

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋微, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区内环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 王金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪污固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌区中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓明, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及影响因素	刘敏霞, 杨玉义, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

连环湖牙门气泡沉积物重金属演化和污染研究

肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗

(哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要: 2010年8月在牙门气泡的湖心位置采集了柱状沉积岩心。采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 联合消解并运用 ICP-MS 测试了柱状沉积岩心中金属元素 Cr、Cu、Mn、Ni、Fe、Pb、Zn、Cd、Al、Ba、Ca、K、Li、Mg、Na 和 Sr 的含量, 结合沉积岩心年代测定, 研究了该湖区沉积物重金属元素演化特征及污染历史。应用富集系数法探讨了湖泊重金属的污染特征。结果表明, 1950 年以前各元素含量变化趋势平稳, 1950~1990 年间波动较大, 1990 年以后金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Cu、Ca、Li 和 Sr 浓度明显增加。牙门气泡重金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb 存在轻微污染, 而 Ni、Cr 和 Cu 无污染。

关键词: 沉积物; 重金属演化; 污染; 牙门气泡; 富集系数

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3088-07

Evolvment and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China

XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, LIU Shao-jun, XU Hai-feng, SUN Qing-zhan, WANG Jing-jing, LI Miao

(Key Laboratory of Geographical Resources and Environmental Remote Sensing, College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: One sediment core was obtained from the center of Yamenqi Lake at the Songnen Plain in eastern China in August 2010 using a gravity corer. The sediment samples were digested using $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$. Concentrations of the metals Cr, Cu, Mn, Ni, Fe, Pb, Zn, Cd, Al, Ba, Ca, K, Li, Mg, Na and Sr were determined using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). With the dating approach, the characteristics and polluted history of heavy metals in lake sediments were determined. The heavy metal pollution of sediment was discussed based on the enrichment factor. The results are listed as following: ① the contents of all elements had a smooth variation trend before 1950, and fluctuated severely from 1950 to 1990. The contents of Mn, Zn, Cd, Pb, Fe, Ni, Cr, Cu, Ca, Li and Sr increased obviously since 1990. ② Mn, Zn, Pb and Cd showed light contamination degree. Contents of Ni, Cr and Cu were below the contamination level.

Key words: sediment; evolvement of heavy metal; contamination; Yamenqi Lake; enrichment factor

重金属污染是当今世界所面临的一个重要的环境的问题^[1~3]。重金属污染的研究也是现在研究的热点之一^[4]。不同的研究者分别对土壤、水体、生物体等之中重金属的含量与分布、迁移转化、重金属污染等方面进行了研究^[5~11]。水环境中的重金属污染也是研究中关注的重点之一, 进入水环境如海洋、湖泊、河流等中的重金属, 在水中经过一系列的物理、化学以及生物的过程, 最终一部分重金属会在底部沉积下来^[12~14]。而沉积在底泥中的重金属, 在适当的条件下(如 pH、氧化还原状况下)会重新释放出来, 重新进入到水中, 从而造成二次污染^[15, 16], 因此, 沉积物中的重金属的研究尤为重要。通过采集湖泊柱状沉积岩心并进行分层测试, 并结合年代测定, 可以恢复湖泊中重金属的污染过程和历史, 从而为湖泊环境的恢复提供依据。本课题组对连环湖中的他拉红泡、阿木塔泡沉积岩心重金属的垂向演化进行了研究^[17, 18], 一些研究者针对连

湖附近扎龙湿地水体、沉积物重金属进行了分析^[19~21]。

连环湖在 70 年代末期曾经出现过由于重金属污染而导致湖中鱼类大量死亡^[22]。连环湖为无出流的闭口湖, 因此进入到湖泊中的重金属更易在湖泊中累积^[23]。本研究通过对连环湖牙门气泡柱状沉积岩心金属元素的研究, 结合年代测定, 重建牙门气泡金属元素的演化历史和重金属元素的污染历史、过程, 通过对重金属元素污染的评价, 确定牙门气泡重金属的污染程度, 以期为进一步的环境控制和环境恢复提供依据。

收稿日期: 2012-11-17; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972115); 国家自然科学基金重点项目(41030743); 黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目(2010td10)

作者简介: 肖海丰(1972~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为湖泊沉积与环境, E-mail: xiaohaifengdejie@sina.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

