



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202109039

中图分类号 X524

文献标识码 A

王亚博, 李慧莉, 张洪刚, 等. 极端降水过程对岩口水库入库溪流污染负荷的影响及其对策[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2061-2072.
[WANG Yabo, LI Huili, ZHANG Honggang, et al. Influence of extreme rainfall process on pollution load of the inflow stream of Yankou reservoir and its countermeasures[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(6): 2061-2072.]

极端降水过程对岩口水库入库溪流污染负荷的影响及其对策

王亚博^{1,2}, 李慧莉¹, 张洪刚^{2,3,✉}, 何怡^{2,3}, 焦茹媛^{2,3}, 刘凡⁴, 张宝³, 杨敏²

1. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 长三角(义乌)生态环境研究中心, 义乌 322000; 4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉, 430078

摘要 以岩口水库小流域为研究对象, 通过监测 2019 年和 2020 年 2 次台风降水过程中入库河流氮磷通量变化, 解析了极端降水事件对入库河流及下游库区污染负荷的影响, 并评估极端降水条件下外源输入对库区水质污染的贡献。结果表明, 降水历时和强度存在明显差异的两场暴雨全过程均可划分为 4 个典型阶段, 即局部产流期、全流域产流期、水量消退期和流域恢复期。其中以全流域产流期(第 II 阶段)污染负荷最重, 输送了整个阶段 50% 以上的总磷负荷, 且污染负荷的增长倍数与降水强度呈显著正相关。与降水前相比, 台风“利奇马”和“黑格比”两场降水过程对下游岩口水库的入库总氮污染负荷分别增加了 880 kg 和 419 kg, 总磷污染负荷分别增加了 110 kg 和 23 kg, 而且增加的总氮以溶解态为主, 总磷以颗粒态为主, 说明地表径流冲刷导致河流中汇入了大量的面源污染负荷。本研究证实了极端降水事件, 尤其是全流域产流阶段的降水会显著加剧流域面源对下游库区的污染贡献, 建议采取合理的滞蓄、沉淀和净化等策略对地表径流污染负荷进行削减以降低下游库区水质污染风险。

关键词 极端降水; 岩口水库; 外源负荷; 氮磷通量; 降水径流

湖库富营养化已成为全球范围内的环境问题^[1-3]。由于水体接纳过量的氮、磷等营养物质使得浮游生物大量繁殖, 导致水体富营养化, 水质逐渐恶化。湖库水体营养盐的来源通常分为内源和外源两个部分。内源一般是指沉积物中累积的营养盐再次释放进入上覆水中; 外源则主要是通过地表径流途径进入库区水体^[4-5]。入湖库河流是大部分湖库水体营养物质最主要的输入源^[6]。

极端降水事件的发生使得河湖等水体扰动加剧, 还会通过地表径流携带大量污染物进入水体^[7-9], 导致河湖水环境质量的变化。因此, 研究极端降水对湖库上游河流水质特征的影响过程与规律, 对流域水环境治理和水质安全保障具有重要意义。

岩口水库是浙江省义乌市最大的饮用水水源地之一, 为义乌市近 3.0×10^5 人口提供日常供水。监测数据表明, 岩口水库水体大部分水质指标能够满足湖库 II 类标准, 但在丰水期总磷为 $0.025 \sim 0.045 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮为 $0.7 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 春、秋季节水体中叶绿素 a 浓度为 $4 \sim 20 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 导致水库每年 4 月~10 月存在间歇性藻华暴发的风险。岩口小流域集水区为丘陵地形, 分布有 25 个自然

收稿日期: 2021-09-08; 录用日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877473); 国家重点研发计划(2021YFC3200904)

第一作者: 王亚博(1995—), 女, 硕士研究生, 1836683669@qq.com.; ✉通信作者: 张洪刚(1980—), 男, 博士, 副研究员, E-mail: hgzhang@rcees.ac.cn

村, 户籍人口为 13 307 人, 流域内现存 1 206 hm^2 农业用地, 其中 482 hm^2 (469~496 hm^2) 为桃树果园。库区水质极易受到流域内人类活动的影响, 同时在降水发生时地表径流对地面的冲刷会导致入库河流污染物通量急剧增加, 使得水库农业面源污染加剧, 水质污染风险增大。

削减入库河流输入污染物总量是提升库区水质、防止富营养化和藻华暴发的前提条件。通过解析降水过程中入库河流水量水质的动态变化规律, 阐明降水过程对入库溪流水质的影响, 是控制库区水质污染负荷、保障水质安全的重要基础, 也是有效核算水库外源输入污染负荷、制定削减方案的前提。

本研究基于“利奇马”(2019 年)和“黑格比”(2020 年)2 次台风降水后岩口水库主要入库河流流量和水质变化情况的全过程监测数据, 探究降水对入库河流不同断面水质、水量的影响过程和规律, 解析降水过程中流域污染物流失过程及输出特征, 评估极端降水条件下河道径流对库区水质、水量的影响, 为科学制定入库污染负荷削减对策提供参考。

1 1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

岩口水库小流域位于浙江省义乌市上溪镇岩口村、钱塘江流域东阳江支流航慈溪的上游, 主要由 4 条支流和岩口水库组成, 如图 1(a) 所示。岩口水库水域面积 2.75 km^2 , 常水位库容 $2\,848\times 10^4\text{ m}^3$, 集水面积约 57.5 km^2 。岩口小流域地处亚热带季风气候区, 多年平均气温 17.1 $^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量 1 394 mm。降水多集中在 3 月~8 月, 占全年降水量约 71%。流域地形以低山丘陵为主, 海拔为 83~824 m。岩口水库入库溪流主要有 4 条, 分别是黄山溪、金傅宅溪、溪华溪和斯何溪。其中, 黄山溪的流量最大, 占入库总流量的 70%。本研究以黄山溪为对象, 设置监测断面的点位如图 1(b) 所示。

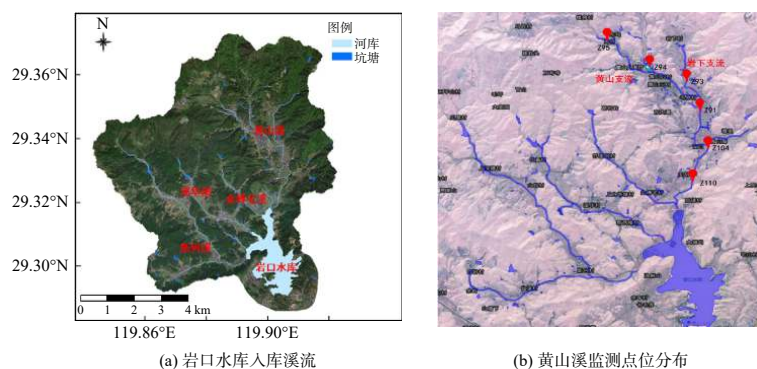


图 1 岩口水库流域示意图和黄山溪断面点分布图

Fig. 1 Schematic diagram of Yankou reservoir basin and distribution of Huangshan creek section points

