

滇池近代沉积物的元素地球化学特征及其环境意义

薛传东, 刘 星, 亓春英, 魏海霞, 宋雪丽, 刘勇强, 郝百武

(昆明理工大学 地球科学系, 云南 昆明 650093)

摘 要: 在滇池水域采集了 10 个近代沉积物芯柱, 系统测定了 2 个芯柱的常量元素、微量元素、稀土元素含量和 8 个芯柱的总磷 (TP) 及磁化率。研究表明, 元素垂向分布上多存在分段富集的特征: 自下而上, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 、Cu、Co、Ni、Pb、Zn、Cd、Sr、U、Zr、TP 含量逐渐增加; P_2O_5 和 CaO 含量逐渐升高, 在表层沉积物中 (12~0 cm) 达最高; MgO、 Na_2O 、MnO、Cr、V、Rb、Sc、Th、Cs、Ba 含量总体较稳定, 但在上部有降低趋势; 稀土元素总量略微降低, 各稀土元素含量也表现出差异变化趋势; 磁化率也缓慢增加, 反映了不同历史时期物源输入的变化。在此基础上, 结合前人对滇池近代沉积物的 ^{137}Cs 定年结果, 确定了滇池约 150 年以来的沉积速率, 其污染历史主要开始于 20 世纪 60 年代初期, 而 70 年代末期以来的 30 多年是 Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cr 等重金属污染的主要时期, 还发现 20 世纪 20 年代末至 30 年代末还存在一次沉积环境的改变事件。滇池近代沉积环境的演化与昆明市的工业化、城市化和经济发展历史相吻合, 人为活动日趋加剧应是导致滇池近代沉积物污染的主导因素。

关键词: 近代沉积物, 元素地球化学, 垂向分布, 环境意义, 滇池

中图分类号: X524, P595, P931

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)06-0582-09

Element geochemical characteristics of modern sediments in the Dianchi Lake, Kunming, and their environmental significance

XUE Chuan-dong, LIU Xing, QI Chun-ying, WEI Hai-xia, SONG Xue-li, LIU Yong-qiang and HAO Bai-wu
(Department of Earth Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Through sampling and measuring samples of ten modern sedimentary column cores (from 0 to 38 cm) in different sections of the Dianchi Lake, the authors determined the elements, the total phosphorus (TP) and the magnetic susceptibility values (χ) by different methods. On such a basis, the vertical distribution of the elements, TP and χ in the lake sediments were studied, with a discussion on their environmental significance. It is indicated that the elements are increasingly concentrated and enriched with the depth. From the bottom to the surface of each sedimentary column core, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , Cu, Co, Ni, Pb, Zn, Cd, Sr, U, Zr and TP increase slowly, P_2O_5 and CaO increase similarly and reach the maximum at 12~0 cm, MgO, Na_2O , MnO, Cr, V, Rb, Sc, Th, Cs and Ba vary steadily and decrease in the top sediments, and the rare elements decrease slowly. These changes show different tendencies, and χ values increase slowly too. These changes reflect the differences of material sources in different periods. Statistical analysis shows that the migration and enrichment of the elements were disturbed strongly by human activities. According to the previous ^{137}Cs dating results, the sedimentary accumulation rates of the Dianchi Lake in the past 150 years was estimated. It is found that the sedimentary pollution began at the early 1960s, and the pollution of Cu, Ni, Pb, Zn, Cr and some other heavy metals occurred considerably during the period of more than 30 years after the late 1960s. Meanwhile, some sedimentary environmental change events from the late 1920s to the late 1930s were gained. It is demonstrated that the environmental pollution of the sediments in the Dianchi Lake was caused mainly by industrialization, municipal construction, and social and economic development. The results obtained provide a new means for understanding the environmental evolution and the pollution process of the Dianchi Lake.

收稿日期: 2007-08-31; 修订日期: 2007-10-14

基金项目: 教育部重点科技资助项目“滇池现代沉积物-水界面氮磷迁移转化的定量研究”(2005146)

作者简介: 薛传东 (1971-), 男, 汉族, 博士, 副教授, 主要从事资源环境与地质的教学与研究, E-mail: cdxue001@yahoo.com.cn

Key words: modern sediments; element geochemical characteristics; vertical distribution; environmental significance; Dianchi Lake

湖泊近代沉积物是化学元素的重要蓄积库和湖泊环境演化的存储器。湖泊沉积物沉积连续而稳定,信息量丰富,分辨率高,能翔实地记录沉积历史时期的气候波动与环境变迁过程,反映自然和人类活动对其产生的影响。利用高分辨率沉积柱研究垂向上的元素分带和迁移转化机理,易于找出元素间的相关性,进而揭示历史污染事件、恢复过去环境的演化历史并预测未来,已成为重建湖泊沉积环境演变的一个重要领域(Yu Lizhong *et al.*, 1990; Horowitz, 1991; Cheng Zhenlou *et al.*, 1992; Wan Guojiang *et al.*, 1996; 鲁安怀, 1999; 冯英军等, 1999; Yang Yongliang *et al.*, 2001; 翁焕新等, 2003; 袁旭音等, 2004; 姚志刚等, 2006)。国内已在中国东部长江流域以北区域和青藏高原开展了相关的研究工作,并取得了较多的进展(Cheng Zhenlou *et al.*, 1992; Wan Guojiang *et al.*, 1996; 冯英军等, 1999; 王苏民等, 1999; 张振克等, 1999, 2000, 2001; 王国平等, 2001; 陆敏等, 2003; 杨丽原等, 2003; 刘恩峰等, 2004; 匡耀求等, 2004; 朱广伟等, 2005)。

滇池位于昆明市城区的南侧,是一个典型的城郊下游湖泊(图 1)。人类活动对其沉积和环境演变产生了较大的影响。20 世纪中期以来,尤其是 80 年代末期以来,伴随流域社会经济、城镇化进程的加速发展,向湖内排放的各种废弃物快速增长,滇池环境发生了前所未有的变化。目前,滇池水质污染、富营养化和生物多样性破坏严重,沉积物中的营养盐和有毒有害化学物质迅速累积,淤积速率明显增大(杨文龙等, 1998; 国家环境保护总局科技标准司, 2001; 田升平等, 2002; 柘元蒙, 2002)。因此,重建滇池发展演变的历史过程,有重要意义。对滇池沉积物的已有研究,较多地侧重于表层沉积物营养盐和重金属污染的调查研究(黎秉铭等, 1995; 夏学惠等, 2002; 高丽等, 2004; 骆少勇等, 2005; 陈云增等, 2006)。本文分段采集了滇池近代沉积物芯柱样,分别测试其元素、总磷(TP)含量及磁化率值,分析其垂向分布及变化规律,有助于认识湖泊污染变化的历史过程和原因,为分析滇池地区人类活动的湖泊响应和水污染修复提供依据。

