

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. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.013

XU Yifan, CHEN Liangang, LAI Zhengqing, 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. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.013

基于入库负荷精细解析的面源污染排放特征识别

徐祎凡¹, 陈炼钢¹, 赖正清², 何常清³, 金秋¹, 陈黎明¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 南京师范大学, 江苏 南京 210023; 3. 江苏省城镇化和城乡规划研究中心, 江苏 南京 210018)

摘要:【目的】为厘清流域面源污染源结构、精细化解析面源污染负荷时空特征,【方法】以SWAT(Soil and Water Assessment Tool)流域面源污染模型为基础,选取代表性水文系列,结合入库污染负荷计算模型,构建了污染负荷量及入库强度的面源污染关键源区识别技术流程,并在数据条件较为完备的沙河水库流域进行验证。【结果】结果表明:沙河水库流域总氮(Total Nitrogen, TN)入库负荷总量为198.34 t/a,面源污染占比为86.53%,流域内茶园TN负荷量贡献率最大,占比为23.84%;TN负荷量在丰水年和特丰水年比枯水年上升58.06%和289.09%,在年内丰水期TN月均负荷量比平水期和枯水期分别高出75.24%和372.51%;河道削减TN负荷量为33.58 t/a,削减比例为14.48%;子流域TN入库产污强度变化范围为0.36~4.73 t/km²。面源污染排放入库低值区主要位于流域南部,高值区主要位于近库区域,沙河西和沙河东控制分区单位面积TN入库强度显著高于流域南部。【结论】针对高产污地类、高产污区域及高产污时段应提高面源污染防控力度;建立的技术流程可有效识别和科学解析流域面源污染关键源区,为流域水环境开展面源污染防治和生态适应性开发提供一定技术支持,使相关工作开展更加有的放矢。

关键词: 面源污染; SWAT模型; 总氮; 特征识别; 沙河水库

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0158-13



Identification of non-point source pollution emission characteristic based on fine detailed analysis of inflow pollution load

XU Yifan¹, CHEN Liangang¹, LAI Zhengqing², HE Changqing³, JIN Qiu¹, CHEN Liming¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Jiangsu 210029, Nanjing, China; 2. Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. Urbanization and Urban-Rural Planning Research Center of Jiangsu, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

收稿日期: 2024-02-24; 修回日期: 2024-04-30; 录用日期: 2024-05-15; 网络出版日期: 2024-06-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3209001); 广西重点研发计划(AB22035075, AB22080093)

作者简介: 徐祎凡(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事环境遥感、面源污染、污染物通量监测评估等研究。E-mail: xuyf@nhri.cn

通信作者: 陈炼钢(1981—), 男, 正高级工程师, 研究室主任, 博士, 主要从事河湖水量水质水生态模拟预警与调控研究。E-mail: lgchen@nhri.cn

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

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the structure of non-point source pollution in the watershed and conduct a detailed analysis of the spatial and temporal characteristics of non-point source pollution loads. [Methods] The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) watershed non-point source pollution model was used as a basis. Representative hydrological series were selected, and combined with an inflow pollution load calculation model. A technical process was developed to identify key non-point source pollution areas based on pollution load and inflow intensity. This process was verified in the Shahe Reservoir watershed, where data conditions were relatively complete. [Results] The results showed that the total inflow load of total nitrogen (TN) in the Shahe Reservoir watershed was found to be 198.34 t/a, with non-point source pollution accounting for 86.53% of this load. The largest contribution to the TN load came from tea gardens in the watershed, contributing 23.84%. The TN load during wet years and extremely wet years increased by 58.06% and 289.09%, respectively, compared to dry years. During the wet season, the average monthly TN load was 75.24% and 372.51% higher than in the normal and dry seasons, respectively. The river reduced the TN load by 33.58 t/a, with a reduction ratio of 14.48%. The variation in TN inflow pollution intensity across sub-watersheds ranged from 0.36 t/km² to 4.73 t/km². The low-value zones for non-point source pollution emissions were primarily located in the southern part of the watershed, while the high-value zones were concentrated near the reservoir. The inflow TN intensity per unit area in the Shahe West and Shahe East control sub-zones was significantly higher than in the southern part of the watershed. [Conclusion] Pollution control efforts should be strengthened in areas with high pollution yields, high pollution regions, and during high pollution periods. The established technical process can effectively identify and scientifically analyze key non-point source pollution areas in the watershed, providing technical support for non-point source pollution prevention and ecological adaptive development in watershed water environments. This will ensure more targeted and effective pollution control measures.

Keywords: non-point source pollution; SWAT model; total nitrogen; characteristic identification; Shahe Reservoir

0 引言

随着点源污染治理水平和强度的不断提高,面源污染越来越成为影响流域水环境质量提升的制约因素^[1-7]。面源污染具有空间位置难以识别定位,产生和输移受到自然地理条件、水文气候特征等因素的影响,特别是降水因素对流域水体环境影响具有延续性和滞后性等特点^[8-10]。通过收集分析全国污染源普查数据,2007年我国农业源总氮排放量占排放总量的57%,到2017年该数值有所降低,但仍占到排放总量的47%,这表明农业面源是我国当前乃至未来一段时期的重要污染源^[11]。针对这些问题,近年来,国家高度重视农业面源污染问题的治理工作,出台一系列政策法规强化面源污染的防控治理,并对面源污染防治工作提出更高要求。量化流域面源污染负荷的来源、结构、分布等特点将对防治工作有力有序开展起到至关重要的作用。

面源污染模型作为评估分析流域面源污染负荷时空分布、产污结构、输出强度的有力抓手,一直以来被广泛应用于相关研究中。常用的模型包括基于经验关系的输出系数法和基于机理关系的 SWAT 模型、AnnAGNPS 模型、HSPF 模型等^[12-19]。相较于其他模型,SWAT 模型能够有效模拟多种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复杂流域水文水质、沉积物及农业化学物质输出的影响,在面源污染防治方面具有很高的应用价值。借助 SWAT 模

型,国内外众多学者对流域面源污染进行评估分析。HAN 等^[20]通过改进的 SWAT 模型对九龙江流域 NH₄⁺ 输移进行模拟分析;WANG 等^[21]采用了 SWAT 模型和空间分析软件相结合的方法来揭示沱江流域典型非点源污染负荷的空间和时间分布特征;CHEN 等^[22]提出了一种通过整合 SWAT 模型和 IHA 指标来研究不同空间尺度下面源污染关键过程和影响因素的方法;MUSYOKA 等^[23]采用 SWAT 模型对奥地利 Petzenkirchen 地区土地管理及面源污染控制进行评估;SRINIVAS 等^[24]采用 SWAT 模型结合 6 种土地利用类型,分析了恒河流域 11 种水质参数,证明农业径流是影响河流 TN、TP 浓度变化的关键因素;FANG 等^[25]借助 SWAT 模型和土地利用类型多变量统计分析,明确了影响阿拉巴马州南部和佛罗里达州西北部水质变化的驱动因素和关键来源;ZEIGER 等^[26]通过 SWAT 模型模拟长时间序列的自然变化以及人类活动对岩溶流域水文过程、沉积物以及养分负荷的影响;WEI^[27]等采用 SWAT 模型对影响黄河水质安全的湟水流域面源污染进行了模拟分析,发现 TN 和 NH₄-N 主要来源分别为农业种植和畜禽养殖。

由此可见,SWAT 模型目前在流域面源污染负荷分析、污染源类型识别、管理措施效果评估等方面已有丰硕的研究成果,但其在以下几个方面研究仍存在一定欠缺:首先,由于时空差异等因素,SWAT 模型参数的灵敏度在不同时空尺度上存在不确定性^[28-29],因此建模数据的完备性和准确性对模型模拟结果的精

