

极端暴雨威胁下的城市内涝风险预警系统研究

曹雪健¹ 戚友存² 李梦迪² 杨志达² 倪广恒¹

1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘要 传统内涝风险预报系统多基于单一降雨产品驱动城市水文水动力模型的模式, 难以解决由于暴雨观测或数值模拟带来的不确定性问题。综合利用多源降雨(雷达、地面雨量计、地面雨滴谱)、积水观测数据, 有利于提高内涝预报精度, 改善风险空间描述。因此, 为了进一步加强洪涝预测能力以更好应对极端暴雨威胁, 本研究提出了基于综合观测的城市内涝风险预警系统, 并在北京市清河流域进行了初步实践和检验。该系统包含六个模块, 融合了新兴的降雨积水观测技术, 引入了主流的降雨临近预报方法, 采用了成熟的城市雨洪模拟手段, 可为道路交通提供实时的积水深度和风险等级, 为城市内涝灾害应急管理提供内涝风险预测和预警产品。

关键词: 城市水文, 城市内涝, 气象雷达, 综合观测, 风险预警, 洪水模型

文章编号: 2021191A **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2112.21191

On an Early Warning System of Urban Waterlogging under the Threat of Extreme Rainfall Events

CAO Xuejian¹ QI Youcun² LI Mengdi² YANG Zhida² NI Guangheng¹

1.State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Abstract Traditional urban flood forecasting mostly adopts the mode of driving an urban hydrodynamic model with a single rainfall product, which is difficult to solve the uncertainty due to rainfall measurements or numerical modeling. Comprehensive utilization of multi-source precipitation (radar, rain gauge, and distrometer), and surface ponding observation will help improve both the forecasting accuracy of waterlogging and the spatial description of risk. Therefore, to better cope with the threat of extreme storms, this study proposes a warning system of urban waterlogging based on comprehensive observations to further strengthen the ability of flood forecasting, and has conducted preliminary practice and validation in the Qing River Basin of Beijing. The system contains six modules, integrates emerging observation technologies of both rainfall and waterlogging, introduces a mainstream method of rainfall nowcasting, and adopts well-established simulation methods of urban flooding. It can provide real-time water depth for road traffic and early warning products for urban emergency management.

Key words urban hydrology, urban pluvial flood, weather radar, comprehensive observation, risk warning, flood modeling

收稿日期: 2021-10-09; 网络预出版日期:

作者简介: 曹雪健, 男, 1993 年出生, 博士研究生, 主要从事城市水文气象研究。E-mail: cxj17@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 戚友存, 主要从事雷达水文气象研究。Email: youcun.qi@igsrr.ac.cn; 倪广恒, 主要从事城市水文气象研究。Email: ghni@tsinghua.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1507505), 中国科学院百人计划

Funded by: National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1507505) and Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences

39 1 引 言

40 受气候变化和人类活动影响(Miller 等, 2017; Pumo 等, 2017; Sofia 等, 2017), 全球水循环过程发
41 生了显著变化(宋晓猛等, 2013; 张建云等, 2016), 极端暴雨事件明显增加, 洪水内涝灾害肆意蔓延(Smith
42 等, 2019), 造成了巨大的经济损失和人员伤亡(Ashley 等, 2008; Paprotny 等, 2018)。从全球来看, 1970
43 至 2009 年间, 共发生洪水及风暴灾害事件约 6200 起, 造成近百万人死亡和超过 1.6 万亿美元的经济损失
44 (WMO, 2013)。就我国而言, 许多城市同样处于洪水内涝的威胁之下, 甚至深受其害(蒋灵峰 2018; Du
45 等, 2019)。据 2018 年《中国水旱灾害公报》统计, 21 世纪以来我国因洪致死人数已经超过 2 万人, 直接
46 经济损失超过 3 万亿元。可以说, 极端暴雨引发的洪水内涝灾害俨然已成为我国城市发展的一大痼疾, 且
47 有可能进一步加剧(Hallegatte 等, 2013; Chen 等, 2020)。

48 面向政府及公众, 开展城市洪涝预报预警研究, 构建可靠的城市内涝灾害预报预警系统, 提前预判风
49 险, 防范于未然, 有利于减少人员伤亡, 遏制经济损失, 更好应对极端暴雨威胁, 为真正实现“预字当先,
50 关口前移”做好保障(Acosta-Coll 等, 2018)。侯天宇等(2021)基于智能物联网技术对天津市积水实况
51 信息进行监测, 而后采用机器学习的方法尝试对未来 1 小时最大积水深度进行预报。结果表明, 该系统可
52 较好预测未来一小时积水深度变化, 但有限的基础数据会极大限制机器学习模型的表现(Duncan 等, 2013),
53 导致预测精度不足。随着城市水文水动力模型及其耦合技术的不断发展, 基于物理模型的洪涝预报技术日
54 趋成熟(宋晓猛等, 2014)。魏军等(2019)以气象站降雨数据驱动城市内涝水动力模型建立了石家庄城市
55 内涝风险预警系统。郝莹等(2019)以空间分辨为 1 公里, 时间分辨率为 1 小时的降雨预报产品驱动城市
56 暴雨内涝模型构建了合肥城市内涝风险预警系统。可以发现, 当前主流的城市内涝风险预报系统依然局限
57 于采用单一降雨产品驱动城市水文水动力模型的模式, 难以同时兼顾降雨估计精度和空间变异性描述两个
58 方面, 从而导致风险预报结果具有较大的不确定性。例如, 雨滴谱仪和雨量计降雨观测产品可以提供准确
59 的点降雨数据(Wang 等, 2013), 但无法考虑降雨的空间变异性; 天气雷达可以精细化描述降雨空间分布
60 (Van de Beek 等, 2010), 但受地形遮挡及信号衰减等因素影响, 在降雨定量估计的准确性方面仍然存在
61 不足。此外, 城市水文水动力模型结构及参数的不确定性, 同样会对预报结果带来影响。导致即使在拥有
62 良好降雨驱动数据的条件下, 洪涝风险预警仍然可能失效。

63 因此, 本研究提出了基于综合观测的城市内涝风险预警系统, 旨在通过充分利用城市多源降雨、积水
64 观测信息, 以有效限制模拟不确定性, 强化城市水灾害预测能力, 为应对极端暴雨威胁提供有力的保障,
65 为城市内涝风险管理提供更好的服务。与此同时, 本文阐述了该系统框架所涉及的现场实况观测方法和预
66 报预警技术手段; 展示了核心部分在北京市清河流域的构建方法, 及其预报效果。

67

68 2 城市水文气象综合观测方法

69 2.1 降雨综合观测

70 迄今为止, 城市降水观测已发展形成了众多方法。考虑到精确的城市水文模拟很大程度上依赖于较高
71 的降雨时空分辨率(Lyu 等, 2018), 常用的降雨观测设备主要包括: 雨量计、雨滴谱仪和天气雷达(如图
72 1 所示)。

73 2.1.1 雨量计

74 雨量计安装方便、操作简单、结果可靠、应用广泛, 是最基本的测雨设备。根据其测量原理, 主要可

75 分为翻斗式雨量计、称重式雨量计、虹吸式雨量计等多种类型。雨量计对地表降雨量进行直接测量，故被
76 认为具有较高的可靠性而成为其他降雨产品的评价基准。但雨量计只能提供特定点位的降雨信息，无法解
77 决降雨空间描述的问题，不能充分反映降雨复杂的空间变异性。

