

基于水环境容量的流域非点源污染风险评价

陆新路¹, 庞树江^{2,3*}, 王小胜², 王帅⁴, 李慧芬², 王丽君⁵, 王明哲⁵

(1. 河北工程大学管理工程与商学院, 邯郸 056038; 2. 河北工程大学数理科学与工程学院, 邯郸 056038;
3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 4. 河北省大清河事务中心, 保定 071899;
5. 河北省保定市水文勘测研究中心, 保定 071000)

摘要: 非点源 (non-point source, NPS) 污染风险评价是有效管理流域水环境的重要前提。了解流域非点源污染风险的时空特征, 对于流域非点源污染风险研究和科学管理具有重要意义。基于此, 该研究针对王快水库这一北京重要战略水源地, 开展基于水环境容量的非点源污染风险研究, 分析丰水年汛期与非汛期、平水年汛期与非汛期、枯水年汛期与非汛期 6 个时期的土壤养分流失的时空分布特征。结果表明: 1) 在模型校准期与验证期, 径流、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的纳什效率系数 (Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 大于 0.5, 平均绝对百分比偏差 (mean absolute percentage error, MAPE) 在 0~1 之间, 决定系数 (R^2) 大于 0.6, 模型结果均满足模型的精度要求。校正后的 SWAT 模型能较好地再现该流域的径流和养分 (即总氮和总磷) 过程。2) TN 和 TP 在不同水文时期的非点源污染风险具有明显的时空异质性。其中, 枯水年非汛期 TN 污染高风险区所占比例最大, 枯水年汛期 TN 高风险区所占比例最小。丰水年汛期 TP 高风险区比例最大, 平水年汛期 TP 高风险区比例最小, 这主要是降水的直接影响。3) 冗余分析发现, 该流域 TN 和 TP 的流失风险与污染物通量、上游输入浓度与水环境容量存在相关关系, 验证了对王快水库上游流域展开多尺度的 NPS 污染风险分析是有必要的。研究结果可为流域时空尺度上的 NPS 污染控制提供有效的依据。

关键词: 非点源污染; 水环境容量; SWAT; 风险评价

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407187

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0089-09

陆新路, 庞树江, 王小胜, 等. 基于水环境容量的流域非点源污染风险评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 89-97. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407187 <http://www.tcsae.org>

LU Xinlu, PANG Shujiang, WANG Xiaosheng, et al. Risk evaluation of nonpoint source pollution based on water environment capacity at watershed scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 89-97. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407187 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在水资源短缺的背景下, 人为活动的增加导致河流生态系统的严重水污染^[1-2]。而水污染是各种污染源向水体排放污染物导致的。通常情况下, 依据污染源的分布特征, 水污染可以分为点源 (point source, PS) 污染和非点源 (non-point source, NPS) 污染^[3]。特别是在点源污染得到有效控制后, 非点源污染已成为水环境保护公认的科学问题^[4-7]。许多国家已经实施了一系列减轻非点源污染的战略。

非点源污染是指通过降雨径流过程排入水体的泥沙、营养物质和农药的污染。由于其具有随机性、广泛性、时间滞后性和不确定性, 这种污染具有明显的时空异质性, 因此, 对 NPS 污染的有效管控提出了严峻的挑战^[8]。在流域水环境保护的框架下, 降低流域内总氮 (TN) 与总磷 (TP) 负荷已成为改善水质, 恢复生态系统健康的

关键性举措, 而风险评价^[9]作为识别、量化及评估 NPS 潜在影响的科学方法^[10], 已被广泛认可为抑制非点源污染的关键。基于水环境容量的风险评价方法 (risk assessment method based on water environmental capacity, WRA-WEC) 是识别 NPS 污染热点的新方法, 该方法综合考虑了水功能区的实际需求、接收水体的水环境容量 (WEC) 和 NPS 污染物分布 3 个因素, 能够准确检测污染风险与水环境容量的相关性, 以及不同非点源污染负荷与不同水功能区的时空风险水平差异。因此, WRA-WEC 方法是量化流域生态系统中 NPS 污染的负荷分布和确定关键原因的有效工具。

目前, NPS 污染负荷常采用定期检测并进行经验公式估算, 这通常耗时且成本高。随着科技的发展, 分布式水文模型在流域 NPS 污染负荷计算中得到了广泛的应用。上述模型包括 TOPMODEL 模型^[11]、一般流域负荷 (generalized watershed loading function, GWLF) 模型^[12]、农业非点源污染 (agricultural non-point source pollution, AGNPS) 模型^[13]、暴雨水管理模型 (storm water management model, SWMM) ^[14] 和水土评估工具 (soil and water assessment tool, SWAT) 模型^[15] 等。其中, SWAT 模型^[16] 已成为世界上使用最广泛的流域模型之一。它是

收稿日期: 2024-07-20 修订日期: 2024-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFA1009001)

作者简介: 陆新路, 研究方向为水资源管理。Email: xinlulu0401@163.com

*通信作者: 庞树江, 博士, 研究方向为水资源预报和优化配置。

Email: pangshujiang@hebeu.edu.cn

一个基于物理、空间分布、连续时间的水文模型,被应用于探讨 NPS 污染负荷时空分布,识别污染物关键源区^[17]以及评估污染物的最佳管理措施^[18]。该模型和 NPS 污染评价方法、反规划方法等的结合可以充分发挥模型的准确性和优势^[19],不仅可以模拟和预测流域的相关参数,还可以有效评价不同尺度或不同情景下的 NPS 污染。SWAT 模型虽然校准耗时较长,对输入数据精度要求较高,但此模型能够结合多种物理因素,进行大流域的水文、污染物迁移、以及土地利用等多个过程的综合模拟。相比于其他模型,SWAT 不仅适合长期模拟,还支持多尺度分析,可以定量评估复杂流域的不同管理方案。此外,SWAT 的开源和免费特性大大降低了使用成本,且它在全球范围内得到了广泛应用,具有很强的实用性和用户基础。

