

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

**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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 ..... 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 ..... 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 ..... 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染状况研究 ..... 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 ..... 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM<sub>2.5</sub>重度污染的数值模拟 ..... 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 ..... 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 ..... 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 ..... 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 ..... 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 ..... 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 ..... 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 ..... 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 ..... 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 ..... 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 ..... 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 ..... 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 ..... 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 ..... 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 ..... 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 ..... 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 ..... 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 ..... 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 ..... 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 ..... 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 ..... 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 ..... 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 ..... 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 ..... 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 ..... 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 ..... 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 ..... 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 ..... 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 ..... 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 ..... 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 ..... 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株*Arthrobacter arilaitensis*菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 ..... 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 ..... 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 ..... 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 ..... 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 ..... 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 ..... 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 ..... 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 ..... 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 ..... 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 ..... 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 ..... 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 ..... 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)

# 溇湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价

熊春晖<sup>1</sup>, 张瑞雷<sup>1</sup>, 吴晓东<sup>2</sup>, 冯立辉<sup>1</sup>, 王丽卿<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 为了揭示溇湖表层沉积物营养盐及重金属分布和污染特征, 2014 年 1 月采集了溇湖北区、湖中区和湖南区共 20 个沉积物样品. 分析了沉积物营养盐和重金属的水平分布特征, 并对营养盐及重金属的污染特征和来源进行了研究. 结果表明, 溇湖沉积物总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的平均含量分别为 2 207.94 mg·kg<sup>-1</sup> 和 708.62 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中湖中区 ( $N=20$ ,  $P=0.027$ ) 和湖南区 ( $N=20$ ,  $P=0.005$ ) TN 及湖中区 ( $N=20$ ,  $P=0.005$ ) TP 含量显著大于湖北区; 重金属 (Zn、As、Cr、Cu、Ni、Pb、Cd、Hg) 的平均含量分别为 766.59、350.66、307.98、59.54、122.67、168.97、2.34 和 0.41 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中湖中区的 Cu 含量显著 ( $N=20$ ,  $P=0.013$ ) 大于湖北区, 湖中区的 Zn 含量显著 ( $N=20$ ,  $P=0.024$ ) 大于湖南区, 其它重金属元素含量在 3 个湖区的差异性不显著 ( $P<0.05$ ). 除 TP、Cu 和 Hg 与粒径之间有一定的相关性, 其它元素与粒径的相关性不明显. 营养盐污染评价中, 综合污染指数 (PI) 表明溇湖处于严重污染, 且湖中区和湖南区比湖北区污染更为严重. 潜在生态风险评价中, 重金属 Cd、As 和 Hg 均已达到很强到极强污染程度, 其余重金属则处于轻微到中等污染水平, 重金属潜在生态风险指数 (RI) 表明溇湖沉积物存在很强到极强的潜在生态风险, 其中 Cd、As 和 Hg 对 RI 的贡献最大.

**关键词:** 溇湖; 表层沉积物; 营养盐; 重金属; 污染评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0925-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.017

## Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China

XIONG Chun-hui<sup>1</sup>, ZHANG Rui-lei<sup>1</sup>, WU Xiao-dong<sup>2</sup>, FENG Li-hui<sup>1</sup>, WANG Li-qing<sup>1\*</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** This study investigated the horizontal distribution characteristics of nutrients and heavy metals (Zn, As, Cr, Cu, Ni, Pb, Cd and Hg) in January, 2014, and assessed the potential ecological risk of Lake Gehu. It was found that the average contents of TN and TP were 2 207.94 and 708.62 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. TN and TP contents of the sediments at the centre were significantly higher than those in the north, while the TN content in the south was also significantly higher than that in the north of Lake Gehu. The average contents of Zn, As, Cr, Cu, Ni, Pb, Cd, Hg were 766.59, 350.66, 307.98, 59.54, 122.67, 168.97, 2.34, 0.41 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The content of Cu at the centre was significantly higher than that in the north, and the Zn content at the centre was significantly greater than that in the south of Lake Gehu, however the difference in the content of other heavy metals at these three areas was not significant. Furthermore, the obvious correlation between elements and granularity was only found in the aspect of TP, Cu and Hg. The comprehensive pollution index (PI) indicated that the Lake Gehu was heavily polluted, especially the centre and south areas. The potential ecological risk index (RI) showed that Cd, As and Hg had caused serious pollution in Lake Gehu while the other heavy metals only induced slight or medium pollution. According to the contribution of Cd, As and Hg to RI, it was concluded that the sediments in Lake Gehu were at a serious potential ecological risk.

**Key words:** Lake Gehu; surface sediment; nutrient; heavy metal; pollution assessment

沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分, 是大多数水体生物赖以生存的主要场所<sup>[1]</sup>, 同时湖泊底泥长时间接纳并蓄积了大量的营养盐和重金属等物质, 成为记录流域人类活动以及湖泊环境相应的档案<sup>[2]</sup>. 当环境条件 (如氧化还原电位、pH 及水温等) 发生变化时, 沉积物中的营养盐和重金属会释放到水体中, 造成水环境的二次污染, 这将严重影响湖泊水质<sup>[3,4]</sup>, 因此研究沉积物营养盐及重金属的含量分布, 对了解其对水质的影响具有重要意义.

目前, 国内外针对湖泊、水库、海洋和河口地区营养盐及重金属的研究比较多<sup>[5-8]</sup>, 已成为评价水域生态系统健康的重要方法之一.

溇湖位于太湖流域上游, 具有供水、泄洪、通航、鱼鸟生息繁衍和渔业生产等多重功能, 随着高

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-007)

作者简介: 熊春晖 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: xchshou@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: lqwang@shou.edu.cn

速发展的工业化与城市化及居民生活水平的提高,大量工业、农业废水和生活污水流入湖中,造成水域环境越来越差,其水体富营养化日益严重<sup>[9]</sup>.近年来,关于漏湖的研究主要集中在生态系统健康和水环境质量评价以及对水污染控制技术的研究上<sup>[9-12]</sup>,但有关漏湖表层沉积物营养盐和重金属分布及环境污染评价的研究较少.本研究根据漏湖中水生植物的生长状况、养殖面积和治理现状,将其分为湖南区、湖中区和湖北区这3个区域,对沉积物营养盐和重金属含量分布特征进行研究,并分别对沉积物营养盐的污染和重金属潜在生态风险进行评价,以期为漏湖污染控制和生态修复提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况及样点设置

漏湖地处北亚热带季风区,位于太湖上游,是苏南地区第二大淡水湖,横跨常州武进区和无锡宜兴市,是太湖流域的重要组成部分,东临太湖,西接长荡湖,南连宜兴洮湖,北经扁担河、德胜河通长江.现有水域面积 164 km<sup>2</sup>,湖面形如长茄,南北长 25 km,东西平均宽 6.6 km,湖底地形平坦,平均水深 1.47 m,容积 2.1 亿 m<sup>3</sup>,常年平均降水量为 1 066.0 mm.

