

基于 HYPE 模型的汉江安康断面以上流域 非点源污染模拟

杨雨潇, 李家科

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于空间数据和属性数据, 构建了汉江安康断面以上流域环境水文预测 (HYPE) 模型, 模拟了 2012—2016 年安康水文站的降水量和径流以及研究区非点源总氮、总磷污染负荷。结果表明: HYPE 模型日径流量和月径流量模拟结果率定期纳升效率系数分别为 0.78、0.90, 验证期分别为 0.69、0.87; 总氮、总磷负荷模拟结果率定期纳升效率系数分别为 0.71、0.69, 验证期分别为 0.68、0.63, 表明 HYPE 模型在研究区具有良好适用性; 汉江安康断面以上流域总氮和总磷非点源污染负荷主要集中在 6—10 月, 主要来源于农业化肥施用与水土流失; 研究区总氮单位面积负荷流失量为 0.354~6.139 kg, 总磷单位面积负荷流失量为 0.012~0.395 kg, 总氮、总磷流失最严重的区域主要分布在流域偏南部, 合理使用化肥、加强防治水土流失是控制研究区非点源污染的有效措施。

关键词: 非点源污染; HYPE 模型; 总氮负荷; 总磷负荷; 汉江

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0140-09

Simulation of non-point source pollution in watershed above Ankang Section of the Han River based on HYPE model // YANG Yuxiao, LI Jiak (State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on spatial and attribute data, the HYPE model of hydrological and water quality in the watershed above Ankang Section of the Han River was constructed to simulate the precipitation and runoff from the Ankang hydrological station, as well as the pollution loads of total nitrogen and total phosphorus from non-point sources in the study area from 2012 to 2016. The results show that the values of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient E_{NS} for daily and monthly runoff of the TYPE model are 0.78 and 0.90 in the calibration period, respectively, and are 0.69 and 0.87 in the validation period, respectively, and E_{NS} values of the total nitrogen and total phosphorus loads are 0.71 and 0.69 in the calibration period, respectively, and are 0.68 and 0.63 in the validation period, respectively. This indicates that the TYPE model has good applicability in the study area. The non-point source pollution loads of total nitrogen and total phosphorus in the watershed above Ankang Section of the Han River are mainly concentrated from June to October, and mainly from agricultural fertilizers and soil erosion. The total nitrogen loss per unit area load in the study area is 0.354~6.139 kg, and the total phosphorus loss per unit area load is 0.012~0.395 kg. The areas with the most severe total nitrogen and total phosphorus loss are mainly distributed in the southern part of the watershed. Reasonable use of fertilizers and strengthening the prevention and control of soil erosion are effective measures to control non-point source pollution in the study area.

Key words: non-point source pollution; HYPE model; total nitrogen loads; total phosphorus loads; Han River

人口的增加和社会、经济的发展导致了水污染问题, 随着对点源污染的有效控制, 非点源污染, 尤其是农业非点源污染, 逐步成为水体恶化的主要污染源^[1-2]。非点源污染是指在降水和径流的冲刷下溶解性或非溶解性的污染物从非特定的地域通过径流过程汇入受纳水体而引起的污染^[3], 与点源污染

相比具有管理监测难度大、分布范围广等特点^[4], 研究已证明非点源污染是导致河流、湖泊富营养化加剧的主要原因^[5]。近年来非点源污染的加剧对生态环境与城市发展造成很大影响, 因此对非点源污染进行科学评价可以为非点源污染的治理提供理论依据。

基金项目: 陕西省重点研发项目 (2019ZDLSF06-01); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目 (2022KXJ-115)

作者简介: 杨雨潇 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事流域非点源污染控制研究。E-mail: 1175139423@qq.com

通信作者: 李家科 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事非点源污染与海绵城市研究。E-mail: xaut_ljk@163.com

水文水质模型是当前非点源污染研究的主要技术之一^[6-7]。目前,由国外引进的诸多经验统计模型(如 SPARROW、USLE 等)和机理模型(如 ANSWERS、SWAT、HSPF 等)已广泛应用于中国流域非点源污染模拟与研究^[8-20](表 1)。作为使用最广泛的机理模型,SWAT 有几个缺点^[21-23]:①需要大量的输入数据,数据获取难度较大;②在水文模拟过程中忽略了地下水进入深层含水层;③需要大量的参数校准等;④高度参数化的机理模型运算效率较低,大量参数带来的不确定性较大。以 SPARROW 为代表的经验统计模型内部结构过于简化,无法体现污染物的迁移转化过程。为了克服上述问题,瑞典气象和水文研究所在 2005—2007 年开发了环境水文预测(hydrological predictions for the environment, HYPE)模型,该模型是基于过程的半分布式水文水质模型,其结构相对简单但功能齐全,模拟准确度高,适用于中、大尺度流域范围,可利用易于测量的降水和气温等气象数据时间序列来模拟河流流量^[24-26],在全球广大地区得到成功应用。Lindstrom 等^[24]使用大量小流域的流量和水质数据对 HYPE 模型校准,并将率定的参数转移到瑞典南部 Ronna 和 Vindan 两个较大的流域,模型适应性良好;Arheimer 等^[26-27]建立了波罗的海的 HYPE 模型,用于模拟波罗的海富营养化情况和预测未来气候,并量化相关措施对海洋的水和营养负荷的影响;Jiang 等^[28-30]利用 HYPE 模型模拟了德国 Selke 地区径流和养分通量的空间变化,并对模型的不确定性进行了分析;Hu 等^[31]将 HYPE 模型应用于日本的数据稀缺的 KAMO 河流域,以预估气候和土地利用变化下的流域水文变化。但 HYPE 模型在中国的应用较少,本文采用 HYPE 模型对汉江安康断面以上流域的径流、总氮负荷、总磷负荷进行模拟,利用实测数据对模拟结果进行校准,并在此基础上分析汉江安康断面以上流域非点源污染的时空变化特征,以为 HYPE 模型在我国具有相似气候、地理条件的中、大型流域的应用提供参考。

