

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.003

水资源集约安全利用评估模型构建及应用

王红瑞¹, 李一阳², 杨亚锋^{1,3}, 赵勇⁴, 杨荣雪¹, 刘璇¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 3. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210; 4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:为贯彻落实“十六字”治水思路的必然要求和重要任务之一——水资源集约安全利用的评价工作,在节水优先和生态优先方针指导下,探讨了水资源集约安全利用的评价指标体系,进而采用AHP-CRITIC综合赋权,引入对称交互熵多属性排序法,建立了水资源集约安全利用评估模型。应用于2019年中国31个省级行政区(不含港澳台)的研究结果表明:31个省级行政区的水资源集约安全利用总体上处于中等水平,存在较大的提升空间;集约与安全之间存在互斥现象,北京、天津和新疆等多个省级行政区的集约利用和安全利用水平悬殊较大,亟须针对性地进行优化;因地制宜、精准施策是当前中国贯彻新发展理念,推进水资源集约安全利用的重要策略之一。

关键词:“十六字”治水思路;水资源集约安全利用;对称交互熵;层次分析法;CRITIC方法

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0018-08

Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources // WANG Hongrui¹, LI Yiyang², YANG Yafeng^{1,3}, ZHAO Yong⁴, YANG Rongxue¹, LIU Xuan¹ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Water Sciences and Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to implement the inevitable requirement and one of the important tasks of the “sixteen character” water treatment thought—the evaluation of intensive and safe utilization of water resources, under the guidance of the policy of water saving priority and ecological priority, the evaluation index system of intensive and safe utilization of water resources was discussed. After that, AHP-CRITIC comprehensive weighting and the symmetrical cross-entropy multi-attribute ranking method were adopted, and the evaluation model of intensive and safe utilization of water resources was established. The research involve 31 provincial administrative regions (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan) in China in 2019 the results indicate that the intensive and safe utilization of water resources in the 31 provincial administrative regions is generally at a medium level, and the level of the intensive and safe utilization of water resources has a huge room for progress. In addition, the relationship between the intensive utilization of water resources and the safe utilization of water resources is heterogeneous. There is a great disparity in the level of intensive utilization and safe utilization in some provincial administrative regions such as Beijing, Tianjin and Xinjiang, which needs to be optimized. Therefore, it is one of the most important strategies for China to implement the new development philosophy and promote the level of intensive and safe utilization of water resources.

Key words: “sixteen character” water treatment thought; intensive and safe utilization of water resources; symmetrical cross-entropy; analytic hierarchy process; CRITIC method

深入贯彻新发展理念,推进水资源集约安全利用,是践行习近平总书记“节水优先、空间均衡、系

统治理、两手发力”十六字治水思路的重要途径和题中之义^[1-3]。集约利用的核心是用最少的水资源

基金项目:国家自然科学基金(51879010,52061125101)

作者简介:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

通信作者:杨亚锋(1985—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hblgyyf@ncst.edu.cn

投入产生更大的效益,提高水资源利用效率,节约亦是其内在要求之一;安全利用指水资源开发利用不能影响生态安全和国家安全,水资源利用要限制在其承载力范围之内;集约安全利用就是要将集约和安全有机结合起来,相互制约,相互促进,即水资源集约利用要保障安全,安全利用要助力集约^[4]。水资源集约安全利用指数的大小是区域高质量发展水平高低的重要体现。因此,在集约中保障安全,在安全下促进集约,是当前水资源高效合理利用的新模式需求。

目前,水资源集约安全利用的相关研究主要集中在国内。在集约利用方面,李来胜等^[5]从三次产业方面提出了解决黄河水资源开发利用的循环经济方程,为黄河水资源集约利用提供了理论依据和政策建议;廖文梅等^[6]从农业用水、工业用水以及居民生活用水等指标合成区域水资源集约利用指数,对区域水资源集约利用进行综合评价;韩宇平等^[7]针对水资源集约利用的概念、内涵与模式进行解读,探讨了构建评价指标体系的基本原则。在安全利用方面,刘华^[8]基于 PSR 模型构建了城市水资源安全利用评价指标体系,利用集对分析方法建立了评价排序模型;刘丽颖^[9]以贵州省为研究区,综合运用地理学、环境学、生态学和人工智能等学科理论和方法对水资源安全进行动态评价、仿真及调控研究。综合考虑集约利用和安全利用,姜文来^[4]在分析水资源集约安全利用内涵的基础上探讨了实现中国水资源集约安全利用的战略路径。可见,已有研究成果大多聚焦水资源集约利用或安全利用,而鲜见将二者综合考虑的情况。虽然相关研究的指标体系在一定程度上涵盖了集约利用和安全利用的相关指标,但若能将二者有机结合起来,从系统论的角度出发,从整体上评价集约安全利用水平,并针对性地提出必要的改进措施,将是很有意义的一项研究。