度影响较大;其次,由于面源污染的产生主要伴随降雨侵蚀^[30-32],污染负荷量大小常随水量(降雨量/径流量)的变化而正相关变化,因此选取代表水文系列对准确估算流域面源污染负荷量具有重要影响,但目前大部分研究中并未考虑这一因素;最后,相关针对流域内不同区域污染负荷量以及产污强度的分析普遍止步于进入江河湖库污染负荷总量、原位负荷量和产污强度,对流域不同区域原位污染负荷最终进入江河湖库的负荷量及强度未进行解析^[33-35],无法准确判断流域不同区域污染负荷对水环境的影响,妨碍了模拟结果在面源污染防治、流域土地利用开发中进一步发挥效能。

综上所述,在完备建模数据的基础上,基于代表性水文系列对流域面源污染排放特征进行模拟并深入分析流域不同区域进入水体污染负荷和强度的研究还相对薄弱。因此,本文针对以上问题,在构建 SWAT 面源污染模型的基础上,选取代表性水文系列,辅以实地采样监测,对流域面源污染源结构、污染负荷时间特征和空间特征进行精细化解析,建立流域内不同区域入库污染负荷量及入库污染强度的面源污染关键源区识别技术流程;并选取了建模条件较好的天目湖沙河水库流域开展实证研究,以期为流域面源污染的综合治理与修复、流域土地利用与开发提供技术支撑和科学依据。

1 方法与模型

针对上述问题,采用代表水文系列确定方法结合构建入库污染负荷计算模型来解决,从而更准确地识别流域面源污染排放特征及入库关键源区。

1.1 代表水文系列确定方法

为了控制与水量丰枯变化密切相关的面源排放,应选择与多年长系列水文过程变化特征接近的水雨情代表系列,才能与面源排放的动态变化特征相匹配。研究中根据流域水文站点和雨量站近 40 a 长系列的逐日监测数据,沙河水库流域多年平均降雨量为 1 248 mm,其中近 10 a 中 2010—2015 年的降雨过程最能代表沙河水库流域多年平均降雨情况(见图 1),2010—2015 年沙河水库站年平均降雨量为 1 278 mm。

沙河水库流域降雨年内分配具有明显的季节特征:丰水期(6—8 月)平均降雨量 522 mm,约占常年雨量的 42%;枯水期(10 月—次年 2 月)平均降雨量 305 mm,仅占常年雨量的 24%左右;平水期(3—5 月,9 月)平均降雨量 421 mm,约占常年雨量的 34%。

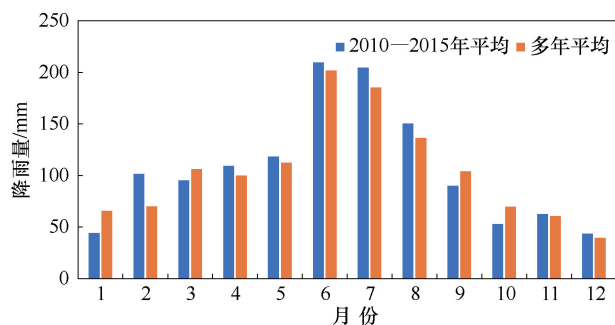


图 1 代表水文系列的降雨量

Fig. 1 Rainfall of representative hydrological series

根据《水文情报预报规范》(GB 22482—2008),天目湖沙河水库流域丰、平、枯水年的降雨量划分标准如表 1 所列。根据这一划分标准,1978—2017 年 40 a 序列中,丰水年 9 个、占比 22.5%,平水年 17 个、占比 42.5%,枯水年 14 个、占比 35.0%。

表 1 沙河水库流域丰、平、枯水年的降雨量划分标准

Table 1 Rainfall division standards for wet, normal, and dry years in Shahe Reservoir Watershed

年型	特丰水年	丰水年	平水年	偏枯水年	枯水年
降雨量/mm	≥1 500	1 375~1 500	1 125~1 375	1 000~1 125	≤1 000

2016 年降雨量高达 2 398.1 mm(见表 2),接近多年平均降雨量的 2 倍,为沙河水库流域有测站记录以来最大年份,故将其作为特丰水年的极端设计条件。

表 2 设计水文条件

Table 2 Design hydrological conditions

年份	年型	降雨量/mm	沙河入库径流量/万 m ³
2010	平水年	1 179.6	6 948.33
2011	枯水年	1 089.6	5 413.35
2012	平水年	1 369.6	6 904.31
2013	枯水年	1 079.5	3 211.67
2014	平水年	1 360.2	7 177.13
2015	丰水年	1 590.8	8 240.55
2016	特丰水年	2 398.1	20 261.24
2010—2015 平均	多年平均	1 278.0	6 315.89

1.2 入库污染负荷计算模型

采用面源污染模型模拟计算各子流域原位污染负荷及子流域出口负荷量等计算结果。考虑流域内不同区域原位污染负荷量与入库负荷量差值主要源于河道输移过程中污染物降解、沉降等因素,为进一步模拟各子流域面源污染的原位产生—河道输移—入库汇集过程,精准支撑流域内不同区域面源污染治理优先顺序和土地资源开发利用方式,基于河流—维水质模型解析解对流域面源污染物输移降解过程进行概化计算,即

$$L_x = L_0 \exp\left(-k \frac{x}{u}\right) \quad (1)$$

式中, L_0 为初始断面污染物负荷量(kg); x 为沿纵向河段的距离(m); L_x 为流经 x 距离后的污染物负荷量(kg); u 为河道断面间平均流速(m/s); k 为污染物随输移时间的综合降解系数(d^{-1})。

对于流域内各级河网水系, 很难获取污染物迁移过程中的水体流速, 为简化计算, 设 $K=k/u$, 将公式(1)进一步转化为

$$L_x = L_0 \exp(-Kx) \quad (2)$$

通过模型模拟的流域入库负荷量 L_x 、原位产污量 L_0 、不同子流域距入库河口距离 x , 可以推算出各个子流域污染负荷随输移距离变化的综合降解系数 K (km^{-1}), 进而可以计算出各子流域入库污染负荷量以及入库产污强度。

采用以上构建的技术流程, 通过选取代表性水文系列, 结合流域面源污染模型模拟流域污染负荷量, 进一步演算子流域入库污染负荷量, 可以更加精准地识别对湖库水体环境影响较大的时空区域。

2 沙河水库流域面源污染估算

借助上述构建的流域污染负荷量及入库污染强度面源污染关键源区识别技术流程, 在沙河水库流域进行实例研究。

2.1 流域概况

沙河水库流域是天目湖流域的组成部分[见图2(a)], 位于江苏、浙江、安徽三省交界, $31^{\circ}08'N-31^{\circ}20'N$ 、 $119^{\circ}21'E-119^{\circ}29'E$ 之间。流域面积约为 154.5 km^2 , 其中位于江苏省境内溧阳市面积约为 126.1 km^2 , 安徽省广德市面积约 28.4 km^2 。沙河水库是一座以防洪、城镇供水、农业灌溉为主, 兼顾旅游、渔业、发电等综合利用功能的大(2)型水库, 1961年建成蓄水, 水面面积约为 11 km^2 , 总库容 $1.09 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。流域水系主要包括中田河、徐家园河、横塘河、平桥河、杨村杨庄河等, 属于太湖流域湖西区南部的南河水系。流域年均降雨量 1251 mm , 汛期(6—9月)平均降雨量为 633 mm , 占全年雨量的50%左右。流域内常住总人口 4.88 万人, 年旅游人数 480 万人次, 水库区域土地面积 181.85 km^2 , 水源区经济以种植业和旅游业为主。

沙河水库流域主要测站包括2个水文站(沙河水库和中田舍)、1个雨量站(平桥站)以及3个水质站(鲢鱼桥、潘村桥和徐家园), 图2(b)为沙河水库流域水系、控制分区及测站分布。

