

文章编号: 1671-6833(2023)03-0020-08

## 基于 PNPI 与 SWAT 模型的非点源污染风险空间分布

郑家珂<sup>1,2</sup>, 甘容<sup>1,2</sup>, 左其亭<sup>1,3</sup>, 杨峰<sup>4</sup>

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 河南省地下水污染防治与修复重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001; 4. 河南省出山店水库建设管理局, 河南 信阳 464043)

**摘要:** 为了明确流域非点源氮(N)、磷(P)营养物质污染风险空间分布特征, 识别流域非点源关键污染源区, 以伊洛河流域为例, 采用输出系数法量化流域不同土地利用类型、居民生活和禽畜养殖所产生的 N、P 污染负荷, 借助改进后的潜在非点源污染指数(PNPI)模型和 SWAT 模型, 阐述流域非点源 N、P 污染风险空间分布特征, 识别 N、P 污染关键源区; 采用皮尔逊相关系数法计算两模型模拟结果的相关性, 评价改进后的 PNPI 模型模拟结果的可靠性。结果表明: 2020 年伊洛河流域 N、P 非点源污染风险空间分布较为相似, 均呈现出伊河、洛河两支流上游污染风险较低, 中下游污染风险较高的空间分布特征, N 和 P 的极低、低、中、高、极高风险区面积分别占伊洛河总面积的 48.85%、14.61%、9.68%、14.64%、12.22% 和 55.48%、8.76%、11.14%、13.25%、11.38%; 土地利用输出是流域产生 N、P 污染的主要源头, 负荷量分别为 20 643.62、3 033.31 t/a, 不同的土地利用类型中耕地输出的 N、P 负荷量最大, 分别为 13 000.07、1 956.44 t/a, 草地输出产生的 N 负荷量最小, 为 1 322.99 t/a, 居民用地产生的 P 负荷量最小, 为 113.61 t/a; 改进后的 PNPI 模型与 SWAT 模型模拟的 N、P 污染负荷间的皮尔逊相关系数均达到 0.6, 表明改进后的 PNPI 模型适用于该研究区。

**关键词:** 氮磷污染; 潜在非点源污染指数模型; 输出系数法; SWAT 模型; 伊洛河流域

中图分类号: X52

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.03.014

随着对点源污染的研究和管理, 点源污染已经得到了有效的控制, 非点源污染也逐渐成为全世界地表水污染治理难题。研究表明, 全世界 30% ~ 50% 的地表水受到了非点源污染的影响, 中国的非点源污染也已经超过点源污染, 成为国内水体的主要污染源。由于非点源污染分散性强, 导致非点源污染治理效率低、治理难度大, 因此, 明确非点源污染的时空效应, 识别关键污染源区是治理非点源污染的关键前提<sup>[1]</sup>。

目前中国对非点源污染的研究主要集中在分析污染源负荷的产生, 但非点源污染所产生的污染物在迁移过程中降解以及被土壤吸收, 使得污染物只有部分进入水体, 因此, 污染源的负荷产生量与对河道造成的污染风险可能存在不一致的现象。Munafu 等<sup>[2]</sup>在 2005 年首次提出 PNPI 模型, 该模型是以土

地利用、径流和距离指标来评价非点源污染风险发生潜力的一种流域尺度非点源污染负荷评价工具。

伊洛河流域是中国中部地区重要的工业基地和连接中西部的关键区域, 发达的工业、高度密集的人口以及频繁的农业活动, 使得大量的工业废水、生活污水、农药化肥残留进入河流中, 致使河流水质受到不同程度的污染。伊洛河作为黄河中下游的一大支流, 水资源短缺、水环境污染问题也会破坏黄河水生态系统, 影响当地以及黄河下游人民生活质量和生命健康<sup>[3]</sup>。

本文借助改进后的潜在非点源污染指数 (potential non-point pollution indicator, PNPI) 模型<sup>[4]</sup>对伊洛河流域非点源污染进行模拟, 该模型采用输出系数法<sup>[5]</sup>计算不同污染源的 N、P 负荷量, 构建污染源、径流和距离各指标的指数函数, 分析流域

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909091); 河南省水利科技攻关计划项目(GG202026, GG202022)

通信作者: 甘容(1983—), 女, 湖北随州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究, E-mail: ganrong168@163.com。

引用本文: 郑家珂, 甘容, 左其亭, 等. 基于 PNPI 与 SWAT 模型的非点源污染风险空间分布[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 20-27. (ZHENG J K, GAN R, ZUO Q T, et al. Spatial distribution of non-point source pollution risk based on PNPI and SWAT model[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 20-27.)

