

李跃红, 蒋晓辉, 张琳. 黄河流域水资源节约集约利用能力评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 731-741. LI Y H, JIANG X H, ZHANG L. Evaluation of conservation and intensive utilization capacity of water resources in Yellow River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 731-741. (in Chinese)

黄河流域水资源节约集约利用能力评价

李跃红, 蒋晓辉, 张琳

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 基于主成分分析法和熵值法, 从水资源系统、社会经济系统、生态环境系统 3 个方面选取 17 个指标建立评价体系, 使用黄河流域 2011—2020 年的相关数据, 进行黄河流域水资源节约集约利用能力评价。研究表明: 黄河流域水资源节约集约利用能力整体上呈先降低后上升趋势, 由 2011 年的 0.093 5 增长到 2020 年的 0.109 7, 9 个省(自治区)的水资源节约集约利用能力从大到小分别为青海(0.025 3)、陕西(0.012 6)、山西(0.012 2)、甘肃(0.011 4)、四川(0.011 0)、宁夏(0.010 3)、内蒙古(0.009 1)、河南(0.008 9)和山东(0.008 9); 黄河流域水资源节约集约利用仍存在水资源供需矛盾突出、开发利用率高、利用效率低和生态环境脆弱的问题, 针对这些问题提出加强黄河流域水资源节约集约利用的对策, 为推动黄河流域用水方式由粗放低效向节约集约转变提供依据。

关键词: 水资源; 节水; 集约; 主成分分析法; 熵值法; 黄河流域

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0071

“水资源节约集约利用”主要包括两层含义: 一是保护水资源, 即对水资源的数量、质量和生态功能进行保护, 从而保护水资源, 防止水资源遭到破坏或者枯竭, 影响人类生存; 二是水资源节约集约利用, 包括节约和集约两方面的内容^[1]。节约用水不是不让用水, 而是减少用水量, 让人们高效地使用水资源, 改善用水结构, 加强用水管理, 改变粗放的利用方式以此提高水资源利用效率, 推动水资源可持续发展, 尽力维持水资源总量的稳定^[2-4]。集约用水是相对于粗放用水而言的, 是以水资源总量为刚性约束, 通过提高资金、管理措施和科学技术等的使用效率或者降低要素重组所需投入的成本来提高水资源利用效率, 获取最大的经济效益^[5-6]。这两方面相辅相成、相互联系, 在促进水资源可持续发展的过程中二者不可或缺。

张欣等^[7]从农业、工业、服务业、生活和综合 5 个方面选取 10 个指标, 采用用水定额和分级标准相结合的评价方法对我国华北地区缺水区域进行评价。张志旭等^[8]对咸阳市进行了节水评价, 采用因素分解模型将用水变化驱动效应分解为规模效应、

技术效应和结构效应。孙晓文等^[9]采用层次分析法对高耗水行业的典型重点监控用水单位进行评价, 指出了节水管理中存在的问题, 提出了相应的节水对策。王红瑞等^[10]用 AHP-CRITIC 综合赋权的方法建立水资源集约安全利用评估模型, 并应用于 2019 年我国 31 个省级行政区。廖文梅等^[11]从农业、工业以及生活用水 3 个方面选取区域水资源集约利用指数, 以鄱阳湖生态经济区为研究对象, 对区域内水资源集约利用进行综合评价。邓铭江^[12]从节水优先、用水总量控制、高效利用和循环经济 4 个方面探究了旱区水资源集约利用内涵, 并提出了相应措施, 以期旱区水资源集约利用提供借鉴。Li 等^[13]以江苏省为例, 基于层次分析法全面分析江苏省民用建筑物节水现状和问题。Mao 等^[14]基于相关函数和层次分析法, 利用定量与定性相结合的节水综合评价指标体系对浙江省舟山市和玉环县进行评价。Zhao 等^[15]基于 TOPSIS 方法构建了综合评价指标体系来评价中国四川省 21 个典型湿润地市的节水灌溉发展水平。Zhang 等^[16]利用 AHP-TOPSIS 模型分析了河南省近 10 年的节水状况。

收稿日期: 2022-11-14 修回日期: 2023-05-03 网络出版时间: 2023-07-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230707.1557.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779209)

作者简介: 李跃红(1999—), 女, 山西吕梁人, 主要从事水文水资源、生态水文研究。E-mail: liyuehong@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 蒋晓辉(1972—), 男, 湖南永州人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源、生态水文研究。E-mail: xhjjiang@nwu.edu.cn

黄河流域水资源总量少、人口多、人均占有量少,属于严重缺水地区,因此通过加快推进黄河流域水资源的高效利用,来实现水资源可持续利用尤为重要。2013年3月《黄河流域综合规划(2012—2030年)》进入组织实施阶段,其中提出了执行最严格的水资源管理制度,并推行各种节水措施,做到节流开源并举、节流优先、适度开源,以此来建设资源节约、环境友好的节水型社会。2016年《水利改革发展“十三五”规划》要求全面推进节水型社会建设,实施《全民节水行动计划》。2017年水利部全面启动县域节水型社会达标建设,黄河流域各省因地制宜,均印发省级县域节水型社会达标建设实施方案。2019年《国家节水行动方案》印发,提出节水主要目标、重点行动和具体要求等。黄河流域各省相继出台省级节水法规或规范性文件,均制定印发省级节水行动实施方案。2021年8月水利部印发《关于实施黄河流域深度节水控水行动的意见》,其内容表明要全面贯彻深度节水控水政策,把量水而行、节水为重作为中心,把水资源作为最大的刚性约束来推进该流域水资源高效和持续利用。2021年10月印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中关于水资源节约集约利用提出必须坚持量水而行、节水优先的内容。

