

近临界最大值。可见广东省交通运输二恶英排放问题应该得到高度重视。

广东省 2003 年排放多环芳烃 54873.62kg，发电和工业燃煤、非交通用油、天然气燃烧多环芳烃排放量分别占总排放量的 11%、11%和 9%；21 个地级和地级以上市中，多环芳烃排放量最大和最小的分别是广州市和汕尾市；燃煤仍然是广东省的主要能源，其排放多环芳烃占总量的 80%；生活燃煤对于多环芳烃的排放贡献最大，占总量的 69%，与欧洲的情况类似。

广东省 2003 年火电厂共排放二氧化碳 3114.17 万吨，多环芳烃 8035.61 千克，二恶英 11.46 克（毒性当量）。二氧化碳和二恶英排放总量中，燃煤的贡献率在 80%以上，多环芳烃排放总量中燃煤的贡献率略大于 50%。珠三角地区火电厂大气污染物排放量占广东排放总量的 70%以上；单位面积二氧化碳排放量和人均排放量都高于全省平均水平，而单位 GDP 二氧化碳排放量低于全省平均水平。

根据本文提出的不完全清单统计，广东省单位面积的二恶英排放量一直在不太高的水平下缓慢增长，这主要得益于垃圾焚烧发电技术的进步。欧洲国家单位面积的二恶英排放量虽然在上世纪九十年代初达到较高水平，但是从那时起，一直在逐步削减，排放水平不断降低。到 2003 年，广东省的二恶英排放水平已经整体上超过欧洲国家。因此，对二恶英等持久性毒害有机污染物排放的控制问题需要得到高度重视。

关键词：持久性有机污染物；二恶英；多环芳烃；排放量；估算模型；广东省

PRELIMINARY STUDY ON THE EMISSION SITUATION OF THE MAIN PERSISTANT ORGANIC POLLUTANTS IN GUANGDONG PROVINCE, CHINA

By Wang Cuiping

Directed by Professor Kuang Yaoyiu and Professor Huang Ningsheng

Abstract

The harm of Persistent Organic Pollutants has been recognized by the whole world, and the widespread occurrence of these compounds and their adverse impacts on the ecosystem and human health have been widely concerned by scientists, policy constituter and international conferences. As starting point of any policy to decrease the environmental burden by dioxins (Particle-bound polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans, PCDD/Fs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), a quantitative overview of their sources is essential. The similar research has been regarded in the world. Until now, very little was known about emissions of dioxins and PAHs in the regional and country scale in China, except those in Hong Kong and Taiwan. An effort was made to collect data set of emission factors (EFs) from the literature, and use an emission inventory model to assess the emissions of dioxins(PCDD/Fs) and PAHs in Guangdong Province in this article. In addition, waste incineration and thermal power plants were studied especially, and the improved model was used to estimate the emmision from the waste incineration based on the actual situation in Guangdong. Geographical distribution and temporal change, as well as the emission sources, were discussed in the article.

The results indicate that improved model should be used to assess PCDD/Fs emission in waste incineration plants, and it is improper to use the inventory model suggested by the Environmental Agency of the United Nations simply. The incineration quantity in waste incineration plants account for over 70% of total waste incineration, but the PCDD/Fs emission contribution was only 2.6%-22.7%. Since the reform and open policy was carried out in China, incineration quantity has been growing dramatically in waste incineration power plants; however, rigid regulations and advanced technologies have significantly decreased the amount of PCDD/Fs emission.

The results indicate a gradually increase trend in emission of PCDD/Fs under the investigated period (1992-2003). The annual total emission was less than 60g TEQ (simple waste incineration was not included). Estimations have showed that the main contribution to emissions is made by fossil fuel combustion, which occupied over 50%. The PCDD/Fs emission in Guangdong Province in 2002 is 61.92g TEQ after simple waste incineration emission was added to the inventory. The uncertainties of emission results were also analyzed based on the variations of the concerned emission factors. At the confidence interval of 75%, there were around 2-5g TEQ of magnitude uncertainties for the emission sources investigated. Residential energy consumption was the main source of PCDD/Fs in European, account for a quarter of the total emission, while industry was the main source in Guangdong Province. PCDD/Fs emission from industrial energy combustion and industrial processes contributed 61% to the total emission in Guangdong Province in 2002. Therefore; efforts should be made to control the dioxins emission from industry. Dioxins emission from transportation has been wave growing in Guangdong Province during 1992-2003, the emission level was higher than that in the European since 1994, and was gradually close to its maximum, the results indicate that more attention should be paid to transportation in order to control PCDD/Fs emission in Guangdong Province.

PAHs emission in Guangdong Province is 54873.61kg in 2003, the power generation, industrial coal combustion, non-transportation oil combustion and natural gas combustion account 11%, 11% and 9% of the total emission respectively. The emission from Guangzhou and Shanwei are the maximum and the minimum in the 21 cities. Coal combustion was still the main energy in Guangdong, it contributes 80% to the total PAHs emission, and residential coal combustion was the main source, account for 69% of the total, this situation was similar to that in Europe.

It was estimated that the total CO₂, PAHs and PCDD/Fs emission from the thermal power plants in Guangdong were 3114.17Mt, 8035.61kg and 11.46g TEQ respectively in 2003. The CO₂ emission in Pearl River delta account for more than 70% of the total emission, however, CO₂ emission per unit GDP in Pearl River delta is lower than the average level of Guangdong province.

Keywords: Persistent Organic pollutants, PCDD/Fs, PAHs, emission, inventory model, Guangdong province

声 明

本人郑重声明：所呈交的（广东省主要持久性有机污染物排放状况的初步研究）硕士学位论文，是本人在导师匡耀求研究员和黄宁生研究员的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经引用的内容外，本文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式表明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：王翠萍

2007 年 5 月 9 日

第一章、 引言

第一节、 绪论

一、研究背景

20世纪特别是50年代以来,化学工业的飞速发展使人工合成的有机物种类和数量与日俱增,其中持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, 以下简称 POPs),大多具有致癌、致畸和致突变性,而且在环境中难于降解,并可通过食物链在生物体内传递和富集,广泛存在于各种环境介质如空气、水体、沉积物、土壤等以及食品、动植物和人体中,对人体健康和生态环境造成严重威胁。因此,POPs已引起了国际社会的高度关注,有关POPs的研究报道也日益增多,POPs研究已成为一个十分活跃并极具影响的研究领域,成为环境化学、生态毒理学、预防医学、环境工程学、环境法学、环境经济学等多学科交叉研究的前沿领域。

越来越严重的POPs污染不仅威胁我国的食品安全和人体健康,而且严重影响产品的进出口贸易。当前环境体系中的POPs类物质以其复杂性、尚不确定性为科学研究、公众和管理者带来了挑战。

2001年5月22-23日,91个国家政府签署《关于持久性有机污染物(POPs)控制的斯德哥尔摩公约》(以下简称《POPs公约》),开始全球协作解决POPs问题。中国作为缔约国,将参与国际合作、保护全球环境。该公约是继1987年《保护臭氧层的维也纳公约》和1992年《气候变化框架公约》之后的第三个具有强制性减排要求的国际公约,是国际社会对有毒化学品采取优先控制行动的重要步骤。2004年5月17日,POPs公约正式生效,全球削减和淘汰POPs进入全面实质性的开展阶段。2004年6月25日我国十届全国人大常委会第十次会议批准该公约,2004年12月11日该公约正式对我国生效。按照该公约规定:中国将在2年内制订国家实施方案并尽快组织实施;将采取必要的法律、行政和技术措施,削减、控制和淘汰持久性有机污染物;同时将促进包括最佳可行技术和最佳环境实践方法的应用,以持续减少并最终消除包括非故意性副产物POPs在环境中的产生和使用;查明并以安全、有效和对环境无害化方式处置POPs库存及废弃物。

二、持久性有机污染物简介

持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, 简称 POPs)是指通过各种环境介质(大气、水、生物等)能够长距离迁移并长期存在于环境,通过生物食

物链(网) 累积, 进而对人类健康和环境具有严重危害的天然或人工合成的有机污染物质。持久性有机污染物具有持久性、生物累积性、半挥发性和剧毒等特性。

《POPs 公约》最初规定削减和淘汰 12 种(类) 物质, 包括两大类: 一是杀虫剂类, 主要是艾氏剂 (aldrin)、氯丹 (chlordane)、DDT、狄氏剂 (dieldrin)、异狄氏剂 (endrin)、七氯 (heptachlor)、灭蚁灵 (mirex)、毒杀酚 (toxaphene) 和六氯苯 (HCB); 二是工业化学品, 主要是二恶英 (PCDDs)、呋喃 (PCDFs)、六氯苯 (HCB) 和多氯联苯 (PCBs)。这一 POPs 清单是开放性的, 将来还会按规定筛选程序和标准进行扩充。除公约公布的 12 种物质外, 还有很多其他 POPs 具有环境毒性, 并引起极大关注, 包括多环芳烃 (PAHs)、六六六 (HCH), 以及目前国际上研究较多的多溴联苯醚、多溴代萘、多溴代二苯并对二恶英和多溴代二苯并呋喃、多氯代萘、氯代酚、多环芳烃、邻苯二甲酸酯类和烷基酚聚氧乙烯醚等。

1、二恶英

1.1 二恶英概述

二恶英(dioxins)最早发现于美国在越战中使用的一种氯酚脱叶剂中。世界卫生组织国际癌症研究所(IARC)宣布 2,3,7,8-四氯二苯-*p*-二恶英(2,3,7,8-TCDD)是 1 级致癌物, 其他多氯联苯二恶英、非氯代联苯二恶英和多氯联苯呋喃为 3 级致癌物(McGregor DB, et al.,1998)。

二恶英(dioxins)是指结构和性质都很相似的包含众多同类物或异构体的两大类氯代三环芳烃类化合物, 全称分别为多氯二苯并-对-二恶英(polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, 简称 PCDDs)和多氯二苯并呋喃(polychlorinated debenzofurans, 简称 PCDFs), 它的结构式如下图 1-1 所示。氯原子在苯环上取代位置的不同使得 PCDDs 包含 75 种同分异构体, PCDFs 有 135 种同分异构体。目前, 国际上有趋势将 PCB 也归入二恶英的范畴。本文二恶英指 PCDDs 和 PCDFs 两类三环多氯取代化合物。



图 1-1 PCDD 和 PCDF 分子结构图

1.2 二恶英的毒性作用机制

二恶英异构体的毒性与所含氯原子的数量及氯原子在苯环上取代位置有很大关系。含有 1-3 个氯原子的异构体被认为无明显毒性；含有 4-8 个氯原子的化合物有毒，其中毒性最强的是 2,3,7,8-四氯二苯并二恶英 (2,3,7,8-TCDD)。动物实验表明 2,3,7,8-TCDD 对天竺鼠 (guinea pig) 的半致死剂量 (LD50) 为 1pg(Eadon,G et al., 1986), 2,3,7,8-TCDD 是迄今为止发现过的最具致癌潜力的物质，所以有人把它称作为“世纪之毒”。

经过二十多年的研究，人们对二恶英毒性机理有了一定认识。总的来说二恶英与生物体产生作用并不是通过直接的损伤，它并不与蛋白质和核酸形成加合物，也不直接损害细胞；二恶英对由刺激素介导的活动具有潜在抑制作用，激活蛋白酶从而产生生物学活性 (Safe,1991) 二恶英对生物造成危害和影响的根本原因是它有效地与芳烃受体进行结合。

1.3 二恶英毒性评价体系

二恶英的风险评价以 1987 年美国环境保护署 (U.S.EPA,1987) 提出的毒性当量因子 (TEF, toxicity equivalency factor) 概念为基础。即以 2,3,7,8-TCDD 为基准，其他各种单个二恶英类似物都给予一个数值用来表明它与 2,3,7,8-TCDD 的相对毒性。1997 年世界卫生组织发布了 29 种二恶英化合物的 TEF 值 (WHO,1997)。一个化合物的总潜在毒性可以表示为 TCDD 的毒性当量浓度 (Toxicity Equivalency Quantity, TEQ)。将二恶英化合物的 TEF 及浓度或含量相乘，就可以将其换算成 2,3,7,8-TCDD 的相当浓度或含量 TEQ。用 TEQ 来表示二恶英化合物的浓度和量更能反映其污染的实际状况和可能对人体产生影响的程度。

1.4 二恶英对人体健康的危害

二恶英类化合物均是脂溶性的，在水中的溶解度极低(一般在 $10^{-1}\mu\text{g/L} \sim 10^{-3}\mu\text{g/L}$ 范围内)，在环境中难以降解，而易在食物链中富集，特别容易富集于食物链的脂肪组织中。由于鱼类的高倍率的生物富集作用，其体内二恶英的浓度可达其周围环境的 100 000 倍以上。现主要发现其在肉品和乳品中。美国环境保护署 (EPA) 估计美国人体内的二恶英类化合物的 90% 来自于食物，对于一个典型的美国人来说，其通过食物摄入的二恶英中，有四分之三来自于所食用的牛肉和牛奶

(USEPA Office of Research and Development, 1994)。二恶英在人体内很难分解, 2,3,7,8-TCDD 在人体内的半衰期为 7.2 年; 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 为 3.7 年; 1,2,3,7,8-PCDD 为 15.7 年; 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 为 3.0 年; 2,3,4,7,8-PCDF 长达 19.6 年(Flesh-Janys D, et al.,1996)。

迄今为止的研究表明, 二恶英类化合物可能对人体产生的危害主要有以下几个方面(Lois Gibbs and the citizens clearinghouse for hazardous waste,1995):

1. 它可引起软组织、结缔组织、肺、肝、胃癌以及非何杰金氏淋巴瘤;
2. 对生殖系统产生影响;
3. 出生缺陷如腭裂、生殖器官和生殖器异常;
4. 对后代的影响, 如产生神经问题、发育问题、延缓青春期、降低生育率;
5. 其他影响, 如对中枢神经系统损害; 对肝脏的损害; 产生甲状腺功能紊乱; 还对免疫系统造成损害, 如增加感染性疾病和癌症的易感性。

1.5 二恶英的主要污染源

二恶英的来源分为自然和人类活动两部分。有机物燃烧时能与无处不在的氯原子结合生成氯代甲烷和有机氯化物, 因此自然界的燃烧过程可能产生二恶英。森林和灌木火灾是环境中二恶英的一个重要来源(Nestrick, et al,1982; Sheffield A, 1985)。其排放因子为 2.0-56ng TEQ/kg (burned)(Paul M. et al.2004)。研究证明人类活动所产生的二恶英远远大于自然过程生成的二恶英。根据人类活动方式和各国二恶英研究资料, 可将二恶英来源划分为十大类(王敬贤, 吴文忠, 2002):

钢铁厂: 包括铸造、熔炼、焦炭厂

有色金属厂: 铜、锌、铅、铝的一段、二段生产厂

电厂: 以煤、石油、天然气、原油、木材为燃料的发电厂

工业燃烧厂: 以煤、天然气、原油、污泥、生物为燃料的在线生产的工厂

小型燃烧单元: 大多数以煤、油、天然气为燃料的家用炉子和烟囱

废物焚烧: 包括城市固废、危险废物、污泥、医院废物、废木材和火葬厂

道路交通: 以含铅或无铅汽油或柴油为燃料的客车、巴士、卡车等

矿物质生产: 水泥、石灰、玻璃、砖等的生产

化学工业: 氯碱和有机氯等化工生产

其他: 破碎、沥青混合、青草株干燥、事故火灾、特殊燃烧和沉积物再释

放等。

造纸工业中造纸废水和污泥中含有大量的二恶英,研究发现干纸浆中 PCDD 的浓度高达 140-390ng/kg, PCDF 的含量为 7-80ng/kg(M.H.Wong, 2003), 焚烧造纸污泥也会释放出二恶英。纺织和皮革工业生产中由于使用含氯化学品、染色剂和污泥焚烧都会产生二恶英,研究发现不同颜色不同质地的纺织品中含有不同浓度的二恶英,如绿色、紫色的纯棉 T-恤的二恶英含量要高于白色和深蓝色(Heidelore Fiedler. 2006)。氯碱法生产烧碱过程中,产生大量含有二恶英的盐泥、废渣,一般每生产 1 吨烧碱会产生 40—60kg(干基)的盐泥。中国某氯碱厂电解盐泥中二恶英浓度也高达 378.85 μ g/kg, 其毒性当量 I-TEQ 值为 21.65 μ g/kg(吴文忠, 2006)。广东省年产烧碱约 16.4 万吨(1995 年-2000 年烧碱产量的平均值)按此计算烧碱盐泥中二恶英的年排放量约为 174g TEQ。

本论文主要计算排入大气中的二恶英,文中把人类活动产生二恶英来源分为以下部分:

- (1) 能源消耗: 火力发电、工业生产、交通运输、家庭生活等领域用做能源的燃料燃烧。其中能源主要是指化石能源和木材。
- (2) 垃圾废物焚烧: 主要包括城市生活垃圾、工业垃圾和医疗垃圾的焚烧。垃圾焚烧是二恶英的主要排放源之一, 1995年包括美、日、英、德、加拿大和澳大利亚等15个国家二恶英排放总量中, 垃圾焚烧产生的二恶英占总量的大约50%(Dioxin and Furan inventories, 1999)。
- (3) 工业生产工艺和其他来源: 工业生产工艺主要包括金属冶炼(钢铁的铸造、熔炼, 有色金属的得一段、二段生产等)和矿物质生产工艺流程中产生的二恶英。

很多研究表明秸秆燃烧会排放二恶英,但是贡献量很少, Brian Gullett 等人对美国西部两个州的秸秆燃烧进行了研究,结果表明全国每年秸秆燃烧二恶英的排放量仅为 0.1g TEQ (Brian Gullett, Abderrahmane Touati. 2003)。

危险废物的燃烧是二恶英的重要污染源,全世界每年燃烧废物排放的二恶英大约 6-7kg TEQ (UNEP Chemicals,2002)。从目前的工业结构和垃圾处理方式来看,我国二恶英的主要排放源与西方国家不同,由于我国城市垃圾焚烧处理所占比例很小,因此二恶英的主要排放源是化工厂生产的副产物,例如生产氯碱业的废渣、其他化工产品生产过程中的副产物、血吸虫防区大量使用的灭钉螺剂、五

氯酚钠中的杂质、造纸废水等（王敬贤,吴文忠,2002）。

2、多环芳烃

多环芳烃（PAHs）是美国环保局制定的 129 种优先控制污染物中的一类，是指两个或者两个以上苯环以稠环的形式连接形成的一类有机化合物，是环境中广泛存在的一类有机污染物。这类物质由于水溶性差，对微生物生长有抑制作用，再加上其特殊而稳定的环状结构，很难被生物降解，因此它们在环境中呈不断累积的趋势。它们的半衰期少则 2 个月，多则几年。研究表明在河流、海洋沉积物中，多环芳烃的浓度高且积累速度快。多环芳烃具有较强的脂溶性，能被生物富集放大，越是生物链上端的生物，其体内所含的多环芳烃可能越多。因此，处于生物链顶端的人类，体内的多环芳烃可能含量最多。

多环芳烃在环境中虽然是微量的，但分布很广，人们能够通过大气、水、食品等摄取。

环境中的多环芳烃（PAHs）是一种多来源的持久性有机污染物，包括：

天然来源：（1）某些细菌、藻类和植物的生物合成产物；

（2）从化石燃料、木质素、底泥等散发出多环芳烃。

人为来源：（1）废物焚烧、化石燃料不完全燃烧产生的烟气，包括汽车尾气；

（2）工厂：炼焦、炼油、煤气厂等。

水体中多环芳烃（PAHs）主要来源于各类工业废水、大气降落物和沥滤液等；大气中多环芳烃（PAHs）主要来源于各种化石燃料或废弃物的不完全燃烧和热解过程。

三、国内外研究进展

1、持久性有机污染物研究进展

持久性有机污染物的研究主要集中于污染机理研究。由于这类物质多呈微量或痕量存在于环境中，其对人体、对生物的危害特别大，而很多常规的监测手段又难以检测到，所以近年来才引起关注。目前人们对这类污染物的很多生物效应仍不甚明了，而且新的这类污染物质仍在不断产生，所以对其研究的重点仍在机理方面（Akcock,R.E.,Jones,K.C.,1996;Guruge,K.S.,Tanabe,B.,2001; Jiang, G.B., Zhou, Q.F., Liu,J.Y., Wu.D.J.,2001; Muir,D.C.G, Omelechenko,A., Grift, N.P., Savoie, D.A. et al,1996; Page,D.S., Ozbal,C.C., Lanphear, M.E.,1996; Pereira,W.E., Domagalski,J.L., Hosteller, F.D. et al, 1996; Pham,T.,Lum,K.,Lemieux,C.,1996;

Ruiz,J.M.,Bachelet,G, Caumette,P. et al, 1996; Zhou, J.L., Maskaoui,K., Qiu,Y.W., Hong, H.S., Wang, Z.D., 2001) 。

中国科学院广州地球化学研究所傅家谟院士领导的研究团队在这方面处于国际、国内领先水平(Jiamo Fu, Bixian Mai, Guoying Sheng et al,2003; Chen, Y. J.; Sheng, G. Y. et al, 2005; J. Li , G. Zhang , X.D. et al, 2006; Liping Yu, Bixian Mai, Xiangzhou Meng, et al.2006; Luo,X.J.;Mai,B.X.;YANG,Q.S.;et al. 2004; Fu, J.M., Sheng,G.Y., Chen, Y, Wang, Z.S., et al, 1997; Fu,J.M.,Wang, Z.S., Mai, B.X., Kang,Y., 2001; Mai,B.X., Sheng,G.Y., Zheng,L.et al, 2001;Mai,B.X., Fu,J.M., Zhang,G.Y. et al, 2002; Zhang, G, Qi,S., Parker,A.et al,2001)。麦碧娴等完成的研究表明, 澳门附近的珠江河口是一个 POPs 的富集地带, 这种污染物的富集地带环境科学上称之为污染物的“汇”。这种 POPs 的汇在特定的条件下可能会出现 POPs 再次进入食物链而影响人类健康甚至危及生命的情况, 有人形象地称之为化学定时炸弹 (Chemical Timing Bomb)。

2、二恶英研究进展

从上世纪 90 年代中期开始, 欧洲十几个国家和美国、加拿大等国就开始了关于持久性有机污染物排放源和排放量清单的研究, 到 1999 年就已经形成系统详细的排放清单。对 15 个国家的二恶英排放资料研究表明, 1993-1997 年全世界二恶英年排放量为 10500g I-TEQ。最低估值为 8300g I-TEQ/a, 最高估值为 36000g I-TEQ/a(Dioxin and Furan inventories, 1999)。2002 年, 包括俄罗斯联邦在内的 10 个东欧国家建立了 1990 年、1995 年和 1997 年二恶英的排放清单(S.Kakareka, T.Kukharchyk.2002)。发达国家已采取了多项措施来减少二恶英等持久性有机污染物的排放, 欧洲 33 个国家的二恶英排放量从 1970 年的 25000g I-TEQ 减少到 1995 年的 8300g I-TEQ(Pacyna,J.M., 2002) 。由于二恶英类化合物排放源的数据缺乏, 亚洲的很多国家还没有开展这方面的研究和合作, 只有日本和韩国有一个合作项目, 分别对本国的二恶英排放量进行了定量估算 (Dioxin and Furan inventories, 1999; UNEP Chemicals,2002)。

研究表明, 我国 2002 年二恶英排放总量为 7144-13575g I-TEQ, 其中排入空气中的二恶英的量为 2773 g I-TEQ(JUN JIN, Hao Peng, Tang Xiaoyan.2004)。目前二恶英的排放清单主要计算了排入大气环境中的量, 对于直接排入水体、土壤环境中的二恶英的定量研究还比较少。

中国二恶英的研究还处于起步阶段,主要研究了二恶英的毒害特性、产生机理和污染控制等。近年来,我国关于区域环境中水体、土壤和沉积物以及大气环境中的二恶英已经有了一些研究。吴文忠、郑明辉等研究了区域水体、土壤和沉积物中的二恶英(Wu, W.Z., et al,2001a; Wu W.Z, et al, 2002; Zheng, M.H., et al, 2001)。于丽萍、麦碧娴等人关于广州市空气中二恶英浓度的研究表明,工业生产活动极大地影响了空气中 PCDD/Fs 的浓度水平,广州市空气中二恶英的浓度高于世界上很多城市的浓度范围,污染严重(Liping Yu, Bixian Mai, et al. 2006)。

3、多环芳烃研究进展

在城市大气中多环芳烃是普遍存在的,主要来源于化石燃料和其他有机质的不完全燃烧和热解等高温反应(Khablt N R, 1995; Durlas S K, et al, 1998)。中科院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室、华南植物研究所以及广东省生态环境与土壤研究所对多环芳烃的研究取得了许多重要成果。包括大气、气溶胶中多环芳烃的研究(祁士华等, 2000a,2000b; 祁士华等, 2001; 祁士华,傅家谟,盛国英等,2001;毕新慧等, 2004; 叶兆贤等, 2000; 谭吉华,2005; 唐小玲,2005); 土壤中多环芳烃的研究(张天彬等, 2005; 郝蓉等, 2004, 2005; 陈来国等, 2004) 和水体中多环芳烃的研究(麦碧娴, 2000; 杨清书等, 2004; 吴启航等, 2004; 康跃惠, 2005)。

目前对于珠三角地区多环芳烃等持久性有机物已进行了大量研究,发现珠三角的河道及河口沉积物中有高浓度的多环芳烃,引起广泛关注(Mai,B.X.et al, 2002; Luo,X.J, et al, 2004) 。

Berdowski J J M, et al (1997) 根据各种排放因子和排放源的统计资料估算出1990年欧洲36国6种PAHs的年排放量为15800吨;美国1996年排放的7种生物致癌多环芳烃量达1400吨(Technology Transfer Network National Air Toxics Assessment, 2001), 其中大湖地区1996年16种优控多环芳烃排放量为14403吨(Wu, C. Y.;et al, 2001); 而在英国, 2000年仅苯并[a]芘的年排放量就达9.578吨(Coleman P, Bush T, et al.2001)。发达国家已采取措施减排多环芳烃, 欧洲33个国家多环芳烃的排放量从1970年的1300吨减少到1995年的590吨 (Pacyna,J.M., 2002), 进步显著。在美国, 七种致癌多环芳烃排放量从1990年的2000吨减少到1996年的1400吨(1990 Emissions Inventory of Section 112(c)(6) Pollutants,1998; Technology Transfer Network National Air Toxics Assessment, 2001)。我国台湾省

多环芳烃研究发现, 机动车和生活垃圾焚烧是二恶英排放的主要来源(Hsi-Hsien Yang, Chia-Mei Chen.2004)。1999年我国16种PAHs排放总量约为9799吨, 其中7种致癌性PAHs排放总量约2000吨, 主要排放源为家庭燃煤和工厂炼焦, 两者分别占总排放量的66.6%和30.6%(许姗姗等, 2005); 2003年我国16种多环芳烃排放总量为25300吨, 主要排放源还是家庭燃煤和工厂炼焦, 在多种排放源中, 生物焚烧、家庭燃煤和工厂炼焦PAHs排放量分别占总量的60%、20%和16% (ShanShan, Xu, et al, 2006)。

此外, 国内外还有一些关于多环芳烃排放因子 (YingJun CHEN, et al.2005; Robert G. M. et al, 2005) 以及关于多环芳烃的其他研究成果, 如多环芳烃来源的季节变化 (J. Li, et al, 2006) 等等。

第二节、研究的目的和意义

持久性有机污染物 (POPs) 的危害已经得到全世界的公认, 引起科学家和政策制定者以及国际会议的广泛关注。POPs 的排放量估算是开展持久性有机污染物多介质归趋模拟、生物有效性和生物富集以及生态风险分析和人群暴露与人体健康研究的重要基础, 是污染物质从源到受体研究过程的基础环节 (图 1-2)。

二恶英是斯德哥尔摩公约规定首批消除的 12 种持久性有机污染物(Persistent organic pollutants, POPs)名单中, 毒性最强、对生态环境的影响最大同时其污染控制难度最大的污染物。控制二恶英的产生和排放是当前亟待解决的问题之一。二恶英是工业或垃圾焚烧过程中的副产物, 因此不可能通过禁止生产或停止使用的方法来消除, 必须使用间接措施减少二恶英进入环境, 降低其环境暴露水平, 从而降低其对环境的影响。因此, 了解二恶英的来源和排放量无疑是非常重要的。同时大量研究表明, 多环芳烃 (PAHs) 作为重要的持久性有机污染物, 已对生态环境和人体健康构成严重威胁, 因此估算其排放量 also 具有重要意义。类似的工作在国际上备受关注。

广东作为我国的第一经济大省, 对我国经济的发展起着十分重要的作用。广东发展迅速, 能源消耗巨大, 城市人口剧增, 对自然环境造成明显影响。目前已有大量关于广东省, 特别是珠江三角洲地区 POPs 的研究成果。研究表明广东珠三角的河道和河口沉积物是 POPs 的富集地带, 广州市空气中二恶英浓度也较高, 污染严重。因此本文选取广东地区作为研究区域。

