王颖，王强国．基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害数值可视化研究[J]．灾害学，2020，35(2)：70-74.［WANG Ying and WANG Qiangguo. Study On Numerical Visualization Of Waterlogging Disaster In Sponge City Based On GIS Technology[J]. Journal of Catastrophology，2020，35(2)：70-74. doi：10.3969/j. issn. 1000-811X. 2020. 02. 014.］

基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害数值可视化研究*

王 颖[1]，王强国[2]

（1. 重庆大学城市科技学院，重庆 402167；2. 重庆市市政设计研究院，重庆 400020）

摘 要：研究基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害数值的可视化技术，为城市内涝灾害预防和控制提供可靠分析依据。通过 GIS 技术采集海绵城市河道、排水口、管网等建模数据后，采用基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害分析模型对某场暴雨进行实测，通过同频率放大方法，获取不同重现期暴雨的设计降雨过程线，依据过程线以及 SWAT 模型获取不同重现期的洪峰过程以及积水淹没情况(深度、区域)，并通过 GIS 可视化显示洪峰过程以及积水淹没情况(深度、区域)。可视化模拟结果显示，以安徽六安市为例，采用 GIS 技术对单个栅格的高程值与建筑物在地面以上的高度相加值进行 DEM 修正后，六安市内涝积水深度更清晰、准确度；随着重现期的延长，暴雨强度、淹没水位高度、淹没面积、最大积水深度也逐渐增加；从六安市暴雨内涝不同重现期淹没场景中可以看出，随着重现期的延长，淹没区域在六安市 3D 图中的范围越来越大；5 年和 25 年一遇的洪水淹没区范围很小，但 60 年一遇的洪水淹没区在六安市北面范围很广，且在西南临界区域分布也较广。

关键词：GIS 技术；海绵城市；内涝灾害；数值可视化；SWAT 模型；重现期

中图分类号：P208；X43；X915.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2020)02－0070－05

doi：10.3969/j. issn. 1000－811X. 2020. 02. 014

近年来，国内多城市出现内涝灾害，2003 年至今平均每年发生 150 多起不同程度的城市内涝灾害。随着我国大量村镇居民进入城市，城市地表径流量显著提高，城市地表径流量的升高会引起多种问题[1]，如洪涝积水、河流水系生态破坏、水污染严重等。因此，国家大力提倡海绵城市建设，所谓的海绵城市就是将城市中的土壤看成是一块海绵，当城市地表水流量增加时，吸收地表水，当地表水流量降低时，将吸收的地表水释放[2]，使地表水在循环中得到充分利用，降低初期地表水径流的污染强度。但并不是完成了海绵城市的建设后，该城市就不会发生内涝现象，当降雨量急剧增加时，海绵城市短时间内无法马上吸收大量地表水，依然会产生内涝灾害。海绵城市内涝现象产生后，分析海绵城市降雨分布状态，且对该海绵城市的内涝情况进行全面、有效预测，获取内涝积水的空间分布、深度分布、淹没面积和淹没时间等相关特征数据[3]，防灾减灾的相关部门以该特征数据为依据，制定防灾减灾策略。

GIS 技术在数据采集和空间分析两个方面有显著优势，基于这两种优势，所产生的模型参数不仅简单便利而且可以被可视化显示，避免了由于空间分析能力差、缺乏数据可视化性能导致模拟结果不精准等问题的产生。因此，本文利用 GIS 技术，研究海绵城市内涝灾害数值的可视化模拟方法，有效模拟海绵城市地形、城市暴雨内涝情景以及内涝灾害淹没区域，这些模拟结果都以可视化形式显示，对于海绵城市内涝灾害的有效预防和管理具有重要的应用价值[4]。

