

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0006

王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 67-74. WANG F Q, MA S Y, ZHAO H, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing Tianjin Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese)

基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区 水循环健康模糊综合评价

王富强^{1,2,3}, 马尚钰¹, 赵衡^{1,2}, 刘沛衡¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450046;
3. 河南省水环境模拟与治理重点实验室, 郑州 450046)

摘要: 在阐明健康水循环内涵的基础上, 构建涵盖水资源、水环境、水生态、水效用和水灾害等 5 个准则层, 包括降水量、人均水资源量、亩均水资源量、地下水供水占比等 18 个指标的水循环健康评价指标体系, 采用层次分析法与熵权法组合赋权, 运用模糊综合评价法评价了京津冀地区 2009—2018 年水循环健康状况。评价结果显示: 近 10 年京津冀地区水循环健康状况总体呈逐步向好趋势, 北京、天津和河北水循环健康等级分别为亚健康、一般和亚健康; 中水供水率、平原地下水埋深下降量、河湖调蓄能力、万元工业增加值用水量等是影响京津冀地区健康水循环的主要指标, 但各指标间发展不平衡, 仍有较大提升空间。

关键词: 健康水循环; 层次分析法; 熵权法; 组合权重; 模糊综合评价; 京津冀

中图分类号: TV 213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



在流域“自然-社会”二元水循环演变进程中, 人类活动对水循环过程的扰动不断加深引起了诸多水问题, 而维持城市健康水循环是解决水资源难题的关键。京津冀地区是区域整体协同发展改革引领区和生态修复环境改善示范区, 但当前水资源短缺、水污染严重、生态用水缺乏、地下水超采等问题亟待解决^[1], 因此维持京津冀地区健康水循环能够改善京津冀地区区域水环境现状和推动水资源一体化保护。

国外对水循环的研究较早, 并且已得到了较丰富的研究成果。20 世纪中期多数国家就开展了水资源调查、评价工作: 美国水文科学国家委员会提出人类活动对水文效应的影响作用^[2]; 日本水文水资源学会基于水量、水质建立了模拟水循环动态模型

以解决水资源问题^[3]。但国外的研究内容主要是水资源评价和水循环的自然过程, 而对人类作用影响下的区域水运行研究较少^[4]。21 世纪初, 随着国内城市水系统的迅速发展, 我国开始从水资源、水环境和水生态整体方向研究城市水系统的健康循环。张杰等^[5]提出了广义的健康水循环的概念, 即上游用水不影响下游水体功能, 水的社会循环不损害水自然循环的客观规律; 许向君等^[6]探讨了城市健康水循环的理念, 依据城市水循环影响因素提出建立城市健康水循环的措施。许多专家学者基于水循环的自然属性对湿地、河流、湖泊进行水循环健康评价, 如: 周林飞等^[7]建立了压力-状态-响应模型对扎龙湿地健康状况进行综合评价; 孟伟^[8]对辽河健康状况进行评价后认为水质和生

收稿日期: 2020-04-16 修回日期: 2020-11-10 网络出版时间: 2020-11-12

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201112.1119.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879106); 中原科技创新领军人才计划(214200510001); 河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTH N010)

作者简介: 王富强(1979—), 男, 河南济源人, 教授, 博士, 主要从事水循环模拟与调控、生态水文学等研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

通信作者: 马尚钰(1996—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: mashangyu0665@163.com

物栖息地质量指标对于河流生态健康影响最大。也有部分学者从自然和社会耦合的角度出发评价城市或区域水循环的健康状况,如:栾清华等^[9]基于城市供水-用水-耗水-排水-回用过程对天津市水循环系统进行健康评价;张尚宏等^[10]从水生态水平、水资源丰度、水资源质量、水资源利用等 4 个维度出发评价区域水循环健康状况。但目前此类研究较少,仍需进一步丰富与发展。

在此背景下,以京津冀地区为典型研究区域在阐明健康水循环内涵的基础上,构建涵盖水资源、水环境、水生态、水效用和水灾害等 5 个准则层,包括降水量、人均水资源量、亩均水资源量、地下水供水占比等 18 个指标的水循环健康评价指标体系,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与熵权法组合赋权,对京津冀地区近 10 年水循环健康状况进行模糊综合评价,旨在为京津冀地区水资源保护和可持续利用提供参考依据。

