

何卿姮,黄智刚,邓淑冰,等. 南亚热带小流域农业面源污染负荷的 SWAT 模型模拟研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(2):225-231.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.033

# 南亚热带小流域农业面源污染负荷 的 SWAT 模型模拟研究

何卿姮,黄智刚,邓淑冰,潘荣庆,刘小梅,郭 豪,黎静宜

(广西大学,广西南宁 530004)

**摘要:**为深入探究农业面源污染在小流域水环境的发生机制,以南亚热带典型农业小流域为研究区,构建 SWAT 模型模拟分析了小流域面源污染的时空分布状况和影响因素,以及在不同土地利用类型下的氮磷流失规律。研究结果表明,河道中的径流量与降水量呈正相关,与总氮、总磷流失量之间呈极显著正相关关系,夏季丰水期(4—9月)是预防农业面源污染关键期;硝态氮是氮流失主要形态,无机磷是磷流失主要形态;小流域水系氮磷污染在空间上呈现为流域东部水系污染较轻,中部一直到靠近流域出口处污染负荷有逐渐加重的趋势,水系干流污染负荷高于支流;不同土地利用类型条件下,总氮单位面积流失量由大到小依次为旱地>城镇用地>水田>林地>水域用地,总磷单位面积流失量由大到小依次为城镇用地>旱地>林地>水田>水域用地,城镇用地和旱地是流域内氮磷污染的主要来源,旱地对整个流域氮磷负荷来源的贡献最大。经过参数敏感性分析及率定验证后的 SWAT 模型明确了面源污染发生规律及存在问题,并依此提出小流域农业面源污染治理对策。

**关键词:**那辣小流域;SWAT 模型;面源污染;时空分布规律;土地利用

**中图分类号:** X592;X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2023)02-0225-06

在世界范围内面源污染已成为地下水和地表水污染的主要来源<sup>[1-3]</sup>,因化肥农药使用量高、土地利用不合理、畜禽粪便无序排放等原因产生的农业面源污染是面源污染治理的重中之重。美国和一些发达国家,都因为施用化肥农药过量而造成河流中的氮磷含量超标<sup>[4-5]</sup>。水污染问题已经成为全球现阶段首要解决的环境污染问题。我国的非点源污染情况也不容乐观,近几年非点源污染呈上升趋势<sup>[6]</sup>。

党的十九大报告强调了关于环境污染治理的问题,面源污染问题成为当下环境污染研究的重点<sup>[7]</sup>。目前国内众多学者尝试应用模型方法来应对非点源污染的预防和治理<sup>[8-10]</sup>,其中 SWAT(Soil and water assessment tool)模型因其适用范围广、操作相对其他模型较为简单的特点,自国外引入国内后迅速得以推行和使用。李亚娇等把较为典型的 4

种非点源污染数学模型 SWAT、GLWF、SPARROW、HSPF 进行比较,阐明了 SWAT 模型的复杂程度在这 4 个模型中属于中等程度,更容易被广泛应用<sup>[11]</sup>。该模型更多地应用在中大型尺度的流域上,如黄河<sup>[12]</sup>、长江<sup>[13-14]</sup>及各类中大型流域、三峡库区<sup>[15-16]</sup>等;相关学者应用 SWAT 模型结合 RS 和 GIS 的空间数据展开非点源污染主要影响因素分析,如气候变化、土地利用<sup>[17-19]</sup>的影响效果;SWAT 模型还可模拟不同削减措施下流域污染负荷变化<sup>[20-21]</sup>。于明鑫运用 SWAT 模型设立果园、封禁治理、保土耕作及水平梯田等治理措施各自的减流减沙效应,结果发现水平梯田较其他措施减沙效果更为显著<sup>[22]</sup>。广西作为甘蔗种植大省,甘蔗地经常遭到扰动翻新的情况,相关研究发现,甘蔗种植模式会影响土壤侵蚀的发生及不同程度的氮磷营养物流失<sup>[23]</sup>,加之农户对甘蔗地过度施肥导致氮磷流失到水体,农业面源污染现象日趋严重。由于国内学者将 SWAT 模型运用在蔗区小流域农业面源污染方面鲜有研究,本研究以南亚热带小流域为研究区,将 SWAT 模型应用在小尺度蔗区流域,分析预测农业面源污染来源情况,为后续小流域面源污染预防与治理提供参考及建议,对揭示水循环规律和水土流失治理也有重大意义。

