

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

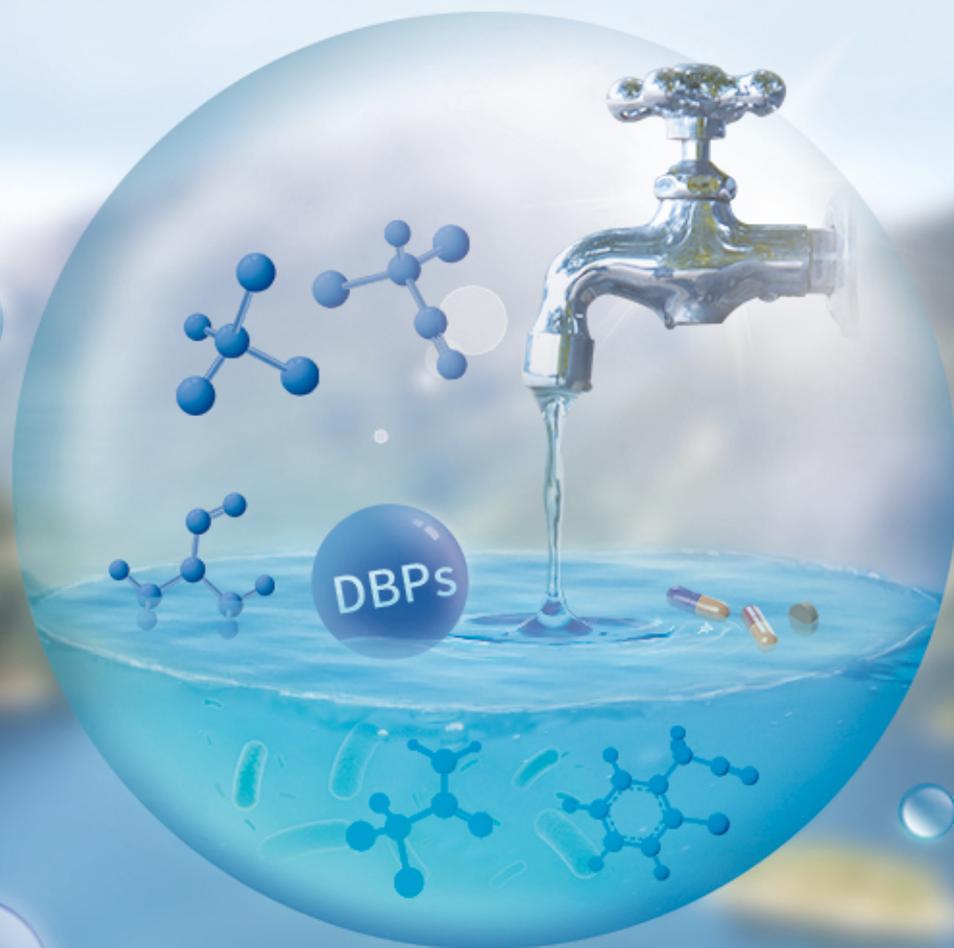
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期  
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 ..... 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 ..... 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布的影响 ..... 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 ..... 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 ..... 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 ..... 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM<sub>2.5</sub> 和能见度的影响 ..... 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 ..... 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 ..... 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 ..... 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 ..... 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 ..... 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 ..... 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 ..... 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 ..... 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O<sub>3</sub> 浓度变化的影响 ..... 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 ..... 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 ..... 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 ..... 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 ..... 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 ..... 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 ..... 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 ..... 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 ..... 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 ..... 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 ..... 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 ..... 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 ..... 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 ..... 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 ..... 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 ..... 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 ..... 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 ..... 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤碳赋存形态的影响 ..... 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 ..... 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 ..... 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 ..... 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 ..... 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 ..... 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 ..... 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 ..... 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 ..... 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 ..... 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 ..... 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 ..... 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 ..... 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 ..... 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 ..... 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

# 巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价

何苗<sup>1</sup>, 刘桂建<sup>1\*</sup>, 吴蕾<sup>1,2</sup>, 齐翠翠<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026; 2. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230022)

**摘要:** 探究了巢湖流域丰水期湖区及10条环湖河流水体中重金属元素V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、Fe和Sb空间分布特征。结果表明,丰水期巢湖西部和西北部4条环湖河流中的重金属元素平均质量浓度高于中部和东部地区;金属元素浓度相关性分析结果显示,Cu、Ni、Zn、Pb和Cd元素质量浓度之间呈显著正相关,这说明5种元素间存在相似的空间规律。单因子污染指数评价结果表明,10条环湖河流中Cr各点位均符合地表水Ⅰ类水标准;Pb符合Ⅰ~Ⅱ类水标准;Cu和Zn符合Ⅰ~Ⅴ类水标准;Fe、V和Sb均远低于水标准限值;Ni在南淝河的部分点位轻微超标;Mn在十五里河和派河的部分点位轻微超标;Cd在南淝河的部分点位严重超标;塘西河一个点位中Mn除外,V、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb和Fe均小于1,为清洁和无污染水平;综合污染指数评价结果发现,西北部环湖河流的综合污染指数相比西南部、中部与东部是最高的。

**关键词:** 巢湖; 环湖河流; 可溶态重金属; 空间分布; 污染评价

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5346-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103064

## Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season

HE Miao<sup>1</sup>, LIU Gui-jian<sup>1\*</sup>, WU Lei<sup>1,2</sup>, QI Cui-cui<sup>1</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Anhui Research Academy of Environmental Sciences, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The spatial distribution characteristics of the mass concentration of V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, and Sb in the Chaohu Lake basin and ten surrounding rivers during the wet season were explored. The results showed that the average mass concentration of heavy metals in the western and northwestern Chaohu Lake surrounding rivers was higher than that in the central and eastern regions. The correlation analysis showed a significant positive correlation between the concentrations of Cu, Ni, Zn, Pb, and Cd, which indicated a similarity of spatial distribution among the five elements. The single-factor pollution index evaluation results classified Cr in the ten surrounding rivers as Grade I based on the Environmental Quality Standards for Surface Water. Pb was classified as Grade I-II; Cu and Zn as Grade I-V; Fe, Sb, and V were far below the standard limit; Ni slightly exceeded the standard at some sampling points of the Nanfei River; Mn slightly exceeded the standard at some points of the Shiwuli and Pai River; Cd exceeded the standard at some points of the Nanfei River. Except Mn at one point of the Tangxi River, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and Fe were all <1, which indicated clean and pollution-free level. The integrated pollution index of the rivers surrounding the lake in the northwestern part was the highest compared to the southwestern, central, and eastern parts.

