

符大焯. 基于云模型的市县级水网功能完整性综合评价[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于云模型的市县级水网功能完整性综合评价

符大焯

(广东省水利电力勘测设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510510)

摘要:市县级水网是落实国家水网体系建设的“最后一公里”,针对当前市县级水网体系功能完整性的评估难、评价过程缺乏技术层面指导的问题,从水资源开发利用、水环境与水生态、防洪排涝与水安全和水网管理信息化四个维度提出了市县级水网功能完整性评价指标体系,引入遗传算法确定指标组合权重,并结合云模型建立了其综合评价模型。将该方法应用于阳春市现状水网功能评价案例中,评价结果表明:该市现状水网功能完整性对不合格等级隶属度为0.7858,评价等级不合格,与实际问题较吻合,验证了评价模型的可行性,并为阳春市水网规划提出了“一廊五支系统治理、六渠多库多节点保障”的布局建议,为今后市县级水网的相关研究提供了参考。

关键词:市县级水网;水网规划;遗传算法;云模型;多指标综合评价;水网功能评价

中图分类号:TV212 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-13

水是生命之源、生产之要、生态之基。中国长期以来存在水资源时空分布不均衡、供需矛盾突出等问题,已严重制约了经济社会的高质量发展^[1]。为了缓解这一状况,中国陆续修建了南水北调、引江济太等大型调水工程^[2],虽然已初步形成“四横三纵、东西互补”的水网格局,但是在新时代背景下,早期水网已不足以在更高水平上保障国家水安全和水资源合理利用,因此对现有水网体系进行优化和完善迫在眉睫。

早期的水网是由自然河湖水系、输配水通道等实体元素组成的水利基础设施体系,如美国加州南水北调、澳大利亚的雪山调水、巴基斯坦西水东调等;中国的引黄济青、引汉济渭、滇中调水、广东省东—西江水利工程等,其本质上是河湖水系连通的引调水工程^[3]。2004年,王维平等^[4]提出联网状水利工程的想法,水网这一概念才正式进入人们的视野。徐宗学^[5]认为水网体系是以南水北调为纲,区域河湖水系连通工程为目,水利枢纽为结的互连工程体系;邹朝望等^[6]提出以提升水生态系统质量和稳定性为核心构建大东湖生态型水网;王忠凯等^[7]

利用云计算等新兴技术,提出具有预报、预警、预案等功能的智慧水网综合管理体系。直到2023年,中共中央颁布《国家水网规划纲要》才明确指出国家水网内涵:国家水网是以自然河湖为基础、引调排水工程为通道、调蓄工程为结点、智慧调控为手段,集水资源优化配置、流域防洪减灾、水生态系统保护等功能为一体的综合体系^[8]。

市县级水网作为国家水网体系的基础单元,在功能上与国家水网相似,因此对它的功能完整性评价应是系统性的综合评价,即从不同的功能出发筛选合适的指标。赵晓晨等^[9]从水资源利用、水环境保护和水生态等维度选取指标构建了广东水网环境影响评价指标体系;费小霞等^[10]围绕水网的水资源优化配置、流域防洪建筑、水生态系统保护三大主要功能和水网智慧管理对信阳市水网建设效果进行综合评价;侯爱冰等^[11]分析了水网经济、粮食、资源、生态4个系统的耦合,构建了区域水网发展综合效益评价指标体系。

综上所述,国内学者在水网建设成效与功能效益评价方面已构建了多维度的评价体系,不仅涵盖

收稿日期:2025-12-31 修回日期:2026-04-08

作者简介:符大焯(2000—),男,主要从事水利工程、水利规划相关工作。

水资源调配、防洪减灾、城乡供水、水生态保护和水资源管理等问题,以满足本区域水利服务需求^[15]。因此,市县级水网功能的完整性应体现在能否高效、完整地实现其作为区域水资源运输载体所具有的兴利、除害、和谐的核心功能属性^[16],具体而言,兴利功能^[17]应聚焦于对水资源的开发利用和供水保障,除害功能^[18]强调对洪涝灾害的防御能力,和谐功能^[19]则更关注水生态环境质量和治理成效。此外,核心功能属性的完整发挥还依赖于对其进行有效的管理和信息化技术的支撑,确保水网兴利、除害、和谐功能的有机统一,最终实现市县级水网功能的完整发挥。

综上所述,功能完整性评价指标应从以下4个维度选取指标:①水资源开发利用(兴利功能完整性)。以实现水资源高效利用为导向,选取能够反映区域供水能力、用水效率的指标,此类指标旨在衡量水资源满足多元用水需求过程中的高效利用

程度,为评估区域水资源开发利用功能提供量化依据;②水生态与水环境(和谐功能完整性)。聚焦于对水生态保护与污染防治,选取能够体现水质达标、生态流量保障及环境治理成效的指标,这些指标可用于评估水生态系统的健康状况,衡量人类活动对水生态环境影响程度;③防洪排涝和水安全(除害功能完整性)。针对防洪减灾工程体系的效能,应选取能表征工程达标率、风险防控能力的指标,通过这些指标可以衡量防洪减灾工程体系在抵御洪涝灾害的实际能力;④水网管理与信息化(功能协同保障)。为保障水网体系高效运行,应选取能体现水网管理机制与信息化建设水平的指标,这些指标是衡量水网管理现代化水平的重要依据,确保水网能够长久、有效地实现功能属性的完整发挥。基于以上指标选取的思路,结合研究区域实际情况,构建市县级水网功能完整性评价指标体系,见图2。

