

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



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝酸胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响

徐进^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 李凯^{1,2}, 杨尚业^{1,2}, 温成成^{1,2}, 林子深^{1,2}, 李衍庆^{1,2}, 刘雪晴^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 对污染物来源和水质演变规律的深入认识是水源水库水质污染控制的前提. 李家河水库是西安市的重要水源地, 为加强李家河水库水源地保护工作, 于2016年12月~2017年12月逐月对李家河水库进行水质监测. 结果表明, 李家河水库的主要污染物来源是上游来水, 其对高锰酸盐指数、TN和TP的贡献率分别达99.52%、99.41%和99.23%; 上游东采峪葛牌小学河段和草坪服务区以上河段污染负荷较高, 西采峪主要污染源汇入点为养鸡场和渔场. 夏秋季水库会形成热分层, 水体稳定分层期, 在外源污染汇入和底部厌氧释放双重作用下水体中TN、TP、高锰酸盐指数、TOC、Fe和Mn的质量浓度分别高达3.32、0.177、5.21、3.01、0.21和0.235 mg·L⁻¹, 其中TN、TP、Fe和Mn质量浓度均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III类水限值; 较高的营养盐水平促进了藻类的大量繁殖, 水体稳定分层期表层水体藻密度最高达到2.18 × 10⁸ 个·L⁻¹, 优势藻种为蓝藻门的铜绿微囊藻和束丝藻, 对水质安全威胁较大. 因此李家河水库水质污染控制的首要任务是采取有效措施控制藻类繁殖, 同时加强水库上游污染源治理, 降低污染物输入负荷.

关键词: 水源水库; 污染物来源; 水体热分层; 水质演变; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3049-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811029

Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir

XU Jin^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, LI Kai^{1,2}, YANG Shang-ye^{1,2}, WEN Cheng-cheng^{1,2}, LIN Zi-shen^{1,2}, LI Yan-qing^{1,2}, LIU Xue-qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: An in-depth understanding of the source of pollutants and the evolution of water quality is a prerequisite for water pollution control in source water reservoirs. Lijiahe Reservoir is an important water source for Xi'an. To strengthen the protection of Lijiahe Reservoir, water quality monitoring was carried out monthly from December 2016 to December 2017. The results showed that the main pollutant source was upstream water, and its percentage contribution to the bulk pollutants was 99.52% for permanganate index, 99.41% for TN, and 99.23% for TP. The main source of pollution in the upstream Dongcayiu was the upper reach with Gepai Primary School and the turf service area. The main source of pollution in Xicayiu was the upper reach with a chicken farm and fishery. In summer and autumn, Lijiahe Reservoir exhibited thermal stratification. During the stable stratification period, the maximum concentrations of TN, TP, permanganate index, TOC, Fe, and Mn in the water body were as high as 3.32, 0.177, 5.21, 3.01, 0.21, 0.235 mg·L⁻¹, respectively, under the dual effects of exogenous pollution and bottom anaerobic release. The maximum concentrations of TN, TP, Fe, and Mn exceeded the Class III water limit of Surface Water Environmental Quality Standards (GB 3838-2002). The higher nutrient levels promoted large-scale reproduction of algae. The density of algae in the upper water reached 2.18 × 10⁸ cells·L⁻¹, and the dominant algae species were *Microcystis aeruginosa* and *Aphanizomenon flosaquae*, which pose a significant threat to water quality. Therefore, the primary goal for water pollution control in Lijiahe Reservoir is to take effective measures to control algae blooms, and at the same time, reduce the input of upstream pollutants.

Key words: source water reservoir; the source of pollutants; thermal stratification; evolution of water quality; eutrophication

近年来, 水库逐渐成为许多城市的主要饮用水水源, 随着经济的发展、生活质量的提高和饮用水水质标准的日益严格, 水源水库的水质污染问题引起了广泛关注, 特别是水体富营养化引起的藻类水华会造成臭味、藻毒素和消毒副产物等水质问题^[1-4], 严重威胁居民饮水健康. 保护和改善水源水库水质, 能够从源头降低污染负荷, 保障饮用水水质安全, 保证水厂稳定运行, 并降低水厂运行成本.

为了控制水源水库水质污染, 需要对其污染物来源和水质演变规律有深入地认识. 水库水质变化具有明显的季节性特征, 特别是深水型水库中季节性热分层对水质演变有重要影响. 污染物来源方

收稿日期: 2018-11-04; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-029); 陕西省教育厅重点实验室专项(16JS061)

作者简介: 徐进(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为水源保护与水质改善, E-mail: 17391970507@163.com

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

面, 水库上游来水输入的氮磷是水体富营养化的重要原因^[5-7], 而底泥中长期蓄积的污染物的释放也是水库重要的污染物来源^[8,9], 特别是深水型水库在热分层期底部长期处于厌氧状态, 会促进底泥中氮、磷、有机物、铁和锰等污染物的释放.

李家河水库是西安市的重要水源地, 该水库建成于2015年, 是典型的峡谷型深水水库. 为了有效保护李家河水库水质, 对上游来水和库区内水质进行了为期1a的连续监测, 分析了其主要污染物来源和水质污染特征, 以期为水库水质污染控制和运行管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

李家河水库位于西安市蓝田县境内灞河支流辋川河中游, 是西安市浐河以东地区的骨干水源工程, 总库容 $5.69 \times 10^7 \text{ m}^3$, 最大坝高98.5 m, 供水设计流量 $3.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 年平均供水量 $5.6 \times 10^7 \text{ m}^3$.

1.2 监测断面及检测方法

于2016年12月~2017年12月逐月对李家河水库主库区水质进行了监测, 表层水样在水面以下0.5 m处采集, 0~25 m深水样隔5 m取样, 25 m以下至底部隔10 m取样. 此外, 对水库上游东采峪和西采峪两条支流水质进行了监测, 取样点编号和位置分别见表1和图1.