非点源污染物的产出、迁移、降解以及潜在的污染空间分布特征并划分风险等级;同时结合 SWAT( soil and water assessment tool) 模型<sup>[6]</sup>模拟流域非点源污染空间分布;利用皮尔逊相关系数法<sup>[7]</sup>计算改进后的 PNPI 模型和 SWAT 模型之间的相关性,对改进后的 PNPI 模型的适用性进行验证,同时避免单一模型模拟结果的不准确性。

## 1 研究区概况

伊洛河流域位于黄河流域中游的三门峡—花园口区间,流域面积为 18 881 km<sup>2</sup>,是黄河下游供水的主要来源之一,与黄河流域的水资源状况息息相关,伊洛河流域地理位置如图 1 所示。流域地处大陆季风性气候带,夏季降雨充沛,冬季较为干旱,年平均气温为 12~14 ℃,年降水量在 850 mm 左右<sup>[8]</sup>。降雨是河流径流的主要来源,保证河流 80% 的径流量。研究区土壤类型主要为棕壤土、潮土、普通褐土等。流域内山地、丘陵和平原面积分别占全流域的 50.7%、39.9%、9.4%,下游为地势平坦的平原区,土质肥沃适宜粮食种植,主要的农作物为小麦和玉米<sup>[9]</sup>。由于伊洛河流域农业产业发达,全年降水偏多,导致化肥农药残渣、农村生活污染物通过地表径流流入河道风险较大<sup>[10]</sup>。

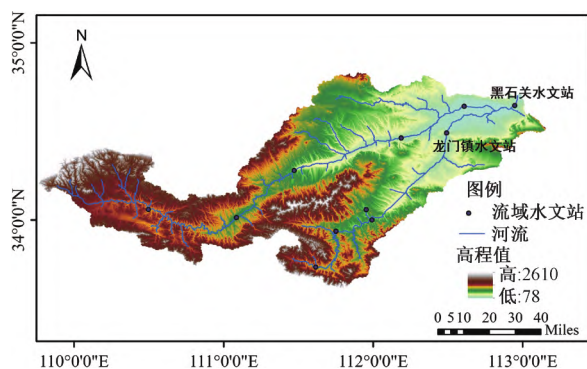


图 1 伊洛河流域地理位置

Figure 1 Location of the Yiluo River Basin

## 2 材料与方法

### 2.1 改进的潜在非点源污染风险指数模型

本研究采用输出系数法估算流域不同源头产生的污染负荷指标( $L_i$ )代替 PNPI 模型中的土地利用指标( $LCI$ )。改进后的 PNPI 模型以源头污染负荷指标( $L_i$ )、径流指标( $ROI$ )和距离指标( $DI$ )分别表征 N、P 污染的产生、迁移和降解,并采用指数函数法建立三者之间的关系,计算得到每个栅格单元的潜在非点源污染风险指数值,使用自然断点法对研

究区的 N、P 污染风险进行等级划分。模型采用的基础数据主要有流域水系矢量数据、数字高程模型、土壤类型矢量数据和流域土地利用类型。

(1) N、P 污染负荷估算。N、P 污染负荷表示各土地单元上不同污染源所产生的氮、磷污染总负荷。本文选取土地利用、居民生活、禽畜养殖 3 类作为主要的 N、P 污染来源,采用输出系数法计算伊洛河流域不同污染源产生的 N、P 污染负荷量,计算公式见式(1)。通过文献查阅,并参考河南省地区和其他相似流域的 N、P 输出系数值<sup>[11-12]</sup>,确定流域的输出系数,如表 1 所示。

$$L_i = \sum_{j=1}^n E_j A_j \quad (1)$$

式中: $L_i$  为污染物  $i$  的负荷总量,kg; $E_i$  为第  $i$  种污染源氮/磷的输出系数,kg/(hm<sup>2</sup>·a)、kg/(人·a)或 kg/(头·a); $A_i$  为研究区中第  $i$  种土地利用类型的面积,hm<sup>2</sup>、第  $i$  种畜禽类型的养殖规模,头/只或人口数量。

表 1 不同污染源输出系数取值

Table 1 Output coefficients of different pollution sources

污染源	类型	输出系数	
		TN	TP
居民生活	人	1.580 kg/(人·a)	0.160 kg/(人·a)
禽畜养殖	牛	6.110 kg/(头·a)	1.007 kg/(头·a)
	猪	0.451 kg/(头·a)	0.170 kg/(头·a)
	羊	0.228 kg/(头·a)	0.045 kg/(头·a)
土地利用	耕地	18.705 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	2.815 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)
	林地	4.885 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	0.890 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)
	草地	9.295 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	1.305 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)
	建设用地	15.450 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)	0.855 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)

(2) 径流指标( $ROI$ )。 $ROI$ 可表示土壤质地、土地利用类型、坡度对非点源营养物质渗透的影响<sup>[13]</sup>,由计算单元到河流之间所有栅格单元的坡度、土地利用类型和土壤类型共同确定。通过选取单元格的初步径流系数再经坡度修正得到最终的径流参数,取值为 0~1。 $ROI$  值越高,表示下渗强度越低,多数污染物质未下渗至土壤而随地表径流流入河网,造成较高的污染风险。每个土地单元的初步径流系数取值如表 2 所示,坡度修正参考见表 3,各类土壤渗透分级参考车振海<sup>[14]</sup>的分级方法,将渗透等级分为 A、B、C、D 4 个等级,分别表示渗透强度极强、强、中等、弱。

