

基于 GI 措施的城市雨水管理模型评析

付恒阳^{1a,1b},李榜晏²,符 锦³

(1.陕西理工大学 a. 历史文化与旅游学院;b.秦岭与蜀道地理研究所,陕西 汉中 723000;

2.西安建筑科技大学 建筑学院,西安 710055;3.西安理工大学 艺术学院,西安 710048)

摘 要:鉴于模型应用的广泛性以及软件升级的可能性,评析了国内外近些年较为流行的 8 个基于绿色基础设施(GI)的城市雨水管理模型。分别从 GI 雨水水质和径流量控制、GI 经济效益分析、GI 雨水管理及经济分析集成模型 3 方面对模型进行分类;从 GI 实践的典型性、空间尺度、模型的算法、数据的输入和输出、用户界面和工具应用几个方面对模型进行详细阐释;从模型支持的 GI 类型、模拟方法、输入参数、模拟精度、应用范围几个方面比较了模型的不同属性;总结了几个典型模型在中国的应用情况,指出亟待解决的问题。针对目前模型的优缺点,提出未来雨水管理模型研发的方向和趋势。通过本研究,帮助城市雨水管理者和研究人员了解不同的基于 GI 措施的雨水管理模型的特征及用途,有助于他们在实践中根据自身需求恰当选用模型。

关键词:雨水管理模型;绿色基础设施(GI);径流量;经济效益分析;SUSTAIN 模型

中图分类号:X321

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2016)08-0011-07

1 研究背景

随着城市的快速发展,城区地表硬化面积在逐步扩大,而可用绿地空间在逐步减少。由于下垫面的改变和不透水面积的增加,改变了城市水循环系统,导致降雨时地表径流的增加和城市水体水质的污染^[1]。因此,为了改进地表环境同时实现对雨水的管理,近些年引入了绿色基础设施(GI)技术,并成为控制非点源雨水污染和自然环境恢复最有前景的方法^[2]。

广义上说,GI 是一个相互联系的绿地网络,旨在通过绿色基础设施的构建来突破传统生态保护的局限性,最终实现生态、社会、经济的协调和可持续发展^[3]。基于 GI 理念的城市雨水管理是利用城市湿地、生态蓄留池、生态廊道、绿色屋顶等具体技术与方法来实现对雨水径流的控制、净化和利用^[4],类似于低影响开发雨洪管理策略(LID)或城市降雨径流最佳管理措施(BMPs)。近期研究发现,利用 GI 措施进行径流及水质控制是雨洪管理的最有效方法之一,不仅可以改善城市水循环,而且可以提供其他重要的生态系统服务,包括节省能源、净化空

气、减少城市热岛效应、改善居民居住环境以及美化城市市容等^[5]。

有关雨水管理模型的评价已有文献报道,如王建龙等^[6](2010)介绍了基于低影响开发技术的雨水管理模型。而目前还没有针对 GI 雨水管理性能及 GI 成本效益分析的模型评价。鉴于模型应用的广泛性以及软件升级的可能性,本文选择了 8 个目前较为流行的基于 GI 的雨水管理模型,分别从 GI 措施的典型性、空间尺度、模型的算法、数据的输入和输出、用户界面和工具应用几个方面对这些模型进行详细描述,从模拟方法、数据要求、准确性和区域限制进行对比分析,并提出模型今后的发展方向。

2 GI 雨水水质和径流控制模型

2.1 P8 模型

P8(Program for Predicting Polluting Particle Passage through Pits, Puddles, and Ponds)是预测城市积水区径流产生和运移的一个模型^[7],主要用于评价 GI 措施对清除雨水径流中总悬浮固体(TSS)的性能。该模型可以模拟的 GI 措施有雨水花坛、自然渗滤池、下洼式绿地和植被缓冲带。近些年来,该模

收稿日期:2015-06-29;修回日期:2015-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51378423);陕西理工学院人才启动项目(SLGKYQD2-30)

作者简介:付恒阳(1975-),男,河南平舆人,讲师,博士,主要从事水资源管理方面的研究,(电话)15809165586(电子信箱)1051592191@qq.com。

通讯作者:李榜晏(1973-),男,陕西西安人,副教授,博士,主要从事园林规划及雨水管理方面的研究,(电话)18691614939(电子信箱)2045004123@qq.com。