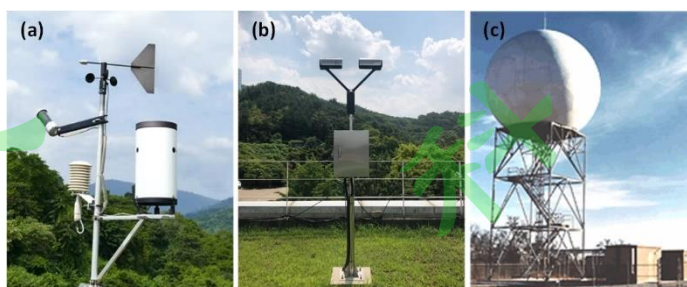
78 2.1.2 雨滴谱仪

79 根据雨滴谱仪的观测原理，可分为冲击型雨滴谱仪、光学雨滴谱仪和声学雨滴谱仪等多种类型。与雨
80 量计相似，雨滴谱仪同样只能提供地面点降雨信息，无法准确刻画降雨空间变异。但雨滴谱仪可实现对雨
81 滴大小、下落速度、雨滴个数等微观特性的定量描述，继而计算得到雷达反射率因子、降雨强度及降雨总
82 量等重要变量。综合使用多部雨滴谱仪的观测数据，可为雷达降水反演提供适用于当地的关键参数。

83 2.1.3 X波段双偏振天气雷达

84 天气雷达通过对目标物体主动发射电磁波，并重新接收其后向散射的部分，对降雨进行观测(杨扬等，
85 2000)。回波强度与雨滴大小及密度紧密相关，故可在一定程度上反应降雨的强度。回波所经历的时间则反
86 映了降雨粒子与雷达的距离。两者相结合，可获得每个时刻降雨的空间分布信息。天气雷达波长范围很大，
87 具体可分为K波段、X波段、C波段、S波段和L波段。不同波段适用范围不同，X、C及S波段雷达通常
88 被应用于降雨探测，其中又以X波段雷达所提供的降雨产品空间分辨率最高。

89 不同于普通的多普勒雷达，双偏振雷达可以同时或交替发射并接收水平方向和垂直方向的偏振波，即
90 双发双收。因此可提供更多的观测参量，继而实现水粒子相态识别、形状判断及衰减订正等多种功能，更
91 好的刻画强对流降水结构。



92 图 1. 城市降雨综合观测设备：(a) 雨量计；(b) 雨滴谱仪；(c) 天气雷达

93 Fig.1 Urban rainfall observation equipment: (a) rain gauge; (b) disdrometer; (c) weather radar

94 2.2 地表积水综合观测

95 随着机器学习、图像识别、语义分析等新兴技术的快速发展，在基于水位传感器的积水监测方法外，
96 基于交通监控影像和社交网络服务的积水反演方法日益成熟(周天颖等，2016；Jiang 等，2018)。

97 2.2.1 水位传感器

98 基于水位传感器的积水监测方法一直以来在城市地区被广泛采用。目前已发展出多类传感器，主要包
99 括雷达水位传感器、地埋式积水监测仪和电子水尺。其中，雷达水位传感器通过发射雷达波以非接触的方
100 式对地表积水深度进行主动测量。相比于激光水位传感器，该方法可避免因穿透水面而导致的观测误差，
101 可对较浅积水进行更好的监测；电子水尺利用水的微导电特性，对积水深度进行估计。虽为接触式测量，
102 但可通过配备特殊材料外壳的方式以有效应对冻、腐、热等特殊工况；地埋式积水监测仪同为接触式测量，
103 但其优势在于安装简单、结构小巧且功耗较低，可部署在前两者无法安装的特殊位置。

104 2.2.2 道路监控摄像

106 高清的监控摄像机可提供较大范围内详细的地物信息，且广泛分布在城市内部，是掌握大尺度积水实
107 况的有效途径。一方面，通过监控视频可以直接定性的掌握现场内涝积水情况；另一方面，可利用机器学
108 习、深度学习等技术对监控图像进行积水深度信息提取，实现对洪水风险的定量评估。

109 2.2.3 社交网络服务

110 社交网络服务会产生海量的数据，其中不乏有许多信息与积水相关。例如，每当暴雨洪涝发生，推特、
111 微信、微博等社交平台便会涌现出大量与之相关的文字和图片。综合采用语义分析，图像处理，本体推理
112 和模糊评估等技术手段，对其中的有效信息进行提取，可以对积水位置进行捕捉，并评估其严重程度。

113

114 3 城市内涝风险预警系统框架

115 城市聚集着大量的人口和财产，对洪涝灾害呈现出较大的脆弱性；但通常也配备着相对完善的水文气
116 象观测网络，拥有较为全面的观测数据。充分利用水文气象综合观测技术，有利于构建一个更加鲁棒的城
117 市内涝风险预警系统。如图 2 所示，本系统包括六个功能模块，集成了多项观测、预测技术，通过融合积
118 水综合观测和洪涝模拟结果，实时呈现全流域、各街区积水状况；通过耦合雷达降雨临近预报技术和城市
119 雨洪模型，对未来内涝积水情势进行预测；最后，面向社会公众发布周边实况积水信息服务于交通出行，
120 面向政府管理部门提供未来内涝风险分布致力于风险应对，所有信息均集成于 GIS 平台，支持基于时间和
121 空间的自定义查询。

122 3.1 积水监测模块

123 对历史内涝风险点或人群聚集地的积水状况进行监测，可避免物理模型中因认知不确定性、结构不确
124 定性、参数不确定性以及驱动数据不确定性所带来的误差，有利于获得更加准确的积水实况。当代积水监
125 测手段众多，这里重点考虑三类监测方法：基于水位传感器的监测方法、基于道路监控图像的监测方法和
126 基于社交网络服务的监测方法。以上三者，特点不一，优势各异，可互为补充。其中，前两者由于监测位
127 置固定，且可将数据实时传回数据库，故这里将其称之为固定式在线监测模式；基于社交网络服务的监测
128 方法数据来源众多（如推特、微博、微信、QQ 等），且监测位置的不确定性大，故将其称之为移动式众源
129 监测。数据分析子模块负责对文字图像资料进行积水信息提取，同时对监测数据进行清洗和质量控制。

130 3.2 降雨监测及临近预报模块

131 X 波段双偏振天气雷达具有时空分辨率高，覆盖范围广的特点，且可获得反射率因子(Z_H)、差分反射
132 率因子(Z_{DR})、差传播相移率(K_{dp})、和相关关系(CC)等多个观测参量，得到相对于单偏振雷达更好的降雨
133 雨量估计输出。本系统降雨定量估计子模块以 X 波段双偏振天气雷达降水反演技术为核心，融合雨量计观
134 测和雨滴谱信息，对研究区降雨时空分布进行反演。首先，需要对雷达基数据进行质量控制，包括非气象
135 回波去除（马建立等，2019），差分传播相位质量控制（Giangrande 等，2013），以及衰减订正（张培昌
136 等，2017）。正如我们知道的，探测信息离目标物越接近，探测准确性越高。考虑到城市洪涝模拟主要关
137 注地表降雨，所以雷达最低仰角获得的降雨信息最为准确。但城市中，雷达降雨观测通常会受到建筑物或
138 地形的遮挡而导致部分信号缺失，需要产生复合平面扫描仰角，即识别出各个方位角上的最低仰角，最终
139 生成复合平面扫描观测场，具体技术细节详见（张哲等，2021）。