1　海绵城市内涝灾害数值可视化研究

1.1　研究方法

采用 GIS 技术的空间数据处理能力和分析功能，对研究区域的 CAD 原始数据进行处理，通过 GIS 技术采集河道、排水口、管网等建模数据。地表径流或其他物质汇聚到共的出水口的过程中，所流经的地表区域被称为汇水区域，由于汇水区域还包含多条子汇水区域，因此需要对子汇水区域进行合理划分。采用海绵城市内涝灾害分析模型对某场暴雨进行实测，并通过同频率放大方法，获取不同重现期暴雨的设计降雨过程线。依据降雨过程线和 SWAT 模型获取不同重现期的洪峰过程和积水淹没情况(深度、区域)，并通过 GIS 显示，并分析造成该情况发生的原因，确定解决措施，降低暴雨对海绵城市造成的不利影响，图 1 为本文研究的技术路线图。

* 收稿日期：2019－10－09　　修回日期：2019－12－04

基金项目：重庆市教委科技研究项目(KJ1602302)

第一作者简介：王颖(1984－)，女，汉族，湖北监利人，硕士，副教授，研究方向为环境设计．E-mail：103311728@qq.com

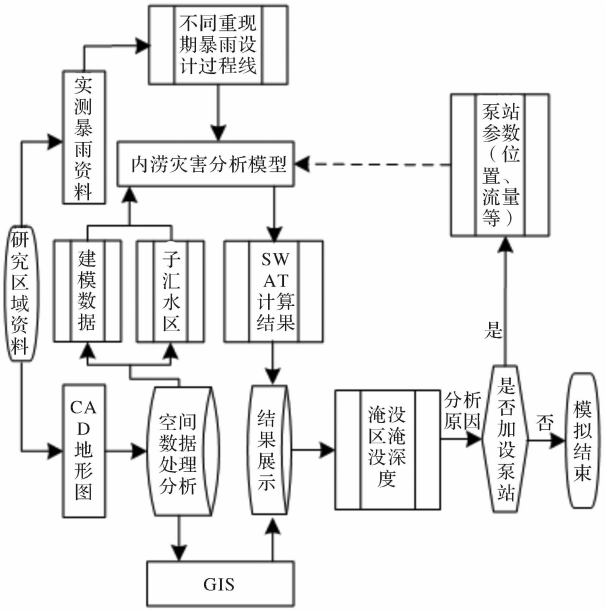


图 1　技术路线

1.2　基础数据处理

将研究区域 1：500 的 CAD 地形图导入 GIS 软件中，CAD 地形图的原始数据格式文件具有多图层，每个图层都具有同类型的图层对象，这些图层对象通常为管网、等高线、出水口、道路等，构建一个同类型的数据集，并将这些同类型的图层对象导入 GIS 软件。为了获取管道尺寸明确的几何数据图形，通过 GIS 技术数据处理排水系统，明确管道尺寸后，建立管道拓扑关系，核查数据高程信息，通过城市排水系统中的排水管网数据得到管道长度、管道直径、管道起点在土壤中潜埋的深度、管道终点在土壤中潜埋的深度等信息[5]，并对检查井的井深赋值。

1.3　海绵城市内涝灾害分析模型

进行海绵城市内涝灾害数值可视化研究过程中，通常通过数字形式完成自然界的呈现，数字形式的主要优势在于可存储大量空间数据，并对该数据进行处理[6]，处理过程中综合分析空间系统并将分析结果进行可视化显示。因此，利用 GIS 技术具有极强的分析能力，设计基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害分析模型，该模型通过气象、水文等专业知识在 GIS 技术基础上，同 SWAT 模型、数学技术模型、地面高程 DEM 模型、海绵城市地理数据库和灾害数据库相融合构建构成[7]，内涝灾害分析模型是海绵城市内涝灾害数值可视化研究走向实用化的核心，其架构图用图 2 所示。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部农业研究中心研发的分布式的流域尺度水文模型，是一个物理性模型，该模型不仅可以用于模拟缺少径流量等观测数据的流域，而且可以对流域内下垫面物理性质的变化对流域径流量的影响做出定量的评价。

