

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.025

基于云模型的生态河道建设评价

赵晨程,高玉琴,刘 钺,吴 迪

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:从水安全保障、水资源保护、水污染防治、水环境治理、水生态修复、水文化建设、水工程管护、水制度创新等8个方面选取30个指标,构建了生态河道建设评价指标体系,利用云模型对江苏省宿迁市生态河道建设进行评价。结果表明:云模型对宿迁市生态河道建设综合评价值为89.52,说明其生态河道建设处于良好水平;水资源保护子体系综合评价值最低,处于中等水平,其余一级指标子体系综合评价值处于良好水平,验证了云模型评价方法在生态河道建设评价中的有效性和适用性。

关键词:生态河道建设评价;指标体系;云模型;水资源;宿迁市

中图分类号:TV85 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0183-07

Evaluation of ecological river construction based on cloud model//ZHAO Chencheng, GAO Yuqin, LIU Yue, WU Di
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With 30 indices selected from eight aspects, including water safety guarantee, water resources protection, water pollution prevention and control, water environment treatment, water ecological restoration, water culture construction, water engineering management and protection, and water system innovation, an ecological river construction evaluation index system was established. A cloud model was constructed to evaluate ecological river construction in Suqian City, Jiangsu Province. Results show that the cloud model evaluation value of the ecological river construction is 89.52, indicating that the ecological river construction is in good condition; the water resource protection subsystem has the lowest evaluation value, being at a medium level, while the evaluation values of the rest subsystems of primary indices are at relatively high levels, verifying the effectiveness and applicability of the cloud model in ecological river construction evaluation.

Key words: ecological river construction evaluation; index system; cloud model; water resources; Suqian City

水生态文明是生态文明建设的重要组成部分^[1],也是河长制实施的最终目标。准确定义生态河道,建立科学合理的评价指标体系具有重要的指导意义和研究价值。

目前,在生态河道建设评价指标体系与评价方法等方面已有诸多研究。陈平等^[2]认为生态河道建设要重视整治后原有生物群落的恢复,构建了5个指标群的生态河道评价指标体系;高晓琴等^[3]指出生态河道治理经历了自然型河道阶段和生态型河道阶段,河流生态修复需要同时考虑河床水体和河岸带生态恢复的作用,兼顾河道安全和生态健康,将城市生态系统影响纳入生态河道建设;左倬等^[4]根据中国城市河道生态建设特点,选取滨岸带生境、滨岸带生物群落、河床生态环境、河床生物群落和特征

指标群5个一级指标以及23个二级指标,构建城市河道生态符合指数的概念,定量描述城市河道生态水平;曹文彪等^[5]使用基于层次分析法的模糊综合评价模型对崇明岛河流生态进行研究;Reheman等^[6]以Landsat遥感影像和水文数据为主要数据源,对比分析水利工程建设前后区域植被覆盖变化特征,表明水利工程建设对生态环境有修复作用,促进了水资源高效利用;熊坤杨^[7]基于河道水质、河道环境、河内物种、生态需水量、水利功能、河道管理等6个指标建立了较为系统的生态河道评价体系。

云模型是基于传统概率统计和模糊数据衍生而来的定量、定性转换模型,其数字特征可有效表现定性概念的定量特性^[8],兼顾事物的模糊性和随机性。云模型评价方法在水利领域已应用于流域综合

基金项目:国家自然科学基金(52079039);江苏省自然科学基金(BK20181310);江苏省水利科技项目(520047612)

作者简介:赵晨程(1997—),女,硕士研究生,主要从事水资源规划及利用、水资源保护和水利经济研究。E-mail: zhaochencheng@hhu.edu.cn

通信作者:高玉琴(1977—),女,教授,博士,主要从事洪涝灾害、风险控制和水利规划研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

评价^[9]、水资源保护效果评价^[10]、河长制考核评价^[11]、低影响开发措施综合效益评价^[12]等方面,而采用云模型对生态河道建设进行评价的研究还不多见。本文以江苏省宿迁市为例利用云模型对生态河道建设进行评价。

1 生态河道建设评价指标体系及评价标准

生态河道建设主要依靠自然作用,通过少量人为方式,在符合河道基本水利功能的前提下维持河道的生态平衡和生物多样性^[13],建设城市生态河道的目的是维持河道水质、水量以及生态的有机统一^[14]。生态河道建设应重视发挥生态服务功能和完善生态保育功能,维持河道正常运行的环境条件,为人类和自然提供生态服务;生态河道建设应保证生态结构完整性,当生态河道建设发展过程中出现干扰问题时,应及时恢复原生态结构。

