

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估

谢婷, 罗东霞, 杨瑞强*

(中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 2008年7月采集了青藏高原南部普莫雍错的湖芯沉积物样品, 利用微波消解和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分析了样品中Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Mn和Fe的含量, 其平均浓度分别为26.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、6.64 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、16.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、26.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、50.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.363 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、16.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、0.302 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和9.84 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 略高于南极沉积物, 但低于人类影响较大的云南滇池、内蒙古岱海、北美五大湖和太湖相应浓度, 处于较低浓度水平。重金属垂向浓度分布波动较小, 表层浓度较高。主成分分析和聚类分析结果表明, 有机质和Mn受地表径流陆源碎屑输入影响较大, 而其他重金属主要受天然成岩风化及大气沉降影响。采用沉积物质量基准法和潜在生态风险指数法进行生态风险评估, 结果表明普莫雍错沉积物中重金属的生态风险水平较低。

关键词: 普莫雍错; 青藏高原; 重金属; 沉积物; 湖泊

中图分类号: X132; X833 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4135-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.013

Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet

XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang

(State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The sediment core was collected in Pumoyum Co, a lake located in southern Tibetan Plateau, in July 2008. Samples were digested using microwave equipment and analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) to determine the content of heavy metals in the sediments. The average concentrations for Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Mn and Fe were 26.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 6.64 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 16.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 26.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 50.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 0.363 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 16.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 0.302 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and 9.84 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The concentrations of analysed metals in Pumoyum Co were slightly higher than those in Antarctic, but lower than those from Dianchi in Yunnan, Daihai in Inner Mongolia, the Great lakes in North America and Taihu in China, which were obviously affected by anthropogenic activities. Overall, these metals in sediments from Pumoyum Co represented a low concentration level. Vertical profiles of heavy metals in the sediment core kept stable without large fluctuation and the concentrations in surface slices were relatively higher. Results of principle component analysis and cluster analysis indicated that organic matter and Mn were affected by surface runoff markedly while other metals were mainly correlated to natural diagenetic weathering and atmospheric deposition. Sediment quality guideline and potential ecological risk index were introduced to assess sediment quality and both of their results indicated that the Pumoyum Co as a whole can be ranked as low potential ecological risk.

Key words: Pumoyum Co; Tibetan Plateau; heavy metals; sediment; lake

随着人类城市化和工业化的发展,大量重金属元素进入环境,由于其具有易积蓄、难降解和危害大等特征,对人类健康及生态环境造成威胁,因此引起全球各界的广泛关注。铬(Cr)、镉(Cd)和铅(Pb)等重金属元素已被国际癌症研究署归类为可对人类以及野生生物致癌的物质^[1]。污染物进入环境水体后能够通过颗粒吸附和重力沉降等作用,进一步进入沉积相中,因此沉积物成为水体甚至整个环境中污染物的重要的汇^[2]。沉积物中的重金属进而会影响栖息在底泥中的生物,在生物富集和累积效应的作用下给处在食物链顶端的人类带来威胁。

通过评价沉积物中重金属的含量水平,可以有效地评价水体的污染程度以及可能的生态风险。

目前我国有关水体沉积物中重金属的研究工作主要集中在沿海^[3~5]以及内陆发达区域湖泊^[6, 7],有关偏远地区,特别是全球平均海拔最高的青藏高原湖泊的研究比较匮乏^[8, 9]。尽管这些地区受到人类直接影响较小,但是已有大量研究证明,重金属也

收稿日期: 2014-03-29; 修订日期: 2014-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277167, 41073093)

作者简介: 谢婷(1989~),女,硕士,主要研究方向为环境化学, E-mail: xieting118@126.com

* 通讯联系人, E-mail: rxyang@rcees.ac.cn

可以伴随细颗粒通过大气长距离传输迁移至远离污染源的地区^[10~13]。青藏高原,作为全球将近半数人口的水源之地,其水生系统中重金属的污染水平将直接影响人类健康,并影响脆弱高原生态系统的稳定性,因此相关调查亟待展开。本研究通过分析青藏高原普莫雍错不同深度沉积物样品中重金属的含量,对其在沉积物中的垂向分布特征进行了分析;采用主成分分析及聚类分析方法,对沉积物中重金属的可能来源进行了分析;基于调查的沉积物中重金属含量,采用潜在危害指数法,对其可能引起的生态风险进行了评估;以期为青藏高原湖泊沉积物的环境风险管理积累数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

