

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽珩,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价

吴蕾^{1,2}, 刘桂建^{1*}, 周春财¹, 刘荣琼¹

(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: 为了解巢湖水体中可溶态重金属时空分布特征及污染水平, 在不同季节对巢湖水体进行了网格化样品采集, 采用电感耦合等离子体发射光谱 ICP-OES (ICAP6000 series) 测试了水样中可溶态重金属 As、Hg、Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Co 的质量浓度, 研究了可溶态重金属的时空分布特征, 并采用单因子污染指数法和综合污染指数法对巢湖水体环境质量进行了评价。结果表明, 巢湖可溶态 As、Cd、Pb 和 Cr 符合《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 I 类水质标准, Cu 和 Zn 为 I ~ II 类, Hg 为 I ~ III 类, Ni 和 Co 质量浓度远低于标准限值; 不同元素质量浓度存在明显的时空差异, Cu、Zn 和 Ni 在夏季最高, Pb 和 Cr 在秋季最高, Co 在春季最高; 西部湖区尤其是西北部湖区元素平均质量浓度在秋季、冬季和夏季高于中部和东部湖区; 元素 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 之间呈显著的正相关, 可能具有一定的同源性; 元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Co 单因子污染指数和综合污染指数均远小于 1, 为清洁和无污染水平; 全年西部湖区综合污染指数最高, 各湖区元素综合污染指数丰水期 > 平水期 > 枯水期。

关键词: 巢湖; 可溶态重金属; 时空分布; 污染评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0738-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703099

Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake

WU Lei^{1,2}, LIU Gui-jian^{1*}, ZHOU Chun-cai¹, LIU Rong-qiong¹

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

Abstract: Surface water samples were collected in different seasons from Chaohu Lake to determine the concentrations and potential environmental impacts of nine dissolved heavy metals (As, Hg, Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Co). The concentrations of the selected heavy metals were determined by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES, ICAP6000 series). The single pollution index method and integrated pollution index method were used to evaluate the potential environmental impacts. The results indicated that the contents of dissolved As, Cd, Pb, and Cr in Chaohu Lake were lower than the limitations of Grade I of the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838-2002), while Cu and Zn were within the limitations of Grade I - II and Hg was within the limitations of Grade I - III. The contents of Ni and Co were far below the limitations. The concentrations of the selected heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Co) varied among seasons and areas. Elevated concentrations of Cu, Zn, and Ni were found in summer, while elevated contents of Pb, Cr, and Co were found in autumn, autumn, and spring, respectively. Trace elements in the western part of Chaohu Lake (especially in the northwestern part) were higher than those in the middle and eastern parts for autumn, winter, and summer. Significant positive correlations were found among Cu, Pb, Zn, Cr, and Ni in the surface water, suggesting that these elements may derive from similar sources. The values of both the single factor pollution index and integrated pollution index of the selected elements in the surface water were far less than 1, suggesting that the environmental impacts could be regarded as negligible. The integrated pollution indices in the western part of the lake were higher than those of the middle and eastern parts on a one-year timescale, and the integrated pollution indices in each lake area followed a pattern of wet season (summer) > normal season (spring and autumn) > dry season (winter).

Key words: Chaohu Lake; dissolved heavy metals; temporal-spatial distribution; pollution assessment

巢湖(N 31°43'28"~31°25'28", E 117°16'54"~117°51'46")位于安徽省合肥市, 是我国五大淡水湖之一。水位 8 m 时, 水面面积 755 km², 容积 17.17 亿 m³, 深 2~5 m。在下游湖区东部裕溪河口处建有巢湖闸, 闸上流域面积 9 153 km², 涉及安徽省 9 个市(县), 2015 年流域人口约 770 万^[1]。巢湖主要功能为工农业和生活供水、渔业、航运、防洪、旅游等, 在安徽省的经济、社会发展中具有重要的战

略地位。

从 20 世纪 70 年代开始, 随着流域社会经济的快速发展, 巢湖水环境开始逐渐恶化; 20 世纪 80

收稿日期: 2017-03-12; 修订日期: 2017-08-18

基金项目: 安徽省省级环保科研项目(2015-11); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07103-004)

作者简介: 吴蕾(1983~), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为水环境治理及环境规划, E-mail: tianjileilei@163.com

* 通信作者, E-mail: lgi@ustc.edu.cn

年代,富营养化问题开始显现并呈逐渐加重趋势^[2],且湖区水质呈现明显的空间差异性。根据历年《安徽省环境状况公报》,1995~2001年,巢湖湖区水体营养状态为重度富营养;2001年之后,巢湖水质逐渐改善,至2003年,全湖为中度富营养,其中西半湖重度,东半湖轻度;至2009年,全湖进一步改善为轻度富营养,其中西半湖中度,东半湖轻度;至2015年,东、西半湖均为轻度富营养,西半湖水水质为Ⅴ类,东半湖水水质为Ⅳ类。目前,关于巢湖污染与治理的研究中,多数集中于有机污染及富营养化问题^[3~7]。但研究表明,巢湖水环境已受到了明显的人为重金属污染^[8~9]。重金属是环境中重要的一类污染物,难降解、易积累、毒性大,且具有生物富集和生物放大效应。水环境中的重金属存在于水相、悬浮物和沉积物中,水相中的重金属即水体中可溶态重金属。根据环保部发布的《水质-32种元素的测定-电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 776-2015)》,“可溶性元素”定义为“未经酸化的样品,经0.45 μm滤膜过滤后测得的元素含量”。水相是重金属在水环境中迁移转化的重要节点,相对于悬浮物和沉积物,水体中可溶态重金属可直接被生物吸收,微量含量即可产生生物毒性效应,通过食物链直接或间接进入人体,对人类健康产生潜在威胁;另外,水体中可溶态重金属含量是环境监测和管理中评价水质的重要指标。因此,对水体中可溶态重金属的研究具有重要意义。国内外学者对不同水体中可溶态元素开展了广泛的研究,如国外希腊Doirani湖和Kerkini湖^[10]、土耳其Tigris River流域的3大人工水库^[11]、巴基斯坦Soan河及其支流等水体^[12],以及国内吉林省第二松花江、云南省沱江、环太湖53条河流及湖区、湘江衡阳段、东北大辽河口、辽宁省浑河上游(清原段)、新疆天山山地河流、云南省38个水库、贵州省百花湖和红枫湖、太湖湖区及梅梁湾、内蒙乌梁素海、江西省鄱阳湖、丹江口水库、西沙海域、广西北仑河口红树林保护区表层海水、福建东山湾海水等江河湖海水体^[13~30]。

