

城市雨洪模拟技术研究进展

胡伟贤¹, 何文华¹, 黄国如¹, 冯 杰²

(11 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640 21 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 从对水文过程描述的角度对城市雨洪模拟技术进行了回顾, 认为管网汇流阶段算法较为成熟, 而产流和坡面汇流阶段还有待深入研究。从模型构建思想的角度回顾其发展历程, 阐明了经验性模型和分布式概念性模型的局限性以及分布式物理模型的良好发展前景。通过总结国内外几个具代表性城市雨洪模型的特点, 从特定模型的角度进一步分析城市雨洪模型现状, 并指出中国与国外模型研究的差距。对与城市雨洪模拟精度密切相关的基础数据收集与管理技术进行了讨论, 并提出了城市雨洪模拟技术的发展方向。

关键词: 城市雨洪; 地表汇流; 管网汇流; RS GIS

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **文章编号:** 100126791(2010)0120137208

城市化是人类社会发展的重要过程, 主要表现在城区人口迅速集中, 工业化规模不断扩大, 城市面积急剧膨胀, 使城区及其附近区域的自然、文化和生态系统都发生了显著的改变, 这其中也包括对水文过程所产生的影响。城市化发展改变了城市局部的自然地貌, 使原先相当部分的自然流域被不透水表面所覆盖, 造成雨水汇流速度加大, 从而导致一系列相异于天然流域的城市水文问题。近年来, 城市化的快速发展与全球气候变化导致城市地区遭受突发性强暴雨洪水的几率加大, 给人民群众生命财产造成的损失与日俱增, 已成为社会各界关注的问题之一。城市暴雨洪水模拟是城市防洪减灾的关键技术之一, 其模拟的精度、广度及深度关系到城市防灾减灾的有效性。本文对近年来城市暴雨洪水模拟技术研究所取得的新进展以及相关问题进行介绍与评述。

1 城市雨洪产汇流计算方法

城市雨洪的产汇流计算是建立城市雨洪模型的基础, 城市地区的产汇流特性有别于天然流域。国内外学者根据长期的观察和研究, 把城市雨洪的产汇流计算归纳为城市雨洪产流计算、城市雨洪地面汇流计算以及城市雨洪地下管流计算等 3 方面内容^[12]。

1.1 城市雨洪产流计算方法

城市是受人类活动影响最大的区域, 城市地表覆盖物种类多且分布复杂, 产流很不均匀, 给城市雨洪产流计算带来很大麻烦。城市地表复杂的下垫面可分为不透水地面及透水地面两部分。Elliott等^[6]通过总结现今流行的 10 个城市雨洪模型对产流部分的处理, 发现对不透水部分均采用相同的处理方法, 即产流量为降雨量扣除填洼、截留、蒸发等损失量; 而对透水部分则出现了多种计算方法, 如径流系数法、概念性降雨径流法、SCS法以及 Green2Ampt法等。虽然这些方法广泛应用于建模实践, 如 STORM 模型中的径流系数法、MOUSE 模型中的概念性降雨径流法以及 SWMM 模型中的 SCS法、Green2Ampt法等, 但由于缺乏对城市地区复杂下垫面产流规律的系统认识, 城市雨洪模型子流域总产流量的计算仅停留在不透水地面产流量和透水地面产流量简单叠加的阶段。如何准确而系统地描述城市雨洪产流过程以提高城市雨洪产流计算的精度成为近

收稿日期: 2009203230

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (200801033); 教育部科学技术研究资助项目 (107135)

作者简介: 胡伟贤 (1984-), 男, 广东佛山人, 硕士研究生, 主要从事城市水文学研究。E-mail weixianhu@yahoo.cn

通信作者: 黄国如, E-mail huangg@scut.edu.cn

年来国内外学者的努力方向。岑国平等^[7]采用室内模拟降雨试验对各种城市地面,如土地面、草地、混凝土地面及其多种组合的产流特性作了系统试验,分析了降雨强度与历时、土壤湿度与密实度、地面覆盖、不透水面积比例与位置等因素对产流的影响,并定量分析了径流系数随雨强、土壤前期含水率、不透水面积比例的变化规律。Shuster等^[8]针对土壤前期含水率、不透水面积比例(0.25%、50%)与位置等因素进行了更为细致详尽的室内试验,得出类似的结论,并且发现在不透水面积比例为25%时,土壤前期含水率为影响产流的主要因素;在不透水面积为50%并且产流经透水部分流到出口时,透水部分会出现回归流。上述对城市复杂下垫面产流规律进行的探索对认清城市产流规律具有重要意义,然而室内试验条件与天然状况毕竟存有差异,在进一步研究城市地区产流规律时有必要结合室外降雨径流观测资料共同研究。

