

黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析

白芳芳^{1,2}, 齐学斌^{1,3}, 乔冬梅¹, 韩洋^{1,2}, 赵宇龙^{1,2}, 陆红飞¹

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002;2.中国农业科学院研究生院,北京 100081;3.中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测测试站,河南 新乡 453002)

摘要: 为了解黄河流域九省区农业水资源利用现状,明晰提高九省区农业水资源利用效率障碍因子。基于熵权 Topsis 模型,以黄河流域九省区为评价单元,从资源利用效率、经济效益、生态效益准则层中选取 14 个评价指标,构建九省区的农业水资源利用效率的综合评价指标体系,评价黄河流域九省区 2004 年、2009 年、2014 年、2019 年的农业水资源利用效率,并对九省区的农业水资源利用效率进行障碍因子诊断。结果表明:(1)2004—2019 年,青海、内蒙古、河南、山东的农业水资源利用效率较高,陕西、甘肃、山西的农业水资源利用效率相对较低。(2)2004—2019 年,各省区的农业水资源利用效率整体提高,且九省区之间的农业水资源利用效率差异逐渐减小。(3)地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)是山西、山东、河南、四川、陕西、甘肃、宁夏的主要障碍因子,人均生态环境用水量(A13)、农业水资源利用效率系数(A4)是青海的主要障碍因子,地均水资源占有量(A6)、用水的农业生产总值(A9)是内蒙古主要障碍因子。因此,九省区水资源禀赋及生态环境用水量是影响其农业水资源利用效率的主要因素。

关键词: 黄河流域; 熵权 TOPSIS 模型; 农业水资源利用效率; 障碍因子

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0146-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.021

Evaluation of Agricultural Water Resource Utilization Efficiency and Obstacle Factor Diagnoses in Nine Provinces of the Yellow River Basin

BAI Fangfang^{1,2}, QI Xuebin^{1,3}, QIAO Dongmei¹, HAN Yang^{1,2}, ZHAO Yulong^{1,2}, LU Hongfei¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002)

Abstract: The purpose of this paper is to understand the present situation of agricultural water resources utilization in nine provinces of the Yellow River Basin and to clarify the obstacles to improve agricultural water resources utilization efficiency. Based on entropy weight Topsis model, 9 provinces of the Yellow River Basin were taken as evaluation units, and 14 evaluation indexes were selected from resource utilization efficiency, economic benefit and ecological benefit to construct a comprehensive evaluation index system of agricultural water resources utilization efficiency. The agricultural water resource utilization efficiency was evaluated by the comprehensive evaluation index system and its obstacle factors were diagnosed in 2004, 2009, 2014 and 2019. The results showed that: (1) From 2004 to 2019, the agricultural water resource utilization efficiency in Qinghai, Inner Mongolia, Henan, and Shandong was relatively high, while that in Shaanxi, Gansu, and Shanxi was relatively low. (2) From 2004 to 2019, the agricultural water resources utilization efficiency of the nine provinces increased on the whole, and the difference of agricultural water resources utilization efficiency among the nine provinces gradually decreased. (3) The main obstacle factors of Shanxi, Shandong, Henan, Sichuan, Shaanxi, Gansu, and Ningxia were per capita water resources (A6) and per capita ecological water consumption (A13); per capita ecological water consumption (A13) and agricultural water resource utilization efficiency (A4) were the main obstacles in Qinghai. Average water resources occupancy (A6) and total agricultural production value (A9) were the main obstacles in Inner Mongolia. Therefore,

收稿日期: 2021-10-25

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研项目(FIR120210102);河南省科技攻关项目(212102110233);国家自然科学基金项目(51879268, 51679241);国家重点研发计划项目(2017YFD0800605)

第一作者: 白芳芳(1986—),女,助理研究员,博士研究生,主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: baiffang0921@163.com

通信作者: 乔冬梅(1978—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: qiaodongmei78@126.com

water resources endowment and ecological water consumption are the main factors affect the agricultural water resources utilization efficiency in the nine provinces.

Keywords: Yellow River Basin; TOPSIS model; agricultural water resource utilization efficiency; obstacle factor

近年来,沿黄省区生态环境严重恶化,农田灌溉受到严重威胁,农业正常生产无法得到保障^[1]。此外,灌溉过程中农业用水浪费进一步加剧了灌溉用水不足问题。因此,水资源是黄河流域九省区农业高质量发展强有力的保障。提高农业水资源利用效率是解决农业水资源短缺的重要途径之一,故对黄河流域九省区农业水资源利用效率进行评价并确定其障碍因子,是保障农业水资源可持续发展和粮食安全的必要前提。

