

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘杰, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析

温成成^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 李楠^{1,2}, 张海涵^{1,2}, 林子深^{1,2}, 李衍庆^{1,2}, 杨尚业^{1,2}, 董亚军³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 3. 李家河水库管理有限公司, 西安 710016)

摘要: 为探究人工强制混合充氧与诱导持续混合对水质改善的影响及人工强制混合与自然混合的衔接条件, 以李家河水库为例, 于2017年6月至2019年4月开展水质及水文气象指标监测, 分析自然过程及人工诱导混合过程各时期水温、溶解氧及水质变化特征. 结果表明: ① 自然过程分层期持续时间长, 混合期仅为2.5个月, 人工诱导混合过程通过扬水曝气系统的运行, 9月底水体达到完全混合且进入降温期, 诱导自然混合条件具备, 表层水温、平均气温分别为20.17℃和16.5℃, 此时系统关闭后水体持续自然混合, 混合周期延长至5.5个月; ② 自然过程污染物浓度较高, 混合期表层污染物浓度呈现先增加后降低的趋势, 氧跃层伴随热分层出现, 底部厌氧周期达6个月; ③ 相较于自然过程, 人工诱导混合过程水体等温层厌氧消除且污染物控制效果良好, 10月至翌年3月同期底层 NH_4^+ -N、TP、Fe和Mn浓度的削减率为76.2%、75.5%、82.2%和82.1%, 均达到地表水环境质量标准, 人工诱导混合过程有利于水质改善及混合作用时效的延长.

关键词: 水源水库; 诱导混合; 自然混合; 水质改善; 混合周期

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1227-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909176

Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir

WEN Cheng-cheng^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, LI Nan^{1,2}, ZHANG Hai-han^{1,2}, LIN Zi-shen^{1,2}, LI Yan-qing^{1,2}, YANG Shang-ye^{1,2}, DONG Ya-jun³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Lijihe Reservoir Management Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: To explore the effects of water quality improvement by artificial destratification and artificially-induced mixing, as well as realize the conditions of artificial mixing and natural mixing, the Lijihe Reservoir was selected to monitor the indexes of water quality and hydrometeorology from June 2017 to April 2019 and to analyze the characteristics of variations in water temperature, dissolved oxygen, and pollutants during the natural and induced-mixing processes. The results demonstrated that: ① The natural process had the features of a long period of thermal stratification and only a short period of mixing of about 2.5 months. Through the operation of water-lifting aerators (WLAs) during the induced-mixing process, the water body was completely mixed and entered the cooling period at the end of September, achieving the conditions of induced-natural mixing. The surface water temperature and average air temperature were 20.17℃ and 16.5℃, respectively, and the water body continued to be naturally mixed after the WLA system was shut down, which led to a natural mixing cycle of 5.5 months. ② During the natural-mixing process, the concentration of pollutants was relatively high in the whole period, and the concentration of surface pollutants in the mixing stage presented a trend of increasing first and then decreasing. The oxycline appeared with thermal stratification, and the anaerobic cycle in the bottom of water column reached 6 months. ③ Compared with the natural-mixing process, the hypolimnetic anaerobic condition was eliminated and the control effects of pollutants dominated during the induced-mixing process. Simultaneously, the concentrations of NH_4^+ -N, TP, Fe, and Mn in the bottom of the water column were cut by 76.2%, 75.5%, 82.2%, and 82.1%, respectively, during the same period from October to March of the following year, and met the "Environmental Quality Standards for Surface Water". This study shows that the artificially-induced mixing process contributes to water quality improvement and mixing-period prolongation.

Key words: drinking water reservoir; induced mixing; natural mixing; water quality improvement; mixing period

湖泊与水库是我国主要的水源地, 为全国85%的人口提供饮用水源^[1,2]. 深水型水库因自然分层及混合过程的存在, 导致水库水质呈现周期性污染, 严重影响民生饮水安全^[3-5]. 不同于自然分层期较长的持续时间及等温层缺氧/厌氧环境, 混合期底部溶解氧迅速提高, 可改善底层水体生态环境, 有助于

收稿日期: 2019-09-18; 修订日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979217); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-020, 2019ZDLSF06-01, 2019ZDLSF06-02)

作者简介: 温成成(1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水源水库污染物演替及水质改善, E-mail: hitchengchengwen@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

水库水质的维持. 因此,开展自然分层、混合过程水库水质演替及分层破坏机制与混合作用时效延长方向的研究是解决水库水体周期性污染的关键.

针对水库分层期水质演替与污染控制,国内外学者开展了大量的研究工作. Tang 等^[6,7]和 Huang 等^[8]研究指出,水库底层沉积物的蓄积与表层藻类的繁殖、衰亡和沉积是分层期内源污染的主要诱因,且无法改变这一自然过程,该时期溶解氧 $< 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是沉积物释放的重要标志^[9],主要污染物为 N、P、Fe 和 Mn 等^[10]. 国外解决自然分层底部厌氧的途径主要包括:等温层充氧 (hypolimnetic oxygenation systems, HO₂) 及人工强制混合 (artificial destratification, artificial mixing)^[11]. 其中,等温层充氧技术应用于 Carvins Cove 水库 (CCR)^[12] 和 Falling Creek 水库 (FCR)^[13,14] 等水源水体,污染控制效果显著,但该技术可诱发深层和沉积物耗氧量的增加;人工强制混合技术可通过破坏水体分层实现水力充氧,但可能因沉积物水相界面有机物代谢不彻底导致水体产生臭味污染. 国内多采用扬水曝气技术 (water-lifting aerators, WLAs),其兼具等温层充氧和水体分层破坏功能,可实现人工强制混合充氧,改善水库水质^[15,16]. 相较于分层期水库水质原位控制研究,混合期水质改善的相关报道较少. 水库自然混合是表层水温降低高密度水体下潜所致,人工强制混合可降低表层水温且缩小上下层水体温差,诱发水体提前进入自然混合 (人工诱导自然混合),同时提高全层水体溶解氧含量,该现象已在 Wivenhoe 水库^[17] 和黑河水库^[15,16] 出现,但混合作用时效延长及水体溶解氧提高对混合期水质影响的研究鲜见报道.