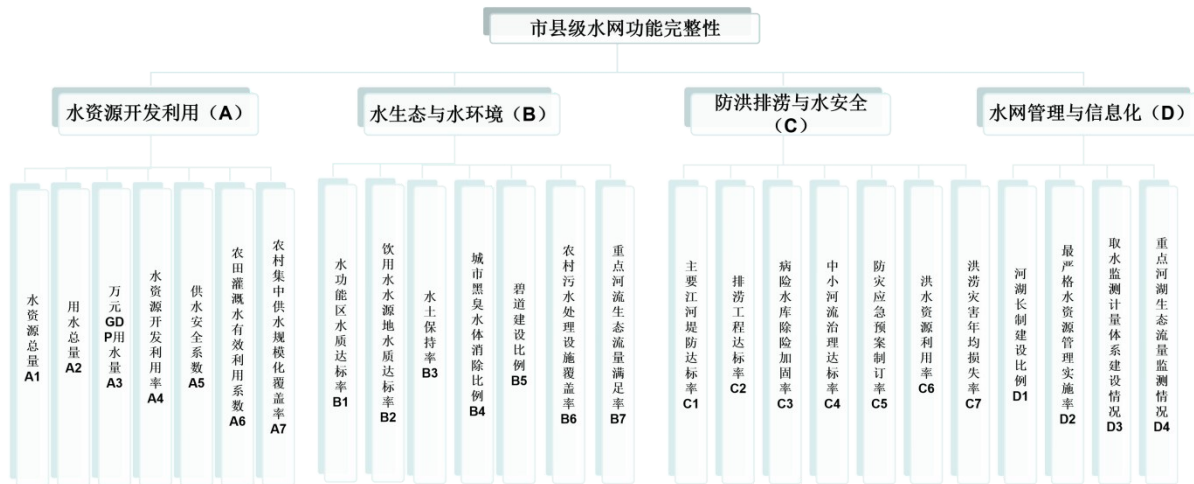


图2 市县级水网功能完整性评价指标体系

Fig. 2 Indicator system for evaluating the functional integrity of county-level water networks

2.2 权重的确定

2.2.1 主观权重

层次分析法是常用的主观赋权法,具有简单、实用的特点,被广泛使用。计算步骤如下:

步骤一:通过专家填写问卷的形式,对评价指标重要程度进行两两比较,重要程度的量化通过1-4刻度法^[20]来表示,建立判断矩阵。

步骤二:对判断矩阵进行一致性检验,当 $CR \leq 0.1$ 时,可认为通过一致性检验。

$$CR = \frac{1}{RI} \times \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中:CR为一致性比率;CI为一致性指标; λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值;RI为同阶平均随机一致性指标;若判断矩阵不满足一致性检验,需进行一致性

修正。

步骤三:当判断矩阵通过一致性检验,求得判断矩阵的最大特征值对应的特征向量,对其归一化即可得到每位专家对评价指标的主观权重 ω' ,构建权重矩阵 A 。

$$A = [a_j^k]_{k \times n} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \cdots & a_n^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & \cdots & a_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^k & a_2^k & \cdots & a_n^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:矩阵 A 为评价指标的权重矩阵; a_j^k 为第 k 位专家对第 j 个评价指标的权重大小。

2.2.2 客观权重

熵值法是一种常用的客观赋权法,根据指标值的离散程度来判断指标的权重,见式(3)—(5):

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*} \ln \left(\frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*} \right) (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

式中, x_{ij}^* 是经过正向化处理后的评价指标数据值, e_j 是指标的信息熵; d_j 是信息效用值, ω_j 是第 j 项指标的客观权重。

2.2.3 基于遗传算法确定组合权重

权重组合问题其实是一种多目标优化问题,可利用遗传算法来寻找最优组合,遗传算法的原理是借鉴达尔文进化论思想,模拟自然进化过程来搜索满足适应度函数的最优解^[21]。构造适应度函数:

$$\min F = \sum_{j=1}^m (\omega_j - \omega_j')^2 + (\omega_j - \omega_j'')^2 \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \cdots \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad (7)$$

式中: ω_j 为第 j 项指标的组合权重; m 为指标数量,利用MATLAB进行程序迭代,求解得到满足适应度函数的最优解对应的组合权重 ω_j 。

2.3 基于云模型理论的市县级水网功能完整性的

评价方法

2.3.1 云模型的基本原理

云模型属于不确定性人工智能,是一种用于定性与定量相互转换的模型。通过逆向云发生器将指标值转换为3个云数字特征,即期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,然后再通过正向云发生器生成足够多的云滴,来实现样本定性和定量之间的映射^[22]。云模型生成的云图能直观地反映出评价指标对评价等级的隶属情况。

