

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险

于真真^{1,2}, 刘恩峰^{1,3*}, 张恩楼¹, 林琪^{1,2}, 沈吉¹, 王荣¹, 李艳玲¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014)

摘要: 沉积物重金属污染是影响湖泊等水体环境质量与健康的主要因素之一。通过对程海 9 个沉积短岩芯中 10 种金属元素含量的分析, 在²¹⁰Pb与¹³⁷Cs定年的基础上, 研究了沉积物中重金属含量与污染的时空变化特征; 采用潜在生态风险指数法与沉积物质量基准法, 并参考重金属污染水平, 评估了表层沉积物重金属的潜在生态风险。结果表明, 各岩芯不同年代沉积物中, 除了 Cd 含量变化较大之外(变异系数为 0.59), 其余各金属元素含量变化均较小(变异系数小于 0.20); 空间上, 各岩芯之间每一种金属的平均含量差异较小, 最大值与最小值的比值为 1.2 ~ 1.8, 显示了不同湖区重金属较为相似的富集规律。沉积物中主要污染元素为 Cd、Pb 和 Hg, 其中 Cd 和 Pb 污染始于 20 世纪 80 年代中期; 近十年来 Cd 污染程度稍有下降, 但仍呈中等污染水平, 而 Pb 污染程度持续增加, 属于弱污染水平; Hg 污染始于 20 世纪 90 年代末期, 呈弱污染水平; 而 As、Cu 和 Zn 仅在部分近表层沉积物呈现较弱污染。空间上, 沉积物中重金属污染水平并未表现出明显的趋势。除了大气沉降(主要为有色金属冶炼释放)输入之外, 程海沉积物重金属污染还可能受到农业面源与生活污水排放的影响。表层沉积物中 As、Cu、Ni、Pb 和 Zn 具有较低的潜在生态风险, Hg 和 Cd 具有中-高潜在生态风险。

关键词: 沉积物; 重金属; 污染; 时空特征; 潜在生态风险; 程海

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4169-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702131

Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake

YU Zhen-zhen^{1,2}, LIU En-feng^{1,3*}, ZHANG En-lou¹, LIN Qi^{1,2}, SHEN Ji¹, WANG Rong¹, LI Yan-ling¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Heavy metals pollution in the sediments is one of the main factors impacting the water quality and ecosystem health. In this study, concentrations of ten metals in nine sediment cores from the Chenghai Lake were determined. Chronology of a typical core (CH2012) was constructed by the ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating method. The spatio-temporal variations in concentrations and contamination characteristics of As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were evaluated. The potential eco-risks of heavy metals in the surface sediments were studied by combining the ecological risk index and sediment quality guidelines (SQGs) assessment as well as their pollution levels (enrichment factors, EF). The metal concentrations in each sediment core showed little vertical change with coefficients of variation of less than 0.20, except for Cd, whose coefficient of variation was 0.59. Spatially, the average concentrations of each metal showed minor difference among the cores, with ratios ranging from 1.2 to 1.8, suggesting similar sedimentary characteristics of metals in the whole lake. Cd and Pb were influenced by anthropogenic contamination that has started in the mid-1980s. The pollution level of Cd decreased in the past decade and still belongs to the moderate pollution degree, whereas the pollution level of Pb increased continually and could be classified as the weak pollution degree. The Hg contamination began in the late 1990s, with EFs ranging from 0.9 to 1.6, belonging to the weak pollution degree. The As, Cu, and Zn pollution occurred mainly near the surface sediments with weak pollution degrees. Spatially, there were no obvious trends in pollution levels of the metals. The heavy metals pollution is mainly influenced by atmospheric deposition that originates from non-ferrous metal smelting emissions, as well as agricultural and domestic discharges. As, Cu, Ni, Pb, and Zn in the surface sediments have low potential ecological risks, whereas Hg and Cd may pose middle-high potential risks.

Key words: sediment; heavy metal; contamination; spatio-temporal variations; potential eco-risk; Chenghai Lake

重金属由于其高毒性、难降解性、易富集和食物链放大等生态环境效应, 成为水环境中备受关注的污染物之一^[1]。沉积物中富集的重金属不仅对底栖生物具有直接的毒害效应, 随着沉积物-水界面环境条件的变化, 沉积物中部分重金属还会重新释

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2014FY110400); 国家自然科学基金项目(41672354, 41271214)

作者简介: 于真真(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究湖泊沉积与环境化学, E-mail: 648771819@qq.com

* 通信作者, E-mail: liuenfeng@sdu.edu.cn

放到水体中,产生“二次污染”^[2,3].相比源自风化的岩石碎屑与土壤等自然来源的重金属,人为源的重金属在水体沉积物中主要以吸附与络合等方式与黏土及有机质等结合,具有较高生物可给性,会对水体生态系统产生更高的危害^[4~7].因此,研究沉积物中重金属的分布、量化其人为贡献与潜在生态风险,对沉积物质量评估和水体生态环境保护具有重要的意义^[5].

随着我国工业化、城镇化和农业现代化的发展及污染物排放量的增加,沉积物重金属污染已经成为湖泊等水体最为突出的环境问题之一^[5~7],在东部经济发达地区尤为严重,相关研究也较为深入^[6~8].云贵高原是我国五大湖区之一,研究表明,抚仙湖^[2]、洱海^[5]、滇池^[9]等都存在不同程度的重金属污染,除了大气沉降输入之外,其沉积物重金属污染很大程度上还受到流域内工业与城市废水直接排放的影响^[4,5].与上述湖泊相比,目前对西南地区九大湖泊中诸如程海、泸沽湖等流域内人类活动直接影响较弱的湖泊沉积物重金属污染研究较为薄弱^[10,11],这在一定程度上影响了对区域湖泊污染的全面认识.

