

# 基于 SWAT 的流域径流和总氮模拟

——以长三角地区的中小流域为例

费国松<sup>1</sup>, 姚允龙<sup>2</sup>, 闫 浩<sup>1</sup>, 陈 鑫<sup>2</sup>, 高鸣远<sup>3</sup>, 陈睿东<sup>4</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022; 2. 江苏省水文水资源勘测局镇江分局, 江苏 镇江 212028;  
3. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 4. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 利用 SWAT 模型, 分别于 2019—2022 年、2020—2022 年、2019—2022 年, 在长三角地区的秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域开展逐月的径流模拟和总氮模拟。结果表明: SWAT 模型在 3 个流域的径流量模拟 ( $R^2 > 0.83$ ,  $E_{NS} > 0.65$ ) 和总氮模拟 ( $R^2 > 0.63$ ,  $E_{NS} > 0.51$ ) 中均表现出较好的效果; 2020—2022 年, 秦淮河流域的单位面积年平均总氮负荷 ( $1.108 \pm 0.391 \text{ t/km}^2$ ) 与洛阳河流域 ( $0.939 \pm 0.174 \text{ t/km}^2$ ) 和中田河流域 ( $1.256 \pm 0.490 \text{ t/km}^2$ ) 相当; 洛阳河流域的总氮负荷与降水量的相关性 ( $R^2=0.25$ ,  $p<0.05$ ) 低于秦淮河流域 ( $R^2=0.73$ ,  $p<0.01$ ) 和中田河流域 ( $R^2=0.86$ ,  $p<0.001$ ), 说明洛阳河流域的总氮负荷对降雨响应的敏感性更弱。研究可为流域的氮素管理提供理论依据和决策支持。

**关键词:** 径流模拟; 总氮模拟; SWAT 模型; 长三角地区

**中图分类号:** TV143 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2025)01-0038-0006

## Simulation of watershed runoff and total nitrogen based on SWAT: taking small and medium-sized watersheds in the Yangtze River Delta Region as examples

FEI Guosong<sup>1</sup>, YAO Yunlong<sup>2</sup>, YAN Hao<sup>1</sup>, CHEN Xin<sup>2</sup>,  
GAO Mingyuan<sup>3</sup>, CHEN Ruidong<sup>4</sup>

(1. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Changzhou 213022, China; 2. Zhenjiang Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Zhenjiang 212028, China; 3. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China; 4. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** This study employed the SWAT model to perform monthly simulations of runoff and total nitrogen in the Qinhuai River Basin, Luoyang River Basin, and Zhongtian River Basin within the Yangtze River Delta Region from 2019 to 2022, 2020 to 2022, and 2019 to 2022, respectively. The results showed that the SWAT model demonstrated good performance in the simulation of runoff (with  $R^2>0.83$  and  $ENS>0.65$ ) and total nitrogen (with  $R^2>0.63$  and  $ENS>0.51$ ) in the three watersheds. From 2020 to 2022, the unit area annual average total nitrogen load in the Qinhuai River Basin ( $1.108 \pm 0.391 \text{ T}/(\text{km}^2 \cdot \text{y})$ ) was comparable to that of the Luoyang River Basin ( $0.939 \pm 0.174 \text{ T}/(\text{km}^2 \cdot \text{y})$ ) and the Zhongtian River Basin ( $1.256 \pm 0.490 \text{ T}/(\text{km}^2 \cdot \text{y})$ ). The correlation between total

收稿日期: 2024-10-28

基金项目: 江苏水利科技项目(2021041)

作者简介: 费国松(1973—),男,高级工程师,本科,主要从事水文水资源工作。E-mail: fgs1973@126.com

nitrogen load and rainfall in the Luoyang River Basin ( $R^2=0.25$ ,  $p<0.05$ ) was lower than that observed in the Qinhuai River Basin ( $R^2=0.73$ ,  $p<0.01$ ) and the Zhongtian River Basin ( $R^2=0.86$ ,  $p<0.001$ ), indicating a reduced sensitivity of total nitrogen load to rainfall response in the Luoyang River Basin. This study provides a theoretical basis and decision support for the management of nitrogen in watersheds.