**Key words:** Chaohu Lake; surrounding rivers; dissolved heavy metals; spatial distribution; pollution assessment

巢湖位于安徽省合肥市,是我国五大淡水湖之一。近年来流域内经济迅速发展,巢湖环湖河流周边各点污染源的污水排放量增大,导致巢湖流域水体污染程度愈发严重。目前,多数研究主要集中在巢湖流域河流及湖泊的富营养化及有机污染等问题,针对相应污染问题,当地政府及时采取措施,至2015年,东西湖均为轻度富营养,西半湖水质为Ⅴ类,东半湖水质为Ⅳ类。有研究表明,除富营养化及其有机污染等问题,人为重金属污染也是巢湖流域亟待研究的问题之一<sup>[1-4]</sup>。重金属是环境中不可忽视的一类污染物,它难以被生物降解,并且能够通过生物进行生物富集和生物放大,最终进入人体,在人体中与蛋白质和酶反应,造成慢性中毒。水环境中的重金属一般以3种形式存在,即可溶态、悬浮物和沉积物。目前巢湖重金属元素的相关研究重点在后两者<sup>[5-15]</sup>,缺乏对水体中重金属可溶态的相关研究<sup>[2,16,17]</sup>。目前已有的大多数研究将重点放在湖区

内部水体中可溶态元素含量上,但是对整个流域环湖重要河流的可溶态元素含量空间变化特征仍然缺乏详细地研究<sup>[18]</sup>。本研究通过对巢湖全湖及10条环湖重要河流进行丰水期的采样分析,选取水中常见的10种可溶态金属元素(第Ⅳ主族元素V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu和Zn以及毒性较大的3种元素Cd、Pb和Sb),对巢湖环湖河流水体中可溶态重金属的丰水期空间分布特征进行探究,通过对各元素的相关性分析推测空间分布规律,并对10条环湖河流中的各河流重金属污染水平进行评价,以期为今后探析巢湖流域重金属迁移和转化打下基础,并为周边地区饮用水安全提供依据。

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-04-23

基金项目: 安徽省博士后基金项目(2020A395); 安徽省自然科学基金项目(1908085MD106)

作者简介: 何苗(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为地表水重金属, E-mail: 15001788507@163.com

\* 通信作者, E-mail: lgj@ustc.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

巢湖流域属北亚热带湿润性季风气候, 主要环湖入湖河流为南淝河、十五里河、派河、杭埠河、白石天河、兆河和柘皋河, 其总量约占入湖总水量的 90%<sup>[18]</sup>. 环湖入湖河流中还有 2 条虽然水量较小, 但是污染程度不容小觑的河流, 分别是西北部河流塘西河, 中北部河流炯场河. 塘西河流经地受工业污染严重, 炯场河流经地污染源多为农业污染. 裕溪河是巢湖的唯一一条环湖出湖河流.

### 1.2 样品采集与分析

在巢湖湖区及环湖河流南淝河、塘西河、十五里河、炯场河、派河、白石天河、杭埠河、柘皋河、兆河和裕溪河 10 条河流设置 63 个采样点位(如图 1). 采样时间为 2020 年 8 月 1~3 日. 为对比巢湖湖区及环湖河流重金属空间差异, 本文按照巢湖 10 条环湖河流进行划分, 将湖区内部的采样点对应河流进行归类(图 1), 划分为: 裕溪河(采样点 S1~S8)、柘皋河(采样点 S9~S12)、南淝河(采样点 S13~S28)、十五里河(采样点 S29~S32)、塘西河(采样点 S33~S36)、兆河(采样点 S37~S40)、白石天河

(采样点 S41~S43)、杭埠河(采样点 S44~S52)、派河(采样点 S53~S56)和炯场河(采样点 S57)共 10 条河流.

样品采集过程中, 采用 OvitallMap 进行定位, 对水面 0.5 m 以下的水体进行采集, 在各点位用纯净水清洗水样采样器后, 再用湖水充分清洗, 采集 3 份同体积平行水样, 均匀混合后装入 1 L 聚乙烯塑料瓶中, 密封后立即带回实验室. 用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜经砂芯抽滤漏斗过滤, 将过滤后的液体加浓 HNO<sub>3</sub> 酸化至 pH 值小于 2, 密封后避光置于 4℃ 冰箱中保存待测.

### 1.3 分析方法

采用 ICP-MS(ICS900-iCAPQ) 对采集的水体样品中的 V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Sb 这 9 种重金属元素进行定量分析, 采用 ICP-OES(OROQ/912) 对水样中的可溶态金属 Fe 进行定量分析.

