

基于熵权 TOPSIS 组合模型的河湖水系连通性评价

林晓云

(廉江市廉江河管理所, 广东 湛江 524400)

摘要: 水系连通性建设是经济社会高质量发展的重要支撑, 开展连通性评价具有重要的理论和现实意义。本章从水系结构、水力、功能、环境等层面构建了河湖水系连通性评价体系, 引入熵权 TOPSIS 组合模型对廉江市水系连通性进行评价, 结果表明现阶段廉江市水系连通性总体表现为“较好”水平, 该评价结果与廉江市实际情况基本相符, 结合专家评价结果对廉江市水系治理提出相关建议, 所得成果有望为廉江市下一阶段城镇化建设提供技术参考。

关键词: 水系连通; TOPSIS 法; 熵值法

中图分类号: TV213.4

文献标识码: B

文章编号: 1008-1305(2024)03-0098-04

0 引言

河湖水系是生态环境的重要组成部分, 也是经济社会发展的重要支撑。近年来, 随着我国城镇化进程的不断加快, “填埋河道”、“与水争地”等现象时有发生, 导致河湖水系连通性降低、水质恶化, 并在一定程度上影响城市防洪排涝。对河湖水系连通性评价是现阶段专家、学者普遍关注的热点问题, 曾冰茹^[1]采用图论方法构建水系评价体系, 定量分析鄱阳湖流域近 30 年来水系格局和结构连通性的时空演变特征。丁洋^[2]构建了基于三流四维生态模型的河湖水系生态连通工程技术体系, 包括纵向连通工程技术、横向连通工程技术与垂向连通工程技术。李秋梅^[3]运用分形理论和景观生态学理论, 研究分析了大清河流域水系分形和水系结构连通性, 以及引江引黄主干道人工水系修建对流域水系分形和连通性的提升作用。傅春^[4]基于景观生态学中“点-边”数量关系建立水系环度(α)、节点连接率(β)和网络连通度(γ)3 种水系连通性评价指标, 并以城市湖水体引流化污为切入点来优化城市水系连通性。门宝辉^[5]应用五元联系数对洛阳市水系连通性进行评价, 利用集对分析与图论法耦合模型计算连通度, 计算得到洛阳河网水系的连通度为 1.34。由于现阶段有关部门对连通性的评价尚未形成统一标准, 且不同模型对连通性的评价结论通常也存在较大的差异, 难以统一结论。因此本文从实践出发, 提出一套基于熵权 TOPSIS 组合模型

的水系连通性评价体系, 该模型以专家赋分作为隶属度矩阵, 评价结果具有较强的可信度, 同时避免了复杂的模型计算, 在实践中具有较强的操作性。

1 研究方法

1.1 评价指标体系

在河湖水系连通性的评价上, 现有文献多是从水系连通度、水面率、河网密度等方面来衡量水系整体的连通情况, 在总结已有成果的基础上, 本文从水系的结构连通性、水力连通性、水系连通的功能性及水系连通的环境效益等层面综合考量区域水系连通状况, 其中结构、水力是连通性的直接评价指标, 而功能、环境则属于连通性的间接评价指标, 并由结构、水力、功能、环境构成评价体系准则层, 在各准则层下分别设指标层, 在此基础上共同形成 4 项准则层、12 项指标层共同构成的河湖水系评价指标体系, 结果如表 1 所示。

1.2 熵值法确定指标权重

根据本文所构建的河湖水系连通性评价指标体系, 在确定指标权重时, 为避免人为主观因素带来的偏差, 本文采用客观赋权法——熵值法, 熵的概念是由德国物理学家鲁道夫·克劳修斯(R·Clausius)于 1850 年提出的, 后经 N·Wiener 和 C·E·

收稿日期: 2023-09-09

作者简介: 林晓云(1990 年—), 女, 工程师。

E-mail: 3641386596@qq.com

表1 河湖水系连通评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标计算方法	指标类型
河湖 水系 连通 评价 指标 体系	结构	水系连通度/%	河链的实际数目/河链可能存在的最大数目	+
		河频率/(条·km ⁻²)	河流数/区域面积	+
		水面率/%	水域面积/区域总面积	+
	水力	河网密度(km·km ⁻²)	河流长度/区域面积	+
		水体流动能力/(KN·m ⁻³)	采用水流动势进行计算	+
		河道输水能力/%	通过某一断面的水量/某一时间段	+
	功能	地表水可供水量/万 m ³	供水设施在不同水平年科提供的符合一定标准的地表水量	+
		景观用水保证率/%	景观用水能够得到满足的年数/总年数	+
		地表水灌溉保证率/%	使用地表水灌溉能够得到满足的年数/总年数	+
	环境	水功能区达标率/%	水质达标的水功能区数量/全部水功能区数量	+
		生态用水保证率/%	生态用水量能够得到满足的年数/总年数	+
		优于Ⅲ类断面比例/%	优于Ⅲ类水质断面数量/总断面数量	+

