

基于水质目标的小清河流域邹平段污染物综合治理效果评价

王好芳¹, 代晨洋¹, 张祎珂¹, 王明栋^{1,2}, 张金存^{1*}

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2. 中电建(山东)勘测设计有限公司, 济南 250098)

摘 要: 实施综合治理措施是改善流域水环境、提升水质的有效手段之一, 进行效果评估是检验治理措施成效的关键。以小清河流域邹平段为研究对象, 对 3 种影响该流域水质的主要污染物 ($\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP) 进行治理。根据污染物负荷的来源, 从流域的点源、面源及外源提出了不同治理措施并进行 5 种组合。建立土壤和水评估工具 (soil and water assessment tool, SWAT) 模型对不同降水情况下 5 种情景进行模拟, 分析各情景中治理措施实施后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 浓度状况, 并结合 R-R-V (reliability-resilience-vulnerability) 指数法和熵值法对不同情景治理措施的治理效果进行综合评价。结果表明: 不同措施组合的治理情景均能够改善水质状况, 其中 S5 (城镇污水处理率提高到 100%, 农村污水处理率提高到 80%, 裸露地减少 30 km^2 , 上游负荷减少 40%, 施肥量减少 40%) 情景下, 唐口桥断面丰水年、平水年和枯水年均达到 III 类水质目标。不同降雨情况下, S5 情景综合得分最高, 丰水年和平水年均均为 0.956, 枯水年为 0.881, 该情景的治理措施对水质改善效果最佳。因此, R-R-V 指数和熵值法相结合能对综合治理措施的效果进行评价, 并为小清河流域邹平段水质管理目标的实现提供治理措施筛选的依据。

关键词: SWAT 模型; 流域治理; 水质目标; R-R-V 指数法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404135

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0212-09

王好芳, 代晨洋, 张祎珂, 等. 基于水质目标的小清河流域邹平段污染物综合治理效果评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 212-220. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404135 <http://www.tcsae.org>

WANG Haofang, DAI Chenyang, ZHANG Yike, et al. Evaluation of the comprehensive pollution control effectiveness in the Zouping section of the Xiaoqing River Basin based on water quality targets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 212-220. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404135 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

2021 年中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》指出: 加强黄河支流及流域腹地生态环境治理, 建设黄河下游绿色生态走廊, 是夯实流域高质量发展的基础。加强河湖管理, 采取流域治理措施是解决中国复杂水问题, 进行水环境治理最有效的手段之一^[1-3]。小清河位于黄河下游, 属于黄河流域渤海水系, 是山东省一条重要的排水河道, 兼顾两岸农田灌溉、内河航运, 具有海、河联运等多种功能。“十四五”规划中, 小清河流域主要断面水质目标为 III 类, 但受沿岸城市经济飞速发展及城镇化快速推进的影响, 小清河流域邹平段 2021 年度水质为 IV 类^[4], 主要是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 浓度较高。为了削减 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 的浓度, 使其持续稳定的达到 III 类水质目标要求, 需从污染物的源头和扩散过程中采取相应措施改善水质^[5-6]。

流域治理措施能够改变或影响流域水文、土壤侵蚀、

养分循环等过程, 有效减少污染物对流域水环境的影响, 如王慧琳等^[7]分析了不同点源污染治理措施对污染物的削减效果, 得到综合管理措施能明显改善流域水质的结论。BOUFALA 等^[8]研究发现减少施肥量等农业管理措施能够有效减少流域氮磷负荷。但由于治理措施的性质、类别和布设方式不同, 其水质改善效果也有所差异。因此充分评估各类措施的治理效果, 筛选出最有效的措施是进行流域水环境治理的关键^[9-11]。

目前水环境治理研究中, 常用水文模型模拟不同治理措施的污染负荷削减率来表征治理效果^[7, 12], 也可通过博弈论、熵值法和层次分析法等方法评价水环境治理效果^[13-14]。但水环境变化对人为干预的响应几乎均为非线性的, 负荷的削减并不意味着河流水环境质量一定会得到改善^[15], 单一的污染负荷削减率指标和评价体系难以对治理效果进行全面评估。因此, HASHIMOTO 等^[16]提出了基于统计学的 R-R-V (reliability-resilience-vulnerability, 可靠性-可修复性-脆弱性) 指数法, 该方法通过可靠性、可修复性和脆弱性 3 个指标对系统进行全面评价^[17], 目前已广泛应用于水文气象学和流域健康评价等领域^[18-20]。如 HOQUE 等^[21]将 RVM (relevance vector machine) 模型与 SWAT (soil and water assessment tool) 模型耦合, 对 St. Joseph 流域进行 R-R-V 风险评估, 结果表明流域整体处于良好状态。HAZBAVI 等^[22]将标准化降水指数、悬浮泥沙浓度、低流排放、高流排放 4 项指标与 R-R-V

收稿日期: 2024-04-19 修订日期: 2024-08-27

基金项目: 山东省智库高端人才成果转化项目 (2022); 山东省科学技术厅引智项目 (20199748)

作者简介: 王好芳, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态水文与生态调度。

Email: whf29@sdu.edu.cn

*通信作者: 张金存, 博士, 讲师, 主要研究方向为分布式水文模型研究。

Email: zhangjincun@sdu.edu.cn

指数法相结合评估了 Shazand 流域的水环境健康状况。但在多情景、多指标情况下，R-R-V 指数的变化趋势不尽相同，通过 R-R-V 指数难以直观的评估不同情景对流域水环境的治理效果。而熵值法可以对多指标进行赋权，通过综合得分直观反映各情景治理效果的优劣。因此，本文提出将 R-R-V 指数法与熵值法相结合，对不同情景的治理效果进行综合评价。

在基于实现Ⅲ类水质管理目标的前提下，本研究根据研究区相关发展规划及实地调研情况，从提高污水处理率、农村污水集中收集处理、减少施肥、区域造林和减少上游来水负荷等方面，实施内源外源相结合的综合性治理措施，预计 2028 年完成。采用 SWAT 模型模拟不同情景的 NH₃-N、TN、TP 状况，分析不同降水和治理情景下 NH₃-N、TN、TP 浓度变化情况及水质状况，并结合 R-R-V 指数与熵值法评价治理情景对水环境的改善效果。以期为小清河流域邹平段水质管理目标的实现，提供综合治理措施筛选的决策依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