目前,农业水资源利用效率的评价指标和评价方法主要从农业水资源利用效率、经济效益和生态效益的方面选取评价指标^[2-4]。国内外对资源利用效率评价的理论与方法比较成熟^[5-6]。以往评价研究^[7]中多用单项指标评价,忽略了农业水资源多层次、多目标特性所带来的指标不相容和高维问题。综合指数法、层次分析法、模糊综合评判法等方法在赋予指标权重时多带有人为因素,并缺乏各指标对总体目标贡献和方向的结构评价^[8]。投影寻踪方法(TOPSIS)^[9]的核心是将多指标问题转换为易进行分析的单指标问题,依据评价指标自身数据特征进行综合评价。投影寻踪法及其与其他优化方法结合在水资源评价领域应用较多^[10-12]。

对黄河流域农业水资源的研究^[13-15]主要集中在水资源承载力、水资源价值、存在问题及技术对策等方面。左其亭等^[13]研究表明,九省区水资源承载力呈增大趋势,水资源承载力提升趋势最为明显的是河南、山东、内蒙古;九省区水资源承载力空间差异性明显,不同省区的水资源承载力障碍因子差异明显。张慧等^[16]研究表明,综合农业水资源利用效率较高的省份为山西、山东、河南与陕西,处于中等水平的省份为甘肃、四川与内蒙古,而宁夏的农业水资源利用率明显低下。张永凯等^[17]研究表明,2009—2017年,黄河流域水资源利用效率呈“先上升、后下降、且波动大”的特点,水资源利用效率整体有所提升,且技术水平是影响其利用效率的关键因素。

综上,针对黄河流域农业水资源利用效率综合评价的研究较少,且并未从时间和空间上分析黄河流域农业水资源利用效率发展趋势及空间分布特征。农业水资源是黄河流域水资源可持续发展、生态保护和粮食安全的前提和基础,而农业水资源利用效率评价及障碍因子诊断是提高农业水资源利用效率的关键环节。鉴于此,基于熵权 TOPSIS 模型,以黄河流域九省区为评价单

元,依据农业水资源高效利用的内涵和特点,来构建黄河流域九省区的农业水资源利用效率评价指标体系和评价方法,评价 2004 年、2009 年、2014 年、2019 年黄河流域九省区农业水资源利用效率,并对评价结果进行农业用水障碍因子诊断,为黄河流域高质量发展和该区农业水资源高效利用与优化配置提供决策支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东九省区,流域多年平均降水量 464 mm,总体呈“南多北少,东多西少”的态势,降水量年内分配极不均衡,6—9 月降水量占全年的 45%~60%。沿黄九省区粮食播种面积占全国的 36.03%,粮食产量占全国的 35.31%^[18],多年(2009—2019 年)平均水资源总量、平均地表水资源量、地下水资源量分别为 $5\ 143.7 \times 10^8$, $4\ 078.4 \times 10^8$, $1\ 898.0 \times 10^8$ m^3 。多年平均供水量、地表水供水量、地下水供水量分别为 $1\ 258.8 \times 10^8$, 819.2×10^8 , 417.4×10^8 m^3 。多年平均农业用水量、生态用水量分别为 831.1×10^8 , 53.9×10^8 m^3 ,分别占水资源总量的 66.0%,4.3%。各省区农田灌溉水有效利用系数为 0.477~0.643,耕地实际灌溉均用水量 157~706 $m^3/667$ m^2 ,万元国内生产总值用水量为 31.7~186.5 m^3 ,九省区资源环境禀赋及经济发展水平差异较大。水资源供需矛盾尖锐,水质严重恶化,生态环境问题突出,农业水资源利用效率低下是九省区面临的共性问题,因此,提高九省区农业水资源利用效率是黄河流域高质量发展的重要保障。

1.2 研究方法

1.2.1 评价指标体系构建 参考前人^[19]在农业水资源评价时选取的评价指标体系,结合黄河流域九省区水资源禀赋条件、生态环境状况、经济和社会发展水平,根据农业水资源内涵及相关的研究理论,综合熵权 TOPSIS 模型特点,从资源利用效率、经济效益、生态效益中共选取 14 个评价指标,构成了九省区农业水资源利用效率的综合评价指标体系(表 1)。

1.2.2 熵权 TOPSIS 模型 熵权 TOPSIS 法核心在于 TOPSIS,首先,利用熵权法计算得到各评价指标的权重,并且将评价指标数据与权重相乘,得到新的数据,利用新数据进行 TOPSIS 分析。TOPSIS^[20]即逼近理想解排序法,是一种基于多指标进行综合评价的客观评价方法,其基本原理是通过确定各指标评价

向量与评价最优方案和最劣方案间的相对距离,然后,基于该相对距离大小对评价对象进行排序评价。该方

法计算过程灵活、评价结果合理,在农业水资源综合评价中应用较多^[12]。主要计算步骤为:

表 1 黄河流域九省(区)农业水资源利用效率评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标计算式	属性	
农业水资源利用效率	资源利用效率	降水效率 A1/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	单位面积粮食产量/年降水量	正向	
		供水模数 A2/(万 m ³ ·km ⁻²)	供水量/区域面积	逆向	
		农业用水比例 A3/%	农业用水量/总用水量	逆向	
		农业水资源利用效率系数 A4/(kg·m ⁻³)	粮食产量/农业用水量	正向	
		农田灌溉用水量 A5/(m ³ ·hm ⁻²)	农田灌溉用水量/耕地实灌面积	逆向	
		地均水资源占有量 A6/(m ³ ·hm ⁻²)	水资源总量/灌溉面积	正向	
		有效灌溉率 A7/%	有效灌溉面积/总耕地面积	正向	
	经济效益	万元 GDP 用水量 A8/m ³	总用水量/GDP 总量	逆向	
		用水的农业生产总值 A9/(元·m ⁻³)	农业生产总值/农业用水量	正向	
		农民家庭平均每人纯收入 A10/(元·人 ⁻¹)	农民年收入总值/农民人口总数	正向	
		单位耕地面积粮食产量 A11/(t·hm ⁻²)	粮食产量/耕地面积	正向	
		生态环境用水比例 A12/%	生态用水量/总用水量	正向	
		生态效益	人均生态环境用水量 A13/(m ³ ·人 ⁻¹)	生态用水量/总人口	正向
			单位面积化肥施用量 A14/(kg·hm ⁻²)	总化肥施用量/总耕地面积	逆向

注:指标属性中正向表示数值越大越好;逆向表示数值越小越好。

(1)评价指标归一化处理。正向指标归一化处理公式:

$$x(i, j) = (x^*(i, j) - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j))$$

逆向指标归一化处理公式:

$$x(i, j) = (x_{\max}(j) - x^*(i, j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j))$$

式中: $x_{\min}(j)$ 、 $x_{\max}(j)$ 分别为样本集中第 j 个指标的最小值和最大值。

$$Z = (r(i, j))_{m \times n}$$

式中: $r(i, j) = \omega_j \times x(i, j)$; ω_j 为第 j 个指标权重。

(2)评价指标归一化后的最优、最劣向量分别为:

$$Z^+ = (Z_{\max 1}, Z_{\max 2}, \dots, Z_{\max m})$$

$$Z^- = (Z_{\min 1}, Z_{\min 2}, \dots, Z_{\min m})$$

第 i 个评价对象与最优、最劣方案的距离分别为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\max j} - Z_{ij})^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\min j} - Z_{ij})^2}$$

第 i 个评价对象与最优方案的接近程度 C_i 为:

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$$

式中:贴适度 C_i 取值 $0 \sim 1$, C_i 值越大则评价对象水平越高, C_i 值越低则表示评价对象水平越低;其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

1.2.3 障碍度模型 运用障碍度模型进行障碍因子诊断有利于识别黄河流域各省(区)农业水资源利用效率的主要障碍因子。具体计算步骤^[21]为:

(1)评价指标的因子贡献度,即单个因素对总目标的贡献程度,用单个因素的权重 ω_j 表示。

(2)计算指标偏离度(I_{ij})。

$$I_{ij} = 1 - x_{ij}$$

(3)计算各评价指标的障碍度(P_{ij})。

$$P_{ij} = I_{ij} \cdot \omega_j / \sum_{j=1}^n (I_{ij} \cdot \omega_j)$$

1.2.4 数据来源 选取 14 个代表性指标,对九省区 2004 年、2009 年、2014 年、2019 年的农业水资源利用效率进行评价。数据主要来源于《中国统计年鉴》^[22]、《中国水利统计年鉴》^[23]、《中国水资源公报》^[24]、《中国国土资源公报》^[25]等。

2 结果与分析

2.1 黄河流域九省区各评价指标权重

根据黄河流域九省区各评价指标的统计数据,采用熵权法确定各指标在不同年份的熵值和权重(表 2),指标的熵值越大,说明该项指标提供的信息越多,从而权重值越大^[26]。由表 2 可知,2004 年,地均水资源占有量权重 A6(0.198)远大于其他指标的权重,说明其是影响该年农业水资源利用效率的主要因素。2009 年、2014 年、2019 年,地均水资源占有量 A6、人均生态环境用水量 A13 权重较大,故二者是影响 2009 年、2014 年、2019 年农业水资源利用效率的主要因素,且二者的权重整体呈上升趋势。综上分析可知,黄河流域各省(区)的水土资源匹配度是影响该区农业水资源利用效率的基本因素。万元 GDP 用水量在 4 个年份中权重值均最小,说明其是影响九省区农业水资源利用效率的潜力因素。

