

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612023

海绵城市潜力评估方法及地下排水系统

王志杰^{1,2}, 周平^{1,2}, 刘川昆^{1,2}, 徐海岩^{1,2}, 王顺意², 侯伟名^{1,2}

(1.交通隧道工程教育部重点实验室(西南交通大学), 成都 610031; 2.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:为探究城市洪涝背景下的地区海绵城市潜力评估方法,从海绵城市最具相关的降雨量、水污染、洪涝灾害和生态绿地4个方面展开,构建海绵城市潜力指标体系,以国家级天府新区为例,运用数理统计、模糊神经网络、模糊综合评价、卫星图像识别等方法对地区指标体系进行综合研究,采用灰度关联分析法对天府新区海绵城市建设潜力定量评价,并给出各区县海绵城市潜力指数排名,最后针对洪涝灾害研发新型排水系统. 研究表明:与实际情况对比可发现从降雨量、水污染、洪涝灾害和生态绿地等4个方面评价地区海绵城市潜力结果较为客观;双流片区指标向量与理想指标向量关联度最小,是天府新区中最具有海绵城市建设潜力的地区;研发的地下排水系统在一定程度上能够缓解城市内涝、水质和管网压力等问题,所提出的海绵城市潜力方法和地下排水系统可为推动海绵城市建设提供参考.

关键词: 洪涝; 海绵城市; 潜力; 地下排水系统; 效益研究

中图分类号: YV213

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)03-0118-10

A potential evaluating methods of sponge city and on the underground drainage system

WANG Zhijie^{1,2}, ZHOU Ping^{1,2}, LIU Chuankun^{1,2}, XU Haiyan^{1,2}, WANG Shunyi², HOU Weimin^{1,2}

(1.Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education(Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, China; 2.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To explore the potential evaluating methods of regional sponge city under the context of urban flood, this paper establishes the potential indicator system of sponge city from the perspectives of rainfall, water pollution, flood disaster and ecological green land. Because these four elements are closely related with sponge city. Taking the national-level Tianfu District as an example, the regional index system is studied comprehensively by using the methods of mathematical statistics, fuzzy neural network, fuzzy synthetic evaluation and satellite image recognition; besides, the construction potential of Tianfu District sponge city is evaluated with the methods of gray correlation analysis quantitatively; moreover, the potential index ranking of every sponge city in every district and county is given. Finally, a new drainage system is developed according to flood disaster. The results show that it is relatively objective to evaluate the sponge city potential from the above four aspects, namely, rainfall, water pollution, flood disaster and ecological green land; also, the indicator vector of Shuangliu Area has the minimum correlation with the ideal indicator vector, which means this area is the most proper and potential place to carry out the sponge city construction in Tianfu District; furthermore, the developed underground drainage system can alleviate problems of city waterlogging, water quality and pipe network pressure and so on. The mentioned evaluating methods of the potential of sponge city and the developed underground drainage system can provide references for promoting the construction of sponge city.

Keywords: flood; sponge city; potential; drainage system; benefit research

随着国家经济的发展和城镇化水平不断提高,城市疾病也不断涌现^[1]. 城市疾病中洪涝问题显得尤为突出^[2]. 洪涝问题造成国家经济的损失和人员的伤亡^[3]. 城市急需寻找一条能够解决城市洪涝问题的可持续发展之路. 基于以上背景,海绵城市应

运而生^[4-5].

由于海绵城市是国内近几年兴起的民生工程,国内外学者对海绵城市的研究与报道处在初级阶段. 其中文献[6]利用生态系统服务、景观安全格局等理论详细阐述“海绵城市”概念的源起、发展、内涵和构建方法体系,对未来“海绵城市”的研究方向提出了展望. 文献[7]认为海绵城市建设与洪水治理息息相关,海绵城市与生态城市、低碳城市、智慧城市存在理论递进的相辅相成紧密关系. 文献[8]以宁乡县海绵城市规划与建设为案例,实证分析了

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(SWJTU11ZT33);

教育部创新团队发展计划资助(IRT0955)

作者简介: 王志杰(1964—),男,教授

通信作者: 周平, zhouping_swjtu@foxmail.com

南方多雨地区海绵城市建设的理念、规划等问题。同时为了减少城市洪涝问题,文献[9]设计了一种全透水路面的组成体系,结合工程实际应用效果,得到解决城市洪涝问题、有效补充地下水、建设“海绵城市”的新型结构设计模式。纵观国内外研究成果^[10-14],在海绵城市的研究领域中大部分涉及地下管网规划和雨水生态管理方面,并提出一些指导性建议,尚未有对地区海绵城市潜力方法进行深入研究。基于此本文创新地结合数理统计、模糊神经网络、模糊综合评价、卫星图像识别等方法,科学地从水资源、水污染、洪涝灾害和生态绿地等指标入手,构建了地区海绵城市潜力方法体系。针对最具有海绵城市潜力的地区洪涝问题,研发一种基于海绵城市的地下排水系统,并对其进行现场监测效果分析。研究思路和成果可为今后海绵城市深入研究提供基础和借鉴作用,同时可为其他城市构建海绵城市潜力提供参考。

1 海绵城市潜力方法体系的构建

与海绵城市试点建设最为密切的指标为降雨量、水质、洪涝灾害和绿地面积,反观其水资源、水质、洪涝灾害风险和绿地面积4个要素,跟海绵城市的六大核心目标“渗、蓄、滞、净、用、排”息息相关。因此针对地区海绵城市潜力评估引入水资源,水质、洪涝灾害和绿地面积等指标进行综合评价,具体方法体系的构建如图1所示。通过数理统计方法,从降雨量的时间、空间分布和水资源空间分布3个方面入手,系统地探明天府新区的降雨量分布和水资源现状。水资源充足却无法进行排水和综合利用容易导致水质污染,因此本文通过引入模糊神经网络,结合天府新区水质公报,对6个污染指标进行深入研究,得到各区域的水质总体情况。绿地面积影响着城市水资源分布和水的吸收与排放,因此绿地面积也是海绵城市试点潜力的一个重要指标,此时引入GIS导出12级精度(32 m×32 m)的程序,利用MATLAB编写图像识别算法进行分析绿地面积。地区洪涝灾害风险等级影响着海绵城市试点选择,如低洼路面等地方更容易引起洪涝灾害,但是不可避免地孕灾环境、致灾因子和承灾体等一级指标对应,引入模糊综合评价对其进行深入探究。最后将降雨量、水质等级、绿地面积和洪涝灾害风险4个大指标进行关联度分析,得到地区海绵城市潜力排序。

