

薄会娟, 董晓华, 魏冲, 等. 富磷流域河流水库总磷滞留特征及其影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 131-143. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.010

BO Huijuan, DONG Xiaohua, WEI Chong, et al. Total phosphorus retention characteristics and influencing factors in rivers and reservoirs of phosphorus-rich watersheds [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 131-143. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.010

富磷流域河流水库总磷滞留特征及其影响因素分析

薄会娟^{1,2}, 董晓华^{2,3}, 魏冲^{2,3}, 章程炎⁴, 陈玲^{2,3}

(1. 湖北水利水电职业技术学院, 湖北 武汉 430070; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 温州市温瑞平水系管理中心, 浙江 温州 325000)

摘要:【目的】磷滞留对河流和水库系统, 尤其是富磷水库流域的生态环境安全影响很大。【方法】通过构建 SWAT 模型, 分析了黄柏河上游玄庙观水库流域 2014—2018 年河流总磷(TP)的滞留量和滞留率时空分布格局, 并采用冗余分析对影响因素进行定性分析。【结果】结果显示: (1) SWAT 模型能很好地模拟磷矿开采区的 TP 负荷, 率定期和验证期的 *NSE* 分别是 0.86 和 0.82, *PBIAS* 分别是 12.54% 和 13.42%, *R²* 分别是 0.88 和 0.82, *RSR* 分别是 0.37 和 0.42。(2) 多年尺度上, 水库的滞留率(53.72%)要大于河流的滞留率(最大值 38.11%), 支流的滞留率(18.88%)要大于干流的滞留率(8.46%)。而随着时间尺度的变小(年或月尺度), 滞留过程变化较大, 甚至会呈现“源”效应。(3) 河流滞留率和滞留量与坡长呈显著正相关; 水库月尺度滞留率与入库流量和出入库流量比呈显著正相关。【结论】结果表明: 磷矿开采流域大量的磷流失会滞留在河流水库系统中, 特定条件下会成为新的磷源, 应采取措施应对内源污染。研究结果可为富磷流域的磷污染防治提供参考。

关键词: 富磷流域; 磷滞留; 磷流失; 水库流域; SWAT 模型; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.010

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0131-13



与作者互动
听语音 聊科研

Total phosphorus retention characteristics and influencing factors in rivers and reservoirs of phosphorus-rich watersheds

BO Huijuan^{1,2}, DONG Xiaohua^{2,3}, WEI Chong^{2,3}, ZHANG Chengyan⁴, CHEN Ling^{2,3}

(1. Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Engineering Research Center for Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, Hubei, China; 3. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 4. Wenzhou Wenruiping Water System Management Center, Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2025-01-22; 录用日期: 2025-01-24; 网络出版日期: 2025-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42401030); 湖北省建设科技计划项目(JK2024029); 校级博士专项(HBSYBSZX202404)

作者简介: 薄会娟(1987—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: bohuijuan027@126.com

通信作者: 董晓华(1972—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] Phosphorus retention has a significant impact on the environmental security of river and reservoir systems, especially in phosphorus-rich reservoir watersheds. [Methods] The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was employed to analyze the spatiotemporal distribution patterns of river total phosphorus (TP) retention volumes and retention rates in the Xuanmiaoguan reservoir watershed, located in the upper reaches of the Huangbai River, from 2014 to 2018. Redundancy analysis (RDA) was conducted to perform qualitative analysis of the influencing factors. [Results] The result showed that: (1) the SWAT model effectively simulated TP loads in the phosphate mining area. It achieved Nash-Sutcliffe efficiency (*NSE*) values of 0.86 and 0.82, Percent Bias (*PBIAS*) of 12.54% and 13.42%, Coefficient of Determination (R^2) values of 0.88 and 0.82, and Ratio of Root Mean Square Error to Standard Deviation (*RSR*) values of 0.37 and 0.42 during the calibration and validation periods, respectively. (2) On multi-year scales, the retention rate of the reservoir (53.72%) was higher than that of the river (maximum 38.11%), while the retention rate of tributaries (18.88%) exceeded that of the main stream (8.46%). However, at smaller time scales (annual or monthly), the retention process exhibited considerable variability and may even exhibit a “source” effect under certain conditions. (3) Both river retention rates and volumes showed significant positive correlations with slope length, while the monthly reservoir retention rates were positively correlated with inflow volumes and inflow-to-outflow ratios. [Conclusion] The result indicate that a large amount of phosphorus loss from phosphate mining watersheds tends to be retained within river and reservoir systems, which may serve as a new phosphorus source under specific conditions. Measures should be implemented to mitigate internal phosphorus pollution. These research findings provide valuable references for phosphorus pollution control in phosphorus-rich watersheds.

Keywords: phosphorus-rich watershed; phosphorus retention; phosphorus loss; reservoir watershed; SWAT model; influencing factors

0 引言

流域营养盐流失会导致土壤肥力减退, 流失的营养盐会随着径流泥沙向下游运输, 流入水库或湖泊, 使湖库水体的营养盐含量提高, 可能造成富营养化, 从而破坏水生生态系统^[1]。其中, 氮、磷是引起湖库等水体富营养化的主要元素, 而磷是限制性营养元素。随着农业化肥的过量施用^[2], 生活污水的排放增长, 以及磷矿等工业生产造成的废水排放, 流域的磷循环发生了改变, 其流失大幅度增加^[3]。进入水体的磷受生物、物理和化学作用的影响发生滞留^[4]。尤其是大坝建成后, 河流系统变为河流-湖库系统, 其水力特性和营养盐的传输连通性以及运输模式都发生了改变^[5-6]。河流和湖库作为运输磷的通道, 可能会变为磷存储区^[7]。因此, 有必要同时对河流-湖库系统开展磷输入输出通量、滞留特征等方面的综合研究, 这对于更好地了解磷的流失和运输具有重要意义, 尤其对数据匮乏和生态脆弱地区。

磷滞留是指河流-水库系统滞留外来的磷负荷量, 其中估算来自不同来源的磷输入和河流或水库特定断面的磷输出是计算磷滞留的关键。已有研究利用观测的流量和浓度计算河流或水库磷的滞留效应^[8]。胡春华等^[9]在江西万安水库丰、枯水期进行入库、出库水样采集研究磷的滞留效应。刘尚武等^[10]通过建立污染物浓度与流量比值和含沙量的关系分析金沙

江下游梯级水库对磷的滞留。而对于数据匮乏地区, 长期的流量和同期水质观测数据需要耗费大量财力且监测和获取困难, 导致无法描述整个流域内部河段的滞留特征。生态水文模型的发展为流域磷污染负荷时空分布分析、河流湖库等水体磷滞留研究等提供了可行方法。

目前, 常用的生态水文模型有 SWAT 模型^[11]、HSPF 模型等。其中, SWAT 模型能够有效模拟磷的物理化学过程并预测多种不同的管理方式对不同时空尺度下流域水文水质、沉积物等的影响, 其应用地区和范围最广^[12-14]。同时, SWAT 模型可以提取流域不同位置的营养盐模拟输出结果, 从而推断出营养盐的输移和滞留情况^[15]。CHENG 等^[16]在甬江流域构建 SWAT 模型, 分析了不同河流的滞留量及进入东海的总磷负荷量, 表明 SWAT 模型可以分析河流系统各个河段的磷滞留。HU 等^[17]基于现场采样和 SWAT 模型模拟的氮磷流失过程, 评估了乌江典型喀斯特流域的水质和非点源污染情况。以上研究表明 SWAT 模型可以用于喀斯特地区的水量水质模拟, 并分析磷固定、吸收和淋失过程及滞留量, 但目前 SWAT 模型在磷矿开采地区水量水质模拟的精度尚未得到充分验证。

河流和湖库是磷源还是汇, 取决于局部河段尺度、湖库特性等因素的影响^[7]。由于磷的活性特性, 滞留的主导机制为颗粒态磷的沉降、吸附和再悬

浮^[18]。有研究发现金沙江梯级水库总磷和颗粒磷的浓度和通量随着水库的级联而减少, 主要原因是颗粒磷伴随着悬浮颗粒物沉积^[19]。而当沉积物中的磷由于水文水力条件的改变可能会释放到水体中变为磷源^[20]。因此, 理解这些驱动因子如何影响磷滞留对于河流系统能否成功管理磷至关重要。

