

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.022

基于 WRF 模型的彭溪河流域非点源污染预测

张万顺^{1,2,3}, 卜思凡¹, 彭虹⁴, 夏函¹, 朱磊¹, 刘馨¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 武汉大学中国发展战略与规划研究院, 湖北 武汉 430072; 4. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为精准揭示三峡库区彭溪河流域非点源污染的空间异质性特征, 基于 WRF 模型, 构建了反映流域 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 精细格点降水的流域非点源污染模拟预测模型, 对彭溪河流域非点源负荷进行模拟预测。结果表明: 与由彭溪河流域 6 个气象站点 2009—2012 年观测降水资料得到的径流模拟结果相比, 基于 WRF 模型输出降水的径流模拟精度提高了 27%, 总磷质量浓度模拟精度提高了 31%, 总氮质量浓度模拟精度提高了 36%; 采用 WRF 模型输出降水模拟的年径流量范围为 35.28 亿 ~ 54.04 亿 m^3 , 总磷负荷均值为 1151.35 t/a, 总氮负荷均值为 11759.72 t/a; 彭溪河流域总磷、总氮非点源负荷较高的子流域单元多呈集聚状分布在河流水系附近, 空间异质性明显。

关键词: WRF 模型; 非点源污染; 空间异质性; 降水模拟; 径流模拟; 彭溪河流域

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)02-0160-08

Prediction of non-point source pollution in Pengxi River Basin based on WRF model // ZHANG Wanshun^{1,2,3}, BU Sifan¹, PENG Hong⁴, XIA Han¹, ZHU Lei¹, LIU Xin¹ (1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China Institute of Development Strategy and Planning, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to accurately reveal the spatial heterogeneity of non-point source pollution in the Pengxi River Basin of the Three Gorges Reservoir area, this paper establishes a simulation and prediction model for non-point source pollution in the Pengxi River Basin based on the WRF model, which reflects the precipitation on a fine grid with the size of $3\text{ km} \times 3\text{ km}$. The results show that the simulation accuracy of runoff based on WRF precipitation data is 27% higher than that obtained based on the precipitation data of six meteorological stations in the Pengxi River Basin from 2009 to 2012, and the simulation accuracies of the concentration of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) are increased by 31% and 36%, respectively. The annual runoff simulated with WRF precipitation data ranges from 3.528 billion to 5.404 billion m^3 , and the average TP and TN loads are 1151.35 t/a and 11759.72 t/a, respectively. Monitoring data show that the sub-basin units with higher TP and TN non-point source loads in the Pengxi River Basin are concentrated near the river system, with obvious spatial heterogeneity.

Key words: WRF model; non-point source pollution; spatial heterogeneity; precipitation simulation; runoff simulation; Pengxi River Basin

流域非点源污染过程受自然和人类活动等多重影响^[1-5], 非点源污染精细化模拟预测研究对保障流域水环境安全和提高生态环境监管水平具有重要意义, 是流域水环境管理领域的研究热点^[6-7]。降水是影响流域非点源污染过程的关键因素^[8-11], 精准反映局部气象过程的空间异质性成为制约非点源

污染模拟预测精度的瓶颈。传统的研究多将气象站点的降水数据进行空间插值, 导致降水等气象条件局部差异的均化, 造成在反映区域气象过程的空间异质性方面存在一定误差^[12-15]。综合考虑大气和陆面过程的气象研究与预报 (weather research and forecasting, WRF) 模型具有分辨率高、参数化方案

基金项目: 国家自然科学基金(41877531)

作者简介: 张万顺(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域环境数值模拟研究。E-mail: wszhang@whu.edu.cn

丰富、时空连续性强等特点,在流域洪水预报、径流模拟、水质预报等领域得到广泛应用^[16-18]。WRF 模型是基于非静力平衡的数值模型,可作为全球模式和区域模式进行天气现象的数值模拟。WRF 模型可有效地将降水数据降尺度至精细化格点单元^[19-20],作为水文模型的边界条件,精准模拟流域非点源过程,反映局部空间单元上非点源污染的异质性。Lee 等^[21]通过耦合 WRF 模型和分布式水文模型(soil and water assessment tool, SWAT)研究不同流量条件下气象数据分辨率对流域径流模拟的影响,显著提高了模拟精度。Yuan 等^[22]构建了集成空气质量(community multiscale air quality, CMAQ)模型、WRF 模型和 SWAT 模型的流域水质综合评估方法,对大型流域氮的迁移转化评估表现出较好的模拟效果。

三峡库区流域特殊的降水、地形地貌和土地利用的空间异质性和复杂性加剧了流域水文和水质过程的不确定性,流域非点源污染问题突出。本文以三峡库区典型支流彭溪河为研究区域,基于 WRF 模型,构建了能反映流域 3 km × 3 km 精细格点降水的流域非点源污染模拟预测模型,能精准模拟流域非点源过程,准确反映局部空间单元非点源污染的异质性,为水资源科学管控和水环境精细化治理提供参考。

1 研究区概况

彭溪河位于北纬 30° 50′ ~ 31° 42′、东经 107°56′ ~ 108°54′,是三峡库区上游北岸的一级支流,干流全长约 182 km,面积 5 172. 5 km²,流域内有东河、桃溪河、南河和普里河等支流,如图 1 所示。流域海拔高度为 148 ~ 2 549 m,地势北高南低。流域处于亚热带季风区,降雨相对充沛,气候潮湿,多年平均降水量和温度分别为 800 ~ 1 500 mm 和 18. 5 ℃。根据支流入汇情况将流域划分为东河、桃溪河-南河、普里河-彭溪河干流 3 个区域。

