

Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 ..... 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 ..... 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 ..... 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 ..... 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 ..... 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 ..... 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 ..... 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 ..... 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 ..... 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 ..... 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 ..... 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 ..... 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 ..... 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 ..... 孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 ..... 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 ..... 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 ..... 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 ..... 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

**研究报告**

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 ..... 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 ..... 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM<sub>2.5</sub> 中有机组分的吸光性质及来源 ..... 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 ..... 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 ..... 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 ..... 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 ..... 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 ..... 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 ..... 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 ..... 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 ..... 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 ..... 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 ..... 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 ..... 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 ..... 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 ..... 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 ..... 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 ..... 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 ..... 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 赵春红, 申豪梁, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 ..... 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 ..... 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 ..... 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 ..... 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的制备及其吸附水中磷的性能 ..... 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 ..... 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 ..... 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 ..... 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 ..... 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 ..... 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 ..... 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 ..... 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 ..... 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 ..... 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域生态空间管控下生境监测方法概述 ..... 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

# 金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价

黄诚<sup>1,2</sup>, 黄廷林<sup>1,2\*</sup>, 李扬<sup>1,2</sup>, 李楠<sup>1,2</sup>, 齐允之<sup>3</sup>, 司凡<sup>1,2</sup>, 华逢耀<sup>1,2</sup>, 赵凌云<sup>1,2</sup>

(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; 3. 西安水务集团黑河金盆水库管理公司, 西安 710401)

**摘要:** 为探究西安金盆水库汛期暴雨径流沿程时空演变过程及库区水质响应, 对汛期 2019 年 8 月初与 9 月中旬两场暴雨径流上游河道至库区各断面的水质指标进行持续原位监测, 并在垂向上采用单因子污染指数法和综合污染指数法对库区进行水质评价. 结果表明: 汛期暴雨径流连续不同的来流条件会演变成不同的潜入情况, 两次径流初期入流量小, 水库潜流均经历全断面径流-底部潜流-间层流的过程, 在末期, 8 月初径流库区间层流位置由初期的 545~565 m 扩大为 535~580 m, 9 月中旬径流潜流位置由初期 540~575 m 的间层流演变成 575 m 以下的底部潜流; 连续的内流使库区热分层结构削弱, 溶解氧得到补充, 同时大量颗粒态污染物汇入库区, 营养盐在垂向上表现为中层、底层水体高于表层; 单因子污染指数表明径流潜流处总磷和高锰酸盐指数值都有一定的增加, 末期均超过地表水Ⅲ类水质标准; 综合污染指数表明 8 月初径流中层水质处于中污染, 底层则受厌氧与颗粒沉降的双重影响达到重污染, 并且在径流一周后达到峰值, 而 9 月中旬的 575 m 以下的潜流直接导致中层水体处于重污染, 底层由于溶解氧的补充处于中污染; 汛期通过泄洪洞的排放与分层取水可以有效地保障供水安全.

**关键词:** 金盆水库; 暴雨径流; 潜流过程; 水质评价; 营养盐

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1380-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007180

## Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir

HUANG Cheng<sup>1,2</sup>, HUANG Ting-lin<sup>1,2\*</sup>, LI Yang<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>1,2</sup>, QI Yun-zhi<sup>3</sup>, SI Fan<sup>1,2</sup>, HUA Feng-yao<sup>1,2</sup>, ZHAO Ling-yun<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, 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; 3. Xi'an Water Group Heihe Jinpen Reservoir Management Company, Xi'an 710401, China)

**Abstract:** To explore the temporal and spatial intrusion process of runoffs and the response of water quality during the flood season in the Jinpen Reservoir (JPR) in Xi'an. Continuous in-situ monitoring was carried out on the water quality indexes (WQI) from the upstream river channel to the reservoir of two runoffs in early August and mid-September 2019. The single factor WQI and comprehensive WQI were used to assess the water quality vertically. Different inflow conditions of rain storm runoffs evolved into different intrusions. The initial inflow of the two runoffs was small, the runoff experienced a full-section intrusion, bottom intrusion, and mid-intrusion process along the way; the position of mid-intrusion in reservoir changed from 545-565 m at the beginning of the runoff to 535-580 m at the end in early August, and developed from 540-575 m of mid-intrusion to 575 m below the bottom of the intrusion in mid-September. The continuous inflow weakened the thermal stratification structure and replenished the DO in the reservoir. Meanwhile, mass particulate pollutants sank into the reservoir, and vertically, the nutrients of middle and bottom parts were higher than at the surface. The single factor WQI showed that the TP and permanganate index values of underflow location increased to some extent, and both exceeded the class III water quality standard of surface water at the end. The comprehensive WQI showed that the middle layer of runoff was moderately polluted in early August, while the bottom layer was heavily polluted due to the dual effects of anaerobic and particle deposition, and reached the peak after one week of runoff, while the bottom intrusion of below 575 m directly caused heavy pollution in the middle layer, and bottom layer was medium polluted due to the supplement of dissolved oxygen in mid-September. The discharge of the spillway tunnel and the intake of stratified water could effectively guarantee the safety of the water supply during the flood season.

**Key words:** Jinpen Reservoir; rainstorm runoff; intrusion process; water quality indexes (WQI) assessment; nutrients

大多数水库由于水坝拦截具有水力停留时间长, 水动力强度低等特点, 这导致高温时期水体的垂向温度差, 形成温度分层的现象<sup>[1-3]</sup>. 热分层的形成使水体恒温层的溶解氧传质受阻, 当水体底部耗氧速率超过复氧速率时, 厌氧区域逐渐出现, 加剧了沉积物的内源污染释放<sup>[4,5]</sup>. 近年来强降雨极端天气出现次数递增<sup>[6]</sup>, 汛期暴雨径流对地表的冲刷造成

水土的大量流失. 水库由于热分层的存在, 水体在垂向上存在一定的密度差, 不同的径流则以不同的等密度潜流方式进入水库<sup>[7,8]</sup>, 导致大量氮、磷营养盐

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2020-10-17

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(2019ZDLSF06-02)

作者简介: 黄诚(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理与微污染控制, E-mail: huangcheng9862@163.com

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

等污染物汇入水库,造成水库水质污染问题.因此,了解径流的潜流过程及径流前后水质响应对评估水库生态系统功能至关重要.

在分层水库中,径流来水由于温度、浊度的差异导致每次入流密度的不同,形成不同的潜入情况<sup>[9,10]</sup>,Marti 等<sup>[11]</sup>研究多股径流进入 Thomson 水库时发现入流以有序的方式潜入水库,其潜入深度取决于入流条件.根据入流条件的不同,密度流可分为表层流、间层流和底部潜流,国内外对此已有大量研究,Cortés 等<sup>[12]</sup>通过贝兹纳尔湖流入地中海水库的示踪实验发现贝兹纳尔湖很大一部分以表层流进入地中海水库,Ma 等<sup>[13]</sup>通过对三峡库区典型支流湘西湾的水动力和水温进行数值模拟发现三峡大坝主体的水位波动、干流与支流之间的水温差以及支流的进水流量是影响密度流的主要因素,吕晓龙等<sup>[14]</sup>对 2015 年与 2017 年金盆水库汛期层流对比发现入流水体密度与潜流区域均随径流量的增大而增加,Gelda 等<sup>[15]</sup>模拟了纽约市 Rondout 水库极端降雨后入流的浊度异重流,为选取有效的取水方式提供了依据.这些大多数都只单一研究径流的潜流形式,然而,对不同径流前后的潜流过程与水体水质响应研究甚少.

