

基于 AHP-模糊综合评价法的中山市 水生态文明城市建设评估*

方奕舟¹, 陈志和^{1,2,3}, 熊育久^{1,2,3}

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082

摘要: 选取水质污染严重的中山市大涌镇为研究区域, 以《水生态文明城市建设评价导则》(SL/Z 738-2016) 推荐的指标为基础, 建立涵盖水安全、水环境、水生态、水监管、水节约、水文化等 6 大准则层、总计 26 项指标层的大涌镇水生态文明城市建设评价体系, 分别基于《水生态文明城市建设评价导则》的等权评价法与基于非等权的 AHP-模糊综合法, 对比了研究区 2017 年水生态文明城市建设的效果。评估结果显示: 1) 等权评价时研究区水生态文明城市建设得分 52 (满分 104), 较低的分值主要由水质污染严重导致水环境得分为零所致; 2) 尽管基于非等权的 AHP-模糊综合评价结果 (48 分) 与等权评价法结果相似, 但差异化的权重表明除水环境外, 水生态也是制约研究区生态文明建设的主要因子。分析显示若该镇期望水生态文明建设基本达标, 水环境各指标应达到导则要求的 II 级, 应在后续建设中加以重视。

关键词: 生态建设; 水生态; 评价指标; AHP-模糊综合评价法; 中山市

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 03-0088-11

Evaluation of water ecological civilization of Zhongshan city based on AHP-fuzzy comprehensive method

FANG Yizhou¹, CHEN Zhihe^{1,2,3}, XIONG Yujia^{1,2,3}

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Water ecological civilization construction is one of the most important parts of Chinese ecological city. Evaluating construction conditions in pilot cities is helpful to summarize the experience and provide guidelines for later construction. In this study, 26 indices were established for Dachong town in Zhongshan city, Guangdong province, based on evaluation guide for water ecological civilization construction (SL/Z 738-2016). With the help of statistical data in 2017, both the equal weight evaluation method and the non-equal weight analytic hierarchy process fuzzy comprehensive method were used to compare the effect of water ecological civilized city construction in the research area. The results show that: 1) under the equal weight evaluation, the score for water ecological civilization construction in the

* 收稿日期: 2020-03-20 录用日期: 2020-09-02 网络首发日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41671416, U1911204, 51861125203)

通信作者: 熊育久 (1982年生), 男; 研究方向: 水生态及其评价; E-mail: xiongyuj@mail.sysu.edu.cn

study area is 52 (full score 104), and the relatively low score is mainly caused by the serious water pollution, which led to a zero value for water environment related indices; 2) Although the assessed score using the non-equal weight analytic hierarchy process (AHP) fuzzy comprehensive method is similar to the equal weight evaluation method, the differentiated weight shows that the water ecology, except for water environment, is the main influencing factor leading to a low score for the study area. The analysis suggests that if the water ecological civilization construction of the town is expected to reach the basic standard, the water environment indicators should reach the level II of the guidelines, which should be paid attention to in the follow-up construction.

Key words: ecological construction; water ecology; evaluation index; analytic hierarchy process (AHP) fuzzy comprehensive evaluation method; Zhongshan city

水生态文明城市建设遵循人与自然和谐相处的理念,协调水资源的开发利用与保护,既能保证地区社会经济充分发展,又能实现水资源可持续利用的目标^[1]。随着我国经济的高速增长以及城镇化的日益加速,水生态问题愈发突出。因此试点建设水生态文明城市,探索水生态文明城市建设模式,并对这些城市开展建设评估有助于总结经验与教训、指导后期水生态文明城市建设,对实现可持续发展具有重大意义。

有关水生态评估的研究可以追溯到1972年美国清洁水法^[2],因为水生态涉及因素多,研究者从不同角度建立了不同的评价体系,如鱼类集体完整性指数^[3]、生物完整性指数^[4]、快速生物监测协议RBPs^[5]、溪流状况指数ISC^[6]等。

国内在《水生态文明城市建设评价导则》(SL/Z 738-2016)^[7]颁布之前,研究以构建指标体系为主。如于鲁冀等^[8]探讨了河流水生态修复体系的构建、付岚等^[9]使用大型底栖动物完整性指数评价了东江流域的水生态。国内在城市评价方面起步较晚,崔向红^[10]探讨了生态学、城市规划学、社会学等多学科相结合的生态文明城市建设理论与实践。覃玲玲^[11]在前人研究基础上,提出了涵盖生态经济、生态社会、生态环境、生态文化、生态制度等五个文明的指标体系。詹卫华等^[12]强调了水生态文明建设中生态的重要性。左其亭^[13]指出水生态文明建设需要从制度、生态修复、水文化等多方面共同推进。陈进^[14]认为水生态文明城市建设应达到水资源可持续利用、水生态系统良好、人民安全和幸福生活等三个目标。王建华和胡鹏^[15]在梳理总结水生态文明评价指标基础上,建议从水文化、水管理、水供用、水生态等四个方面评价水生态文明。户超等^[16]认为水生态文明评价指标体系应综合考虑“自然—社会”二

元水循环的特征。

2016年《水生态文明城市建设评价导则》颁布实施,构建了涵盖水安全、水环境、水生态、水监管、水节约、水文化等6大准则层、总计25项指标的评价体系,但各指标在评价中权重相等。然而,我国各地具体的自然条件和经济发展状况存在差异,等权重评价法可能不适用于局部小区域,且各指标权重相等下难以判断影响水生态文明建设的主导因子。因此,在《水生态文明城市建设评价导则》颁布后,研究者尝试使用非等权重评价方法,如物元可拓模型^[17-18]、投影寻踪法^[19]、主成分分析法^[20]、层次分析法^[21-23]、AHP-模糊综合评价法^[24]。其中AHP-模糊综合评价法是一种将层次分析法与模糊综合评价法相结合综合评价法,它通过层次分析法对模糊综合评价法的赋权提升评价结果的可靠性,同时通过模糊综合评价法的计算减轻层次分析法人为主观因素的影响,两者结合使评价的结果更具指导意义^[25],在水环境质量评价^[26]、城市建设评价^[27]等领域获得广泛应用。