水资源集约安全利用评价涉及资源、经济、生态等多领域,是多属性决策问题^[10-12]。近年来,模糊综合评判法^[13-15]、集对分析法^[16-20]、投影寻踪法^[21-22]、物元模型法^[23-25]、TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) 方法^[26-29]等是水资源系统分析领域的常用决策方法。其中, TOPSIS 方法由于具有计算简便、应用性强等特点广受学者们青睐。刘树林等^[30]针对 TOPSIS 方法中存在不能排序的问题提出夹角度量法,并与 TOPSIS 法对比得到较好的结果。然而,有研究发现夹角度量法也存在不足^[31-32],只考虑两方案的夹角贴进度,忽略其长度差异;若两方案夹角完全相同、长度不同,那么夹角度量法就不能得到正确的结论,

因此,赵萌等^[33]提出相对熵排序法。卢国祥等^[34]发现相对熵不满足对称性和三角不等式,不是方案与理想方案和负理想方案之间真正的距离,但将其作为方案与理想方案和负理想方案的差异测度具有实际意义,基于此对相对熵排序法进行改进,得到新的排序方法——对称交互熵多属性排序法,满足了相对熵的对称性和有界性。目前,对称交互熵多属性排序法已在 ISAR 干扰效果评估、信息度量与聚类、遥感图像分割和综合生产效果评价等方面得到成功应用,反映出该方法在多属性评价问题中的适用性和有效性,可望在水资源系统评价领域发挥作用,但尚未有相关研究和报道。

鉴于此,在前人研究基础上,本文基于节水优先和生态优先方针探讨水资源集约安全利用的时代内涵及其相互影响关系,从系统论的角度探索水资源集约安全利用评价指标体系,进而基于对称交互熵多属性排序法构建一种新的水资源集约安全利用评估模型,并在 2019 年中国 31 个省级行政区(不含港澳台)展开应用,其结果可为中国水资源高效利用和经济社会高质量发展提供支撑。

1 水资源集约安全利用评价体系构建

在参考相关文献的基础上筛选评价指标体系,利用层次分析(analytic hierarchy process, AHP)法与 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation)法综合赋权,进而基于对称交互熵多属性决策排序方法建立水资源集约安全利用评估模型。

1.1 集约安全利用评价指标体系

指标体系构建是定性、定量评价水资源集约安全利用的前提。生态环境保护和经济社会高质量发展是水资源开发和利用的必要前提和追求目标之一。水资源集约利用和安全利用是实现该目标的两个重要途径。集约是安全的约束,安全是集约的保障,二者相互制约、相互促进,是一个有机的统一体。作为重要的基本资源,水资源必须保质保量地满足经济社会高质量发展的需求;水资源开发利用要走绿色发展之路,与资源环境相协调,以水资源承载力为红线,不能破坏生态环境^[4];此外,以科技创新为动力,革新开发利用技术,提升水资源利用效率,也是水资源集约安全利用的主要途径。坚持“节水优先”方针是水资源管理工作的根本依据,坚持“生态优先”原则是可持续发展的刚性约束,二者同时为水资源的集约安全利用提出了纲领性的要求,因此,水资源集约安全利用既要在节约用水的前提下着力提高水资源利用效率和效益,又要在生态友好的导向下严格限制水资源开发的强度,保障三生用水的

安全度和和谐度。基于以上分析,本研究结合相关文献[1,4,7]的主要论点,构建水资源集约安全利用评价指标体系,见图1。

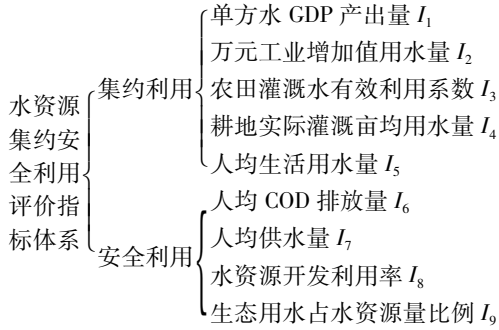


图1 水资源集约安全利用评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of intensive and safe utilization of water resources