目前巢湖重金属污染的研究大多集中在沉积物^[8, 31~39],关于水体中可溶态重金属的研究比较缺乏^[9, 40, 41],且已有研究主要关注局部湖区或单一时段水体中可溶态元素质量浓度,对整个湖区水体可溶态重金属的时空变化特征缺乏研究。本文通过对巢湖全湖进行一个水文年的季节性采样分析,研究了巢湖水体中可溶态重金属的季节性变化规律及空

间分布特征,对各元素之间的相关性进行了分析,并对其污染水平进行了评价,以期探析巢湖重金属来源和迁移规律以及为未来巢湖水资源保护与有效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与点位设置

巢湖原为长江中下游的开放型湖泊,自20世纪60年代巢湖闸、裕溪闸建成后,巢湖变为由人工控制的半封闭型湖泊,非汛期巢湖闸基本为关闭状态,汛期开闸放水,保证流域防洪安全。流域属北亚热带湿润性季风气候,多年平均气温16℃,多年平均降雨量1 132 mm,多年平均入湖径流量34.9亿m³。受季风影响,降雨主要集中在汛期。主要入湖河流为南淝河、十五里河、派河、杭埠河、白石天河、兆河、柘皋河,这7条河流入湖水量占巢湖总入湖水量的90%以上。其中位于巢湖西北部的南淝河、十五里河、派河水水质为劣Ⅴ类,杭埠河、白石天河、兆河、柘皋河水水质为Ⅲ类。

基于网格布点法,同时兼顾主要入湖河流的河口区域,在巢湖湖区设置32个采样点位(图1)。采样时间为2013年11月7~8日,2014年1月5~7日,2014年4月1~3日,2014年7月8~10日,分别代表秋季、冬季、春季、夏季,涵盖了一个水文年的枯水期(冬季)、平水期(春季、秋季)和丰水期(夏季)。采样过程中采用GPS进行定位,对湖区表层水(水面以下约0.5 m)进行采集,采样前将有机玻璃水样采集器用湖水充分清洗,每个点位采集3份平行水样,将水样等比例混合均匀后立即用0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤,滤液装入100 mL聚乙烯塑料瓶中,加1:1的HNO₃酸化至pH值小于2,密封后避光保存,带回实验室置于4℃冰箱中保存待测。

1.2 样品测试

采用ICP-OES(ICAP6000 series, Thermo, 美国)对样品中9种重金属进行定量分析。仪器方法检测限(单位为μg·L⁻¹)分别为As 0.5、Hg 0.05、Cd 0.1、Cu 0.1、Pb 0.1、Zn 0.1、Cr 0.1、Ni 0.1、Co 0.1。实验中每批样品均加入3组空白对照,以检验和消除样品处理与测试过程中的污染程度;为检测和保证样品测试的准确性,每批样品加入5组标准物质(GSS系列),处理方法同样品,结果表明,标准物的回收率在90%~105%,满足实验要求。此外,对每批样品的测试分析均进行20%的重复性检验,结果表明,每批样品测试的相对误差小

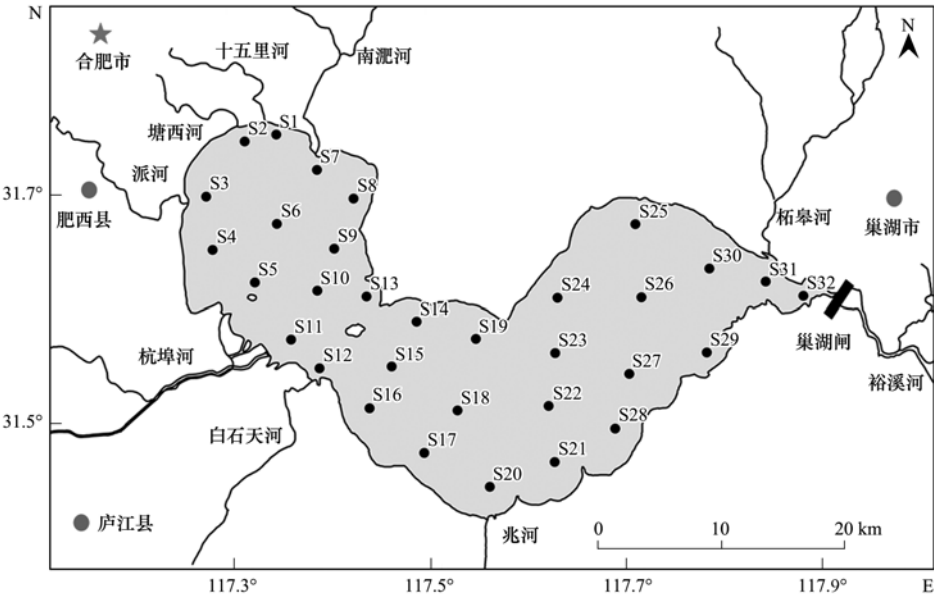


图 1 巢湖采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites of the surface water of Chaohu Lake

