

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.021

基于陆气耦合的城市内涝高分辨率模拟预报方法

周 聂¹, 侯精明¹, 苏 锋², 毕 旭³, 陈光照¹, 张大伟⁴, 李丙尧¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 西安市气象台, 陕西 西安 710016; 4. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038)

摘 要: 高分辨率城市内涝预报能更准确反映城市内涝情况,有助于及时发布预警预报信息,降低城市内涝带来的损失。基于预报降雨校正模块和高精度水文水动力模型,耦合 GRAPES_MESO 数值天气预报模式,构建了基于陆气耦合的城市内涝模拟预报模型。并以陕西省西咸新区部分区域为研究对象,通过三场实测暴雨检验模型的预报性能。结果表明,所建模型能高效准确预测城市内涝积水要素,计算 15 h 降雨-致涝过程平均用时为 0.82 h,预报内涝积水面积平均误差低于 10%,积水量平均误差小于 20%,可见模型预报性能良好,能高效开展城市内涝预报工作,其模拟预报结果对指导城市防灾减灾工作具有一定意义。

关键词: 城市内涝预报; GRAPES_MESO 模型; 水文水动力模型; 数值模拟; 降雨校正; 高分辨率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0131-08

High-resolution Simulation and Forecasting of Urban Waterlogging Based on Land-atmosphere Coupling

ZHOU Nie¹, HOU Jing-ming¹, SU Feng², BI Xu³, CHEN Guang-zhao¹,
ZHANG Da-wei⁴, LI Bing-yao¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Meteorological Station, Xi'an 710016, China; 4. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The high-resolution urban waterlogging forecasting can reflect the urban waterlogging more accurately, help to release the early warning and forecast information in time, and reduce the loss caused by the urban waterlogging. Based on the rainfall forecast correction module and the high-precision hydrodynamics model and coupling with the GRAPES_MESO numerical weather forecast model, an urban waterlogging simulation forecast model based on land-atmosphere coupling was constructed. The prediction performance of the model in Xixian New Area of Shaanxi Province was tested through three

基金项目: 国家十三五重大研发专项(2016YFC0402704); 国家自然科学基金资助项目(51609199); 陕西省水利科技项目(2017SLKJ-14); 固原海绵城市建设及运营关键技术研究项目(SCHM-2018-0104)
通信作者: 侯精明 E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

measured rainstorm events. The model could predict the urban waterlogging factors efficiently and accurately. The average time for calculating a 15 h rainfall-waterlogging process was 0.82 h, and the average error of predicting the waterlogging area was less than 10% and the average error of the water volume was less than 20%, indicating that the prediction performance of the model was good. The model can efficiently forecast the urban waterlogging, and the simulation results have certain significance to guide the urban disaster prevention and mitigation.

Key words: urban waterlogging forecasting; GRAPES_MESO model; hydrological hydrodynamic model; numerical simulation; rainfall correction; high resolution

城市内涝预报有助于及时发布预警预报信息,安排防灾减灾工作,是指导防灾减灾工作的重要依据之一。历经多年发展起来的数值天气预报模型可以提供网格格式并且具有较长前置时间的定量降雨预报(QPF)产品,最新天气预报模型的预报期可长达 15 d。将中尺度数值预报模型(NWP model)与降雨-径流模型耦合构建大气水文模拟系统可以进行洪涝预报,其在实时洪涝预报中的预见时间较长,因此具有广泛的应用前景^[1]。国内外专家学者在这方面进行了许多研究,取得了一些成果^[2-4]。例如,汪君等^[2]运用卫星遥感获得降雨资料,结合 CREST 水文模型进行洪涝灾害预报,能较好反映大尺度洪涝灾害的程度和范围,但无法进行高分辨率的模拟,且对春冬季的径流量预报具有较大误差;Gomez 等^[4]通过综合气象信息和水位信息,将 HEC-RAS 一维水力学模型与区域水文综合预报系统耦合,提高了中短期洪水淹没模型的预报能力,但是其模型只能展示最终计算结果,无法反映洪涝过程。