2.2 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价结果

由表 3 可知,2004 年,青海、山东、河南农业水资源利用效率的贴适度 C_i 值较大,说明这 3 个省份的农业水资源利用效率较高;2009 年农业水资源利用效率较高的省份为青海、内蒙古、四川;2014 年农业水资源利用效率较高的省份为内蒙古、青海、宁夏;2019 年农业水资源利

用效率较高的省份为青海、内蒙古、河南。2004年,宁夏、陕西、甘肃省农业水资源利用效率的贴近度 C_i 值较低,说明这3个省份的农业水资源利用效率较低;2009年农业水资源利用效率较低的省份为甘肃、山西、陕西;2014年农业水资源利用效率较低的省份为四川、陕西、甘肃;2019年农业水资源利用效率较低的省份为陕西、宁夏、甘肃。整体上看,青海、内蒙古、山东、河南农业水资源利用效率常年较高,陕西、甘肃、山西农业水资源利用效率常年较低。

表2 各评价年份指标权重

指标	2004年	2009年	2014年	2019年
降水效率 A1	0.086	0.086	0.066	0.060
供水模数 A2	0.057	0.074	0.061	0.073
农业用水比例 A3	0.041	0.034	0.043	0.043
农业水资源利用效率系数 A4	0.075	0.068	0.061	0.071
农田灌溉用水量 A5	0.046	0.035	0.039	0.032
地均水资源占有量 A6	0.198	0.204	0.204	0.231
有效灌溉率 A7	0.077	0.047	0.047	0.069
万元 GDP 用水量 A8	0.026	0.029	0.027	0.033
用水的农业生产总值 A9	0.068	0.068	0.058	0.068
农民家庭平均每人纯收入 A10	0.076	0.055	0.039	0.042
单位耕地面积粮食产量 A11	0.082	0.067	0.056	0.057
生态环境用水比例 A12	0.053	0.050	0.091	0.064
人均生态环境用水量 A13	0.076	0.113	0.176	0.111
单位面积化肥施用量 A14	0.039	0.069	0.033	0.049

表3 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价结果

省份	2004年		2009年		2014年		2019年	
	C_i	排序	C_i	排序	C_i	排序	C_i	排序
山西	0.334	6	0.306	8	0.286	6	0.287	6
内蒙古	0.379	5	0.447	2	0.516	1	0.413	2
山东	0.423	2	0.345	5	0.296	4	0.345	4
河南	0.396	3	0.338	6	0.293	5	0.358	3
四川	0.394	4	0.355	3	0.266	7	0.306	5
陕西	0.284	8	0.256	9	0.231	8	0.280	7
甘肃	0.244	9	0.317	7	0.226	9	0.246	9
青海	0.577	1	0.618	1	0.490	2	0.604	1
宁夏	0.319	7	0.347	4	0.335	3	0.253	8

将黄河流域九省区的农业水资源利用效率评价指标分别按省区进行熵权 TOPSIS 分析,以 2004 年、2009 年、2014 年、2019 年为评价对象,评价结果 C_i 值见图 1。由图 1 可知,2004—2019 年,九省区农业水资源利用效率整体上呈增加态势,说明农业生产过程中各省区的水资源利用情况趋于合理;山东、甘肃、宁夏的农业水资源利用效率 C_i 值呈逐年增加态势。2004—2009 年,甘肃省 C_i 值增幅最大,从 0.179 增加到了 0.345,增幅高达 92.7%,主要是甘肃省的有效灌溉率(A7)、用水的农业生产总值(A9)、农民家庭平均每人纯收入(A10)、人均生态环境用水量(A13)分别提高了 12 414%,83%,61%,1 316%,同时,万元

GDP 用水量(A8)降低了 54%;2009—2014 年,内蒙古自治区 C_i 值增幅最大,增幅高达 79.0%,主要是因为 2014 年内蒙古自治区降水量增加了 20.9%,属平水年,水资源总量增加了 42.2%,用水的农业生产总值(A9)、农民家庭平均每人纯收入(A10)、单位耕地面积粮食产量 A11、人均生态环境用水量(A13)分别增加了 48.4%,50.5%,22.6%,45.9%,同时万元 GDP 用水量(A8)、农田灌溉用水量(A5)降低了 81.7%,10.6%,说明内蒙古农业水资源利用状况逐渐好转,粮食产量增加、农田灌溉用水量减少、农民收入增加、生态环境用水量增加,故农业水资源利用效率提升;山西、河南 C_i 值增幅紧随其后,增幅分别为 77.9%,75.1%。2014—2019 年,陕西省农业水资源利用效率增幅最大为 57.2%,这主要是因为 2019 年陕西省降水量增加了 8.3%,属丰水年,水资源总量增加了 40.9%,其中,地表水资源量增加了 44.1%;同时,陕西省 GDP 总量增加了 45.9%,万元 GDP 用水量(A8)降低了 29.3%;人均生态环境用水量(A13)增加了 70.92%,故陕西省的农业水资源利用效率提高较多。2004—2009 年,山西、内蒙古、河南、四川、陕西、青海的农业水资源利用效率 C_i 值出现了负增长,增幅分别为 -18.1%, -0.6%, -18.9%, -0.5%, -12.5%, -9.1%;2014—2019 年,山西省的农业水资源利用效率 C_i 值略降,增幅为 -3.3%。2004 年、2009 年、2014 年、2019 年九省区的农业水资源利用效率 C_i 值的标准差分别为 0.078, 0.054, 0.063, 0.062,这说明九省区的农业水资源利用效率相对差异整体呈减小趋势。