近年来,国内外在非点源污染及其管理方面取得了显著进展,研究成果涵盖了模型应用、风险管理和政策分析等多个方面。在模型应用方面,ZHANG 等^[2]基于 SWAT 模型对李村河的城市非点源污染进行了负荷量化和效应评估,为城市水体污染控制提供了重要的数据支持。此外,吴迪等^[5]通过改进 SWAT 模型研究了多水源灌区的节水潜力及其尺度效应。XUE 等^[6]则回顾了中国城市-乡村过渡区的非点源水污染建模研究现状,并展望了未来的发展方向。同时,戴立峰等^[14]基于 SWMM 模型进行了城市下穿隧道排水设计及校核,为城市排水系统的优化提供了理论依据。风险管理与控制方面,WANG 等^[3]分析了中国水源保护区农民的环境行为,并提出了非点源污染控制和管理策略。郑博福等^[7]对中国农田磷流失风险及其关键驱动因素进行了评价,为农业面源污染的风险管理提供了重要依据。REN 等^[8]探讨了肥料施用的时空异质性,以改进稻田水体氮磷污染建模。在政策与治理方面,管孝艳等^[4]对三峡库区的农业面源污染风险进行了评估,并提出了治理清单,为区域内的污染治理提供了详细的方案。赵串串等^[13]基于农业非点源污染模型对灞河流域的径流进行了模拟与分析,揭示了流域内非点源污染的空间分布特征和风险。在综合评价方面,LI 等^[10]应用水环境容量评估了流域非点源污染风险,为流域管理提供了全面的评估方法。李钰珩等^[11]改进并应用了 TOPMODEL 模型用于径流模拟,李泽利等^[12]基于一般流域负荷模型对桥水库入库河流进行了氮磷负荷估算。目前基于水环境容量的非点源污染风险评价方法在国内尤其是北京市重要水源地的应用较为匮乏,针对复杂流域中的关键驱动因素分析尚不深入,缺少对不同尺度下污染风险的系统评价。因此,开展本研究的必要性在于填补现有研究在复杂流域非点源污染风险评价方面的空白。

基于此,本文将选取王快水库上游流域作为研究区^[4],该区域 SWAT 模型,针对该流域首次利用基于水环境容量的非点源污染风险评价方法,对该流域的 NPS 污染风险进行评价。本研究基于时空尺度(丰水年、平水年、枯水年汛期和非汛期),结合水环境容量,计算 TN 和

TP 的流失风险并划分为 5 级,分析区域时空分布特征,以期为流域提供污染防控的理论依据。

1 方法与材料

1.1 研究区概况

王快水库位于白洋淀上游流域(113°39'E~114°32'E,38°39'N~39°22'N),是雄安新区的供水源头之一^[20],也是北京市的战略水源地。该流域的水环境关系到社会的经济和文化发展^[21-22],在水力发电、蓄洪、供水保障和水产养殖^[23]中发挥主要作用。

研究区在行政区划上主要涉及阜平县全境,截至 2022 年末,阜平县常住人口为 18.94 万人,该县建设优质特色林果基地近 6 667 hm²,覆盖 6 万余人。拥有畜禽养殖小区 376 家。但由于研究区域主要是山区,人口较少,养殖规模不大。但农业种植等活动造成污染物的排放严重^[24-25],使得该流域的非点源污染加剧。

本文选取王快水库上游流域作为研究区域,此流域所属山脉为太行山脉中部地带^[26],所属水系为海河流域大清河水系,涉及行政区域有河北省阜平县,以防洪、发电、浇灌为主,流域面积达 3 770 km²。王快水库流域属于半湿润半干旱地区,气候为北温带大陆季风性气候,四季分明。年平均气温为 12.6℃,多年平均降水量 635 mm。流域地形主要以山地为主,地势由西北向东南降低,海拔从 2 766 m 下降至 182 m。王快水库上游流域(图 1a)为白洋淀湿地的重要供水水源和生态屏障,也是华北地区北京市重要的替代饮用水源地,对当地生态环境的维护和社会经济的发展至关重要。

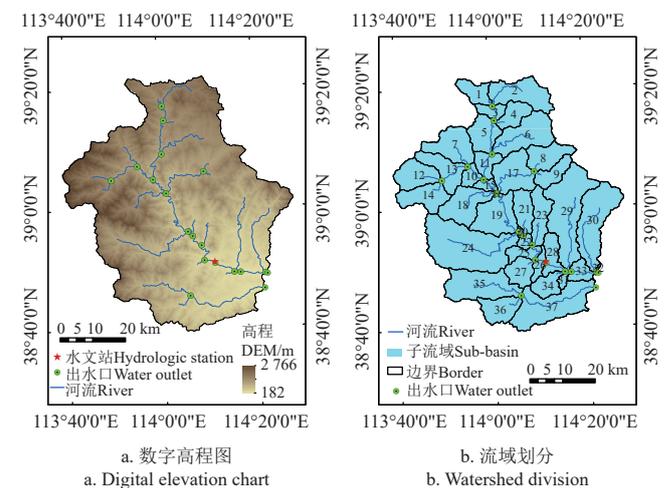


图 1 王快水库上游流域示意图
Fig.1 Location of Wangkuai Reservoir Watershed

1.2 数据采集

本研究使用的数据库包括空间数据库和属性数据库。数字高程数据模型(digital elevation model, DEM)来源于中国地理环境空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/),分辨率为 30 m。土地利用数据获取于国家地球系统科学数据共享平台(http://www.geodata.cn)。土壤数据来源于世界土壤数据库(harmonized world soil database,

HWSD)。气象数据来源于中国气象资料服务中心 (<http://data.cma.cn/>)，水文和水质数据 (包括降雨量，径流等) 来源于保定市水文局。最后，应用 ArcGIS 软件进行数据的分析处理和模拟。土地利用和土壤数据也经过数据插值处理，确保模拟结果的精度。此外，所用气象和水文数据为 2023 年的观测结果，确保研究能够反映 2019—2023 年实际情况，提升了结果的有效性和合理性。