表 1 非点源污染模型在中国流域的应用

Table 1 Application of non-point source pollution models in Chinese watersheds					
模型名称	参数形式	时间步长	计算方法	污染物类型	应用地区
SPARROW	经验统计	1 a	非线性回归方程等	氮磷、泥沙、杀虫剂、有机碳等	乌江流域 ^[8] 、艾比湖流域 ^[9] 等
USLE	经验统计	1 a	六参数乘法算式	泥沙、吸附态污染物等	滦河流域 ^[10] 、滇池流域 ^[11] 等
GWLF	集总	1 m	SCS 曲线模型、平均浓度法、USLE 模型、线性水库法等	氮磷、泥沙等	于桥水库流域 ^[12] 、新安江流域 ^[13] 等
SWAT	分布	1 d	SCS 曲线模型、MUSLE 模型、动力蓄水模型等	氮磷、农药、杀虫剂等	飞来峡流域 ^[14] 、红枫湖流域 ^[15] 、潘家口水库流域 ^[16] 、蚂蚁河流域 ^[17] 等
HSPF	分布	1 min	Stanford 水文模型、曼宁公式等	氮磷、BOD、DO、农药等	东江流域 ^[18] 、派河流域 ^[19] 等
HYPE	分布	1 d	Freundlich 方程等	氮磷、泥沙、有机碳、示踪剂等	乐安江流域 ^[20]

1 研究区概况

以安康水文站为控制断面,选取汉江安康断面以上流域作为研究区,如图 1 所示,流域面积约为 4 万 km²。汉江径流年内分配不均,夏季和秋季干流径流占 75% 左右。汉江流域地处亚热带季风区,年平均气温 14.6℃,年均降水量为 750 ~ 1 100 mm,但降水年内分配不均,雨季(6—10 月)的降水量占全年总量的 80% 以上。流域内主要土壤类型有黄棕壤、棕壤、粗骨土、黄褐土以及褐土等,其中黄棕壤和棕壤在全流域的占比大于 70%。棕壤主要特征为土壤质地薄、保水能力差、易侵蚀。黄褐土及水稻土长时间受人工耕作培养,质地较好、土壤肥沃,但在强降水情况下容易发生水土流失。汉江河流主要污染源有农业化肥、水土流失污染等^[32]。

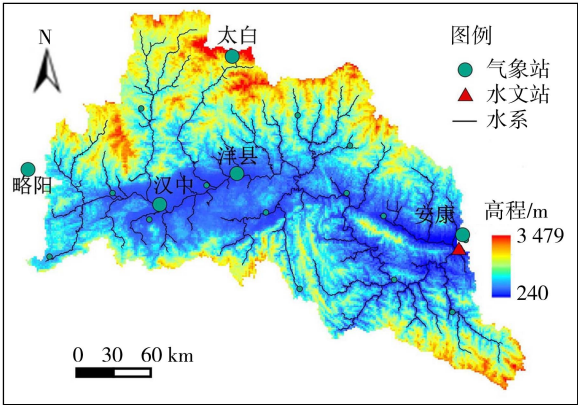


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 HYPE 模型与数据

采用 HYPE 模型进行研究区的水文、水质模拟,模型的开源代码可在 HYPE-Browse Files at Source Forge.net 上获取。HYPE 模型是在 HBV-NP 水质模型基础上开发的基于过程的半分布式水文水质模型^[12-13,33-34],以日尺度时间步长模拟水文和养分输出,可用于模拟从降水经土壤、河流和湖泊到河流出

口的流量和水质随时间的变化^[35]。在应用时,首先使用 HYPE 模型提供的 WHIST 程序将集水区划分为子流域。WHIST 程序分别使用累积流量、流向和高程网格创建水文连通流域,根据地形和水系网络将集水区划分为子流域。每个子流域进一步划分为不同的土地利用类型和土壤类型单元组合,称为土壤类型与土地利用类别 (soil type and land use category, SLC)。SLC 与地理位置无关,被定义为子流域的一部分,在每个 SLC 中,土壤最多分为 3 层,可以根据实际情况设定不同的深度。在每个土壤层上模拟径流和水质过程,并累积到 SLC,最后每个子流域的流量和营养物质浓度为每个 SLC 的面积加权和^[12]。将研究区重新划分归类为 6 种土地利用类型和 6 种土壤类型 (图 2),汉江流域被划分为 63 个子流域和 35 个 SLC。本文使用的数据包括 DEM、土地利用类型、土壤类型、气象数据及农业管理数据等来源见表 2。

2.2 模型参数率定与验证

利用安康水文站 2012—2016 年的实测流量、总氮、总磷数据对 HYPE 模型进行参数率定和验证,以 2012—2014 年作为率定期,2015—2016 年作为验证期。HYPE 模型的水文、水质参数分为 3 类:全局参数、土地利用决定参数和土壤类型决定参数。采用

人工试错法结合非线性参数估计器 PEST(parameter estimation)自动率定法进行参数率定,其中一部分参数的取值范围来自文献查阅和以往的建模经验^[15-17,30],选择其中最敏感的参数进行校准。利用 PEST 对通过单因素一次方法进行灵敏度分析获得的敏感参数进行优化。PEST 是一种使用 Gauss-Marquardt-Levenberg 算法的局部搜索方法^[36],其基于 Levenberg-Marquardt 算法对目标函数求解最小值^[37],该方法集中了逆海森方法和最速下降法的优点,能够朝着目标函数更快而有效地收敛^[38]。

