

# 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇 沉积过程与环境演变

杨守业<sup>1</sup>, 韦刚健<sup>2</sup>, 石学法<sup>3</sup>

1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 3. 国家海洋局 海洋沉积与环境地质重点实验室 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

**摘 要:** 东亚大陆边缘发育特征的河控型边缘海沉积, 其源汇沉积过程的深入研究对于深入理解地球表生过程、物质循环和大陆边缘构造沉积演化特征, 具有重要意义。东亚边缘海沉积地球化学研究主要集中于几方面: 入海河流沉积物的地球化学组成示踪沉积物源区的风化剥蚀特征, 河口陆架区沉积地球化学行为; 通过大陆边缘的沉积地球化学记录, 探讨不同时空尺度河流入海沉积物的通量、搬运扩散方式及其蕴含的季风气候和海区环境演化信息。目前相关研究与国际前沿水平依然存在较大差距, 需要从海陆结合的地球系统科学角度, 通过地球化学与其他学科方法交叉的研究手段, 从整体上研究东亚大陆边缘的沉积过程, 揭示从流域到河口、陆架至开阔海的沉积物源汇系统过程和环境演变规律, 及东亚大陆边缘沉积和海洋相互作用的全球意义。

**关 键 词:** 东亚大陆边缘; 地球化学; 沉积; 环境; 河流; 从源到汇

中图分类号: P593 文章编号: 1007-2802(2015)05-0902-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.05.003

## Geochemical Approaches of Tracing Source-to-Sink Sediment Processes and Environmental Changes at the East Asian Continental Margin

YANG Shou-ye<sup>1</sup>, WEI Gang-jian<sup>2</sup>, SHI Xue-fa<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092 China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao Shandong 266061, China

**Abstract:** The east Asian continental margin is characterized by river-dominated marginal sedimentation, and understanding of its source-to-sink sediment process will significantly improve our recognition on earth surface processes, material cycling and tectonic-sedimentary evolution in continental margins. Thus, sedimentary geochemical studies of the east Asian marginal seas focus on: (1) geochemical compositions of river sediments and their indications to the provenance characters including weathering and erosion patterns; (2) sedimentary geochemical processes in estuarine and shelf seas; (3) sedimentary geochemical records of flux, transport and dispersal of river sediments into seas in continental margins, and monsoon climate and paleoenvironmental changes of marginal seas. A large knowledge gap exists between the international frontier and the present research progress of east Asian continental margin sedimentation, more research efforts could be put on the systematic and multidisciplinary work on the land-sea interaction and sedimentary process in the east Asian continental margin, with special emphases on the sediment source-to-sink transport system from catchments to estuaries and open seas, and on the relating environmental changes driven by natural and anthropogenic forcing. Thus, the global significance of east Asian continental margin sedimentation will be increasingly recognized by the international community.

**Key words:** East Asian continental margin; geochemistry; sedimentation; environment; river; source to sink

收稿日期: 2105-07-23 收到 2015-09-02 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41225020, 41376049)

第一作者简介: 杨守业(1971-) 男 教授 研究方向: 海洋地质学. E-mail: syyang@tongji.edu.cn.

## 1 东亚大陆边缘沉积的研究意义

新生代青藏高原隆起和东亚边缘海形成作为地球演化的重大事件,形成了亚洲大陆边缘独特的“从源到汇”体系。东亚发育系列特征边缘海,如东海连接世界上最大的大陆和最大的大洋,发育世界罕见的宽广大陆架,及复杂的陆架流系;在冰期和间冰期旋回尺度上,东亚边缘海经历强烈的陆海相互作用,沉积环境发生巨大变化。在构造-季风气候-海平面-海洋环流-人类活动等不同时间尺度多因素控制下,东亚边缘海接纳了世界大河(如长江、黄河、珠江)和岛屿山溪性河流(如台湾)的巨量入海泥沙,成为世界上物质交换最活跃的大陆边缘之一,并发育大河三角洲和独特的陆架泥质与砂质沉积体系(李铁刚等,2003;杨守业,2006;Kao and Milliman,2008;高抒,2013;Liu *et al.*,2013;Gao and Collins,2014;Li *et al.*,2014)。因此,东亚边缘海具有典型的河控型大陆架沉积特色,是研究大陆边缘沉积、环境演变、陆海相互作用和陆源沉积物从源到汇过程的天然实验室;对其海洋地质过程的深入研究,对于深入理解地球表生过程、物质循环和大陆边缘构造沉积演化特征,具有重要意义(Yang *et al.*,2014)。

近年来国际相关研究计划和设想,如大三角洲河口湾LDE(Bianchi and Allison,2009)、河控型大陆边缘RioMar(McKee *et al.*,2004;RioMar 2004 workshop)、大陆边缘从源到汇计划NSF MARGINS S2S(MARGINS,2003;Kuehl and Nittrouer,2011)、海岸带海陆相互作用LOICZ(张经,2011)等,都指出东亚大陆边缘及长江、黄河源汇体系研究的重要性。过去几十年,围绕东亚大陆边缘的沉积过程与环境演变取得了许多重要成果,但依然存在一些亟待解决的关键科学问题,如:在不同时间尺度上,在自然环境变化和人类活动双重因素耦合作用下,大河流域风化物质如何产生?陆源物质进入边缘海的通量、从源到汇过程和搬运机制?如何通过边缘海的沉积记录来追踪新生代高原隆升、季风变迁、河流演化和边缘海形成等事件?这些也是当前亚洲海洋地质及全球变化研究的关键科学问题。

## 2 东亚河流沉积地球化学与海陆相互作用

由于河控型的东亚大陆边缘沉积特征,东亚主要河流入海物质组成的认识对于深入理解东亚边缘海的沉积源汇过程与环境演变具有重要意义。

在上世纪80年代以前,中国河流沉积物地球化学的研究几乎是空白。因为缺乏中国河流颗粒物元素与同位素组成的资料,上世纪70年代,Meybeck和Martin等学者估算的世界河流沉积物化学平均组成时都没有或很少中国河流数据(Meybeck,1976;Martin and Meybeck,1979)。显然,考虑到中国发育若干条世界性的大河,且这些河流跨越不同的地质、地理和气候单元,入海物质具有巨大的通量,不将中国河流沉积物的地球化学组成纳入到全球河流系统中去,是非常不完善的。直到上世纪八九十年代,以陈静生、李远辉、杨作升、赵一阳、蓝先洪、黄薇文和张经等代表的中国学者便开展了中国大陆三大河流(长江、黄河与珠江)沉积物地球化学组成的基础研究,主要集中在元素地球化学方面。