1 样品采集和分析

1.1 滇池概况

滇池为云贵高原中部的断陷湖泊,流域面积 2 920 km²。湖体呈南北长、东西窄的弓弦形,南北最长 40 km,东西最宽 12.9 km,按平均水位 1 887.5 m 计,平均水深 4.4 m,水域面积 306.3 km²,湖容量 15.7 × 10⁸ m³。由于滇池处于半封闭状态,换水周期达 3.5 年以上。北部有一天然堤(海埂)将湖体分为两个水域,中间仅有一航道相通,海埂以北称草海,以南为滇池主体,称外海。有 20 余条大小河流呈向心状注入滇池,河流携带着丰富的泥沙、污染物及营养物质入湖。西岸紧邻西山主脉,湖岸陡峭,南北端及东岸由三角洲、台地、岗地、

丘陵及中低山构成。北、东和南部是主要的入流区,流经昆明市主城区的盘龙江、宝象河和大观河每年的入水量占全年入湖水量的 80% 以上,西部的海口河(螳螂川上游)是滇池的唯一天然出水口,20 世纪 90 年代中期在草海西南部修建的西园隧洞将草海污水经草铺排向西侧的螳螂川。滇池外海的北部和草海一带频繁暴发大面积、长时间的蓝藻水华,已呈现藻型湖泊特征。

滇池沉积物以陆源碎屑为主,大致呈环带状分布,可以等深线作为分界线确定湖心区,其中深度大于 5.0 m 区域为远岸湖心区(I),深度在 4.0~5.0 m 之间的区域为近岸湖心区(II),4.0 m 等深线以外区域定为湖滨区(III)(图 1)。湖心区湖底地形平坦,表层沉积物为含粉砂粘土及粘土,分选性好;湖滨区地形较为平缓,表层沉积物为粘土质粉砂以及含砾粉砂、细砂质粘土。

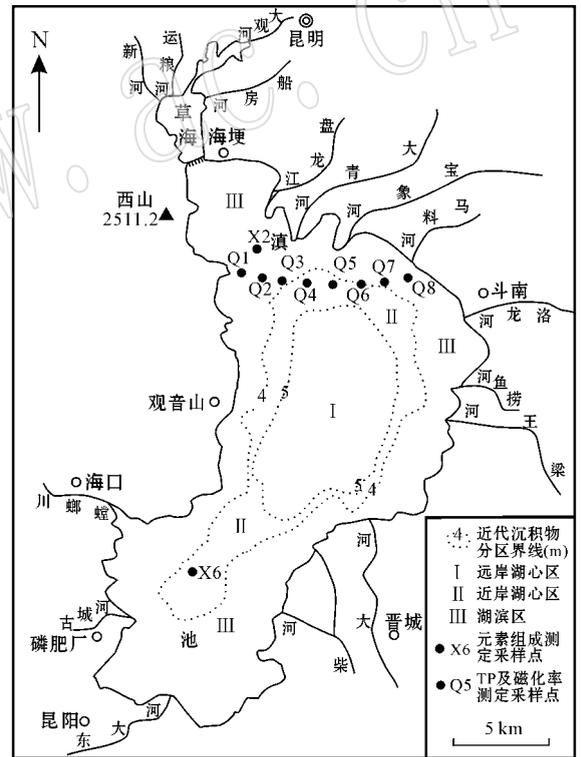


图 1 滇池近代沉积物芯柱样采样点分布图

Fig. 1 Sample distribution of sedimentary column cores for modern sediments in the Dianchi Lake

1.2 样点布设及采样方法

沉积物柱状岩芯采样点位如图 1 所示。用于元素含量分析的芯柱样点分别位于北部西山东侧和南部磷肥厂东侧的滇池近岸湖心,编号为 X2 和 X6。野外采样在 2004 年 5 月进行。对 2002 年 10 月沿西山小倒石煤厂至矣六乡一线的滇池北部水域采集的 8 个芯柱样进行了总磷(TP)和磁化率(χ)的分析,样点自西而东按点距约 1 km 采集,编号依次为 Q1、Q2、

...、Q8。沉积物芯柱采集用奥地利产 Uwitec 筒式重力采样器(样管材料为无磁性聚丙烯玻璃,长 1 m,内径 60 mm),芯柱采集长度为 34~38 cm。所采集的沉积物芯柱及上覆水仍保持原态,悬浮层未受扰动,水-沉积物界面清晰。根据取现场对沉积物的观察,可见滇池近代沉积物有明显的分层现象,自上而下可明显分为以下 3 层:

表层(表层~10 cm)黑色、深黑色淤泥、淤泥质砂质亚粘土;

中层(10~20 cm)浅黄褐色、灰褐色、黑褐色等粉砂质粘土及灰色、灰黑色淤泥,颜色差异较大;

下层(20 cm~底部)泥质夹粉砂质粘土,多呈黄褐色、黄色。

采集出来的沉积物芯柱上层水用虹吸法抽去,芯柱按一定间隔自表层向下依次在现场分割成单个柱状样,并依次编号。其中,元素含量分析柱状样按 2 cm/层分割,总磷和磁化率分析柱状样按 3 cm/层分割。分割后,混合均匀并装入塑料袋密封,带回实验室进行后续处理。

1.3 样品分析

样品在室温下自然风干,经缩分混匀后,研磨至过 200 目尼龙筛,进行分析。常量元素用化学法测定,微量元素和稀土元素分析前,样品经 HF-HClO₄-HNO₃ 消解处理,去离子水定容后,用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定元素含量(以干重计)。元素含量测定在国土资源部国家地质分析测试中心完成。样品在室温下自然风干,混匀后研磨至过 100 目尼龙筛后,采用高氯酸-硫酸溶法测定总磷含量(以干重计)。测定时,做 2 个平行和 1 个空白对照,测定允许误差小于 5%。磁化率(χ)测定样品在室温下自然风干后,磨碎并混匀,装入直径 2.4 cm、高 2.2 cm 的圆柱形无磁塑料盒中,压紧后进行测量。测定使用的仪器是 KT-6 型磁化率仪(捷克生产,测量范围 $-999 \times 10^{-3} \sim 9999 \times 10^{-3}$ SI)对每个样品进行 5 次重复测试,取其平均值做为该样品的磁化率值。总磷含量和磁化率测定均在云南省环境科学研究院化学分析实验室进行。

2 元素地球化学及其垂向分布特征

X2、X6 号沉积物芯柱样的化学分析结果及元素地球化学变化特征见图 2、图 3。在剖面上,各元素从沉积物底部到表层呈现明显各异的元素组合和分段富集特征。

2.1 常量元素

对于 Al、Fe、K、Na、Ca、Mg、Mn、Ti、P 等常量元素,依据其地球化学行为的差异,可分为 3 类:Al、Ti 为惰性元素,常残留于原地;K、Na、Ca、Mg 为活动元素,易于发生淋滤;Fe、Mn、P 为活化再沉淀元素,常发生短距离迁移。X2、X6 号两个芯柱样化学分析结果(图 2、图 3)显示,各元素的变化范围分别为:Al₂O₃ 13.71%~22.40%,Fe₂O₃ 7.73%~11.68%,CaO 1.04%~11.99%,MgO 1.53%~1.87%,K₂O 1.54%~2.89%,Na₂O 0.19%~0.26%,MnO 0.07%~0.12%,TiO₂ 0.78%~1.30%,P₂O₅ 0.14%~0.25%。从图中可见,常量

