

基于 Cesium 的城市内涝模拟三维可视化方法

章 旭^{1,2,3}, 沈 婕^{1,2,3}, 周 卫^{1,2,4}, 杜毅贤^{1,2,3}, 徐家鹏^{1,2,3}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(3. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(4. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 针对城市内涝研究中存在的问题, 通过分析水文模型数据中的关系模式及结构特征, 研究水文模型与三维可视化结合的集成方法, 探索城市内涝演化过程及机理与三维可视化的结合。基于 SWMM 模型, 利用开源的 JavaScript 地图引擎 Cesium, 将内涝模拟结果展示在三维场景中, 设计实现了模拟参数可调的城市内涝三维可交互式可视化系统。

[关键词] 城市内涝, SWMM, Cesium, 三维可视化, WebGIS

[中图分类号] P28 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)03-0065-06

Study on Urban Waterlogging Simulation and Visualization Method Based on Cesium

Zhang Xu^{1,2,3}, Shen Jie^{1,2,3}, Zhou Wei^{1,2,4}, Du Yixian^{1,2,3}, Xu Jiapeng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Centre for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(3. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(4. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper attempts to analyze the relationship patterns and structural features in hydrological model data, study the interactive method of hydrological model and 3D visualization, and explore the method of combining waterlogging evolutionary processes and mechanisms with 3D visualization. This paper uses the open source JavaScript map engine Cesium to display the waterlogging simulation results in a 3D scene based on SWMM, and implements a three-dimensional interactive visualization system for urban waterlogging with adjustable simulation parameters.

Key words: urban waterlogging, SWMM, Cesium, 3D visualization, WebGIS

20 世纪 60 年代开始, 西方国家研制了一系列的暴雨模型, 例如美国环保署提出的 SWMM 模型^[1], 英国 Wallingford 软件公司推出的 Infoworks CS 模型^[2]、SLAMM 模型^[3], 丹麦水力学研究所提出的 MOUSE 模型、MIKE11 模型^[4]和 MIKE21 模型^[5], 美国陆军工程兵团研发的 STORM 模型, 美国地质勘察局提出的 DR3M-QUAL 模型^[6]等。在国内, 也有专家自主研发出了有效的城市内涝模型: 岑国平等^[7]基于降雨汇流和管网汇流的计算方法, 研究构建了城市雨水径流计算模型(SSCM); 仇劲卫等^[8]基于二维非恒定水力学模型, 开发研制了天津市暴雨内涝仿真模拟系统, 实现了地面积水和管网水流结合的过程模拟; 周玉文等^[9]设计提出了基于城市排水系统的非恒定流模拟模型, 该模型能够对超载情况下的城市排水系统进行模拟计算。SWMM 等模型模拟的特点是可以量化评估分析城市内涝问题, 模型模拟可以反映出城市内涝的发生发展过程, 但对于用户尤其是非专业用户来说, 模型计算过程原理难以理解, 黑箱模型的模拟结果只是数字, 并不能直观地展现模拟的过程及结果。

随着可视化技术与 WebGIS 的发展, 以及三维可视理论的不完善, 基于 WebGIS 的三维可视化方法

收稿日期: 2019-11-02.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0131600)、国家自然科学基金项目(41871371、41671457)。

通讯作者: 沈婕, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 地图自动综合高性能计算、面向移动地图表达的动态地图综合、面向灾害与预警管理的动态地图制图。E-mail: shenjie@njnu.edu.cn

已成为研究城市内涝的一个重要方向. 三维可视化技术可在一定程度上重现事件的过程,使用户在三维场景中对城市内涝灾害进行研究,以实现对内涝过程的控制. Cesium 是一个能够在 Web 浏览器中创建三维地球及二维平面地图的 JavaScript 开源库,拥有开发效率高、易扩展、实时性好等优点.

本文基于 Cesium 平台,分析城市内涝的发生发展过程,利用 SWMM 模型模拟计算引擎,将水文模拟计算与三维可视化平台相结合,研究基于 SWMM 模型的城市内涝模拟与可视化方法,并设计实现面向城市内涝的三维可视化系统,解决了内涝模型的结果展示不直观、信息共享能力差等问题.

