

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估

郭泌汐^{1,3*}, 刘勇勤^{1,3*}, 张凡^{2,3}, 侯居峙^{2,3}, 张宏波^{2,3}

(1. 中国科学院青藏高原研究所高寒生态学与生物多样性重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为了探究青藏高原湖泊沉积物中重金属的来源以及对生态环境的危害, 本文分析了青藏高原共 18 个湖泊的表层沉积物样品。微量元素 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Co、Ni、As 含量采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, X-7series)测定, 全氮全碳分析仪(Vario Max CN, Elementar, Germany)测定了湖泊沉积物中的总碳氮含量。18 个湖泊沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Co、Ni、As 这 8 种重金属平均含量分别为 24.61、70.14、0.26、25.43、74.12、7.93、33.85、77.69 mg·kg⁻¹。西藏湖泊沉积物中元素含量都要高于南极, 但与人类活动频繁地区的湖泊沉积物重金属含量相比却较低, 并且除了 Cd、Ni 和 As 之外都要低于西藏土壤背景值。运用 Pearson 相关性分析和主成分分析法分析了湖泊沉积物中重金属元素的来源, 结果表明 Cu、Zn、Cd、Pb、Co、Ni、As 受流域内土壤及大气沉降影响较大, 而 Cr 主要受人类活动的影响。用 Hakanson 潜在生态风险指数进行生态风险评估并聚类分析的结果显示只有普莫雍错、龙木错和班公错的综合生态污染程度低, 其他湖泊生态系统均有不同程度的潜在生态风险, 别若则错具有最强的生态风险。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 沉积物; 重金属; 相关性分析; 生态风险

中图分类号: X142; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0490-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.012

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet

GUO Bi-xi^{1,3*}, LIU Yong-qin^{1,3*}, ZHANG Fan^{2,3}, HOU Ju-zhi^{2,3}, ZHANG Hong-bo^{2,3}

(1. Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity (LAEB), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To explore the source of heavy metals in lake sediments and their hazard to environment on Tibetan Plateau, China, heavy metal (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni and As) levels in surface sediments of 18 lakes were investigated. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS, X-7 series) was used to determine the contents of heavy metals and the concentrations of carbon and nitrogen in sediment samples were analyzed by element analyzer (Vario Max CN, Elementar, Germany). The average concentrations for Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni and As were 24.61 mg·kg⁻¹, 70.14 mg·kg⁻¹, 0.26 mg·kg⁻¹, 25.43 mg·kg⁻¹, 74.12 mg·kg⁻¹, 7.93 mg·kg⁻¹, 33.85 mg·kg⁻¹, 77.69 mg·kg⁻¹. It was found that heavy-metal concentrations in Tibet sediments were higher than those in Antarctic, but lower than those in the regions affected by anthropogenic activities. The contents of Cu, Zn, Pb, Cr and Co in the samples were lower than the background values of Tibet. Correlation analysis and principal components analysis (PCA) were used to analyze the origins of heavy metals. The result showed that Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Ni and As came from soil in drainage basin and atmospheric deposition. Cr was mainly affected by human activities. Assessment on ecological risk of heavy metals was carried out using Hakanson's method and cluster analysis (CA). Assessment on ecological risk indicated that Pumoyum Co, Longmo Co and Bangong Co were at low risks, Bieruoze Co was at high ecological risk level and the other lakes were at different risk levels.

Key words: Tibetan Plateau; lake; sediments; heavy metals; correlation analysis; ecological risk

重金属元素具有潜在的生物毒性和环境持久性, 进入环境后易积蓄、难降解, 不仅会通过食物链进入人体对人类健康产生危害, 同时也会对生态环境造成威胁。因此成为全球的研究热点之一。进入湖泊中的重金属元素经沉降或絮凝作用最后进入沉积物中并逐渐富集, 使沉积物受到污染, 另一方面, 沉积物中的重金属元素会在一定的条件下重新释放进入水体, 并在富集作用下通过食物链对人类产生威胁^[1~4]。因为湖泊沉积物能够被连续地、最大限度地保存, 所以

可以作为研究湖泊的历史变动的良好介质^[5]。

沉积物作为湖泊的重要组成部分, 是整个湖泊水体中重金属的源和汇, 水环境中的重金属主要富集在沉积物中。近年来, 城市化和工业化的发展伴

收稿日期: 2015-06-27; 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB956100); 国家自然科学基金项目(41171050)

作者简介: 郭泌汐(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为自然地理, E-mail: guobixi@itpcas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yqliu@itpcas.ac.cn

随着大量重金属元素进入水环境,并最终汇集到沉积物中^[6]. 世界经历了经济的快速发展,大量产业化过程中产生的重金属元素可能会通过如大气沉降、废水排放、水土流失、雨水淋溶与冲刷等不同的方式潜在地移动到偏远/寒冷地区,因此对原始环境造成污染^[7].