(3) 距离指标( $DI$ )。污染物的降解和污染物迁移的路径长短也有很大关系。 $DI$ 考虑了污染源产生的 N、P 污染和受纳水体间的运输距离的影

表 2 初步径流系数

Table 2 Preliminary runoff coefficient

土地类型	径流系数			
	A	B	C	D
耕地	0.70	0.80	0.86	0.90
林地	0.36	0.60	0.73	0.79
草地	0.30	0.58	0.71	0.78
湿地	0.76	0.85	0.89	0.91
居民用地	0.77	0.85	0.90	0.92
水体	0	0	0	0

表 3 坡度修正

Table 3 Slope correction

坡度	修正系数	坡度	修正系数
<2°50′	0	[7°05′ 7°56′)	0.6
[2°50′ 3°41′)	0.1	[7°56′ 8°47′)	0.7
[3°41′ 4°32′)	0.2	[8°47′ 9°38′)	0.8
[4°32′ 5°23′)	0.3	[9°38′ 10°29′)	0.9
[5°23′ 6°14′)	0.4	>10°29′	1.0
[6°14′ 7°05′)	0.5		

响<sup>[15]</sup>。N、P 营养物质在运输过程中发生流失和降解,距离越远,营养物质流失和降解越多,对水体产生的污染风险就越小。首先通过 GIS 中的欧式距离计算每个单元格到达河网的距离,然后利用经验公式计算每个单元的  $DI$  值:

$$DI_i = \exp(-D_i \cdot k) \quad (2)$$

式中:  $D_i$  为第  $i$  个土地单元到受纳水体的水力距离,用单元格数表示;常数  $k$  取值为 0.09。

(4) 指数函数法。原始的 PNPI 模型通过专家评价法对土地利用、径流和距离指标权重赋值,计算公式为  $V_{PNPI} = 4.8LCI + 2.6ROI + 2.6DI$ ,其中  $LCI$  为土地利用指标;  $V_{PNPI}$  为潜在非点源污染指数值;其余指标与前述一致。为了避免专家赋权法的主观性, Yang 等<sup>[16]</sup>采用指数函数法计算  $V_{PNPI}$  值,并与专家赋权法进行比较,得到了更为客观的流域潜在非点源污染指数值。因此,本文采用指数函数法来表述非点源污染源因子、径流因子和运移因子之间的函数关系。N、P 污染风险指数值为

$$V_{PNPIN/P} = L_i \cdot [\exp(ROI) + \exp(DI)] \quad (3)$$

## 2.2 非点源污染负荷模型

SWAT 模型是基于物理机制的分布式水文模型,近年来在非点源污染模拟方面应用广泛,可以模拟人类活动、农业施肥等对流域中水量水质和沉积物迁移的影响,并可应用于多个子流域的径流量以及氮磷、泥沙、负荷量模拟。本文借助 SWAT 模型模拟各子流域的 TN、TP 负荷,并分析子流域潜在非

点源污染风险指数。

(1) 模型建立。SWAT 模型根据河网水系将流域划分为多个子流域(subbasin),并通过河道或渠系等路径实现拓扑连通,子流域再根据地表覆盖类型、土壤类型、坡度等特征的不同组合进一步划分为多个水文响应单元(HRUs),每个水文单元单独计算。其中水文响应单元水运移过程分为垂向迁移与水平迁移:垂向迁移是指水分在植被层、非饱和土壤层、浅层含水层、深层含水层之间的运移,包括降水与灌溉入渗、非饱和土壤水分再分配、向浅层含水层以及深层含水层渗漏、潜水蒸发、根系吸水、土壤蒸发等过程;水平迁移主要是指水文单元的侧向输出,包括地表径流、壤中流、基流等过程<sup>[17]</sup>。模型建立所需数据见表 4。

表 4 SWAT 模型建立所需数据及来源

Table 4 Data and sources for SWAT model establishment

数据类型	数据说明
高程数据	空间分辨率 12.5 m
土地利用	2020 年 30 m 精度
土壤数据	1:100 万矢量数据
气象数据	气象站实测数据
径流数据	黑石关水文站
水质数据	龙门镇水文站
农业生产	人口、禽畜养殖、农业化肥等

(2) 模型参数率定与验证。结合黑石关水文站的实测径流数据和龙门镇水文站的实测水质数据,使用 SWAT-CUP 软件对模型模拟结果进行率定和验证。根据决定性系数  $R^2$  和纳什效率系数  $NSE$  的结果对模型进行适用性评价。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(N_i - \bar{N})]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (5)$$

