

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将求, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征

杨思远¹, 赵剑³, 余华章³, 彭亮^{1,2}, 肖利娟^{1,2*}

(1. 暨南大学生物研究中心, 广州 510632; 2. 广东省水库蓝藻水华防治中心, 广州 510632; 3. 广东省水文局汕头水文分局, 汕头 515041)

摘要: 铁(Fe)和锰(Mn)均为氧化还原敏感性元素,是水质评价的重要指标之一. 为了解南亚热带地区供水水库夏季 Fe、Mn 的垂直分布特征,于 2016 年 7 月调查了粤东地区 9 座水库敞水区湖沼学变量和 Fe、Mn 浓度的垂直分布特征. 在有明显温度分层的深水水库中 Fe、Mn 存在显著的梯度分布,表层水体中总 Fe(TFe)、总 Mn(TMn)以及溶解性 Fe、Mn(DFe、DMn)的浓度显著(TFe, $F=6.708$, $P=0.032$; TMn, $F=9.720$, $P=0.014$; DFe, $F=8.129$, $P=0.029$; DMn, $F=11.125$, $P=0.016$) 低于底层. 5 座深水水库底层水体中 TFe、TMn 平均浓度分别为 $0.399 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.422 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中溶解态离子占 70% 以上,而在没有明显温度分层的浅水水库中,表层水体 TFe、TMn 以及 DFe、DMn 浓度略低于底层但无显著性差异(TFe, $F=0.135$, $P=0.726$; TMn, $F=0$, $P=1$; DFe, $F=0.006$, $P=0.943$; DMn, $F=0.007$, $P=0.936$),4 座浅水水库底层水体中 TFe、TMn 平均浓度分别为 $0.110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且主要以非溶解态存在. 水体中 TFe 和 DFe 浓度与溶解氧(DO)浓度、pH 值和深度呈显著相关关系($P<0.05$),与总磷(TP)、总氮(TN)浓度没有显著相关性. 水体热分层及高的水体稳定性导致 DO 和 pH 值呈现明显的梯度分布,是导致深水水库 Fe、Mn 在水层间形成梯度分布的关键原因. 深水水库底层水体低 DO 浓度和酸性条件有利于沉积物中 Fe、Mn 的释放,是导致 Fe、Mn 以溶解态存在的主要原因. 同时,以红壤为主的土壤类型可能是该地区水体中 Fe、Mn 普遍较高的重要原因. 以上结果表明,南亚热带地区夏季分层稳定的深水水库底层水体普遍存在 Fe、Mn 较高的现象,以深层取水的供水方式易出现 Fe、Mn 浓度超标,湖上层取水则可避免该问题.

关键词: 南亚热带; 夏季; 水库; Fe; Mn; 垂直分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4546-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704233

Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer

YANG Si-yuan¹, ZHAO Jian³, YU Hua-zhang³, PENG Liang^{1,2}, XIAO Li-juan^{1,2*}

(1. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangdong Center for Control and Prevention of Reservoir Cyanobacterial Blooms, Guangzhou 510632, China; 3. Shantou Suboffice, Hydrological Bureau of Guangdong Province, Shantou 515041, China)

Abstract: Iron (Fe) and manganese (Mn) are redox-sensitive elements that are both important chemical indicators of water quality. To study their vertical distribution characteristics in south-subtropical reservoirs during summer, Fe and Mn concentrations in the water column, as well as the physical and chemical conditions of the water, were investigated in the lacustrine zones of nine reservoirs in the eastern of Guangdong Province, in July 2016. These results showed that Fe and Mn exhibited a strong concentration gradient in deep reservoirs due to thermal stratification. The total Fe (TFe), total Mn (TMn), dissolved Fe (DFe), and dissolved Mn (DMn) concentrations in the surface water are significantly lower than in these in bottom zones (TFe, $F=6.708$, $P=0.032$; TMn, $F=9.720$, $P=0.014$; DFe, $F=8.129$, $P=0.029$; DMn, $F=11.125$, $P=0.016$). The average concentrations of TFe and TMn are $0.399 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.422 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively at the bottom five of the deep reservoirs, and the dissolved ions accounted for more than 70% of this concentration. In shallow reservoirs without thermal stratification, TFe, TMn, DFe and DMn concentrations in surface water are lower than those measured at bottom of the reservoir, no significant difference was detected (TFe, $F=0.135$, $P=0.726$; TMn, $F=0$, $P=1$; DFe, $F=0.006$, $P=0.943$; DMn, $F=0.007$, $P=0.936$). The average concentrations of TFe and TMn are $0.110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.089 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively at the bottom of the four shallow reservoirs, and they were present predominantly in particulate form. The concentrations of TFe and DFe correlated significantly ($P<0.05$) with the dissolved oxygen (DO) concentration, pH and depth, but did not significantly correlate with TN or TP concentration in the deep reservoirs. The gradient distributions of DO and pH levels is critical to the gradient distribution of Fe and Mn in deep reservoirs because of water stratification. Low DO concentrations and acidic conditions in these areas contributed to the release of Fe and Mn from sediment and result in high dissociation of these elements in the bottom of deep reservoirs. Simultaneously, high concentrations of Fe and Mn at the bottom of reservoirs may also attribute to the characteristic red soil of this region. The results from this study imply that the high concentrations of