青藏高原上分布着地球上数量众多的高海拔内陆湖泊,主要靠地表径流,降水以及冰川补给为主. 其湖泊沉积物的化学性质受流域内的岩石风化、气候变化、冰川融水以及人类活动影响^[8,9]. 高原湖泊对生态系统意义重大,在水环境容量变化,水体和沉积物生源要素的地球化学循环、沉积物重金属的污染等方面都有其特殊性^[10]. 青藏高原作为受人类污染影响最小的区域之一,人类活动的进驻给青藏高原的生态也带来了巨大的影响. 近几十年来,许多学者利用不同的方法开展了有关青藏高原上重金属的研究. 目前的研究主要结论是,对于不同的研究区域,其样品中重金属元素的来源存在较大的差异. 根据相关研究可知:青藏高原公路两旁土壤中重金属含量主要与交通有关^[11,12]. Wang 等^[7]发现青海湖沉积物中的重金属元素主要来自人类活动对大气的输入. Li 等^[13]对雅鲁藏布江沉积物的研究认为重金属元素几乎没有人为影响,但与上地壳元素含量有关. 由于其独特的陆地景观,脆弱的生态系统以及特殊的季风循环,青藏高原已经成为一个对全球污染影响

反映敏感的地区^[14]. 因此,有必要探究青藏高原湖泊沉积物中重金属的来源以及对生态环境、人类健康的危害. 本研究调查了青藏高原的 18 个湖泊沉积物中的 8 种重金属元素的含量,通过主成分分析及相关性分析方法对沉积物中的重金属来源进行了分析,并采用 Hakanson 潜在生态风险指数法评估了重金属对青藏高原湖泊的污染程度,以期对青藏高原环境质量的综合评价和污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青藏高原有世界“第三极”之称,是世界上最高的高原,平均海拔4 500 m,面积约 250 万 km²,分布着地球上面积最大、海拔最高、数量最多并且以盐碱湖集中为特色的高原湖泊^[15,16],其面积约为 36 900 km²,高达中国总湖泊面积的 51.4%. 本文主要研究了分布在青藏高原上的 18 个湖泊(28°34′33.347″~34°36′40.804″ N,78°57′30.553″~96°45′E,图 1),从西向东分别是松木希错、龙木错、班公错、芦布错、昆仲错、热帮错、埃永错、阿翁错、公珠错、扎仓茶卡、别若则错、达热不错、朗错、洞错、羊卓雍错、普莫雍错、达则错、然乌湖. 采样湖泊海拔跨度为3 850~5 020 m,面积为 12.1~638 km²,既有淡水湖也有咸水湖,盐度从 0.32~747.1 g·L⁻¹,湖泊 pH 值从 6.88~10.37(表 1).

表 1 青藏高原面上 18 个所研究湖泊的地理位置以及基本特性

Table 1 Geographical location and basic characteristics of 18 studied lakes on the surface of Tibetan Plateau															
湖泊ID	湖泊名	经度 / (°)	纬度 / (°)	平均细菌丰度 / cells·mL ⁻¹	Chla / μg·L ⁻¹	流域内冰川面积百分比 / %	是否为封闭湖	距离公路 / m	海拔 / m	湖泊面积 / km ²	集水面积 / km ²	补给系数	导电率 / mS·cm ⁻¹	pH	湖泊类型
RWC	然乌错	96.75	29.41			26	否	7 830	3 850	22	1 776	80.7	0.7	8.24	碳酸盐型淡水外流湖
LC	朗错	87.4	29.2	4 784 049	1.38	0	否	3 816	4 213	12.1	84.9	7	1.3	9.60	碳酸盐亚型微咸水湖
GZC	公珠错	82.15	30.63	2 541 013		0.8	否	4 585	4 710	66.2	849.8	12.4	3.6	9.65	碳酸盐亚型微咸水湖
BGC	班公错	78.96	33.73	752 361	1.36	1	否	65 957	4 167	604	28 110	46.5	0.4	8.16	氯化物类钠组水微咸水湖
SMXC	松木希错	80.25	34.6	503 503	4.01	8.8	是	68 336	4 975	24.6	1 605	64.2	0.3	8.04	内陆淡水湖
LMC	龙木错	80.44	34.61	430 793		1.9	是	81 764	4 933	97	570	5.9	19.5	8.40	硫酸镁亚型卤水盐湖
AYC	埃永错	80.56	33.36	130 978		0	否	55 328	4 292	22.4	509.6	22.8	19	9.73	盐湖
LBC	芦布错	83.8	32.95	2 707 565	3.53	0	是	293 514	4 271	12.4	672	53.5	1.8	6.88	
KZC	昆仲错	80.40	33.10	6 030 193				42 591	4 266	15	525	34	1.8	8.00	
RBC	热帮错	80.59	33.04	6 604 224				61 077	4 250	31.6	1 530.4	48.4	1.8	8.49	碳酸钠亚型盐湖
AWC	阿翁错	81.73	32.76	801 911	0.95	4	是	147 851	4 374	58.6			19.5	9.70	碳酸盐型盐湖
ZCCK	扎仓茶卡	82.38	32.60	2 817 125		0	是	205 939	4 326	128.25	1 749.4	29.8	15.4	9.49	硫酸镁亚型盐湖
BRZC	别若则错	82.93	32.43	336 355	1.37			210 354	4 395	33.2	2 123	63	13.2	9.27	硫酸钠亚型内陆盐湖
DRBC	达热不错	83.21	32.47	1 019 707	1.8	0	否	223 862	4 436	21	1 250	59.5	0.9	9.03	
DC	洞错	91.17	31.73	3 315 295	3.2	0	是	50 188	4 396	123.5	1 089.5	8.8	11.4	9.33	碳酸盐型内陆微咸水湖
DZC	达则错	87.54	31.90	1 085 419	2.01	0.55	是	285 005	4 393	244.7	10 885.3	44.5	8.1	10.37	盐酸盐型咸水湖
PMYC	普莫雍错	90.40	28.58			7.3	否	39 812	5 010	290	1 232.9	4.2	0.3	9.02	重碳酸盐型内陆淡水湖
YZYC	羊卓雍错	90.65	28.85			2.3	否	31 323	4 441	638	5 422	8.5	2.2	9.27	硫酸盐类微咸水湖

