

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.009

基于地表地下双拦蓄网格模型的清水河流域“23·7”洪水模拟复盘

张媛媛¹, 姚成^{1,2}, 王容³, 杨丰源⁴, 龚珺夫⁵, 白云鹏⁴, 郑爱民⁴, 杜昀宸⁴

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 河海大学中国气象局水文气象重点开放实验室;

3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心); 4. 河北省水文勘测研究中心; 5. 河海大学农业科学与工程学院)

摘要: 针对海河流域“23·7”特大暴雨洪水事件,选取清水河北辛店流域为研究对象,基于网格新安江模型构建了耦合地表与地下拦蓄模块的双拦蓄网格模型,对“23·7”洪水过程进行了模拟复盘,并分析了降雨-土壤水-地下水响应关系以及地表与地下拦蓄水库的调蓄效应。结果表明:对1980—2000年的11场历史洪水,双拦蓄网格模型模拟径流深合格率达100%,洪峰合格率64%,确定性系数大于0.5的场次占64%,优于网格新安江模型和研究流域现有预报方案;对于“23·7”洪水过程,双拦蓄网格模型模拟的洪峰、径流深误差均控制在4%以内,确定性系数为0.91;土壤湿度的时空变化对“23·7”洪水形成与消退过程具有调控作用,双拦蓄网格模型地表拦蓄模块具有拦洪削峰效应,地下拦蓄模块使退水曲线吻合度提升。

关键词: 双拦蓄网格模型;海河“23·7”特大洪水;洪水预报;复盘分析;北辛店流域;清水河流域

Retrospective simulation of “23·7” flood event in Qingshui River basin based on surface-subsurface dual retention grid model

Zhang Yuanyuan¹, Yao Cheng^{1,2}, Wang Rong³, Yang Fengyuan⁴, Gong Junfu⁵, Bai Yunpeng⁴, Zheng Aimin⁴, Du Yunchen⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

2. Key Laboratory of Hydro-Meteorology, China Meteorological Administration, Hohai University;

3. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources;

4. Hydrological Survey and Research Center of Hebei Province;

5. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University)

Abstract: In response to the “23·7” extreme storm-flood event in the Haihe River basin, the Beixindian watershed of the Qingshui River was selected as the study area. Based on the grid Xin’ anjiang model, a dual retention grid model was developed by coupling surface and subsurface retention modules. The “23·7” flood process was retrospectively simulated, and the rainfall-soil water-groundwater response relationship and the regulation and storage effects of the surface and subsurface retention reservoirs were analyzed. The results show that for 11 historical flood events from 1980 to 2000, the dual retention grid model achieves a 100% qualification rate for runoff depth and a 64% qualification rate for flood peaks, and the proportion of events with a deterministic coefficient greater than 0.5 is 64%, which are superior to the grid Xin’ anjiang model and the existing forecasting schemes in the study basin. For the “23·7” flood process, the simulated errors of flood peak and runoff depth by the dual retention grid model are constrained within 4%, with a deterministic coefficient of 0.91. The spatiotemporal variation of soil moisture has a regulating effect on the formation and recession processes of the “23·7” flood. The surface retention module of the dual retention grid model has a flood-retention and peak-reduction effect, and the subsurface retention module improves the agreement of the recession curve.

Key words: dual retention grid model; “23·7” extreme flood in Haihe River; flood forecasting; retrospective analysis; Beixindian watershed; Qingshui River basin

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3211400);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240203007);水利部重大科技项目(SKS-2022136)

作者简介: 张媛媛(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:231301010121@hhu.edu.cn

通信作者: 姚成(1982—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn

随着城市化进程的加速与全球气候变暖,我国极端降雨事件频发^[1],其中海河流域因其特殊地理位置成为极端暴雨多发区。如 1963 年 8 月,受台风影响,海河流域出现持续性特大暴雨,创全国暴雨极值,产洪总量 301 亿 m³^[2]。2012 年 7 月,京津冀地区遭遇 1951 年以来最强降水天气过程^[3]。2023 年 7 月 28 日至 8 月 1 日,海河流域受台风“杜苏芮”残余环流叠加地形抬升等综合影响,引发海河流域极为罕见的强降雨过程,呈现“降雨总量极大、洪水量级极大”特点:全流域累计降水量 494 亿 m³,洪水径流量约 200 亿 m³,均创“63·8”洪水后最大值^[4]。此次“23·7”暴雨导致海河流域发生自 1963 年以来首次流域性特大洪水,洪水过程随降雨过程移动自南向北出现,导致先后 22 条河流超警戒水位,7 条河流超保证水位,8 条河流突破历史实测洪水位,其中子牙河、永定河和大清河相继发生编号洪水^[5]。

作为典型半湿润流域,海河流域人口密度高且人类活动剧烈^[6],近年来其洪水预报精度受下垫面影响有恶化趋势。据 2018 年海河流域洪水预报方案数据显示^[7],仅 38%的预报断面精度达到 B 级及以上标准,10%的断面处于 C 级,而其余 52%的断面预报精度较差,甚至无法评级。水利部海河水利委员会指出,海河流域洪水预报精度较差的主要原因是人类活动引起的下垫面变化导致产汇流机制发生改变,目前下垫面的剧烈变化主要归因于地下水超采导致包气带增厚、水利基础设施的密集建设和城市不透水面的增加,而传统水文模型无法精确考虑到这些改变,这一现象普遍存在于海河流域和大多数地下水过度开采的半湿润地区^[8]。

