张 轩[1,2],黄廷林[1,2*],李 凯,等.径流输入对分层型水库水质影响及其调控研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6858-6868.
ZHANG Xuan[1,2], Huang Ting-lin[1,2*], LI Kai, et al. Effects and management of runoff input on water quality in a stratified reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2025,45(12):6858-6868.

径流输入对分层型水库水质影响及其调控研究

张 轩[1,2],黄廷林[1,2*],李 凯[1,2],张海涵[1,2],邵承宗[1,2],尚元琪[1,2],杨永强[3] (1.西安建筑科技大学,秦岭水源地水质陕西省野外科学观测研究站,陕西 西安 710055；2.西安建筑科技大学,陕西省水污染控制与水质安全保障协同创新中心,陕西 西安 710055；3.西安水务(集团)李家河水库管理有限公司,陕西 西安 710016)

摘要：为探究径流输入对分层型水库水质的影响以及人工调控径流潜流位置以实现优质取水的条件,以秦岭北麓李家河水库为例,对春季融雪径流和夏季暴雨径流水质指标进行高频及全断面原位监测,分析不同径流污染特征、潜流位置及库区水质响应规律.结果表明:①径流中的氮磷浓度显著升高,其中融雪径流中的氮磷均以溶解态为主,暴雨径流中的氮以溶解态为主,而磷以颗粒态为主,且因流量差异暴雨径流中的氮磷浓度显著大于融雪径流;②三场径流均可忽略悬浮颗粒物(SS<1kg/m^3)对水体密度的影响,水温成为影响径流潜流层的主要因素.融雪径流水温普遍大于水库表底层水温,形成表层流,导致水库在分层初期表层水体藻类迅速繁殖,极易诱发水华现象;③径流输入前,扬水曝气强制混合可通过改变库区水温垂向分布调控暴雨径流潜流位置,7 月暴雨径流入库前扬水曝气系统间歇运行,暴雨径流水温[(18.46±0.76)℃]高于水库底部水温(16.67℃),形成中部潜流(837.9~815.6m),9 月暴雨径流入库前扬水曝气系统持续运行,有效提高水库底部水温至19℃,高于径流水温[(12.35±0.59)℃],形成底层潜流800~828.2m;④径流入库导致潜流层水体氮磷浓度显著升高,扬水曝气诱导形成的底层流可使潜流层位置位于取水口高程 832m 以下,有效避免了高污染负荷径流对供水水质的直接影响,同时压缩径流潜流层厚度,缩短其对水库水质的影响周期.本研究为水库供水安全提供了实际工程借鉴经验,建议在水库分层初期即开始运行扬水曝气系统,一方面解决分层初期融雪径流诱发的表层水体水华问题,另一方面提高水库底部水温大于径流水温以诱导暴雨径流形成底部潜流,实现蓄水期"中层优质取水"与洪峰期"排浊蓄清".

关键词：分层水源水库；融雪径流；暴雨径流；扬水曝气；诱导底层潜流
中图分类号：X524;X505 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6858-11

Effects and management of runoff input on water quality in a stratified reservoir. ZHANG Xuan[1,2], HUANG Ting-lin[1,2*], LI Kai[1,2], ZHANG Hai-han[1,2], SHAO Chen-zong[1,2], SHANG Yuan-qi[1,2], YANG Yong-qiang[3] (1.Shaanxi Provincial Field Scientific Observation and Research Station of Water Quality in Qinling Mountains,Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China；2.Collaborative Innovation Center of Water Pollution Control and Water Quality Security Assurance of Shaanxi Province, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China；3.Xi'an Water Supply Corporation (Group) Lijiahe Reservoir Management Co. Ltd, Xi'an 710016, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6858~6868

Abstract：An investigation was conducted to examine the influence of runoff input on the water quality of stratified reservoirs and to identify optimal artificial control strategies for positioning the intrusive layer, so as to enable the withdrawal of high-quality water. High-frequency and comprehensive in-situ monitoring of water quality indicators for spring snowmelt and summer storm runoff was conducted at Lijiahe reservoir (LJHR) in the northern foothills of the Qinling Mountains, to analyze the pollution characteristics, intrusive layer, and reservoir water quality response mechanisms. The results indicated that ① nitrogen/phosphorus (N/P) concentrations in runoff were significantly higher than those in baseflow, with snowmelt runoff was dominated by dissolved nutrients, while storm runoff contained dissolved N but particulate P. Moreover, N/P concentrations in storm runoff were significantly greater than those in snowmelt, which was attributed to differences in discharge. ② The effects of suspended solid (SS < kg/m^3) on water density was neglected in the three runoffs events, and three different intrusive layers can be formed based on the differences between the runoff water temperature and the surface and bottom water temperatures of the reservoir. The water temperature of snowmelt runoff was typically higher than that of the reservoir bottom layer, leading to the development of overflows. Additionally, the abundance of available nutrients and the stable water environment during the early stages of reservoir stratification promoted rapid algal growth in the surface layer, which could easily induce algal blooms. ③ Prior to storm runoff inflow, the Water-lifting aerators system (WLAs) was used to regulate the intrusive layer of runoff seepage by modifying the vertical thermal structure of the reservoir.

收稿日期：2025-05-13
基金项目：国家重点研发计划课题(2022YFC3203602);国家自然科学基金项目(52470015);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设(2023KXJ-227)
* 责任作者, 教授, huangtinglin@xauat.edu.cn

During the July torrential rain event, intermittent operation of the WLA resulted in higher water temperatures in the storm runoff [(18.46 ± 0.76)°C] compared to the bottom layer (16.67°C), leading to the formation of an interflow (837.9~815.6m). In September, continuous operation of the WLA raised the bottom water temperature to 19°C before the storm inflow, which was higher than that of the incoming runoff [(12.35±0.59)°C], thereby inducing an underflow (800~828.2m). ④ Nutrient concentrations were significantly elevated in the intrusive layer, the formation of underflow induced by WLA placed the intrusive layer below the intake elevation (832m), effectively mitigating the impact of high-pollution-load runoff on water supply quality. Additionally, the compression of the intrusive layer reduces its thickness, thereby shortening the duration of its effects on water quality. This study provides a practical engineering reference for ensuring the safety of reservoir water supply. It is recommended activating the WLA at the early stages of reservoir stratification to inhibit algal blooms caused by snowmelt runoff and to increase the reservoir bottom water temperature above that of the runoff, thereby inducing the formation of underflow from runoff to achieve "high-quality mid-level water intake" during the storge period while ensuring "turbidity reduction and water clarity" during peak floods events.