尽管耦合气象数值预报信息的洪涝预报研究较广泛,但研究大多局限于构建大尺度流域的水文模型,将气象数值预报信息与水文水动力模型耦合并应用于高分辨率城市内涝预报的研究较少。对于城市内涝预报,水文水动力模型能更详尽地表征暴雨致涝过程,得到更加全面的内涝信息。鉴于此,笔者通过耦合 GRAPES_MESO 数值预报模式和水文水动力模型,以高分辨率地形为基础数据,生成精细化网格,研究构建基于陆气耦合的高分辨率城市内涝预报模型,旨在为城市内涝预警和预报工作提供可靠的决策依据。

1 基于陆气耦合的内涝高分辨率预报方法

1.1 耦合模拟方法

进行城市内涝预报需要高效的暴雨洪涝过程模型和准确的降雨预报数据,本研究基于预报降雨校

正模块和水文水动力模型,耦合数值气象预报模式构建了气象-水文水动力耦合的高分辨率城市内涝预报模型。模拟预报方法如图 1 所示,预报降雨数据由 GRAPES_MESO 模型每 12 h 更新,并由基于回归技术的降雨数据校正模块加以改进;而后将校正预报降雨数据作为输入条件,通过水文水动力模型计算,模拟预报城市内涝过程。

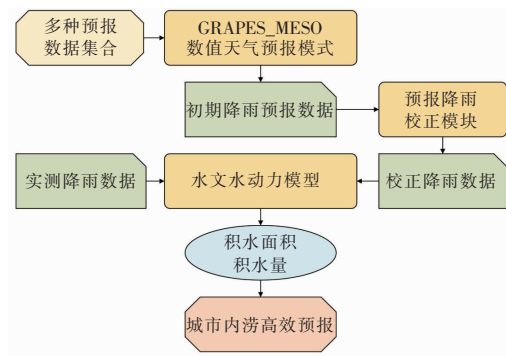


图 1 城市内涝预报流程

Fig. 1 Workflow of urban waterlogging forecast

积水面积、积水量和水深是评价城市内涝危险程度的重要指标,由于水深可由积水量与积水面积来估算,故本研究采用积水面积、积水量作为评价模型预报效果的主要指标,并通过历史降雨-致涝数据修正内涝预报模型的预报性能。

1.2 GRAPES_MESO 数值预报模型

GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 是中国气象局自主研发构建的基于多层次通用资料同化的数值预报系统,在 GRAPES 中根据不同分辨率要求,可分别组建成全球中期天气预报系统 (GRAPES_GFS) 和区域中尺度天气预报系统 (GRAPES_MESO)。经过数次升级,GRAPES_MESO 的湿度场分析功能和地形资料集成模块获得了优化,选用垂直分层方式,将等压面分析系统升级为模式面分析系统^[5],优化改进水汽平流

方案^[6],对各类降雨情况的预报性能得到了较大的提升。

目前 GRAPES_MESO 已发展到 V4.0 版本,对变分质量控制进行校核,同时优化探空湿度量化模块,进一步整合 GPS/PW 及 FY-2E 云导风等资料,显著提升了预报模式的精度。此外,针对模式中涉及的扩散问题,引入四阶水平扩散方案,使在降雨预报的趋势及降水点转移预报方面的求解方式更加可靠。优化微物理参数化方案和动力框架的集合方案,健全地面辐射能量平衡方程,升级雷达中反射率因子的反映方式,使其更好地反映雨带细节^[7],预报偏差明显降低,ETS 评分显著提升,现已能高效稳定地提供水平分辨率为 10 km、时间分辨率为 3 h 的我国及周边区域未来 72 h 的预报降雨数据。

1.3 水文水动力模型

1.3.1 控制方程

模型控制方程为耦合水文过程的二维浅水方程(SWEs),忽略运动黏性项、科氏力、风应力及紊流黏性项。其对应的二维非线性浅水方程守恒格式的矢量形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{q} 为变量矢量,包括 x 和 y 方向的单宽流量 q_x 和 q_y ; u 、 v 分别为 x 和 y 方向的流速; \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 分别为 x 、 y 方向的通量矢量; i 为净雨率; \mathbf{S} 为源项矢量; z_b 为河床底面高程; $C_f = gn^2/h^{1/3}$ 为河床糙率系数,其中 n 为曼宁系数。

1.3.2 数值方法

模型采用考虑物理问题最全面的动力波方法进

行城市雨洪过程的模拟运算,利用 Godunov 格式的有限体积法进行空间离散求解二维浅水方程,并通过二阶显式 Runge Kutta 方法^[8]构造具有二阶时空精度的 MUSCL (Monotonic Upwind Scheme for Conservation) 型格式,确保物质守恒并有效解决不连续问题^[9]。