收稿日期:2022-01-13

基金项目:广西创新驱动发展专项(编号:桂科 AA17204078);广西科技计划(编号:桂科 AD17195098)。

作者简介:何卿姮(1996—),女,广西贵港人,硕士,主要从事流域面源污染研究。E-mail:651002051@qq.com。

通信作者:黄智刚,博士,副教授,主要开展农业资源利用研究。E-mail:hzg@gxu.edu.cn。

1 研究区概况

研究区选用那辣小流域(107°39'E,22°20'N),位于广西壮族自治区扶绥县境内,流域面积 3 km<sup>2</sup>,最终汇流到客兰水库(图 1)。那辣流域是南亚热带典型农业小流域甘蔗集约化种植区,亚热带湿润季风气候,以山麓丘陵为主要地形条件,平均坡度在 4°~35°,年平均气温 20.8℃左右,平均海拔约为 1 200 m,年降水量在 1 400 mm 左右,夏日高温多雨,冬日暖和潮湿,雨热同期。土壤类型以赤红壤为主,主要的土地利用类型为水稻田、甘蔗地、林地、建设用地、水域这 5 大类;农业种植作物主要是甘蔗、水稻等。为追求更好的经济效益,流域在 2018 年开始实行甘蔗集约化种植模式,在原有小块甘蔗地基础上,大面积开垦农用地和林地改种甘蔗,甘蔗种植面积迅速扩增,甘蔗生产约占研究区所有土地利用面积的 74%。

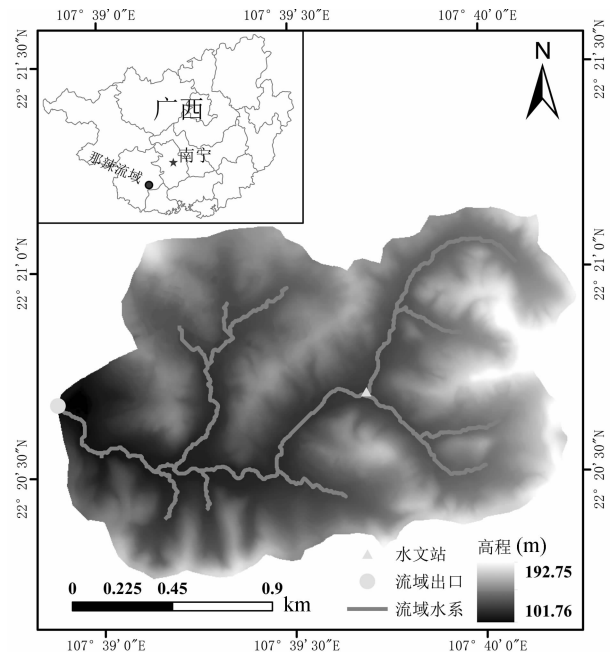


图 1 那辣流域区位

2 研究方法

2.1 模型原理

SWAT 模型是基于物理过程的分布式水文模型,以日为步长进行长时间序列计算,基于物质循环和水文循环的宏观尺度上的模型。该模型模拟的水文过程分为水文循环的陆地阶段(即产流和坡面汇流部分)和水文循环的汇流阶段(即流域陆面部分产生的径流、泥沙、营养物等在河道的迁移转化过程),整个水分循环系统遵循水量平衡规律,其水量平衡表达式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{k=1}^t (R_{day} - E_a - W_{seep} - Q_{surf} - Q_{gw})。$$

式中:SW<sub>t</sub> 为土壤最终含水量;SW<sub>0</sub> 为土壤初始含水量;t 为计算时段;R<sub>day</sub> 为第 k 天降水量;E<sub>a</sub> 为第 k 天的蒸发量;W<sub>seep</sub> 为第 k 天土壤剖面底层的渗透量和侧流量;Q<sub>surf</sub> 为第 k 天的地表径流量;Q<sub>gw</sub> 为第 k 天地下水含量。

2.2 数据获取

以 SWAT2012 为研究工具,收集那辣流域空间和属性数据库,包括流域 DEM 高程图、土地利用类型、土壤类型、气象数据、水文水质监测数据等资料,进行模型构建及模拟运行。本研究用到 0.5 m 空间分辨率的 DEM 数字高程图,利用 ArcGIS 10.2 提取流域范围并建立流域地形基础;土地利用和土壤数据库用于构建研究区下垫面数据库;气象数据源于中国气象数据网,逐日降水数据采用研究区气象站;水文水质数据由流域内水文站点监测得到(表 1)。