Key words：stratified drinking water reservoir；snowmelt runoff；storm runoff；water-lifting aerators；induce underflow

随着城市地下水开采受限,水库逐渐成为我国重要的供水水源[1-2].水库的修建改变了河流原有的水环境,通过增加水深、降低流速、延长水力停留时间等致使水库出现周期性水质污染,且污染情况逐年加剧[3-5].造成水库水质恶化的原因主要包括两方面:①外源输入[6-7]:水库蓄水过程中大量氮磷营养盐和有机物等随径流输入水库,直接影响水库水质,且此类污染物在水库中不断蓄积成为潜在的污染源;②内源释放[8-10]:深水型水库普遍存在的热分层结构阻碍了氧的垂向传递,底部水体溶解氧不断消耗至其浓度小于2mg/L时沉积物中的氮磷和有机物将向上覆水体释放,导致底层水体污染物浓度升高并在水库自然翻库时造成全层水质恶化.李家河水库于 2018 年安装了兼具等温层充氧与破坏水体热分层功能的扬水曝气系统,内源污染释放可被有效控制[11-13].因此,径流外源污染输入成为影响水库水质的主要原因.

李家河水库位于秦岭北麓,径流主要包括融雪径流和降雨径流.其中融雪径流指春季温度升高,冬季积雪逐渐融化形成的水流,降雨径流指降水未下渗的部分沿地表汇入水库[14].目前国内外学者已在不同流域开展了径流水体污染特征研究,结果表明径流可导致地表养分流失,氮磷污染物浓度显著高于基流.其中氮主要以硝酸盐氮为主,而磷在融雪径流中主要以溶解态为主,在降雨径流中主要以颗粒态为主[15-16].以上研究多集中于径流水体本身污染特征研究,而忽略了其对受纳水体(水库)产生的影响,尤其是春季水库分层初期融雪径流对水库水质影响的研究尚属空白.

径流潜入分层型水库的特性主要由径流水体与水库受纳水体密度之间的差异决定[6],水体密度由水温和含沙量共同决定,依据径流在分层型水库中的运动形态来分,将径流潜流分为表层流、间层流和底层流[17-18].Alavian 等[19]研究发现当入流水体密度小于表层水体密度时,则以表层流的方式进入库区;Fernandez 等[20]通过室内实验将径流水体连续沿斜面进入线性分层水体,发现入流水体密度随时间呈线性减少,最终与斜面底部分离,形成间层流;Ahlfeld 等[21]采用模型验证了水库中间层流的潜流时间,结果表明入流水体密度在水库的温跃层范围以内,且流速足以维持连续的间层流.一般来说,径流水体携带的污染负荷较高,潜流至库区后造成水质恶化;Li 等[6]研究发现暴雨径流入库提高了底部水体 DO 浓度,但由于径流携带的耗氧物质使得底部水体 DO 迅速降低至缺氧状态,导致内源污染释放;黄诚等[18]探究了黑河水库两场暴雨径流沿程时空演变过程,发现水库潜流经历全断面径流-底层流-层间流的过程;曾康等[22]的研究也表明暴雨径流到达主库区时变为间层流,且潜流层水体受径流影响污染物浓度明显升高.以上研究多集中于径流潜入位置及对水质影响等自然过程,而针对扬水曝气强制混合系统改变库区水温垂向分布人工调控暴雨径流潜流位置的研究较少.

基于上述径流污染问题,本研究以秦岭北麓分层型水源水库为研究对象,对春季融雪径流(2024 年 3 月 8~10 日)和夏季两场降雨径流(2024 年 7 月 17 日,2024 年 9 月 29 日)进行高频多断面水质监测,探究了峡谷型水库水质对径流输入的响应以及扬水曝气强制混合对径流潜流位置的影响,以期为分层型水源水库水质安全保障提供实际工程参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

李家河水库位于陕西省西安市蓝田县境内(秦岭北麓),于 2015 年建成蓄水,蓄水总量 5700m^3,平均水深 56m,最大水深 80m,流域面积 362km^2,水域面积 2.18km^2,为西安市主要供水水源之一.该水库源于秦岭山脉,主要接纳上游东西采峪方向来水,东采峪水源受人为活动影响较大,西采峪植被覆盖率高,水源受工农业影响较小,取水口高程位于水库中层(高程 832m).李家河水库属典型的季节性热分层水库,其水域属暖温带半湿润大陆性气候区,春季随气温升高秦岭山脉积雪融化形成径流,同时水库开始形成热分层,自然分层期一般从 3 月中持续至 12 月末,降雨主要集中在 6~9 月.2018 年,为解决水库表层水体水华及底层厌氧内源污染释放问题,水库安装扬水曝气水质改善系统(WLAs),8 台扬水曝气设备呈 S 形分布在李家河水库坝前区域,平均间隔 160~200m (图 1).单个扬水曝气系统固定在底层沉积物 3~5m 以上处,气体流量小于 20m^3/h 时主要为底层水体充氧,气体流量在 20~50m^3/h 时可将底部水体提升至表层,系统持续运行能够提高水体溶解氧浓度并促进水体完全混合.系统启动条件如下:(1) 等温层厌氧(DO<2mg/L);(2) 藻类水华(藻密度>3000 万个/L).

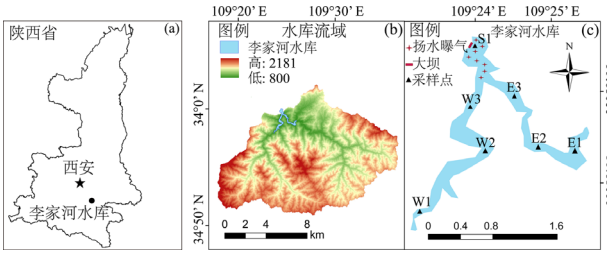


图 1 李家河水库径流沿程监测点及扬水曝气布置示意

Fig.1 Map of sampling sites and WLA in the LJHR

1.2 水样采集与监测

为探究水库热分层状态对径流潜流特性的影响及水质响应规律,根据实际水位与地形变化情况沿库区中泓线共设置 7 个监测断面(东、西采峪:E1–E3、W1–W3;坝前:S1),覆盖入库沿程及扬水曝气直接作用区(S1).S1 断面监测频率为每周一次,径流期间监测所有断面水质.采用有机玻璃采水器采集各监测断面表层(水下 0.5m)、中层和底层(底泥以上 0.5m)3 个不同深度的水样.此外,径流量变化期间在李家河水库东西采峪入库口进行高频采样,以了解径流中氮磷污染物的行为特征,间隔 2~5h 采集一次水样,确保采集的样品覆盖流量变化的全过程.利用预先清洗过的聚乙烯瓶采集水样,置于 4℃冰箱,24h 内完成各理化指标测定.

1.3 水样测定

利用 HACH Hydrolab DS5 型多参数水质测定仪原位测定水温(WT)、溶解氧(DO)和浊度(Turb)等指标,垂向间隔约 1~5m 收集一次数据.水样营养盐指标测定方法参考文献[23].总氮(TN)采用碱式过硫酸钾消解−紫外分光光度法,总磷/总溶解态磷(TP/DTP)采用过硫酸钾−钼锑抗分光光度法,氨氮(NH_4^+−N)采用钠氏试剂比色法测定,其中 TN/TP 采用原水测定,DTP 浓度由原水过 0.45μm 复合纤维膜测定.悬浮颗粒物(SS)采用烘干称重法测定.