2 潜力方法体系的应用

天府新区作为成都市的国家级新区,于2010年规划成立,其科学技术和经济的发展对成都市构建

国家级中心城市起到决定性要素。而在城市日益发展的今天,城市洪涝问题影响其发展,这就要求天府新区提高自身的防洪能力,其防治洪涝措施的提出迫在眉睫,基于此天府新区海绵城市试点建设适应这一要求。因此以国家级天府新区为研究对象,探明其海绵城市潜力方法对城市的发展具有深远意义。

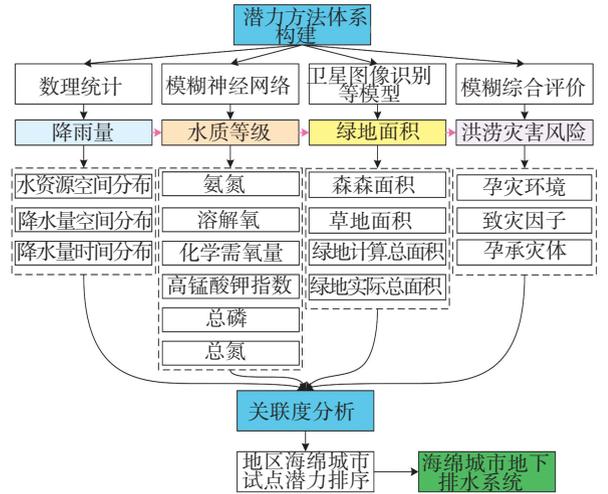


图1 海绵城市潜力指数体系的构建

Fig.1 The construction of potential index system of sponge city

2.1 天府新区降雨量情况

2.1.1 水资源空间分布研究

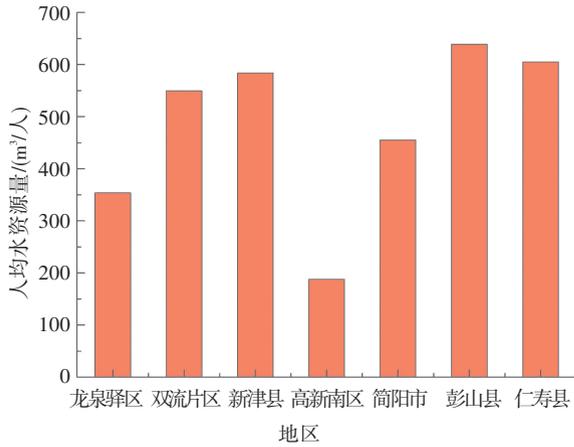
由于水资源在时间上存在差异,为降低在空间上研究结果与实际的偏差,故引入水资源量多年平均值作为区域研究的对象。同时,为避免水资源区域人口的不同而产生差异,采用多年水资源均值除以地区居住人口,得到区域人均水资源量 Q_{wp} 。通过 Q_{wp} 分布来衡量当地的水资源状况显得更为精准,其计算公式为

$$Q_{wp} = \text{水资源总量} / \text{辖区面积} \quad (1)$$

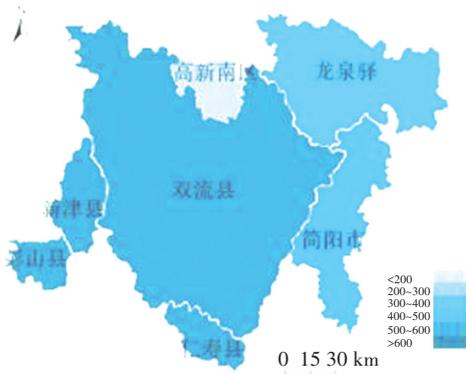
将各区数据代入式(1)得到人均水资源量和空间分布情况,如图2所示。

从图2(a)中可得到,天府新区各区域的人均水资源量均低于国际公认人均缺水警戒线1000 m³/人,因此天府新区属于重度缺水区,从水资源结果也可以看出天府新区亟需进行海绵城市试点,进行水资源综合利用。为了进一步探明各个区域 Q_{wp} 的缺水程度,本文将水资源评估标准进行细化,凸显各区域水资源的差异,以差值100 m³/人为一个区间。同时由图2(b)可以看出,天府新区各区水资源量由西南到东北方向呈递减趋势,高新南区的水资源最为匮乏,这与其辖区面积小,流经水域有关;彭山和仁寿水资源量较少,但是由于其人口极少,人均水资源量丰富。双流片区处于天府新区的

中部,水资源总量是其他地区水资源总和的两倍. 天府新区中部和东部人口密度大、产业发达,淡水资源却十分缺乏,将作为节能减排重点研究区域. 水资源多说明其存量多,一旦遇到降雨量多的季节,若不进行及时排水措施,将引起城市内涝严重. 水资源的来源之一是降水量,为了更加合理的配置水资源,需要进一步研究降水量的时空分布.



(a) 地区人均水资源量



(b) 人均水资源量的地区分布

图 2 人均水资源量的空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of per capita water resources

2.1.2 降水量的空间分布情况

根据四川省气象站提供的 2010 年—2014 年天府新区各区县每年的降水量数据,本文进行详细地数据处理,以此研究天府新区境内各地域的降水状况,本文选取各个地区 2010 年—2014 年的年均降水总量和日均降水量作为衡量当地降水的指标. 以上两个指标的统计数据如图 3 所示.

图 3 表明天府新区的年均降水总量和日降水量均值空间分布较为均匀,地区差异较小,这与地区的气候条件相似,地势平坦,以及降水的年际变化不大有关.

2.1.3 降水量的时间变化情况

本文定义每年 3 月至 5 月为春季,6 月至 8 月为夏季,9 月至 11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬

季. 为更加准确地对天府新区降雨量统计进行深入研究,采用 2015 年天府新区各个地区的日降水量,可得到春、夏、秋、冬 4 个季节的累计降水量,如图 4 所示,这样能直观的看出各个地区降雨总量随季节的变化情况.