模拟值与实测值之间会产生偏差,需要通过评价指标来反映模拟值与实测值之间的拟合效果。采用确定性系数 (R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_{NS}) 以及相对误差 (R_E) 3 个指标来评价模型的模拟效果。 E_{NS} 主要用于衡量实测数据和模拟数据的拟合程度, R^2 反映实测数据和模拟数据趋势的一致性, R_E 反映模拟序列的可信度。 R^2 越接近 1,表明实测与模拟拟合效果越好,模型精度越高,一般认为 $R^2 \geq 0.6$ 时,模型模拟结果良好。 E_{NS} 越接近 1,表明模型模拟效率越高,当 $E_{NS} \geq 0.5$ 时,认为模拟结果较好。一般认为 R_E 越接近于 0,模拟结果越好。当率定期和验证期 $R_E < 20\%$, $R^2 > 0.6$, $E_{NS} > 0.5$,说明模拟值与实测值吻合较好,满足要求。

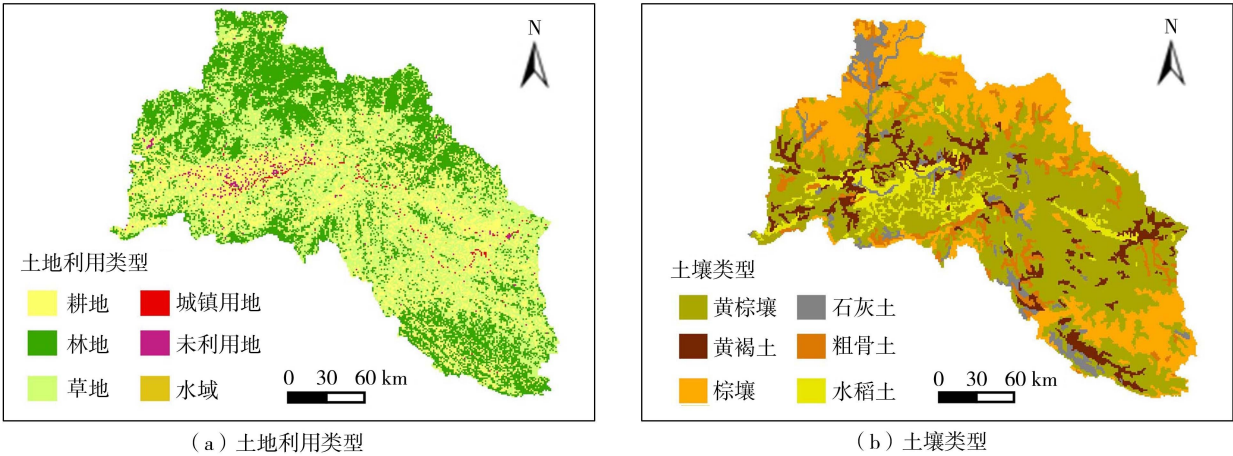


图 2 研究区土地利用类型和土壤类型
Fig.2 Land use type and soil type of study area

表 2 HYPE 模型所需数据情况
Table 2 Data required for HYPE model

类型	名称	数据格式	数据概述	数据来源
空间数据	DEM	Grid	分辨率为 30 m×30 m	地理空间数据云
	土地利用类型	Shape	分辨率为 90 m×90 m	中国科学院资源环境科学数据中心
	土壤类型	Shape	分辨率为 1 km×1 km	中国科学院资源环境科学数据中心
属性数据	气象数据	TXT	日降水量、日平均气温	CMADS 数据集
	水文、水质数据	TXT	2012—2016 年安康水文站逐日流量、逐月总氮质量浓度、逐月总磷质量浓度	安康水文站
	点源污染负荷	TXT	点源排放口位置、污染物负荷	陕西省统计年鉴
	农业管理数据	TXT	作物生长期、施肥等	陕西省统计年鉴

3 结果与分析

3.1 模型参数率定结果

HYPE 模型敏感参数率定结果见表 3。水文模拟中,最敏感的参数是 $cevp$ 、 $rivvel$ 和 $wcep$ 。 $cevp$ 反映了潜在蒸散发率,而耕地和林地是汉江流域主要土地利用类型,共占流域总面积的 60.41%,其蒸散发过程是汉江流域水量平衡的重要部分; $wcep$ 反映了土壤体积中可供土壤径流的比例; $rivvel$ 表示河流的流速,该参数影响流量峰值的模拟。与磷迁移过程相关的敏感参数是 $sreroexp$ 和 $freuc$ 。 $sreroexp$ 为地表径流引起的土壤侵蚀计算方程中的指数,表明土壤侵蚀对土壤中磷运移过程具有控制作用; $freuc$ 为 Freundlich 方程指数, Freundlich 吸附等温公式决定土壤中可溶性无机磷 SP 和颗粒态磷 PP 之间的平衡质量浓度,且黄棕壤是研究区域最主要的土壤类型,占流域总面积的 52.35%,故其敏感性较高,土壤中无机磷与颗粒态磷之间的转化关系对河流水体中总磷质量浓度影响较大。与氮迁移过程相关的敏感参数是 $fertdays$ 和 $denitrm$ 。 $fertdays$ 表示农作

