

摘 要

本文研究了贵阳市黄壤菜地表土层、心土层、根际与非根际土壤理化性质的区域变异特征，分析了菜地土壤理化性质及重金属含量与蔬菜重金属含量的相关关系，评价了菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况，探讨了贵阳市菜地土壤特性的区域变异原因及其对环境的影响。得出的主要结论如下：

(1) 贵阳市不同区域之间的菜地表土层多为重壤土，菜地物理性粘粒、毛管孔隙度、非毛管孔隙度存在明显的差异，其余土壤物理性质的差异不明显。各区域的菜地表土层呈中性或弱酸性，菜地表土层阳离子交换量有近郊区高于城区和远郊区的趋势，其平均值均在 $17\text{Cmol}(+)/\text{kg}$ 以上，属于中上等保肥水平。城区菜地表土层有机质、全氮和碱解氮含量高于近郊区和远郊区并达到显著性差异；城区表土层有机质均值达到 $117.4\text{g}/\text{kg}$ ，是远郊区土壤的 3 倍。钾素含量是远郊区 > 近郊区 > 城区。

(2) 贵阳市菜地土壤的大部分特性指标是根际 > 非根际，只有土壤 P 素和 K 素含量表现为根际 < 非根际。

(3) 贵阳市不同区域菜地土壤的理化性质基本上表现为表土层 > 心土层，表明土壤养分含量等特性在菜地土壤表层有明显富集现象。

(4) 贵阳市菜地土壤重金属含量呈现出城区 > 近郊区 > 远郊区的趋势，但均未达到显著差异。3 个区域表土层受 Hg 污染最严重，远郊处于警戒状态，近郊已处于轻度污染，城区则受到重度污染；其次是受 Cr、Pb 污染，未受到明显的 As、Cd 污染。3 个区域菜地心土层的重金属多因子综合污染指数是城区 > 郊区 > 远郊区，其中除了城区土壤中的 Pb 达到了轻度污染，Cr 达到警戒状态外，其余各重金属的单因子综合污染指数均小于 0.7，说明心土层尚未受到污染。

(5) 贵阳市菜地蔬菜中重金属含量也表现为城区 > 近郊区 > 远郊区，但均未达到显著差异。蔬菜中 Hg 和 As 污染较重，而 Cd、Cr 含量没有超标。

(6) 不同区域菜地土壤上生产的蔬菜中 Pb、Cr、Cd 含量相互之间存在着极显著的相关关系，但各重金属的含量在蔬菜与土壤之间没有达到显著的相关性。

(7) 菜地土壤 pH 值、CEC 值的高低对蔬菜吸收 Cr 和 Hg 有一定影响，对其吸收 Pb、Cd、As 几乎没有影响；有机质含量较高的土壤上生产的蔬菜中 As、Hg

和 Cd 含量较高，说明菜地土壤有机质对蔬菜吸收重金属 As、Hg 和 Cd 具有一定影响；土壤速效 K 对蔬菜吸收重金属的影响不大，但有效磷对其吸收重金属有一些影响。除了 As 外，碱解氮对蔬菜吸收其他重金属有一定影响。

关键词：贵阳市；菜地；土壤特性；区域变异；蔬菜品质；相关性

图书分类号：

Area Variation of Soil Characteristics in Vegetable Plots of Yellow soil and its impact on the quality of the vegetables in Guiyang

Summary

This paper studied regional variability of vegetables soil physical and chemical nature about the surface soil, the soil hearts, the rhizosphere and non-rhizosphere soil in the yellow soil in Guiyang city. And it analyzed contents of heavy metals in soils and the relationship of them in vegetables and soil, and evaluated contamination by heavy metals in vegetables and soil, and discussed the main reasons for the regional variations of the soil properties and their effects on the environment. The main conclusions was as follows :

(1) Most vegetables surface soil was heavy loam, and there existed conspicuous differences on the soil physical clay, soil capillary porosity and non-capillary porosity in the different regions, but the difference of other soil physical properties were not obvious. The vegetable soil assumed the neutrality or the weak-acid, and the difference in areas was not big. There was the trend that CEC (Cation exchange capacity) in vegetable soil in suburb was higher than that in urban and rural area, which its mean value was $17\text{Cmol}(+)/\text{Kg}$ above, belonging the superior level on holding fertilizer. The content of soil organic matter, total N and hydrolyzed N in urban area was higher than that in suburb and rural area, reaching significant variation. The mean value of soil organ matter in urban area reached on $117.4\text{g}/\text{kg}$, which was three times of it in rural area. And the content of Potassium element in vegetable soil was the most in rural area, and secondly was suburb.

(2) Most indicators of the soil properties in rhizosphere were more than non-rhizosphere, but the content of P and K in the soil rhizosphere were more than non-rhizosphere .

(3) Most indicators of the soil properties in surface soil were more than heart soil in vegetable soil in Guiyang, and it sames to the different areas, showing that the soil nutrient content and other characteristics of the surface soil significantly enriched.

(4) The levels of heavy metals in soil in urban area were the most, but not have significantly different in the three areas. Hg was the most main contaminant, followed by Cr and Pb, and As, Cd are not obvious in 3 area; The multi-factor of heavy metal pollution in the heart soil was same to the surface soil. With the exception of Pb pollution of soil in urban reached a mild, Cr achieve alert, the one-pollution index of in the rest of heavy metals was less than 0.7, indicating the heart soil had not been contaminated.

(5) The levels of heavy metals in vegetables were most in urban area, but not had significantly different in the three areas. Hg and As were the main contaminant

in vegetables and Cd, Cr are not exceeding.

(6) There were also significant correlations on Pb, Cr, Cd in vegetables. However, the content of heavy metals in soil and vegetables were not statistically significant correlation.

(7) The CEC and pH affect that Cr and Hg were absorbed in vegetables, but which not affected on Pb, Cd and As. The contents of As, Hg, and Cd in vegetable were high if the content of organic matter in soil is high, noting the increase of soil organic matter will affect that As, Hg, and Cd is absorbed in vegetables. Soil available K was not much impact on vegetable absorbing heavy metals. But P had some impact on vegetable to the absorption of heavy metals. The heavy metals As addition, the alkali - soluble nitrogen had a certain influence on other vegetables absorbing other heavy metals .

Key words: Guiyang city; Vegetable plots; Correlation; Area variation; Soil characteristics; Vegetable quality

蔬菜是人们生活中必不可少的食物，也是十分重要的经济作物。菜地土壤理化性质的变化将直接影响着蔬菜的产量及品质。随着城市工业的发展，工业“三废”、城市垃圾、生活污水、汽车尾气的排放及农药、化肥的不合理使用，大大加重了土壤的环境压力，极大的加剧了土壤理化性质的变化，进而影响蔬菜的品质以及对人类的健康带来了潜在的危害。菜地作为人类耕作活动极频繁的土地利用方式，在区域经济发展不平衡性的影响下，必然导致土壤特性的空间不平衡性，因此开展不同区域菜地土壤理化性质的空间变异研究具有重要意义。本文着重研究贵阳市黄壤菜地生态系统土壤特性的区域变化规律及其对蔬菜品质的影响，有助于掌握贵阳市黄壤菜地土壤环境质量状况，为绿色蔬菜基地建设提供科学依据。

1 土壤空间变异研究概况

1.1 土壤空间变异的概念

土壤-植物系统是陆地生态系统最基本的结构单元，也是生态系统物质能量循环的枢纽。自然界土壤分布极为复杂，受土壤母质、气候、水质，尤其是人类活动等因素的影响，同一质地的土壤在不同区域、不同土层深度、或根际与非根际上其土壤特性参数，如容重、粒径组成、有机质、pH、肥力、重金属含量等都不尽相同。这种土壤特征在空间分布上的非均一性，称为土壤特性的空间变异性。土壤特性在空间上分布不均匀就会导致空间上的植物生长不均衡。

1.2 土壤空间变异的国内外研究现状

1.2.1 在土壤物理特性空间变异上的应用

研究土壤物理性质的空间变异性能促进土壤学定量和动态研究的深入及许多新技术的实际应用。国外自 20 世纪 60 年代就已经利用地统计学研究土壤水分、机械组成、容重等方面的问题，近年来研究有所深入。Dirk 等（1995、1996）用地统计学方法得到除土壤粘粒外各种土壤化学性状都有相似规律的结论，并模拟出土壤电导率最优采样间距的空间预测模型。TsegayL（1998）通过研究认为精耕细作能够影响土壤物理属性的空间变异性，进而影响取样间距的大小。吕军等（1990）利用时间序列分析方法和随机统计理论研究了水稻土物理性质田间实际观测值的变异特性，着重讨论了它们在二维平面上的空间变异结构。冯娜娜等（2006）利用地统计学方法，在两个尺度下对繁顶山茶园土壤颗粒组成的空间变

异性进行了研究。结果表明：小尺度下土壤颗粒组成各粒级均具有强烈的空间相关性，微尺度下只有粘粒具有强烈的空间相关性。随着研究的不断深入，研究方向由纯粹的土壤物理特性空间变异研究逐渐向应用研究成果转移。如通过研究土壤水分的空间变异性来确定田间中子仪埋设的数目、间距及位置，从而制定科学合理的灌溉方案，为实现精确灌溉奠定试验和理论基础。

1.2.2 在土壤养分空间变异性上的应用

目前，土壤养分空间变异的研究是土壤化学性质空间变异性研究的主体部分。开展土壤养分空间变异性研究对于科学合理地制定农田施肥方案，提高养分资源利用率，促进变量施肥技术的发展，实现精确施肥都具有重要意义。

美国、加拿大等国家的精确农业研究已初有成效，变量施肥技术发展也很快，这与他们对土壤空间变异性研究的重视是密切相关的。许多报道描述了土壤养分、土壤盐分、pH 值及有机质等化学属性的空间变异情况。近几年，国内开始采用美国标准进行变量施肥，一些土壤科学家开始了土壤养分空间变异性的研究，如表土全氮量的半方差，有机质含量的半方差模拟。和爱玲等（2006）采用传统统计和地统计相结合的方法，对 55hm² 菜田耕层土壤养分空间变异特征进行了研究，结果表明，土壤养分的主要限制因子是 N、P、K 和 Zn。梁中龙（2006）等以广州郊区岑村为例，采用 GIS 与地统计学相结合的方法对城郊耕层土壤（0—20cm）的有机质、全 N、全 P 和全 K 的空间变异特征进行了分析，结果表明几种土壤养分具有很强的空间相关性和异质性特征。

1.2.3 土壤重金属空间变异的研究

土壤重金属的空间变异的研究是对土壤中重金属元素的起伏变化特征、趋势走向及不同方向的差异性空间结构特征的探讨，它既是土壤化学特性空间变异性的研究内容，又是土壤环境质量评价及重金属污染评价的基础。土壤重金属元素空间变异性的研究方法大致有 3 种：时间序列分析法、随机方程法及地统计学法。其中地统计学法的应用在近年来得到了较大的发展，并逐渐成为一个热门的研究方向。White（1997）等对美国土壤锌的含量分布进行了半方差分析，发现其空间的自相关距离为 470km，虽然模型的拟合程度不高，但仍可用 Kriging 插值作出美国土壤锌的分布图。在我国直到 20 世纪 90 年代才有一些科学家将其应用在重金属的研究上。王波等（2006）利用地统计学和 GIS 相结合的方法，对河北省迁安市农田土壤耕层（0~20 cm）8 种重金属含量的空间变异性进行了研究，

结果表明，农田中 8 种重金属含量均值未超过土壤环境质量(GB15618—1995)二级标准，属于中等变异。

1.2.4 菜地土壤区域空间变异的研究现状

土壤的复杂性决定了任何一种方法都无法解释土壤空间变异研究中的所有问题，地统计学方法在土壤空间变异研究中也存在着一些问题：在理论上，没有严格的判别标准来判定土壤性质的空间变异性是否符合内蕴假设的条件，半方差函数模型的选择有一定的主观性。

因此，对于土壤特性的复杂多变性，从不同角度研究土壤空间变异，有利于系统、合理地解释各种现象。如从环境保护角度研究农药、重金属在土壤中的空间分布及运移规律，从生态学角度研究土壤区域分布及土壤侵蚀，从植物营养角度研究土壤养分的空间变异特性及作物生育期内吸收利用养分的变异等。随着土壤空间变异研究的日益深入，学科的交叉越来越广泛，对土壤空间变异现象的解释也越来越全面，越来越为人所接受（李亮亮，2005）。

本文就是希望在区域分布上揭示菜地土壤特性的空间变化规律。目前国内关于此类相关研究也较多。

何腾兵（2000）等测定了贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒根际和非根际土壤的理化性质，探讨了适宜花椒生长的土壤特性，提出了发展花椒生产的主要技术措施。房世波等（2003）分析了南京市郊菜地土壤肥力及重金属的空间变化和时间变化的规律，并对肥力和重金属的时空变化原因进行了剖析，得出城市化促进了菜地土壤肥力的空间变异，城区全 P、有机质和全 N、重金属等较郊区和远郊区偏高。姚丽贤等（2004）通过地统计学、空间分析方法及结合农户施肥调查，对广州市一蔬菜基地土壤养分的空间变异特征进行研究，认为土壤各养分的空间变异结构有较大区别，土壤 OM 及 NH_4^+-N 的变异具有强烈空间相关性，土壤 P、K、Ca、Mg 和 S 养分含量的变异为中等空间相关性。周建斌等（2004）连续 2 年对陕西杨凌地区设施栽培菜地土壤剖面的养分含量进行了测定，对设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应做了研究。葛晓光（2004）等研究了长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统的变化，分别对土壤有机质、土壤理化性质、蔬菜生态系统等方面的变化做了系统的分析。张学利等（2005）对章古台不同林龄樟子松固沙林根际土壤和非根际土壤进行了对比研究。王彩绒等（2005）对太湖典型地区宜兴市老蔬菜基地土壤 P 素淋失风险进行了研究，针对土壤状况，提出了控

制菜地 P 淋溶对策。黄辉等 (2006) 基于野外土壤调查与样品分析数据, 应用数理统计分析方法, 揭示了南通市城市边缘带土壤肥力特征、影响因素、变化趋势以及时空规律。

2 研究目的和意义

2.1 土壤空间变异的影响因素

土壤特性的系统变异是由母质、气候、水文、地形、生物、时间、人类活动等差异引起的, 而随机变异是由取样、分析等误差引起的。

2.1.1 气候

气候是影响土壤特性空间变异的基本因素。气候支配着成土过程的水热条件, 直接和间接地影响着土壤形成过程的方向和强度, 而土壤特性空间变异程度决定于土壤形成过程以及其在空间和时间上的平衡, 因而气候的差异会对土壤特性空间变异产生强烈的影响。由于地球上的气候条件变化频繁, 大多数土壤都是各种成土过程交互作用的结果, 导致土壤特性空间变异现象相当普遍。

2.1.2 母质

土壤母质对土壤特性变异有较大影响。土壤母质是土壤形成的基础, 往往由于母质的差异而致使土壤特性存在着较大的变异, 母质差异小, 土壤特性空间变异也小。一般认为, 在没有人造因素影响的情况下, 母质养分含量高, 土壤中养分含量也会较高。但在特定区域内, 由于气候条件等比较一致, 经过长期比较一致的种植和管理后, 土壤特性空间变异将趋于缓和, 即由于母质差异等引起的变异逐渐减小, 可形成表面上大体一致的区域。

2.1.3 地形

地形与土壤特性变异有直接的关系。地形影响水热条件和成土物质的再分配, 因而不同地形位置有着不同的土壤特性。目前的研究结果表明, 地形对土壤肥力和有效水有较大影响, 在坡度相似的位置, 土壤特性趋于相似。在复杂的丘陵地区, 土壤物理特性如粘粒含量、砂粒含量和 pH 与地形位置均有高度的相关性; 土壤有机质随山坡位置变化而变化。地形是影响 NO_3^- -N 的重要因素, 而土壤磷与地形的相关性较差。

2.1.4 人类活动

人类活动对土壤特性变异也有较大影响。农业生产中的施肥(化肥或有机肥)、

作物品种、灌溉及其它的一些生产管理措施都是使土壤特性产生较大变异的因素。作物对养分的吸收、养分本身在土壤剖面中的淋洗及土壤酸碱调节剂的应用都会引起土壤特性的空间变异。在土壤免耕和肥料条施情况下，由于作物残茬、相对不易移动的磷钾等肥料及养分残留在土壤中分布的不均匀性增加，致使土壤肥力特性变异增大；灌溉水质的选择也不容忽视，现今受工业及人类生活的影响，农业灌溉水质中含有大量的 N、P 等养分及重金属、细菌等其他有害物质，对农田的影响颇大。人类对施用农药化肥的选择及其使用方式，也对土壤空间变异造成影响。