程海位于云南省丽江市永胜县西南,湖泊水面面积 78 km²,平均水深 25 m^[12~14].程海为典型封闭型深水湖泊,主要依靠地表径流和湖面降水补给.流域经济以农业为主,耕地面积 19.1 km²,占流域汇水面积的 7.74%^[12],流域内无典型的工业^[12,14].近年来,程海富营养化问题日趋突出^[13~15],在富营养化过程、原因与机制方面已经开展了较为深入地研究^[14,15];与之相比,对重金属污染研究较为薄弱.Zhang 等^[10]基于两个沉积岩芯的研究表明,程海沉积物也存在一定程度的重金属污染,但对与人类活动污染排放密切相关的 As、Hg 两种典型毒性元素污染状况缺乏必要的研究.国内外研究表明,受到水下地形和物源等因素的影响,同一湖泊的不同湖区重金属累积与污染程度等可能存在较大的空间异质性^[11,16].目前对程海不同湖区沉积物重金属富集规律与污染时空差异缺乏全面的了解,而且对沉积物重金属潜在生态风险也缺乏系统的评估.

本文通过对程海不同湖区 9 个沉积短岩芯中 As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等金属元素含量的分析,研究了其时空变化规律、污染特征以及表层沉积物中重金属的潜在生态风险,以期全面了解程海环境质量演化及其与人类活动的关系,及有针对

性地开展环境保护与污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2012 年,使用奥地利产 UWTTEC 重力采样器在程海中部湖区采集了长 50 cm 的沉积岩芯(编号 CH2012);2014 年 6 月,补充采集了 8 根沉积岩芯,采样点位置与岩芯编号见图 1.沉积岩芯现场以 1 cm 为间隔分样,所有样品均装入聚乙烯自封袋中密封保存,带回实验室并低温保存.

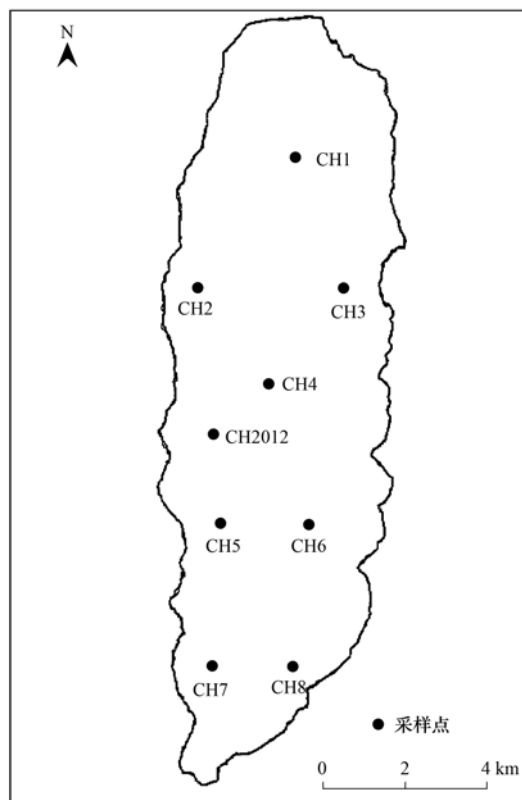


图 1 程海沉积岩芯采样点位置与编号

Fig. 1 Sampling sites and numbers of the sediment cores in the Chenghai Lake

1.2 实验分析

沉积物样品冷冻干燥后用于不同指标分析. CH2012 岩芯样品中²¹⁰Pb、²²⁶Ra及¹³⁷Cs活度采用美国 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器(HPGe GWL-120-15)测定.¹³⁷Cs和²²⁶Ra标准样品由中国原子能科学研究院提供,²¹⁰Pb由英国利物浦大学做比对标,测试误差 < 10%.根据²¹⁰Pb与²²⁶Ra差值计算获得过剩²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{ex}),并通过²¹⁰Pb_{ex}、¹³⁷Cs活度进行 CH2012 岩芯年代序列的建立^[17].

沉积物样品用玛瑙研钵研磨并过 200 目筛后,经 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 完全消解^[7],采用电感耦

合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES, Leeman Labs, Profile DV) 测定 Al、Fe、Ti 和 Zn 含量, As、Cd、Cu、Ni 和 Pb 含量采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7700) 测定. Hg 含量采用美国 Leeman Labs Hydra II C 型全自动测汞仪测定. 实验中所用试剂均为优级纯, 样品测定在湖泊与环境国家重点实验室完成; 分析过程中采用标准参考物质 GBW07309 进行质量控制, 各金属元素回收率在 92% ~ 106% 之间, 测量误差均小于 $\pm 10\%$.

1.3 重金属污染与生态风险评价方法

重金属易富集于细粒沉积物中, 受到“粒度效应”的影响, 沉积物中重金属含量的增加并不一定反映人为污染^[2,18]. 为了降低沉积物“粒度效应”的潜在影响, 准确量化重金属的污染程度^[2,5], 本文利用惰性元素 (Al 和 Ti) 作为参比元素, 采用富集系数 (enrichment factor, EF) 法区分重金属的自然与人为来源并评判其污染程度^[18,19]. 理论上, $EF > 1$, 即存在人为污染. 根据 Sutherland 等^[20] 的划分标准: $EF < 2$, 无污染到弱污染; $2 \leq EF < 5$, 中等污染; $5 \leq EF < 20$, 重污染; $EF \geq 20$, 极重污染.

沉积物质量基准和潜在生态风险指数法是目前常用的沉积物重金属潜在生态风险评估方法. 我国目前尚无完备的淡水沉积物质量基准, 相对于其他学者 (国家或地区) 提出的沉积物质量基准, MacDonald 等^[21] 提出的淡水水体沉积物质量基准 (SQGs) 具有更高的普适性. SQGs 包括阈值效应含量 (TEC) 与可能效应含量 (PEC)^[21], 当重金属的含量低于 TEC 时, 表示该金属不会对底栖生物产生

毒性效应; 若含量高于 PEC, 表明该金属会对底栖生物产生毒性; 若介于两者之间, 则可能会产生毒性效应^[21].