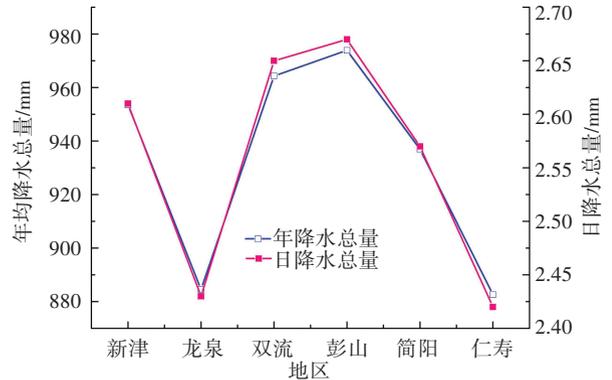


图 3 各区县降水量数据

Fig.3 Rainfall data of every district and county

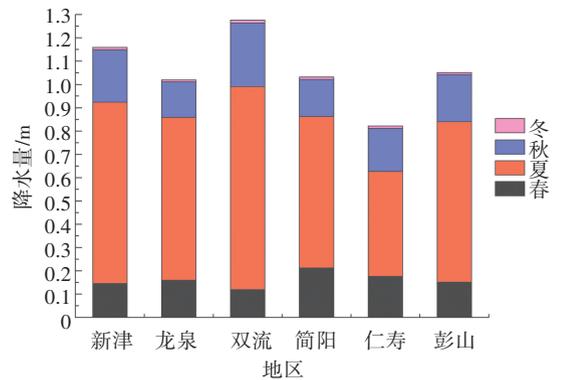


图 4 天府新区各区县降水量随季节变化情况

Fig.4 The change of rainfall of Tianfu new area with seasons' change

由于高新区南区没有降水量的监测站,因此没有相关的降水量数据,而高新南区和双流片区和龙泉驿地区比较近,因此,可以间接的从双流片区和龙泉驿地区降水量看出高新南区的降水情况. 冬季(12 月—2 月)的降水总量低于 12 mm,因此可以判定在冬季不会发生因降雨问题导致的洪涝灾害,在此期间应采取适当的暴雨防洪措施,防止意外的暴雨情况发生. 但是在春、夏、秋 3 个季节里,降水量相对春季较大,特别是在夏季,其降水量约为春、秋季的 3 倍. 根据 2015 年日降雨量数据显示,天府新区各个区县的日降水量 ≥ 100 mm 基本上发生在夏季,可见,夏季是一个洪涝灾害易发时期. 将日降水量 ≥ 100 mm 看成为洪涝的标准,2010 年—2014 年发生洪涝的次数结果为:新津、龙泉、双流、彭山、简阳、仁寿分别为 3、1、4、2、5、1 次. 从中可以得到每个地区都曾发生过洪涝灾害,简阳和双流地区发生洪涝的次数高于其他地区,从以上水资源量角度分

析,双流地区和简阳的水资源相对其他地区较为充沛,因此结合降雨量和水资源计算结果中可以明显得到在暴雨的情况下,双流地区和简阳地区发生区域洪涝现象的潜力比其他地区要高。

2.2 天府新区水质等级评定的研究

区域水质评价是根据水质评价标准和采样水样各项指标值,通过一定的数学模型计算确定水样本的水质等级.针对天府新区各区县进行水质等级评定,得到各区县水体污染程度,为天府新区海绵城市建设提供依据。

2.2.1 水污染评价指标的确定

水体水质的分析有多项指标,本文从节能减排的视觉出发,结合《四川省环境状况公报》^[15],重点研究氨氮、溶解氧、化学需氧量、高锰酸钾指数、总磷和总氮6项指标.通过统计天府新区各区县水质监测断面水污染情况数据和《成都市环境状况公报》^[16]水质数据,本文得到天府新区各区县指标值,详见表1。

表1 评价指标数据

Tab.1 The evaluation index data mg/L

地区	氨氮	溶解氧	化学需氧量	高锰酸钾指数	总磷	总氮
双流片区	1.19	5.91	20.50	5.70	0.46	1.99
龙泉驿	0.39	4.88	20.34	4.50	0.44	1.14
新津县	0.39	4.82	20.64	3.60	0.33	1.22
简阳市	1.23	5.06	20.03	4.10	0.45	1.47
彭山县	0.37	4.92	20.81	4.50	0.41	1.19
仁寿县	0.54	4.22	20.29	4.80	0.37	1.27
高新南区	0.25	5.38	20.55	4.40	0.37	1.37

2.2.2 T-S 模糊神经网络模型的建立

为更加精确地得到水质等级数据结果,综合分析并建立模糊神经网络结构,如图5所示.从图5中可以得到该结构是由前件网络和后件网络两部分组成.前件网络用来匹配模糊规则的前件;后件网络用来产生模糊规则的后件,由N个结构相同的并列子网络组成。

2.2.3 T-S 模糊神经网络模型的求解

1) 模糊神经网络初始化

因训练样本数有6项指标(氨氮、溶解氧、化学需氧量、高锰酸钾指数、总磷、总氮),则模糊神经网络输入节点数为6个,最终输出的评价值只有一维,故输出节点为1个.所以模糊神经网络的结构为6-12-1,即有12个隶属度函数,而模糊隶属度函数的中心值C和宽度b随机产生。

考虑到原始数据的不足,本文采用等间隔均匀分布内插法将地表水环境质量和综合水质等级

判定标准数据生成400组训练样本,其中选取350组作为训练组,50组作为预测组,这样可更加精确地得到结果。

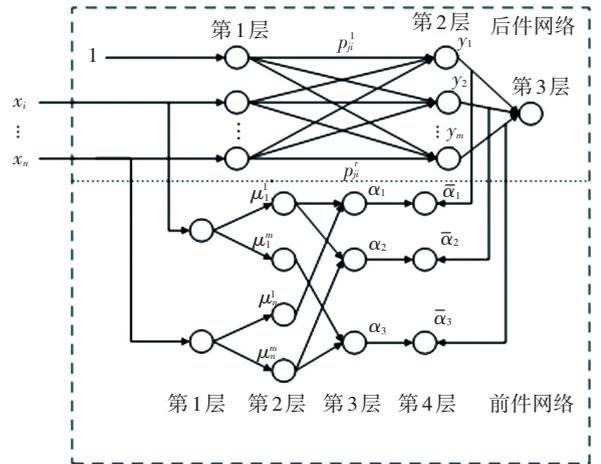


图5 基于T-S模型的模糊神经网络结构

Fig.5 Fuzzy neural network structure based on the T-S model

2) T-S 模糊神经网络训练

为实现基于T-S模型的模糊神经网络学习过程,一般将其转化为一个自适应网络,即自适应神经网络模糊推理系统(ANFIS).本文结合水质等级神经网络初始化的网络结构及其相关参数,得到天府新区水质等级ANFIS结构如图6所示。

