毕 杨,荣 易,赵琰鑫,等.基于 SWAT 模型的盐津河流域氮磷污染关键源识别及特征解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6881-6891.
Bi Y, Rong Y, Zhao Y X, et al. Identification of critical sources and characteristic analysis of nitrogen and phosphorus pollution in Yanjin River Basin based on SWAT Model [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6881-6891.

基于 SWAT 模型的盐津河流域氮磷污染关键源识别及特征解析

毕 杨[1],荣 易[2],赵琰鑫[2],陈 岩[2],黄 凯[1*],王 东[2] (1.北京林业大学环境科学与工程学院,北京 100083；2.生态环境部环境规划院,北京 100041)

摘要：通过构建 SWAT 模型,模拟赤水河重要支流盐津河流域 2023 年控制断面径流及氮磷负荷通量的变化,解析流域点、面源负荷排放的时空特征,并检验 SWAT 模型在西南岩溶区的适用性,结果表明: SWAT 模型验证期径流量、TN、TP 的模拟性能指标 R^2分别为 0.77,0.82 和 0.84,Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.77,0.67,0.78,这表明模型在典型岩溶区适用性较好;总氮负荷主要排放区域分布在流域中部和西南地区,而总磷负荷主要分布在流域东部中间和西南地区,负荷排放空间差异特征反映了流域土地利用和产业活动的空间分布特征;种植业面源和城镇面源分别是流域总氮、总磷最主要贡献来源,分别占流域总氮、总磷流失量的 52%和 31.4%;汛期总氮、总磷的排放量可达非汛期的 2.2 倍和 3 倍,氮磷负荷流失与降雨强度之间存在显著的相关性,总磷的流失过程更易受到强降雨事件的影响.

关键词：盐津河流域；SWAT 模型；氮磷污染负荷；关键源识别
中图分类号：X52 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6881-11

Identification of critical sources and characteristic analysis of nitrogen and phosphorus pollution in Yanjin River Basin based on SWAT Model. BI Yang[1], RONG Yi[2], ZHAO Yan-xin[2], CHEN Yan[2], HUANG Kai[1*], WANG Dong[2] (1.College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China；2.Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100041, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6881~6891

Abstract：By constructing a SWAT model, this study simulated the variations in runoff and nitrogen/phosphorus load fluxes at control sections of the Yanjin River Basin in 2023, analyzed the spatiotemporal characteristics of point and non-point source load emissions, and evaluated the applicability of the SWAT model in the karst region of southwestern China. The results show that: during the validation period, the SWAT model achieved R^2 values of 0.77, 0.82, and 0.84 for runoff, TN, and TP simulations, respectively, with Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of 0.77, 0.67, and 0.78, indicating good applicability in typical karst areas. The main emission zones for total nitrogen (TN) were distributed in the central and southwestern parts of the basin, while total phosphorus (TP) emissions were concentrated in the eastern-central and southwestern regions, reflecting spatial differences in land use and industrial activities. Agricultural non-point sources and urban non-point sources were the dominant contributors to TN and TP losses, accounting for 52% and 31.4% of the total losses, respectively. TN and TP emissions during the flood season reached 2.2 and 3 times those of the non-flood season, with significant correlations between nitrogen/phosphorus loss and rainfall intensity. TP loss was more susceptible to heavy rainfall events.

Key words：Yanjin River Basin；SWAT model；nitrogen and phosphorus pollution loads；key source identification

水资源作为国家和社会的重要战略资源[1-2],对社会经济的可持续发展起着重要的支撑作用[3].随着全国水污染防治工作的不断深入,氮磷营养盐已经逐渐成为重点湖库和长江经济带地表水首要污染物.按照排放方式,水体中的氮磷主要来源有点源污染和非点源污染[3-5].点源污染主要为工业废水排放,经污水处理厂处理后排入水体的生活污水,及集中式畜禽养殖场尾水等;非点源污染则主要来自农业施肥、分散式畜禽养殖、部分农村生活污水、水土流失以及大气沉降等.科学评价流域水环境状况,把握水质时空变化规律,识别并量化分析流域内各类点源、非点源污染来源及排放特征,进而因地制宜地采取精准治污措施,对于针对性开展流域水环境治理具有极其重要的意义[6].

SWAT 模型作为一种水文模型,在大时空尺度和复杂水文条件下具有很大优势,被广泛应用于水资源评估[7]、关键源区识别[8]以及气候变化影响[9-10]

收稿日期：2025-04-30
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3203502)
* 责任作者, 教授, huangkai@bjfu.edu.cn

和径流模拟[11],成为流域综合管理的重要工具.如陈岩[12]构建了江西八里湖流域 SWAT 模型来研究流域氮磷迁移,杨承华等[13]利用 SWAT 水文模型揭示了汉江流域径流与非点源氮磷排放的时空分布规律,晁雷[14]基于 SWAT 模型分析了海城河流域的总磷负荷及其时空分布及污染来源等.但相关研究主要针对平原、湿润地区流域非点源污染对水环境的影响[15-18],对流域水文过程驱动下各类点面源协同影响和时空耦合分析不足,针对喀斯特地貌发育、雨洪响应迅速的西南山地岩溶区的研究亟待加强.岩溶流域特殊的水文结构表现为:岩溶流域含水系统通过落水洞等垂向通道将近水平地下暗河相连,降水及地表径流经垂向管道快速输入地下河系,导致水体和污染物在垂向与水平方向的传输速率及数量发生改变,使得地表-地下水系统的物质交换与传输呈现复杂性[19-20],因此岩溶区氮磷污染问题严峻且治理困难.SWAT 模型凭借其综合模拟能力,能揭示岩溶区氮磷迁移的规律,识别关键源区,从而为制定科学高效的岩溶区水污染治理与水资源保护策略提供支撑.

盐津河为赤水河一级支流,位于贵州省仁怀市境内.盐津河流域是贵州省酱香型白酒原产地和主产区,兼具喀斯特地貌敏感性和工农业复合污染特征,水环境保护和社会经济发展矛盾尖锐,主要控制断面总氮、总磷超标问题突出.系统识别流域内点面源排放的时空特征是实施水环境精准治理的关键.本文通过整合流域社会经济统计数据,多年的水文、气象、水质监测数据,以及点源排污监测数据等,构建盐津河流域 SWAT 模型,解析盐津河流域氮、磷污染负荷排放的多维时空特征,为受点面源复合污染的流域精准治污提供重要参考.同时通过建立本地化参数库,可提升 SWAT 模型针对西南山地岩溶区水文水质的模拟精度,拓展 SWAT 模型的应用场景.