式中:  $M_i$  为第  $i$  次模拟值;  $\bar{M}$  为模拟平均值;  $N_i$  为第  $i$  次实测值;  $\bar{N}$  为实测平均值;  $i$  和  $n$  分别为样本编号和总样本数量。

$NSE$  取值从  $-\infty$  到 1.00,当  $NSE = 1.00$  时,模拟值为最优;当  $0.75 < NSE \leq 1.00$  时,模拟效果非常好;当  $0.65 < NSE \leq 0.75$  时,模拟效果为好;当  $0.50 < NSE \leq 0.65$  时,模拟效果为满意;当  $NSE \leq 0.50$  时,模拟效果为不满意。 $R^2$  取值从 0 到 1,该统计量越接近于 1 模型的拟合优度越高;当  $R^2 > 0.5$  时,认为模型模拟效果是可以接受的<sup>[18]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 N、P 污染负荷指标空间分析

伊洛河流域的 N、P 污染负荷指标空间分布如图 2 所示。整体上 N、P 污染负荷指标值空间分布十分相似,均呈现出东北高、西部及南部低,河流附近地区分布较高。N、P 污染负荷指标较高的区域主要位于涧西区、洛龙区、西工区、老城区、瀍河回族区、巩义市,这些区域的主要土地利用方式为耕地和城镇用地,农药残留、农村居民生活以及禽畜粪便造成了当地的较高的非点源负荷。污染负荷指标较低的地区主要分布在陕州区,该地区种植和养殖业较少,主要是由居民生活造成的点源污染。

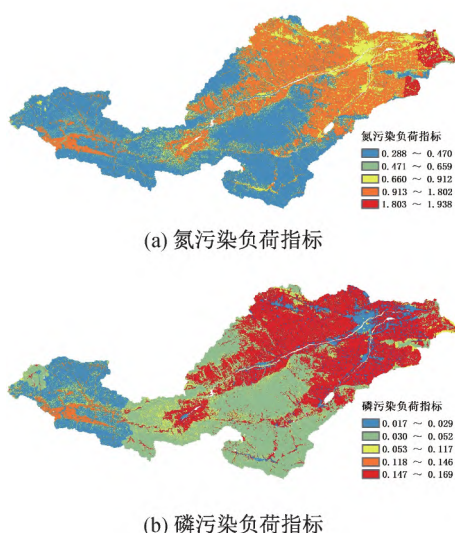


图 2 污染指标分布图

Figure 2 Distribution of pollution load index

流域 N、P 污染源头以及负荷量见表 5,2020 年研究区内 TN、TP 负荷量分别为 39 302.95 t/a 和 5 226.11 t/a。张关超<sup>[19]</sup>使用输出系数法计算的河南省非点源污染负荷,采用面积比例法,推求出伊洛河非点源 TN、TP 负荷量为 39 993.98 t/a、5 467.343 t/a,与本文的计算结果基本一致。土地利用输出的 N、P 负荷量最大,分别为 20 643.62 t/a 和 3 033.31 t/a,分别占流域污染总负荷的 52.52% 和 58.04%;牲畜养殖产生的 N、P 负荷量占流域污染总负荷占比最小,分别为 6.75%、10.94%。

表 6 为不同类型土地利用输出 N、P 污染负荷值。从各土地利用类型来看,耕地输出产生的 N、P 负荷量最大,分别为 13 000.07 t/a 和 1 956.44 t/a;草地(水库坑塘不计入)输出产生的 N 负荷量最小,为 1 322.99 t/a;居民用地输出产生的 P 负荷量最小,为 113.61 t/a。

表 5 流域 N、P 污染负荷来源统计

Table 5 Statistics of N and P pollution load sources in the watershed

污染源	TN 负荷量/ (t · a <sup>-1</sup> )	TN 负荷量 占比/%	TP 负荷量/ (t · a <sup>-1</sup> )	TP 负荷量 占比/%
土地利用	20 643.62	52.52	3 033.31	58.04
居民生活	16 007.01	40.73	1 620.96	31.02
禽畜养殖	2 652.32	6.75	571.84	10.94
合计	39 302.95	100.00	5 226.11	100.00

表 6 不同类型土地利用输出 N、P 污染负荷值

Table 6 Output N and P pollution loads of different land uses

土地利用 类型	TN 负荷量/ (t · a <sup>-1</sup> )	TN 负荷量 占比/%	TP 负荷量/ (t · a <sup>-1</sup> )	TP 负荷量 占比/%
耕地	13 000.07	62.97	1 956.44	64.50
林地	4 267.58	20.67	777.51	25.63
草地	1 322.99	6.41	185.74	6.12
居民用地	2 052.97	9.94	113.61	3.75
流域	20 643.62	100.00	3 033.31	100.00

注:20 643.62 为先保留 3 位小数求总和再四舍五入的结果。

#### 3.2 径流指标空间特征分析

整体来看,研究区径流指标(ROI)的空间分布特征大致与流域坡度一致,见图 3。研究区内虽然土壤类型繁多,但土壤渗透系数为 0.36~0.72 mm/h,分布区间较小,对 ROI 影响较小;不同土地利用方式之间初步径流虽然相差较大,但由于研究区坡度差异大,ROI 受到坡度的修正影响较大。