Håkanson 提出的潜在生态风险指数法包括单因子潜在生态风险系数 (E_r) 和潜在生态风险指数 (RI), 该方法综合考虑了重金属毒性、多种污染物的综合生态效应以及重金属背景值的差异等因素^[22], E_r 和 RI 的计算方法见文献^[22]. Håkanson 基于 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 PCBs 8 种污染物对 RI 划分了 4 个等级. Cr 和 PCBs 在本次研究中未涉及, 采用原有的 RI 等级划分标准可能会低估重金属的生态风险. 因此, 参考 Zhang 等^[23] 所提出的加权平均法, RI 等级划分标准修改为: $RI < 108$, 低等生态风险; $108 \leq RI < 216$, 中等生态风险; $216 \leq RI < 432$, 重生态风险; $RI \geq 432$, 严重生态风险. 单因子潜在生态风险等级仍参考 Håkanson 提出的标准^[22].

2 结果与讨论

2.1 沉积岩芯年代

程海 CH2012 岩芯中 ^{137}Cs 活度具明显的峰值, 出现于深度 20.5 cm, 对应 1963 年全球核爆炸大气沉降峰值; $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度随深度的增加呈指数降低 ($R^2 = 0.66$). 沉积岩芯中 ^{137}Cs 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度的变化特征指示了稳定的沉积环境, 采用 ^{137}Cs 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 建立的 CH2012 沉积岩芯年代见图 2.

2.2 沉积岩芯及表层沉积物金属含量

2.2.1 CH2012 岩芯金属元素含量的垂向变化

如图 2 所示, Cd 含量呈三段式变化, 20 世纪

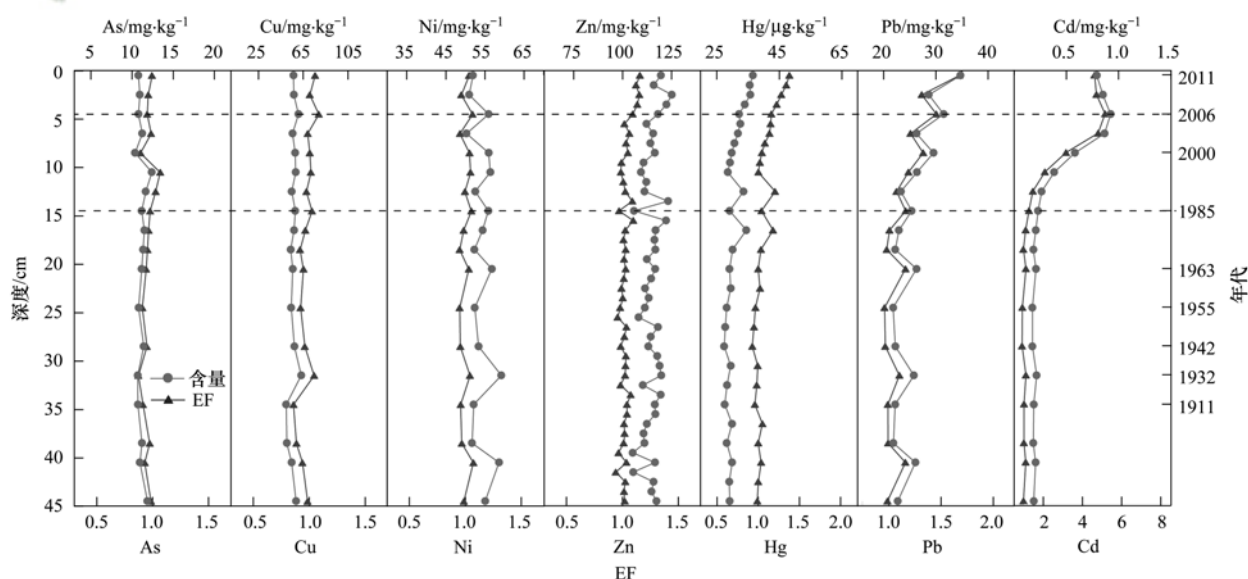


图 2 CH2012 岩芯重金属含量和 EF 垂向变化

Fig. 2 Vertical variations in concentrations and EF of heavy metals in core CH2012

80 年代中期以前,其含量较为稳定;80 年代中期到 2006 年,其含量急剧增加;2006 年以来,含量逐渐下降. 20 世纪 80 年代中期和 90 年代末期以来,Pb 和 Hg 含量分别呈波动增加趋势. 该岩芯中其他金属含量无明显变化趋势. CH2012 岩芯中金属元素变化趋势与 Zhang 等^[10] 研究结果相似.

2.2.2 不同湖区沉积岩芯中金属元素含量的变化

CH1~CH8 岩芯中各金属元素垂向变化趋势与 CH2012 岩芯相似(图 2 和图 3);沉积岩芯下部所有金属元素含量较低且较为稳定,岩芯中部 Cd 与 Pb 含量逐渐升高,岩芯上部 Cd 含量略呈降低趋势,而 Pb 含量则持续增加. 垂向上,各沉积岩芯中 Cd 含量变化最为明显,最大值与最小值的比值为 3.2~6.6,变异系数为 0.59;其余金属最大值与最

小值的比值为,1.0~1.6,变异系数介于 0.05~0.20(表 1).

程海不同湖区沉积岩芯中金属元素具有相似的富集规律(图 2 和图 3),表明各湖区较为稳定且相似的沉积环境变化特征,这与纳木错和泸沽湖等湖泊研究结果相似^[11,16]. 但不同湖区沉积岩芯中金属元素含量仍表现出一定时空差异(图 3),如:CH2012、CH4 岩芯 Cd 含量分别在 14.5 cm 和 18.5 cm 处开始明显增加,这主要与不同湖区沉积速率的差异有关. 此外,各岩芯之间每一种金属平均含量差异较小,最大值与最小值的比值为 1.2~1.8. 因此,采用单一或少数岩芯可以反映程海重金属等指标的变化趋势,但在全湖重金属污染等量化方面会存在较大的误差.