西安金盆水库是西安市的主要水源地,2019 年汛期 8 月初与 9 月中旬持续的径流形成不同的潜流过程,水库水质均遭到严重破坏.本研究通过对西安金盆水库汛期多断面水质监测,对比两场暴雨径流的时空演变过程,探讨汛期径流前后水库库区水质响应,以为后续汛期径流研究提供有效数据,也为水库汛期径流的管理提供科学的理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

西安金盆水库(33°58'~34°03'N; 108°09'~108°13'E)位于陕西省黑河峪口以上约 1.5 km 处,距西安市 86 km,属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 850.52 mm.水库位于秦岭山中,从其河流汇入口至库区全长约 13 km,四周地势陡峭,属于峡谷深水型水库,上游森林覆盖率 56%,人类活动少,是西安市主要水源地.水库总库容 2 亿 m<sup>3</sup>,有效库容 1.77 亿 m<sup>3</sup>,最大水域面积 4.68 km<sup>2</sup>,最大水深 106 m,平均水深 70 m,正常高水位 594 m,汛限 591 m,死水位高程 520 m,泄洪洞口底高程 545 m,引水塔的取水口分三层,上、中、下底板高程分别为 514.3、554 和 571 m.

金盆水库热分层一般出现每年 4~9 月,其中 4~5 月处于热分层形成期,6~9 月处于热分层稳定

期.库区流域降雨主要集中在 5~9 月,其中 7~9 月为主汛期,这也导致汛期径流进入稳定分层的库区,形成不同的潜流情况.

### 1.2 采样时间与采样点设置

根据水库上游实际地形与水位情况沿着中泓线沿程选取 10 个具有代表性的监测断面.如图 1 所示,S1~S9 为上游断面区,其中 S9 为主库区入口,S10 为水库的主库区靠近引水塔位置.2019 年 7~10 月,对 S10 断面每周一次原位水质监测,径流期间对所有断面进行水质监测,并根据雨情及上游情况增加监测频率,极个别情况下,上游断面无法到达,能够监测的断面根据实际情况而定.在垂向上水体自表层 0.5 m 至底泥以上 0.5 m 进行分层取样,根据水深分为表层(0.5~10 m)、中层(20~40 m)和底层(60 m~底泥以上 0.5 m).

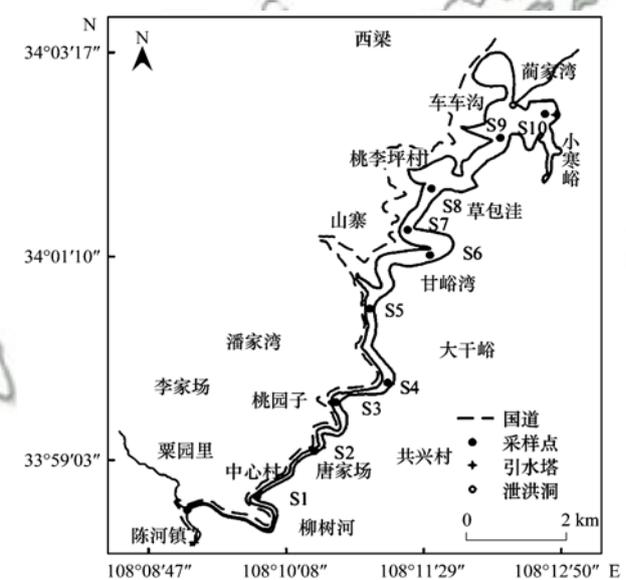


图 1 金盆水库监测断面分布示意

Fig. 1 Map of monitoring section distribution of JPR

### 1.3 样品分析与数据收集

#### 1.3.1 样品分析方法

水深、水温、浊度和溶解氧等参数用 HACH Hydrolab DS5 型多参数水质测定仪(美国哈希公司)进行垂向的原位监测,深度间隔 1~5 m.总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳等参数的测定均按照国家标准方法<sup>[16]</sup>进行测定.

#### 1.3.2 水质评价

采用《环境影响评价技术导则 地表水环境》(HJ/T2.3-2018)中水质指数法<sup>[17]</sup>评价库区径流前后水质,评价标准采用国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)规定的Ⅲ类水水质标准<sup>[18]</sup>,单因子选取溶解氧、pH、氨氮、总磷和高锰酸盐指数.同时采用水质综合污染指数<sup>[19,20]</sup>来说明水库水质的综合情况.

### 1.3.3 数据的收集与处理

降雨及水位等气象数据来自金盆水库水文监测站;水质参数采用 Microsoft Excel 2010 软件建立数据库;采用 Origin 2018 软件进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 汛期入流与降雨量分析

如图 2 所示,金盆水库全年降雨分布不均匀,降

雨主要集中于 5~9 月。1~4 月连续为西安市供水,水位持续降低至 555 m 左右,经 4 月末~5 月初的“桃花汛”时期,累计降雨量 111.11 mm,水位迅速上升至 582 m 左右。7~9 月为金盆水库的主汛期,累计降雨量 707.83 mm,占全年降雨量的 70.03%,入库总量占全年的 74.35%。在 7~9 月汛期,选取 8 月初(7 月 28~7 日)与 9 月中旬(9 月 8~17 日)两场持续径流,其降雨与径流特征如表 1 所示。

表 1 汛期降雨与径流特征

Table 1 Characteristics of rainfall and runoffs in the flood season

日期 (月-日)	单场最大降雨量 /mm	最大日均入库流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	最大日均出库流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	上游洪峰流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	最大泄洪流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
07-28~08-01	38.36	149.44	30.00	456.00	—
08-02~08-07	64.21	668.43	330.00	1 329.00	1 030.00
09-08~09-12	54.44	233.52	226.00	460.00	200.00
09-13~09-17	61.73	908.93	826.00	1 170.00	1 126.00

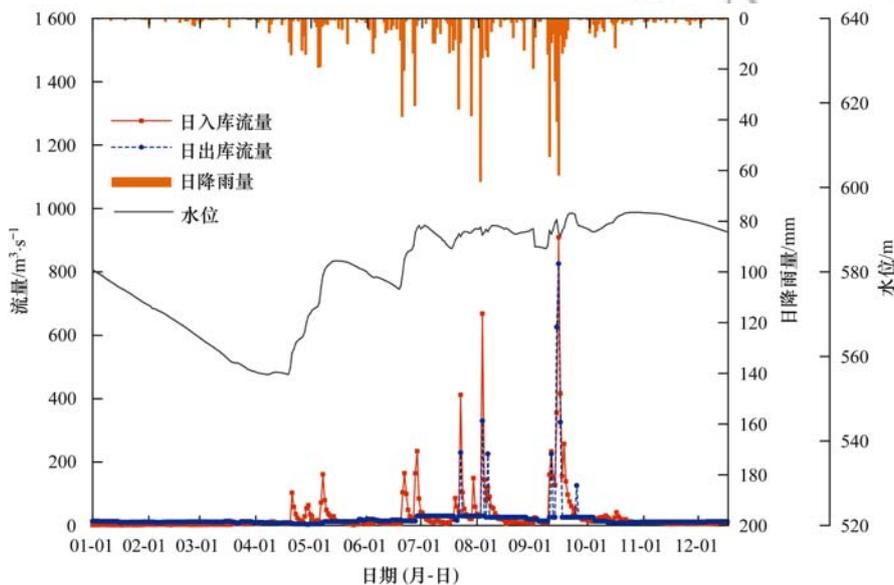


图 2 2019 年金盆水库水位、日出入库流量和日降雨量变化

Fig. 2 Changes in water level, daily inflow and outflow, and daily rainfall of JPR in 2019

