

长江口九段沙上沙典型岸滩短期地貌动力过程研究

摘 要

长江河口呈三级分叉四口入海的河势格局,九段沙位处长江口南北槽之间,是现代长江河口第三代新生江心沙洲,是一块未受围垦影响的“处女地”,也是国内唯一基本保持原始河口沙洲地貌及其发育过程的重要地区。本文即确定九段沙上沙为研究区域,着重分析了九段沙上沙一典型岸滩的短期地貌动力过程。本文选用的实测资料数据包括:在九段沙上沙布设的2个断面9个测站,于2006年6月~2007年6月逐月测取的滩面高程资料和采集的表层沉积样品,与此同时,在上沙码头一固定采样点逐日采集的悬沙水样,并于2006年洪枯季在上沙码头前沿水域进行的两次定点周日水文测量。

本文利用水文学、泥沙运动力学和数理统计相结合的方法,详细分析了九段沙上沙一典型岸滩短期冲淤演变特征,及其表层沉积物和悬沙浓度年内变化特征,探讨了上述岸滩的短期地貌动力过程及其演变机理。

研究结果表明,潮滩具有明显的季节性冲淤循环规律,呈现“洪淤枯冲”的变化特征;潮滩表层沉积物在时间上也表现出洪枯季变化特征:丰水期潮滩淤积,沉积物粒度较细;枯水期潮滩冲刷,沉积物粒度较粗。潮滩沉积物在空间上表现出明显的纵向差异和横向分异特征,这是由于人工抛石筑堤改变了潮滩泥沙来源及水动力条件。

2006年“碧利斯”台风期间,波高达2.56m,增水1m多,强浪伴随增水,导致滩面平均蚀低6.4cm,最大蚀深20.2cm,其侵蚀量占年侵蚀总量近五成。台风作用造成滩面冲刷,沉积物粗化,台风过后滩面迅速回淤,粒径变细。台风期间的沉积物粒径变化幅度较正常天气大近1~2个数量级。这充分表明,暴风浪是引起九段沙上沙岸滩及其沉积物短期突变的重要动力因素。

对比两断面岸滩及其表层沉积物粒度特征变化过程和结果之异同认为,有人工抛石堤庇护的潮滩相对于自然潮滩,其冲淤变化量值和幅度均较小,而其相对高程与悬沙浓度间的线性相关系数变幅大,表明人工抛石堤具有一定的护岸保滩功能,但其同时也改变了潮滩自然发育演变过程和规律。

上述岸滩短期变化主要原因在于波浪掀沙和潮流输沙的联合作用。由于潮流和潮位位相不一致,造成涨潮流携高含沙量水体上滩落淤,落潮流携低含沙量滩水归槽,涨潮输沙淤滩被波浪刷滩所掩盖,潮滩年累积演变(净变化)趋于侵蚀。

综上所述:上述岸滩年周期冲淤演变特征及其表层沉积物和悬沙浓度年内时空分布特征,是在人为因素影响基础上,暴风浪和流域来水来沙综合作用的体现。该研究结果可为河口湿地的保护和建设提供科学依据。

关键词: 九段沙上沙, 岸滩, 短期, 表层沉积物, 悬沙浓度, 地貌动力

Study of short-term morphodynamic process in the typical coast of Upper Jiuduansha in Yangtze River estuary

ABSTRACT

The Jiuduansha is located between the south and north Passage of Changjiang River estuary, which shows the three grades furcation and fore mouths going into the sea. The Jiuduansha is the only region that has been kept in the original state of tidal-flat in the big estuary. The study area is beyond the Upper Jiuduansha dock. The short-term morphodynamic process are studied in this paper. The observed data includes the bank and surface sediment data from June 2006 to June 2007 at nine fixed sampling sites of two profiles along Upper Jiuduansha and suspended sediment was observed at one fixed site of dock. At the same time, the depth, velocity, current direction and sediment concentration was observed in the dry or flood season of 2006.

Methods of hydrology and sediment transportation and statistics are used to analyze the evolution characters of the bank, surface sediment and suspended sediment, and to discuss the morphodynamic processes and the evolution mechanism of the typical bank near the Upper Jiuduansha dock over a year period.

The tidal-flat shows the obvious seasonal erosion-deposition cycle, which is "deposition in flood season and erosion in dry season". The tidal flat sediment grain sizes also show the significant seasonal changes. The sediment sizes are finer during the tidal flat accretion period in flood season, and are coarser during the tidal flat erosion in dry season. It shows the obvious longitudinal and lateral variation in space. The reason is that the construction of artificial riprap-embankment changed the way of sediment sources and hydrodynamic conditions.

During the typhoon "Bilis" in 2006, the wave was as high as 2.56m, which just increased more than 1m. The strong wave going with the increased water led to an average 6.4cm and 20.2cm maximum depth of erosion. The erosion during the typhoon accounts for almost half of the total erosion. The storm waves have an obvious change for the bank and tidal flat sediment during the Typhoon "Billis" period. The range during the Typhoon is bigger with 1~2 levels. The storm wave is the important dynamical factor for the break-change.

The reasons for the short-term variety is the joint operation of the sands transported by tidal current and the sands lifted by waves. The erosion-deposition and rate for the artificial profile is smaller than the natural one, while the variation of linear regression correlation coefficient between tidal flat vertical relative elevation and suspended sediment concentrations is larger. This

is because that artificial riprap has the function of flat-protection, but it alters the nature process and evolution.

The phase of tidal current isn't consistent with that of tide height, which makes a larger sand amount of flux tide to shoal but less sand amount of ebb-tide to the channel. The tidal flat eroded by waves covers the silt formed by the sands transported through the flux tides. As a whole, the tidal flat shows the erosion.

In a word, the short-term erosion-deposition characters for tidal flat and temporal and spatial characteristic of sediment and suspended sediment are combined effects of storm and runoff from the basin on the basis of human factor. The study results can offer scientific reference for estuarine wetland protection and construction.

KEY WORDS: Upper Jiuduansha, Bank, Short-term, surface sediment, suspended sediment concentration, morphodynamic

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是我在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名: 李平

日期: 2008.6.16

学位论文授权使用声明

本人完全了解华东师范大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅。有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

论文作者签名: 李平

日期: 2008.6.16

导师签名: 李平

日期: 2008.6.16

第一章 绪论

1.1 研究的目的意义

九段沙形成于 20 世纪 50 年代,经 1949 和 1954 年两次特大洪水的作用,-5m 深槽贯通形成北槽,使得九段沙成为独立沙体而形成。九段沙湿地已成为长江河口诸多湿地中面积最大,淤涨速率最快的一个沙岛,其地理位置独特,生物资源丰富,具有典型的河口型湿地的生物多样性特征,巨大的生态服务功能和重要的科学研究价值。因其对人类生存的重大意义,2005 年 7 月 23 日被批准成为国家级湿地自然保护区。

九段沙位处长江河口和东海交汇处,海洋、河流和陆地三大生态系统相互作用,加之为世界最重要的生态敏感区之一,使得九段沙成为研究自然条件下的成陆过程,河口湿地生态系统自然演变过程及其生物多样性起源与维持的良好场所。九段沙虽紧邻上海,但人为干扰极少,是原生性极强的新生湿地生态系统,对生态学、河口学的研究极具科学价值,也为河口物理、化学、生物和地质过程研究提供了多领域的天然研究基地。

九段沙是长江河口重要的地貌单元,属于长江河口滩槽相间拦门沙系的重要组成部分(陈吉余,1982;1995),已成为现代长江河口区的第三代新生沙岛。谢小平等(2004)、杨世伦等(2006)、李九发等(2006)分别对于长江河口九段沙的形成历史及其形成后的演变过程进行了研究。杨世伦等(1998)、杜景龙等(2005)对长江口九段沙的形成过程,形成后的变化及其与南北槽发育的关系进行了研究。前人多通过浅层沉积物和海图数字化及多时相卫星遥感影像进行九段沙潮滩的长周期大尺度滩面冲淤和沉积物特征等方面的研究,而对其短期变化缺乏较全面和深入的研究。针对九段沙岸滩的短期冲淤变化过程及其机理,尤其是台风等风暴天气条件下,九段沙岸滩蚀淤变化的研究甚少。以短期实测资料为基础,尤其是台风前后实测的水文地貌资料,开展九段沙上沙典型岸滩的短周期地貌动力过程,及沉积物对台风等风暴天气的响应研究,不仅具有科学意义,而且对国家级湿地的保护,对北槽深水航道的开发利用、维护和整治,都有着重要的现实意义。该研究结果可为河口湿地的保护和建设提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 海岸河口动力地貌研究现状

国内外很多学者自 20 世纪 50 年代以来对河口地貌动力过程进行了很多研究。这些研究主要从水文泥沙、地貌沉积、数学模拟等方面来进行。Pritchard (1952) 从盐度分布和河口环流的状况对河口区动力沉积进行了研究, 并提出了涨潮槽和落潮槽的概念, 认为河口砂坝形成于涨落潮槽之间。在河口地貌沉积方面, Hayes (1975) 将泥沙堆积与河口地貌的形成结合起来进行研究, 认为河口地貌是河口泥沙沉积的结果。在河口形成发育过程中, Dalrymple et al. (1992) 认为河口的发育取决于河流、波浪和潮汐三者之间的对比关系, 并认为潮流是形成河口地貌的一个非常重要的动力。关于河口海岸问题的研究方法, 传统的方法有 3 种, 即现场观察、实物模型实验和数值模拟。H.J.de VRIEND (2004) 介绍了第 4 种研究方法, 即行为分析法 (Behaviour analysis), 并将多种方法结合起来对多沙河口海岸的地貌演变进行了预测, 结果表明: 采用多种方法对河口海岸的地貌演变进行预测会得到额外的收获。

目前, 河口学研究主要集中在河口演变规律与河口沉积动力两个方面, 着重于河口的水动力、泥沙运动、河槽演变、沉积过程、物质通量、界面过程及全球变化响应的研究, 揭示自然和人类活动作用下各种河口过程的变化规律及其相互作用, 为河口的综合开发和治理服务。我国河口研究工作者对河口地貌动力过程也进行了大量的观测研究。如, 吴超羽等 (2006) 根据实测水文资料、地形图和钻孔资料, 对珠江河口的“门”进行了 6000 年来地貌动力学探讨。陈吉余等 (1959) 就长江三角洲山地地貌和平原地貌发育过程作了分析, 并概况长江河口近两千年来的发育模式为五个方面: 南岸边滩推展、北岸沙岛并岸、河口束狭、河道成型和河槽加深 (1979)。黄胜 (1986) 通过对长江口长周期演变过程的研究, 总结出长江口的演变规律: 南冲北淤, 逐渐北移, 最终与北陆併岸。陈吉余 (1959)、恽才兴 (1988)、徐海根 (1988) 等分别就长江河槽不同河段的演变发育进行了研究。杨世伦等 (2001) 以长江口为例, 做了大河口潮滩地貌动力过程的研究, 认为河口潮滩发育依赖于河流泥沙来源、河口动力和海底地形诸方面的有利条件, 还认为在总体迅速淤涨的背景下, 大河口潮滩存在不同时间尺度的冲淤循环。

1.2.2 长江口九段沙的研究现状

根据陈吉余院士等早年的研究,长江河口两千年来的发育模式可以概括为 5 个方面,即南岸边滩推展;北岸沙岛併岸;河口束狭;河道成形;河槽加深。长江河口发育模式阐明了河口发育的基本规律,为河口发育和滩涂演变趋势预测研究提供了理论根据。九段沙形成时间不长,仅有 50 年左右的历史。对于九段沙历史的研究,即九段沙形成和演变过程的研究,陈家宽等(2003)在《上海九段沙湿地自然保护区科学考察集》中进行了详细的分析;杨世伦等(2006)根据 1958~2004 年的系列地形图,探讨了近半个世纪长江口九段沙湿地的冲淤演变过程;李九发等(2006)从长江河口发育过程中沙洲形成与底沙推移运动来研究九段沙的成因和演变及发展趋势;谢小平等(2006)利用卫星遥感和数字化海图,通过对九段沙不同高程的体积和面积的计算和分析,以了解流域来水来沙与九段沙形成演化间的关系。对于九段沙沉积地貌的研究,谢小平等(2005)根据 2003 年对长江河口九段沙潮间带和潮上带的现场调查和室内对沉积构造、粒度分布、矿物组成、沉积速率等的分析,对九段沙现代潮滩的沉积特征进行了分析;贺宝根等(2000)根据实地观察,对九段沙微地貌演变与芦苇的生长关系进行了研究。北槽深水航道工程一期工程于 1998 年 1 月开工,主体工程包括分流口—鱼嘴工程(修建在江亚南沙顶端)、南岛堤及其相连的束水丁坝(修筑在九段沙北缘)。北槽深水航道工程改变了九段沙局部水动力条件的同时也改变了九段沙长期以来的自然冲淤演变模式。目前,南北槽分流口稳定,九段沙形态及南北槽河势进入相对稳定时期。九段沙位于南北槽之间,其形成过程及其形成后的演变过程都与南北槽的发育存在相互制约关系。南北槽的摆动导致了九段沙南北侧频繁的冲淤变化,而反过来,九段沙演变也会对两侧河槽(南、北槽)产生重大影响。九段沙的稳定也会有助于南北槽的稳定,进而会对深水航道发展有利。杨世伦等(1998)根据 1842~1995 年的地形图和 1996、1997 年的野外观测,对长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系进行了研究;杜景龙等(2005),根据 1989~2003 年长江口九段沙附近地形图,对长江口北槽深水航道工程对九段沙冲淤影响进行了研究。另外,严以新等(2001)则从数值计算方面研究九段沙的分流分沙变化,预测九段沙演化过程。徐福敏等(2002)对九段沙下段的冲淤演变从水动力方面进行过研究。前人的这些有关九段沙的研究成果,为九段沙的进

一步研究打下了坚实的基础。

1.2.3 河口岸滩演变国内外研究现状

河口地区是陆海相互作用最为剧烈的区域。受河流和海洋的共同作用，在河口地区发生的物理化学过程和生物过程等都特别复杂，河口岸滩冲淤演变的影响因子也极为众多，长期以来中外许多研究河口的学者专家，从不同角度对岸滩冲淤演变的原因进行了探讨。许多学者(Edmand 1981; Cart 1988; 任美愕, 1983; 许世远, 1984, 1997; 茅志昌, 1987; 杨世伦, 1989, 1997, 1999, 2003 等)都对潮滩冲淤变化因子进行了研究。归纳起来影响潮滩冲淤变化的因子主要有: 流域来水来沙变化、潮流、风浪、风暴潮、海面变化、植被盖度、人类围垦影响等。事实上, 影响河口潮滩发育的因子还很多, Bird 就列出了 20 种。他指出, 没有一个冲淤事件是由单因子所引起的, 也没有一种解释能全球通用(Bird, 1996)。

外国学者 Robinson (1960) 对砂质河口的涨落潮槽系统进行了详细研究, 并将潮流变化与河口砂坝结合, 分析了河口区涨落潮槽的形成演化。在国外, 海岸研究主要以砂质海岸为对象, 尤其是进入 50 年代后, 海岸地貌研究与海岸动力相结合, Postma(1954)在研究荷兰瓦登海淤泥质潮滩时提出了泥沙“沉降迟后”和“冲刷迟后”作用。

国内许多学者对河口岸滩的冲淤演变机理作了研究。恽才兴(1983)研究认为, 滩槽之间存在着强烈的泥沙交换, 致使滩槽之间存在着滩冲槽淤和滩淤槽冲两种对应关系。河口潮滩冲淤变化具有明显的周期性, 其中洪枯季变化是最显著的一个特征, 其原因在于作用因素本身的周期性变化。导致淤泥质滩潮短期冲淤演变的影响因子多而复杂, 包括风、水体含沙量、暴风浪、潮汐潮流和流域来水来沙等。根据风和波浪相关性研究为理论依据, 结合潮滩冲淤变化资料, 茅志昌等(1993)分析了台风浪对崇明东滩的冲淤作用; 杨世伦等(1991)认为风浪是控制南汇东滩开敞潮滩短期演变的主要动力因子。而恽才兴(1983)则认为风向与岸线走向之间的关系是潮滩季节性变化的控制性因子。河口潮滩沉积物粒度特征及输运研究方面: 戴志军 (2005)、李为华 (2006) 分别利用 Gao-Collins 泥沙输运模型探讨了南汇边滩和黄河三角洲飞雁滩的沉积特征和沉积物输运趋势。恽才兴 (1983) 提出潮滩季节性冲淤和滩槽泥沙交换的概念。陈沈良等 (2005) 根据黄河三角洲飞雁滩海岸的地形和断面水深监测资料, 分析了该岸段流路废弃后的侵

蚀特征和地貌变化,认为波浪以掀沙为主,潮流以输沙为主,波浪和潮流的联合作用是飞雁滩海岸侵蚀的主要动力机制。黄胜等(1980)考虑盐水入侵对流速分布、流态和含沙量分布的影响,阐明拦门沙淤积的原因和部位,进行长江口拦门沙形成与预测的研究。张华等(2000)认为由于径、潮流的相互作用,盐、淡水相互交汇,悬沙絮凝沉降,在河口形成最大浑浊带,进而发育了巨大的拦门沙体系。潮滩在台风等风暴天气下,其冲淤强度比正常天气下的高1~2个数量级。有关这方面的研究,杨世伦等(2002)以长江口南汇边滩—南槽—九段沙系统为例,研究了开敞大河口滩槽冲淤对台风的响应及其动力泥沙机制。朱大奎等(1986)认为潮流是影响潮滩发育的主要因素,波浪会对潮流的含沙浓度产生影响,在风暴天气下,波浪对潮滩的影响会更明显。相关分析是揭示要素之间相互关系的,而回归分析是用来研究诸多要素之间相关关系的数学方法,即一个要素与其他要素之间的相互关系用一定的函数关系近似表达。赵庆英等(2003)利用长江口南槽1989年12个月的实测地形图和大通站响应的水沙资料,采用数理统计技术分析了南槽的地形变化与河流来水来沙的关系。赵华云(2006)利用实测的悬沙浓度资料,建立了悬沙浓度与影响因子之间的回归关系。河口岸滩的冲淤演变受诸多因子影响,这些多定性研究各因子综合作用下岸滩的演变,而定量探讨单个影响因子作用下的变化规律及其对岸滩演变的贡献率方面较少。

1.3 本文的研究内容

由于流域水沙通量等影响因子年内分配不均,具有明显的季节性变化,河口潮滩冲淤、悬沙浓度及表层沉积物粒度时间变化均表现出洪枯季变化特征。台风等极端天气作为短期地貌演变的重要因子,对于岸滩、表层沉积物和悬沙浓度的突变具有决定性作用。本文根据实测潮滩地形、表层沉积物及悬沙浓度资料,并利用泥沙运动力学,动力沉积和动力地貌相结合方法探讨了长江口九段沙上沙典型岸滩、表层沉积物及其邻近海域悬沙浓度年周期变化规律,及其对“碧利斯”台风的响应,最后对江亚北水道以及整个九段沙的地貌演变趋势进行了预测。

第一章 绪论。主要阐述本研究的研究意义,国内外研究现状和存在的主要问题以及本文拟解决的问题等。

第二章 研究区概况、资料来源及方法。简要介绍长江口九段沙的形成及其演变

过程、研究区概况、水沙特性，最后介绍一下本文的资料来源及研究方法。

第三章 九段沙上沙典型岸滩年周期冲淤演变分析。依据实测岸滩数据，分析该岸滩季节性变化特征，尤其进行岸滩对于“碧利斯”台风的响应研究。并对比分析两剖面年周期演变之异同，结果表明，流域来水来沙和暴风浪等为影响九段沙潮滩发育演变的主控因子，而人为因素也成为其中不可忽略的重要影响因素。

第四章 九段沙上沙码头水域悬沙浓度短期变化特征研究。利用逐日采集的表层悬沙水样，分析悬沙浓度短期变化特征及其影响因素，进而探讨了其与岸滩发育演变的关系。结果表明悬沙浓度与岸滩演变并不存在明显的正相关关系，风速、风向等才是影响悬沙浓度变化的重要因子。

第五章 九段沙上沙潮滩沉积物短期时空变化特征。着重分析表层沉积物时空变化特征，然后探讨其与岸滩发育之间的关系，研究结论表明表层沉积物粒度与滩地演变具有一致的变化趋势，共同印证了潮滩短期地貌动力变化特征。并且人工抛石堤的修筑改变了泥沙来源和水动力条件，其是潮滩沉积物沿岸变化的最重要原因。

第六章 九段沙上沙潮滩短周期地貌动力过程研究。利用 2006 年 6 月~2007 年 6 月九段沙上沙完整一年的水沙数据资料，运用水文学、泥沙运动力学和数理统计学相结合的方法，结合岸滩、表层沉积物和悬沙浓度时空变化特征，探讨了九段沙上沙码头近域岸滩的短周期地貌过程，着重分析九段沙上沙岸滩及邻近水域冲淤演变机理及其影响因素，并对该区域及其整个九段沙今后演变趋势进行了预测。最后分析了上沙抛石堤的护岸保滩作用及不足之处，并提出了加固措施。

第七章 结论与不足。

第二章 研究区概况、资料来源及研究方法

2.1 九段沙的形成及其演变过程

长江河口呈三级分汊四口入海，为一典型的江心洲型河口湾（图 2.1）。九段沙位于长江口外南侧水道的南北槽之间的拦门沙河段，其范围包括已露出水面的陆地和尚未露出水面的水下阴沙及水下浅滩，由上沙、中沙和下沙组成，自 1992 年江亚南沙与九段沙上沙并沙后就成了九段沙的一部分。九段沙属于河口沙洲，滩面最高高程达 4.3m（吴淞零点）。其地貌形态可以划分为高潮滩、中潮滩、低潮滩和潮下滩。中、高潮滩上发育有蘆草、海三棱蘆草和芦苇群落，芦苇群落为九段沙上的顶级群落。