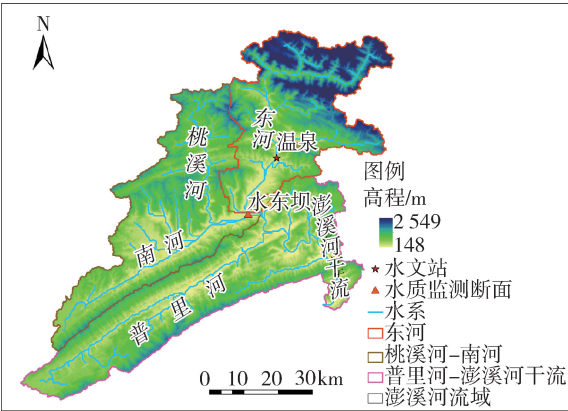


图 1 彭溪河流域
Fig.1 Pengxi River Basin

2 模型构建

2.1 WRF 模型

WRF 模型是完全可压缩的非静力中尺度模型,模型水平方向采用 Arakawa-C 网格,垂直方向采用地形跟随坐标系;采用 Runge-Kutta 时间积分方案求解非静力欧拉方程,在中尺度天气模拟预报方面表现出突出的优势^[23]。本文设置双层嵌套区域,格点水平分辨率分别为 9 km 和 3 km, WRF 格点设置和彭溪河流域 6 个气象站点分布如图 2 所示,其中,彭溪河流域内共设置 568 个 3 km × 3 km 格点。将 ERA-interim 再分析数据集作为 WRF 模型的初始场和边界条件,采用国家气象观测站数据进行数据同化校正,模型运行时间为 2009—2012 年,输出时间间隔为 24 h。

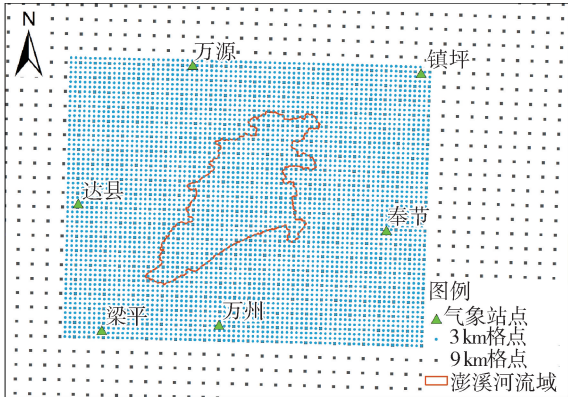


图 2 WRF 模型格点
Fig.2 WRF model lattice

2.2 非点源模型

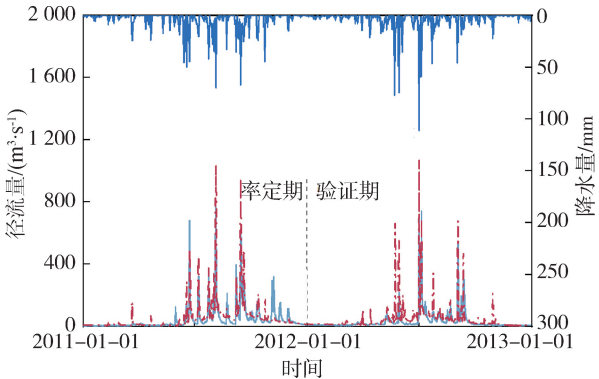
SWAT 模型是基于过程的分布式水文模型,通过将流域划分为子流域和水文响应单元(hydrological response unit, HRU)模拟预测复杂流域的水文过程和产流产污规律^[7]。模型以 HRU 为基本计算单元,再汇集到子流域中,将多个子流域汇集成整个流域进行计算,模拟流域径流过程和污染物迁移转化规律。

本文分别将气象站降水和 WRF 模型输出降水作为 SWAT 模型的输入,采用单向耦合方式将 WRF 模型内层嵌套的 3 km × 3 km 精细格点上模拟的降水过程通过数据处理和尺度转换输入 SWAT 模型,进行流域径流和非点源污染模拟。输入 SWAT 模型的污染源包括点源和附加非点源,其中点源主要包括工业点源和城镇污水处理厂,非点源主要包括农村生活污水、畜禽养殖和农业化肥等。

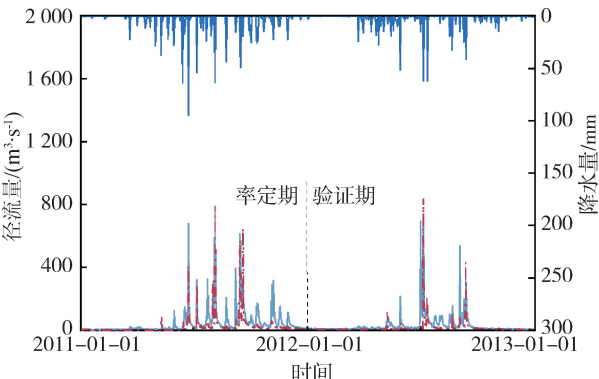
2.3 模型率定与验证

本文采用 Pearson 相关系数(r)和均方根误差(RMSE)2 个指标对 WRF 模型降水模拟效果进行评

— 实测值 — 模拟值 — 降水量



(a) WRF 降水模拟径流



(b) 气象站降水模拟径流

图 3 径流率定验证

Fig. 3 Calibration and verification of runoff

3 结果与分析

3.1 降水量时空分布

WRF 模型模拟降水和气象站降水过程如图 5 和图 6 所示。WRF 模型模拟降水量与气象站降水量峰值对应较好,流域内 60% ~ 80% 的降水量集中在 6—9 月,降水量峰值多出现在 7—8 月,降水量较少的月份出现在 11 月至次年 3 月,呈现出明显的丰枯月差异。WRF 模型模拟的日降水量最大值为 141.4 mm,气象站日降水量最大值为 122.6 mm; WRF 模拟的月均降水量约为 120 mm,月降水量最大值为 585.7 mm;气象站月均降水量约为 95 mm,月降水量最大值为 340.9 mm。

