

赵玲玲, 刘昌明, 王梓尹, 张鑫辉, 杨兴. 2023. 中小流域暴雨洪水计算及参数地理综合研究进展. 热带地理, 43 (11): 2119-2134.

Zhao Lingling, Liu Changming, Wang Ziyin, Zhang Xinhui, and Yang Xing. 2023. Storm and Flood Prediction and Progress in Parameter Synthesis Research in Small and Medium-Sized Watersheds. *Tropical Geography*, 43 (11): 2119-2134.

中小流域暴雨洪水计算及参数地理综合研究进展

赵玲玲^{1,2}, 刘昌明^{2,3}, 王梓尹^{1,4}, 张鑫辉^{1,4}, 杨 兴⁵

(1. 广东省科学院广州地理研究所, 广州 510070; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 北京师范大学水科学学院, 北京 100875; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 安徽省交通勘察设计院有限公司, 合肥 230000)

摘 要: 中小流域暴雨洪水计算及其参数综合在洪水灾害防治中起着关键作用。变化环境引发暴雨洪水等水文极值增加, 中小流域暴雨洪水灾害面临严峻挑战。文章对中小流域暴雨洪水计算全过程及参数综合研究进展进行系统回顾、梳理和总结, 并对目前常用的产汇流计算方法及其参数在实际应用中存在的问题和局限性进行探讨。流域下垫面和暴雨特性的空间异质性大, 产流损失根据其地理特征形成以经验和半经验方法为主的计算方法; 汇流计算以推理公式和单位线法为主, 流域地形地貌汇流特征能基本反映, 但流域形状和微地形在当前计算方法中反映甚少; 当前使用的参数成果均由20世纪80年代前的数据得到, 限于资料精度和技术水平, 参数综合要素较为简单, 多地出现不适用现象, 亟需开展新一轮的暴雨洪水计算参数综合; 在中小流域暴雨洪水过程模拟及实时预报上, 结合雷达测雨、高分辨率遥感、高性能计算和深度学习等技术方法的研究已初具规模, 建议加强利用新兴技术计算流域产汇流参数, 推进其在暴雨洪水设计上的应用。

关键词: 暴雨; 洪水; 产汇流计算; 参数综合; 模拟预报; 中小流域

中图分类号: TV122+.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)11-2119-16

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003763

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中国极端水灾害事件呈突发、频发、并发、重发趋势, 尤其是中小流域水灾害损失极为严重。水利上定义流域面积小于1 000 km²且大于50 km², 在特殊情况下不小于3 km²的流域为中小流域(中华人民共和国水利部, 2013)。据水利部水文局统计, 一般年份全国水灾害总损失的70%~80%发生在中小流域, 近10年水灾造成的人员伤亡有2/3以上发生在中小流域(水利部水文局, 2010; 黄金池, 2010)。开展中小流域治理是区域和流域防洪安全的重要保障途径, 中小流域暴雨洪水计算是其洪水灾害防治的关键环节和难点。

中小流域的暴雨洪水设计涉及防洪的工程措施和非工程措施, 包括水利工程设计洪水确定、病险水利工程提标加固设计洪水、中小流域山洪灾害防治、河道综合治理小流域产汇流计算单元、社会经

济发展地区和发生地质灾害的基本地形单元在内的多个领域。中小流域暴雨洪水计算是一项量大面广的工作(刘昌明等, 1978)。国内外学者都进行了大量的研究(Horton et al., 1939; Thomas et al., 1970; 小流域暴雨径流研究组, 1978; 陈家琦, 1985; 王博等, 2009; Swain et al., 2017), 归纳起来可以分为3类, 即经验公式, 半理论半经验方法和理论方法, 产汇流理论是其核心问题。产汇流理论是从19世纪后期逐步发展起来的。传统的产流理论是1935年霍顿初次提出产流的物理条件, 阐明了超渗地面径流与地下径流的形成机制; 在此基础上, 1970年邓恩提出另一种产流机制, 当土壤变得饱和, 任何额外的降水都会转化为径流。中国1968年颁布了洪水计算指南, 其中暴雨洪水计算方法主要有推理公式和单位线。推理公式自1851年摩尔凡

收稿日期: 2023-02-13; **修回日期:** 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金“变化环境下华南中小流域设计暴雨洪水同频率假定检验与作用机制”(41771044); 广东省科学院发展基金“粤港澳大湾区城市群生态系统观测研究”(2020GDASYL-20200401001)

作者简介: 赵玲玲(1980—), 女, 河南安阳人, 研究员, 博士, 主要从事中小流域暴雨洪水及水生态过程研究, (E-mail) lingling-zhao@foxmail.com;

通信作者: 王梓尹(1998—), 女, 四川雅安人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源, (E-mail) 2021055825@nwafu.edu.cn。

尼 (T J Mulvaney) 提出推理公式的基本形式后在暴雨概化、损失计算、汇流时间和过程计算等方面都取得了长足的发展 (刘克岩 等, 1985; 赵鸣雁, 2001; 俞芳琴, 2008)。谢尔曼 (Sherman, 1932) 提出单位线方法, Snyder (1938) 等提出综合单位线方法, 之后在单位线过程线与洪水演进之间的关系、综合单位线的理论推导、流域汇流的调蓄作用等方面, 学者们都展开了广泛深入的研究 (芮孝芳, 1999a; 芮孝芳 等, 2012)。流域的地理特征在中小流域暴雨洪水计算中起着重要作用: 中小流域地形通过局地天气系统对其降水过程产生影响; 中小流域土壤特性、植被覆盖类型、地形地貌和地质构造在暴雨洪水产流计算中直接决定着产流损失量; 流域形状、坡度、河道坡度等对中小流域汇流的流向和流动速度计算起到关键作用。

产汇流参数综合是根据水文现象的地域性特征, 综合流域的自然地理要素, 在已有水文资料的基础上构建地区性经验公式; 对资料匮乏地区小流域, 借助有水文资料流域的洪水汇流参数以及流域自然地理特征间的相关关系, 再根据无资料流域的自然地理特征值间接地推出流域洪水汇流参数 (杨兴, 2020)。地理综合法具有明显的经验性, 需要对成果的可靠性和合理性深入分析 (Liang et al., 2001)。20 世纪 60 年代, 中国开展了大规模的水文调查研究工作, 根据地区特征, 各省市分别编制了当地的《水文手册》《水文图集》《暴雨径流查算表》等。此后各地针对该查算表中计算方法的应用和参数综合进行了深入的讨论 (叶贵明 等, 1982; 詹道江, 2010)。

近年变化环境引发极端水文事件增加, 致使洪涝灾害有增加趋势。而中小流域暴雨洪水计算及参数综合是洪涝灾害防治的关键, 且中小流域暴雨洪水计算及参数已有深入广泛的相关研究, 但多数研

究为某一方法或具体地区的工作, 为了更好地适应当前形势, 服务现实需求, 有必要对中小流域暴雨洪水计算及参数综合相关研究进行全面的综述。本文从产流损失和汇流过程, 对中小流域暴雨洪水计算全过程及参数综合研究进展进行系统回顾, 并对综合单位线法、推理公式法及经验公式法等计算方法及其参数在实际应用中存在的问题和局限性进行探讨。提出未来重点研究的问题, 并结合当前社会发展需求和技术发展, 预估未来解决该问题的研究趋势。为中小流域暴雨洪水参数计算方法更新与新技术结合直接提供前置经验, 推动变化环境下应对中小流域暴雨洪水极端事件能力奠定基础。

1 中小流域定义

中小流域 (流域面积 $\leq 1\,000\text{ km}^2$) 是暴雨洪水灾害的重点发生区。迄今为止, 中小流域还没有统一的定义, 通常在不同的设计需求中有其特有的流域分区 (表 1)。水利上通常指流域面积小于 $1\,000\text{ km}^2$ 或河道基本上是在一个县属范围内的区域 (王淑云 等, 2017)。《水文情报预测技术手册》中将流域面积小于 $1\,000\text{ km}^2$ 的集水区域称为中小流域。在国土规划领域, 小流域是以分水岭为界, 以小溪为地貌特征的一个集水区域。它是一个水文单元、自然生物单元、社会经济政治单元和资源管理规划单元。从水文角度看中小流域通常具有流域汇流以坡面汇流为主、集水面积小等特性。在生态水文方面, 流域的生态需水得按流域内的不同群落划分分区, 根据各分区生态样本调查后按面积划分。

2 产流计算及参数综合

2.1 产流计算

流域产流实质上是降雨在不同下垫面中各种因素综合作用下的再分配过程, 主要受流域的降雨特

表 1 中小流域定义

Table 1 Definition of Middle and small watershed

定义	集水面积 F/km^2	出处 (文献)	应用领域
是以分水岭和出口断面为界形成的集水单元	<50	连增蛇等 (2013)	人类活动区域
是指一条河流或水系的集水区域, 河流从这个积水区域获得水量补给	<30	王森 (2013)	适用于社会经济发展地区
一般指集水面积在 $5\sim 30\text{ km}^2$ 的闭合集水区域	$5\sim 30$	刘春元等 (1988)	水土保持计算、水土流失治理单元
以分水岭为界, 以小溪为地貌特征的一个集水区域	分水岭为界的集水区域	赵珂等 (2015)	在国土规划领域, 它是一个水文单元、自然生物单元、社会经济政治单元和资源管理规划单元
集水面积 $\leq 200\text{ km}^2$ 的流域	≤ 200	张桂娇等 (2004)	小流域产汇流计算单元
由地表水或地下水的分水线所包围的集水区或汇水区	$3\sim 50$	侯轶攀等 (2019)	地质灾害发生的基本地形单元
流域面积 $< 1\,000\text{ km}^2$ 或河道基本上在一个县属范围	$< 1\,000$	周理等 (2014)	水利计算单元

性和时空分布、流域湿润程度、植被覆盖类型、地表洼地分布、土壤质地和结构等要素的影响 (Ion, 1985; 刘晓燕等, 2019; 苏伟忠等, 2019)。

产流计算是除去初损、入渗、填洼、植物截留后的净雨量, 以初损和下渗为主, 且中小流域多为无资料地区, 其数据资料或因流域内人类活动而无法继续使用, 水文模型无法很好进行长序列产流参数综合。本文主要介绍常用的前期影响雨量法 (降

雨径流相关图法), 并将其他产流计算方法列于表2 (靳春蕾, 2005; 李军等, 2014; 张一龙等, 2015; 赵玲玲等, 2016; 吴健生等, 2017)。湿润地区设计条件下的一次暴雨损失量与暴雨量的比例较小, 对设计洪水的计算影响不大, 故湿润地区产流计算采用降雨径流相关法、平均损失率扣损法等。对于比较干旱的地区, 其损失量较大, 采用下渗曲线法、初损后损法等。