连环湖位于松嫩沉降盆地中心最洼处,是由构造断陷形成的^[23]。地理位置处于北纬 46°30′~46°50′,东经 123°59′~124°15′。由牙门气泡、阿木塔泡、他拉红泡、火烧黑泡、西葫芦泡等 18 个湖泊联合组成(图 1),以河沟相连形似连环而得名。总面积 556.08 km²,湖水平均水深 2.14 m,最大水深 4.6 m。湖水依赖湖面降水和地表径流补给,主要入湖河流为乌裕尔河,上游有来自嫩江支流托力河口人工渠八一幸福运河的水,无出流。湖区属温带大陆性半湿润气候。牙门气泡位于连环湖的中西部。湖泊周围土壤主要为风沙土、草甸土和黑钙土零星分布^[24],连环湖周围主要为农业牧业混合区^[25]。湖泊所在的杜尔伯特蒙古族自治县有石油化工、机械、建材、食品、纺织、皮革等工业部门^[22]。

1.2 样品采集和测试

于 2010 年 8 月赴连环湖,利用重力采样器在牙门气泡的湖心位置采集了 18.5 cm 的柱状沉积岩心,所采沉积物原状保存,上层未受扰动。沉积岩芯带回实验室,按 0.5 cm 间隔连续取样。样品研磨至 100 目,采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解体系消解沉积物样品,利用美国 Agilent 7500cx 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定金属元素含量,共测得 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Fe、Al、Ba、Ca、K、Li、Mg、Na 和 Sr 共 16 种元素,采用水系沉积物 GSD-9 为参考物质,样品分析误差 < ±10%。

样品中²¹⁰Pb、²²⁶Ra 及¹³⁷Cs 活度分析仪器采用美国 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器(Ortec HPGGeWGL)与由 Ortec919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16k 道多道分析器所组成的 γ 谱分析系统。¹³⁷Cs 和²²⁶Ra 标准样品由中国原子能研究院提供;²¹⁰Pb 由英国利物浦大学做比对进行校准。测试误差 < 10%。沉积物年代的确定采用 CRS 模式,结合¹³⁷Cs 时标建立沉积岩芯的年代序列^[26],岩心底部的年龄为 19 世纪末。样品粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪分析。样品有机质的测定采用重铬酸钾容量法。

1.3 重金属富集因子计算

富集因子是用来评价人类活动对土壤中重金属富集程度影响的参数^[27],用来判断重金属元素的富集程度和污染状况。富集因子的计算见公式(1):

$$EF = [X/RE]_{\text{sample}}/[X/RE]_{\text{baseline}} \quad (1)$$

式中,EF 为富集因子;X 为所评价元素的浓度;RE 为标准化元素的浓度;sample 和 baseline 分别表示样品实测浓度和背景浓度。

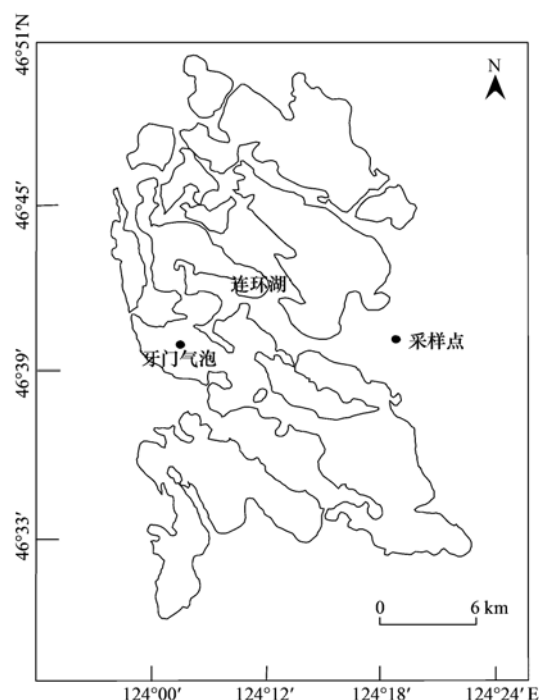


图 1 牙门气泡采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Yamenqi Lake

2 结果和分析

2.1 牙门气泡沉积物重金属元素含量和演化分析

牙门气泡沉积物中金属元素的含量和一些统计特征值见表 1。从中可见,重金属元素 Cd 的变异系数最高,超过了 0.3, Mn、Ca 和 Li 的变异系数也较高,都超过了 0.2,金属元素变异系数大小的排序为: Cd > Li > Ca > Mn > Mg > Al > Zn > Pb > Cu > Sr > Cr > Ni > Fe > K > Na > Ba, 重金属元素 Cd 最大值为最小值 3.33 倍。

