

基于SWAT模型的浑太河流域非点源氮磷污染负荷分布模拟研究

欧阳婉盈

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年9月11日; 录用日期: 2025年10月23日; 发布日期: 2025年11月12日

摘要

非点源与城市污水排放的复合输入显著加剧流域富营养化风险。以浑太河流域为例, 应用SWAT模型模拟分析流域非点源氮磷污染的时空分布特征。研究结果表明: (1) SWAT模型在率定期、验证期的 R^2 、 E_{ns} 均大于0.7, 说明模型在研究区具有较高适用性; (2) 时间分布: 2010~2022年间TN和TP总体负荷呈下降趋势, 年内变化表现为“汛期高、非汛期低”的特征。(3) 空间分布: TN和TP的高值区主要分布在上中游及库区周边, 下游地区负荷相对较低。进一步分析表明, 土地利用变化对氮磷输出具有显著影响: 耕地和建设用地是流域氮磷输出的主要“源区”, 而林地、草地与水域则发挥“汇区”功能, 有效削减非点源污染。本研究揭示了浑太河流域非点源氮、磷污染的时空格局及其驱动机制, 可为流域水环境管理提供科学依据。

关键词

氮磷, SWAT, 非点源, 浑太河

SWAT-Based Modeling of Spatiotemporal Variations in Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Loads in the Huntai River Basin

Wanying Ouyang

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: September 11, 2025; accepted: October 23, 2025; published: November 12, 2025

Abstract

The combined input of non-point sources and urban sewage discharge significantly exacerbates the

文章引用: 欧阳婉盈. 基于 SWAT 模型的浑太河流域非点源氮磷污染负荷分布模拟研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(11): 1541-1552. DOI: 10.12677/aep.2025.1511168

risk of eutrophication in river basins. Taking the Huntai River Basin as an example, the SWAT model was applied to simulate and analyze the temporal and spatial distribution characteristics of non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the basin. The research results indicate that: (1) The R^2 and Ens values of the SWAT model during the calibration and validation periods are both greater than 0.7, suggesting that the model has high applicability in the study area. (2) Temporal distribution: From 2010 to 2022, the overall loads of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) showed a downward trend, and the intra-annual variation was characterized by “high during the flood season and low during the non-flood season”. (3) Spatial distribution: The high-value areas of TN and TP are mainly distributed in the upper and middle reaches and around the reservoir area, while the loads in the downstream area are relatively low. Further analysis shows that land-use changes have a significant impact on nitrogen and phosphorus output: cultivated land and construction land are the main “source areas” of nitrogen and phosphorus output in the basin, while forest land, grassland, and water areas function as “sink areas”, effectively reducing non-point source pollution. This study reveals the temporal and spatial patterns and driving mechanisms of non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the Huntai River Basin, providing a scientific basis for water environment management in the basin.

Keywords

Nitrogen and Phosphorus, SWAT Model, Non-Point Source Pollution, Huntai River Basin

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化和人类活动增强的背景下,非点源污染(NPS)已成为农业和城市化地区水体污染的主要来源之一,也是流域水环境治理的核心难题。我国作为世界第二大农业生产国,农业面源污染问题尤为突出。大量氮、磷等营养物质流入地表水体,导致富营养化、水华频发、水质退化等环境问题[1]。全国第二次污染源普查数据显示,农业源氮、磷排放分别占全国总量的45%以上[2],表明农业活动已成为水环境安全的重要威胁。

非点源污染的本质是污染物在降雨或融雪过程中随地表径流或壤中流迁移,从分散、非固定的源头进入河流、湖泊、水库等水体,具有源头广泛、传输路径复杂以及显著的时空异质性等特征[3][4]。按污染源属性可分为城市型与农村型,其中农村面源污染问题更为复杂,主要来源包括农业生产、化肥与农药施用、畜禽养殖排泄物以及农村生活污水等。与工业点源污染相比,非点源污染更难以监测与量化,传统的水体治理手段难以实现有效控制,这也使得准确识别污染负荷的时空分布格局成为流域管理与治理的前提[5]。

目前,非点源污染负荷估算方法主要包括输出系数法、经验模型法与物理模型法。其中,物理过程模型因能够较为精确地描述水文循环、泥沙输移及污染物迁移转化过程,已成为主流研究手段[6]。在众多物理模型中,SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)、SWMM (Storm Water Management Model)等被广泛应用于流域水文与水质模拟。已有大量研究表明,SWAT模型凭借其对流域复杂下垫面和长期时序数据的适应性,在非点源污染研究中具有较高可靠性和普适性。Romagnoli等[7]在阿根廷Carcarañá河流域利用SWAT模型识别了氮磷污染的关键贡献区;Busteed等[8]在美国Wister湖流域确定了农业活动对非点源污染的主导作用;Huang等[9]则指出,城市扩张与农业集

自然条件数据包括地形数据、土壤数据、气象数据。高程和坡度来自于空间分辨率为 30 米的 ASTER GDEM 卫星的数字高程模型；土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)，分辨率为 1 km (图 3)；气象数据(降水、气温、太阳辐射、风速、相对湿度)来自 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(CAMDS)；水文数据(逐日径流量；输沙量)来自于《中华人民共和国水文年鉴》第二卷，农业管理数据参考辽宁省统计年鉴。