水资源集约安全利用评价指标体系中,单方水 GDP 产出量受产业结构、自然地理、社会经济等影响,能从一定程度上反映水资源综合利用效率的高低,也能反映水资源投入产出关系和用水效益;万元工业增加值用水量可从一定程度上反映工业用水效益,是水资源集约利用的经济学表征;农田灌溉水有效利用系数可从一定程度上反映农业领域的用水效率和科技水平;耕地实际灌溉亩均用水量能够反映农业领域的耕地灌溉用水效率和效益;人均生活用水量的高低可从一定程度上反映一个地区的居民日常生活中节水意识的强弱;人均 COD 排放量可反映水资源利用所产生的负面生态环境影响,也是水质保障的重要指标;人均供水量从一定程度上反映了用水量保障度,是水资源短缺风险的一项重要表征指标;水资源开发利用率是生态安全和社会可持续发展水平的重要衡量指标之一;生态用水占水资源量比例在一定程度上反映了生态需水的满足程度,包括河道内生态需水满足程度和河道外生态需水满足程度,是水资源安全利用的主要表征。指标 I_1 、 I_3 、 I_7 和 I_9 为正向指标,即越大越优,其余指标为负向指标,即越小越优。

1.2 对称交互熵多属性排序法

基于水资源集约安全利用评价指标体系,采用对称交互熵多属性决策排序法,将31个省级行政区的水资源集约安全利用水平及其发展态势评估问题转化为多属性决策排序问题。具体步骤如下:

步骤1 建立标准化决策矩阵。设多属性决策问题包含 m 个方案和 n 个评价指标,其方案集、指标集分别为: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$, 方案 A_i 对指标 B_j 的值记为 y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$), 则形成目标决策矩阵 $Y = [y_{ij}]_{m \times n}$, 建立标准化决策矩阵 Z :

$$z_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2} \quad (1)$$

步骤2 确定指标权重。为兼顾专家经验、指标客观数据的统计规律及指标间的相关性,采用 AHP 法和 CRITIC 法相结合的组合赋权方法。指标 B_j 的权重 w_j 为:

$$w_j = \sqrt{\alpha_j \beta_j} / \sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j} \quad (2)$$

式中 α_j 、 β_j 分别为 AHP 法和 CRITIC 法所得到的权重。

步骤3 构建加权标准化矩阵和确定其理想解。计算加权决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$, $x_{ij} = w_j z_{ij}$ 。对于正向和负向指标,分别计算正理想解向量 X^+ 和负理想解向量 X^- :

$$\begin{cases} X^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+) \\ X^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-) \end{cases} \quad (3)$$

式中:对于正向指标, $x_j^+ = \max_i x_{ij}$, $x_j^- = \min_i x_{ij}$;对于负向指标, $x_j^+ = \min_i x_{ij}$, $x_j^- = \max_i x_{ij}$ 。

步骤4 计算对称交互熵。设 D_i^+ 和 D_i^- 分别为方案 A_i (即矩阵 X 的第 i 个列向量) 与 X^+ 和 X^- 的对称交互熵,即:

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n \left[x_j^+ \ln \frac{2x_j^+}{x_j^+ + x_{ij}} + (1 - x_j^+) \ln \frac{2(1 - x_j^+)}{2 - x_j^+ - x_{ij}} + x_{ij} \ln \frac{2x_{ij}}{x_j^+ + x_{ij}} + (1 - x_{ij}) \ln \frac{2(1 - x_{ij})}{2 - x_j^+ - x_{ij}} \right] \quad (4)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n \left[x_j^- \ln \frac{2x_j^-}{x_j^- + x_{ij}} + (1 - x_j^-) \ln \frac{2(1 - x_j^-)}{2 - x_j^- - x_{ij}} + x_{ij} \ln \frac{2x_{ij}}{x_j^- + x_{ij}} + (1 - x_{ij}) \ln \frac{2(1 - x_{ij})}{2 - x_j^- - x_{ij}} \right] \quad (5)$$

步骤5 计算相对贴近度。计算各方案与理想方案的相对贴近度 C_i , C_i 值越接近于1,说明第 i 个评价方案就越接近最优方案; C_i 值越小,说明第 i 个评价方案越差。

$$C_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-} \quad (6)$$

2 模型应用与分析

2.1 数据来源

选取中国31个省级行政区(不含港澳台)为研究单元。所需的社会经济数据来源于2020年《中国统计年鉴》和各省、自治区、直辖市《统计年鉴》,所需的水资源和用水数据主要来源于2019年《中国水资源公报》。