型广泛应用于 GI 的初级设计^[8],适用范围多用于场地 GI 实践,有时也可以扩展到一个流域。

P8 的径流模拟算法源于许多其他流域模型,例如雨水管理模型(SWMM)、STORM 模型、水文模拟程序(HSPF)和 TR-20 等。可渗透区域的径流计算源于水土保持部门给出的径流曲线值方法,在洼地储水量已知情况下,不透水区域的径流量通过计算区域降雨量获得。

模型的主要输入参数是流域特征和 GI 设施、水质成分特征、降雨量(每小时的连续降雨量)和气温。输出结果以列表形式呈现,包括悬浮物去除效率、模拟前后径流量比较、沉积物堆积速率、流入或流出 GI 措施的各水质指标浓度平均值、时间序列图等。该模型应用程序用图表形式设计,方便用户使用,易于被相关研究人员进行二次开发。

2.2 城市暴雨管理模型(SWMM)

城市暴雨管理模型(EPA Stormwater Management Model, SWMM)是水资源管理研究人员应用最广的径流模拟工具之一,该模型能够评价多种 GI 措施,如透水铺装、雨水花园、屋顶绿化、街道植被渗透带、砾石滞留池、下洼式绿地等。该软件应用空间较广,小到一个场地,大到一个流域。在模拟 GI 措施对降雨径流的作用时,该工具采用了子流域为基础的方法,其原理是雨水产生的径流被分流到类似于存储器或水处理设备的不同 GI 措施中^[9]。

SWMM 主要由 4 个模块组成,分别是径流模块(Runoff Block)、输送模块(Transport Block)、扩展的输送模块(Extended Transport Block)、调蓄/处理模块(Storage/Treatment Block),每个模块用于模拟 GI 作用下水文循环的不同阶段^[10]。4 个模块都可以模拟 GI 对雨水径流的滞留过程,同时 S/T 模块还可用于模拟多种 GI 的水质改善过程。该模型在模拟 GI 的雨水水质管理中采用了一阶衰变,其中运移模块采用沉降速度来模拟悬浮固体的沉降过程。

SWMM 要求的输入参数包括流域面积、流域宽度、子流域坡度、降雨数据、不透水面积占汇水区的百分比、透水区和不透水区内洼地的储水量。另外,在模拟 GI 对雨水径流管理的有效性时,还要输入 GI 的尺寸大小。导入数据后,模型会输出一个报告文件,详细描述模拟的状态。模型还利用输出的报告文件创建时间序列图表,并统计、分析模拟结果。该模型具有用户友好型图形界面,通过导入 CAD 或 GIS,使研究区更具可视化,不足之处是 SWMM 软件应用时需要使用者具备有关水文建模的基本知识,这限制了该软件只适用于特定用户组^[11]。

3 GI 经济分析模型

3.1 GI 评估工具包

GI 评估工具包(The Green Infrastructure Valuation Toolkit)是一个基于 Excel 的电子表格工具,通过计算 GI 覆盖的土地面积或绿地空间,可以得出不同 GI 的经济效益。该工具有助于在现有的 GI 措施中挑选最佳方案,同时也可以比较 GI 方法相对于传统雨水管理方法的优势。该模型针对的用户群体是城市雨水管理者、相关研究人员和其他对 GI 投资感兴趣的利益相关者。GI 评估工具包和其他模型之间的差别是该模型不仅可以计算 GI 带来的雨水管理经济效益,而且还可以评估 GI 产生的其他社会效益,包括缓解气候变化、提高社区福祉、提高土地利用价值、减少投资、提高劳动生产率、旅游、休闲和提高生物多样性等^[12]。

计算 GI 的不同成本及效益时采用现行的市场价值,若无法获得市场价值时,则使用非市场价值(如在用价值)替代。对 GI 的经济效益评估方法有多种,如价值评估、享乐定价、旅游成本法、效益转移法,具体现值法等。

模型所需的主要输入参数是 GI 覆盖的土地面积和模拟场地的植被类型等。将计算得出的各种经济利益累加起来作为最终效益。由于该模型设计简单和具有方便使用的电子表格工具,比较适用于 GI 的成本和效益分析。