2.3 SWAT 模型构建

首先导入 DEM 数据,设置集水面积,提取河网并自动划分子流域,模型最终划分出 21 个子流域;随后将研究区重分类好的土地利用类型、土壤类型

表 1 构建模型的基本资料

数据类型	格式	来源	数据说明
DEM(0.5 m×0.5 m)	grid	流域实地测绘图	高程、坡度
土地利用数据(1:10 万)	grid	无人机遥感影像航拍图	土地利用类型图
土壤类型图(1:100 万)	grid	中国科学院南京土壤研究所	土壤类型分布图
气象数据	txt	中国气象科学数据共享中心、研究区气象站	气象站点气温、降水、风速、相对湿度、日照时数等
水文水质	xls	实验室实测数据	逐月径流量、总氮、总磷

图添加到 SWAT 模型,并对土地利用、土壤类型和坡度分级分别设置面积阈值(20%、20%、20%),形成 47 个水文响应单元(HRU),每个 HRU 对应 1 种

土地利用、土壤类型和坡度等级。随后输入气象数据、农田管理措施等属性数据及设置模型模拟时间,即初步构建好研究区的 SWAT 模型。由于模型

的初始参数并不都适用于研究区的实际情况,需要对模型率定与验证,在合理范围内不断调整参数,使得模拟值和实测值越趋吻合,尽可能减少与实测值的误差。利用本研究区水文站的月径流、总氮、总磷实测数据进行模型的校准和验证。选用相关系数( $R^2$ )、Nash Sutcliffe 模型效率系数( $E_{ns}$ )作为评价指标,验证结果优于  $E_{ns}$ 、 $R^2$  的限定阈值( $E_{ns} > 0.6, R^2 > 0.5$ )<sup>[24]</sup>,说明该模型在流域适用性良好,可用于研究区的模拟研究。其表达式分别见公式(1)、公式(2)。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \overline{Q_o})^2}; \tag{1}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_o - \overline{Q_o})(Q_p - \overline{Q_p})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_p - \overline{Q_p})^2} \tag{2}$$

式中: $Q_o$  为实测值; $Q_p$  为模拟值; $\overline{Q_o}$  为实测平均值; $\overline{Q_p}$  为模拟值平均值; $n$  为实测数据个数。当  $Q_o = Q_p$  时, $E_{ns} = 1$ ;若  $E_{ns}$  为负值,说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度更低。 $R^2$  用于实测值与模拟值之间的数据吻合程度评价, $R^2 = 1$  表示非常吻合,当  $R^2 < 1$  时,其值越小反映出数据吻合程度越低。

2.4 模型率定与验证

设置研究区模拟时间为 3 年(2018 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日),径流量、总氮、总磷的率定期为 2018—2019 年,验证期为 2020 年。径流校准采用逐月平均流量监测数据,在 SWAT - CUP 软件中采用 SUFI - 2 算法进行率定和验证,以及参数灵敏性分析,有关参数的选取由参考文献[25 - 26]及

查阅资料得到,将参数多次迭代计算得到的率定期模型评价指标结果见表 2,敏感性参数排行及最佳取值见表 3、表 4。根据前面提到的评价标准,该模型适用于本研究流域,可用于后续的模拟分析。由于获取到的总氮、总磷水质监测数据为水环境中的指标浓度,mg/L;模型的校准和验证采用的是污染物月平均总负荷,kg;因此需对实测数据总氮和总磷负荷量转化,计算公式如下:

$$L = C \times F \times S \times 10^{-3}。$$

式中: $L$  为月平均总负荷量,kg; $C$  流域监测实测指标浓度,mg/L; $F$  为流域监测断面实测月平均径流量, $m^3/s$ ; $S$  为时间,s。

表 2 率定期和验证期评价结果

评价指标	率定期		验证期	
	$R^2$	$E_{ns}$	$R^2$	$E_{ns}$
径流量	0.78	0.60	0.78	0.64
总氮	0.96	0.72	0.81	0.80
总磷	0.91	0.81	0.86	0.50

3 面源污染负荷时空分布规律

3.1 空间分布规律

利用构建好的 SWAT 模型模拟研究区的面源污染状况,得到各子流域的输出强度分布见图 2。从 2018—2020 年期间污染物流失总量上看,流域中总氮流失总量最高的是 10、14、15 号子流域,总氮年平均流失负荷约为 6 000 kg/年;其次是 13、16、18 号子流域,总氮年流失负荷为 4 300 kg/年。流域总磷年均流失负荷最高的是 10、13、14、15、16、18 号子流域,总磷年均流失负荷平均为 40 kg/年;其次是

