

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圻, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究

王心宇¹, 周丰², 伊旋¹, 郭怀成^{1*}

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 基于滇池 10 个监测点 (1991 ~ 2010 年) 表层沉积物中主要污染物 (Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Sn、Zn、TP 以及 KN) 含量数据, 利用 SOM 自组织映射神经网络对污染物时间演变特征进行识别. 将 1991 ~ 2010 年分为 4 个阶段, 1991 ~ 1995 年低含量阶段; 1996 ~ 2001 年高含量阶段; 2002 ~ 2006 年含量波动阶段; 2007 ~ 2010 年含量回落阶段. 各沉积物中污染物的变化模式不尽相同, 但各类重金属含量峰值多集中出现在 1996 ~ 1999 年、2005 ~ 2007 年 2 个时间段内. 在污染物含量变化的时序分析基础上, 参考入湖污染负荷、污染源普查数据等相关资料, 分析人类活动对滇池沉积物中主要污染物的影响, 发现人类活动对沉积物中污染物含量变化的影响很大, 在污染物排放量大的时期, 沉积物中污染物含量也会随之出现明显升高, 在采取污染控制及治理措施后, 沉积物中污染物含量会随之下降.

关键词: 沉积物; SOM; 时间分异特征; 滇池; 人类活动

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0194-08

Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake

WANG Xin-yu¹, ZHOU Feng², YI Xuan¹, GUO Huai-cheng¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The statistical technique self-organizing maps (SOM) was applied for stages analysis of Lake Dianchi sediments, southwestern China. The dataset of nine pollutants, including Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Sn, Zn, TP and KN, was observed and collected for 10 monitoring sites from 1991 to 2010. The results show that the 20 years' study could be divided into 4 stages. In stage one (1991 to 1995), concentrations of sediments are relatively low. In the second stage (1996 to 2001), concentrations of most sediments are higher than the stage before and show increasing trends. In the following stage (2002 to 2006), majority of the observed sediments exhibit fluctuation characteristics. Nevertheless, different concentration patterns exist among different pollutants, the concentration climaxes of most pollutants have been observed during the year 1996 to 1999 and 2005 to 2007. According to the relevant information gathering from yearly lake pollution load, the national survey of pollution sources etc., the reason for the above stages and concentration patterns of observed sediments are analyzed. The result shows that sediment concentration is sensitive to human activities in the basin, such as pollution emission as well as controlling.

Key words: sediments; SOM; time stages; Lake Dianchi; human activities

滇池是我国著名的高原湖泊. 近 20 年来, 由于受到流域经济发展、人口增长的影响, 滇池水质恶化程度不断加剧, 在人为环境干扰的作用下, 滇池沉积物中污染物含量已远超出土壤本底值, 且整体污染情况逐年加重^[1]. 沉积物会再悬浮造成内源污染, 如营养盐、重金属的释放^[2], 从而进一步影响到湖泊水质、水环境安全与健康. 针对滇池沉积物的研究开展较多. 李宝等^[3]研究了滇池沉积物内源营养盐的释放通量, 李仁英等^[4]揭示了滇池沉积物重金属污染物的形态分布, 邵晓华等^[5]探讨了滇池沉积物中污染物的时空分布情况, 陈云增等^[6]对滇池沉积物重金属污染进行了生态风险评价. 但针对滇池沉积物中污染物含量的时间演变模式, 尤其是结合人类活动对沉积物变化的成因进行分析, 却鲜见报道.

沉积物污染的历史, 可以反映湖泊污染的发展过程, 同时记录了流域内人类活动与自然环境的相

互作用^[7]. 通过研究过去 20 a 滇池沉积物主要污染物的时间分异性, 结合入湖污染负荷、污染源普查数据、滇池治理等相关资料进行讨论, 可以更好地剖析滇池沉积物污染物的整体变化过程, 评判人类活动对沉积物中污染物的影响方式与程度.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与测定

1991 ~ 2010 年每年 3 月, 对滇池草海、外海共 10 个监测点 (图 1) 进行采样, 采用北京新地标土壤

收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41222002); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07102-006)

作者简介: 王心宇 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划与管理、富营养化控制, E-mail: linden_wangxinyu@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: hcguo@pku.edu.cn

设备有限公司生产的活塞式柱状沉积物采样器,进行表层沉积物取样、样品保存、运输、风干、初粉碎、缩分,细粉碎,过 100 目样筛. 按文献[8]分别对沉积物中的 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Sn、Zn、TP、KN 进行含量分析测定. 考虑到底泥相对于水质较稳定的特征,每年 1 次采样可基本代表当年的污染变化情况.

1.2 分析方法

为获得滇池沉积物主要污染物在 1990 ~ 2010 年间的时间演变模式,在散点图分析的基础上,联合使用因子分析法 (FA) 和自组织映射神经网络 (SOM). 因子分析旨在对沉积物指标进行降维,剔除冗余信息,确保分析的准确性. 在此基础上,采用基于不分层最近邻居法分类的 (K Nearest Neighbors) 自组织映射神经网络实现不同年份数据的特异性分析^[9,10].