以上研究揭示了分层期水质改善及人工强制混合诱发水体提前自然混合的机制,但就分层期水质改善对混合期水质的影响及诱导水体提前实现自然混合的条件及其水质响应的关注较少. 本研究以李家河水库为例开展为期近 2 年的连续监测,验证水体热分层消除-底部充氧-自然混合作用时效延长对水库水质污染控制效果,探究人工强制混合与自然混合的衔接条件,缩短系统运行周期,以期为饮用水水源水库水质改善及系统低成本运行提供科学支撑,同时也为国内外深水型水源水库水体污染原位控制提供工程借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

李家河水库位于西安市蓝田县境内,于 2015 年建成蓄水,为西安市重要的饮用水供水水源之

—^[18,19]. 李家河水库源起秦岭山脉,主要接纳东采峪、西采峪方向来水,上游被森林及农田覆盖,流域面积 362 km^2 ,水域面积 2.18 km^2 ,最大库容 $5.7 \times 10^7 \text{ m}^3$,平均水深和最大水深分别为 56 m , 80 m . 该区域位于欧亚板块腹地,属暖温带半湿润大陆性气候区,2017~2018 年降雨主要集中在 6~10 月,水位在 $844 \sim 877 \text{ m}$ 之间,平均年蓄水位分别为 855 m 和 863 m (表 1).

表 1 李家河水库降雨及水位变化

月份	2017 年		2018 年	
	降雨量/mm	水位/m	降雨量/mm	水位/m
1	5	846	23	870
2	15	853	8	865
3	49	852	39	856
4	44	844	87	851
5	52	855	86	873
6	106	854	73	871
7	136	852	154	864
8	82	845	72	862
9	179	845	96	859
10	137	877	10	861
11	13	870	34	862
12	0	871	2	858

依据水文及气候条件,李家河水库属峡谷季节性分层水库,面临藻类高发及底层厌氧等问题^[20]. 2017 年 9 月暴发藻类水华,藻密度达 $2.95 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,底部水体厌氧状态持续 6 个月^[19]. 为改善源水水质,降低饮水处理成本,提高供水安全,李家河水库于 2018 年安装扬水曝气水质改善系统 (WLAs),共含 8 台扬水曝气设备,间隔约为 $250 \sim 300 \text{ m}$,呈 S 型布设在主库区 (见图 1),主要的功能为等温层充氧和全层强制混合,其他详细性能和技术控制参见文献^[10,14,19,21].

2018 年 6 月 20 日~9 月 30 日, WLAs 间歇试运行,实现了水库水体人工强制混合,运行结束后,水体逐步进入诱导混合期. 根据水文地质特征及研究需要,在主库区设置监测点 S1 (见图 1),该区域水深较大且水体滞留时间长,距离 1 号扬水曝气器为 0.03 km ,属 WLAs 直接作用区.

1.2 水样采集与监测

2017 年 6 月~2019 年 4 月对李家河水库主库区实施原位监测,频率为每月 2~4 次,采用有机玻璃采水器对取样点表层 (水下 0.5 m)、中层 (分层期为温跃层中部,混合期为水体垂向中部) 和底层 (沉积物以上 0.5 m) 3 个不同深度水样进行采集,并置于聚乙烯采样瓶中,实验室 4°C 保存,24 h 内完成理化指标的测定. 同时,利用 HACH Hydrolab DS5 型多参数水质测定仪对水温 (Temp)、溶解氧 (DO)

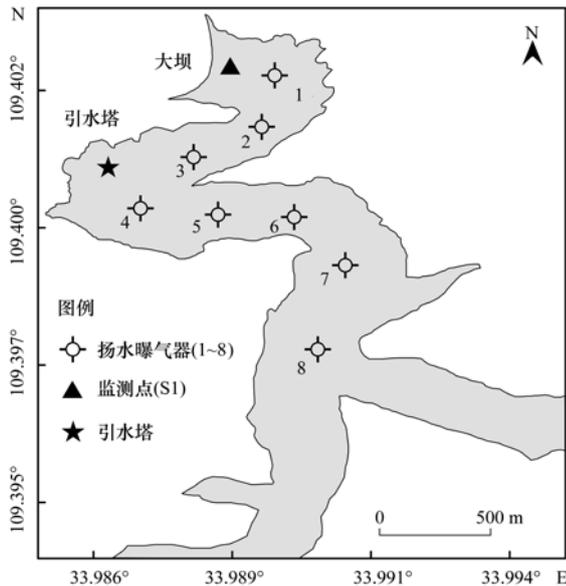


图1 李家河水库取样点及扬水曝气器布置示意

Fig. 1 Map of sampling sites and water-lifting aerators in Lijiahe Reservoir

原位测定,垂向间隔约 1 m. 为了避免极端天气对取样的影响且尽量保证取样条件基本一致,选择晴天中午开展水质监测.

1.3 样品测定

所有理化指标的测定均参照文献[15]中所列分析方法,其中铁(Fe)和锰(Mn)采用火焰原子吸收法测定,氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂比色法测定,总磷(TP)采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定.

1.4 水文气象数据

日平均气温数据来自中国气象网,降雨及水位数据由李家河水库水文监测站提供.

1.5 自然过程及人工诱导混合过程

2018年6月前,WLAs已安装,并未运行,对水体热分层未实施人工干预,故2017年6月~2018年4月属于自然过程,含自然分层、混合过程. 2018年6月以后,WLAs开始间歇试运行,水体自然过程受到人工干预,该时期及间接影响期(2018年6月~2019年4月)归于人工诱导混合过程,其中,2018年6月20日~9月30日由于WLAs间歇运行,破坏了水体自然分层,该时期属人工强制混合过程(强制混合期),2018年9月30日水体完全混合(垂向温差 $<1^\circ\text{C}$)且处于降温期,WLAs关闭后自然混合过程提前且持续至2019年3月下旬,该时期属诱导自然混合过程(诱导混合期).

