

水肥耦合模式下沙颍河农业非点源污染模拟研究

马建琴¹, 郭薇^{2*}, 刘蕾¹

(1.华北水利水电大学, 郑州 450045; 2.南水北调中线建管局河南分局, 郑州 450000)

摘要:【目的】通过研究不同水肥组合对农田氮磷污染负荷输出量的影响, 确定最佳水肥耦合方案。【方法】使用验证后的 SWAT 模型, 以 2008—2015 年为例, 模拟计算了沙颍河流域农田非点源污染 TN 和 TP 负荷的时空分布特征, 并综合考虑不同灌水和施肥量情景下污染物输出负荷的变化规律。【结果】通过对设置的 16 种情景下的氮磷负荷变化进行比较得出: 污染负荷的削减率与施肥量的减少量呈正相关, 且在 S4 模式下, 污染负荷削减效果最佳; 污染负荷的削减率与灌水的减少量呈负相关, 且在 S8 模式下, 污染负荷削减效果最佳; 当同时耦合灌水和施肥时, 总氮的削减趋势随着灌水施肥的降低有所减缓, 总磷的削减趋势在不同情景下变化不同。【结论】施肥量和灌水量各减少 30% 或 40% 时, 农业污染削减效果最好。

关键词: 模型; 沙颍河; 农业非点源污染; 模拟; 水肥耦合

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20190268

马建琴, 郭薇, 刘蕾. 水肥耦合模式下沙颍河农业非点源污染模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 111-119.

MA Jianqin, GUO Wei, LIU Lei. Study on Simulation of Agricultural Non-point Source Pollution in Shaying River under Water-fertilizer Coupling Model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 111-119.

0 引言

【研究意义】目前非点源污染是造成水环境污染的主要因素之一^[1], 严重危害水资源安全与农业安全, 并带来巨大的社会经济损失^[2], 其污染负荷难以控制, 具有随机性强、潜伏周期长、涉及范围广等特点^[3]。全世界由非点源污染引起陆地退化的面积约 40% 左右, 其中约有 12% 左右是由农业非点源污染引起的^[4], 农业非点源污染是河流、湖泊的第一大污染源, 约占污染负荷输出总量的 2/3, 是引起湿地退化和地下水污染的主要原因^[5]。【切入点】由于沙颍河流域的耕地面积占总流域面积的 70% 以上^[6], 农田施肥量过多, 肥料利用率普遍偏低, 导致农田非点源污染严重, 因此需要运用科学有效的方法对该流域农业非点源污染的损失展开研究。【研究进展】目前, 国内学者在模拟流域非点源污染负荷时已取得一定的成果。张晓晗等^[7]在对不同土地利用类型下单位面积所产生的污染物输出负荷进行模拟, 得出耕地施肥是

导致非点源污染的主要原因, 减少施肥可以有效控制非点源污染负荷; 刘方平^[8]通过分析不同施肥模式下水稻田氮磷负荷排放规律, 结果表明随着氮肥和磷肥施用量的减少, 流域总氮和总磷的排放量也相应地减少; 杨宝林等^[9]运用 SWAT 模型对莲塘口流域农业污染负荷的影响进行模型分析, 研究表明减少施肥量能有效降低农田污染负荷的输出量, 但施肥量不变仅增加施肥次数无明显减排效果。【拟解决的关键问题】然而, 人们在运用 SWAT 模型模拟分析农田污染负荷规律时, 往往只改变了施肥量或施肥次数, 却鲜少有人考虑到灌水和施肥共同响应对污染输出负荷的影响, 随着节水灌溉技术的开展与推广^[10], 同时耦合灌水和施肥量对污染输出负荷开展研究更有利于控制非点源污染。为此, 选取沙颍河为研究区域, 在运用 SWAT 模型分析农田非点源污染时空分布的同时, 重点模拟不同灌水和施肥量组合对氮磷负荷的输出规律, 以期制定沙颍河流域合理的水肥利用管理和氮磷污染的治理提供重要的科学依据。

1 研究区概况

沙颍河发源于河南省登封市嵩山, 是淮河最大支流, 位于淮河北侧, 自西向东横跨豫皖二省, 在安徽省颍上县汇入淮河。其中河南省境内流域面积为 34 467.0 km², 占流域总面积的 88.21%。流域面积

收稿日期: 2019-06-17

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (15HASTIT046); 河南省科技攻关项目 (152102110095); 河南省高等学校重点科研项目资助 (15A570008)

作者简介: 马建琴 (1973-), 女, 教授, 主要研究方向为干旱地区水资源管理、农业水资源可持续利用、区域水资源优化配置、水环境。E-mail: 393204148@qq.com

通信作者: 郭薇 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农业水资源可持续利用。E-mail: 344789617@qq.com

较大的一级支流有沙河、北汝河、澧河、清颍河、贾鲁河、新运河、新蔡河、汾泉河和黑茨河等；大于100 km²的二级支流有百余条^[11]。流域涵盖河南省的南阳、洛阳、平顶山、郑州、开封、许昌、漯河、驻马店、周口，安徽省阜阳市等10个地市。沙颍河流域土地沃腴，地形较平，农业耕种密集，耕地面积范围广阔，农作物主要为冬小麦和夏玉米轮作模式为主。其农耕管理措施主要包括，在6月初对土壤进行翻耕，施用一定量的氮肥和磷肥作为夏玉米耕种的基肥，随后进行夏玉米的种植，7月和8月在夏玉米的生长发育期对其施加一定量的氮肥，夏玉米生育期内对其灌水3次，9月底进行收获。当年10月在进行冬小麦的播种前，进行土地翻耕并施用一定量的氮肥和磷肥，随后进行冬小麦的种植，在11月、翌年的3月和4月施一定量的氮肥，并灌水3次，在6月初收获^[12-15]。

2 研究方法

2.1 SWAT模型数据库的构建

非点源污染由于时空分布复杂并且缺少污染监测信息，成为国内外水污染模拟研究的难点。SWAT模型为非点源污染提供了一个有效的平台，是目前被广泛应用于流域污染负荷计算的模型，该模型目前已