1.3 SWAT 模型的建立与校准

SWAT 模型具备综合性和高精度，能够与 NPS 污染评价方法和反规划方法相结合，充分发挥模型的优势。该模型不仅可以模拟和预测流域内的相关水文和污染参数，还能在不同情景和尺度下进行有效的污染评价，适用于复杂流域的非点源污染模拟和管理决策。论文利用 DEM，并根据流域单元的流向和累积流量进行分流域圈定。本文通过 ArcSWAT 软件的流域圈定器模块，将流域总面积 3 296.41 km² 划分为 37 个小流域 (图 1b)。通过空间结合土地利用类型、土壤分布和边坡条件确定水文响应单元 (Hru)。Hru 的划分依据主要包括：1) 地形特征，通过 DEM 分析流域的坡度、流向和集水区；2) 土地利用类型，通过不同的土地利用分类，反映各区域对水文过程的影响；3) 土壤类型，考虑土壤的渗透性和水分保持能力。划分 Hru 的目的是细化流域内各区域的水文响应特征，使模型能够更准确地模拟流域过程。根据 SWAT 项目土壤类型和边坡划分的面积阈值 (5%)，得到 400 个 Hru。SWAT 模型录入了 2010—2023 年逐日尺度的降水、气温、风速、太阳辐射、相对湿度等气象数据。对王快水库流域的农业经营信息进行了参数化，以表征该流域的农业活动过程，并对地表径流、泥沙和 NPS 污染物进行初始情景模拟。获取计算所需的初始数据。

模型的结构和参数关系复杂，因此在使用前必须先进行校准和验证，以确保模型能够准确模拟流域内的水流和水质变化，从而提高预测结果的可靠性^[26-27]。

论文以月为尺度对径流、污染物 (TN、TP) 依次进行校准与验证，模型的性能通过纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 和决定系数 (R^2) 等度量指标^[28-29] 进行评估。其中，NSE 衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度，NSE 值越接近 1，表示模型模拟效果越好；值为 0 表示模拟结果与观测值的均值相同，负值则表示模型性能差。MAPE 是衡量模型预测值与实际值之间的百分比误差，值越低表示模型精度越高，通常用于评估模型的预测能力。 R^2 值接近 1 表示强相关性，表示模型能较好地解释数据变化。

1.4 NPS 污染风险评价方法

基于非点源污染负荷和流域水功能区的水环境容量，定量分析了流域非点源 TN、TP 流失负荷对其附近水质的影响，据此得到风险值 ((WRA-WEC) 方法)。该方法可以区分被相差不大的污染负荷量掩盖的风险水平差异。具体而言，首先，计算子流域的非点源污染物总

负荷和非点源污染物的通量。其次，考虑上游输入流量和上游输入污染物的浓度以及点源排放的污染负荷，计算出该子流域 TN、TP 的水环境容量。最后，求出 NPS 污染物的风险值，该计算方法来自 LI 等^[10] 的研究。

1) 计算 TN/TP 的 NPS 污染负荷

在流域模型的基础上，对子流域向邻近水体排放的污染物负荷进行了量化。在 SWAT 模型中，子流域被划分为 Hru，因此每个子流域排放的 NPS 污染物 TN 和 TP 的污染负荷是 Hru 排放量的总和：

$$P_{i,nps} = \sum_{j=1}^n (A_{Hru(i,j)} \times L_{Hru(i,j)}) \quad (1)$$

式中 $P_{i,nps}$ 是子流域 i 排放的非点源污染负荷总量 (kg)； $A_{Hru(i,j)}$ 和 $L_{Hru(i,j)}$ 分别为 Hru(i,j) 的面积 (hm²) 和污染物流失强度 (kg/hm²)，即单位面积上的污染物流失量； n 为水文响应单位的数量；Hru 是分布式水文模型中的基本单位之一，通常指一个具有相对均匀的土地利用、土壤类型和地形条件等特征的区域，它可以是一个小流域、一块土地或一个网格单元。

2) 计算河流运输效率

河流运输效率是指在污染物沿河流传输的过程中，有效输送污染物的比例。由于沉降、吸附和再悬浮等过程，一部分污染物在河道中被保留或滞留。因此，使用滞留因子 R_i 作为估计河流运输效率的指标，表示为

$$R_i = \frac{R_{i,in} - R_{i,out}}{R_{i,in}} \quad (2)$$

式中 $R_{i,in}$ 和 $R_{i,out}$ 分别是子流域 i 中 NPS 污染物负荷的输入量和输出量。

3) 计算 TN/TP 的 NPS 污染通量

根据 TN/TP 的 NPS 污染负荷和河流运输效率，得到特定河段校正后的 NPS 污染物通量，表示为

$$P'_{i,nps} = P_{i,nps} \times R_i \quad (3)$$

式中 $P'_{i,nps}$ 表示子流域 i 下游断面的非点源污染物通量。

4) 计算各子流域 TN/TP 的实际水环境容量

考虑上游输入，结合水功能区水质标准，计算各子流域 i 的污染物水环境容量。

$$W_i = 86.4Q_i(c_{st,nps} - c_{i,up}) + 10^{-3} \times k \cdot V_i \cdot c_{st,nps} \quad (4)$$

式中 W_i 为子流域 i 污染物的水环境容量 (kg/d)； Q_i 为子流域 i 上游输入流量 (m³/s)； $c_{i,up}$ 为上游进水污染物浓度 (mg/l)； $c_{st,nps}$ 代表相应水功能区的水质标准 (mg/l)； k 为污染物降解系数 (1/d)，TN 的降解系数取 0.4，该数值能够较好地反映中等降解条件下的氮降解速率，适用于大多数淡水流域。TP 的降解系数取 0.1，该数值能够较好地反映其在多数淡水流域中的缓慢去除速率。 V_i 为子集水区 i 的水体体积 (m³/s)。

结合点源污染物的排放量，子流域 i 的实际水环境容量 (NPS 污染物的水环境容量) 如下：

$$W_{i,r} = W_i - W_{i,point} \quad (5)$$

式中 $W_{i,r}$ 为子流域 i 的每天 NPS 污染物的水环境容量 (kg/d); $W_{i,\text{point}}$ 为子流域 i 中每天点源排放的污染负荷 (kg/d)。

5) 计算 TN、TP 的 NPS 污染风险级别

根据以上步骤, 计算 2019—2023 年期间的典型丰水年汛期 (7—8 月) 与非汛期、平水年汛期与非汛期、枯水年汛期与非汛期 6 个时期的风险值, 以量化子集水区的非点源污染排放对周围水体的影响。

$$v_i = \frac{P'_{i,\text{nps}}}{W_{i,r}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中 v_i 是 TN、TP 的风险值。

最后, 基于风险数值和自然断点法对 NPS 污染风险

进行级别分类 (共 5 级), 参考文献 [30], 将 5 级、3~4 级和 1~2 级分别定义为高风险区、中风险区和低风险区。这种方式可以更全面地对该流域进行风险管理。