1 模型与方法

1.1 研究区概况

盐津河位于贵州省遵义市仁怀市中部,系赤水河右岸一级支流[21].主河道全长 35.2km,平均比降 2.17%,多年平均流量 4.35m^3/s,主要支流有建村沟、猴儿沟、鱼鳅河等.流域面积 281km^2,岩溶地貌和侵蚀地貌交错分布,具有地形起伏度大、切割强、坡度陡、地形破碎等特点;主要土壤类型为黄壤、石灰土、紫色土等;属中亚热带湿润季风气候,年均气温 15.8℃,年均蒸发量 903.25mm,年均降雨量 1027.2mm,汛期降水量占全年降水量的 78.1%,枯水期河道流量明显减少甚至断流.流域是仁怀市人口集中区、粮食主产区和酱香型白酒的核心产区,各类点面源污染负荷排放量大,水环境问题突出[22].位于河流下游的盐津河水质断面,现状水质平均为Ⅳ~Ⅴ类,主要污染物指标氨氮、总氮、总磷等指标均大幅超标[23].盐津河的水质污染直接影响下游人民的饮用水安全和郎酒、习酒等名酒的取水水源水质.

1.2 SWAT 模型简介

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是一种典型的分布式模型[24],由美国农业部(USDA)开发[25],可基于物理过程模拟流域内的水文循环、泥沙输移、污染物迁移以及农业管理措施的影响[26].SWAT 模型的核心优势在于其能够处理复杂的土地利用和气候变化情景,适用于大尺度流域的长期模拟.

1.3 模型数据

构建 SWAT 模型数据需要气象、水文、水质监测数据,点、面源污染排放数据和地理空间数据等(图 1).其中,气象资料由国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)提供,包括 2021~2023 年盐津河流域及周边 2 个气象站的日降水量、日均气温、日最高气温和日最低气温、逐日的日照时数、日均风速、日相对湿度等;盐津、白杨湾两个水文监测站点逐日流量数据均来自《中华人民共和国水文年鉴:长江流域水文资料》;盐津桥省控断面及主要季节性溪沟控制断面水质数据依据仁怀市生态环境监测站实测数据成果;地理空间数据包括数字高程(DEM)、土地利用数据及土壤类型数据:流域数字高程数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/),分辨率 30m,使用自然间断法[27-28]将 DEM 坡度百分比(%)等级分为 5 级[29];流域 2020 年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/),分辨率 30m,并结合 SWAT 模型土地利用标准进行重分类等预处理操作[24];土壤数据来自国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)提供的分辨率 1000m 的世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集[30],包含全球土壤类

型分布及土壤属性数据库,通过 SPAW 软件、土壤侵蚀方程、使用数据库默认值等计算方式构建 SWAT 模型土壤数据库.利用 Arcgis10.4 将上述地理空间数据和获取的数据统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 坐标系,重采样得到盐津河流域分辨率 30m 的空间数据.流域全口径点源排放清单数据来自仁怀市生态环境局,包括流域内全部白酒污水处理厂、城镇生活污水处理厂、工业企业、规模化畜禽养殖以及农村生活污水处理站 2021~2023 年逐日废污水排放量.流域耕地种植制度、施肥量、农村人口及畜禽散养量等用以核算面源排放的社会经济统计数据依据当地统计部门.

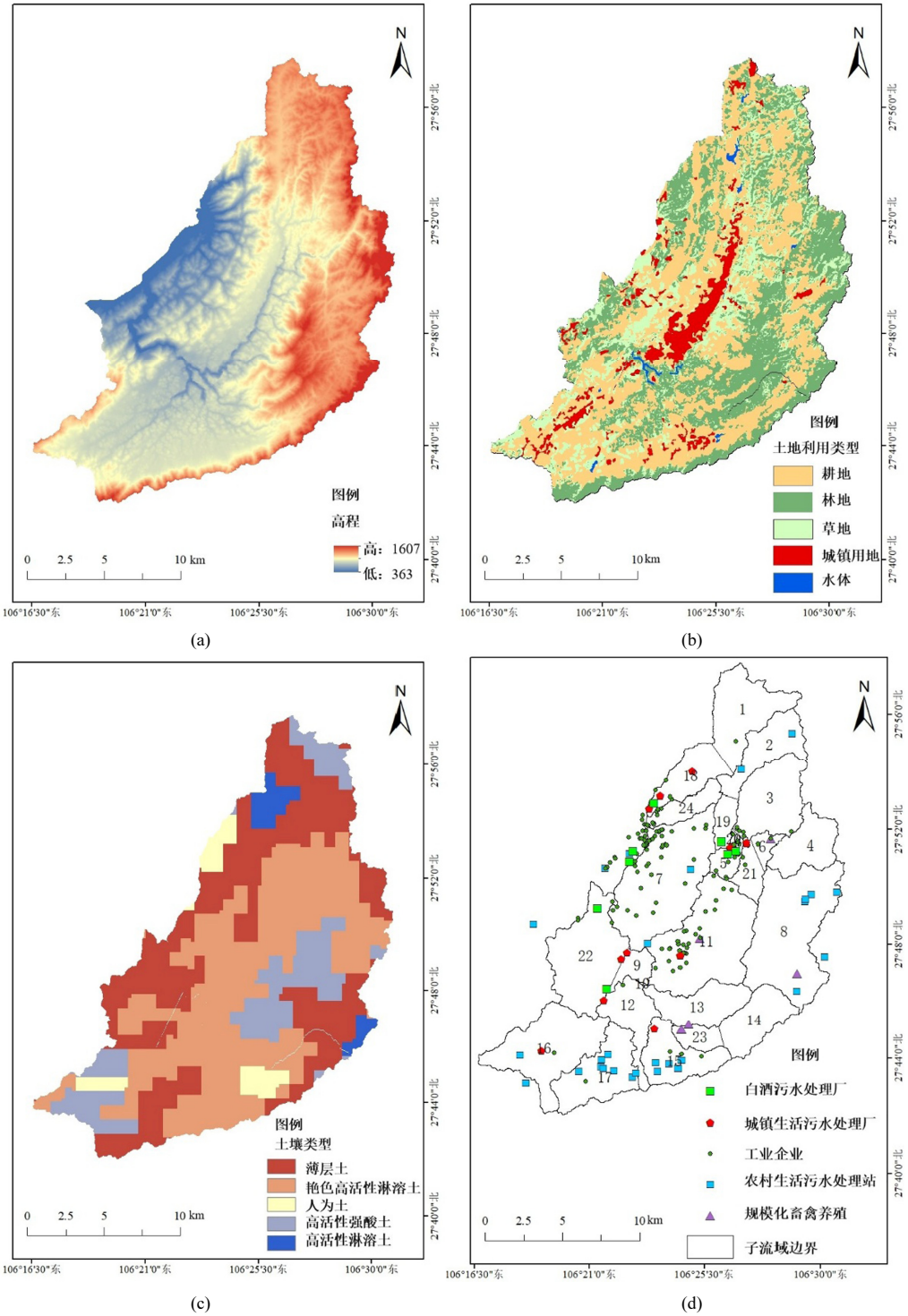


图 1　盐津河流域(a)DEM 图、(b)土地利用类型图、(c)土壤类型图及(d)点源分布图

Fig.1　Yanjin River Basin: (a) DEM map, (b) land use type map, (c) soil type map, and (d) point source distribution map