本研究选取黄柏河流域作为研究区, 该河是湖北省宜昌市的供水水源地, 也是磷矿富集地和开采区。磷负荷模拟和滞留研究对黄柏河流域磷治理至关重要。根据前人的研究, 黄柏河流域总磷较高的原因包括: (1)磷矿和磷化工污染源的高负荷排放; (2)生活污染源的排放; (3)畜禽废弃物资源利用不足; (4)生态流量不足; (5)水污染控制措施不完善, 污染源监测不系统^[21]。为全面了解黄柏河水库流域磷负荷特征和磷滞留效应, 采用分布式水文模型(SWAT)进行水量水质模拟, 定量计算黄柏河上游水库流域的磷负荷量和不同子流域的磷流失强度, 并分析各河段及水库磷滞留特征, 最后探讨影响河流和水库磷滞留的因子。研究成果可加深对磷在黄柏河流域迁移过程的认识, 为磷污染防治提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄柏河是长江中游左岸的一级支流, 发源于宜昌市夷陵区的黑良山, 东西两支于夷陵区黄花镇两河口汇合为干流, 于葛洲坝三江上游引航道汇入长江。流域面积 1 902 km², 流经远安县、夷陵区的 7 个镇(街道), 承担着枝江市、当阳市、远安县、夷陵区、西陵区、伍家岗区、猗亭区等 7 个县(市、区)200 万人饮水、100 万亩农田灌溉的重任, 是宜昌市的母亲河。黄柏河东支自上而下建有玄庙观、天福庙、西北口、尚家河四座水库。本文所选的研究区是玄庙观水库流域, 其位于黄柏河东支流的源头[见图 1(a)], 流域面积 380 km², 年平均降水量为 1 101 mm, 雨季是 5—10 月, 年平均气温约为 16.9 ℃。

1.2 研究数据

本研究所使用的数据主要包括 4 类(见表 1): (1)空间数据, 如 DEM、土地利用类型、土壤类型; (2)模型驱动数据, 如气象数据(降水、气温等); (3)观测数据, 如径流、水质数据; (4)污染源数据, 包括点源(Point Source, PS)和非点源(Non-Point Source, NPS)。降水数据采用 CMADS (the China Meteorological Assimilation Driving Datasets) 数据。未收集的最高/最低气温、太阳辐射、风速、相对湿度

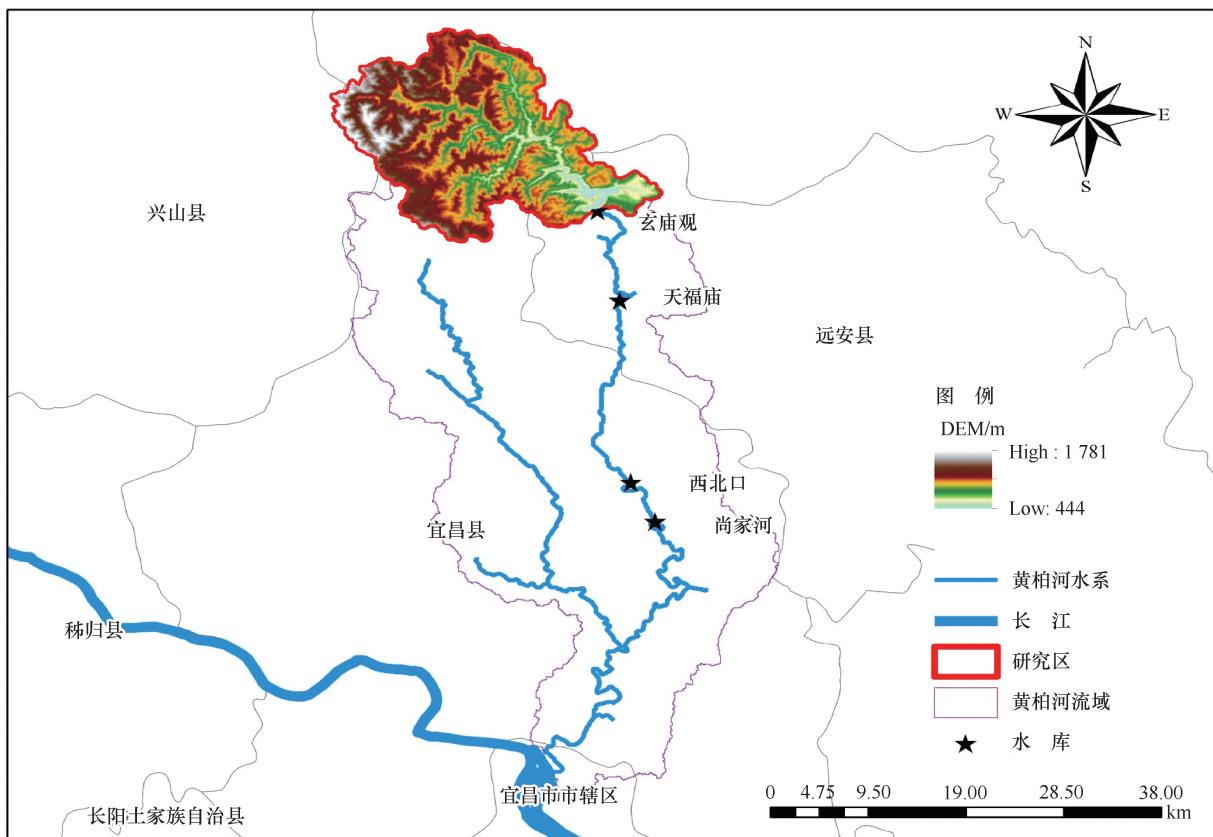
等数据由天气发生器模拟生成, 天气发生器采用 NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis) 下载的长时间系列气象数据来建立。土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心基金委国家地球系统科学数据平台—基于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)土壤数据集 v1.2, 分辨率为 1:100 万, 采用 FAO-90 土壤分类系统。根据土壤编码对土壤类型进行重新分类, 分别为筒育高活性淋溶土 1(LVh1), 筒育高活性淋溶土 2(LVh2)和筒育高活性淋溶土 3(LVh3), 得到最终的研究区土壤类型, 如图 1(b)所示, 其中土壤属性数据采用 SPAW 软件计算得到。结合研究区的实际及模型的需要, 土地利用类型划分为 8 类, 分别为森林、耕地、水域、农村、荒地等[见图 1(c)]。

本文使用的径流和水质数据由黄柏河流域管理局提供。水质采样点共有 6 个[见图 1(d)], 分别位于支流入河口、水库库尾和库首处。采样时间从 2014 年 1 月—2018 年 11 月, 采样周期为 2014 年每月一次, 2015—2018 年每月三次。黄柏河流域的总磷输入考虑点源和非点源两类。点源主要来自磷矿废水排放, 磷矿位置如图 1(d)所示。由于黄柏河综合治理强度增加, 特别是在《宜昌市黄柏河流域保护条例》颁布后, 点源污染得到有效治理, 故本文的点源输入数据为 2014—2016 年。由于缺少每年的准确点源数据, 本文假定这三年的入河污染物总量保持恒定。城镇污水没有集中处理, 故将城镇污水纳入农村生活污水, 作为非点源。将畜禽养殖粪尿和城镇、农村生活污水产生的污染物概化后转化为化肥, 以连续施肥的方式施用到相应子流域的耕地中。根据《宜昌市统计年鉴》计算 2014 年研究区的化肥施用量(折纯量), 平均施肥强度为 1 154 kg/hm², 得到 TP 的强度为 339 kg/hm²。

