

基于数值模拟的淮河干流蒙洼蓄洪区运用过程与效果分析

宋天旭¹, 梅超^{1,2}, 刘家宏^{1,2}, 张安琪¹, 李萌萌¹, 陈邦慧³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室;

2. 中国水利水电科学研究院水利部数字孪生流域重点实验室; 3. 水利部淮河水利委员会水文局(信息中心))

摘要:采用二维水动力学方法,构建了蒙洼蓄洪区洪水演进模型,并利用遥感影像对模型进行了验证,对 2003 年、2007 年、2020 年 3 次分洪情景的蓄洪区洪水演进过程开展复盘模拟分析。结果表明:洪水淹没模拟结果与遥感影像解译结果较为吻合,多项评价指标均高于 93%,模型具备分洪情景复盘能力;不同情景下洪水传播速度存在差异,洪峰流量大、持续时间长的 2007 年较 2003 年提前 8 h 到达曹台孜闸;3 次分洪过程分别呈现双峰、高流量持续时间长、洪峰流量偏大等不同特点,蓄洪量也存在较大差异,但淹没面积差别较小,最大差值仅为 7.5%。

关键词:二维水动力学;洪水复盘;遥感影像;洪水淹没;蒙洼蓄洪区

Analysis of operation process and effect of Mengwa flood storage area in main stream of the Huaihe River based on numerical simulation//Song Tianxu¹, Mei Chao^{1,2}, Liu Jiahong^{1,2}, Zhang Anqi¹, Li Mengmeng¹, Chen Banghui³
(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research;
2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research;
3. Hydrological Bureau (Information Center) of Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources)

Abstract: A two-dimensional hydrodynamic model was used to construct a flood routing model for Mengwa flood storage area. The model was verified using remote sensing images, and retrospective simulations of flood routing processes in the flood storage area under three flood diversion scenarios in 2003, 2007 and 2020 were performed. The results indicate that the simulated flood inundation results are in good agreement with interpreted remote sensing images, with multiple evaluation indicators above 93%, which verifies the model's capacity for retrospective simulation of flood diversion scenarios. Flood propagation velocities differ across scenarios; the 2007 flood, characterized by a larger peak discharge and longer duration, arrived at Caotaizi Sluice 8 hours earlier than the 2003 flood. Three flood diversion processes feature distinct patterns: double flood peaks, prolonged high flow, and large peak discharge respectively. Although their flood storage volumes differ greatly, their inundated areas have minor discrepancies, with a maximum difference of only 7.5%.

Key words: two-dimensional hydrodynamics; flood retrospective; remote sensing images; flood inundation; Mengwa flood storage area

淮河流域气候与地形条件复杂,暴雨洪涝灾害频发^[1-3],干流仅上游建有出山店水库^[4],难以对中下游关键节点的洪水过程实现有效调控,行蓄(滞)洪区成为该流域防洪减灾的重要工程措施^[5]。淮河干流分布有蒙洼、城西湖、南润段、邱家湖、城东湖和瓦埠湖等^[6] 19 处行蓄(滞)洪区,蓄洪区设计总蓄洪量达 65.44 亿 m³。蒙洼作为千里淮河第一处蓄洪区,运用频次高、影响范围广,在淮河防洪体系中发挥着举足轻重的作用^[7]。在气候变化条件下,淮

河流域暴雨特征不断发生改变^[8],其防洪体系面临着超标准洪水的不断挑战^[9]。蒙洼蓄洪区的科学运用,事关淮河流域整体防洪安全。因此,面对超标准洪水挑战,相关学者总结经验,对蒙洼历史分洪场景进行复盘,为有效应对淮河流域性洪水提供支撑。例如:曾明等^[10]构建了预报调度一体化体系,开展了流域洪水调度模拟研究;陈瑜彬等^[11]将河道槽蓄量较大的河段作为储水单元,基于大湖模型建立了调洪演算模型,分析蓄洪区的入流过程及河道水位变化。

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3212800);国家自然科学基金项目(52192671)

作者简介:宋天旭(1995—),男,工程师,博士,主要从事极端洪涝模拟研究。E-mail:songtx@iwhr.com

通信作者:梅超(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事洪涝防控与智慧水利研究。E-mail:meichao@iwhr.com

现有流域洪水调度与调洪演算模型多将蓄洪区简化为储水单元,未对蓄洪区内部开展深入研究,难以真实反映蓄洪区实际淹没状况。例如:廖明等^[12]分析了不同重现期标准下的蓄洪区风险区划,为蓄洪区空间规划提供了支撑,但风险区划图为静态风险分布,在实际应用中存在时效性不强等问题;练迪等^[13]通过一维水动力模型与 GIS 工具的联合运用,得到了滹江蓄洪区的淹没范围;赵然杭等^[14]耦合了水文与水动力学方法,得到了蓄洪区详细的洪水演进过程;邹佳宇等^[15]应用耦合水动力模型开展了蓄洪区联合运用研究,分析了蓄洪区洪水的淹没过程。上述研究从不同维度开展了蓄洪区洪水风险分析,为蓄洪区的空间规划及人员财产安全转移提供了重要参考。

在蓄洪区的洪水复盘方面,吴滨滨等^[16]构建了一二维耦合水动力模型,复盘了东淀蓄洪区的洪水演进过程,并采用实测断面流量数据完成了模型验证,还原了海河“23·7”流域性特大洪水过程中蓄洪区的启用情况;刘鑫等^[17]应用水动力学方法,对2024年团洲垸溃堤过程进行了复盘模拟,为后续类似应急工作提供了参考;陈家明等^[18]借助 SAR 雷达遥感数据对蓄洪区的淹没范围进行了监测分析,为蓄洪区的相关模拟验证、灾害动态评估提供了有效方法。

本文以蒙洼蓄洪区为研究对象,建立精细二维水动力模型,结合高分三号雷达遥感影像验证了模型的可靠性,对2003年、2007年和2020年蒙洼蓄洪区启用过程进行了复盘模拟。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

蒙洼蓄洪区地处淮河上、中游交界地带,为淮河干流第一处蓄洪区,由王家坝闸(进水)、曹台孜闸(退水)、蒙洼圈堤组成,总面积 180.4 km²,设计蓄洪总量达 7.5 亿 m³^[19],研究区概况如图 1 所示。依据国家防汛抗旱总指挥部批复的《淮河洪水调度方案》,当淮河干流王家坝站(水文站)水位达到 29.3 m,且继续上涨,视雨情、水情和工程情况,适时启用蒙洼蓄洪区。