1 Cesium 可视化引擎

基于 Web 端的三维可视化的方法主要包括两大类:基于浏览器插件的可视化方法和基于 WebGL 的可视化方法. 基于浏览器插件的可视化要求对浏览器安装特定的插件以实现可视化渲染,如 Flash、java3D 等. 这类方法需将三维数据转换为相应支持的格式,再利用插件实现三维应用程序的构建. 基于 WebGL 的可视化无需安装任何插件,通过 HTML 控制三维渲染. 随着 WebGL 的不断发展,大量基于 WebGL 的开源引擎也出现并投入实际应用,如 Three.js、Cesium.js、Webglearth 等. 其中,Cesium.js 除了 WebGL 的硬件加速外,还具有丰富的展示特性和扩展、便捷的测试平台、详细的 API 文档说明等优势,运行不需要浏览器的任何插件支持,仅要求浏览器支持 WebGL 功能. Cesium 可便捷地访问地理数据,且访问方式均符合行业标准,所支持的地图数据服务和数据格式十分丰富.

2 Cesium 可视化平台与 SWMM 模型的集成方法

将 SWMM 模型集成到 Web 端并进行可视化,具有成本低、跨平台、用户广、展示直观等优势. SWMM 模型与 Cesium 可视化引擎的集成过程首先需考虑 SWMM 模型和 Cesium 的空间参考的一致性;其次需考虑模型数据与 Cesium 的通信问题,即数据互操作方法;最后需解决 SWMM 计算引擎在 Cesium 平台的接入问题.

2.1 空间参考转换

空间参考也即坐标系. 常用的坐标系包括大地坐标系和直角坐标系. Cesium 坐标系基于 WGS84 地理坐标系. SWMM 模型运行的坐标系一般基于平面坐标系,本研究中 SWMM 模型的数据输入基于地方坐标系. 在集成中必须保证空间参考的一致性,转换过程主要涉及参数拟合和坐标正反算问题. 地方坐标系与 WGS84 之间的转换参数未知,可利用同名控制点求解转换模型.

2.2 SWMM 模型地理空间数据集成

SWMM 模型数据要在 Cesium 平台实现可视化,需将 SWMM 模型数据转换为 Cesium 可视化可直接使用的数据交换格式. SWMM 中的数据大多为地理空间数据,包括管点、管道、汇水区等. 地理数据中的矢量数据一般为原生的数据,可在 Web 端自动实现符号化或存储在数据库中. 管点等矢量数据可利用 GeoJSON 等格式在 Web 表达,即将模型文件、报告文件等相关数据以 GeoJSON 格式组织为交换数据. GeoJSON 是一种基于 JSON 的地理空间数据交换格式,它定义了一些不同类型的 JSON 对象及组织方式,用于表达地理特性、属性和空间范围,其地理坐标参考采用 WGS84.

数据集成包括空间信息和属性信息,其坐标信息数据来源于 shape 数据,属性数据来源于 shape 数据和模型模拟的相关文件. shape 数据和 GeoJSON 都是地理空间地理数据,所含内容几乎相同,即点、线、面等对象的坐标、属性等,shape 数据转换成 GeoJSON 可通过 GDAL 中的 ogr2ogr 实现. 模型文件为文本文件,需对其所包含的与模拟有关的属性数据进行信息抽取.

GeoJSON 作为轻量级的数据传输格式,适用于快速实现地理空间数据到 Web 端的传输. Cesium 中可直接返回 GeoJSON 格式文件作为可视化数据的来源,并通过 Cesium.GeoJsonDataSource.load 函数将 GeoJSON 数据加载到三维地球中,通过上述方式即可实现模型空间数据在可视化平台的集成.

2.3 计算集成

(1) SWMM 模型原生接口分析

SWMM 模型在调用时主要提供 3 个数据接口:工程文件、报告文件及输出文件.

工程文件为文本文件(inp),包括模型模拟计算所需的数据及与模拟相关的设置. 工程文件按节组

织,不同的节对应不同对象的不同属性。

报告文件为文本文件(rpt),是在 SWMM 执行模拟计算后产生的文件。报告文件主要内容为执行结果的状态报告,具体包含内容可在工程文件中的一节[REPORT]中进行设置。

输出文件为二进制文件(out),主要为 SWMM 模拟的数值结果。SWMM 软件用户界面中的部分统计分析功能及图表的绘制一般均基于二进制结果文件进行。

(2) 基于 Python 封装的 SWMM 计算引擎

基于 Python 封装的计算引擎包可用于加载和操作 SWMM 模型,优化相关参数,控制和处理输出结果。模型的操作主要通过 swmm_run、swmm_start、swmm_end、swmm_report 等函数实现,利用这些函数实现后台计算引擎的调用。具体的实现是在 SWMM5 扩展 API 函数的基础上创建一个模型模拟的 Python 接口,支持的功能包括:访问控制 SWMM5 数据模型、模拟内涝过程、生成报告文件及结果文件等。

