

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 13. 019

基于云模型的喀斯特山区海绵系统综合效益评价

郭诺玮, 李孟, 王乾坤, 韩双, 郭曾
(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对喀斯特山区水系统存在的问题,根据当地的自然环境特征和经济发展状况,提出喀斯特山区海绵系统的构建思路。为真实反映该海绵系统的综合效益,提出了组合赋权-云模型评价方法。首先构建能反映喀斯特山区海绵系统特色的评价体系,接着采用层次分析法和熵权法确定评价指标的权重,最后引入云模型和相似度计算确定评价等级。以湖北保康县后坪镇九池村为研究对象,构建喀斯特山区海绵系统,并进行综合效益整体评价。结果表明,喀斯特山区海绵系统明显改善了当地的生态、经济和社会效益。组合赋权-云模型的评价方法既准确客观,又具有可行性和有效性。

关键词: 喀斯特山区; 海绵系统; 综合效益评价; 云模型; 组合赋权

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0117-07

Comprehensive Benefit Evaluation of Sponge System in Karst Mountain Areas Based on Cloud Model

GUO Nuo-wei, LI Meng, WANG Qian-kun, HAN Shuang, GUO Zeng
(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the existing problems of water system in karst mountain areas, the construction strategy of sponge system in karst mountain areas was proposed according to the local natural environment characteristics and economic development. A combination weighting and cloud model evaluation method was proposed to truly reflect the comprehensive benefits of the sponge system. Firstly, an evaluation system reflecting the characteristics of sponge system in karst mountain areas was constructed. Then, analytic hierarchy process and entropy weight method were used to determine the weight of evaluation indexes. Finally, cloud model and similarity calculation were introduced to determine the evaluation level. The sponge system in karst mountain area, Jiuchi Village, Houping Town, Baokang County, Hubei Province, was constructed and its comprehensive benefit was evaluated. The sponge system in karst mountain area obviously improved the local ecological, economic and social benefits, indicating that the combination weighting and cloud model evaluation method was accurate, objective, feasible and effective.

Key words: karst mountain area; sponge system; comprehensive benefit evaluation; cloud model; combination weighting

近年来,国家大力推广“海绵城市”建设,以解决城市内涝问题,实现雨水的资源化利用。然而,农村地区的水环境受到了忽略,且稀缺的水资源制约当地生态和社会环境以及经济的发展^[1]。2018年出台的《农村人居环境整治三年行动方案》明确提出到2020年要实现明显改善农村人居环境的行动目标^[2]。因此,可以借助“海绵城市”的建设理念,充分利用农村自然环境资源,建设适宜地区发展的农村海绵系统,从而改善农村地区的水资源情况,促进当地经济发展。

农村海绵系统的建设不仅要解决当地水系统存在的问题,还要能改善生态环境、促进经济发展。因此,需要全面评估其综合效益,为后续工程建设提出指导性意见。综合评价常用的方法有层次分析法(AHP)、主成分分析法、模糊综合评价法、神经网络评价法等^[3]。但是,山区海绵系统建设尚处于起步阶段,数据较少且涉及的影响因素繁杂,具有复杂性和不确定性,因此上述评价方法存在一定的局限性。

例如层次分析法和模糊综合评价法存在主观色彩较重的缺陷^[4];主成分分析法的模型计算相对复杂繁琐^[5];神经网络评价法对于数据样本的需求量比较大,必须保证一定数量的检测样本,才能保证评价结果的准确性^[6]。海绵系统是一个动态、复杂且不确定的过程,因此需要寻求一种可同时兼顾指标模糊性与随机性的评价方法。云模型是在概率统计学和模糊数学的基础上提出的一种复合不确定性数学理论模型,不仅实现了定性概念和定量描述之间的转换问题,同时还能兼顾系统的模糊性和随机性^[7]。

基于以上分析,笔者针对喀斯特山区独特的地形地貌、自然环境特征、水系统现状和当地的经济情况,在“海绵城市”理论的基础上,构建了“喀斯特山区海绵系统”。同时,在湖北保康县这一典型的喀斯特山区进行试点应用,尝试采用云模型的综合评价方法,从生态环境效益、经济效益和社会效益三方面构建具有喀斯特山区海绵城市特色的评价体系,对喀斯特山区海绵系统进行综合效益评价,依据云模型的相似度得到喀斯特山区海绵系统综合效益的等级,以衡量其是否达到既定标准或预设目标。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