2 结果与分析

2.1 模型校准与验证

SWAT 模型的校准与验证是通过调整参数使模拟值与实际值达到理想的拟合效果, 通过 SWAT 模拟的径流、总氮和总磷与河北省海河流域沙河阜平水文站的实际值进行了比较, 如图 2 所示。对于径流和 TP 指数, 校准期为 2010—2018 年, 验证期为 2019—2023 年; 对于 TN, 校准期为 2019—2021 年, 验证期为 2022—2023 年。

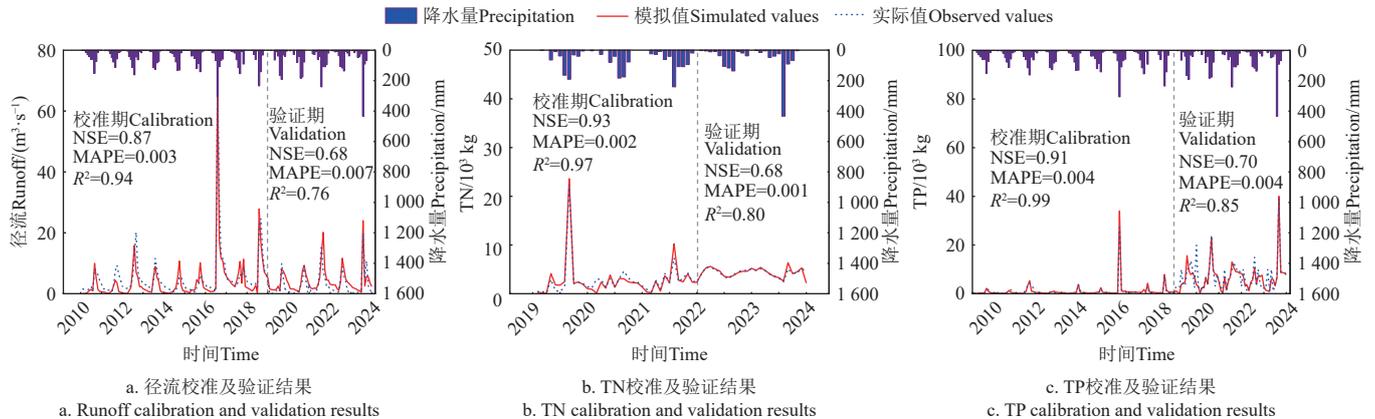


图 2 SWAT 模型校准及验证结果

Fig.2 SWAT model calibration and validation results

由图 2 可知, 模型在该区域径流、TN 和 TP 的校准期和验证期模拟值与实际值趋势基本符合。在模型的校准期和验证期间, 径流、TN 和 TP 的校准验证结果均满足 $\text{NSE} > 0.5$, MAPE 在 0~1 之间, $R^2 > 0.6$, 模拟结果满足模型的精度要求。对比模型评价指标的计算值和标准可知, 尽管模拟值和实际值之间由于模型的限制和观测的不确定性存在偏差 [31], 但经过校准后的模型符合要求。SWAT 模型在该区域具有较好的适用性。

2.2 流域非点源污染风险分级分区

2.2.1 TN/TP 污染负荷的空间分布

为了评估流域非点源污染 (NPS) 污染风险, 必须首先分析 TN 和 TP 污染负荷空间分布。这种空间分布分析不仅能够揭示不同区域的污染负荷差异, 还能为进一步的研究提供参数依据, 为了更直观地展示流域内 TN 和总磷 TP 污染负荷的空间分布特征, 绘制了 TN 和 TP 污染负荷的空间分布图 (图 3)。

从图中可以看到, TN 和 TP 污染负荷在研究流域内呈现出相似的空间分布差异。TN 污染负荷的空间分布显示, 流域的东南部地区污染较为严重, TN 负荷超过 70.61 t/a, 表明该区域的氮污染风险较高。该现象可能与集中的农业活动、农田排水和氮肥施用过量有关。而流域的西北部污染负荷相对较低, 低于 24.57 t/a, 表明该区域氮污染的压力较小。

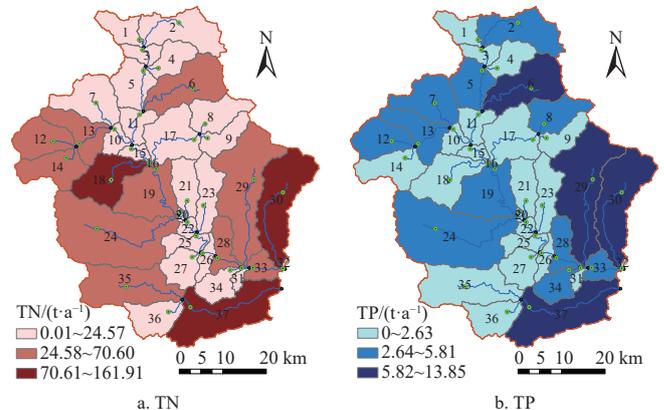


图 3 TN 和 TP 污染负荷的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of TN and TP pollution loads

对于 TP 污染负荷, 流域的南部和东南部表现出较高的污染负荷, 数值集中在 5.82~13.85 t/a 之间, 说明该区域的磷污染较为严重, 可能与农业施肥强度较高或土壤侵蚀有关。相对而言, 研究区域中污染物低于 2.63 t/a 的子流域, 磷污染风险较小。