针对模拟过程中可能产生急变流与非连续等复杂问题,模型选用 HLLC 近似黎曼求解器对单元界面上的质量以及动量的通量进行求解。运用静水重构法^[10]处理干湿边界处出现负水深的问题,用流速替代单宽流量作为计算变量,将容易失稳的二阶格式在水深低于或流速高于一定值时有效地转换为稳定的一阶计算格式。在保障计算精度的前提下,将计算单元中的坡面源项转换为该单元边界上的通量,确保其在进行复杂地形计算时同样满足全稳条件。摩阻源项使用 Hou 等人^[11]优化的分裂点隐式法保障运算结果的稳定性。同时,模型利用 GPU (Graphics Processing Unit) 并行技术对模拟计算过程进行加速,保障模型运算效率。

该模型具有输入参数较少、率定简便的优点,可在单机上实现大规模数据计算,模型能够对尺度大、下垫面条件复杂的城市区域进行高精度的内涝模拟,在文献[12]中对一小流域的模拟结果与实测数据结果相吻合,模型模拟性能良好,另外,在文献[13]中对另一区域的模拟结果与实测数据的良好对比分析,再次验证了模型的可靠性。

2 基于回归分析的预报降雨数据校正方案

降雨是洪涝灾害发生的主要驱动因素,进行高分辨率洪涝预报除了依靠高分辨率的水文水动力模型外,很大程度上也取决于预报降雨数据的准确性。笔者将从陕西省西咸新区海绵城市综合管控平台获得的实测降雨数据与从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获得的预报降雨数据进行对比,发现预报降雨数据在研究区域内存在较大误差,无法满足高分辨率城市内涝预报要求,因此,本研究构建了预报降雨校正模块,采用回归技术对预报降雨数据进行校正。

考虑到 GRAPES_MESO 中国及周边区域数值预报产品从 2015 年 12 月 29 日开始发布,故校正方案选用 2016 年 1 月 1 日—2019 年 1 月 1 日共 3 年的预报与实测降雨数据作为研究样本。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,冷暖干湿四季分明,

据此对 3 年降雨样本进行季度性分析,总结出 GRAPES_MESO 预报数据在各个季度不同的误差规律,第一季度预报降雨数据普遍偏小,第二季度预报降雨数据普遍偏大,第三季度预报降雨数据普遍偏小,鉴于研究区第四季度降雨场次及降雨量均较少,暂未对其进行分析与修正。

校正方案基于以上分析的预报降雨数据特点,分析对比各季度实测降雨数据与预报降雨数据,由 SPSS 软件的回归功能模块拟合出各季度的预报降雨校正公式,第一季度: $H_2 = 0.251\ 8 \lg H_1 + 2.781\ 5$,第二季度: $H_2 = 0.002\ 8 H_1^2 + 0.123\ 6 H_1 + 2.013\ 6$,第三季度: $H_2 = 0.006\ 9 H_1^2 + 0.285\ 8 H_1 + 3.748\ 1$,其中, H_1 为预报降雨的累计降雨量, H_2 为校正后的累计降雨量。该公式用于修正单场次预报降雨数据的累计降雨量,预报数据是 GRAPES_MESO 提供的水平分辨率为 10 km、时间分辨率为 3 h 的预报降雨数据。

研究区域的暴雨公式^[14]如下:

$$q = \frac{446.367\ 6 \times (1 + 1.971 \lg P)}{(t + 7.424\ 6)^{0.812\ 4}} \quad (6)$$

式中: q 为暴雨强度,mm/h; P 为重现期,年; t 为降雨历时,min。

经各季度校正公式校正后,将校正后的累计降雨量按校正前各时段降雨量所占比例进行分配,其时间分辨率仍为 3 h。为使校正预报降雨数据更符合实测情况,对校正后的降雨量进行再分配,将其时间分辨率降为 1 h。因暴雨致涝情况通常由暴雨峰值决定,进而选择对预报降雨量最大的 3 h 时段进行降尺度修正,其余时段降雨量对致涝情况的影响相对较小,默认为均匀降雨,对比校正预报降雨数据和实测降雨数据,总结出以下二次校正规律:

① 当校正后 3 h 累计降雨量 < 20 mm 时,可认为是在 1 h 内的集中降雨,若当前 3 h 时段的前期有降雨而后期无降雨,则认为降雨都集中在第 1 小时,若前期无降雨而后期有降雨则认为是第 3 小时的集中降雨,如后文中的暴雨Ⅲ;若前后期均有或均无降雨情况时,则根据其累计降雨量,按照对应重现期的芝加哥雨型时程分配比例对降雨量按比例分配,即按暴雨公式获得对应重现期降雨的分配比例将总雨量依次分配入第 1、第 2、第 3 小时。

② 当校正后累计降雨量 > 20 mm,且降雨量集中于某个 3 h 时段内时,则对此 3 h 累计降雨量按对应重现期的芝加哥雨型时程分配比例进行分配,

如后文中的暴雨Ⅱ;若降雨量较分散,则将其视为均匀降雨,如后文中的暴雨Ⅰ。

3 预报性能分析

3.1 研究区域及典型暴雨场次

3.1.1 研究区域概况

本研究选取西咸新区部分区域作为研究区域,检验预报模型的预报性能。区域总面积为 1.7 km²,地形复杂,存在多处低洼路段,每逢雨季,极易产生大面积道路积水。

进行城市内涝预报时,低精度地形资料将直接导致预报结果与实际不符,过高精度地形资料,将会延长模拟计算时间,降低预报模型的时效性。经综合考虑,本预报模型地形数据的水平分辨率取值 2 m,由 427 176 个网格构成,数字高程图如图 2 所示。基于最大似然分类法将研究区域内的土地按不同利用情况划分为房屋、道路、林地、绿地和裸地共 5 大类型,占地面积分别为 0.193、0.291、0.022、0.957、0.243 km²,占比分别为 11.33%、17.06%、1.28%、56.08%、14.25%。研究区域的管网根据其设计排水能力,采用侯精明等人^[15]提出的等效排水方法,等效为 10.74 mm/h 的下渗率;各类型地块的下渗率及曼宁系数根据文献^[16]确定,房屋、道路、林地、绿地和裸地的下渗率分别为 0、0、37.55、28.39、19.43 mm/h,曼宁系数分别为 0.015、0.014、0.2、0.06、0.03。

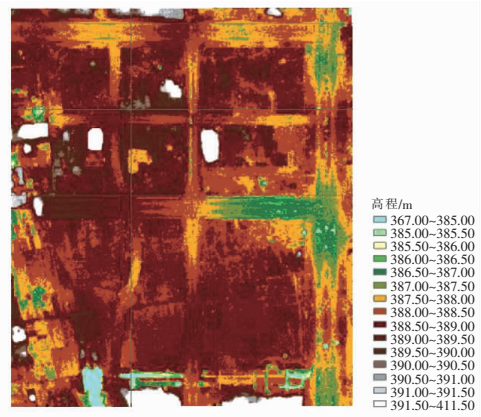


图 2 研究区域数字高程图

Fig. 2 DEM data of study area

3.1.2 典型暴雨场次

因研究区域致涝暴雨主要集中在 7 月—9 月,本研究主要利用第三季度的实测暴雨资料来检验内涝预报模型的预报性能。

主要选择 3 场实测暴雨:暴雨 I 发生于 2018 年 8 月 21 日,历时 13 h,累计降雨量为 40.2 mm,降雨强度峰值出现在第 1 小时,最大小时降雨量为 14.2 mm;暴雨 II 为 2017 年 8 月 7 日的降雨,累计降雨量为 33.8 mm,历时 6 h,短于暴雨 I,但最大小时降雨量较大,达到 22 mm;暴雨 III 为 2017 年 7 月 27 日的降雨,累计降雨量较小,为 21 mm,历时 5 h,最大小时降雨量为 17.4 mm。

3.2 模拟结果与分析

采用内涝积水面积与积水量的误差百分比来评价洪涝预报系统的性能。为了更全面地反映模型预报性能,本研究对 3 场典型暴雨各选择两个内涝较为严重的时刻进行分析,选取 9 个主要积水位置进行验证。