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-29); 广东省应用型重大项目(2015B020235007)

作者简介: 杨思远(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为水库富营养化防治, E-mail: siyuanyoung@126.com

* 通信作者, E-mail: tljxiao@jnu.edu.cn

Fe and Mn common in the bottom of deep reservoirs is associated with the stable stratification of these reservoirs in the summer. The concentrations of Fe and Mn may be exceeded water standards when deep water is taken for public water provision. The problem may be avoided with surface water supplying.

Key words: subtropical; summer; reservoirs; iron; manganese; vertical distribution

Fe 和 Mn 均是氧化还原敏感性元素,在特定环境下,其在水环境中能通过自身的价态转化及其与周围其他物质的相互作用来实现其地球化学循环^[1-3]. 在氧化条件下,Fe、Mn 易形成沉淀,而在还原条件下以溶解态存在,对水质有重要的影响,例如,Fe 及其化合物均为低毒和微毒性,含 Fe 量高的水体呈黄色,有铁腥味,饮水中 Fe 含量较高会影响水的色度和嗅味; Mn 盐毒性不大,但 Mn 含量高的水体呈现黑色,影响水的色度,因此 Fe 和 Mn 是重要的水质评价指标之一^[4-6]. 我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定集中式生活饮用水地表水源地 Fe 的项目标准限值为 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mn 的项目标准限值为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[7].

Fe、Mn 元素在地化循环中均为沉积型循环元素,自然水体中 Fe、Mn 的来源主要有两种途径:地表径流的输入和沉积物释放^[8]. 一般而言,自然水体中 Fe、Mn 元素的浓度不高,但在厌氧环境中,沉积物的 Fe、Mn 释放增强可能导致水体中 Fe、Mn 浓度的升高,尤其在高温、低 pH 值条件下,Fe、Mn 的释放强度将显著增加^[9-11].

我国亚热带地区,属于亚热带季风性气候区,夏季高温,水体易出现稳定分层以及底部溶解氧(DO)较低^[12,13]. 此外,近年来,随着人类活动的加剧,该地区的水库面临越来越严重的富营养化问题,而水体底部厌氧和酸化是水体富营养化的主要表征之一^[14]. 亚热带地区水库尤其是富营养水库,夏季水体分层期间,水体底部易出现厌氧可能导致 Fe、Mn 浓度较高. 为验证该分布特点,本文对广东省粤东地区 9 座不同深度和不同营养状态的水库夏季 Fe、Mn 的垂直分布进行了调查研究.

1 材料与方法

1.1 水库概况

本次调查的粤东地区包括广东省汕头、揭阳、汕尾、潮州 4 市,该地区水库水质相对于粤中、粤西等地区水库较好,部分水库处在贫-中营养状态,有利于本研究的开展,因此本次调查选择该地区 9 座水库为研究对象. 9 座水库均为当地主要的供水源地或备用水源地(图 1). 其中,公平水库、龙颈水库和汤溪水库为大型水库,其他 6 座水库为中型水库(表 1).