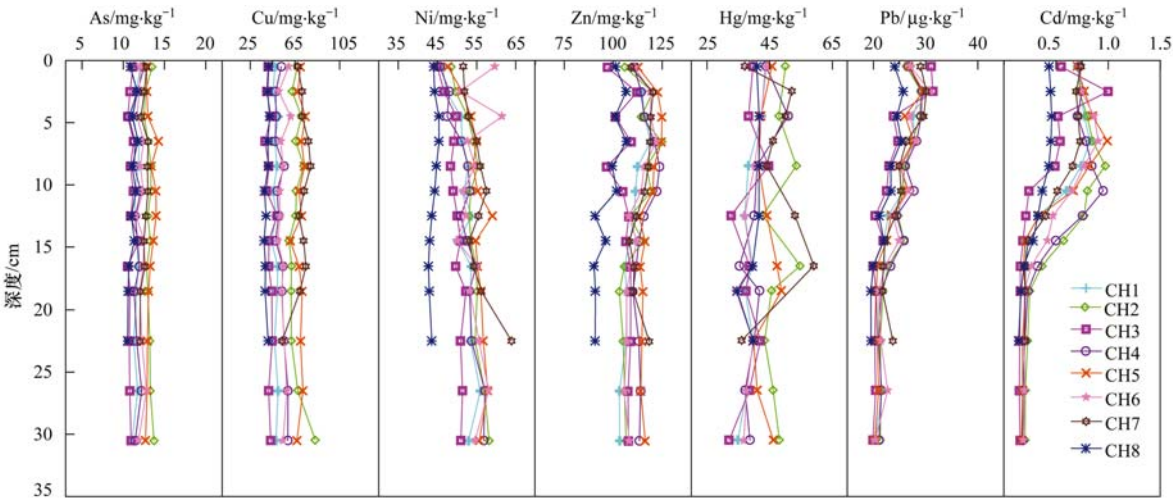


图 3 CH1~CH8 岩芯重金属含量垂向变化

Fig. 3 Vertical variations in concentrations of heavy metals in cores CH1-CH8

2.2.3 表层沉积物金属含量变化

程海表层沉积物(0~1 cm)金属元素平均含量大小依次为 Al>Fe>Ti>Zn>Cu>Ni>Pb>As>

Cd>Hg(表 1);其中变异系数最大为 0.20(Cu),金属元素含量的空间差异明显小于沉积岩芯中的垂向变异. 不同湖区表层沉积物中 As、Cd、Cu 和 Zn

表 1 程海不同类型沉积物金属元素含量统计

Table 1 Statistics of metals concentrations in the sediments of Chenghai Lake

项目	类型	Al /mg·g ⁻¹	Fe /mg·g ⁻¹	Ti /mg·g ⁻¹	As /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹	Hg /μg·kg ⁻¹	Ni /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹
表层沉积物(n=9)	范围	77.0~83.6	44.0~52.0	5.6~7.7	10.8~13.5	0.43~0.79	41.5~70.3	37~50	44.1~51.9	24.1~34.7	97~120
	均值	80.3	48.0	6.4	12.1	0.68	56.2	42	47.6	28.1	109
	变异系数	0.02	0.05	0.12	0.08	0.17	0.20	0.10	0.06	0.11	0.06
沉积岩芯(n=9)	范围	75.4~95.3	44.0~59.3	5.6~9.4	10.4~14.3	0.14~1.00	37.4~83.5	27~59	42.7~63.9	19.5~34.7	90~125
	均值	86.6	51.7	7.0	11.9	0.46	55.9	39	52.2	24.4	112
	变异系数	0.05	0.07	0.12	0.08	0.59	0.20	0.18	0.08	0.13	0.06
历史背景(n=9)	范围	77.4~95.2	46.0~57.9	6.0~8.5	10.6~13.5	0.15~0.21	39.7~75.7	29~47	43.3~60.0	19.5~22.7	91~115
	均值	89.4	52.9	7.2	11.9	0.19	57.1	38	54.6	21.2	108
云南土壤背景值 ^[5]		— ¹⁾	—	—	18.4	0.22	46.3	60	42.5	40.6	90
沉积物质量基准 ^[21]	TEC	—	—	—	9.8	0.99	31.6	180	22.7	35.8	121
	PEC	—	—	—	33	5	149	1 100	48.6	128	459

1)表示没有相关数据

空间差异不显著($P > 0.05$), 但 CH2、CH5 和 CH7 采样点的 As 和 Cu 含量相对较高; CH2012 采样点的 Cd 和 Zn 含量较高; Ni、Pb 和 Hg 含量存在一定的空间差异($P < 0.05$), 高值出现在 CH2012 和 CH7 采样点(图 4). 与我国西南地区受到流域强烈

人类活动影响的湖泊(如洱海^[5]、滇池^[9])相比, 程海表层沉积物中金属元素含量空间差异较小, 反映了较为稳定的物源输入与沉积环境, 此外还与重金属污染较弱、以面源污染(如大气沉降)为主并且不受工业点源排放的影响有关。