对 GRAPES_MESO 预报降雨数据的处理结果如图 3 所示,通过预报降雨校正模块提高了预报降雨量的准确性。经过对比发现,预报降雨的累计降雨量均高于 3 场降雨的观测值,这意味着 GRAPRS_MESO 模型过高地估计了研究区域的降雨量,后续借助预报降雨校正模块对预报降雨量进行校正,获得了校正预报降雨量,使预报降雨量的准确性得到了有效提高。

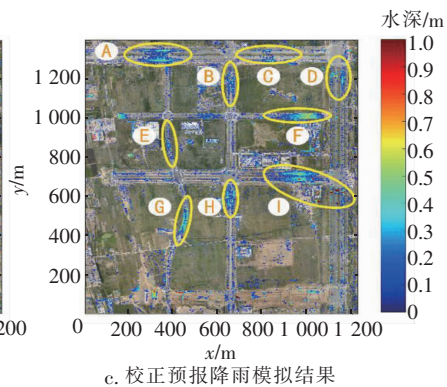
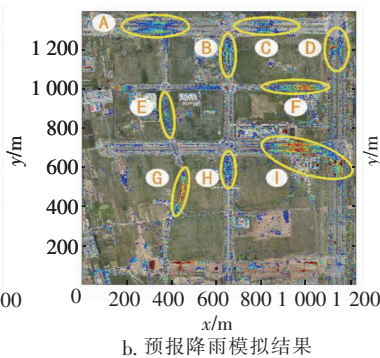
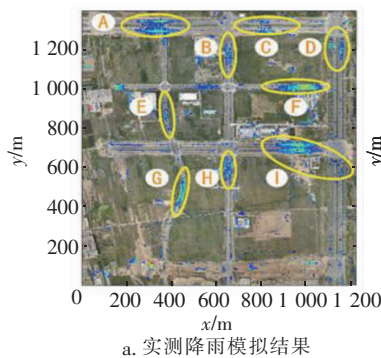
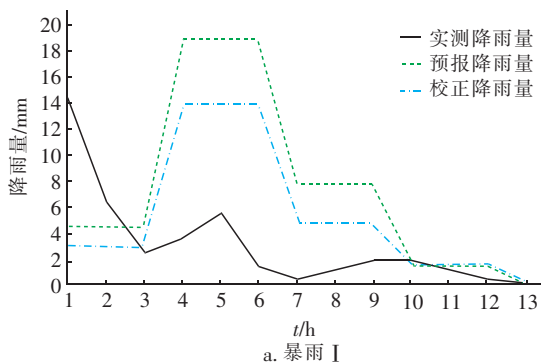


图 4 暴雨 I 模拟致涝情况对比 ($t=4$ h)

Fig. 4 Comparison of waterlogging simulation results in rainstorm event I ($t=4$ h)

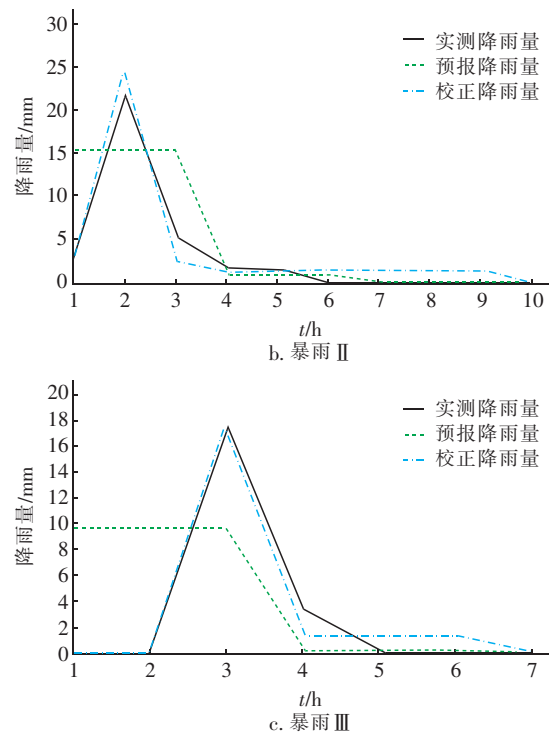


图 3 各场暴雨的降雨过程

Fig. 3 Process of the selected rainstorm events

暴雨 I 共持续 13 h,为长历时降雨,降雨峰值出现在第 1 小时,模拟结果显示其内涝积水最严重的时刻在第 4 小时,相对于雨峰滞后了一段时间,这是由于前期土壤下渗能力较大而且地表积水汇流需要一定的时间,内涝积水峰值相对于雨峰应该有一定的滞后。其暴雨致涝情况如图 4 所示,表 1 为具体的预报结果。在 4 h 时,实测降雨模拟结果和预报降雨模拟结果的积水面积平均误差为 45.86%,积水量平均误差为 210.77%;在 6 h 时,实测降雨模拟结果和预报降雨模拟结果的积水面积平均误差为 50.60%,积水量平均误差为 236.29%。