在 50 多个不同国家的流域进行模拟应用和推广^[16]。模型建立所需要的数据包括空间数据和属性数据 2 大类，空间数据包括数字高程图（DEM）、土壤类型图、土地利用图、河流水系图等；属性数据包括土壤属性数据、污染数据、农业耕种管理措施等。本研究所需的模型数据见表 1。基于 DEM、土地利用类型（见图 1）、土壤类型，采用模型推荐的阈值将沙颍河流域划分为 24 个子流域和 47 个水文响应单元（HRUs），如图 2 所示。

表 1 模型主要输入数据来源

Table 1 Main input data sources of the model

数据类型 Data type	精度 Precision	数据来源 Data source	格式 Format
数字高程图 (DEM) Digital elevation map (DEM)	90 m × 90 m	地理空间数据云	Grid
土地利用 The land use	1 km × 1 km	中国科学院资源环境科学数据中心	.shp file
土壤数据 Soil data	1:100 万	中国土壤数据库	.shp file
气象数据 Meteorological data	日均值	中国气象数据网	.txt
水文数据 Hydrological data	日均值	淮河水利委员会水文局	.txt
农耕管理 Agricultural management		区县年鉴	.txt

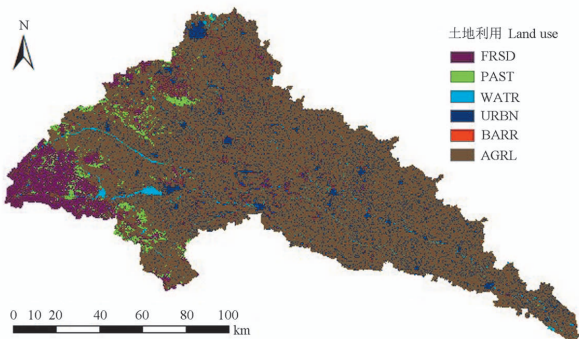


图 1 沙颍河流域土地利用图

Fig.1 Land use map of Shaying River Basin

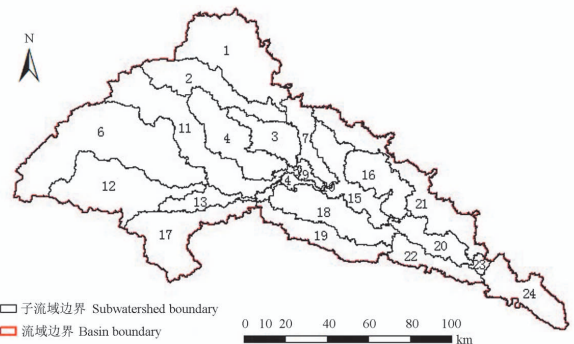


图 2 沙颍河子流域划分图

Fig.2 Subwatershed division of Shaying River

2.2 模型适用性评价

本文对SWAT模型进行校准和验证，采用人工调整参数和自动率定相结合的方法进行参数率定。在分析比较的基础上，为提高计算模型模拟效果的可靠性，通过计算决定系数（ R^2 ）和效率系数Nash-Sutcliffe（ E_{ns} ）来评价模型参数的校验的优劣性^[17]。

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave}) \times (P_i - P_{ave})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 \right]^{0.5} \times \left[\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2, \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2}, \quad (2)$$

式中： P_{ave} 为模拟数据的平均值； O_{ave} 为实测数据的

平均值； O_i 为观测的实测数据； P_i 为模型的模拟数据。理论上， R^2 和 E_{ns} 的值越接近1，模型模拟效果就越好^[18]。当 $R^2 > 0.6$ 且 $E_{ns} > 0.5$ 时，可认为模型模拟效果较好、结果可靠。

3 结果与分析

3.1 模型的校准与验证

通常需要对模型参数中的敏感性进行评价分析以减少参数率定的工作量，为此，需找出对模拟结果精度影响较大的参数，有针对性地进行调整。通过SWAT-CUP 软件对模型主要参数进行敏感性分析，确定流域中参数敏感性等级最高的 10 个敏感性参数，分

别为 ESCO、CN2、EPCO、CANMX、SOL_K、SOL_AWC、GWQMN、SOL_Z、GW_REVAP、ALPHA_BF 软件自动生成的参数没有中文对照，详见表 2。本研究以沙颍河研究区域周口水文站 1971—1980 年的实测数据进行对径流量的模拟，将 1966—1970 年为预热期，1971—1980 年为校准期，2001—2010 年为验证期。根据参数敏感性排名，对其进行敏感性分析。月径流模拟值与实测值对比见图 3 和图 4，模型校准期和验证期模拟效果评价指标如表 3 所示，率定后的 SWAT 模型具有较好的精度，满足沙颍河流域产流模拟应用要求。

本文仅对径流进行参数的率定和校准，根据已有研究^[19]做出周口水文站的氮氮的模拟值与文献中的实测值对比图，如图 5 所示。本文模拟的氮氮值与文献中实测值的相关系数为 0.68，其相关性略低的主要原因在于，本文所研究的非点源污染主要对农田的施肥量进行模拟分析，而参考文献中的非点源污染负荷输出负荷包括对泥沙的模拟。图 5 进一步证明该模型在沙颍河流域适用性良好。

3.2 非点源污染的时间分布特征

利用校准后的模型，对沙颍河流域在 2008—2016 年模拟时间段中选取降雨量相对较大（2010、2012 年）和降雨量较小（2008、2015 年）的 4 a 的年均氮、磷输出的年负荷进行计算，统计结果见表 4。对其降雨量、径流量、总氮和总磷的月均统计量结果见图 6。

表 2 参数敏感性分析及率定结果

Table 2 Parameter sensitivity analysis and calibration result

参数 Parameter	初始范围 Initial scope		调试范围 Scope of debugging		最终值 Final value
	Min	Max	Min	Max	
v_ESCO.hru	0	1	0	0.58	0.15
v_CN ₂ .mgt	35	98	59.5	108.4	83.9
v_EPCO.hru	0	1	0.45	1.36	0.91
v_CANMX.hru	0	100	37	113	75.8
v_SOL_K.sol	0	2 000	129	1 376	753
v_SOL_AWC.sol	0	1	0.34	1.03	0.69
v_GWQMN.gw	0	5 000	248	3 416	1 832
r_SOL_Z.sol	-1	1	-0.34	0.22	0.06
v_GW_REVAP.gw	0.02	0.2	0.02	0.13	0.05
v_ALPHA_BF.gw	0	1	0	0.58	0.17

注 r、v 为参数调整方式，r 为参数按给定值乘以若干倍，v 为参数被替换为给定值。

Note: r and v are parameter adjustment methods, r means that the parameter is multiplied by the given value several times, v means that the parameter is replaced with the given value.