图 1 9 座水库的分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling reservoirs

表 1 水库特征及使用现状

Table 1 Reservoir characteristics and function

| 所在市 | 水库名称 | 库容/ m^3 | 敞水区深度/m | 营养状况 | 使用现状 |
|-----|-------|--------------------|---------|------|-----------------|
| 汕头 | 河溪水库 | 1.80×10^7 | 21.5 | 富 | 潮阳区主要水源地 |
| 汕头 | 秋风岭水库 | 6.38×10^7 | 16.3 | 中富 | 潮南区主要水源地 |
| 揭阳 | 龙颈水库 | 1.66×10^8 | 20.6 | 贫中 | 揭阳市备用水源地 |
| 揭阳 | 新西河水库 | 6.29×10^7 | 6.9 | 中富 | 市区主要水源地 |
| 揭阳 | 三坑水库 | 1.51×10^7 | 4.1 | 中 | 普宁市主要水源地 |
| 潮州 | 汤溪水库 | 3.81×10^8 | 22.6 | 中富 | 粤东库容最大水库,黄岗河水源地 |
| 潮州 | 凤凰水库 | 5.99×10^7 | 34.1 | 富 | 潮州市备用水源地 |
| 汕尾 | 赤沙水库 | 1.10×10^6 | 5.3 | 中富 | 市区主要水源地 |
| 汕尾 | 公平水库 | 3.38×10^8 | 9.5 | 中 | 大型水库,备用水源地 |

1.2 样品采集与分析

在水库坝前敞水区(供水区)深度最大的位置设置采样点,于2016年7月25日至29日期间,现场用多参数水质监测仪(YSI6600)每隔1 m测定水温(T)、溶解氧浓度(DO)、pH值;用塞氏盘测定透明度(SD);测深仪测定水深.根据YIS测定的水体温度结构,有明显温跃层(即1 m间隔的水层水温差异大于 1°C)出现的水库定义为深水水库,没有温跃层出现的水库为浅水水库.深水水库采集表层0.5 m,温跃层和距底部1 m深度水层(底层)的水样;浅水水库采集表层0.5 m和距底部1 m深度水层的水样.每层共采集2 L水样,1 L用于测定总铁(TFe)、锰(TMn)和溶解态铁(DFe)、锰(DMn),1 L用于测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)和叶绿素a浓度,其中Fe、Mn、TN、TP和 NH_4^+-N 根据国家水质监测标准方法进行测定^[15].叶绿素a采用反复冻融浸提法测定^[16].同时表层0.5 m和温跃层取样点的距底部深度(BD)的计算用水深减去取样深度(D).

1.3 数据处理

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA, LSD)比较了水层之间的Fe、Mn浓度的差异,采用皮尔森相关性分析(Pearson)分析了Fe、Mn与N、P、深度(D)、距底部深度(BD)、DO、pH值等之间的相关性,通过逐步线性回归模型分析了水库Fe、Mn浓度与其他因子的回归关系,所有分析和作图均在SPSS 22.0、Sigmaplot 12.5中完成.

2 结果与分析

2.1 水体温度、DO浓度和pH值剖面特征

凤凰、汤溪、河溪、秋风岭、龙颈这5座水库水深在16.3~34.1 m之间,平均水深为 $(23.02 \pm 6.64)\text{m}$,有明显的温跃层,为深水水库.它们在上层的0~4 m范围内水温下降缓慢,为变温层;4~20 m范围内水温出现跃变,为温跃层;而在20 m以下水温变化范围非常有限,为均温层.表层DO浓度较高在 $7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,pH值在7.5以上;温跃层DO浓度急剧下降,降为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右;pH值也降到6以下;底层DO浓度最低,平均浓度为 $0.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;pH均值为5.77;3个水层的DO浓度、pH值均有显著差异($P < 0.05$),见图2.

赤沙、公平、新西河、三坑这4座水库深度较浅,水深在4~9.5 m之间,平均深度为 $(6.45 \pm 2.33)\text{m}$,水温降幅较小,没有出现明显的温跃层,基

本处于混合状态,属于浅水水库.表层DO浓度也在 $7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上;pH值为7;底层DO浓度虽然有所下降,但均值也超过 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;pH均值为6.5,两个水层的DO浓度、pH浓度均无显著差异($P > 0.05$),见图2.