黄河是西北地区和华北地区重要的水源地之一^[17],因此构建合理的水资源节约集约利用能力评价体系对其具有重要意义。结合黄河流域水资源实际情况,本文运用主成分分析法和熵值法,从水资源系统、社会经济系统和生态环境系统3方面选取17个指标建立黄河流域水资源节约集约利用能力评价体系,得到黄河流域9省(自治区)2011—2020年的节约集约能力,分析黄河流域水资源节约集约利用存在的问题及原因,有针对性地提出提升对策,为该流域水资源的高效利用提供依据。

1 黄河流域水资源利用现状

黄河是我国北方的重要水源,长5464 km,是仅次于长江的第二长河^[18]。黄河流域幅员辽阔,自西向东分别流经青、川、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫、鲁9个省(自治区)^[19],流域面积达79.5万km²(含内流区面积4.2万km²)。21世纪以来,经济社会的发展加剧了水资源的紧张趋势,全国50多座大中城市由黄河供水,开发利用率超过了80%,远超一般河流生态警戒线,供需矛盾突出^[20-21]。

《黄河水资源公报》显示,2020年,黄河流域供水区总取水量为536.15亿m³,其中地表水取水量占79.5%、地下取水量占20.5%。供水区总耗水量为435.35亿m³,其中地表水耗水量占81.3%、地下水耗水量占18.7%。黄河供水各省(自治区)取水量、耗水量见表1。总取水量内蒙古最多为111.94亿m³,占总取水量的20.9%;总耗水量山东最多为88.87亿m³,占总耗水量的20.4%。黄河流域分行业取水量、耗水量百分比见图1、图2。从图1可以看出:农业取水量最多,占总取水量的65.3%;生态环境取水量最少,占总取水量的10.2%。从图2可以看出:农业耗水量最多,占总耗水量的64.7%;工业耗水量最少,占总耗水量的10.6%。

表1 黄河供水各省(自治区)取水量、耗水量
Tab. 1 Water intake and consumption of the provinces (autonomous regions) supplied by the Yellow River 单位:亿m³

省(自治区)	取水量			耗水量		
	地表水	地下水	合计	地表水	地下水	合计
青海	12.64	2.17	14.81	9.33	1.31	10.64
四川	0.24	0.01	0.25	0.19	0.01	0.20
甘肃	34.52	3.18	37.70	28.03	2.27	30.30
宁夏	65.07	6.15	71.22	39.87	4.32	44.19
内蒙古	88.31	23.63	111.94	66.15	18.37	84.52
陕西	36.56	28.34	64.90	29.22	20.87	50.09
山西	32.15	18.61	50.76	28.99	14.04	43.03
河南	52.67	21.19	73.86	49.76	15.42	65.18
山东	85.68	6.70	92.38	83.96	4.91	88.87
河北	18.33	0	18.33	18.33	0	18.33
合计	426.17	109.98	536.15	353.83	81.52	435.35

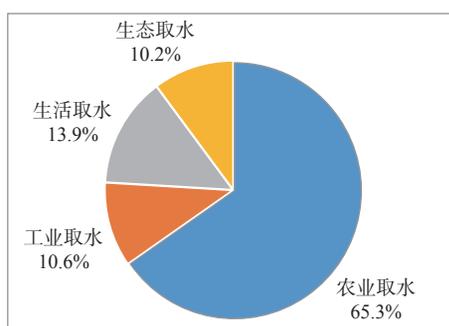


图1 黄河流域分行业取水量百分比
Fig. 1 Percentage of water extracted by industry in the Yellow River basin

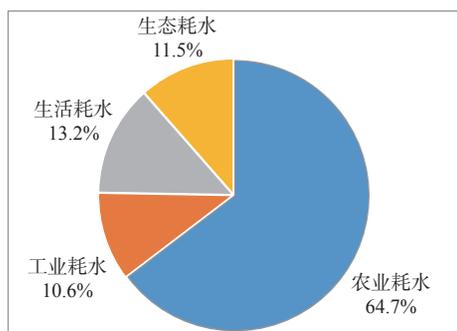


图2 黄河流域分行业耗水量百分比
Fig. 2 Percentage of water consumption by industry in the Yellow River basin

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

2011—2020年指标数据来源:人均用水量、人均水资源量、地表水开发利用、用水普及率、水重复利用率、森林覆盖率和废水排放总量数据来源于《中国环境统计年鉴》;耗水总量、供水总量、工业用水总量、农业用水总量和生态用水总量数据来源于《黄河水资源公报》;城市供水管网漏损率和城市污水处理率由《中国城乡建设统计年鉴》计算整理得到;万元工业增加值用水量、万元GDP用水量和农田有效灌溉面积均来源于《中国统计年鉴》。

2.1.1 评价指标体系选取原则

综合性原则。指标的选取必须综合考虑研究区域内的各种不同因素,包括自然、社会和经济条件等,既要能反映出研究区域的主要特征、状态,也要能反映出它们之间的内在联系,从而对其进行全面的分析和评价。

客观性原则。客观性是指各指标的选取能客观反映研究区的自然经济和社会特征,尊重客观实际同时有科学的理论作为支持,保证研究结果的真实性。

典型性原则。水资源利用能力受到多种社会、经济和资源环境因素的影响,其影响程度不同,所以选取指标要具有典型代表性,尽可能准确反映研究区域的特征。

可比性原则。评价指标体系要有通用可比性,对评价指标数据采取调整权重的方法,使得评价结果更加科学合理。

实用性原则。评价指标体系不能太复杂,合理地选取指标,评价所需要的数据要容易获得,同时要考虑数据的准确性,评价方法要简单,容易计算,确保评价结果的真实可靠性。

2.1.2 评价指标体系

水资源节约集约利用能力评价的核心环节就是建立评价指标体系。本着客观性、典型性和可比性等原则,根据黄河流域水资源利用现状,结合2021年国家发改委联合有关部门印发的《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》,在诸多评价指标中,有针对性地选择出水资源系统、社会经济系统和生态环境系统3个一级指标、用水普及率和供水总量等17个二级指标作为黄河流域水资源节约集约利用能力评价的指标体系,见表2。

