

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220079

暴雨山洪水动力学模拟研究进展

黄卫¹, 岳志远², 孙楠³, 马美红⁴

(1.长江科学院水力学研究所,湖北武汉 430010; 2.长江勘测规划设计研究院,湖北武汉 430010;
3.太原理工大学 土木工程学院,山西太原 030024; 4.天津师范大学 地理与环境科学学院,天津 300387)

摘要:暴雨山洪灾害突发性强、破坏性大、预测难度高,其预报是水文学及水动力学面临的重大科学问题。深入理解暴雨山洪响应机理是准确预测山洪灾害的关键。暴雨山洪通常发生在资料较为匮乏的小流域,给适用于较大流域的水文模型应用带来了挑战;而暴雨山洪完整水动力学方法对历史资料需求低,充分考虑了暴雨山洪形成与演化的物理机制,能够准确地描述降雨-产汇流-沟道洪水演进的全过程,减小了暴雨山洪预报的不确定性。首先比较了应用水文学方法和水动力学方法模拟暴雨山洪的优缺点;其次,详细梳理了暴雨山洪水动力学模拟的关键技术,特别是结合暴雨山洪非规则坡面流动的特点,总结概括了浅水动力学控制方程离散中的地形源项和阻力源项处理方法;系统探究了暴雨山洪水动力学关键物理影响因子(降雨、下渗、阻力等)作用规律及其定量化方法;最后,展望了暴雨山洪水动力学模型精度、计算效率、应用领域等发展方向。

关键词:暴雨山洪;水动力学模型;物理影响因子;研究进展

中图分类号:TV1;P33;P954

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)04-0008-07

0 引言

山洪一般是指发生在山丘区小流域,由短时强降雨引起的突发性、暴涨暴落的地表径流。我国山丘区面积占国土面积约2/3,是世界上山洪灾害最严重的国家之一。暴雨山洪还常常诱发滑坡、泥石流等次生灾害;加之极端降水事件频发和人类活动的增多,进一步加剧了山洪灾害带来的危害^[1-3]。近年来,我国大江大河防洪体系建设取得了很大成就,而对中小流域投入相对较少,导致山洪灾害问题凸显,已成为造成生命损失的主要洪水灾害类型。因此,暴雨山洪研究成为目前的研究重点和热点。

山洪灾害突发性强,预测和预防难度大,其形成主要受降雨、前期土壤含水量、地形地貌等影响。暴雨山洪物理过程复杂,包括水流下渗、坡面产流、坡面

汇流和沟道洪水传播,是复杂的非线性过程。深入理解暴雨作用下山洪机理是准确预测山洪灾害的关键,同时也是水文学及水动力学面临的重大科学问题。而我国对山洪灾害形成机理的认识有限,缺乏成熟计算临界雨量方法,导致山洪预测预报精度不高。因此,深入研究山洪灾害形成机理,提出有效的山洪灾害风险评估方法具有重要的研究价值。

目前广泛应用洪水灾害预报方法主要包括水文学方法和水动力学方法。水文学方法主要有黑箱式、集总式(如API^[4]、新安江^[5])和分布式水文模型^[6]。黑箱式模型一般依据经验关系,不考虑水流本身的运动机理。集总式模型不考虑水流运动的空间差异。分布式模型主要采用简化的运动波和扩散波模型,在河道汇流中采用一维河网水动力学模型或马斯京根法。水文模型所需资料较少,应用相对简单,在资料丰富

收稿日期:2022-02-28

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.1814.P.20230818.1602.003

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42101086);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2021482SL);企业自主创新科研业务费项目(CX2021Z03)

作者简介:黄卫(1986—)男,重庆忠县人,博士,高级工程师,主要研究方向为防灾减灾水力学。E-mail: davidhuang@mail.crsri.cn

通信作者:马美红(1987—),女,山东菏泽人,博士,主要从事山洪灾害预警预报研究。E-mail: mamh@tjnu.edu.cn

网络首发日期:2023-08-21

地区预报能满足要求^[7-9]。但在资料稀缺,或者流域下垫面变化剧烈时预报能力较差,也难以真实反映暴雨山洪的物理过程;而其参数的物理意义不明确,也存在异参同效的问题。完整水动力学方法在暴雨山洪研究中,实现了模拟降雨-产流-汇流-沟道洪水演进的全过程,能提供洪水淹没范围、淹没水深、小流域出口断面流量等信息^[10]。由于水动力学方法反映暴雨山洪形成与演化的物理过程,相关模型参数意义明确,在暴雨山洪研究中具有很好的前景。本文首先梳理了暴雨山洪水动力学模型的关键技术,总结概括了浅水动力学控制方程离散中的地形源项和阻力源项处理方法;系统探究了模型构建基础资料与关键参数的确定方法;然后针对暴雨山洪水动力学模型的应用进行探讨;最后展望了暴雨山洪水动力学模型的发展方向。