2.3.2 云数字特征与云发生器

云模型理论的核心是云数字特征和云发生器。云的数字特征包括 E_x 、 E_n 和 H_e , E_x 是表示定性概念 A 的平均水平; E_n 是概念 A 的离散性; H_e 是定性概念熵的不确定性。

云发生器包括有正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器将云数字特征通过云算法生成足够多的云滴,实现了定性概念到定量数据集合的转换;逆向云发生器将数据集合转换为定性概念的云数字特征^[23]。

2.3.3 云模型综合评价流程

a)建立评价指标等级标准云。根据确定的评价指标等级范围,按照边界值划分为4个等级,即优秀、良好、合格和不合格。每个等级范围对应的云数字特征计算见式(8)—(10):

$$E_x = \frac{(C_{\max} + C_{\min})}{2} \quad (8)$$

$$E_n = \frac{(C_{\max} - C_{\min})}{3} \quad (9)$$

$$H_e = k \quad (10)$$

式中: C_{\max} 、 C_{\min} 为某一等级区间的最大、最小边界值,超熵 H_e 的值 k 根据评价等级本身调整。

b)构建二级指标层评价云模型。将指标的原始数据输入到逆向云发生器中,通过逆向云发生器算法生成云模型的3个数字特征,再通过正向云发生器生成云图。

c)计算一级指标层云参数。将二级指标云数字特征经过加权处理^[24],得到一级指标层的综合云参数,见式(11)—(13):

$$E'_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} \omega_i \quad (11)$$

$$E'_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{ni}^2 \omega_i} \quad (12)$$

$$H'_e = \sum_{i=1}^n H_{ei} \omega_i \quad (13)$$

式中： E'_x 、 E'_n 和 H'_e 为一级指标层的综合云参数； E_{xi} 、 E_{ni} 和 H_{ei} 为一级指标对应的第*i*个二级指标的云参数； ω_i 为二级指标层内第*i*个指标的组合权重，这里的*n*是一级指标层对应的二级指标的个数。目标层的云参数也通过上式计算。

d)评价指标隶属度的计算。根据钟型隶属度函数 $\mu(x)$ 计算指标云模型对四朵标准等级云的隶属度，并根据最大隶属度原则确定评价指标从属的评价等级^[25]，见式(14)：

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2E_n^2}\right] \quad (14)$$

3 案例分析

3.1 评价指标等级划分

评价结果是否科学、合理，不仅与评价指标的选取有关，还与指标的等级划分密切相关。为确保评价结果客观可信、贴合研究区域的实际情况，本文在参考相关规划成果、国家及行业规范的基础上，结合专家的咨询意见，将评价等级划分为优秀、良好、合格和不合格4个等级，具体见表1。

3.2 确定指标权重

根据已建立的评价指标体系设计相应的专家调查问卷，共发放50份专家权重打分表，收回有效打分表38份，其中包含正高级工程师7名，高级工程师15名，中级工程师16名，研究领域涵盖水文水资源、水利规划、城市水务、水环境等多个方向。整个计算过程通过MATLAB软件实现。评价指标组合权重赋权结果见表2。

3.3 云模型综合评价

将指标数据输入逆向云发生器，即可生成对应指标的云数字特征，将二级指标云数字特征经过加权处理即可得到一级指标层和目标层的综合云参数，计算结果见表3。

将一级指标层和目标层的云数字特征和等级云参数输入正向云发生器中即可生成相应的云图，根据式(18)计算各指标对应等级的隶属度并进行归一化处理，以上操作均在MATLAB中进行。计算结果见表4和图3。

3.4 结果分析与建议

根据表4和图3可知，阳春市现状水网体系的功能完整性评价结果为不合格。其中，“水资源开发利用”和“防洪排涝和水安全”功能对不合格等级的隶属度最高，是导致目标层评价等级低的主要原因；其次，“水环境与水生态”功能对不合格等级隶属度为0.4922，是次要原因；最后，“水网管理与信息化”功能隶属于优秀等级(0.52)，对目标层评价等级低影响较小。进一步分析二级指标层中导致评价结果不合格的原因：①A3、A5、A6、A7指标是影响“水资源开发利用”功能评价等级低的主要原因；②B1、B4、B5、B7指标是影响“水环境与水生态”功能评价等级低的主要原因；③C1、C2、C3、C4、C5、C7指标是影响“防洪排涝和水安全”功能评价等级低的主要原因；④D1、D3、D4是影响“水网管理与信息化”功能评价等级低的主要原因。

综上所述，认为阳春市现状水网功能完整性不合格主要归因于以下3个方面短板：①水资源开发利用效率不足。阳春市万元GDP用水量近三年来均值在165 m³/万元，2020年超过一半的农村没有实现供水规模化覆盖，与《阳春市水利发展“十四五”规划》中“城乡供水保障能力不足”的问题诊断高度吻合。结合现场调研发现，现有的水厂70%以上存在设备老化问题，管网漏损率高达9.52%~14%，导致供水规模不能满足当下的用水需求。②水环境压力突出。根据2021年阳江市环境治理公报，水功能区水质达标率为14.3%，城市黑臭水体整治效果低，与生态环境部“阳春市黑臭水体未完成整治”的通报一致。现场监测发现，由于畜禽养殖污染排放，漠阳江下游段氨氮含量超标。③防洪体系薄弱，主要堤防和排涝工程达标率不合格，河道水土流失、泥沙淤积较多，导致行洪堵塞，与《阳春市水利发展“十四五”规划》中“防洪工程问题”分析吻

