

## 基于 SWAT 模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析\*

王慧勇<sup>1,2</sup>, 迺超普<sup>2\*\*</sup>, 王良杰<sup>1</sup>, 董磊<sup>2</sup>, 夏永秋<sup>2</sup>, 颜晓元<sup>2</sup>

(1: 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

(2: 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站, 南京 210008)

**摘要:** 水资源恶化、水体富营养化严重威胁生态环境健康, 农业活动所产生的氮是造成水污染的主要原因之一。本研究以句容水库农业流域为研究对象, 基于实地监测数据验证了 SWAT 模型模拟当地氮污染的适用性, 并分析了氮素负荷的时空分布特征及其关键源。结果表明: 硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)和总氮(TN)的年均入库量分别为 9.98 和 27.22 t。时间尺度上, 入库氮素负荷量年际呈现“M”型波动趋势; 年内主要集中在汛期(6—9月), 汛期氮素负荷量占到全年的 84%以上。空间尺度上, 径流  $\text{NO}_3^-$ -N 负荷量和 TN 负荷量均呈现“局部集中, 临近水体”的分布特征, 主要集中在农田占比高的地区。流域入库 TN 负荷量主要来源是农田施肥, 贡献率达 49.60%。研究结果可为当地流域氮污染控制提供理论依据。

**关键词:** SWAT 模型; 氮素负荷; 时空特征; 关键源; 句容水库; 农业流域

## Spatiotemporal distribution characteristics and key sources of nitrogen pollution in a typical agricultural watershed based on SWAT model\*

Wang Huiyong<sup>1,2</sup>, Ni Chaopu<sup>2\*\*</sup>, Wang Liangjie<sup>1</sup>, Dong Lei<sup>2</sup>, Xia Yongqiu<sup>2</sup> & Yan Xiaoyuan<sup>2</sup>

(1: Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, P.R.China)

(2: Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

**Abstract:** The deterioration of water resources and surface water eutrophication threaten the health of the ecological environment seriously. Nitrogen (N) pollution from agricultural activities is an important source of water pollution. In this study, the Jurong Reservoir agricultural watershed was taken as the research object, and the local applicability of the SWAT model for N pollution was validated based on field monitoring data. In addition, the spatial and temporal distribution characteristics of N load and key pollution sources were analyzed. During the monitoring period, the annual N load showed an “M” type fluctuation trend, with a high N load occurred in the flood season from June to September, which accounted for more than 84% of the total N load of the whole year. Moreover, the spatial distribution of nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N) and total nitrogen (TN) load showed a trend of “local concentration, adjacent to water body”, mainly concentrated in the area with a high proportion of farmland. Farmland fertilizer is the main source of TN load in this watershed, contributing to 49.60% of total N load and the average annual storage capacity of  $\text{NO}_3^-$ -N and TN was 9.98 t and 27.22 t, respectively. Our results can serve as a theoretical basis for the control of N pollution at the watershed scale.

**Keywords:** SWAT model; nitrogen load; spatiotemporal characteristics; key sources; Jurong Reservoir; agricultural watershed

氮是植物生长必要的营养元素, 但过量的氮进入水体会造成氮污染, 使得水体生态系统恶化。例如, 美国墨西哥湾流域和切萨皮克湾流域自 1950 年来由于氮肥的大量使用, 当地的海湾水体富营养化不断加剧,

\* 2021-05-13 收稿; 2021-08-02 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41961124004, 42061124001)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: cpti@issas.ac.cn.

破坏了其生态系统健康<sup>[1-2]</sup>. 2018年我国对1097座水库的营养状况评价结果显示, 69.6%的水库处于中营养状态, 30.4%的水库处于富营养状态, 主要由氮磷等营养物质过度排放所造成的<sup>[3]</sup>. 水体污染的形式分为点源污染和非点源污染, 随着点源污染的有效控制, 非点源污染已成为我国水体污染的主要因素, 其中农业非点源氮污染问题尤为严重. 根据我国第二次全国污染源普查公报, 农业活动造成的总氮排放占非点源污染排放总量的46.52%. 同时在太湖、巢湖等富营养化重点区域的研究中, 由农业活动所引起的总氮污染高达60%<sup>[4-5]</sup>.

模型模拟可有效应用于对非点源污染的定量研究, 从而达到控制和减少非点源污染的目的, 其中SWAT模型应用最为广泛<sup>[6]</sup>. SWAT模型由美国农业部农业研究中心(USDA)于1994年研发, 其主要目的是在不同土地管理方式以及不同土地利用等条件下对流域内土壤的状况进行相关预测. 后经众多学者的研究改进, 模型对于流域产流<sup>[7]</sup>、产沙<sup>[8]</sup>、营养物质<sup>[9]</sup>迁移的变化规律都具有较好的模拟效果, 多用于大、中尺度的流域<sup>[10-11]</sup>, 在小尺度流域也有较好的模拟效果<sup>[12]</sup>. 周铮等<sup>[13]</sup>运用SWAT模型对饮用水保护区北山水库小流域进行径流模拟, 在实测径流数据缺乏情况下采用水库参数进行率定和验证, 结果显示北山水库蓄水量的模拟值与实测值吻合性较好, 表明模型适用于该区域小流域的研究. 林晓娟等<sup>[14]</sup>利用SWAT模型对岳城水库流域的污染源进行模拟, 得出该流域年入库非点源污染所占比例近50%, 其中总氮含量高达3025 t/a, 其污染的主要来源为耕地. Bauwe等<sup>[15]</sup>基于农业小流域评估SWAT模型对径流、硝态氮负荷和作物产量三者分别模拟后的效果, 三者基本符合模拟要求. 在此基础上设置相应情景模拟进行分析, 结果表明在保持作物产量的情况下适当减少氮肥施用量可使得硝态氮负荷显著减少. Panagopoulos等<sup>[16]</sup>利用SWAT模型对Arachthos流域的氮负荷量进行模拟, 确定了氮流失的重点区域. 韩博等<sup>[17]</sup>在蒲河流域建立非点源污染模型, 分别对氮污染含量、氮污染的时空分布和关键区进行了模拟研究.