表2 产流分析的主要方法

Table 2 Main methods of production flow analysis

序号	净雨分析方法	原理简介
1	降雨径流相关图法	根据实测资料建立 $P \sim P_a \sim R$ 关系图
2	下渗曲线法	降雨扣除下渗过程得到了净雨过程
3	初损法	假设损失只发生在降雨初期, 满足总损失量后的降雨全部产生径流
4	扣损法	初损后损法
5		平均损失率法
6		稳定下渗率法
7	径流系数法	综合径流系数法
8		变径流系数法
9		SCS产流模型
10	水文模型法	新安江产流模型
11		LCM产流模型

黄膺翰等 (2014) 在霍顿下渗能力曲线的基础上, 推导出了一种基于流域最大蓄水容量、稳定下渗率以及初始下渗率3个参数的流域产流计算方法。Ivanov等 (2004) 在网格法的基础上建立了一种分布式水文模型, 模型仅用原始网格节点的5%~10%就能捕捉到流域地形的水文特征, 利用网格法进行产流计算, 也会随着卫星遥感等技术的发展而得到应用。网格法将流域划分为多个网格, 在网格单元上叠加雷达测雨信息和下垫面遥感信息, 以获得每个网格单元降雨量和下垫面因子, 从而计算出每个网格单元的产流量。芮孝芳 (2017) 在Rodriguez-Iturbe和Valdes提出R-V地貌瞬时单位线理论的基础上, 引入“网格水滴”的概念, 提出了单元嵌套网格产汇流理论。这套产汇流理论取等流时线法和单位线法之精华, 去其糟粕, 同时采用将坡面汇流和河网汇流先分开、后卷积的考察流域汇流的方法, 使在物理上统一等流时线法和单位线法成为可能。

刘昌军等 (2021) 针对山丘中小流域暴雨洪水提出了一种时空变源混合产流模型, 该模型在蓄满产流和超渗产流的平面上搭建混合产流模型, 更好地反映两种产流模式的时空变化。研究表明, 该模型适用于湿润、干旱和半干旱流域。

2.2 产流参数综合

通过建立参数与流域下垫面的关系进行产流参数综合, 其中前期影响雨量参数和损失参数的综合一般是为了相应流量的推算需求而取值。部分中小流域缺乏充足的下垫面资料, 无法以下垫面条件为基础进行分类分析, 多以单站综合或区域参数综合分析计算该类地区的产流。产流参数综合多以经验法选取参数, 其精度较低。但是面上水利工程推求设计洪水时, 其产流计算可以通过参数综合分析, 来定量区域产流参数, 对流域特征在产流计算中的作用进行经验界定。

1) 降雨径流相关图法。降雨径流相关图基于成因分析, 考虑净雨量以及径流量的前期影响因素, 建立降雨径流相关关系, 主要考虑前期影响雨量 P_a 和前期土壤湿度 (含水量) W_0 。全国各地沿用的降雨径流相关图类型见表3 (暴雨洪水分析计算工作协调领导小组办公室, 1984)。

2) 损失法。地表产流过程也是暴雨损失的过程, 土壤最大损失量 (I_m 值) 是反映流域最大损失量的综合指标。表4损失法的分类中, 初损后损法是指扣除产流开始前的降雨损失量 I_0 , 并用产流期内的平均损失率 $\bar{f}$ 扣除后损, 求出径流深 R 。 I_0 进行地区综合, 首先计算单站 I_0 再建立 I_0 与流域面积 F 、

表3 降雨径流相关图法综合类型

Table 3 Comprehensive types of rainfall-runoff correlation map method

方法	参数综合模型	应用地区	备注
降雨径流相关图法	蓄满产流模型 $P \sim R$ 相关图, 其中 $R = \sqrt[3]{(P + P_a - C_p)^3 + C_t^3} - C_t$	湖北、江西、福建、广西省	考虑前期土壤含水量 W_0
	给出经验相关图 $P \sim R$ 相关图	江苏	式中: P 为降雨量; P_a 为前期影响雨量; C_p 为纵坐标轴截距; C_t 为 C_p 与相关图 45% 渐近线在纵轴上截距的差。
	径流系数法	陕西南部、云南、河南、山东	实测资料经验图
	扣除 I_m 的某个百分数	河北	不考虑 P_a
		贵州	$P \sim R$ 采用直线表示
		四川	I_m 为最大初损

表4 损失法的几种综合类型

Table 4 Several synthetic types of loss methods

产流模式	方法	原理	公式	参数综合	备注
蓄满产流	初损后损法	扣除初损 I_0 和 h , 并用产流期内的平均损失率扣除后损	$\bar{f} = \frac{(P - h - I_0 - P_{t-t_0-t_c})}{t_c}$		
	平均损失率	仅考虑一个均化的产流期平均损失率 μ	$\mu = \frac{P_{t_c-h}}{t_c}$	建立参数与流域面积 F 、前期影响雨量 P_a 、雨强 i 、产流历时 t_c 和产流期降雨 H_{t_c} 关系	前 3 种损失率之间的关系为: $\mu > \bar{f} > \bar{f}_1$
		降雨历时内的平均损失率 $\bar{f}_1$	$\bar{f}_1 = \frac{P}{t}$		
超渗产流	稳定下渗率法	土壤含水率达到饱和后, 单位时间内的稳定下渗量 f_c	$f_c = \frac{P-R}{t}$		

注: P 为一次降雨总量; h 为净雨总量; $P_{t-t_0-t_c}$ 为降雨后期不产流的降雨量; t 为降雨历时; t_c 为产流历时; P_{t_c} 为产流历时内的降雨量; R 为径流量。

P_a 或分区定值的关系。 I_0 平均损失率 μ 一般应用于推理公式的推求, 精度直接影响设计值的准确程度, 其推求方法包括: 实测资料反推 μ 值和从小流域特有的产汇流概念出发以推理公式法推求。后损 $\bar{f}$ 进行综合时按地区综合或与 P_a 建立关系。产流参数综合在中国得到应用, 金双彦等 (2017) 用流域实测降雨量、径流量及前期影响雨量等资料, 分析佳芦河下渗能力, 建立 $f \sim W_0 \sim F$ 关系, 计算出佳芦河流域稳定下渗率为 3.1 mm/h。刘金艳 (2011) 对秦皇岛流域产汇流参数综合, 得出该流域最大损失量 I_m 为 103 mm, 稳定下渗率为 1.8 mm/h, 汇流参数 m 为 0.68, 并通过历史洪水验证, 结果较精确。

3 汇流计算及参数综合

3.1 汇流计算

流域汇流的实质是水质点经过坡面和河网在流域出口断面汇集的过程。主要受流域水系结构特征和流域的形状和结构特征影响。汇流计算的主要方法有单位线法 (瞬时单位线、经验单位线、综合单位线等)、推理公式法 (国外称合理化法)、等流时线法、流域水文模型法等 (张婷婷等, 2007)。中

国幅员辽阔, 自然地理条件十分复杂, 产汇流特性差异很大, 因此造就了产汇流计算方法的多样性。单位线法可以直观地反映出流域地形、地貌等汇流特性, 应用简便, 但是对资料要求较高, 且地貌单位线受面积影响不具有唯一性。推理公式法历史悠久, 较适用于小流域。经验公式法应用简易, 反映了流域的地理特征和暴雨特征, 系列资料的长短对经验公式本身计算结果的影响大。瞬时单位线和推理公式都是概念性模型, 具有一定的物理概念, 因此其参数不能采用完全严格的水力学方法确定, 水文计算中常用实测暴雨洪水资料反求瞬时单位线和推理公式参数, 然后对参数进行综合用来推求流域设计洪水。

中国多数省 (市、区) 按流域面积的大小选择不同的计算方法, 普遍采用的方法是瞬时单位线 (共有 19 个省、市、区采用) 和水科院推理公式 (共有 18 个省、市、区采用) (暴雨洪水分析计算工作协调小组办公室, 1984)。此外, 辽宁、浙江、广东等省采用综合单位线, 江苏采用总入流法 (适用于平原地区), 新疆采用调蓄经验单位线, 吉林采用推理瞬时单位线。总的来说, 全国各地基本上采用了两种途径进行汇流计算, 一种是单位线, 另

一种是推理公式。

3.1.1 瞬时单位线 单位线法是计算设计洪水的常用方法, 指在给定流域上, 单位时段内分布均匀的单位净雨量所直接产生的径流量在流域出口断面处形成的流量过程线。常用的单位线主要有瞬时单位线、综合单位线和地貌瞬时单位线(谢莹莹等, 2006)。单位线法最早由谢尔曼(Sherman, 1932)提出。克拉克(Clark, 1945)考虑流域产流成因概念, 突破固有的经验方法, 阐明单位线法与洪流演进法之间的关系, 这便是瞬时单位线的雏形。1950年爱迪生等进一步提出了瞬时单位线公式的经验性推导, 认为一个流域面积曲线的累积线具有一般抛物线形式, 流量也具有这种形式, 而河槽调蓄类似一个水库的作用, 即出流量随时间呈指数递减, 并且在1953年提出流域瞬时单位线公式的经验性推导。50年代以来, 脉冲技术理论被应用到水文研究中, 1957年纳希(Nash, 1957)在有关英国河流单

位线的研究中, 第一次提出纳希瞬时单位线模式(表5)。在此后的发展中, 杜格(Dooge, 1959)提出单位线的一般模式, 周文德等(Chow, 1959)进一步发展流域瞬时单位线。60年代初, 中国开始使用瞬时单位线研究暴雨洪水过程。华士乾等(1980)通过探索单位线的适用性考察了流域汇流非线性现象。1960—1978年中国科学院与地方院开展小流域暴雨洪水流量计算和单位线的地区综合研究。1980年王广德等(1981)开展对单位线峰量和单位线滞时与净雨量的非线性关系的研究, 张恭肃(1981)、冯焱(1983)、夏军(1982)、杨家坦(1981)等也对非线性问题做了研究。单位线法可以直观地反映出流域地形、地貌等汇流特性, 应用简便。随着研究的深入, 单位线的含义和用途不断丰富, 目前的单位线已经不仅只有自然流域产汇流特征, 其形状的变化和线型的不稳定也蕴含了环境变化的影响。

表5 单位线公式汇总

Table 5 Summary of Unit line formulas

方法	估算公式	参数	适用性
纳希瞬时单位线	$u(Q, t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left[\frac{t}{k} \right]^{n-1} e^{-\frac{t}{k}}$	式中: $\Gamma(n)$ 为伽玛系数; n 为反映流域调蓄能力的参数; k 为线性水库的蓄泄系数。	优点: 简便实用, 能反映出流域地形、地貌等汇流特性。 缺点: 与流域汇流的非线性相矛盾。
无因次单位线汇流模型	$u(n) = [S(t) - S(t - \Delta t)] / \sum q(\Delta t_0, t)$	$\sum q(\Delta t_0, t)$ 为净雨时段单位线纵坐标之和; $S(t)$ 为 t 时 S 曲线。	优点: 消除面积因子影响, 完整展示单位线特性