1.4 水文气象数据

水库水位、库容、降雨量以及出入库流量均由李家河水库水文监测站提供,日平均气温数据来自中国气象网.

1.5 数据分析与绘图

采用 RWCS 指标评估水体热分层结构稳定性[6,24],具体如下式所示:

$$\mathrm{RWCS}=\frac{D_\mathrm{b}-D_\mathrm{S}}{D_4-D_5}$$

式中:D_S 和 D_b 分别为表层和底层水体密度,D_4 和 D_5 分别为 4℃和 5℃时纯水密度 kg/m^3.李家河水库无较大径流输入时,浊度较低,因此计算水体密度时只考虑温度对密度的影响.此外,采用温度梯度为 0.2℃/m 来定义温跃层概念,以评估扬水曝气系统不同运行状态时对水体热分层结构的破坏程度.

水体密度计算公式为:

$$\rho=1000-1.9549\times10^{-2}\,|T-4|^{1.68}+0.623\times S$$

式中:ρ为潜流水体密度,kg/m^3;T 为水温,℃;S 为悬浮固体颗粒浓度,kg/m^3.

水质参数采用 Microsoft Excell 2010 软件建立数据库,绘图采用 Origin 2018 软件.

2 结果与分析

2.1 水文特征

2024 年李家河水库入库流量、水位高程、面

雨量变化如图 2a 所示,研究期内累计日面雨量858mm,降雨主要集中在 6~9 月,占全年总面雨量的 65.8%.为探究水库热分层状态对径流潜流特性的影响,选择春季融雪径流(3 月 8~10 日)和夏季降雨径流(7 月 17 日,9 月 29 日)为研究对象,三场径流事件详细的水文特征如表 1 和图 2 所示.3 月初平均气温升高冬季秦岭山脉积雪开始融化,同时水库开始进入自然分层阶段,春季虽无明显降雨事件发生但入库径流量相比基流显著升高,径流水温为(8.27±0.38)℃(图 2b);降雨事件 B 总面雨量为71.3mm,峰值流量最大为 78.5m^3/s (图 2c);降雨事件 C 总面雨量为 85.6mm,东采峪峰值流量最大为73.3m^3/s (图 2d).降雨事件 B 的面雨量虽然小于事件 C,但其雨前土壤相对湿度在三场径流中最大,因此记录了最大的峰值流量.径流水温与平均气温呈现显著的正相关关系(P<0.01),7 月发生的降雨事件径流水温最大为(18.46±0.76)℃.三场径流中的 SS 浓度均小于 1kg/m^3,因此可认为径流水体的密度主要由水温决定.

表 1　三场径流水文特征

Table 1　Hydrological characteristics of three runoffs

变量	A	B	C
日期	03-08~03-10	07-17	09-29
径流水温 (℃)	8.27 ± 0.38	18.46 ± 0.76	12.35 ± 0.59
SS 最大浓度 (kg/m^3)	0.26	0.89	0.45
总面雨量 (mm)	/	71.3	85.6
降雨历时 (h)	/	33	26
API_{14}	3.47	65.3	1.4
峰值流量 (m^3/s)	8.56	109.5	90.1

注:前期土壤湿度:$API_{14}=\Sigma K^j P_j$, 其中P_j表示降雨事件发生前第1, 2, …, j (j = 14)d的降雨量,K为常数,定义为0.85.

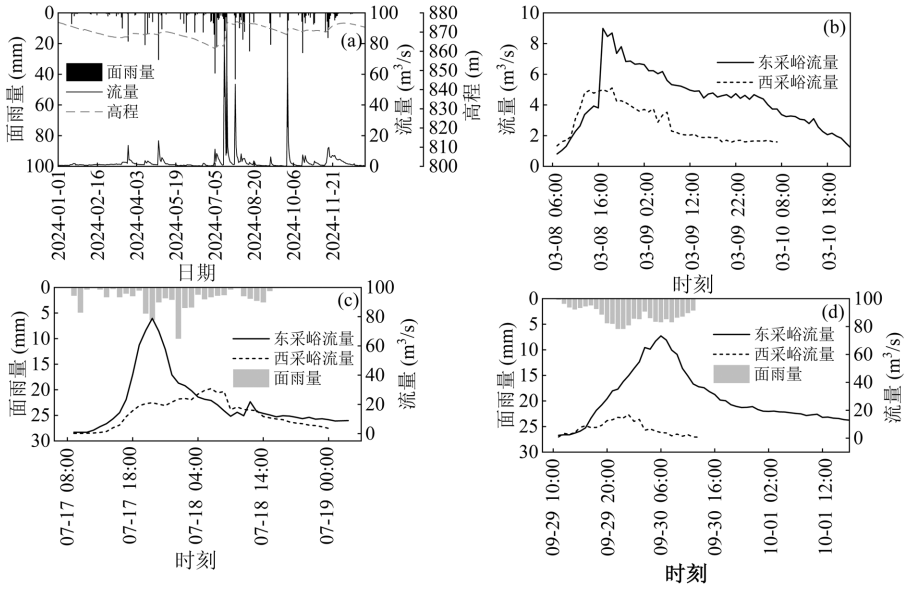


图 2　2024 年李家河水库入库流量、水位、面雨量变化(a)及(b–d)三场径流流量变化特征

Fig.2　Variations in discharge, water levels, precipitation (a) and the characteristics of three runoffs (b–d) in 2024

2.2　径流水质特征

三场径流中氮磷浓度及组分变化如图 3 和表 2 所示.基流中氮磷浓度均处于较低水平,其中氨氮浓度占比总氮浓度均小于 10%,表明基流中的氮组分以溶解态的硝酸盐氮为主.径流中的氮同样以硝酸盐氮为主,但其占比总氮浓度相比基流下降,氨氮浓度占比总氮浓度上升,表明氨氮浓度相比硝酸盐氮浓度受径流影响变化更加显著.基流中的总磷浓度较低且主要以溶解态为主,融雪径流中的磷主要以溶解态为主,而在降雨径流中主要以颗粒态为主.东采峪(202km^2)流域面积大于西采峪(160km^2),因此氮磷浓度受径流影响变化相对更加显著.径流 A 为融雪径流,其流量变化显著小于降雨径流,氮磷浓度受径流量影响较小,总氮和总磷浓度变化范围分别为1.54~2.94mg/L 和 0.023~0.086mg/L.虽然三场径流事件中径流 A 的污染负荷最小,但其径流持续时间较长,且氮磷浓度显著大于基流中的浓度,因此其对水库分层初期水质的影响同样不容忽视.降雨径流 B 和 C 中的氮磷浓度相比基流显著升高,径流 C 的降雨历时短,强度大,对上游流域地表的冲刷作用更强,

因此径流 C 中的总氮和总磷浓度变化范围最大,分别为 1.89~4.65mg/L 和 0.2~3.13mg/L,同时径流 C 也记录了最大的污染负荷.三场径流事件中硝酸盐氮和氨氮负荷分别占总负荷的 13%~52%和 38%~76%,表明基流主要控制硝酸盐氮的输出,而径流以氨氮输出为主.降雨径流中颗粒态磷占比总磷均达到 95%以上,表明降雨径流主要输出颗粒态磷,而融雪径流中以溶解态磷为主.