图 2 为金属的演化图,依据金属元素的变化特点,整个演化过程可以分为 3 个演化阶段。

阶段 1 为底部至 14.25 cm。在这个演化阶段中,除了金属元素 Li 和 Al 的变化稍大外,其他所有金属元素的变化都较小, Mn、Zn、Fe、Ni、Cr、Cu 和 Ca 的浓度稍有增加,而 Ba、Na 和 K 的浓度稍有减少。阶段 2 为 14.25 ~ 6.25 cm, 此阶段各种指标的变化都较大。Al 在均值附近波动,变化趋势不明显。Sr 和 Mg 的变化很相似,都是在 14.25 ~ 8.25 cm 阶段较稳定,而在 8.25 ~ 6.25 cm 比下部增大。Na、Ba 和 K 的变化很相似,自 14.25 ~ 8.75 cm 是一直增加的,而自 8.75 ~ 7.25 cm 减少,而后自 7.25 ~

表 1 柱状沉积物主要金属含量统计特征 (n = 37)

Table 1 Characteristics of the concentration of the major metals in core sediments (n = 37)						
金属元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准偏差	变异系数	最大值/最小值
Cr	25.78	40.12	32.58	4.19	0.13	1.56
Cu	9.86	16.56	12.73	1.84	0.14	1.68
Fe	35 360.00	54 840.00	44 052.43	5 042.81	0.11	1.55
Mn	304.40	582.00	396.09	79.82	0.20	1.91
Ni	13.62	20.76	16.19	1.97	0.12	1.52
Pb	15.86	28.66	22.06	3.24	0.15	1.81
Zn	38.10	63.26	47.74	7.44	0.16	1.66
Cd	0.09	0.31	0.17	0.05	0.33	3.33
Al	24 780.00	53 280.00	35 458.11	6 121.15	0.17	2.15
Ba	490.00	593.60	537.28	25.15	0.05	1.21
Ca	19 826.00	36 960.00	25 988.14	5 251.11	0.20	1.86
K	21 620.00	26 600.00	24 100.54	1 336.00	0.06	1.23
Li	9.46	22.48	14.51	3.19	0.22	2.38
Mg	4 200.00	9 330.00	5 580.11	1 075.05	0.19	2.22
Na	13 972.00	17 188.00	15 560.11	759.85	0.05	1.23
Sr	201.00	351.60	254.62	35.13	0.14	1.75

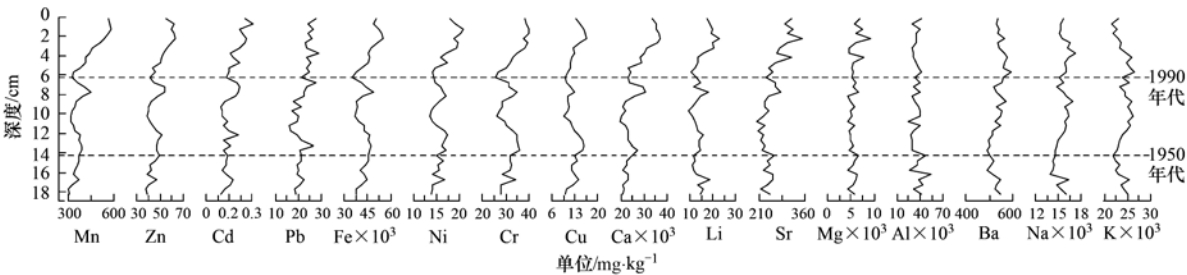


图 2 沉积物金属元素含量垂向图

Fig. 2 Variation of metal contents in the core sediments at different depths and ages

6.25 cm 又增加. Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Cu、Li 和 Ca 的变化很相似,波动很大. 阶段 3 为 6.25 cm 至表层,在这个阶段,金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Cu、Ca、Li 和 Sr 都是自 6.25 cm 向上增大,在顶部金属元素 Mn、Zn、Fe、Ni、Cr、Cu、Ca、Li 和 Sr 稍有减少. 而 Ba 和 K 自 6.25 cm 开始减少,Na 从 6.25 ~ 3.75 cm 是增加的,而 3.75 cm 至表层趋于减少,Al 的变化较稳定,而此阶段 Mg 的变化很大.