1 暴雨山洪水动力学模型

1.1 控制方程

暴雨山洪水流控制方程是建立在流体力学基本守恒律基础上的二维浅水动力学控制方程,包括质量守恒方程和动量守恒方程。考虑降雨和土壤入渗的影响,完整水动力学模型基本控制方程组如下:

考虑降雨与下渗对水量守恒的影响,水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = r - f \quad (1)$$

由于降雨和下渗对水流动量的影响基本可以忽略,运动方程为:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[hu^2 + 0.5gh^2] + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}[hv^2 + 0.5gh^2] = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3)$$

式中: h =水深; (u, v) =(x, y)方向流速分量; g 为重力加速度; z =地表高程; r =降雨强度,在暴雨山洪水动力学模型中,降雨强度应该考虑植被截流、蒸发等因素的影响; f =入渗强度; ρ =水的密度; (τ_{bx}, τ_{by}) =(x, y)方向的床面阻力。

根据模型的简化程度,坡面水流动力学模型分为动力波模型、扩散波模型和运动波模型。运动波模型忽略惯性力和压力项的影响,将水力坡度近似等价于地形底坡。扩散波模型不考虑惯性项的影响。分布式模型如HEC-HMS模型采用了扩散波模型;也有部分模型如马斯京根法采用了运动波模型。完整水动

力学模型普遍适用于坡面水流中复杂的流动现象,其中运动波和扩散波是其两种特殊形式。Rousseau等^[11]验证了在简单的坡面形态时,运动波模型具有较好的模拟能力;但在有地形间断或者空间差异显著情况下,完整的水动力学模型更好。Haider等^[12]研究表明,采用简化的扩散波模型难以准确描述非规则地形上的水流运动,并且计算时间长。显示格式的完整水动力学模型受CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)线性稳定条件的限制,时间步长与网格精度的关系为 $\Delta t \sim \Delta x^{-1}$,而扩散波模型则为 $\Delta t \sim \Delta x^{-2}$ ^[13];加之扩散波模型计算效率的降低随着计算网格精度的提高更为显著。因此,从模型精度和计算时间上,完整水动力学模型优于简化的扩散波模型。

1.2 模型封闭

由于控制方程组并不封闭,需要引入额外的本构关系才能够实现封闭,主要为床面阻力计算。山丘区地形复杂,坡面比降一般在0.1%~20%之间,地表植被覆盖较广。因此,水流阻力规律与一般明渠水流有很大的差别。由于目前尚无成熟的坡面阻力公式,一般沿用明渠水流的阻力公式,主要有曼宁公式和达西-威斯巴哈公式^[14-15];后者在早期应用较多,近年来曼宁糙率研究较为丰富,前者应用较为广泛。因此推荐使用曼宁公式;设曼宁糙率系数为 n ,则床面阻力表达式为:

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2} / h^{7/3}, \quad \tau_{by} = \rho g n^2 q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2} / h^{7/3} \quad (4)$$

式中: $q_x=(hu)$ 和 $q_y=(hv)$ 分别是 x 和 y 方向的单宽流量。

1.3 数值格式

暴雨山洪水动力学模型的数值格式与溃坝水流模型较为类似,但与一般河道洪水或溃坝水流具有显著差异;后者淹没区域局限于河道或洪漫滩且水深相对较大(通常为米级),而流域内坡面在降雨时一般是湿的。一方面,坡面流水深常在毫米或者厘米级,导致大部分传统河道洪水演进数值模型不适用。由于降雨过程具有间歇性,坡面时干时湿,模拟区域干湿边界处于快速变化中,因此,需要准确处理干湿边界。同时,坡面流水深很小,从公式(4)可以看出,不合理的离散格式可能导致大流速出现,或者由于计算机精度引起误差。另一方面,天然流域坡面一般强非规则,存在较多的地形间断,这对地形源项的处理提出了较高要求。总之,暴雨山洪模型的数值格式比一般河道洪水模型数值格式要求更高。