长江口是一个丰水、多沙和中等潮汐强度的分汊河口，具有泥沙来源丰富、盐度低、口门开阔和风浪作用强等特点。九段沙是现代长江河口滩槽相间拦门沙体系的重要组成部分，位于长江口南北槽之间。其形成时间距今只有 50 年左右的历史，是处于冲淤变化中的河口沙洲型岛屿湿地。目前九段沙东西长约 50km，南北宽约 15km，-5m 等深线以上的面积约 421km²，0m（海图基准面）以上的面积约 124km²。

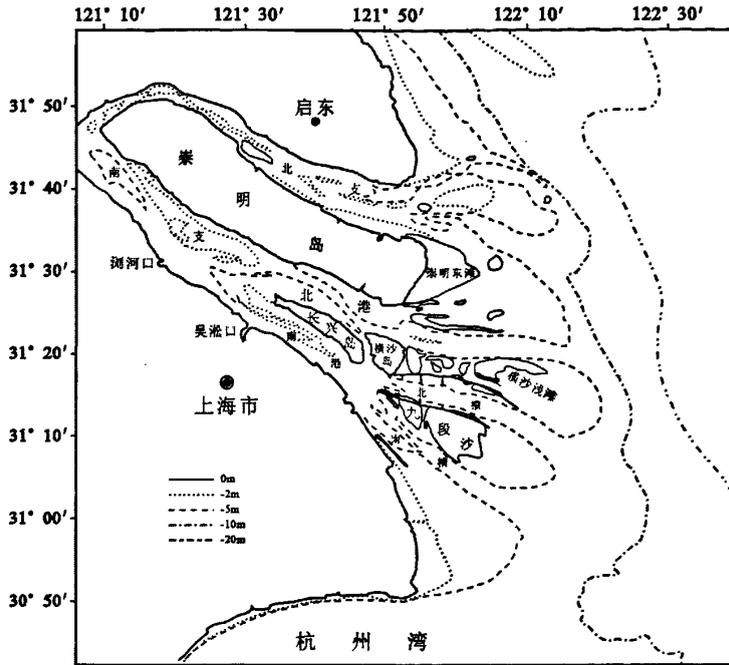


图 2.1 长江河口河势图

Fig. 2.1 Changjiang River estuary

2.1.1 九段沙的形成

九段沙的母体是长江河口横沙沙体的复合体。九段沙原是横沙东滩的组成部分之一，横沙东滩被长江口北槽串沟切开后，到 20 世纪 50 年代中期，被切割出来的部分逐渐淤涨形成三个比较明显的水下阴沙，即是九段沙的雏形。1954 年的特大洪水使 -5m 深槽贯穿整个串沟形成北槽，九段沙开始作为一个独立的沙体，成为长江口第三代新生沙岛。九段沙是现代长江河口拦门沙体系的组成部分，河口拦门沙系是河流动力和海洋动力达到相对均衡情况下泥沙大量沉积形成的地貌形体。由于径流和潮流流路分歧，柯氏力作用下的落潮流南偏和涨潮流北偏的结果，地貌形体上落潮槽和涨潮槽相悖分布和一定程度的藕合，因此在地貌形体上出现浅滩和深槽相间分布的河口拦门沙系特殊的地貌组合形态。

总而言之，九段沙形成时间不长，仅有 50 年左右的历史。九段沙是长江河口发育过程中河床底沙推移堆积的必然产物，同时又是特大洪水作用的结果。

2.1.2 九段沙形成后的演变过程

以 1998 年北槽深水航道修筑为分界，整个九段沙的演变分为自然演变期和

工程演变期两个阶段。前一时期（1954~1998 年）演变特征表现为沙头受冲、沙尾向东南伸展，南、北冲淤多变，面积不断扩大。后一阶段（1998 年至今）演变特征表现为南坍北涨、汉道淤浅、沙尾北偏、沙头向西北伸展。

2.1.2.1 1961 年的九段沙

长江口北槽串沟经历 40 年的强烈冲刷不断扩大。1949 和 1954 年的特大洪水使 5m 深槽贯穿整个串沟形成北槽，九段沙开始作为一个独立的沙体。此时九段沙-2m 等深线已经贯通，0m 等深线已分为九段上沙、九段中沙和九段下沙三个沙体。

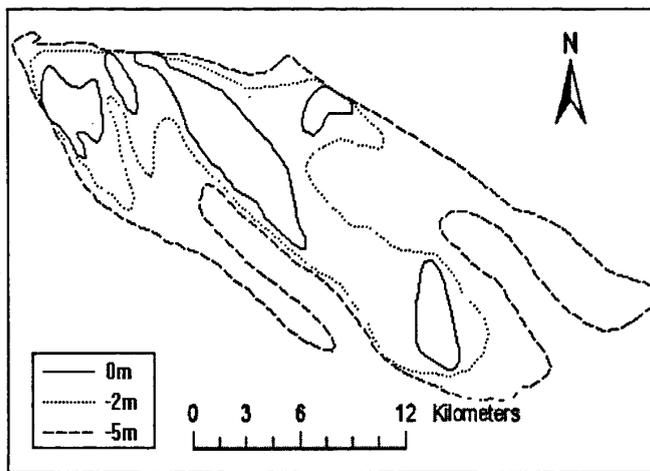


图 2.2 1961 年的九段沙

Fig.2.2 Jiuduansha in 1961

2.1.2.2 1978 年的九段沙

进入 70 年代以后，九段沙已基本成型，其位置也相对稳定，但中、下沙部分变化较大，两沙沙体逐渐连成一体，成椭圆型，见图。另外，九段沙中、下沙体南北宽度和东西长度都明显增大。

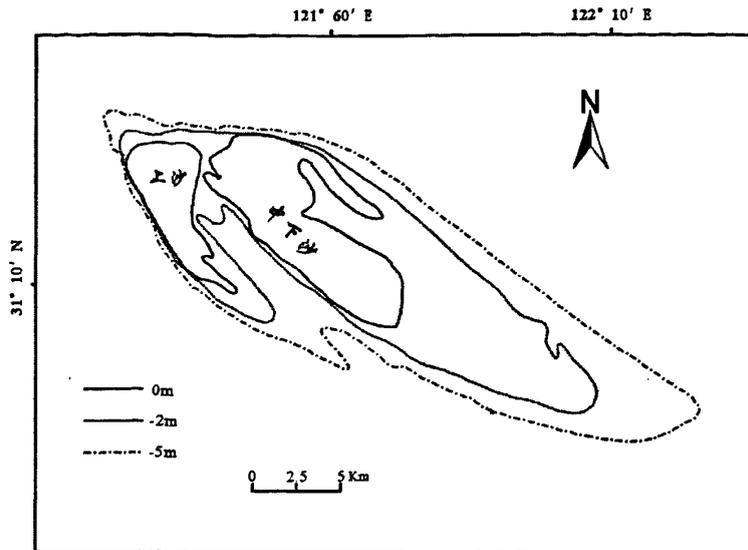


图 2.3 1978 年的九段沙

Fig.2.3 Jiuduansha in 1978

2.1.2.3 1986 年的九段沙

在这一时期，九段沙的上沙和中、下沙的北侧均因北槽的发展而遭到侵蚀，而南侧则因南槽的萎缩而逐渐增长。其间长江口变化最为明显的是长江南边滩受落潮流的切割作用，而逐渐加深加宽形成新的南槽。江亚南沙真正脱离长江南边滩是在 1986 年，新形成的南槽代替老南槽(江亚航道)则是在 1986~1992 年之间。江亚南沙的形成使长江口又多了一个水下沙洲，并成为九段沙的组成部分，使得九段沙面积突增。根据对江亚南沙形成和发展趋势的研究，它必将与九段沙连成一体，成为长江口第三代的“崇明岛”。

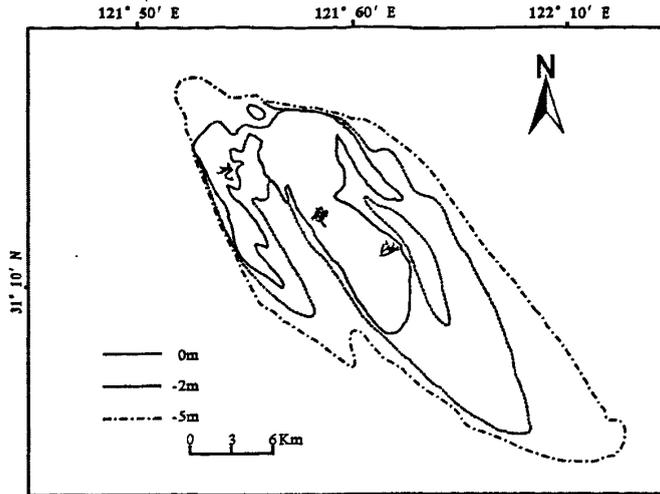


图 2.4 1986 年的九段沙

Fig.2.4 Jiuduansha in 1986

2.1.2.4 1995 年的九段沙

1995 年到 2000 年间的九段沙形态上无多大变化，上沙与中下沙之间的小泓沟一直存在，但水深略有变浅，而中、下沙之间无明显界线。

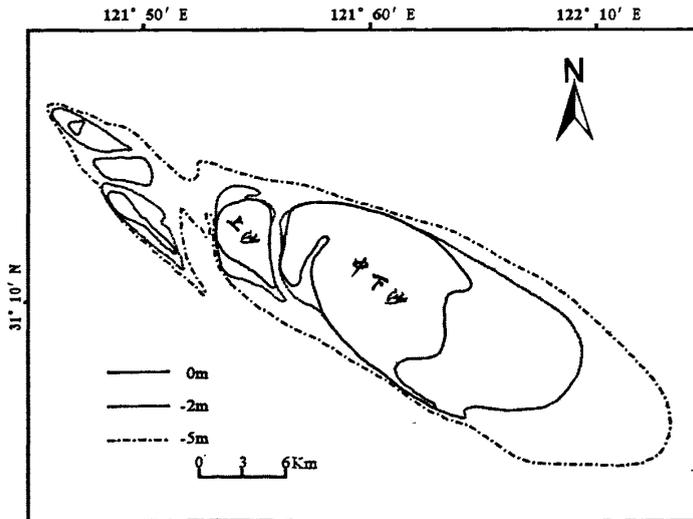


图 2.5 1995 年的九段沙

Fig.2.5 Jiuduansha in 1995

2.1.2.5 2004 年的九段沙

1995 年以来，九段沙下段仍保持稳定的形态，而顶端的轮廓却发生了很大

的变化。介于九段上沙和中下沙之间的纵向串沟是贯通南北槽的重要水沙通道，1995 年以来其平均水深迅速变浅。

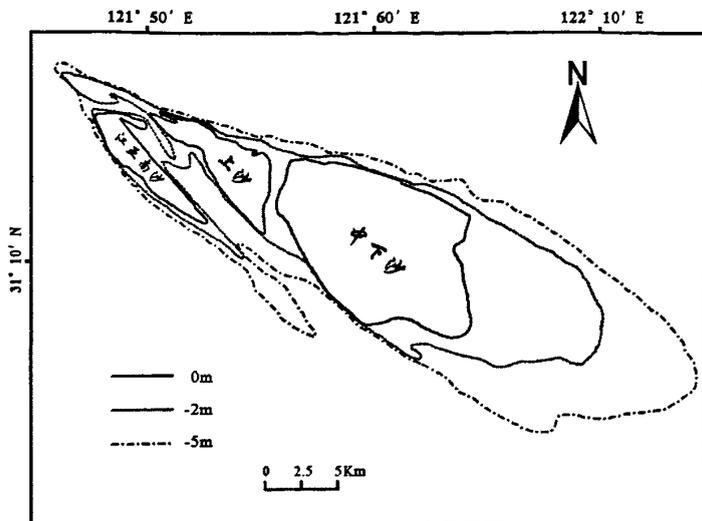


图 2.6 2004 年的九段沙

Fig.2.6 Jiuduansha in 2004

综上所述，九段沙的形成和演变反映了自然与人为因素的共同影响。九段沙自形成以来面积、体积总体上是处于增大过程中，高程也在增高，成陆化作用明显。

2.2 研究区概况

九段沙形成于 20 世纪 50 年代，近 50 年来，在长江径流与海洋潮流相互作用下，面积和高程不断增加，成陆化作用明显。1998 年北槽深水航道治理工程南导堤与鱼嘴工程的修建，迫使江亚南沙北水道束狭淤浅，两沙归一统称九段沙湿地。现九段沙湿地由上沙、中沙、下沙、江亚南沙和周边浅水域组成，-5m 以上面积已达 421km^2 ，与形成时相比，扩大了一倍多。其中上沙高程最高，0m 以上面积已达约 20km^2 ，3.5m（吴淞零点）以上的成陆面积接近 10km^2 ，最大高程达 4.3m，超过上海陆域平均高程 3.5m。

九段沙受东亚季风影响，季风盛行、温和湿润、雨量充沛、日照充足、四季分明。九段沙水域全年以风浪为主，浪向频率与风向频率基本一致。九段沙水域属于非正规半日浅海潮海区，多年平均潮差 2.67m，最大潮差 4.62m。该水域悬

沙中值粒径 (d_{50}) 小于 0.01mm, 属粉砂粒级, 且其多年平均悬沙浓度为 $0.38 \sim 1.43 \text{ kg/m}^3$, 最大悬沙浓度为 2.28 kg/m^3 。九段沙潮滩坡度平缓, 平均坡度为 19‰, 沉积物组成以细颗粒泥沙为主。

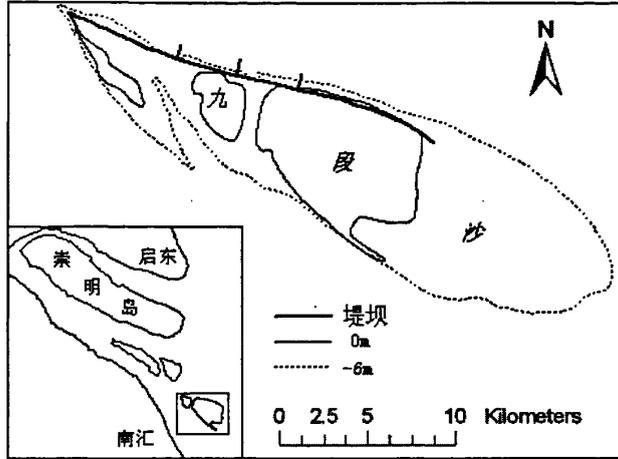


图 2.7 长江河口九段沙位置图

Fig.2.7 The site of Jiuduansha in Changjiang River estuary

研究区位于九段沙上沙南侧东部 (图 2.8), 江亚南沙北水道的北岸, -5m 线深泓北缘。该深泓大潮高潮时, 水深 $10 \sim 12 \text{ m}$, 泓槽主轴呈 $145^\circ \sim 325^\circ$ 走向, 槽舌向西北伸展, 在地貌形态上反映出由涨潮流所塑造, 属涨潮槽性质。研究区的堤岸和潮滩就位于这一涨潮槽北侧的 0m 线以上, 西起上沙码头, 东至离码头约 500m 处, 内有人工堤岸和自然堤岸两种类型, 中部内凹处原是潮沟的出口, 现由块石封堵, 涨、落潮水仍可在块石间穿流, 堤岸走向以潮沟口为界, 以东为 $120^\circ \sim 300^\circ$, 以西为 $140^\circ \sim 320^\circ$ 。潮滩从 0m 线至堤脚, 平均宽度约 130m, 面积约 6.5 万 m^2 。

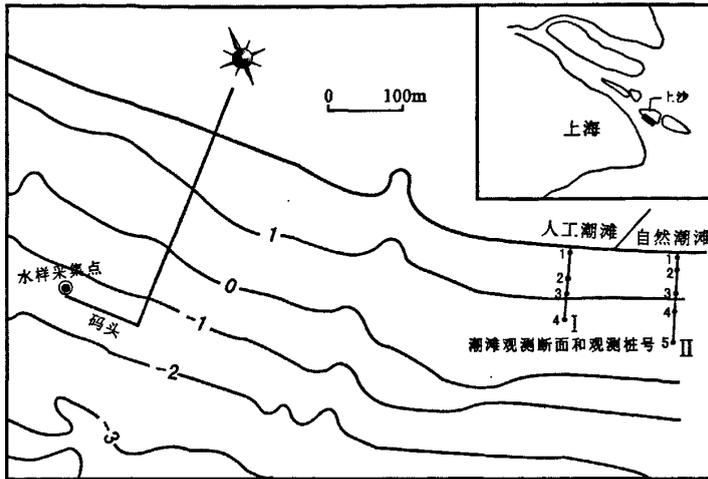


图 2.8 研究区域概况图

Fig.2.8 Sketch of the study area

2.3 特枯水文年

长江是我国第一大河，入海水、沙分别居世界第五和第四位。本文采用的长江大通水文站 1951~2007 年间的年径流量及输沙量资料。大通站是长江河口枯季潮区界，也是长江干流入海前的最后一个控制性水文站，在此站以下没有大的直流注入，距口门 624km，集水面积 $170.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占长江流域面积的 94.72%，其径流基本代表了全流域的径流状况。因此将大通水文站的径流量及输沙量资料作为长江入河口地区的径流量和输沙量资料进行分析。

据 1904~1937 年和 1946~2000 年大通流量统计分析，长江丰水期和枯水期有明显的周期性，连续丰水年和连续枯水年相继出现，平均约 14~16 年一个轮回，在 3~4 个轮回中常会出现一个特枯水年。

表 2.1 长江特枯水年入海水量与多年平均入海水量比较 ($\times 10^8 m^3$)

Table.2.1 Discharge comparison between the history and 2006 period

月份 入海水量	6	7	8	9	10	11	12	1	23	3	4	5	全年
多年平均 1904~1937, 1946~2000	1052	1348	1258	1119	970	677	416	2916	3786	4306	601	896	9337
1928.6~1929.5	752	8462	9722	778	656	386	232	309	174	196	206	482	5990
1978.6~1979.5	108	1023	806	671	501	410	308	193	186	279	384	103	5947
2006.6~2007.5	1001	931	735	495	398	358	359	281	283	478	445	589	6261

据大通流量逐月统计：2006年6月~2007年6月长江入海水量比多年平均少 $3000 \times 10^8 m^3$ 以上，减少 33%，属特枯水文年。丰水期为 6~8 月，流量之和占年径流总量近五成；2007 年 1 月经流量全年最低，仅为 $10474 m^3/s$ (图 2.9)。

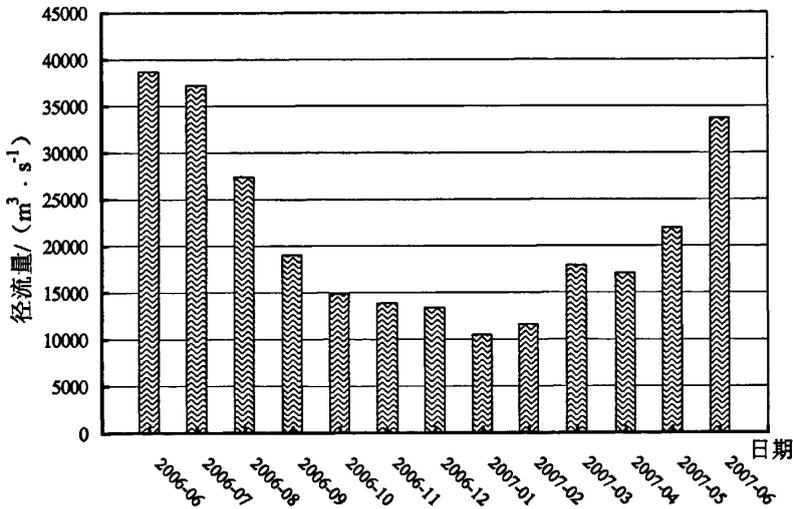


图 2.9 大通站月均径流量

Fig.2.9 Monthly average discharge of Datong station

2.4 热带风暴“碧利斯”

2006 年热带风暴“碧利斯”，于 7 月 14 日 12:30 在福建霞浦县北壁镇登陆，引起长江口大风。九段沙上沙码头从 14 日 11:00 起出现 6 级以上大风，持续增大到 15 日 12:00 出现最大风速 $23.60 m/s$ ，直至 16 日风力才恢复正常。经上沙自

动监测站资料统计，受“碧利斯”影响期间的主风向为 SSE，频率达 72.04%，次风向为 SE，频率为 24.19%，平均风速达 16m/s。在“碧利斯”台风经过时的平均风速和最大风速下，其 $H_{1/10}$ 分别为 1.73m 和 2.56m。

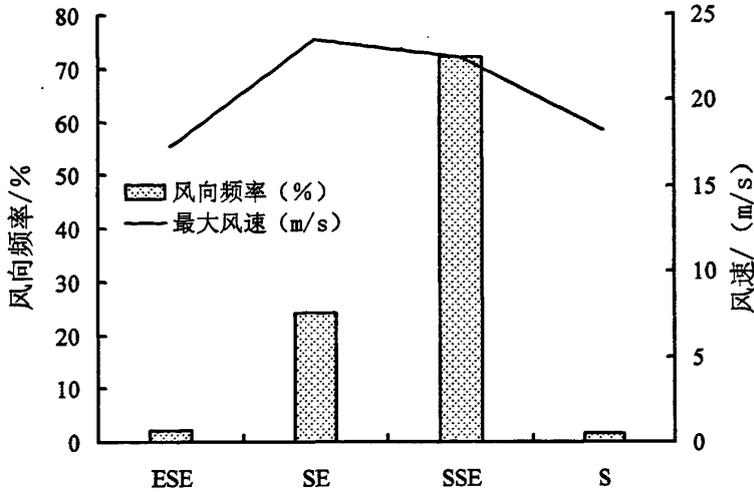


图 2.10 “碧利斯”台风期间风向频率和最大风速统计图

Fig.2.10 Frequency of wind-direction and maximal wind speed during the period of Bilis

