

海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价研究

马瑾瑾¹, 陈星¹, 许钦²

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 对雨水进行吸纳和利用是海绵城市建设的初衷。以雨水资源为研究对象, 构建了基于雨水资源化条件、雨水资源化可实施程度、区域生态环境状况、经济可行性与综合雨水需求率的海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价体系, 利用层次分析法与模糊综合评价法对海绵城市建设中雨水资源的利用潜力进行评价。以浙江省临海市海绵城市建设试点区为例, 通过综合径流系数法计算出, 该地区在实施海绵城市建设后可增加雨水资源利用量 $28.46 \times 10^4 \text{ m}^3$; 通过运用评价体系对该区域雨水资源的利用潜力进行评价。评价结果表明: 该区域雨水资源利用潜力为 I 级, 雨水资源利用潜力大, 即雨水资源丰富且可实施条件充裕。这与综合径流系数法计算出来的结果有较好的一致性, 说明评价体系具有一定的合理性。从而为其他开展雨水利用工作的区域提供了基础的评价方法和理论支撑, 具有一定的工程意义。

关键词: 海绵城市建设; 雨水资源利用潜力; 层次分析法; 模糊综合评价

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0027-06

Evaluation of regional rainwater resources utilization potential in sponge city construction

MA Jinjin¹, CHEN Xing¹, XU Qin²

(1. Collage of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: The absorption and utilization of rainwater is the original intention of sponge city construction. Taking rainwater resources as the research object, a rainwater resource utilization potential evaluation system was set up based on rainwater resources conditions, the implementation degree of rainwater resources, regional ecological environment conditions, economic feasibility and comprehensive rainwater demand rate. The analysis method and fuzzy comprehensive evaluation method were used to evaluate the utilization potential of rainwater resources in sponge city construction. Taking the pilot zone of sponge city construction in Linhai City of Zhejiang Province as an example, the comprehensive runoff coefficient method can be used to calculate that the utilization of rainwater resources can increase by $28.46 \times 10^4 \text{ m}^3$ after the construction of sponge city. The utilization potential of rainwater resources in the region is assessed by using the evaluation system. The evaluation results show that the utilization potential of rainwater resources in this region is Grade I, and the utilization potential of rainwater resources is large, that is, rainwater resources are abundant and can be fully utilized. This is in good agreement with the results calculated by the integrated runoff coefficient method, indicating that the evaluation system has certain rationality. This provides a basic evaluation method and theoretical support for other areas where rain water utilization is carried out, and has certain engineering significance.

Key words: sponge city construction; the utilization potential of rainwater; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579148, 51779146)

作者简介: 马瑾瑾(1992-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 陈星(1980-), 女, 新疆伊犁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水文水资源及流域水文模拟。

1 研究背景

随着城市化发展对水资源的需求日益迫切,人们越来越重视对非传统水资源的利用。近些年来,有关我国城市雨洪资源利用及利用潜力的研究取得了较大进展。许多研究表明,城市建设增加下的地表雨洪径流可以通过海绵城市建设中的雨洪资源综合利用措施得以留存和应用,这些留存下来的雨洪利用量即城市区域雨水资源利用潜力^[1-4]。在区域雨水资源利用潜力方面的研究中,余卫东等^[5]提出了城市雨水资源化的概念,并把建成区划分为了几种不同的类型进行计算。在对雨水资源利用潜力计算方面,申亚青^[6]通过GIS软件,对某地一年的水资源潜力进行了预算;李晓贝等^[7]建立了雨水利用潜力分析模型,得出其结果与实际情况极为相似;赵飞等^[8]利用多年平均降水量算法对我国部分城市的雨水利用潜力进行了分析,结果表明在实施雨洪利用措施后,雨水利用效果较好。海绵城市是结合我国城市现状提出的治水新构想,由于其注重源头控制,所以与低影响开发理念有着高度的契合^[9]。建立契合自然的低影响开发模式是解决城市水生态、水安全的重要途径^[10]。