2.2 Fe、Mn浓度垂直分布特征

在深水型水库中,表层水体Fe、Mn含量较低,TFe、TMn平均浓度分别为 $0.054\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.059\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DFe、DMn平均浓度分别为 $0.006\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.031\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在温跃层水体中Fe、Mn浓度升高,TFe、TMn平均浓度分别为 $0.117\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.096\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DFe、DMn平均浓度分别为 $0.051\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.027\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在底层水体中,温度和DO都降到了最低,Fe、Mn平均浓度也最高,TFe、TMn平均浓度分别为 $0.399\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.422\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DFe、DMn平均浓度分别为 $0.303\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.326\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.方差分析表明,在深水型水库中底层水体Fe、Mn的平均浓度显著($P < 0.05$)高于表层,且TFe、TMn浓度分别是表层水体的7.4倍和7.1倍(图3).

在浅水型水库中,表层水体TFe、TMn平均浓度分别为 $0.093\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.089\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DFe、DMn平均浓度分别为 $0.021\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.029\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;底层水体TFe、TMn平均浓度分别为 $0.110\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.089\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,DFe、DMn平均浓度分别为 $0.022\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.032\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.随着水体深度的增加,Fe、Mn浓度并没出现明显的梯度变化,底层水体Fe、Mn平均浓度与表层平均浓度并无显著性差异($P > 0.05$),见图3.

进一步方差分析结果表明:深水水库表层TFe、TMn、DFe、DMn与浅水水库表层TFe、TMn、DFe、DMn浓度并无显著性差异($P > 0.05$);而深水型水库底层TFe、TMn、DFe、DMn浓度显著高于浅水型水库底层TFe、TMn、DFe、DMn浓度($P < 0.05$).

2.3 Fe、Mn浓度与其他理化因子的关系

在不区分两种水库类型的条件下,TFe、TMn、DFe、DMn浓度与其他因子的相关性分析中均没有显著性.但在深水水库中TFe和DFe浓度与DO、pH和距底部深度均呈现显著负相关($P < 0.05$);与深度呈现极显著正相关($P < 0.01$).把TFe、TMn、DFe、DMn浓度与TN、TP作相关性分析显示,Fe、Mn与这几种营养盐均无显著相关性.浅水水库的TFe、TMn、DFe、DMn与DO、pH和距底部深度均呈负相关,与深度呈正相关,但所有相关关系均无显著性(表2).