140 双偏振雷达可获取包括反射率因子在内的多个观测参量，这也为雷达降雨定量估计提供了不同方法，
141 如公式(1)–(4)所示：

$$R(Z_H) = aZ_H^b \quad (1)$$

$$R(K_{dp}) = aK_{dp}^b \quad (2)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = aZ_H^b Z_{DR}^c \quad (3)$$

$$R(K_{dp}, Z_{DR}) = aK_{dp}^b Z_{DR}^c \quad (4)$$

其中， Z_H 为反射率因子； Z_{DR} 为差分反射率因子； K_{dp} 为差传播相移率，°/km； a ， b ， c 为参数，在不同地区
和不同降雨条件下，由于降雨粒子雨滴谱特性特征不同，该参数值存在明显差异。本系统基于经过质量
控制的当地雨滴谱数据，计算了雨滴谱观测的 1 min 等效雷达观测参量（即 Z_H ， Z_{DR} ，和 K_{dp} ），随后使用
非线性最小二乘法拟合得到了适用于研究区 X 波段双偏振天气雷达的定量降雨估计参数。需要注意的是，
这里 Z_H 和 Z_{DR} 分别是 Z_h 和 Z_{dr} 的指数形式，具体关系见公式（5）-（6）：

$$Z_H = 10^{0.1Z_h} \quad (5)$$

$$Z_{DR} = 10^{0.1Z_{dr}} \quad (6)$$

式中， Z_h 为雷达反射率，dBz； Z_{dr} 为雷达差分反射率，dB。为了在不同的降雨条件下均取得良好的降雨定
量估计结果，本系统采用了混合使用不同降雨反演方法的策略（Thompson, et al, 2018）。即通过判断在
雷达观测的每一个库上双偏振信号的强弱，以确定使用哪一套降雨反演关系，具体规则见图 3。

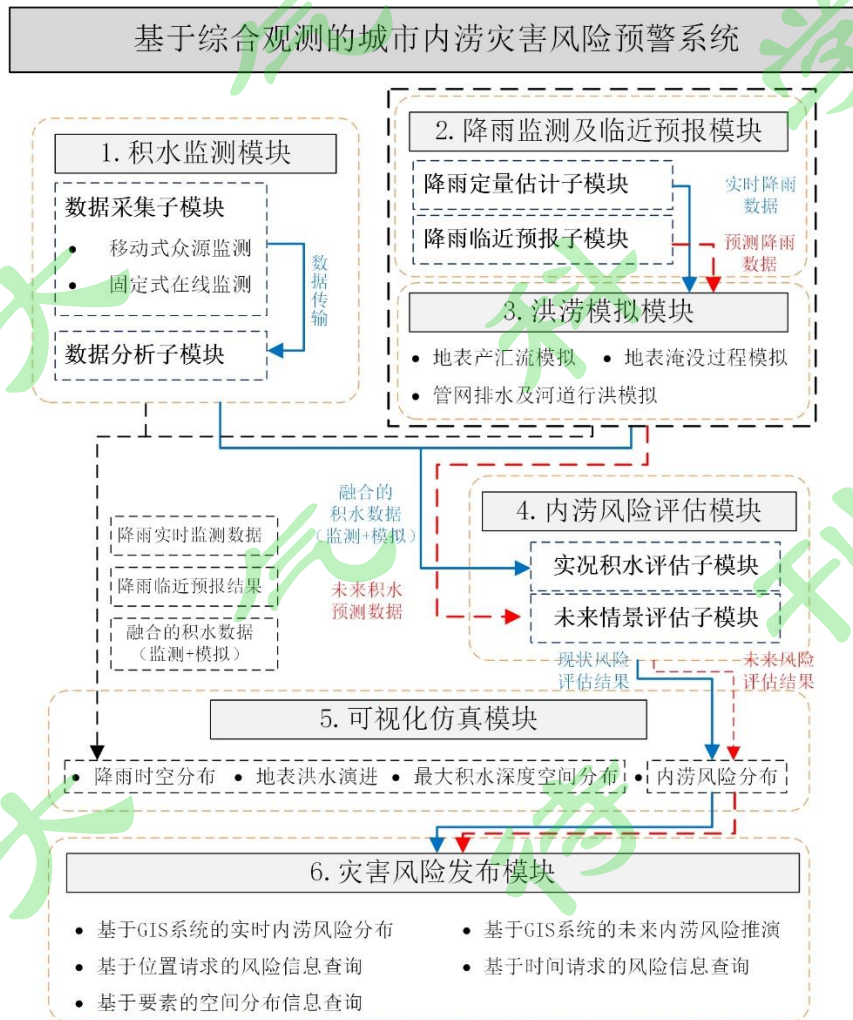


图 2. 城市内涝灾害风险预警系统技术框架

Fig.2 Technical framework of urban waterlogging warning system

153 考虑到雷达定量降雨估计依然可能存在残余偏差，融合局地雨量计观测数据对雷达定量降雨估计产品
154 做进一步订正。首先根据公式（7）计算每个雨量计对应位置雷达降雨定量估计与雨量计观测的差值，再通
155 过公式（8）计算得到的偏差场对所有格点雷达降雨定量估计结果进行系统性修正。

$$e_i = r_i - g_i \quad (7)$$

$$R_{e,x} = \sum_{i=1}^n e_i w_{i,x} / \sum_{i=1}^n w_{i,x} \quad (8)$$

156 其中， e_i 为第*i*个雨量计对应格点处雷达降雨定量估计与雨量计观测的差值，mm； r_i 为第*i*个雨量计对应格点
157 处雷达降雨定量估计值，mm； g_i 为第*i*个雨量计降雨观测值，mm； $R_{e,x}$ 为*x*格点处雷达降雨定量估计的偏差值，
158 mm； $w_{i,x}$ 为针对*x*格点第*i*个雨量计的权重； n 为参与该雷达格点偏差计算的雨量计个数。这里针对特定雷达
159 格点，采用反距离权重法对每个雨量计的权重进行计算，见公式（9）-（11）：

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \exp[-d_i^2 / (D/2)^2] \quad (9)$$

$$w_i = \begin{cases} 1/d_i^b, & d_i \leq D \\ 0, & d_i > D \end{cases} \quad (10)$$

$$w_i = \begin{cases} \alpha/d_i^b, & d_i \leq D \\ 0, & d_i > D \end{cases} \quad (11)$$

160 当 α 大于1时，认为有足够的雨量计用于雷达降雨定量估计订正，采用公式（10）计算雨量计权重；反之，
161 采用公式（11）进行计算。这里， b 为 d_i 的指数参数，范围为0.5-3.0； D 为最大可接受距离，km，即若某
162 一雨量计与该格点距离大于 D ，则其权重为0， D 的范围为10-500 km。在 b 、 D 各自的定义域内，可得到不
163 同的参数组合，通过依次去除单个雨量计信息，并定量评估该参数组合下在去除雨量计格点位置处的雷达
164 降雨定量估计订正效果，从而挑选出最优的参数组合。