2.2 土壤空间变异的研究意义

2.2.1 在施肥上的意义

土壤空间变异对土地资源利用、农业技术推广的重大影响，已得到越来越普遍的重视。近几年，土壤性质的空间变异性研究已成为土壤营养元素空间分布、精准施肥、土壤质量评价、农业土壤环境污染调查等重要的研究手段。精确施肥技术可使低肥力区域产量增加和高肥力区域节省肥料成本，因而能获得较高的经济效益，应用精准施肥技术可使氮肥利用率达到 60%以上。国内也有一些研究者应用 GPS、GIS 等先进技术从事有关该方面的工作。杨俐苹等（2000）采用网格取样方法对河北省邯郸市陈刘营村棉花土壤养分精准管理研究表明，精准平衡施肥比当地习惯施肥增产 19.8%，增加经济效益 5315 元 / hm^2 。黄绍文等（2003）对县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术进行的研究报道，土壤 N、P、K、Mn 和 Zn 的空间相关距离在 14~28 km 之间，分区平衡施肥技术在小麦和玉米上使产量分别平均增产 12.5%和 16.8%，使经济效益分别平均增加 784 和 1053 元 / hm^2 ，使氮肥利用率分别平均提高 12.7 和 13.1 个百分点。土壤硝态氮或土壤无机氮作为土壤有效氮的指标日益受到重视。因此，在推荐氮肥用量时，主要考虑土壤 NO_3^- -N 的含量，并结合考虑土壤有机质的含量（和爱玲，2006）。

2.2.2 城市菜地土壤区域空间变异研究意义

城市化的发展使得人类对土壤的活动更加频繁。城市内主要是工矿区的聚集地，其周边蔬菜基地的发展很大程度上受工矿厂的影响。城市近郊区作为城市与乡村经济活动交互作用界面，土地利用类型的多样性、空间结构的复杂性及高度可变性，为这一特殊的地理区域的土壤资源保护、利用与管理带来严峻挑战。由

于具有巨大的市场和科技优势，城市边缘带一直是鲜活农产品最主要的生产与供给基地，城郊型农业集约程度高、土壤资源利用强度大、利用方式多样，因此土壤质量在空间结构上的分异均较其他地区强烈（陈杰，2002）。乡村等远郊区菜地生产水平较城区、近郊区低，但随着交通的便利，远郊区菜地的蔬菜生产也成了近郊区蔬菜生产的后备军。城市化的发展对于菜地的影响程度与城、近郊区、远郊区的菜地有何空间差异，是我们研究的内容之一。

（1）认真研究这些区域的菜地土壤特性空间变异，可以深入了解城市各区域菜地的土壤基本情况，比如酸碱性、肥力、营养元素是否平衡，以便科学合理的制定施肥方案，提高养分资源利用率。

（2）随着城市的发展，我们也担心在关注菜地重金属污染的基础上忽略了菜地土壤特性的变异，因此对于菜地土壤特性空间变异性研究还有利于防止城市化进程对土壤环境质量的影响。

2.3 土壤环境效应

城市发展的同时，给环境带来的负面影响是明显的。目前工业废水、生活垃圾、农药化肥等带给土壤的环境压力也日益增加。众所周知的是，目前的技术水平不能广泛应用到处理工厂排出的含高 N、P 的污水上，N、P 含量过高又将给土壤及水体造成“营养过剩”的压力（张涛，2005）。

2.3.1 重金属污染

目前关于菜地土壤重金属污染的研究与评价非常的热门，这说明重金属的污染已经严重影响到土壤环境质量，直接影响到作物的生长及品质，间接危害了人类的健康。重金属污染的污染源主要是工业废水、生活垃圾、农药化肥的不合理施用。

（1）汞。汞存在于塑料工业、电池工业和电子工业排放的污水中。如果农田已被污染，可用石灰肥料，将土壤的 pH 值提高到 6.5 以上，可使汞形成难溶的化合物。施用磷肥也是降低土壤中汞生物有效性的一种有效的方法。据有关研究资料，土壤中的汞容易残留在水稻糙米中，而不易积累在小麦等旱田作物中，因此，可在旱田灌溉含低汞的污水。

（2）镉。污水中镉的来源是有色金属冶炼、电镀、玻璃、油漆、化工、医药等等工业排放的污水。植物中镉的含量超标就会使作物的叶子发黄，影响叶绿

素的形成。对于被金属镉污染的农田应采用排土法、客土法，如污染不严重的农田可以施用石灰肥料和磷肥，可使土壤中的镉变成难溶态，降低其生物有效性。

(3) 铅：污水中铅的来源是冶金、电镀、电子、油漆等工业排放的污水，人们食用被铅污染的食物将会引起铅中毒。对于已被铅污染的农田，可采取排土法、客土法进行治理，对污染不严重的农田可以用石灰肥料、磷肥使铅呈难溶态，从而达到治理目的。

(4) 砷。砷主要来源于冶炼、皮革、涂料、化肥、造纸、纺织等工业排放的废水。如果土壤中含砷的含量超标会抑制作物生长。在砷污染严重的农田可采用排土法、客土法。一般旱田作物要比水稻的耐砷能力强些。在砷污染较弱的地方可以种植一些耐砷的作物。

2.3.2 菜地土壤 N、P 的过剩危机

氮素是农业生长必须的物质，在某种情况下利用含氮素的污水灌溉可以弥补氮素的不足，是有利于农作物生长的。但如果氮的含量过高，会使作物抗倒伏能力降低易患虫病。作物在含氮量大于所需要的量时，会有一部分转化呈亚硝酸，亚硝酸的含量过多会引起高铁血红蛋白症，在一定的条件下还会转化成亚硝氨，它能引起人体或动物的恶性肿瘤。土壤中过多的 N、P 将随着雨水流入河流或渗漏到地下水中，造成更严重的水污染。

2.3.3 其他污染

有机氯化物主要来源于石油、化工、农药制造等行业排放的污水，有机氯化物挥发性小，残留时间较长，难以被降解，所以很容易在农作物及人体中相互循环，保存在食物链中。所以应引起重视，严格限制排放。

酚主要来源于石油、化工有机合成和造纸等行业排出的废水，在一般低浓度下不会有太大的危害，但酚的含量过高则会对作物的质量有影响。

酸、碱、盐。含这 3 种物质的废水主要来源于采矿、化工、食品等部门的排污，用含这 3 种污染的水可以改变土壤的 pH 值，造成土地的盐碱化。

许多废水中特别是生活污水含有大量的有害微生物，被灌溉的土壤会成为病源的传染地，将会给人类和家畜的健康带来很大的影响，所以应在灌溉时引起注意，当病菌及微生物严重超标时不适宜灌溉。

2.3.4 污水利用

在很多地区虽然利用了污水灌溉，但对如何正确地利用污水灌溉没有足够的认识，这样容易出现一些误区，有的城镇是不经过任何处理，不管水质含有哪些有害物质，拿来就灌，这样就会造成农作物的严重减产甚至绝产。土壤对一些有机物的净化和分解是有限度的，有些污染物存在土壤里很难降解，甚至使土壤的土质发生变化，造成土壤板结。污水灌溉利用不当还易造成地下水污染，将影响到人们饮用水的质量，产生生态环境的问题。所以应正确地利用不同成分的污水来灌溉，农作物不同的生长期，所需的养分各不相同，比如在许多作物初期，如果养分含量过高，会把苗烧死。而在棉花、小麦等作物在成熟期时，用含养分高的污水灌溉造成作物徒长，易感染病虫害，造成减产。在我国，一般的灌区都没有污水监测系统，对污水的了解不足，其中的含量成分也不十分清楚，缺乏一个长期的规划，这样就不利于正确地利用污水灌溉。

2.3.5 污水灌溉应注意的事项

首先应建立一套完整的污水管理措施，在灌溉前要对污水进行监测，对于那些不适合灌溉的污水做到坚决不用；对于污染物超标的污水应进行净化处理，防止有毒物质污染农田，同时也要控制其排放量，要防止污水灌溉的量过大，从而渗入深层土壤，引起地下水污染。

在利用污水灌溉前，要对所灌溉的土壤进行检测，以便以后对照土质的变化情况，还应该对该地区的地下水进行定期的监测，如发生变化及时采取补救措施，同时也应该对该地区的居民身体进行健康检查。总之，利用污水灌溉既要变废为宝，又要不危害生态环境和人们的身体健康，使废水能够进入良性的水资源循环中。

2.4 本研究的目的是和意义

蔬菜种植是一种高度集约化的农业土地利用方式，其农药、肥料、农膜等农业生产资料的投入是一般粮食作物的数倍甚至数十倍。菜地施肥往往具有肥料施用量过大，N、P、K 比例不协调的特点。超过蔬菜生长需求的土壤养分还会造成肥料资源的大量浪费，滞留在土壤中的养分还会造成土壤的“富营养化”和养分的“非均衡化”。土壤中大量易溶于水的 NO_3^- -N、速效 P 不仅影响农产品的品质，而且往往还成为周边大气和水环境的污染源。

目前，我国蔬菜的播种面积已经超过 $1.1 \times 10^7 \text{hm}^2$ ，占全国农作物播种面积的

1/10，因此，需要对菜地的土壤养分状况进行调查研究，以便能够为建立科学的平衡施肥制度和合理的耕作管理体系提供依据。

本研究以同一母质发育的菜地土壤为研究对象，根据其蔬菜地离贵阳市中心的距离不同划分为城区、郊区、远郊区 3 个区域，采集土壤样品进行土壤特性的空间变异研究，包括不同区域土壤特性的变异、根际与非根际土壤特性的变异、剖面上不同深度土壤特性的变异等，通过对菜地土壤理化性质差异的研究，了解菜地土壤特性（理化性质、重金属含量）的变异规律，同时测定对应的菜地土壤上生产的蔬菜中养分元素和重金属元素的含量，探讨其生物有效性。

随着科学技术以及城镇化的发展，环境污染已经涉及了人类生活的方方面面，农产品的安全性问题也日益被受关注。贵州是我国西部大开发的重点省份，而贵阳地处黔中腹地，是经济、文化、政治交流的中心。因此对贵阳市菜地土壤特性的研究将对发展无公害农产品有着极其重要的意义。

（1）土壤是人类赖以生存和发展的宝贵资源，但近年来的土壤重金属污染已经严重影响到农产品的质量。土壤的理化性质对土壤中重金属污染有着很大影响，研究其土壤理化性质的空间变异可以为贵阳市菜地土壤重金属污染防治及无公害农产品生产提供基础数据资料。

（2）土壤特性普遍存在着空间变异，作物生长所需的养分主要来源于土壤，土壤特性的空间变异是造成作物产量甚至作物品质变异的重要因素。因此，开展土壤特性空间变异性研究对于科学合理制定农田施肥方案，提高养分资源利用率，促进施肥技术的发展，实现精确施肥都具有重要意义。

（3）贵阳市作为中国西部重点发展的城市，正在建设生态城市，但关于其城市化进程中菜地土壤特性的变化规律尚未见报道，因此，本文对贵阳市黄壤菜地生态系统土壤特性的区域变化规律进行研究，探讨土壤特性对养分元素和重金属元素的生物有效性，有助于掌握贵阳市黄壤菜地土壤质量状况，为绿色蔬菜基地建设提供科学依据。

3 研究方法和技术路线

3.1 土壤特性空间变异研究方法

土壤空间变异一直困扰着土壤学家。如测定土壤某些性质时，如何确定田间合理取样尺度和取样数目，如何使土壤过程的预测、模拟更接近复杂的农田土壤变化情况，如何更好地理解空间作用对土壤作物关系的重要性等等。如何解决这些问题，成为土壤学家思索的问题。

3.1.1 传统的解决办法

传统的解决办法是按土壤质地将土壤在平面上划分为若干较为均一的区域，在深度上划分为不同层次来描述土壤空间变异。虽然在一定程度上描述了土壤的空间变异情况，但很多情况下难以确切地描述土壤性状的空间分布。

3.1.2 地统计学方法

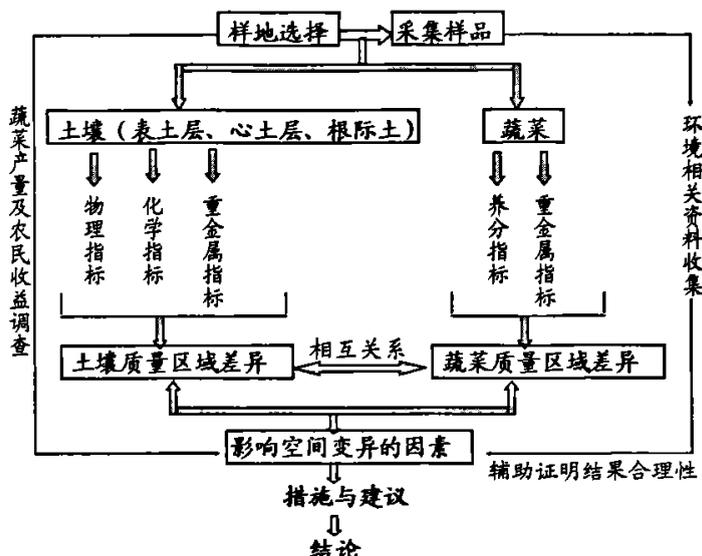
20 世纪 70 年代，在地质矿产部门广泛使用的地统计学方法被引入土壤科学研究领域，并在土壤空间变异研究中取得了良好成效。作为土壤空间变异研究方法之一，对解决上述问题提供了一条较为合理的途径，进而推动了土壤科学量化研究与精确农业的实施（李亮亮，2005）。

3.1.3 本文的研究方法

选择有代表性的地块是土壤性质观测的基础和关键，土壤性质的空间异质性及取样的合理性往往成为影响观测质量的关键性因子。

本文采用田间调查取样与室内化验统计相结合的方法开展研究工作。研究对象是贵阳市不同区域的黄壤蔬菜基地，在空间上主要表现为星罗棋布的城镇、交通和工业用地之间夹杂着呈碎块状分布的农用地，而菜地又分布在农用地中，其分布比较零散，不适宜采用网格法进行研究。因此本文是把贵阳市划分为城区、近郊区、远郊区 3 个区域来研究土壤特性因城市化进程造成的变异，寻找其变异规律。这种方法虽然不能够精确地了解菜地土壤特性，但是能在大体上了解贵阳市菜地土壤因区域不同而产生的土壤特性空间差异，同时分析引起贵阳市菜地土壤空间变异的主要原因。

3.2 技术路线



3.2.1 样地选择原则

在满足《农田土壤环境质量监测技术规范》要求的前提下，样地选择要遵循下列原则：

(1) 样地选择要体现一个区域的特征。在收集贵阳市各区域菜地的相关文字和图片资料的同时，对贵阳市黄壤菜地分布状况和蔬菜生长环境特征进行路线调查，初步确定采样地点。

(2) 样地选择要排出点源污染的影响，即凡是已知或怀疑有次生成矿作用污染及其它人为影响明显的地区，不设采样点。如：在采集样品时，应尽可能避免采集工矿企业污染物排放点，尽可能避免采集刚施肥的土壤。

(3) 既要具有代表性，又要照顾均衡性，即：样地要尽量布设在能代表该区域特征或代表该环境单元的地块。

(4) 蔬菜样品的采集：选择对应菜地土壤上生长的成熟蔬菜，不同区域采集的蔬菜种类相同，并不刻意选择长势最好或最劣的蔬菜，随机选取具有代表性长势的蔬菜。

3.2.2 样地布设方法及样地情况

样点的布设合理与否直接影响分析结果的代表性和最后所得结论的准确性，为此在采样之前拟定了野外样点的布设原则和具体的布设方法。选择贵阳市黄壤蔬菜基地的土壤作为研究对象，根据蔬菜基地的分布状况和离城市中心的远近不

同，把贵阳市划分为城区、近郊区、远郊区 3 个区域，分别在贵阳市白云区、花溪区、清镇、惠水等地区选择样地，在各区域内选择具有代表性的蔬菜基地作为土壤和蔬菜样品的采集地，同时选择极少受到环境污染的林地作为对照。为了保证土壤特性的可比性，所选择的样地土壤母质基本一致，主要为第四系黏土或老风化壳，在建立蔬菜基地之前的土壤类型为黄壤旱地或黄壤性水稻土。供试土壤和蔬菜样地的基本情况详见表 3-1 和表 3-2。

表 3-1 供试样品采样地基本情况（一）

Tab3-1 The general situation of the base

地点	区域	经度	纬度	海拔 (m)	种植年限	产量
白云区白云寺	城区	106° 38.684'	26° 41.089'	1289—1301	35	低
		106° 39.438'	26° 41.598'			
清镇市后午镇	城区	106° 26.827'	26° 31.481'	1180—1282	35	低
		106° 26.926'	26° 32.619'			
花溪贵大北区校门口	近郊区	106° 40.397'	26° 26.781'	1025—1030	25	中等
		106° 40.476'	26° 26.537'			
青岩镇南街村	近郊区	106° 40.978'	26° 19.577'	1080—1075	30	高
		106° 40.735'	26° 16.519'			
惠水县长田村	远郊区	106° 40.801'	26° 16.910'	1075—1080	20	中等
		106° 40.735'	26° 16.969'			
白云区沙文镇	远郊区	106° 41.352'	26° 43.621'	1324—1339	20	一般
		106° 41.666'	26° 43.920'			