1.4 模型建立

利用 ArcSWAT10.4 平台,根据输入的 DEM 生成河网,将流域划分为 24 个子流域.河流由北向西南流经仁怀市中心城区苍龙、中枢、盐津、坛厂、鲁班街道办事处和茅台镇共计 5 街 1 镇,其中 24 个子流域依次分配到 5 街 1 镇中.将土地利用类型、土壤属性和坡度等土壤参数阈值设定为 10%,进一步划分为 471 个水文响应单元.在此基础上,将所有土地利用、土壤数据、气象数据以及点源排放数据都分配到水文单元中.如图 1 所示,其中工业企业多聚集在子流域 5、7、11、15、20,并且该子流域的用地类型大多为城镇用地.农村生活污水处理站聚集在子流域 8、15、17,城镇生活污水处理厂则聚集在子流域 18 和 22,因研究区域白酒行业盛行,还有一些大型白酒污水处理厂聚集在子流域 5、7 和 22.采用 SWAT-CUP 工具中 SUFI-2 算法[31]进行参数敏感性分析[32]及参数率定[33].水文率定站点白杨湾站,以及水质率定断面盐津断面均位于流域出口,设定 2022 年为模型率定期,2023 年为模型精度验证期.模型精度验证使用纳什效率系数(ENS)、回归决定系数(R^2)进行评价[34];当 ENS>0.5、R^2>0.6[35]时,则认为模型精度合格及输出结果可靠.

2 结果与讨论

2.1 模型适用性评估

径流及水质的率定参数根据文献进行选择[36],分别确定 10 个径流率定参数及 21 个水质率定参数,并利用 SWAT-CUP 软件进行参数敏感性排序[36]和参数最优值确定,参数率定结果如表 1 所示.如图 2 对比白杨湾站的逐月径流计算值与实测值:2022 年率定期 ENS=0.86、R^2=0.87,2023 年验证期 ENS=0.86、R^2=0.77;对比盐津站 TN 的率定期(2022 年)ENS=0.70、R^2=0.85,验证期(2023 年)ENS=0.67、R^2=0.82,TP 的率定期(2022 年)ENS=0.96、R^2=0.97,验证期(2023 年)ENS=0.78、R^2=0.84.调参之后模拟结果和实测结果吻合很好,能较好地反映控制断面逐月径流和总氮、总磷水质过程变化特征,表明 SWAT 模型在盐津河流域具有一定的适用性.

赖格英等[19]、王万宾等[37]、尚朵朵等[38]的研究共同表明,在岩溶地区,SCS 径流曲线数(CN2)和地下水延迟时间(GW_DELAY)的误差对 SWAT 模型模拟结果的精度均会产生显著影响,如 CN2 率定值达 0.04,GW_DELAY 率定值介于 361.79~487.68d.受地形地貌差异影响,不同地区的 CN2 值和 GW_DELAY 值率定结果存在差异,其中 CN2 通常为敏感性参数[39].由于各地水文条件、土壤及化学性质不同,地下水中的化学过程延长了其向河流的响应时间[40],导致 GW_DELAY 值呈现区域差异.本研究通过参数率定,结果显示 CN2、GW_DELAY 2 个参数对河流径流及水质模拟影响较为显著.通过反复调整参数取值并进行多轮迭代,最终 CN2 的率定值为 0.01,GW_DELAY 的率定值为 376.5d,结果与岩溶地区的率定值较为一致.

表 1 参数率定结果

Table 1 Parameter calibration results

参数	中文含义	最小值	最大值	率定值	参数	中文含义	最小值	最大值	率定值
CN2.mgt	径流曲线数	−0.2	0.2	0.01	BIOMIX.mgt	生物混合效率系数	0	1	0.000
ALPHA_BF.gw	基流 Alpha 因子	0	1	0.375	NPERCO.bsn	硝酸盐渗透系数	0	1	0.801
GW_DELAY.gw	地下水延迟时间	30	450	376.5	RSDCO.bsn	残留物分解系数	0.02	0.1	0.051
GWQMN.gw	地下水径流生成阈值	0	2	0.65	CMN.bsn	有机氮矿化速率系数	0.001	0.005	0.004
GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0	0.2	0.075	CDN.bsn	反硝化速率系数	0	5	4.261
ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	0.8	1	0.805	BC1.swq	河道水质模型速率常数 1	0.1	1.5	1.071
CH_N2.rte	河道曼宁系数	0	0.3	0.1275	BC3.swq	河道水质模型速率常数 3	0	0.4	0.192
CH_K2.rte	河道导水率	5	130	95.625	RS4.swq	河道水质模型速率常数 4	0.001	0.1	0.009
ALPHA_BNK.rte	河岸蓄水系数	0	1	0.225	N_UPDIS.bsn	氮吸收分布系数	0	100	0.094
SOL_AWC.sol	土壤有效含水量	−0.2	0.4	−0.125	P_UPDIS.bsn	磷吸收分布系数	0	200	159.157
SOL_K.sol	土壤饱和导水率	−0.8	0.8	0.52	PPERCO.bsn	磷渗透系数	10	17.5	11.869
SOL_BD.sol	土壤容重	−0.5	0.6	−0.0875	PHOSKD.bsn	磷土壤分配系数	100	300	203.883
SFTMP.bsn	降雪温度阈值	−5	5	3.75	PSP.bsn	磷溶解度系数	0.01	0.7	0.363
SPCON.bsn	泥沙输移线性系数	0.0001	0.1	0.052	USLE_K(1).sol	USLE 土壤可蚀性因子(层 1)	−0.2	0.2	−0.1115
SPEXP.bsn	泥沙输移指数系数	1	1.5	1.473	USLE_P.mgt	USLE 水土保持措施因子	0.2	0.2	0.4985
USLE_C.plant.dat	USLE 植被覆盖管理因子	−1	1	−0.283					