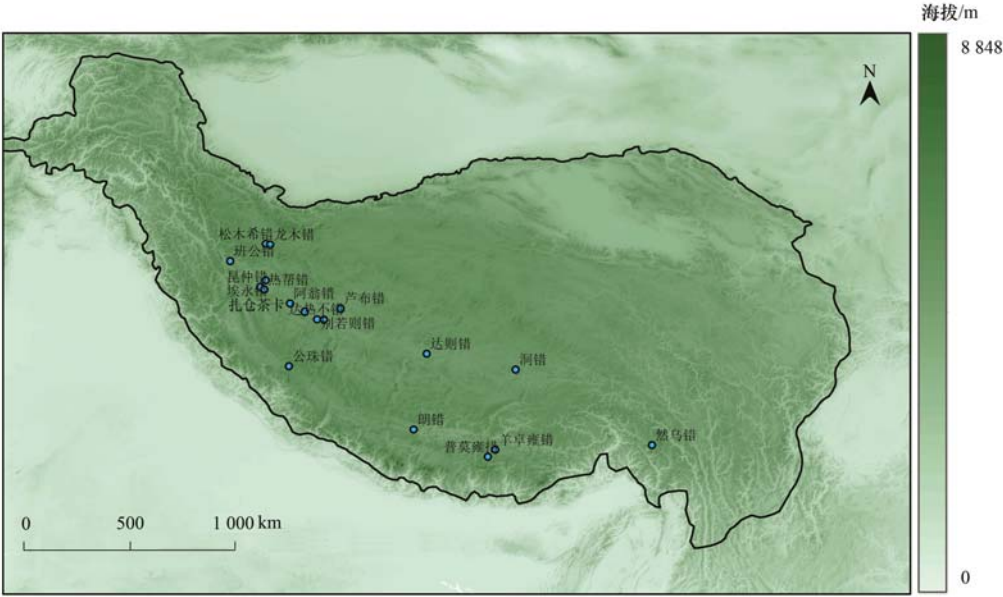


图 1 青藏高原面上 18 个采样湖泊地理位置示意

Fig. 1 Location of 18 sampling lakes on the surface of Tibetan Plateau

1.2 样品采集和分析

中国科学院青藏高原研究所野外考察队于 2007 和 2010 年分别对青藏高原上的 18 个湖泊进行了野外考察和采样,利用重力钻取装置在每个湖泊采样点钻取了 20 cm 长的短湖芯,取完样品后保存在原塑料管中保持垂直状态立即运送回实验室测定,实验室分割湖芯样本时选取纵向 1 cm 梯度进

行^[17,18]. 湖泊沉积物中的总碳氮的含量用全氮全碳分析仪 (Vario Max CN, Elementar, Germany) 获得. 微量元素含量利用三步消解法对固体样品进行消解后采用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS, X-7series) 测定,仪器的相对标准偏差 (RSD) 小于 3%,实际分析误差 (含前处理环节) 一般小于 5%. 分析结果见表 2.

表 2 湖泊沉积物中 8 种重金属以及总碳、氮含量¹⁾

Table 2 Concentrations of 8 heavy metals, total carbon and total nitrogen in lake sediments

湖泊 ID	湖泊名	TN	TC	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Co	Ni	As
				/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹
RWC	然乌错	0.063	1.15	43.9	144	0.21	76.7	55.9	15.5	31.5	36.5
LC	朗错	0.141	1.69	74.1	123	0.26	27.2	110	23.2	69.1	28
GZC	公珠错	0.933	13.2	41.4	53.9	0.04	13.2	262	0.88	44.5	216
BGC	班公错	0.512	8.12	32.9	109	0.06	20.4	164	9.46	38.5	14.5
SMXC	松木希错	0.091	3.48	28.9	156	0.26	53.7	56.5	15.1	34.9	34.8
LMC	龙木错	0.023	4.37	9.17	46.8	0.1	22.8	11.9	4.46	11.2	11.1
AYC	埃永错	0.134	4.73	12.7	53.2	0.02	12.2	35.7	6.97	35.6	65.8
LBC	芦布错	0.5535	9.44	14.75	47.25	0.32	21.95	78.9	2.73	21.4	12.75
KZC	昆仲错	0.5065	7.505	32.5	64.7	0.25	17.25	102.3	7.825	45.6	16.2
RBC	热帮错	0.154	3.68	21.6	64.4	0.83	40.7	72.7	11.1	95.2	53.3
AWC	阿翁错	0.140	7.88	17.5	49	0.27	20.3	40.8	9.8	58.7	29.1
ZCCK	扎仓茶卡	0.114	3.350	11.71	42.83	0.243	16.9	29.53	3.38	12.07	153.767
BRZC	别若错	0.113	7.32	12.9	47.1	0.65	16	38.7	4.67	20.9	463
DRBC	达热不错	0.487	11.8	14.3	31.2	0.03	13.1	100	0.1	11	31.8
DC	洞错	0.036	3.90	9.79	42.6	0.26	26.2	26.5	5.62	22.8	53.1
DZC	达则错	0.189	4.45	18.95	65.8	0.6	18.5	63.8	8.46	33.2	27.1
PMYC	普莫雍错		2.92	42.3	142.1	0.13	47.67	73.72	14.81	32.08	
YZYC	羊卓雍错		2.886	31.475	62.53	0.076	21.72	67.39	13.05	35.28	48.26
背景值				21.9	73.7	0.08	28.9	77.4	11.6	32.1	18.7

湖泊沉积物数据用 SPSSstatistics 20 for mac 进行了相关性分析、主成分分析以及聚类分析. 相关性分析主要反映了重金属元素含量之间或与其他因素之间的相关性,主成分分析揭示了各重金属元素之间来源的相似性,聚类分析同样也用于分析湖泊

之间的相似性.

