

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

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

1960~2013年我国霾污染的时空变化	符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)
太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)
石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征	刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258)
南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析	吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)
南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析	肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)
上海崇明地区大气分形态汞污染特征	李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)
三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量	王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)
长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析	吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)
铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征	刘大钧,汪家权 (3315)
祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究	贾文雄,李宗省 (3322)
三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价	郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)
太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素	车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)
太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险	张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)
岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)
西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例	詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)
不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析	李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)
滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献	李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)
荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)
富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析	张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)
基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例	安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)
于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系	王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)
人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响	刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)
共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响	许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)
模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响	王兵,温奋翔,肖波 (3447)
对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为	周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲锋,张振国,展惠英 (3453)
多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究	尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)
某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究	吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)
Fe ⁰ -PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制	卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)
EDTA-nSiO ₂ 纳米颗粒对 Cd ²⁺ 的吸附	蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)
硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征	沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)
人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能	崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)
生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能	牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)
甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系	刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)
光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制	胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)
宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响	王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)
北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价	董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)
红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应	贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)
外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应	辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)
改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应	杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)
生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果	周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)
长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响	赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)
应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响	曾清苹,何丙辉 (3590)
三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化	隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)
外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH ₄ 、CO ₂ 排放的短期影响	胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)
模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO ₂ 通量变化及其影响因素	杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)
太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性	严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)
生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响	王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)
氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响	辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)
冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响	李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)
堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究	李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)
酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响	刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)
《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289,3321,3422)	

太湖不同富营养化水域砷的分布特征及其环境影响因素

车霏霏^{1,2}, 王大鹏^{1,2}, 甄卓¹, 颜昌宙^{1*}, 王灶生¹

(1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对夏季与冬季太湖不同营养水平湖区(竺山湾、梅梁湾、贡湖湾和南太湖)上覆水的砷含量及水质参数进行调查, 运用多元分析技术分析砷的空间与季节分布特征及其与水质参数之间的关系。结果表明, 北部湖区(竺山湾、梅梁湾和贡湖湾)水体中总砷(TAs)、砷酸盐[As(V)]、亚砷酸盐[As(III)]及甲基砷(MMA+DMA)的平均含量(2.58~3.34、1.37~2.34、0.53~0.64 和 0.16~0.36 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)均高于南太湖(1.73、1.10、0.31 和 0.10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 显示了砷在太湖北部与南部的空间分布差异。此外, 夏季 TAs、As(V)、As(III)和甲基砷的平均含量分别为 3.40、2.06、0.73 和 0.25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均高于冬季(1.78、1.10、0.30 和 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 呈现明显的季节分布特征。因子分析与冗余分析结果进一步表明, 总磷(TP)、总铁(TFe)和叶绿素 a(Chl-a)是影响太湖水体砷时空分布的关键环境因子。其中, TP、TFe 与太湖水体中 TAs 和 As(V)的分布存在显著正相关; Chl-a 含量对 As(III)和甲基砷的分布有显著影响, 推测浮游植物(Chl-a)对砷还原和生物甲基化具有一定的调控作用。

关键词: 砷形态; 水质参数; 砷转化; 富营养化; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3340-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.09.012

Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors

CHE Fei-fei^{1,2}, WANG Da-peng^{1,2}, ZHEN Zhuo¹, YAN Chang-zhou^{1*}, WANG Zao-sheng¹

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A detailed field survey of arsenic species and water quality parameters was conducted in different eutrophic regions of Lake Taihu (Zhushan Bay, Meiliang Bay, Gonghu Bay and Southern Taihu) in summer and winter. Furthermore, spatial and seasonal distributions of arsenic species and their relations to water quality parameters were investigated with multivariate analysis techniques. Higher average contents of total arsenic (TAs), arsenate [As(V)], arsenite [As(III)] and methylarsenicals [sum of monomethylarsenic acid (MMA) and dimethylarsenic acid (DMA)] were observed in northern regions (including Zhushan Bay, Meiliang Bay, and Gonghu Bay) (TAs: 2.58-3.34 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, As(V): 1.37-2.34 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, As(III): 0.53-0.64 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, methylarsenicals: 0.16-0.36 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), compared to those in Southern Taihu (1.73, 1.10, 0.31, 0.10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). The results exhibited obvious spatial characteristics of arsenic species in the surface water of Lake Taihu. Besides, average values of TAs, As(V), As(III) and methylarsenicals in summer were 3.40, 2.06, 0.73 and 0.25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, higher than those in winter (1.78, 1.10, 0.30, 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), reflecting significant seasonal characteristics of arsenic distribution. Factor analysis revealed the significant relationships of TAs and As(V) with several water quality parameters, which suggested that spatial and seasonal distributions of TAs and As(V) in Lake Taihu were affected by external pollution and internal arsenic release from sediments. Redundancy analysis further indicated significant effects of total phosphorus (TP) and total iron (TFe) on the distributions of TAs and As(V). At the mean time, the above statistical analyses exhibited that As(III) and methylarsenicals were positively correlated with chlorophyll-a (Chl-a). A large amount of microalgae could accumulate As(V) and transform it more strongly to As(III) and methylarsenicals in eutrophic regions when compared to mesotrophic region, especially in summer, reflecting the regulation of microalgae on arsenic biotransformation.