3.2 WERF 模型

WERF(Water Environment Research Foundation BMP and LID Whole Life Cycle Cost Modeling Tools)模型包含一组 Excel 电子表格,这有利于对 GI 雨水管理中整个生命周期的成本评估。该模型可以模拟与 GI 有关的资本支出、运营及维护成本,且可以模拟多种 GI 措施,包括自然排水系统、砾石滞留带、下洼式绿地、透水路面、屋顶绿化、雨水花园、多功能蓄水池、生态草沟等。WERF 模型主要适合于 GI 规划阶段的成本估算^[13],模型的 GI 成本细节源自文献、访谈和专家评价。不过,当获得某个区域的特定数据时,用户可以修改成本分析的默认值。

使用该工具时,要求用户输入研究场地的基本信息,如 GI 的大小、排水区、GI 类型等。通过对 GI 的建设、运行和维护整个生命周期成本评估后,模型会给使用者提供一个成本总结。此外,该工具为用户提供了在规划和设计阶段进行 GI 成本敏感性分析的机会。WERF 模型的另一个重要特点是模型输

出结果以现值图形式呈现,包括:年度费用支出的现值、累计折扣费用和随时间变化的贴现成本^[14]。用于模拟GI的WERF模型配备了数据输入接口,且以Excel电子表格的形式呈现,以便于不同层次的用户操作。

4 GI雨水管理及经济分析集成模型

4.1 MUSIC模型

MUSIC(Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization)模型是一个GI规划和设计工具,该工具用于评价不同GI在改进雨水径流水质方面的性能以及对GI的经济效益分析。为了实现利用生命周期成本评价来选择最佳GI方案以达到削减雨水径流量目标,该模型允许用户设计流域的径流水质和不同GI的径流水质改良性能。MUSIC可以在0.01至100 km²之间的应用范围内操作^[15],并支持多种GI措施,如生物滞留系统、砾石渗滤系统、雨水花园、植被缓冲带、下洼式绿地、生态沉淀池、生态草沟、人工湿地和自然排水系统等。

MUSIC的模拟算法是对SimHyd模型的修订,即将后者的日径流量计算分解成每日的子时间径流量来计算,不透水区和透水区生成的径流分别在MUSIC中模拟,污染物生成的模拟采用干湿平均浓度的随机方法^[16]。GI生命周期成本数据源于澳大利亚不同城市的雨水管理者,这些数据通过回归和统计手段作进一步分析,进而得到不同GI的一系列成本核算数据。

MUSIC模型内置有澳大利亚50个地区的气象数据,用户在使用该模型时还必须获得所研究区域的气象数据。其输入参数有流域特征(包括不透水面积和土地利用状况)、GI设计规范(如GI类型、大小、面积等)。模型的输出结果是径流减少量、污染物的去除效率、不同GI的生命周期成本等。输出结果通过时间序列图、表格静力图和累积频率曲线图显示出来^[17]。该工具专门为具备雨水管理技术知识的专业人士设计,针对的用户群体包括城市雨水工程师、城市规划者、政府工作人员、以及国家和区域的政府机构。

4.2 SUSTAIN模型

SUSTAIN(EPA System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration)模型是美国环保局研发的一个基于ArcGIS的决策支持系统,该系统用于帮助水资源管理专业人员进行雨水管理规划的设计和实施,以保护水资源和满足流域水质要求。

该模型也包括GI的雨水管理模拟,并允许用户基于环保和经济视角进行最优化设计。SUSTAIN模型包括5大功能模块:用地产流模块、BMPs模拟模块、径流输送模块、优化模块和后处理模块^[18]。当前SUSTAIN模型支持的GI措施包括生物滞留带、砾石滞留滤池(地表和非地表)、生态蓄水池、人工湿地、下洼式绿地、绿色屋顶和透水路面等。

成本估算和成本优化模块是SUSTAIN软件雨水管理中GI经济效益分析的2个主要组成部分^[19]。成本估算模块中的成本数据直接从工业方面获得,计算中采用单位成本法以尽量减少由于考虑GI建设成本所导致的错误。优化模块采用分层方法分析单个和综合GI的成本效益,其中优化决策标准是用户自定义的,为了满足该标准,模型采用了非支配排序遗传算法等先进的优化技术。为得到预期的水质和水量控制目标,该模块会生成一个最佳成本效益曲线。