为评估了湖泊沉积物中重金属的潜在生态风险,本研究中采用了 Hakanson 潜在生态风险指数法. 该方法可以对给定的污染状况下潜在的生态风险进行定量评估. 不仅包括重金属污染程度,同时

也能表明生物危险度^[19,20]。因此,这种评价方法是一个相对稳定、快速、简单和标准的方法。单一金属的生态风险系数 E_r^i 由下式进行计算:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

式中, T_r^i 是单一污染元素的毒性参数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度, C_f^i 是重金属的污染指数。研究区的综合生态风险指数 RI:

$$RI = \sum E_r^i$$

2 结果与讨论

2.1 西藏湖泊沉积物中重金属含量及分布规律

这 18 个湖泊沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、

Co、Ni、As 这 8 种重金属平均含量分别为 24.61、70.14、0.26、25.43、74.12、7.93、33.85、77.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同元素的最高值分别在不同的湖泊中, Cu 和 Co 含量最高值分别为 74.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 23.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,都出现在中部的朗错沉积物中。Zn 和 Pb 含量最高值分别为 156 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 76.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别在西部的松木希错和东部的然乌错沉积物中。Cr 元素含量最高为 262 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在公珠错沉积物中。热帮错中 Cd、Ni 含量最高,分别为 0.83 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、95.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。别若则错沉积物中 As 含量最高,为 236 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2)。18 个研究湖泊中,已知的是然乌错、松木希错、普莫雍错都是淡水

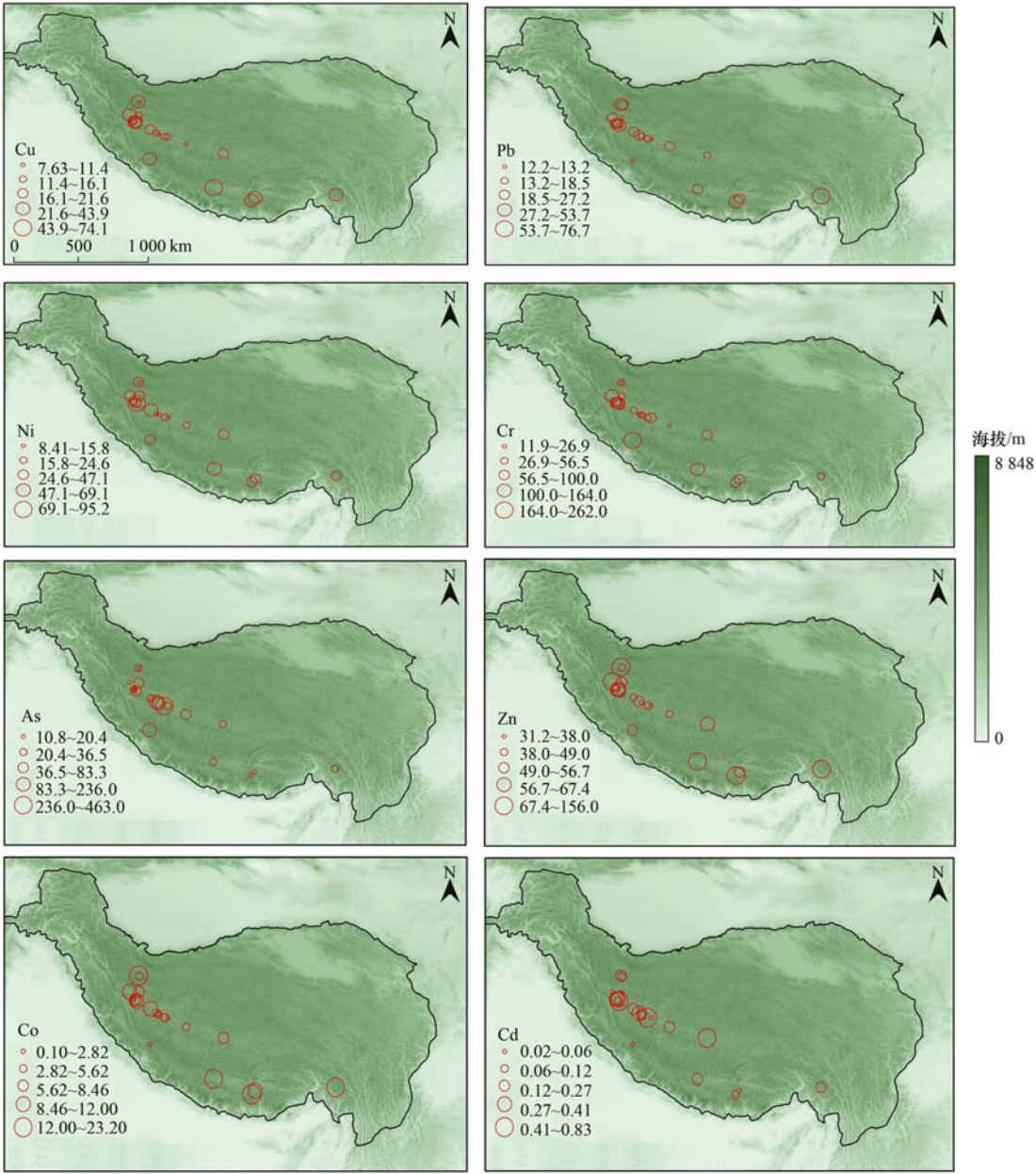


图2 18 个湖泊中 8 种重金属元素的含量分布

Fig. 2 Distribution of the concentrations of 8 heavy metals in 18 lakes

湖,朗错、公珠错、班公错、龙木错、埃永错、热帮错、阿翁错、扎仓茶卡、别若则错、洞错、达则错以及羊卓雍错都是咸水湖(表1)。从8种重金属含量来看,淡水湖中Zn和Pb的含量比咸水湖中要高,而其他的元素含量都是咸水湖中较高,说明咸水湖比淡水湖更易富集重金属元素。