生态河道建设总体目标为:有效保障水安全、永续利用水资源、保持水环境整洁优美、保持水生态系统健康、传承弘扬水文化。我国应从以下几方面落实生态河道建设:建成防洪减灾体系,高效利用水资源,维护经济社会稳定发展,落实水资源管理制度,保障经济社会可持续发展;优化产业布局,减少污染排放,降低环境自净负荷,治理河湖乱占、乱建、乱排的“三乱”现象;消除黑臭水体,沟通水系,涵养水源,修复河湖生态;保护、挖掘、弘扬水文化,丰富水文化内涵;实现河湖资源有序利用,完善河湖长效管护体制机制。

1.1 评价指标体系

本文根据中央、省、市关于生态文明建设的决策部署要求,参照《宿迁市生态河湖行动计划(2018—2020年)》,选择水安全保障、水资源保护、水污染防治、水环境治理、水生态修复、水文化建设、水工程管护、水制度创新 8 个方面的 30 项指标,建立生态河道建设评价指标体系,如图 1 所示,各指标通过定量数值来体现,除底泥污染程度按 5 分制计算外,其余各指标均以百分制计算。

1.2 评价等级与标准

根据数值大小和相关评价文献^[2,5,9,11]将生态河道建设评价指标分为 5 个等级:不合格、合格、中等、良好和优秀,评价指标各等级数值范围见表 1。

2 基于云模型的生态河道建设评价模型

2.1 云模型理论

云模型概念最初由李德毅院士提出^[15],按机制可分为正向云发生器(forward cloud generator, FCG)、逆向云发生器(backward cloud generator, BCG)

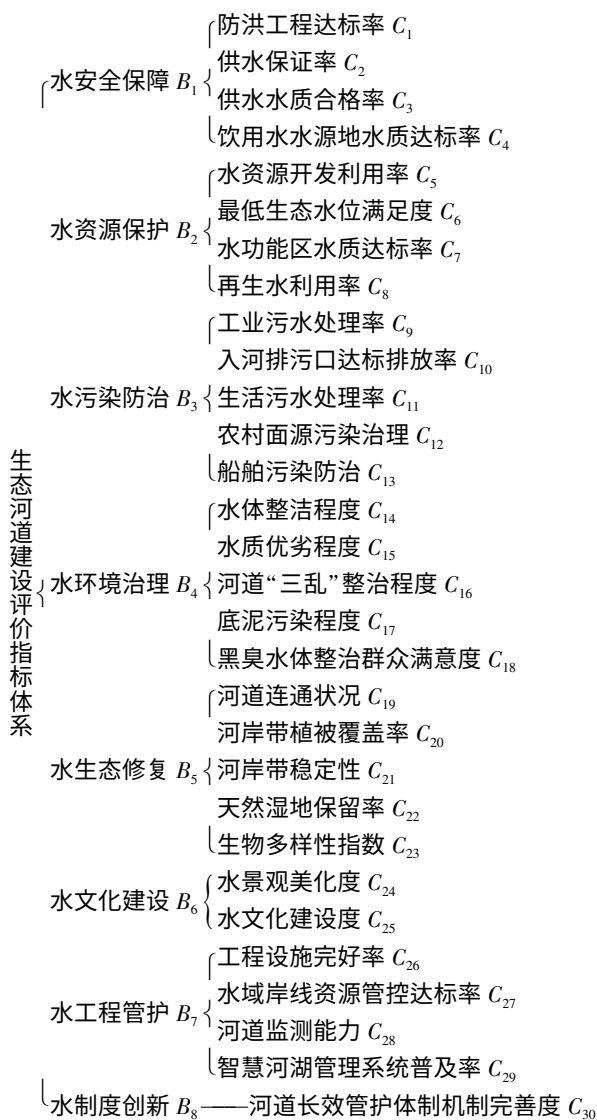


图 1 生态河道建设评价指标体系

Fig. 1 Ecological river construction evaluation index system

和条件云发生器,按不同形式隶属函数可分为不同类型的云模型。正态分布现象在自然界极为普遍,许多大样本统计量近似服从正态分布,正态云模型能反映和描述其中的模糊性和不确定性^[16],因此得到广泛应用。