2.5 资料来源

2006 年 5 月 14~15 日在上沙东南岸滩建立地貌监测站，设立 I 和 II 两个监测断面。断面 I 为人工堤岸（抛石堤）庇护下的监测断面，从堤脚向外至 0m 线附近依次埋设 6 根观测桩，1 号桩离堤脚 0.5m，6 号桩置于 0m 线外，从堤脚至 6 号桩全长 123.0m；断面 II 为自然堤岸下的监测断面，位于断面 I 以东约 100m，共埋设 7 根观测桩，1 号桩离堤脚 0.3m，从堤脚至 7 号桩全长 131.8m，两断面的桩间距离列于表 2.3。埋桩两周后，潮滩自然修复，于 2006 年 5 月 30 日进行首次观测，测量桩位的滩面高度，采集表层沉积物进行粒度分析，并进行地貌摄影。此后，每月择大潮期间进行重复观测取样。由于长江口海平面存在季节性变化，观测月的海平面均较高，故通常只取到 1~4 号或 1~5 号桩位的资料。并于 2006 年 8 月大潮在码头前沿进行了连续 26h 的正点流速、流向和含沙量测量。此外，还收集了九段沙潮位和气象资料，并进行了风浪推算。

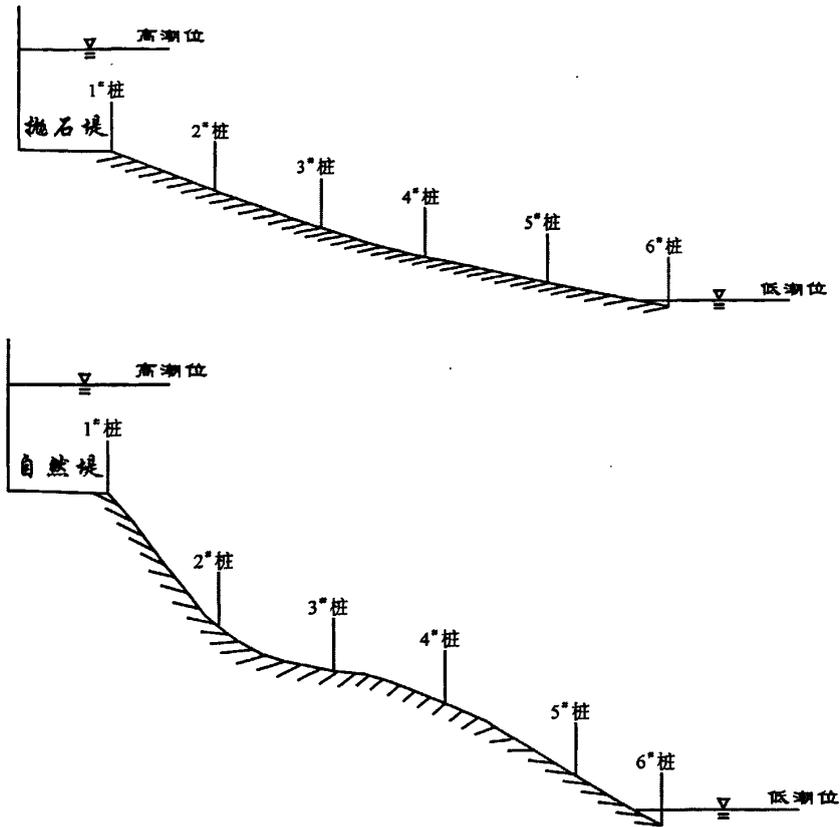


图 2.11 九段沙上沙两观测断面（上图为断面 I，下图为断面 II）

Fig.2.11 Two typical cross sections (top= I profile; bottom=II profile)

表 2.3 两断面观测桩及采样点间距

Tab.2.3 Distance between the observation stakes

观测桩编号	1	2	3	4	5	
I 断面桩间距 (m)	—	23.0	18.0	28.0	29.0	—
II 断面桩间距 (m)	—	19.5	22.5	16.5	24.0	—

2.5.1 逐月滩面高程数据及表层沉积物取样

为对比分析潮滩在有无抛石堤庇护下变化之异同，在九段沙上沙潮滩选取 I 和 II 两条监测断面。自 2006 年 6 月 1 日至 2007 年 6 月 26 日，逐月择期测量桩位的滩面高程，共重复观测 12 次。观测采用桩柱法，即在每个测点上插入两根木桩，两木桩露出滩面的高度相等，间距约为 1m，测量时，将一根长度为 1.2m 的带槽木板架在两根木桩上，量取木板中心点至滩面的垂直距离。测量前用水准尺进行校正。用后一次测得的木板至滩面的垂直距离减去前一次的测量值即

得到两次测量期间的滩面冲淤量（若为侵蚀，则为负值）。

为对比分析潮滩沉积物粒度年周期变化，2006年6月~2007年6月逐月择期在九段沙上沙两断面9个点采集表层沉积物，重复采样12次（2007年1月未能取样），共取样108个。室内用库尔特激光粒度仪（LS100Q）对沉积物进行粒度参数测定，并进行统计分析。

2.5.2 逐日表层水样采集

资料由实测所得，2006年5月在江亚北水道上沙码头建站，6月1日开测，由经专业技术培训后的码头管理人员兼职，每日定点按时在高潮位、落潮中潮位、低潮位和涨潮中潮位时刻各采集一个表层水样，每月送华东师范大学“盐度·悬浮物实验室”测定含沙量，至今，取得了整一年多的含沙量数据。与此同时，自2006年6月1日起逐日，测定含沙量。

2.5.3 水文泥沙资料

与此同时，为了了解九段沙上沙码头前沿水域水沙特征，2006年选择在洪枯季大潮期间，分别在上沙码头前沿水域布设测站进行水文同步测量。该站布在上沙码头前沿，2006年8月23~24日的观测站位为121°53.258'E, 31°12.537'N，同年12月4~5日的观测站位为121°53.477'E, 31°11.950'，12月的测站稍偏8月的东南。观测项目共六项，即流速、流向、盐度、含沙量、悬沙粒径和水深；按《海港水文规范》（GB50179-93）和《海洋调查规范海洋水文》（GB12763-91）等采用六点法（表层、0.2H层、0.4H层、0.6H层、0.8H层和底层）、进行了连续26个小时的测量，测量仪器主要采用直读式海流计和横式采水器，盐度和含沙量由华东师大“盐度·悬浮物实验室”测定，悬沙粒径由华东师大“沉积学实验室”，用美产LS100Q型粒度仪测定。运用数值内插的方法将数据由绝对水深层转化为相对水深层，对处理后的数据计算各分层的涨落潮周期平均值及垂向平均值，其中垂向平均流速采用垂线加权的方法获得：

$$\langle \mu \rangle = \frac{1}{10}(\mu_0 + 2\mu_{0.2} + 2\mu_{0.4} + 2\mu_{0.6} + 2\mu_{0.8} + \mu_{1.0})$$
，垂线平均含沙量也采用同样的方法获得，即：
$$\langle c \rangle = \frac{1}{10}(c_0 + 2c_{0.2} + 2c_{0.4} + 2c_{0.6} + 2c_{0.8} + c_{1.0})$$
。

2.5.4 其他资料

九段沙是一个无人定居的海岛，2006年4月9日之前没有固定的气象观测资料，其潮位及气象资料都是由最靠近九段沙的中浚潮位站或横沙岛新民站气象观测资料来代替。而从2006年4月9日开始，九段沙开始有了自己的潮位及气象观测资料，每5秒钟都会有风速、风向、潮位及降雨量数据的采集。这些宝贵的第一手资料为九段沙湿地研究提供了科学的依据。还收集了其九段沙地形等数据资料，并进行统计分析。本文以上述实测数据资料为依据，运用数理统计分析方法，探讨上述潮滩年周期演变的特征和规律。

2.6 论文框架

具体的文章架构如下图所示：

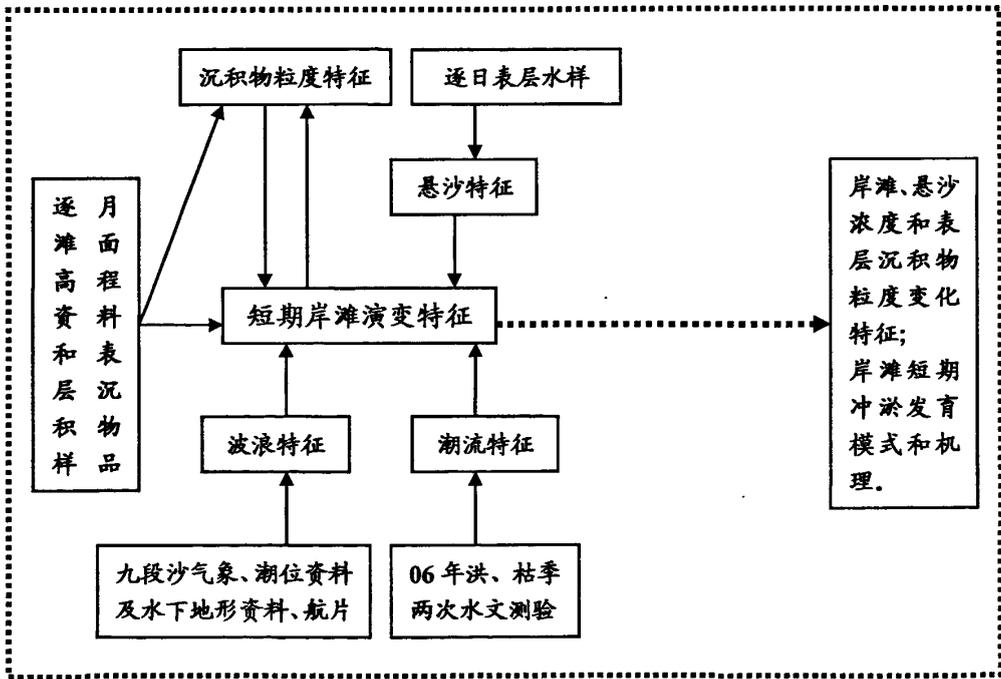


图 2.12 本文结构图

Fig 2.12 Framework of this paper

第三章 九段沙上沙典型岸滩年周期冲淤演变分析

九段沙是长江口潮滩的主要分布区,潮滩面积约 120km^2 , 同时又是一块未受围垦影响的“处女地”。九段沙湿地地处南、北槽之间,其北侧有北槽南导堤庇护,冲淤变化小,南侧直接受南槽水流影响,冲淤变化较大。同时,北槽深水航道工程的修筑,在改变了九段沙局部水动力条件的同时也改变了九段沙长期以来自然冲淤模式。加强九段沙冲淤演变的研究对国家级河口湿地的保护和建设,具有重要的现实意义。岸滩的年周期冲淤变化,可分为堤岸蚀涨和潮滩冲淤演变。由于流域来水来沙和风浪等影响因子的季节性变化,及其台风作用的突然性,岸滩的冲淤变化亦有明显的季节性和突变性。而前人多通过海图数字化及多时相卫星遥感影像进行九段沙潮滩的长周期大尺度滩面冲淤等方面的研究,而对九段沙潮滩短期冲淤进行多因子分析还较少。本文试图利用一年的实测水文地貌资料,对潮滩冲淤的年内变化特征,做一个较为完整的探讨。

3.1 堤岸坍塌后退

人工堤岸是一条抛石堤,位于上沙码头两侧,建于 2003 年,经 2005 年修护延长,位在研究区内的长度约 400m。该堤结构简单,修护后,顶高 4.5m,顶宽 2.0m,底宽 11m,迎水面坡度 33%,背水面直立,块石均重约 35kg,最重约 50kg,透水性好。2006 年 5 月踏勘时,堤顶平整完好,迎水面块石杂乱,个别块石离堤陷滩;“碧利斯”台风过后的 7 月 19 日观测时,见堤顶全线损坏,无一平整之处,迎水面更杂乱无章,部分岸段出现严重坍塌下沉,个别块石被搬运至离堤 20 余 m 之远(图 3.1)。



图 3.1 抛石堤坍塌下沉

Fig.3.1 Riprapping-dike's collapse and subsidence

自然堤岸实是上沙陆地的陆缘，无隆起，地势顺陆面略向江域倾斜，高程 3.5~4.2m，表土呈青灰色或黄褐色，多由细砂质粉砂（ST）组成，平均粒径 4~5.5 Φ ，粉砂含量占 55~65%，密实度差，质地松散，芦苇生长茂盛，海三棱镜草稀疏；迎水面高出滩面 2m 左右，层理清晰，有直立的陡坡和多级陡坎，陡坎高差在 20~40cm 之间，近处有大小不等的泥砾和崩塌的大型土块，呈现出强烈的侵蚀地貌，不断后退。在九段沙上沙东南岸滩经常能发现，泥砾、波痕和冲蚀小陡坎等特殊的地貌形态，说明九段沙是属于冲蚀—淤积型潮滩，波浪对于岸滩的塑造作用明显。5 月 30 日首次观测时，1 号桩离堤脚仅 30cm，9 月 19 日堤脚后退至警示牌水泥基座，基座离 1 号桩为 4.5m，即从 5 月 30 日至 9 月 19 日堤岸被蚀退 4.3m，蚀退速率每月为 1m 左右，每日约 4cm。11 月 19 日观测时，见基座将脱离堤岸，12 月 16 日冷空气南下，出现大风浪，17 日堤岸被蚀退至警示牌后，基座倒伏潮滩。

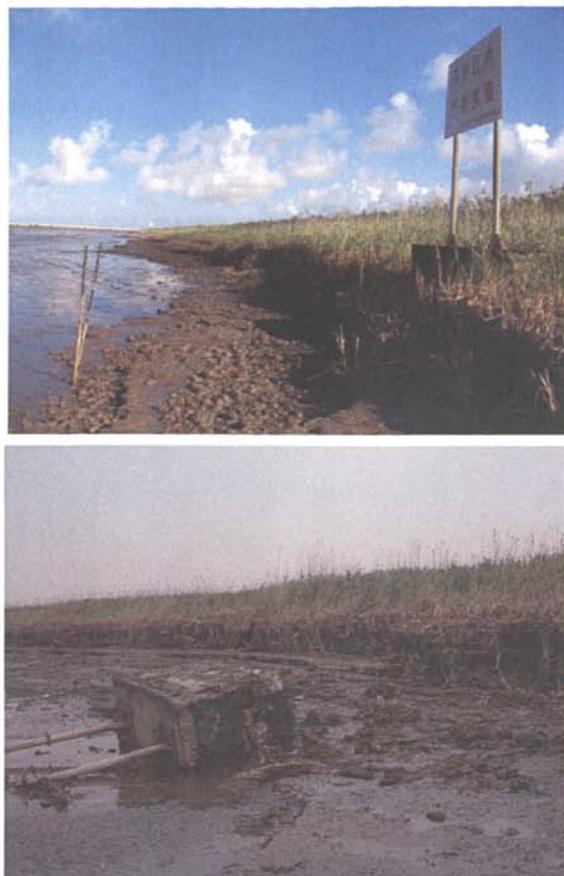


图 3.2 警示牌在堤岸中的位置变化

(上图摄于 2006 年 9 月 19 日；下图摄于 2006 年 12 月 17 日)

Fig.3.2 Position of guard-brand on September 19th, 2006

(The top figure shot on Sep 9th, 2006; the bottom one on Dec 17th)

综上所述，自观测以来，研究区堤岸始终处于强烈的侵蚀状态，而侵蚀状况不同，人工堤岸为坍塌毁坏，自然堤岸为崩塌后退。

3.2 潮滩冲淤变化

依据中浚站长期观测潮位统计，并结合九段沙实测潮位修正，按照 1: 20 的高、宽比绘制成图 3.3。从图中可见：研究区大潮高潮位高于堤岸，小潮高潮位接近堤脚，高潮滩缺失；小潮高潮位至小潮低潮位间的潮滩为中潮滩，宽仅为 20m 左右，很狭窄；小潮低潮位至大潮低潮位间的潮滩为低潮滩，宽约 80m，其外边界伸至 0m 等深线稍下，较缓；0m 线以下为潮下带，较陡。整个潮滩以低

潮滩为主，淹没时间长，这在水体含沙量大、水动力弱时，利于泥沙沉降或淤积。

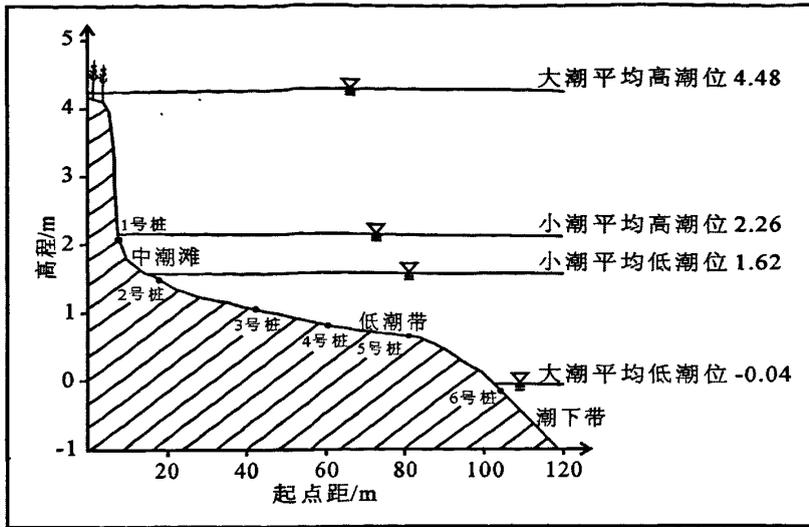


图 3.3 九段沙上沙断面 II 示意图

Fig.3.3 Sketch map of profile II in Upper Jiuduansha

两断面时冲时淤，变化趋势一致，全年都以冲蚀为主，皆属侵蚀型潮滩，这是因为两断面处于同一个强水动力环境。其中 I 号固定断面经过一年冲淤变化调整之后，整个滩面处于冲刷蚀低之中，冲刷幅度相差不大，为微冲岸滩。表现为 4#桩>2#桩>1#桩和 3#桩，海滩剖面形态未发生大的变化。也就说明 2007 年 5 月该岸段的水动力与泥沙条件和 2006 年 6 月基本是相同的。

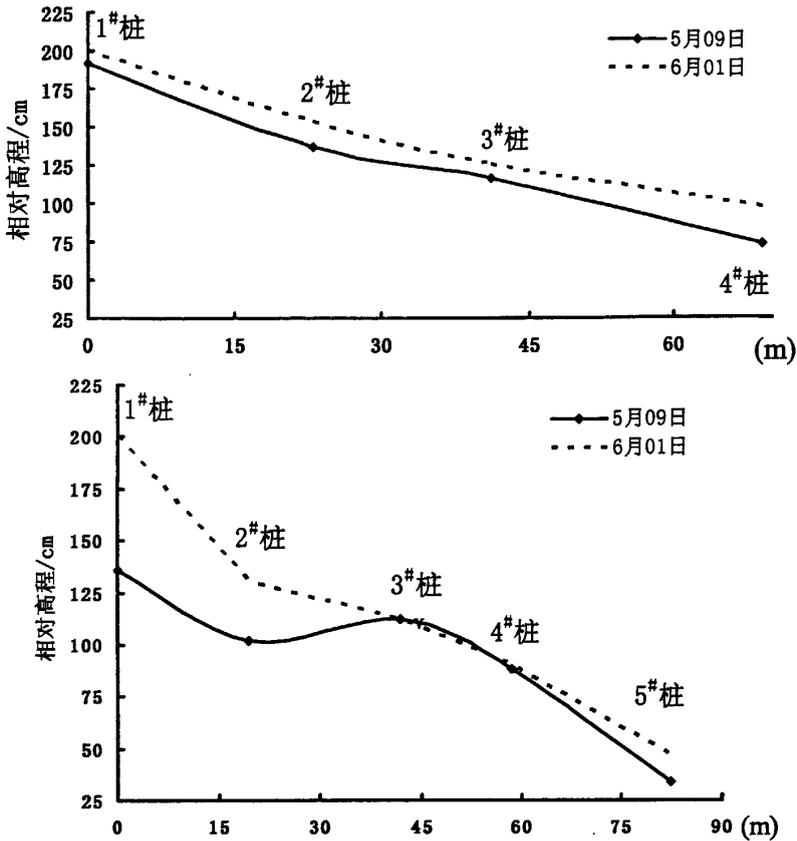


图 3.4 潮滩监测断面年周期冲淤变化图（上图为断面 I，下图为断面 II）

Fig.3.4 The scour and silting of tidal flat profiles (top= I profile; bottom= II profile)

从冲淤表中可见：全年中，除 1 月及其前后时段（06 年 12 月 4 日~07 年 2 月 17 日），两监测断面全受冲蚀外，其余时间均具有此冲彼淤、冲淤部位和强度多变的特点；但在总体上都呈现有“洪淤枯冲”的季节变化，最长持续淤积时间和最大淤积厚度多出现在洪季，最长持续冲蚀时间和最大冲蚀厚度多出现在枯季。如表所列：I 和 II 断面的最长持续淤积时间分别为 115 天和 92 天，最大淤积厚度分别为 36.7cm 和 24.2cm，最大持续淤积速率分别为 3.93mm/d 和 3.15mm/d，多出现在洪季内；I、II 断面的最长持续冲蚀时间分别为 250 天和 227 天，最大冲蚀厚度分别为 42.0cm 和 34.0cm，最大持续冲蚀速率分别为 3.39mm/d 和 1.99mm/d，多出现在枯季内。