目前,河流沉积地球化学主要运用于两方面研究,一是根据河流沉积物的元素与同位素组成来研究河流沉积物的物源区,流域内源岩的化学风化特征和人类活动对元素组成的影响,及河口地区元素的地球化学行为等;二是根据流域内、河口三角洲及邻近陆架区的岩心沉积地球化学组成,探讨地质历史时期河流入海沉积物的通量、搬运扩散方式及其蕴含的源区风化特征和气候演化信息。另外,沉积地球化学方法也被广泛运用于重建主要河流水系的演化历史。

### 2.1 入海河流沉积物来源和源区风化特征

元素地球化学研究揭示,在河流的下游及河口三角洲地区,表层沉积物或悬浮物各具不同的元素组成特征,主要受流域不同源岩类型、物理和化学风化过程、人类活动(包括污染)等因素控制。长江作为亚洲第一大河,黄河作为多年输沙量第一的亚洲大河,它们的河流地球化学组成一直是科学界关注的热点。在上世纪八九十年代,以张经和黄薇文为代表的学者比较研究了长江与黄河下游及河口三角洲沉积物的元素地球化学组成(Yang and Milliman,1983;Zhang *et al.*,1988,1992;Huang and Zhang,1990;Zhang *et al.*,1990;Huang *et al.*,1992;张经,1994,1997),引起国际科学界对东亚河流地球化学研究的广泛重视。赵一阳等学者率先运用中国主要河流沉积物的元素地球化学不同组成特征,来示踪入海河流沉积物在东部边缘海的分布,并讨论了元素的不同结合相态和沉积物粒度对元素组成的控制机制(赵一阳,1983;赵一阳和鄢明才,1992,1994)。东亚河流沉积地球化学研究中,应用比较普遍的物源示踪方法主要包括:主、微量元素,Sr-Nd-Pb同位素等传统地球化学方法及

轻矿物、重矿物、黏土矿物、矿物化学等矿物学方法。在传统地球化学方法中,微量元素如 REEs(稀土元素), Ti, Th, Sc, Co 等受风化作用、沉积动力分选、后期成岩和变质作用等影响较小,基本继承和反映了物源区源岩的平均组成,而被广泛运用于河流入海沉积物的物源判别(Yang *et al.*, 2002, 2003; Song and Choi, 2009; 杨守业和王中波, 2011)。

尽管东亚河流沉积物的元素地球化学组成已有很多研究,但对河流水系沉积物地球化学组成的时空不均一性研究还比较薄弱(杨守业, 2006)。而近些年,由于水动力分选(造成沉积物粒度和矿物分异)引起的河流地球化学组成不均一性问题越来越受国际科学界的重视(Bouchez *et al.*, 2011; Garzanti *et al.*, 2011; Lupker *et al.*, 2012)。最近的研究也揭示,中国主要河流近河口区干流悬浮物的酸不溶相组分作为整个流域风化剥蚀细颗粒物质的平均混合,具有较好的源区平均组成的示踪特性,可代表入海河流颗粒物的平均地球化学组成,用于示踪研究东部边缘海河流沉积物的源汇过程(杨守业等, 2013)。

对一些反映化学风化程度的地球化学参数,如化学蚀变指数 CIA、化学风化指数(CIW, WIP, PIA)、A-CN-K 图解(Parker, 1970; Nesbitt and Young, 1982; Harnois, 1988)等的研究揭示,中国从北到南入海河流的流域化学风化呈总体增强趋势,不同地带性季风气候特征可能是控制这些流域硅酸盐化学风化程度的主要因素。基于沉积物组成的一些化学风化参数实际反映了流域累积的综合化学风化历史,而不是一个可靠的瞬时化学风化指标,在指示短时间尺度的季节性气候变化研究应用中需慎重(Yang *et al.*, 2004; 茅昌平, 2009; Li and Yang, 2010; Shao and Yang, 2012; Shao *et al.*, 2012)。

在沉积物风化、搬运和沉积过程中,元素组成受多因素影响会发生变化;而一些放射性同位素组成则相对稳定,保留了源岩化学组成的特征,可以更准确地示踪沉积物物源。相比南亚和东南亚的主要河流,中国河流沉积物的放射性同位素地球化学示踪研究非常薄弱。Goldstein 等(1984)仅报道了一个长江口表层沉积物的 Nd 同位素组成,认为它与长江流域一个寒武纪/前寒武纪界线处的沉积岩样品具有相同的 Nd 同位素组成;Clift 等(2002)分析了金沙江上 4 个河流沉积物的 Pb 同位素组成,并和红河以及南海沉积物的同位素组成进行了比

较,研究了它们之间的物源关系。而国内一些学者近些年则较系统地开展了中国主要河流沉积物的 Sr-Nd 同位素地球化学研究,分析了流域水系不同地区沉积物的同位素组成,讨论物源、化学风化和水动力等因素对河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成的制约(孟宪伟等, 2000; Yang *et al.*, 2007; 茅昌平等, 2011; 罗超等, 2012; Wang *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2014);尤其是国际上近一些年新发展的非传统稳定同位素方法也在中国河流地球化学示踪研究中得到运用,取得重要成果(Wei *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015)。总体上,与国外一些河流沉积物的同位素地球化学研究相比,东亚入海河流同位素地球化学研究依然比较薄弱,尤其是对水体与沉积物的同位素组成的时空变化特征和沉积动力分选的影响认识还不够深入,缺乏长期连续的季节性变化特征分析。另外,同位素样品的前期沉积物酸处理方法也不统一,如不同浓度的盐酸(0.25 N, 1 N, 2 N 等)、醋酸(0.5 N)和混合酸均有报道;这也一定程度上影响了同位素数据的解释和对比。

## 2.2 流域环境演化和陆海相互作用

长江与黄河何时形成一直是科学界非常关注的热点科学问题,近百年来国内外学者运用自然地理学、水文地貌学、第四纪地质学等研究手段,在河流的中、上游地区开展了大量基础研究,提出老到中生代,新至晚更新世的河流发育历史。在长江与黄河中下游盆地及河口三角洲地区,运用主、微量元素、REE、Nd 同位素、独居石和锆石的年龄谱系等多学科交叉的研究方法,为精确剖析三角洲地区第四纪海侵事件,判别第四系沉积物的物源,探讨古水系演化提供了较好的约束(Chen *et al.*, 1997; Yang *et al.*, 2006a, 2006b; 杨守业等, 2007; Jia *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Shao *et al.*, 2011; Gu *et al.*, 2014)。最近,郑洪波等通过长江下游古河道的玄武岩 Ar-Ar 定年结合砂质沉积物的碎屑锆石年代学研究,推测长江约 23 Ma 前就已经形成,而三峡切穿不会早于 36.5 Ma;长江水系演化与青藏高原东部构造演化与亚洲夏季风强化有密切关系(Zheng *et al.*, 2013)。