Key words: arsenic species; water quality parameters; arsenic transformation; eutrophication; Lake Taihu

砷在天然水体中多以砷酸盐[As(V)]、亚砷酸盐[As(III)]等无机形态和一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)等有机形态存在^[1,2], 因其不同的生物毒性效应与环境健康风险引起世界范围内的广泛关注。As(V)作为氧化环境中的热力学稳定形态多存在于富氧水体, 而As(III)多存在于还原性的缺氧水体中^[2]; MMA及DMA作为微生物甲基化作用的产物, 在水环境中含量相对更低^[1]。当砷的形态

发生改变时, 其理化性质也随之改变, 从而引起其在环境中的迁移特性及毒性的改变^[3]。

有研究表明, 砷在天然水体中的迁移与转化可能受到水体富营养化的影响^[4~7]。水体富营养化不

收稿日期: 2016-02-19; 修订日期: 2016-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277136); 国际科技合作与交流专项(2011DFB91710)

作者简介: 车霏霏(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水生生态与水环境过程, E-mail: ffche@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: czyan@iue.ac.cn

仅能导致蓝绿藻生物量的快速增加,还可引起水体 pH、氧化还原电位、溶解氧、溶解性有机碳等多种水质参数的变化^[8],水质条件的变化可直接或间接地影响水体中砷的化学形态转化。目前,天然水系中砷的生物地球化学研究多侧重于砷污染水平、分布特征、污染来源、赋存形态和风险评估等方面^[9-12],而涉及富营养化对水体砷形态分布与生物转化影响方面的研究较少,尤其缺少基于多元统计分析的环境影响因素研究。

太湖是中国第二大淡水湖泊,位于江苏省境内东南部,相连通的河流计 220 余条。自 20 世纪 80 年代后期起,伴随着周边地区社会经济的快速发展,大量污染物不断进入水体,使得太湖不仅承受着水体富营养化的困扰,同时也面临类金属砷污染问题^[13,14]。国内一些学者调查发现砷在太湖水相、沉积物、生物相中均有检出^[9,15];还有研究表明砷在水相与悬浮相之间的分配可能受到浮游藻类及风浪扰动的影响^[16,17]。这些研究主要关注总砷(TAs)在不同介质中的分布特征以及影响其分配特征的生物环境因子,但对水相中不同化学形态的砷分布以及砷形态分布与富营养化和环境因子的联系鲜见报道。因此,本文以太湖作为研究对象,选取竺山湾、梅梁湾、贡湖湾与南太湖作为不同营养化水域的代表,调查了夏季与冬季不同营养化水域中砷的形态及其分布特征,并在此基础上运用多元统计分析探讨了主要水质参数对太湖砷分布特征的影响,以期深入理解富营养化湖泊中砷的生物地球化学及其环境风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据太湖水质调查结果^[18]及 9 个湖区不同营养水平水质的出现频次^[13],本研究选择竺山湾与梅梁湾作为重度富营养化湖区的代表,贡湖湾与南太湖则分别作为中度富营养化和中营养化湖区的代表,并在 4 个湖区各选取 3 个采样点位(图 1),分别于 2014 年 7 月(夏季)与 2015 年 1 月(冬季)对水面下约 50 cm 处的水体进行采集。用于测定砷的水样需用 0.45 μm 滤膜过滤,同时为防止水体中砷形态改变,需在现场加入 HNO_3 将水样酸化至 pH 值为 3~4 的范围,并于 -20°C 的冰箱中保存,尽快完成测定。

1.2 样品测定

1.2.1 砷含量测定

水样中的 TAs 采用电感耦合等离子体质谱仪

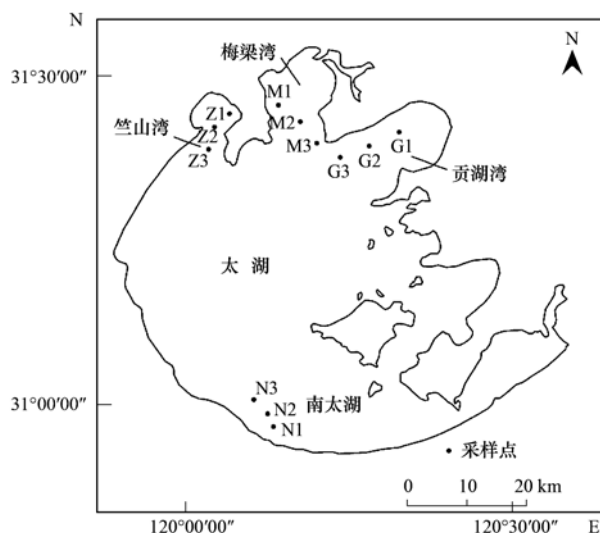


图 1 太湖采样点位分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Lake Taihu

(ICP-MS, Agilent7500cx, 美国)在氦气模式下进行测定。砷形态[As(V)、As(III)、MMA、DMA]的测定参照 Zhu 等^[19]的方法,由高效液相色谱(HPLC, Agilent1200, 美国)与 ICP-MS 联用,在 PRP(苯乙烯-二乙烯基苯共聚物)-X100(250 mm $\times$ 4.1 mm)型阴离子交换柱(Hamilton, 瑞士)中使用流动相对各种砷形态进行分离;流动相洗脱运行程序为 1.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

为实现质量控制,在砷含量的测定中,选取⁷²Ge 与¹⁰³Rh 作为内标以确保信号稳定性;每个样品做 3 次重复测定,使相对误差 $< 10\%$;每 15 个样品后对砷标准样品进行一次回测,确保测定的准确性。TAs、As(V)、As(III)、MMA 与 DMA 的检出限分别为 0.01、0.20、0.07、0.12 与 0.07 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2.2 水质参数测定

水体的 pH、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chl-a)、水温(WT)等水质参数由多参数水质分析仪(YSI 6600V2, 美国)进行现场监测。水体总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定。水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,采用 ICP-MS 对总铁(TFe)与总锰(TMn)含量进行测定。水样中的溶解性有机碳(DOC)经过滤后采用 TOC 元素分析仪(SHIMADZU TOC-Vcph, 日本)测定。

1.3 数据处理

由于 MMA 作为甲基化的中间产物,其含量较 DMA 更低,因此将 MMA 与 DMA 的含量加和,并在后续统计分析中统一表示为甲基砷(MMA + DMA)。

磷含量及水质参数的季节间差异使用 t 检验,湖区间差异使用单因素方差分析;磷含量与水质参数间的相关性由 Pearson 相关系数进行计算;同时,采用因子分析对多个变量进行降维,以便分析主要水质参数对磷分布的影响. 以上统计分析均在 SPSS 19.0 中进行. 冗余分析在 Canoco for Windows 4.5 中完成,用于筛选对磷分布有显著影响的关键环境因子.