WRF 模型模拟的 2011 年 3 月、6 月、9 月和 12 月降水量空间分布如图 7 所示,降水量呈精细格点状分布,空间异质性明显,4 个典型月降水量均呈现出从东北向西南递减趋势,降水量较多的区域主要分布在流域东北部和南部边缘等区域,这些区域多为海拔较高的林地和草地,对水汽具有阻挡抬升作用,容易形成降水^[25]。

从各格点单元月降水量看,彭溪河流域 3 月、6 月、9 月和 12 月格点单元降水量最大值分别为 209 mm、

价^[23],采用决定系数(R^2)评价 SWAT 模型对径流量、总磷(TP)和总氮(TN)的模拟效果^[8]。

选取彭溪河流域周围 6 个气象站点 2009—2012 年逐日连续降水观测数据对 WRF 模型降水模拟效果进行评价。如表 1 所示,日尺度降水模拟的 r 为 0.27 ~ 0.44, RMSE 为 7.43 ~ 12.83 mm/d;月尺度降水模拟的 r 为 0.58 ~ 0.89, RMSE 为 65.76 ~ 175.39 mm/月。模拟效果与现有研究结果接近^[23-24],模拟效果较为可靠,可用于研究降水对流域径流和污染负荷时空分布的影响。

表 1 WRF 模型模拟降水验证结果

Table 1 Verification results of simulated precipitation from WRF model

站点	r		RMSE	
	日尺度	月尺度	日尺度/ (mm · d ⁻¹)	月尺度/ (mm · 月 ⁻¹)
奉节	0.44	0.66	9.27	91.02
万州	0.40	0.67	10.30	95.09
梁平	0.30	0.58	9.68	94.98
达县	0.34	0.75	10.97	121.70
万源	0.38	0.89	12.83	175.39
镇坪	0.27	0.61	7.43	65.76

采用彭溪河流域温泉水文站的逐日径流监测数据对 SWAT 模型径流过程模拟效果进行评价,以 2011 年为模型率定期,2012 年为验证期,模拟效果如表 2 和图 3 所示。采用 WRF 模型输出降水的径流模拟精度均高于采用气象站降水,验证期模型径流模拟精度提高了 27%,径流模拟结果满足模型模拟精度要求。因此,基于 WRF 模型输出降水构建的 SWAT 模型可用于模拟彭溪河流域径流过程。

表 2 SWAT 模型径流和水质率定验证结果

Table 2 Calibration and verification results of runoff and water quality from SWAT model

降水数据类型	R^2					
	径流		TP		TN	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
WRF 模拟	0.76	0.70	0.71	0.68	0.58	0.68
气象站	0.61	0.55	0.64	0.52	0.52	0.50

采用彭溪河流域水东坝监测断面逐月水质监测数据对 SWAT 模型水质模拟效果进行评价,以 2011 年为模型率定期,2012 年为验证期,模拟效果如表 2 和图 4 所示。采用 WRF 模型输出降水的水质模拟精度均高于采用气象站降水,验证期模型 TP 质量浓度模拟精度提高了 31%,TN 质量浓度模拟精度提高了 36%,水质模拟结果满足模型模拟精度要求。因此,基于 WRF 模型输出降水构建的 SWAT 模型可用于彭溪河流域非点源污染研究。