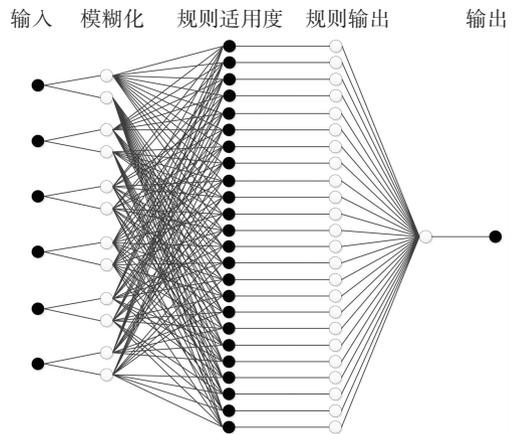


图6 评价模型的ANFIS结构

Fig.6 Evaluation model of the ANFIS structure

T-S 模糊神经网络需要学习的参数主要有后件网络的连接权 p_{ki}^k 以及前件网络第2层各结点隶属函数的中心值 C_{kj} 宽度 σ_{kj} 。

2.2.4 T-S 模糊神经网络水质评价

通过上述模糊神经网络训练,本文得到各水质采样口水样指标值,进而根据神经网络预测值得到水质等级指标和综合水质评价标准.综合水质评价标准: I (0, 1.5]、II (1.5, 2.5)、III (2.5, 3.5)、IV (3.5, 4.5) 和 V [4.5, 6), 具体分级标准见表2。

表 2 综合水质评价标准

Tab.2 Comprehensive water quality assessment standards mg/L

类别	氨氮	溶解氧	化学需氧量	高锰酸钾指数	总磷	总氮
I	≤0.15	≥7.5	≤15	≤2.0	≤0.02	≤0.2
II	≤0.50	≥6.0	≤15	≤4.0	≤0.10	≤0.5
III	≤1.0	≥5.0	≤20	≤6.0	≤0.20	≤1.0
IV	≤1.50	≥3.0	≤30	≤10	≤0.30	≤1.5
V	≤2.0	≥2.0	≤40	≤15	≤0.40	≤2.0

表 3 水质等级评价结果

Tab.3 Water quality grade evaluation results

监测断面	监测地区	网络预测值	水质等级
双流片区黄龙溪	双流	4.72	V
龙泉驿区十陵	龙泉驿	3.36	III
老三岔断面	简阳	4.16	IV
龙爪堰断面	高新南区	3.30	III
新津县西河断面	新津	2.96	III
彭山县岷江大桥	彭山	3.28	III
黑龙滩水库	仁寿	3.18	III

通过 MATLAB 编程,利用模神经网络的综合水质评级模型,训练结果为水质指标标准训练曲线和水质指标标准预测曲线,如图 7 所示. 由图 7 可知,综合水质等级评价模型训练数据预测输出结果与实际输出结果基本吻合,其误差在允许范围内. 同时测试数据预测的实际输出结果和预测也较为一致. 综合以上结果表明,基于 T-S 模糊神经网络的综合水质评价模型训练成功.

从表 3 可以得到,天府新区各区县水污染情况较为严重,双流区域水污染最为严重,水质等级为 5 级;简阳其次,水质等级为 4 级;其他区县水污染一般,水质等级均为 3 级.

2.3 天府新区洪涝灾害风险性评估

为评价双流片区、新津县、龙泉驿区、高新区南区、仁寿县、彭山区、简阳市的区域洪涝灾害风险性情况. 由于风险性是一个模糊的概念,因此本文考虑利用改进的模糊评价模型评价其风险等级. 首先建立评价洪涝灾害风险性等级的指标体系;其次对数据进行一致化和标准化处理;最后建立模糊评价模型,分别对 7 个县(区、市)进行打分,得到每个地区洪涝灾害风险等级.

2.3.1 评价指标的选取和指标体系的构建

基于广义的洪涝灾害风险性评估模型,本文结合天府新区所独有的地形地貌等特点,确定孕灾环境、致灾因子和承灾体 3 个二级指标;其中孕灾环境中高程、坡度、地表水资源量密度、森林覆盖率等三级指标;致灾因子有大暴雨日数、日最大降雨量和年均降雨天数等三级指标;承灾体有人口密度、出生率、死亡率、GDP 密度、耕地面积比重、抗灾能力和救灾能力等三级指标.

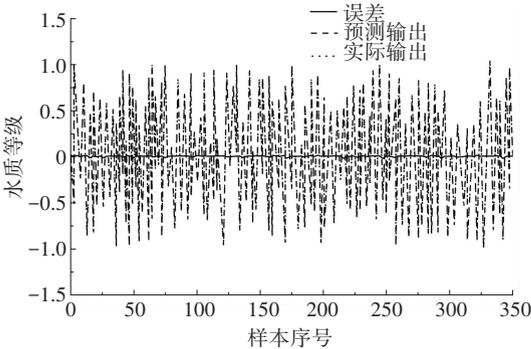
2.3.2 模糊评价模型的建立

1) 隶属度函数的确立

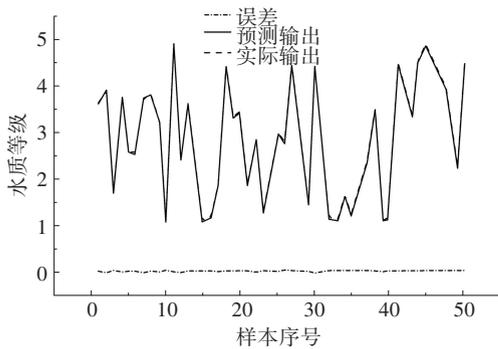
针对洪涝风险等级的各个指标数值存在模糊性,因此用隶属度来划分分级界限比较合理,所以单因素评价矩阵是单因素的隶属度 r 为行元素组成的矩阵. 隶属度是通过隶属函数的计算来确定的,根据数据分布的特点,在此本文选用“降半梯形”的函数,根据各因素的五级标准做出各个指标的隶属函数依据上述熵权理论,确定二级指标的权重,见表 4.