Shannon 提出了更广阔的信息熵,如今已广泛应用于社会经济、工程技术等各个领域。熵值法主要步骤如下:

(1)数据标准化

为消除各指标原始数据由于量纲不同所引起的计算误差,采用极差标准化的方法对原始数据进行标准化处理,具体计算公式如下:

正向“+”指标:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{\min j}) / (X_{\max j} - X_{\min j}) \quad (1)$$

负向“-”指标:

$$X'_{ij} = (X_{\max j} - X_{ij}) / (X_{\max j} - X_{\min j}) \quad (2)$$

式中, X'_{ij} 为标准化处理后的指标值; X_{ij} 为指标原始值; $X_{\max j}$ 、 $X_{\min j}$ 分别为历年来指标 j 的最大值、最小值。但考虑到有些指标本身虽为正向指标,但当其增加到一定程度又会对经济社会发展产生一定的负面作用。诸如此类指标通常并非越大越好,而是当其接近于某一标准值时最佳,定义此类指标为非单向指标。

$$\text{非单向“} \pm \text{”指标: } X'_{ij} = \frac{X_0 - |X_{ij} - X_0|}{X_0} \quad (3)$$

式中,当 $X_{ij} < X_0$ 时, X'_{ij} 为正向指标;当 $X_{ij} \geq X_0$

时, X'_{ij} 为正向指标;式中 X_0 主要借鉴有关规范、标准加以确定。

(2)权重计算

①第 j 个指标在第 i 年的比重 P_{ij}

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (4)$$

式中, m —统计年数。

②第 j 个指标信息熵 E_j

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (5)$$

其中, $0 \leq E_j \leq 1$ 。

③第 j 个指标的效用值 D_j

$$D_j = 1 - E_j \quad (6)$$

④第 j 个指标的权重 W_j

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (7)$$

式中, n —指标数。

1.3 TOPSIS 法评价各方案优劣次序

TOPSIS 法是由 C. L. Hwang 和 K. Yoon 于 1981 年首次提出,是一种逼近于理想解的排序法,该方法只要求各效用函数具有单调递增(或递减)性即可,是多目标决策分析中一种常用的有效方法,又称为优劣解距离法。该方法主要原理如下^[6-8]:

假定多属性决策方案集为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 衡量方案优劣的属性变量为 x_1, \dots, x_n , 这时方案集 D 中的每个方案 $d_i (i=1, \dots, m)$ 的 n 个属性值构成的向量是 $[a_{i1}, \dots, a_{in}]$ 。

(1)用向量规范化的方法求得规范决策矩阵

设多属性决策问题的决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, 规范化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$, 其中:

$$b_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2} \quad (8)$$

其中 $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

(2)构成加权规范矩阵

$$C = (c_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

根据上文采用的熵值法确定的各属性权重向量 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, 对规范化决策矩阵 B 中各项指标分别赋予权重系数, 即

$$c_{ij} = w_j \cdot b_{ij}, \text{ 其中 } i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

(3)确定正理想解 C^* 和负理想解 C^0

设正理想解 C^* 的第 j 个属性值为 c_j^* , 负理想解 C^0 的第 j 个属性值为 c_j^0 , 则

正理想解

$$c_j^* = \begin{cases} \max c_{ij}, & j \text{ 为效益型属性} \\ \min c_{ij}, & j \text{ 为成本型属性} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n. \tag{11}$$

负理想解

$$c_j^0 = \begin{cases} \min c_{ij}, & j \text{ 为效益型属性} \\ \max c_{ij}, & j \text{ 为成本型属性} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n. \tag{12}$$

(4) 计算各方案到正理想解与负理想解的距离
备选方案 d_i 到正理想解的距离为

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^*)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \tag{13}$$

备选方案 d_i 到负理想解的距离为

$$s_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^0)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \tag{14}$$