通过梳理暴雨山洪模型的数值格式,早期暴雨山洪水动力学模型采用了有限差分方法^[14,16],但大多数为有限体积法^[17-20]。有限差分方法在坡面水流模拟时容易出现数值失稳,由于要求整个区域处于湿润状态,也不考虑下渗的非恒定性^[14]。因此,在坡面水流模拟时很少采用。而有限体积法可以保证水量守恒,在溃坝洪水演进过程中应用广泛。同时,具有激波捕捉的有限体积数值格式采用 Godunov 类型的有限体积法,黎曼算子计算通量,TVD(total variation diminishing schemes)格进行变量重构的限制^[20],广泛应用在溃坝洪水中。而坡面水流地形坡度大且强不规则,需要具有激波捕捉的数值格式。因此,坡面流模拟较大程度地沿用了溃坝洪水模型的数值格式。

1.3.1 地形源项离散

地形源项离散影响数值格式稳定和计算结果的精确性。为了保证陡坡和强不规则地形上的浅水流动不产生非物理流速,需要正确地处理地形源项^[21-28],其方法主要分为静水重构^[25]和表面重构^[23,29]。静水重构模型只能满足静水平衡特征,很难模拟离散时可能出现的水跌。Xia 等^[29]提出了表面重构方法;但该格式只为一阶精度,且会出现非物理小幅振荡^[30]。因此,处理地形源项的问题还未解决。表1以一维情况为例,总结了静水重构和表面重构的主要计算步骤。

1.3.2 阻力源项

在阻力源项方面,如果采用隐式格式离散,可能超过计算机的存储和计算精度。而且阻力的不合理离散也会造成数值振荡;所以主要采用显示格式、半隐格式和隐式格式。代表有 Liang 等^[31]的半隐格式。Cao 等^[18]通过对控制方程最大特征值的雅克比矩阵进

行分析,得到了一阶龙格库塔显示格式的时间步长限制条件,从而保证阻力源项离散的稳定性。Xia 等^[29]和 Hou 等^[32]提出了阻力源项全隐式离散格式,通过对坡面水流达到局部均匀流的时间分析,发现在水深很小时,水流能够在一个时间步长内达到平衡状态,该时间远小于由柯朗条件限定的时间步长;现有的半隐格式会低估流速,因此提出了求解隐式阻力离散方程的代数根方法,实现隐式求解。隐式阻力离散方法避免了许多传统模型中需要人为给定 10^{-4} m 量级的水深^[11],或当水深小于临界水深时采用不同模式计算^[33],以及额外方法带来的水量与动量的误差,使干湿转换处理变得十分方便^[34]。全隐格式较好地解决了阻力源项的离散问题,使得小水深条件下的坡面流速度计算更加准确。

1.4 模型高效运算方法

由于暴雨山洪水动力学模型主要为显格式,其时间步长受制于线性稳定条件较小。与传统水文模型相比,暴雨山洪水动力学模型对发生在复杂地形和大范围流域的暴雨山洪过程计算耗时长。故需要通过改进模型算法和采用并行计算提高模型计算效率。改进模型算法主要包括改进模型网格和时间步长等。暴雨山洪水动力学模型的计算时间由网格尺寸、网格数量和时间步长决定。网格尺寸大小主要由局部复杂地形和水流流态决定;对于变化较缓的区域,采用较粗的网格不会影响到模型整体精度,可以采用非均匀网格^[35]或四叉树网格减少网格数量。另外,暴雨山洪水动力学模型通常将整个计算区域最小的时间步长作为整体时间步长,导致计算效率降低。可以采用单元局部时间步长技术^[36]减少通量和源项的计算次数,从而节约计算时间。

目前通过改进模型算法提高计算效率的暴雨山洪水动力学模型还较少。借鉴 CPU(Central Processing Unit)和 GPU(Graphical processing units)加速方法改造现有模型可以提高计算效率。在 CPU 上实现并行加速,主要方法有共享内存式和分布内存式。现有水动力学模型常采用 OpenMP(open multi-processing)技术实现共享内存式的多线程加速方法,但加速效果有限^[35]。另外,也可以采用 MPI(message passing interface)技术实现分布内存式方法对模型进行加速,如采用 OpenMP 算法对自编 Fortran 程序进行加速改造^[37],采用 8 线程能够加速 5~6 倍左右^[35]。对于 200km²左右的小流域采用 30m 矩形网格剖分,可以在 1h 内模拟完