### 2.2 汛期入流水体水质分析

汛期入流水体水质如表 2 所示,8 月初径流演变中,上游来水总氮由  $(1.47 \pm 0.02) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升至  $(1.81 \pm 0.06) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总磷由  $(0.043 \pm 0.010) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升至  $(0.078 \pm 0.016) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,9 月中旬的演变中总氮由  $(1.18 \pm 0.05) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升至  $(1.49 \pm 0.17) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总磷由  $(0.026 \pm 0.004) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升至  $(0.076 \pm 0.010) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总氮与总磷含量均超过国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)规定的 III 类水水质标准,表现出随着径流量的增大,入流的污染负荷逐渐升高。同时 8 月初与 9 月中旬入流浊度与温度的变化,也为不同的异重流提供了条件。

土壤受降雨的冲刷作用,造成土壤中大量污染物的流失<sup>[21~23]</sup>。彭梦玲等<sup>[24]</sup>采用室内人工模拟降

雨实验发现,养分流失与坡面产流量具有较强的线性相关性,与产沙量呈显著的幂函数关系,郭怀成等<sup>[25]</sup>通过对滇池宝象河初期 3 场暴雨观测,结果发现 TSS 和总磷负荷贡献率与降雨强度的变化趋势一致,具有典型的颗粒态负荷冲刷特点,而总氮和高锰酸盐指数负荷贡献率与降雨量的变化趋势一致,更多地表现为溶解态负荷冲刷特征。Li 等<sup>[26]</sup>对太湖流域暴雨、高、中、低强度的 4 次降雨径流的初期冲刷进行研究,发现氮、磷流失与平均降雨强度和最大降雨强度密切相关,当降雨强度较大时,氮、磷流失更为严重。金盆水库上游位于秦岭山脉中,地势陡峭,人类活动少,汛期受降雨冲刷及溅蚀,8 月初与 9 月中旬径流氮磷等污染物的流失均随降雨强度的增加而显著增大。

表 2 汛期上游入流水体水质  
Table 2 Water quality of upstream inflow water in the flood season

日期 (月-日)	浊度 /NTU	温度 /°C	溶解氧 /mg·L <sup>-1</sup>	总氮 /mg·L <sup>-1</sup>	总磷 /mg·L <sup>-1</sup>	总有机碳 /mg·L <sup>-1</sup>	高锰酸盐指数 /mg·L <sup>-1</sup>
07-30	161.1 ± 58.2	15.45 ± 0.95	6.57 ± 1.04	1.47 ± 0.02	0.043 ± 0.010	3.97 ± 0.36	5.52 ± 0.43
08-04	219.8 ± 80.4	16.63 ± 0.54	9.93 ± 0.12	1.81 ± 0.06	0.078 ± 0.016	3.03 ± 0.20	4.88 ± 0.22
09-12	98.9 ± 23.5	16.97 ± 0.39	8.16 ± 0.42	1.18 ± 0.05	0.026 ± 0.004	2.01 ± 0.15	3.82 ± 0.33
09-15	477.5 ± 320.7	14.65 ± 1.05	9.44 ± 0.60	1.49 ± 0.17	0.076 ± 0.010	3.08 ± 0.42	4.80 ± 0.25

## 2.3 汛期暴雨径流时空演变过程

### 2.3.1 8月初径流时空演变过程

由于汛期径流带来大量的颗粒态物质,浊度能够直观地反映径流汇入情况<sup>[27]</sup>.如图3(a)~3(c)所示,前期降雨历时短,监测时径流已汇入至S3,上游S1已无径流汇入,导致S1和S2全断面浊度小(浊度<2NTU).自S3起由于入流的温度低和底部浊度的增加,入流的密度与S3~S5底部水体密度相同,形成底部潜流,在565m处形成明显的清浑水界面.随着水深的增加和底部温度的降低,在S6的535m处形成新的清浑水界面,间层流潜入位置在535~565m处.由于断面水深的进一步增加和颗粒的沉降,潜入位置下部清浑水界面不断上移,到库区S10下部清浑水界面位置上升至545m.库区潜流区的溶解氧稀释至7.90 mg·L<sup>-1</sup>左右,但并未影响底部厌氧状态.

经8月2日64.21 mm的降雨后,入流浊度显著升高.如图3(d)~3(f)所示,由于此次来流量大,浊

度较大,底部潜流发生在S2~S6,清浑水界面出现在580m,相对初期,底部潜流开始位置提前,并且延至S6,潜流范围也增大.和初期一样随着水深的增加和底部温度的降低,在S7~S10形成间层流,库区潜入位置为535~580m[图3(e)],由于此次入流水温[(16.63 ± 0.54)°C]比初期入流水温[(15.45 ± 0.95)°C]大,导致初期潜入区域下移,下部清浑水界面相比前期降低至525m.溶解氧在S1~S9分布基本一致,S10库区由于面积大,入流溶解氧与初期库区相稀释,在中部535~580m处溶解氧稀释至8.80 mg·L<sup>-1</sup>左右.值得注意的是,在两次沿程中,585m左右处溶解氧都出现显著地降低,这是由于连续的降雨天气,表层浮游藻类缺乏光照死亡沉降,微生物分解有机物消耗溶解氧<sup>[28]</sup>.

### 2.3.2 9月中旬径流时空演变过程

水体的异重流是由水体的密度差形成,密度又与水体水温和浊度密切相关<sup>[29]</sup>.由于9月12日入流的浊度小,径流的潜入位置主要取决于水温,是以

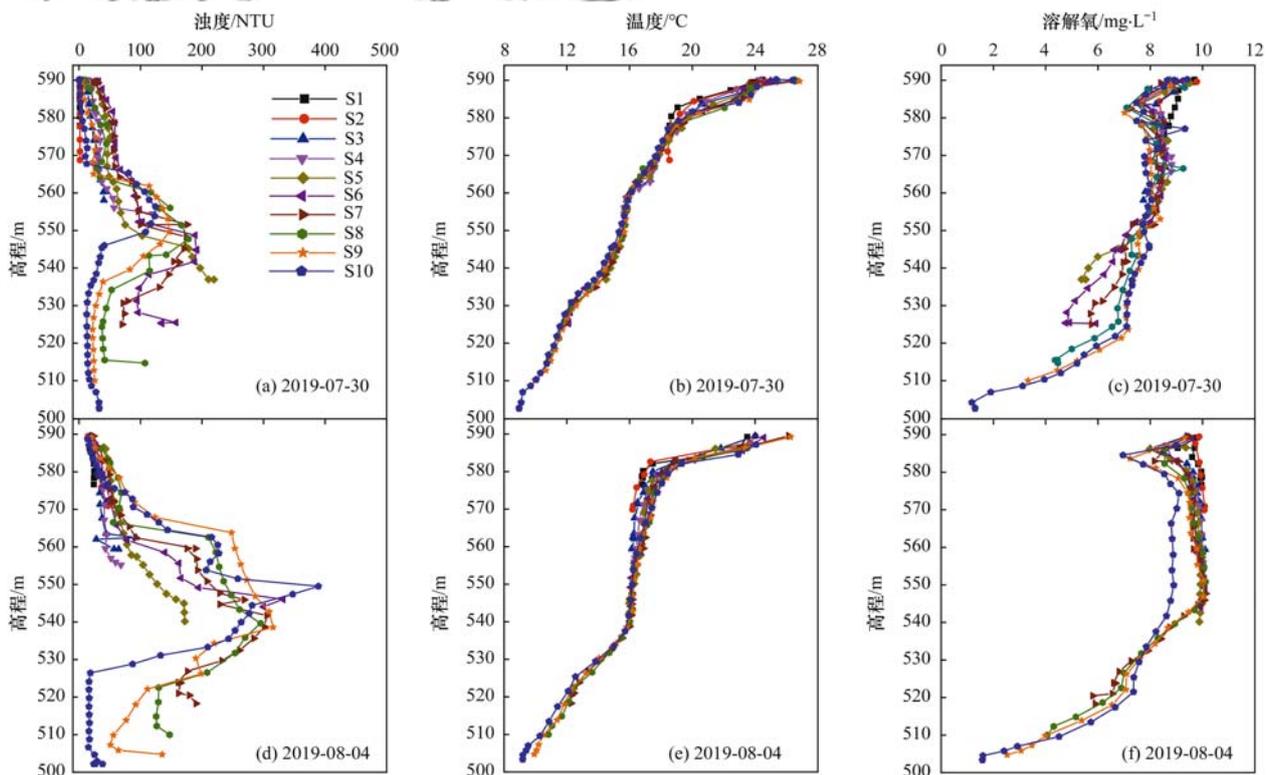


图 3 8月初径流过程中沿程各断面浊度、温度和溶解氧垂向变化

Fig. 3 Vertical variation of turbidity, temperature and dissolved oxygen of each section along the runoff process in early August