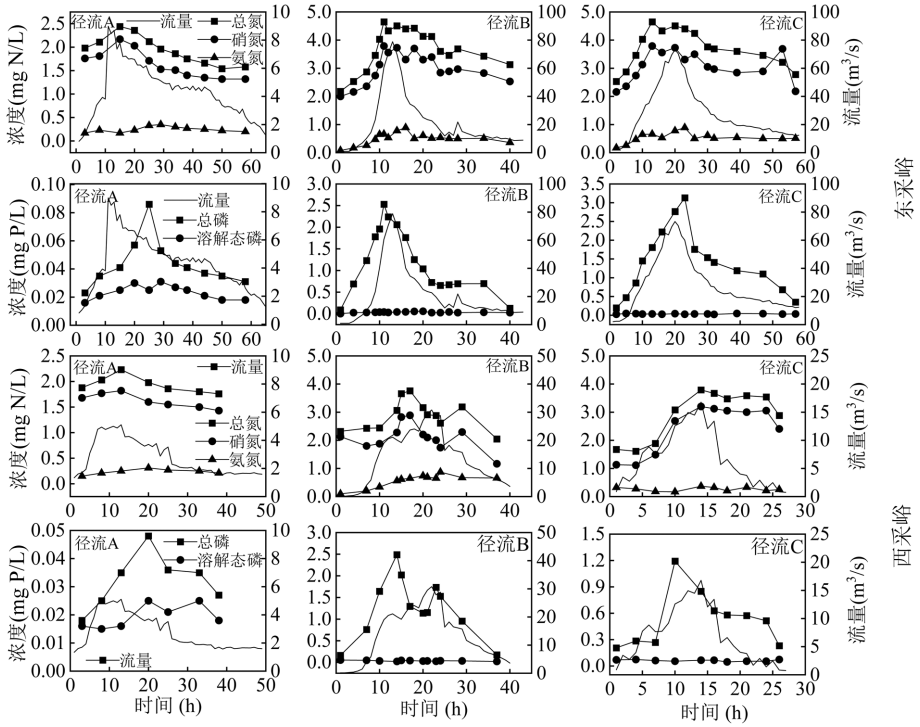


图 3 三场径流中氮磷浓度与流量变化关系

Fig.3 The relationship between N/P concentrations and discharge during the three storm events.

表 2 三场径流氮磷浓度及组分变化特征

Table 2 Characteristics of N/P concentrations and components variations in three runoffs

项目	径流	TN (mg/L)	NO_3^-N (mg/L)	NH_4^+N (mg/L)	NH_4^+N/TN (%)	NO_3^-N/TN (%)	TP (mg/L)	PP (mg/L)	TDP (mg/L)	PP/TP (%)	TDP/TP (%)
径流前浓度	A	1.57~1.81	1.46~1.56	0.087~0.18	5~9	77~80	0.008~0.016	0~0.008	0.008~0.012	0~50	75~100
	B	2.13~2.28	1.79~1.84	0.12~0.15	6~7	81~84	0.016~0.019	0.004~0.008	0.012	25~37	63~75
	C	1.83~1.96	1.48~1.59	0.15~0.16	8	81	0.035~0.035	0.023~0.027	0.012~0.016	63~66	34~37
径流氮磷浓度范围	A	1.54~2.44	1.48~2.19	0.029~0.55	3~27	72~95	0.023~0.086	0.008~0.051	0.016~0.047	25~59	41~75
	B	2.05~4.42	1.17~3.79	0.078~0.89	4~33	57~92	0.09~2.53	0.086~2.49	0.004~0.059	64~99	1~34
	C	1.89~4.65	1.48~3.79	0.17~0.89	5~20	67~88	0.2~3.13	0.14~3.10	0.023~0.074	66~98	2~34
径流氮磷平均浓度(东/西)	A	2.87 / 2.45	2.44 / 2.03	0.096 / 0.05	4 / 2	85 / 82	0.087 / 0.053	0.04 /0.022	0.047 / 0.031	46 / 42	54 / 58
	B	3.70 / 2.87	3.01 / 2.11	0.50 / 0.56	14 / 20	81 / 74	1.19 / 1.25	1.16 / 1.21	0.035 / 0.037	97 / 97	3 / 3
	C	3.65 / 2.92	3.06 / 2.12	0.54 / 0.26	15 / 9	84 / 73	1.40 / 0.53	1.37 / 0.47	0.035 / 0.062	98 / 89	2 / 11
径流污染负荷(t)	A	2.93 / 1.2	2.49 / 0.99	0.098 / 0.024	4 / 2	85 / 82	0.089 / 0.026	0.041 / 0.011	0.048 / 0.015	46 / 42	54 / 58
	B	12.2 / 5.6	10.05 / 4.13	1.64 / 1.1	14 / 20	81 / 74	3.91 / 2.45	3.80 / 2.37	0.11 / 0.080	97 / 97	3 / 3
	C	21.2 / 1.94	17.8 / 1.41	3.14 / 0.17	15 / 9	84 / 73	8.13 / 0.35	7.93 / 0.31	0.20 / 0.04	98 / 89	2 / 11
径流污染负荷比例(%)	A	36 / 22	33 / 19	49 / 43			33 / 45	53 / 57	83 / 76		
	B	42 / 21	40 / 13	76 / 73			98 / 98	99 / 99	66 / 68		
	C	50 / 33	52 / 25	72 / 38			97 / 93	98 / 95	54 / 81		

2.3　水库热分层结构变化特征

水库表层水体水温随平均气温变化,可导致水库出现季节性热分层现象[25],扬水曝气系统通过强制交换上下层水体破坏水库热分层结构,同时向水库底层持续充氧有效抑制内源污染释放[26].水温变化如图 4a 所示,2024 年 3 月 11 日开始平均气温大于水库表层水温,水库自然混合期结束重新进入分层期,分层现象随平均气温升高不断加剧,底层水温在自然状态下维持在 4.5℃左右不变.至 4 月 9 日 WLAs 运行之前,水体表底温差增大至 7.13℃,RWCS 指数和温跃层厚度分别升高至 32.05 和 12.34m.4~10 月系统间歇运行,底部水温和溶解氧浓度显著升高,同时降低了水体稳定性并消除了温跃层(图 4b–d).9 月 18 日系统关闭时水体混合水温 22℃大于平均气温(18℃),具备诱导混合条件,水体提前 3 个月进入自然混合期.