表1 静水重构和表面重构的主要步骤

Table1 Main steps of hydrostatic reconstruction and stage reconstruction

静水重构	η 表面重构
$\eta_L = \eta, \eta_R = \eta_{i+1}$	$z_{i+1/2-} = z_i + r_i \psi_i \sqrt{z_i}, z_{i+1/2+} = z_{i+1} + r_{i+1} \psi_{i+1} \sqrt{z_{i+1}}$
$h_L = h_i, h_R = h_{i+1}$	$\delta z = z_{i+1/2-} - z_{i+1/2+}$
$q_L = q_i, q_R = q_{i+1}$	$\eta_L = \eta_i + \max[0, \min(z_{i+1} - z_i - \delta z, \eta_{i+1} - \eta_i)]$
$u_L = q_i/h_L, u_R = q_R/h_R$	$\eta_R = \eta_{i+1} + \max[0, \min(z_i - z_{i+1} + \delta z, \eta_i - \eta_{i+1})]$
$z_j = \max(\eta_L - h_L, \eta_R - h_R)$	$z_j = \max(\eta_L - h_i, \eta_R - h_{i+1})$
$h_L = \max(0.0, \eta_L - z_j)$	$h_L = \max(0, \eta_L - z_j), h_R = \max(0, \eta_R - z_j)$
$h_R = \max(0.0, \eta_R - z_j)$	
$q_L = u_L h_L, q_R = u_R h_R$	$q_L = u_L h_L, q_R = u_{i+1} h_{i+1}$

注:其中 η 为水位, L 和 R 分别代表界面左右两边, r 和 ψ 分别为单位向量和梯度函数。

成6h山洪降雨-产汇流全过程。另外一类比较可行的方法为图形显卡加速,在GPU上采用Nvidia CUDA等加速技术,使用图形显卡进行并行计算,费用相对较低且能够实现高达10~100倍左右的加速,在暴雨山洪水动力学模型已有运用^[38]。

2 模型构建和关键参数确定

暴雨山洪水动力学模型精度不仅决定于数值格式的精度,还取决于模型输入资料和参数。输入资料主要包括地形、降雨条件、土壤渗流特性等,但这些资料具有不确定性^[39]。其中地形资料是地表水流运动的边界;一般地形数据分辨率越高,计算精度越高。目前可以获取0.1 m分辨率的高精度地形数据^[36]。但由于其计算单元多,计算时间步长小,会导致计算时间成倍增加。现有流域山洪水动力学模拟采用的最细网格尺寸为10 m,最大网格尺寸为200 m;30 m精度的地形数据可以满足山洪水动力学预报需求。

雨水量最为关键的输入条件之一,与流域洪水密切相关,准确把握面雨量的分布规律也是提高模型精度的关键。一般通过点雨量插值计算得到面雨量,但当前全球雨量站分布密度差异很大,例如,美国密西西比流域内一个面积为21.3 km²的小流域有31个雨量站^[41],而在我国很多超过100 km²的小流域只有7个雨量站^[20]。不同的降雨空间插值方法也有一定影响;常见的插值方法有流域算术平均法、泰森多边形法、克里金法等^[42-43]。随着遥感、雷达技术的发展,非传统观测手段逐渐受到专家学者关注,即利用遥感地信平台,以卫星估测降雨数据结合气象站降雨观测数据,通过地理统计方法、水文模型等有效融合估算流域面雨量,甚至建立数据管理、分析显示一体化的面雨量系统,该系统已在部分发达国家实现业务化运行,但我国面雨量系统建设亟待发展^[44-46]。此外,由于暴雨山洪降雨时间短,一般不考虑其蒸发对径流过程产生影响;但要考虑冠层对降雨的截留,一般在4~34 mm;而洼地截留洼地可通过地形进行表现,能够真实反映洼地对水量以及汇流过程的影响^[47]。

2.1 土壤渗流特性

2.1.1 主要下渗模型

土壤下渗是暴雨山洪中的重要过程,主要跟降雨、土壤特性、初始土湿和边界条件有关;产流模式主要有超渗产流和蓄满产流。暴雨山洪水动力学模型中采用方程(1),通过降雨量与下渗量之间的差值反