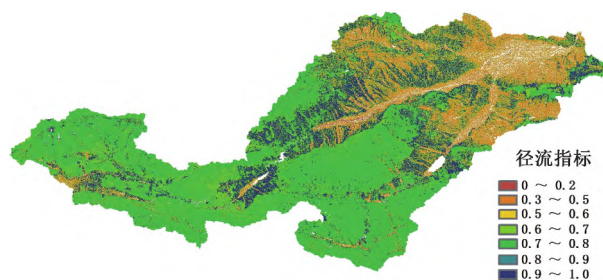


图 3 2020 年径流指标分布图

Figure 3 Runoff index distribution in 2020

#### 3.3 距离指标空间特征分析

距离指标(DI)表示污染源在运移过程中的迁移和降解。距离水体越近 DI 值就越高,距离水体越远 DI 值就越低,如图 4 所示。

#### 3.4 潜在非点源污染风险指数空间特征分析

依据自然断点法<sup>[20]</sup>将潜在非点源污染指数分为 5 个不同风险等级,并基于 GIS 得到 2020 年伊洛河流域潜在非点源污染风险空间分布图,如图 5 所示。

表 7 为 2020 年氮、磷污染风险等级表。可以看



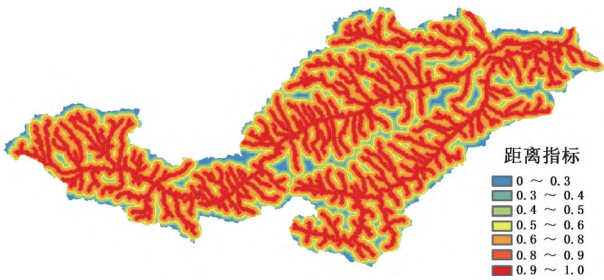


图 4 2020 年距离指标分布图  
Figure 4 Distribution of distance indicators in 2020

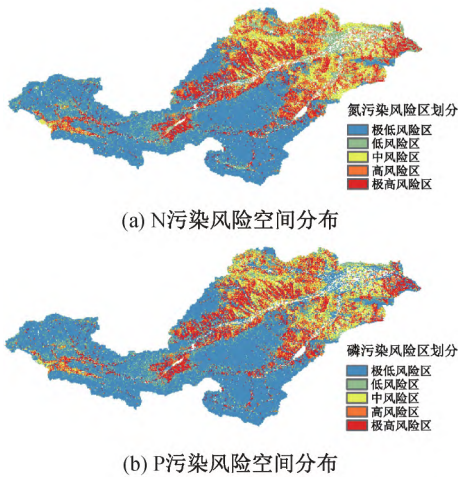


图 5 2020 年非点源空间分布  
Figure 5 Spatial distribution of non-point sources in 2020

出,研究区的 N、P 非点源污染风险以极低风险区为主,N 污染极低风险区面积为 8 578.621 km<sup>2</sup>,占伊洛河流域总面积的 48.85%,低、中、高和极高风险区面积分别为 2 566.316、1 699.806、2 570.505、2 145.029 km<sup>2</sup>,面积比例分别为 14.61%、9.68%、14.64%、12.22%。P 污染极低风险区面积为 9 766.24 km<sup>2</sup>,占伊洛河流域总面积的 55.48%,低、中、高和极高风险区面积分别为 1 541.82、1 961.47、2 331.92、2 003.16 km<sup>2</sup>,面积比例分别为 8.76%、11.14%、13.25%、11.38%。

表 7 2020 年氮、磷污染风险等级表

Table 7 Risk levels of N and P pollution in 2020			
污染	等级	面积/km <sup>2</sup>	占流域总面积比例/%
N	极低	8 578.621	48.85
	低	2 566.316	14.61
	中	1 699.806	9.68
	高	2 570.505	14.64
	极高	2 145.029	12.22
P	极低	9 766.24	55.48
	低	1 541.82	8.76
	中	1 961.47	11.14
	高	2 331.92	13.25
	极高	2 003.16	11.38

通过专家评价赋权法所得的 2020 年非点源污染风险空间分布如图 6 所示,与指数函数法所得到的结果大致相同,但下游平原地区存在差异。下游平原地区主要的土地利用方式为城镇用地及耕地,人口集中的城镇区域具有较完善的污水处理系统,污染主要经处理后以点源的形式排入河流,故产生的非点源负荷较小。相比之下,指数函数法所得结果比较符合研究区实际情况。