2 结果与分析

2.1 水质参数变化特征

从空间分布来看(表 1),TP、TN、Chl-a 与 TFe 在竺山湾、梅梁湾以及贡湖湾的平均含量均高于南太湖,其中竺山湾与梅梁湾的 TP、Chl-a 与 TFe 的平均含量明显高于贡湖湾,表现出营养盐与 Chl-a 含

量等水质参数在不同富营养化湖区空间分布差异. 单因素方差分析结果显示,竺山湾的 TP、TN 与 DOC 含量显著高于其他 3 个湖区($P < 0.05$);而梅梁湾和竺山湾的 Chl-a 含量也显著高于贡湖湾和南太湖($P < 0.05$),与重富营养化湖区频发的水华暴发现象相一致.

从季节分布来看,一些水质参数也呈现规律性变化. t 检验结果显示,除 TP、TN、Chl-a 与 TMn 以外,其他水质参数在夏季与冬季均出现显著性差异($P < 0.05$),其中 DOC、WT、pH、TFe 在夏季有更高值,而 DO 则在冬季有更高值. TP 在夏季水华暴发期间的含量略低于冬季(特别是在贡湖湾和南太湖),这可能是由于浮游植物对磷的大量利用所引起的局部短期缺磷现象;此外,夏季采样前的连续降雨也可能稀释水体中的磷.

表 1 水质参数的空间与季节特征

Table 1 Spatial and seasonal characteristics of water quality parameters

水质参数	空间分布				季节分布	
	竺山湾	梅梁湾	贡湖湾	南太湖	夏季	冬季
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.17 ± 0.04	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.09 ± 0.06	0.11 ± 0.04
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.56 ± 1.42	1.94 ± 0.92	2.11 ± 0.92	1.61 ± 0.32	2.01 ± 0.83	3.11 ± 1.84
Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	9.38 ± 4.25	9.88 ± 2.08	4.22 ± 1.82	2.80 ± 0.44	7.47 ± 3.88	5.68 ± 4.01
DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.96 ± 0.93	4.63 ± 0.82	3.68 ± 1.43	3.75 ± 0.51	5.10 ± 1.08	3.91 ± 1.28
pH	7.69 ± 0.94	8.11 ± 0.76	7.87 ± 0.72	8.05 ± 0.53	8.57 ± 0.21	7.28 ± 0.36
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.99 ± 1.98	10.50 ± 3.34	9.89 ± 2.79	9.77 ± 1.89	8.29 ± 1.26	12.79 ± 1.05
WT/ $^{\circ}\text{C}$	19.64 ± 14.22	18.77 ± 13.44	18.47 ± 13.07	18.99 ± 13.68	31.38 ± 0.94	6.56 ± 0.17
TFe/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	199.68 ± 141.62	177.29 ± 144.11	165.53 ± 137.71	130.30 ± 103.93	287.28 ± 47.99	49.12 ± 14.70
TMn/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	36.20 ± 18.75	20.02 ± 8.74	18.72 ± 8.29	21.40 ± 5.89	24.06 ± 13.62	24.11 ± 12.83

2.2 太湖上覆水的砷分布

2.2.1 砷的空间分布特征

太湖上覆水中 TAs 平均含量的空间波动范围不大($1.73 \sim 3.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),与 Zhang 等^[9]的调查结果基本一致. 水体中的砷主要以 As(V) 和 As(III) 形式存在,其中 As(V) 占无机砷含量的 56% ~ 82%,是太湖主要的无机砷形态;而甲基砷作为水体中主要的有机形态,仅占 TAs 含量的 7% ~ 14%.

太湖水体中砷含量与水体的营养水平有关. 由图 2 可知,TAs 与各形态砷在竺山湾、梅梁湾、贡湖湾(富营养化)的含量均高于南太湖(中营养化),特别是 TAs 与 As(III) 在太湖北部与南部呈现显著的统计学差异($P < 0.05$);此外,TAs 与 As(V) 在竺山湾的平均含量高于梅梁湾和贡湖湾,而梅梁湾的甲基砷平均含量则显著高于竺山湾和贡湖湾($P < 0.05$).

2.2.2 砷的季节分布特征

从季节变化来看,夏季 TAs 的含量范围为 2.38

$\sim 5.06 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,冬季 TAs 的含量范围为 $0.92 \sim 2.56 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3),各湖区夏季 TAs 含量均高于冬季;就不同砷形态的季节变化而言,除贡湖湾的 As(V) 和竺山湾的 As(III) 外,As(V)、As(III) 和甲基砷在夏季的平均含量均高于冬季(图 4). t 检验结果表明,TAs、As(V) 和 As(III) 的平均含量均存在显著的季节性差异($P < 0.05$). 贡湖湾 As(V) 与竺山湾 As(III) 冬季含量偏高可能主要是由于采集水样时风浪较大,水流扰动引起了湖底沉积物的再悬浮及其中砷的释放^[20],造成冬季水体砷含量的波动.