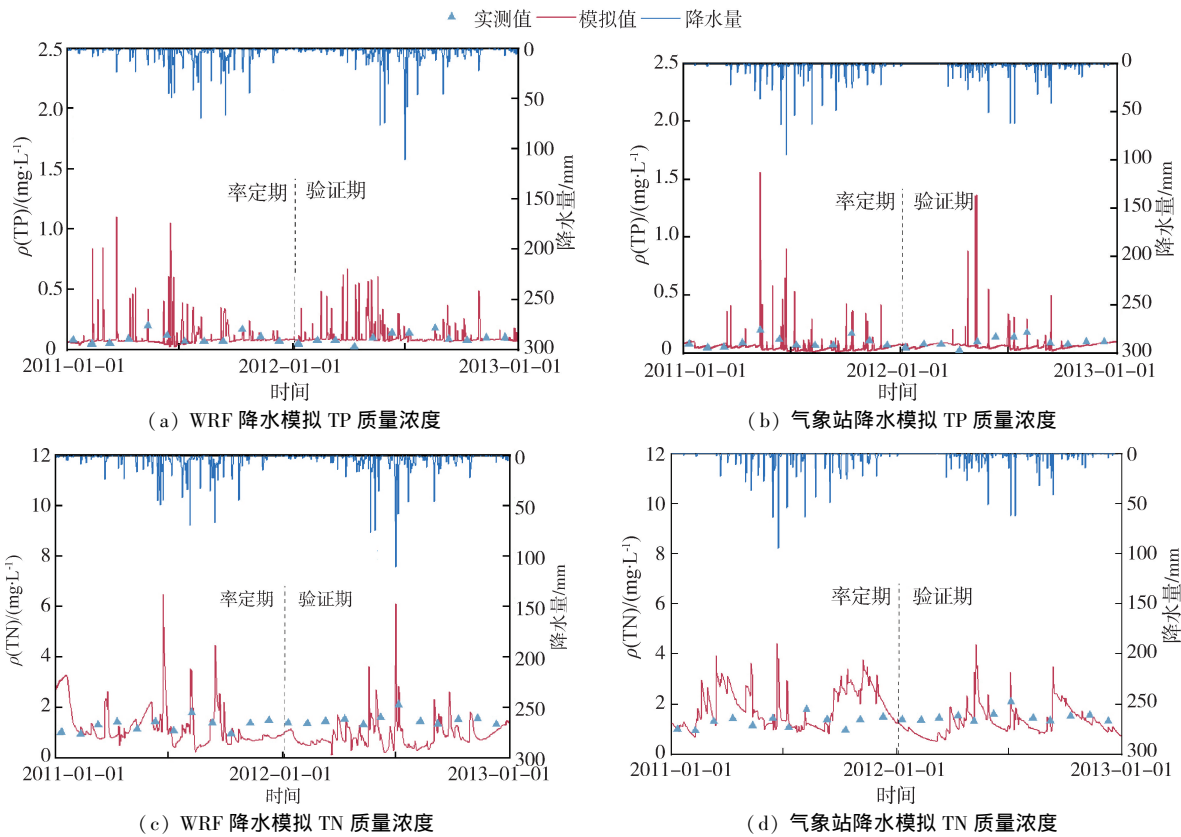


图 4 水质率定验证

Fig. 4 Calibration and verification of water quality

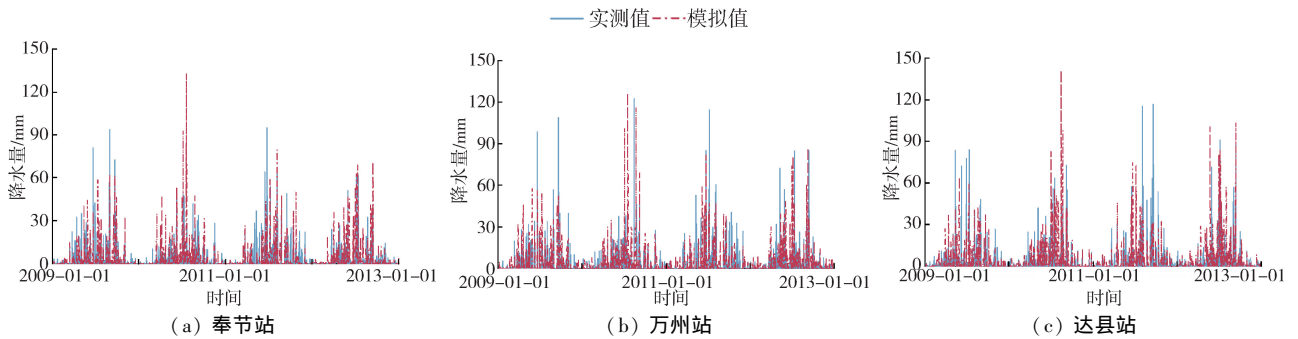


图 5 日降水过程

Fig. 5 Daily precipitation process

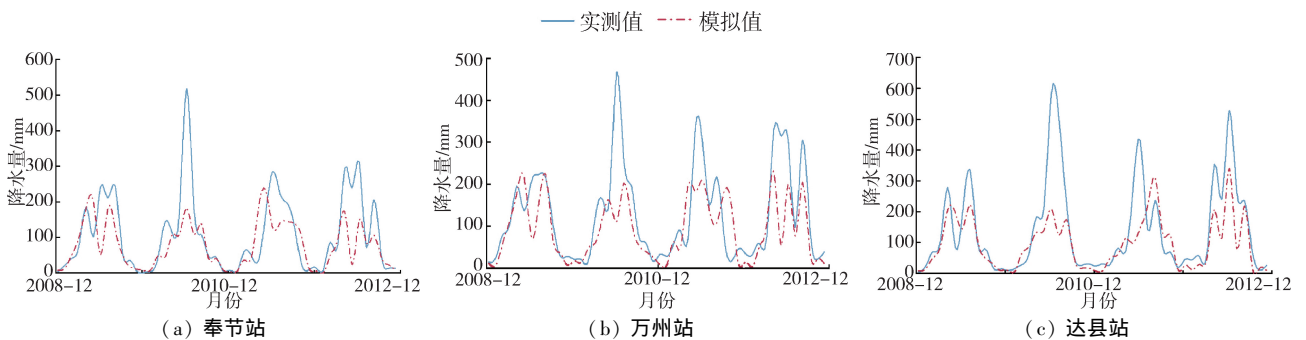


图 6 月降水过程

Fig. 6 Monthly precipitation processes

699 mm、553 mm 和 82 mm。从区域分布上,3 月最大降水量从大到小依次分布在东河、桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流;6 月和 9 月最大降水量从大到小

依次分布在东河、普里河-澎溪河干流、桃溪河-南河;12 月最大降水量从大到小依次分布在普里河-澎溪河干流、东河、桃溪河-南河。

从各区域月平均降水量来看,月平均降水量最大的区域均集中在东河,3月、6月、9月和12月东河月平均降水量分别为92 mm、268 mm、272 mm和43 mm,各区域月平均降水量从大到小依次为:东河、桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流。