本研究于 2014 年 1 月在漏湖用全球定位系统(GPS)设定 20 个采样点(图 1).并根据地理位置,湖区开发利用及修复情况,将整个湖区分为湖北区(N1~N6)、湖心区(C1~C8)和湖南区(S1~S6)3个部分,其中湖北区于 2010 年实施了底泥疏浚和水生植被恢复等生态修复工程,N3 和 N4 分别位于场北河和扁担河入湖口;湖中区围网养殖密度较小,水生植物覆盖率较低,其中 C4、C5 和 C6 分别位于大洪港、湟里河和太漏河入湖口;湖南区围网养殖密度较高,且水生植物覆盖高于湖中区,其中 S1、S3 和 S4 分别位于北干河、张河港入湖口和殷村港出湖口.

### 1.2 样品采集与测试方法

利用彼得森采泥器,采集 0~15 cm 表层沉积物样品,取中部样品放入干净的聚乙烯塑料袋内.采样完毕后,将样品运回实验室,挑出杂物后将样品分成两份,一份新鲜冷冻保存,用于粒度分析,另一份样品经自然风干后研磨过 80 目筛,用于总氮、总磷和重金属的测定.

沉积物总氮(TN)采用半微量法测定;总磷(TP)用钼锑抗比色法测定;重金属元素 Cr、Cu、

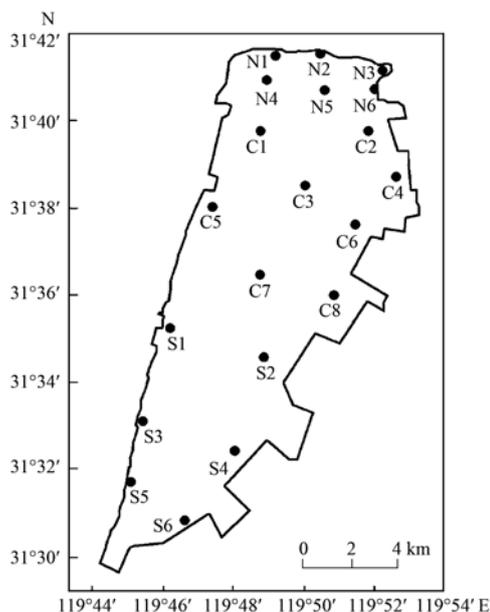


图 1 沉积物采样站点位置

Fig. 1 Samplingsites for sediments of Lake Gehu

Zn、Ni、Pb 和 Cd 经 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消解后,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-Q)测定;As 和 Hg 采用北京吉天 AFS-9130 双道原子荧光分光光度计测定;粒径采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定.为保证结果的准确性,每个样品测试 3 次,分析误差 < 5%,取平均值作为最后结果.

### 1.3 数据处理与分析

在 Excel 2007 中对数据进行预处理,采用 Origin 8.5 软件分析沉积物粒径分布特征;利用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析,检验表层沉积物总氮、总磷和重金属元素含量在 3 个湖区之间的差异性;若差异显著,采用 LSD 方法进行多重比较(显著水平设置为 0.05),分析各个元素在任意两个湖区之间的差异;利用 Pearson 相关性分析方法检验沉积物粒径与营养元素和重金属元素的相关性.

对沉积物总氮、总磷和重金属元素的空间分布特征利用 ArcGIS 10.2 软件包分析进行反距离加权插值(inverse distance weighting interpolation),IDW 插值方法是一种确定性的插值法,是依靠所测值在取样范围内的一种精确插值,对数据不做特殊要求.

### 1.4 环境风险评价方法

#### 1.4.1 营养盐污染评价方法

采用单因素污染指数法和综合污染指数法对沉积物营养盐的污染状况进行评价<sup>[13]</sup>,其计算公式为:

$$PI = \sum_{i=1}^n (W_i \times PI_i) = \sum_{i=1}^n \left( W_i \times \frac{c_i}{c_{0i}} \right)$$

式中,  $PI_i$  为第  $i$  种营养盐的污染指数,  $c_i$  为第  $i$  种营养盐实测值,  $c_{0i}$  为第  $i$  种营养盐评价标准,  $PI$  为综合

污染指数,  $W_i$  为污染因子  $i$  的权重, 本研究认为所有污染因子的权重均相同。

根据营养盐污染评价分级依据(表 1), 即可对沉积物中营养盐的污染状况进行评价。

表 1 沉积物营养盐污染评价分级依据

Table 1 Classification of nutrient pollution assessment for sediment

PI	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	≥2.0
污染程度	清洁	有影响	轻污染	重污染	严重污染

#### 1.4.2 重金属潜在生态风险评价方法

采用 Hakanson<sup>[14]</sup> 提出的沉积物污染评价法对溇湖表层沉积物重金属含量进行潜在生态风险评价。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times c_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{c_i^i}{c_n^i}$$

式中,  $RI$  为潜在生态风险指数;  $E_r^i$  为第  $i$  种元素的潜在生态风险系数;  $T_r^i$  为第  $i$  种元素的毒性相应系数;  $c_i^i$  为第  $i$  种元素的污染指数;  $c^i$  为沉积物中第  $i$  种元素的实测值;  $c_n^i$  为第  $i$  种元素的背景值。江苏省地区的重金属背景值<sup>[15]</sup> 和毒性系数见表 2, 潜在风险指数与污染程度的分级见表 3。

表 2 重金属评价背景值和毒性系数

Table 2 Reference values and toxicity coefficients of heavy metals

重金属元素	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
江苏省土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	9.4	0.151	76	26	32.9	26.8	73	0.082
毒性系数	10	30	2	5	5	5	1	40