物施肥的天数,说明氮的浓度与化肥的使用密切相关; $denitrm$ 是全局参数,反映了河流中氮的反硝化速率。

3.2 水文模拟结果分析

图 3 为率定期及验证期安康水文站径流的模拟值与实测值对比。安康水文站的日径流量和月径流量率定期 E_{NS} 分别为 0.78、0.90, R^2 分别为 0.87、0.94, R_E 分别为 11.84、1.87;验证期 E_{NS} 分别为 0.69、0.87, R^2 分别为 0.79、0.92, R_E 分别为 2.74、4.67,结果表明 HYPE 模型可以较好地再现流域径流随时间的变化。HYPE 模型基本上能够捕捉由强降雨事件产生峰值流量,但对于极端洪水的模拟存在一定的低估。该模型应用于国内外其他流域时同样也遇到对峰值流量的低估的问题^[39],这主要是由于径流高峰是由短时高强度的降雨引起的,而 HYPE 模型以日尺度为最小时间单元进行计算,很难精确模拟出径流峰值。而且对于高流量的洪水事件,流量测量的可靠性会降低^[40],模型对流量模拟的低估也可能由输入数据误差引起。总体而言,安康水文站径流模拟在率定期和验证期性能均较好,

表 3 HYPE 模型敏感参数率定结果

Table 3 Calibration results of HYPE model sensitivity parameters

参数	类别	含义	参考范围	相对综合敏感度	最终值
cevp	耕地	蒸散参数	0.01 ~ 1 mm/℃	0.005 5	0.152 mm/℃
	林地		0.001 ~ 1 mm/℃	0.006 4	0.116 mm/℃
rrcs1	黄棕壤	最上层土壤径流系数	0.01 ~ 1	0.000 5	0.900
	黄褐土		0.01 ~ 1	0.000 6	0.950
wcep	黄棕壤	有效孔隙度	0.01 ~ 1	0.009 3	0.110
	黄褐土		0.001 ~ 1	0.001 2	0.002
rivvel		河道内的水流速度	0 ~ 0.3 m/s	0.007 9	1.558 m/s
fertdays		施肥时间	1 ~ 365 d	0.002 3	95 d
denitrm		河流反硝化参数	0.001 ~ 1 mg/(m ² ·d)	0.015 4	0.040 mg/(m ² ·d)
freuc	黄棕壤	freundlich 方程中的系数	10 ~ 250 kg ⁻¹	0.089 0	195.360 kg ⁻¹
	黄褐土		10 ~ 250 kg ⁻¹	0.053 0	23.760 kg ⁻¹
sreroexp		径流引起土壤侵蚀计算方程指数	0.1 ~ 10	0.016 0	1.930

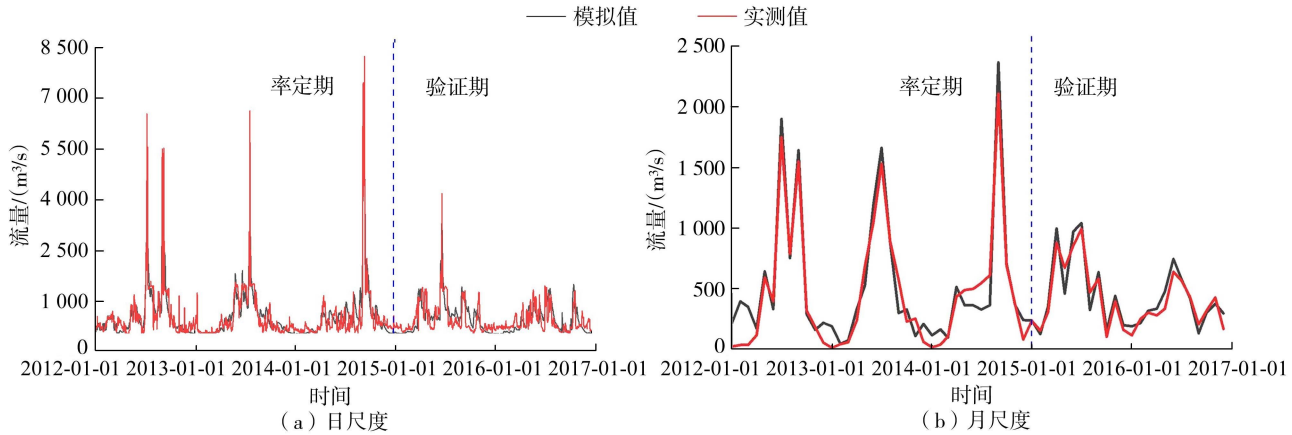


图 3 率定期及验证期安康水文站径流的模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and measured values of runoff at Ankang Hydrological Station during calibration and validation periods

可以为研究区非点源氮、磷污染模拟提供良好的数据基础。

3.3 总氮和总磷模拟结果分析

3.3.1 非点源总氮、总磷污染负荷的时间分布特征

图4为率定期及验证期研究区总氮、总磷负荷模拟值与实测值对比。总氮、总磷负荷模拟结果率定期 E_{NS} 分别为0.71、0.69, R^2 分别为0.87、0.91, R_E 分别为9.95、1.77;验证期 E_{NS} 分别为0.68、0.63, R^2 分别为0.82、0.83, R_E 分别为6.54、10.53。结果表明HYPE模型在汉江安康断面以上流域的总氮、总磷负荷模拟中有较好的适应性。

图5为2012—2016年研究区总氮、总磷年污染

负荷与安康水文站年降水量。由图5可见,研究区总氮、总磷污染负荷与安康水文站年降水量的变化趋势基本一致。计算研究区总氮、总磷年污染负荷与安康水文站年降水量之间的皮尔逊相关系数 r 分别为0.38、0.76,相关关系明显,表明流域产生的总氮、总磷污染负荷随着流域降水量的增大而增大。

图6为2012—2016年研究区总氮和总磷多年月平均负荷与安康水文站多年月平均降水量。由图6可见,总氮、总磷的多年月均负荷在降水量的影响下变化规律基本一致,随着降水量起伏变化。将6—10月作为汛期,其余月份作为枯水期,汛期降水量比例占全年的75.75%。年内污染负荷也主要集