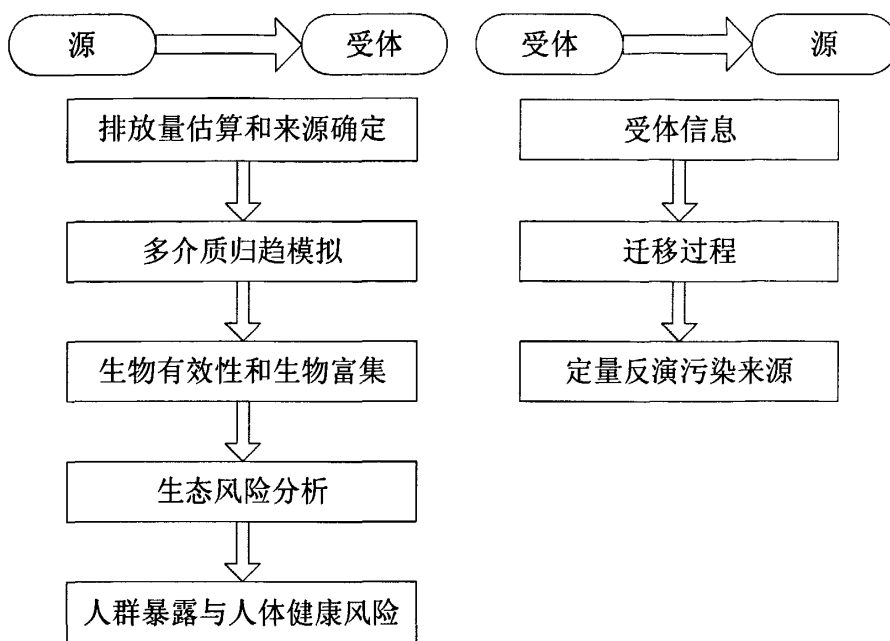


图 1-2 污染物质研究过程图

目前,我国二恶英和多环芳烃排放量的定量研究还很少,本文收集整理大量文献中二恶英和多环芳烃的排放因子,按照国际通用的排放量计算方法对广东省二恶英和多环芳烃的排放量进行估算;另外,对垃圾焚烧、火电厂两个重要排放源进行重点研究,并针对广东省的具体情况改进排放量估算模型;对广东省二恶英和多环芳烃的排放源进行重点分析,并对排放量进行时间过程分析和空间分布分析。

虽然估算的模型还很粗糙,估算的结果可能还达不到期望的准确度水平,本文对于广东省二恶英和多环芳烃的排放量进行了尝试性和探索式的研究,以期为持久性有机污染物的进一步研究和控制提供一些基本数据,为政策制定和环境健康风险评价提供参考。希望可以为我国履行 POPs 公约尽一点绵薄之力。

履行 POPs 公约是我国政府对国际社会的承诺,也为我国减少未来经济损失和环境健康风险提供了机遇:

- 1) 淘汰和削减 POPs 将引发对有毒化学品管理机构、政策、法规方面的深刻变革,有助于从根本上降低我国出口商品中的 POPs 残留量,突破“绿色壁垒”,促进我国出口贸易;
- 2) 通过 POPs 公约的资金机制,引进国际资金,将加快我国削减和淘汰 POPs 污

染的进程；同时通过技术援助，引进国际上先进的对环境无害的有机氯农药类POPs 替代品和替代技术，在全面清除有毒有机氯农药对健康和环境影响的同时，促进卫生防疫、建筑防护等方面技术水平的快速提升；

- 3) 通过采用最佳环境可行技术和环境友好实践，减少二恶英等污染物的排放，促进相关产业结构的调整和产业的升级转型；
- 4) POPs 的分析监测、风险评估、处理处置、污染修复等一系列工作的开展，将促进我国相关领域基础科学和应用技术的研究，缩短我国与发达国家的整体科技差距；
- 5) 履行国际公约、削减POPs 污染是整体提高我国人民生活质量和健康水平的重要机遇，是落实“以人为本”科学发展观的重要举措。

第三节、数据来源及可靠性分析

本文所使用的能源消耗、工业品生产量、人口、面积等数据均来源官方统计资料。其中能源消耗数据来源于历年的《广东省统计年鉴》和《广东省环境统计资料汇编》以及《广东省资源节约专项检查数据汇总》；工业品生产量、区域面积数据来源于《广东省统计年鉴》；人口数据来源于《广东省统计年鉴》和2000年《广东省第五次人口普查数据》。

排放因子数据来自国内外公开发表的文献，其中生活能源煤炭燃烧的排放因子采用我国学者发表的实验研究成果。本文尽可能多地收集了排放因子资料，引用文献包括欧洲、北美、东亚各国的主要研究成果，并且对排放因子进行了不确定性分析，重点参考我国排放因子的数据，从而最终确定排放因子典型值用于计算。具体方法见第三章第二节。

第四节、研究思路和技术路线

1、数据收集

- (1) 能源消耗数据：包括生活能源消耗、工业生产能源消耗、电力和交通运输等部门化石能源消耗数据；
- (2) 工业生产过程数据：各种工业产品产量；
- (3) 垃圾产生、处理、焚烧量；垃圾焚烧发电厂焚烧处理量；火葬场焚烧的尸体数量（即每年人口死亡数）；
- (4) 各种排放源的排放因子。

- 2、运用估算模型进行二恶英、多环芳烃排放量估算。
- 3、对排放量结果进行时间过程、空间分布分析。
- 4、与国内外对比。

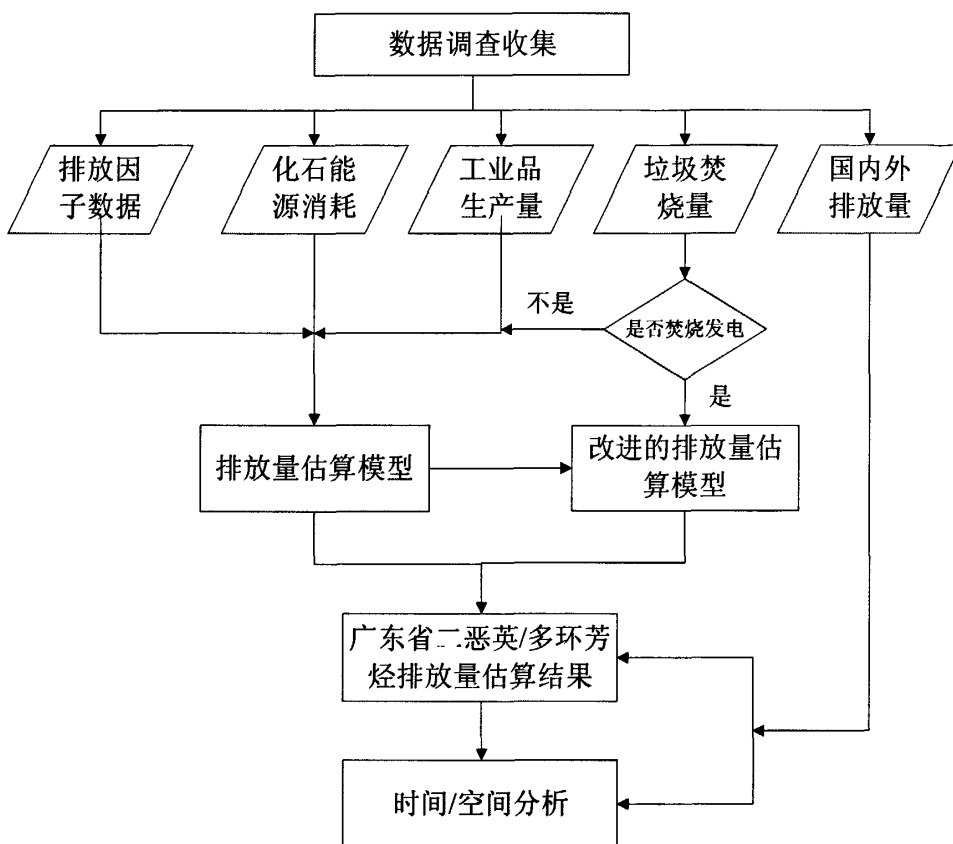


图 1-3 技术路线示意图

第五节、完成的工作量

一、攻读硕士学位阶段参与的主要科研工作

- 1) 广东省科技计划项目：“珠江三角洲环境中毒害有机污染物现状与控制对策研究”（2004-2006）
- 2) 广东省人口发展战略研究课题专题“广东省人口容量与资源承载力研究”（2005）
- 3) 广东省社会发展科技攻关项目：“大地热流对广东降水分布与台风路径影响研究”（2003-2005）
- 4) 广东省自然科学基金研究团队项目“珠江三角洲人地系统演进与人地关系协

调研究”（2005.01-2008.12）

- 5) 广东省自然科学基金重点项目“广东可持续发展的监测、评价、预警与调控研究”（2003-2005）

二、相关研究工作

- 1) 珠江三角洲毒害有机污染物研究；
- 2) 我国省域二恶英排放量估算模型建立和初步应用；
- 3) 广东省火电厂大气污染物排放现状分析；
- 4) 广东省 21 地市可持续发展能力研究；广东省城市化进程研究；
- 5) 中国水泥生产排放二氧化碳人口经济压力分析；
- 6) 绿色 GDP 核算；
- 7) 广东省人口容量与资源承载力研究、生态足迹与生态承载力研究。
- 8) 广东省陆域碳收支估算及其机制探讨。

三、资料收集、整理与信息提取

1、统计数据与文献数据收集

收集的统计资料与提取的数据见表 1-1 所示：

表 1-1 收集的统计资料与数据提取

统计资料	提取的数据
《广东统计年鉴》（1993-2005） 《广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）》	(1) 水泥、焦炭、钢生产量； (2) 交通运输能源消耗； (3) 广东省一次能源消耗量； (4) GDP 数据； (5) 死亡人口数
《广东省 2000 年人口普查资料》（1-6 册）	人口
《广东省环境统计资料汇编》（1992-2003）	1992-2003 年工业能源消耗（煤和油类）
《广东省资源节约专项检查数据汇总》	广东省火电厂能源消耗、发电量等数据
《广东省环境统计公报》（1994-2005）	垃圾、危险废物产生量、焚烧量、综合利用率等
《广东省治污保洁（城市污水、垃圾处理） 工程项目规划（2005-2020）》 《广东省固体废物污染防治规划(2001-2010)》	广东省垃圾焚烧发电厂数据

2、文献资料收集与信息提取

在准备本论文时，用大约一年时间收集阅读了大量参考文献，这些文献均是公开发表的论文、专著和国际网站信息。通过阅读，掌握了持久性有机污染物的概况、研究方向、研究进展等，特别是对于二恶英和多环芳烃有了较深认识；得到重要的污染物估算方法和模型，并且根据我国特别是广东省的实际情况和资料

可获取情况对其稍加改进,使之更适合本论文研究区域的实际。

从这部分文献资料中提取的最重要信息是国际上持久性有机污染物排放量数据和各排放源的二恶英排放因子,排放因子提取和确定过程是琐碎而艰难的,具体的方法在第三章中有特别介绍。

3、专家咨询

向中国科学院广州能源研究所专家咨询垃圾热值、焚烧空气量等信息,得到专家的悉心指点。

四、参加会议

- (1) 2005 年 12 月 16-18 日 清远英德 “ 第四纪科学研究会热带亚热带专委会环境演化与可持续发展学术讨论会”。
- (2) 2006 年 4 月 20 日 广州地球化学研究所第二届研究生学术论坛 论文优秀奖。
- (3) 2006 年 6 月 3 日 广州地化所 广东省可持续发展协会成立十周年庆祝大会暨“可持续发展与科学发展观”学术研讨会。
- (4) 2006 年 11 月 8-10 日,北京,中国可持续发展研究会 2006 年学术年会。
- (5) 2006 年 11 月 23-26 日 澳门、香港、广东 第三届粤港澳可持续发展研讨会——泛珠三角城市的可持续发展。

五、野外调研

- 1) 2005 年 10 月 阳江温泉地热观测;
- 2) 2006 年 3 月 20-21 日,东莞市潼湖湿地野外调查;
- 3) 2006 年 8 月 肇庆鼎湖山二氧化碳浓度监测。

第六节、主要成果与创新性

持久性有机污染物的研究是当今全球环境领域研究的热点,持久性有机污染物的排放量估算更是研究的热点和难点之一。本文在这方面作了一些探索性的工作,研究过程中改进了排放量估算模型,并对广东省二恶英的排放量进行了来源分析和时间过程分析,分别计算了 2003 年广东 21 个地市多环芳烃排放量并分析了广东火电厂污染物排放浓度的空间分布。本论文研究的成果与创新之处主要体现在以下几点。

一、主要成果

1. 本文在研究过程中改进了排放量估算模型；
2. 利用现有资料多角度对本文改进模型的效果进行了验证；
3. 改进的模型中增加了垃圾简易焚烧一项，并以 2002 年为例，对广东省二恶英排放源进行分析；
4. 估算了广东省 1992 年到 2003 年二恶英的排放量，并进行时间进程分析；
5. 广东省二恶英排放量与国际的对比；
6. 分别计算 2003 年广东 21 个地市多环芳烃排放量，并进行了排放源分析；
7. 特别计算了广东省火电厂污染物（包括二氧化碳、多环芳烃和二恶英）的排放量，并引入经济、人口和区域面积进行浓度空间分布分析。

二、主要创新点

1. 首次对于我国省域的二恶英排放量进行了估算；
2. 根据研究区域具体情况，改进了垃圾焚烧发电的二恶英排放量估算模型，特别是垃圾焚烧所需理论空气量模型的应用，使得在数据缺乏的情况下，能够计算垃圾焚烧二恶英的排放量，并且估算结果达到与实际情况基本相符的期望；
3. 在广东省范围内进行了长时间跨度（12 年）、大区域范围的二恶英排放量估算研究，并且分析了排放来源；
4. 和国外的对比，有助于我们确定区域环境容量；
5. 对广东省二氧化碳、多环芳烃和二恶英排放量进行区域分布的研究尚不多见。

第二章、 研究区域概况

第一节、 广东省自然状况

广东省地处中国大陆最南部，东邻福建，北接江西和湖南，西连广西，南临南海，中南部珠江三角洲东西两侧分别与香港和澳门两个特别行政区接壤，西南部雷州半岛隔琼州海峡与海南省相望。全境位于北纬 $20^{\circ}13'$ ~ $25^{\circ}31'$ 和东经 $109^{\circ}39'$ ~ $117^{\circ}19'$ 之间。东西跨越约 800km，南北跨度约 600km。全省陆地面积 17.98 万 km^2 ，约占全国陆地面积的 1.87%；其中岛屿面积 1592.7 km^2 ，约占全省陆地面积的 0.89%。全省大陆岸线长 3368.1 km，居全国第一位。全省海域总面积 41.9 万 km^2 。全省共辖 19 个地级市和 2 个副省级城市。

广东省地势北高南低，中南部和东部有珠江三角洲平原和潮汕平原，大部分地区为山地、丘陵。全省水域宽广，河流众多，其主要江河有珠江、韩江、漠阳江、鉴江、潭江、榕江和练江等，其中珠江是由西江、北江和东江汇合而成，全长 2122km，为我国第三大河流，珠江三角洲土地肥沃，是著名的鱼米之乡。

第二节、 广东省工业发展状况

一、工业发展与工业结构

改革开放以来，广东省凭借着“先行一步”的政策优势和毗邻港澳的地缘优势，经济发展取得了举世瞩目的成就。过去 20 多年中，广东省的竞争力集中表现在工业制造业上，优势大体集中在电子信息、家用电器等行业，成为全球信息技术产品加工出口的重点地区。如今，电子信息、电器机械、石油化工、纺织服装、食品饮料、建材、造纸、医药、汽车产业是广东省九大支柱产业，对全省工业增长起主导作用；电子信息、电器机械及专用设备、石油化工是广东省的三大新兴支柱产业，稳步发展；三大传统支柱产业为纺织服装、食品饮料、建筑材料；造纸、医药、汽车是三大潜力产业。2005 年，九大产业完成工业增加值 6203.07 亿元，同比增长 20.3%，占规模以上工业增加值的比重升至 73.7%。

在市场经济国家的工业化过程中，工业结构显示了由低级向高级有序变化的规律，即一般都从轻工业的发展起步；然后向以能源原材料为主的基础性重化工业变动；在基础工业充分发展的基础上，工业中心又转向加工组装工业，进入

高度加工度化的最高发展阶段。经历了从轻工业—重化工业—信息工业—后工业化的发展过程。目前广东省工业重型化趋势已日益明显，重工企业增幅明显大于轻工企业(表 2-1)，长期以轻型为主的广东工业结构也加快了向重型演化的趋势，工业增加值的轻重工业比逐年下降，重化工业所占的比重已经大大超过轻工业(表 2-2)。

表 2-1 2001-2003 广东工业企业数 单位：家

工业结构	2001 年	2002 年	2003 年
轻工业	13087	14365	14834
重工业	7634	8254	9660

资料来源：中国工业经济统计年鉴

表 2-2 2000-2004 年广东轻重工业产值比 单位：%

工业结构	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
轻工业	47.0	46.6	44.5	44.8	42.7
重工业	53.0	53.4	55.5	55.2	57.3

资料来源：根据中国工业经济统计年鉴数据整理而成

然而，有研究表明广东省工业结构的不经济性日益显著，工业的整体竞争力是比较弱的。2003 年，广东省 29 个工业部门中，同全国相比具有竞争优势的部门主要是轻型的加工制造业，其中多为劳动密集型产业部门，技术密集型部门如通信电子制造业数量较少。而影响广东省工业结构整体竞争力的是那些主要是以能源(煤、石油)为对象的采选和加工行业，由于受能源紧缺的限制，以能源为基础的其他加工业，如五金、陶瓷，也会受到严重的影响(刘志霞，张加恭，2006)。

二、工业固废分析

由于近年来重化工业的迅猛增长，广东省工业固体废物产生量逐年增长，自 1997 年以来广东省工业垃圾年产量均超过 1500 万吨，2002 年固体废物产生量超过 2000 万吨(表 2-3)；固体废物的成分主要是粉煤灰、尾矿、炉渣、冶炼废渣等，这四种物质分别占固体废物总量的 37%、20%、13%和 8%，合计 78%(图 2-1)。大部分工业固体废弃物已逐渐得到综合利用，如用于烧砖、烧窑和水泥生产的替代原料等，而且工业固体废物的利用率呈上升趋势，2004 年工业固废的综合利用率达到 80.31%。因此本文在计算垃圾焚烧二恶英排放量时未计算工业垃圾焚烧。

工业固体废物主要产生于矿业、电力、蒸汽和热水生产和供应业、食品饮料、烟草制造业、石油加工和炼焦业、金属冶炼及压延加工业和化学原料及化学制品

制造业，具体来源行业分析见表 2-4。

表 2-3 广东省工业固体废物产生、利用和排放量

项目	单位	2000	2001	2002	2003	2004
1.产生量	万吨	1694.33	1990.3	2044.88	2245.66	2609.22
2.综合利用量	万吨	1144.49	1429.57	1552.61	1881.09	2312.06
综合利用率	%	68.48	68.95	74.4	79.03	80.31
3.排放量	万吨	11.7	33.49	29.18	17.81	15.93
危险废物排放量	吨	147.65	627.1	851.14	920.95	848.2

数据来源于广东省环境保护局公众服务网

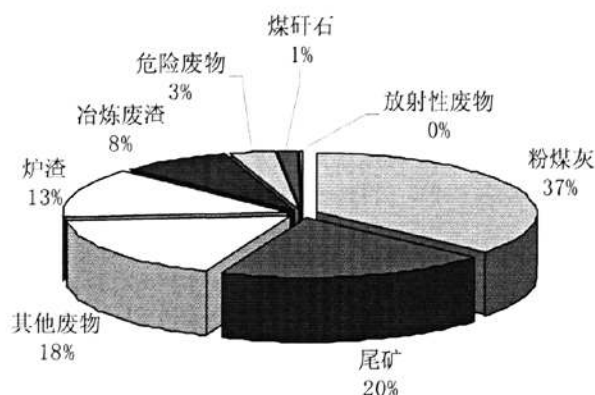


图 2-1 2000 年工业固体废物成份分析

表 2-4 广东省重点调查工业企业工业固体废物产生行业分析 (%)

行业	1992	1996 年	2000 年
矿业	25.71	22.75	22.69
电力、蒸汽、热水的生产和供应业	18.06	32.04	36.81
食品、烟草加工及食品饮料制造业	16.5	11.98	9.94
石油加工和炼焦业	12.94	1.63	0.71
金属冶炼及压延加工业	9.55	12.24	12.15
化学原料及化学制品制造业	8.22	9.31	5.56
纺织业	-	2.99	2.62
制造业	2.06	1.26	1.91
造纸及纸制品业	1.97	2.84	3.4
医药制造业	0.58	0.35	0.31
水泥制造业	0.47	0.85	1.05
橡胶制品业	0.23	0.26	0.15
服装、皮革、毛皮、羽绒及其他纤维制品制造业	3.12	0.26	0.41
塑料制品业	0.07	0.07	0.1
金属制品业	0.01	0.18	0.28
印刷	-	0.01	0.09

数据来源：广东省环境统计资料汇编

第三节、广东省资源与能源消耗

一、广东省能源资源简介

在全国各省分中,广东省是一个常规能源资源短缺的省份,全省人均拥有能源资源储量不足30吨标准煤,不到全国人均储量的1/20,并且远离我国煤炭石油工业产地。

广东省各种常规能源资源储量统计如下(黄何,增乐民,2002):

- 1) 油气:在南海珠江口盆地,保有储量折合标准煤约 3.6 亿吨。其中石油 2 亿吨,折合标准煤 3 亿吨,占全国石油探明储量的 6.06%。
- 2) 油页岩:较为丰富,保有储量 55 亿吨,折合标准煤约 10 亿吨。
- 3) 煤炭:探明储量 8.75 亿吨,保有储量 5.97 亿吨,折合标准煤 3.8 亿吨,仅占全国煤炭保有储量的 0.052%。主要分布在广东省的北部和西部,西、北部储量占全省煤炭储量的 78%,以韶关市和梅州市最多。
- 4) 水力资源:理论蕴藏量 1073 万千瓦,占全国理论蕴藏量的 1.6%。可开发装机容量 666 万千瓦,占全国的 1.8%。年发电量约 243 亿千瓦时,以 50 年计算的水能资源蕴藏量为 4.9 亿吨标准煤。主要分布在韶关、河源、肇庆、梅州和清远等东西部地区,占全省可开发量的 75%。到 2002 年为止已开发水电装机容量 475 万千瓦,占可开发容量的 70%。
- 5) 此外,广东省拥有较丰富的新能源资源,如地下热水矿、太阳能、风能、潮汐能等。尤其是风能资源,按目前已掌握的资料测算,风能理论储量 9698 万千瓦,风力发电可开发装机容量达 600 万千瓦,略低于全省水电资源可开发装机容量,其中汕头、揭阳、汕尾和湛江等地风能资源较好。

二、广东省能源消耗状况

1、经济增长与能源消耗

1979 至 2006 年,广东连续 26 年生产总值年均以两位数的速度增长,稳居中国大陆各省、自治区和直辖市首位。如图 2-2 所示,与经济增长紧密相关的是能源的极大消耗,能源消耗与经济增长均呈指数增长趋势,2003 年广东省一次能源消费量突破 1 亿吨标准煤。

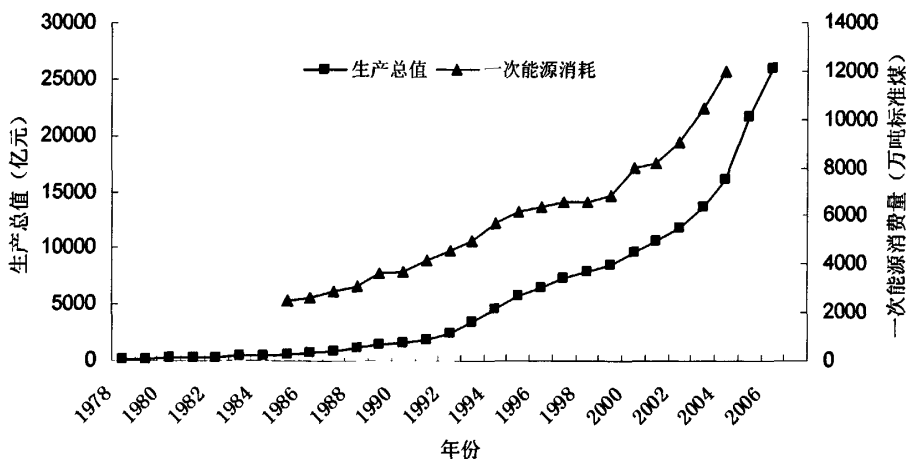


图 2-2 1978-2006 年广东省生产总值与一次能源消耗量情况图

广东省常规能源资源贫乏，能源自给能力一直偏低，近年来能源供给量甚至出现负增长。伴随经济社会发展而快速增长的能源需求，主要依靠省外调进解决，能源供应体系的安全稳定性相对薄弱，近年接连出现电力供应短缺、煤炭供应紧张、油品脱销等现象，严重影响了广东经济社会的正常发展。

从广东能源生产弹性系数（能源生产增长速度 / 国民经济增长速度）来看，1995年为0.99，2000年下降为0.53，2002年为0.60，尤其是1999和2001年能源生产负增长，增长幅度分别为-10.3和-8.3。2001年广东能源消费总量比上年增长7.7，而能源生产总量却比上年下降8.3。2002年广东能源消费总量比上年增长11.6，能源生产总量比上年增长6.5。未来阶段，广东依靠传统能源工业的发展提高能源自给率的途径将面临环境承载能力的制约（伦蕊，欧阳颖弋，2005）。

广东省能源工业的煤炭消耗量大，但洁净燃煤技术的应用相对落后。火电装机容量和发电量均占全省电力结构的70%以上，大部分火电厂的烟气排放未经脱硫、脱硝处理，2005年全省电力行业的二氧化硫排放总量达到70.3万吨，再加上大量的汽车尾气排放，对大气污染严重，并导致全省酸雨频率长期居高不下，2005年全省酸雨频率高达55%，尤其是经济发达的珠江三角洲地区酸雨频率高达80%以上。

2、广东省能源消耗情况

广东省的能源消耗消耗主要是火力发电和工业生产，生活能源消耗只占原煤

消耗总量的很小一部分。除火力发电外，能源消耗比较大的工业行业还有水泥制造业、食品饮料、烟草制造业、纺织业、造纸及纸制品业、化学工业、金属冶炼及压延工业等。

本文将广东省能源消耗数据分为工业能源消耗、生活能源消耗和交通运输能源消耗三部分，具体能源消耗情况统计列表如后。

2.1 工业能源消耗情况

2.1.1 1985-1989 年分行业工业能源消费量和构成

(1) 原煤消费

1985-1989 年分行业原煤消耗逐年增长，1989 年超过 1000 万吨标准煤。制造业是最主要的原煤消耗行业，占全部原煤消耗行业消耗总量的 90%以上。交通运输行业原煤消耗量很少，不足 1%。水泥制造业、化学工业原煤消耗量大。

表 2-5 1985-1989 年分行业原煤消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	628.73	684.2	736.8	992.97	1175.6
工业	628.73	680.68	734.27	990.52	1172.5
轻工业	215.11	240.95	338.18	367.05	622.48
重工业	413.62	439.73	396.09	623.47	550.04
采掘业	17.15	20.7	16.14	30.96	31.37
矿业	17.03	20.12	15.07	30.06	29.46
木材及竹材采运业	0.11	0.58	1.07	0.89	0.75
制造业	611.58	659.98	718.13	959.56	1141.2
食品制造业	80.8	92.22	97.35	137.97	161.26
饲料工业	0.76	0.55	10.63	10.23	11.3
纺织业	22.88	32.87	34.55	56.6	71.35
造纸业	37.71	34.13	37.04	50.74	50.76
电力生产业	-	2.85	2.52	1.44	1.66
蒸汽、热水生产供应业	-	-	0.03	2.16	0.93
石油加工业	0.23	0.3	0.28	0.19	0.26
炼焦、煤气及煤制品业	2.32	4.16	6.85	3.01	3.22
化学工业	106.65	118.83	127.55	124.35	147.69
1 基本化学原料制造	8.97	16.08	14.93	20.15	13.65
2 化学肥料制造业	78.57	85.11	72.96	85.64	96.86
3 化学农药制造业	0.56	0.84	6.26	1.66	1.66
4 有机化学原料制造	4.66	7.44	7.17	7.14	8.13
5 合成材料制造业	1.55	1.24	1.99	1.22	1.89
医药工业	9.51	12.31	15.99	27.3	31.01
化学纤维工业	4.62	4.62	6.14	8.84	9.37
橡胶制品业	8.66	10.46	13.17	19.39	22.89
塑料制品业	2.02	2.78	4.06	13.54	20.18
建筑材料及其他非金属矿物业	241.7	220.72	231.84	294.53	350.47
1 水泥制造业	127.51	154.5	183.37	132.88	233.38