1.6 数据分析与绘图

水体热分层结构稳定性评估采用Xiao等^[22]和Li等^[23]建议的方法,通过RWCS指标量化水体参混

状态,具体见下式:

$$\text{RWCS} = \frac{D_b - D_s}{D_4 - D_5} \quad (1)$$

式中, D_b 和 D_s 分别为底层水体密度和表层水体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, D_4 和 D_5 分别为 4°C 和 5°C 时的纯水密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 由于该水库水体为水源水库,整体浊度较低^[20],故计算表层及底层水体密度时,忽略悬浮颗粒的影响.

除水体热分层结构稳定性指标(RWCS)外,本研究另引入温跃层及厌氧区概念,进一步讨论自然混合及诱导混合状态下热分层结构及溶解氧变化对水体地球化学的影响. 温跃层尚无统一的定义,国内外学者中多采用温度梯度 $0.05 \sim 2^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 界定这一水层^[24],本研究以 $0.2^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 为标准识别温跃层演替过程;Li等^[9]的研究指出,水体溶解氧 $<2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,沉积物污染物将发生解吸现象,导致污染物不断向上覆水体释放,故将溶解氧 $<2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 区域定义为厌氧区.

水质参数采用Excel 2010软件建立数据库,水体相关参数拟合采用SPSS 22.0软件,绘图采用Surfer 12.0和OriginPro 8.5.1软件.

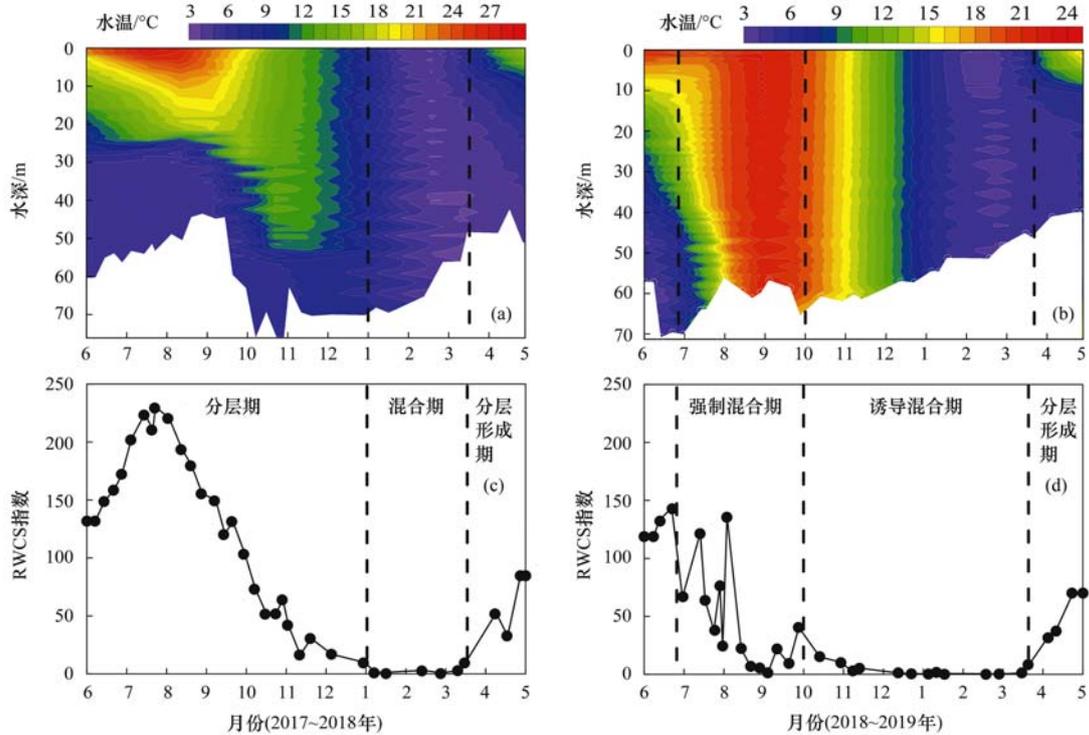
2 结果与分析

2.1 水温及温跃层结构变化

水体自然状态下,水温分布及季节性演替主要与气温相关,气温改变引起水体表层热通量变化,进而作用于水体热分层、温跃层结构^[2],但人工强制混合可改变水温垂向分布^[16]. 图2为自然过程及人工诱导强制混合过程热分层状态变化. 如图2(a)所示,自然过程水温在 $3.52 \sim 29.64^\circ\text{C}$ 之间,平均水温 11.56°C ,垂向温差范围为 $0.17 \sim 23.53^\circ\text{C}$;RWSC指数呈现先升高后降低再升高的趋势[图2(c)],2017年6~12月为水体自然分层期,该时期温跃层下潜至 $40.9 \sim 57.8\text{m}$,温跃层厚度逐步压缩[图3(a)],2018年1~3月中旬为自然混合期,水温垂向均化,持续时间达2.5个月,2018年3月中旬后,水体再次进入分层过程. 如图2(b)所示,人工诱导混合过程水温受人工强制混合作用的影响,水温变化幅度小于自然过程,水温在 $3.23 \sim 25.14^\circ\text{C}$ 之间,平均水温 14.21°C ,垂向温差范围为 $0.11 \sim 18.15^\circ\text{C}$;RWSC指数变化趋势与自然过程基本一致[图2(d)],2019年6月20日~9月水体人工强制去分层(WLAs间歇运行),该时期为强制混合期,8月初出现了RWSC指数波动现象,主要是强降雨入流导致WLAs停运所致,但温跃层不断下潜并于8月中旬消失[图3(b)],9月底由于

水体完全混合且已进入降温期,此时表层水温、平均气温分别为 20.17℃ 和 16.5℃,垂向温差 1°C,诱导自然混合条件具备,故关闭 WLAs,实现了人工强制混合与自然混合的有效衔接,将自然混合提前至 10 月并持续至翌年 3 月下旬,混合

期延长至 5.5 个月,该时期为诱导混合期. 总体来看,深水型水库自然过程由于气候的影响,热分层周期长而混合期短,但人工诱导混合过程主要受 WLAs 水力混合和气候变化的协同作用,分层周期缩短,混合作用时效明显延长.