2.3 太湖砷分布与水质参数的关系

2.3.1 相关分析

众所周知,水体富营养化会引起水质条件的恶化,而不同水质参数的变化可影响砷在水体中的迁移转化. 为了分析水质参数对砷分布特征的影响,本研究中使用 Pearson 相关系数计算多种水质参数与各砷形态含量之间的相关性(表 2). 结果显示,

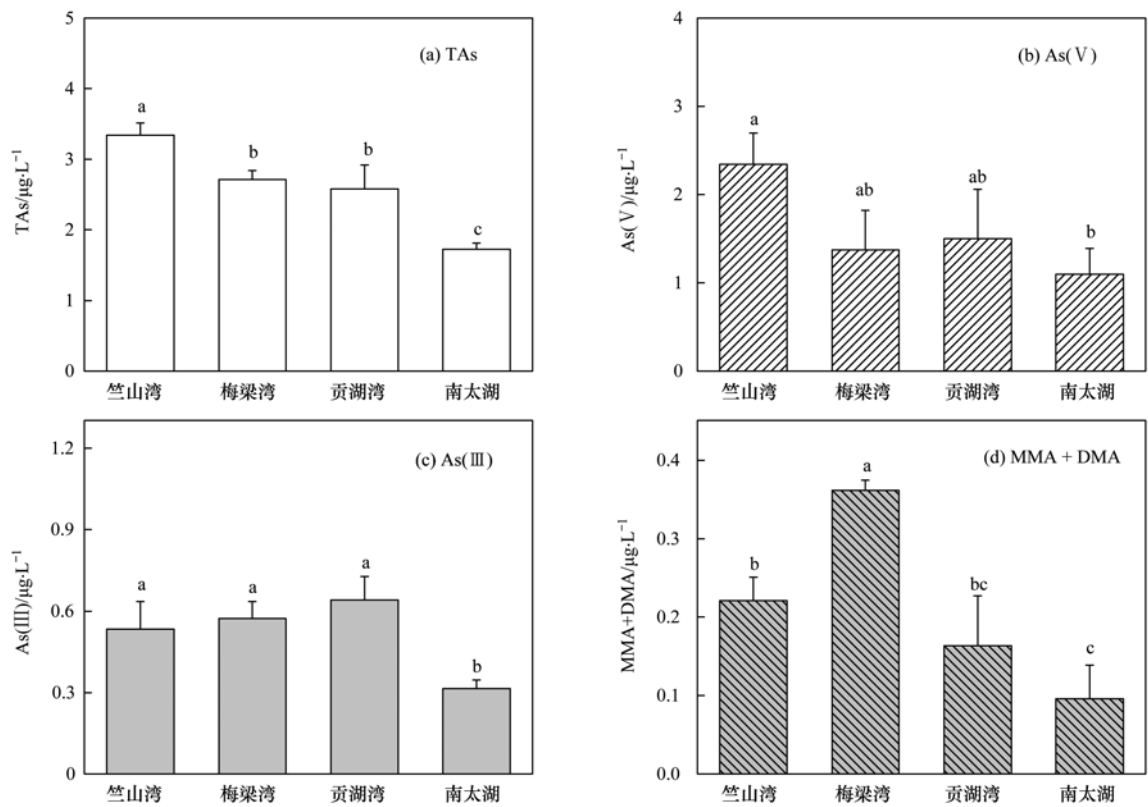


图2 太湖各湖区水体砷的平均含量(夏冬两季)
Fig. 2 Average concentrations (summer and winter) of As species in different regions of Lake Taihu

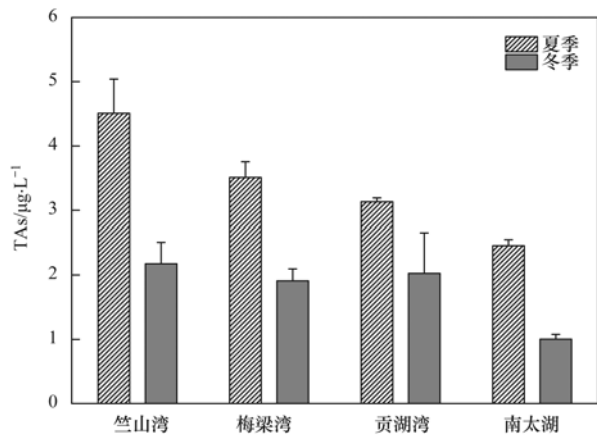


图3 太湖 TAs 含量的季节分布
Fig. 3 Seasonal distribution of TAs in Lake Taihu

TAs 含量与 Chl-a、DOC、WT、pH 和 TFe 均存在显著正相关,且与 DO 呈负相关。从砷形态上来看,As(V)含量与 TP、WT 和 TFe 均存在正相关关系;As(III)含量除与 DO 存在显著负相关外,还与 WT、pH、TFe 和 DOC 呈显著正相关;甲基砷则与 Chl-a 和 DOC 存在显著正相关,反映了浮游藻类对砷的甲基化作用。

2.3.2 基于主成分的因子分析

由上述的相关分析可知,砷含量与多种水质参

数均存在相关性。为了探究水质参数变化与各砷形态来源间的关联性,本研究对 13 个变量(包括 9 项水质参数、TAs 及 3 种砷形态)综合进行了基于主成分的因子分析($n=24$)。SPSS 中调查要素分析显示 KMO 检验值为 $0.537 > 0.5$, Bartlett 球形检验结果为 $P=0.000$,说明数据可进行因子分析^[21]。由表 3 可知,特征值 >1 的第一主成分(F1)、第二主成分(F2)和第三主成分(F3)的累积方差贡献率达到 82.27%,可概括初始变量的大部分信息。