表1 采样点编号信息

Table 1 Sampling point numbering system

位置	采样点名称	编号
西采峪	养鸡场下游	1
	冷水沟养鸡场	2
	二仙桥	3
	红门寺西	4
	红门寺东	5
	渔场下游	6
	渔场上游	7
	核桃沟	8
东采峪	黄沙沟	9
	凉水湾	10
	草坪服务区	11
	铁索桥	12
	葛牌小学	13

水温、溶解氧等指标使用哈希 Hydrolab DS-5 型多功能水质分析仪现场测定, 高锰酸盐指数采用高锰酸钾氧化法测定, TN 和 TP 采用分光光度法测定^[10], TOC 采用岛津总有机碳分析仪测定, Fe 和 Mn 采用火焰原子吸收法测定, 藻密度通过显微镜来观察计数并鉴定种群^[11].



图1 李家河水库上游采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling points upstream of Lijiahe Reservoir

2 结果与讨论

2.1 污染物来源计算

2.1.1 上游来水

李家河水库有两条支流: 分别是东采峪和西采峪, 最后汇入主库区. 该水库多年平均来水量经统计为 $83.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 时期划分为丰水期(6~10月)、平水期(2~5月)和枯水期(11月~次年1月). 根据对李家河水库上游来水的监测数据, 各时期两条支流汇流点处来水中的高锰酸盐指数、TN 和 TP 质量浓度如表2所示(表中各指标每月浓度值为4次测量结果的加权平均值).

表2 李家河水库各期高锰酸盐指数、TN 和 TP 质量浓度

Table 2 Concentration of permanganate index, TN, and TP in each phase

月份	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	入库径流量 $Q_i \times 10^6 / \text{m}^3$
1	2.87	1.41	0.009	1.11
2	2.99	2.06	0.009	1.70
3	3.52	2.42	0.046	5.14
4	3.19	2.25	0.019	7.94
5	3.22	2.19	0.034	2.92
6	3.67	2.34	0.098	4.17
7	4.74	3.10	0.174	2.94
8	4.65	2.59	0.124	1.98
9	3.98	3.09	0.074	14.70
10	3.71	2.58	0.065	37.20
11	3.42	2.41	0.032	2.28
12	3.10	2.06	0.016	1.17

不同月份来流污染物质量浓度 ρ_i 与该月入库径流量 Q_i 的乘积即为此月入库污染物总量 W_i , 则根据^[12,13]下式计算上游来水中各时期污染物负荷及其所占比例:

$$W_i = \rho_1 \times Q_1 + \rho_2 \times Q_2 + \dots + \rho_i \times Q_i$$

式中, W_i 为各时期入库污染物总量, ρ_i 为每月入库污染物质量浓度, Q_i 为每月入库径流量, 计算结果如表3所示.

表 3 李家河水库各期高锰酸盐指数、TN 和 TP 总量及所占比例¹⁾

Table 3 Total gross and proportion of permanganate index, TN, and TP in each phase

时期	TN	TP	高锰酸盐指数
丰水期(6~10月)	165.40(76.9)	4.672(88.6)	235.0(76.4)
平水期(2~5月)	40.20(18.7)	0.502(9.5)	57.9(18.8)
枯水期(11~1月)	9.47(4.4)	0.102(1.9)	14.6(4.8)
合计/ $t \cdot a^{-1}$	215.07	5.276	307.5

1) 括号外数字表示含量, $t \cdot a^{-1}$, 括号内表示比例, %

2.1.2 底泥释放

有研究表明^[14], 内源释放是引起水质恶化的另一个主要的原因, 底泥在厌氧环境下, 会持续向上层水体中释放有机质、氮、磷、铁和锰等污染物, 造成上覆水体水质恶化. 李家河水库从4月开始, 水体温度分层开始逐渐形成, 4月初, 上下层水体温差已达8.8℃, 温度梯度导致垂向氧传质受阻, 底层溶解氧浓度逐渐降低, 至6月底, 底部溶解氧为0.54 $mg \cdot L^{-1}$, 小于2 $mg \cdot L^{-1}$ 的临界值, 表示底部水体已处于厌氧状态, 直至次年1月, 水体垂向混合之后才结束这种厌氧状态, 沉积物厌氧释放结束. 采用实验室模拟的方法计算李家河水库底部沉积物的最大释放量. 本实验采用2个2L的抽滤瓶作为反应器, 外面包裹一层黑塑料袋, 模拟底层水体的黑暗条件, 泥水按1:3的比例放入烧杯中(沉积物厚度约5cm, 上覆水厚度约15cm, 直径

15cm), 上覆水即水库原水, 抽滤瓶密封, 给里面曝 N_2 使其快速达到厌氧状态, 置于8℃的恒温培养箱中, 在此状态下, 每周测一次上覆水中TP、TN、 NH_4^+ -N和高锰酸盐指数等指标. 结果表明, 进行至40d左右各污染物质量浓度释放量达到最大, 经估算李家河水库库底区域覆盖面积约 $1.05 \times 10^5 m^2$, 释放时间按40d计算.

模拟实验平均释放通量:

$$J = (\rho_1 - \rho_0) \cdot V / (S_0 \times d_0)$$

水库污染物释放估算量:

$$W = J \times S \times d$$

式中, ρ_0 为污染物初始质量浓度($mg \cdot L^{-1}$), ρ_1 为最大释放质量浓度($mg \cdot L^{-1}$), S_0 为烧杯截面积(m^2), V 为模拟实验反应器体积(L), d_0 为实验进行时间(d), S 为李家河水库底部区域面积(m^2), d 为释放时间(d), 计算结果如表4所示.