模型所需的输入参数是土地使用数据、流域数据,以及不同GI的设计细节。输出结果为不同GI改善径流水质和减少径流量的效果。该模型可评估为了达到水质和水量控制目标,所采取GI的最佳布局、类型和费用,有助于根据不同GI的成本效益挑选最佳的GI方案。由于SUSTAIN模型集成了GIS数据分析,使得模型的输入参数要求更全面,并且复杂程度更高,因此,终端用户需要有足够的雨水管理知识和GIS应用知识^[20]。应用范围上,该模型主要适用于在环境 and 经济方面精度要求较高的大型项目。

4.3 WinSLAMM

WinSLAMM(Source Loading and Management Model for Windows)最初是用来研究城市雨水径流污染物与径流量之间关系的一种模型。随着GI作为雨水源头控制方法的进展,该工具添加了GI性能模拟模块和模拟不同GI的生命周期成本模块,这些GI措施包括生物过滤池、生态滞留池、下洼式绿地、生态草沟和透水路面等^[21]。该工具支持不同空间尺度的GI模拟,如场地、流域和区域范围。

WinSLAMM可以评价一系列的城市降雨事件,并综合考虑了土壤对城市雨水径流的影响。该模型根据使用的GI类型和场地特点可以评价城市受纳水体的水质,另外,不同GI的成本明细通过模型操作直接获得。当需要对雨水径流作详细分析时,WinSLAMM可以集成其它的水文模型。

该模型输入参数是实地测量得到的数据,如GI面积和流域特点、研究区域固体污染物等。输出数

据是 GI 实施前后径流量和水质的差异、总控制成本、土地成本、每年的维护费用、所有费用的现值以及年均成本。该模型重要特征之一是输出的结果可以被导入到其他模型中,也可以集成到 GIS 平台中。在操作该模型时,要求用户具有城市水文和雨水管理的基本知识。

4.4 LIDRA 模型

LIDRA (Low-Impact Development Rapid Assessment) 是一种通过水文模型和成本核算方法来评估不同 GI 成本效益的工具。该模型可以模拟超过 30 种不同的 GI 措施,最重要的是,该工具内置有生命周期成本数据库,利用分阶段的生命周期成本算法实现对各种 GI 的成本效益分析^[22]。LIDRA 是基于 Web 的在线评估工具,可以实现流域尺度的 GI 规划^[23]。

该模型包含一个随机降雨生成模式,径流量计算是基于一个水量平衡程序,降雨数据是通过马尔可夫链从历史降雨数据库中随机生成,再用 Thornthwaite-Mather 水平衡方法计算 GI 实施前后中雨水径流量的不同^[24]。经济分析方面,该模型采用了 30 a 的生命周期成本算法,记录了 GI 投入、运营和维护成本^[25]。

LIDRA 模型的主要输入参数是每小时的降水数据、区域特征、土地利用数据、土壤类型,以及 GI 的具体数据。模型输出结果是每年雨水径流的减少量、GI 的年度或累积成本、不同 GI 的成本效益对比。LIDRA 是一个基于 Web 的在线程序,具有用户友好型界面,适用于不同层次的用户。

5 模型对比分析

5.1 模型支持的 GI 类型

不同的模型支持不同的 GI 类型,对于用户来说,挑选模型时要了解每种模型支持的 GI 类型。上文讨论的模型有些可以模拟多种 GI 措施及其经济特征,而有些模型却有一定的局限。比较而言,LIDRA 支持的 GI 类型数量最多,可以模拟超过 30 种 GI 措施。GI 评估工具包、SWMM、WERF 模型、SUSTAIN 模型、MUSIC 模型和 WinSLAMM 可以模拟雨水花园、绿色屋顶、透水铺装、生态渗滤池和滞留池、下洼式绿地等多种 GI 类型,而 P8 模型只能模拟生态滞留池和下洼式绿地等少数 GI 措施。

5.2 模型的输入参数

几乎所有工具都需要输入气象数据、土壤剖面以及土地利用数据。与需要较多输入参数的

SWMM 相比,P8 模型、LIDRA 模型和 WinSLAMM 要求的输入参数较少,且这些模型需要的大部分参数可以从相关文献、市政排水规划、地方议会资料或土地调查中获得,但这些模型适用于 GI 的初步规划而不是详细设计。