1 研究方法

1.1 健康水循环的内涵

天然的水循环过程是健康水循环的完美状态^[11],但随着人类不断深入认识、改造自然界,社会水循环的作用不断加强,自然水循环与社会水循环两者相互依存、此消彼长。此时的健康水循环是指在用水过程中合理开发利用水资源、节约高效用水、注重废污水再利用和水灾害防范。在循环路径上水的社会循环不损害自然循环^[12],“自然-社会”二元水循环系统达到动态平衡;在循环结果上表现为水资源质优量足、水生态功能完善、水资源利用模式高效可持续^[13]。其本质是既要满足社会经济发展需求,又要保证水循环系统合理正常运行,从而实现经济社会发展与流域自然水系统的协调。因此,保证充足的水资源量、良好的水质状况和水生态水平、较高的水资源利用效率、一定的水灾害抵御能力是保证健康水循环的关键。

1.2 AHP-熵权法

AHP 与熵权法组合赋权能够避免 AHP 人为确定各因子相对重要性和熵权法极值影响所引起的误差^[14],计算步骤^[15-18]如下。

第一步 层次分析法计算

(1) 建立健康水循环层次分析结构。

(2) 构建判断矩阵 U 。采用 1~9 及其倒数标度法构建判断矩阵表示同级别指标相对上层元素的重要性,公式(1)中用 U_{ij} ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, n$) 表示

两元素 U_i 和 U_j 的相对重要程度。

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{n1} & \dots & U_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(3) 计算各指标权重 W'_i 。计算矩阵 U 的最大特征值 λ_{\max} 和特征向量确定权重,计算公式为

$$UW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

$$W'_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n U_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n U_{ij}}} \quad (3)$$

(4) 对计算结果进行一致性检验。若 $CR < 0.1$, 则通过一致性检验,否则重新构建判断矩阵,直至通过一致性检验。计算公式为

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

$$CI = \frac{1}{n-1} (\lambda_{\max} - n) \quad (5)$$

式中: RI 为随机性指标,根据矩阵阶数 n 进行取值。

第二步 熵权法计算

(1) 计算第 k 年第 i 个指标的比重

$$X_{ki} = x_{ki} / \sum_{k=1}^m x_{ki} \quad (6)$$

式中: x_{ki} 表示第 k 年第 i 个指标的取值。

(2) 计算指标信息熵 E_i 和信息冗余度 D_i , 公式为

$$E_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{k=1}^m x_{ki} \ln x_{ki} \quad (7)$$

$$D_i = 1 - E_i \quad (8)$$

(3) 计算指标权重。

$$W''_i = D_i / \sum_{i=1}^n D_i \quad (9)$$

第三步 计算各指标组合权重

$$W_i = \frac{(W'_i \cdot W''_i)^{0.5}}{\prod_{i=1}^n (W'_i \cdot W''_i)^{0.5}} \quad (10)$$

1.3 模糊综合评价方法

模糊综合评价法是解决边界模糊问题的方法,能够把定性的指标量化,从而使评价指标更加精确^[19-20],具体评价过程^[21-22]如下。

(1) 构建模糊综合评价指标体系、评价指标阈值,计算权重向量 W 。

(2) 计算各指标隶属度 r_{jk} , 构建隶属度矩阵 R 。

正向指标隶属度

$$r_{jk} = \frac{x_{jk} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (11)$$

逆向指标隶属度

$$r_{jk} = \frac{x_{jmax} - x_{jk}}{x_{jmax} - x_{jmin}} \quad (12)$$

隶属度矩阵

$$R = (r_{jk})_{mn} = U = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

(3) 计算总隶属度, 公式为

$$B = W \times R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (14)$$

(4) 计算综合评价指数(comprehensive evaluation index, CEI)。CEI 可以将多个指标转化为反映

区域水循环健康状况的一个综合性指数, 采用多目标线性加权函数^[23] 计算, 公式为

$$CEI = 1/n \times \{a_1 \times n + a_2 \times (n-1) + \dots + a_n\} \quad (15)$$

通过参考相关研究成果^[24-25]、专家问询等方式, 结合京津冀地区水循环实际情况, 将水循环健康程度划分为健康、亚健康、一般、亚健康、病态等 5 个等级, 不同等级分别对应不同 CEI 评分, 详见表 1。

表 1 水循环健康程度分级标准
Tab.1 Classification criteria of water cycle health

等级	健康	亚健康	一般	亚健康	病态
水循环健康状况	健康水循环状态良好, 功能完善, 系统稳定	健康水循环状态较好, 功能较完善, 系统较稳定	健康水循环状态一般, 功能不完善, 系统尚可维持	健康水循环状态较差, 功能部分缺失, 系统遭受轻微破坏	健康水循环状态极差, 功能大部分丧失, 系统遭受严重破坏
CEI	0.85 ≤ CEI ≤ 1.00	0.70 ≤ CEI < 0.85	0.55 ≤ CEI < 0.70	0.40 ≤ CEI < 0.55	CEI < 0.40