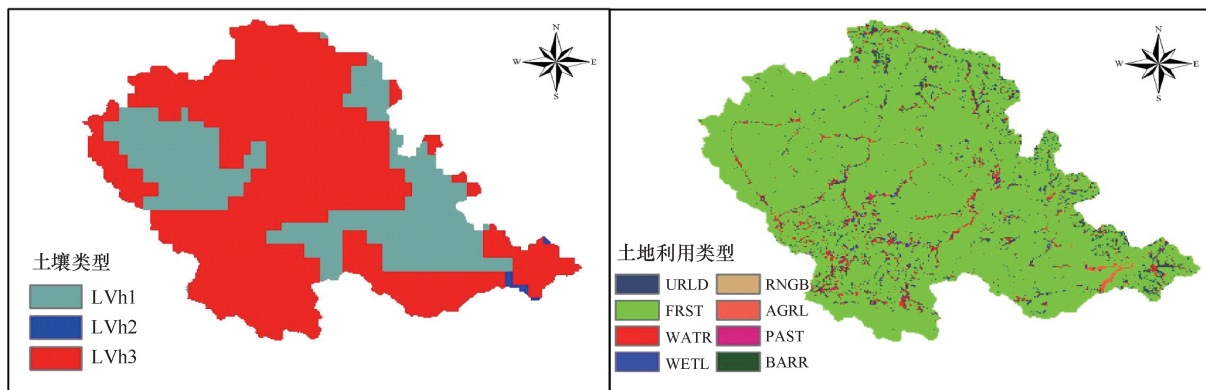
1.3 SWAT 模型构建及参数率定

SWAT 模型是基于物理过程的模型, 能综合考虑气象、地形、土壤和土地利用等条件, 对可能无法获得长期监测数据流域的径流、泥沙和污染物进行数值模拟。模型的详细介绍参考 SWAT 模型手册^[22]。根据土地利用和土壤类型分布图, 研究区离散化得到 12 个子流域[见图 1(e)], 子流域构建以一级支流作为 1 个集水区, 为避免产生过小的集水区或明显错误的破碎集水区, 支流局部区域并入干流集水区。进一步细分为 254 个水文响应单元(HRUs)。

模型构建后需要实测数据对其进行校正及验证。

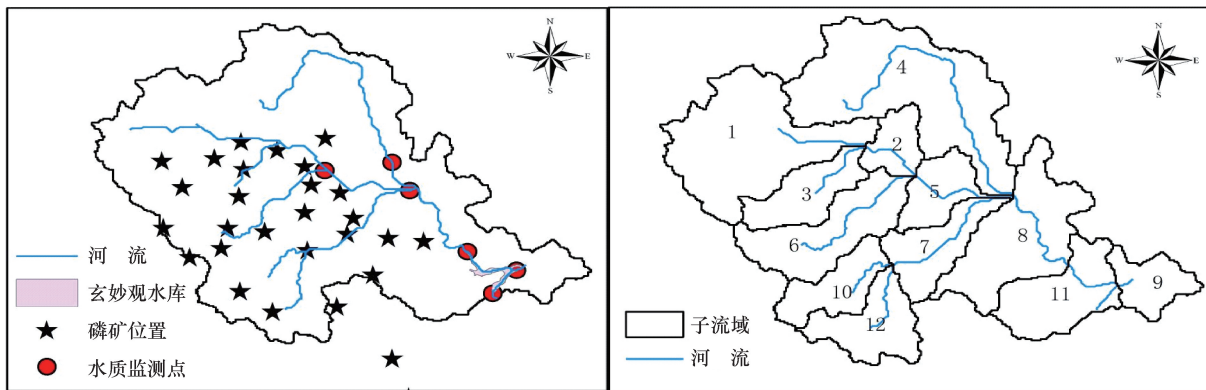


(a) 研究区位置



(b) 土壤类型

(c) 土地利用类型



(d) 水质监测和磷矿位置

(e) 子流域划分

图 1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

表 1 数据及数据来源

Table 1 Data and data sources

数据	精度	来源
数据高程模型	30 m×30 m	地理空间数据云
土壤类型数据库	1 : 1 000 000	寒区旱区科学数据中心
2015 年土地利用数据	30 m×30 m	清华大学数据中心
降水数据	2012—2018 年	CMADS 官网 http://www.cmads.org/
气象数据	1979—2019 年	NCEP National Centers for Environmental Prediction
径流数据	2014—2018 年	黄柏河流域管理局
水质数据	2014—2018 年	黄柏河流域管理局
点源污染数据	2014—2016 年	黄柏河流域管理局
农田管理等数据	2014—2018 年	《宜昌市统计年鉴》

本研究选取水库的入库径流作为径流模拟的实测值; 采用入库径流和库首采样点的 TP 浓度计算的负荷值作为水质模拟的实测值。同时为了验证模型模拟结果的空间有效性, 采用其他水质监测点的数据进行进一步验证。采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting Version 2) 算法和反复试错法对模型参数进行率定^[23]。本研究以 2012—2013 年作为预热期, 不输出结果; 2014—2016 年的月径流和月总磷负荷进行参数敏感性分析和模型参数率定; 2017—2018 年的监测数据用于模型验证。采用 Nash-Sutcliffe 系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)、确定性系数 (Coefficient of Determination, R^2)、相对误差 (Percent Bias, $PBIAS$) 和均方根差与标准偏差的比值 (Ratio of Root Mean Square Error to Standard Deviation, RSR) 作为评价径流和 TP 负荷模拟精度的指标, 指标的介绍参见文献[24]。

1.4 磷滞留量和滞留率的计算

比较河流和水库两种水体中 TP 在不同时间尺度上(月、年和多年)的滞留特征, 进一步分析滞留规律。采用滞留量和滞留率两个指标进行评价。滞留量是特定河流或水库总磷的输入负荷与输出负荷的差^[25]。其中, TP 的输入包括来源于上游、沿河坡地非点源和点源的输入。滞留率是滞留量与输入负荷的比值。滞留量和滞留率为正值表示磷发生滞留作用, 负值表示磷出现释放作用。

(1) 特定河流月或年尺度的滞留量和滞留率计算公式为

$$R_s = M_{in-up} + M_{in-NPS} + M_{in-PS} - M_{out} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{R_s}{M_{in-up} + M_{in-NPS} + M_{in-PS}} \quad (2)$$

式中, R_s 为河流的滞留量 (kg/月或 kg/年); M_{in-up} 为从上游河道的输出负荷即计算河道的输入负荷 (kg/月或 kg/年), 当河道为源头支流时, 该项为 0;

M_{in-NPS} 为该河道所在子流域的非点源输入负荷 (kg/月或 kg/年); M_{in-NPS} 为采用模型验证后 HRU 输出文件中地表径流输出的可溶性磷 (SOLP)、有机磷 (ORGP)、无机磷 (SEDP) 和地下水磷 (GW_P) 四者的和; M_{in-PS} 为河道的点源输入负荷 (kg/月或 kg/年); M_{out} 为河道的输出负荷 (kg/月或 kg/年); M_{in-up} 和 M_{out} 采用模型的结果, 见 output. rch 文件中; η 为河流的滞留率。

(2) 水库滞留量采用冉祥滨等^[26]在三峡水库计算营养盐收支平衡的方法, 即入库负荷减去出库负荷。其中, 负荷的计算采用流量和水质浓度的乘积, 即

$$M = \int_0^T CQdt \quad (3)$$

$$R_{es} = M_{in} - M_{out} \quad (4)$$

$$\eta_e = \frac{R_{es}}{M_{in}} \quad (5)$$

式中, M 为负荷 (kg/月或 kg/年); C 为浓度 (mg/L); Q 为径流 (m^3/s), 库尾和支流流量采用 SWAT 模型模拟的结果, 出库流量和浓度是实测值; R_{es} 为河道的滞留量 (kg/月或 kg/年); M_{in} 为入库负荷 (kg/月或 kg/年); M_{out} 为出库负荷 (kg/月或 kg/年); η_e 为水库的滞留率。

1.5 冗余分析

冗余分析是多变量回归模型的延伸, 能够快速获取响应变量和解释变量之间的关系。该方法通过对特征值进行一系列筛选, 进而简化目标变量个数, 使响应变量和解释变量同时展现在同一坐标轴上, 获取二者之间的关系, 并得到一个或多个主要影响因素。具体的原理和步骤参考文献[27]。本文为了研究不同因子对 TP 滞留效应的影响, 河流选取滞留率 (η)、滞留量 (R_s)、流量 (Q)、坡长 (slope length, SL)、坡度 (Slope, Sl)、降水 (P) 进行冗余分析; 水库选取滞留率 (η_e)、滞留量 (R_{es})、入库流量 (Q_{in})、出入库流量比 (Q_{in}/Q_{out})、水力滞留时间 (hydraulic retention

time, *HRT*)、降水(*P*)进行冗余分析。采用 CANOCO 软件进行冗余分析, 能够定量分析解释变量中各因子与响应变量中因子的相关关系及影响程度, 使滞留量和滞留率成因得到更好的解析。