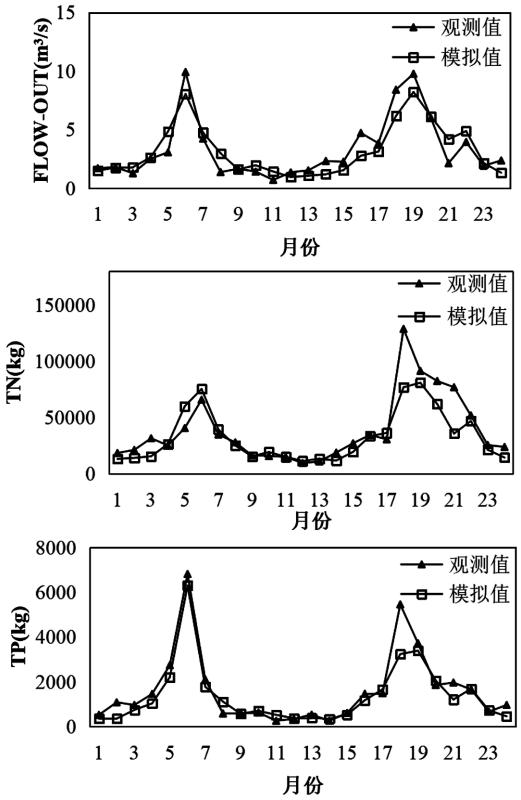
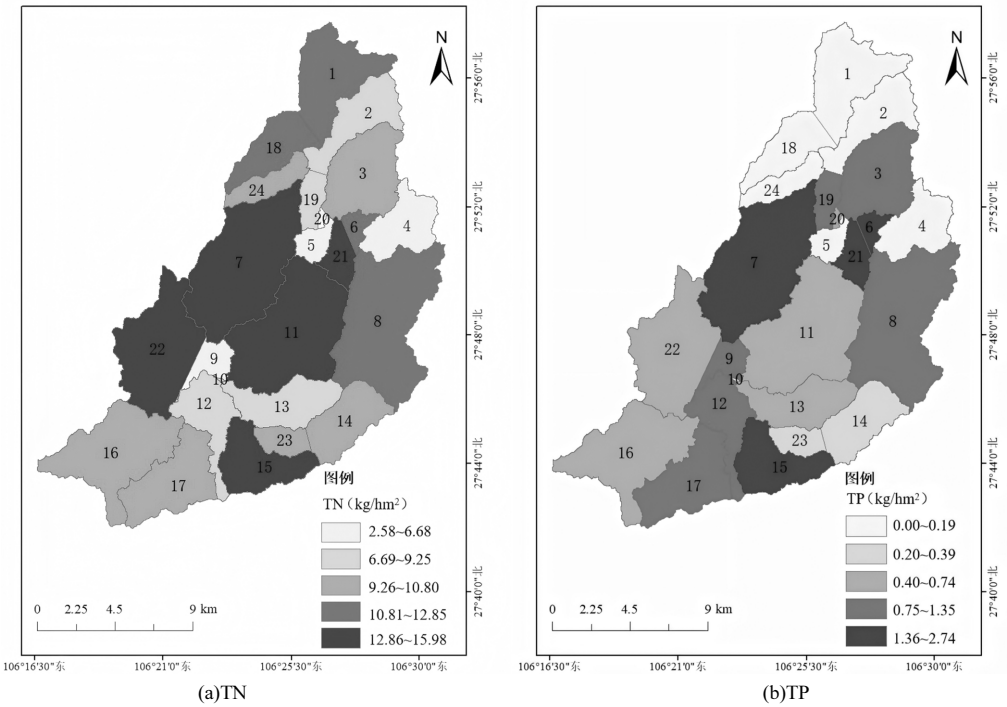


图 2　控制断面逐月径流量、总氮和总磷模拟值与实测值对比

Fig.2　Comparison of simulated and measured values of monthly runoff, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) at the control section

2.2　氮磷污染负荷的空间格局

2.2.1　氮磷排放强度空间特征　通过 SWAT 模型的点源以及非点源输入,对盐津河流域 2023 年总氮总磷污染负荷进行模拟,模拟结果如图 3 所示.各子流域年单位面积 TN 负荷平均值为 10.13kg/hm^2,范围在 2.58~15.98kg/hm^2,TP 负荷平均值为 0.83kg/ hm^2,范围在 0.19~2.74kg/hm^2,差异性较大.由图可以看出,总氮负荷主要分布在流域中部以及西南地区(子流域 7、11、15、21、22),其中高负荷区域的总氮负荷占流域总负荷的 30%.总磷负荷主要分布在流域东部中间以及西南地区(子流域 6、7、15、22),其中高负荷区域的总磷负荷占流域总负荷的 46%.总氮总磷的分布区域与主要污染源总氮总磷污染输出地情况符合,并且与土地利用类型较为一致,高负荷区主要为城镇地区.该流域白酒行业盛行,河道周围分布了众多白酒工业企业,通过实地调查以及统计得知 90%以上的工业企业都分布在流域中部以及西南地区(子流域 7、11、15).城镇人口密度高,生活污水排放量大,其中含有大量的氮和磷.针对以上问题,应加强城镇污水处理设施建设,减少氮、磷的直接输入;在人口密集的中部偏东以及西南地区,完善污水收集管网,避免污水直排河道;针对流域内农业区化肥使用量大的问题,推广科学施肥技术.

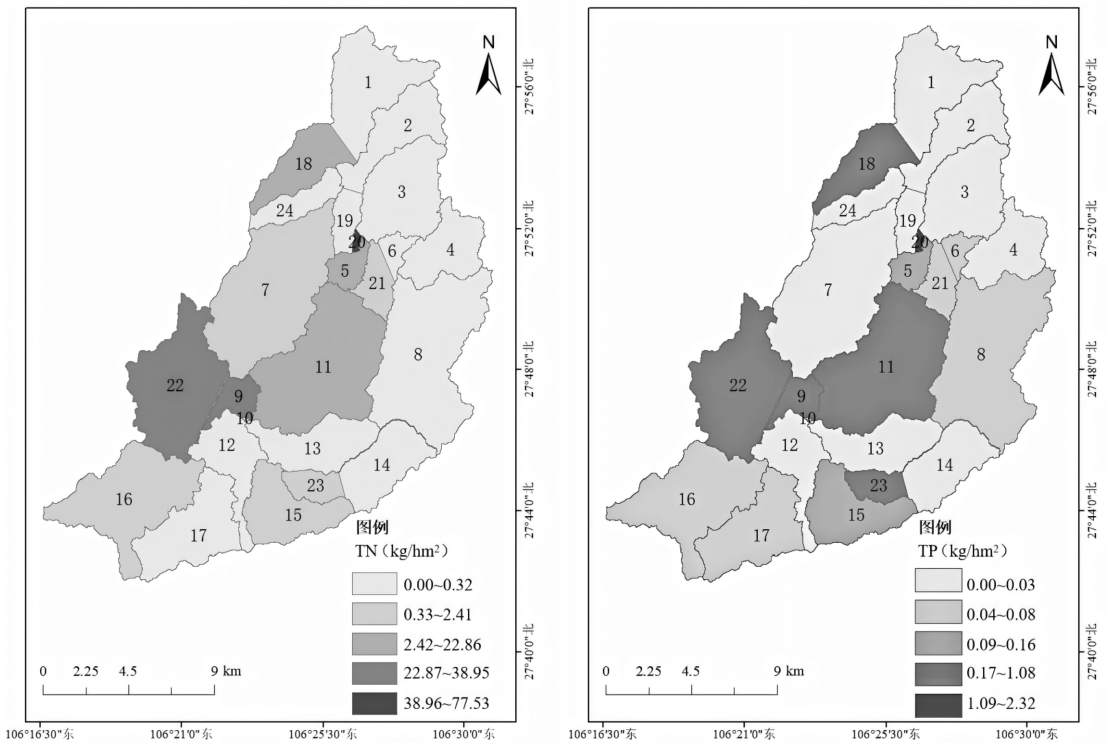


(a)TN　　(b)TP

图 3　盐津河流域 2023 年(a)总氮(b)总磷污染负荷空间分布

Fig.3　Spatial distribution of (a) total nitrogen (TN) and (b) total phosphorus (TP) pollution loads in the Yanjin River Basin (2023)