径流的潜流位置主要由径流水温与水库底部水温之间的关系决定.然而,由于径流入库浊度升高 WLA 停止运行,系统间歇运行对水库底部水温的影响有限.径流 A 入库前水库水体处于自然混合期(混合水温 4.5℃),底部水体密度为 999.99kg/m^3;径流 B 入库前水库表底层水温分别为 21.74 和 16.2℃,水体密度分别为 997.55 和 998.69kg/m^3;径流 C 入库前 WLA 持续运行(09−01~09−18)水体已达到完全混合状态,混合水温 21.45 ℃,底部水体密度为 997.62kg/m^3.

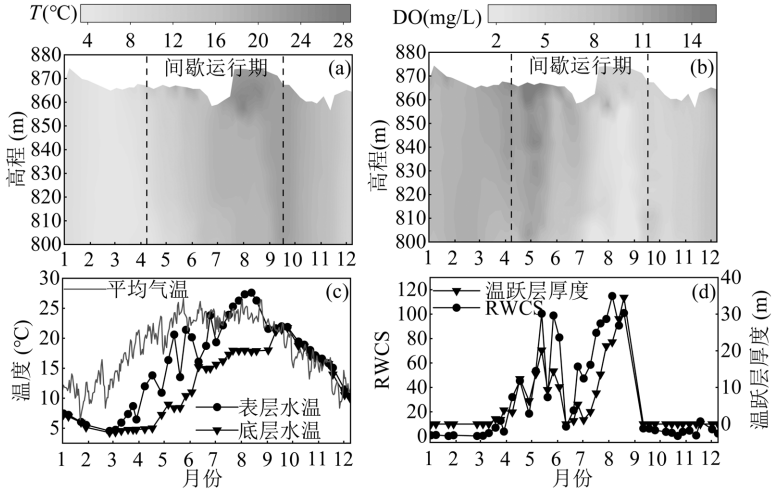


图 4　2024 年李家河水库水温(a, c)、溶解氧(b)、热分层指数和温跃层(d)变化

Fig.4　Variations in WT (a, c), DO (b), RWCS, and thermocline (d) at LJHR in 2024

2.4　径流沿程演变特性

2.4.1　沿程各断面水温、浊度变化　图 5 为三场径流入库沿程各断面水温和浊度变化情况.融雪径流 A 水温为(8.27±0.38)℃,此时水库处于自然混合状态,各监测点位水温保持在 4.5℃左右,径流水体密度(999.77kg/m^3)小于水库表底层水体密度(999.99kg/m^3),因此径流在各监测断面均形成表层流(图 5a).由于融雪径流量较小,对流域地表冲刷作用较弱,且污染物大多以溶解态形式存在,因此未观察到潜流层浊度明显升高(图 5b).

暴雨径流 B 入库洪峰流量 109.5m^3/s,径流水温(18.46±0.76)℃,径流水体密度 998.26kg/m^3,东西采峪沿程各断面(E1–E3,W1–W3)属水库上游–过渡区且水深较浅,底部水体水温范围为 18.21~19.4℃,水体密度介于 998.07~998.31kg/m^3 之间,因此在各监测断面均为底层流.S1 断面水温受 WLA 间歇运行影响,底层水温仅提高至 16.67℃,水体密度(998.61kg·m^3)小于径流水体密度,因此径流潜流至 S1 断面形成中部潜流,潜流层高程为 837.9~815.6m.浊度在 E1 断面最大为 349.6NTU,随沿程水体掺混及悬浮颗粒物沉降至 S1 断面浊度降低至 121.1NTU.

暴雨径流 C 入库洪峰流量 90.1m^3/s,径流水温(12.35±0.59)℃,径流水体密度 999.31kg/m^3.同样的,径流水温大于东西采峪沿程各断面(E1–E3,W1–W3)水温,均形成底部潜流.S1 断面径流入库前 WLA 持续运行(09−01~09−18),底部水温提高至 19℃,径流水

体密度显著大于水库底部水体密度(998.15kg/m^3),因此在 S1 断面形成底部潜流,潜流层高程为 800~828.2m.浊度至 S1 断面下降至 234.2NTU.图 6 对比了系统运行年(2024 年)与自然年(2017 年)同时期、同强度暴雨径流潜流层的位置变化,2017 年水库自然分层时,底部水体(800~825m)水温均保持在 6℃左右,而径流水温(15.2℃)大于水库底部水温,因此径流形成了中部潜流,潜流层水体(830~850m)浊度显著升高至 250NTU 左右.2024 年系统持续运行提高水库底部水温(19℃)显著大于径流水温(12.35℃),诱导径流形成底层潜流,取水口(832m)水质未受到径流的直接影响.

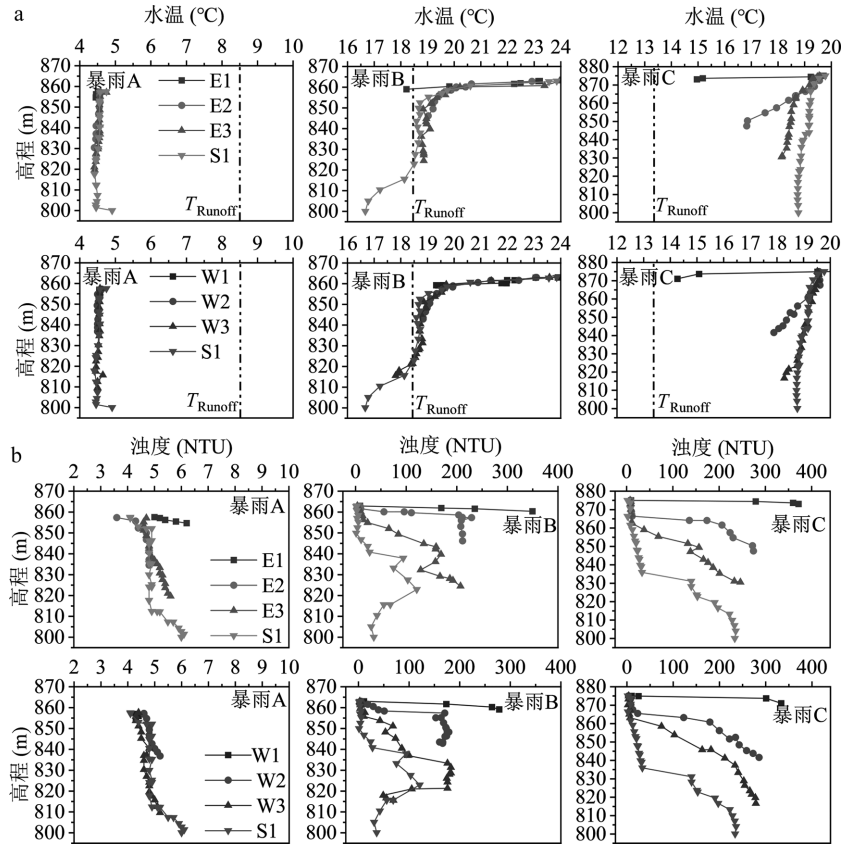


图 5 径流沿程各断面水温、浊度垂向变化

Fig.5 Vertical variations in WT and turbidity at various sampling sites from the tail to head of LJHR