本研究数据预处理和多元统计过程采用 Microsoft Excel 2010、STATISTICA 8 以及基于 MATLAB® 2012 计算平台的 SOM Toolbox (Ver. 2.0) 工具箱^[11].

2 滇池沉积物主要污染物的时序分析

1991 ~ 2010 年间,滇池沉积物中主要污染物含量呈现出波动变化,且有明显尖峰的特征. 从空间分布情况看,监测点间的空间分异性不强,主要表现为草海与外海沉积物含量的差异(表 1),但变化趋

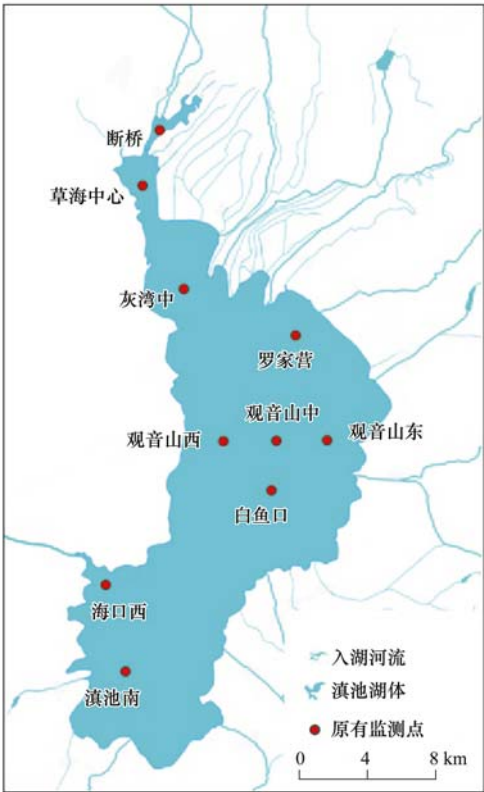


图 1 滇池沉积物监测点位示意

Fig. 1 Monitor stations for Lake Dianchi sediment survey

势无显著差别. 从沉积物主要污染物时间变化趋势看,污染物的变化模式可以分为 3 类:①先上升后下降再回升模式;②先上升后下降模式;③波动变化模式.

表 1 滇池沉积物空间分类情景¹⁾

Table 1 Spatial classification of sediments in Lake Dianchi

序号	监测点位	分类情景				
		2	3	4	5	6
1	草海中心(草海)					
2	白鱼口					
3	观音山东					
4	观音山中					
5	灰湾中					
6	滇池南				○	○
7	观音山西				○	○
8	海口西			△	△	△
9	罗家营			△	△	◇
10	断桥(草海)	☆	☆	☆	☆	☆
正确率	线性判别	0.970	0.945	0.625	0.555	0.505
	贝叶斯判别	0.975	0.950	0.765	0.650	0.610

1) 不同符号代表不同的空间分类类别.

2.1 滇池沉积物重金属的时序分析

沉积物 Sn、Cr 含量呈先升后降再回升的趋势 [图 2(a)、2(b)]. 对于大多数监测点,Sn 含量在 1996 ~ 1999 年间达峰值(文中所指峰值均在含量分

布的 10% 之外),随后下降,2003 ~ 2005 年起开始小幅回升. Cr 含量在 2005 ~ 2006 年间达到峰值,后快速下降,2008 年起开始小幅回升.

沉积物 Cd 含量呈先上升,后下降的变化趋势

[图 2(c)]. 在 1991 ~ 1995 年间 Cd 含量逐渐上升, 1999 ~ 2010 年间波动回落, 含量在 1996 ~ 1998 年间达到(除罗家营监测点)最高。

沉积物 Hg、Pb、Cu、Zn 含量呈现无规律波动变化[图 2(d) ~ 2(g)]. Hg 含量峰值集中在 1996 ~ 1998、2005 ~ 2006 年 2 个时间段内. Pb 含量峰值较为分散, 集中在 1996 ~ 1998、2002 ~ 2007 年

间. Cu 含量峰值非常分散, 不同监测点峰值在 1993、1996 ~ 1999、2007 ~ 2009 年间均有出现. Zn 含量峰值主要集中在 1996 ~ 1998 年、2005 ~ 2007 年内。