3.1.2 综合单位线法 综合单位线分为综合经验单位线和地貌综合单位线。地貌综合单位线是将流域自然地理特征与单位线要素联系起来, 借助单位线的概率释义, 通过地区的各种流域特征资料综合导出单位线分析表达式(表6)。水文地理学家早在20世纪30—40年代就已提出通过经验统计分析, 建立单位线峰值、峰值滞时等流域单位线的主要特征以及流域地形地貌参数, 以确定缺乏水文资料情况下流域单位线的方法(陈明等, 1995; 芮孝芳, 1999a, 1999b; 张静怡, 2008)。但这类方法忽略了流域汇流机理, 缺乏一定的理论基础, 导致计算结果误差大、精度小, 不适用于参数外延和地区移用。斯奈德等(Snyder, 1938)提出综合经验单位线法。纳希(Nash, 1957)在分析英国河流资料的基础上建立的瞬时综合单位线, 实质上是参数的综合。地貌瞬时单位线理论最初是由Rodríguez(1979)和Gupta(1980)等建立和应用的, 认为瞬时单位线是水质点到达流域出口断面汇流时间的概

率密度函数, 并将水力因子融为一体, 这是在瞬时单位线认识上的突破。中国在20世纪80年代初开始在全国范围内研究单位线方法, 结合各省的研究成果, 编制了暴雨径流查算图表。例如, 1978年广东省深入分析纳希瞬时单位线方法, 并提出了一套具有本地特色的综合单位线方法, 即广东省综合单位线法(舒晓娟, 2004; 王国安等, 2011)。地貌单位线属于随机水文过程, 简便实用, 适宜区间与小流域洪水预报, 但受面积影响, 使流域地貌瞬时单位线不具有唯一性。

3.1.3 推理公式法 推理公式法具有一百多年的历史, 国外称为“合理化法”(表7)。古典的推理公式是理想条件下形成的最大流量的推理关系, 一般只包含径流系数、降雨强度和流域面积3个要素。例如1851年摩尔凡尼(T J Mulvaney)基于降雨、产流、汇流等过程为均匀的假设给出推理公式基本形式, 并概化设计暴雨及损失等(陈家琦等, 1985)。此后, 推理公式法逐渐在世界范围内发展,

表6 地貌综合单位线

Table 6 Geomorphic integrated unit line

方法	计算公式	参数	适用性
广东省 综合 单位线	$q_i = \frac{u_i W}{t_p}; Q_m = \frac{u_m W}{t_p};$ $t_p = \left(m_1 + \frac{1}{2} \Delta t\right) k; t_i = x_i t_p$	式中: u_i 为无因次单位线的纵坐标(比值); x_i 为无因次单位线的横坐标(比值); q_i 为时段单位线的纵坐标; t_i 为时段单位线的横坐标; t_p 为时段单位线的上涨历时; $W=F/3.6$, 相当于 1 mm 的净雨所形成的时段单位的总洪量, F 为流域面积; m_1 为时段单位线滞时	优点: 对流域地形地貌条件综合考虑。适用于流域面积 $< 1\ 000\ \text{km}^2$ 。
广东省 三角形 综合单位线	$Q_t = \sum_{i=1}^n R_i C_u(i)$	式中: Q_t 为 t 时刻雨量系列在桥址断面处产生的流量; R_i 为第 i 时段雨量大小; $C_u(i)$ 为 t 时刻第 i 时段雨量对应的单位线纵坐标; n 为雨量时段数	三角形综合单位线体现了当地的地域特点
地貌综合 瞬时单位线 (张静怡, 2008)	$G_{\text{GluH}}(t) = \left(\frac{t}{k}\right)^{a-1} \frac{e^{-\frac{t}{k}}}{kr(a)}; a = 3.29 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.78} R_L^{0.07};$ $k = 0.70 \left(\frac{R_A}{R_B R_L}\right)^{0.48} \frac{L_\Omega}{v}$	式中: v 为流速; $r(a)$ 为 a 的伽马函数; L_Ω 为最高级河流长度河长比(R_L)、分叉比(R_B)和面积比(R_A)	缺点: 分叉比、河长比、面积比受面积影响, 从而使流域地貌瞬时单位线不唯一。

水文学家(暴雨洪水分析计算工作协调小组办公室, 1984)在基本公式的基础上,将推理公式法和暴雨洪水地区特征结合,推导出新的改进推理公式。改进推理公式因其适用性强、计算的高效性在中国广泛使用。1956年原水利部北京水利科学研究院水文研究所于中国首次提出基于推理公式法的最大径流量计算方法(陈家琦等, 1985)。1958年水利科院进一步提出小流域雨洪最大径流图解分析法(水利科学研究院, 1958)。

推理公式法历史悠久,计算程序简便,对资料要求不高,但具有一定的局限性,适用于小流域且由于该方法对许多外部条件作了概况和假定,其计算结果的不确定性较大。随后小流域暴雨径流研究组(1978)考虑洪峰流量形成中汇流面积的分配和调蓄作用对推理公式进一步完善。

3.1.4 经验公式法 经验公式法的原理是根据各地区实测暴雨洪水资料推算设计洪水,通过结合流域地理、降水特征,建立经验关系公式,并用于缺资料或无资料地区。由于19世纪水文资料十分缺乏,并未出现水文频率的概念,经验公式法最早是建立洪峰流量和流域面积的关系,经验公式类型见表8。20世纪以来,随着各类研究及工程项目的开展,各国在建立地区性经验公式方面做了许多工作,经验公式法的研究逐渐成熟,经验公式的内容逐渐丰富。中国各相关部门从修建水利工程出发,结合实际需求,分析研究了中小流域设计洪峰流量经验公式的理论和计算方法,提高了经验公式法的适应性及实用性。经验公式法应用简易,反映了流域的地理特征和暴雨特征,对于集水面积小于 $10\ \text{km}^2$ 的河流使用效果好。但是较难反映不同流域的特性,且

由于水文图集出版的时间早,水文系列资料的长短对经验公式本身计算结果的影响大(郑章忠等, 2002)。

3.2 汇流参数综合

降雨特征、流域特征和地质特征共同影响着洪水汇流参数的变化。定量分析这些特征因素的难度较大。一般以特征因素为依据划分水文分区,以区域为单元推求综合洪水汇流参数。汇流参数综合则综合分析了三大要素对参数的影响。柏绍光等(2008)以下垫面条件为依据划分了水文分区,通过分析各分区域内单站洪水汇流参数,构建汇流参数与流域地理特征的关系。

3.2.1 单位线参数综合 Nash对英国各河流建立了参数的地区综合关系式。Nash瞬时单位线的参数 n 、 K 并不固定,其根据场次洪水特征而变化,这是因为在实际的汇流过程中,根据不同洪水推求得到的单位线有差异。一旦确定了流域的瞬时单位线参数 n 、 K ,其瞬时单位线也便唯一地确定了。 n 是综合反映流域调蓄能力的参数, K 是流域汇流时间的参数,具有时间因次。Rosso(1984)建立了Nash瞬时单位线参数与Horton地貌参数之间的经验关系,芮孝芳(1999a)提出了Nash瞬时单位线参数与Horton地貌参数之间的计算公式。

瞬时单位线参数 n 、 K 用于分析单位线与流域特征因子之间的关系。目前常用的参数推算方法有矩法、遗传算法等。瞬时单位线参数综合分为单站综合和地区综合。单站综合通过建立单位线参数与雨强之间的关系进行参数综合分析,地区综合则建立单站综合结果与流域特征的经验关系。

1) 单站综合。对参数 m_1 进行单站综合时,将

表7 推理公式法汇总

Table 7 Summary of inference formula methods

方法名称	估算公式	主要参数	优缺点(适应性)
摩尔尼推理公式	$Q_m = CIA$	式中: Q_m 为流域出口断面的最大流量; C 为径流系数; A 为流域面积; I 为流域平均降雨强度。	缺点: 推理公式只适用于山区丘陵小流域的设计洪水计算, 不适应与平原河流和平原河网排涝计算。
林平一法	$Q_m = 16.67C \frac{S_p}{\tau^n} F$ $\tau = \left[\frac{K}{(CS_p)^{\frac{1}{4}}} \right]^{4-n}$ $K = 645N_c^{0.75} \frac{L^{0.4}}{J_c^{0.2}}$	式中: n 为暴雨衰减指数; S_p 为设计雨力; C 为径流系数; K 为全面汇流时间参数; L 为河长; J_c 为主河道 L 的坡度; N_c 为河道汇流糙率。	适用于流域面积 $< 150 \text{ km}^2$ 的小流域洪水计算。
水文所推理公式法	$Q_m = 0.278\phi TF$	式中: ϕ 为洪峰径流系数; T 为平均降雨强度; F 为流域汇水面积; 其余同前。	适用于小流域。优点: 公式简单, 仅有 3 个变量, 意义明确, 公式结构具有一定物理基础。
中铁法	$Q_t = \int_0^t \left(\frac{\partial w(\tau, r)}{\partial \tau} \right) r_{t-\tau} d\tau$	式中: τ 为流域某一位置处净雨水质点的汇流时间; $w(\tau, r)$ 为流域面积增长函数; $r_{t-\tau}$ 为流域面上 $t-\tau$ 时刻的雨强; 其余同前。	优点: 具有严密的理论基础, 公式形式也非常简单。把流域造峰历时看作随雨强变化而变化。
改进后的美国推理法	$Q_m = 0.278S_p T_c^{1-n} CF$	式中: Q_p 为频率为 p 的计算洪峰流量; C 为洪峰径流系数; S_p 为频率为 p 的暴雨雨强; 其余同前。	优点: 改进后的公式考虑了时间段对暴雨洪峰的影响, 雨强变化下洪峰的变化。
半推理半经验公式	$Q_p = 0.278\phi(S\tau^n)$	式中: Q_p 为频率为 p 的计算洪峰流量; ϕ 为径流系数; S 为暴雨雨力; τ 为流域汇流时间; n 为暴雨强度递减系数; 其余同前。	适用于流域面积小于 500 km^2 小流域。优点: 反映不同流域的实际情况; 还可推求时段洪水总量和洪水过程线。缺点: 公式中的洪峰流量径流系数 ϕ 、汇流参数 m 的计算或选取, 与实际情况不符。
推理公式法	$Q_p = \frac{0.278Fh_t}{\tau}$ $\tau = 0.278\theta / (mQ_p^{1/4})$	式中: h_t 为历时 t 的最大净雨量; τ 为汇流时间; θ 为地理参数 $\theta = L/J^{1/3}$; L 为主沟道长度; J 为主沟道平均坡降; m 为汇流参数; 其余同前。	适用于 $F < 20 \text{ km}^2$ 特小流域。
美国推理公式	$Q_p = 0.278iCF$ $T_c = 0.02L^{0.07} S^{-0.385}$	式中: Q_p 为频率是 p 的计算洪峰; i 为频率是 P 的暴雨雨强; C 为洪峰径流系数; F 为流域面积; T_c 为造峰历时; L 为流域主河槽长度; S 为流域主河槽坡度。	优点: 具有严密的理论基础, 公式形式也非常简单。缺点: 把流域造峰历时看作与雨强无关。
推理公式法	$Q_m = 0.278C \frac{24^{n-1} H_{24p}}{\tau^n} F$ $\tau = 2 + 0.278 \frac{L}{V}$	式中: C 为洪峰径流系数; n 为暴雨衰减指数; H_{24p} 为设计频率为 p 的 24 h 暴雨总量; V 为平均汇流速度; 其余同前。	适用于流域面积 300 km^2 以下的流域优点: 简便, 能够反映一定的不同河流特性, 理论依据充足。缺点: 各参数的取值受人因素为影响很大, 且不同河流、流域的不同河段各参数有区别。
推理公式法	当 $t_c \geq \tau$ 时, $Q_m = 0.278 \left(\frac{h_t}{\tau} \right) F$ 当 $t_c \leq \tau$ 时, $Q_m = 0.278 \left(\frac{h_R}{\tau} \right) F$	式中: h_t 为相应于 τ 时段的最大净雨; h_R 为单一洪峰的净雨。在小流域设计洪水计算过程中, 净雨历时 t_c 一般大于汇流时间 τ , 故以全面积汇流为主。	主要用于中小集水面积。
水科院推理公式	$Q_m = 0.278 \left(\frac{S_p}{\tau^n} - \mu \right) A$ $Q_m = 0.278 \left[\frac{S_p t_c^{1-n} - \mu t_c}{\tau} \right] A$	式中: μ 为损失参数; 其余同前。	适合于中国大部分区域。