句容水库农业流域是位于江苏省句容市的典型农业小流域, 流域内的句容水库为省重点中型水库, 是市饮用水二级保护区和生态保护区, 其水质情况直接影响当地居民的饮用水安全. 因此以句容水库农业流域为研究区域, 通过构建SWAT非点源污染模型, 以此分析氮污染的时空分布特点, 探讨流域氮污染的关键源区, 可为当地流域氮污染控制提供理论依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区句容水库农业流域(图1)位于江苏省句容市东北部丘陵山区的句容河上游(32°01'N, 119°13'E), 东近镇江, 西临南京市, 距南京大约40 km, 离句容城区仅4 km, 属长江水系秦淮河流域, 流域集水面积45.5 km<sup>2</sup>. 研究区属北亚热带季风气候, 气候湿润, 多年平均气温15℃, 年平均相对湿度为78%. 多年平均降雨量为1050 mm, 降雨主要集中在6—9月. 流域东起句东林场, 西至句容水库, 地形总体上为四周高中部低, 海拔在3.00~279.13 m之间, 平均海拔低于50 m. 句容水库总库容2907万m<sup>3</sup>, 兴利库容1202万m<sup>3</sup>, 防洪库容1924万m<sup>3</sup>, 水库下游为句容市华阳街道, 防洪保护人口11.5万人, 灌溉面积2061.3 hm<sup>2</sup>.

研究区内雨水径流自然流动或经由人工简易沟道排入就近水体, 无专门修筑输水管道或渠道, 且研究区为仅有一个排水出口的封闭性良好的小流域. 研究区内无大型养殖业和工业, 生产活动以农业为主, 主要种植方式为水稻—小麦轮作, 流域内的污染主要以非点源形式存在.

### 1.2 数据来源及处理

构建研究区SWAT模型所需基础数据库包括空间数据库和属性数据库, 空间数据库主要包括研究区数字高程模型(DEM)、土地利用类型图、土壤类型图、河网水系图; 属性数据库包括气象数据、土壤理化属性数据、污染源数据以及水文水质数据等数据. 根据SWAT模型叠加分析时的统一图层要求, 研究中图层均采用Krasovsky\_1940\_Transverse\_Mercator投影坐标系.

1.2.1 数字高程模型 DEM作为提取流域坡长、坡度等参数的必要数据, 在模型中用于河网的生成和子流域的划分. DEM的分辨率对模型的模拟结果具有一定的影响, 选择合适的分辨率可以提高模拟精度<sup>[18]</sup>. 经过对比, 研究采用来源于中国科学院南京土壤研究所的10 m分辨率DEM, 依据流域边界图进行裁剪得到句容水库农业流域DEM数据, 见图2.

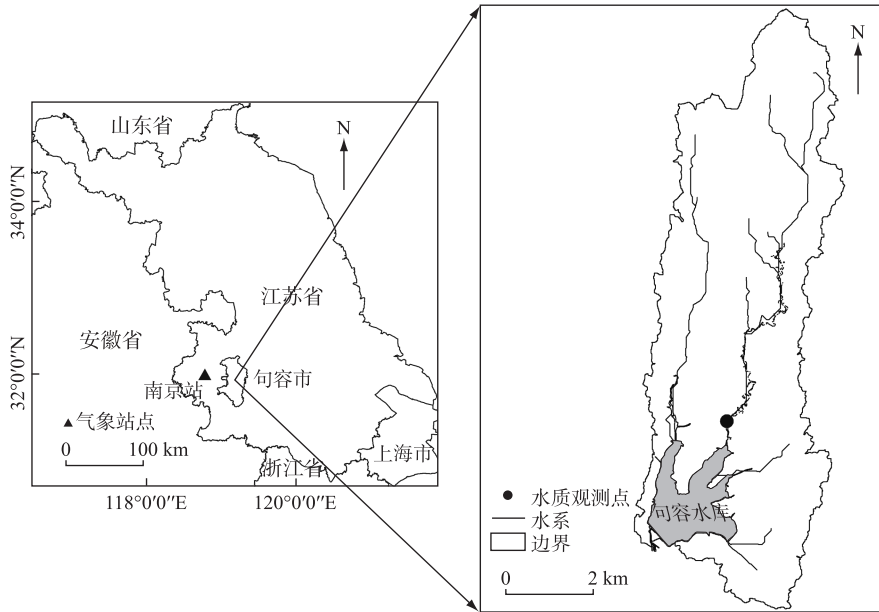


图 1 句容水库农业流域地理位置  
Fig.1 Location of Jurong Reservoir agricultural watershed

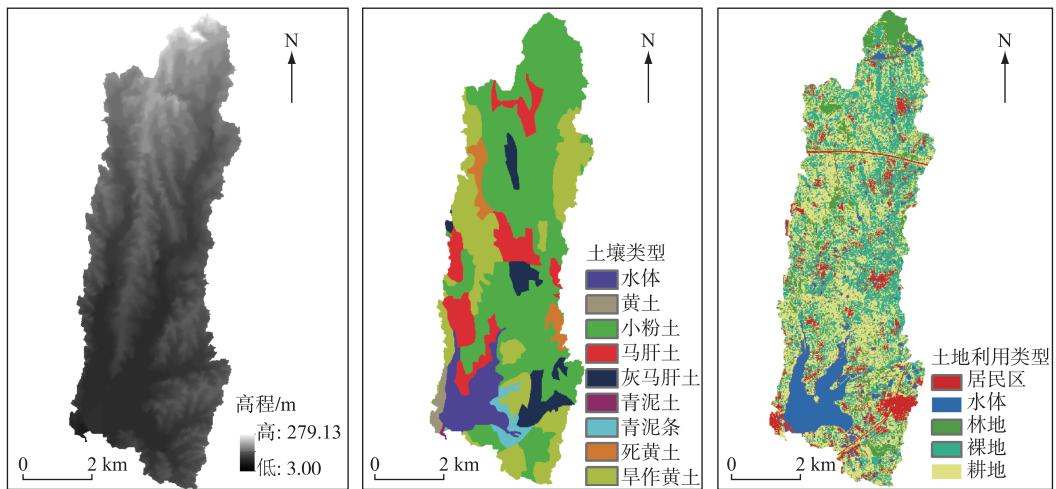


图 2 句容水库农业流域基础数据  
Fig.2 Basic data of Jurong Reservoir agricultural watershed

1.2.2 土壤类型 土壤类型采用来源于中国科学院南京土壤研究所 1:5万比例尺的栅格图,结合已有数据并查阅《江苏土壤》和中国土壤数据库<sup>[19]</sup>,通过 SPAW 等相关软件计算出土壤属性数据,流域内土壤类型共有 9 种,见图 2。