蒙洼蓄洪区常住人口约 17.6 万人,农田面积占比达 65% 以上。蓄洪区内分布有死淮河、蒙洼大沟等沟道。村庄等居住点主要以庄台、保庄圩等形式存在,曹集镇地处蓄洪区中部,为人口较为集中片区。1954 年以来,蒙洼蓄洪区累计 13 个年份、16 次开闸蓄洪^[20],总蓄洪量达 75 亿 m³,有效削减了淮河干流洪峰,为淮河流域防洪安全做出了重要贡献^[21]。

1.2 研究数据

研究区高程数据来源于无人机航摄获取的激光点云数据,通过处理获得 5 m 分辨率的地形数据。土地利用数据来源于 GlobeLand30 (<https://www.webmap.cn/>) 与 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>),通过数据融合得到如图 2 所示的高程与土地利用数据^[22-23]。蓄洪区以耕地为主,大规模开发活动较少,地形高程和土地利用格局整体变化较小。本文重点关注蒙洼蓄洪区分洪演进过程,故统一采用近期土地利用数据构建模型进行情

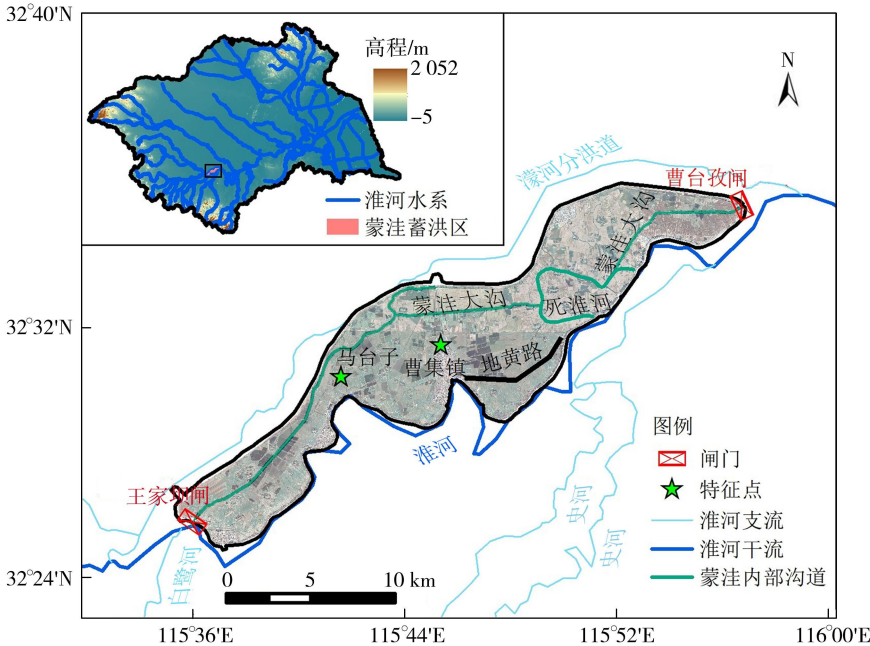


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

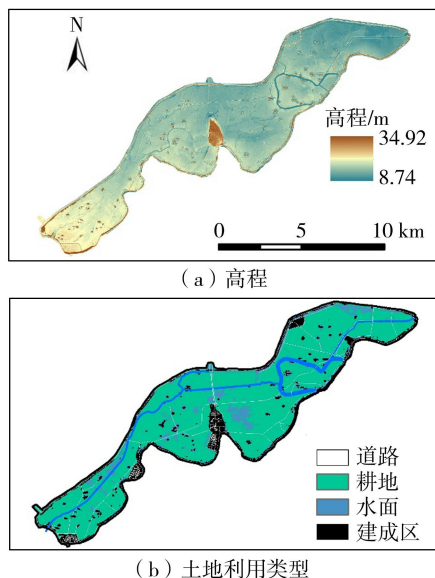


图2 研究区高程和土地利用数据

Fig. 2 Basic data of elevation and land use for study area 景模拟。水文站、闸门流量、水位实测等数据取自水文年鉴摘录成果。

2 模型构建与验证

2.1 模型构建

地表洪水演进物理过程常采用二维水动力模型模拟,其控制方程为浅水方程组^[24-25],包括连续性方程与动量方程。浅水方程组常用的数值求解方法包括有限元法、有限体积法等。本文基于TELEMAC-2D模型建立蓄洪区洪水演进模型^[26-27],选用能够更好保持水量平衡的有限体积法对二维浅水方程进行求解。

非结构化三角网格能够灵活地适应不同形状的边界。为了能够更好地刻画蓄洪区内部沟道等细微地形对洪水演进的影响,采用该网格对研究区进行剖分。取三角网格最大边长为5 m,对总面积180.4 km²的蓄洪区进行网格剖分,最终生成网格17997950个、节点9008762个。

在初始条件与边界条件设置方面,考虑到模拟洪水过程量级较大,在模拟初始阶段,研究区水深均设为0 m;王家坝闸依据实测数据设置水位、流量入流边界,其余边界均设为闭边界。曼宁糙率系数设置参考宋天旭等^[28]的研究,依据土地利用类型进行确定;由于耕地面积占比较大,因此耕地的曼宁糙率系数参考了多个相关研究^[14,16],通过模拟不同曼宁糙率系数下的洪水演进过程,最终确定各区域曼宁糙率系数为:沟道0.015、道路0.05、耕地0.065、其他用地类型为0.05。

2.2 情景设置

蒙洼蓄洪区在历史上多次开闸分洪,近年来的

启用过程对当前蓄洪区管理更具借鉴意义,本文选取2003年、2007年和2020年蓄洪区分洪过程进行复盘模拟分析。3次蓄洪区启用前,王家坝闸前最高水位分别为29.39、29.48、29.75 m,均高于启用标准29.30 m。王家坝闸入流过程如图3所示,其中,2003年洪水期间为两次启用,两次启用过程之间存在5 d左右的间隔,且并未开闸退水,因此按照1次连续蓄洪过程进行模拟;第1次启用最大分洪流量为1460 m³/s,第2次为1450 m³/s。2007年分洪时间2.5 d左右,最大分洪流量为1730 m³/s,且分洪流量超过25 h维持在1600 m³/s以上。2020年分洪时间3 d左右,最大分洪流量为1820 m³/s,为3次分洪过程中流量最大情景。