于 5%，表明样品分析步骤符合分析实验的质量要求。

1.3 污染评价方法

本研究中分别采用单因子污染指数法^[19]和综合污染指数法^[18]对巢湖水体中单一重金属污染水平以及多种重金属综合污染水平进行评价，计算公式分别见式(1)和式(2)：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中， P_i 表示水体中元素 i 的单因子污染指数； C_i 表示水体中元素 i 的实测浓度； S_i 表示水体中元素 i 的评价标准。

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \tag{2}$$

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。

参考文献[18, 19]，单因子污染指数和综合污染指数的评价标准见表 1。

表 1 单因子污染指数和综合污染指数的评价标准

Table 1 Standards for single factor pollution index(P_i) and synthetic pollution index(I)

单因子污染指数(P_i)	污染水平	综合污染指数(I)	污染水平
$P_i \leq 1$	清洁	$I \leq 1$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$1 < I \leq 2$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$2 < I \leq 3$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$I > 3$	重度污染

2 结果与讨论

2.1 巢湖水体可溶态重金属质量浓度及季节性变化

在 4 次采样共 128 个样品中，Hg、Cd 质量浓度范围分别是 ND(未检出)~0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、ND~0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，As 全年未检出。Hg、Cd、As 未检出的样品分别占总样品数的 65.9%、53.5% 和 100%。鉴于此，本研究不对这 3 种元素进行时空分布及相关性分析研究，仅在后文对其进行水质评价。

元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Co 的统计性描述

见表 2。从中可知，各元素全年质量浓度均值为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Co}$ 。对比各元素变异系数，发现各季节元素在湖区分布不均，总体来说变异系数为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu}$ ；且同一元素的变异系数季节性差异较大，Cu、Cr、Pb 和 Zn 变异系数均是夏季最高，Ni 和 Co 变异系数为秋季最高，6 种元素变异系数均为春季最低，即夏季湖区表层水体中元素分布差异最大，春季差异最小。与国内其他湖、库对比，发现巢湖湖区水体中可溶态 Cu、Pb、Zn 和 Cr 质量浓度介于各湖库之间。

表 2 巢湖表层水体可溶态重金属质量浓度及与其他湖库对比¹⁾/μg·L⁻¹

Table 2 Concentrations of dissolved heavy metals in the surface water of Chaohu Lake and other lakes or reservoirs/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$							
季节	元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co
秋季	范围	0.48 ~ 2.10	0.76 ~ 4.34	0.82 ~ 20.09	0.54 ~ 5.06	0.49 ~ 5.80	ND ~ 0.60
	均值	1.42	2.6	7.56	2.47	1.59	0.17
	标准偏差	0.39	0.94	5.57	1.19	1.01	0.13
	变异系数/%	27.77	36.05	73.65	48.17	63.94	81.11
冬季	范围	1.28 ~ 2.49	0.69 ~ 3.35	0.10 ~ 4.16	0.59 ~ 3.26	0.81 ~ 2.38	ND ~ 0.51
	均值	1.8	1.73	1.4	1.33	1.4	0.18
	标准偏差	0.31	0.67	1.15	0.58	0.46	0.1
	变异系数/%	17.51	38.78	82.56	43.89	32.63	58.95
春季	范围	1.83 ~ 3.40	1.22 ~ 3.25	1.79 ~ 19.22	0.82 ~ 2.53	1.16 ~ 3.22	ND ~ 0.42
	均值	2.28	2.07	4.95	1.73	1.63	0.24
	标准偏差	3.41	0.55	3.55	0.48	0.48	0.08
	变异系数/%	13.21	26.59	71.64	27.82	29.18	34.51
夏季	范围	6.30 ~ 22.70	0.70 ~ 6.70	4.40 ~ 984.50	0.10 ~ 7.80	1.00 ~ 8.70	0.10 ~ 0.40
	均值	12.21	1.83	66.44	0.95	2.93	0.15
	标准偏差	3.75	1.05	173.98	1.72	1.55	0.09
	变异系数/%	30.68	57.66	261.85	181.38	53.11	59.77
全年	范围	0.48 ~ 22.70	0.69 ~ 6.70	0.10 ~ 984.50	0.10 ~ 7.80	0.49 ~ 8.70	ND ~ 0.60
	均值	4.53	2.08	20.67	1.63	1.92	0.19
其他湖库	太湖 ^[23]	2.88	ND	8.77	1.29	2.44	—
	鄱阳湖 ^[26]	2.67	0.81	28.82	2.21	—	—
	红枫湖 ^[22]	1.24	4.63	33.10	—	—	—
	百花湖 ^[21]	1.50	0.36	11.70	13.00	—	—
	乌梁素海 ^[25]	14.3	9.3	37.9	0.5	—	—
	丹江口水库 ^[27]	13.32	10.59	2.02	6.29	—	—
	Tigris River 上游 3 水库均值 ^[11]	1.65	1.99	4.41	19.05	15.86	—

