

不同强度降雨径流对水源水库热分层和水质的影响

华逢耀,黄廷林*,李楠,司凡,黄诚,赵凌云 (西安建筑科技大学,陕西省环境工程重点实验室,西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710055)

摘要: 基于西安金盆水库 2012~2019 年汛期多场不同强度的降雨径流水质数据,对水温、浊度、总氮、总磷及含砂率等指标进行分析,全面探究不同强度降雨径流潜入过程及其对水源水库热分层与水质的影响。结果发现,不同强度降雨潜入库区位置不同,径流量较小时(洪峰流量 $<500\text{m}^3/\text{s}$),径流为等温度层潜流,从温跃层上部进入库区;中径流(洪峰流量为 $500\sim1500\text{m}^3/\text{s}$)受温度和含沙量共同作用,潜入点下移,以中部层间流方式进入库区;大径流(洪峰流量 $>1500\text{m}^3/\text{s}$)受含沙量影响显著,潜流层厚度变大,径流以底部潜流方式进入库区。不同强度降雨径流对库区热分层影响也不同,小径流影响较小;中径流会破坏水体上部的温跃层,并在底部形成温度梯度较小的温跃层;大径流则会使中底部水体完全更新混合,导致中底部水体水温均匀一致,由温跃层直接过渡到恒温层。不同径流量、来水水质和潜流位置对主库区水质影响不同,TN 主要以溶解态为主,占比在 76%以上,TP 则以颗粒态为主,占比达 61%;径流量较低时,温跃层上部氮磷浓度较高,随径流量的增大,冲刷效果的增强,潜流层水体氮磷浓度变高,当热分层被打破时,整个断面浓度均明显升高。

关键词: 金盆水库; 降雨径流; 热分层; 水质

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1234-09

Influence of rainfall runoff with different intensities on thermal stratification and water quality of water source reservoir.

HUA Feng-yao, HUANG Ting-lin*, LI Nan, SI Fan, HUANG Cheng, ZHAO Ling-yun (Northwest Water Resources and Environmental Ecology Key Laboratory, Ministry of Education, Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1234~1242

Abstract: Based on the rainfall-runoff and water quality data of Jinpen Reservoir in Xi'an from 2012 to 2019, indicators such as water temperature, turbidity, total nitrogen, total phosphorus and sand content were analyzed to comprehensively explore the infiltration process of rainfall-runoff with different intensities and its impact on thermal stratification and water quality of the water source reservoir. Research results show that different intensities of rainfall dive into the reservoir area at different locations. When the peak flow was less than $500\text{m}^3/\text{s}$, the density undercurrent entered the reservoir area from the upper thermocline; with peak inflow of $500\sim1500\text{m}^3/\text{s}$, the middle runoff was affected by the temperature and sediment concentration, whose diving point moved downward, entering the reservoir area in the form of interlayer flow in the middle; while the peak flow of the flood was over $1500\text{m}^3/\text{s}$, where the runoff was significantly affected by the sand content, entering the reservoir area in the form of underflow at the bottom, and the thickness of the intruding layer became larger. The effects of rainfall-runoff with different intensities on thermal stratification in the reservoir area were also different: small flow runoff had little impact; medium flow runoff would destroy the thermocline on the upper part of the water body, forming a thermocline with small temperature gradient at the bottom; while large flow runoff would completely renew and mix the water body, resulting in uniform water temperature in the middle and at the bottom, as well as transition from thermocline to constant temperature layer directly. Different inflow runoff, incoming water quality and intruding layer locations had different impacts on water quality of the main reservoir area. TN was mainly in dissolved state, accounting for more than 76%, while TP was mainly in granular state, accounting for 61%. When the inflow was low, the concentration of nitrogen and phosphorus in the upper thermocline was higher. With the increase of inflow and the scouring effect, the concentration of nitrogen and phosphorus in the intruding layer became higher. When the thermal stratification was broken, the concentration of the whole section increased obviously.

Key words: Jinpen Reservoir; rainfall-runoff; thermal stratification; water quality

水源水库作为重要的水利枢纽,对水质有着更高的要求,水质防污染重要性日益突出^[1]。黑河金盆水库作为西安最大的饮用水水源水库,保证着西安 70%的用水需求。金盆水库上游森林植被覆盖率高,人烟稀少,近年来在当地政府与人民的共同努力防护下,上游人为污染外源输入已得到有效管理^[2],而水库分层

期虽然有内源污染风险,但在扬水曝气设备底部供氧条件下也得到有效控制^[3]。根据多年水质监测,汛期降

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1100101);国家自然科学基金资助项目(51979217)陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-02)

* 责任作者, 教授, huangtinglin@xauat.edu.cn

雨径流汇入常携带着高负荷营养物入库,对于金盆水库,径流汇入已成为重大的污染来源。

受水温及含沙量影响,降雨径流潜流密度不同,在进入库区时会形成横流(表层流)、层间流(中部潜流)和底部潜流。异重流从形成到坝前需满足入库径流量、洪峰流量持续时间、含沙量、库区地形及库底坡降等要求^[4]。水库水体的热能传输不均匀,冷、热水密度的差异则会导致峡谷型水库在深度方向出现热分层现象^[5]。分层的形成严重阻碍了上下层水体物质交换过程,导致底部易形成厌氧环境,使得底部水体氮磷营养盐、金属离子及有机物等污染物释放^[6]。同时,深层湖库热分层现象是暴雨潜流的必要条件,不同水温、含砂率的暴雨径流入库时遵循“等密度潜流”的方式进入相同密度水层,会导致该层水质发生严重恶化;另一方面,不同流量、不同密度条件暴雨径流潜流过程对深层湖库水体热分层结构、水质特征同样产生强烈影响^[7-9]。