112 城市雨洪地面汇流计算方法

雨降落到地表产流后到流入雨水管道系统的集水口,这一过程称为雨水地面汇流过程。城市地表覆盖的复杂性给城市排水区域内集水口流域的边界划定及地面汇流计算带来很大的困难。针对城市地面汇流的特点,有两类解决方法,即水文学方法和水动力学方法。水文学方法采用系统分析的途径,把汇水区域当作黑箱或灰箱系统,建立输入和输出之间的关系以模拟坡面汇流,常用的有推理公式法、等流时线法、瞬时单位线法、线性水库法及非线性水库法。Kidd等^[9]曾利用英国、瑞典等国城市地表径流观测资料,对以上几种方法作了比较,得出对于城市雨水地面汇流模拟而言,非线性水库演算法较好,等流时线法和线性水库法一般,瞬时单位线法较差的结论。在国内,任伯帆等^[10]采用长沙市实测雨洪资料,对以上几种方法进行了验证,得出了类似的结论。水动力学方法基于微观物理定律,直接求解圣维南方程组或其简化形式,从而得出较水文学方法详尽的雨水地面径流过程。复杂的下垫面情况以及缺乏稳定可靠的有效解法使得该类方法目前应用不多,然而由于其能够提供更为详尽的城市雨洪地表非恒定流过程的良好前景,学者们进行了许多有益的探索。Maik等^[11]利用有限差分法隐式求解圣维南方程组,建立起强降雨条件下城区街道系统与地下管网系统联动的一维水动力学模型,成功模拟出地表非恒定流一维流动过程并分析了该方法的潜力及局限性,指出地下管网系统与地表二维水动力模型相耦合的发展方向。随后,Schmitt等^[12]利用基于三角网有限体积法离散求解浅水方程组,并与地下管网系统相耦合,成功模拟出暴雨条件下城市地表径流二维非恒定流过程。Mignot等^[13]对所建立的二维城市地表径流模型的多个模型参数、地形参数及网格变化等进行敏感性分析,基于1988年资料修正模型并将其应用于2002年一场大暴雨,得出与1988年那场洪水相近的结果,更为可贵的是通过此种分析为希望建立城区雨洪模型的研究者提供网格疏密程度、边界条件数据收集及处理、地表摩阻系数选择等方面的建议。在国内,仇劲卫^[5]、张新华等^{[14][5]}学者基于不同的离散方法对城市地表二维非恒定流过程进行模拟,但在精度及深度上与国外尚有一定差距。随着计算技术的发展,可以预见基于有限体积法的城市地表二维非恒定流过程的模拟将逐渐成熟,然而由于城市地区缺乏足够的实测数据,特别是极端暴雨过程中城区的淹没范围、淹没水深等数据,城市雨洪地面汇流的水动力学方法在应用上仍然受到限制。城市雨洪地面汇流两种模拟方法的局限性导致了既能反映小区域实际地表水流过程,又提高了模型精度的水文水动力学方法的发展。周玉文等^[16]曾介绍过水文学方法和水动力学方法相结合的两类途径,一是采用水文学方法模拟径流过程的同时引用水力学成果来确定汇流速度;另一种是采用水力学方法进行模拟的同时,借助水文学方法来调整有关参数值。水文水动力学方法作为水动力学方法精度不高情况下的一种替代方法,理应具有强大的生命力。

113 城市雨洪地下管流计算方法

城市雨水管网汇流计算在城市雨水管网设计中起着十分重要的作用,直接关系到城市雨水排放的通畅性。城市雨水管网由管线和节点组成,管线主要为圆管,也有其它形状的沟渠等。管线主要起输送作用,而节点起连接管线、汇集地表及支管并进行调节和控制作用。城市雨水管道汇流计算方法总体分为水文学方法与水动力学方法。早期水文学方法应用较多,主要有瞬时单位线法^[3]和马斯京根法^[17];随着城市对防洪决策资料要求的提高以及计算技术的发展,城市雨水管网的水动力学方法逐渐受到重视。然而由于圣维南方程组计算复杂,对资料要求高,实际应用中多采用其简化形式,应用最为广泛的是扩散波方程^[3]和运动波方