1) “ND”表示未检出, “—”表示无该数据

元素不同季节全湖质量浓度均值对比见图 2。
由图 2 可知, 元素全湖质量浓度均值季节性变化规律各不相同, 大致可分为三类。其中, Cu 为夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季, Zn 为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, Ni 为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 这 3 种元素在夏季均显著高于其他季节。马迎群等^[18]发现浑河上游(清原段)水体中可溶态 Cu、Zn 质量浓度均值在丰水期高于平水期和枯水期, 与本文研究结

果相似。Pb 为秋季 > 春季 > 夏季 > 冬季, Cr 为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季, 这 2 种元素在秋季稍高于其他季节。Co 四季相差不大, 在春季略高。总体来说, Cu、Zn 元素质量浓度季节性差异较大, 其他元素季节性差异相对较小。本研究在对湖区样品采集测试时, 也同步分析了巢湖 7 条主要入湖河流水体可溶态重金属质量浓度(数据尚未发表), 其中 Cu 在各入湖河流中夏季均为最高, 为其他季节的 5 ~ 16 倍, 其他季节相差不大, 由此可见, 河流输入的影响是造成巢湖湖区水体中元素质量浓度季节性差异的重要原因。而作为一个大容积的半封闭型湖泊, 对于湖区水体中各物质而言, 河流输入仅是其中重要的影响因素之一, 湖区实时水质还与不同湖区间的水力交换以及水体与湖区沉积物中的物质交换等有关, 其影响因素比较复杂, 各因素共同作用, 造成了元素质量浓度的季节性差异。

2.2 巢湖水体可溶态重金属空间分布特征
为对比巢湖湖区重金属空间差异, 根据湖区形状、地理位置及水流水动力特点^[42], 将湖区划分为西湖区(图 1 中 S1 ~ S13)、中湖区(S14 ~ S23, S28)和东湖区(S24 ~ S27, S29 ~ S32)三大

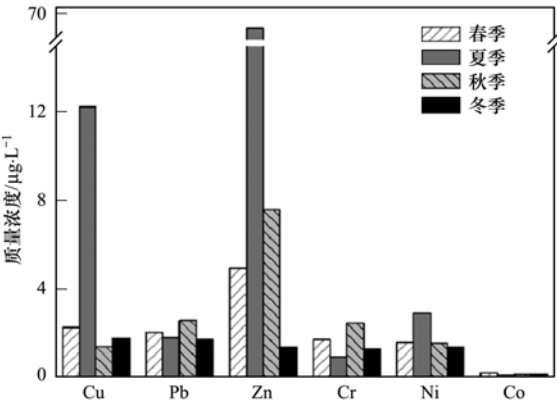


图 2 巢湖表层水体可溶态重金属质量浓度季节性对比
Fig. 2 Variations in average contents of dissolved heavy metals in the surface water of Chaohu Lake in different seasons

湖区. 表 3 为不同湖区各季节元素质量浓度均值统计, 图 3 为各元素不同季节全湖质量浓度分布等值线图, 根据表 3 和图 3 对湖区元素空间分布特征进行分析.

表 3 巢湖表层水体三大湖区各季节可溶态重金属质量浓度均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Average concentrations of dissolved heavy metals in the surface water of three areas of Chaohu Lake in different seasons/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

季节	区域	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co
秋季	西湖区	1.51 ± 0.53	3.19 ± 0.83	10.73 ± 6.24	3.28 ± 0.99	2.41 ± 1.28	0.26 ± 0.19
	中湖区	1.43 ± 0.24	2.64 ± 0.74	8.07 ± 4.27	2.60 ± 0.92	1.36 ± 0.41	0.13 ± 0.09
	东湖区	1.28 ± 0.37	1.81 ± 0.78	3.03 ± 3.03	1.30 ± 0.78	0.88 ± 0.32	0.10 ± 0.00
冬季	西湖区	2.09 ± 0.23	2.26 ± 0.59	2.32 ± 1.07	1.76 ± 0.65	1.83 ± 0.42	0.27 ± 0.10
	中湖区	1.66 ± 0.19	1.50 ± 0.53	0.66 ± 0.71	1.01 ± 0.36	1.16 ± 0.21	0.13 ± 0.05
	东湖区	1.53 ± 0.18	1.23 ± 0.34	1.00 ± 0.80	1.11 ± 0.22	1.07 ± 0.16	0.10 ± 0.02
春季	西湖区	2.22 ± 0.27	1.83 ± 0.38	5.14 ± 4.59	1.56 ± 0.48	2.03 ± 0.53	0.20 ± 0.09
	中湖区	2.24 ± 0.19	2.10 ± 0.64	4.16 ± 3.10	1.72 ± 0.42	1.36 ± 0.12	0.26 ± 0.05
	东湖区	2.45 ± 0.43	2.39 ± 0.53	5.74 ± 2.03	2.03 ± 0.48	1.36 ± 0.09	0.26 ± 0.10
夏季	西湖区	11.66 ± 4.13	2.22 ± 1.52	135.41 ± 261.87	1.73 ± 2.51	3.63 ± 1.97	0.23 ± 0.10
	中湖区	11.65 ± 4.17	1.66 ± 0.44	26.94 ± 31.11	0.54 ± 0.45	2.49 ± 1.13	0.10 ± 0.00
	东湖区	13.89 ± 1.96	1.43 ± 0.43	8.70 ± 3.87	0.24 ± 0.09	2.38 ± 0.80	0.10 ± 0.00