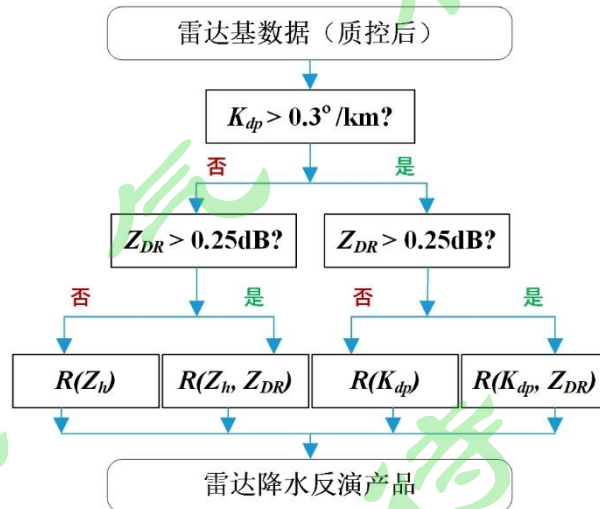


图 3. 基于 X 波段双偏振雷达的混合降雨定量估计流程

Fig.3 The flowchart of mixed quantitative rainfall estimation based on X-band dual-polarization radar

168 降雨临近预报子模块采用集合 COTREC 外推方法，通过估算风暴移动速度和移动方向，对未来降雨进
169 行预测。该方法可以过滤异常的速度矢量，使得移动速度场更加的平滑，此外引入变分法修正初始运动场，
170 使其满足连续性方程。此外，集合 COTREC 方法通过多次改变外推单元位置并对其外推结果进行集合平均，

171 同时适当考虑历史时刻信息，以得到更加连续的外推速度场，可以更好的考虑不同尺度的风暴情况，使预
172 报更加准确。

173 3.3 洪涝模拟模块

174 洪涝模拟模块旨在通过降雨产品驱动，以数值模拟的方式提供现状及未来研究区内洪涝时空分布信息。
175 该模块基于分布式城市水文水动力耦合模型，包含地表产汇流模拟、管网排水及河道行洪模拟、和地表淹
176 没过程模拟三个部分，兼顾城市地表和地下要素信息，以实现对城市暴雨径流产生和运动的科学描述，做
177 到对城市内涝风险区的准确定位。

178 该模块采用基于规则网格的离散方式，精细化描述下垫面信息。根据水量平衡原理（见公式（12）），
179 网格单元内水深变化受降雨、蒸发、下渗、及径流流量（出流）控制。其中，降雨时空信息由上述降雨监测
180 及临近预报模块提供；蒸发量在暴雨事件中通常极其有限，故针对城市场次雨洪模拟，可以忽略；下渗过
181 程使用格林-安普特模型进行模拟，见公式（13）；坡面汇流过程（即网格单元出流流量）采用非线性水库
182 法计算，如公式（14）所示。

$$\frac{\partial d}{\partial t} = p - e - f - q \quad (12)$$

$$f = K_s \left(\frac{d + L_s + \psi_s}{L_s} \right) \quad (13)$$

$$q = \frac{WS^{1/2}}{A_c n} (d - d_s)^{5/3} \quad (14)$$

183 式中， d 为蓄水深，m； t 为时间，s； p 为降雨率，m/s； e 为蒸发率，m/s； f 为入渗率，m/s； q 为单位面积径
184 流流量，m/s； K_s 为饱和水力传导度，m/s； L_s 为饱和层厚度，m； ψ_s 为湿润峰面的毛细吸力水头，m； n 为汇
185 水区曼宁系数； W 为汇水区宽度，m； d_s 为最大洼地蓄水深度，m； S 为汇水区坡度； A_c 为汇水区面积， m^2 。
186 对于管道或河道经过的网格单元，网格单元内产流经过坡面汇流将直接汇入相应管道或河道节点，继而利
187 用一维圣维南方程组（公式（15）-（16））计算管网及河道内的水流演进过程；相反，若该网格单元无管
188 道或河道经过，网格单元出流则将根据地表高程信息流入相邻网格单元，继续参与坡面产汇流计算，直至
189 汇入管道或河网。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (16)$$

190 式中， x 为沿水流方向的距离，m； t 为时间，s； A 为过水断面面积， m^2 ； Q 为出流量， m^3/s ； H 为管内水深，
191 m； S_f 为阻力坡度（单位长度上的水头损失）； g 为重力加速度， m/s^2 。在上述一维模型之上，用正方形网
192 格离散选定的二维模拟区域，构成地表、地下（管道）双排水系统，用以考虑管网溢流或河道漫堤后的地
193 表淹没过程和排水系统能力恢复后的涝水消退过程。这里，将地表概化为由节点和矩形开放通道构成的循
194 环网络，其中节点为二维模拟区域内的正方形网格的中心点，矩形开放通道负责连接相邻节点。沿着计算
195 网络的每个组分（即垂直于正方形网格边的方向）分别建立基于均匀流体的一维平均深度动量方程和连续
196 性方程，使用有限差分法进行求解，从而实现从全动态一维方法到二维自由表面流计算的拓展。

197 3.4 内涝风险评估模块

198 根据现场观测或数值模拟结果，内涝风险评估模块负责给出定量的风险评估结果和相应的风险等级分

199 区。考虑到侧重目标和服务对象的差异，内涝评估模块内设实况积水评估和未来情景评估两个子模块，分
200 别采用不同的评估体系。其中，实况积水评估模块侧重为车辆行人提供周边积水信息，以便及时调整路线，
201 提高出行效率。因此，该模块采用了仅考虑积水深度信息的单因子风险评估方法(王成坤等，2019)，具体
202 评价标准如表 1 所示。未来情景评估模块虽同样可以为行人车辆提供积水信息，但该模块更加关注政府机
203 构、职能部门等管理单位的现实需求。通过综合评估流域内各区域未来可能的积水深度和积水时间(徐宗
204 学等，2020)，为相关部门制定决策和采取行动提供参考，采用表 2 所示内涝灾害等级划分标准。

205 3.5 可视化仿真模块

206 可视化仿真模块旨在对致灾因子和内涝风险等级进行基于图像的直观呈现，包括降雨总量空间分布、
207 地表洪水动态演进、最大积水深度空间分布和内涝灾害风险分区 4 项内容。从逻辑上看，以上 4 项内容从
208 降雨驱动，到洪水演进，再到最大积水深度，最后到内涝风险等级评估，依次递进，为内涝灾害应急管理
209 和风险应对提供更加直接的信息。

210 表 1 基于积水深度的内涝灾害等级划分标准

211 Table 1 Classification standard of risk based on waterlogging depth

风险等级	积水深度 (m)	危险程度
1	≥ 0.5	可能造成人员伤亡
2	[0.3,0.5)	显著影响行人交通，大部分机动车无法通行
3	[0.15,0.3)	影响行人通行，车辆行驶缓慢
4	< 0.15	积水不会淹没路边路缘石，基本不影响行人和机动车通行