元素以 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 为主(占 28.48%~37.88%);不活动常量元素 TiO₂ 的含量高于较易迁移的 MnO 和 P₂O₅;活动元素中 CaO 的含量最高,其次为 K₂O 和 MgO,而 Na₂O 含量最低。这与本区地处暖温带、化学风化较强、沉积物中 Na 的淋滤和 K 的吸附较大并含有较多的粘土矿物(薛传东等,2001)等因素有关。

(1) Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂ 的含量变化在底部~24 cm 段较平稳,其余段的变化有差异。在 X2 号芯柱中,各元素含量在 24~16 cm 段较快降低,16~0 cm 段缓慢降低;对于 X6 号芯柱,各元素含量在 24~16 cm 段则缓慢降低,而 16~0 cm 段较快降低。

(2) MgO、Na₂O、MnO 含量的变幅极小,但 X6 号芯柱的 MnO 含量在 6~0 cm 段具有缓慢增加的特点。

(3) CaO 的含量在底部~26 cm 段较平稳,两芯柱含量分别稳定在 1.4%、1.1% 左右,26~18 cm 段迅速升高,18~12 cm 段缓慢升高,12~0 cm 段则又趋向稳定,分别在 11.50%、8.70% 左右小幅变化。

(4) P₂O₅ 的含量变化趋势一致,但分层位置略有不同。对于 X2 芯柱,底部~12 cm 段较平稳,12~8 cm 段则缓慢升高,8~0 cm 段则稳定在 0.23% 左右;对于 X6 芯柱,底部~18 cm 段较平稳,18~6 cm 段则缓慢升高,6~0 cm 段稳定在 0.24% 左右。

从上可知,MgO、Na₂O、MnO 含量总体较稳定,Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂ 含量自上而下逐渐增加,P₂O₅ 和 CaO 含量在顶部(8~0 cm)表层沉积物中最高,而 MnO 略有增加。这说明,顶部的表层沉积物是一个特殊的沉积部位,曾经受到强烈的沉积物-水界面环境效应影响,并发生了活动元素的迁移富集作用,与前人认识基本一致(Horowitz,1991;Cheng Zhenlou *et al.*,1992;Wan Guojiang *et al.*,1996;马英军等,1999)。对比而言,X2 芯柱的 Fe₂O₃、CaO、MnO、TiO₂ 含量明显高于 X6 芯柱,而 P₂O₅、MgO、K₂O、Na₂O、Al₂O₃ 的含量又明显低于 X6 芯柱,这正反映了两者所处沉积物源区或物源供应的差异。其中,X2 芯柱主要接受来自昆明盆地北部的玄武岩、碳酸盐岩和磷块岩的风化搬运补给,X6 芯柱主要接受来自盆地南部的碎屑岩、含磷碳酸盐岩和磷块岩的风化搬运补给。

2.2 微量元素

两个芯柱各样品微量元素的变化范围为:Ba 361.4 × 10⁻⁶~484.2 × 10⁻⁶,Sr 69 × 10⁻⁶~158 × 10⁻⁶,Rb 81 × 10⁻⁶~151 × 10⁻⁶,Cs 7.1 × 10⁻⁶~39 × 10⁻⁶,Cu 38 × 10⁻⁶~157 × 10⁻⁶,Pb 38 × 10⁻⁶~212 × 10⁻⁶,Zn 84 × 10⁻⁶~343 × 10⁻⁶,Co 4.6 × 10⁻⁶~142 × 10⁻⁶,Ni 41 × 10⁻⁶~210 × 10⁻⁶,Cd 0.37 × 10⁻⁶~2.90 × 10⁻⁶,Cr 72 × 10⁻⁶~109 × 10⁻⁶,V 194 × 10⁻⁶~295 × 10⁻⁶,Sc 17 × 10⁻⁶~27 × 10⁻⁶,Zr 141 × 10⁻⁶~275 × 10⁻⁶,Hf 6.9 × 10⁻⁶~11 × 10⁻⁶,U 3.7 × 10⁻⁶~5.9 × 10⁻⁶,Th 13 × 10⁻⁶~21 × 10⁻⁶(图 2、图 3)。根据地球化学性质的差异,将其分为亲氧(Sr、Ba、Rb、Cs)、亲硫(Cu、

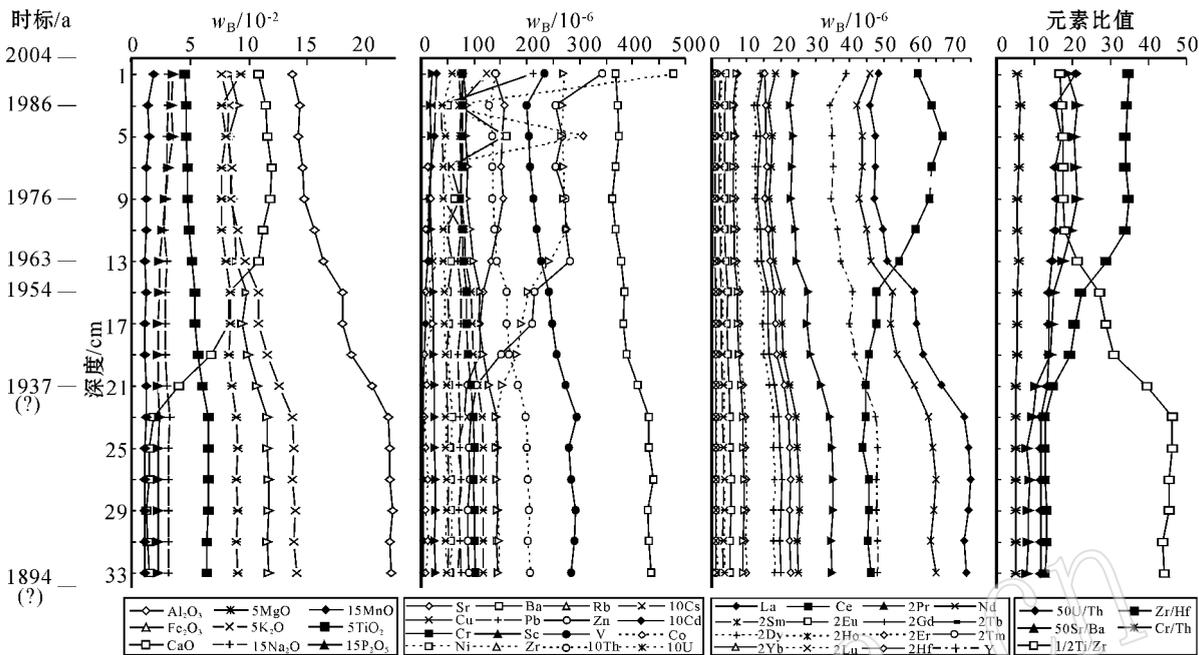


图 2 X2 号沉积芯柱元素地球化学垂向变化曲线

Fig. 2 Element geochemical variations with depth in No. X2 sedimentary column core