海绵城市内涝灾害分析模型将 SWAT 模型和 GIS 的空间分析应用模块相结合的综合模型，GIS 技术空间应用分析模块为 海绵城市内涝灾害积水过程的显示和模拟提供技术依靠[8]。GIS 技术空间分析模型依据气象、水文、水利等专业知识，在 GIS 的空间分析技术基础上，将城市地理数据库和灾害数据库相结合构建的。SWAT 模型由降雨模型、产汇流模型、排水模型构成，这些综合计算结果为城市内涝积水的计算提供了依据。数学计算模型提供了这些综合计算的关键理论和公式。地面高程模型 DEM 可模拟城市地面的高低起伏。GIS 的空间分析模块则为数学模型中空间问题提供了空间解决方案，同时可视化显示内涝积水过程以及模拟过程[9]。

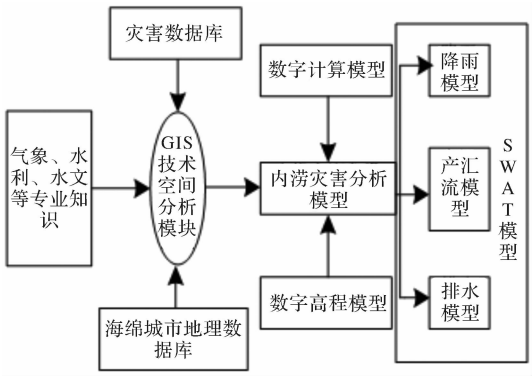


图 2　基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害分析模型结构图

1.4　SWAT 模型

SWAT 模型优势在于可模拟海绵城市流域内的多种物理地理过程，该模型通常由水文、天气、土壤类型、河湖、水库汇流等要素组成，本文主要研究基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害，因此需要将流域水文过程和气象模拟相结合。

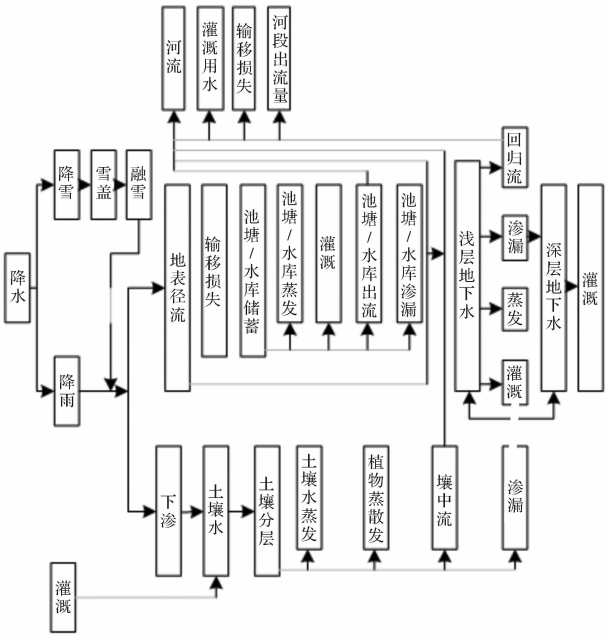


图 3　SWAT 模型结构图

SWAT 模型功能结构模块中包含了 710 多个函数和 1 100 多个中间变量，该模型的设计以模块化设计为依据，且由水文、天气、土壤类型、河湖、

水库汇流等 8 个要素组成，利用模块方式充分调用每一个要素，确保 SWAT 模型在对海绵城市内涝灾害模拟时具有很强的严密性和科学性[10]。该模型优势主要体现在当所有要素被模块化后，SWAT 模型变为一个开放式的模型平台，用户可编写自己的功能插件集成到 SWAT 模型中。图 3 为 SWAT 模型结构图。