从各元素三大湖区质量浓度均值来看, Zn 和 Cr 各季节空间分布规律相似, 在秋季和夏季为西湖区 > 中湖区 > 东湖区, 且各湖区均值有一定浓度梯度差; 在冬季西湖区 > 东湖区 > 中湖区; 在春季东湖区均值高于其他两个湖区. Pb 和 Co 在各季节空间分布规律相似, 在秋季、冬季和夏季均为西湖区 > 中湖区 ≥ 东湖区, 在春季为东湖区 ≥ 中湖区 > 西湖区. Cu 在秋季和冬季为西湖区 > 中湖区 > 东湖区, 在春季为东湖区 > 中湖区 > 西湖区, 在夏季为东湖区 > 西湖区 > 中湖区. Ni 在四季均为西湖区 > 中湖区 ≥ 东湖区.

总体来说, 在秋季、冬季和夏季, 6 种元素均是西湖区平均质量浓度最高 (Cu 除外, 在夏季东湖区略高); 在春季, 则是东湖区平均质量浓度最高 (Ni 除外, 在春季西湖区最高), 即在全年大部分时间段西湖区尤其是西北部湖区元素质量浓度较高 (图 3). 分析原因为: 合肥市区位于巢湖西北部, 近些年来经济发展较快, 人口增长迅速, 根据合肥市 2016 年统计年鉴, 市辖区 2015 年人口密度已达 $0.95 \text{ 万人}\cdot\text{km}^{-2}$, 市辖区以约 4.6% 的流域面积承载了约 51.9% 的流域人口; 全市污水排放量逐年增多, 2011 ~ 2015 年全市 (含三县一市) 城镇生活污水排放量由 34 167 万 t 增长至 45 022 万 t, 其中约 80% 经由湖区西北部的南淝河、十五里河、塘西河、派河进入到巢湖中, 为西湖区带来了极重的污染负荷; 目前流域内市级以上工业园区为 23 个, 排水经由西北部几条重污染河流进入到巢湖的工业园区为 13 个, 且基本为国家级或省级大型工业园区;

而其他湖区周边大多为农业农村用地, 人口密度相对较小, 工业发展总量较小且相对较分散, 大部分重金属的排放及入湖负荷相对小于西湖区. 陆域污染源的排放及入湖负荷的差异性是导致湖区污染存在区域差异性的主要原因. 另外, 虽然湖水具有流动性, 但巢湖湖区水流主要以风生流为主, 湖区流速较小, 且西湖区在垂向上存在几个区域性环流, 不利于该区域与外界的水量和物质交换, 这也是造成全湖污染存在区域差异性的重要因素^[39].

2.3 重金属间的相关关系

为探讨各元素之间的相关关系, 分析其是否具有同源性, 拟采用皮尔森相关系数 (Pearson correlation coefficient) 法对不同季节巢湖水体中各元素质量浓度之间的相关性进行分析. 在分析之前, 首先对各季节各元素 32 个样本进行正态分布检验. 检验结果为, 秋季和冬季的 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 服从正态分布, 春季的 Pb、Cu、Cr 和 Co 服从正态分布, 夏季仅 Pb、Cu 和 Ni 服从正态分布. 因此, 选择秋季和冬季对 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 这 5 种元素进行皮尔森相关分析, 结果见表 4.

由表 4 可知, 在秋季, 5 种元素之间均为正相关, 除 Ni-Cu 之外, 其他元素两两之间均为显著正相关. 在冬季, 5 种元素之间均为显著正相关, 且总体来说, 相关性强于秋季. 从该结果可初步判断巢湖水体中这 5 种元素可能具有相似的来源. Li 等^[33] 在 2009 年 10 月 (秋季) 对巢湖全湖表层水进行采样分析, 发现可溶态 Cu、Zn、Ni 和 Cr 质量浓度之间存在极高的正相关, 与本研究结果相符.