表 3-2 供试样品采样地基本情况（二）

Tab3-2 The general situation of the base

区域	施肥	农药	主要污染源	备注	林地优势树种
白云 (城区)	受污染的 农家肥	无	贵州铝厂烟 尘, 耐火材 料厂的污水	由于该地施用的化肥是将人畜粪便, 生活废 水等混合了工厂排污废水而成的农家肥, 所 以污染较重, 导致该地蔬菜长势弱, 芹菜, 莴苣的生长均受限。	马尾松、油茶 等
清镇 (城区)	化肥, 农家肥	过大	交通污染, 电厂煤灰	由于该地处于道路两旁, 交通污染对该地的 影响及其严重, 导致蔬菜受到的污染较重。	马尾松、油茶、 映山红等
花溪 (郊区)	化肥, 农家肥	用量 过大	农药, 化肥, 交通污染	病虫害较多, 农药用量大, 该地块有污水管 通过, 所以菜农使用该污水管破漏溢出的生 活污水进行灌溉。	马尾松、油茶 等
青岩 (郊区)	农家肥, 化肥	一般	农药, 化肥	土壤肥力好, 颜色深, 当季种植各种蔬菜的 产量都较大。	马尾松、油茶 等
惠水 (远郊区)	化肥	用量 过大	交通, 生活 污水, 农药, 化肥	病虫害较多, 使用农药用量较大。	马尾松、油茶 等
沙文 (远郊区)	化肥, 农家肥	少量	交通污染	土壤比较贫瘠。	马尾松、油茶 等

3.3 采样时间、样品数量、样品采集和处理方法

采样时间为 2005 年 10 月底至 11 月初。

采集土壤样品共计 144 个，包括耕作层（表土层）土壤混合样品 18 个、根际土壤样品 18 个、非根际土壤样品 18 个、土壤剖面样品 36 个（其中表土层 18 个，心土层 18 个）；林地表土层土壤混合样品 18 个、剖面样品 36 个（其中表土层 18 个，心土层 18 个）。蔬菜样品 18 个，其中大白菜 6 个、莴苣 6 个、芹菜 6 个。

3.3.1 土壤混合样品的采集

根据《农田土壤环境质量监测技术规范》的要求进行采样，土壤混合样品主要为土壤表层样品，由很多点混合组成，它实际上相当于一个平均数，借以减少差异。其采样方法如下：

(1) 土壤样品采集深度控制在 0~20cm 之间。

(2) 每一点采取的土样厚度、深浅、宽窄应大体一致。

(3) 以“S”型采样法取若干个采样点，一般取 10 到 20 个点的土壤混合为一个土壤样品。

(4) 在采集每个点的土壤时注意离各蔬菜根部有一定距离，大概是两棵蔬菜之间直线距离的中间点，避免采集蔬菜的根部土壤。

(5) 把采集的土壤样品放在塑料布上捏碎、混匀、摊平，用四分法对角取两份混合样品放在布袋里，附上标签，用铅笔注明采样地点、采样深度、采样日期、采样人，标签一式两份，一份放在布袋里，一份扣在布袋上。与此同时做好采样记录。

(6) 样品重量 1kg 左右。

3.3.2 根际与非根际土壤样品的采集

关于根际与非根际土壤的定义，本文将在 0~20cm 土层深度内挖出的蔬菜根系，抖动后仍然粘在根上，且粘着厚度小于 5mm 的土壤作为根际土，抖动时落下的土壤为非根际土。采样的具体操作如下：

(1) 在采集蔬菜样品的同时采集根际与非根际土壤。

(2) 在具有代表性的蔬菜根部周围，利用铁锹把蔬菜连根部挖出，取抖动后仍然粘在根部上，且粘着厚度小于 5 毫米的土壤作为根际土，抖动时落下的土壤

为非根际土壤。

(3) 采集若干株蔬菜的根际土壤和非根际土壤，分别混合后，采集样品重量达到 1kg 左右为宜。

3.3.3 土壤剖面样品的采集

选取各个菜地及林地土壤具有代表性的地段，挖掘土壤剖面，分别采集其耕作层(表土层)(0~20cm)和心土层(20~40cm)样品1kg左右，采样时避免铁铲等仪器造成重金属污染。

3.3.4 土壤样品的制备

将采集的土壤样品剔除石块、杂草等异物，在室内自然风干，采用四分法取 300g 左右的样品，用玻璃研钵磨碎后过 1.00mm 及 0.25mm 的尼龙筛，保存于磨口玻璃瓶中待测。

3.3.5 蔬菜样品的采集和制备

蔬菜样品的采集是根据植物样品的采集原则，按照样品的充分代表性，采样时间部位的统一性以及统计学原理要求“多点”、“随机”的方法，在多个土壤采样点上多点采集当季生产的 3 种叶菜类蔬菜样品：大白菜、莴苣、芹菜。

每种样品的混合样数不少于 4 个，重量不少于 2kg。将蔬菜去除根部及部分坏死的叶子后装入布袋中。贴上标签，作好记录。

采回的蔬菜样品取可食部位用去离子水将粘附于表面的灰尘、泥土等附着物冲洗掉，再用粗滤纸尽快吸干水分，将洗净的蔬菜样品用不锈钢刀切碎，称取 1 kg 左右盛于干净的瓷盘内在 80~90℃杀青 30 分钟后，在 65℃的烘箱中烘至恒重，再用玻璃研钵磨碎，过 1.00mm 目尼龙筛。将过筛样品充分混匀后装于磨口玻璃瓶中，贴好标签，待测。为避免样品在制备过程中产生重金属的二次污染，所以从采样到制备都避免与金属仪器接触。

3.4 供试样品的测定方法

土壤物理性质测定方法参照《土壤农化分析》(南京农大, 1990), 土壤容重: 环刀法; 比重: 比重瓶法; 质地: 比重计法; 毛管水含量及毛管孔隙度: 环刀吸水法, 总孔隙度利用容重和比重计算而得, 非毛管孔隙度等于总孔隙度减去毛管孔隙度; 自然含水量: 恒温烘干称重法。

土壤化学性质的测定方法均参照《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤, 1999),

其中土壤 pH 值：电极电位法(土与盐水比为 1:2.5)；土壤有机质：重铬酸钾-外加热法；阳离子交换量：乙酸铵法；全氮：半微量开氏法；碱解氮：碱解扩散法；有效磷：根据 pH 值选择 Olsen 法 (NaHCO₃法) 与 Bray1 法 (HCl+NH₄F 法)；速效钾：乙酸铵提取法；全磷和全钾是利用 ICP-OES (电感耦合等离子发射光谱) 测定。

土壤 Pb、Cr、Cd 的测定：样品经硝酸-氢氟酸-双氧水消解后，利用 ICP-OES (电感耦合等离子发射光谱) 仪器检测，检测范围在 0.005 以上；土壤 As、Hg 的测定参照中华人民共和国国家标准 (GB/T17136-1997)，样品经王水消煮后通过原子荧光光谱仪测定，土壤 As 的检测范围在 0.1 以上，Hg 的检测范围是 0.002mg/kg。

蔬菜样品的测定方法参照《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤，1999)，蔬菜样品全氮的测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-半微量开氏法、全磷、全钾及重金属 Pb、Cr、Cd、As、Hg 的测定方法与土壤测定方法相同。

3.5 数据处理

对样品分析测定结果，采用 SPSS 统计方法进行数据处理和统计分析。

4 研究区域的概况

4.1 自然环境概况

供试样品均采自贵阳市周边地区，包括花溪区、白云区、清镇市、惠水县等地。

(1) 地理位置：贵阳市位于贵州省中部的云贵高原东斜坡地带，地处东经 106°07'至 107°07'，北纬 26°11'至 27°22'之间，平均海拔 1200m。土地总面积 8034 平方千米，占全省总面积的 4.56%。

(2) 气候：贵阳市气候具有明显的高原性季风气候特点，系亚热带湿润温和型气候。温和湿润，雨量充沛，一般年均降雨量 1200mm 左右，大雨集中在每年 6~7 月。年平均温度 15.3℃，最热月(7 月)平均温度 24℃，最冷月(1 月)平均温度 4.6℃，极端高温 39.5℃。春秋气温、晴雨多变，光、热、水同季，相对湿度大，无霜期 270d 左右。全年主导风向北偏东，夏季主导风向南偏东，晴天多南风，雨天多北风，年均风速 2.2m/s，短时最大风速 20m/s。年平均气压 8935mPa。冬季气压较高，夏季气压较低。主要灾害有倒春寒、秋雨低温、冰雹、

暴雨、大风和酸雨。

(3) 水资源：贵阳市水资源主要源于天然雨，全市年天然径流 546~640mm，平均每平方千米产水 $56.3 \times 10^4 \text{m}^3$ ，水资源总量为 $53.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。市域境内 $1 \times 10^4 \text{m}$ 以上河流共 98 条，其中长江流域 90 条，珠江流域 8 条，主要河流有长江水系的乌江、南明河、猫跳河、鸭池河、暗流河、鱼梁河、谷撒河、息烽河和洋水河以及珠江水系的蒙江。人工湖泊主要有红枫湖、百花湖、阿哈水库、花溪水库等。

(4) 土壤：全市土壤总面积 $60.82 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，有黄壤、黄棕壤、石灰土、紫色土、冲积土、沼泽土、水稻土、草甸土等 8 个土类。其中，黄壤 $30.16 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，石灰土 $19.66 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，水稻土 $8.01 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，分别占土壤面积的 49.59%、32.33% 和 13.17%。全市土地总面积 804667hm^2 ，耕地 288979hm^2 ，占土地部面积的 35.91%；园地 5616hm^2 ，占 0.70%；林地 266258hm^2 ，占 33.09%，森林覆盖率 15.97%；牧草地 28860hm^2 ，占 3.59%；水面 15247hm^2 ，占 1.89%；建设用地（含居民点及工矿用地、交通用地和水利设施） 48276hm^2 ，占 6.00%；未利用地 151431hm^2 ，占 18.82%。全市人均土地面积 0.26hm^2 ，人均耕地面积 0.093hm^2 ；全市每个农业人口占有土地 0.46hm^2 ，不足全国平均值的一半，农业人口人均耕地 0.17hm^2 ，为全国平均值的三分之二。

4.2 经济社会发展概况

4.2.1 经济总量

贵阳市辖六区（云岩、南明、小河、花溪、乌当和白云）、一市（清镇）、三县（修文、息烽和开阳）。总人口 350.85 万（437 人/ km^2 ）。其中，市区面积 2403km^2 ，人口 198.22 万（825 人/ km^2 ）；建成区面积 129km^2 。市中心人口密度超过 2×10^4 人/ km^2 。贵阳市是多民族聚居的城市，有布依族、苗族等 50 个少数民族，少数民族人口占总人口 15.4%。

全市生产总值从 2002 年的 348.02 亿元增加到 2006 年的 602.88 亿元，按可比价格计算，年均增长 14.1%，实现了市十一届人大一次会议提出的比 2000 年翻一番的目标。人均 GDP 从 10123 元增加到 17025 元。城市居民人均可支配收入从 7306 元提高到 11222 元，年均实际增长 10%；农民人均纯收入从 2352 元提高到 3465 元，年均实际增长 7.8%。2006 年生产总值比上年增长 14.7%，这是多年来增

幅最高的一年。第一产业增加值增长 7.6%；第二产业增加值增长 16.7%；第三产业增加值增长 13.6%。

4.2.2 经济结构

在全市生产总值中，第一产业占7.2%，第二产业占52.6%，第三产业占40.2%。在农业结构中种植业占63.0%，牧业占34.2%，林、副、渔业占2.8%。在工业结构中，轻、重工业比为41.4：58.6。高技术产业增加值占规模以上工业增加值的17%，新兴产业正在蓬勃发展。随着产业布局的调整，特别是近年来加大了对农村经济发展的支持力度，加强了农业基础设施建设，实施了通乡、通村公路建设和毛草房改造工程等，城乡差别正逐步缩小，城市化率为63%。

工业经济呈现了多年未有的高增长。2006年全市纳入跟踪的109个重点项目建设达到预期目标。开磷集团 1.20×10^6 t磷铵、清镇配煤基地 4.5×10^5 t/y煤矿等重点项目开工建设，中化开磷有限公司 6.0×10^5 t多功能复合肥、贵州信邦远东制药有限公司GMP改造等项目建成投产，贵州轮胎公司全钢子午线轮胎、贵阳海信数字平板电视生产线等项目取得较好效益。

农业产业结构调整取得新突破，蔬菜总产量突破百万吨，完成花卉大棚建设2000个，启动养殖小区建设项目318个。命名28家市级龙头企业，扶持农业专业合作经济组织20个。完成农村富余劳动力非农技能培训2.67万人，有序转移2.18万人。

4.2.3 环境现状

十一五期间全市工业废气排放总量 1.14×10^{11} cm³。全市废水排放总量 1.60×10^6 t，其中工业废水 4.99×10^7 t，占排放总量的31.25%，城镇生活污水 1.10×10^6 t。废水中污染物排放量：化学需氧量 5.77×10^4 t万吨，其中工业废水中化学需氧量 5.4×10^3 t，占排放总量9.36%，城镇生活污水中化学需氧量 5.23×10^4 t；氨氮 4.6×10^4 t，其中工业废水中氨氮 6.3×10^2 t，占排放总量的13.70%，城镇生活污水中氨氮 3.97×10^3 t。全市工业固体废物以粉煤灰、冶炼废渣、尾矿、炉渣和化工废渣为主。工业固体废物产生量 6.57×10^6 t，排放量 6.96×10^4 t。城市生活垃圾产生量 5.45×10^5 t，清运率100%，其中无害化处理量 4.56×10^4 t，无害化处理率83.85%。

南明河城区河段水质总体状况较好，其中：花溪河段和普渡桥河段水质达到国家规定的水功能区要求；水口寺河段水质稍差，化学需氧量、氨氮超标率均为

16.67%，未达到国家规定的水功能区要求。2005年我市城区全年降水 pH 年平均值为 6.22。

4.3 蔬菜生产概况

蔬菜类除白菜、青菜、萝卜等大路菜之外，还有各种细菜种植。特色菜有折耳根、蕨菜等。据统计，2006年我市蔬菜播种面积达 $5.33 \times 10^4 \text{hm}^2$ （次），产量突破 $100 \times 10^4 \text{t}$ ，1月至11月实现产值 13.4 亿余元。贵阳市形成了许多蔬菜生产基地，目前全市商品蔬菜上市量为 $3000 \times 10^4 \text{kg}$ 左右。

为解决贵阳蔬菜在域外市场认知度低的问题，市蔬菜办组织科技人员开展技术攻关，以发展无公害蔬菜基地为基础，按照“质量等级化、重量标准化、包装规范化”的技术标准，先后在市郊农村建立了一批以无公害、规范化生产为特征的名优蔬菜基地。2006年，全市有 23 个蔬菜产品成功通过了农业部农产品质量安全中心的无公害农产品认证，获得了外销的“绿色通行证”，加快了贵阳蔬菜走出去的步伐。目前，贵阳“黔山牌”蔬菜不仅在两广、重庆、浙江等国内市场声名鹊起，还成功打入了东南亚、香港、日本等国际市场，今年贵阳蔬菜外销超 $35 \times 10^4 \text{t}$ 。

5 结果与分析

5.1 菜地土壤特性的区域变异特征

5.1.1 菜地表土层物理性质的区域变异特征

土壤的物理性质是土壤最重要的性质之一，它包括土壤质地、结构、容重、比重、含水量、孔隙度等等重要的指标。分析了贵阳市不同区域菜地土壤的物理性质，分析比较其均值大小，了解各物理性质的变异特征，对认识城市化进程对土壤物理性质的影响有重要意义。

5.1.1.1 菜地土壤物理性粘粒含量的区域变化

土壤质地是根据土壤的颗粒组成划分的土壤类型。一般分为砂土、壤土和粘土三类，其类别和特点主要是继承了成土母质的类型和特点，又受到耕作、施肥、排灌、平整土地等人为因素的影响，是土壤的一种十分稳定的自然属性，对土壤特性有很大影响。

由表 5-1 可见，菜地土壤物理性粘粒含量在 32.20%~91.00%之间，城区与近郊区菜地土壤其平均值在 49.09%~57.66%范围内，属于重壤土；只有远郊区土壤平均值为 60.99%，稍高于 60%属于轻粘土。从其均值来看，其趋势是城区向远郊区递增；从统计差异来看，土壤物理性粘粒含量城区低于远郊区并达到 0.05 显著水平，而城区与郊区差异不显著。3 个区域菜地土壤母质相同，质地的差异可能是人为耕作、培肥引起的。3 个区域的土壤质地为重壤土—轻粘土，表明菜地土壤中粘粒和砂粒的比例适当，土壤物理性能良好，宜耕期长，有机质矿质化与腐殖化比较协调，保水保肥力强，透水通气性适中，土性温暖，水、肥、气、热比较协调，是蔬菜生产较为理想的土壤。