2) 各地区洪涝灾害风险性等级的确定

a) 洪涝灾害一级指标的评价. 在确定单因素模糊评价矩阵 R_n 、量化的评语集 v' 后,模糊综合评价



(a) 水质指标标准训练曲线



(b) 水质指标标准预测曲线

图 7 水质指标标准训练、预测曲线

Fig.7 Water quality indicators standard training, forecasting curve

通过 MATLAB 编程,本文得到各区域监测断面所在监测地区水质等级结果,并进行水质等级的划分,具体结果见表 3.

由公式 $R_i v' w$ 确定. 利用 MATLAB 软件计算 7 个地区洪涝灾害的孕灾环境、致灾因子和承灾体的评价结果.

表 4 洪涝灾害风险等级评价指标权重

Tab.4 Flood disaster risk level evaluation index weight

二级指标	三级指标	指标权重
孕灾环境	高程	0.194 4
	坡度	0.208 5
	地表水资源量密度	0.238 4
	森林覆盖率	0.358 7
	大暴雨日数	0.292 5
致灾因子	日最大降雨量	0.306 5
	年均降雨天数	0.401 0
	人口密度	0.073 3
承灾体	出生率	0.115 5
	死亡率	0.171 0
	GDP 密度	0.073 5
	耕地面积比重	0.096 0
	抗灾能力	0.142 6
	救灾能力	0.328 2

b) 洪涝灾害风险等级的确定. 通过计算, 本文得到孕灾环境、致灾因子和承灾体的权重向量为 $A = (0.35, 0.40, 0.25)$, 由改进的模糊评级模型得到各个地区的洪涝灾害得分矩阵为

$B = A \times R \times v' \times w =$

0.296 6	0.089 2	0.061 9	0.510 8	0.484 0
0.451 1	0.236 3	0.182 8	0.177 3	0.107 7
0.337 8	0.171 5	0.192 8	0.074 6	0.045 9
0.231 0	0.103 5	0.208 9	0.361 7	0.206 1
0.380 0	0.108 9	0.124 6	0.240 5	0.164 0
0.374 0	0.127 9	0.139 4	0.220 4	0.189 0
0.094 3	0.025 9	0.143 9	0.550 9	0.495 5

取矩阵 B 的行向量最大值为综合得分, 则各地区的评价结果见表 5.

对天府新区各个地区的洪涝灾害风险性进行模糊评价的结果表明, 天府新区各区域洪涝灾害风险等级集中在一级和四级, 无法彰显区域间的差异, 所以拟对其等级以差值为 0.2 为一个区间进行等级细化, 体现洪涝灾害等级在区域间的差异. 对照每个地区发生洪涝的实际情况, 此结果合理有效, 为了更直观的表现天府新区的洪涝灾害等级, 图 8 给出了各地区的洪涝灾害等级划分.

从图表 4 和图 8 可以得到各区县洪涝灾害风险模糊综合评判结果可以得到各区县洪涝灾害风险严重程度依次为新津县、彭山县、简阳市、双流片区、高

新南区、龙泉驿、仁寿县. 仁寿县和龙泉驿两地的洪涝风险等级最大, 其次为双流片区等地. 其洪涝风险等级较大的原因是由于城区低洼地汇水快, 排水不畅; 同时目前天府新区地下设施迅速发展, 地下空间分布不均匀加重洪涝灾害风险. 特别是仁寿县、龙泉驿和双流片区等地, 在大力建设的同时改变城区水文特征, 以及一些不合理城市布局, 耕地面积减少, 救灾和抗灾能力变弱, 从而提高了这些地区洪涝风险等级.

表 5 模糊评价结果

Tab.5 The result of fuzzy evaluation

地区	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	评判结果
龙泉驿	0.296 6	0.089 2	0.061 9	0.510 8	0.484 0	IV
双流片区	0.452 1	0.236 3	0.182 8	0.177 3	0.107 7	I
新津县	0.337 8	0.171 5	0.192 8	0.074 6	0.045 9	I
高新南区	0.231 0	0.103 5	0.208 9	0.361 7	0.206 1	IV
简阳市	0.380 0	0.108 9	0.124 6	0.240 5	0.164 0	I
彭山县	0.374 0	0.127 9	0.139 4	0.220 4	0.189 0	I
仁寿县	0.094 3	0.025 9	0.143 9	0.550 9	0.495 5	IV

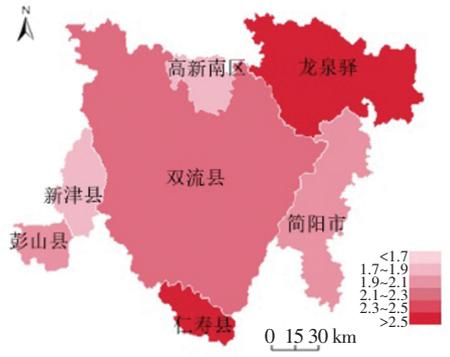


图 8 洪涝灾害风险等级分布

Fig.8 The distribution of flood disaster risk level

2.4 天府新区城市绿地面积研究

绿地面积影响着城市水资源分布和水的吸收与排放, 其对城市环境改善和生态化起着重要作用, 因此绿地面积也是海绵城市试点潜力的一个重要指标, 将其作为现状评估的一部分符合实际需求.

2.4.1 天府新区各区县绿地面积数据

为了对建设海绵城市给天府新区带来的绿化面积进行定量评估, 本文首先对天府新区当前的绿地面积进行评估. 为方便对整个天府新区的绿地经济效益的进行分析, 本文采用基于 GIS 及 MATLAB 的图像识别算法来获取天府新区各区县各类绿地面积, 以下为详细算法详细说明.

步骤 1 首先利用 GIS 软件得到分辨率为 33 m×33 m 的天府新区各区县的数字卫星图像.