表 3 径流敏感性参数排行及范围

敏感性排序	参数	含义	取值方式	取值范围	最佳取值
1	CN2	SCS 径流曲线数	r	0 ~ 1	0.129 1
2	ALPHA_BNK	河岸调蓄的基流 $\alpha$ 因子	v	0 ~ 1	0.554 9
3	SOL_BD	土壤的湿容重	r	-1 ~ 1	-0.007 8
4	CH_N2	主河道曼宁系数	v	-0.01 ~ 0.30	0.021 6
5	RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	v	0 ~ 1	0.254 0
6	ALPHA_BF	基流回退系数	v	0 ~ 1	0.949 6
7	GWQMN	发生回归流所需的浅层含水层水位阈值	v	0 ~ 5 000	4 328.790 0
8	ESCO	土壤蒸发补偿系数	v	0 ~ 1	0.659 9
9	SOL_AWC	土壤有效含水量	r	0 ~ 1	0.107 0
10	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	v	0.02 ~ 0.20	0.020 6
11	SOL_K	饱和渗透系数	r	-1 ~ 1	-0.262 2
12	GW_DELAY	地下水的时间延迟	v	0 ~ 500	384.369 7

注:其中 v 表示赋值,r 表示默认值乘以某值。表 4 同。

表 4 氮磷敏感性参数取值范围及最佳取值

模块	敏感性排序	参数	含义	取值方式	取值范围	最佳取值
总氮 (TN)	1	NPERCO	硝酸盐的渗流系数	v	0 ~ 1	0.532 2
	2	ERORGN	有机氮的富集比	v	0 ~ 5	0.709 5
	3	SOL_NO3	土壤硝态氮起始浓度	v	0 ~ 100	41.500 0
	4	SOL_ORGN	土壤有机氮起始浓度	v	0 ~ 100	28.312 0
	5	BIOMIX	生物混合效率	v	0 ~ 1	0.534 7
总磷 (TP)	1	PPERCO	河道中的有机磷浓度	v	10.0 ~ 17.5	10.86
	2	ERORGP	沉积物提供可溶性磷速率	v	0 ~ 5	0.033 0
	3	P_UPDIS	有机磷沉降速率	v	0 ~ 100	57.930 9
	4	PHOSKD	土壤磷分配系数	v	100 ~ 200	103.478 7
	5	CMN	腐殖质矿化速率因子	v	0.001 ~ 0.003	0.001 8

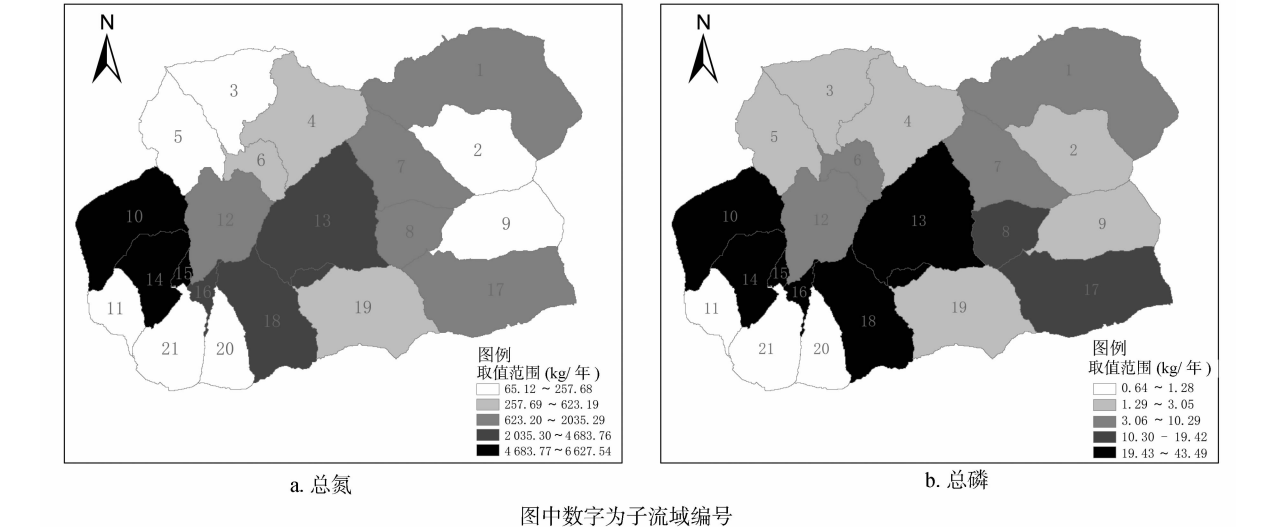


图 2 各子流域氮磷污染年均流失负荷量的空间分布

8、17 号子流域,年均总磷流失负荷为 17 kg/年左右。总氮、总磷污染最为严重的区域都分布在靠近流域出口的 10、14、15 号子流域,水系东部的上游子流域的污染较轻。在预防面源污染的发生时,应着重管控河道下游靠近流域出口的水质,同时也要从源头预防,减少氮磷污染的发生。