总体来看, TN 和 TP 污染负荷的高值区域集中在流域的东南部, 显示该地区农业非点源污染问题较为突出。

2.2.2 TN 流失风险等级分布

依据上述计算方法, 得到风险分级, 分级结果输入 SWAT 模型中, 得到该流域 6 种水文情景下 NPS 污染物 TN 的风险时空分布图 (图 4)。

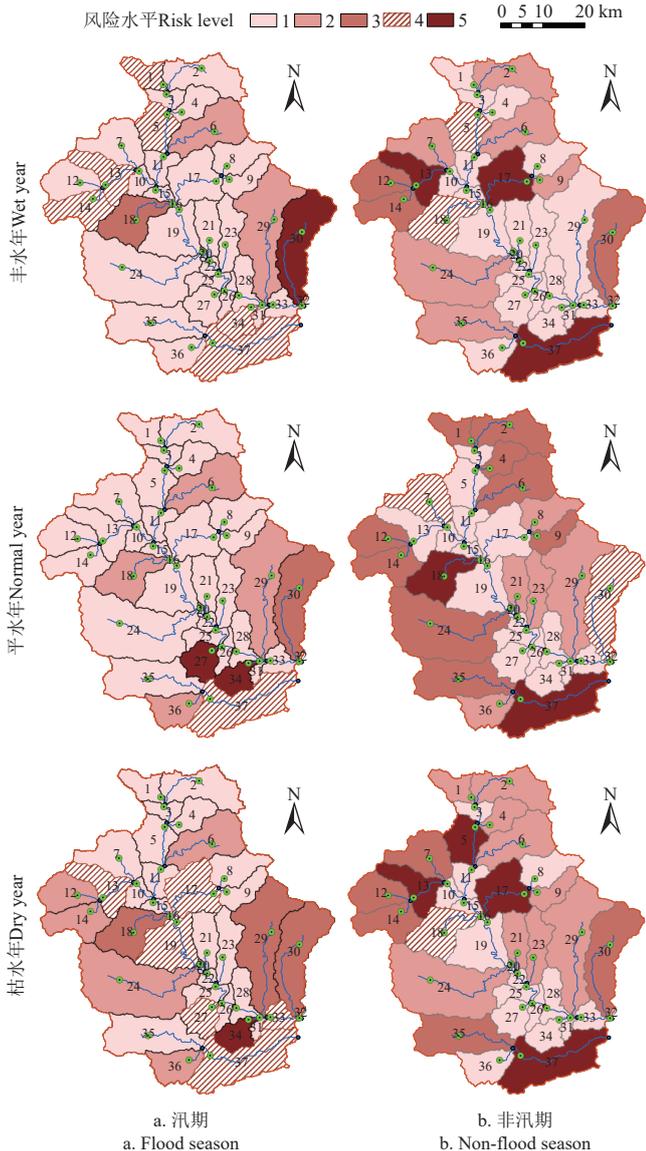


图 4 流域中 TN 流失风险的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of TN loss risk in watershed

图 4 显示了 6 个时期 TN 的风险时空分布和等级对比。从整体上看,不同时期的 TN 流失风险分布存在差异。从地势方面,丰水年汛期的高风险区分布在流域东部,平水年汛期和枯水年汛期的高风险区分布在流域中南部。丰水年、平水年和枯水年非汛期的高风险区主要分布在西北部 and 东南部。研究发现,高风险区分布在地势相对较高和较低的区域,这一结果与耿润哲等^[32]的发现一致,都强调污染风险与地势之间的相关性。另外,图中显示,高风险区的子流域主要分布在下游,且在枯水年非汛期的高风险区最多,15.75%的子流域均为高风险区。这说明降水少,更容易发生水环境污染。这主要是因为降水少,水环境容量小,导致 TN 浓度偏高,水污染风险变大。ZHANG 等^[33]在探究洛阳地区面源污染时,发现冬季河流中 TN 含量高,可以清楚地看到,由于以城镇和农田为主的下游地区受到明显的人为干扰,在下游地区 TN 污染风险水平增加,即地势低的地方污染严重,与本文中的结果相似。另一方面,这些河道中

的污染可能受到上游污染物的影响,包括农业活动和点源排放。因此,有必要根据不同流域单元在不同时期的不同风险程度,采取分区分级的方式对 TN 进行差别化管理。

从表 1 可以看出,同一子流域不同水文时期, TN 污染风险级别也不完全相同。其中,在枯水年非汛期,有 4 个子流域被确定为 TN 污染高风险区。而在丰水年汛期和枯水年汛期情景下,只有 1 个子流域被确定为 TN 污染高风险区。枯水年非汛期 TN 高风险区所占比例最高(15.75%),其次为丰水年非汛期(13.17%)、平水年非汛期(10.20%)、丰水年汛期(6.17%)、平水年汛期(3.56%),枯水年汛期所占比例最小(1.64%)。这种现象可能与王快水库流域局部 TN 污染风险受降水和流量明显的季节变化影响有关^[3,7]。

表 1 不同水文年 TN 污染高风险区的子流域及面积占比
Table 1 Sub-basins and their corresponding areas at high risk of TN pollution in different hydrological years

水文时期 Hydrological period	子流域编号 Sub-basin No.	面积 Area/km ²	占比 Percentage /%	
汛期 Flood season	丰水年	30	203.30	6.17
	平水年	27,34	117.29	3.56
	枯水年	34	54.19	1.64
非汛期 Non-flood season	丰水年	13,17,37	434.27	13.17
	平水年	18,37	336.27	10.20
	枯水年	5,13,17,37	519.08	15.75

2.2.3 TP 流失风险等级分布

在子流域划分的基础上,采用 1.4 中的方法,对王快水库上游流域 6 个时期的 TP 流失风险进行分级,并探讨该区域 NPS 污染的时空分布。TP 的风险评价时空分布如图 5 所示。基于各子流域面积,得到各子流域在 6 个时期的 TP 污染高风险区的面积占比(表 2)。

表 2 不同水文年 TP 污染高风险区的子流域及面积占比
Table 2 Sub-watershed and area proportion of TP pollution high-risk areas in different hydrological years

水文时期 Hydrological period	子流域编号 Sub-basin number	面积 Area/km ²	占比 Percentage /%	
汛期 Flood season	丰水年	6,29,30	624.41	18.94
	平水年	34	54.19	1.64
	枯水年	8,18,27,28	330.70	10.03
非汛期 Non-flood season	丰水年	13,37	304.87	9.25
	平水年	28,37	269.93	8.19
	枯水年	37	212.02	6.43

从图 5 可以看出,6 个时期 TP 的风险时空分布存在差异和相似特征。丰、平、枯水年汛期的高风险区分别分布在东部、中南部、西南部,其他时期的高风险区分布在西北部和东南部。TP 的时空异质性与气候变化、地形因素和人类活动存在一定关联,因此,不同水文时期的风险级别也不完全一样。先前的研究也提到,流域下游地势低,导致河流径流大,促进 TP 的流失^[34],因此,在 3 个水文年非汛期的高风险区主要分布在东南部地势低的地方。

表 2 所示的 TP 污染高风险区比例在 6 个水文情景下有差异性。丰水年汛期子流域范围最大,所占面积 624.41 km²,占流域总面积的 18.94%,这一结果与山东

