

基于层次分析—熵权法的内蒙古农牧交错带 农业用水水平综合评价

王 腾¹, 李 佳^{1,2}, 付 尧³, 郑 慧¹, 赵永峰¹, 李 俊¹, 樊才睿^{1,4}

(1. 集宁师范学院, 内蒙古 乌兰察布 012000; 2. 内蒙古工业大学建筑学院,

呼和浩特 010051; 3. 吉林省水文水资源局辽源分局, 吉林 辽源 136200;

4. 乌兰察布地理空间大数据应用与环境监测重点实验室, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要: 在我国北方干旱半干旱地区, 农业灌溉是水资源消耗的主要途径, 农业水资源利用效率的高低, 直接决定着区域可利用水资源量。为探究我国北方农牧交错带农业用水水平, 以内蒙古农牧交错带农业灌溉用水为研究对象, 在综合分析用水现状的基础上, 通过层次分析—熵权法和模糊综合评价相结合的方法, 选取体现农牧交错带农业用水特征的代表性指标, 构建农牧交错的农业用水水平综合评价体系, 对 2020 年内蒙古农牧交错带农业用水进行综合评价。结果表明: 内蒙古农牧交错带各旗县间农业灌溉用水量相差较大, 整体呈现东高西低趋势, 灌溉水量为 $582.41 \sim 4\,905.86 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水利用效率为 $51\% \sim 84\%$; 各旗县农业用水综合评价得分为 $2.26 \sim 3.67$, 农业用水水平整体处于中等偏上, 29 个旗县中较高水平占比 44.80% , 中等水平占比 55.20% ; 与作物水分利用效率(WUE)对比, 构建的综合评价体系可以更真实地反映出农牧交错带农业用水实际情况, 对于农牧交错带中农业用水水平处于中等偏下水平的旗县地区, 需加大力度发展农业节水措施, 提升农业水资源利用效率。

关键词: 农牧交错带; 农业用水; 模糊综合评价; 层次分析—熵权法

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0259-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.05.031

Comprehensive Evaluation of Agricultural Water Use Level in Agro-pastoral Ecotone of Inner Mongolia Based on Analytic Hierarchy Process and Entropy Weight Method

WANG Teng¹, LI Jia^{1,2}, FU Yao³, ZHENG Hui¹, ZHAO Yongfeng¹, LI Jun¹, FAN Cairui^{1,4}

(1. Jining Normal University, Ulanqab, Inner Mongolia 012000;

2. School of Architecture, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051; 3. Liaoyuan

Branch of Hydrology and Water Resources in Jilin Province, Liaoyuan, Jilin 136200; 4. Key Laboratory

of Geospatial Big Data Application and Environmental Monitoring in Ulanqab, Ulanqab, Inner Mongolia 012000)

Abstract: Agricultural irrigation is the main way of water consumption in arid and semi-arid areas of north China. The level of agricultural water-saving directly determines the amount of regional available water resources. In order to explore the level of agricultural water saving in the farming-pastoral ecotone in north China, we took the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia as the research object. By combining analytic hierarchy process (AHP) with entropy weight method and fuzzy comprehensive evaluation, representative indicators reflecting the characteristics of agricultural water use in the agro-pastoral ecotone were selected to construct an agricultural water-saving comprehensive evaluation system, and a comprehensive evaluation of agricultural water-saving in the agro-pastoral ecotone in Inner Mongolia in 2020 was carried out. The results showed that there was a great difference in agricultural irrigation water consumption among counties in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia, and the overall trend was higher in the east than in the west.

收稿日期: 2023-02-20

资助项目: 内蒙古自然科学基金项目(2019BS05027, 2021MS04005); 内蒙古社科基金项目(2023AY04, 202113); 内蒙古自治区高校科研项目(NJZY21241, NJZY21243); 乌兰察布市基础研究项目(2021JC322); 集宁师范学院博士基金项目(jsbsjj2324)

第一作者: 王腾(1988—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事城市生态及区域规划研究。E-mail: wangtengnjsy@126.com

通信作者: 樊才睿(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态水文过程研究。E-mail: fancairui@126.com

The irrigation water consumption ranged from 582.41 m³/hm² to 4 905.86 m³/hm², and the utilization efficiency of irrigation water ranged from 51% to 84%. The comprehensive evaluation score of agricultural water-saving irrigation in all counties was between 2.26 and 3.67, and the overall water consumption level was above average. In 29 counties, good proportion was 44.80%, and medium proportion was 55.20%. Compared with crop water use efficiency (WUE), the constructed comprehensive evaluation system can more truly reflect the actual situation of agricultural water use in the farming-pastoral ecotone. The areas with medium level of agricultural water-saving irrigation still need to develop water-saving measures to improve the utilization efficiency of agricultural water resources.

