

doi:10.3799/dqkx.2010.026

# 珠江口沉积地球化学特征与古环境演化过程

王珊珊<sup>1</sup>, 曹志敏<sup>2</sup>, 兰东兆<sup>2,3</sup>, 郑志昌<sup>4</sup>

1. 浙江省水利河口研究院, 浙江杭州 310020
2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100
3. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 590100
4. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

**摘要:** 利用 ICP-AES 法和重铬酸钾氧化还原容量法测定珠江口沉积物中的微量元素和总有机质含量, 结合沉积物粒度参数, 采用因子分析方法识别控制沉积物化学组成和元素行为的 3 个因子: 流域侵蚀因子、表生沉积作用控制因子和海洋环境控制因子。研究发现, 3 个控制因子的得分曲线基本反映了该地区气候干湿、冷暖的强弱变化, 可作为恢复古气候环境的代用曲线; 在本岩心所代表的沉积年代中共有 5 次较为明显的环境变化, 为深入研究珠江三角洲区域古环境、古气候演化提供了重要的参考依据。

**关键词:** 珠江口; 因子分析; 地球化学; 古环境。

**中图分类号:** P628; P59

**文章编号:** 1000-2383(2010)02-0261-07

**收稿日期:** 2009-02-15

## Geochemical Characteristics of Sediment of Pearl River Estuary and Its Paleoenvironmental Evolution

WANG Shan-shan<sup>1</sup>, CAO Zhi-min<sup>2</sup>, LAN Dong-zhao<sup>2,3</sup>, ZHENG Zhi-chang<sup>4</sup>

1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China
2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
3. Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 590100, China
4. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, China

**Abstract:** The trace metal elements and average grain size were determined for sediments of Pearl River Estuary and three important factors were identified using factor analysis method, which controls chemical compositions of sediments, such as catchment erosion, biogenic deposit, marine dominated condition. Moreover, further research indicates that the factor score curves of the three factors can be used to represent the changes of humidity, temperature and the hydrodynamics, respectively, which provides a good effective approach to paleoenvironmental reconstruction. On the basis of the study, the evolution history of the regional climate and environment is evaluated and it is revealed that the basic climate succession in the region of Pearl River Delta is the cool-humid, cool-dry, warm-dry, warm-dry, warm-humid and warm-dry successively.

**Key words:** Pearl River Estuary; factor analysis; geochemistry; paleoenvironment.

近岸河口沉积物地球化学组成受多种环境因素的综合影响(Nechaev and Isphording, 1993)。不同元素具有不同的地球化学行为, 因而它们所反映的环境信息往往具有多解性。如何正确、综合地辨识和提取这些指标所记录的古环境和古气候信息是一个亟待解决的问题(罗超等, 2008)。现代珠江三角洲位

于东亚亚热带区, 气温较高, 雨量充沛, 作为东南季风活动的前沿, 珠江三角洲地区的古气候研究对于丰富和完善亚洲古季风研究具有重要的理论与现实意义(于革, 1997; 施雅风和于革, 2003)。

因子分析在湖泊沉积物中讨论气候环境变化、在古海洋学中探讨水团演化以及探讨成矿成藏主控

因素等有一定的成果(李雪铭, 1997; 陈敬安等, 1998, 1999; 曾溅辉等, 2002; 黄宝琦等, 2005), 但是在河口近岸环境中讨论气候变化研究较少。本文选择位于珠江三角洲前缘浅海的沉积岩心, 采用因子分析方法研究晚全新世的沉积化学纪录与气候变化, 识别控制沉积物化学组成的主要因子, 力图综合提取与识别多种地球化学指标所记录的气候与环境信息, 恢复珠江三角洲区域气候与环境演化历史。