相比黄土-古土壤、冰心、湖泊、珊瑚、洞穴和深海沉积的连续记录,中国东部地区由于陆海相互作用频繁,沉积地层不连续,缺乏可靠的高分辨率的地层记录,同时一些开阔海洋和内陆古环境恢复的常用替代指标在东部地区也不完全适用,这使得陆架海古环境重建相当困难。近十多年,沉积地球化

学指标,如细粒沉积物的  $\text{CaCO}_3$  含量,化学蚀变指数 CIA,  $\text{K}/\text{Na}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ba}$ ,  $\text{Al}/\text{Ti}$ ,  $\text{K}/\text{Ti}$ ,  $\text{Sr}-\text{Nd}-\text{Pb}$  同位素等参数被广泛运用于研究中国东部和河口地区第四纪古环境演变和陆海相互作用特点,揭示流域古化学风化状况与东亚季风演化的区域响应(Chen *et al.*, 1997; Wei *et al.*, 2004, 2006, 2012; Yang *et al.*, 2006b; Hu *et al.*, 2012a, 2012b)。

总体而言,东亚河流沉积地球化学虽然开展了大量基础研究工作,但目前无论是从宏观还是微观角度,都急需进一步提炼科学目标,与国际性的研究计划结合,综合多学科的研究力量,加强与国际其他河流的比较研究;在研究思路 and 关键方法上需要突破和深入,如开展更深入的非传统稳定同位素地球化学与单矿物化学的示踪研究,加强研究的广度和深度,从定性走向定量,更深入地揭示东亚入海河流地球化学组成的独特性。

### 3 东亚边缘海沉积地球化学研究进展

沉积物地球化学方法在海洋古环境研究中越来越受重视,沉积物的元素和同位素组成变化可以反映边缘海沉积物物源和古环境变迁。国际上,边缘海沉积的源汇研究内容和手段也大大扩展,已不仅仅局限于海区(汇)的研究,而更关注沉积物从陆到海的过程,倡导海陆结合的综合系统研究。

中国海洋沉积地球化学研究开始于 1958 年的“全国海洋普查”,首次研究了中国近海沉积物中的  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{CaCO}_3$  与有机质含量分布特征。上世纪 60 年代研究了渤海的  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{CaCO}_3$ , 有机质与  $\text{U}$  的地球化学特征;70 年代开展了东海大陆架、冲绳海槽及黄海和南海的海洋地球化学调查,主要集中在沉积物的元素地球化学研究。如赵一阳早在 1980 年就发表了中国海洋沉积地球化学的奠基性论文“中国渤海沉积物中铀的地球化学”(赵一阳, 1980)。他于 1983 年率先提出中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式,即“元素的亲陆性”、“元素的亲碎屑性”和“元素的粒度控制规律”等,与 Taylor 和 McLennan(1985)提出的上陆壳元素地球化学组成特征非常一致,反映出中国学者在当时海洋沉积地球化学领域取得的巨大成就。这些地球化学模式对今天的东亚边缘海沉积地球化学研究依然有重要的指示价值。以赵一阳为代表的学者在 1994 年出版了《中国浅海沉积物地球化学》,代表了当时中国海洋沉积地球化学研究的最重要成果;研究揭示出中国浅海沉积物的元素地球化学模式,阐述了元素的近似丰度及元素的共生

组合特征;通过不同海区沉积物元素组成比较,他们进一步揭示出中国海洋沉积物元素组成的地球化学效应,包括气候效应、物源效应、生物效应、热水效应等。这些开创性的研究成果对推动中国海洋沉积地球化学研究具有重要意义。

总体来看,目前东亚边缘海沉积地球化学主要集中于两个方面研究:海洋沉积物的物源识别和古环境演化的重建。

#### 3.1 沉积地球化学方法示踪海洋沉积物来源

东亚大陆边缘河海相互作用强烈,河流入海沉积物的源汇过程和对边缘海沉积贡献一直是困扰学术界几十年的关键科学问题。由于在海区缺乏较高质量的长岩心,缺少高分辨率的采样和可靠的定年方法,以及稳定可靠的陆源沉积物源区识别指标,东部边缘海的沉积物物源研究多年来一直进展不大。虽然在上世纪八九十年代,根据中国边缘海第四系岩心沉积物的元素组成特征,一些学者开展了元素地层学研究。如提出冲绳海槽晚第四纪沉积物中,不同元素可以指示不同来源或环境影响。如亲碎屑元素( $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Sc}$  及稀土元素 REE 等)指示陆源物源,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Sr}$  和生物硅含量等指示海洋生物沉积/生产力大小,  $\text{Na}$ ,  $\text{Si}$  和  $\text{Zr}$  等元素指示火山活动,  $\text{Hg}$ ,  $\text{I}$  等指示热液活动(李铁刚和常凤鸣, 2009)。但总体上,在本世纪沉积地球化学方法才被广泛地运用于中国东部边缘海的沉积物源判别研究,某些领域的研究在国际上引得较高关注。

在第四纪,长江与黄河沉积物对南黄海和东海具有显著影响,基本控制了陆架海区的第四纪沉积体系。因此,国内外学者围绕现代和第四纪长江源、黄河源物质在黄、东海的扩散和混合问题,开展了大量沉积地球化学研究工作。目前,东部边缘海中沉积物物源研究主要集中在几个热点地区,如冲绳海槽西坡、黄海和东海的几个典型泥质沉积区、南海北部陆坡等。最近几年,台湾山溪性河流因为巨大的入海泥沙通量,它们对东海和南海第四纪沉积的影响也获得很多关注,成为亚洲海洋地质学研究的新热点。

在沉积地球化学示踪指标上,稳定元素比值( $\text{Th}/\text{Sc}$ ,  $\text{Ti}/\text{Sc}$ ,  $\text{Sc}/\text{Al}$ , 元素与  $\text{Ti}$  比值等)、REE 特征配分参数、酸不溶组分的元素及  $\text{Sr}-\text{Nd}-\text{Pb}$  同位素、碎屑单矿物化学等获得广泛运用(Li *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2003; Wei *et al.*, 2004, 2012; Choi *et al.*, 2007; Dou *et al.*, 2010, 2012; Hu *et al.*, 2012a, 2012b; Lim *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2015)。沉积物物源是中国边缘海海洋地质和