黄山溪上游多为林地, 农田较少, 主要种植红薯、樱桃、桃树、猕猴桃等; 中游多为农田, 主要种植桃树、芋头、豆角等; 下游河岸一边为林地, 一边为农田。其中, 上游河道较窄、流速较大、流量较小, 中游河道较宽、流速减小、流量增加, 下游河道最宽、流速达到最低, 尤其是 Z110 断面前后。黄山溪全长约 8.15 km。另外, 黄山支流全长 3.34 km, 岩下支流全长 1.58 km。从黄山溪上游 Z95 和 Z93 断面起始, 坡度依次降低。上游为微斜坡, 坡度在 0.9° ~ 1.4° ; 中下游为平原, 坡度在 0° ~ 0.5° 。岩口水库水质污染来源主要为外源河流输入, 其中降水径流导致的外源污染汇入是主要来源, 占岩口水库总污染源贡献的 81%(以 TP 计), 因此, 现阶段削减外源污染的输入是保障岩口水库水质的关键^[10]。此外, 岩口水库外源输入主要集中在雨季(4—9 月), 枯水期上游河流几乎处于断流状态, 河流导致的污染输入可忽略。

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集和分析

在2019年台风“利奇马”(简称“LQM”)和2020年台风“黑格比”(简称“HGB”)导致的降水过程中,采集黄山溪各断面水样并分析氮、磷营养盐含量。采样时间点有:降水前,开始降水0.5 h、1 h、1.5 h等及降水后12 h。总氮(TN)和溶解性总氮(TDN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;总磷(TP)和溶解性总磷(TDP)采用钼酸铵分光光度法;颗粒态氮(TPN)和颗粒态磷(TPP)采用差值法计算。采样过程中同步监测各断面的水文数据,包括河宽、水深和流速。其中,流速采用流速仪测定,即根据流速垂向分布规律,在每个断面点的不同深度上布设若干个流速测点进行测定。具体布设方法为:在水深小于0.5 m的地方,流速测点位于水面下相对于整个水深0.6倍处,即该情况下测量1层的数据;若水深在0.5~1 m,分别测量位于整个水深0.2倍和0.8倍处,即该情况下测量2层数据;当水深大于1 m时,分3层进行测量,分别为整个水深0.2倍、0.6倍和0.8倍处。每个河流断面点流量计算公式为式(1)。

$$Q = v_0 \times (H \times B) \quad (1)$$

式中: Q 为河流断面点流量,即该断面的瞬时流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; v_0 为断面点的平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; H 为断面点处的水深, m; B 为断面点处的河流宽度, m。

1.2.2 降水数据采集与分析

2019年台风LQM于8月9日在浙江省登陆,上午9点左右开始降水,至8月10日21点左右结束;2020年台风HGB于8月4日在浙江省登陆,上午11点左右开始降水,至8月4日23点左右结束。本研究中降水数据来自浙江省义乌市研究流域内黄山村和长富村2个水文站,按气象部门采用的标准将雨强划分为小雨、中雨、大雨和暴雨4级^[11]。选用6 h作为最小降水时间间隔进行降水场次划分^[12],同时选用每小时平均降水量计算降水强度。降水的基本情况如表1所示。

表1 两场台风降水及河道径流特征
Table 1 Characteristics of rainfall and river runoff during the two typhoons

台风简称	单次降水量/mm	降水历时/h	降水特征		河道径流特征		级别
			平均雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
LQM	117.1	37	3.165	13.800	4.023	0.313	暴雨
HGB	59.8	12	4.983	25.700	2.000	0.102	暴雨

1.2.3 数据处理与计算方法

河道径流中污染物的平均浓度(EMC_s)可用来表示降水事件后径流的污染状况^[13-14],其值用污染负荷同河道径流总量的比值来确定,计算式为式(2)。

$$\text{EMC}_s = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

$$V = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

式中: M 为污染物总负荷, g; V 为径流总量, m^3 ; C_i 为污染物在样本 i 监测时的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_i 为样本 i 在监测时的流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Δt_i 是样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔, s。

氮磷迁移通量指某断面单位时间内产生的氮磷迁移量;径流通量指单位时间内产生的流量^[15],计算公式为式(5)。

$$F = C \times Q \times f \quad (5)$$

式中: F 为单位时间段内营养盐的迁移通量, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为河流的瞬时流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; C 为营养盐的瞬时质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; f 为单位换算系数。

本研究的数据统计分析采用 IBM SPSS Statistics 26 软件, 数据可视化采用 origin2018 软件。

2 结果与讨论

2.1 降水特征分析

极端降水事件指的是降水高于(或低于)观测值区间的上限(或下限)。国际上采用极端降水指数来分析评估极端降水, 由降水事件序列的百分位数来界定极端降水的阈值, 如超过降水序列的 95% 或 99% 就定义为极端降水。LQM 和 HGB 都属于台风导致的极端降水事件^[16-17], 虽然都属于暴雨级别, 但降水特征存在明显不同。LQM 平均降水量小, 降水历时长, 而 HGB 平均降水量大, 降水历时短, 且 HGB 降水期间河道流量的增加倍数大于 LQM。

按照降水量、降水强度及河道全部断面流量平均值(间接指示地表径流量)的变化过程, 将 2 次台风降水全过程划分成 4 个典型阶段^[18-19], 如图 2 所示。第 I 阶段为局部产流期, 此阶段的降水量少, 未形成明显的地表径流, 故河流流量波动不大, 与雨前流量基本一致。在此阶段, LQM 历时 5 h, HGB 历时 0.5 h。HGB 降水初期雨强较大, 在 0.5 h 后迅速形成地表径流, 汇入河道。第 II 阶段为地表径流为主的全流域产流期, 降水量最集中, 雨强最大, 导致河道流量迅速上升。其中, LQM 累计降水量达 117.2 mm, 平均降水强度为 $3.165 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 河道流量为第 I 阶段的 6.85 倍, 历时 32 h; HGB 累计降水量达 59.8 mm, 平均降水强度达到 $4.983 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 河道流量为第 I 阶段的 12.23 倍, 历时 11.5 h。第 III 阶段为水量消退期, 降水过程在此阶段基本结束, 河道流量较峰值明显下降, 属于水量消减期。其中, LQM 历时 37 h, HGB 历时 28 h。第 IV 阶段为流域恢复期, 此阶段可能存在部分地下水径流, 河道流量逐步恢复至雨前水平, LQM 历时 22 h, HGB 历时 16 h。