**Key words:** runoff simulation; total nitrogen simulation; SWAT model; the Yangtze River Delta Region

## 1 概述

水文过程涉及降水、蒸发、径流以及伴随的淋溶运移等多个环节,这些环节相互作用,形成了复杂的水文系统。由于流域水文过程研究的尺度适中,其研究结果也能更好地服务地方的水资源和水环境管理,因而得到更多的关注。特别是近几十年来,人为活性氮输入量显著增加,引起了水体富营养化等一系列生态环境问题。流域的径流过程和氮素运移得到了广泛关注。以往研究发现,在不同土地利用、地形条件的流域中,径流的氮浓度存在差异,并且可能呈现不同的时间变化特征。土地利用等下垫面条件决定了源区氮输入量和输入方式,而地形影响流域的水文过程。由于源区氮输入和水文过程的差异,不同类型的流域可能存在差异化的流域氮运移过程。因此,有必要针对不同类型的流域开展径流模拟和氮素模拟研究,以增加对流域氮运移过程的认识。

水文模型是实现流域径流模拟和氮素模拟的有效手段,常用的水文模型包括数理统计模型和基于物理过程的水文模型。其中,数理统计模型通过建立河水的氮浓度、负荷等指标与流域内土地利用比例、人口数量、降水量等指标的相关性,以估算流域氮浓度、负荷<sup>[1]</sup>。然而,该方法未考虑差异化的氮排放方式、复杂的陆面过程和自然水系统的氮输送过程,并且估算结果可能因资料统计不完全和估算方式不合理而产生较大误差。基于物理过程的水文模型的出现为定量理解氮素的陆面过程及其在流域水系统中的运移过程提供了可能。目前,包括SWAT(Soil and Water Assessment Tool)在内的基于物理过程的水文模型考虑了氮素输入、输移和转化等过程,并得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。

长三角地区是长江经济带的核心区,其水质状况直接关系到区域的可持续发展<sup>[5]</sup>。据报道,近十多年来,长三角地区的河流氮浓度呈现下降趋势,但仍然处于高水平<sup>[6]</sup>。本研究利用SWAT模型在长三角地区的3个中小流域开展径流模拟和总氮模拟,以明确不同流域的径流过程和氮素运移过程。

## 2 研究区概况

研究选取长三角地区的秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域为研究区。秦淮河流域地处长江下游,江苏省西南部,总面积为2 631 km<sup>2</sup>;洛阳河流域位于太湖上游,总面积为148 km<sup>2</sup>;中田河流域位于江苏省的沙河水库上游,总面积为42 km<sup>2</sup>,属太湖流域的宜溧丘陵山区的一部分。受亚热带季风气候的影响,研究区具有四季分明、降雨充沛、雨热同期的特点,平均气温为15.8℃,平均年降水量为1 262 mm,约63.2%的降水集中在5-9月。秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域的人口密度分别为1 410、510和190人/km<sup>2</sup>,建设用地面积占比分别为26.13%、11.32%和3.88%,平均坡度分别为2.12°、1.96°和9.90°。洛阳河流域的耕地面积占比最高(73.90%),而中田河流域的林地面积占比最高(57.63%)。

## 3 数据处理与模型构建

### 3.1 空间数据库和属性数据库构建

为构建SWAT模型的空间数据库,本研究收集了秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域的水系图、数字高程图(DEM)、土壤类型、土地利用等数据,数据的来源、时间跨度和用途如表1所示。

此外,本研究收集了3个流域的土壤属性、气象和土地利用等数据,用于构建模型的属性数据库。土壤属性数据和土地利用数据均参考前人的方法进行处理。气象数据来源于国家气象科学数据中心的国家气象地面观测站的记录,包括降雨、气温、风速。数据库构建所需的其余气象数据由SWAT自带的天气发生器生成。秦淮河流域内包含4个气象观测站,而洛阳河流域和中田河流域内无气象观测站,其降雨等气象数据由距离流域最近的3个气象站的数据通过克里金插值得到。

### 3.2 氮源数据库构建

氮源数据库包括点源数据和非点源数据。其中,点源包括城镇污水处理厂尾水和工业废水。根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—