212 表 2 基于积水深度和积水时间的内涝灾害等级划分标准

213 Table 2 Classification standard of risk based on waterlogging depth and duration

风险等级	积水深度(m)	积水时间(min)	危险程度
1	> 0.4		城市交通、基础设施和各类建筑受到威胁
2	[0.3,0.4)	> 15	城市交通受到严重影响
3	[0.15,0.3)	> 30	城市交通不便
4	< 0.15		一般积水

214 3.6 灾害风险发布模块

215 灾害风险发布模块负责向用户发布洪涝积水可视化结果，并支持基于时间和位置的自定义风险信息查
216 询。该模块设置主面板用于展示基于 GIS 系统的实时内涝灾害风险和未来内涝风险推演，降雨及最大积水
217 深度等致灾因子的具体信息可通过切换至相应面板进行查看。

219 4 案例研究：以北京市清河流域为例

220 4.1 流域概况、模型构建及验证

221 综合地理条件、气候条件、社会经济条件、和气象监测条件等多个方面，本文选择清河流域作为首个
222 示范区。清河流域位于北京市中心城区北部，源起西山碧云寺，横跨海淀、朝阳、昌平三区，包含山区、
223 平原、和平原低洼区三种地形，总面积达到 200 km²。近年来在快速城市化背景下，流域内不透水面积占比
224 已超过 50%，且管网密集、高楼林立、道路纵横，具备典型的城市化流域特征。从气候条件来看，清河流
225 域属于温带半干旱半湿润大陆性季风气候，春秋短促而冬夏漫长，多年平均降雨量 660 mm，但年内分配不
226 均，主要集中在 6、7、8 三个月份 (卢丽，2017)。纵观清河历史，大洪水事件多发生在 7 月下旬和 8 月
227 上旬。例如，1963 年 8 月 8 日，清河流域遭遇 24 小时最大降雨量超 400 mm 的特大暴雨，清河全线漫溢，

228 淹没农田 3.4 万亩，周边 17 个村庄受到不同程度的影响；2012 年 7 月 21 日，清河流域再次遭遇特大暴
229 雨，流域内低洼区域均出现严重积水现象，给道路交通带来巨大影响。从社会经济条件来看，清河流域内
230 聚集了包含清华大学、北京大学在内的众多国内名校，聚集了包含中关村科技园、天通苑在内的许多高科
231 技园区，涉及人口超过三百万。流域内人口和社会资产的广泛聚集使得清河流域面对洪涝灾害表现出很高
232 的易损性，需要高度重视。最后，从现有气象监测条件来看，清河流域内部署了多台雨滴谱仪和微型气象
233 站，且可以被位于顺义和昌平的两台 X 波段双偏振天气雷达很好的覆盖。这极大的满足了上述城市内涝预
234 警系统对精细化降雨数据驱动的需求。

235 基于高精度地表高程数据、土壤类型数据、地表覆盖数据和管网分布数据，对清河流域下垫面条件进
236 行详细刻画，为精准的内涝风险预报提供基础保障。采用北京顺义 X 波段双偏振雷达对全流域开展定量降
237 雨观测，降雨数据时空分辨率分别可达 3 min 和 75 m。基于北京地区 11 部雨滴谱仪的观测数据，统计得
238 到适用的定量降水估计关系参数，继而实现雷达降水反演。

239 清河流域洪水模型采用立体分层结构，纳入地表、管道、河道等多项要素，考虑地面降雨产流、地表
240 坡面汇流、地下管网排水、河道洪水演进和地表积水扩散等多个过程，对城市洪水响应的全过程进行模拟
241 (Cao 等, 2020a)；采用与雷达降雨产品空间分辨率相适应的结构化网格对流域进行离散，一方面实现对地
242 表汇流路径的精细刻画(Cao 等, 2020b; Cao 等, 2021)，另一方面避免精细化降雨空间分布信息丢失。这
243 里，基于实况积水照片和积水区情况调研，特别对 2018 年 ‘7·15’ 暴雨个例下（见图 5 中 E5 所示）的内
244 涝积水模拟结果进行了评估，如图 4 所示。结果表明，在西二旗公交站和回龙观地铁站所在区域，模型均
245 识别出较高的洪涝灾害风险，且模拟所得最大积水深度与图中参照物最大淹没深度基本吻合，相对误差不
246 超过 20%，具有较高的可靠性；在清河流域的东南区域，模型同样报出较高的洪涝风险。进一步分析发现，
247 该区域为北京市温榆河公园，地势较低，且具有蓄滞洪功能，故可以认为存在较大的淹没水深；此外，在
248 流域的中南部，模拟得到部分高风险区域，但由于缺乏实际观测目前尚未得到验证。总体来看，该模型可
249 以比较准确的定位内涝高风险区，具有较高的可靠性。