2 砖瓦、石灰和轻质建筑材料制造业	85.07	48.84	34.47	61.92	51.29
3 玻璃及玻璃制品业	3.86	5.01	5.36	4.7	3.71
黑色金属冶炼和压延加工业	50.61	43.58	67.02	88.18	119.25
有色金属冶炼及压延加工业	6.96	9.53	11.3	16.07	15.55
金属制品业	5.24	3.77	4.65	19.14	9.59
机械、电气、电子设备制造	11.08	13.12	17.45	29.47	36.89
交通运输和邮电通讯	-	3.52	2.53	2.45	3.05
交通运输	-	3.52	2.53	2.45	3.05

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(2) 焦炭消费

焦炭消费量相比原煤消耗是比较少的，约为原煤消耗量的 1%，消耗行业同样集中于制造工业。金属冶炼和压延加工业消耗焦炭量最大，占总消耗量的 80% 左右。

表 2-6 1985-1989 年分行业焦炭消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	74.37	79.65	93.36	93.86	115.1
工业	74.37	79.54	93.33	93.83	114.97
轻工业	7.42	4.19	4.76	7.36	21.42
重工业	66.95	75.35	88.57	86.47	93.55
采掘业	0.22	0.15	0.22	0.64	0.88
矿业	0.18	0.15	0.22	0.62	0.79
木材及竹材采运业	-	-	-	-	0.01
制造业	74.15	79.39	93.11	93.19	114.09
食品制造业	0.33	0.39	0.51	0.51	0.77
饲料工业	-	-	-	0.04	0.07
纺织业	0.02	0.03	0.03	0.37	0.85
造纸业	0.02	0.02	0.12	0.11	0.11
蒸汽、热水生产和供应业	-	-	-	0.04	0.07
石油加工业	0.02	0.03	0.05	0.02	0.04
化学工业	0.86	1.79	3.11	1.87	1.29
1 基本化学原料制造业	0.51	0.61	0.8	0.68	0.61
2 化学肥料制造业	0.08	1.04	0.77	0.2	0.34
3 化学农药制造业	0.03	0.1	0.21	0.17	0.02
4 有机化学原料制造业	0.22	0.04	1	0.24	0.02
医药工业	0.01	-	-	0.28	0.06
化学纤维工业	-	-	-	-	0.06
橡胶制品业	-	-	-	0.04	0.09
塑料制品业	-	-	-	0.2	0.75
建筑材料及其他非金属矿物制品	0.27	0.27	1.19	0.53	0.3
1 水泥制造业	0.11	0.17	0.8	0.09	0.18
2 砖瓦、石灰和轻质建筑材料	0.15	0.01	0.14	0.14	0.6
3 玻璃及玻璃制品业	0.01	-	-	0.23	0.01
黑色金属冶炼和压延加工业	50.59	59.12	67.76	59.8	73.28
有色金属冶炼及压延加工业	11.19	7.41	9.18	16.01	19.82

金属制品业	2.95	1.84	1.78	2.3	2.66
机械、电气、电子设备制造业	7.51	8.21	8.89	9.05	9.85
交通运输和邮电通讯	-	0.12	0.03	0.03	0.13
交通运输	-	0.1	0.03	0.03	0.13

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(3) 原油消费

原油消耗量很低，1989 年最大，也仅有 22.56 万吨标准煤。主要消耗行业为石油加工业。

表 2-7 1985-1989 年分行业原油消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	5.6	3.01	1.92	22.04	22.56
工业	5.6	3.01	1.89	22.04	22.56
轻工业	3.69	0.17	-	-	0.86
重工业	1.91	2.84	1.89	22.04	21.7
制造业	5.6	3.01	1.89	22.04	21.7
食品制造业	0.01	-	-	-	0.03
纺织业	0.49	0.17	-	-	0.03
蒸汽、热水生产和供应业	2.54	-	0.24	-	-
其中电力生产	2.54	-	0.24	-	-
石油加工业	-	1.71	-	21.17	21.03
化学工业	0.41	0.24	0.52	0.41	0.47
1 基本化学原料制造业	0.29	-	0.06	0.19	0.11
2 化学肥料制造业	0.04	-	-	-	-
4 有机化学原料制造业	0.09	0.24	0.46	0.22	0.36
橡胶制品业	0.16	-	-	-	-
建筑材料非金属矿物制品	1.23	0.89	1.13	0.46	0.74
玻璃及玻璃制品业	0.59	0.89	1.13	0.46	0.74
黑色金属冶炼压延加工业	0.43	-	-	-	0.06
有色金属冶炼压延加工业	0.16	-	-	-	-
交通运输和邮电通讯	-	-	0.03	-	-

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(4) 汽油消费

汽油消耗最大的行业是交通运输业，约占总消耗量的 70%。其次是制造业，重工业消耗大于轻工业。

表 2-8 1985-1989 年分行业汽油消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	28.75	81.12	85.02	90.72	120.89
工业	28.75	29.81	27.99	25.6	37.05
轻工业	8.7	13.88	14.14	13.18	21.19
重工业	20.05	15.92	13.85	12.42	15.86
采掘业	4.39	4.44	3.51	2.09	2.49

矿业	3.67	3.19	2.34	1.74	1.99
木材及竹材采运业	0.65	1.15	1.07	0.29	0.35
制造业	24.36	25.36	24.48	23.51	34.56
食品制造业	3.28	4.75	4	2.53	3.37
饲料工业	0.03	0.06	0.32	0.09	0.12
纺织业	0.49	0.87	0.68	1.04	1.41
造纸业	0.18	0.32	0.25	0.26	0.31
电力生产业	0.38	0.56	0.43	0.26	0.54
蒸汽、热水生产和供应业	-	-	-	-	0.01
石油加工业	0.4	0.51	0.56	0.01	0.49
炼焦、煤气及煤制品业	0.01	0.03	0.03	0.49	0.03
化学工业	1.4	2.32	2.32	1.72	2.69
1 基本化学原料制造业	0.22	0.34	0.29	0.41	0.26
2 化学肥料制造业	0.5	0.85	0.84	0.49	0.5
3 化学农药制造业	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03
4 有机化学原料制造业	0.29	0.63	0.49	0.35	0.51
5 合成材料制造业	0.03	0.07	0.01	0.04	0.06
医药工业	0.26	0.41	0.6	0.41	1.15
化学纤维工业	0.04	0.06	0.12	0.07	0.13
橡胶制品业	0.74	1.21	1.12	0.91	1.59
塑料制品业	0.21	0.37	0.43	0.6	1.63
建筑材料及非金属矿物品	1.99	2.96	2.72	2.5	2.6
1 水泥制造业	1.28	1.85	1.56	0.93	1.1
2 砖瓦、石灰轻质建筑材料	0.28	0.63	0.68	0.47	0.85
3 玻璃及玻璃制品业	0.1	0.18	0.21	0.18	0.18
黑色金属冶炼压延加工业	0.4	0.69	0.68	0.59	0.62
有色金属冶炼压延加工业	0.26	0.56	0.49	0.47	0.54
金属制品业	0.49	0.85	0.85	0.97	1.32
机械、电气、电子设备业	12.07	5.34	4.93	6.82	8.83
交通运输和邮电通讯	-	51.32	57.03	65.12	83.84

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(5) 煤油

除 1985 年因数据不全消耗量只有 0.82 万吨标准煤外，其它年份均在 20 万吨标准煤左右，消耗量呈增加趋势，1986-1989 年平均年消费量为 23.43 万吨标准煤。主要消耗行业是交通运输和邮电通讯业，占总消耗量的 90%左右，工业行业柴油消耗量很少，只占 5%左右。

表 2-9 1985-1989 年分行业煤油消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	0.82	18.05	23.26	25.14	27.27
工业	0.82	1.22	1.1	1.51	2.83
轻工业	0.32	0.59	0.47	0.6	0.87
重工业	0.5	0.63	0.63	0.91	1.96
采掘业	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01

矿业	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01
木材及竹材采运业	-	-	0.01	-	-
制造业	0.73	1.19	1.08	1.5	2.82
食品制造业	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03
饲料工业	-	0.03	-	-	-
纺织业	-	-	0.01	0.04	0.09
造纸业	0.02	-	0.01	-	0.01
石油加工业	0.09	0.03	0.04	0.03	0.07
炼焦、煤气及煤制品业	-	-	-	-	-
化学工业	0.16	0.31	0.4	0.78	1.46
1 基本化学原料制造业	-	0.03	0.01	-	-
3 化学农药制造业	0.16	0.28	0.35	0.66	1.24
4 有机化学原料制造业	-	-	-	-	0.01
5 合成材料制造业	-	-	-	-	0.01
医药工业	0.02		0.01	-	0.01
塑料制品业		0.01	0.01	0.01	0.06
建筑材料及其他非金属矿物制品业	0.07	0.09	0.07	0.21	0.28
1 水泥制造业	-	-	-	0.01	-
2 砖瓦、石灰和轻质建筑材料制造业	-	0.01	0.03	0.12	0.06
3 玻璃及玻璃制品业	0.03	0.06	0.03	0.06	0.04
黑色金属冶炼和压延加工业	0.01	0.04	0.01	-	0.01
有色金属冶炼及压延加工业	0.01	0.04	0.03	0.03	0.12
金属制品业	0.03	0.03	0.07	0.07	0.24
机械、电气、电子设备制造业	0.15	0.15	0.15	0.15	0.18
交通运输和邮电通讯	-	16.83	22.16	23.63	24.44

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(6) 柴油

柴油的消耗量较大，大约为汽油消耗量的两倍左右，主要用于交通运输和工业制造业。1986-1989 年均消耗量为 178.8 万吨标准煤。

表 2-10 1985-1989 年分行业柴油消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	36.22	164.2	160.47	176.61	213.74
工业	36.22	57.02	55.92	64.97	100.22
轻工业	11.49	24.1	22.7	26.3	41
重工业	24.73	32.92	33.22	38.67	59.22
采掘业	2.83	5.42	4.95	3.05	3.79
矿业	2.55	4.62	4.18	2.74	3.28
木材及竹材采运业	0.22	0.63	0.6	0.15	0.16
制造业	33.39	51.6	50.97	61.92	96.43
食品制造业	2.06	3.89	3.38	2.87	5.46
饲料工业	0.03	0.16	0.63	0.26	0.44
纺织业	1.25	3.92	2.45	4.05	8.23
造纸业	0.19	0.39	0.39	0.51	0.8
电力生产业	4.69	8.1	14.05	7.9	6.5
蒸汽、热水生产和供应业	-	-	-	-	0.06

石油加工业	0.28	0.57	0.5	0.35	0.47
炼焦、煤气及煤制品业	0.04	0.07	0.07	0.04	0.06
化学工业	1.05	2.11	2.01	1.75	2.9
1 基本化学原料制造业	0.15	0.58	0.35	0.34	0.12
2 化学肥料制造业	0.44	0.47	0.68	0.36	0.36
3 化学农药制造业	0.01	0.01	0.04	0.06	0.04
4 有机化学原料制造业	0.22	0.58	0.52	0.31	0.22
5 合成材料制造业	0.01	0.01	-	0.01	0.09
医药工业	0.22	0.68	0.51	0.58	0.9
化学纤维工业	0.04	0.03	0.28	0.23	0.31
橡胶制品业	0.09	0.25	0.23	0.35	0.63
塑料制品业	0.39	1.5	1.37	1.78	6.41
建材及其他非金属矿物制品业	2.55	4.71	4.09	3.26	11.31
1 水泥制造业	0.99	1.6	1.57	1.3	2.59
2 砖瓦、石灰和轻质建材业	0.44	1.17	1.36	1.18	3.23
3 玻璃及玻璃制品业	0.25	0.48	0.25	0.41	1.08
黑色金属冶炼和压延加工业	0.26	0.92	0.93	1.31	1.78
有色金属冶炼及压延加工业	0.26	1.11	1.36	1.3	1.97
金属制品业	0.73	2.03	2.19	2.32	5.09
机械、电气、电子设备制造业	14.54	13.22	8.51	25.41	17.18
交通运输和邮电通讯	-	107.18	104.55	111.64	113.52

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(7) 重油

1985-1989 年重油的消耗逐年增加，1985 年因缺少交通运输重油消耗数据，其消耗总量为 119.13 万吨标准煤，1986-1989 年重油的消耗量均在 200 万吨标准煤以上。制造业是重油的主要消耗行业，其中化学工业、建筑材料制造业消耗重油较多，交通运输行业重油消耗年均 70 万吨标准煤。

表 2-11 1985-1989 年分行业重油消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	119.13	209.39	242.98	259.39	295.73
工业	119.13	141.65	172.72	194.62	224.52
轻工业	28.17	38.62	47.09	51.62	70.14
重工业	90.96	103.03	125.63	143	154.38
采掘业	5.31	-	-	0.15	0.63
矿业	5.31	-	-	0.14	0.56
木材及竹材采运业	-	-	-	-	0.01
制造业	113.82	141.65	172.72	194.47	223.89
食品制造业	0.89	0.5	0.9	1.11	0.29
饲料工业	-	-	4.86	0.04	0.11
纺织业	4.53	7.11	8.36	6.96	8.67
造纸业	0.53	0.7	0.8	0.81	0.99
蒸汽、热水生产和供应业	1.76	5.16	6.97	1.21	9.57
其中：电力生产业	1.76	3.37	-	-	-
石油加工业	36.84	41.7	40.9	37.57	46.8

化学工业	19.09	19.8	19.59	35.69	44.16
1 基本化学原料制造业	3.13	2.66	2.81	2.77	2.93
2 化学肥料制造业	10.1	10.73	10.33	27.2	27.14
3 化学农药制造业	0.7	0.47	0.41	0.4	0.4
4 有机化学原料制造业	4.39	5.11	5.13	5.11	5.47
5 合成材料制造业	0.06	0.04	0.11	0.03	0.51
医药工业	0.07	0.03	0.04	0.09	0.13
化学纤维工业	-	-	0.06	0.29	0.53
橡胶制品业	1.39	1.5	1.57	2.13	2.36
塑料制品业	0.17	0.3	0.14	0.64	1.37
建材及其他非金属矿物制造业	33.99	38.4	46.64	49.04	69.06
1 水泥制造业	2.34	2.09	3.16	3.44	3.24
2 砖瓦、石灰和轻质建材制造业	0.39	4.43	2.23	4.2	5.99
3 玻璃及玻璃制品业	17.81	18.87	26.81	23.64	25.51
黑色金属冶炼和压延加工业	8.1	9.61	19.61	27.99	12.73
有色金属冶炼及压延加工业	1.09	7.01	6.53	6.89	6.96
金属制品业	0.59	0.36	0.24	0.61	1.43
机械、电气（子）设备制造业	3.26	4.6	7.24	13.1	7.09
交通运输和邮电通讯	-	67.74	70.26	64.77	71.22
交通运输	-	67.74	70.26	64.77	69.79

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

(8) 电力

电力消耗低于原煤，是广东省第二大消耗能源，1986-1989 年均消耗量约 650 万吨标准煤。电力主要消耗于工业生产，电力消耗重工业略高于轻工业。

表 2-12 1985-1989 年分行业电力消费（单位：万吨标准煤）

项 目	1985	1986	1987	1988	1989
总计	493.53	511.3	601.74	712.16	771.5
工业	493.53	501.1	587.31	697.04	756.94
轻工业	176.41	185	229.19	305.18	308.78
重工业	317.12	386.8	358.12	391.86	448.16
采掘业	96.15	64.58	75.31	81.36	77.15
矿业	86.54	48.41	56.03	65.78	54.09
木材及竹材采运业	0.9	0.08	0.31	0.43	0.26
制造业	397.38	436.52	512	615.68	679.79
食品制造业	29.92	56.24	53.97	45.78	46.42
饲料工业	1.74	0.51	8.61	2.56	3.1
纺织业	21.23	20.75	25.65	40.43	39.93
造纸业	18.03	17.43	17.5	20.94	23.72
蒸汽、热水生产和供应业	35.25	33.99	44.54	60.74	62.37
电力生产业	33.05	33.99	44.54	54.05	52.37
石油加工业	18.49	16.52	17.58	20.39	23.1
炼焦、煤气及煤制品业	0.04	0.99	1.47	0.43	0.51
化学工业	64.36	51.93	57.04	65.26	65.11

1 基本化学原料制造业	14.73	14.98	13.85	16.77	16.42
2 化学肥料制造业	40.95	30.75	35.54	35.98	34.45
3 化学农药制造业	0.88	1.03	1.9	1.77	1.68
4 有机化学原料制造业	2.3	2.17	2.72	2.64	4.6
5 合成材料制造业	0.47	0.24	0.35	0.67	0.95
医药工业	3.31	3.75	4.77	5.27	8.03
化学纤维工业	2.87	7.23	11.91	7.4	11.68
橡胶制品业	6.98	6.28	11.56	5.08	10.88
塑料制品业	6.1	10.35	8.54	18.78	26.68
建材及其他非金属矿物制品业	77.5	56.67	66.85	69.83	74.85
1 水泥制造业	36.16	39.25	47.53	36.06	40.84
2 砖瓦、石灰和轻质建材制造业	30.76	5.65	5.66	10.82	14.93
3 玻璃及玻璃制品业	2.9	3.95	5.32	4.96	5.77
黑色金属冶炼和压延加工业	25.55	25.14	25.88	31.53	37.48
有色金属冶炼及压延加工业	6.72	12.13	15.17	21.18	24.16
金属制品业	10.67	40.43	46.68	33.77	35.11
机械、电气、电子设备制造业	36.98	45.41	49.9	51.25	58.14
交通运输和邮电通讯	-	10.2	14.43	15.12	14.56
交通运输	-	8.42	11.44	11.42	11.86

资料来源：广东省国民经济和社会发展统计资料 1949-1989（工业能源交通部分）

2.1.2 1992-2003 年重点调查工业能源消耗

(1) 燃料煤

燃料煤的消耗主要是电力、蒸汽和热水生产供应业，而且占消耗总量的比例呈增长趋势，1992 年电力、蒸汽、热水生产和工业燃料煤消耗占总量的 42.3%，到 2003 年这个比例已经上升到 80%。水泥制造行业的燃料煤消耗量呈降低趋势，由 1995 年的 811.84 万吨下降到 2003 年的 37.39 万吨；造纸和纸制品工业燃料煤消耗量年均 100 万吨以上，消耗量递增，1992 年燃料煤消耗为 98.4 万吨，2003 年上升为 285.98 万吨。

表 2-13 1992-2003 年重点调查工业分行业燃料煤消费 (单位: 万吨)

行 业	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
总计(重点调查)	2614.7	3074.92	3388.03	3313.85	2470.48	2563.54	2563.32	3001.52	3733.66	4126.67	4566.03	5064.03
纺织业	106.9	111.3	107.14	94.61	75.95	78.6	74.64	77.63	112.28	156.72	215.86	244.91
金属制品业	-	0.7	0.94	0.94	-	3.29	2.89	6.67	2.82	4.47	5.3	7.09
非金属矿物制品业	536.2	745.72	789.77	884.08	72.62	635.43	65.44	89.58	84.62	81.68	34.77	65.81
其中: 水泥制造业	446	682.19	727.68	811.84	59.95	287.28	39.47	75.97	69.45	65.82	19.84	37.39
电子及通信设备制造业	-	-	-	8.61	-	6.31	-	-	26.12	0.02	0.06	-
造纸及纸制品业	98.4	125.01	123.38	121.38	114.34	107.97	107.31	162.02	195.56	246.51	271.33	285.98
食品加工业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108.67	84.34	78.02
化学原料及制品制造业	153.1	136.04	115.68	125.16	79.66	82.18	74.36	63.58	39.31	35.52	33.41	47.26
食品制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.62	52.21	46.77
电气机械及器材制造业	14.6	15.33	10.11	-	8.05	-	5.83	4.74	-	1.07	1.2	-
塑料制品业	5.3	5.82	4.67	4.18	2.77	3.98	4.17	3.9	4.31	4.49	4.95	5.94
皮革、毛皮、羽绒制品业	0.1	1.54	1.29	1.89	1.97	1.97	0.89	0.84	1.21	1.41	2.12	1.51
服装及纤维制品制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.04	5.72	12.59
交通运输设备制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	0.37	-
电力、蒸汽、热水供应业	1106.3	1318.86	1652.33	1511.34	1732.46	1858.06	1865.8	2256.98	2915.73	3161.39	3609.53	4027.13
其中: 火力发电	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3160.19	3605.23	4024.26
黑色金属冶炼压延加工	102	102.85	101.14	99.88	20.63	29.52	26.63	33.19	57.86	-	-	-
有色金属冶炼压延加工	22.9	22.26	15.01	17.49	3.78	28.91	21.97	24.34	23.82	22.18	23.23	22.73
医药制造业	23.8	19.01	17.17	14.59	10.69	12.03	12.1	8.93	10.48	10.34	9.95	12.98
普通机械制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.44	1.38	0.78
饮料制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	25.95	-
其他	23.1	27.69	18.88	23.33	13.08	242.4	343.46	330.84	276.92	225.7	184.35	198.98
食品、烟草、饮料制造业	332	351.49	337.79	306.88	237.27	238.32	230.54	192.16	195.43	-	-	-
石油加工和炼焦业	58	60.57	63.98	72	59.54	53.28	50.1	53.91	41.23	-	-	-
化学纤维制造业	8.2	8.46	6.38	6.49	1.9	1.18	1.17	0.97	-	-	-	-
橡胶制品业	12.5	10.26	10.38	11.15	10.71	9.48	8.49	7.12	6.87	-	-	-
印刷业	1.4	0.68	1.02	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-

注：92 年没有区分原料煤和燃料煤，本表中 93-95 年数据也为总煤量，而且为所有工业消费量，不是重点调查工业企业消费量；电力、蒸汽、热水的生产 and 供应业有的也叫“电力、煤气及水的生产和供应业”；1999 年为广东省工业能源消费 3321.29 万吨；资料来源：广东省环境统计资料汇编（1992-2003）

(2) 原料煤

表 2-14 1992-2003 年重点调查工业分行业原料煤消费（单位：万吨）

行 业	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
总计	744.33	762.42	871.19	782.12	792.98	1240.21	-	1154.67	-	-	-
总计(重点调查)	744.33	762.42	871.19	762.57	764.08	738.98	787.1	828.66	787.15	1024.67	972.25
纺织业	1.14	-	-	-	-	1.2	-	-	-	0.46	1
金属制品业	-	-	0.02	0.02	0.1	-	-	-	-	0.11	-
非金属制品业	592.54	612.41	722.77	622.31	657.38	1101.36	1129.62	1049.28	684.33	930.93	859.48
其中：水泥制造业	573.03	577.1	681.92	610.15	642.52	756.51	768.67	787.9	374.34	911.45	851.12
电子及通信设备制造业	0.63	-	0.3	5.46	0.01	0.73	-	0.04	0	0	0
造纸及纸制品业	0.05	-	0.5	-	0.03	-	-	-	0	0.06	3
食品加工业	-	-	-	-	-	-	-	-	1.82	1.92	2
化学原料及化学制品制造业	53.64	49.99	52.54	38.74	41.58	23.11	21.25	14.51	11.08	13.3	16.06
食品制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
电气机械及器材制造业	-	1.21	-	-	-	-	0.03	-	0	0	0
塑料制品业	-	-	0.01	-	-	-	-	-	0	0.06	0
皮革、毛皮、羽绒及其制品业	-	-	0.13	-	0.05	-	-	-	0	0	0
电力、蒸汽、热水的生产和供应业	-	-	-	-	-	2.09	0.71	4.83	0	0	5
其中：火力发电	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	2
黑色金属冶炼及压延加工业	77.78	81.24	79.29	81.88	82.85	79.42	78.23	77.69	-	-	-
有色金属冶炼及压延加工业	8.21	9.11	6.5	7.43	1.53	14.24	2.88	1.23	5.62	0.8	1
医药制造业	-	-	-	-	-	-	0.19	0.03	0	0	0
饮料制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.3	0
其他	0.32	-	0.01	-	0.52	0.12	0.27	-	84.29	76.73	83.7
食品、烟草加工及食品饮料制造业	5.36	3.28	3.72	3.9	3.95	14.41	12.79	3.03	-	-	-
采掘业	-	-	-	-	-	-	4.21	-	-	-	-
石油加工和炼焦业	-	-	-	-	1.18	0.04	0.3	0.3	-	-	-

注意:机械\电子\电气设备制造业,不同年份划分不同,最后统一为制造业;资料来源:广东省环境统计资料汇编(1992-2003)

(3) 燃料油

燃料油的消耗以重油为主,其中1992-2000年表中数据是燃料油消耗总量,没有区分燃料油种类,2001年之后燃料油数据分为重油和柴油两部分,燃料油也主要消耗在电力、蒸汽、热水的生产和供应业,主要用于火力发电。非金属制品制造业消耗燃料油也较多。

表 2-15 1992-2003 年重点调查工业分行业燃料油消费(单位:万吨)

行 业	1992		1993		1994		1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油	重油	柴油
总计(重点调查)	413.63	545.97	580.19	613.03	673.28	662.32	778.03	942.94	838.14	683.06	167.08	754.69	139.08	829.27	129.1									
纺织业	21.69	33.50	36.76	42.01	658.63	55.42	61.48	69.89	73.2	50.63	9.39	52.32	8.92	40.25	4.94									
金属制品业	1.42	0.62	-	1.4078	45.07	3.14	4.68	8.86	8.41	0.47	3	0.55	4.25	0.59	4.96									
非金属制品业	76.93	87.97	99.05	105.58	5.96	141.08	152.84	144.92	159.2	64.42	58.75	61.14	56.07	60.25	52.2									
其中:水泥制造业	13.40	9.86	1.85	1.56	106.71	1.57	1.65	8.47	2.86	1.24	0.53	0.42	0.34	1.3	0.42									
电子通信设备制造	-	7.53	11.89	-	1.47	8.61	9.64	-	13.49	1.59	5.63	1.95	4.88	-	-									
造纸及纸制品业	2.08	2.06	2.28	2.33	14.67	4.63	4.17	14.62	5.16	4.83	0.82	5.66	0.59	5.22	0.24									
食品加工业	-	-	-	-	3.08	-	-	-	-	3.72	2.19	4.21	1.25	2.67	0.84									
化学原料制品制造	13.32	13.61	12.53	13.73	-	12.2	11.56	21.15	22.25	8.05	1.62	10.94	1.87	10.21	1.81									
食品制造业	-	-	-	-	15.32	-	-	-	-	3.63	1.27	4.26	1.16	6.03	1.14									
电气机械器材制造	5.25	-	-	16.32	-	-	-	12.51	-	2.97	3.75	1.28	4.88	-	-									
塑料制品业	0.97	-	2.29	2.77	-	2.92	3.18	4.9	5.58	3.69	1.97	2.67	1.74	2.77	2.49									
皮革/毛皮/羽绒品	0.48	0.96	0.78	1.36	2.05	2.5	2.46	2.81	3.04	2.16	2.44	2.35	2.78	2.30	1.07									
服装/纤维品制造	-	-	-	-	1.23	-	-	-	-	1.78	0.31	2.18	0.25	1.89	0.42									
交通运输设备制造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.53	0.52	0.58	5.36	0.36	0.24									
电力、蒸汽、热水的生产和供应业	230.68	334.87	327.59	350.98	-	363.57	420.73	494.38	433.24	453.30	62.79	529.93	34.44	603.17	33.85									
其中:火力发电	-	-	-	-	370.17	-	-	-	-	443.39	58.45	505.1	28.68	576.78	33.75									
黑色金属冶炼及压延加工业	10.26	12.07	8.66	13.26	14.31	15.68	14.93	13.32	12.07	-	-	-	-	-	-									

有色金属冶炼及压延加工业	6.52	7.64	0.69	9.27	14.31	15.80	8.53	7.58	9.65	2.80	5.19	3.41	4.51	3.16	5.26
医药制造业	0.58	2.01	0.94	1.27	16.71	1.33	1.77	1.77	2.13	1.77	0.78	1.68	0.79	1.81	0.86
普通机械制造业	-	-	-	-	1.20	-	-	-	-	0.29	0.36	0.36	0.23	0.01	0.45
饮料制造业	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.23	1.32	4.02	1.18	-	-
其他	8.54	5.74	94.64	16.68	-	4.35	4.99	5.25	7.81	72.18	4.98	65.21	3.9	70.43	6.69
食品/烟草/饮料业	4.09	5.42	8.70	6.51	-	10.38	29.06	90.54	15.64	-	-	-	-	-	-
采掘业	-	-	-	-	9.32	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-	-
石油加工和炼焦业	27.24	25.89	26.25	25.82	-	43.95	40.35	42.54	57.67	-	-	-	-	-	-
化学纤维制造业	0.96	0.98	0.89	1.18	34.45	3.70	4.55	4.24	4.69	-	-	-	-	-	-
橡胶制品业	1.51	1.96	2.02	2.18	2.83	2.39	2.29	2.65	2.22	-	-	-	-	-	-
通讯设备/计算机/电子设备制造业	-	-	-	-	2.80	-	-	-	-	-	-	-	-	16.79	5.75
仪器仪表及文化、办公用机械制造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.96	3.88
电器机械器材制造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	1.53
交通运输设备制造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.38	0.24
印刷业	0.79	0.06	0.18	0.22	-	0.07	0.40	-	2.14	-	-	-	-	-	-