表 3.1 监测断面的最长冲淤时间和最大冲淤厚度

Table.3.1 Longest time and most thickness of scour and silting

断面 部位	I 断面				II 断面				
	堤脚	中潮滩	低潮滩		堤脚	中潮滩	低潮滩		
桩号	1	2	3	4	1	2	3	4	5
最大淤积厚度 (cm)	13.5	36.2	36.7	20.5	5.3	22.9	24.9	22.2	17.0
淤积时段 (月.日~月.日)	8.24~ 10.19	7.19~ 10.19	7.19~ 11.11	2.17~ 4.13	2.17~ 3.22	7.19~ 10.19	8.24~ 11.11	8.24~ 11.11	8.24~ 11.11
持续淤积天数 (日)	56	92	115	55	33	92	79	79	79
淤积速率 (mm/d)	2.41	3.93	3.19	3.73	1.61	2.49	3.15	2.81	2.15
最大冲蚀厚度 (cm)	32.0	42.0	32.7	41.0	16.9	34.0	30.4	15.5	29.6
冲蚀时段 (月.日~月.日)	3.22~ 6.26	10.19~ 6.26	11.11~ 2.17	10.19~ 2.17	9.19~ 2.17	12.4~ 6.26	11.11~ 4.13	11.11~ 2.17	11.11~ 6.26
持续冲蚀天数 (日)	96	250	98	121	151	204	153	98	227
冲蚀速率 (mm/d)	3.33	1.68	3.34	3.39	1.12	1.67	1.99	1.58	1.30

其中，堤脚和中潮滩的 I 断面年冲蚀量分别为 26.0cm 和 22.0cm，II 断面分别为 67.9cm 和 33.8cm，均为 I 断面的冲蚀量小，这是因为 I 断面受到抛石堤庇护，起到了护岸保滩作用，同时也反映出抛石堤护岸保滩的有效范围，能扩展到中潮滩一带。低潮滩的年冲蚀量 I 断面在 11.5~20.5cm 之间，II 断面在 3.3cm~17.8cm 之间，均为 II 断面的冲蚀量小，这是因为 II 断面的自然岸线处于不断崩塌蚀退之中，崩塌的陆域物质参与了潮滩建造，而 I 断面的造滩物质仅靠潮流输沙。

3.3 潮滩洪枯季冲淤变化特征

经两固定断面监测表明：九段沙上沙潮滩具有明显的季节性冲淤演变规律，呈现出“洪淤枯冲”的变化特征；全年均以冲刷为主，属侵蚀型潮滩。

如图所示：枯季两断面均以冲刷为主；洪季除断面 II 的 1* 桩强蚀和断面 I

的 1[#]、4[#]桩微冲外，其余均以淤积为主。最长持续淤积时间和最大淤积厚度均出现在洪季，而最长持续冲刷时间和最大冲刷厚度均出现在枯季。断面 I 和 II 的最长持续淤积时间分别为 115 天和 92 天，最大淤积厚度分别为 36.7cm 和 24.2cm，最大持续淤积速率分别为 3.93mm/d 和 3.15mm/d，均出现在洪季；最长持续冲刷时间分别为 250 天和 227 天，最大冲刷厚度分别为 42.0cm 和 34.0cm，最大持续冲刷速率分别为 3.39mm/d 和 1.99mm/d，多出现在枯季 (表 3.2)。

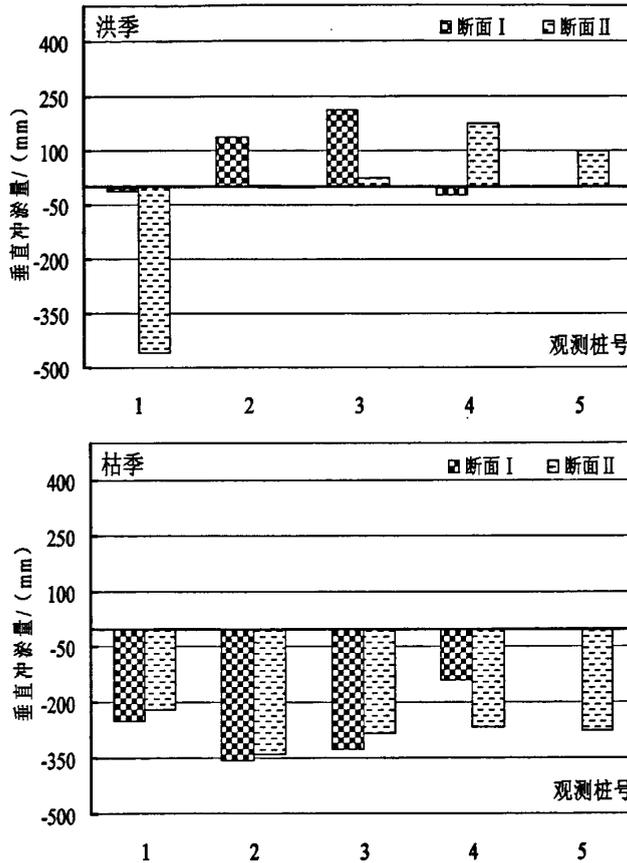


图 3.5 两断面洪枯季垂直冲淤变化图

Fig.3.5 The vertical erosion-deposition variation of the two profiles in the flood or dry season

表 3.2 两观测断面各桩位冲 (-) 淤 (+) 状况

Tab.3.2 The erosion (-) or accretion (+) at different sites

监测时间	天 数	断面 I				断面 II				
		1	2	3	4	1	2	3	4	5
2006.6~2007.6										
06.01~07.19	50	-8.0	-16.2	-8.0	+0.6	-10.6	-20.2	+2.7	+2.5	-0.2
07.19~08.24	36	-1.0	+13.2	+16.7	+9.9	-33.7	+4.4	-2.1	-7.3	-5.6
08.24~09.19	26	+5.5	+7.0	+10.3	-5.0	+1.4	+12.5	+7.8	+6.5	+3.5
09.19~10.19	30	+8.0	+16.0	+6.9	+2.5	-2.4	+6.0	+11.5	+12.3	+11.0
10.19~11.11	23	-0.9	-1.5	+2.8	-4.5	-0.9	-4.5	+5.6	+3.4	+2.5
11.11~12.04	23	-4.8	-4.8	-7.5	-6.0	-0.3	+2.0	-0.5	-0.2	-1.4
12.04~02.17	75	-6.3	-3.7	-25.2	-30.5	-13.3	-18.0	-0.8	-15.3	-9.6
02.17~03.22	33	+13.5	-14.0	+0.2	+8.5	+5.3	-0.5	-19.5	0.0	-5.0
03.22~04.13	22	-9.0	-13.0	-2.7	+12.0	-11.0	-6.5	-9.6	-5.2	-1.0
04.13~05.09	26	-5.4	-0.3	-2.4	-11.1	+0.5	-4.0	+4.9	+1.3	-7.3
05.09~06.26	48	-17.6	-4.7	-2.6	+3.1	-3.5	-5.0	-3.4	-7.3	-5.3
2006.6.1~ 2007.6.26	392	-26.0	-22.0	-11.5	-20.5	-67.9	-33.8	-3.3	-9.3	-17.8

图 3.6 为长江大通站流量与同期断面 II 的 1* 桩(其他桩点也可)滩面冲淤量的相关关系 (相关系数为 0.61), 相关结果良好, 由此表明河口潮滩冲淤对流域水沙变化有较敏感响应, 长江来水来沙变化是制约潮滩季节性冲淤演化的重要因子。丰水期大量水沙下泄, 悬沙沉降量较大, 潮滩易得泥沙补给而引起潮滩的淤积; 反之, 枯水期由于水沙来量的减少, 悬沙沉降量较小, 潮滩不易得到泥沙补给而引起潮滩冲刷。

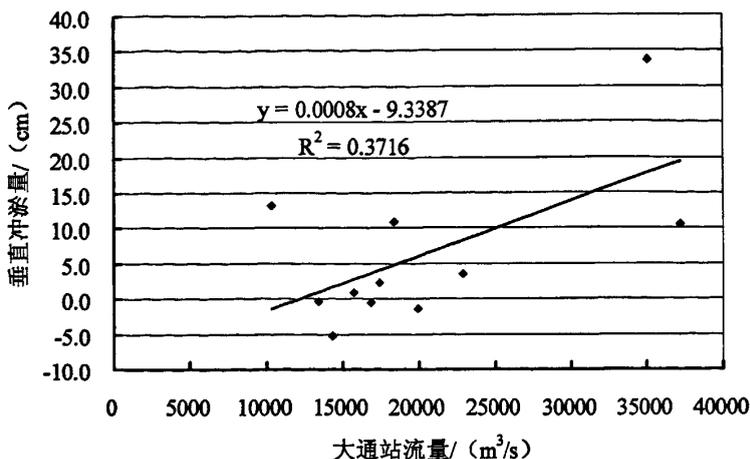


图 3.6 长江大通站流量与潮滩冲淤量的关系

Fig 3.6 The relationship between the discharge of Datong and erosion-deposition of tidal flat

3.4 “碧利斯”台风前后潮滩冲淤对比

台风是发生于低纬洋面上急速旋转的猛烈风暴，在其侵袭过程中带来狂风暴雨和大浪、高潮增水，都会对九段沙的岸滩造成了强烈的冲刷作用。台风对于岸滩的冲淤变化影响，可分为水平方向上的岸滩侵蚀后退和垂直方向上岸滩的蚀深。

2006年7月中旬的热带风暴“碧利斯”，对于九段沙岸滩侵蚀有极大的影响，其中在没有护坡的岸段，岸滩水平方向上侵蚀后退达到1米左右；在有简单抛石的岸段，原来比较平整的抛石发生了严重的坍塌。根据九段沙气象站收集到的降雨及风况信息，降雨从7月15日00:40开始，持续到11:50，连续降雨时间达12个小时，总降雨量达300mm。平均风速为16m/s，最大风速达20.6m/s。潮波和增水波叠加，造成增水，加大了对于岸滩的侵蚀及海滩剖面的塑造。“碧利斯”期间整个滩面均发生大幅度冲刷，平均蚀低6.4cm，最大蚀深20.2cm，侵蚀量占年侵蚀总量近一半。断面I整个滩面在台风期间均蚀低，其中2#桩位侵蚀量最大，其值达到16.2cm；1#和3#桩均为8cm，4#桩最小。断面II则以3#桩为界，向岸方向均受到强烈冲刷，其中2#桩蚀深20.2cm，1#桩也达到10.6cm；朝离岸方向则逐减。台风期间的冲淤强度比正常天气高1~2个数量级。这充分表明，暴风浪是潮滩短期突变的重要动力因素。

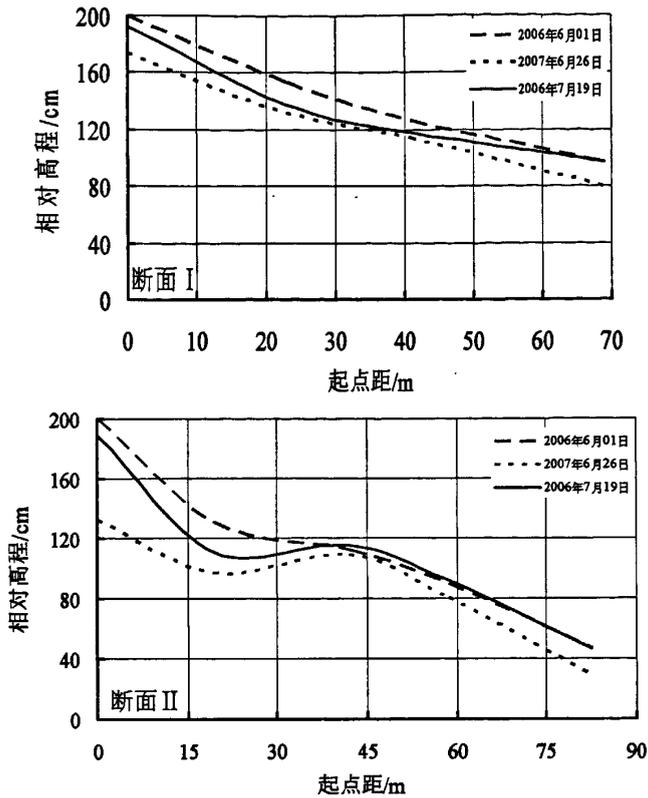


图 3.7 “碧利斯”台风前后两监测断面冲淤变化图

Fig.3.7 Erosion-deposition of the two profiles during the period of Bilis

据上沙码头的风资料推算,该水域在平均风速 0.55m/s 下,波高 0.57m;在“碧利斯”台风影响期间的平均风速下,波高 1.73m,在“碧利斯”期间的最大风速下,波高 2.56m,波浪对潮滩的侵蚀是在淹滩时通过掀动滩面泥沙进行的。用 Silvester 公式经波浪最大涡动水深计算表明,在日常平均风速下产生的波浪也能掀动滩面泥沙,故在“碧利斯”台风下,滩面受到较大强度的冲刷。

3.5 潮滩年周期冲淤演变机理

从不同高程地貌部位变化来看,堤脚和中潮滩,断面 I 年垂直冲刷量分别为 26.0cm 和 22.0cm,断面 II 分别为 67.9cm 和 33.8cm,均为断面 I 冲刷量小,这是因为断面 I 受抛石堤庇护,且起到了护岸保滩作用,使滩面不易受到冲刷,冲淤波动变化小,同时也反映抛石堤护岸保滩的有效范围仅能扩展到中潮滩一带;低潮滩的年冲刷量断面 I 为 11.5~20.5cm,断面 II 为 3.3cm~17.8cm,均为断面

II 的冲蚀量小, 这是因为断面 II 的自然岸线处于不断崩塌蚀退之中, 崩塌的陆域物质参与了潮滩建造, 而断面 I 的造滩物质仅靠潮流输沙。

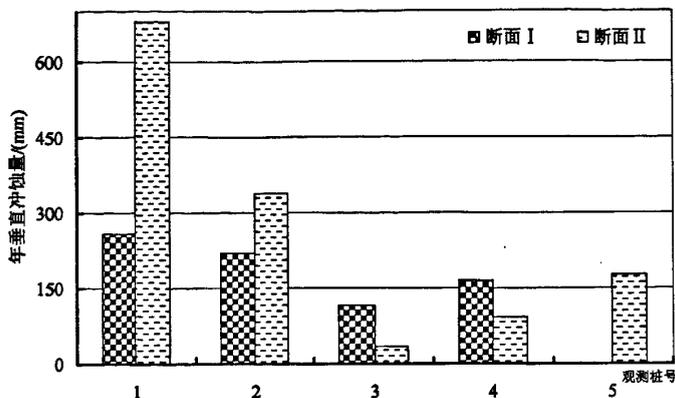


图 3.8 潮滩年周期冲淤变化图

Fig.3.8 Annually erosion-deposition of the tidal flat

表 3.3 为 2006 年 6 月~2007 年 6 月两断面各观测桩位滩面相对高程与提前一周悬沙浓度值的线形相关系数, 除断面 I 的 4#桩外相关结果均较好, 表明水体悬沙是造成九段沙上沙潮滩冲淤演变的主要自然因素。其作用机制为: 涨潮含沙量大时, 上滩水体易因饱和而发生淤积; 相反, 则对滩面进行侵蚀。但对比发现断面 II 的相关系数较断面 I 稳定, 变化不甚明显, 由此也表明人工抛石堤在保护岸滩的同时也改变了潮滩自然的发育演变过程, 改变了潮滩自身自然平衡调节能力; 在潮滩平衡剖面调节中, 人为因素也是影响潮滩发育演变的重要因子。

表 3.3 各观测桩滩面高程与悬沙浓度间的线形相关系数

Tab.3.3 The correlation between elevations and suspended sediment concentrations

断面	断面 I				断面 II				
	1	2	3	4	1	2	3	4	5
观测桩号									
相关系数	0.153	0.601	0.379	0.009	0.320	0.361	0.561	0.512	0.394

从动力沉积和动力地貌角度分析, 九段沙上沙典型潮滩短期冲淤变化, 主要反映了潮滩发育环境的改变, 主要表现为自然条件的改变以及人类活动的影响。其作用的动力是近岸地区的波浪和潮流, 而洪水和台风是长江口拦门沙冲淤变化的两个主导因子, 人类活动也逐渐成为对潮滩发育产生直接影响的重要因子。研究表明, 潮滩冲淤变化与长江径流量季节性变化的趋势相同, 长江径流所携带的

泥沙是潮滩泥沙的主要来源。据大通流量逐月统计表明, 2006年6月~2007年6月长江入海水量比多年平均少 $3000 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上, 减少 33%, 属特枯水文期。特枯水期与“碧利斯”台风对潮滩冲刷作用相叠加, 故造成潮滩更大幅度的冲刷。人工堤的建造使滩地自然属性发生重大变化, 在抵御堤岸被冲蚀的同时也影响了潮滩自然发育演变过程。总之, 上述潮滩年周期演变过程和特征是流域来水来沙与暴风浪等自然因素同人为因素综合作用的结果。

3.6 本章结语

岸滩冲淤循环与平均海面、潮差、风(浪)和岸外含沙量等多种因素的季节性变化有关。滩面年内变化不同程度地表现为“夏淤冬冲”特征, 这与风(浪)的季节性变化有关。根据两断面连续一年的滩面高程观测, 并对观测数据进行总结分析, 发现: 布设在九段沙上沙的两条具有典型代表性的潮滩, 具有很明显的季节性冲淤循环规律。对比两条断面变化过程和结果, 发现, 断面 I 较 II 变化幅度及速率均较小, 这充分说明了人工抛石堤在“护岸保滩”方面的作用。另外, 根据完整一年时间的观测资料, 也总结出来潮滩一般发育规律, 比如: 潮滩在发育过程中, 均表现冲淤交替发育的特征, 印证了潮滩本身的自动调节能力。

河口潮滩的冲淤变化过程决定于水动力条件、潮滩沉积过程和地貌动态变化三者之间的对比关系。由于流域来水来沙的洪枯季变化, 九段沙上沙码头东南潮滩的季节变化显著, 具有明显的“洪淤枯冲”变化特征。潮滩全年表现为冲刷大于淤积, 属微冲型。由此表明, 入海水沙是制约潮滩发育的关键因子。在“碧利斯”台风期间, 两监测断面潮滩普遍受冲, 导致滩面平均骤冲 6.0cm, 最大蚀深 20.2cm。台风期间滩面冲刷厚度可达数厘米或数十厘米, 而在平静天气下, 在一个周期内滩面高程变化仅为毫米量级。由此可以认为暴风浪是影响潮滩短期冲淤演变的决定性因子。对比两断面潮滩年周期演变过程和结果, 均表现为时冲时淤和冲淤多变等特征, 这是因为两断面处于同一个强水动力环境。但在有抛石堤庇护的潮滩, 其冲淤变化量值和幅度均小于自然潮滩, 而与其与表层含沙量之间线形相关系数的变化幅度大, 说明人工抛石堤能抵御岸线蚀退和潮滩侵蚀, 但同时也改变了潮滩自然的冲淤变化规律。总之, 流域来水来沙和暴风浪等均为影响九段沙潮滩发育演变的主控因子, 而人为因素也成为其中不可忽略的重要影响因子。

第四章 九段沙上沙码头水域悬沙浓度短期变化特征

长江口是我国最大的河口，为充分利用长江的丰富资源，一批重大工程，如三峡工程，北槽深水航道工程的建设，必将影响长江河口的入海物质通量，尤其是悬沙通量。由于入海河口区域紊流结构、泥沙颗粒性质、河口潮汐的不对称等因素的复杂性，悬沙浓度在该区域表现为一个随机性很强的变量，因此加强悬沙浓度短期变化规律的研究显得尤为重要。

悬沙是九段沙湿地的重要物质来源，主要来自长江输沙。根据多年资料分析，长江来水来沙特征表现为水、沙量大，且具有明显的洪枯季变化。在九段沙上沙码头布设固定点，于2006年6月1日~2007年6月30日逐日进行高潮、涨潮中潮位、低潮、落潮中潮位时刻水样采集，在实验室进行含沙量分析，分析含沙量变化规律，并在2006年洪枯季两次进行了水文测验，按6点法测取水样，在室内分析其悬沙浓度，并计算沙量输运量。本章利用上述观测的数据资料，分析了悬沙浓度年周期变化特征及其机理，并计算了悬沙输运量及其趋势。

4.1 含沙量统计特征值及其年周期变化

据2006年6月至2007年5月在上沙码头一固定观测点实测得的数据，全年最大含沙量（表层，下同）为 $4.57\text{kg}/\text{m}^3$ ，最小含沙量为 $0.03\text{kg}/\text{m}^3$ ，年内变幅达 $4.50\text{kg}/\text{m}^3$ 以上。通过一年监测，求得上沙码头水域的年平均含沙量为 $0.64\text{kg}/\text{m}^3$ 。月平均含沙量以9月最大，达 $1.70\text{kg}/\text{m}^3$ ；6月最小，达 $0.17\text{kg}/\text{m}^3$ ，9月比6月大一个量级（图4.1，图4.2）。

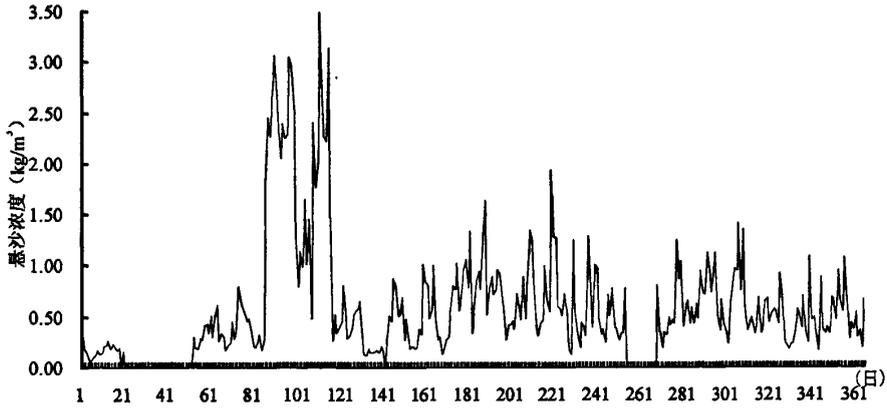


图 4.1 九段沙上沙码头水域日均悬沙浓度变化

Fig.4.1 Daily fluctuations of suspended sediment concentrations in Upper Jiuduansha dock