## 1 研究区地理概况

珠江三角洲位于北纬  $21^{\circ}50' \sim 23^{\circ}25'$ 、东经  $112^{\circ}33' \sim 114^{\circ}10'$ , 是华南南部晚更新世以来形成的一个亚热带河潮混控多源复合的湾内充填三角洲(李平日等, 1991; 杨雪舞和王文介, 1994), 分别以西江边高地、北江边清远和东江边惠州为顶点, 面积为  $189\,000\text{ km}^2$ , 其中陆区面积  $10\,000\text{ km}^2$ , 水下面积约  $8\,000\text{ km}^2$ 。珠江三角洲基本地貌轮廓表现为以北向西向平行岭谷为主的棋盘状格局, 北、东、西为断垄, 中部为断陷, 故三角洲平原只能在断陷盆地内发育, 环境演变范围受到构造格局所围陷(李平日等, 1991; 罗传秀等, 2005)。全新世以来的升降速率多数地区不足  $\pm 1\text{ mm/a}$ , 构造环境相对稳定(罗传秀等, 2005)。

由于北回归线在珠江三角洲中北部通过, 因此珠江三角洲在气候变化方面呈现许多低纬度地带的特殊性, 具有低纬带独有的温热气候, 气温变差小, 基本无冰雪。同时, 珠江三角洲位于东亚季风区, 这个经度区域性特点使它有别于同纬度的非洲、中东、大洋洲和南亚的干旱地带气候, 而成为湿润多雨的东亚季风气候。这种特点不仅对珠江三角洲地区环境起重要作用, 而且对上游河道如西江、北江、东江等流域自然地理条件起到不可低估的作用, 使各上游江河径流丰沛、植被覆盖度高, 因而珠江三角洲水文特征相对长江、黄河而言水丰沙少, 沉积物颗粒较细(杨雪舞和王文介, 1994; 于革, 1997)。

## 2 样品和方法

ZXZ2 钻孔位于鸡啼门外、高栏岛右侧  $10\text{ m}$  水深坡折处( $21^{\circ}55.27'N, 113^{\circ}20.73'E$ )(图 1), 孔口高程  $-10.50\text{ m}$ (黄海基面), 岩心长度  $3.5\text{ m}$ 。由于研究区受到岛屿屏蔽, 同时珠江口外近岸流西向输沙

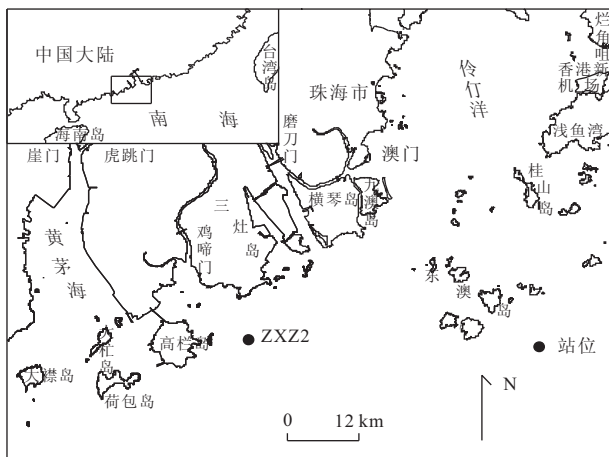


图 1 研究区环境和采样站位图

Fig. 1 Setting and sampling station of core ZXZ2

和近岸岛屿波浪输沙或掀沙共同作用, 使得研究区成为潮流、波浪的低能区, 从而促进粘土级泥沙迅速落淤, 即此处是低能环境下的粉沙质粘土沉积区(杨雪舞和王文介, 1994)。

我们把钻孔岩心按  $20\text{ cm}$  间隔分样, 且样品分成 3 份, 分别进行微量金属含量、总有机质含量和粒度分析。

微量金属元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-AES4300DV(SYC002)分析测定, 主要依据国土资源部《1:20 万区域化探样品分析方法及质量管理》(DZG20.03-8)方法, 利用标准物质(GBW-07313)对本方法进行质量控制, 所有微量元素的回收率在  $95\% \sim 110\%$  之间。