表 3 沉积物重金属潜在生态风险程度的划分标准

Table 3 Classification for the ecological risk of heavy metals in sediments

生态风险系数	生态风险指数 RI	风险程度
<40	<150	轻微
40 ≤ <80	150 ≤ RI < 300	中等
80 ≤ <160	300 ≤ RI < 600	强
160 ≤ <320	600 ≤ RI < 1200	很强
≥320	≥1200	极强

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物粒度组成与分布

溇湖表层沉积物颗粒按粒径可分为砂、粉粒和黏土这 3 种, 其中粉粒又可分为细粉粒、中粉粒和粗粉粒。各采样点黏土组 (<4  $\mu\text{m}$ ) 的质量分数变化不大, 变幅为 16.77% ~ 28.69%, 平均为 23.59%。粉粒组 (4 ~ 64  $\mu\text{m}$ ) 的质量分数变化也不大, 变幅为 54.32% ~ 72.62%, 平均为 61.96%, 其中主要以中粉粒 (16 ~ 32  $\mu\text{m}$ ) 为主, 占粉粒组的 52.40%。砂粒组 (>64  $\mu\text{m}$ ) 的质量分数变化较大, 变幅为 4.90% ~ 28.04%, 平均为 14.45%。中值粒径的变幅也比较大, 变幅为 8.80 ~ 33.9  $\mu\text{m}$ , 但其范围主要处于细粉粒和中粉粒之间。结果表明, 溇湖表层沉积物主要由粉粒组成, 其次是黏土, 含砂量比较少, 中值粒径主要处于细

粉粒和中粉粒之间, 说明溇湖各位点表层沉积物粒度特征比较相似(图 2)。

### 2.2 表层沉积物营养盐和重金属元素分布特征

#### 2.2.1 表层沉积物营养盐空间的分布特征

溇湖各采样点营养盐的含量存在很大的差异(图 3), 其中 TN 含量的变幅为 635.37 ~ 4 126.60  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 2 207.94  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最高值出现在湖南区, 并在 S6 达到最大; TP 含量的变幅为 323.13 ~ 1 061.07  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为 708.62  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最大值位于湖中区, 在 C3 达到最大。TN 和 TP 的平均含量都比较高, 并且 TN 的含量 (2 207.94  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 明显高于 TP (707.62  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。不同区域之间营养盐的平均含量也有所不同(图 3), 沉积物 TN 含量的高值主要位于湖南区, 其平均含量最大 (2 777.39  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 其次是湖中区 (2 362.34  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 最小的为湖北区 (1 432.62  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); TP 平均含量的高值为湖中区 (842.99  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 其次是湖南区 (701.94  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 最低的是湖北区 (536.14  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。3 个湖区中 TN ( $F = 5.656, P = 0.013$ ) 和 TP ( $F = 5.200, P = 0.017$ ) 的含量均呈显著性差异, 其中湖中区的 TN ( $P = 0.027$ ) 和 TP ( $P = 0.005$ ) 的含量显著大于湖北区; 湖南区的 TN 的含量显著大于湖北区 ( $P = 0.005$ ); 湖中区和湖南区的 TN 和 TP、湖北

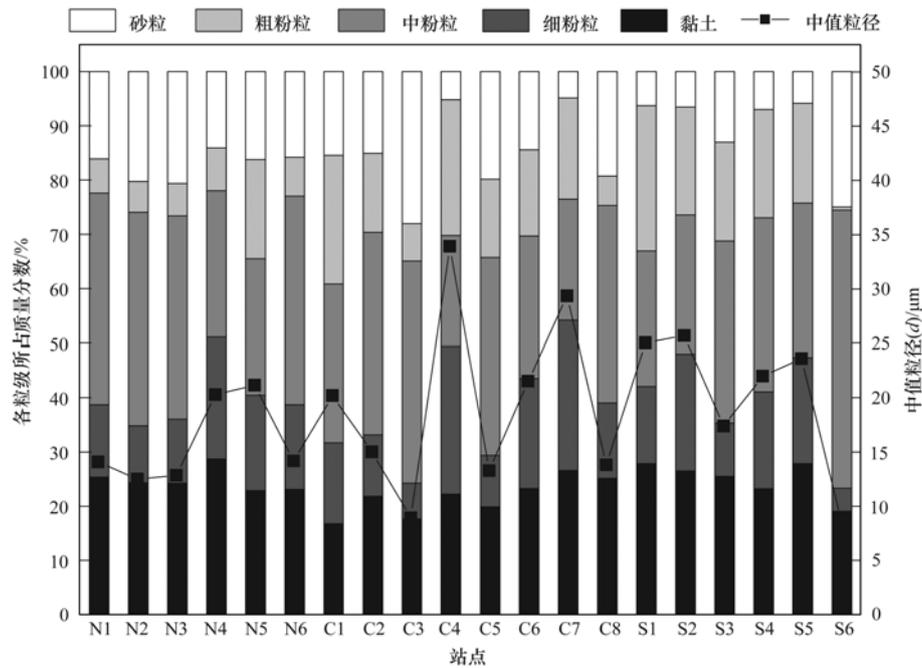


图2 漏湖表层沉积物粒度分布

Fig. 2 Granularity distribution in surface sediment of Lake Gehu

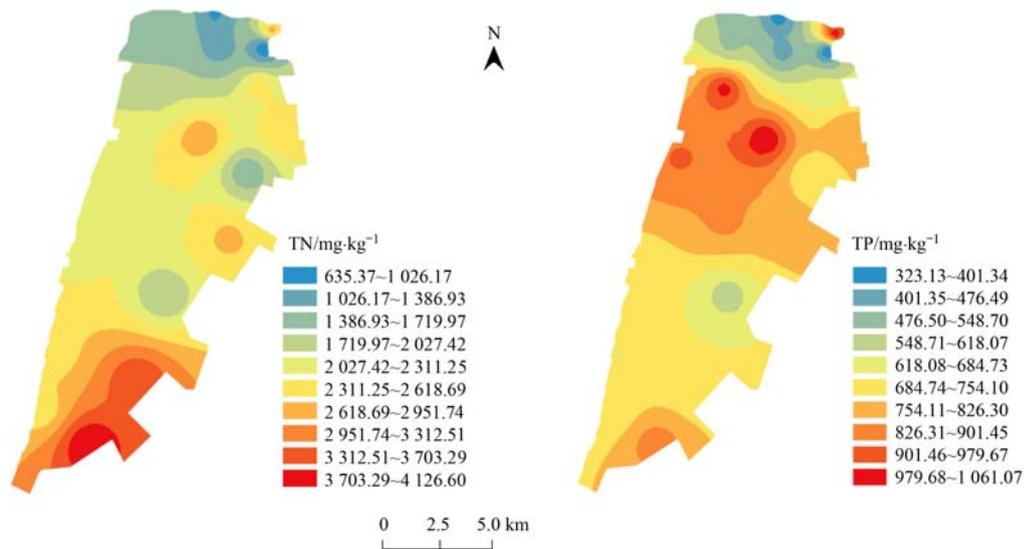


图3 漏湖表层沉积物营养盐的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of nutrients in surface sediments of Lake Gehu