3.2 径流量时空分布

采用 WRF 模型输出的降水数据作为非点源模型输入条件,模拟的澎溪河流域 2010—2012 年年径流量分别为 54.04 亿 m³、42.54 亿 m³和 35.28 亿 m³,呈下降趋势。澎溪河流域多年平均年径流量约为 35.80 亿 m³[26],基于 WRF 模型降水数据模拟的年径流量范围与 Shi 等[7]研究中模拟的年径流量范围 31.90 亿~47.30 亿 m³接近。

基于 WRF 模型输出降水模拟的澎溪河流域地表径流深空间分布如图 8 所示,整体上呈现东北部大、东南部次之、中部最小的规律。2010—2012 年,澎溪河流域径流深总体呈现出逐年递减的趋势,年平均径流深依次为 1 617 mm、1 270 mm 和 1 021 mm,平均径流深最大的区域均集中在东河,各区域平均径流深由大到小依次为:东河、桃溪河-南河、普里

河-澎溪河干流。径流深大于 1 200 mm 的子流域单元集中分布在东河东北部,径流深小于 500 mm 的子流域单元多集中在普里河北岸以及澎溪河干流附近。流域东北部地势高,对水汽具有阻挡抬升作用,易形成降水,增加了流域产流量;流域南部植被覆盖度较高,水源涵养能力较强,产流相对其他区域较小。

3.3 非点源负荷时空分布

采用 WRF 模型输出的降水数据作为非点源模型输入条件,模拟的澎溪河流域 2010—2012 年 TP 负荷分别为 1 402.50 t/a、1 140.06 t/a 和 911.50 t/a,均值为 1 151.35 t/a; TN 负荷量分别为 14 503.39 t/a、11 487.39 t/a 和 9 288.37 t/a,均值为 11 759.72 t/a,总体呈下降趋势,与径流量变化趋势吻合度较高。高银超等[26]研究中,澎溪河流域 TN 负荷年均值为 8 335.23 t/a,石茆原等[7]研究中澎溪河流域 TP 负荷范围为 802~1 432 t/a, TN 负荷范围为 7 674~13 775 t/a,与本文研究结果接近。

基于 WRF 模型输出降水模拟的澎溪河流域氮磷负荷空间分布如图 9 和图 10 所示。TN、TP 负荷

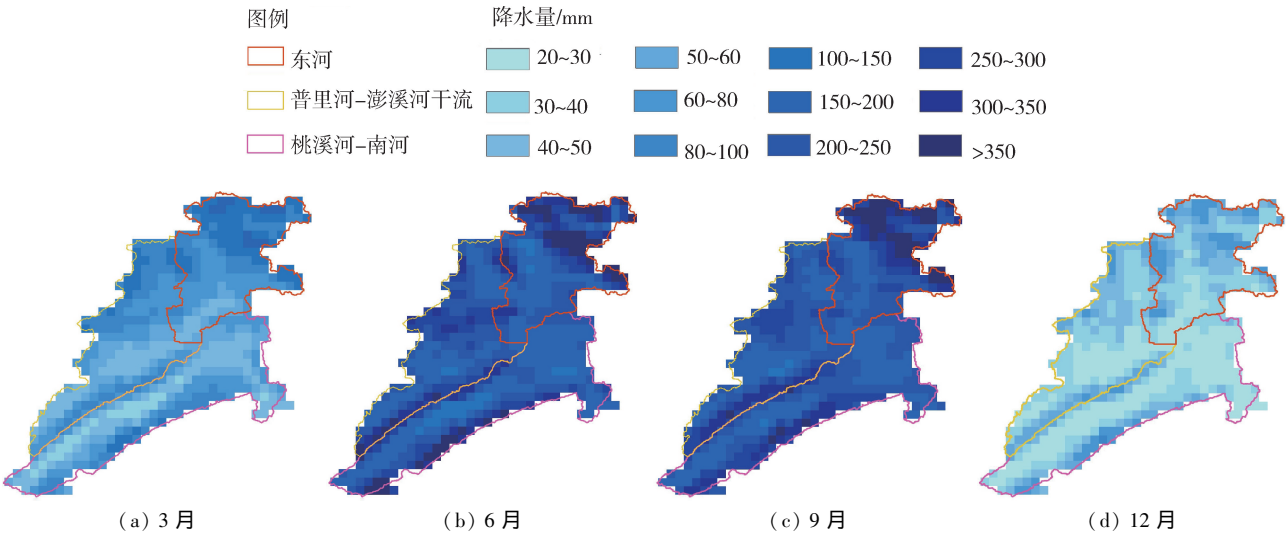


图 7 WRF 模型模拟的降水量空间分布
Fig.7 Spatial distribution of precipitation simulated with WRF model

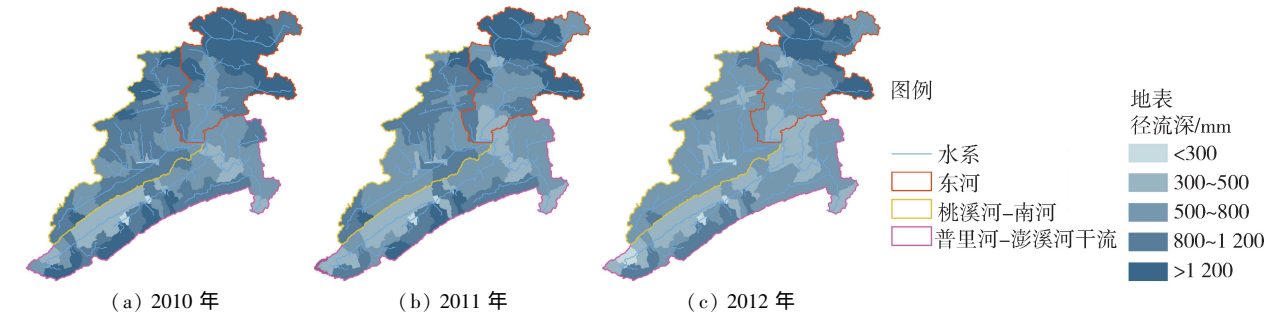


图 8 基于 WRF 模型降水模拟的径流深空间分布
Fig.8 Spatial distribution of runoff depth simulated with WRF precipitation from WRF model