(3) SWMM 计算引擎与可视化平台的接入

将封装的 SWMM 计算引擎接入到三维可视化平台的思路如图 1 所示。首先利用 Python 封装的 SWMM 引擎作为系统的后台,在模拟计算时需以生成的工程文件去调用该引擎。Web 端界面有 SWMM 模型参数调整窗口,当需要修改模型参数时,用户可在参数调整窗口输入信息,后台则根据输入的信息对工程文件进行修改并生成新的 inp 格式文件,重新模拟时以新的工程文件去调用计算引擎,生成报告文件和结果文件供用户下载。同时,系统会根据生成的报告文件中的相关模拟结果信息,将模拟结果与 Cesium 可视化功能相结合,实现模拟结果的直观展示。

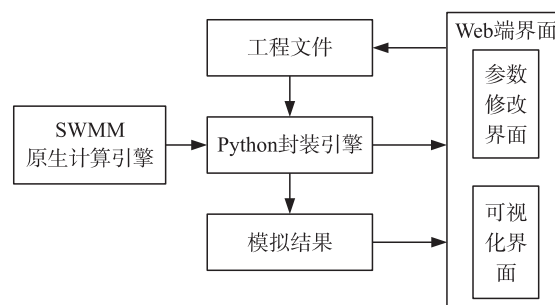


图 1 SWMM 计算集成思路

Fig. 1 The route of calculation integration

3 面向城市内涝的 Cesium 三维交互式可视化方法

3.1 面向城市内涝的三维可视化方法

城市内涝研究中可视化的对象一般分为 3 类:模型计算中涉及的管道节点、管段、汇水区、淹没范围等矢量要素,构建三维场景所需的三维建筑模型,场景底图。

对矢量要素的可视化需在模型和 Cesium 平台数据集成的基础上进行。Cesium 可视化的数据来源于将模型文件按 GeoJSON 等格式组织的交换数据,基于 Cesium 的要素可视化通过 Entity 对象实现,Cesium 支持的常用 Entity 对象如表 1 所示。

表 1 Cesium 支持的 Entity 对象
Table 1 Entity object supported by Cesium

名称	类型	说明	名称	类型	说明
box	BoxGraphics	盒子实体	wall	WallGraphics	墙体
corridor	CorridorGraphics	走廊实体	polygon	PolygonGraphics	多边形实体
cylinder	CylinderGraphics	椎体实体	polyline	PolylineGraphics	折线实体
ellipse	EllipseGraphics	圆、椭圆实体	rectangle	RectangleGraphics	矩形
ellipsoid	EllipsoidGraphics	球体、椭圆柱体			

对于三维模型的可视化,Cesium 支持 glTF (GL transmission format) 格式的三维模型传输格式。在 Cesium 平台展现三维模型时需将 3D 模型数据转换为 glTF 格式,才能在前端使用。其具体转换流程为:利用 3Ds Max 软件将初始数据转换为 obj 格式,并导出为 OpenCollada 标准的 dae 文件,再利用 ColladaToGltf 转换工具将文件转为 glTF 格式。

3.2 面向城市内涝的交互式可视化方法

从地理信息维度的角度来看,地图的交互方式可分为空间交互、时间交互和数据交互^[10]。空间交互是最基础的交互类型,主要包括地图的缩放、平移等。时间交互是指地理特征随时间变化而改变。数据交互是用户与客户端之间的联系以及前后端之间的数据交换等。

面向城市内涝的交互式可视化重点在于数据交互,主要体现在用户可对模型模拟的参数进行调整并实时重新模拟计算.对城市内涝模拟来说,整个过程涉及的参数十分复杂,且参数的不确定性会造成最终模拟结果的不同,因而需要研究用户在前端修改参数值并重新模拟后将结果可视化表达的方法.系统的模型调参功能实现过程如图 2 所示.系统通过前端上传 inp 格式的模型文件,将 inp 文件作为参数调用 SWMM 计算引擎,将模拟结果利用 GeoJSON 交换格式传给前端进行 Cesium 可视化.不同的用户根据实际需求输入信息对模型参数进行修改,系统会根据输入信息在后台对 inp 文件进行操作,修改后生成新的工程文件,并调用 SWMM 计算引擎重新模拟计算并在前端输出模拟结果.

