

学校编码：10384
学号：22320121151301

密级_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**东海陆架及沿岸河口表层沉积物地球化学
记录：化学风化及其物源示踪**

**Geochemistry of surface sediments from the continental
shelf of the East China Sea and small rivers of SE China:
Constraints on chemical weathering and provenance**

林宝治

指导教师姓名：Selvaraj Kandasamy 副教授

专业名称：海洋化学

论文提交日期：2015年5月

论文答辩时间：2015年5月

2015年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外，该学位论文为(古海洋与古气候)课题(组)的研究成果，获得(古海洋与古气候)课题(组)经费或实验室的资助，在(古海洋与古气候)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。)

声明人(签名)：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

() 2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年 月 日

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究区域	3
1.2.1 东海环流体系	3
1.2.2 东海底质沉积类型	5
1.2.3 东海沉积物来源	7
1.2.4 长江流域地质背景	9
第2章 方法	10
2.1 样品采集	10
2.2 样品分析	11
2.2.1 元素分析	11
2.2.2 磁化率分析	11
2.2.3 粒径分析	12
2.2.4 总有机碳分析	12
2.2.5 烧失量 (LOI) 测定	12
2.2.6 CaCO_3 含量计算	12
第3章 结果与讨论	13
3.1 海面水文条件季节变化	13
3.1.1 温度	13
3.1.2 盐度	13
3.1.3 叶绿素a	13
3.1.4 浊度	14
3.2 东海沉积物粒径分布	15
3.3 有机碳含量分布	19
3.4 碳酸钙含量分布	20

目录

3.5 磁化率分布.....	22
3.6 沉积物组分分析.....	23
3.6.1 粒径与各元素相关性分析.....	25
3.6.2 Al ₂ O ₃ 与其他元素相关性分析.....	30
3.6.3 部分元素含量分布.....	33
3.7 UCC和UC-YC标准化分析.....	35
3.8 硅酸盐风化：地球化学指示物.....	38
3.8.1 化学风化蚀变指数和A-CN-K三角图.....	38
3.8.2 斜长石蚀变指数和(A-K)-C-N三角图.....	43
3.8.3 A-CNK-FM三角图.....	44
3.8.4 化学风化指数.....	46
3.8.5 其他风化指数.....	47
3.9 地球化学分类.....	51
3.10 Al-Zr-Ti三角图.....	53
3.11 统计分析.....	54
第4章 结论.....	56
参考文献.....	57
文章与摘要.....	66
致谢.....	68

CONTENTS

CHINESE ABSTRACT	I
ENGLISH ABSTRACT	II
CHAPTER I INTRODUCTION	1
1.1 Introduction	1
1.2 Study area	3
1.2.1 The modern current system in the East China Sea	3
1.2.2 Sediment types in the East China Sea	5
1.2.3 Sediment sources to the East China Sea	7
CHAPTER II METHODOLOGY	10
2.1 Sample collection	10
2.2 Laboratory analysis	11
2.2.1 Elemental analysis	11
2.2.2 Magntic susceptibility	11
2.2.3 Grain size analysis	12
2.2.4 Total organic carbon analysis	12
2.2.5 Loss of ignition measurement	12
2.2.6 CaCO ₃ calculation	12
CHAPTER III RESULTS AND DISCUSSION	13
3.1 Seasonal patterns of sea surface conditions	13
3.1.1 Temperature	13
3.1.2 Salinity	13
3.1.3 Chlorophyll a	13
3.1.4 Turbidity	14
3.2 Spatial distribution of grain size in the East China Sea	15
3.3 Spatial distribution of total organic crabon (TOC)	19
3.4 Spatial distribution of calcium carbonate (CaCO₃)	20
3.5 Spatial distribution of magnetic susceptibility	22
3.6 Chemical composition of sediments	23
3.6.1 Correlation between grain size and elements	25

目录

3.6.2	Correlation between Al_2O_3 and other elements.....	30
3.6.3	Spatial distribution of selected elements	33
3.7	Normalization to UCC and UC-YC.....	35
3.8	Silicate weathering:Geochemical indicators.....	38
3.8.1	Chemical index of alteration (CIA) and A-CN-K diagram	38
3.8.2	Plagioclase index of alteration (PIA) and (A-K)-C-N diagram.....	43
3.8.3	A-CNK-FM ternary diagram.....	44
3.8.4	Chemical index of weathering (CIA)	46
3.8.5	other weathering indexes using elemental ratios.....	47
3.9	Geochemical classification.....	51
3.10	Al-Zr-Ti triangle plot.....	53
3.11	Statistical analyses	54
CHAPTER IV CONCLUSIONS		56
REFERENCE.....		57
PUBLICATIONS.....		66
ACKNOWLEDGEMENTS.....		68