海绵城市建设中雨水资源利用潜力的大小不仅与雨水利用工程有关,当地气候条件、经济发展等都会成为影响雨水资源利用潜力的因素。本文在总结了相关区域雨水资源利用潜力研究的基础上,提出了海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价模型,从5个方面反映了研究区-临海市海绵城市建设试点区的雨水资源利用潜力,客观评估了区域采取海绵城市建设后的雨水资源利用潜力,为该区域实施海绵城市建设方案提供了理论依据,也为后续将要实施海绵城市建设的地区提供了参考方法。

2 雨水资源利用潜力内涵

所谓雨水资源化利用潜力,是指某个特定的区域在一定时段内,通过规划设计及采取相应的技术工程措施后,能够开发利用的最大雨水资源量。在不考虑经济和技术是否可行的情况下,某一范围内的雨水资源有可能会被全部开发利用,此时的雨水资源量即雨水资源的理论潜力。但无论采取何种技术措施和方法,是不可能实现雨水资源的全部利用的,此时雨水资源的可实现潜力称为雨水资源化潜力^[11-12]。在构建评价体系进行雨水资源利用潜力评价之前,为验证指标体系与模型结果的精确度与

可信任度,首先采用综合径流系数法^[13]对区域内雨水资源的利用潜力进行初步粗略计算。

雨水资源利用理论潜力:

$$W = HA\psi \quad (1)$$

雨水资源利用现实潜力:

$$W' = HA\psi\alpha\beta \quad (2)$$

式中: W 为区域雨水资源利用理论潜力, m^3 ; W' 为区域雨水资源利用现实潜力, m^3 ; H 为年降雨量, m ; A 为下垫面汇水面积, m^2 ; ψ 为径流系数; α 为弃流系数; β 为季节折减系数。

3 区域雨水资源利用潜力的研究方法

3.1 评价指标与标准

区域在实施海绵城市建设后的雨水资源利用潜力大小可通过海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价指标体系进行判断,建立一个能够从各方面衡量雨水资源化利用潜力的评价指标体系是对区域雨水资源化利用潜力进行评价的基础。陈卫宾等^[14]从生活、生产、生态3个方面选取了评价因素构成评价指标体系,对区域雨水资源开发潜力进行了评价。

指标体系的构建应遵循以下原则:(1)科学性原则;(2)系统性与层次性原则;(3)全面性与代表性原则;(4)动态性与静态性原则。根据海绵城市建设中区域雨水资源利用潜力的量度要求,遵循层次分析原理^[15],将评价指标体系分为3个层次:目标层、准则层和指标层。通过分析影响区域雨水资源利用潜力(A)的因素,遴选出雨水资源化条件(B_1)、雨水资源化可实施程度(B_2)、区域生态环境状况(B_3)、经济可行性(B_4)、综合雨水需求率(B_5)5个主导层次制定雨水资源利用潜力评价指标体系,具体评价指标体系见表1。

雨水资源化条件(B_1)是区域是否可以开展雨水资源开发利用工作的决定性因素,是衡量雨水资源利用潜力的决定性因素^[16]。雨水资源化可实施程度(B_2)是区域内雨水资源条件开发利用能力的反映,依据区域不同用地性质,因地制宜地选择其对应的低影响开发措施,将渗透滞留设施可实施率(C_4)、雨水运输设施可实施率(C_5)和调蓄净化设施可实施率(C_6)作为雨水资源化可实施程度的指标^[17]。区域生态环境状况(B_3)主要反映了雨水利用潜力实现的自然条件,主要包括林草覆盖比率(C_7)、坡度(C_8)、土壤渗透系数(C_9)。经济可行性准则层(B_4)的指标(C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12})是区域雨水资源能够利用得以实现的基础,开展雨水利用工作需要