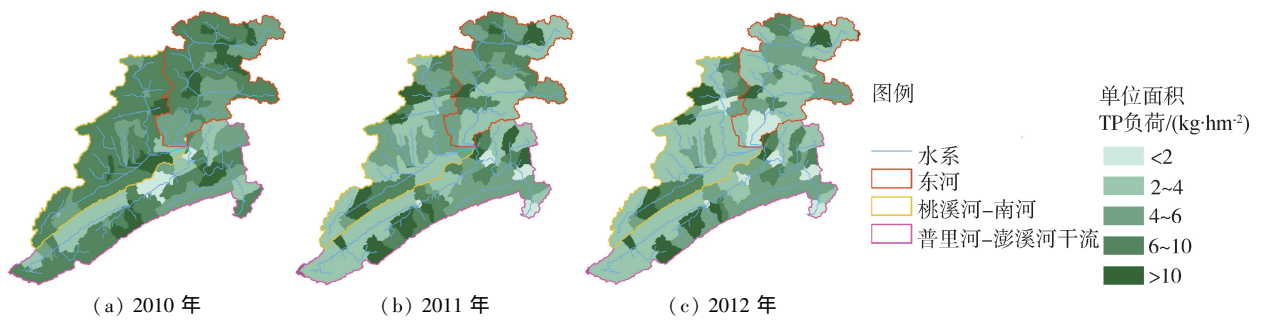


图9 基于 WRF 模型降水模拟的 TP 负荷空间分布

Fig.9 Spatial distribution of TP simulated with precipitation from WRF model

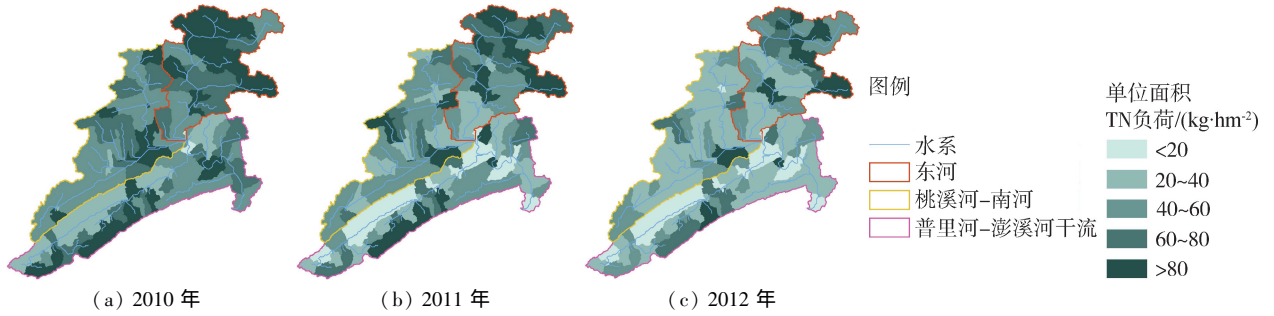


图10 基于 WRF 模型降水模拟的 TN 负荷空间分布

Fig.10 Spatial distribution of TN simulated with precipitation from WRF model

空间分布总体呈现出“局部集中、靠近水体”的特点^[27]。2010 年, 澎溪河流域各区域最大单位面积 TP 负荷为 8.00 kg/hm^2 , 各区域单位面积 TP 负荷由大到小依次为: 东河、桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流; 2011 年, 各区域最大单位面积 TP 负荷为 11.99 kg/hm^2 , 各区域单位面积 TP 负荷由大到小依次为: 桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流、东河; 2012 年, 各区域最大单位面积 TP 负荷为 9.27 kg/hm^2 , 各区域单位面积 TP 负荷由大到小依次为: 桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流、东河。2010—2012 年, 澎溪河流域单位面积 TN 负荷最大的区域均为东河, 单位面积 TN 负荷量依次为 99.58 kg/hm^2 、 81.37 kg/hm^2 和 62.23 kg/hm^2 , 各区域单位面积 TN 负荷由大到小依次为: 东河、桃溪河-南河、普里河-澎溪河干流。单位面积 TP 负荷高于 10 kg/hm^2 的子流域单元主要集中于东河东北部、桃溪河西岸、南河上游两岸和普里河南岸; 单位面积 TN 负荷高于 80 kg/hm^2 的子流域单元主要集中于东河东北部、普里河南岸。流域东北部区域海拔较高、坡度较大, 降雨冲刷作用强, 易造成水土和养分流失; 流域南部耕地和草地面积比例较大, 农药化肥使用量大, 导致该区域非点源污染负荷增大^[28]。