上述结果表明, 降水过程中河道流量峰值比降水雨强峰值明显滞后, 这与李瑞玲等^[11]在太湖缓坡丘陵地区研究雨强对径流的影响结果一致。在 LQM 的第 1 个雨强峰值之后 1 h 内出现的最大流量峰值为 $0.79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 在 HGB 的第 1 个雨强峰值 2 h 后出现的最大流量峰值为 $1.38 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。主要原因有: 1) 在 LQM 期间第 1 个雨强峰值出现之前已开始降水, 导致土壤中的水含量达到饱和, 随着雨强变大, 大部分雨水经地表径流汇入河流造成流量短时间内急剧上升; 2) HGB 瞬时雨强较大, 雨水下渗速率低于地表雨水径流的累积速率, 导致更多雨水来不及下渗就形成地表径流汇入河道, 造成流量持续增加。杨帆等^[20]对西湖龙泓涧流域暴雨径流对氮磷流失的研究结果, 以及于兴修等^[21]对沂蒙山区典型小流域降水径流的研究结果均与本研究的结果一致。

2.2 营养盐变化特征

2.2.1 降水对上下游断面氮、磷浓度及其形态的影响

雨前数据为降水前晴天数据; 雨中数据为降水过程中监测的全部数据, 并根据公式(2)~(4)计算得到雨中河道径流中污染物的平均浓度值(EMC_s); 雨后数据为降水结束后 12 h 的监测数据。黄山溪(雨前、雨中和雨后)颗粒态和溶解态氮(磷)分布变化如图 3 所示。方差分析结果表明, LQM 和 HGB 相同断面雨前的总氮或总磷不存在明显差异($P > 0.05$), 说明雨前水质基本稳定。LQM 雨前、雨中、雨后的总氮无明显差异, HGB 雨中的总氮是雨前的 1.38 倍, 雨后是雨前的 1.19 倍; LQM 雨中的总磷是雨前的 1.49 倍, 雨后是雨前的 98%; HGB 雨中的总磷是雨前的 1.87 倍, 雨后是雨前 87%。这说明降水过程会导致河道中氮、磷增加, 而磷的质量浓度比氮更易受降水量的影响, 且雨强越大, 河道水体中磷的质量浓度越高。这一结果与于兴修等^[21]对沂蒙山

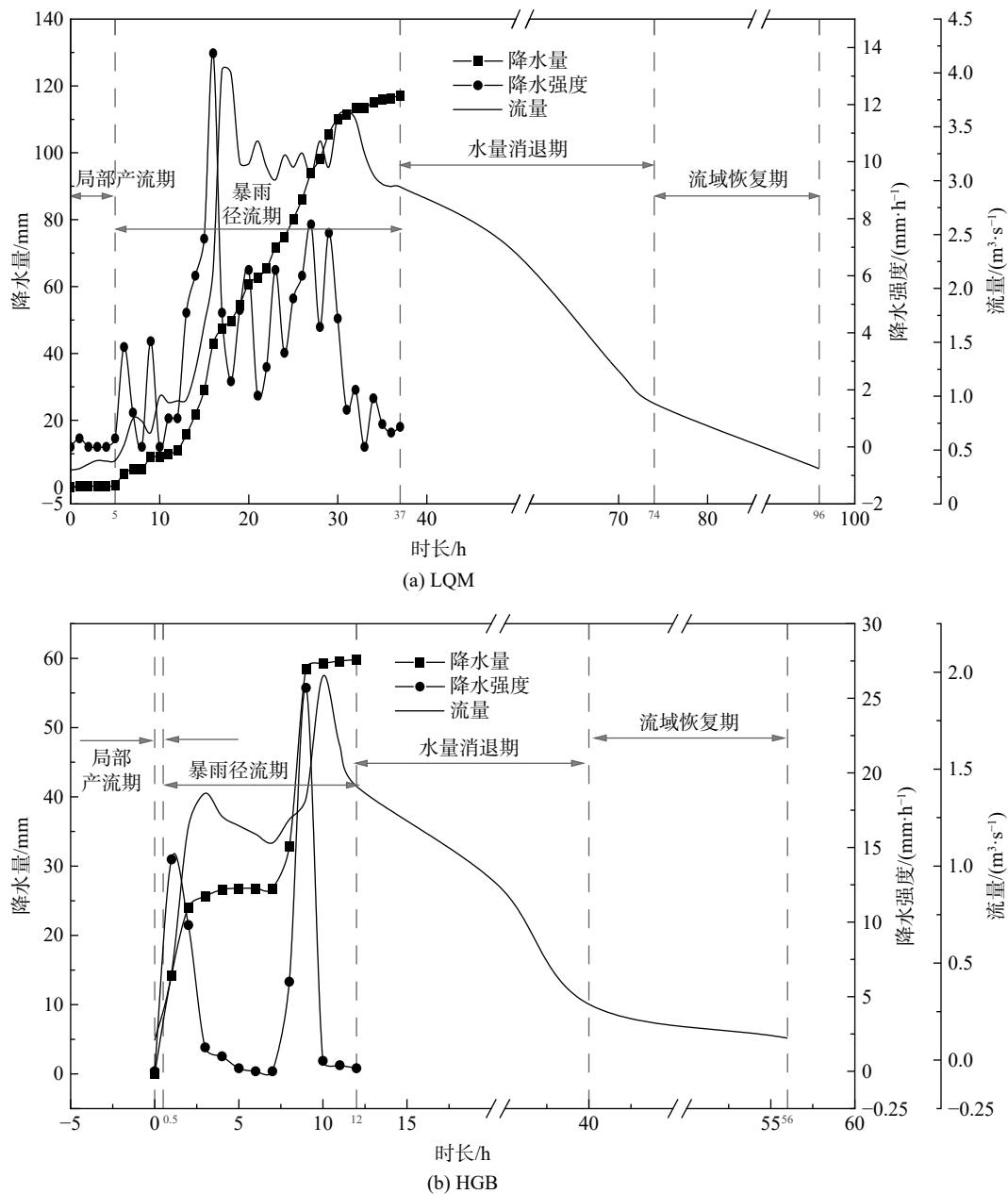


图 2 不同台风过程中降水量、降水强度和径流量的变化
Fig. 2 Changes of rainfall, rainfall intensity and runoff during different typhoons