(a) 和 (c) 自然过程; (b) 和 (d) 人工诱导混合过程

图 2 自然过程及人工诱导混合过程水温和热分层指数变化

Fig. 2 Variations of water temperature and RWCS index during the natural and induced-mixing processes

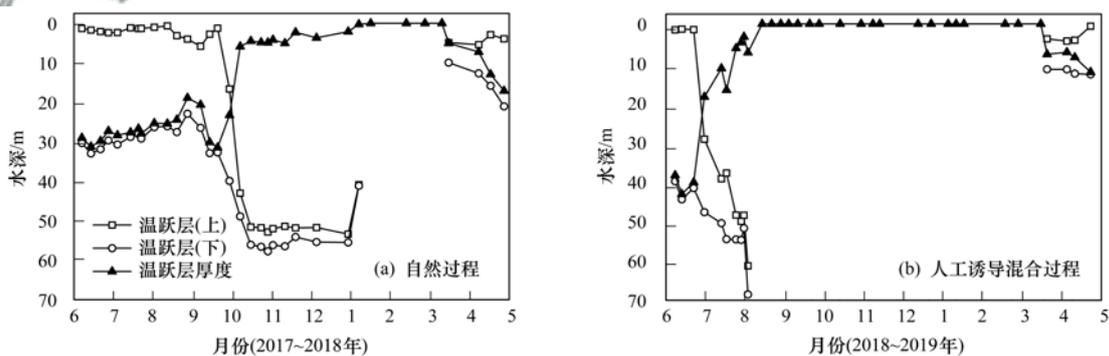


图 3 自然过程及人工诱导混合过程温跃层结构变化

Fig. 3 Variations of thermocline structure during the natural and induced-mixing processes

2.2 溶解氧及厌氧层厚度变化

图 4 为自然过程及人工诱导混合过程溶解氧变化. 如图 4(a) 所示, 自然过程表层和底层溶解氧的变化范围分别为 $6.57 \sim 17.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0 \sim 9.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体底部厌氧伴随热分层出现, 持续时间达 6 个月, 底部厌氧层厚度在 $0 \sim 27.58 \text{ m}$ 之间[图 5(a)], 混合期底部厌氧现象消失, 水体全层高溶解氧状态仅维持 2.5 个月, 3 月中旬后再次出现氧分层现象. 如图 4(b) 所示, 人工诱导混合过程表层和

底层溶解氧浓度分别为 $7.72 \sim 15.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.69 \sim 10.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 该过程未出现等温层厌氧现象, 同时溶解氧在强制混合期与诱导混合期垂向维持在较高水平[图 5(b)], 主要原因是 WLAs 运行实现了人工强制混合充氧与混合作用时效延长的双重作用. 李家河水库自然过程和人工诱导混合过程初期(WLAs 未运行)均出现了表层溶解氧过饱和及温跃层溶解氧最小 (metalimnetic oxygen minimum, MOM) 现象, 这两种现象同样在千岛湖^[25] 和德国

Rappbode 水库^[3]被报道,溶解氧过饱和现象主要是藻类水华引起,随之藻类迁移至温跃层呼吸耗氧和藻细胞衰亡分解耗氧导致出现 MOM 现象,自然过程此两种现象持续至 9 月下旬,但人工诱导混合过程由于 WLAs 的运行,水体藻类得到控制,表层溶解

氧过饱和状态及 MOM 现象于 7 月底消失 [图 5 (b)]. 综上所述,WLAs 兼具等温层充氧和人工强制混合作用,消除了分层期底层水体厌氧现象,自然混合过程的提前与混合作用时效的延长有利于水体高溶解氧环境的持续和水体生态环境的改善.

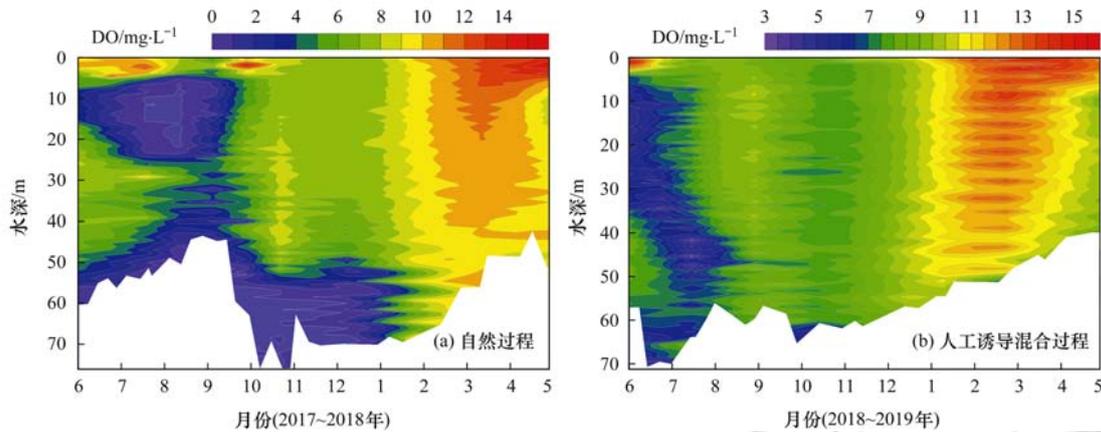


图 4 自然过程及人工诱导混合过程溶解氧变化

Fig. 4 Variations of dissolved oxygen during the natural and induced-mixing processes