2.2 计算过程

以31个省级行政区的水资源集约安全利用水平为评价方案,根据指标的原始数据,建立标准化决策矩阵(表1)。采用 $e^{0/5} \sim e^{8/5}$ 标度的 AHP 法确

定指标的专家权重,采用 CRITIC 法确定指标的客观权重,进而得到指标体系权重向量 $w = (0.139, 0.131, 0.108, 0.085, 0.103, 0.127, 0.144, 0.098, 0.066)$, 并确定正理想解向量和负理想解向量 $X^+ = (0.0819, 0.0038, 0.0253, 0.0053, 0.0104, 0.0053, 0.0948, 0.0001, 0.0477)$, $X^- = (0.0028,$

$0.0550, 0.0151, 0.0304, 0.0382, 0.0343, 0.0074, 0.0670, 0.0005)$ 。利用式(4)~(6)计算各省级行政区与正、负理想解之间的对称交互熵 D_i^+ 、 D_i^- 和贴进度 C_i 。为方便表达和作图,以贴进度 C_i 乘以 10 作为水资源集约安全利用指数,记作 S_i ,结果见表 2。

表 1 标准化决策矩阵

Table 1 Standardization decision matrix

省级行政区	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
安徽	0.093	0.274	0.171	0.098	0.154	0.185	0.123	0.063	0.053
北京	0.591	0.029	0.234	0.065	0.199	0.047	0.055	0.209	0.727
重庆	0.215	0.156	0.156	0.128	0.178	0.117	0.069	0.019	0.032
福建	0.166	0.128	0.173	0.218	0.222	0.143	0.126	0.016	0.038
甘肃	0.055	0.138	0.177	0.175	0.108	0.189	0.117	0.042	0.090
广东	0.182	0.089	0.159	0.292	0.226	0.160	0.101	0.025	0.026
广西	0.052	0.343	0.157	0.310	0.241	0.195	0.161	0.017	0.022
贵州	0.108	0.206	0.150	0.152	0.164	0.134	0.084	0.012	0.018
海南	0.080	0.176	0.178	0.357	0.243	0.193	0.139	0.023	0.037
河北	0.134	0.060	0.211	0.067	0.121	0.169	0.068	0.198	0.230
河南	0.159	0.090	0.193	0.062	0.124	0.165	0.069	0.174	0.233
黑龙江	0.031	0.218	0.191	0.158	0.113	0.204	0.232	0.025	0.007
湖北	0.105	0.209	0.164	0.135	0.239	0.240	0.144	0.061	0.011
湖南	0.083	0.288	0.168	0.197	0.186	0.205	0.135	0.020	0.022
吉林	0.071	0.155	0.186	0.135	0.136	0.211	0.120	0.028	0.107
江苏	0.112	0.242	0.193	0.187	0.195	0.195	0.216	0.329	0.011
江西	0.068	0.244	0.161	0.236	0.173	0.210	0.153	0.015	0.018
辽宁	0.133	0.083	0.185	0.137	0.148	0.253	0.084	0.063	0.087
内蒙古	0.063	0.097	0.172	0.107	0.124	0.201	0.211	0.053	0.248
宁夏	0.037	0.129	0.170	0.278	0.113	0.270	0.284	0.684	0.076
青海	0.079	0.124	0.157	0.188	0.145	0.131	0.121	0.004	0.101
山东	0.220	0.051	0.202	0.066	0.102	0.155	0.063	0.142	0.150
山西	0.156	0.076	0.171	0.074	0.102	0.181	0.057	0.096	0.122
陕西	0.194	0.057	0.181	0.113	0.130	0.113	0.067	0.023	0.092
上海	0.264	0.225	0.231	0.192	0.204	0.041	0.117	0.257	0.021
四川	0.129	0.105	0.150	0.144	0.184	0.154	0.085	0.011	0.044
天津	0.345	0.046	0.224	0.079	0.104	0.136	0.051	0.432	0.413
西藏	0.037	0.420	0.140	0.214	0.372	0.257	0.259	0.001	0.018
新疆	0.016	0.110	0.176	0.218	0.181	0.231	0.659	0.083	0.158
云南	0.105	0.145	0.152	0.150	0.142	0.136	0.090	0.012	0.054
浙江	0.262	0.066	0.188	0.128	0.206	0.079	0.080	0.015	0.062