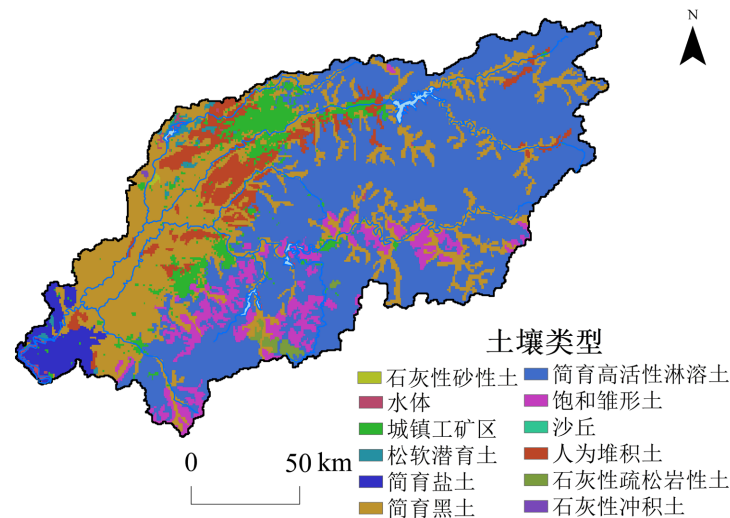


Figure 2. Distribution of soil types in Huntai River
图 2. 浑太河土壤类型分布

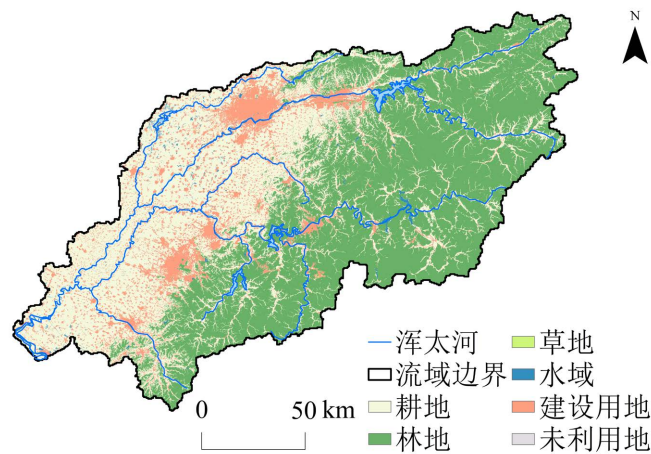


Figure 3. Distribution of land use types in Huntai River
图 3. 浑太河土地利用类型分布

3. 研究方法

3.1. SWAT 模型

SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)由美国农业部农业研究局(USDA-ARS)开发，是一种基于物理过程的流域尺度非点源污染模拟模型，广泛应用于水文过程、泥沙输移及非点源污染负荷的模拟与评估[11]。SWAT 模型依据地形和河流网络将流域划分为若干个子流域，进一步基于土地利用类型、土壤类型和坡度特征细分为水文响应单元(Hydrologic Response Unit, HRU)，从而提升对流域内空间异质性的

描述能力。氮磷循环是 SWAT 模型进行非点源污染模拟的核心环节，涵盖氮、磷的输入、转化、存储与输出等多个过程。氮的输出主要通过地表径流、壤中流与地下水迁移及植物吸收三条途径实现；磷的输出则主要依赖地表径流与泥沙吸附两种方式进入水体。总氮(Total Nitrogen, TN)和总磷(Total Phosphorus, TP)负荷的计算公式为：

$$TN = N_{surf} + N_{lat} + N_{gw} \quad (1)$$

$$TP = P_{surf} + P_{sed} \quad (2)$$

式中，TN 为总氮含量， N_{surf} 为地表径流中的氮， N_{lat} 为壤中流的氮， N_{gw} 为地下水中的氮。TP 为总磷含量， P_{surf} 为地表径流的磷含量， P_{sed} 为泥沙吸附的磷含量。

3.2. SWAT 模型构建

模型建立以及运行时间设置为 2008~2022 年，一共 15 年数据，以月尺度进行，在 SWAT 模型中设置 2008~2010 年为预热期，径流和泥沙的率定期为 2010 年 1 月 1 日~2013 年 12 月 31 日，验证期为 2014 年 1 月 1 日~2022 年 12 月 31 日。总流域面积为 $2.593 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，划分子流域 183 个。SWAT 模型中的最小水文响应单元(HRU)的划分会极大的影响流域内径流、含沙量以及氮磷负荷的模拟。在本研究中为确保模型输出结果的精确度，并确保每个流域都有相对合理的 HRU，将土地利用、土壤类型和坡度的阈值设定为 10%，最终划分出 2158 个最小水文响应单位(HRU)。

3.3. 污染源数据输入

3.3.1. 点源污染

浑太河流域内工业点源与污水处理厂分布广泛。为在模型中准确反映其空间影响，本研究根据各排放源在流域内的实际地理位置，将其分别归并至对应的子流域进行污染负荷加总。基于 2008~2022 年环境监测与统计资料，整理得到各子流域内点源的日均污染物排放总量，并以此为基准构建 SWAT 模型点源输入文件，实现点源污染负荷在时间和空间维度上的准确定量输入。