2.2 牙门气泡粒度指标演化分析

图 3 为牙门气泡粒度指标演化图,牙门气泡沉积岩心的粒度组成以 >128 μm 粒级和 16 ~ 64 μm 粒级为主, >128 μm 和 16 ~ 64 μm 粒级平均含量分别为 34.36% 和 24.43%. 中值粒径指标的波动较大,变化范围为 12.39 ~ 176.86 μm,均值为 62.68 μm. <4 μm、4 ~ 16 μm、64 ~ 128 μm 粒级含量的变化范围为 9.51 ~ 24.88%、10.51 ~ 31.13%、3.74 ~ 11.62%. 根据粒度指标的演化特征可划分为底部

至 14.25 cm、14.25 ~ 6.25 cm、6.25 cm 至表层这 3 个演化阶段,在底部至 14.25 cm 阶段,中值粒径和 >128 μm 粒级含量指标趋于减少,而 <4 μm、4 ~ 16 μm、16 ~ 64 μm 粒级含量趋于增加. 14.25 ~ 6.25 cm 阶段各种粒度指标的波动增大. 在 6.25 cm 至表层阶段,中值粒径指标和 >128 μm 粒级含量整体趋于减少,而在上部 1.25 cm 至表层稍有增加. 在这个阶段 <4 μm、4 ~ 16 μm、16 ~ 64 μm 粒级含量整体趋于增加,而在上部 1.25 cm 至表层 <4 μm、4 ~ 16 μm、16 ~ 64 μm 粒级含量稍有减少. 64 ~ 128 μm 粒级含量在 6.25 ~ 2.25 cm、1.25 cm 至表层趋于增加,而 2.25 ~ 1.25 cm 趋于减少.

表 2 为牙门气泡金属元素与粒度指标相关分析结果,从中可见,元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Zn、Cd、Ca 和 Sr 是与中值粒径在 0.01 水平上负相关. Cu、Fe 与 <4 μm 粒径含量在 0.05 水平上相关,元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Zn、Cd、Ca、Li 和 Sr 与 4 ~ 16 μm 粒径含量为正相关,元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、

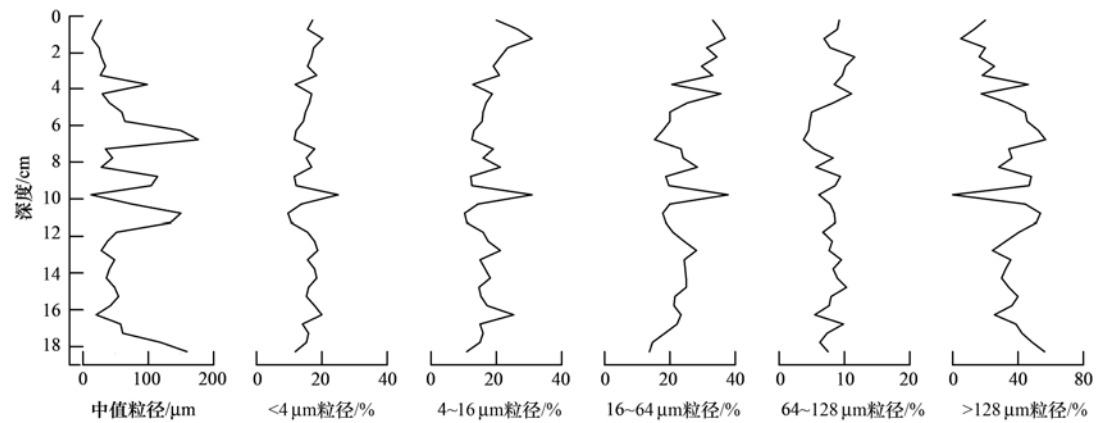


图3 牙门气泡沉积物粒度变化

Fig. 3 Grain size distributions of sediments in Yamenqi Lake

Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 与 16 ~ 64 μm 粒径含量在 0.01 水平上为正相关,元素 Pb 与 16 ~ 64 μm 粒径含量在 0.05 水平上为正相关,Cr、Cu、Fe、Ni 和 Li 与 64 ~ 128 μm 粒径含量在 0.01 水平上的正相关,Mn、Zn、Ca、Mg 和 Sr 与 64 ~ 128 μm 粒径含量在 0.05 水平上的正相关. Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 与 >128 μm 粒径含量为 0.01 水平上负相关. 由以上可推测,在牙门气泡中,金属元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 主要受 4 ~ 128 μm 粒径含量的影响,而且其中 16 ~ 64 μm 粒径含量的影响更突出. 元素 K 与中值