区与湖南区的 TP 差异均不显著 ( $P > 0.05$ ).

### 2.2.2 表层沉积物重金属的空间分布特征

漏湖表层沉积物重金属平均含量相差很大,各元素平均含量的大小顺序为  $Zn > As > Cr > Cu > Ni > Pb > Cd > Hg$ . 由图4可见,各采样点重金属元素的含量有所不同,其中 Zn 和 As 元素的含量变幅分别为  $477.92 \sim 1481.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $53.12 \sim 1204.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Cr、Cu、Ni 和 Pb 的含量范围分别为  $88.04 \sim 361.78$ 、 $39.75 \sim 105.41$ 、 $28.80 \sim$

$159.56$  和  $10.48 \sim 87.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Cd 和 Hg 含量的变幅分别为  $0.87 \sim 4.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.10 \sim 0.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Zn、Cr 和 Ni 含量的高值部分主要分布在湖北区的东部和湖中区的北部,Zn 和 Cr 低值部分主要位于湖南区,而 Ni 的低值部分主要分布在湖中区的南部和湖南区的北部; Cu、Pb 和 Cd 含量的高值部分主要位于湖中区,低值部分分布比较广泛; Hg 的高值部分主要分布在湖北区的北部和湖南区的南部,低值部分主要分布在湖中区;而 As 含量在

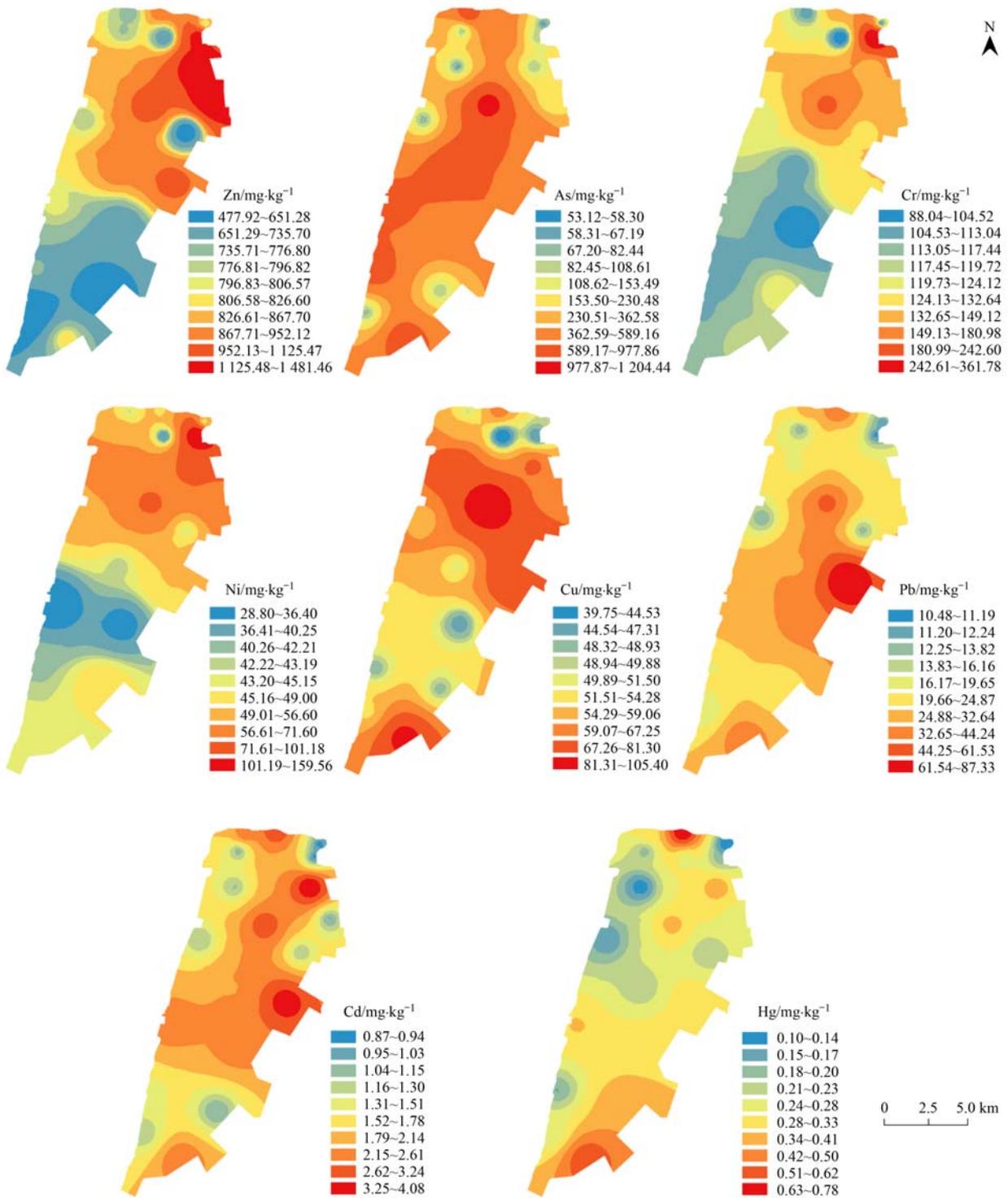


图4 溇湖表层沉积物重金属的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments of Lake Gehu

各样点的分布比均匀. 3 个湖区中 Cu ( $F = 4.292, P = 0.031$ ) 和 Zn ( $F = 3.056, P = 0.073$ ) 的含量差异显著, 其它 6 种重金属含量在 3 个湖区的差异均不显著 ( $P > 0.05$ ). 其中湖中区 Cu 的含量显著大于湖北区 ( $P = 0.013$ ); 湖中区 Zn 的含量显著大于湖

南区 ( $P = 0.024$ ); 湖北区和湖中区 Zn 的含量、湖中区和湖南区 Cu 的含量、湖北区和湖南区 Cu 和 Zn 的含量差异均不显著 ( $P > 0.05$ ).