小清河流域邹平段隶属于山东省滨州市，是小清河流域内城镇化程度高，工业、农业较为发达的地区。小清河自魏桥镇五龙堂村进入邹平市，自西南向东北斜贯邹平市境中北部，基本与黄河平行；东至焦桥镇韩套村出境，系邹平市最大的过境河流，流域面积 1 389.83 km²。境内降水量较少，多年平均降雨量为 641.5 mm^[4]，主要集中于汛期，河道流量与降水量变化规律一致，枯季流量较小。小清河流域邹平段概况见图 1。

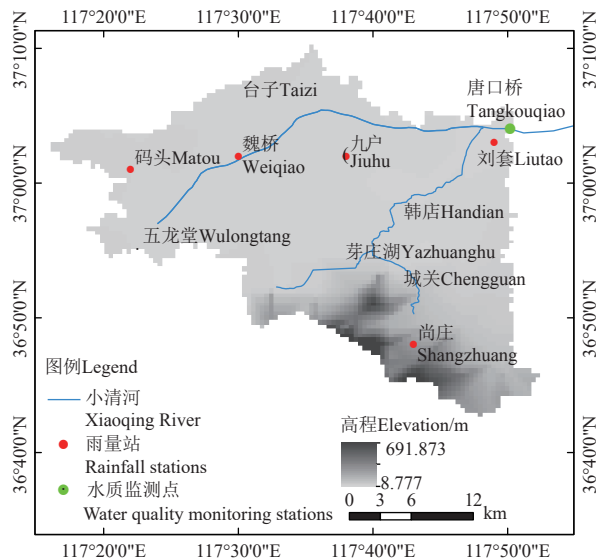


图 1 小清河流域邹平段概况图
Fig.1 Overview of the Zouping section of the Xiaoqing River basin

小清河流域邹平段城镇发达，企业较多，生活污水和工业废水排放量大，而部分污水管网设施老化影响了污水收集和处理的效率。同时农村污水难以集中收集处理，导致生活垃圾产生的渗滤液进入小清河，对水体造

成污染。邹平市农业种植发达，河道基本无自然缓冲带，其截污纳污、涵养水源的生态功能减弱，化肥中的氮、磷元素易随雨水冲刷进入河道。现状情况下，小清河邹平段入境的五龙堂断面 TN 浓度较高，超出 V 类地表水标准。出境的唐口桥断面水质为Ⅳ类，部分月份 NH₃-N、TN、TP 浓度超标。

1.2 基础数据来源

本研究采用 SWAT 模型进行水质模拟。建立小清河流域邹平段 SWAT 模型需要 DEM、土壤、土地利用、气象水文等数据。研究区数据来源见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型

SWAT 模型是适合大尺度的分布式水文模型^[23]，主要包括水文过程、土壤侵蚀和污染负荷子模块，能模拟多种土壤类型、土地利用类型和农业管理措施等对水、沙、污染物的影响，是流域治理研究中应用最广泛的模型之一^[24-26]。本文根据流域基础数据建立 SWAT 模型，模拟不同治理情景下 NH₃-N、TN、TP 的浓度。模型以 2020 年为基准年，点源面源污染负荷量通过产排污系数法计算。

表 1 研究区数据来源
Table 1 Data source

序号 No.	数据类型 Data type	数据描述 Data description	数据来源 Data sources
1	DEM 数据	30 m×30 m 栅格图	地理空间数据云
2	土地利用	2020 年 1 km 栅格图	中科院资源与环境研究所
3	土壤类型	1: 100 万土壤栅格图	HWSD 土壤数据库 V1.2
4	气象数据	最高、最低温度，太阳辐射，风速 (2008—2022)	CMADS, 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)
		降雨量 (2018—2022)	山东省水文中心
		实测径流量	山东省水文中心
5	水文数据	实测径流量	山东省水文中心
6	水质数据	NH ₃ -N、TN、TP 实测数据 (2018—2022)	邹平市生态环保局
7	污染物数据	NH ₃ -N、TN、TP 排放量	邹平市统计年鉴

1.3.2 R-R-V 指数法

R-R-V 表示可靠性、可修复性和脆弱性 3 个指数，由 HASHIMOTO 等^[16]基于统计学方法提出，可以更加全面地定量评估水环境治理效果。其计算方法如下：

可靠性指数 (Reliability, R_{el}): 通常指流域在特定条件下正常运行的能力。即某水质成分在指定的某一时间段内，流域实际负荷不超过标准负荷 (“满意” 状态) 的概率，其取值范围为 [0,1]，其公式为^[16]:

$$R_{el} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^M d_n}{T}$$

(1)

式中 d_n 表示流域系统在第 n 次 “不满意” 状态下持续的时间，月； M 表示流域系统处于 “不满意” 状态发生的次数总和； T 表示总记录时间，本文研究时间为 2028 年的 12 个月，因此 T 取 12。

可修复性指数 (Resilience, R_{es}): 指流域在受到污染后恢复至正常状态的能力，评估流域在污染后恢复的速度和效果。即流域内某水质成分处于 “不满意状态”，在下一个单位时间步长内，该水质成分由 “不满意状态”

转为“满意状态”的概率,其取值范围为[0,1],计算见式(2) [16]。

$$R_{es} = \left\{ \frac{\sum_{n=1}^M d_n}{M} \right\}^{-1} \quad (2)$$

脆弱性指数 (Vulnerability, V_{ul}): 指流域在面对污染时可能受到的损害程度,用以评估污染浓度超标状态对流域的影响程度和系统的恢复能力。即流域某水质成分在某段时间内处于“不满意状态”对流域系统的破坏程度,其取值范围为[0,∞]。计算见式(3) [16]。

$$V_{ul} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^T \left\{ \left[\frac{L_{sim(i)} - L_{std(i)}}{L_{std(i)}} \right] H[L_{sim(i)} - L_{std(i)}] \right\} \quad (3)$$