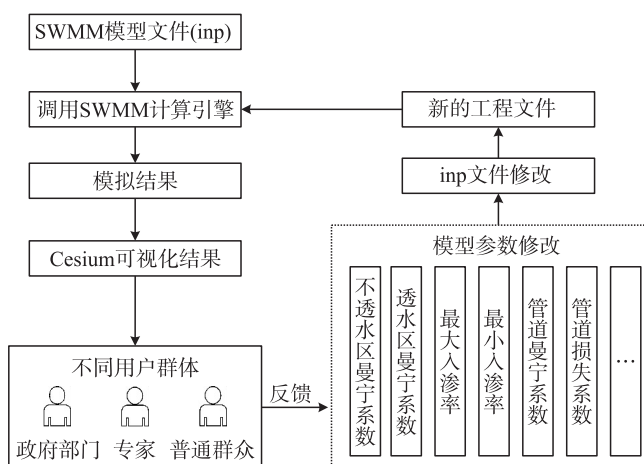


图 2 交互式调参实现流程

Fig. 2 The process of parameter adjustment

4 实验与验证

4.1 系统架构

系统设计采用 3 层结构,总体架构如图 3 所示.

系统从逻辑结构上包括前端和后端.后端选取基于 Python 的 Flask 应用框架,同时配合 SWMM 计算引擎进行模型数据的处理和模拟. Flask 是一个 Python 语言的轻量级 Web 应用框架,在可视化平台实现过程中,Flask 的作用主要是接收前端发送的数据并转发给后台计算引擎,此外也将计算引擎的处理结果发送回前端.前端采用 Cesium 作为可视化引擎,基于 React 及相关生态组件库设计开发前端界面及逻辑. React 是一个用来构建用户界面的 JavaScript 库,相较于其他库,React 能够简单、专注、有效地完成目标.此外,React 可轻松创建用户交互界面,在数据改变时也能高效地更新渲染界面.

4.2 可视化系统界面

基于 Cesium 的城市内涝三维可视化系统可根据输入的模型数据进行城市内涝的模拟并将结果在三维场景中展示,也可随时通过用户输入对模型参数进行修改并重新模拟计算.

本文选择 2018 年 8 月 17 日 0 时 50 分至 24 时作为研究时间段,选择南京师范大学北区作为研究区域,对该地区该时段暴雨内涝情况进行模拟计算并可视化表达,根据模拟结果将各节点水深情况表达如图 4 所示,将节点的水深用不同颜色标记以反映节点内部的状态.

由图 4 可以看出,在该时间段内操场附近部分道路周围的节点水位超过了 1.5 m,有溢水的可能性,水深较大的节点多位于地势较低处,与实际情况较为符合.

4.3 调参可视化对比

系统可实现对部分经验参数的取值调整、模拟并可视化展示结果.图 5 为系统的用户交互界面,可通过手动输入的方式实现对 SWMM 模型参数的修改.

以不透水区注蓄量为例,本文对不透水区注蓄量进行参数值的调整,并分别将模拟结果可视化.不透水区注蓄量 S-Imperv 的参数值分别取 2.5、3.5、4.5.根据模拟结果报告中具体的洪流信息及地形数据,得到的洪水淹没范围如图 6 所示.对比可以看出不同的参数取值对最终淹没范围的影响,但差异不显