古环境研究的核心科学问题,虽然过去 30 年取得大量研究成果,但目前依然存在不少问题需要解决,尤其是物源的研究方法和判别指标方面亟待突破。例如不少学者关注到一些常用的地球化学指标有多解性,如河流与海洋细颗粒的沉积物中 Al/Ti 值受到沉积动力分选影响(杨守业等,2013);海洋沉积物中部分 Al 不赋存于陆源碎屑中,显示了“过剩铝  $Al_{xs}$ ”的存在(韦刚健等,2003;任景玲,2010)。因此,海洋环境中的 Al/Ti 值不完全是陆源沉积物物源的指标,而某种程度上也可以反映海洋初级生产力( $Al_{xs}/Ti$ )。另外,海洋环境中也存在一些过剩 Ti( $Ti_{xs}$ ),说明在运用这些“亲碎屑/陆源元素”来指示陆源入海沉积物时候,最好结合元素赋存的矿物和化学相态分析,才能取得更稳定可靠的物源判别效果。

除此以外,沉积物来源追踪研究还受一些很基础但仍未解决的问题困扰,如第四纪中国河流入海通量与化学组成是否稳定?如何去除沉积动力分选、化学风化、早期成岩作用及人类活动等影响,真正得到可以指示陆源区源岩信息的河流入海物质化学组成?如何结合沉积学、地球化学、矿物学方法,并与海区沉积动力环境结合,得到稳定可靠的物源判别效果?虽然一些定量模型在东部边缘海沉积物物源研究中取得较好效果,但总体上,沉积地球化学方法在中国边缘海沉积物物源研究中依然以定性为主,还缺乏更深入的地球化学定量判别模型。这些问题也是下一阶段中国海洋地球化学与沉积物物源研究中需要解决的。

### 3.2 地球化学方法重建海洋古环境演变历史

海洋气候环境演变始终是海洋科学研究的重要组成部分之一,地球化学的研究方法从一开始就在这方面的研究中发挥重要作用,而在现阶段地球化学方法已经是该领域不可或缺的研究手段,特别是在获取定量化气候环境演变记录方面具有不可替代的重要地位。早在上世纪 80 年代初期中国学者就通过“中美海洋沉积作用过程联合研究”等国际合作,运用  $^{210}Pb$ ,  $^{226}Ra$ ,  $^{14}C$  等同位素年代学方法,开展了长江口及陆架海区沉积速率研究(陈毓蔚等,1982;刘韶等,1983;夏明等,1983;陈进兴等,1984;李凤业,1988)。其中,南海南部 V35-5 岩心中浮游有孔虫的 AMS  $^{14}C$  测年在国际上也是开创性的工作(Andree *et al.*, 1986; Broecker *et al.*, 1988)。

从 80 年代末期开始,古海洋学研究逐渐在中国兴起,一些国际上常用的地球化学研究手段也被逐

渐引入,例如以有孔虫氧同位素为主的东亚边缘海氧同位素和碳酸盐地层学取得众多研究成果。随着古海洋学的研究的不断深入,中国学者也紧跟国际学术前沿,发展出一系列新的地球化学指标,并陆续运用于中国边缘海的古海洋与古环境研究,探究亚洲季风和边缘海海洋环流体系演化在海区的沉积记录。其中主要包括:①在最经典的海水古温度方面,发展了利用有孔虫的 Mg/Ca 值(Tian *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2007; Xiang *et al.*, 2007)和基于生物标志化合物如长链烯酮化合物的不饱和度  $U_{37}^K$ (Zhao *et al.*, 2006),甘油双烷基甘油四醚 GDGT 的  $TEX_{86}$ (Jia *et al.*, 2012)等方法重建表层海水温度;②利用生物成因碳酸盐的 B/Ca 值或者 B 同位素组成重建海水 pH(刘卫国等,1999; Liu *et al.*, 2009);③通过沉积物的无机元素组成如 Ti/Al 值、有机元素及碳氮同位素组成、生物标志物等多指标来重建中国东部海平面变化(Huang and Tian, 2012; Chen *et al.*, 2013; Zong *et al.*, 2013)。

另外,地球化学方法还运用到一系列的海洋环境综合研究,如示踪水团来源与成因(海洋沉积物的可溶组分中 Sr-Nd 同位素、稀土元素等),古季风、生产力和生物地球化学过程(有孔虫 Cd/Ca 值,总有机碳氮含量、沉积物和单体化合物中有机碳氮同位素组成、古菌生物标志物 BIT、生物成因 Ba 和 Mo、过剩 Al 或 Al/Ti 值、 $^{231}Pa/^{230}Th$  和  $^{10}Be/^{230}Th$ ),大陆化学风化过程(Ti/Al, K/Si, La/Lu, 化学风化指数 CIA 等, Fe 的矿物和化学相态; Sr-Nd-Pb 同位素)等(Meyers, 1997; Huh and Su, 1999; 陈建芳, 2002; Liu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Huh *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012b; Wei *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2014; Dou *et al.*, 2015; Wan *et al.*, 2015)。而目前国际上最近几年兴起的一些新的地球化学指标如非传统稳定同位素(Mo, Mg, Ca, Zn, Fe, Si, Cu 等)、和团簇同位素(clumped isotopes, 早期没有统一的中文名字,在国内曾经在多种表述方法,如“稀-稀同位素”、“二元同位素”和“耦合同位素”)在古海洋与古环境研究领域也取得了迅猛发展(Robinson and Siddal, 2012)而目前中国一些相关的实验室也正在开展这方面的研究,预计未来的几年将陆续被应用到中国的边缘海海洋科学研究中。

用于重建气候环境演变历史的研究对象,通常都是生物成因物质如钙质生物壳体和各种生物标志化合物等。中国研究人员在古海洋学研究方法上的一个重要贡献,是利用沉积物中碎屑组分的元

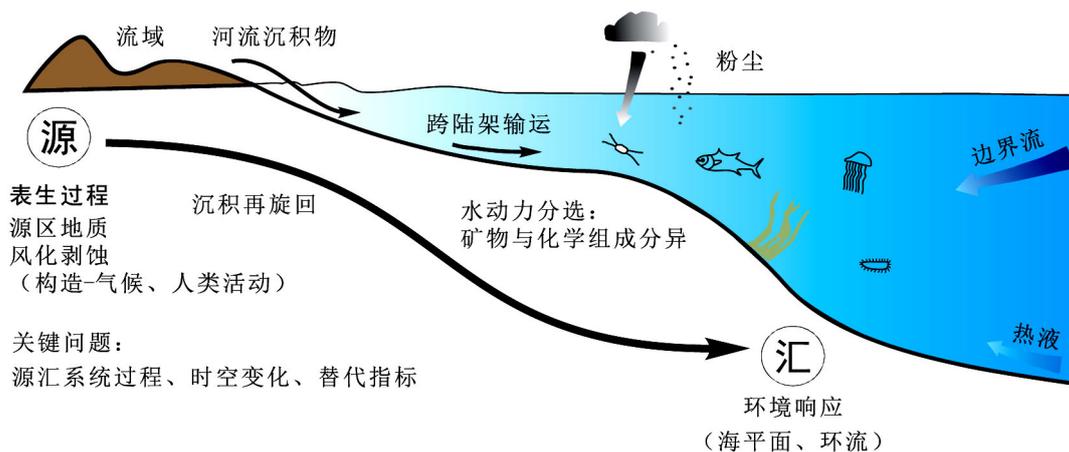


图 1 东亚大陆边缘沉积物从源到汇过程研究的特色与复杂性

Fig.1 Unique and complex source-to-sink sediment processes in the east Asian continental margin