4 结 论

a. 本文构建的 WRF 模型模拟的降水呈精细格点状分布, 对日尺度降水模拟的相关系数最大可达

到 0.44, RMSE 为 $7.43 \sim 12.83 \text{ mm/d}$; 月尺度降水模拟的相关系数最大可达到 0.89, RMSE 为 $65.76 \sim 175.39 \text{ mm/月}$, 模拟效果较好。

b. 基于 WRF 模型, 构建了能反映流域 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 精细格点降水的流域非点源污染预测模型。与由澎溪河流域 6 个气象站点 2009—2012 年观测降水资料得到的模拟结果相比, 基于 WRF 模型输出降水的径流量模拟精度提高了 27%, TP 和 TN 质量浓度模拟精度分别提高了 31% 和 36%。

c. 采用 WRF 模型输出降水模拟的澎溪河流域年径流量范围为 $35.28 \text{ 亿} \sim 54.04 \text{ 亿 m}^3$, 径流深大于 1200 mm 的子流域单元分布在东河东北部, 年径流量表现出较明显的空间异质性。

d. 基于 WRF 模型输出降水模拟的 TP 负荷范围为 $911.50 \sim 1402.50 \text{ t/a}$, TN 负荷范围为 $9288.37 \sim 14503.39 \text{ t/a}$ 。单位面积 TP 负荷高于 10 kg/hm^2 的子流域单元主要集中于东河东北部、桃溪河西岸、南河上游两岸和普里河南岸; 单位面积 TN 负荷高于 80 kg/hm^2 的子流域单元多集中在东河东北部、普里河南岸, 空间分布差异显著。

参考文献:

- [1] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 941-952. (XIA Jun, ZHAI Xiaoyan, ZHANG Yongyong. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models[J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 941-952.

- (in Chinese))
- [2] CHEN X M, XU G H, ZHANG W S, et al. Spatial variation pattern analysis of hydrologic processes and water quality in Three Gorges Reservoir area[J]. Water, 2019, 11(12): 2608.
 - [3] 付超, 苏晶, 赵海萍, 等. 基于 GIS 的漳河上游城市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 60-66. (FU Chao, SU Jing, ZHAO Haiping, et al. Estimation of urban non-point source pollution load in upper reaches of Zhanghe River based on GIS [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 60-66. (in Chinese))
 - [4] 陈晓丽, 雷勇, 黄国如. 北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 44-48. (CHEN Xiaoli, LEI Yong, HUANG Guoru. Evaluation on non-point source pollution in Feilaixia Reservoir Area of Beijiang River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 44-48. (in Chinese))
 - [5] 代俊峰, 全秋慧, 方荣杰, 等. 漓江流域上游非点源污染负荷估算[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 57-63. (DAI Junfeng, QUAN Qiuhui, FANG Rongjie, et al. Estimation of non-point source pollution load in upstream of Lijiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 57-63. (in Chinese))
 - [6] CHENG M L, WANG Y G, BERNARD E, et al. Performance assessment of spatial interpolation of precipitation for hydrological process simulation in the Three Gorges Basin[J]. Water, 2017, 9(11): 838.
 - [7] SHI Y Y, XU G H, WANG Y G, et al. Modelling hydrology and water quality processes in the Pengxi River Basin of the Three Gorges Reservoir using the soil and water assessment tool [J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 24-38.
 - [8] 程美玲, 高飞, 王永桂, 等. 基于水汽输送与 IDW 法耦合的降雨插值方法研究[J]. 人民长江, 2017, 48(8): 23-27. (CHENG Meiling, GAO Fei, WANG Yonggui, et al. Study on precipitation interpolation method based on coupling water vapor transport with IDW method [J]. Yangtze River, 2017, 48(8): 23-27. (in Chinese))
 - [9] 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 等. 降水空间异质性的非点源关键源区识别面积变化的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4564-4571. (GAO Xiaoxi, ZUO Depeng, MA Guangwen, et al. Impact of spatial heterogeneity of precipitation on the area change in critical source area of non-point sources pollution [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4564-4571. (in Chinese))
 - [10] 黄国如, 陈晓丽, 任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 9-16. (HUANG Guoru, CHEN Xiaoli, REN Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 9-16. (in Chinese))
 - [11] 李家科, 彭凯, 郝改瑞, 等. 黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 90-102. (LI Jiako, PENG Kai, HAO Gairui, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 90-102. (in Chinese))
 - [12] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))
 - [13] 李运龙, 熊立华, 闫磊. 基于地理加权回归克里金的降水数据融合及其在水文预报中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1359-1368. (LI Yunlong, XIONG Lihua, YAN Lei, et al. A geographically weighted regression kriging approach for TRMM-rain gauge data merging and its application in hydrological forecasting [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1359-1368. (in Chinese))
 - [14] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 9-18. (LEI Xiaohui, WANG Hao, LIAO Weihong, et al. Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 9-18. (in Chinese))
 - [15] 陈华, 盛晟, 夏润亮, 等. 基于矩阵分解的降水时空插值方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 35-41. (CHEN Hua, SHENG Sheng, XIA Runliang, et al. Spatiotemporal interpolation method of rainfall based on matrix decomposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 35-41. (in Chinese))
 - [16] 殷志远, 王志斌, 李俊, 等. WRF 模式与 Topmodel 模型在洪水预报中的耦合预报试验研究[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 672-684. (YIN Zhiyuan, WANG Zhibin, LI Jun, et al. An experimental study on the prediction of flood using coupled WRF-Topmodel model. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(4): 672-684. (in Chinese))
 - [17] RUMMLER T, ARNAULT J, GOCHISD, et al. Role of lateral terrestrial water flow on the regional water cycle in a complex terrain region: investigation with a fully coupled model system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124: 507-529.
 - [18] RAN L, YUAN Y, COOTER E, et al. An integrated agriculture, atmosphere, and hydrology modeling system for ecosystem assessments [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11(12): 4645-4668.
 - [19] 郝春沣, 贾仰文, 王浩. 气象水文模型耦合研究及其在渭河流域的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1042-1049. (HAO Chunfeng, JIA Yangwen, WANG Hao. Atmospheric and hydrological models' coupling and application in flood forecasting of the Weihe Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1042-1049. (in Chinese))
 - [20] CURIO J, MAUSSION F, SCHERER D. A 12-year high-resolution climatology of atmospheric water transport over the Tibetan Plateau [J]. Earth System Dynamics, 2015, 6(1): 109-124.