2.2 流域地物类型及产污监测

沙河水库流域土地利用类型时空分布、面积和占比情况(不含沙河水库)如图2(c)所示、表3所列。流域内地物类型面积占比最高为林地, 占流域面积的44.76%, 分布主要集中于流域南部以及库区东北临库面; 其次为园地, 占流域面积的26.45%, 主要分布在流域中部; 流域内耕地面积占比为7.38%, 主要零散分布在流域中部。茶叶种植业作为溧阳市重要的特色产业之一, 茶园面积在流域内占比为7.67%, 主要分布在流域中部。

表3 沙河水库流域土地利用分类情况

Table 3 Classification of land use in Shahe Reservoir Watershed

地物类型	面积/ km^2	占比/%
交通用地	3.29	2.32
耕地	10.48	7.38
林地	63.56	44.76
草地	0.34	0.24
商业用地	0.56	0.39
工矿用地	2.40	1.69
城镇居民区	0.37	0.26
农村居民区	4.48	3.16
公共用地	0.77	0.54
裸地	0.02	0.01
园地	37.56	26.45
水域	7.26	5.11
茶园	10.89	7.67

根据土地利用数据并结合实际地形等因素, 选取了流域内不同地物类型设置采样点共计20个, 开展了5次采样监测, 2019年汛末监测1次, 2020年梅雨季节监测4次。基于监测数据发现, TN面源污染排放浓度占前三的地物类型分别为: 茶园、工矿用地和耕地, 坡面产水TN平均浓度为 8.15 mg/L 、 4.29 mg/L 、 4.27 mg/L 。茶园因其较高的施肥量, 造成TN污染排放浓度远高于其他地物类型; 工矿用地由于地表裸露, 水土流失严重, 导致TN排放浓度与耕地接近(见表4)。

2.3 面源污染模型构建及率定验证

SWAT模型是美国农业部农业中心开发的基于物理过程的流域—子流域—水文响应单元三级分布式水文模型, 它被用来评价土地利用管理等人类活动对流域水循环、泥沙、农业污染物迁移的长期影响和作用。SWAT模型模拟的流域水文过程分为水循环的陆面部分(产流和坡面汇流部分)和水循环的水面部分(河道汇流部分)。前者控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质和化学物质等的输入量; 后者

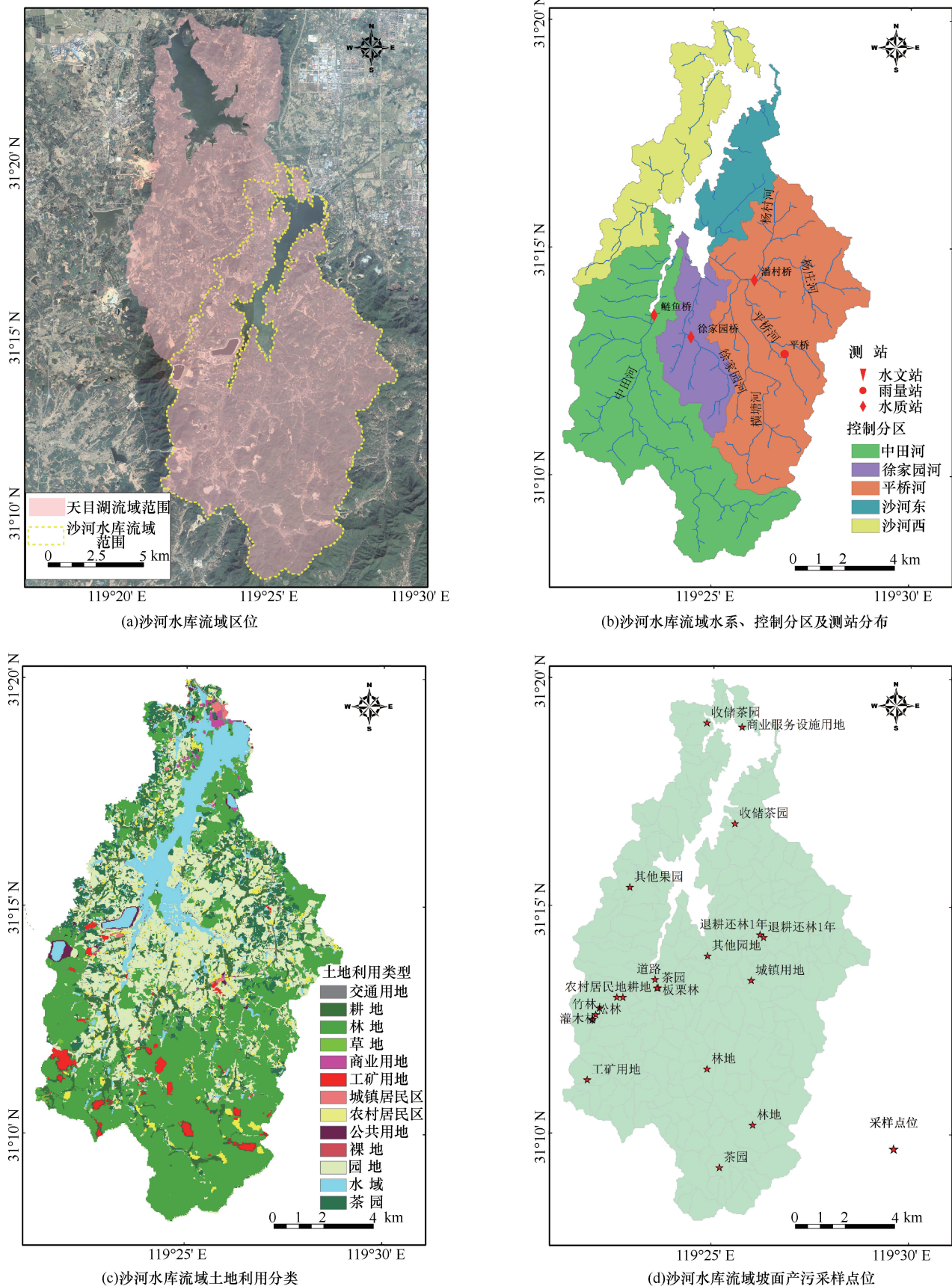


图2 沙河水库流域基本情况

Fig. 2 Basic information of Shahe Reservoir watershed

表 4 实测流域不同地物 TN 排放浓度

Table 4 Measured TN emission concentrations for different land covers in the watershed

地物类型	茶 园	工矿用地	耕 地	商业服务设施用地	道 路	灌木林	其他园地	松 林
TN/mg · L ⁻¹	8.15	4.29	4.27	3.56	3.04	2.84	2.55	2.26
地物类型	竹 林	退耕还林	收储茶园	退耕还林 1 a 后	混合林	板栗林	农村居民地	城镇用地
TN/mg · L ⁻¹	2.26	2.06	1.97	0.99	0.91	0.75	0.29	0.21

决定水、沙等物质从河网向流域出口的输移运动, 整个水循环系统遵循水量及物质量平衡规律。

为获得相对可靠准确的模型模拟结果, 研究中充分收集了沙河水库流域的各类建模数据资料(见表 5), 主要包括: 流域地形数据; 土地利用分类数据; 土壤数据; 降雨、气温、湿度、风速等气象数据; 河流、水库等数字化水系数据; 遥感影像数据; 河流流量、水质等水文数据; 干湿沉降数据; 农村生活排污数据; 畜禽养殖排污数据; 青虾等水产养殖排污数据; 农业管理措施调查数据。其中点源数据主要为农村居民点的集中式污水处理设施、畜禽养殖以及青虾养殖, 根据收集设施数量、位置、人口、排出污水污染物浓度以及养殖规模等进行设置。所有地理空间数据统一采用 CGCS2000 坐标系, 高斯-克吕格投影, 将流域划分为 236 个子流域进行计算模拟。