区典型小流域降水径流的研究结果亦一致。需要注意的是，氮和磷的质量浓度在降水前后表现出不同趋势，总氮降水前低于降水后，而总磷是呈现相反的特征，即降水前高于降水后。这说明氮磷污染物在溪流中的赋存状态可能存在差异，降水可能会导致颗粒物含量骤增，雨后颗粒物在沉降过程中会吸附磷，使得水体中的总磷降低^[22]。

LQM 雨前各断面颗粒态磷占总磷的 28%，雨中占 66%，雨后占 40%。HGB 雨前各断面颗粒态磷占总磷的 38%，雨中占 64%，雨后占 48%。结果表明，降水会增加颗粒态磷的含量，雨中土壤冲刷导致大量颗粒物随地表径流汇入河道，颗粒态磷含量增加，同时颗粒态磷在降水停止 12 h 后仍保持较高浓度。这与 LEE 等^[23]在韩国 9 个流域地区研究不同土地利用类型暴雨对污染物浓度影响的结果一致。在降水过程中，岩口水库上游河流输入的总磷以颗粒态磷为主，是陆域表层土壤被

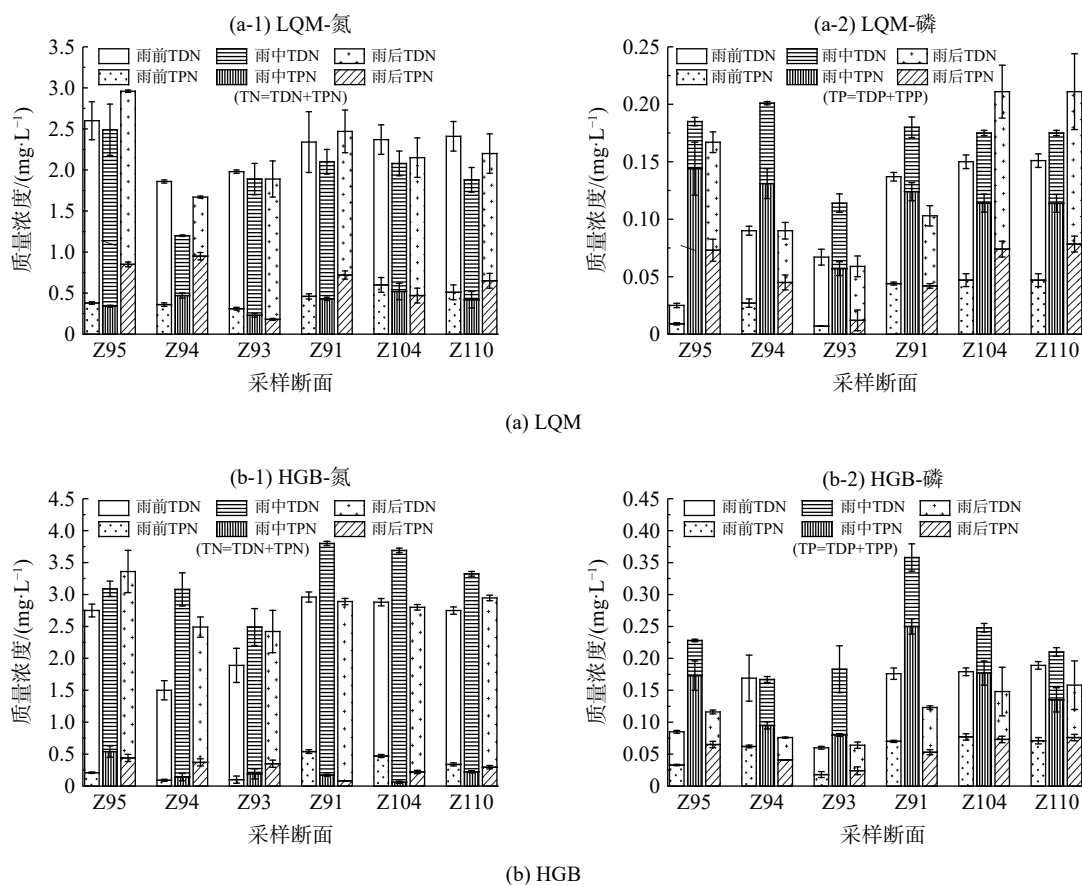


图3 黄山溪(雨前、雨中和雨后)颗粒态和溶解态氮(磷)分布变化

Fig. 3 Distribution changes of granular and dissolved nitrogen (phosphorus) in Huangshan Stream (before, during and after rain)

地表径流冲刷进入河道所致。FOSTER等^[24]在英国赫里福德郡(英格兰旧郡名)研究农业面源污染时亦发现,排水沟渠中颗粒态磷占总磷的60%以上,且至少73%的总负荷来自表层土壤。另外,LQM各断面雨前、雨中和雨后溶解性氮占总氮的76%,HGB的该值为81%。这表明雨前、雨中和雨后河流中的氮均以溶解态为主,受降水影响较小。综上所述,降水过程对磷形态的影响较其对氮形态的影响更大。

2.2.2 降水对上下游断面氮、磷通量的影响

黄山溪不同监测断面的雨天流量、流速和浊度分布变化如图4所示。各断面的流量由上游到下游呈增加趋势,且下游相对增量高于上游区域。这说明:由上游到下游存在水量的汇集和污染累积效应,降水导致各断面的流量发生数量级增长,尤其是下游区域。在降水过程中,地表径流的冲刷导致大量颗粒物汇入河道,上游地区坡度较大,地表径流冲刷强度较大,汇入河道的颗粒物骤增,浊度骤升,且流速较高不利于颗粒物的沉降;上游山涧溪流流动过程中逐渐汇集至下游缓坡区域,地势平坦,河道变宽,流速降低,有利于颗粒物的沉降,浊度变小,Z104断面之下尤为突出。

黄山溪不同监测断面的雨前和雨中氮磷通量及其占Z104断面通量的比例如表2所示。总体上,从上游到下游氮磷输送通量都呈上升趋势,降水导致氮磷输送通量发生数量级增大,尤其是中下游断面的增加量较大;而上游的增长速度一般大于下游,这主要是由于上游冲刷强度较大。降水导致Z95断面总磷通量占Z104通量的比例升高。因上游地形坡度大,降水过程中地面冲刷效