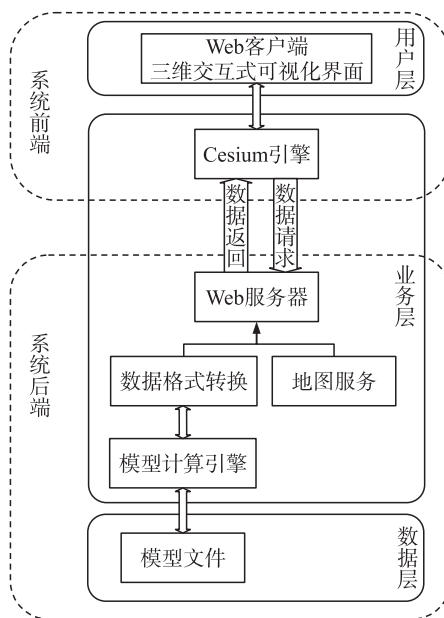


图 3 系统架构图

Fig. 3 System architecture diagram

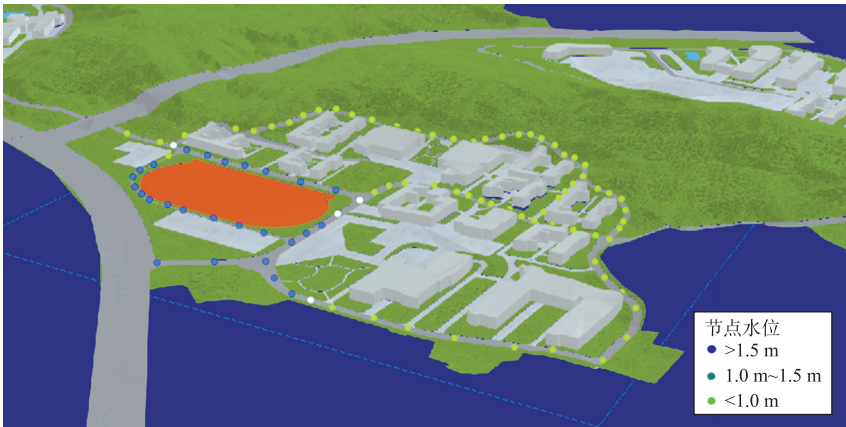


图 4 节点水位情况可视化
Fig. 4 Node water level visualization

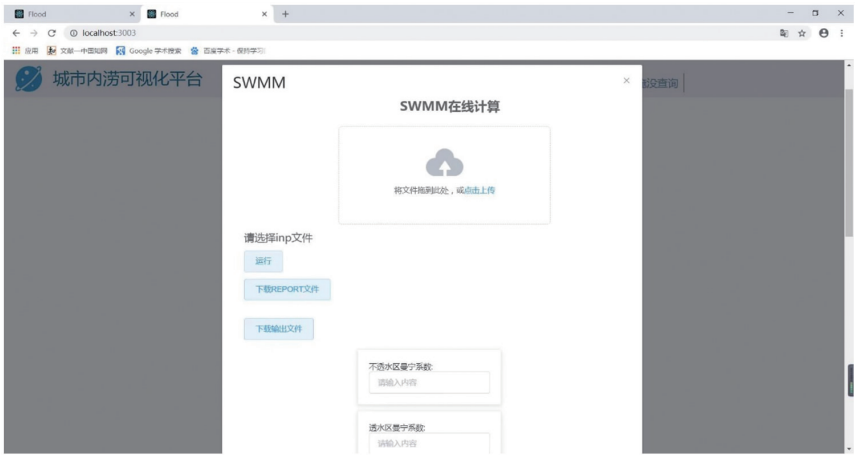


图 5 模型参数修改界面
Fig. 5 Parameter modification interface

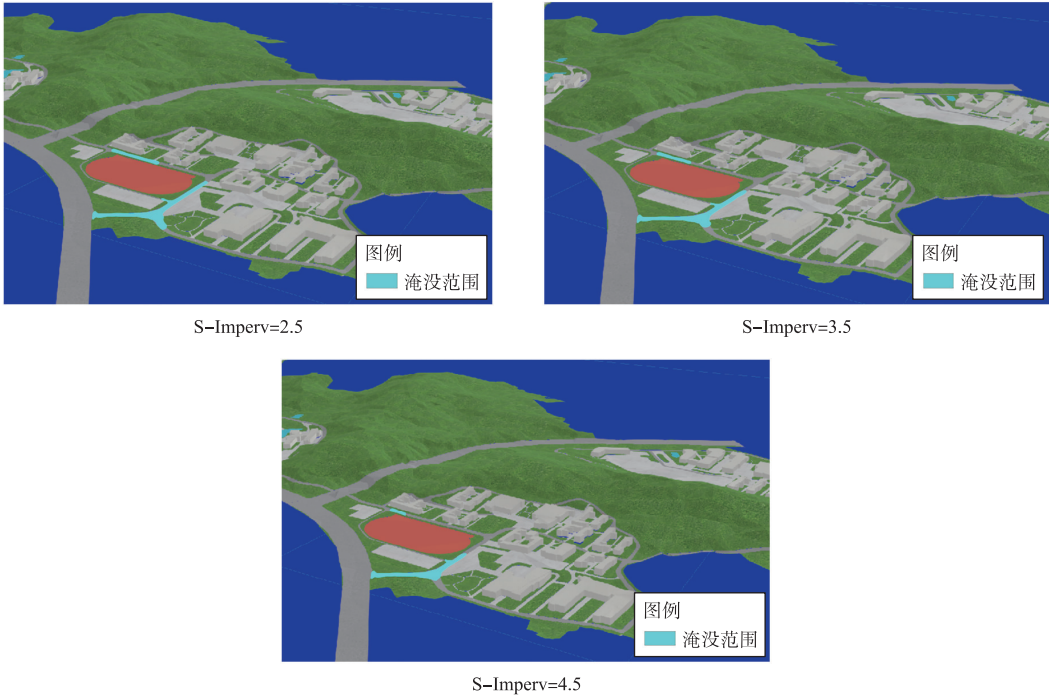


图 6 S-Imperv=2.5、3.5、4.5 时淹没范围可视化结果
Fig. 6 Visualization of submerged area when S-Imperv = 2.5, 3.5, 4.5

著. 随着 S-Imperv 取值的增大,可见淹没范围有一定程度的缩减,所以不渗透区注蓄量是内涝模型的敏感参数;但缩减程度较小,所以其敏感度较低.

在其他因素保持不变的情况下,当不透水区注蓄量 S-Imperv 的取值变大时,发生淹没的区域略有减小. 研究区域内地表类型中的不透水区占有很大的比例,不透水区包括有注蓄不透水区和无注蓄不透水区,对于有注蓄不透水区,不透水区注蓄量的取值会对其产流造成影响. 随着 S-Imperv 取值的增大,地表产流量会有所减小,经过汇流过程后汇入排水系统的流量也相应减少,从而导致各节点水位有所下降,发生溢流的节点数量和溢流量都随之减小,最终使得淹没的区域也有一定程度的缩小.

5 结论

本文在分析城市内涝发生过程机理的基础上,解析 SWMM 模型各模块的参数和计算原理,研究 SWMM 模型数据建模方法. 针对已有的城市内涝模型在模拟结果表达方面的不足,研究 SWMM 模型与三维可视化平台的集成技术. 对比分析了目前发展迅速的三维可视化技术的优缺点及可视化的具体需求,选择 Cesium 作为可视化的平台,利用开源技术构建城市内涝模型与 Cesium 集成的三维可视化原型系统,在三维场景中展示城市内涝模拟的结果,对城市内涝灾害的应急管理有一定的价值.

[参考文献](References)

- [1] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual, version 5.0 [M]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [2] KOUDELAK P, WEST S. Sewerage network modelling in latvia, use of infoworks cs and storm water management model 5 in liepaja city [J]. Water & Environment Journal, 2010, 22(2): 81-87.