2.3 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价指标障碍因子诊断

由表 4 可知,九省区农业水资源利用效率障碍因子排名前 6 的为地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)、降水效率(A1)、单位耕地面积粮食产量(A11)、农民家庭平均每人纯收入(A10)、有效灌溉率(A7)。山东、河南、四川、陕西排名前 2 的障碍因子均为地均水资源占有量(A6)、降水效率(A1),分别占总障碍度的 52.289%,53.022%,40.506%,39.122%。内蒙古、甘肃排名前 2 的障碍因子均为地均水资源占有量(A6)、单位耕地面积粮食产量(A11),说明这 2 个省份的地均水资源占有量较少,同时单位面积粮食产量有待提高;山西排名前 2 的障碍因子为地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13),占总障碍度的 43.702%,主要是山西的地均水资源占有量较少,人均生态环境用水量偏低;宁夏排名前 2 的障碍因子为地均水资源占有量(A6)、农业水资源利用效率系数(A4),占总障碍度的 37.192%,说明宁夏的地均水资源占有量较少,农

业水资源利用效率系数较低;青海排名前 2 的障碍因子为农业水资源利用效率系数(A4)、农民家庭平均每人纯收入(A10),占总障碍度的 29.323%,说明青海的农业水资源利用效率系数较低,农民家庭收入有待提高。万元 GDP 用水量(A8)的农业用水障碍度较低,是 2004 年山西、河南、四川、陕西农业用水潜力影响因子。内蒙古降水效率(A1)的障碍度是 0,故对其农业水资源利用效率无影响。有效灌溉率(A7)、万元 GDP 用水量(A8)、农民家庭平均每人纯收入(A10)、单位耕地面积粮食产量(A11)对山东农

业水资源利用效率无影响。农业水资源利用效率系数(A4)、人均农业用水量(A5)、用水的农业生产总值(A9)、生态环境用水比例(A12)对河南省的农业水资源利用效率无影响。四川的农业用水比例(A3)的障碍度为 0,说明四川省的用水比例合理,对其农业水资源利用效率无影响。供水模数(A2)、地均水资源占有量(A6)、单位面积化肥施用量(A14)对青海省的农业水资源利用效率无影响。降水效率(A1)、人均生态环境用水量(A13)对宁夏的农业水资源利用效率无影响。