表 4 李家河水库沉积物实验室模拟计算结果

Table 4 Laboratory simulation results of Lijihae Reservoir sediments

指标	ρ 初始 $/mg \cdot L^{-1}$	释放极值 $/mg \cdot L^{-1}$	释放通量 $/mg \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$	释放量 $/t \cdot a^{-1}$
高锰酸盐指数	3.865	9.06	14.675	0.062
TN	2.71	4.62	5.395	0.023
TP	0.052	1.138	3.068	0.013

2.1.3 大气湿沉降

在本研究中, 分别收集3个不同时期的雨水, 带回实验室进行分析测定, 最后取平均值, 测定结果为: 丰水期TP(0.054 $mg \cdot L^{-1}$)、TN(2.36 $mg \cdot L^{-1}$)和高锰酸盐指数(2.7 $mg \cdot L^{-1}$); 平水期TP(0.041 $mg \cdot L^{-1}$)、TN(2.01 $mg \cdot L^{-1}$)和高锰酸盐指数(2.27 $mg \cdot L^{-1}$); 枯水期TP(0.027 $mg \cdot L^{-1}$)、TN(1.99 $mg \cdot L^{-1}$)和高锰酸盐指数(2.1 $mg \cdot L^{-1}$); 水库水面区域覆盖面积经估算约为 $6.76 \times 10^5 m^2$, 统计得李家河水库年降雨量为817mm, 污染物总量计算如表5所示.

对李家河水库污染物来源进行统计, 结果如表6所示, 高锰酸盐指数、TN和TP的输入负荷分别为:309.0、216.4和5.3 $t \cdot a^{-1}$, 高锰酸盐指数的输入负荷顺序为:上游来水>降雨作用>内源释放; TN的输入负荷顺序为:上游来水>降雨作用>内源

表 5 李家河水库大气沉降污染负荷计算结果/ $t \cdot a^{-1}$ Table 5 Calculation results of atmospheric settlement pollutional load for Lijihae Reservoir/ $t \cdot a^{-1}$

时期(降雨量/mm)	TN	TP	高锰酸盐指数
丰水期(638.9)	1.019	0.023	1.166
平水期(159.9)	0.217	0.004	0.245
枯水期(18.2)	0.024	0.001	0.025
合计	1.260	0.028	1.436

释放; TP的输入负荷顺序为:上游来水>降雨作用>内源释放. 3种污染物的主要来源是上游来水, 其贡献率均在99%以上, 主要原因是李家河水库新建不久, 底部沉积物较少, 内源释放量所占质量分数较低.

2.2 主要污染源分析

为了找出上游的主要污染源, 分别在丰水期、平水期和枯水期这3个时期对水库上游东采峪和西

表 6 李家河水库污染物负荷及其所占比例

Table 6 Pollutant loads and proportions for Lijiahe Reservoir

项目	高锰酸盐指数		TN		TP	
	污染负荷 /t·a ⁻¹	所占质量分数 /%	污染负荷 /t·a ⁻¹	所占质量分数 /%	污染负荷 /t·a ⁻¹	所占质量分数 /%
上游来水	307.500	99.52	215.070	99.41	5.276	99.23
底泥释放	0.062	0.02	0.023	0.01	0.013	0.24
降雨作用	1.436	0.46	1.260	0.58	0.028	0.53

采峪进行取样监测，监测点位如图 1 所示，具体监测结果如图 2 所示。

从图 2(a)~2(c)可知：水库上游西采峪沿程 TP 和 TN 的主要污染源汇入点为养鸡场和渔场，其次是红门寺；而高锰酸盐指数的主要污染源汇入点为养鸡场，渔场次之，其中饲料和粪便占主导因素，3 个时期 TP、TN 和高锰酸盐指数整体呈现的规律同样为：丰水期 > 平水期 > 枯水期。因葛牌镇位于水库上游东采峪，人流量与耕地面积多于西采峪，所以在丰水期，水库上游东采峪沿程河段的

TP、TN 和高锰酸盐指数的浓度整体高于西采峪。

从图 2(d)~2(f)可知：水库上游东采峪葛牌小学河段 TN 污染负荷较高，为沿程的一个主要氮源汇入点，其次是草坪服务区和铁索桥；沿程 TP 的主要汇入点为草坪服务区，葛牌小学次之，均为入流量比较密集的区域，因排入过多的生活污水以及农田施肥，导致附近河段中 TP 和 TN 浓度偏大；而黄沙沟、草坪服务区和葛牌小学河段的高锰酸盐指数污染负荷稍高于凉水湾和铁索桥，3 个时期 TP、TN 和高锰酸盐指数整体呈现的规律为：丰水期 > 平