总有机质采用重铬酸钾氧化还原容量法, 依据《海洋监测规范》(GB/T 17378.5-1998)进行。

粒度分析采用筛吸法和沉析法, 依据《海洋调查规范海洋地质地球物理调查》(GB/T 13909-92)进行; 粒度单位采用尤登—温德华氏等比制  $\phi$  值粒级标准, 并采用福克和沃德粒度公式计算粒度参数。

化学分析和粒度分析在国土资源部广州地质调查局实验测试所检测完成。

## 3 结果与讨论

沉积岩心中各化学组分和平均粒径的剖面垂直变化系列见图 2。

由图 2 可知, 受表生作用影响弱, 富集在碎屑矿物中的惰性组分 Co、Cu、Zn、Ni 和 Cr 以及生源元素 Sr 含量呈现明显的自下向上波动增大的趋势, 同时

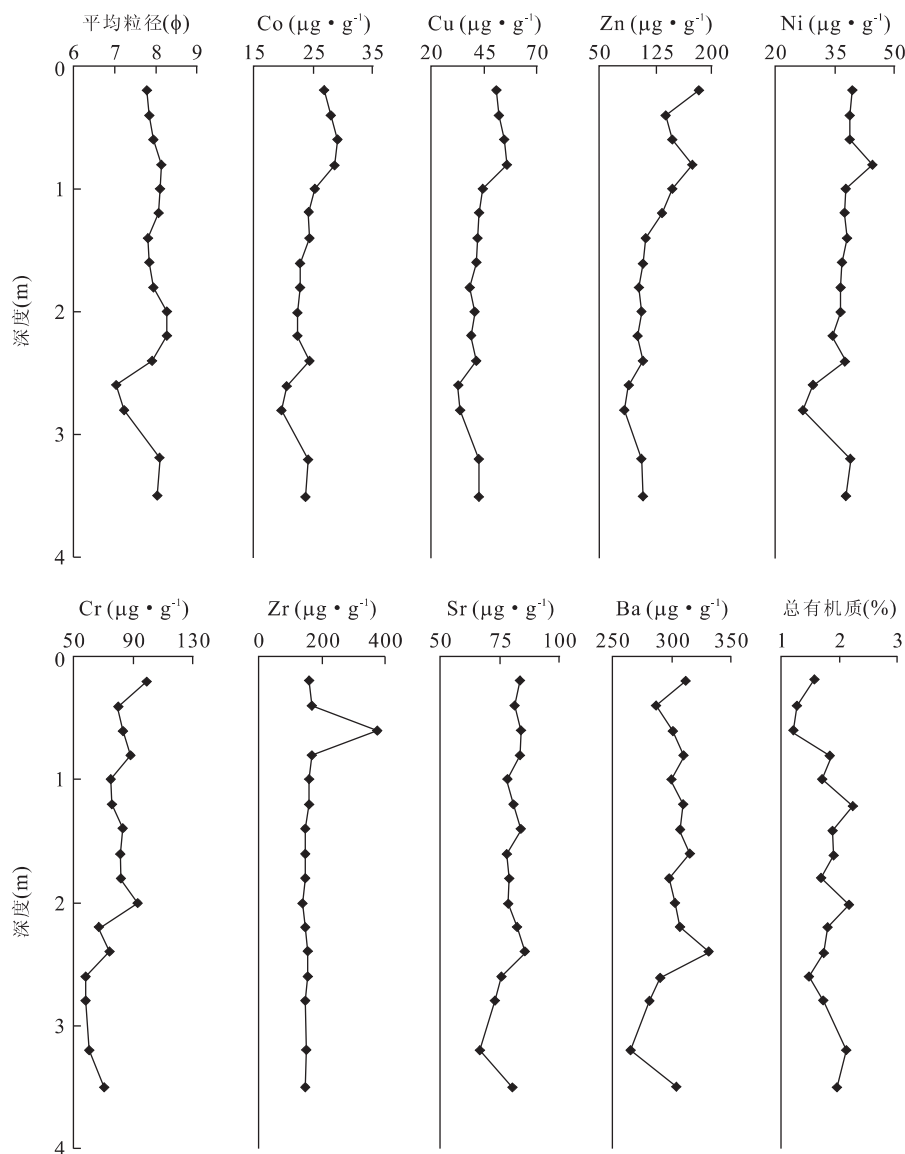


图 2 沉积柱地球化学和粒度参数指标垂直剖面图

Fig. 2 Vertical profiles of chemical elements and mean grain size in the sediments of core ZXZ2

惰性元素 Zr 的含量除了在近表层出现含量的极大值之外,总体波动不大;活性元素 Ba 和总有机质的含量则与其他元素表现出相反的变化趋势,即含量从下向上波动减少。元素间这种相似性与各异性记录了沉积环境的变化,为研究环境变化奠定了物质基础,同时也为此项研究提出了挑战。如何去伪存真,去粗取精获得更有效的信息则是研究环境变化问题的关键。

通常,源岩(流域的岩石组成)、构造及气候影响的化学风化与物理风化、水动力作用、沉积盆地地形、沉积环境、沉积介质的物理化学性质等是控制沉积物组成的因素(Nechaev and Isphording, 1993)。在构造环境相对较为稳定的珠江河口及三角洲前缘

地区,沉积物剖面中化学元素组成和粒度参数的变化往往反映了地质历史时期全球和区域气候控制下的海平面、物源区与沉积区距离和水动力条件的变化(赵一阳和鄯明才,1994;蒋富清等,2002)。多个化学元素和粒度参数对于气候环境的解释会由于各参数本身物理化学性质的各异性而错综复杂,因此可以采用因子分析方法提取隐藏在多个参数背后的主要影响因素。