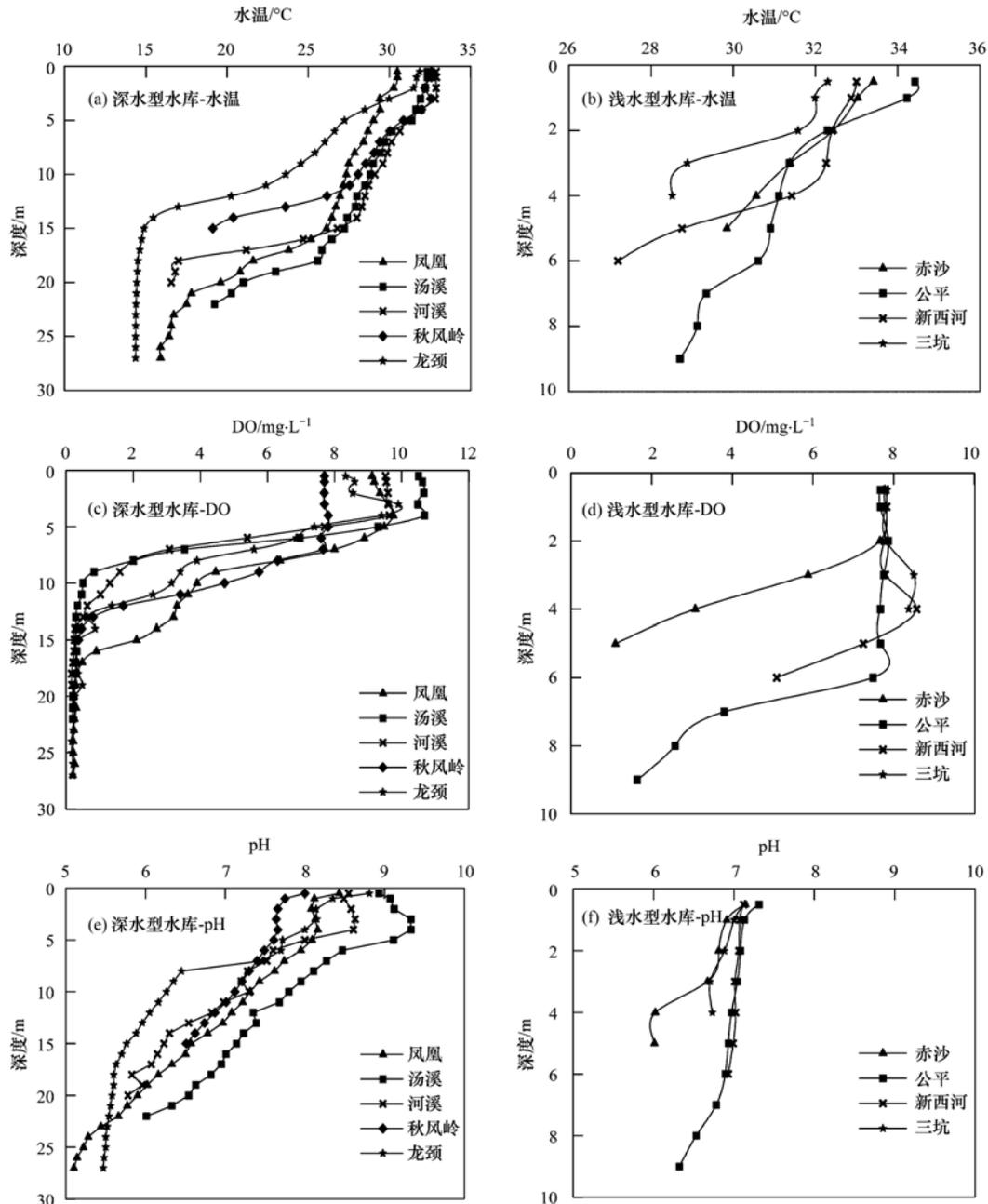


图2 水深大于 10 m 和水深小于 10 m 的水库水温 (T)、溶解氧 (DO) 和 pH 值的垂直剖面特征

Fig. 2 Vertical profiles of water temperature (T), dissolved oxygen (DO) and pH in deep and shallow reservoirs

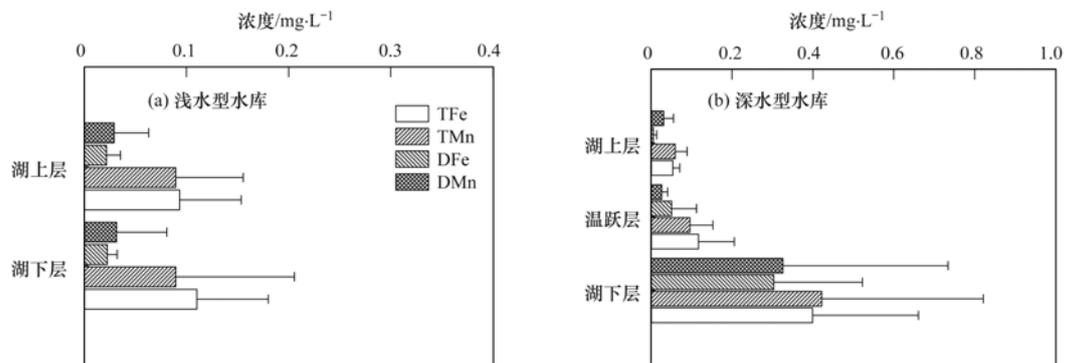


图3 浅水水库和深水水库 Fe、Mn 浓度垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of Fe and Mn concentrations in deep and shallow reservoirs

表 2 Fe、Mn 浓度与环境因子间的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis between Fe and Mn concentrations and associated environmental variables

| | TN | TP | 叶绿素 | DO | pH | 深度(D) | 距底深(BD) |
|-----|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 深水型 | | | | | | | |
| TFe | n. s. | n. s. | n. s. | -0.576 * | -0.570 * | 0.675 ** | -0.624 * |
| TMn | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |
| DFe | n. s. | n. s. | n. s. | -0.556 * | -0.595 * | 0.690 ** | -0.631 * |
| DMn | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |
| 浅水型 | | | | | | | |
| TFe | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |
| TMn | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |
| DFe | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |
| DMn | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. |

1) * 表示显著相关, $P < 0.05$; ** 表示极显著相关, $P < 0.01$; n. s. 表示无显著相关, $P > 0.05$

pH 值、DO 浓度和距底部深度之间存在较大的共线性,即 pH 值和 DO 浓度随距底部深度的降低而

降低. 多元逐步回归分析结果表明深度为决定 TFe 和 DFe 浓度的最重要的变量(表 3).