温差为主导的异重流. 由图 4(a)~4(c)可知, S3~S10 垂向温度分布基本一致, 在垂向 540~575 m 处与来流的水温相似. 根据各断面的高程和水温情况说明入流经 S1 和 S2 的全断面径流后, 进入 S3~S5 底部形成底部潜流, 再以间层流(540~575 m)的方式流入库区. 溶解氧在 540~575 m 维持在  $8.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 库区底部依旧处于厌氧状态, 进一步验证了初期以温差为主的异重流.

经 9 月 13 日与 9 月 14 日持续降雨, 9 月 15 日日入库流量达  $908.93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 此次径流流量大, 相对初期浊度明显提高, 异重流位置由浊度与温差共同控制. 由图 4(d)可知, 在垂向上浊度不断升高, 在沿程中上游经 S2 的全断面径流后, 由于颗粒的沉降, 沿程潜入位置逐渐下降, 从 S3 在 585 m 处的清浑水界面沿程逐渐降至 S10 的 575 m 处的清浑水界面. 从图 4(e)和 4(f)也可以看出, 温度突变和溶解氧突变的界面沿程逐渐下降, 并且界面以下水体全部更换成来流水, 破坏了库区底部厌氧情况, 处于混合状态.

在径流演变中, 不同的入流情况会发展成沿程

不同的潜流过程<sup>[11,30]</sup>. Cherry 等<sup>[31]</sup>对中国台湾 Feitsui 水库暴雨后产生的异重流进行跟踪和模拟发现悬浮固体浓度高、水温低的入流会向水库 50~60 m 深处移动. Chung 等<sup>[32]</sup>通过模拟多个尺寸组的悬浮颗粒, 并利用特定的悬浮颗粒与浊度的关系进行转化, 研究了不同异重流进入水库的潜入情况. 在 2019 年金盆水库汛期中, 8 月初径流随着入流条件的改变, 由初期上游 S3~S5 潜入位置为 565 m 发展至 S2~S6 潜入位置为 580 m 的底部潜流, 进入库区间层流厚度由初期的 20 m(545~565 m)升高至 45 m(535~580 m), 下部清浑水界面从 545 m 降低至 525 m. 9 月中旬径流入流条件由初期的低流量、低浊度向 9 月 15 日高流量、高浊度变化, 初期的温差异重流使来流进入与来流温度相同的水层形成上游 S3~S5 的底部潜流, S6~S10 的间层流, 在高程 540~575 m 进入库区, 高流量高浊度进入后, 使初期的以温差为主的异重流向以浊度与温差共同控制的异重流转变, 形成除 S2 全断面径流外 S3~S10 的沿程底部潜流情况, 潜入位置从 S3 的 585 m 沿程降至 S10 的 575 m, 潜入位置以下水体全部发生更换.

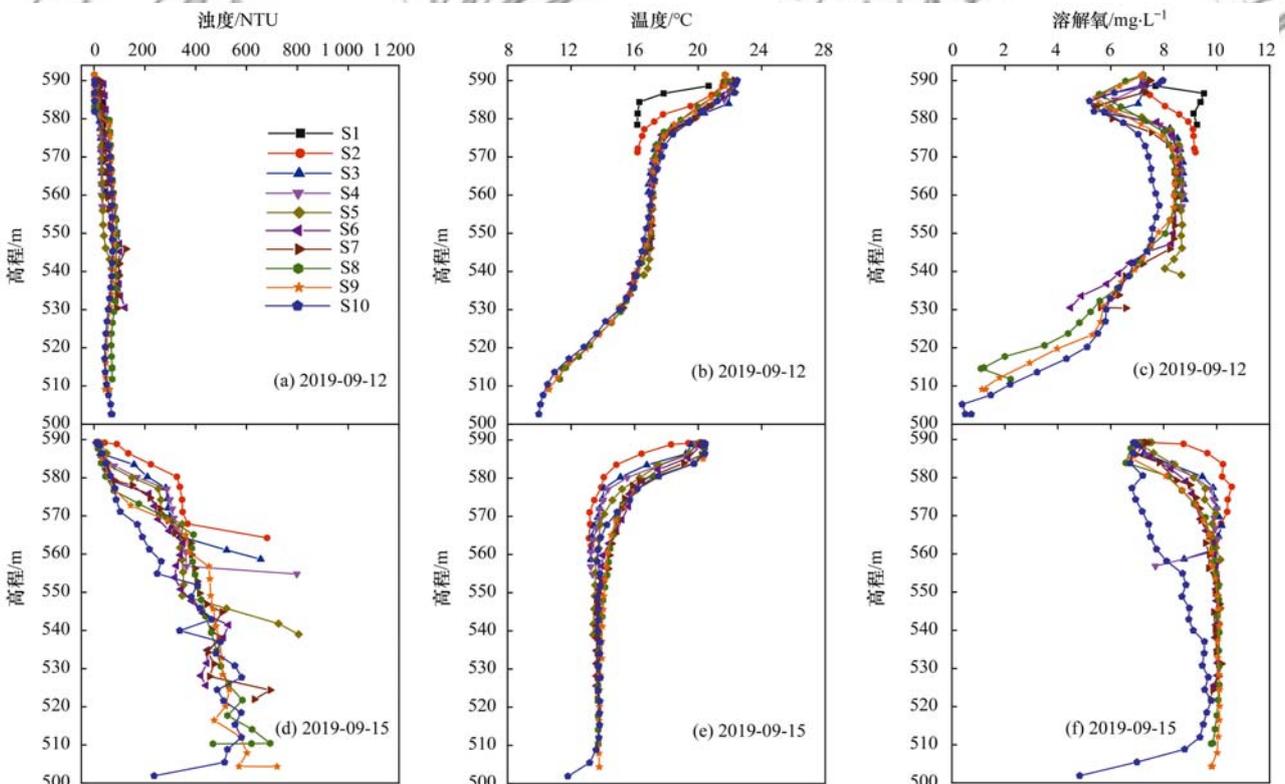


图 4 9 月中旬径流中水库沿程各断面浊度、温度和溶解氧垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of turbidity, temperature and dissolved oxygen of each section along the runoff process in mid-September

## 2.4 汛期库区水体水质变化

### 2.4.1 汛期库区浊度、温度、溶解氧的变化

对于饮用水源地, 极端降雨事件和随后持续的浊度是比较关心的问题. 在 8 月初径流前库区整体

浊度低( $<20 \text{ NTU}$ ), 从图 5(a)和 5(d)可以看出, 经径流后大量污染物汇入库区, 浊度明显上升. 径流初期以间层流的形式流入库区, 潜流位置为 545~565 m, 随径流的演变, 在 8 月 4 日发展成潜流区域

更大的间层流,浊度垂向峰值由初期的 124.2NTU 增大至 347.5NTU. 径流结束后,由于颗粒的不断沉降,于 9 月 2 日整体浊度降低至 70NTU 以下. 在 9 月中旬,初期由于上游来水浊度低,进入库区的浊度与径流前无明显差别. 9 月 15 日入流浊度( $477.5 \pm 320.7$ )NTU,库区从初期潜入位置 540~575 m 的间层流演变成 575 m 以下的潜流,垂向浊度峰值达 581.0NTU. 为了防止径流后底部出现厌氧区域释放污染物导致混合时期水质污染问题,金盆水库于 9 月 26 日~10 月 23 日开启扬水曝气<sup>[33]</sup>使水体提前混合. 虽然扬水曝气对颗粒的沉降有些影响,但浊度在 11 月 7 日仍降低至 30NTU 以下.