表 3 模型在研究区域适用性

Table 3 The applicability of the model in the study area

时期 Period	R ²	E _{ns}	评价结果 Evaluation results
校准期 Calibration period (1971—1980 年)	0.75	0.66	满意
验证期 Validation period (2001—2010 年)	0.77	0.74	满意
合计 Total	0.76	0.70	满意

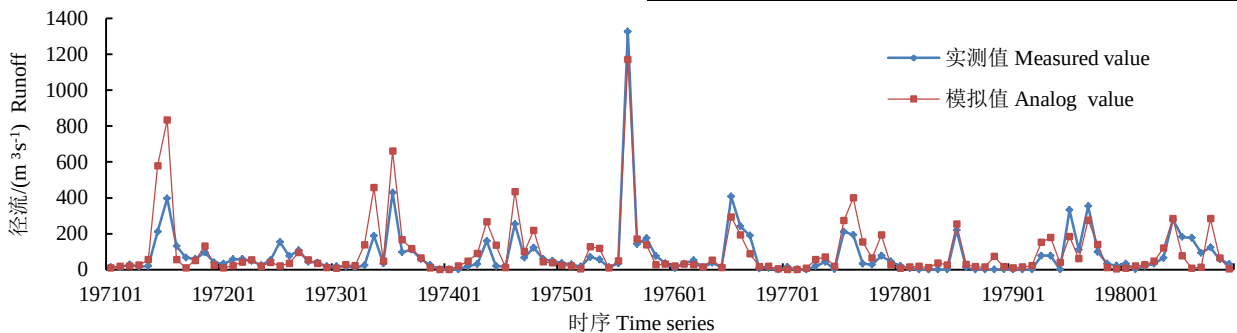


图 3 沙颍河流域逐月径流率定期的模拟值与实测值对比效果

Fig.3 Comparison of the simulated and measured monthly runoff rates in the Shaying River Basin

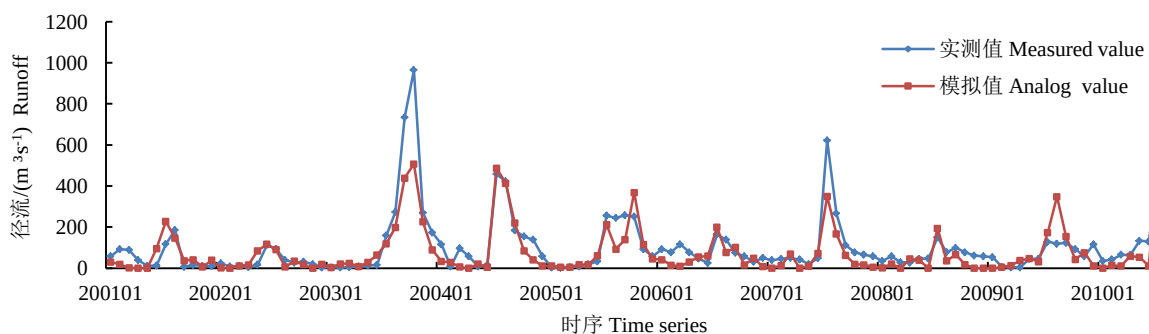


图 4 沙颍河流域逐月径流验证期的模拟值与实测值对比效果

Fig.4 Comparison of simulated and measured monthly runoff in the verification period of Shaying River Basin

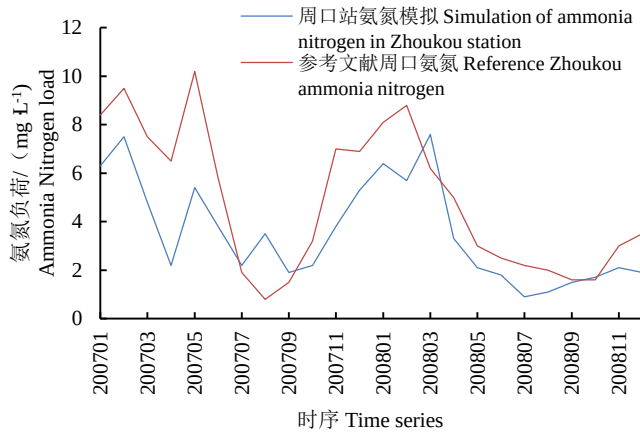


图5 沙颍河流域周口水文站模拟氨氮与参考文献对比效果
Fig.5 Comparison of simulated ammonia nitrogen with references in Zhoukou hydrological station of Shaying River Basin

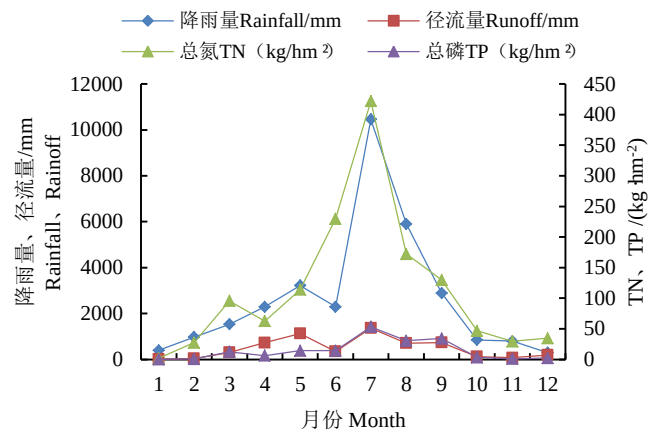


图6 月降雨量、产水量、非点源污染年内变化图
Fig.6 Annual variation chart of monthly rainfall, water yield and non-point source pollution