m_1 与造峰雨平均雨强 i 建立关系, 滞时-雨强关系式形式如下:

$$m_1 = ai^{-b} \quad (1)$$

式中: a 为反映流域特征的参数; b 为非线性改正指数; m_1 为瞬时单位线滞时。

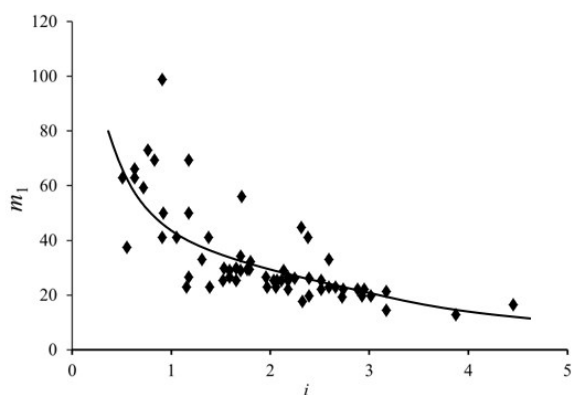
2) 地区综合。地区综合类型根据单位线的特

点分为两种。第一种是建立单站瞬时单位线滞时和雨强的关系, 推求 10 mm/h 雨强的滞时 $m_{1, (10)}$, 根据流域的地理因子 (流域面积 F 、坡降 J 等) 以及 $m_{1, (10)}$ 进行单站地理综合。一般用于流域地理综合主要受面积和坡降影响的区域, 其中 $m_{1, (10)}$ 和流域面积呈正相关关系, 和坡降呈负相关关系。其次,

表8 经验公式法汇总

Table 8 Summary of empirical formula methods

方法	计算公式	参数	适用性
经验公式法	$F \leq 300q_m = \frac{2.80}{F^{0.115}}$ $F > 300q_m = \frac{7.30}{F^{0.282}}$	式中: F 为计算断面以上的集水面积; q_m 为洪峰流量均值模数。	优点:简便。缺点:反映不同流域特性差,且由于水文图集出版的时间早,系列资料的长短对经验公式本身计算结果的影响大。
市政部门经验公式	$Q_p = CSF^{2/3}$	式中: F 为汇水时间; C 为系数; S 为相应设计频率的1 h降雨量。	优点:应用简易。缺点:设计洪水选取的标准与水利部门的概念差异较大,公式计算出的仅为洪峰流量,且难以对其计算成果作出了合理分析。
广东省洪峰流量经验公式法	$Q_p = \frac{C_p H_{24p} F^{0.84}}{\theta^{0.15}}$	式中: Q_p 为某频率的洪峰流量; C_p 为随频率而变的系数; H_{24p} 为24 h设计暴雨量; θ 为汇流特征参数; F 为集水面积。	适用性:反映了流域的地理特征和暴雨特征,对于集水面积 $<10 \text{ km}^2$ 的河流使用效果好。
公路科学研究所经验公式	$Q_{\text{设}} = KF^n$	式中: $Q_{\text{设}}$ 为设计控制断面处洪峰流量; F 为项目区流域面积; K 为径流模数; n 为面积参数。	适用于:面积 $<10 \text{ km}^2$ 流域。
多年平均年最大洪峰流量计算	$Q_m = CPF^n$	式中: Q_m 为多年平均最大洪峰流量; C 为地理参数; P 为多年平均最大日暴雨均值; F 为流域面积; n 为经验指数。	以实测和调查洪水资料为基础,综合考虑影响洪水的暴雨、地形、土壤、流域几何特征及人类活动,分析其与洪峰流量的关系。

图1 雨强*i*-滞时(m_1)单站综合关系示意Fig.1 Rainfall intensity (*i*)-Lag time (m_1) schematic diagram of single station comprehensive relationship

对非线性改正指数 b 进行地区综合,非线性改正指数 b 反映了单位线非线性与集水面积大小之间的关系,在大部分地区,两者呈负相关。这种方法还可以在建立单位瞬时单位线滞时与雨强的关系后,不经过雨强滞时转换,直接对参数 a 、 b 进行参数综合。

$$m_{1,(10)} = \phi(F, J, \dots) \quad (2)$$

m_1 与 $m_{1,(10)}$ 关系为:

$$m_1 = m_{1,(10)} \left(\frac{10}{i} \right)^{-b} \quad (3)$$

第二种是将一个地区内所有集水区的洪水相应单位线滞时 m_1 统一并进行地区综合,再推求地区综合公式。

单位线滞时 m_1 的综合,同时考虑了暴雨特性和

流域特征的影响。根据表9,各地区的公式一般都是以雨强和流域地理因子表达 m_1 的关系式。在进行地区综合时选取 $m_{1,(10)}$ 旨在消除雨强对 m_1 的影响,但由于气候、地理等因素,各地对雨强在量级上的定义有一定差异,求出的 $m_{1,(10)}$ 仍无法完全消除雨强因素的影响。同时,各地对单位线滞时 m_1 的计算方法不同,在一定程度上也影响了计算结果的比较。因此,无法在细化研究各流域下垫面条件的不同对 $m_{1,(10)}$ 地区分布的影响。

3.2.2 推理公式参数综合 水利科学研究院(1958)在“小汇水面积雨洪最大径流图解分析法”报告中提出推理公式法。20世纪60年代初,在研究应用推理公式法的过程中,对小水库的设计洪水复核工作中提出汇流参数 m 。推理公式汇流参数 m 的综合分为两种:第一种为单站综合,确定具有一定代表性的单站 m 值;第二种是对区域内各流域站点的稳定 m 值进行地区综合。

1) 单站综合。利用流域实测暴雨洪水资料,推求场次洪水 m 值,通过建立流域 $m \sim Q_m$ 或 $m \sim h_t$ 关系图确定稳定的流域单位线 m 值,关系示意图如图2所示。各省确定 m 值的方法有一定差异,湖北按照洪水量级或雨强确定 m 值,山西则才采用峰量关系确定 m 值。

2) 地区综合。通过建立汇流参数(m)~汇流特征参数(θ)具有指数形式的关系式,对 m 值进行地区综合。由于流域峰量比与 θ 的负相关关系,在实际计算中, $m \sim \theta$ 关系式的指数 <1 。不同省份或区域对 $m \sim \theta$ 定线时采取的方法有一定差异(表

表9 滞时 (m_1) - 雨强 (i) 综合类型Table 9 Lag time (m_1) - rainfall intensity (i) synthesis types

综合类型	地区	地区综合公式
m_1 同雨强 i 建立关系	安徽江淮山丘区	$m_{1,(10)} = 3.42(F/J^2)^{0.24}$ (当 $F/J^2 \leq 1$ 时)
		$m_{1,(10)} = 3.42(F/J^2)^{0.12}$ (当 $F/J^2 > 1$ 时)
	甘肃黄土区	$m_{1,(10)} = 0.94F^{0.16}/J^{0.33}$
	湖南山区	$m_{1,(10)} = 2.7(F/J)^{0.116}$
	浙江省	$m_{1,(10)} = 0.0061L/J^{\frac{1}{3}} + 5.5$
	广西自治区(I)	$m_{1,稳} = 1.34F^{0.297}/J^{0.218}$
	云南区	$m_{1,(10)} = c_m F^{0.262}/(J^{0.171} B^{0.467})$
	陕西省陕北地区	$b = 0.482 - 0.08961 \lg F$
	江西省(I区)	$b = 0.371 - 0.071 \lg(F/J)$
	四川省(I区)	$b = 0.9813 - 0.2109 \lg F$
非线性指数 b 地区综合	福建沿海地区	$b = 0.262F^{-0.07}J^{0.126}$
	浙江省	$b \sim J^{1/3} F^{\frac{1}{4}}$
	黑龙江省	$m_1 = c_2 F^{0.27} i^{-0.31}$
	宁夏贺龙山区	$m_1 = 0.135L^{0.864} i^{-0.093}$
公式 $m_1 \sim ar^{-b}$ 中的参数 a, b 进行地区综合	青海浅脑混合区	$m_1 = (1.717 \lg F - 2.63) i^{-0.383 + 0.39 \lg F}$
	山东省山丘区	$m_1 = 0.196F^{0.33} J^{-0.27} R^{-0.20} t_c^{0.17}$
考虑净雨量 R 和净雨历时 t_c	$m_1 \sim (R, t_c)$	
不考虑雨强	江苏省苏北山区	$m_1 = 2.4 \left(\frac{F}{J} \right)^{0.23}$
	山东省	$m_1 = 1.34F^{0.463}$