巨大的经济支撑,拥有突出的经济实力的地区在开展雨水资源利用方面更有优势。综合雨水需求率(B_5)在很大程度上决定了区域雨水资源转化量的

多少,包括以下几种形式:生活用水率(C_{13})、生态用水率(C_{14})、工业用水率(C_{15}),雨水回用后的不同用水途径及需水量计算方式见表 2。

表 1 海绵城市建设中区域雨水资源利用潜力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	数据来源与计算公式
海绵城市建设中区域雨水资源利用潜力(A)	雨水资源化条件(B_1)	多年平均降雨量(C_1)	水资源公报
		多年平均蒸发量(C_2)	水资源公报
		综合径流系数(C_3)	环境公报
	雨水资源化可实施程度(B_2)	渗透滞留设施可实施率(C_4)	统计指标 + 实施方案
		雨水运输设施可实施率(C_5)	统计指标 + 实施方案
		调蓄净化设施可实施率(C_6)	统计指标 + 实施方案
	区域生态环境状况(B_3)	林草覆盖比率(C_7)	环境公报
		坡度(C_8)	环境公报
		土壤渗透系数(C_9)	中国土壤数据库
	经济可行性(B_4)	人均 GDP(C_{10})	国民经济及社会发展统计公报
		雨水利用工程单方投资(C_{11})	住建部估算指标
		利用节水成本(C_{12})	实施方案
	综合雨水需求率(B_5)	生活用水率(C_{13})	生活用水量 / 总用水量
		生态用水率(C_{14})	生态用水量 / 总用水量
		工业用水率(C_{15})	工业用水量 / 总用水量

表 2 雨水回用不同用水途径及需水量计算公式

种类	用途	计算公式
生活用水	居民生活	人口数 × 用水定额 × 365
	冲厕	每人每天平均使用次数 × 用水定额 × 人口数 × 365
生态用水	洗车	车辆数 × 平均每年冲洗次数 × 用水定额
	绿地浇灌	面积 × 平均每年浇灌次数 × 用水定额
工业用水	道路冲洗	面积 × 平均每年冲洗次数 × 用水定额
	冷却用水	万元工业增加值用水量 × 工业年产量

参考其他水资源相关的评价标准及研究结果,确定了本文海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价指标体系的等级划分标准,具体评价指标等级见表 3。Ⅰ级表示雨水资源丰富且可实施条件充裕,雨水资源利用潜力大,可大力发展海绵城市建设;Ⅱ级表示雨水资源丰富度或可实施条件相对没有那么理想,雨水资源利用潜力处于中度利用状态;Ⅲ级表示雨水资源相对缺乏,可实施条件相对较差,雨水资源利用潜力弱。

3.2 构建评价模型

海绵城市建设中雨水资源利用潜力的众多评价指标中定性指标较多,具有模糊性和不确定性等特

点,所以引入模糊综合评价法对其进行雨水资源利用潜力的评价^[18]。本文将层次分析法与模糊综合评价法相结合,对海绵城市建设中雨水资源的利用潜力进行分析评价。通过层次分析法确定评价体系中各评价指标的权重,再使用模糊综合评价法对海绵城市建设中雨水资源的利用潜力进行评价。

3.2.1 确定评价指标权重 根据标度法的计算步骤,首先邀请部分专家根据相关经验和在分析地区特性的基础上对准则层的指标进行重要性评判,构建判断矩阵,通过归一化计算指标的相对权重,之后对其进行一致性检验,一致性检验的相关公式如下。

一致性指标:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

一致性比例:

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵对应的最大特征值; RI 为平均随机一致性指标,可通过查表获得相关值。只有当 $CR < 0.1$ 时,才符合一致性检验,根据上述公式计算得出所有指标的权重。

3.2.2 模糊综合评价模型 首先设定两个集合,集合 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 为评价要素集合;集合 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$, 为评语集,每一评语集对应着一

个评价等级。

u_i 的单因素评价集为:

$$r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\} \quad (5)$$

把 n 个单因素评价集作为矩阵的行,得到模糊综合评价矩阵:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: R 反映的是因素 u_i 和评语 v_j 的模糊关系,称 R 为模糊综合评价矩阵。 R 的第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots,$