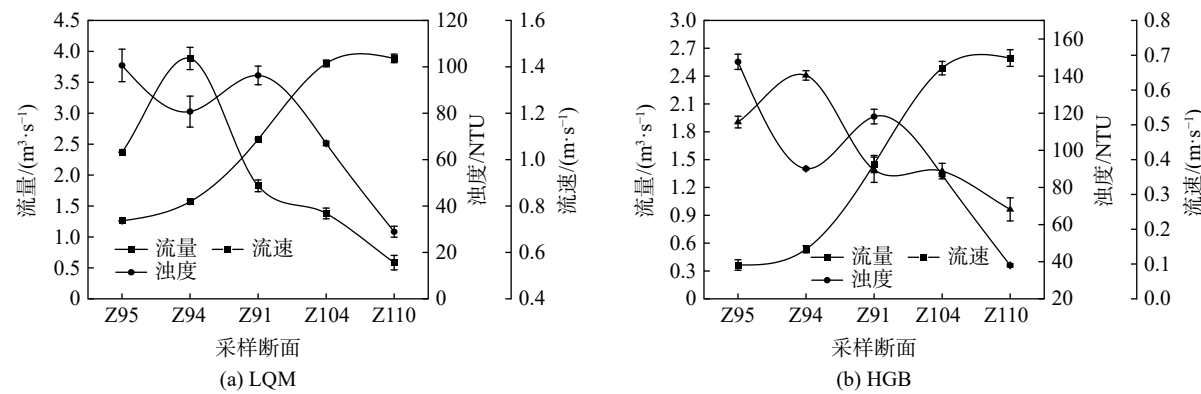


图 4 黄山溪不同断面雨天流量、流速和浊度的分布变化

Fig. 4 Distribution of flow, velocity and turbidity in different sections of Huangshan Stream in rainy days

表 2 黄山溪不同断面营养盐通量及占 Z104 断面通量的比例

Table 2 Nutrient flux in different sections of Huangshan Stream and the proportion of the flux in Z104 in different sections											
台风简称	断面	晴天总氮通 量/(g·h ⁻¹)	晴天 比例/%	雨天总氮通 量/(g·h ⁻¹)	雨天 比例/%	总氮增 长速度	晴天总磷通 量/(g·h ⁻¹)	晴天 比例/%	雨天总磷通 量/(g·h ⁻¹)	雨天 比例/%	总磷增 长速度
LQM	Z95	466	11.3	11 295	39.6	23.23	4	1.7	839	35.0	186.23
	Z94	783	19.0	6 782	23.8	7.66	38	14.5	1 136	47.4	28.97
	Z93	396	9.6	6 532	22.9	15.49	14	5.2	391	16.3	27.91
	Z91	3 698	89.8	19 490	68.4	4.27	217	83.1	1 671	69.7	6.72
	Z104	4 117	100.0	28 492	100.0	5.92	261	100.0	2 397	100.0	8.20
	Z110	4 112	99.9	26 300	92.3	5.40	258	98.9	2 224	92.8	7.63
	平均	2 262	—	16 482	—	6.29	132	—	1 443	—	9.95
HGB	Z95	238	16.2	4 062	12.3	16.10	7	8.0	299	13.5	40.55
	Z94	194	13.2	5 927	17.9	29.49	22	23.9	322	14.5	13.67
	Z93	638	43.4	2 571	7.8	3.03	20	22.2	188	8.5	8.34
	Z91	1 469	99.9	19 865	60.1	12.52	87	95.6	1 870	84.2	20.38
	Z104	1 470	100.0	33 062	100.0	21.49	91	100.0	2 220	100.0	23.28
	Z110	1 425	96.9	31 046	93.9	20.79	98	107.2	1 961	88.2	19.02
	平均	906	—	16 089	—	16.76	54	—	1 143	—	20.03

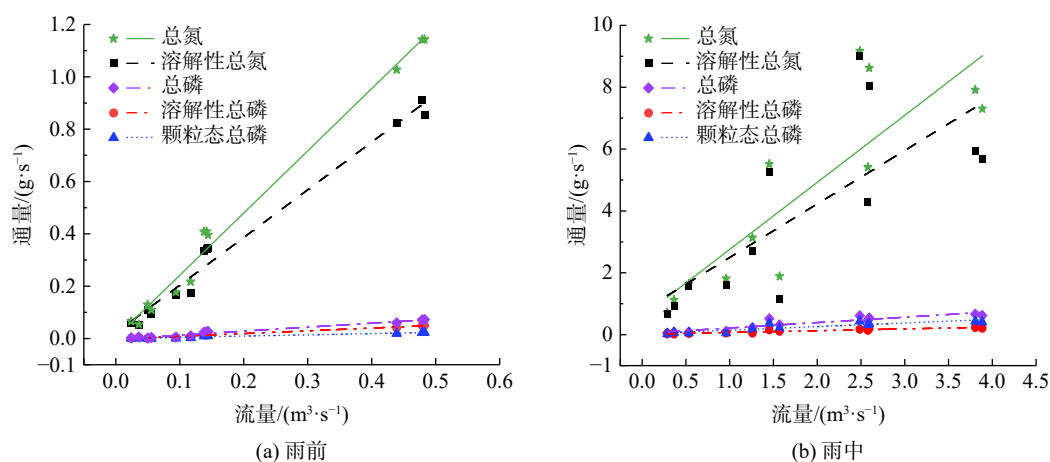
注：增长速度为（雨天通量-晴天通量）/晴天通量；比例为各断面通量占Z104断面通量的比例；—表示无法计算。

应明显，故携带大量颗粒物的地表径流汇入河道，颗粒态磷含量增加。Z91 和 Z104 断面的雨前总氮和总磷的输送通量基本接近，Z91 断面氮磷通量占 Z104 断面通量的 83%~100%；而 Z104 断面的雨天总氮和总磷的输送通量远远大于 Z91 断面，Z91 断面氮磷通量占 Z104 断面通量的 60%~84%。这说明 Z91 与 Z104 间的雨前氮磷增加通量仅占 Z104 通量的 0~17%，而雨天占 16%~40%，即在雨前河流污染物主要由上游河水贡献，而在雨天下游河道污染负荷中陆域面源的汇入贡献比例增加 [25-26]，导致入库营养盐增多。Z110 的雨前断面通量占 Z104 断面通量的 97%~107%，而雨天占 88%~94%，这说明在 Z110 断面处，营养盐通量有所降低，特别是在雨天。这是由于 Z104 与 Z110 间的地势平坦、河面较宽、流速变慢，导致颗粒物逐渐沉降，污染物降低。

2 场台风的降水过程存在明显差别，分析断面通量的变化，结果如表 2 所示。研究 2 场降水所有断面氮平均磷通量后发现：LQM 总氮和总磷的雨中通量相对于雨前通量的增长速度分别是

6.3倍和10.0倍；而HGB的相关增长速度分别为16.8倍和20.0倍。这说明此增长速度与降水强度有关，雨强越大，营养盐通量的增长速度越快；且对于同一场降水而言，总磷通量的增长速度大于总氮。