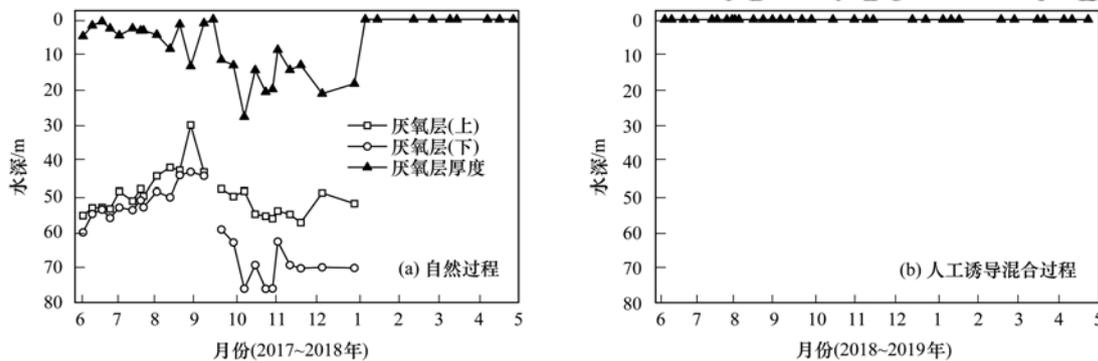


图 5 自然过程及人工诱导混合过程底部厌氧层变化

Fig. 5 Variations of the anoxic layer in the bottom of the water column during the natural and induced-mixing processes

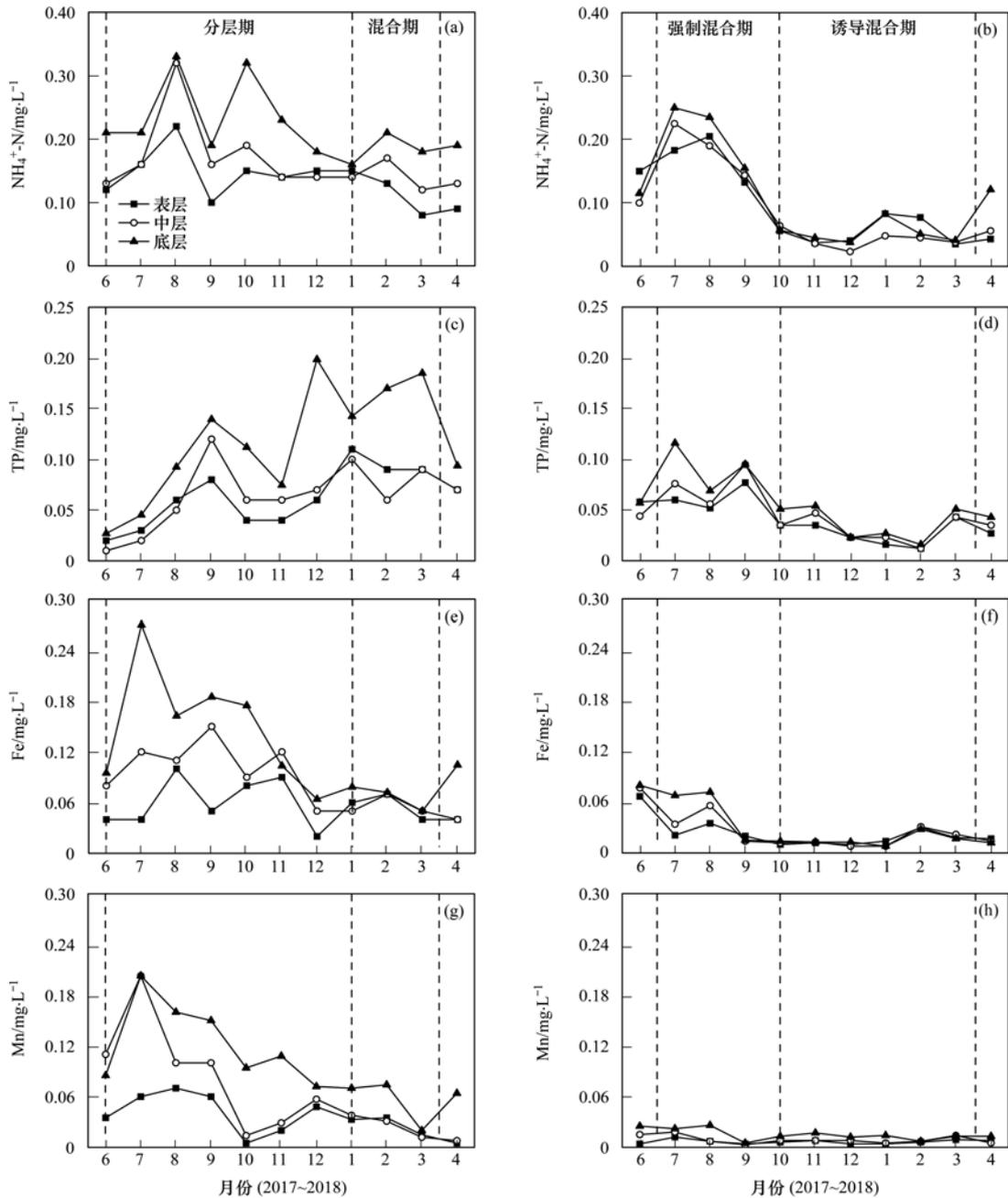
2.3 水质改善效果

图 6 为自然过程及人工诱导混合过程污染物浓度变化,同时为明晰人工强制混合充氧(7~9 月)及诱导自然混合(10 月~翌年 3 月)对水质改善的效果,对比了两过程同时期底层污染物浓度,结果见表 2.

如图 6(a)和 6(b)所示,自然过程 NH_4^+-N 浓度较高,分层期浓度总体高于混合期,但混合期末浓度有所下降;人工诱导混合过程强制混合期浓度总体呈下降趋势,且在诱导混合期保持较低浓度;相较于自然过程,人工诱导混合过程 NH_4^+-N 浓度明显较低(表 2),7~9 月及 10 月~翌年 3 月两个时期底层浓度削减分别达 12.5% 和 76.2%. 如图 6(c)和 6(d)所示,自然过程 TP 浓度呈上升趋势,表层、底层 TP 浓度平均值为 $0.063 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.116 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未达到地表水 III 类水体标准(湖库 TP < $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);人工诱导混合过程 TP 浓度较自然过程同期 7~9 月平均浓度基本一致,但呈明显下降

趋势,同期 10 月~翌年 3 月,底层 TP 浓度较自然过程削减达 75.5%,该时期 TP 达标. 如图 6(e)~6(h)所示,Fe 和 Mn 在自然过程与人工诱导混合过程与 NH_4^+-N 变化趋势基本一致,但 Mn 在 2017 年 7~12 月(分层期)中层、底层水体呈现季节性超标(地表水环境质量标准)现象;相较于自然过程,人工诱导强制过程 Fe 和 Mn 浓度削减明显,7~9 月及 10 月~翌年 3 月两时期底层 Fe 浓度削减分别达 74.8% 和 82.2%,底层 Mn 浓度削减分别达 89.5% 和 82.1%,Mn 浓度达标.