由于篇幅原因本文仅对 SWAT 模型中的排水模型进行分析。考虑到海绵城市路面下铺设的下水管网是海绵城市排水的主要渠道，下水管网由雨水口、支管、干管、出水口等组成，排水能力好坏要看干管的形状和大小，通常情况下圆形的管道排水能力好，坡度和断面都被确定后，水力半径达到最大，流速和流量很大。由此可知，为了提高排水性能，海绵城市的排水管道通常使用圆形管道，下水管道排水能力可用漫宁方程表示为：

$$V_{downcomer}=\frac{1}{n}wR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}。\tag{1}$$

式中：n、w、R、S 分别代表管道内壁粗糙率、水断面面积、水力半径、管道底部坡度。

设置 d、θ、x、分别代表管道直径、水面弦长所对应的圆心角、湿周，即过流断面上流体与固体壁面接触的周界线。想要获取水断面面积、水力半径、流量，可用以下公式表示：

$$w=\frac{d^2}{4}\left(\pi-\frac{\theta}{2}+\frac{\sin\theta}{2}\right);\tag{2}$$

$$x=d\left(\pi-\frac{\theta}{2}\right);\tag{3}$$

$$R=\frac{w}{x}=\frac{d}{4}\left(1+\frac{\sin\theta}{2\pi-\frac{\theta}{2}}\right)。\tag{4}$$

将公式(2)、(3)、(4)代入公式(1)中可得：

$$Q=\frac{1}{n}\frac{d^2}{4}\left(\pi-\frac{\theta}{2}+\frac{\sin\theta}{2}\right)\left(\frac{\theta}{4}\right)^{\frac{2}{3}}\left(1+\frac{\sin\theta}{2\pi-\theta}\right)^{\frac{2}{3}}\tag{5}$$

当海绵城市发生内涝灾害时，假设下水管道内部的水量出现满流状态，此时水面弦长所对应的圆心角 $\theta=0°$，则公式(5)可变换为：

$$Q=\frac{1}{n}\frac{\pi d^2}{4}S^{\frac{1}{2}}。\tag{6}$$

管道的排水能力和空间布置对于空间排水性能有直接影响，由此设计排水模型过程中，通常采用离散方式概化管道，将管道的输水和调蓄功能进行分离，管道仅考虑输水功能系统的调蓄功能及来水接受功能，将这两个功能合并在蓄水节点，将地下管网节点分布图栅格化，采用泰森多边形法获取管道排水的空间分布栅格图。将管网节点栅格图与 DEM 全地形图叠加并计算淹没区域，统计淹没区域内各节点的流量，即总的排水量。排水模型建立后，就能够把城市 DEM 模型、降雨模型、产汇流模型、排水模型相结合，确定城市的淹没区域、淹没高度和淹没时间。