正态云模型采用期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 作为特征值。期望即数学期望,反映所有云滴的平均值,熵反映云滴之间的离散程度,超熵反映熵的不确定程度。云模型通过云发生器完成特征与云滴的互相转换,FCG 是定性转向定量的过程,通过云的数字特征生成大量云滴和对应的隶属度;BCG 则相反,通过定量的样本(x)和确定度(μ)计算出云模型的定性概念(E_x, E_n, H_e);条件云发生器以特定的 X 条件或 Y 条件作为规则产生隶属度。

2.2 云模型计算指标权重和指标等级

收集若干专家对指标赋予的权重,通过 BCG 求解每个项目的云数字特征(E_x, E_n, H_e),通过 FCG 生

表 1 生态河道建设评价指标的等级与标准

Table 1 Ecological river construction evaluation index grades and standards

等级	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
不合格	[0,60)	[0,60)	[0,95)	[0,70)	[80,100]	[0,40)	[0,60)	[0,10)	[0,60)	[0,50)	[0,70)
合格	[60,70)	[60,75)	[95,97)	[70,80)	[60,80)	[40,60)	[60,70)	[10,20)	[60,70)	[50,70)	[70,80)
中等	[70,80)	[75,85)	[97,98)	[80,90)	[40,60)	[60,80)	[70,80)	[20,30)	[70,85)	[70,90)	[80,90)
良好	[80,90)	[85,95)	[98,100)	[90,95)	[20,40)	[80,90)	[80,90)	[30,40)	[85,95)	[90,95)	[90,95)
优秀	[90,100]	[95,100]	100	[95,100]	[0,20)	[90,100]	[90,100]	[40,100]	[95,100]	[95,100]	[95,100]

等级	$C_{12} \sim C_{15}$	C_{16}	C_{17}	C_{18}	$C_{19} \sim C_{20}$	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	$C_{25} \sim C_{30}$
不合格	[0,20)	[0,70)	[4,5]	[0,60)	[0,20)	[0,30)	[0,20)	[0,50)	[0,50)	[0,20)
合格	[20,40)	[70,80)	[3,4)	[60,70)	[20,40)	[30,60)	[20,40)	[50,75)	[50,70)	[20,40)
中等	[40,60)	[80,90)	[2,3)	[70,80)	[40,60)	[60,70)	[40,60)	[75,85)	[70,80)	[40,60)
良好	[60,80)	[90,95)	[1,2)	[80,90)	[60,80)	[70,80)	[60,80)	[85,95)	[80,90)	[60,80)
优秀	[80,100]	[95,100]	[0,1)	[90,100]	[80,100]	[80,100]	[80,100]	[95,100]	[90,100]	[80,100]

成更多云滴,将确定度 μ 最大时对应的 x 作为对应指标 C_i 的权重计算值^[17],对指标的隶属度进行归一化处理^[18]。考虑到最大隶属度准则可能造成评价结果信息损失,进而影响评价效果,本文采用级别特征值法进行评价等级判断,即不合格、合格、中等、良好和优秀分别为 50、60、75、85 和 95,最后得到总体评分和评价等级。

2.3 云模型评价流程

将专家打分结果输入云模型中,利用 BCG 生成相应的云数字特征后,将获取的云数字特征输入 FCG 实现云滴的有效补充,依据生成的云数字特征评价生态河道建设情况。基于云模型的生态河道建设评价流程如图 2 所示。

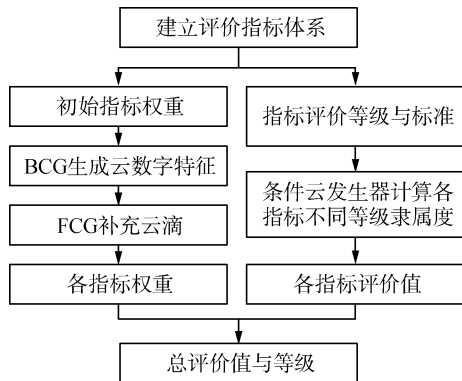


图 2 云模型生态河道建设评价流程

Fig. 2 Flowchart of ecological river construction evaluation based on cloud model