映混合产流。当降雨量大于下渗量时产流,小于时则不产流。常用的下渗模型主要分为基于物理意义的模型,半经验模型和经验模型;其中基于物理意义的代表模型有Green-Ampt模型^[48],Philip模型^[49]、Smith-Parlange入渗公式^[50]等。半经验模型包括Horton模型^[51],Singh-Yu模型^[52]等。经验模型包括Kostiakov模型^[53],Collis-George模型^[54]等。经验模型参数物理意义不明确,但形式简单,计算方便,基础资料需求少,应用较为广泛。物理模型意义明确,但难以确定部分参数。因此,理论模型和经验模型均存在局限性。Morbidelli等^[55]表明Green-Ampt公式由于简单,物理意义明确,被广泛采用。在暴雨山洪水动力学模型中也多采用该模型计算入渗强度,定量描述入渗对流域产、汇流的影响。Green-Ampt公式针对各种复杂条件下的下渗情况,具有各种扩展型式^[56],能够用于变雨强条件下非均质土壤的入渗研究,在暴雨山洪中广泛采用,但需要注意湿润锋出的吸力参数的确定^[57]。

2.1.2 土壤水力特性

土壤特性决定了稳定入渗强度和土壤孔隙率。一般而言,土壤孔隙率由野外实测资料确定,但获取困难,而且测点有限。在无实测资料时,土壤孔隙率根据产流下垫面情况、邻近区域有关资料或国际通用土壤类型推荐孔隙率取值决定^[58];其中稳定入渗强度由流域特征确定,也可以参考土性分类估算表^[59];Green-Ampt公式的土壤特性也可以参考^[60]。

2.1.3 初始土壤含水量

初始土壤含水量(或前期土壤含水量)对于旱半干旱地区产汇流过程有重要影响,一般通过实测资料或计算得到。通过求解包含下渗、蒸发水量平衡在内的控制方程组,得到的初始含水量是较准确的计算方法,但该方法需要大量输入条件,其中部分资料难以获取。Martina等^[61]提出了简化处理方法,考虑三种不同的初始土壤体积含水量,分别为饱和含水量(孔隙率)的1/3, 2/3和1.0,即 $\theta_i/\theta_s=1/3, 2/3$ 和1.0,分别对应于前期土壤干、半干(平均)和湿润情况。虽然结果存在一定误差,但应用于实测资料不足时也能够取得较满意结果。

2.2 地表阻力

地表阻力与产汇流地貌类型和土地利用情况有关。由于流域内不同区域的土地利用情况、地表植被覆盖不同,对水流的阻力存在差异;反映在计算结果上为水动力过程的差异,对坡面水流汇流时间和汇入

沟道水流量有影响,从而对沟道洪水产生影响。关于植被覆盖、土壤特性、坡度等对坡面水流阻力均有影响^[62-66]。在暴雨山洪水动力学模型中,阻力影响主要体现在阻力参数取值上,一般分区域给定阻力参数值。由于曼宁糙率公式取值经验丰富,故一般采用曼宁糙率公式计算阻力。

3 暴雨山洪水动力学模型的应用

完整水动力学暴雨山洪模型应用在多个小流域洪水模拟中。例如Huang等人应用暴雨山洪水动力学模型,对山西冷口流域场次暴雨的产汇流及沟道洪水演进开展了模拟^[20],并分析了糙率、前期土湿、饱和下渗率等参数对不同量级洪水的影响;验证了洪水流量越大,参数的影响越小^[67]。魏永强等^[38]对湖南宝盖寺流域场次洪水过程进行模拟,并与水文模型结果进行了比较;指出尽管水动力学模型参数具有明确的物理意义,但其计算量特别大,参数优化效率较低,应用在实际暴雨山洪预警预报中较为少见^[68]。现有的暴雨山洪水动力学模型的应用主要体现在:一为替换现有水文模型中运动波、扩散波等水文模型参数;如Bellos and Tsakiris 计算了15分钟和30分钟单位线^[69-70]。Cea and Fraga 分析了缺资料流域的洪水风险频率^[71]。另一方面,应用暴雨山洪动力学模型,制定了湿润地区^[18]和半湿润地区^[72]的山洪预警指标(临界降雨量),并对系列设计降雨量、前期土壤含水量组合进行模拟^[73],通过提取流域内每个计算单元的水流信息(水深、流速)计算灾害指标,得到临界降雨量。该方法不局限于流域出口断面的水位、流量,同时给出流域内临界降雨量的空间分布,较传统水文学方法更加精细化,针对性更强^[74-75]。