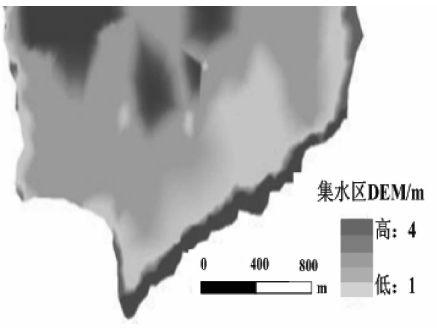
2 可视化效果分析

2.1 研究区域概况

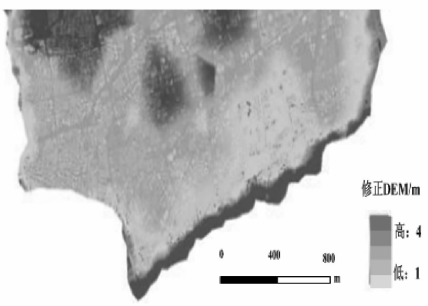
安徽省六安市，位于安徽省西部，处于长江与淮河之间，大别山北麓，六安市作为海绵城市，由于处于北亚热带向暖温带转换的过渡带，暖冷气流交汇频繁，年际间季风强弱程度不同，进退时间不一致，导致气候多变，经常受到内涝灾害的威胁。全市多年平均降水量为 900～1 600 mm，且降水通常集中在 3-9 月间，大概占全年降雨量的 70%，长时间连续的降雨极易给六安市带来洪水灾害。且六安市不透水面的面积不断增加，流经城区的河流也被人工大力改造，由此该市的排水系统越来越人工化，且洪水调节含蓄系统不够完善，所以从 2010-2016 年间六安市几乎每年都会发生不同程度的内涝灾害。为了对六安市后续的内涝灾害进行有效的防灾减灾，需要对内涝灾害进行有效的识别和判断。由此采用本文技术对六安市地形和暴雨内涝情景进行可视化模拟，并分析六安市内涝灾害淹没区。本文实验只取六安市典型区域进行分析。

2.2 海绵城市地形模拟

对海绵城市内部地貌高程变化的模拟通常通过海绵城市地形模型实现，经过海绵城市集水区地表高程影响修正，获取的海绵城市表面高程与现实基本一致。传统 DEM 修改方法通过单个栅格的高程值与地面上房屋总体高度相加获取，该方法虽然可以模拟出海绵城市地表的内涝状况，但没有考虑水进入到建筑物后对建筑物内部也具有淹没作用，在这种情况下获取的海绵城市内涝积水深度比实际值多。由此通过本文技术对单个栅格的高程值与建筑物在地面以上的高度相加值进行 DEM 修正后，得到安徽省六安市建筑修正 DEM 图，如图 4 所示。对比分析图 4a 和图 4b 可以看出，修正后的 DEM 图，显示的六安市内涝积水深度更清晰、明显，准确度提高。



(a) 原始DEM图



(b) 建筑修正后的DEM图

图 4 六安市海绵城市建筑修正 DEM

表 1　六安市不同重现期淹没深度和淹没面积

主要参数		暴雨强度/(mm/h)	淹没水位高度/m	淹没面积/km^2	最大积水深度/m
重现期(T)	5 年	59	2.71	3.2	0.21
	10 年	68	2.78	3.6	0.28
	25 年	78	2.84	4.1	0.34
	60 年	92	2.91	4.5	0.41
	100 年	102	2.96	4.9	0.46

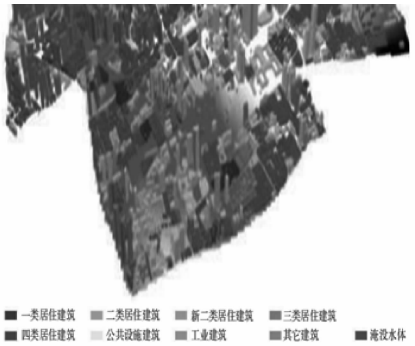
2.3　城市暴雨内涝情景模拟

六安市作为海绵城市，为了模拟其内涝淹没区域以及淹没深度，需以集水区内涝积水量为依据，通过 GIS 技术中的“等体积法”获取。假设六安市暴雨内涝处于无源淹没状态，由于该市地形可能存在洼地连通或高洼地，因此需对集水区 DEM 中的全部洼地进行搜寻，计算所有洼地的最低点高程值和边界点高程值，以每个洼地边界最小高程值为出口，水流会从该出口流出，要保证洼地与洼地之间存在包含关系。不以汇流具体过程为基础，只以地面水流由高处地处流淌时的地形起伏状况为依据，在流淌过程中水流会填充每个洼地，假设六安市降雨 1 h 内的重现期为 T，其分别取值为 5 年、10 年、25 年、60 年、100 年、200 年，受到篇幅的限制，以 10 年和 60 年两种重现期下的暴雨内涝为情景，获取两种情景下六安市淹没高程与面积(表 1)。