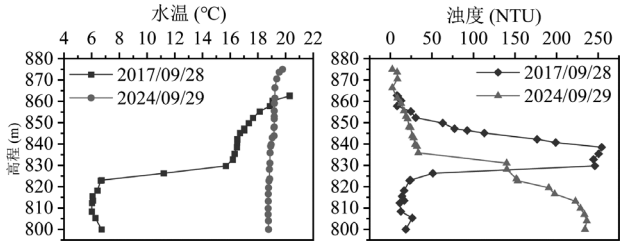


图 6 运行年与自然年同期暴雨径流潜流层对比

Fig.6 Comparison of intrusive layer between the operational and natural year during the same period

2.4.2 沿程各断面水质变化 径流外源输入是造成水库水质恶化的主要原因,地表径流携带大量的颗粒态及溶解态污染物(其浓度显著高于水库水体)直接导致水库水体污染负荷升高[27].图 7 为三场径流潜流过程中各监测断面氮磷组分及浓度变化情况.总氮中颗粒态与溶解态占比类似,因此其浓度沿程变化较小.总磷在融雪径流中以溶解态为主,而在暴雨径流中以颗粒态为主,其浓度随沿程颗粒物沉降及水体掺混显著降低,但潜流层污染物浓度显著高于其它层.具体来看,融雪径流 A 导致主库区表层水体总氮和总磷浓度分别升高至 2.36 和 0.058mg/L,其溶解态占比分别达到 78%和 60%.融雪径流与水库热分层结构随平均气温升高同时出现,此时大量溶解态的氮磷营养盐随径流进入表层水体,并在水库逐步分层有利的环境条件下导致藻类在表层水体迅速繁殖,极易诱发水库出现藻华现象.暴雨径流 B 和 C 径流量较大,在水库上游(E1,W1)为全断面径流,沿入库方向随水深增加逐步

演变为底层流,径流 B 至主库区(S1)形成中部潜流,中层水体总氮和总磷浓度分别升高至2.73 和0.13mg/L,可直接增加下游水厂污染物处理负荷.而径流 C 形成底部潜流,底部水体总氮和总磷浓度分别升高至 2.15 和 0.076mg/L,径流 C 潜流层位置位于取水口高程以下,即使污染负荷显著升高也不会对水库供水水质产生直接影响,同时底层潜流可加速悬浮颗粒污染物沉降,缩短径流对水库水质的影响周期.

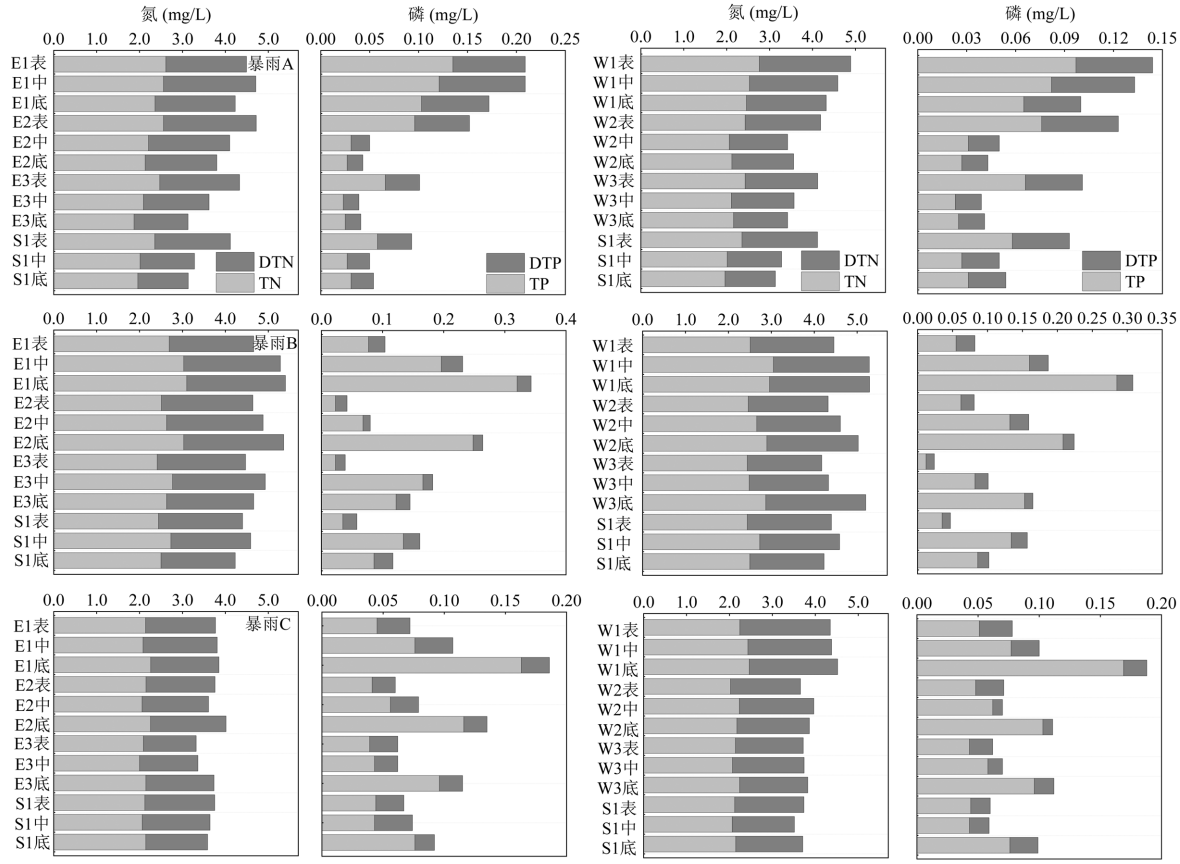


图 7　径流沿程各断面水质变化

Fig.7　Variations in water quality at various sampling sites from the tail to head of LJHR