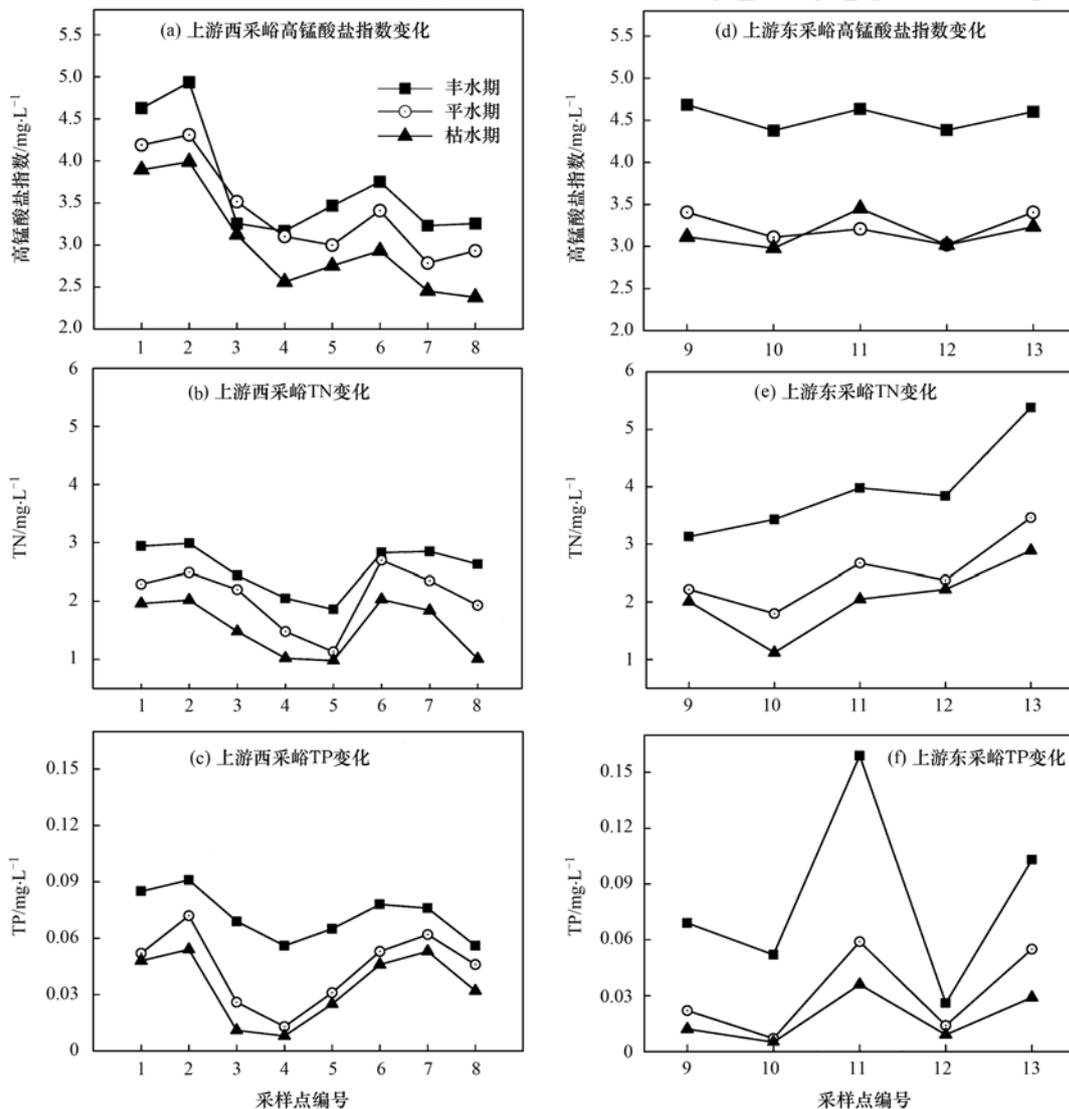


图 2 李家河水库上游 TP、TN 和高锰酸盐指数变化

Fig. 2 Changes in TP, TN, and permanganate index in the upper reaches of Lijiahe Reservoir

水期 > 枯水期。

2.3 水体分层对水质的影响

水库水温分层一般采用 α 指标法, 即 $\alpha = \text{年入库径流量} / \text{总库容}$ 。当 $\alpha < 10$ 时, 为稳定分层型; 当 $\alpha > 20$ 时, 为完全混合型^[15]。李家河多年平均水量为 $83.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 正常蓄水库容为 $56.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, 所以李家河水库的 $\alpha = 1.46 < 10$, 为稳定分层型。

2.3.1 水温、溶解氧变化特征

李家河水库属于深水型季节性热分层水库, 夏季水温和溶解氧分层显著, 水库垂向水温主要取决于当地自然气候及水体分层结构; 垂向溶解氧水平取决于水体复氧和耗氧过程的相对强弱, 水库表层水体因为大气复氧作用全年处于接近饱和状态, 且水温越低, 水体溶解氧含量越高^[16]。如图 3(a) 所示, 李家河水库表层水体与大气直接接触, 因存在明显的热量交换, 表层水温波动较大, 全年水温在 $3.0 \sim 30.0^\circ\text{C}$ 之间变动; 中层水温在 $4.0 \sim 24.0^\circ\text{C}$ 之间; 下层水温相对比较恒定, 全年水温维持在 $3.0 \sim 10.0^\circ\text{C}$ 之间。在水体完全混合期(1~3 月), 垂向水温基本保持一致, 截止 3 月底, 表底层温差达 6°C , 分层尚未形成。随后进入水体分层形成期(4~6 月), 表层水体受气温升高的影响, 水温逐渐升高, 至 6 月底, 表层水温已经高达 24°C , 表底层温差达到 15°C , 在水深 $18 \sim 25 \text{ m}$ 处出现明显的温跃层, 水体热分层逐渐开始形成。在水体稳定分层期(7~9 月), 李家河水库表层水温达到全年最大值(30°C), 此时表底

层温差高达 24°C , 温跃层厚度也达到全年最大, 水体热分层开始趋于稳定。进入 10 月份后, 随着气温的不断降低, 表底层温差逐渐变小, 水体热分层结构逐渐失稳破坏, 开始进入水体混合期, 至 12 月底, 表层水体与底部温差仅为 2.41°C , 基本达到完全混合, 水体各项指标趋于一致^[17]。