由于 MUSIC 模型把内置的区域具体参数,包括气候数据、土壤类型、导水率等作为默认值,故它们对雨水径流模拟时输入参数的要求也较低。由于 SUSTAIN 模型集成了一个 GIS 接口,因此使用时要求输入一些基于 GIS 的参数,如流域信息、土地利用、土地覆盖、以及数字高程等。

对于成本参数,MUSIC、WERF、SUSTAIN、LIDRA 和 GI 评估工具包内置有输入数据库,这使得对 GI 实践的经济分析更加便捷。不过,当需要更具体的评价时,用户自定义的输入成本参数也可以供这些模型使用。

5.3 模拟方法

在上文挑选的 8 个模型中,除了 WERF 和 GI 评估工具包之外,其他模型都是通过模拟由降雨产生的径流来评估 GI 的性能。P8 模型和 LIDRA 模型的时间步长为 1 h,而 SWMM、SUSTAIN、MUSIC 和 WinSLAMM 的时间步长可以是 1 h 或 0.5 h 或更短。

在经济效益模拟方面,GI 评估工具包通过复杂的经济定价和评估方法计算 GI 累计成本效益,而 MUSIC、LIDRA 和 WERF 可以计算 GI 生命周期成本,且这些模型中还内置了有关 GI 的建设、维护和运行成本数据库。

5.4 模拟精度

不确定性是任何模型都不可避免的一个属性,不确定性对模拟结果的有效性有显著影响。然而,通过对模型的校准和验证,可将不确定性减少到一定程度。就模拟精度方面,SWMM 和 WinSLAMM 作为详细的设计工具,准确性相对较高。其中 WinSLAMM 内置有蒙特卡罗抽样程序,该程序以概率表示模型输出,减少了模拟结果的不确定性。另外,文献研究表明,当对 SWMM 进行校准和验证后,可以产生相当精确的结果。

P8 模型和 LIDRA 模型对输入参数要求不高,参数的变化显著影响这些工具的模拟结果,故这些模型精度不高,比较适用于 GI 的初步规划;SUSTAIN 模型采用综合方法来模拟较大规模的分散式 GI 措施,虽然这种方法可以减少计算时间,但可能会增加模型输出结果的不确定性;由于 MUSIC 模型缺少 GI 尺寸设计的算法工具,故该模型只能是相对精确的方案设计工具。

WERF 和 GI 评估工具包内置的成本数据库只是一个供参考的数据集,故在不同的应用中精度有限,因此,用户需要做大量调查以确定所需的成本数据,才能获得更准确的结果。GI 评估工具包虽具有成本和效益双重分析的优势,但可能会增加模拟结果的不确定性。

5.5 区域应用局限

虽然上述模型可用于 GI 的雨水管理模拟,但制约其应用的局限之一是大多数模型只针对一个特定国家或地区设计,且大多数模型内置的数据库都有区域性,故很少有工具可以广泛适用于其他区域。

P8 模型是美国罗得岛州流域雨水管理工具。因此,除了本区域之外,该工具应用的范围有限,仅仅适用于一些特定区域。MUSIC 由于内置有美国气候数据,因此是美国 GI 雨水管理模拟最受欢迎的工具。不过,英国目前已经成功研发出适合于英国背景的 MUSIC 模型。

WERF, SUSTAIN 和 LIDRA 内置有特定背景的数据库,但用户可以根据需要,输入自己的数据,灵活使用这 3 个模型。GI 评估工具包由英国研发,但也可以在其他区域使用。WinSLAMM 最初在北美研发,最近应用范围扩展至其他国家。在上述模型中,SWMM 应用范围最广,该模型只要输入必要的参数,可以应用于任何国家和地区。

6 基于 GI 的雨水管理模型在中国的应用

我国对城市雨洪径流模型的研究起步较晚,随着低影响开发雨洪管理策略(LID)、水敏感性城市设计(WSUD)、城市降雨径流最佳管理措施(BMPs)等雨洪管理技术的引进和推广,我国一些学者在降雨径流管理规划中也开始尝试借鉴国外先进的雨水管理模拟工具,目前已有一些结合我国实际的研究成果问世。在上述模型中,我国应用最多的是 SWMM 和 SUSTAIN 模型。