因此了解径流对热分层及水质的影响对水源水防污染控制十分重要,然而近年来对降雨径流的潜入形态研究多是单一的实验室模拟或数值计算^[10-12]。关于金盆水库汛期水质恶化现象的研究已有报道,但其都缺乏小、大径流潜入时位置演变分析及热分层结构与水质之间相互作用关系的系统研究^[13-14]。本研究以西安金盆水库为研究对象,综合了2012~2019年多场不同流量的降雨径流的原位水质数据,探究不同雨强下入库径流的潜流演变过程,对比分析了不同流量降雨径流对主库区热分层及水质的影响规律及相互间的作用关系,旨在为汛期水源水库防污染控制提供科学建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西安金盆水库位于陕西省西安市周至县境内黑河峪口以上约1.5km处,属峡谷深水型水库,主库区长3.5km,最大水深90~105m,平均水深60~95m。黑河流域属于典型的暖温带半湿润季风性气候,水库夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨雪^[13]。

金盆水库热分层结构年际变化较为显著,每年都会经历分层形成期(3~5月初)—分层稳定期(5月初~9月底)—分层衰减期(10月)—自然混合期(11初~次年2月初)过程。降雨主要集中在6~10月,此时热

分层结构处于稳定分层状态,底部水温为6~8℃,表层水温为18~29℃,并在水深15~25m处和底部55~70m处形成温跃层,8月份上下温差达到最大,为15.40~22.19℃。2012~2019年入库年均径流量20~30m³/s,最大径流量为1750m³/s,最小径流量为1m³/s。

1.2 研究方法

1.2.1 监测点设置及样品分析 从上游退水位到主库区在河道中泓线处选取取样点及监测断面共10个:其中选取S9断面为入库口,S10断面为主库区,S2~S8断面为过渡断面,监测断面位置如图1所示。

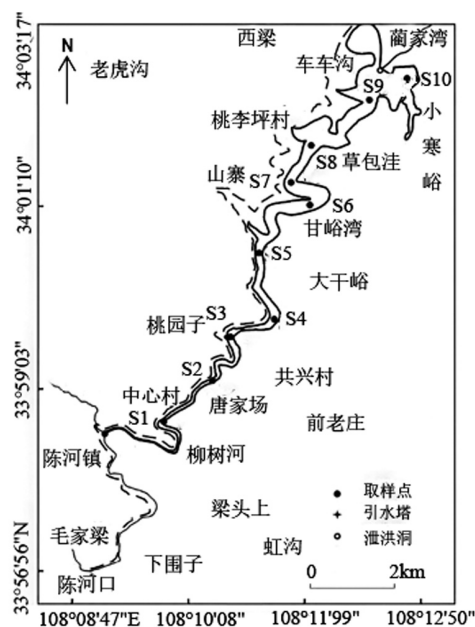


图1 沿程监测断面布置

Fig.1 Distribution of monitoring sections along the upstream to main basin

水样由直立式有机玻璃采样器收集,采样点的布置受水深变化影响,具体为:S1~S6设置表中底3个取样点,S7、S8设置0.5m、20m、40m和水底上0.5m4个取样点,S9、S10作为供水区域,从表层到底每隔10m设置取样点。水样收集后采用1.5L预酸化的聚乙烯瓶收集,于24h内完成总氮(TN)、总磷(TP)指标及含沙量(SS)的测定,分别采用过硫酸钾消解—紫外分光光度法、过硫酸钾消解—钼锑钨分光光度法^[15]及烘干法方法测定。现场水样的水深、温度(T)及浊度等指标由美国HACH公司Hydro-labDS5型多参数水质监测仪监测。

1.2.2 潜流水体密度计算 水体密度计算公式为:

$$\rho = \rho_T + \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_s}\right) S \tag{1}$$

式中: ρ 为潜流水体密度, kg/m^3 ; ρ_T 为清水在温度 T 时的密度, kg/m^3 ; ρ_s 为泥沙密度,以 2650kg/m^3 计; S 为含沙量, kg/m^3 .

2 结果与讨论

2.1 汛期水文特征

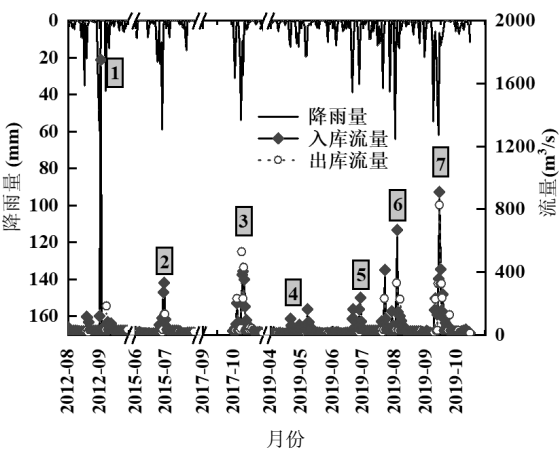


图2 金盆水库径流期间降雨量和出入库流量
Fig.2 Rainfall and inflow/outflow of Jinpen Reservoir during runoff period