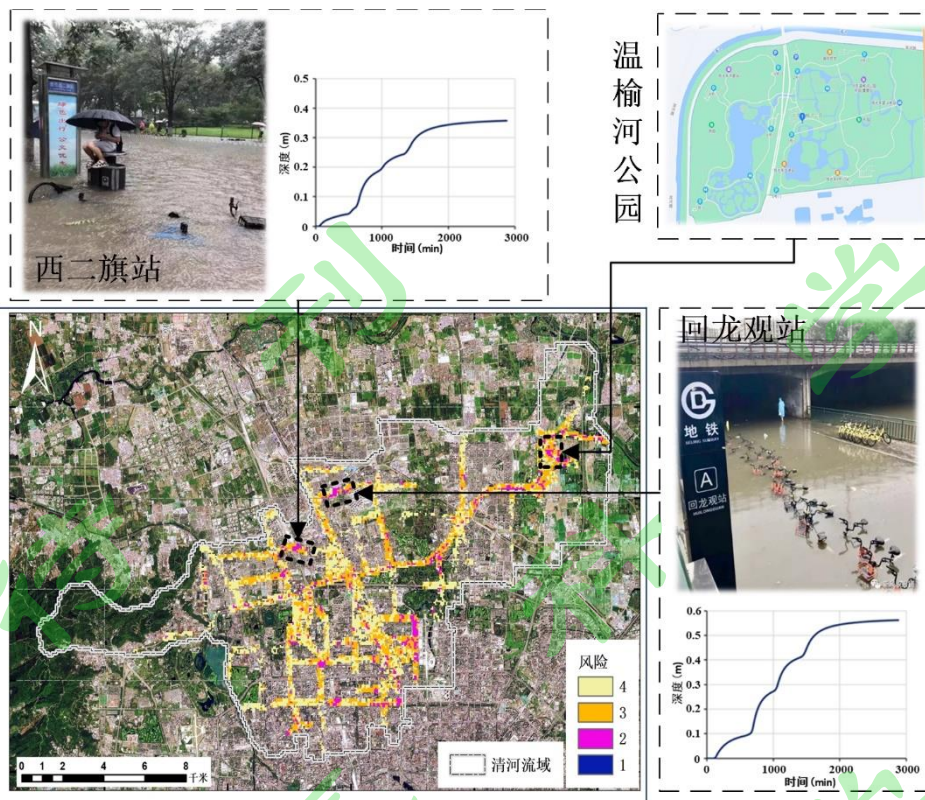


图 4. 清河流域 '7·15' 暴雨内涝灾害风险模拟及评估

Fig.4 Simulation and assessment of "7.15" waterlogging risk in Qing River Basin

4.2 多降雨个例观测、积水模拟、及风险评估

图 5 展示了 2017-2018 年间清河流域雷达观测得到的 7 个典型对流性降雨。可以看到，这 7 个降雨过程降雨量级不同、空间分布各异，且降雨历时、暴雨云团移动方向均有不同（见表 3），具有较好的代表性。本研究首先利用雨量计监测数据对雷达降雨反演结果进行了定量评估。结果表明，雷达定量降雨估计结果和雨量计观测结果相关系数高达 0.85，呈现出良好的一致性，如图 6 所示。然后，针对以上 7 个降雨事件使用该系统框架核心部分在北京市清河流域进行了积水模拟和内涝风险评估。图 7 展示了不同降雨条件下流域最大积水深度的空间分布，可以发现积水主要分布在道路及洼地，且与降雨条件密切相关。例如，E3 降雨主要集中在流域东南部（见图 5），则相应区域积水状况更加严重（见图 7）；作为对照，E5 降雨主要集中在流域西北部，则流域西北部积水现象则明显加重（见图 7）。这一结果也从一定程度上表明了降雨落区的准确估计对于积水模拟的重要性。综合考虑积水深度和积水时间，对内涝灾害风险进行分级，结果如图 8 所示。对照图 7 可发现，洪涝灾害分级结果与最大积水深度空间分布存在很高的一致性。其主要原因在于，积水深度越大往往意味着更长的积水时间，因而造成更高的风险。

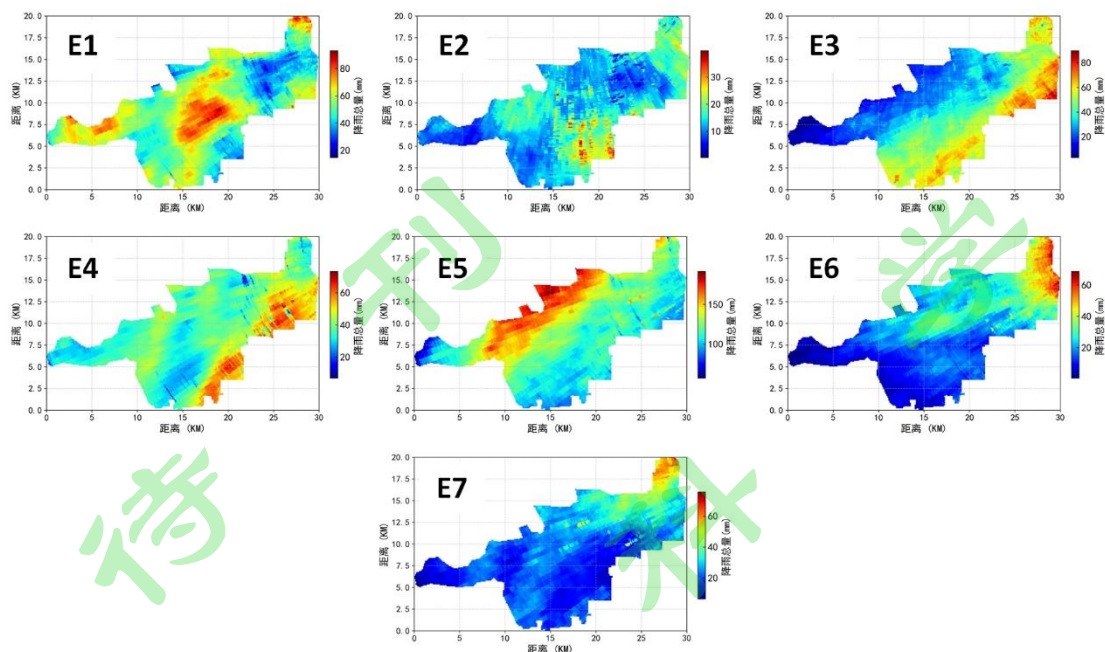


图 5. X 波段双偏振天气雷达降水反演结果：7 个典型对流性降雨过程的降雨总量空间分布

Fig.5 Rainfall retrieval results of the X-band dual-polarization weather radar: spatial distribution of total rainfall in seven typical convective rainfall processes

表 3 典型降雨个例特性汇总

Table 3 Characteristic summary of typical rainfall cases

降雨个例	日期 (UTC)	降雨总量 (流域平均) (mm)	降雨峰值 (流域平均) (mm/h)	风暴移动方向
E1	2017/07/13 – 2017/07/14	51.32	20.95	↘
E2	2017/08/08	11.82	23.54	↘
E3	2017/08/11 – 2017/08/12	34.59	22.78	↗
E4	2017/08/22	35.05	11.12	↗
E5	2018/07/15 – 2018/07/17	116.64	29.42	↗
E6	2018/08/07 – 2018/08/08	18.36	21.30	↗
E7	2018/08/10 – 2018/08/11	20.89	26.62	↗

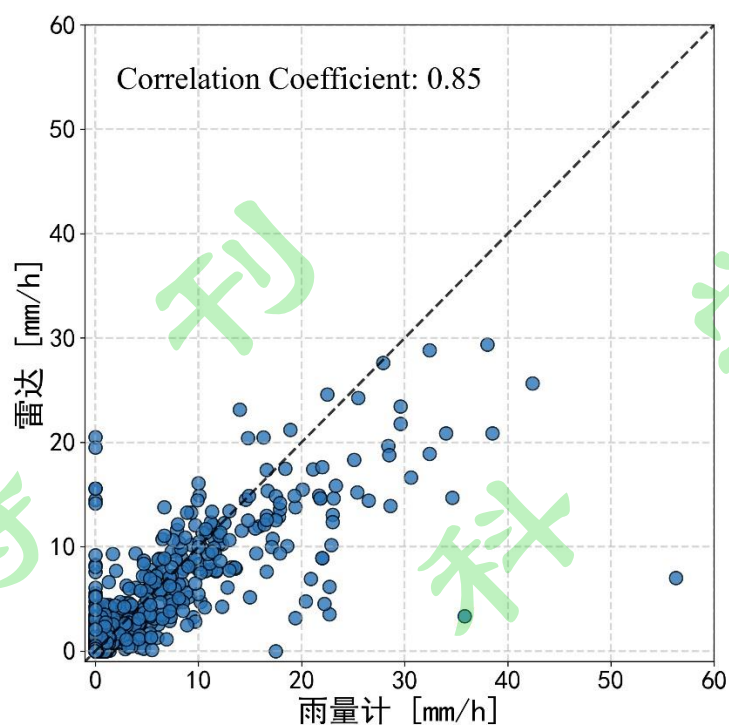


图 6. X 波段双偏振雷达降雨反演产品评估

Fig.6 Evaluation of X-band dual-polarization radar rainfall retrieval products



图 7. 不同对流性降雨过程下最大积水深度空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of maximum ponding depth under different convective rainfall processes