F1 中 WT 与 pH 在正轴方向有较大的因子载荷量,而 DO 在负轴方向载荷量较大。由表 1 可知受夏季水华暴发及微生物活动增加的影响,这几项水质参数均表现出其在夏季与冬季间明显的季节差异,因此 F1 反映了水质的季节变化情况;TFe 与 F1 的密切关系同样反映出 TFe 的季节性变化。此外,TAs (因子载荷 0.778)、As(V) (0.647) 与 As(III) (0.503) 也与 F1 存在一定的关联性,这表明 TAs、As(V) 与 As(III) 的分布可能受到 WT、pH、DO 等季节性变化的水质参数的影响,并且存在与 TFe 同源的可能性。

F2 中的 TP 与 TN 是引起富营养化的主要营养盐,其因子载荷量分别为 0.937 和 0.767,与 F2 存

在密切关系. 因此 F2 以 TP、TN 为代表,反映了水体的营养盐负荷. 同时,F2 中 As(V)与 TMn 也有

相对较大的载荷量,这表明砷和锰可能与氮、磷存在共同来源.

表 2 砷含量与水质参数的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between the concentrations of arsenic species and water quality parameters

项目	TP	TN	Chl-a	DO	DOC	WT	pH	TFe	TMn
TAs	0.313	0.049	0.489 *	-0.497 *	0.657 **	0.786 **	0.645 **	0.861 **	0.265
As(V)	0.462 *	0.199	0.280	-0.255	0.403	0.540 **	0.403	0.635 **	0.379
As(III)	-0.178	-0.078	0.290	-0.608 **	0.481 *	0.631 **	0.526 **	0.660 **	0.050
MMA + DMA	0.020	-0.108	0.652 **	-0.180	0.518 **	0.331	0.335	0.417 *	0.040

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

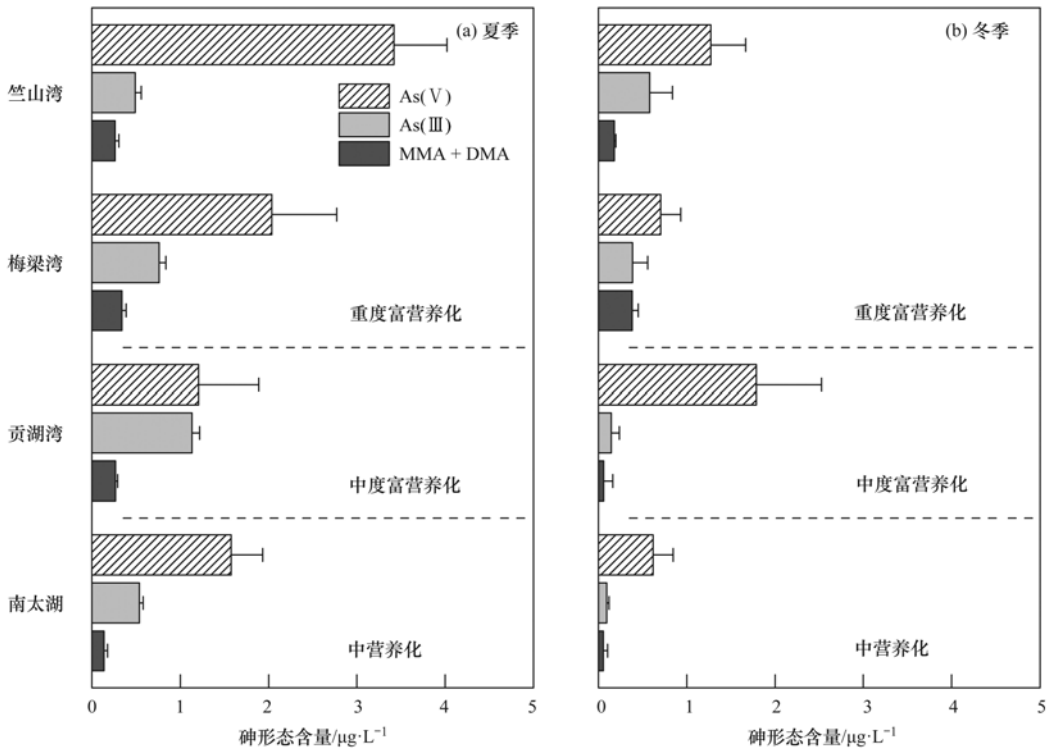


图 4 太湖砷形态的季节分布

Fig. 4 Seasonal distribution of As speciation in Lake Taihu

F3 中 Chl-a 与 DOC 均有较大的载荷值,反映了水体的浮游藻类含量. 与 F3 显著相关的还有甲基砷与 As(III),这表明甲基砷与 As(III)的来源与分布可能受到浮游藻类的影响.

2.3.3 冗余分析

本研究在因子分析结果的基础上进一步对各种砷形态与水质参数进行冗余分析,以探讨影响太湖不同形态砷分布的关键环境因子. 分析结果表明, Monte Carlo 置换检验下筛选的 TFe ($F = 10.196, P = 0.001$)、TP ($F = 7.184, P = 0.011$)、Chl-a ($F = 4.475, P = 0.040$) 共解释了 83.1% 的砷形态变化信息,第一、二轴累积解释了 81.5% 的砷形态变化信息和 95.3% 的砷形态-环境因子关系信息.