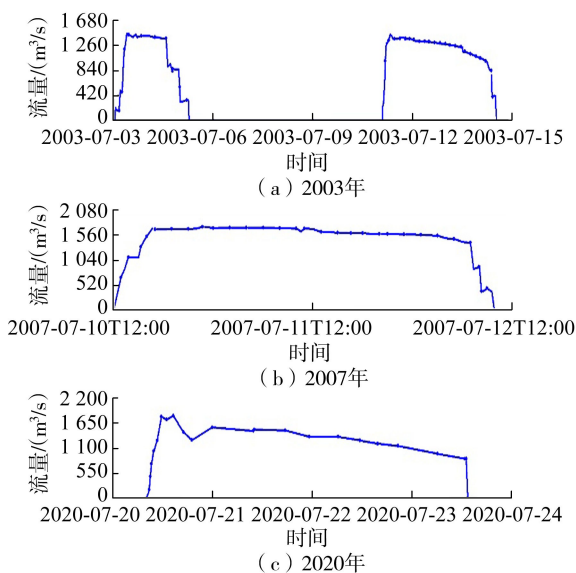


图3 不同年份蒙洼蓄洪区启用下王家坝闸入流过程

Fig. 3 Inflow hydrographs at Wangjiaba Gate under flood diversion scenarios of Mengwa flood storage area in different years

2.3 模型验证

基于洪水演进过程与淹没时段对应的遥感影像解译提取洪水淹没范围,将其与模拟结果比对以完成模型精度验证^[29]。采用能够穿透云层的SAR遥感卫星图像开展淹没范围提取^[30],收集高分三号卫星^[31]在2020年7月20日18时与21日17时的遥感影像,通过遥感解译得到实测淹没范围。选取敏感性(S_e)、特异性(S_p)和准确度(E_c)对洪水演进模型模拟结果进行评价^[32]:

$$S_e = A_{TP} / (A_{TP} + A_{FN}) \quad (1)$$

$$S_p = A_{TN} / (A_{FP} + A_{TN}) \quad (2)$$

$$E_c = (A_{TP} + A_{TN}) / (A_{TN} + A_{FN} + A_{TP} + A_{FP}) \quad (3)$$

式中: A_{TP} 为真淹没区面积,为模拟与实测结果中均淹没的区域; A_{FN} 为假未淹没区面积,为模拟结果未淹没但实测结果淹没的区域; A_{FP} 为假淹没区面积,

为实测未淹没但模拟结果淹没的区域; A_{TN} 为真未淹没区面积,为模拟与实测结果均未被淹没的区域。

将模拟结果与蓄洪区启用过程中的遥感影像图进行对比,结果如图 4(底图为遥感影像图)所示。可以看出,两者的淹没范围整体较为相近,在 7 月 21 日 17 时模拟范围相较于遥感提取洪水范围稍大,该差异可能源于模型地表曼宁糙率系数采用固定值,而实际洪水演进过程中地表曼宁糙率系数会随洪水演进过程而变化。

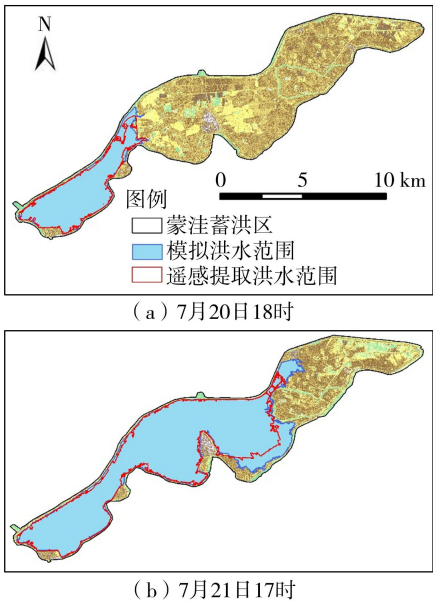


图 4 研究区洪水淹没结果验证

Fig. 4 Verification of flood inundation results in study area

模拟与遥感影像解译范围统计结果显示,7 月 20 日 18 时模拟的敏感性为 95.85%,特异性为 98.17%,准确度 97.76%,其中 $A_{TN} = 157.82 \text{ km}^2$, $A_{FN} = 1.41 \text{ km}^2$, $A_{TP} = 32.54 \text{ km}^2$, $A_{FP} = 2.95 \text{ km}^2$;7 月 21 日 17 时模拟结果的敏感性为 97.20%,特异性为 93.43%,准确度 95.41%,其中 $A_{TN} = 86.31 \text{ km}^2$, $A_{FN} = 2.87 \text{ km}^2$, $A_{TP} = 99.47 \text{ km}^2$, $A_{FP} = 6.07 \text{ km}^2$ 。各项评价指标结果表明,两个时刻的模拟结果与遥感影像提取淹没范围吻合度较高,各评价指标均高于 93%,平均值高于 95%。

除淹没范围外,水深、洪水到达时间等相关参数也可对模型进行一定程度的验证。曹台孜闸为蒙洼蓄洪区的退水闸,闸前水深能够一定程度上反映蓄洪区整体蓄滞情况。2020 年蓄洪期间,曹台孜闸前最高水深为 5.20 m,本文模拟结束时,曹台孜闸前最高水深为 5.14 m,仅相差 1.15%。

洪水到达时间是洪水的另一重要特征,王家坝闸在 7 月 20 日 8 时左右开闸分洪,遥感影像显示,洪水在当日 18 时到达马台子附近,模拟结果与其较

为相近。7 月 21 日 17 时,遥感影像显示,洪水已到达地黄路附近,而模拟洪水 15 时已到达该处,模拟到达时间略早于观测值,但该误差在合理范围内,满足本文精度需要。从整体流向来看,洪水在蓄洪区内由西南向东北逐步演进,淹没了高程较低区域,与蓄洪区的高程分布较为吻合。

本文仅基于 2020 年分洪过程对淹没范围进行验证。蒙洼蓄洪区内部以耕地为主,限制大规模开发,多年来下垫面条件变化较小,且洪水均发生在 7 月,作物生长期较为一致,模型概化的下垫面曼宁糙率系数也较为相近。同时,本次选取的两个时间均处于分洪演进过程,对洪水演进的验证较为充分。因此,可认为建立的洪水演进模型满足研究所需的精度要求,适用于不同情景下的洪水复盘模拟分析。

3 结果与分析

3.1 蓄洪区分洪情景模拟结果分析

3.1.1 洪水淹没过程

图 5 为 2003 年、2007 年和 2020 年情景下洪水演进过程。模拟开始 4 h,如图 5(a)(d)(g)所示的洪水从王家坝闸流入蓄洪区,一部分沿蒙洼大沟演进,另一部分漫出沟道并向两侧农田漫流。2007 年与 2020 年由于洪峰流量较大,沟道漫溢水量更多,两侧耕地水深显著高于 2003 年。