1.2.3 土地利用类型图和河网水系图 土地利用类型是水文循环的主要影响因素之一,是 SWAT 模型的必要输入数据.土地利用类型基于 2010 年遥感影像进行人工目视解译所得,同时根据 SWAT 模型要求的土地利用分类体系,土地利用类型分为居民区、水体、林地、裸地和耕地(共 5 种),详见图 2。

SWAT 模型应用于平原区时存在子流域划分边界不准确的情况<sup>[20]</sup>,研究采用模型中的 Burn In 功能结合实测河网进行修正,以改进提取的地形地貌特征<sup>[21]</sup>. 实测河网水系图通过 DEM 划分并结合实地勘察获得.

1.2.4 气象数据 模型构建所需的气象数据分为实测数据和天气发生器两部分,输入的实测数据包括日降水量、日最低最高气温、日平均风速、太阳辐射和相对湿度,天气发生器用于补充实测数据中的部分缺失数据. 鉴于研究区内无气象站点,采用临近站点南京气象站 2000—2019 年 20 年长时间序列逐日气象数据计算天气发生器各参数,气象站点数据来源于中国气象科学数据网. 同时采用由句容水库管理所所提供的句容水库农业流域 2007-01—2012-09 逐日降水和日最低、最高气温数据输入模型,其余数据由天气发生器生成.

1.2.5 水文水质数据 水文水质数据主要用于模型的校正. 水文数据主要为水库数据,其中包括水库基本参数和水库管理数据. 基本参数包括正常水位对应的水域面积和蓄水量、初始蓄水量、防洪水位对应的水域面积和蓄水量以及蒸发等相关参数. 水库管理数据主要为水库入水量数据,水库入水量数据为 2007-01—2012-09 逐月数据. 水质数据为中间河流上水质观测点的逐月观测数据,观测时间长度为 2007-01—2012-09.

1.2.6 污染源数据 根据 2010 年实地调研结果,获取流域内常住人口、家禽养殖、氮肥施用数据. 结合第二次全国污染普查产排污系数计算出各源头的污染量,再转化为化肥以连续施肥的方式施用到相应子流域的耕地中进行模拟计算. 通过实验观测得句容水库农业流域氮的平均沉降为  $39 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ . 流域内水稻和小麦均在播种前施基肥,在生长发育阶段进行 2 次追肥,肥料种类为尿素、碳铵和复合肥. 经换算成 N 肥用量后,水稻和小麦基肥施肥量分别为  $110.05$  和  $73.37 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,水稻在 7 月上旬和 8 月上旬进行追肥,两次施肥量均为  $82.54 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;小麦在 1 月上旬和 3 月上旬的追肥量均为  $55.03 \text{ kg}/\text{hm}^2$ .

### 1.3 研究方法

1.3.1 模型建立 SAWT 模型内部采用模块化结构,由水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型 3 个子模型所构成<sup>[22]</sup>,可模拟流域内径流、泥沙、营养物质等各物质的输移过程. SWAT 模型主要依据水量平衡方程进行,该方程是流域内所有过程的驱动力,水量平衡方程如下:

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

式中,  $SW_t$  代表  $i$  天土壤最终含水量, mm;  $SW_0$  代表土壤初始含水量, mm;  $t$  代表时间, d;  $R_{\text{day}}$ 、 $Q_{\text{surf}}$ 、 $E_a$ 、 $W_{\text{seep}}$ 、 $Q_{\text{gw}}$  依次代表第  $i$  天的降水、地表径流、蒸发、土壤层的渗透和侧流、地下含水量, 单位均为 mm.

基于 DEM 和实测河网水系图模型划分子流域, Jha 等<sup>[23]</sup>的研究结果表明子流域划分阈值在小于总面积的 5% 时, 氮磷模拟能够得到较为合理的值, 因此本研究基于此条件将句容水库农业流域按照最优标准共划分 25 个子流域. 基于划分的子流域, SWAT 模型结合土地利用类型、土壤类型和坡度(阈值均为 10%) 进一步将子流域细分为具有相同土地利用、土壤类型、坡度的水文响应单元(HRUs), 共 155 个 HRUs.

1.3.2 率定和验证 为使模拟的水文过程和物质输移特征更贴近流域内的实际情况, 需要利用流域内实测数据进行率定和验证, 对模型参数值做出合理调整. 模型的率定和验证遵循先径流后营养物质的原则, 采用句容水库入库径流量对径流进行率定和验证, 对氮营养物质的率定验证采用逐月实测河流水质数据, 时间长度均为 2007-01—2012-09. 模型设置 2007 年为预热期, 2008-01—2010-12 为率定期, 验证期为 2011-01—2012-09.

使用 SWAT-CUP2012 软件对模型进行率定和验证, 软件集成 SUFI2、PSO 和 GLUE 等多种算法, 研究选用较为常用的算法 SUFI2. 采用决定系数( $R^2$ )和纳什系数( $NSE$ )作为模拟结果的评判标准, 在基于月尺度的模拟中当  $R^2 \geq 0.6$  和  $NSE \geq 0.5$  时认为模拟结果是可行的.

SWAT 模型中参数众多, 为减少参数率定的复杂性, 常通过参数敏感性分析选出对结果影响显著的参数进行率定. 研究选取对径流和水质有重要影响的 20 个参数作为参数率定的重点, 分别对径流和水质进行率定和验证, 其率定参数见表 1.