表 5 SWAT 模型建模数据说明

Table 5 SWAT model data description

数据类型	数据描述
DEM	1 : 10 000
土地利用分类数据	全国国土调查矢量图层
土壤数据	1 : 50 000 土壤图数字化
气象数据	雨量、气温、湿度等逐日观测数据(2008—2018 年)
水系与影像	哨兵 2 卫星影像水系数字化
水文数据	河流逐日流量观测数据(2008—2018 年)
水质数据	2013—2017 年水质数据
干湿沉降数据	大气气干沉降、湿沉降观测数据
点源数据	农村生活排污监测、畜禽养殖排污统计、青虾等水产养殖排污统计
农业管理措施数据	耕地、茶园、果园耕作措施调查

选择 2008—2009 年作为模型预热期, 运行 2010—2017 年的模拟结果。流量观测站点位于中田舍断面, 选择 2010—2012 年作为流量模拟率定期, 2013—2017 年作为验证期。SWAT 模型参数包括依据试验观测数据设定和模型自主率定两部分构成, 参数主要包括 SCS 径流曲线系数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)以及土层有效含水量(SOL_AWC)等, 选择决定系数(R^2)、纳什系数(NSE)和百分比偏差(Pb)作为模型模拟精度验证指标。

模型流量率定验证结果如图 3 所示, 在率定期模型 R^2 、NSE 以及 Pb 分别为 0.88、0.87 和 12.00%; 在验证期模型 R^2 、NSE 以及 Pb 分别为 0.81、0.78 和 11.00%。模型流量模拟结果良好, 可进一步对沙河水库流域 TN 负荷量产生和输移进行率定验证。

模型水质观测站点位于中田河(鲢鱼桥站)、平桥-杨村杨庄河(潘村桥站)、徐家园河(徐家园站)3 条河流, 选择鲢鱼桥站数据用于 TN 模拟的参数率定, 主要包括降雨中氮的浓度(RCN)、土壤层中初始硝酸盐浓度(SOL_NO₃)以及有机氮富集比(ERORGN)等, 徐家园站和潘村桥站用于验证。鲢鱼桥站率定结果 R^2 、NSE 以及 Pb 分别为 0.76、0.69 和 22.76%, 潘村桥站验证精度为 R^2 、NSE 以及 Pb 分别为 0.77、0.74 和 -5.46%, 徐家园站验证精度分别为 0.80、0.80 和 7.98%。沙河水库流域 SWAT 模型具有较好的模拟精度, 能应用于该流域面源污染负荷量时空分布评估、情景模拟及预测(见图 4)。

2.4 流域控制区划分

根据对沙河水库流域地形、库区、库湾以及入库河流分布等情况进行分析, 将流域划分为 5 个控制分区。中田河控制分区主要对应控制中田河流域; 徐家园河控制分区主要对应控制徐家园河流域; 横塘-平桥-杨村杨庄河控制分区主要控制横塘河、平桥河以及杨村杨庄河流域; 沙河东控制分区主要控制沙河水库东岸入库河道流域; 沙河西控制分区主要控制沙河水库西岸入库河道流域, 如图 2(b)所示、表 6 所列。

表 6 流域控制分区划分

Table 6 Division of watershed control zones

控制分区	面积/km ²	占比/%
中田河	50.01	35.03
徐家园河	13.32	9.33
横塘-平桥-杨村杨庄河	48.32	33.85
沙河东	10.72	7.51
沙河西	20.38	14.28