大涌镇位于中山市网河区中游,镇内河涌纵横,不但是中山市河网密度较大的地区之一,而且是珠江河口区网状水系的重要组成部分。大涌镇早期以工业生产为主,乡镇企业在带来经济效益的同时也产生了严重的水环境污染问题,如河涌水质较差,多属于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)^[28]中的劣V类水体,制约了全市整体建设效果。因此,本文选择水污染严重的大涌镇为研究对象,以《水生态文明城市建设评价导则》^[7]各项指标及等权重评价为基础,结合非等权重AHP-模糊综合评价法,以期识别等权重与非等权重下评估结果的差异、识别影响局部区域水生态文明建设的的主导因子,为后续水生态文明城市建设提供决策依据与参考。

1 研究区概况

中山市东临珠江口,与珠海、澳门相邻,与深圳、香港隔海相望,北距省会广州市约 100 km。大涌镇地处中山市中西部,东临石岐河,西与江门市新会区隔西江相望,属亚热带季风气候。常年阳光充足,气候温和,雨量充沛。

大涌镇境内河涌纵横交错,根据 2018 年 5 月中山市境内各镇区河涌水质监测数据统计,大涌镇内 19 条主要河涌水质为劣 V 类水体(GB 3838-2002)(图 1)。

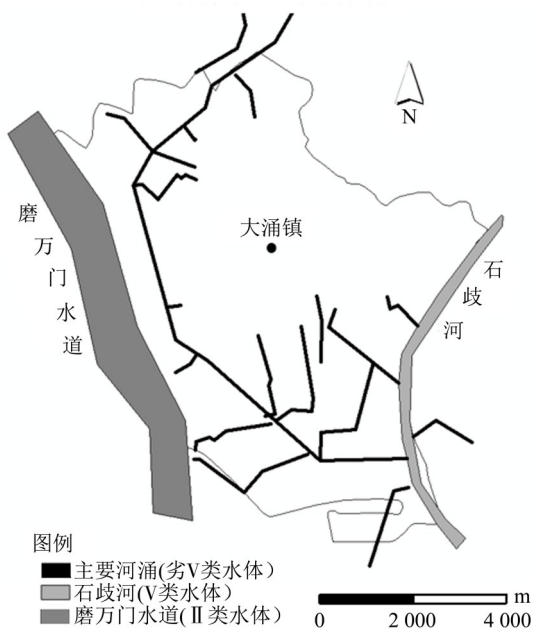


图 1 研究区中山市大涌镇水系及其水质等级现状

Fig. 1 The water system and their water quality at Dachong town in Zhongshan city

2 研究方法介绍

为评估研究区 2015 年后的生态建设情况,本文根据大涌镇的实际情况,结合《2017 年中山市统计年鉴》^[29] 的统计数据,选用《水生态文明城市建设评价导则》^[7]、《节水型社会评价指标体系及评价方法》(GB/T 28284-2012)^[30] 中的推荐指标,建立大涌镇水生态文明城市建设评价指标体系,分别基于《水生态文明城市建设评价导则》^[7] 的等权评价法与基于非等权的 AHP-模糊综合法,对比了研究区 2017 年水生态文明城市建设的效果。

2.1 指标体系构建及等权评价法

本文中的水生态文明城市建设评价指标体系涵盖水安全、水环境、水生态、水监管、水节约、

水文化六大准则层以及共计 26 项的指标层(表 1)。其中:水安全准则层(B_1)涵盖防洪排涝达标率(C_{11})等 4 项指标;水环境准则层(B_2)涵盖水功能区水质达标率(C_{21})等 4 项指标;水生态准则层(B_3)涵盖河流生态基流满足率(C_{31})等 6 项指标;水监管准则层(B_4)涵盖用水总量控制达标情况(C_{41})等 3 项指标;水节约准则层(B_5)涵盖万元工业增加值用水量相对值(C_{51})等 6 项指标;水文化准则层(B_6)涵盖水文化传承载体数量(C_{61})等 3 项指标。

在基于等权评价法的水生态文明城市建设评价体系中,各指标层对准则层以及各准则层对目标层的相对重要性相等,根据各指标取值范围与分界阈值,划分为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级,分别对应 4 分(优)、3 分(良)、2 分(中)、1 分(差)、0 分(劣)(表 1)。根据各指标的统计数据,结合表 1 中相应的评分标准,确定各指标的得分。

2.2 AHP-模糊综合评价法

AHP-模糊综合评价法是一种结合了层次分析法以及模糊综合评价法的优点的评价方法。该方法通过层次分析法对各准则层以及指标层进行赋权,然后通过模糊综合评价法计算隶属度进行评价。

2.2.1 权重确定 为评价各指标层相对准则层的重要性以及各准则层相对目标层的重要性,本文使用专家评分法通过问卷调查的形式邀请了数十名水利行业从业人士及专家学者进行权重打分,并通过 1~9 标度法规各指标的赋值标准。核心计算公式为

$$W_l = \frac{\bar{X}_l}{\sum_{j=1}^n \bar{X}_j}, \quad (1)$$

式中 W_l 为相对权重,表征指标层 l 对准则层(准则层 l 对目标层)的重要性; \bar{X}_l 通过专家评分法得出,表征专家对 X 准则层具体指标层 l (X 目标层的准则层 l) 的评分; $\sum_{j=1}^n \bar{X}_j$ 表征 X 准则层共计 n 个指标层(X 目标层共计 n 个准则层)的专家评分之和。

2.2.2 隶属度及分值计算 各指标的单因素评价,需要通过模糊综合评价进行隶属度计算。本文在此将评价指标集划分为目标层评价指标集以及准则层评价指标集,并建立评判集“优(4分)、良(3分)、中(2分)、差(1分)、劣(0分)”,对应表 1 中划分的 I 级(4分)、II 级(3分)、III

表1 大涌镇水生态文明城市建设评价体系及标准与结果

Table 1 Water ecological civilization evaluation system, standards and results in Dachong town