2.5　径流入库前后主库区水质变化

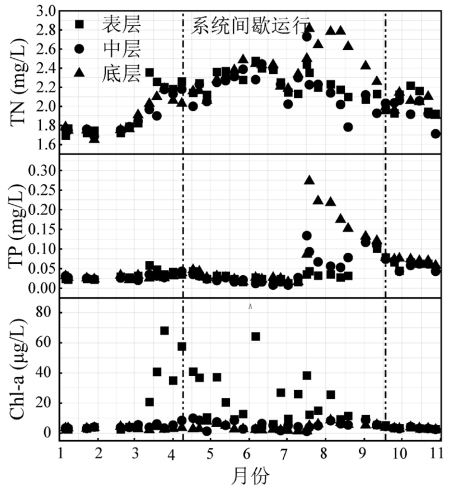


图 8　2024 年李家河水库主库区水质变化

Fig.8　Variations in water quality in the main reservoir of LJHR in 2024

2024 年主库区水质变化如图 8 所示,径流外源输入可提高水库污染负荷,尤其是夏季暴雨径流引起水库氮磷浓度显著升高.随平均气温升高,上游秦岭山脉冬季积雪逐渐融化形成径流,同时水库表层水温升高开始形成热分层现象.融雪径流氮磷多以溶解态为主,且径流水温大于水库表层水温形成表层流,此时丰富的营养物质及分层稳定的环境条件可促进藻类迅速繁殖,因此在分层初期观察到到叶绿素 a 浓度迅速升高至 68.08μg/L.暴雨径流对库区氮磷浓度的影响更加明显,例如暴雨径流 B 和 C 导致潜流层水体总磷浓度分别升高至 0.13 和 0.076mg/L,其浓度分别是非汛期水平的 8.1 倍和 4.8 倍,总氮浓度分别升高至 2.73 和 2.15mg/L,由于其主要以溶解态为主,因此其浓度变化受径流影响相对较小.此外,WLA 间歇运行可补充底部水体溶解氧浓

度,有效抑制内源污染释放,同时降低 Chl-a 浓度并削减氮磷污染负荷.因此可认为,在夏季径流入库前持续运行 WLA,使水库底部水温大于径流水温,诱导径流形成底部潜流,可加速污染物的沉降速率,保障水库汛期供水水质,同时持续改善水质.

3 讨论

径流污染物浓度及组分受上游流域土地利用类型、植被覆盖率和土壤含水率等因素共同影响,不同径流量污染负荷之间具有显著差异[28].李家河水库位于秦岭北麓,森林覆盖率高,其流域内主要以农业生产为主,径流中硝酸盐氮在总氮中占比达到57%~95%,其中融雪径流中的硝酸盐氮占比高于暴雨径流.之前的研究多集中于降雨径流中的氮磷污染特征,例如李晓虹等[29]研究了降雨强度对凤羽河氮磷排放的影响,结果表明径流中氮磷平均浓度与降雨强度具有高度的相关性;连心桥等[30]定量揭示强降雨对平原河网河道氮磷的影响,发现颗粒态磷浓度峰值出现在强降雨当天,而总氮峰值具有一定的延迟性,出现在强降雨后的 2~5d.华玲玲等[31]通过研究小流域内的氮素流失形态,发现硝酸盐氮流失通量占总氮的 78.63%,且硝酸盐氮浓度与降雨量之间存在显著相关性(p<0.05).地表径流总氮中硝酸盐氮占比较高可能的原因是:带正电荷的氨氮与带负电荷的土壤胶体结合稳定,难溶于水中,而硝酸盐氮带负电荷,与土壤黏粒电荷之间互相排斥而易溶于水,因此地表径流中硝酸盐氮占比较高[32].地表径流通过雨蚀动能首先作用于比表面积大、吸附能力强、粒径较小的土壤颗粒,导致暴雨径流中的磷主要以颗粒态为主[33].

暴雨径流在水库中的潜流层位置受入流条件(水温、悬浮颗粒物浓度)与水库受纳水体条件(库区地形、水温和含沙量垂向分布)共同影响,使得暴雨径流呈现出不同的潜流形式[34],夏季径流水体密度多小于水库底层水体密度而大于表层水体密度,因此在水库夏季稳定分层时多观察到径流以层间流形式运动[35].李家河水库属于典型的热分层型水库,三场径流的水体密度均由水温主导(SS<1kg/m^3),我们首次观察到春季融雪径流以表层流的形式进入水库,此潜流方式将促进水库分层初期藻类繁殖,极易诱发水华现象.通过对比夏季两场暴雨径流潜流位置可知,径流前扬水曝气系统持续运行提高水库底部水温大于径流水温,可诱导暴雨径流形成底部潜流,压缩潜流层厚度,缩短径流对水库的影响周期.此外,径流携带的有机污染物通过沉降等作用成为内源污染的“汇”,扬水曝气通过向底层充氧可有效抑制内源污染的释放,同时提高微生物活性,对水库水质具有持续改善作用,因此我们建议水库管理在水库分层形成后即运行系统以诱导季节性暴雨径流形成底部潜流,在蓄水期实现"中层优质取水”,在洪峰入库时打开底部泄洪口排出高污染负荷径流实现"排浊蓄清”.

4 结论

4.1 径流外源输入是水库水质恶化的主要诱因.融雪径流中氮磷以溶解态为主,暴雨径流中氮以溶解态为主,而磷以颗粒态为主,且径流污染负荷与入库流量具有显著相关性.

4.2 径流在库区的潜流位置取决于径流水体与库区受纳水体之间的密度差异.融雪径流水温普遍大于水库表底层水温,形成表层流,此时丰富的氮磷营养物质与有利的环境可促进藻类在水库分层初期迅速繁殖.7 月暴雨径流入库前扬水曝气系统间歇运行,暴雨径流水温[(18.46±0.76)℃]高于水库底部水温(16.67℃),形成中部潜流(837.9~815.6m),9 月暴雨径流入库前扬水曝气系统持续运行,有效提高水库底部水温至 19℃,高于径流水温[(12.35±0.59)℃],形成底层潜流(800~828.2m).

4.3 扬水曝气诱导径流形成底部潜流可加速悬浮颗粒污染物的沉降,缩短浊度对水体的影响周期.在水库蓄水期保障中层取水口水质,实现"中层优质取水”,同时在洪峰期打开底部泄洪口可排出高污染负荷径流水体,实现"排浊蓄清”.

参考文献:

[1] Zhang Y, Deng J, Qin B, et al. Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China [J]. Fundamental Research, 2023,3(2):265-273.

[2] Li N, Huang T, Li Y, et al. Inducing an extended naturally complete mixing period in a stratified reservoir via artificial destratification [J]. Science of the Total Environment, 2020,745:140958.

[3] Wang X, Chen Y, Yuan Q, et al. Effect of river damming on nutrient transport and transformation and its countermeasures [J]. Frontiers in Marine Science, 2022,9:1078216.

[4] Wang X, Wang P, Wang C, et al. Cascade damming impacts on microbial mediated nitrogen cycling in rivers [J]. Science of the total environment, 2023,903:166533.

[5] Sitian L, Julio P, Patricia J, et al. A novel approach to assessing the impacts of dam construction on hydrologic and ecosystem alterations. Case study: Castril river basin, Spain [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2022,22(4):598−608.

[6] Li X, Huang T, Ma W, 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: 27−36.