综上所述, 滇池沉积物重金属污染物的变化模式虽不尽相同, 但各类重金属含量峰值多集中出现在 1996 ~ 1999、2005 ~ 2007 年 2 个时间段内。

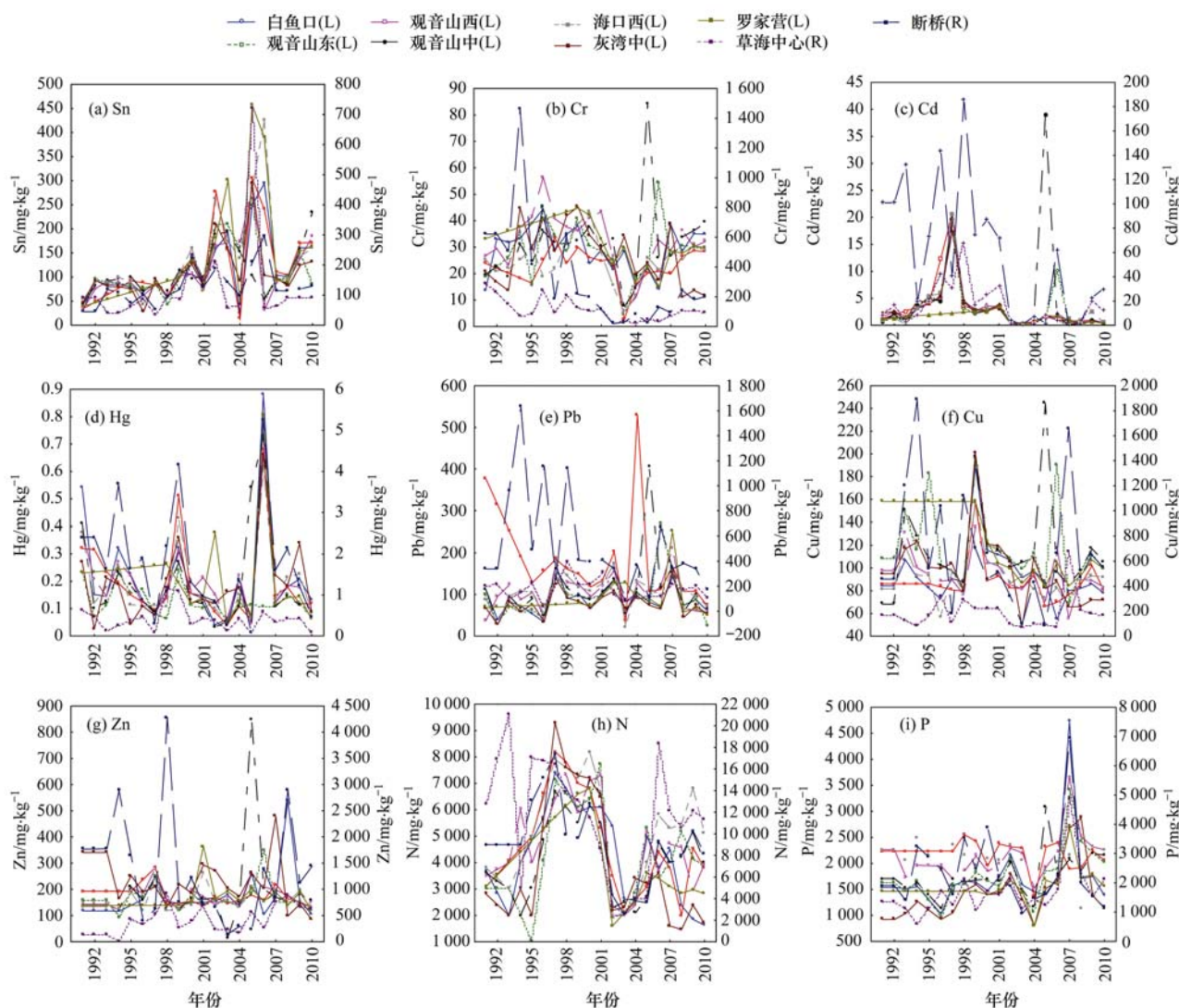


图 2 1991 ~ 2010 年滇池沉积物主要污染物含量变化

Fig. 2 Concentrations of major sediments in Dianchi during year 1991 to 2010

2.2 滇池沉积物营养盐的时序分析

滇池底泥 KN 含量呈先升后降再小幅上升的变化趋势. 除罗家营外, 其他点位的 N 含量在 1996 ~ 1999 年维持较高水平. 从图 2(h) 可看出, KN 含量自 2000 年起有明显回落过程, 2002 ~ 2004 年间各监测点含量普遍维持在相对较低水平, 2005 年后再度回升。

滇池底泥 P 含量呈波动变化趋势见图 2(i), 除

海口西和滇池南监测点外, 其余监测点峰值出现在 2007、2008 年, 海口西、滇池南监测点分别在 2004、2007 以及 2007、2008 年内出现谷值 ($< 10\%$).

3 滇池沉积物主要污染物的时间演变模式分析

3.1 滇池沉积物主要污染物的因子分析

考虑到沉积物污染物指标较多, 且污染物通常具有协同排放特点, 不同监测指标会包含重复信

息^[12],导致分析准确性的降低,故采用因子分析对原始数据进行降维.

KMO 检验(KMO =0.87)、Bartlett’s 球形检验($P < 0.05$)表明本文数据适合进行因子分析. 当总累计

方差 > 80% 时,共提取 4 个因子,解释总体方差的 85.13%,较好地反映了原始变量. 经最大方差旋转后,得到因子 1 代表 Sn、Hg、Pb、Cd、Cu 和 Zn,因子 2 代表 KN,因子 3 代表 P,因子 4 代表 Cr(表 2).