图 5 中 TAs 及 As(V)与 TP 和 TFe 的显著相关性表明,随着水体 TP 与 TFe 含量的升高,TAs 和 As(V)的含量也出现明显升高趋势; As(III)及甲基砷与 Chl-a 存在显著正相关,显示 Chl-a 含量对太湖水体 As(III)和甲基砷的分布影响显著,推测浮游植物(Chl-a)对砷还原和生物甲基化具有一定的调控作用.

3 讨论

3.1 富营养化对 TAs 和 As(V)分布的影响

与 Hasegawa 等^[5]的报道相似,受营养水平的影响,太湖上覆水中 TAs 和 As(V)的含量变化存在明显的空间与季节分布规律.

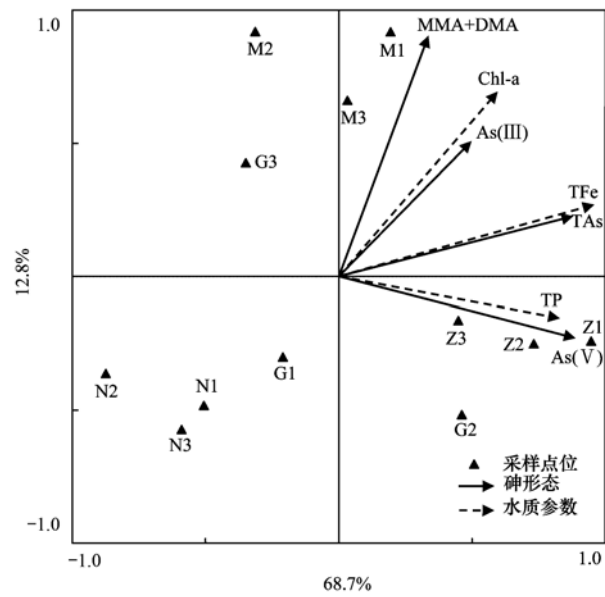


图5 砷与水质参数冗余分析排序图

Fig. 5 Correlation plots of the redundancy analysis on the relationship between As species and water quality parameters

表3 旋转因子载荷矩阵¹⁾

Table 3 Rotated component matrix

项目	旋转后的因子载荷率		
	F1	F2	F3
特征值	4.996	3.255	2.444
方差贡献率/%	38.432	25.036	18.798
累积方差贡献率/%	38.432	63.468	82.266
TAs	0.778	0.422	0.315
As(V)	0.647	0.634	
As(III)	0.503		0.618
MMA+DMA			0.895
TP		0.937	
TN	-0.401	0.767	
Chl-a		0.428	0.743
DO	-0.878	0.378	
DOC	0.361	0.510	0.605
WT	0.956		
pH	0.896		
TFe	0.938		0.307
TMn		0.746	

1) 载荷率小于0.3的值未列出

水体中砷的分布特征主要受到外源污染和内源释放的影响。资料显示太湖北部周边经济发达,工业分布较为密集,且北部沿岸分布有梁溪河、望虞河、太滆运河等多条入湖河流^[22,23];受周边地区工、农业及生活污水排放的影响,北部湖区特别是竺山湾和梅梁湾的水体与沉积物中有相对较高的营养盐及重金属含量^[24];同时,富集在沉积物中的砷在微生物及环境条件影响下可重新释放到水体中^[5,20,25],造成水体中砷含量的升高。太湖南部与北

部湖区不同,分布在南部沿岸的长兜港、太浦河等河流有较大出湖水量^[22],且研究表明太湖西南部沉积物中砷的污染相对较轻^[26],因此南太湖水体的砷含量普遍低于北部湖区。此外,因子分析结果显示,As(V)与水体的氮、磷可能存在共同的污染来源。众所周知,砷与氮、磷为同族元素,该族元素单质及其化合物在农药、化肥等方面有重要应用,而农药和化肥的使用也是氮、磷营养盐和砷的重要人为来源^[27,28]。已有的研究表明,目前农业面源污染是太湖污染负荷的主要来源之一^[27],由此推测太湖外源性的氮、磷和砷可能共同来源于流域的农业面源污染(化肥和农药等),从而使得氮、磷和砷在太湖水体中呈现相似的空间分布特征;同时,冗余分析进一步显示TP与TAs和As(V)的分布呈显著相关。

TAs和As(V)的季节变化特征也受到内源释放的影响。据金相灿等^[29]的报道,太湖北部沉积物中氧化物以氧化铁、氧化铝等为主;而进入沉积物的砷极易吸附在富含氧化铁等矿物颗粒表面^[30],通过吸附-解吸过程在沉积物与水相间进行重新分配。夏季水温升高,引发富营养化水体中蓝藻的大量快速繁殖与死亡,从而引起水体pH升高和底层水溶解氧下降,以及沉积物表面有机质含量的上升,使沉积物表面处于还原状态^[25],这一环境条件促进了氧化铁的还原性溶解以及砷的解吸与向水体的释放,因此夏季太湖水体中砷的含量伴随着TFe的升高而升高。这一内源释放过程在因子分析中表现为TAs和As(V)与WT、pH、DO和TFe等水质参数的密切相关性,且冗余分析结果表明TFe与TAs及As(V)的分布存在显著相关,与Sohrin等^[4]及Baeyens等^[10]的调查结果相一致。

此外,As(V)作为水体中砷的主要存在形态,其内源释放也可能受到磷的调控作用。AsO₄³⁻与PO₄³⁻相似的理化性质,使得PO₄³⁻能通过竞争吸附方式与沉积物颗粒表面的砷进行离子交换,使AsO₄³⁻脱离黏土矿物的吸附表面并释放到上覆水中^[30],引起水体As(V)含量的升高。

3.2 富营养化对As(III)和甲基砷分布的影响

浮游藻类、细菌与真菌作用下砷的还原和甲基化是环境中砷形态转化的主要过程。从太湖水体中As(III)和甲基砷的分布情况来看,营养水平显著影响着砷的氧化还原及甲基化。