摘要

沉积物元素地球化学特征可为沉积环境演化历史提供重要信息，包括沉积物物源、物源成分特征、物源区岩石风化侵蚀程度、成岩作用、沉积物传输、沉积过程及古气候变化等。本研究于东海大陆架，瓯江、闽江和晋江河口共采集 79 个表层沉积物样品，分析其常微量元素地球化学特征并探讨物源区性质及化学风化特征。UCC 和 UC-YC 标准化蛛网图表明，CaO、Na₂O、Ba 和 Sr 呈现出不同程度的亏损，而 Rb 元素则轻微富集。硅酸盐风化指数 (CIA、PIA 和 CIW) 及三角形图 (A-CN-K、(A-K)-C-N 和 A-CNK-FM) 表明东海陆架沉积物物源区经历了低-中等的化学风化作用。与东海相比，瓯江、闽江和晋江河口沉积物的风化指数波动较大。闽江河口沉积物的硅酸盐风化指数呈现最低值且表现出不同的地球化学特征，可能是由于沉积物中钾长石和石英含量较高。这些区域的地球化学特征与前人粘土矿物组成研究认为闽江河口沉积物碱性长石与斜长石含量比较高而长石与石英含量比较低的结果相一致。结果表明，相对于河流沉积物，长江来源为主的东海沉积物物源风化程度较低，尽管这些河流受到现代人类活动的干扰。鉴于中国东南沿岸的城镇化可能会影响海陆交界处及相邻沿岸区域的沉积物地球化学特征，本研究能够为未来评估建坝导致沉积物输出量减少的效应和调查东海及台湾海峡沉积系统的古地球化学特征提供有力的帮助。

关键词：地球化学；沉积物；化学风化；物源；东海

ABSTRACT

Major and trace elemental geochemistry of sediments can provide information central to interpreting the sedimentary history, including chemical weathering conditions, the nature and composition of provenance, sediment transport processes, diagenetic changes and paleoclimate. In this study, seventy-nine surface sediments collected from the continental shelf of the East China Sea (ECS) and the estuaries of three small rivers (Ou River, Min River and Jin River) along the southeast coastal China were investigated geochemically to understand their provenance and weathering conditions of source rocks. Reference-normalized geochemical patterns of major oxides and large-ion lithophile elements (Ba, Rb, Sr, Zr) revealed the depletion of CaO, Na₂O, Ba and Sr and a slight enrichment of Rb. Silicate weathering indexes, such as the chemical index of alteration (CIA), the plagioclase index of alteration (PIA) and chemical index of weathering (CIW), and ternary diagrams of silicate weathering suggested the derivation of surface sediments of the ECS from low-moderately weathered source rocks in the provenance. On the other hand, such indexes in sediments from small rivers along the land-sea intersections varied widely with the lowest chemical weathering index observed in the sediments of Min River estuary. Triangular weathering diagrams and other elemental ratios further indicated that the sediments from Min River estuary were geochemically odd owing to the higher contents of potassic feldspars and quartz. These geochemical interpretations corroborated the published results of clay mineralogy, which suggested the lower ratio of feldspar/quartz and higher ratio of K-feldspar/plagioclase in the sediments of Min River compared to Yangtze River and Ou River sediments. Geochemical data presented here further indicated that the Yangtze-derived modern continental shelf sediments in the ECS were less weathered than that of sediments from small rivers, even though these riverine/estuarine sediments are largely disturbed by modern activities. Given that the swift coastal zone urbanization in southeast coastal China may obliterate natural geochemical characteristics of sediments along the land-sea intersections and adjoining coastal regions in the near future, geochemical results presented here would be helpful for the evaluation of declining sediment export due to the “dam effect” and paleo-geochemical investigations of sedimentary systems both in the East China Sea and Taiwan Strait on decadal to millennial time scales.