不同强度降雨径流事件可由水文预测模型和现场水文资料进行分级,而水文预测模型的建立也常在大量的实测径流资料基础上^[16].如图2所示,选取2012~2019年7场不同降雨强度径流进行对比分析,依据多年历史径流资料进行归纳总结^[17],按照潜入库区方式对应不同入库流量将其分为大(事件1,底部潜流,洪峰径流 $>1500\text{m}^3/\text{s}$)、中(事件2、3、6和7,中部潜流,洪峰径流为 $500\sim1500\text{m}^3/\text{s}$)、小(事件4和5,表层流,洪峰径流 $<500\text{m}^3/\text{s}$)三种类型径流.其中最强的径流事件出现在2012年9月1日,日降雨量为 59.76mm ,洪峰流量达到 $1750\text{m}^3/\text{s}$,为近十年最大径流量.在降雨过程中,由于受到植物截流、下渗蒸发等消耗,进入河流的径流量比降雨量小,且坡地漫流与河网汇集使得径流过程变缓,历时增长,时间滞后^[18].各降雨径流具体特征如表1所示,3次规模较大的径流(事件1、3与7)表明前几日高降雨量推动了高流量径流事件的发生,然而流域径流产生量不仅与流域前期降水量密切相关,而且也受当日降水量影响^[19],事件6持续降雨量低于其他高流量径流

事件,但由于其当日降雨量却高达 64.21mm ,高强度降雨导致洪峰流量 $1329\text{m}^3/\text{s}$ 的径流出现.

表1 2012~2019年暴雨径流特征
Table 1 Characteristics of storm runoff from 2012 to 2019

事件序号	月份	前5日累计雨量(mm)	最大雨强(mm)	入库平均流量(m^3/s)	洪峰流量(m^3/s)	潜入位置(m)
(1)	2012-09	131.73	59.76	918.41	1750	20m 以下
(2)	2015-06	95.18	58.85	330.00	576	35~65
(3)	2017-10	122.57	53.75	404.34	520	18~68
(4)	2019-04	26.27	14.30	103.38	168	/
(5)	2019-06	48.24	38.36	164.58	400	/
(6)	2019-08	81.21	64.21	668.43	1329	26~55
(7)	2019-09	222.33	61.73	908.93	1170	23~83

2.2 不同强度降雨径流潜入

选取典型的三场不同流量降雨径流(事件1、3和4)进行对比分析,如图3所示,2019年4月,受前日短期降雨的影响,入库洪峰径流仅为 $168\text{m}^3/\text{s}$,径流量较小.此次径流上游来水温度为 12.45°C ,浊度 $84\sim111\text{NTU}$,潜流密度为 999.47kg/m^3 ; $S_2\sim S_4$ 为全断面径流, S_5 断面径流开始以底部潜流的方式向前输送, $S_6\sim S_8$ 断面在底部出现明显的清浑水界面,来水温度低于原始水温,水体密度减小,径流转变为层间流,至 S_9 断面时层间流消失.2017年10月,受前日内强降雨的影响(降雨量 53.75mm),入库径流达到 $520\text{m}^3/\text{s}$.此次径流来水 $10.52\sim10.91^\circ\text{C}$,浊度 $113\sim169\text{NTU}$.由于来水密度低于原水密度,从上游 S_2 断面到 S_7 断面均为底部潜流; S_9 、 S_{10} 断面水深增大,浊度降低,径流由底部潜流转变为层间流,潜流水深为 $18\sim68\text{m}$.2012年9月受前几日频繁强降雨的影响(累计降雨量 131.73mm),入库洪峰径流达到 $1750\text{m}^3/\text{s}$,为近10年最大入库流量.此次径流各断面浊度、温度、水体密度变化均呈现出相同分布,表明径流从 S_2 断面便开始以底部潜流的方式潜入至主库区;受高含沙量与低水温的共同影响,径流于 20m 水深以下潜入主库区,潜流浊度在 1000NTU 以上,库底浊度高达 3000NTU ,温度 $13.40\sim15.32^\circ\text{C}$,水体密度 $999.13\sim1000.21\text{kg/m}^3$,潜流层厚度为 68m .

降雨径流进入水库的过渡断面($S_2\sim S_8$)之后,伴随着沿程水深的不断增大,水流最大流速由接近水面向库底转移,当水流流速减少到一定值时,浑水开始下潜,随后沿等密度水层向前运行^[17].异重流从形

成并持续输移到库区的过程中需克服异重流沿程和局部的能量损失^[20]。2019 年 04 月径流量最小,上游含沙量极低,对水体密度贡献率仅为 0.003%,从上游到库区,伴随着水位的增大及颗粒沉降,含沙量不断降低,水体密度增量为 0.32kg/m^3 ,潜流密度主要受水温作用;2017 年 10 月径流量达到 $520\text{m}^3/\text{s}$,潜流水

体水温密度增量达到 0.61kg/m^3 ,含沙量增量为 0.13kg/m^3 ,潜流水体在水温与含沙量共同作用下从中部等密度层进入库区;2012 年 09 月入库洪峰径流高达 $1750\text{m}^3/\text{s}$,入流水体含沙量增量为 0.86kg/m^3 ,温度密度增加 0.22kg/m^3 ,在高浊度水入库条件下,含沙量对潜流水体密度的作用显著上升。