湖北保康县是襄阳市唯一全山区县,其森林覆盖率达67%以上,属于典型的喀斯特山区,以亚热带和温带气候为主,降雨量充足,多年平均降雨量为900~1 200 mm^[8]。其可利用雨水资源潜力非常大,但受当地自然因素、雨水集蓄技术、经济水平等制约,导致雨水资源的开发利用量非常小。由于流水对可溶性岩石长期侵蚀和溶蚀作用,导致喀斯特地区地表坡度大,地表沟河、地下暗河较多,地面存不住水,雨水易快速流失^[9],因此喀斯特地区水土流失严重,出现了不同程度的缺水现象。

以保康县后坪镇九池村为试点(见图1),该村无雨水收集管道,处于散排状态,且下垫面的雨水透水能力差,导致严重的地表径流污染和有效雨水资源的浪费。九池村没有适宜的污水处理设施,污水通过管道汇入排污明渠,最后通过排污明渠流入周边水体。不仅如此,由于给水设施的不完善和水源水量的缺乏,无法保障村民长期的用水安全。并且喀斯特山区铺设的给水输送管道系统也不尽合理,使得部分地势较高或地处偏远的分散型居民用水点的水压和水量偏低,甚至没有水源供应。为此,根据当地水系统存在的问题和生态环境资源现状,2017年5月开始构建喀斯特山区海绵系统,在2018年5月—2019年12月历时1年半运行效果的基础上,开展对喀斯特山区海绵系统的综合效益评价研究。

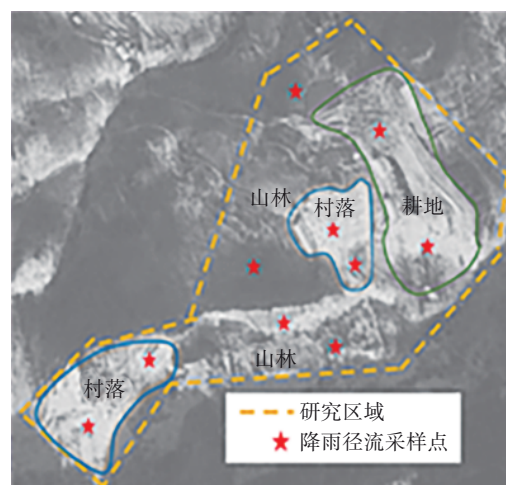


图1 研究区域范围及采样点位置

Fig.1 Scope and sampling locations of study area

1.2 喀斯特山区海绵系统的构建

为解决典型喀斯特山区水系统存在的问题,基于传统海绵城市的建设理念,以雨水的高效资源化利用为纽带,将喀斯特山区中的三个重要子系统(给水系统、雨水系统、排水系统)有机融合为一体,利用喀斯特山区独特的自然资源,建设适宜喀斯特山区的海绵系统。喀斯特海绵系统首先要解决当地的供排水问题,以实现雨水的资源化利用,最终达到改善山区生态环境的目的,进而达到山区经济和社会发展的远期目标。海绵系统结构构建如图2所示。

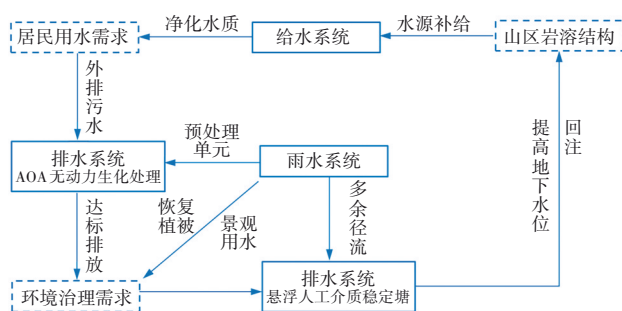


图2 典型喀斯特山区海绵系统结构构建

Fig.2 Sponge system construction structure of typical karst mountain area

喀斯特山区海绵系统的构建以雨水子系统为核心,主要发挥其渗、蓄、净的功能,采取的措施为在村落间建造集流和雨水渗透设施,在山坡坡底和平缓处建设蓄水池,修整植草沟,在山体陡峭处种植植被,利用植被-土壤构建吸水性强的天然微海绵体和净化处理设施。采用人工构筑物和自然相结合的方式收集、渗透和净化雨水,从而控制年径流总量和污染物浓度。