以上结果表明,人工诱导混合过程较自然过程表现出良好的污染物控制效果,强制混合期污染物浓度随 WLAs 运行逐步下降,并在诱导混合期维持较低水平,表明强制混合期水质改善是诱导混合期水质保障的重要前提,同时,人工强制混合与自然混合的有效衔接延长了混合作用时效,进一步促进了水体中污染物削减和良好水质状态的持续.



(a)、(c)、(e)和(g)自然过程; (b)、(d)、(f)和(h)人工诱导混合过程

图6 自然过程及人工强制混合过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、Fe和Mn浓度变化

Fig. 6 Variations in the concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP, Fe, and Mn during the natural and induced-mixing processes

表2 自然过程与人工诱导混合过程底层水质对比

Table 2 Comparison of the bottom water quality between the natural and induced-mixing processes

底层污染物 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	自然过程		人工诱导混合过程	
	2017-07 ~ 2017-09	2017-10 ~ 2018-03	2018-07 ~ 2018-09 (强制混合期)	2018-10 ~ 2019-03 (诱导混合期)
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.24 ± 0.06	0.21 ± 0.05	0.21 ± 0.04	0.05 ± 0.01
TP	0.092 ± 0.038	0.147 ± 0.043	0.093 ± 0.019	0.036 ± 0.015
Fe	0.206 ± 0.046	0.090 ± 0.041	0.052 ± 0.026	0.016 ± 0.006
Mn	0.171 ± 0.023	0.073 ± 0.027	0.018 ± 0.009	0.013 ± 0.003

3 讨论

3.1 水体分层及混合的影响因素

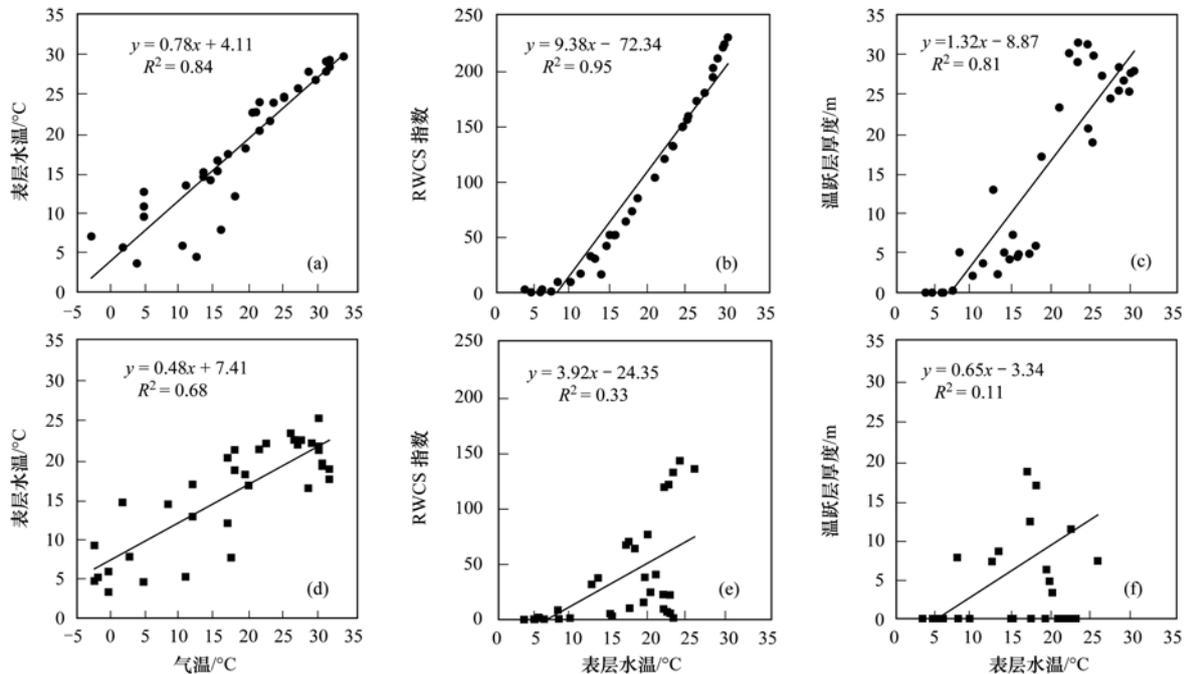
水库自然过程热分层受热通量(气温与表层水温

热交换)、风力、降雨(暴雨径流潜流)和水库形态学特征等因素控制^[25-27]. 针对水库自然状态热分层时空演替,热通量仍是主导因素^[28],但人工强制混合可改变自然过程水温分布,进而影响水体热分层结构.

因此,为解析自然过程及人工诱导混合过程水体分层及混合的主导因素,开展了气温、表层水温、热分层稳定指数和温跃层厚度间的相关性分析(图7)。

如图7(a)~7(c)所示,自然过程气温与表层水温($R^2 = 0.84$)、表层水温和 RWCS 指数($R^2 = 0.95$)和温跃层厚度($R^2 = 0.81$)均呈现出良好的相关性,表明气温是自然过程水体热分层形成与消亡影响的主导因素;如图7(d)~7(f)所示,相较于自然过程,人工诱导混合过程气温与表层水温($R^2 = 0.68$)、表层水温和 RWCS 指数($R^2 = 0.33$)和温跃

层厚度($R^2 = 0.11$)相关性较低,该时期 WLA 运行对水体自然分层过程实施人工干预,影响了水体自然分层及温跃层结构演替,这是导致表层水温与 RWCS 指数和温跃层厚度相关性较低的原因,但该时期气温与表层水温表现出较高的相关性,表明气温与表层水温差仍是水气界面热交换的主要驱动因素。综上所述,自然过程气温是影响水体热分层结构的主要因素,但人工诱导混合过程水体分层和混合是气温和人工强制混合共同作用的结果,这与 Li 等^[16]的研究结果一致。