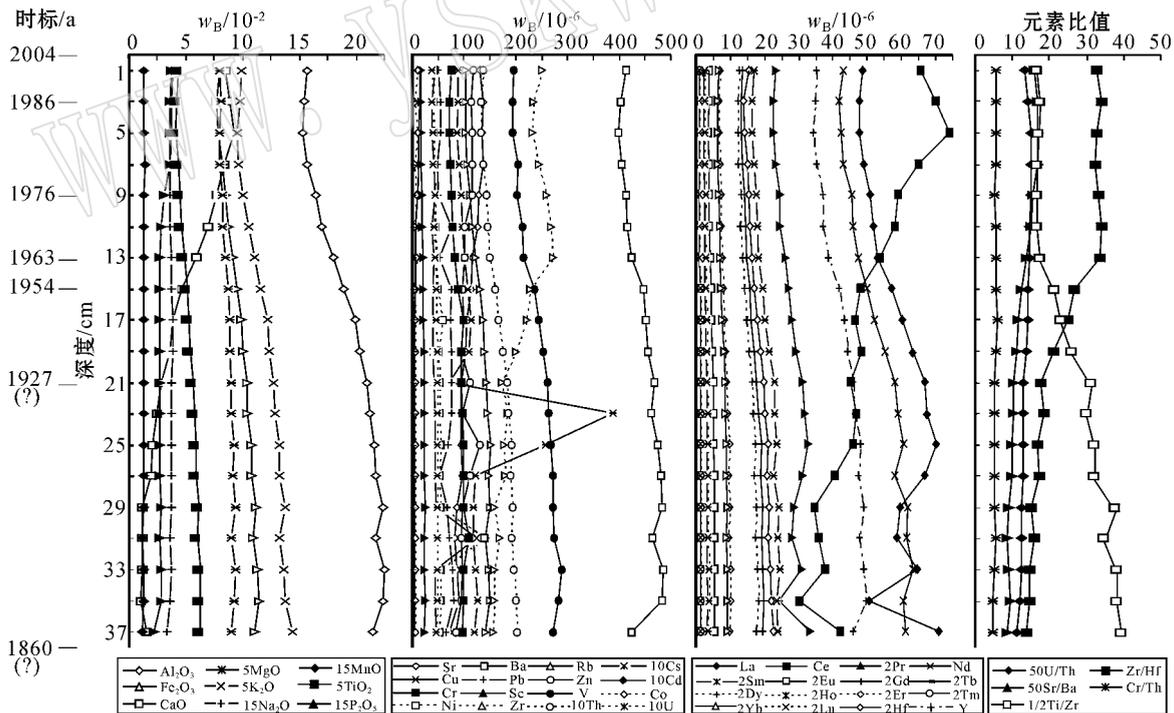


图 3 X6 号沉积芯柱元素地球化学垂向变化曲线

Fig. 3 Element geochemical variations with depth in No. X6 sedimentary column core

Pb、Zn) 亲铁 (Co、Ni、Cr、V、Sc) 和稀有 (Zr、Hf) 及放射性 (U、Th) 元素, 两个芯柱微量元素的剖面变化趋势基本一致, 但存在一定的差别。

(1) 对于 X2 芯柱, Cu、Co、Ni 含量在底部 ~6 cm 段缓慢

升高, 6~10 cm 段达到最高, 其中 Cu、Ni 含量的变化较小。而 X6 芯柱的 Cu、Ni 含量具有一致的变化趋势, 底部 ~28 cm 段较平稳, 28~10 cm 段缓慢降低, 10~0 cm 段又趋平稳, 并在 32 cm 处出现一个高值; Co 含量总体缓慢升高, 且存在小幅频繁

升降,底部~14 cm 段的变幅很小,14~0 cm 段的变幅略大。

(2) X2 芯柱的 U、Pb 含量在底部~10 cm 段较平稳,10~2 cm 段平缓升高,2~0 cm 段达最高。X6 芯柱的 U、Pb 含量总体缓慢上升,底部~28 cm 段较稳定,28~10 cm 段缓慢上升,10~0 cm 段趋平稳,且 Pb 的变化略大,在 12 cm 处出现一个低值,在 14、28 cm 处出现两个高值。而 X2 芯柱的 U 在顶部突然增大,表明该处表层沉积物曾处于氧化-还原界面位置,使氧化条件下淋滤迁出的 U 在该位置还原沉淀而明显富集。

(3) X2 芯柱 Ba、Cr 含量的变化总体较平稳,V、Rb、Sc、Th、Cs 的含量在底部~24 cm 段较平稳,24~10 cm 段较快降低,10~0 cm 段缓慢降低。而 X6 芯柱 Ba、Cr、V、Rb、Sc、Th 的含量变化总体均较平稳,底部~24 cm 段和 10~0 cm 段较稳定,24~10 cm 段有缓慢降低趋势,而 Cs 含量变化大,在底部~28 cm 段较稳定,28~20 cm 段急剧变化,升降幅度大,22 cm 处出现一个明显的低值,在 24、26 cm 又存在两个明显的高值,20~8 cm 段则缓慢降低,6~0 cm 段又趋稳定。

(4) X2 芯柱 Cd 含量在底部~24 cm 段平稳变化,24~6 cm 段急剧升高,6~0 cm 段则又趋稳定,其中在 26 cm 处有一小幅度升高。X6 芯柱 Cd 含量在底部~18 cm 段平缓下降,并在 28 cm 处有一小幅度升高,18~4 cm 段急剧升高,4~0 cm 段又趋稳定。

(5) 两个芯柱的 Sr、Zn、Zr 含量变化基本一致,在底部~24 cm 段较平稳,24~12 cm 段缓慢升高,12~0 cm 又趋稳定,其中 Zn 在局部层位存在有小幅度升高。

相对而言,X2 芯柱金属元素含量明显高于 X6 芯柱,且除 Co、Ni 及局部层位的 Cu、Cr 外,大多元素都已超出页岩的平均含量,说明人类活动已较大地影响沉积物。相对于滇池沉积物环境质量基准(陈云增等,2006),两个芯柱沉积物上部均存在较为严重的 Cr、Pb、Zn、Cu 污染,超标率分别达 97.2%、63.9%、47.2%、19.4%,并显示从 24~20 cm 以上逐步增高的特征,顶层沉积物还存在 Cd 含量明显增加的趋势。其中 X2 号芯柱的污染程度明显高于 X6 号芯柱,反映重金属污染与昆明市近代的工农业发展和污染物排放有关。虽然与国内外湖泊相比,目前滇池沉积物重金属元素的含量尚处于中低水平,但其污染趋势不容乐观,值得关注。而从下部向表层,Pb、Cr 又表现出含量逐渐降低的趋势,反映出 Pb、Cr 的富集还同时受某种自然作用过程(如水动力、粘土矿物含量等)的控制。

Sr/Ba 比值常用来判别沉积环境类型和水体盐度的参数(Raiswell and Buckley, 1988)。滇池两个芯柱样的 Sr/Ba 比值从底部至表层逐渐增加,20 cm 以上沉积物的 Sr/Ba 比值较大(0.27~0.43),数值上位于北部的 X2 号芯柱样均比南部 X6 号芯柱样略高。这表明,近半个世纪以来,滇池盐度和沉积物源量均有逐渐增加的趋势,且北区更多地接受昆明市区人为活动带来的物源和化学元素,与实际相吻合。Ti/Zr 和 Zr/Hf 比值也明显反映出类似的物源供给的阶段性差异演化特点。