3 结果与分析

基于验证后的沙河水库流域面源污染模型结合

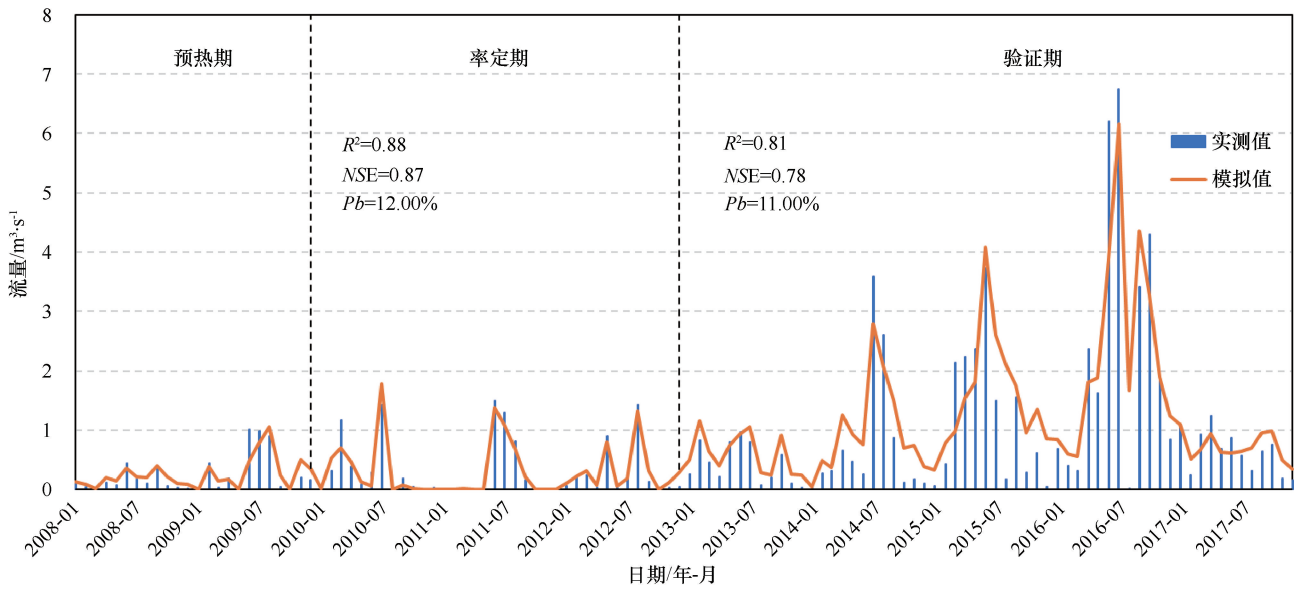


图3 模型流量模拟校正与验证

Fig. 3 Model flow simulation calibration and validation

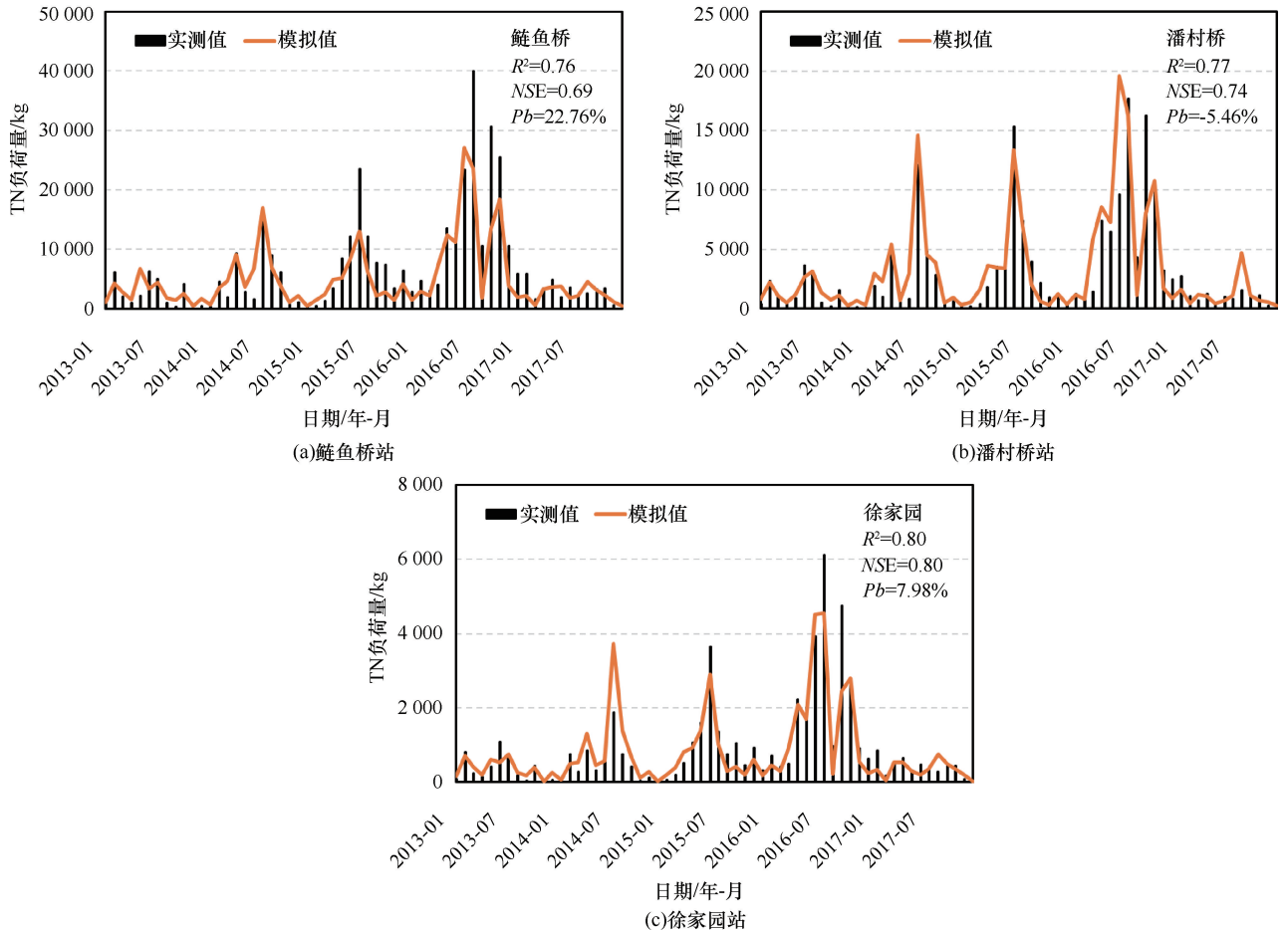


图4 TN负荷量的模拟率定和验证

Fig. 4 TN simulation, calibration, and validation

入库污染负荷计算模型, 辅以实测数据, 采用2010—2015年代表水文系列开展沙河流域面源污染

源结构、污染负荷时间特征和空间特征精细化解析。

3.1 流域面源污染源构成

根据模型结果分析,沙河水库流域 TN 入库负荷总量为 198.34 t/a,其中,面源污染占比为 86.53%,合计 171.62 t/a;点源污染占比为 13.47%,合计为 26.72 t/a。流域 TN 污染负荷量主要来源包括:面源污染中的茶园、林地、园地、耕地和点源污染中的农村生活污水(见表 7)。沙河水库流域作为传统的茶园种植区域,其范围内存在大量茶园,面积为 10.89 km²,根据现场调研和产污监测,茶园施肥量和单位面积产污量均远高于其他地物类型,通过模型演算也印证相关结论,流域内茶园的 TN 负荷量贡献率最大,达到了 23.84%,共 47.28 t/a;农村居民点作为点源污染,其生活污水 TN 负荷量为 20.96 t/a,占比为 10.57%。沙河水库流域面源 TN 污染负荷量远高于点源,面源污染在影响水库水环境质量因素中占主导地位。

表 7 沙河水库流域不同地物 TN 负荷量

Table 7 TN load for different land covers in Shahe

Reservoir watershed

来源	TN 负荷量/t·a ⁻¹	占比/%
茶园	47.28	23.84
林地	45.38	22.88
园地	38.02	19.17
耕地	26.43	13.33
农村居民点	20.96	10.57
建设用地	14.51	7.32
青虾养殖	3.21	1.62
畜禽养殖	2.55	1.29

3.2 流域面源污染时间特征

以面源污染为主要污染来源区域,其重要特征是入库污染负荷量与流域内降水量密切相关。通过面源模型结合代表 2010—2015 年水文系列演算发现,在年际过程中,沙河水库流域丰水年 TN 负荷量为 214.94 t/a,特丰水年上升至 529.13 t/a,比枯水年分别上升 58.06%和 289.09%。5 个控制分区不同水文年型的 TN 入库负荷量如表 8 所列,沙河水库流域 5 个控制分区中,横塘-平桥-杨村杨庄河控制分区不

同水文年型下 TN 负荷量变幅最大,丰水年和特丰水年相较枯水年负荷量分别上升 71.81%和 346.77%;沙河西控制分区丰水年变幅最小,相较枯水年负荷量上升 43.73%;沙河东控制分区特丰水年变幅最小,相较枯水年变幅为 171.00%。

年内过程中,沙河水库流域 TN 入库负荷量变化同样与降水量密切相关,丰水期(6—8 月)TN 月均负荷量明显高于平水期(3—5 月,9 月)和枯水期(10 月—次年 2 月)。多年平均来水条件下,流域丰水期 TN 月均负荷量为 31.28 t,而平水期和枯水期 TN 月均负荷量分别为 17.85 t 和 6.62 t,丰水期 TN 月均负荷量比平水期和枯水期分别高出 75.24%和 372.51%。

3.3 流域面源污染空间特征

通过模型计算,流域 TN 原位负荷总量为 231.92 t/a,236 个子流域 TN 原位负荷量变化范围为 0.02~5.11 t/a[见图 5(a)]。TN 入库负荷量相较原位负荷量,经河道削减 33.58 t/a,削减比例为 14.48%。采用入库污染负荷计算模型[见式(2)],对流域河道污染负荷削减特征空间分布进行模拟分析[见图 5(b)],沙河水库子流域 TN 入库负荷削减量变化范围为 0.01~0.81 t/a,子流域 TN 入库负荷削减比例为 0.17%~38.87%。子流域原位污染负荷与入库污染负荷存在强相关性, R^2 为 0.97(见图 6)。TN 负荷削减量及比例空间分布特征主要受子流域入库河道长度及原位产污量等因素影响,两者总体呈现距沙河水库距离由远及近,TN 削减量和削减比例由高到低的变化规律[见图 5(b)(c)]。

根据控制分区分析,流域 TN 原位负荷量最高的为横塘-平桥-杨村杨庄河,原位负荷量为 76.96 t/a,占比为 38.67%;TN 入库负荷最高的为中田河控制分区,入库负荷量为 63.02 t/a,占比为 31.77%;横塘-平桥-杨村杨庄河和中田河控制分区的 TN 河道削减量分别为 14.05 t/a 和 8.66 t/a,削减量分别占各自控制分区原位产污量的 18.32%和 12.08%。中田河和横塘-平桥-杨村杨庄河控制分区均占流域面积的 30%以上;通过对各控制分区内地物类型面积分

表 8 沙河水库流域不同水文年型 TN 负荷量

Table 8 TN load in Shahe Reservoir watershed for different hydrological years

水文年型	沙河流域	中田河	徐家园河	横塘-平桥-杨村杨庄河	沙河东	沙河西
多年平均	198.34	63.02	17.42	62.64	17.54	37.71
丰水年	214.94	68.66	18.10	68.05	19.10	41.03
平水年	198.13	65.66	17.66	61.67	17.02	36.13
枯水年	135.99	43.33	11.48	39.61	13.02	28.55
特丰水年	529.13	179.89	49.78	176.96	35.29	87.22