资料来源：广东省环境统计资料汇编（1992-2003）

2.2 1992-2003 年广东省分类能源消耗总量

以上是 1985-2003 年广东省各种能源类型分行业的消耗状况, 本文用于估算持久性有机污染物排放量需要的能源消耗数据, 是经过整理的以万吨为单位的能源消耗数据。主要分为发电、工业能源消耗、生活能源消费和交通邮电四部分。除交通邮电外, 其他三部分的能源消耗分别分为煤炭消耗和油类消耗, 具体数据见表 2-16。能源消耗从 1992 年到 2003 年是逐年增长的, 其中用于发电的煤炭量 2003 年比 1992 年增长了约 3 倍, 耗油量增长了约 2 倍。用于生活消费的煤炭量降低, 燃油消耗量增加, 主要是天然气的利用率增加的结果。交通运输的能源消耗数据收集自《广东统计年鉴》, 计算时所用的能源消耗总量是根据能源折算系数得到的以万吨为单位的数据, 其中具体的折算方法, 在本论文后面的章节有详述。

表 2-16 1992-2003 年广东省分类能源消费总量 (单位: 万吨)

项目	发电		工业		生活消费		交通邮电	
类型	煤炭	耗油	煤炭	耗油量	煤炭	燃料油类	能耗总量	能耗总量
单位	万吨	万吨	万吨	万吨	万吨	万吨	万吨标准煤	万吨
1992	1106.3	230.6796	1526.5	190.9321	433.417	6.64673	450.23	310.5
1993	1318.86	334.8742	1764.24	222.3438	380.302	6.08264	471.64	325.27
1994	1652.33	327.5945	1742.66	266.8827	402.8	5.40981	534.32	368.5
1995	1511.34	350.9849	1808.58	276.1371	380.806	27.9359	577.29	398.13
1996	1732.46	370.17	1549.17	303.11	252.961	29.1416	612.21	422.21
1997	1858.06	363.57	2330.82	328.55	223.45	27.5161	581.61	401.11
1998	1867.89	420.73	2269.78	357.3	162.145	28.9611	697.89	481.3
1999	2257.69	494.38	2314.09	448.56	163.657	29.3429	838.42	578.22
2000	2920.55	433.24	2232.74	404.9	116.5	30.75173	964.96	665.49
2001	3161.39	517.71	1752.43	346.45	120.188	32.3302	1057.23	729.12
2002	3609.53	575.43	1981.17	330.17	120.96	35.72712	1151.88	794.4
2003	4031.73	637.4	2004.55	321.66	99.7	41.7768	1324.28	913.3

资料来源: 整理自广东省环境统计资料汇编 (1992-2003) 和广东统计年鉴 (1993-2004)

第三章、研究方法

第一节、排放量估算模型的建立

一、常用气体排放估算模型

国际上常用的气体排放量计算方法主要有两种，一种是活动量（即燃料燃烧量或产品生产量等）与其排放因子相乘；另一种方法是测定单位时间单位体积排放物中待测物的浓度乘以排放物体积和操作运行时间计算得到（CITEPA,2001;UNEP,1999;UNEP,2001）。第一种方法的计算公式如下：

$$E = \sum_{a=1}^{a=n} (AR_{a,t} \times EF_{a,t}) \quad (1)$$

式中，E（Emission）为气体污染物（如二恶英、多环芳烃等）的排放量； $AR_{a,t}$ （Activity rate）为在 t 时间段内 a 种活动的量，具体为燃料消耗量或者产品生产量、垃圾焚烧量等； $EF_{a,t}$ （Emission factor）为 a 排放源在 t 时间的排放因子。

第二种计算公式如下：

$$E = C_a \times V_b \times T \quad (2)$$

式中， C_a 指烟气中污染物的浓度，单位是 ng TEQ/m^3 （二恶英）， V_b 指单位时间排出烟气的体积，单位 m^3/d ，T 为运行时间，单位 d。

二、估算模型的选择

国外对各种排放源的二恶英和多环芳烃的排放因子进行了大量研究，排放源的活动量也可以从统计部门获得，因此估算方法一可操作性强且具有可比性，已得到广泛应用。因此本文在估算广东省二恶英和多环芳烃的排放量时，除垃圾焚烧发电排放二恶英估算外均采用方法一进行计算。

垃圾焚烧因二恶英排放因子大，成为二恶英的重要排放源。1995 年 15 个国家垃圾焚烧二恶英的排放量占排放总量的 50%左右（UNEP, 1999）；1990 年日本的 PCDD/Fs 排放量为 3940-8450g TEQ，其中由垃圾焚烧排放出来的 PCDD/Fs 为 3100~7400g TEQ，占 PCDD/Fs 总排放量的 80%-90%（全浩等，1998）；根据美国环保署 1994 年完成的评价报告，全美产生的 PCDD/Fs 中来自垃圾焚烧的占 3.5%（王明武，2001）；2000 年欧洲的 PCDD/Fs 排放量中，由生活垃圾焚烧排放出来的约为 412-506g I-TEQ/yr（Ulrich Qnass,et al, 2000）；2002 年我国

垃圾焚烧排放二恶英量约为 3.2-924 g I-TEQ/yr(Jun JIN, et al, 2004)。可见垃圾焚烧的排放量估算对二恶英排放总量估算至关重要。研究表明先进的垃圾焚烧技术和严格的法律法规已使得垃圾焚烧排放的二恶英大大降低(Pacyna, J..M, ,et al.2003; UNEP,1999, 2002)。

本文采用第二种估算方法计算垃圾焚烧发电厂二恶英排放量主要基于以下六个原因的考虑:

- 1) 垃圾焚烧时二恶英产生、排放的复杂性使得排放因子的变化幅度非常大,甚至同一类排放源的排放因子竟然相差成千上万倍;
- 2) 我国的垃圾焚烧处理起步晚,目前垃圾仍以堆放、填埋等传统简单处理方式为主;
- 3) 由于生活习惯、生活方式不同,各国的垃圾在成分、比例、热值等方面不一样,如日本的垃圾热值在 8400kJ/kg 以上,我国的垃圾热值则在 4200kJ/kg 左右(周肇秋,李海滨等,2000);就国内而言,各地因经济发展水平不一,产生的垃圾也有差异;
- 4) 影响垃圾焚烧二恶英排放因子变化的因素大致分为两个方面,即焚烧技术和法律法规严格程度。就焚烧技术而言,垃圾成分、焚烧炉内温度、烟气停留时间、烟气含氧量以及烟气冷却和除尘技术等都极大地影响着二恶英的产生和排放;
- 5) 近年来新建垃圾焚烧发电厂技术都已达到国际先进水平,排放因子很低;
- 6) 我国自 2000 年开始实行严格的废物焚烧污染控制标准。研究表明,先进的垃圾焚烧技术和严格的法律法规使得英国从 1990-2003 年间二恶英的排放量减少了 81%(AEA Technology.2006)。

因此广东省垃圾焚烧二恶英的排放因子实际上是比较低的,并不是二恶英的主要排放源。如果完全采用国外以往的二恶英排放因子数据,采用方法一估算并不能反映二恶英排放量的真实水平,很可能会夸大我国垃圾焚烧时二恶英的排放量。结合我国实际情况,采用第二种方法更为科学合理。

三、估算模型的改进

第二种估算方法要求垃圾焚烧发电厂排放的烟气中二恶英的浓度数据 C_a , 以及垃圾焚烧时单位时间排放的烟气体积 V_b 和运行时间。

虽然我国学者对垃圾焚烧产生、排放二恶英已进行了大量研究,主要集中于

垃圾焚烧二恶英产生机理、检测方法和控制(张宇等, 2005; 黄蕾等, 2005; 李海英等, 2005; 胡红伟等, 2006; 张红兵等, 2005, 张记市等, 2003; 曹玉春等, 2005; 石谊双等, 2005; 孙宏, 2006; 鲁钢, 2005)、对垃圾焚烧炉飞灰中二恶英分布特征、检测也有一定研究(金宜英等, 2003; 李润东等, 2004; 杨志军等, 2004; 张骅, 2004), 并有人探讨了烟气中污染物对人体健康风险评价(孙冬, 2004)等。但是, 到目前为止, 还没有关于广东垃圾焚烧排放烟气中二恶英浓度的研究报告, 使得应用第二种估算方法估算二恶英排放量受到限制, 本文根据我国国家规定的垃圾焚烧二恶英排放限制标准, 结合实际情况确定浓度 C_a 。

计算垃圾焚烧单位时间排放的烟气体积, 需要确定单位质量垃圾焚烧所需理论空气量和过量空气系数。国内已有关于垃圾焚烧所需空气量的研究(陈浩泉等, 2004), 但到目前为止还没有见到现成的垃圾焚烧的理论空气量经验公式。

因为垃圾燃烧的热值很低, 在计算垃圾焚烧所需的理论空气量时, 本文采用热值与之最为接近的劣质煤燃烧所需要的理论空气量经验公式(宋贵良, 1995):

$$V_k^0 = \frac{0.239Q_{ar.net.p} + 450}{990} \quad (3)$$

其中 V_k 为垃圾焚烧需要的理论空气量, 单位为 Nm^3/kg , $Q_{ar.net.p}$ 为垃圾的燃烧热值, 单位为 kJ 。过量空气系数取值为 1.8-2.0, 从而计算得到单位质量的垃圾焚烧所排放的烟气量。经过对比, 本经验公式与已有垃圾焚烧研究的结果极为接近, 可以精确到小数点后三位。

第二节、排放因子的确定

一、二恶英排放因子的确定和不确定性分析

1、排放因子的确定

由于实验中的样品来源不同, 实验装置、燃烧条件的差异以及实验环境条件和采取的实验程序不同, 实验得出的同种排放源的排放因子差异很大(张素坤, 2006; Robert G.M.et al, 2005)。为保证估算结果的可靠性, 本研究搜集了大量二恶英排放因子数据(UNEP,1999;UNEP,2001;UNEP,2002; S.Kakareka,et al.,2002; Brian Gullett,et al, 2003; 张素坤, 2006; Begona Fabrellas,et al, 2004; Gullett, B. K.,et al, 2000; Lin-Chi Wang, et al, 2003; Sergey V. Kakareka., 2002; Jozef M Pacyna, et al, 2003; Emission Inventory Guidebook,2005; Robert G.M.LEE,et al, 2005)。引用

文献包括欧洲、北美、东亚各国的主要研究成果。而到目前为止我国发表的二恶英排放因子数据非常有限,仅报道了生活用蜂窝煤和烧烤木炭的二恶英排放因子数据(张素坤, 2006),因此本研究只能借鉴国外研究成果来确定各类排放源的排放因子。相信随着排放因子数据的进一步积累,二恶英的排放量估算将更加准确。排放因子的表示方法有很大不同,本文选取的都是采用国际毒性当量(TEQ)为单位的数据。

对收集到的排放因子数量多于 20 个的排放源,利用 SPSS 对数据进行分析,在不剔除异常值的情况下对排放因子进行分布检验(偏度-峰度检验, $\alpha=0.05$),结果证实同一排放源的排放因子符合自然对数正态分布,且显著性水平比较高(表 3-1)。这一近似结果在多环芳烃的研究中也有发现(许姗姗等, 2005)。据此,对二恶英排放因子的数据作自然对数变换后取其中位数,反算得到排放源二恶英的排放因子作为典型值。收集到的排放因子数较少的排放源的典型值的确定主要参考文献中推荐的排放因子以及来自其他文献的补充。按照 SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) 把排放源及其排放因子进行整理后归纳于表 3-2。

2、不确定性分析

各种排放源的二恶英排放因子的对数分布情况见图 3-1。本文关于排放量的估算是简单乘积的线性相加,因此可以在有关参数分布特征的基础上给出估算结果的分布,并借此描述估算结果的不确定性。

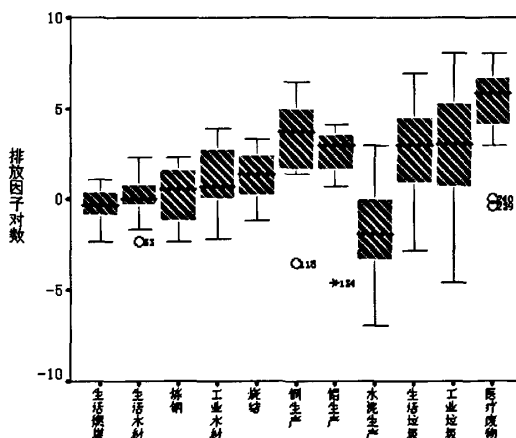


图 3-1 排放因子对数分布箱图分析结果

(图中箱形中间的粗线表示排放因子的中位数,方框包括了中间 50%的排放因子对数的分布范围,方框外的上下细线代表除去异常值后的最大值和最小值,“o”代表异常值,“*”代表极值。)

表 3-1 在不剔除异常值的情况下 SPSS 对排放因子进行分布检验

项目	对数中位数	排放因子	平均值	平均值对数	标准偏差	显著性水平
生活煤炭	0.010	1.010	1.664	0.509	1.683	0.379
生活木材	1.203	3.330	6.258	1.834	2.463	0.189
炼钢	0.781	2.184	1.574	0.454	1.743	0.970
工木	0.741	2.098	4.406	1.483	1.987	0.489
烧结	1.692	5.431	4.928	1.595	1.459	0.957
铜生产	3.912	49.999	35.361	3.566	2.598	0.865
铝生产	3.246	25.690	13.904	2.632	2.190	0.650
水泥生产	-1.897	0.150	0.361	-1.018	3.035	0.319
生活垃圾焚烧	2.996	19.999	19.366	2.964	2.567	0.555
工业垃圾	3.011	20.300	17.814	2.880	3.141	0.941
医疗废物	5.826	339.102	181.236	5.200	2.399	0.583

表 3-2 排放源清单及各排放源的排放因子

排放源		SNAP	排放因子 (μg TEQ/t)		
			典型值	最小值	最大值
固定能源燃烧		01+02+03			
发电	煤炭	01c	0.2	0.1	10
	泥煤	01p	0.2	0.2	0.2
	燃料油	01fo	0.2	0.054	1
	木材	01w	0.2	0.1	5
生活能源消耗	煤炭*	02c	0.725*/0.13**	0.1	70
	木材*	02w	1	0.1	10
	燃料油	02fo	0.2	0.2	1
	其他液体油	02ol	0.2	0.2	0.2
	煤炭	03c	1	0.1	10
工业燃烧	油类	03fo/03ol	0.2	0.2	6
	木材*	03w	2	0.11	50.9
生产过程		03&04			
金属生产	烧结厂*	0.0301	4.1	0.3	27.7
	焦炭生产	010406	0.25	0.25	3
	炼钢*	040207	1.8 ^a	0.1 ^a	10 ^a
	灰铁	030303	-	-	-
	铝生产*	-	19	0.01	60
	铝一段	040301	-	10	35
	铝二段	030310	50	22	100
	铜生产*	0303	41.83	0.03	650
	铜一段	030306	-	0.03	50
	铜二段	030309	200	5	500
	铅二段	030307	20	0.5	80
	锌生产		5-100	5	500
矿物质生产	水泥*	030311	0.15 ^a	0.001 ^a	20 ^a
	石灰	030312	0.08	0.07	10
	玻璃	030315	0.32	0.015	0.2
	砖		0.086	0.02	0.2

交通运输邮电通讯		07+08			
	无铅汽油	07gs	0.05	0.0062	0.104
	含铅汽油	07e	0.5	0.035	2.2
	柴油	07+08d	1	0.015	6.2
	其他液体油	07+08olf	1	-	-
垃圾焚烧		090000			
	城市生活垃圾*	090201	20	0.06	1000
	工业垃圾	090202	20.3	0.01	3230
	污泥焚烧	-	0.4-50	-	-
	医疗废物*	090207	339.1	0.7	3220
	焚尸炉	090901	3.65 ^b	0.4	90
	秸秆焚烧	100300	0.5	0.338	0.725
其他	吸烟	-	0.1-0.3	-	-
	森林火灾	110300	2-56	-	-
	垃圾桶内焚烧	-	76.89	1.7	6433

“*”表示该排放源排放因子的典型值是通过对该排放因子进行对数正态分布检验后符合对数正态分布后，经过取对数的中位数反算得到排放因子。“-”为二恶英的排放源，但是排放因子数据不足，垃圾焚烧、秸秆焚烧和森林火灾排放因子单位为 $\mu\text{g I-TEQ/t(burned)}$ 。a 单位为 $\mu\text{g I-TEQ/t(产品)}$ ，b 单位为 $\mu\text{g I-TEQ/body}$ 。 ** 参考张素坤 (2006) 的文献中我国生活消费的煤炭燃烧二恶英排放因子，本文取其实验结果的平均值。

二、多环芳烃排放因子

国外有大量关于多环芳烃排放因子的研究，我国对于多环芳烃排放因子也进行了一定研究 (Chen, Y. J. et al, 2005; Yang, H. H. et al, 1998)，可是到目前为止我国关于多环芳烃的排放因子数据还极为有限 (ShanShan, Xu, et al, 2006)。

本文多环芳烃排放因子的确定主要参考我国多环芳烃年排放量研究 (ShanShan, Xu, et al, 2006; 许姗姗, 2005) 的排放因子。其中多环芳烃包括美国国家环保局 USEPA 推荐的优控污染物清单中的 16 种亲体 PAHs，包括苊烯 (Acenaphthylene, Acy)、二氢苊 (Acenaphthene, Ace)、苊 (Fluorene, Flu)、荧蒹 (Fluoranthene, Fth)、萘 (Naphthalene)、蒽 (Anthracene, Ant)、菲 (Phenanthrene, Phe)、芘 (Pyrene, Pyr)、苯并[a]蒽 (Benzo(a)anthracene, BaA)、屈 (Chrysene, Chry)、苯并[a]芘 (Benzo[a]pyrene, BaP)、苯并[k]荧蒹 (Benzo[k]fluoranthene, BkF)、苯并[b]荧蒹 (Benzo[b]fluoranthene, BbF)、印并[123-c,d]芘 (Indeno[1,2,3-cd]pyrene, IcdP)、苯并[g,h,i]芘 (Benzo[g,h,i]perylene, BghiP) 和二苯并[a,h]蒽 (Dibenzo[a,h]anthracene, DahA)。

表 3-3 经自然对数变换后多环芳烃排放因子的中位数 (M) 和标准偏差 (S.E.)
(单位: 天然气 $\text{g} \cdot 10^{-8} \text{m}^{-3}$, 其余 $\text{g} \cdot 10^{-4} \text{t}^{-1}$)

PAHs	发电与工业燃煤		家庭燃煤		炼焦用煤		非交通用油		交通用油		天然气
	M	S.E.	M	S.E.	M	S.E.	M	S.E.	M	S.E.	M
萘	0.21	0.10	10.50	3.13	9.23	2.74	3.58	1.31	3.86	1.44	8.83
二氢萘	1.00	0.46	4.80	1.44	7.80	2.31	3.61	1.25	1.52	0.67	7.42
芴	1.52	0.65	4.93	1.48	8.75	2.60	4.17	1.23	5.57	1.84	7.12
荧蒽	3.24	1.00	10.60	3.19	9.88	2.93	2.87	0.71	7.69	0.99	6.24
苯	6.59	2.39	11.60	3.48	10.80	3.20	8.64	2.32	10.50	1.63	10.68
蒽	0.72	0.29	9.65	2.89	8.86	2.63	4.15	1.22	6.65	0.98	5.97
菲	4.43	1.47	10.30	2.88	10.60	3.16	4.37	1.17	8.33	1.18	7.08
芘	3.33	1.20	10.10	3.04	9.09	2.70	1.88	0.56	5.42	1.04	6.95
苯并[a]蒽	-0.57	0.23	9.23	2.76	8.28	2.46	4.76	1.58	5.37	0.80	6.44
屈	0.41	0.15	9.23	2.77	7.80	2.32	3.26	1.00	6.24	0.90	7.10
苯并[a]芘	3.22	0.80	7.50	1.33	8.85	2.63	3.25	0.85	5.06	0.62	4.97
苯并[k]荧蒽	-0.05	0.02	7.96	2.39	7.71	2.29	2.87	0.95	4.78	0.69	6.26
苯并[b]荧蒽	0.69	0.22	9.68	2.90	8.15	2.42	2.90	0.92	4.97	0.86	5.35
印并[123-c,d]芘	0.18	0.06	9.65	2.89	8.34	2.47	3.62	1.11	4.48	0.71	4.71
苯并[g,h,i]芘	0.41	0.13	8.98	2.69	8.34	2.47	3.89	1.19	5.04	0.93	5.07
二苯并[a,h]蒽	0.41	0.17	10.30	3.09	6.76	2.01	0.95	0.37	2.63	0.57	3.63

参考文献(许姗姗, 2005)

第四章、广东省二恶英排放量估算

第一节、垃圾焚烧二恶英排放量估算与模型可靠性检验

垃圾焚烧是二恶英的主要排放源之一。垃圾焚烧主要包括城市固废、危险废物、污泥、医疗废物、废木材和焚尸炉焚烧。虽然我国垃圾仍然以堆放、填埋为主,但垃圾焚烧法处理因其具有显著的减容和可以回收热能等优点正在成为我国垃圾处理的重要方法。

一、广东省垃圾焚烧状况

1、垃圾产生量和成分特征

广东省经济飞速发展,人口增长快,人均生活水平提高,生活垃圾产生量也大幅度增长。1996年生活垃圾产生量为565.1万吨,2002年增加至1099.4万吨。由于生活习惯、生活方式不同,各国的垃圾在成分、比例、热值等方面不一样。广东省生活垃圾与日本的生活垃圾的成分相差很大(周肇秋等,2000),广东省生活垃圾约50%为厨余,含水量大而热值较低,日本生活垃圾中厨余只占约35%,广东省生活垃圾中玻璃、草木、沙土等成分远远高于日本,如图4-1和图4-2所示。因成分不同,垃圾燃烧热值差异很大,日本的垃圾热值在8000 kJ/kg以上,而广东省生活垃圾热值仅有4500-6000kJ/kg。虽然广东省工业垃圾年产量大,因其成分大都可以综合利用,因此本文未列入计算范围。危险废物焚烧是二恶英的重要污染源,全世界每年焚烧危险废物排放的二恶英大约6-7kg TEQ (UNEP, 2002)。广东省危险废物年产量50万吨左右,危险废物主要来自于医疗、电子、石化、化工、有色金属、电力、核工业等。

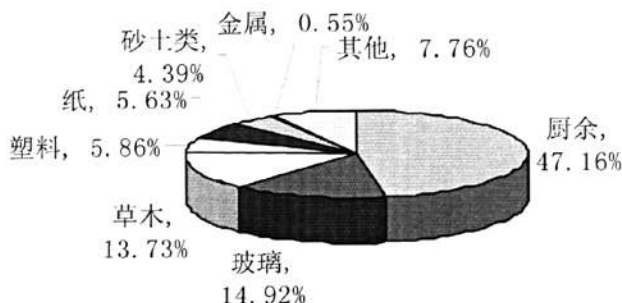


图 4-1 广东省生活垃圾组成成分分析图

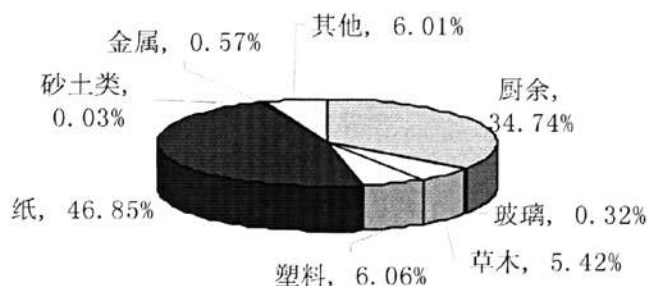


图 4-2 日本生活垃圾组成成分分析图

广东省垃圾产生量与焚烧量见表 4-1，垃圾焚烧大部分用于焚烧发电，2002 年垃圾焚烧发电厂的垃圾处理量约为 56.67 万吨，占当年城市垃圾焚烧总量的 78.4%。目前缺乏垃圾焚烧量的详细统计数据，垃圾焚烧发电厂垃圾焚烧量作为垃圾焚烧的主要部分，可根据各垃圾焚烧发电厂处理能力与运行时间作出估计。无组织垃圾焚烧因为没有办法统计暂时未包括在本文估算范围内。广东省医疗废物年焚烧量约为 4-5 吨，包括在危险废物焚烧量中。

表 4-1 广东省 1996-2003 年固体废物产生量及焚烧量

项目	单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
生活垃圾产生量	万吨	565.1 [*]	744.00	1025.36	815.88	879.06	1133.00	1099.40	-
工业固体废物产生量	万吨	1352.21	1506.37	1771.70	1877.30	1694.33	1990.30	2044.88	2245.66
危险废物产生量	万吨	54.41	60.43	58.84	59.23	53.91	52.49	44.61	61.51
城市垃圾焚烧量	万吨	-	-	-	-	-	70.70	72.30	-
危险废物焚烧量	万吨	-	-	-	-	-	1.38	2.97	2.33

注：表中数据来源于《广东省环境统计资料汇编》和《广东省环境统计公报》；“-”代表没有数据

2、广东省垃圾焚烧发电厂现状

广东省垃圾焚烧发电厂主要分布于深圳市、珠海市、佛山市、东莞市和惠州市，主要焚烧生活垃圾。危险废物集中处理厂主要分布于广州市、深圳市、珠海市、湛江市、东莞市和中山市。垃圾焚烧发电厂和危险废物集中处理厂分别达到我国实施的《生活垃圾焚烧污染控制标准》和《危险废物焚烧污染控制标准》。标准规定垃圾焚烧二恶英类排放限值为 1ng TEQ/m^3 烟气，部分新建的焚烧发电厂二恶英排放浓度为 0.1ng TEQ/m^3 烟气量，达到国际先进水平。国家危险废物焚烧污染控制标准中规定危险废物焚烧二恶英排放限值为 0.5ng TEQ/m^3 。

二、估算方法

本文分别采用第三章中介绍的两种气体排放量估算方法（公式 1 和公式 2）计算广东省垃圾焚烧二恶英的排放量：

- 1) 方法一：气体排放量估算方法一（公式 1）中，排放因子采用《用于对二恶英和呋喃排放进行识别和计量的标准工具包》（UNEP，2001）（以下简称工具包）中推荐的排放因子进行计算。工具包中垃圾焚烧的排放因子按照焚烧技术进行分级，根据具体的分级标准可以确定采取相应的排放因子。按照工具包推荐的排放因子，本文采取生活垃圾焚烧排放因子为 30-350 $\mu\text{g TEQ/t}$ ，危险废物焚烧排放因子为 10-350 $\mu\text{g TEQ/t}$ ，医疗废物焚烧排放因子为 525-3000 $\mu\text{g TEQ/t}$ 。
- 2) 方法二：垃圾焚烧发电厂二恶英排放量估算采用气体排放量估算方法二（公式 2）和垃圾焚烧所需理论空气量公式（公式 3）进行计算。其中，广东省垃圾热值为 4500-6000kJ/kg，则 1kg 垃圾焚烧需要的理论空气量为 1.54-1.9Nm³。过量空气系数取值 1.8，计算得 1kg 垃圾焚烧后排放的烟气量约为 2.8-3.42Nm³，本文在计算二恶英的排放量时取其平均值 3.2Nm³/kg。1988 年广东省建设了第一家垃圾焚烧发电厂，即深圳环卫综合处理厂，一期工程 1988 年 11 月投产，二期工程 1996 年 7 月投产。根据焚烧技术的改进情况和焚烧排放标准，1996 年-2000 年是垃圾焚烧二恶英排放浓度的达标过渡期，1996 年以后是垃圾焚烧发电厂的集中建设期，2000 年后垃圾焚烧发电厂先后建成投产。部分垃圾焚烧发电厂见表 4-2。因此 1996-2000 年烟气中二恶英浓度通过插值计算，1996 年以前取值为 50 ng TEQ/Nm³，从 1996 年开始出现大幅削减，直至 2000 年基本达到控制标准 1ngTEQ/Nm³。根据垃圾的焚烧量和烟气中二恶英的排放浓度计算得到垃圾焚烧所排放的二恶英总量。