表 2 因子载荷矩阵¹⁾

Table 2 Rotated component matrix (varmix)									
指标	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	指标	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
N	0.230	0.101	0.045	0.953	Pb	0.898	0.027	0.176	0.146
P	0.168	-0.023	0.976	0.034	Cd	0.747	-0.012	-0.017	0.421
Sn	0.880	0.079	0.034	0.218	Cu	0.843	0.032	0.353	0.128
Hg	0.824	-0.074	0.119	0.143	Zn	0.857	-0.029	0.122	0.159
Cr	-0.009	-0.993	0.020	-0.084					

1) 粗体代表各因子所包含指标的因子载荷

3.2 滇池沉积物时间演变模式的 SOM 分类

对经因子分析处理过的数据进行 SOM 分类,根据 David-Boulding 指数可以确定最优分类数,滇池沉积物中重金属时间变化的 SOM 分类结果如图 3 所示,当分类数为 4 时,David-Boulding 指数最小,实现最优分类(图 3).

根据原始分类结果并经校正后,可将 1991 ~ 2010 年划分为 4 个阶段(表 3),第一阶段 1991 ~ 1995 年;第二阶段 1996 ~ 2001 年;第三阶段 2002 ~ 2006 年;第四阶段 2007 ~ 2010 年. 第一阶段,各类污染物含量较低;第二阶段,污染物含量开始上升,且含量较高;第三阶段,各类污染物含量变化趋

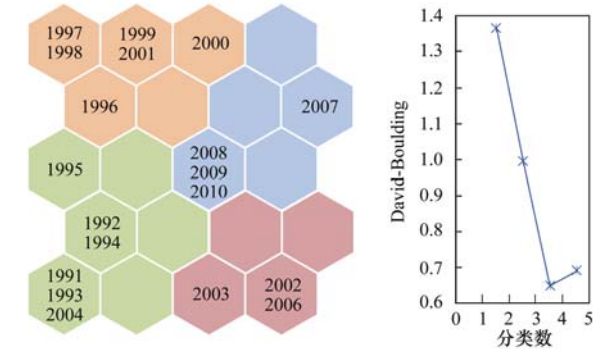


图 3 滇池沉积物时间变化的 SOM 分类结果及最优分类数确定
Fig. 3 Stages of major sediments in Dianchi using SOM method and the optimal number of categories

表 3 滇池沉积物主要污染物时间演变阶段表

Table 3 Stages of major sediments in Lake Dianchi						
类别	阶段(年)	特征	第一类沉积物 (Sn、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn)	第二类沉积物 (Cr)	第三类沉积物 (P)	第四类沉积物 (N)
1	1991 ~ 1995	低值	含量相对较低,除 Hg, 其余沉积物含量略上升	含量相对较低、略有上升趋势	含量相对较低、略有上升趋势	含量相对较低、波动上升趋势
2	1996 ~ 2001	高值	含量陆续达到峰值,主要集中在 1996 ~ 1999 年	含量上升	含量上升	含量维持在较高水平
3	2002 ~ 2006	波动	含量波动, Sn、Hg、Pb、Cd、Zn 出现第二峰值	含量上升, 2005、2006 年达到峰值	含量波动上升	2002 ~ 2003 年含量回落, 2004 ~ 2006 年含量上升
4	2007 ~ 2010	回落	含量回落, 并维持相对较低水平	含量大幅降低	2007 年达峰值, 随后含量下降	含量呈下降趋势

势不统一,多为波动变化;第四阶段,各类污染物含量总体呈下降趋势.

3.3 滇池沉积物主要污染物时间演变成因分析

3.3.1 沉积物主要污染物直接来源分析

湖泊是流域上各物质搬运的最后归宿^[13]. 污染物进入湖泊底层的途径主要有两种:①在重力的作用下,水相中的污染物通过沉积作用沉入湖泊底层;②在水力冲刷的作用下,入湖河道中的沉积物冲刷进入湖泊,并在湖流作用下,在湖泊底泥中进行

分布. 目前,滇池入湖河流年均输沙量在 36.94 万 m³^[14],占湖体沉积物总量的 0.4%.

相关分析表明,滇池沉积相污染物含量和水相污染物浓度相关性较低. 比较草海中心、断桥、灰湾中 3 个监测点入湖口沉积物污染物含量,与同点位湖泊水体、入湖河流水体以及入湖河流沉积物污染物含量的相关性,发现湖泊沉积物与入湖河流沉积物中污染物的含量呈显著相关(表 4). 散点图分析可以看出,上述两者在变化趋势上亦具有较高一

致性(以断桥监测点为例,图4),入湖河流沉积物含量峰值较湖体沉积物提前0~2 a出现。

湖泊沉积物含量仅表现为与入湖河流沉积物含量相关性高的原因可能是:①重金属污染物在排入水体后会迅速沉降在河道内^[15],沉降后的重金属污染物可随河道底泥在水力冲刷作用下再迁移^[16],最