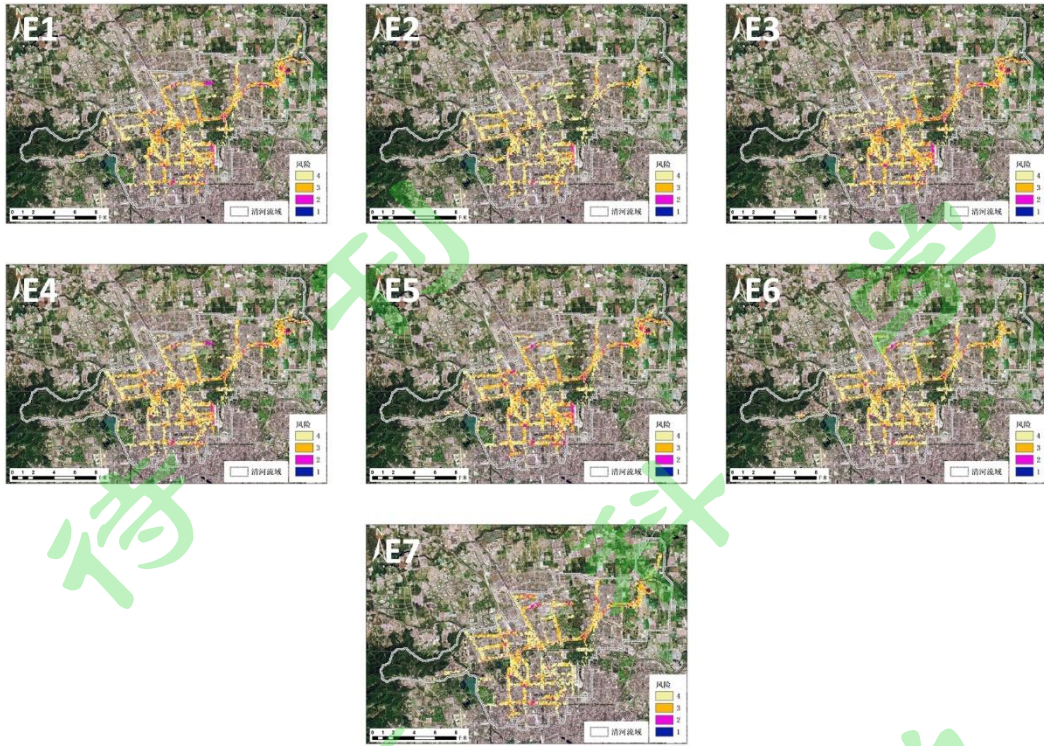


图 8. 不同对流性降雨过程下内涝灾害风险分级图

Fig.8 Waterlogging risk distribution under different convective rainfall processes

5 结 论

受全球气候变化和城市化影响，极端暴雨所引发的洪涝灾害事件日益增多，俨然已成为城市可持续发展必须要面临的挑战。因此，构建一套可靠的内涝灾害预警系统以科学应对风险则具备了更加重要的意义。

区别于仅采用单一降雨产品驱动水文水动力耦合模型的传统城市洪涝预警模式，本文提出了一套基于综合观测的城市内涝灾害风险预警系统，以进一步提高预报结果的可靠性。该系统融合了新兴的降雨、积水观测技术，引入了主流的降雨临近预报方法，集成了成熟的城市雨洪模拟手段，可为交通出行提供实时的周边积水信息，亦可为应急管理提供未来的内涝风险推演。此外，将该系统框架主体部分在北京市清河流域进行了初步实践和评估分析。结果表明，该系统可以较好的模拟预测积水分布并定位内涝高风险区域。可以发现，虽然地形地势是决定积水内涝状况的关键因素，但降雨空间分布条件变化同样发挥着重要的作用，因此有必要进一步加强高时空分辨率降雨产品在城市雨洪管理中的应用。此外，该系统尚未考虑河湖闸坝调度、及泵站抽排等措施的影响。这需要在未来的工作中逐步纳入，以进一步提高洪涝预报精度，推动精细化数字孪生实践，为城市洪涝应急管理和智慧水务建设提供更好服务。该研究对于城市洪涝灾害管理及相关研究具有一定的借鉴意义和参考价值。

297 参考文献

- 298 Acosta-Coll, M., F. Ballester-Merelo, M. Martinez-Peiro, E. De la Hoz-Franco (2018). "Real-Time Early
299 Warning System Design for Pluvial Flash Floods-A Review." *Sensors (Basel)* 18(7).
- 300 Ashley, W. S., S. T. Ashley (2008). "Flood Fatalities in the United States." *Journal of Applied Meteorology and
301 Climatology* 47(3): 805-818.
- 302 Cao, X., Y. Qi, and G. Ni (2021), Significant Impacts of Rainfall Redistribution through the Roof of Buildings
303 on Urban Hydrology, *Journal of Hydrometeorology* 22(4):1007-1023.
- 304 Cao, X., G. Ni, Y. Qi, B. Liu (2020b). "Does Subgrid Routing Information Matter for Urban Flood Forecasting?
305 A Multiscenario Analysis at the Land Parcel Scale." *Journal of Hydrometeorology* 21(9): 2083-2099.
- 306 Cao, X., H. Lyu, G. Ni, F. Tian, Y. Ma, C. Grimmond (2020a). "Spatial Scale Effect of Surface Routing and Its
307 Parameter Upscaling for Urban Flood Simulation Using a Grid-Based Model." *Water Resources Research*
308 56(2): e2019WR025468.
- 309 Chen, X., H. Zhang, W. Chen, G. Huang (2020). "Urbanization and climate change impacts on future flood risk
310 in the Pearl River Delta under shared socioeconomic pathways." *Sci Total Environ*: 143144.
- 311 Du, S., X. Cheng, Q. Huang, R. Chen, P. J. Ward, J. C. J. H. Aerts (2019). "Brief communication: Rethinking
312 the 1998 China floods to prepare for a nonstationary future." *Natural Hazards and Earth System Sciences*
313 19(3): 715-719.
- 314 Duncan, A., Keedwell, E., Djordjevic, S., & Savic, D. (2013). Machine learning-based early warning system
315 for urban flood management.
- 316 Giangrande, S. E., McGraw, R., & Lei, L. (2013). An application of linear programming to polarimetric
317 radar differential phase processing. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 30(8), 1716-1729.
- 318 Hallegatte, S., C. Green, R. J. Nicholls, J. Corfee-Morlot (2013). "Future flood losses in major coastal cities."
319 *Nature Climate Change* 3(9): 802-806.
- 320 郝莹, 陈靖, 王元, 王皓, 邱学兴, 王东勇, & 翟振芳. (2019). 基于高时空分辨率降水预报产品的
321 城市内涝预警研究. *暴雨灾害*, 38(03), 229-237. Hao, Y., Chen, J., Wang, Y., Wang, H.,
322 Qiu, X., & Wang, D., et al. (2019). Research on urban waterlogging risk early warning based on high
323 spatial-temporal resolution precipitation forecast products. *Torrential Rain and Disasters*. (in Chinese)
- 324 侯天宇, 梁好, 霍凯, 赵敏, 陈子煊, 张春莉, & 苑超. (2021). 基于智能物联网技术的天津城市积
325 水监测预警系统. *气象研究与应用*, 42(01), 85-89. doi:10.19849/j.cnki.CN45-
326 1356/P.2021.1.15. Hou, T., Liang, H., Huo, K., Zhao, M., Chen, Z., Zhang, C., & Yuan,
327 C. (2021). Tianjin urban water logging monitoring and early warning system based on intelligent Internet
328 of Things technology. *Meteorological Research and Application*. 42(01), 85-89. (in Chinese)
- 329 Jiang, J., J. Liu, C.-Z. Qin, D. Wang (2018). "Extraction of Urban Waterlogging Depth from Video Images
330 Using Transfer Learning." *Water* 10(10): 1485.
- 331 姜灵峰 (2018). "近 76 年我国洪涝灾损度变化特征分析." *气象科技进展* 8(05): 13-18. Jiang, L...
332 (2018). Analysis on the Characteristics of Flood Disaster Damage in China in Recent 76 Years. *Advances
333 in Meteorological Science and Technology*. (in Chinese)
- 334 卢丽. (2017). 北京市清河流域极端降水及防汛预警指标研究. (Doctoral dissertation, 中国农业大
335 学). Extreme precipitation characteristics and flood warning indexes in qinghe basin in Beijing. (Doctoral

dissertation, China Agricultural University)