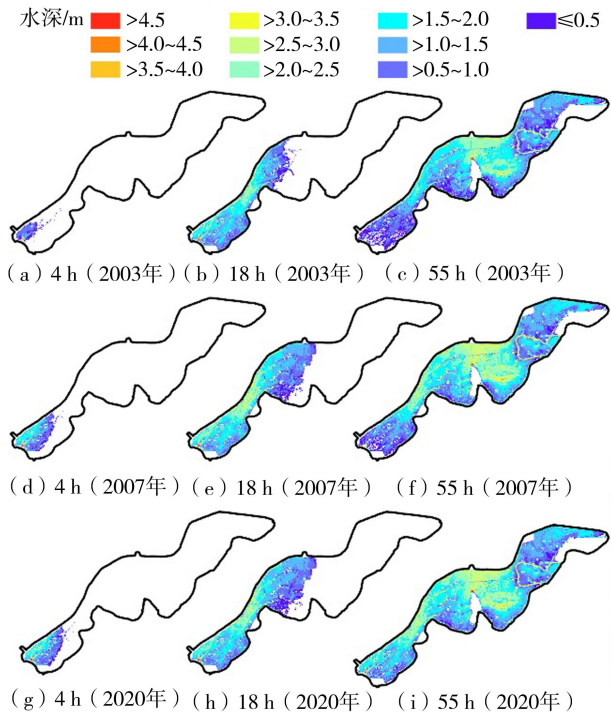


图 5 不同情景下洪水演进过程

Fig. 5 Flood propagation processes under different scenarios

模拟至 18 h 时,2020 年和 2007 年情景下洪水已演进至曹集镇,而 2003 年情景洪水还未到达曹集

镇,可能是因为各年份分洪流量不同,造成洪水演进速度有所差别;模拟至 47 h 时,2007 年情景下洪水已到达曹台孜闸前,并率先淹没了闸前北部区域;模拟至 49、55 h 时,2020 年、2003 年情景下洪水才陆续到达曹台孜闸前。

值得注意的是,2020 年分洪洪峰流量略高于 2007 年,洪水演进初期推进速度更快,18 h 均到达曹集镇,但依然略快于 2007 年。然而,在曹台孜闸前却是 2007 年于 47 h 率先到达,而 2020 年在 49 h 才到达,原因在于 2007 年洪峰流量持续时间较长,而 2020 年虽然存在较大洪峰,但持续时间较短,使得洪水在演进过程中发生坦化,从而演进相对较慢。

由模拟结果可知,洪水沿主要沟道及靠近北部的耕地演进,且洪峰流量越大,演进越快;在后续的洪水演进过程中,洪峰持续时间也与演进速度相关,洪峰维持时间越长,洪水推进速度越快。其中,2007 年洪峰流量大于 $1600\text{ m}^3/\text{s}$ 的持续时长超过 25 h,洪水整体演进速度更快,抵达曹台孜闸的时间较 2003 年提前 8 h。

3.1.2 洪水演进流速

图 6 为模拟时段内洪水最大流速分布,可以看出,各模拟工况下最大流速整体分布规律相近,呈现西部流速偏高、向东逐步递减的特征。一方面,由于西部地形较高,坡降较陡;另一方面,由于洪水刚入蓄洪区时流速较大,向东推进过程中水流向南北漫散,进入大面积耕地,水流分散,流速随之衰减。高流速区域主要集中在研究区西部、各级沟道及北部靠近堤防区域,该区域在不同情景下流速均达 0.3 m/s 以上,部分区域可达 0.5 m/s 以上。沟道、河道内的阻力较小,曼宁糙率系数偏低,行洪通畅,因此形成高流速区。各情景流速分布也存在一定差异,2007 年流速大于 0.5 m/s 的区域为 13.27 km^2 ,较 2003 年提升 21.91%;流速低于 0.1 m/s 的区域,2007 年较 2003 年减少 15.51%。

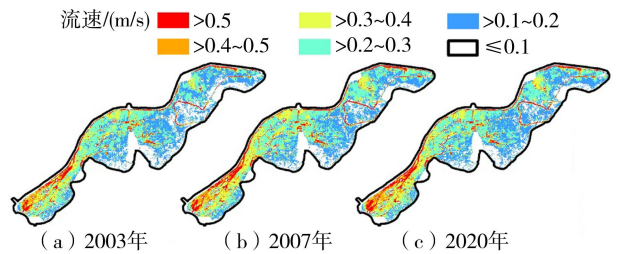


图 6 不同情景下模拟时段洪水最大流速分布

Fig. 6 Distribution of maximum flood velocity during simulation period under different scenarios

可见,不同情景下流速整体均呈现从西向东逐渐减小的趋势,在北部堤防、沟道、河道内存在局部

高流速区域。大流量情景下高流速区域分布面积大于小流量情景,其中,2007 年流速超 0.5 m/s 的区域面积较 2003 年增大 21.91%。

3.1.3 洪水传播时间

洪水传播时间是指从蓄洪区启用开始,洪水到达区域各点所需的时间,可为区域内人员、财产转移提供参考。图 7 为不同情景下洪水传播时间空间分布,可以看出,洪水从西南侧王家坝闸进入蓄洪区,西南部洪水传播时间较短,东北部传播时间较长。而洪水到达死淮河后,由于该区域面积较为开阔,演进进入短期瓶颈阶段,淹没范围扩张速率放缓;随后洪水沿死淮河、蒙洼大沟向曹台孜闸演进,直至淹没整个区域。对比不同情景,随着分洪流量与洪水总量的增大,洪水演进速度越快,导致洪水传播时间有所不同。在 2020 年和 2007 年情景下,洪水在 18 h 即可到达中部的曹集镇,而对于 2003 年情景,22 h 左右才会到达。

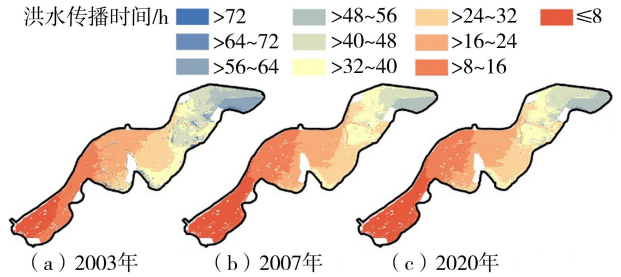


图 7 不同情景下洪水传播时间分布

Fig. 7 Distribution of flood propagation time under different scenarios

蒙洼蓄洪区整体呈狭长形态,洪水自西南向东北演进,洪水传播时间也沿该方向逐步递增。分洪流量、总洪量越大,洪水抵达各点的时间越早;在 2003 年、2007 年和 2020 年情景下,洪水抵达曹集镇的时长为 18~22 h。