3.2 时间分布规律

由径流量与降水量随时间的变化情况及总氮和总磷月平均负荷变化(图 3、图 4)可以看出,降水与径流量呈正相关关系,降水与径流量集中在每年的雨季(4—9 月),同时每年的 1—3 月、10—12 月径流量都较低,且较为稳定,无明显波动;河道中总氮、总磷的流失主要发生在每年夏季,随着降水量变化而呈现丰枯季节变化,分别在 2018 年达最大值(TN 1 184 kg、TP 9.441 kg),在 2020 年、2019 年分别达 TN 和 TP 的最低值(TN 0.404 1 kg、TP 3.759 × 10<sup>-6</sup> kg)。从图 4 可以看出,2018—2020 年总氮和总磷的变化趋势一致,其年均流失总量都在逐年

降低,且月均流失量峰值也在逐年降低,但是从总氮、总磷占全年污染物流失的贡献率来看,却在逐年递增,总氮、总磷在 4—9 月的总流失负荷占年度流失负荷的 75% 以上。

从污染物流失形态上看,这 3 年的硝态氮流失量占总氮流失量的 99.38%,矿物磷占总磷流失量的 69.24%,各指标之间相关性和显著性见表 5。结果表明,径流量与大部分形态的氮磷都呈显著或极显著相关关系,TN 与各形态的氮及总磷、矿物磷、可溶性磷呈极显著相关,其中总磷又与矿物磷、可溶性磷极显著相关,矿物磷与可溶性磷之间极显著相关,有机磷与泥沙磷之间极显著相关;径流量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N, TN 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、SOLP, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 与 SOLP, TP 与 MINP 相关系数在 0.8 以上。