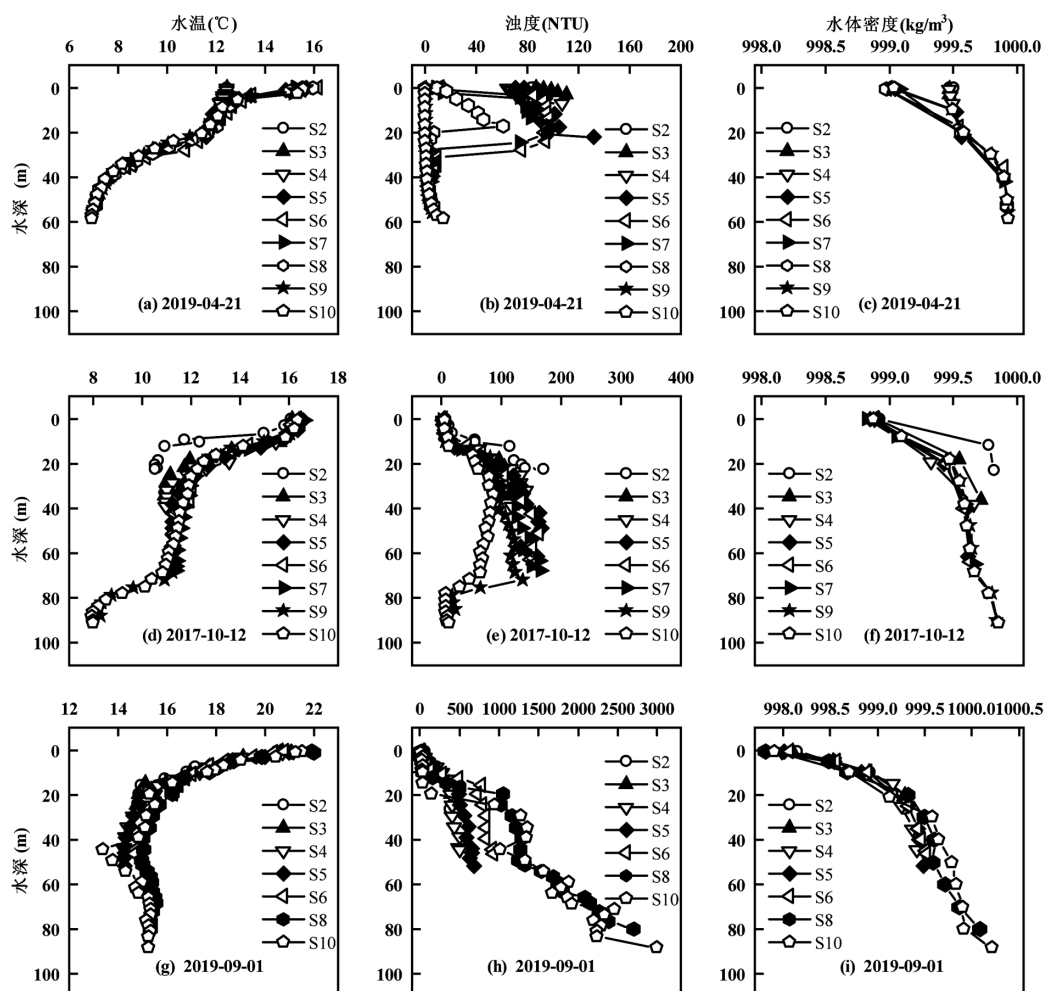


图3 不同强度降雨径流沿程各监测点水温、浊度及水体密度垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of water temperature, turbidity and water density at monitoring points of different rainfall runoff

对比三场不同强度的降雨径流可以得出,降雨径流从上游开始都会经历从底部潜流到中部潜流的演变过程,随着水中颗粒沉降,径流与原水的不断混合,水体密度不断降低。解岳^[21]与 Parker 等^[22]通过试验模拟得出入流量与含沙量、潜入位置和携沙范围呈明显的正相关,在本分析中也是如此,当流量较低时,由于其水动力较弱,含沙量较低,水体密度主要受水温控制,径流从表层或温跃层上部进入库区;随着流量增大,携沙能力增强,上游底部潜流形式持续

运输的断面位置会更远,中部等密度层潜流的位置也就越靠近库区;随着颗粒沉降,水体密度降低^[12],径流潜入水位升高,最终在温度和含沙量的共同作用下以层间流的方式进入中部水体;当含沙量增大时,径流潜入位置不断下移,潜流层厚度不断增大,当潜流水体足够打破水体温跃层结构时,径流最终以底部潜流方式进入库区。

2.3 不同强度降雨径流对主库区热分层稳定性的影响

图4展示了降雨径流来临前后主库区垂向水温变化,2019年4月和6月为小入库径流事件(图4a和4b),洪峰流量分别为 $168\text{m}^3/\text{s}$ 和 $400\text{m}^3/\text{s}$,此时主库区处于热分层稳定期,受气温及光照的影响,垂向水温升高,热分层结构更加稳定,小径流未对库区热分层结构稳定性产生明显影响;2017年10月、2015年6月末和2019年9月入库径流达到 $520\text{m}^3/\text{s}$ 、 $576\text{m}^3/\text{s}$ 和 $1170\text{m}^3/\text{s}$,径流于中部水层潜入库区,与库区上下

原水进行混合与热量传递,潜流层温差皆变小($7.41^\circ\text{C}\sim 2.14^\circ\text{C}$, $8.93^\circ\text{C}\sim 5.73^\circ\text{C}$ 、 $7.37^\circ\text{C}\sim 0.69^\circ\text{C}$),上部温跃层被破坏,温度梯度变大,并在底部形成温度梯度较小的新温跃层(图4c、4d和4e);2012年9月洪峰流量为 $1750\text{m}^3/\text{s}$,为近十年最大径流量,径流来临前水体呈稳定的热分层结构,9月2日径流于24m处以底部潜流的方式进入库区,中下层水体混合,潜流水温为 $13.39\sim 15.54^\circ\text{C}$,水温趋于均一(图4f).