6.1 雨水管理模型(SWMM)在中国的应用

SWMM 于 20 世纪 70 年代成功研发,随后引入我国并被广泛应用。首先是利用该工具作案例研究。如河海大学和南京水文水资源研究所在天津市雨洪分析中引入 SWMM,证明了该模型在雨洪管理方面的有效性。刘俊等^[26](2001)、丛祥宇等^[27](2006)、任伯帜等^[28](2006)、董欣等^[29](2006)、黄卡等^[30](2008)分别利用 SWMM 模拟了天津、北京、长沙、深圳和广州个别区域的降雨径流过程,分析了

下凹绿地、绿色屋顶、植草沟和透水铺装等 GI 措施对暴雨径流的消减效果。其次是对 SWMM 的改进和二次开发。清华大学城市规划与设计研究院将 GIS 技术与 SWMM 整合,研发了新一代的城市内涝模拟模型——Digital Water Drainage System。赵冬泉等^[31](2008)、黄国如等^[32](2011)、孟超等^[33](2012)、郑磊等^[34](2013)通过 SWMM 模型与 GIS 平台的集成,提取土地利用的空间结构和属性数据,使 SWMM 具有更好的精度、适用性和可靠性,不仅可以实现雨水管理的模拟分析,同时有助于 GI 的设计与评估。袁显贵^[35](2014)利用 GIS 提取雨水管网设计的水文参数,通过 C#编程语言、NET 平台下的 SWMM Engine 与 ArcGIS Engine 组件的耦合,构建了雨水管网设计模型 ArcSWMM,从而不依赖取值经验进行赋值,使模型更为接近真实。

6.2 SUSTAIN 模型在中国的应用

唐颖^[36](2010)借助 SUSTAIN 模型,在 ArcGIS 平台下进行 GI 的选址和布局,并通过 SUSTAIN 系统对不同 GI 方案进行经济分析,即不同 GI 措施给区域降雨径流控制带来的效益,从而制定最优的降雨径流控制管理规划方案。唐颖通过对该模型的结构、模块功能、模拟算法等进行梳理,识别其在城市降雨径流管理规划各个阶段所能起到的辅助作用和前端输入需求,并对其中的封装参数进行修改,实现了模型利用本地化。

陈彦熹^[37](2013)利用 SUSTAIN 模型,在获得模型基本输入数据要求前提下对研究区域进行下垫面和雨水管网的概化,建立了研究区域基于 SUSTAIN 的径流模拟和 GI 布局模型。通过模型的情景分析方法对雨水罐、绿色屋顶、植物过滤带和生物蓄留池等多个 GI 布局进行模拟分析和功效评价。

由于基于 GI 的 SUSTAIN 模型操作较为复杂,要求 SUSTAIN 模型使用者深入理解不同 GI 的机理,并熟悉模型率定和验证的操作过程,这无疑阻碍了该模型在我国雨洪管理中的推广与应用。

6.3 模型在中国应用的现存问题及解决对策

我国对城市雨水径流模型的研究起步较晚,目前尚处于起始阶段,尚未形成系统的城市雨水生态管理的理论、方法与规划体系。整体而言,存在以下主要问题:

(1) 基于 GI 的雨水径流控制模型在我国的应用还仅限于某些城市的局部地区,应用范围小,对国外先进技术支持的 GI 规划和设计工具应用水平较低或没有应用,造成了工程中模型实际应用的效果并不明显。

(2) 很多雨水径流模拟工作都是单纯地套用国外模型,对研究区域进行概化,脱离了研究区域土地利用的实际情况,缺乏实测监测数据验证,导致模拟结果失真^[38]。

(3) 缺乏适用于我国国情的基于 GI 的全面的雨水管理设计规范和标准,雨水管理设计和研究人员找不到相关依据,给模型的实际运用带来诸多困难。

因此,在借鉴国外雨水管理先进模型基础上,需要对我国城市降雨径流控制和管理进行深入研究,建立适用于我国城市特征的雨水管理体系,以降低城市降雨径流的洪涝和雨水污染问题。

具体建议有:

(1) 模型研究方面。模拟研究需要结合我国研究区域土地利用的实际规划情况,开展相应的基于 GI 实践的雨水管理模型研究及模型评估;结合 GI 措施研发易于使用的决策支持工具,研发雨水径流控制模型、水质预测模型、经济分析模型、环境风险分析模型、管网模型和各种业务管理系统充分集成的城市雨水综合管理系统。