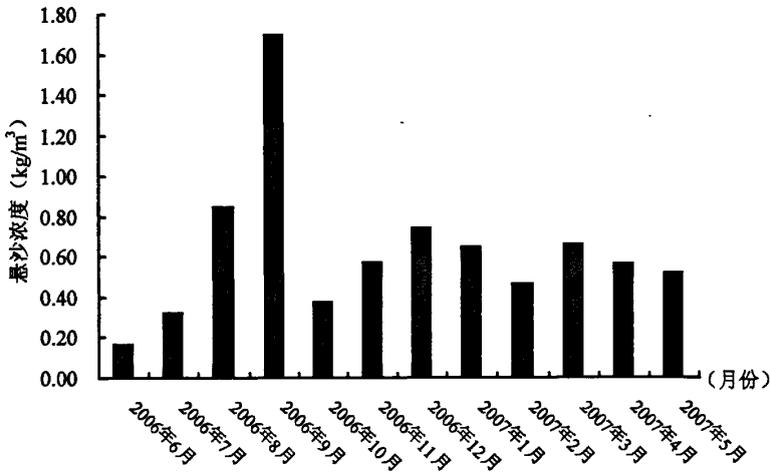


图 4.2 九段沙上沙码头水域月均悬沙浓度变化

Fig.4.2 The fluctuations of monthly suspended sediment concentrations

月最大含沙量(表 4.1)多出现在大潮和中潮,遇大风浪时,小潮也可以出现,如 2006 年 9 月 9~18 日连续 10 天的风速较大,日平均风速都在 6.5m/s 以上(表 4.2),其中 17 日 4 时~16 时、17 日 23 时~18 日 15 时,连续 12h 和 17h 的风速均达 7.00~11.80m/s,风力 ≥ 6 级(≥ 10.8 m/s)以上大风刮了 4 个小时多,边滩和床底泥沙被大量掀起成悬沙,又因悬沙落淤的迟后效应,故在 19 日小潮测到了全年最大含沙量 4.57kg/m^3 。月最小含沙量变化在 $0.03\text{kg/m}^3\sim 0.18\text{kg/m}^3$ 之间,不足 0.1kg/m^3 的占多数;全年除 11 月最小含沙量出现在中潮外,余 11 个月均出现在风小浪小的小潮流。这是因为小潮流速小,加之风浪弱,底沙不易被

掀起，故常降致低含沙量，出现一月中的最小值。

表 4.1 九段沙上沙码头水域各月最大含沙量（含沙量， kg/m^3 ；潮差，m）

Table.4.1 The monthly maximum suspended sediment concentrations

月份	高潮		落潮低潮位		低潮		涨潮中潮位		月最大含沙量	月最大含沙量出现日期		潮汐强度		出现时的潮位
	最大含沙量	出现日期	最大含沙量	出现日期	最大含沙量	出现日期	最大含沙量	出现日期		公历	农历	日平均潮差	日最大潮差	
6	0.449	13	0.238	1	0.534	1	0.212	16	0.534	1	五月初六	2.45	3.10	低潮位
7	0.785	30	0.438	27	0.551	28	0.547	28	0.785	30	七月初六	2.99	3.48	高潮位
8	3.033	29	3.093	29	3.031	29	3.142	29	3.142	29	闰七月初六	3.10	3.37	涨潮中潮位
9	4.280	23	3.980	23	3.281	5	4.572	19	4.572	19	闰七月廿七	2.39	2.85	涨潮中潮位
10	1.417	25	0.793	1	1.613	24	0.672	8	1.613	24	九月初三	3.55	3.77	低潮位
11	2.008	29	2.518	29	1.793	12	0.941	9	2.5178	29	十月初九	1.95	2.13	落潮中潮位
12	1.969	6	1.683	5	1.949	27	3.178	6	3.178	6	十月十六	3.49	3.90	涨潮中潮位
1	1.659	7	1.925	16	2.486	16	1.813	23	2.486	16	十一月廿八	2.16	2.43	低潮位
2	0.796	3	1.390	1	1.301	3	1.280	9	1.389	1	十二月十四	2.99	3.27	落潮中潮位
3	1.470	7	1.550	7	1.446	20	1.523	5	1.550	7	正月十八	3.50	3.45	涨潮中潮位
4	1.218	22	1.773	2	2.254	3	2.569	5	2.569	5	二月十八	3.48	3.56	涨潮中潮位
5	1.358	22	1.069	18	1.763	6	2.272	22	2.272	22	四月初六	2.20	2.93	涨潮中潮位

说明：7月14~15日受热带风暴“碧利斯”影响，九段沙连续吹6级以上大风，最大风速达23.6m/s，6月21日7月21日所取的水样被风暴卷入江中，故7月的最大含沙量有可能会超过4.572 kg/m^3 。

表 4.2 九段沙上沙码头9月9日~19日实测风速 (m/s)

Table.4.2 Measured wind speed in Upper Jiuduansha dock from September 9th to 19th

日期	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
日平均风速	7.94	7.32	6.80	7.33	7.38	6.80	6.76	6.52	8.49	7.18	4.56
日最大风速	12.00	11.90	9.40	10.60	10.65	8.55	10.25	8.85	11.80	11.30	6.25

9月含沙量大，是因2006年9月的长江流量比该月的多年平均流量43173 m^3/s 减少了24000 m^3/s 多，仅为19087 m^3/s ，上游来水量的显著减少，加大了海水入侵的上溯距离，外加该月风速大，大风的出现次数多，持续时间长，风大浪大，致使原先落淤滨海地带的长江泥沙，再悬浮后随入侵的海水带入测区，故使9月成了全年中平均含沙量最高的月份。同理，6月含沙量小，是因2006年6月

风小、浪小，再悬浮泥沙少；与此同时，长江来水量无明显减少，仍保持了 $38630\text{m}^3/\text{s}$ 的大流量，海水入侵势力弱，从下游输入测区的泥沙减少。按季节平均，测区的含沙量为秋>冬>春>夏。按洪（5月~10月）、枯（11月~翌年4月）季平均，测区的含沙量为洪季>枯季，分别为 $0.660\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $0.614\text{kg}/\text{m}^3$ 。这里需指出，上沙码头的洪季含沙量高，决不是因洪季长江来水来沙多使含沙量增大所致，而是 2006 年长江洪季来水量比多年平均洪季来水量减少了 2266.53 亿 m^3 （表 4.4），即减少了 34%，加大了海水上溯，使下游泥沙的回输量增大所致。

表 4.3 九段沙上沙码头水域月平均含沙量

Table.4.3 The monthly average suspended sediment concentrations in the Upper Jiuduansha dock

季节	夏季			秋季			冬季			春季		
月份	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
月平均 含沙量/ kg/m^3	0.171	0.324	0.861	1.700	0.380	0.575	0.745	0.654	0.469	0.670	0.570	0.522
季节平均 含沙量/ kg/m^3	0.452			0.8850			0.6227			0.5871		

表 4.4 长江洪季（5月~10月）入海水量(亿 m^3)

Table.4.4 The flux to sea of Changjiang River in the flood season from May to October of 2006

月份	5	6	7	8	9	10	合计
多年平均入海水量	895.90	1052.04	1348.31	1258.04	1119.04	970.55	6643.88
2006 年入海水量	817.34	1001.29	930.96	734.66	494.74	398.36	4377.35
2006 年比多年平均减少的水量	78.56	50.75	417.35	523.38	624.30	572.19	2266.53

综上所述，含沙量是一个随机性很大的变量，但通过长期监测揭示出它的变化规律，上沙码头水域的含沙量具有大潮大于小潮、冬季大于夏季、风浪大含沙量高和年内变幅大等特点；其值的大小主要是径流、潮流和风浪三大动力综合作用的结果，同时还受长江下泄沙量的影响，其中风浪对含沙量的影响尤为显著。

4.2 泥沙与沙量输运

洪季测到涨、落潮最大含沙量（表 4.5）分别为 $3.58\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.47\text{kg}/\text{m}^3$ ，都出现在底层；最小含沙量分别为 $0.09\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $0.07\text{kg}/\text{m}^3$ ，都出现在表层；全潮全

水层平均含沙量, 涨潮为 1.29kg/m^3 , 落潮为 0.66kg/m^3 ; 最大、最小和平均含沙量均为涨潮大。枯季测得涨、落潮最大含沙量分别为 5.19kg/m^3 和 3.75kg/m^3 ; 最小含沙量分别为 0.23kg/m^3 和 0.07kg/m^3 ; 全潮全水层平均含沙量, 涨潮为 1.30kg/m^3 , 落潮为 1.33kg/m^3 ; 最大和最小含沙量均为涨潮大, 平均含沙量为落潮略大于涨潮。洪、枯两测次相比, 枯季全潮平均(涨、落潮平均)含沙量是洪季的 2.6 倍, 为枯季含沙量大。这与长期监测站统计的含沙量洪季>枯季反之, 析其原因, 与测量期间的风浪有关: 枯季为 12 月 4~5 日测量, 测量前遇冷空气南下, 风力较大(表 4.6), 3 日的最大风速达 9.35m/s , 平均风速 6.49m/s , 风大浪大, 风浪掀沙增大了水体的含沙量, 又因悬沙(含沙量)落淤的迟后效应, 故在 4~5 日仍测到了高含沙量; 而洪季 8 月 23~24 日测量其间和测量前(22 日)的风速都很小, 所以测到的含沙量低。

表 4.5 洪、枯季周日水文测验含沙量特征值(kg/m^3)

Taber.4.5 The measured suspended sediment concentrations in the flood or dry seasons

项目	潮次	涨、落潮	表层含沙量			中层(0.6H)含沙量			底层含沙量			垂线平均含沙量		
			最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
洪季 2006年 8月23~24日	第一潮次	落潮	0.170	0.066	0.112	0.359	0.149	0.259	0.786	0.358	0.534	0.300	0.155	0.247
		涨潮	0.370	0.094	0.194	1.167	0.362	0.692	1.788	0.655	0.918	0.923	0.367	0.609
	第二潮次	落潮	0.244	0.075	0.178	0.673	0.229	0.445	1.469	0.308	0.745	0.692	0.211	0.422
		涨潮	0.271	0.119	0.165	1.348	0.228	0.795	3.575	0.573	1.494	1.191	0.251	0.710
	全潮	落潮	0.244	0.066	0.148	0.673	0.149	0.359	1.469	0.308	0.648	0.692	0.155	0.341
		涨潮	0.370	0.094	0.179	1.348	0.228	0.744	3.575	0.573	1.206	1.191	0.251	0.659
枯季 2006年 12月4~5日	第一潮次	落潮	0.786	0.195	0.451	3.068	0.660	1.428	3.748	1.325	2.295	2.046	0.728	1.293
		涨潮	0.631	0.2270	0.371	2.587	0.881	1.501	5.187	0.933	2.282	2.026	0.776	1.331
	第二潮次	落潮	0.742	0.070	0.421	3.099	0.719	1.701	3.313	0.909	1.984	2.220	0.492	1.370
		涨潮	1.037	0.234	0.652	2.585	0.885	1.437	2.956	1.360	2.025	1.863	0.936	1.269
	全潮	落潮	0.786	0.070	0.437	3.099	0.660	1.554	3.748	0.909	2.151	2.220	0.492	1.329
		涨潮	1.037	0.227	0.512	2.587	0.881	1.469	5.187	0.933	2.153	2.026	0.776	1.300

表 4.6 周日水文测验前和测验期间的风况

Table.4.6 The wind during the hydrology measured period

测量日期	全潮平均含沙量 (kg/m ³)	测量前的风况			测量期间的风况				
		平均风速 (m/s)	平均风向	最大风速 (m/s)	最大风速的风向	平均风速	平均风向	最大风速	最大风速的风向
洪季 8月23~24日	0.5001	3.19 (22日)	东北~ 偏东	4.85 (22日)	偏东风	4.20	偏东~东北	6.70	东南
枯季 12月4~5日	1.3143	6.49 (3日)	西北~ 偏北	9.35 (3日)	偏北风	3.80	东北~偏北	6.35	东北 偏北

沙量单宽通量是指水表到底床，宽为 1m 的过水断面内在涨潮（或落潮）流时段通过的沙量，依据这一定义，沙量单宽通量应为含沙量、流速、流时和水深的 4 因子乘积。计算时，流速、流时和水深的单位分别取 m/s、s 和 m，数据均由实测所得；悬沙浓度单位取 kg/m³。取值和单位确定后即可计算沙量单宽通量，现将取值和计算结果列入表 4.7。洪季测次的涨、落潮沙量单宽通量分别为 128801kg 和 39587kg；枯季测次的涨、落潮沙量单宽通量分别为 19591kg 和 142181kg。涨潮和落潮的沙量输运量都为枯季测次大。尽管枯季测次的沙量输运量比夏季大，但输入测区的涨潮净输沙量却为洪季测次比枯季测次的大，洪季测次在一潮内宽为 1m 的过水断面中向测区净输入泥沙约 89t，枯季测次仅为 57t。这说明：枯季测次的泥沙，在测区大进大出，来回输运，以过往为主；而夏季测次的泥沙，在测区的进出量较少，但落淤量较多，因此使涨潮净输沙量增大。由此可见：位在江亚北水道南北两边的沙体和潮滩，有着“洪淤枯冲”的特征，主要是由洪、枯季的风浪强度不同所致。

表 4.7 上沙码头前沿水域的泥沙单宽通量计算结果

Table.4.7 The net flux of suspended sediment in the foreland of Upper Jiuduansha dock

测量日期	涨、落潮	平均含沙量(kg/m ³)	平均流速(m/s)	流时(h:min)	平均水深(m)	泥沙单宽通量(kg)	单宽净输沙量(t)
2006年 8月23~24日	洪季 涨潮	0.6593	1.00	6:10	8.8	128801	89
	落潮	0.3408	0.73	6:30	6.8	39587	
2006年 12月4~5日	枯季 涨潮	1.2999	0.82	6:16	8.3	199591	57
	落潮	1.3286	0.70	6:32	6.5	142181	

说明：单宽净输沙量为涨潮减落潮。

4.3 本章小结

据实测，九段沙上沙码头水域的含沙量具有大潮大于小潮、冬季大于夏季、风浪大含沙量高和年内变幅大等特点；悬沙浓度的年变化主要受控于径流和风浪两大因子。悬沙浓度主要取决于风浪掀沙，本水域冬季的风浪大于夏季(除台风浪外)，故悬沙浓度为冬高夏低。且由于观测点地处上沙边滩，易受风浪作用，风浪卸沙往往会掩盖当地悬沙浓度年周期变化规律。从最大悬沙浓度看，8和9月偏高，这主要是受长江洪季径流输沙和风浪掀沙共同影响的反映，冬季12和1月偏高，是受风浪掀沙作用的影响。

第五章 九段沙上沙潮滩沉积物短期时空变化特征

九段沙演化过程,也是九段沙从水下阴沙到局部地区高出平均高潮位而成为陆地的过程。九段沙上沙是九段沙中成陆最早的沙体。沙洲在发育过程中,不同潮位的沉积物,是水动力和潮滩沉积物相互适应的结果,成陆沙洲自上而下代表了高、中和低潮滩沉积物的分布规律。九段沙上沙位于九段沙的头部,它受落潮流顶冲的冲刷侵蚀影响,沙洲头后退向下移动。现固定断面高潮滩以上部分的沉积物是现在高水位漫滩的沉积物,而高潮位以下为过去潮滩的沉积物。因此,要研究固定断面物质来源有两个方面:一是海岸后退过程中岸滩侵蚀后退残留在海滩上,经水动力作用后而成为滩地组成物质的一部分,另一部分是现在长江带来的悬沙参与沉积物的重新组合。也就是通常所说的就地供应和外来物质共同形成现在海滩的沉积。

沉积物粒度组成特征及其空间分布、时间变化是沉积物的基本特征。沉积物粒度特征是衡量沉积环境的一种重要尺度,粒度参数常被用来识别沉积环境的类型或判定泥沙输运的方式,而粒度分析是揭示沉积环境动力条件的主要手段之一。沉积物粒度特征是一定动力和地貌条件下综合作用的产物,也是泥沙运动的具体反映。对于沉积物粒度,前人往往更多地关注其空间上(沿岸和横向上)的分布变化,而时间上的演变,尤其是短期粒度特征及其变化很少引起关注。实际上,沉积物随时间变化也具有周期性,其中季节性变化是其最重要的规律之一且同样能够反映沉积环境特征及其变化。

利用收集到的2006年6月~2007年6月,尤其是台风前后宝贵的逐月采集的表层沉积物资料,及其水文地貌资料,开展九段沙上沙表层沉积物时空变化规律,及沉积物对台风等极端天气响应的研究,不仅具有科学意义,而且对国家级湿地的保护,对北槽深水航道的开发利用、维护、和整治,都有着重要的现实意义。

5.1 研究区域样品分析

5.1.1 潮滩表层沉积物粒度分析

粒径的表示通常有平均粒径 (Mz) 和中值粒径(d₅₀)。粒度参数 (标准偏差、偏度和峰度) 运用 Fork-Ward 公式计算:

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$$

$$SK_1 = \frac{\Phi_{16} - 2\Phi_{50} + \Phi_{84}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} - 2\Phi_{50} + \Phi_5}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$

$$KG = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

式中: $\Phi_i(i=5,16,25,\dots)$ 表示在粒度累计曲线中百分含量为 i 时的粒径值。沉积物分类方案采用 Trefethen(1950)分类方案,按砂(>62.5 μm)、粉砂(3.9~62.5 μm)、粘土 (<3.9 μm)粒组的含量划分。

5.1.2 沉积物粒度参数及其年周期变化特征

研究区动力和地貌条件十分复杂,上述潮滩表层沉积物类型、分布和变化复杂多样。沉积物主要包括由细砂 (FS)、粉砂质细砂 (TS)、细砂质粉砂 (ST)、粉砂 (T) 和粘土质粉砂 (YT) 组成 5 类。按照粒度组成三角分类法 (Shepard, 1951), 沉积物以粉砂和砂为主。

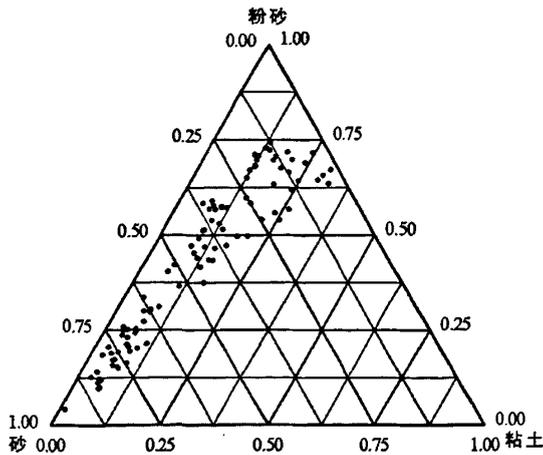


图 5.1 表层沉积物粒径三角分类图

Fig.5.1 Triangle classification of the surface sediment size

九段沙上沙沉积物粒度分析结果显示,总体上潮滩表层沉积物颗粒较粗, Mz=8.430~173.660 μm , d₅₀=13.665~174.909 μm , 年均中值粒径和平均粒径分别为 62.319 μm 和 70.655 μm , 两者相关系数为 0.970, 相关性很好, 以下用中值

粒径表征沉积物颗粒大小。潮滩表明沉积物粒度参数还包括分选系数、偏度和峰度，均表现出明显的时空变化特征。其中，分选系数 $\sigma_1=1.557\sim 2.315$ ，均值为 1.850，分选差至很差；偏度系数 $=0.275\sim 0.571$ ，年均值为 0.423，正偏至极正偏，以正偏为主；峰态 $KG=0.867\sim 2.114$ ，均值为 1.426，宽至很窄（表 5.1）。其年内变化除 2006 年 7 月和 8 月因受“碧利斯”台风强烈影响变化趋势相反外，均表现出明显的季节性变化特征，且与粒度变化具有一致的趋势，共同反映了该区域沉积环境的变化。

表 5.1 潮滩沉积物粒度参数年周期变化

Tab.5.1 Annually changes in size parameters of tidal flat sediment

日期	分选系数 (σ_1)	偏度 (SK_1)	峰度 (KG)	平均粒径 (μm)
2006-06	2.145	0.340	1.049	66.566
2006-07	1.744	0.506	2.114	94.250
2006-08	2.315	0.275	0.867	45.983
2006-09	1.909	0.447	1.308	61.786
2006-10	1.750	0.571	1.882	87.780
2006-11	1.609	0.439	1.476	72.109
2006-12	1.620	0.389	1.436	61.097
2007-01	—	—	—	—
2007-02	1.866	0.398	1.382	61.097
2007-03	1.557	0.512	1.652	68.865
2007-04	1.648	0.424	1.598	82.614
2007-05	2.145	0.340	1.049	66.566
2007-06	1.896	0.430	1.299	67.305
年平均	1.850	0.423	1.426	70.655