在排水子系统的建造过程中,以AOA(厌氧—好氧—缺氧)无动力生化处理设施作为主要处理单元,充分利用当地高差大的地势条件,阶梯式立状布置厌氧池、好氧池和缺氧池,将高差产生的势能转换为水的动能,实现无动力高效充氧,减少了水泵、鼓风机曝气等传统的动力机械设备,经其处理后的出水水质完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。为提高喀斯特山区的污水再生利用效率,利用当地丰富的天然植被资源,以悬浮人工介质稳定塘作为深度处理单元,将部分经过生化处理以后的尾水进行深度处理,用于生活杂用水和公共用水。在暴雨时期,输

送部分多余径流雨水至悬浮人工介质稳定塘进行净化后,缓慢回注于喀斯特山区的岩溶结构中,既能有效缓解大流量地表径流对排水处理设施运行带来的压力,降低暴雨时期洪涝灾害的风险和危害,又可以缓慢提高地下水的水位,为给水系统提供长期稳定的补给水源。

在给水子系统建造中,要解决供水水源的水量 and 水质两大问题。将采用有效的保水防渗措施,借助当地天然的多层土壤基础结构建造具有水量水质调节功能的蓄水池,实施坡改梯、小型水利水保等工程。根据水源水中杂质颗粒物浓度低、病原微生物指标含量高的特点,采用以“微絮凝+消毒”为核心简洁有效的处理工艺,且根据村民的居住位置和山势情况,采用分级分散式净水-用水系统,为村民长期提供安全卫生的饮用水。

1.3 综合评价方法

1.3.1 云模型基本理论

云模型最早由我国著名学者李德毅院士提出,其采用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 来整体表征事物的分布情况^[10-11]。标准云模型按照标准等级个数将指标评价值的论域 U 划分成5个子区间,第 j 个子区间为 $[x_{jmin}, x_{jmax}]$,该子区间对应的正态云的特征值为 (Ex_j, En_j, He_j) ,其计算表达式为^[12]:

$$\begin{cases} Ex_j = (x_{jmin} + x_{jmax})/2 \\ En_j = (x_{jmax} - x_{jmin})/6 \\ He_j = s \end{cases} \quad (1)$$

确定各指标权重后,采用逆向云发生器计算所有指标的评价云,第 i 个指标的评价云 C_i 为 (Ex_i, En_i, He_i) 。在得到指标层正态云模型参数后,结合上述计算的指标组合权重,按式(2)计算准则层及目标层的综合云参数^[13]。

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^m (Ex_i \cdot w_i) \\ En = \sqrt{\sum_{i=1}^m (En_i^2 \cdot w_i)} \\ He = \sum_{i=1}^m (He_i \cdot w_i) \end{cases} \quad (2)$$

1.3.2 层次分析法-熵权法确权

层次分析法(AHP)是一种主观赋权的方法,其将复杂的问题分解为多个指标以形成多层次结构^[10],分析步骤见文献[4]。熵权法是根据数据资

料来反映指标重要程度的客观赋权方法,计算步骤见文献[11]。

2 喀斯特山区海绵系统综合评价模型构建

2.1 综合效益评价指标体系的设计

喀斯特山区海绵系统是一个综合体系,构建过程中需要考虑体系的整体效果。参照《海绵城市建设绩效评价与考核指标》和《全国水生态文明城市评价标准》等规范,并结合专家现场调研和问卷调查的结果,最终确定了涵盖生态环境效益、经济效益、社会效益的适用于喀斯特山区海绵系统的综合评价指标体系。该体系共包含 15 个细项指标(如图 3 所示),其既能体现出喀斯特山区海绵系统建设的目的,又能凸显当地水系统生态环境和社会经济发展的特征。