### 1.4 评价方法

#### 1.4.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法<sup>[19]</sup>对巢湖环湖河流中所测的单一重金属污染水平进行评价, 计算公式见式(1):

$$P_i = \rho_i / S_i \quad (1)$$

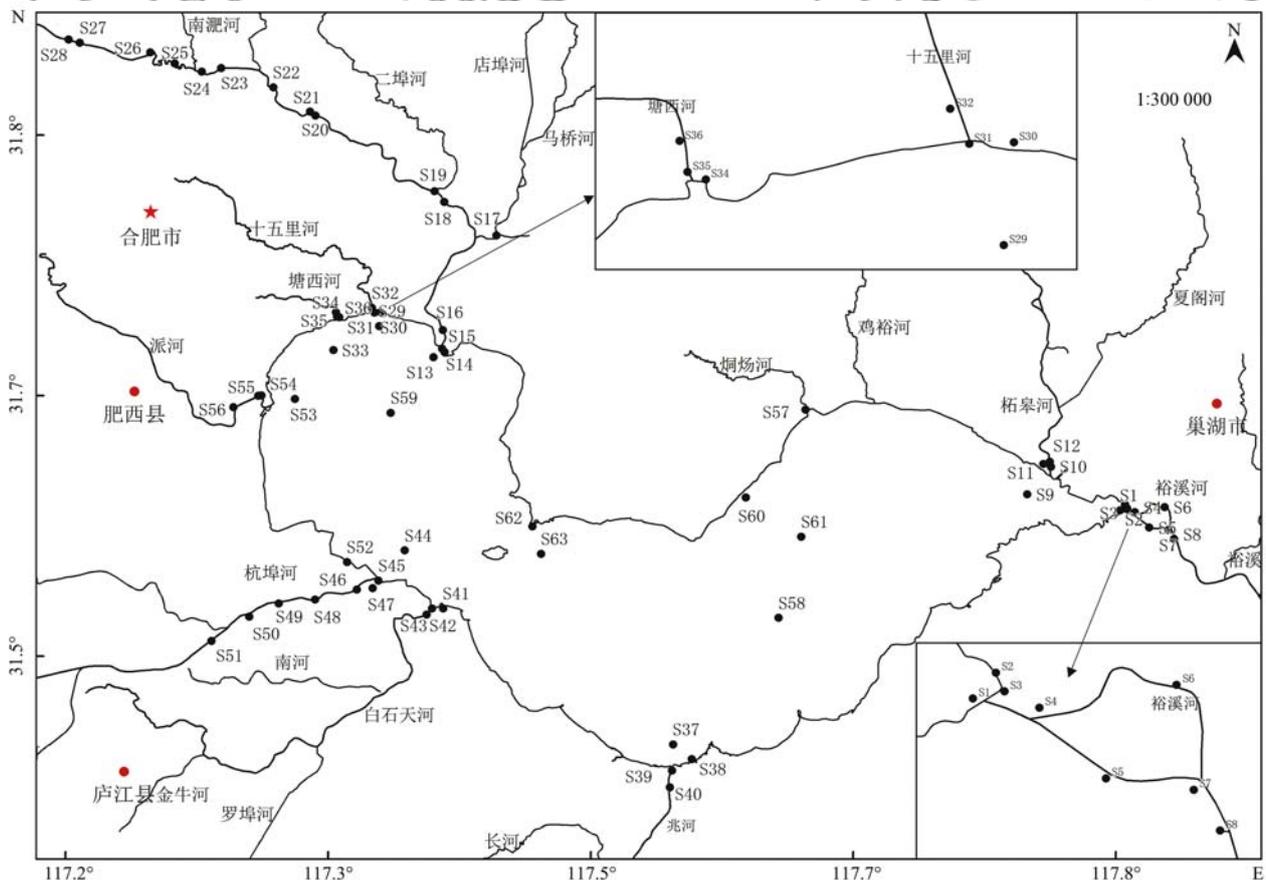


图 1 巢湖及其环湖河流点位示意

Fig. 1 Location map of Chaohu Lake and surrounding rivers

式中,  $P_i$  表示元素  $i$  的单因子污染指数,  $\rho_i$  表示元素  $i$  的质量浓度,  $S_i$  表示元素  $i$  的评价标准.

单因子污染指数的评价标准参考文献[19].

#### 1.4.2 综合污染指数法

采用综合污染指数法<sup>[20]</sup>对巢湖环湖河流中所测的 10 种重金属综合污染水平进行评价,计算公式见式(2):

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中,  $I$  为综合污染指数,  $n$  为元素个数,  $P_i$  为元素  $i$  的单因子污染指数.

综合污染指数的评价标准参考文献[20].

## 2 结果与讨论

### 2.1 可溶态重金属质量浓度变化

采集到的样品中, Sb 的质量浓度范围 ND(未检出)  $\sim 0.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Cd 的质量浓度范围 ND(未检出)  $\sim 0.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Sb 和 Cd 未检出的样品分别占总样品数的 26.98% (17/63) 和 65.08% (41/63).

表 1 巢湖及其环湖河流水体可溶态重金属质量浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Changes in the mass concentration of dissolved heavy metals in Chaohu Lake and surrounding rivers/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	范围	均值	标准差	变异系数/%
V	0.24 ~ 7.02	2.80	1.68	60.11
Cr	0 ~ 1.47	0.48	0.32	67.70
Mn	0 ~ 294.54	22.89	61.80	269.94
Ni	0.46 ~ 30.49	2.62	5.01	190.82
Cu	0.55 ~ 3 097.23	121.75	479.67	393.97
Zn	2.02 ~ 1 937.21	89.38	327.82	366.78
Cd	0 ~ 128.26	5.08	20.19	3.98
Sb	0 ~ 0.28	0.08	0.08	1.9
Pb	0.06 ~ 20.72	1.34	2.97	222.16
Fe	4.00 ~ 169.30	31.81	37.47	117.79

在丰水期, Ni、Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 5 种元素之间呈显著正相关, V、Mn、Cr 和 Fe 与其他金属元素正相关性较低, 从该结果可初步判断巢湖及其环湖河流水体中 Ni、Cu、Zn、Pb 和 Cd 这 5 种元素具有相似的空间分布规律. Liu 等<sup>[10]</sup>的研究在秋季对巢湖全湖表层水进行采样分析后发现, 可溶态金属元素 Cu、Zn、Ni 和 Cr 的质量浓度之间存在极高的正相关, 这个结论与本研究部分相符, 推测原因是 Cu、Zn 和 Ni 这 3 种元素处于元素周期表第 IV 周期, 彼此相邻, 最外层电子层数相同, 相似的结构决定相似的性质. 然而, 本研究发现 Pb 和 Cd 的正相关性很高, 这一结论则需要进一步探讨.

河流湖泊等开放性水体的地球化学特性与沉积物不同<sup>[21]</sup>. 河流湖泊等开放性水体具有流动性, 其流动性通常会造成本体与外界环境的物质交换频

V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、Sb、Pb 和 Fe 的统计性描述见表 1. 从中可知, 各元素丰水期质量浓度均值为:  $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Sb}$ , 对比各元素变异系数, 发现丰水期各元素分布不均, 总体来说变异系数为:  $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Sb}$ ; 即丰水期湖区及环湖河流表层水体中 Cu 元素分布差异最大, Sb 元素差异最小.

### 2.2 重金属间相关性分析

为探讨水体中重金属的来源, 推测研究的各元素含量间是否有相似的空间分布规律, 采用皮尔森相关系数法对所采集到的样品可溶态金属元素 V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd、Sb、Pb 和 Fe 质量浓度进行相关性分析, 结果见表 2. 从中可知, Cu、Zn 和 Ni 这 3 种元素互为正相关, 且相关系数都接近于 1, Pb 与 Cu、Zn、Ni 和 Cd 这 4 种元素呈正相关, 相关系数在 0.90 左右, 而 Cd 与 Ni、Cu 和 Zn 都呈正相关, 且相关系数都接近于 1, Fe 与 Mn 正相关, 但是相关系数较低, 为 0.65.

繁, 从而影响水体中各元素的迁移转化, 通常流动性造成的影响表现在径流输入输出、气象条件上, 所以在研究水体中的可溶态元素时, 由于影响水体中元素迁移转化的因素比较复杂, 各元素的质量浓度特征也受到很强的时空条件限制, 所以为了进一步确定巢湖湖区及环湖河流中各元素来源之间的关系, 还需研究所测元素在对应水体沉积物中的含量分布特征. 前人研究表明<sup>[8,12,22]</sup>, 巢湖沉积物中 Cu、Pb、Zn 和 Ni 含量之间相互存在高度正相关. 沉积物是悬浮物长期累积形成的, 所受时空条件影响比较稳定, 元素迁移转化的因素相比水体易于研究, 能够真实地记录湖泊河流环境中各种环境变化的信息, 且沉积物中的重金属能够释放进入水相, 所以其金属元素相关性可以作为借鉴, 也从侧面证实了巢湖及其环湖河流水体中的 Cu、Pb、Zn 和 Ni 具有相似的空间分布规律.