2 京津冀地区水循环健康评价

2.1 评价指标体系的构建

基于对城市健康水循环概念和内涵的理解, 遵循评价指标选取原则, 构建水循环健康评价指标体系。本文从水资源、水环境、水生态、水效用和水灾害准则层出发, 筛选出 18 项适合京津冀地区的水循环健康评价指标^[26-27]。水资源准则层指标主要考虑区

域水资源禀赋条件、供水能力及水资源管理水平; 水环境准则层指标主要从排水、回用水水质两方面反映城市水质状况; 水生态准则层指标主要考虑区域天然水体生态水平、城市绿化水平和地下水生态水平; 水效用准则层主要考虑农业、工业、生活和中水利用率确定评价指标; 水灾害准则层指标主要从受灾前、受灾时的管理和灾后恢复层面反映城市抵御水灾害的能力。评价指标体系见图 1。

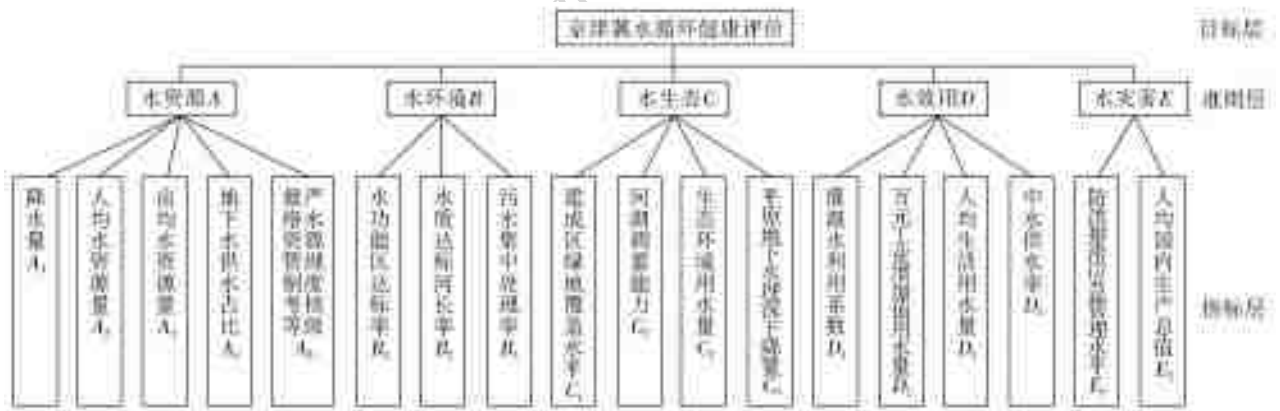


图 1 水循环健康评价指标体系
Fig. 1 Water cycle health evaluation index system

2.2 评价指标阈值的确定

参考国家规范标准、文献资料及相关研究成果确定水循环健康评价指标阈值, 具体分级数值见表 2。为综合评判区域水循环健康状态, 将健康评价标准划分为健康、亚健康、一般、亚健康、病态等 5 个等级, 对应健康评分分别为 5、4~ < 5、3~ < 4、2~ < 3、1~ < 2。

2.3 评价指标权重的确定

本文使用 AHP-熵权法组合赋权对评价指标权重进行计算, 京津冀地区各指标权重见图 2。由图 2

可知, 京津冀地区各指标中 D4(中水供水率)、C4(平原地下水埋深下降量)、C2(河湖调蓄能力)、D2(万元工业增加值用水量) 权重较高, 表明污水的处理及使用、地下水开采状况是京津冀地区健康水循环的主要影响因素, 同时提高区域河湖生态水平和工业用水效率也极为重要。北京市各指标权重分布最不均匀, 天津市指标分布较为平衡, 河北省指标权重总体分布最稳定, 但京津冀地区各指标权重总体分布不稳定, 仍需改善。