终进入湖泊。②滇池入湖河流 pH 值均值为 7.94。通常,在碱性条件下沉积物中重金属不易再释放入水相^[17],因而水相中重金属污染物含量很低。③对于 N、P 营养盐,在水相和沉积相间发生着复杂、密切的转换过程,但沉积相含量远高于水相浓度,因此这两者难以呈现出简单的线性相关关系(表4)。

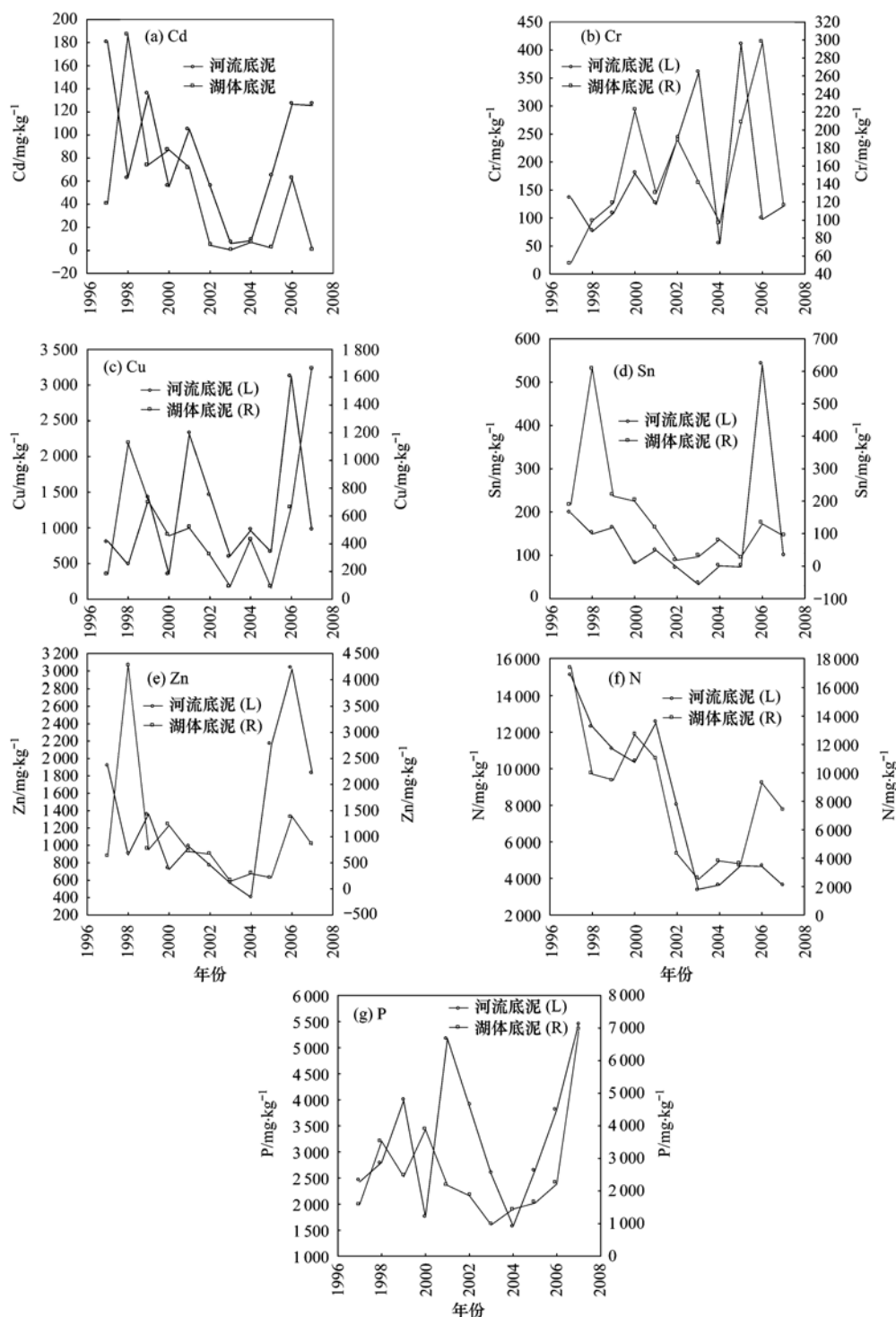


图4 断桥监测点入湖河流底泥沉积物与湖体底泥沉积物含量变化

Fig. 4 Concentrations of major sediments in lake and river at Duanqiao station

表 4 滇池水体、入湖口水体、入湖口底泥与滇池底泥主要污染物含量相关性(R)¹⁾

Table 4 Correlation between the concentrations of major pollutants in lake sediment, lake water, river water and river sediment