如图 3(b) 所示, 在水体热分层结构的影响下, 垂向溶解氧也呈现出相似的季节性变化规律。在水体完全混合期(1~3 月), 由于上下层水体可以得到充分交换, 因此整个垂向溶解氧含量都处于较高的水平, 维持在 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。进入水体分层形成期(4~6 月)后, 随着水体热分层的逐渐形成, 垂向水体溶解氧传递受阻, 至 6 月初, 垂向溶解氧也呈现出显著的分层现象。水体出现两个厌氧区域(溶解氧为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$): 中上层水体(5~24 m)及底部水体。①中上层水体厌氧区域的形成主要与藻类水华相关, 在水体表层过高的光照强度下, 部分藻种会迁移至次表层(5~10 m), 导致藻类下沉聚集^[18, 19], 在无光条件下, 藻类分解增加了水体耗氧速率, 导致中上部水体出现缺氧甚至厌氧环境; ②底部水体厌氧区域的形成是由于温跃层阻碍了垂向水体溶解氧的传递, 导致底部逐渐开始厌氧。这一分层结构一直持续到水体稳定分层期(7~9 月), 至 9 月底由于受到暴雨径流对水体混合充氧的影响, 削弱了这种独特的氧分层特点, 水库开始进入自然混合时期, 厌氧区域逐渐消失。

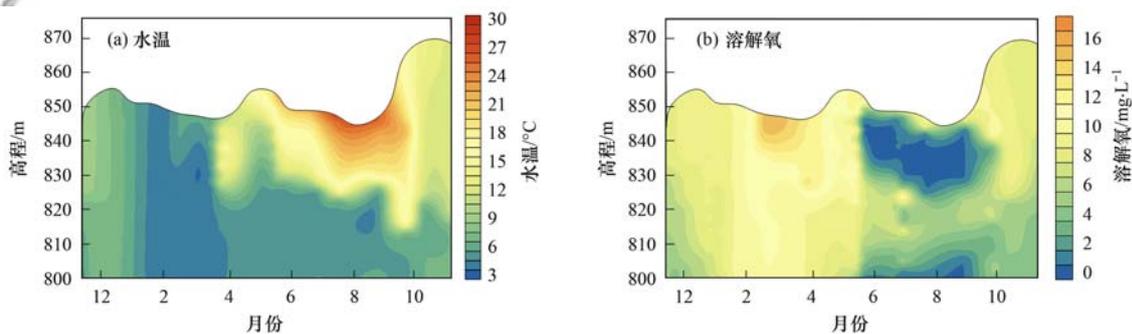


图3 李家河水库水温和溶解氧时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of water temperature and dissolved oxygen in Lijihae Reservoir

2.3.2 水体氮、磷和有机物变化特征

如图 4 所示, 2016 年 12 月~2017 年 12 月, 李家河水库上部水体 TP 浓度变幅为 $0.019 \sim 0.095 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均值为 $0.046 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 中部水体 TP 浓度变幅为 $0.019 \sim 0.099 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均值为 $0.047 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 底部水体 TP 浓度变幅为 $0.017 \sim 0.177 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均值为 $0.079 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总体上, 李家河水库 TP 浓度处于较高水平。热分层期, 底部水体 TP 浓度在 4 月最低, 为 $0.017 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 但随着库底

季节性缺氧的出现, 沉积物附近氧化还原电位降低, 不同形态的磷不断转化释放进入上覆水体中, 使得底部水体 TP 浓度迅速增大^[20, 21], 极大值出现在 7 月和 10 月, 分别为 $0.177 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.107 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水体混合后底部水体 DO 浓度增加, 磷释放受到抑制, 底部 TP 含量开始向上层水体迁移扩散, 导致上部水体 TP 浓度增加而底部降低, 整个垂向水体中 TP 浓度逐渐趋于均一化。

水体混合期, 水库垂向各水层 TN 浓度差异不

大且浓度相对较低, 3月开始, 水体中 TN 浓度开始出现升高现象, 在水温、光照及营养盐的多重作用下, 水库发生了小规模硅藻暴发, 之后水体中 TN 浓度又开始缓慢降低. TN 最大质量浓度出现在水库汛期6月. 主要原因是: 随着雨季的来临, 大量径流携带污染物进入水库导致水体污染负荷升高, TN 浓度达到全年最大值 $3.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 7月进入稳定分层期后, 李家河水库 TN 质量浓度开始降低, 垂向分布呈现“上低下高”的特征^[22]. 一方面由于温跃层的存在导致垂向水体交换受阻, 所以底部恒温

层的 TN 浓度高于表层和中部水体. 另一方面, 藻类因获得了适宜的光照和温度条件而开始大量繁殖, 尤其是蓝藻门的铜绿微囊藻, 最大密度达 $2.18 \times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 期间藻类通过光合作用将水中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 等无机离子所含的 N 元素缔结到碳骨架上形成藻类细胞, 从而消耗大量氮营养盐导致上层水体中氮质量浓度降低. 10月后水库开始慢慢进入自然混合期, 垂向 TN 和 TP 质量浓度均值逐渐降低并趋于一致, 可见, 在寒冷的冬季, 水库水质较好^[23].

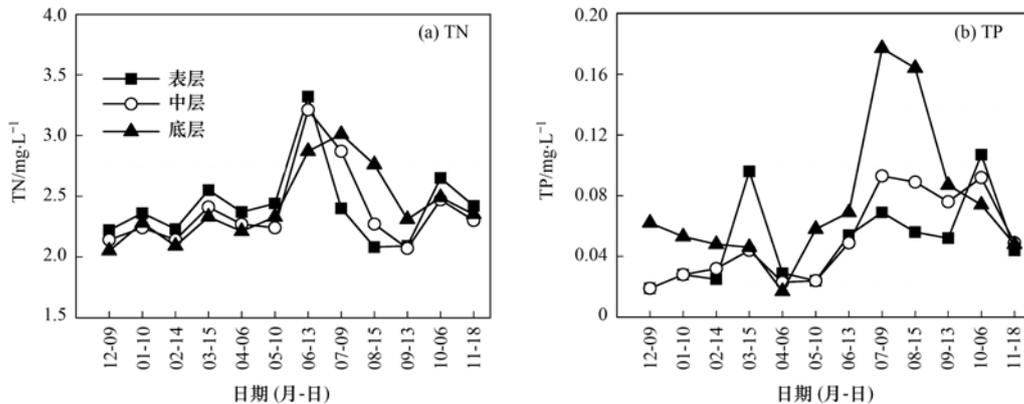


图4 李家河水库氮、磷动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of nitrogen and phosphorus in Lijiahe Reservoir