近年来,学者们对海河流域的人类活动响应进行了大量水文模拟研究。例如:段新光等^[9]针对高强度人类活动影响下原有模型适应性不足的问题,通过在模型结构中加入水利工程调度模块,并提出调度反演方法,显著提升了缺资料地区的洪水预报精度;李致家等^[10]应用新安江模型与新安江-海河模型在海河流域进行对比分析,得出在人类活动影响较大的流域,新安江-海河模型模拟效果更好;张珂等^[11]提出了考虑地表水利工程和地下水开采双重人类活动影响的半湿润地下水超采区分布式水文模型,该模型在清水河流域的模拟效果比新安江-海河模型更好。针对“23·7”特大洪水,吴滨滨等^[12]基于 IFMS/Urban 软件构建了蓄滞洪区一维-二维水动力学耦合模型,模拟结果与遥感检测及实测数据吻合度较高;蔡阳^[13]对降雨特性开展了深入剖析,并耦合数字孪生平台对流域防洪“四预”体系效能进行了评估,归纳了存在的问题,进而提出了针对性优化措施。部分学者还对“23·7”洪水进行了复盘分析,如北京洪水复盘^[14]、永定河流域洪水复盘^[15]以及密云水库洪水复盘^[16]等。

关于“23·7”特大洪水,已有研究主要围绕降雨时空特征分析、防御工作及问题短板总结、蓄滞洪区洪水演进模拟以及复盘分析等方面开展,而对暴雨特性与水文过程中要素的关联研究较少。本文在分布式水文模型——双拦蓄网格模型(Grid-XAJ-DAR 模型)的基础上结合 PE-EUZI 方法^[17]计算张力水蓄水容量,融合多源遥感数据反演研究区内水库初始蓄水容量,选取清水河流域的典型子流域——北辛店流域开展“23·7”特大洪水复盘模拟,并系统分析暴雨-径流-调蓄全过程中水文要素的动态变化,以期为强降雨条件下的洪涝灾害预警提供技术支撑。

1 双拦蓄网格模型原理

双拦蓄网格模型是在网格新安江模型(Grid-XAJ 模型)分布式框架^[18]基础上构建的耦合人类活动干扰的流域降雨径流模型。该模型以 DEM 网格为计算单元,在植被截留和蒸散发计算部分与网格新安江模型相同,但在产汇流计算中考虑了地表水利工程与地下水超采:①通过考虑水库河闸等人类水利工程对产汇流的影响,新增了地表拦蓄模块;②通过考虑地下水超采造成的区域性地下漏斗现象(即产汇流过程中产生的地下径流可能无法汇入河道),新增了地下拦蓄模块。本文主要介绍双拦蓄网格模型中的新增模块,其他模块原理与网格新安江模型一致,详见文献[18]。

1.1 地表拦蓄模块

双拦蓄网格模型不考虑水库河闸的调节能力。各水库河闸的蓄水容量及所处位置通过遥感技术提取,并结合水利普查信息加以验证和完善。模型在河道网格上新增地表拦蓄库容 V_{chm} ,该库容在任意水库河闸以上河段的河道网格中共享,即每个河道网格的入流量都会汇入对应拦蓄主体中,消耗于蒸散发或灌溉。水源划分后,模型基于工程控制范围识别受控网格,其产流将优先被对应的拦蓄主体截留储存,仅当累计入流量超过 V_{chm} 时,超额流量才作为有效径流参与后续河网汇流。

1.2 地下拦蓄模块

双拦蓄网格模型在分水源部分新增了下层自由水库以及对应的参数。透水网格中表层自由水库中的自由水量会被划分为地表径流 R_s 、壤中流 R_i 和下层自由水库入流 F_d 。其中 F_d 与新安江模型中的地下径流 R_g 不同,为了模拟地下水开采导致地下渗漏的现象, F_d 将会流入下层自由水库中。该下渗过程通过 Green-Ampt 渗透方程^[19]进行描述:

$$f(t) = K\left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)}\right)$$
 (1)

式中: $f(t)$ 为下层自由水库流入能力, mm/h; K 为土壤饱和导水率, mm/h; ψ 为湿润锋处土壤吸力, mm; $\Delta \theta$ 为湿润锋处土壤含水量的变化量; $F(t)$ 为累计入渗量, mm。

下层自由水库入流受潜在入流量和下层自由水库入渗能力双重制约,故最终取二者中的较小值,第 t 时段下层自由水库入流 $F_{d,t}$ 为:

$$F_{d,t} = \min\{R_t + S_t - R_{s,t}, f(t) \Delta t\}$$
 (2)

式中: R_t 为第 t 时段的产流量, mm; S_t 为第 t 时段初上层自由水库中蓄存的自由水, mm; $R_{s,t}$ 为第 t 时段的地面径流, mm; Δt 为第 t 时段的时间步长, h。

只有当下层自由水库被蓄满时,超出下层自由水蓄水容量阈值 (S_{LM}) 的部分径流才能成为地下径流参与河网汇流过程^[11]。双自由水库通过概念化的方法,模拟了地下水位下降对地下径流的影响。

1.3 参数计算方法

网格新安江模型计算张力水蓄水容量的理论基于包气带厚度与地形指数存在负相关关系的假设,该假设能较好地刻画我国南方湿润地区的张力水蓄水容量空间异质性,但在地下水超采平原区存在局限性:无论地形指数的大小,开采井周围的地下漏斗区域均呈现较厚的包气带和较大的土壤含水量,并且未考虑城市化导致的不透水面扩张对张力水蓄水能力机制的影响。故本文采用 Chen 等^[17]提出的 PE-EUZI 方法,通过可蒸发包气带厚度以及不透水面比例计算张力水蓄水容量 W_M :

$$W_M = aD(\theta_{fc} - \theta_{wp})(1 - \sigma) + b$$
 (3)