省栖霞市的研究结果 (18.07%) 相近^[35]。其次为枯水年汛期 (10.03%), 丰水年非汛期 (9.25%), 平水年非汛期 (8.19%), 枯水年非汛期 (6.43%), 平水年汛期所占面积比例最小 (1.64%)。与华南的乐安河流域相关研究^[10]相比, 王快水库的 TP 高风险区占流域总面积的比例相对较小, 说明该地区污染相对范围小。这一特征说明了水文条件的动态变化, 同时也为风险管理策略的调整提供了时间尺度的依据。

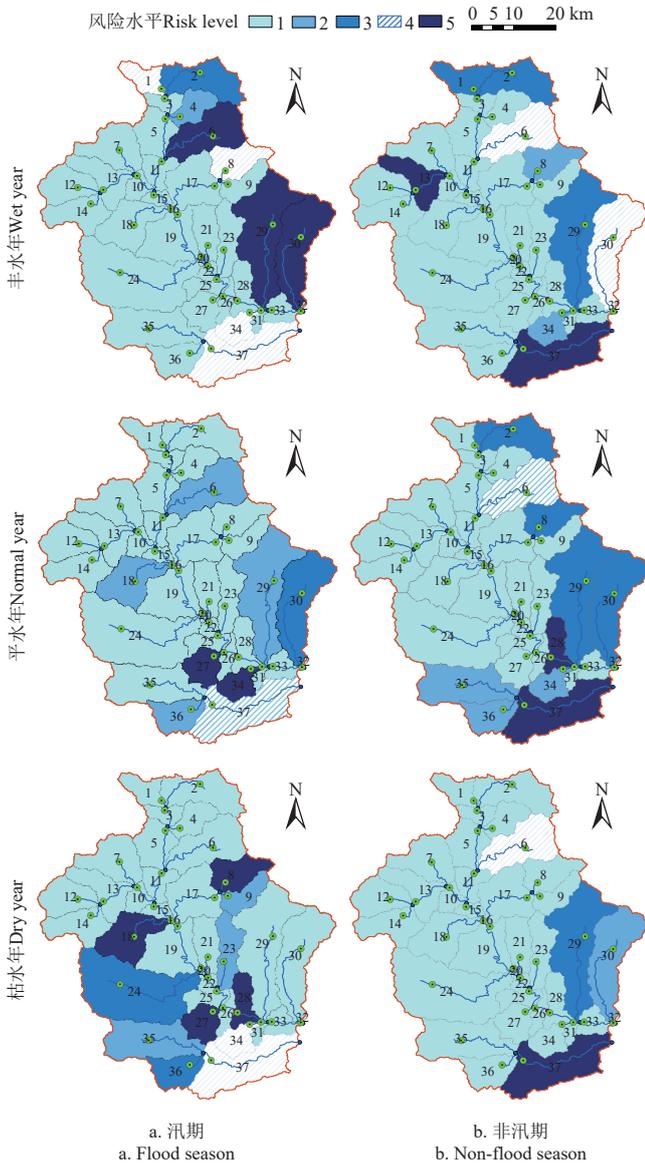


图5 流域中 TP 流失风险的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of TP loss risk in a basin

2.3 风险类别差异分析

从上述分析可知, 各子流域之间的 NPS 污染物的风险等级存在差异。为了探究流域污染物 (TN、TP) 流失强度、上游污染物输入浓度、污染物水环境容量^[36]等驱动因子对 TN、TP 污染风险值差异的影响, 本节利用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 探讨风险值与驱动因子之间的关系 (图 6)。其中, 箭头越长表示其对风险值的相关性越大, 反之越小。箭头之间的角度代表变量之间的相关性, 角度越小, 相关性越高, 反之越低。

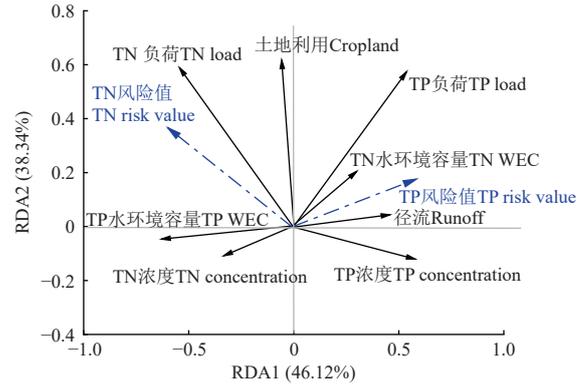


图6 流域 TN、TP 流失风险值与驱动因子的冗余分析
Fig.6 Redundancy analysis of the risk value and driving factors of TN and TP loss in watershed

RDA 分析表明, 响应变量 (TN、TP 风险值) 与驱动因子的 P 值为 0.023, 结果有效。图 6 表明, NPS 污染物 TN 的风险值与上游输入 TN 浓度、TN 的流失强度存在正相关关系, 与 TN 水环境容量、径流呈负相关。这反应在风险值的时空差异上, 如果一个流域的水环境容量大而污染负荷小, 则该流域的污染风险小。NPS 污染物 TP 的风险值与 TP 的流失强度、上游输入 TP 浓度和径流呈正相关, 与 TP 的水环境容量呈负相关。其中, TP 与其流失强度之间存在正相关关系。这反应在风险时空分布上, 高污染负荷导致高污染风险。

从图中可以看出, TN 浓度和 TP 浓度的箭头之间的关联度不高, 钝角表明二者呈现出弱负相关关系。这意味着在该流域中, TN 和 TP 浓度的变化并不总是同步的。这是因为 TN 和 TP 的来源不同, TN 主要来源于农业施肥, 而 TP 则更多与土壤侵蚀相关。同时, 两者在水体中的行为差异, 例如 TN 易溶解而 TP 易与颗粒物结合, 也可能导致这种负相关性。综上所述, 确定了 TN、TP 的污染物损失强度和上游输入的污染物浓度是土壤养分流失风险空间变异的主要原因^[37]。此外, 土地利用的差异也会导致水质变化^[38-39]。这些驱动因子使污染风险具有时空差异性, 导致污染治理和管理难度增加。因此, 基于水环境容量, 对王快水库上游流域展开多尺度的 NPS 污染风险分析是有必要的。

该研究方法具有较强的推广价值, RDA 分析结果阐明了驱动因子对 NPS 污染风险的响应关系, 为探讨非点源污染的空间异质性提供了有效工具, 可应用于其他流域的污染治理研究。研究结果有助于针对不同污染源采取精准的管理和控制措施, 这将减少流入白洋淀的污染物浓度, 改善水体质量, 缓解富营养化等水生态问题, 从而维护整个区域生态系统的健康和稳定。