程^[18]。运动波方程只适用于坡度大、下游回水影响小的管道, 扩散波方程也只能考虑下游边界条件, 因此它们还是不能很好地模拟各种流态共存、有压流和无压重力流交替发生的城市环状管网中的水流运动。计算技术的发展使得求解完整的圣维南方程组成为了可能, 动力波方法在 SWMM 模型中的成功应用预示着城市雨水管网计算技术的成熟^[1], 而目前的主要困难在于为了求解动力波方程所需要的庞大而完善的边界条件数据。

2 城市雨洪模型的建模方法

自 20 世纪 70 年代早期美国一些政府机构开发出能够模拟城市雨洪水量及水质的城市雨洪模型起, 城市雨洪模型如雨后春笋般发展起来^[19], 这些模型既包括简单的概念性模型也包括复杂的水动力学模型。现今广泛应用的雨洪模型的构建均基于确定性途径, 且绝大部分为分布式的确定性模型^[20]。纵观城市雨洪模型的发展, 其主要经历了经验性模型、概念性模型及物理性模型三阶段。

2.1 经验性模型

经验性模型又称 / 黑箱 0 模型, 所使用的数学方程是基于对输入输出系列的经验分析, 而不是基于对水文物理过程的分析。常用于城市雨洪模拟的经验性模型主要有推理公式法、等流时线法及单位线法。早在 19 世纪 90 年代, Kuichling 就把推理公式用于城市排水设计中, 100 多年后的今天, 这一方法仍在广泛应用^[21]。但由于推理公式法只给出洪峰流量, 不能推算出流量过程线, 因此无法满足城市环境下复杂的雨洪过程模拟。为克服推理公式法的不足, 在城市雨水径流计算中, 先后出现过单位线法、等流时线法。1950 年芝加哥市工程局开始了雨水管道设计水文过程线的研究, 提出了早期城市雨水流量过程线计算模型(简称 CHM), 到 1975 年, Keifer 和他的助手在此基础上开发出修正 CHM 模型^[22]。英国公路研究所根据时间) 面积径流演算方法提出了一种城市径流模型 TRRL^[23], 该模型在美国称 RRL 法^[24]。经验性模型没有基于对研究区域水文物理过程的分析, 只能提供输出端的资料, 远远不能满足城市防洪决策的要求。然而, 作为城市雨洪模拟的一种方法, 其可以弥补概念性模型及物理性模型的不足, 为城市资料缺乏地区的雨洪模拟提供一定依据。

2.2 概念性模型

概念性模型往往具有分布式特征, 即分布式概念性模型。它把城市研究区域按集水口划分为各个排水小区, 每个排水小区作为一个计算单元, 应用集总式概念性模型计算各个集水口的入流过程, 然后通过管网或河道汇流演算到研究区域出口。自 20 世纪 70 年代起, 分布式概念性模型思想就广泛应用于建模实践, 先后出现了 SWMM^[1]、Wallingford 等^[2]通用性的模型。有一定物理意义的模型结构以及在空间上采取分布式处理使得这些模型广泛应用于城市排水、防洪等工程实践^[2520]。然而, 为提高模型模拟精度, 在进行城市雨洪模拟之前需根据单元出口流量对各计算单元的参数进行率定。随着城市排水、防洪等方面决策要求的提高, 研究区域进一步细分, 模型参数率定工作将会成倍增加。而且由于其简化处理了计算单元内水的移动, 计算单元之间的相互作用仅通过管道或河道汇流来考虑, 使其难以提供诸如特定点流速等更加详细的城市雨洪非恒定流过程。

2.3 物理性模型

物理性模型是指具有物理基础的一类模型, 往往以水动力学为主要基础, 具有分布式特征, 即分布式物理模型。它把城市研究区域分割成空间网格, 根据水流动的偏微分方程、边界条件及初始条件应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系。能直接考虑各水文要素的相互作用及其时空变异规律, 使得分布式物理模型在城市雨洪模拟中具有良好的应用前景。21 世纪初期, 由于城市排水、防洪等方面对决策资料要求越来越细, 城市雨洪模拟的分布式概念模型有其固有缺陷, 不能很好地满足城市局部地区对水位、流速等的要求, 学者们开始了对城市雨洪模拟分布式物理模型的探索。早期, 在城市区域内建立二维大网格, 在有集水口及濒临河道的网格通过源与汇的方式和管网及河道系统进行水量交换, 构建起城市地区大范围分布式物理模型^[5]。随着研究的深入, 针对街道^[11]、交叉路口^[31]及它们的组合^[13]等细部进行了城市雨洪非恒定