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型评估

本研究采用玄庙观水库月入库径流和入库 TP 负荷进行模型评估, 模拟结果如图 2 所示。由图 2(a)(b) 可以看出, 在整个研究时间跨度(2014—

2018 年), 月入库径流和入库 TP 负荷的观测值和模拟值具有良好的一致性, 且与降水的变化趋势保持一致。在 2017 年 10 月, 模拟径流被低估, 导致 TP 负荷也被低估, 出现这一现象的原因可能是降水数据源 CMADS 没有捕捉到此次降水过程, 或入库径流计算误差所致。

采用 4 种统计指标(*NSE*、*PBIAS*、*R²* 和 *RSR*) 评估模型性能, 月入库径流和入库 TP 负荷的模拟效果评价结果如表 2 所列。率定期(2014—2016 年)和验证期(2017—2018 年)的指标如表 2 所列。对入库径

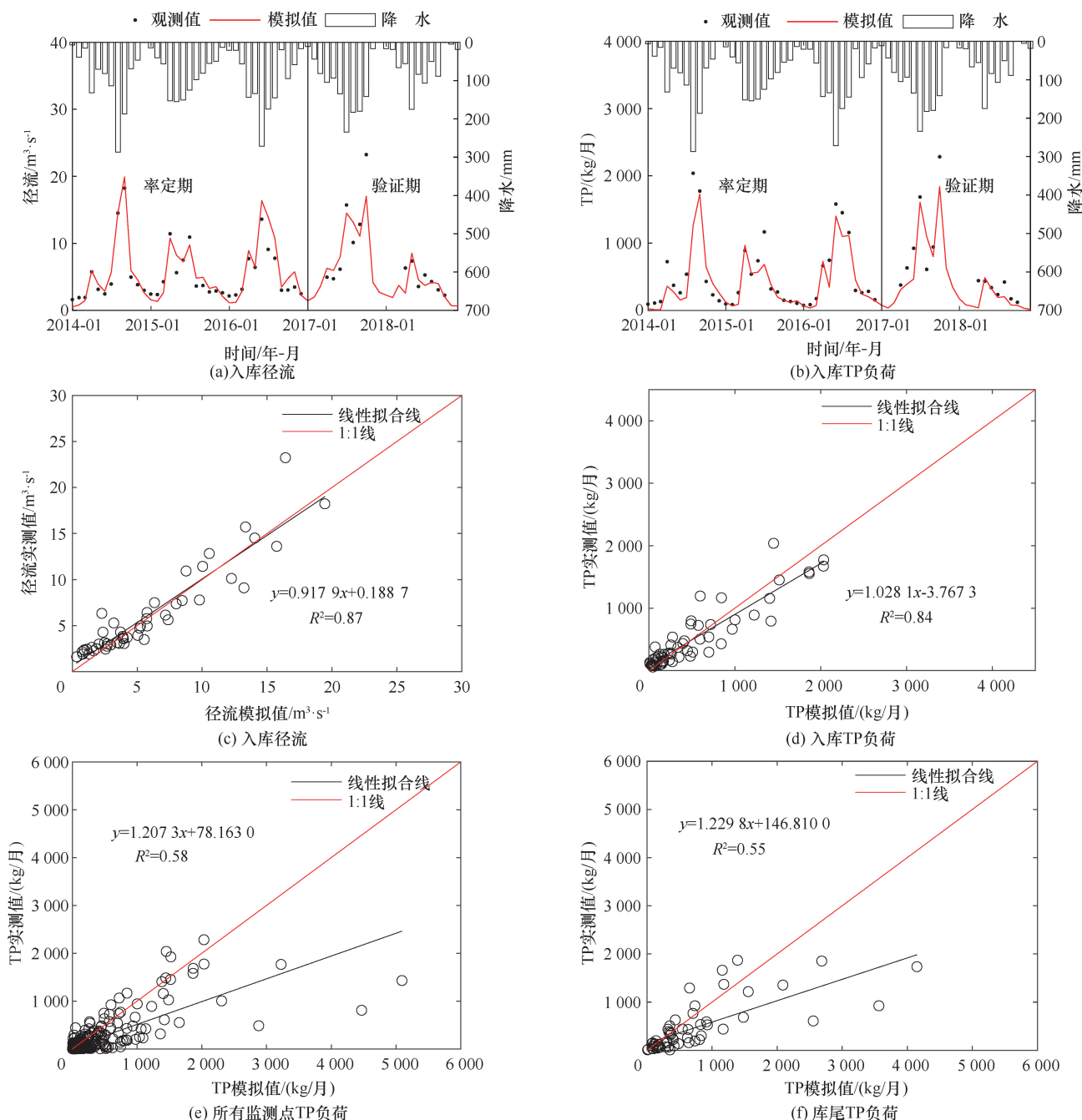


图 2 月尺度入库径流和 TP 负荷模拟结果

Fig. 2 Simulation results of monthly inflow and TP loads

表2 月入库径流和入库 TP 负荷的模型模拟效果评价

Table 2 Performance evaluation of model simulation for monthly inflow runoff and TP loads

评价指标	径流		总磷	
	率定期(2014—2016年)	验证期(2017—2018年)	率定期(2014—2016年)	验证期(2017—2018年)
<i>NSE</i>	0.89	0.81	0.86	0.82
R^2	0.92	0.85	0.88	0.86
<i>RSR</i>	0.33	0.44	0.37	0.42
<i>PBIAS</i> /%	1.27	11.61	12.54	13.42

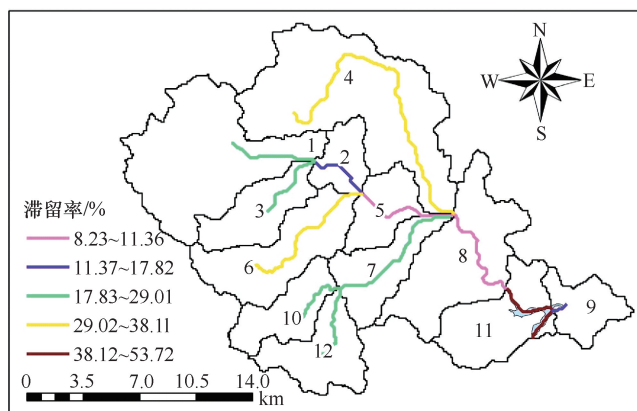
流而言, 率定期和验证期的 *NSE* 分别为 0.89 和 0.81, *PBIAS* 分别为 1.27% 和 11.61%, R^2 分别为 0.92 和 0.85, *RSR* 分别为 0.33 和 0.44。对入库 TP 负荷而言, 率定期和验证期的 *NSE* 分别为 0.86 和 0.82, *PBIAS* 分别为 12.54% 和 13.42%, R^2 分别为 0.88 和 0.82, *RSR* 分别为 0.37 和 0.42, 说明 SWAT 模型的模拟精度达到“good”^[24]。表明构建的模型能够满足磷矿开采区的水量水质模拟, 并进一步用模拟结果进行河流和水库的 TP 滞留分析。

同时采用研究区其他水质监测点的 TP 负荷数据来检验 SWAT 模型的空间有效性。总体思路是: 采用水质监测点的浓度实测值与验证后 SWAT 模型模拟输出的径流值相乘作为水质监测点的 TP 负荷实测值, 将该值与模型模拟的 TP 负荷进行对比。如果呈显著相关关系, 说明模型输出数据可以用来分析 TP 在不同河流和水库的滞留特征, 且计算结果是可靠的。将 2014—2018 年间的入库径流、入库 TP 负荷、所有实测水质监测点的 TP 负荷以及玄庙观水库库尾水质监测点的 TP 负荷结果与 SWAT 模型模拟结果进行对比, 散点图、线性拟合直线和回归方程如图 2(c)—(f) 所示。由图 2(c)—(d) 可以看出, 整个时段入库径流和入库 TP 负荷实测值和模拟值的确定性