- [3] PITT R, VOORHEES J, FIELD R, et al. SLAMM, the source loading and management model [J]. Wet-weather Flow in the Urban Watershed: Technology and Management, 2003: 79-101.
- [4] 程海云, 黄艳. 丹麦水力研究所河流数学模拟系统 [J]. 水利水电快报, 1996, 17(19): 24-27.
- [5] 许婷. 丹麦 MIKE21 模型概述及应用实例 [J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 867-869.
- [6] ALLEY W M, SMITH P E. Distributed routing rainfall-runoff model; version II [R]. Dallas: US Department of the Interior, 1982.
- [7] 岑国平. 城市雨水径流计算模型 [J]. 水利学报, 1990(10): 68-75.
- [8] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统 [J]. 水利学报, 2000(11): 34-42.
- [9] 周玉文, 戴书健. 城市排水系统非恒定流模拟模型研究 [J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 84-86.
- [10] 陈建香. 面向用户的地图交互方式的比较与应用研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第26页)

- [10] 包贵浩, 戴飞. 非均匀螺距的双绞线串扰统计特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 193-197.
- [11] 王天皓, 王忠福. 基于混沌多项式展开法的线束串扰统计模型 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1568-1576.
- [12] 王天皓. 汽车电磁兼容中线束串扰及其统计特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] 安占扬. 汽车线束串扰及其动态特性的预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [14] 张俊东. 汽车线束串扰和电磁辐射敏感度的时域分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [15] 张昭. 基于“场—线耦合”效应的多导体传输线电磁噪声的预测 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

[责任编辑: 陈 庆]