Keywords: agro-pastoral ecotone; agricultural water-saving; fuzzy comprehensive evaluation; AHP and entropy weight method

农业用水长期以来作为我国的用水大户,其用水占比可达 65% 以上,其中灌溉用水又占到农业总用水量的 90% 以上,可以说农业灌溉用水量的多少直接决定着区域水资源的利用水平^[1]。内蒙古地处我国北方干旱半干旱气候区,其境内的农牧交错带是我国东南部农耕区与西北部草原牧区相连接的生态过渡带,区域内农业、牧业接壤交替,可利用的水资源有限,区域生态环境较为脆弱^[2]。地理位置及生态环境等因素决定了水资源短缺是制约内蒙古农牧交错带的区域发展的重要限制因子。因此,大力发展农业节水灌溉,提升水资源利用效率,减少水资源浪费是区域生态文明建设和可持续发展的必要手段。

农业水资源利用效率受到工程技术、种植条件、经济水平、气候因素等影响差异较大,而如何精准衡量各地区农业灌溉用水水平及灌溉效果仍是当前研究的热点问题^[3]。目前国内外的研究者对农业灌溉用水及其评估方式进行了大量的研究,主要针对不同地区的农业种植结构,结合水资源调控目标,对区域灌溉水利用效率及水资源承载力进行研究^[4-5],同时结合农业节水的经济效益及环境效益,利用所产生的经济收益衡量农业节水灌溉水平^[6]。部分研究者^[7-8]对农业灌溉用水的评价方法及指标进行改进,结合国家政策、节水技术、资源环境等方面建立了指标体系。评价方法已经逐步由简单的农业灌溉用水定性描述,向定性定量多层次相结合的灌溉用水评价转变^[9]。农业用水评价研究虽然较多,但大多数研究^[10]是从单一方面出发对农业用水情况进行评价,而对农业水资源利用效率的综合性评价考虑较少。并且农业用水评价尚处于一个起步阶段,评价理论及方法还没有

形成统一标准,均处于探索时期。现有的农业用水评价主要集中黄河流域腹地水资源相对充足的广阔农业种植区等^[11-12],关于农牧交错带等地处于干旱半干旱区生态环境相对脆弱的农业用水评价研究较少。因此,本文在现有农业水资源评价方法的基础上,考虑内蒙古农牧交错带自然环境特征,以 2020 年内蒙古自治区农牧交错带 29 个旗县农业水资源利用情况为研究对象,利用层次分析—熵权法和模糊综合评价相结合的方法,选取体现农牧交错带农业用水特征的指标,构建覆盖相对全面的指标体系,对内蒙古农牧交错带农业用水水平进行尝试性评价,为我国北方水资源持续利用和生态安全屏障的构筑提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古农牧交错带地处北纬 39°35′—45°15′和东经 109°36′—120°52′,横跨内蒙古东中西部地区,与山西省、河北省、辽宁省接壤,由赤峰的敖汉旗向西延伸至包头固阳县。按 2016 年农业部印发《关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》中明确指出内蒙古农牧交错带重点区域共包含 29 个旗县(市、区),面积约 1 455.15 hm²,行政区划见表 1^[13]。该区域属于干旱半干旱气候区,年降水量在 300~450 mm,降水量由东向西递减,年平均温度在 1.5~3.7 °C,土壤以棕钙土、栗钙土、栗褐土类型为主。交错带内放牧草地面积为 501.39 hm²,农业耕地面积 308.11 hm²,农业生产主要以小麦、玉米、马铃薯、甜菜、向日葵等作物为主。