(5) 计算各方案的综合评价系数

$$f_i^* = s_i^0 / (s_i^0 + s_i^*), i = 1, 2, \dots, m. \tag{15}$$

按计算得到 f_i^* 由大到小排列即可得到各方案的优劣次序。

2 实例应用

2.1 研究区概况

廉江市位于广东省西南部、雷州半岛北部，西南濒临北部湾。全市东西相距 79.5km，南北相距 60.2km，总面积 2866.83km²。廉江市境内河流纵横交错，水系发达。全市有大小河流 342 条，集雨面积 3987km²，其中境内集雨面积为 2840km²，境内河流总长度 1347.03km，年径流总量 24.5 亿 m³。市内一级河道有九洲江、南桥河、青平河和高桥河等 4 条，境内主河道总长 152.91km，二级河道有沙铲河、廉江河、武陵河、良垌河、龙湾河等 12 条，境内主河道总长 211.41km，三级河道有蓬塘河、陀村河、白马岭河、香山河和三塘河等 5 条，境内主河道总长 125.36km。尽管廉江市水系发达，但受城镇化建设影响，部分河道出现功能萎缩、淤积严重等问题，很大程度上降低了河道连通性及行洪能力。为满足我国高质量发展的要求，近年来廉江市通过开展多轮水系整治和河道治理工程，全市河湖水域环境得到较大的改善，水环境质量稳步提升。

2.2 指标权重计算

根据熵值法，分别计算廉江市河湖水系连通性

评价各项指标权重，结果见表 2 所示。

2.3 构建隶属度矩阵及规范化矩阵

由于水系连通性评价体系中涉及的部分评价指标具有模糊性强、难以量化的特点，在构建隶属度矩阵时采用专家赋分法。为保证评价结果的客观性，本次邀请了行业内十余位专家对各项评价指标进行现场赋分，回收有效问卷 10 份。对各项指标的评价结果设置了良好、较好、中等、一般、较差共 5 个等级，由各位专家对各项指标评价结果进行选择，最后统计各等级所对应的专家人数，并核算百分比作为各指标的隶属度值，对专家评分隶属度矩阵进行规范化处理后，得到规范化矩阵，根据表 2 计算的各项指标权重，对规范化矩阵赋权后，计算各项指标理想解，结果见表 3 所示。

表 2 廉江市河湖水系连通评价指标权重

目标层	准则层	指标层	指标权重	指标类型
河湖 水系 连通 评价 指标 体系	结构	水系连通度/%	0.1186	+
		河频率/(条·km ⁻²)	0.0874	+
		水面率/%	0.1084	+
	水力	河网密度/(km·km ⁻²)	0.0692	+
		水体流动能力/(KN·m ⁻³)	0.0529	+
		河道输水能力/%	0.0359	+
	功能	地表水可供水量/万 m ³	0.0707	+
		景观用水保证率/%	0.0934	+
		地表水灌溉保证率/%	0.0479	+
	环境	水功能区达标率/%	0.1301	+
		生态用水保证率/%	0.0859	+
		优于Ⅲ类断面比例/%	0.0996	+

2.4 计算综合评价系数

根据 TOPSIS 法依次计算各评价等级到正理想解距离 S_i^* ，到负理想解距离 S_i^0 及综合评价系数 f_i^* ，结果如表 4 所示。

2.5 结果讨论与建议

根据 TOPSIS 法计算得到的廉江市河湖水系连通各评价等级综合评价系数依次为 0.355、0.883、0.520、0.271、0.000，根据 f_i^* 计算值确定各评价等级排序为较好 > 中等 > 良好 > 一般 > 较差，根据 TOPSIS 法计算原则确定廉江市河湖水系连通性最终评价结果应为“较好”。从总体上来看，廉江市近年来水系治理工作成效显著，得到专家的普遍认可，但从专家赋分隶属度矩阵来看，仍有部分指标存在较大的改进空间，如河道输水能力不足、河道

表3 专家评分隶属度矩阵、规范化矩阵及理想解计算表

评价指标	专家评分隶属度矩阵					规范化矩阵					理想解	
	良好	较好	中等	一般	较差	良好	较好	中等	一般	较差	正理想解	负理想解
水系连通度/%	0.1	0.6	0.2	0.1	0	0.154	0.926	0.309	0.154	0.000	0.110	0.000
河频率/(条·km ⁻²)	0.2	0.5	0.1	0	0	0.365	0.913	0.183	0.000	0.000	0.080	0.000
水面率/%	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.730	0.548	0.365	0.183	0.000	0.079	0.000
河网密度/(km·km ⁻²)	0.2	0.5	0.2	0.1	0	0.343	0.857	0.343	0.171	0.000	0.059	0.000
水体流动能力/(KN·m ⁻³)	0	0.6	0.4	0	0	0.000	0.832	0.555	0.000	0.000	0.044	0.000
河道输水能力/%	0.1	0.6	0.1	0.2	0	0.154	0.926	0.154	0.309	0.000	0.033	0.000
地表水可供水量/万 m ³	0.2	0.4	0.3	0.1	0	0.365	0.730	0.548	0.183	0.000	0.052	0.000
景观用水保证率/%	0	0.4	0.3	0.3	0	0.000	0.686	0.514	0.514	0.000	0.064	0.000
地表水灌溉保证率/%	0.2	0.2	0.5	0.1	0	0.343	0.343	0.857	0.171	0.000	0.041	0.000
水功能区达标率/%	0	0.5	0.4	0.1	0	0.000	0.772	0.617	0.154	0.000	0.100	0.000
生态用水保证率/%	0.1	0.4	0.3	0.2	0	0.183	0.730	0.548	0.365	0.000	0.063	0.000
优于Ⅲ类断面比例/%	0.2	0.5	0.2	0.1	0	0.343	0.857	0.343	0.171	0.000	0.085	0.000