流过程的模拟。以上探索对认清城市雨洪非恒定流过程有重要意义,然而由于这些研究大多针对特定研究区域且缺乏足够的实测数据进行验证,模型的稳定性、精确性及通用性尚有待进一步提高。

3 代表性城市雨洪模型评述

欧美发达国家从 20 世纪 60 年代起开始研制满足城市排水、防洪、环境治理等方面要求的城市雨洪模型,其中应用比较广泛的是 70 年代开发的通用模型 SWMM 和 Wallingford 模型。

美国环保局的 SWMM^[1]最早开发于 1971 年,是动态的降雨径流模拟模型,能对径流量水质进行单独或者连续模拟,主要用于规划和设计阶段。该模型把每个子流域概化成透水地面、有滞蓄库容的不透水地面和无滞蓄库容的不透水地面 3 部分,利用下渗扣损法(Horton, GreenAmpt)及 SCS 法进行产流计算,坡面汇流采用非线性水库法,管网汇流部分提供了恒定流演算、运动波演算和动力波演算 3 种方法。近年来,SWMM 多次应用于解决城市排水^[2526]及环境整治等^[27]方面工程问题并不断得到完善。然而,模型中的动力波演算方法是通过 EXTRAN 模块显式差分求解浅水方程的,这限制了其应用范围。MIKE2SWMM^[19]的出现使 SWMM 模型应用于城市雨洪的运行管理成为现实,此模型是利用丹麦水力学研究所的 MIKE11 来代替 SWMM 模型中的 EXTRAN 模块来进行一维非恒定流的模拟。由于 MIKE11 在求解浅水方程的时候采用的是隐式差分格式,因此较之 SWMM 模型中的 EXTRAN 模块适用范围更广、更稳定。而且 MIKE2SWMM 可以与丹麦水力学研究所开发的全部模型兼容,如降雨处理模块 STORMPSAC、城市排水管网模型 MOUSE、二维洪水模拟模型 MIKE21 及植物影响评估模块 STOAT 等。结合后的模型能够模拟任何时空尺度下的城市雨洪水量和水质问题,能很好地解决城市雨洪的规划、设计及运行管理问题,具有很好的发展前景。

Wallingford 模型^[2]早期于 1978 年由英国 Wallingford 水力学研究所开发,主要包含降雨径流模块(WAS2SP)、简单管道演算模块(WALLRUS)、动力波管道演算模块(SPDA)以及水质模拟模块(MOSQUITO)。模型既可以用于暴雨系统、污水系统或者雨污合流系统的规划设计,又可以进行实时运行管理模拟,时间步长可达 15 min。该模型将每个子流域概化成铺砌表面、屋顶及透水区 3 部分,采用修正的推理法进行产流计算。该方法的实质是一个包含传输系数的推理法,传输系数与不透水面积比例、土壤类型、蒸散发总量以及土壤前期湿度密切相关。地表汇流演算主要采取非线性水库法,同时一些简单蓄泄演算法和 SWMM 模型中的降雨径流模块在该模型的地表汇流演算中也是可选的。管网汇流部分由马斯京根法及隐式差分求解完整的浅水方程组成。近年来,Wallingford 模型广泛应用于城市管网水量^[28]及水质^[2920]的模拟,模拟结果表明其具有良好的适用性。

总结国外应用最为广泛的两个城市雨洪模型的特性,可以发现城市雨洪模型发展至今呈现以下几方面的特点: 1 许多城市雨洪模型,如 SWMM、Wallingford 模型等,既具备模拟水量又具备模拟水质的能力; 2 大多数城市雨洪模型能应用于城市雨洪模拟的规划和设计阶段,然而很少能用于运行管理阶段,包括 SWMM; 3 大多数模型的建模都是从排水的角度来考虑,缺乏综合性,理想的雨洪模型应当考虑城市诸多涉水系统的互动; 4 由于二维坡面流的复杂性,模型在模拟坡面汇流的时候大多采用传统的水文学方法,如线性水库法、非线性水库法等,很少通过求解二维浅水方程的途径来解决问题。经整合后的 MIKE2SWMM 具备模拟二维坡面流的能力,但其精度及稳定性还是不能满足要求。