3.3.2. 非点源污染

非点源污染主要来源于农业化肥施用、农村生活污水、畜禽养殖及城市地表径流等。在 SWAT 模型中，其通过水文响应单元(HRU)实现空间分配与过程模拟。农业管理数据(如施肥量、作物类型)基于《辽宁省统计年鉴》，经降尺度后分配至 HRUs。

浑太河流域耕地以旱田与水田为主，旱田主要种植春玉米，水田以单季水稻为主。具体施肥制度如下：(1) 玉米：纯氮 70 kg/ha、纯磷 22.5 kg/ha、尿素 100 kg/ha；(2) 水稻：纯氮 70 kg/ha、纯磷 35 kg/ha、尿素 100 kg/ha。其他非点源污染负荷依据土地利用类型、农村人口密度和畜禽分布等空间代理指标估算，并以分布式方式参与流域水文与水质过程的耦合模拟。

3.4. 模型率定以及验证

本研究率定以及验证采用校准与不确定性程序(SWAT-CUP)中的序列不确定性拟合算法(SUFI-2)对 SWAT 模型进行校准和验证。SUFI-2 算法是一种基于反向建模的优化方法，被广泛应用于水文模型的参数优化与不确定性分析。其基本原理是通过定义一个较大的初始参数范围，利用多次迭代运行模型，将模拟结果与观测数据进行对比，并根据误差逐步调整参数范围，使其逐渐收敛于一个合理的范围内。最终，SUFI-2 算法通过对参数范围的收敛性和模拟结果的不确定性范围进行综合评估，确定模型的最优参数设置及不确定性范围。该方法能够有效结合参数校准与不确定性分析，尤其适用于复杂流域条件下的

模型校准需求。

本研究采用 SWAT-CUP 中的序列不确定性拟合算法(SUFI-2)对 SWAT 模型进行校准和验证。在模型率定与验证过程中,为了评估模型模拟结果的准确性与可靠性,采用了确定性系数(R^2)和 Nash-Sutcliffe (E_{ns})来两项常用统计指标,其计算方法:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \overline{M_i})^2 + \sum_{i=1}^N (S_i - \overline{S_i})^2} \tag{3}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum (M_i - S_i)^2}{\sum (M_i - \overline{M_i})^2} \tag{4}$$

式中, M_i 和 S_i 分别表示观测值和模拟值; $\overline{M_i}$ 和 $\overline{S_i}$ 分别表示观测值和模拟值的平均值。采用 R^2 和 E_{ns} 效率系数来判断模拟的效果,当 $R^2 > 0.6$ 、 $E_{ns} > 0.6$ 认为模拟较好,贴近实测值; $R^2 > 0.75$ 、 $E_{ns} > 0.75$ 认为模拟效果优秀[11] [12]。

4. 结果分析

4.1. SWAT 模型参数率定与验证

研究选取了位于浑太河中游的沈阳站及下游的唐马寨站,作为流域径流与输沙过程的率定与验证站点。其中,唐马寨站所控制的汇水区域覆盖了流域的大部分面积,因此其模拟精度直接反映模型在复杂水文条件及异质下垫面背景下的适应能力。此外,牛庄站与唐马寨站均具备连续且长期的水文监测记录,能够较为系统地呈现流域的水文响应特征,为模型验证提供了坚实的数据支撑。

在 SWAT-CUP 平台上,首先对浑太河流域进行了参数敏感性分析,识别出 11 个对模拟结果具有显著影响的关键参数。在此基础上,通过多轮迭代优化过程,逐步调整这些参数的取值区间,并最终确定出一组表现最佳的参数组合,用于模型率定(见表 1)。

Table 1. Sensitivity parameters and calibration range of the SWAT model in Huntai River Basin

表 1. 浑太河流域 SWAT 模型敏感性参数以及率定范围

参数类别	参数	含义	参数范围
径流	CN2	中等湿润条件下的径流曲线数	35~98
	ALPHA_BF	基流衰减常数	0~1
	GWQMN	基流产生的最小地下水储量	0~5000
	ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.47~1.47
	GW-DELAY	地下水滞后系数	90~400
	SLSUBBSN	平均坡长	10~150
	REVAPMN	蒸发回补的最小水位	0~500
	CANMX	冠层截留最大容量	0~100
泥沙	SPCON	泥沙输移线性浓度系数	0.0001~0.01
	SPEXP	泥沙输移方程指数	1~1.5
	CH_K2	河道渗透系数	0.01~500

如图 4 和图 5 所示,沈阳站与唐马寨站在径流模拟方面均表现出较高的一致性。在率定期内,两站点的决定系数(R^2)均达到 0.80,纳什效率系数(E_{ns})分别为 0.79 和 0.80;在验证期, R^2 分别提升至 0.81 和

0.82, E_{ns} 系数分别为 0.80 和 0.85。输沙模拟方面, 沈阳与唐马寨两站点在率定期的月均输沙量模拟 R^2 分别为 0.80 和 0.83, E_{ns} 系数分别为 0.79 和 0.81; 在验证期, 两站点的 R^2 均为 0.82, E_{ns} 系数为 0.81 和 0.80。