2.3 稀土元素

稀土元素是一组化学和物理性质极为相似的元素,在地质地球化学作用过程中作为一个整体迁移,但不同稀土元素性质仍有微小差异。从两个芯柱的稀土元素分析结果(图 2、图 3)看,滇池沉积物的稀土元素总量较高($229.46 \times 10^{-6} \sim 299.36 \times 10^{-6}$),平均 260.39×10^{-6} ,其组成中轻稀土元素所占比重较大(63.30%~73.61%,平均 69.79%),表现出轻稀土元素富集的特征,轻重稀土元素比值为 5.02~8.23(平均 6.84)。两芯柱样品的稀土元素含量具有近似一致的垂向分布特征:

(1) 稀土元素总量从下到上总体略呈降低的趋势。

(2) Pr、Sm、Hf、Gd、Dy、Yb、Er、Eu、Ho、Tb、Tm、Lu 具有相似的变化趋势,其含量依次降低,在底部~26 cm 段较稳定,26~10 cm 段则缓慢下降,10~0 cm 段则又趋稳定。

(3) La、Nd、Y 具有相近的变化特征,含量变化在底部~26 cm 段较平稳,局部有小幅升降,26~10 cm 段则较快降低,10~4 cm 段渐趋稳定,4~0 cm 段又缓慢上升。

(4) Ce 含量在底部~16 cm 段较平稳,局部略有降低,16~6 cm 段快速升高,6~0 cm 段较快降低。

从芯柱样稀土元素北美页岩标准化配分曲线看,各沉积物样品的稀土元素具有相似的配分曲线,均表现为平缓的右倾型,轻、重稀土元素分馏明显,具有明显的 Ce 负异常及较弱的 Tm 负异常,表明它们具有近于一致的物质来源。Ce/Y 和 Eu/ Σ REE 比值显示,滇池沉积物与流域北部、西部地区的碳酸盐岩和玄武岩一样,均属贫铈富铈型稀土。这表明,近岸的风化搬运、沉积作用均不能明显改变源岩的稀土元素组成特征,表现出对流域源岩特征的继承性。

稀土元素的分馏特征可指示湖泊沉积物中元素迁移、富集和环境的变化。上述特征说明,滇池近代沉积物具有较高的稀土元素含量,风化碎屑在沉积过程中稀土元素发生了富集和分馏,其中轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损。Ce 亏损较明显,Eu 略富集,反映湖泊沉积物-水界面的物化环境较特殊,长期具有较还原的特征。同时,在 14 cm 以下沉积物稀土元素总量略有增加,轻/重稀土元素比值明显减少,而 14 cm 以上的表层沉积物则表现出稀土元素总量略有减少、轻/重稀土元素比值增加的特征,反映近年来受城市建设和人为耕作活动改变的影响,物源直接进入湖区的份额越来越少,更多地是接受近湖滨第四系堆积物、耕地土壤风化搬运和大气沉降的补给。

2.4 元素相关性分析

应用 SPSS 统计分析软件,对 X2、X6 两个沉积芯柱 36 件柱状样的 27 个元素(稀土元素按 Σ REE 计)测试数据进行了 Q 型聚类分析和 R 型因子分析。聚类分析结果显示,在距离系数 $d=0.4$ 时,可得到 6 个元素组合,即:Al₂O₃、K₂O、Na₂O、Rb、Ba 组合;Fe₂O₃、V、Ti、Cr、Sc、Hf、Th、Y、REE 组合;MgO、Pb、U 组合;CaO、Sr、Zn、Cd、Zr 组合;Mn、P₂O₅ 组合和 Cu、Co、Ni 组合,每个组合内元素之间的关系紧密。由于元素间的依

存关系是元素本身特性、物理化学环境和人为干扰等多种因素的综合结果,这既体现了元素地球化学特性的差异,同时也反映滇池近代沉积物中元素的迁移、富集强烈地叠加了人为活动的干扰。各沉积物柱状样的 Q 型聚类分析表明,36 件柱状样可分为 4 组,基本可与图 2、图 3 所确定的柱芯层位分段吻合。这从一个侧面印证了这两个点位基本具有复杂而一致的物源供应过程,也说明本次所选取的沉积柱芯样点可作为解剖滇池沉积地球化学过程的代表性点位。

一般地,亲和力强、赋存状态相同/相近、地球化学行为相似的元素,其相关性较好。在 Pearson 相关系数 $r > 0.6$ 时, R 型因子分析结果显示,滇池近代沉积物中各元素的相关性较为复杂。其中 Al_2O_3 与大多数元素, CaO 与 Sr, Zn, Cd, Zr, Sr 与 $CaO, P_2O_5, Zn, Cd, Zr, P_2O_5$ 与 Mn, Sr, Zr, Cd, Mn 与 P_2O_5, Co, Ni, Cd, Cu 与 Co, Ni, Pb 与 U, Co, Ni 均具有较高的正相关性。可见,并不是地球化学性质相似的元素均表现出显著的相关性。这是由于湖泊沉积中,元素的迁移富集还明显受沉积物粒度、碎屑矿物组成、粘土矿物及铁锰氧化物含量、生物碳酸盐沉积作用和(间隙)水-岩(碎屑矿物)相互作用等影响。初步的 X 衍射分析结果为,滇池近代沉积物粗粒组 ($> 2 \mu m$) 全为石英,细粒组 ($< 2 \mu m$) 由多种粘土矿物组成。经半定量分析,高岭石占 39.7%,伊利石占 33.5%,蒙脱石及混层矿物占 19.4%,绿泥石占 7.4%,蛭石及方解石等其他矿物含量极低。这方面的研究还有待进一步加强。

3 总磷及磁化率的垂向分布特征

Q1~Q8 号沉积物芯柱样品的总磷含量和磁化率值分析结果见图 4。

3.1 总磷

从图 2~图 4 可见,各沉积物芯柱样总磷含量的垂向变化相当明显,从表层到深部逐渐减少或呈 S 形降低(除 Q8 柱外)。底部~21 cm 段较平稳,仅有小幅起伏变化,21~9 cm 段缓慢升高,9~0 cm 段急剧增加。总体上,表层沉积物中总磷的含量明显高于下层,除 Q3 柱和 Q5 柱外,并显示出近表层含量变化较大、下层差异较小的特点。滇池水浅,风浪作用显著,靠近滨岸带时水-沉积物交换作用强烈,因此表层沉积物中总磷含量变化较大。而随深度的加深,沉积环境趋于稳定,下层沉积物总磷含量差异小。夏学惠等(2002)研究也证实,磷在滇池外海沉积物中随深度的增加而降低,1 m 以下磷含量变化不明显。这均说明,表层沉积物中总磷含量与近几十年来滇池周围磷矿大规模开采和工农业生产废水及生活污水的影响有关。

从本次分析结果看,上部浅层沉积物(0~12 cm)中磷含量的高值区主要分布在 X2、Q1、Q2、Q6、Q7、X6 芯柱中,并具有从湖滨带向湖心区逐渐降低的特点;而各芯柱下部沉积物中磷含量较为接近,变化较小。从物源补给条件看,沉积物中磷含量高的 X2、Q1、Q2、Q6、Q7 芯柱均分布在靠近北部的海