- [21] LEE M H, BAE D H, IM E S. Effect of the horizontal resolution of climate simulations on the hydrological representation of extreme low and high flows [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33: 4653-4666.
- [22] YUAN Y, WANG R, COOTER E, et al. Integrating multi-media models to assess nitrogen losses from the Mississippi River Basin to the Gulf of Mexico [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2018, 15(23): 7059-7076.
- [23] GAO J, HOU W, XUE Y, et al. Validating the dynamic downscaling ability of WRF for East Asian summer climate [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 128: 241-253.
- [24] SOARES P M, CARDOSO R M, MIRANDA P M, et al. WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal [J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(9/10): 2497-2522.
- [25] 陈祥义, 肖文发, 黄志霖, 等. 1951—2012 年三峡库区降水时空变化研究 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1310-1315. (CHEN Xiangyi, XIAO Wenfa, HUANG Zhilin, et al. Spatiotemporal distribution of precipitation in Three Gorges Reservoir Area (TGRA) during 1951-2012 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1310-1315. (in Chinese))
- [26] 高银超, 鲍玉海, 唐强, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域非点源污染负荷评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(增刊 1): 119-126. (GAO Yinchao, BAO Yuhai, TANG Qiang, et al. Applying annagnps to estimate non-point pollution loading from Xiao Jiang Basin in the Three Gorges [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21 (Sup 1): 119-126. (in Chinese))
- [27] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(5): 1484-1492. (GENG Renzhe, WANG Xiaoyan, JIAO Shuai, et al. Application of improved export coefficient model in estimating non-point source nutrient load from Miyun Reservoir watersheds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1484-1492. (in Chinese))
- [28] 张皓天, 张弛, 周惠成, 等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(6): 644-650. (ZHANG Haotian, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, et al. Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(6): 644-650. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-01-18 编辑: 施业)

(上接第 159 页)

- [44] 龚元石, 陆锦文, HUWE B, 等. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算 [J]. *北京农业大学学报*, 1993(增刊 1): 82-91. (GONG Yuanshi, LU Jinwen, HUWE B, et al. Estimation of irrigation water demand for main crops in North China Plain [J]. *Journal of Beijing Agricultural University*, 1993(Sup 1): 82-91. (in Chinese))
- [45] 朱瑾瑾, 孙军娜, 张振华, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 113-117. (ZHU Jinjin, SUN Junna, ZHANG Zhenhua, et al. Effect of alternate irrigation of saline and fresh water on water and salt transport in coastal saline alkali soil [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2019, 26(5): 113-117. (in Chinese))
- [46] 王海霞. 黄河三角洲典型地区冬小麦微咸水灌溉的土壤水盐特征及运移模拟研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [47] 王海霞, 徐征和, 庞桂斌, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 291-297. (WANG Haixia, XU Zhenghe, PANG Guibin, et al. Effects of brackish water irrigation on soil water and salt distribution and winter wheat growth [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 291-297. (in Chinese))
- [48] 张凌云, 王智华, 魏立兴. 盐碱地冬闲棉田复种模式探索 [J]. *中国棉花*, 2019, 46(12): 31-32. (ZHANG Lingyun, WANG Zhihua, WEI Lixing. Exploration on multiple cropping mode of winter fallow cotton field in saline alkali soil [J]. *China Cotton*, 2019, 46(12): 31-32. (in Chinese))
- [49] 高树琴, 王竑晟, 段瑞, 等. 关于加大在中低产田发展草牧业的思考 [J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(2): 166-174. (GAO Shuqin, WANG Hongsheng, DUAN Rui, et al. Thoughts on increasing the development of grass husbandry in medium and low yield fields [J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(2): 166-174. (in Chinese))
- [50] 张玉娟, 宫慧慧, 游均, 等. 黄河三角洲盐碱地芝麻丰产栽培技术 [J]. *中国农技推广*, 2020, 36(2): 45-46. (ZHANG Yujuan, GONG Huihui, YOU Jun, et al. High yield cultivation techniques of sesame in saline alkali soil of Yellow River Delta [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2020, 36(2): 45-46. (in Chinese))
- [51] 厉广辉, 侯蕾, 夏晗, 等. 黄河三角洲盐碱地发展芦笋产业的优势与措施 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52(4): 159-163. (LI Guanghui, HOU Lei, XIA Han, et al. Advantages and measures of asparagus industry development in saline alkali land of Yellow River Delta [J]. *Shandong Agricultural Science*, 2020, 52(4): 159-163. (in Chinese))
- [52] 秦基皓. 粮饲种植模式对滨海盐碱地作物产量及土壤水盐动态的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [53] 王兴军, 侯蕾, 厉广辉, 等. 黄河三角洲盐碱地高效生态利用新模式 [J]. *山东农业科学*, 2020, 52(8): 128-135. (WANG Xingjun, HOU Lei, LI Guanghui, et al. A new model of efficient ecological utilization of saline alkali land in the Yellow River Delta [J]. *Shandong Agricultural Science*, 2020, 52(8): 128-135. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-11-08 编辑: 施业)