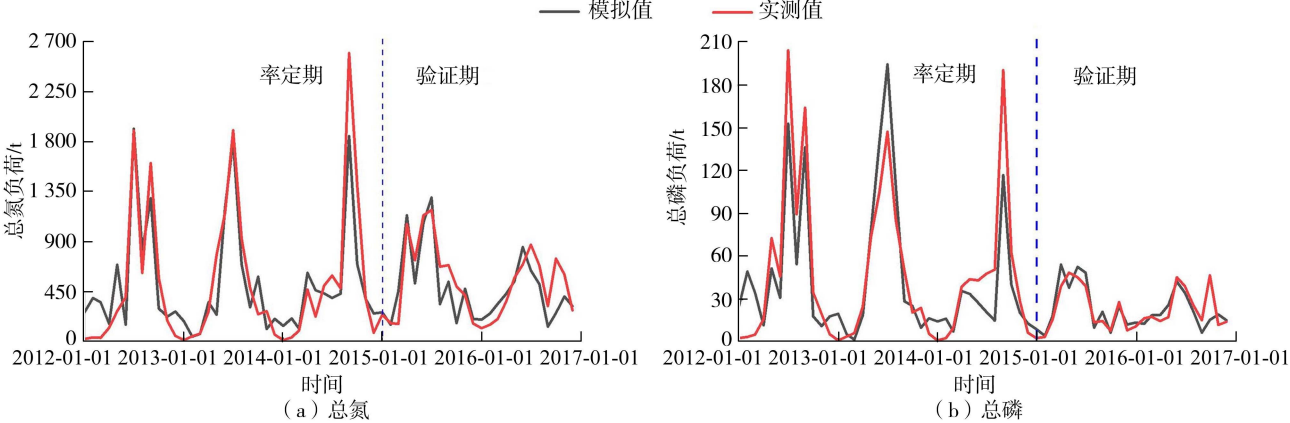


图4 率定期及验证期研究区总氮、总磷负荷模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured values of TN and TP loads in study area during calibration and validation periods

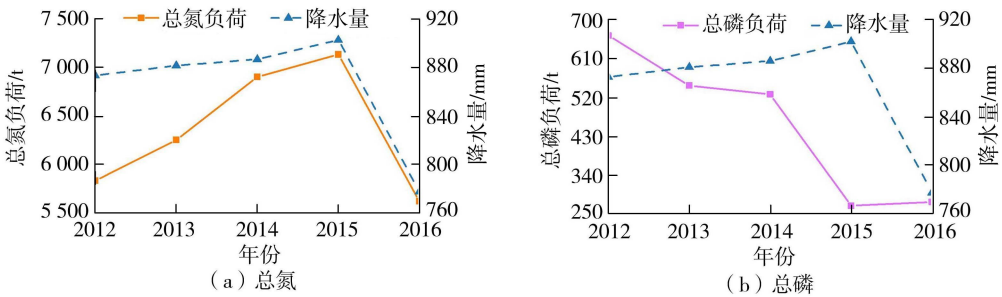


图5 2012—2016年研究区总氮、总磷年污染负荷与安康水文站年降水量

Fig. 5 Annual TN and TP pollution loads in study area and annual precipitation at Ankang Hydrological Station from 2012 to 2016

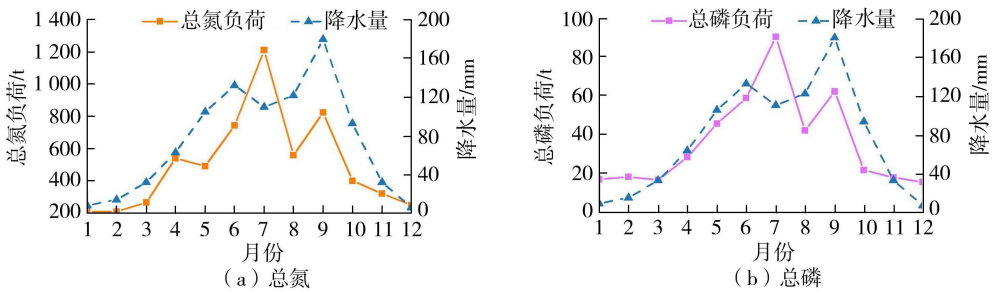


图6 2012—2016年研究区总氮、总磷多年月平均负荷与安康水文站多年月平均降水量

Fig. 6 Changes in multi-year monthly average TN and TP loads in study area and multi-year monthly average precipitation at Ankang Hydrological Station from 2012 to 2016

中在汛期,总氮和总磷汛期污染负荷分别占年总负荷的 78.25% 和 85.34%,说明降水与非点源污染负荷的产生关系密切,汛期是总氮、总磷非点源污染负荷产生的关键时期。

分析研究区非点源总氮、总磷年负荷以及多年平均负荷与安康水文站降水量之间的关系可知,降水量为汉江安康断面以上流域输出非点源污染总氮、总磷负荷的关键驱动因子,这与非点源污染产生的机理密切相关。汛期丰沛的降水会增加对植被覆盖度较小地面的冲刷,加剧土壤侵蚀,导致水土流失带走更多的氮、磷污染物,污染物会随着径流、泥沙汇入汉江,是汉江河流氮、磷污染负荷的主要来源。同时,根据农业管理数据可知,6—7 月为汉江流域内的施肥期,土壤中大量的氮、磷等营养物质将会随地表径流流出。因此,研究区在汛期采取合理使用化肥和调整施肥结构等措施可以有效减少非点源污染氮、磷负荷的输出。