步骤 2 利用 MATLAB 编写图像处理算法, 提

取出卫星图像中的绿地面积及绿地类别数据。

步骤 3 利用卫星图像提取出的数据并结合分辨率及卫星图像比例尺计算得到总的绿地面积及各区县各类绿地的面积。

步骤 4 将得到的天府新区各区县绿地面积与已有的区县绿地面积进行比对,检验算法的精度。

2.4.2 绿地面积处理

利用 GIS 导出 12 级精度 (32 m×32 m) 的程序,利用 MATLAB 编写图像识别算法进行分析,其中双流片区算法运行效果图如图 9 所示。

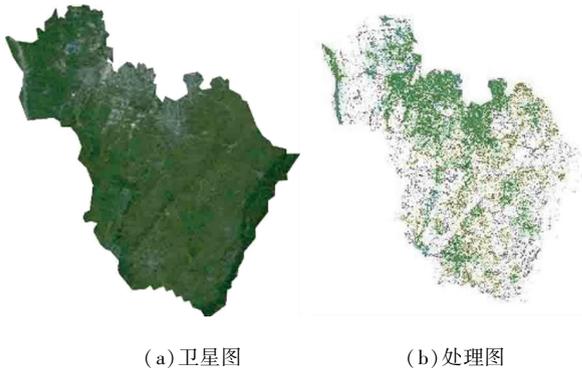


图 9 12 级精度双流片区卫星图和处理图

Fig.9 Shuangliu area satellite map and processing map of 12 accuracy

采取类似方法对各个区域进行计算,得到各县县两种类型绿地面积大小,见表 6。

表 6 天府新区各区县两种类型绿地面积单位

Tab.6 Two types of green area in Tianfu New Area km²

地区	森林面积	草地面积	绿地计算总面积	绿地实际总面积
简阳	27.99	0.790	28.77	27.53
仁寿	7	0.16	7.167	—
彭山	6.627	1.292	7.919	—
双流	222.6	37.75	260.3	243.6
高新南区	10.66	7.545	18.2	—
龙泉驿	62.79	9.965	72.76	69.49
新津县	15.85	3.468	19.31	—

双流,龙泉驿及武侯区的计算误差可以得到算法的平均误差 5.357%,算法误差不算太大,因此本文所采用 GIS 结合 MATLAB 图像处理算法的精度较高,适用于计算绿地覆盖面积缺失的区县。在海绵城市建设过程中绿地面积越多,暴雨过后雨水将缓慢地流出,从而避免短时间内大量雨水带来城市内涝问题。“海绵城市”建设注重对绿地的保护利用,保护河、湖、池塘等水系,改善城市的生态环境,缓解城市热岛效应和洪涝压力。雨水调蓄设施又往往与城市既有的绿地、园林、景观水体相结合,“净增成本”比较低,还能大幅减少水环境污染治理费

用,降低城市内涝造成的巨额损失。

3 海绵城区潜力指数评价

本文将与海绵城市息息相关的 4 个大指标,降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积进行加权关联度分析,对天府新区各区县原始数据进行无量纲化处理,并利用变异系数法求得各指标权重,得到潜力指数评价模型的指标权重,得到各个地区指标向量与理想指标向量关联度,从而可得到地区海绵城市潜力指数排名。

3.1 潜力指数评价模型的建立

潜力指数评价包括层次分析法、模糊综合评价法、灰色关联分析方法等,本文采用灰色关联分析方法,结合灰色关联度和变异系数法,构建灰色理想值逼近模型。

步骤 1 构建指标矩阵

针对天府新区海绵城市设潜力指数评价,假设对 m 个样本进行评价,包含 n 个评价指标,参考数列为 $x_0 = \{x_0(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$, 比较数列为 $x_i = \{x_i(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}, i = 1, 2, \dots, m$. 相对应的各指标值为 $r_{ij}(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$, 其指标矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$. 本文对天府新区各区县进行潜力指数评价,评价对象为天府新区海绵城市建设潜力指数,评价指标分别为降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积 4 个指标。

步骤 2 指标权重的确定

由于评价指标体系中的降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积指标的量纲不同,不宜直接比较其差别程度。为了消除各项评价指标的量纲不同的影响,需要用各项指标的变异系数来衡量各项指标取值的差异程度。降水量、水污染、洪涝和绿化面积 4 个指标的变异系数公式为

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中: V_i 为第 i 项指标的变异系数、也称标准差系数; σ_i 为第 i 项指标的标准差; \bar{x}_i 为第 i 项指标的平均数,此时 i 为 4。

变异系数突出反应了各指标的差异程度,在此基础上,通过计算各指标变异系数的权重,来准确描述降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积等 4 个指标的相对变化幅度。

各项指标的权重为

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i. \quad (3)$$

式中 W_i 为第 i 项指标的权重

步骤 3 计算灰色关联系数

$$\xi_i(k) = \frac{\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|}{|x_0(t) - x_i(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|} \quad (4)$$

式中: $x_0(t)$ 为参考数列, $x_s(t)$ 为比较数列, ρ 为分辨率系数, $\xi_s(t)$ 为比较数列 x_i 对参考数列 x_0 在第 k 个指标上的关联系数, 其中 $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数. 称 $\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 、 $\max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 分别为两级最小差及两级最大差.

一般来讲, 分辨系数 ρ 越大, 分辨率越大; ρ 越小, 分辨率越小; 本文分辨系数取值为 0.5.

步骤 4 计算灰色加权关联度

本文利用线性加权灰色关联度对降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积 4 个指标进行计算, 灰色加权关联度的计算公式为

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k) \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.716\ 3 & 0.441\ 4 & 0.551\ 4 & 0.333\ 3 & 0.802\ 8 & 1.000\ 0 & 0.868\ 7 \\ 1.000\ 0 & 0.392\ 9 & 0.611\ 1 & 0.382\ 6 & 0.333\ 3 & 0.379\ 3 & 0.363\ 3 \\ 0.592\ 3 & 0.577\ 7 & 0.761\ 5 & 0.934\ 6 & 1.000\ 0 & 0.983\ 1 & 0.333\ 3 \\ 1.000\ 0 & 0.402\ 9 & 0.353\ 4 & 0.343\ 3 & 0.344\ 3 & 0.334\ 0 & 0.333\ 3 \end{bmatrix}$$

对关联系数矩阵采用等权重法得到关联度矩阵为

$$B = [0.827\ 1 \quad 0.453\ 7 \quad 0.569\ 3 \quad 0.498\ 5 \quad 0.620\ 1 \quad 0.674\ 1 \quad 0.474\ 8]$$

将得到的关联度矩阵结果进行排序可得

$$C = [1 \quad 7 \quad 4 \quad 5 \quad 3 \quad 2 \quad 6]$$

即关于天府新区各区县建设海绵城市的潜力指数排序分别为双流 1、彭山 7、新津 4、简阳 5、高新南区 3、仁寿 2 和龙泉驿 6. 由排序结果可知双流片区指标向量与理想指标向量关联度最小, 因此双流片区是天府新区中最具有海绵城市建设潜力的地区. 进而依据上述海绵城市潜力指数计算结果, 在最典型的双流片区中选取一个实际区域进行海绵城市的设计. 从结果可以发现双流区在降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积 4 个指标中表现较为突出, 尤其在水资源和降雨量上最容易导致其发生洪涝灾害.