表4 模拟输出的年负荷

Table 4 Annual simulated output load

年份 Year	2008 年	2010 年	2012 年	2015 年	年均值 Annual mean
有机氮 Organic nitrogen	2 738.76	6 275.32	4 347.01	4 384.20	4 436.32
硝酸盐氮 Nitrate nitrogen	17 717.29	16 822.85	16 937.73	16 042.53	16 880.10
TN	20 456.06	23 098.16	21 284.74	20 426.73	21 316.42
TP	923.50	5 625.82	1 925.14	2 576.01	2 762.62
有机磷 Organic phosphorus	314.00	1 520.41	420.36	432.17	671.74
可溶性磷 Soluble phosphorus	203.30	648.09	561.39	924.99	584.44
无机磷 Inorganic phosphorus	406.20	3 457.33	943.40	1 218.84	1 506.44

由表4可知,2008—2015年的年负荷中,2010年的污染负荷量最高,2008年的污染负荷量最低。年平均总氮负荷输出量均大于年均总磷负荷输出量,2010年总氮和总磷的输出量最高,分别为23 098.16 t和5625.82 t,比年均值分别高出17.65%和50.9%。

由沙颍河流域4 a间的月降雨量、径流量、总氮和由图6可以看出,月均降雨量、径流量与面源污染负荷的变化趋势基本保持一致,降雨量在5月和7月达到峰值,8—10月呈下降趋势,其月径流量也在5月和7月达到最大值,与降雨量用回归方程计算得出的相关系数为0.84。总氮和总磷的输出量受到降雨量的影响,在降雨较为集中的月份里,径流量大导致污染负荷也最大,总氮总磷与径流量的相关系数为0.749、0.809。在农田管理中,6—8月正值夏玉米种植施肥时期,导致化肥积累,由于该时间段属于汛期容易发生暴雨,暴雨产生的地表径流会携带大量的污染负荷导致污染物迁移,造成非点源污染加剧。

3.3 非点源污染的空间分布特征

本文选取沙颍河研究区域2008、2010、2012年和2015年的24个子流域输出文件,计算出各子流域的月

均降雨量和以WYLD为月均径流量,计算出沙颍河研究区域4 a年均总氮和总磷的污染负荷,做研究区域年均的月降雨量、径流量和污染负荷输出量的空间分布图,对其空间分布特征进行研究,结果如图7所示。

分析图7可知,4 a年均月径流量在研究区域西部、中部和东部最高,区域中部偏东部地区最低,月降水量在区域的中部最高,二者呈大致相似的分布。年均月降水量呈区域中部高于东部,其月径流量在区域的东部最低,二者呈现出相同的分布。总氮、总磷的输出负荷在不同子流域的变化范围分别为2.5~8.3 kg/hm²和0.28~1.24 kg/hm²。总氮和总磷的输出负荷主要集中于1、2、3、4、5、9、14子流域,普遍达到5.39 kg/hm²和0.93 kg/hm²左右。对比总氮和总磷的分布图,污染物的输出负荷在中部最高,北部其次,由图2可知,沙颍河流域西部以山区林地为主,所以即使降雨和径流量较大,污染负荷也不是很高,其中部主要以耕地为主,施肥量大导致污染物负荷输出高。污染物分布规律图与降雨量和径流量分布图较为一致。污染分布严重的区域与人口密度大、农耕施肥量大和化肥利用率不高有密切的关系。

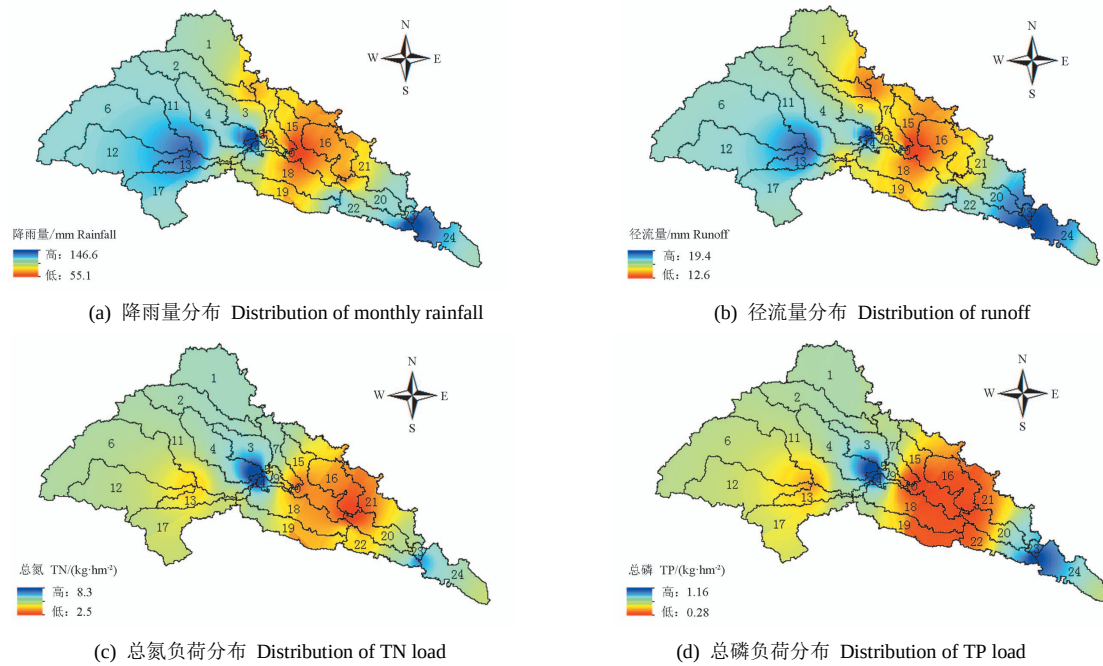


图7 月降雨量、径流量及污染负荷分布

Fig.7 Distribution of monthly rainfall, runoff and pollution load

3.4 不同灌水施肥制度下氮磷排放负荷变化规律

根据国家和国际上对目前化肥使用量的要求和倡导^[20-22], 本研究同时耦合了灌水和施肥2个因素, 以冬小麦夏玉米轮作模式下各地区农户普遍灌水和施肥为对照, 设置16种不同情景, 如表5所示。