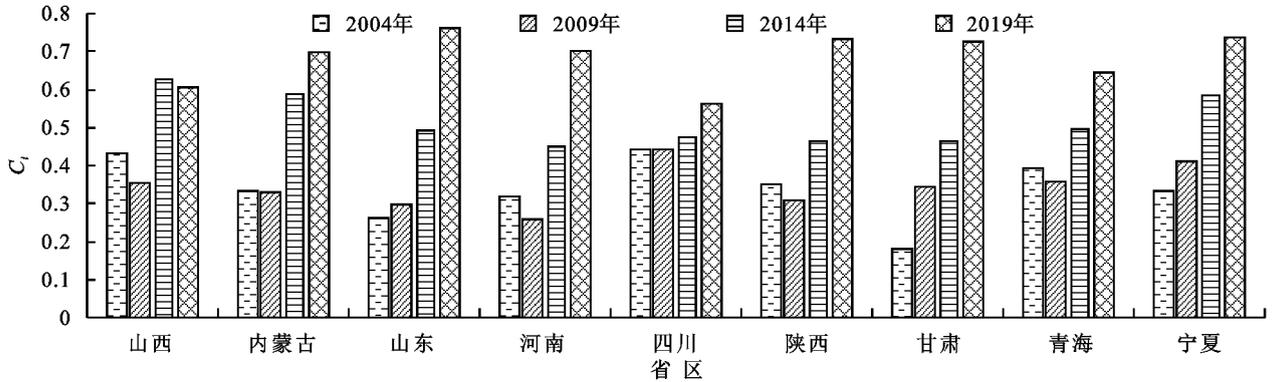


图 1 2004—2019 年黄河流域各省区农业水资源利用效率 C_i 值

表 4 2004 年黄河流域各省区农业水资源利用效率评价指标障碍度

省份	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
山西	11.170	2.170	0.253	0.772	0.235	31.687	11.156	0.130	3.795	6.869	10.968	6.307	12.015	2.474
内蒙古	0	0.750	5.949	10.344	2.438	32.659	0.737	1.504	10.020	7.127	11.760	7.617	8.216	0.880
山东	13.580	10.844	3.294	5.636	0.234	38.708	0	0	0.696	0	0	6.580	12.689	7.738
河南	15.465	9.279	1.005	0	0	37.557	8.262	0.304	0	8.463	5.950	0	7.933	5.782
四川	15.291	2.864	0	3.633	2.214	25.215	13.691	0.573	4.824	8.070	4.842	5.781	10.815	2.187
陕西	12.122	1.946	1.402	4.829	1.125	27.000	8.103	0.318	3.811	10.978	11.287	3.885	9.003	4.192
甘肃	3.718	1.281	3.265	8.247	3.371	24.190	9.840	1.452	6.935	9.713	10.479	6.773	9.713	1.023
青海	5.805	0	3.467	15.047	8.603	0	6.008	1.806	13.031	14.276	13.597	8.285	10.076	0
宁夏	0.776	7.772	5.591	10.193	6.272	26.999	5.833	3.545	9.272	7.434	9.002	5.453	0	1.857
均值	8.659	4.101	2.692	6.522	2.721	27.113	7.070	1.070	5.820	8.103	8.654	5.631	8.940	2.904

由表 5 可知,2019 年,九省区农业水资源利用效率障碍因子排名前 6 的为地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)、农业水资源利用效率系数(A4)、有效灌溉率(A7)、用水的农业生产总值(A9)、生态环境用水比例(A12)。山西、山东、河南、四川、陕西、甘肃、宁夏排名前 2 的障碍因子均为地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13),分别占总障碍度的 51.830%,59.883%,58.519%,44.060%,44.856%,42.639%,39.670%;内蒙古排名前 2 的障碍因子为地均水资源占有量(A6)、用水的农业生产总值(A9),占总障碍度的 58.295%,说明内蒙古的地均水资源占有量较少,用水的农业生产总值较低;青海排名前 2 的农业水资源利用效率障碍因子为人均生态环境用水量(A13)、农业水资源利用效率系数(A4),占总障碍度的 32.978%,说明其人均生态环

境用水量相对较低,农业水资源利用效率系数有待提高。万元 GDP 用水量(A8)、人均农业用水量(A5)障碍度较低,分别为 0.430,0.291,是 2019 年山西省农业用水潜力影响因子。降水效率(A1)、生态环境用水比例(A12)、人均生态环境用水量(A13)的障碍度是 0,对内蒙古 2019 年的农业水资源利用效率无影响。有效灌溉率(A7)、万元 GDP 用水量(A8)、农民家庭平均每人纯收入(A10)、单位耕地面积粮食产量(A11)对山东省 2019 年的农业水资源利用效率无影响。农业用水比例(A3)、农业水资源利用效率系数(A4)、人均农业用水量(A5)、用水的农业生产总值(A9)对河南省的农业水资源利用效率无影响。万元 GDP 用水量(A8)障碍度较低为 0.721,是四川农业用水潜力影响因子。万元 GDP 用水量(A8)、用水的农业生产总值(A9)障碍度较低为 0.126,0.005,是陕西 2019 年农业用水潜力影

响因子。供水模数(A2)、地均水资源占有量(A6)、单位面积化肥施用量(A14)对青海2019年的农业水资源利用效率无影响。有效灌溉率(A7)的障碍度是0.769,是宁夏农业水资源利用潜力影响因子。对比表4、表5可知,地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)(内蒙古除外)、供水模数(A2)、单位

面积化肥施用量(A14)(山东除外)、万元GDP用水量(A8)(陕西除外)对黄河流域大部分省区的农业水资源利用效率障碍度增加;农民家庭平均每人纯收入(A10)、单位耕地面积粮食产量(A11)对各省份的农业水资源利用效率障碍度降低,二者对山东省的农业水资源利用效率无影响。