粒径和 > 128 μm 粒级含量为正相关,而与 < 4 μm 、4 ~ 16 μm 、16 ~ 64 μm 粒径含量为负相关. Al 和 Ba 与所有粒径含量的相关都没有通过检验,Na 只是与 < 4 μm 粒级含量在 0.05 水平上负相关,Pb 只是与 16 ~ 64 μm 粒级含量在 0.05 水平上正相关. 在已有的研究中发现^[28],大多数黏土矿物元素含量随沉积物粒度变细而升高,少部分易迁移元素含量随沉积物粒度变细而降低,本研究中 K、Ba、Na 元素应属于此类,而 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 元素应属于第一类元素.

表2 金属元素和粒度的相关系数¹⁾($n=37$)

Table 2 Correlation coefficients of the grain size and metal elements($n=37$)						
金属元素	中值粒径	<4 μm	4 ~ 16 μm	16 ~ 64 μm	64 ~ 128 μm	>128 μm
Cr	-0.551 **	0.317	0.456 **	0.674 **	0.485 **	-0.608 **
Cu	-0.581 **	0.381 *	0.436 **	0.568 **	0.498 **	-0.567 **
Fe	-0.606 **	0.352 *	0.457 **	0.681 **	0.536 **	-0.626 **
Mn	-0.521 **	0.293	0.555 **	0.738 **	0.372 *	-0.653 **
Ni	-0.544 **	0.307	0.492 **	0.683 **	0.434 **	-0.616 **
Pb	-0.215	0.049	0.198	0.357 *	0.085	-0.258
Zn	-0.535 **	0.280	0.486 **	0.706 **	0.397 *	-0.614 **
Cd	-0.418 **	0.186	0.431 **	0.578 **	0.235	-0.493 **
Al	-0.017	0.131	0.134	-0.062	-0.179	-0.024
Ba	0.240	-0.289	-0.063	0.056	-0.075	0.069
Ca	-0.513 **	0.306	0.533 **	0.710 **	0.331 (*)	-0.629 **
K	0.498 **	-0.458 **	-0.452 **	-0.413 *	-0.227	0.482 **
Li	-0.277	0.111	0.334 *	0.481 **	0.426 **	-0.422 **
Mg	-0.271	0.186	0.308	0.472 **	0.385 (*)	-0.420 **
Na	0.274	-0.384 (*)	-0.210	0.007	0.156	0.134
Sr	-0.425 **	0.276	0.498 **	0.683 **	0.352 *	-0.601 **

1) ** 表示 0.01 水平显著相关,* 表示 0.05 水平显著相关

2.3 牙门气泡沉积物中金属元素和有机质的相关分析

在已有的研究中发现^[29],沉积物中的有机质对

重金属元素具有较强的络合能力. 重金属元素可以不同形式进入或吸附在有机颗粒上,与有机质络合生成复杂的络合态金属,这种络合态金属绝大多数

被固定在沉积物中,较稳定而不易释放. 由表 3 可见,金属元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Ba、Ca、Li、Mg 和 Sr 与有机质含量为正相关,其中 Cr、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 与有机质含量在 0.01 水平上相关,指示金属元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Ba、Ca、Li、Mg 和 Sr 受有机质变化的影响.