表 1 内蒙古农牧交错带行政区划

盟市	旗县(市、区)
包头市	土默特右旗、固阳县
呼和浩特市	托克托县、武川县、土默特左旗、清水河县、和林格尔县
乌兰察布市	集宁区、兴和县、卓资县、化德县、凉城县、察哈尔右翼后旗、商都县、察哈尔右翼中旗、丰镇市、察哈尔右翼前旗
锡林郭勒盟	太仆寺旗、多伦县
赤峰市	克什克腾旗、巴林左旗、敖汉旗、宁城县、阿鲁科尔沁旗、林西县、巴林右旗、翁牛特旗、喀喇沁旗、松山区

1.2 研究方法

1.2.1 层次分析—熵权法 构建农业节水水平评价体系,首先要确定各评价指标的权重,为加强权重确定的合理性和准确性,采用层次分析法确定主观权重,然后利用熵权法确定客观权重,最后将主观权重和客观权重进行耦合得到综合权重。

(1)层次分析法确定主观权重。确定主观权重,首先在结合内蒙古农牧交错带农业所处的自然环境下,考虑用水、节水、经济效益、供水环境等方面确定指标层次及指标体系,然后采用1~9比例标度法进行相互判断比建立判断矩阵,通过矩阵运算,计算最大特征值和特征向量,进行一致性检验,若 $C_R < 0.1$,则通过检验,计算公式为:

$$C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$C_R = C_I / R_I \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; R_I 为随机一致性指标, R_I 在1~9阶矩阵取值分别为0,0,0.58,0.90,1.12,1.24,1.34,1.41,1.45。

(2)熵权法确定客观权重。客观权重确定首先需要构建评价指标矩阵 $A = (x_{ij})_{m \times n}$,然后计算指标特征比值(r_{ij}),然后根据特征比值 r_{ij} 计算第 j 个指标的信息熵(S_j),最后计算出相应指标权重(v_j),公式为:

$$r_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}} \quad (3)$$

$$S_j = -(\ln m) - 1 \sum_{i=1}^m (r_{ij} \ln r_{ij}) \quad (4)$$

$$v_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{j=1}^n (1 - S_j)} \quad (5)$$

(3)AHP—熵权法确定综合权重。在确定了评价指标主观权重和客观权重后,采用乘数归一法计算综合权重,计算公式为:

$$a_j = \frac{v_j P_j}{\sum_{j=1}^n (v_j P_j)} \quad (6)$$

式中: a_j 为AHP—熵权法确定的综合权重。

1.2.2 模糊综合评价法 模糊综合评价主要是通过模糊关系合成原理对多种模糊因素所影响的事物及现象进行总体评价,首先以层次分析—熵权法所确定的权重作为模糊评价的权重,然后确定模糊关系矩阵(R),计算模糊子集隶属度,进行模糊运算,将各因素权向量(P)与模糊关系矩阵(R)相乘,确定评价对象的综合评价结果(F);最后将评语集合分为5个等级 $T = \{\text{高, 较高, 中, 低, 浪费}\}$,对其赋值 $\{5, 4, 3, 2, 1\}$ 分值,综合评价得分用 $X = F \cdot T$ 表示,最终确定评价结果。具体步骤为:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n), \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (7)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F = (P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_n) \quad (9)$$

$$f_j = \min(1, \sum_{i=1}^n p_i r_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

1.3 数据来源

各指标数据主要来源于2020年的内蒙古自治区和农牧交错带所涉及到的乌兰察布市、呼和浩特市、包头市、锡林郭勒盟、赤峰市的统计年鉴和水资源公报以及相关行政事业单位的统计数据。

2 结果与分析

2.1 农牧交错带农业水资源利用现状

以2020年为现状年,对内蒙古自治区农牧交错带的5个盟市内29个旗县农业灌溉用水现状进行分析(图1)可以看出,内蒙古29个旗县每公顷农业灌溉用水量相差较大,最小灌溉用水量为多伦县,灌溉水量为 $582.41 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,最大灌溉用水量为土默特右旗($4\ 905.86 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),灌溉水量是多伦县的16.8倍,平均灌溉用水量为 $2\ 585.04 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,变异系数为0.38。灌溉水量整体呈现出东部地区高于西部地区和中部地区。对29个旗县灌溉水利效率进行分析,各旗县灌溉水利用效率全部都在55%以上,平均利用效率为68%,变异系数为0.14,整体变化相对较小。各旗县利用效率在全区灌溉水利用平均水平以上^[14],最高利用水平为商都县,其灌溉水利用效率为84%。农牧交错带各旗县灌溉水利用效率分布不均,其中利用效率 $>80\%$ 的旗县占比10.30%,利用效率在70%~80%的旗县占比37.90%,利用效率在60%~70%的旗县占比24.10%,利用效率在50%~60%的占比27.60%。整体来看,乌兰察布市和锡林郭勒盟的农牧交错带农田灌溉水利用效率较好,而赤峰市和呼和浩特市灌溉水利用情况相对较差。