5.1.1.2 菜地土壤容重、比重的区域变化

土壤容重的大小取决于机械组成、结构和垒结状况及有机质的含量和松紧状况等因素，在一定条件下可以用作土壤坚实度的指标。3 个区域土壤容重变化在 0.84~1.08 g/cm³之间，郊区大于城区和远郊区；城区与远郊区土壤容重均值相当。各区域土壤比重均值是城区小于郊区小于远郊区，城区与郊区较接近。不同区域菜地土壤的容重和比重均未达到显著性差异（表 5-1）。

5.1.1.3 菜地土壤孔隙度、含水量的区域变化

土壤质地和结构对水、气状况的影响，归根结底是土壤孔隙的大小和多少的

问题，因此土壤孔隙度是土壤重要的物理性质之一。由表 5-1 可见，土壤总孔隙度均在 50%以上，近郊小于城区和远郊，其差异未达到 0.05 显著性水平；毛管孔隙度在 33%以上，近郊大于城区大于远郊，非毛管空隙度在 8%~31%，近郊小于远郊区，其差异均达到 0.05 显著性水平；自然含水量变化在 24%~31%之间，3 个区域菜地土壤之间没有显著性差异，但有城区、近郊区大于远郊区的趋势。毛管含水量城区为 44.57%，其趋势是城区 > 近郊区 > 远郊区。

如果对照植物生长发育的土壤某些物理性质标准：即土壤容重为 0.9~1.3 g/cm³，总空隙度为 50%~65%，通气孔度在 8~10%之间，如能达到 20%则更好（朱祖祥，1983，何腾兵等，2000）。表 5-1 所列的蔬菜土壤各项物理性质均在此标准范围内，说明供试土壤的松紧状况适度、结构良好、通气透气及保水供水能力较强，适宜于蔬菜作物生长。

表 5-1 不同区域菜地表土层的物理性质比较

Table 5-1 The comparison of physical nature in surface soils in different regions

项目	区域	平均值	标准差	最大值	最小值	变异系数
物理性粘粒 (%)	城 区	49.09a*	13.18	78.20	32.20	26.8
	近郊区	57.66b	12.99	91.00	45.92	22.5
	远郊区	60.99b	6.93	74.20	53.12	11.4
容重 (g/cm ³)	城 区	0.84	0.07	0.90	0.78	8.3
	近郊区	1.08	0.15	1.21	0.94	13.9
	远郊区	0.84	0.07	0.91	0.78	8.3
比重	城 区	2.355	0.03	2.38	2.33	1.3
	近郊区	2.365	0.03	2.39	2.34	1.3
	远郊区	2.46	0.03	2.49	2.43	1.2
自然含水量 (%)	城 区	28.88	6.57	33.52	24.23	22.7
	近郊区	30.95	1.61	32.09	29.81	5.2
	远郊区	24.05	0.42	24.34	23.75	1.7
毛管水含量 (%)	城 区	44.57	6.41	49.10	40.04	14.4
	近郊区	41.35	7.20	46.44	36.26	17.4
	远郊区	39.41	5.66	43.41	35.41	14.4
总孔隙度 (%)	城 区	63.65	3.37	66.03	61.27	5.3
	近郊区	53.60	8.89	59.88	47.31	16.6
	远郊区	65.20	2.93	67.27	63.12	4.5
毛管孔隙度 (%)	城 区	37.89a	1.38	38.86	36.91	3.6
	近郊区	44.63b	0.12	44.71	44.54	0.3
	远郊区	33.52 c	1.43	34.53	32.51	4.3
非毛管孔隙度 (%)	城 区	25.76 a	1.99	27.17	24.35	7.7
	近郊区	8.97 b	9.01	15.34	2.60	100.4
	远郊区	31.68 a	1.51	32.74	30.61	4.8

*小写字母表示达 0.05 显著水平。

5.1.2 菜地表土层化学性质的区域变异特征

5.1.2.1 pH 值

3个区域菜地土壤pH值的平均值变化在6.5~7.0之间,其差异未达到显著性水平,远郊区土壤pH值一般高于城区和近郊区(表5-2)。有研究表明,菜地土壤呈弱酸性对蔬菜生长有益,但其酸度低于5或高于7.5,就会发生烂根现象,影响作物生长(唐高霞等,2006)。3个区域的菜地土壤均起源于黄壤,但由于长期施用石灰、火土灰等碱性物质,其pH值发生了很大变化,大部分土壤呈中性或弱酸性,有益蔬菜生长。

5.1.2.1 有机质和全氮

从菜地土壤有机质和全氮的均值来看,从城区到近郊区,到远郊区依次减小。从统计差异来看,有机质在3个区域之间都达到了0.05显著水平。全氮是城区高于近郊和远郊区,均达到0.05显著水平,而近郊和远郊差异不明显。城区和近郊土壤有机质含量都很高,是远郊区土壤的2~3倍(表5-2)。有研究表明,菜田培肥的土壤有机质含量指标不应低于30 g/kg(葛晓光等,2004),本研究的3个供试区域有机质含量均在此标准以上,远郊区为46.6 g/kg,城区则达到了117.4 g/kg。

王介元等(1997)曾提出土壤有机质分解过程中产生的热、有机酸和局部高浓度的铵盐亦会影响蔬菜作物的正常生长。尽管菜地土壤有机质含量是否像大田或水田那样,具有一定的最高界限,超过界限后即产量降低(金耀青等,1993),还有待于进一步研究,但在实际调查中城区菜地的蔬菜确实生长缓慢,产量较低。不过由于城区菜地位于铝厂、耐火材料厂、电厂等工厂附近,交通污染、生活污水污染、空气污染等致使的重金属等污染都有可能是导致蔬菜生长受阻、品质低劣的祸首。在施肥方面,城区多施用工厂废水、生活污水等混合而成的受污染农家肥,利用污水灌溉及大量施用农药以期望减低病虫害等措施也是蔬菜产量低下的重要因素。

近郊区菜地是城郊区蔬菜市场的主要供应源,其化肥、有机肥的施用比例相对合理,其水源丰富,水质相对城区好,蔬菜的长势也较好,产量也相对较高。但该地区有生活污水管通过,不少菜农就近使用该污水管破漏溢出的生活污水进行灌溉。其菜地土壤平均有机质含量为83.2 g/kg,可能正是由于污水中含丰富有机质而增加了土壤中的有机质含量。远郊区其灌溉水源主要是沟渠、排水沟或蓄

水池，其水质受污染程度较低，再加上农民因成本问题而对于菜地管理水平有限，在施肥方面只注重农家肥导致远郊菜地土壤有机质和全氮低于城区和近郊。由此可知城市内不同区域间菜地土壤有机质和全氮因城市化发展产生了剧烈的变化。

贵阳市蔬菜地距离城市中心越近，土壤全氮含量越高，并与有机质含量之间呈极显著的正相关关系。其公式为 $y=0.0211x+0.9948$ ， $R^2=0.8282$ 。其中， y 为菜地土壤全氮含量（%）， x 为菜地土壤有机质含量（%）。

5.1.2.3 全P和全K

近郊区土壤全P含量高于城区和远郊区，但并没达到显著性差异（表5-2）。菜地土壤是通过人为耕作、灌溉与培肥使原来的土壤逐渐形成一类有较厚耕作层，以高度熟化和P素累积为特点的土壤（房世波等，2003）。城区和近郊区菜地耕作年限高于远郊区，因此城区和近郊可能由于种菜时间较长，土壤熟化程度较高，而导致全P偏高。同时生活污水灌溉也可能是近郊土壤全P含量高于城区的原因。

城区、近郊到远郊区菜地土壤全K含量呈递增趋势，城区和近郊区菜地土壤全K均值较接近，而其与远郊区之间的差异很大（表5-2）。自然土壤的钾素养分含量主要受制于气候、母质、植被、地形等成土因素的影响，本试验区均在贵阳市范围内，受以上因素影响较小。所以，各区域K含量的差异在很大程度上是受人为因素的影响，与施肥水平及耕作制度有密切的关系。有人研究长期连续施用无机氮肥以及配施氮磷钾肥的所有处理，菜田钾素的表现盈亏量全部出现负值，而且亏缺量较大，而施用有机肥则相反。这说明多施用有机肥的土壤含K量要多于施用无机肥的土壤。城区与近郊菜农多施用化肥来改善土壤，远郊区则为节约成本基本上完全施用农家肥。再看城区和近郊区土壤，由于近20年来贵州施用化肥成为农田的主要施肥方式（陈旭晖等，2003）。因此，远郊区土壤全K含量明显高于城区和近郊区，正好说明了这一问题。

5.1.2.4 阳离子交换量

土壤阳离子交换量的大小，基本上代表了该土壤可能保存的养分数量，即一定程度上代表了土壤保肥能力的高低。由表5-2可知，3个区域菜地土壤阳离子交换量的平均值均在 17cmol/kg 以上，属于中上等保肥水平，有利于施肥后的作物吸收。近郊菜地土壤阳离子交换量明显高于城区和远郊区并达到0.05显著水平，这说明近郊土壤保肥能力高于城区和远郊。事实上近郊菜地蔬菜长势弱，菜农也

抱怨耕种几十年的土地还是很瘦，而郊区菜地蔬菜长势好，产量高就说明了这一问题。

表 5-2 不同区域菜地表土层主要化学性质的比较

Table 5-2 The comparison of chemical properties in surface soils in different regions

项目	区域	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数%
pH 值	城 区	6.66	0.50	6.03	7.22	7.5
	近郊区	6.52	0.84	5.49	7.4	12.9
	远郊区	6.93	0.23	6.75	7.28	3.3
有机质 (g/kg)	城 区	117.4a*	16.5	96.4	135.2	14.1
	近郊区	83.2b	20.2	68.6	119.9	24.3
	远郊区	46.6c	6.8	39.2	58.4	14.6
阳离子交换 [Cmol(+)/kg 土]	城 区	17.13a	4.15	11.96	22.57	24.2
	近郊区	22.48b	2.02	19.72	24.83	9.0
	远郊区	17.25a	1.65	15.69	20.37	9.6
全氮 (g/kg)	城 区	3.68a	0.87	2.89	5.21	23.6
	近郊区	2.36b	0.91	1.70	4.18	38.6
	远郊区	2.17b	0.42	1.44	2.70	19.4
全 P (g/kg)	城 区	0.61	0.39	0.10	1.28	63.9
	近郊区	0.92	0.50	0.19	1.39	54.3
	远郊区	0.46	0.39	0.12	1.06	84.8
全 K (g/kg)	城 区	15.39	4.18	11.46	21.64	27.2
	近郊区	15.56	2.65	11.99	18.34	17.0
	远郊区	19.13	4.46	15.17	25.32	23.3

*小写字母表示达0.05显著水平。

5.1.2.5 碱解氮、有效磷和速效钾

通常采用土壤碱解氮、有效磷和速效钾作为土壤供氮、磷、钾的能力与水平的评估指标。

表 5-3 数据表明，城区、近郊区、远郊区菜地土壤中碱解氮、有效磷均依次递减，但只有土壤有效磷城区和近郊高于远郊，其差异达到 0.05 显著水平。碱解氮的变化规律与全氮相似，由于城区土壤中全氮含量较高，其供氮能力就比其他两区高。速效钾呈现出远郊大于城区、近郊的趋势，这是由于蔬菜多为喜钾植物，种植蔬菜的年限越长，土壤中钾素的消耗越多所致。还可能导致了菜地土壤 K 素分布状况与其他肥力因素成反相关（蒋名川等，1985）。

表 5-3 不同区域菜地表土层速效养分含量的比较

Table 5-3 The comparison of the quick nutrient content in surface soils in different regions

养分元素	区域	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数%
碱解氮 (mg/kg)	城 区	216.2	82.9	131.5	311.6	38.3
	近郊区	157.8	38.8	127.0	231.9	24.6
	远郊区	136.1	65.5	31.4	220.7	48.1
有效磷 (mg/kg)	城 区	67.5a*	15.5	49.9	84.8	23.0
	近郊区	51.2a	15.8	30.7	72.0	30.9
	远郊区	27.7b	9.4	11.8	39.2	33.9
速效钾 (mg/kg)	城 区	204.3	34.3	145.0	245.9	16.8
	近郊区	140.7	84.5	60.0	292.7	60.1
	远郊区	234.1	131.6	105.3	423.2	56.2

*小写字母表示达0.05显著水平。

5.1.3 菜地表土层重金属含量的区域变异特征

从各区域菜地表土层中重金属含量均值可以看出(表 5-4):菜地土壤 Pb 含量在城区和近郊区没有明显差异,但都高于远郊区,其差异达到了显著水平;土壤 Hg 含量是城区明显高于近郊区和远郊区,并达到显著差异水平;土壤中 Cr、Cd 的含量都是近郊明显高于城区和远郊区,并达到显著性差异,城区和远郊区差异不显著;3 个区域菜地土壤中 As 含量是城区<近郊区<远郊区,但均未达到显著差异。从总体上看,城区和近郊区的重金属含量都高于远郊区。

表 5-4 不同区域菜地表土层重金属含量比较(单位:mg/kg)

Tab. 5-4 The comparison of the heavy metal in surface soils in different regions

重金属元素	区域	平均值*	方差	最小	最大	变异系数(%)
Pb	城 区	51.57a	14.31	28.32	64.48	28
	近郊区	51.67a	2.95	47.83	54.56	6
	远郊区	28.00b	12.34	12.71	47.02	44
Cr	城 区	199.21a	89.49	87.86	324.71	45
	近郊区	414.81b	77.22	340.20	496.93	19
	远郊区	204.43a	173.93	62.90	583.90	85
Cd	城 区	0.14a	0.11	0.03	0.30	79
	近郊区	0.26b	0.05	0.19	0.30	18
	远郊区	0.10a	0.07	0.02	0.21	66
As	城 区	20.97	12.96	7.64	34.27	62
	近郊区	27.26	7.94	16.98	34.40	29
	远郊区	28.82	11.23	3.59	34.42	39
Hg	城 区	1.66a	1.34	0.75	4.32	80
	近郊区	0.82b	0.10	0.67	0.90	12
	远郊区	0.47b	0.13	0.36	0.66	28

*小写字母表示达 0.05 显著水平

贵阳市是贵州省工业发展的中心，其城市分布着各种类型的工厂比如耐火材料厂、铝厂、冶炼厂、化工厂、电厂等。位于清镇市的贵州水晶有机化工集团大量排放 Hg 含量严重超标的废水，已经严重污染了红枫湖和百花湖的水质，并对整个贵阳市的土壤和水质中的 Hg 含量造成了极大的影响。“三废”的排放是导致城区菜地土壤 Hg 含量明显高于郊区的重要原因。近郊区菜地为方便蔬菜运输，大部分菜地分布在公路边，汽车尾气中的 Cr、Cd 含量高可能是致使近郊区菜地 Cr、Cd 含量高的原因之一；实地调查发现，近郊区菜农大量施用农药和化肥以防止病虫害及提高蔬菜产量，农药、化肥中的 Cr、Cd 含量超标也是导致近郊区菜地 Cr、Cd 含量高的一个原因。3 个区域菜地土壤中 As 含量较高但没有达到显著差异，这可能和整个贵阳市土壤的成土母质 As 含量较高有关。

5.2 菜地土壤剖面特性的区域变化

5.2.1 菜地土壤剖面物理性质的区域变化

土壤剖面特征反映了土壤中物理性质的状态，是土壤肥力因素的外部表现。自然土壤的剖面是在母质、气候、生物、地形和时间五种主要成土因素共同影响下形成的。人类生产活动和自然因素的综合作用，使耕作土壤产生层次化。耕作土壤剖面层次从上到下，大体可以分为三层。首先是表土层，它是受耕作、施肥、灌溉等影响最强烈的土壤，一般厚度在 20cm 左右。其次是心土层，位于 20-40cm 深度，受到一定的耕作影响。最后是底土层，一般位于 50-60cm 以下深度，主要受母质等影响。本文采用表土层和心土层物理性质的平均值之差来分析比较其差异性的大小。

由表 5-5 可以了解到，贵阳市菜地表土层与心土层物理性质指标之差值的区域差异变化趋势是城区 > 近郊区 > 远郊区。远郊区和近郊区菜地的物理性粘粒含量表土层低于心土层，只有城区菜地表土层物理性粘粒含量高于心土层，其差值为 5%；近郊区菜地心土层为轻粘土，表土层为重壤土，心土层的物理性粘粒比表土层高 7%；而远郊区菜地表土层的物理性粘粒比心土层低 1%，均属于轻粘土。3 个区域的菜地土壤容重和比重均是表土层小于心土层，其趋势是远郊土壤容重和比重的表土层与心土层之差小于城区和近郊。土壤含水量和各种孔隙度呈现城区 > 近郊区 > 远郊区的趋势。

综上所述，远郊区菜地土壤表土层和心土层物理性质差异不明显，而城区和近郊区表土层和心土层物理性质差异较大。这可能跟耕作年限有关，在长期耕作下，城区和近郊区菜地土壤表土层变化很大，而远郊区菜地由于耕作时间较短，其表土层与心土层差异没有城区、近郊区明显。