表 1 市县级水网功能完整性评价指标等级划分

Table 1 Grading standards for functional integrity evaluation indicators of county-level water networks

二级指标层	单位	优秀	良好	合格	不合格
水资源总量	亿 m ³	>45	(35,45)	[30,35]	<30
二级指标层	单位	优秀	良好	合格	不合格
用水总量	亿 m ³	<6.3	[6.3,6.62]	[6.62,6.93]	>6.93
万元 GDP 用水量	m ³ /万元	<40	[40,80]	[80,170]	>170
供水安全系数	/	(1.7,2)	(1.4,1.7)	(1,1.4)	[0,1]
农田灌溉水有效利用系数	/	[0.65,1]	[0.55,0.65]	[0.45,0.55]	[0-0.45]
农村集中供水规模化覆盖率	%	[90,100]	[80-90]	[70-80]	[0,70]
水功能区水质达标率	%	[95,100]	[85,95]	[75,85]	[0,75]
饮用水水源地水质达标率	%	[95,100]	[80,95]	[70,80]	[0,70]
水土保持率	%	[85,100]	[70,85]	[60,70]	[0,60]
城市黑臭水体消除比例	%	[95,100]	[90,95]	[80,90]	[0,80]
碧道建设比例	%	[80,100]	[60,80]	[40,60]	[0,40]
农村污水处理设施覆盖率	%	[80,100]	[65,80]	[50,65]	[0,50]
重点河流生态流量满足率	%	[90,100]	[75,90]	[60,75]	[0,60]
主要江河堤防达标率	%	[90,100]	[70,90]	[50,70]	[0,50]
排涝工程达标率	%	[90,100]	[70,90]	[50,70]	[0,50]
病险水库除险加固率	%	[80,100]	[70,80]	[60,70]	[0,60]
中小河流治理达标率	%	[80,100]	[70,80]	[60,70]	[0,60]
防灾应急预案制订率	%	[95,100]	[90,95]	[80,90]	[0,80]
洪水资源利用率	%	[80,100]	[70,80]	[60,70]	[0,60]
洪涝灾害年均损失率	%	[0,15]	[15,25]	[25,50]	[50,100]
河湖长制建设比例	%	[95,100]	[90,95]	[80,90]	[0,80]
最严格水资源管理实施率	%	[80,100]	[70,80]	[60,70]	[0,60]
取水监测计量体系建设情况	%	[95,100]	[90,95]	[85,90]	[0,85]
重点河湖生态流量监测情况	%	[95,100]	[90,95]	[85,90]	[0,85]

合。根据已完成的水库除险加固工程报告结果,还有超过 40% 的水库没有开展除险加固工作。④重建轻管理现象仍存在。基层水管理制度不健全,运行管理和维修养护经费不足,严重阻碍了水网功能完整性的充分发挥。

基于评价结果分析,以提高阳春市水网功能完整性为目标导向提出以下建议:①在供水保障方面,根据相关规划,阳春市预计至 2035 年完成十五

个乡镇水厂改造和大河水库引水工程,通过对乡镇水厂的升级改造,完善配套水厂管网建设,形成供水水源—水厂—管网—用水户为一体的城乡供水保障网络。②在农业灌溉方面,阳春市现状有 6 座中型灌区,但是仅西山陂灌区能够满足片区灌溉用水需求,其中灌区渠道渗漏等问题是造成水资源浪费的主要原因,因此阳春市在需求端应采取“节流”措施减少农业需水量,在供应端采取渠道防渗、因

表 2 评价指标组合权重赋权
Table 2 Combined weights of evaluation indicators

一级 指标	一级指标权重			二级 指标	二级指标权重		
	主观权重	客观权重	组合权重		主观权重	客观权重	组合权重
A	0.3558	0.3465	0.352	A1	0.1045	0.1027	0.1036
				A2	0.1926	0.1631	0.1873
				A3	0.1421	0.178	0.1601
				A4	0.1682	0.1375	0.1568
				A5	0.1539	0.1464	0.1560
				A6	0.1133	0.1316	0.1025
				A7	0.1254	0.1404	0.1337
B	0.1827	0.2008	0.1925	B1	0.1860	0.1763	0.1812
				B2	0.2486	0.2159	0.2323
				B3	0.1043	0.1350	0.1235
				B4	0.0944	0.1157	0.1051
				B5	0.0825	0.1113	0.0960
				B6	0.1122	0.1041	0.1082
				B7	0.1720	0.1417	0.1539
				C1	0.2062	0.1756	0.1909
				C2	0.1532	0.185	0.1691
				C3	0.1618	0.1958	0.1788
				C4	0.1323	0.1463	0.1393
				C5	0.1253	0.1052	0.1153
				C6	0.1045	0.1127	0.1086
				C7	0.1167	0.0794	0.0981
D	0.1080	0.164	0.146	D1	0.2434	0.3448	0.2941
				D2	0.3575	0.2052	0.2813
				D3	0.1962	0.2689	0.2325
				D4	0.2029	0.1812	0.1920