### 2.3 粒径与营养盐、重金属之间的关系

由表 4 可知, 溇湖表层沉积物营养盐含量中 TP

含量与黏土百分比呈显著负相关关系 ( $R = -0.49$ ,  $P = 0.030$ ), 而粉粒、砂粒和中值粒径大小与营养盐的相关性并不明显. 由此可见, 沉积物中营养盐的水平与粒度组成关系不是很密切. 沉积物中重金属 Cu 的含量与黏土呈极显著负相关关系 ( $R = -0.63$ ,  $P = 0.003$ ), 与砂粒呈现极显著正相关关系 ( $R = 0.59$ ,  $P = 0.006$ ); Hg 的含量与中粉粒比例呈

显著正相关关系 ( $R = 0.47$ ,  $P = 0.039$ ); 而 Cr、Ni、Zn、As、Cd 和 Pb 与粒度组成的相关性却很小. 由此可见, 沉积物颗粒物越粗, Cu 的含量就相对越高, Hg 则主要分布在中值粉粒比例较高的部分, 而其它重金属含量与粒度组成关系不是很密切. 从相关性趋势上看, 漏湖沉积物营养盐和重金属元素主要集中在中粉粒和砂粒中.

表 4 沉积物粒径与营养元素、重金属的相关性<sup>1)</sup> ( $N = 20$ )

Table 4 Correlation between granularity and nutrients and heavy metals in the sediment

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	TN	TP
黏土	-0.23	-0.33	-0.63**	-0.29	-0.03	-0.06	-0.08	-0.03	-0.31	-0.49*
细粉粒	-0.12	-0.07	-0.43	0.01	-0.25	-0.37	-0.37	-0.24	-0.30	-0.19
中粉粒	0.29	0.25	0.42	0.11	0.18	0.35	0.47*	0.28	0.32	0.08
粗粉粒	-0.28	-0.22	-0.31	-0.08	-0.21	-0.29	-0.35	-0.35	-0.02	0.09
砂粒	0.22	0.19	0.59**	0.11	0.28	0.31	0.26	0.31	0.09	0.22
中值粒径	-0.27	-0.23	-0.42	-0.01	-0.19	-0.34	-0.31	-0.27	-0.11	-0.06

1) \* 为在 0.05 水平上显著相关; \*\* 为在 0.01 水平上显著相关

## 2.4 漏湖表层沉积物的环境质量评价

### 2.4.1 营养盐污染评价

依据加拿大安大略省环境和能源部 1992 年制定的沉积物质量评价指南为标准, 其中总氮和总磷能够引起最低级别生态毒性效应的含量分别为  $550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[16]</sup>. 依据此标准可知, 漏湖各采样点总氮含量均能引起最低级别生态毒性效应; 总磷中, 70% 的采样点能引起最低级别生态毒性效应, 其余采样点处于安全浓度, 不会产生毒性效应. 由图 5 可知营养盐综合污染指数范围为 0.85 ~ 4.47, 湖南区和湖中区均处于严重污染 (C6 除外), 湖北区处于轻污染与严重污染之间, 由此可知, 漏湖沉积物营养盐污染较为严重. 单因素方差分析表明, 3 个湖区之间的 PI 值具有显著性差异 ( $F = 5.642$ ,  $P = 0.013$ ), 其中湖北区的 PI 值均显著小于湖中区 ( $P = 0.015$ ) 和湖南区 ( $P = 0.006$ ), 说明湖北区营养盐的污染状况明显要好于湖中区和湖南区.

### 2.4.2 重金属污染评价

漏湖表层沉积物的重金属单项生态风险系数见图 6. 可以看出, Cr、Cu 和 Zn 在各站点的单项潜在生态风险程度均为低风险. Ni 除了 C3、S4 和 S5 为中等生态风险, 其它站点也均为低生态风险. As 除了 S1 为中等生态风险, 其它站点生态风险均较高, 分别处于强、很强和极强的程度. Cd 在各站点的生态风险均较高, 其中 N5 和 N6 处于强风险, 其它站点分别处于很强和极强风险. Hg 的生态风险也较高, 除了 C5 和 C6 处于极强风险, 其它站点分别处

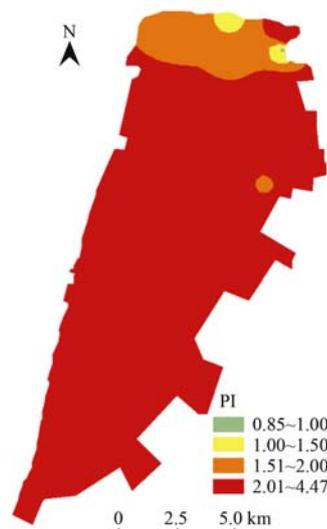


图 5 漏湖表层沉积物营养盐综合污染指数

Fig. 5 Comprehensive pollution index of nutrients in surface sediments of Lake Gehu

于强和很强风险. Pb 除了 S4 为中等风险, N1、C6 和 C8 处于强风险, 其它站点均处于低生态风险. 对于漏湖全湖沉积物重金属风险, 其中 As、Cd 和 Hg 的贡献较大, 分别为 41.58%、33.38% 和 17.86%, 其余 5 种重金属对潜在生态风险的平均贡献仅占 7.18%, 单一重金属对其贡献大小依次为:  $\text{Cd} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr}$ .