准则层B	指标层C	各指标分级评价标准					评价结果	
		I级(4分)	II级(3分)	III级(2分)	IV级(1分)	V级(0分)	2017得分	
水安全B ₁	防洪排涝达标率C ₁₁	[90,100]	[75, 90]	[60, 75]	[40, 60]	[0, 40]	90	4
	降雨滞蓄率C ₁₂	[40, +∞]	[30, 40]	[20, 30]	[10, 20]	[0, 10]	9.5	0
	集中式饮用水水源地安全保障达标率C ₁₃	100	[90, 100]	[80, 90]	[70, 80]	[0, 70]	100	4
	自来水普及率C ₁₄	[95,100]	[80, 95]	[60, 80]	[40, 60]	[0, 40]	100	4
水环境B ₂	水功能区水质达标率C ₂₁	[90,100]	[75, 90]	[60, 75]	[40, 60]	[0, 40]	16.7	0
	水质优良度C ₂₂	[90,100]	[75, 90]	[60, 75]	[40, 60]	[0, 40]	17	0
	废污水达标处理率C ₂₃	A级以上	[95,100]	[90, 95]	[85, 90]	[0, 85]	82.7	0
	水功能区限制纳污控制率C ₂₄	100	[80, 100]	[60, 80]	[40, 60]	[0, 40]	16.7	0
水生态B ₃	河流生态基流满足率C ₃₁	[98, 100]	[90, 98]	[80, 90]	[60, 80]	[0, 60]	80	2
	河流纵向连通性指数C ₃₂	[0,0.3]	(0.3, 0.5]	(0.5, 0.8]	(0.8, 1.2]	(1.2, +∞)	0.3	4
	河湖生态护岸比例C ₃₃	[90,100]	[70, 90]	[50, 70]	[30, 50]	[0, 30]	35	1
	水域空间率C ₃₄	[30,100]	[20, 30]	[10, 20]	[6, 10]	[0, 6]	10.6	1
	水土流失治理程度C ₃₅	[90,100]	[75,90]	[60,75]	[50,60]	[0, 50]	75	3
	建成区透水面积率C ₃₆	[40,100]	[35,40]	[30,35]	[25,30]	[0, 25]	32.8	2
水监管B ₄	用水总量控制达标情况C ₄₁	达标	/	/	/	不达标	达标	4
	水资源监控能力指数C ₄₂	[90,100]	[75, 90]	[60, 75]	[40, 60]	[0, 40]	73	2
	水生态文明建设重视度C ₄₃	[10, +∞)	[8, 10]	[5, 8]	[3, 5]	[0, 3]	5	2
水节约B ₅	万元工业增加值用水量相对值C ₅₁	[0,25]	(25, 50]	(50, 100]	(100, 150]	(150, +∞)	96.2	2
	农田灌溉水有效利用系数C ₅₂	[0.7,1]	[0.6, 0.7]	[0.5, 0.6]	[0.45, 0.5]	[0, 0.45]	0.9	4
	生活节水器具普及率C ₅₃	[90,100]	[80, 90]	[70, 80]	[60, 70]	[0, 60]	92	4
	公共供水管网漏损率C ₅₄	[0,8]	(8, 12]	(12, 18]	(18, 25]	(25, 100]	10.6	2
	工业用水重复利用率C ₅₅	[90,100]	[80, 90]	[60, 80]	[40, 60]	[0, 40]	50	1
	非常规水资源利用率C ₅₆	[90,100]	[80, 90]	[50, 80]	[20, 50]	[0, 20]	8	0
水文化B ₆	水文化承载载体数量C ₆₁	[8, +∞)	[6,7]	[3,5]	[1,2]	0	2	1
	水生态文明建设公众认知度C ₆₂	[20, +∞)	[15, 20]	[10, 15]	[5, 10]	[0, 5]	15	3
	水生态环境质量公众满意度C ₆₃	[90,100]	[80, 90]	[60, 80]	[50, 60]	[0, 50]	70	2
总分							52	

级(2分)、IV级(1分)、V级(0分)。

利用柯西分布函数计算隶属度,其核心公式为

$$R_x = \frac{1}{[1 + a_2(x - a_1)^2]}, \quad (2)$$

式中 R_x 为隶属度函数; x 为2017年指标 x 的实测值; a 值根据 x 确定:

1) 当 x 属于I级时

$$a_1 = x_u, a_2 = 4/(x_u - x_i)^2. \quad (3)$$

2) 当 x 属于II~IV级时

$$a_1 = (x_u + x_i)/2, a_2 = 4/(x_u - x_i)^2. \quad (4)$$

3) 当 x 属于V级时

$$a_1 = x_i, a_2 = 4/(x_u - x_i)^2. \quad (5)$$

式(3)、(4)、(5)中 x_u 以及 x_i 分别对应 x 所处级别的上下边界值。

最终评价得分根据公式(6)计算

$$Z = W \cdot Y, \quad (6)$$

式中 Z 为得分, W 为式(1)中权重向量, Y 为综合评价结果,由式(2)根据最大隶属原则得出。

3 评价结果

3.1 等权评价结果

《水生态文明城市建设评价导则》^[7] 等权评价结果表明, 研究区水生态文明城市建设得分 52 分 (图 2), 其中水安全准则层 (B_1) 的评价为“优” (得分率 75%), 主要影响因子是降雨滞蓄率 (C_{12}); 水监管准则层 (B_4) 的评价为“良” (得分率 67%), 主要影响因子是水资源监控能力指数 (C_{42}) 和水生态文明建设重视度 (C_{43}); 水节约准

则层 (B_5) 评价为“中” (得分率 54%), 主要影响因子是非常规水资源利用率 (C_{56}); 水生态准则层 (B_3) 评价为“中” (得分率 54%), 主要影响因子是河湖生态护岸比例 (C_{33}) 和水域空间率 (C_{34}); 水文化准则层 (B_6) 评价为“中” (得分率 50%), 主要影响因子是水文化传承载体数量 (C_{61}); 水环境准则层 (B_2) 评价为“劣” (得分率为 0%), 准则层内四项指标得分全部为 0, 研究区的水质污染问题导致该准则层成为制约水生态文明城市建设的重要因子。