素和同位素地球化学来重建气候环境演变记录,例如组成碎屑组分的化学组成追踪其在源区受到的化学风化程度,从而反演东亚夏季风在冰期/间冰期循环乃至早新生代以来的演变历史(Wei *et al.*, 2004, 2006)。这一研究方法目前已经被国内外学者广泛使用于海洋沉积等相关领域的研究中(Sun *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2015)。

总体来看,过去几十年,沉积地球化学方法被广泛运用于东亚边缘海的沉积过程与环境演变研究,取得众多研究成果,显著推进了西太平洋海洋地质与古环境研究进展。但目前的研究进展与国际前沿研究依然存在较大差距。东亚大陆边缘具有独特的地质、地理、气候和水文特征,受不同时空尺度的自然环境和人类活动多因素驱动,形成活跃的陆源物质从源到汇体系。目前以地球系统科学的视野来看,近些年东亚边缘海的源汇系统过程的研究还没有取得国际性的理论重要突破(Gao and Collins, 2014)。重要的原因可能是对东亚大陆边缘的地质背景特征和跨越不同时空尺度的构造-沉积演化过程认识还不够深入,也缺乏重大研究计划的支持和国际层面的跨学科合作。同时,对一些地球化学指标示踪源汇沉积过程和海洋古环境演变的理论基础、多解性和不确定性缺乏深入认识(图1)。目前迫切需要以海陆结合的地球系统科学角度,通过地球化学与其他多学科方法交叉的研究手段,从整体上研究东亚大陆边缘的源汇过程特征,揭示从流域到河口、陆架至开阔海的沉积物源汇系统过程和环境演变规律(图1)。这样有可能从理论基础到实际研究案例上都突破国际大陆边缘沉积研究(MARGINS S2S, RioMar, LDE, LOICZ等)的主要框架和思路,突出东亚大陆边缘沉积和海陆相

互作用的全球意义,推动东亚大陆边缘沉积学科的整体研究进展。

参考文献 (References):

Andree M, Oeschger H, Broecker W S, Beavan N, Mix A C, Bonani G, Hofmann H J, Morenzoni E, Nessi M, Suter M, Wolfli W. 1986. AMS radiocarbon dates on foraminifera from deep sea sediments. *Radiocarbon*, 28( 2A): 424-428

Bianchi T S, Allison M A. 2009. Large-river delta-front estuaries as natural "recorders" of global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106( 20): 8085-8092

Bouchez J, Lupker M, Gaillardet J, France-Lanord C, Maurice L. 2011. How important is it to integrate riverine suspended sediment chemical composition with depth? Clues from Amazon River depth-profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75( 22): 6955-6970

Broecker W S, Andree M, Klas A, Bonani G, Wolfli W, Oeschger H. 1988. New evidence from the South China Sea for an abrupt termination of the last glacial period. *Nature*, 333( 6169): 156-158

Chen H F, Chang Y P, Kao S J, Chen M T, Song S R, Kuo L W, Wen S Y, Yang T N, Lee T Q. 2011. Mineralogical and geochemical investigations of sediment-source region changes in the Okinawa Trough during the past 100 ka (IMAGES core MD012404). *Journal of Asian Earth Sciences*, 40( 6): 1238-1249

Chen H F, Yeh P Y, Song S R, Hsu S C, Yang T N, Wang Y, Chi Z Q, Lee T Q, Chen M T, Cheng C L, Zou J J, Chang Y P. 2013. The Ti/Al molar ratio as a new proxy for tracing sediment transportation processes and its application in aeolian events and sea level change in East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 31-38.

Chen Z Y, Chen Z L, Zhang W G. 1997. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with special reference to marine transgression. *Quaternary Research*, 47( 2): 181-191

Choi M S, Yi H I, Yang S Y, Lee C B, Cha H J. 2007. Identification of Pb sources in Yellow Sea sediments using stable Pb isotope ratios. *Marine Chemistry*, 107( 2): 255-274