表 2 水循环健康评价指标阈值

Tab. 2 Water cycle health evaluation index threshold values

准则层	指标层	指标分级阈值及分值					设定依据
		健康	亚健康	一般	亚病态	病态	
		5	(5, 4]	(4, 3]	(3, 2]	(2, 1]	
水资源 A	$A_1/m\ m$	[650, 600)	[600, 550)	[550, 500)	[500, 450)	≤ 450 或 > 650	
	A_2/m^3	[900, 500)	[500, 400)	[400, 200)	[200, 100)	[100, 0)	北京市评价指标健康阈值 ^[10]
	A_3/m^3	1500	(1500, 1000]	(1000, 800]	(800, 500]	< 500	北京市评价指标健康阈值 ^[10]
	$A_4/\%$	(10, 25]	(25, 40]	(40, 55]	(55, 70]	(70, 100]	北京市评价指标健康阈值 ^[10]
水环境 B	A_5	优	良	合格	不合格	不合格	《实行最严格水资源管理制度考核办法》
	$B_1/\%$	[100, 90)	[90, 60)	[60, 40)	[40, 20)	[20, 0)	京津冀水循环健康评价指标阈值 ^[13]
	$B_2/\%$	[100, 90)	[90, 70)	[70, 40)	[40, 30)	[30, 0)	京津冀水循环健康评价指标阈值 ^[13]
	$B_3/\%$	100	(100, 95]	(95, 80]	(80, 70]	(70, 0]	西安市水循环健康分级标准 ^[26]
水生态 C	$C_1/\%$	[100, 50)	[50, 40)	[40, 30)	[30, 20)	[20, 0)	西安市水循环健康分级标准 ^[26]
	C_2	强	较强	一般	较弱	弱	
	$C_3/亿\ m^3$	[25, 20)	[20, 15)	[15, 10)	[10, 5)	[5, 0)	邯郸市水循环健康程度分级标准 ^[27]
	C_4/m	[- 2.0, - 1.5)	[- 1.5, 0)	[0, 1.5)	[1.5, 2)	[2, 3)	京津冀水循环健康评价指标阈值 ^[13]
水效用 D	D_1	[0.85, 0.75)	[0.75, 0.65)	[0.65, 0.55)	[0.55, 0.45)	[0.45, 0)	《2011 年中央一号文件——关于加快水利改革发展的决定》
	D_2/m^3	(5, 15]	(15, 25]	(25, 45]	(45, 60]	(60, 100]	京津冀水循环健康评价指标阈值 ^[13]
	D_3/m^3	[100, 80)	[80, 60)	[60, 40)	[40, 20)	[20, 0)	城市生活水循环调查与健康评价研究 ^[28]
	$D_4/\%$	[40, 30)	[30, 20)	[20, 10)	[10, 5)	[5, 0)	《城市污水再生利用技术政策》
水灾害 E	E_1	强	较强	一般	较弱	弱	
	$E_2/万元$	[20, 15)	[15, 10)	[10, 5)	[5, 1)	[1, 0)	

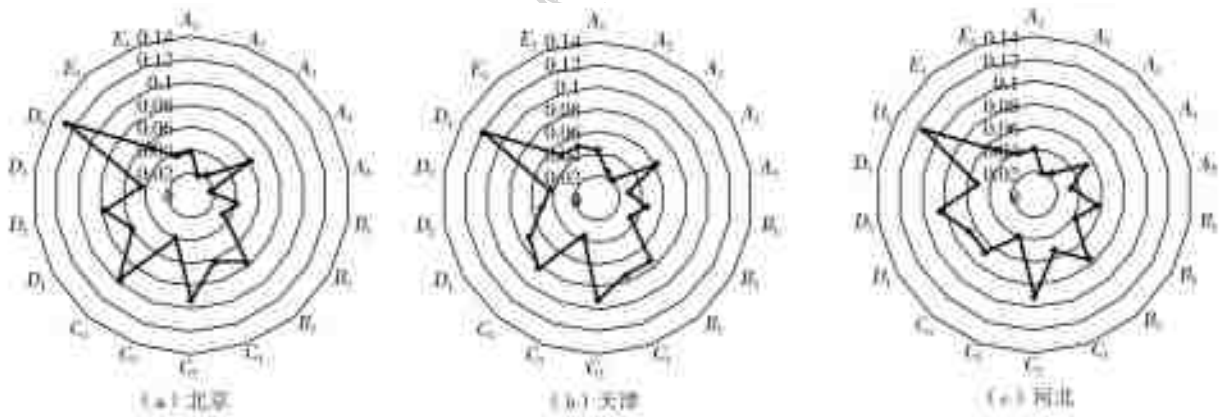


图 2 京津冀地区指标权重雷达图

Fig. 2 Index weight radar map in Beijing Tianjin Hebei region

2.4 模糊综合评价结果

京津冀地区 2009—2018 年各准则层多年平均 CEI 健康评分、目标层 CEI 健康评分及健康状况见

表 3。由表 3 可知,北京、天津、河北水循环健康评分分别为 0.741、0.582、0.530,相应健康等级分别为亚健康、一般、亚病态。

表 3 京津冀地区水循环健康评价结果

Tab. 3 Water cycle health evaluation results in Beijing Tianjin Hebei region

地区	准则层(平均)					目标层(平均)	健康状况
	水资源	水环境	水生态	水效用	水灾害		
北京	0.096	0.108	0.205	0.272	0.060	0.741	亚健康
天津	0.114	0.032	0.174	0.195	0.067	0.582	一般
河北	0.074	0.074	0.160	0.178	0.044	0.530	亚病态