注： F 为流域面积， J 为坡降。

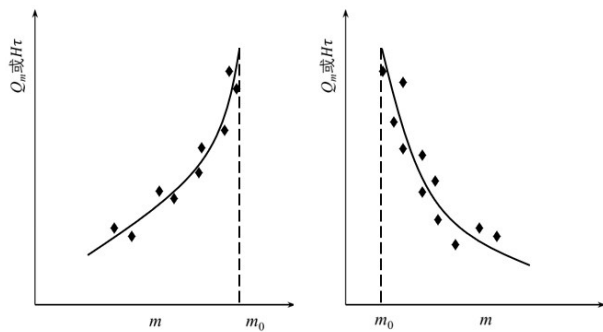
图2 汇流参数(m) - 洪峰流量 [Q_m (或净雨(H_r))] 关系示意

Fig.2 Relationship diagram of Parameter(m)~
Flood peak [Q_m (or rain depth (H_r))]

10)。可以看出，定线时大多考虑下垫面条件、植被覆盖及降雨因素等。

$$m = a\theta^b (\beta < 1) \quad (4)$$

$$\theta \sim \frac{L^a}{J^b F^c} \quad (5)$$

式中： a 、 b 、 c 为地区定线的常数，可以看出 θ 值与河长呈正相关关系，与坡度和流域面积呈负相关关系。

目前 m 值定线的主要依据为 θ 值，但不同地区 θ

表10 不同区域汇流参数(m) - 特征参数(θ) 定线类型

Table 10 Alignment types of parameter(m)~character parameter (θ)
in different area

定线类型	地区	分类	m 值
下垫面	山西	密闭林区	$0.23h^{-0.21}\theta^{0.21}$
		裸露山丘区	$0.35h^{-0.16}\theta^{0.21}$
	贵州	山区、强岩溶、植被差	$0.056\theta^{0.73}$
		山区、少量岩溶、植被较好	$0.064\theta^{0.73}$
	甘肃	六盘山土石山林区	$0.1\theta^{0.384}$
地区定线	青海	黄土区	$1.845h^{-0.465}\theta^{0.515}$
		脑山区	$0.45\theta^{0.356}$
	四川	浅、脑山区	$0.75\theta^{0.487}$
		盆地丘陵区($\theta=1\sim 30$)	$0.40\theta^{0.204}$
	福建	青衣江-鹿头山($\theta=1\sim 30$)	$0.318\theta^{0.204}$
洪水大小	湖北	沿海($\theta \geq 2.5$)	$0.058\theta^{0.786}$
		内陆($\theta \geq 2.5$)	$0.035\theta^{0.785}$
	湖北	PMP及 $H_{24} > 600$ mm 一般频率洪水	$0.36\theta^{0.24}$ $0.50\theta^{0.21}$

注： h 为净雨深， H_{24} 为24 h净雨深。

值的计算方法略有差异(表11)。全国各个省份 θ 值取值时考虑的因素不同，但主要围绕流域面积 F 、坡降 J 以及河长 L 3个因素。

由于参数地区综合的复杂性，站点数量及类型的丰富是进行地区综合的必备条件。进行参数地区

表 11 汇流特征参数 (θ) 取值类型Table 11 Value types of character parameter (θ)

θ 值	省(区)
$\frac{L}{J^{1/3} F^{1/4}}$	湖南、四川、河南、广西、贵州、甘肃、青海、福建、吉林、山西等省(区)
$\frac{L}{J^{1/3}}$	湖北、内蒙、甘肃、江西等省(区)
$\frac{L}{J^{1/3} F^{2/5}}$	山东
$\frac{L}{J^{1/3} F^{1/3}}$	陕西的陕北、渭北

综合时需要分析流域特征、地理特征及降水特征等影响因子对汇流的影响,通常需要与实地野外勘测相结合,以更好地体现流域汇流情况。各地区的特征因素互有差异,在进行参数地区综合时,应结合地区特征采用不同方式进行。

由于实际的汇流过程存在一定的非线性,这种性质在中小流域的中小洪水表现更为显著,但在大洪水条件下,非线性减弱,流域洪水滞时 m_1 和推理公式参数 m 等趋于稳定。全国《暴雨径流查算图表》的编制对汇流计算的发展十分重要。但是,随着水文测站数量及种类的增加、水文数据的细化以及气候、流域下垫面条件等因素的变化,《暴雨径流查算图表》的更新对缺资料、无资料地区水利水电工程设计提供更加可靠的成果。

4 暴雨洪水过程模拟及预报技术

结合雷达测雨、高分辨率遥感、高性能计算和深度学习等研究方法,近年学者们针对洪水过程模拟和预报预警做出许多研究(杨扬等, 2000; 汪君等, 2016a; Kwak et al., 2021),提高洪水模拟和预报的精度。

4.1 降水实测技术提升对模拟预报的影响

中小流域数据资料短缺是导致洪水模拟和预报精度不高的主要原因,雷达能够提供高效的高时空分辨率降雨信息,保证更加精确地分析流域降雨时空分布特征。上世纪70年代,英国自主兴建的河流预报系统(RFFS)和水文雷达系统(HYRAD)共同组成实时降水与河流洪水预报系统,对水文预报的预见期结果都稳定达到或超过雨量计实测雨量的结果,更适用于中小流域,其已在泰晤士河流域多个预警中心站点应用(Krajewski et al., 2002; Berne et al., 2013)。美国目前应用于全国的新一代多普勒天气雷达系统(WSR-88D)具有高质量定量降水探测能力(杨扬等, 2000),可提供空间分辨率0.25

km,速度分辨率0.5 m/s的数据资料。中国现役的气象雷达有很多种,常见的有711、713、714、718和多普勒雷达,各雷达应用于不同区域,例如,713雷达现应用于中国西北部和中部的部分省市。此外,中国还研发了多种以雷达为核心的新型高分辨率局部地面降雨量自动监测系统。自20世纪90年代以来,中国已经建设完成S波段和C波段的新一代天气雷达系统,S波段的雷达系统,其距离分辨率可精确到150 m。系统监测得到的降雨数据在空间分布上连续且定量,与分布式水文模型的输入雨量数据要求更加匹配。雷达测雨技术的原理使其不受流域地形地貌的影响,在一些地理条件复杂的流域,雷达测雨技术能更精确地测量瞬时降雨量。然而,雷达测雨技术成本较高的缺点明显,只适用于成本高、精度高的工程场所(李薇等, 2019)。受种种因素限制,中小流域无法较好地应用天气雷达测算降雨及下垫面数据,其中大多数流域还属于无资料地区,暴雨洪水的模拟和预报研究应用受限。

4.2 遥感技术提高对模拟预报的影响

随着卫星遥感技术的发展,卫星遥感降水也逐步应用到水文预测中。目前,国际上主要应用TRMM卫星反演降水、GSMaP卫星降水、CMORPH卫星降水、PERSIANN卫星降水以及IMERG卫星降水(徐海飞等, 2016),其中IMERG卫星降水是全球降水任务(GPM)的三级产品,可以达到 $0.1^\circ/0.5\text{ h}$ 的高时空分辨率。汪军等(2015)使用CMORPH卫星遥感降水资料,搭载CREST模型,建立一个高分辨率的动力数值洪涝灾害预报系统,该模型可以实时运行以监测预报全国的洪涝情况(汪君等, 2016a)。汪君等(2016a; 2016b)基于2010舟山暴雨泥石流事件的数据资料,研究对比了不同分辨率下WRF模式预报的精准度,结果从总体上看,采用高分辨率遥感数据的WRF模式的效果要高于低分辨率下的效果,特别是在一定程度上预报降雨的基本特征,包括降雨的基本分布、降雨极值的时间和位置,更好地预警预报洪涝灾害。邢贞相等(2020)利用SSEBop卫星遥感蒸散发数据作水文模拟,克服传统地面蒸散发数据受站点分布影响及蒸散发空间内分布不均匀等问题,与水文模型更好地契合,预报效果更好。Zeng等(2016)基于TRMM卫星降水数据和MODIS的土地覆盖和植被覆盖数据等,通过山洪潜在指数(FFPI)、山洪灾害指数(FFHI)、山洪风险指数

(FFRI) 建立了级联山洪预警系统 (CFFG) 并已在云南部署应用。陈晓宏等 (2017) 采用新一代 GPM IMERG 卫星遥感反演降水数据, 基于北江流域研究了准实时 IMERG 产品的水文模拟效果, 结果表明, 其在汛期的模拟效果较好, 在短期洪水预报上具有一定的潜力。然而, IMERG 最大的局限在于其只能提供 2014 年 3 月之后的降水数据, 对长时间降水序列的研究能力较低。目前, 卫星遥感技术对洪涝灾害的监测以及预报效果显然, 但仍需要进一步与中小流域参数地理综合结合, 以增加预报的地区可靠性及准确性。

4.3 高性能计算对模拟预报的影响

高性能计算 (High Performance Computing, HPC) 利用聚集起来的计算能力来处理标准工作站无法完成的数据密集型计算任务。如 1983 年研制的中国第一台高性能计算机——银河 1 号巨型计算机。随后研制了曙光 1000、天河一号、天河二号以及神威太湖之光等高性能超级计算机。高性能计算机逐渐应用在水利上。Martinovic 等 (2010) 创建 FLOREN+ 系统能够预测洪水范围并进行有效的洪涝灾害管理, 并利用高性能计算在该系统中同时运行多个水文模拟过程, 来预报未来的洪水。相比于其他模型预报结果, 搭载高性能计算的 FLOREN+ 系统能够进行模型联合计算, 显著提高了计算速度和可信度 (Martinovic et al., 2010)。Zhu 等 (2016) 建立基于 HPC 的水文模拟方法, 其结果与传统量测和雷达预报相比, 在保证能够精准捕捉到洪峰的前提下, 提高了预报提前期的价值。高性能计算的研究工作还未应用到洪水计算的地区参数综合中, 预计未来可以发挥其优势, 深入分析各特征因素对产汇流参数的影响。

人工智能大数据技术也逐渐应用到水文模拟预报中, 包括深度学习中循环神经网络、卷积神经网络、递归神经网络、长短时记忆神经网络、极限学习机等。Hochreiter 等 (1997) 基于循环神经网络, 提出带有记忆单元的长短时记忆 (LSTM) 神经网络。Kwak 等 (2021) 认为, 基于深度学习的 LSTM 模型虽模拟效果好, 但目前并不能完全取代传统水文模型对暴雨洪水进行模拟及预报。马瑜君等 (2018) 建立基于栈式降噪自动编码器的深度学习模型, 在与传统机器学习模型 (BP 神经网络以及支持向量回归) 的洪水预报精度对比中指出, 深度学习模型的预报精度更好, 且误差波动更小。由于中小流域资料短缺, 可靠性、代表性较低, 深度学

习在针对中小流域无资料地区或资料短缺地区模拟时, 其模拟意义下降, 适用性减少, 在这种情况下, 与参数综合相结合的意义就更为重要。

5 总结和展望

本文对中小流域暴雨洪水计算全过程及参数综合研究进展进行系统回顾, 对各部分的主要方法进行梳理和总结。并对综合单位线法、推理公式法及经验公式法等计算方法及其参数在实际应用中存在的问题和局限性进行探讨。