普莫雍错地处西藏南部(图1),位于羊卓雍错以南、喜马拉雅山北坡的一个山间盆地内,湖面海拔为5 020 m,湖面面积为290 km²,年均温2~4℃,主要由其南面山区的库拉岗日雪山的冰川融雪补给^[14, 15]。普莫雍错周边人类活动有限,受到直接的人为影响较小。

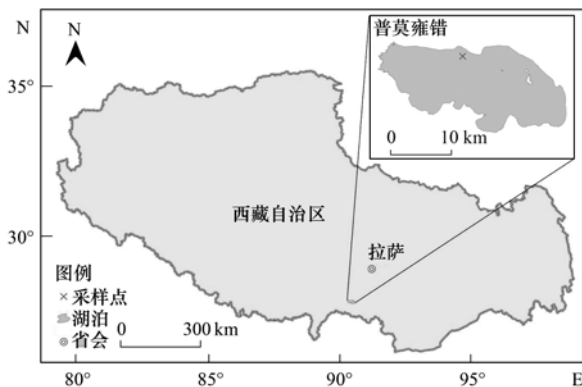


图1 采样点示意

Fig. 1 Location of sampling site

1.2 样品采集和分析

2008年7月采用HTH重力采样器对普莫雍错的湖芯样品进行了采集,采样点坐标为28°36′28.06″N, 90°22′09.87″E,采样器直径为6 cm,沉积柱长度为20 cm,以0.5 cm长度为间隔对沉积柱样品进行现场切割,并用洁净的铝箔将每个子样分别包装,冷冻运输至实验室,冷冻干燥后进行研磨过筛,于-20℃保存。

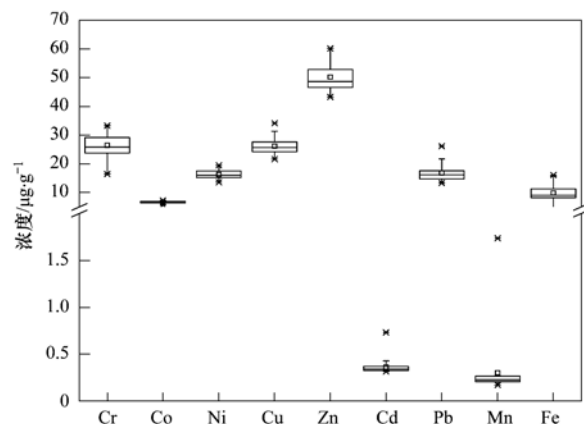
沉积物样品采用微波消解法进行处理:称取0.1 g样品,加入3 mL HNO₃(德国Merk,优级纯)、2 mL H₂O₂(国药集团,优级纯)和1 mL HF(国药集

团,优级纯),采用CEM MARS 5微波消解仪进行消解。样品消解溶液定容后过0.22 μm的滤膜以除去可能存在的颗粒。样品中重金属元素铬(Cr)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)和锰(Mn)采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Agilent 7500a)进行测定,Fe采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, PerkinElmer Optima 8300)进行测定,重金属混合标准溶液购自国家有色金属及电子材料分析测试中心,测样时通过加入In和Y内标在线监测信号变化,以保证测量的准确性。为了验证实验方法的可靠性,对标准沉积物SRM 1944(购自美国National Institute of Standards and Technology, NIST)中上述各重金属元素进行了分析,回收率在82.7%~116%之间。实验过程还进行了实验空白以及平行性控制,空白中重金属含量远低于样品浓度,平行样品间的RSD均小于20%。沉积物有机质(organic matter, OM)的含量是通过将定量样品置于马弗炉中550℃烘6 h至恒重,测其处理前后所损失的质量即得。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的浓度水平

普莫雍错湖芯中Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb的平均浓度分别为26.4、6.64、16.2、26.2、50.2、0.363和16.8 μg·g⁻¹, Mn和Fe的平均浓度分别为0.302 mg·g⁻¹和9.84 mg·g⁻¹,浓度范围见图2。OM的范围为7.73%~12.97%,平均值为8.76%。普莫雍错由于地理位置偏远,周边人类活动较少,基本无重金属的直接污染输入



其中Mn和Fe的浓度单位为mg·g⁻¹

图2 沉积物中各重金属元素的浓度范围比较

Fig. 2 Concentration comparisons of different heavy metals in lake sediments

源,因此重金属的浓度总体处于较低水平. 例如从表 1 可以看出,普莫雍错沉积物中以上几类重金属均低于人为因素影响相对较大的云南滇池^[16]、内蒙古岱海^[17]、北美五大湖^[18]、太湖^[6]以及湘江等地的研究结果^[19](低了 50% ~ 90%),并与人类活动相对较少的青海^[20]、天山赛里木湖^[2]的沉积物金属浓度相似,略高于南极沉积物^[21]. 然而本研究沉积物中 Cu 和 Cd 的含量相对欧洲 Pyrenees Respomuso 湖^[22]较高,并高于巢湖^[7]、海州湾^[5]以及黄海^[3]等人类活动更密集的地区,Zn 的含量也与黄海^[3]沉积物相当,可能与本研究区域的地质因素有关.