表5 2019年黄河流域各省区农业水资源利用效率评价指标障碍度

省份	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
山西	6.573	3.752	1.265	5.365	0.291	35.739	3.100	0.430	6.292	3.924	7.039	6.178	16.090	3.961
内蒙古	0	1.377	5.716	8.548	1.372	46.406	9.805	3.487	11.889	2.654	5.161	0	0	3.585
山东	5.846	13.286	2.327	4.238	0.127	41.909	0	0	2.819	0	0	5.586	17.974	5.888
河南	5.953	13.500	0	0	0	42.729	8.648	0.478	0	2.496	1.309	0.904	15.790	8.193
四川	8.730	3.791	1.897	7.000	1.822	27.374	10.372	0.721	4.198	2.407	3.083	9.621	16.686	2.298
陕西	8.477	3.040	1.478	6.640	1.071	29.880	9.408	0.126	0.005	3.970	7.083	6.924	14.977	6.923
甘肃	3.972	1.562	4.699	8.111	2.285	29.714	7.143	2.730	6.958	5.697	5.707	6.753	12.925	1.744
青海	8.028	0.000	5.352	14.380	3.790	0.000	7.622	2.444	12.341	6.553	11.545	9.348	18.598	0
宁夏	1.818	8.886	5.589	9.098	4.159	30.026	0.769	4.289	8.839	3.295	2.829	7.028	9.644	3.730
均值	5.488	5.466	3.147	7.042	1.658	31.531	6.318	1.634	5.927	3.444	4.862	5.816	13.631	4.036

3 讨论

提高黄河流域农业水资源利用效率是黄河流域生态环境保护和高质量发展的重要保障。本研究表明,2004—2019年,山西、内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海、宁夏的农业水资源利用效率 C_i 值均不同程度增加,且九省区的农业水资源利用效率差异整体减小,主要因为经济效益和生态效益部分指标提升较多,农田灌溉水利用效率提高。这与左其亭等^[13]对黄河流域九省区水资源承载力研究结论相符。评价指标的选取对农业水资源利用效率至关重要,本研究中青海省、内蒙古的农业水资源利用效率较高,山东、河南、四川处于中等水平,而陕西、甘肃、宁夏的农业水资源利用效率较低,这与张慧等^[16]研究略有差异,主要因为张慧等^[16]从资源利用效率和经济效率方面选取了5个评价指标,而本文添加了生态效益、经济效益准则层,共选取了14个评价指标,评价因素更全面。

从资源利用效率准则层看,排名靠前的是青海、宁夏、内蒙古、甘肃,排名靠后的是四川、山东、山西、河南、陕西。青海资源利用效率较高,是因为其地均水资源占有量、降水效率较高,但农业用水比例偏高;宁夏降水效率和有效灌溉率较高,但供水模数、农田灌溉用水量、农业用水比例均较高,有待调整;内蒙古的降水效率较高、供水模数较低,但农业用水比例偏高;甘肃的农业用水比例、农田灌溉用水量偏高,农业水资源利用效率系数有待提升;四川的降水效率、农业水资源利用效率系数、有效灌溉率均较低;山东、河南的农业水资源利用效率系数较高,农田灌溉用水量较低,但地均水资源占有量远低于其他省份,供水模数较高,故资

源利用效率较低。山西农田灌溉水资源利用效率均较高,主要是因为地均水资源占有量较低,故资源利用效率偏低;陕西的降水效率、有效灌溉率、农业水资源利用效率系数均偏低,农田灌溉用水量略高。

从经济效益准则层看,排名靠前的分别为河南、山东、四川、陕西,排名靠后的为内蒙古、山西、宁夏、甘肃、青海,前者主要是因为经济水平整体较高,农业用水产值、农民收入均较高,后者主要是因为受社会发展水平限制,农民收入及农业用水产值均较低。其中,内蒙古、宁夏的万元GDP用水量均较高,且用水的农业生产总值、单位面积粮食产量较低;山西主要是因为单位面积粮食产量、用水的农业生产总值均较低;甘肃主要是因为万元GDP用水量偏高,用水的农业生产总值、单位面积粮食产量、农民家庭平均每人纯收入均较低。

从生态效益准则层看,排名靠前的分别为内蒙古、河南、青海、宁夏,排名靠后的为陕西、四川、山西。内蒙古的生态效益较高主要因为生态环境用水比例及人均生态环境用水量均较高;河南的生态环境用水比例较高,但人均生态环境用水量偏低,且单位面积化肥施用量偏高;青海的单位面积化肥施用量最低,但生态环境用水比例及人均生态环境用水量均偏低;宁夏的人均生态环境用水量较高,但生态环境用水比例较低,单位面积化肥施用量略高;陕西、四川、山西的生态环境效益较低主要因为生态环境用水比例及人均生态环境用水量均较低,且单位面积化肥施用量偏高。

综上可知,九省区农业水资源利用效率呈现出空间差异的原因各异,各因素在九省区障碍度差异显著。本研究中地均水资源占有量(A6)、人均生态环

境用水量(A13)是九省区主要障碍因子。因此,提高九省区农业水资源利用效率关键在于通过合理调节引黄水量,调节各省区水资源量,增加生态环境用水量,提高农业产值和农田灌溉水有效利用系数。