$r_{im})$ 为第 i 个因素 U_i 的单因素评价结果; r_{ij} 表示 U_i 对 V_j 的隶属度。

模糊综合评价的模糊变换为:

$$B = A \cdot R \quad (7)$$

式中: A 为评价要素集合 U 上的模糊子集; a_i 为 U_i 对 A 的隶属度, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n), 0 \leq a_i \leq 1$, 满足 $\sum_{i=1}^n a_n = 1$ 。 B 为评语集 V 上的等级模糊子集; b_j 为 V_j 对综合评价所得模糊子集 B 的隶属度, $B = (b_1, b_2, \dots, b_m), 0 \leq b_j \leq 1$, 根据最大隶属原则, $\max\{b_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 所对应的等级即为综合评判的结果。

表3 海绵城市建设中区域雨水资源利用潜力评价指标等级划分

评价指标	指标属性	评价指标等级划分		
		I级	II级	III级
多年平均降雨量/mm	正向指标	>1400	800~1400	<800
多年平均蒸发量/mm	逆向指标	<800	800~1300	>1300
综合径流系数	正向指标	>0.50	0.35~0.50	<0.35
渗透滞留设施可实施率/%	正向指标	>5	2.1~5	<2.1
雨水运输设施可实施率/%	正向指标	>1.5	0.5~1.5	<0.5
调蓄净化设施可实施率/%	正向指标	>3	0.9~3	<0.9
林草覆盖比率/%	正向指标	>12	7~12	<7
坡度/(°)	正向指标	>25	10~25	<10
土壤渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	逆向指标	<0.05	0.05~0.25	>0.25
年人均GDP/元	正向指标	>75500	50000~75500	<50000
雨水利用工程单方投资/($元 \cdot m^{-3}$)	正向指标	>565	308~565	<308
节水成本/($元 \cdot m^{-3}$)	正向指标	>0.7	0.5~0.7	<0.5
生活用水率/%	正向指标	>10	7~10	<7
生态用水率/%	正向指标	>15	10~15	<10
工业用水率/%	正向指标	>17	11~17	<11

4 实例应用

应用上述评价模型,对浙江省临海市城区东北部新城区的雨水资源利用潜力进行评价。研究区多年平均降水量 1 602.7 mm,年内降雨主要集中在 5-9 月的雨季,汛期降水量占全年 75% 左右,汛期天然径流量占全年的 80%;现状建成区面积约 15.3 km^2 ,现状水面率为 13.3%,现状用地以居住用地和工业用地为主,其次是建设用地与生态用地;主要河道有洛河、大寨河、大田河,主要湖泊有灵湖。研究区独特的气候条件与地理环境决定了雨水资源的可利用性,有效利用本地雨洪资源,对促进该区域经

济、社会和资源环境的可持续发展有着举足轻重的作用。该区域未来 3~5 年要进行城市建设,所以在建设初期考虑将海绵城市建设下基于低影响开发措施的雨水利用工程与城市建设相结合^[19],这样可以极大地减少雨水利用工程的建设成本,获得更好的运行效果。

4.1 研究区雨水资源的利用潜力及增加值

临海市城区东北部新城区的现状建成区面积约 15.3 km^2 ,各部分的功能特点明显,可以划分为六个土地利用类型,分别是生态用地、水域、公共设施用地、工业用地、市政道路、居住用地。由公式(1)、(2)计算得到该研究区的雨水资源利用的理论与现实潜

力。 α 为弃流系数,取 0.85; β 为季节折减系数,研究区的年内降雨主要集中在 5-9 月份,汛期降水量占全年 75% 左右,由此可确定季节折减系数为 0.75;根据《城市小区雨水利用技术规范》(GB50400-2006)和车伍等^[20]的资料分析研究,可以得出研究区不同下垫面对应下的综合径流系数值的大小。

计算结果见表 4。

根据《海绵城市建设技术指南》中各措施的适用性,针对不同的土地利用形式或基础设施选择适宜的低影响开发措施。研究区内与未来城市建设相结合的“海绵城市”建设下相关低影响开发措施的可实施情况见表 5。