1) 产流计算方面, 产流损失是中小流域暴雨洪水计算的关键量, 产流过程受天上暴雨和地表特性的影响, 呈现复杂非线性, 当前的产流计算以经验和半经验方法为主, 经验方法有降雨径流相关法和径流系数法等, 半经验的有分阶段的扣损法、分下垫面类别的 SCS 曲线法和分阶段分类别的蓄水容量曲线法; 流域下垫面如地形、流域形状和土壤性质等在中小流域暴雨洪水产流计算中起到至关重要的作用, 而当前的计算方法多呈现经验性表达, 对其作用的精确刻画将是未来研究方向。

2) 汇流计算方面, 暴雨洪水计算中的汇流计算方法较多, 主要有单位线法、推理公式法和经验公式法, 单位线法又有瞬时单位线和综合单位线; 各汇流计算方法适用性不同, 单位线法可以直观地反映出流域地形、地貌等汇流特性, 但是对资料要求较高。推理公式法历史悠久, 较适用于小流域。经验公式法应用简易, 反映了流域的地理特征和暴雨特征, 系列资料的长短对经验公式本身计算结果的影响大。汇流计算的非线性是未来研究的重点内容, 区域产汇流参数综合, 可对汇流参数作非线性校正, 提高流域汇流模型的精度。

3) 参数综合方面, 参数综合有两个过程, 首先是单站点的综合, 建立参数与暴雨稳定关系; 其次是地区综合, 建立参数与流域特征之间的关系; 单位线方法单站综合建立了滞时参数与造峰平均雨强的关系, 地区综合考虑了流域面积和平均坡度; 推理公式单站综合建立了参数与洪峰流量的关系, 地区综合考虑了流域平均坡度、河长和面积, 同时按照下垫面类型进行分类; 但暴雨的时程分配、流域形状及地形对产汇流参数的影响并没有反映。该方面的研究将成为未来的研究趋势。

4) 中小流域暴雨洪水模拟预测方面, 天气雷达和高分卫星遥感实现了小区域高精度和大区域雨量测定, 大尺度水文模拟和深度学习在暴雨洪水

模拟计算中得到广泛的应用。然而,结合这些技术开展模拟预报的工作还停留在应用基础层面,很少应用到实际设计上,且如何利用这些技术反映降雨特征、流域特征和地质特征对流域产汇流参数进行综合,并服务于设计中需要进行深入研究。

5) 近年来环境变化对水文过程产生较大影响,特别是气候变化导致的暴雨极端事件增多趋势已经被多地证实,同时剧烈人类活动对流域下垫面的改变直接影响降水径流形成机制,从而对洪水过程产生影响;综述全国各地当前中小流域暴雨洪水计算方法和参数成果仍采用20世纪80年代之前数据推求的成果;而气候变化对不同气候区影响不同,各地社会经济发展对下垫面改变程度不同,这些都使得全国各地暴雨洪水特性变化存在差异,仍采用原有的查算成果进行计算将存在较大不确定性。

6 未来发展趋势

1) 暴雨和洪水发生背景都发生在如此剧烈变化的背景下,中小流域暴雨洪水计算中的过程概化合理性及计算假设条件的适用性不确定性增加;同时中小流域暴雨-洪水过程复杂,又面临复杂环境变化形势,如何运用学科交叉和利用新技术阐明气候变化和人类活动对暴雨洪水的影响机制,并将其用于解决变化环境下的暴雨洪水计算问题,将是当前面临的重要挑战。

2) 但随着全国暴雨洪水数据的积累,大数据处理技术不断提高,基于机器学习的数据挖掘技术将在暴雨洪水形成机制、暴雨洪水特征变化的诊断和界定、暴雨洪水特征的挖掘提取和新表达等方面有广阔的应用前景。

3) 随着高精度下垫面数据的普及、新技术的出现和处理计算能力增加,下垫面精细化表述,微地形地貌、流域形状等更精确表达方法的研究将向更深层次推进;同时运用新技术在中小流域暴雨洪水计算中如何将更多的下垫面要素考虑在内,诸如流域形状、地形和水利工程等,并将其作用参数化运用到实际设计中成为未来发展的主要方向和研究趋势。

4) 随着暴雨洪水新的测定技术的运用,实时获取多种形式的暴雨资料,实时预警预报的广泛应用将成为可能,实时预警预报系统将从项目和研究的理论基础上,逐渐发展到实际应用并推广到全国范围内广泛应用,在机理方面暴雨洪水关系的挖掘和界定将得到进一步研究。

参考文献 (References):

- 暴雨洪水分析计算工作协调领导小组办公室. 1984. 编制全国《暴雨径流查算图表》技术报告及各省主要成果. 北京: 暴雨洪水分析计算工作协调领导小组办公室. [Office of the Coordinating Group for Storm and Flood Analysis and Calculation. 1984. *Compilation of the National Storm Storm Runoff Calculation Chart Technical Report and Major Achievements of Each Province*. Beijing: Office of the Coordinating Group for Storm and Flood Analysis and Calculation.]
- 柏绍光, 黄英, 方绍东, 李自顺. 2008. 资料匮乏地区小流域洪水汇流参数移用分析. 水电能源科学, (3): 21-24. [Bai Shaoguang, Huang Ying, Fang Shaodong, and Li Zishun. 2008. Diverting Use Analysis of Flood Confluence Parameter in Small Watersheds Lacking Hydrologic Data. *Water Resources and Power*, (3): 21-24.]
- Berne A, and Krajewski W F. 2013. Radar for Hydrology: Unfulfilled Promise or Unrecognized Potential?. *Advances in Water Resources*, 51: 357-366.
- Clark C O. 1945. Storage and the Unit Hydrograph. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 110: 1419-1446.
- Chow Ven Te. 1959. Discussion of "Divining Rods Versus Hydrologic Data and Research". *Journal of Hydraulic Engineering*, 85 (1959): 65-66.
- 陈家琦, 张恭肃. 1985. 小流域暴雨洪水计算. 北京: 水利电力出版社. [Chen Jiaqi and Zhang Gongsu. 1985. *Calculation of Storm Flood in Small Watershed*. Beijing: Water Resources and Electric Power Press.]
- 陈明, 傅抱璞, 于强. 1995. 山区地形对暴雨的影响. 地理学报, 50 (3): 256-263. [Chen Ming, Fu Baopu, and Yu Qiang. 1995. Influence of Topography on Storm Rainfall. *Acta Geographica Sinica*, 50(3): 256-263.]
- 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 赖成光, 陈家超. 2017. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估. 水利学报, 48 (10): 1147-1156. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170202. [Chen Xiaohong, Zhong Ruida, Wang Zhaoli, Lai Chenguang, and Chen Jiachao. 2017. Evaluation on the Accuracy and Hydrological Performance of the Latest: Generation GPM IMERG Product over South China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48(10): 1147-1156. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170202.]
- Dooge J C I. 1959. A General Theory of the Unit Hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, 64(2): 241-256.
- 冯焱. 1983. 论变动等流时线. 水利学报, (9): 70-72. [Feng Yan. 1983. On the Constant Flow Line of Change. *Journal of Hydraulic Engineering*, (9): 70-72.]
- Gupta Vijay K, Waymire E D, and Wang C T. 1980. A Representation of an IUH from Geomorphology. *Water Resour. Res.* 16: 862-885.
- 黄金池. 2010. 我国中小河流洪水综合管理探讨. 中国防汛抗旱, 20 (5): 7-8, 15. [Huang Jinchi. 2010. Discussion on Integrated Flood Management of Small and Medium-Sized Rivers in China. *Flood Control and Drought Relief in China*, 20(5): 7-8, 15.]
- Horton Robert E. 1939. Analysis of Runoff-Plat Experiments with Varying Infiltration-Capacity. *Transactions, American*