Lee 等<sup>[34]</sup>在 2009 年莫拉克台风期间对高平河浊度变化研究发现,在降雨过程中浊度的增加率与降雨强度呈显著正相关. Park 等<sup>[35]</sup>对高浊水汇入 Soyanggang 水库研究发现强热分层作用下,高浊度水停留在水库温跃层内,但当热分层较弱时,高浊度水可以与周围水迅速混合. 2019 年金盆水库 8 月初与 9 月中旬径流中也表现出汇入水库的浊度随降雨强度的增加而增大. 对于径流后持续的浊度问题,水库通过泄洪塔的排放已极大程度达到排浊的目的,但仍有部分颗粒物停留在水库中. 由于 8 月初的间层流并未完全破坏水体的热分层,弱分层使颗粒的

沉降略微受到影响,浊度从 350NTU 左右降低至 8 月 12 日的 150NTU 左右,而 9 月中旬的潜流使水库热分层遭到严重破坏,中下部水体混合,径流后一周底部水体降至 250NTU 左右(9 月 23 日).

水温与溶解氧是水库中的两个重要的环境因素变量<sup>[36]</sup>. 如图 5 所示,2019 年 8 月初暴雨径流以间层流潜入库区,来流水温、溶解氧由初期的( $15.45 \pm 0.95$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、( $6.57 \pm 1.04$ ) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  改变为 ( $16.63 \pm 0.54$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、( $9.93 \pm 0.12$ ) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,库区温度和溶解氧在潜流区明显提升,底部处于厌氧状态. 径流后,由于径流带来大量氮磷营养物,表层水体浮游植物大量生长,死亡沉入 580 m 左右,分解消耗大量溶解氧,在中下层水体中,微生物分解径流带来的有机物,溶解氧在垂向上显著下降. 2019 年 9 月中旬暴雨径流间层流演变成底部潜流中,受 8 月初径流影响,径流前呈现出双温跃层,径流初期间层流(540~575 m)后主温跃层从 565 m 上升至 575 m. 来流水温( $14.65 \pm 1.05$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、溶解氧( $9.44 \pm 0.60$ ) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的潜流后,潜流界面 575 m 以下水温一致,溶解氧提升. 径流后,在人工诱导混合作用下表层水温逐渐降低,于 11 月 7 日提前导致整个水体混合.

夏秋季水温分层时期表层与大气充分接触,保持较高的溶解氧,如果表层营养盐充足,会使水中浮

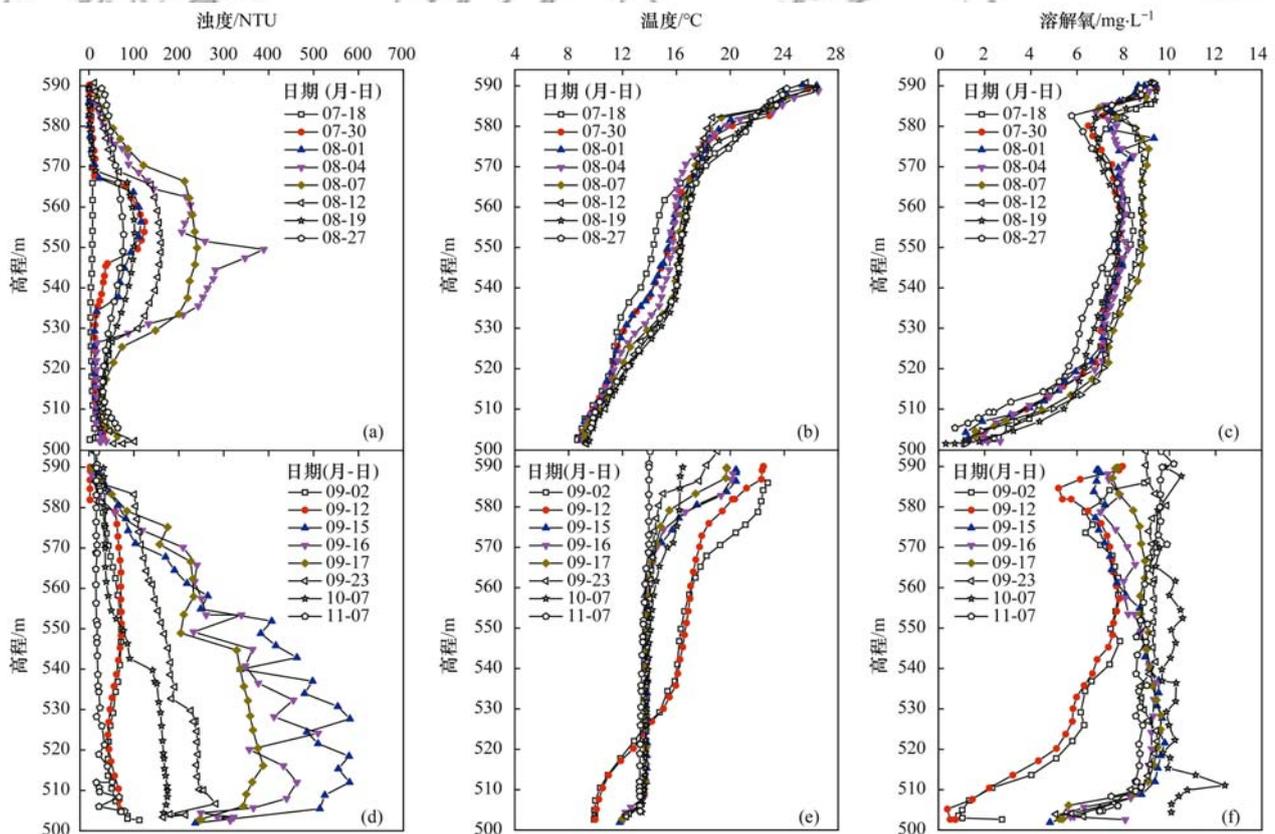


图 5 两次暴雨径流前、中、后库区浊度、温度和溶解氧垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of turbidity, temperature and dissolved oxygen in the reservoir before, during and after two rainstorms

游植物大量生长出现富营养化现象,而在库底恒温层由于紊动扩散小、传质受阻以及微生物分解耗氧形成底部厌氧环境,导致溶解氧分层<sup>[37,38]</sup>. 水库分层后径流潜入与来流密度相同的水层,同时携带大量的溶解氧,缓解水体缺氧情况<sup>[14,27,29]</sup>. Liu等<sup>[39]</sup>研究表明,降雨对热分层结构的影响很大程度上取决于降水量的大小,中、强降雨事件会降低水库的热稳定性,加深混合层深度,而暴雨会彻底破坏水库的温跃层. Fink等<sup>[40]</sup>通过研究东部康斯坦斯湖底部潜流表明,多次的径流将增加底部潜流的数量与深水区溶解氧更新的强度,从而导致深水区更高的溶解氧浓度. 金盆水库汛期8月初库区间层流发展中,水库的热稳定性逐渐降低,而9月中旬直接破坏了水体的热分层结构. 库区潜流区在径流后期均展现出更高的溶解氧浓度:8月7日潜流区溶解氧浓度为 $8.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右与9月17日潜流区溶解氧浓度为 $9.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,表明持续的入流使潜流区的溶解氧得到更新,溶解氧浓度随降雨量的增加而增大.