表5 不同情景的模拟方案

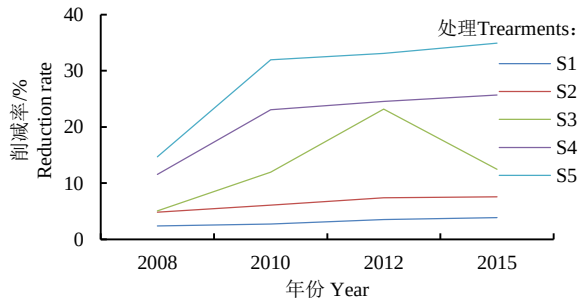
Table 5 Simulation schemes of different scenarios

情景模拟 Scenario simulation	方案 Plan
施肥 Fertilization	S1: 施肥减少 10%
	S2: 施肥减少 20%
	S3: 施肥减少 30%
	S4: 施肥减少 40%
	S5: 施肥减少 50%
灌水 Irrigation	S6: 灌水减少 10%
	S7: 灌水减少 20%
	S8: 灌水减少 30%
	S9: 灌水减少 40%
	S10: 灌水减少 50%
水肥耦合 Water-fertilizer coupling	S11: 灌水施肥各减少 10%
	S12: 灌水施肥各减少 20%
	S13: 灌水施肥各减少 30%
	S14: 灌水施肥各减少 40%
	S15: 灌水施肥各减少 50%

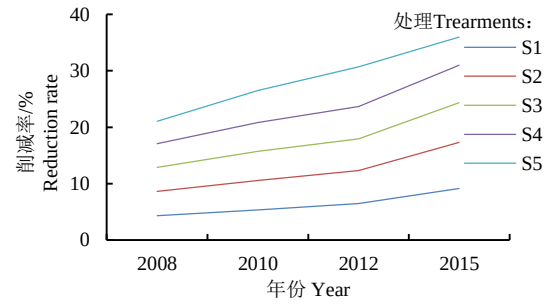
为得出在保证作物产量的前提下最优的水肥耦合方案, 本文引入边际产出概念来模拟不同情境下污染负荷输出的边际效果, 即灌水和施肥量每多削减10%所带来的总削减率的增加量, 当边际削减效果越好则边际产出值越大, 反之则越小^[23]。据此得出不同

情景下研究区域总氮和总磷污染负荷输出量的削减率和4 a年均边际削减趋势, 如图8和图9。

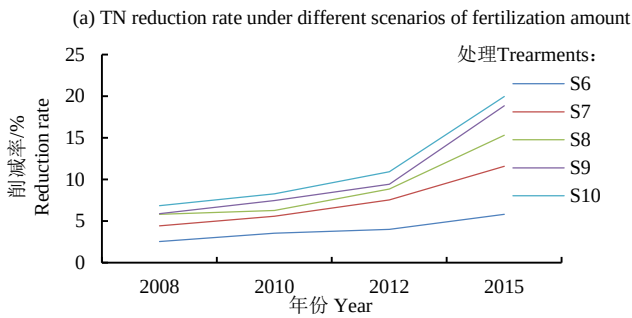
由图8和图9可知, 当仅改变作物施肥量时, 研究区所产生的总氮总磷污染负荷的削减率随着施肥量的降低而降低, 且当施肥量每多减少10%时, 污染负荷的削减率呈逐年升高的趋势, 总氮和总磷负荷的削减率在2015年S5的情景模式下, 分别达到34.95%和36%; 在S4的情景下, 总氮的边际削减值呈先增加后减少的趋势, 总磷的边际削减值在S3-S4模式下, 趋势变缓效果降低, 由此可以看出当施肥量设置在S4模式下, 污染负荷削减效果最佳。当仅改变作物灌水时, 研究区所产生的污染负荷削减率随着灌水量的降低而有所下降, 下降的幅度没有改变施肥量的幅度大, 在S10的情景下, 污染负荷削减率最高; 总氮的边际削减值在S8-S9模式下, 趋势逐渐变缓, 削减效果变差, 总磷的边际削减值在S8的模式下呈先升高后降低的趋势, 由此可知, 当灌水在S8情景模式下, 污染物输出负荷的削减效果最好。当同时耦合灌水和施肥时, 总氮的削减率趋势随着灌水施肥量的降低, 削减趋势有所减缓, 在S15的情景下分别达到15.37%、32.7%、36.02%和41.26%, 总磷的削减率趋势变化较大; 总氮负荷在S13-S14模式下边际削减值呈上升趋势, 在S14情景下达到峰值, 随后呈下降趋势, 总磷负荷在S13-S14模式下趋势放缓, 效果越来越弱, 根据已有文献^[10,24-25], 冬小麦夏玉米的灌水施肥量过低会影响作物产量, 导致作物减产, 所以在S13或S14的情景模式下, 最利于控制农田非点源污染并保证作物正常生长。