式中: a 、 b 为待定系数; θ_{fc} 、 θ_{wp} 分别为田间持水量和凋萎含水量; σ 为不透水面所占比例; D 为可蒸发包气带厚度,指受蒸散发作用影响的包气带厚度,这部分土层下方的土壤含水量保持在田间持水量与饱和含水量之间。

待定系数 a 、 b 可通过网格单元中 $D(\theta_{fc} - \theta_{wp})(1 - \sigma)$ 的最大值、最小值对应的 W_M 最大值与最小值(一般取 0)确定。

双拦蓄网格模型的参数与流域地貌特征、土地利用类型、土壤类型、植被类型及地下水埋深等下垫面特征有着明确的关系^[19],其中大部分参数及其确定方法与网格新安江模型相同,新增了以下参数:流域出口断面河道下方弱不透水层高程 Z_i 、地下水位变动带给水度 μ 、水利工程防洪库容 V_f 和湿润锋处土壤吸力 ψ ,参数确定方法可参考文献[17-18,21]。中间参数初始水库蓄水量通过多源数据同化方法估算获得,该方法基于 GF1-WFV4 多光谱遥感数据反演水域面积,耦合地面实测数据及水库的水位-面积曲线与水位-库容曲线联合推求。

2 研究区概况与暴雨洪水过程分析

海河流域清水河水系是下泄白洋淀、维持淀区水文连通性以及入淀水量的重要支流。以清水河为研究对象,选取其控制站——北辛店水文站控制断面以上流域(地理坐标 38.6°N~39.2°N, 114.8°E~115.5°E)作为典型研究区(图 1)。研究流域面积约为 1 650 km²,主河道长 108.6 km,河道纵坡 3.0‰,属于华北半湿润山丘-平原过渡带。流域包含两大基本地貌单元:西北部为山地丘陵区,中部及东部为平坦开阔平原区,土层深厚疏松。流域内土壤以黏壤土为主,伴有砂壤土和

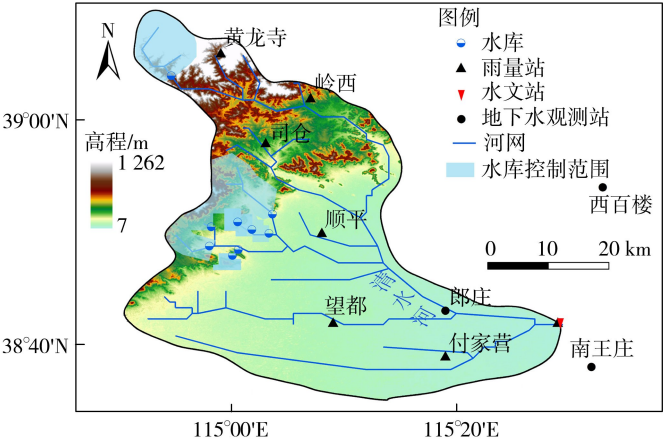


图 1 北辛店流域水系及水库控制范围
Fig. 1 River system and reservoir control areas in Beixindian watershed

粉壤土,主要作物为小麦、玉米、高粱及豆类等。

流域多年平均降水量为 460.0 mm,最大年降水量为 833.7 mm(2008 年),出口断面北辛店水文站 1966—2010 年多年平均年径流量为 0.29 亿 m³,实测最高洪峰水位为 19.70 m。该流域常年洪峰流量在 200 m³/s 以下,2023 年发生有记录以来第三大洪水,洪峰为 366 m³/s。流域内设有 1 个水文站、7 个雨量站、3 个地下水观测站、9 座水库。流域内地下水开采严重(2010 年平原区地下水位埋深已超 15 m),叠加流域内水库、闸坝等水利工程分布,形成典型的人类活动影响剧烈的地下水超采流域,加之洪水资料匮乏,洪水预报难度大。

2.1 “23·7”暴雨过程

“23·7”极端降雨发生于 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日,累计持续时间 82 h,降雨主峰集中在 48 h 内,具有雨量大、雨强突出、时段集中的特点。流域平均降水量为 489.0 mm,超过 1966—2010 多年平均值。暴雨中心主要位于上游岭西一带,空间分布极不均匀(图 2(a)):最大 1 h 降水量为北辛店水文站的 65.0 mm,最大 24、48 h 降水量为岭西雨量站的 357.8、580.8 mm,分别占单站累计降水量的 13%、53%和 86%。研究区内 7 个雨量站的总降水量介于 438.4 ~ 674.4 mm 之间,岭西站最大,付家营站最小,极差达 1.5 倍(图 2(b))。具体降雨过程:7 月 29 日暴雨雨量 77.0 mm;7 月 30 日特大暴雨雨量 324.3 mm,占整场降雨过程的 66%;7 月 31 日暴雨雨量 74.6 mm;8 月 1 日中雨雨量 13.2 mm。