表 1 SWAT 模型的构建和验证所需数据的来源

数据类型	时间段	数据来源	数据用途
DEM	2020 年	NASA Aster G-Dem	提取河网和子流域划分
水系图	2010 年	江苏省水文局	验证河网提取的准确性
气象数据	2019—2022 年	国家气象科学数据中心	构建属性数据库
土地利用图	2020 年	数字地球开放平台、实地调研	生成水文响应单元
土壤类型图	2001 年	江苏省志-土壤志	生成水文响应单元
流量数据	2019—2022 年	江苏省水文局	水文模块的率定和验证
水质数据	2019—2022 年	江苏省水文局	水文模块的率定和验证

2002),城镇污水处理厂尾水的TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的质量浓度分别为15.0 mg/L和5 mg/L。参考《污水综合排放标准》(GB 8978—1996),工业废水的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N质量浓度为15.0 mg/L。城镇污水处理厂和工业废水的排放量数据来自地方统计年鉴。点源的排放量由排放体积和尾水浓度相乘得到,统计结果如表2所示。基于第一次水利普查中关于入河排污口的调查结果,考虑每个子流域中排污口的数量和排污量,将点源污染概化到每个子流域的出口。前后研究的现场调研均发现,中田河流域内不存在污水处理厂,部分生活污水通过简易的沉淀池处理后排放。并且,该流域内不存在工业废水排放。鉴于此,本研究认为中田河流域内无点源污染,未在水文模型中考虑该部分影响。

表 2 秦淮河流域和洛阳河流域的点源氮排放量

流域	年份	TN / t	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / t
秦淮河流域	2019	3 850.64	1 710.50
	2020	4 057.28	1 787.90
	2021	4 292.06	1 872.53
	2022	4 439.57	1 939.58
洛阳河流域	2020	7.96	2.56
	2021	8.04	2.68
	2022	8.21	2.87

非点源氮数据库的构建主要包括设置农业管理措施。根据3个流域的主要作物类型以及通过入户调查确定的施肥制度,对农业管理措施进行了设置。需要强调的是,3个流域均存在未处理的农村生活污水排放。鉴于此,本研究构建了3个流域未处理生活污水排放量的时间序列,并根据子流域的面积加权概化到子流域出口。未处理生活污水的氮排放量根据长三角地区的人均居民生活污水排放监测结果和流域内的人口数量相乘得到,结果如

表3所示。

表 3 研究区未处理生活污水中的氮排放量

流域	年份	TN / t	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / t
秦淮河流域	2019	587.02	363.17
	2020	503.86	12.42
	2021	451.32	279.61
	2022	433.13	268.12
洛阳河流域	2020	261.26	194.71
	2021	255.47	189.20
	2022	247.69	182.32
中田河流域	2019	44.82	25.91
	2020	44.86	25.94
	2021	44.79	25.68
	2022	44.83	25.91

3.3 子流域和水文响应单元划分

由于坡度、土地利用和土壤类型存在空间变异性并且对径流和氮迁移转化过程具有显著影响,本研究基于这些流域属性数据,利用GIS软件(ArcGIS, ESRI)的空间和地形分析技术生成子流域和水文响应单元。结果显示,秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域分别被划分为29、29和25个子流域以及201、120和109个水文响应单元(图1)。随后,本研究在秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域分别开展了2019—2022年、2020—2022年、2019—2022年的逐月径流模拟和总氮模拟。