盐津河流域涉及跨区域的水环境管理问题,分析点源和面源污染的贡献及其空间分布规律,为流域内不同区域的污染治理责任划分提供依据.图 4 为盐津河流域点源总氮总磷排放负荷时空分布图.如图所示,各子流域年单位面积点源 TN 负荷平均值为 8.8kg/hm^2,范围在 0.32~77.53kg/hm^2,TP 负荷平均值为 0.3kg/hm^2,范围在 0.026~2.32kg/hm^2,差异显著.对比分析点面源的总氮总磷负荷空间分布图可知其主导的子流域不同.总氮负荷的子流域 7、11、15、21 主要由面源影响,而子流域 5、9、18、20 受点源影响比较大.总磷的子流域 6、7、15 主要受面源影响,而子流域 9、11、18、20、23 受点源影响较大,22 号子流域总氮总磷污染负荷均受到点面源较大影响,为重点污染区.点源污染负荷主导区主要集中在流域中心区域以及东部偏南和东部偏北地区.由此可见子流域的面源重点污染区以及点源重点污染区,同时证实了点面源污染在这些子流域中的显著贡献,揭示了点源污染在空间上的集中性和规律性.因此需要加强对白酒工业的监管,推行清洁生产技术和严格的排放标准,减少工业废水中的氮、磷污染物排放;强化污水处理厂的脱氮除磷工艺,减少氮磷输入;同时加强对流域东部地区的监控,尤其是东部中间地域因人类活动密集,需重点关注其污染负荷变化.



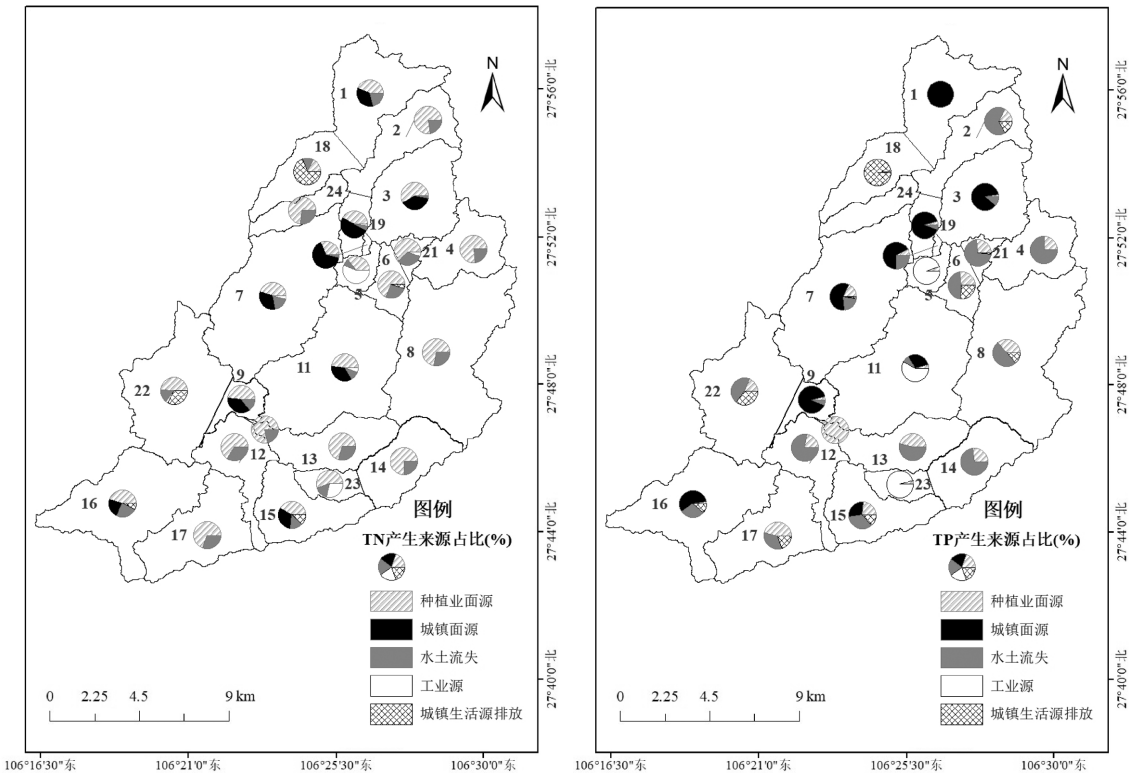
(a)TN (b)TP

图 4 盐津河流域 2023 年(a)总氮(b)总磷点源污染负荷空间分布

Fig.4 Spatial distribution of (a) total nitrogen (TN) and (b) total phosphorus (TP) point source pollution loads in the Yanjin River Basin (2023)

2.2.2 氮磷污染关键源分析 通过统计模拟计算盐津河流域2023年点源面源污染负荷,得出不同排放结构对流域的总氮总磷污染贡献率.由图 5 可知,总氮污染贡献率为:种植业面源 52%、水土流失 18%、城镇面源 16%、城镇生活源 8.3%、工业源 5.4%.由此可见,盐津河流域总氮的关键源为种植业面源.盐津河流域地处西南山区,地形以坡耕地和梯田为主,农业活动密集[21],是总氮污染以种植业面源为主导的核心原因.流域内坡耕地占比高,土壤保水保肥能力差,加之雨季降雨集中[22],加剧了氮素流失.其中总磷污染贡献率为:城镇面源 31.4%、水土流失 25.3%、工业源 17.5%、种植业面源 15%、城镇生活源 10.7%.由此可见盐津河流域总磷的关键源为城镇面源.流域内城镇多沿河分布,人口密度

较高,但污水管网覆盖率却较低,并且老旧城区存在雨污合流问题.总磷水土流失贡献率达到流域总磷总贡献率的四分之一,主要由于流域独特的喀斯特地貌特性,导致流域水土流失严重[20].对照图 5 和流域土地利用类型图可以看出,城镇面源在城镇用地地区贡献量占比较大,城镇面源污染占城镇用地地区总氮污染的 40%,占城镇用地地区总磷污染的 61%.而点源污染贡献占比大多聚集在流域中部以及南部的工业企业聚集地,尤其是子流域 5、11、23 的工业源占比较大,其中工业源总氮占总氮负荷的 48%,总磷占 79%,需重点关注;城镇生活源排放在子流域 15、18、22 中占主导位置,城镇生活源排放总氮占总氮负荷的 41%,总磷占 39%,需重点关注.因此,应对中部和南部工厂、居民区污水管道全面排查堵漏,严查企业偷排漏排,在排污口设置过滤装置拦截污染物.