表 5-5 不同区域菜地表土层与心土层的物理性质平均值之差

Table 5-5 The comparison of physical nature in soil profile in different areas

区域	物理性粘粒 (%)	容重 (g/m ³)	比重	自然含水 (%)	毛管含水量 (%)	总孔度 (%)	毛管孔度 (%)	非毛管孔度 (%)
城区	5	-0.42	-0.12	2	13	15	3	12
近郊区	-7	-0.27	-0.03	-18	12	10	2	8
远郊区	-1	-0.25	-0.11	0	6	8	2	6

5.2.2 菜地土壤剖面化学性质的区域变化

菜地土壤耕作层易受人类生产生活和地表生物、气候条件的影响，一般疏松多孔，干湿交替频繁，温度变化大，通透性良好，物质转化快，含有效态养分多。心土层在耕作土壤中起保水保肥作用，是生长后期供应水肥的主要层次。研究贵阳市各区域菜地土壤剖面化学性质的变异特征，有利于了解土壤肥力在剖面上的变化规律（见表 5-6）。

5.2.2.1 pH 值

城区和近郊区菜地表土层与心土层 pH 值均值之差均为负值，说明城区和近郊区菜地表土层 pH 值低于心土层，这也许是使用污水灌溉和使用酸性垃圾等，使得表土层的酸度增加所致。远郊区表土层与心土层 pH 值均值之差为 0.26，说明远郊区菜地表土层 pH 值高于心土层。

5.2.2.2 有机质和全氮

贵阳市城区、近郊区和远郊区菜地土壤有机质含量均显示出表土层明显高心土层，城区和近郊区菜地表土层和心土层有机质含量之差值达到 56g/kg 以上，但两个区域的相差不大，表明这两个区域菜地土壤的熟化程度较高；而远郊区菜地表土层和心土层有机质含量之差值较小，表明其熟化程度较低。3 个区域菜地表土层和心土层的全氮含量之差值的变化规律与有机质的变化规律一致。

5.2.2.3 全 P 和全 K

贵阳市菜地土壤全 P 在近郊区剖面层次差异大，在城区和远郊区差异较小。近郊区菜地磷肥施用量大，使用年限又较城区短，磷素在表土层富集但又未迁移至心土层；而城区菜地耕种年限长，表土层磷素已经向心土层迁移淀积，因而上

下层的差异较小；远郊区菜地种植蔬菜时间较短，表土层磷素富集较少，尚受原来母质的影响，剖面上下层磷素含量差异小。土壤全 K 在远郊区层次差异大于近郊区和城区，而城区和近郊区的差异不大。这可能与城区和近郊区长期种植喜钾的蔬菜作物吸收带走钾素及钾素向心土层淋淀有关；远郊区菜地种植蔬菜作物后增施钾肥和农家肥使表土层钾素增高，而钾素又尚未淋移至本来钾素含量就较低的心土层，因而上下层的钾素含量差异大。

5.2.2.4 阳离子交换量

菜地土壤阳离子交换量表土层与心土层之差，近郊的差异最大，其次是远郊。

表 5-6 不同区域菜地表土层与心土层的化学性质平均值之差

Table 5-6 The comparison of chemical properties on top and sub soil in different areas

区域	pH	阳离子交换量			全 P (g/kg)	全 k (g/kg)
		有机质 (g/kg)	(cmol/kg)	全氮 (g/kg)		
城区	-0.94	56.12	2.60	1.97	0.40	4.04
近郊区	-0.26	57.93	6.55	1.45	0.83	3.84
远郊区	0.31	19.48	4.54	0.98	0.36	5.89

5.2.2.5 碱解氮、有效磷和速效钾

通常，表土层在频繁的人类耕作下，其有效态养分含量都会大于心土层。由表 5-7 得知，贵阳市菜地表土层与心土层有效养分含量之差均为正值，说明表土层有效养分含量大于心土层。有效磷层次差异表现为城区 > 近郊区 > 远郊区，速效钾上下层差异表现为城区 > 远郊区 > 近郊区，碱解氮上下层差异在 3 个区域的变化不大，但有远郊区 > 城区 > 近郊区的趋势。

表 5-7 不同区域菜地表土层与心土层的碱解氮、有效磷和速效钾含量平均值之差

Tab. 5-7 The comparison of the quick nutrient content on top and sub soil in different regions

区域	碱解氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)
城区	101.4	132.0	37.4
近郊区	92.9	56.8	11.1
远郊区	106.6	100.3	3.4

5.2.3 菜地土壤剖面上下层重金属含量的区域变化

为了反映土壤重金属含量的垂直空间变化，用菜地表土层 (0~20cm) 重金属含量减去心土层 (20~40cm) 重金属含量，得到差值分区作均值比较。由表 5-8 可知：菜地土壤剖面中表土层和心土层的 Pb、Cr、Cd、As、Hg 含量的差值均为

正值,说明表土层中重金属含量高于心土层。从不同区域看,除了 Hg 外,其余 4 个重金属元素含量的表土层和心土层之差均是近郊大于城区和远郊。从统计差异看, Pb、Cr、Cd 只有近郊剖面上下层之差值的差异达到显著水平。As 的含量则是近郊和远郊土壤上下层之差值达到了显著差异。土壤剖面上下层中 Hg 含量之差只在城区达到了显著差异。总体上讲,菜地土壤剖面上下层中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 含量在近郊的差异最大。重金属本身具有难迁移性的特点,因此外界环境施加于土壤的重金属大量富集在表土层中,导致表土层与心土层中重金属含量的差异增大。近郊土壤剖面上下层重金属含量差异显著高于城区和远郊区,这可以说明三个问题,一是近郊区土壤正在遭受重金属的污染,而重金属尚未移动到心土层,因此土壤剖面上下层重金属含量差异大;二是城区土壤重金属污染较重,表土层中重金属已经部分下移,致使土壤剖面上下层重金属含量差异减小;三是远郊区土壤尚未遭受重金属污染,土壤含量主要受原来母质中含量高低的影响,因而土壤剖面上下层重金属含量差异很小。

表 5-8 不同区域菜地表土层与心土层的重金属含量平均值之差比较 (单位: mg/kg)

Table5-8 The comparison of the heavy metal on top and sub soil in different regions

区 域	土 层	Pb	Cr	Cd	As	Hg
城 区	表土层	51.57	199.21	0.14	20.97	1.66a
	心土层	42.27	192.84	0.02	6.95	0.16b
	差值	9.30	6.37	0.12	14.02	1.50
近郊区	表土层	51.67a	414.81a	0.26a	27.26a	0.82
	心土层	24.39b	178.97b	0.03b	8.17b	0.15
	差值	27.28	235.84	0.22	19.09	0.68
远郊区	表土层	28.00	204.43	0.10	28.82a	0.47
	心土层	15.70	138.64	0.05	10.82b	0.53
	差值	12.30	65.80	0.06	17.99	-0.06

*小写字母表示达 0.05 显著水平

5.3 菜地根际与非根际土壤特性的区域差异性

5.3.1 菜地根际与非根际土壤化学性质的区域差异性

根际是一个只有 0.1~4mm 左右的区域,而根际土壤是指围绕根面 0-5mm 受根分泌物控制的薄层土壤。它是植物-土壤-微生物及其环境条件相互作用的场所,是一种特殊的微生态系统,是土壤圈物质循环的重要环节。

采用菜地根际土壤减去非根际土壤的各化学性质,求其均值做比较,探讨蔬

菜根际土壤化学性质与非根际土壤的差异（表 5-9）。

5.3.1.1 pH 值

从表 5-9 可以看出，3 个区域的蔬菜根际与非根际土壤 pH 值差异不明显，其差值的绝对值都小于 0.1，但仍然有土壤 pH 值根际小于非根际的趋势。在土壤中植物根附近，由于受到植物根和微生物活动所产生的 CO₂ 以及根系分泌质子、有机酸等影响较为强烈，从而导致 pH 值下降（何腾兵，2000）。

5.3.1.2 有机质和全氮

根际土壤有机质及全氮含量均高于非根际土壤。有机质的差异是城区 > 近郊 > 远郊，而全氮相反。施肥与蔬菜生长过程中根系的分泌物或溢泌物、根组织的脱落物等根产物和微生物活动加剧，同时细胞死亡残体分解等是引起蔬菜土壤有机质和全氮含量高于非根际土壤的重要原因。

5.3.1.3 全磷、全钾和阳离子交换量

3 个区域的蔬菜根际与非根际土壤全 P 之差都是负值，根际土全 P 含量小于非根际土且差异显著。丰富的有机质能提高 P 的水融性，促进植物吸收，因此根际土壤中的 P 素含量会低于非根际土壤。全 K 在根际与非根际土中差异不明显，但有根际土小于非根际土的趋势，可能是由于蔬菜对 K 素的需求较大，使得 K 素在根际产生了亏缺。土壤阳离子交换量是根际土大于非根际土但未达到显著差异，其趋势是城区 > 近郊 > 远郊。可能是城区土壤较高的有机质含量，提高了根际阳离子交换量，提高了根际环境的缓冲能力。

表 5-9 不同区域菜地根际土壤与非根际土壤的化学性质平均值之差比较

Tab. 5-9 The comparison of chemical properties on rhizosphere and non-rhizosphere soil in different areas

区域	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全 P (g/kg)	全 k (g/kg)	CEC [cmol (+)/kg]
城 区	-0.063	11.214	0.075	-0.115	0.610	1.644
近郊区	-0.068	10.181	0.113	-0.258	-0.817	0.803
远郊区	0.085	5.523	0.251	-0.104	-1.630	0.286

5.3.1.4 碱解氮、有效磷和速效钾

为反映贵阳市蔬菜根际与非根际的土壤营养元素速效量的空间变化，用土壤非根际土减根际土的含量，分 3 个区域作均值比较（表 5-10）。结果表明，3 个区域的蔬菜根际土壤中速效钾含量比非根际土壤少，其差值的绝对值从城区到远郊递增。蔬菜是一种喜钾植物，对于钾的需求量较大，随着蔬菜的生长，钾在根际产生一定程度的亏缺，只是这种亏缺差异程度城区小于近郊和远郊，这是城区

菜地土壤中钾的总体含量就少于远郊的缘故。

3个区域的蔬菜根际土壤碱解氮含量比非根际土壤高，说明此元素在根际产生了明显的富集现象。不同区域菜地土壤碱解氮的富集情况具有一定差异，其近郊和城区小于远郊。远郊菜地根际土与非根际土碱解氮含量之间达到了显著差异。有效磷在3个区域的蔬菜根际土与非根际土壤中没有明显规律，但城区根际与非根际土中有效磷差异比郊区和远郊区明显。

表 5-10 不同区域菜地根际与非根际土壤速效养分含量之差比较

Tab. 5-10 The comparison of quick amount of nutrients on rhizosphere and non-rhizosphere soil in different areas

	速效钾 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)
城 区	-24.7	20.9	14.0
近郊区	-28.0	8.3	-2.3
远郊区	-35.2	24.7	-2.1

5.3.2 菜地根际与非根际土壤重金属含量的区域差异性

对菜地根际与非根际土壤重金属含量的差异大小进行了比较，结果见表 5-11。从统计差异上看，近郊菜地根际与非根际土壤中 Cr、As 的差异达到了显著水平；Hg 只有在城区达到了显著差异；Pb、Cd 在 3 个区域的菜地根际与非根际土壤中差异都不显著。

Pb, Cd, As 这 3 种重金属在根际土中的含量有小于非根际土的趋势，Cr 和 Hg 则有根际土大于非根际土的趋势。这可能跟重金属离子在土壤中的形态和受根系环境影响的强弱有关，具体的原因还待进一步研究。

表 5-11 不同区域菜地根际与非根际土壤重金属含量之差比较 (单位: mg/kg)

Tab. 5-11 The comparison of heavy metal on rhizosphere and non-rhizosphere soil in different areas

		Pb	Cr	Cd	As	Hg
城 区	非根际土	51.57	199.21	0.14	20.97	1.66a
	根际土	43.57	267.59	0.07	27.71	2.42b
	差值	-8.00	68.38	-0.07	6.74	0.76
近郊区	非根际土	51.67	414.81a	0.26	27.26a	0.82
	根际土	42.84	286.59b	0.20	18.41b	0.86
	差值	-8.84	-128.22	-0.06	-8.85	0.04
远郊区	非根际土	28.00	204.43	0.10	28.82a	0.47
	根际土	31.05	296.40	0.13	18.80b	0.46
	差值	3.05	91.97	0.03	-10.01	-0.01

*小写字母表示达 0.05 显著水平

5.4 相同区域不同利用方式土壤特性空间变异特征

5.4.1 林地土壤化学性质的区域空间变异特征

为了反映耕作等人为活动对菜地土壤特性的影响，在同区域选择林地作为对照，林地化学性质测定结果见表 5-12。

分析表明，3 个区域林地土壤各化学性质有一定差异，但都未达到显著水平。pH 值、全 P、全 K 和速效 K 的规律是城区 > 远郊 > 近郊区，阳离子交换量和有效磷是城区 < 近郊 < 远郊，有机质和全氮、碱解氮是城区 > 近郊区 > 远郊区。总体而言，3 个区域林地土壤化学性质的区域变化趋势是城区 > 郊区，但差异不明显。

林地是受人为耕作影响小的土地利用方式，其土壤中的营养含量主要跟母质、地形、气候以及种植种类有关。由于在贵阳市范围内采集的马尾松林地作为比较对象，在各方面影响条件中都相对一致。所以，尽管区域不同，其马尾松林地土壤各化学性质含量差异不显著。

表 5-12 不同区域林地土壤化学性质比较

Tab. 5-12 The average value comparison of chemistry nature in the foerset soil

区域	pH	有机质 g/kg	CEC (cmol/kg)	全氮 g/kg	P(g/kg)	k(g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
城区	6.1	61.170	19.7	2.234	0.22	15.4	170.0	0	162.2
近郊区	4.1	58.858	20.1	2.126	0.05	8.0	167.1	0.4	92.8
远郊区	4.3	55.520	20.3	1.683	0.07	15.1	160.8	0.9	118.1

5.4.2 相同区域不同利用方式下表土层化学性质的变异特征

利用菜地表土层化学性质减去林地表土层的化学性质的差值大小，探讨种植蔬菜过程中土壤特性的变化（见表 5-13）。

分析表明，土壤化学性质在总体上是菜地高于林地。远郊的菜地土壤有机质、阳离子交换量、碱解氮低于林地。近郊菜地只有碱解氮低于林地，城区只有阳离子交换量低于林地。由于远郊受到工矿厂废弃物、生活污水等污染较少，所以其菜地土壤化学性质与林地土壤比较接近，只有速效 K 的差异达到显著水平。远郊菜地速效 K 含量比林地高出 116.0mg/kg，是林地速效 K 平均含量的 2 倍。蔬菜是喜 K 植物，城区的蔬菜种植年限高于远郊，所以城区菜地土壤中速效 K 含量低于远郊，而加上可能远郊土壤母质中速效 K 的含量较高等原因导致了这一现象。

菜地是人为耕作较频繁的一种土地利用方式，而林地恰恰相反。在气候、母

质、地形等因素相差不大的情况下，菜地土壤受施肥、灌溉、耕作等影响，其土壤化学性质自然要比林地高。只不过，与林地土壤比较分析得出，菜地还是缺乏 K 素，菜农应该加大对 K 肥的施用。

表 5-13 菜地和林地表土层化学性质之差比较

Tab. 5-13 The average value comparison of chemistry nature between the foeset and vegetable soil

区域	pH	有机质 (g/kg)	CEC (cmol/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 k (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
城区	0.6	58.5	-2.6	1.4	0.4	0.02	46.2	67.5	42.1
近郊区	2.4	22.0	2.4	0.2	0.9	7.6	-9.3	50.8	47.9
远郊区	2.6	-8.9	-3.1	0.5	0.4	4.0	-24.7	26.8	116.0

5.4.3 相同区域不同利用方式土壤剖面上下层化学性质的变异特征

表 5-14 结果表明,3 个区域林地土壤剖面化学性质差异是表土层大于心土层。全 K 有表土层小于心土层的趋势。可能因为贵州省普遍缺 K 素，植物吸收表层 K 素后得不到补给，导致了 K 素表土层小于心土层。

与前文中表 5-6 相比较，总的说来菜地化学性质在剖面上的变异要大于林地在剖面上的变异。其原因可能是菜地表土层是相对耕作较频繁的一层土壤，肥料相对集中在这一层，因此与心土层的差异较大。而林地主要受自然因素的影响，其剖面差异自然要小一些。

表 5-14 林地土壤剖面上下层化学性质之差的比较

Tab. 5-14 The average value comparison of the chemical property of forestland section plane

区域	pH	有机质 g/kg	全 N(g/kg)	全 P(g/kg)	全 k(g/kg)	速效钾 mg/kg	碱解氮 mg/kg	速效磷 mg/kg	CEC(cmol/kg)
城区	1.62	49.78	1.47	0.15	-2.58	91.49	123.10	0.01	2.07
近郊区	-1.04	52.63	1.34	-0.01	-2.89	69.86	112.11	0.41	6.95
远郊区	0.11	39.46	0.77	-0.01	3.83	64.04	89.91	-0.44	6.38