3.3 不同土地利用类型氮磷流失规律

那辣小流域土地利用类型以耕地(水田、旱地)为主,占 87.56%;其次是林地,占 7.59%;水域、建设用地分别占 4.32%、0.54%。在划分流域的水文

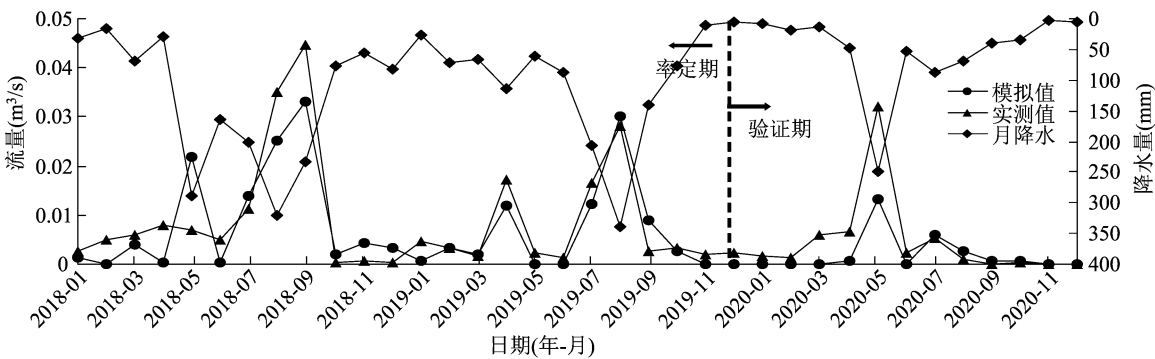


图3 月降水和月径流的变化

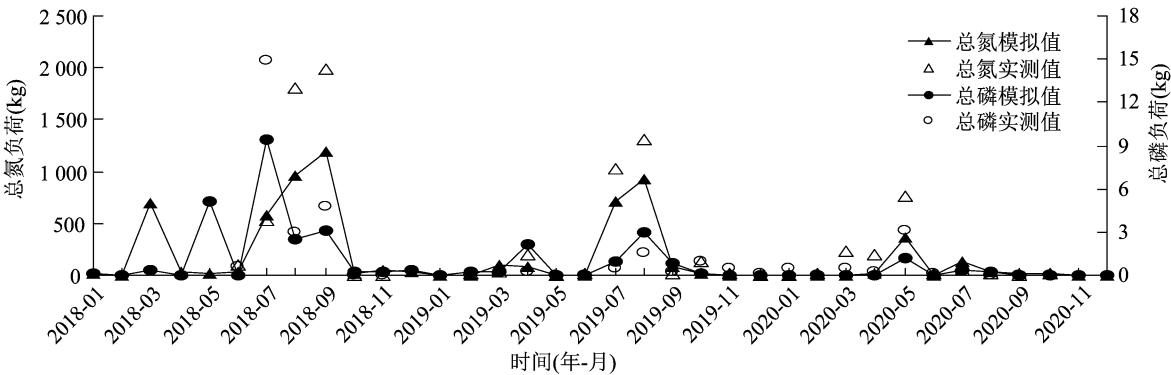


图4 研究区水文站月总氮和月总磷负荷变化

表 5 氮磷相关性分析

项目	相关系数								
	径流量	TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TP	MINP	ORGP	SOLP	SEDP
径流量	1.000 0								
TN	0.835 6 **	1.000 0							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	0.835 5 **	0.999 9 **	1.000 0						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	0.862 6 **	0.771 2 **	0.771 0 **	1.000 0					
TP	0.671 0 **	0.515 0 **	0.514 9 **	0.562 1 **	1.000 0				
MINP	0.651 8 **	0.519 2 **	0.519 1 **	0.542 0 **	0.994 1 **	1.000 0			
ORGP	0.336 6 *	0.090 8	0.090 5	0.316 8	0.299 8	0.195 0	1.000 0		
SOLP	0.987 3 **	0.835 4 **	0.835 3 **	0.794 3 **	0.692 0 **	0.675 1 **	0.321 0	1.000 0	
SEDP	0.279 1	0.007 9	0.007 6	0.256 1	0.267 2	0.164 0	0.981 9 **	0.265 5	1.000 0

注：\*、\*\* 分别表示显著 ( $P < 0.05$ )、极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关。表中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MINP、ORGP、SOLP、SEDP 分别表示硝态氮、氨态氮、矿物磷、有机磷、可溶性磷、吸附在泥沙中的无机磷。

响应单元时,将坡度分为  $0 \sim 30^\circ$ 、 $>30^\circ \sim 70^\circ$  2 个等级,其中  $0 \sim 30^\circ$  的子流域占整个流域面积的 97.03%;坡度为  $>30^\circ \sim 70^\circ$  的土地类型主要是林地,也有少部分耕地。

利用构建好的 SWAT 模型模拟的 2018—2020 年的各土地利用类型单位面积总氮和总磷年均负荷见图 5。旱地的总氮、总磷流失量分别占整个研究区流失总量的 97.81%、91.67%,坡度高 ( $>30^\circ \sim 70^\circ$ ) 的耕地产生的污染负荷相比坡度小 ( $0 \sim 30^\circ$ ) 的区域污染大;由于城镇用地所占面积小,氮磷污染总量的贡献率仅为 2%~6%,但总氮、总磷的单位面

积流失量都较大;林地氮磷流失极小,分别为  $\text{TN } 0.836 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 、 $\text{TP } 0.386 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 。在相关研究成果中,同样得到居民用地的氮、磷流失量最大的结果<sup>[27-28]</sup>,也认为林地具有较好的水土保持效果<sup>[17]</sup>。以上分析可知,旱地是整个研究区非点源污染的主要来源,林地具有较好的面源污染防治效果。

4 结论与建议

4.1 结论

经过率定和验证后的 SWAT 模型模拟结果良好,可以用于研究区域的非点源污染氮磷数值模拟

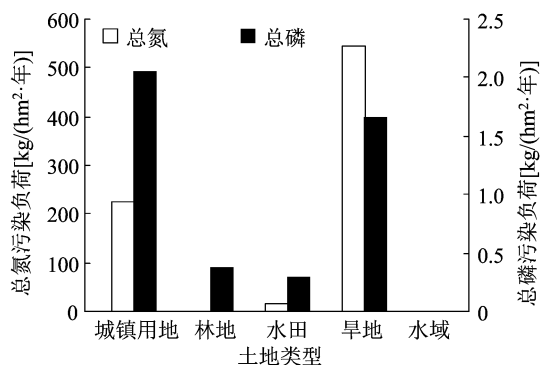


图5 不同土地利用类型主要污染物负荷

分析。利用 SWAT 模型对那辣流域进行农业面源污染的模拟及分析,得到以下主要结论:(1) 那辣流域的时间分布规律表明,主要污染负荷高峰期集中在每年4—9月,降水是造成氮磷流失的关键驱动因素;径流与降水量呈正相关,同时径流与河道中的总氮、总磷也呈现极显著正相关关系。(2) 农业面源污染的氮磷流失形态中,硝态氮是氮流失的主要形态,矿物磷是磷流失的主要形态。(3) 研究区非点源污染的空间分布规律表明,研究区非点源污染在空间上表现为流域东部污染较轻,中部一直到靠近流域出口处污染负荷有逐渐加重的趋势,水系主干道区域的污染负荷高于支流区域。(4) 不同土地利用类型上的氮磷污染负荷状况表明,城镇建设用和旱地是流域内氮磷污染的主要来源,旱地对整个流域的氮磷负荷来源的贡献最大,虽然城镇用地的氮磷流失总量小,但其单位面积上的磷污染排放负荷最大,因此也要注意管控城镇用地的磷排放。