3 实例评价

3.1 江苏省宿迁市生态河道基本情况

宿迁市位于江苏省北部,地处淮、沂沭泗水系下游,有 2 区 3 县,总面积 8 555 km²。全市共有 2 045 条县乡以上河道,5 655 条村级河道,近 8 000 名河长、警长。至今已完成 10 条生态示范河道建设,整治骨干河道 20 余条,启动西南片区水环境规划方案编制,开展水环境治理。2018 年全市年用水量控制在 29.3 亿 m³ 以内,万元国内生产总值用水量为 101.3 m³。2018 年完成重点水利工程投资 4.44 亿元,区域防洪除涝能力得到进一步增强。近年来大力推进生态河道建设,提出“一核、两湖、三片、四廊、多点”的概念^[19],市河长制办公室先后开展 5 轮月督查、18 轮河湖“三乱”专项督查,解决了一批历史积累的问题,为宿迁市水生态文明建设、经济发展和民生改善提供了有力保障。

3.2 云模型指标权重计算

邀请 10 名专家对生态河道建设评价指标打分,得到各一级指标初始权重,通过云模型 BCG 计算每个样本的特征值,通过 FCG 补充云滴,模拟 1 000 位专家的指标权重,将均值作为最终权重结果,如表 2 所示,各一级指标的云数字特征如表 3 所示。重复以上过程分别求出云模型各指标在子体系中的权重以及在评价指标体系中的权重,如表 4 所示,各指标体系权重云模型如图 3 所示。

表 2 一级指标权重专家评估值及云模型计算值

Table 2 Primary index weights evaluated by experts and calculated by cloud model

指标	权重										云模型计算权重值
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10	
B_1	0.17	0.17	0.18	0.15	0.15	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.1540
B_2	0.15	0.16	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.1482
B_3	0.15	0.14	0.13	0.11	0.13	0.13	0.14	0.15	0.13	0.13	0.1343
B_4	0.12	0.13	0.14	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.11	0.11	0.1247
B_5	0.12	0.11	0.12	0.15	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.1233
B_6	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.1069
B_7	0.08	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.14	0.10	0.12	0.11	0.1069
B_8	0.10	0.08	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.1026

表3 一级指标云数字特征

Table 3 Cloud digital characteristics of primary indices

一级指标	E_x	E_n	H_e	一级指标	E_x	E_n	H_e
B_1	0.154 0	0.015 4	0.001 4	B_5	0.123 3	0.010 4	0.001 0
B_2	0.148 2	0.006 1	0.000 5	B_6	0.106 9	0.007 1	0.001 1
B_3	0.134 3	0.011 4	0.000 9	B_7	0.106 9	0.013 6	0.002 1
B_4	0.124 7	0.010 2	0.001 0	B_8	0.102 6	0.010 3	0.001 6

表4 子体系各指标云数字特征及权重

Table 4 Cloud digital characteristics and weights of subsystem indices

指标	E_x	E_n	H_e	子体系中的权重	指标体系中的权重	指标	E_x	E_n	H_e	子体系中的权重	指标体系中的权重
C_1	0.293 5	0.016 3	0.001 0	0.293 5	0.045 2	C_{16}	0.240 7	0.022 2	0.002 4	0.240 7	0.030 0
C_2	0.243 8	0.023 3	0.001 7	0.243 8	0.037 5	C_{17}	0.205 5	0.011 0	0.001 2	0.205 5	0.025 6
C_3	0.243 3	0.022 9	0.001 7	0.243 3	0.037 5	C_{18}	0.175 6	0.030 5	0.005 8	0.175 6	0.021 9
C_4	0.221 6	0.015 4	0.000 6	0.221 6	0.034 1	C_{19}	0.214 9	0.015 6	0.000 9	0.214 9	0.026 5
C_5	0.247 1	0.011 1	0.000 8	0.247 1	0.036 6	C_{20}	0.187 1	0.022 7	0.002 4	0.187 1	0.023 1
C_6	0.224 4	0.028 5	0.002 3	0.224 4	0.033 3	C_{21}	0.208 3	0.022 1	0.002 4	0.208 3	0.025 7
C_7	0.299 2	0.014 7	0.002 9	0.299 2	0.044 3	C_{22}	0.188 3	0.016 1	0.002 0	0.188 3	0.023 2
C_8	0.230 2	0.013 7	0.001 5	0.230 2	0.034 1	C_{23}	0.201 0	0.022 7	0.001 9	0.201 0	0.024 8
C_9	0.222 4	0.030 0	0.003 4	0.222 4	0.029 9	C_{24}	0.521 6	0.056 4	0.005 5	0.521 6	0.055 8
C_{10}	0.256 7	0.027 6	0.003 2	0.256 7	0.034 5	C_{25}	0.480 6	0.055 7	0.005 6	0.480 6	0.051 4
C_{11}	0.192 3	0.019 5	0.002 3	0.192 3	0.025 8	C_{26}	0.323 0	0.029 3	0.002 7	0.323 0	0.034 5
C_{12}	0.177 4	0.019 3	0.002 3	0.177 4	0.023 8	C_{27}	0.283 2	0.029 9	0.002 9	0.283 2	0.030 3
C_{13}	0.148 5	0.025 4	0.001 9	0.148 5	0.019 9	C_{28}	0.224 1	0.034 1	0.007 0	0.224 1	0.024 0
C_{14}	0.173 6	0.016 2	0.001 8	0.173 6	0.021 6	C_{29}	0.168 4	0.024 5	0.004 2	0.168 4	0.018 0
C_{15}	0.204 5	0.013 4	0.002 0	0.204 5	0.025 5	C_{30}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.102 6