## 2 结果与分析

### 2.1 率定和验证

模型参数评估结果见表 2, 径流模拟的率定期决定系数  $R^2 = 0.85$ ,  $NSE = 0.80$ , 使用率定后的参数进行验

表 1 率定参数敏感性分析及最优结果\*  
Tab.1 Sensitivity of calibration parameters and optimal results

类别	参数	描述	最小值	最大值	敏感性	最优值	
径流	R_CN2	SCS 径流曲线数	-0.53	-0.48	10	-0.49	
	R_SOL_AWC	土壤有效可利用水量/(mm/mm)	-0.13	1.11	2	0.88	
	R_SOL_K	土壤饱和和水力传导率/(mm/h)	-0.01	0.41	9	0.27	
	V_GW_DELAY	地下水延迟时间/d	1.85	3.24	5	2.04	
	V_ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 因子	0	0.07	1	0.05	
	V_GWQMN	浅层含水层产生基流的水位阈值/mm	213.48	334.24	8	282.43	
	V_REVAPMN	浅层含水层发生下渗流的阈值/mm	337.13	614.45	4	548.17	
	V_GW_REVAP	地下水蒸发系数	0.10	0.11	7	0.11	
	V_ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.57	0.77	3	0.58	
	V_EPCO	植物吸收补偿因子	0.03	0.05	6	0.03	
	水质	V_NPERCO	硝酸盐的渗透系数	0.10	0.12	5	0.11
		V_RCN	降雨中的渗流系数	2.78	3.12	6	2.82
		V_N_UPDIS	氮吸收分布参数	16.29	17.74	7	17.62
V_ERORGN		有机氮的富集比	0.05	0.17	4	0.11	
V_CMN		腐殖质矿化速率因子	0.29	0.31	8	0.30	
V_CANMX		植被冠层截留量/mm	10.00	10.46	3	10.00	
V_SOL_ORGN		土壤有机氮起始浓度/(mg/kg)	44.70	49.55	1	45.89	
V_SOL_NO3		土壤硝氮起始浓度/(mg/kg)	73.54	80.17	9	74.28	
V_CDN		反硝化指数速率系数	1.58	2.08	10	1.72	
V_SDNCO		反硝化土壤含水阈值	1.00	1.23	2	1.71	

\* R\_代表乘以(1+率定值),V\_代表替换原有值.

表 2 模型评估结果  
Tab.2 Model evaluation results

评估参数	率定期(2008-01-2010-12)		验证期(2011-01-2012-09)	
	$R^2$	$NSE$	$R^2$	$NSE$
径流	0.85	0.80	0.83	0.78
$\text{NO}_3^-$ -N	0.87	0.86	0.86	0.84
TN	0.80	0.79	0.78	0.77

证得出验证期结果,验证期的  $R^2$ 、 $NSE$  均在 0.78 以上,结果满足模拟要求且远大于 0.6、0.5,表明所构建的模型能够较好地反映出流域的水文特征. 在率定期,监测点位的  $\text{NO}_3^-$ -N 模拟结果  $R^2$ 、 $NSE$  为 0.87 和 0.86, TN 模拟的  $R^2$ 、 $NSE$  分别为 0.80 和 0.79;  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 验证期的  $R^2$ 、 $NSE$  分别在 0.77 以上,模型模拟结果良好. 径流量、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN 的模拟值与实测值比较结果见图 3,可见模型的模拟值和实测值波动趋势均大体一致,峰值拟合结果良好. 总体结果表明 SWAT 模型能较好地应用于研究区对氮素污染的模拟研究.

## 2.2 入库氮素时间分布特征

采用率定好的参数代入模型再次运行,从而分析流域内的氮素时空分布特征. 根据 2008—2012 年流域内 5 年的各月平均入库 TN、入库  $\text{NO}_3^-$ -N 与入库径流量绘制变化趋势图,见图 4a. 三者在年内的变化趋势一致,随降水的分布而变化,呈现出集中分布的时间特征,非汛期三者值相对较低,高值主要集中在汛期(6—9 月). 汛期入库径流量占到全年的 82.94%,汛期  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 的入库量分别占全年的 84.16% 和 84.06%.

2008—2012 年期间,句容水库农业流域内  $\text{NO}_3^-$ -N 的年入库量为 3.66~16.38 t,多年平均入库量为 9.98 t; TN 年入库量为 8.72~46.39 t,多年平均值为 27.22 t. 由图 4b 可见,句容水库农业流域年  $\text{NO}_3^-$ -N 入库量、年