#### 4.2 建议

(1) 根据广西壮族自治区那辣流域作为甘蔗核心种植区的特点,为使经济效益和生态效益平衡发展,蔗区尽量以种植宿根蔗为主,减少因种植新植蔗对土壤的翻耕和土地扰动而导致氮磷养分流失急剧扩增;(2) 完善蔗区的农田管理制度,实行测土配方施肥,在不造成作物减产的情况下减少肥料施用,既可以提高肥料利用率,同时减轻流域水环境污染,这将有利于促进农业发展和水资源的开发利用;(3) 改变流域下垫面条件,如水稻田改为梯田、坡度大的(>25°)甘蔗地改种林地;(4) 河岸两侧可增加防护栏及种植保持水土、吸附氮磷污染物的植被。

本研究通过 SWAT 模型实现了该流域氮磷污染负荷的定量模拟,证明了 SWAT 模型在广西壮族自治区那辣小流域的适用性,在流域农业面源污染方面的研究中是一个方便快捷的水文模拟分析工

具。同时,该模型也存在不足之处,流域基础实测数据较少,需进一步完善,另外该流域没有涉及不同气候条件、最佳管理措施等方面的非点源污染流失规律分析,今后还有待进一步研究阐明。

#### 参考文献:

- [1] Gazhit T T. The ecosystem condition of basin of the trans border river argun in Zabaikalsky Krai, Russia [J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(2): 119–122.
- [2] Neal C, House W A, Leeks G J L, et al. Conclusions to the special issue of science of the total environment concerning ‘The water quality of UK rivers entering the North Sea’ [J]. Science of the Total Environment, 2000, 251/252: 557–573.
- [3] 程 序, 张 艳. 国外农业面源污染治理经验及启示 [J]. 世界农业, 2018(11): 22–27, 270–271.
- [4] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 251–257.
- [5] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1018–1025.
- [6] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978–2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110400.
- [7] 欧阳威, 刘迎春, 冷思文, 等. 近三十年非点源污染研究发展趋势分析 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2234–2241.
- [8] 向文艳. 基于 LSPC 模型潘家口水库外源污染模拟及研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] 李鸿儒, 卢 远, 何 文. 基于 SWAT 模型的钦江流域径流对气候变化的响应研究 [J]. 环保科技, 2016, 22(3): 1–4, 22.
- [10] 韦 钰, 阮 柱. 基于 CLUE-S 模型的柳州市 2025 年土地变化情景模拟分析 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 76–79.
- [11] 李亚娇, 宋佳宝, 李家科, 等. 四种典型非点源污染模型研究与应用进展 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 21–24, 32.
- [12] 李二辉. 黄河中游皇甫川水沙变化及其对气候和人类活动的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [13] 孙占东, 黄 群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2703–2710.
- [14] 牟婷婷. 基于 SWAT 模型的径流模拟及预测研究——以湘江流域为例 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [15] 宋林旭, 刘德富, 崔玉洁. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 428–434.
- [16] 崔 豪, 王贺佳, 肖伟华, 等. 三峡库区 CMFD 降水数据适用性评估 [J]. 人民长江, 2021, 52(8): 98–104.
- [17] 黄勇梅. 澎溪河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [18] 张 灵. 桑干河上游流域径流泥沙对气候要素与土地利用变化的响应研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [19] 张鹏飞. 不同气候条件下密云水库流域非点源污染评价 [D]. 北京: 首都师范大学, 2013.

夏 杨,徐 彬,李传明,等. 印度梨形孢的荧光定量 PCR 检测及其在水稻根系的定殖测定[J]. 江苏农业科学,2023,51(2):231-235.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.034

# 印度梨形孢的荧光定量 PCR 检测及其在水稻根系的定殖测定

夏 杨<sup>1</sup>, 徐 彬<sup>1</sup>, 李传明<sup>1,2</sup>, 刘 琴<sup>1,2</sup>, 韩光杰<sup>1</sup>, 黄立鑫<sup>1</sup>, 祁建杭<sup>2</sup>, 陆玉荣<sup>1</sup>, 徐 健<sup>1</sup>

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所/国家农业微生物扬州观测实验站,江苏扬州 225007; 2. 扬州绿源生物化工有限公司,江苏扬州 225008)