[7] 李刚浩,范先鹏,夏　颖,等.三峡库区典型流域水质时空特征及污染防控策略 [J]. 农业工程学报, 2022,38(17):118−126.
Li G H, Fan X P, Xia Y, et al. Spatial−temporal characteristics of water quality and pollution prevention strategies in a typical watershed of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2022,38(17):118−126.

[8] Li N, Huang T, Mao X, 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.

[9] 崔会芳,陈淑云,杨春晖,等.宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 [J]. 环境科学, 2020,41(12):5400−5409.
Cui H F, Cheng, S Y, Yang C H, et al. Characteristics of endogenous pollution and release in sediments of Hengshan Reservoir, Yixing City [J]. Environmental Science, 2020,41(12):5400−5409.

[10] 郑海利,史　敏,马　鑫.水库污染问题分析与治理措施 [J]. 水利水电工程设计, 2021,40(3):8−9,23.
Zheng H L, Shi M, Ma X. Analysis of reservoir pollution issues and remediation measures [J]. Hydraulic and Hydroelectric Engineering Design, 2021,40(3):8−9,23.

[11] Sedláček J, Bábek O, Nováková T. Sedimentary record and anthropogenic pollution of a complex, multiple source fed dam reservoirs: An example from the Nové Mlýny reservoir, Czech Republic [J]. Science of the Total Environment, 2017,574:1456−1471.

[12] 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. Seasonal change characteristics of water quality in stabilized stratified reservoirs and improvement of water quality by lift aeration [J]. Lake Science, 2015,27(5):819−828.

[13] Huang Y, Yang C, Wen 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.

[14] 李志飞,徐金忠,杨庆楠.黑土坡耕地融雪径流及氮磷特征 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023,6(2):79−81.
Li Z F, Xu J Z, Yang Q N. Characteristics of snowmelt runoff and nitrogen and phosphorus in arable land on black soil slopes [J]. Water Resources Science and Cold Zone Engineering, 2023,6(2):79−81.

[15] 陈　蕾,戴长雷,王润蒲.寒区融雪径流研究进展 [J]. 水利科学与寒区工程, 2022,5(3):6−10.
Chen L, Dai C L, Wang R P. Progress of snowmelt runoff in cold regions [J]. Water Resources Science and Cold Region Engineering, 2022,5(3):6−10.

[16] 杨　鑫,刘　刚,谢　云,等.东北黑土区北部典型小流域融雪径流及发生条件分析 [J]. 中国水土保持科学, 2019,17(4):34−40.
Yang X, Liu G, Xie y, et al. Analysis of snowmelt runoff and occurrence conditions in typical small watersheds in the northern part of the Northeast Black Soil Region [J]. China Soil and Water Conservation Science, 2019,17(4):34−40.

[17] Marti L C, 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.

[18] 黄　诚,黄廷林,李　扬,等.金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 [J]. 环境科学, 2021,42(3):1380−1390.
Huang C, Huang T L, Li Y, et al. Spatial and temporal evolution of stormwater runoff from JinPen Reservoir and evaluation of water quality [J]. Environmental Science, 2021,42(3):1380−1390.

[19] Alavian V B, Gerhard H, Jirka, et al. Density currents entering lakes and reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992,118:1464−1489.

[20] Fernandez R L, Imberger J. Time−Varying Underflow into a Continuous Stratification with Bottom Slope [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(9):1191−1198.

[21] Ahlfeld D, Joaquin A, Tobiason J, et al. Case study: Impact of reservoir stratification on interflow travel time [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,129(12):966−975.

[22] 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. Submerged and thermally stratified water quality response of high turbidity water runoff during flood season in Jinben Reservoir [J]. China Environmental Science, 2015,35(9):2778−2786.

[23] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.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.
National Environmental Protection Administration Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods Editorial Committee. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[24] Huang T, Wen C, Wang S, et al. Controlling spring dinoflagellate blooms in a stratified drinking water reservoir via artificial mixing: Effects, mechanisms, and operational thresholds [J]. Science of the Total Environment, 2022,847:157400.

[25] 孙　祥,朱广伟,笪文怡,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. Changes in thermal stratification and its effect on water quality in Shahe Reservoir, Tianmu Lake [J]. Environmental Science, 2018,39(6):2632−2640.

[26] Wen C, Huang T, Wen G, et al. Controlling phytoplankton blooms in a canyon−shaped drinking water reservoir via artificeal and induced natural mixing: taxonomic versus functional groups [J]. Chemosphere, 2021,287:131771.

[27] Wang Z, Wang T, Liu X, et al. Water level decline in a reservoir: implications for water quality variation and pollution source identification [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(7):2400.

[28] 关荣浩,马保国,黄志僖,等.冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2020,39(3):581−589.
Guan R H, Ma B G, Huang Z X, et al. Simulated rainfall experimental study of nitrogen and phosphorus loss from farmland in Ji'nan area [J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2020,39(3):581−589.

[29] 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 nitrogen and phosphorus discharges from Fengyu River in Erhai Basin [J]. Environmental Science, 2019,40(12):5375−5383.

[30] 连心桥,朱广伟,杨文斌,等.强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 [J]. 环境科学, 2020,41(11):4970−4980.
Lian X Q, Zhu G W, Yang W B, et al. Impact of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus in rivers entering lakes in the plains river network area [J]. Environmental Science, 2020,41(11):4970−4980.

[31] 华玲玲,李文超,翟丽梅,等.三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 [J]. 环境科学, 2017,38(1):138−146.
Hua L L, Li W C, Zhai L M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus discharges in the Gufu River sub−watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2017,38(1):138−146.

[32] 陈仕奇,龙 翼,严冬春,等.三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 [J]. 环境科学, 2020,41(3):1276−1285.
Chen S Q, Long Y, Yan D C, et al. Nitrogen and phosphorus export patterns and loss fluxes in the Shipanqiu sub−basin of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2020,41(3):1276−1285.

[33] 张 丽,邹 鹰,陆海明,等.流域非点源磷素输出负荷估算方法研究 [J]. 水文, 2013,33(6):11−15.
Zhan L, Chun Y, Lu H M, et al. Research on the estimation method of phosphorus output load from nonpoint sources in watersheds [J]. Hydrology, 2013,33(6):11−15.

[34] 彭文启,曾玉红,槐文信.水库密度流研究进展综述 [J]. 节水灌溉, 2009,(7):18−20.
Peng W Q, Zeng Y H, Huai W X. A review on the progress of reservoir density flow research [J]. Water Saving Irrigation, 2009,(7):18−20.

[35] 任 实,刘 亮.温度分层水库中泥沙间层流形成条件研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2018,33(3):370−375.
Ren S, Liu L. Study on the formation conditions of intersediment laminar flow in temperature stratified reservoirs [J]. Hydrodynamics Research and Progress, 2018,33(3):370−375.

作者简介：张 轩(1997−),男,陕西宝鸡人,西安建筑科技大学博士研究生,主要从事水源水质污染控制.发表论文 3 篇.xuanzhang0303@163.com.