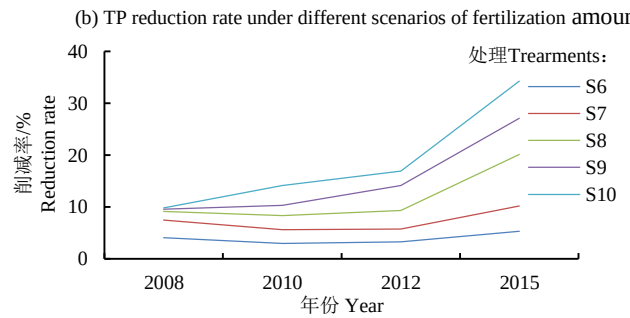
(a) 施肥量的不同情境模拟下TN削减率



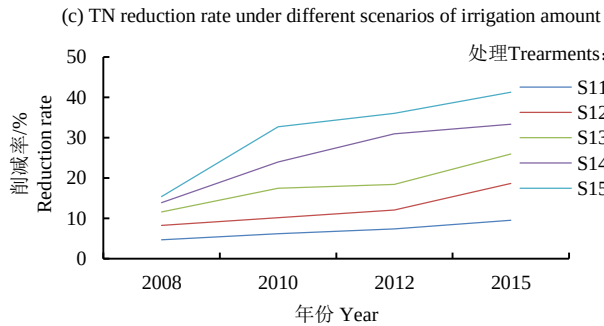
(b) 施肥量的不同情境模拟下TP削减率



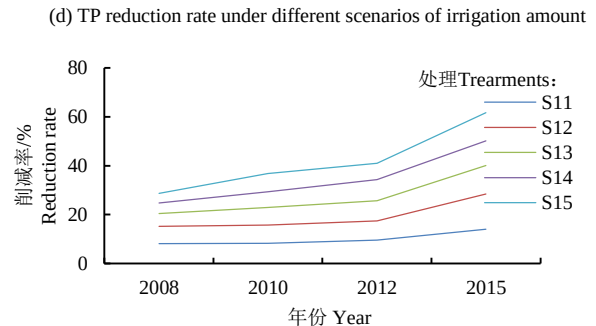
(c) 灌水量的不同情境模拟下TN削减率



(d) 灌水量的不同情境模拟下TP削减率



(e) 水肥耦合不同情境模拟下TN削减率



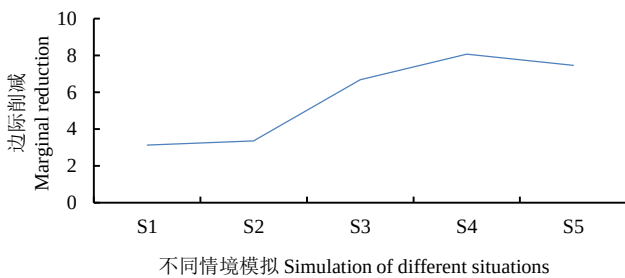
(f) 水肥耦合不同情境模拟下TP削减率

(e) TN reduction rate under different scenarios of water fertilizer coupling

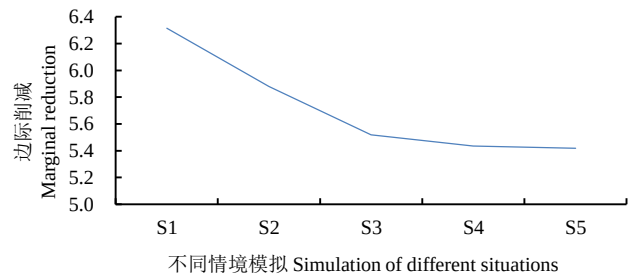
(f) TP reduction rate under different scenarios of water fertilizer coupling

图8 不同情景下总氮总磷输出负荷的削减率

Fig.8 Reduction rate of total nitrogen and total phosphorus output load under different scenarios



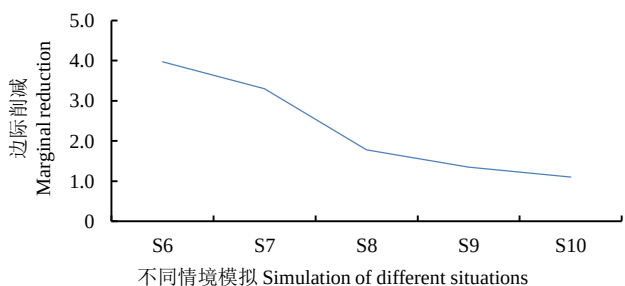
(a) 施肥量的不同情境模拟下TN边际削减



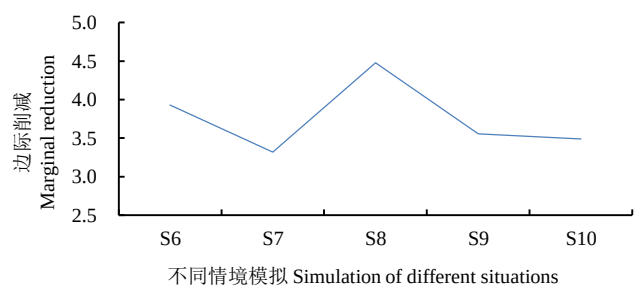
(b) 施肥量的不同情境模拟下TP边际削减

(a) TN marginal reduction under different scenarios of fertilizer application

(b) TP marginal reduction under different scenarios of fertilizer application



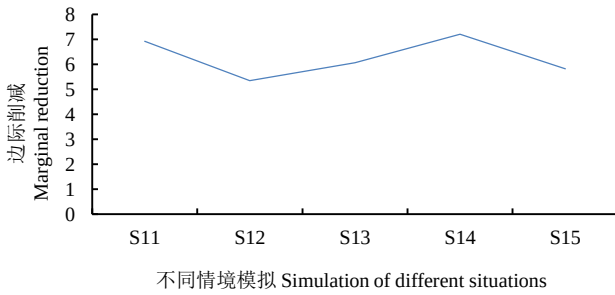
(c) 灌水量的不同情境模拟下TN边际削减



(d) 灌水量的不同情境模拟下TP边际削减

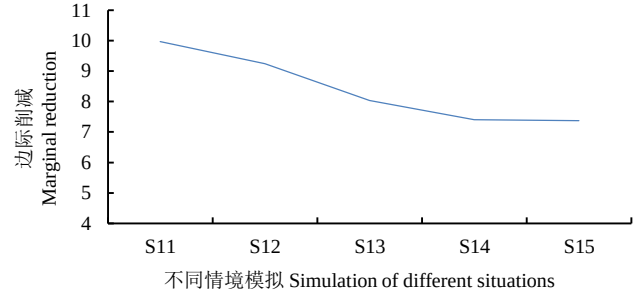
(c) TN marginal reduction under different scenarios of irrigation amount

(d) TP marginal reduction under different scenarios of irrigation amount



(e) 水肥耦合不同情境模拟下TN边际削减

(e) TN marginal reduction under different scenarios of water and fertilizer coupling



(f) 水肥耦合不同情境模拟下TP边际削减

(f) TP marginal reduction under different scenarios of water and fertilizer coupling

图9 不同情景下总氮总磷的边际产出值

Fig.9 Marginal output value of total nitrogen and total phosphorus under different scenarios