ABSTRACT

Key Words: Geochemistry; Sediment; Chemical Weathering; Provenance; East China Sea

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第 1 章 绪 论

1.1 引言

作为岩石循环的一个基本组成部分，风化侵蚀作用是地球系统中的一个关键过程。通过岩石风化侵蚀作用，许多维持人类生命的矿物和元素会溶解储存在土壤中，最终进入到人类的食物链中，因此风化侵蚀作用对人类具有重要的意义 (Lutgens and Tarbuck, 2009)。众所周知，从长时间的尺度上，陆地岩石风化作用可调节大气中的二氧化碳浓度，从而控制全球气候变化 (Berner, 1992; Dessert et al., 2003; Gaillardet et al., 1999; Velbel, 1993)。研究表明，硅酸盐岩石风化侵蚀产物可用来评估陆地岩石的风化作用。据估计，通过河流输送到海洋的岩石风化产物，即沉积物，的年平均输出产量约为20亿吨，其中6.3亿吨是通过亚洲河流输送，特别是流经青藏高原区域的河流 (Milliman and Syvitski, 1992)。最终，这些沉积到海洋中的风化产物将会影响该区域的地貌和元素的生物地球化学循环。

因此，近岸海洋与河口沉积物由流域盆地风化产物的混合物组成，富含着沉积物的来源、地质的构造和风化机理等重要信息 (Hedges and Keil, 1995; Stallard and Edmond, 1983)。东海作为西太平洋海域上重要的陆架边缘海之一，不仅连接着全球最大的陆地（亚欧）与海洋（太平洋），而且10%全球经河流入海的陆架沉积物可输入东海及其邻近的区域，特别是来自于长江与黄河 (Milliman and Meade, 1983)。此外，东海濒临于全球人口最密集的区域，由于受到人类活动的影响，如土地利用，接收了大量的来自于陆地的沉积物，特别是来自于中国 (Deng et al., 2006)。因此，东海吸引了许多国内外地球与海洋科学的科学家注意。

至今，许多科学家采用不同的途径来示踪东海表层沉积物的来源，如沉积物粒径、磁化率、CHIRP地震剖面图、沉积物的化学成分与矿物成分、生物标志物和有机物的同位素记录等 (Hu et al., 2014; Liu et al., 2007b; Liu et al., 2010; Xu et al., 2012; Xu et al., 2009; Zhao, 1983)。其中，海洋沉积物化学组分及纹理分析可提供沉积物的母岩化学特征、母岩的风化侵蚀程度、沉积物传输与沉积过程中水动力分选过程和沉积后的成岩作用等一些有价值的重要信息 (McLennan, 1989; Nesbitt et al., 1996)。1961年，Niino 和 Emery通过分析中国近

岸边缘海域沉积物沉积特性，第一次调查了东海大陆架表层沉积物的分布特征及其来源。

近年来，许多研究者广泛采用沉积学与地球化学的手段来研究东海表层沉积物的特征 (Jiang et al., 2011; Lin et al., 2002; Xiao et al., 2005; Youn and Kim, 2011; Zhao, 1983; Zhao, 1985; Zhao et al., 1995)。然而，大部分的这些研究主要集中在东海的远岸泥质区 (Youn and Kim, 2011) 和冲绳海槽 (Jiang et al., 2011)，只有少数研究研究东海内陆架沉积物特征，特别是利用沉积物的地球化学手段 (Xiao et al., 2005; Zhao, 1983; Zhao, 1985; Zhao et al., 1995)。例如，赵一阳 (1983) 通过调查东海沉积物的主微量元素地球化学特征，表明了东海内陆架沉积物的化学成分主要受到陆源输入的控制，而冲绳海槽的沉积物组成主要是受到海洋自生成分的控制。赵一阳 (1985) 研究了我国边缘海的陆架沉积物，包括东海，发现东海的表层沉积物与陆地岩石碎屑和地壳有很强的地球化学相似性。赵一阳 (1995) 等人进一步研究了我国陆架海（从渤海到北部湾）沉积物中化学元素丰度，表明我国陆架海沉积物的元素特征类似于陆地沉积物，随后这些沉积物化学特征会受到一些海洋活动的影响。

Lin et al. (2002) 通过研究东海沉积物的地球化学、粒径和有机碳含量，表明东海的沉积物主要来自长江。肖尚斌 (2005) 等人研究了从东海内陆架泥质区采集的DD2柱状沉积物岩芯的地球化学特征，表明东海的沉积物主要来源于花岗岩。虽然之前研究能够使我们对东海沉积物的地球化学特征有一些初步的了解，但是对东海陆架沉积物的地球化学特征及其物源示踪的理解仍然有待进一步的研究。事实上，类似的研究已经被用在东亚地区的许多河流系统中。例如，Yang et al. (2004) 通过研究长江和黄河沉积物中的化学成分，表明这些流域盆地的岩石化学风化侵蚀程度主要受到气候控制的。Liu et al. (2012) 研究了热带东南亚河流中沉积物的粘土矿物组成与主量元素的地球化学特征，区分了地质构造、气候和岩性分别对化学风化侵蚀的控制作用。然而，对东海陆架沉积物中类似的地球化学研究仍然非常鲜有。因此，为了充分理解沉积物源区的岩石特征和粒径、水动力分选作用和一些小河流分别对沉积物地球化学特征的影响，对东海陆架表层沉积物进行全面的、系统的地球化学特征的研究仍是急需的。