4 结果与讨论

4.1 径流模拟结果与分析

本研究选取决定系数( $R^2$ )和纳什系数( $E_{ns}$ )作为模型可靠性的评价指标。结果表明,3个流域的水文模型在径流量模拟方面均表现出较好的效果

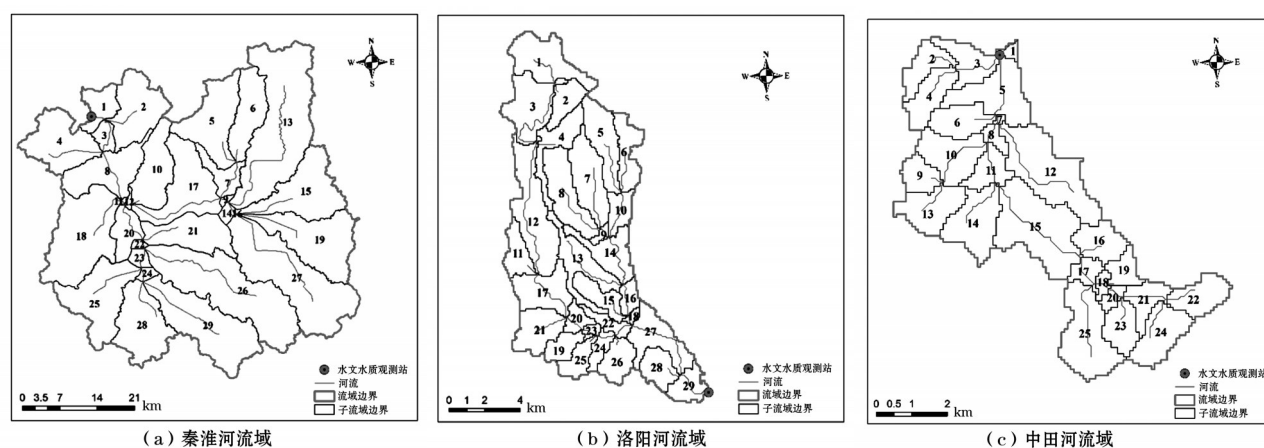


图1 秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域的子流域分布和流域出口位置

( $R^2 > 0.83$ ,  $E_{NS} > 0.65$ , 图2)。在秦淮河流域水文模型中,径流模拟在率定期的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 分别为0.93和0.79,在验证期分别为0.88和0.71。在洛阳河流域水文模型中,径流模拟在率定期的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 分别为0.90和0.84,在验证期分别为0.84和0.65。在中田河流域水文模型中,径流模拟在率定期的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 分别为0.93和0.92,在验证期分别为0.83和0.80。前人研究表明,若径流模拟在率定期和验证期的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 大于0.5,则模拟结果可信<sup>[7]</sup>。因此,本研究的

水文模型的径流模拟结果基本可靠。然而,在非汛期,秦淮河流域和洛阳河流域流量的模拟值普遍低于实测值。由于本研究中的水文模型未考虑水库的蓄泄水过程,低流量时期水库开闸泄水可能使得实际流量高于模拟值。

#### 4.2 总氮模拟结果与讨论

SWAT模拟结果显示,在率定期和验证期,总氮负荷的模拟值与实测值接近( $R^2 > 0.63$ ,  $E_{NS} > 0.51$ , 图3),且能反映实际的变化趋势。在秦淮河流域,