表 1 本研究及其他研究中沉积物重金属的浓度¹⁾/μg·g⁻¹
Table 1 Concentrations of heavy metals in sediments from this study and other literatures/μg·g⁻¹

研究区域	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Mn	Fe	文献
普莫雍错	26.4	6.64	16.2	26.2	50.2	0.363	16.8	302	9 845	本研究
希门错	57.3	11.9	30.2	44.2	146	0.600	49.1	972	—	[9]
滇池	88.0	—	118	122	201	1.20	127	759	57 365	[16]
内蒙古岱海	—	16.9	43.3	54.4	106	—	18.4	—	36 248	[17]
天山赛里木湖	39.0	—	—	21.4	65.2	0.250	19.7	—	—	[2]
北美 Great lakes	275	—	43.0	48.0	107	1.40	67.0	—	—	[18]
欧洲 Respomuso 湖	31.5	14.5	23.1	13.1	36.5	1.93	82.0	1 171	—	[22]
南极	—	—	—	17.0	9.00	0.170	20.0	—	—	[21]
太湖	148	—	47.9	39.6	113	1.32	40.4	798	—	[6]
巢湖	37.5	—	—	17.3	115	0.180	15.1	502	39 855	[7]
湘江	—	—	—	147	1 610	25.0	363	—	—	[19]
辽东半岛	70.0	—	27.0	31.0	79.0	0.400	32.0	~450	~26 000	[4]
海州湾	74.2	—	—	19.4	73.3	0.174	18.2	—	—	[5]
黄海	48.9	9.30	22.0	15.9	57.3	0.090 0	24.1	353	25 600	[3]

1) “—”表示文中没有相关数据

2.2 沉积物中重金属的垂向分布

普莫雍错沉积物主要来源于流域径流以及颗粒沉降过程,因此不同深度沉积物中重金属的含量反映了天然成岩老化、径流输入以及大气沉降等作用的历史变化过程^[23],而 OM 的含量则可反映湖泊内源与外源有机质输入与保存状况^[15]. 从图 3 可以看出,OM 随深度分布较稳定,表层 OM 含量最高(12.97%),可能是由于表层沉积物中含有较多的植物碎屑. 而对于 9 种重金属元素,从底层到表层

浓度波动较小,与赛里木湖^[2]和南极^[21]的研究结果相似,推测可能是长期以来该区域的重金属输入量(大气颗粒沉降、降雨或成岩过程)较为稳定. 王君波等^[15, 24]通过不同岩心粒度指标的变化提出普莫雍错沉积物 10 cm 以上层段具有较强的水动力条件,可能会引起沉积物扰动现象的发生,因此沉积物扰动可能也是导致重金属垂向浓度波动较小的原因之一. 除此之外,沉积物还可能会受到湖内水生生物(如裸鲤)的扰动作用. 从图 3 中还可以看出,表