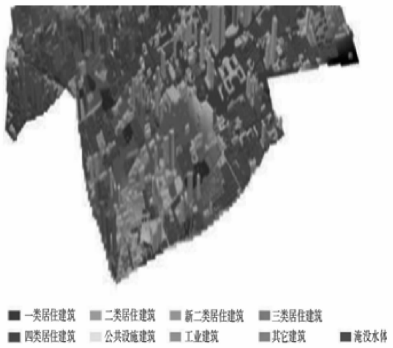
由表 1 可知，六安市随着重现期的延长，暴雨强度、淹没水位高度、淹没面积、最大积水深度也逐渐增加，在 100 年重现期下的四种主要参数最高，暴雨强度达到 102 mm/h，淹没面积达到 5.2 km^2，最大积水深度为 46 cm。本文技术结合 ArcScene 对两种情境下六安市暴雨内涝淹没场景进行模拟，图 5 为六安市暴雨内涝不同重现期淹没场景。在图 5 中可以看出随着重现期的延长，淹没区域在六安市 3D 图中的范围越来越大。

2.4　六安市内涝灾害淹没区分析

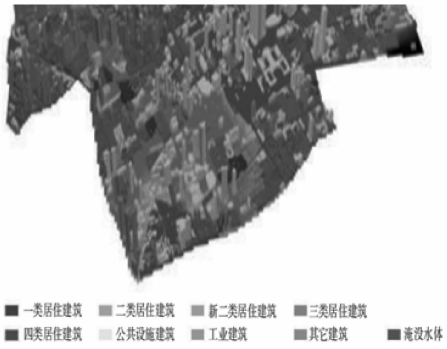
收集六安市水文气象数据，用 P 表示洪水重现频率，为了简化分析过程，这里重现取重现期 T 取值为 5 年、25 年、60 年，$T=5$ 年时，$P=20\%$，洪水水位线高程为 334 m；$T=25$ 年时，$P=5\%$，洪水水位线高程为 331 m；$T=60$ 年时，$P=2\%$，洪水水位线高程为 320 m。并结合淹没区分析步骤获取六安市淹没区分析图。六安市的淹没区分析步骤为：以水文气象数据为依据，确定不同洪水频率下的洪水水位高度；并以无洼地 DEM 数据为依据，通过 GIS 软件中地图代数模块的栅格计算器，对比相应洪水水位线低的区域，该区域就是无源淹没区，无源淹没区缺点在于只考虑降水造成的地表水位上升引发的洪水将中心城区淹没的区域，并未没考虑地表径流汇入造成的淹没情况，所以淹没区分析的最后一步是将无源淹没区叠加雨水地表径流，人为判别符合连通要求的区域，得到有源淹没区。图 6 为六安市淹没区分析图。从图 6 中可看出，5 年和 25 年一遇的洪水淹没区区域很小，但 60 年一遇的洪水淹没区在六安市北面区域很广，且在西南临界区域分布也较广。由此可知，随着洪水重现期的延长，洪水重现频率越低，洪水水位线高程也跟着降低，但洪水淹没区域范围是不断扩大的。