2.2 水资源节约集约利用能力评价方法

考虑评价结果的准确性和客观性,选取主成分分析法和熵值法开展黄河流域水资源节约集约利用评价。

2.2.1 主成分分析法

主成分分析法(principal component analysis, PCA)是利用降维的方法对基础指标体系进行筛选,将原本可能存在相关关系的变量通过正交变换进行转换,得到一组线性不相关的变量^[22]。利用SPSS 26对原始数据进行分析处理,对各指标在各主成分线性组合中的系数的加权平均的归一化,计算得到所选17个指标的权重值(表3),计算步骤如下:

计算相关系数矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ip} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $r_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, p)$ 为原变量 x_i 和 x_j 的相关系数(记原有变量指标为 x_1, x_2, \dots, x_p)。

计算特征值和特征向量:

解特征方程 $|\lambda E - R| = 0$, 这里 E 是单位矩阵, 求出所有特征值, 并按其大小顺序排列为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$, 分别求出对应特征值 λ_i 的特征向量 $e_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 。

根据特征值, 计算主成分累计贡献率:

$$\frac{\sum_{k=1}^m \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (2)$$

计算原指标在不同成分线性组合中的系数:

$$l_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

式中: e_{ij} 为第 i 主成分对原指标变量 x_j 的载荷数。

计算主成分贡献率:

表 2 黄河流域水资源节约集约利用能力评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of water resources conservation and intensive use capacity in the Yellow River basin

目标层	准则层	指标层	属性	指标含义
黄河流域水资源节约集约利用能力评价	水资源系统	人均用水量/m ³	负向	是指一个人生活中使用的水量
		人均水资源量/m ³	正向	指在一个地区内某一个时期每个人占有的平均水资源量
		地表水开发利用率/%	负向	流域或区域地表用水量占地表水资源总量的比,体现地表水资源开发利用的程度
		供水总量/亿m ³	负向	指各种水源提供的包括输水损失在内的毛供水量
		耗水总量/亿m ³	负向	指在输水、用水过程中通过蒸发蒸腾、居民引用、土壤吸收等多种途径消耗掉不能回归到地表水体和地下含水层的水量
		工业用水总量/亿m ³	负向	是指工业生产中使用的水和员工生活用水量的和
		农业用水总量/亿m ³	负向	是指农田、林地、草地和鱼塘等用水量的和
	社会经济系统	万元工业增加值用水量/m ³	负向	工业用水量与工业增加值之比,也就是以万元为单位的工业增加值
		万元GDP用水量/m ³	负向	由总用水量除以生产总值得到
		城市供水管网漏损率/%	负向	城市管网漏损的水量与供水总量之比,是衡量供水系统效率的指标
生态环境系统	用水普及率/%	正向	指城市用水的非农业人口数与城市非农业人口数之比	
	农田有效灌溉面积/10 ³ hm ²	正向	是地块比较平整,有一定水源、灌溉设施配套,在一般年景下当年能进行正常灌溉的农田面积	
	废水排放总量/万t	负向	包括生产过程中的工业废水和居民的生活污水	
	水重复利用率/%	正向	生产过程中重复用水量加上回用水量与总用水量之比	
		城市污水处理率/%	正向	指经过污水处理厂处理的城市污水量占污水排放总量的比
		森林覆盖率/%	正向	是指森林面积占土地总面积的比值

$$u_i = \frac{\lambda}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

计算原指标在综合模型中的系数:

$$d_j = \sum_{i=1}^m u_i l_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

指标权重归一化,计算各个因子所占的权重:

$$\lambda_j = \frac{d_j}{\sum_{k=1}^p d_k} \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

2.2.2 熵值法

熵在信息论中是对不确定性的一种度量。信息少,不确定性增大,熵值就越大^[23-24]。熵值法是通过计算指标数据的熵值来量化指标相对变化程度对研究对象的影响,是一种客观的计算权重的方法。指标的熵值与有效信息量及其权重成反比。这种方法几乎不受主观因素的影响,有效地补偿了人为原因造成的结果不准确^[25-26],使计算结果更加真实可靠。

由于熵值法需要有一定量的样本数据才能进行权重计算,且熵值与指标数值本身的大小关系非常密切^[27],因此熵值法只适用于二级指标的构权,熵值

法的主要步骤^[28-30]如下:

设定数据矩阵,构建第*i*年样本第*j*项评估指标的判断矩阵*B*。

$$B = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: X_{ij} 为第 *i* 年第 *j* 项指标的值。

数据的标准化:

水资源节约集约利用有一系列指标的影响因素。由于构建评价指标体系时选取的指标范围比较广泛,各指标间的评价标准和单位不同,因此,需要对指标进行标准化处理,消除变量之间的关系,保证数据的可比性。

正向指标标准化方法:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (8)$$

逆向指标标准化方法:

$$Y_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad (9)$$

式中: Y_{ij} 指的是第 *i* 年第 *j* 项指标数据的标准化值;

X_{ij} 表示原始数据; $\max X_{ij}$ 、 $\min X_{ij}$ 代表第 i 年第 j 项指标的最大值和小值。

确定指标权重:

计算第 i 年第 j 项指标值的比重 R_{ij} :

$$R_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij} \quad (10)$$

计算第 j 项指标的熵值 H_j :

$$H_j = - \sum_{i=1}^n R_{ij} \ln R_{ij} / \ln n \quad (11)$$

计算第 j 项指标的差异性系数 G_j :

$$G_j = 1 - H_j \quad (12)$$

计算各指标的权重 β_j :

$$\beta_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j \quad (13)$$

式中: R_{ij} 是第 i 年第 j 项指标值占该指标总值的比重; X_{ij} 是第 i 年第 j 项指标的具体值; H_j 是第 j 项指标的熵值; G_j 是第 j 项指标的差异性系数; β_j 是第 j 项指标的权重。