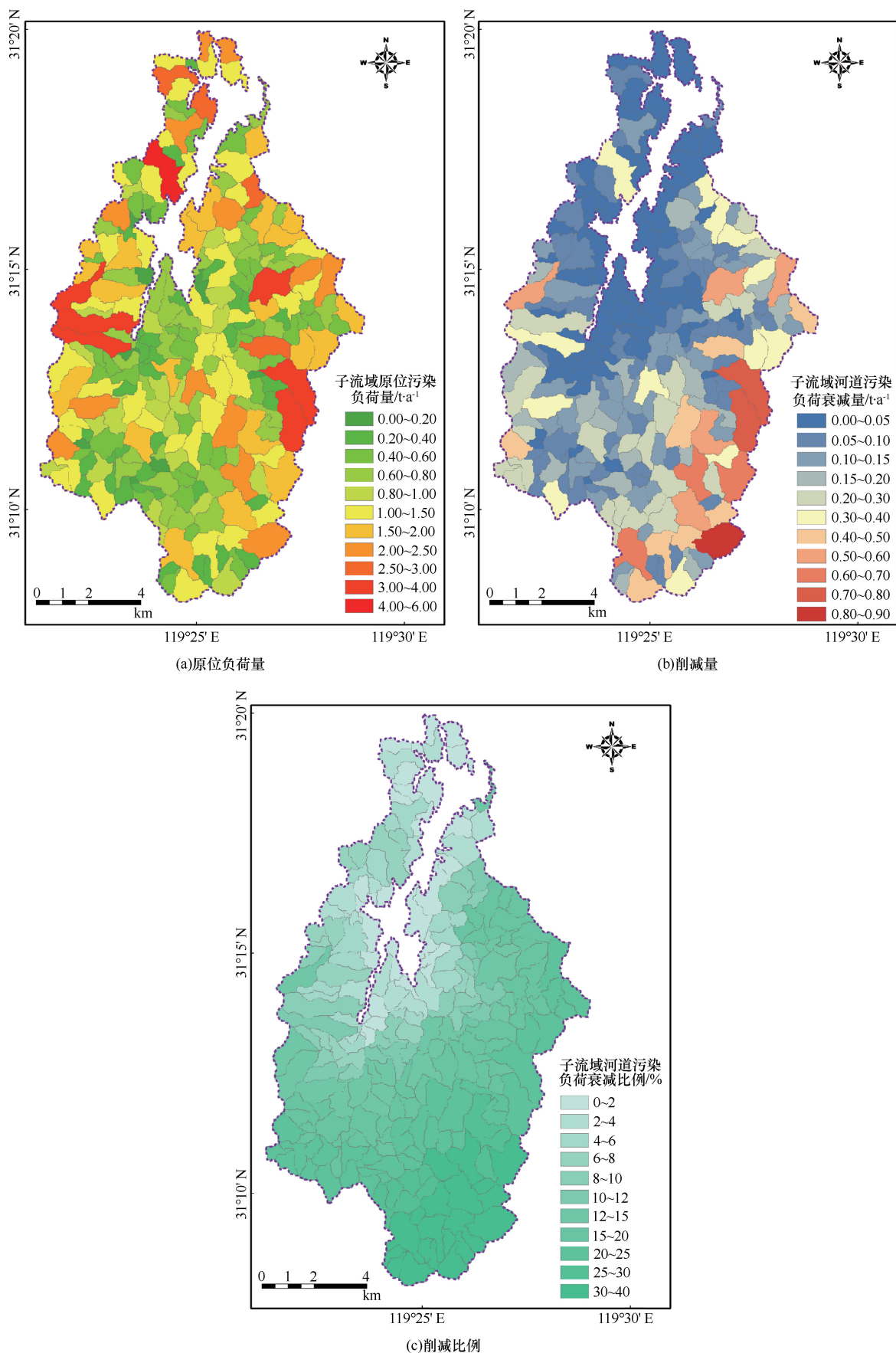


图5 沙河水库流子流域污染负荷

Fig. 5 Pollution load in sub-watersheds of Shahe Reservoir

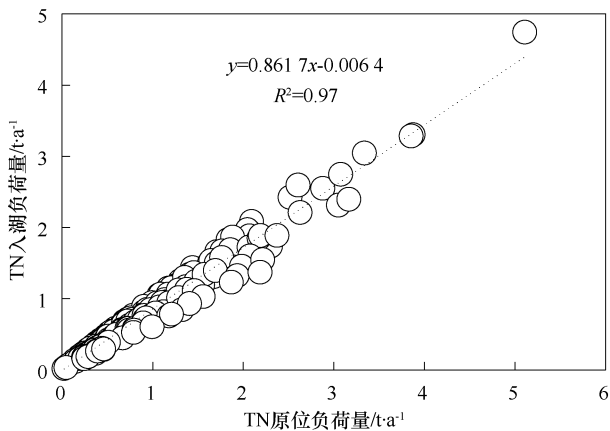


图6 沙河水库流域子流域原位污染负荷与入库污染负荷关系

Fig. 6 Relationship between in-situ pollution load and inflow pollution load in sub-watersheds of Shahe Reservoir watershed

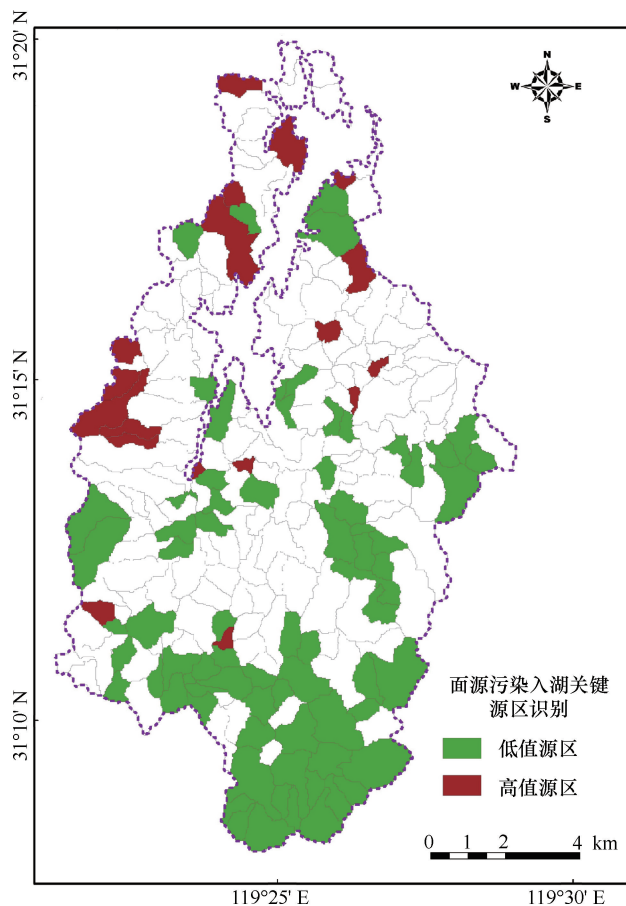
析,中田河控制分区园地、耕地面积分别为 9.08 km^2 和 3.33 km^2 , 占流域同类地物面积比例为 24.17% 和 31.74% , 横塘-平桥-杨村杨庄河控制分区园地、茶园面积分别为 14.02 km^2 和 3.75 km^2 , 占流域同类地