因子分析的基本目的是用少数几个变量去描述多个变量间的协方差关系,其思路是将观测变量分类,将相关性较高及联系比较紧密的变量分在同一类中,每一类的变量实际上代表了一个本质因子,从而可将原观测变量表示为新因子的线性组合(张华

表 1 因子分析结果  
Table 1 Results of factor analysis

| 公因子   | 变量及公因子负载                                                   | 方差贡献(%) |
|-------|------------------------------------------------------------|---------|
| $F_1$ | Co 0.873 Cu 0.906 Ni 0.925<br>Zn 0.807 Cr 0.628 平均粒径 0.710 | 42.06   |
| $F_2$ | Sr 0.885 Ba 0.949                                          | 21.95   |
| $F_3$ | Zr 0.748 有机质 -0.937                                        | 21.58   |

良,1994). 利用珠江三角洲 ZXZ2 沉积柱剖面 16 个样品分析取得的 160 个化学和粒度原始数据,我们对数据进行标准化之后,利用统计软件 SPSS13.0,采用 R 因子分析中的主成分分析方法,设置公因子最小方差贡献值(即最小特征值)为 1,经方差极大正交旋转后,选取公因子负载绝对值大于 0.60 的变量.据此方法提取了 3 个最重要的公因子  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  (表 1).

因子分析的计算结果(因子解)只能看作是一个中间结果,还需要我们自己做进一步的分析和判断.事实上,它是一个客观计算同主观思维相结合的过程.