(a)TN　　(b)TP

图 5　单位土地面积氮磷负荷产生量与污染源类型的关系

Fig.5　Relationship between nitrogen and phosphorus load per unit land area and pollution source types

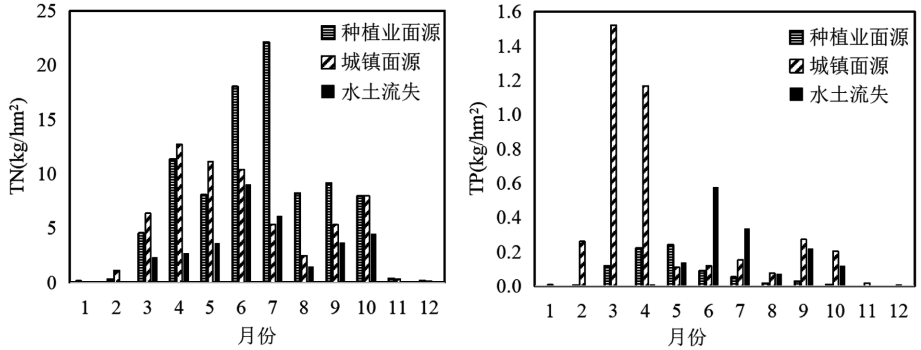


图 6　盐津河流域 2023 年月尺度面源污染负荷时间分布

Fig.6　Temporal distribution of monthly non−point source pollution load in Yanjin River Basin, 2023

如图 6 所示,模拟计算得出 2023 年种植业面源在 6、7 月份为对流域总氮月尺度污染贡献的关键

时段,占全年贡献的 44.4%.与流域作物的施肥期叠加雨季(年均 54.6%降水集中在汛期)有关,加之岩溶地区导致氮素易随暴雨快速下渗至地下河,形成污染峰值.城镇面源在 4、5、6 月份为污染贡献的关键时段,占全年贡献的 54.1%.反映春季城市由于初春干燥少雨而使地表灰尘累积加之雨季初期雨水冲刷效应.水土流失在 6、7 月份为污染贡献的关键时段,占全年贡献的 45.2%.6、7 月份为强降雨时段,导致坡耕地土壤侵蚀加重.在流域总磷污染方面,种植业面源在 4、5 月份为污染贡献的关键时段,占全年贡献的 60.1%.对应旱季末期磷肥施用与雨季初期地表径流冲刷,导致磷负荷在 4、5 月份贡献较大.城镇面源在 3、4 月份为污染贡献的关键时段,占全年贡献的 68.9%.水土流失在 6、7 月份为污染贡献的关键时段,占全年贡献的 62.2%,是由于强降雨引发的污染贡献峰值.

2.3 氮磷污染负荷的时间演变特征

盐津河流域的汛期主要集中在每年的 6~9 月期间,这一时期降雨量显著增加,该流域的降雨量受季风气候影响,呈现明显的季节性分布.由图 7 可见,随着 2023 年汛期的来临,盐津河流域径流量迅速增大,统计得知,汛期的平均径流量为 5.26m^3/s,是非汛期平均径流量 2.18m^3/s 的 2.4 倍,汛期的径流量占全年总流量的 54.6%.汛期的平均总氮负荷为 51372.5kg/月,是非汛期平均总氮负荷 23216.2kg/月的 2.2 倍.汛期的平均总磷负荷为 2457.8kg/月,是非汛期平均总磷负荷 828.4kg/月的 3 倍.由图可以看出,总氮和总磷负荷随河道径流量变化高度一致,主要原因是对径流污染物的携带作用.因此,河道径流量的变化直接影响了污染物的迁移和负荷,使得总氮和总磷负荷与径流量呈现一致的变化趋势.由此可见,强化河道清淤和疏通工作,建设绿色基础设施尤为重要,特别是在城镇区域实施雨污分流改造,减少雨水径流对污染物的携带.

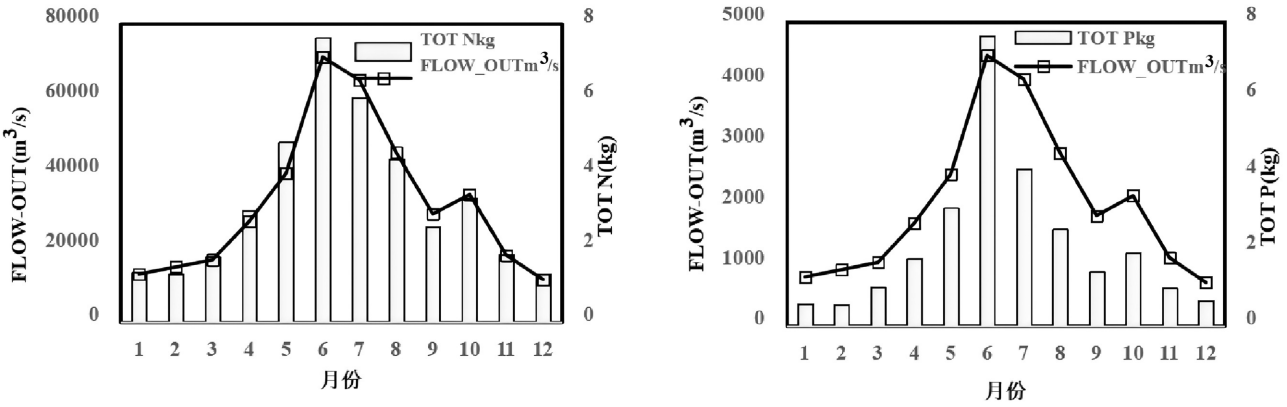


图 7 盐津河流域月均径流量与流域总氮、总磷负荷对比

Fig.7 Comparison of monthly average runoff with total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) loads in the Yanjin River Basin

由图 8 可知,流域 2023 年总氮负荷产生量与降雨量呈强显著相关,相关系数为 0.8.总磷负荷与降雨量的相关系数为 0.65.表明总氮总磷负荷产生量对降雨强度的响应是随着降雨强度越大其响应越显著,此时流域上总氮负荷产生能力更强.盐津河流域喀斯特地貌发育区裂隙渗透性强,陡坡地形导致径流速度快,未吸收的氮肥随雨水短时间内进入河道,降雨会将河水中有机氮转化为硝态氮,硝态氮和铵态氮易溶于水,溶解态氮通过地下暗河系统间接输入水体,降雨强度大是有机氮迅速转化为硝态氮的主要因素[41].

在 2023 年逐日统计数据中,选取日降雨量明显偏高的 12d,发现总氮总磷污染负荷也分别在当天达到峰值.在选取的时间内,统计得知总氮负荷占全年总氮负荷的 28%,总氮负荷最高为 28977.92kg;总磷负荷占全年总磷负荷的 65%,总磷负荷最高为 6532.88kg.由此可见,总氮总磷负荷均受降雨强度影响,其中从逐日尺度分析,总磷更容易受到强降雨现象的剧烈影响,应该重点关注.山区河流比降大、汇流时间短,降雨事件与氮磷负荷峰值几乎同步,逐日尺度相关性显著.因此,流域内的降雨尤其是汛期降雨和强降雨现象能强烈影响氮磷负荷,极大增加流域内的氮磷损失.