(a) 六安市3D图



(b) T=10年



(c) T=60年

图 5　六安市暴雨内涝不同重现期淹没场景

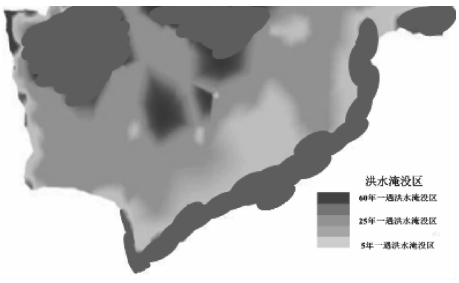


图 6　六安市淹没区分析图

3 结论

为了降低雨洪发生时产生的内涝灾害对海绵城市的影响，需要根据城市降雨分布情况，模拟和预测城市的内涝灾害有关的如内涝积水的空间分布、深度分布、淹没面积等特征数据，依据这些数据实现海绵城市内涝灾害的可视化显示，为城市内涝预防以及治理提供可靠地分析依据。本文研究了基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害数值可视化技术，利用 GIS 技术具有极强的分析能力，设计基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害分析模型，分析城市内涝灾害情况，并且该分析模型中的 SWAT 模型集成了降雨模型、产汇流模型、排水模型，这些模型可获取海绵产生内涝灾害的综合计算结果，为城市内涝积水的计算提供依据，运算结果通过 GIS 的空间分析功能进行可视化显示，模拟城市内涝积水过程、深度以及淹没区等情况，为未来制定合理的防灾减灾策略提供数据基础。

参考文献

[1] 陈鹏，张继权，孙滢悦，等．城市内涝灾害应急救援兵棋推演研究[J]．水利水电技术，2018，49(4)：8-17.
[2] 麻蓉，白涛，黄强，等．MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]．自然灾害学报，2017，26(4)：172-179.
[3] 赵万民，朱猛，束方勇．生态水文学视角下的山地海绵城市规划方法研究——以重庆都市区为例[J]．山地学报，2017，35(1)：68-77.
[4] 赖文波，蒋璐，等．培育城市的海绵细胞——以日本城市“雨庭”为例[J]．中国园林，2017，33(1)：66-71.
[5] 李兰，李锋．“海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J]．生态学报，2018，38(7)：2599-2606.
[6] 王大江，江叶峰，仇晨光，等．江苏电网在线动态安全评估系统及应用研究[J]．电力工程技术，2017，36(2)：51-55.
[7] 王志杰，周平，刘川昆，等．海绵城市潜力评估方法及地下排水系统[J]．哈尔滨工业大学学报，2018，12(3)：118-127.
[8] 时薏，李运远，戈晓宇，等．华北地区城市浅山区海绵绿道设计方法研究——以石家庄鹿泉区山前大道为例[J]．北京林业大学学报，2017，39(11)：82-91.
[9] 孙晓英，王俊英，胡嘉，等．完善北京市防洪排涝体系关键问题研究[J]．人民黄河，2017，39(2)：28-33.
[10] 任圆，孟瑞明，罗凯，等．水敏感区域雨水系统构建——以北京新机场为例[J]．给水排水，2017，43(9)：28-32.

Study On Numerical Visualization Of Waterlogging Disaster In Sponge City Based On GIS Technology

WANG Ying[1] and WANG Qiangguo[2]

(1. *City College of Science and Technology*, *Chongqing University*, *Chongqing* 402167, *China*;
2. *Chongqing Municipal Design Institute*, *Chongqing* 400020, *China*)

Abstract: We study the visualization technology of waterlogging disaster in sponge city based on GIS technology, which provides reliable analysis basis for the prevention and control of waterlogging disaster. Through GIS sponge city river, drain and pipe network modeling data, using the sponge urban waterlogging disaster analysis model based on GIS technology to measurement of a storm, through the method of the homogenous frequency enlargement of access to different rainfall return period of the design of the heavy rain process line, according to the process line and the SWAT model for different return period flood process and submergence (depth, area), and through the GIS visualization display flood process and water flooded condition (depth, area). Visual simulation results show, take Lu'an City in Anhui Province as an example, that the depth of water logging water in lu án city is clearer and more accurate after DEM correction of elevation value of a single grid and the addition value of building height above the ground by GIS technology. With the extension of the recurrence period, the intensity of rainstorm, the height of flooded water level, flooded area and the maximum depth of the water gradually increased. It can be seen from the inundation scenes in different recurring periods of rainstorm waterlogging in lu án that, with the extension of the recurrence period, the inundation area in the 3D map of lu án becomes larger and larger. The five - and 25-year flood zones are very small, but the 60 - year flood zones are very large to the north of lu'an city and widely distributed in the southwest critical region.

Key words: GIS technology; sponge city; waterlogging disaster; numerical visualization; SWAT Model; recurrence period