4 地下排水系统研发

从上文得到双流片区为国家级天府新区最先进进行海绵城市试点建设的地区, 为有效解决双流区区域洪涝问题, 本文选取易于发生洪涝的最典型的道路进行局部研究, 从非机动车道径流、机动车道径流和人行道径流 3 个方面进行排水, 由透水砖表层、绿

式中 r_i 为第 i 个评价指标对理想对象的灰色加权关联度. 此时评价指标包含降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积 4 个指标.

3.2 潜力指数评价模型求解及结果分析

通过对天府新区各区县原始数据进行无量纲化处理, 并利用变异系数法求得各指标权重, 得到潜力指数评价模型的指标权重, 结果见表 7.

表 7 潜力指数评价模型的指标权重

Tab.7 The index weight of potential index evaluation model

指标	平均数	标准差	变异系数	权重/%
降水量	481.87	397.82	0.826	15.3
水污染	3.56	1.55	0.435	8.04
洪涝	0.41	0.15	0.366	6.76
绿化面积	59.20	223.96	3.783	69.9

利用上述公式计算各指标灰色关联系数, 得到灰色关联矩阵为

化面层、粗砂平层和砂滤层等过滤结构将水排到植草沟和生态树池, 汇集到集水池, 以达到消减径流总量和减轻排水管道压力的目的. 其设计图如图 10 所示, 海绵城市构建过程中实际水流渗透方向如图 11 所示.

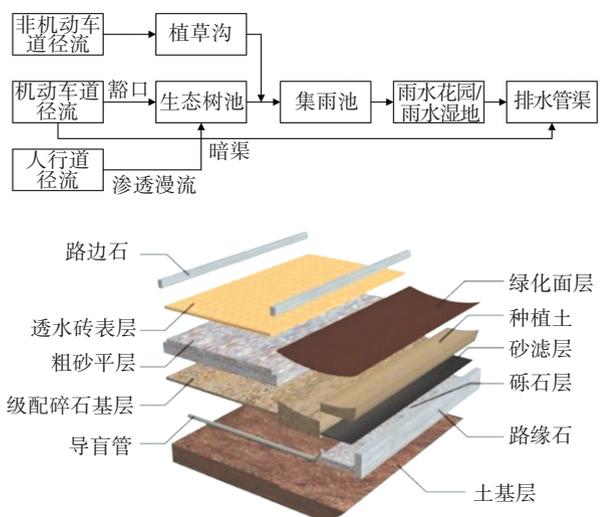


图 10 设计图

Fig.10 Product design

本次现场试验段监测的数据有径流量监测、管网压力监测对比和悬浮物测试. 监测系统有管道压力传感器和一体化涡轮流量计. 试验水质中悬浮物可通过中速定量滤纸(孔径为 0.45 μm 的滤膜), 截

留在滤膜上并于 103 °C 烘干至恒重的固体物质. 按重量分析要求,对通过水样前后的滤膜进行称量,算出一定量水样中颗粒物的质量,从而求出悬浮物的含量. 图 12~14 分别为径流量、峰值水位和固体悬浮物 SS 质量浓度变化图.



图 11 实际水流方向

Fig.11 The direction of the actual flow

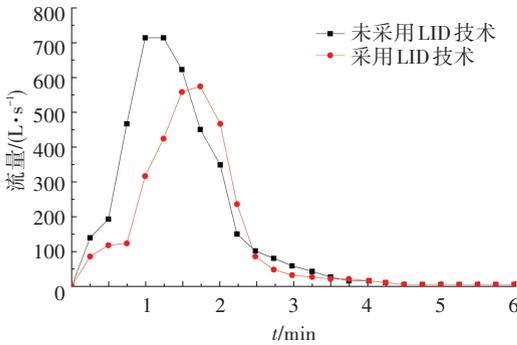


图 12 10 a 重现期下排水口径流量变化曲线

Fig.12 The change curve of outfall's net runoff in 10 a recurrence interval

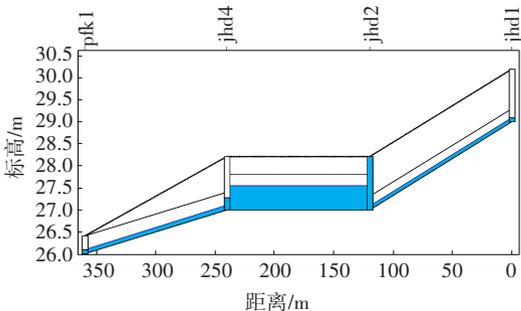


图 13 LID 道路在降雨峰值时刻的管道峰值水位

Fig.13 The pipeline peak hydrograph of LID road at the peak of the rainfall

根据现场测试,得到排水径流效果,如图 12 所示,从图中可以得到降雨重现期下,小区采用该排水系统与不采用任何措施,其径流总量削减率可达 17.51%,洪峰流量削减率可达 20.06%是开发前的

1.78 倍,且峰值时间推迟了 33 min 左右,径流总量比开发前减少了 143.4 L/s. 因此,该排水系统能够有效推迟峰值、削减峰值流量和径流总量. 图 13 为 LID 道路在降雨峰值时刻的管道峰值水位图在降雨峰值时刻,传统小区在峰值时刻雨水管径流量达到饱和,而采用 LID 技术开发的小区则在降雨峰值时刻达到管网最大径流量的 78.71%,由此可见,LID 技术开发地下排水系统将很大程度上缓解雨水管网的压力. 图 14 为 3 a 降雨重现期下道路管道排出口处 SS 质量浓度变化曲线,使用低影响开发技术的小区相对于未使用低影响开发技术的传统小区,其对水中固体颗粒悬浮物 SS 的总负荷削减率可以达到 19.7%,另外在道路管道排出口污染物峰值减少 391.1 mg/L.由上述仿真结果,本文得到的结论为 LID 技术改造的道路对于污染物的拦截吸收有较好的效果.