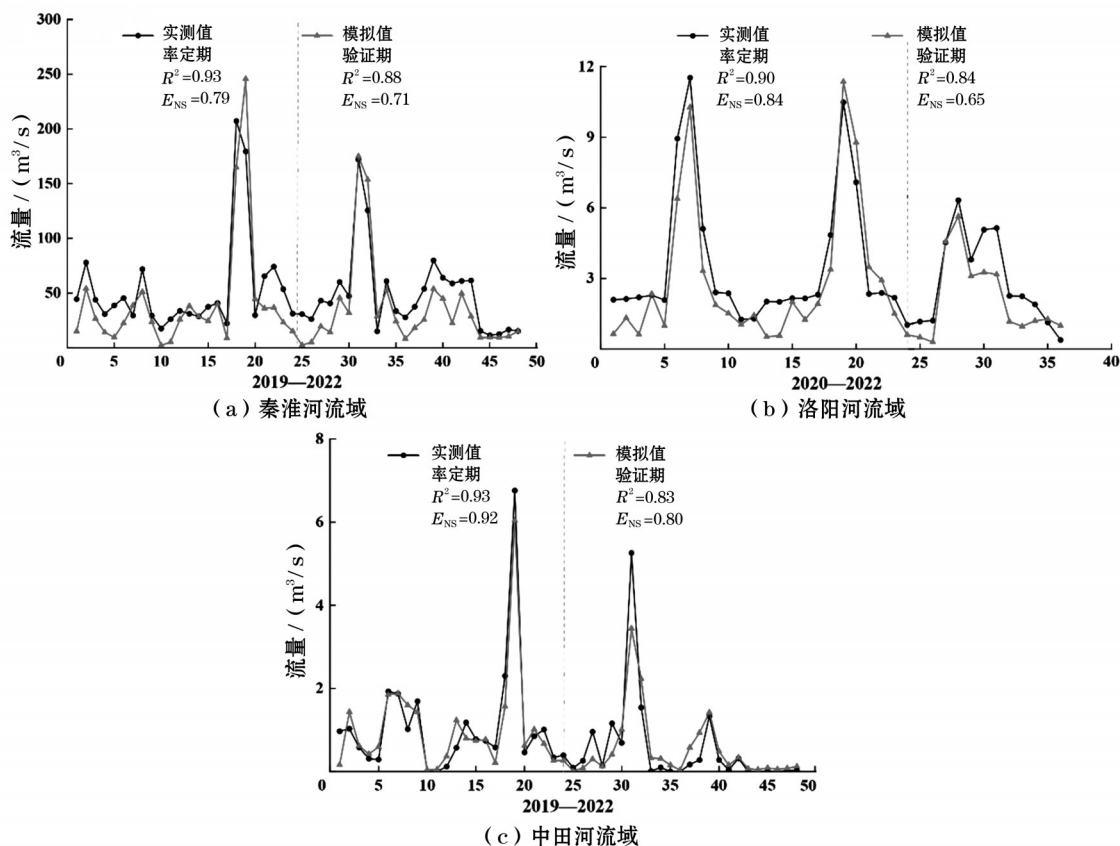


图2 秦淮河流域水文模型、洛阳河流域水文模型和中田河流域水文模型的流量模拟的率定和验证结果



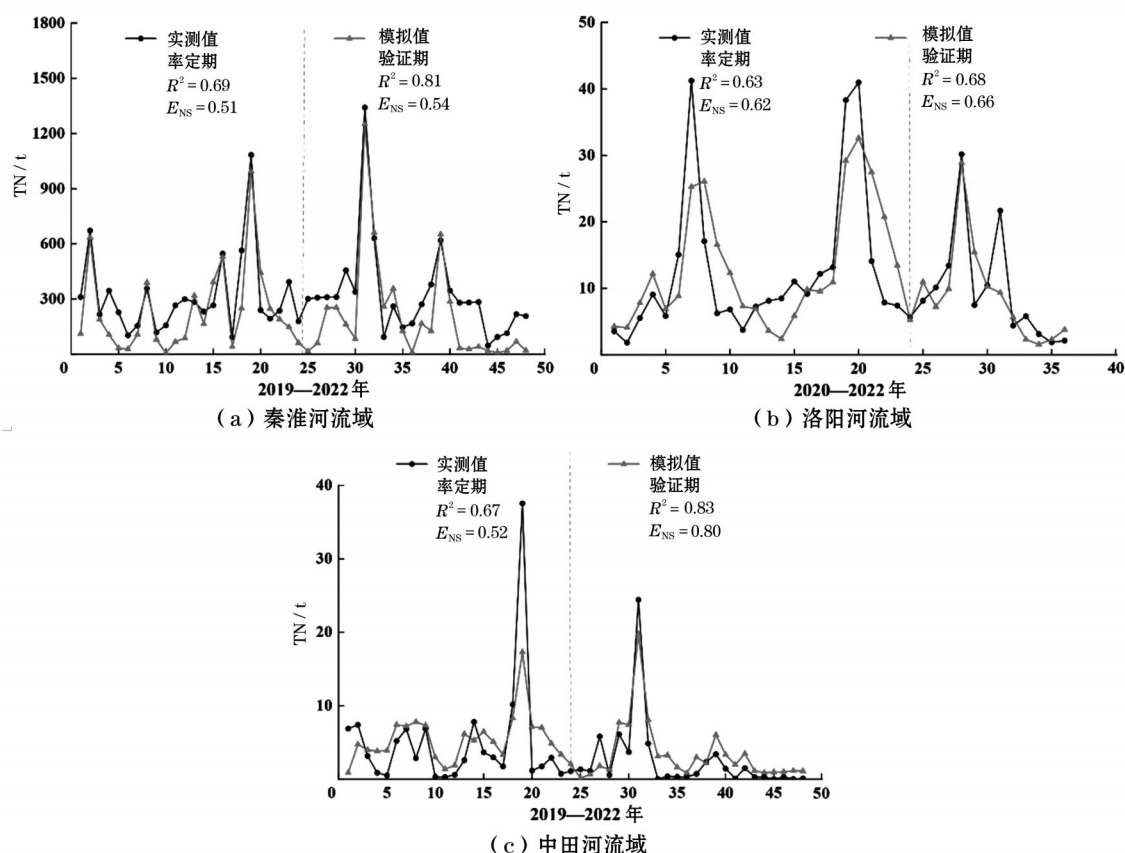


图3 秦淮河流域水文模型、洛阳河流域水文模型和中田河流域水文模型的总氮模拟的率定和验证结果

总氮负荷模拟的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 在率定期分别为0.69和0.51,在验证期分别为0.81和0.54。在洛阳河流域,总氮负荷模拟的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 在率定期分别为0.63和0.62,在验证期分别为0.68和0.66。在中田河流域,总氮负荷模拟的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 在率定期分别为0.67和0.52,在验证期分别为0.83和0.80。前人研究表明,若总氮模拟在率定期和验证期的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 大于0.5,则模拟结果可信。本研究总氮模拟的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 分别大于0.63和0.51,表明结果可靠。

SWAT模拟结果表明,2020、2021、2022年秦淮河流域的单位面积总氮年负荷分别为1.437 t/km<sup>2</sup>、1.328 t/km<sup>2</sup>和0.558 t/km<sup>2</sup>。2020、2021、2022年洛阳河流域的单位面积总氮年负荷分别为0.936 t/km<sup>2</sup>、1.154 t/km<sup>2</sup>和0.728 t/km<sup>2</sup>。