式中 $L_{sim(i)}$ 为第 i 个时间步长内某水质成分的模拟负荷, kg; $L_{std(i)}$ 为第 i 个时间步长内某水质成分的标准负荷 (由第 i 个时间步长内径流量和某水质成分的标准浓度乘积得到), kg。H[.] 是亥维赛函数,用来保证流域只有在“不满意”状态下才可参与脆弱性指数的计算。

在计算流域某水质成分的 R-R-V 指数时,需要设定水质成分的标准阈值作为评估“满意”和“不满意”状态的标准 [17]。根据唐口桥断面水质目标要求,小清河流域邹平段标准浓度阈值采用地表水环境质量 III 类标准 (GB 3838-2002),其他数据由 SWAT 模型模拟得到。

1.3.3 熵值法

熵值法是基于信息熵而产生的一种客观定量评价方法,可以利用熵来判断数据的离散程度,客观地为多个指标赋予权重,为多情景、多指标评价提供决策依据 [13-14]。权重确定和综合得分的计算步骤如下:

设有 a 个评价对象,每个评价对象有 b 个评价指标,第 j 个指标的熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln b} \sum_{k=1}^a \left(\frac{x_{kj}}{\sum_{k=1}^a x_{kj}} \ln \frac{x_{kj}}{\sum_{k=1}^a x_{kj}} \right) \quad (4)$$

式中 x_{ij} 为指标的标准化值。

第 j 个指标权重 w_j :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^b (1 - e_j)} \quad (5)$$

第 k 个评价对象的综合得分 S_k :

$$S_k = \sum_{j=1}^b w_j x_{kj} \quad (6)$$

本文通过熵值法对不同情景的 R-R-V 指数进行赋权,并计算各情景的综合得分,综合得分越高,表明该情景中的措施治理效果越好。

1.4 治理措施情景设置

流域治理措施种类繁多,不同的治理措施由于其不同的针对性和实施难度而适用于不同特征的区域,对污染物的削减效果也有一定的差异。小清河流域邹平段污染源主要包括内源污染和外源污染。内源污染由流域内的点源面源负荷引起,外源污染主要受上游来水中所携带的污染负荷影响。本文根据小清河流域相关发展规划及实地调研情况,制定了多种治理措施。

1.4.1 内源治理措施

1) 点源治理措施

2022 年《滨州市“十四五”生态环境保护规划》(以下简称《规划》)提出,要推进城镇污水处理设施建设,加快提升污水处理厂的生活污水处理能力。邹平市对高新片区、好生临池片区、魏码台片区和明集青阳片区的污水处理厂进行提标改造。根据《规划》要求,预计到 2028 年,邹平市城镇污水将实现全部收集处理,城镇污水处理率由现状的 98% 提升到 100%。

农村生活污水排放也是小清河主要污染源之一。为推进农村生活污水治理,邹平市以农村生活污水治理、农村黑臭水体治理等为重点,在沿河大部分村庄设置了垃圾收集系统。根据实地调研情况,2028 年,邹平市农村污水收集处理率将由目前的 32% 提升到 80%,因此设置农村污水处理率为 60% 和 80%。

2) 面源治理措施

小清河流域邹平段以耕地为主,为保证农作物产量施肥强度高 [27],肥料易随降雨径流进入小清河。《规划》中强调,要减少化肥使用量,深入推广测土配方施肥。在小清河流域管理保护的总体目标中,邹平市农田落实化肥、农药减施等面源污染防治措施的面积比例为 90% [4]。根据《规划》要求以及实地调研情况,2028 年化肥施用量将减少 40%。

3) 造林措施

不同土地利用类型会影响径流和污染物迁移转化过程。在单一的土地利用类型中,污染物负荷流失率排序为耕地>草地>住宅用地>林地 [28],林地能有效降低流域的污染负荷,净化水质 [29]。根据“黄河流域生态保护及环境污染治理结果导向型贷款项目”要求,邹平市通过增加林地覆盖率 [30-31] 来减少污染物流失。其中灌木林减少 0.76 km²、草地减少 1 km²,其他林地减少 1.94 km²,裸露地在不同情景中分别减少 1 和 30 km²。

1.4.2 外源治理措施

由于上游来水中污染物的携带量会影响下游水体的纳污能力和水体自净能力 [32]。为了减少上游对下游因水环境污染而造成的经济损失,小清河流域实行生态补偿机制。即小清河上游济南段采取治理措施,保障入邹平境内的五龙堂断面水质达到目标要求,否则上游济南段要对邹平段进行经济补偿。根据《小清河“一河一策”综合整治方案》要求,小清河上游济南市加强污水处理厂等城市排水基础设施建设,完成黑臭水体治理,消除污水直排,强化底泥污染防治,使五龙堂断面水质由现状提升到 III 类标准。为达到水质目标要求,设置五龙堂断面的污染负荷在现状基础上减少 40%。

1.4.3 综合治理措施方案选择

通过前期工作发现,在小清河流域邹平段,单一的治理措施难以达到 III 类水质目标。因此,本文将上述治理措施进行 5 种组合。5 种情景治理措施组合方式见表 2。

表 2 治理情景
Table 2 Integrated governance scenarios

治理项目 Governance projects		治理情景 Governance scenarios					
		治理前 Pre-governance	S1	S2	S3	S4	S5
污水处理率 Sewage treatment rate/%	城镇	98	100	100	100	100	100
	农村	32	60	80	80	80	80
土地利用类型面积 Area of land use type/ km ²	灌木林	24	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76
	其他林地	57.42	-1.94	-1.94	-1.94	-1.94	-1.94
	草地	132	-1	-1	-1	-1	-1
	裸露地	30	-1	-1	-30	-30	-30
上游入境负荷量比例 Upstream inbound loadings/%		2020 年实测逐月数据计算	/	/	/	-40	-40
农业施肥量比例 Agricultural fertiliser application/%		产排污系数法计算	/	/	/	/	-40

注：表中“/”表示情景中未涉及该项措施。
Note: A “/” in the table indicates that the measure is not addressed in the scenario.