表 4-2 部分建设的垃圾焚烧发电处理厂

名称	建成时间	处理规模（吨/日）
深圳环卫综合处理厂	1988/1996	450
南山焚烧发电厂	2004	800
盐田焚烧发电厂	2004	450
龙岗区综合处理厂	1999	300
珠海垃圾发电厂	2000	600
南海垃圾处理有限公司	2002.9	400
东莞厚街垃圾发电厂	2002.7	300

数据来源：广东省治污保洁工程项目规划(2005-2020)

三、估算结果及估算模型改进的可靠性讨论

1、垃圾焚烧发电厂二恶英排放量估算结果——模型检验

按照两种方法分别计算得到广东省 1996-2004 年垃圾焚烧发电厂二恶英的排放量见表 4-3。可见,两种方法计算得到的结果相差比较大,尤其是自 2000 年我国颁布实施二恶英排放标准后,两者的差距更大。通过两种方法估算可以大致得到广东省 1996-2004 年垃圾焚烧发电排放到空气中的二恶英量范围。方法一由于采用相同的排放因子计算,所以二恶英的排放量估算结果呈持续增长趋势;而采用方法二计算得到的排放量估算结果比较稳定,还有所下降。1996-2004 年垃圾焚烧发电厂垃圾焚烧量与二恶英排放量的具体分析见图 4-3。可见,虽然垃圾焚烧发电厂的建设使得垃圾焚烧量大大增加,然而由此产生的二恶英排放量却比较稳定。

表 4-3 广东省垃圾焚烧发电厂焚烧量与二恶英排放量

年份	焚烧量 (万吨)	二恶英排放量 (g TEQ)		
		方法一	方法二	范围
1996	12.5	3.75-43.75	8	8-43.75
1997	15	4.5-52.5	7.2	7.2-52.5
1998	15	4.5-52.5	4.8	4.8-52.5
1999	15	4.5-52.5	2.4	2.4-52.5
2000	35	10.5-122.5	1.12	1.12-122.5
2001	45	13.5-157.5	1.44	1.44-157.5
2002	56.7	17.0-198.5	1.81	1.81-198.5
2003	68.3	20.5-239.2	2.19	2.19-239.2
2004	105	31.5-367.5	2.29	2.29-367.5

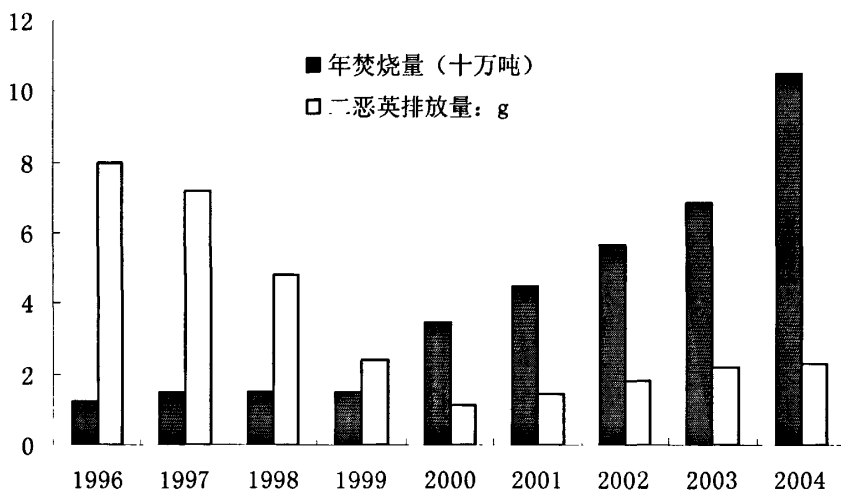


图 4-3 垃圾焚烧发电焚烧量及二恶英排放量(单位:mg TEQ)

利用现有资料对两种方法估算得到的结果分析如下：

- (1) 垃圾焚烧技术和工艺的改进使得二恶英的排放因子大大降低，垃圾焚烧产生的二恶英排放量存在逐年减少的趋势。日本垃圾焚烧技术在 1970 年代二恶英的排放量为 50ng TEQ/m^3 ，1990 年代左右为 5ng TEQ/m^3 ，现代技术使二恶英的排放因子降到了 0.1 ng TEQ/m^3 （UNEP,1999），垃圾焚烧排放二恶英的总量显著减少；
- (2) 通过对我国垃圾焚烧发电厂的烟气排放进行检测，研究表明通过采用烟气净化处理，垃圾焚烧排放的烟气中二恶英的浓度低于 0.5ng TEQ/m^3 ；1988 年在深圳建成投产的我国第一座垃圾焚烧发电厂烟气净化采用静电除尘器，监测出其烟气中二恶英浓度仅为 0.16 ng TEQ/m^3 ，其他采用半干法+活性炭+袋式除尘烟气净化方法的垃圾焚烧发电厂烟气中二恶英的浓度均低于 0.1 ng TEQ/m^3 ，达到国际先进水平（胡庆新，2006）。可见，工具包中推荐的排放因子比较适用于 20 世纪 90 年代中期以前，依据方法一得到的高排放量与广东省垃圾焚烧发电厂目前的实际情况不符；
- (3) 我国自 2000 年开始实行生活垃圾污染控制标准，焚烧炉大气污染物二恶英排放限值为 0.1ng TEQ/m^3 。已有大量研究结果表明改进垃圾焚烧技术，严格实施垃圾焚烧污染排放控制标准，可以大幅削减二恶英的排放量。本文利用第二种方法的估算结果 2004 年垃圾焚烧量是 1996 年的 8.4 倍，但二恶英的排放量没有提高反而有下降的趋势，这一结果与很多国家的研究结果相一致（UNEP, 1999; UNEP, 2002; National Atmospheric Emission Inventory, 2006）；
- (4) 广东省大气中二恶英的实测数据表明，广州市大气中的二恶英主要来源于工业（Liping Yu,et al, 2006），而不是垃圾焚烧。利用第一种估算方法得到的结果明显偏大。

综上所述，利用本文改进的估算模型计算垃圾焚烧二恶英的排放量结果比利用常用的估算模型所得到的结果更加符合广东的具体情况，改进模型的可靠性更好一些。

2、2002 年广东省垃圾焚烧二恶英排放量估计

为了评估 2002 年垃圾焚烧二恶英排放总量，同时采用两种估算方法，其中垃圾焚烧发电厂二恶英排放量按照方法二估算，其余按照方法一估算。广东省垃圾焚烧二恶英排放量如表 4-4 所示，2002 年广东省垃圾焚烧排入空气中的二恶英 7.93-67.96g TEQ，其中生活垃圾焚烧发电以外的简易焚烧二恶英排放量最大，占总量的 50%以上。医疗废物的焚烧量不大，故虽然排放因子较高但对总量的贡献比较小；垃圾焚烧发电垃圾焚烧量占总量的 70%以上，但二恶英排放量的贡献率仅为 2.6%-22.7%。说明垃圾焚烧发电相比垃圾简易焚烧处理，二恶英的排放量显著减少。

表 4-4 广东省 2002 年垃圾焚烧二恶英排放量

垃圾焚烧分类	万吨	排放因子($\mu\text{g TEQ/t}$)	二恶英排放量 (g TEQ)
生活垃圾焚烧发电	56.7	-	1.8
生活垃圾简易焚烧	15.6	30-350	4.68-54.6
危险废物焚烧	2.9695	10-350	0.297-10.393
医疗废物	0.0005	525-3000	0.0026-0.015
焚尸炉	39.73 ^a	3.65 ^b	1.15
总量	-	-	7.93-67.96

注：a 单位：万人； b 单位为 $\mu\text{g I-TEQ/body}$ 。

第二节、广东省 1992-2003 年二恶英排放量时间进程分析

一、数据来源和估算方法

研究数据来源于广东省统计年鉴和广东省环境统计资料汇编，能源燃烧、工业生产、废物焚烧中垃圾简易焚烧处理和焚尸炉等排放源的二恶英排放量估算根据公式(1)计算，排放因子的数据来自表 3-2 中的典型值，其中生活能源煤炭燃烧的排放因子采用我国的实验研究成果。垃圾焚烧发电厂和危险废物焚烧处理厂二恶英的排放量根据公式(2)、(3)计算。

1、能源消费产生的二恶英

能源燃烧产生二恶英主要包括四部分：火力发电、工业生产燃煤燃油，家庭供暖、烹饪燃煤燃油以及交通运输和邮电通讯。因为天然气燃烧产生的二恶英对总量的相对贡献很小 (S.Kakareka, T.Kukharchyk, 2002)，因此本文也未把天然气燃烧作为二恶英的排放源。广东省工业能源消耗比较大的行业主要包括水泥制造业、食品饮料烟草制造业、纺织业、造纸及纸制品业、化学工业、金属冶炼及

压延工业等。生活能源消耗只占能源消耗总量的很小一部分，主要是火力发电和工业生产消耗能源。

在计算交通运输产生的二恶英时，因为只有部分年度有汽油、柴油消耗的具体数据，为了使计算结果具有可比性，采用广东省统计年鉴中以标准煤为单位的交通运输与邮电通讯业能源消耗数据，利用各能源折算标准煤的参考系数反算得到燃油量。因为柴油燃油量约占总燃油量的 50%，本文采用加权平均得到的折算系数 1.45 计算燃油量(汽油折算标准煤的参考系数为 1.4714，柴油折算标准煤的参考系数为 1.4571，燃料油折算标准煤的参考系数为 1.4286)。广东省自 2000 年开始推行无铅汽油，因此，在计算 2002 年二恶英的排放量时，1992-1999 年交通运输燃油二恶英的排放因子取值为 $0.75\mu\text{g TEQ/t}$ ，2000-2003 年取值为 $0.525\mu\text{g TEQ/t}$ 。

2、工业生产工艺中产生的二恶英

工业生产工艺中产生的二恶英主要来源于化工、水泥生产、金属冶炼，尤其是有色金属铜、铝、铅、锌的二段生产。烧结过程是冶金的一个环节，是二恶英生成的重要排放源 (Ulrich QuaB, et al, 2004)，然而广东省目前还没有单独的烧结数据统计资料。本文利用钢铁产量计算了炼钢过程排放的二恶英量，已基本包含了烧结过程所产生的二恶英。

很多国家在水泥生产中采用危险废物作为替代原料，有研究表明当以危险废物作为原料生产水泥时二恶英的排放因子为 $24.34\mu\text{g TEQ/t}$ (烧渣)，约为传统原料排放因子 $0.29\mu\text{g TEQ/t}$ 的 80 倍 (S.Kakareka, T.Kukharchyk, 2002)；而关于西班牙水泥生产的研究发现采用不同的工艺过程，即使利用危险废物作为替代燃料，二恶英的排放量也并没有发生显著变化 (Begona Fabrellas, et al, 2004)。广东省基本没有使用危险废物作为水泥生产的原料，所以计算中采用的排放因子为 $0.15\mu\text{g TEQ/t}$ 。

本文主要计算了排入大气中的二恶英的量，因此造纸业、纺织、皮革业生产没有列入计算范围，但是在研究二恶英排入水体和土壤环境中的情况时，应该重视这些工业排放的贡献量。

3、垃圾焚烧产生的二恶英

垃圾焚烧分为焚烧发电和普通焚烧两部分，焚烧发电二恶英的排放量按照第

三章介绍的方法二（公式 2 和 3）计算，普通焚烧部分按照方法一（公式 1）计算。垃圾焚烧电厂的年处理时间约为 8000 小时，广东省垃圾热值为 4500-6000kJ/kg，根据公式(3)计算得到 1kg 垃圾焚烧需要的理论空气量为 1.54-1.9Nm³。过量空气系数取值 01.8，则 1kg 垃圾焚烧后排放的烟气量约为 2.8-3.42Nm³，本文在计算二恶英的排放量时取其平均值 3.2Nm³/kg。根据垃圾的焚烧和烟气中二恶英的排放浓度可以计算得到垃圾焚烧所排放的二恶英总量。

4、森林火灾

广东省 1995 年发生森林火灾 304 次，受害森林面积 3158.8 公顷，1998 年火灾 245 次，受害面积 1736 公顷，2002 年发生火灾 182 次，受害面积 1023 公顷，2003 年发生火灾 258 次，受害面积 1633.11 公顷。由此可见，森林火灾作为二恶英的排放源应该给予关注。但本文限于数据不全，暂未列入估算范围。

二、估算结果和讨论

1、1992-2003 年广东省二恶英排放量估算

广东省 1992-2003 年能源消耗、工业生产和固体废物焚烧产生的二恶英总量估算结果见表 4-5。其中固体废物焚烧部分包括垃圾焚烧发电、危险废物焚烧和焚尸炉三部分。

表 4-5 广东省 1992-2003 年二恶英排放量（单位：g TEQ）

项目	能源消耗二恶英排放量				工业生产二恶英排放量			固废焚烧二恶英排放量			总量
	生活	发电	工业	交通	水泥	钢	焦炭	焚烧发电	危废	焚尸炉	
1992	0.58	2.67	15.65	2.33	4.83	2.66	0.13	16	-	1.46	46.31
1993	0.51	3.31	18.06	2.44	5.91	3.04	0.14	16	-	1.39	50.80
1994	0.53	3.96	17.93	2.76	7.53	3.31	0.14	16	-	1.39	53.55
1995	0.55	3.72	18.64	2.99	7.98	3.73	0.14	16	-	1.42	55.17
1996	0.39	4.21	16.1	3.17	7.92	4.04	-	8	-	1.54	45.38
1997	0.35	4.44	23.97	3.01	7.72	4.48	0.14	7.2	-	1.38	52.69
1998	0.27	4.58	23.41	3.61	7.64	4.75	0.14	4.8	-	1.46	50.65
1999	0.27	5.5	24.04	4.34	8.41	5.46	0.14	2.4	-	1.42	51.98
2000	0.21	6.71	23.14	3.49	8.81	5.17	0.13	1.12	-	1.47	50.24
2001	0.22	7.36	18.22	3.83	8.71	6.35	0.13	1.44	0.02	1.45	47.72
2002	0.23	8.37	20.47	4.17	8.98	8.45	0.14	1.81	0.05	1.45	54.12
2003	0.21	9.34	20.69	4.79	10.31	10.73	0.14	2.19	0.04	1.53	59.97

注：表中数据是根据广东统计年鉴和广东省环境统计资料汇编的相关数据计算得到。“-”表无数据。

排放量的构成和变化趋势如图 4-4 所示，二恶英的排放总量变化不大，排放

量波动于 40-60g TEQ 之间，总体呈增长趋势，1996 年和 2001 年有两次明显的削减。1992-1995 年排放量有小幅增长，2001-2003 年二恶英的排放量增加。能源消耗产生的二恶英约占总排放量的 50%以上，变化不大。工业生产排放量呈增加趋势，2001 年有一个明显的削减。垃圾焚烧产生的二恶英排放量自 1996 年起显著减少。

能源燃烧产生的二恶英排放量最大，占总量的约 50%左右，其中 1996-2003 年所占比例均超过 50%，1992-1995 年略低于 50%，均大于 40%。工业生产过程中二恶英的排放量逐年增大，其占总排放量的比例也呈增长的趋势；垃圾焚烧过程中排入空气中的二恶英占总排放量的比例呈降低趋势，1996 年-2003 年所占的比重比较稳定，均远小于 1992-1995 年所占比重。

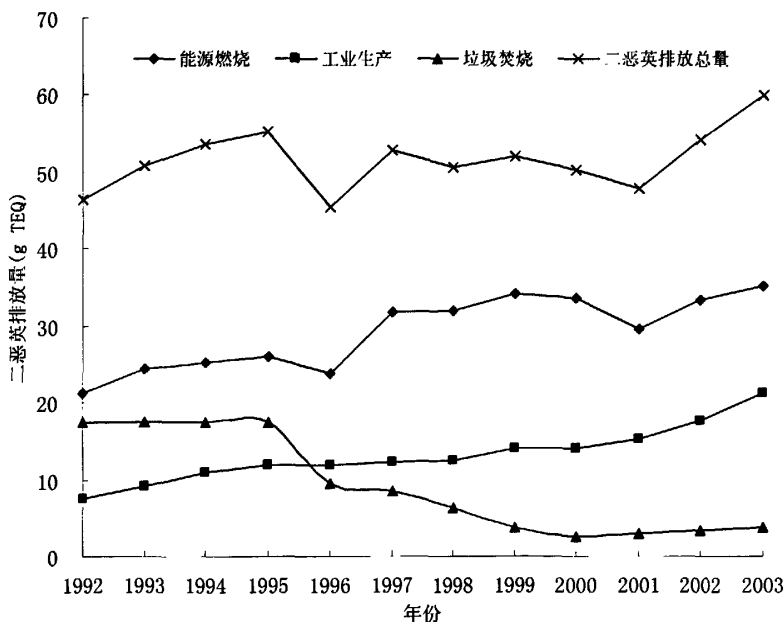


图 4-4 广东省 1992-2003 年二恶英排放量构成和趋势图

2、能源燃烧二恶英排放量分析

能源消耗产生的二恶英的量占总排放量的约 50%，从图 4-6 中可以看到工业生产能源消耗产生的二恶英的量最大，占 50%左右。年排放量均大于 15g TEQ，略有波动，其中 1996 年和 2001 年的排放量出现两个低点。生活能源消耗产生的二恶英的排放量呈逐年下降趋势，原因可能是因为煤气的普及率上升，替代了传统的煤炭和燃料油能源。火力发电和交通运输业二恶英的排放量呈上升趋势。

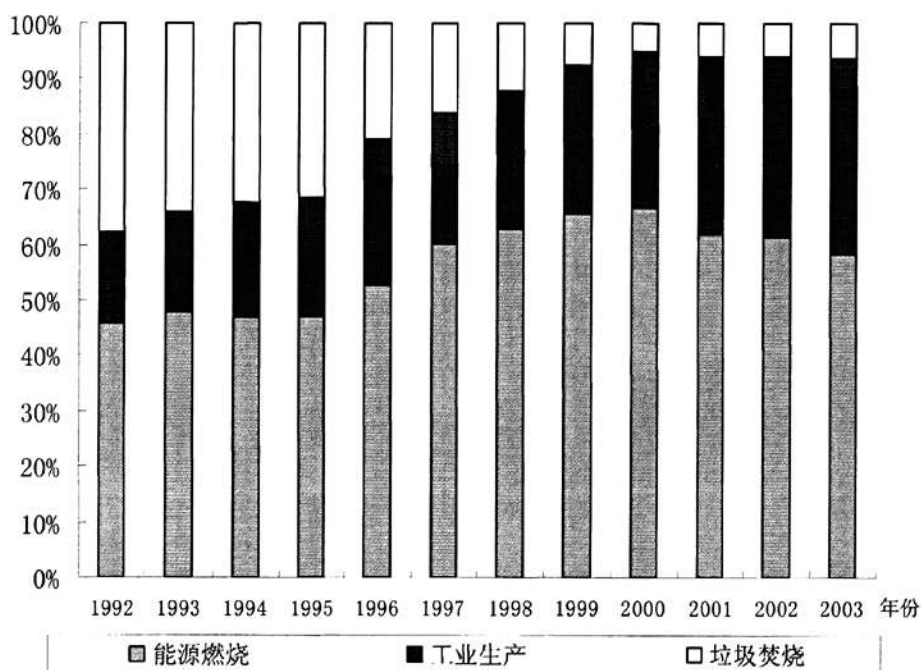


图 4-5 广东省 1992-2003 年二恶英排放量百分比构成图

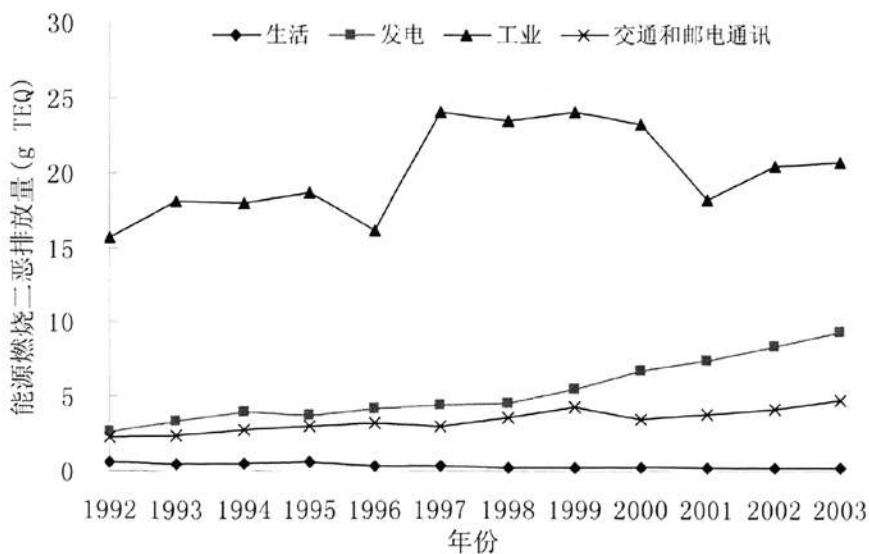


图 4-6 广东省能源消耗产生二恶英排放量变化（单位：g TEQ）

第三节、广东省二恶英排放源分析——以 2002 年结果为例

本节详细估算 2002 年广东省二恶英排放量，二恶英排放量的计算方法与上节相同，具体分为能源燃烧、工业生产过程和垃圾焚烧三个部分。其中垃圾焚烧不仅计算了垃圾焚烧发电厂和危险废物以及焚尸炉二恶英的排放量，而且根据广东省环境统计资料汇编和广东省环境统计公报中的数据，计算了简易垃圾焚烧二恶英的排放量。废物焚烧中垃圾简易焚烧处理和焚尸炉等排放源的二恶英排放量估算根据公式(1)计算，排放因子的数据来自表 3-2 中的典型值，垃圾焚烧发电厂和危险废物焚烧处理厂二恶英的排放量根据公式(2)、(3)计算。

一、二恶英排放量及来源分析

按照估算模型计算得到 2002 年全省化石能源燃烧、工业生产、废物焚烧排放二恶英的总量为 61.92g I-TEQ。三部分的贡献率分别为 53.68%、28.38%和 17.94%。

如图 4-7 所示在能源燃烧二恶英排放总量中，生活、工业、火力发电、交通运输能源燃烧二恶英的排放量分别为 0.23g TEQ、20.47g TEQ、8.37g TEQ、4.17g TEQ。工业生产过程二恶英的排放总量中，水泥生产的贡献率为 51.11%，钢铁生产的贡献率 48.09%，焦炭生产的贡献率为 0.8%。工业燃料燃烧和工业生产过程二恶英的排放量分别为 20.47 g TEQ 和 17.57 g TEQ，两者之和达到总量的 61.43%。研究表明广州市空气中的二恶英浓度分布情况是：郊区<居民区<工业区，显然，工业生产活动极大地影响了空气中 PCDD/Fs 的浓度水平 (Liping Yu, et al, 2006)。

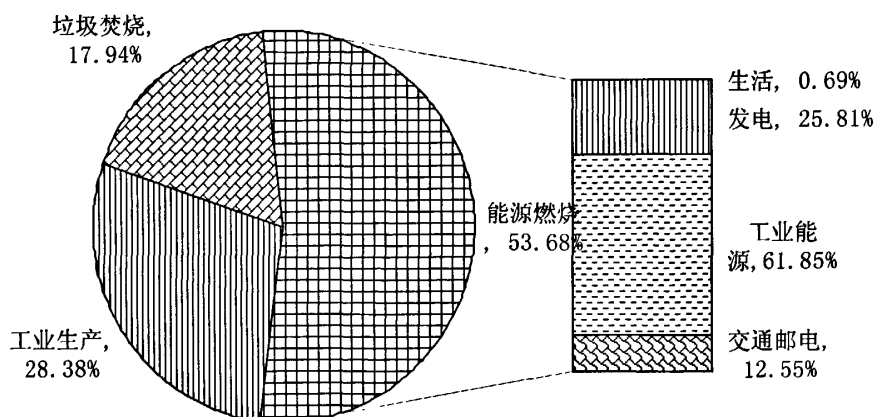


图 4-7 广东省二恶英排放来源分析

广东省垃圾焚烧大部分用于焚烧发电, 2002 年广东省垃圾焚烧电厂的垃圾处理量约为 56.67 万吨, 占当年城市垃圾焚烧总量的 78.4%。固体废物焚烧二恶英排放总量中, 垃圾简单焚烧处理的贡献率最大, 为 70.21%, 垃圾焚烧发电的贡献率仅为 16.29%。说明垃圾焚烧发电相比垃圾简易焚烧处理, 二恶英的排放量显著减少。危险废物焚烧的贡献率为 0.45%, 焚尸炉的贡献率为 13.05%, 如图 4-8 所示。以上结果表明, 我国垃圾焚烧污染排放标准的实施有效削减了二恶英的排放量。也充分说明利用模型中的第二种计算方法更加符合广东省的实际情况, 否则会夸大垃圾焚烧的二恶英排放量。

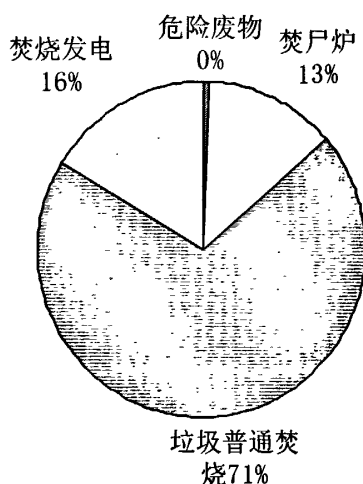


图 4-8 垃圾焚烧二恶英排放源分析

二、二恶英排放估算的不确定性

二恶英排放量估算的不确定性主要取决于活动量和排放因子的波动幅度。由于前者来自于相关的统计资料, 相对排放因子而言, 可大体视为准确数据。而排放因子的情况则不同, 文献中有大量可供借鉴的数据, 他们分别来源于不同研究人员和实验室, 这为进行不确定性分析提供了重要依据。本文收集到大量排放因子数据, 统计检验结果表明排放源的排放因子服从对数正态分布。就本研究的目的而言, 采用 75% 的置信区间足以满足精度要求, 图 4-9 显示了 6 种排放源二恶英排放量的 75% 置信区间。可见, 估算结果的 75% 置信区间大约覆盖正负 2-5g I-TEQ。

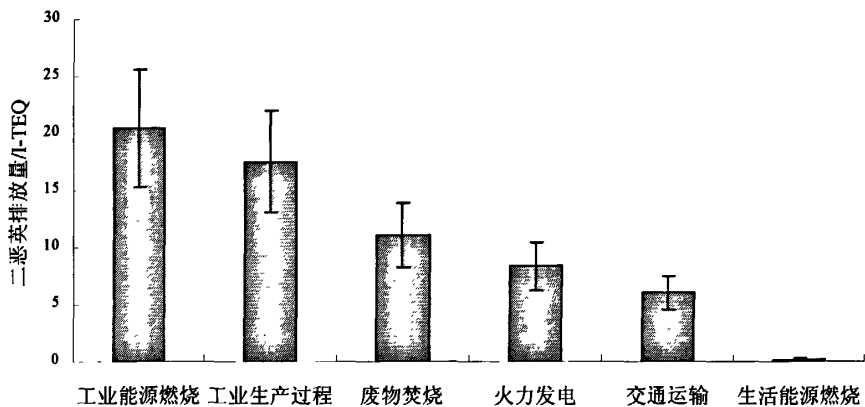


图 4-9 广东省 2002 年不同排放源的二恶英排放量

三、与全国及国外数据对比

2002 年全国与广东省部分排放源的二恶英排放量见表 4-6。表中五项排放源全国二恶英排放总量为 297.63 g TEQ，广东省相应排放总量占全国的 6.44%。其中，火力发电厂、生活能源燃烧和焚尸炉的百分比可能会偏高，因为全国火电和生活能源燃烧只计算了煤炭的燃烧，本文计算中还包括燃油的排放量。

表 4-6 2002 年全国与广东省二恶英排放量比较（单位: g TEQ）

来源	全国	广东省	百分比（%）
水泥生产过程	145*	8.984	6.2
火电厂	50.19	8.37	16.68
生活能源燃烧	44.45 ^a	0.23	5.17
焦炭生产	42.84	0.14	0.33
焚尸炉	9.96-332, 15.15*	1.45	14.56-0.44, 9.57*

注：全国二恶英排放数据来源于参考文献(JUN JIN, et al,2004)；*为按照本文排放因子计算值，其中水泥生产过程数据 145 g I-TEQ 是按照排放因子 0.15μg TEQ/t（水泥）计算得到，参考文献(JUN JIN, et al,2004)中的值为 210.25g I-TEQ，是按照排放因子 0.29μg TEQ/t 计算的，可能排放因子的选取略有偏差，高估了水泥生产二恶英的排放量。

广东省部分排放源二恶英的排放量与德国二恶英的排放量（Steffi Richter, Bernt Johnke.2004）对比于表 4-7，对比 2001 年的情况，广东省火力发电二恶英的排放量约为德国的 2-3 倍，工业生产燃料燃烧二恶英排放量约为德国的 2 倍，交通运输业二恶英的排放量是德国交通二恶英排放量的 5 倍多，相当于德国 1994