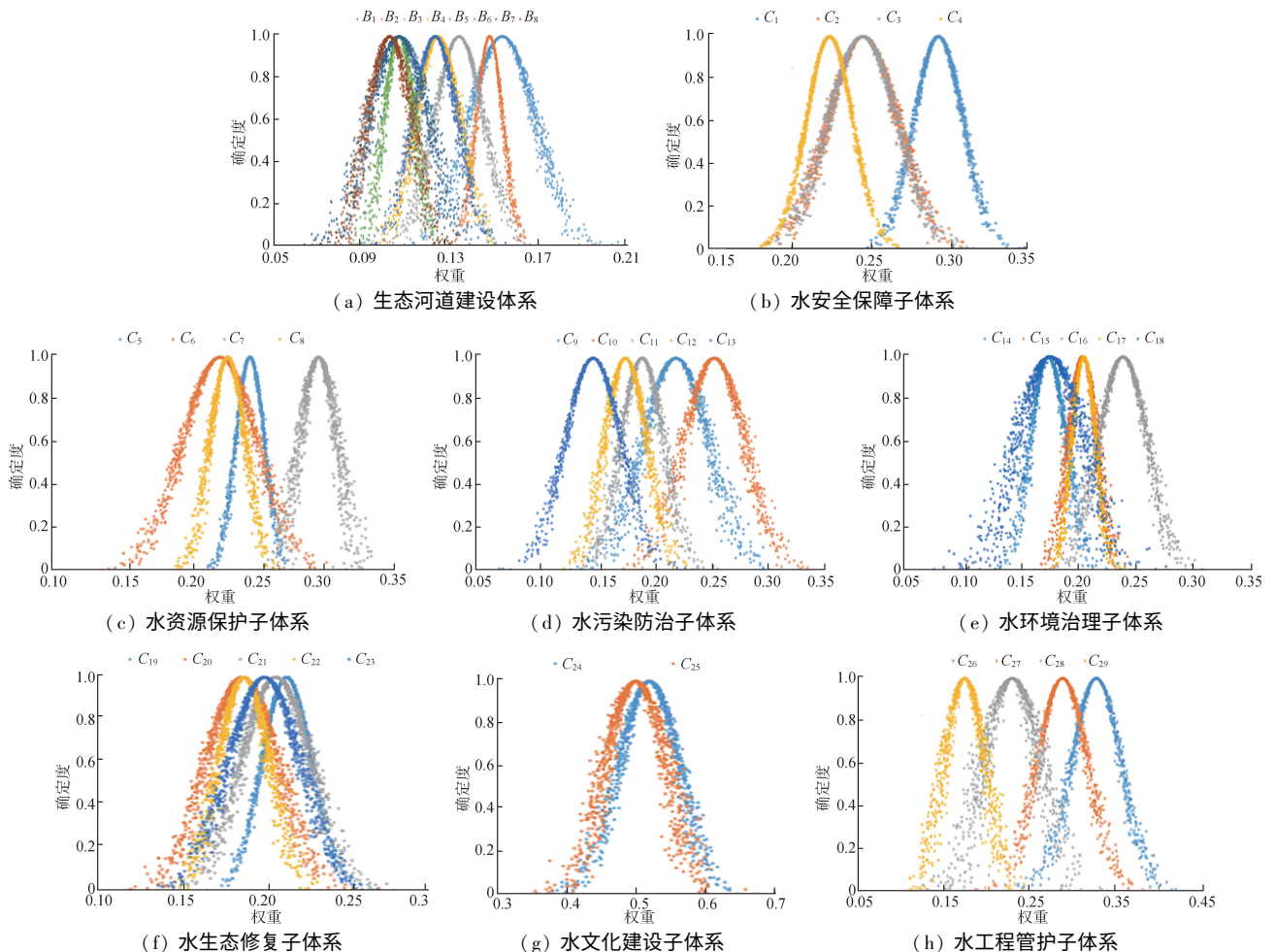


图3 评价指标体系及各子体系指标权重云模型

Fig. 3 Cloud graphs for index weights of evaluation index system and subsystems

3.3 云模型评价等级计算

根据宿迁市生态河道建设情况,通过条件云发生器计算出各评价指标不同等级的隶属度(表5),最后通过级别特征值法^[20]求出各评价指标综合评价价值,如表5所示。

3.4 评价结果分析

由云模型指标权重(表4)和指标评价值(表5)进行加权计算可得2018年宿迁市生态河道建设综合评价价值为89.52,属于良好水平,各子指标体系 $B_1 \sim B_8$ 的综合评价值分别为94.32、80.36、86.98、92.04、87.67、89.38、91.90、94.92,其中水资源保护子体系评价值较低,为80.36,其余在85~95之间。主要原因是宿迁市地表与地下水资源量较少,主要依赖上游来水,水资源开发利用程度过高,远高于国际公认的40%警戒线。此外,为改善生态河道状况,还应加强农村面源污染治理和船舶污染防治,优化产业布局,从源头减少污染物的排放,提升水生态承载力。

4 结 语

生态河道建设评价指标体系需要结合水资源、水质、社会、经济、生态、环境等因素,指标多、涉及面广,且不同河道间存在类型、结构、功能上的差异,需要选择易于理解、便于监测、可操作性强的关键指标来表征河道生态健康的总体状况。本文将云模型应用于宿迁市生态河道建设评价,在建立评价指标体系的基础上,计算各指标权重和评价等级,用级别特征值法计算最终评价值,验证了结果的合理性。正态云模型的适用性较广泛,可以很好地处理等级边界隶属度问题,通过计算每个指标在不同评价等级的隶属度,综合判定最终指标等级,使得指标等级隶属度模糊化,边界过渡自然,具有一定的实用价值。运用云模型计算权重时,初始权重具有较强的主观性,需要专家对实际情况有较深的理解,提高初始权重的客观性,避免主观意愿对结果造成较大影响。

表5 评价指标等级隶属度和指标评价值
Table 5 Index grade memberships and index evaluation values

指标	指标评价值	指标等级隶属度				
		不合格	合格	中等	良好	优秀
C_1	92.0	0.0002	0.0017	0.0166	0.2619	0.7196