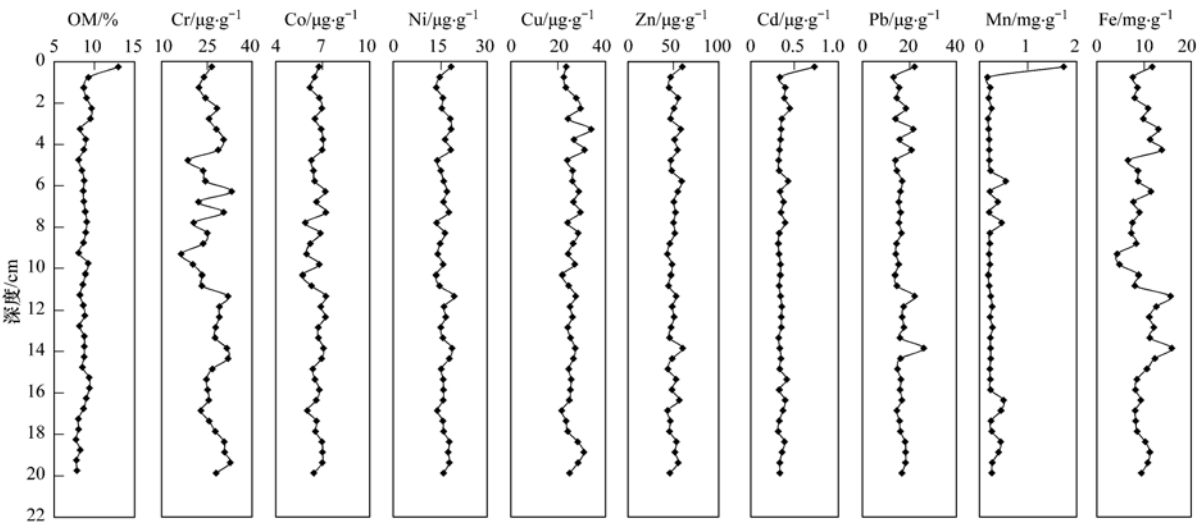


图 3 普莫雍错沉积物中 OM 以及重金属的垂直分布
Fig. 3 Vertical profiles of OM and heavy metals in sediments from Pumoyum Co

层沉积物(0 ~ 1.5 cm)重金属含量呈现增长趋势,这可能与表层植物碎屑含量以及水含量较高有关.植物已被大量研究证实在一定程度上会对重金属元素进行生物富集^[25~28],而重金属由于具有一定的水溶性,在沉积物样品冷冻干燥过程中,溶解在水溶液中的重金属可能会转移至沉积物中.另外,从中可看出一个明显的现象是 Cr 和 Fe 的垂直分布趋势具有显著的相似性,反映了两者在沉积物中分配时可能存在相关性.

2.3 相关分析与来源分析

为了分析不同金属元素间及其与 OM 间的相关性及来源,利用软件 SPSS 18.0 对测得数据进行主成分分析、相关矩阵分析和聚类分析.在此之前为了判断数据变量是否适合作因子分析,对数据变量进行了 KMO 和 Bartlett 球形度检验.当 KMO 值 > 0.5 时可认为变量适用于作因子分析,本研究测试结果 KMO = 0.74, Bartlett 检验统计量为 358.60 ($df = 0.45, P < 0.001$),结果均符合因子分析要求.

2.3.1 主成分分析

通过主成分分析,提取出两个特征值大于 1 的成分,累积占有主成分方差的 74.6% (表 2).在成分 1 中(占 53.6% 方差),Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Fe 均呈现显著的正载荷,反映了这些金属元素具有一定程度相似的来源和分配过程.而在成分 2 中(占 21.0% 方差),仅有 OM 和 Mn 具有显著正载荷,说明其与成分 1 中其他金属元素的来源可能存在差异.图 4 为不同变量的载荷分布,从中可以看出显著的成分分配.

表 2 沉积物中环境变量的主成分分析结果
Table 2 Result of principle component analysis (PCA)
for the environment variables of the sediments

项目	成分	
	1	2
OM	0.190	0.850
Cr	0.782	-0.366
Co	0.811	-0.308
Ni	0.911	-0.084
Cu	0.681	-0.405
Zn	0.793	0.252
Cd	0.750	0.355
Pb	0.894	0.147
Mn	0.268	0.868
Fe	0.837	-0.122
方差%	53.583	21.010
累积方差%	53.583	74.593

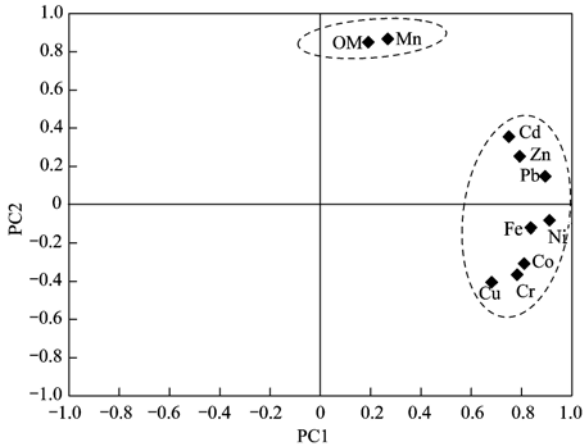


图 4 主成分载荷分布

Fig. 4 PCA result showing loading distribution

2.3.2 相关矩阵分析

通过相关矩阵分析可以得出不同变量间具体的相关性,如表 3 所示,各金属元素之间(除 OM 和 Mn 外)均显著正相关,与主成分分析结果一致,反映了其来源与分配过程的相似性. Fe 作为一种天然大量元素,主要受岩石地球化学过程控制,它与除 Mn 以外的重金属元素均呈现显著的正相关性 ($P < 0.01$).不少研究已证实铁锰氧化物对各种重金属元素均有显著的吸附作用^[29~31],因此铁锰氧化物可能会影响重金属在沉积物中的分配或扰动再分配过程,这可能是 Fe 与各重金属元素显著相关的主要原因.同时,从表 3 中可以得出 Cr 是与 Fe 相关性最显著的元素 ($r = 0.813$),从而解释了上文中 Fe 与 Cr 相似的垂直分布趋势.