地制宜发展喷微灌等工程措施以提高农业水资源利用效率。③在防洪减灾方面,由于阳春市城镇主要集中在漠阳江、西山河和潭水河中下游,防洪安全应聚焦三大水系,如对漠阳江下游堤防新建加固,河道中游开展清淤疏浚等整治措施,上游水库

除险加固等分段措施,根据《阳春市水利发展“十四五”规划》,规划近期优先对漠阳江上游大中型水库如大河水库、北河水库除险加固工作,远期开展剩余中型水库和小型水库的除险加固。④在水环境治理上,建议以漠阳江干流为生态主轴,潭水河、西

表 3 评价指标云数字特征
Table 3 Cloud digital characteristics of evaluation indicators

目标层 (Ex, En, He)	一级指标层 (Ex, En, He)	二级指标层			
		指标	(Ex, En, He)		
市县级水网功能完整性 (52.6206, 9.1769, 0.2322)	水资源开发利用 (41.539, 7.8557, 0.52)	A1	(43.983, 1.3162, 0.042)		
		A2	(5.8167, 0.1558, 0.0058)		
		A3	(164.99, 3.6898, 0.1463)		
		A4	(15.0767, 1.9044, 0.0007)		
		A5	(1.0567, 0.0205, 0.0007)		
		A6	(0.5127, 0.0084, 0.0003)		
	水环境与水生态 (59.54, 12.732, 0.1126)	A7	(52.04, 20.2105, 0.7083)		
		B1	(38.1, 24.2492, 0.2594)		
		B2	(92.8667, 10.0876, 0.1105)		
		B3	(90.4667, 0.25, 0.01)		
		B4	(12.133, 11.3525, 0.1281)		
		B5	(16.38, 9.4565, 0.1046)		
市县级水网功能完整性 (52.6206, 9.1769, 0.2322)	防洪排涝和水安全 (47.5337, 9.621, 0.2368)	B6	(65.49, 9.0566, 0.1)		
		目标层 (Ex, En, He)	一级指标层 (Ex, En, He)	二级指标层 (Ex, En, He)	
		市县级水网功能完整性 (52.6206, 9.1769, 0.2322)	水网管理和信息化 (81.039, 5.3246, 0.168)	B7	(64.7, 2.4865, 0.0286)
				C1	(48.3, 2.4536, 0.0973)
				C2	(18.9733, 5.7393, 0.1786)
				C3	(39.16, 19.925, 0.7231)
				C4	(35.42, 4.6533, 0.1256)
				C5	(85.4667, 4.7833, 0.1356)
				C6	(78.6887, 8.5633, 0.1856)
				C7	(48.6834, 3.563, 0.056)
				D1	(76.52, 1.6829, 0.0598)
				D2	(80.4667, 3.6958, 0.1305)
D3	(84.8767, 7.2526, 0.236)				
D4	(84.18, 7.7207, 0.3078)				

山河等支流为辅的治理格局,具体以流域源头区实施水源涵养规范管理;中游区强化农村污水治理,截污控源;下游城区结合碧道建设,推进水环境治理和水生态修复。⑤在水网智慧管理方面,重点可依托于水利信息化建设,构建涉水数据收集整理平

台,搭建水网预警决策平台,通过构建智慧管理网来统筹全市的水网管理,确保水网良性运行。综上所述,阳春市水网的建设建议以漠阳江、潭水河、西山河3条主干自然河流和新建的大河水库引水工程构建水网之“纲”;以灌区供水渠道和水厂管网等小

表 4 评价指标隶属度计算结果

Table 4 Calculation results of indicator membership degrees

评价指标	优秀	良好	合格	不合格
A	0	0	0	1
A1	0.332 0	0.668 0	0	0
A2	0.998 2	0.001 8	0	0
A3	0	0	0.660 5	0.339 5
A4	0.988 8	0.011 2	0	0
A5	0	0	0.693 8	0.306 2
A6	0.024 9	0.033 0	0.801 2	0.140 8
A7	0.025 1	0.052 9	0.100 2	0.821 8
B	0.052 1	0.162 5	0.293 1	0.492 2
B1	0.003 5	0.014 9	0.044 6	0.937 0
B2	0.218 3	0.573 6	0.109 5	0.098 6
B3	0.963 3	0.036 7	0	0
B4	0	0	0	1
B5	0	0	0.009 4	0.990 6
B6	0.065 8	0.432 0	0.397 5	0.104 7
B7	0	0.005 8	0.755 4	0.238 7
C	0	0.002 8	0.045 0	0.952 2
C1	0	0	0.384 7	0.615 3
C2	0	0	0	1
C3	0.020 3	0.038 0	0.090 6	0.851 1
C4	0.001 2	0.014 7	0.104 2	0.879 9
C5	0.085 8	0.356 0	0.434 2	0.124 0
C6	0.402 5	0.385 0	0.129 0	0.083 6
C7	0	0	0.59	0.41
D	0.532 6	0.392 4	0.019 9	0.055 1
D1	0	0	0.003 0	0.997 0
D2	0.511 8	0.479 3	0.008 9	0
D3	0.068 4	0.163 7	0.342 8	0.425 2
D4	0.074 1	0.174 9	0.259 0	0.492 0
目标层	0.003 9	0.003 9	0.206 3	0.785 8