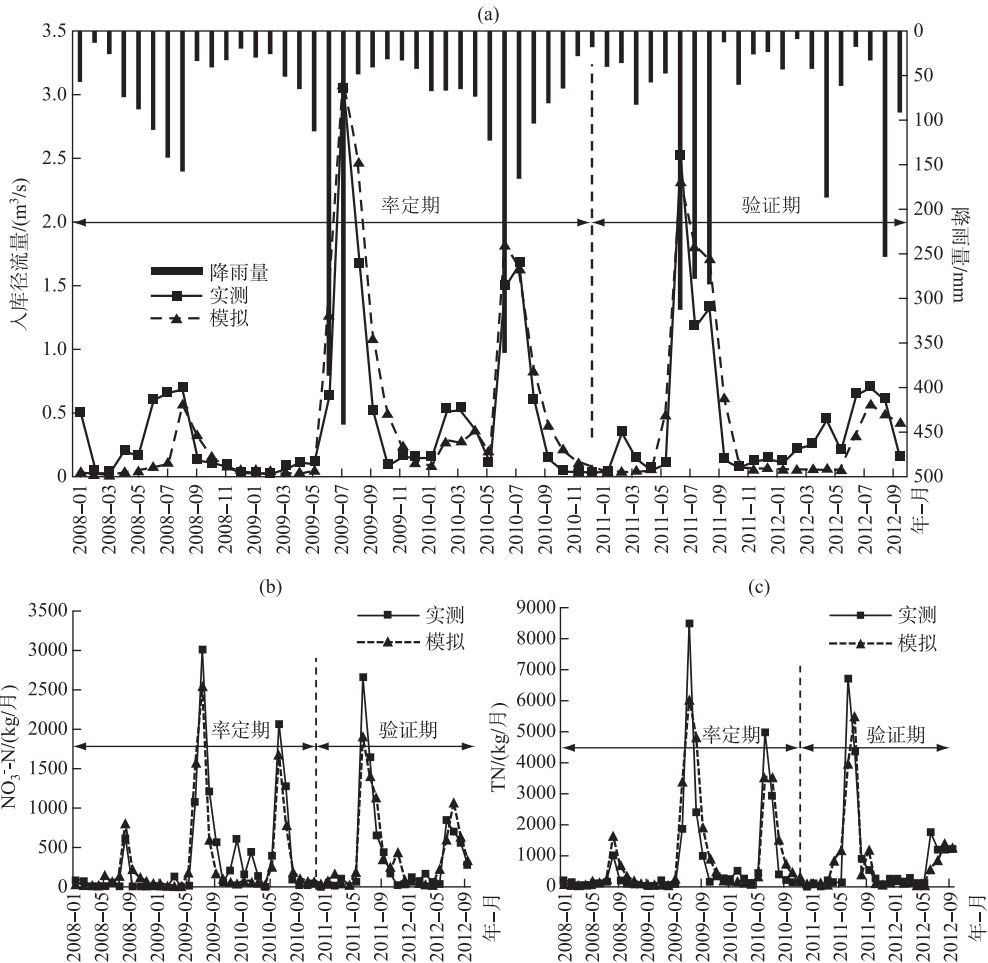


图3 句容水库农业流域径流量(a)、NO<sub>3</sub>-N(b)、TN(c)模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparison of simulated and measured values of runoff(a), NO<sub>3</sub>-N(b), TN(c) in Jurong Reservoir agricultural watershed

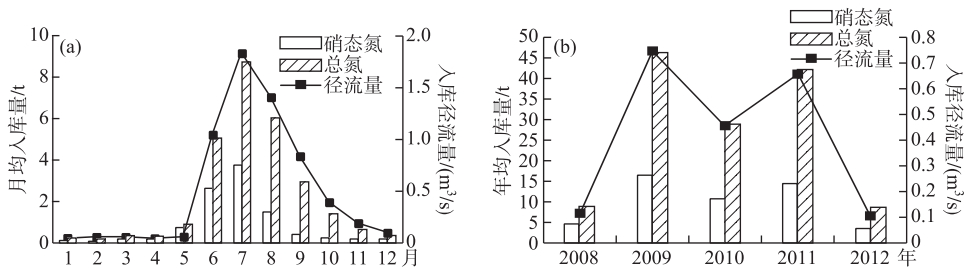


图4 句容水库农业流域氮素和径流量的年内(a)和年际变化(b)

Fig.4 Intra-year(a) and inter-year(b) variation of nitrogen and runoff in the Jurong Reservoir agricultural watershed

TN 入库量与年入库径流量的总体趋势相同,呈“M”型波动趋势,三者 在 2009 年均最多. 在年尺度上,分别

计算  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 的入库量与降水量的相关性,其相关系数均在 0.9 以上,表明了入库氮负荷量与降水量之间存在较强的正相关关系。

### 2.3 流域径流氮素负荷空间分布特征

流域径流氮素负荷除受径流的影响外,同样与下垫面情况有关,不同的下垫面具有不同的氮素负荷特征。图 5 为流域 2008—2012 年多年平均径流氮素负荷的空间分布,结果显示流域内各子流域径流氮素负荷具有较大的差异性。研究区各子流域年均径流 TN 负荷范围为  $2.67\sim 9.28\text{ kg/hm}^2$ ,均值为  $6.40\text{ kg/hm}^2$ ,主要集中在中下部农田比例较高的子流域,其中负荷量较大区域有 11、12、16 号子流域,这 3 个子流域中农田的占比均在 60% 以上。各子流域  $\text{NO}_3\text{-N}$  的分布特征与 TN 的空间分布特征基本一致,都呈现“局部集中,临近水体”的特征。

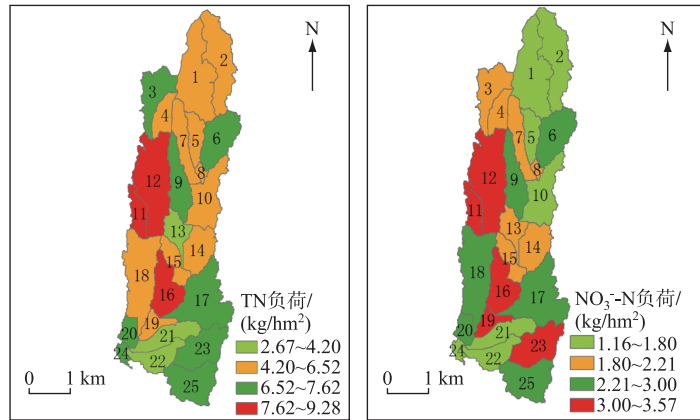


图 5 句容水库农业流域氮素单位负荷量的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of unit nitrogen load in the Jurong Reservoir agricultural watershed

### 2.4 来源分析

句容水库农业流域现状氮素主要来源于农田施肥、农村生活污水、畜禽养殖、氮沉降。在农业非点源污染中土壤背景值对氮素污染的贡献率较大,不可忽略,因此在句容水库农业流域来源分析中考虑流域的土壤背景值。通过采用分别模拟有、无相应污染源输入时入库水质变化情况的方法,估算出句容水库农业流域内不同污染源对入库 TN 的污染贡献率。

由图 6 可知,句容水库入库 TN 负荷贡献最大的为农田施肥,贡献率高达 49.60%;背景值的贡献率为 21.19%;氮沉降 18.21%;农村生活污水次之,贡献率为 8.32%;畜禽养殖最小。因此各输入污染源对入库 TN 的贡献率为:农田施肥>氮沉降>农村生活污水>畜禽养殖。

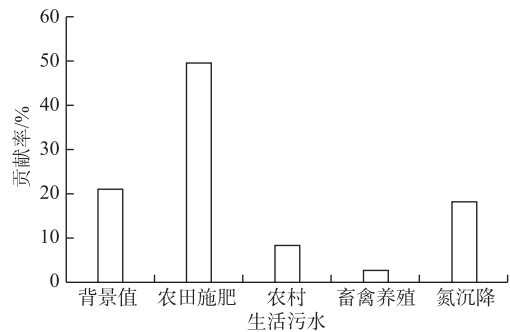


图 6 不同污染源对入库 TN 的贡献率

Fig.6 Contribution of different pollution sources to TN load in the Jurong Reservoir agricultural watershed