3.1  $F_1$  因子

$F_1$  因子的方差贡献占总方差贡献的 42.06%,远高于其他因子,因而该因子对本区域元素的组成具有决定性的影响.此因子主要包括一组在表生环境下性质稳定、赋存在陆源碎屑矿物中的化学元素,如 Cu、Ni、Co、Cr 和 Zn 以及平均粒径. Cu、Zn 作为亲硫元素有比较一致的化学行为.陆源碎屑元素具有粒度控制性质,含量的变化与沉积粒径之间有一定的相关性(赵一阳和鄢明才,1994).由于本沉积岩心位于 10 m 水深处,从地貌角度属于河口三角洲地区,而河口三角洲地区沉积物的重要来源是上游河流对流域冲刷侵蚀带来的陆源输入物质.元素含量的多少间接反映了陆源物质输入的多少,因此  $F_1$  可以代表流域侵蚀强弱的大小,并称之为流域侵蚀因子.由于流域侵蚀作用的强弱与流域地表径流的发育程度密切相关,而流域地表径流的发育程度很大程度上取决于本气候区降雨量的多寡,即决定于区域气候的干湿状况,因此  $F_1$  在一定程度上反映了气候干湿变化对沉积物化学组成的影响,它的因子得分曲线可以近似反映区域气候干湿变化历史.

3.2  $F_2$  因子

$F_2$  因子的方差贡献占总方差贡献的 21.95%,该因子是 Sr 和 Ba 的组合,且 Sr、Ba 两元素的因子负载很高. Sr、Ba 同为碱土金属元素,在表生作用过

程中, Sr、Ba 均可以形成重碳酸盐、氯化物和硫酸盐而进入水溶液;但另一方面,由于  $Ba^{2+}$  半径大, Ba 的硫酸盐溶解度很低,因而钡不仅在河口混合作用过程中以  $BaSO_4$  形式首先沉淀,而且往往为近海水解产物所吸附(刘英俊,1984). Sr、Ba 是与生物成因有关的元素. Sr 和主要以生物碎屑存在的 Ca 具有相似的晶体化学特征,因而  $Sr^{2+}$  容易进入到晶体晶格中取代  $Ca^{2+}$  的位置,也成为生物碎屑沉积物中的一类主要的元素.  $F_2$  因子代表生物作用下的表生沉积作用,因此  $F_2$  因子得分曲线可以近似作为这个地区表生沉积作用强弱曲线,间接反映了珠江三角洲地区气候冷暖变化的历史.

3.3  $F_3$  因子

$F_3$  因子的方差贡献占总方差贡献的 21.58%,包括了 Zr 和有机质两个变量. Zr 元素具有明显的正载荷,而有机质则具有很强的负载荷. Zr 主要以锆石的形式存在,是在化学风化中非常稳定的一种元素,主要赋存在重矿物中,在化学风化过程中不易淋失,常形成砂矿;在沉积物中 Zr 相对富集于粗颗粒物质中(马英军和刘丛强,1999; Dypvik and Harris, 2001; 孟宪伟等,2001). 因此沉积物中元素 Zr 的富集反映了较强的动力条件. 沉积物中有机质的来源分内源输入和外源输入两种. 内源有机质主要来自水体生产力本身产生的动植物残体、浮游生物及微生物等的沉积;外源输入主要是通过外界水源补给过程中携带进来的颗粒态和溶解态的有机质(朱广伟和陈英旭,2001). 沉积物中有机质存在多种赋存形式,较粗的有机质如植物碎屑主要富集在砂质沉积物中;而一些高度聚合的、无定型状态的腐殖质,也是沉积物中有机质的主要赋存形式,则主要富集在泥炭层以及细粒级的粘土中(朱广伟和陈英旭,2001). 根据本钻孔的位置以及前人的研究,该区重矿物主要来源于陆源碎屑物质,而有机质既可以来自海洋自生沉积,也可以来自随陆源物质下泄的生物碎屑. 由于 Zr 元素含量对  $F_3$  因子具有明显的正载荷,同时有机质对  $F_3$  因子具有明显的负载荷,因此可以将  $F_3$  因子看作是指示水动力条件变化的海洋环境影响因子,其大小反映了海洋水动力因素对该区沉积环境的影响强弱.