表 3 深水水库 TFe 和 DFe 与环境因子的多元逐步回归分析

Table 3 Multiple stepwise regression analysis between TFe and TMn concentrations and associated environmental variables in deep reservoirs

| 因变量 | 自变量 | 回归方程 | 样本容量(n) | R^2_{adj} | P |
|-----|-------|----------------------|---------|-------------|-------|
| TFe | 深度(D) | $y = 0.017x + 0.018$ | 15 | 0.413 | 0.006 |
| DFe | 深度(D) | $y = 0.014x - 0.029$ | 15 | 0.436 | 0.004 |

3 讨论

在本次调查期间,两类水库 Fe、Mn 垂直分布特征有着明显差异. 从水体剖面看,深水型水库垂直分布特征明显,TFe、TMn 浓度从表层到底层依次上升,且底层 TFe、TMn 浓度分别是表层的 7.4 和 7.1 倍;而在浅水型水库中,底层 Fe、Mn 浓度虽略高于表层但没有明显差异,垂直分布特征不明显. Fe 和 Mn 都是氧化还原敏感性元素,极易受氧化还原环境的影响,在含氧丰富的水体中,三价 Fe 与氢氧根和磷酸根形成沉淀,Mn 离子与氢氧根、碳酸根结合形成沉淀,而在还原条件下,Fe、Mn 被还原,多以溶解态存在^[17-20]. 本研究的结果表明调查区域的水库表层水体 DO 含量丰富($DO > 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),有利于水体中的 Fe、Mn 形成沉淀往深水层迁移;而 10 m 以下水层基本上处于缺氧条件,DO 浓度低于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有利于 Fe、Mn 被还原以溶解态存在,该条件下,不利于上层沉淀下来的 Fe、Mn 继续沉淀,同时有利于沉积物中的 Fe、Mn 释放到水体中^[21]. 本研究的结果也表明在深水水库中 TFe 和 DFe 的浓度与 DO 浓度、深度(D)和距底深度(BD)有着显著的相关性. 进一步地,在深水水库中,底部高的 Fe、Mn 浓度主要以溶解态(占到总浓度的 70% 以上)存在. 相对于浅水水库,由于底层水体中 DO 相对较高(在 $1 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间),即使靠近底部,底层 TFe

和 TMn 浓度只是略高于表层水体,但没有显著的差异,因此推断,深水水库底层高的 Fe、Mn 浓度是由于富氧的上层沉淀和厌氧条件下沉积物的释放共同导致的.

虽然在我国其他地区(陕西、江苏、贵州)的深水水库也得到类似的 Fe 浓度随水深增加而增加的结果^[22-24](图 4). 但将本研究结果与这些水库的同季节的研究结果相比较,发现本文中水库 Fe 浓度远高于以上水库,尤其是底层水体中的 Fe 浓度比以上水库底层(或上覆水)中的 Fe 浓度高 1~2 个数量级.

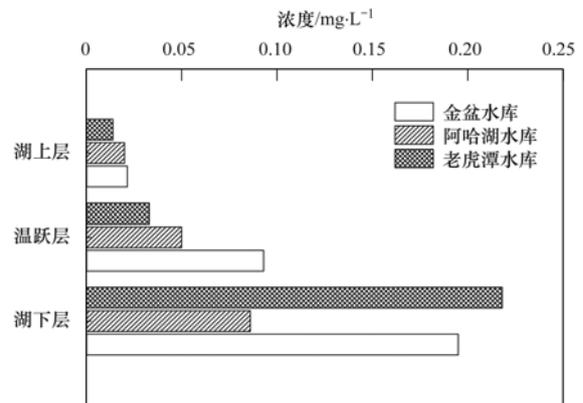


图 4 温带和其他亚热带地区水库总铁垂直分布特征^[22-24]

Fig. 4 Vertical distribution of total Fe concentration in temperate and other subtropical regions