4 结论

(1)2004—2019年,青海、内蒙古、河南、山东的农业水资源利用效率较高,陕西、甘肃、山西的农业水资源利用效率相对较低。

(2)2004—2019年,黄河流域九省区农业水资源利用效率评价 C_i 值整体上呈增加态势,且九省区之间的农业水资源利用效率差异逐渐减小。

(3)地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)是山西、山东、河南、四川、陕西、甘肃、宁夏的主要障碍因子,人均生态环境用水量(A13)、农业水资源利用效率系数(A4)是青海的主要障碍因子,地均水资源占有量(A6)、用水的农业生产总值(A9)是内蒙古主要障碍因子。

(4)2004—2019年,地均水资源占有量(A6)、人均生态环境用水量(A13)(内蒙古除外)、供水模数(A2)、单位面积化肥施用量(A14)(山东除外)、万元GDP用水量(A8)(陕西除外)对黄河流经大部分省区的农业水资源利用效率障碍度增加;农民家庭平均每人纯收入(A10)、单位耕地面积粮食产量(A11)对各省份的农业水资源利用效率障碍度降低,二者对山东省的农业水资源利用效率无影响。

参考文献:

- [1] 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,2020,18(7):33-40.
- [2] Huang Y J, Huang X K, Xie M, et al. A Study on the effects of regional differences on agricultural water resource utilization efficiency using Super-efficiency SBM model [J].Scientific Reports,2021,11(1):e9953.
- [3] 侯新,刘玉邦,梁川,等.农业水资源高效利用评价指标体系构建及其应用[J].中国农村水利水电,2011(9):8-11.
- [4] 马玉龙.基于指标体系的新疆农业水资源高效利用评价[J].广东水利水电,2018(8):5-7,24.
- [5] Yue Q, Zhang F, Guo P. Optimization-based agricultural water-saving potential analysis in Minqin County, Gansu Province China [J].Water,2018,10(9):e1125.
- [6] 孙才志,吴永杰,刘文新.基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J].水资源保护,2017,33(4):1-8.
- [7] 靳京,吴绍洪,戴尔阜.农业资源利用效率评价方法及其比较[J].资源科学,2005,27(1):146-152.
- [8] Guan X J, Liang S X, Meng Y. Evaluation of water resources comprehensive utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Water Science and Technology Water Supply,2016,16(6):1561-1570.
- [9] Wang Z G, Wang J B, Zhang G P, et al. Evaluation of agricultural extension service for sustainable agricultural development using a hybrid entropy and TOPSIS Method [J].Sustainability,2021,13(1):e347.
- [10] 金菊良,杨通竹,郟建强,等.投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用[J].水利水运工程学报,2020(4):10-16.
- [11] Tu Y, Chen K, Wang H Y, et al. Regional water resources security evaluation based on a hybrid fuzzy BWM-TOPSIS method [J].International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(14):e4987.
- [12] 刘东,徐磊,朱伟峰.基于最优组合赋权和改进 TOPSIS 模型的区域农业水资源恢复力评价[J].东北农业大学学报,2019,50(6):86-96.
- [13] 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.
- [14] 吴泽宁,黄硕俏,狄丹阳,等.黄河流域农业系统水资源价值及其空间分布研究[J].灌溉排水学报,2019,38(12):93-100.
- [15] Wei J X, Lei Y L, Yao H J, et al. Estimation and influencing factors of agricultural water efficiency in the Yellow River Basin, China [J].Journal of Cleaner Production,2021,308:e127249.
- [16] 张慧,刘秋菊,史淑娟.黄河流域农业水资源利用效率综合评估研究[J].气象与环境科学,2015,38(2):72-76.
- [17] 张永凯,孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护,2021,37(4):37-43,50.
- [18] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [19] 刘学智,李王成,赵自阳,等.基于投影寻踪的宁夏农业水资源利用率评价[J].节水灌溉,2017(11):46-51,55.
- [20] 余鹏明,管孝艳,陈俊英.基于 Topsis 方法的北方地区再生水开发利用综合评价[J].灌溉排水学报,2020,39(9):132-137.
- [21] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.河南省农业水资源脆弱性时空特征及障碍度诊断[J].农业现代化研究,2020,41(2):312-320.
- [22] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2004—2020.
- [23] 中华人民共和国水利部.中国水利统计年鉴[M].北京:中国水利水电出版社,2004—2020.
- [24] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报[R].北京:中国水利水电出版社,2004—2020.
- [25] 中华人民共和国自然资源部.中国国土资源公报[R].北京:中国国土资源报社,2004—2020.
- [26] 管新建,梁胜行.基于熵权模型的黄河流域水资源利用效率综合评价[J].中国农村水利水电,2016(11):82-85.