埂附近,是盘龙江、大观河、宝象河、马料河等贯穿昆明市区及斗南花卉、蔬菜种植区的河流的汇水域,长期接纳大量工农业生产废水和城镇生活污水,大量的磷在远岸沉积物中沉积下来,因而磷含量较高;而位于海口河出口东部的 X6 芯柱,浅层沉积物中磷含量较高,主要是由于滇池南部周缘有昆阳、观音山和上蒜等大型磷矿区,磷矿开采和雨水冲刷剥蚀后的磷块岩及磷化工企业含磷废水流入湖区,致使沉积物中磷含量增高。而沉积物磷含量较低的 Q3、Q4、Q8 芯柱位于湖底正地形区和滨岸带,风浪较大,沉积物与水体间的交换频繁,磷在湖水中逐渐被稀释,因而沉积物中磷含量较少。

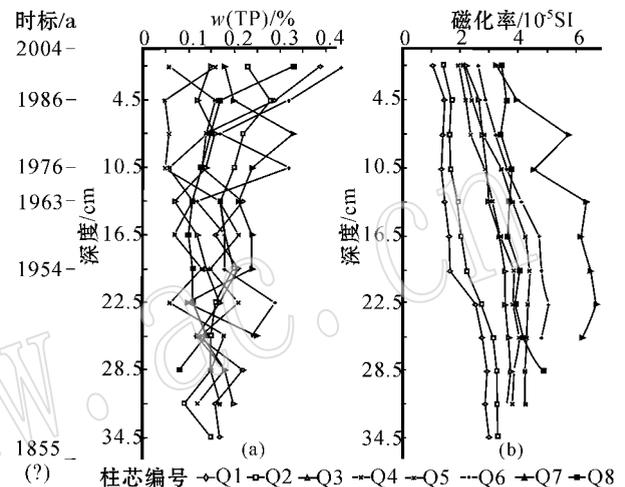


图 4 滇池沉积芯柱总磷(a)及磁化率(b)垂向变化曲线

Fig. 4 Variations of total phosphorus content (a) and magnetic susceptibility value (b) with depth in sedimentary column cores in the Dianchi Lake

3.2 磁化率

横向上,除 Q7 样点,磁化率自西而东依次增加,即东部滨岸带磁化率较西部高(图 4)。滇池沉积物中密度较大的重矿物有赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、磁铁矿等,自生铁矿物主要有针铁矿、菱铁矿、蓝铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和海绿石,这些矿物的含量和分布决定了沉积物磁化率的大小及分布特征。磁化率变化特征应是滇池南部和北部物源区铁含量较低、东部滨岸带铁含量较高、铁含量向湖心逐渐减少的结果。

垂向上看,磁化率都是随深度增加而缓慢变大,36~21 cm 段总体较稳定,在 30~25 cm 段附近达最大值,下部略有小幅起伏,21~9 cm 段(除 Q8 芯柱外)缓慢小幅度降低,9~0 cm 段较快减少(图 4)。下层沉积物的磁化率明显大于表层沉积物,这是因为滇池表层沉积物中存在大量有机质和植物残体,降低了铁磁性矿物含量,水生植物的繁衍和长期的滞水还原环境可使铁磁性矿物转化为弱磁性矿物,也会导致表层沉积物中的磁化率较低。随深度的加深,还原条件逐渐变为氧化条件,弱磁性矿物也向强磁性矿物转变,磁性变强,磁化率也因之增大。

总磷和磁化率成弱的负相关关系,磁化率随深度的增加

而缓慢变大,而总磷含量大体随深度增加而变小。

4 滇池近代环境污染变迁的探讨

于银亭等(1996)测定,滇池平均沉积速率约为 2.90 mm/a。项亮(1997)的研究表明,20 世纪 50、60 年代有 1 个沉积速率的波动变化,而在 80 年代末,尤其 90 年代以来沉积速率急剧上升。而吴艳宏等(1998)测得,滇池 1948 年以来的平均沉积速率为 1.78 mm/a,近 250 年来的平均沉积速率为 1 mm/a。程致远等(1990)研究也表明,滇池近 100 年来的沉积速率和沉积通量是随年代变化的,20 世纪 50 年代以前沉积环境比较稳定,50、60 年代达到了高峰,近几十年来又稍有下降。张燕等(2005)借助¹³⁷Cs 定年法,在滇池湖区选取 5 个沉积物芯柱(深 20 cm)分别确定了与~1986 年、1986~1976 年、1976~1963 年和 1963~1954 年相对应的沉积物深度区间。由于本次采集的芯柱位置与其大致相当,考虑沉积物元素含量、总磷及磁化率变化规律,以其测定结果为基准,确定了各湖泊沉积物芯柱的沉积时标(图 2、图 3)。在此基础上确定出不同阶段的沉积速率(表 1)。其中,1954 年以前的湖泊沉积速率以 2.34 mm/a 计。

表 1 滇池近代沉积物沉积速率表
Table 1 Sedimentary accumulation rates of modern sediments in the Dianchi Lake

年份/a	2004~	1986~	1976~	1963~	1954~
	1986	1976	1963	1954	
X2 号 对应层位/cm	0~6	6~12	12~16	16~20	20~34
柱芯 沉积速率	4.00	6.00	2.86	4.44	2.34
X6 号 对应层位/cm	0~6	6~10	10~14	14~16	16~38
柱芯 沉积速率	4.00	4.00	2.86	2.20	2.34
平均沉积速率	4.00	5.00	2.86	3.30	2.34

总体上,本次采集的沉积物芯柱剖面大致代表了约 150 年以来滇池的沉积历史记录,且体现出相似的沉积变化规律。依据各芯柱沉积物中记录的元素、总磷和磁化率的垂向变化规律看,滇池的污染历史主要开始于 20 世纪 60 年代初期以来,而大规模的 Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cr 等重金属污染则是 70 年代末期以来人为活动日趋加剧的结果。这与滇池流域污染工业类型及经济快速发展阶段相吻合,其中滇池周缘的磷矿开发、工业生产和农田开垦占较大比重。从表 1 可知,近 50 年以来,滇池的沉积速率均呈渐进式增加,X2 芯柱的沉积速率明显高于 X6 芯柱,这说明城镇建设对滇池沉积的物源贡献明显大于磷矿开采和农业生产的影响。X2 芯柱记录的沉积速率明显增加的 1986~1976 年和 1963~1954 年,分别与滇池北岸的围湖造田和工农业生产快速发展等两个历史事件相吻合,也与前人的研究结果较为接近。20 世纪 50 年代末至 60 年代初,在滇池流域东岸和南岸河流上游兴建了一批水

库,控制径流面积达流域面积的 47% 以上,拦截了水库上游山区的泥沙,致使直接进入滇池的泥沙量减小,平均沉积率下降,而 60 年代末,在滇池北部发生过有组织、大规模的围湖造田和蚕食湖湾,在一定程度上抵消了水库拦截泥沙的作用,沉积率也较低。