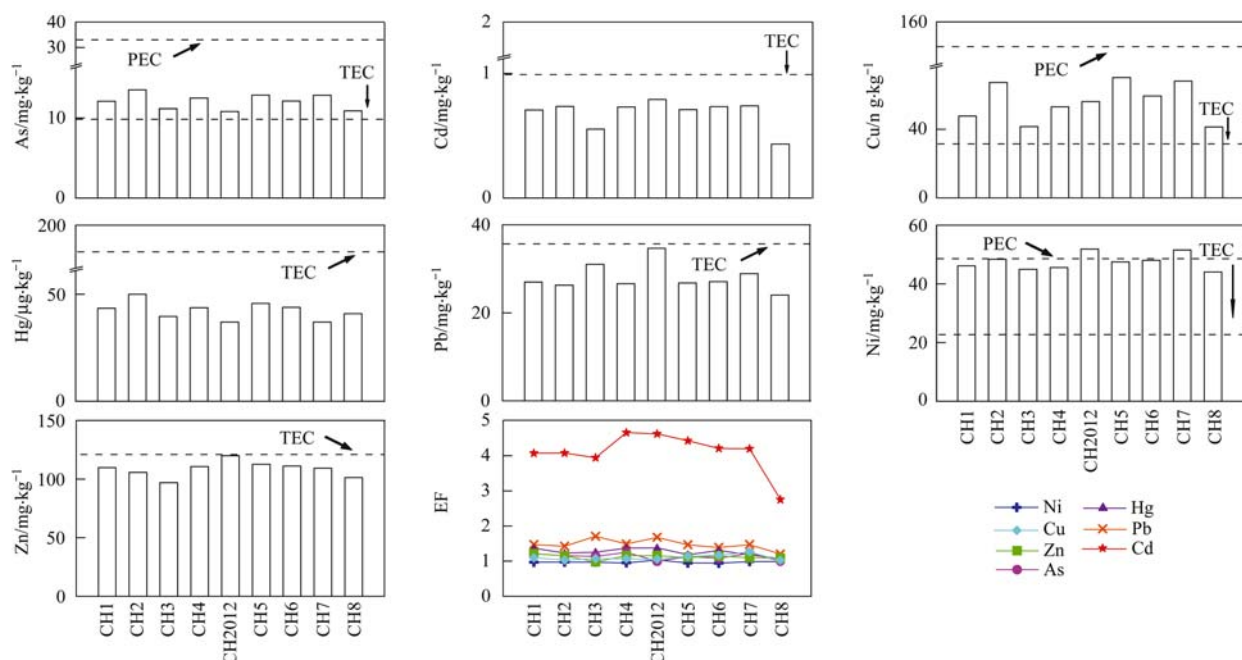


图 4 程海表层沉积物重金属含量、EF 及沉积物质量基准阈值(TEC 和 PEC)

Fig. 4 Concentrations and EF of heavy metals in the surface sediments of Chenghai Lake and the thresholds of sediment quality guidelines (TEC and PEC)

2.3 重金属污染评价

2.3.1 背景值的选取

背景值的选取直接影响到重金属污染程度的判别^[24], 区域土壤或者地壳中金属元素含量常被用来作为背景^[2,5]; 但由于基岩与土壤类型的差异, 湖泊等较小水体单元沉积物重金属背景与区域土壤或者地壳中金属元素含量可能明显不同^[2], 程海沉积物与云南土壤背景金属元素含量存在显著差异($P < 0.05$), 如表 1. 因此, 湖泊沉积物重金属污染评价时采用历史沉积物作为背景更为合适. 依据程海沉积岩芯年代及沉积速率($0.34 \sim 0.42 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$)^[14]、金属元素垂向变化规律(图 2 和图 3), 各岩芯底部对应于西南地区工业化与强烈人类活动干扰之前的沉积阶段, 可作为(准)自然背景. 为了进一步降低空间异质性的影响^[16], 本文采用每个岩芯的底部沉积物作为各自的背景.

2.3.2 重金属污染历史过程

鉴于 CH2012 岩芯较为精确的年代序列、以及不同湖区沉积岩芯重金属元素变化规律的相似性,

本文以 CH2012 岩芯为例阐述程海近百年来重金属污染的历史过程(图 2). CH2012 岩芯中 As、Cu、Ni 和 Zn 等金属元素 EF 值较为稳定($0.9 \sim 1.1$), 主要为自然来源; 20 世纪 80 年代中期以前, Pb 和 Cd 的 EF 值较为稳定, 均小于 1.2, 说明这两种元素以自然来源为主; 80 年代中期以来, Pb 与 Cd 的 EF 值呈不同程度增加, 受到人为污染的影响, 其污染具有明显的阶段性特征. 近 30 年来, Pb 的 EF 值逐渐增加, 最高达 1.7, 属于弱污染水平; 80 年代中期至 2006 年, EF 值反映了 Cd 污染程度快速增加, 已接近于重污染水平($EF \leq 4.6$); 2006 年以来, Cd 的 EF 值小幅下降, 其污染程度降低, 但仍保持中等污染水平. 20 世纪 90 年代末期以来, Hg 的 EF 值呈逐渐增加趋势, 最高达 1.4, 指示了较弱的人为污染特征.

2.3.3 各湖区沉积岩芯中重金属污染空间特征

各沉积岩芯中 As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的 EF 值分别为 $0.9 \sim 1.3$ 、 $0.9 \sim 4.8$ 、 $0.9 \sim 1.3$ 、 $0.9 \sim 1.6$ 、 $0.9 \sim 1.1$ 、 $0.9 \sim 1.7$ 和 $0.9 \sim 1.3$. Cd 和 Pb 仍是各岩芯中最为典型的污染元素, 其 EF 变化

趋势与 CH2012 岩芯相似(图 2 和图 5),说明不同湖区重金属污染具有相似的历史过程;但不同沉积岩芯中 Cd 和 Pb 的 EF 值变化幅度以及开始增加的深度仍存在一定的差别,如 CH4 岩芯中 Cd 的平均 EF 值是 CH9 岩芯的 1.5 倍,CH3、CH6 岩芯中 Cd 的 EF 值分别在 12.5cm 和 16.5cm 处开始增加,说明不同湖区沉积物人为重金属累积存在一定的差异. CH1~CH8 岩芯中, Hg 的 EF 值除了在近表层沉积物中稍高之外,并未表现出明显的垂向变化趋

势(图 5),一方面可能与 Hg 污染水平较低有关($EF < 1.5$),另一方面可能与岩芯中样品分析密度较低有关.

虽然程海沉积物中 Cu、Ni 和 Zn 含量均高于云南省土壤背景值(表 1),而 Cu 和 Zn 仅在部分近表层沉积物存在较弱的污染,这可能与程海流域基岩组分富含这些金属元素有关^[2,5]. 沉积物中 Pb 和 Hg 含量均低于云南土壤背景值,却表现出不同程度的污染,印证了背景值选取对重金属污染评价的重要性.