(2) 技术标准方面。应在充分借鉴国外应用案例和标准的前提下,结合国内的实际情况,考虑经济条件和环境状况的差异,加快制定适合我国国情和不同城市特点的 GI 技术标准。参照国外雨水径流管理数据库,建立我国自己的雨水管理实践数据库,以便更好地服务于我国城市雨洪的管理和规划。

(3) 技术实践方面。因地制宜,根据地区条件选择适宜的 GI 技术,科学、合理地利用国内外先进模型,并及时总结经验和不断调整,实现模型的本地化和性能优化。

7 结论和展望

本文评析了目前较为流行的 8 个基于 GI 的雨水管理模型,详细描述了它们的性能和优缺点。P8 模型和 SWMM 多用于雨水水质和径流量控制,GI 评估工具包、WERF 多用于 GI 的经济分析,MUSIC, SUSTAIN, WinSLAMM 和 LIDRA 支持雨水径流和水质控制以及 GI 的经济分析。从 GI 类型方面, LIDRA 支持的 GI 类型最多;从模拟精确性上比较, SWMM 在模拟雨水水质、水量和 GI 性能方面更加精确;应用范围上,与其他模拟工具相比,SWMM 应用范围较广,且适合于包括 GI 详细设计的较复杂的大型项目。多数模型的共同特点是应用的区域局限性。由于模型的局限性和我国城市雨水管理自身的复杂性,我国在借鉴国外基于 GI 的雨水管理先进模

型的应用类型和范围有限。

尽管上述模型都很强大,且多是用户友好型的,未来研究中仍有许多问题和挑战需要解决,包括输入参数的要求、区域局限性和模拟结果的不确定性。所以,提高精确性和普适性仍是未来基于 GI 的雨水管理模型研发的方向。同时,在模拟过程中,应更多地将其纳入考虑范畴:利益相关者的集体参与、模型驱动的决策支持系统、与 3S 技术的充分集成、基于不同目标的最优化模拟以及增加模型耦合的性能。再者,模拟工具应与最新的技术如信息化平台、实时控制相兼容;应集成不同的模型优点,提高模型的模拟结果;应建立全球共享的数据库以方便不同区域的相关者使用;就我国而言,应在借鉴国外先进技术的基础上,自主研发能够真正满足我国各地需求并适应我国国情的城市雨水管理与评估模型。

参考文献:

- [1] 肖 洋.基于景观生态学的城市雨洪管理措施研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [2] 张 伟,车 伍,王建龙,等.利用绿色基础设施控制城市雨水径流[J].中国给水排水,2011,27(4):22-27.
- [3] 周艳妮,尹海伟.国外绿色基础设施规划的理论与实践[J].城市发展研究,2010,17(8):87-93.
- [4] 姜宁宁.基于绿色基础设施理论的城市雨洪管理研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.
- [5] 吴晓敏.国外绿色基础设施理论及其应用案例[J].风景园林管理与工程,2010,16(2):1034-1038.
- [6] 王建龙,车 伍,易红星.基于低影响开发的雨水管理模型研究及进展[J].中国给水排水,2010,26(18):50-54.
- [7] WALKER W W J. P8 Urban Catchment Model User's Guide[R]. USA: USEPA, Minnesota PCA & WISCONSIN DNR, 2007.
- [8] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A Review of Models for Low Impact Urban Stormwater Drainage[J]. Environmental Modelling & Software, 2007,22(3):394-405.
- [9] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual (Version 5.0) [M]. Washington D.C: US Environmental Protection Agency, 2010.
- [10] TSIHRINTZIS V A, HAMID R. Runoff Quality Prediction from Small Urban Catchments Using SWMM[J]. Hydrological Processes, 1998, 12:311-329.
- [11] ABI A M, SUIDAN M, SHUSTER W. Modelling Techniques of Best Management Practices: Rain Barrels and Rain Gardens Using EPA SWMM - 5 [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15:434-443.
- [12] EVANS B, CROOKES L, COAFFEE J. Obesity/fatness and the City: Critical Urban Geographies[J]. Geography Compass, 2012, 6:100-110.
- [13] Water Environment Research Foundation. User's Guide to the BMP and LID Whole Life Cycle Cost Modelling Tools (Version 2.0) [M]. New York: Water Environment Research Foundation, 2009.