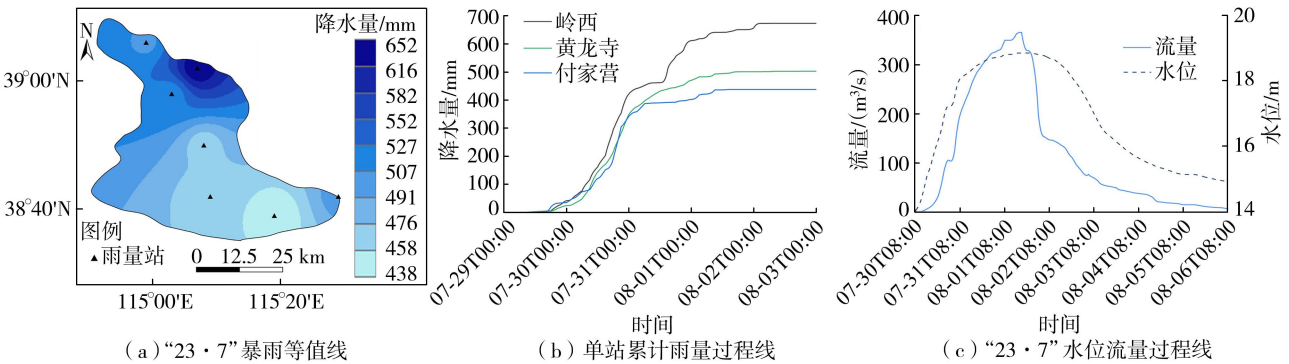


图 2 北辛店流域“23·7”暴雨洪水过程
Fig. 2 “23·7” storm-flood process in Beixindian watershed

2.2 洪水过程

本场洪水出现北辛店流域自 1989 年以来最大洪峰,位列历史第三大洪水。洪水演进过程分为 4 个阶段:①起涨阶段(7 月 29 日 8 时),降雨前初始水位为 13.88 m(相应流量为 0.37 m³/s);②涨洪阶段(7 月 30 日 8 时至 31 日 0 时),受降雨入渗补给作用,水位开始抬升并出现明显涨水过程,流量过程滞后 3 h,至 31 日 0 时水位涨至 17.14 m(流量 96 m³/s);③峰型变化阶段(7 月 31 日 1 时至 8 月 1 日 15 时),受雨强波动影响,出现短暂小洪峰后继续递增,但涨洪速率趋缓,至 8 月 1 日 15 时水位、流量分别达最大值 18.86 m、366 m³/s,峰现时间较降雨峰值滞后 44 h;④退水阶段(8 月 1 日 17 时至 7 日 7 时),流量过程线陡降,初期退水速率 18.5(m³·s⁻¹)/h,而后升至 29.2(m³·s⁻¹)/h,至 2 日 4 时进入平缓退水期,揭示地表径流快速消退与地下水延迟补给的耦合机制(图 2(c))。

2.3 研究数据

本文用到的数据包括 DEM 数据、土壤类型数据、全球 30 m 不透水面空间分布以及 CLDAS 数据,分别源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、联合国粮农组织(FAO)、中国科学院空天信息创新研究院^[22]以及中国气象局陆面数据同化系统。清水河流域的降水、蒸散发、实测径流量、河道水位资料、水利工程空间分布及拦蓄量、多年平均地下水埋深空间分布资料均来源于河北省水文水资源勘测局。地形指数、最陡坡度、累计汇水面积等地形特征均通过流域数字化及地貌特征提取系统(DWTES 系统)^[18]计算得到。

海河流域的洪水事件数据非常有限,清水河流域也不例外^[23]。除 2023 年外,2000 年之后该流域未发生较大洪水,鉴于清水河流域洪涝事件较少以及洪水预报的实际需求,选取洪峰流量大于 25 m³/s、具有完整实测数据的 12 场洪水开展参数率定与检验。基于清水河流域下垫面数据及同期雨水情数据,构建双拦蓄网格模型与网格新安江模型,计算时间步长为 1 h。

3 洪水模拟复盘分析

3.1 洪水过程模拟分析

基于式(3),本文对比了新安江模型^[24-25]、网格新安江模型和双拦蓄网格模型 3 种模型张力水蓄水容量分布曲线的模拟特性(蓄水容量曲线指数均取 0.4),结果显示,在标准化处理(最大单元蓄水量设为 1)条件下,网格新安江模型模拟的流域总蓄水量最小,新安江模型中等,双拦蓄网格模型最大(图 3)。这与双拦蓄网格模型综合考虑了地下水超采及城市化对张力水蓄水容量的影响有关,所以 PE-EUZI 方法更真实地反映了清水河流域地下水超采导致包气带增厚使得流域整体的张力水蓄水容量偏大的实际现状。

采用网格新安江模型和双拦蓄网格模型对清水河流域 11 场洪水数据进行模拟。所用模型参数大都可根据土壤类型和植被覆盖数据进行预估,或者从物理意义上与土壤类型与植被覆盖建立联系。网格新安江模型与双拦蓄网格模型待率定参数的优选结果为:蒸散发折算系数 K 均取值 0.9,河网水流消退系数 C_s 分别取值 0.95 和 0.50,河网汇流滞时 L_{ag} 分别取值 10h 和 11h,逐网格河道汇流参数 K_{ech} 分别取值 0.01h 和 0.02h,河道汇流比重因子 X_{ech} 分别取值 0.20 和 0.45,逐网格坡面汇流参数 K_{es} 均为 0.04h,坡面汇流比重因子 X_{es} 分别取值 0.1 和 0.4,流域出口断面河道下方弱不透水层高程 Z_i 取值 13.0 m。

为验证模型的实际应用效果,本文依据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,对 1980—2000 年的 11 场历史洪水进行模拟精度评估。目前清水河流域洪水预报由于缺乏合适且足够的洪水事件用于水文模型参数率定以及现有的水文模型适用性存疑,导致现有的预报方案洪峰合格率仅有 40%,预报效果较差^[17]。对清水河流域而言,洪峰模拟合格率和洪峰出现时间模拟合格率是流域管理机构最为关心的两项指标。验证结果表明,11 场洪水网格新安江模型径流深模拟合格率达 91%,洪峰合格率为 45%,峰现时间合格率 64%,确定性系数大于 0.5 的占比为 36%;双拦蓄网格模型径流深模拟合格率达 100%,洪峰模拟合格率为 64%,峰现时间达到 82%的合格率,确定性系数大于 0.5 的占比为 64%,整体精度都优于网格新安江模型。