C_2	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_3	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_4	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_5	60.1	0	0.9908	0.0092	0	0
C_6	85.0	0	0	0.0263	0.9494	0.0243
C_7	93.6	0.0001	0.0004	0.0067	0.1231	0.8696
C_8	80.0	0	0	0.5005	0.4933	0.0061
C_9	89.6	0.0001	0.0003	0.0299	0.4755	0.4942
C_{10}	85.9	0	0.0002	0.0574	0.7999	0.1426
C_{11}	90.0	0.0006	0.0062	0.0629	0.3495	0.5808
C_{12}	85.0	0	0	0	0.9986	0.0014
C_{13}	85.0	0	0	0.0001	0.9997	0.0001
C_{14}	90.2	0	0	0	0.4814	0.5186
C_{15}	94.9	0	0	0	0.0089	0.9911
C_{16}	88.4	0.0006	0.0069	0.0846	0.4600	0.4479
C_{17}	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_{18}	92.0	0.0002	0.0013	0.0149	0.2629	0.7208
C_{19}	94.9	0	0	0	0.0070	0.9930
C_{20}	90.0	0	0	0	0.5049	0.4951
C_{21}	88.1	0	0.0001	0.0043	0.6762	0.3194
C_{22}	90.3	0	0	0	0.4749	0.5251
C_{23}	75.1	0	0.0211	0.9427	0.0340	0.0022
C_{24}	85.0	0	0.0013	0.0454	0.9105	0.0429
C_{25}	93.7	0	0	0	0.1266	0.8734
C_{26}	90.1	0	0	0	0.4901	0.5099
C_{27}	90.1	0	0	0	0.4925	0.5075
C_{28}	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_{29}	95.0	0	0	0	0	1.0000
C_{30}	94.9	0	0	0	0.0077	0.9923