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型校准

SWAT 模型参数率定和验证是模拟的基础^[33]，为保证模型能够较好的模拟治理情景，采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2^[34] 算法对径流和水质参数进行率定。径流参数的率定利用魏桥水文站和唐口桥断面实测的逐月径流数据进行，其中 2018—2020 年为率定期，2021—2022 年为验证期。水质参数的率定采用小清河流域邹平段唐口桥断面逐月水质监测数据，其中 2020—2021 年为率定期，2022 年为验证期。率定和验证过程见图 2。

采用纳什效率系数（NSE，Nash-Sutcliffe efficiency coefficient）来衡量模拟精度，其取值范围为 0~1。当 NSE 系数越接近 1 时，表明模拟精度越高。小清河流域邹平段模拟精度见表 3。参数率定和验证结果表明，径流和水质参数的 NSE 系数均能达到“良好”或“满意”状态^[35]，因此，本文建立的 SWAT 模型满足精度要求，能够较好地模拟小清河流域邹平段治理措施情景。

2.2 水质状况分析

2.2.1 年际水质状况分析

在丰、平、枯降水情况下，5 种治理情景后 NH₃-N、TN 和 TP 浓度比治理前显著降低，除枯水年 S1 情景外，S2、S3、S4、S5 治理措施均能使污染物年均浓度达到Ⅲ类水质目标，特别是 S5 情景治理效果更显著。唐口桥断面污染物年均浓度见表 4。

治理措施实施后丰水年水质达标状况比平水年和枯水年好。由于降雨和径流是面源污染输移的直接驱动力^[36]，丰水年和汛期河道水量充足，水体自净能力强，污染物浓度低，水质状况好。枯水年降水量少，径流量较小，面源冲刷入河的污染物负荷明显下降，但枯水年份水量少流速低，自净能力差，污染物沉积使水质状况变差。

2.2.2 水质时程状况分析

除枯水年 S1 情景外，唐口桥断面污染物的年均浓度均能够达到Ⅲ类水质标准。但从污染物浓度时程分布情况看（图 3），丰、平、枯降水情况下仍有部分月份污染物浓度超标，仅 S5 情景所有月份均能达到Ⅲ类水质目标。

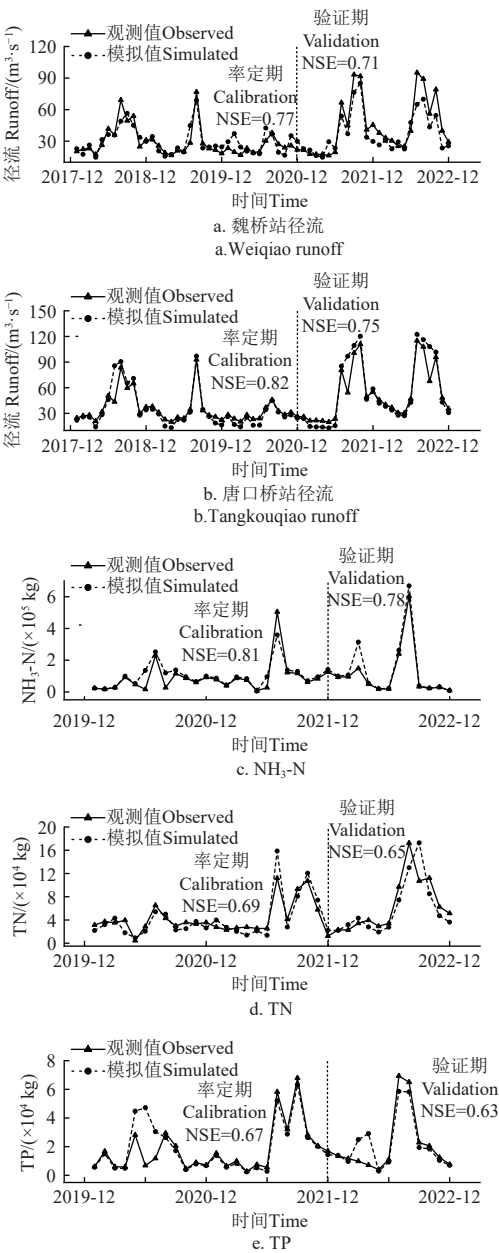


图 2 率定和验证结果
Fig.2 Calibration and validation results

不同降雨情景中，NH₃-N 浓度的时程变化呈现相同的趋势，TN、TP 也如此。水体中 NH₃-N 主要来源于生

生活污水、工业废水和农田退水等^[37], TN 主要来源于化肥和生活污水^[38], TP 主要来源于农业施肥。S1 情景中, 污水处理率的提升能够直接减少水体中氮、磷污染物的入河量, 同时林地面积的增加能够减少土壤流失所携带的污染物质。经过 S1 情景中的措施治理后, NH₃-N、TN 和 TP 浓度较治理前有所降低, 但在峰值期依然超标。S2 情景中提升了农村污水收集处理能力, 减少了农村面源污染负荷, 在非汛期, 3 种污染物浓度较治理前均明显降低, 且 TP 在丰水年各月份均能达到Ⅲ类水质目标。化肥中磷元素难溶于水, 主要附着在土壤颗粒上, 因此 S3 情景中将容易产生水土流失的草地、灌木林和裸露地转换林地, 通过截留和降低径流流速来减少地表径流, 进一步拦截泥沙和防止氮磷污染物流失, 能在 4 月份明显降低污染物浓度。S4 情景在 S3 情景基础上, 减少了上游点源污染负荷量, 在丰水年和平水年, NH₃-N 和 TP 已经基本能够满足水质要求。S5 情景中减少施肥量能够从根源上减少农业面源氮、磷的流失^[39], 从而明显减少峰值期 NH₃-N、TN 和 TP 的浓度, 使其在丰、平、枯情景下均能达到Ⅲ类水质目标。

表 3 模型模拟精度		
Table 3 Model simulation accuracies		
项目 Item	率定期 Calibration	验证期 Validation
魏桥站径流	0.77	0.71
唐口桥径流	0.82	0.75
NH ₃ -N	0.81	0.78
TN	0.69	0.65
TP	0.67	0.63