然而,Mn 与 Fe 的规律截然相反,其与重金属元素间无显著相关性或相关性较弱,但与 OM 的相关系数达到 0.736,与上述主成分分析结果一致,说明 Mn 的来源可能还受到其他因素干扰,且这种干扰作用与 OM 的来源具有相关联系. OM 可以反映沉积物中有机质的含量水平,一般主要受陆源植被以及湖内浮游生物(如藻类)的影响^[15].随着全球变暖导致温度升高,冰川融水对普莫雍错的补给增加,地表径流也相应增强^[15, 32],因此陆源有机质输入的影响加大,从而导致近表层沉积物中有机质含量增加,这与上文表层沉积物 OM 值较高的规律一致.同时,王君波等^[15]在研究普莫雍错岩芯环境指标时提出,沉积物中 Mn 出现富集堆积现象可能是因为湖泊西部主要补给河流(冰川供给)带入了较多含 Mn 的陆源碎屑.因此,本研究沉积物中 OM 与 Mn 表层浓度增加以及两者显著的相关性可能主要受地表径

表3 普莫雍错沉积物中各金属元素间及其与 OM 的相关矩阵分析¹⁾

Table 3 Correlation matrix between metals and OM of the sediments from Pumoyum Co

	OM	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Mn	Fe
OM	1									
Cr	-0.093	1								
Co	0.038	0.790 **	1							
Ni	0.133	0.754 **	0.808 **	1						
Cu	-0.173	0.507 **	0.683 **	0.631 **	1					
Zn	0.313 *	0.443 **	0.556 **	0.655 **	0.559 **	1				
Cd	0.326 *	0.283	0.332 *	0.603 **	0.383 *	0.635 **	1			
Pb	0.168	0.570 **	0.576 **	0.733 **	0.503 **	0.706 **	0.850 **	1		
Mn	0.736 **	-0.010	-0.008	0.202	-0.172	0.409 **	0.369 *	0.330 *	1	
Fe	0.031	0.813 **	0.607 **	0.704 **	0.408 **	0.482 **	0.650 **	0.782 **	0.095	1

1) * 表示在 $P=0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P=0.01$ 水平上显著相关

流陆源碎屑输入的影响。

2.3.3 聚类分析

聚类分析采用 Ward 法,欧几里德距离和 Pearson 相关系数分别作为距离指标和相似性指标,分析结果如图 5 所示。从中可以看出变量主要聚集为两大类,第一类包括 Cd、Pb、Zn、Cr、Fe、Co、Ni 和 Cu,第二类包括 OM 和 Mn,分析结果与主成分分析结果以及相关矩阵分析结果一致。第一类元素与 OM、Mn 间显著的欧几里德距离差异反映了两种类别组分的来源可能不同,即第一类金属元素受地表径流影响较小,鉴于普莫雍错周边人烟稀少、人类活动影响有限,这些重金属元素可能主要来自天然成岩风化及大气沉降过程。

从图 5 中还可以看出,根据欧几里德距离第一类元素又分为 3 组: Fe—Cr、Co—Ni—Cu 和 Cd—Pb—Zn,这可能与不同金属的产生、分配以及长距离迁移能力等因素的异同有关^[1, 3, 16, 23]。例如 Co—

Ni—Cu 常与电池、电镀和涂料工业的排放有关^[33], Qu 等^[34]的研究表明在电镀过程中会释放 Cu、Ni、Co、Zn、Cd 等金属。Cd—Pb—Zn 则主要与工农业使用有关,例如在冶金工业和化石燃料的燃烧过程中会释放挥发性的 Pb、Zn^[35], Cd 在肥料以及杀虫剂方面有较广泛的应用^[36]。另外,在印度季风和西风带的显著影响下,青藏高原周边国家密集的人类活动过程产生的重金属污染物很可能通过吸附在细颗粒上随大气传输迁移至青藏高原区域^[10, 23],而已有研究表明不同金属的长距离迁移能力差异较大^[10, 11, 37, 38]。