- Geophysical Union*, 20(4): 693.
- 侯铁攀, 杨宜军, 王鹏来. 2019. 小流域评价单元在地质灾害详细调查易发性分区中的应用. *资源环境与工程*, (S1): 36-42. DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2019.S1.008. [Hou Yipian, Yang Yijun, and Wang Penglai. 2019. Application of Small Watershed Evaluation Unit in Detailed Investigation of Geological Hazard Prone Zoning. *Resources, Environment and Engineering*, (S1): 36-42. DOI:10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2019.S1.008.]
- 黄膺翰, 周青. 2014. 基于霍顿下渗能力曲线的流域产流计算研究. *人民长江*, 45 (5): 16-18, 23. [Huang Yinghan, and Zhou Qing. 2014. Calculation of Basin Runoff Yield Based on Horton Infiltration Capacity Curve. *Yangtze River*, 45(5): 16-18, 23.]
- 华士乾, 文康. 1980. 论流域汇流的数学模型 (第一部分线性模型). *水利学报*, (5): 3-14. [Hua Shiqian, and Wen Kang. 1980. A Study on the Mathematical Model of Watershed Flow Concentration(I). *Journal of Hydraulic Engineering*, (5): 3-14.]
- Hochreiter S, and Schmidhuber J. 1997. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8): 1735-1780.
- Ivanov Valeriy Y, Vivoni R Enrique, Bras Rafael L, and Entekhabi Dara. 2004. Catchment Hydrologic Response with a Fully Distributed Triangulated Irregular Network Model. *Water Resources Research*, 40: W11102. DOI: 10.1029/2004WR003218.
- Ion Zăvoianu. 1985. Chapter I The Drainage Basin as a System Unit. *Morphometry of Drainage Basins*, 9-25. DOI: 10.1016/s0167-5648(08)70413-1.
- 金双彦, 蒋昕辉. 2017. 基于霍顿下渗能力曲线的流域产汇流计算. *水资源研究*, 6 (4): 317-323. [Jin Shuangyan, and Jiang Xinhui. 2017. Calculation of Basin Production Convergence Based on Horton Infiltration Capacity Curve. *Research of Water Resources*, 6(4): 317-323.]
- 靳春蕾. 2005. 城市防洪能力分析研究. 太原: 太原理工大学. [Jin Chunlei. 2005. *The Analysis and Research on Urban Flood Control*. Taiyuan: Taiyuan University of Technology.]
- Rodríguez-Iturbe I, and Valdés B J. 1979. The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, 15 (6): 1409-1420.
- Kwak Jaewon, Han Heechan, Kim Soojun, and Soo Hung. 2021. Is the Deep-Learning Technique a Completely Alternative for the Hydrological Model?: A Case Study on Hyeongsan River Basin, Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36: 1615-1629.
- Krajewski W F, and Smith J A. 2002. Radar Hydrology: Rainfall Estimation. *Advances in Water Resources*, 25: 1387-1394.
- 刘金艳. 2011. 秦皇岛汤河流域产汇流参数特性. *南水北调与水利科技*, 9 (4): 66-69. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04066. [Liu Jinyan. 2011. Characteristics of Production and Convergence Parameters in the Tanghe River Basin of Qinhuangdao. *South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Science & Technology*, 9(4):66-69. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04066.]
- 刘昌明, 钟骏襄. 1978. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 33 (2): 112-127. [Liu Changming, and Zhong Junxiang. 1978. The Influence of Forest Cover upon Annual Runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 33(2): 112-127.]
- 刘克岩, 张子贤. 1985. 对确定推理公式中损失参数 μ 值的建议. *水文*, (3): 43. [Liu keyan, and Zhang Zixian. 1985. Suggestions for Determining the Lost Parameter Value in the Reasoning Formula. *Journal of China Hydrology*, (3): 43.]
- Liang X, and Xie Z. 2001. A New Surface Runoff Parameterization with Subgrid-Scale Soil Heterogeneity for Land Surface Models. *Advances in Water Resources*, 24(9/10): 1173-1193.
- 连增蛇, 董欢. 2013. 论小流域治理对水土保持的重要性. *城市建设理论研究 (电子版)*, (11): 1-4. [Lian Zengshe, and Dong Huan. 2013. On the Importance of Small Watershed Governance to Soil and Water Conservation. *Theoretical Research on Urban Construction (Electronic Edition)*, (11): 1-4.]
- 刘春元, 郭素彦. 1988. 我国水土保持小流域治理的现状与特点. *中国水土保持*, (11): 24-27, 64-65. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.1988.11.008. [Liu Chunyuan, and Guo Suoyan. 1988. Current Situation and Characteristics of Small Watershed Governance of Soil and Water Conservation in China. *Soil and Water Conservation in China*, (11): 24-27, 64-65. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.1988.11.008.]
- 刘晓燕, 刘昌明, 党素珍. 2019. 黄土丘陵区雨强对水流含沙量的影响. *地理学报*, 74 (9): 1723-1732. [Liu Xiaoyan, Liu Changming, and Dang Suzhen. 2019. Effects of Rainfall Intensity on Sediment Concentration in Loess Hilly Region of China. *Acta Geographica Sinica*, 74(9): 1723-1732.]
- 李军, 刘昌明, 王中根, 梁康. 2014. 现行普适降水入渗产流模型比较研究: SCS与LCM. *地理学报*, 69 (7): 926-932. [Li Jun, Liu Changming, Wang Zhonggen, and Liang Kang. 2014. Two University Runoff Yield Models: SCS vs. LCM. *Acta Geographica Sinica*, 69(7): 926-932.]
- 刘昌军, 周剑, 文磊, 马强, 郭良, 丁留谦, 孙东亚. 2021. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究. *中国水利水电科学研究院学报*, (1): 99-114. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200161. [Liu Changjun, Zhou Jian, Wen Lei, Ma Qiang, Guo Liang, Ding Liuqian, and Sun Dongya. 2021. Research on Spatiotemporal Variable Source Mixed Production Flow Model and Parameter Regionalization Method in Small and Medium-Sized River Basins. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, (1): 99-114. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200161.]
- 李薇, 徐海峰, 李玉梅. 2019. 高精度降雨雷达设备在局地暴雨监测中的应用. *水文*, 39 (5): 67-70. [Li Wei, Xu Haifeng, and Li Yumei. 2019. Application of High-Resolution Rainfall Radar in Local Rainstorm Monitoring. *Journal of China Hydrology*, 39(5): 67-70.]
- Martinovic Jan, Stepan Kuchar, Ivo Vondrák, Vít Vondrák, Boris Nir, and Jan Unucka. 2010. Multiple Scenarios Computing in the Flood Prediction System FLOREON. *European Conference on Modelling and Simulation*, (Jun.): 182-188.
- 马瑜君, 邹希. 2018. 基于深度学习的中小河流洪水预报方法研究. *国外电子测量技术*, 37 (12): 7-13. DOI: 10.19652/j.cnki.femt.1801286. [Ma Yujun, and Zou Xi. 2018. Study on Flood Forecasting Methods of Small and Middle Rivers Based on Deep

- Learning. *Foreign Electronic Measurement Technology*. 37(12): 7-13. DOI: 10.19652/j.cnki.femt.1801286.]
- Nash J E. 1957. The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph. *Hydrological Sciences Bulletin*, 45(3): 114-121.
- Rosso Renzo. 1984. Nash Model Relation to Horton Order Ratios. *Water Resources Research*, 20(7): 914-920.
- 芮孝芳. 1999a. 利用地形地貌资料确定Nash模型参数的研究. 水文, (3): 6-10. [Rui Xiaofang. 1999a. A Study on Determining the Parameters of the Nash Model Using Geomorphological Data. *Hydrology*, (3): 6-10.]
- 芮孝芳. 1999b. 地貌瞬时单位线研究进展. 水科学进展, (3): 345-350. [Rui Xiaofang. 1999b. Some Advances in Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph Theory. *Advances in Water Science*, (3): 345-350.]
- 芮孝芳, 刘宁宇, 凌哲. 2012. 单位线的发展及启示. 水利水电科技进展, 32 (2): 1-5. [Rui Xiaofang, Liu Ningning, and Ling Zhe. 2012. Development and Inspiration of Unit Hydrograph. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 32 (2): 1-5.]
- 芮孝芳. 2017. 单元嵌套网格产汇流理论. 水利水电科技进展, 37 (2): 1-6. [Rui Xiaofang. 2017. Theory of Runoff Yield and Confluence by Grid Inlaid in Watershed Basic Unit. *Advances in Science and Technology of Water Resource*, 37(2): 1-6.]
- 水利科学研究院. 1958. 小汇水面积雨洪最大径流图解分析法 (水利科学研究报告第7号). 北京: 水利电力出版社. [Hydraulic Research Institute. 1958. *Graphical Analysis Method of Maximum Rainwater Runoff in Small Catchment Area (Hydraulic Science Research Report No. 7)*. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press.]
- 水利部水文局. 2010. 水文情报预报技术手册. 北京: 中国水利水电出版社. [China Hydrology. 2010. *Hydrological Information Forecast Technical Manual*. Beijing: China Water&Power Press.]
- 水利部水土保持监测中心. 2013. 小流域划分及编码规范. 北京: 中华人民共和国水利部, 51. [Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources. 2013. *Specification for Division and Encoding of Small Watershed*. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 51.]
- Swain Janaki Ballav, and Patra Kanhu Charan. 2017. Streamflow Estimation in Ungauged Catchments Using Regionalization Techniques. *Journal of Hydrology*, 554(7): 04017010.
- Sherman L K. 1932. Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News-Record*, 108: 501-505.
- Snyder F F. 1938. Synthetic Unit Graphs. *Transactions American Geophysics Union*, 19: 447-454.
- 苏伟忠, 汝静静, 杨桂山. 2019. 流域尺度土地利用调蓄视角的雨洪管理探析. 地理学报, 74 (5): 948-961. [Su Weizhong, Ru Jingjing, and Yang Guishan. 2019. Modelling Stormwater Management Based on Infiltration Capacity of Land Use in the Watershed Scale. *Acta Geographica Sinica*, 74(5): 948-961.]
- 舒晓娟. 2004. 广州抽水蓄能电站设计洪水研究. 武汉: 武汉大学. [Shu Xiaojuan. 2004. *Study on Design Flood of Guangzhou Pumped Storage Station*. Wuhan: Wuhan University.]
- Thomas Dunne, and Richard D Black. 1970. An Experimental Investigation of Runoff Production in Permeable Soils. *Water Resources Research*, 6(2): 478-490. DOI: 10.1029/wr006i002p00478.
- 王广德, 吴凯. 1981. 几种水文概念性模型的阶跃函数解. 水文, (4): 13-19. DOI: 10.19797/j. cnki. 1000-0852.1981.04.003. [Wang Guangde, and Wu Kai. 1981. Step Function Solutions for Several Hydrological Conceptual Models. *Hydrology*, (4): 13-19. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.1981.04.003.]
- 王淑云, 钟向伟. 2017. 库设计洪水计算研究. 湖南水利水电, (1): 46-47. [Wang Shuyun, and Xiang Wei. 2017. Study on Design Flood Calculation of Mangshan Reservoir. *Hunan Water Conservancy and Hydropower*, (1): 46-47.]
- 王森. 2013. 基于排水管网中心城区小流域划分方法研究. 北京测绘, (5): 16-18. DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2013.05.004. [Wang Miao. 2013. Research on the Division Method of Small Watershed in the Central Urban Area of Drainage Pipe Network. *Beijing Surveying and Mapping*, (5): 16-18. DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2013.05.004.]
- 王博, 崔明霞. 2009. 城镇小汇水面积设计洪水计算方法比较. 中国农村水利水电, (10): 84-86, 93. [Wang Bo, and Cui Mingxia. 2009. Comparison of Design Flood Calculation Methods for Small Catchment Area in Cities and Towns. *Rural Water Conservancy and Hydropower in China*, (10): 84-86, 93.]
- 吴健生, 张朴华. 2017. 城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例. 地理学报, 72 (3): 444-456. [Wu Jiansheng, and Zhang Puhua. 2017. The Effect of Urban Landscape Pattern on Urban Waterlogging. *Acta Geographica Sinica*, 72(3): 444-456.]
- 汪君, 王会军, Hong Yang. 2016a. 一个新的高分辨率洪涝动力数值监测预报系统. 科学通报, 61 (Z1): 518-528. [Wang Jun, Wang Huijun, and Hong Yang. 2016aa. A High-Resolution Flood Forecasting and Monitoring System for China Using Satellite Remote Sensing Data. *Chinese Science Bulletin*, 61(Z1): 518-528.]
- Wang Jun, Wang Huijun, and HongYang. 2016b. Comparison of Satellite-Estimated and Model-Fforecasted Rainfall Data during a Deadly Debris-Flow Event in Zhouqu, Northwest China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(2): 139-145. DOI: 10.1080/16742834.2016.1142825.
- 小流域暴雨径流研究组. 1978. 小流域暴雨洪峰流量计算. 北京: 科学出版社, 104-121. [Small Watershed Rainstorm Runoff Study Group. 1978. *The Calculation of Flood Peak Discharge during Rainstorm in Small Watersheds*. Beijing: Science Press, 104-121.]
- 谢莹莹, 刘遂庆, 信昆仑. 2006. 城市暴雨模型发展现状与趋势. 重庆建筑大学学报, (5): 136-139. [Xie Yingying, Liu Suiqing, and Xin Kunlun. 2006. Present Situation and Trend of Urban Storm Water Model Development. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, (5): 136-139.]
- 夏军. 1982. 非线性水文系统识别方法的探讨. 水利学报, (8): 24-33. [Xia Jun. 1982. An Approach to the Method of Nonlinear Hydrologic System Identification. *Journal of Hydraulic Engineering*, (8): 24-33.]
- 王国安, 贺顺德, 李超群, 李荣容, 盖永岗, 崔鹏. 2011. 论广东省综合单位线的基本原理和适用条件. 人民黄河, (3): 15-18. [Wang Guo'an, He Shunde, Li Chaoqun, Li Rongrong, Gai