国内对城市雨洪模型的研制晚于西方国家,但是也出现了很多有益的成果。岑国平^[3]于 1990 年提出了国内首个自主开发的城市雨水径流计算模型(SSCM),该模型把城市地面分为不透水地面和透水地面分别进行产流计算,坡面汇流计算采用变动面积)))时间曲线法,管网汇流验算采用了时间漂移法和简化的扩散波法。周玉文等^[4]根据城市雨水径流的特点,把径流分为地表径流和管内汇流两个阶段,建立了可用于设计、模拟和排水管网工况分析的城市雨水径流模型(CSYM)。该模型采用扣损法进行产流处理,瞬时单位线法进行雨水口入流过程线生成,非线性运动波方法进行管网汇流演算,得到了比较满意的结果。中国水利水电科学研究院与天津气象局等单位^[5]合作开发了城市雨洪模拟系统(UFDSM),该模型采用无结构不规则网格以二维非恒定水力模型为基础来模拟城市雨洪过程,模型对天津市暴雨沥涝的模拟结果较为可靠,随后解以

扬^[32]、邱绍伟等^[33]针对特定的研究区域对该模型进行了改进, 验证结果表明模型对南京、南昌及上海等城市也具有较好的适用性。徐向阳等^[34]提出了包括产流、坡面汇流、管网汇流和河网汇流在内的平原城市雨洪模型, 该模型将汇水面积划分为若干个单元区域, 每个单元区域由铺砌面积和透水面积两部分组成, 每个单元设一个出流口, 降落在单元面积上的雨水, 产流后通过坡面汇流经出流口汇入管网系统的调蓄节点。管网汇流类似于河网水流计算, 根据平原城市的特点选择适当的计算模型, 经验证表明成果较为可靠合理。

对比国内外城市雨洪模型的特点, 可以发现两者有以下两点比较明显的差距: ①从模型的功能上来说, 国内研发的模型功能比较单一, 仅限于城市排水、防洪等方面, 并没有涉及到水质部分的内容。而国外很多模型均具备模拟水质的能力^[19], 如 SWMM 能模拟 BOD、COD、总磷、总氮等 8 种污染物在管网内的输移。②从模型的通用性方面来说, 国内城市雨洪模型的研发仅针对特定研究区域, 移植到别的地区需要进行一定的改进^[33], 通用程度并不高。而国外的城市雨洪模型已广泛应用于实际规划、设计和管理工作中^[2530], 且有几个比较成熟的模型已开发出商用软件, 如 Wallingford 的 *inforworks*、DH I 的 *Mouse* 及 *Mc2SWMM*。另外, 国外的城市雨洪模型往往具有较为强大的前后处理功能, 数据分析和管理能力强, 可视化程度高, 方便用户使用。

4 城市雨洪模拟基础数据的收集与管理

要提高城市雨洪模拟的精度, 除了建立合理的模型结构外, 还必须要有足够且可靠的实测数据进行模型的检验与验证。过去几十年里, 研究者们已研制出许多结构合理、计算稳定、通用性强的城市雨洪模型, 然而由于城市暴雨径流实测资料, 特别是极端暴雨情况下的暴雨径流资料严重缺乏, 城市雨洪模拟的精度及深度一直受限。建立城市雨洪模拟分布式时空数据库是提高城市雨洪模拟精度、增加模拟深度及改进城市雨洪模拟技术, 特别是改进能反映详细的城市雨洪非恒定流过程的分布式物理模型的重中之重^[35]。分布式时空数据库的建立包括两方面的内容, 即基础数据的收集与基础数据的管理。