参考文献:

- [1] 赵钟楠,张越,黄火键,等.基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J].水资源保护,2019,35(3):84-88. (ZHAO Zhongnan,ZHANG Yue,HUANG Huojian,et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):84-88. (in Chinese))
- [2] 陈平,崔广柏,刘正祥.南方生态河道评价指标体系初探[J].中国生态农业学报,2007,15(4):166-169. (CHEN Ping,CUI Guangbo,LIU Zhengxiang. Setting up evaluation index system for the ecological river course in south China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007,15(4):166-169. (in Chinese))
- [3] 高晓琴,姜姜,张金池.生态河道研究进展及发展趋势[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(1):103-106. (GAO Xiaolin,JIANG Jiang,ZHANG Jinchu. Research advance and developing tendency of ecological river[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2008,32(1):103-106. (in Chinese))
- [4] 左倬,朱雪诞,胡伟,等.上海城市生态河道符合度评价[J].生态学报,2012,31(9):2437-2442. (ZUO Zhuo,ZHU Xuedan,HU Wei,et al. Conformity degree evaluation of urban ecological river: a case study in Shanghai [J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(9):2437-2442. (in Chinese))
- [5] 曹文彪,方海洋,李建华.崇明岛村镇级生态河道评价指标体系构建及应用[J].浙江农业科学,2016,57(3):414-419. (CAO Wenbiao,FANG Haiyang,LI Jianhua. Construction and application of evaluation index system for rural ecological river in Chongming Island[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2016,57(3):414-419. (in Chinese))
- [6] REHEMAN A,RUSULI Y. Ecological effects of the First Water Diversion Hub Station in Kaidu River based on the vegetation index [J]. Science of Soil & Water Conservation,2017,15(2):115-124.
- [7] 熊坤杨.生态河道治理模式及其评价方法研究[J].中国高新科技,2019(3):111-113. (XIONG Kunyang. Study on the ecological regulation model and evaluation method of river abstract[J]. China High-Tech,2019(3):111-113. (in Chinese))
- [8] 李晓英,江崇秀,张琛.基于云模型的城市资源水价研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):215-221. (LI Xiaoying,JIANG Chongxiu,ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(3):215-221. (in Chinese))
- [9] 季晓翠,王建群,傅杰民.基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J].水资源保护,2019,35(2):74-79. (JI Xiaocui,WANG Jianqun,FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019,35(2):74-79. (in Chinese))
- [10] 余亚丽,唐德善.基于云模型的安康市水资源保护效果评价[J].中国农村水利水电,2020(10):34-40. (YU Yali,TANG Deshan. Evaluation of water resources protection effect of Ankang City based on cloud model [J]. China Rural Water and Hydropower,2020(10):34-40. (in Chinese))
- [11] 唐新玥,唐德善,常文倩,等.基于云模型的区域河长制考核评价模型[J].水资源保护,2019,35(1):41-46. (TANG Xinyue,TANG Deshan,CHANG Wenqian,et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (1):41-46. (in Chinese))
- [12] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等.海绵城市低影响开发措施综合评价体系及应用[J].水资源保护,2021,37(3):13-19. (GAO Yuqing,CHEN Jiahui,WANG Dongdong,et al. Comprehensive evaluation system and application of low impact development measures in sponge city [J]. Water Resources Protection,2021,37(3):13-19. (in Chinese))
- [13] HARRIS J H,SILVEIRA R. Large-scale assessments of river health using an index of biotic integrity with low-diversity fish communities[J]. Freshwater Biology,2010,41(2):235-252.
- [14] 张皓,徐东炯,张翔,等.应用大型底栖无脊椎动物评价常州市“清水工程生态修复”示范河道的研究[J].环境污染与防治,2015,37(1):12-19. (ZHANG Hao,XU Dongjiong,ZHANG Xiang,et al. Using macrozoobenthos to evaluate the “clear water ecological remediation engineering” typical river in Changzhou [J]. Environmental Pollution & Control,2015,37(1):12-19. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004,6(8):28-34. (LI Deyi,LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science,2004,6(8):28-34. (in Chinese))
- [17] 高玉琴,陈鸿玉,刘云萃.基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J].水利水电科技进展,2018,38(6):38-43. (GAO Yuqin,CHEN Hongyu,LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):38-43. (in Chinese))