由熵值法计算得到黄河流域水资源节约集约利用能力评价各指标的权重见表3。

表3 黄河流域水资源节约集约利用能力评价权重
Tab. 3 Weight of evaluation of water resources conservation and intensive use capacity in the Yellow River basin

指标层	熵值法权重	主成分分析法权重	组合权重
人均用水量	0.028 106	0.033 891	0.030 998
人均水资源量	0.308 842	0.020 370	0.164 606
地表水开发利用率	0.015 172	0.017 675	0.016 423
供水总量	0.064 534	0.100 442	0.082 488
耗水总量	0.089 862	0.098 346	0.094 104
工业用水总量	0.032 395	0.092 042	0.062 218
农业用水总量	0.076 570	0.100 036	0.088 303
生态用水总量	0.014 611	0.080 492	0.047 551
万元工业增加值用水量	0.024 530	0.054 272	0.039 401
万元GDP用水量	0.014 177	0.026 228	0.020 202
城市供水管网漏损率	0.038 508	0.003 224	0.020 866
用水普及率	0.037 813	0.084 858	0.061 335
农田有效灌溉面积	0.109 071	0.091 806	0.100 438
废水排放总量	0.029 514	0.081 227	0.055 370
水重复利用率	0.021 498	0.036 389	0.028 943
城市污水处理率	0.019 901	0.035 406	0.027 653
森林覆盖率	0.074 896	0.043 298	0.059 097

2.2.3 组合权重及评价价值计算

基于熵值法和主成分分析法的组合权重 W_j 计

算公式为

$$W_j = (\beta_j + \lambda_j) / 2 \quad (14)$$

根据求出的组合权重,采用线性加权法分别计算评价价值,计算公式为

$$E_j = \sum_{j=1}^{17} Y_{ij} W_j \quad (15)$$

式中: Y_{ij} 指的是第 i 年第 j 个指标数据的标准化值; W_j 是第 j 个指标的组合权重; E_j 为水资源节约集约利用能力综合评价价值。

3 结果与讨论

针对研究区域水资源的实际情况,利用2.2节中的公式计算得出各指标的权重以及黄河流域9个省(自治区)2011—2020年每个年份的水资源节约集约利用能力,见表4。

黄河流域9省(自治区)水资源节约集约利用能力评价价值变化趋势见图3。从整体上看,黄河流域水资源节约集约利用能力分为两个阶段:2011—2015年在波动中呈现降低趋势,2015年为0.094 4,2015年后开始增强,2020年达到最大值为0.109 7。其中:青海2011年至2015年水资源节约集约利用能力波动大,2015年以后呈增长趋势,最小值为2015年的0.018 2,最大值为2020年的0.025 3;内蒙古水资源节约集约利用能力波动幅度次之,2011年至2013年增至最大值后开始降低到2017年的0.008 3,2017年后呈增长趋势;四川、陕西、河南和山东水资源节约集约利用能力都呈现先下降后上升的趋势,四川2015年开始增加,陕西的最小值为2016年的0.011 9,河南增加的转折点是2013年,山东2014年水资源节约集约利用能力最差,而甘肃、山西和宁夏基本上一直处于增长阶段。

虽然2015年后黄河流域9省(自治区)的水资源节约集约利用能力均处于增长阶段,但其仍存在如下问题。

水资源系统方面。流域水资源供需矛盾突出,开发利用率高,农业灌溉效率低。黄河流域黄河沿岸城市化进程的发展,居民数量增长,农用地面积扩大,生活需水量增加,导致对黄河水的取用量增加,黄河水资源的总量日益减少,2020年黄河流域除青海、四川外其余省份人均水资源量均低于全国平均水平。同时,黄河流域水资源开发利用仍偏高。流域内以农业为主,黄河取水量每年约2/3用于农业灌溉,部分地区还在使用传统的灌溉方式,喷灌、滴灌等节水灌溉方式的使用率低,且灌溉设

备年久失修,老化严重,导致农业用水还存在浪费现象。位于黄河上游源头的青海,地貌复杂多样,80%以上的地区为高原,人均水资源量大但开发利用率低,加之受气候条件的限制,牧民以畜牧业为

主,工业和农业耗水分别占用水总量的 9.88% 和 73.06%。河南、山东和山西水资源短缺,耗水总量大且开发利用率高,水资源节约集约利用刻不容缓。

表 4 2011—2020 年黄河流域水资源节约集约利用能力评价结果

Tab. 4 Evaluation results of water resources conservation and intensive use capacity in the Yellow River basin from 2011 to 2020

省(自治区)	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
甘肃	0.008 4	0.009 5	0.009 5	0.009 6	0.009 7	0.009 7	0.010 1	0.010 7	0.010 8	0.011 4
河南	0.007 6	0.007 5	0.007 1	0.008 2	0.007 8	0.007 9	0.008 1	0.008 2	0.008 2	0.008 9
内蒙古	0.008 0	0.009 2	0.010 3	0.008 8	0.009 0	0.008 7	0.008 3	0.008 8	0.009 0	0.009 1
宁夏	0.008 9	0.010 1	0.009 6	0.009 7	0.009 9	0.010 2	0.010 4	0.010 9	0.010 3	0.010 3
青海	0.020 0	0.023 2	0.019 0	0.021 1	0.018 2	0.018 8	0.021 4	0.023 9	0.023 5	0.025 3
山东	0.008 2	0.008 9	0.008 2	0.008 2	0.008 3	0.008 7	0.009 0	0.009 0	0.008 6	0.008 9
山西	0.011 1	0.011 4	0.011 1	0.011 5	0.011 5	0.011 5	0.011 7	0.012 0	0.011 8	0.012 2
陕西	0.012 6	0.012 3	0.012 2	0.012 1	0.012 1	0.011 9	0.012 5	0.012 1	0.012 4	0.012 6
四川	0.008 7	0.009 6	0.008 9	0.009 3	0.008 0	0.008 3	0.008 8	0.009 9	0.009 9	0.011 0
合计	0.093 5	0.101 8	0.095 8	0.098 7	0.094 4	0.095 8	0.100 4	0.105 4	0.104 4	0.109 7