2.5 结果分析与讨论

京津冀地区近 10 年各指标健康状况见图 3, 由于《实行最严格水资源管理制度考核办法》于 2013 年发布, 指标 A_5 (最严格水资源管理制度考核等级) 2008—2012 年缺少数据。由图 3 可知: 北京市指标 A_5 (最严格水资源管理制度考核等级)、 D_2 (万元工业增加值用水量)、 D_3 (人均生活用水量) 健康状况最优, 反映出水资源管理措施的落实情况较好、工业用水效率提升明显、居民生活用水也得到了保障; 指标 A_2 (人均水资源量) 健康状况较差, 而水资源稀缺主要受

地理位置和气候条件影响, 可通过跨流域调水等方式解决。天津市指标 D_2 (万元工业增加值用水量) 10 年间一直保持健康状态, 表明天津市工业节水水平较高; 指标 C_4 (平原地下水埋深下降量) 不稳定, 地下水过度开采仍是天津市地下水利用的主要问题; 水资源、水环境准则层下的指标健康状况最差, 应尽快改善天津市水资源不足、水生态环境差的问题。河北省指标健康状况最差, 水资源量不足、供水不稳定、水质污染严重、中水利用率低是当前河北省急需解决的问题; 水生态指标有所好转, 但仍需加大治理力度。