2020、2021、2022年中田河流域的单位面积总氮年负荷分别为1.818 t/km<sup>2</sup>、1.327 t/km<sup>2</sup>和0.624 t/km<sup>2</sup>。总体而言,3个流域的总氮负荷均存在明显的年际波动,秦淮河流域、洛阳河流域、中田河流域的总氮负荷年变异系数分别为35.3%、18.5%、39.0%。3个流域的总氮负荷在2020年和2021年均高于2022年。降雨数据显示,2020年(1 784 mm)和2021年(1 672 mm)的降水量

高于2022年(1 090 mm)。降水量的增加往往会引起流域氮负荷的增加。一方面,降雨强度达到阈值将产生壤中流,进而引起土壤氮流失及后续对河流等受纳水体的影响;另一方面,一定强度的降雨会促进地下水流动,进而增加地下径流向河流的氮输送。此外,水文模拟结果显示,秦淮河流域的年平均总氮年负荷(1.108 ± 0.391 t/km<sup>2</sup>)与洛阳河流域(0.939 ± 0.174 t/km<sup>2</sup>)和中田河流域(1.256 ± 0.490 t/km<sup>2</sup>)相当。这表明污水处理对高度城市化地区的氮去除具有重要作用,同时说明农业流域中不受管控的氮排放(如化肥和生活污水)对河流总氮负荷产生了重要影响。这一发现与美国监测到的农业流域的总氮负荷略大于城市流域的结果一致。

从年内变化来看,秦淮河流域的总氮负荷月变异系数为81.3%,高于中田河流域(65.0%)和洛阳河流域(48.8%)。洛阳河流域总氮负荷月变异系数较小,这可能是由于该流域的总氮负荷受降雨影响的程度较低。相关性分析结果(图4)显示,洛阳河流域( $R^2=0.25, p<0.05$ )的总氮负荷与降水量的相关性低于秦淮河流域( $R^2=0.73, p<0.01$ )和中田河流域