Fe、Mn 以沉积型循环参与地球化学循环,水体

中的 Fe、Mn 浓度很大程度上受流域土壤状况的影响。我国北回归线以南是主要的红壤分布区,红壤中 Fe、Mn 含量相对较高,这可能是该地区水体中 Fe、Mn 浓度较高的主要原因^[25]。此外,水体的 DO 浓度、pH 值和温度对溶解性 Fe、Mn 的浓度有重要的作用,高温、厌氧、酸性条件均有利于 Fe、Mn 以溶解态存在^[11]。广东省大部分地区位于北回归线以南,常年高温,大型水库大部分时期处于分层状态^[12],不利于大气复氧向深水层输送,由于温度分层和水质富营养化,深层水体常呈厌氧、酸性^[26,27]。在这种高温、厌氧、酸性条件下,有利于溶解性 Fe、Mn 以较高的浓度存在。因此,根据我国南亚热带地区土壤类型和气候条件,笔者推断,流域内较高的 Fe、Mn 输入和高温及水体分层是导致该地区深水水库底层 Fe、Mn 浓度相对于其他地区水库更高的主要原因。

相关性分析表明,只有深水水库 TFe、DFe 与 DO 浓度、pH 值、深度和距底深度有显著相关性, TMn 与 DMn 在两类水库中与其他变量均没有显著相关性,这可能是由于自然界中 Fe 的化学活性(金属活动性)要强于 Mn^[28,29]。当外界环境条件发生变化时,在相同时间内 Fe 的形态转化速率要高于 Mn,因此 Fe 比 Mn 要更为敏感,与外界环境的相关性更为显著。进一步多元回归分析结果表明,深度为决定 TFe、DFe 浓度的主要变量,这更加确定了夏季在深水型水库中,Fe 和 Mn 有着明显的垂直分布特征。

4 结论

综上所述,南亚热带地区,Fe、Mn 浓度在水柱中存在明显的梯度分布,水体的 DO 浓度、pH 值和深度是影响 Fe 和 Mn 的浓度的重要因素,水体稳定分层的深水水库底部厌氧和酸性条件有利于沉积物中 Fe 和 Mn 的释放,是导致溶解性 Fe 和 Mn 浓度较高的重要原因。深水水库底层水体 Fe、Mn 浓度常高于我国《生活饮用水卫生标准》,因此采取底层取水的供水方式存在较高的 Fe、Mn 超标风险。

致谢:汕头水文分局的同事们在采样过程中提供帮助,唐鹊辉、卓泉龙、韩诺和陈飞等在实验数据获取方面给予支持,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Davison W. Iron and manganese in lakes [J]. *Earth-Science Reviews*, 1993, **34**(2): 119-163.
- [2] Zaw M, Chiswell B. Iron and manganese dynamics in lake water [J]. *Water Research*, 1999, **33**(8): 1900-1910.
- [3] Taillefert M, Lienemann C P, Gaillard J F, *et al.* Speciation, reactivity, and cycling of Fe and Pb in a meromictic lake [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(2): 169-183.
- [4] 张超莹. 青岛王圈水库铁锰存在形态和释放规律的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [5] Gerke T L, Little B J, Maynard J B. Manganese deposition in drinking water distribution systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **541**: 184-193.
- [6] Tobiason J E, Bazilio A, Goodwill J, *et al.* Manganese removal from drinking water sources [J]. *Current Pollution Reports*, 2016, **2**(3): 168-177.
- [7] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [8] Czaplicka A, Bazan S, Szarek-Gwiazda E, *et al.* Spatial distribution of manganese and iron in sediments of the Czorsztyn Reservoir [J]. *Environment Protection Engineering*, 2016, **42**(4): 179-188.
- [9] Foley B, Jones I D, Maberly S C, *et al.* Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication [J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(2): 278-289.
- [10] 刘树元, 郑晨, 袁琪, 等. 台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3702-3708.
Liu S Y, Zheng C, Yuan Q, *et al.* Analysis on the variation characteristics of iron and manganese concentration and its genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3702-3708.
- [11] 于海涛, 潘伟斌, 侯晓辉. 供水水库沉积物中铁锰的释放规律研究 [J]. *工业安全与环保*, 2012, **38**(4): 72-75.
Yu H T, Pan W B, Hou X H. Study on release of iron and manganese from sediments in a water-supply reservoir [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2012, **38**(4): 72-75.
- [12] 肖利娟. 华南地区两座大型水库浮游植物群落与演替机制比较 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [13] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir-Zhoucun Reservoir in north of China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [14] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正. 溶解氧对湖库热分层和富营养化的响应——以枣庄周村水库为例 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1547-1553.
Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z. Responses of dissolved oxygen on thermal stratification and eutrophication in lakes and reservoirs—an example in Zhoucun Reservoir in Zaozhuang City [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进 [J]. *生态科学*, 2005, **24**(1): 9-11.
Lin S J, He L J, Huang P S, *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton [J].