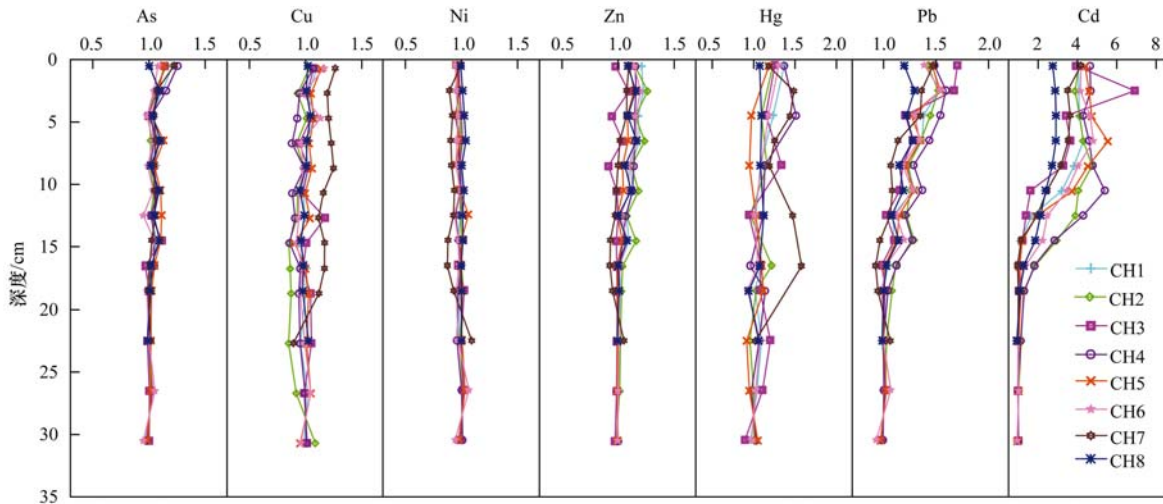


图 5 CH1~CH8 岩芯重金属 EF 垂向变化

Fig. 5 Vertical variations in EF of heavy metals in cores CH1-CH8

2.3.4 表层沉积物重金属污染空间变化

表层沉积物中 Ni 的 EF 值为 0.9~1.0, 主要为自然来源; As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的 EF 值分别为 1.0~1.3、2.7~4.7、1.0~1.3、1.1~1.4、1.2~1.7、1.0~1.2, 平均分别为 1.1、4.1、1.1、1.3、1.5 和 1.1. 参考 Sutherland^[20] 的 EF 划分标准, As、Cu、Zn 仅在部分采样点受到较弱人为污染的影响; Hg 和 Pb 在所有采样点都存在较弱污染; 而 Cd 是最典型的污染元素, 达到中等污染水平(图 4). 空间上, 表层沉积物中 7 种重金属的 EF 值并无明显的空间趋势($P > 0.05$).

2.4 西南地区典型湖泊重金属污染时空变化对比

从重金属污染种类来看, Cd、Hg、Pb 和 Zn 为西南地区湖泊沉积物中典型的重金属污染元素^[2,9,10]. 沉积记录显示, 抚仙湖^[2,25]、洱海^[5,18]、滇池^[9]等湖泊重金属污染略早于程海, 如: 洱海^[18]和滇池^[9]沉积物重金属污染均开始于 20 世纪 60 年代, 与流域内工业发展较早及工业废水直接排放影响有关. 在污染水平上, 洱海、抚仙湖等湖泊沉积物重金属污染程度大于程海, 而且重金属污染空间

差异更显著, 如: 洱海^[5]表层沉积物中 Cd 和 Hg 的 EF 值分别为 1.1~15.2 和 2.7~14.1, 平均达到重污染水平; 抚仙湖^[2,25]表层沉积物中 Cd 达到重度污染水平, Pb 和 Zn (EF 分别为 1.6~4.1 和 1.4~2.6) 达到中等污染水平, 可能与上述湖泊受到工业点源污染影响有关. 与受人类活动直接影响较弱的泸沽湖相似, 程海与泸沽湖沉积物中 Cd 污染最为突出, 平均为中等污染水平, 污染均开始于 20 世纪 80 年代中期.

2.5 程海沉积物人为重金属的来源分析

湖泊、河流等水体沉积物中重金属的污染来源非常广泛, 大致可分为工业和农业来源, 其输入途径可分为点源排放和面源污染两种^[2,5]. 虽然程海不同湖区沉积物重金属含量存在一定的变化, 但程海沉积物重金属污染程度空间差异不显著($P > 0.05$), 这与受到工业废水排放直接影响的湖泊明显不同^[6,7], 表明程海沉积物重金属污染主要受到面源的影响, 也与程海流域内无典型的工业污染源吻合. 已有研究表明, 源于有色金属冶炼释放的大气沉降是西南地区湖泊重金属污染的主要输入途径

之一^[2,5,18]. Tian 等^[26]的研究也表明, 西南地区是我国重要的大气重金属污染区, 云南省大气 Cd 释放量居全国第三位, Hg、Pb、Zn 等释放量也位居全国各省前列; 时间上, 20 世纪 80 年代以来各金属元素大气释放量快速增加^[26], 这与程海沉积物中 Cd、Pb 等污染变化趋势基本一致. 因此, 有色金属冶炼释放对程海沉积物 Cd、Pb 等污染有着至关重要的影响. 程海流域经济发展以农业为主^[13~15], 已有研究表明, 农药和化肥施用可导致土壤 As、Cu、Cd、Hg、Pb 和 Zn 等污染^[27], 农田中蓄积的人为重金属可能会随着土流失进入程海. 程海东北部设有仙人河引水工程作为程海补水水源^[12], 仙人河流经永胜县城, 据统计, 每年 2 316 t 生活污水通过仙人河引水带入程海^[12]; 城市废水中除了氮磷

等污染物之外, 还含有大量的重金属^[5,8]. 因此, 除了大气沉降之外, 农业面源和生活污水可能也是程海重金属污染的潜在来源.

2.6 重金属潜在生态风险评价

2.6.1 潜在生态风险指数法

程海表层沉积物重金属单因子潜在生态风险系数(E_r)和潜在生态风险指数(RI)如图 6 所示. As、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的 E_r 值均小于 40, 具有低等级潜在危害; Hg 和 Cd 的 E_r 值分别为 41 ~ 50 和 85 ~ 126, 均值为 45 和 110, 分别具有中等和较重潜在生态风险. 7 种重金属的 RI 值为 156 ~ 204, 均值为 182, 属于中等潜在生态风险; 其中 Cd 和 Hg 的贡献比较大(87%), 与其毒性响应系数和污染程度较高(以 Cd 为主)有关.