表 2 各元素之间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficients between selected elements

	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Pb	Fe
V	1									
Cr	-0.014	1								
Mn	-0.127	0.402 **	1							
Ni	0.029	0.070	0.033	1						
Cu	0.015	0.032	-0.074	0.969 **	1					
Zn	0.008	0.028	-0.069	0.976 **	0.994 **	1				
Cd	0.016	0.027	-0.072	0.972 **	0.999 **	0.997 **	1			
Sb	0.538 **	0.105	0.019	0.464 **	0.371 **	0.381 **	0.373 **	1		
Pb	-0.027	0.183	0.049	0.892 **	0.926 **	0.905 **	0.920 **	0.312 **	1	
Fe	-0.123	0.250 **	0.653 **	0.265 **	0.237	0.240	0.238	0.024	0.324 **	1

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ 

### 2.3 可溶态重金属空间分布特征

表 3 为不同河流丰水期元素质量浓度均值统计,从各元素在 10 条河流的质量浓度均值来看,在丰水期,V 在派河的质量浓度均值最高; Ni、Cu、Pb 和 Zn 在南淝河的质量浓度均值最高; Cr、Fe 和 Mn 在塘西河的质量浓度均值最高; V、Ni 和 Cu 在白石天河的质量浓度均值最低; Cr 在杭埠河的质量浓度均值最低; Pb 和 Fe 在柘皋河的质量浓度均值最低; Zn 和 Mn 在裕溪河的质量浓度均值最低。

总体来说,在丰水期,所测 10 种元素均是巢湖

西北地区的 4 条河流(南淝河、派河、塘西河和十五里河)平均质量浓度最高,近几年研究表明南淝河、派河、塘西河和十五里河的水体污染程度较重<sup>[23~27]</sup>,这和本研究的结论一致。东湖和巢湖西南地区的 5 条河流(烔炀河、柘皋河、裕溪河、白石天河与杭埠河)平均质量浓度较低,目前有研究表明丰水期南淝河沉积物中 Cu 和 Zn 的含量显著高于柘皋河、杭埠河和丰乐河这 3 条河流<sup>[28]</sup>,该研究的沉积物中重金属元素含量和本文水体中的重金属元素含量具有相同的规律。

表 3 巢湖环湖 10 条河流可溶态重金属质量浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 3 Average mass concentration of dissolved heavy metals in ten rivers around Chaohu Lake/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 

区域	V	Ni	Cu	Cr	Pb
裕溪河	3.99 ± 1.08	0.85 ± 0.33	1.76 ± 0.81	0.56 ± 0.91	1.03 ± 4.01
柘皋河	1.03 ± 2.20	1.00 ± 0.54	1.17 ± 1.68	0.52 ± 0.28	0.13 ± 0.03
南淝河	3.41 ± 3.61	6.58 ± 23.91	474.13 ± 2623.09	0.47 ± 0.56	2.90 ± 17.812
十五里河	2.91 ± 1.71	1.92 ± 0.79	1.79 ± 1.31	0.54 ± 0.78	0.89 ± 1.21
塘西河	2.29 ± 2.00	2.57 ± 4.27	2.00 ± 3.29	0.77 ± 0.14	1.66 ± 2.58
兆河	1.70 ± 0.56	0.93 ± 0.19	1.92 ± 1.37	0.51 ± 0.08	0.43 ± 0.26
白石天河	0.39 ± 0.10	0.60 ± 0.09	0.77 ± 0.13	0.45 ± 0.25	0.59 ± 0.48
杭埠河	1.71 ± 3.83	0.67 ± 0.24	1.97 ± 4.47	0.30 ± 0.50	0.95 ± 2.96
派河	4.05 ± 0.63	3.07 ± 0.97	2.12 ± 0.43	0.48 ± 0.18	1.39 ± 1.79
烔炀河	1.16	1.46	1.31	0.63	0.20
区域	Fe	Zn	Mn	Cd	Sb
裕溪河	12.84 ± 17.46	3.23 ± 3.05	0.28 ± 0.47	0.00	0.00 ± 0.01
柘皋河	10.95 ± 11.85	5.21 ± 4.87	0.79 ± 1.55	0.00	0.00
南淝河	38.58 ± 112.63	331.67 ± 1641.55	3.90 ± 12.00	19.89 ± 108.37	0.09 ± 0.15
十五里河	45.18 ± 96.63	9.20 ± 13.26	75.93 ± 218.60	0.01 ± 0.02	0.00 ± 0.01
塘西河	112.53 ± 56.78	12.10 ± 16.99	145.16 ± 139.54	0.05 ± 0.02	0.00 ± 0.01
兆河	44.7 ± 13.7	14.42 ± 27.78	9.79 ± 7.16	0.01 ± 0.01	0.07 ± 0.21
白石天河	36.97 ± 2.43	4.89 ± 0.36	12.62 ± 9.35	0.00	0.00
杭埠河	14.96 ± 13.44	5.23 ± 5.23	1.16 ± 3.86	0.02 ± 0.03	0.00
派河	20 ± 10.3	7.72 ± 2.90	94.85 ± 65.44	0.20 ± 0.43	0.12 ± 0.05
烔炀河	15.8	5.11	0.51	0.00	0.00

### 2.4 重金属空间变化原因

巢湖各河流水体重金属浓度变化的原因,主要是陆源污染排放,而不同区域的产业结构不同造成重金属含量的区域差异。2017 年调查结果显示合肥

市拥有工业企业 5 610 个,工业废水排放量达 43 010 万 t,其中大部分污水来自合肥市辖区,随南淝河、十五里河和塘西河等 3 条河流排入巢湖<sup>[29]</sup>。除此之外,本研究发现派河的重金属含量也比较高(如图

2), 派河是肥西县的主要河流, 主要流经上派镇, 是肥西县乡镇排放工业废水和生活污水的主要受纳水体, 肥西县近年来经济发展很快, 仅上派镇就拥有冶炼、化工和食品等工业行业共 556 个, 这些行业排放的污水主要通过镇内 7 个排污口排入派河, 进而进入巢湖, 对巢湖西半湖的污染产生了很大的影响<sup>[26,30]</sup>. 柘皋河、炯炆河、兆河、白石天河和裕溪河主要流经巢湖市, 巢湖市主要以农业为主, 优势产业主要是水稻、油菜、棉花、水禽、水产和蔬菜, 重金属主要来源为肥料和农药, 入湖负荷小于西湖区, 河流和湖区中重金属含量低. 杭埠河主要流经六安市舒城县, 舒城县主要以农业为主, 重金属来源主要为肥料农药和生活排水, 入湖负荷较小<sup>[31]</sup>.