表 1 暴雨 I 致涝积水点模拟结果

Tab. 1 Simulation results of waterlogging in rainstorm event I

积水点编号			A	B	C	D	E	F	G	H	I
$t = 4 \text{ h}$	积水面积/ m^2	实测	13 059	4 104	5 742	5 499	6 579	3 204	6 327	4 059	21 204
		预报	17 325	6 309	9 522	8 604	7 497	5 337	9 234	4 734	34 119
		校正	13 131	4 104	5 850	5 418	6 363	3 303	6 129	4 329	20 268
	积水量/ m^3	实测	2 703	999	1 202	1 237	2 149	544	1 665	803	5 735
		预报	7 105	3 159	3 973	4 017	4 868	2 236	5 450	1 758	21 721
		校正	2 580	959	1 153	1 174	1 902	524	1 490	876	4 976
$t = 6 \text{ h}$	积水面积/ m^2	实测	11 664	3 852	6 130	5 067	6 444	2 862	5 949	3 816	19 692
		预报	16 047	6 237	9 306	8 424	7 407	5 247	9 171	4 275	34 137
		校正	12 537	3 978	5 373	5 166	6 345	3 096	6 030	3 969	19 818
	积水量/ m^3	实测	2 369	897	1 044	1 100	2 004	467	1 521	702	5 234
		预报	6 414	3 037	3 865	3 861	4 642	2 156	5 436	1 577	22 023
		校正	2 407	917	1 058	1 101	1 885	480	1 468	752	4 931

对比实测降雨数据和校正预报降雨数据可知,在 4 h 时,积水面积平均误差为 2.72%,积水量平均误差为 7.30%;在 6 h 时,积水面积平均误差为 4.53%,积水量平均误差为 3.38%。在这场降雨中,如果没有对预报降雨数据进行校正,与实测降雨量对比,预报降雨量将造成约 2 倍的误差,这将导致内涝预报的失败,因此,对此类长历时降雨事件,对

预报降雨量进行适当校正极为重要。

对于暴雨 II,降雨历时相对较短,雨量分布较为集中,模拟结果如表 2 所示,预测内涝情况大于实际情况。无校正模块时 4 h 预测积水量的平均误差为 261.19%,校正后为 14.51%;校正后 6 h 积水量的平均误差为 15.32%。与暴雨 I 的校正效果相比,校正模块在该场降雨中表现稍差。

表 2 暴雨 II 致涝积水点模拟结果

Tab. 2 Simulation results of waterlogging in rainstorm event II

积水点编号			A	B	C	D	E	F	G	H	I
$t = 4 \text{ h}$	积水面积/ m^2	实测	17 199	6 327	11 403	9 891	7 470	5 571	9 315	4 779	36 117
		预报	20 565	6 633	13 923	12 159	7 668	6 120	10 296	5 400	39 960
		校正	18 828	6 408	13 032	11 169	7 452	5 787	9 540	4 824	37 818
	积水量/ m^3	实测	8 559	3 572	5 777	5 369	5 025	3 062	6 535	2 124	25 960
		预报	35 152	11 114	21 517	20 923	15 090	11 855	20 295	9 192	87 207
		校正	10 035	3 942	7 211	6 637	5 320	3 479	6 955	2 542	28 277
$t = 6 \text{ h}$	积水面积/ m^2	实测	16 092	6 066	10 881	9 468	7 389	5 400	9 099	4 590	35 667
		预报	18 441	6 399	13 329	11 952	7 470	5 949	9 972	4 923	39 537
		校正	17 739	6 237	12 510	10 863	7 380	5 616	9 405	4 716	37 566
	积水量/ m^3	实测	8 092	3 369	5 448	5 102	4 885	2 920	6 294	1 984	25 293
		预报	33 181	10 676	20 688	20 354	14 622	11 576	19 925	8 827	85 187
		校正	9 473	3 728	6 948	6 317	5 164	3 362	6 766	2 401	27 680