3 结论

本研究利用 WRA-WEC 方法, 基于 SWAT 模型, 结合王快水库上游流域的氮磷污染物通量和水环境容量, 分别对该流域丰水年、平水年、枯水年汛期和非汛期的 NPS 总氮和总磷污染风险进行了评价研究。结论如下:

1) 王快水库上游流域的水文站点的校准结果显示,在校准期与验证期,径流、TN 和 TP 的模拟值与实际值的波动趋势基本一致。且模型校准期和验证期径流、TN 和 TP 的 NSE 大于 0.5, MAPE 在 0~1 之间, $R^2 > 0.6$, SWAT 模型在该区域具有较好的适用性。

2) TN 和 TP 在 6 个时期的风险时空分布和高风险区面积占比存在差异。高风险区主要分布在地势较高和较低的区域。枯水年非汛期的 TN 和枯水年汛期的 TP 的高风险区所占的子流域个数最多(均为 4 个), 枯水年非汛期的 TN 污染和丰水年汛期的 TP 高风险区面积占比最大。因此, 针对等级不同的子流域进行 TP 污染分时分级管控。

3) 冗余分析表明, 该流域的径流、污染物流失强度和上游输入 TN/TP 浓度(决定水环境容量的因素之一)是风险差异性的主要原因。因此, 基于水环境容量, 对王快水库上游流域展开多尺度的 NPS 污染风险分析十分必要。

从流域管理的角度出发, 研究结果可为王快水库上游流域水污染的精准管理和水质的有效保护提供参考。但是, 本研究也存在一定的局限性, 没有考虑极端天气事件下的污染风险时空分布, 后续研究中将进一步优化。从长远的角度来看, 解决上述问题可为该区域的污染治理提供更进一步的理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] LI H, ZHAO F, LI C, et al. An improved ecological footprint method for water resources utilization assessment in the cities[J]. *Water*, 2020, 12(2): 503.
- [2] ZHANG M, WANG L, HUANG X, et al. Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Licun River based on SWAT model[J]. *Water Science and Technology*, 2023, 87(4): 852-865.
- [3] WANG Y, YANG J, LIANG J, et al. Analysis of the environmental behavior of farmers for non-point source pollution control and management in a water source protection area in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1126-1135.
- [4] 管孝艳, 陶园, 陈皓锐, 等. 三峡库区农业面源污染风险评估及治理清单[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(20): 200-210. GUAN Xiaoyan, TAO Yuan, CHEN Haorui, et al. Assessing risk and governing of agricultural non-point source pollution in Three Gorges Reservoir Areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(20): 200-210. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 82-90. WU Di, CUI Yuanlai, HUANG Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(12): 82-90. (in Chinese with English abstract)
- [6] XUE J, WANG Q, ZHANG M. A review of non-point source water pollution modeling for the urban-rural transitional areas of China: Research status and prospect[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154146.
- [7] 郑博福, 刘海燕, 吴汉卿, 等. 中国农田磷流失风险评价及其关键驱动因素[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 332-343. ZHENG Bofu, LIU Haiyan, WU Hanqing, et al. Risk assessment and key driving factors of phosphorus loss in farmland of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 332-343. (in Chinese with English abstract)
- [8] REN R, ZHANG H, GAO X, et al. Capturing spatiotemporal heterogeneity in fertilizer application for better modelling paddy water nitrogen and phosphorus pollution at regional scale[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 362: 108837.
- [9] CHENG X, CHEN L, SUN R. Modeling the non-point source pollution risks by combing pollutant sources, precipitation, and landscape structure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 11856-11863.
- [10] LI Y, WANG H, DENG Y, et al. Applying water environment capacity to assess the non-point source pollution risks in watersheds[J]. *Water Research*, 2023, 240: 120092.
- [11] 李钰珩, 熊立华, 唐莉华. TOPMODEL 模型在径流模拟中的改进与应用[J]. *水文*, 2020, 40(4): 33-39. LI Yuheng, XIONG Lihua, TANG Lihua. Application and improvement of TOPMODEL for runoff modeling[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(4): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [13] 赵串串, 章青青, 冯倩, 等. 基于农业非点源污染模型的灞河流域径流模拟与分析[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(4): 460-464. ZHAO Chuanchuan, ZHANG Qingqing, FENG Qian, et al. Runoff simulation based on annualized agriculture non-point source pollution model in Bahe River Basin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, 40(4): 460-464. (in Chinese with English abstract)
- [14] 戴立峰, 陈雄志, 金溪. 基于 SWMM 模型的城市下穿隧道排水设计及校核[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(8): 45-48. DAI Lifeng, CHEN Xiongzi, JIN Xi. Design and check of urban tunnel drainage based on SWMM[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(8): 45-48. (in Chinese with English abstract)