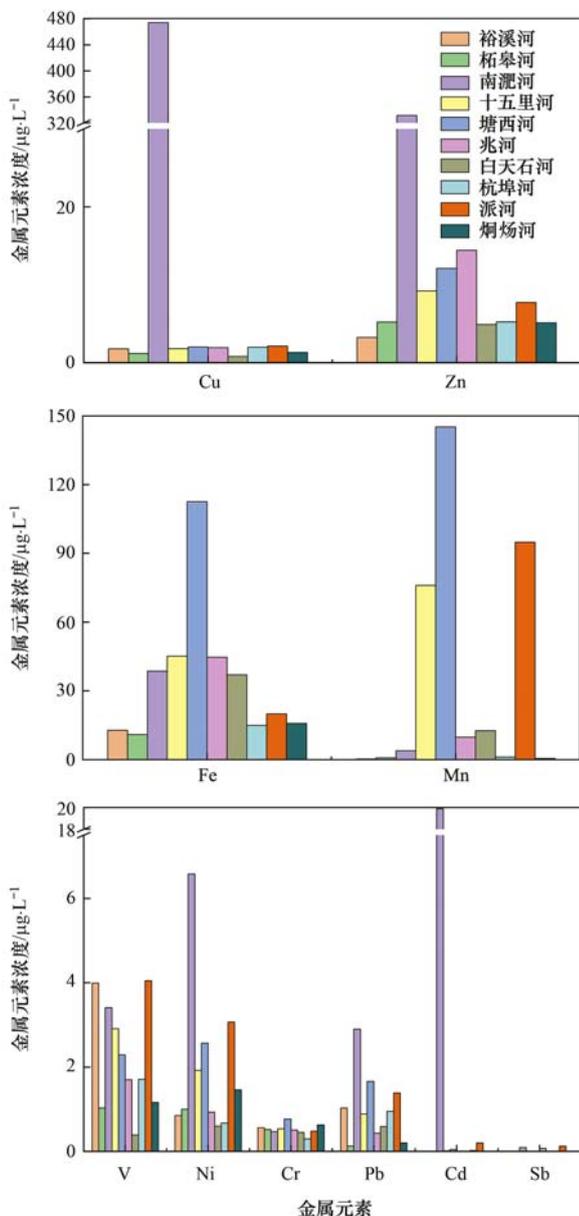


图2 巢湖环湖 10 条河流可溶态重金属质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of dissolved heavy metal mass concentration in ten rivers around Chaohu Lake

除了陆源污染排放的因素, 水体的理化性质也是导致东西湖污染存在区域性差异的另一个因素<sup>[32,33]</sup>. 本研究对比了丰水期巢湖湖内东西湖心、中庙和黄麓等湖区水样中的各元素质量浓度均值 (如图 3), 结果发现东湖心的 Cr、Pb、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Sb 等重金属元素含量最高, 其次是中庙和黄麓, 西湖心最低, 这与东西湖心地理位置对应的环湖河流水体中金属元素含量不符, 结合水体理化性质进行分析, 发现东湖心的 pH 值最低, 为 6.29, 中庙和黄麓分别为 9.15 和 9.14, 西湖心的 pH 值较东湖心高, 为 8.49, 查阅已有研究可知沉积物中的重金属在 pH 值较低的情况下容易发生解吸, 酸性较高的水体中金属的浓度也比较高, 沉积物中的重金属释放量随着体系 pH 的降低而升高, 这可能是两个原因导致的, 一是  $H^+$  的竞争吸附作用, 二是金属难溶盐类和配合物

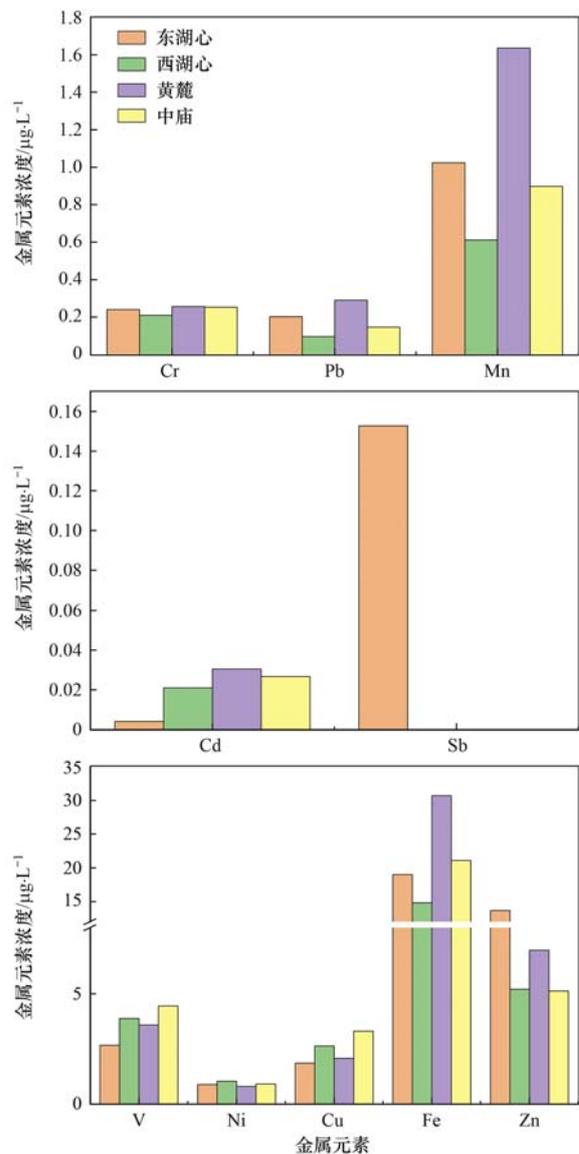


图3 巢湖湖心、中庙和黄麓等可溶态重金属质量浓度分布

Fig. 3 Mass concentration distribution of dissolved heavy metals in the center of Chaohu Lake, Zhongmiao, and Huanglu

的溶解<sup>[32,33]</sup>. 除此之外, 巢湖西北部河流水体中的 pH 普遍小于巢湖中部和东部河流, 这也进一步证明了可能存在沉积物中重金属释放的现象, 具体的释放机制还需要进一步实验探究<sup>[30]</sup>.