漏湖 8 种重金属的潜在生态风险指数介于 414.34 ~ 1793.97 之间, 平均 RI 值为 1117.71, 各站点的 RI 值均大于 300, 有很高的潜在生态风险. 由图 7 可见, 漏湖湖中区的西部和整个东部基本处于

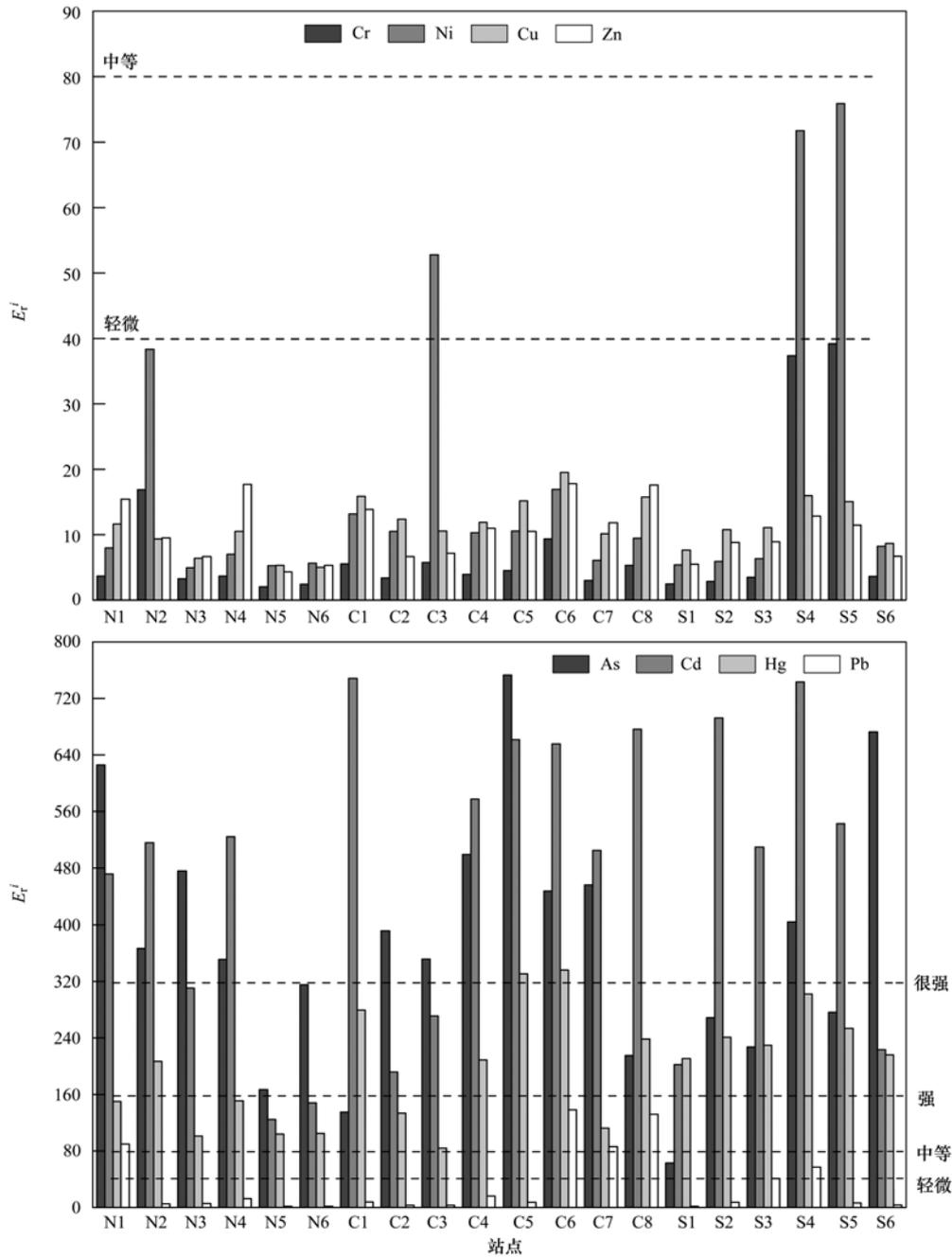


图 6 漏湖表层沉积物重金属潜在生态风险系数

Fig. 6 Potential ecological risk coefficient of heavy metals in surface sediment of Lake Gehu

极强风险,漏湖北部和湖南区西部基本处于很强风险,3个湖区之间的RI值差异性不显著( $F = 1.403$ ,  $P = 0.273$ ).

### 3 讨论

不同生态系统类型的湖泊沉积物中,营养盐和重金属的含量存在较大的差异.由结果可知(表5),漏湖表层沉积物营养盐的含量相对较高,其中总氮和总磷含量高于长江中下游地区的太湖、巢湖和洞庭湖<sup>[7,17,18]</sup>,也高于北方地区的青海湖、乌梁

素海和天鹅湖<sup>[19~21]</sup>,但低于我国南方亚热带地区的滇池<sup>[22,23]</sup>和高州水库<sup>[24]</sup>.因此,漏湖表层沉积物中总氮和总磷含量与其它湖泊相比处于较高的水平.污染指数法和综合污染指数法评价结果表明,漏湖沉积物中总氮的污染水平为严重污染,总磷的污染水平处于轻污染,营养盐综合污染指数处于严重污染,这与基于大型底栖动物、浮游植物的污染评价结果一致<sup>[10,11]</sup>,也与通过水质评价漏湖污染状况相一致<sup>[9]</sup>,说明此方法用于评价沉积物营养盐的污染较为合适.研究表明,沉积物的氮磷一部分来源于于



图7 漏湖表层沉积物重金属潜在生态风险指数  
Fig. 7 Potential ecological risk index of heavy metals  
in surface sediments of Lake Gehu

水生生物的残体,另一部分来源于外源性输入<sup>[25]</sup>.近30多年来,由于漏湖周边地区工业经济的发展、人口数量的增加和农田面积的增大,入湖污染物排放日益增多和围网养殖的饲料投加,导致漏湖沉积物中的营养盐含量日益增加.本研究中,沉积物的总氮和总磷含量分别是范成新<sup>[26]</sup>于1995年对漏湖沉积物营养盐调查结果的8倍和30倍,进一步说明了漏湖沉积物营养盐含量有很大的增长趋势,尤其是总磷.湖泊中高含量的氮磷营养盐的流入,又导致水域生态系统发生了较大变化,其水质急剧恶化,鱼类多样性锐减,水生植物覆盖率也急剧下降,已从1994年的95%下降到4%左右<sup>[9]</sup>;大量的水生动植物死亡腐烂,分解后的营养物质经过长时间的沉降积累进入湖泊的底泥中,又进一步增加了漏湖沉积物中氮磷营养盐的含量,造成漏湖沉积物营养盐内源和外源性的双重污染.另外,不同的生境区域沉积物营养盐的含量也不同.黄小平等<sup>[27]</sup>研究表明鱼类养殖导致沉积物氮磷,贝类养殖导致沉积物氮均有较大程度的增加.本研究中,湖南区围网和网箱养殖的面积较大,湖中区有少量的围网养殖,其沉积物总氮、总磷含量明显要高于无任何养殖的湖北区,这也可能与湖北区进行过疏浚和生态修复有关.还有研究表明水草的分布状况和生物量的大小能够影响湖泊沉积物元素的含量,氮含量均会随着水草生物量的增加而增加,但水草生物量对磷含量的影响不大<sup>[28]</sup>,甚至能够降低沉积物磷的含量<sup>[29]</sup>.漏湖