#### 2.4.2 汛期库区营养盐变化

汛期库区营养盐变化如图6所示,在汛期各营养盐变化趋势相似,均在径流时期出现峰值. 径流前总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳垂向平均浓度分别为 $2.00$ 、 $0.014$ 、 $3.79$ 和 $3.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其中总氮主要以硝态氮为主. 经初期7月30日间层流后( $545\sim 565\text{ m}$ ),总氮在中层由于来流硝氮稀释的原因降至 $1.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,氨氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳在中层和底层均有升高. 随着径流量的增加,8月4日中层潜流区域增大,总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳中层的浓度达 $1.66$ 、 $0.094$ 、 $5.51$ 和 $3.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,底层由于初期的沉降,其总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳浓度升高至 $1.84$ 、 $0.084$ 、 $6.19$ 和 $4.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 径流后各营养盐浓度逐渐降低,垂向趋于混合,在9月3日总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳垂向平均浓度降低至 $1.24$ 、 $0.019$ 、 $3.81$ 和 $1.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 由于径流带来营养物质为表层浮游藻类繁殖提供有利条件,9月3日叶绿素a含量达 $25.83\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

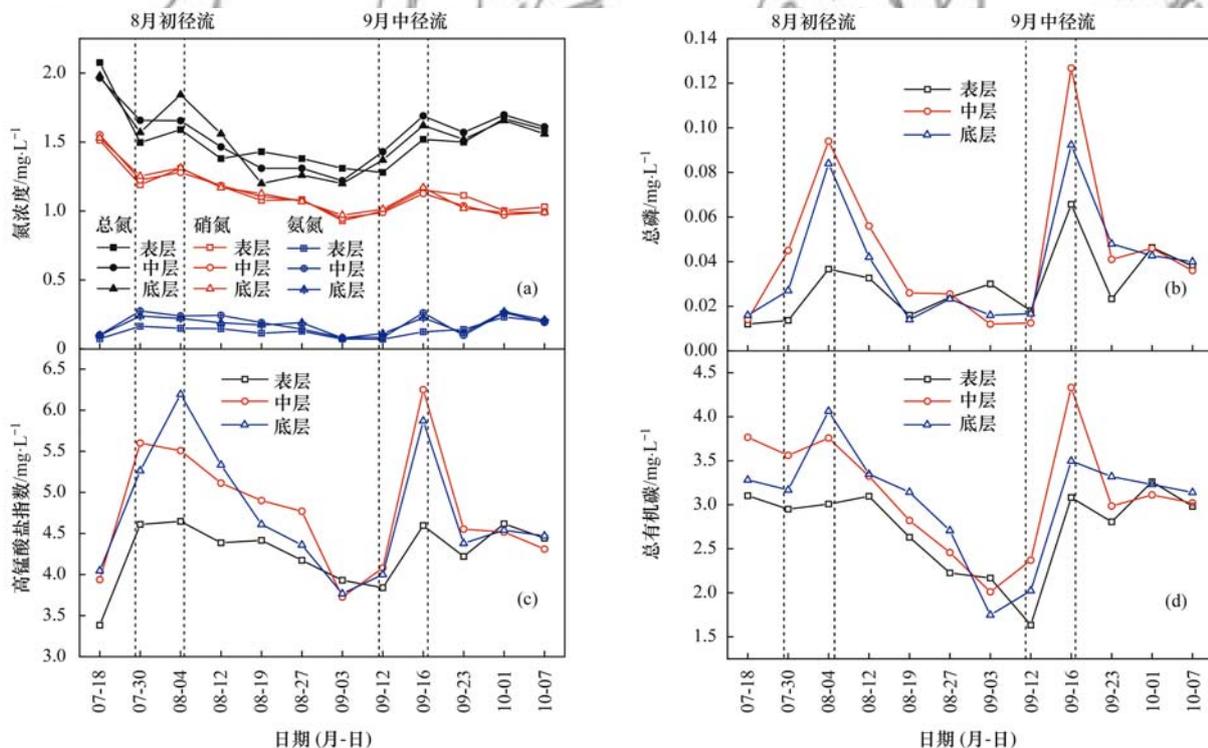


图6 汛期库区营养盐变化

Fig. 6 Changes in nutrients in the reservoir during the flood season

9月中旬径流演变中,9月12日由于来流浊度小,总氮、高锰酸盐指数和总有机碳在中层和底层略有提升,表层由于气温低光照弱引起藻类的死亡沉降导致营养盐的下降.9月16日来水在 $575\text{ m}$ 以下潜流使垂向各营养盐的浓度显著上升,中层总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳浓度升高至 $1.69$ 、

$0.127$ 、 $6.25$ 和 $4.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,底层总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳浓度增至 $1.62$ 、 $0.092$ 、 $5.87$ 和 $3.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,经一周后各指标都有一定的降低. 9月26日扬水曝气开启,在人工强制混合的作用下,使营养盐垂向上分布基本一致,同时加强微生物活性导致营养盐开始下降<sup>[41]</sup>.

降水量、土地利用和土壤类型是影响污染负荷的重要因素<sup>[22,24]</sup>. 曾康等<sup>[27]</sup>对 2014 年金盆水库的异重流的研究发现,不同降雨量上、中水层总氮、总磷、总有机碳出现不同的响应,中下层变化较为显著,呈双峰式分布. Qiu 等<sup>[42]</sup>在暴雨期间对密云水库上游流域的研究发现,氮磷的流失与农业用地面积呈显著的正相关,植被覆盖度高的林地能有效防止养分流失. 金盆水库上游森林覆盖率高,人类活动少,汛期径流带来的污染物浓度主要受降雨量影响,8 月初与 9 月中旬库区总氮、总磷、高锰酸盐指数和总有机碳浓度均随降雨量的增加而升高,中下层浓度显著高于表层水体. 温成成等<sup>[43]</sup>通过扬水曝气对李家河水库诱导自然混合研究发现人工诱导混合后,与同期自然混合期相比氨氮、总磷、铁和锰都极

大地削减. 金盆水库 9 月径流后扬水曝气的开启,一方面保障了水体高溶解氧的状态,改善水环境,另一方面水体的混合加强水体中微生物的代谢活性.

2.4.3 单因子污染指数法评价

采用单因子污染指数法计算得出汛期金盆水库各因子的  $S_i$  值,结果见表 3. 从中可以看出在径流时期潜流位置处,由于径流的汇入,氨氮、总磷和高锰酸盐指数的  $S_i$  值都有一定的增加,具有较高的污染风险,均表现出  $S_i$  值随着径流的持续汇入而增大;溶解氧受潜流位置的影响,8 月初与 9 月中旬初期的间层流未影响到底层,中层由于溶解氧的补充使  $S_i$  值略有减少,而 9 月中旬径流末期的底部潜流使底层  $S_i$  值迅速减少. 除上述情况外,其余各  $S_i$  值均小于 1,符合地表水 III 类水水质标准.