## 3 讨论

### 3.1 模型率定和验证

模拟结果显示句容水库农业流域的径流模拟结果整体上与实测值相吻合,但在非汛期的春季模拟较汛期的精度低,存在低估现象。王尹萍等<sup>[24]</sup>在泾河流域利用 SWAT 模型模拟径流分布时也得出相似的结果,可能是由于气象数据空间分布不均匀所造成的影响<sup>[10,25]</sup>。 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 TN 的部分模拟结果值在汛期低于观测

值,这可能与汛期出现的暴雨有较大关系,Zeiger 等<sup>[26]</sup>在美国中部流域的研究表明了 SWAT 模型在暴雨等极端事件中存在低估现象. 其原因是真实情况下一天的降水量可能主要集中在这一天的某个时间段,即暴雨情况,短时间的较大降水量产生冲刷强度大从而形成的径流氮素负荷量较大,SWAT 模型中输入的降水数据为日均降水量,平均至一天的降水量往往削减了这种影响.

### 3.2 氮污染时空分布特征

句容水库农业流域属于北亚热带季风气候,年内降水分布集中,汛期的降水可占到全年降水的 60% 以上,丰富的降水汇流形成径流,氮素在受到降水径流的影响同样主要集中在汛期,造成汛期是句容水库农业流域在一年内氮素污染最大的时期. 张婷等<sup>[27]</sup>针对潘家口水库流域的非点源污染研究得出,TN 负荷在汛期占全年的 72%,与本文结论相似.

在模拟的 5 年内年径流氮负荷量最大的一年为 2009 年,其降水量和径流量同样最大,主要原因是降水和径流是非点源污染的主要驱动力,当下垫面情况稳定时,非点源污染主要受这两者的影响<sup>[28]</sup>. 基于句容水库农业流域的模拟结果,降水量和径流量在对流域内氮素输移的影响程度上略有差别,径流氮负荷量与径流的相关性较与降水量的相关性好. 究其原因,降水虽然能够影响径流量从而影响氮素迁移,但是降水仅能够反映氮素从土壤剥离的量,无法体现输出氮的迁移量;径流不仅有降水的影响,同时包括对沿途土壤前期含水量的氮素的作用<sup>[27]</sup>. 因此在汛期减少如农田施肥等氮源输入可有效控制流域氮素污染.

流域内为保证作物产量在农田施放大量氮肥,过量肥料进入农田土壤后易经降水形成的径流携带后进入水体,同时流域内单位面积施放的氮肥量远大于单位面积的生活污水和畜禽养殖的排放量,土壤氮素随着施氮量的增加而升高,特别是表层土壤<sup>[29]</sup>,同时表层土壤的 TN 流失量与其含量呈正比<sup>[30]</sup>,输入量大在地形差异不大的条件下往往代表着产生的径流 TN 负荷量较大,因此农田占比越大的区域径流 TN 负荷量也越大,刘鹤等<sup>[31]</sup>在研究汤浦水库流域时也得出农田单位面积产污负荷较高,这使得句容水库农业流域的径流 TN 负荷量的高值主要局部集中在农田占比较高的子流域. 径流 TN 的负荷量也受径流的影响,越往下越靠近水体的径流经过汇流后增加,所产生的负荷量也随之增加,因此形成越往下越靠近水体的子流域的负荷量也越大的空间分布趋势,与研究区类似的岔河小流域也具有相同的趋势<sup>[19]</sup>. 径流  $\text{NO}_3^-$ -N 负荷量与 TN 负荷量的空间分布特征总体一致,但两者在局部存在差异,主要为非农田为主的子流域,如以林地为主坡度较大的 1、2 号子流域径流  $\text{NO}_3^-$ -N 的负荷量为低污染而 TN 大幅增加,可能原因是较大的坡度使得林地内的大量有机氮流失进入水体. 在句容水库农业流域的早期研究中,胡小丽<sup>[32]</sup>得出该流域不同土地利用类型单位面积的有机氮输出量依次排序为林地>耕地>居民区>水域. 而以  $\text{NO}_3^-$ -N 负荷量作为指标呈现为高污染的 19 和 23 号子流域由于以水体为主,相对于其他子流域有机氮的增量较小,从而使得对比其他子流域该区域径流 TN 的负荷量相对降低.

### 3.3 氮污染关键来源

句容水库农业流域是农业为主的小流域,流域内的居住人口较少,同时未建设有大型养殖场,存在的畜禽养殖为农户的少许养殖,因此生活污水和畜禽养殖所造成的污染占比少,主要的污染来源于贡献率达 49.60% 的农田施肥. 在农田面积仅占 10.13% 但所造成氮污染占比达 60% 的汤浦水库流域中,刘鹤等<sup>[31]</sup>在实际化肥施用量的基础上削减 20% 后  $\text{NO}_3^-$ -N 可减少 11.15% 的输出. 因此考虑减少流域内的氮污染措施时可以优先考虑控制农田施肥的施用量. 但同时化肥削减程度与氮污染的减少幅度不一致,因此在不影响作物产量的前提下减少污染时应确定最适宜削减值.

土壤颗粒对硝酸根离子具有较弱的吸附性,在土壤中的氮素主要以  $\text{NO}_3^-$ -N 的形式流失. Yan 等<sup>[33]</sup>在句容水库农业流域的氮平衡研究中发现,在流域氮输入和输出之间存在着 50% 左右的氮盈余,剩余氮的去向包括淋溶作用、土壤存储以及反硝化作用. 根据研究区周边地区的相关研究成果可知,周边地区的淋溶作用仅为当季施肥量的 2% 左右<sup>[30]</sup>,研究区的淋溶作用更低,低于 1%;李飞跃等<sup>[34]</sup>研究句容水库农业流域时发现流域的反硝化作用低于 TN 输入量的 3.19%,这两者都不是流域剩余氮的主要去向,水体反硝化作用是流域内主要的去氮途径,太湖地区河网湿地的平均脱氮效率可达到 42.90%<sup>[35]</sup>. 流域内池塘众多,大部分的盈余氮主要经径流携带后从土壤流失进入水体,在水体反硝化作用下从流域内去除. 杜鹃等<sup>[36]</sup>在安徽怀远县的研究结果同样以农田施肥的贡献率为最大. 流域内土壤背景值所占比例较大,仅次于农田施肥,达到