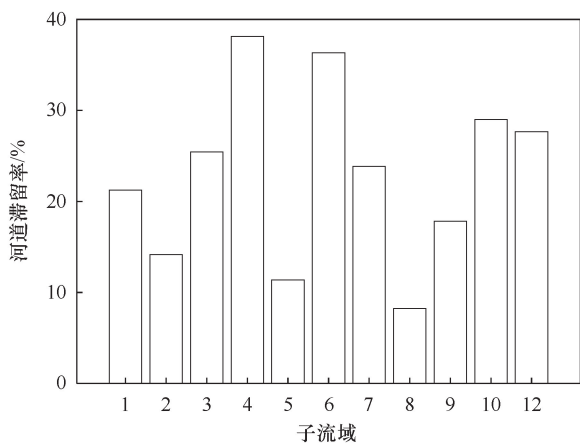
系数 R^2 分别为 0.87 和 0.84, 呈显著线性相关($P < 0.01$)。所有水质监测点实测值和模拟值的确定性系数 R^2 为 0.58 [见图 2(e)], 呈显著线性相关($P < 0.01$), 说明经率定验证后的 SWAT 模型能用于量化黄柏河流域任意子流域出口的 TP 迁移转化过程, 也能够用来揭示 TP 的时空变化特征。同时为了分析玄庙观水库 TP 的滞留特征, 单独将库尾 TP 负荷的模拟值和实测值进行对比, 求得的确性系数 R^2 为 0.55, 呈显著线性相关($P < 0.01$), 表明玄庙观水库库尾处 TP 负荷的模拟精度满足模型精度要求。

2.2 TP 滞留的空间变化特征

针对水库流域特有的特征, 将河流和水库分开进行滞留计算。其中, 子流域 1—9、10 和 12 共 11 个子流域属于河流, 滞留计算采用河流留方法; 玄庙观水库位于子流域 11 [见图 1(d)], 滞留计算采用水库滞留方法。计算结果如图 3(a)—(b) 所示。图 3(a) 显示的是在多年平均尺度下不同河流和水库中 TP 滞留率的空间分布。可以看出, TP 不管在河流还是在水库系统中都处于滞留状态, 且水库的滞留作用(滞留率为 53.72%)要大于河道的滞留作用(滞留率最大值为 38.11%)。究其原因是水库系统更利于 TP 滞留, 大坝建设使水流流速变缓, 而流速是影响营养盐



(a) 河道和水库的多年平均磷滞留率



(b) 河道多年平均磷滞留率

图3 2014—2018年河道和水库的多年平均磷滞留率

Fig. 3 Multi-year average phosphorus retention rates in rivers and reservoirs (2014—2018)

滞留的关键因子^[28]。

不同子流域中的河流由于地理位置、坡度、坡长及人类活动影响程度的不同, TP 的滞留作用也不一样[见图 3(b)]。滞留率最大值是子流域 4 的河流, 为 38.11%; 其次为子流域 6 的河流, 滞留率为 36.32%, 这两个子流域的坡长、坡度都较大。支流子流域(3、4、6、7、9、10 和 12)河流的滞留率普遍大于干流子流域(1、2、5 和 8)河流的滞留率。支流河流 TP 的平均滞留率为 18.88%, 干流河流 TP 的平均滞留率为 8.46%, 所有河流(包括支流和干流) TP 的平均滞留率为 13.61%, 表明干流河流中 TP 的滞留作用相对较小。分析原因主要是由于 TP 的滞留与流量相关, 干流河流的高流量导致 TP 滞留作用相对较低^[29]。

2.3 TP 滞留的时间变化特征

2.3.1 水库的 TP 滞留特征

水库年均入库、出库流量在 2014—2018 年变化剧烈, 尤其是 2018 年, 入库流量最小, 只有 3.02 m³/s, 主要原因是水库以上流域 2018 年的降雨量也最小(686.89 mm), 是有雨量站点实测记录以来(2005 年—至今)的最枯年份。水库 2014—2018 年的年平均入库流量为 5.1 m³/s, 出库流量为 5.14 m³/s, 出库流量大于入库流量(见表 3)。入库 TP 负荷的范围是 2.80~21.33 t, 年均入库负荷为 12.03 t; 出库 TP 负荷的范围是 3.83~7.78 t, 年均出库负荷为 5.57 t。TP 年滞留率的范围是 -36.83%~72.84%, 5 a 平均滞留率为 53.72%。由表 3 可以看出, 2014—2017 年年滞留率都大于 0, 说明水库对 TP 呈滞留作用; 而 2018 年年滞留率小于 0, 说明水库对 TP 呈释放作用, 变成 TP 的“源”。

由于上述水库入库和出库负荷是通过流量与 TP 浓度乘积计算得到的, 滞留率的计算结果会受到入库流量和出库流量的影响。为避免因流量的差异而错误判断水库中 TP 释放或滞留的作用, 引入了输运系数, 其考虑了径流变化对营养盐负荷的影响。输运系

数是营养盐输出负荷与输入负荷的比值, 包括水输运系数和营养盐输运系数。当营养盐输运系数与水输运系数的比值大于 1 时, 系统表现为释放作用(即:“源”); 当营养盐输运系数与水输运系数的比值小于 1 时, 表现为滞留作用(即:“汇”)^[30]。由表 3 可以看出, 2014—2017 年的输运系数比都小于 1, 表现为滞留作用, 即水库是 TP 的“汇”, 而 2018 年的输运系数比大于 1, 表现为释放作用, 即水库是 TP 的“源”。

由水库 TP 滞留的年际变化结果(见表 3)可以看出, 2014—2017 年和 2018 年水库对 TP 的作用是不同的, 故本研究在分析 TP 滞留的月际变化时分两段进行分析(时段 1: 2014—2017 年; 时段 2: 2018 年)。

时段 1: 2014—2017 年水库月均入库和出库流量、入库和出库负荷、滞留率如表 4 所列。可以看出, 3—12 月的入库负荷都大于出库负荷, 输运系数比都小于 1, 表明水库对 TP 表现为滞留作用。其中 3—6 月的滞留率较大, 超过 70%, 主要是由于入库径流大于出库径流, 使进入水库的 TP 负荷高, 能滞留的 TP 负荷也较高。到了汛期(7—9 月), 为了水库本身的安全, 出库流量大于入库流量, 使 TP 滞留率减小。1—2 月的入库负荷都小于出库负荷, 滞留率都小于 0, 分别为 -85.05% 和 -45.02%, 水库表现为“源”作用。但通过计算输运系数比值后发现 1—2 月的值都小于 1, 表明 1—2 月的“源”效应是由流量变化引起的伪“源”作用。总体来说, 在月平均情况下, 水库都表现为滞留作用。

时段 2: 2018 年水库月均入库和出库流量、入库和出库负荷、滞留率如表 5 所列。2018 年由于降雨偏少, 为保证水库下游的生态流量和梯级水库的供水需求, 水库大部分时间处于放水状态, 使得 1 月、4—7 月、9—10 月的入库 TP 负荷小于出库 TP 负荷, 滞留率为负值。尤其是 5 月、7 月和 10 月, 滞留率分别为 -127.57%、-111.41% 和 -93.40%, 且输运

表 3 水库 TP 的年负荷和年滞留率

Table 3 Annual TP loads and retention rates in reservoir

年份	入库流量/m ³ ·s ⁻¹	出库流量/m ³ ·s ⁻¹	入库负荷/t	出库负荷/t	滞留率/%	输运系数比
2014	5.44	5.28	10.27	4.39	57.22	0.44
2015	5.01	4.94	21.33	5.79	72.84	0.28
2016	5.35	5.53	17.69	7.78	56.06	0.43
2017	6.70	6.50	8.05	6.04	24.96	0.77
2018	3.02	3.47	2.80	3.83	-36.83	1.19
年均	5.10	5.14	12.03	5.57	53.72	0.46

表 4 2014—2017 年水库 TP 多月平均负荷和滞留率

Table 4 Multi-year average monthly TP loads and retention rates in reservoir (2014—2017)