从图2的8种重金属元素分布可以看出,各元素含量在空间分布上没有显著的规律。青藏高原的基本气候特点是严寒而干旱、降水稀少、蒸发强烈,故冰雪融水、地下水是湖泊补给的主要形式,强烈的蒸发作用使得部分湖泊湖水处于萎缩状态^[21]。但从湖泊沉积物重金属元素含量状态来看并未有明显的区别,说明降水、蒸发以及地域对元素含量影响不大。

2.2 西藏湖泊沉积物中重金属含量与其他地区的比较

与西藏土壤背景值相比^[22],湖泊沉积物中除了Cd和As含量相对较高以外,其他重金属元素的含量总体与土壤相似,As含量最高,是土壤的4倍多。由于青藏高原广泛分布富含As元素的页岩、片岩以及千枚岩等母岩,所以青藏高原湖泊沉积物中As

含量较高^[13]。与已有报道的青藏高原道路两侧土壤中重金属含量相比,西藏湖泊沉积物中的Zn含量远低于土壤,Cr、As含量却远高于土壤含量,Cu、Cd、Pb、Co、Ni含量与土壤中相似^[19],说明沉积物中Cu、Cd、Pb、Co、Ni可能与交通有关。

湖泊沉积物中重金属含量与其他地方相比,雅鲁藏布江沉积物中Cu、Zn、Pb、Cr、Co、Ni含量都要高于本文研究的青藏高原湖泊,只有Cd、As含量较低^[13]。青海湖中Cu、Zn、Co、Ni含量较高,Pb、Cr、Cd、As含量低^[7]。对南极重金属含量研究中Cu、Cd的含量高于本文青藏高原湖泊沉积物中的含量,但Zn、Pb和Cr的含量都低于研究区的含量^[23]。北极地区Cd的含量要高于青藏高原湖泊沉积物,但Pb、Cs含量都远远偏低^[24]。黄海地区沉积物重金属Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni含量都要低于青藏高原湖泊中的含量,但Co的含量要高^[25]。太湖中Cu、Zn、Pb、Cr、Ni的含量都要高于青藏高原(表3)^[26]。与受人类活动影响较高的地区相比,西藏湖泊沉积物重金属元素的含量大部分要高于南北极沉积物,但与人类活动频繁地区的湖泊沉积物重金属含量相比却较低。

表3 本研究及其他研究中沉积物重金属的含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Concentrations of heavy metals in sediments from this study and other literatures/mg·kg⁻¹

研究区域	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Co	Ni	As
本研究区	24.61	70.14	0.26	25.43	74.12	7.93	33.85	77.69
青藏高原公路	23.13	100.97	0.3	29.6	36.2	10.31	31.93	21.4
国道	22.84	100.56	0.282	28.75	—	—	—	—
雅鲁藏布江	36.03	91.83	0.16	32.63	92.63	15.17	55.88	33.58
青海湖	28.65	71.5	0.21	21	58.65	11.2	58.65	10.8
南极	73	58	0.62	5.4	5.6	—	—	—
太湖	39.6	113	1.32	40.4	148	—	47.9	—
黄海	15.9	57.3	0.09	24.1	48.9	9.3	22	—
尼泊尔(土壤)	26.82	87.77	0.27	4.07	—	—	—	—
北极	—	—	1.55	3.27	—	—	—	17.84

1) “—”表示文中没有相关数据

2.3 西藏湖泊沉积物中重金属来源

对总金属元素进行了主成分分析,提取了特征值>1和累计占主成分方差90%以上的2种主成分(表4)。成分1主要由Cu、Zn、Cd、Pb、Co、Ni、As组成,占总方差的78.4%,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。主成分2中,Cr呈显著的正载荷,占总方差的14.8%,说明Cr与其他元素的来源是存在差异的。从成分图(图3)中可以明显看出2种主成分的分布。

根据相关性表可知(表5),除去Cr与Cd、As之间存在显著的相关关系之外,其他各金属元素之

表4 沉积物中重金属元素的主成分分析结果

Table 4 Result of principle component analysis (PCA) for the environment variables of the sediments

项目	成分	
	1	2
Cu	0.963	0.229
Zn	0.990	-0.007
Cd	0.903	-0.284
Pb	0.971	-0.045
Cr	0.563	0.762
Co	0.990	0.038
Ni	0.965	0.040
As	0.614	-0.680
方差/%	78.359	14.762
累积/%	78.359	93.121

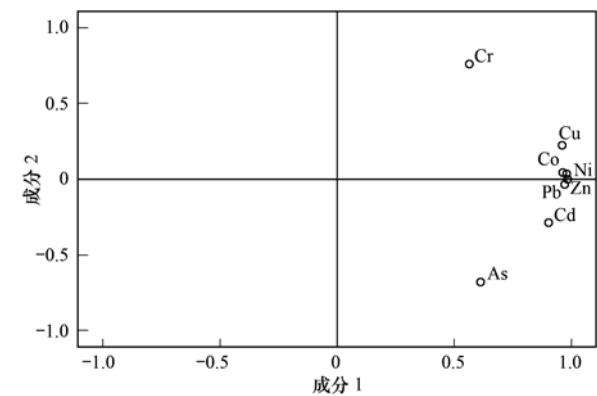


图3 主成分载荷分布

Fig. 3 PCA result showing loading distribution

间都具有显著的正相关性,可能暗示了在研究区域内存在相似的过程控制着沉积物中重金属元素的含量. 湖泊沉积物的 8 种重金属元素中,Cu、Zn、Cd、Pb、Co、As 元素都与流域内的冰川面积百分比呈显著相关,说明这几种元素的来源主要是冰川融水. 冰川融水中的重金属元素来源主要有两方面,