表 2 31 省的对称交互熵、贴进度和水资源集约安全利用指数

Table 2 Symmetrical cross-entropy, closeness and intensive-safe utilization index of water resources in 31 provinces

省级行政区	D_i^+	D_i^-	C_i	S_i	省级行政区	D_i^+	D_i^-	C_i	S_i
安徽	0.110	0.053	0.325	3.253	江西	0.117	0.057	0.326	3.258
北京	0.061	0.147	0.707	7.069	辽宁	0.099	0.068	0.407	4.072
重庆	0.094	0.077	0.449	4.488	内蒙古	0.077	0.080	0.511	5.110
福建	0.090	0.072	0.444	4.445	宁夏	0.145	0.035	0.195	1.950
甘肃	0.105	0.063	0.374	3.745	青海	0.092	0.077	0.453	4.533
广东	0.097	0.072	0.425	4.249	山东	0.084	0.083	0.495	4.949
广西	0.131	0.050	0.276	2.756	山西	0.095	0.075	0.442	4.422
贵州	0.111	0.065	0.368	3.682	陕西	0.082	0.092	0.531	5.312
海南	0.115	0.056	0.327	3.269	上海	0.103	0.053	0.342	3.416
河北	0.093	0.070	0.429	4.291	四川	0.098	0.075	0.433	4.331
河南	0.089	0.070	0.439	4.391	天津	0.087	0.090	0.508	5.077
黑龙江	0.114	0.065	0.361	3.612	西藏	0.138	0.060	0.305	3.052
湖北	0.114	0.051	0.308	3.079	新疆	0.087	0.098	0.530	5.299
湖南	0.118	0.055	0.316	3.158	云南	0.100	0.071	0.417	4.166
吉林	0.100	0.066	0.397	3.971	浙江	0.076	0.096	0.557	5.574
江苏	0.121	0.030	0.199	1.995					

2.3 结果与分析

水资源集约安全利用指数是区域水资源集约安全利用水平的一种相对度量方式,在 0 ~ 10 之间取值,其值越大,代表水资源集约安全利用水平越高。由表 2 可知,中国 31 个省级行政区的水资源集约安全利用水平总体上不容乐观。具体来看,北京是唯一的 6 分以上的省级行政区,其水资源集约安全利用指数为 7.069,然而仍存在较大的提升空间。指数为 5 ~ 6 的省级行政区,包括新疆、内蒙古、陕西、天津和浙江。指数为 3 ~ 5 的省级行政区占比 71%,分别是环渤海区域的河北、山东、辽宁;中部地区的河南、山西;西南地区的云南、四川、重庆;西北地区的青海和东南沿海的广东和福建;紧随其后的是贵州、湖南、湖北、江西、安徽、上海、海南、西藏、甘肃、吉林和黑龙江。此外,有 3 个省级行政区水资源集约利用水平相对落后,指数均在 3 以下,分别是宁夏、江苏和广西。

水资源集约安全利用是一个整体概念,集约和安全相辅相成,缺一不可,形成一个水资源利用的多目标约束系统。为探究子系统的耦合发展状态和主要症结所在,在综合评估的基础上,将评价指标体系分为相对独立的两部分:集约利用指标(I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5)和安全利用指标(I_6 、 I_7 、 I_8 、 I_9),分别执行本文构建的模型,并与集约安全利用指数进行比较分析,结果见图 2。

由图 2 可见,北京的水资源集约安全利用指数最高,但主要归功于集约利用指数(9.817),接近理想解,而安全利用指数则相对较低。具体来看,北京的单方水 GDP 产出达到 847.46 元,是排在第二位的天津的 1.7 倍;万元工业增加值用水量和农田灌溉水有效利用系数均处于最高水平。可以看出,超高的用水效率和用水效益是北京市水资源集约安全利用水平最高的主要原因。此外,北京市在投入约