沉积物	草海中心			断桥			灰湾中		
	湖体	河流水体	河流沉积物	湖体	河流水体	河流沉积物	湖体	河流水体	河流沉积物
Cr	0.151	0.003	0.850	0.298	NaN	0.781	0.198	0.001	0.872
Pb	0.460	0.066	0.639	0.198	0.047	0.184	0.658	0.001	0.467
Cd	0.409	0.328	-0.112	0.230	0.010	0.822	-0.184	0.127	0.798
Cu	0.140	0.007	0.847	0.083	0.057	0.162	-0.272	0.001	-0.061
Zn	-0.335	0.022	0.330	0.146	0.689	-0.429	-0.055	0.171	-0.057
KN	0.152	0.185	0.506	-0.274	-0.319	0.814	-0.262	-0.198	0.916
TP	0.260	0.028	-0.304	0.260	0.371	0.140	0.335	0.440	0.664

1)粗体为相关系数>0.5

3.3.2 人类活动对沉积物中污染物含量的影响分析

1991~2010年间,滇池流域经历了区域快速发展的20 a,在此期间,流域人口年均增长率为3.3%,GDP年均增长率18%,城市化率提高了17%^[18].但经济的飞速发展带给滇池流域巨大的环境压力^[19].滇池流域的工业自1980年代初开始大规模发展,初期主要以冶金、化肥等粗放式工业为主^[19],到1990年代初期,滇池周边厂矿遍布,产生的大量污染物未经任何处理便排入滇池,造成滇池水质迅速恶化.1970年代中后期滇池外海、草海水质为Ⅲ类,但至1990年代,已全面恶化为劣Ⅴ类^[21],湖泊沉积物环境质量也呈现出污染加剧的趋势^[22].

随着对污染控制及滇池水体保护工作的不断开展,尤其是“九五”期间,国家和地方开展了大量治理工作.2000年前后,治理成效开始逐渐体现,湖泊水质呈现出好转趋势,BOD、TN浓度开始大幅降低^[23].潘珉等^[24]研究了1960~2006年间滇池水质与流域人口和GDP之间的相关关系,发现滇池水体的TN、TP浓度与流域人口数和GDP密切相关,但2000年后,相关性有所减弱.众多相关资料表明^[25~27],1999~2000年前后是滇池水质的一个转折点^[20],自1998年国务院对滇池“流域水污染防治九五计划”及“2010年规划”做出正式批复后,多项污染源治理措施在滇池流域展开.1999年流域开展了“零点行动”,清理关闭了云南印染厂、昆明造纸厂、昆明冶炼厂等重点污染源,将昆明农药厂、福保造纸厂制浆生产线等迁出滇池流域.同时在昆明市兴建4座污水处理厂,加大了对城市生活污水的处理力度.1998-03~1999-03,滇池草海进行了底泥疏浚工程,直接去除草海污染底泥量424万m³^[25,26].

上述多项治理措施的效果一定程度反映在沉积物含量的变化上.自2001年后滇池沉积物含量进

入了波动、下降的阶段,尤其以KN、Sn、Cu的下降趋势最为明显.虽然大部分污染物在2002~2006年间仍以波动变化为主,这是因为影响底泥污染物的因素较多,外源污染物浓度削减效果往往需要一定时间才能反映在沉积物含量变化上^[27].随着“十五”、“十一五”治理项目的进一步开展,污染控制措施进一步严格,滇池湖体水质从2004年起逐步转向Ⅳ类^[28],2007年后,各类底泥污染物含量也相应呈现出较明显的下降趋势.

重金属污染物在1991~2010年间含量出现了较大幅度波动.Wei等^[29]研究了滇池流域重金属的本底值(mg·kg⁻¹),Sn:3.50、Hg:0.247、Cr:115.18、Pb:65.76、Zn:153.95.中国环境监测总站公布的云南土壤环境背景值(mg·kg⁻¹),Cu:33.6、Cr:57.6、Cd:0.104、Pb:36.0、Hg:0.045、Zn:80.5^[30].从图2中可以看出,滇池沉积物重金属污染物含量大多超出了土壤本底值,峰值均呈尖峰形式.朱广伟等^[31]对太湖沉积物重金属污染物的研究,认为超出本底值的尖峰多为人为因素造成的污染物含量激增.高丽等^[32]的研究认为,引起滇池底泥重金属污染物变化的主要因素是外源重金属排放,其中以工业污染排放为主.

根据郭怀成等^[20]对滇池流域水环境与社会经济系统调查的结果,滇池流域内Cr、Cd、Pb、Hg这4类重金属污染物表现出显著的行业特征性,并集中在特定行业的重点工业中.Cr是金属制品业的特征污染因子,主要的污染企业是昆明建芳工贸有限公司,其排放量占Cr排放总量的84.66%.Pb、Cd、Hg是有色金属冶炼及压延加工业的主要污染因子,其中仅云南铜业股份有限公司的排放量就分别占Pb、Cd、Hg排放总量的60.87%、98.76%和93.70%.