年的排放量水平。上世纪 90 年代后期，德国采取了严格的环境法规和技术改进措施后使得二恶英的排放量大大降低，尤其是垃圾焚烧部分。可见，对于广东省来说，应该尽量减少垃圾的简单焚烧处理，依据垃圾的成分、热值等具体特点采取适宜的处理方式。

表 4-7 广东省二恶英排放量与德国排放量对比（单位: g I-TEQ）

排放源	德国(1994)	德国(2001)	广东(2001)	广东省(2002)
钢、铁厂	10	-	6.35	8.45
其他生产过程	91	-	8.84	9.12
垃圾焚烧	30	< 0.5	14.31	11.11
其中生活垃圾焚烧	30	0.4	1.44 ^a , 12.85 ^b	1.81 ^a , 7.8 ^b
危险废物	2	0.04	0.02	0.05
火力发电	3	< 3	7.36	8.37
工业燃烧	15	< 10	18.22	20.47
生活燃烧	15	< 10	0.22	0.23
交通	4	< 1	5.55	6.05
焚尸炉	2.3	< 2	1.45	1.45

注：“-”表示无数据，a 为垃圾焚烧发电二恶英排放量，b 为普通垃圾焚烧二恶英排放量

第四节、广东省二恶英排放量与国际对比

一、排放量与排放源

目前欧洲已经有详细的二恶英排放清单研究成果，本文参考了 1990-2003 年欧洲 34 个国家的二恶英排放量数据。包括政府官方数据和专家评估数据两部分，2003 年欧洲二恶英总排放量比 1990 年下降了 63%。2003 年 EMEP（欧洲监测和评价长距离迁移空气污染物合作项目）区域的二恶英总排放量为 4.7 kg TEQ（MSC-E&CCC. 2005.）。

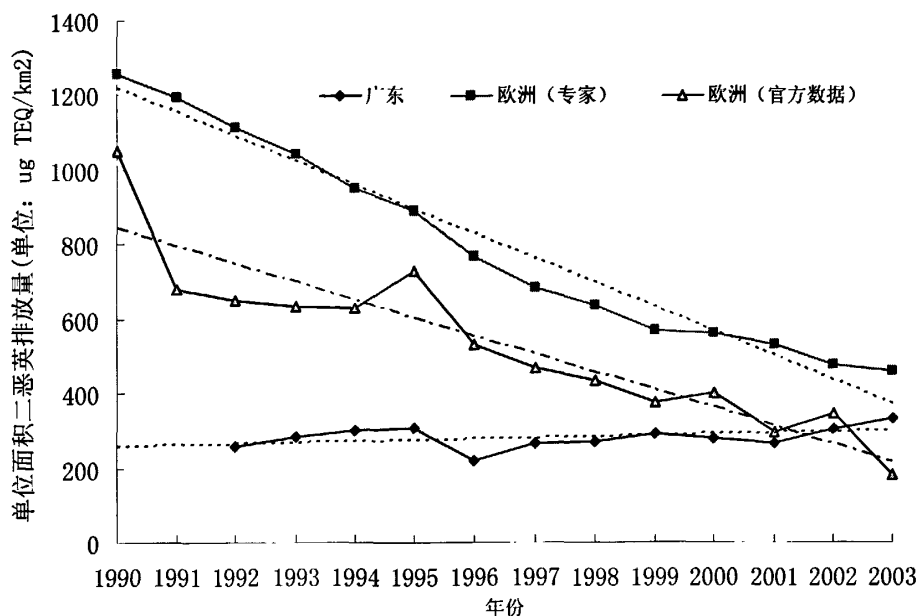


图 4-10 1990-2003 年单位面积欧洲（23 个国家）与广东二恶英排放量

按照单位面积二恶英排放量对比于图 4-10, 本文估算的广东省二恶英排放呈增长趋势, 欧洲的二恶英排放量专家评估和官方数据均显示出二恶英的排放量在显著降低。图中虽然显示本文估算的广东省单位面积二恶英排放量低于欧洲单位面积排放量, 但需要注意的是本文估算的仅是排入大气中的二恶英量, 而且本文估算的重点集中于能源消耗二恶英排放量, 垃圾焚烧只计算了垃圾焚烧发电厂的排放量, 工业生产过程只涉及了三个产品, 所以如果充实了其他方面的数据, 并计算排入水体、生产产品等其他介质的二恶英排放量之后, 广东省单位面积二恶英排放量应高于本文估算结果。而且在本文未完全统计所有排放源二恶英排放量的情况下, 2003 年广东省单位面积二恶英排放量已经超过欧洲单位面积的排放水平, 说明采取措施控制二恶英的排放已非常重要。

欧洲 23 个国家 2003 年二恶英排放来源的分析见图 4-11 所示, 居民家庭能源燃烧是最主要的二恶英排放源, 其排放量占总排放量的四分之一, 其次是垃圾焚烧、制造和建筑业、电力热力生产和金属生产, 所占百分比分别为 16%、13%、12%和 9%。广东省二恶英的最主要来源是工业生产, 包括工业生产能源消耗和工业生产工艺过程两部分, 2002 年两部分所排放的二恶英量占全省二恶英排放量总和的 61% (图 4-12), 可见控制工业生产过程中的二恶英排放势在必行。家庭生活能源消耗所排放的二恶英很少, 主要是因为广东煤气普及率和利用率很

高,且根据我国国内家庭燃煤二恶英排放因子研究成果,家庭燃煤二恶英的排放因子很低。垃圾焚烧和电力生产以及交通运输业是二恶英的重要排放源,2002年这三部分的贡献率分别为18%、14%和7%。

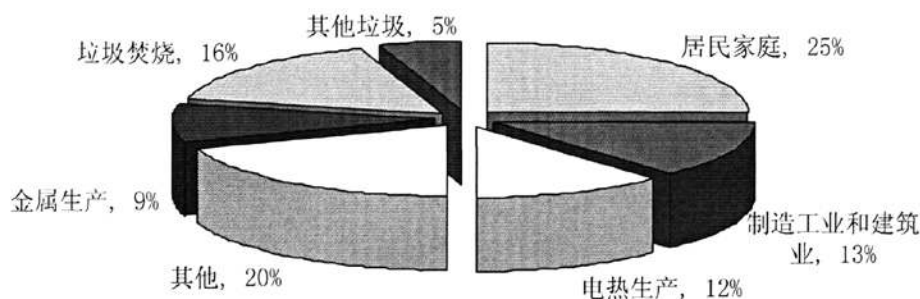


图 4-11 欧洲 23 个国家 2003 年二恶英排放源分析

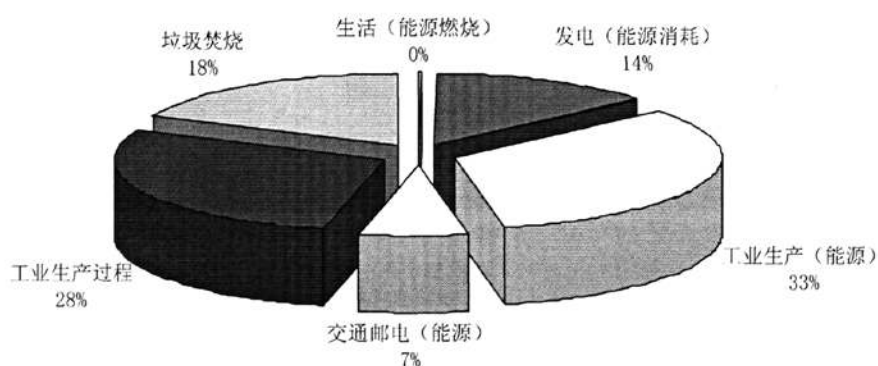


图 4-12 广东 2002 年二恶英排放源分析

二、行业排放源对比

1、电力生产

1970-1980 年欧洲电力生产排放的二恶英量逐步上升,1980-1995 年欧洲电力生产排放的二恶英量显著降低,特别是 1980-1985 年间下降了四分之三 (Pacyna,J.M.; Breivik,K.; Munch,J.; et al.2003),这一现象是符合库兹涅茨曲线的。广东省发电产生的二恶英一直处于上升趋势,2003 年广东单位面积电力生产排放的二恶英超过 $50\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$,欧洲自 1990 年以后单位面积电力生产排放的二恶英已远低于这一值,如图 4-13 所示 1993-1995 年间单位面积电力生产二恶英浓度约为 $20\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。

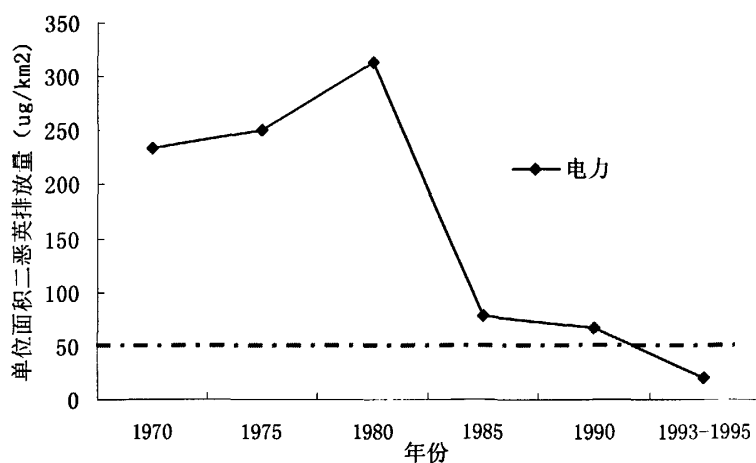


图 4-13 1970-1995 年欧洲单位面积电力生产排放二恶英量

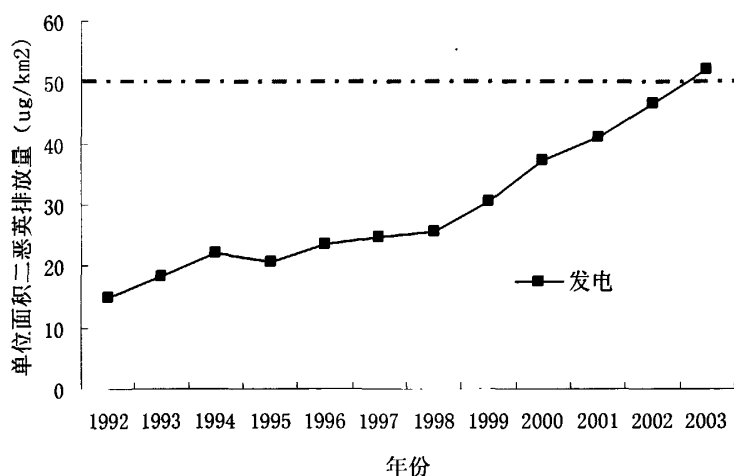


图 4-14 1992-2003 年广东单位面积电力生产排放二恶英量

2、工业能源消耗排放源

1970-1995 年间欧洲制造工业能源燃烧排放二恶英逐年降低, 而 1992-2003 年广东省工业生产能源燃烧所产生的二恶英呈先增后降的“倒 U 形”曲线趋势, 并且在达到约 $120\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 时出现一个转折点, 欧洲自 1980 年后单位面积制造工业能源燃烧所产生的二恶英量均低于这一值, 而广东省也只有 1997-2000 年四年间高于 $120\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。1993-1995 年欧洲单位面积制造工业能源燃烧排放的二恶英量已经低于 $60\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$, 而广东省 1992-2003 年间工业生产能源消

耗所产生的单位面积二恶英排放水平均高于 $80\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ ，说明广东应该调整工业结构，充分利用清洁能源，降低工业生产能耗，从而降低二恶英等持久性有机毒害物的产生和排放。

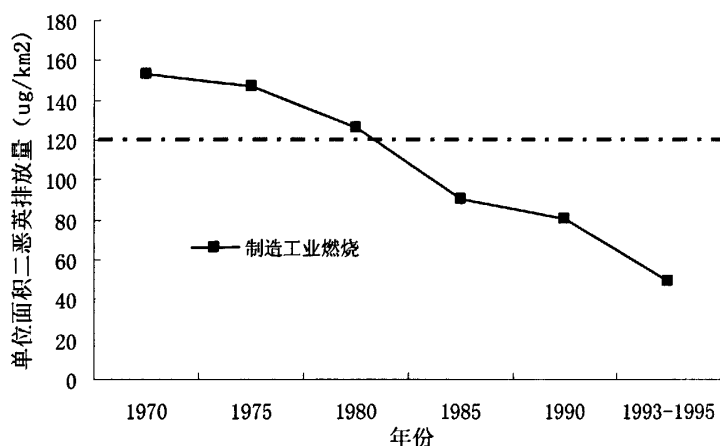


图 4-15 1970-1995 年欧洲单位面积制造业能源燃烧二恶英排放量

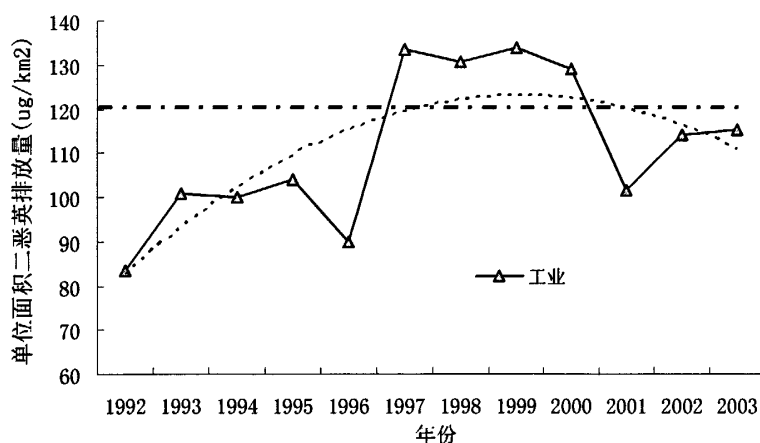


图 4-16 1992-2003 年广东单位面积工业能源燃烧二恶英排放量

3、交通运输邮电通信业

1970-1995 年欧洲交通运输行业二恶英排放量呈先增后减的趋势，1980 年达到最大值，这时单位面积内由交通运输产生的二恶英约为 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ ，1993-1995 年为最低值 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。相比而言，广东省 1992-2003 年单位面积内由交通运输所产生的二恶英量波动上升，从 1994 年起均高于 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$

的值, 并且越来越接近 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。可见广东省交通运输二恶英排放的控制问题应该得到高度重视。

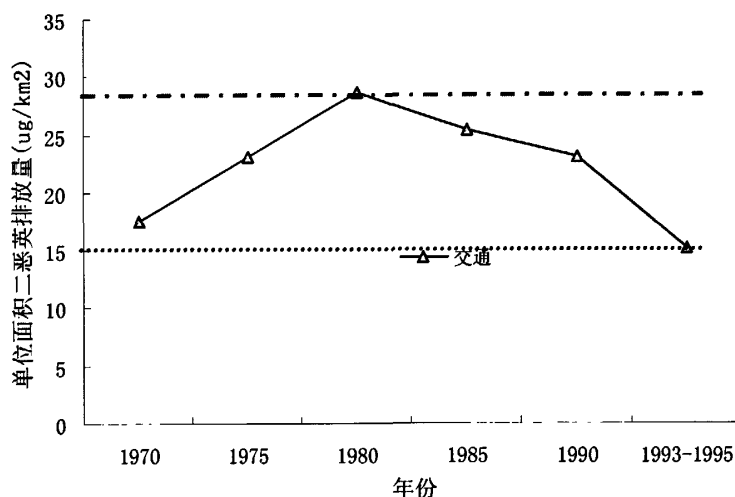


图 4-17 1970-1995 年欧洲交通运输单位面积二恶英排放量

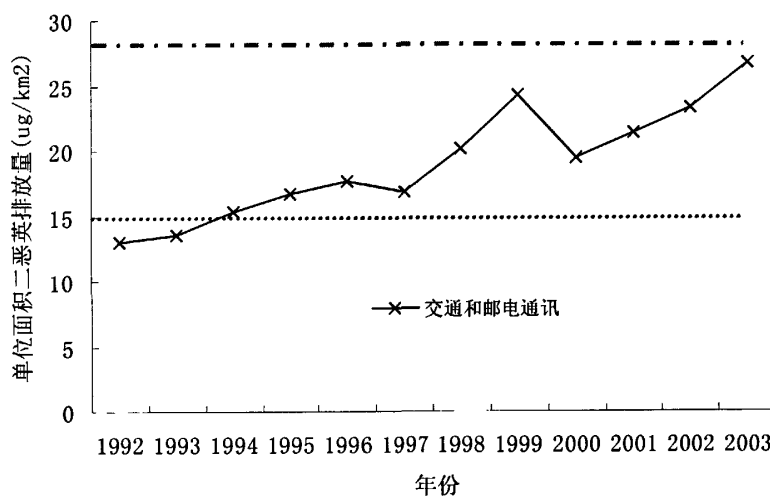


图 4-18 1992-2003 年广东交通运输单位面积二恶英排放量

由此可见, 我国常规的、传统的污染物已经在降低, 即到达库兹涅茨曲线的后期; 而新兴的、潜在的、微量的污染物却还处于上升阶段, 即处于库兹涅茨曲线的前期。所以目前有必要采取措施降低这类污染物质的排放量, 从而降低其对人体和生态的危害。

第五节、本章小结

本文在对常用的排放量估算方法进行改进的基础上,对广东省 1992-2003 年二恶英的排放量进行了估算。得到以下主要结论:

1. 我国省域垃圾焚烧二恶英排放量估算应该根据具体情况采用不同的排放模型。不宜简单套用联合国环境署推荐的排放模型;利用现有资料从多个角度分析说明本文采用和改进的估算模型具有较好的效果;
2. 广东省 2002 年垃圾焚烧二恶英的排放量约为 7.93-67.96g TEQ;垃圾焚烧发电垃圾焚烧量占垃圾焚烧总量的 70%以上,但二恶英的排放量仅为 1.8 g I-TEQ,贡献率仅为 2.6%-22.7%;垃圾焚烧发电厂垃圾焚烧量大幅增长,但是二恶英排放量呈先增后减趋势,说明我国垃圾焚烧排放控制标准的实施以及焚烧技术的改进可以有效大幅降低二恶英的排放。
3. 在未考虑垃圾简易焚烧时,广东省 1992-2003 年能源消耗、工业生产过程以及废物焚烧二恶英年排放总量低于 60g TEQ,其中最低量为 1996 年的 45.38g TEQ,最高为 2003 年的 59.97g TEQ。能源消耗排放的二恶英约占总排放量的 50%,其中工业生产的贡献最大,生活能源消费二恶英的排放量呈逐年下降趋势,而火力发电和交通运输呈上升趋势。
4. 增加垃圾简易焚烧二恶英排放量一项之后,广东省 2002 年二恶英的排放量约为 61.92g TEQ,其中燃料燃烧的贡献率为 55.04%,工业生产过程的贡献率为 27.54%,废物焚烧的贡献率为 17.42%;经过不确定性分析,广东省二恶英排放量估算结果的 75%置信区间大约覆盖正负 2-5g I-TEQ。
5. 本文估算的广东省二恶英排放呈增长趋势,欧洲的二恶英排放量专家评估和官方数据均显示出二恶英的排放量在显著降低。
6. 欧洲居民家庭能源燃烧是最主要的二恶英排放源,其排放量占总排放量的四分之一,广东省二恶英的最主要来源是工业生产。2002 年工业燃料燃烧和工业生产过程两部分所排放的二恶英占全省二恶英排放量总和的 61%,可见控制工业生产中的二恶英排放势在必行。
7. 1970-1995 年欧洲交通运输二恶英排放量呈先增后减的趋势,最大值约为 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$,最低值 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。广东省 1992-2003 年交通运输所产生的二恶英排放呈波动上升状态,从 1994 年起均高于 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 的值,并

且越来越接近 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。可见广东省交通运输二恶英排放问题应该得到高度重视。

8. 我国常规的、传统的污染物已经在降低，即到达库兹涅茨曲线的后期；而新兴的、潜在的、微量的污染物却还处于上升阶段，即处于库兹涅茨曲线的前期。
9. 本文估算的仅是排入大气中的二恶英量，并且没有计算所有的排放源，估算的重点集中于能源消耗部门的二恶英排放，垃圾焚烧只计算了垃圾焚烧发电厂的排放量，工业生产过程只涉及了三个产品，所以如果充实了其他排放源，并估算排入水体、土壤和生产产品等其他介质后，广东省二恶英排放量应高于本文估算结果。

第五章、广东省多环芳烃排放量估算结果

第一节、数据与方法

多环芳烃估算方法见本论文第三章排放量估算模型方法一（公式1），其中多环芳烃的排放因子见第三章表 3-3。

广东省能源消耗数据来源于 2004 年的《广东省统计年鉴》和《广东省环境统计资料汇编》以及《广东省资源节约专项检查数据汇总》。能源消耗主要分为以下五类，即发电与工业燃煤、生活燃煤、交通用油、非交通用油和天然气。其中交通用油目前还没有获得可靠的数据，所以表 5-1 中仅列出其他四项能源消耗量。

机动车能源消耗是多环芳烃的主要排放源之一，因为无现成数据，本文暂未计算，但收集了 2003 年广东省机动车保有量数据（表 5-2），在获取单位车辆类型年均（日均）耗油量，或者单位车辆类型行驶距离和单位距离的耗油量之后，可以根据本文估算方法和提供的排放因子计算得到交通用油多环芳烃的排放量。

表 5-1 广东省 21 地市 2003 年能源消耗量（单位：天然气为 10^4m^3 ，其余为 10^4t ）

2003 年	发电与工业燃煤	生活燃煤	非交通用油	天然气
广东省	6634.51	108.69	959.06	814432
广州市	1634.31	23	155.14	0
韶关市	540.06	8.95	5.13	0
深圳市	318.5	0.5	160.29	18020
珠海市	377.85	3.8	27.76	383997
汕头市	199.51	1.7	38.52	50
佛山市	400.31	1.56	308.51	11556
江门市	231.82	0.41	11.45	649
湛江市	358.05	5	6.44	4707
茂名市	103.42	5.2	86.05	390584
肇庆市	106.52	10.73	5.22	237
惠州市	52.53	10.23	14.15	0
梅州市	287.29	0.4	0.43	79
汕尾市	0.34	0.3	1.71	0
河源市	31.82	12	0.75	2160
阳江市	38.06	0.29	0.55	0
清远市	259.98	5.74	3.23	530
东莞市	1397.93	6.7	64.72	58
中山市	58.46	2	60.76	513
潮州市	8.38	3.4	2.95	1290
揭阳市	9.04	3.67	1.18	2
云浮市	220.33	3.11	4.12	0

资料来源：广东省统计年鉴，广东省环境统计资料汇编和《广东省资源节约专项检查数据汇总》。

表 5-2 广东省 21 个地市 2003 年车辆拥有量(单位: 辆)

市别	总计	汽车				农运车	拖拉机	摩托车	其他
		总计	载客车	载货车	其他				
广州市	1705457	577241	387582	178108	11551	1749	41	1119578	2017
韶关市	268518	36220	18806	17051	363	685	1198	215669	14583
深圳市	541679	496033	363552	118867	13614	-	-	43989	-
珠海市	132153	69860	46057	22536	1267	10	11	59102	1494
汕头市	530747	93855	61751	30911	1193	1551	4	431803	3523
佛山市	1505176	313836	169491	140422	3923	367	24	1184297	5384
江门市	987236	112002	56839	53545	1618	2393	138	861213	10297
湛江市	405251	51623	23844	27000	779	676	2714	349388	402
茂名市	814247	60658	23357	36672	629	749	1414	745215	6098
肇庆市	500529	49147	22854	26008	285	765	309	439531	10678
惠州市	470756	72750	42231	29037	1482	439	-	397452	-
梅州市	517413	34759	18229	16169	361	2533	24	469900	10145
汕尾市	163630	15425	9809	5442	174	2045	3	142692	3434
河源市	246759	19969	11057	8419	493	1045	495	222778	2430
阳江市	427496	20640	11241	9215	184	279	2	400021	6522
清远市	319617	37480	18217	18931	332	518	1757	263463	16369
东莞市	948707	255603	155206	97047	3350	240	8	692562	-
中山市	472062	124359	70486	52348	1525	103	-	346760	-
潮州市	297670	38148	21820	16130	198	2320	2	256809	277
揭阳市	349828	39319	25983	13166	170	726	1	304117	5659
云浮市	354877	30373	13571	16633	169	2000	39	312445	9974

资料来源:广东省统计年鉴

第二节、多环芳烃排放量估算结果

广东省 2003 年 21 个地市多环芳烃的排放量估算结果如表 5-3 所示,可见广东省 2003 年发电与工业、生活燃煤排放多环芳烃共 44042.73kg,非交通用油排放多环芳烃 5994.88kg,天然气燃烧排放多环芳烃 4836.01kg,合计排放多环芳烃 54873.62kg,约 54.9 吨。

21 个地市中,广州市多环芳烃排放量最大,其次是茂名市和河源市;排放量最小的是汕尾市,各地市按照排放量从大到小排序结果见表 5-3。

表 5-3 广东省 2003 年多环芳烃排放量结果

地区	排序	PAHs 排放量(kg)				合计
		发电与工业燃煤	生活燃煤	非交通用油	天然气	
广东省		6037.51	38005.22	5994.88	4836.01	54873.62
广州市	1	1487.25	8042.32	969.75	0.00	10499.32
茂名市	2	94.11	1818.26	537.88	2319.25	4769.50
河源市	3	28.96	4195.99	4.69	12.83	4242.47
珠海市	4	343.85	1328.73	173.52	2280.13	4126.23
东莞市	5	1272.14	2342.76	404.55	0.34	4019.79
肇庆市	6	96.93	3751.92	32.63	1.41	3882.89
惠州市	7	47.80	3577.09	88.45	0.00	3713.34
韶关市	8	491.46	3129.51	32.07	0.00	3653.04
佛山市	9	364.29	545.48	1928.43	68.62	2906.82
清远市	10	236.59	2007.08	20.19	3.15	2267.01
湛江市	11	325.83	1748.33	40.26	27.95	2142.37
深圳市	12	289.84	174.83	1001.94	107.00	1573.61
云浮市	13	200.50	1087.46	25.75	0.00	1313.71
揭阳市	14	8.23	1283.27	7.38	0.01	1298.89
潮州市	15	7.63	1188.87	18.44	7.66	1222.60
中山市	16	53.20	699.33	379.80	3.05	1135.38
汕头市	17	181.56	594.43	240.78	0.30	1017.07
江门市	18	210.96	143.36	71.57	3.85	429.74
梅州市	19	261.44	139.87	2.69	0.47	404.47
阳江市	20	34.64	101.40	3.44	0.00	139.48
汕尾市	21	0.31	104.90	10.69	0.00	115.90

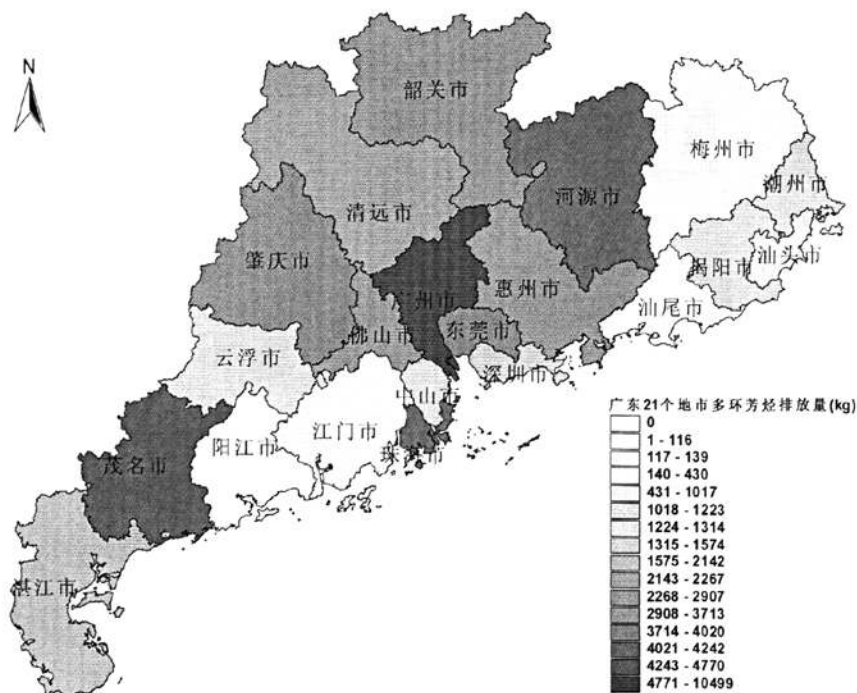


图 5-1 广东省 21 个地市多环芳烃排放量 (kg)

由图 5-2 可见,生活燃煤对于多环芳烃的排放贡献最大,占总量的 69%,主要是因为生活燃煤多环芳烃的排放因子较高,而且本文计算中未包括交通运输产生的多环芳烃量,使得生活燃煤一项所占比例相对较大。