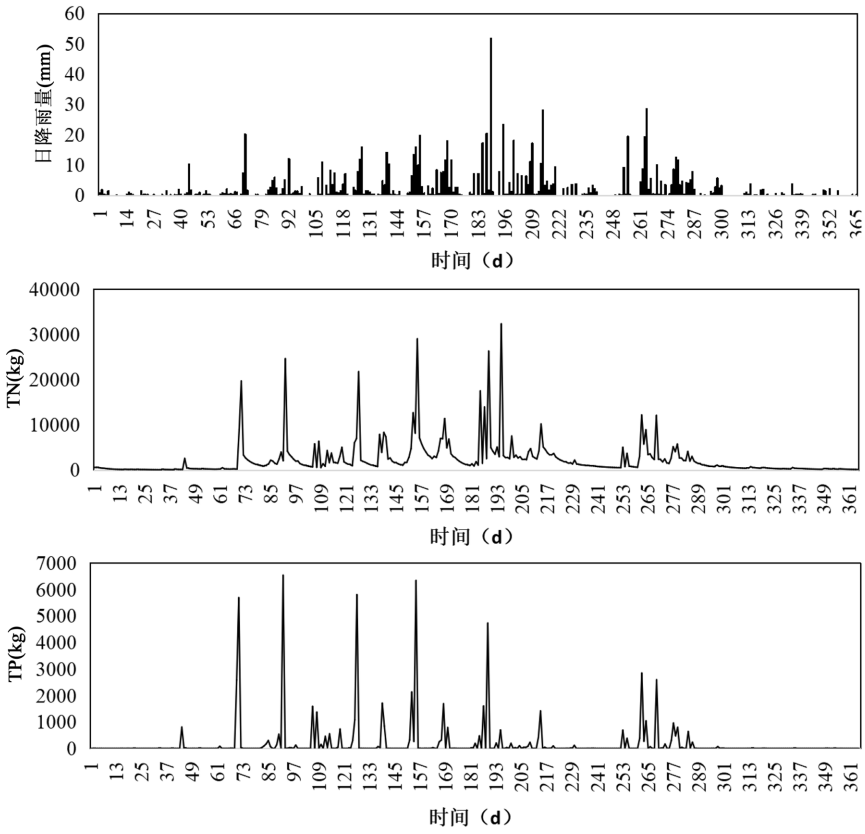


图 8　降雨强度与氮磷负荷产生量的关系

Fig.8　Relationship between rainfall intensity and nitrogen and phosphorus load generation

3　结论

3.1　本文验证了 SWAT 模型能较好地模拟盐津河流域河流径流量以及 TN、TP 负荷量,验证期 R^2 位于 0.77~0.84 之间,E_{NS} 位于 0.67~0.78 之间,实现了流域水文水质全要素模拟,同时验证了模型在岩溶地区的适用性.

3.2　盐津河流域总氮、总磷污染空间分布与土地利用高度关联,城镇区为高负荷核心区.总氮集中于流域中西部(占总负荷 30%),总磷富集于东部及西南部(占 46%);TN、TP 的面源主导区差异显著,点源污染则集中分布于流域中心及东侧南北片区,凸显城镇排污与农业活动的空间分异特征.

3.3　通过 SWAT 模拟计算得出盐津河流域总氮的关键源为种植业面源,总磷的关键源为城镇面源;城镇面源在城镇用地地区贡献量占比较大,而点源污染贡献占比较大地区大多聚集在流域中部以及南部的工业企业聚集地和城镇居民区.

3.4　盐津河流域汛期平均径流量达非汛期 2.4 倍,占全年 54.6%;汛期总氮、总磷负荷分别为非汛期的 2.2 倍和 3 倍,污染负荷与径流量变化趋势高度同步;总氮、总磷负荷与降雨强度显著相关,相关系数分别为 0.8 和 0.65;其中总磷对强降雨响应更敏感,凸显极端降雨对其迁移的放大效应.

参考文献:

[1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. Science Advances, 2016,2(2):e1500323.

[2] Vörösmarty C, McIntyre P, Gessner M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010,467(7315):555−561.

[3] Strokal M, Bai Z, Franssen W, et al. Urbanization: An increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century [J]. npj Urban Sustainability, 2021,1(1):24.

[4] Carpenter S, Caraco N F, Correll D L, et al. Non−point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications, 1998,8(3):559−568.

[5] 张启元,赵雨晴,李远俊,等.222Rn 示踪岩溶湿地地下水排泄及氮磷营养盐输入 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3226−3239.
Zhang Q Y, Zhao Y Q, Li Y J, et al. 222Rn tracing of groundwater discharge and nitrogen−phosphorus nutrient input in karst wetlands [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3226−3239.

[6] Giri S, Qiu Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review [J]. Journal of

Environmental Management, 2016,173:41−48.

[7] Krysanova V, White M. Advances in water resources assessment with SWAT—an overview [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015,60(5): 771−783.

[8] Tuppad P, Kannan N, Srinivasan R, et al. Simulation of agricultural management alternatives for watershed protection [J]. Water Resources Management, 2010,24(12):3115−3144.

[9] Giri S, Arbab N N, Lathrop R G. Assessing the potential impacts of climate and land use change on water fluxes and sediment transport in a loosely coupled system [J]. Journal of Hydrology, 2019,577:123955.

[10] Ficklin L, Tewart T, Maurer P. Climate change impacts on streamflow and subbasin−scale hydrology in the Upper Colorado River Basin [J]. PloS one, 2013,8(8):e71297.

[11] Gassman P W, Sadeghi A M, Srinivasan R. Applications of the SWAT model special section: Overview and insights [J]. Journal of Environmental Quality, 2014,43(1):1−8.

[12] 陈 岩,赵琰鑫,赵 越,等.基于 SWAT 模型的江西八里湖流域氮磷污染负荷研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019,55(6):1112−1118.
Chen Y, Zhao Y X, Zhao Y, et al. Research on nitrogen and phosphorus pollution load in Bali Lake Basin of Jiangxi Province based on SWAT model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019,55(6):1112−1118.

[13] 杨承华,胡 恩,田 涛.基于 SWAT 模型的汉江流域汉中段水文要素研究 [J]. 水资源开发与管理, 2024,10(10):1−9,40.
Yang C H, Hu E, Tian T. Study on hydrological elements in Hanzhong section of Hanjiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Development and Management, 2024,10(10):1−9,40.

[14] 晁 雷,鲜龙宇,李亚峰.基于 SWAT 模型的海城河总磷关键源识别管控研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024,40(6):1144−1152.
Chao L, Xian L Y, Li Y F. Research on identification and control of key phosphorus sources in Haicheng River Basin based on SWAT model [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024,40(6):1144−1152.