总体来看, SWAT 模型在径流与输沙的模拟中与实测数据具有良好的拟合度, 尤其在洪峰阶段的响应较为准确, 低水期的模拟结果也具备较强的稳定性。这表明 SWAT 模型在沈阳与唐马寨站均表现出良好的模拟性能, 说明其在浑太河流域的水文与泥沙过程模拟中具有较强的适用性和可靠性。

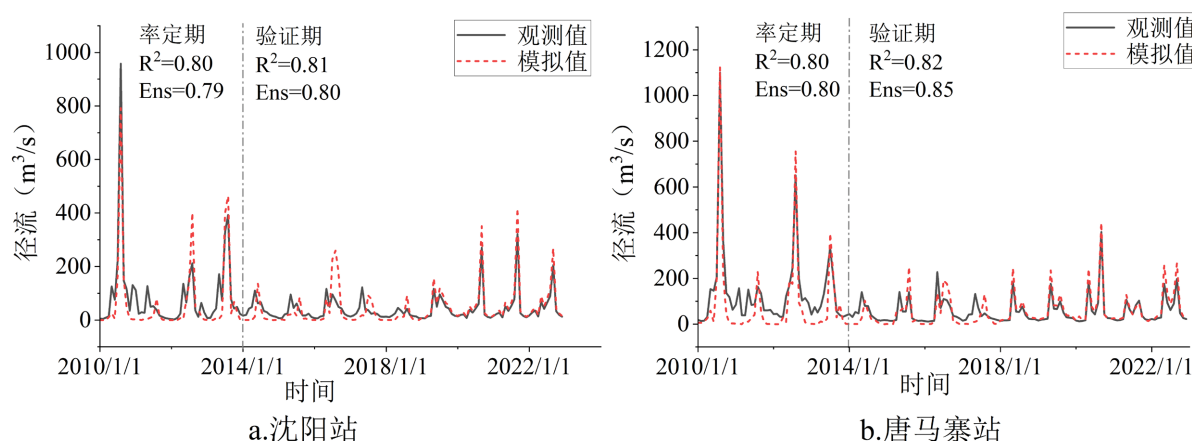


Figure 4. Calibration and validation results of the Huntai River runoff rate

图 4. 浑太河径流率定与验证结果

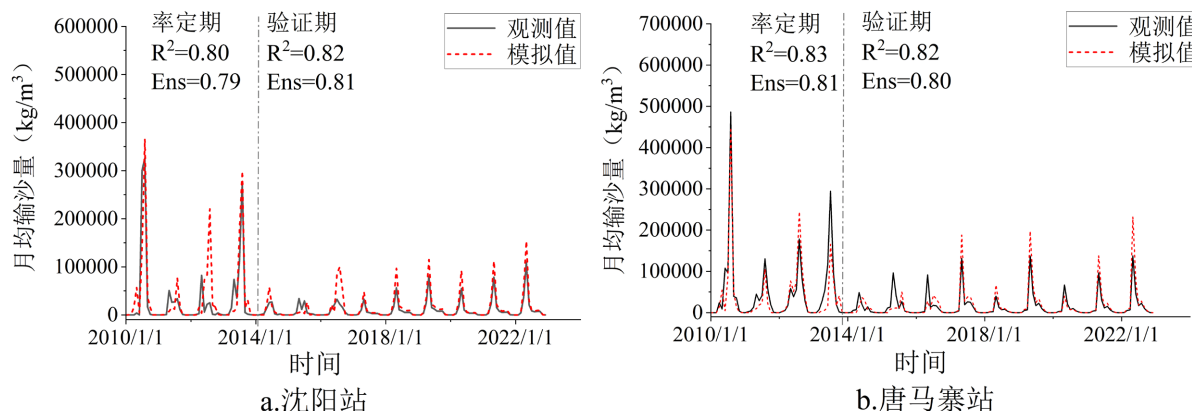


Figure 5. Calibration and validation results of mud content in Huntai River

图 5. 浑太河泥沙率定与验证结果

4.2. 总氮总磷的时间分布特征

(1) 年际变化

2010~2022 年浑太河流域年均 TN、TP 年负荷变化见图 6。结果显示: 2010~2022 年, 浑太河流域总氮(TN)与总磷(TP)输出量整体呈下降趋势, 但两者变化幅度存在差异。TN 由 2010 年的约 2.3×10^4 t 降至 2022 年的 1.5×10^4 t, 累计降幅达 34.8%。阶段性来看, 2010~2013 年 TN 下降 8.7%, 变化较缓; 2013~2018 年降幅增至 14.3%; 2018~2022 年下降最为显著, 减少约 16.7%。TP 输出量则由 2010 年的 410 t 降至 2022 年的 320 t, 累计降幅 22%。其中, 2010~2013 年下降 4.9%, 2013~2018 年降幅 10.3%, 2018~2022 年继