3.4 珠江口区域气候与环境演化过程

综上所述,珠江口岩心沉积物中这 9 种化学元素含量和平均粒径的变化主要受到流域侵蚀因子( $F_1$ )、表生沉积作用因子( $F_2$ )和海洋环境控制作用

表 2 沉积物因子得分  
Table 2 Factor scores of sediments of core ZXZ2

| 编号 | 深度(m)   | $F_1$ 因子 | $F_2$ 因子 | $F_3$ 因子 |
|----|---------|----------|----------|----------|
| 1  | 0.0~0.2 | 0.814    | 1.005    | 0.561    |
| 2  | 0.2~0.4 | 0.714    | -0.473   | 1.197    |
| 3  | 0.4~0.6 | 0.995    | -0.137   | 2.616    |
| 4  | 0.6~0.8 | 1.720    | 0.351    | -0.090   |
| 5  | 0.8~1.0 | 0.482    | -0.245   | -0.046   |
| 6  | 1.0~1.2 | 0.252    | 0.272    | -0.962   |
| 7  | 1.2~1.4 | -0.145   | 0.720    | -0.318   |
| 8  | 1.4~1.6 | -0.356   | 0.495    | -0.552   |
| 9  | 1.6~1.8 | -0.380   | 0.082    | -0.242   |
| 10 | 1.8~2.0 | 0.134    | 0.241    | -1.359   |
| 11 | 2.0~2.2 | -0.488   | 0.418    | -0.566   |
| 12 | 2.2~2.4 | -0.523   | 1.597    | -0.155   |
| 13 | 2.4~2.6 | -2.109   | -0.342   | 1.076    |
| 14 | 2.6~2.8 | -1.899   | -1.134   | 0.486    |
| 15 | 3.0~3.2 | 0.839    | -2.920   | -1.008   |
| 16 | 3.3~3.5 | -0.052   | 0.070    | -0.639   |

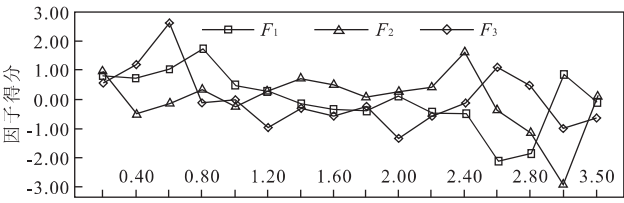


图 3 珠江口 ZXZ2 孔沉积物因子得分曲线图  
Fig. 3 Curves of factor scores of sediments of core ZXZ2

因子( $F_3$ )三者的共同影响.虽然每个沉积样品的化学组成都受到这 3 个因子的影响,但是每个样品也必定会受其中某个因子所控制.该因子在该样品上有最高的因子载荷,对该样品的化学组成起着最为重要的作用,称为主控因子.因此,某一样品的主控因子可反映与该样品相对应地影响沉积物化学组成的主要过程.珠江口 ZXZ2 岩心沉积物各样品的因子得分和因子得分曲线见表 2 和图 3.

350~300 cm 样段的流域侵蚀因子  $F_1$  得分最高,表生沉积作用控制因子  $F_2$  得分最低,反映了这个时期流域侵蚀是影响该地区沉积物组成的最主要因素.在这个时期,降水丰富,河流水量较大,水动力作用很强,强烈侵蚀沿岸基岩,造成大量陆源沉积物随河水汇入河口地区,间接反映了这个时期珠江三角洲地区的气候属于湿润多雨期,丰富的降雨促进了流域侵蚀的进行.

300~250 cm 样段的海洋环境控制因子  $F_3$  得分最高,流域侵蚀因子  $F_1$  得分最低,反映了此时期海洋动力作用相对于河流径流而言对沉积物化学组

成作用更大,表明此时期本区可能处于干燥少雨期.

250~120 cm 样段的生物作用下的表生沉积作用控制因子  $F_2$  得分最高,海洋环境控制因子  $F_3$  得分最低,反映此期气候较暖,生物生产力较高,生物作用较为强烈,生物活动大大影响了沉积物的元素组成.