水体中有机物(包括高锰酸盐指数和 TOC)变化的主要因为: ①藻类解体释放有机物; ②厌氧条件下有机质的分解释放; ③沉积物中释放的 DOC 被其中的微生物分解利用. 如图 5 所示, 有机物浓度两次峰值分别出现在 3 月和 8 月. 3 月有机物峰值的出现是由于当时出现了小规模硅藻暴发, 藻类有机物的释放是造成第一次峰值出现的主导因素; 8 月刚好处于热分层时期, 底部水体出现厌氧, DO 浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉积物中有机质大量分解释放, 进入上覆水中导致底部水体有机物浓度升高, 而表层水体因藻类的大量繁殖, 有机物浓度也保持较高的水平. 混合初期, 垂向水

体混合使得底部水体逐渐开始好氧, 在好氧状态下沉积物中释放的 DOC 不断被微生物分解利用, 且分解速度超过了释放速度, 同时期的藻类也进入消亡期. 因此在混合期, 水体中有机物浓度一直处于较低的水平.

2.3.3 金属元素变化特征

底部水体处于厌氧环境时, 很容易发生沉积物-水界面的 Fe 和 Mn 元素的迁移转化^[24], 导致上覆水中 Fe 和 Mn 含量超标. 如图 6 所示, 在水体混合期, 垂向 Fe 和 Mn 质量浓度基本趋于一致, 从分层形成期开始(4~6月), 由于温度分层初步形成, 温跃层较薄, 垂向水体传质受阻影响较小, 加之底

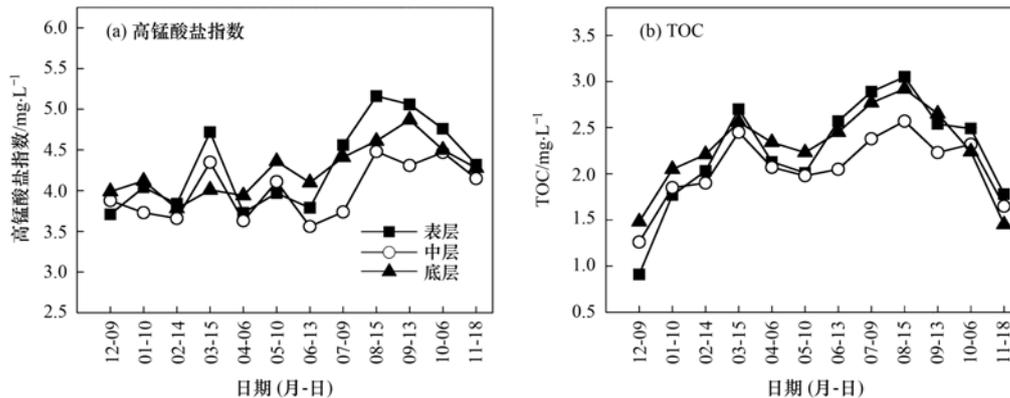


图5 李家河水库有机物动态变化

Fig. 5 Dynamic changes in organic compounds in Lijiahe Reservoir

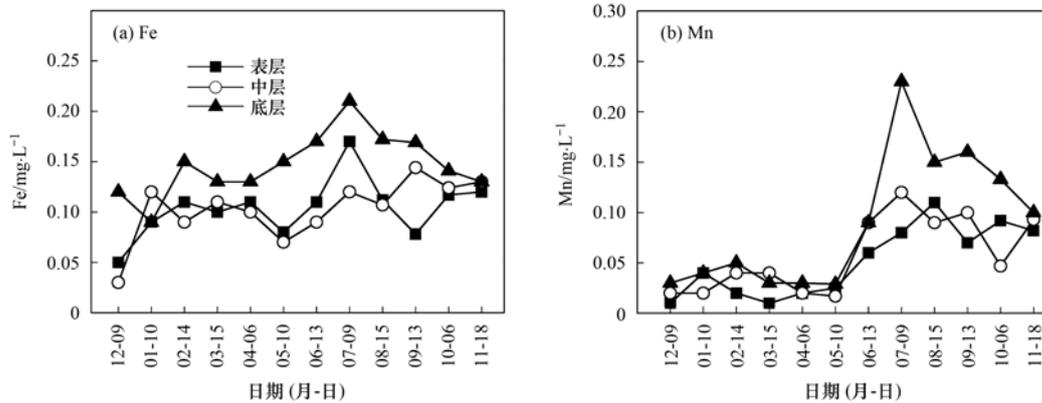


图6 李家河水库铁锰动态变化

Fig. 6 Dynamic changes in iron and manganese in Lijiahe Reservoir

部水体还未达到完全厌氧状态, 所以垂向 Fe 和 Mn 质量浓度差距较小且整体水平较低, 但逐月呈递增趋势, 至 6 月底, 底部的 Fe 和 Mn 质量浓度已达到 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 进入稳定分层期后(7~9 月), 底部已达到完全厌氧状态, 沉积物开始向上覆水体中释放 Fe 和 Mn 等金属元素, 导致底部恒温层的 Fe 和 Mn 质量浓度远高于表层和中层水体, 达到 Fe 和 Mn 全年最大质量浓度, 分别为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.235 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均达到超标状态, 之后水温分层强度逐渐削弱, 底部溶解氧浓度有所升高, 进入自然混合期后, Fe 处于较低水平, Mn 则依然处于超标状态.