- [18] 贺磊. 基于熵权法-正态云模型的辽宁省水生态承载力评价[J]. 水资源开发与管理, 2020(7): 16-22. (HE Lei. Evaluation of water ecological carrying capacity in Liaoning Province based on entropy weight method-normal cloud model [J]. Water Resources Development and Management, 2020(7): 16-22. (in Chinese))
- [19] 王振, 叶志才, 叶丽华. 宿迁市水生态文明建设实践[J]. 中国水利, 2018(3): 12-13. (WANG Zhen, YE Zhicai, YE Lihua. The practice of water ecological civilization construction in Suqian City [J]. China Water Resources, 2018(3): 12-13. (in Chinese))
- [20] 董颖, 李兢, 武宏梅, 等. 基于级别特征值的灰色聚类法在黄河干流水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(10): 175-179. (DONG Ying, LI Jing, WU Hongmei, et al. Application of grey clustering method based on level eigenvalue in water quality evaluation of Yellow River [J]. Environmental Science and Management, 2019, 44(10): 175-179. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-01-13 编辑: 施业)
-
- (上接第 175 页)
- [26] 花瑞祥, 张永勇, 刘威, 等. 不同评价方法对水库水质评价的适应性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 183-189. (HUA Ruixiang, ZHANG Yongyong, LIU Wei, et al. Adaptability analysis of multiple evaluation methods in reservoir water quality evaluation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 183-189. (in Chinese))
- [27] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems; the critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [28] 李兴锋. 排污许可法律制度重构研究: 环境容量资源配置视角[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2016, 16(2): 32-40. (LI Xingfeng. Reconstruction of legal system of pollutant discharge permit-from the perspective of environmental capacity and resource allocation [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2016, 16(2): 32-40. (in Chinese))
- [29] 尹真真. 部分基于水环境容量的污染物总量分配方法: 以三峡库区为例[J]. 环境保护与循环经济, 2019, 39(9): 84-87. (YIN Zhenzhen. Total pollutant allocation method based partly on water environmental capacity: a case study of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2019, 39(9): 84-87. (in Chinese))
- [30] 瞿一清, 逢勇. 基于龙王庙断面水质达标的城南河流域水环境容量[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 76-80. (QU Yiqing, PANG Yong. Water environmental capacity of Chengnan River Basin based on water quality standard of Longwangmiao Section [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 76-80. (in Chinese))
- [31] 王乙震, 郭书英, 崔文彦. 基于水功能区划的河湖健康内涵与评估原则[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 136-141. (WANG Yizhen, GUO Shuying, CUI Wenyan. Connotations of river and lake health and assessment principles based on water function regionalization [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 136-141. (in Chinese))
- [32] 中国环境规划院. 《全国水环境容量核定技术指南》[R]. 北京: 中国环境规划院, 2003.
- [33] 付可, 胡艳霞, 谢建治. 基于非点源污染的密云水源保护区水环境容量核算及其分配[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(4): 10-17. (FU Ke, HU Yanxia, XIE Jianzhi. Estimation and allocation of water environment capacity in the First-Grade protecting area of Miyun reservoir based on One-point source pollutions [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(4): 10-17. (in Chinese))
- [34] 闻建伟, 杨春生, 付意成. 浑太河流域水环境容量分配研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 150-155. (WEN Jianwei, YANG Chunsheng, FU Yicheng. Study on allocation of water environmental capacity of Huntaihe River watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 150-155. (in Chinese))
- [35] 刘建华, 黄亮朝. 黄河下游水资源利用与高质量发展关联评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 24-30. (LIU Jianhua, HUANG Liangchao. Evaluation of correlation between water resources utilization and high-quality development in the lower reaches of the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 24-30. (in Chinese))
- [36] 刘奇, 李智, 姚刚. 基于基尼系数的水污染物总量分配公平性研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(11): 90-94. (LIU Qi, LI Zhi, YAO Gang. Fairness of total water pollutants load allocation based on Gini coefficient method [J]. China Water & Waste Water, 2016, 32(11): 90-94. (in Chinese))
- [37] 范嘉炜, 黄锦林, 袁明道, 等. 广州市用水结构空间均衡差异性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 82-86. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. Analysis of spatial equilibrium of water consumption structure in Guangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 82-86. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-01-16 编辑: 王芳)