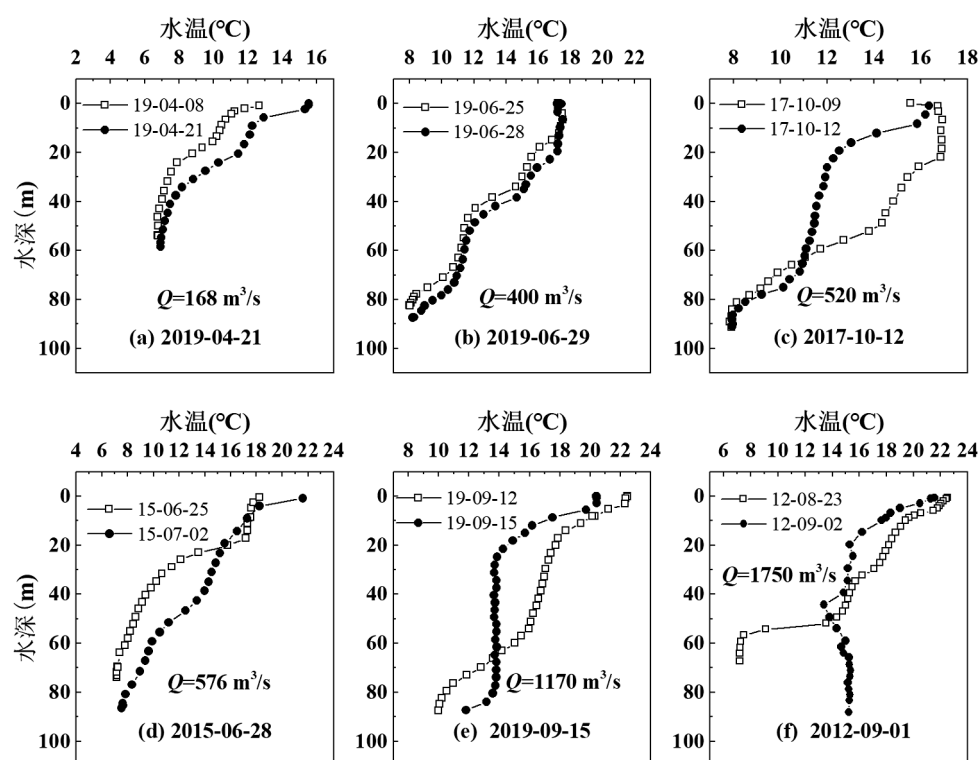


图4 降雨径流来临前、后主库区水温垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of water temperature in main reservoir area before and after rainfall runoff

对于峡谷型水库,垂向水温变化主要靠不同深度水层热量的传递分配,包含水体内部的热量传送与外界热量的输入^[23].内部的传递主要受阳光辐射及热交换影响^[24],外部的输入主要靠暴雨径流输送不同温度水体的更新与混合.Liu等^[25]当洪水温度与水库出流温度相同时,热分层结构将保持原来的状态,当洪水温度低于出流温度时,洪水将在一定程度上引起温跃层稳定性的削弱;Wang等^[26]研究流溪河水库热分层特征时发现高入库流量由于加剧了水体扰动可导致秋季水体提前混合,显著降低热分层稳定性.当径流量较小时,外来能量的输入较低,由于水库主要受气温及光辐射的影响,径流对热分层结

构稳定性的影响不明显;随着流量的进一步增大,径流在中部等密度层潜入库区,改变中部水体温度,并进行垂向热交换导致温跃层上部水体温度降低,水温梯度变大,而底部原水水温较低,与潜流水体形成梯度较小的新温跃层;当洪峰流量达到 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 以上时,此时受来水水温与含沙量的共同影响,径流以底部潜流的方式进入库区,加强了水体扰动,随着库区不断泄洪排浊,低温高浊水取代原水,破坏水体热分层结构,使潜流水体垂向水温分布均匀一致.

2.4 不同强度降雨径流污染物的输入特征

2.4.1 上游来水水质分析

由于来水水质、水动力作用强弱、径流潜入位置及人工调度等因素不同,径

流对库区水质的影响有区别.已有研究表明,不同降雨强度的径流其冲刷和稀释能力会影响氮磷元素的输出^[27].总体来看,金盆水库汛期上游来水 TN 浓度高于 1.50mg/L,超过地表水Ⅳ类标准,且浓度随着入库水量的增大而降低,这是由于金盆水库 TN 主要以溶解态为主,占比高达 76%以上(图 6),随着径流量增大,稀释作用增强,并逐渐高于冲刷作用,导致 TN 越低,由 2.25mg/L 变为 1.71mg/L;夏汛期间(除 2019 年 4 月)TP 浓度则呈相反趋势,随流量增大而升高(400m³/s 时为 0.02mg/L,1750m³/s 时为 0.34mg/L),这是由于径流携带的 TP 主要以颗粒态为主(占比在

61%以上),降雨量越大,对地表冲刷能力越强,TP 附着在泥沙颗粒上而进入河道.杨帆等^[28]对龙泓涧流域降雨时期氮磷输出特征进行研究时发现初期冲刷作用与前期降雨量有关,降雨量越小 TP 和氨氮的冲刷效果越明显.2019 年 4 月虽其径流量最低,但其库区 TP 浓度却高于大径流事件,TN 浓度仅次于 2015 年 6 月径流事件,这是因为其处于桃花汛时期,前一个月降雨量仅为 22mm,上游 S2 水位极低(0.24m),表层沉积物裸露,且长时间未被冲刷,初始冲刷作用明显降雨过后来水水质 TP 浓度 0.66mg/L,TN 浓度 3.99mg/L,均高于其他径流来水水质(表 2).

表 2 径流上游来水与库区潜流层水质对比表
Table 2 Water quality comparison between upstream runoff and reservoir underflow layer

径流事件	洪峰流量 (m ³ /s)	浊度 (NTU)	来水水温 (℃)	上游水质		库区潜流层水质		入库水量 (万 m ³)
				TN(mg/L)	TP(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)	
2019-04	168	98.7±12.0	12.44±0.01	3.99±0.02	0.66±0.04	2.25±0.01	0.04±0.01	849.77
2019-06	400	124.3±12.7	13.76±0.01	3.46±0.17	0.12±0.01	1.90±0.04	0.02±0.01	2208.89
2017-10	520	141.8±27.9	11.14±0.61	2.04±0.02	0.13±0.02	2.29±0.18	0.02±0.01	2992.45
2015-06	576	321.7±22.6	14.07±0.01	3.17±0.05	0.14±0.01	1.90±0.04	0.03±0.01	2913.66
2019-09	1150	503.6±177.4	14.65±1.05	1.51±0.08	0.09±0.01	1.88±0.04	0.09±0.04	7980.00
2012-09	1750	2435.8±564.3	15.25±0.04	/	/	1.71±0.09	0.34±0.01	8922.60

注:“/”表示数据缺失.