其次是发电和工业燃煤,占 11%,非交通用油多环芳烃排放量也占总排放量的 11%,天然气燃烧所排放的多环芳烃占总量的 9%。燃煤仍然是广东省的主要能源,其排放多环芳烃占总量的 80%。图 5-3 是 2003 年欧洲(包括 15 个国家)的多环芳烃排放源分析(MSC-E&CCC, 2005),如图所示,欧洲多环芳烃的最主要来源也是居民家庭生活能源燃烧,其次是金属冶炼工业,交通运输、电热生产和制造业与建筑业的能源燃烧所释放出的多环芳烃均占 2003 年欧洲(15 个国家)多环芳烃排放总量的 5%。

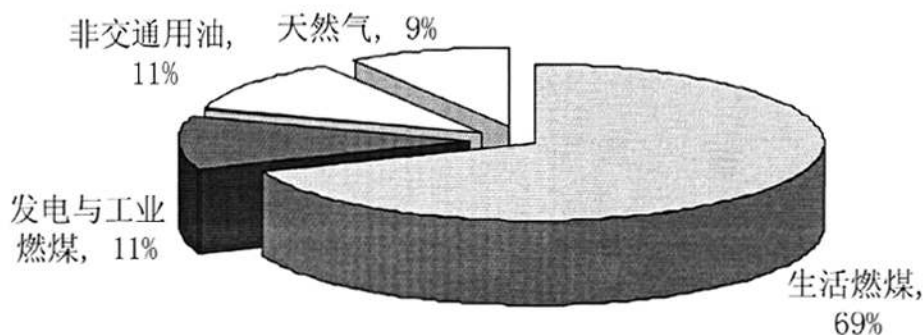


图 5-2 各种主要燃烧源对 PAHs 总排放量的贡献比例

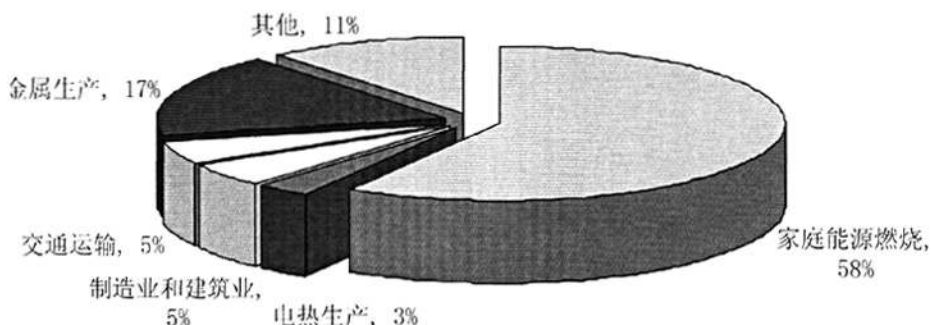


图 5-2 欧洲 (15 个国家) 2003 年多环芳烃排放源分析

第三节、小结

- 1) 广东省 2003 年排放多环芳烃 54873.62kg, 约 54.9 吨, 其中发电与工业、生活燃煤、非交通用油、天然气燃烧分别排放多环芳烃 44042.73kg、5994.88kg 和 4836.01kg;
- 2) 21 个地市中, 多环芳烃排放量最大和最小的分别是广州市和汕尾市;
- 3) 发电和工业燃煤、非交通用油、天然气燃烧多环芳烃排放量分别占总排放量的 11%、11%和 9%;
- 4) 生活燃煤对于多环芳烃的排放贡献最大, 占总量的 69%, 与欧洲的情况类似;
- 5) 燃煤仍然是广东省的主要能源, 其排放多环芳烃占总量的 80%。

第六章、广东省火电厂污染物排放量分析

自改革开放以来,广东经济飞速发展,2003 年广东省内生产总值 15844.64 亿元,居全国首位。经济增长伴随着巨大的能源消耗,2003 年广东能源消费总量 13099.29 万吨标准煤,其中原煤消费量 7824.11 万吨,电力消费量 2031 亿千瓦时。随着国民经济的发展和人们物质文化生活水平的提高,人们对环境的要求也越来越高,尤其对大气环境质量的要求更高,因而火电厂大气污染物的排放问题受到格外关注。火电厂大气污染物中主要有烟尘、 SO_2 、 NO_x 等,这些污染物排放到大气中将产生悬浮颗粒使空气浑浊,出现灰霾、酸雨、光化学烟雾等气象灾害,危害环境和人体健康;火力发电燃煤燃油过程中还会产生多环芳烃、二恶英等持久性有机污染物以及排放大量温室气体——二氧化碳;此外,燃煤电厂飞灰中还检出吸附有非多环芳烃类有机污染物(刘惠永,张爱云,2004)。

我国《火电厂大气污染物排放标准》1991 年制定颁布实施以后,又经 1996、2003 年两次修订(段宁,柴发合,陈义珍等,2004),然而该标准仍然只关注氮氧化物和二氧化硫气体,而对火电厂排放二氧化碳和持久性有机污染物还没有给予足够的重视。火电装机容量和发电量在广东省电力结构中均占 70% 以上,与燃煤燃油有关的环境污染已成为电力工业发展的一个制约因素,因而研究燃煤火电厂对大气造成的污染具有重要意义。目前对珠三角地区多环芳烃等持久性有机物已进行了大量研究,发现珠三角流域及河口沉积物中有高浓度的多环芳烃,引起广泛关注(Mai,B.X.;Fu,J.M,2002; Luo,X.J.;Mai,B.X.;2004)。广州市大气中的二恶英平均浓度高于世界上其他很多城市浓度范围(Liping Yu, et al, 2006)。广东省火电厂作为能源消耗大户,其排放持久性有机污染物现状亟待研究。本章估算了 2003 年广东火电厂二氧化碳、多环芳烃和二恶英类大气污染物的排放量,并进行空间分析。有关结果不仅可以为制定相应的能源与环境政策提供重要依据,也是在大尺度上开展大气污染物归趋模拟和暴露分析的必要前提。

第一节、广东火电厂概况

广东省大部分火电厂的烟气排放未经脱硫、脱硝处理,2000 年全省电力行业的二氧化硫排放总量达 66 万吨左右(洪晖虹,2004)。2003 年二氧化硫排放量 563423.5 吨,二氧化硫去除量 39552 吨,烟尘去除量 6337408 吨,排放量 95070.77 吨。由此可见广东火电厂的除硫除尘问题还有待改善。

2003 年广东省火力发电年耗能总量 4470.07 万吨标准煤, 生产电量 1257.09 亿千瓦时, 单位产品综合能耗约 355.58 克标准煤/千瓦时。能源消耗中煤炭消耗量为 3715.35 万吨标准煤, 占总量的 83.12%。从表 6-1 可见广东省 21 个地市中火电厂能源消耗最大的三个城市分别为东莞市、广州市和珠海市, 而潮州市、河源市、揭阳市、汕尾市、肇庆市和阳江市因当时无火电厂故表中未列出。至 2003 年广东省火电厂共建成 70 余座, 主要分布在珠江三角洲地区, 2003 年珠江三角洲地区用于火力发电的能源为 3188.84 万吨标准煤, 占整个广东省火力发电能源消耗总量的 70%以上。

第二节、研究方法和数据来源

一、研究方法

收集广东省 21 个地市火电厂能源消耗数据和二氧化碳、多环芳烃和二恶英类大气污染物在火力发电过程中的排放因子。将能源消耗数据与相应的排放因子相乘之后线性相加, 来估算大气污染物的排放量和不同能源贡献比例。此外, 引入经济、人口和区域面积等因素进行空间分析和综合分析。

二、数据来源与可靠性分析

能源消耗数据主要来源于广东省政府有关部门公布的数据, 为了保证数据完整全面, 本文综合参考了《广东省资源节约专项检查数据汇总》和《广东省环境统计资料汇编 2003》的数据。《汇总》中的数据详细, 具体到每个单位(公司), 然而缺少深圳市、中山市数据, 惠州市、茂名市、梅州市以及清远市的燃煤、燃油数据也有部分疏漏, 因此这部分数据参考《环境统计资料汇编》中的相应数据。最终全省能源消耗总量与《广东统计年鉴 2004》的数据非常一致, 从而确保了本文能源数据的准确性。

火力发电大气污染物排放因子的数据和参考资料见表 6-2, 所有数据都取自公开发表的刊物和书籍。其中多环芳烃是指美国国家环保局 USEPA 推荐的优控污染物清单中的 16 种亲体 PAHs, 其排放因子是这 16 种多环芳烃排放因子之和。

表 6-1 广东省火力发电厂能源消耗与发电量

区域	煤消耗量 (万吨标煤)	油消耗量 (万吨标煤)	产电量 (万千瓦时)
广州市	642.25	102.24	3184897.13
江门市	56.00	7.52	111468.00
云浮市	287.52	6.20	356703.00
珠海市	589.52	8.83	1837325.00
汕头市	151.63	9.56	528700.00
佛山市	323.00	167.68	1816008.00
湛江市	217.74	6.10	695855.00
惠州市	7.15 [*]	17.37	98079.00
梅州市	239.14	0.27 [*]	517898.00
清远市	110.07	3.26 [*]	231573.00
东莞市	659.22	129.12	2463999.00
茂名市	3.97 [*]	52.94	205211.00
韶关市	192.83	0.00	523149.00
深圳市	227.15 [*]	184.69 [*]	-
中山市	8.16 [*]	58.94 [*]	-
珠三角	2512.45	676.39	9511776.13
广东省	3715.35	754.72	12570865.13

注：表中标有“*”的数据来源于《广东省环境统计资料汇编 2003》；其他数据来源于《广东省资源节约专项检查数据汇总》，“-”表示没有数据。

表 6-2 火力发电能源燃烧气体污染物排放因子

污染物	能源类型	排放因子	单位	参考文献
CO ₂	煤炭	0.982×0.73257	-	(方精云等, 1996)
	油	0.982×0.73257×0.813	-	(方精云等, 1996)
ΣPAHs	煤炭	910.02	g·10 ⁻⁴ t ⁻¹	(许姗姗等, 2005)
	油	6250.78	g·10 ⁻⁴ t ⁻¹	(许姗姗等, 2005)
PCDD/Fs	煤炭	0.20	μg TEQ·t ⁻¹	(S.Kakareka, T.Kukharchyk.,2002)
	油	0.20	μg TEQ·t ⁻¹	(S.Kakareka, T.Kukharchyk.,2002)

注：表中 0.982 为有效氧化百分率，0.73257 为每吨标准煤含碳率，0.813 为在获得相同热能的情况下，石油释放 CO₂ 是煤释放 CO₂ 的倍数；表中 ΣPAHs 是指美国国家环保局 USEPA 推荐的优控污染物清单中 16 种亲体 PAHs。

第三节、排放量估算结果

2003 年广东省火电厂共排放二氧化碳 3114.17 万吨, 其中珠江三角洲地区共排放二氧化碳 2203.01 万吨, 占总量的 70.74%。燃煤、燃油的贡献率分别为 85.83 %和 14.17%。全省火电厂共排放多环芳烃 8035.61 千克, 其中珠江三角洲地区共排放多环芳烃 6160.38kg, 占总量的 76.66%。燃煤、燃油的贡献率分别为 58.9 %和 41.1%。2003 年广东火电厂共排放二恶英类 11.46g TEQ, 其中珠江三角洲地区排放 7.98 g TEQ, 占总量的 69.63%。燃煤、燃油的贡献率分别为 90.78%和 9.22%。

表 6-3 广东火电厂大气污染物排放量

地市	CO ₂ (10 ⁴ t)			PAHs(kg)			PCDD/Fs(g TEQ)		
	合计	燃煤(%)	燃油(%)	合计	燃煤(%)	燃油(%)	合计	燃煤(%)	燃油(%)
广州市	521.82	88.54	11.46	1265.57	64.65	35.35	1.94	92.63	7.37
江门市	44.68	90.16	9.84	104.25	68.44	31.56	0.17	93.71	6.29
云浮市	210.46	98.28	1.72	393.43	93.10	6.90	0.81	98.93	1.07
珠海市	429.26	98.80	1.20	789.69	95.11	4.89	1.66	99.26	0.74
汕头市	114.67	95.12	4.88	235.01	82.20	17.80	0.44	96.94	3.06
佛山市	330.43	70.32	29.68	1145.18	35.93	64.07	1.14	79.39	20.61
湛江市	160.21	97.77	2.23	304.09	91.22	8.78	0.62	98.62	1.38
惠州市	15.30	33.61	66.39	85.11	10.70	89.30	0.04	45.15	54.85
梅州市	172.19	99.91	0.09	305.85	99.61	0.39	0.67	99.94	0.06
清远市	81.09	97.65	2.35	154.48	90.77	9.23	0.31	98.54	1.46
东莞市	549.75	86.26	13.74	1404.81	59.78	40.22	2.03	91.08	8.92
茂名市	33.82	8.44	91.56	236.70	2.14	97.86	0.09	13.05	86.95
韶关市	138.72	100.00	0.00	245.67	100.00	0.00	0.54	100.00	0.00
深圳市	271.43	60.20	39.80	1097.49	26.37	73.63	0.89	71.10	28.90
中山市	40.34	14.55	85.45	268.31	3.88	96.12	0.11	21.69	78.31
珠三角	2203.01	82.04	17.96	6160.38	51.96	48.04	7.98	88.14	11.86
广东省	3114.17	85.83	14.17	8035.61	58.90	41.10	11.46	90.78	9.22

第四节、排放量空间分布分析

广东省各地区发展不平衡，珠江三角洲地区经济繁荣，人口密度大，区域面积相对较小；东西两翼区域面积大，经济发展相对落后，人口密度相对小。因此，为了深入分析广东火电厂大气污染物排放现状，引入 21 个地市区域面积、人口数量和经济发展数据（GDP）对排放量进行空间分析。因大气污染物排放量与能源消耗数据有紧密的相关性，故多环芳烃，二恶英类的排放量空间分布与二氧化碳具有相似特征，本文仅展示二氧化碳排放量空间分析结果。

图 6-1 为单位面积二氧化碳排放量空间分布图，区域面积既包括陆地面积，也包括海域面积。变化范围是 $0\text{--}2102\text{t}/\text{km}^2$ 。珠江三角洲地区单位面积二氧化碳排放量普遍较高，东莞市、深圳市和佛山市名列前三，其次是广州市和珠海市。若不计海域面积珠海市单位面积二氧化碳排放量最高。江门市和惠州市也因海域面积大使得单位面积二氧化碳排放量大大降低。另外珠三角以外的汕头市、云浮市和湛江市单位面积二氧化碳排放量也较高。珠三角单位面积二氧化碳排放量高于全省平均水平。除无排放量的六个地市外，单位面积排放量相对最低的三个地市为惠州市、江门市和茂名市。

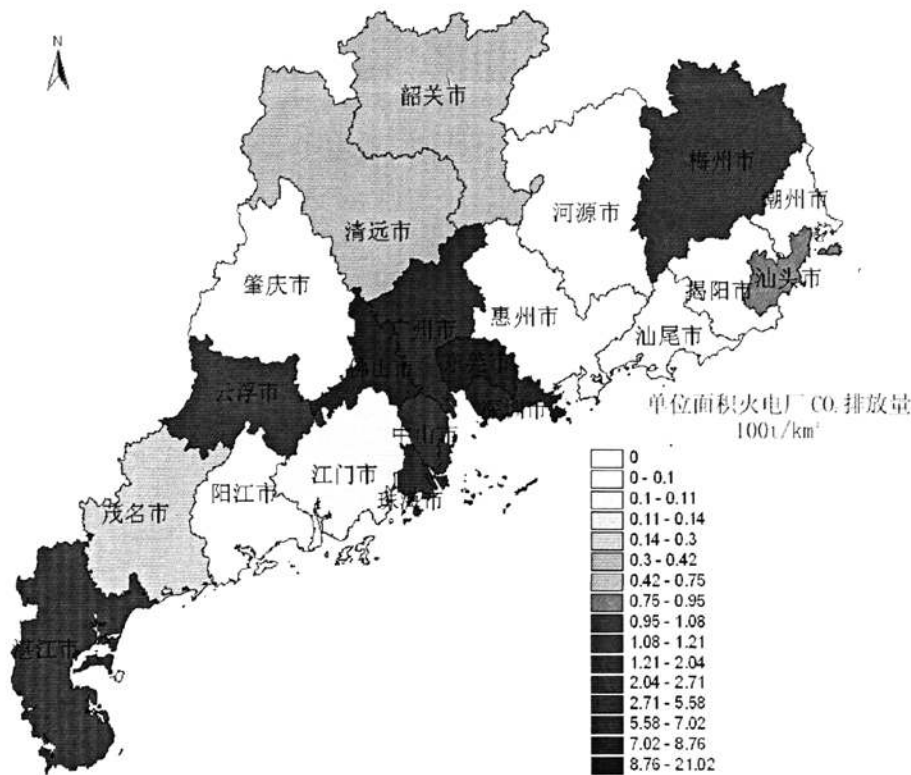


图 6-1 单位面积二氧化碳排放量空间分布图，单位（ $10^2\text{t}/\text{km}^2$ ）

图 6-2 为人均二氧化碳排放量空间分布图，变化范围是 0-3417kg/per。各地市的人口数据来源于广东省统计年鉴 2003 和 2004 以及 2000 年广东省第五次人口普查数据。统计的人口数据中，深圳市、珠海市、东莞市和中山市包括了办理暂住证的外来人口，佛山市的外来人口是估计值，其余各市为户籍人口。由图 6-2 可见珠江三角洲地区与其他地区的人均二氧化碳排放量的差距有所缩小。其中珠海市、东莞市排名一、二，云浮市上升到第三位，整个珠三角地区人均二氧化碳排放量仍然高于全省平均水平；深圳市因外来人口较多排名有所下降。韶关市、梅州市和汕头市的人均二氧化碳排放量也较高，除无排放量的六个地市外，人均二氧化碳排放量最低的三个地市为茂名市、惠州市和江门市。

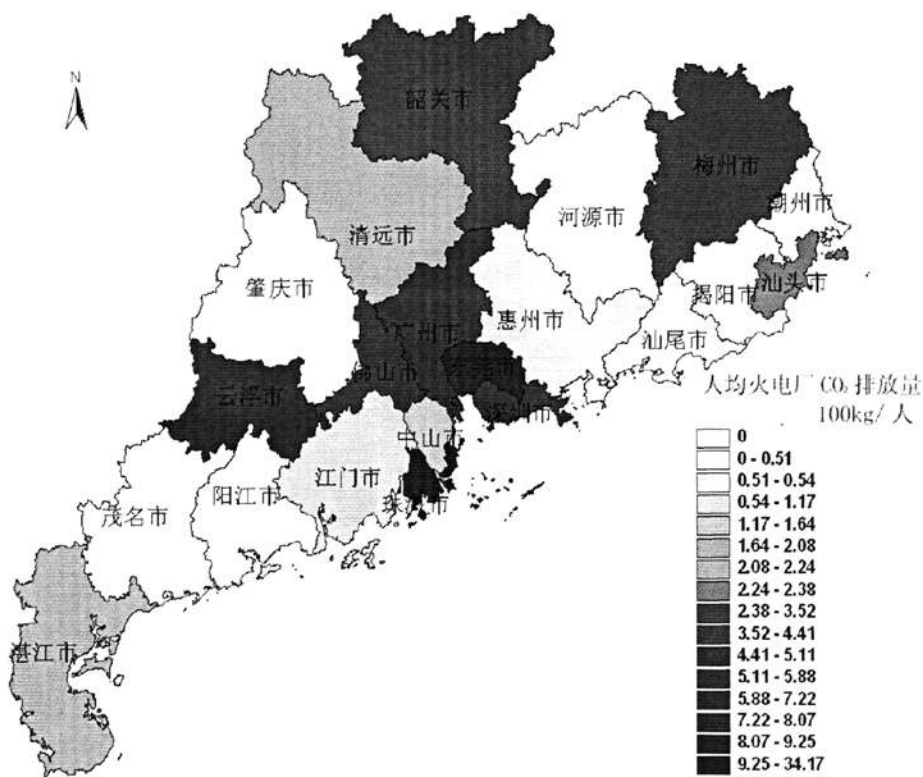


图6-2 人均二氧化碳排放量空间分布图，单位为（ 10^2 kg/person）

图 6-3 为单位 GDP 二氧化碳排放量，变化范围是 0-98g/yuan RMB GDP。如图所示，珠江三角洲地区火电厂单位 GDP 二氧化碳排放量低于全省平均水平，最高的三个地市为云浮市、珠海市和梅州市。东莞市、深圳市、佛山市和广州市分别下降到第四、第十四、第九和第十三位。韶关市、清远市、湛江市也较高。除无排放量的 6 个地市外，单位 GDP 二氧化碳排放量最低的 3 个地市为惠州市、茂名市和江门市。

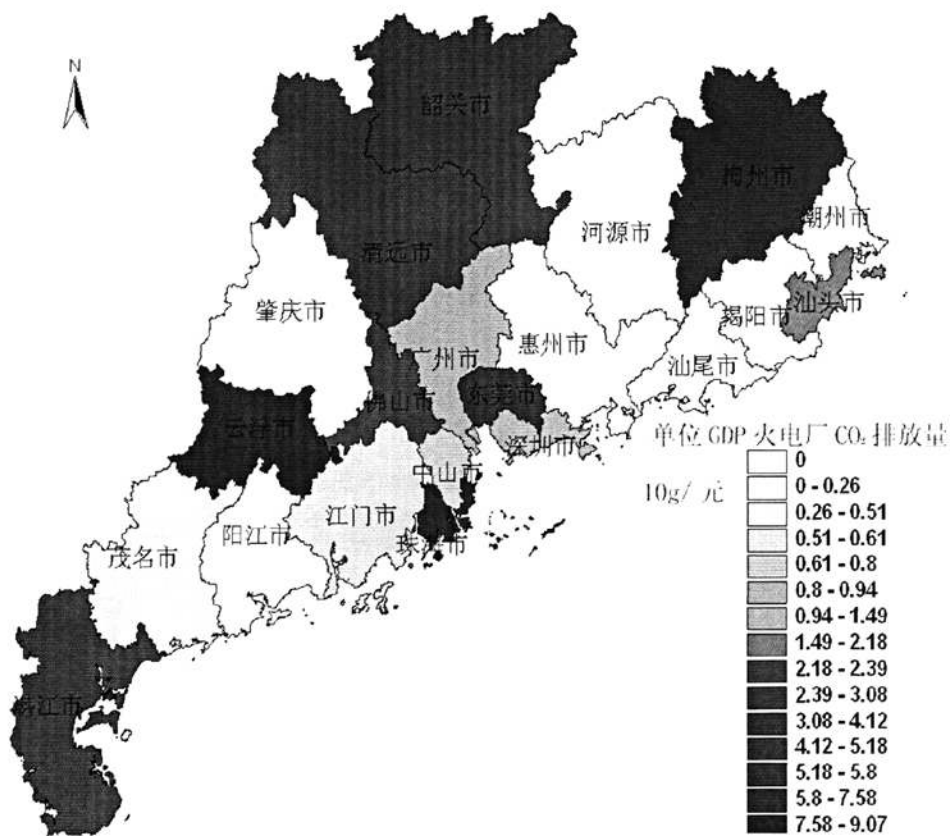


图6-3 单位GDP二氧化碳排放量分布图，单位（10g TEQ/yuan RMB GDP）

第五节、 小结

本文采用通用气体污染物排放量估算模型,收集广东省火电厂能源消耗以及污染物排放因子数据,对广东省 2003 年火电厂二氧化碳、多环芳烃和二恶英类气体污染物排放量进行了估算,并引入经济、人口、区域面积进行空间分析。主要得出以下结论:

- (1) 广东省 2003 年火电厂共排放二氧化碳 3114.17 万吨,多环芳烃 8035.61 千克,二恶英 11.46 克(毒性当量);
- (2) 二氧化碳和二恶英排放总量中,燃煤的贡献率在 80%以上,多环芳烃排放总量中燃煤的贡献率略大于 50%;
- (3) 珠三角地区火电厂大气污染物排放量占广东排放总量的 70%以上;
- (4) 珠三角火电厂单位面积二氧化碳排放量和人均排放量都高于全省平均水平,而单位 GDP 二氧化碳排放量低于全省平均水平。
- (5) 建议我国《火电厂大气污染物排放标准》中增加对持久性有机污染物和二氧化碳的排放限制;广东省珠江三角洲地区经济实力较强,环保问题突出,已有系统的天然气管网规划,所以建议在珠三角地区今后主要建设和发展液化天然气(LNG)电厂,减少污染物排放;大力开发水电、风电、核电等清洁能源。

第七章、结论与不足

一、结论

本文在对常用的排放量估算方法进行改进的基础上,对广东省二恶英和多环芳烃的排放量进行了估算,并分析了主要排放源。其中对 1992-2003 年二恶英排放量进行了时间分析,对 2003 年广东省 21 个地市多环芳烃排放量进行了空间分析,主要得到以下主要结论:

1. 我国省域垃圾焚烧二恶英排放量估算应该根据具体情况采用不同的排放模型。不宜简单套用联合国环境署推荐的排放模型;利用现有资料从多个角度分析说明本文采用和改进的估算模型具有较好的应用效果;
2. 在未考虑垃圾简易焚烧二恶英排放量的情况下,广东省 1992-2003 年能源消耗、工业生产过程以及废物焚烧二恶英年排放总量低于 60g TEQ,但呈增长趋势。能源消耗排放的二恶英约占总排放量的 50%,其中工业生产的贡献最大,生活能源消费部门二恶英的排放量呈逐年下降趋势,而火力发电和交通运输部门的排放呈上升趋势;
3. 增加考虑垃圾简易焚烧二恶英排放量之后,广东省 2002 年二恶英的排放量约为 61.92g TEQ。在未考虑垃圾简易焚烧二恶英排放量的情况下,燃料燃烧的贡献率为 55.04%,工业生产过程的贡献率为 27.54%,废物焚烧的贡献率为 17.42%。经过不确定性分析,广东省二恶英排放量估算结果的 75%置信区间大约覆盖正负 2-5g I-TEQ;
4. 广东省 2002 年垃圾焚烧发电垃圾焚烧量占垃圾焚烧总量的 70%以上,但二恶英的排放量仅为 1.8 g I-TEQ,贡献率仅为 2.6%-22.7%;垃圾焚烧发电厂垃圾焚烧量大幅增长,但是二恶英排放量呈先增后减趋势,说明我国垃圾焚烧排放控制标准的实施以及焚烧技术的改进可以有效大幅降低二恶英的排放;
5. 欧洲居民家庭生活能源燃烧是最主要的二恶英排放源,其排放量占总排放量的四分之一,广东省二恶英的最主要来源是工业生产。2002 年工业燃料燃烧和工业生产工艺两部分所排放的二恶英量占全省二恶英排放量总和的 61%,可见控制工业生产中的二恶英排放势在必行;
6. 1970-1995 年欧洲交通运输部门二恶英排放量呈先增后减的趋势,最大值约

为 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$, 最低值 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。广东省 1992-2003 年交通运输部门所产生的二恶英呈波动上升态势, 从 1994 年起均高于 $15\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 的值, 并且越来越接近 $28\mu\text{g TEQ}/\text{km}^2$ 。可见广东省交通运输二恶英排放问题应该得到高度重视;

7. 我国常规的、传统的污染物已经在降低, 即到达库兹涅茨曲线的后期; 而新兴的、潜在的、微量的污染物却还处于上升阶段, 即处于库兹涅茨曲线的前期。
8. 广东省 2003 年排放多环芳烃 54873.62kg, 即 54.9 吨, 其中发电与工业、生活燃煤、非交通用油、天然气燃烧分别排放多环芳烃 44042.73kg、5994.88kg 和 4836.01kg; 发电和工业燃煤、非交通用油、天然气燃烧多环芳烃排放量分别占总排放量的 11%、11%和 9%; 21 个地市中, 多环芳烃排放量最大和最小的分别是广州市和汕尾市;
9. 燃煤仍然是广东省的主要能源, 其排放多环芳烃占总量的 80%; 生活燃煤对于多环芳烃的排放贡献最大, 占总量的 69%, 与欧洲的情况类似;
10. 广东省 2003 年火电厂共排放二氧化碳 3114.17 万吨, 多环芳烃 8035.61 千克, 二恶英 11.46 克 (毒性当量); 二氧化碳和二恶英排放总量中, 燃煤的贡献率在 80%以上, 多环芳烃排放总量中燃煤的贡献率略大于 50%;
11. 珠三角地区火电厂大气污染物排放量占广东排放总量的 70%以上; 单位面积二氧化碳排放量和人均排放量都高于全省平均水平, 而单位 GDP 二氧化碳排放量低于全省平均水平;
12. 根据本文提出的不完全清单统计, 广东省单位面积的二恶英排放量一直在不太高的水平下缓慢增长, 这主要得益于垃圾焚烧发电技术的进步。欧洲国家单位面积的二恶英排放量虽然在上世纪九十年代初达到较高水平, 但是从那时起, 一直在逐步削减, 排放水平不断降低。到 2003 年, 广东省的二恶英排放水平已经整体上超过欧洲国家。因此, 对二恶英等持久性毒害有机污染物排放的控制问题需要得到高度重视。
13. 建议我国《火电厂大气污染物排放标准》中增加对持久性有机污染物和二氧化碳的排放限制; 广东省珠江三角洲地区经济实力较强, 环保问题突出, 已有系统的天然气管网规划, 所以建议在珠三角地区今后主要建设和发展液化天然气 (LNG) 电厂, 减少污染物排放; 大力开发水电、风电、核电等清洁能源。

二、不足

本文估算存在以下不足：

- (1) 仅考虑了排入大气中的二恶英量；
- (2) 没有考虑森林火灾等自然排放源；
- (3) 由于一些排放源的数据缺乏，故没有计算所有的排放源，在计算能源燃烧时没有计算木材、秸秆燃烧的排放量；工业生产过程也只计算了炼钢、水泥和焦炭生产；垃圾焚烧只计算了垃圾焚烧发电厂的排放量，没有计算烧碱生产、造纸、纺织等工业部门排放的二恶英；
- (4) 估算的重点集中于能源消耗领域的二恶英排放。

所以如果充实了其他排放源数据，并估算排入水体、土壤和生产产品等其他介质后，广东省二恶英排放总量应高于本文估算结果。

本文的结果是广东省的不完整的排放清单，可以代表广东省排放总量的下限。本文研究结果表明基于现有的技术水平，以及我国现在实行的环境标准，只要我们严格执行环境标准，提高技术工艺，完全可以达到本文的期望排放结果。

我国二恶英的研究，尤其是排放量的研究才刚刚起步，还需要更加深入的研究。在估算模型的确定、各种排放源的二恶英排放因子的实验测定以及垃圾焚烧量、能源消耗量的数据收集上还需要进一步的工作。

参考文献

1. 毕新慧, 盛国英, 谭吉华等.多环芳烃(PAHs)在大气中的相分布[J].环境科学学报.2004, 24(1):101-106.
2. 曹玉春等.垃圾焚烧炉中二恶英生成机理的研究进展[J].热力发电, 2005(9): 15-21.
3. 陈浩泉, 赵由才, 陆文龙.航空垃圾焚烧炉空气量估算[J].环境卫生工程. 2004,12:(4):210-216.
4. 陈来国,冉勇,麦碧娴等.广州周边菜地中多环芳烃的污染现状[J].环境化学. 2004, 23 (3): 341-344.
5. 段宁, 柴发合, 陈义珍等.《火电厂大气污染物排放标准》与火电厂大气污染控制[J].中国能源, 2004(26): 20-24.
6. 方精云, 刘国华, 徐嵩龄等.中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[A]//王如松等.现代生态学的热点问题研究(上册)[M].北京:中国科学技术出版社, 1996: 240-250.
7. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1992[Z].广州:广东省环境信息中心,1992.
8. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1993[Z].广州:广东省环境信息中心,1993.
9. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1994[Z].广州:广东省环境信息中心,1994.
10. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1995[Z].广州:广东省环境信息中心,1995.
11. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1996[Z].广州:广东省环境信息中心,1996.
12. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1997[Z].广州:广东省环境信息中心,1997.
13. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1998[Z].广州:广东省环境信息中心,1998.
14. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 1999[Z].广州:广东省环境信息中心,1999.
15. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 2000[Z].广州:广东省环境信息中心,2000.
16. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 2001[Z].广州:广东省环境信息中心,2001.
17. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 2002[Z].广州:广东省环境信息中心,2002.
18. 广东省环境保护局.广东省环境统计资料汇编 2003[Z].广州:广东省环境信息中心,2003.
19. 广东省经济贸易委员会等.广东省资源节约专项检查数据汇总[Z].2004.
20. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1993[Z]北京:中国统计出版社, 1993.
21. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1994[Z]北京:中国统计出版社, 1994.
22. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1995[Z]北京:中国统计出版社, 1995.

23. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1996[Z]北京: 中国统计出版社, 1996.
24. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1997[Z]北京: 中国统计出版社, 1997.
25. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1998[Z]北京: 中国统计出版社, 1998.
26. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 1999[Z]北京: 中国统计出版社, 1999.
27. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 2000[Z]北京: 中国统计出版社, 2000.
28. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 2001[Z]北京: 中国统计出版社, 2001.
29. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 2002[Z]北京: 中国统计出版社, 2002.
30. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 2003[Z]北京: 中国统计出版社, 2003.
31. 广东省年鉴编委会.广东统计年鉴 2004[Z].北京: 中国统计出版社, 2004.
32. 广东省人口普查办公室.广东省 2000 年人口普查资料[Z].北京: 中国统计出版社, 2002.
33. 郝蓉, 彭少麟, 宋艳墩等.汕头经济特区土壤中优控多环芳烃的分布[J]. 生态环境,2004, 13(3): 323-326.
34. 郝蓉, 万洪富, 杜卫兵等. 亚热带地区农业土壤和植物中多环芳烃的分布[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版) 2005, 31(4): 374-380.
35. 洪晖虹.关于广东发展液化天然气电厂必要性的分析[J].广东电力, 2004, 17(4): 18-21.
36. 胡红伟, 刘彪. 二恶英在垃圾焚烧过程中的产生与控制[J].安徽化工,2006(2): 58-59.
37. 胡庆新. 垃圾焚烧烟气中二恶英的形态及去除方法[J]. 中国环保产业,2006(8):23-24
38. 环保局公众服务网.广东省环境统计公报, 1996-2003.<http://www.gdepb.gov.cn/>
39. 黄何, 增乐民. 广东能源资源报告[J]. 广东科技. 2002 (9): 10-15.
40. 黄蕾, 李晓东等.城市生活垃圾焚烧产生的二恶英的防治措施[J]. 电站系统工程,2005, 21 (2) : 5-7.
41. 金宜英, 田洪海等. 3 个城市生活垃圾焚烧炉飞灰中二恶英类分析[J].环境科学, 2003, 24(3) : 21-25.
42. 康跃惠, 盛国英, 李芳柏等. 珠江口现代沉积物柱芯样多环芳烃高分辨沉积记录研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1):45-51.
43. 李海英, 张书廷, 赵新华. 城市生活垃圾焚烧产物中二恶英检测方法[J].燃料

- 化学学报, 2005, 33(3): 379-384.
44. 李润东等.垃圾焚烧飞灰中重金属和二恶英等痕量污染物分析[J].燃烧科学与技术, 2004, 10(6): 479-483.
45. 刘惠永, 张爱云. 燃煤电厂飞灰吸附非多环芳烃类有机污染物的检出及意义[J].环境工程, 2004, 18(2): 56-57.
46. 刘志霞, 张加恭. 广东工业结构分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2006, 21 (2): 58-62.
47. 鲁钢.垃圾焚烧烟气中二恶英零排放技术实践[J].电力环境保护, 2005. 21 (3): 39-40.
48. 伦蕊, 欧阳颖弋.广东工业可持续发展的能源约束研究[J]. 煤炭经济研究. 2005 (2): 30-32.
49. 麦碧娴, 林峥, 张干等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J].环境科学学报. 2000, 20 (2): 192-197.
50. 祁士华,傅家谟,盛国英等.气溶胶与降尘中多环芳烃的含量分布研究[J].中国环境监测. 2001, 17 (2): 3-7.
51. 祁士华,盛国英,傅家谟,叶兆贤,吴建勋.鼎湖山自然保护区大气气溶胶中的PAHs[J].地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 83-87.
52. 祁士华,盛国英,傅家谟等.不同高程气溶胶中多环芳烃分布研究[J].环境科学学报, 2000a, 120(3): 308-311.
53. 祁士华, 盛国英, 叶兆贤等. 珠江三角洲地区大气气溶胶中有机污染物背景研究[J].中国环境科学, 2000b.20(3): 225-228.
54. 全浩, 黄业茹. 垃圾焚烧与二恶英[J].环境科学研究,1998, 11(3): 8-10.
55. 石谊双等.硫对垃圾焚烧过程中二恶英生成的抑制作用[J].能源与环境, 2005.
56. 宋贵良. 锅炉计算手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995: 728
57. 孙冬等.垃圾焚烧烟气中污染物对人体健康风险评价[J].环境卫生工程, 2004, 12(3): 144-147.
58. 孙宏.生活垃圾焚烧过程中二恶英的生成及控制[J].环境卫生工程, 2006, 14(2): 12-14.
59. 谭吉华,毕新慧,段菁春等.广州市大气可吸入颗粒物(PM10)中多环芳烃的季节

- 变化[J].环境科学学报. 2005, 25 (7): 855-862.
60. 唐小玲,毕新慧,陈颖军等.广州市空气颗粒物中烃类物质的粒径分布[J].地球化学. 2005, 34(5): 508-514.
61. 王敬贤, 吴文忠. 二恶英的主要来源、排放量及相关环境与健康标准. 水生生物学报. 2002, 26(3): 286-294.
62. 王明武. 城市生产垃圾处理方法综述[J].矿山环保,2001, 32(1): 13-23.
63. 吴启航, 麦碧娴, 杨清书等. 珠江广州河段重污染沉积物中多环芳烃赋存状态初步研究[J]. 地球化学. 2004, 22(1): 37-45.
64. 吴文忠 中国二恶英的污染源和排放量的调查与评估
<http://www.gefchina.org.cn/gef/pops/papers/wuwenzhong.htm>
65. 许珊珊, 刘文新, 陶澍.全国多环芳烃年排放量估算[J].农业环境科学学报, 2005, 24 (3): 476-479.
66. 杨清书, 麦碧娴, 罗孝俊, 傅家谟等. 珠江澳门水域水柱多环芳烃初步研究[J]. 环境科学研究. 2004, 17(3): 28-33.
67. 杨志军等.垃圾焚烧飞灰或炉渣中二恶英的分布特征[J].中国环境科学, 2004, 24(5): 524-52.
68. 叶兆贤, 简颖涛, 祁士华等.广佛公路机动车排放有机污染物监测与研究[J]. 广州环境科学. 2000, 15(2):36-39.
69. 张红兵, 张志峰.二恶英零排放生活垃圾气化熔融技术[J].科技情报开发与经济, 2005, 15(17): 134-136.
70. 章骅等.生活垃圾焚烧飞灰中的二恶英检测[J].同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1655-1659.
71. 张记市, 王华等.垃圾焚烧二恶英污染物的控制技术[J].环境保护, 2003(1): 20-21.
72. 张素坤, 彭平安. 2006.珠江三角洲地区土壤/沉积物中 PCDDs/PCDFs 的空间分布和污染源研究[D].中科院广州地球化学研究所博士学位论文:103-137
73. 张天彬, 杨国义, 万洪富等.东莞市土壤中多环芳烃的含量、代表物及其来源[J].土壤, 2005, 37(3):265-271.
74. 张宇, 邓娜等.城市垃圾焚烧中二恶英产生的机理与控制[J].环境卫生工程. 2005, 13(3): 37-40.

75. 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2004[Z].北京: 中国统计出版社, 2004.
76. 周肇秋, 李海滨, 吴创之, 等. 从日本垃圾焚烧处理技术到广东省垃圾处理问题[J]. 广东科技, 2000(8) :27-30.
77. 1990 Emissions Inventory of Section 112(c)(6) Pollutants: Polycyclic Organic Matter (POM), TCDD, TCDF, PCBs, Hexachlorobenzene, Mercury, and Alkylated Lead: Final Report; U.S.EnvironmentalProtectionAgency: Research Triangle Park,NC,1998.
78. AEATechnology. Dioxins. National Atmospheric Emission Inventory [OL]. NAEI website ,2006 http://www.naei.org.uk/pollutantdetail.php?poll_id=45&issue_id=5
79. Alcock R.E., Jones K.C. Dioxins in the environment: a review of trend data. Environment Science and Technology, 1996,30:3133-3143
80. Begona Fabrellas, David Larrazabal, M.Angelos Martinez, et al.Global assessment of PCDD/F emissions from the Spanish cement sector.Effect of conventional/alternative fuels. Nonthermal sources and source inventories.Organohalogen compounds. 2004,66
81. Berdowski, J. J. M.; Baas, J.; Bloos, J. P. J.; Visschedijk, A. J. H.; Zandveld, P. Y. J. *The European Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants for 1990*; UBA-FBreport 104 02 672/03;TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation: Apeldoorn, 1997.
82. Brian Gullett, Abderrahmane Touati. PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue. Atmospheric Environment 2003.37: 4893-4899.
83. Chen, Y. J.; Sheng, G. Y.; Bi, X. H.; Feng, Y. L.; Mai, B. X.; Fu, J.M. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China. Environ. Sci. Technol. 2005, 39, 1861-1867.
84. CITEPA. Calculating emissions into the air-General methodological principles [OL]. CITEPA website,2001.
http://www.citepa.org/emissions/methodologie/Methodologie_emissions_EN.pdf
85. Coleman P, Bush T, Conolly C, et al. , 2001. Assessment of benzo[a]pyrene atmospheric concentrations in the UK to support the establishment of a national PAH objective [R]. AEAT/ENV/R/0620 Issue 5.1.1. Oxfordshire: AEA

Technology plc Culhan.

86. Dioxin exposure and health.

<http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/download.htm#European%20Dioxin%20Inventory>

87. Durlas S K, Biswas P, Shi J, et al. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons particulate and gaseous emissions from polystyrene combustion[J]. Environ Sci Technil. 1998, 32:2301-2307.

88. Eadon,G; Kaminsky,L; Silkworth,J; et al. Calculation of 2,3,7,8-TCDD equivalent concentrations of 12 complex environmental contaminant mixtures.Environ Health Perspect 1986, 25(70) :221-227.

89. Emission Inventory Guidebook. A joint EMEP/CORINAIR Production Prepared by the EMEP Task Force on Emission Inventories. 2005.

90. Flesh-Janys D, Becher H, Gurn P, et al. Elimination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in occupationally exposed persons [J] .J Toxicol Environ Health, 1996,47(4):363-378.

91. Fu J.M., Wang Z.S., Mai B.X., Kang Y.. Field monitoring of toxic organic pollution in the sediments of Peral River Estuary and its tributaties. Water Science and Technology, 2001,43(2): 83-89.

92. Fu.J.M.,Sheng G.Y.,Chen Y, Wang Z.S. et al. Preliminary study of organic pollutants in air of Guangzhou, Hong Kong and Macao. In: Eganhouse, R.P.(Ed.), Molecular Markers in Environmental Geochemistry. ACS Symposium Series, 1997, 671:164-176.

93. Gullett, B. K., P. Lemieux, C.Winterrowd, D.Winters. 200 0. PC DD/F Emissions from Uncontrolled, Domestic Waste Burning. Organohalogen compounds 2000, 46:193-196.

94. Guruge K.S., Krueger A.B. "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement," Woodrow Wilson School, Princeton, N.J., 1992.

95. Heidelore Fiedler. Textile and leather dyeing and finishing. http://www.pops.int/documents/meetings/bat_bep/2nd_session/egb2_followup/draftguide/6JTextileandleatherdyeingDRAFTb.pdf

96. Hsi-Hsien Yang , Chia-Mei Chen. Emission inventory and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere at a suburban area in Taiwan [J]. Chemosphere, 2004. 56 : 879-887.

97. J. Li , G. Zhang , X.D. Li , S.H. Qi , G.Q. Liu , X.Z. Peng. Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China[J]. Science of the Total Environment 2006, 355:145-155.
98. Jiamo Fu, Bixian Mai, Guoying Sheng et al. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: an overview. Chemosphere, 2003, 52:1411-1422.
99. Jiang, G.B., Zhou Q.F., Liu J.Y., Wu D.J. Occurrence of butyltin compounds in the water of selected lakes, rivers and coastal environments from China. Environmental Pollution, 2001, 115:81-87.
100. JUN JIN, Hao Peng, Tang Xiaoyan , An inventory of potential PCDD and PCDF emission sources in the mainland of China [J]. Nonthermal sources and source inventories, 2004, 66:852-858.
101. Khablt N R, Scheff P A, Holsen T M PAH source biogerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels and wood combustion emissions[J]. Atmosphere Environment, 1995, 29:533-542.
102. Lin-Chi Wang, Wen-Jhy Lee, Perny-Jy Tsai, et al. Emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from stack flue gases of sinter plants. Chemosphere 2003 ,50: 1123-1129.
103. Liping Yu, Bixian Mai, Xiangzhou Meng, et al. Particle-bound polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the atmosphere of Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 96-108.
104. Lois Gibbs and the citizens clearinghouse for hazardous waste. Dying from dioxin: a citizens guide to reclaiming our health and rebuilding democracy [M] .South End Press: Boston, 1995, 138-139.
105. Luo, X.J.; Mai, B.X.; YANG, Q.S.; et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in south China[J], Marine Pollution Bulletin, 2004, 48:1102-1115.
106. M.H. Wong, B.H.T. Poon. Source, fates and effects of Persistent Organic Pollutants in China, with Emphasis on the Pearl River Delta. The Handbook of Environmental Chemistry, Part O Persistent Organic Pollutants 2003, 3.
107. Mai B.X, Fu J.M., Zhang G., Lin Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Pearl River and Estuary, China: spatial and temporal

- distribution and sources. *Applied Geochemistry*, 2001,16:1429-1445.
- 108.Mai B.X., Sheng G.Y., Zheng L. et al. High-resolution sedimentary record of hydrocarbon contaminates in a core from the major reaches of the Pearl River, China. *Chinese Sciences Bulletin*, 2001, 45(Suppl.): 97-104.
- 109.Mai B.X.,Fu J.M. Sheng G.Y. et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China. *Environmental Pollution*, 2002, 117:457-474.
- 110.Mai,B.X.;Fu,J.M.;Sheng,G.Y.;et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta,China[J].*Environ.Pollut.* 2002, 117: 457-474.
- 111.McGregor DB,Partensky C,Wilbourn J,et al. An IARC evaluation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans as risk factors in human carcinogenesis [J] .*Environ.Health Perspect*, 1998,106(suppl.2): 755-760.
- 112.MSC-E contribution to the HM and POP emission inventories[R]. Technical Note 7/2001.Moscow:Meteorological Synthesizing Centre-East, 2001:7-25.
- 113.MSC-E&CCC. 2005. A. Gusev, E. Mantseva, O. Rozovskaya, et al, Persistent Organic Pollutants in the Environment, Emep.Status Report 3/2005.
- 114.Muir D.C.G., Omelchenko A., Grift N.P., Savoie D.A., Lockhart W.L., Wilkinson P., Brunskill G.J., Spatial trends and historical deposition of polychlorinated biphenyls in Canadian Midlatitude and Arctic Lake sediments. *Environmental Science and Technology*, 1996,29:89-109
- 115.National Atmospheric Emission Inventory.
http://www.naei.org.uk/pollutantdetail.php?poll_id=45&issue_id=5
- 116.Nestrick T J. Lamparski L L. Isomer-specific determination chlorinated dioxins for assessment of formation and potential environmental emission of wood combustion [J] *Anal. Chem.*, 1982, 54: 2292-2299.
- 117.Pacyna, J.M.; Breivik,K.; Munch,J.; et al.European Atmospheric emissions of selected persistent organic pollutants,1970~1995[J]. *Atmos.Environ.*2003,37: S119-S131.
- 118.Page D.S., Ozbal C.C, Lanphear M.E. Concentration of butyltin species in sediments associated with shipyard activity. *Environmental Pollution*, 1996, 91:237-243.

119. Paul M. Lemieux, Christopher C. Lutes, Dawn A. Santoianni. Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. *Progress in Energy and Combustion Science* 2004, 30 :1-32.
120. Pereira, W.E., Domagalski J.L., Hosteller F.D., Brown L.R., Rapp J.B. Occurrence and accumulation of pesticides and organic contaminants in river sediment, water and clam tissues from the San Joaquin river and tributaries, California. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15:172-180.
121. Pham T., Lum K., Lemieux C. Seasonal variation of DDT and its metabolites in the St. Lawrence River (Canada) and four of its tributaries. *The Science of the Total Environment*, 1996, 179:17-26.
122. Robert G. M. L. E. E., Petercoleman, Joannel. Jones, Kevinc. Jones, et al. Emission Factors and Importance of PCDD/Fs, PCBs, PCNs, PAHs and PM10 from the Domestic Burning of Coal and Wood in the U.K. [J]. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 1436-1447.
123. Ruiz J.M., Bachelet G., Caumette P., Donard O.F.X. Three decades of tributyltin in the coastal environmental Pollution, 1996, 93:195-293.
124. S. Kakareka, T. Kukharchyk. 2002. Expert estimates of PCDD/F and PCB emissions for some European countries. MSC-E Technical Note, <http://www.msceast.org>.
125. Safe S, Astroff B, Harri M, Zacharewski T, Dickerson R, Romkes M, Biegel L. *Pharmacol Toxicol*, 1991, 69:400.
126. Sergey V. Kakareka. Sources of persistent organic pollutants emission on the territory of Belarus. *Atmospheric Environment* 2002, 36:1407-1419.
127. ShanShan, Xu, WenXin, Liu, Shu Tao. Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in China [J]. *Environ. Sci. Technol.* 2006, 40, 702-708.
128. Sheffield A. Source and release of PCDDs and PCDFs to the Canadian environment [J] *Chemosphere*, 1985, 14: 811-814.
129. Steffi Richter, Bernt Johnke. Status of PCDD/F-emission control in Germany on the basis of the legislation and strategies for further action [J]. *Chemosphere*, 2004, 54:1299-1302.
130. Technology Transfer Network National Air Toxics Assessment; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, 2001.
131. The European Emission Inventory of Heavy Metal and Persistent Organic

- Pollutants for 1990[R]. UBA-FB report 104 02 672/03. Apeldoorn: TNO institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, 1997: 239.
132. Technology Transfer Network National Air Toxics Assessment; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, 2001.
133. Ulrich Qnass, Michael Fermann, Giinter BrSker. The European Dioxin Emission Inventory, Stage I [R]. Executive Summary, 96 / 771 / 3040 / DEB / EI, 2000, 1.
134. Ulrich QuaB, Michael Fermann, Gunter Broker. The European Dioxin Air Inventory Project-Final Results. Chemosphere2004, 54: 1319-1327.
135. UNEP, Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases [M]. Geneva, Switzerland, 2001: 1-194.
136. UNEP, Dioxin and Furan inventories – National and Regional Emissions of PCDD/PCDF[M]. Geneva. UNEP Chemicals1999. :1-100.
137. UNEP, Regional based assessment of persistent toxic substances – Region vii Central and North East Asia[A].in : UNEP Chemicals 11-13[C]. Switzerland: United Nations Environment Programme Chemicals. 2002:19-102.
138. USEPA Office of Research and Development. Estimating exposure to dioxin-like compounds[C]. vol.1:executive summary review draft, Washington DC, 1994:36
139. WHO. 1997.WHO toxic equivalency factor(TEF) for doxin-like compounds for humans and wildlife[M].
140. Wu W.Z ,Schramm K.W., Xu Y., et al. Mobility and profiles of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in sediment of Ya-Er Lake, China [J]. Water Research, 2001, 35(12): 3025–3033.
141. Wu W.Z, K W Schramm, Y Xu, et al. Contamination and distribustion of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans (PCDD/F) in agriculture fields in Ya-Er Lake area, China[J].Ecotoxicology and Environmental safety, 2002, 53:141-147.
142. Wu, C. Y.; Nelson, C.; Cabrera-Rivera, O.; Quan, J.; Asselmeier,D.; Baker, G.; McGeen, D.; McDonough, R.; Sliwinski, R.;Altenburg, R.; Velalis, T.; Judson, H.; Wong, P.; Wagemakers, J.;Moy, D. *Analysis of Air Toxics Emission Inventories for Area Sources in the Great Lakes Region*; U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, 2001.
143. Yang, H. H.; Lee, W. J.; Chen, S. J.; Lai, S. O. PAH emission from various industrial stacks. J. Hazard. Mater. 1998, 60, 159-174.

144. YingJun CHEN, GuoYing, Sheng, XinHui, Bi, et al. Emission Factors for Carbonaceous Particles and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Residential Coal Combustion in China. *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 1861-1867.
145. Zhang G., Qi S., Parker A., Li X., Li J., Wang X. Distribution of organocarbons in soil from the Pearl River Delta, South China, Abstract on the 3rd Asia-Pacific Symposium on Environmental Geochemistry, Guangzhou, China, 2001:93.
146. Zheng, M.H., Bao, Z.C., Zhang, B., Xu, X.B., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in paper making from a pulp mill in China. *Chemosphere* 2001, 44, 1335-1337.
147. Zhou J.L., Maskouli K., Qiu Y.W., Hong H.S., Wang Z.D. Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of Daya Bay, China. *Environmental Pollution*, 2001, 113:373-384.

已公开发表的论文和成果

1. 王翠萍, 匡耀求, 黄宁生, 刘宇, 许连忠. 广东火电厂大气污染物排放现状. 中国人口资源与环境, 2006, (中国可持续发展研究会 2006 年学术年会专刊): 1133-1136
2. 王翠萍, 匡耀求, 黄宁生, 刘宇, 许连忠. 广东火电厂排放的大气污染物分布特征. 地球与环境, 2007; 35 (1): 69-73
3. 王翠萍, 匡耀求, 黄宁生, 刘宇, 唐金利, 肖慧娟. 区域二恶英排放量估算模型的建立及其初步应用. 见: 澳门工程师学会, 广东科学技术协会, 香港工程师学会编, 泛珠三角城市的持续发展, 第三届粤港澳可持续发展研讨会文集, 2006, 澳门, 158-164
4. 匡耀求, 唐金利, 王翠萍. 广东 21 个地级与地级以上城市现代化水平测评. 见: 梁桂全 谢名家主编: 《2005 年: 广东现代化进程蓝皮书》, 广州: 广东经济出版社, 2005, 1-36
5. 刘宇, 匡耀求, 黄宁生, 吴志峰, 王翠萍. 水泥生产排放二氧化碳的人口经济压力分析. 环境科学研究, 2007; 20 (1): 118-122

致 谢

值此毕业之际,回首三年研究生学习生活,我的内心充满对中科院研究生院和广州地化所老师的感激之情。感谢各位老师认真、亲切的教诲和指导,感谢老师在生活中给予我热心的帮助。

首先感谢我的导师匡耀求研究员和黄宁生研究员,本论文是在两位老师的悉心指导下完成的,在论文选题,工作进展和论文撰写各方面都对我进行了细致、深入的指导。两位老师广博的专业知识,严谨的治学态度,创新的思维方法,敏锐的观察力,高尚的人格魅力让我叹服,令人尊敬。老师教育我要“踏踏实实,一步一个脚印的做好自己的工作”;治学科研要“大胆地假设,小心地求证”。老师的教导我铭记于心,它将是我今后工作和学习的指路明灯。在日常生活中,老师也同样给予我无微不至的关怀。在此千言万语也无法表达我对恩师的感激之情!

感谢朱照宇老师、吴志峰老师、欧阳婷萍师姐三年来在学习和生活上给予我热情的指导和帮助。特别感谢中科院能源研究所李海滨老师亲切耐心地解答我的疑问,并热情地给予指导。感谢麦碧娴老师和地化所第二届研究生学术论坛的其他评委老师对我的指导。

感谢刘宇师兄、唐金利和肖惠娟师姐、许连忠师兄、吴玉琴师姐、邓玉姣师姐、宋金芳师姐、马娅师妹、杨晓飞师弟在我的学习和生活中给予我诸多支持、鼓励和帮助。特别感谢刘宇师兄两年来的帮助,师兄踏实认真的学习态度和宽厚的为人处事是我的榜样。三年学习生活我们师兄弟姐妹朝夕相处,一起探讨问题,互相帮助,共同进步。我们之间深厚的情谊是我人生的宝贵财富。

感谢研究生处马跃良老师、孙静林老师、李燕老师在学习和毕业时给予的帮助。

感谢复印室胡巧老师和收发室霍老师给予我的热情地关心和鼓励。感谢图书馆、所办、网络中心、图像采集的老师和工作人员在生活中给予的大力支持和帮助,在此谨表谢意。

感谢中科院 2004604 班全体同学,感谢广州地化所太极协会、瑜伽协会和健美操队,三年的生活留给我许多美好的回忆。

特别感谢我的父母,感谢您毫无怨言的辛苦付出,感谢您给予我的爱和教育,感谢您把我培养成国家有用的人才。感谢我的兄弟姐妹,感谢你们的鼓励和支持,感谢您们给予我的温暖和亲情。感谢我的男友王浩杰对我的支持、包容和照顾。

再次向一直关心和照顾我的所有老师,亲人和朋友致以我深深的谢意!

王翠萍

2007 年 5 月 于中国科学院广州地化所