表 3 牙门气泡沉积物金属元素含量与有机质的相关系数¹⁾ ($n=37$)
Table 3 Correlation coefficients of metal elements concentration and organic matter ($n=37$)

金属元素	有机质
Cr	0.699 **
Cu	0.372 *
Fe	0.697 **
Mn	0.897 **
Ni	0.763 **
Pb	0.720 **
Zn	0.873 **
Cd	0.834 **
Al	-0.104
Ba	0.369 *
Ca	0.927 **
K	-0.274
Li	0.715 **
Mg	0.519 **
Na	0.271
Sr	0.868 **

1) ** 表示 0.01 水平显著相关, * 表示 0.05 水平显著相关

2.4 牙门气泡金属元素聚类分析

图 4 为牙门气泡金属元素聚类分析结果,从中可见,Ba、Na、K 为一类,而 Mn、Ca、Zn、Cr、Ni、Fe、Cd、Li、Cu、Mg、Sr、Pb 为一类,后与 Al 聚为一类. 元素 Ba、Na、K 为易迁移的元素^[30],活度较高,在流域气候干旱、风化作用相对较弱的情况下,也能形成卤化物、硫酸盐、碳酸盐等组合,呈离子或

胶体状态迁移; Al、Mn、Fe 等元素属较难迁移的元素,沉积物中其含量的变化反映了流域碎屑成分的来源状况.

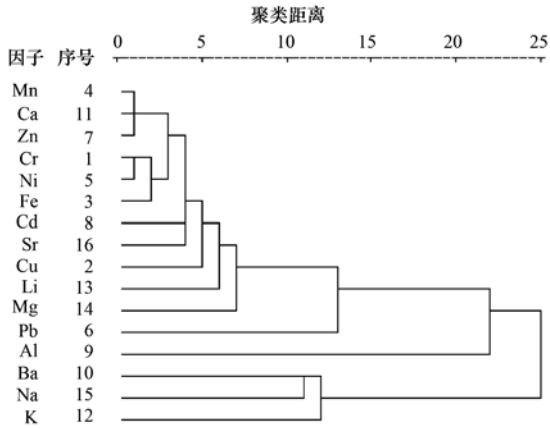


图 4 聚类分析的树形图
Fig. 4 Horizontal plot of cluster analysis

2.5 牙门气泡重金属元素富集系数变化分析

背景值的选择对富集系数的计算非常重要,牙门气泡沉积物重金属元素在 1950 年之前主要受自然输入的影响,因此选择 1950 年之前的重金属元素浓度平均值做为背景值. 标准化元素通常选择表生过程中地球化学性质稳定的元素,如 Al、Fe、Li 等,考虑在 Al、Fe、Li 元素与粒度指标、其他元素的相关分析中,Al 与粒度指标的相关性没能通过检验,而 Li 与中值粒径、 $<4\text{ }\mu\text{m}$ 粒径含量的相关性较差,Fe 与粒度指标和其他元素的相关性较好,因此本研究中选择 Fe 元素作为标准化元素. 图 5 为牙门气泡重金属元素的富集系数变化曲线. 从中可见,重金属元素 Ni、Cr 和 Cu 的富集系数在 1 附近波动,没有出现富集. 重金属元素 Mn 自 10.75 cm 开始 $EF>1$,由 2.25 cm 到表层富集系数增大,重金属元素 Zn、Cd 自 8.75 cm 开始 $EF>1$,重金属元素 Pb

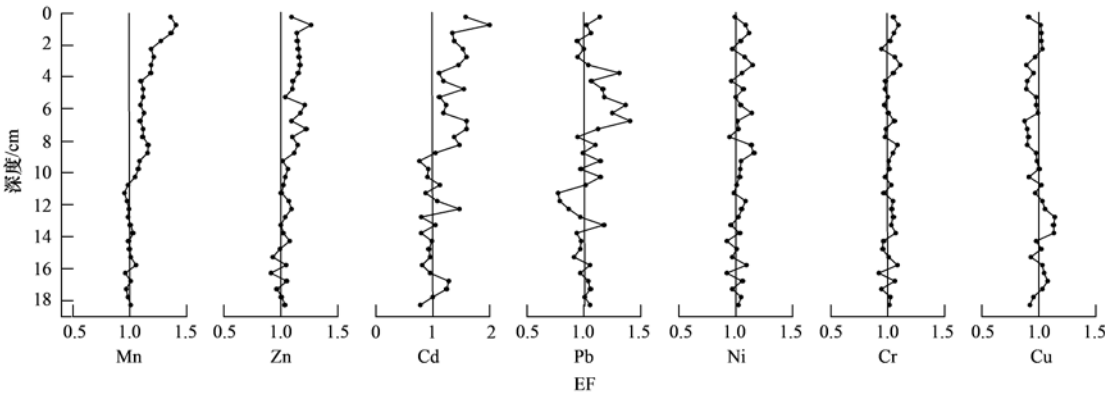


图 5 牙门气泡沉积物重金属富集系数
Fig. 5 Enrichment factors of the heavy metals in core sediment in Yamenqi Lake

在 7.25 ~ 3.25 cm 阶段 $EF > 1$ 大于, Pb 在此阶段出现富集. 所有重金属元素的富集系数都没有超过 2, 牙门气泡重金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb 存在轻微污染, 而 Ni、Cr 和 Cu 无污染.