表 4 唐口桥断面污染物年均浓度表											
Table 4 Annual average concentration of pollutants at Tangkouqiao section (mg·L ⁻¹)											
污染物 Pollutants	降水情景 Rainfall scenarios	污染物浓度 Pollutant concentration									
		Ⅲ类水标准 Class III water standards	治理前 Pre-governance	S1	S2	S3	S4	S5			
NH ₃ -N	P=20%	1.00	0.87	0.79	0.66	0.53	0.41	0.35			
	P=50%	1.00	1.23	0.96	0.78	0.65	0.48	0.42			
	P=75%	1.00	1.44	1.09	0.82	0.66	0.50	0.42			
TN	P=20%	1.00	0.93	0.75	0.65	0.6	0.50	0.44			
	P=50%	1.00	1.21	0.87	0.79	0.61	0.51	0.41			
	P=75%	1.00	1.23	1.01	0.87	0.74	0.57	0.46			
TP	P=20%	0.20	0.17	0.15	0.12	0.11	0.09	0.07			
	P=50%	0.20	0.22	0.19	0.15	0.12	0.10	0.08			
	P=75%	0.20	0.26	0.24	0.2	0.16	0.12	0.09			

注: P 代表降雨频率。
Note: P represents rainfall frequency.

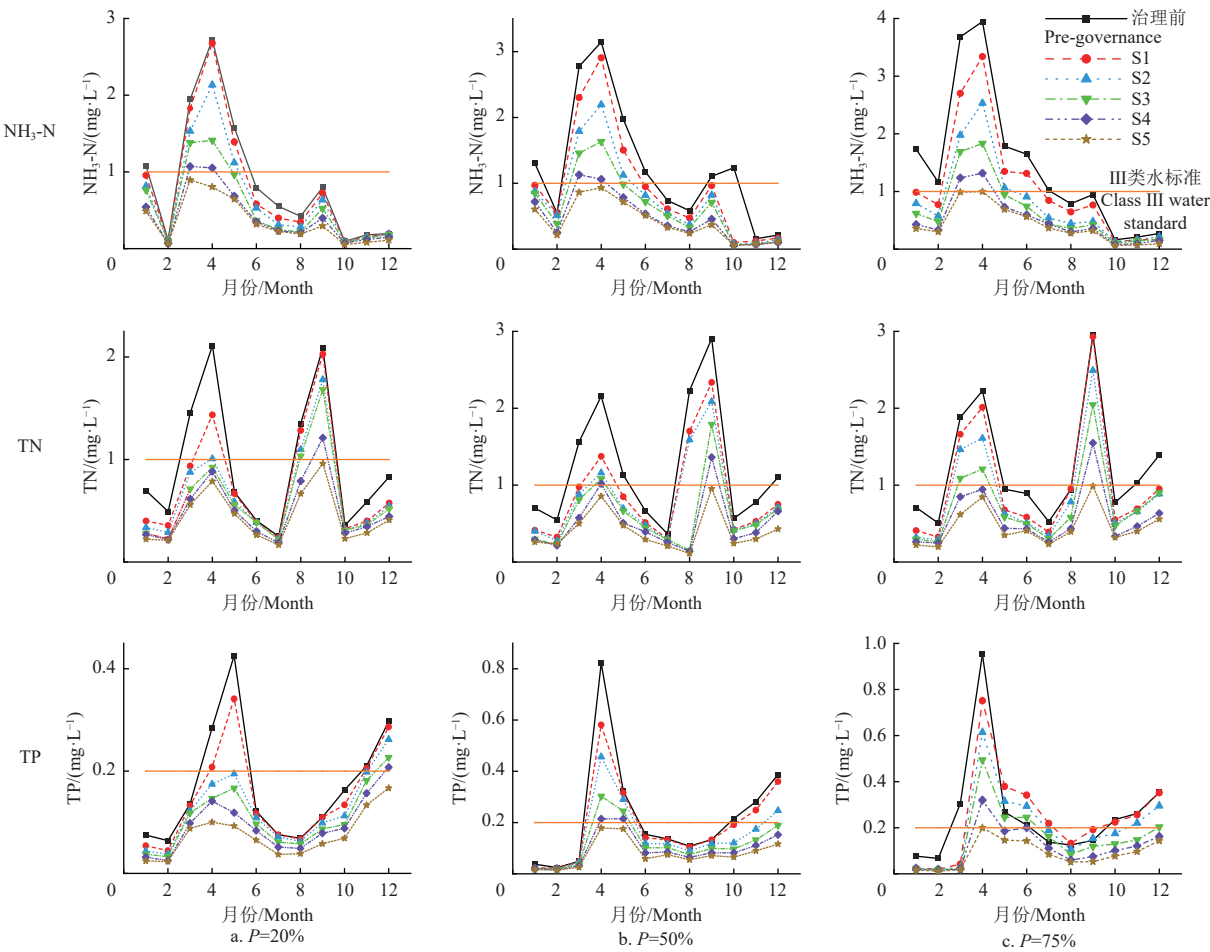


图 3 不同治理情景下污染物浓度时程分
Fig.3 Temporal distribution of pollutant concentrations under different governance scenarios

各种治理情景下, 汛期污染物浓度降低不明显, 表明面源污染仍然是污染物主要来源, 若要保持水质稳定在Ⅲ类标准, 未来仍要关注面源污染治理。

2.3 治理效果评估

P=20% 降水情况下, 5 种情景中 NH₃-N 的 R_{el} 均比治理前大, 而 R_{es} 指数仅 S5 治理情景增大。这说明 S1、

S2、S3、S4 情景中的措施不能快速降低 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度，稳定保持在Ⅲ类水质标准。所有治理情景中 TN 的 R_{el} 和 R_{es} 指数均比治理前增大， V_{ul} 指数均比治理前减小，表明情景中所述措施均能对 TN 进行有效治理。TP 仅在 S4 情景中 R_{es} 指数较治理前有所减小，该情景中的措施难以使 TP 浓度稳定达标。