5.4.4 相同区域不同利用方式下土壤重金属含量的变异特征

林地作为一种人为干扰较小的土地利用方式，其土壤中重金属含量受人为环境因素影响较小。

表 5-15 表明:城区菜地土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 这 5 种重金属均值含量均高于林地土壤。近郊除了 Pb 以外，其他菜地重金属含量都高于林地。远郊除了 Cr 外，其他菜地重金属含量也都高于林地。从统计差异看，城区菜地土壤中的 Pb 和 Hg，近郊和远郊菜地中土壤中的 As 都与其同区域林地土壤中的含量达到了

显著差异。总的说来，菜地土壤中重金属含量高于林地土壤。菜地土壤受人为干扰大，工厂“三废”的排放，农药化肥的施用，汽车尾气排放等都是造成菜地重金属含量高于林地的原因。

林地剖面土壤的重金属含量差异规律是表土层大于心土层。林地不但受污染小，而且也不受人为耕作的影响，其剖面土壤中重金属含量差异规律直接跟土壤母质中重金属含量有关。

表 5-15 不同利用方式土壤剖面上下层重金属含量的比较 (单位: mg/kg)

Tab. 5-15 The average value comparison of the heavy metal in different using way and average value comparison in section plane of forestland

区域	土层	Pb	Cr	Cd	As	Hg
城 区	菜地表土层	51.57a	199.21	0.14	20.97	1.66a
	林地表土层	19.85b	186.33	0.02	8.34	0.15b
	林地心土层	26.93	130.03	0.10	3.86	0.07
	菜地与林地表土层差值	31.72	12.88	0.12	12.63	1.52
	林地上下层差值	-7.08	56.30	-0.08	4.49	0.07
近郊区	菜地表土层	51.67	414.81	0.26	27.26a	0.82
	林地表土层	57.37	338.17	0.23	12.57b	0.40
	林地心土层	57.11	160.81	0.12	10.30	0.28
	菜地与林地表土层差值	-5.69	76.64	0.03	14.69	0.42
	林地上下层差值	0.26	177.36	0.11	2.27	0.12
远郊区	菜地表土层	28.00	204.43	0.10	28.82a	0.47
	林地表土层	21.19	300.30	0.05	9.18b	0.39
	林地心土层	13.95	149.00	0.06	11.93	0.07
	菜地与林地表土层差值	6.81	-95.87	0.05	19.64	0.08
	林地上下层差值	7.25	151.30	0	-2.75	0.32

5.5 贵阳市菜地土壤特性的相关性分析

5.5.1 菜地土壤化学性质的相关性分析

表 5-16 统计表明，pH 值与有机质、全氮、CEC 等其他化学性质存在着负相关关系，其中与 CEC 达到了 0.05 显著水平。阳离子交换量是由土壤胶体表面的净负电荷决定的。所以土壤 pH 值越低，土壤中 CEC 阳离子交换量越大。

有机质与全氮、速效磷之间存在着极显著的正相关关系，与碱解氮也存在着显著的正相关关系。碱解氮、全氮、有效磷之间各存在极显著的正相关关系。但有机质与全 K 和速效 K 之间都存在着负相关关系。全国大量的资料分析结果表明，土壤有机质含量与土壤总氮量之间呈正相关，只是随土壤所处的环境因素和利用

状况而变化。也已经有研究表明土壤中 P 含量与土壤质地和有机质也有关系，有机质丰富的土壤，含磷亦较多。本文的研究也跟其他资料显示的结果一致。全 K 和其他几项指标都没有达到显著的相关关系，可能跟土壤中普遍缺乏 K 素有关系。

表 5-16 菜地土壤主要化学性质之间的相关系数

Tab. 5-16 The relevance of chemistry nature in vegetable plot soil

	pH 值	有机质	CEC	全氮	全 P	全 K	碱解氮	速效磷	速效 K
pH 值	1								
有机质	-0.072	1							
CEC	-0.572*	0.015	1						
全氮	-0.112	0.759**	0.142	1					
全 P	0.159	0.114	0.057	-0.296	1				
全 K	-0.202	-0.379	0.019	-0.192	-0.144	1			
碱解氮	-0.220	0.548*	0.337	0.852**	-0.211	-0.031	1		
速效磷	-0.436	0.784**	0.348	0.808**	-0.096	-0.196	0.829**	1	
速效 K	0.093	-0.025	-0.180	0.383	-0.654**	0.438	0.429	0.178	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5.5.2 菜地土壤重金属含量的相关性分析

为了解贵阳市菜地土壤中的重金属间存在何种关系，它们之间的关系跟污染源的联系如何，分析了菜地土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 五种重金属间的相关性，其结果表明（表 5-17）：Pb 与 Cr 存在着极显著的正相关关系，与 Cd 也存在显著的正相关。这说明土壤中 Pb、Cr、Cd 的含量增多可能是由同种污染源造成的。比如汽车尾气中的 Pb、Cr、Cd 含量大量进入到菜地，富集在菜地土壤表层。

土壤中 As 和 Hg 与 Pb、Cr、Cd 呈负相关关系，但未达到显著水平。这跟土壤中 As、Hg 污染的原因与其他重金属污染不一样有关。有研究表明（邓秋静，2005），贵州土壤母质中的 As、Hg 含量较高。另外，由于 Hg 具有较强的挥发性，并随大气漂移，因此受贵阳市工厂的 Hg 污染影响，贵阳市菜地土壤中 Hg 污染普遍较严重。

表 5-17 菜地土壤中重金属元素含量之间的相关系数

Tab. 5-17 The relevance of the heavy metal in vegetable plot soil

	Pb	Cr	Cd	As	Hg
Pb	1.00				
Cr	0.486**	1.00			
Cd	0.417*	0.482*	1.00		
As	-0.273	-0.256	-0.110	1.00	
Hg	0.047	-0.201	-0.392*	0.226	1.00

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5.5.3 菜地土壤理化性质与重金属含量的相关性分析

土壤 PH、有机质、CEC（阳离子交换量）及<0.001mm 土壤粘粒等与土壤重金属含量之间的相关性分析结果见表 5-18。

结果表明，5 种重金属元素的含量与 pH 值呈负相关关系但均未达到 0.05 显著水平。土壤 pH 是影响土壤中重金属元素溶解度及生物有效性的主要因素之一。就一般重金属而言，土壤 pH 的降低可能导致非有效态重金属的溶解和释放，使其毒性增强。Pb 和 Cr 与有机质呈正相关关系并分别达到 0.01 和 0.05 显著水平。Cd、As、Hg 与有机质呈负相关关系，但均未达到 0.05 显著水平。土壤有机质是重金属离子的螯合剂，对重金属元素有吸附作用。一般而言，有机质含量高的土壤，对重金属的累积量也相应较大。这表明贵阳市菜地土壤有机质对重金属 Pb 和 Cr 的累积具有重要作用。

Pb、Cr、Cd、As、Hg 5 种重金属元素的含量均与阳离子交换量呈正相关关系，Pb 与土壤阳离子交换量达到了 0.01 显著水平，Cr 和 Hg 与土壤阳离子交换量达到了 0.05 显著水平，Cd、As 与土壤阳离子交换量未达到显著相关关系，而且相关系数较小，接近于 0。CEC 反映了土壤负电荷量的多少，其大小可表示土壤保蓄能力的高低。本文结果说明，贵阳市菜地土壤的保蓄性能对 Pb、Cr、Hg 的累积有重要作用，对 Cd、As 的累积影响不大。

<0.001mm 土壤粘粒是土壤无机胶体的核心部分，其对重金属元素具有极大的吸附作用，相关性分析结果表明贵阳市菜地土壤中重金属元素 Pb 与 <0.001mm 土壤粘粒含量呈正相关，并达到 0.05 显著水平，Cr、Cd、Hg 与 <0.001mm 土壤粘粒含量的相关系数都接近 0，说明他们之间的相关性不大，可能是由于 Cr、Cd、Hg、As 这 4 种重金属在贵阳市菜地土壤中的变化相对较大。

表 5-18 菜地土壤理化性质与重金属含量的相关系数

Tab. 5-18 The relevance of Soil nature and the heavy metal in vegetable plot soil

土壤性质	Pb	Cr	Cd	As	Hg
PH	-0.22	-0.38	-0.43	-0.36	-0.43
有机质	0.51**	0.38*	-0.07	-0.01	-0.06
CEC	0.50**	0.39*	0.05	0.03	0.45*
<0.001mm	0.49*	0.03	-0.02	-0.14	0.04

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5.6 贵阳市菜地蔬菜营养元素和重金属含量的区域变化分析

5.6.1 菜地蔬菜中营养元素的区域变化

植物的常量元素通常是指氮、磷、钾、钙、镁、硫。它们是土壤农化分析的常规分析项目。确定土壤养分的供应状况、诊断作物的营养水平和施肥效应及肥料利用率等，一般都离不开测定其中一种或几种元素，特别是氮、磷、钾三种要素的含量。

为了解贵阳市蔬菜中的营养元素变异特征。本文列出了贵阳市 3 个区域常见蔬菜莴笋、白菜、芹菜体内的营养元素含量，作均值比较，见表 5-19。

结果表明，3 个区域蔬菜中营养元素全 N、全 P、全 K 都没有达到显著差异。只有全 N 的规律是城区 > 近郊 > 远郊，跟土壤中全 N 含量的规律一致。全 P 和全 K 都是远郊 > 城区 > 近郊，二者的规律与土壤中全 P 和全 K 的规律不一致。

蔬菜能够富集土壤中的营养元素，蔬菜中营养元素含量可能是土壤中 10 倍、100 倍。由于本文研究得出，在各个区域的菜地中蔬菜对营养元素的富集没有显著差异。由于各个区域菜地土壤中 N、P、K 三种营养元素的含量对于蔬菜来说都不缺乏，城区甚至含量过高。而蔬菜中这 3 种营养元素含量又没有明显的差异，这说明蔬菜本身对营养元素的富集跟各区域菜地土壤中营养元素含量差异无关，只是跟蔬菜本身对这 3 种营养元素的吸收能力有关。

表 5-19 不同区域菜地土壤上的蔬菜营养元素含量比较 (单位: k/kg)

Tab. 5-19 The average value comparison of the nutritive elements in vegetables in different areas

肥力元素	区域	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数(%)
全 N	城 区	37.7	1.2	35.9	38.81	3
	近郊区	36.4	2.4	34.05	40.71	7
	远郊区	35.0	6.9	24.43	45.15	20
全 P	城 区	12.5	3.2	9.38	16.7	26
	近郊区	12.4	4.4	6.18	16.62	35
	远郊区	12.9	3.3	10.3	19.22	25
全 K	城 区	63.2	12.9	41.7	78.3	20
	近郊区	46.4	21.3	29.1	79.7	46
	远郊区	69.5	17.0	54.9	91.4	24

5.6.2 菜地蔬菜中重金属含量的区域变化

土壤中的重金属不能被土壤微生物分解，反而生物体可以富集重金属，并且把某些重金属转变成毒性更大的甲基化合物，这些污染物有的通过食物链以有害

浓度在人体内富集，严重危害人体健康。对贵阳市蔬菜中重金属含量分区域作均值比较（表 5-20）结果表明，贵阳市菜地蔬菜中重金属含量的趋势是城区 > 近郊 > 远郊。从各区域上看，蔬菜中 Cr、Cd、Hg 的含量是城区 > 近郊 > 远郊；Pb 和 As 都是近郊小于城区和远郊。从统计差异看，蔬菜中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 的含量在城区、近郊和远郊都没有达到显著差异。

表 5-20 不同区域菜地蔬菜中重金属含量差异比较（单位：mg/kg）

Tab. 5-20 The average value comparison of the heavy metal in vegetables in different areas

重金属元素	区域	平均值 [*]	方差	最小值	最大值	变异系数 (%)
Pb	城 区	1.232	0.772	0.650	2.690	63
	近郊区	0.955	0.216	0.680	1.210	23
	远郊区	1.035	0.328	0.650	1.620	32
Cd	城 区	0.038	0.026	0.020	0.090	69
	近郊区	0.037	0.014	0.020	0.060	37
	远郊区	0.030	0.011	0.020	0.050	37
Cr	城 区	0.695	0.942	0.210	2.600	136
	近郊区	0.313	0.314	0.120	0.950	100
	远郊区	0.217	0.048	0.140	0.280	22
Hg	城 区	0.015	0.006	0.010	0.024	39
	近郊区	0.014	0.003	0.011	0.019	24
	远郊区	0.011	0.008	0.007	0.027	68
As	城 区	0.701	0.544	0.238	1.720	78
	近郊区	0.556	0.234	0.270	0.864	42
	远郊区	0.840	0.841	0.129	2.493	100

5.6.3 贵阳市菜地蔬菜中营养元素和重金属之间的相关性分析

贵阳市蔬菜中营养元素和重金属之间的相关性分析结果（表 5-21）表明，贵阳市蔬菜中 3 种养分元素，全 N、全 P、全 K 的含量之间没有显著的相关性。蔬菜中 Pb、Cr、Cd 存在着极显著的相关性。这跟蔬菜受汽车尾气影响，吸收了大量 Pb、Cr、Cd 元素有关，这再次说明汽车尾气对贵阳市菜地和蔬菜质量造成了非常严重的影响。

蔬菜中全 N 与重金属 As 有着显著的正相关关系，但对其他 4 种重金属的影响不明显。P 与重金属 Pb、Cr 存在着正相关，跟 Cd、As、Hg 存在着负相关，但都未达到显著水平。K 除了与 As 存在着负相关关系，与其他 4 种都存在着正相关关系，但均没有达到显著水平。总的说来，蔬菜中的营养元素与蔬菜中的重金属含量之间没有明显的相关性。这说明蔬菜中重金属的来源跟蔬菜的营养元素含量关

系不大。

表 5-21 菜地蔬菜中营养元素与重金属的相关关系

Tab. 5-21 The relevance of the nutritive elements and heavy metal in vegetables

	Pb	Cr	Cd	As	Hg	全 N	全 P	全 K
Pb	1							
Cr	0.864**	1						
Cd	0.813**	0.770**	1					
As	0.148	0.158	0.433	1				
Hg	-0.146	-0.180	-0.017	-0.104	1			
全 N	-0.098	-0.051	0.000	0.484*	-0.099	1		
全 P	0.156	0.143	-0.284	-0.277	-0.243	0.118	1	
全 K	0.137	0.164	0.024	-0.316	0.218	-0.140	0.175	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5.7 贵阳市菜地蔬菜与土壤特性之间的相关性分析

5.7.1 菜地蔬菜与土壤营养元素间的相关性分析

养分的生物有效性指土壤中那些能被植物根系吸收的无机态养分以及在植物生长期由有机态释放出的无机态养分。试图通过比较蔬菜中营养元素和土壤中有效态营养元素之间的相关性，来了解养分的生物有效性。由表 5-22 可以得出，土壤中只有有效 K 和植物中的全 K 有极显著的相关关系，碱解 N、速效 P、CEC 等与植物中全 K、全 P、全 N 相关性不显著。可能是由于植物体内的 K 几乎都以无机离子态存在，便于植物吸收。

表 5-22 蔬菜与土壤中营养元素的相关系数

Tab. 5-22 The relevance of the nutritive elements in vegetables and soil

	土壤有效 K	土壤碱解 N	土壤速效 P	CEC	蔬菜全 N	蔬菜全 P	蔬菜全 K
土壤有效 K	1.00						
土壤碱解 N	0.41	1.00					
土壤速效 P	0.16	0.83**	1.00				
CEC	-0.17	0.37	0.32	1.00			
蔬菜全 N	-0.09	-0.09	0.07	-0.13	1.00		
蔬菜全 P	-0.18	-0.19	-0.42	-0.20	0.12	1.00	
蔬菜全 K	0.69**	0.28	-0.09	-0.28	-0.14	0.18	1.00

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

5.7.2 菜地蔬菜与土壤中重金属含量之间的相关性分析

植物富集重金属的能力除了重金属在土壤中含有关系，还与其本身固有的

基本特征有关。菜地蔬菜中重金属含量与土壤中重金属含量之间的相关系数见表 5-23。

分析结果表明，贵阳市蔬菜与土壤中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 的含量没有显著的相关性。本文选择的主要是白菜、芹菜、莴笋叶等蔬菜作为研究对象，白菜和芹菜是根系不发达的蔬菜，主要部分是菜叶，而采集的莴笋也以菜叶为主。这说明，由于根系的特征影响，重金属容易富集在植物根部，导致了菜叶中的重金属含量与土壤中的含量相关性不明显。

表 5-23 蔬菜与土壤中重金属含量的相关系数

Tab. 5-23 The relevance of the heavy metal in vegetables and soil

	蔬菜 Pb	蔬菜 Cr	蔬菜 Cd	蔬菜 As	蔬菜 Hg
土壤 Pb	-0.128	-0.152	-0.200	0.024	-0.023
土壤 Cr	0.024	-0.006	-0.073	0.132	0.167
土壤 Cd	0.210	0.111	0.151	0.376	0.133
土壤 As	-0.371	-0.393	-0.365	-0.198	0.022
土壤 Hg	-0.182	0.003	-0.268	-0.080	0.082