3.3.2 非点源氮、磷污染负荷的空间分布特征

利用 HYPE 模型计算 2012—2016 年研究区 63 个子流域的总氮、总磷年均输出负荷,同时以各个子流域为基本单元,利用 2012—2016 年平均模拟结果计算研究区总氮、总磷年均单位面积负荷。将总氮、总磷流失强度划分为 5 个等级:总氮和总磷的极轻度流失、轻度流失、中度流失、重度流失、极重度流失分别对应质量浓度范围 0.354 ~ 1.096、>1.096 ~ 1.997、>1.997 ~ 2.892、>2.892 ~ 3.453、>3.453 ~ 6.139 kg/hm² 和 0.012 ~ 0.037、>0.037 ~ 0.061、>0.061 ~ 0.154、>0.154 ~ 0.271、>0.271 ~ 0.395 kg/hm²。图 7 为 2012—2016 年研究区年均污染物流失强度的空间分布。由图 7 可见,研究区总氮单位面积负荷流失量为 0.354 ~ 6.139 kg,主要分布在流域偏南部,其中 4、6、7、11、15、21、26、29、47 和 49 号子流域的总氮流失最为严重,其子流域的面积占流域面积的 20.69%,但产出的总氮负荷量占流域比例为 52.49%。总磷单位面积负荷流失量为 0.012 ~ 0.395 kg,其中 4、6、11、21、26、29、41、48、55、56 和 57 号子流域的总磷流失比较严重,其子流域的面积占流域面积的 18.54%,但产出的总磷负荷量占流域比例为 51.47%。

总氮、总磷污染负荷的空间分布规律有一定的相似性,总氮流失强度大的区域内总磷流失强度也较大,反之亦然。这一研究结果与赵串串等^[41]的结论一致,其原因可归纳为:①总氮、总磷流失强度小的区域位于流域上游北部山区,区域内主要土地利用类型为林地,地表植被覆盖度高,对氮、磷吸附作用较大,因此总氮、总磷的流失强度相对较小。②总

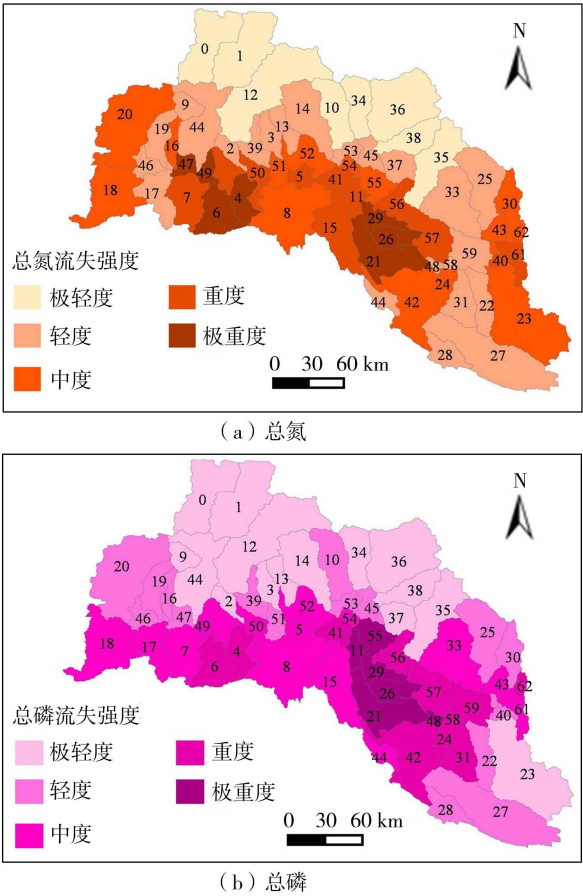


图 7 2012—2016 年研究区年均污染物流失强度的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of annual average pollution logistics loss intensity in study area from 2012 to 2016

氮、总磷流失强度大的区域位于中下游南部平原地区,区域内主要土地利用类型为耕地和建设用地,人类长期耕作以及化肥施用量逐年累积,而城镇建设用地等不透水类型面积增加,导致地区生态系统脆弱,加剧了氮磷的污染负荷的流失;从空间分布来看,耕地产生的总氮、总磷负荷量远大于林地、草地等其他土地利用类型,说明汉江安康断面以上流域非点源污染主要来源于农业生产活动。③汉江流域中,吸附态形式的氮磷污染物会附着在泥沙上,当发生大规模降雨时,氮磷污染物会随着泥沙的迁移而流动,这也解释了氮磷流失强度大的地区降水量也较大。综上所述,农业用地使用化肥以及强降雨导致的土壤侵蚀是研究区的非点源污染的主要来源。

4 结 论

a. 基于空间数据和属性数据,构建了汉江安康断面以上流域的 HYPE 模型,研究区总氮、总磷负荷模拟结果评价指标中率定期 E_{NS} 分别为 0.71、0.69, R^2 分别为 0.87、0.91, R_E 分别为 9.95、1.77;验证期 E_{NS} 分别为 0.68、0.63, R^2 分别为 0.82、0.83, R_E 分别为 6.54、10.53,说明 HYPE 模型在研究区的径流和

污染物负荷模拟中有较好的适应性。

b. 汉江安康断面以上流域 2012—2016 年非点源总氮年污染负荷分别为 5 834. 60、6 254. 80、6 904. 97、7 132. 45、5 620. 89 t,总磷年污染负荷分别为 665. 08、548. 56、528. 52、268. 68、277. 49 t,研究区总氮、总磷污染负荷与安康水文站年降水量的变化趋势基本一致。

c. 汉江安康断面以上流域非点源污染负荷年内时间分布不均匀,汛期总氮、总磷的产出分别占全年的 78. 25% 和 85. 34%;降水、径流是研究区域内非点源污染产生的驱动因子,强降水导致的水土流失是非点源污染物运移的重要途径。

d. 研究区总氮单位面积负荷流失量为 0. 354 ~ 6. 139 kg,总磷单位面积负荷流失量为 0. 012 ~ 0. 395 kg,总氮、总磷流失最严重的区域主要分布在流域偏南部,合理使用化肥、加强防治水土流失是控制研究区的非点源污染的有效措施。