一方面是大天气溶胶携带的大气污染物长距离传输^[27]. 重金属元素可能通过干/湿大气沉降被引入整个生态系统中. 已经有研究表明,季风期间大天气溶胶能够将南亚的污染物传入青藏纳木错地区^[28]. 另一方面是径流在经过流域时带走了部分土壤内富集的重金属元素. 冰川是一种动态资源,随着气候的变暖,大多数的冰川处于强烈的退缩状态,从而导致一些河流因冰川的消融径流量大增^[29],补给湖泊的径流会向湖泊中带入更多的流域土壤,使土壤中的重金属元素进入湖泊沉淀物中. 元素含量与公路距离并没有显著的相关性,表明交通并不是影响湖泊沉积物中元素含量的主要因素. Zn 元素与海拔也有显著的相关性,说明海拔越高,湖泊中 Zn 元素的含量越高. As 元素与湖泊的补给系数有关. 补给系数是湖泊流域面积与湖水面积之比,补给系数越大,As 元素含量越大则可以说明 As 主要来自流域内土壤. Cr 来源与冰川无关,可能受湖泊周围人类活动影响较大.

表5 18 个湖泊沉积物重金属之间及其与其他因素之间的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficient between heavy metals and other factors in the sediments from 18 lakes										
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Co	Ni	As	TN	TC
Cu	1									
Zn	0.951 **	1								
Cd	0.775 **	0.890 **	1							
Pb	0.905 **	0.969 **	0.911 **	1						
Cr	0.702 **	0.522 *	0.276	0.508 *	1					
Co	0.965 **	0.988 **	0.887 **	0.963 **	0.551 **	1				
Ni	0.964 **	0.961 **	0.828 **	0.884 **	0.541 **	0.960 **	1			
As	0.443 *	0.581 **	0.675 **	0.600 **	-0.058	0.544 **	0.558 **	1		
TN	-0.125	-0.169	-0.138	-0.231	0.005	-0.232	-0.047	0.153	1	
TC	-0.236	-0.237	-0.237	-0.296	-0.027	-0.324	-0.172	0.096	0.865 **	1
距公路距离	-0.419	-0.336	-0.202	-0.324	-0.337	-0.395	-0.408	-0.271	0.107	0.270
流域内冰川面积百分比	0.500 *	0.513 *	0.498 *	0.668 **	0.274	0.527 *	0.414	0.436 *	-0.282	-0.360
海拔	0.327	0.432 *	0.377	0.393	0.210	0.410	0.323	0.242	-0.121	0.044
湖泊面积	0.279	0.218	-0.064	0.093	0.145	0.212	0.295	-0.044	-0.155	-0.160
集水面积	0.265	0.229	-0.014	0.063	0.005	0.177	0.366	0.099	0.143	0.083
补给系数	0.052	0.166	0.290	0.240	-0.173	0.099	0.126	0.444 *	0.160	0.164
电导率	-0.507 *	-0.437 *	-0.465 *	-0.423 *	-0.458 *	-0.443 *	-0.530 *	-0.408	-0.401	-0.341
pH	-0.227	-0.294	-0.353	-0.304	0.009	-0.241	-0.290	-0.212	-0.194	-0.116
细菌丰度	-0.231	-0.282	-0.052	-0.293	-0.130	-0.260	-0.188	-0.239	0.388	0.207
叶绿素	0.155	0.286	0.418	0.256	-0.223	0.253	0.278	0.422	0.017	0.111
	距公路 距离	流域内冰川 面积百分比	海拔	湖泊面积	集水面积	补给系数	电导率	pH	细菌丰度	叶绿素
距公路距离	1									
流域内冰川面积百分比	-0.337	1								
海拔	-0.116	-0.118	1							
湖泊面积	-0.151	-0.044	0.075	1						
集水面积	0.000	-0.049	-0.187	0.728 **	1					
补给系数	0.294	0.411	-0.401	-0.276	0.152	1				
电导率	0.299	-0.275	-0.057	-0.109	-0.175	-0.183	1			
pH	-0.218	-0.228	0.030	0.061	-0.048	-0.348	0.150	1		
细菌丰度	0.048	-0.340	-0.283	-0.370	-0.221	-0.056	-0.166	-0.024	1	
叶绿素	0.229	-0.034	0.160	-0.088	0.118	0.297	-0.322	-0.253	-0.101	1

1) ** 表示 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

前人的研究中对各重金属的来源都有不同的结论. 化石燃料的燃烧, 矿石的高温处理以及农业活动都是有毒重金属进入湖泊沉积物的重要途径^[30]. Zhang 等^[31]对滇池沉积物重金属研究显示 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Cr 元素主要来自人为因素, Fe 和 Mn 元素主要来自自然过程. Kükreer 等^[32]对土耳其 Çıldır 湖泊沉积物中重金属进行了研究, 他们认为湖泊表层沉积物中重金属富集能够用化石燃料的消耗来解释, 下层沉积物中的重金属的来源有可能是火山, 但很难用人类活动如化石燃料的使用以及工业活动解释. 在对新疆赛里木湖的研究中, Zeng 等^[33]发现燃煤排放和车用汽油中的 Pb 均是天山地区重金属污染的主要来源. 南极海洋沉积物中的重金属元素来源主要有两个: ①岸边岩石, 地表径流和表层冰川的消融; ②人为活动. 研究人员发现, 南极 Pb 元素的富集与人为的污染有直接联系, 而夏季的融水径流带入自然来源的 Fe 和 Cd 元素^[23].