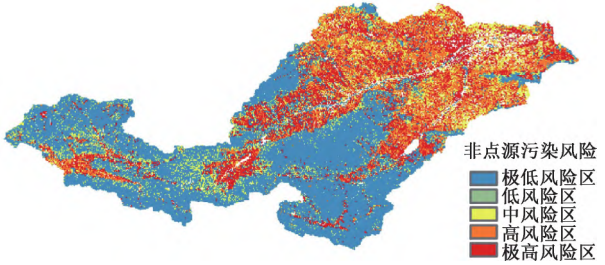


图 6 基于原始 PNPI 模拟非点源污染风险空间分布  
Figure 6 Simulated spatial distribution of non-point source pollution risk based on original PNPI

伊洛河流域 2020 年 N、P 潜在非点源污染风险空间分布特征较为相似,伊河、洛河 2 支流上游污染风险较低,中下游污染风险较高。高风险主要集中在中下游河南省瀘河回族区、老城区、西工区、涧西区、洛龙区、伊川县、巩义市、宜阳县、洛宁县、嵩县、卢氏县以及洛南县等地的河道两侧,此类区域以耕地和城镇用地居多,人口密度大,地势平坦距离河流较近,产生的农药残留、人类生活垃圾、牲畜粪便对河流造成污染风险高;低风险区主要分布在上游陕西省华州区、丹凤县及河南省栾川县,此地区以林地和灌木林为主,受人类干扰较少,植被对污染物质有拦截作用,距离河流较远,对河流造成污染风险低。

3.5 非点源污染模型估算污染关键源区

SWAT-CUP 是专门应用于 SWAT 模型参数率定的计算机软件,该软件将 GLUE、SUFI2、PSO 程序与 SWAT 模型联系起来,可进行参数敏感性以及不确定性分析、参数的率定和验证。SUFI2 算法是通过拉丁超立方随机采样法估算参数的最优化方法。本文采用 SWAT-CUP 中的 SUFI2 方法对影响流域产汇流的水文参数进行全局敏感性分析,选取敏感性较高的 13 个参数进行率定验证,如表 8 所示,其中,方式 r 表示乘以原始参数值,ν 表示该值代替原始值。

利用黑石关水文站 2001—2015、2016—2017 年的逐日径流资料作为校准期、验证期对伊洛河流域进行模拟,结果如图 7 所示。径流模拟的 R<sup>2</sup> 和 NSE 在校准期分别为 0.87、0.85,在验证期分别为 0.86、0.86。利用龙门镇水文站 2004—2015 年、2015—

表8 模型敏感性参数

Table 8 Sensitivity parameters of model

参数	含义	方式	调试终值
CN2	SCS 径流曲线数	r	-0.000 2
SOL_BD	土壤湿容重	r	-0.380 0
SOL_K	土层饱和水导率	r	-0.625 0
SOL_AWC	土壤有效含水量	r	0.130 0
ALPHA_BF	基流消退系数	v	0.360 0
CANMX	树冠截留	v	76.400 0
GWQMN	潜水回流临界深	v	0.120 0
ESCO	土壤蒸发补偿系数	v	0.880 0
GW_REVAP	潜水补给系数	v	0.110 0
CHN_2	主河道曼宁系数	v	0.280 0
GW_DELAY	地下水延迟	v	407.360 0
RREVAPMN	潜水补给阈值	v	378.520 0
SFTMP	降雪气温	v	1.040 0

2017 年的实测年 TP 负荷分别作为校准期、验证期, TP 模拟的  $R^2$  和  $NSE$  在校准期分别为 0.85、0.84, 在验证期分别为 0.85、0.84, 利用龙门镇水文站 2012—2015 年、2015—2017 年的实测年 TN 负荷分别作为校准期和验证期, TN 模拟的  $R^2$  和  $NSE$  在校准期分别为 0.66、0.59, 在验证期分别为 0.66、0.59。由此可知, SWAT 模型在伊洛河流域的模拟效果是可以接受的。

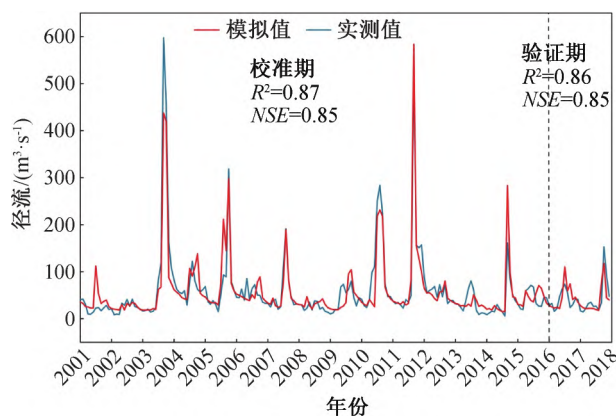


图7 径流模拟结果

Figure 7 Simulation results of runoff

SWAT 模型估算的流域 TN 负荷量为  $0.08 \sim 9.28 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ , TP 负荷量为  $0.003 \sim 2.436 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$  如图 8 所示。TN 负荷量极高区主要分布在洛龙区、涧西区、西工区、老城区、偃师区、伊川县、嵩县、卢氏县; 极低负荷区主要分布在栾川县、洛南县、丹凤县、华州区。TP 负荷量极高风险区主要分布在巩义市、洛龙区、新安县、宜阳县、伊川县嵩县、卢氏县; 极低风险区主要分布在栾川、丹凤县、洛南县、华州区。