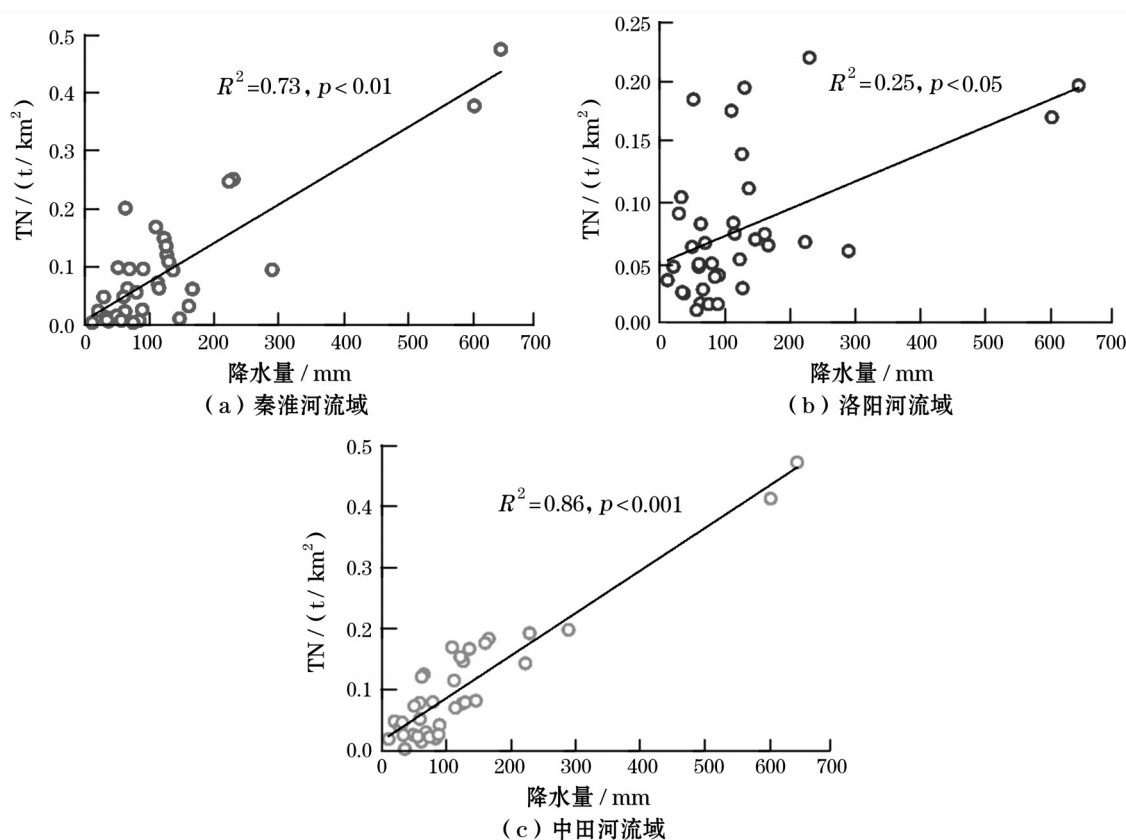


图4 2020—2022年秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域的月河流TN年负荷与月降水量的相关性

( $R^2=0.86$ ,  $p<0.001$ )。这验证了关于洛阳河流域负荷受降水量影响较弱的推测。

## 5 结论

在秦淮河流域、洛阳河流域和中田河流域, SWAT模型在径流量模拟( $R^2>0.83$ ,  $E_{\text{NS}}>0.65$ )和总氮模拟( $R^2>0.63$ ,  $E_{\text{NS}}>0.51$ )方面均表现出较好的效果,在模型中考虑水库调水过程将进一步提高模拟精度。

2020—2022年,秦淮河流域的单位面积年平均总氮负荷( $1.108\pm0.391$  t/km²)与洛阳河流域( $0.939\pm0.174$  t/km²)和中田河流域( $1.256\pm0.490$  t/km²)相当; 3个流域总氮负荷的年际变化和年内变化均主要受到降水量的影响。

### 参考文献:

[1] 冯素珍,李畅游. 内蒙古乌梁素海污染源调查研究[J].

中国农村水利水电,2010(4):125-128.

- [2] CHEN S B, CHEN L, LIU X J, et al. Unexpected nitrogen flow and water quality change due to varying atmospheric deposition[J]. Journal of Hydrology, 2022(609): 127679.
- [3] 王鹏全,李润杰. 基于水文学法和SWAT模型的北川河流域生态需水量分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 118-127.
- [4] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域SWAT模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 17-24, 69.
- [5] 李轶,万芬芬,张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 1-9.
- [6] HUANG J, ZHANG Y, BING H, et al. Characterizing the river water quality in China: Recent progress and on-going challenges[J]. Water Research, 2021(201): 117309.
- [7] 韩宁,陈维梁,高扬,等. 基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2317-2325.