(a)~(c)自然过程; (d)~(f)人工诱导混合过程

图7 自然过程及人工诱导混合过程气温、表层水温、RWCS 指数和温跃层厚度相关性分析

Fig. 7 Relationship between air temperature, surface temperature, RWCS index, and thermocline strength during the natural and induced-mixing processes

3.2 人工强制混合及自然混合的衔接

自然过程水体分层及混合在水-气界面热交换的控制下周期性出现或消失,气温与水温差是驱动水体混合的主要动力^[2, 29]。例如,升温期,水体吸收热量促使垂向温差增加,热分层逐渐形成稳定;降温期,水面失热驱动水体混合^[29]。不同于自然过程,人工诱导混合过程水体分层与混合是气温与人工强制混合协同作用的结果。因此,探究自然过程及人工诱导混合过程气温及水温变化(图8),可为人工强制混合及自然混合的衔接提供理论依据,在混合作用时效的延长和 WLA 运营能源节约方向具有重要意义和现实价值。

如图8所示,自然过程于2017年10月气温逐渐低于表层水温,水体进入分层衰亡期;人工诱导混合过程水体散热期(2018年9月初)较自然过程提前1个月,9月底水体达到完全混合且已进入降

温期,表层水温下降而密度升高,高密度水体不断下潜,实现了水体持续自然混合,气温替代人工强制混合成为水体持续自然混合的主要驱动因素。Li 等^[16]的研究提出,人工强制混合与自然混合的衔接应满足两个条件:①WLA 在垂向温差 $< 3^{\circ}\text{C}$ 时可根据底部溶解氧的状态适当减小供气量或停止运行;②WLA 停止运行时,研究区域应进入降温期。本研究2019年9月底水体垂向温差 $< 1^{\circ}\text{C}$,表层水温、平均气温分别为 20.17°C 和 16.5°C ,标志着诱导水体自然翻转混合过程的开始,此时关闭 WLA,水体持续自然混合,实现了人工强制混合和自然混合的有效衔接,印证了上述研究结论。

3.3 诱导自然混合对水库水质改善的机制

相较于自然过程,人工诱导混合过程由于 WLA 的运行水质得到了较大改善,在强制混合期及诱导混合期表现出良好的污染物削减效果且诱导

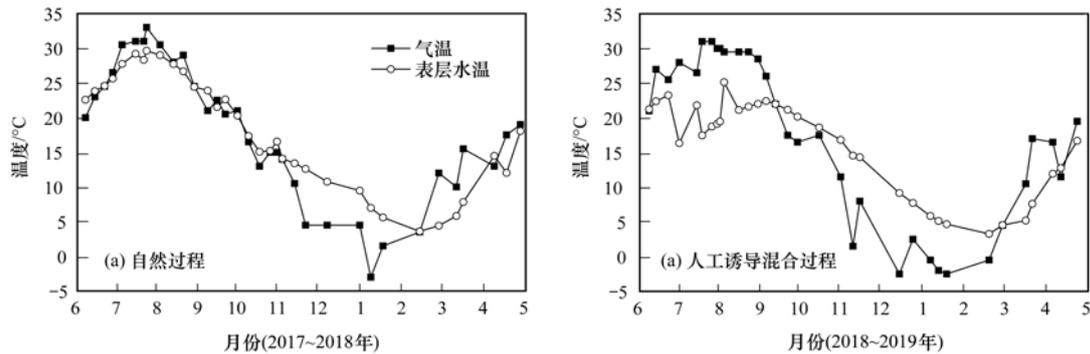


图8 自然过程及人工诱导混合过程气温和表层水温变化

Fig. 8 Variations of air temperature and surface water temperature during the natural and induced-mixing processes

混合期污染物浓度维持在较低水平. 而水库水体水质优劣及自净能力与其地球生物化学循环有关, 主要的影响因子包括: 溶解氧、水温和微生物多样性及活性等^[30,31].

本研究结果表明: 人工诱导混合过程 WLAs 运行期水体等温层充氧及分层破坏, 解决了因水体耗氧及沉积物厌氧导致的污染物释放问题, WLAs 停运后诱导自然混合的实现使水体高溶解氧状态持续, 维持了水体良好生境; 其次, 自然过程和人工诱导混合过程 10 月~翌年 3 月温度梯度分别为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$, 诱导混合期水体温度梯度变化较小, 有利于微生物降温期适应性提高与活性维持^[31]. 同时, 周子振等^[32]的研究指出, 人工诱导混合过程 WLAs 运行(强制混合期)可强化表层沉积物中微生物的总代谢活性, 达到削减沉积物污染的目的, 诱导混合期水体微生物活性无明显衰减且碳源利用率较高, 但自然过程混合期微生物活性呈降低趋势.

综上所述, 诱导自然混合作用一方面通过水体混合保障了高溶解氧状态持续, 改善了水体生境, 另一方面较低的水体温度梯度变化有利于降温期微生物高活性及碳源利用率延续, 维持了水体自净能力. 混合作用时效延长保障了源水供水安全.

4 结论

(1) 人工强制混合充氧破坏了自然过程水体分层结构, 强制混合期达 3 个多月, 9 月底由于水体完全混合且已进入降温期, 诱导自然混合条件具备, 关闭 WLAs 后水体自然混合提前且持续至翌年 3 月下旬, 诱导混合期达 5.5 个月, 相较于自然过程混合期增加了 2 个月, 混合作用时效延长.

(2) 自然过程分层期持续时间长, 伴随着底层厌氧出现并于翌年混合期消失, 持续时间达 6 个月, 人工诱导混合过程溶解氧处在较高水平, 彻底消除了水体底部厌氧现象, 底层溶解氧浓度为 $3.69\sim$

$10.95\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且在强制混合期与诱导混合期垂向保持在较高水平.