3.2 蓄洪区运用过程和效果对比

3.2.1 蓄洪区运用过程对比

蒙洼蓄洪区进水闸为王家坝闸,蓄洪区启用时闸前水位会改变淮河干流王家坝站的水位、流量过程,分析该过程变化,可量化蒙洼蓄洪区启用分洪对干流洪水的削峰减灾效果。

图 8 中的红色与黑色竖直虚线分别代表蒙洼蓄洪区进水闸开启与关闭时刻,可以看出,蒙洼蓄洪区启用时,干流洪水位均较高,且处于上升阶段,这与蓄洪区启用条件相吻合。蓄洪区启用后,淮河干流王家坝站流量快速下降,水位也得到有效控制,保障了下游河道的安全泄洪。在 2003 年 7 月 2 日夜間,淮河干流流量突然上涨,因此首次启用蓄洪区;随着干流流量减小,在 7 月 5 日 7 时左右关闭了进水闸;

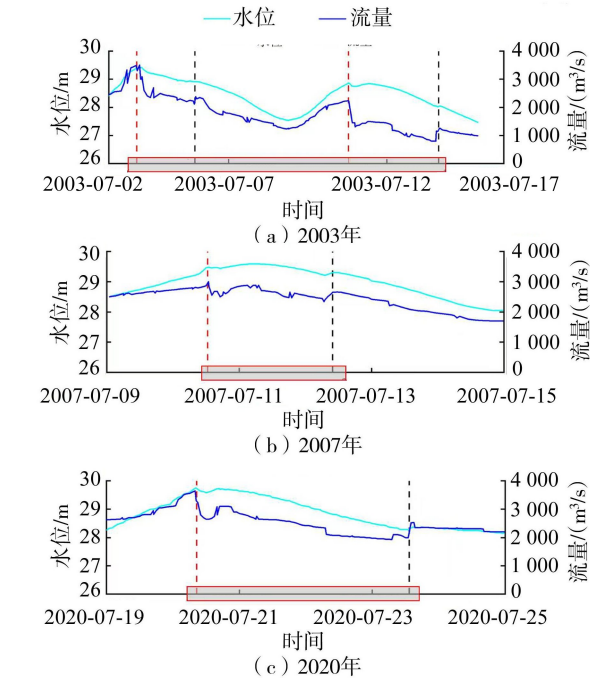


图 8 蒙洼蓄洪区启用对淮河干流王家坝站水位和流量的影响

Fig. 8 Influence of Mengwa flood storage area operation on water level and discharge at Wangjiaba Station of Huaihe River main stream

7月11日2时前后淮河干流又迎来洪峰,蓄洪区二次启用。两次启用蓄洪区共分洪5.60亿m³,削峰效益显著,保障了淮河干流防洪安全。

洪水来临时可能存在一段时间的多次洪峰,因此启用蓄洪区时,既要实现干流削峰,还需预留库容抵御后续洪峰,2003年的两次启用印证了这一结论,也导致蓄水量存在两次快速上涨过程,如图9所示。2007年的蓄洪区运用过程中,在洪峰时段实现

了有效的削峰目标,为后续可能存在的洪峰留出了调蓄空间。

河道流量快速增大时,会加大洪水预报与防洪形势的研判难度,2003年和2020年均存在短时间流量快速增大的情况,并达到蒙洼蓄洪区的启用标准,随即启用蓄洪区进行分洪。其中2020年洪峰流量为复盘洪水中流量最高,其分洪流量达1820m³/s。在启用蓄洪区后,淮河干流水位、流量得到了有效控制,但仍存在部分时段水位超保证水位。在洪峰流量处于极值时,蓄洪区分洪流量会随闸前水位上升有所增大,但其最大分洪量有限,难以将干流水位稳定控制在保证水位以内。因此需开展多项水利工程联合调度,依托工程群的联合调洪效用,保障流域防洪安全。

3.2.2 蓄洪区运用效果对比

蒙洼蓄洪区在多次历史洪水条件下,通过分蓄淮河干流洪水,保障了淮河下游防洪安全。表1为2003年、2007年和2020年洪水情景下蓄洪效果。可见,2003年情景下,淮河干流洪水流量上涨迅速,7月2日11时至3日1时,流量增大了900m³/s,水位上涨了0.55m,高于分洪控制水位29.30m,且洪水流量持续增大,满足蓄洪区启用条件。

启用蓄洪区后,淮河干流王家坝站流量迅速减小,水位也随之降低。2003年洪水呈双峰特征,在蓄洪区进水闸关闭后,洪水流量一度下降至1230m³/s,但后续又逐渐增大,在7月11日2时30分左右达2230m³/s。由于前期洪水已对下游防洪造成了一定压力,加之蓄洪区此前已投入运用,故再次开闸分洪。模拟结果显示,曹台孜闸前最高水

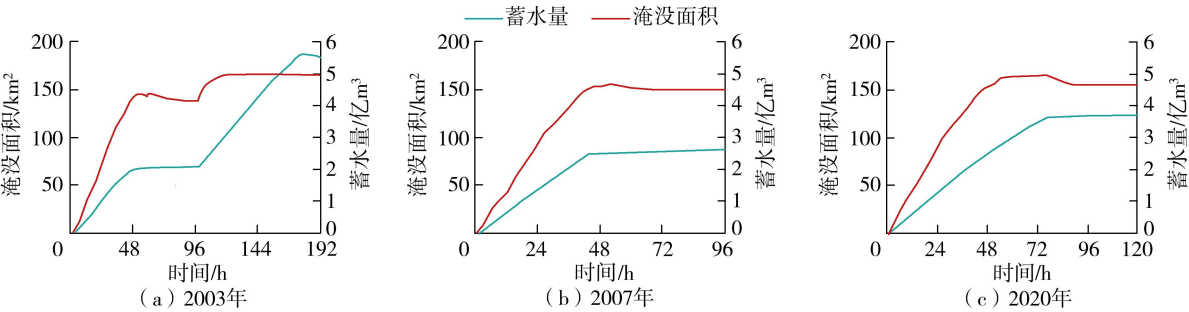


图 9 蒙洼蓄洪区启用后蓄水量与淹没面积随时间变化过程

Fig. 9 Hydrograph of water storage volume and floodplain area in Mengwa flood storage area after its operation

表 1 不同情景下蒙洼蓄洪区蓄洪影响对比

Table 1 Comparison of flood storage impacts of Mengwa flood storage area under different scenarios

年份	启用时王家坝水文站 实测水位/m	实测最大分洪 流量/(m ³ /s)	启用后淮河干流 实测最高水位/m	模拟蓄洪区 蓄洪量/亿 m ³	模拟蓄洪区最大 淹没面积/km ²
2003 年	29.39 (28.87)	1460 (1450)	29.2 (28.84)	2.00 (5.60)	146.3 (166.5)
2007 年	29.48	1730	29.59	2.62	154.9
2020 年	29.75	1820	29.71	3.75	164.7