本研究将利用地球化学手段来评估沉积物源区岩石的化学风化侵蚀程度，

为东海大陆架表层沉积物的化学特征提供一套系统的信息。此外,本研究还将分析来自于大陆的三个沿岸河口(瓯江,闽江,晋江)沉积物的地球化学特征,用来区别这些小河流对东海沉积物输送的影响,同时,将与东海陆架的表层沉积物进行对比,了解其不同的地球化学特征。

由于海洋沉积物的地球化学成分会受到沉积物粒度性质的影响,特别是粒径(Loring and Rantala, 1992),即沉积物中大部分元素的含量会随着粒径减小而增加。同样,海洋沉积物的磁学性能分析可提供关于沉积物来源,沉积物动力学特征及沉积后的成岩作用等额外信息(Holz et al., 2004; Liu et al., 2003a)。因此,本研究将结合分析沉积物的粒径、磁化率、总有机碳含量和主微量元素的含量等参数,研究东海陆架表层沉积物的来源及其源区岩石化学风化侵蚀程度。

1.2 研究区域

东海介于东经 121 度至 126 度,北纬 26 度至 31 度之间,西临中国大陆,东临冲绳海槽,南接台湾及台湾海峡,北临黄海(图 1-1)。东海的面积约为 77 万平方公里,平均水深为 349 米,占总面积的 65%的大陆架(约为 50 万平方公里)多为水深 200 米以内。其中,往东南方向,水深越来越深,在冲绳岛西侧(中琉界沟)达到最大深度,约为 2300 米(Deng et al., 2006)。东海沿岸区域属于典型的半日潮类型,其东部潮差变化为 1-2 米,西岸的潮差较大,一般为 2-6 米,特别是钱塘江河口,潮差为 8.9 米,为中国潮差最大的地方(图 2-1)。东海的潮流流速在长江河口可达 200 厘米/秒,向东递减至 5-10 厘米/秒(Bao et al., 2001)。东海环流系统是受东亚季风控制,在夏季盛行东南风,并伴随着台风频繁生成,在冬季盛行西北风,并伴随着风暴产生(图 1-1)。强的潮流与季风作用导致东海陆架区沉积物再悬浮活动,特别在近海岸区域(Milliman et al., 1985)。

1.2.1 东海环流体系

东海海流系统主要由沿东海陆架边缘的黑潮暖流(盐度 $> 34.6\text{‰}$),沿

东海中间陆架的台湾暖流及沿沿岸区域的闽浙沿岸冷流（温度 $<18^{\circ}\text{C}$ ，盐度 $<$

32 ‰）组成 (Guan and Mao, 1982; Lee and Chao, 2003)（图1-1）。把东海从开放的西北太平洋区分开来且终年相对稳定的黑潮，沿着东海大陆坡向东北流动，在济州岛西南进入南黄海，称为黄海暖流。黄海海流是一支向北输送高盐暖水的流系。在秋季与冬季，闽浙沿岸冷流形成于长江口的南部，随后沿着东海的西岸向南运移，随后进入到台湾海峡。而在夏季，受到东南季风的影响，闽浙沿岸冷流则沿岸向北流动（图1-1）。台湾暖流受限于东海西部海岸水深为50-100米的区域，始于台湾海峡，流入黄海或对马海峡。其海流强度在夏季较强，而在冬季减弱。在陆架坡折区有两支黑潮支流形成的反气旋流，一支位于台湾的东北部而另一支位于日本九州的西南部 (Lee and Chao, 2003)。此外，在秋季与冬季，受到向南流的强的闽浙沿岸冷流与向北流的台湾暖流的影响，长江口冲淡水形成一支非常狭窄的沿岸流向南运移 (Liu et al., 2003b; Su, 2001)；而在长江径流强盛时期（夏季），长江口的冲淡水可向东北方向延伸，至济州岛附近 (Liu et al., 2003b)。