节点保障”的阳春市水网总体布局,见图4。

4 结论

a)基于国家水网战略内涵,明确了市县级水网作为基础单元的功能完整性内涵,从水资源开发利用(兴利)、水生态与水环境(和谐)、防洪排涝与水资源安全(除害)以及水网管理与信息化(协同保障)4个维度构建评价指标体系。

b)本文采用遗传算法的组合赋权克服了单一赋权方法的片面与局限,同时引入云模型理论,通过正向与逆向云发生器实现评价等级定性概念与指标定量数据之间的双向映射,有效解决了评价指标的不确定性,提升了评价结果的科学性与可信度。

c)将所构建的评价模型应用于阳春市现状水网功能完整性评价中,根据评价结果显示:阳春市现状水网功能完整性对不合格等级隶属度为0.7858,评价等级不合格,该评价结果揭示了阳春市现状水网存在的问题,并通过实地走访、资料核查等方式证明了评价模型的适用性。

d)基于评价结果分析,从供水保障、农业灌溉、防洪减灾、水环境治理及智慧水网平台搭建五个方面提出了具体改进措施,提出了“一廊五支系统治理、六渠多库多节点保障”的阳春市水网布局建议,为同类地区水网规划建设与功能提升提供了参考。

型输配水通道织密水网之“目”,以大中型水库筑牢水网之“结”,构建“一廊五支系统治理、六渠多库多

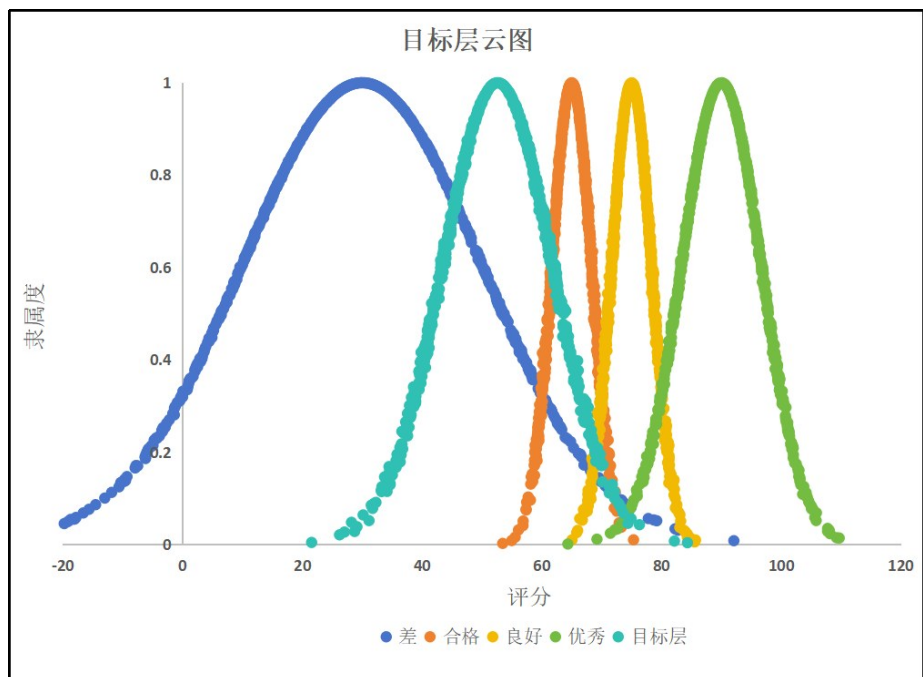


图3 “阳春市水网功能完整性”目标层云图

Fig. 3 Goal layer cloud map for functional integrity of Yangchun City water network

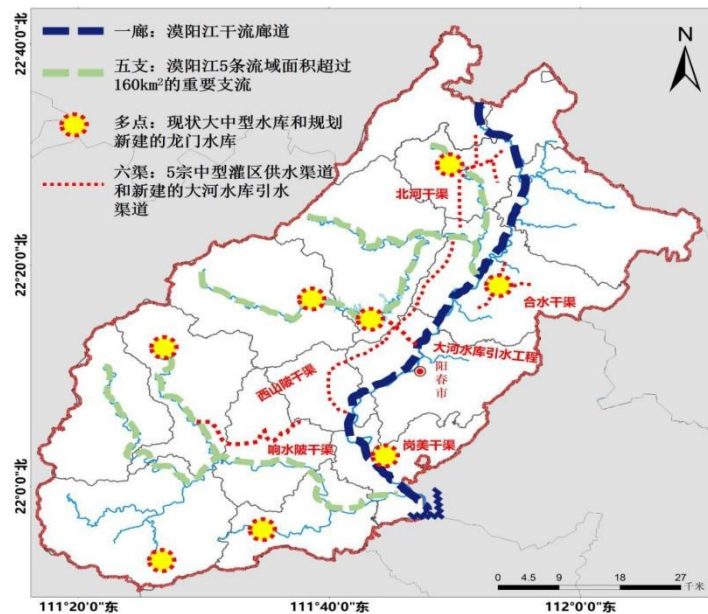


图4 阳春市水网总布局

Fig. 4 General layout of Yangchun City water network

参考文献:

- [1] 江津清. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 智慧城市, 2019, 5(1): 44-45.
Jiang Jinqing. Analysis of Water Resources Status and Sustainable Development Countermeasures in China [J]. Smart City, 2019, 5(1): 44-45. (in Chinese)

- [2] 左其亭, 郭佳航, 李倩文, 等. 借鉴南水北调工程经验构建国家水网理论体系[J]. 中国水利, 2021 (11): 22-24, 21.
Zuo Qiting, Guo Jiahang, Li Qianwen, et al. Drawing on Experience from the South-to-North Water Diversion Project and establishing a Theoretical System of National Network of Water Resources [J]. China Water Resources, 2021 (11): 22-24, 21.

- (in Chinese)
- [3] 谷丽雅, 侯小虎, 张林若. 浅谈国外跨流域调水工程现状、机遇和挑战[J]. 中国水利, 2021 (11): 61-62.
Gu Liya, Hou Xiaohu, Zhang Linruo. Current Status of Global interbasin Water Transfer Projects and its Opportunities and Challenges[J]. China Water Resources, 2021 (11): 61-62. (in Chinese)
- [4] 王维平 杨金忠, 范明元, 等. 现代化水网建设与水资源优化配置研究[J]. 水利水电技术, 2004 (5): 11-14.
Wang Weiping, Yang Jinzhong, Fan Mingyuan, et al. Modern Water Network System and Optimal Water Resources Allocation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004 (5): 11-14. (in Chinese)
- [5] 魏晓雯. 深入研究河湖水系连通支撑国家水网工程建设[N]. 中国水利报, 2022-08-11(5).
Wei Xiaowen. In-depth Study on River and Lake System Connectivity to Support National Water Network Project Construction [N]. China Water Resources News, 2022-08-11 (5). (in Chinese)
- [6] 邹朝望, 邓秋良, 黎南关. 大东湖生态水网构建技术及应用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(8): 50-53, 58.
Zou Chaowang, Deng Qiuliang, Li Nanguan. Construction Technology and Application of Dadonghu Ecological Water Network [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(8): 50-53, 58. (in Chinese)
- [7] 王忠凯, 马赛, 高舒, 等. 数字孪生技术在城区智慧水网建设中的应用[J]. 江苏水利, 2022 (S2): 48-51.
Wang Zhongkai, Ma Sai, Gao Shu, et al. Application of Digital Twin Technology in Urban Smart Water Network Construction[J]. Jiangsu Water Resources, 2022 (S2): 48-51. (in Chinese)
- [8] 国家水网建设规划纲要[J]. 中国水利, 2023 (11): 1-7.
Outline of the National Water Network Construction Plan [J]. China Water Resources, 2023, (11): 1-7. (in Chinese)
- [9] 赵晓晨, 葛晓霞, . 广东省水网建设规划环境影响评价指标体系研究[J]. 水利建设与管理, 2025, 45(7): 3-9.
Zhao Xiaochen, Ge Xiaoxia. Environmental Impact Assessment Index System for the Water Network Construction Plan in Guangdong Province [J]. Water Resources Construction and Management, 2025, 45(7): 3-9. (in Chinese)
- [10] 费小霞, 李乾, 张鹏超, 等. 基于熵权法和云物元模型的水网建设效果评价:以河南省信阳市为例[J]. 河南科学, 2022, 40 (10): 1685-1695.
Fei Xiaoxia, Li Qian, Zhang Pengchao, et al. The Evaluation of Water Network Construction Effect Based on Entropy Weight Method and Cloud Matter-element Model: A Case Study of Xinyang City, Henan Province [J]. Henan Science, 2022, 40 (10): 1685-1695. (in Chinese)
- [11] 侯爱冰, 张东, 聂龑, 等. 区域水网发展综合效益评价及其耦合协调机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23 (2): 312-322.
Hou Yuanbing, Zhang Dong, Nie Yan, et al. Comprehensive Benefit Evaluation and Coupling Coordination Mechanism of Regional Water Network Development [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(2): 312-322. (in Chinese)
- [12] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29, 36.
Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation Method of Urban Flood Disaster Resilience Based on Combination Weighting-Cloud Model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29, 36. (in Chinese)
- [13] 宋亮亮, 张劲松, 杜建波, 等. 基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 208-214.
Song Liangliang, Zhang Jinsong, Du Jianbo, et al. Assessment of Operation Safety Resilience of Water Conservancy Projects Based on Cloud Model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 208-214. (in Chinese)
- [14] 马聪聪, 刘登峰, 黄强, 等. 基于熵权云模型评价法的省级考核断面水质评价与对比[J]. 人民珠江, 2022, 43 (5): 50-59, 74.
Ma Congcong, Liu Dengfeng, Huang Qiang, et al. Water Quality Evaluation and Comparison of Provincial Assessment Sections Based on Evaluation Method by Entropy-Weighted Cloud Model [J]. Pearl River, 2022, 43(5): 50-59, 74. (in Chinese)
- [15] 李原园, 赵钟楠, 姜大川. 国家水网各层级协同建设思考[J]. 中国水利, 2024 (19): 31-36.
Li Yuanyuan, Zhao Zhongnan, Jiang Dachuan. Establishment of Collaboration for National Water Network Construction at All Levels [J]. China Water Resources, 2024 (19): 31-36. (in Chinese)
- [16] 李慧. 现代水网规划建设模式及目标可达性分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
Li Hui. Modern Water Network Planning and Construction Mode and Goal Accessibility Analysis [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [17] 李原园, 李云玲, 龙晓旭, 等. 基于粮食安全保障的国家水网建设思路探讨[J]. 中国水利, 2024 (17): 42-47.