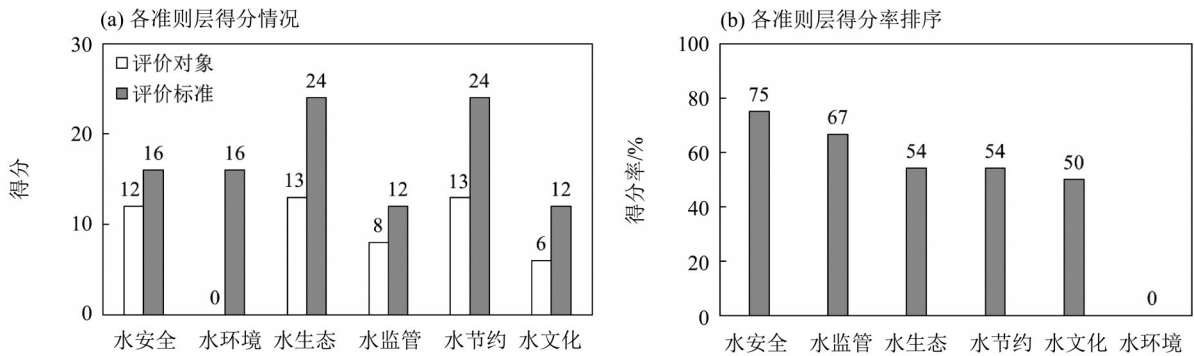


图 2 大涌镇水生态文明城市建设各准则层等权评价结果

Fig. 2 Evaluation results of water ecological civilization city construction based on equal right method for Dachong town

3.2 非等权评价结果

3.2.1 权重计算结果 准则层权重排序显示水环境、水生态、水安全、水节约、水监管、水文化等 6 大准则层的权重分别为 0.29、0.29、0.19、0.10、0.08、0.05 (图 3)。其中水安全、水环境、水生态 3 个准则层权重高于等权重结果, 而水监管、水节约、水文化 3 个准则层低于等权重结果。水环境以及水生态准则层的所占权重并列第一, 可能是因为水环境以及水生态准则层能够直观体现水生态文明城市建设效果, 而水文化准则层的所占权重最低, 这可能是因为水文化准则层更侧

重于精神文明建设, 建设效果短期内难以评估。

各准则层具体指标的权重分布 (图 4) 显示, 影响水安全准则层 (B_1) 的主要指标是防洪排涝达标率 (C_{11} , 权重为 0.41)。制约水环境准则层 (B_2) 评价的主要指标是水质优良度 (C_{24} , 权重为 0.52)。制约水生态准则层 (B_3) 评价的主要指标是水土流失治理程度 (C_{35} , 权重为 0.37)。制约水监管准则层 (B_4) 评价的主要指标是水生态文明建设重视度 (C_{43} , 权重为 0.75)。制约水节约准则层 (B_5) 评价的主要指标是万元工业用水量增加值相对值 (C_{51} , 权重为 0.30)。制约水文化准则层 (B_6) 评价的主要指标是水生态环境质量公众满意度 (C_{63} , 权重为 0.64)。将准则层权重与指标层权重相乘可以得出 26 项指标重要性排序, 前 3 位分别为水环境准则层 (B_2) 的水质优良度 (C_{24} , 权重为 0.15)、水生态准则层 (B_3) 的水土流失治理程度 (C_{35} , 权重为 0.11), 水安全准则层 (B_1) 的防洪排涝达标率 (C_{11} , 权重为 0.08)。

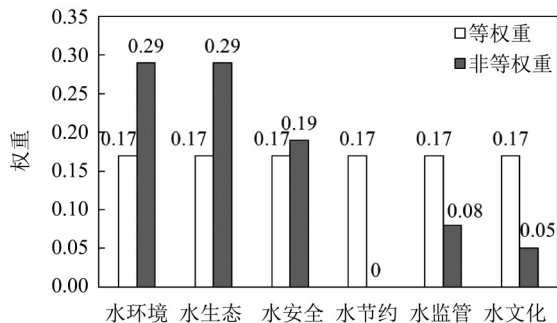


图 3 准则层等权重与非等权重差异对比

Fig. 3 Weight values for criteria layer based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method

3.2.2 隶属度及分值计算结果 隶属度计算结果显示 (表 2), 水安全准则层 (B_1) 4 项具体指标——防洪排涝达标率 (C_{11})、降雨滞蓄率 (C_{12})、集中式饮用水水源地安全保障达标率 (C_{13})、自来