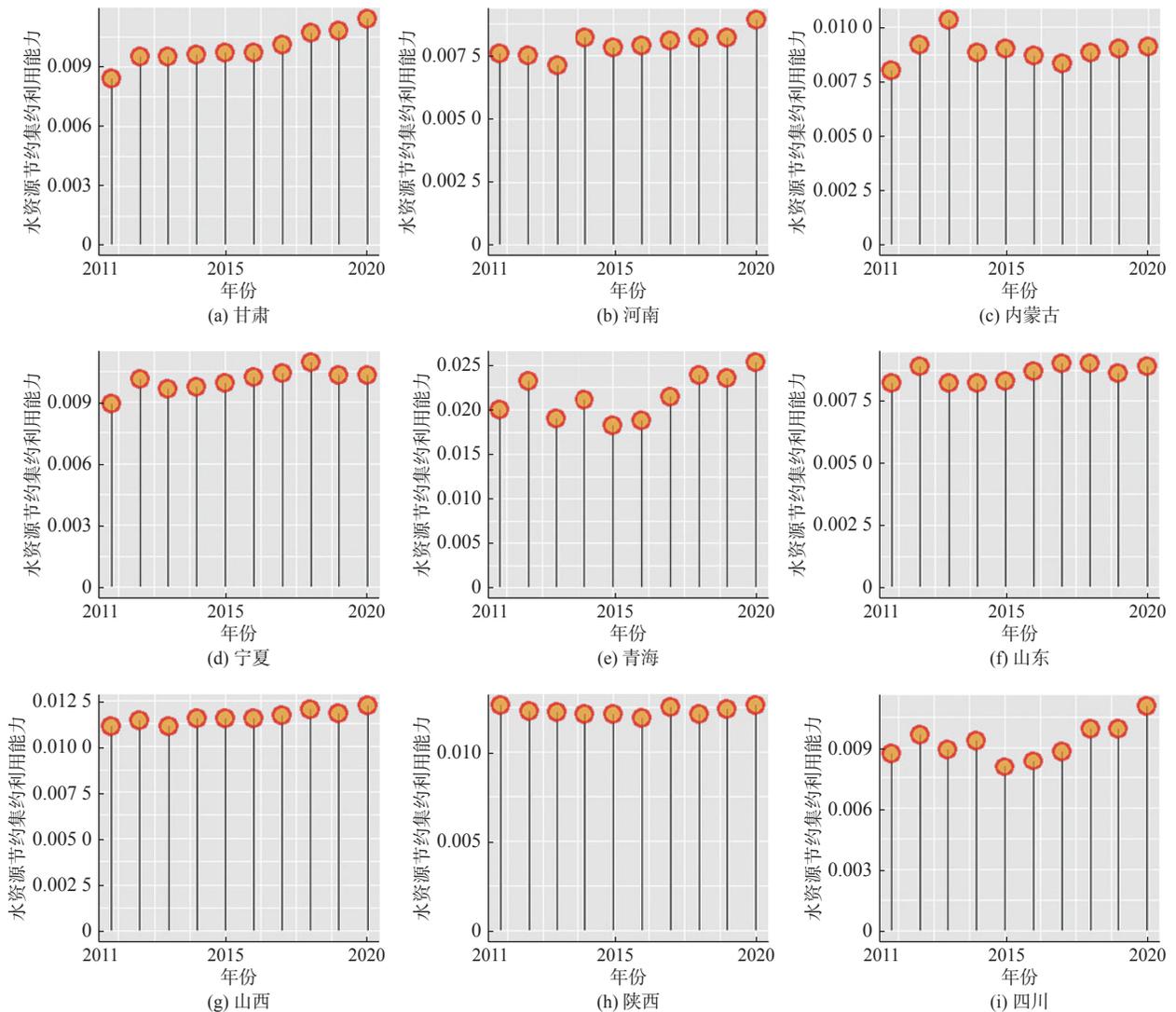


图 3 2011—2020 年黄河流域水资源节约集约利用能力变化趋势

Fig. 3 Change trend of water resources conservation and intensive use capacity in the Yellow River basin from 2011 to 2020

社会经济方面。工业耗水量大,居民生活方面公众节水意识不强。黄河流域产业以高耗水的煤炭、钢铁、金属冶炼行业为主,且缺乏水资源回收利用装置,经济发展的同时工业需水量增加,2020年青海万元工业增加值用水量均超过 30 m^3 ,宁夏的经济发展比较薄弱,结构单一,经济效益指数偏低,万元工业增加值用水量和万元GDP用水量均是黄河流域中最高的。随着经济社会发展以及科技进步,几乎每户都有自来水,用水普及率提高,但公众节水意识有待增强,黄河流域各省(自治区)还存在浪费水的现象。城市供水管网不进行定期维修,黄河流域9省(自治区)中仅有2个省份城市管网漏损率在10%以下,内蒙古的漏损率最高,水资源利用率有待提高。

生态环境方面。黄河流域生态环境脆弱,防治水土流失任重道远。山东的水环境压力大,2011年到2020年废水排放总量总体呈下降趋势,但废水排放总量仍较大;青海、陕西和四川的水资源重复利用率低,对当地的高质量发展和生态保护造成了影响。2020年黄河流域水土流失面积 26.27万 km^2 ,其中,黄土高原水土流失面积占黄河流域的89.15%。青海省的森林覆盖率在2011年到2020年处于增长状态但仍低于我国平均森林覆盖面积。