## 2.5 典型河流不同河段重金属空间分布

经过对巢湖及其环湖 10 条河流的可溶态重金属含量进行分析发现, 南淝河中部分区域重金属空间差异较大, 且 Cd 和 Sb 含量较多, 为对比其重金属空间差异, 本文将南淝河的点位进行上游、中游、下游及入湖区这 4 个区域的划分, 4 个区域分别是上游(采样点 S26 ~ S28)、中游(采样点 S20 ~ S25)、下游(采样点 S17 ~ S19)和入湖区(采样点 S13 ~ S16). 表 4 中为不同区域丰水期元素质量浓度均值统计, 从各元素不同区域含量均值来看, Cu、Pb、Cd 和 Zn 这 4 种元素在各区域的含量分布趋势相似, 都是在中游含量最高, 在下游的表层水含量其次, 入湖区最低, 其中中游区域附近 Cu 含量高达

935.97  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Zn 含量高达 656.10  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , Ni 也是在中游区域含量最高, 达到 11.25  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对中游区域周边环境进行调查发现, 中游区域位于市中心, 其中医疗机构和居民区占比大, 除此之外区域中还有两家净水厂, 医疗废水、工业废水和生活污水的排入使得中游区域的 Cu、Pb、Cd 和 Zn 含量过高; Fe、Mn 和 Sb 等元素含量的区域分布也具有相似的规律, 在入湖区含量最高, 在中游区域含量较高, 在上游区域含量最低, 推测中游区域污染源大量排放的 Fe、Mn 和 Sb 在下游进行稀释, 最后汇集到入湖区, 由于受沉积物内源释放及其他近距离污染排放量较大的河流(十五里河和塘西河)等影响, 导致这 3 种元素在入湖区含量较高. V 在上游含量最高, Cr 在入湖区的含量最高, V 和 Cr 在中游和下游的含量较低, 推测 V 在上游含量较高, 主要是由于上游是水库区, 天然矿物较多, 而入湖区 Cr 含量较高的原因, 可能是受到周边距离较近污染较高的河流影响.

表 4 南淝河表层水体可溶态重金属质量浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Average mass concentration of dissolved heavy metals in the Nanfei River/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

位置	V	Ni	Cu	Cr	Pb	Fe	Zn	Mn	Cd	Sb
入湖区	3.32	2.42	1.73	0.79	0.17	43.35	8.54	8.30	0.01	0.14
下游	2.96	3.54	148.53	0.04	0.75	31.93	110.23	1.51	6.26	0.04
中游	2.81	11.25	935.97	0.38	5.60	33.96	656.10	3.09	39.12	0.12
上游	5.03	1.31	28.06	0.46	0.55	31.80	18.09	1.11	0.84	0.00

## 2.6 可溶态重金属污染评价

### 2.6.1 地表水水质评价

根据地表水环境质量标准(GB 3838-2002), 对巢湖 10 条环湖河流水体中可溶态 V、Ni、Cu、Cr、Pb、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Sb 水质进行评价, 结果见表 5. 从中可知, 在丰水期, Cr 在各河流中各点位均符合 I 类标准; Pb 在南淝河中均为 I ~ II 类标准; Cu 和 Zn 在南淝河中少数点位达到 II ~ V 类标准; Fe 和 V 在所有河流各点位质量浓度均远低于标准限值; Ni 除在南淝河的部分点位轻微超标, 在其他各河流点位均远低于标准限值; Mn 除在十五里河和派河的部分点位轻微超标外, 在其他各河流点位也均远低于标准限值; Cd 在除南淝河外其他河流点位均符合 I 类标准, 在南淝河的部分点位严重超标; Sb 在所有河流中各点位则远低于限值. 总体来说, 测试的 10 种元素大部分满足水质要求, 但南淝河的个别点位 Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 严重超标, 其中, 采样点 S20 中 Cu、Zn 和 Cd 个别时段接近 V 类限值(3 097.23、1 973.21 和 128.26  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 推测部分水质超标的原因可能是丰水期降雨量过多, 导致其他区域面源污染通过地表径流进入, 在某

些程度上表明 Cu、Zn 和 Cd 污染已经较为严重, 相关部门应当开始重视.

查阅已有研究可知, 巢湖湖区丰水期的污染指数普遍较高, 推测原因是巢湖流域受季风气候影响, 丰水期降雨量大, 导致入湖径流量明显增加, 流域内生活污染、工业污染及农业污染随径流进入环湖河流, 大量排入湖内, 导致丰水期环湖出入湖河流及湖区内部部分元素浓度高于其他季节<sup>[18]</sup>. 除此之外, 丰水期巢湖流域水体 pH 值普遍高于其他季节, 流域中蓝藻水华对水体中重金属的吸附去除率主要取决于水体 pH 值, 研究表明, 蓝藻吸附重金属最适 pH 值为 6, 高于 6 则去除率大幅下降, 然而通过对丰水期水样分析发现丰水期巢湖流域水体 pH 普遍高于 6, 湖区部分点位达到 9, 最高达 9.27, 推测蓝藻对重金属的吸附净化作用较弱, 此外, 丰水期蓝藻暴发, 蓝藻聚集在一起, 底层蓝藻无法接触空气, 阻碍呼吸作用, 导致蓝藻腐烂使得生物体中吸收的重金属元素释放<sup>[4,34]</sup>. 本文对丰水期巢湖 10 条环湖各河流水质进行评价, 进一步细化了各河流对湖区污染程度, 但是在此基础上, 还需进一步研究其他季节的环湖河流水体中可溶态金属含量并进行对比完善<sup>[18]</sup>.

表 5 巢湖环湖 10 条河流可溶态重金属水质评价结果<sup>1)</sup>

Table 5 Evaluation results of dissolved heavy metal water quality in ten rivers around Chaohu Lake

区域	Ni	Cu	Cr	Pb	Zn	Mn	Cd
裕溪河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I
柘皋河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I
南淝河	部分超过限值	II ~ V	I	I ~ II	II ~ V	远低于限值	I ~ V
十五里河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	部分超过限值	I
塘西河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	超过限值	I
兆河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I
白石天河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I
杭埠河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I
派河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	部分超过限值	I
炯炆河	远低于限值	I	I	I ~ II	I	远低于限值	I

1) V、Fe 和 Sb 远低于限值; 评价标准参考地表水环境质量标准(GB 3838-2002)

### 2.6.2 污染指数评价

对 10 条环湖河流水体中所测试的重金属元素(V、Ni、Cu、Cr、Pb、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Sb)平均质量浓度进行单因子污染指数和综合污染指数评价,结果见表 6。单因子污染指数评价结果发现,塘西河 Mn 元素污染指数大于 1,为“轻度污染”水平;南淝河 Cd 元素污染指数大于 2,为“中度污染”水平;除此之外,其它环湖河流各元素的单因子污染指数均小于 1,均为“清洁”水平。综合污染指数评价结果表明 10 条环湖河流的综合污染指数均小于 1,为“无污染”水平。分析 10 条环湖河流水体中所测试的各重金属元素综合污染指数的空

间变化特征,结果发现在丰水期,10 条环湖河流所测各重金属元素综合污染指数排序为:南淝河 > 塘西河 > 派河 > 十五里河 > 兆河 > 杭埠河 > 裕溪河 > 白石天河 > 炯炆河 > 柘皋河,其中,南淝河的综合污染指数最高,为 0.570 5,除此之外,巢湖西北的其他 3 条河流塘西河、派河和十五里河综合污染指数普遍高于巢湖东部和西南部河流,为 0.273 6、0.203 1 和 0.158 5,这与西湖区尤其是西北部湖区水体污染较严重的现状相符,巢湖中部兆河的综合污染指数比西北部河流要低,但是也明显高于巢湖东部和西南部河流,综合污染指数为 0.092 3。