图 4 为 1980—2000 年历史洪水率定期模拟结果。由图 4 可见:在历史洪水模拟的误差中,双拦蓄网格模型和网格新安江模型两者径流深平均相对误差分别为 11%和 12%,其中双拦蓄网格模型在 5 场洪水中误差更低,如 19890722 场次双拦蓄网格模型误差为-1.15 mm,网格新安江模型为 4.03 mm,显著减小了高估现象(图 4(a));两者洪峰平均相对误差分别为-18%和-21%,双拦蓄网格模型在 8 场洪水中表现更优,如 19800827 场次双拦蓄网格模型误差为 15.98%,网格新安江模型为 45.84%,中小洪峰捕捉能力显著提升(图 4(b));两者平均确定性系数分别为 0.56 和 0.45,其中双拦蓄网格模型在 9 场洪水中精度更高,典型场次如 19890722 场次,双拦蓄网格模型为 0.92,网格新安江模型为 0.86,反映其对洪水流量过程模拟还原能力更优(图 4(c))。可见双拦蓄网格模型通过耦合地表-地下调蓄机制,提升了强人类活动扰动地区的洪水

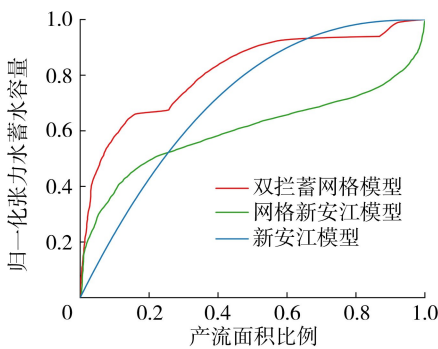


图 3 归一化张力水蓄水量计算方法对比
Fig.3 Comparison of calculation methods for normalized tension water storage capacity

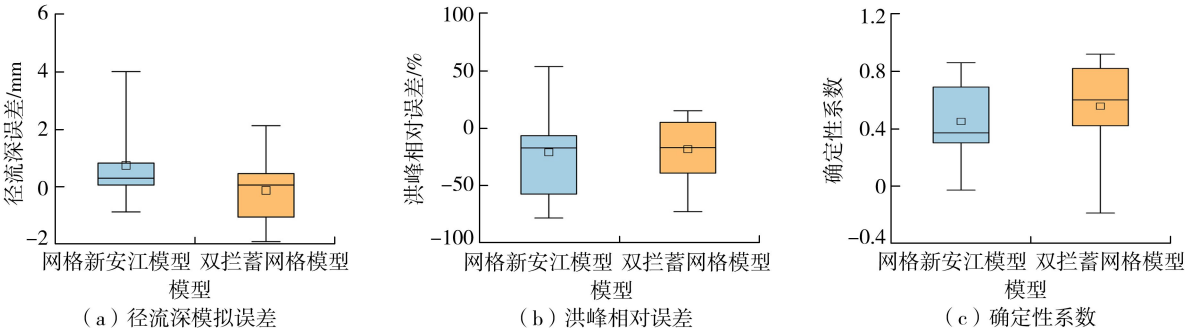


图 4 1980—2000 年历史洪水率定期模拟结果箱型图

Fig.4 Box plots of simulation results in calibration period of historical floods from 1980 to 2000

模拟精度与可靠性。

综合以上洪水场次模拟效果,发现双拦蓄网格模型在跨量级洪水适应性方面表现稳定,如图 5 所示,特大洪水(1989072201 场次)与较小洪水(1988081000 场次)的径流深相对误差分别在 5% 和 2% 以内,洪峰相对误差分别控制在 6% 和 3% 以内,确定性系数均优于网格新安江模型,证明其在高强度人类活动扰动地区的水文模拟可靠性。

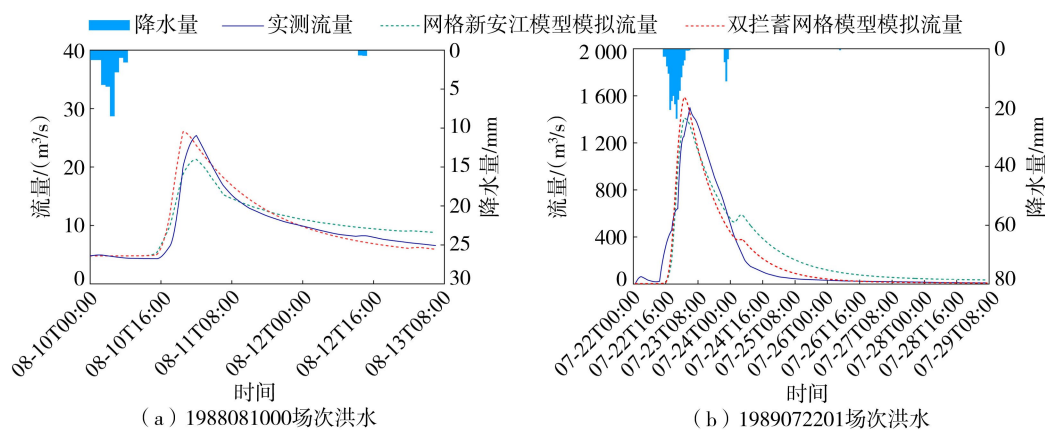


图 5 典型洪水模拟过程
Fig. 5 Simulation processes of typical floods

对于北辛店流域“23·7”洪水过程,双拦蓄网格模型的模拟效果较好(图 6)。根据洪水过程线来看,清水河流域洪水历时较长,洪水过程呈现“快速起涨—急剧消退—缓慢退水”的演变特征,模拟洪水过程线与实测过程趋势吻合良好,其中洪峰相对误差与径流深相对误差均控制在 4% 以内,确定性系数为 0.91,表明该模型能够较为准确地模拟以北辛店流域为代表的清水河流域洪水过程。但峰现时间误差较大,分析原因可能在于北辛店流域属于丘陵-平原过渡区,其主要产流区并非深山区,而平原区因长期地下水超采导致包气带厚度异常增厚,地表与地下径流比例发生改变,使得洪峰传播时间延长。