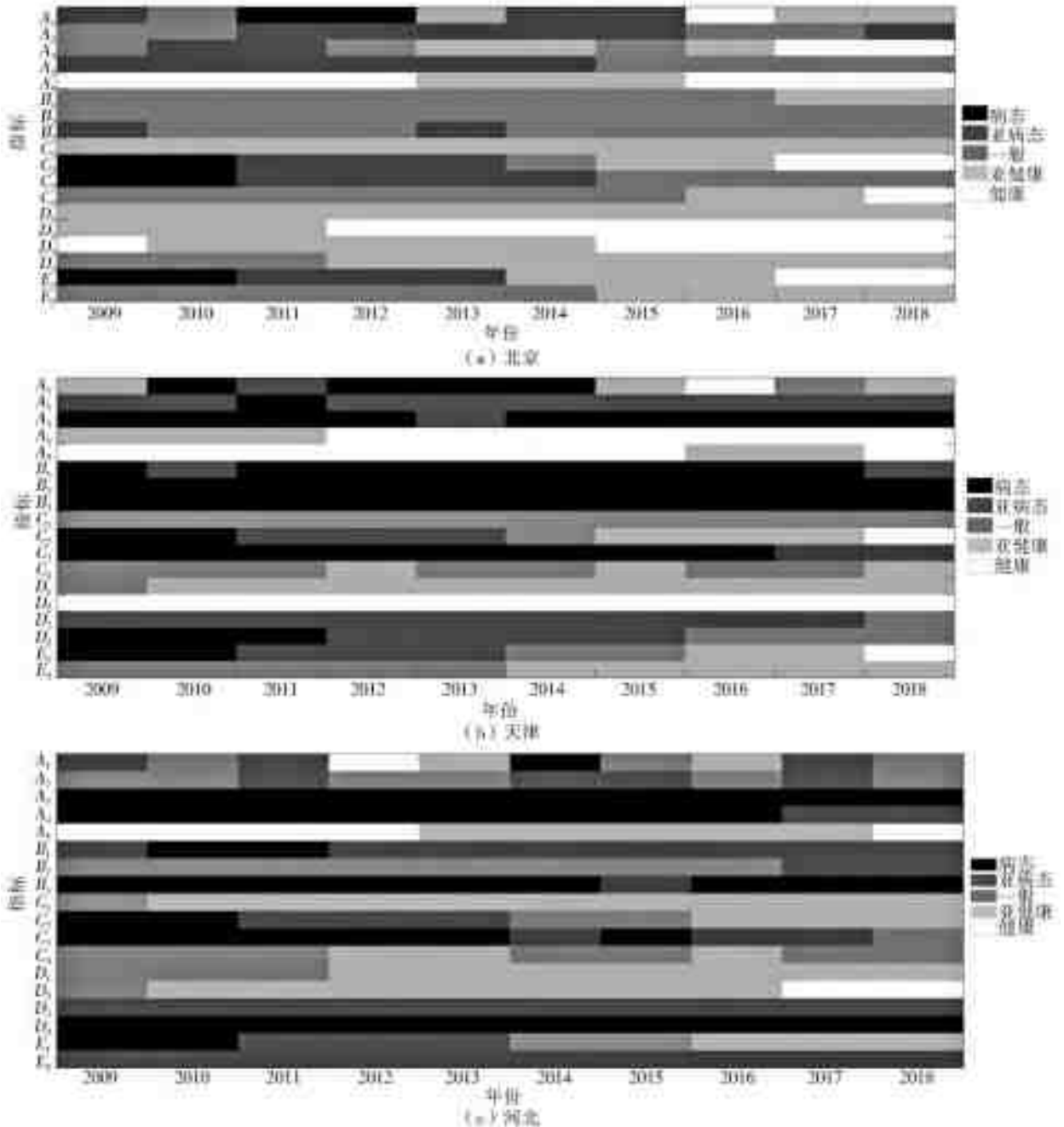


图 3 京津冀地区指标健康状况

Fig. 3 The health status map in Beijing Tianjin Hebei region

由图 4 可知, 近 10 年京津冀地区水循环健康状况逐渐好转, 京津冀三地 CEI 评分总体呈上升趋势

势, 但波动幅度有所不同。北京市 CEI 评分呈逐年稳步上升趋势, 由 2009 年的一般状态变为 2018 年

的健康状态;各准则层中水效用评分最高,水生态评分走势最好,水灾害评分最低。天津市 CEI 评分低于北京市,10 年间评分呈现低速增长,至 2018 年已好转为亚健康状态;水生态和水效用评分较高,水环境评分最低且无好转迹象,其原因是 10 年间水环境准则层指标持续呈亚健康或病态,因

此天津市应提高污水处理率,改善水体环境。河北省 CEI 评分略低于天津市,呈波动上升趋势,2015 年前处于亚健康,2015 年后均为一般状态;水效用评分最高,水灾害、水资源、水环境评分较低,表明河北省应加强水灾害防控、解决水资源缺乏困境、改善水体环境。

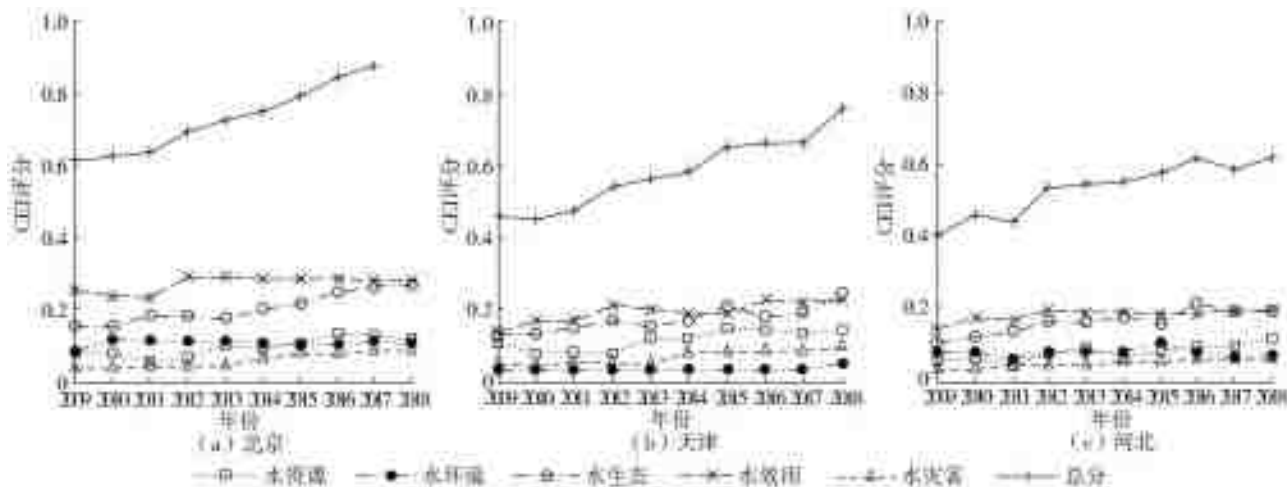


图 4 京津冀地区准则层健康评分

Fig. 4 Health score of standard level in Beijing-Tianjin-Hebei region

3 结 论

(1) 近年来京津冀地区水循环健康状态呈逐年好转趋势,其中北京、天津、河北水循环健康等级分别为亚健康、一般、亚健康。北京市水循环状态最好,但仍存在水资源量缺乏和水灾害抵抗能力不足的现象;天津市水循环健康状况与北京市相比不够稳定,需要有针对性地改善区域水体生态环境水平和应对水灾害的能力;河北省水循环健康状况最差,需要提升水灾害应对能力、解决水资源缺乏困境、改善水质恶化现象。