$P=50\%$ 降水情况下，5 种情景中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 R_{el} 和 R_{es} 指数均比治理前增大。而 S1、S2、S3 情景下 V_{ul} 指数增大，这 3 种治理情景下， $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度超标后将会对水环境产生较大影响。TN 在 S1、S2、S3 和 S4 措施下， R_{el} 和 R_{es} 并未发生变化，说明提高污水处理率，进行农村污水收集处理、减少上游来水负荷和增加林地等措施能够减少 TN 负荷量，但 TN 浓度达到Ⅲ类标准的难度依较大。同时，现状情况下五龙堂断面的 TN 浓度较高，即使配置相关措施，TN 浓度仍存在超过地表水Ⅲ类标准的

可能性，因此 4 种情景下平水年 TN 的 R_{el} 和 R_{es} 没有显著改善。5 种情景中 TP 的 R-R-V 指数均比治理前好，平水年各情景中的措施均能对 TP 进行较好的治理。

$P=75\%$ 降水情况下，5 种情景中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 S4 情景时 V_{ul} 指数减小最明显，即枯水年减少上游来水负荷措施对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染的修复效果最好。TN 的 R_{el} 和 R_{es} 指数较治理前均增大。在 S1 情景下，TN 的 V_{ul} 指数较治理前增大，该情景中的措施并不能使 TN 浓度较快达标。而 S3 情景中进一步提高农村污水处理率和增加林地面积，能够使 TN 浓度能够较快达到Ⅲ类水质标准，减少对水环境的影响，因此 V_{ul} 指数减小。TP 在 S1 情景的 R_{es} 指数最小，表明提高污水处理率和增加部分林地后 TP 仍难以修复。受降雨径流影响和各种措施的治理，TP 的 V_{ul} 指数较丰水年好。不同降雨情景下污染物的 R-R-V 指数见表 5。

表 5 不同降雨情景下污染物的 R-R-V 指数
Table 5 R-R-V indices for pollutants under different rainfall scenarios

情景 Scenarios		$P=20\%$			$P=50\%$			$P=75\%$		
		R_{el}	R_{es}	V_{ul}	R_{el}	R_{es}	V_{ul}	R_{el}	R_{es}	V_{ul}
治理前 Pre-governance	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.58	0.86	0.69	0.33	0.50	1.27	0.42	0.80	2.63
	TN	0.58	0.57	0.90	0.42	0.40	1.11	0.50	0.33	1.46
	TP	0.42	0.80	1.83	0.33	0.75	0.96	0.25	0.67	2.76
S1	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.67	0.75	0.75	0.67	0.75	2.04	0.58	0.71	2.28
	TN	0.67	0.75	0.75	0.67	0.63	1.11	0.67	0.50	1.62
	TP	0.67	0.75	0.75	0.42	0.80	0.74	0.25	0.33	0.77
S2	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.67	0.75	0.42	0.67	0.75	1.56	0.67	0.75	1.83
	TN	0.67	0.63	0.54	0.67	0.63	0.95	0.67	0.50	1.25
	TP	0.67	0.88	1.87	0.50	0.83	0.55	0.42	0.75	0.61
S3	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.83	0.70	0.40	0.75	0.78	1.32	0.75	0.78	1.77
	TN	0.83	0.78	0.63	0.67	0.63	0.82	0.67	0.50	0.84
	TP	0.67	0.88	1.64	0.67	0.75	0.43	0.50	0.67	0.34
S4	$\text{NH}_3\text{-N}$	0.83	0.70	0.06	0.75	0.78	0.57	0.75	0.78	0.96
	TN	0.83	0.70	0.54	0.67	0.63	0.58	0.83	0.70	1.07
	TP	0.67	0.78	1.20	0.67	0.75	0.11	0.75	0.78	0.21
S5	$\text{NH}_3\text{-N}$	1.00	1.00	0.00	0.92	0.82	1.14	0.92	0.82	1.99
	TN	0.92	0.82	0.67	0.83	0.80	0.60	0.92	0.82	1.32
	TP	0.75	0.89	1.26	0.92	0.82	0.26	1.00	0.92	0.00

不同降雨和治理情景中，污染物 R-R-V 指数未显出相同趋势，难以评估出治理效果最优的情景。因此利用熵值法对各项指标进行赋权，并计算综合得分。综合得分越高，表明该情景中治理措施的治理效果越好。不同降雨情景指标权重及不同情景治理效果综合得分见表 6。

表 6 不同降雨情景指标权重及不同治理策略效果综合得分

Table 6 Indicator weights for different rainfall scenarios and combined scores for different scenarios of governance measures

降雨情景 Rainfall scenarios	权重 Weights			综合得分 Combined scores				
	R_{el}	R_{es}	V_{ul}	S1	S2	S3	S4	S5
$P=20\%$	0.335	0.449	0.216	0.10	0.26	0.50	0.46	0.96
$P=50\%$	0.417	0.430	0.153	0.05	0.14	0.19	0.26	0.96
$P=75\%$	0.396	0.353	0.251	0.00	0.19	0.30	0.68	0.88

综合来看，S5 情景的综合得分最高。该情景组合措施可使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 浓度达到Ⅲ类水质目标的月份最多，对污染物的治理速度快，水质状况可以得到稳定改善，综合治理效果最好。

3 结 论

本文通过 SWAT 模型模拟了 2028 年不同降水情景下，内源外源相结合的综合治理措施对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 的改善效果，分析了治理措施实施后的水质达标状况，评估了治理措施对水质的改善效果，得到以下结论：

1) 在小清河流域邹平段，采取内源、外源治理相结合的综合措施能够明显改善水环境状况。在 S5（城镇污水处理率提高到 100%，农村污水处理率提高到 80%，裸露地减少 30 km^2 ，上游负荷减少 40%，施肥量减少 40%）情景的措施治理后，唐口桥断面丰水年、平水年和枯水年均达到Ⅲ类水质目标。

2) 面源污染是影响小清河流域邹平段水质的重要因素，加强面源污染治理仍是最需要关注的方面。

3) R-R-V 指数法能够从可靠性、可修复性和脆弱性三方面评价 5 种情景的治理效果，并通过熵值法筛选出 S5 情景的治理措施为小清河流域邹平段的最佳治理措施。