4 结论和展望

完整水动力学方法,能够模拟从降雨-下渗-坡面水流-汇流到河道洪水演进全过程,具有一定的物理基础,且参数较少,在山洪灾害预报预警方面具有广泛的应用前景。通过对现有文献梳理分析得出结论:

(1)暴雨山洪流动具有强非规则地形、水流运动复杂、坡面薄层水流等特征,需要特别注意地形离散和阻力源项离散,才能保证模型的精度。现有的暴雨山洪水动力学模型的数值格式基本能够满足需求。

(2)在模型输入条件与参数确定方面,对于小流域而言,30 m精度地形基本能够平衡精度和计算效率;降雨资料和土壤渗流特性可采用现有的分布式水文模型的相应成果,地表阻力采用常见的曼宁公式及下垫面经验取值可以得到较为满意的结果。

(3)暴雨山洪水动力学模型除了应用于小流域场次暴雨山洪模拟外,还可以替代水文模型中简化水动力学模型来计算水文参数,也可以进一步用于山洪预警指标的确定。

为了更好地促进暴雨山洪水动力学模型的发展,使其应用到更广泛的领域中,还需要进一步提升暴雨山洪动力学模型本身的预测精度,提高暴雨山洪完整水动力学模型的计算效率,以及与其他学科交叉融合,拓展暴雨山洪模型应用场景。随着暴雨山洪完整水动力学模型的不断进步,预期将来可以逐渐应用到暴雨山洪预警预报实际作业,还能够与其他学科交叉融合,拓展到城市内涝^[36]、泥石流、坡面侵蚀、山洪沟道水沙运动^[76]和农业面源污染输移等方面研究中。

参考文献:

- [1] REID I, LARONNE J B, POWELL D M. Flash-flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(4):543-557.
- [2] 尚全民,涂勇,吴泽斌,等. 2020典型山洪灾害事件调研与思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 3(2):14-24.
- [3] PAPALEXIOU S M, MONTANARI A. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55: 4901-4914.
- [4] 袁作新. 流域水文模型[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [5] 赵人俊. 流域水文模拟—新安江模型和陕北模型[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [6] PETERS J, FELDMAN A. Hydrologic Modeling System[C]//North American Water and Environment Congress & Destructive Water. ASCE, 2010.
- [7] 王中根,刘昌明,吴险峰. 基于DEM的分布式水文模型研究综述[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2):168-173.
- [8] 刘志雨,侯爱忠,王秀庆. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. *水文*, 2015, 35(1):1-6.
- [9] 王璐,叶磊,吴剑,等. 山丘区小流域水文模型适用性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018, 2, 78-84, 90.
- [10] JHA M, AFREEN S. Flooding Urban Landscapes: Analysis Using Combined Hydrodynamic and Hydrologic Modeling Approaches[J]. *Water*, 2020, 12(7):1986-2003.
- [11] ROUSSEAU M, CERDAN O, DELESTRE O, et al. Overland Flow