用于城市雨洪模拟的基础资料主要包括下垫面资料、降雨资料及受灾情况。测量技术的发展使市政部门、测绘部门能比较方便而精确地获取地形、土地利用类型、街道位置、管网布置等下垫面资料; 城市雨量站点的建立也使准确获取城区分布式降雨资料成为可能。然而, 反映受灾情况的基础资料, 如淹没范围、淹没水位等却难以精确收集, 这使得所建立的城市雨洪模型缺乏准确可靠的校正资料。Yu 等^[36]曾利用遥感 (RS) 技术测定英国 Ouse 河沿岸城市在一次大暴雨后淹没范围的动态变化过程; Hunter 等^[37]曾利用自记水位计测量水位的方法来减少校正资料的不确定性; Mignot 等^[13]曾利用 99 组暴雨洪水过后测量的洪水痕迹及破坏痕迹作为校正资料对模型进行校正。以上方法对城市雨洪受灾情况资料收集具有启发性意义, 然而, 每种方法均存有不足, 如城市复杂的下垫面使 RS 技术在城区的精度不高、自记水位计受限于一定的范围、洪水痕迹不能提供完整的洪水过程线等。Neal 等^[35]综合上述几种方法建立校正数据序列并对所建立的二维城市地面淹没模型进行检验, 得出考虑建筑物与不考虑建筑物的情况下, 模拟数据与实测数据最大水位的均方误差分别为 0.128 m 及 0.132 m, 这为城市雨洪受灾资料的收集与处理提供了很好的指导作用。

城市雨洪模型要高效地利用空间数据, 需要有一个强大的工具对空间数据进行管理。地理信息系统 (GIS) 可以高效地获取、创建、分析和显示各种类型的地理和空间信息数据, 它能将图形和数据有机地结合在一起, 充分地表达数据的地理图形信息。在进行数值计算时, 需要整理大量数据, 生成计算网格及分析计算结果等工作量很大, 因而需要建立网格生成程序和简单易用的前后处理程序, 在实时计算和模拟预报时能够进行直观的可视化操作, 实践证明 GIS 技术与城市雨洪模型相结合能有效地提高城市雨洪模型的前后处理和数据分析及管理能力, 因而在城市雨洪模拟方面得到了大量的应用。国外利用 RS 和 GIS 可较为方便地确定模型参数, 根据城市空间分布数据库, 通过研制城市单位过程线, 用以模拟城市水文过程^[38]。国内也加快了对水文模拟新技术方面的探索, 利用 GIS 系统的功能动态地演示地面积水的涨消过程, 为制定城市防汛减灾对策和措施提供水情及涝情信息, 取得了一些具有实用价值的研究成果^[39242]。

5 结论与展望

城市雨洪模拟技术发展至今已形成了较为完善的模型框架,对水文物理过程机理的认识和数据管理能力已成为限制模拟精度和应用范围的主要瓶颈,瓶颈的解决主要依赖于水文学、水动力学理论、计算技术、计算机软硬件及量测技术的发展。GIS技术与城市雨洪模型的结合研究才不过 10 多年时间,研究者们主要针对自身研制的模型,将 GIS 作为分析处理工具,很少有人将 GIS 内嵌到雨洪模型之中。因此,RS、GIS 等空间信息技术与多种实用性城市雨洪模型有机集成,形成有较好的人机对话、结果显示、决策支持、预警预报等功能的城市雨洪系统,必将成为城市雨洪模拟技术发展的趋势。由于城市地区缺乏长系列水文气象资料,从而影响了雨洪模拟精度及应用范围,在以后的工作中需要收集更多的资料对所构建的雨洪模型进行验证和检验。随着计算机的快速发展,计算技术的不断提高以及量测技术和数据库的不断完善,收集与处理的与城市雨洪模拟相关的实测资料将更能反映城市雨洪过程的实际情况,可进一步满足细部水流运动规律研究的需要,开发更加完善和精度更高的水动力学模型,提供更可靠的城市雨洪模拟结果。

参考文献:

- [1] ROSSMAN L A Storm water management model User's manual Version 5.0 [EB/OL] [2009-02-21] http://www.epa.gov/edr2/nmr/mode/s/wmm/epaswmm5_user_manual.pdf
- [2] PRICE R K, KIDD C H R A design and simulation method for storm sewers [C] // International Conference on Urban Storm Drainage London: Pentech Press, 1978: 327-337.
- [3] 岑国平. 城市雨水径流计算模型 [J]. 水利学报, 1990(10): 682-751 (CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 682-751 (in Chinese)).
- [4] 周玉文, 赵洪宾. 1 城市雨水径流模型研究 [J]. 中国给水排水, 1997, 13(4): 4261 (ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. A study on urban storm runoff model [J]. China Water & Wastewater, 1997, 13(4): 4261 (in Chinese)).
- [5] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 1 天津城区暴雨沥涝仿真模拟系统 [J]. 水利学报, 2000(11): 3424-21 (QIU Jinwei, LI Na, CHENG Xiaotao, et al. The simulation system for heavy rain fall in Tianjin City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(11): 3424-21 (in Chinese)).
- [6] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22: 394-405.
- [7] 岑国平, 沈晋, 范荣生, 等. 1 城市地面产流的试验研究 [J]. 水利学报, 1997(10): 4725-21 (CEN Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng, et al. Experimental study on urban surface runoff yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(10): 4725-21 (in Chinese)).
- [8] SHUSTER W D, PAPPASE, Zhang Y L Laboratory scale simulation of runoff response from pervious/imperious systems [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(9): 886-893.
- [9] KIDD C H R Rainfall runoff processes over urban surfaces [EB/OL] [2009-02-21] http://norl.nerdc.ac.uk/5780/1
- [10] 任伯帆, 邓仁建. 1 城市地表雨水汇流特性及计算方法分析 [J]. 中国给水排水, 2006, 14: 3924-21 (REN Bozhai, DENG Renjian. Analyses of properties and calculation methods of urban surface rainwater conflux [J]. China Water & Wastewater, 2006, 14: 3924-21 (in Chinese)).
- [11] MARK O, WEESAKUL S, APRUMANEKUL C, et al. Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4): 284-299.
- [12] SCHMITT T G, THOMAS M, ETTRICH N I Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4): 300-311.
- [13] MIGNOT E, PAQUER A, HAIDER S I Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2): 18-29.
- [14] 张新华, 隆文非, 谢和平, 等. 1 二维浅水波模型在洪水淹没过程中的模拟研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(1): 202-251 (ZHANG Xinhuai, LONG Wenfei, XIE Heping, et al. Numerical simulation of flood inundation processes by 2D shallow water equations [J]. Journal of Sichuan University Engineering Science Edition, 2006, 38(1): 202-251 (in Chinese)).

- [15] 张新华, 隆文非, 谢和平, 等. 1 任意多边形网格 2D FVM 模型及其在城市洪水淹没中的应用 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(4): 62111 (ZHANG Xinzhua LONG Wenfeij XIE He ping et al 2D FVM model based on an arbitrary polygonal mesh system for the simulation of flood inundation and its application in municipal regions [J]. Journal of Sichuan University Engineering Science Edition, 2007, 39(4): 62111 (in Chinese))
- [16] 周玉文, 赵洪宾. 1 排水管网理论与计算 [M]. 1 北京: 中国建筑工业出版社, 2000 (ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin Theories and calculation of sewer systems [M]. 1 Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese))
- [17] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 1 马斯京根法在雨水管道流量演算中的应用 [J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(4): 27522781 (CEN Guoping SHEN Jin, FAN Rongsheng The application of Muskingum method to storm sewers flow routing [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1995, 11(4): 27522781 (in Chinese))
- [18] 周玉文, 孟昭鲁, 宋军. 1 城市雨水管网非线性运动波法模拟技术 [J]. 给水排水, 1995(4): 92111 (ZHOU Yuwen, MENG Zhao lu, SONG Jun. 1 Simulation of urban storm sewer system by nonlinear kinematic wave method [J]. Water & Wastewater Engineering, 1995(4): 92111 (in Chinese))
- [19] CHRISTOPHER ZI. Review of urban storm water models [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16: 19522311
- [20] NIX S. Urban storm water modeling and simulation [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994
- [21] AKAN A O. Pavement drainage design using Yen and Chow rainfall [C]. // Proceedings of the International Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula. Charlottesville: University of Virginia, 1989: 28522911
- [22] KEIFER C J, HUNG C Y, WOLKA K. Modified Chicago hydrograph method storm sewer design [M]. 1 Chicago: Univ of Illinois, 1978
- [23] Transport Road Research Laboratory. A Guide for Engineers to the design of storm sewer systems [M]. 1 London: H M Stationery Office, 1976
- [24] STALL J B, TERSTRIEP M L. Storm sewer design: an evaluation of the RRL method [M]. 1 Washington DC: U S Govt Printing Office, 1972
- [25] TSHRNTZIS V A, HAMID R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(2): 31123291
- [26] 刘俊, 郭亮辉, 张建涛, 等. 1 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 642701 (LU Jun, GUO Lianghui, ZHANG Jiantao et al. Study on simulation of drainage and flooding in urban areas of Shanghai based on improved SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21): 642701 (in Chinese))
- [27] 董欣, 陈吉宁, 赵冬泉. 1 SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用 [J]. 给水排水, 2006, 32(5): 10621091 (DONG Xin, CHEN Jining, ZHAO Dongquan Applications of SWMM model on urban sewer system planning [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(5): 10621091 (in Chinese))
- [28] BRUEN M, YANG J. Combined hydraulic and black box models for flood forecasting in urban drainage systems [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(6): 58925961
- [29] KOUDELAK P, WESE S. Sewerage network modeling in Latvia, use of info works CS and storm water management model 5 in Liepaja city [J]. Water and Environment Journal, 2008, 22(2): 812871
- [30] DEVESA F, COMAS J, TURON C, et al. Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management [J]. Environmental Modelling and Software, 2009, 24(3): 37123801
- [31] KHAN A A, CADAVID R, WANG S S Y. Simulation of channel confluence and bifurcation using the CCHE2D model [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water, Maritime and Energy, 2000, 142(2): 9721021
- [32] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 1 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用 [J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 38423901 (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 38423901 (in Chinese))
- [33] 邱绍伟, 董增川, 李娜, 等. 1 暴雨洪水仿真模型在上海防汛风险分析中的应用 [J]. 水力发电, 2008, 34(5): 112141 (QIU Shaowei, DONG Zengchuan, LI Na, et al. Application of storm flood simulation model on flood prevention & risk analysis in Shanghai urban area [J]. Water Power, 2008, 34(5): 112141 (in Chinese))
- [34] 徐向阳. 1 平原城市雨洪过程模拟 [J]. 水利学报, 1998(3): 342371 (Xu Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(3): 342371 (in Chinese))