2.4.2 降雨前后主库区氮磷营养盐响应 热分层结构是降雨径流潜入的前提及必要条件,受水温和含沙量影响,不同密度径流会沿着等密度水层进入库区,其温度及其携带的高浓度营养盐反过来影响水体分层结构及水质安全.如图 5a 所示,径流来临前垂向水体 TN、TP 浓度分布均一,当小流量径流来临后,受来水水质影响(表 2),温跃层上部 TN 峰值浓度由 1.42 升至 2.25mg/L、TP 峰值浓度由 0.01mg/L 升至 0.46mg/L,随后氮磷浓度向上下传质,导致整个断面浓度增大.图 5b 径流来临后 TP 浓度变化较小,TN 浓度呈降低趋势,一方面是由于汛期径流量小,水动力作用较弱,携带的污染物逐步被稀释,另一方面受主库区扬水曝气系统控制,氮磷浓度得到有效削减.当入库流量增大(>500m³/s)时,径流以层间流方式进入库区,导致库区中部水体 TN、TP 浓度升高(图 5c、5d 和 5e),且降雨量越大,降雨对地表的冲刷作用越强,TP 浓度峰值也就越高(分别为 0.03、0.04 和 0.13mg/L),对应水深分别为 20~60m、20~70m 及 20~80m,与上述潜流位置基本一致.图 5f 径流以底部潜流的方式进入库区,TN 浓度在稀释和冲刷的共同

作用下由 1.31mg/L 升至 1.43mg/L,TP 浓度明显升高,从 30m 水深处便超过 0.40mg/L,底部浓度高达 0.91mg/L,这与浊度、水体密度分布极为相似,表明 TP 污染物主要附着在颗粒泥沙表面而被高浊水带入库区.

潜流位置不仅对热分层结构造成影响,而且对潜流层(等密度层)水体水质产生显著影响.Marti 等^[29]研究 Thomson 水库时发现,异重流携带大量污染物进入库区导致潜入层水质恶化,但受温跃层阻碍而很难扩散至表层.当入库流量较低时,降雨径流从温跃层上部进入库区,导致库区上部水体 TN、TP 浓度明显升高;随着入库流量增大,潜入位置下移,热分层结构被破坏,水体更新可削弱水体的热分层结构^[30],有利于水质的上下交换,从而促进营养盐及溶解氧的垂向扩散^[31].降雨径流有效削减了水体的热分层稳定性,加快了水体进入分层消亡期,促进底部水体污染物往上扩散,导致上部水体水质变差.

2.4.3 主库区污染物的赋存形态 选取 2019 年三场不同强度入库径流的污染负荷形态进行对比(图 6),结果发现在不同的降雨径流下,总磷主要以颗粒

态(PP)为主,占比均在 61%以上,总氮则是以溶解态(DTN)为主.在入库流量较低的情况下(图 6a),上部水体 PP 浓度为 0.04mg/L,占比 94.57%,高于中部与底部,而上部水体中 DTN 浓度为 1.70mg/L,明显高于中部与底部,表明污染负荷从温跃层上部进入库区.图 6b 洪峰径流量达到 $1170\text{m}^3/\text{s}$,此时中部与底部颗粒态氮磷浓度和占比进一步升高,以 PP 为例,中底部水体中浓度达到 0.10~0.11mg/L,占比高达 85.79%~

88.41%,表明大入库径流携带颗粒污染物的能力更强.图 6c 为洪峰径流量达到 $1326\text{m}^3/\text{s}$ 的暴雨径流,由于其潜入位置为中部(26~57m),导致中部潜流层水体 PP 浓度达到 0.06mg/L,占比 82.61%,远高于表层与底部的 69.09%和 48.89%;垂向分布中 DTN 浓度变化不大,在 1.56~1.59mg/L,但中部水体颗粒态总氮(PN)占比明显升高,占比为 23.51%,高于表层与底部的 12.83%和 9.14%.