表 6 巢湖环湖 10 条河流可溶态重金属污染指数

Table 6 Pollution index of dissolved heavy metals in ten surrounding rivers of Chaohu Lake

河流	单因子污染指数										综合污染指数
	V	Ni	Cu	Cr	Pb	Fe	Zn	Mn	Cd	Sb	
裕溪河	0.079 8	0.042 5	0.176 0	0.056 0	0.103 0	0.042 8	0.064 6	0.002 8	0.004 5	0.000 2	0.057 2
柘皋河	0.020 6	0.050 0	0.117 0	0.052 0	0.013 0	0.036 5	0.104 2	0.007 9	0.000 7	0.000 0	0.040 2
南淝河	0.068 2	0.329 0	0.474 1	0.047 0	0.290 0	0.128 6	0.331 7	0.039 0	3.978 9	0.018 7	0.570 5
十五里河	0.058 2	0.096 0	0.179 0	0.054 0	0.089 0	0.150 6	0.184 0	0.759 3	0.014 3	0.000 6	0.158 5
塘西河	0.045 8	0.128 5	0.200 0	0.077 0	0.166 0	0.375 1	0.242 0	1.451 6	0.049 2	0.000 4	0.273 6
兆河	0.034 0	0.046 5	0.192 0	0.051 0	0.043 0	0.149 0	0.288 4	0.097 9	0.006 9	0.014 1	0.092 3
白石天河	0.007 8	0.030 0	0.077 0	0.045 0	0.059 0	0.123 2	0.097 8	0.126 2	0.000 0	0.000 0	0.056 6
杭埠河	0.034 2	0.033 5	0.197 0	0.030 0	0.095 0	0.049 9	0.104 6	0.011 6	0.024 0	0.000 0	0.058 0
派河	0.081 0	0.153 5	0.212 0	0.048 0	0.139 0	0.066 7	0.154 4	0.948 5	0.203 3	0.024 6	0.203 1
炯炆河	0.023 2	0.073 0	0.131 0	0.063 0	0.020 0	0.052 7	0.102 2	0.005 1	0.000 0	0.000 0	0.047 0

### 3 结论

(1) 丰水期巢湖湖区及其环湖河流各重金属元素平均质量浓度为: Cu > Zn > Fe > Mn > V > Ni > Pb > Sb > Cr > Cd。相关性分析结果表明,巢湖湖区及其环湖河流水体中可溶态重金属元素 Cu、Ni、Zn、Pb 和 Cd 之间呈显著的正相关,具有相似的空间分布规律。从各河流各重金属元素质量浓度均值来看,巢湖西部及其西北部河流重金属元素平均质量浓度普遍高于中部和东部地区及河流;对比巢湖湖内东

西湖心,结果发现东湖心的 Cr、Pb、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Sb 等元素含量最高,西湖心的 V、Ni 和 Cu 等元素则较高。

(2) 水质评价结果表明,各河流水体中 Cr 符合地表水 I 类标准; Pb 符合 I ~ II 类标准; Cu 和 Zn 符合 I ~ V 类标准; Fe、V 和 Sb 均远低于标准限值;南淝河的部分点位 Ni、Cd 超标,十五里河与派河的部分点位 Mn 轻微超标。污染指数评价结果表明,除塘西河 Mn 外,其他河流水体中 V、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Fe 单因子污染指数和综合污染指数

均小于 1, 污染程度很小. 巢湖西北部的河流综合污染指数普遍高于巢湖东部和西南部河流.

(3) 对典型河流不同河段重金属空间变化分析结果发现, 河流水体中重金属浓度变化的主要原因是陆源污染排放. 对东西湖心重金属含量对比分析, 结果发现水体的 pH 值也可能是导致重金属空间变化的另一原因, 具体影响机制还需要进一步实验探究.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东, 等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 59-66.  
Du C C, Liu E F, Yang X D, *et al.* Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(1): 59-66.
- [ 2 ] 曹德菊, 岳永德, 黄祥明, 等. 巢湖水体 Pb, Cu, Fe 污染的环境质量评价[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(4): 509-512.  
Cao D J, Yue Y D, Huang X M, *et al.* Environmental quality assessment of Pb, Cu, Fe pollution in Chaohu Lake waters[J]. China Environmental Science, 2004, **24**(4): 509-512.
- [ 3 ] 施阳, 彭宇豪, 吴源. 丰水期巢湖水体砷和重金属污染调查[J]. 环境与健康杂志, 2018, **35**(4): 333-336.  
Shi Y, Peng Y H, Wu Y. Arsenic and heavy metals contamination in Chaohu Lake during wet season[J]. Journal of Environment and Health, 2018, **35**(4): 333-336.
- [ 4 ] 江江, 李玉成, 王宁, 等. 巢湖蓝藻聚集对重金属迁移释放的影响[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 558-566.  
Jiang J, Li Y C, Wang N, *et al.* Effect of cyanobacteria aggregation on the migration and release of heavy metals in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(3): 558-566.
- [ 5 ] Yin H B, Deng J C, Shao S G, *et al.* Distribution characteristics and toxicity assessment of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **179**(1-4): 431-442.
- [ 6 ] Zhang M, Xu J, Xie P. Metals in surface sediments of large shallow eutrophic lake Chaohu, China [ J ]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **79**(2): 242-245.
- [ 7 ] 李国莲, 刘桂建, 姜萌萌, 等. 巢湖表层沉积物与上覆水体中重金属分配特征及其相关性研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, **41**(1): 9-15.  
Li G L, Liu G J, Jiang M M, *et al.* Partition characteristics and correlation of heavy metal between sediment and surface water from Chaohu Lake [ J ]. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, **41**(1): 9-15.
- [ 8 ] 孔明, 董增林, 晁建颖, 等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1223-1229.  
Kong M, Dong Z L, Chao J Y, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1223-1229.
- [ 9 ] 刘新, 蒋豫, 高俊峰, 等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 502-512.  
Liu X, Jiang Y, Gao J F, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): 502-512.
- [ 10 ] Liu E F, Shen J, Yang X D, *et al.* Spatial distribution and human contamination quantification of trace metals and phosphorus in the sediments of Chaohu Lake, a eutrophic shallow lake, China [ J ]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(4): 2105-2118.
- [ 11 ] Liu E F, Shen J. A comparative study of metal pollution and potential eco-risk in the sediment of Chaohu Lake (China) based on total concentration and chemical speciation [ J ]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(12): 7285-7295.
- [ 12 ] Zhang L, Liao Q J H, Shao S G, *et al.* Heavy metal pollution, fractionation, and potential ecological risks in sediments from Lake Chaohu ( eastern China ) and the surrounding rivers [ J ]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(11): 14115-14131.
- [ 13 ] Li G L, Liu G J, Zhou C C, *et al.* Mobility, binding behavior and potential risks of trace metals in the sediments of the fifth largest freshwater lake, China [ J ]. Water Science & Technology, 2013, **67**(11): 2503-2510.
- [ 14 ] Wang J Z, Peng S C, Chen T H, *et al.* Occurrence, source identification and ecological risk evaluation of metal elements in surface sediment: toward a comprehensive understanding of heavy metal pollution in Chaohu Lake, Eastern China [ J ]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(1): 307-314.
- [ 15 ] Wen S F, Shan B Q, Zhang H. Metals in sediment/pore water in Chaohu Lake: distribution, trends and flux [ J ]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(12): 2041-2050.
- [ 16 ] 童军华, 黄祥明, 陈勇. 巢湖水体重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2006, **34**(17): 4373-4374.  
Tong J H, Huang X M, Chen Y. Evaluation of contamination of heavy metal in Chaohu Lake [ J ]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, **34**(17): 4373-4374.
- [ 17 ] Li G L, Liu G J, Zhou C C, *et al.* Spatial distribution and multiple sources of heavy metals in the water of Chaohu Lake, Anhui, China [ J ]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(5): 2763-2773.
- [ 18 ] 吴蕾, 刘桂建, 周春财, 等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 738-747.  
Wu L, Liu G J, Zhou C C, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of dissolved heavy metals in Chaohu Lake [ J ]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 738-747.
- [ 19 ] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 等. 天山山地河流水体中微量重金属的分布特征及形态分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3612-3619.  
Zhang Z Y, Abuduwailil J, Jiang F Q, *et al.* Distribution characteristics and speciation analysis of trace heavy metals in river waters of the Tianshan Mountains, China [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3612-3619.
- [ 20 ] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 108-116.  
Ma Y Q, Shi Y, Qin Y W, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River ( Qingyuan section ), northeast China [ J ]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 108-116.
- [ 21 ] 田林锋, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 基于统计的百花湖表层水中重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(3): 259-267.  
Tian L F, Hu J W, Qin F X, *et al.* Statistical analysis of