在体系的构建中,摒弃了生态岸线恢复、管网漏损控制、下沉式绿地率、透水铺装率、绿色屋顶率这些常用于评价海绵城市的指标。根据喀斯特山区海绵系统构建要实现的目标,将地下水位、水土流失治理度、饮用水水质达标率、水源保障程度这 4 个非常规指标纳入体系中,使构建的评价指标体系更能有效反映出喀斯特山区海绵系统构建的综合效益,对之后喀斯特山区海绵系统的建设、推广和

应用更具有实际指导意义。

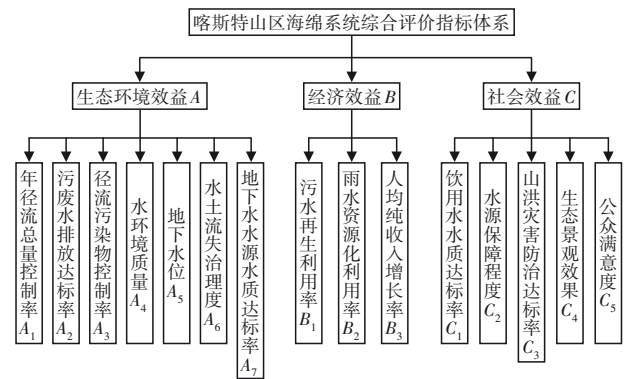


图3 喀斯特山区海绵综合评价指标体系

Fig.3 Sponge comprehensive evaluation index system of karst mountain area

2.2 综合评价模型

2.2.1 评价指标权重确定和数据收集

收集保康县后坪镇九池村的数据,对于定性指标,邀请相关领域的 10 位专家和当地居民进行打分。定量指标以提供的地方统计年鉴、水环境质量状况、财政报表和相关监测数据为依据,评价量化标准参照国家相关规范,层次分析法-熵权法组合得到海绵系统综合效益评价的指标权重结果如表 1 所示。

表1 海绵系统综合效益评价指标权重和相关数据

Tab.1 Evaluation index weight and data of sponge system comprehensive benefit

评价指标	评价量化标准	参照规范	建设前数据	建设后数据	组合权重
年径流总量控制率 A_1	70%~85%	《海绵城市建设技术指南》	45%~50%	75%~80%	0.054 6
污水排放达标率 A_2	$\geq 90\%$	《国家园林城市标准》	70%~75%	100%	0.094 7
径流污染物控制率 A_3	40%~60%	《海绵城市建设技术指南》	20%	55%	0.055 2
水环境质量 A_4	不得出现黑臭现象	《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	60 分	85 分	0.066 6
地下水位 A_5	年均地下水位保持稳定或下降趋势明显得到遏制	《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	4~6 m	3~5 m	0.086 5
水土流失治理度 A_6	$\geq 95\%$	《全国水生态文明城市评价标准》	20%~30%	40%~45%	0.062 1
地下水水质达标率 A_7	100%	《全国水生态文明城市评价标准》《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	50%	85%	0.116 9
污水再生利用率 B_1	$\geq 20\%$	《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	5%	12%	0.068 1
雨水资源化利用率 B_2	$\geq 1\%$	《国家节水型城市考核标准》《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	0	$\geq 1.5\%$	0.094 9
人均纯收入增长率 B_3	8.80%	2018 年全农村居民人均可支配收入增长	6.75%	9.15%	0.016 0
饮用水水质达标率 C_1	100%	《全国水生态文明城市评价标准》	85%	100%	0.104 1
水源保障程度 C_2	95%	《全国水生态文明城市评价标准》	50%	85%	0.070 7
山洪灾害防治达标率 C_3	100%	《海绵城市建设绩效评价与考核指标》	45%	70%	0.045 1
生态景观效果 C_4	水工程与周边环境是否融合,景观效果如何	《全国水生态文明城市评价标准》	50 分	85 分	0.037 6
公众满意度 C_5	满意率达 80% 以上	《全国水生态文明城市评价标准》	68 分	88 分	0.026 9