2.3.4 藻类数量和种群演变

藻类的大量繁殖对水库水质的恶化影响显著^[25~27], 其生长繁殖受到多种因素的限制, 其中主要的影响因素有水温、光照强度、营养盐浓度及降雨影响^[28~30]. 如图 7 所示, 越冬期间(12 月~次年 2 月), 藻类生长繁殖受到抑制, 藻类种群密度达到全年最低, 优势藻主要为绿藻和硅藻, 有文献记载, 藻类在越冬时期由于环境条件的限制而进入休眠过程, 当环境适宜时再恢复生长, 为次年藻类的生长提供种源. 湖泊底泥作为湖泊生态系统的重要组成部分, 不仅是湖泊内源性污染的主要汇和源, 也是湖泊生物重要的栖息地和主要越冬场所^[31], 通过显微镜观察计数发现, 在越冬期湖泊底泥中确有大量的硅藻(以针杆藻为主)存在, 其数量甚至超过中上层水体藻密度, 证实了这一观点的可靠性.

随着 3 月气温的逐渐升高, 在比较适宜的水温和光照条件下, 底泥中硅藻开始恢复生长, 上浮聚集至表层水体并开始大量繁殖, 形成全年第一次藻类暴发, 藻类密度接近 $3.0 \times 10^6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 表层水体因藻类光合作用而大量产氧, 水体达到溶解氧过饱和和状态; 在水体分层形成时期(4~6 月), 藻类繁殖

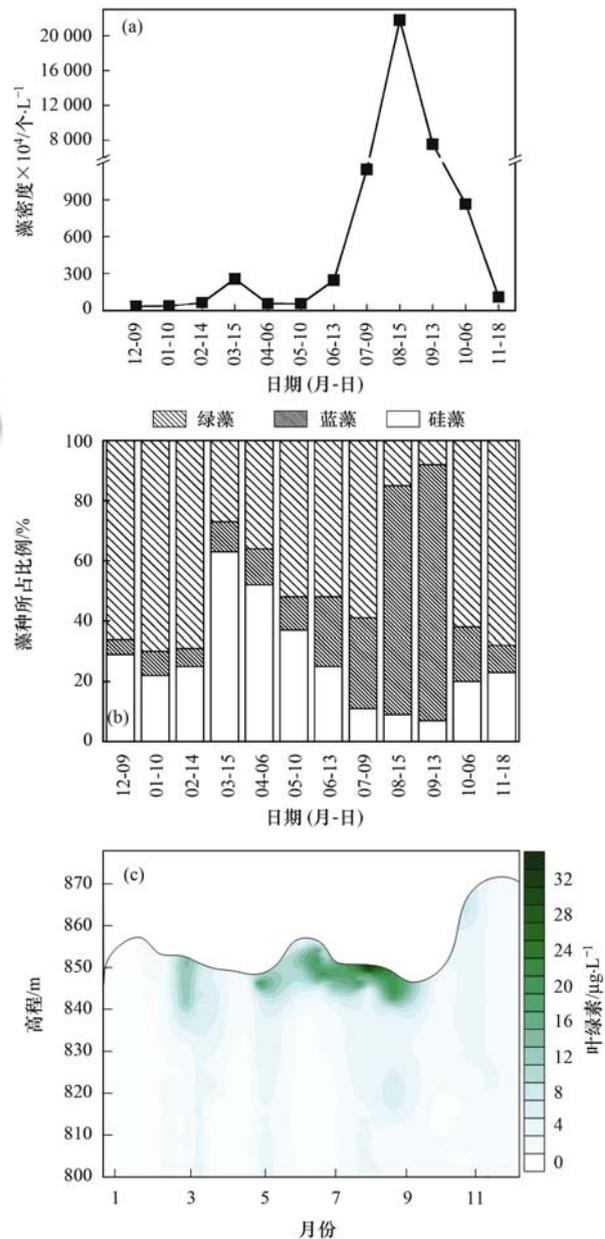


图7 李家河水库藻类动态变化

Fig. 7 Dynamic changes in algae in Lijiahe Reservoir

速度较为缓慢,其密度维持在 10^6 个·L⁻¹左右;水体分层稳定期(7~9月),此时的水温及光照强度达到了全年藻类生长的最适条件,并在营养盐的综合作用下,绿藻(以小球藻为主)及硅藻(以小环藻为主)首先获得优势并开始大量繁殖,随后受到光照强度的抑制由更耐光强的蓝藻(以铜绿微囊藻和束丝藻为主)所取代,藻密度也因蓝藻的暴发而上升至全年最高,达 2.18×10^8 个·L⁻¹,水体中溶解氧再次达到过饱和状态,随后进入自然混合期(10~12月初),随着气温的降低,水体分层逐渐消失,表层水温降低,藻类进入衰减消亡期,蓝藻几乎消亡殆尽,绿藻和硅藻再次成为优势藻种,藻密度明显减少,进入藻类越冬时期。

3 结论

(1)李家河水库为新建水库,底泥中蓄积的污染物较少,底泥内源释放影响相对较小;上游来水是水库主要的污染物来源,对高锰酸盐指数、TN和TP污染物总量的贡献率分别达99.52%、99.41%和99.23%,上游东采峪葛牌小学河段污染负荷较高,为沿程的一个主要污染源汇入点,其次是草坪服务区,西采峪主要污染源汇入点为养鸡场和渔场。

(2)李家河水库为典型的季节性分层水库,4月开始形成水体分层,垂向温度及溶解氧梯度逐渐增大,底部逐渐进入厌氧状态;稳定分层期,高锰酸盐指数、TN、TP和TOC的最大释放浓度分别为5.93、3.32、0.177和3.01 mg·L⁻¹,Fe和Mn的最大释放浓度分别为0.21 mg·L⁻¹和0.235 mg·L⁻¹。

(3)李家河水库较高的营养盐含量造成藻类污染问题严重,藻密度最高达到 2.18×10^8 个·L⁻¹,主要藻种为蓝藻门的铜绿微囊藻和束丝藻,严重威胁水质安全。因此,控制库区内藻类繁殖是李家河水库水质污染控制的首要任务,同时应通过水库上游污染源治理减少营养盐的输入,从根本上降低水库富营养化水平。

参考文献:

[1] Palma P, Ledo L, Soares S, *et al.* Spatial and temporal variability of the water and sediments quality in the Alqueva Reservoir (Guadiana Basin; Southern Portugal) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 780-790.