续下降 8.6%。总体而言，TN 的减幅显著高于 TP，表明氮素负荷对环境变化的响应更为敏感，而磷的削减相对滞后。

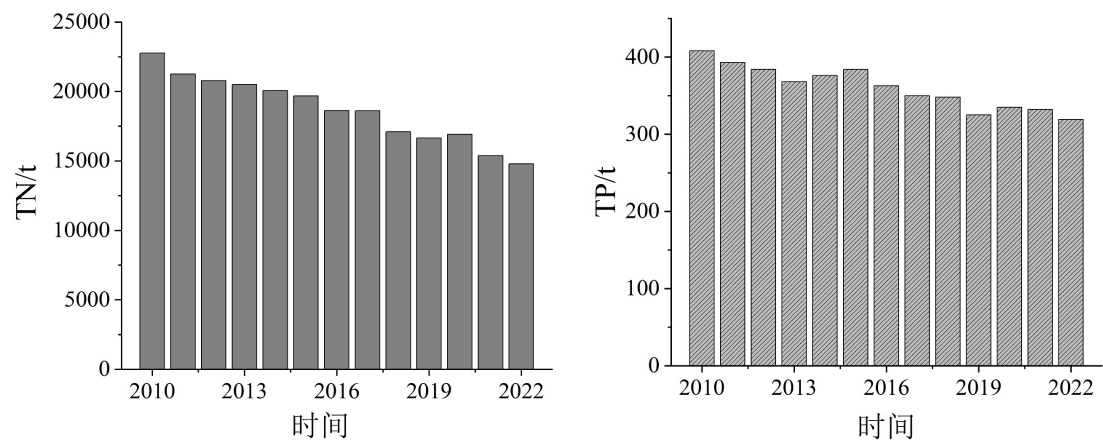


Figure 6. Annual TN and TP loads in the Huntai River Basin from 2010 to 2022

图 6. 浑太河流域 2010~2022 年均 TN、TP 负荷

(2) 年内变化

2010~2022 年浑太河流月均 TN、TP 年负荷变化见图 7。结果显示：从月尺度来看，2010~2022 年浑太河流域总氮(TN)与总磷(TP)输出量均表现出显著的季节性波动特征。TN 输出呈现“单峰型”分布，主要集中在 6~8 月汛期，8 月达到峰值约 4.5×10^3 t，占全年总量的 40%以上；1~4 月及 10~12 月 TN 输出维持在低水平，单月贡献率不足 5%。TP 输出的年内变化与 TN 基本一致，但峰值出现时间略提前，7 月达到最大值约 82 t，占全年总量的 30%左右；1~3 月与 11~12 月 TP 输出极低，接近全年“低谷期”。综合来看，TN 和 TP 的高输出期与降水高峰高度吻合，表明径流过程对氮磷迁移具有显著驱动作用；而在枯水季，受径流量限制，TN 和 TP 输出均保持在较低水平，贡献率有限。

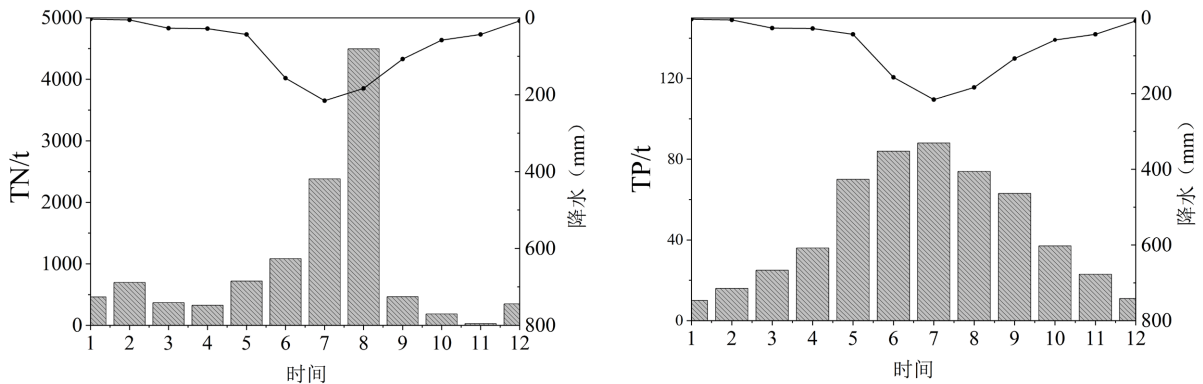


Figure 7. Monthly average TN and TP loads in the Huntai River Basin

图 7. 浑太河流域月均 TN、TP 负荷

4.3. 总氮总磷空间分布特征

基于 SWAT 模型多年平均模拟结果，分析了浑太河流域总氮(TN)和总磷(TP)年均输出负荷的空间分布特征(图 8)。结果表明，TN 输出在流域内呈现出显著的高值集聚特征，主要分布于上中游及东南部部

分子流域，最大值可达 861.29t；而西南部平原区 TN 输出显著偏低，普遍不足 60t。TP 的高值区则主要集中在流域南部及库区周边子流域，最高达 106.53t，其余区域普遍处于低水平，尤其是西北部子流域多低于 10t。总体来看，TN 与 TP 输出均表现为“上中游及库区高、下游低”的空间格局。其中，TN 高值区分布范围更广，空间分异程度更强；相比之下，TP 高值区更为集中，主要受库区周边局地条件的影响。