由于喀斯特山区海绵系统建设的首要目的是解决当地村民供排水问题和实现雨水资源化利用,与一般海绵城市的建设目标有所不同,且数据较少,因此在组合赋权时,主观权重的占比较大。根据表1的赋权结果可知,地下水水源水质达标率 A_7 、饮用水水质达标率 C_1 、雨水资源化利用率 B_2 、污水水排放达标率 A_2 对本项目的影响最为重要,其次为地下水位 A_5 、水源保障程度 C_2 、污水再生利用率 B_1 、水环境质量 A_4 ,而水土流失治理度 A_6 、径流污染物控制率 A_3 、年径流总量控制率 A_1 和山洪灾害防治达标率 C_3 权重较小。赋权结果反映出典型喀斯特山区海绵系统建设的目标和需要解决的关键问题。

2.2.2 标准云与综合云

按照设定,将典型喀斯特山区海绵系统的综合效益评价分为五个等级,评价区间为 $[0, 100]$ 。按照式(1)确定各等级的云模型参数,见表2。

表2 海绵系统综合效益评价等级及正态云参数

Tab.2 Evaluation grade and normal cloud parameters of comprehensive benefit of sponge system

评价等级	I级	II级	III级	IV级	V级
区间划分	[0,25)	[25,50)	[50,75)	[75,90)	[90,100]
云模型参数	(12.5,4.17,0.5)	(37.5,4.17,0.5)	(62.5,4.17,0.5)	(82.5,2.5,0.5)	(95.0,1.67,0.5)

通过正向云发生器生成云滴($N=2\ 000$),所有的云滴共同组合成云图,即可得到综合效益评价标准云图,如图4所示。

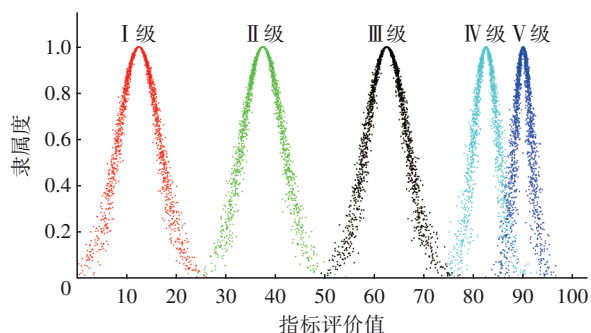


图4 海绵系统综合效益评价标准云

Fig.4 Standard cloud of comprehensive benefit evaluation of sponge system

将定量指标的量化分值与定性指标的专家打分值整理成综合效益评价矩阵,通过逆向云发生器计算各指标对应的正态云模型参数。结合确定的指标层和准则层权重,按照式(2)确定综合云参数,

结果见表3。

表3 海绵系统综合效益评价综合云

Tab.3 Comprehensive cloud of comprehensive benefit evaluation of sponge system

正态云	云模型参数(E_x, E_n, H_e)	
	建造前	建造后
生态环境效益评价云	(47.09, 3.15, 1.02)	(75.19, 3.31, 0.89)
经济效益评价云	(51.21, 2.65, 0.84)	(83.43, 2.88, 0.95)
社会效益评价云	(45.09, 2.83, 0.92)	(81.09, 2.15, 0.42)
综合效益评价云	(46.22, 3.47, 1.06)	(78.56, 2.99, 0.81)

3 结果与讨论

根据标准云与综合云的模型参数,判断海绵系统综合效益所处的评价等级。此外,还可以通过计算综合云 $C(E_x, E_n, H_e)$ 和标准云 $C(E_{x_j}, E_{n_j}, H_{e_j})$ 的相似度 γ 进行等级判断^[14]。