物面积比例为 37.33% 和 34.44% , 这几类地物均为 TN 产污负荷量较大的地物类型。

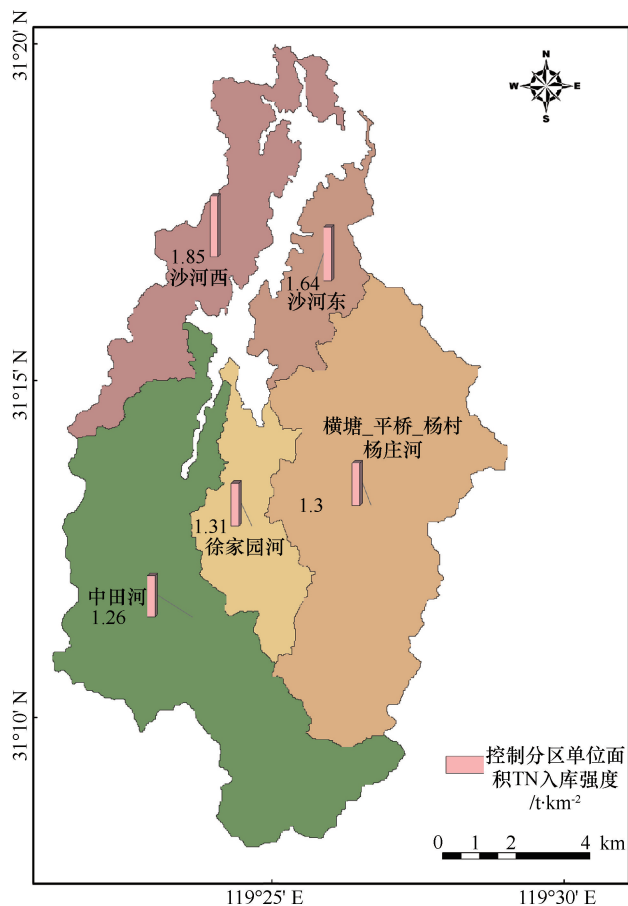
3.4 流域面源污染排放入库重点区域识别

通过计算子流域 TN 入库产污强度,对流域面源污染排放入库重点源区进行识别,结果如图 7(a) 所示。根据实测资料,将 TN 入库强度 $\leq 1 \text{ t/km}^2$ 的区域确定为低值区,主要位于流域南部区域;入库强度 $\geq 2.5 \text{ t/km}^2$ 的区域确定为高值区,主要位于流域近库区域。子流域 TN 原位产污强度变化范围为 $0.36 \sim 5.49 \text{ t/km}^2$, TN 入库产污强度变化范围为 $0.36 \sim 4.73 \text{ t/km}^2$ 。结合流域土地利用类型[见图 2(c)]分析,沙河水库流域南部地物类型以林地为主,面源污染产污强度相对较低;沙河西及沙河东区域因靠近库区, TN 在河道输移过程中沿程削减量较少,并存在大面积茶园等高产污地物类型,面源污染产污强度相对较高。

根据控制分区分析[见图 7(b)],沙河西和沙河东控制分区单位面积 TN 入库强度为 1.85 t/km^2 和 1.64 t/km^2 ,显著高于沙河水库流域南部三个控制分



(a)入库关键源区



(b)控制分区单位面积入库强度

图7 沙河水库流域面源污染排放识别

Fig. 7 Identification of non-point source pollution emission in Shahe reservoir watershed

区;中田河控制分区单位面积 TN 入库强度最低,为 $1.26 \text{ t}/\text{km}^2$ 。在多年平均降水条件下,沙河水库流域应进一步加强对近库区(沙河东及沙河西控制分区)面源污染治理力度,降低控制分区单位面积 TN 入库产污强度。

4 结果讨论

基于机理关系的 SWAT 模型搭建需要较为完备的输入数据条件,包括气象、土壤、地形、土地利用和农业管理等数据,同时本文构建的污染负荷量评估及入库强度面源污染关键源区识别技术流程在此基础上需要较长的水文数据积累,以便确定研究区具有代表性的水文系列,从而准确评估区域不同水文年型下的面源污染负荷量产生和输移情势。而沙河水库流域作为我国东南湿润地区典型丘陵山区,由于其数据条件的完备性,此前已有学者开展过相关研究^[36-37],采用了包括输出系数法、基于格网模型和子流域模型相结合的方法等多种模拟手段,对沙河水库流域氮磷面源污染状况进行分析。对比前人研究成果,本研究中的监测结果(不同地物 TN 排放强度)和模型模拟结果(TN 入库负荷总量、TN 原位负荷总量)与李恒鹏等^[37]相关研究较为接近,侧面印证了本研究方法的合理性和模拟结果的可靠性。而输出系数法不适合用于分析污染负荷量在时间或空间上的详细变化,并且通常不考虑环境条件,如气象条件、地形等对污染扩散和转化的影响,因此研究中不对其模拟结果进行对比分析。

本研究构建的面源污染关键源区识别技术流程可提升面源污染模型应用效能。通过代表水文系列确定方法提高了面源污染模型模拟结果的代表性,避免了降水异常年份导致面源污染模拟结果偏离现实的情况;通过入库污染负荷计算模型克服了传统面源污染研究止步于子流域原位产污强度、负荷量和流域总入库负荷的问题,相对精确解析了各子流域水库污染负荷量,并且计算便捷。面源污染排放特征识别是有效提高流域水环境质量的前提和基础,技术流程识别的关键产污源区可为下一步面源污染治理提供依据,入库污染负荷低值区则可作为流域生态适应性开发备选区域。

近年来,随着天目湖流域退耕还林、林茶收储、农村生活污水设施等治理工程的投入,天目湖流域水质得到了一定改善,但开发建设与水质保护的现实矛盾依然存在,成为阻碍天目湖地区兑现生态产品价值、实现高质量发展的问题症结。本研究解析了沙河

水库流域面源污染源结构、污染负荷时间特征和空间特征,识别关键产污源区和入库污染负荷低值区,在下一步研究中,应将相关成果与国土空间生态修复和水环境质量提升相结合,通过强化治理面源污染排放入库重点区域,合理规划流域国土空间保护、开发、利用、修复等各类活动,从而推动流域水环境质量提升。

5 结论

本研究通过采用代表性水文系列,结合入库污染负荷计算模型,构建了污染负荷量及入库强度的面源污染关键源区识别技术流程,并在建模数据条件较为完备的沙河水库流域进行实例验证。

(1)沙河水库流域 TN 污染入库负荷量总量为 $198.34 \text{ t}/\text{a}$,面源污染占比为 86.53% ,合计 $171.62 \text{ t}/\text{a}$,点源污染占比为 13.47% ,合计为 $27.62 \text{ t}/\text{a}$ 。面源污染在影响沙河水库流域水环境质量因素中占主导地位。面源污染中,茶园、林地和园地三类地物类型 TN 污染负荷量贡献率最大,三者合计占比为 65.89% 。

(2)流域面源污染负荷量在年际间差异较大,丰水年和特丰水年比枯水年 TN 负荷量上升 58.06% 和 289.09% ,不同控制分区在不同降水条件下, TN 负荷量变化幅度不同;年内间,丰水期流域 TN 污染负荷量显著高于枯水期和平水期。多年平均来水条件下,流域河道削减 TN 负荷总量为 $33.58 \text{ t}/\text{a}$,削减比例为 14.48% ;子流域 TN 入库负荷削减比例为 $0.17\% \sim 38.87\%$ 。因控制区域面积较大且高产污地物类型占比较高,横塘-平桥-杨村杨庄河控制分区 TN 原位负荷量最高,占比为 38.67% ;中田河控制分区 TN 入库负荷量最高,占比为 31.77% 。

(3)流域面源污染排放入库低值区主要位于流域南部,高值区域主要位于流域近库区域。子流域 TN 入库产污强度变化范围为 $0.36 \sim 4.73 \text{ t}/\text{km}^2$;沙河西和沙河东控制分区单位面积 TN 入库强度为 $1.85 \text{ t}/\text{km}^2$ 和 $1.64 \text{ t}/\text{km}^2$,显著高于沙河水库流域南部 3 个控制分区。

(4)采用的面源污染关键源区识别技术流程厘清了流域面源污染源结构、污染负荷时间特征、空间特征,识别了流域面源污染排放入库重点区域。流域内需要加强面源污染治理的对象主要为茶园和园地;在丰水年和年内丰水期,应强化治理力度,提高治理水平;沙河水库流域面源污染关键源区主要集中于沙河西和沙河东控制分区。研究建立的技术流程可为开展

流域面源污染防治和生态适应性开发与保护提供一定技术支持。

参考文献 (References):