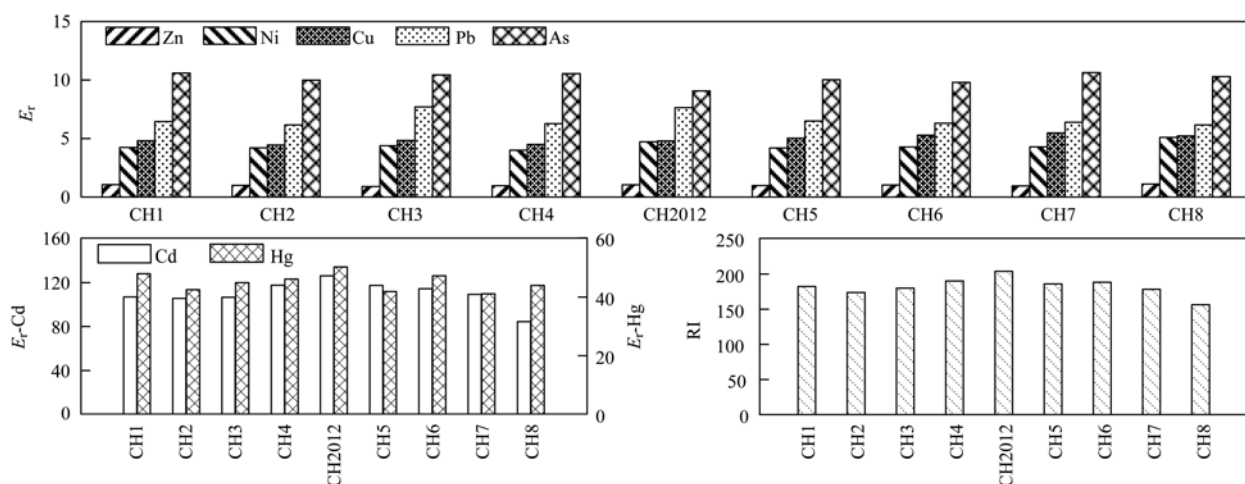


图 6 程海表层沉积物重金属单因子潜在生态风险系数(E_r)和潜在生态风险指数(RI)

Fig. 6 Ecological risk factor (E_r) and ecological risk index (RI) of heavy metals in surface sediments from Chenghai Lake

2.6.2 沉积物质量基准法

参考 SQGs, 程海表层沉积物中 Cd、Hg、Pb 和 Zn 的含量均低于 TEC 阈值; As 和 Cu 的含量介于 TEC 和 PEC 阈值之间; 两个样品中 Ni 的含量高于 PEC 阈值, 其余样品 Ni 含量也接近 PEC 阈值(图 4). 根据 SQGs 生态风险等级标准^[21], Cd、Hg、Pb 和 Zn 不会对底栖生物产生毒性效应; As 和 Cu 可能会对底栖生物产生毒性效应; Ni 对底栖生物有较高的毒性效应.

2.6.3 不同方法评价结果的对比研究

E_r 法与 SQGs 法的评价结果对比分析表明, 二者对程海表层沉积物 As、Cd、Cu、Hg 和 Ni 风险等级划分并不一致, 其中根据 SQGs 得到的 Cd 与 Hg 的生态风险明显小于 E_r 评价结果, 而根据 SQGs 得到的 As、Cu、Ni 的生态风险程度明显高于 E_r 评价结果. 形态提取结果表明^[6,7], 人为源的重金属在

沉积物中主要以生物可给态为主, 其含量与污染程度(如 EF 值)呈正相关, 具有相对较高的潜在生态风险; 自然源的重金属在沉积物中残渣态比例较高, 具有较低生物可给性与潜在生态风险^[4,7]. E_r 评价方法不仅考虑了重金属的毒性, 还考虑到重金属的污染程度, 即生物可利用形态含量的高低^[7]; SQGs 只以重金属总量为判断依据, 未考虑不同地域沉积物重金属背景值的差异. 程海沉积物中 As、Ni、Cu 均为无污染至弱污染水平, 结合其他水体沉积物重金属污染与赋存形态分析结果^[7], 程海表层沉积物中 As、Cu、Ni 应以残渣态为主, 具有较低的生物可给性, 因此它们应具有较低的潜在生态风险. 根据 SQGs 评价, As、Cu、Ni 具有较高的风险等级, 可能与程海流域基岩与土壤母质中富含上述元素有关. 程海表层沉积物中 Cd 平均为中等污染水平(EF = 4.1), 在很大程度上会对底栖生物产生

毒性效应。Hg 的含量均低于 TEC 阈值,表明其不会对底栖生物产生毒性效应,这与富集系数推断的 Hg 较弱污染水平的相符,但由于 Hg 较高的毒性系数,程海沉积物中 Hg 可能会对底栖生物产生毒性效应。

综合 E_r 和 SQGs 评价结果,并参考重金属的污染程度,程海表层沉积物中重金属 As、Cu、Ni、Pb 和 Zn 具有低生态风险,而 Hg 和 Cd 具有中-高等生态风险。只根据 SQGs 法,而不考虑重金属污染程度,程海表层沉积物中 Cd 潜在生态风险会被低估,As、Cu 和 Ni 潜在生态风险会被高估。因此,富集系数可以作为基于 SQGs 生态风险评价方法的补充信息,相对于 SQGs, E_r 法可能更为准确地反映沉积物重金属的潜在生态危害。采用多种生态风险评估方法进行对比分析,能够减小单一评估方法带来的不确定性,提供更加可靠的评估结果。有研究表明,湖泊等水生系统中重金属的生态风险还受水体富营养化水平的影响,水体富营养化能够导致重金属的 Fe-Mn 氧化物结合态、有机物和硫化物结合态发生转化^[28];程海现已属于中富型营养化湖泊^[13,15],因此,在今后的研究中,还应结合形态分析、生态毒理监测等方法对程海沉积物重金属潜在生态风险程度做进一步的分析。