- [15] 王慧琳, 邹民忠, 方伟文, 等. 基于 SWAT 模型的武强流域非点源污染关键源区界定与控制策略[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 228-238.
WANG Huilin, ZOU Minzhong, FANG Weiwen, et al. Definition and control strategy of the key source areas of non-point source pollution based on SWAT model in Wuqiang River Basin, Zhejiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 228-238. (in Chinese with English abstract)
- [16] ARNOLD J G, SRINIVASIN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [17] CHANG D, LAI Z, LI S, et al. Critical source areas' identification for non-point source pollution related to nitrogen and phosphorus in an agricultural watershed based on SWAT model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 47162-47181.
- [18] LI S, LI J, HAO G, et al. Evaluation of best management practices for non-point source pollution based on the SWAT model in the Hanjiang River Basin, China[J]. *Water Supply*, 2021, 21(8): 4563-4580.
- [19] ZHANG P, LIU Y, PAN Y, et al. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(34): 588-595.
- [20] ZHOU L, SUN W, HAN Q, et al. Assessment of spatial variation in river water quality of the Baiyangdian Basin (China) during Environmental water release period of upstream reservoirs[J]. *Water*, 2020, 12(3): 688.
- [21] CHEN S, HE Y, TAN Q, et al. Comprehensive assessment of water environmental carrying capacity for sustainable watershed development[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303: 114065.
- [22] BAI H, GAO W, WANG D, et al. Allocating total emission pollutant control based on water environmental carrying capacity: model establishment and case study[J]. *Water Policy*, 2019, 21(6): 1175-1192.
- [23] 和思羽, 张蕾. 基于 InVEST 模型的王快水库流域生态系统服务功能评估及权衡/协同关系[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(11): 60-63.
HE Siyu, ZHANG Lei. Evaluation and trade-off/synergy relationship of ecosystem services in Wangkuai reservoir watershed based on INVEST model[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(11): 60-63. (in Chinese with English abstract)
- [24] XU H, GAO Q, YUAN B. Analysis and identification of pollution sources of comprehensive river water quality: Evidence from two river basins in China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108561.
- [25] BADRZADEH N, SAMANI J M V, MAZAHERI M, et al. Evaluation of management practices on agricultural nonpoint source pollution discharges into the rivers under climate change effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 156643.
- [26] SAKAKIBARA K, TSUJIMURI M, SONG X, et al. Spatiotemporal variation of the surface water effect on the groundwater recharge in a low-precipitation region: Application of the multi-tracer approach to the Taihang Mountains, North China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 132-144.
- [27] NIRAULA R, KALIN L, WANG R, et al. Determining nutrient and sediment critical source areas with SWAT: Effect of lumped calibration[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 55(1): 137-147.
- [28] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN L M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [29] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [30] ZHAO W, ZHOU Z, ZHAO Z, et al. Risk assessment of non-point source pollution in karst reservoirs based on 'source-sink' landscape theory[J]. *Water Supply*, 2022, 22(6): 6094-6110.
- [31] SHEN Z, QIU J, HONG Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 138-146.
- [32] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1484-1492.
GENG Runzhe, WANG Xiaoyan, JIAO Shuai, et al. Application of improved export coefficient model in estimating non-point source nutrient load from Miyun reservoir watersheds[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1484-1492. (in Chinese with English abstract)
- [33] ZHANG X, CHEN P, DAI S, et al. Analysis of non-point source nitrogen pollution in watersheds based on SWAT model[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108881.
- [34] 黄紫旂, 姜三元, 高海鹰, 等. 鄱阳湖丘陵流域水质时空变化及影响因素[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(3): 47-57.
HUANG Ziyi, JIANG Sanyuan, GAO Haiying, et al. Temporal and spatial variations and influencing factors of water quality in a hilly catchment of Poyang Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(3): 47-57. (in Chinese with English abstract)
- [35] WAN W, HAN Y, WU H, et al. Application of the source-sink landscape method in the evaluation of agricultural non-point source pollution: First estimation of an orchard-dominated area in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: 106910.
- [36] BUI L T, PHAM H T H. Linking hydrological, hydraulic and

- water quality models for river water environmental capacity assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159490.
- [37] ZHANG Y, WU H, YAO M, et al. Estimation of nitrogen runoff loss from croplands in the Yangtze River Basin: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116001.
- [38] YAZDI M N, SAMPLE D J, SCOTT D, et al. The effects of land use characteristics on urban stormwater quality and watershed pollutant loads[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145358.
- [39] WANG S, HE Q, AI H, et al. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(3): 502-510.

Risk evaluation of nonpoint source pollution based on water environment capacity at watershed scale

LU Xinlu¹, PANG Shujiang^{2,3*}, WANG Xiaosheng², WANG Shuai⁴, LI Huiqin²,
WANG Lijun⁵, WANG Mingzhe⁵

(1. School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Northeast Institute of Geography and AgroEcology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 4. Daqinghe River Affairs Center in Hebei Province, Baoding 071899, China; 5. Hydrological Survey Research Center of Baoding in Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: Non-point source pollution risk assessment is an important prerequisite for effective management of the watershed water environment. Compared with point source pollution, non-point source pollution often comes from a wide geographical area and a variety of activities, and its impact has strong temporal and spatial variability. Major sources of non-point source pollution include agricultural runoff, urban stormwater runoff, soil erosion, etc. These sources are difficult to monitor and manage individually, so assessing their risks is a critical step in ensuring healthy water quality in a watershed. Understanding the temporal and spatial characteristics of non-point source pollution risk in river basins is essential for developing scientific and effective management strategies. Based on this, this paper studies the risk of non-point source pollution based on water environmental capacity in the Wangkuai Reservoir, an important strategic water source in Beijing. Based on the risk assessment method of water environmental capacity (WRA-WEC), the calibrated SWAT model was used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of soil nutrient loss in six periods in flood and non-flood seasons in different hydrological years. The main conclusions of paper were as follows. 1) The processes of runoff and nutrient (i.e. TN and TP) can be reproduced with good simulation performance for the SWAT model in this watershed. During the calibration period and validation period of the model, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), mean absolute percentage error (MAPE), and coefficient of determination (R^2) of runoff, TN and TP all met the accuracy requirements. 2) In general, there are differences in the distribution of TN loss risk in different periods. From the perspective of topography, the high risk areas in the flood season in wet year are distributed in the eastern part of the basin, and the high risk areas of flood season in normal year and dry year are distributed in the central and southern part of the basin. The high risk areas of non-flood season in wet, normal and dry years are mainly distributed in the northwest and southeast. There were both differences and similarities in the spatial and temporal distribution of TP risk in the six periods. The high risk areas of flood season in flood season of abundant, flat and dry year are distributed in the east, central and south, southwest and northwest respectively, and the high risk areas of other periods are distributed in the northwest and southeast. The pollution risk levels of total nitrogen and total phosphorus and the proportion of high risk areas in different hydrological periods of the same sub-basin are not exactly the same. 3) The effects of pollutant (TN and TP) loss intensity, upstream pollutant input concentration and pollutant water environment capacity on the difference of TN and TP pollution risk value were investigated by redundancy analysis. Redundancy analysis found that the loss risk of TN and TP in this basin is related to pollutant flux, upstream input concentration and water environmental capacity. These driving factors make the pollution risk different in time and space, resulting in the difficulty of pollution control and management. It is necessary to carry out multi-scale Non-point source pollution risk analysis for the upper watershed of the Wangkuai Reservoir. The results of this study will provide an effective basis for Non-point source pollution control at the spatial and temporal scale of the basin, and can provide a reference for NPS load reduction and water quality improvement in the basin considering the water environmental capacity.

Keywords: nonpoint source pollution; water environment capacity; SWAT model; risk evaluation