该区域在采用了以上“海绵城市”建设工程措施后,雨水总调蓄容积达到 284 590 m³,即在实施海绵城市低影响开发措施后雨水利用潜力增加了

28.46 × 10⁴ m³。可见,该区域海绵城市建设中雨水资源较丰富,且有条件开展实施海绵城市建设工程。各雨水利用设施工程的渗透量、运输量或调蓄量的详细计算方法见《海绵城市建设技术指南》。

表 4 临海市城区东北部新城区雨水资源潜力计算表

下垫面类型	面积/ km ²	径流系 数 ψ	理论潜力 W / 10 ⁴ (m ³ · a ⁻¹)	现实潜力 W' / 10 ⁴ (m ³ · a ⁻¹)
生态用地	1.99	0.15	47.84	30.50
水域	2.81	1.0	450.36	287.10
公共设施用地	1.64	0.7	183.99	117.29
工业用地	2.75	0.8	352.59	224.78
市政道路	2.55	0.9	367.82	234.49
居住用地	3.56	0.7	399.39	254.61
总和	15.3		1801.99	1148.77

表 5 临海市城区东北部新城区雨水利用设施可实施工程量汇总表

雨水利用设施	具体工程内容	可实施工程量/km ²	可实施工程比例/%
渗透滞留设施	透水铺装、绿色屋顶、雨水花园、下沉绿地、沥青透水路面等	0.83	5.42
雨水运输设施	植草沟、树池等	0.25	1.63
调蓄净化设施	调节塘、湿塘、雨水湿地、蓄水池等	0.46	3.00

4.2 模型计算结果与分析

评价体系中相关指标的具体资料及数据主要来源于《临海市 2017 年国民经济及社会发展统计公报》、《临海市 2017 年水资源公报》、《临海市 2017 年环境公报》、《临海市 2017 年统计年鉴》、《临海市海绵城市建设试点实施方案》、《建筑给排水设计规范》和《室外给水设计规范》(GB50013-2006)等资料,部分数据可以通过计算整理得到。

首先根据各项评价指标与雨水资源利用潜力之间的相关关系以及实际的评价经验,听取了区域相关部门人员以及专家的建议,构造出判断矩阵,通过归一化计算出指标的相对权重,之后根据公式(3)、(4)对其进行了一致性检验,得到准则层及目标层各评价指标的合成权重见表 6。

表 6 评价指标权重值

评价因子	CR	权重系数
$U = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)$	0.0312	$A = (0.23, 0.22, 0.18, 0.20, 0.17)$
$U_1 = (C_1, C_2, C_3)$	0.0091	$A_1 = (0.12, 0.04, 0.07)$
$U_2 = (C_4, C_5, C_6)$	0.0145	$A_2 = (0.08, 0.06, 0.08)$
$U_3 = (C_7, C_8, C_9)$	0.0283	$A_3 = (0.05, 0.07, 0.06)$
$U_4 = (C_{10}, C_{11}, C_{12})$	0.0058	$A_4 = (0.10, 0.06, 0.04)$
$U_5 = (C_{13}, C_{14}, C_{15})$	0.0563	$A_5 = (0.08, 0.04, 0.05)$

将评价要素集 U 分为 2 个层次,根据层次分析法确定的各评价指标的权重建立各级评价指标的权重向量,根据构造出的判断矩阵 R ,由公式(7)可以求得准则层各指标的模糊综合评价向量,进而获得目标层对应的评价矩阵,最终求得目标层的模糊综合评价向量;按照最大隶属度原则,确定出评价等级,最大隶属度及评价等级见表 7。

雨水资源化条件准则层的评价结果为“Ⅰ级”,对应指标层的多年平均降雨量、蒸发量评价结果为“Ⅰ级”,综合径流系数为“Ⅱ级”,表明该区域雨水资源条件较好,雨水资源可利用度较高。雨水资源化可实施程度准则层的评价结果为“Ⅰ级”,对应指标层下的各指标的评价结果均为“Ⅰ级”,表明该地区海绵城市相关工程的的可实施率较高,根据《临海市海绵城市建设试点实施方案》及表 5 可知,该区域相关工程设施覆盖率较广,有利于雨水资源回收利用。区域生态环境状况准则层的评价结果为“Ⅱ级”,对应指标层下的区域林草覆盖比率评价结果为“Ⅰ级”,坡度及土壤渗透系数评价结果为“Ⅱ级”,表明该区域林草覆盖比率较大,但由于土壤性质属于红壤土亚黏土,故土壤渗透系数相对偏大,且地势较为平坦,坡度较小,表明该区域生态环境状况对雨水回收利用稍有不利用。经济可行性准则层的评