- distribution characteristics of heavy metals in surface water from Baihua Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(3): 259-267.
- [22] 黄本柱. 巢湖烔炀河口沉积物及植物污染特征研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. 2-9.  
Huang B Z. Contaminative characteristics analysis of sediments and plants in estuary of Tongyang River at Chaohu Lake [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. 2-9.
- [23] 石勇. 巢湖塘西河口湿地沉积物污染特征及环境质量评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. 2-10.  
Shi Y. Pollution characteristics analysis and environmental quality assessment of sediments for estuary wetland of Tangxihe River [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. 2-10.
- [24] 东方超, 王宁, 李玉成, 等. 合肥市十五里河重金属和多环芳烃的含量及生态风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2013, **26**(3): 38-42, 46.  
Dong F C, Wang N, Li Y C, *et al.* Variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals and PAHs in the Shiwuli River of Hefei [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2013, **26**(3): 38-42, 46.
- [25] 王秀, 王振祥, 潘宝, 等. 南淝河表层水中重金属空间分布、污染评价及来源[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(2): 297-303.  
Wang X, Wang Z X, Pan B, *et al.* Spatial distribution, contamination assessments and sources of heavy metals in surface water from the Nanfei River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(2): 297-303.
- [26] 汪巧玲. 派河流域水环境治理及生态修复工程[J]. *绿色科技*, 2016, (14): 93-94, 97.  
Wang Q L. Analysis on environment governance and ecological restoration engineering in Paihe River Basin [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016, (14): 93-94, 97.
- [27] 李如忠, 石勇. 巢湖塘西河口湿地重金属污染风险不确定性评价[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1156-1163.  
Li R Z, Shi Y. Uncertainty assessment of heavy metal pollution risk in the estuarine wetland of Tangxi River in Chaohu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1156-1163.
- [28] 丁云霄. 巢湖主要入湖河流(南淝河、柘皋河、丰乐河、杭埠河)生态系统健康诊断[D]. 合肥: 安徽大学, 2018. 1-12.  
Ding Y X. Ecosystem health diagnosis of rivers (Nanfei River, Zhengao River, Fengle River, Hangbu River) into the Chaohu Lake [D]. Hefei: Anhui University, 2018. 1-12.
- [29] 司友斌, 岳永德. 南淝河水及沉积物中的重金属污染评价[J]. *安徽农业大学学报*, 1998, **25**(4): 444-447.  
Si Y B, Yue Y D. Investigation on the heavy metals contamination in Nanfei River [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1998, **25**(4): 444-447.
- [30] Chen Y Y, Liu Q Q. Numerical study of hydrodynamic process in Chaohu Lake [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2015, **27**(5): 720-729.
- [31] 余骏. 杭埠河流域贝类重金属的污染特征及源解析[D]. 合肥: 安徽大学, 2016. 34-43.  
Yu J. Pollution characteristics and source analysis of heavy metal in bivalves from Hangbu River [D]. Hefei: Anhui University, 2016. 34-43.
- [32] 杨丽莉, 张登峰, 曾向东. 沉积物中重金属释放规律研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(27): 8630-8631.  
Yang L L, Zhang D F, Zeng X D. Research on the releasing-rule of heavy metals from sediment [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(27): 8630-8631.
- [33] 鲁成秀. 富营养化湖泊沉积物—水界面重金属释放的生物化学过程研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2016. 7-17.  
Lu C X. Biochemical process of released heavy metals on the sediment-water interface of eutrophic lakes [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2016. 7-17.
- [34] 袁时琛, 张道方. pH和溶解氧对上海蕴藻浜河道沉积物重金属的影响[J]. *能源研究与信息*, 2016, **32**(2): 63-70.  
Yuan S J, Zhang D F. Effects of pH and dissolved oxygen on the release of heavy metals in the sediment from Yunzaobang River [J]. *Energy Research and Information*, 2016, **32**(2): 63-70.

## CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review .....	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar .....	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016 .....	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China .....	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain .....	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang .....	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin .....	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China .....	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019 .....	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method .....	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture .....	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China .....	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area .....	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City .....	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O <sub>3</sub> Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu .....	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River .....	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province .....	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers .....	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing .....	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake .....	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone .....	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake .....	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area .....	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model .....	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River .....	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season .....	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment .....	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors .....	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula .....	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region .....	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen .....	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland .....	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing .....	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar .....	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate .....	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II) .....	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal .....	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields .....	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil .....	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China .....	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter .....	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing .....	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions .....	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure .....	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)