滇池流域的重金属污染物具有显著的行业及重点工业特征,工业活动中产生的重金属污染物是流

域重金属的主要来源,污染物随污水排放后会最终沉积到湖泊底泥中,造成湖泊沉积物含量变动.以 Cr 为例^[33],工业源 Cr 排放总量的 88.7% 来自昆明建芳工贸有限公司,该公司成立于 2003 年,其后 1~2 a 中不同监测点底泥 Cr 含量出现同样的上升趋势,并于 2005、2006 年达到峰值.再以 Sn 为例,1988 年滇池 Sn 超标率在 33%~100%^[33],1990 年代初期开始治理云南冶炼厂、昆明冶炼厂等高 Sn 排放量企业,1990 年代后期,滇池底泥 Sn 含量呈现出较明显下降趋势.滇池流域的主要重金属来源于工业废水,由于重金属污染物排放后具有稳定、难降解的特征,因此流域工业生产中排出的重金属污染物在排放后 0~2 a 内会进入湖泊沉积物,并在湖泊底泥中进行累积.

沉积物 KN 含量变化与人类活动也存在密切联系.不同于重金属污染物,滇池流域 TN 排放以农业面源为主、生活面源为辅,工业企业污染源所占比例较低^[34].根据郭怀成等^[20]对滇池流域水环境与社会经济调查的结果,1988~2009 年间,滇池流域的污染物削减能力不断增强,在排放总量不断增加的情况下,TN 入湖排放量从 2000 年起止升转降.此外 1999 年,昆明市环保局开展了工业污染整治“零点行动”,清理关闭了如造纸厂、印染厂等一些高氮污染物排放企业,大大降低了流域内的 TN 入湖量.滇池流域 TN 排放量在 2000 年前后的下降趋势一定程度反映在沉积物含量的变动上,从图 2(h)中可以看出,在 1995~2000 年间,各监测点 KN 含量稳定维持在较高浓度水平,但从 2000 年起,沉积物 KN 含量呈现出与 TN 入湖排放量一致的回落趋势在 2002~2009 年间,流域内的 TN 入湖排放量浓度出现小幅度波动^[19],相应滇池各监测点沉积物 KN 含量在 2002~2004 年间普遍在较低水平波动,2005 年后开始小幅波动上升.总体来说,沉积物 KN 含量变化存在明显、缓和的变化趋势,并与流域 TN 入湖排放量的变化趋势较为吻合.

滇池沉积物中总磷含量在 1991~2006 年间维持波动变化,部分监测点有小幅上升趋势,2007 年前后多监测点磷沉积物含量出现明显峰值.然而滇池湖体 TP 浓度在 1991~2008 年间呈逐步上升趋势^[20],并未在 2007 年前后出现明显的浓度激增,尚未找到非常合理的依据来解释 2007 年前后底泥磷含量出现的峰值.

此外,从沉积物含量的空间分布看,明显存在人类活动对沉积物污染物浓度的影响.草海区域接纳

了大量来自昆明市的生活污水和工业废水^[35].从图 2 中可以看出,滇池草海监测点沉积物各类污染物含量都远高于外海监测点沉积物含量,如 Sn、Cd、Hg 等污染物含量存在数量级上的差异.

4 讨论

本研究通过分析滇池 10 个监测点(1991~2010 年)表层沉积物中主要污染物含量数据,将 1991~2010 年分为低含量、高含量、含量波动以及含量回落阶段.其中大多数污染物浓度变化模式在 2000 年左右出现变化,结合滇池流域社会发展及污染调查数据可以看出,1999 年前后,流域内开展了多项大规模的污染源治理,随之在 2000 年前后大多数沉积物含量停止了增长或转为下降趋势,尤其以 KN 变化最为明显.通过对现有资料的分析,重金属沉积物如 Cr、Sn 含量都表现出与流域内相关污染源排放量密切的关系,但限于资料有限,无法对各重金属沉积物的变化原因一一进行解释,也很难就短期内沉积物污染物含量与人类活动建立定量关系.然而通过文中的分析,已经可以看出人类活动在很大程度上影响了滇池沉积物污染物含量变化,不仅是工业污染排放会造成沉积物含量的升高,污染控制及治理也可以有效降低沉积物污染物含量.

但本研究需改进之处尚多,如:①提高采样频率,获得更为准确的沉积物污染物含量数据;②增加采样监测点,以更为全面反应滇池沉积物的情况;③在沉积物直接来源的分析中,考虑河道水体以及底泥中的污染物时,可以再结合流量信息,考虑入湖负荷更为准确;④本研究搜集到的滇池流域污染源排放数据、污染普查数据以及重点污染企业排污情况等数据有待补充,以更好地找到人类活动与沉积物含量变化的关系,尤其是对与沉积物 P 的变化过程,现有资料无法解释.

5 结论

(1)1991~2010 年间滇池沉积物主要污染物的时间演变模式总体分为 4 个阶段,1991~1995 年低含量阶段、1996~2001 年高含量阶段、2002~2006 年含量波动阶段以及 2007~2010 年含量回落阶段.

(2)重金属污染物含量峰值集中出现在 1996~1999 年、2005~2007 年,KN 含量高值区集中在 1996~1999 年间,P 含量峰值则出现在 2006、2007 年前后.