Clift P D, Lee J II, Hildebrand P, Shimizu N, Layne G D, Blusztajn J,

- Blum J D , Garzanti E , Khan A A. 2002. Nd and Pb isotope variability in the Indus River System: Implications for sediment provenance and crustal heterogeneity in the Western Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters* , 200( 1-2) : 91-106
- Dou Y G , Yang S Y , Liu Z X , Clift P D , Shi X F , Yu H , Berne S. 2010. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: Constraints from rare earth element compositions. *Marine Geology* , 275( 1-4) : 212-220
- Dou Y G , Yang S Y , Liu Z X , Li J , Shi X F , Yu H , Berné S. 2012. Sr-Nd isotopic constraints on terrigenous sediment provenances and Kuroshio Current variability in the Okinawa Trough during the late Quaternary. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 356-366: 38-47
- Dou Y G , Yang S Y , Li C , Shi X F , Liu J H , Bi L. 2015. Deepwater redox changes in the southern Okinawa Trough since the last glacial maximum. *Progress in Oceanography* , 135: 77-90
- Gao S , Collins M B. 2014. Holocene sedimentary systems on continental shelves. *Marine Geology* , 352: 268-294
- Garzanti E , Andó S , France-Lanord C , Censi P , Vignola P , Galy V , Lupker M. 2011. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt ( Ganga-Brahmaputra , Bangladesh) . *Earth and Planetary Science Letters* , 302( 1-2) : 107-120
- Goldstein S L , O'Nions R K , Hamilton P J. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters* , 70( 2) : 221-236
- Gu J W , Chen J , Sun Q L , Wang Z H , Wei Z X , Chen Z Y. 2014. China's Yangtze delta: Geochemical fingerprints reflecting river connection to the sea. *Geomorphology* , 227: 166-173
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* , 55( 3-4) : 319-322
- Hu B Q , Li G G , Li J , Bi J Q , Zhao J T , Bu R Y. 2012a. Provenance and climate change inferred from Sr-Nd-Pb isotopes of late Quaternary sediments in the Huanghe( Yellow River) Delta , China. *Quaternary Research* , 78( 3) : 561-571
- Huang E Q , Tian J. 2012. Sea-level rises at Heinrich stadials of early Marine Isotope Stage 3: Evidence of terrigenous *n*-alkane input in the southern South China Sea. *Global and Planetary Change* , 94-95: 1-12.
- Huang W W , Zhang J. 1990. Effect of particle size on transition metal concentrations in the Changjiang( Yangtze River) and the Huanghe ( Yellow River) , China. *Science of the Total Environment* , 94( 3) : 187-207
- Huang W W , Zhang J , Zhou Z H. 1992. Particulate element inventory of the Huanghe ( Yellow River) : A large , high-turbidity river. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 56( 10) : 3669-3680
- Huh C A , Su C C. 1999. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from <sup>210</sup>Pb , <sup>137</sup>Cs and <sup>239,240</sup>Pu. *Marine Geology* , 160( 1-2) : 183-196
- Huh C A , Chen W F , Hsu F H , Su C C , Chiu J K , Lin S , Liu C S , Huang B J. 2011. Modern( <100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: Rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution. *Continental Shelf Research* , 31( 1) : 47-63
- Jia G D , Zhang J , Chen J F , Peng P A , Zhang C L. 2012. Archaeal tetraether lipids record subsurface water temperature in the South China Sea. *Organic Geochemistry* , 50: 68-77
- Jia J T , Zheng H B , Huang X T , Wu F Y , Yang S Y , Wang K , He M Z. 2010. Detrital zircon U-Pb ages of late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin* , 55( 15) : 1520-1528
- Kao S J , Milliman J D. 2008. Water and sediment discharge from small mountainous rivers , Taiwan: The roles of lithology , episodic events , and human activities. *The Journal of Geology* , 116( 5) : 431-448
- Kuehl S A , Nittrouer C A. 2011. Exploring the transfer of Earth surface materials from source to sink. *Eos, Transactions , American Geophysical Union* , 92( 22) : 188
- Li C , Yang S Y. 2010. Is chemical index of alteration( CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins?. *American Journal of Science* , 310( 2) : 111-127
- Li G X , Li P , Liu Y , Qiao L L , Ma Y Y , Xu J S , Yang Z G. 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum. *Earth-Science Reviews* , 139: 390-405
- Li T G , Xu Z K , Lim D , Chang F M , Wan S M , Jung H , Choi J. 2015. Sr-Nd isotopic constraints on detrital sediment provenance and paleo-environmental change in the northern Okinawa Trough during the late Quaternary. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 430: 74-84
- Li X H , Wei G J , Shao L , Liu Y , Liang X R , Jian Z M , Sun M , Wang P X. 2003. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: A response to Cenozoic tectonism in SE Asia. *Earth and Planetary Science Letters* , 211( 3-4) : 207-220
- Lim D I , Jung H S , Choi J Y. 2014. REE partitioning in riverine sediments around the Yellow Sea and its importance in shelf sediment provenance. *Marine Geology* , 357: 12-24
- Liu J , Saito Y , Kong X H , Wang H , Xiang L H , Wen C , Nakashima R. 2010. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary , East China Sea , during the last ~ 13 , 000 years , with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. *Quaternary Science Reviews* , 29( 17-18) : 2424-2438
- Liu J T , Kao S J , Huh C A , Hung C C. 2013. Gravity flows associated with flood events and carbon burial: Taiwan as instructional source area. *Annual Review in Marine Science* , 5: 47-68
- Liu Y , Liu W G , Peng Z C , Xiao Y K , Wei G J , Sun W D , He J F , Liu G J , Chou C L. 2009. Instability of seawater pH in the South China Sea during the mid-late Holocene: Evidence from boron isotopic composition of corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 73( 5) : 1264-1272
- Liu Z F , Colin C , Trentesaux A , Blamart D , Bassinot F , Siani G , Sicre M A. 2004. Erosional history of the eastern Tibetan Plateau since 190 kyr ago: Clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea. *Marine Geology* , 209( 1-4) : 1-18
- Luo C , Zheng H B , Tada R , Wu W H , Irino T , Yang S Y , Saito K. 2014. Tracing Sr isotopic composition in space and time across the Yangtze River basin. *Chemical Geology* , 388: 59-70
- Lupker M , France-Lanord C , Galy V , Lavé J , Gaillardet J , Gajurel A P , Guilmette C , Rahman M , Singh S K , Sinha R. 2012. Predominant floodplain over mountain weathering of Himalayan sediments ( Ganga basin) . *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 84: 410-432