表 3 汛期库区各单因子水质指数  $S_i$  值

Table 3 The  $S_i$  value of the water quality index of each single factor in the reservoir during the flood season

日期 (月-日)	溶解氧			pH			氨氮			总磷			高锰酸盐指数		
	表层	中层	底层	表层	中层	底层									
07-18	0.63	0.66	2.01	0.72	0.28	0.08	0.07	0.10	0.10	0.24	0.28	0.32	0.68	0.79	0.81
07-30	0.63	0.65	2.7	0.85	0.35	0.06	0.17	0.28	0.24	0.27	0.9	0.54	0.92	1.12	1.05
08-04	0.51	0.58	2.52	0.64	0.51	0.05	0.15	0.24	0.22	0.73	1.88	1.68	0.93	1.1	1.24
08-12	0.47	0.59	3.94	0.75	0.51	0.16	0.15	0.24	0.19	0.65	1.12	0.84	0.88	1.02	1.07
08-19	0.57	0.67	3.02	0.82	0.51	0.10	0.11	0.19	0.17	0.32	0.52	0.28	0.88	0.98	0.92
08-27	0.43	0.70	2.79	0.81	0.49	0.10	0.13	0.14	0.19	0.33	0.51	0.47	0.83	0.95	0.87
09-03	0.68	0.68	2.94	0.7	0.33	0.25	0.25	0.07	0.08	0.6	0.24	0.32	0.79	0.75	0.75
09-12	0.78	0.7	4.17	0.56	0.45	0.06	0.07	0.08	0.11	0.30	0.25	0.33	0.66	0.82	0.74
09-16	0.68	0.58	0.80	0.54	0.65	0.49	0.13	0.26	0.23	1.31	2.54	1.85	0.92	1.25	1.17
09-23	0.55	0.54	0.75	0.69	0.62	0.55	0.14	0.10	0.12	0.47	0.82	0.96	0.84	0.91	0.88
10-01	0.40	0.29	0.44	0.59	0.53	0.54	0.23	0.26	0.27	0.93	0.92	0.85	0.92	0.90	0.91
10-07	0.22	0.36	0.27	0.59	0.56	0.55	0.20	0.19	0.21	0.69	0.55	0.96	0.89	0.86	0.89

2.4.4 综合水质污染指数评价

利用单因子水质污染指数得出汛期库区垂向上综合水质污染指数如图 7 所示. 从中可知,水库汛期表层一直处于轻污染状态,径流时期略有增大. 中层与底层则受径流的影响较大,8 月初径流与 9 月中

旬径流中层综合水质污染指数均随径流的发展逐渐上升,8 月初水质状态由轻污染升至中污染,9 月中旬则直接从轻污染升至重污染. 底层水质状态变化主要受溶解氧影响,8 月初底层由于溶解氧的单因子水质污染指数较大,并且径流带来的颗粒态污染物的沉淀,导致径流后一周底层综合水质污染指数到达峰值,而 9 月中旬末期底层富氧水的汇入导致水质状态从初期的重污染降至中污染. 径流后由于泄洪洞的排放,综合水质污染指数迅速下降,8 月初径流后 2 周底层降至中污染状态,表层和中层降至轻污染状态,而 9 月中旬径流造成中下层水体混合,1 周后整个水体都处于轻污染状态.

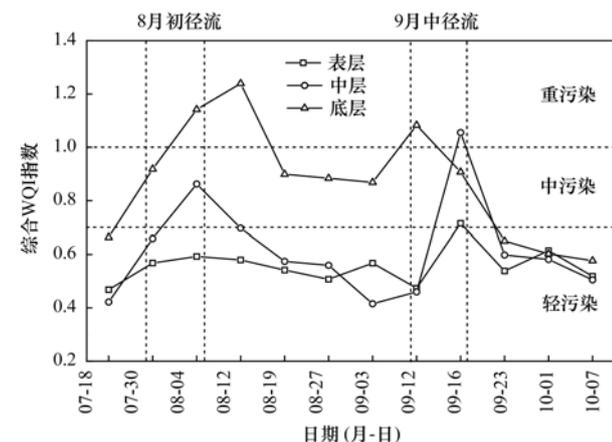


图 7 汛期库区综合 WQI 指数的变化

Fig. 7 Changes in comprehensive WQI in the reservoir during the flood season

2.5 汛期库区的应对措施

汛期阶段性外源汇入使水库水质遭到严重污染,为表层藻类的生长提供充足的营养盐<sup>[44]</sup>. 陈修康等<sup>[45]</sup>对广东高州水库研究表明,洪水后水库的理化性质改变,水库由以蓝藻和绿藻为优势类群的群落转变为洪水后以硅藻和甲藻为优势类群的群落. 径流后大量的颗粒态污染物沉入水库底层,增加内

源污染负荷<sup>[46,47]</sup>. 2017 年金盆水库沉积物的研究表明随着入库流量的增加,沉降颗粒中无机磷的占比也增加,表层沉积物中的 Ca-P 和 rest-P 也随之增加<sup>[48]</sup>. 金盆水库 2019 年汛期 8 月初径流间层流的发展和 9 月中旬间层流向底部潜流的演变中,中层和底层营养盐浓度显著增大,并且都随着径流的发展,汇入的污染物逐渐增多. 通过两种水质评价表明了径流潜流位置处的短时高负荷污染,尤其在 8 月初径流末期的底层与 9 月中旬径流的末期的中层水体水质都处于重污染状态. 入库后水质对水库供水的水厂净化系统也会带来一定程度的冲击,造成水厂运行困难,制水成本大幅提高,增大了自来水厂出厂水和供水管网水质超标风险.

为了应对汛期暴雨径流引起的污染,金盆水库采取以下两种措施:①对于径流期间带来的外源污染,利用高程为 545 m 的泄洪洞进行泄洪,同时根据径流的潜流情况,选取上层取水方式减少对水厂的影响;②对于径流后水库热分层末期可能出现的内源污染,通过人工强制混合使水库水体提前混合,改善水环境.

### 3 结论

(1) 汛期暴雨径流连续不同的来流条件会演变成不同的潜入情况,径流初期水库潜流一般沿程经历全断面径流-底层潜流-中层潜流的过程,随着入流量与密度的增大,上游底层潜流位置提前,中层潜流位置延后并且垂向潜流区域逐渐扩大,当达到一定的入流量和密度时,沿程演变成全断面径流-底层潜流两个阶段.

(2) 汛期由于入流水温与溶解氧的改变,库区热分层遭到不同程度的破坏,潜流区溶解氧得到补充,同时高浊水的不断潜入,造成库区的短时高负荷污染,营养盐浓度表现为随降雨量的增加而升高. 随着泄洪洞的泄洪与颗粒态污染物的沉降,在潜流区浊度、营养盐和有机物逐渐下降,底层则由于不断沉降聚集,大大增加了内源污染负荷.

(3) 根据单因子污染指数知,汛期径流的汇入使水库具有较高的污染风险. 综合污染指数结果表明,库区中层和底层的污染状态由于径流潜流的位置受到影响,8 月初中层污染指数随降雨强度的增大而升高,处于中污染状态,底层受厌氧与颗粒沉降的双重影响,在径流一周后达到峰值,9 月中旬径流中层直接升至重污染状态,底层由于富氧水的汇入,水质污染状态由重污染降至中污染.

(4) 径流带来的外源污染通过泄洪洞的排放达到排浊蓄清的效果,采用上层取水的方式有效规避

高浊、高有机负荷原水对水厂的冲击,以保证供水安全. 径流后利用人工强制混合使水体提前混合来预防水库热分层末期出现的内源污染释放问题.