另外,芯柱样的 28~24 cm 处沉积物也有较高的 Pb、Zn、Cr、Cu、Ni 富集,对应的大约是 70~90 年前的淤积产物,可能与当时滇池流域颇具规模的工矿企业生产活动有关,尽管当时工业发展规模尚难以对滇池产生污染。值得注意的是,在 X2 芯柱的 24 cm 和 X6 芯柱的 22 cm 还存在一个沉积环境变化界线,大致分别对应 20 世纪 20 年代末至 30 年代末,可能与当时的城市建设及耕作等活动有关。

5 结论

根据对滇池近代沉积物 X2、X6 以及 Q1~Q8 共 10 个芯柱样的元素及总磷、磁化率的分析,得到如下几点认识:

(1) 滇池近代沉积物剖面上,各元素从底部到表层呈现明显各异的元素组合和分段富集特征,不同地段对应层位沉积物中元素含量也存在差异,这反映了不同历史时期的物源输入的变化,也体现湖泊沉积物-水界面环境效应、水动力学及沉积环境差异的影响。

(2) 不同深度沉积物中元素含量的总体变化规律是,剖面上自下而上元素垂向分布上多存在分段富集的特征。其中,Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂、Cu、Co、Ni、Pb、Zn、Cd、Sr、U、Zr 含量逐渐增加,P₂O₅ 和 CaO 含量逐渐升高,在表层沉积物中(12~0 cm)最高,MgO、Na₂O、MnO、Cr、V、Rb、Sc、Th、Cs、Ba 含量总体较稳定,但在上部有降低趋势,稀土元素总量略微降低,各稀土元素含量也表现出差异变化趋势,磁化率也缓慢增加。这表明,滇池沉积物的营养盐和重金属负荷在逐年加重,并发生了程度不同的活动元素迁移富集作用。统计分析也反映,滇池近代沉积物中元素的迁移、富集强烈地叠加了人为活动的干扰。

(3) 根据沉积物芯柱样的元素及总磷含量、磁化率值的垂向变化,结合前人的¹³⁷Cs 测年结果,确定了滇池约 150 年以来的沉积速率,其污染历史主要开始于 20 世纪 60 年代初期,而 70 年代末期以来的 30 多年是大规模 Cu、Ni、Pb、Zn 和 Cr 等重金属污染的时期。还发现 20 世纪 20 年代末至 30 年代末尚存在一次沉积环境的改变事件。

(4) 滇池的环境演化历史与昆明市的工业化、城市化和经济发展阶段相吻合,人为活动日趋加剧产生大量污染物的输入和积累,应是导致滇池水质急剧下降和近代沉积物污染的主导因素。

致谢 研究工作得到中国科学院南京土壤研究所杨浩研究员和云南农业大学汤利教授的帮助,昆明理工大学骆少勇硕士和云南农业大学陈永川硕士参加了野外采样工作,国土

资源部国家地质分析测试中心王淑贤高级实验师完成元素含量分析工作,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

References

- Chen Yunzeng, Yang Hao, Zhang Zhenke, *et al.* 2006. Application of equilibrium partitioning approach to the assessment of sediment quality in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(9): 1545~1552 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Zhenlou, Huang Ronggui and Wan Guojiang. 1992. Character of Fe, Mn distribution and migration on the surface between sediment and water in Hongfeng Lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(21): 1974.
- Cheng Zhiyuan, Liang Zhuocheng, Lin Ruifen, *et al.* 1990. A geochronological study of ^{210}Pb CF model for the recent sediments of Dianchi Lake, Yunnan Province [J]. *Geochimica* 4: 327~332 (in Chinese with English abstract).
- Gao Li, Yang Hao, Zhou Jianmin, *et al.* 2004. Sediment burden and release potential of phosphorus to water in Dianchi Lake, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24(5): 776~781 (in Chinese with English abstract).
- Horowitz A. J. 1991. *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry* [M]. MI, USA: Lewis Publishers.
- Kuang Yaoqiu, Huang Yongyang and Zhong Hexian. 2004. Clues to the geochemical evolution of the sedimentary environment as revealed by factor analysis of sediments in area CC of the East Pacific oceanic basin [J]. *Geology in China*, 31(3): 325~331 (in Chinese with English abstract).
- Li Bingmin, Wan Guojiang, Jiang Zhongcheng, *et al.* 1995. Concentration levels, change records and enrichment patterns of heavy metals in waters and sediments in both lake Dianchi and lake Erhai, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 16(2): 50~52 (in Chinese with English abstract).
- Liu Enfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, *et al.* 2004. Speciation of heavy metals in Lake Taihu sediments of core MS [J]. *Geochimica*, 33(3): 602~610 (in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai. 1999. The application of environmental mineral materials to the treatment of contaminated soil, water and air [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(4): 292~300 (in Chinese with English abstract).
- Lu Min, Zhang Weiguo, Shi Yuxin, *et al.* 2003. Vertical variations of metals and nutrients in sediments from northern Taihu Lake and the influencing factor [J]. *Journal of Lake Science*, 15(3): 213~220 (in Chinese with English abstract).
- Luo Shaoyong, Liu Xing and Qi Chunying. 2005. Study on the distribution features of ammoniac nitrogen and magnetic susceptibility in modern sediment of Dianchi Lake [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 30(5): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yingjun and Wan Guojiang. 1999. Study on trace heavy metal diffusion at sediment-water interface and its effects on overlying lake water quality [J]. *Environmental Science*, 20(2): 7~11 (in Chinese with English abstract).
- Martine D B and Sophie S. 2001. TEM-EDX investigation on Zn- and Pb- contaminated soils [J]. *Applied Geochemistry*, 16: 165~177.
- Raiswell R and Buckley F. 1988. Degree of pyritization of iron as a palaeoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 812~819.
- State Environmental Protection Administration of China. 2001. *Study on Lake Eutrophication and Its Countermeasure in China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese).
- Tian Shengping, Dongye Maixing, Zhou Jianmin, *et al.* 2002. Phosphorus burden on water body of Dianchi lake and its impact on water environment [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 24(1): 11~16 (in Chinese with English abstract).
- Tuo Yuanmeng. 2002. Eutrophication of Dianchi and its trend and treatment [J]. *Yunnan Environmental Sciences*, 21(1): 35~38 (in Chinese with English abstract).
- Wan Guojiang, Chen Zhenlou, Wan Xi, *et al.* 1996. New progress on Fe-Mn circulation on the surface lake sediment and water [J]. *Geol. and Geochem.* 2: 5.
- Wang Guoping, Liu Jingshuang and Gao Feng. 2001. Environmental pollution tracing of the catchment by heavy metals in sediment cores of the Xianghai wetlands [J]. *Scientia et Geographica Sinica*, 21(6): 549~553 (in Chinese with English abstract).
- Wang Sumin and Zhang Zhenke. 1999. New advances of lacustrine records and environmental evolution of lake in China [J]. *Sciences Bulletin of China*, 44(6): 579~587 (in Chinese with English abstract).
- Weng Huanxin and Zhang Xingmao. 2003. Environmental and biogeochemical information in oceanic sedimentary record and its indication to global changes [J]. *Quaternary Sciences*, 23(5): 529~536 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanhong, Wu Ruijin, Xue Bin, *et al.* 1998. Determinations of sedimentation rates in Kunming's Dianchi Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 10(2): 5~9 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui, Dongye Maixing, Zhou Jianmin, *et al.* 2002. Geochemistry and influence to environment of phosphorus in modern sediment in Dianchi Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 416~420 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Liang. 1997. Dating of recent Dianchi Lake sediments by gamma ray analysis [J]. *Nuclear Technique*, 20(2): 100~104 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chuandong, Tan Shucheng, Li Feng, *et al.* 2001. Clay minerals in Quaternary clayey soil and its relation to the land subsidence in Kunming basin area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 437~440 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liyuan, Shen Ji, Zhang Zulu, *et al.* 2003. A 40-year element geochemical record and its environment implication in Lake Nansihu, Shangdong Province [J]. *Geochimica*, 32(5): 453~460 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenlong and Yang Shuhua. 1998. Regionalization of un-point pollutant sources control in Dianchi Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 10(3): 55~60 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yongliang, Yin Xiaocai and Mou Xiaoyan. 2001. Environmental geochemistry of Swan Lake Inlet, Rongcheng Bay, the Yellow Sea