4 黄河流域水资源节约集约利用提升策略

4.1 推进节水型社会建设

在当前水资源日益紧缺的形势下,提高水资源利用效率、创建节水型社会是必不可少的手段。首先,要提高人们的节水意识,让大家自觉地计划用水、节约用水,以减少耗水总量。同时,通过电视广播等公布黄河水资源利用现状,将水污染和浪费现象展示给公众,社区也要加大节水宣传的力度,创办节水宣传读物,开展节水知识竞赛,利用“世界水日”向公众宣传水资源相关法律,科普各种节约用水的方法,将节约用水渗透到日常生活中,培养群众的节水意识,让每一个人都参与到节水型社会的建设中,从而达到全社会节水的目的。其次,要充分发挥政府的主导作用,发布各项节水行政措施,加快节水立法的进程,明确对违法用水行为的惩罚,加强对水资源的管理,特别是对污水排放的管理,应加大其处理率,尽可能将污水对生态环境的影响降到最低,共同努力提高水资源利用效率,推进黄河流域更多节水型城市的建设。例如陕西是教育

大省,高校多、师生多、水量较大,提高学生的节水护水爱水意识,创建“节水型高校”,从而带动公众节约用水,提高陕西水资源节约利用程度。

4.2 调整产业结构

黄河流域不同省份的产业结构不同,应综合考虑各地区的地形与资源优势,加强对工业、农业、生活用水等方面的节水管理。工业方面,黄河流域以高耗水高污染的煤炭企业居多,首先对传统产业进行升级,淘汰高耗水的工业项目,重点发展低耗水型新兴产业。对于难以转型的企业,加强用水管理和污水排放管理,使用循环用水、高效冷却和废水资源化等节水工艺,提高水资源的重复利用率。农业方面,黄河流域农业用水占比大,应适度压减农业用水,大力引进新型节水灌溉设备,培训工人以提高其灌溉节水意识,提升灌溉技术,发展旱作农业,增加低耗水农作物的种植。城镇用水方面,尽可能减小供水管网漏损率,对使用年限长、漏损率高的管道进行更换,定期维护检查城市供水管网,同时增加节水器具的使用率,大力推进城镇节水。如山东:在工业上,坚持以水定产,严格落实水权交易制度,彻底清查水黑户企业和高耗水企业;在农业上,坚持以水定地,减少种植耗水作物,引进低耗高效的灌溉技术,增加农田有效灌溉面积;在生活上,坚持以水定人、以水定城,定期维修检查输水管道来减少城市管道漏损水量。

4.3 优化水资源配置

科学设计水资源配置方案是节约集约用水工作的重点。一方面,优化细化黄河水量分配方案,合理调配黄河流域的水量,坚持生态优先,大稳定、小调整,建立生态补水机制,在保障基本生态用水基础上,推进跨省主要支流水量分配,修建大中型水库,提高蓄水能力,在“先节水后调水”的原则下推进南水北调工程,受水区全面落实“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”原则,增加下游地区对南水北调供水的使用量,以此来保障中上游地区各城市居民的生活用水,加快建立水资源刚性约束。另一方面,开发利用非常规水资源,在企业推广水资源回收利用技术,充分利用矿井疏干水、雨水和海水等,提高水资源再生利用率,减少对地表水的开发利用。比如河南省作为农业大省,应优化水资源配置战略格局,加强对生态环境的保护,注重绿色发展,完善预防水旱灾害的体系,尽可能保证充足的耕地灌溉水源,推动减污降碳协同增效,让老百姓实实在在感受到生态环境质量改善。

4.4 完善水权水价水市场

首先,建立科学、合理的水价运行机制,对居民实行阶梯水价,对于非居民及用水大户设置用水超定额累进加价制度。在保证农民基本用水量的基础上,推进农业水价综合改革,建立“多用水多花钱,少用水少花钱,不用水得补贴”的机制,对农业灌溉用水实施定额管理,以综合手段提高农业用水效率。其次,完善水权概念,明晰水权主体,建立经济合理、技术可行的用水权初始分配制度,在此基础上,完善水权交易制度,加强对发放取水许可证的管理,建立健全统一的水权交易平台,加强对水权转让的监督和管理,从水权方面改善水资源节约集约利用现状。同时,建立功能健全的水市场,发挥灵活水价在市场的的作用,使其效益最大化,倡导企业培养节水产业、发展节水技术,使水资源流向节水且高效益的产业。如建议内蒙古应对水资源总量进行控制,管制水资源用途,实施阶梯水价,尤其是农业方面,节水减压,有效监测、有序治理,管好、用好水资源,形成水资源节约集约利用的产业结构、生产方式、生活方式、空间格局,促进内蒙古高质量发展。

4.5 建立水资源承载力评价预警机制

对黄河流域各县域的河流污染物、全干流和主要支流生态流量等均建立健全的水资源承载力预警机制,依据水资源管理制度“三条红线”、黄河流域水量分配方案、水资源综合规划,结合当地水资源条件、工农业发展和经济社会发展情况等确立预警指标体系,建立合适的水资源承载力预警模型预测机制,对水资源进行监测,在水资源承载力接近预警阈值时,及时发布预警信息并提出相应措施,以此来改善水资源状况,从而推动水资源和经济社会协调发展。如宁夏干旱少雨,水资源短缺,需深化水资源承载力预警机制的建设,严格监测用水总量和地下水使用量,对已有水文站点进行提档升级改造,建立高效实时的数据共享平台,全面提升水文水资源监测预警现代化水平。