120~70 cm 样段的流域侵蚀因子  $F_1$  得分最高,海洋环境控制因子  $F_3$  得分最低,反映了这个时期基岩风化作用较强,河流侵蚀作用较为明显,动力作用较为单一.此时径流作用占主导作用,海洋动力作用较弱,珠江三角洲可能处于海退陆进,且气候相对湿润的时期.

70~0 cm 样段的海洋环境控制因子  $F_3$  得分最高,表生沉积作用因子  $F_2$  得分最低,表明这个时期本区可能处于海相环境,表生沉积作用较弱,珠江三角洲地区气候较为寒凉.

因子分析的结果表明,一定来源的物质往往与一定的元素组合相对应.反过来,如果某一族元素在垂向上协同变化,那么,这种变化往往代表某种物质来源的变化,物质来源的变化直接与某种古环境的变化相关,这为我们研究沉积物化学变化对古环境和古气候的响应提供了理论上的依据.

4 结论

(1)珠江口沉积物化学组成主要受流域侵蚀因子、生物作用的表生沉积因子和海洋环境控制因子的影响.其中,流域侵蚀因子对沉积化学组成起着决定性作用,并具有气候干湿变化指示意义;生物作用的表生沉积因子可作为气候冷暖变化的良好指标;海洋环境控制因子则反映了海洋环境对沉积组成的影响,对海进海退变化有一定的指示意义.

(2)3 个主控因子揭示了在本沉积阶段,珠江三角洲地区经历了 5 次环境气候的波动,分别是凉湿期、干燥少雨但气候有所回暖期、暖干期、暖湿期和暖干期.

(3)珠江三角洲区域的气候冷暖干湿变化与全球气候冷暖变化密切相关,作为低纬度地区东南季风的前沿,加强对珠江地区气候变化的研究,不仅可以丰富我国区域气候变化的研究内容,而且对于完善亚洲古季风研究具有重要作用.