Lyu, H., G. Ni, X. Cao, Y. Ma, F. Tian (2018). "Effect of temporal resolution of rainfall on simulation of urban flood processes." *Water* 10(7): 880.

马建立, 陈明轩, 李思腾, 仰美霖 (2019). 线性规划在 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分传播相移质量控制中的应用. *气象学报*, 77 (3) : 516– 528. Jianli, M. A., Chen, M., Siteng, L. I., & Yang, M. (2019). Application of linear programming on quality control of differential propagation phase shift data for x-band dual linear polarimetric doppler weather radar. *Acta Meteorologica Sinica*. (in Chinese)

Miller, J. D., M. Hutchins (2017). "The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom." *Journal of Hydrology: Regional Studies* 12: 345-362.

Paprotny, D., A. Sebastian, O. Morales-Napoles, S. N. Jonkman (2018). "Trends in flood losses in Europe over the past 150 years." *Nat Commun* 9(1): 1985.

Pumo, D., E. Arnone, A. Francipane, D. Caracciolo, L. V. Noto (2017). "Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology." *Journal of Hydrology* 554: 80-99.

Smith, A., P. D. Bates, O. Wing, C. Sampson, N. Quinn, J. Neal (2019). "New estimates of flood exposure in developing countries using high-resolution population data." *Nat Commun* 10(1): 1814.

Sofia, G., G. Roder, G. Dalla Fontana, P. Tarolli (2017). "Flood dynamics in urbanised landscapes: 100 years of climate and humans' interaction." *Sci Rep* 7: 40527.

宋晓猛, 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军 (2014). "变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理." *水科学进展* 25 (05) : 752–764. Song, X. M., Zhang, J. Y., Wang, G. Q., He, R. M., & Wang, X. J. (2014). Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management. *Advances in Water Science*, 25(5), 752-764. (in Chinese)

宋晓猛, 张建云, 占车生, 刘春蓁 (2013). "气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展." *水利学报* 44 (007) : 779–790. Song, X. M., Zhang, J. Y., Zhan, C. S., & Liu, C. Z. (2013). Review for impacts of climate change and human activities on water cycle. *J. Hydraul. Eng*, 44(7), 779-790. (in Chinese)

Thompson, Elizabeth, J., Rutledge, Steven, & A., et al. (2018). Dual-polarization radar rainfall estimation over tropical oceans. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*.

Van de Beek, C., H. Leijnse, J. Stricker, R. Uijlenhoet, H. Russchenberg (2010). "Performance of high-resolution X-band radar for rainfall measurement in The Netherlands." *Hydrology and Earth System Sciences* 14(2): 205.

Wang, L. P., S. Ochoa-Rodriguez, N. E. Simoes, C. Onof, C. Maksimovic (2013). "Radar-raingauge data combination techniques: a revision and analysis of their suitability for urban hydrology." *Water Sci Technol* 68(4): 737-747.

王成坤, 黄纪萍, 曾胜, 叶淦升, 林春生 (2019). "基于积水特征和暴露脆弱性的城市内涝风险评估." *中国给水排水* v. 35; No. 481 (05) : 146–151. Wang, C., Huang, J., Zeng, S., Ye, G., and Lin, C. (2019). Urban flooding risk assessment based on coupling of waterlogging characteristics and exposed vulnerability. *China Water & Wastewater*, v.35; No.481(05): 146-151. (in Chinese)

WMO. (2013). Reducing and managing risks of disasters in a changing climate [R]. Geneva: WMO, 2013: 23-31.

376 魏军, 俞海洋, 胡会芳, 彭相瑜, & 陈小雷. (2019). 石家庄市城市内涝气象风险监测预警系统研制
377 及应用. 中国农村水利水电 (02), 34-38+43. Wei, J., Hai-Yang, Y. U., Hui-Fang, H. U., Peng,
378 X. Y., & Chen, X. L. . (2019). Development of meteorological risk monitoring and early warning system
379 for urban waterlogging in shijiazhuang. China Rural Water and Hydropower. (in Chinese)

380 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 程涛 (2020). “中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展.” 水科学进展
381 31 (05): 713-724. Xu, Z. , Chen, H. , Ren, M. , and Cheng, T. . (2020). Progress on disaster
382 mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in china. Advances in Water Science,
383 31(5), 713-724. (in Chinese)

384 杨扬, 张建云, 戚建国, 岳智慧 (2000). “雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望.” 水科学进展
385 (01): 92-98. Yang, Y. , Zhang, J. Y. , Guo, Q. J. , & Yue, Z. . (2000). Review and prospect on the
386 application of weather radar in hydrology. Advances in Water Science. (in Chinese)

387 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 胡庆芳, 宋晓猛 (2016). “中国城市洪涝问题及成因分析.” 水科学进展
388 27 (004): 485-491. Zhang, J., Wang, Y. T., He, R. M., Hu, Q. F., & Song, X. M. (2016). Discussion on
389 the urban flood and waterlogging and causes analysis in China. Advances in Water Science, 27(4), 485-
390 491. (in Chinese)

391 张培昌, 魏鸣, 黄兴友等 (2018). 双线多普勒天气雷达探测原理与应用, 北京: 气象出版社. Zhang P,
392 Wei M, Huang X, et al. 2018. Dual Polarization Doppler Weather Radar Detection Principle and
393 Application. Beijing: Meteorological press. (in Chinese)

394 张哲, 戚友存, 朱自伟, 李东欢, 曾庆锋, 兰红平 (2021). 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降
395 水估计中的应用. 气象学报, 79 (5): 1-18. Zhang Zhe, Qi Youcun, Zhu Ziwei, Li Donghuan,
396 Zeng Qingfeng, Lan Hongping. 2021. Application of radar quantitative precipitation evaluation using
397 S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen. Acta Meteorologica Sinica, 79(5):1-18. (in Chinese)

398 周天颖, 赖顺仁, 黄崇典, 杨龙士, 叶美伶, 吴政庭, 方耀民 (2016). “运用社交网络分析淹水空间
399 信息之关联性.” 遥感学报 20 (05): 1299-1307. Chou, T. , Lai, S. , Huang, C. , Yang, L. , &
400 Fang, Y. . (2016). Social crowd sourcing application in spatial information analysis. (in Chinese)

401