- Yonggang, and Cui Peng. 2011. On the Basic Principle and Applicable Conditions of Integrated Unit Line in Guangdong Province. *Yellow River*, (3): 15-18.]
- 邢贞相, 傅爽, 孙明新, 纪毅, 付强, 李衡. 2020. 遥感蒸散发在无测站资料地区洪水模拟中的应用. 东北农业大学学报, 51 (2): 78-85. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2020.02.0010. [Xing Zhenxiang, Fu Shuang, Sun Mingxin, Ji Yi, Fu Qiang, and Li Heng. 2020. Application of Remote Sensing Evapotranspiration in Flood Simulation in Ungauged Basins. *Journal of Northeast Agricultural University*, 51(2): 78-85. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.]
- 徐海飞, 谭显辉, 朱自伟, 刘国. 2016. 高分辨率遥感降水对强降雨的监测能力研究. 科学技术与工程, 16 (10): 178-185. [Xu Haifei, Tan Xianhui, Zhu Ziwei, and Liu Guo. 2016. Study on the Monitoring Capacity of High Resolution Satellite Precipitation on Heavy Rainfall. *Science Technology and Engineering*, 16(10): 178-185.]
- 俞芳琴. 2008. 滁河流域中下游区域城市防洪研究. 南京: 河海大学. [Yu Fangqin. 2008. *Study on Urban Flood Control in the Middle and Lower Reaches of Chuhe River Basin*. Nanjing: Hohai University.]
- 杨兴. 2020. 华南强降雨地区中小流域设计暴雨洪水参数计算与综合. 淮南: 安徽理工大学. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2020.000325. [Yang Xing. 2020. *Calculation and Synthesis of Design Storm and Flood Parameters in Medium and Small Watersheds in Heavy Rain Areas in South China*. Huainan: Anhui University of Science and Technology. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc. 2020. 000325.]
- 叶贵明, 傅世伯. 1982. 从东峡水库洪水复核谈编制《暴雨径流查算图表》的几个问题. 水文, (3): 13-18. [Ye Guiming, and Fu Shibo. 1982. This Paper Discusses Some Problems in Compiling the Chart of Stormwater Runoff from Dongxia Reservoir Flood Review. *Journal of China Hydrology*, (3): 13-18.]
- 杨家坦. 1981. 小流域汇流非线性模式的研究. 地理学报, 36 (4): 442-449. [Yang Jiatan. 1981. Study on Nonlinear Model of Confluence in Small Watershed. *Acta Geographica Sinica*, (4): 442-449.]
- 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, (1): 92-98. [Yang Yang, Zhang Jianyun, Qi Jianguo, and Yue Zhihui. 2000. Review and Prospect on the Application of Weather Radar in Hydrology. *Advances in Water Science*, (1): 92-98.]
- 赵鸣雁. 2001. 城市地区中小流域防洪预报系统研究, 济南: 山东大学. [Zhao Mingyan. 2001. *Study on Flood Control Forecast System of Small and Medium-Sized Watersheds in Urban Areas*. Jinan: Shandong University.]
- 詹道江. 2010. 工程水文学. 北京: 中国水利水电出版社. [Zhan Daojiang. 2010. *Engineering Hydrology*. Beijing: China Water & Power Press.]
- 赵玲玲, 刘昌明, 吴潇潇, 刘丽红, 王中根, 苏磊. 2016. 水文循环模拟中下垫面参数化方法综述. 地理学报, 71 (7): 1091-1104. [Zhao Lingling, Liu Changming, Wu Xiaoxiao, Liu Lihong, Wang Zhonggen, and Su Lei. 2016. A Review of Underlying Surface Parametrization Methods in Hydrologic Models. *Acta Geographica Sinica*, 71(7): 1091-1104.]
- 张一龙, 王红武, 秦语涵. 2015. 城市地表产流计算方法和径流模型研究进展. 四川环境, 34 (1): 113-119. [Zhang Yilong, Wang Hongwu, and Qin Yuhuan. 2015. Review of Urban Surface Runoff Calculation Method and Relevant Models. *Sichuan Environment*, 34(1): 113-119.]
- 周理, 刘星, 黎小东, 张洪波, 敖天其. 2014. 小流域农业非点源污染防治措施探究——以濠溪河(泸县境内)为例. 中国农村水利水电, (5): 7-10, 14. [Zhou Li, Liu Xing, Li Xiaodong, Zhang Hongbo, and Ao Tianqi. 2014. Investigation on Agricultural Non-Point Source Pollution Prevention and Control Measures in Small Watersheds: A Case Study of Sexi River (in Luxian County). *China Rural Water Resources and Hydropower*, (5): 7-10, 14.]
- 张婷婷, 王铁良, 孙毅. 2007. 城市雨水产汇流过程损失研究. 灌溉排水学报, 26 (4): 180-181. [Zhang Tingting, Wang Tielang, and Sun Yi. 2007. Study on the Confluence Loss of Urban Rain Aquatic Products. *Journal of Irrigation and Drainage*, 26 (4): 180-181.]
- 张恭肃, 黄守信, 贺伟程, 庾维德. 1981. 小流域单位线的非线性分析. 水利学报, (3): 1-9. [Zhang Gongsu, Huang Shouxin, He Weicheng, and Yu Weide. 1981. Nonlinear Analysis of Small Watershed Unit Lines. *Journal of Hydraulic Engineering*, (3): 1-9.]
- 张静怡. 2008. 水文分区及区域洪水频率分析研究. 南京: 河海大学. [Zhang Jingyi. 2008. *Study on Hydrological Division and Regional Flood Frequency Analysis*. Nanjing: Hohai University.]
- 赵珂, 夏清清. 2015. 以小流域为单元的城市水空间体系生态规划方法——以州河小流域内的达州市经开区为例. 中国园林, (1): 41-45. [Zhao Ke, and Xia Qingqing. 2015. Ecological Planning Method of Urban Water Spatial System with Small Watershed as Unit: A Case Study of Dazhou Economic Development Zone in Small Watershed of Zhouhe. *Chinese Landscape Architecture*, (1): 41-45.]
- 张桂娇, 刘筱琴, 李水金, 熊小群. 2004. 江西省小流域暴雨洪水参数地理规律探讨. 江西水利科技, (1): 23-27. [Zhang Guijiao, Liu Xiaoqin, Li Shuijin, and Xiong Xiaoqun. 2004. Discussion on the Geographical Law of Heavy Rainfall and Flood Parameters in Small Watersheds of Jiangxi Province. *Jiangxi Water Conservancy Science and Technology*, (1): 23-27.]
- 郑章忠, 石向荣. 2002. 小流域治理规划中的水文分析. 浙江水利科技, (3): 15-17. [Zheng Zhangzhong, and Shi Xiangrong. 2002. Hydrologic Analysis in Regulation Planning of Small Watershed. *Zhejiang Hydrotechnics*, (3): 15-17.]
- Zeng Ziyue, Tang Guoqiang, Long Di, Zeng Chao, Ma Meihong, Hong Yang, Xu Hui, and Xu Jing. 2016. A Cascading Flash Flood Guidance System: Development and Application in Yunnan Province, China. *Natural Hazards*, 84(3): 2071-2093.
- Zhu Dehua, Echendu Shirley, Xuan Yunqing, Webster Mike and Cluckie Lan. 2016. Coupled Hydro-Meteorological Modelling on a HPC Platform for High-Resolution Extreme Weather Impact Study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(12): 4707-4715.

作者贡献声明:**赵玲玲:**文章的整体架构,文章撰写与修改;**刘昌明:**文章逻辑结构、思路提供指导;**王梓尹:**协助论文修改校对,提供绘图制图支持,提

出修改意见;

张鑫辉:完善文章思路,润色文章内容;**杨 兴:**前期论文撰写,协助数据资料采集,提出修改意见。

Storm and Flood Prediction and Progress in Parameter Synthesis Research in Small and Medium-Sized Watersheds

Zhao Lingling^{1,2}, Liu Changming^{2,3}, Wang Ziyin^{1,4}, Zhang Xinhui^{1,4}, and Yang Xing⁵

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

5. Anhui Traffic Survey and Design Institute Co. LTD, Hefei 230000, China)

Abstract: The prediction of rainstorms and floods in small and medium-sized watersheds, as well as the synthesis of related parameters, plays a pivotal role in preventing flood disasters. Environmental changes have led to an increase in hydrological extremes such as rainstorms and floods, presenting unprecedented challenges for small and medium-sized river basins. In this review, we systematically categorize, and summarize the processes involved in predicting rainstorms and floods in these watersheds, along with advancements in correlated parameter synthesis research. Furthermore, we analyze and discuss the most commonly employed runoff and confluence estimation methods and their associated parameters in practical applications, as well as their limitations. First, we establish the concept of small- and medium-sized watersheds across various academic disciplines. From a hydrological perspective, these watersheds typically exhibit slope confluence and have relatively small catchment areas. In terms of eco-hydrology, the ecological water demand of the basin must be calculated based on the different communities occupying the river basin and divided by area according to the ecological samples from each district after the investigation. Thereafter, we summarized the methods and types of runoff calculation and parameter synthesis in small- and medium-sized basins, and the methods and principles of runoff analysis, such as rainfall – runoff correlation diagram, infiltration curve method, deduction method, runoff coefficient method, and hydrological model method as well as the methods of parameter synthesis, such as rainfall-runoff correlation diagrams and loss methods are introduced. Second, we summarize and discuss the assessment of confluence and its associated parameters in small- and medium-sized river basins. This encompasses background information and various calculation methods, such as the instantaneous unit line, comprehensive unit line, inference formula method, and empirical formula method. We also examine how the three major elements of parameter synthesis convergence influence confluence parameters. We emphasize that combining radar rainfall measurements, high-resolution remote sensing, high-performance computing, and deep learning can facilitate research on simulating and forecasting rainstorms and flood processes in small- and medium-sized basins. However, a significant portion of these basins lacks data, limiting the application of simulation and flood forecasting. To address this, integration with geographical parameters specific to small- and medium-sized basins is necessary to enhance regional reliability and forecasting accuracy. Additionally, when applying deep learning to simulate basins with limited or no data, the significance of parameter synthesis becomes even more pronounced. Finally, we discuss the problems and challenges associated with storm flood calculations and parameter synthesis methods in small- and medium-sized basins and offer predictions regarding future research and technical developments. We recommend strengthening the use of emerging technologies for watershed runoff and runoff parameter calculations and advocate for their application in storm flood design.

Keywords: rainstorms; floods; watershed runoff calculation; parameter synthesis; simulation forecast; small- and medium-sized watersheds