21.19%,在相似的岳城水库流域的 SWAT 模拟研究中去除点源污染后土壤背景也具有相当的贡献率<sup>[14]</sup>。造成流域内土壤背景值所占比例较大的原因可能是存在一部分氮滞留于土壤中,但这部分氮不会体现在当年输出 TN 内<sup>[37]</sup>。总之农田施肥是流域内占比最大的输入源,减少化肥的施用量可以在减少直接污染的同时降低进入土壤的氮滞留,可有效控制流域内氮污染的产生。

## 4 结论

运用 SWAT 构建适合句容水库农业流域氮素迁移模拟的模型,通过 2008 年 1 月—2012 年 9 月观测水文和实测氮素负荷量( $\text{NO}_3^-$ -N、TN)对模型进行率定和验证,在此基础上进行分析,结果表明:

1)从时间变化上看,入库氮素负荷量随着径流的变化而变化。年际入库氮素负荷量总体呈现“M”型波动趋势,其中以 2009 年的入库量最多;年内入库氮素负荷量随降水径流的变化而呈现出集中分布的特征,主要集中在汛期。因此合理安排施肥时间可作为减少污染的有效措施。

2)从空间变化上看,句容水库农业流域的径流  $\text{NO}_3^-$ -N 与 TN 负荷量空间分布特征都呈现“局部集中,临近水体”,主要集中在农田占比高的地区。二者在局部以非农田为主的子流域有差异,相对  $\text{NO}_3^-$ -N 的污染分级程度,以林地为主的 1、2 号子流域径流 TN 负荷量污染程度增加,以水体为主的 19、23 号子流域降低。

3)农田施肥为流域内主要的污染源,占 49.60%;由于土壤的氮储存土壤背景值贡献值达 21.19%。控制农田施肥的施用量可作为治理句容水库农业流域氮素污染的有效措施,同时土地利用类型的改变也会影响氮素迁移量,这可作为在句容水库农业流域内的进一步研究方向。

## 5 参考文献

- [1] Rabotyagov SS, Kling CL, Gassman PW *et al.* The economics of dead zones: Causes, impacts, policy challenges, and a model of the gulf of Mexico hypoxic zone. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2014, **8**(1): 58-79. DOI: 10.1093/reep/ret024.
- [2] Keisman JLD, Devereux OH, Lamotte AE *et al.* Manure and fertilizer inputs to land in the Chesapeake Bay watershed, 1950–2012. United States: U.S. Geological Survey, 2018.
- [3] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China ed. China water resources bulletin 2018. Beijing: China Water & Power Press, 2019.[中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2018. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.]
- [4] Chen D, Zhang B, Zeng YF *et al.* Analysis of temporal and spatial characteristics of nitrogen pollution in Qingshan Lake basin based on SWAT model. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1216-1222.[陈丹, 张冰, 曾逸凡等. 基于 SWAT 模型的青山湖流域氮污染时空分布特征研究. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1216-1222.]
- [5] Wang JH, He L, Yang C *et al.* Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981–2015). *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 897-906. DOI: 10.18307/2018.0403.[王菁晗, 何吕奇姝, 杨成等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较 (1981–2015 年). 湖泊科学, 2018, **30**(4): 897-906.]
- [6] He SJ, Lv J. Quantitative Study on Nitrogen an Quantitative study on nitrogen and phosphorus loss in baseflow of typical agricultural watershed based on non-point source pollution model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 20-26.[何圣嘉, 吕军. 流域基流氮磷流失的非点源污染定量研究. 水土保持学报, 2017, **31**(6): 20-26.]
- [7] Ye JJ, Lu JT, Yin XL *et al.* Simulation of runoff change in the upper reaches of the Hanjiang river based on SDSM-SWAT model. *Water Resources and Power*, 2019, **37**(4): 1-4,12.[叶加俊, 卢健涛, 银星黎等. 基于 SDSM-SWAT 模型的汉江上游径流变化模拟. 水电能源科学, 2019, **37**(4): 1-4,12.]
- [8] Li CY, Fang HY. Simulation of sediment yield and analysis of influencing factors in the Shouchang river basin based on SWAT model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(6): 127-135, 142.[李朝月, 方海燕. 基于 SWAT 模型的寿昌江流域产沙模拟及影响因素分析. 水土保持学报, 2019, **33**(6): 127-135, 142.]
- [9] Ma GW, Wang SR, Wang YY *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and diffuse source pollution load simulation of Poyang Lake Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1285-1291. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.1046.[马广文, 王圣瑞, 王业耀等. 鄱阳湖流域面源污染负荷模拟与氮和磷时空分布特征. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1285-1291.]