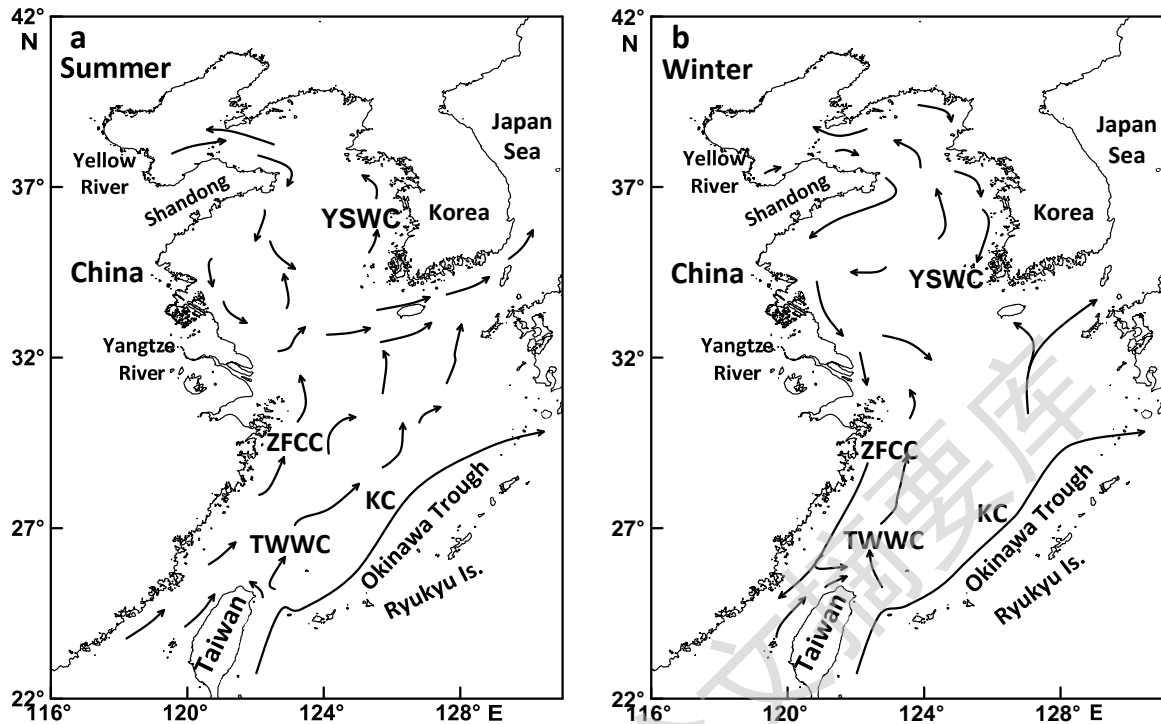


图 1-1 东海 (a) 夏季与 (b) 冬季环流系统示意图 (Chen, 2008)。KC: 黑潮;