5.7.3 菜地蔬菜中重金属含量与土壤化学性质之间的相关性分析

菜地土壤中的有机质、pH 值、CEC、营养元素等理化性质不同，会直接影响重金属在土壤中的迁移与固定，从而影响蔬菜对其吸收和富集。本文试图通过土壤特性与蔬菜中重金属含量之间的相关性分析，探讨土壤特性对蔬菜中重金属含量的影响，结果表明（表 5-24）：土壤有机质、pH 值、CEC、营养元素等性质跟蔬菜中重金属的相关性不显著。

表 5-24 菜地土壤化学性质与蔬菜中重金属含量的相关关系

Tab. 5-24 The relevance of the heavy metal in vegetables and the other natures soil

项目	蔬菜 Pb	蔬菜 Cr	蔬菜 Cd	蔬菜 As	蔬菜 Hg
pH	0.122	0.257	0.081	-0.094	-0.237
有机质	0.029	-0.125	0.271	0.442	0.131
速效 K	0.006	0.243	0.135	-0.135	0.032
碱解氮	0.277	0.155	0.321	-0.021	0.412
有效磷	0.292	0.129	0.473	0.346	0.208
CEC	-0.029	-0.112	-0.089	-0.053	0.292

土壤 pH 值和 CEC 跟蔬菜中 Cr 和 Hg 的相关性最大，跟 Pb、Cd、As 几乎没有相关性。这说明 pH 值、CEC 值的升高或降低对蔬菜吸收 Cr 和 Hg 有影响，对蔬菜吸收 Pb、Cd、As 几乎没有影响。有机质含量较高的土壤上生产的蔬菜中 As、Hg 和 Cd 含量较高，说明菜地土壤有机质对蔬菜吸收重金属 As、Hg 和 Cd 具有一定

影响；土壤速效 K 对蔬菜吸收重金属的影响不大，但有效磷对其吸收重金属有一些影响，除了 As 外，碱解氮对蔬菜吸收其他重金属有一定影响。其具体的原因还有待进一步研究。

5.8 贵阳市菜地土壤重金属污染评价

5.8.1 土壤重金属环境质量评价标准

本文采用《中国蔬菜生产质量管理规范》(简称 GAP)推荐的蔬菜产地的环境应符合国家相应标准：即土壤应符合《土壤环境质量标准 GB-15618-1995》二级标准。评价标准见表 5-25。

土壤环境质量分级是土壤质量评价的基本内容。本文根据农业部行业标准《农田土壤环境质量监测技术规范 NY/T395-2000》的分级方法，来对土壤中重金属污染进行评价，分级标准见表 5-26。

表 5-25 土壤环境质量标准 (GB-15618-1995) (单位: mg/kg)

Tab.5-25 Environmental quality standard for soils,GB15618-1995 (mg/kg)

项目	一级		二级		三级
	自然背景	pH<6.5	pH=6.5~7.5	pH>7.5	pH>6.5
镉≤	0.20	0.30	0.60	1.0	
铬≤	90	150	200	250	300
铅≤	35	250	300	350	500
汞≤	0.15	0.30	0.50	1.0	1.5
砷≤	15	40	30	25	40

表 5-26 土壤污染分级标准

Tab. 5-26 The Craduation standard of soil pollution

等级	综合污染指数	污染等级	污染水平
I	$P_n \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_n \leq 1.0$	警戒级	尚清洁
III	$1.0 < P_n \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超过背景值，视为轻度污染，作物开始污染
IV	$2.0 < P_n \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物均受到中度污染
V	$P_n > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

5.8.2 菜地土壤重金属污染评价方法

土壤重金属质量安全评价模式分为单项污染指数法和综合污染指数法。

单项污染指数公式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中： P_i 为土壤中污染物*i*的单项污染指数； C_i 为土壤中污染物*i*的实测数据； S_i 为污染物*i*的评价标准。 $P_i < 1$ ，表示土壤未受污染物*i*污染； $P_i > 1$ ，表示土壤受污染， P_i 越大，受污染程度越重。

综合污染指数公式为：

$$P_{\text{综合}} = \left[\frac{1}{2} (P_{\text{最大}}^2 + P_{\text{平均}}^2) \right]^{1/2}$$

式中：

- $P_{\text{综合}}$ — 内梅罗综合污染指数
- $P_{\text{最大}}$ — 单项污染指数最高值
- $P_{\text{平均}}$ — 参加评价的单项污染指数的算术平均值

5.8.3 不同区域菜地地表土层重金属污染现状评价

贵阳市 3 个区域菜地地表土层重金属元素的综合污染指数如表 5-27。可以看出，全市菜地土壤重金属多因子综合污染指数城区 > 近郊 > 远郊。城区其多因子污染指数 $P_{\text{综}}$ 为 3.306，表明该区域菜地地表土层土壤重金属处于重度污染，作物也受到重度污染。近郊的 $P_{\text{综}}$ 为 1.674，该区域土壤已处于轻度污染，土壤污染已经超过了背景值，作物也开始受到污染。远郊的 $P_{\text{综}}$ 为 0.863，暂时处于警戒级，土壤尚算清洁。

从单因子综合污染指数来看，除了 Cr 外，其他重金属的单因子综合污染指数也均是城区 > 近郊 > 远郊。Pb 的综合污染指数城区为 1.448，属于轻度污染水平；近郊在 0.7 到 1 之间，处于警戒状态；远郊低于 0.7，处于安全级内。

近郊菜地 Cr 的综合污染指数均大于 2，已造成中度污染；远郊区大于 1，属于轻度污染。Cd 的综合污染指数均低于 0.7，土壤处于安全级内。近郊和远郊菜地未受到 As 的污染，城区稍大于 0.7 处于警戒状态。Hg 的综合污染指数是所有因子中最高的，城区已经达到 4.366，明显受到重度污染，近郊已处于轻度污染，远郊处于警戒状态。

城区菜地受到的重金属污染明显比近郊和远郊严重。随着城市工业的发展，“三废”等污染物进入土壤，市郊菜地也成为污染源的承接地。由于蔬菜基地大

部分地块处于汽车来往频繁的公路边，汽油燃烧时排放的含铅废气已引起较为明显的污染，而远郊土壤中 Pb 含量明显低于城区，也是远郊车流量明显低于城区所致。土壤 Cr 的污染主要受贵阳耐火材料厂和贵州铝厂以及一些电镀，金属酸洗等工业废水影响，而近郊和远郊区 Cr 污染比城区严重的原因可能是受汽车尾气的影响。土壤 Cd 的污染目前在贵阳地区菜地土壤中还未见表现。城区菜地土壤 As 的污染主要受电厂等厂矿影响，土壤 Hg 的污染主要受贵州铝厂、贵阳钢厂、贵阳电厂等燃煤量大的厂矿的影响。

表 5-27 贵阳市不同区域菜地表土层重金属污染指数

Tab.5-27 Pollution evaluation of heavy metal in arable soils of different base

区域	单因子综合污染指数					多因子综合污染指数
	Pb	Cr	Cd	As	Hg	
城区	1.448	0.996	0.672	0.875	4.366	3.306
近郊区	0.881	2.074	0.343	0.659	1.751	1.674
远郊区	0.578	1.022	0.295	0.618	0.827	0.863

5.8.4 不同区域菜地心土层中重金属污染现状评价

贵阳市 3 个区域菜地心土层重金属元素的综合污染指数如表 5-28。从多因子综合污染指数可以看出，3 个区域菜地心土层土壤重金属多因子综合污染指数城区 > 近郊 > 远郊，城区和近郊稍大于 0.7，属于警戒状态，远郊没有受到污染。从单因子综合污染指数来看，只有城区的 Pb 达到了轻度污染，其程度几乎是近郊和远郊的 3 倍。城区 Cr 的综合污染指数为 0.9，大于 0.7 属于警戒状态。其余心土层各重金属的单因子综合污染指数均小于 0.7，属于安全级内，土壤没有受到污染。重金属是最难迁移的污染物，因此，表土层土壤重金属高是外来重金属输入并在土壤表层累积的结果。

表 5-28 贵阳市不同区域菜地心土层重金属污染指数

Tab.5-28 Pollution evaluation of heavy metal in sub soils of different base

分区	单因子综合污染指数					多因子综合污染指数
	Pb	Cr	Cd	As	Hg	
城区	1.13	0.90	0.05	0.26	0.23	0.876
近郊区	0.49	0.97	0.12	0.30	0.36	0.754
远远郊区	0.42	0.69	0.14	0.36	0.20	0.553

5.9 贵阳市菜地蔬菜中重金属污染评价

5.9.1 蔬菜中重金属污染评价方法

本文对蔬菜重金属污染状况评价采用《中华人民共和国蔬菜食品卫生标准》

中限量值（表 5-29）。污染指数是蔬菜重金属污染状况的评价指标，其计算方法如下：

$$\text{污染指数: } I_i = \frac{P}{S}$$

$$\bar{I}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

$$I_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{I}_i$$

I_i —污染物污染指数；

\bar{I}_i —污染物在某种蔬菜中的平均污染指数；

I_i —各种蔬菜综合污染指数；

P —测定值；

S —蔬菜限量标准值（见表 5-29）；

n —某种蔬菜样品数； N —污染物种类。

表 5-29 中华人民共和国蔬菜食品卫生标准

Tab.5-29 Hygienic standards for vegetable food security of P.R.China

元素	标准限值（鲜重 mg/kg）	依据标准
Cd	≤0.1（根茎类蔬菜）	GB 2762-2005
	≤0.2（叶菜、芹菜、食用菌类）	
	≤0.05（其它蔬菜）	
Cr	≤0.50	GB 2762-2005
Pb	≤0.1（除球茎、叶菜、食用菌类外的蔬菜）	GB 2762-2005
	≤0.3（球茎蔬菜）	
	≤0.3（叶菜类）	
Hg	≤0.01	GB 2762-2005
As	≤0.05	GB 2762-2005

5.9.2 不同区域蔬菜中重金属污染现状评价

不同区域土壤、空气及灌溉水中重金属含量不同，对蔬菜中重金属含量有着极大影响。下面主要以平均污染指数及综合污染指数来进行总体上评价各区域蔬菜中各重金属污染状况。

表 5-30 结果表明，贵阳市菜地蔬菜中重金属污染的总趋势是城区 > 近郊 > 远郊。根据我国蔬菜食品卫生标准（表 5-29），贵阳市蔬菜中重金属 Pb、Hg、As 的含量超标，而 Hg、As 污染最为严重；蔬菜中 Cd、Cr 含量没有超过标准。

表 5-30 贵阳市不同区域蔬菜中重金属污染指数

Tab.5-30 Pollution evaluation of heavy metal in vegetable of different base

分区	平均污染指数					综合 污染指数
	Pb	Cd	Cr	Hg	As	
城 区	0.684	0.032	0.232	0.250	2.337	1.178
近郊区	0.531	0.031	0.104	0.233	1.853	0.917
远远郊区	0.575	0.025	0.072	0.183	2.800	1.219

5.10 贵阳市菜地土壤特性的区域变异原因及对环境的影响

5.10.1 贵阳市菜地土壤性质的区域变异原因

根据上述研究结果得出，从整体上来看贵阳市土壤特性存在明显的区域变异，其趋势是城区>郊区>远郊区。对于引起菜地土壤特性区域变异的主要因素有母质、气候、地形、水文、种植时间、人类活动等。

首先，土壤母质是土壤形成的基础，往往由于母质的差异而致使土壤特性存在着较大的变异，母质差异小，土壤特性空间变异也小。本研究均采集黄壤和黄壤性水稻土发育的菜地土壤，以及相应的极少受到环境污染的黄壤林地土壤剖面样品作为对照样品。因此本研究的菜地土壤区域变异，土壤母质差异不是主要原因。

其次，地形对土壤肥力和有效水有较大影响，在坡度相似的位置，土壤特性趋于相似。本研究中的蔬菜基地是在贵阳市范围内，其地形大致一致，地形不是土壤差异的主要原因。

最后，对贵阳市蔬菜基地土壤产生区域变异最大的影响因素是气候、时间、水文、人类活动。

(1) 菜地耕作的年限长短会影响到菜地土壤特性的变异。根据表 4-1，贵阳市菜地的种植年限是城区>近郊>远郊。有众多研究表明，种植年限长的土壤土层深厚，熟化程度高，与种植年限短的土壤特性有明显区别。因此，贵阳市蔬菜基地土壤特性区域变异跟各区域菜地蔬菜种植年限有关。

(2) 土壤特性空间变异程度决定于土壤形成过程及其在空间和时间上的平衡，因而气候的差异会对土壤特性空间变异产生强烈的影响。目前受城市“热岛效应”的影响，城区气温明显高于近郊和远郊。

(3) 灌溉水质的差异是贵阳市菜地土壤特性区域变异的重要原因。由于城

区、近郊区水质都受到不同程度的污染，2个区域菜地都有因灌溉水质问题产生的土壤特性变异。比如生活污水中含有大量 N、P 等物质，菜农盲目利用此类水灌溉菜田，导致近郊区和城区的菜地有机质含量是远郊区的 2 到 3 倍。

(4) 其他人类活动也是贵阳市菜地土壤特性区域变异的主要原因。农业生产中的施肥（化肥或有机肥）、作物品种、灌溉及其它的一些生产管理措施都是使土壤特性产生较大变异的因素。贵阳市不同区域的菜农在管理、施肥、灌溉方式上都存在差异，这是导致蔬菜基地土壤区域变异的重要因素。比如城郊区菜农偏向于施用化肥、农药来改善土壤，而远郊区菜农出于经济上考虑偏向施用农家肥，如此以来，在施肥方式上不同导致了贵阳市菜地土壤 K 素的区域变异。人类活动中还有重要的一项就是工矿厂的“三废”排放，也是影响菜地土壤特性的重要因素。比如城区菜农一般会将工矿厂排放到菜地的废渣堆积在蔬菜表层或混合土壤种植蔬菜，并将污水不加合理处理就灌溉。总之，影响贵阳市黄壤菜地土壤特性区域变异的主要因素是蔬菜种植年限、灌溉水质及其他人类活动。而贵阳市黄壤菜地土壤母质、气候、地形等因素对其没有明显的影响。

5.10.2 贵阳市菜地土壤特性区域变异对环境的影响

贵阳市菜地土壤特性产生了区域变异，对土壤生态环境和水体生态环境都将产生影响。贵阳市菜地区域土壤产生了变异，使土壤生态环境的重金属污染加剧，土壤肥力不均衡，营养过剩、空气污染等危机。

第一，土壤的其他性质对土壤中重金属的影响很大，如土壤 pH 的降低可能导致非有效态重金属的溶解和释放，使其毒性增强；菜地土壤有机质对重金属 Pb 和 Cr 的累积具有重要影响。土壤的保蓄性能对 Pb、Cr、Hg 的累积有重要作用，对 Cd、As 的累积影响不大。<0.001mm 土壤粘粒对重金属 Pb 的吸附影响较大，对 Cr、Cd、Hg、As 没有影响。土壤的这些性质产生了区域变异，同时也会影响到蔬菜中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 等重金属产生区域变异。研究表明，由于工矿厂“三废”排放、农药化肥施用使得菜地表土中 Pb、Cr、Cd、As、Hg 的含量在城区和近郊都高于远郊，土壤中的重金属具有长期隐蔽性，难迁移，易富集到植物体中等特征，所以蔬菜中重金属含量也有城区>近郊>远郊的趋势，且主要受到 Pb、As、Hg 的污染，其中 Pb、Hg 的污染较为严重。因此，贵阳市菜地土壤特性的空间变异对土壤及蔬菜品质都会产生影响。

第二，土壤肥力不均衡，营养过剩也可能对环境造成难以弥补的污染。城郊

区土壤中过剩的营养如 N、P 等可能随着雨水流入附近河流，或渗漏到地下污染地下水，造成水体的富营养化。

第三，Hg 这种重金属具有挥发性，会污染空气。贵阳市菜地土壤的保蓄性能就对 Hg 的累积有重要作用，因此，土壤特性的区域变异也会影响土壤中重金属的含量，进而影响空气质量。

总之，由于土壤特性在空间上产生变异，受土壤特性影响的土壤重金属也产生了区域变异，进而影响到蔬菜的品质和空气质量，并受土壤肥力过剩的影响，可能造成水体的富营养化。

6 菜地土壤合理利用及污染防治措施与建议

6.1 解决土壤肥力不均衡问题的对策

贵阳市菜地土壤肥力空间变异特性大，其主要土壤性质的变异趋势是城区 > 近郊 > 远郊，而 K 素的变异趋势却相反。城郊区菜地土壤有机质与 N 素含量很高，超过前人研究的蔬菜有机质和 N 素的合适含量。