1/3 的生态用水的同时,人均供水量处在倒数第二名,仅高于天津。归根结底,资源型缺水仍然是北京用水安全的主要制约因素。天津和山东的情况和北京类似,其中天津水资源的集约利用和安全利用水平悬殊更大。河北的水资源集约利用处于较高水平,相对而言用水安全也是应关注的重点。总体来看,未来几十年,仍需继续加大南水北调中线工程的调水规模,同时加快推进南水北调东线二期工程,以满足京津冀地区及山东的经济社会发展的用水需求。浙江、陕西、山西和河南 4 个省级行政区水资源集约利用水平均处在较高的水平,但用水安全情况处于相对滞后状态,这一点与河北相似,水资源短缺问题是主要矛盾之一。重庆、辽宁、上海、福建、四川和广东等 6 个省级行政区表现出了较高的水资源集约利用水平,相比之下,安全利用水平稍低,但在全国范围内也属于中等水平。而云南、吉林、甘肃、贵州、安徽、湖北、内蒙古和青海等 8 个省级行政区情况类似,但相反的是,集约用水水平稍微低于安全用水水平。各省级行政区应因地制宜,抓住主要矛盾,重点突破,以最有效的方式努力提升短板,同时兼顾保持或提升相对优势,以耦合发展和共同提升的模式从整体上提升水资源集约安全利用水平。黑龙江、海南、江西、湖南、西藏、广西和新疆等 7 个省级行政区的水资源集约利用处于落后水平。其中,尤以西藏和广西为甚,水资源集约利用情况接近负理想解,但需指出的是,这些省级行政区却表现出了较高的水资源安全利用水平,如新疆的水资源安全利用指数在 31 个省级行政区中排名第一,西藏排名第三。单方水 GDP 产出量是导致新疆集约利用水平较低的主要因素。这些省级行政区大多水资源禀赋优越,同时能够做到合理、适度开发利用水资源,三生用水和生态环境较为和谐。加大科技投入,提升用水效率,将是这些省级行政区促进水资源集约利

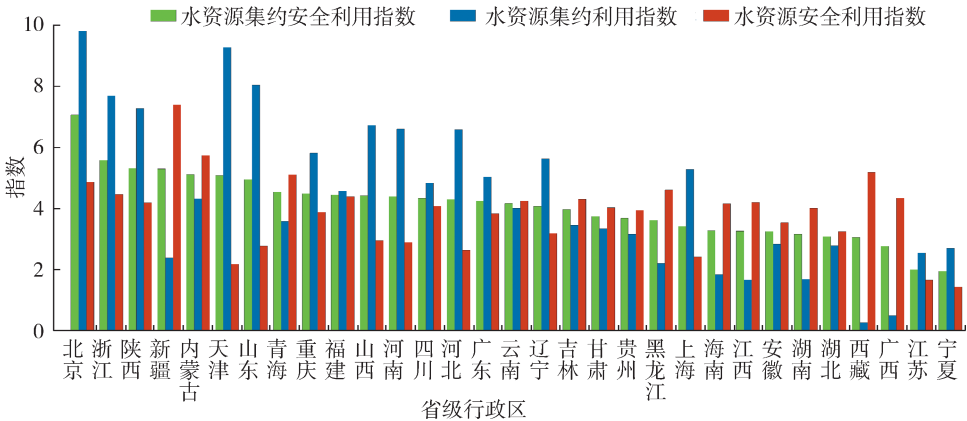


图 2 中国 31 省级行政区水资源集约、安全利用对比
Fig. 2 Comparison of intensive and safe utilization of water resources in 31 provinces of China

用的主要途径之一。宁夏和江苏的水资源集约利用水平处于落后水平,分别排在 23 和 24 位,而安全利用水平则是最低的两个省级行政区,因此全面施策、协同优化,势在必行。

3 结 论

a. 中国 31 个省级行政区的水资源集约安全利用总体上处于中等偏下水平,水资源集约安全利用指数在 5 分以下的省级行政区占比 80.1%,指数最高的北京也存在较大的提升空间;天津、北京、山东、新疆、西藏和广西等多个省级行政区水资源集约利用和安全利用之间悬殊较大,协调发展程度较低。资源型缺水是北京等地区水资源安全利用的主要障碍;用水效益低下是新疆等地区水资源集约利用的主要瓶颈。

b. 中国水资源集约利用水平具有较明显的地域特征和区域差异,基本趋势是,经济发达且水资源利用压力较大的地区集约利用水平较高,但安全利用水平偏低,这些地区包括北京、天津、山东、浙江和陕西等;经济不发达或者受自然条件限制较大的地区水资源集约利用水平较低,而安全利用水平则相对较高,包括广西、西藏等;水资源集约利用和安全利用在一定程度上存在互斥现象。

c. 新发展理念下,中国水资源集约安全利用迫在眉睫,任重道远。推进水资源的集约安全利用首先要因地制宜,抓住主要矛盾重点突破,同时要做到各方兼顾,均衡发展,重视集约利用与安全利用的辩证影响关系,从系统论的角度,疏经把脉,精准施策。

参考文献:

[1] 李国英. 深入贯彻新发展理念推进水资源集约安全利用[N]. 人民日报,2021-03-22(10).