由北向南水生植物的密度逐渐升高,随之沉积物总氮含量也逐渐升高,总磷含量变化不明显,两者之间是否存在一定的相关性,还需进一步的研究.

表5 不同湖库表层沉积物营养盐含量对比

名称	TN/mg·kg <sup>-1</sup>	TP/mg·kg <sup>-1</sup>
太湖	1 349	486
巢湖	1 022	605
洞庭湖	1 340	294
青海湖	1 800	471
乌梁素海	1 960	560
天鹅湖	850	350
滇池	4 910	2160
高州水库	3 360	780

重金属方面,其含量明显高于江苏地区的洪泽湖、骆马湖、白马湖、高邮湖、玄武湖、石臼湖、固城湖和太湖<sup>[30,31]</sup>,潜在生态风险指数也明显高于该地区的其它湖泊,但是重金属单项生态风险系数基本一致,均表现为重金属As、Cd和Hg的污染最为严重,其它重金属污染等级略有差别.湖泊重金属污染来源主要为流域母质和人为污染排放,后者为主要来源.研究表明,冶炼工业是引起沉积物Cd污染的一大原因,电镀、合金制造和原油燃烧等过程也会产生大量的Cd和Ni<sup>[32]</sup>;Hg主要来源于化石燃料和石油产品的燃烧<sup>[33]</sup>;As主要存在于农药和工业废水中<sup>[34]</sup>;Pb主要来源于矿石和含铅汽油的燃烧、含铅工业的排放,部分Pb是城市排放的生活污水所致<sup>[35]</sup>.近年来漏湖周边乡镇经济快速发展,煤、石油等燃料的消耗量的增加,皮革、电镀、造纸、印染、金属冶炼、化工等工业废水和生活污水大量排入湖泊<sup>[36]</sup>,导致漏湖沉积物重金属含量严重超标,具有较高的潜在生态风险,需引起足够重视和继续加强针对性治理.

研究表明,底泥疏浚能够在一定程度上去除表层沉积物中的营养物质,降低底泥重金属含量及其潜在生态风险<sup>[37,38]</sup>.但是,也有研究证明底泥疏浚后在短时间内可能对营养盐和重金属有较好的控制效果,但长时间观察效果可能有所减弱<sup>[39,40]</sup>.本研究中湖北区经过底泥疏浚后,其沉积物营养盐中的总氮、总磷含量明显低于未经底泥疏浚处理的湖南区和湖中区,但是重金属含量的变化并不明显,甚至还有增加的趋势,可能与疏浚深度较小,疏浚将重金属含量更高的层次暴露出来有关<sup>[41]</sup>.结果表明对漏湖实施底泥疏浚能够有效地减少营养盐氮磷含

量,而对沉积物重金属含量没有太大的改变,所以在实施疏浚工程以前,应根据疏浚所要控制的目标污染物,必须评价污染物随底泥深度的剖面变化特征和环境风险,结合不同疏浚层的污染物可能释放强度,确定疏浚深度。

沉积物营养盐和重金属含量除了受到人为污染外,粒径的不同会使得不同水体或者同一水体不同沉积物样品中营养盐和重金属含量有所不同。不同粒度的沉积物具有不同的比表面积、质量、有机质含量等,对于沉积物吸附和释放营养盐的能力有重要的影响<sup>[42]</sup>。李强等<sup>[43]</sup>对巢湖及其入湖河流的研究发现,随着沉积物粒径的增大,沉积物粒径与总氮和总磷含量的相关性变差;而李青芹等<sup>[19]</sup>对我国不同地区 6 个不同特征湖泊的研究发现,沉积物氮磷与小于 4  $\mu\text{m}$  的细颗粒呈正相关关系,而与 16 ~ 64  $\mu\text{m}$  的粒径范围呈负相关关系;王小雷等<sup>[44]</sup>对抚仙湖的研究表明,沉积物总氮与各级粒径之间无显著相关性,总磷与粒径小于 2 $\mu\text{m}$  的颗粒呈显著正相关。以上研究均表明沉积物总氮总磷主要集中在粒径较小的黏土中,而本研究表明,总氮与粒径之间无显著相关性,总磷与黏土呈负相关关系,沉积物总氮总磷主要集中在粒径较粗的粉粒和砂粒中,这可能是由于溇湖的深度较浅,风浪对底部沉积物的干扰较大,造成上层粒径较小的黏土对沉积物营养盐的吸附能力减弱有关。重金属方面,张远等<sup>[45]</sup>认为重金属主要集中在粉粒中,而高丽等<sup>[21]</sup>通过对天鵝湖的研究发现,重金属与黏土呈极显著正相关关系,与砂粒呈极显著负相关关系,重金属主要集中在黏土中,其次是粉粒。溇湖重金属主要集中在砂粒和中粉粒中,其中 Cu 与砂粒呈现极显著正相关关系, Hg 与中粉粒呈正相关关系。综上所述,溇湖表层沉积物营养盐和重金属生态风险会随着砂粒和中粉粒的增加而增加。