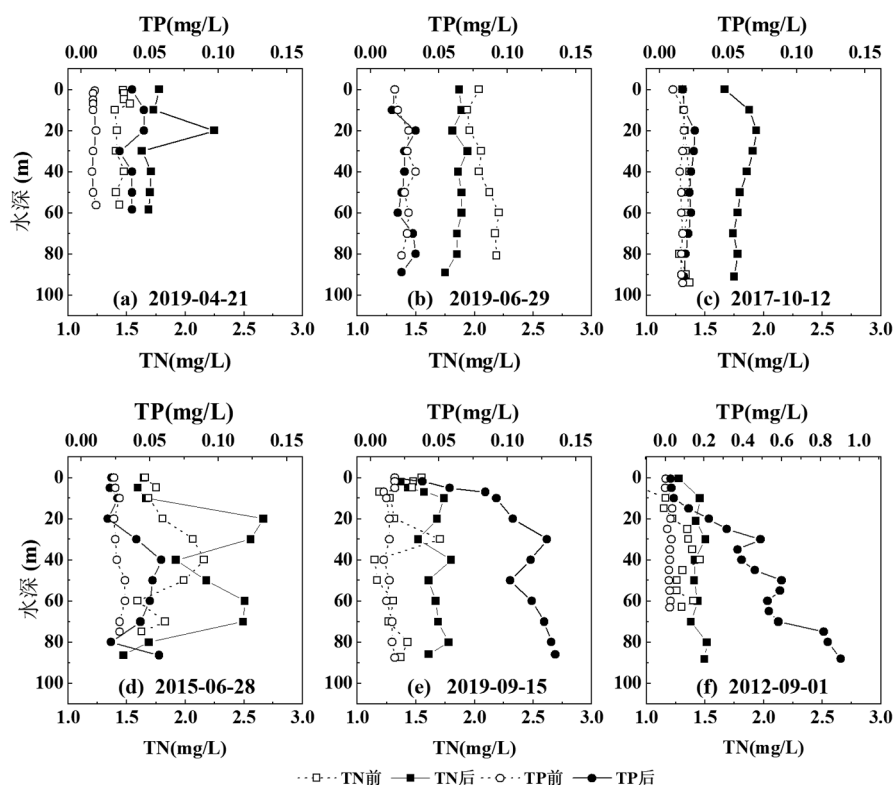


图 5 不同强度降雨径流来临前后主库区 TN、TP 浓度垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of TN and TP concentrations in main reservoir area before and after rainfall runoff with different intensities

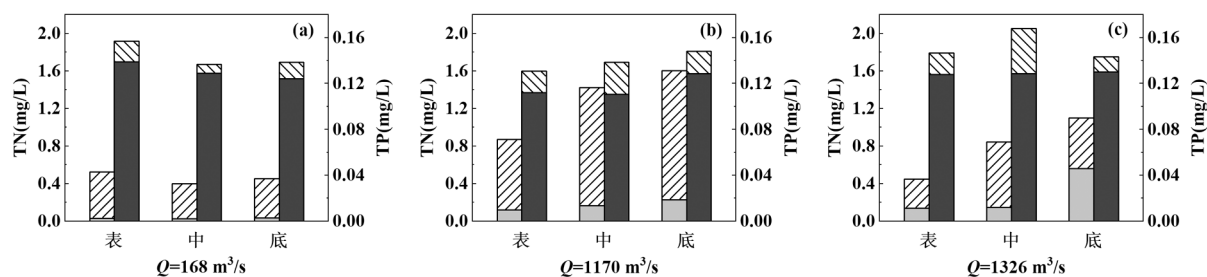


图 6 不同强度降雨径流入库时污染物的垂向赋存形态

Fig.6 Vertical forms of pollutants in different rainfall intensities

PP DTP PN DTN

已有研究表明,不同降雨强度的径流其对地表的冲刷能力会影响氮磷元素的输出^[32-33].暴雨径流期间,由于泥沙表面往往吸附大量污染物和有机质,

在受到水动力强弱、沉积环境、搬运介质和方式的影响后,这些污染物通常以悬浮颗粒物为载体而进入库区^[34]. Peraza-Castro 等^[35]对 Basque Country 流

域水质的研究时得出高强度洪水事件常常会携带大量颗粒污染物,从而对污染负荷的输入产生影响,且颗粒负荷的变化与悬浮颗粒物、沉降和排放有关等结论。在径流量较小时,受水温影响,径流从温跃层上部进入库区,由于颗粒对不同污染物的吸附能力不同,导致表层水体中 DTN,PP 浓度占比最高;当径流量增大时,水体以层间流方式进入库区,中部水体颗粒态氮磷占比升高,表层由于温跃层存在而影响污染负荷的向上传递,而底部水体由于颗粒污染物沉降,在厌氧环境下易还原释放,水质变差;当径流量继续增大,水体整个断面颗粒态污染物占比升高,一方面是受连续强降雨,导致流域水土冲刷严重,上游来水污染负荷较高,另一方面由于径流量增大,携沙能力增强,更多的污染物从中底部进入库区,在径流破坏水体的热分层稳定性后,污染物可向上传递交换造成水质恶化。

3 结论

3.1 金盆水库汛期小径流在迁移过程中主要受水温控制,为等温度层潜流,从温跃层上部进入库区;当流量进一步增大,含沙量作用增强,潜流层下移,径流以中部等密度层潜流进入库区;而大径流受高含沙量影响明显,潜流层厚度增大,径流以底部潜流方式进入库区。

3.2 小径流对主库区分层稳定性影响较小;中径流从中部等密度水层潜入水库,加强了水体的扰动作用,促进中部水体的垂向混合,温跃层遭到破坏;大入库径流条件下,垂向水温保持一致,中部变温层几乎消失,由温跃层直接过渡至恒温层。

3.3 在上游水质、径流量及潜流位置共同作用下,金盆水库 TN 污染物以溶解态为主,而 TP 以颗粒态为主,受冲刷作用明显,流量越大,潜流层水体 TP 浓度越高,随着热分层被破坏,营养盐进行垂向扩散,整个断面均处于较高水平。

参考文献:

- [1] 苏 露.金盆水库沉积物中磷的迁移转化规律及扬水曝气原位控制 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
Su L.Fate of phosphorus in sediments of Jinpen Reservoir and its in-situ control using water lifting aerator [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2016.
- [2] 朱 丹.黑河金盆水库水源地下水环境调查和保护措施研究 [D]. 西安:长安大学, 2014.
- [3] 李 杨.分层型水源水库水温模拟及扬水曝气系统运行优化研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
Li Y. Water temperature simulation of a stratified source water reservoir and optimal operation of water-lifting aerator system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2018.
- [4] 解河海,张金良,郝振纯,等.水库异重流研究综述 [J]. 人民黄河, 2008,30(5):28-30.
Xie H H, Zhang J L, Hao Z C, et al. Overview of researches on density currents in reservoir [J]. Yellow River, 2008,30(5):28-30.
- [5] 王雨春,朱 俊,马 梅,等.西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化 [J]. 湖泊科学, 2005,(1):54-60.
Wang C L, Zhu J, Ma M, et al. Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon-Reservoir, Southwestern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2005,(1):54-60.
- [6] 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.
- [7] 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.
Lü 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.
- [8] 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. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain [J]. Environmental Science, 2020,41(11):4970-4980.
- [9] 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.
- [10] 余伟宾.分层水库异重流数值模拟及水质响应预测 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
Yu W B. Numerical simulation of density currents in thermally stratified reservoir and water quality prediction [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2018.
- [11] Wei L, Jiang D, Tao C. Effects of flood on thermal structure of a stratified reservoir [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(Part B):1811-1817.
- [12] 任 实.温度分层水库中密度流运动特性研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2016.
Ren S. Investigation of density current in thermal stratified reservoir [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [13] 曾 康.降雨径流对大水深分层型水库水质的影响 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
Zeng K. The effects of rainfall runoff on water quality of a stratified deep reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2016.
- [14] 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/OL]. 环境科学:1-13[2020-12-14].<https://doi.org/10.13227/>

- j.hjcx.202007180.
- Huang C, Huang T L, Li Y, et al. Temporal and spatial evolution of storm runoff and water quality assessment in Jinpen Reservoir [J/OL]. *Environmental Science*:1-13[2020-12-14].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202007180>.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- The State Environmental Protection Administration The Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] 程忠良,刘 勇,高 成,等.基于马氏距离判别的丹江口水库长期径流分级预报 [J]. *中国农村水利水电*, 2018,(7):1-4.
- Cheng Z L, Liu Y, Gao C, et al. Long-term runoff classification forecast of Danjiangkou Reservoir based on Mahalanobis distance discrimination [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018,(7):1-4.
- [17] 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 & Technology, 2015.
- [18] 黄 俊,张 旭,彭 炯,等.暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2004,(2):255-258.
- Huang J, Zhang X, Peng J, et al. Temporal and spatial distribution and transportation of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004,(2):255-258.
- [19] 陆海明,张 丽,王 姐,等.降雨径流对江淮丘陵区农业流域磷素输出影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019,38(9):2165-2173.
- Lu H M, Zhang L, Wang N, et al. Impact of rainfall-runoff on phosphorus export from an agriculture watershed in the hilly region of Yangtze Huaihezone, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019,38(9):2165-2173.
- [20] 张俊华,李 涛,马怀宝.小浪底水库调水调沙研究新进展 [J]. *泥沙研究*, 2016,(2):68-75.
- Zhang J H, Li T, Ma H B. Proceedings on water and sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016,(2):68-75.
- [21] 解 岳,陈思源,孙 昕.分层水库异重流挟沙特性及适宜排沙口的确定 [J]. *中国给水排水*, 2017,(5):108-112.
- Xie Y, Chen E Y, Sun X. Characteristics of transporting sediment by density currents and determination of proper location of sediment releasing outlet in stratified Reservoir [J]. *CHINA WATER & WASTEWATER*, 2017,(5):108-112.
- [22] Parker G, Toniolo H. Note on the analysis of plunging of dentisy flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,133(6):690-694.
- [23] 黄廷林,谭欣林,李 扬,等.金盆水库热分层特性及扬水曝气系统运行效果研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(2):270-276,284.
- Huang T L, Tan X L, Li Y, et al. Study of the thermal regime characteristics and effect of water-lifting aerators operation on the Jinpen Reservoir [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2018,50(2):270-276,284.
- [24] Monika W, Daniel E S. Climate change uncouples trophic interaction in an aquatic ecosystem [J]. *Ecology*, 2004,85(8):2100-2106.
- [25] Liu W, Jiang D G, Cheng T. Effects of Flood on Thermal Structure of a Stratified Reservoir [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011,10: 1811-1817.
- [26] Wang S, Qian X, Han B P, et al. Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China [J]. *Water Research*, 2012,46(8):2591-2604.
- [27] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等.三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征 [J]. *环境科学*, 2013,34(8):3035-3042.
- Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, et al. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2013,34(8):3035-3042.
- [28] 杨 帆,蒋轶锋,王翠翠,等.西湖龙泓洞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.
- [29] Marti C L, Mills R, Jörg Imberger. Pathways of multiple inflows into a stratified reservoir: Thomson Reservoir, Australia [J]. *Advances in Water Resources*, 2011,34(5):551-561.
- [30] 卢金锁,李志龙.热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例 [J]. *湖泊水库*, 2014,26(5):698-706.
- Lu J S, Li Z L. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: A case study of Heihe Reservoir, Xi'an City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014,26(5):698-706.
- [31] Ma W X, Huang T L, Li X, et al. The effects of storm runoff on water quality and the coping strategy of a deep canyon-shaped source water reservoir in China [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2015,12(7):7839-7855.
- [32] 曾 康,黄廷林,马卫星,等.金盆水库汛期高浊水径流的潜流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 Jin-pen Reservoir during flood season [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(9):2778-2786.
- [33] 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.
- [34] 邓立凡,黄廷林,李 楠,等.水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 [J]. *环境科学*, 2019,40(6):2722-2729.
- Deng L F, Huang T L, Li Nan, et al. Migration characteristics of manganese during rainfall events and its impacts on water quality in a drinking water source reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6):2722-2729.
- [35] Peraza-Castro M, Sauvage S, Sánchez-Pérez J M, et al. Effect of flood events on transport of suspended sediments, organic matter and particulate metals in a forest watershed in the Basque Country (Northern Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, (569-570):784-797.

作者简介: 华逢耀(1995-),男,山东临沂人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事水源保护与水质改善研究。