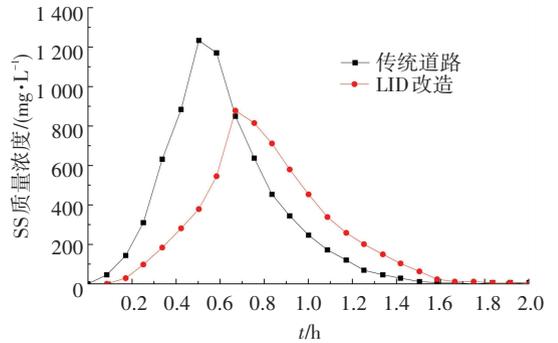


图 14 3 a 降雨重现期下道路管道排出口处 SS 浓度变化曲线

Fig.14 The SS concentration change curve of road pipeline discharge port in 3 a rainfall recurrence interval

5 结 论

1)通过数理统计法对天府新区各区县降雨量进行时空分布研究,双流地区和简阳的水资源相对于其他地区较为充沛,结合降雨量和水资源计算结果中可以明显得到在暴雨的情况下,双流地区和简阳地区发生区域洪涝的潜力比其他地区要高.

2)引入 T-S 模糊神经网络模型对天府新区各区县水污染进行水质等级研究,结果表明:双流水污染最为严重,水质等级为 5 级;简阳其次,水质等级为 4 级;其他区县水污染一般,水质等级均为 3 级.

3)运用模糊综合评价研究了天府新区洪涝灾害风险情况,研究发现龙泉驿、高新南区、仁寿县洪涝风险等级较高,而双流区、简阳市、新津县和彭山县相对较低.

4)对降水量、水污染、洪涝灾害风险和绿化面积 4 个指标进行关联度分析,得到天府新区各区县

海绵城市试点建设潜力指数排名,从结果中得到双流区是天府新区中最具有海绵城市建设潜力的地区,在试点过程中优先考虑对双流区建设。

5) 基于低影响开发理念天府新区潜力评估方法及排水系统设计,贯穿海绵城市理念,从节能减排视觉,提出了基于低影响开发理念的排水系统,对系统进行雨水径流量、缓解管网压力和水中的固体颗粒悬浮物等指标的现场监测效益研究,排水系统的设计改造将会对小区抗洪能力带来显著效果,有效解决了排水防涝问题,既能有效改善环境,又能兼顾经济效益。

参考文献

- [1] 刘勇,张韶月,柳林,等.智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J].地理科学进展,2015,34(4):494-504. DOI:10.11820/dlkxjz.2015.04.011.
LIU Yong, ZHANG Shaoyue, LIU Lin, et al. Research on urban flood simulation; a review from the smart city perspective [J]. Progress in Geography, 2015, 34(4): 494-504. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.04.011.
- [2] 李梦婕,汪明,史培军.湖南暴雨洪涝灾害损失时空特征及影响因素分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(4):429-434.
LI Mengjie, WANG Ming, SHI Peijun. Temporal-spatial distribution of rainstorm-flood disasters in Hunan, China and its affecting factors [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2014, 50(4):429-434.
- [3] 扈海波,张艳莉.暴雨灾害人员损失风险快速预评估模型[J].灾害学,2014,29(1):30-36. DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2014.01.006.
HU Haibo, ZHANG Yanli. Quick assessing model on casualty loss in rainstorms [J]. Journal of Catastrophology, 2014,29(1):30-36. DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2014.01.006.
- [4] 刘昌明,张永勇,王中根,等.维护良性水循环的城镇化LID模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J].自然资源学报,2016,31(5):719-731. DOI:10.11849/zrzyxb.20151294.
LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. Journal of natural resources, 2016, 31(5): 719-731. DOI: 10.11849/zrzyxb.20151294.
- [5] 邓钟尉,古晓雯,周平,等.城市洪涝潜力评估及地下工程排水系统研发[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(6):887-894. DOI:10.14188/j.1671-8844.2017-06-014.
DENG Zhongwei, GU Xiaowen, ZHOU Ping, et al. Potential assessment of city flood-waterlogging and design of underground engineering drainage system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(6): 887-894. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2017-06-014.
- [6] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36. DOI:10.11819/cpr20150605a.
YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. “Sponge city”: theory and practice [J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26-36. DOI:10.11819/cpr20150605a.
- [7] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97. DOI:10.3969/j.issn.1002-9753.2016.01.008.
WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics [J]. China soft science, 2016(1): 79-97. DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2016.01.008.
- [8] 邹宇,许乙青,邱灿红.南方多雨地区海绵城市建设研究——以湖南省宁乡县为例[J].经济地理,2015,35(9):65-71,78.
ZOU Yu, XU Yiqing, QIU Canhong. The research on sponge city construction in southern hilly area—a case study of Ningxiang county in Hunan province [J]. Economic geography, 2015, 35(9): 65-71, 78.
- [9] 王谦,苏立超.全透水路面在建设“海绵城市”中的应用研究[J].施工技术,2015,44(增刊2):284-286.
WANG Qian, SU Lichao. Study on the application of the water surface in the construction of “sponge city” [J]. Construction technology, 2015, 44(Sup2):284-286.
- [10] HUANG Xiaofei, JIA Jingwei, WANG Zhengke, et al. A novel chitosan-based sponge coated with self-assembled thrombin/tannic acid multilayer films as a hemostatic dressing [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2015, (2): 284-290.
- [11] JIANG Jiuxing, ZHANG Xuzhi, WANG Zhenhua, et al. Graphene/polyaniline composite sponge of three-dimensional porous network structure as supercapacitor electrode [J]. Chinese Physics B, 2016, (4):407-412.
- [12] ZHAO Lian Qin, YU Bao Wei, ZHANG Xiao Liang, et al. Size and shape controllable preparation of graphene sponge by freezing, lyophilizing and reducing in container [J]. Science China(Technological Sciences), 2016(5):709-713.
- [13] FU Wantao, ZHANG Julin, ZHENG Changbo, et al. Molecular cloning of partial 14-3-3 genes in the marine sponge hymeniacidon perleve and its role in differentiating infectious and non-infectious bacteria [J]. Chinese Science Bulletin, 2013(7):766-776.
- [14] 王昊,张永祥,唐颖,等.雨水泵站水泵机组启停优化[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(8):98-103. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201609076.
WANG Hao, ZHANG Yongxiang, TANG Ying, et al. Optimization of pump start-stops in rainwater pump station [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 98-103. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201609076.
- [15] 四川环保局.2015年四川省环境状况公报[DB/OL].(2016-06-05)[2016-11-20].http://www.schj.gov.cn.
- [16] 成都市环保局,2015年成都市环境状况公报[DB/OL].(2016-05-11)[2016-11-20].http://www.cdepb.gov.cn/cdepbws/web/index.aspx.

(编辑 魏希柱)