青藏高原的环境决定了其湖泊沉积物中的重金属元素来源可能多与新疆和南极地区相似, 主要来自人为活动和自然过程. 随着人类活动的慢慢渗入, 交通和化石燃料的燃烧可能是青藏高原重金属污染的主要来源.

2.4 西藏湖泊沉积物中重金属污染的综合评价

使用聚类分析法分析了 18 个湖泊的综合生态风险指数(RI), 分析结果如图 4 所示. 从中可以看出, 18 个湖泊聚成了三大类. 一类包括别若则错, 一类包括热帮错、扎仓茶卡、公珠错, 最后一类包括朗错、阿翁错、羊卓雍错、松木希错、埃永错、然乌错、芦布错、昆仲错、达热不错、洞错、达则错, 与表 6 的分析结果相一致. 西藏湖泊综合生态风险大部分都处于中等以上, 重金属污染较严重, 只有普莫雍错、龙木错和班公错的重金属污染程度较低. 可以看出西藏虽属于偏远地区, 人类活动不频繁, 但是由于近几十年的开发、旅游以及大气污染加重, 造成了西藏湖泊污染严重.

表 6 湖泊沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in lake sediments

湖泊 ID	湖泊名	E_r^i								RI
		Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Co	Ni	As	
RWC	然乌错	5.78	1.67	126	19.18	1.77	2.42	2.76	192.11	351.69
LC	朗错	9.75	1.43	156	6.8	3.492	3.63	6.06	147.37	334.53
GZC	公珠错	5.45	0.63	24	3.3	8.32	0.14	3.9	1136.84	1182.57
BGC	班公错	4.33	1.27	36	5.1	5.21	1.48	3.38	76.32	133.07
SMXC	松木希错	3.80	1.81	156	13.43	1.79	2.36	3.06	183.16	365.41
LMC	龙木错	1.21	0.54	60	5.7	0.38	0.70	0.98	58.42	127.93
AYC	埃永错	1.67	0.62	12	3.05	1.13	1.09	3.12	346.32	369
LBC	芦布错	1.94	0.55	192	5.49	2.5	0.43	1.88	67.11	271.89
KZC	昆仲错	4.28	0.75	150	4.31	3.25	1.22	4	85.26	253.07
RBC	热帮错	2.84	0.75	498	10.18	2.31	1.73	8.35	280.53	804.69
AWC	阿翁错	2.30	0.57	162	5.08	1.30	1.53	5.15	153.16	331.08
ZCCK	扎仓茶卡	1.54	0.50	146	4.23	0.94	0.53	1.06	809.30	964.09
BRZC	别若则错	1.70	0.55	390	4	1.23	0.73	1.83	2436.84	2836.88
DRBC	达热不错	1.88	0.36	18	3.28	3.17	0.02	0.96	167.37	195.04
DC	洞错	1.29	0.50	156	6.55	0.84	0.88	2	279.47	447.53
DZC	达则错	2.49	0.77	360	4.63	2.04	1.32	2.91	142.63	516.77
PMYC	普莫雍错	5.57	1.65	78	11.92	2.34	2.31	2.81	—	104.60
YZYC	羊卓雍错	4.14	0.73	48	5.43	2.14	2.04	3.09	254	319.57

表 6 总结了 18 个湖泊沉积物中 8 种重金属元素的潜在生态风险系数以及各个湖泊的综合生态风险指数, 根据潜在生态风险指数评价标准(表 7)可以看出 Cu、Zn、Pb、Cr、Co、Ni 的潜在生态危害系数(E_r^i)均在 40 以下, 为轻度污染. 湖泊沉积物中重金属的生态风险的主要贡献因子为 Cd 和 As 元素, 但在公珠错、班公错、埃永错、达热不错中 Cd 的生态风险较小, 热帮错中 Cd 的生态风险程度很强, 高

表 7 潜在生态风险指数评价标准

Table 7 Evaluation criteria of potential ecological risk index

E_r^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		

达 498. As 对生态环境的危害在龙木错中最小, 而

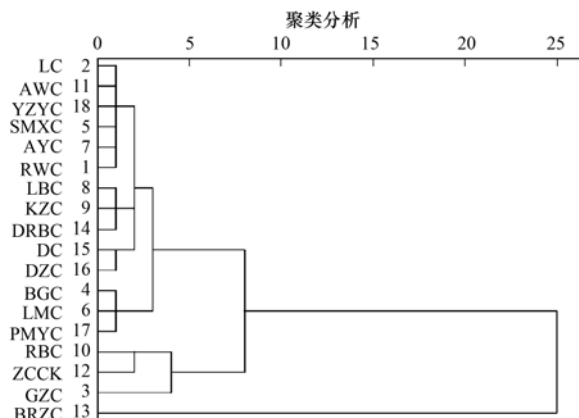


图4 湖泊潜在生态风险聚类树状

Fig. 4 Dendrogram showing clusters of RI of 18 lakes

在别若则错中高达2 436.

各个湖泊沉积物中重金属综合生态风险指数(RI)各不相同,综合生态风险指数低(<150)的湖泊是普莫雍错(104.6)、龙木错(127.93)和班公错(133.07),芦布错、昆仲错和达热不错湖泊沉积物重金属综合生态污染程度中等(150~300),然乌错、朗错、松木希错、埃永错、阿翁错、洞错、达则错、羊卓雍错污染较严重(300~600),而公珠错、热帮错、扎仓茶卡、别若则错重金属污染最严重(>600),尤其是别若则错综合生态风险指数最高(2 836),这表示别若则错湖泊沉积物中重金属污染对生态系统的危害十分严重,可能会对湖泊沉积物以及水生生物的生存构成威胁.