4 讨论

本文应用 SWAT 模型对沙颍河流域农业非点源污染进行模拟分析，率定系数均在 0.66 以上，说明该模型在沙颍河流域适用性良好。由非点源污染负荷分布特征可知，总氮和总磷的非点源污染负荷主要集中于降水量和产水量较大的地区。已有研究^[19]表明，沙颍河上游区域中，降雨、径流和耕地与河道非点源污染负荷的输出之间有很强的正相关性，人类活动对非点源污染负荷影响较大，这与文中研究结果基本一致。与陈曼雨等^[26]在莲塘口流域模拟分析不同情景下面源污染负荷的排放规律相似，施肥量的减少会导致氮磷排放负荷减少。造成这种现象的原因是：目前我国肥料利用率普遍低，大部分污染物由于径流的产生而发生迁移，虽然改变农作物的灌水和施肥量能有效地控制面源污染输出负荷，但过度减少施肥和灌水量可能导致农作物减产。黄令峰等^[27]认为，在一定范围内灌水量增加可以提高冬小麦单位面积穗数，但灌水过多反而会使穗粒数减少，千粒质量降低。姚金保等^[28]认为，随施氮量增加，冬小麦产量及产量构成的各项指标均增加，但超过一定量后，继续增加施氮量穗粒数明显下降，甚至导致减产。本研究表明，通过分析研究 4 a 平均削减率的边际削减变化趋势，可以确定当灌水量和施肥量减少 30%或 40%时，最有利于控制农田非点源污染，灌水量和施肥量继续减少边际削减效果减弱并可能导致作物减产，下一步应添加作物产量和产量结构进行综合评价加以验证。

5 结论

1) SWAT 模型在沙颍河流域的适用性良好。

2) 沙颍河流域农田污染负荷输出规律与降雨量和径流量的变化趋势较为一致，总氮和总磷污染负荷会同时随着降雨量或者径流的产生而迁移；从空间分布上来看，总氮和总磷的输出负荷在2012年表现为

中部最高，在2015年表现为西部和东部较高，其空间分布与降雨量和径流量的分布图较为一致。

3) 当同时考虑水肥耦合时，在S13或S14的情景模式下，总氮负荷在S14情景下达到峰值，随后呈下降趋势，总磷负荷在S13-S14模式下趋势放缓，效果越来越弱。因此，在S13或S14的情景模式下最有利于在保证作物生长发育的前提下控制农田非点源污染负荷输出量，此时边际削减趋势最佳。

参考文献:

- [1] JULIE S. The water crisis-constructing solutions to freshwater pollution [M]. London: Earthscan Publications Ltd., 1998, 31-50.
- [2] 查恩爽. 伊通河流域农业非点源污染模拟及最佳管理措施的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
ZHA Enshuang. Simulation of agricultural non-point source pollution and application of best management measures in Yitong River Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [3] BRYAN B A, KANDULU J M. Designing a policy mix and sequence for mitigating agricultural non-point source pollution in a water supply catchment[J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 875-892.
- [4] 朱丹丹. 大庆地区农业非点源污染负荷研究与综合评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
ZHU Dandan. Study and comprehensive evaluation of agricultural non-point source pollution load in Daqing area [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.
- [5] USEPA. National water quality inventory[M]. Report to Congress Executive Summary. Washington DC: USEPA 1995: 497.
- [6] 曾俊. 基于 SWAT 模型的沙颍河上游非点源污染模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
ZENG Jun. Simulation of non-point source pollution in the upper reaches of Shaying River Based on SWAT model [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [7] 张晓晗, 王甜, 程文, 等. 黑河水库非点源污染时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 324-330.
ZHANG Xiaohan, WAN Tian, CHENG Wen, et al. Temporal-spatial

- distribution of non-point source pollution research of Heihe reservoir[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 324-330.
- [8] 刘方平. 稻田水肥管理对不同尺度区域农业面源污染排放规律影响分析[J]. 江西农业学报, 2016, 28(12): 105-109.
- LIU Fangping. Effects of Irrigation and Fertilization in Paddy Field on Discharge of Agricultural Non-point-source Pollution in Different Scales Districts[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(12): 105-109.
- [9] 杨宝林, 崔远来, 赵树君, 等. 基于 SWAT 模型的莲塘口流域农业面源污染模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 359-364.
- YANG Baolin, CUI Yuanlai, ZHAO Shujun, et al. Simulation and application of agricultural non-point source pollution in Liantangkou watershed based on SWAT model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 359-364.
- [10] 马建琴, 崔弼峰, 刘蕾, 等. 基于改进层次分析的模糊综合评价在灌区方案优选中的应用[J]. 节水灌溉, 2017(8): 34-37, 43.
- MA Jianqin, CUI Bifeng, LIU Lei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process in optimization of irrigation scheme[J]. Water Saving Irrigation, 2017(8): 34-37, 43.
- [11] 左其享, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与自然地理特征[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 66-72.
- ZUO Qiting, LUO Zengliang, SHI Yongqiang, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shayinghe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 66-72.
- [12] 刘灿华, 孙笑梅, 闫军营. 2017 年河南省冬小麦测土配方施肥建议[J]. 种业导刊, 2017(7): 8-10.
- LIU Canhua, SUN Xiaomei, YAN Junying. Suggestions on soil testing and formula fertilization of Winter Wheat in Henan Province in 2017 [J]. Journal of Seed Industry Guide, 2017(7): 8-10.
- [13] 王芳, 汪左, 黄静, 等. 安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 268-279.
- WANG Fang, WANG Zuo, HUANG Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 268-279.
- [14] 南纪琴, 肖俊夫, 刘战东, 等. 河南省夏玉米年均需水量空间插值法研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Supp.1): 16-18.
- NAN Jiqin, XIAO Junfu, LIU Zhandong, et al. Study on spatial interpolation method of annual average water demand of Summer Maize in Henan Province [J]. Journal of irrigation and drainage, 2014, 33 (Supp.1): 16-18.
- [15] 张建军, 盛绍学, 王晓东. 安徽省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 163-168.
- ZHANG Jianjun, SHENG Shaoxue, WANG Xiaodong. Temporal and spatial distribution characteristics of drought during summer corn growing season in Anhui Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(2): 163-168.
- [16] 黄晓秋. 基于 SWAT 模型的大凌河流域面源污染模拟影响分析[J]. 水利规划与设计, 2018(4): 53-55, 169.
- HUANG Xiaoqiu. Simulation impact analysis of non-point source pollution in Daling River Basin Based on SWAT model [J]. Water Resources Planning and Design, 2018(4): 53-55, 169.
- [17] 李冉, 闫红娇, 焦保义, 等. 基于 SWAT 模型的漳河流域面源污染模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(9): 6-13.
- LI Ran, YAN Hongjiao, JIAO Baoyi, et al. The simulation research on non-point source pollution in Zhanghe river based on SWAT model[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(9): 6-13.
- [18] LIM K J, MOON J, JUNG Y, et al. Determining the effective width of riparian buffers in Korean watersheds using the swat model[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, 12(11): 2249-2260.
- [19] 曾俊. 基于 SWAT 模型的沙颍河上游非点源污染模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- ZENG Jun. Simulation of non-point source pollution in the upper reaches of Shaying River Based on SWAT model [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [20] 丁艳宏, 屈忠义, 李昌见, 等. 不同灌溉水源及方式对玉米生长特性及水肥利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 1-7.
- DING Yanhong, QU Zhongyi, LI Changjian, et al. Effects of different water sources and irrigation methods on growth and water-fertilizer use efficiency of maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 1-7.
- [21] 杜娟娟, 李粉婵. 不同灌水及施肥措施对冬小麦生长及产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 30-34.
- DU Juanjuan, LI Fenchuan. Experimental study on the growth and yield of winter wheat under different irrigations and nitrogen applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(9): 30-34.
- [22] 苏毅捷, 代俊峰, 莫磊鑫, 等. 漓江上游灌区小流域不同尺度氮磷污染排放负荷研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 92-98.
- SU Yijie, DAI Junfeng, MO Leixin, et al. Discharge of nitrogen and phosphorus at different scales over a small watershed within an irrigation district in upstream of the Li river[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 92-98.
- [23] 杨晓, 雪合来提·马合木提, 张玉玲. 资本边际产出的变化特征及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2012(7): 121-125.
- YANG Xiao, XUEHELAITI·Mahemuti, ZHANG Yuling. Analysis on the change characteristics and influencing factors of marginal output of capital [J]. Statistical observation, 2012(7): 121-125.
- [24] 汪顺生, 刘东鑫, 孟鹏涛, 等. 不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 161-166.
- WANG Shunsheng, LIU Dongxin, MENG Pengtao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on yield and water consumption of winter wheat with different cropping patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 161-166.
- [25] 汪顺生, 刘东鑫, 王康三, 等. 不同沟灌方式对夏玉米耗水特性及产量影响的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 89-94.
- WANG Shunsheng, LIU Dongxin, WANG Kangsan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on water consumption characteristics and