4.6 加强水资源监控监管能力

黄河流域内的 9 个省(自治区)应该共同治理,建立协同管理机构,全面加强对黄河流域水资源的监控监管能力。首先,要建立水资源监测体系,完善监测站的监测设施,健全重要取水口监管名录,从中选取主要监控对象,进行重点监测监管,加强工作人员培训,做到实时监测并及时上报。其次,建立完善的水监测体系,其中包括农业和工业等方

面,检定校准进水和取水计量设施,从而管住用水。确保监测数据的准确性和有用性,规范对取水量和用水量的监测,强化对监测数据的分析运用,通过使用大数据建模与预测的方法加强水资源管理,为水管理提供强有力的支持。最后,黄河流域各省区应明确各自目标任务,明确各自的水资源监管机构职责定位,针对各省区的水资源利用状况分别制定合适的监管方案,健全主体责任指标体系和考核激励政策,系统谋划黄河流域水资源节约集约利用工作。例如山西省开展专项监督检查工作,加强对涑水河 18 条河流主要断面的流量监测力度,并在节水部门中设置专门机构进行管理监测。

5 结论

本文运用主成分分析法和熵值法相结合的方法从水资源系统、社会经济系统和生态环境系统 3 个方面选取 17 个指标建立水资源节约集约利用能力评价体系,并计算得到各指标权重,更加客观准确的对黄河流域 2011—2020 年水资源节约集约利用能力进行评价,为推动黄河流域用水方式由粗放低效向节约集约转变提供依据。结果显示,整体上黄河流域水资源节约集约利用能力分为两个阶段:2011—2015 年在波动中降低到 0.094 4,2015 年后开始增强,2020 年增长到 0.109 7。9 省(自治区)的水资源节约集约利用能力从大到小分别为青海(0.025 3)、陕西(0.012 6)、山西(0.012 2)、甘肃(0.011 4)、四川(0.011 0)、宁夏(0.010 3)、内蒙古(0.009 1)、河南(0.008 9)和山东(0.008 9),较 2011 年均呈现增长。青海波动最大,节水能力呈现先降低后升高的趋势,内蒙古波动幅度次之,四川、陕西、河南和山东都呈现先下降后上升的趋势,甘肃、山西和宁夏基本一直处于增长阶段。这表明政府颁布的各项政策措施与管理是有成效的,面对经济增长的现状,实现黄河流域水资源可持续利用仍需坚持国家以及省区颁布的各项措施,节水型社会的建成离不开政策的支持和水系统的高效管理。

本文也存在一定的局限性。考虑权重的客观性和准确性,本文选取主成分分析法和熵值法进行黄河流域水资源节约集约利用能力评价,避免了人为因素导致的偏差,但无法考虑指标之间的相互影响,对评价结果的准确性有一定影响。选取黄河流域 2011—2020 年的 17 个指标数据进行评价,基于数据的可获取性,指标的选取受到一定限制,影响评

价结果。因此,在未来的研究中,可以考虑各评价方法的优缺点,并结合主观赋权法和客观赋权法,选取更具代表性的指标,收集更广泛的数据来评价黄河流域水资源节约集约利用能力。

参考文献:

- [1] 于琪洋. 对水资源集约节约安全利用的思考[J]. *中国水利*, 2021, 21: 34-47. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2021.21.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2021.21.019).
- [2] 李广贺. 水资源利用与保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 239-241.
- [3] 周兵兵, 马群, 邬建国等. 再论可持续性科学: 新形势与新机遇[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 325-336. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201901.001](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201901.001).
- [4] 李舒, 张瑞嘉, 蒋秀华, 等. 黄河流域水资源节约集约利用立法研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(2): 65-70. DOI: [10.3969/J.ISSN.1000-1379.2022.02.014](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1000-1379.2022.02.014).
- [5] 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, 895(13): 43-44. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2020.13.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2020.13.023).
- [6] 向往, 秦鹏. 节约集约利用理念在黄河水资源保护立法中的应用探析[J]. *环境保护*, 2020, 48(增刊1): 47-49. DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.zl.008](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.zl.008).
- [7] 张欣, 张保祥, 李冰, 等. 基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 95-106. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0011](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0011).
- [8] 张志旭, 宋孝玉, 刘晓迪, 等. 咸阳市用水量变化驱动效应与节水评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(6): 73-79, 87. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2020.06.12](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2020.06.12).
- [9] 孙晓文, 陈松峰, 何菡丹. 基于AHP的重点监控用水单位节水水平评价[J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(9): 3-10. DOI: [10.16616/j.cnki.10-1326/TV.202209.02](https://doi.org/10.16616/j.cnki.10-1326/TV.202209.02).
- [10] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 18-25. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.003](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.003).
- [11] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7652.2015.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7652.2015.06.013).
- [12] 邓铭江. 旱区水资源集约利用内涵探析[J]. *中国水利*, 2021(14): 8-11, 14. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2021.14.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2021.14.010).
- [13] LI J X, SHEN R L, LI J R, et al. Assessment of water-saving status of civil buildings in Jiangsu Province based on AHP method[C]. *ICEMEE2020(VOL. 2)*, 2020: 155-160. DOI: [10.1088/1755-1315/508/1/012101](https://doi.org/10.1088/1755-1315/508/1/012101).
- [14] MAO J S, MAO J R, XU R G, et al. Study on regional water-saving evaluation system based on extension evaluation method[J]. *Earth and Environmental Science*, 2020, 510(3): 032008. DOI: [10.1088/1755-1315/510/3/032008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/510/3/032008).
- [15] ZHAO L, ZHANG L L, CUI N B, et al. The evaluation of regional water-saving irrigation development level in humid regions of southern China[J]. *Water*, 2019(11): 172-180. DOI: [10.3390/w11010172](https://doi.org/10.3390/w11010172).
- [16] ZHANG X Q, LIANG T Y. Comprehensive evaluation of urban water-saving based on AHP-TOPSIS[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021: 202-213. DOI: [10.5004/dwt.2021.26728](https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26728).
- [17] 张强. 浅谈黄河流域生态保护和黄河水资源节约集约利用[J]. *皮革制作与环保科技*, 2022, 3(16): 173-174, 183. DOI: [10.20025/j.cnki.CN10-1679.2022-16-59](https://doi.org/10.20025/j.cnki.CN10-1679.2022-16-59).
- [18] 夏军, 刘柏君, 程丹东. 黄河水安全与流域高质量发展思路探讨[J]. *人民黄河*, 2021, 43(10): 11-16. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.003).
- [19] 谢维维, 马忠. 黄河流域9个省(区)虚拟水流动格局及趋势研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(10): 78-83. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.10.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.10.015).
- [20] 袁磊, 韩双宝, 李甫成, 等. 黄河流域灌溉发展演变及对地下水资源的影响[J]. *人民黄河*, 2022, 44(4): 80-84. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.04.016).
- [21] 党丽娟. 黄河流域水资源开发利用分析与评价[J]. *水资源开发与管理*, 2020(7): 33-40. DOI: [10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2020.07.07](https://doi.org/10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2020.07.07).
- [22] 康泽璇, 王芳, 刘扬, 等. 基于IHA-RVA法的大通河上中游水文节律变化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1065-1075. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0105](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0105).
- [23] 曾浩, 申俊, 江婧. 长江经济带资源环境承载力评价及时空格局演变研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 89-96. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0063](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0063).
- [24] 傅琳琳, 毛晓红, 毛小报, 等. 浙江省2013—2018年