**摘要:**印度梨形孢(*Piriformospora indica*)是一种促进作物生长、增强植株抗逆性的多功能根系内生真菌。传统染色镜检和 PCR 方法检测存在干扰误差大、灵敏度不高、难以定量等问题。基于 *P. indica* 转录延伸因子 *EF1 $\alpha$*  基因建立 *P. indica* 的实时荧光定量 PCR(qPCR)检测方法,并通过对水稻苗根系 *P. indica* 的定殖检测,比较与染色法、常规 PCR 法检测结果的差异。结果表明,利用 *EF1 $\alpha$*  基因序列引物扩增获得 84 bp 特异性产物,以特异性产物构建重组质粒 pCE2-Pi 作为 qPCR 扩增的标准品模板,建立的标准曲线线性关系良好且灵敏度高,qPCR 检测下限为  $2.03 \times 10^2$  copies/ $\mu$ L,较常规 PCR 敏感度提高 1 000 倍,实现 *P. indica* 的快速、准确、定量检测。对水稻苗根系 *P. indica* 的定殖检测进一步表明,染色法检测受取样部位影响大,仅在定殖 7 d 的部分根系中检出,而 PCR 法灵敏度较低,也只在定殖 7 d 的根系中扩增出产物。采用 qPCR 方法在 3~13 d 的定殖周期根系中都检测到了 *P. indica* 的有效定殖,定殖 7 d 扩增产物最高,为  $1.51 \times 10^4$  copies/ $\mu$ L。

**关键词:**印度梨形孢;实时荧光定量 PCR;水稻;定殖检测

**中图分类号:**S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)02-0231-05

植物内生菌(endophyte)是一定阶段或全部阶段生活于健康植物的组织、器官内部或细胞间隙的真菌、细菌或放线菌<sup>[1]</sup>。内生菌长期定殖在植物体

内,通过自身的代谢产物或借助于信号传导作用于植物体产生影响,产生酶、激素、拮抗物质等来改善植物对非生物胁迫(干旱、盐胁迫等)和生物胁迫(病原物、害虫等)的耐受性<sup>[2]</sup>。梨形孢属担子菌门(Basidiomycota)层菌纲(Hymenomycetes)蜡壳耳目(Sebacinales)蜡壳耳科(Sebacinaceae)梨形孢属(*Piriformospora*),是一类最早分化的担子门菌根菌,长期定殖存活在植物根系。1998 年首次从沙漠灌木根际分离获得 *P. indica* 菌株<sup>[3]</sup>,2012 年在德国分离鉴定 *P. williamsii* 菌株<sup>[4]</sup>。大量研究证明,印度梨形孢寄主范围广泛,可以与 200 多种单子叶、双子叶植物共生<sup>[5]</sup>,通过增强植物对 N、P 等营养物质的吸收,促进植物生长,增强植物系统抗性,是一种

收稿日期:2022-04-26

基金项目:江苏省科技支撑计划(编号:BE2019338、BE2020321);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(20)1004];江苏省国际合作项目(编号:BZ2020039)。

作者简介:夏 杨(1992—),男,江苏海安人,硕士,研究实习员,从事应用微生物研究,E-mail:xiayeung@163.com;共同第一作者:徐彬,男,江苏高邮人,硕士,助理研究员,从事应用微生物研究,E-mail:13270002585@163.com。

通信作者:徐 健,博士,研究员,从事农业微生物资源的开发与利用研究。E-mail:bio-xj@163.com。

[20]史伟达,崔远来,王建鹏,等. 不同施肥制度下水稻灌区面源污染排放的数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):23-26.

[21]倪永明,胥彦玲. 澜河流域非点源污染最佳管理措施模拟研究[J]. 干旱区地理,2015,38(3):608-617.

[22]于明鑫. 东港市台隆小流域减流减沙效益分析[J]. 水土保持应用技术,2020(3):50-52.

[23]Li Y,Mo Y Q,Are K S,et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses:evidence from hillslope observation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,309:107289.

[24]郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型——理论方法与应用

[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.

[25]荣 易,秦成新,杜鹏飞,等. 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J]. 环境科学,2021,42(6):2769-2777.

[26]荣 易,秦成新,孙 傅,等. SWAT 模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. 环境科学研究,2020,33(11):2571-2580.

[27]王晓燕,王一岫,王晓峰,等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究,2003,16(1):30-33.

[28]童晓霞,许文盛,张平仑. 不同土地利用对灌区土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[C]//海峡两岸水土保持学术研讨会论文集. 武汉:中国水土保持学会,2014.