考虑水库、河闸等水利工程对洪水的调蓄作用对于提高洪水预报精度具有重要意义,其拦洪削峰作用不容忽视^[26],因此通过在模型中引入地表拦蓄模块,评估水库群对洪水过程的调节效应。北辛店流域内共分布 9 座水库,其中包括中型水库 1 座,小(二)型水库 8 座,均位于河道上游,总控制面积为全流域的 11%。由图 6 可见,未启用地表拦蓄模块时导致洪峰流量高估 11 m³/s(对应水位降幅 0.03 m),累计洪量偏差 3%,表明流域内水库群因控制面积有限,主要发挥短历时洪峰调节功能,而对洪水总量的调控较弱。研究^[26]显示,将中小型水库拦蓄效应纳入水文模型可有效改善洪峰流量与洪量模拟精度,且水库控制面积与调控效能呈正相关关系。

在北辛店流域的水文循环过程中,秋冬季地下水超采易形成区域性降落漏斗,故汛期地表径流会通过优先流通道下渗补给地下水,促使地下水位动态回升。双拦蓄网格模型通过地下自由水库模块刻画此过程,忽略该模块时模拟过程中洪水总量虚增 31%,退水曲线趋平,无法反映真实径流缓慢衰减过程。该模块的引入有效校正了人类活动干扰下的地表-地下水再分配过程,提升了强人类活动扰动流域洪水模型的物理机制完备性。

3.3 土壤湿度分析

中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)通过融合气象观测、卫星遥感及数值模式数据,驱动 Noah-MP 陆面模式实现土壤湿度的垂向分层模拟,并结合集合卡尔曼滤波同化地面实测与卫星反演数据,生

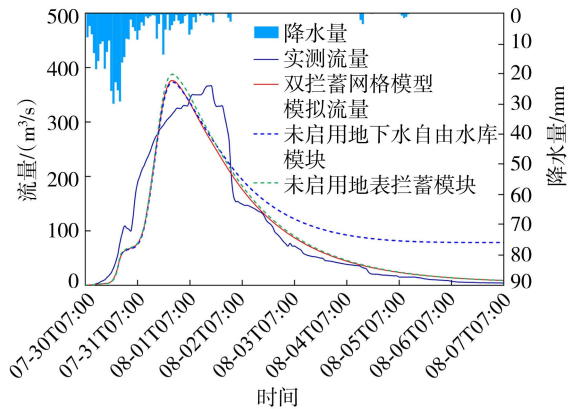


图 6 “23·7”洪水过程线
Fig. 6 Hydrographs of “23·7” flood

成东亚区域逐时土壤湿度产品(空间分辨率 0.062 5°),其垂向分层包括 0~5、0~10、10~40、40~100、100~200 cm 5 个层级^[27]。针对“23·7”洪水事件,本文选取 2023 年 7 月 24 日至 8 月 15 日 0~200 cm 土层日尺度土壤湿度数据解析暴雨过程中土壤水分的时空响应机制。

土壤湿度作为水循环的核心参量,调控着地表水与地下水间的交换过程,也与北辛店流域洪水过程的演变紧密相关^[28]。洪水起涨前(7 月 29 日),流域内 0~10 cm 表层土壤含水率维持在 0.305 m³/m³ 的低值,表明土壤具备较高的入渗能力,有利于后续降雨入渗。7 月 30 日,流域遭遇降水量高达 401.3 mm 的特大暴雨,导致表层土壤迅速饱和,0~10 cm 土层含水率在 24 h 内骤增至 0.418 m³/m³(增幅达 37%),10~40 cm 土层含水率同步达到峰值 0.412 m³/m³,40~100 cm 与 100~200 cm 深层土壤存在响应延迟,但其含水率也在增大。此时,表层和深层土壤迅速饱和和导致入渗能力显著下降,促使降雨转变为地表径流,迅速汇流并推高水位,使流量从 7 月 30 日 8 时的 0.37 m³/s 逐步增至 7 月 31 日 0 时的 96 m³/s。

在 7 月 31 日至 8 月 1 日的涨洪阶段,尽管降雨强度出现波动,但前期土壤中累积的水分仍持续作用于径流的形成。同时,40~100 cm 与 100~200 cm 深层土壤含水率的滞后响应逐渐显现,分别达到峰值 0.398 m³/m³ 和 0.383 m³/m³(较表层延迟 24~48 h)。此时土壤的饱和状态与持续的地表径流共同作用,促使流量于 8 月 1 日 15 时达到 366 m³/s 的洪峰极值。8 月 1 日 17 时降雨停止,洪水进入退水阶段,表层土壤含水率开始快速下降,而深层土壤水分则以较缓的速度逐步释放(图 7)。这种分层次的水分消退机制延长了退水过程,使洪水过程从急剧下降逐步转为平缓衰减,退水历时持续 72 h 以上,体现出地表快速消退与地下缓释补给之间的耦合效应。