月 份	入库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	出库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	入库负荷/t	出库负荷/t	滞留率/%	运输系数比
1	1.27	3.06	0.10	0.19	-85.05	0.79
2	1.37	2.48	0.07	0.10	-45.02	0.79
3	2.67	2.66	0.62	0.17	72.05	0.28
4	6.53	7.42	4.63	1.09	76.43	0.21
5	6.22	5.74	1.50	0.41	72.46	0.29
6	7.33	6.85	2.06	0.61	70.36	0.32
7	8.77	10.52	1.63	0.99	39.12	0.51
8	8.85	10.30	1.07	0.97	8.94	0.78
9	8.11	9.07	1.29	0.64	50.76	0.44
10	6.16	7.52	0.66	0.41	38.14	0.51
11	3.46	3.92	0.54	0.30	44.51	0.49
12	1.92	2.13	0.16	0.11	31.46	0.62

表 5 2018 年水库 TP 月平均负荷和滞留率

Table 5 Monthly average TP loads and retention rates in reservoir (2018)

月 份	入库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	出库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	入库负荷/kg	出库负荷/kg	滞留率/%	运输系数比
1	2.12	2.27	198.06	313.80	-58.44	1.48
2	1.78	1.89	134.71	81.52	39.49	0.57
3	3.54	3.74	359.93	226.26	37.14	0.60
4	2.46	2.55	181.61	193.50	-6.55	1.03
5	8.07	8.62	528.31	1 116.89	-111.41	1.98
6	4.27	4.56	424.38	684.85	-61.38	1.51
7	3.44	3.75	170.66	388.39	-127.57	2.09
8	3.74	4.15	386.41	242.09	37.35	0.56
9	3.73	4.02	211.12	295.08	-39.77	1.30
10	1.85	1.98	97.11	187.80	-93.40	1.81
11	0.63	0.67	55.03	47.68	13.36	0.81
12	0.61	0.64	49.98	49.69	0.58	0.95

系数比都大于1,说明水库是TP的“源”。其他月份水库表现为滞留作用,滞留率为0.58%~39.49%,且运输系数比都小于1。其中8月份的滞留率为37.35%,而7月和9月均为负值。通过分析主要包括两方面的原因:(1)8月份水库入库TP浓度监测值较高,使计算的TP入库负荷变高;(2)出库TP负荷计算值较小,从而使得8月滞留率为正值。由于采样误差和月平均浓度计算误差(三次日浓度均值为月平均浓度),这个结果的不确定性较大。

2.3.2 河流的TP滞留特征

为了分析河流TP滞留的年际变化,分别在子流域尺度和流域尺度上进行比较。子流域尺度上支流和干流滞留作用的年际变化情况如图4所示。由图4可以看出,2014—2018年支流和干流都表现为滞留作用。

在支流河流中,子流域4的河流滞留率最大,变化范围为27.43%~48.85%,其中2018年的滞留率

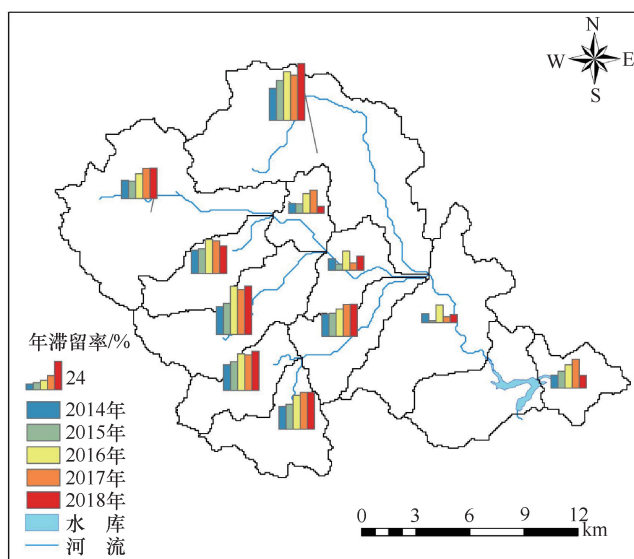


图 4 各条河流 TP 滞留率的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations in TP retention rates across different rivers

最大, 2014 年的滞留率最小; 其次是子流域 6 的河流, 变化范围为 23.90%~41.42%, 其滞留作用最大和最小的年份与子流域 4 一致; 子流域 9 的河流滞留率最小, 变化范围为 10.99%~24.79%, 其中 2017 年的滞留率最大, 2014 年的滞留率最小。

干流河流中的滞留作用比支流河流普遍要小。滞留作用最大的为源头子流域 1 的河流, 滞留率变化范围为 15.11%~26.30%, 滞留率最大的年份是 2018 年, 最小的年份是 2015 年; 滞留作用最小的为子流域 8 中的河流, 滞留率范围是 1.62%~15.11%, 滞留率最大的年份是 2016 年, 最小的年份是 2015 年。整体而言, 2014—2018 年滞留率的变化是复杂的。为分析 TP 滞留的年际变化规律, 在流域尺度上计算了整个河流的滞留率。变化范围在 9.36%~16.86%, 2016 年的滞留率最大(16.86%), 2015 年的滞留率最小(9.36%)。

支流和干流河流 TP 滞留率的月际变化情况如图 5 所示。可以看出, 随着月份的变化, 河流对 TP 的作用表现不同, 有的月份表现为“汇”, 有的月份表现为“源”。非汛期(1—3 月和 11—12 月)表现为“源”, 原因可能是非汛期河流处于低水位, 沉积物中较高浓度的 TP 会向上扩散使水体中的磷浓度升高, 造成“源”效应。其中 1 月份的“源”作用最强, 分析原因可能是: (1)1 月份的径流最小, 相应的河流水位最低; (2)径流小会使 TP 负荷偏小, 河流负荷输入输出的差较小, 导致滞留率计算值较大。汛期(4—10 月)表现为“汇”, 各个月份 TP 滞留作

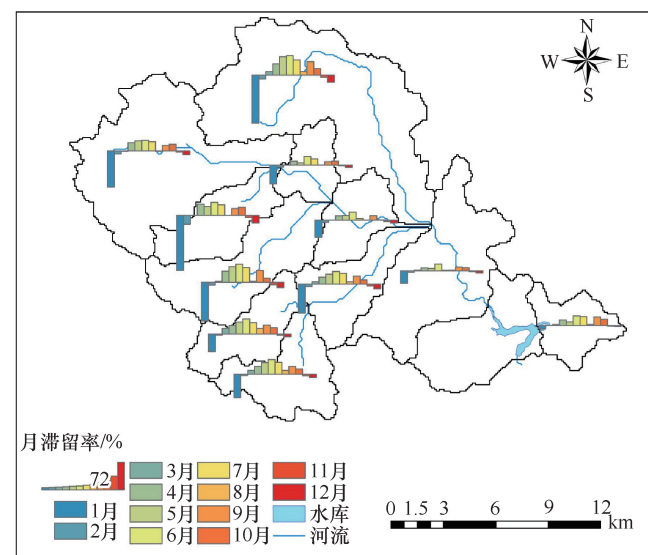


图 5 各条河流 TP 滞留率月际变化

Fig. 5 Monthly variations in TP retention rates across different rivers

用的大小也不同。其中, 6—8 月份的滞留率较大, 可能原因是水体的温度较高, 藻类和微生物生长旺盛, 大量的生物会吸收磷降低磷浓度从而使滞留作用增强^[16]。

2.4 磷滞留影响因素分析

采用冗余分析法对影响河流和水库在年和月尺度上 TP 滞留因素进行分析, 结果如图 6 所示。其中图 6(a)(b)是河流 TP 滞留影响因素分析结果; 图 6(c)(d)是水库 TP 滞留影响因素分析结果。由图 6(a)和图 6(c)可以看出, 年滞留的第一 RDA 排序轴的解釋量分别为 65.19%和 93.22%, 第二 RDA 排序轴的解釋量分别为 18.84%和 6.78%, 即前两轴分别解释了影响因子的 84.03%和 100%, 表明第一、二排序轴能够很好地反映滞留量和滞留率与影响因子的关系。月尺度的第一、第二 RDA 排序轴的解釋量要比年尺度小[见图 6(b)和图 6(d)], 可能是由于月尺度相对于年尺度来说, 时间跨度更短, 影响因子的变化更加复杂多变, 不容易通过少数几个排序轴捕捉到大部分的变异性。