价结果为“Ⅱ级”,对应指标层下的人均GDP评价结果为“Ⅰ级”,雨水利用工程单方投资及节水成本的评价结果均为“Ⅱ级”,表明该地区经济发展水平较好,但对雨水利用工程建设方面的投资力度尚未达到住建部估算的高标准,将会导致工程设施工作效率稍有落后,节水成本达不到理想状态。综合雨水需求率准则层的评价结果为“Ⅰ级”,对应指标层下的生活、生态、工业用水率的评价结果均为“Ⅰ级”,表明该区域对回收的雨水资源的需求量较大,符合海绵城市建设的初衷,同时对节约城市水资源、适应社会经济发展需求有重要意义。以上结果与研究区“海绵城市”建设中雨水资源利用潜力较大的增加值有较好的一致性,说明构建的评价指标体系合理且准确,可为临海东北部新区接下来的发展提供一些新的思路。

表7 海绵城市建设中雨水资源利用潜力各级评价指标的模糊评价结果

目标层	最大隶属度	准则层	最大隶属度	指标层	最大隶属度
				C_1 (Ⅰ级)	1.00
		B_1 (Ⅰ级)	0.62	C_2 (Ⅰ级)	1.00
				C_3 (Ⅱ级)	0.39
				C_4 (Ⅰ级)	0.35
		B_2 (Ⅰ级)	0.43	C_5 (Ⅰ级)	0.42
				C_6 (Ⅰ级)	0.46
				C_7 (Ⅰ级)	1.00
A (Ⅰ级)	0.42	B_3 (Ⅱ级)	0.41	C_8 (Ⅱ级)	0.53
				C_9 (Ⅱ级)	0.46
				C_{10} (Ⅰ级)	1.00
		B_4 (Ⅱ级)	0.54	C_{11} (Ⅱ级)	0.51
				C_{12} (Ⅱ级)	0.42
				C_{13} (Ⅰ级)	0.38
		B_5 (Ⅰ级)	0.35	C_{14} (Ⅰ级)	0.47
				C_{15} (Ⅰ级)	0.41

5 结 论

海绵城市可大大提升城市在水资源、水环境等方面的保障能力,雨水资源利用潜力是区域发展海绵城市建设的一个评价标准。本文从5个方面构建了海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价体系,主要研究结论如下:

(1)本文基于雨水资源化条件、雨水资源化可

实施程度、区域生态环境状况、经济可行性与综合雨水需求率,从5个方面共15个指标构建了海绵城市建设中雨水资源利用潜力评价体系,将评价指标划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ3个等级表示雨水资源利用潜力大小,并采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的方法对海绵城市建设中雨水资源利用潜力的大小进行综合评价。

(2)对研究区——临海市海绵城市建设试点区运用评价体系进行评价,结果显示:该区域海绵城市建设中的雨水资源利用潜力为Ⅰ级,即雨水资源丰富且可实施条件充裕;通过综合径流系数法计算出,该地区在实施海绵城市建设后可增加的雨水资源利用量为 $28.46 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。两种方法计算出来的结果有较好的一致性,说明了该评价体系的合理性,可为之后的城市发展建设提供一些新的思路,也为区域雨水资源的开发利用及保证区域生态环境健康发展提供了一定的基础设施依据。

参考文献:

- [1] 吴普特,黄占斌,高建恩.人工汇集雨水利用技术研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002:1-48.
- [2] 余海龙,黄菊莹,肖国举.黄土高原半干旱区雨水资源化研究综述[J].人民黄河,2010,32(1):46-47+49.
- [3] 孙艳伟,魏晓妹,POMEROY C A.低影响发展的雨洪资源调控措施研究现状与展望[J].水科学进展,2011,22(2):287-293.
- [4] 张书函.基于城市雨洪资源综合利用的“海绵城市”建设[J].建设科技,2015(1):26-28.
- [5] 余卫东,汤景华,杨淑萍.城市雨水资源化潜力研究[J].气象与环境科学,2007,30(3):29-32.
- [6] 申亚青.成都市雨水资源化潜力及利用模式分析[D].西安:西安科技大学,2015.
- [7] 李晓贝,杨侃,刘建林,等.城市雨水利用潜力计算与效益识别模型与应用[J].中国农村水利水电,2017(11):14-19.
- [8] 赵飞,张书函,陈建刚,等.我国城市雨洪资源综合利用潜力浅析[J].人民黄河,2017,39(4):48-52+57.
- [9] 崔广柏,张其成,湛忠宇,等.海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J].水资源保护,2016,32(2):1-4.
- [10] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].给水排水,2015,51(3):1-7.
- [11] 牛文全,吴普特,冯浩,等.区域雨水资源化潜力计算方法与利用规划评价[J].中国水土保持科学,2005,3(3):40-44.

(下转第39页)

- 遵义市农业干旱特征研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(8):109-114.
- [10] 齐冬梅,李跃清,王 莺,等. 基于 Z 指数的四川干旱时空分布特征[J]. 干旱气象,2017,35(5):734-744.
- [11] 鞠 彬,曾 明,徐国梁. 不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):237-243.
- [12] 张 磊. 基于 SPI 的近 51 年临沂市旱涝时空特征分析[C]//中国气象学会,创新驱动发展·提高气象灾害防御能力——S7 应对气候变化与农业气象防灾减灾,2013,9.
- [13] 王 栋,梁忠民,王 军,等. 基于主成分聚类分析的云南省干旱自然分区[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):15-21+28.
- [14] 李 明,王贵文,张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):65-70.
- [15] 陈继祖. 河南省区域干旱灾害风险评估[D]. 郑州:郑州大学,2010.
- [16] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究,2015,34(8):1547-1558.
- [17] 李思诺,翁白莎,严登明,等. SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):101-107+113.
- [18] 张剑明,廖玉芳,彭嘉栋,等. 湖南气象干旱日数的时空变化特征[J]. 中国农业气象,2013,34(6):621-628.
- [19] 史佳良,王秀茹,李淑芳,等. 近 50 年来河南省气温和降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究,2017,24(3):151-156.
- [20] 程运平. 河南省农业干旱风险评价及区划[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016.
- [21] 李树岩,刘荣花,师丽魁,等. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析[J]. 干旱气象,2009,27(2):97-102.
- [22] 杜 懿,麻荣永. 1961-2016 年南宁市年降雨量变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):50-55.

(上接第 32 页)

- [12] JAEHOON L, JAYNES D B, HORTON R. Evaluation of a simple method for estimating solute transport parameters: laboratory studies. [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(2):492-498.
- [13] 隋 涛. 济南市城区雨水利用潜力分析[D]. 济南:山东建筑大学,2008.
- [14] 陈卫宾,徐建新,张 亮. 区域雨水资源开发利用潜力综合评价[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):66-68.
- [15] 蔡锁章. 数学建模原理与方法[M]. 北京:海洋出版社,2000:234-240.
- [16] 朱文彬,吕爱锋,曲 波. 我国城市雨水资源化利用的效益评价[J]. 给水排水,2017,53(S1):123-127.
- [17] 郑斐冉. 基于低影响开发的雨水利用研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [18] 向碧为,黄国如,冯杰. 基于 AHP 法的东江流域水基系统健康模糊综合评价[J],水电能源科学,2011,29(10):1-4.
- [19] 胡东启,陈 星,张其成,等. 低影响开发在海绵城市建设中的应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4):18-21.
- [20] 车 伍,李俊奇,刘 红,等. 现代城市雨水利用技术体系[J]. 北京水务,2003(3):16-18.