(3)人类活动很大程度影响了滇池沉积物主要

污染物含量的变化过程,沉积物含量会在人类活动产生影响后的 1~2 a 内出现相应的变化。

参考文献:

- [1] 刘勇. 滇池近代沉积物营养盐沉积记录及重金属污染特征研究[D]. 南昌:南昌大学, 2011. 42-46.
- [2] 步青云,金相灿,王圣瑞. 长江中下游浅水湖泊表层沉积物潜在可交换性磷研究[J]. 地理研究, 2007, 26(1): 117-124.
- [3] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福宝湾沉积物内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 114-120.
- [4] 李仁英,杨浩,王丽,等. 滇池沉积物中重金属的形态分布特征[J]. 土壤, 2008, 40(2): 264-268.
- [5] 邵晓华. 云南滇池沉积物重金属元素分布规律研究[D]. 南京:南京师范大学, 2003. 62-65.
- [6] 陈云增,杨浩,金峰. 滇池沉积物重金属污染及潜在风险研究[J]. 土壤, 2007, 39(5): 737-741.
- [7] 巧海鳌,吴敬禄. 近 50 年来抚仙湖重金属污染的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 128-132.
- [8] 国家环境保护总局科技标准司. 土壤环境质量标准 GB15618-1995[S]. 1995. 1-1.
- [9] Astel A, Tsakovski S, Barbieri P, *et al.* Comparison of self-organizing maps classification approach with cluster and principal components analysis for large environmental data sets [J]. Water Research, 2007, 41(19): 4566-4578.
- [10] Davies D L, Bouldin D W. A cluster separation measure [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1979, (2): 224-227.
- [11] Vesanto J, Himberg J, Alhoniemi E, *et al.* SOM toolbox for Matlab 5 [M]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 2000. 112-156.
- [12] 秦延文,张雷,郑丙辉,等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4291-4299.
- [13] 姚书春,薛滨,朱育新,等. 长江中下游湖泊沉积物铅污染记录[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 602-609.
- [14] 汤承彬. 滇池泥沙冲淤的初步研究[J]. 云南环境科学, 1991, 2: 3-12.
- [15] 陈守莉,王平祖,秦明周,等. 太湖流域典型湖泊沉积物中重金属污染的分布特征[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(2): 124-130.
- [16] Knox A S, Paller M H, Nelson E A, *et al.* Metal distribution and stability in constructed wetland sediment [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(5): 1948-1959.
- [17] 张祖德. 无机化学[M]. 北京:中国科技大学出版社, 2008. 125-132.
- [18] 李中杰,郑一新,张大为,等. 滇池流域近 20 年社会经济发展对水环境的影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 875-882.
- [19] 段昌群,王焕. 滇池的区域生态经济容量特点和昆明城市功能关系[J]. 城市环境与城市生态, 1992, 5(3): 16-19.
- [20] 郭怀成,刘永,周丰,等. 国家水体污染控制与治理科技重大专项验收技术报告——河流社会经济结构调整及水污染综合防治中长期规划研究[R]. 北京:北京大学环境科学与工程学院, 2012. 119-121.
- [21] 祝艳. 滇池水质演替趋势及防止对策分析[J]. 云南环境科学, 2004, 23(增刊): 97-100.
- [22] 陈云增,杨浩,张振克,等. 滇池沉积物金属污染及环境质量评价[J]. 湖泊科学, 2008, 20(4): 492-499.
- [23] 郭怀成,孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500-506.
- [24] 潘珉,高路. 滇池流域社会经济发展对滇池水质变化的影响[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 117-122.
- [25] 安琪,李发荣. 滇池草海底泥疏挖对水体水质及底泥影响分析研究[J]. 云南地理环境研究, 2002, 14(2): 65-69.
- [26] 李文义,李进军. 滇池草海污染底泥疏挖及处置工程(一期)施工技术[A]. 见:国家环境保护总局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究[C]. 北京:中国环境科学出版社, 2001. 5-114.
- [27] 胡小贞,刘倩,李英杰. 滇池福保湾植被重建对底泥再悬浮及营养盐释放的控制[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1288-1292.
- [28] Liu Y, Guo H C, Yang P J. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis[J]. Ecological Modeling, 2010, 221(4): 681-688.
- [29] Wei C Y, Wen H L. Geochemical baseline of heavy metal in the sediments of two large freshwater lakes in China: Implication for contamination character and history [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2012, 34(6): 737-748.
- [30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990. 57-86.
- [31] 朱广伟,秦伯强,高光,等. 太湖近代沉积物中重金属元素的累积[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 143-150.
- [32] 高丽,杨浩,周健民,等. 滇池水体和沉积物种营养盐的分布特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(4): 1-4.
- [33] 徐晓梅,张琨玲. 影响滇池入湖污染物总量变化的主要因素分析[J]. 云南环境科学, 2004, 23(4): 42-44.
- [34] 崔键,马友华,赵艳萍,等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-340.
- [35] 彭永岸,朱彤. 滇池污染的成因及其治理新方案[J]. 地球信息科学, 2003, 3(1): 16-21.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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