以2场降水全部断面的平均流量为研究对象，分析了氮磷通量与河道径流量的线性回归关系，结果如图5所示。黄山溪晴天和雨天的氮磷通量与径流量 Q 之间均呈显著的线性关系^[27-28]，溶解性总磷通量主要受径流量所控制，颗粒态磷通量与 Q 之间的线性关系稍差主要是由于颗粒态磷受河水中悬浮颗粒物控制的影响。这与沈志良^[15]研究长江对通量与径流量的关系时得出结果一致。在晴天，氮磷通量与 Q 之间的可决系数大于0.96，雨天氮磷通量与 Q 之间的可决系数大于0.75。因此，晴天氮磷通量与 Q 之间的线性关系优于雨天。



注：雨前流量和通量线性拟合公式有 $TN(g \cdot s^{-1}) = 0.004 + 2.377 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.994^{**}$, $p=0.000$), $TDN(g \cdot s^{-1}) = 0.022 + 1.822 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.991^{**}$, $p=0.000$), $TP(g \cdot s^{-1}) = -0.002 + 0.152 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.985^{**}$, $p=0.000$), $TDP(g \cdot s^{-1}) = -0.002 + 0.105 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.991^{**}$, $p=0.000$), $TPP(g \cdot s^{-1}) = -6.954E-6 + 0.047 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.960^{**}$, $p=0.000$); 雨中流量和通量线性拟合公式有 $TN(g \cdot s^{-1}) = 0.586 + 2.169 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.858^{**}$, $p=0.000$), $TDN(g \cdot s^{-1}) = 0.766 + 1.730 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.749^{**}$, $p=0.005$), $TP(g \cdot s^{-1}) = 0.043 + 0.174 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.915^{**}$, $p=0.000$), $TDP(g \cdot s^{-1}) = 0.013 + 0.058 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.938^{**}$, $p=0.000$), $TPP(g \cdot s^{-1}) = 0.030 + 0.116 Q(m^3 \cdot s^{-1})$ ($R^2=0.938^{**}$, $p=0.000$).

图5 黄山溪雨前和雨中营养盐通量与流量的回归分析

Fig. 5 Correlation between nutrient flux and discharge before and during the rain in Huangshan Stream

2.3 降水不同阶段污染物通量的时间变化特征

受降水及汇流的影响，入库河流污染物负荷与河道径流量变化具有相关性。以黄山溪全部断面平均流量为对象，利用流量-通量关系曲线对监测空缺时的通量进行插值计算^[29]，对2次极端降水全过程中不同时间阶段的氮磷通量变化进行分析，结果如表3所示。

LQM导致黄山溪入库总磷和总氮的污染负荷分别达到122 kg和1 097 kg。第I阶段的通量与雨前基本相同，说明局部产流期的污染负荷与雨前一致。第II阶段的污染负荷最重，总氮和总磷的通量分别达到17.49 kg·h⁻¹和2.06 kg·h⁻¹，较雨前分别增长了7.73和15.58倍，以49.38%的径流量输送污染物占比分别达到了51.02%(总氮)和53.82%(总磷)。第II阶段的峰值通量分别达28.45 kg·h⁻¹(总氮)和3.47 kg·h⁻¹(总磷)，分别是雨前的12.58和26.28倍。第III阶段以42.20%的径流量输送污染物占比分别达到了40.49%(总氮)和40.81%(总磷)，总氮和总磷的通量分别达到12.01 kg·h⁻¹和1.35 kg·h⁻¹，较雨前分别增长了5.31和10.22倍。第IV阶段以7.28%的径流量输送污染物占比分别达到了7.26%(总氮)和4.78%(总磷)，总氮和总磷的通量分别达到3.63 kg·h⁻¹和0.27 kg·h⁻¹，较雨前分别增长了1.60和2.02倍，在此阶段通量逐渐恢复至雨前。

HGB暴雨过程导致黄山溪入库总磷和总氮的污染负荷分别达到26 kg和470 kg。第I阶段的通

表 3 LQM 和 HGB 雨前和暴雨径流过程各阶段营养盐通量

Table 3 Nutrient fluxes of LQM and HGB before the rain and at the stage of rainstorm runoff process

降水阶段	LQM						HGB					
	时长 /h	总氮通量 /(kg·h ⁻¹)	总磷通量 /(kg·h ⁻¹)	总氮负荷 /kg	总磷负荷 /kg	流量百分 比/%	时长 /h	总氮通量 /(kg·h ⁻¹)	总磷通量 /(kg·h ⁻¹)	总氮负荷 /kg	总磷负荷 /kg	流量百分 比/%
雨前	—	2.26	0.13	—	—	—	—	0.91	0.05	—	—	—
局部产流 期 I	5	2.7	0.15	13.49	0.72	1.14	0.5	0.95	0.06	0.47	0.03	0.11
暴雨径流 期 II	32	17.49	2.06	559.78	65.81	49.38	11.5	16.85	1.17	193.8	13.4	30.98
水量消退 期 III	37	12.01	1.35	444.33	49.9	42.2	28	9.22	0.42	258.03	11.79	58.41
流域恢复 期 IV	22	3.63	0.27	79.75	5.85	7.28	16	1.13	0.06	18.01	0.94	10.5

注：流量百分比为各降水阶段的流量占4个阶段流量总和的比值；—表示无法计算。

量与雨前基本相同，说明局部产流期污染负荷与雨前一致。第Ⅱ阶段的污染负荷最重，总氮和总磷的通量分别达到 16.85 kg·h⁻¹和 1.17 kg·h⁻¹，较雨前分别增长了 18.60 和 21.57 倍，以 30.98% 的径流量输送污染物占比分别达到了 41.33%(总氮) 和 51.24%(总磷)。第Ⅱ阶段的峰值通量分别达 24.80 kg·h⁻¹ (总氮) 和 1.92 kg·h⁻¹(总磷)，分别是雨前的 27.38 和 35.56 倍。第Ⅲ阶段以 58.40% 的径流量输送污染物占比分别达到了 54.86%(总氮) 和 45.07%(总磷)，总氮和总磷的通量分别达到 9.22 g·h⁻¹ 和 0.42 g·h⁻¹，较雨前分别增长了 10.17 和 7.80 倍。第Ⅳ阶段以 10.51% 的径流量输送污染物占比分别达到了 3.83%(总氮) 和 3.58%(总磷)，总氮和总磷的通量分别达到 1.13 kg·h⁻¹ 和 0.06 kg·h⁻¹，较雨前分别增长了 1.24 和 1.09 倍，在此阶段通量逐渐恢复至雨前。