暴雨 III 的模拟致涝情况如表 3 所示。无校正模块的 3 h 预测积水量的平均误差为 109.82%,校正后为 8.21%;无校正模块的 4 h 预测积水量的平均误差为 111.30%,校正后为 7.42%。对于累计降雨量较小的降雨事件,虽然直接运用预报降雨数据模拟结果与前两场暴雨相比得到了相对较好的预测效果,但仍然存在较大的误差,预报性能仍有较大的提升空间。

综合以上分析,本研究构建的预报降雨校正公式能够有效降低因预报降雨数据不准确而造成的过大误差,能大幅提高城市内涝预报模拟的可靠性;暴雨致涝模拟预报精度分析如表 4 所示,所建城市内涝预报模型对内涝积水面积的预报误差 $< 10\%$,对积水量的预报误差 $< 20\%$,预报性能较好。同时,计算 15 h 降雨-致涝过程平均用时为 0.82 h,具有良好的时效性。

表 3 暴雨Ⅲ致涝积水点模拟结果

Tab.3 Simulation results of waterlogging in rainstorm event Ⅲ

积水点编号			A	B	C	D	E	F	G	H	I
t = 3 h	积水面积/m ²	实测	17 397	5 814	8 928	7 830	7 497	4 887	8 523	5 656	29 808
		预报	20 367	6 597	12 087	10 737	7 668	5 787	9 450	5 508	36 360
		校正	17 640	5 904	9 009	8 046	7 533	5 103	8 649	5 283	30 294
	积水量/m ³	实测	6 339	2 358	3 107	3 103	4 383	1 638	3 995	1 806	14 606
		预报	12 513	4 806	7 158	7 119	7 161	4 092	8 004	3 349	33 362
		校正	6 811	2 574	3 371	3 380	4 628	1 821	4 306	1 919	15 925
t = 4 h	积水面积/m ²	实测	16 848	5 796	8 694	7 731	7 443	4 734	8 478	4 590	30 366
		预报	18 774	6 498	12 204	10 629	7 524	5 742	9 522	5 022	36 801
		校正	16 857	5 886	8 775	7 848	7 452	4 860	8 559	4 599	30 861
	积水量/m ³	实测	5 995	2 347	2 997	3 009	4 247	1 582	4 149	1 457	15 534
		预报	11 388	4 592	7 280	7 082	6 782	4 039	8 128	2 939	34 982
		校正	6 334	2 551	3 242	3 264	4 444	1 750	4 433	1 551	16 657

表 4 暴雨致涝模拟预报精度分析

Tab.4 Accuracy analysis of the modeled waterlogging caused by rainstorms %

项 目	实测降雨与预报降雨模拟内涝平均误差		实测降雨与校正预报降雨模拟内涝平均误差	
	积水面积	积水量	积水面积	积水量
暴雨Ⅰ	48.23	223.53	3.63	5.34
暴雨Ⅱ	12.44	263.91	6.03	14.91
暴雨Ⅲ	18.11	110.56	1.71	7.81

4 结论

本研究基于预报降雨校正模块和高精度水文水动力模型,集合 GRAPES_MESO 数值天气预报模式,建立了基于气象-水文水动力模型耦合的高分辨率城市内涝预报模型,并以西咸新区部分区域为研究区域验证模型的预报性能,结论如下:

① 经分析预报降雨资料与实测降雨资料,发现 GRAPES_MESO 数值天气预报模式所提供的预报降雨量与实测降雨量间存在较大误差。为实现高分辨率的城市内涝预报工作,基于回归分析构建了研究区域内 GRAPES_MESO 数值天气预报模式预报降雨资料的校正方案,结果表明,校正方案能够有效降低预报降雨数据的预报误差。

② 暴雨Ⅱ的实测降雨与校正预报降雨模拟内涝积水量平均误差为 14.91%,暴雨Ⅰ与暴雨Ⅲ的模拟内涝积水量平均误差分别为 5.34% 和 7.81%,因此,本研究所建城市内涝预报模型对历时长和峰值较小暴雨的致涝情况预报性能更佳。