- yield of summer corn under different furrow irrigation patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 89-94.
- [26] 陈曼雨, 崔远来, 郑世宗, 等. 基于 SWAT 模型的农业面源污染尺度效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 187-191, 196.
- CHEN Manyu, CUI Yuanlai, ZHENG Shizong, et al. Scale effects of agricultural non-point source pollution based on SWAT model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 187-191, 196.
- [27] 黄令峰, 林琪, 刘义国, 等. 限量补灌对旱地高产田小麦光合和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 470-474.
- HUANG Lingfeng, LIN Qi, LIU Yiguo, et al. Effect of limited supplementary irrigation on photosynthesis and yield of wheat in high-yield dry land[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(2): 470-474.
- [28] 姚金保, 杨学明, 马鸿翔, 等. 拔节期追施氮肥对宁麦 16 产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 727-730.
- YAO Jinbao, YANG Xueming, MA Hongxiang, et al. Effect of nitrogen application at jointing stage on grain yield and quality of ningmai 16[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(4): 727-730.

Study on Simulation of Agricultural Non-point Source Pollution in Shaying River under Water-fertilizer Coupling Model

MA Jianqin¹, GUO Wei^{2*}, LIU Lei¹

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Henan Branch of Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: 【Background】Water is an indispensable and precious natural resource for human and other organisms to survive, as well as for socio-economic development and agricultural production. Water resources shortage has become the focus of people's attention. With the continuous growth of China's population and the rapid advancement of industry, agriculture and urbanization, environmental pollution has become increasingly serious, the ecological environment around rural areas has been destroyed, especially for water pollution. The problem of water pollution is usually classified into point source pollution and non-point source pollution according to its source. When people worked for effective management and control of point source pollution, while water quality has not been much improved, they gradually realize the non-point source pollution is the main factor of water pollution of the environment. Control of watershed non-point source pollutant load on the output water quality plays a very important role in environmental protection. In recent years, the application amount of fertilizer driven by agricultural production increase is increasing, and the water body in China is generally polluted by non-point agricultural sources. The eutrophication of water body and the continuous decline of river water quality, and the water environment pollution are increasingly serious, which has become one of the hot issues concerned by the academia and production departments. In response to national policies, it is urgent to analyze the impact of reducing the amount of irrigation and fertilizer applied to agricultural crops on the output load of non-point source pollutants in different regions. 【Objective】By studying the effects of different combinations of water and fertilizer on the output of nitrogen and phosphorus pollution load in farmland, the optimal coupling scheme of water and fertilizer will be determined. 【Method】At present, because of the lack of a pollution monitoring system, the uncertainty of the pollutant emission points make it difficult to simulate agricultural non-point source pollution. This study used the verified SWAT model to simulate the spatial and temporal distribution characteristics of TN and TP loads of farmland non-point source pollution in Shaying River basin from 2008 to 2015, and the variation of pollutant output loads under different irrigation and fertilizer rates was comprehensively considered. 【Result】By comparing the changes of nitrogen and phosphorus load under 16 scenarios, it was concluded that the reduction rate of pollution load was positively correlated with the reduction of fertilizer application amount, and the pollution load reduction effect was the best under S4 mode. The reduction rate of pollution load is negatively correlated with the reduction amount of irrigation water, and the reduction effect of pollution load is the best under S8 mode. When both irrigation and fertilization were coupled, the trend of total nitrogen reduction slowed down with the decrease of irrigation fertilization, and the trend of total phosphorus reduction varied under different scenarios. 【Conclusion】When the amount of fertilizer and irrigation water are reduced by 30% or 40% respectively, the effect of agricultural pollution reduction is the best.

Key words: SWAT model; the Shaying River; agricultural non-point source pollution; simulation; water and fertilizer coupling

责任编辑：赵宇龙