3 讨论

牙门气泡周围原来为草甸草原, 有少量的蒙古族放牧, 从 19 世纪末期起, 周围开始农业开发, 把草原开垦为耕地, 由于开垦和耕作, 引起土壤粒度的变化, 因而在底部至 14.25 cm 阶段, 中值粒径和 $> 128 \mu\text{m}$ 粒级含量减少, 而 $< 4 \mu\text{m}$ 、 $4 \sim 16 \mu\text{m}$ 、 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 粒级含量稍有增加, 而金属元素浓度的变化主要受粒度变化的影响, Mn、Zn、Fe、Ni、Cr、Cu 和 Ca 的浓度稍有增加, 而 Ba、Na、K 的浓度稍有减少.

在 50 年代至 90 年代阶段, 金属元素的波动较大, 金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Ca 和 Li 的变化趋势与粒度指标的变化的较一致, 仍然是受粒度因素的影响. 解放后由于工农业用水增加, 在乌裕尔河上修建了很多水库, 因此进入连环湖的水量大量减少, 连环湖的水量年际变化增大, 此阶段中湖泊周围的降水量整体变化趋势趋于减少, 连环湖曾在 1954 年和 1979 年出现干湖事件, 只是在湖泊中心位置有小面积的湖泊水面, 因此导致粒度指标和金属元素浓度的波动增大. 在这个阶段中, 重金数据元素 Mn、Zn、Cd、Pb 开始出现富集, 前文已提及, 70 年代末期连环湖由于输入河流重金属污染的影响, 曾发生过鱼类大量死亡的污染事件^[22]. 此阶段湖泊周围农业活动增强^[22], 湖泊周围多数都被开辟为农田, 农业化肥农药的施用也会导致其中所含的重金属元素随地表径流进入湖泊.

在 90 年代之后连环湖的引水工程每年固定向连环湖补水, 保证湖泊稳定的水位. 自 90 年代开始, 湖区周围的降水量有所增加. 因而此阶段中中值粒径指标和 $> 128 \mu\text{m}$ 粒级含量减少, 而 $< 4 \mu\text{m}$ 、 $4 \sim 16 \mu\text{m}$ 、 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 、 $64 \sim 128 \mu\text{m}$ 粒级含量整体趋于增加, 此阶段中金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Cu、Ca、Li、Sr 仍与粒度指标的总变化趋势相一致, 整体变化趋势趋于增加, 在顶部稍有减少. 而 Ba、Na、K 整体趋于减少. 在这个阶段 Mn、Cd 富集系数在顶部稍有增加, 推测由于 Mn、Cd 人为输入有所增加.

4 结论

(1) 牙门气泡沉积岩心金属元素 1950 年之前

变化较小. 1950 ~ 1990 年受降水减少、入湖河水减少、湖周围农业垦殖强度增大等影响金属元素波动剧烈. 自 1990 年起, 受降水增加、引水、人类输入等的影响, 金属元素 Mn、Zn、Cd、Pb、Fe、Ni、Cr、Cu、Ca、Li 和 Sr 明显增加.

(2) 牙门气泡沉积岩心金属元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Zn、Cd、Ca、Li、Mg 和 Sr 主要受 $4 \sim 128 \mu\text{m}$ 粒径含量的影响, 而其中 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 粒径含量的影响更突出.

(3) 牙门气泡沉积岩心金属元素 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Zn、Cd、Ba、Ca、Li、Mg 和 Sr 浓度受有机质变化的影响.

(4) 牙门气泡沉积物重金属元素 Mn、Zn、Cd 和 Pb 存在轻微的污染, 由于连环湖湖泊环境的脆弱性, 应在以后的湖泊管理中应加以关注, 严格控制重金属元素的输入.