注:括号中为 2003 年第 2 次启用蓄洪区时对应的数据。

深达 6.29 m,两次分洪总量 5.60 亿 m³,有效缓解了淮河干流下游的防洪压力。

2007 年情景下,淮河干流水位上涨缓慢,但洪水持续时间久,洪峰流量大,下游防洪压力较大。在 7 月 10 日 12 时 30 分至 12 日 9 时 30 分启用蒙洼蓄洪区,洪水仍处于缓慢上升阶段,满足蓄洪区启用条件。蓄洪区启用后,分洪流量高于设计分洪流量 1 620 m³/s,充分发挥了蓄洪区削峰作用;分洪期间洪水位持续上涨,且持续了较长时间高水位,致使分洪流量超 1 600 m³/s 的时长超过 25 h。分洪后曹台孜闸前最高水深达到了 4.37 m。

2020 年情景下,淮河干流水位涨势同样迅速,且洪峰流量为 3 场洪水最大。在 7 月 20 日 1—8 时,干流流量增幅 530 m³/s,水位从 0.38 m 抬升至 29.75 m,超出 29.30 m 分洪控制水位,且水位仍快速上涨,满足蓄洪区启用条件。蓄洪区启用后,淮河干流王家坝站最大流量依然达 3 100 m³/s,对应水位为 29.71 m,也为 3 场洪水中的最大值,但持续时间较短,数小时后逐渐回落,曹台孜闸前最大水深 5.14 m。直至 8 月 1 日开启曹台孜闸启动泄水,退水过程持续至 8 月 28 日,整个蓄洪持续时间 40 d。

2007 年与 2020 年两场洪水期间,蒙洼蓄洪区分洪流量峰值均突破设计分洪流量,这是由于淮河干流水位偏高,促使实际分洪流量增大,即便启用蓄洪区分洪,王家坝站仍出现水位超保证水位现象。由此可见,在应对流域大尺度超标洪水时,需统筹水库、蓄滞洪区等各类水利工程实施联合调度,构建防洪工程群联防联控体系,充分发挥流域整体防洪减灾效益。

对比 2007 年和 2020 年蓄洪量、淹没面积(表 1),虽然蓄洪量存在较大差异,但淹没面积相差较小,该规律与传统认知存在偏差。现有流域性洪水分析常将蓄洪区概化为静态水箱,即每一蓄洪量均有唯一蓄洪水位与其对应,蓄洪时洪水从库区底部逐渐上涨。但实际蓄洪区内部的洪水是流动的,且有进水口与退水口,如蒙洼蓄洪区,西南部的王家坝闸为进水口,东北部的曹台孜闸为出水口,洪水会从王家坝闸进入,向地势较低的东北部演进。蓄洪区内有蒙洼大沟、死淮河等过洪渠道,但过洪能力有限。小流量情景下,洪水沿沟道演进至曹台孜闸蓄积,不会影响两侧耕地;而蓄洪区启用时,通常以削峰分洪为主要目标,分洪量较大时,洪水会直接溢出沟道漫溢至两侧农田,自西南至东北贯通整个蓄洪区,因此较小蓄洪量也可形成大范围淹没。

在 2003 年的两次蓄洪过程中,第 1 次蓄洪量约 2.00 亿 m³,第 2 次蓄洪量达 5.60 亿 m³,蓄洪量增长

了 3.60 亿 m³,但最大淹没面积仅增长了 20.5 km²。2003 年与 2007 年的蓄洪量相差最大,为 2.98 亿 m³,高出了 113.7%,但最大淹没面积仅相差 7.5%。可见,蓄洪区的淹没面积与蓄洪量并非简单的线性关系,在流量突破沟道行洪能力时,淹没面积将快速增大,从而扩大小蓄洪量时的分洪损失。依据曼宁公式估算,蒙洼大沟的过流能力在 100~150 m³/s,蓄洪区分洪时,分洪洪峰流量通常在 1 600 m³/s 左右,远高于蒙洼大沟的过流能力,洪水会向两侧漫流。蒙洼蓄洪区地势较为平缓,洪水漫出沟道后会影响两侧广泛的耕地。

4 讨 论

4.1 蓄洪区洪水演进模型构建

蓄洪区的洪水演进模型能够获取详细的演进过程与水深、流速等洪水特征,可为蓄洪区启用、区域规划、开发建设等提供参考。但面对超标洪水时,现有的洪水演进模型面临挑战。一方面,超标洪水的破坏性会对蓄洪区农作物、基础设施造成破坏,使得曼宁糙率系数、高程等模型参数在模拟过程中发生变化;另一方面,现有防洪工程体系可能面临局部失效甚至损毁的情况。例如,2024 年团洲垸堤防发生溃决^[33],由于事发突然,难以实时获取或预估溃决带来的影响,这些均对现有模型提出了更高的要求,未来面对极端降雨引发的超标洪水情景,需要开展工程灾变评估与动态预演,以应对超标条件下的复杂情况^[34]。

4.2 考虑水工程群联合调度的蓄洪区运用

各类防洪工程的调度效果与水力特性存在差异,在流域综合防洪体系中,多工程联合调度才能充分发挥蓄洪区防洪效益。蓄洪区分洪的理想工况是精准削减干流洪峰,使其最大化发挥作用。然而,实际洪水情景通常较为复杂,难以保证分洪时机恰好匹配洪峰时段。因此需要开展关键断面水文预报^[35],提前预警,做好蓄洪区的启用准备,从而实现精准分洪,提高蓄洪区功能效果^[36]。蒙洼蓄洪区是淮河干流首个蓄滞洪工程,需与上、下游水利工程协同调度才能充分释放调蓄能力。出山店水库虽与蒙洼蓄洪区相距较远,但其可以结合水文模型预报信息,提前控制干流下泄流量,削减洪水峰值流量,与蒙洼蓄洪区共同作用,以更好发挥现有水利工程的防洪功能。

4.3 新形势下蓄洪区运用探讨

启用蓄洪区虽能缓解干流防洪压力,但会对区内居民财产造成破坏,2020 年蒙洼蓄洪区的启用即造成区内直接经济损失 6.9 亿元。不同时代背景

下,蓄洪区启用损失与防洪效益之间的权衡标准存在差异。2025 年 6 月 23 日《蓄滞洪区运用补偿办法》开始实施,为蓄洪区的规范化调度提供了制度支撑,该办法一方面为蓄洪区规范补偿提供了重要支撑,保障了当地居民的合法权益;另一方面兼顾防洪效益与损失补偿的多目标量化决策,使蓄洪区的启用顺序、启用时间等重要决策更加合理。