5.2 表层沉积物年周期时间演变

由于水动力条件的季节性变化，表层沉积物粒度也存在短周期时间演变规律。其中流域来水来沙和暴风浪是影响沉积物短期变化的主导性因子。

5.2.1 洪枯季变化

洪枯季变化不考虑受“碧利斯”台风强烈影响的 2006 年 7 月和 8 月。潮滩表层沉积物粒度变化具有明显的周期性，其中洪枯季变化是最显著的一个特征，其原因在于流域来水来沙和风浪等作用因素本身的季节性变化。潮滩沉积物洪枯季变化显著，由图 4 可以得出：同大通径流量变化趋势相一致，表层沉积物中值粒径也具有明显的季节性变化规律；洪季潮滩淤积，中值粒径变小，在粒径级配上，粘土粒级的含量逐渐增多，而砂和粉砂减少，分选性差，而枯季潮滩冲蚀，颗粒分选性由差变好，颗粒粒径趋于粗化。

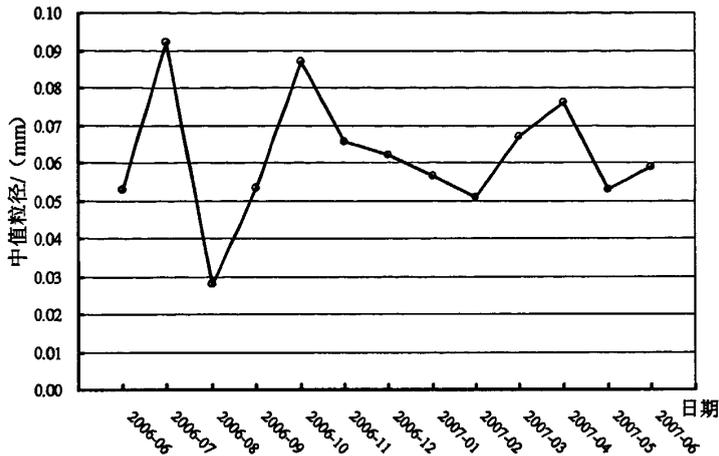


图 5.2 表层沉积物中值粒径年变化

Fig.5.2 Annually changes of surface sediment grain size

洪季 5~9 月沉积物中值粒径小于 $60\mu\text{m}$ ，均值为 $49\mu\text{m}$ ；而枯季除 2006 年 2 月外中值粒径均大于 $60\mu\text{m}$ ，均值达 $68\mu\text{m}$ 。枯季期间砂含量大于年均值 43.9% 的月份占 2/3 以上，而粘土含量均小于年平均值 12.4%；洪季粘土含量均大于年均值，砂含量均小于年均值（表 5.2）。这些均符合潮滩沉积物在冲淤中的一般变化规律，即淤积时，物质细化；冲刷时物质粗化，冲刷越强，物质越粗；在冲淤平衡带，平均粒径变化小。总之，丰水期滩面淤积，泥沙粒径变细，分选性变差；枯水期滩面受冲刷，泥沙粒径粗化，分选明显。这种季节性变化主要与流域来水来沙和风浪的季节性变化有关，上述潮滩夏季多东南风，为向岸风，推波助澜，能量增大，导致滩面冲刷，物质粗化，而冬季以离岸的西北风为主，常起消浪作用，从而引起泥沙的沉积。

表 5.2 九段沙上沙潮滩沉积物各粒级含量及中值粒径

Tab.5.2 Grain size and its grade content of sediment in Upper Jiuduansha

日期	粘土 ($<3.9\mu\text{m}$)	粉砂 ($3.9\sim 62.5\mu\text{m}$)	砂 ($>62.5\mu\text{m}$)	中值粒径 (μm)
2006-06	16.7	46.7	36.7	52.915
2006-07	12.7	26.5	60.9	92.395
2006-08	21.0	52.9	26.1	27.992
2006-09	12.8	51.0	36.2	53.463
2006-10	9.2	30.8	60.0	87.142
2006-11	9.4	41.7	48.9	65.789
2006-12	8.0	48.2	43.8	62.278
2007-01	—	—	—	—
2007-02	12.4	50.1	37.6	50.807
2007-03	8.0	45.0	47.0	66.948
2007-04	9.6	40.6	49.8	76.230
2007-05	16.7	46.7	36.7	52.915
2007-06	11.9	45.3	42.7	58.954
年平均	12.4	43.8	43.9	62.319

5.2.2 “碧利斯”台风前后对比

“碧利斯”台风期间整个潮滩发生大幅度冲刷，导致滩面平均蚀低 6.4cm，最大蚀深 20.2cm。与此相应，台风期间滩面沉积物月均中值粒径和砂含量分别骤增达到年最大值 92 μm 和 60.9%，底质粗化十分明显。台风过后的 8 月份潮面迅速回淤，粒径明显小于其他月份，月均中值粒径和砂含量分别仅为 28 μm 和 26.1%，均为年内最小。其中断面 I 整个滩面沉积物粒径在台风期间大幅度增大台风后大幅度减小，表现为“骤增骤减”，其中 1* 和 3* 点变化幅度最大，分别为 115.39 μm ~173.66 μm ~43.05 μm 和 13.23 μm ~104.32 μm ~43.05 μm ，4* 点最小，增、减幅度分别仅为 49.70 μm 和 42.89 μm ；断面 II 则以 3* 点为界，沿离岸方向中值粒径先增大后减小，其中 4* 点由 13.24 μm 增大到 111.54 μm 后减至 23.40，5* 点为 18.48 μm ~106.57 μm ~15.66 μm ，向岸方向则先减后增（图 5.3）。总体而言，台风期间滩面变化表现为，断面 I 整个滩面沉积物粒径变大， d_{50} 由 66.6 μm 变为 94.3 μm ，分选变好，而断面 II 表现为下部粒径变大上部粒径变小的特征。其原因

为,断面Ⅱ的自然岸线处于不断崩塌蚀退之中,崩塌的陆域物质参与了潮滩建造,而断面Ⅰ的造滩物质仅靠潮流输沙。

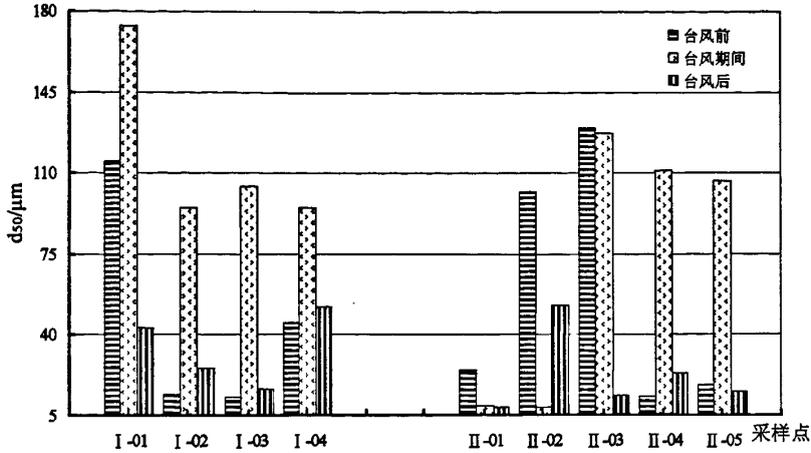


图 5.3 “碧利斯”台风前后沉积物粒径变化

Fig.5.3 Sediment grain size changes of two profiles during the period of Bilis

总之,台风作用造成滩面冲刷,沉积物粗化,台风过后滩面迅速回淤,粒径变细。台风期间的沉积物粒径变化幅度比正常天气大近 1~2 个数量级。这充分表明,暴风浪是引起九段沙上沙潮滩沉积物短期突变的重要动力因素。

5.3 表层沉积物空间分布

潮滩沉积物受地形和水动力等因素制约而出现明显的空间分布差异,该分布特征是水动力条件与地貌特征综合作用的结果。根据沉积物粒度分析结果,沉积物表现出明显的纵向(沿岸方向)和横向的分布特征。

5.3.1 表层沉积物沿岸变化

本文分析滩面沉积物沿岸变化,是通过对比两断面沉积物粒度变化过程和结果之差异而进行的。图 5.4 为两断面逐月沉积物样品的中值粒径变化图,结果表明,总体上断面 I 沉积物样品粒径值变幅小,集中在细粒段;而断面 II 沉积物中值粒径值比较分散,向粗细两端集中分布。其中在近岸带和中潮滩,即从堤脚向外至 20m 左右的近岸带,受堤岸物质影响大,人工堤的岩石碎屑和自然堤的崩岸物质分别参与该带沉积,故冲刷期断面 I 处的近岸物质比断面 II 处的粗,细砂

组分较多；淤积期断面 I 的近岸物质细化，断面 II 粗化。细化是因为新的沉积物使细砂组分相对减少，粗化是因为该时期的崩岸物质相对减少；在低潮滩，冲刷时物质粗化，淤积时细化，在冲淤平衡带（断面 II），平均粒径变化小，并在滩面相对稳定期，表层沉积物有从里向外逐渐变粗的趋势。

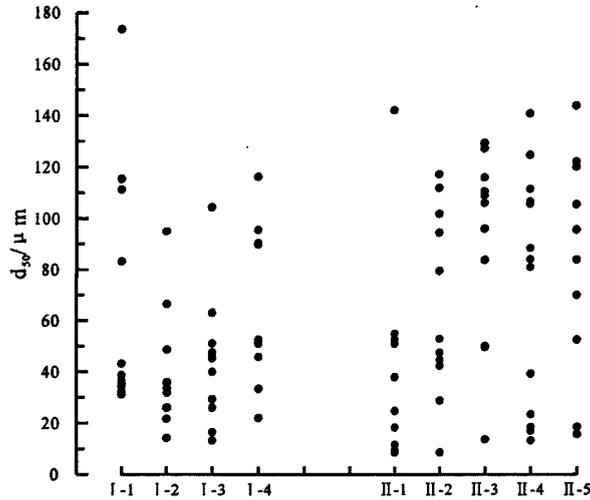


图 5.4 2006 年 6 月~2007 年 7 月潮滩表层沉积物粒度变化

Fig.5.4 Temporal changes of tidal sediment grain size from July 2006 to July 2007

分析两断面沉积物样品粒径变化趋势发现，断面 I 逐月中值粒径变化趋于一致化，而断面 II 变化趋势线较紊乱，变化幅度大。在低潮滩断面 I 和 II 均为细砂沉积物，砂含量都高达 70% 以上。其中断面 I 的 4* 点变幅仅为 94.2 μm ，而断面 II 的 4* 和 5* 点粒径变幅最大达 127.7 μm ，粒径变化幅度均较大，表明两者均处于一个强水环境。其余各采样点中值粒径，除受台风影响的 7 和 8 月份外，断面 I 变幅均值仅为 77.2 μm ，而断面 II 变幅均值达 117.7 μm ，其原因为人工抛石堤的护岸保滩作用，且对整个潮滩均能起到一定的保护作用。另外，断面 I 的 1* 点中值粒径较断面 II 变幅反而减小，主要是因为断面 II 的崩岸物质经常参与潮滩建造，而断面 I 由于人工抛石堤的护岸作用，泥沙来源仅为潮流输沙。总之，两断面沉积物粒度特征对比分析认为，人工抛石堤的修筑改变了泥沙来源途径及水动力条件。

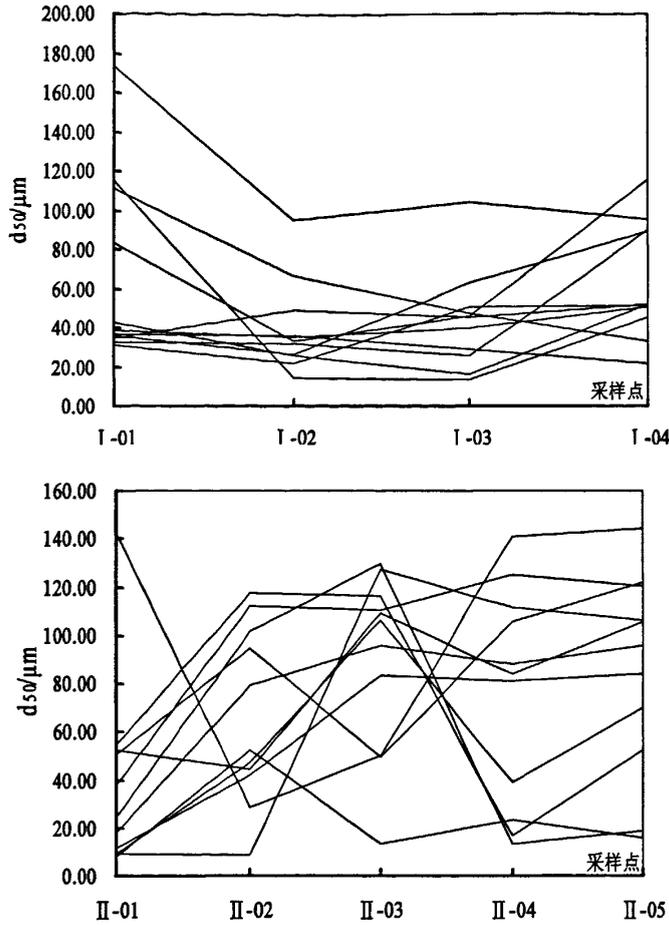


图 5.5 2006 年 6 月~2007 年 6 月潮滩沉积物粒度年变化

(左: 断面 I; 右: 断面 II)

Fig.5.5 Annually changes of tidal sediment grain size from July 2006 to July 2007

(left= I profile; right= II profile)

5.3.2 沉积物粒度横向变化

沉积物粒径大小与一定的水动力条件相适应, 粒度分布可以反映水动力强弱, 水动力条件亦决定沉积物分布特征。一般垂直岸线自低潮滩向高潮滩, 随着水深变浅, 潮流流速逐渐减小, 沉积物粒径由粗变细, 分选性变差。反之, 水深增加, 沉积物颗粒偏粗, 分选明显。总体上表现为水下环境粗于潮滩。

在中潮滩, 即从堤脚向外至 20m 左右的近岸带, 受堤岸物质影响大, 人工堤的岩石碎屑和自然堤的崩岸物质均参与该带沉积, 故在冲刷期, 断面 I 处的近岸物质比断面 II 处的粗, 细砂组分较多; 在淤积期: 断面 I 的近岸物质细化, 断

面 II 的近岸物质粗化。细化是因为新的沉积物使细砂组分相对减少,粗化是因为该时期的崩岸物质相对减少。在低潮滩均为细砂沉积物,到淤积期砂的组分相对减少,物质细化。在近岸带,断面 I 和断面 II 的平均粒径有明显区别;在低潮滩,冲刷时物质粗化,淤积时物质细化,在冲淤平衡带(断面 II),平均粒径变化小;并在滩面相对稳定期,表层沉积物有从里向外逐渐变粗的趋势。

表 5.3 上沙东南潮滩不同时期的沉积物分布(2006 年)

Table 5.3 The sediment distribution on the southeast tidal flats in different periods (2006)

断面	时间	部位	近岸带		离岸 20m 外
			堤脚	中潮滩	低潮滩
I	冲刷期 (7月19日)	沉积物命名	细砂	粉砂质细砂	细砂
		平均粒径(Φ)	2.5	3.3	3.2
		细砂含量(%)	83.8	72.1	82.7
	淤积期 (10月19日)	沉积物命名	粉砂质细砂	粉砂	细砂
平均粒径(Φ)		4.2	4.8	3.1	
细砂含量(%)		68.8	14.1	34.8	
II	冲刷期 (7月19日)	沉积物命名	粘土质粉砂	粘土质粉砂	细砂
		平均粒径(Φ)	5.9	6.2	3.0
		细砂含量(%)	4.3	1.8	84.1
	淤积期 (10月19日)	沉积物命名	细砂质粉砂	细砂	细砂
平均粒径(Φ)		4.2	3.2	3.2	
细砂含量(%)		36.0	78.0	82.5	

两断面沉积物在横向上具有明显的沉积分带现象,总体上潮滩中部沉积物砂含量高,粘土和粉砂含量较少,这与潮滩最大流速出现在中潮位附近有关,同时也是海岸崩塌后退及滩面冲刷所成物质参与潮滩建造的结果。其中断面 I 月均中值粒径随滩面高程具有较一致的变化趋势,均表现为 1*点粒径最粗,年均中值粒径为 70.84 μm ,然后依次为 4*和 3*点,分别为 62.04 μm 和 41.27 μm ,2*点最小,仅为 37.38 μm ;而断面 II 各采样点月均中值粒径变化幅度较大,其中 3*点年均粒径最粗,为 93.42 μm ,2*、4*和 5*采样点粒径较接近,1*点最小,仅为 37.05 μm 。总体上,其垂向粒序基本上断面 I 是中间细两端粗,断面 II 为两端细中间粗。这是由于人工抛石堤保护了岸滩,改变了泥沙来源和水动力条件。总之,潮滩沉积物粒度横向变化受制于物质来源,潮滩地貌特征和水动力条件是决定沉积物横向

变化的两个基本因子。

5.4 本章小结

根据九段沙上沙两监测断面 9 个采样点表层沉积物一年的底质取样,采用库尔特 LS100Q 型激光粒度仪进行粒度分析,结果表明,潮滩沉积物具有明显的年周期时空变化特征。在时间演变上,由于流域来水来沙和风浪的季节变化,沉积物粒度具有明显的洪枯季变化特征;暴风浪是沉积物粒度短期演变的另一个决定性因子,台风过程对潮滩沉积物有明显的影响,台风强烈影响过程中潮滩粒径明显变粗,之后滩面迅速回淤粒径变细,其变化幅度比正常天气大近 1 个数量级。在空间分布上,潮滩沉积物表现出明显的纵向(沿岸方向)和横向变化规律。其中人工抛石堤的修筑改变了泥沙来源和水动力条件,其是潮滩沉积物沿岸变化的最重要原因;横向上粒径变化是地貌形态与水动力条件综合作用的结果。潮滩沉积物时间变化和空间分布特征具有重要的沉积地貌学意义,对于国家级湿地的保护和建设具有重要的参考价值。

第六章 九段沙上沙岸滩短期地貌动力过程分析

淤泥质潮滩是一种低平海岸地貌,同时是人类活动强烈的地带。潮滩地貌动力过程及其潮滩演变对流域来水来沙的响应是目前河口研究的热点,也是长期以来海岸科学家们感兴趣的问题。潮滩围垦、保滩护岸和航道疏浚整治等工程往往都涉及到潮滩地貌过程的问题。河口潮滩动力地貌(morphodynamics)的研究是将过程和潮滩形态有机结合的研究,主要研究河口动力与河口地貌之间的响应,动力与地貌之间往往通过泥沙运动过程而紧密结合起来,而河口地区的泥沙运动主要由于波浪和水流作用所引起。水动力是塑造河口地貌形态、促进河口演变的主要动力因素,而泥沙运动是动力作用与地貌过程之间的纽带。潮滩季节性冲淤演变的影响因子多而复杂,仅仅从单一因子出发得出的结论往往是片面的,不能全面反映潮滩时空变化的总体特征。

九段沙的形成、发育和成陆过程,是长江河口演变过程中的必然产物,可视冰后期以来,长江河口在演进过程中孕育的第七代沙坝,现为长江河口最年轻的沙岛,它承继着历代河口沙岛的演变过程:南冲北淤,逐渐北移,最终与北陆併岸。尽管这是一个漫长的历史过程,需要数百年乃至几千年的时间,但它和崇明、横沙等沙岛一样,已呈现出南冲北淤的特征。基于此,前人多通过浅层沉积物和海图数字化及多时相卫星遥感影像研究九段沙形成演变过程及其与南北槽的相互制约关系等方面,但对于九段沙岸滩的短周期冲淤变化及其机理,尤其是台风等风暴天气下的岸滩蚀淤变化研究极少。本文利用实测水文地貌数据,对九段沙岸滩短期变化过程及其机理进行分析。此外,分别对江亚南沙、江亚北水道及其整个九段沙今后的演变趋势特征进行了预测分析。

6.1 岸滩短周期演变机制探讨

海岸稳定性取决于泥沙供给、水动力条件和海岸地质地貌三大要素的动态平衡。九段沙上沙湿地地处长江口口外海滨江、海交接带,在河流和海洋两大动力交互作用下,由长江泥沙堆积而成。潮汐、潮流和波浪是其演变的主要动力条件。

6.1.1 波浪对岸滩的冲蚀

据九段沙上沙自动监测站与断面监测同期的风向、风速统计,常风向为 SSE 和 SE, 频率分别为 13.98% 和 13.79%, 平均风速 6.11m/s; 强风向出现在常风向方位, 为 SSE, 最大风速达 23.60m/s, 出现在热带风暴(台风)影响期间。SSE 和 SE 向的风均为研究区的向岸风, 向岸风吹刮下成长的风浪为向岸浪, 对研究区岸滩具有冲蚀作用, 其强度取决于风浪大小。现引用长江口风浪经验公式计算波高和周期:

$$\frac{g \bar{H}_{1/10}}{U^2} = 0.0012 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.5}$$

$$\frac{g \bar{\tau}}{U} = 0.5199 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25}$$

式中, $\bar{H}_{1/10}$ 、 $\bar{\tau}$ 分别代表 1/10 大波平均浪高和平均周期。 g 、 U 、 F 分别表示重力加速度、风速和风区长度。计算时, F 据上沙至长江口口门的距离取 80km, 常浪 U 取 6.11m/s, 计算台风浪 U 取平均风速 16.00m/s 和最大风速 23.60m/s 两种, 则得:

常浪: 平均风速下, $\bar{H}_{1/10}$ 为 0.66m, $\bar{\tau}$ 为 3.90s;

台风浪: 平均风速下, $\bar{H}_{1/10}$ 为 1.73m, $\bar{\tau}$ 为 6.31s;