由图 6(a)可见, 河流 TP 滞留量(R_s)在年尺度上与坡长(SL)和降水量(P)呈正相关, 与坡度(SL)和流量(Q)呈负相关, SL 和 Q 的显著性 p 值 < 0.05 , 表明其对年尺度 TP 滞留量的影响显著。滞留率(η)与降水量、坡长和流量呈正相关, 与坡度呈负相关, SL 的显著性 $p < 0.05$, 其余都大于 0.1, 表明 SL 对年尺度 TP 滞留率的影响极显著, 其余 3 个因素均未达到显著水平。

由图 6(b)可见, 河流 TP 滞留量和滞留率在月时间尺度上与流量、坡长、降水量呈正相关, 与坡度呈负相关。 SL 和 Q 的显著性 $p < 0.05$, 表明流量和坡长对月尺度 TP 滞留量和滞留率的影响显著, 降水量和坡度未达到显著水平。

由图 6(c)可见, 水库 TP 滞留量和滞留率在年时间尺度上与入库流量(Q_{in})、出入库流量比(Q_{in}/Q_{out})和降水量(P)呈正相关, 与水力滞留时间(HRT)呈负相关。但四个影响因子的显著性 p 都大于 0.1, 表明 4 个因素均未达到显著水平。

由图 6(d)可见, 水库 TP 滞留量在月尺度上与 Q_{in} 和 P 呈正相关, 与 Q_{in}/Q_{out} 和 HRT 呈不明显关系; 滞留率与 Q_{in} 、 Q_{in}/Q_{out} 、 HRT 和 P 都呈正相关关系, Q_{in} 和 Q_{in}/Q_{out} 的显著性 $p < 0.05$, 表明月尺度水库 TP 滞留率主要受入库径流和出入库流量比的影响。

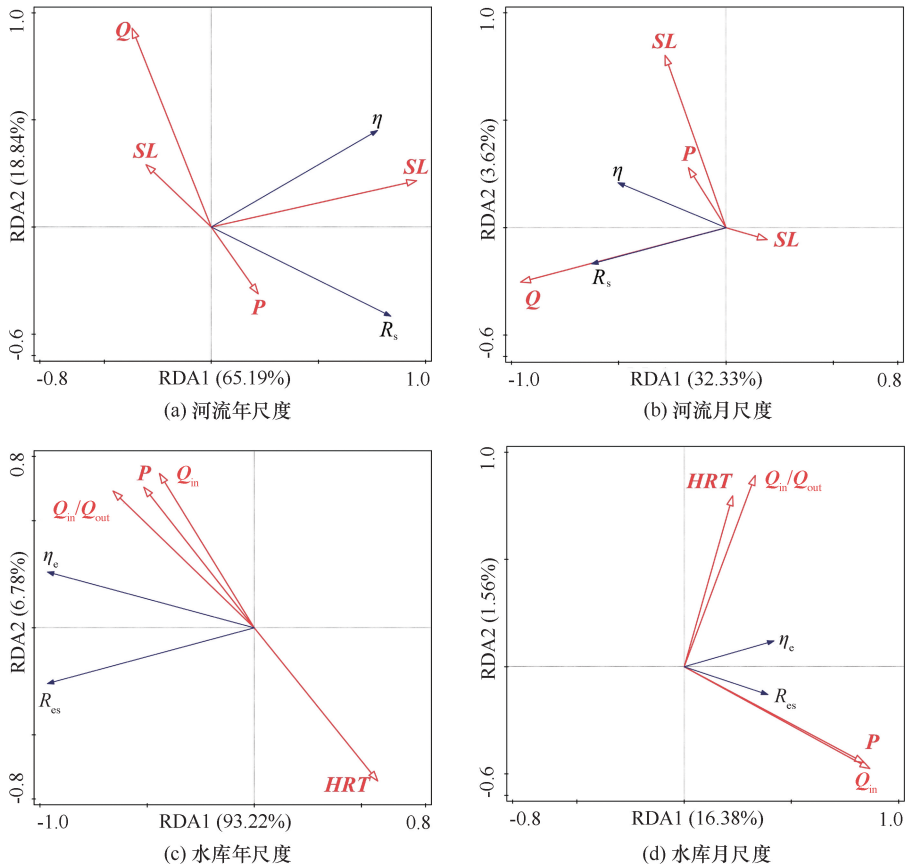


图6 河流和水库 TP 滞留量和滞留率在年尺度和月尺度上的影响因素冗余分析图

Fig. 6 Redundancy analysis biplots of influencing factors on TP retention volumes and rates in rivers and reservoirs at annual and monthly scales

3 结果讨论

本研究发现 TP 在所有河流(包括支流和干流)的平均滞留率为 13.61%，其中支流河流 TP 的平均滞留率为 18.88%，干流河流 TP 的平均滞留率为 8.46%(见图 5)，这与 TAN 等^[29]的研究成果较一致，其发现全部河流的平均磷滞留率为 9%，干流河流的滞留效应(磷滞留率为 3%)要小于支流河流的滞留效应(磷滞留率为 18%)。但本研究 TP 滞留规律也与部分研究者的结果有一定差别，如：CUI 等^[31]发现进入水体的磷大约有 1/3 会滞留在河流系统中，CHENG 等^[16]发现有 63.5%的 TP 滞留在河流系统中。因此，不同的河流对磷滞留会有较大区别，应对特定河流的磷滞留效应开展全面客观的研究。

本研究计算的水库年滞留率范围为 -36.83% ~ 72.84%，多年平均滞留率为 53.72%。与国内其他学者研究的水库 TP 滞留作用相比(密云水库为 61.4%^[32]，三峡水库为 22% ~ 57%^[33]，金沙江下游溪洛渡和向家坝梯级水库为 67.0%^[10]，江西省万安

水库为 -89% ~ 80%^[9]等)，可以看出本研究的计算结果在合理范围内。不同的水库由于气候条件、水库运行方式、库容大小，研究时段等不同，水库的滞留效应会有所变化。本研究发现玄庙观水库 2018 年的滞留率为 -36.83%，分析原因可能是这一年的降水很少，使得入库径流 ($3.02 \text{ m}^3/\text{s}$) 小于出库径流 ($3.47 \text{ m}^3/\text{s}$)，导致入库 TP 负荷小于出库 TP 负荷，且长期的磷矿开采等外源污染排入水库，使得水库沉积物中的磷含量较高^[34]，低水位运行时较高浓度的磷排放会形成“源”效应^[35]。

水库的入库流量越大和出入库流量比越大，则滞留率越大，主要原因是入库流量与 TP 负荷之间存在一致的变化规律。其中，入库 TP 负荷与径流量的关系为 $L_{X_{in}} = 0.0018Q_{X_{in}} + 3.33$ ，相关系数 $R^2 = 0.73$ ；出库 TP 负荷与径流量的关系为 $L_{X_{out}} = 0.005Q_{X_{out}} + 3.18$ ，相关系数 $R^2 = 0.78$ ；相关系数较高说明流量是影响 TP 季节变化的重要因素。水力滞留时间因素对 TP 滞留量和滞留率的影响则在年尺度和月尺度上表现不同，对 TP 滞留的影响随着时间尺度的变化有正有

负, 和先前的研究成果一致^[36-37]。

4 结 论

本研究采用 SWAT 模型模拟黄柏河上游玄庙观水库流域的总磷负荷, 分析河流和水库的滞留特征, 并对影响总磷滞留的因子进行解析。主要结论如下。

(1) SWAT 模型能较好地对比磷矿开采区的水量和水质进行模拟, 且评价指标都达到“好”的标准, 证明其能够成功量化流域的 TP 时空分布。

(2) TP 在河流和水库系统中都处于滞留状态, 且水库的滞留作用要大于河道的滞留作用。支流河流 TP 的平均滞留率要大于干流河流 TP 的平均滞留率, 所有河流(包括支流和干流) TP 的平均滞留率为 13.61%。

(3) 在多年平均尺度上, 水库和河流都表现为滞留作用; 在年尺度上, 水库在 2018 年表现为“源”作用; 在月尺度上, 河流在枯水期表现为“源”作用, 在丰水期表现为滞留作用; 水库在 2014—2017 年全部月份都表现为滞留作用, 2018 年部分月份为“源”作用。水体长期的 TP 滞留导致较高的 TP 累积, 应采取相应措施降低底泥中磷的含量, 减小水体的磷“源”效应。

(4) 河流的滞留量和滞留率都与坡长呈显著正相关, 降水量和坡度相关程度未达到显著水平。水库月尺度 TP 滞留主要受入库径流和出入库流量比的影响, 年尺度滞留呈不显著相关。

参考文献 (References):

[1] WANG G Q, LI J W, SUN W C, et al. Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model [J]. *Water Research*, 2019, 157: 238-246.