TWWC: 台湾暖流; ZFCC: 闽浙沿岸流; YSWC: 黄海暖流

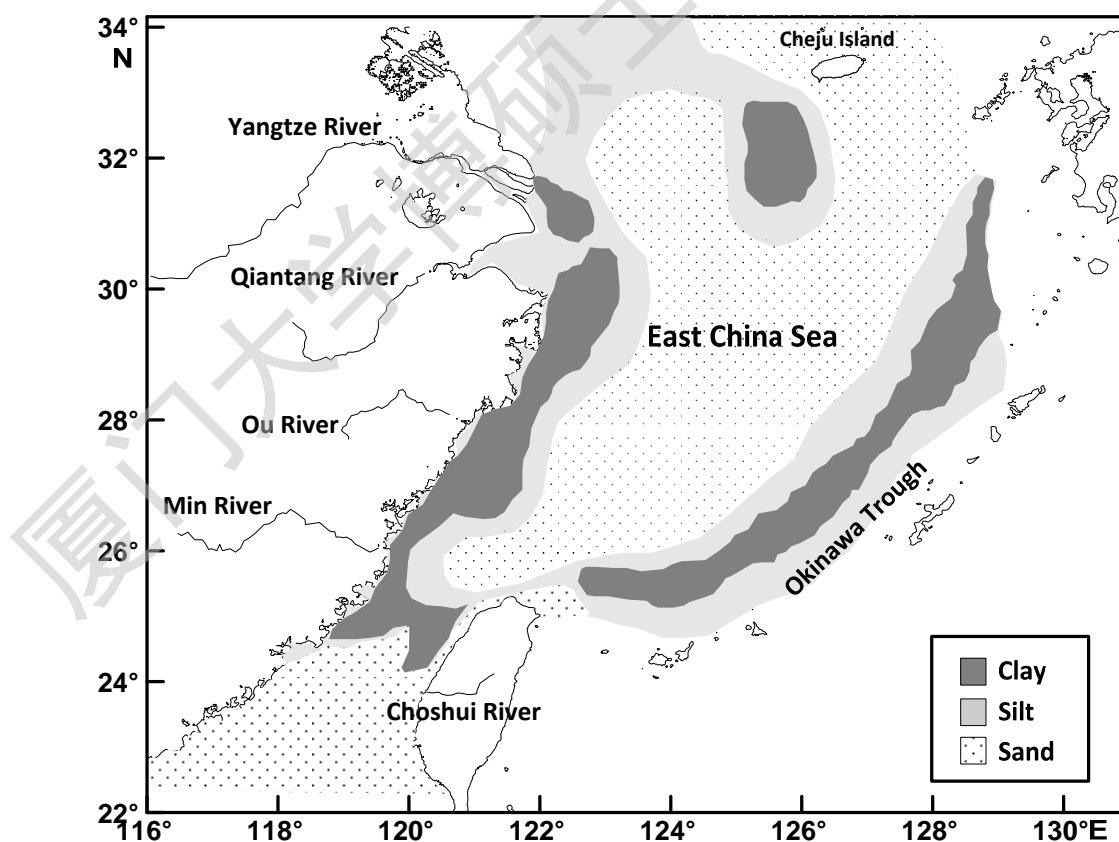
Fig. 1-1 Schematic panels of (a) summer and (b) winter circulation patterns in the East China Sea (redrawn from Chen, 2008). KC: Kuroshio Current; TWWC: Taiwan Warm Current; ZFCC: Zhejiang-Fujian Coastal Current; YSWC: Yellow Sea Warm Current

1.2.2 东海底质沉积类型

研究表明, 东海沿岸的复杂水动力作用, 对河流 (特别是长江) 携带的入海物质在东海陆架的搬运、沉积、再搬运和再沉积过程中扮演着重要的角色 (Guo et al., 2003; Liu et al., 2007b)。图2-1为东海陆架表层沉积物的沉积类型分布图。受到夏季盛行的东南季风影响, 长江径流量升高, 闽浙沿岸流退却减弱, 导致长江来源为主的陆源物质沉积在长江河口, 形成长江河口泥质区 (Guo et al., 2003; Liu et al., 2006)。在冬季, 强潮流和波浪等水动力因素作用下, 沉积于水深小于20米的河口区域的细颗粒物会频繁发生起动。这些起动的细颗粒物, 受到向南流的闽浙沿岸流和向北流的台湾暖流的影响, 将沿着东海内陆架向南迁移运输, 在水深小于90米的区域形成闽浙沿岸泥质区 (图1-1和图2-1) (Guo et al., 2003; Liu et al., 2006; Liu et al., 2007b)。据估计, 闽浙沿岸泥质区斜

坡上的沉积物体积为 4.5×10^{11} 立方米 (Liu et al., 2007b)。

长江口附近的沉积物停留时间为100天，随后，在聚集速率为100年的时间尺度上，沿着东海的沿岸区域向南搬运 (Milliman et al., 1985)。东海内陆架的两个泥质区（闽浙沿岸泥质区与长江河口泥质区）之间的沉积物类型主要为沙条纹或大波痕的砂质 (Butenko et al., 1985)。东海外陆架的沉积物类型主要为砂质沉积物，据测量该砂质沉积物厚度可达30厘米甚至几米，且该区域沉积物沉积速率较东海泥质区的沉积速率低 (Alexander et al., 1991; Demaster et al., 1985; Saito et al., 1998)。这些砂质的表层沉积物，是自末次盛冰期（大约距今20-18 ka）以来由于海侵-海退循环作用形成的 (Bartek and Wellner, 1995; Suk, 1989)。总之，东海内陆架（水深<80米）区域为泥质沉积区，由长江口向南延伸1000米至台湾海峡 (Xu et al., 2012)。东海外陆架区域（水深为80-200米）主要为砂质沉积区，也被定义于“残余沉积”，该区域受到陆源物质的影响很小且保存自晚更新世最后阶段以来的地貌特征和沉积特征 (Emery, 1968; Qin, 1996)。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.