- [35] NEAL J C, BATES P D, FEWTRELL T J et al Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations [J] Journal of Hydrology, 2009, 368(1/2/3/4): 422-51
- [36] YU D, LAND S N Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment part I Mesh resolution effects [J] Hydrological Processes, 2006, 20(7): 1567-1583
- [37] HUNTER N M, BATES P D, HORTON M S et al Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework [J] Hydrology and Earth System Science, 2005, 9(4): 412-430
- [38] HOMME J, BOUVIER C, PERRIN J L Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments [J] Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4): 203-216
- [39] 王林, 秦其明, 李吉芝, 等. 基于 GIS 的城市内涝灾害分析模型研究 [J] 测绘科学, 2004, 29(3): 48-51 (WANG Lin, QIN Qiming, LI Jizhi et al Study on the disaster analysis model of waterlogging in city based on GIS [J] Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 48-51 (in Chinese))
- [40] 张书亮, 曾巧玲, 姜永发, 等. GIS 支持下的城市暴雨积水计算的可视化 [J] 水利学报, 2004(12): 922-981 (ZHANG Shuliang, ZENG Qiaoling, JIANG Yongfa et al GIS supported visualized calculation of urban retaining water due to rain storm [J] Journal of Hydraulic Engineering, 2004(12): 922-981 (in Chinese))
- [41] 赵东泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型 [J] 中国给水排水, 2008, 24(7): 88-91 (ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan et al Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS [J] China Water & Wastewater, 2008, 24(7): 88-91 (in Chinese))
- [42] 徐向阳, 刘俊, 郝庆庆, 等. 城市暴雨积水过程的模拟 [J] 水科学进展, 2003, 14(2): 193-216 (XU Xiangyang, LIU Jun, HAO Qingqing et al Simulation of urban storm water logging [J] Advances in Water Science, 2003, 14(2): 193-216 (in Chinese))

Review of urban storm water simulation techniques*

HU Weixian¹, HE Wenhua¹, HUANG Guoan¹, FENG Jie²

(¹School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

²Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract Urban storm water simulation techniques are reviewed in the context of hydrological processing. In spite of the fact that the established techniques for pipe network flow concentration have been made available, substantial improvements in the areas of runoff generation and overland flow concentration are clearly desirable. Viewing from the perspective of modeling approaches, the development has undergone from empiricism, conceptualization, to the newly emerged theorization. Both lumped and distributed techniques have been used for model developments and applications. Advantages and disadvantages of these modeling approaches are discussed by summing up the characteristics of representative models for urban storm water simulations, and the gaps in the modeling techniques between China and the world are pointed out. The review also involves discussions of data collection and management, which is important to the improvement of model performances. Finally, the main future challenges in urban storm water simulation are highlighted.

Key words urban storm water simulation techniques; overland flow concentration; pipe network flow concentration; RS; GIS

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Programme (No. 200801033)1