综上所述,可推测地表径流中陆源碎屑的输入是沉积物中 OM 与 Mn 的重要共同来源,而其他重金属受地表径流影响较小,主要来源于天然成岩风化以及大气沉降过程。相关性分析结果反映了不同重金属元素主要产生过程及长距离迁移能力的差异。

2.4 生态风险评价

2.4.1 沉积物质量基准法 (sediment quality guideline, SQG)

本研究采用两类常用的沉积物质量基准^[39]评价沉积物中重金属的风险水平: 阈值效应浓度 (threshold effects level, TEL) 和可能效应浓度 (probable effects level, PEL); 风险低值 (effects range low, ERL) 和风险中值 (effect range median, ERM)。一般而言,当污染物浓度低于 TEL 或 ERL 时,基本不会对环境系统产生不良影响,而当污染物浓度高于 PEL 或 ERM 时,可能存在生态风险。从表 4 中可以看出,所有样品中 Cr、Zn 和 Pb 的浓度均低于 TEL 和 ERL,表明普莫雍错沉积物中这 3 种金属不会对水生环境造成生态风险。对于 Cd 而言,最表层沉积物的浓度略高于 TEL 值,但远低于 PEL,说明 Cd 对水生系统的不良影响同样较小。然而,对于

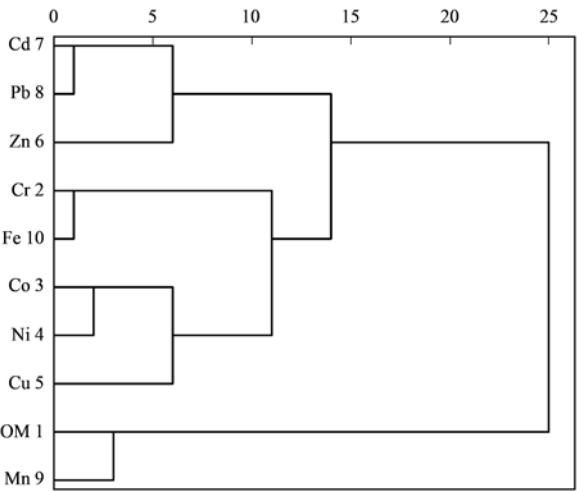


图5 沉积物中重金属和 OM 的聚类分析系统树状图

Fig. 5 Dendrogram showing clusters of heavy metals and OM of sediments

Ni 和 Cu, 分别有 55% 和 100% 的沉积物样品浓度超过 TEL, 另有 1 个沉积物样品的 Cu 浓度高于 ERL, 但两者均显著低于 PEL 和 ERM, 对水生系统造成不良影响的可能性较低。

表 4 利用两种沉积物质量基准系数评价普莫雍错沉积物重金属的潜在生态风险¹⁾

Table 4 Assessments of potential ecological risks of heavy metals in sediment from Pumoyum Co using two kinds of SQG						
项目	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
浓度范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	16.5 ~ 33.3	13.6 ~ 19.4	21.6 ~ 34.1	43.3 ~ 60.2	0.315 ~ 0.735	13.3 ~ 26.1
TEL	52.3	15.9	18.7	124	0.68	30.2
> TEL/%	0	55 (22)	100 (40)	0	2.5 (1)	0
PEL	160	42.8	108	271	4.21	112
> PEL/%	0	0	0	0	0	0
ERL	81	20.9	34	150	1.2	46.7
> ERL/%	0	0	2.5 (1)	0	0	0
ERM	370	51.6	270	410	9.6	218
> ERM/%	0	0	0	0	0	0

1) 黑体表示浓度超过质量基准, 括号内为对应于百分比的样品个数

2.4.2 潜在生态风险指数法

Hakanson 生态风险指数 (potential ecological risk index, RI) 是建立在综合重金属的毒性以及生物体对环境中污染物响应的基础上进行评价的^[40]。计算如下:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i f_i = \sum T_i C_i / B_i$$

式中, RI 为所有重金属的风险因子之和; E_i 为单种重金属的生态风险因子; T_i 为特定污染物的毒性响应因子; f_i 为污染因子; C_i 为沉积物中重金属的含量; B_i 为参考值。利用计算所得的 E_i 及 RI 值, 结合

表 5 中的临界标准值即可对沉积物中重金属的生态风险水平进行初步评估。本研究不计算大量元素 Fe 和 Mn 的风险指数, Co 由于缺少标准数据也未参与计算, 计算结果如表 6 所示。

表 5 潜在生态风险指数评价标准

Table 5 Evaluation criterion of potential ecological risk index			
E_i 范围	单因子生态风险水平	RI 范围	综合生态风险水平
< 40	低	< 150	低
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	较高	300 ~ 600	较严重
160 ~ 320	高	≥ 600	严重
≥ 320	严重		