- Li Yuanyuan, Li Yunling, Long Xiaoxu, et al. Probing into Ideas for National Water Network Construction Based on Food Security Guarantee[J]. *China Water Resources*, 2024 (17): 42–47. (in Chinese)
- [18] 李原园, 刘震, 赵钟楠, 等. 加快构建国家水网全面提升水安全保障能力[J]. *水利发展研究*, 2021, 21(9): 30–31.
- Li Yuanyuan, Liu Zhen, Zhao Zhongnan, et al. Accelerating the Construction of National Water Network to Comprehensively Improve Water Security Capability [J]. *Water Resources Development Research*, 2021, 21(9): 30–31. (in Chinese)
- [19] 左其亭, 蒋国栋, 臧超, 等. 基于人水和谐视角的国家水网优化布局构想与展望[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(4): 1–7.
- Zuo Qiting, Jiang Guodong, Zang Chao, et al. Concept and Prospect of Optimal Layout of National Network of Water Resources Based on the Perspective of Humans–Water Harmony [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(4): 1–7. (in Chinese)
- [20] Tan F, Wang J, Yu Y J, et al. Suitability evaluation of underground space based on finite interval cloud model and genetic algorithm combination weighting [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103743.
- [21] 周聪聪, 沈振中, 马福恒, 等. 改进云模型的水库大坝应急预案可行性评价[J]. *人民黄河*, 2023, 45(1): 156–162.
- Zhou Congcong, Shen Zhenzhong, Ma Fuheng, et al. Feasibility Evaluation of Reservoir Dam Emergency Plan Based on Improved Cloud Model [J]. *Yellow River*, 2023, 45(1): 156–162. (in Chinese)
- [22] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于云模型的堤防工程风险评价方法与应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(7): 572–580.
- Yang Zitong, Huang Xianfeng, Fang Guohua, et al. Risk Assessment Method and Application of Embankment Engineering Based on Cloud Model [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(7): 572–580. (in Chinese)
- [23] 赵晨程, 高玉琴, 刘钺, 等. 基于云模型的生态河道建设评价[J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 183–189.
- Zhao Chencheng, Gao Yuqin, Liu Yue, et al. Evaluation of Ecological River Construction Based on Cloud Model [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 183–189. (in Chinese)
- [24] 吴炯璨, 方俊, 秦淑莹, 等. 基于云模型的环境工程PPP项目后评价[J]. *统计与决策*, 2021, 37(15): 175–179.
- Wu Jiongcan, Fang Jun, Qin Shuying, et al. Post-evaluation of Environmental Engineering PPP Projects Based on Cloud Model [J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(15): 175–179. (in Chinese)
- [25] 郭茜. 基于云模型的京津冀物流一体化指标权重研究[J]. *云南财经大学学报*, 2018, 34(6): 96–104.
- Guo Qian. Research on the Index Weight of Logistics Integration in Beijing–Tianjin–Hebei Region Based on Cloud Models [J]. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 2018, 34(6): 96–104. (in Chinese)

Comprehensive Evaluation of Functional Integrity of City- and County-Level Water Networks Based on Cloud Model

Fu Daxuan

(Guangdong Hydropower Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510510, China)

Abstract: City- and county-level water networks represent the "last mile" in implementing the national water network system. To address the difficulties in assessing the functional integrity of existing water network systems at the city and county levels and the lack of technical guidance in the evaluation process, this paper proposes an evaluation indicator system for the functional integrity of city- and county-level water networks from four dimensions: water resources development and utilization, water environment and water ecology, flood control and drainage and water security, and water network management informatization. A genetic algorithm is introduced to determine the combined weights of indicators, and a comprehensive evaluation model is established by integrating the cloud model. The proposed method is applied to a case study evaluating the current water network function of Yangchun City. The evaluation results show that the membership degree of the city's current water network functional integrity to the "unqualified" grade is 0.7858, indicating an unqualified evaluation level, which agrees well with the actual problems, thereby verifying the feasibility of the

evaluation model. Furthermore, a layout suggestion of "one corridor and five branches for systematic governance, and six canals, multiple reservoirs, and multi-node guarantee" is proposed for the water network planning of Yangchun City. This study provides a reference for future research on city- and county-level water networks.

Keywords: city- and county-level water network; water network planning; genetic algorithm; cloud model; multi-indicator comprehensive evaluation; water network function evaluation

(责任编辑:程 茜)