最大风速下, $\bar{H}_{1/10}$ 为 2.56m, $\bar{\tau}$ 为 7.67s。

岸滩侵蚀主要取决于波能。波能按下式计算:

$$E_i = \frac{1}{8} \rho g P_i \bar{H}_i^2$$

式中, P_i 、 \bar{H}_i 表示 i 方向的波浪频率和平均波高, 取向岸风浪, 波频以风频代之, 平均波高以上述计算值为准, ρ 为水体密度, 取 1015kg/m³, 则得常浪波能为 521.5J; 台风浪波能: 平均为 2195.6J, 最大为 7841.4J。可见, 台风浪的能量比常浪大一个数量级, 对岸滩具有巨大的破坏力。

台风浪对堤岸的破坏在观测中得到了印证, 若把 35kg 重的块石搬到离岸 20m 处, 需做功 6686J, 小于“碧利斯”台风的最大波能。因此, “碧利斯”过后人工抛石堤坍塌下沉, 个别块石被抛离堤岸 20m 之外; 由紧靠塌堤内侧的冲刷坑、芦苇折断等地貌景观可知, 台风浪是通过跃浪后蚀和正面掏蚀、前后夹击将石堤毁坏的; 封堵潮沟口的抛石堤段, 落潮时, 潮水从石堤下部穿流而泄, 使得石堤

坍塌下沉,再结合堤前表层沉积物的分布状况,可以认为:现有的抛石堤能防御常浪冲刷,有效范围仅为宽 20m 左右的近岸带;在台风期间仅能抵御堤岸蚀退,石堤自身的毁坏难于避免,需经常修护;在潮沟口应设涵洞;基于台风浪的巨大能量,抛石堤块石应予以增大增重。

风浪对自然堤岸的冲蚀破坏更剧烈,警示牌堤岸后退的 4.30m 中,约有 2m 以上是在“碧利斯”台风浪期间蚀退的。其蚀退机理是:波浪先从堤脚掏蚀,随着潮位上涨,拍击陡岸,形成底浪进一步掏蚀堤脚,与此同时波锋涌入堤顶,从上部击压,随之,堤岸在重力和压力的合力作用下产生裂缝,崩塌后退。此外,台风伴随增水,近岸水深增大,使台风浪未经破碎耗能就直拍堤岸,破坏力更大。波浪的破碎深度可以波高的 1.28 倍计算,以“碧利斯”台风浪平均波高 1.73m 计,其破碎深度约为 2.2m。据实测,7 月 15 日最高潮位 4.49m,超过该日预报高潮位 3.24m,增水 1.25m,增水使当时的多数台风浪未经破碎就直拍堤岸,加剧了对堤岸的破坏。

波浪对潮滩的冲蚀是在淹滩时通过掀动滩面泥沙进行的。掀动水深可借助最大涡动水深 Silvester 公式估算:

$$sh(2\pi h_m / L) = H_{1/3} 128 D_{50}^{1/2}$$

式中, h_m 为最大涡动(掀动)水深, L 为波长, $H_{1/3}$ 是有效波高, D_{50} 为滩面泥沙中值粒径。研究区潮滩能否受波浪掀动,可通过滩面水深 h_f 和 h_m 的比较进行判定:若 $h_f > h_m$, 则滩面泥沙不受波浪掀动;反之当 $h_f < h_m$ 时,则被波浪掀动。研究区 h_f 的最大水深据滩面高程和潮位推得在正常水文气象条件下为 4.5m,在台风增水期间为 5.5m。用式估算 h_m 时,其中的有效波高和波长分别按 $H_{1/3} = 0.7874 \bar{H}_{1/10}$ 和 $L = T \sqrt{gh}$ 推算, D_{50} 取低潮滩表层沉积物的中值粒径 0.005cm,计算要素和结果见表 6.1。可见,均为 $h_f > h_m$,即使在常浪下滩面泥沙也能被掀动。在波、流联合作用下,掀起的泥沙被滩面上的涨落潮流搬运,潮滩便受冲蚀。然而,观测期间,除“碧利斯”台风期间滩面受大幅度冲蚀外,总体呈淤积趋势,这是因为弱浪无浪状况在时间上占据绝对优势。据统计,研究区无风浪和弱浪时间约占整个观测期时间的 70%以上,加之该水域含沙量大,易于落淤,故在观测期间,整个潮滩在总体上呈淤积状态。

表 6.1 潮滩在不同波况下的涡动水深计算要素及结果

Table 6.1 Turbulence depths under different wave regimes on the tidal flat

波况	$H_{1/10}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	周期 T (s)	波长 L (m)	水深 h_f (m)	h_m (m)
常浪	0.66	0.52	3.90	25.91	4.50	9.30
平均台风浪	1.73	1.36	6.31	46.35	5.50	23.64
最大台风浪	2.56	2.02	7.67	56.34	5.50	32.24

6.1.2 潮流对岸滩的塑造

6.1.2.1 潮流观测及其统计特征值

2006 年洪季（8 月 24~25 日）和枯季（12 月 4~5 日）分别进行了大潮期周日水文测验，两次测站基本处于同一位置，位在江亚南沙北水道深泓北缘，上沙码头正前方约 100m。大潮高潮时，泓槽水深 10~12m；测站水深 8~9m，全潮平均水深 7.5m 左右。泓槽主轴呈西北~东南走向，槽舌向西北伸展，在地貌形态上反映出由涨潮流塑造，属涨潮槽性质。两次水文测验成果基本相同，潮流以涨潮流占优势，输沙以涨潮流输运量大，呈现出涨潮槽的水文特征。

表 6.2 特殊水文年大通站径流量

Tab.6.2 The discharge of Datong station in 2006

月份	多年平均 (m^3)	历史最大 (m^3)	历史最小 (m^3)	2006 年 (m^3)
2006 年 8 月	46300	84200 (1954 年)	32600 (1959 年)	27400
2006 年 12 月	15300	29100 (1935 年)	8310 (1956 年)	13400

根据实测资料，潮流在一个太阴日（24h48min）内两涨两落，却具有涨、落潮流的不对称现象，故上沙码头水域的潮流性质属非正规浅海半日潮流。

洪季大潮（表 6.3），测到涨、落潮最大流速分别为 1.92m/s 和 1.45m/s，与其相应的流向分别为 294°和 147°；全潮涨、落潮平均流速分别为 1.00m/s 和 0.73m/s，平均流向分别为 305°和 141°。不论最大流速或平均流速，其流向均与泓槽走向基本一致，涨潮流指向西北，落潮流指向东南；流速均为涨潮大于落潮。流速的垂向变化，为表层大，中层次之，底层最小；落潮流速表层约为底层的 2 倍，涨潮流速表层约为底层的 1.3 倍。另经实测流时分析，涨潮流流时为 6h10min，

落潮流流时为 6h30min，落潮比涨潮长 20min。

表 6.3 九段沙上沙码头前沿洪季水文测验潮流特征值

Table 6.3 Measured flood tidal current in the foreland of Upper Jiuduansha dock

项目	潮次	涨、落潮	表层		中层 (0.6H)		底层		垂线平均	
			流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)
最大流速及其相应的流向	第一潮次	落潮	1.40	131	1.12	137	0.66	138	1.15	137
		涨潮	1.92	306	1.70	311	1.42	312	1.77	306
	第二潮次	落潮	1.45	127	1.18	137	0.68	134	1.20	138
		涨潮	1.57	304	1.70	308	1.36	308	1.67	308
	全潮	落潮	1.45	127	1.18	137	0.68	134	1.20	138
		涨潮	1.92	306	1.70	311	1.42	312	1.77	306
平均流速和平均流向	第一潮次	落潮	1.02	143	0.74	138	0.50	132	0.77	139
		涨潮	1.38	295	1.30	308	1.01	326	1.08	308
	第二潮次	落潮	0.93	150	0.73	145	1.47	133	0.69	144
		涨潮	1.12	294	1.13	296	0.86	287	0.92	301
	全潮	落潮	0.97	147	0.73	142	0.48	133	0.73	141
		涨潮	1.25	294	1.21	302	0.94	307	1.00	305

枯季大潮 (表 6.4) 测到涨、落潮最大流速分别为 1.75m/s (中层) 和 1.53m/s，与其相应的流向分别为 308°和 143°；全潮涨、落潮平均流速分别为 0.82m/s 和 0.70m/s，平均流向分别为 302°和 134°。涨、落潮流流时分别为 6h3min 和 6h32min，落比涨长 16min。与洪季相比，落潮流时长、涨潮流速大、流向顺泓槽走向、流速垂向变化等潮流特征，均无明显的变化。只是枯季的流速比洪季的流速稍有减小，造成流速稍有减小的原因，主要是由枯季测次的潮汐强度较洪季测次的小所致。枯季测次的日平均潮差，日最大潮差都比洪季测次的小；日最高潮位比洪季测次的低。潮差和潮位均表明枯季测次的潮汐强度较小，所以流速减小。

表 6.4 九段沙上沙码头前沿枯季水文测验潮流特征值

Table 6.4 Measured dry tidal current in the foreland of Upper Jiuduansha dock

项目	潮次	涨、落潮	表层		中层 (0.6H)		底层		垂线平均	
			流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)
最大流速及其相应的流向	第一潮次	落潮	1.51	122	1.07	130	0.67	126	0.95	134
		涨潮	1.44	299	1.24	303	0.90	312	1.04	309
	第二潮次	落潮	1.53	143	0.93	133	0.70	106	0.92	136
		涨潮	1.42	289	1.75	308	1.53	310	1.46	308
	全潮	落潮	1.53	143	1.07	130	0.70	106	0.95	134
		涨潮	1.44	299	1.75	308	1.53	310	1.46	308
平均流速和平均流向	第一潮次	落潮	1.04	145	0.76	132	0.48	126	0.70	135
		涨潮	0.77	284	0.85	299	0.57	293	0.70	294
	第二潮次	落潮	1.05	141	0.75	130	0.53	119	0.70	134
		涨潮	0.88	281	1.15	314	0.82	308	0.94	310
	全潮	落潮	1.04	143	0.76	131	0.50	123	0.70	134
		涨潮	0.82	283	1.00	307	0.69	300	0.82	302

从表 6.2 和表 6.3 还可看出：测区的底层流速很大，洪季测到涨、落潮底层流速，最大分别为 1.42m/s 和 0.68m/s, 平均分别为 0.94m/s 和 0.48m/s; 枯季测到涨、落潮底层流速，最大分别为 1.53 m/s 和 0.70 m/s, 平均分别为 0.69 m/s 和 0.50 m/s。底层流速大，泥沙不易落淤，反映出江亚南沙北水道近期较稳定，在自然状态下，能存在较长的时间。

6.1.2.2 潮流对岸滩的作用机理

研究区高潮滩缺失，以低潮滩占主体，多陡坎地貌。据逐时潮位统计，一年中堤岸约有 45% 时间被水浸淹，潮滩约有 70% 以上的时间淹没于水中，致使潮流有充足的时间塑造岸滩，具有蚀岸搬沙、输沙淤滩的功能。

潮流蚀岸主要是通过涨潮淹滩、落潮露岸、干湿交替、水淹和风化结合，使自然堤岸的组成物质变得松散，常浪（弱浪）也能对堤岸造成破坏，并将崩岸物质输往异地。

潮流输沙淤滩的机理较复杂，由涨落潮过程不同、涨潮流输沙占优势、潮流

和潮位存在位相差等多种因素所致。涨潮时，随着水位上升，涨潮流向岸运动，悬浮物质便顺流向上游输移，至抛石堤前，因岩体摩阻作用，流速相对减小，悬浮物质落淤，从而造成抛石堤前的落淤强度比自然堤前的大；落潮时，随着水位下降，落潮流离岸运动，在退离中将携带的部分堤前物质带到近岸带，因抛石堤多岩屑，从而造成抛石堤近岸带的细沙组分比自然堤近岸带的多。

研究区位于涨潮槽北缘，槽中涨潮流速和含沙量均比落潮大。据 2006 年 8 月大潮实测，涨、落潮平均流速分别为 1.00m/s 和 0.73m/s；平均含沙量分别为 0.7121kg/m^3 和 0.3567kg/m^3 ；涨、落潮流时分别为 6h10min 和 6h30min，涨、落潮历时分别为 5h06min 和 7h18min，两者相比，潮流流时的差值比潮汐历时的差值小很多；涨、落潮平均流向分别为 310° 和 137° ，属往复流。据此，可用优势沙阐明潮滩的泥沙来源，进而分析潮滩冲淤变化机理。优势沙计算通常采用下式：

$$G = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_1 \rho_1 dt}{\int_{t_1}^{t_2} V_1 \rho_1 dt + \int_{t_3}^{t_4} V_2 \rho_2 dt}$$

式中，G 为优势沙，是无量纲值， $G > 0.5$ 为涨潮输沙占优势， $G < 0.5$ 为落潮流输沙占优势； t_1 、 t_2 分别为涨潮流起始时刻和终止时刻， t_3 、 t_4 分别为落潮流起始时刻和终止时刻； V_1 、 V_2 分别为涨潮流速和落潮流速； ρ_1 、 ρ_2 分别为涨潮含沙量和落潮含沙量。计算结果， $G=0.72$ ，为涨潮输沙占优势，这表明上沙东南潮滩的泥沙主要来自涨潮流输沙。

涨潮流输沙淤滩，与潮波传播引起潮流和潮位产生的位相差有关。传入九段沙水域的潮波，因受河床摩阻和径流下泄影响，潮波发生变形，致使潮流和潮位的位向发生差异。如图 6.1，涨潮最大流速多出现在涨潮中潮位附近，落潮最大流速多出现在落潮中潮位过后。潮流和潮位的这一位相配置，结合当地潮滩的高程，便可揭示潮滩淤积机理：即涨潮流速在中潮位附近最大，掀起床底的泥沙最多，形成高含沙量水体，高含沙量水体随大流速上滩，此后，流速逐渐减小，水体挟沙力降低，悬沙沉降淤滩，至高潮时，水体含沙量已明显减小。继后，落潮时的初始流速较小，涨潮淤滩的泥沙不能全被掀起，只能部分随落潮流归槽，并随水位下降，潮流渐离潮滩，降至中潮位后，出现落潮最大流速，此时潮水已脱离潮滩，滩面避免了落潮大流速的冲刷。九段沙滩面的流速类似长江口一般的滩面流速，具有涨、落潮流速过程线平缓、转流快，无明显涨、落急流速等特点，

这有利于滩面泥沙的沉积,并逐渐淤高。又因涨潮输沙淤滩的时间比波浪蚀滩的时间长,故使上沙东南潮滩在总体上呈淤积态势。

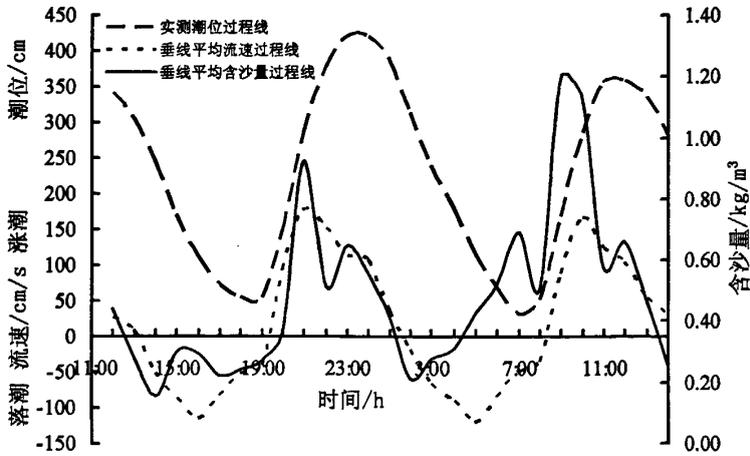


图 6.1 上沙前沿实测潮流、潮位和含沙量过程线

Fig.6.1 Time series of the tidal current, tide height and suspended sediment concentration

6.2 冲淤演变趋势探讨

6.2.1 上沙南部滩、槽发展趋势

潮汐水道,潮流作用大于径流作用,是潮控水道,在分汊河口,潮控水道一般都属副槽,副槽经衰退后,最终都趋于消亡。但从衰退至消亡需经过数百年乃至数千年的漫长时间。副槽的衰退一般有两个标志:其一是潮流作用大于径流作用,其二是水道两边的滩涂都成陆,归槽流速和漫滩流速基本消失。北支现是长江口一级分汊的副槽,初成时是主槽,直至 18 世纪中叶(1733 年清雍正十一年),径流主流入南支便成副槽,1959 年以来由径流控制作用转化为潮流控制作用,才逐渐出现水、沙、盐倒灌,致使河槽逐趋淤浅,下流河段南淤北冲,进入衰退期,至今已有近 50 年的历史,据有关研究,在自然状态下,崇明岛向苏北并岸,北支消亡,至少还需 200 年的时间。

江亚北水道现是南槽分汊的副槽,初成时,是南槽的主航道,自 1998 年 7 月至 2000 年 5 月北槽深水航道一期工程、构筑南导堤和分流鱼嘴工程后,才成副槽,至今刚满七年。尽管输水、输沙和输盐已似同北支,均为涨潮净输,出现了水、沙、盐倒灌。但是,江亚南沙还未大片成陆,“漫滩流速”和“归槽流速”都

十分强劲，造槽和造滩同在进行。所以，江亚北水道目前还没有进入衰退期，仅处在进入衰退期的前夕；根据北支的衰退过程，在自然状态下，江亚北水道还能存在一个较长的时期。江亚北水道的存在，强劲的涨潮流也依旧存在，涨潮流因在科氏力作用下右偏，故对江亚南沙一侧的冲刷力相对较弱，有利沙体淤涨，而对上沙边滩一侧，冲刷力相对较强，则有利维持码头前的航道水深，同时也会使上沙边滩的潮下带遭受冲刷，制限边滩向槽扩展。此外，在出现归槽的大流速时段，也能把造槽中产生的较粗泥沙带至上沙沙嘴，助长上沙沙嘴向下游伸展；上沙沙嘴的伸展，会导致上沙与中、下沙间的串沟逐趋淤浅，进而引起串沟的生态环境发生变化。

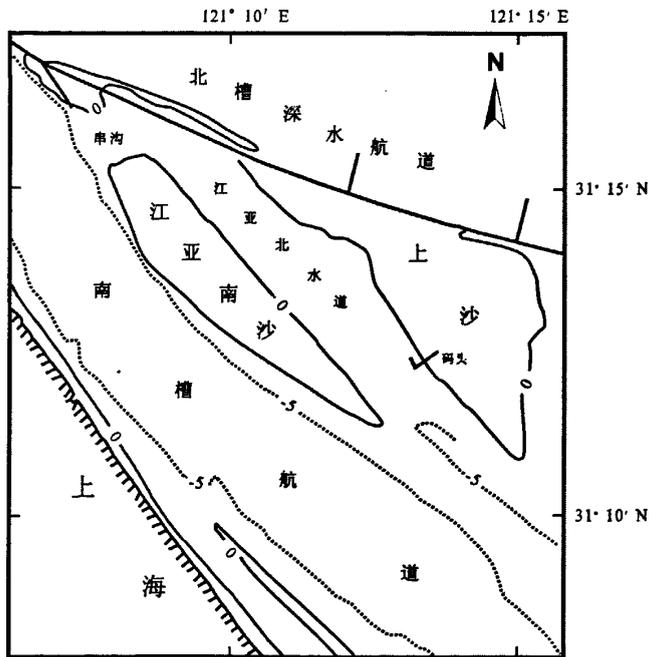


图 6.2 上沙南部区域示意图

Fig.6.2 The sketchmap of south of Upper Jiuduansha

6.2.2 九段沙今后的冲淤演变趋势

如前文所述，根据 1958~2004 年地形图，探讨了九段沙的形成及其形成后的演变过程(图 6.3)；依据在九段沙上沙典型岸滩两断面 9 个固定监测点 2006 年 6 月~2007 年 6 月逐月滩面高程实测资料，分析了该岸滩年周期演变特征。以此为据，九段沙今后的演变趋势将具有如下特点：

1) 北槽深水航道南导堤上端的鱼咀工程的修筑将会阻止上沙沙头的下移，进而

进一步保证了整个九段沙的稳定。从而对于九段沙的成陆化, 使的九段沙朝着健康的演变方向发展均起到一定的积极意义。

- 2) 北槽深水航道实施后, 南北槽分水分沙情况均有所变化, 南槽分流增加后, 江亚南沙及九段沙上沙南岸明显冲刷, 但整个九段沙仍迅速淤涨。北槽深水航道双导堤工程对北槽南北摆动起着遏制作用, 同时使北槽分水分沙比趋于稳定。南北槽演变趋于稳定, 进而会减弱九段沙的横向摆动, 有利于整个九段沙平面位置的稳定。
- 3) 南导堤对上沙与中、下沙之间的串沟的南、北槽水体交换起着阻隔作用(在中潮位以下), 将进一步促进该串沟的淤浅甚至消亡; 此外, 南导堤及其丁坝系统对该导堤两侧滩地具有一定的促淤作用。这将有利于 0 m 等深线以上面积的继续扩大。
- 4) 江亚南沙合并九段沙后, 南槽主槽的河势趋于顺畅, 近期(比如今后 10~20 年) 不大可能再有大型的沙洲并入九段沙, 即九段沙的面积不大可能因“并沙”而出现明显增加。
- 5) 随着长江入海泥沙减少, 鉴于 2000-2004 年期间(大通平均输沙率 2.43 亿 t/a) 九段沙的面积增长已变得十分缓慢, 今后 10~20 年九段沙 5 m 等深线以上区域可能停止淤涨或甚至出现净的蚀退。但是, 由于北槽深水航道南导堤工程对浅滩的促淤以及植被的捕沙作用, 九段沙的 0 m 以上区域(特别是植被带) 可能还会继续淤涨扩大。