表 6 普莫雍错沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk index of metals in sediments from Pumoyum Co						
元素	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
T_i	2	5	5	1	30	5
$B_i/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	60	40	30	80	0.50	25
E_i	0.55 ~ 1.11 ¹⁾ (0.88) ²⁾	1.71 ~ 2.43 (2.02)	3.60 ~ 5.69 (4.36)	0.54 ~ 0.75 (0.63)	18.94 ~ 44.08 (21.77)	2.65 ~ 5.23 (3.35)
RI	29.13 ~ 56.38 (33.02)					
综合风险水平	低					

1) 表示所有研究深度沉积物的重金属风险指标范围; 2) 括号内数值表示其平均值

结合表 5 和表 6 可以得出重金属的生态风险指数 E_i 的大小顺序为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$, 单因子风险均属于较低水平 (< 40), 综合生态风险指数 $RI = 33.02$, 其中 Cd 是最大的生态风险贡献因子, 沉积物中重金属总体处于低风险水平 (< 150), 不会对生态系统造成危害。

以上两种风险评价结果一致表明, 普莫雍错沉积物中重金属的风险水平较低, 不会对湖泊沉积物以及水生生物的生存构成威胁。然而, 从分析结果可以看出, Cu 和 Ni 在大部分沉积物样品中浓度均高于 TEL, 考虑到重金属的生物富集和食物链放大

作用^[19, 41], 它们的影响应当引起足够重视。

3 结论

通过分析普莫雍错湖芯沉积物样品中重金属含量, 发现该湖重金属的含量属于较低水平。重金属的垂向分布变化幅度较小, 表层沉积物浓度略有上升趋势, 可能受沉积物扰动和植物碎屑等因素的影响。主成分分析、聚类分析及来源分析结果显示 OM 和 Mn 受地表径流影响较大, 其他重金属可能主要来源于天然成岩老化与大气颗粒物沉降过程。沉积物质量基准法和潜在生态风险指数法的评估结果

一致表明普莫雍错沉积物中重金属的生态风险较低。

参考文献:

- [1] Beyersmann D, Hartwig A. Carcinogenic metal compounds: recent insight into molecular and cellular mechanisms [J]. Archives of Toxicology, 2008, **82**(8): 493-512.
- [2] Zeng H A, Wu J L, Liu W. Two-century sedimentary record of heavy metal pollution from Lake Sayram: a deep mountain lake in central Tianshan, China [J]. Quaternary International, 2014, **321**: 125-131.
- [3] Huang P, Li T G, Li A C, *et al.* Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of the North Yellow Sea [J]. Continental Shelf Research, 2014, **73**: 1-13.
- [4] Zhao J T, Hu B Q, Li J, *et al.* One hundred-year sedimentary record of heavy metal accumulation in the southeastern Liaodong Bay of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(3): 1073-1082.
- [5] 李飞, 徐敏. 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评估 [J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1035-1040.
- [6] Yu T, Zhang Y, Meng W, *et al.* Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(7): 4367-4382.
- [7] Cheng J, Li X D, Hua R M, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Chaohu Lake [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1403-1408.
- [8] Yang H D, Battarbee R W, Turner S D, *et al.* Historical reconstruction of mercury pollution across the Tibetan Plateau using lake sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(8): 2918-2924.
- [9] Yuan H Z, Liu E F, Shen J, *et al.* Characteristics and origins of heavy metals in sediments from Ximen Co Lake during summer monsoon season, a deep lake on the eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **136**: 76-83.
- [10] Steinnes E, Friedland A J. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: existing and missing knowledge [J]. Environmental Reviews, 2006, **14**(3): 169-186.
- [11] Berg T, Steinnes E. Recent trends in atmospheric deposition of trace elements in Norway as evident from the 1995 moss survey [J]. Science of the Total Environment, 1997, **208**(3): 197-206.
- [12] Barbante C, Veyseyre A, Ferrari C, *et al.* Greenland snow evidence of large scale atmospheric contamination for platinum, palladium, and rhodium [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(5): 835-839.
- [13] Kaste J M, Friedland A J, Stürup S. Using stable and radioactive isotopes to trace atmospherically deposited Pb in montane forest soils [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(16): 3560-3567.
- [14] 吕新苗, 朱立平, Nishimura M, 等. 西藏南部普莫雍错 19 cal ka BP 以来高分辨率环境记录 [J]. 科学通报, 2011, **56**(24): 2006-2016.
- [15] 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏普莫雍错不同岩芯环境指标的对比研究及其反映的近 200 年来环境变化 [J]. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 819-826.
- [16] Zhang Y, Shi T R, Zhang Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from a hypertrophic plateau lake Dianchi, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(2): 1219-1234.
- [17] Jin Z D, Li X D, Zhang B, *et al.* Geochemical records in Holocene lake sediments of northern China: implication for natural and anthropogenic inputs [J]. Quaternary International, 2013, **304**: 200-208.
- [18] Mudroch A, Sarazin L, Lomas T. Summary of surface and background concentrations of selected elements in the Great Lakes sediments [J]. Journal of Great Lakes Research, 1988, **14**(2): 241-251.
- [19] Zhang C, Song N, Zeng G M, *et al.* Bioaccumulation of zinc, lead, copper, and cadmium from contaminated sediments by native plant species and *Acrida cinerea* in South China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(3): 1735-1745.
- [20] Jin Z D, Han Y M, Chen L. Past atmospheric Pb deposition in Lake Qinghai, northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Paleolimnology, 2010, **43**(3): 551-563.
- [21] Yin X B, Liu X D, Sun L G, *et al.* A 1500-year record of lead, copper, arsenic, cadmium, zinc level in Antarctic seal hairs and sediments [J]. Science of the Total Environment, 2006, **371**(1-3): 252-257.
- [22] Zaharescu D G, Hooda P S, Soler A P, *et al.* Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Resposuso, Central Pyrenees [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(11): 3546-3553.
- [23] Wang X P, Yao T D, Gong P, *et al.* One century sedimentary records of polycyclic aromatic hydrocarbons, mercury and trace elements in the Qinghai Lake, Tibetan Plateau [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(10): 3065-3070.
- [24] Wang J B, Zhu L P, Nishimura M, *et al.* Spatial variability and correlation of environmental proxies during the past 18, 000 years among multiple cores from Lake Pumoyum Co, Tibet, China [J]. Journal of Paleolimnology, 2009, **42**(3): 303-315.
- [25] Raskin I, Kumar P B, Dushenkov S, *et al.* Bioconcentration of heavy metals by plants [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1994, **5**(3): 285-290.
- [26] Peng K J, Luo C L, Lou L Q, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals by the aquatic plants *Potamogeton pectinatus* L. and *Potamogeton malaianus* Miq. and their potential use for contamination indicators and in wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2008, **392**(1): 22-29.
- [27] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, *et al.* Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 2. Assessment of metal accumulation and toxicity in plants [J]. Chemosphere,

- 2006, **63**(5): 811-817.
- [28] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb, Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2021-2027.
- [29] Gadde R R, Laitinen H A. Heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxides[J]. Analytical Chemistry, 1974, **46**(13): 2022-2026.
- [30] Jain C K, Gupta H, Chakrapani G J. Enrichment and fractionation of heavy metals in bed sediments of River Narmada, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **141**(1-3): 35-47.
- [31] Feng X H, Zhai L M, Tan W F, *et al.* Adsorption and redox reactions of heavy metals on synthesized Mn oxide minerals[J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 366-373.
- [32] 朱立平, 鞠建廷, 王君波, 等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化[J]. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 772-780.
- [33] Suthar S, Nema A K, Chabukdhara M, *et al.* Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India; impact of industrial and urban discharges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 1088-1095.
- [34] Qu W C, Dickman M, Wang S M. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. Hydrobiologia, 2001, **450**(1-3): 83-89.
- [35] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. Nature, 1988, **333**(6169): 134-139.
- [36] Liu Y F, Li Y G, Yang X H, *et al.* Analysis of pollution in Dianchi Lake and consideration of its application in crop planting [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **12**: 174-183.
- [37] Berg T, Røyset O, Steinnes E, *et al.* Atmospheric trace element deposition; principal component analysis of ICP-MS data from moss samples[J]. Environmental Pollution, 1995, **88**(1): 67-77.
- [38] Steinnes E, Rambæk J P, Hanssen J E. Large scale multi-element survey of atmospheric deposition using naturally growing moss as biomonitor[J]. Chemosphere, 1992, **25**(5): 735-752.
- [39] Burton G A J. Sediment quality criteria in use around the world [J]. Limnology, 2002, **3**(2): 65-76.
- [40] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [41] Yang R Q, Yao T D, Xu B Q, *et al.* Accumulation features of organochlorine pesticides and heavy metals in fish from high mountain lakes and Lhasa River in the Tibetan Plateau [J]. Environment International, 2007, **33**(2): 151-156.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行