3 结论

本文通过研究青藏高原上的18个湖泊沉积物中8种重金属(Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Co、Ni、As),发现不同湖泊中含量最高的重金属不同,与西藏背景值及其他研究区域相比,这18个湖泊中的沉积物As含量最高.从各元素含量在空间分布、青藏高原的基本气候特点来看,降水、蒸发以及地域对元素含量影响不大.重金属元素主成分分析和相关性分析表明,重金属元素与冰川融水、流域内土壤人类活动等因素有关.青藏高原重金属污染的来源可能主要是化石燃料的燃烧以及有色金属采矿等.潜在生态风险分析结果显示18个湖泊沉积物中Cu、Zn、Pb、Cr、Co、Ni都为轻度污染,西藏湖泊综合生态风险大部分都处于中等以上,重金属污染较严重,只有普莫雍错、龙木错和班公错的重金属污染程度较低.

参考文献:

[1] 贾英,方明,吴友军,等.上海河流沉积物重金属的污染特征

与潜在生态风险[J].中国环境科学,2013,33(1):147-153.

[2] 谢婷,罗东霞,杨瑞强.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[J].环境科学,2014,35(11):4135-4142.

[3] 蒋豫,刘新,高俊峰,蔡永久.江苏省淡水湖泊表层沉积物中重金属污染特征及其风险评价[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1157-1162.

[4] Yan X D, Zhang F, Zeng C, et al. Relationship between heavy metal concentrations in soils and grasses of roadside farmland in Nepal[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(9): 3209-3226.

[5] 张小龙,徐柏青,李久乐,等.青藏高原西南部塔若错湖泊沉积物记录的近300年来气候环境变化[J].地球科学与环境学报,2012,34(1):79-90.

[6] 季斌,杭小帅,梁斌,等.湖泊沉积物重金属污染研究进展[J].污染防治技术,2013,26(5):33-40.

[7] Wang X P, Yang H 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.

[8] 鞠建廷,朱立平,汪勇,等.藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义[J].湖泊科学,2008,20(5):591-599.

[9] 汪勇,朱立平,王君波,等.青藏高原中部纳木错湖泊表层沉积物有机质空间分布及其揭示的沉积过程[J].科学通报,2012,57(32):3090-3099.

[10] 李卫平.高原典型湖泊营养元素地球化学循环与重金属污染研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[11] Zhang F, Yan X D, Zeng C, et al. Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(5): 1715-1731.

[12] 王冠星,闫学东,张凡,等.青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J].环境科学学报,2014,34(2):431-438.

[13] Li C L, Kang S C, Zhang Q G, et al. Heavy metals in sediments of the Yarlung Tsangpo and its connection with the arsenic problem in the Ganges-Brahmaputra Basin [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, 33(1): 23-32.

[14] Xie H T, Li J, Zhang C Z, et al. Assessment of heavy metal contents in surface soil in the Lhasa-Shigatse-Nam Co area of the Tibetan Plateau, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 93(2): 192-198.

[15] 时玉,孙怀博,刘勇勤,等.青藏高原淡水湖普莫雍错和盐水湖阿翁错湖底沉积物中细菌群落的垂直分布[J].微生物学通报,2014,41(11):2379-2387.

[16] 张雪芹,孙瑞,朱立平.藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价[J].冰川冻土,2012,34(4):950-958.

[17] 李久乐,徐柏青,林树标,等.青藏高原南部枪勇错冰前湖泊沉积记录的近千年来冰川与气候变化[J].地球科学与环境学报,2011,33(4):402-411.

[18] Ju J T, Zhu L P, Wang J B, et al. Water and sediment

- chemistry of Lake Pumayum Co, South Tibet, China: implications for interpreting sediment carbonate[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **43**(3): 463-474.
- [19] Yan X D, Gao D, Zhang F, *et al.* Relationships between heavy metal concentrations in roadside topsoil and distance to road edge based on field observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, **10**(3): 762-775.
- [20] Yan X, Zhang F, Gao D, *et al.* Accumulations of heavy metals in roadside soils close to Zhaling, Eling and Nam Co Lakes in the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, **10**(6): 2384-2400.
- [21] 姜加虎, 黄群. 青藏高原湖泊分布特征及与全国湖泊比较[J]. *水资源保护*, 2004, **20**(6): 24-27.
- [22] 成延鳌, 田均良. 西藏土壤元素背景值及其分布特征[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [23] Vodopivec C, Curtosi A, Villaamil E, *et al.* Heavy metals in sediments and soft tissues of the Antarctic clam *Laternula elliptica*: More evidence as a possible biomonitor of coastal marine pollution at high latitudes? [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 375-384.
- [24] Jörundsdóttir H Ó, Jensen S, Hylland K, *et al.* Pristine Arctic: Background mapping of PAHs, PAH metabolites and inorganic trace elements in the North-Atlantic Arctic and sub-Arctic coastal environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 719-728.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 李潮流, 康世昌, 丛志远. 青藏高原念青唐古拉峰冰川区夏季季风期间大气气溶胶元素特征[J]. *科学通报*, 2007, **52**(17): 2057-2063.
- [28] Cong Z Y, Kang S C, Liu X D, *et al.* Elemental composition of aerosol in the Nam Co region, Tibetan Plateau, during summer monsoon season[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(6): 1180-1187.
- [29] 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J]. *自然杂志*, 2010, **32**(1): 4-8.
- [30] Cheng H X, Li M, Zhao C D, *et al.* Concentrations of toxic metals and ecological risk assessment for sediments of major freshwater lakes in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **157**: 15-26.
- [31] 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.
- [32] Kükür S, Erginal A E, Şeker S, *et al.* Distribution and environmental risk evaluation of heavy metal in core sediments from Lake Çıldır (NE Turkey) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 453.
- [33] 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.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行