综合这一阶段的土壤湿度数据分析表明,在涨洪阶段,强降雨引发的土壤快速饱和显著增强了径流过程并加速洪峰形成;而在退水阶段,各层土壤水分的持续释放则有效延缓了洪水消退。这种耦合关系表明,土壤湿度的动态变化不仅反映降雨入渗的即时响应,更通过控制水分转移速度和累积效应,深刻影响洪水过程的演变特征及其持续时间。

4 结 论

- a. 双拦蓄网格模型通过耦合地表拦蓄和地下拦蓄模块,构建地表-地下水协同调蓄机制。基于 PE-EUZY 方法融合不透水面比例与可蒸发包气带厚度,重构张力水蓄水容量 W_M ;同时融合多源遥感数据反演研究区内水库初始蓄水容量,优化人类活动影响下的参数估算方法,提高了极端降雨条件下的洪水模拟精度。
- b. 双拦蓄网格模型模拟结果表明,1980—2000 年历史洪水模拟的径流深合格率达 100%,洪峰合格率为 55%,精度优于网格新安江模型和该流域现有预报方案;对于“23·7”洪水过程,洪峰与径流深相对误差均控制在 4% 以内,确定性系数为 0.91。双拦蓄网格模型中地表拦蓄模块通过调蓄作用削峰 11 m³/s(水位降幅 0.03 m),洪量降幅 3%;未考虑地下拦蓄模块时,退水段斜率变陡,洪水总量骤增 31%。
- c. 清水河北辛店流域“23·7”暴雨过程具有降水量大、强度高且时段集中等特点,其降雨分布不均且暴雨中心位于上游。强降雨使土壤快速蓄满,促进径流形成并推动洪峰形成,而土壤深层水分的滞后释放则延缓洪水消退,导致退水过程持续 72 h 以上,表明土壤湿度的时空变化对洪水过程的形成与消退具有重要影响。

参考文献:

[1] 张存杰,张思齐,宁惠芳. 近 60 a 中国极端天气气候事件变化趋势及 2023 年特征分析[J]. 干旱气象,2024,42(4):536-552. (Zhang Cunjie,Zhang Siqi,Ning Huifang. Trends of extreme weather and climate events in China in recent 60 years and their characteristics in 2023[J]. Journal of Arid Meteorology,2024,42(4):536-552. (in Chinese))

[2] 程宸,房小怡,张硕,等. 极端暴雨过程对海河流域暴雨分布特征的影响[J]. 大气科学学报,2025,48(2):289-299. (Cheng Chen,Fang Xiaoyi,Zhang Shuo,et al. Influence of extreme rainstorms on the spatial distribution characteristics of rainfall in

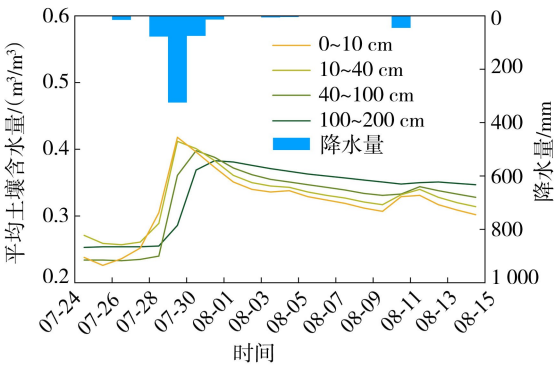


图 7 日平均土壤含水量变化
Fig. 7 Variation of daily average soil moisture

- China's Haihe River basin[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2025, 48(2): 289-299. (in Chinese))
- [3] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 33-40. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 33-40. (in Chinese))
- [4] 姚文广. 抗御海河“23·7”流域性特大洪水的实践启示和检视思考[J]. 中国水利, 2023(18): 1-4. (Yao Wenguang. Practice and reflection of flood defense of “July 23” catastrophic flood in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2023(18): 1-4. (in Chinese))
- [5] 乔建华. 防御海河“23·7”流域性特大洪水经验启示[J]. 中国水利, 2023(18): 9-12. (Qiao Jianhua. Experience and enlightenment of preventing “July 23” flood in the Haihe River[J]. China Water Resources, 2023(18): 9-12. (in Chinese))
- [6] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (Zhang Jing, Ma Guihong, Gao Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
- [7] 韩瑞光, 杨邦. 破解海河流域洪水监测预报难题的措施[J]. 水利发展研究, 2020, 20(7): 29-32. (Han Ruiguang, Yang Bang. Measures to solve the problem of flood monitoring and forecasting in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(7): 29-32. (in Chinese))
- [8] Li Zepeng, He Xin, Lu Chuilu. Assessment and analysis of groundwater overexploitation in China[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 228(10): 01008.
- [9] 段新光, 陈然, 潘连和, 等. 基于数据与机理驱动的密云水库洪水预报技术研究及应用[J]. 中国水利, 2024(8): 33-39. (Duan Xinguang, Chen Ran, Pan Lianhe, et al. Research and application of data and mechanism driven flood forecasting technology for the Miyun Reservoir[J]. China Water Resource, 2024(8): 33-39. (in Chinese))
- [10] 李致家, 张心愿, 白云鹏, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 13-19. (Li Zhijia, Zhang Xinyuan, Bai Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))
- [11] 张珂, 张企诺, 陈新宇, 等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 94-101. (Zhang Ke, Zhang Qinuo, Chen Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 94-101. (in Chinese))
- [12] 吴滨滨, 马奉泉, 胡珊珊, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水东淀蓄滞洪区洪水演进复盘分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 96-105. (Wu Binbin, Ma Fengquan, Hu Shanshan, et al. Retrospective analysis of flood propagation in Dongdian flood storage-detention area during “23·7” catastrophic flood in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 96-105. (in Chinese))
- [13] 蔡阳. 数字赋能海河“23·7”流域性特大洪水防御[J]. 中国水利, 2023(18): 13-18. (Cai Yang. Digital enables the Haihe River “July 23” basin-wide catastrophic flood prevention[J]. China Water Resources, 2023(18): 13-18. (in Chinese))
- [14] 麦合木提·图达吉, 童瑞, 徐宝宁, 等. 北京“23·7”特大洪水复盘分析[J]. 水力发电学报, 2024, 43(4): 12-22. (Mahmut Tudaji, Tong Rui, Xu Baoning, et al. Hindcasting on “July 2023” flood event in Beijing[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(4): 12-22. (in Chinese))
- [15] 李致家, 李安琪, 姚成, 等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 10-17. (Li Zhijia, Li Anqi, Yao Cheng, et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 10-17. (in Chinese))
- [16] 陈然, 段新光, 刘华杰. 密云水库“23·7”暴雨洪水复盘分析[J]. 水资源开发与管理, 2024, 10(12): 54-61. (Chen Ran, Duan Xinguang, Liu Huajie. Retrospective analysis of the “23·7” rainstorm and flood event at Miyun Reservoir[J]. Water Resources Development and Management, 2024, 10(12): 54-61. (in Chinese))
- [17] Chen Xinyu, Zhang Ke, Luo Yuning, et al. A distributed hydrological model for semi-humid watersheds with a thick unsaturated zone under strong anthropogenic impacts: a case study in Haihe River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: 129765.
- [18] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xinjiang)模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [19] 霍文博, 李致家, 张珂, 等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 47-54. (Huo Wenbo, Li Zhijia, Zhang Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 47-54. (in Chinese))