- Martin J M, Meybeck M. 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7(3): 173-206
- McKee B A, Aller R C, Allison M A, Bianchi T S, Kineke G C. 2004. Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: Benthic boundary layer and seabed processes. *Continental Shelf Research*, 24(7-8): 899-926
- Meybeck M. 1976. Total mineral dissolved transport by world major rivers/transport en sels dissous des plus grands fleuves mondiaux. *Hydrological Sciences Bulletin*, 21(2): 265-284
- Meyers P A. 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27(5-6): 213-250
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715-717
- Parker A. 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107(6): 501-504
- Robinson L F, Siddall M. 2012. Palaeoceanography: Motivations and challenges for the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1980): 5540-5566
- Shao J Q, Yang S Y. 2012. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin?. *Chinese Science Bulletin*, 57(10): 1178-1187
- Shao J Q, Yang S Y, Li C. 2012. Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: Inferences from analysis of fluvial sediments. *Sedimentary Geology*, 265-266: 110-120
- Shao L, Li C A, Yuan S Y, Kang C G, Wang J T, Li T. 2011. Neodymium isotopic variations of the late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin: Implications for sediment source and evolution of the Yangtze River. *Journal of Asian Earth Science*, 45: 57-64
- Shi X F, Wu Y H, Zou J J, Liu Y G, Ge S L, Zhao M X, Liu J H, Zhu A M, Meng X W, Yao Z Q, Han Y. 2014. Multiproxy reconstruction for Kuroshio responses to northern hemispheric oceanic climate and the Asian Monsoon since Marine Isotope Stage 5.1 (~88 ka). *Climate of the Past*, 10(5): 1735-1750
- Song Y H, Choi M S. 2009. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea. *Chemical Geology*, 266(3-4): 328-342
- Sun Y B, Wu F, Clemens S C, Oppo D W. 2008. Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle. *Chemical Geology*, 257(3-4): 240-246
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications
- Tian J, Pak D K, Wang P X, Lea D, Cheng X R, Zhao Q H. 2006. Late Pliocene monsoon linkage in the tropical South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1-2): 72-81
- Wan S M, Toucanne S, Clift P D, Zhao D B, Bayon G, Yu Z J, Cai G Q, Yin X B, Révillon S, Wang D W, Li A C, Li T G. 2015. Human impact overwhelms long-term climate control of weathering and erosion in southwest China. *Geology*, 43(5). Doi: 10.1130/G36570.1
- Wang B, Lee X Q, Yuan H L, Zhou H, Cheng H G, Cheng J Z, Zhou Z H, Xing Y, Fang B, Zhang L K, Yang F. 2012. Distinct patterns of chemical weathering in the drainage basins of the Huanghe and Xijiang River, China: Evidence from chemical and Sr-isotopic compositions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 59: 219-230
- Wang J T, Li C A, Yong Y, Shao L. 2010. Detrital zircon geochronology and provenance of core sediments in Zhoula town, Jiangnan plain, China. *Journal of Earth Science*, 21(3): 257-271
- Wang P X, Clemens S, Beaufort L, Braconnot P, Ganssen G, Jian Z M, Kershaw P, Sarnthein M. 2005. Evolution and variability of the Asian monsoon system: State of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, 24(5-6): 595-629
- Wang Q L, Chetelat B, Zhao Z Q, Ding H, Li S L, Wang B L, Li J, Liu X L. 2015. Behavior of lithium isotopes in the Changjiang River system: Sources effects and response to weathering and erosion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 151: 117-132
- Wei G J, Liu Y, Li X H, Shao L, Fang D Y. 2004. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212(3-4): 331-342
- Wei G J, Li X H, Liu Y, Shao L, Liang X R. 2006. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea. *Paleoceanography*, 21(4): PA4214. Doi: 10.1029/2006PA001300
- Wei G J, Deng W F, Liu Y, Li X H. 2007. High-resolution sea surface temperature records derived from foraminiferal Mg/Ca ratios during the last 260 ka in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 250(1-4): 126-138
- Wei G J, Liu Y, Ma J L, Xie L H, Chen J F, Deng W F, Tang S. 2012. Nd, Sr isotopes and elemental geochemistry of surface sediments from the South China Sea: Implications for Provenance Tracing. *Marine Geology*, 319-322: 21-34
- Wei G J, Ma J L, Liu Y, Xie L H, Lu W J, Deng W F, Ren Z Y, Zeng T, Yang Y H. 2013. Seasonal changes in the radiogenic and stable strontium isotopic composition of Xijiang River water: Implications for chemical weathering. *Chemical Geology*, 343: 67-75
- Xiang R, Sun Y B, Li T G, Oppo D W, Chen M H, Zheng F. 2007. Palaeoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation: Evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243(3-4): 378-393
- Xu Z K, Li T G, Chang F Q, Wan S M, Choi J Y, Lim D I. 2014. Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 399: 236-245
- Yang S Y, Jung H S, Choi M S, Li C X. 2002. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(2): 407-419
- Yang S Y, Jung H S, Lim D I, Li C X. 2003. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Science Reviews*, 63(1-2): 93-120
- Yang S Y, Jung H S, Li C X. 2004. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: Geochemical evidence from river sediments. *Sedimentary Geology*, 164(1-2): 19-34
- Yang S Y, Li C X, Yokoyama K. 2006a. Elemental compositions and