#### 4 结论

(1) 溇湖表层沉积物营养盐空间分布规律较为明显,湖南区和湖中区的总氮含量显著高于湖北区,湖中区的总磷显著高于湖北区,而重金属的空间分布规律不太明显。

(2) 溇湖表层沉积物营养盐含量均较高,足以引起最低级别生态毒性效应,湖南区和湖中区均已严重污染,湖北区污染较轻。

(3) 溇湖表层沉积物重金属元素单项生态风险系数的大小依次为: Cd > As > Hg > Pb > Ni > Cu > Zn

> Cr, 其中 As、Cd 和 Hg 污染极为严重,对 RI 的贡献最大,其余重金属处于轻微到中度污染。以江苏省土壤环境背景值为参比,评价表明溇湖沉积物重金属具有很高的潜在生态风险,需引起足够重视和继续加强针对性治理。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(8): 2193-2197.
- [3] Ting D S, Appan A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(7-8): 53-59.
- [4] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 393-398.
- [5] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F O, et al. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark[J]. Limnology and Oceanography, 1995, 40(5): 908-917.
- [6] 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.
- [7] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3057-3064.
- [8] 罗先香, 田静, 杨建强, 等. 黄河口潮间带表层沉积物重金属和营养元素的分布特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 892-897.
- [9] 汪院生. 溇湖水环境演变及其原因分析[J]. 水利规划与设计, 2013, (8): 37-40, 55.
- [10] 王丽卿, 吴亮, 张瑞雷, 等. 溇湖底栖动物群落的时空变化及水质生物学评价[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1990-1996.
- [11] 陈立婧, 彭自然, 孔优佳, 等. 江苏溇湖浮游藻类群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1549-1556.
- [12] 吴晓东, 潘继征, 李文朝, 等. 溇湖东岸生态修复试验区的水质净化效果[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 284-289.
- [13] 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉, 等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 28-33.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1363-1378.
- [16] Leivuori M, Niemistö L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. Chemosphere, 1995, 31(8): 3839-3856.
- [17] 王永华, 刘振宇, 刘伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4): 501-506.

- [18] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(2): 25-31.
- [19] 李青芹, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(12): 2390-2397.
- [20] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(9): 1770-1776.
- [21] 高丽, 宋鹏鹏, 史衍玺, 等. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(4): 99-102.
- [22] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J]. 土壤, 2007, **39**(6): 879-883.
- [23] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 51-57.
- [24] 王妙, 王胜, 唐鹤辉, 等. 粤西三座重要供水水库沉积物营养盐负荷与重金属污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(5): 834-841.
- [25] 王玲玲, 吴卫菊, 张斌, 等. 梁子湖沉积物中重金属及营养盐分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(6): 197-203.
- [26] 范成新. 漏湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 341-350.
- [27] 黄小平, 郭芳, 黄良民. 大鹏澳养殖区柱状沉积物中氮、磷的分布特征及污染状况研究[J]. 热带海洋学报, 2010, **29**(1): 91-97.
- [28] Squires M M, Lesack L F W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community structure along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, **60**(3): 333-343.
- [29] Horppila J, Nurminen L. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake[J]. Hydrobiologia, 2005, **545**(1): 167-175.
- [30] 陈乾坤, 刘涛, 胡志新, 等. 江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 1044-1050.
- [31] 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.
- [32] Olivares-Rieumont S, De La Rosa D, Lima L, et al. Assessment of heavy metal levels in Almendares River sediments—Havana City, Cuba[J]. Water Research, 2005, **39**(16): 3945-3953.
- [33] 刘俊华, 王文华, 彭安. 北京市二个主要工业区汞污染及其来源的初步研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(3): 331-336.
- [34] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. 国外医学医学地理分册, 2003, **24**(4): 173-175.
- [35] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou[J]. Science of the Total Environment, 2007, **385**(1-3): 182-195.
- [36] 谢红彬, 陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 53-59.
- [37] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 385-392.
- [38] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 263-268.
- [39] Ryding S O. Lake Trehörningen restoration project changes in water quality after sediment dredging[J]. Hydrobiologia, 1982, **91-92**: 549-558.
- [40] 刘爱菊, 孔繁翔. 底泥疏浚对五里湖沉积物生物毒性的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(12): 881-883.
- [41] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 1-10.
- [42] 梁海清, 王圣瑞, 金相灿, 等. 不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J]. 中国农学通报, 2007, **23**(3): 380-385.
- [43] 李强, 霍守亮, 王晓伟, 等. 巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, **3**(2): 147-155.
- [44] 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 抚仙湖沉积物中营养盐和粒度垂向分布及相关性研究[J]. 环境工程技术学报, 2014, **4**(5): 353-360.
- [45] 张远, 石陶然, 于涛, 等. 滇池典型湖区沉积物粒径与重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(4): 370-379.

## CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration .....	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> ( 789 )
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination .....	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC .....	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> ( 801 )
Different Air Pollution Situations of O <sub>3</sub> and PM <sub>2.5</sub> During Summer in Beijing .....	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> ( 807 )
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013 .....	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> ( 816 )
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai .....	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> ( 825 )
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China .....	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> ( 834 )
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO <sub>2</sub> /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor .....	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> ( 847 )
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay .....	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> ( 854 )
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data .....	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> ( 862 )
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> ( 873 )
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas .....	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> ( 884 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section .....	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 893 )
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> ( 900 )
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water .....	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 910 )
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary .....	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> ( 917 )
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China .....	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 925 )
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> ( 935 )
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River .....	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> ( 942 )
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period .....	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 950 )
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area .....	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 955 )
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns .....	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> ( 963 )
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body .....	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> ( 970 )
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland .....	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> ( 980 )
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF .....	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> ( 988 )
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> ( 994 )
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite .....	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> ( 1000 )
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments .....	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> ( 1008 )
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes .....	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 1016 )
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex .....	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> ( 1023 )
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil .....	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> ( 1032 )
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite .....	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> ( 1039 )
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge .....	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 1048 )
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater .....	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> ( 1055 )
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation .....	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> ( 1061 )
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature .....	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> ( 1070 )
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria .....	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> ( 1075 )
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i> .....	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> ( 1082 )
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment .....	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 1089 )
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province .....	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie ( 1098 )
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices .....	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> ( 1106 )
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration .....	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> ( 1114 )
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration .....	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> ( 1121 )
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau .....	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> ( 1128 )
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou .....	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> ( 1139 )
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil .....	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> ( 1147 )
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel .....	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang ( 1156 )
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash .....	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> ( 1163 )
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries .....	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> ( 1171 )

# 《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3月15日 第37卷 第3期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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