- 粮食综合生产能力评价[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(9): 1748-1758. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1524.2021.09.19](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1524.2021.09.19).
- [25] 李俊杰, 程婉静, 梁媚, 等. 基于熵值-层次分析法的中国现代煤化工行业可持续发展综合评价[J]. *化工进展*, 2020, 39(4): 10. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1195](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1195).
- [26] 杨静, 荆平, 高蝶, 等. 京津冀城市群水资源循环经济发展的障碍因子分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020(10): 131-136. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2020.10.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2020.10.023).
- [27] 张亚青, 王相, 孟凡荣, 等. 基于熵值和层次分析法的VOCs处理技术综合评价[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6): 10. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0298](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0298).
- [28] XU W J, ZHANG X P, CUI Y J, et al. Study on comprehensive evaluation of urban water resource vulnerability[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 4149. DOI: [10.3390/SU14074149](https://doi.org/10.3390/SU14074149).
- [29] 王逸可, 方国华, 张钰, 等. 基于改进模糊综合评价的河流型水源地风险评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 670-681. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0069](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0069).
- [30] REN L, GAO J C, SONG S P. Evaluation of water resources carrying capacity in Guiyang City[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2155. DOI: [10.3390/W13162155](https://doi.org/10.3390/W13162155).

Evaluation of conservation and intensive utilization capacity of water resources in Yellow River basin

LI Yuehong, JIANG Xiaohui, ZHANG Lin

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Water is the source of life and an important cornerstone of ecological and economic development. The economic growth rate and urbanization construction process on both sides of the Yellow River are closely related to the utilization of water resources in the Yellow River basin, and the increase in the demand for water resources from the Yellow River in China's industry, high development utilization rate, and prominent contradiction between supply and demand, agriculture and life have seriously aggravated the water shortage problems. In 2019, the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin becomes a national strategy to improve the economical and intensive use of water resources in the basin. The evaluation of water resource utilization capacity is an indispensable part of promoting the construction of a comprehensive water-saving society, so the evaluation of water resource conservation and intensive utilization capacity in the basin is particularly important.

According to the current situation of water resources in the Yellow River basin and combined with the implementation plan for the conservation and intensive use of water resources in the basin, the per capita water consumption, the per capita water resources, and the surface water development and utilization rate was selected as water resources indicators. Water consumption of 10,000 yuan of industrial added value, water consumption of 10,000 yuan of GDP, and leakage rate of urban water supply network was selected as socio-economic indicators. The total wastewater discharge, the water reuse rate, and the urban sewage treatment rate were selected as ecological and environmental indicators. A total of 17 indicators were used to build an evaluation system for the capacity of water resources conservation and intensive use in the Yellow River basin. The principal component analysis method and the entropy value method were used to calculate the capacity of water resources use and its change trend in the past ten years (from 2010 to 2020) in nine provinces and regions.

The calculation results show that the water conservation and intensive use capacity of the nine provinces and regions in the Yellow River basin decreased first and then increased. Among them, the water-saving capacity of Qinghai Province and Inner Mongolia Autonomous Region is fluctuating and increasing. Sichuan, Shaanxi, Shandong, and Henan all show a trend of decreasing and then increasing. The water resources utilization capacity of Gansu, Shanxi, and Ningxia provinces has been in the stage of increasing.

In recent years, the water resources utilization capacity of the nine provinces in the Yellow River basin has been on the increase side, indicating that the policies and measures enacted by China to build a water-saving society and

to protect the ecology and quality development of the basin have been effective, but there are still problems such as low utilization rates, widespread waste, and serious soil erosion. Building a comprehensive water-saving society still requires measures and in-depth implementation of the decisions of the Party Central Committee to sustain the long-term survival of mankind. For example, improving the efficiency of water resources use, adjusting the industrial structure, optimizing the allocation of water resources, improving water rights and prices and the water market, establishing an early warning mechanism for evaluating the carrying capacity of water resources, and strengthening water resources supervision capacity. The study provides a basis for promoting the transformation of water use in the Yellow River basin from crude and inefficient to economical and intensive.

Key words: water resource; water saving; intensive utilization; principal component analysis; entropy method; Yellow River basin