[2] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))

[3] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展,2021,32(1):33-44. (YANG Yafeng, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese))

[4] 姜文来. 我国水资源集约安全利用的战略路径[J]. 中国水利,2021(6):58-59. (JIANG Wenlai. Strategic path of intensive and safe utilization of water resources in China

[J]. China Water Resources, 2021(6): 58-59. (in Chinese))

[5] 李来胜,高志宏. 循环经济视角下的黄河水资源集约利用研究[J]. 中南大学学报(社会科学版),2007,13(6):711-714. (LI Laisheng, GAO Zhihong. The research of Yellow River water resource's intensive use under the circular economy[J]. Journal of Central South University (Social Science), 2007, 13(6): 711-714. (in Chinese))

[6] 廖文梅,张广来,孔凡斌. 区域水资源集约利用评价及其影响因素分析:以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 新疆农垦经济,2015(6):67-72. (LIAO Wenmei, ZHANG Guanglai, KONG Fanbin. Evaluation of regional water resources intensive utilization and analysis of its influencing factors: a case study of Poyang Lake Ecological Economic Zone[J]. Xinjiang State Farms Economy, 2015(6): 67-72. (in Chinese))

[7] 韩宇平,黄会平. 水资源集约利用概念、内涵与模式[J]. 中国水利,2020(13):43-44. (HAN Yuping, HUANG Huiping. Concept, connotation and mode of intensive utilization of water resources[J]. China Water Resources, 2020(13): 43-44. (in Chinese))

[8] 刘华. 上海市水资源安全利用理论及应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.

[9] 刘丽颖. 喀斯特地区水资源安全利用动态评价及仿真模拟研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.

[10] 崔玉,朱东升,胡潇月,等. 基于改进模糊层次分析法的二次设备差异化改造方案评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):276-283. (CUI Yu, ZHU Dongsheng, HU Xiaoyue, et al. Differential retrofit scheme evaluation of secondary equipment based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(3): 276-283. (in Chinese))

[11] 薛鹏腾,毛立波,张峰,等. 基于质量冲刷曲线和多属性决策的分流制控污调蓄设施的优化设计[J]. 水资源保护,2021,37(4):127-132. (XUE Pengteng, MAO Libo, ZHANG Feng, et al. Optimal design of regulation and storage facilities for pollution control in separate system based on mass flush curve and multi-attribute decision making[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 127-132. (in Chinese))

[12] 金菊良,汤睿,周戎星,等. 基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 1-6. (in Chinese))

[13] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33(1):52-56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive

- evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 52-56. (in Chinese))
- [14] YU Huayang, CHEN Yanlin, WU Qi, et al. Decision support for selecting optimal method of recycling waste tire rubber into wax-based warm mix asphalt based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121781.
- [15] 杨亚锋, 王红瑞, 巩书鑫, 等. 可变勾股模糊 VIKOR 水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 633-646. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, GONG Shuxin, et al. Variable Pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 633-646. (in Chinese))
- [16] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广义水环境承载能力评价[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 730-735. (HE Ruimin, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 730-735. (in Chinese))
- [17] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [18] 金菊良, 徐新光, 周成星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [19] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [20] 杨亚锋, 王红瑞, 赵伟静, 等. 水资源承载力的集对势-偏系数评价模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 99-105. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese))
- [21] YU Sen, LU Hongwei. An integrated model of water resources optimization allocation based on projection pursuit model: grey wolf optimization method in a transboundary river basin [J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 156-165.
- [22] 高媛媛, 许新宜, 王红瑞, 等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 776-784. (GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application [J]. System Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(3): 776-784. (in Chinese))
- [23] WANG Qiang, LI Siqu, LI Rongrong. Evaluating water resource sustainability in Beijing, China: combining PSR model and matter-element extension method [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 171-179.
- [24] 杜现增, 袁榆梁, 孟钰, 等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 145-151. (DU Xianzeng, YUAN Yuliang, MENG Yu, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 145-151. (in Chinese))
- [25] 王雪, 方国华, 李鑫. 基于序关系分析-模糊物元法的昆山市节水型社会建设综合评价[J]. 水利经济, 2020, 38(5): 30-35. (WANG Xue, FANG Guohua, LI Xin. Comprehensive evaluation of construction of water-saving society in Kunshan City based on sequence relation analysis-fuzzy matter-element method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(5): 30-35. (in Chinese))
- [26] TORNYEVIADZI H M, NEBA F A, MOHAMMED H, et al. Nodal vulnerability assessment of water distribution networks: an integrated Fuzzy AHP-TOPSIS approach [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2021, 34: 100434.
- [27] 李星, 左其亭, 韩淑颖, 等. 塔里木河流域水资源适应性利用能力评价及调控[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 63-68. (LI Xing, ZUO Qiting, HAN Shuying, et al. Evaluation of adaptive utilization capacity of water resources in Tarim River and its regulation [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 63-68. (in Chinese))
- [28] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [29] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 20-25. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of

- Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese))
- [30] 刘树林,邱苑华. 多属性决策的 TOPSIS 夹角度量评价法[J]. 系统工程理论与实践, 1996(7): 13-17. (LIU Shulin, QIU Yuhua. The TOPSIS angle measure evaluation method for MADM [J]. System Engineering: Theory & Practice, 1996(7): 13-17. (in Chinese))
- [31] GEEM Z W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search [J]. Engineering Optimization, 2006, 38(3): 259-277.
- [32] 孔峰,刘鸿雁. 对多属性决策问题中夹角度量法的质疑[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(2): 130-134. (KONG Feng, LIU Hongyan. Questioning the angle measure evaluation method in MADM[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(2): 130-134. (in Chinese))
- [33] 赵萌,邱苑华,刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1098-1100. (ZHAO Meng, QIU Yuhua, LIU Beishang. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making [J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1098-1100. (in Chinese))
- [34] 卢国祥,李冰清. 基于对称交互熵的多属性决策排序法[J]. 数学杂志, 2016, 36(6): 1253-1260. (LU Guoxiang, LI Bingqing. Evaluation method based on symmetric cross entropy for multiple attribute decision making[J]. Journal of Mathematics, 2016, 36(6): 1253-1260. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-15 编辑:王芳)

(上接第6页)

- [9] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [10] 王浩,王建华,胡鹏. 水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))
- [11] 张泳华,刘祖发,赵铜铁钢,等. 东江流域基流变化特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 75-81. (ZHANG Yonghua, LIU Zufu, ZHAO Tongtiegang, et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 75-81. (in Chinese))
- [12] ZHOU Xiyin. Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 292-301.
- [13] LEI Xiaowen, ZHAO Jianshi, WANG Dingbao, et al. A Budyko-type model for human water consumption [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 212-226.
- [14] PHAN T D, BERTONE E, STEWART R A. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management [J]. Cleaner Environmental Systems, 2021, 2: 100031.
- [15] BEN-DAOUD M, MAHRAD B E, ELHASSNAOUI I, et al. Integrated water resources management: an indicator framework for water management system assessment in the R'Dom sub-basin, Morocco [J]. Environmental Challenges, 2021, 3: 100062.
- [16] VANHAM D, LEIP A. Sustainable food system policies need to address environmental pressures and impacts: the example of water use and water stress[J]. Science of the Total Environment, 2020, 730: 139151.
- [17] 张盛文. 关于人水关系的哲学思考[J]. 水利发展研究, 2012, 12(2): 89-93. (ZHANG Shengwen. Philosophical reflections on human-water relationship[J]. Water Resources Development Research, 2012, 2(2): 89-93. (in Chinese))
- [18] 左其亭. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 268-273. (ZUO Qiting. The embedded system dynamic model used to human-water system modeling [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 268-273. (in Chinese))
- [19] 左其亭,刘欢,马军霞. 人水关系的和谐辨识方法及应用研究[J]. 水利学报, 2016, 47(11): 1363-1370. (ZUO Qiting, LIU Huan, MA Junxia. Research on identification methods and applications for harmony of human-water relationship[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(11): 1363-1370. (in Chinese))
- [20] ZUO Qiting, LI Wen, ZHAO Heng, et al. A harmony-based approach for assessing and regulating human-water relationships: a case study of Henan Province in China [J]. Water, 2021, 13(1): 3201-3222.
- [21] ZUO Qiting, ZHAO Heng, MAO Cuicui, et al. Quantitative analysis of human-water relationships and harmony-based regulation in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(8): 0001118.
- [22] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 135-144. (ZUO Qiting. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 135-144. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-14 编辑:熊水斌)