As(III)和甲基砷在太湖北部与南部的空间分布上存在明显差异。已有研究表明,蓝绿藻可大量累积As(V)并在细胞内对其进行还原和甲基化作

用,后将还原产物和甲基化产物释放入水体,引起水体中As(Ⅲ)和甲基砷含量的增加^[31]。受水体高营养盐负荷及夏季东南季风的影响,北部湖区蓝藻水华频发,导致竺山湾、梅梁湾和贡湖湾有相对南太湖更高的Chl-a含量,大量的浮游藻类明显促进了水体中As(V)向As(Ⅲ)和甲基砷的生物转化作用;而处于中营养水平的南太湖则属于草型湖泊,浮游藻类含量相对较少,因此南太湖的As(Ⅲ)和甲基砷含量也相对更低。由因子分析及冗余分析可知,As(Ⅲ)和甲基砷与Chl-a含量之间均存在正相关关系,与前人的研究结果^[6]相似,这显示了Chl-a对As(Ⅲ)和甲基砷分布的调控作用。值得注意的是,处于重度富营养水平的竺山湾和梅梁湾水体中As(Ⅲ)的平均含量较贡湖湾略低,这可能是由于大量藻类将其体内的As(Ⅲ)进行甲基化或进一步转化为更复杂的有机砷化合物(包括三甲基砷氧化物、砷甜菜碱、砷胆碱、砷糖等)^[31],竺山湾和梅梁湾水体中更高的Chl-a及甲基砷含量可印证这一过程。其中,梅梁湾甲基砷的平均浓度显著高于竺山湾,很可能是因为竺山湾的一部分甲基砷在浮游藻类的作用下转化成了更复杂的有机砷化合物。从包括甲基砷在内的总有机砷(TOrgAs,TAs与无机砷含量之差)含量来看,竺山湾的TOrgAs平均含量($0.59 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)与梅梁湾($0.64 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)相差不大,且均明显高于贡湖湾($0.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和南太湖($0.31 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的TOrgAs平均含量,这与Chl-a含量在各湖区的分布情况一致。该结果也间接印证了浮游藻类对砷生物转化的调控作用。

调查结果显示,夏季As(Ⅲ)的平均含量($0.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)显著高于冬季的平均含量($0.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),表明As(Ⅲ)也存在明显的季节分布特征。据Lehman等^[32]的报道,温度对藻类的生长有明显的调控作用;受夏季水温的影响,浮游藻类生物量的增长明显高于冬季,从而促进了夏季As(V)向As(Ⅲ)的生物还原。除浮游藻类对砷的生物氧化还原作用外,As(Ⅲ)与As(V)间的转化也可能受到水体DO的影响。与冬季相比,夏季微生物活动的显著增加可引起水体溶解氧的大量消耗,较低的溶解氧含量(缺氧环境)也会促进As(V)向As(Ⅲ)的还原^[5]。因此在因子分析中,As(Ⅲ)与WT、DO、pH等季节性变化的水质参数也存在相关关系,显示出水质条件变化对As(Ⅲ)与As(V)间形态转化的调控作用。此外,研究表明As(Ⅲ)在铁氧化物表面有较强的吸附作用^[28],因此夏季水体中的As(Ⅲ)

也可能来自铁氧化物表面的解吸,在多元统计分析结果中表现为As(Ⅲ)与TFe的显著正相关性;另一方面,水华暴发会引起DOC含量的升高,而DOC的存在能增加沉积物表面金属氧化物的溶解^[28],对As(Ⅲ)的释放也有促进作用。

夏季甲基砷的平均含量($0.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)也高于冬季甲基砷的平均含量($0.17 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这种现象在贡湖湾和南太湖尤为明显,这可以归结为夏季大量增加的浮游藻类对水体中砷的甲基化作用。同时,因子分析显示太湖水体中的甲基砷与DOC呈正相关性,与陈春霄等^[8]和MacMillan等^[33]研究中甲基汞和DOC的相关性类似,可以推测夏季水华暴发引起的水体DOC含量升高刺激了砷的生物可利用性^[34]以及微生物的甲基化活性^[35],使水体中甲基砷的含量升高。然而,从 t 检验结果来看,竺山湾与梅梁湾水体中的甲基砷不存在显著的季节性差异,特别是梅梁湾夏冬两季的甲基砷含量几乎没有变化。除了考虑夏季甲基砷向复杂有机砷化合物的转化外,这可能也与夏季甲基砷的降解有关。Maki等^[36]的研究结果显示,夏季较高的水温(30°C)会引起富营养化水体中DMA的降解,使其含量相近甚至低于冬季DMA的水平,因而可能导致了竺山湾和梅梁湾水体中甲基砷微弱的季节性变化。

4 结论

(1)太湖水体中砷的时空分布特征明显,从空间分布来看,TAs、As(V)、As(Ⅲ)与甲基砷在竺山湾、梅梁湾与贡湖湾(富营养化)的平均含量均高于南太湖(中营养化);从季节分布来看,除贡湖湾的As(V)和竺山湾的As(Ⅲ)外,夏季TAs、As(V)、As(Ⅲ)与甲基砷的平均含量均高于冬季,其中TAs、As(V)与As(Ⅲ)在统计学上呈现显著季节差异。

(2)通过因子分析发现,太湖砷的空间和季节分布受到多重环境因素的控制。冗余分析进一步表明,砷的分布特征可能主要受到TP、TFe和Chl-a含量的影响;其中TAs和As(V)与TP和TFe呈正相关,表明TP与TFe对TAs和As(V)的分布有显著影响;而As(Ⅲ)和甲基砷与Chl-a含量密切相关,显示Chl-a含量对太湖水体中As(Ⅲ)和甲基砷的分布存在显著影响。