综上所述，第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段是极端降水最主要的污染负荷时期，尤其是第Ⅱ阶段。第Ⅱ阶段的污染负荷值最大，相对于第Ⅰ阶段，其总氮和总磷的时污染负荷增加量较大，尤其是总磷增加量尤为显著。这是由于第Ⅱ阶段以地表径流为主，地表冲刷严重，产生大量颗粒态磷，第Ⅱ阶段输送了整个阶段 50% 以上的总磷负荷。第Ⅱ阶段污染负荷冲击强，可通过强化初期雨水治理等减少暴雨径流期对水质风险的影响。第Ⅲ阶段呈现时间较长，污染负荷相对于第Ⅱ阶段较低。HGB 第Ⅱ阶段污染负荷增长倍数比 LQM 大是由于 HGB 场降水强度较大、时间短，污染物负荷冲击强。

2.4 极端降水条件下入库河流污染负荷削减对策

LQM 导致黄山溪入库总磷和总氮增加的污染负荷分别为 110 kg 和 880 kg，HGB 导致黄山溪入库总磷和总氮增加的污染负荷分别为 23 kg 和 419 kg。这说明极端降水条件下地表径流的冲刷导致农业面源污染负荷严重，入库河流污染负荷骤增，加剧了岩口水库水质污染风险。依据本研究结果，提出以下 3 点入库污染负荷削减对策。

- 1) 鉴于氮磷通量与流量之间呈线性关系，应在流域内加强对极端降水条件下水资源的管理和调配，例如建设滞蓄沉淀、净化塘，充分利用岩口流域内的多水塘系统，汇聚雨水来补充地下水从而削减洪峰流量。
- 2) 在极端降水事件的 4 个典型阶段中，第Ⅱ阶段是最主要的污染负荷期，建议通过强化初期雨水收集和治理系统，减少地表径流直接汇入河流。
- 3) 在降水过程中，Z91 与 Z104 间氮磷通量的增量尤为显著，说明这两断面间面源污染汇入风险较高。建议重点加强这两断面间的陆域范围水土保持工作，充分利用现有田间沟渠-多水塘系

统, 将降水径流有效滞留和净化。

针对以上3点对策, 基于岩口流域内分布众多的坑塘系统特征, 制定了以“多水塘”为核心的生态梯级屏障削减技术体系(图6), 以期实现对降水产生的地表径流从源头-过程-末端径流全路径上的逐级拦截、滞蓄和净化并有效削减入库河流的污染负荷。核心技术的流程依次为: 生态拦渗坝/流域植草沟——生态滞留回用塘/植被过滤带/功能湿地——生态截水渠/道边植草沟——介质筛护岸/渗滤低坝——河道。实施途径主要是依托流域内农业用地现状特征, 对农田排水系统(坑塘、沟渠、排水沟等)开展生态改造和连通, 对河流生态缓冲带进行生态基底构建包括功能湿地建设, 对溪流沿岸进行净化功能提升, 利用土壤/基质吸附、植物吸收、生物降解等作用, 降低入河氮磷负荷。

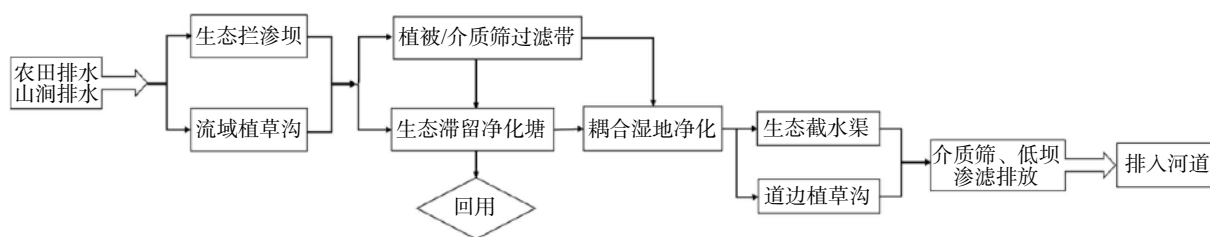


图6 多级屏障控制技术流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the multistage barrier control technology

第1级屏障包括: 1) 沿小流域主要冲刷路径设生态拦渗坝, 实现多水塘上游雨洪径流的拦截和滞蓄; 2) 沿生态水塘横向汇流路径构建植草沟过滤带, 实现侧向汇流的滞蓄和净化。

第2级屏障包括: 1) 利用现状一至多个水塘生态改造, 实现滞蓄、净化功能的提升, 原则上水塘总面积不低于上游汇流面积的1/10, 优选分散式中小型水塘, 避免单一大型水塘, 构建多水塘系统可实现对降水径流滞蓄、渗滤、截污、净化、回用等功能; 2) 基于岸滤湿地的设计理念, 构建表流-潜流湿地复合净化系统, 提升水体进入水塘前的净化效率。

第3级屏障包括: 1) 建设生态排/截水渠, 其主要功能是水塘水溢流和排涝, 同时通过现状水渠的改造, 提升渗透和自净能力; 2) 布设道边植草沟, 主要是在农用地内现状道路上游侧设置, 收集上游径流, 与生态沟渠连通, 以期实现径流的导流以用作周围农田的灌溉排水等。

第4级屏障包括: 建设岸滤系统, 包括介质筛堤岸和低渗滤坝。主要建设内容包括对上游多级净化的径流进行入河前的末端深度净化, 基质填料结构模拟了天然河道冲刷效应, 由河至岸分多级设置大、中、小不同粒径砾石或沸石等填料, 对入河径流通过过滤、吸附和生物降解等多功能净化效果。

多水塘系统对总氮的削减效率能达到50%^[30], 甚至70%以上^[31], 对总磷的净化效率也能达到40%以上^[32]。需要注意的是, 因地理条件和气候因素的不同, 在不同流域中梯级多水塘系统发挥的水量滞蓄和水质净化功能存在差异。以本研究为例, 通过构建不低于岩口水库流域中农业用地面积10%的多水塘梯级屏障系统, 在LQM和HGB两场暴雨过程中, 理论上可分别削减入库总氮487.5 kg和222 kg, 总磷48.8 kg和10.4 kg。在实际治理工程中, 多水塘系统对氮、磷等污染物的削减效率受水塘个数、面积, 以及水塘与水塘之间沟渠结构和密度等因素的影响。另外, 多水塘的水环境容量还需结合不同降水情景进行设计, 在超过系统水环境容量的极端降水条件下, 还应考虑适当分流或者系统崩溃后的自恢复能力。

3 结论

1) 降水过程对黄山溪各断面的水量和水质都产生显著影响, 降水导致断面流量呈现数量级式

增长。溪流中氮磷污染物的质量浓度也显著增加,特别是总磷,远高于雨前。

2) 与雨前相比,入库氮磷通量呈数量级增加,降水导致携带大量污染物的地表径流汇入河道为主要原因。降水导致氮磷负荷中总氮以溶解态为主,总磷以颗粒态为主,故应对外源氮、磷的输入采取差异化控制策略。