参考文献:

[1] 李家科,彭凯,郝改瑞,等. 黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展[J]. 水资源保护, 2021,37(1): 90-102. (LI Jiake, PENG Kai, HAO Gairui, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 90-102. (in Chinese))

[2] 周申蓓,王晓静,陈松峰,等. 地区重点企业水污染减排复合政策模拟研究[J]. 水利经济,2022,40(4):17-22. (ZHOU Shenbei, WANG Xiaojing, CHEN Songfeng, et al. Simulation study on the compound policy of water pollution reduction of regional key enterprises[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 17-22. (in Chinese))

[3] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 54-64. (HAO Gairui, LI Jiake, LI Huai'en, et al. Advances in research of watershed non-point source pollution models and uncertainty analysis methods[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 54-64. (in Chinese))

[4] 管飞,马友华,张东红,等. 农业面源污染负荷空间分布及风险评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(30): 61-66. (GUAN Fei, MA Youhua, ZHANG Donghong, et al. Agricultural non-point source pollution loads: spatial distribution and risk assessment [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(30): 61-66. (in Chinese))

[5] 涂小强,傅春. 非点源污染研究发展演化与前沿分析[J]. 人民长江,2021,52(4): 47-54. (TU Xiaoqiang, FU

Chun. Evolution and frontier analysis of non-point source pollution research[J] Yangtze River, 2021, 52(4): 47-54. (in Chinese))

[6] 李一平,施媛媛,姜龙,等. 地表水环境数学模型研究进展[J]. 水资源保护,2019,35(4): 1-8. (LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 1-8. (in Chinese))

[7] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):11-19. (in Chinese))

[8] 代义彬. 基于 SPARROW 模型评估乌江流域铵态氮的来源与分布传输[D]. 天津:天津大学, 2019.

[9] 任岩. 基于 SPARROW 模型的艾比湖流域地表水水质评价及污染负荷研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2017.

[10] 孙超,韩伟刚,齐苑儒. 基于 USLE 模型的泸瀾河流域土壤侵蚀研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(1): 226-232. (SUN Chao, HAN Weigang, QI Yuanru. Soil erosion in chanba river basin based on USLE model [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(1): 226-232. (in Chinese))

[11] 彭双云,杨昆,洪亮,等. 基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J]. 农业工程学报,2018, 34(10): 138-146. (PENG Shuangyun, YANG Kun, HONG Liang, et al. Spatio-temporal evolution analysis of soil erosion based on USLE model in Dianchi Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 138-146. (in Chinese))

[12] 李泽利,张庆强,高锴,等. 基于 GWLF 模型的于桥水库入库河流水文模拟及氮磷负荷估算[J]. 中国环境监测, 2021, 37(6): 127-135. (LI Zeli, ZHANG Qingqiang, GAO Kai, et al. Hydrological simulation and nitrogen and phosphorus load estimation of inflow rivers to Yuqiao Reservoir based on GWLF model [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(6): 127-135. (in Chinese))

[13] 齐作达,亢戈霖,王玉秋. GWLF 模型的改进及其在新安江流域的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 17-23. (QI Zuoda, KANG Gelin, WANG Yuqiu. Improvement of GWLF model and its application to Xin' anjiang River Watershed [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4): 17-23. (in Chinese))

[14] 黄国如,陈晓丽,任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2019,35(4):9-16. (HUANG Guoru, CHEN Xiaoli, REN Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area