根据云模型3个特征参数,通过MATLAB编程将改造前后的综合效益评价云与标准云绘制在同一云图上,如图5所示。

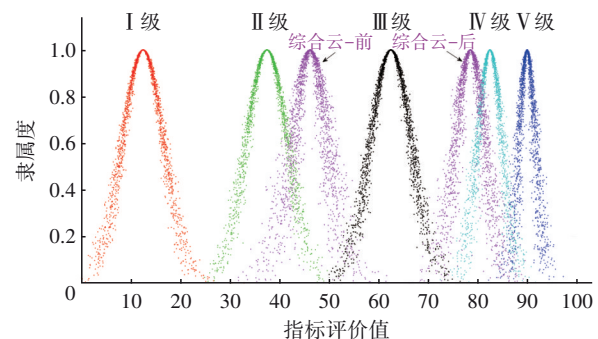


图5 海绵系统建设前后综合效益评价结果

Fig.5 Comprehensive benefit evaluation results before and after sponge system construction

结合相似度的计算结果(见表4),确定海绵系统建设前后的综合效益等级。海绵系统建设前的综合效益评价云为 C_{before} (46.22, 3.47, 1.06),建成运行后的综合效益评价云为 C_{after} (78.56, 2.99, 0.81),通过云图的绘制和相似度计算可知,海绵系统建设前综合效益的评价等级为II级,综合效益较差,而喀斯特海绵系统的综合效益可以达到IV级,综合效益处于较好水平。进一步对比云的期望值 E_x 可知,改造后的综合效益提升了65%左右。由表4可知,提出的基于云模型的喀斯特山区海绵系统综合效益的评价模型,其综合效益的评价结果与模糊综合评价法模型的结果基本一致,因此构造的喀斯特山区海绵系统综合效益的评价方法是客观合

理且有效可行的,主客组合赋权法考虑了人为因素和指标值本身的客观属性,采用组合赋权-云模型

评价方法能真实反映评价指标的模糊性和随机性,且具有较好的适应性。

表4 海绵系统建设前后综合效益相似度计算

Tab.4 Similarity calculation results before and after sponge system construction

项 目	综合云相关度					本研究 评价结果	模糊综合 评价法结果
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级		
建设前综合效益	0.000 0	0.219 0	0.015 3	0.000 0	0.000 0	II	II
建设后综合效益	0.000 0	0.000 0	0.008 2	0.363 4	0.000 1	IV	IV

由表1可知,建设后的饮用水水质达标率 C_1 和污水排放达标率 A_2 达到100%,居民饮用水安全和污水排放不达标问题得到解决;地下水水源水质达标率 A_3 和水源保障程度 C_2 均由50%提升至85%,雨水资源化利用率 B_2 达到1.5%以上,均取得了较好的成绩,实现了喀斯特山区海绵系统建设的近期目标。随着喀斯特山区海绵系统的长期运行,水环境质量 A_4 和生态景观效果 C_4 也得到了有效改善,当地村民收入有所增长,生活质量得以提高。但污水再生利用率 B_1 和水土流失治理度 A_6 与评价量化标准差距较大,故仍需要采取适当的措施加以管控,以提高水资源再生利用率和水土流失治理度,这样有利于喀斯特山区海绵系统远期目标的实现。

4 结论

① 针对喀斯特山区水系统存在的问题,根据当地的地形地貌特点、自然环境特征和经济建设等情况,基于“海绵城市”理论,提出了喀斯特山区海绵系统的构建体系。

② 由于喀斯特山区海绵系统的复杂性、模糊性和随机性,引入组合赋权-云模型,提出了喀斯特山区海绵系统的综合效益评价方法。组合赋权方法的灵活性与准确性保证了喀斯特山区海绵系统各项指标的权重分配得当,避免了数据较少带来的局限性,更加准确地确定了各指标的重要程度。云模型则实现了定性概念和定量数据间的转换,使评价结果更加客观有效。

③ 以湖北保康县后坪镇九池村为试点,建设喀斯特山区海绵系统,以生态环境效益、经济效益和社会效益为主,开展综合效益评价。评价结果表明,喀斯特山区海绵系统的综合效益评价等级为IV级,综合效益水平良好。其中地下水水源水质达标率 A_3 、饮用水水质达标率 C_1 、雨水资源化利用率 B_2 和污水排放达标率 A_2 的影响最为重要。为促进

喀斯特山区海绵系统远期效益的实现,需要进一步采取措施提高污水再生利用率 B_1 和水土流失治理度 A_6 。

参考文献:

- [1] 刘丙军,陈晓宏,雷洪成,等.流域水资源供需系统演化特征识别[J].水科学进展,2011,22(3):331-336.
LIU Bingjun, CHEN Xiaohong, LEI Hongcheng, et al. Distinguishing of water resources supply and demand system evolution features [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3):331-336(in Chinese).
- [2] 朱明石,陈轩,周少奇,等.西部(贵州)喀斯特山区农村生活污水治理概述[J].广东化工,2019,46(8):160-161.
ZHU Mingshi, CHEN Xuan, ZHOU Shaoqi, et al. Technical analysis of rural sewage treatment in western karst mountains [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019,46(8):160-161(in Chinese).
- [3] 苏为华.多指标综合评价理论与方法问题研究[D].厦门:厦门大学,2000.
SU Weihua. Research on the Theory and Method of Multi-index Comprehensive Evaluation [D]. Xiamen: Xiamen University, 2000(in Chinese).
- [4] 韩利,梅强,陆玉梅,等.AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J].中国安全科学学报,2004,14(7):86-89.
HAN Li, MEI Qiang, LU Yumei, et al. Analysis and study on AHP-fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7):86-89(in Chinese).
- [5] 刘莉,汪丽娜.基于熵权-正态云模型的水资源可持续性评价[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(1):77-84.
LIU Li, WANG Lina. The entropy weights-based approach to and the normal cloud model for water resources assessment [J]. Journal of South China

- Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52 (1):77-84(in Chinese).
- [6] 刘国东,黄川友,丁晶. 水质综合评价的人工神经网络模型[J]. 中国环境科学,1998,18(6):514-517.
- LIU Guodong, HUANG Chuanyou, DING Jing. The models of artificial neural networks for comprehensive assessment of water quality [J]. China Environmental Science, 1998, 18(6):514-517(in Chinese).
- [7] 薛黎明,李长明,郑志学,等. 基于云理论的综合评价方法[J]. 系统科学学报,2020,28(2):68-72.
- XUE Liming, LI Changming, ZHENG Zhixue, *et al.* Comprehensive evaluation based on cloud theory [J]. Chinese Journal of Systems Science, 2020, 28(2):68-72 (in Chinese).
- [8] 王恒松,张芳美,张育林. 喀斯特山区雨水集蓄关键技术研发与示范[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 114-118.
- WANG Hengsong, ZHANG Fangmei, ZHANG Yulin. Research and development of key technologies for rainwater collection and storage in karst mountainous areas [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (7):114-118(in Chinese).
- [9] 严友进. 喀斯特石漠化区浅层岩溶裂隙及其土壤主要生态功能研究[D]. 贵阳:贵州大学,2019.
- YAN Youjin. Study on the Main Ecological Functions of Shallow Karst Fissures and Soil in an Area Rocky Desertification in SW China [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019(in Chinese).
- [10] SINGH R P, NACHTNEBEL H P. Analytical hierarchy process (AHP) application for reinforcement of hydropower strategy in Nepal [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55:43-58.
- [11] 叶达,吴克宁,刘霏珈. 半干旱区农业开发土地资源生态安全评价——以宁夏孙家滩国家农业科技园区为例[J]. 环境科学学报,2016,36(3):1099-1105.
- YE Da, WU Kening, LIU Peijia. Ecological security evaluation of land resources based on agricultural development in semi-arid areas [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(3):1099-1105(in Chinese).
- [12] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.
- LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6):15-20(in Chinese).
- [13] 李英攀,刘名强,王芳,等. 装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27 (6):115-120.
- LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang, *et al.* Safety performance assessment of fabricated building project based on cloud model [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6):115-120(in Chinese).
- [14] 王利平. 宜居城市水资源安全评价研究——以北京为例[D]. 天津:天津大学,2018.
- WANG Liping. Study on the Evaluation of Water Resources Safety in Livable City—Taking Beijing as an Example [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).

作者简介:郭诺玮(1996-),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制技术。

E-mail:1009267136@qq.com

收稿日期:2020-07-06

修回日期:2020-07-25

(编辑:任莹莹)

贯彻执行《中华人民共和国防洪法》