(2) 京津冀地区水循环健康评价体系中权重最高的指标为中水供水率、平原地下水埋深下降量、河湖调蓄能力和万元工业增加值用水量,可知污水的处理及使用、地下水开采状态、天然水体生态水平和工业用水效率是影响京津冀地区健康水循环的重要因素。

(3) 本文在计算过程中仅采用一种评价方法进行区域水循环健康评价,在今后的研究中可采用多种方法进行对比分析,形成更为综合的结论,进而探讨采用不同评价方法进行水循环健康评价的优劣。

参考文献(References):

[1] 余灏哲,李丽娟,李九一.基于量质域流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358-

371. (YU H Z, LI L J, LI J Y. Comprehensive evaluation of water resource carrying capacity in Beijing Tianjin Hebei region based on quantity quality domain flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2020.02.14.

[2] HIRNER W, MAYR H. Improving efficiency in water distribution method and technology [C]. Blackwell Science Ltd: IWSA World Congress, 1997: 21-22.

[3] TOSHIHARU K. 日本水文学与水资源研究进展[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1): 33-35. (TOSHIHARU K. Advances in hydrology and water resources research in Japan[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2003, 34(1): 33-35. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2003.01.009.

[4] 许向君.城市水务系统循环规律与评价指标体系研究[D].泰安:山东农业大学,2007. (XU X J. Research on circulation law and evaluation index system of urban water system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007. (in Chinese))

[5] 张杰,熊必永.城市水系统健康循环的实施策略[J].北京工业大学学报,2004,30(2):185-188. (ZHANG J, XIONG B Y. Strategies for implementing healthy circulation in urban water system[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(2): 185-188. (in Chinese)) DOI: 10.11936/bjutxb2004020185.

[6] 许向君,汪中华,刘志峰,等.关于建立城市水健康循环的研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2006,37(4):609-614. (XU X J, WANG Z H, LIU Z F, et al.

- Research on the establishment of a healthy urban water cycle[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 37 (4): 609-614. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2006.04.025.
- [7] 周林飞,徐士国,孙万光.基于压力状态响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究[J].水科学进展,2008,19(2):205-213.(ZHOU L F, XU S G, SUN W G. Evaluation of healthy water circulation in Zhalong wetland based on pressure state response model[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 205-213. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2008.02.009.
- [8] MENG W, ZHANG N, ZHANG Y, et al. Integrated assessment of river health based on water quality, aquatic life and physical habitat[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21 (8): 1017-1027. DOI: 10.1016/S1001-0742(8)62377-3.
- [9] 栾清华,张海行,褚俊英,等.基于关键绩效指标的天津市水循环健康评价[J].水电能源科学,2016,34(5):39-41.(LUAN Q H, ZHANG H X, CHU J Y, et al. Health evaluation of Tianjin water cycle based on key performance indicators[J]. Science of Hydropower and Energy, 2016, 34(5): 39-41. (in Chinese))
- [10] ZHANG S H, FAN W W, YI Y J, et al. Evaluation method for regional water cycle health based on nature society water cycle theory[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551 (6): 352-364. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.013.
- [11] 张士政.基于健康水循环的南四湖流域城镇体系规划[D].徐州:中国矿业大学,2014.(ZHANG S Z. Urban system planning of Nansihu river basin based on healthy water cycle[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))
- [12] 张杰,李冬.城市水系统健康循环理论与方略[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(6):849-854.(ZHANG J, LI D. Healthy circulation theory and strategy of urban water system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42 (6) : 849-855. (in Chinese)) DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2010.06.004.
- [13] 范威威.京津冀水循环健康评价与水资源配置研究[D].北京:华北电力大学,2018.(FAN W W. Water cycle health assessment and water resource allocation in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018. (in Chinese))
- [14] 刘大海,宫伟,邢文秀,等.基于 AHP 熵权法的海岛海岸带脆弱性评价指标权重综合确定方法[J].海洋环境科学,2015,34(3):462-467.(LIU D H, GONG W, XING W X, et al. Based on the AHP Entropy weight method, a comprehensive method to determine the index weight of vulnerability assessment in the coastal zone of islands [J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 462-467. (in Chinese)) DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2015.03.024.
- [15] 田林钢,马成功,王绪.基于 AHP 熵权法的水利工程业主风险模糊评价[J].人民黄河,2017,39(12):117-122.(TIAN L G, MA C G, WANG X. Risk fuzzy evaluation of water conservancy project owners based on AHP Entropy weight method[J]. People's Yellow River, 2017, 39(12): 117-122. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.12.027.
- [16] 宋力,孟仁富,周金山,等.基于层次分析的水利工程施工方案优选[J].人民黄河,2009,31(7):74-75.(SONG L, MENG R F, ZHOU J S, et al. Optimization of water conservancy project construction scheme based on analytic hierarchy process [J]. People's Yellow River, 2009, 31 (7): 74-75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.07.035.
- [17] 鲁仕宝,黄强,孙晓懿,等.基于熵权理论的水利工程招标研究[J].水力发电学报,2010,29(3):221-224,176.(LU S B, HUANG Q, SUN X Y, et al. A study on bidding for hydraulic engineering based on entropy weight theory [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2010, 29(3): 221-224, 176. (in Chinese))
- [18] 宋浩静,张宾.基于 AHP 熵权法的郑州市水资源承载力评价研究[J].黄河水利职业技术学院学报,2019,31(2):1-6.(SONG H J, ZHANG B. Evaluation of water resources carrying capacity in Zhengzhou city based on AHP Entropy weight method [J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical College, 2019, 31 (2) : 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2019.02.001.
- [19] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [20] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.(CHEN S Y. Theory and application of engineering fuzzy sets [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [21] 杜娟娟.基于熵值法的山西省水资源脆弱性模糊综合评价[J].水资源开发与管理,2018(9):50-54.(DU J J. Fuzzy comprehensive evaluation of water resource vulnerability in Shanxi Province based on entropy method [J]. Water Resource Development and Management, 2018(9): 50-54. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.101326/TV.2018.09.11.
- [22] 陈海涛,徐家豪.基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J].人民珠江,2020,41(1):48-53.(CHEN H T, XU J H. Evaluation of water re