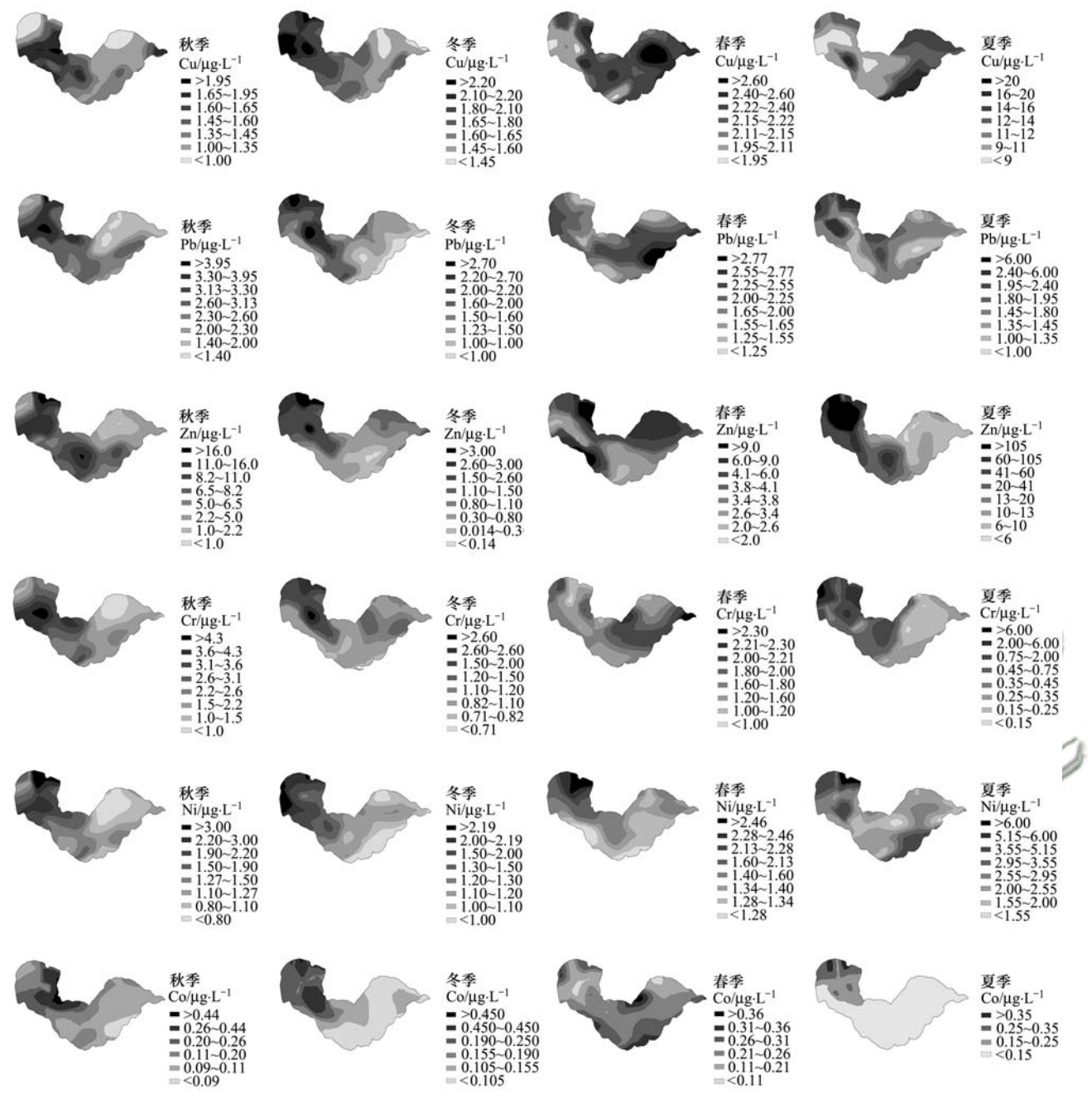


图3 巢湖表层水体各季节可溶态重金属质量浓度分布等值线

Fig. 3 Spatial variations of concentrations of dissolved heavy metals in the surface water of Chaohu Lake in different seasons

对于河流湖泊等开放性水体，其地球化学特性与沉积物不同^[21]。水体具有流动性，其流动性与径流输入、气象条件、闸坝控制等各因素息息相关，影响水体中元素迁移转化的因素比较复杂。而沉积物流动性较差，是水体中的悬浮物长期积累而形成的相对比较稳定的底质，可以保存污染物较长时间序列的历史记录。因此，为进一步确定巢湖水环境中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 的来源关系，还需研究其在沉积物中的相关关系。有研究表明^[35~37]，巢湖沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 含量之间普遍存在

较程度的正相关，这与本研究结果相符，进一步证明了巢湖水环境中这 5 种元素可能具有同源性。

2.4 巢湖水体可溶态重金属污染评价

2.4.1 地表水水质评价

根据《安徽省水功能区划》成果，巢湖水质应执行Ⅲ类标准。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)，对巢湖水体中可溶态 As、Hg、Cd、Cu、Zn、Cr、Pb、Co 和 Ni 水质进行评价(对水体中可溶态 Cr 的评价借鉴标准中 Cr⁶⁺ 的分级标准)，结果见表 5。可知，As、Cd、Pb、Cr 各时段各点位均符

表 4 巢湖表层水可溶态元素质量浓度之间的
皮尔森相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient between contents of
dissolved heavy metals in the surface water of Chaohu Lake

秋季	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
Cu	1				
Pb	0.571 **	1			
Zn	0.419 *	0.658 **	1		
Cr	0.552 **	0.845 **	0.617 **	1	
Ni	0.042	0.425 *	0.666 **	0.524 **	1
冬季	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
Cu	1				
Pb	0.681 **	1			
Zn	0.667 **	0.666 **	1		
Cr	0.671 **	0.747 **	0.767 **	1	
Ni	0.824 **	0.627 *	0.727 **	0.574 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

合Ⅰ类标准; Cu 和 Zn 在秋、冬、春三季各点位均满足Ⅰ类标准, 夏季少数点位为Ⅱ类; Ni、Co 全年各点位质量浓度均远低于标准限值; Hg 在春季各点位均符合Ⅲ类标准, 但其他3个季节个别点位轻微超标. 因此, 从全湖水平来看, 本研究所测试元素均满足巢

湖目标水质要求, 但 Hg 存在个别时段个别点位超标现象, Zn 个别时段已接近Ⅲ类标准限值(S9 在夏季达 $984.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 表明这两种元素已受到一定程度的污染, 应引起相关管理部门的重视.