[参 考 文 献]

- [1] GENG R, YIN P, SHARPLEY A N. A coupled model system to optimize the best management practices for nonpoint source pollution control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 581-592.
- [2] AVCI B C, KESGIN E, ATAM M, et al. Modeling agricultural practice impacts on surface water quality: Case of Northern Aegean watershed, Turkey[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(5): 5265-5280.
- [3] URIBE N, SRINIVASAN R, CORZO G, et al. Spatio-temporal critical source area patterns of runoff pollution from agricultural practices in the Colombian Andes[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 149: 105810.
- [4] 李伟. 小清河“一河一策”综合整治方案[R]. 济南: 山东省水利勘测设计院, 2021.
- [5] 秦承志, 朱良君, 申申, 等. 基于流域系统模拟一情景优化的精细治理决策支持方法[J]. *地理学报*, 2024, 79(1): 58-75.
QIN Bingzhi, ZHU Liangjun, SHEN Shen, et al. Methods for supporting decision-making of precision watershed management based on watershed system simulation and scenario optimization[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 58-75. (in Chinese with English abstract)
- [6] LIU G, CHEN L, WANG W, et al. A water quality management methodology for optimizing best management practices considering changes in long-term efficiency[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138091.
- [7] 王慧琳, 邹民忠, 方伟文, 等. 基于 SWAT 模型的武溪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 nonpoint 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)
- [8] BOUFALA M, EL HMAIDI A, ESSAHLAUI A, et al. Assessment of the best management practices under a semi-arid basin using SWAT model (case of M'dez watershed, Morocco)[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022(8): 713-731.
- [9] ZUO D, HAN Y, GAO X, et al. Identification of priority management areas for non-point source pollution based on critical source areas in an agricultural watershed of Northeast China[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 213892.
- [10] CHEN Y, LU B, XU C, et al. Uncertainty evaluation of best management practice effectiveness based on the Ann AGNPS model[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(4): 1307-1321.
- [11] LOPEZ-BALLESTEROS A, TROLLE D, SRINIVASAN R, et al. Assessing the effectiveness of potential best management practices for science-informed decision support at the watershed scale: The case of the Mar Menor coastal lagoon, Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160144.
- [12] 张磊. 基于 SWAT 模型珠溪河流域面源污染最佳管理措施研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 2-3.
ZHANG Lei. Research on Non-point Source Pollution Management Measures of Zhuxi River Basin Based on SWAT Model[D]. Nanchang, Nanchang University, 2021: 2-3. (in Chinese with English abstract)
- [13] 鲁佳慧, 唐德善. 基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价[J]. *水利水运工程学报*, 2018(6): 105-111.
LU Jiahui, TANG Deshan. Evaluation of comprehensive water environment treatment effect based on game theory combination weighting[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(6): 105-111. (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘艺文, 王洪涛. 基于灰水足迹和熵值法的苏锡常地区水敏感性行业识别[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(8): 3053-3061.
LIU Yiwen, WANG Hongtao. Identification of water-sensitive industries in Su-Xi-Chang Region based on grey water footprint and entropy method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(8): 3053-3061. (in Chinese with English abstract)
- [15] WANG L, ROBERTSON D M, GARRISON P J. Linkages between nutrients and assemblages of macroinvertebrates and fish in wadeable streams: Implication to nutrient criteria development[J]. *Environmental Management*, 2007, 39(2): 194-212.
- [16] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water-resource system performance evaluation[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20.
- [17] 郭英壮, 王晓燕, 周丽丽, 等. 控制流域氮流失的最佳管理措施配置及效率评估[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 860-71.
GUO Yingzhuang, WANG Xiaoyan, ZHOU Lili, et al. Configuration and efficiency evaluation of the best management practices to control nitrogen loss in the watershed[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(2): 860-71. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨肖丽, 崔周宇, 任立良, 等. 1966—2015 年长江流域水文干旱时空演变归因[J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 349-59.
YANG Xiaoli, CUI Zhouyu, REN Liliang, et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River basin from 1966 to 2015[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349-59. (in Chinese with English abstract)
- [19] ZENG P, SUN F Y, LIU Y Y, et al. Future river basin health assessment through reliability-resilience-vulnerability: Thresholds of multiple dryness conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140395.
- [20] ASEFA T, CLAYTON J, ADAMS A, et al. Performance evaluation of a water resources system under varying climatic