- [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(4): 9-16. (in Chinese))
- [15] 黄维,贾仰文,黄国如,等. 红枫湖流域非点源污染时空分布及管理措施[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 190-195. (HUANG Wei, JIA Yangwen, HUANG Guoru, et al. Spatiotemporal distribution and control measures of non-point source pollution in the Hongfeng Lake Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 190-195. (in Chinese))
- [16] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [17] 张皓天,张弛,周惠成,等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(6): 644-650. (ZHANG Haotian, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, et al. Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)* 2010, 38(6): 644-650. (in Chinese))
- [18] 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]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (4): 39-43. (in Chinese))
- [19] 陈吉春. 基于 HSPF 模型的派河流域土地利用对非点源污染的影响研究[D]. 厦门:厦门大学, 2019.
- [20] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 14-19. (in Chinese))
- [21] CHAHINIAN N, TOURNOUD M, PERRIN J, et al. Flow and nutrient transport in intermittent rivers: a modelling case-study on the Vène River using SWAT 2005 [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(2): 268-287.
- [22] GLAVAN M, WHITE S, HOLMAN P I. Evaluation of river water quality simulations at a daily time step: experience with SWAT in the Axe Catchment, UK [J]. *Clean Soil, Air, Water*, 2011, 39(1): 43-54.
- [23] LI H, SIVAPALAN M, TIAN F, et al. Water and nutrient balances in a large tile-drained agricultural catchment: a distributed modeling study [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(11): 2259-2275.
- [24] LINDSTRÖM G, PERS C, ROSBERG J, et al. Development and testing of the HYPE (hydrological predictions for the environment) water quality model for different spatial scales [J]. *Hydrology Research*, 2010, 41(3/4): 295-319.
- [25] ANDERSSON L, JOUM L, ROSBERG R, et al. Estimating catchment nutrient flow with the HBV-NP model: sensitivity to input data [J]. *A Journal of the Human Environment*, 2005, 34(7): 521-532.
- [26] ARHEIMER B, DAHNÉ J, DONNELLY C. Climate change impact on riverine nutrient load and land-based remedial measures of the Baltic sea action plan [J]. *Ambio*, 2012, 41(6): 600-612.
- [27] OMARM E D M, MOUSSAA M A, HINKELMANN R. Impacts of climate change on water quantity, water salinity, food security, and socioeconomy in Egypt [J]. *Water Science and Engineering*, 2021, 14(1): 17-27.
- [28] JIANG S, ZHANG Q, WERNER A, et al. Effects of stream nitrate data frequency on watershed model performance and prediction uncertainty [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 569: 22-36.
- [29] JIANG S, JOMAA S, BÜTTNER O, et al. Multi-site identification of a distributed hydrological nitrogen model using Bayesian uncertainty analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 940-950.
- [30] GHAFAR G R M. Spatial validation of a semi-distributed hydrological nutrient transport model [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593(1): 1-13.
- [31] HU M, TAKARA K, LUO P, et al. Climate change and land use change impact analysis in a data sparse watershed using a hydrological model [J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering)*, 2014, 70(4): 109-114.
- [32] ARHEIMER B, LOUML M, WGRE N, et al. Integrated catchment modeling for nutrient reduction: scenarios showing impacts, potential, and cost of measures [J]. *A Journal of the Human Environment*, 2005, 34(7): 513-520.
- [33] GÖRAN L, JÖRGEN R, BERIT A. Parameter precision in the HBV-NP model and impacts on nitrogen scenario simulations in the Rönneä River, southern Sweden [J]. *Ambio*, 2005, 34(7): 533-537.
- [34] STRÖMQVIST J, ARHEIMER B, DAHNÉ J, et al. Water and nutrient predictions in ungauged basins: set-up and evaluation of a model at the national scale [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 229-247.
- [35] DOHERTY J. PEST, model independent parameter estimation user manual [M]. Corinda: Watermark Computing. 2008.
- [36] BAHREMAND A, SMEDT F. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(12): 2869-

[37] BAHREMAND A, SMEDT F D. Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa Watershed, Slovakia[J]. Water Resources Management, 2008, 22 (3):393-408.

[38] JIANG Sanyuan. Hydrological water quality modelling of nested meso scale catchments [D]. Braunschweig : Technical University Carolo-Wilhelmina,2014.

[39] HAMILTON A, MOORE R. Quantifying uncertainty in streamflow records [J]. Canadian Water Resources Journal,2012,37(1):3-21.

[40] 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 Quintai. Simulation of non-point source pollution load distribution in small watershed based on SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (6): 41-44. (in Chinese))

[41] 赵串串,冯倩,侯文涛,等. 基于 AnnAGNPS 模型的澜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 AnnAGNPS model in Bahe River Basin [J]. Environmental Pollution & Control, 2019 41 (3): 317-322). (in Chinese))

(收稿日期:2023 -08 -09 编辑:王芳)

(上接第 97 页)

[21] 王树威,李建林,崔延华,等. 混沌理论与 BPNN 耦合的径流中长期预测模型[J]. 水资源与水工程学报,2021, 32(3):73-79. (WANG Shuwei, LI Jianlin, CUI Yanhua, et al. Medium and long term runoff prediction model coupled with chaos theory and BPNN[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32 (3): 73-79. (in Chinese))

[22] 张相,丁鸣鸣,林杰,等. 水蚀作用下红壤丘陵区土壤特性的空间分异特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47 (6): 77-84. (ZHANG Xiang, DING Mingming, LIN Jie, et al. Spatial differentiation of soil properties in hilly red soil region under water erosion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2023,47(6): 77-84. (in Chinese))

[23] 滕文龙,丛炳虎,商云坤,等. 基于 MEA-BP 神经网络的

建筑能耗预测模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51 (5): 1857-1865. (TENG Wenlong, CONG Binghu, SHANG Yunkun, et al. Modeling of building energy consumption prediction based on MEA-BP neural network[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (5): 1857-1865. (in Chinese))

[24] 连运涛,王昱,郑健,等. 黑河流域上游水沙输移趋势及其成因分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(3): 98-104. (LIAN Yuntao, WANG Yu, ZHENG Jian, et al. The trend of runoff and sediment transport in the upper reaches of Heihe basin and its cause analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 98-104. (in Chinese))

(收稿日期:2023 -08 -07 编辑:王芳)

(上接第 139 页)

[21] 李佳,谢文霞,姜智绘,等. 海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输[J]. 环境科学,2020,41(9):4113-4123. (LI Jia, XIE Wenxia, JIANG Zhihui, et al. Transition of particulate pollutant in the parcel-based catchment of sponge city [J]. Environmental Science, 2020, 41 (9): 4113-4123. (in Chinese))

[22] ALMAMOON A, JAHAN S, HE X, et al. First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate [J]. Science of the Total Environment, Elsevier,2019,693:133552.

[23] 张香丽,赵志杰,秦华鹏,等. 常州市不同下垫面污染物冲刷特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54 (3): 644-654. (ZHANG Xiangli, ZHAO Zhijie, QIN Huapeng, et al. Characteristics of pollutants flush on different types of underlying surface in Changzhou [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018,54(3):644-654. (in Chinese))

[24] HOSSAIN I, IMTEAZ M, GATO-TRINIDAD S, et al. Development of a catchment water quality model for continuous simulations of pollutants build-up and wash-off [J]. International Journal of Environmental and Ecological Engineering,2010,4(1):11-18.

(收稿日期:2023 -02 -09 编辑:王芳)