2.4.2 污染指数评价

对巢湖水体中重金属(Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Co)各季节各区域平均质量浓度进行单因子污染指数和综合污染指数评价. 由评价结果(表6)可知, 各湖区元素单因子污染指数均远小于1, 污染水平为“清洁”, 水质较好; 各湖区综合污染指数远小于1, 污染水平为“无污染”. 分析巢湖湖区重金属综合污染指数的时空变化特征, 空间上, 在秋、冬、夏这3个季节是西湖区>中湖区>东湖区, 在春季是西湖区>东湖区>中湖区, 即西湖区在全年综合污染指数最高, 这与西湖区尤其是西北部湖区水体污染较重的现状相符; 时间上, 6种元素西湖区、中湖区以及全湖平均的综合污染指数为夏季>秋季>春季>冬季, 东湖区为夏季>春季>秋季>冬季, 即各区域元素综合污染指数均为丰水期(夏季)>平水期(春季、秋季)>枯水期(冬季), 这可能与

表 5 重金属水质评价结果
Table 5 Evaluation results of surface water quality per heavy metals

季节	As	Hg	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co
秋季	Ⅰ	Ⅰ~Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	远低于限值	远低于限值
冬季	Ⅰ	Ⅰ~Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ		
春季	Ⅰ	Ⅰ~Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ		
夏季	Ⅰ	Ⅰ~Ⅳ	Ⅰ	Ⅰ~Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ~Ⅱ	Ⅰ		

表 6 巢湖表层水体可溶态重金属污染指数

Table 6 Pollution index of dissolved heavy metals in the surface water of Chaohu Lake

季节	湖区	单因子污染指数(P_i)						综合污染指数(I)
		Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	
秋季	西湖区	0.0015	0.0639	0.0107	0.0656	0.1207	0.0003	0.0438
	中湖区	0.0014	0.0529	0.0081	0.0520	0.0678	0.0001	0.0304
	东湖区	0.0013	0.0363	0.0030	0.0260	0.0439	0.0001	0.0184
	全湖平均	0.0014	0.0520	0.0076	0.0493	0.0793	0.0002	0.0316
冬季	西湖区	0.0021	0.0453	0.0023	0.0352	0.0913	0.0003	0.0294
	中湖区	0.0017	0.0299	0.0007	0.0203	0.0581	0.0001	0.0185
	东湖区	0.0015	0.0245	0.0010	0.0222	0.0534	0.0001	0.0171
	全湖平均	0.0018	0.0347	0.0014	0.0266	0.0701	0.0002	0.0224
春季	西湖区	0.0022	0.0367	0.0051	0.0313	0.1016	0.0002	0.0295
	中湖区	0.0022	0.0420	0.0042	0.0345	0.0678	0.0003	0.0252
	东湖区	0.0024	0.0479	0.0057	0.0405	0.0680	0.0003	0.0275
	全湖平均	0.0023	0.0413	0.0050	0.0347	0.0816	0.0002	0.0275
夏季	西湖区	0.0117	0.0443	0.1354	0.0346	0.1815	0.0002	0.0680
	中湖区	0.0116	0.0333	0.0269	0.0107	0.1245	0.0001	0.0345
	东湖区	0.0139	0.0285	0.0087	0.0048	0.1188	0.0001	0.0291
	全湖平均	0.0122	0.0366	0.0664	0.0189	0.1463	0.0002	0.0468

各水期降雨量有关,丰水期降雨量大,入湖径流量明显多于其他水期,流域内城市面源、农业、农村及矿山等面源污染随径流大量入湖,导致夏季湖水部分测试元素(Cu、Pb、Zn)浓度高于其他季节。

3 结论

(1)巢湖湖区各元素全年平均质量浓度为 $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Co$ 。湖区元素分布存在明显的时空差异,Cu、Zn 和 Ni 在夏季明显高于其他季节,Pb 和 Cr 在秋季稍高于其他季节,Co 在春季略高;全年大部分时间段中,西湖区尤其是西北部湖区元素质量浓度最高。

(2)相关性分析结果表明,巢湖水体中可溶态 Zn、Cu、Cr、Ni 和 Pb 之间呈显著的正相关,可能具有一定的同源性。

(3)水质评价结果表明,元素 As、Cd、Pb 和 Cr 符合地表水 I 类标准,Cu 和 Zn 为 I ~ II 类,Ni 和 Co 远低于标准限值,Hg 基本符合 III 类水质,个别时段个别点位轻微超标。污染指数评价结果表明,6 种元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Co)单因子污染指数和综合污染指数均远小于 1,污染程度极小;各季节西湖区综合污染指数最高,各湖区综合污染指数均为丰水期 > 平水期 > 枯水期。

参考文献:

- [1] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 2016 安徽统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2016. 113.
Statistics Bureau of Anhui Province, National Bureau of Statistics Anhui Survey Organization. 2016 Anhui Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. 113.
- [2] 殷福才,张之源. 巢湖富营养化研究进展[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 377-384.
Yin F C, Zhang Z Y. Survey of Chaohu Lake eutrophication research[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(4): 377-384.
- [3] 祝心如,姚渭溪,何芬珠,等. 巢湖西北部水域的有机污染和富营养化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(2): 191-196.
Zhu X R, Yao W X, He F Z, et al. Water pollution and eutrophication of the northwest part of the Chaohu Lake[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(2): 191-196.
- [4] 张之源,王培华,张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 45-48.
Zhang Z Y, Wang P H, Zhang C D. Study on the eutrophication in Chaohu Lake and its remediation [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(5): 45-48.
- [5] 李梦,刘桂建,吴蕾,等. 冬季巢湖西半湖的富营养化及污染状况研究——基于浮游藻类的多样性分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(2): 150-158.
Li M, Liu G J, Wu L, et al. Eutrophication and water quality characteristics of western Chaohu Lake in winter via planktonic alga diversity analysis[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(2): 150-158.
- [6] 张民,孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013 年)[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 791-798.
Zhang M, Kong F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984—2013) [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 791-798.
- [7] 奚姗姗,周春财,刘桂建,等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 542-547.
Xi S S, Zhou C C, Liu G J, et al. Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 542-547.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Pertsemli E, Voutsas D. Distribution of heavy metals in Lakes Doirani and Kerkini, northern Greece[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(3): 529-537.
- [11] Varol M. Dissolved heavy metal concentrations of the Kralktzt, Dicle and Batman dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey[J]. Chemosphere, 2013, 93(6): 954-962.
- [12] Nazeer S, Hashmi M Z, Malik R N. Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan[J]. Ecological Indicators, 2014, 43: 262-270.
- [13] 陆继龙,郝立波,赵玉岩,等. 第二松花江中下游水体重金属特征及潜在生态风险[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 168-172.
Lu J L, Hao L B, Zhao Y Y, et al. Contents and potential ecological risk of heavy metals in middle and lower reaches of Second Songhua River [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(5): 168-172.
- [14] 王李鸿,角媛梅,明庆忠,等. 云南省珠江流域水体重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5): 595-600.
Wang L M, Jiao Y M, Ming Q Z, et al. Evaluation of heavy metal pollution in Bijiang Basin in Yunnan Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(5): 595-600.
- [15] 燕姝雯,余辉,李焕利,等. 枯水期环太湖河流溶解态重金属空间分布[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 6-10.
Yan S W, Yu H, Li H L, et al. Spatial patterns of dissolved heavy metal in surrounding rivers of Lake Taihu during dry seasons[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 6-10.
- [16] 秦延文,韩超南,张雷,等. 湘江衡阳段重金属在水体、悬浮颗粒物及表层沉积物中的分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2836-2844.
Qin Y W, Han C N, Zhang L, et al. Distribution of heavy metals among surface water, suspended solids and surface sediments in Hengyang section of Xiangjiang River [J]. Acta Scientiae

- Circumstantiae, 2012, **32**(11): 2836-2844.
- [17] 王小静, 张帅, 简慧敏, 等. 大辽河口溶解态重金属的变化特征及影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报, 2011, **41**(10): 79-86.
- Wang X J, Zhang S, Jian H M, *et al.* Variation characteristics of dissolved heavy metals in the Daliaohe Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, **41**(10): 79-86.
- [18] 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.
- [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, Jilili A, 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] 刘总堂, 李春海, 章钢娅. 运用主成分分析法研究云南湖库水体中重金属分布[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 459-466.
- Liu Z T, Li C H, Zhang G Y. Application of principal component analysis to the distributions of heavy metals in the water of lakes and reservoirs in Yunnan Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(4): 459-466.
- [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] 田林锋, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 481-489.
- Tian L F, Hu J W, Qin F X, *et al.* Distribution of heavy metal elements in the water body from Lake Hongfeng [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(3): 481-489.
- [23] Yu T, Zhang Y, Meng W, *et al.* Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(7): 4367-4382.
- [24] 李聪聪, 成小英, 张光生, 等. 太湖梅梁湾水体重金属浓度的时空变化研究[J]. 上海环境科学, 2010, **29**(5): 185-191, 212.
- Li C C, Cheng X Y, Zhang G S, *et al.* A study on spatial and temporal variations of heavy metal contents in water body of Meiliang Bay in Taihu Lake [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2010, **29**(5): 185-191, 212.
- [25] 岳荣, 张红, 史锐, 等. 乌梁素海水体重金属元素统计分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2015, **43**(31): 376-379, 383.
- Yue R, Zhang H, Shi R, *et al.* Research on statistical distribution characteristics of heavy metals in Wuliangsu Lake [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, **43**(31): 376-379, 383.
- [26] 张大文, 张莉, 何俊海, 等. 鄱阳湖溶解态重金属空间分布格局及风险评估[J]. 生态学报, 2015, **35**(24): 8028-8035.
- Zhang D W, Zhang L, He J H, *et al.* Spatial distributions and risk assessment of dissolved heavy metals in Poyang Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(24): 8028-8035.
- [27] Li S Y, Xu Z F, Cheng X L, *et al.* Dissolved trace elements and heavy metals in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. Environmental Geology, 2008, **55**(5): 977-983.
- [28] 周静, 杨东, 彭子成, 等. 西沙海域海水中溶解态重金属的含量及其影响因子[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, **37**(8): 1036-1042.
- Zhou J, Yang D, Peng Z C, *et al.* The concentrations of dissolved heavy metals in Xisha waters and their influential factors [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, **37**(8): 1036-1042.
- [29] 罗万次, 苏搏, 刘熊, 等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素[J]. 海洋通报, 2014, **33**(6): 668-675.
- Luo W C, Su B, Liu X, *et al.* Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River Estuary in Guangxi [J]. Marine Science Bulletin, 2014, **33**(6): 668-675.
- [30] 杨妙峰, 郑盛华, 席英玉, 等. 福建东山湾海水中溶解态重金属平面分布及影响因素初探[J]. 海洋学研究, 2016, **34**(2): 75-82.
- Yang M F, Zheng S H, Xi Y Y, *et al.* The horizontal distribution and affecting factors of dissolved heavy metals in seawater of Dongshan Bay, Fujian Province [J]. Journal of Marine Sciences, 2016, **34**(2): 75-82.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.

- [37] 孔明, 董增林, 晁建颖, 等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性及生态风险评价[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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Chen Y Y, Liu Q Q. Numerical study of hydrodynamic process in Chaohu Lake[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, **27**(5): 720-729.



CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)