致谢:本研究在采样及一些水质参数测定过程中,得到了中国科学院南京地理与湖泊研究所朱广伟研究员及其研究组的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Cullen W R, Reimer K J. Arsenic speciation in the environment [J]. Chemical Reviews, 1989, **89**(4): 713-764.
- [2] Rahman M A, Hassler C. Is arsenic biotransformation a detoxification mechanism for microorganisms? [J]. Aquatic Toxicology, 2014, **146**: 212-219.
- [3] 王娟, 韩涛, 司友斌. *Shewanella oneidensis* MR-1 对不同价态砷的生物转化与甲基化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3396-3402.
- [4] Sohrin Y, Matsui M, Kawashima M, et al. Arsenic biogeochemistry affected by eutrophication in Lake Biwa, Japan [J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(10): 2712-2720.
- [5] Hasegawa H, Rahman M A, Kitahara K, et al. Seasonal changes of arsenic speciation in lake waters in relation to eutrophication [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(7): 1684-1690.
- [6] Dos Anjos V E, da C Machado E, Grassi M T. Biogeochemical behavior of arsenic species at Paranaguá Estuarine Complex, Southern Brazil[J]. Aquatic Geochemistry, 2012, **18**(5): 407-420.
- [7] Rahman M A, Hasegawa H. Arsenic in freshwater systems: influence of eutrophication on occurrence, distribution, speciation, and bioaccumulation [J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(1): 304-314.
- [8] 陈春霄, 郑丙辉, 王金枝, 等. 太湖不同营养水平湖区汞的形态和分布特征[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(6): 883-889.
- [9] Zhang N, Wei C Y, Yang L S. Occurrence of arsenic in two large shallow freshwater lakes in China and a comparison to other lakes around the world[J]. Microchemical Journal, 2013, **110**: 169-177.
- [10] Baeyens W, de Brauwere A, Brion N, et al. Arsenic speciation in the River Zenne, Belgium [J]. Science of the Total Environment, 2007, **384**(1-3): 409-419.
- [11] Ren J L, Zhang J, Li D D, et al. Behavior of dissolved inorganic arsenic in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, **57**(11-12): 1035-1046.
- [12] 黄莹, 李永霞, 高甫威, 等. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2046-2053.
- [13] 吕学研, 吴时强, 张咏, 等. 太湖富营养化主要指标及营养水平变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, **25**(4): 1-6.
- [14] Jiang X, Wang W W, Wang S H, et al. Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(9): 1539-1548.
- [15] Zeng J, Yang L Y, Chuai X M, et al. Comparison of metal (loid) concentrations in water, sediments and fish from two large shallow lakes[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, **10**(6): 1209-1218.
- [16] Yang F, Geng D, Wei C Y, et al. Distribution of arsenic between the particulate and aqueous phases in surface water from three freshwater lakes in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(8): 7452-7461.
- [17] 耿頔, 杨芬, 韦朝阳, 等. 风浪扰动对太湖水体中砷在水相-悬浮物相之间分配的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1358-1365.
- [18] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5): 439-445.
- [19] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, et al. High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and nonimpacted Chinese rice [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(13): 5008-5013.
- [20] Wei C Y, Zhang N, Yang L S. The fluctuation of arsenic levels in Lake Taihu[J]. Biological Trace Element Research, 2011, **143**(3): 1310-1318.
- [21] 张文彤, 闫洁. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 218-232.
- [22] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.
- [23] 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 等. 环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1404-1412.
- [24] 狄贞珍, 高泽晋, 张洪, 等. 太湖湖心区的痕量金属历史沉积过程研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2867-2874.
- [25] Liu R B, Yang C L, Li S Y, et al. Arsenic mobility in the arsenic-contaminated Yangzonghai Lake in China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 321-327.
- [26] 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(4): 363-370.
- [27] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析[J]. 环境科技, 2015, **28**(3): 17-21, 26.
- [28] 胡立刚, 蔡勇. 砷的生物地球化学[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 458-466.
- [29] 金相灿, 孟凡德, 姜霞, 等. 太湖东北部沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(3): 388-394.
- [30] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(5): 517-568.
- [31] Wang Y, Wang S, Xu P P, et al. Review of arsenic speciation, toxicity and metabolism in microalgae [J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2015, **14**(3): 427-451.
- [32] Lehman P W, Marr K, Boyer G L, et al. Long-term trends and causal factors associated with *Microcystis* abundance and toxicity in San Francisco Estuary and implications for climate change impacts[J]. Hydrobiologia, 2013, **718**(1): 141-158.
- [33] MacMillan G A, Girard C, Chételat J, et al. High methylmercury in Arctic and subarctic ponds is related to nutrient levels in the warming eastern Canadian Arctic[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(13): 7743-7753.
- [34] Norton G J, Adomako E E, Deacon C M, et al. Effect of organic matter amendment, arsenic amendment and water management regime on rice grain arsenic species [J]. Environmental Pollution, 2013, **177**: 38-47.
- [35] Belzile N, Lang C Y, Chen Y W, et al. The competitive role of organic carbon and dissolved sulfide in controlling the distribution of mercury in freshwater lake sediments[J]. Science of the Total Environment, 2008, **405**(1-3): 226-238.
- [36] Maki T, Hirota W, Ueda K, et al. Seasonal dynamics of biodegradation activities for dimethylarsinic acid (DMA) in Lake Kahokugata[J]. Chemosphere, 2009, **77**(1): 36-42.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (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