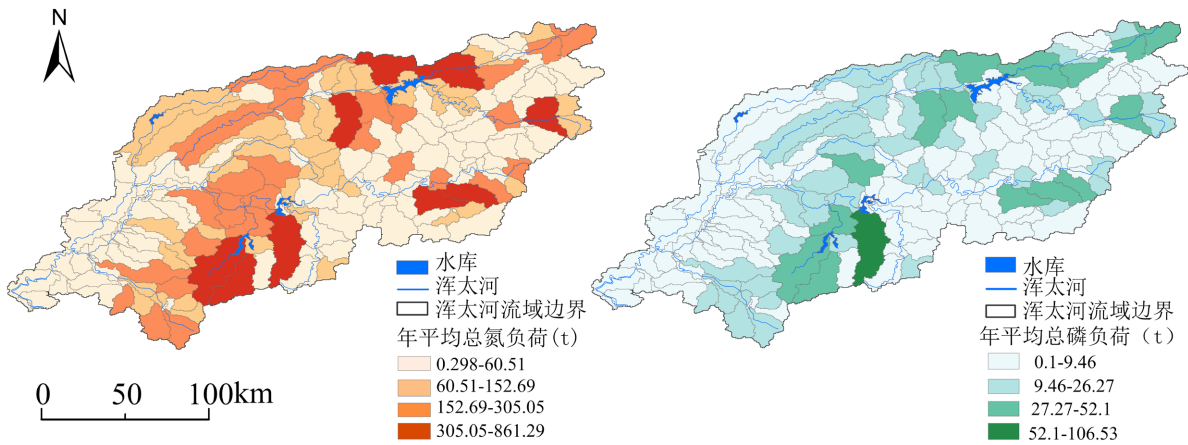


Figure 8. Spatial distribution of total nitrogen and total phosphorus over the years
图 8. 年均总氮总磷空间分布

4.4. 子流域土地利用变化对氮磷输出的影响

从水文响应单元 HRU 尺度上进行分析，各土地利用类型对氮磷输出贡献率如图 9 所示：耕地的总氮和总磷负荷分别占比约 77.5%和 63.2%，远高于其他类型用地，是流域内贡献率最高的用地类型；建设用地对总磷负荷的贡献率达 28%，是仅次于耕地的第二大磷污染源。林地和草地对于总氮总磷负荷贡献率为 8%、7.34%、2.34%、1.07%，体现了林地和草地具有明显的削减氮磷污染能力。未利用地的贡献率非常低，浑太河流域内未利用地面积小，故氮磷产出量和贡献低。综上所述，耕地的氮磷产出量最大，其次是建设用地、林地、草地和为利用地。

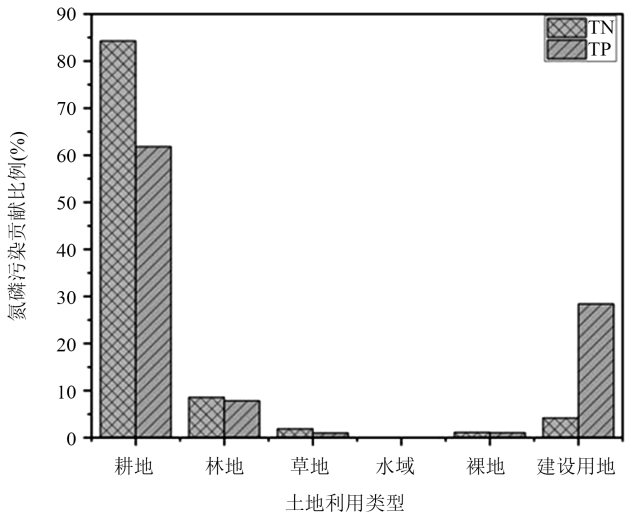


Figure 9. Contribution rate of each land use type to nitrogen and phosphorus output
图 9. 各土地利用类型对氮磷输出贡献率

为评估土地利用变化对氮磷输出的影响,选取年均 TN、TP 变化幅度较大的四个典型子流域(编号 49、63、122、176)进行分析(见表 2)。结果表明,2010~2022 年间,各子流域土地利用格局演变显著,氮磷输出响应差异明显。在 49 号子流域,总氮与总磷年均输出量分别减少 19.9%和 10.0%。该区域耕地和建设用地面积分别下降 4.4%和 2.33%,林地增加 1.6%,土地利用向生态用地优化,显著降低了氮磷负荷。63 号子流域 TN、TP 输出亦下降约 7.8%,得益于耕地缩减 4.66%与林地扩张 2.01%。122 号子流域则因林地增加 4.24%、耕地减少 5.96%,TN 和 TP 年均负荷分别下降 10.03%与 5.96%,进一步印证生态用地扩张的正面效应。相对而言,176 号子流域呈反向趋势,TN 和 TP 负荷分别上升约 10%。该区域耕地扩张 4.03%、林地减少 4.35%,导致氮磷来源增加,成为流域污染风险加剧的典型代表。

综上,耕地压缩与林地恢复显著有助于降低氮磷非点源污染,而耕地扩张则会加剧污染风险。因此,流域管理应注重林地保护与生态空间修复,防止耕地无序扩张,以提升区域水环境质量。

Table 2. Proportion and changes in land use area of sub-basins with significant variations
表 2. 变化明显的子流域土地利用类型面积占比及变化