- conditions: Reliability, resilience, vulnerability and beyond[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 53-65.
- [21] HOQUE Y M, TRIPATHI S, HANTUSH M M, et al. Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109: 101-112.
- [22] HAZBAVI Z, SADEGHI S H R. Watershed health characterization using Reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(5): 1528-1537.
- [23] 吴海滔, 崔远来, 王强, 等. 考虑灌排运行特点的南方平原圩区分布式水文模拟[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(4): 66-75.
- WU Haitao, CUI Yuanlai, WANG Qiang, et al. Distributed hydrological simulation in the polder areas of the southern plain considering irrigation-drainage operation characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(4): 66-75. (in Chinese with English abstract)
- [24] RICCI G F, D'AMBROSIO E, DE GIROLAMO A M, et al. Efficiency and feasibility of best management practices to reduce nutrient loads in an agricultural river basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 107241.
- [25] KHAN M A, STAMM J. Assessment of the hydrological and coupled soft computing models, based on different satellite precipitation datasets, to simulate streamflow and sediment load in a mountainous catchment[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(2): 610-32.
- [26] PUERTES C, BAUTISTA I, LIDON A, et al. Best management practices scenario analysis to reduce agricultural nitrogen loads and sediment yield to the semiarid Mar Menor coastal lagoon (Spain)[J]. *Agricultural Systems*, 2021, 188: 103029.
- [27] 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*, 2024, 40(2): 332-343. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨妮娟, 王晓云, 李建柱, 等. 桃林口水库流域氮磷污染负荷对土地利用的响应分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(5): 61-69, 79.
- YANG Nijuan, WANG Xiaoyun, LI Jianzhu, et al. Response of nitrogen and phosphorus pollution load to different land use patterns in Taolinkou Reservoir basin[J]. *Journal of Water Resource & Water Engineering*, 2023, 34(5): 61-69, 79. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张旭达, 韩谔, 孙长顺, 等. 无定河及延河流域不同时空尺度下土地利用对水质的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4540-4552.
- ZHANG Xuda, HAN Xu, SUN Changshun. Effects of landscape pattern on water quality at different spatial and temporal scales in Wudinghe River Basin and Yanhe River Basin[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4540-4552. (in Chinese with English abstract)
- [30] MORISAI D N, Pai N, STEINER J L, et al. SWAT - LUT: A desktop graphical user interface for Updating Land Use in SWAT[J]. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2019, 55(5): 1102-1115.
- [31] KHEEREEMANGKLA Y, SHRESTHA R P, SHRESTHA S, et al. Modeling hydrologic responses to land management scenarios for the Chi River Sub-basin Part II, Northeast Thailand[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 1-16.
- [32] 赵政楠, 茹少峰. 黄河流域生态补偿的时空格局、区域差异及分布动态演进 [J]. *环境科学*, 2024, 45 (10): 5853-5867.
- ZHAO Zhengnan, RU Shaofeng. Spatial-temporal situation, regional differences, and dynamic evolution of the distribution of ecological compensation in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science*, 2024, 45 (10): 5853-5867. (in Chinese with English abstract)
- [33] LI S, LI J, XIA J, et al. Optimal control of nonpoint source pollution in the Bahe River Basin, Northwest China, based on the SWAT model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(39): 55330-55343.
- [34] MALIK M A, DAR A Q, JAIN M K. Modelling streamflow using the SWAT model and multi-site calibration utilizing SUFI-2 of SWAT-CUP model for high altitude catchments, NW Himalaya's[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, 8(1): 1203-1213.
- [35] 冯在香. 基于 SWAT 模型的大汶河流域极端情景下径流响应研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2023: 38-39.
- FENG Zaixiang. Study on Runoff Response Under Extreme Scenarios in Dawen River Basin Based on SWAT Model[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023: 38-39 (in Chinese with English abstract)
- [36] CHEN C L, GAO M, XIE D T, et al. Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges Region[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4): 1-15.
- [37] 焦军霞, 石锦, 周脚根, 等. 城市圈层和水体管理措施对小水体无机氮含量空间分布格局的影响——以湖南省长沙市为例[J/OL]. *环境工程*: 1-11[2024-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20240409.1607.005.html>.
- JIAO Junxia, SHI Jin, ZHOU Jiaogen, et al. Effects of urban circle and water management measures on spatial distribution pattern of inorganic Nitrogen content in small water bodies - A case study of Changsha City, Hunan Province. [J/OL]. *Environmental Engineering*: 1-11[2024-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20240409.1607.005.html>. (in Chinese with English abstract)

- [38] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 257-264.
TAO Yuan, XU Jing, REN Hejing, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin.[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(4): 257-264. (in Chinese with English abstract)
- [39] WANG Y, ZHU C, HU C, et al. Evaluating the effects of different pollution reduction scenarios on the total phosphorus concentration of a mountainous river basin in southwest China using SWAT model: A case study of the Donghe River in Baoshan, Yunnan[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(9): 3027-3053.

Evaluation of the comprehensive pollution control effectiveness in the Zouping section of the Xiaoqing River Basin based on water quality targets

WANG Haofang¹, DAI Chenyang¹, ZHANG Yike¹, WANG Mingdong^{1,2}, ZHANG Jincun^{1*}

(1. Department of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Power China Shandong Engineering Corporation Limited, Jinan 250098, China)

Abstract: The implementation of integrated management measures is one of the effective means to improve the water environment of the basin and to enhance water quality, and the assessment of the effects is the key to testing the effectiveness of the management measures. Xiaoqing River is located in the lower reaches of the Yellow River. It is an important drainage channel of Shandong Province. The river is a source of irrigation of farmland on both sides, and is used for river transport and access to the sea. However, the Zouping section of the Xiaoqing River basin has high concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP, which do not meet water quality objectives. Focusing on the Zouping section of the Xiaoqing River Basin, three major pollutants affecting the water quality of the basin ($\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP) were treated. According to the source of the pollutant load, comprehensive management measures combining internal and external sources are considered from the aspects of upgrading the sewage treatment plant, centralised collection and treatment of rural sewage, reduction of fertiliser application, regional afforestation and reduction of upstream incoming water load. Five combinations were created. The SWAT model was established based on the basic data of the basin and the parameter rates were determined to simulate the five treatment scenarios under different precipitation conditions, and to analyse whether the concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP could reach the target of Class III water quality of surface water after the implementation of the treatment measures. A combination of the R-R-V (Reliability-Resilience-Vulnerability) index method and the entropy method were used to assess the effectiveness of the combined measures in terms of reliability, reparability and vulnerability. On this basis the best measure were selected. The results showed that different combinations of treatment measures were able to improve the water environment condition. The concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP after the five treatment scenarios were significantly lower than those before the treatment under abundant, flat and dry precipitation, and the annual average concentrations of pollutants in the treatment scenarios of S2, S3, S4, and S5 were able to reach the target of Class III water quality. Under S5 (the scenario including urban sewage treatment rate increased to 100%, rural sewage treatment rate increased to 80%, bare land reduced by 30 km^2 , upstream load reduced by 40%, fertiliser application reduced by 40%), the monthly concentrations of pollutants in the Tangkouqiao section reached the target of Class III water quality during wet, normal, and dry years. The S5 scenario had the highest composite score under different rainfall scenarios, with 0.956 and 0.956 in the year of abundance and flat water, respectively, and 0.881 in the year of dry water, which demonstrated the best effect of treatment measures on water quality improvement. Therefore, the R-R-V index and the entropy method are useful for assessing the effectiveness of integrated measures and selecting the best measures. This study provides a foundation for implementing water quality management objectives in the Zouping section of the Xiaoqing River Basin.

Keywords: SWAT modelling; basin management; water quality objectives; R-R-V index approach