- sources carrying capacity in Henan Province based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation model [J]. *People's Pearl River*, 2020, 41(1): 48-53. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2020.01.009.
- [23] 王文龙, 王晓敏. 多目标线性规划的交互式线性加权内点算法[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2004, 21(1): 30-35. (WANG W L, WANG X M. Interactive linear weighted interior point algorithm for multi objective linear programming [J]. *Journal of Guizhou University(Natural Science)*, 2004, 21(1): 30-35. (in Chinese) DOI: 10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2004.01.005.
- [24] 王富强, 刘沛衡, 杨欢, 等. 基于 PSR 模型的刁口河尾闾湿地生态系统健康评价[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(11): 75-83. (WANG F Q, LIU P H, YANG H, et al. Ecosystem health evaluation of Diaokou River tailgating wetland based on PSR model [J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2019, 50(11): 75-83. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.11.010.
- [25] 付会, 刘晓兰, 孙英兰. 大沽河口湿地生态系统健康评价[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(3): 329-332. (FU H, LIU X L, SUN Y L. Health assessment of wetland ecosystem in Dagu estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(3): 329-332. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-6336.2009.03.024.
- [26] 唐继张, 夏伟, 周维博, 等. 基于关键绩效指标的西安市水循环健康评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 39-45, 60. (TANG J Z, XIA W, ZHOU W B, et al. Xi'an City water cycle health evaluation based on key performance indicators [J]. *South to North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology*, 2019, 17(1): 39-45, 60. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2019.0006.
- [27] 段娜. 邯郸市主城区水循环健康评价与演变分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019. (DUAN N. Health evaluation and evolution analysis of water cycle in main urban area of Handan City [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019. (in Chinese))
- [28] 王海叶. 城市生活水循环调查与健康评价研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017. (WANG H Y. Research on urban living water cycle survey and health evaluation [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. (in Chinese))

A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing Tianjin Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method

WANG Fuqiang^{1,2,3}, MA Shangyu¹, ZHAO Heng^{1,2}, LIU Peiheng¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Based on clarifying the connotation of the healthy water cycle, five criterion layers covering water resources, water environment, water ecology, the water utility, and water disasters were constructed, including precipitation, per capita water resources, per mu water resources, and groundwater supply ratio. The water cycle health evaluation index system of other 18 indicators, using the combination of analytic hierarchy process and entropy method to assign weights and using fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate the water cycle health status of the Beijing Tianjin Hebei region from 2009 to 2018. The evaluation results show that: the overall water cycle health in the Beijing-Tianjin-Hebei region has gradually improved in the past ten years. The water cycle health levels in Beijing, Tianjin, and Hebei are sub healthy, normal, and sub morbid; the storage capacity of rivers and lakes and the water consumption of 10,000 yuan of industrial added value are the main indicators that affect the healthy water cycle in the Beijing-Tianjin-Hebei region. However, the development of the various indicators is not balanced, and there is still much room for improvement.

Key words: healthy water cycle; AHP; entropy weight method; combination weight; fuzzy comprehensive evaluation; Beijing Tianjin Hebei