[15] 王锦志,赵喜萍,刘 林,等.基于 SWAT 模型对非点源污染分布特征的研究——以汾河上游为例 [J]. 山西水土保持科技, 2023,(2): 45−49.
Wang J Z, Zhao X P, Liu L, et al. Study on distribution characteristics of non−point source pollution based on SWAT model − A case study of upper Fenhe River [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2023,(2):45−49.

[16] Xianqi Z, Peng C, Shengnan D, et al. Analysis of non−point source nitrogen pollution in watersheds based on SWAT model [J]. Ecological Indicators, 2022,138.

[17] Yang S, Dong G, Zheng D, et al. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non−point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China [J]. Ecological Modelling, 2011,222(20): 3701−3717.

[18] 闫雪嫚,卢文喜,欧阳琦.基于替代模型的非点源污染模拟不确定性分析——以石头口门水库汇水流域为例 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(8):3011−3018.
Yan X M, Lu W X, Ouyang Q. Uncertainty analysis of non−point source pollution simulation based on surrogate model: A case study of Shitoukoumen Reservoir catchment [J]. China Environmental Science, 2017,37(8):3011−3018.

[19] 赖格英,易姝琨,刘 维,等.基于修正 SWAT 模型的岩溶地区非点源污染模拟初探——以横港河流域为例 [J]. 湖泊科学, 2018,30(6): 1560−1575.
Lai G Y, Yi S K, Liu W, et al. Preliminary study on non−point source pollution simulation in karst areas using modified SWAT model: A case study of Henggang River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(6):1560−1575.

[20] Malagò A, Efstathiou D, Bouraoui F, et al. Regional scale hydrologic modeling of a karst−dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete [J]. Journal of Hydrology, 2016,540:64−81.

[21] 聂 睿,诸葛亦斯,李国强,等.基于土地利用的盐津河流域生态系统服务价值时空变化分析 [J]. 水生态学杂志, 2025,(4):1−13.
Nie R, Zhuge Y S, Li G Q, et al. Spatiotemporal variation analysis of ecosystem service value in Yanjin River Basin based on land use [J]. Journal of Hydroecology, 2025,(4):1−13.

[22] 王万宾,管堂珍,梁启斌,等.赤水河流域(云南省境内)水环境承载能力测算研究 [J]. 人民长江, 2021,52(3):28−35.
Wang W B, Guan T Z, Liang Q B, et al. Study on water environmental carrying capacity in Chishui River Basin (Yunnan section) [J]. Yangtze River, 2021,52(3):28−35.

[23] 滕智超,丁爱中,李亚惠,等.赤水河上游水质时空特征分析及其污染源解析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016,52(3):322−327.
Teng Z C, Ding A Z, Li Y H, et al. Spatiotemporal characteristics of water quality and pollution source analysis in upper reaches of Chishui River [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016,52(3):322−327

[24] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions [J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(4): 1211−1250.

[25] Olivera F, Valenzuela M, Srinivasan R, et al. Arcgis-SWAT: A geodata model and Gis interface for SWAT [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2006,42(2):295−309.

[26] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1): 73−89.

[27] 刘连华,欧阳威,白 艳,等.基于田−沟−塘系统优化的稻作流域氮素面源污染减排潜力评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2693−2699.
Liu L H, Ouyang W, Bai Y, et al. Assessment of nitrogen non−point source pollution reduction potential in rice cultivation watersheds based on paddy−ditch−pond system optimization [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2693−2699.

[28] 阮炳南,吴 磊,郭嘉薇,等.考虑环境成本综合效益的泾河流域最佳管理措施评价与筛选 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):319−328.
Ruan B N, Wu L, Guo J W, et al. Evaluation and screening of best management practices in Jing River Basin considering comprehensive benefits of environmental costs [J]. China Environmental Science, 2024,44(1):319−328.

[29] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size,

landscape representation, and hydrologic simulations [J]. Water Resources Research, 1994,30(4):1019−1028.

[30] Sinitambirivoutin M, Milne E, Schiettecatte L S, et al. An updated IPCC major soil types map derived from the harmonized world soil database v2.0 [J]. Catena, 2024,244:108258−108258.

[31] 刘　宁,张　霞,祝雪萍,等.基于 SWAT 模型和 SUFI−2 算法的碧流河流域径流模拟 [J]. 水力发电, 2019,45(3):18−22,89.
Liu N, Zhang X, Zhu X P, et al. Runoff simulation in Biliu River Basin based on SWAT model and SUFI−2algorithm [J]. Water Power, 2019,45(3):18−22,89.

[32] 王圣伟,李　翔,李艳霞,等.基于不确定性分析的畜禽粪污土地承载力评估——以排泄系数不确定性为例 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(S1):186−196.
Wang S W, Li X, Li Y X, et al. Evaluation of livestock manure land carrying capacity based on uncertainty analysis: A case study of excretion coefficient uncertainty [J]. China Environmental Science, 2023,43(S1):186−196.

[33] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al. A continental−scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high−resolution large−scale SWAT model [J]. Journal of Hydrology, 2015,524:733−752.

[34] Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, et al. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference [J]. Journal of Hydrology, 2007,340(3/4):167−182.

[35] Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria [J]. Transactions of the ASABE, 2015,58(6):1763−1785.

[36] Griensven A v, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi−variable catchment models [J]. Journal of Hydrology, 2005,324(1):10−23.

[37] 王万宾,赵洋毅,管堂珍,等.SWAT 模型在岩溶地区赤水河上游流域的污染特征模拟研究 [J]. 环境科学与技术, 2024,47(10):117−124.
Wang W B, Zhao Y Y, Guan T Z, et al. Simulation of pollution characteristics in upper reaches of Chishui River Basin in karst area using SWAT model [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(10):117−124.

[38] 尚朵朵,杨金礼,吴洋洋,等.基于 SWAT 模型的典型喀斯特流域水文响应与干旱评估——以赤水河流域为例 [J]. 水科学与工程技术, 2024,(6):1−5.
Shang D D, Yang J L, Wu Y Y, et al. Hydrological response and drought assessment of typical karst basin based on SWAT model: A case study of Chishui River Basin [J]. Water Science and Engineering Technology, 2024,(6):1−5.

[39] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(3):885−900.

[40] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(4): 1491−1508.

[41] 董姝含,贺章咪,王婉琦,等.土壤有机氮组分的年际变化及其对秸秆还田的响应 [J]. 应用生态学报, 2022,33(11):2963−2970.
Dong S H, He Z M, Wang W Q, et al. Interannual variation of soil organic nitrogen fractions and their response to straw returning [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(11):2963−2970.

作者简介：毕　杨(2001-),女,山东日照人,北京林业大学硕士研究生,主要从事环境规划与管理研究.发表论文 1 篇.Yang0806@bjfu.edu.cn.