(3) 自然混合过程分层期和混合期污染物浓度较高, TP 和 Mn 呈现阶段性超标且污染周期较长, 混合期污染物表现为先升高后降低的趋势. 人工诱导混合过程相较于自然过程呈现出良好的污染物控制效果, 诱导混合期底层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、Fe 和 Mn 浓度的削减率为 76.2%、75.5%、82.2% 和 82.1%, 混合期作用时效延长有利于水质改善.

参考文献:

- [1] 房旭, 段洪涛, 曹志刚, 等. 基于多源卫星数据的小型水体蓝藻水华联合监测——以天津于桥水库为例[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 967-978.
Fang X, Duan H T, Cao Z G, et al. Remote monitoring of cyanobacterial blooms using multi-source satellite data: a case of Yuqiao Reservoir, Tianjin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 967-978.
- [2] 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2632-2640.
Sun X, Zhu G W, Da W Y, et al. Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2632-2640.
- [3] Wentzky V C, Frassl M A, Rinke K, et al. Metalimnetic oxygen minimum and the presence of *Planktothrix rubescens* in a low-nutrient drinking water reservoir[J]. Water Research, 2019, 148: 208-218.
- [4] Li Z C, Xu X G, Ji M, et al. Estimating sedimentary organic matter sources by multi-combined proxies for spatial heterogeneity in a large and shallow eutrophic lake [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 147-155.
- [5] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality[J]. Limnology, 2008, 9(2): 135-142.
- [6] Tang X Q, Wu M, Li R. Phosphorus distribution and bioavailability dynamics in the mainstream water and surface sediment of the Three Gorges Reservoir between 2003 and 2010 [J]. Water Research, 2018, 145: 321-331.
- [7] Tang X Q, Li R, Wu M, et al. Influence of turbid flood water release on sediment deposition and phosphorus distribution in the bed sediment of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 36-45.
- [8] Huang T L, Li X, Rijnaarts H, et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China[J]. Science of

- the Total Environment, 2014, **485-486**: 820-827.
- [9] Li N, Huang T L, Mao X J, *et al.* Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification [J]. Science of the Total Environment, 2019, **685**: 497-507.
- [10] Shi J C, Huang T L, Wen G, *et al.* The variation characteristic of sulfides and VOSc in a source water reservoir and its control using a water-lifting aerator [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, **13**(4): 427.
- [11] Antenucci J P, Ghadouani A, Burford M A, *et al.* The long-term effect of artificial destratification on phytoplankton species composition in a subtropical reservoir [J]. Freshwater Biology, 2005, **50**(6): 1081-1093.
- [12] Bryant L D, Gantzer P A, Little J C. Increased sediment oxygen uptake caused by oxygenation-induced hypolimnetic mixing [J]. Water Research, 2011, **45**(12): 3692-3703.
- [13] Munger Z W, Carey C C, Gerling A B, *et al.* Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir [J]. Water Research, 2016, **106**: 1-14.
- [14] McClure R P, Hamre K D, Niederlehner B R, *et al.* Metalimnetic oxygen minima alter the vertical profiles of carbon dioxide and methane in a managed freshwater reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2018, **636**: 610-620.
- [15] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 819-828.
- Ju T, Huang T L, Ma W X, *et al.* Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(5): 819-828.
- [16] Li Y, Huang T L, Tan X L, *et al.* Destratification and oxygenation efficiency of a water-lifting aerator system in a deep reservoir: implications for optimal operation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **73**: 9-19.
- [17] Helfer F, Zhang H, Lemckert C. Modelling of lake mixing induced by air-bubble plumes and the effects on evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2011, **406**(3-4): 182-198.
- [18] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 [J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3049-3057.
- Xu J, Huang T L, Li K, *et al.* Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe Reservoir [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3049-3057.
- [19] Huang Y W, Yang C, Wen C C, *et al.* S-type dissolved oxygen distribution along water depth in a canyon-shaped and algae blooming water source reservoir: reasons and control [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(6): 987.
- [20] 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 [J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- Liu X Q, Huang T L, Li N, *et al.* Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe Reservoir during thermal stratification [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- [21] Ma W X, Huang T L, Li X. Study of the application of the water-lifting aerators to improve the water quality of a stratified, eutrophic reservoir [J]. Ecological Engineering, 2015, **83**: 281-290.
- [22] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir [J]. Water Research, 2011, **45**(16): 5099-5109.
- [23] Li X, Huang T L, Ma W X, *et al.* Effects of rainfall patterns on water quality in a stratified reservoir subject to eutrophication: Implications for management [J]. Science of the Total Environment, 2015, **521-522**: 27-36.
- [24] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. Water Research, 2015, **75**: 249-258.
- [25] Liu M, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 614-624.
- [26] Lee Y G, Kang J H, Ki S J, *et al.* Factors dominating stratification cycle and seasonal water quality variation in a Korean estuarine reservoir [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2010, **12**(5): 1072-1081.
- [27] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(4): 1193-1202.
- [28] Yang J W, Holbach A, Wilhelms A, *et al.* Highly time-resolved analysis of seasonal water dynamics and algal kinetics based on in-situ multi-sensor-system monitoring data in Lake Taihu, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **660**: 329-339.
- [29] 谢奇珂, 刘昭伟, 陈永灿, 等. 溪洛渡水库水温日变化的测量与分析 [J]. 水科学进展, 2018, **29**(4): 523-536.
- Xie Q K, Liu Z W, Chen Y C, *et al.* Observation and analysis of diurnal water temperature variation in Xiluodu Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2018, **29**(4): 523-536.
- [30] Zhou S L, Xia C, Huang T L, *et al.* Seasonal variation of potential denitrification rate and enhanced denitrification performance via water-lifting aeration technology in a stratified reservoir—a case study of Zhoucun reservoir [J]. Chemosphere, 2018, **211**: 1123-1136.
- [31] Zhou Z Z, Huang T L, Li Y, *et al.* Sediment pollution characteristics and *in situ* control in a deep drinking water reservoir [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **52**: 223-231.
- [32] 周子振, 黄廷林, 李扬, 等. 扬水曝气器对水源水库水质改善及沉积物控制 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 210-217.
- Zhou Z Z, Huang T L, Li Y, *et al.* Improvement of water quality and sediment control by WLAs in a source water reservoir [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 210-217.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)