针对本研究得出的贵阳市菜地土壤肥力空间变异的特征，应该从控制 N 素对菜地土壤的富集和提高对菜地施用 K 肥的重视两个方面来解决。

土壤中过多的 N 含量会随着雨水或灌溉水进入附近河流或则渗透到地下水中，造成水体的富营养化。而 N 素含量过多除了施肥的比例不当以外，生活污水、工业“三废”的影响也非常大。因此，菜农在施用肥料时应相对减少对 N 素的施用。

贵阳市菜地土壤中 K 素含量明显缺乏。城郊区常施用化肥而不重视有机肥的施用是其菜地土壤 K 素缺乏的重要原因。因此，建议城郊区菜农应重视农家肥等有机肥的施用，或重视施用 K 肥。

6.2 解决土壤重金属污染问题的对策

根据本文的研究，贵阳市菜地土壤受重金属污染的趋势是城区 > 近郊 > 远郊。其中个别菜地（如：清镇、白云菜地）土壤的污染程度已到中度污染以上，此类菜地已不合作为无公害农产品生产菜地。

蔬菜和土壤中的重金属污染源主要是工矿厂的“三废”和汽车尾气。针对污染源的治理原则，应请市政府和有关管理部门对土壤重金属污染问题予以高度的

重视。

6.2.1 严格控制工业“三废”

土壤重金属污染在很大程度上是由于工业“三废”污染源造成的，因此应首先严格控制污染物的排放，从源头控制重金属污染物进入土体。无论是城市还是乡镇，凡新建、扩建、改建企业都要严格执行国家颁布的工业“三废”排放标准，使污染尽可能控制在排放之前。各级部门应加大对土壤污染的监督和管理力度，并同时加强宣传工作，提高公众的环保和健康意识，以此来促进土壤环境保护工作的深入开展。建立和完善土壤污染防治、控制和治理的有关法规和政策措施。

6.2.2 治理与宣传相结合

贵阳市现有的菜地都位于城市郊区，其生态环境基本都已经达不到绿色生产要求，而要对现有的城郊菜地进行综合治理，又十分困难，要在这些菜地生产绿色无公害蔬菜基本上是不可能达到要求的，最好的办法就是我们应该逐步淘汰目前的离市区较近的菜地，在城市远郊、远离厂矿的地方选择生态环境好，交通良好但是车流量少的地块建立无公害菜地，并形成一定规模，由政府提出相应的政策措施对其进行统一的管理。对菜地菜农进行宣传教育和指导，引导菜农进行绿色蔬菜生产。让他们真正从思想上认识到进行蔬菜的绿色无公害生产是提高人们身体健康、保护环境、维护生态平衡和蔬菜产业可持续发展的迫切需要。然后，严格按照无公害生产标准进行生产，真正形成有贵阳市特色的绿色蔬菜生产菜地。

对已被重金属污染的土壤要及时采取措施进行治理，在治理中要重视实用技术的开发。目前对土壤重金属污染的治理有工程治理和农艺调控两种措施。

6.2.3.1 工程治理措施

(1) 改土法。主要是覆土和换土，此法适用于小面积污染严重的土壤治理。

(2) 电化法。此法经济合理特别适合于低渗透性的黏土和淤泥土，而且可以回收多种重金属元素。但对于渗透性高、传导性差的砂质土壤清除重金属的效果较差。

(3) 热处理法。对于具有挥发性的重金属汞，热处理法可将其有效地从土壤中清除。其原理是向汞污染土壤通入热蒸汽或用低频加热的方法，促使其从土壤中挥发并回收再处理。

总之，用工程治理土壤重金属污染，对于污染重、面积小的土壤具有治理效果明显、迅速的优点，但对于污染面积较大的土壤则需要消耗大量的人力与财力，而且容易导致土壤结构的破坏和土壤肥力的下降。

6.2.3.2 农艺调控措施

作物从土壤中吸收重金属，不仅取决于其在土壤中的含量，而且也受土壤的性质、水分条件、施肥的种类和数量、栽培的植物种类、栽培方式以及耕作制度等农艺措施的影响。因此，可以通过调节土壤 pH、土壤氧化还原状态、有机质含量等因素，改变土壤重金属活性，降低其生物有效性，减少从土壤向作物的转移。

7 结论与问题讨论

7.1 主要结论

本文研究了贵阳市黄壤菜地表土层、心土层、根际与非根际土壤理化性质的区域变异特征，分析了菜地土壤理化性质及重金属含量与蔬菜重金属含量的相关关系，评价了菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况，探讨了贵阳市菜地土壤特性的区域变异原因及其对环境的影响。得出的主要结论如下：

(1) 贵阳市不同区域之间的菜地表土层多为重壤土，土壤容重、孔隙度等比较适中，土壤保水透水性能较好，适合蔬菜生长。不同区域之间的菜地表土层物理性粘粒、毛管孔隙度、非毛管孔隙度存在明显的差异，其余土壤物理性质的差异不明显。各区域的菜地表土层呈中性或弱酸性，区域之间差异不大。菜地表土层阳离子交换量有近郊区高于城区和远郊区的趋势，区域之间具有一定的差异，其平均值均在 $17\text{Cmol}(+)/\text{kg}$ 以上，属于中上等保肥水平。城区菜地表土层有机质、全氮和碱解氮含量高于近郊区和远郊区并达到显著性差异；城区表土层有机质均值达到 $117.4\text{g}/\text{kg}$ ，是远郊区土壤的 3 倍。菜地表土层全磷和有效磷含量的变化规律并不完全一致，有城区和近郊区大于远郊区的趋势；而钾素含量是远郊区 > 近郊区 > 城区。

(2) 贵阳市菜地土壤的大部分特性指标是根际 > 非根际，只有土壤 P 素和 K 素含量表现为根际 < 非根际。

(3) 贵阳市菜地土壤的大部分特性指标是表土层 > 心土层。不同区域菜地土壤的理化性质基本上表现为表土层好于心土层，表明土壤养分含量等特性在菜

地土壤表层有明显富集现象。

(4) 贵阳市菜地土壤重金属含量呈现出城区>近郊区>远郊区的趋势，但均未达到显著差异。3个区域表土层受Hg污染最严重，远郊处于警戒状态，近郊已处于轻度污染，城区则受到重度污染；其次是受Cr、Pb污染，未受到明显的As、Cd污染。3个区域菜地心土层的重金属多因子综合污染指数是城区>郊区>远郊区，其中除了城区土壤中的Pb达到了轻度污染，Cr达到警戒状态外，其余各重金属的单因子综合污染指数均小于0.7，说明心土层尚未受到污染。

(5) 贵阳市菜地蔬菜中重金属含量也表现为城区>近郊区>远郊区，但均未达到显著差异。蔬菜中Hg和As污染较重，而Cd、Cr含量没有超标。

(6) 不同区域菜地土壤上生产的蔬菜中Pb、Cr、Cd含量相互之间存在着显著的相关关系($r=0.864, n=18$)，但各重金属的含量在蔬菜与土壤之间没有达到显著的相关性。

(7) 菜地土壤pH值、CEC值的高低对蔬菜吸收Cr和Hg有一定影响，对其吸收Pb、Cd、As几乎没有影响；有机质含量较高的土壤上生产的蔬菜中As、Hg和Cd含量较高，说明菜地土壤有机质对蔬菜吸收重金属As、Hg和Cd具有一定影响；土壤速效K对蔬菜吸收重金属的影响不大，但有效磷对其吸收重金属有一些影响，除了As外，碱解氮对蔬菜吸收其他重金属有一定影响。

(8) 城市化的快速发展已经导致了城市菜地生态系统土壤特性区域间的变化，其影响趋势是城区>郊区>远郊区。影响贵阳市菜地土壤特性区域变异的主要因素是种植年限、灌溉水质、人类的活动等，其中人类活动是主要因素，如施肥管理水平的高低直接影响贵阳市菜地土壤肥力的空间变异。

7.2 创新、问题与下一步工作设想

本论文是在同课题组前人工作的基础上进一步完成的。此次工作主要针对贵阳市黄壤菜地土壤性质区域变异特征、蔬菜品质进行研究，本文的创新点就在于分析了黄壤菜地土壤特性间的相关性，尤其是蔬菜中重金属含量与土壤中重金属含量的相关性分析。

由于课题研究时间有限和认识的局限性，本论文还存在一些不足，需要进一步完善。

(1) 此次研究着重针对采集野外田间样品进行分析，还未能室内进行盆

载模拟试验以求排除各差异因素得到更加精确的实验结论。

(2) 本论文只选择了贵阳市黄壤菜地土壤进行讨论，而关于贵阳市其他菜地土壤类型未涉及，需要课题组以后作补充。

(3) 本文未能就土壤特性对蔬菜吸收重金属的影响进行深入研究，还有待课题组作进一步研究。

致 谢

在论文撰写完成之际，我要衷心地感谢我的恩师何腾兵教授和林昌虎研究员，该论文是在他们悉心指导下完成的。几年来，导师严谨务实的治学态度、渊博的知识、与时俱进的科学精神和宽以待人的品质，将让我受益终生。在今后的日子里，我将牢记他们的谆谆教诲，决不辜负他们对我的殷切希望。

在论文的设计和实验过程中，得到了刘方教授、魏成熙教授、刘元生副教授、卜通达老师、凌邦元老师及张冬青师兄、何佳芳、周涛、董玲玲师姐等的悉心指导，以及环境科学和土壤学研究生李中元、李珊、王金乐、余海、符裕红、唐敏等同学的无私帮助，在此深表感谢。同时也感谢所有关心、帮助、鼓励过我的朋友、同学和师兄师姐、师弟师妹。

最后，我要向亲爱的母亲涂建清、男友吕磊表示最深切的感谢，感谢他们在我多年的学习生涯中给予我莫大的支持和鼓励。

王 萍

2007年3月于贵阳市花溪区

参考文献

- [1]王萍,何腾兵.贵阳市蔬菜基地土壤特性区域变化规律.贵州农业科学.2007,35(1):36~39
- [2]王波,王元仲,李冬梅等.迁安市农田重金属含量空间变异性.应用生态学报,2006,17(8):1495~1500
- [3]王介元,等.土壤肥料学[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [4]王彩绒,胡正义,杨林章,等.太湖典型地区菜地土壤磷素淋失风险[J].环境科学学报,2005,25(1):76~80.
- [5]王巩,罗海波.从养分平衡看贵州土壤养分及肥料的补充.耕作与栽培.2000,3:52~53
- [6]王政权.地统计学及在生态学中的应用.北京:科学出版社,1999.
- [7]北京林业大学.土壤学(上册)[M].北京:中国林业出版社,1998.
- [8]申屠超,夏伟立,周焱,等.污水灌溉对大白菜金属元素吸收与积累的影响[J].浙江农业学报,2003,15(5):297~301.
- [9]田应兵,程水源,周建利等.城郊菜地土壤重金属含量及其影响因素[N].湖北农业科学.2005(2):66~70.
- [10]冯娜娜,李廷轩,张锡洲等.不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征.水土保持学报.2006,20(3):123~128
- [11]朱祖祥.土壤学(上册).北京:农业出版社,1983.
- [12]刘元生,何腾兵,罗海波.贵阳市乌当区耕地土壤重金属污染现状及其评价[J].重庆环境科学.2003,25(10):42~45.
- [13]李俊莉,宋华明.土壤理化性质对重金属行为的影响分析.环境科学动态.2003,1:24~26.
- [14]李子忠.不同尺度下农田土壤水分和无机氮的空间变异性.中国农业大学博士论文.2000
- [15]李毅,刘建军.土壤空间变异性研究方法.石河子大学学报(自然科学版).2004,4(4):331~337
- [16]李亮亮,依艳丽,凌国鑫等.地统计学在土壤空间变异研究中的应用.土壤通报.2005,36(2):265~268
- [17]何腾兵,刘元生,李天智,等.贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒土壤特性研究.水土保持学报,2000,14(2):55~59.
- [18]何腾兵,董玲玲,刘元生,等.贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究.水土保持学报,2006,20(6):157~162
- [19]何佳芳,何腾兵.某铅锌冶炼厂废弃地复垦整理区土壤重金属污染评价.水土保持学报.2006,20(2):97~101
- [20]杜彩艳,祖艳群,李元.pH和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究.云南农业大学学报.2005,20(4):539~543
- [21]邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异.地理学报.2002,57(5):587~594
- [22]房世波,潘剑君,杨武年.南京市郊菜地土壤肥力的时空变化规律[J].土壤.2003,35(6):518~521.
- [23]张涛,卫和平.谈城市污水灌溉.黑龙江水利科技.2005,33(4)
- [24]张学利,杨树军,张百习,等.不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比[J].福建林学院学报.2005,25(1):80~84.
- [25]和爱玲,黄绍文,介晓磊等.菜田土壤养分空间变异特征.土壤肥料.2006(1):9~13
- [26]金耀青,张中原.配方施肥方法及其应用[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1993,98.
- [27]陈旭晖,陈湘燕.贵州土壤钾素状况与钾肥施用问题[J].西南农业大学学报,2003,25(2):157~163.

- [28]周涛. 贵阳市城郊菜地土壤重金属污染状况及其对蔬菜安全的影响评价. 贵州大学硕士研究生学位论文, 2006
- [29]周建斌, 翟丙年, 陈竹君等. 设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应[N]. 农业环境科学学报. 2004, 23(2): 332~335.
- [30]陆引罡, 王巩. 贵州贵阳市郊区菜园土壤重金属污染的初步调查[J]. 土壤通报. 2001, 32(5): 235-237.
- [31]杨俐苹, 姜城, 金继运, 张峰民. 棉田土壤养分精准管理初探[J]. 中国农业科学. 2000, 33(6): 67-72.
- [32]姜勇, 庄秋丽, 梁文举等. 空间变异在土壤性质长期定位观测及取样中的应用, 土壤通报, 2005, 36(4): 531-535
- [33]姚丽贤, 周修冲, 蔡永发. 菜地土壤养分的空间变异特征[J]. 土壤通报. 2004, 35(5): 533~536.
- [34]南京农业大学. 土壤农化分析(第2版)[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- [35]涂成龙. 贵州西部喀斯特地区典型石漠化土壤氮素变异特征初步研究. 贵州大学2005届硕士研究生学位论文, 2005
- [36]涂成龙, 林昌虎, 何腾兵, 等. 黔中石漠化地区生态恢复过程中土壤养分变异特征. 水土保持通报, 2004, 24(6): 22~25
- [37]唐高霞 金春花. 土壤酸碱度对蔬菜生长的影响[J]. 土壤肥料, 2006(1): 27.
- [38]秦耀东. 土壤空间变异研究中的定量分析[J]. 地球科学进展, 1992. 7(1): 44-49.
- [39]梁中龙, 袁中友, 林兴通, 等. 城郊耕层土壤养分的空间变异特征. 土壤通报. 2006, 37(3): 417-421
- [40]葛晓光, 高慧, 张恩平, 等. 长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统变化的研究(IV)蔬菜生态系统的变化[J]. 园艺学报, 2004, 31(5): 598-602.
- [41]葛晓光, 张恩平, 张昕. 长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统变化的研究(I)土壤有机质的变化[J]. 园艺学报. 2004, 31(1): 34~38.
- [42]黄辉, 檀满枝, 陈杰. 南通市城市边缘带土壤肥力时空特征分析. 土壤. 2006, 38(3): 276-281
- [43]黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79-88.
- [44]蒋名川, 解淑贞. 蔬菜施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1985, 1-30.
- [45]鲁植雄, 张维强, 潘君拯. 分形理论及其在农业土壤中的应用[J]. 土壤学进展, 1994, 22(5): 40-45.
- [46]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [47]蒋大明, 肖厚军, 夏锦慧, 等. 修文县久长试区主要旱地黄壤理化性质与农业利用对策. 贵州农业科学. 2004. 32(1): 35~38
- [48]谭丽娟, 魏成熙, 常德荣. 贵阳市无公害蔬菜基地土壤环境质量的监测与评价[J]. 山地农业生物学报 2004, 23(3): 234~238.
- [49]Dirk Mallants Binayakp. Spatial Variability of Hydraulic properties in a multi-layered soil profile[J]. Soil Science, 1996, 161(3): 167-181.
- [50]Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. Geoderma, 1999, 89: 1-45.
- [51]Huang Shao-Wen, Jin Ji-Yun, Yang Li-Ping, Bai You-Lu and Li Chun-Hua. Spatial variability of nitrate in cabbage and nitrate-N in soil[J]. Soil Science. 2004, 169(9): 640-649.
- [52]White J G, Welch R M, and Novell W A. Soil Zn map of USA using geostatistics and geographic information systems[J]. Soil Sci. Soc. Am., 1997, 61: 185-194.
- [53]Tsegaye T, Hill R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties[J]. Soil Science, 1998, 163(2): 143-154.

附录

1、发表论文情况：

王 萍，何腾兵. 贵阳市蔬菜基地土壤特性区域变化规律. 贵州农业科学, 2007, 35 (1) : 36~39

2、参加科研情况：

(1) 黔中菜地土壤理化属性空间变异对重金属生物有效性的影响研究
(黔科合 J 字[2005]2079 号)

(2) “贵州省喀斯特山区石漠化分级分类中土壤性状特征研究” (贵州省省长基金资助项目)。