表4 各评价等级综合评价系数计算值

评价等级	S_i^*	S_i^0	f_i^*
良好	0.187	0.103	0.355
较好	0.032	0.238	0.883
中等	0.130	0.141	0.520
一般	0.195	0.072	0.271
较差	0.247	0.000	0.000

景观用水保证率偏低等问题仍然存在。结合专家赋分情况及廉江市水系存在的主要问题^[9-11]，本次提出以下建议：①坚持规划引领，统筹建设。强化规划的引领作用，以既有的水系连通体系为基础，打通断头浜，构建骨干水网连通体系，统筹安排各年度实施计划，逐步实现中小河流并网工程，形成现代化水网系统；②坚持系统治理，精准施策。廉江市河流、湖荡数量众多，但水系主次不明晰，在开展水系整治过程中要因河施策，因地施策，同时要打破区域壁垒，实现系统治理；③坚持创新驱动，有序推进。水系整治是一项重要的民生工程，工程建设实施主要依托于政府投资，有关部门要打破常规，积极创新项目承发包模式，同时要探索拓宽项目投融资渠道，保障项目的高效、有序推进。

3 结语

文章通过构建河湖水系连通性评价指标体系对廉江市水系现状进行综合评价。从评价结果来看，尽管全市总体上取得了“较好”评价等级，但仍有部分指标存在较大的改进空间，文章结合专家赋分结

果对廉江市水系治理工作提出了相关建议，研究成果有望为廉江市下一阶段城镇化建设提供一定的技术参考，并丰富该领域的研究成果。从研究方法来看本文仍有一定的不足之处，由于现阶段尚无公认的指标评价等级划分标准，故在确定指标隶属度时采用了专家赋分法，同时受限于客观条件专家问卷数量相对较少，在下一阶段研究中，将进一步深入研究评价指标的等级划分问题，以提高评价结果的客观性。

参考文献

[1] 曾冰茹, 李云良, 谭志强. 基于连通性指数(IC)的近30年鄱阳湖流域水系结构与水文连通演变评估[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5).

[2] 丁洋, 赵进勇, 张晶, 等. 河湖水系生态连通工程技术体系构建[J]. 中国农村水利水电, 2022(4): 120-126.

[3] 李秋梅, 杨建英, 吴海龙, 等. 大清河流域水系分形及连通性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(3): 296-303.

[4] 傅春, 邓俊鹏, 欧阳欢葵, 等. 基于图论法对城市水系连通性表征及优化[J]. 地理科学, 2022, 42(11): 2028-2038.

[5] 门宝辉, 刘菁苹. 联系数-图论耦合的城市河网水系连通性评价[J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 65-76.

[6] 袁鹰, 吴伟杰, 张伊宁, 等. 基于AHP-熵权法-TOPSIS的广东省抽水蓄能站点优选评价[J]. 广东水利水电, 2023(1): 37-42.

[7] 李晓花. 基于熵权的TOPSIS模型在水利工程方案优选中的应用[J]. 广东水利水电, 2009(12): 29-31.

[8] 罗朝晖, 陈丹, 席会华. 区域水资源开发利用程度综合评价的TOPSIS模型及其应用[J]. 广东水利水电, 2004(6): 17-18, 41.

[9] 李辉. 沈阳市水系形态结构特征及水系连通指标阈值的确定[J]. 水利技术监督, 2023(6): 106-109.

[10] 禹佳奇, 唐仁. 水系连通及水美乡村建设县建设方案的思考[J]. 水利技术监督, 2023(6): 127-130.

[11] 孟宇. 辽宁省农村水系连通评价体系研究与应用[J]. 水利规划与设计, 2022(4): 13-15.