- of China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 20(2):152~160.
- Yao Zhigang, Bao Zhengyu and Gao Pu. 2006. Environmental geochemistry of heavy metals in sediments of Dongting Lake[J]. Geochimica, 35(6):629~638(in Chinese with English abstract).
- Yu Lizhong, Oldfield F, Wu Yushu, et al. 1990. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment core from Kunming Basin, southwest China[J]. Journal of Paleolimnology, 3:95~111.
- Yu Yinting, Li Peiquan, Wu Run, et al. 1996. Determinations of sedimentation rates in Kunming's Dianchi Lake[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 27(1):41~45(in Chinese with English abstract).
- Yuan Xuyin, Wang Aihua and Xu Naizheng. 2004. Chemical partitioning of heavy metals and their characteristics for sediments from Lake Taihu[J]. Geochimica, 33(6):611~618(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Peng Buzhuo, Chen Jie, et al. 2005. Evaluation of sediment accumulation in Dianchi Lake using ^{137}Cs dating[J]. Acta Geographica Sinica, 60(1):71~78(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenke and Wang Sumin. 1999. Environmental evolution of lacustrine records of lake in China: New advances and future[J]. Advance in Earth Sciences, 14(4):417~422(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenke, Wang Sumin, Shen Ji, et al. 1999. River channel changes recorded by lake sediments in Nansihu Lake, the lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Lake Sciences, 11(3):231~236(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Shen Ji, et al. 2001. Lacustrine records showing climatic changes in Erhai Lake, Yunnan Province since the past 2000 years[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 21(2):31~35(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Zhu Yuxin, et al. 2000. Lacustrine records of human activities in the catchment of Erhai Lake, Yunnan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 55(1):66~74(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang, et al. 2005. Accumulation characteristics of heavy metals in the sediments of lake Taihu, China[J]. Journal of Lake Sciences, 17(2):143~150(in Chinese with English abstract).
- 黎秉铭, 万国江, 江成忠, 等. 1995. 滇池、洱海水及沉积物中重金属元素的行为[J]. 环境科学, 16(2):50~52.
- 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 2004. 太湖MS岩芯重金属元素地球化学形态研究[J]. 地球化学, 33(6):602~610.
- 鲁安怀. 1999. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 18(4):292~300.
- 陆敏, 张卫国, 师育新, 等. 2003. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, 15(3):213~220.
- 骆少勇, 刘星, 亓春英. 2005. 滇池现代沉积物氮氮及磁化率研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 30(5):1~5.
- 马英军, 万国江. 1999. 湖泊沉积物-水界面微量重金属扩散作用及其水质影响研究[J]. 环境科学, 20(2):7~11.
- 田升平, 东野脉兴, 周建民, 等. 2002. 滇池湖泊磷负荷及其对水环境的影响[J]. 化工矿产地质, 24(1):11~16.
- 栢元蒙. 2002. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策[J]. 云南环境科学, 21(1):35~38.
- 王国平, 刘景双, 高峰. 2001. 向海湿地沉积物重金属对流域环境污染示踪[J]. 地理科学, 21(6):549~553.
- 王苏民, 张振克. 1999. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 44(6):579~587.
- 吴艳宏, 吴瑞金, 薛滨, 等. 1998. 13ka BP以来滇池地区古环境演化[J]. 湖泊科学, 10(2):5~9.
- 翁焕新, 张兴茂. 2003. 海洋沉积记录中环境与生物地球化学信息及其对全球变化的指示[J]. 第四纪研究, 23(5):529~536.
- 夏学惠, 东野脉兴, 周建民, 等. 2002. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境的影响[J]. 沉积学报, 20(3):416~420.
- 项亮. 1997. 用 γ 分析方法研究滇池现代沉积年代[J]. 核技术, 20(2):100~104.
- 薛传东, 谈树成, 李峰, 等. 2001. 昆明盆地第四系粘性土中的粘土矿物[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4):437~440.
- 张燕, 彭补拙, 陈捷, 等. 2005. 借助 ^{137}Cs 估算滇池沉积量[J]. 地理学报, 60(1):71~78.
- 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 2003. 近四十年来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. 地球化学, 32(5):453~460.
- 杨文龙, 杨树华. 1998. 滇池流域非点源污染控制区划研究[J]. 湖泊科学, 10(3):55~60.
- 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 2006. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 35(6):629~638.
- 于银亭, 李培泉, 吴润, 等. 1996. 昆明滇池沉积速率的测定[J]. 海洋与湖沼, 27(1):41~45.
- 袁旭音, 王爱华, 许乃政. 2004. 太湖沉积物中重金属的地球化学形态及特征分析[J]. 地球化学, 33(6):611~618.
- 张振克, 王苏民. 1999. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 14(4):417~422.
- 张振克, 王苏民, 沈吉, 等. 1999. 黄河下游南四湖地区黄河河道变迁的湖泊沉积响应[J]. 湖泊科学, 11(3):231~236.
- 张振克, 吴瑞金, 沈吉, 等. 2001. 近2000年来云南洱海沉积记录的气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(2):31~35.
- 张振克, 吴瑞金, 朱育新, 等. 2000. 云南洱海流域人类活动的湖泊沉积记录[J]. 地理学报, 55(1):66~74.
- 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 2005. 太湖近代沉积物中重金属的累积[J]. 湖泊科学, 17(2):143~150.

附中文参考文献

- 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 2006. 相平衡分配法在滇池沉积物环境质量评价中的应用研究[J]. 环境科学学报, 26(9):1545~1552.
- 程致远, 梁卓成, 林瑞芬, 等. 1990. 云南滇池现代沉积物 ^{210}Pb 法的CF模式年龄研究[J]. 地球化学, 9:327~332.
- 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 2004. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. 环境科学学报, 24(5):776~781.
- 国家环境保护总局科技标准司. 2001. 中国湖泊富营养化及其防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 匡耀求, 黄永祥, 钟和贤. 2004. 东太平洋海盆CC区沉积物因子分析揭示的沉积环境地球化学演化信息[J]. 中国地质, 31(3):325~