- Ecologic Science, 2005, **24**(1): 9-11.
- [17] Shaked Y, Erel Y, Sukenik A. The biogeochemical cycle of iron and associated elements in Lake Kinneret [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(7): 1439-1451.
- [18] 贾国东, 钟佐燊. 铁的环境地球化学综述[J]. *环境科学进展*, 1999, **7**(5): 74-84.
- [19] Neretin L N, Pohl C, Jost G, *et al.* Manganese cycling in the Gotland Deep, Baltic Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3): 125-143.
- [20] Cerrato J M, Reyes L P, Alvarado C N, *et al.* Effect of PVC and iron materials on Mn(II) deposition in drinking water distribution systems[J]. *Water Research*, 2006, **40**(14): 2720-2726.
- [21] Gantzer P A, Bryant L D, Little J C. Controlling soluble iron and manganese in a water-supply reservoir using hypolimnetic oxygenation[J]. *Water Research*, 2009, **43**(5): 1285-1294.
- [22] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. *水利学报*, 2013, **44**(4): 406-415.
Ma Y, Guo Q L, Huang T L, *et al.* Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river, Xi'an city in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(4): 406-415.
- [23] 朱维晃, 吴丰昌. 贵阳市阿哈湖水库中铁、锰的形态分布[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(S1): 83-86.
Zhu W H, Wu F C. The speciation and distribution of iron and manganese in the A-Ha Lake, Guiyang City [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(S1): 83-86.
- [24] 杨晓红, 郑俊, 常艳春, 等. 中型水库水温分层的影响及分层取水建议[J]. *城镇供水*, 2014, (5): 62-66.
- [25] 龚子同. *中国土壤地理*[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [26] Obenour D R, Michalak A M, Zhou Y T, *et al.* Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the northern Gulf of Mexico [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(10): 5489-5496.
- [27] 张垒, 李秋华, 黄国佳, 等. 亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 438-447.
Zhang L, Li Q H, Huang G J, *et al.* Seasonal stratification and eutrophication characteristics of a deep reservoir, Longtan Reservoir in subtropical area of China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 438-447.
- [28] 陶亚奇, 马宏佳. 正确理解与探究金属活性顺序[J]. *化学教育*, 2003, **24**(6): 36, 42.
- [29] 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 铁锰在贵州阿哈湖沉积物中的分离[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 135-140.
Wang F S, Liu C Q, Liang X B, *et al.* Acid-mining drainage impacts on the separation between iron and manganese in sediments of the Aha Lake, Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(1): 135-140.



CONTENTS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin | ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447) |
| Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China | PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454) |
| Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province | ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463) |
| Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou | YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469) |
| Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou | FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478) |
| Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China | LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486) |
| Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China | LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494) |
| Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn | TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501) |
| Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China | ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513) |
| Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics | LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525) |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin | ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537) |
| Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer | YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546) |
| Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China | ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553) |
| Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu | HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562) |
| Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China | ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570) |
| Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region | XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580) |
| Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China | TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589) |
| Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios | LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598) |
| Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances | CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607) |
| Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water | WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617) |
| Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions | ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623) |
| Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites | JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632) |
| Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation | YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641) |
| Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) | SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648) |
| Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor | LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656) |
| Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664) |
| Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants | LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673) |
| Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System | XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679) |
| Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature | HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687) |
| Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System | GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696) |
| Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA | ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706) |
| Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) | GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715) |
| Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province | DU Ze-ru, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725) |
| Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area | YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733) |
| Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment | WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747) |
| Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil | LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756) |
| Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 | MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763) |
| Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing | YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774) |
| Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary | LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782) |
| Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation | SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790) |
| Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China | ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800) |
| Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert | DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809) |
| Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields | JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819) |
| Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems | LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828) |
| Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock | DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836) |
| Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil | YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844) |
| Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features | YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850) |
| Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex | WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860) |
| Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products | YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868) |
| Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste | CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874) |
| Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste | LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882) |
| Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models | CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889) |