random forests algorithm[J]. Journal of Hebei Academy of Sciences,2019,36(3):37-41. (in Chinese))

[27] 刘娟,彭剑虹,曹伟,等. 县域城市质量效益指数与城市综合竞争力相关性研究:基于斯皮尔曼秩相关系数的实证分析[J]. 质量与认证,2024,(12):63-65. (Liu Juan, Peng Jianhong, Cao Wei, et al. Correlation study between the quality and benefit index of county-level cities and the comprehensive competitiveness of cities[J]. China Quality Certification,2024,12(12):63-65. (in Chinese))

[28] 代硕,苏怀智,谷宇,等. 基于 PCA-GO-BP-AdaBoost 的大坝变形监控模型[J]. 人民黄河,2025,47(增刊 1):100-102. (Dai Shuo,Su Huaizhi,Gu Yu,et al. Dam deformation monitoring model based on PCA-GO-BP-AdaBoost[J]. Yellow River,2025,47(S1):100-102. (in Chinese))

[29] 胡嘉玮,徐宗学,陈浩,等. 基于精细化 GDP 格局的城市洪涝风险评估:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(6):1480-1490. (Hu Jiawei,Xu Zongxue,Chen Hao, et al. Urban flood risk assessment based on refined GDP spatial distribution: a case study of Huangtaiqiao River Basin, Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025,23(6):1480-1490. (in Chinese))

[30] 王双涛. 基于非结构化网格的 1D-2D 水动力模型耦合研究及应用[D]. 西安:长安大学,2023.

[31] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报,2009,28(2):25-34. (Li Zhijia,Yao Cheng,Zhang Yuxia,et al. Study on Grid-based Xin’ anjiang Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2):25-34. (in Chinese))

[32] 化盈盈,张岱堉,葛仕明. 深度学习模型可解释性的研究进展[J]. 信息安全学报,2020,5(3):1-12. (Hua Yingying,Zhang Daichi,Ge Shiming,et al. Research progress in the interpretability of deep learning models[J]. Journal of Cyber Security,2020,5(3):1-12. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-18 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 68 页)

[20] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (Yao Cheng,Li Zhijia,Zhang Ke,et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin’ anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))

[21] 童冰星,李致家,姚成. 基于 SoilGrids 的栅格新安江模型参数空间分布估算[J]. 水科学进展,2022,33(2):219-226. (Tong Bingxing,Li Zhijia,Yao Cheng. Estimation of distributed Grid-Xin’ anjiang Model parameters based on SoilGrids[J]. Advances in Water Science,2022,33(2):219-226. (in chinese))

[22] Zhang Xiao,Liu Liangyun,Wu Changshan,et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform[J]. Earth System Science Data,2020,12(3):1625-1648.

[23] 林祚顶,李兰涛. 海河“23·7”流域性特大暴雨洪水水文测报成效、存在问题及对策[J]. 中国水利,2023(18):5-8. (Lin Zuoding,Li Lantao. Results,problems and mitigation measures of hydrological monitoring and forecasting of “July 23” rainstorm and severe flood in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources,2023(18):5-8. (in Chinese))

[24] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988(6):2-9. (Zhao Renjun,Wang Peilan. Analysis of the parameters of the Xinanjiang model[J]. Journal of China Hydrology,1988(6):2-9. (in Chinese))

[25] 石朋,丁松,司伟,等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):1-6. (Shi Peng,Ding Song,Si Wei,et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin’ anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):1-6. (in Chinese))

[26] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (Si Wei,Huang Siqi,Wang Peixia,et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):1-7. (in Chinese))

[27] 韩慧敏. 基于集成学习方法的 CLDAS 土壤湿度降尺度及其干旱监测应用:以华北地区为例[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.

[28] 孔月,张珂,申晓骥,等. 基于微波遥感和多模型集成的安徽省土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):75-81. (Kong Yue,Zhang Ke,Shen Xiaoji,et al. Soil moisture inversion in Anhui Province based on microwave remote sensing and multi-model ensemble[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(6):75-81. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-23 编辑:熊水斌)