- monazite age patterns of core sediments in the Changjiang delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3-4): 762-776
- Yang S Y, Li C X, Cai J G. 2006b. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: Implication for Late Cenozoic palaeoenvironmental changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4): 287-302
- Yang S Y, Jiang S Y, Ling H F, Xia X P, Sun M, Wang D J. 2007. Sr-Nd isotopic compositions of the Changjiang sediments: Implications for tracing sediment sources. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(10): 1556-1565
- Yang S Y, Wang Z B, Dou Y G, Shi X F. 2014. A review of last glacial sedimentation since the last glacial maximum on the continental shelf of eastern China. *Geological Society, London, Memoirs*, 41: 293-303
- Yang Z S, Milliman J D. 1983. Fine-grained sediments from the Changjiang and Huanghe River and sediment sources of the East China Sea. *Proceedings of the International Symposium on Sedimentation on Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 1: 72-82
- Zhang J, Huang W W, Martin J M. 1988. Trace metals distribution in Huanghe( Yellow River) estuarine sediments. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 26(5): 499-516
- Zhang J, Huang W W, Liu M G, Zhou Q. 1990. Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C8): 13277-13288
- Zhang J, Huang W W, Liu S M, Liu M G, Yu Q, Wang J H. 1992. Transport of particulate heavy metals towards the China Sea: A preliminary study and comparison. *Marine Chemistry*, 40(3-4): 161-178
- Zhao M X, Huang C Y, Wang C C, Wei G J. 2006. A millennial-scale  $U_{37}^{K}$  sea-surface temperature record from the South China Sea ( $8^{\circ}N$ ) over the last 150 kyr: Monsoon and sea-level influence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236(1-2): 39-55
- Zheng H B, Clift P D, Wang P, Tada R, Jia J T, He M Y, Jourdan F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(19): 7557-7561
- Zong Y Q, Zheng Z, Huang K Y, Sun Y Y, Wang N, Tang M, Huang G Q. 2013. Changes in sea level, water salinity and wetland habitat linked to the late agricultural development in the Pearl River delta plain of China. *Quaternary Science Reviews*, 70: 145-157
- 陈建芳. 2002. 古海洋研究中的地球化学新指标. *地球科学进展*, 17(3): 402-410
- 陈进兴, 吴世炎, 施纯坦. 1984. 长江口及邻近陆架沉积物中 $^{226}Ra$ 的分布. *海洋学报*, 6(4): 553-556
- 陈毓蔚, 赵一阳, 刘菊英, 邱健根. 1982. 东海沉积物中 $^{226}Ra$ 的分布特征及近岸区沉积速率的测定. *海洋与湖沼*, 13(4): 380-387
- 高抒. 2013. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程-产物关系研究进展评述. *沉积学报*, 31(5): 845-855
- 李凤业. 1988. 用 $^{210}Pb$ 法测定南海陆架浅海沉积速率. *海洋科学*, (3): 64-66
- 李铁刚, 曹奇原, 李安春, 秦蕴珊. 2003. 从源到汇: 大陆边缘的沉积作用. *地球科学进展*, 18(5): 713-721
- 李铁刚, 常凤鸣. 2009. 冲绳海槽古海洋学. 北京: 海洋出版社
- 刘韶, 吴良基, 秦佩玲. 1983. 铀系法在南海深海沉积物沉积速度研究中的应用. *热带海洋*, 2(3): 244-247
- 刘卫国, 彭子成, 肖应凯, 王兆荣, 聂宝符, 安芷生. 1999. 南海珊瑚礁同位素组成及其环境意义. *地球化学*, 28(6): 534-541
- 罗超, 郝洪波, 吴卫华, 王平, 陈宇亮, 魏晓椿. 2012. 河流悬浮物 Sr-Nd 同位素随深度的分异: 以长江大通站为例. *科学通报*, 57(21): 2022-2030
- 茅昌平. 2009. 长江流域沉积物(悬浮物)的地球化学和矿物学研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学
- 茅昌平, 陈骏, 袁旭音, 杨忠芳, 季峻峰. 2011. 长江下游悬浮物 Sr-Nd 同位素组成的季节性变化与物源示踪. *科学通报*, 56(31): 2591-2598
- 孟宪伟, 杜德文, 陈志华, 王湘芹. 2000. 长江、黄河流域泛滥平原细粒沉积物 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 空间变异的制约因素及其物源示踪意义. *地球化学*, 29(6): 562-569
- 任景玲. 2010. 长江流域和黄、东海铝的生物地球化学循环及其影响因素研究. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学
- 韦刚健, 刘颖, 李献华, 梁细荣, 邵磊. 2003. 南海沉积物中过剩铝问题的探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 22(1): 23-25
- 夏明, 张承蕙, 马志邦, 梁卓成, 周秀云. 1983. 铅-210年代学方法和珠江口、渤海锦州湾沉积速度的测定. *科学通报*, (5): 291-295
- 杨守业. 2006. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展. *地球科学进展*, 21(6): 98-105
- 杨守业, 韦刚健, 夏小平, 孙敏, 唐珉. 2007. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约. *第四纪研究*, 27(3): 339-346
- 杨守业, 王中波. 2011. 长江主要支流与干流沉积物的 REE 组成. *矿物岩石地球化学通报*, 30(1): 31-39
- 杨守业, 李超, 王中波, 王晓丹, 舒劲松. 2013. 现代长江沉积物地球化学组成的不均一性与物源示踪. *第四纪研究*, 33(4): 645-655
- 张经. 1994. 中国河口地球化学研究的若干进展. *海洋与湖沼*, 25(4): 438-445
- 张经. 1997. 中国主要河口的生物地球化学研究: 化学物质的迁移与环境. 北京: 海洋出版社
- 张经. 2011. 关于陆-海相互作用的若干问题. *科学通报*, 56(24): 1956-1966
- 赵一阳. 1980. 中国渤海沉积物中铀的地球化学. *地球化学*, (1): 101-105
- 赵一阳. 1983. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式. *地质科学*, (4): 307-314
- 赵一阳, 何丽娟, 张秀莲, 李凤业, 贾凤梅, 夏青. 1984. 冲绳海槽沉积物地球化学的基本特征. *海洋与湖沼*, 14(5): 371-379
- 赵一阳, 鄢明才. 1992. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较. *科学通报*, 37(13): 1202-1204
- 赵一阳, 鄢明才. 1994. 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版社

(本文责任编辑: 刘莹)

## 专栏作者简介



陈建芳，男，1968年生，国家海洋局第二海洋研究所研究员，博士生导师，现任国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室副主任。主要从事海洋化学与海洋生物地球化学研究。先后主持或参加了国家自然科学基金重点研究项目，国家科技支撑计划课题，国家重点基础研究发展计划（973计划）等多项国家级研究项目以及其他省部级科研项目。在海洋生物泵过程、极地海-气-冰交互作用以及中国近海海洋生态环境等方面有丰富的研究经验和学术成果。



任向文，男，1976年生，博士，国家海洋局第一海洋研究所副研究员。主要从事海底成矿作用、地球化学与资源评价研究。主持和参加国家自然科学基金项目、中国大洋协会项目多项，近年来主要研究富钴结壳的沉淀机理、富钴结壳元素的富集机制与控制因素、古海洋演化与海山构造演化对富钴结壳成矿的制约，以及富钴结壳资源的分布规律等。



孙卫东，男，1966年生，中国科学院广州地球化学研究所研究员，博士生导师，中科院百人计划、国家杰出青年基金获得者。现任中科院矿物学与成矿学重点实验室主任、国家大学仪器中心-广州质谱中心主任。（国际）经济地质学家学会 Fellow，曾任该学会负责亚洲事务的副主席（2010—2013）；（国际）地球化学学会戈尔德施密特奖评委（2012—2015）；矿物岩石地球化学学会同位素专业委员会主任委员；IODP 科学委员会评委；Solid Earth Sciences 主编，GCA、Acta Geochimica 及《地球化学》副主编。主要利用地球化学手段研究地质事件和成矿过程，重点从事板块俯冲工场、元素地球化学性质与成矿研究。共发表论文

200余篇，SCI 他引 2500 余次，H 因子 33，入选 ESI 高引用率排名。主持/完成基金委重大项目、创新群体项目、杰出青年项目、中科院创新工程重大项目、国家 973 二级项目等。2008 年获得安徽省科学技术一等奖（排名第三），2010 年获得国家自然科学基金二等奖（排名第四）。2013 年入选广东省“南粤百杰”。



鄢全树，男，1976 年生，博士，国家海洋局第一海洋研究所副研究员，国家基金委优秀青年基金获得者。主要从事弧后盆地、俯冲带及大洋板内背景等构造位置的海底岩石学研究，近年来主要开展边缘海盆和大洋板内火山作用的岩石学和地球化学研究。先后主持和参加国家自然科学基金、国家海洋局专项及中国大洋协会课题等多项，已发表论文 40 篇。



杨守业，男，1971 年生，同济大学海洋与地球科学学院教授，博士生导师，国家杰出青年基金获得者。现任海洋地质国家重点实验室副主任，中国矿物岩石地球化学学会海洋地球化学专业委员会副主任委员。从事河流与海洋沉积地球化学研究，近些年主要开展东亚大陆边缘流域风化、沉积物源判别、晚第四纪陆海相互作用和环境演化研究，已发表论文 130 篇。



曾志刚，男，1968 年生，中国科学院海洋研究所研究员，博士生导师，国家杰出青年基金获得者，国家“万人计划”入选者，国家 973 项目首席科学家。现任中国科学院海洋地质与环境重点实验室主任，中国矿物岩石地球化学学会副秘书长、海洋地球化学专业委员会副主任委员。主要从事海底热液活动研究，与合作者共同发表论文达 80 篇。