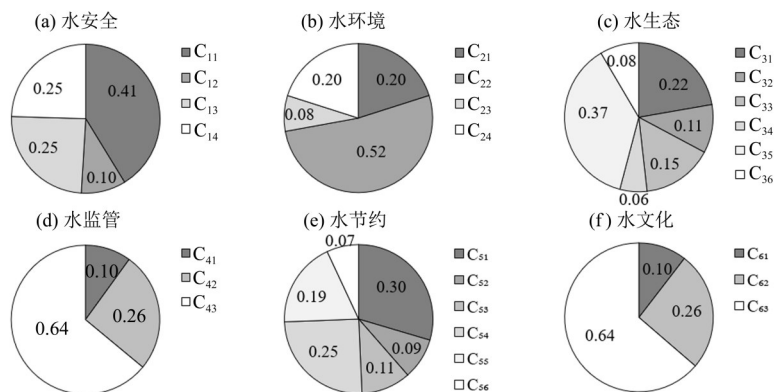


图 4 各指标权重分布图

Fig. 4 Weight values for different indices in each criterion layer

表 2 隶属度计算及指标层评价结果

Table 2 Membership calculation and evaluation results of index level

准则层 B	指标层 C	隶属度计算结果					隶属度评价结果
		优	良	中	差	劣	
水安全 B ₁	防洪排涝达标率 C ₁₁	0.222 7	0.550 1	0.110 3	0.064 9	0.052 0	良
	降雨滞蓄率 C ₁₂	0.038 9	0.044 4	0.113 1	0.543 2	0.260 4	差
	集中式饮用水水源地安全保障达标率 C ₁₃	0.572 2	0.286 1	0.057 2	0.022 0	0.062 4	优
	自来水普及率 C ₁₄	0.684 0	0.181 1	0.068 4	0.026 3	0.040 2	优
水环境 B ₂	水功能区水质达标率 C ₂₁	0.003 3	0.011 7	0.019 5	0.075 5	0.890 0	劣
	水质优良度 C ₂₂	0.003 3	0.011 8	0.019 6	0.076 5	0.888 8	劣
	废污水达标处理率 C ₂₃	0.025 4	0.026 0	0.057 3	0.199 4	0.691 9	劣
	水功能区限制纳污控制率 C ₂₄	0.014 5	0.016 2	0.030 1	0.073 1	0.866 1	劣
水生态 B ₃	河流生态基流满足率 C ₃₁	0.001 9	0.056 2	0.372 4	0.372 4	0.197 1	中
	河流纵向连通性指数 C ₃₂	0.201 3	0.503 3	0.156 2	0.076 0	0.063 3	良
	河湖生态护岸比例 C ₃₃	0.004 4	0.034 8	0.102 1	0.592 2	0.266 5	差
	水域空间率 C ₃₄	0.101 2	0.081 8	0.427 8	0.286 0	0.103 2	中
	水土流失治理程度 C ₃₅	0.029 6	0.385 4	0.385 4	0.045 3	0.154 2	良
建成区透水面积率 C ₃₆	0.091 0	0.121 5	0.538 4	0.099 0	0.150 2	中	
水监管 B ₄	用水总量控制达标情况 C ₄₁	定性指标, 未参与隶属度计算					
	水资源监控能力指数 C ₄₂	0.024 6	0.286 1	0.479 5	0.117 5	0.092 3	中
	水生态文明建设重视度 C ₄₃	0.047 6	0.052 9	0.449 6	0.449 6	0.000 4	中
水节约 B ₅	万元工业增加值用水量相对值 C ₅₁	0.011 6	0.030 4	0.407 3	0.300 4	0.250 3	中
	农田灌溉水有效利用系数 C ₅₂	0.709 2	0.083 4	0.038 3	0.006 3	0.162 7	优
	生活节水器具普及率 C ₅₃	0.304 9	0.366 7	0.086 4	0.036 0	0.205 9	良
	公共供水管网漏损率 C ₅₄	0.087 3	0.191 1	0.413 3	0.066 3	0.242 0	中
	工业用水重复利用率 C ₅₅	0.006 4	0.013 0	0.130 1	0.650 4	0.200 1	差
	非常规水资源利用率 C ₅₆	0.0023	0.003 3	0.051 0	0.185 8	0.757 5	劣
水文化 B ₆	水文化传承载体数量 C ₆₁	0.008 1	0.016 3	0.162 6	0.406 5	0.406 5	差
	水生态文明建设公众认知度 C ₆₂	0.277 6	0.317 3	0.317 3	0.063 5	0.024 4	良
	水生态环境质量公众满意度 C ₆₃	0.018 5	0.068 4	0.683 6	0.068 4	0.161 2	中

水普及率 (C_{14}) 的评价结果分别为“良”“差”、“优”、“优”。水环境准则层 (B_2) 下 4 项指标层水功能区水质达标率 (C_{21})、水质优良度 (C_{22})、废污水达标处理率 (C_{23})、水功能区限制纳污控制率 (C_{24}) 的评价结果都为“劣”。水生态准则层 (B_3) 下六项指标层河流生态基流满足率 (C_{31})、河流纵向连通性指数 (C_{32})、河湖生态护岸比例 (C_{33})、水域空间率 (C_{34})、水土流失治理程度 (C_{35})、建成区透水面积率 (C_{36}) 的评价结果分别为“中”、“良”、“差”、“中”、“良”、“中”。水监管准则层 (B_4) 下两项指标层水资源监控能力指数 (C_{42})、水生态文明建设重视度 (C_{43}) 的评价结果都为“中”。水节约准则层 (B_5) 下六项指标层万元工业增加值用水量相对值 (C_{51})、农田灌溉水有效利用系数 (C_{52})、生活节水器具普及率 (C_{53})、公共供水管网漏损率 (C_{54})、工业用水重复利用率 (C_{55})、非常规水资源利用率 (C_{56}) 的评价结果分别为“中”、“优”、“良”、“中”、“差”、“劣”。水文化

准则层 (B_6) 下 3 项指标层水文化传承载体数量 (C_{61})、水生态文明建设公众认知度 (C_{62})、水生态环境质量公众满意度 (C_{63}) 的评价结果分别为“差”、“中”、“良”。

非等权评价结果 (图 5) 显示, 研究区水生态文明城市建设总分 48 分, 其中水安全准则层评价为“优” (得分率 84%), 主要影响因子为降雨滞蓄率 (C_{12}); 水监管准则层评价为“良” (得分率 67%), 主要影响因子为水生态文明建设重视度 (C_{43}); 水生态准则层评价为“中” (得分率 59%), 主要影响因子为河流生态基流满足率 (C_{31}); 水节约准则层评价为“中” (得分率 50%), 主要影响因子为万元工业增加值用水量相对值 (C_{51}); 水文化准则层评价为“中” (得分率 40%), 主要影响因子为水生态环境质量公众满意度 (C_{63}); 水环境准则层评价为“劣” (得分率 0%), 四项指标得分全部为 0, 是制约研究区水生态文明城市建设的关键。

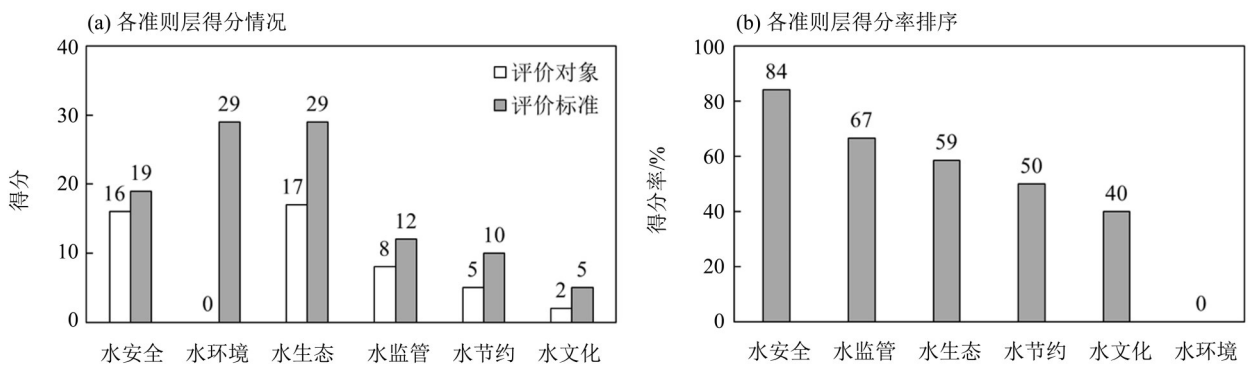


图 5 大涌镇水生态文明城市建设非等权评价结果

Fig. 5 Non-equal right evaluation results of water ecological civilization city construction in Dachong town