References  
Chen, J. A., Wan, G. J., Chen, Z. L., et al., 1999, Chemical

- elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution, *Geochimica*, 28(6): 562—570 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. A., Wan, G. J., Huang, R. G., 1998. Geochemical phases and pollution history of heavy metals in sediments of Lake Erhai. *Geology Geochemistry*, 26(2): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Dypvik, H., Harris, N. B., 2001. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr + Rb)/Sr ratios. *Chemical Geology*, 181(1—4): 131—146.
- Huang, B. Q., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2005. Variations in deep-water masses from the northern South China Sea since the Late Pliocene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 529—533 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, F. Q., Li, A. C., Li, T. G., 2002. Geochemical characteristics for core sediments of the southern Okinawa trough and their paleoenvironment implication. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(3): 11—17 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. R., Qiao, P. N., Zheng, H. H., et al., 1991. Envolution of Zhujiang Delta in the past 10 000 years. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Li, X. M., 1997. Sedimentary characteristics of the Dalianpao sediment in southern Liaoning and its paleoenvironment changes. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(1): 80—84 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., 1984. Element geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Luo, C. X., Pan, A. D., Shi, R. Q., 2005. The environmentary significance of granularity of the Quaternary sediments in Jiangcun ZK2 core of the Pearl River Delta. *Journal of Stratigraphy*, 29(Suppl.): 631—634 (in Chinese with English abstract).
- Luo, C., Peng, Z. C., Liu, W. G., et al., 2008. Evidence from the lacustrine sediments of Lop-Nur Lake, North west China for the Younger Dryas event. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 190—196 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. J., Liu, C. Q., 1999. Trace element geochemistry in chemical weathering. *Chinese Science Bulletin*, 44(22): 2433—2437 (in Chinese).
- Meng, X. W., Du, D. W., Cheng, Z. B., 2001. Trace elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of foraminifera shell of the Okinawa Trough. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(2): 62—68 (in Chinese with English abstract).
- Nechaev, V. P., Isphording, W. C., 1993. Heavy-mineral assemblages of continental margins as indicators of plate-tectonic environments. *Journal of Sedimentary Research*, 63(6): 1110—1117.
- Shi, Y. F., Yu, G., 2003. Warm-humid climate and transgressions during 40—30 ka BP and their potential mechanisms. *Quaternary Sciences*, 23(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. J., Li, A. C., Wan, S. M., et al., 2009. Terrigenous mineral constrains on the grain-size distribution and geochemical composition of sediments in the inner shelf of the East China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(4): 614—622 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. W., Wang, W. J., 1994. A statistical study on hydrodynamic sedimentation and sand movement Huang-maohai estuary bay. *The Ocean Engineering*, 12(4): 42—51 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G., 1997. 1997 international paleoclimate summer meeting hot points: mid-Holocene Epoch and last ice age of China. *Chinese Science Bulletin*, 42(17): 1903—1904 (in Chinese).
- Zeng, J. H., Zhang, S. W., Qiu, N. S., et al., 2002. Degree of oil-gas charged in lens-shaped sand body in Jiyang depression and its main controlling factors. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 729—732 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. L., 1994. Math geology. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, Y. Y., Yan, M. C., 1994. Geochemistry of Sediments of the China shelf sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, G. W., Chen, Y. X., 2001. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments. *Journal of Lake Science*, 13(3): 272—279 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等, 1999. 洱海沉积物化学元素与古气候演化. *地球化学*, 28(6): 562—570.
- 陈敬安, 万国江, 黄荣贵, 1998. 洱海沉积物重金属地球化学相及污染历史研究. *地质地球化学*, 26(2): 1—8.
- 黄宝琦, 翦知民, 赵泉鸿, 等, 2005. 晚上新世以来南海北部深部水团演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 529—533.
- 蒋富清, 李安春, 李铁刚, 2002. 冲绳海槽南部柱状沉积物地球化学特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 22(3): 11—17.
- 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 等, 1991. 珠江三角洲一万年来环境演变. 北京: 海洋出版社.



- 李雪铭,1997. 辽南大莲泡沉积物的沉积特征及古环境变化. 沉积学报,15(1):80—84.
- 刘英俊,1984. 元素地球化学. 北京:科学出版社.
- 罗传秀,潘安定,施汝权,2005. 珠江三角洲江村 ZK2 钻孔沉积物粒度的环境意义. 地层学杂志,29(增刊):631—634.
- 罗超,彭子成,刘卫国,等,2008. 新仙女木事件在罗布泊湖相沉积物中的记录. 地球科学——中国地质大学学报,33(2):190—196.
- 马英军,刘丛强,1999. 化学风化作用中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例. 科学通报,44(22):2433—2437.
- 孟宪伟,杜德文,程振波,2001. 冲绳海槽有孔虫壳体的微量元素 Sr、Nd 同位素地球化学. 海洋学报,23(2):62—68.
- 施雅风,于革,2003. 40~30 ka BP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨. 第四纪研究,23(1):1—11.
- 徐方建,李安春,万世明,等,2009. 东海内陆架陆源物质矿物组成对粒度和地球化学成分的制约. 地球科学——中国地质大学学报,34(4):614—622.
- 杨雪舞,王文介,1994. 珠江口黄茅海河口湾水动力沉积和泥沙运动的统计研究. 海洋工程,12(4):42—51.
- 于革,1997. 1997 年夏国际古气候会议的热点之一:中国的中全新世和末次盛冰期. 科学通报,42(17):1903—1904.
- 曾溅辉,张善文,邱楠生,等,2002. 济阳坳陷砂岩透镜体油气藏充满度大小及其主控因素. 地球科学——中国地质大学学报,27(6):729—732.
- 张华良,1994. 数学地质. 北京:冶金工业出版社.
- 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.
- 朱广伟,陈英旭,2001. 沉积物中有机质的环境行为研究进展. 湖泊科学,13(3):272—279.