- [10] Pulighe G, Bonati G, Colangeli M *et al.* Predicting streamflow and nutrient loadings in a semi-arid Mediterranean watershed with ephemeral streams using the SWAT model. *Agronomy*, 2019, **10**(1): 2. DOI: 10.3390/agronomy10010002.
- [11] Getachew B, Manjunatha BR, Bhat HG. Modeling projected impacts of climate and land use/land cover changes on hydrological responses in the Lake Tana Basin, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2021, **595**: 125974. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.125974.
- [12] Mu J, Shi MC, Guo HZ *et al.* Spatial and temporal differentiation of non-point source pollution load of a small watershed based on SWAT model. *Soil and Water Conservation in China*, 2013, (9): 49-52, 77. [穆婧, 史明昌, 郭宏忠等. 基于 SWAT 模型的小流域面源污染负荷时空分异研究——以重庆市万州区陈家沟小流域为例. 中国水土保持, 2013, (9): 49-52, 77.]
- [13] Zhou Z, Wu JF, Yang Y *et al.* Surface runoff simulation based on SWAT model in Beishan Reservoir watershed. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, **18**(1): 66-73. [周铮, 吴剑锋, 杨蕴等. 基于 SWAT 模型的北山水库流域地表径流模拟. 南水北调与水利科技, 2020, **18**(1): 66-73.]
- [14] Lin XJ, Huang JH, Lin C *et al.* Simulation of pollution sources of Yuecheng Reservoir Basin. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(1): 74-79. [林晓娟, 黄津辉, 林超等. 岳城水库流域污染源模拟. 水资源保护, 2015, **31**(1): 74-79.]
- [15] Bauwe A, Kahle P, Lennartz B. Evaluating the SWAT model to predict streamflow, nitrate loadings and crop yields in a small agricultural catchment. *Advances in Geosciences*, 2019, **48**: 1-9. DOI: 10.5194/adgeo-48-1-2019.
- [16] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Baltas E *et al.* SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(19). DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.08.008.
- [17] Han B, Zhou LL, Fan H *et al.* Nitrogen pollution load simulation of the Puhe River Basin and the spatial and temporal distribution. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, **11**(2): 90-96. DOI: 10.16843/j.sswc.2013.02.015. [韩博, 周丽丽, 范昊明等. 蒲河流域氮污染负荷模拟及时空分布. 中国水土保持科学, 2013, **11**(2): 90-96.]
- [18] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and  $\text{NO}_3^-$ -N loads predictions. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1/2/3/4): 207-222. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.017.
- [19] Jiangsu Province Soil Survey Office ed. Soil in Jiangsu. Jiangsu: China Agriculture Press, 1995. [江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 江苏: 中国农业出版社, 1995.]
- [20] Ding Y, Zhao JY, Xu ZH *et al.* Simulation of runoff from a small lake watershed using SWAT. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(2): 7-13. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2019.02.002. [丁洋, 赵进勇, 徐征和等. 基于 SWAT 模型的平原河湖水网区小流域径流过程模拟. 水生态学杂志, 2019, **40**(2): 7-13.]
- [21] Jiang JJ, Du PF. Improvement and application of SWAT model watershed delineation method in plain irrigation districts. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2019, **59**(10): 866-872. [姜婧婧, 杜鹏飞. SWAT 模型流域划分方法在平原灌区的改进及应用. 清华大学学报: 自然科学版, 2019, **59**(10): 866-872.]
- [22] Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR *et al.* Soil and water assessment tool. Texas: Texas A & M University System College Station, 2005.
- [23] Jha M, Gassman PW, Secchi S *et al.* Effect of watershed subdivision on swat flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, **40**(3).
- [24] Wang YP, Jiang RG, Xie JC *et al.* Research on the monthly runoff distributed simulation and its application in Jinghe River Basin based on SWAT model. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, **36**(2): 135-144, 158. [王尹萍, 姜仁贵, 解建仓等. 基于 SWAT 模型的泾河流域月径流分布式模拟. 西安理工大学学报, 2020, **36**(2): 135-144, 158.]
- [25] Chen HJ, Luo YZ, Potter C *et al.* Modeling pesticide diuron loading from the San Joaquin watershed into the Sacramento-San Joaquin Delta using SWAT. *Water Research*, 2017, **121**: 374-385. DOI: 10.1016/j.watres.2017.05.032.
- [26] Zeiger SJ, Hubbart JA. A SWAT model validation of nested-scale contemporaneous stream flow, suspended sediment and nutrients from a multiple-land-use watershed of the central USA. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 232-243. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.178.
- [27] Zhang T, Gao Y, Li JZ *et al.* Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2021, **49**(1): 42-49. [张婷, 高雅, 李建柱等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟. 河海大学学报: 自然科学版, 2021, **49**(1): 42-49.]
- [28] Zhang HT, Zhang C, Zhou HC *et al.* Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2010, **38**(6): 644-650. [张皓天, 张弛, 周惠成等. 基于 SWAT 模型的流域非

- 点源污染模拟. 河海大学学报:自然科学版, 2010, **38**(6): 644-650.]
- [29] Xia XL, Shi ZL, Jing Q *et al.* Effects of nitrogen fertilization on spatial-temporal distributions of soil nitrate and nitrogen utilization in wheat season of rice-wheat systems. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(3): 490-496.[夏晓亮, 石祖梁, 荆奇等. 氮肥运筹对稻茬小麦土壤硝态氮含量时空分布和氮素利用的影响. 土壤学报, 2010, **47**(3): 490-496.]
- [30] Yu YL, Xue LH, Yang LZ. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(5): 988-995.[俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响. 土壤学报, 2011, **48**(5): 988-995.]
- [31] Liu H, Wang M, Meng T *et al.* Temporal-spatial distribution of non-point source pollution and scenario simulation of Tangpu reservoir watershed. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, **32**(3): 321-327.[刘鹤, 王敏, 孟婷等. 汤浦水库流域非点源污染的时空分布及情景分析. 西安理工大学学报, 2016, **32**(3): 321-327.]
- [32] Hu XL. Study on nitrogen transport in Jurong reservoir basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, **23**(5): 59-62.[胡小丽. 句容水库流域氮输移研究. 水资源与水工程学报, 2012, **23**(5): 59-62.]
- [33] Yan XY, Cai ZC, Yang R *et al.* Nitrogen budget and riverine nitrogen output in a rice paddy dominated agricultural watershed in Eastern China. *Biogeochemistry*, 2011, **106**(3): 489-501. DOI: 10.1007/s10533-010-9528-0.
- [34] Li FY, Wang JF, Xie Y *et al.* Denitrification of farmland soils in the agricultural watershed of Jurong reservoir, Jiangsu Province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(3): 638-643.[李飞跃, 汪建飞, 谢越等. 江苏句容水库农业流域农田土壤反硝化作用的研究. 农业环境科学学报, 2012, **31**(3): 638-643.]
- [35] Zhao YQ. Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model[Dissertation]. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2014.[赵永强. 太湖地区河网湿地脱氮能力研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2014.]
- [36] Du J, Wang L, Zhou HY *et al.* Spatial-temporal distribution of agricultural non-point source pollution: A case study of Huaiyuan, Anhui. *Journal of Chian Agricultural University*, 2021, **26**(2): 139-149.[杜鹃, 王乐宜, 周皓媛等. 农业面源污染时空分布及污染源解析——以安徽怀远县为例. 中国农业大学学报, 2021, **26**(2): 139-149.]
- [37] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(45).