采用皮尔逊相关系数法对伊洛河流域 115 个子

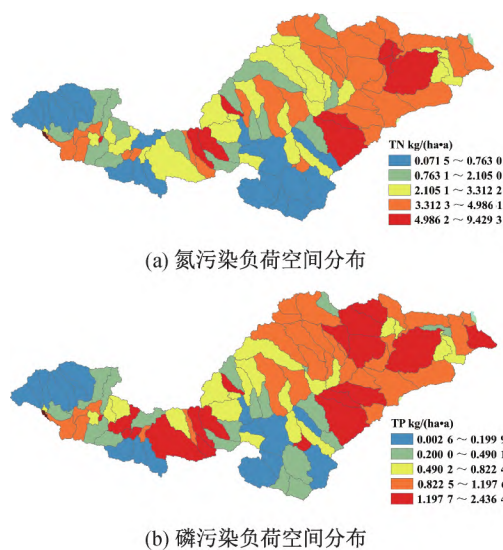


图8 伊洛河流域污染负荷空间分布

Figure 8 Spatial distribution of pollution loads in the Yiluo River Basin

流域所模拟的非点源污染氮磷负荷与潜在非点源污染风险模拟结果进行相关性分析, 得到 N、P 相关系数均为 0.6, 这表明研究区非点源营养物负荷空间分布与潜在非点源污染风险空间分布间存在强相关关系。

#### 4 结论

本文研究了伊洛河 2020 年潜在非点源污染风险空间分布特征, 并使用 SWAT 模型识别流域内非点源污染关键源区。主要结论如下。

(1) 伊洛河流域 N、P 非点源污染风险空间分布较为相似, 均呈现出伊河、洛河两支流上游污染风险较低, 中下游污染风险较高的空间分布特征; N 和 P 污染极低、低、中、高、极高风险区面积分别占伊洛河流域总面积的 48.85%、14.61%、9.68%、14.64%、12.22% 和 55.48%、8.76%、11.14%、13.25%、11.38%。

(2) 2020 年流域的氮、磷非点源污染主要来源于土地利用输出, 分别为  $20\,643.62 \text{ t/a}$  和  $3\,033.31 \text{ t/a}$ , 不同的土地利用类型中耕地输出的 N、P 负荷量相对较大, 分别为  $13\,000.07 \text{ t/a}$  和  $1\,956.44 \text{ t/a}$ ; 草地输出产生的 N 负荷量最小, 为  $1\,322.99 \text{ t/a}$ , 居民用地产生的 P 负荷量最小, 为  $113.61 \text{ t/a}$ 。

(3) 采用皮尔逊相关系数法计算改进后的 PNPI 模型模拟结果以及 SWAT 模型模拟结果之间的相关性, 具有较好的拟合度, 证明改进后的 PNPI 模型在研究区模拟结果较好。