4 分析与讨论

4.1 等权评价法与非等权评价法评价结果差异分析

对比等权与非等权评价结果 (图 6), 两种方法最终评价得分差异不大, 但中间得分 (准则层、指标层) 呈现一定差异。其中, 尽管水环境准则层的权重有所提高, 由 0.17 提高到 0.29, 但由于河涌水质污染等问题, 两种权重下的评价结果均为零分; 水生态准则层的权重有所提高, 由 0.17 提高到 0.29, 评分与等权评价法相比提高 4 分; 水安全准则层的权重有所提高, 从 0.17 提高到 0.19, 评分与等权评价法相比提高 4 分; 水节约准则层的权重有所降低, 从 0.17 降低到 0.10, 评分与等权评价法相比降低 8 分; 水监管准则层的权重有所降

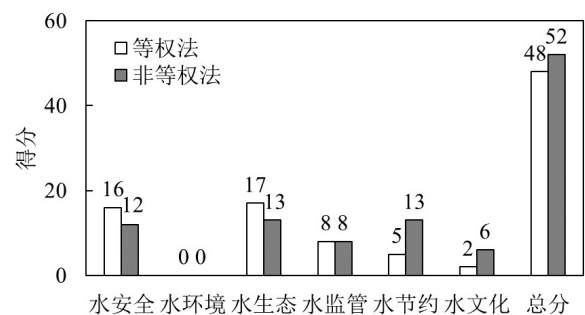


图 6 AHP-模糊综合评价法 (非等权) 与《导则》评价法 (等权) 评价结果对比

Fig. 6 Comparison of scores between AHP-fuzzy comprehensive evaluation method and evaluation guideline of water ecological civilized city construction in Dachong town

低, 从0.17降低到0.08, 两种权重下的评价结果均为8分; 水文化准则层的权重有所降低, 从0.17降低到0.05, 评分与等权评价法相比降低4分。研究区水生态文明城市最终得分48分, 评分与等权评价法相比降低4分。两种评价结果均显示水环境、水生态是制约研究区水生态文明城市建设的关键。

本文评价时基于《水生态文明城市建设评价导则》^[7]、结合研究区特色建立了新的评价指标体系。《水生态文明城市建设评价导则》^[7]作为指导性文件, 其设置的指标可能难以反映地区特色, 各项指标的重要程度以及适用程度可能会发生变化。等权评价法在评价过程中, 由于各项指标对整体的影响程度一致, 难以识别制约总体得分的关键因子, 不利于指导后期开展针对性的工作。相比之下, 非等权评价法通过差异化的赋权, 能够更直观的体现制约当前水生态文明城市建设的关键因子, 更有利于指导后续建设工作。因此, 在实施评价的过程中, 应根据评价范围和城市等级差异, 以及城市规模和发展需求与地方特色, 构建评价指标体系并赋权, 确立评价等级标准^[31], 方能提升评价结果的代表性。

如刘姝芳等^[32]基于《水生态文明城市建设评价导则》^[7]指标体系, 使用基于专家打分的层次分析法评价西安市水生态文明时, 发现水安全准则层的权重高于水生态、水节约等其余准则层, 是主要影响因子。王富强等^[33]立足于郑州市, 建立涵盖“最严格水资源管理”、“水资源优化配置”、“防洪排涝体系”、“节水管理”、“水资源保护与水生态修复”、“水文化建设”六项准则层的指标体系, 并通过差异化的赋权得出“最严格水资源管理”是主要影响因子。孔兰等^[34]将东莞市划作3个片区, 并分别构建指标体系进行差异化赋权,

发现制约东莞市水生态文明建设的主要为“中部沿海片区”。

此外专家打分法对指标权重赋权不可避免地受人为主观因素影响, 近年来研究者将熵值法^[35]、频度统计法^[36]等方法应用于水生态文明城市建设评价, 旨在降低人为主观因素的影响, 提升评价结果的代表性。综上所述, 建立适用性更广更符合地区特色的指标评价体系, 通过更加合理的赋权评分方法将会使评价效果更具指导意义。

4.2 研究区未来水生态文明城市建设方向

前面的评价结果显示研究区水生态文明城市建设整体得分率为46%, 尚未达到国家《水生态文明城市建设评价导则》^[7]规定的Ⅲ级标准(得分率60%), 水环境污染是最大问题。若假设水环境准则层下水功能区水质达标率(C_{21})、水质优良度(C_{22})、废污水达标处理率(C_{23})、水功能区限制纳污控制率(C_{24})4项指标全部达到《水生态文明城市建设评价导则》要求的Ⅱ级情景下, 根据非等权评价法重新评价(图7), 可知水环境准则层得分从0提高到22分, 得分率从0%提高到76%, 研究区整体水生态文明城市建设得分从48分提高到70分, 得分率从46%提升到67%, 略超过国家《水生态文明城市建设评价导则》^[7]规定的水生态文明城市Ⅲ级标准(得分率60%)。

《中山市生态文明建设规划(修编)(2018-2030年)》^[37]中明确提到2020年中山市地表水环境质量达到或优于Ⅲ类水质比例将达到70%, 同时彻底消除劣Ⅴ类水体。根据2018年5月中山市境内各镇区河涌水质监测数据统计显示, 研究区的水功能区有西部排灌渠、石歧河、岚田水库等共计6个水功能区, 其中只有岚田水库水功能区水质以及限制纳污控制率达标。

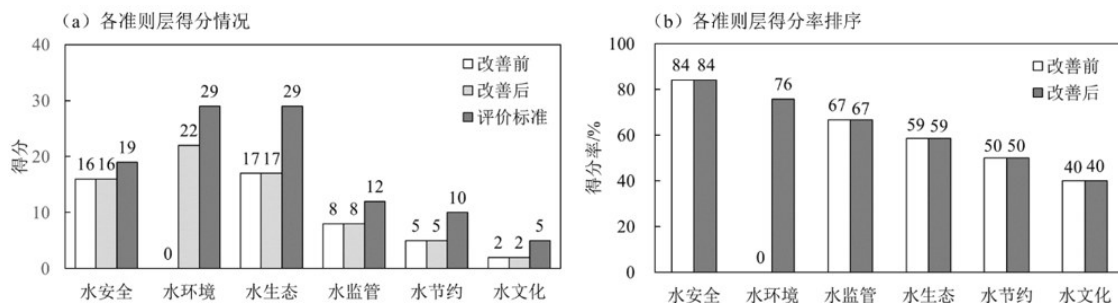


图7 大涌镇水生态文明城市建设改善前后评价结果对比

Fig. 7 Comparison of evaluation results for pre- and post- water ecological civilization city construction in Dachong town