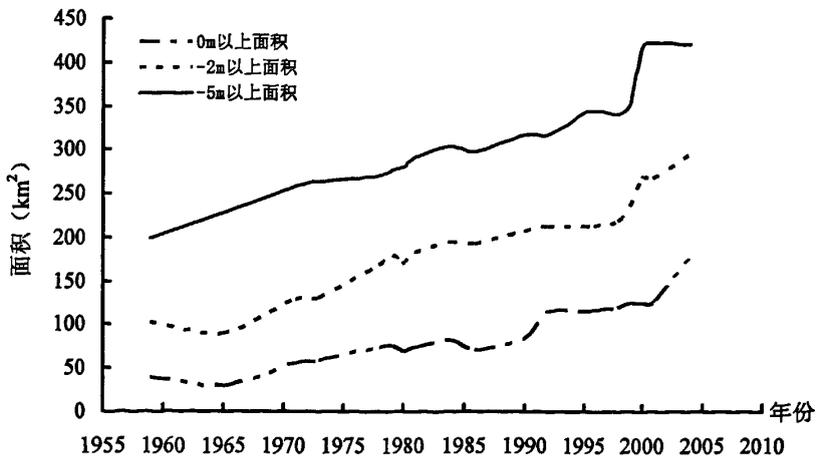


图 6.3 近 50 年来九段沙不同深度以浅面积变化

Fig.6.3 Areas above the different isobaths of Jiuduansha during the last 50 years

综上所述,九段沙的形成和演变历史反映了自然与人为因素的共同影响。由于九段沙冲淤演变的影响因子极其复杂,今后这些因子的变化仍然存在较大的不确定性,加之目前河口地形的中长期演变预测仍处于探索阶段,以上结论尚有待在今后的监测和研究中进一步完善。

6.3 本章小结

- 1) 九段沙上沙东南岸滩,堤岸呈现冲蚀,潮滩冲淤变化中总体趋于冲蚀。其中人工堤岸受抛石庇护,阻止了岸线的后退,自然堤岸则被台风浪蚀退 2m 以上。潮滩在台风期间普遍受冲,台风过后趋于淤积。人工抛石堤具有一定的抗冲护岸保滩促淤功能。
- 2) 堤岸坍塌后退以浪蚀为主,潮流有助于浪蚀作用。九段沙上沙东南堤岸始终处于强烈的侵蚀状态,而侵蚀状况不同,人工堤岸为坍塌毁坏,自然堤岸为坍塌后退。总之,影响岸滩短期变化的主要动力因素是波浪,台风大浪则是滩面迅速变化的直接驱动力。建议给予及时防护,否则上沙的成陆湿地将会快速减少。
- 3) 潮滩淤积以涨潮输沙淤滩为主,是因为潮流和潮位位相发生差异,导致涨潮流携高含沙量水体上滩落淤,落潮流携低含沙量滩水归槽。久之,潮滩便趋淤积。
- 4) 现有的上沙抛石堤能防御常浪冲刷,有效范围仅为宽 20m 左右的近岸带,受台风浪袭击时仅能抵御堤岸蚀退,石堤自身的毁坏难以避免,需经常修护;在潮沟口应设涵洞;基于台风浪的巨大能量,抛石堤块石需增大增重。

第七章 结论和问题

本文利用 2006 年 6 月~2007 年 6 月,尤其是“碧利斯”台风前后实测水文地貌资料,开展九段沙上沙典型岸滩的地貌动力过程及其岸滩、悬沙浓度和表层沉积物对台风的响应研究,并对岸滩冲淤演变机制进行了探讨,最后对该海域及其整个九段沙今后的演变趋势进行了定性预测。该研究结论不仅具有重要的科学意义,而且对滨海湿地的保护和建设,有着重要的现实意义。主要工作和结论有以下几点:

- 1) 九段沙上沙 I 和 II 号沉积地貌固定观测断面相距较近,其水文动力环境基本相近,不同之处在于 I 号断面为有人工护岸抛石堤,岸线固定,无陆源物质供应参与潮滩建造。而 II 号断面为由粘土质粉砂组成的淤泥质自然岸段,堤岸受海洋动力作用后产生崩塌后退,崩塌物质参与潮滩的建造过程。
- 2) 通过一年滩面冲淤变化观测,结果表明: I 号断面受抛石堤护岸工程保护,岸线稳定,潮滩也得到了一定程度的保护,滩面冲淤变化幅度和速率均小于 II 号断面,堤脚最大连续冲刷厚度仅为 14.4cm,而 II 号断面达到 43.3cm,抛石堤起到了“护岸保滩”作用。
- 3) I 和 II 号断面年周期冲淤量值均很小,故本岸滩是一个相对稳定的微冲岸滩。I 号断面冲淤变化强度小于 II 号断面,且两条断面均表现为“洪淤枯冲”的特征,滩地发育以口外涨潮流挟沙上滩为主。
- 4) 经过一年的沉积物组成分析, I 号断面的沉积物类型以粉砂组成为主,而 II 号断面则以砂为主。在断面上以中潮滩位置沉积物相对较粗。同时也表现为洪季潮滩淤积,表层沉积物趋于细化,反之,枯季粒度趋于变粗。
- 5) 台风对潮滩有较强的侵蚀作用,在“碧利斯”台风作用下,岸线明显后退,滩面显著蚀低,沉积物组成明显变粗,但台风过后沉积物组成快速恢复,滩面回淤但恢复相对较慢。
- 6) 建议为保护码头两侧岸线不再后退,修建抛石堤是必要的,由于长江口处于
- 7) 台风影响范围内,台风对抛石堤有一定的破坏作用。建议每年对抛石堤加强维护。同时根据实地观测抛石堤损坏严重部位在原潮沟口,建议抛石堤不应

内凹，拉直与岸线平行。抛石护堤段，不应有潮沟出口，堤内汇水通道改造成与堤平行，改由自然岸段出口为宜。

- 8) 江亚南沙与九段沙间的浅槽（江亚北水道）可利用北槽深水航道疏浚土，吹抛成陆，有利于九段沙上沙保护。
- 9) 为加强对九段沙不同潮滩类型的研究，从沉积地貌方面来看，建议扩大研究范围。并且还需要与相关学科结合起来进行多学科交叉研究。

在研究的过程中也存在着一些问题及不足，有待深入研究：

- 1) 由于客观条件的限制，仅在上沙潮滩建立两条观测断面，且监测时间仅为一年时间，因此所得结论，可能只是周期性的而不是趋势性的，一段时间之后侵蚀可能减弱或停止，或甚至转为淤积。九段沙整个岸滩及其表层沉积物粒度长期变化特征有待进一步观测研究；
- 2) 两监测剖面分别只有 69m 和 82.5m，两者直线间距也仅 100m，其长度和间距均较小，其所反映出的变化特征并不十分明显；
- 3) 论文的研究深度不够，还需在今后的研究中继续努力。

参考文献:

- [1] U.S. Army Coastal Engineering Research Center (CERC). Shore Protection Manual (3rd ed.)[M]. U. S Government Printing Office, Wahington, D.C., 1997.
- [2] Silvester, R. Coastal Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company (Amsterdam London New York), 1974, 60.
- [3] Komar, P.D. Beach Processes and Sedimentation [M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1976. 50-53.
- [4] Trefethen, J.M. Classification of sedimentents [J]. Amer. Jour. Sci., 1950, 248: 55 - 62.
- [5] Pritchard D.W. 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay Estuaries system. J. Mar. Res. 11, 106-123.
- [6] Pritchard D.W. 1955. Estuarine circulation patterns. Proc. Am. Soc. Cir. Eng. 81, No. 717.
- [7] Robinson, A.H.W., 1960. Ebb-flood channel systems in sandy bays and estuaries. Geography 45, 183-199.
- [8] Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries. In: Cronin, L.E.(Ed.), Estuarine Research, 2. Geology and Engineering. Academic Press, New York, pp. 3-22.
- [9] Xie Wenhui, Yang Shilun. Evolution of Jiuduansha Shoal and Its Influence on Adjacent Channels in the Changjiang Estuary [J]. China Ocean Engineering, 1999, 13(2): 185-195.
- [10] Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., Boyd, R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. Journal of Sedimentary Petrology 62, 1130-1146.
- [11] Postma, H. 1954, Hydrography of the Dutch Wadden Sea, Arch, Neerl. Zool, 10, 405~511.
- [12] Shi-lun Yang, Ping-xing Ding, Shen-liang Chen. 2001. Changes in progradation rate of the tidal flats at the mouth of the Changjiang (Yangtze) River, China. Geomorphology 38: 167-180.
- [13] Li Jiufa. The rule of sediment transport on the Nanhui tidal flat in the Changjiang Estuary [J]. Acta Oenologica Sinica, 1991, 10(1): 117-127.
- [14] 杨世伦. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释[J]. 地理研究, 1994, (3): 23-31.
- [15] 陈沈良, 杨世伦, 吴瑞明. 杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义 [J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3): 299-3054.
- [16] 杜景龙, 杨世伦, 张文祥, 等. 长江口北槽深水航道工程对九段沙冲淤影响研究[J]. 海洋学报, 2005, 23(3): 78-83.
- [17] 楼飞, 虞志英, 何青. 长江口北槽一期工程后潮滩沉积物分布特征及其影响因素[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 183-189.
- [18] 戴志军, 韩震, 恽才兴. 长江口南槽沉积物特征和运移趋势[J]. 海洋湖沼通报, 2005,

- (2):72-78.
- [19] 陈家宽, 马志军, 李博, 等. 上海九段沙湿地自然保护区科学考察集[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 严钦尚, 许世远, 等. 长江三角洲现代沉积研究 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987.
- [21] 杨世伦, 贺松林, 谢文辉. 长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系[J]. 海洋工程, 1998, 16(4): 55-65.
- [22] 贺宝根, 袁峻峰, 陈家治. 长江口九段沙湿地自然保护区的探讨[J]. 上海环境科学, 2000, 19(9): 412-413, 417.
- [23] 华东师范大学河口海岸研究所. 长江口九段沙上沙湿地岸滩沉积地貌及资源开发利用研究[Z]. 上海: 华东师范大学河口海岸研究所, 2005.
- [24] 贺宝根, 左本荣. 九段沙微地貌演变与芦苇的生长[J]. 上海师范大学学报 (自然科学版), 2000, 29 (4): 86-90.
- [25] 沈芳, 周云轩, 张杰, 等. 九段沙湿地植被时空遥感监测与分析[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37 (6): 498-504.
- [26] 谢小平. 长江河口九段沙形成发展及其演化规律研究[D]. 上海: 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 2004.
- [27] 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳. 长江河口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究, 1986(1): 1-13.
- [28] 王宝灿, 黄仰松. 海岸动力地貌[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.
- [29] 杨世伦. 海岸环境和地貌过程导论[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [30] 陈吉余, 王宝灿, 虞志英, 等. 中国海岸发育过程和演变规律[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [31] 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳. 长江河口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究, 1986, (1): 1—13.
- [32] 李为华, 李九发, 戴志军, 等. 黄河三角洲飞雁滩表层沉积物对水动力的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 17—21.
- [33] 陈沈良, 张国安, 陈小英, 等. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀与机理[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 9-14.
- [34] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报. 2004, 59(2):260-266.
- [35] 戴志军, 陈吉余, 程和琴, 等. 南汇边滩的沉积特征和沉积物运输趋势[J]. 长江流域资源与环境. 2005, 14 (6): 735—739.
- [36] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [37] 李九发. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. 海洋学报. 1990, 12(1):75-82.
- [38] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. 水利学报, 2004, 7: 1-6.
- [39] 李平, 朱大奎. 波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997,

- 17(2): 39-46.
- [40] 黄胜.长江河口演变特征[J]. 泥沙研究, 1986, (4): 1~12.
- [41] 李九发, 沈焕庭, 徐海根. 长江河口底沙运动规律. 海洋与湖沼, 1995, 26 (2): 138~145.
- [42] 张华, 阮伟.长江口北槽浮泥初步研究[J]. 水运工程, 323 (12): 96-102.
- [43] 张志忠, 阮文杰, 蒋国俊.长江口动力絮凝沉降与拦门沙淤积得关系[J].海洋与湖沼, 1995, 26 (6): 632-638.
- [44] 时钟, 周凌红, 王殿志, 等.河口和海岸物理海洋学研究进展[J].海洋科学进展, 2004, 22 (2): 240-246.
- [45] 严钦尚, 许世远. 长江三角洲现代沉积研究 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987.
- [46] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口的发育模式[J]. 海洋学报, 1979, 1(1): 103-111.
- [47] 杨世伦, 杜景龙, 郇昂, 等. 近半个世纪长江口九段沙湿地的冲淤演变[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 335-339.
- [48] 贺宝根, 袁峻峰, 陈家治. 长江口九段沙湿地自然保护区的探讨[J]. 上海环境科学, 2000, 19(9): 412-413, 417.
- [49] 杜景龙, 杨世伦, 张文祥, 等. 长江口北槽深水航道工程对九段沙冲淤影响研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 78-83.
- [50] 李九发, 万新宁, 应铭, 等. 长江河口九段沙沙洲形成和演变过程研究[J]. 泥沙研究, 2006, (12): 44-49.
- [51] 谢小平, 王兆印, 沈焕庭. 长江河口九段沙现代潮滩沉积特征[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 566-573.
- [52] 谢小平, 付碧宏, 王兆印, 等. 基于数字化海图与多时相卫星遥感的长江口九段沙形成演化研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 391-396.
- [53] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [54] 恽才兴. 长江河口潮滩冲淤和滩槽泥沙交换[J]. 泥沙研究, 1983, (4): 43-52.
- [55] 高进. 长江河口的演变规律与水动力作用[J]. 地理学报, 1998, 53(3): 264-269.
- [56] 茅志昌. 长江口的台风浪及其对崇明东滩的冲淤作用[J]. 东海海洋, 1993, 11(4): 8-16.
- [57] 杨世伦. 风浪在开敞潮滩短期演变中的作用—以南汇东滩为例[J]. 海洋科学, 1991, (2): 59-63.
- [58] 季子修, 蒋自巽, 朱季文, 等. 海平面上升对长江三角洲和苏北滨海平原海岸侵蚀的可能影响[J]. 地理学报, 1993, 48(6): 516-526.
- [59] 杜景龙, 杨世伦, 张文祥, 等. 长江口北槽深水航道工程对九段沙冲淤影响研究[J]. 海洋学报, 2005, 23(3): 78-83.

- [60] 杨世伦, 贺松林, 谢文辉. 长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系[J]. 海洋工程, 1998, 16(4): 55-65.
- [61] 杨世伦, 杜景龙, 郇昂, 等. 近半个世纪长江口九段沙湿地的冲淤演变[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 335-339.
- [62] 贺宝根, 袁峻峰, 陈家治. 长江口九段沙湿地自然保护区的探讨[J]. 上海环境科学, 2000, 19(9): 412-413, 417.
- [63] 杨世伦, 丁平兴, 赵庆英. 开敞大河口滩槽冲淤对台风的响应及其动力泥沙机制探讨——以长江口南汇边滩-南槽-九段沙系统为例[J]. 海洋工程, 2002, 20(3): 69-75.
- [64] 杨世伦, 谢文辉, 朱骏, 等. 大河口潮滩地貌动力过程的研究——以长江口为例[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(3): 258-265.
- [65] 杨世伦, 赵庆英, 丁平兴, 等. 长江口拦门沙河槽季节性冲淤的主控因子探讨[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(3): 44-48.
- [66] 沈焕庭, 张超, 茅志昌. 长江入河口区水沙通量变化规律 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(3): 288-294.
- [67] 戴志军, 陈子燊, 李春初. 岬间海滩剖面短期变化的动力作用分析 [J]. 海洋科学, 2001, 25(11): 38-41.
- [68] 杨世伦. 长江三角洲潮滩季节性冲淤循环的多因子分析 [J]. 地理学报, 1997, 52(2): 123-130.
- [69] 李平, 陈沈良, 谷国传, 等. 长江口九段沙上沙典型潮滩年周期冲淤变化分析 [J]. 长江流域资源与环境 (增2), 2007, 16(Z2): 79-84.
- [70] 王颖, 朱大奎. 海岸地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [71] 杜景龙, 杨世伦, 张文祥, 等. 海岸地貌建模方法研究——以长江口九段沙、芦潮港附近边滩为例 [J]. 海洋通报, 2004, 23(6): 61-65.
- [72] 徐福敏, 严以新, 茅丽华. 长江口九段沙下段冲淤演变水动力机制分析. 水科学进展, 2002, 13(2): 166-171.
- [73] 严以新, 高进, 宋志尧, 等. 长江口九段沙分流计算模式及工程应用. 水利学报, 2001, No.4: 79-84.
- [74] 李九发, 沈焕庭, 徐海根. 长江河口底沙运动规律. 海洋与湖沼, 2000, 31(1): 101-109.
- [75] 沈焕庭, 李九发, 金元欢. 河口涨潮槽的演变及治理. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 85-89.
- [76] 沈焕庭, 贺松林, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带研究. 地理学报, 1992, 47(9): 472-479.
- [77] 陈沈良, 谷国传, 虞志英. 长江口南汇东滩淤涨演变分析[A]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 239-244.
- [78] 茅志昌. 南汇东滩的波浪作用和滩面冲淤分析[J]. 上海水利, 1992, (3): 1-6.
- [79] 向卫华, 李九发, 徐海根, 等. 上海市南汇南滩近期演变特征分析[J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2003, (3): 49-55.

- [80] 杨世伦.长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释[J].泥沙研究, 1994(3):23-31.
- [81] 吴加学, 张叔英, 任来法.长江口北槽抛泥流速和悬沙浓度时空分布观测[J].海洋学报, 2003, 25(4): 91-103.
- [82] 谢文辉, 陈沈良, 谷国传, 等.崎岖列岛邻近海域的水文泥沙特征[J].东海海洋, 2000, 8(2):1-7.
- [83] 沈焕庭, 贺松林, 潘定安, 等.长江河口最大浑浊带研究[J].地理学报,1992,47(5):472-479.
- [84] 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳.长江河口悬沙输移特性[J].泥沙研究. 1986(1):1-13.
- [85] 沈焕庭, 潘定安.长江河口最大混浊带.北京: 海洋出版社, 2001, 51, 98-99.
- [86] 李九发, 时伟荣, 沈焕庭.长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律[J].地理研究,1994, 13(1): 51-59.
- [87] 李九发.长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J].海洋学报,1990, 12(1):75-82.
- [88] 谷国传, 胡方西.我国沿海近岸带水域的悬沙分布特征[J].地理研究,1989, 8(2):1-15.
- [89] 陈沈良, 谷国传.杭州湾口悬沙浓度变化与模拟[J].泥沙研究,2000(5):45-50.

硕士期间发表的论文

在参与课题的基础上已发表文章（中文核心期刊）有：

1. 李平, 陈沈良, 谷国传, 等. 长江口九段沙上沙典型潮滩年周期冲淤变化分析 [J]. 长江流域资源与环境 (增 2), 2007, 16 (Z2): 79-84.
2. 李平, 陈沈良, 谷国传, 等. 《长江口九段沙上沙潮滩沉积物短期时空变化特征》《海洋通报》待刊.
3. 李平, 陈沈良, 谷国传, 等. 《长江口九段沙岸滩的短周期地貌动力过程》《海洋学研究》待刊.

致 谢

笔者三年硕士生活即将结束，掩卷深思，更多的是回忆，是留恋，心中涌动的则是憧憬。三年河口海岸研究与实践，是一个无穷学习的过程，同时也是不断取得进步的历程。在这段人生征程中，我不能不感谢在此期间寄予我启发、指导和帮助的人。

首先我要感谢我的导师陈沈良教授，是在他的悉心指导下完成本论文的，并使我走上河口海岸的研究道路。导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。不仅使我树立了远大的学业目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。本论文从选题到完成，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血。在此，谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

我还要深深地感谢谷国传教授，在平时的生活和学习中给予我很多关心和帮助。淳淳教诲，耳濡目染，使我逐渐养成认真负责的工作和生活态度，谷老师勤奋的作风和高昂的生活态度是我一生学习的榜样。同时还要感谢副导师杨世伦教授和李九发教授在论文方面给予的宝贵意见和建议。

河口海岸国家重点实验室是一个温暖的集体，在这里得到了太多老师和同学的帮助，在这里要对他们表示由衷的感谢。感谢国家重点实验室丁平兴院长、王平书记、周云轩副院长、华棣副主任、何青副主任、张国安副书记等领导的关怀；感谢沈焕庭、茅志昌、王玲香、吴瑞明、李蔚、金灿等老师在学习生活中给予的关心；感谢唐跃敏老师和陈冬春老师在资料查询、复印和装订等方面提供的方便；感谢同门师兄弟姐妹陈小英、刘勇胜、胡静、黄广、曹惠美、李向阳、俞航、哈长伟、范恩梅、周永东、张伯虎、杨伟、任初希子，他们不仅让我感到生活在一个和睦大家庭中的快乐，而且给予我许多无私的帮助；感谢同宿舍的吉小强、王亚、郭建强，以及同窗好友曹佳、张明等所构建的无限的情谊，让我快乐地度过了这三年难忘的时光。

我要将最真挚的感激送给我的父母和妹妹弟弟等家人。你们的理解、支持、鼓励和鞭策催我更加上进，我竭尽全力的努力，更希望的是能够让你们高兴和满意。同时感谢上海市九段沙国家级湿地自然保护区管理署陈秀芝科长、郑麟老师、刘雨邑等在野外观测取样中给予的协助。

感谢岁月，赋予了我成长的酸甜；感谢风雨，造就了我搏击的坚强；感谢爱，永不疲倦地向我凝望。向所有曾经给予我帮助，激励我成长的老师、同学和亲友送去我最真心的感谢和美好的祝愿。

本文研究得到上海市科委重大科技攻关项目“上海市滩涂资源可持续利用研究”（04DZ12049）及“上海市九段沙国家级湿地自然保护区上沙水文地貌观测”项目的支持，特此致谢！！