(5) 本研究中没能解决重金属元素人为输入和自然输入的量化问题, 在以后的研究中需要进一步的分析和探索.

致谢: 本研究在样品采集过程中得到杜尔伯特蒙古族自治县连环湖管理处的全力帮助, 在此衷心感谢!

参考文献:

- [1] Sekabira K, Origa H O, Basamba T A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **7**(3): 435-446.
- [2] 曹源, 仇雁翎, 杨晓红, 等. 南太湖区域表层沉积物中有机氯化物及重金属污染现状[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 561-567.
- [3] 张华俊, 陈修康, 韩博平, 等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1167-1175.
- [4] 邝海健, 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.
- [5] 智颖颢, 王再岚, 马中, 等. 鄂尔多斯地区公路沿线土壤重金属形态与生物有效性[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 2030-2039.
- [6] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 298-304.
- [7] 陶澍, 曹军, 李本纲, 等. 深圳市土壤微量元素含量成因分析[J]. *土壤学报*, 2001, **38**(2): 248-255.
- [8] 姚书春, 薛滨, 朱育新, 等. 长江中下游湖泊沉积物铅污染记录——以洪湖、固城湖和太湖为例[J]. *第四纪研究*, 2008, **28**(4): 659-666.
- [9] Shen J, Liu E F, Zhu Y X, *et al.* Distribution and chemical

- fractionation of heavy metals in recent sediments from Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 141-150.
- [10] 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.
- [11] 徐卫红, 王宏信, 李文一, 等. 重金属富集植物黑麦草对 Zn 的响应[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(3): 43-46.
- [12] Alvarez M B, Malla M E, Batistoni D A. Comparative assessment of two sequential chemical extraction schemes for the fractionation of cadmium, chromium, lead and zinc in surface coastal sediments [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **369**(1): 81-90.
- [13] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [14] 张翠, 陈振楼, 毕春娟, 等. 黄浦江上游饮用水源地水及沉积物中汞、砷的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1455-1462.
- [15] Izquierdo C, Usero J, Gracia I. Speciation of heavy metals in sediments from salt marshes on the southern Atlantic coast of Spain[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, **34**(2): 123-128.
- [16] Zoumis T, Schmidt A, Grigorova L, *et al.* Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 195-202.
- [17] 孙丽, 臧淑英, 肖海丰, 等. 连环湖他拉红泡重金属和营养元素的沉积记录[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, **26**(4): 99-103.
- [18] 李晶, 臧淑英, 宋延山, 等. 连环湖阿木塔泡沉积物中重金属形态及其对环境影响分析[J]. *环境科学与管理*, 2009, **34**(1): 37-41.
- [19] 吴攀碧, 解启来, 卜艳蕊, 等. 扎龙湿地湖泊表层沉积物重金属污染评价[J]. *华南农业大学学报*, 2010, **31**(1): 24-27.
- [20] 苏丹, 臧淑英, 叶华香, 等. 扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1816-1822.
- [21] 孙清展, 臧淑英. 水体重金属污染评价方法对比研究——以扎龙湿地湖水为例[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2242-2248.
- [22] 杜尔伯特蒙古族自治县地方志编纂委员会. 杜尔伯特蒙古族自治县志[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社出版, 1996. 194-197.
- [23] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 504-506.
- [24] 黑龙江百科全书编纂委员会. 黑龙江百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2007. 26.
- [25] 魏文侠, 王衍臻, 陈修万, 等. 松嫩平原农牧渔交错区生态敏感性评价研究——杜尔伯特蒙古族自治县为例[J]. *地球信息科学*, 2008, **10**(3): 370-376.
- [26] 刘恩峰, 薛滨, 羊向东, 等. 基于 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, **29**(6): 89-94.
- [27] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 密云水库上游某铁矿区土壤重金属含量及形态研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(9): 1632-1639.
- [28] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 130-150.
- [29] 罗冬莲, 阮金山, 许翠娅, 等. 福建主要贝类养殖区表层沉积物重金属和有机质的含量及其相关性[J]. *海洋环境科学*, 2004, **23**(1): 33-36.
- [30] 韩淑妮, 李志中. 论新疆巴里坤湖沉积地球化学指标的累积规律[J]. *海洋与湖沼*, 1994, **25**(4): 429-437.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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)

2013年8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 15, 2013

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

国内外公开发行人