- Modeling with the Shallow Water Equations Using a Well-Balanced Numerical Scheme: Better Predictions or Just More Complexity[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(10): 04015012.
- [12] HAIDER S, PAQUIER A, MOREL R, et al. Urban flood modelling using computational fluid dynamics[J]. *Water & Maritime Engineering*, 2003, 156(2): 129–135.
- [13] BATES P D, HORRITT M S, FEWTRELL T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387: 33–45.
- [14] ZHANG W, CUNDY T W. Modeling of two-dimensional overland flow[J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(9): 2019–2035.
- [15] FIEDLER F R, RAMIREZ J A. A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface[J]. *Int J Numer Meth Fl*, 2020, 32(2): 219–239.
- [16] ESTEVES M, FAUCHER X, GALLE S, et al. Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(3–4), 265–282.
- [17] CEA L, GARRIDO M, PUERTAS J, et al. Overland flow computations in urban and industrial catchments from direct precipitation data using a two-dimensional shallow water model[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(9): 1998–2008.
- [18] CAO Z, WANG X, ZHANG S, et al. Hydrodynamic modelling in support of flash flood warning[J]. *Proceedings of the ICE – Water Management*, 2010, 163(7): 327–340.
- [19] SINGH J, ALTINAKAR M S, DING Y. Numerical Modeling of Rainfall-Generated Overland Flow Using Nonlinear Shallow-Water Equations[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(8): 04014089.
- [20] HUANG W, CAO Z X, QI W J, et al. Full 2D hydrodynamic modeling of rainfall-induced flash floods[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(5): 1203–1218.
- [21] GREENBERG J, LEROUX A. A well-balanced scheme for the numerical processing of source terms in hyperbolic equations[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1996, 33(1): 1–16.
- [22] LEVEQUE R J. Balancing source terms and flux gradients in high-resolution Godunov methods: the quasi-steady wave-propagation algorithm [J]. *J Comput Phys*, 1998, 146(1): 346–365.
- [23] ZHOU J G, CAUSON D M, MINGHAM C G, et al. The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow-water equations[J]. *J Comput Phys*, 2001, 168(1): 1–25.
- [24] ROGERS B D, BORTHWICK A G L, et al. Mathematical balancing of flux gradient and source terms prior to using Roe's approximate Riemann solver[J]. *J Comput Phys*, 2003, 192(2): 422–451.
- [25] AUDUSSE E, BOUCHUT F, BRISTEAU M, et al. A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2004, 25(6), 2050–2065.
- [26] KURGANOV A, PETROVA G. A second order well balanced positivity preserving central upwind scheme for the Saint-Venant system [J]. *Commun. Math. Sci*, 2007, 5(1): 133 – 160.
- [27] GEORGE D L. Augmented Riemann solvers for the shallow water equations over variable topography with steady states and inundation [J]. *J Comput Phys*, 2008, 227(6): 3089–3113.
- [28] MURILLO J, GARCÍA-NAVARRO P, BURGUETE J. Conservative numerical simulation of multi-component transport in two-dimensional unsteady shallow water flow[J]. *J Comput Phys*, 2009, 228(15): 5539–5573.
- [29] XIA X, LIANG Q, MING X, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3730–3759.
- [30] LU X H, MAO B, DONG B J. Comment on "An Efficient and Stable Hydrodynamic Model With Novel Source Term Discretization Schemes for Overland Flow and Flood Simulations." By Xilin Xia et al. [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 621–627.
- [31] LIANG Q, MARCHE F. Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms[J]. *Adv Water Resour*, 2009, 32(6): 873–884.
- [32] HOU J, WANG T, LI P, et al. An implicit friction source term treatment for overland flow simulation using shallow water flow model[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 357–366.
- [33] YU C, DUAN J. Simulation of surface runoff using hydrodynamic model[J]. *Journal of hydrologic engineering*, 2017, 22(6): 04017006.
- [34] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于 Godunov 格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. *水利学报*, 2018, 49(7), 787–794, 802.
- [35] HUANG W, CAO Z, PENDER G, et al. Coupled flood and sediment transport modelling with adaptive mesh refinement[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(8): 1425–1438.
- [36] GUO K, GUAN M, YU D. Urban surface water flood modelling—a comprehensive review of current models and future challenges[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020.
- [37] VU T T, LAW W K, NGUYEN T H, et al. Computational Flood Modeling with UPC Architecture[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2019, 33(2): 04019002.1–04019002.9.
- [38] 魏永强, 刘昌军, 赵伟明. 基于激光雷达数据的小流域暴雨山洪二维数值模拟研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 838–845.
- [39] BLÖSCHL G, BIERKENS M, F P, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, 64(10), 1141–1158.
- [40] TAN M L, YANG X. Effect of rainfall station density, distribution and missing values on SWAT outputs in tropical region[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584, 124660.
- [41] KING K W, ARNOLD J G, BINGNER R L. Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. *Trans. ASAE*, 1999, 42(4): 919–926.