[2] 陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(4): 438-443.

Chen X F, Chuai X M, Yang L Y. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 438-443.

[3] 邓焕广, 张菊. 东昌湖水体富营养化评价及N、P平衡研究

[J]. *环境科学与管理*, 2008, **33**(8): 178-180.

Deng H G, Zhang J. Assessment of eutrophication and balance of N and P in Dongchang Lake [J]. *Environmental Science and Management*, 2008, **33**(8): 178-180.

[4] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4141-4150.

Gou T, Ma Q L, Wang Z X, *et al.* Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in the summer in Guishi Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4141-4150.

[5] 黄廷林, 曾明正, 邱晓鹏. 周村水库季节性热分层消亡期水质响应特性[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(10): 5695-5702.

Huang T L, Zeng M Z, Qiu X P. Response of water quality of Zhoucun Reservoir during the disappearance of seasonal thermal stratification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(10): 5695-5702.

[6] Ma J Z, Ding Z Y, Wei G X, *et al.* Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei basin of Shiyang River, Northwest China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(2): 1168-1177.

[7] Ma X, Li Y, Zhang M, *et al.* Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **412-413**: 154-161.

[8] Li Y, Cao W Z, Su C X, *et al.* Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jialong River, Southeast China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**(5-12): 249-254.

[9] 黄廷林, 章武首, 柴蓓蓓. 大水深水库内源污染特征及控制技术[J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(3): 1-4.

Huang T L, Zhang W S, Chai B B. Study on the characteristics and control of endogenous pollution in source water reservoir with great depth [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010, **32**(3): 1-4.

[10] 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.

[11] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[12] 黄廷林, 秦昌海, 李璇. 石砭峪水库氮、磷营养盐季节变化及其收支分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **45**(1): 111-116.

Huang T L, Qin C H, Li X. Studies on the seasonal variation and budget of nitrogen, phosphorus of the Shibianyu reservoir [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2013, **45**(1): 111-116.

[13] 周子振, 黄廷林, 章武首, 等. 柘林水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, **48**(2): 93-99.

Zhou Z Z, Huang T L, Zhang W S, *et al.* Pollution sources and the stratification effects on water quality of Zhelin Reservoir [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, **48**(2): 93-99.

[14] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1477-1485.

Xia P H, Lin T, Li C X, *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng Reservoir in Guizhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1477-1485.

[15] 王煜, 戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2009, **31**(6): 11-14, 28.

- Wang Y, Dai H C. Effects of water temperature delamination in large-scale reservoirs and protection methods [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2009, **31**(6): 11-14, 28.
- [16] 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.
- [17] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- Dong C Y, Yu Z M, Wu Z X, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- [18] Stramski D, Sciandra A, Claustre H. Effects of temperature, nitrogen, and light limitation on the optical properties of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(2): 392-403.
- [19] 殷燕, 张运林, 王明珠, 等. 光照强度对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长及吸收特性的影响 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(5): 755-764.
- Yin Y, Zhang Y L, Wang M Z, *et al.* Effects of different irradiation intensity on the growth and absorption properties of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(5): 755-764.
- [20] 黄廷林, 秦昌海, 李璇. 峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3423-3429.
- Huang T L, Qin C H, Li Y. Studies on seasonal variation and sources of nitrogen and phosphorus in a canyon reservoir used as water source [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3423-3429.
- [21] 段木春, 肖海丰, 藏淑英. 西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2472-2479.
- Duan M C, Xiao H F, Zang S Y. Vertical distribution characteristics and analysis in sediments of Xidahai Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2472-2479.
- [22] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- Zhang C H, Huang T L, Fang K K, *et al.* Analysis of driving factors on the nitrogen decrease in the early stage of the thermal stratification in main area of Zhoucun Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4187-4193.
- [23] 李洁, 张思凡, 肖琳. 微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2164-2170.
- Li J, Zhang S F, Xiao L. Effect of water bloom on the nitrogen transformation and the relevant bacteria [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2164-2170.
- [24] 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.
- [25] Smith V H, Sieber-Denlinger J, Denoyelles Jr F, *et al.* Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2002, **18**(4): 319-323.
- [26] Yang J, Yu X Q, Liu L M, *et al.* Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(5): 1432-1442.
- [27] Nguyen M L, Westerhoff P, Baker L, *et al.* Characteristics and reactivity of algae-produced dissolved organic carbon [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(11): 1574-1582.
- [28] Chen S N, Chen X L, Peng Y, *et al.* A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, **33**(2): 1097-1106.
- [29] McQueen D J, Lean D R S. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratios on the dominance of blue-green algae in Lake St. George, Ontario [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, **44**(3): 598-604.
- [30] 宋云龙, 张金松, 郭小雅, 等. 石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3302-3311.
- Song Y L, Zhang J S, Guo X Y, *et al.* Spatiotemporal variations of chlorophyll a and its relationship to environmental factors in Shiyan Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3302-3311.
- [31] 王敬富, 陈敬安, 李秋华, 等. 贵州红枫湖越冬藻类的空间分布与实验室复苏实验 [J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(1): 108-114.
- Wang J F, Chen J A, Li Q H, *et al.* Spatial distribution and recruitment simulation test of over-winter algae in Lake Hongfeng, Guizhou [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(1): 108-114.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)