3 结论

近百年来,程海不同湖区沉积岩芯中 Cd 和 Pb 具有相似的污染历史,20 世纪 80 年代中期之前,其含量与富集系数较为稳定,主要为自然来源;80 年代中期至 2006 年,Cd 和 Pb 含量与富集系数快速增加,显示了持续增强的人为污染;此后,Cd 含量与富集系数趋于平稳并略呈下降,但仍属中等污染水平,Pb 含量与富集系数持续增加,保持弱污染水平。Hg 含量和富集系数自 20 世纪 90 年代末期开始增加,属较弱污染水平。沉积岩芯中 As、Cu 和 Zn 含量较为稳定,主要为自然来源,仅在近表层沉积物存在较弱水平污染。不同湖区沉积岩芯中金属含量与富集系数变化幅度、以及开始增加的深度存在一定的差别,但污染程度空间差异并不显著。结合区域大气重金属污染与排放特征以及程海流域经济发展特征,程海沉积物重金属污染受到大气沉降以及流域农业面源、生活污水排放的共同影响。单一评价方法在生态风险等级划分方面存在很大的不确定性;根据沉积物质量基准法和潜在生态风险指数法以及富集系数综合分析,程海表层沉积物中

Hg 和 Cd 具有中-高程度的潜在生态风险,其余金属为低生态风险等级。

致谢:肖霞云副研究员、蒋庆丰副教授、纪明博士、罗文磊、宁栋梁等参加野外采样,朱育新副研究员、蔡艳杰协助完成金属元素测定,夏威夷高级工程师负责完成沉积岩芯年代测定,在此深表感谢。

参考文献:

- [1] Stankovic S, Kalaba P, Stankovic A R. Biota as toxic metal indicators[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, **12**(1): 63-84.
- [2] 燕婷,刘恩峰,张恩楼,等. 抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 50-58.
Yan T, Liu E F, Zhang E L, *et al.* The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Lake Fuxian and the contamination assessment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 50-58.
- [3] 李莹杰,张列宇,吴易雯,等. 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
Li Y J, Zhang L Y, Wu Y W, *et al.* GIS spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
- [4] 林承奇,胡恭任,于端莲,等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [5] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China[J]. *Catena*, 2016, **145**: 193-203.
- [6] 秦延文,张雷,郑丙辉,等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
- [7] Liu E F, Shen J. A comparative study of metal pollution and potential eco-risk in the sediment of Chaohu Lake (China) based on total concentration and chemical speciation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(12): 7285-7295.
- [8] Liu E F, Shen J, Yang L Y, *et al.* Assessment of heavy metal contamination in the sediments of Nansihu Lake Catchment, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **161**(1-4): 217-227.
- [9] 李梁,胡小贞,刘聘婷,等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(S1): 46-51.
Li L, Hu X Z, Liu P T, *et al.* Heavy metals distribution characteristics and potential ecological risk evaluation in the sediment of outer area of Lake Dianchi[J]. *China Environmental*

- Science, 2010, **30**(S1): 46-51.
- [10] Zhang Y L, Huo S L, Zan F Y, *et al.* Historical records of multiple heavy metals from dated sediment cores in Lake Chenghai, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(5): 3897-3906.
- [11] 林琪, 刘恩峰, 张恩楼, 等. 泸沽湖近代沉积环境时空变化特征及原因分析[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 246-256.
- Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Temporal and spatial variations in sedimentary characteristics of Lake Lugu during the last hundred years and the influence factors analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 246-256.
- [12] 程静. 对永胜县程海流域环境治理的思考[J]. 林业调查规划, 2005, **30**(3): 42-45.
- Cheng J. Thinking on environmental control of Chenghai River basin in Yongsheng County[J]. Forest Inventory and Planning, 2005, **30**(3): 42-45.
- [13] 于洋, 张民, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊水质现状及演变[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 820-828.
- Yu Y, Zhang M, Qian S Q, *et al.* Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(6): 820-828.
- [14] 吴敬禄, 蒋雪中, 夏威夷, 等. 云南程海近 500 年来湖泊初始生产力的演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(2): 95-98.
- Wu J L, Jiang X Z, Xia W L, *et al.* Climate and primary productivity over the last 500 years of the Chenghai Lake, Yunnan[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, **22**(2): 95-98.
- [15] Wu J L, Gagan M K, Jiang X Z, *et al.* Sedimentary geochemical evidence for recent eutrophication of Lake Chenghai, Yunnan, China[J]. Journal of Paleolimnology, 2004, **32**(1): 85-94.
- [16] Wang Y, Zhu L P, Wang J B, *et al.* The spatial distribution and sedimentary processes of organic matter in surface sediments of Nam Co, Central Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(36): 4753-4764.
- [17] Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments [A]. In: Last W M, Smol J P (Eds.). Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques[M]. New York: Springer, 2001. 171-196.
- [18] Li K, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Historical variations of atmospheric trace metal pollution in Southwest China: Reconstruction from a 150-year lacustrine sediment record in the Erhai Lake [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **172**: 62-70.
- [19] 邴海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 675-683.
- Bing H J, Wu Y H, Liu E F, *et al.* The accumulation and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediment of different lakes within the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 675-683.
- [20] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [21] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.
- [22] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] Zhang J, Deng H G, Wang D Q, *et al.* Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(1): 323-332.
- [24] Dung T T T, Cappuyns V, Swennen R, *et al.* From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2013, **12**(4): 335-353.
- [25] 曾海鳌, 吴敬禄. 近 50 年来抚仙湖重金属污染的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 128-132.
- Zeng H A, Wu J L. Recent fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution in the Fuxian Lake[J]. Quaternary Sciences, 2007, **27**(1): 128-132.
- [26] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, *et al.* Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(17): 10127-10147.
- [27] 王铁宇, 吕永龙, 罗维, 等. 北京官厅水库周边土壤重金属与农药残留及风险分析[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(4): 57-61.
- Wang T Y, Lv Y L, Luo W, *et al.* Heavy metal and pesticide residues in soils around the Guanting reservoir and environmental risk assessment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, **22**(4): 57-61.
- [28] De Jonge M, Teuchies J, Meire P, *et al.* The impact of increased oxygen conditions on metal-contaminated sediments part I: effects on redox status, sediment geochemistry and metal bioavailability [J]. Water Research, 2012, **46**(7): 2205-2214.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)