#### 参考文献:

[1] 王萌, 刘云, 李春蕾, 等. 三峡库区湖北段非点源污

- 染氮磷排放时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 46-52, 2.
- WANG M, LIU Y, LI C L, et al. Spatio-temporal distribution of pollution loads from agricultural non-point sources nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir area of Hubei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 46-52, 2.
- [2] MUNAFO M, CECCHI G, BAIOTTO F, et al. River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 77(2): 93-98.
- [3] 郑志杰. 伊洛河流域地表水环境模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- ZHENG Z J. Study on surface water environment simulation in the Yi-Luo River Basin[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [4] 于佩丹, 张守红, 李华林, 等. 北沙河上游流域氮、磷污染风险空间分布特征解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 4-12.
- YU P D, ZHANG S H, LI H L, et al. Spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus pollution risk in the upper Beisha River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(2): 4-12.
- [5] LU J, GONG D Q, SHEN Y N, et al. An inversed Bayesian modeling approach for estimating nitrogen export coefficients and uncertainty assessment in an agricultural watershed in Eastern China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 79-88.
- [6] CHEN Y. Assessing the effects of land use changes on non-point source pollution reduction for the Three Gorges Watershed using the SWAT model[J]. Journal of Environmental Informatics, 2013, 22(1): 13-26.
- [7] 林永泽. 基于图卷积的时空水质预测方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- LIN Y Z. Research on prediction method of spatiotemporal water quality based on graph convolution[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [8] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1184-1196.
- LIU S T, ZHANG D, LI Y H, et al. Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yi-Luo River Basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1184-1196.
- [9] SHAO T T, WANG T. Effects of land use on the characteristics and composition of fluvial chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yiluo River Watershed, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106332.
- [10] 鲁东霞, 李祥华, 丁颀, 等. 巩义伊洛河高品质水质安全与持续改善的科技需求[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(6): 40-43.
- LU D X, LI X H, DING S, et al. Scientific and technological requirements for high-quality water quality safety and continuous improvement of Gongyi Yi-Luo River[J]. Agro-Environment & Development, 2010, 27(6): 40-43.
- [11] 彭舜磊, 李鹏, 王梓臣, 等. 河南省农业面源污染负荷估算及区划[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 225-230.
- PENG S L, LI P, WANG Z C, et al. Calculations and regionalization of agricultural non-point source pollution load in He'nan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 225-230.
- [12] 王国重, 李中原, 左其亭, 等. 丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 415-422.
- WANG G Z, LI Z Y, ZUO Q T, et al. Estimation of agricultural non-point source pollutant loss in catchment areas of Danjiangkou Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 415-422.
- [13] 武晓峰, 李婷. 流域内污染负荷分布的评价模型研究: 以密云县蛇鱼川小流域为例[J]. 中国环境科学, 2011, 31(4): 680-687.
- WU X F, LI T. Study on the assessment model about contaminant load distribution in basins—take Sheyuchuan small watershed as example[J]. China Environmental Science, 2011, 31(4): 680-687.
- [14] 车振海. 试论土壤渗透系数的经验公式和曲线图[J]. 东北水利水电, 1995, 13(9): 17-19.
- CHE Z H. On the empirical formula and curve of soil permeability coefficient[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 1995, 13(9): 17-19.
- [15] 徐文静, 常国梁, 时迪迪, 等. 北运河上游非点源污染风险空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 7-14.
- XU W J, CHANG G L, SHI D D, et al. Spatial distribution of non-point source pollution risk in the upper Beiyun River Watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 7-14.
- [16] YANG F, XU Z C, ZHU Y Q, et al. Evaluation of agricultural nonpoint source pollution potential risk over China with a transformed-agricultural nonpoint pollution potential index method[J]. Environmental Technology, 2013, 34(21): 2951-2963.
- [17] GAN R, CHEN C Z, TAO J, et al. Hydrological process simulation of sluice-controlled rivers in the plains area of China based on an improved SWAT model[J]. Water Re-

- sources Management, 2021, 35(6): 1817–1835.
- [18] 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.
- [19] 张关超. 河南省农业非点源污染特征研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- ZHANG G C. Study on the characteristics of agricultural non-point source pollution in Henan Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [20] 张丹红, 王效科, 张路, 等. 大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1391–1401.
- ZHANG D H, WANG X K, ZHANG L, et al. Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1391–1401.

## Spatial Distribution of Non-point Source Pollution Risk Based on PNPI and SWAT Model

ZHENG Jiak<sup>1,2</sup>, GAN Rong<sup>1,2</sup>, ZUO Qiting<sup>1,3</sup>, YANG Feng<sup>4</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Rehabilitation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resources and Water Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Construction Management Company for Chushandian Reservoir of Project of Henan Province, Xinyang 464043, China)

**Abstract:** In order to clarify the spatial distribution characteristics of non-point source nitrogen (N) and phosphorus (P) nutrient pollution risk in the watershed, the key non-point source pollution source areas in the watershed were identified. This study took the Yiluo River Basin as an example. The output coefficient method was used to quantify the N and P pollution loads generated by different land use types, residents' lives and livestock breeding in the watershed. With the improved potential non-point pollution indicator (PNPI) model and SWAT (soil and water assessment tool) model, the spatial distribution characteristics of N and P pollution risk were described, and the key source areas of N and P pollution were identified. Pearson correlation coefficient method was used to calculate the correlation between the simulation results of the two models, and the reliability of the simulation results of the improved PNPI model was evaluated. The results showed that in 2020, the spatial distribution of N and P non-point source pollution risks in the Yiluo River Basin was similar. It showed the spatial distribution characteristics of lower pollution risks in the upper reaches of the Yi River and Luo River tributaries, and higher pollution risks in the middle and lower reaches. N and P very low, low, medium, high and extremely high risk areas accounted for 48.85%, 14.61%, 9.68%, 14.64%, 12.22% and 55.48%, 8.76%, 11.14%, 13.25%, 11.38% of the total area of Yiluo River, respectively. The output of land use was the main source of N and P pollution in the basin, with the load of 20 643.62 t/a and 3 033.31 t/a, respectively. Among different land use types, the output of N and P pollution from arable land was the most, which were 13 000.07 t/a and 1 956.44 t/a, respectively; the output of grassland produced the least N pollution, with a pollution load of 1 322.99 t/a. The P pollution of residential land was the least, and the pollution load was 113.61 t/a. The Pearson correlation coefficients between the N and P pollution loads simulated by the improved PNPI model and the SWAT model reached 0.6, indicating that the improved PNPI model was suitable for the study area.

**Keywords:** nitrogen and phosphorus pollution; potential non-point source pollution index model; output coefficient method; SWAT model; Yiluo River Basin