[2] GOYETTE J O, BENNETT E M, MARANGER R. Low buffering capacity and slow recovery of anthropogenic phosphorus pollution in watersheds [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 921-925.

[3] DING X W, ZHU Q, ZHAI A F, et al. Water quality safety prediction model for drinking water source areas in Three Gorges Reservoir and its application [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 734-741.

[4] LIU B, MCLEAN C E, LONG D T, et al. Eutrophication and recovery of a Lake inferred from sedimentary diatoms originating from different habitats [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 1352-1361.

[5] ZHANG Y Q, LIAO J, PEI Z L, et al. Effect of dam construction on nutrient deposition from a small agricultural karst catchment [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105548.

[6] FANG H Y. Impact of land use change and dam construction on soil

erosion and sediment yield in the black soil region, northeastern China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(4): 1482-1492.

[7] KREILING R M, PERNER P M, BRECKNER K J, et al. Watershed-and reach-scale drivers of phosphorus retention and release by streambed sediment in a western Lake Erie watershed during summer [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160804.

[8] TONG Y D, BU X G, CHEN J Y, et al. Estimation of nutrient discharge from the Yangtze River to the East China Sea and the identification of nutrient sources [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 321: 728-736.

[9] 胡春华, 周文斌, 钟夏莲, 等. 江西省万安水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 35-39.

HU C H, ZHOU W B, ZHONG X L, et al. Retention of nitrogen and phosphorus in Wan'an Reservoir, Jiangxi Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 35-39.

[10] 刘尚武, 张小峰, 吕平毓, 等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 656-666.

LIU S W, ZHANG X F, LV P Y, et al. Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 656-666.

[11] 徐祎凡, 陈炼钢, 赖正清, 等. 基于入库负荷精细解析的面源污染排放特征识别 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(3): 158-170.

XU Y F, CHEN L G, LAI Z Q, et al. Identification of non-point source pollution emission characteristic based on fine detailed analysis of inflow pollution load [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(3): 158-170.

[12] DAS S K, AHSAN A, KHAN M H R B, et al. Calibration, validation and uncertainty analysis of a SWAT water quality model [J]. *Applied Water Science*, 2024, 14(4): 86.

[13] AGHSAEI H, MOBARGHAEI DINAN N, MORIDI A, et al. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136449.

[14] ZEIGER S J, OWEN M R, PAVLOWSKY R T. Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: A SWAT modeling application [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147295.

[15] NASR A, BRUEN M, JORDAN P, et al. A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland [J]. *Water Research*, 2007, 41(5): 1065-1073.

[16] CHENG J R, GONG Y M, ZHU D Z, et al. Modeling the sources and retention of phosphorus nutrient in a coastal river system in China using SWAT [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111556.

[17] HU C C, WU Q X, LIU G D, et al. Nitrogen and phosphorus non-point source pollution in the upper Wujiang River Karst Basin: Critical source areas identification and influencing factors [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 112989.

[18] 陈晴空, 陈治君, 王殿常, 等. 三峡库区悬沙颗粒磷的粒径变化和滞留特征 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(1): 181-

192.

CHEN Q K, CHEN Z J, WANG D C, et al. Particle size variation and retention characteristics of phosphorus in suspended sediments in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(1): 181-192.

[19] ZHAO B L, ZENG Q H, WANG J H, et al. Impact of cascade reservoirs on nutrients transported downstream and regulation method based on hydraulic retention time[J]. *Water Research*, 2024, 252: 121187.

[20] LYU Y B, ZHANG M, YIN H B. Phosphorus release from the sediment of a drinking water reservoir under the influence of seasonal hypoxia[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170490.

[21] 张玲玲, 黎娜. 水污染治理与农业生态效率关系研究: 基于经济门槛视角[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(2): 168-178.

ZHANG L L, LI N. The relationship between water pollution control and agricultural eco-efficiency: Based on economic threshold perspective[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(2): 168-178.

[22] NEITSCH S L, AMOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Input/output File Documentation: Version 2009 [M]. Texas: Texas A&M University System Texas Water Resources Institute, 2011.

[23] ROMAGNOLI M, PORTAPILA M, RIGALLI A, et al. Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596/597: 437-450.

[24] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.

[25] WANG A, TANG L H, YANG D W. Spatial and temporal variability of nitrogen load from catchment and retention along a river network: A case study in the upper Xin'anjiang catchment of China[J]. *Hydrology Research*, 2016, 47(4): 869-887.

[26] 冉祥滨, 刘军, 于志刚, 等. 典型枯水年长江干流硅的分布、输送与滞留[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 740-752.

RAN X B, LIU J, YU Z G, et al. Distribution, transport and retention of silica in the main channels of the Yangtze River in exceptionally low water discharge year[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(3): 740-752.

[27] 刘书颖, 张翔, 徐晶, 等. 基于冗余分析的城市河湖污水污染成因及尺度效应[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4768-4779.

LIU S Y, ZHANG X, XU J, et al. Analysis of the causes for pollution of urban river and lake waters based on the redundancy analysis method and the influence from selection of scales[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4768-4779.

[28] 刘梅冰, 陈兴伟, 陈莹. 山美水库氮营养盐滞留特征及其影响因素的多时间尺度分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2348-

2356.

LIU M B, CHEN X W, CHEN Y. Multiple time-scale analysis of nitrogen retention characteristics and influencing factors in Shanmei Reservoir, Fujian, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2348-2356.

[29] TAN Y, CHEN M, ZHANG L L, et al. Flux and spatial pattern of phosphorus in the Shigatse section of the Yarlung Zangbo River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108552.

[30] 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 等. 三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2152-2159.

QIN Y W, HAN C N, ZHENG B H, et al. Analysis of transport and transformation characteristics between dissolved phosphorus and particulate phosphorus in water of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2152-2159.

[31] CUI M, GUO Q J, WEI R F, et al. Human-driven spatiotemporal distribution of phosphorus flux in the environment of a mega river basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141781.

[32] 申校, 杜新忠, 贾东民, 等. 入库河流输入对密云水库磷滞留过程的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(10): 3114-3120.

SHEN X, DU X Z, JIA D M, et al. The influence of upstream input on phosphorus retention in Miyun Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(10): 3114-3120.

[33] 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 等. 三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2096-2106.

TANG X Y, TONG S C, HUANG G X, et al. Tempo-spatial and retention analysis of total phosphorus in the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2096-2106.

[34] 包宇飞, 胡明明, 王殿常, 等. 黄柏河梯级水库沉积物营养盐与重金属分布特征及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 1005-1016.

BAO Y F, HU M M, WANG D C, et al. Distribution and pollution assessment of nutrients and heavy metals in sediments of the cascade reservoirs in Huangbai river[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(5): 1005-1016.

[35] 李琼, 刘佳, 李永凯. 黄柏河流域水库底泥内源磷释放对水质影响分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 60-65.

LI Q, LIU J, LI Y K. Effect of endogenous phosphorus release from reservoir bottom sediment on water quality in Huangbai River Basin[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(3): 60-65.

[36] LIU X C, BEUSEN A H W, VAN BEEK L P H, et al. Exploring spatiotemporal changes of the Yangtze River (Changjiang) nitrogen and phosphorus sources, retention and export to the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Water Research*, 2018, 142: 246-255.

[37] BAO L L, LI X Y, CHENG P. Phosphorus retention along a typical urban landscape river with a series of rubber dams[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 228: 55-64.

(责任编辑 王璐)