- [42] TEEGAVARAPU R, S V, MESKELE T, et al. Geo-spatial grid-based transformations of precipitation estimates using spatial interpolation methods[J]. *Computers & Geosciences*, 2012,40:28-39.
- [43] WAGNER P D, FIENER P, WILKEN F, et al. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2012,464-465, 388-400.
- [44] LORENZO-LACRUZ J, GARCIA C, MORÁN-TEJEDA E, et al. Hydro-meteorological reconstruction and geomorphological impact assessment of the October, 2018 catastrophic flash flood at Sant Llorenç, Mallorca (Spain) [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2019,19(11): 2597-2617.
- [45] 严昌盛, 朱德华, 马燮铤, 等. 基于雷达短时临近降雨预报的王家坝洪水预报研究[J]. *水利水电技术*, 2020,51(9): 13-23.
- [46] 廖慕科. 多普勒雷达强降雨预警在山洪灾害预警中的应用[J]. *农业灾害研究*, 2012, 2(4):84-88.
- [47] 张焜, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山5种森林类型林冠截留影响因素浅析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 139(11): 173-179.
- [48] GREEN W H, AMPT G. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, 4(1):1-24.
- [49] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. *Soil Sci*, 1957, 83:345 - 357.
- [50] PARLANGE J Y. Theory of water-movement in soils: 2. One-dimensional infiltration [J]. *Soil Sci*. 1971, 111:170 - 174.
- [51] HORTON R E. The Role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. *Eos Trans. AGU*, 1993, 14(1):446 - 460.
- [52] SINGH V P, YU F X. Derivation of infiltration equation using systems approach[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1990,116(6): 837-857.
- [53] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils[J]. In Sixth Commission, International Society of Soil Science, Part A, 1932, 15 - 21.
- [54] COLLIS-GEORGE N. Infiltration equations for simple soil systems [J]. *Water Resources Research*, 1977,13(2): 395 - 403.
- [55] MORBIDELLI R, CORRADINI C, SALTALIPPI, C, et al. Rainfall Infiltration Modeling: A Review[J]. *Water*, 2018, 10(12):1873.
- [56] 寇小华, 王文, 郑国权. 土壤水分入渗模型的研究方法综述[J]. *亚热带水土保持*, 2013, 25(3): 53-55.
- [57] KALE R V, SAHOO B. Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit [J]. *Water Resour Manag*, 2011,25(14): 3505-3536.
- [58] EPA (Environmental Protection Agency). Storm water management model user's manual Version 5.1[R].2015.
- [59] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, SAXTON K E. Estimation of soil water properties[J]. *Trans Asae*, 1982,25: 1316-1320.
- [60] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, MILLER N. Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data[J]. *Journal of hydraulic engineering*, 1983,109(1):62-70.
- [61] MARTINA M, L V, TODINI E, et al. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006,10(3):413-426.
- [62] MüGLER C, PLANCHON O, PATIN J, et al. Comparison of roughness models to simulate overland flow and tracer transport experiments under simulated rainfall at plot scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,402(1-2): 25-40.
- [63] KIM J, IVANOV V Y, KATOPODES N D. Hydraulic resistance to overland flow on surfaces with partially submerged vegetation[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(10):1-19.
- [64] RAZAFISON U, CORDIER S, DELESTRE O, et al. A Shallow Water model for the numerical simulation of overland flow on surfaces with ridges and furrows[J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2012,31:44-52.
- [65] 彭清娥, 刘兴年, 黄尔, 等. 植被对坡面汇流时间影响的试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2018,50(3): 185-192.
- [66] 杨坪坪, 王云琦, 张会兰, 等. 降雨强度和单宽流量与地表粗糙度交互作用下坡面阻力特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 145-151.
- [67] 潘佳佳, 曹志先, 王协康, 等. 暴雨山洪水动力学模型及其简化模型的比较研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012,44(S1):77-82.
- [68] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019,17(4): 262-270,278.
- [69] BELLOS V, TSAKIRIS G. A hybrid method for flood simulation in small catchments combining hydrodynamic and hydrological techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,540: 331-339.
- [70] MORENO-RODENAS A M, BELLOS V, LANGEVELD J G, et al. A dynamic emulator for physically based flow simulators under varying rainfall and parametric conditions[J]. *Water Resources Research*, 2018,142: 512-527.
- [71] CEA L, FRAGA I. Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54,8774-8791.
- [72] HUANG W, CAO Z, HUANG M, et al. A New Flash Flood Warning Scheme Based on Hydrodynamic Modelling[J]. *Water*, 2019, 11(6): 1221-1235.
- [73] 狄靖月, 许凤雯, 包红军, 等. 引发山洪的降水特征及动态阈值研究[J]. *暴雨灾害*, 2021, 40(6):655-663.
- [74] KANG A, KANG Z, JI L, et al. Applying the dynamic critical precipitation method for flash flood early warning[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 28(3):1727 - 1733.
- [75] STEENBERGEN N V, WILLEMS P. Increasing river flood preparedness by real-time warning based on wetness state conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 489(3):227 - 237.
- [76] YANG Q Y, LIU T H, ZHAI J J, et al. Numerical investigation of a flash flood process that occurred in Zhongdu River, Sichuan, China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021(9):1-11.