子流域	用地类型	面积占比/%		变化量 /%	子流域	用地类型	面积占比/%		变化量 /%
		2010	2022				2010	2022	
49 号 -19.9%	耕地	51.1	46.7	4.4	63 号 -7.80%	耕地	52.44	47.78	4.66
	林地	0	1.6	-1.6		林地	0.02	2.03	-2.01
	草地	0	0.06	-0.06		草地	0.01	0.94	-0.93
	水域	10.48	9.7	0.78		水域	3.24	3	0.24
	建设用地	38.41	40.74	-2.33		建设用地	44.27	46.25	-1.98
	未利用地	0	1.2	-1.2		未利用地	0.01	0	0.01
122 号 -10.03%	耕地	41.6	35.64	5.96	176 号 +10%	耕地	55.85	59.88	-4.03
	林地	52.83	57.07	-4.24		林地	23.75	19.4	4.35
	草地	0.19	0.23	-0.04		草地	1.03	0.89	0.14
	水域	0.33	0.95	-0.62		水域	0.47	0.25	0.22
	建设用地	5.04	5.41	-0.37		建设用地	18	18.8	-0.8
	未利用地	0.01	0.7	-0.69		未利用地	0.9	0.78	0.12

5. 讨论

5.1. 时空分布特征与土地利用对氮磷的贡献

2010~2022 年,流域 TN 与 TP 输出总体下降,年内高值集中于汛期:TN 于 8 月占比逾 40%,TP 于 7 月 30%,表明降雨-径流过程控制年内波动与峰值形成。空间上,二者均呈“上中游及库区高、下游低”,TN 的高值区更分散,TP 高值更集中于库区周边。结合土地利用分析可知,耕地为首要来源,建设用地对 TP 的贡献次之;林地与草地贡献较低,体现显著的削减效应。耕地分布密集的区域往往伴随较高的氮磷输出,是驱动氮磷输出的关键用地类型。农业活动(耕作和过度施肥)增加了土壤侵蚀的风险,导致的土壤氮磷累积过多[13];加上耕地植被覆盖率低、土壤结构疏松,在强降水或大水灌溉条件下,未被吸收的氮磷通过径流/侵蚀过程进入水体,从而增加了水体氮磷负荷风险[14] [15]。建设用地扩张会明显增加流域氮磷污染。这是因为城市普遍存在大量的不透水地面,降雨形成的径流难以入渗,转为地表径流进入河流[16]。地表径流在流经城市时,易携带大气沉降的氮化物、氨氮和生活污水等含磷污染物进入水体,尤其在降雨冲刷作用下更为显著,进而加剧了氮磷负荷的输出。在东北地区,林地草地会减少流

域内年径流量[17],这是由于林地中茂密的植被冠层能够有效截留降雨,减弱地表冲刷,从而降低氮磷随径流进入水体的强度。同时,发达的植物根系结构能改善土壤孔隙度,增强雨水下渗转化为地下水,进一步削弱地表径流生成。林地不仅通过减少土壤侵蚀来阻断污染物输出,还能直接吸收和固定氮磷,显著改善河流水质。同时,草地的有机质层和微生物群落能够通过吸附-转化过程,有效截留雨水携带的营养盐,进一步实现氮磷的显著削减。

5.2. 模型不确定性

虽然 SWAT 模型在浑太河流域的水文与氮磷污染负荷模拟中整体表现良好(多数站点 R^2 与 $E_{ns} > 0.7$),但其结果仍不可避免地受到不确定性的影响,这主要源自于输入数据精度、模型结构简化和率定过程的局限。土壤数据方面,使用 HWSD 等分辨率较粗的数据库(如 1 km^2)可能无法捕捉坡耕地、河岸缓冲带等关键区域的土壤异质性,从而削弱对氮磷迁移与反应过程的模拟精度[18]。气象数据虽经过插值处理,但当站点分布不均或存在缺测时,对极端降雨或干旱事件的模拟精度仍可能较低[19]。土地利用数据多基于遥感影像分类,其时效性和分类误差也可能导致模型对污染源空间分布的识别发生偏差。此外, SWAT 模型在氮、磷迁移过程中对河道沉降-再悬浮、小型水体滞留-释放等过程的描述较为简化,可能低估这些过程的调节作用[20]。率定过程中即使采用像 SUFI-2 或 GLUE 等不确定性分析方法,也无法完全避免“等效性”问题,即不同参数组合可能产生相似拟合效果,从而限制模型在空间上的可推广性。因此,未来研究应尽量引入更高分辨率的本地土壤、气象与土地利用数据,同时结合不确定性分析方法(如 SUFI-2、GLUE 等)对模拟结果进行置信度评估,从而提升模型在流域尺度的可靠性与解释力[21]。

6. 结论

本文基于 SWAT 模型,结合历史土地利用和水文气象数据,对浑太河流域非点源氮、磷污染负荷的时空分布特征进行模拟与分析,结论如下:

- (1) SWAT 模型率定期、验证期的 R^2 和 E_{ns} 均稳定高于 0.7,表明模型在浑太河流域的实际应用中具有较高的准确性。
- (2) 浑太河流域 2010~2022 年 TN、TP 负荷整体呈现下降的趋势,年内变化呈现“汛期高、非汛期低”的特征。
- (3) TN、TP 的空间分布呈现“上中游及库区高、下游低”的格局,与土地利用类型关系密切。耕地和建设用地是流域氮磷输出的主要“源区”,而林地、草地与水域则发挥“汇区”功能,有效削减非点源污染。

参考文献

- [1] 解鑫, 尤佳艺, 李文攀, 等. 2011-2021 年全国地表水环境质量评价与变化分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(4): 23-32.
- [2] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- [3] 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.
- [4] Du, X., Li, X., Zhang, W. and Wang, H. (2014) Variations in Source Apportionments of Nutrient Load among Seasons and Hydrological Years in a Semi-Arid Watershed: GWLF Model Results. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 6506-6515. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2519-2>
- [5] Wang, K., Wang, P., Zhang, R. and Lin, Z. (2020) Determination of Spatiotemporal Characteristics of Agricultural Non-Point Source Pollution of River Basins Using the Dynamic Time Warping Distance. *Journal of Hydrology*, 583, Article ID: 124303. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124303>
- [6] Shen, Z., Liao, Q., Hong, Q. and Gong, Y. (2012) An Overview of Research on Agricultural Non-Point Source Pollution Modelling in China. *Separation and Purification Technology*, 84, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.018>

- [7] Romagnoli, M., Portapila, M., Rigalli, A., Maydana, G., Burgués, M. and García, C.M. (2017) Assessment of the SWAT Model to Simulate a Watershed with Limited Available Data in the Pampas Region, Argentina. *Science of the Total Environment*, **596**, 437-450. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.041>
- [8] Busted, P.R., Storm, D.E., White, M.J. and Stoodley, S.H. (2009) Using SWAT to Target Critical Source Sediment and Phosphorus Areas in the Wister Lake Basin, Usa. *American Journal of Environmental Sciences*, **5**, 156-163. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2009.156.163>
- [9] Huang, Y., Huang, J., Ervinia, A., Duan, S. and Kaushal, S.S. (2021) Land Use and Climate Variability Amplifies Watershed Nitrogen Exports in Coastal China. *Ocean & Coastal Management*, **207**, Article ID: 104428. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.02.024>
- [10] Li, Q., Zhang, J., Zhang, J., Gao, H., Chen, W., Huang, J., et al. (2023) Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Prediction Analysis of Nitrogen and Phosphorus Surface Source Pollution in Shandong Province under the Climate and Land Use Changes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **11**, Article 1231394. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1231394>
- [11] Bihon, Y.T., Lohani, T.K., Ayalew, A.T., Neka, B.G., Mohammed, A.K., Geremew, G.B., et al. (2024) Performance Evaluation of Various Hydrological Models with Respect to Hydrological Responses under Climate Change Scenario: A Review. *Cogent Engineering*, **11**, Article ID: 2360007. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2360007>
- [12] Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., et al. (2015) Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, **58**, 1763-1785
- [13] Wu, L., Long, T., Liu, X. and Guo, J. (2012) Impacts of Climate and Land-Use Changes on the Migration of Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus during Rainfall-Runoff in the Jialing River Watershed, China. *Journal of Hydrology*, **475**, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.022>
- [14] 马东, 杜志勇, 吴娟, 等. 强降雨下农田径流中溶解态氮磷的输出特征——以崂山水库流域为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1228-1233.
- [15] Withers, P.J.A. and Jarvie, H.P. (2008) Delivery and Cycling of Phosphorus in Rivers: A Review. *Science of the Total Environment*, **400**, 379-395. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.002>
- [16] Yuan, X., Krom, M.D., Zhang, M. and Chen, N. (2021) Human Disturbance on Phosphorus Sources, Processes and Riverine Export in a Subtropical Watershed. *Science of the Total Environment*, **769**, Article ID: 144658. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144658>
- [17] Lowrance, R., Todd, R., Fail, J., Hendrickson, O., Leonard, R. and Asmussen, L. (1984) Riparian Forests as Nutrient Filters in Agricultural Watersheds. *BioScience*, **34**, 374-377. <https://doi.org/10.2307/1309729>
- [18] Camargos, C., Julich, S., Houska, T., Bach, M. and Breuer, L. (2018) Effects of Input Data Content on the Uncertainty of Simulating Water Resources. *Water*, **10**, Article 621. <https://doi.org/10.3390/w10050621>
- [19] Tan, M.L. and Yang, X. (2020) Effect of Rainfall Station Density, Distribution and Missing Values on SWAT Outputs in Tropical Region. *Journal of Hydrology*, **584**, Article ID: 124660. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124660>
- [20] Shen, Z.Y., Chen, L. and Chen, T. (2012) Analysis of Parameter Uncertainty in Hydrological and Sediment Modeling Using GLUE Method: A Case Study of SWAT Model Applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**, 121-132. <https://doi.org/10.5194/hess-16-121-2012>
- [21] Wang, M., Chen, L., Wu, L., Zhang, L., Xie, H. and Shen, Z. (2022) Review of Nonpoint Source Pollution Models: Current Status and Future Direction. *Water*, **14**, Article 3217. <https://doi.org/10.3390/w14203217>