- [1] NOVOTNY V, OLEM H. Water quality: Prevention, identification and management of diffuse pollution[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(2): 383.
- [2] JUNG H, LEE J, YOO J, et al. Improving the accuracy of nitrogen estimates from nonpoint source in a river catchment with multi-isotope tracers[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 171016.
- [3] ZOU L, LIU Y, WANG Y, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China; 1978—2017[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400.
- [4] ZHANG X, QI Y, LI H, WANG X, et al. Assessing the response of non-point source nitrogen pollution to land use change based on SWAT model[J]. *Ecological Indicators*. 2024, 158: 111391.
- [5] 肖宇婷, 姚婧, 谌书, 等. 沱江流域总氮面源污染负荷时空演变[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3773-3784.
XIAO Yuting, YAO Jing, CHEN Shu, et al. Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3773-3784.
- [6] 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 等. 红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5394-5404.
FANG Zhida, SU Jingjun, ZHAO Hongtao, et al. Output characteristics of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution of typical land use in a micro-watershed in hilly red soil region[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5394-5404.
- [7] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1839-1846.
LI Minglong, JIA Mengdan, SUN Tiancheng, et al. Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1839-1846.
- [8] VAREKAR V, YADAV V, KARMAKAR S. Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111342.
- [9] 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 等. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4445-4453.
KONG Peiru, CHEN Liding, SUN Ranhao, et al. Identification and optimized simulation of non-point source pollution risk patterns in the Haihe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4445-4453.
- [10] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5): 937-946.
CUI Chao, LIU Shen, ZUI Limei, et al. Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi River Basin, Kingshan county[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 937-946.
- [11] 胡钰, 林煜, 金书秦. 农业面源污染形势和“十四五”政策取向: 基于两次全国污染源普查公报的比较分析[J]. *环境保护*, 2021, 49(1): 31-36.
HU Yu, LIN Yu, JIN Shuqin. The situation of agricultural non-point source pollution and the policy orientation of the 14th Five-Year Plan: Based on the comparative analysis of two pollution census bulletins[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(1): 31-36.
- [12] 任智慧, 赵春发, 王青青, 等. 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟: 以南京市云台山河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1): 174-184.
REN Zhihui, ZHAO Chunfa, WANG Qingqing, et al. Characteristics and simulation of nitrogen and phosphorus in complex watersheds: A case study in the Yuntaishan River Basin in Nanjing City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 174-184.
- [13] 向鑫, 敖天其, 肖钦太. 基于 SWAT 模型的小流域非点源污染负荷分布模拟研究[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(6): 41-44.
XIANG Xin, AO Tianqi, XIAO Qintai. Simulation of non-point source pollution load distribution in small watershed based on SWAT model[J]. *Water Resources of Power*, 2022, 40(6): 41-44.
- [14] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 62-67.
WANG Yiran, DING Wenfeng, ZHANG Guanhua. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang Watershed based on SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 62-67.
- [15] 张水锋, 张金池, 庄家尧, 等. 长三角小流域 AnnAGNPS 模型参数敏感性及其适用性评价[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 183-192.
ZHANG Shuifeng, ZHANG Jinchi, ZHUANG Jiayao, et al. Parameters sensitivity and applicability evaluations of AnnAGNPS model in a small watershed of the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2021, 45(3): 183-192.
- [16] 赵串串, 冯倩, 侯文涛, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的灞河流域非点源污染模拟研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(3): 317-322.
ZHAO Chuanchuan, FENG Qian, HOU Wentao, et al. Simulation of non-point source pollution based on AnnAGNP model in Bahe River Basin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(3): 317-322.
- [17] 孙滔滔, 赵鑫, 尹魁浩, 等. 基于 HSPF 模型的东江流域氮磷污染研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(4): 39-43.
SUN Taotao, ZHAO Xin, YIN Kuihao, et al. Dongjiang River HSPF Model for evaluating nutrient pollution [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020(4): 39-43.
- [18] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 等. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析及其预测[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 862-872.

- ZHANG L K, ZUO Q T, ZHONG T, et al. Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe River basin based on SWAT [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(5): 862-872.
- [19] 刘林娟. 洋河流域分布式 SWAT 水文模型研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2023, 6(4): 61-63.
- LIU L J. Study on distributed SWAT hydrological model in Yanghe River Basin[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023, 6(4): 61-63.
- [20] HAN F, TIAN Q, CHEN N, et al. Assessing ammonium pollution and mitigation measures through a modified watershed non-point source model[J]. *Water Research*, 2024, 254: 121372.
- [21] WANG Y, HUA C, FAN M, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of typical pollution loads based on SWAT model across Tuojiang River watershed located in Sichuan Province, Southwest of China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(7): 865.
- [22] CHEN L, XU Y, LI S, et al. New method for scaling nonpoint source pollution by integrating the SWAT model and IHA-based indicators [J]. *Journal of environmental management*, 2022, 325: 116491.
- [23] MUSYOKA F K, STRAUSS P, ZHAO G, et al. Evaluating the impacts of sustainable land management practices on water quality in an agricultural catchment in Lower Austria using SWAT[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195: 512.
- [24] SRINIVAS R, SINGH A P, DHADSE K, et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact of non-point source pollution in the riverine ecosystem[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118963.
- [25] FANG S, DEITCH M J, GEBREMICAEL T G, et al. Identifying critical source areas of non-point source pollution to enhance water quality: Integrated SWAT modeling and multi-variable statistical analysis to reveal key variables and thresholds[J]. *Water Research*, 2024, 253: 121286.
- [26] ZEIGER S J, OWEN M R, PAVLOWSKY R T. Simulating non-point source pollutant loading in a karst basin: A swat modeling application[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 785(4), 147295.
- [27] TAO W, WEI J, WANG N L. The characteristics of non-point source nitrogen pollution in the lower reaches of Huangshui Basin in Western China based on SWAT Model[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2023, 234(8). DOI: 10.1007/s11270-023-06480-9.
- [28] HE Yan, WANG Pengcheng, SHENG Hao, et al. Sustainability of riparian zones for non-point source pollution control in chongming island; Status, challenges, and perspectives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020b, 244: 118804.
- [29] CHEN Lei, CHEN Shibo, LI Shuang, et al. Temporal and spatial scaling effects of parameter sensitivity in relation to non-point source pollution simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 36-49.
- [30] 桂晗亮, 张春萍, 武治国, 等. HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 115-120.
- GUI Hanliang, ZHANG Chunping, WU Zhiguo, et al. Application of HSPF in hydrological simulation in tropical coastal watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 115-120.
- [31] 徐光志, 邵志江, 汪涛, 等. 川中丘陵区不同下垫面集水区氮磷流失特征[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(7): 3334-3342.
- XU Guangzhi, SHAO Zhijiang, WANG Tao, et al. Patterns of nitrogen and phosphorus losses in two catchments with contrasting underlying surfaces[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(7): 3334-3342.
- [32] 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.
- [33] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1421-1430.
- CAI Jingzhou, FAN Xianpeng, HUANG Min, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1421-1430.
- [34] 马广文, 王圣瑞, 王业耀, 等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1285-1291.
- MA Guangwen, WANG Shengrui, WANG Yeyao, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and diffuse source pollution load simulation of Poyang Lake Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiate*, 2015, 35(5): 1285-1291.
- [35] 张淼淼, 肖武, 徐建飞, 等. 巢湖流域土地整治与面源污染时空过程及关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 360-367.
- ZHANG Miaomiao, XIAO Wu, XU Jianfei, et al. Spatiotemporal processes and relationships between land consolidation and non-point source pollution in Chaohu Lake Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 360-367.
- [36] 刘同岩, 杨驰浩, 周宇澄, 等. 天目湖流域氮磷面源污染现状分析[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(12): 2641-2643.
- LIU Tongyan, YANG Chihao, ZHOU Yucheng, et al. Status of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Tianmu Lake[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Science*, 2020, 61(12): 2641-2643.
- [37] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, et al. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理: 以天目湖沙河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(6): 785-798.
- LI Hengpeng, CHEN Weimin, YANG Guishan, et al. Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: A case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(6): 785-798.

(责任编辑 王璐)