- [14] HOUDSHEL C, POMEROY C, HAIR L. Cost Estimating Tools for Low-impact Development Best Management Practices: Challenges, Limitations and Implications[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2010, 137(3):183-189.
- [15] WONG T H, FLETCHER T D, DUNCAN H P. A Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation[J]. Global Solutions for Urban Drainage, 2002, 6:8-13.
- [16] DOTTO C, KLEIDORFER M, DELETIC A. Performance and Sensitivity Analysis of Stormwater Models Using a Bayesian Approach and Long-term High Resolution Data [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26: 1225-1239.
- [17] WONG T H, FLETCHER T D, DUNCAN H P. Modelling Urban Stormwater Treatment—A Unified Approach[J]. Ecological Engineering, 2006, 27:58-70.
- [18] LAI F H, DAI T, ZHEN J. SUSTAIN: An EPA BMP Process and Placement Tool for Urban Watersheds[R]. Alessandria: Water Environment Federation, 2007.
- [19] LAI F H, SHOEMAKER L, ALVI K. Current Capabilities and Planned Enhancements of SUSTAIN, 2010 [C] // World Environmental and Water Resources Congress. Washington D.C.: US Environmental Protection Agency, 2010:3271-3280.
- [20] LEE J G, SELVAKUMAR A, ALVI K. A Watershed-scale Design Optimization Model for Stormwater Best Management Practices[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 37:6-18.
- [21] PITT R, VOORHEES J. WinSLAMM and Low Impact Development. Putting the LID on Stormwater Management [M]. Maryland: University of Maryland College Park Press, 2004.
- [22] SPATARI S, YU Z, MONTALTO F. A. Life Cycle Implications of Urban Green Infrastructure[J]. Environmental Pollution, 2011, 159:2174-2179.
- [23] MONTALTO F A, BEHR C T, YU Z. Accounting for Uncertainty in Determining Green Infrastructure Costeffectiveness. Economic Incentives for Stormwater Control[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012:71-100.
- [24] AGUAYO, M. Development of a Database and Website for Low Impact Development Rapid Assessment Tool(Version 2.0) [D]. Philadelphia: Drexel University, 2010.
- [25] YU Z, AGUAYO M, PIASECKI M. Developments in LIDRA 2.0: A Planning Level Assessment of the Cost-effectiveness of Low Impact Development [C] // Proceedings of the ASCE Environment and Water Resources Institute Conference. Providence, Rhode Island, May 16-20, 2010:355-368.
- [26] 刘俊,徐向阳. 城市雨洪模型在天津市区排水分析计算中的应用[J]. 海河水利, 2001, (1):9-11.
- [27] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 基于SWMM的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(4):64-67.
- [28] 任伯帜,邓仁健,李文健. SWMM模型原理及其在霞凝港区的应用[J]. 水运工程, 2006, (4):41-44.
- [29] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. 环境科学, 2008, 29(6):1495-1501.
- [30] 黄卡,张翔,李鹏. SWMM模型在城市设计洪水中的应用研究[J]. 企业科技与发展, 2008, (10):214-216.
- [31] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆元,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.
- [32] 黄国如,黄晶,喻海军,等. 基于GIS的城市雨洪模型SWMM二次开发研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4):43-45.
- [33] 孟超,杨昆. SWMM模型与GIS集成技术研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(10):6286-6298.
- [34] 郑磊,杨雪婷,葛银杰. SWMM模型及GIS的系统整合实现[J]. 中国科技信息, 2013, 32(3):76-77.
- [35] 袁显贵. 基于GIS的SWMM模型在新城区雨水管网设计中的应用研究[D]. 江西赣州:江西理工大学, 2014.
- [36] 唐颖. SUSTAIN支持下的城市降雨径流最佳管理BMP规划研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [37] 陈彦熹. 基于LID的城市化区域雨水排水系统规划方法研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [38] 刘文,陈卫平. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):1901-1912.

(编辑:黄玲)

Review of Urban Stormwater Management Models Based on GI Measures

FU Heng-yang^{1,2}, LI Bang-yan³, FU Jin⁴

(1.School of History and Tourism, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong 723000, China;

2.Qinling and Intones Geography Research Institute, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong 723000, China;

3.School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

4.School of Art, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In consideration of the application universality of models and the upgrading possibility of softwares, we make a review on eight urban stormwater management models based on green infrastructure (GI) measures. These models have been applied widely in recent years. Firstly, the eight models are classified in terms of the rain and

(下转第27页)