③ 模型预报积水点位置、积水面积及积水量与实测降雨内涝模拟数据相吻合,能高效准确预报

出研究区域的内涝积水情况。模型模拟 1.7 km² 研究区域的 15 h 内涝积水过程,平均用时为 0.82 h,可实现提前 14 h 的高分辨率内涝预报,具有较好的时效性,能够满足城市内涝预报工作的要求。且基于 GRAPES_MESO 数值天气预报模式所提供的未来 72 h 降雨数据,模型能够在较短时间内完成对未来 72 h 的城市内涝模拟预报工作。

本研究所构建的城市内涝高分辨率模拟预报模型能够高效完成城市内涝预报工作,其模拟预报结果对城市防灾减灾工作有一定意义。因目前所用的 GRAPES_MESO 降雨预报模式空间和时间分辨率的限制,影响了整体洪涝过程的预报可靠性,下一步研究中将引入空间和时间分辨率更高的降雨预报模式来进一步提升模拟预报精度。

参考文献:

[1] VISWANADHAPALLI Y, VENKATA S C, SABIQUE L, et al. Predicting extreme rainfall events over Jeddah, Saudi Arabia: impact of data assimilation with conventional and satellite observations [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142 (694): 327 - 348.

[2] 汪君,王会军, HONG Yang. 一个新的高分辨率洪涝动力数值监测预报系统 [J]. 科学通报, 2016, 61 (4): 518 - 528.

WANG Jun, WANG Huijun, HONG Yang. A high-resolution flood forecasting and monitoring system for China using satellite remote sensing data [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61 (4): 518 - 528 (in Chinese).

[3] TIAN J, LIU J, YAN D, et al. Ensemble flood forecasting

- based on a coupled atmospheric-hydrological modeling system with data assimilation [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 224: 127 – 137.
- [4] GOMEZ M, SHARMA S, REED S, *et al.* Skill of ensemble flood inundation forecasts at short- to medium-range timescales [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 207 – 220.
- [5] 马旭林, 庄照荣, 薛纪善, 等. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展 [J]. *气象学报*, 2009, 67(1): 50 – 60.
- MA Xulin, ZHUANG Zhaorong, XUE Jishan, *et al.* Development of 3-D variational data assimilation system for thenonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(1): 50 – 60 (in Chinese).
- [6] 沈学顺, 王明欢, 肖锋. GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究 I: 理论方案设计与理想试验 [J]. *气象学报*, 2011, 69(1): 1 – 15.
- SHEN Xueshun, WANG Minghuan, XIAO Feng. A study of the high-order accuracy and positive-definite conformal advection scheme in the GRAPES model I: scientific design and idealized tests [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(1): 1 – 15 (in Chinese).
- [7] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_Meso_V4.0 主要技术改进和预报效果检验 [J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 25 – 37.
- HUANG Liping, CHEN Dehui, DENG Liantang, *et al.* Main technical improvements of GRAPES_Meso_V4.0 and verification [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(1): 25 – 37 (in Chinese).
- [8] HUBBARD M E. Multidimensional slope limiters for MUSCL-type finite volume schemes on unstructured grids [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 155(1): 54 – 74.
- [9] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, *et al.* An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 66: 131 – 152.
- [10] SIVAKUMAR P, HYAMS D G, TAYLOR L K, *et al.* A primitive-variable Riemann method for solution of the shallow water equations with wetting and drying [J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(19): 7452 – 7472.
- [11] HOU J, LIANG Q, SIMONS F, *et al.* A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 82: 132 – 147.
- [12] 侯精明, 李桂伊, 李国栋, 等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(2): 96 – 107.
- HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, *et al.* Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2): 96 – 107 (in Chinese).
- [13] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(3): 40 – 49.
- HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, *et al.* High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(3): 40 – 49 (in Chinese).
- [14] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 45 – 55.
- HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, *et al.* Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 45 – 55 (in Chinese).
- [15] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟 [J]. *水科学进展*, 2017, 28(6): 820 – 828.
- HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, *et al.* Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 820 – 828 (in Chinese).
- [16] 李贵玉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- LI Guiyu. Comparative Study on Soil Infiltration under Different Land Uses in Loess Hilly Regions [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007 (in Chinese).

作者简介: 周赓 (1996 –), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事城市水力学方面研究。

E-mail: 565746347@qq.com

收稿日期: 2020 – 02 – 13

修回日期: 2020 – 04 – 26

(编辑: 刘贵春)