根据 2019 年的《大涌镇河涌专项整治方案》^[38],大涌镇将从清理非法排污口、水面漂浮物、底泥污染物、河湖障碍物、涉河违建等方面多管齐下,全面提升水环境质量。根据《2019 年第二季度中山市河涌水质情况》^[39]以及《2019 年大涌镇政府工作报告》^[40],研究区已经实现 3 个水功能区水质及限制纳污控制率达标,基本完成镇内 9 条河涌的整治工程。由此来看研究区水环境准则层四项指标在有针对性的整治下,完全是能够达到《水生态文明城市建设评价导则》^[7]的 II 级标准,上文的假设具有可行性。

5 结论

本文以中山市大涌镇为研究区域,结合研究区水质污染严重等实际情况,建立了涵盖水安全、

水环境、水生态、水监管、水节约、水文化等 6 大准则层、总计 26 项指标层的大涌镇水生态文明城市建设评价体系,分别基于《水生态文明城市建设评价导则》^[7]的等权评价法与基于非等权的 AHP-模糊综合法,根据 2017 年数据对比评价了研究区水生态文明城市的建设效果,主要结论如下:

1) 两种方法评价结果相似,得分均较低,主要是由水质污染严重导致水环境指标得分为零所致,表明研究区水生态文明城市建设仍然任重道远;2) 非等权的 AHP-模糊综合评价结果表明,除水环境外,水生态也是制约研究区生态文明建设的主要因子。分析显示若该镇期望水生态文明建设基本达标,水环境各指标应达到导则要求的 II 级,应在后续建设中加以重视。

参考文献:

- [1] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4.
TANG K W. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4.
- [2] 汪云岗, 周军英, 钱谊. 美国水环境标准及其实施体系述评[J]. 生态与农村环境学报, 1999, 15(3): 49-53.
WANG Y G, ZHOU J Y, QIAN Y. Analysis on aquatic environmental standard system and its enforcement in USA [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1999, 15(3): 49-53.
- [3] KLEYNHANS C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1996, 5(1): 41-54.
- [4] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. Freshwater biology, 1999, 41(2): 221-234.
- [5] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish[M]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [6] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.
- [7] 中华人民共和国水利部. 水生态文明城市建设评价导则(SL/Z 738-2016)[S], 2016.
Ministry of Water Resources the People's Republic of China. Evaluation guide of water ecological civilization construction(SL/Z 738-2016)[S], 2016.
- [8] 于鲁冀, 吕晓燕, 宋思远, 等. 河流水生态修复阈值界定指标体系初步构建[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 170-175.
YU L J, LÜ X Y, SONG S Y, et al. The preliminary structure of definition index system for river water ecological restoration threshold [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 170-175
- [9] 付岚, 江源, 刘琦, 等. 基于大型底栖动物完整性指数 B-IBI 的东江流域水生态健康评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1502-1511.
FU L, JIANG Y, LIU Q, et al. Eco-health assessment of Dongjiang river basin based on index of biotic integrity (B-IBI) of macroinvertebrates[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(8): 1502-1511.
- [10] 崔向红. 创建生态文明城市的理论与实践研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
CUI X H. The theoretical and practical research on establishing the civilized and ecological city [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [11] 覃玲玲. 生态文明城市建设与指标体系研究[J]. 广西社会科学, 2011(7): 110-113.
QIN L L. An evaluation index system for ecological civilization construction [J]. Social Sciences in Guangxi, 2011(7): 110-113.
- [12] 詹卫华, 邵志忠, 汪升华. 生态文明视角下的水生态文明建设[J]. 中国水利, 2013(4): 7-9.
ZHAN W H, SHAO Z Z, WANG S H. Water ecological civilization construction with respect to ecological civili-

- zation[J]. *China Water Resources*, 2013 (4): 7-9.
- [13] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. *中国水利*, 2013 (4): 1-3+6.
ZUO Q T. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. *China Water Resources*, 2013 (4): 1-3+6.
- [14] 陈进. 水生态文明建设的方法与途径探讨[J]. *中国水利*, 2013 (4): 4-6.
CHEN J. Methods and approaches of water ecological civilization construction [J]. *China Water Resources*, 2013 (4): 4-6.
- [15] 王建华, 胡鹏. 水生态文明评价体系研究[J]. *中国水利*, 2013 (15): 39-42.
WANG J H, HU P. Studies on evaluation system of water ecological civilization [J]. *China Water Resources*, 2013 (15): 39-42.
- [16] 户超, 褚俊英, 何素明, 等. 城市水生态文明内涵及指标体系构建综述[J]. *人民黄河*, 2015, 37(12): 74-76.
HU C, CHU J Y, HE S M, et al. A review of city water ecological civilization connotation and index system construction[J]. *Yellow River*, 2015, 37(12): 74-76.
- [17] 刘海娇, 黄继文, 仕玉治, 等. 黄河下游典型城市水生态文明评价[J]. *人民黄河*, 2013, 35(12): 64-67.
LIU H J, HUANG J W, SHI Y Z, et al. Water ecological civilization evaluation on the typical urban of the lower Yellow River[J]. *Yellow River*, 2013, 35(12): 64-67.
- [18] 汪伦焰, 袁杰, 李娜, 等. 基于物元可拓模型的水生态文明城市建设评价——以许昌市为例[J]. *人民长江*, 2016, 47(18): 18-21.
WANG L Y, YUAN J, LI N, et al. Evaluation of water ecological civilization city construction based on matter-element extension evaluation model: case of Xuchang City[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(18): 18-21.
- [19] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价[J]. *水资源保护*, 2016, 32(6): 117-122.
HUANG X F, JIA Y L, FANG G H. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 117-122.
- [20] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(10): 1537-1544.
REN J L, LI H, WU X M, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(10): 1537-1544.
- [21] 陈璞. 水生态文明城市建设的评价指标体系研究——以安徽省六安市为例[D]. 济南: 济南大学, 2014.
CHEN P. Water ecological civilization evaluation index system of city construction of research——regarding Luan in Anhui Province as an example[D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [22] 张欢, 成金华, 冯银, 等. 特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用——以武汉市为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 47-556.
ZHANG H, CHENG J H, FENG Y, et al. An evaluation index system for ecological civilization construction in megacities and its research applications: the case of Wuhan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 547-556.
- [23] 山红翠, 盛东, 徐幸仪, 等. 湖南郴州市水生态文明评价指标体系构建[J]. *人民长江*, 2016, 47(S2): 7-10.
SHAN H C, SHENG D, XU X Y, et al. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction in Hunan Chen Zhou [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(S2): 7-10.
- [24] 褚克坚, 仇凯峰, 贾永志, 等. 长江下游丘陵库群河网地区城市水生态文明评价指标体系研究[J]. *四川环境*, 2015, 34(6): 44-51.
CHU K J, CHOU K F, JIA Y Z, et al. Evaluation indicator system of city water ecological civilization in reservoir and river network region in hilly areas of the lower Yangtze River [J]. *Sichuan Environment*, 2015, 34(6): 44-51.
- [25] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. *水利学报*, 2004(3): 65-70.
JIN J L, WEI Y M, DING J. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004 (3): 65-70.
- [26] 潘峰, 付强, 梁川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. *环境工程*, 2002 (2): 58-61+5.
PAN F, FU Q, LIANG C. Applying fuzzy synthesise judgement in the study of water environment quality evaluation[J]. *Environmental Engineering*, 2002 (2): 58-61+5.
- [27] 付晓敏, 方国华, 黄显峰. 城市水生态文明建设协调度评价——以马鞍山市为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(2): 21-25.
FU X M, FANG G H, HUANG X F. Coordination degree evaluation of city aquatic ecological civilization: the case of Maanshan city [J]. *South-to-North Water*

- Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 21-25.
- [28] 中华人民共和国生态环境部. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002)[S], 2002.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water(GB 3838-2002)[S], 2002.
- [29] 中山市统计局. 2017年中山市统计年鉴[EB/OL]. http://stats.zs.gov.cn/zwgk/tjxx/tjn/content/post_1342224.html, 2017.
Bureau of Statistics of Zhongshan city. Statistical year-book of Zhongshan city in 2017 [EB/OL]. http://stats.zs.gov.cn/zwgk/tjxx/tjn/content/post_1342224.html 2017.
- [30] 中华人民共和国水利部. 节水型社会评价指标体系和评价方法(GB/T 28284-2012)[S], 2012.
Ministry of Water Resources the People's Republic of China. Index system and methods for assessment of water-saving society(GB/T 28284-2012)[S], 2012.
- [31] 陈甜, 金科, 房振南. 水生态文明城市评价指标体系和研究方法——以江苏省邳州市为例[J]. 人民长江, 2020, 51(S1): 47-52.
CHEN T, JIN K, FANG Z N. Evaluation index system and method of water ecological civilization city: case of Pizhou city in Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2020, 51(S1): 47-52.
- [32] 刘姝芳, 毛豪林, 张丹, 等. 西安市水生态文明城市试点建设成效评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 82-85.
LIU S F, MAO H L, ZHANG D, et al. Effectiveness evaluation for pilot city of water ecological civilization in Xi'an city[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 82-85.
- [33] 王富强, 刘沛衡, 魏怀斌. 郑州市水生态文明城市建设成效评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 58-63.
WANG F Q, LIU P H, WEI H B. Evaluation on the construction effect of water ecological civilization city in Zhengzhou [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 58-63.
- [34] 孔兰, 蒋任飞, 杨磊. 水生态文明城市建设评价指标与方法研究——以东莞市为例[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(2): 48-54.
KONG L, JIANG R F, YANG L. The evaluation index and method for water ecological civilization construction of city: a case study of Dongguan city[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(2): 48-54.
- [35] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3244-3251.
ZHOU W H, WANG R S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [36] 宋梦林, 左其亭, 赵钟楠, 等. 河南省水生态文明建设试点城市生态系统健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1185-1190.
SONG M L, ZUO Q T, ZHAO Z N, et al. Assessment of urban ecosystem health in experimental units of water eco-civilization construction in Henan [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1185-1190.
- [37] 中山市生态环境局. 中山市生态文明建设规划(修编)(2018-2030年)[EB/OL]. http://zsepb.zs.gov.cn/xxml/xxgk/tzgg/tzgg/content/post_175999.html, 2019.
Bureau of Ecology and Environment of Zhongshan city. Zhongshan ecological civilization construction plan (Revised) (2018-2030) [EB/OL]. http://zsepb.zs.gov.cn/xxml/xxgk/tzgg/tzgg/content/post_175999.html, 2019.
- [38] 中山市大涌镇人民政府. 大涌镇河涌专项整治方案[EB/OL]. http://www.zs.gov.cn/dyz/zcgw/qtjw/content/post_1291249.html, 2019.
People's Government of Dachong town, city Zhongshan. Special river regulation scheme of Dachong town [EB/OL]. http://www.zs.gov.cn/dyz/zcgw/qtjw/content/post_1291249.html, 2019.
- [39] 中山市生态环境局. 2019年第二季度中山市河涌水质情况[EB/OL]. http://zsepb.zs.gov.cn/xxml/xxgk/zfxxgkml/gzdt/gggs/content/post_1432903.html, 2019.
Bureau of Ecology and Environment of Zhongshan city. River water quality in Zhongshan City in the 2nd quarter of 2019[EB/OL]. http://zsepb.zs.gov.cn/xxml/xxgk/zfxxgkml/gzdt/gggs/content/post_1432903.html, 2019.
- [40] 中山市大涌镇人民政府. 2019年大涌镇政府工作报告[EB/OL]. http://www.zs.gov.cn/zsdcz/gkmlpt/content/1/1695/post_1695518.html#2099, 2020.
People's Government of Dachong Town of Zhongshan City. Report on the work of Dachong town government in 2019[EB/OL]. http://www.zs.gov.cn/zsdcz/gkmlpt/content/1/1695/post_1695518.html#2099, 2020.