3) 入库氮磷通量与河流流量之间呈线性关系,这与全流域产流期为最主要的污染负荷贡献阶段有关,因此对全流域产流期污染负荷的削减尤为重要。

4) 在降水过程中,Z91与Z104间流量和氮磷通量的增量尤为显著,为水质风险骤增区,与周围陆域范围内大面积农业用地有关,需重点加强水土保持工作。

参考文献

- [1] WANG S, LI J, ZHANG B, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index[J]. *Remote sensing of environment*, 2018, 217: 444-460.
- [2] 杨尚, 罗澈葱, 翟海涛, 等. 大沙河水库主要入库河流氮磷营养输入分析[J]. *生态科学*, 2013, 32(2): 158-164.
- [3] DAVIDSON K, GOWEN R J, HARRISON P J, et al. Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters[J]. *Journal of environmental management*, 2014, 146: 206-216.
- [4] 杨哲, 钟晓辉, 次新波, 等. 苕溪污染物入湖通量研究[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2013, 40(2): 196-206.
- [5] WANG S, QIAN X, WANG Q H, et al. Modeling Turbidity Intrusion Processes in Flooding Season of a Canyon-Shaped Reservoir, South China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13(10): 1327-1337.
- [6] MAAVARA TAYLOR, PARSONS CHRISTOPHER T, RIDENOUR CHRISTINE, et al. Global phosphorus retention by river damming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(51): 15603-15608.
- [7] ZHAI P, ZHOU B, CHEN Y. A review of climate change attribution studies[J]. *Journal of meteorological research*, 2018, 32(5): 671-692.
- [8] TSAI J W, KRATZ T K, HANSON P C, et al. Seasonal dynamics, typhoons and the regulation of lake metabolism in a subtropical humid lake[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 53(10): 1929-1941.
- [9] 夏星辉, 吴琼, 牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 124-133.
- [10] 张洪刚, 焦茹媛, 王聪, 等. 义乌市水库型水源地保护与水质提升策略研究——以岩口水库为例[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(2): 9-14.
- [11] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1220-1226.
- [12] 张宇航, 杨默远, 潘兴瑶, 等. 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 122-127.
- [13] 中华人民共和国国家环境保护总局. 地表水环境质量标准GB 3838-2002, [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. <http://www.mee.gov.cn/>.
- [14] SANSALONE J J, BUCHBERGER S G. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(2): 134-143.
- [15] 沈志良. 长江磷和硅的输送通量[J]. *地理学报*, 2006, 61(7): 741-751.
- [16] YIN Y N. Spatial-temporal variation of extreme precipitation indices in Zhejiang Province from 1971 to 2016[J]. *Open Journal of Nature Science*, 2019, 7(4): 294-306.
- [17] 莫康, 刘光裕, 贺治国, 等. 气候变化下浙江省极端降水时空变化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(3): 74-79.
- [18] 李彤, 易雯, 付青, 等. 极端暴雨条件下北江重金属非点源污染负荷估算[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 990-997.
- [19] 车蕊, 林澍, 范中亚, 等. 连续极端降水对东江流域水质影响分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4440-4449.
- [20] 杨帆, 蒋铁锋, 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.
- [21] 于兴修, 李振伟, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降水径流的磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2644-2651.
- [22] 潘纲. 亚稳平衡态吸附(MEA)理论——传统吸附热力学理论面临的挑战与发展[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(2): 156-173.
- [23] LEE J H, BANG K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. *Water Research*, 2000, 34(6): 1773-1780.
- [24] FOSTER I, CHAPMAN A S, HODGKINSON R M, et al. Changing suspended sediment and particulate phosphorus loads and pathways in underdrained lowland agricultural catchments; Herefordshire and Worcestershire, U. K.[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 494(1-3): 119-126.
- [25] 王继增, 李定强. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 12-18.
- [26] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3390-3396.
- [27] GOOLSBY D A, BATTAGLIN W A, AULENBACH B T, et al. Nitrogen flux and sources in the Mississippi River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 248(2-3): 75-86.
- [28] 张韵, 郭胜, 封丽, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1266-1272.

- [29] 郑丙辉, 王丽娟, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 125-131.
- [30] 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 等. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4999-5005.
- [31] 王沛芳, 王超, 徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 782-785.
- [32] 李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2482-2489.

(责任编辑: 靳炜)

Influence of extreme rainfall process on pollution load of the inflow stream of Yankou reservoir and its countermeasures

WANG Yabo^{1,2}, LI Huili¹, ZHANG Honggang^{2,3,*}, HE Yi^{2,3}, JIAO Ruyuan^{2,3}, LIU Fan⁴, ZHANG Bao³, YANG Min²

1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Yangtze River Delta Research Center for Eco-Environmental Sciences, Yiwu 322000, China; 4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, 430078, China

*Corresponding author, E-mail: hg Zhang@rcees.ac.cn

Abstract The influence process of extreme rainfall events on the water pollution load of upstream rivers and downstream reservoirs in the basin was analyzed, and the contribution of external input to water pollution in the reservoir area under extreme rainfall conditions was evaluated, with the small watershed of Yankou reservoir as the research object, by monitoring the changes of nitrogen and phosphorus flux of river entering the reservoir during two typhoon rainstorms in 2019 and 2020. The results showed that the whole process of the two rainstorms with obvious differences in rainfall duration and intensity can be divided into four typical stages: local runoff generation period, whole watershed runoff generation period, water volume regression period and watershed restoration period. The heaviest pollution load occurred in the whole watershed runoff generation period (stage II). More than 50% of the total phosphorus load in the whole stage was transported in stage II and the increasing multiple of the pollution load was significantly correlated with the rainfall intensity. During the two rainstorms of LQM and HGB, TN load of Yankou reservoir increased by 880 kg and 419 kg, TP load increased by 109 kg and 23 kg respectively, compared with that before the rainfalls. It was showed that surface runoff erosion led to a large amount of non-point source pollution load into the river, since the increased total nitrogen was mainly dissolved, while the increased total phosphorus was mainly granular. The results of this study proved that extreme rainfall events, especially in the whole watershed runoff generation period, significantly aggravated the pollution contribution of non-point sources to the downstream reservoir area. Therefore, it is suggested to adopt reasonable strategies such as detention, sedimentation and purification to reduce the pollution load of surface runoff in order to reduce the risk of water pollution in the downstream reservoir area.

Keywords extreme rainfall; Yankou Reservoir; exogenous load; nitrogen and phosphorus flux; rainfall runoff