5 结 论

- a. 本文构建的蒙洼蓄洪区洪水演进模型模拟过程与遥感影像解译成果在两个时间点的淹没面积验证中,敏感性、特异性和准确度均高于 93%,该模型能够反映蓄洪区内的洪水演进过程,满足洪水复盘精度需要。
- b. 蒙洼蓄洪区分洪过程中,高流速主要出现在沟道内、靠近北部堤防处,且不同年份启用过程的传播时间存在差异,2007 年洪水洪峰流量大,持续时间久,较 2003 年提前 8 h 到达曹台孜闸前。
- c. 2003 年、2007 年和 2020 年淮河干流洪水过程分别具有双峰、洪峰持续时间久、洪峰流量大等特点,蓄洪区在不同特征的洪水应对中均进行了有效分洪,最大分洪流量发生在 2020 年,达 $1\,820\text{ m}^3/\text{s}$,最大分洪量发生在 2003 年,达 5.60 亿 m^3 。但淹没面积相差不大,2003 年较 2007 年蓄洪量增加 113.7%,但淹没面积仅增大 7.5%。

参考文献:

[1] 董世杰,安慧,吴海林. 淮河流域地表温度时空变化及驱动因素分析[J]. 测绘科学,2024,49(10):175-188. (Dong Shijie, An Hui, Wu Hailin. Analysis of spatial-temporal variation and driving factors of surface temperature in the Huai River Basin [J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(10): 175-188. (in Chinese))

[2] 鞠琴,马啸赞,李伟,等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Li Wei, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese))

[3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water

Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))

[4] 甘容,李丹丹,杨峰,等. 1952—2017 年出山店水库上游降水时空变化[J]. 水土保持研究,2022,29(4):150-158. (Gan Rong, Li Dandan, Yang Feng, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in upper upstream of Chushandian Reservoir from 1952 to 2017 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 150-158. (in Chinese))

[5] 李久林,胡大卫,谢敏,等. 社会-生态视角下乡村聚落系统脆弱性评价:以蒙洼行蓄洪区为例[J]. 生态学报,2023,43(22):9164-9176. (Li Jiulin, Hu Dawei, Xie Min, et al. Vulnerability assessment of rural settlement systems from a socio-ecological perspective: the case of Mengwa floodplain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9164-9176. (in Chinese))

[6] 张晓蕾,雷添杰,宋豫秦,等. 基于情景分析的蓄滞洪区土地利用方式优化模拟研究:以蒙洼蓄洪区为例[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(2):55-66. (Zhang Xiaolei, Lei Tianjie, Song Yuqin, et al. Scenario-based optimization and simulation of land use in flood detention basins: a case study of Mengwa [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 55-66. (in Chinese))

[7] 张震,夏广义,辜兵. 安徽省淮河洪水及行蓄洪区调度决策风险管理系统研究与开发[J]. 人民珠江,2018,39(11):157-164. (Zhang Zhen, Xia Guangyi, Gu Bing. Research and development of risk decision management system for flood discharge and retention zones in Huaihe River of Anhui Province [J]. Pearl River, 2018, 39(11): 157-164. (in Chinese))

[8] Duan Kai, Mei Yadong, Zhang Liping. Copula-based bivariate flood frequency analysis in a changing climate: a case study in the Huai River Basin, China [J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(1): 37-46.

[9] Liu Jiahong, Song Tianxu, Mei Chao, et al. Flood risk zoning of cascade reservoir dam break based on a 1D-2D coupled hydrodynamic model: a case study on the Jinsha-Yalong River [J]. Journal of Hydrology, 2024, 639: 131555.

[10] 曾明,张晓皓,纪国良,等. 河库及蓄滞洪区洪水预报调度一体化技术研究[J]. 人民长江,2024,55(10):48-54. (Zeng Ming, Zhang Xiaohao, Ji Guoliang, et al. Research on integrated technology of flood forecasting and dispatching in rivers, reservoirs and flood diversion and storage areas [J]. Yangtze River, 2024, 55(10): 48-54. (in Chinese))

[11] 陈瑜彬,张涛,童冰星,等. 江-湖-蓄滞洪区聚合调洪演算模型研究与应用[J]. 人民长江,2024,55(9):60-65. (Chen Yubin, Zhang Tao, Tong Bingxing, et al. Construction and application of river-lake-flood detention basin aggregation flood routing model [J]. Yangtze River, 2024, 55(9): 60-65. (in Chinese))

- [12] 廖明,林江武,何小花. 龙骨湖蓄滞洪区洪水风险区划研究[J]. 水电与新能源,2025,39(4):55-57. (Liao Ming,Lin Jiangwu,He Xiaohua. On the flood risk zoning of Longgu Lake flood storage and detention area[J]. Hydropower and New Energy,2025,39(4):55-57. (in Chinese))
- [13] 练迪,许玉联,王质军,等. 北江“22·6”特大洪水潯江蓄滞洪区运用研究[J]. 水电能源科学,2025,43(6):218-222. (Lian Di,Xu Yulian,Wang Zhijun,et al. Application research of Pajiang River flood detention basin in the “22·6” flood of Beijiang River[J]. Water Resources and Power,2025,43(6):218-222. (in Chinese))
- [14] 赵然杭,徐悦华,齐真,等. 多源洪水影响下南四湖湖东滞洪区洪水演进模拟[J]. 科学技术与工程,2024,24(32):13983-13995. (Zhao Ranhang,Xu Yuehua,Qi Zhen,et al. Simulation of flood routing in east flood detention basin of Nansi Lake under the influence of multi-source flood[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(32):13983-13995. (in Chinese))
- [15] 邹佳宇,温天福,顾平,等. 超标准洪水下鄱阳湖单退圩和蓄滞洪区联合分洪运用研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(2):54-62. (Zou Jiayu,Wen Tianfu,Gu Ping,et al. Study on joint operation of semi-restoration polder and detention and retention area for flood diversion in Poyang Lake under extreme flood conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(2):54-62. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 刘鑫,官学文,张俊,等. 2024 年洞庭湖团洲垸溃堤过程及洪水演进模拟[J]. 人民长江,2024,55(10):7-14. (Liu Xin,Guan Xuewen,Zhang Jun,et al. Analysis on embankment failure process and flood routing simulation of Tuanzhou embankment in Dongting Lake in 2024[J]. Yangtze River,2024,55(10):7-14. (in Chinese))
- [18] 陈家明,孟令奎,张文. 基于 SAR 遥感的海河“23·7”特大洪水东淀蓄滞洪区淹没范围动态监测及灾害评估[J]. 水利信息化,2025(1):28-33. (Chen Jiaming,Meng Linghui,Zhang Wen. Dynamic monitoring and disaster assessment of Haihe River “23·7” extreme flooding in Dongdian flood storage area based on SAR remote sensing[J]. Water Resources Informatization,2025(1):28-33. (in Chinese))
- [19] 魏凯,梁忠民,王军. 基于 MIKE21 的蒙洼蓄滞洪区洪水演算模拟[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(6):16-19. (Wei Kai,Liang Zhongmin,Wang Jun. Flood routing simulation of Mengwa detention basin based on MIKE21[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2013,11(6):16-19. (in Chinese))
- [20] 胡勇,贲鹏,章启兵,等. 内涝和外洪遭遇情景下洪水风险要素解耦模拟[J]. 江淮水利科技,2023(3):37-43. (Hu Yong,Ben Peng,Zhang Qibing,et al. Decoupled simulation of flood risk factors in scenarios of inland inundation and river flood[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology,2023(3):37-43. (in Chinese))
- [21] 程志远,徐迎春,周婷,等. 基于有无对比法的蒙洼蓄洪工程农业生产效益分析[J]. 中国防汛抗旱,2025,35(6):57-60. (Cheng Zhiyuan,Xu Yingchun,Zhou Ting,et al. Analysis of agricultural benefit analysis of Mengwa flood detention project based on counterfactual method[J]. China Flood & Drought Management,2025,35(6):57-60. (in Chinese))
- [22] 刘家宏,宋天旭,梅超,等. 利比亚德尔纳 2023 年极端洪水模拟复盘分析[J]. 水利学报,2024,55(6):723-734. (Liu Jiahong,Song Tianxu,Mei Chao,et al. Retrospective simulation and analysis of 2023 extreme flood in Derna, Libya[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(6):723-734. (in Chinese))
- [23] Salvucci G, Salvati L. Official statistics, building censuses, and OpenStreetMap completeness in Italy[J]. International Journal of Geo-information,2022,11(1):1-29.
- [24] 夏军强,冯基恒,徐政,等. 水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响研究[J]. 水资源保护,2025,41(2):106-114. (Xia Junqiang,Feng Jiheng,Xu Zheng,et al. Study on influence of rainwater outlet number arranged in hydrodynamic model on urban drainage capacity[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):106-114. (in Chinese))
- [25] 刘宏伟,储少志,蔡钊,等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):30-39. (Liu Hongwei,Chu Shaozhi,Cai Zhao,et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):30-39. (in Chinese))
- [26] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(1):117-124. (Wang Zhaoli,Chen Yuhong,Lai Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):117-124. (in Chinese))
- [27] 李国一,邵薇薇,刘家宏,等. 基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):46-52. (Li Guoyi,Shao Weiwei,Liu Jiahong,et al. Flood simulation and inundation analysis in Ji'nan City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources

- Protection,2024,40(5):46-52. (in Chinese))
- [28] 宋天旭,刘家宏,梅超,等. 极端降雨下地下空间淹水对城市内涝过程的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(2):349-364. (Song Tianxu, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. Research on the influence of underground space on urban waterlogging in extreme rainfall [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(2): 349-364. (in Chinese))
- [29] 周婷,汪炎,邹俊,等. 基于 PCA 和 SVM 的遥感影像水体提取方法及验证[J]. 水资源保护,2023,39(2):180-189. (Zhou Ting, Wang Yan, Zou Jun, et al. PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 180-189. (in Chinese))
- [30] 李宾,栾清华,李涛,等. 协同 MIKE11-KF 的遥感河道流量数据同化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026,54(2):18-27. (Li Bin, Luan Qinghua, Li Tao, et al. Remote sensing river discharge data assimilation with MIKE11-KF [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(2): 18-27. (in Chinese))
- [31] 冯佑斌,何颖清,潘洪洲. 基于高分三号的北江洪水水域提取方法及应用[J]. 水资源保护,2025,41(3):101-110. (Feng Youbin, He Yingqing, Pan Hongzhou. Method for water area extraction of Beijiang River floods based on GF-3 images and its application [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 101-110. (in Chinese))
- [32] Chapi K, Singh V, Shirzadi A, et al. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 95: 229-245.
- [33] 杨广西,张轩庄,由淑明,等. 水陆联合快速封堵技术在团洲垸特大决口抢险中的应用[J]. 人民黄河,2024,46(增刊2):38-39. (Yang Guangxi, Zhang Xuanzhuang, You Shuming, et al. Application of rapid land-water joint sealing technology in emergency response to the major breach at tuanzhou enclosure [J]. Yellow River, 2024, 46(S2): 38-39. (in Chinese))
- [34] 冯宝飞,曾明,张虎,等. 长江 2024 年第 1 号洪水预报调度复盘[J]. 人民长江,2024,55(12):2-7. (Feng Baofei, Zeng Ming, Zhang Hu, et al. Retrospective analysis of flood forecast and reservoir operation during 2024 Changjinag River No. 1 flood [J]. Yangtze River, 2024, 55(12): 2-7. (in Chinese))
- [35] 王雨洁,李致家,姚成,等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 11-18. (in Chinese))
- [36] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (Zhang Xumin, Qu Simin, Li Qian, et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 88-95. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-09-10 编辑:胡新宇)
- +++++
- (上接第 231 页)
- [21] 高明国,陆秋雨. 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学与技术,2021,44(8):198-206. (Gao Mingguo, Lu Qiuyu. Decoupling relationship between water resources utilization and economic development in the Yellow River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(8): 198-206. (in Chinese))
- [22] 路娜,伊丽努尔·阿力甫江,冯平平. 西北五省省会城市水资源利用与经济发展脱钩分析[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(12):107-112. (Lu Na, Ilnur Ghalip, Feng Pingping. Decoupling relations between water resources utilization and economic development in the capital cities of five northwestern provinces [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 107-112. (in Chinese))
- [23] 沈瑞华,姚磊. 基于脱钩分析的 2004—2017 年京津冀城市群水足迹与经济协调关系研究[J]. 西安理工大学学报,2022,38(4):507-518. (Shen Ruihua, Yao Lei. Decoupling analysis of water footprint and economic development in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2004 to 2017 [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(4): 507-518. (in Chinese))
- [24] 陈述,汪钟铃,颜克胜,等. 湖北省水资源压力与经济发展脱钩的时空演化[J]. 水资源保护,2023,39(3):134-141. (Chen Shu, Wang Zhongling, Yan Kesheng, et al. Spatio temporal evolution of decoupling between water resources stress and economic development in Hubei [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 134-141. (in Chinese))
- [25] 郑炎辉,何艳虎,王金杰,等. 基于脱钩理论的区域产业节水目标研究:以广东省为例[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(4):38-44. (Zheng Yanhui, He Yanhu, Wang Jinjie, et al. Study on the regional industrial water-saving target based on decoupling theory: a case study of Guangdong Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(4): 38-44. (in Chinese))
- [26] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望[J]. 自然资源学报,2014,29(1):46-54. (Wu Dan. Evaluation and prospect on the decoupling trend of economic development and water resource utilization in China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 46-54. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-09-29 编辑:胡新宇)