### 参考文献:

- [1] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 等. 分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 547-554.
- [2] Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z, *et al.* Response of the water quality of a stratified reservoir to an extreme El Niño event during summer[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 547-554.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Cavalcante H, Araújo F, Noyma N P, *et al.* Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1022-1029.
- [6] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 166-172.
- [7] Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 166-172.
- [8] 龙妍妍, 范广洲, 段炼, 等. 中国近 54 年来夏季极端降水事件特征研究[J]. 气候与环境研究, 2016, **21**(4): 429-438.
- [9] Long Y Y, Fan G Z, Duan L, *et al.* A study on the characteristics of summertime extreme precipitation events over China in recent 54 years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(4): 429-438.
- [10] Zhou Z Z, Huang T L, Ma W X, *et al.* Impacts of water quality variation and rainfall runoff on Jinpen Reservoir, in Northwest China[J]. *Water Science and Engineering*, 2015, **8**(4): 301-308.
- [11] Zhang J P, Xiao H L, Zhang X, *et al.* Impact of reservoir operation on runoff and sediment load at multi-time scales based on entropy theory[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 809-815.
- [12] 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.
- [13] Li Y, Huang T L, Ma W X. Correlation analysis of rainstorm runoff and density current in a canyon-shaped source water reservoir; implications for reservoir optimal operation[J]. *Water*, 2018, **10**(4), doi: 10.3390/w10040447.
- [14] Marti C L, Mills R, Imberger J. Pathways of multiple inflows into a stratified reservoir: Thomson reservoir, Australia [J]. *Advances in Water Resources*, 2011, **34**(5): 551-561.
- [15] Cortés A, Fleenor W E, Wells M G, *et al.* Pathways of river water to the surface layers of stratified reservoirs[J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(1): 233-250.
- [16] Ma J, Liu D F, Wells S A, *et al.* Modeling density currents in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Ecological Modelling*, 2015, **296**: 113-125.
- [17] 吕晓龙, 黄廷林, 李楠, 等. 暴雨径流潜流过程及其对分层水库水质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3064-

- 3072.
- Liu X L, Huang T L, Li N, *et al.* Impact of stormwater inflow on water quality of stratified source reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3064-3072.
- [15] Gelda R K, Effler S W, Prestigiacomo A R, *et al.* Characterizations and modeling of turbidity in a water supply reservoir following an extreme runoff event [J]. *Inland Waters*, 2013, **3**(3): 377-390.
- [16] 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.
- [17] HJ 2.3-2018, 环境影响评价技术导则 地表水环境 [S].
- [18] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S].
- [19] 刘琰, 郑丙辉, 付青, 等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(3): 49-55.
- Liu Y, Zheng B H, Fu Q, *et al.* Application of water pollution index in water quality assessment of rivers [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(3): 49-55.
- [20] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River [J]. *Water Research*, 2000, **34**(11): 2915-2926.
- [21] 杨帆, 蒋轶锋, 王翠翠, 等. 西湖龙泓流域暴雨径流氮磷流失特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 141-147.
- Yang F, Jiang Y F, Wang C C, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in Longhong ravine basin of Westlake in rainstorm runoff [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 141-147.
- [22] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: a case study of the Fengyu River watershed [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [23] Marzen M, Iserloh T, de Lima J L M P, *et al.* Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 502-513.
- [24] 彭梦玲, 吴磊, 乔闪闪. 不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1109-1116.
- Peng M L, Wu L, Qiao S S. Coupling simulation of runoff-sediment-nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1109-1116.
- [25] 郭怀成, 向男, 周丰, 等. 滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1298-1307.
- Guo H C, Xiang N, Zhou F, *et al.* First flush effects of storm events of Baoxiang River in Lake Dianchi watershed [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1298-1307.
- [26] Li S M, Wang X L, Qiao B, *et al.* First flush characteristics of rainfall runoff from a paddy field in the Taihu Lake watershed, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(9): 8336-8351.
- [27] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 金盆水库汛期高浊水径流的潜入及热分层水体水质响应 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2778-2786.
- Zeng K, Huang T L, Ma W X, *et al.* Water-quality responses of the intrusion of high-turbidity runoff to the thermal stratified Jinpen Reservoir during flood season [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2778-2786.
- [28] 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.
- [29] 邓云, 李嘉, 罗麟, 等. 水库温差差异重流模型的研究 [J]. *水利学报*, 2003, **34**(7): 7-11.
- Deng Y, Li J, Luo L, *et al.* Temperature prediction model for reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, **34**(7): 7-11.
- [30] 马卫星. 暴雨径流潜流对峡谷分层型水源水库水质影响与水质原位改善 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- Ma W X. The effects of rainstorm flow undercurrent on water quality and the in-situ water quality improvement of a canyon-shaped, stratified, source water reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [31] Cherry Chen Y J, Wu S C, Lee B S, *et al.* Behavior of storm-induced suspension interflow in subtropical Feitsui Reservoir, Taiwan [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(2): 1125-1133.
- [32] Chung S W, Hipsey M R, Imberger J. Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake: Daecheong Reservoir, Korea [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(12): 1467-1482.
- [33] 张晗, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧对分层型水库细菌群落演替的影响 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1732-1739.
- Zhang H, Huang T L, Li N, *et al.* The effect of artificial forced mixing and oxygenating on the bacterial community succession in the stratified reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1732-1739.
- [34] Lee C S, Lee Y C, Chiang H M, *et al.* Abrupt state change of river water quality (turbidity): Effect of extreme rainfalls and typhoons [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 91-101.
- [35] Park H, Chung S, Cho E, *et al.* Impact of climate change on the persistent turbidity issue of a large dam reservoir in the temperate monsoon region [J]. *Climatic Change*, 2018, **151**(3-4): 365-378.
- [36] Weber M, Rinke K, Hipsey M R, *et al.* Optimizing withdrawal from drinking water reservoirs to reduce downstream temperature pollution and reservoir hypoxia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **197**: 96-105.
- [37] 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.
- [38] 陈倩, 李秋华, 胡月敏, 等. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析 [J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(7): 1266-1274.
- Chen Q, Li Q H, Hu Y M, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Baihua Reservoir, Guizhou Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(7): 1265-1274.
- [39] Liu M, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Effects of rainfall on thermal stratification and dissolved oxygen in a deep drinking water reservoir [J]. *Hydrological Processes*, 2020, **34**(15): 3387-3399.
- [40] Fink G, Wessels M, Wüest A. Flood frequency matters: why climate change degrades deep-water quality of peri-alpine lakes [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **540**: 457-468.

- [41] 周石磊. 混合充氧强化水源水库贫营养好氧反硝化菌的脱氮特性及技术应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.  
Zhou S L. Nitrogen removal characteristics of indigenous-oligotrophic aerobic denitrifiers via in situ oxygen enhancement and technology application research[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [42] Qiu J L, Shen Z Y, Wei G Y, *et al.* A systematic assessment of watershed-scale nonpoint source pollution during rainfall-runoff events in the Miyun Reservoir watershed [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(7): 6514-6531.
- [43] 温成成, 黄廷林, 李楠, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1227-1235.  
Wen C C, Huang T L, Li N, *et al.* Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- [44] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 774-782.  
Liu X Y, Song L X, Ji D B, *et al.* Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 774-782.
- [45] 陈修康, 郭跃华, 冯喻, 等. 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 137-146.  
Chen X K, Guo Y H, Feng Y, *et al.* Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: a case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 137-146.
- [46] Chen N W, Mo Q L, Kuo Y M, *et al.* Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 301-310.
- [47] 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.
- [48] 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 等. 金盆水库沉积物磷的来源及分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2738-2744.  
Mao X J, Huang T L, Li N, *et al.* Sources and distribution of phosphorus in sediments of the Jinpen Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2738-2744.



## CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas .....	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt .....	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas .....	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors .....	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China .....	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors .....	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City .....	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park .....	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development .....	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area .....	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter .....	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil .....	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment .....	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil .....	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice .....	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes .....	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic .....	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ .....	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM <sub>2.5</sub> Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing .....	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an .....	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City .....	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Beijing .....	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City .....	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region .....	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China .....	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter .....	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China .....	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019 .....	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste .....	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas .....	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin .....	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake .....	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries .....	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir .....	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season .....	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring .....	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO <sub>2</sub> Remolded Sediment .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China .....	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> Advanced Reduction Process .....	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate .....	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions .....	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility .....	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia .....	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons .....	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) .....	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia .....	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China .....	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields .....	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice .....	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics .....	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field .....	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N <sub>2</sub> O Emission from a Wheat Maize Rotation System .....	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management .....	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)