2.2 农业节水评价指标体系构建

内蒙古农牧交错带地处我国北方干旱半干旱地区,常年降水少蒸发大,地表水资源短缺,生态环境相对脆弱,同时受经济发展和自然环境影响农业种植与畜牧生产活动呈现波动性交替并存的特点。因此,针对内蒙古农牧交错带所呈现出的农业用水环境的特殊性,以农业供水、用水、节水、种植、收益、环境等实际情况为基础,考虑气候干旱、水资源短缺、农业用水

受限、农业牧业互相竞争等影响农业灌溉的主要因素,将农牧交错带农业用水评价体系划分为目标层、准则层和指标层。其中目标层为农业用水水平综合评价,准则层为农业用水、农业节水、经济效益、供水环境等 4 个子系统,农业用水子系统中主要包括农业灌溉用水占比、农业灌溉水利用系数、公顷灌溉水量等 3 个指标;农业节水子系统中主要包括节水作物种

植面积比率、节水灌溉面积比率、高标准农田建设比率等 3 个指标;农业经济效益子系统中主要包括灌溉水生产效率、主要农作物产量、农业万元 GDP 用水量等 3 个指标;农业供水环境子系统中主要包括降水效率、供水模数、农牧业用水量比率、人均农业用水量等 4 个指标。供水环境指标具体反映内蒙古农牧交错带自然环境和社会环境特征对农业用水的影响。

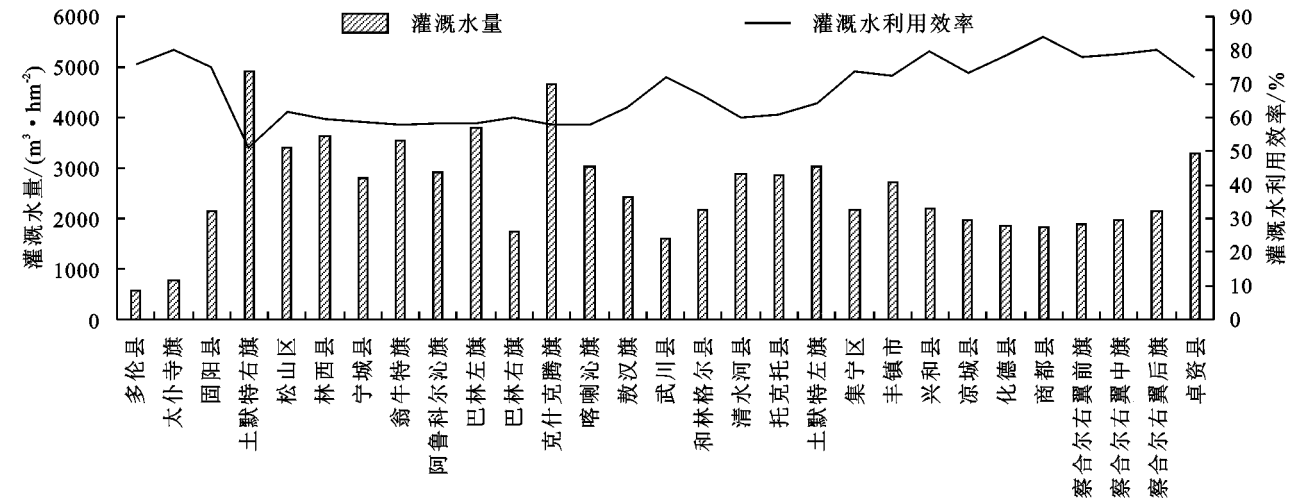


图 1 内蒙古农牧交错带各旗县农业灌溉水量

在确定评价体系各项指标后,参考《国家农业节水纲要(2012—2020 年)》《全国高标准农田建设总体规划(2011—2020 年)》《全国现代灌溉发展规划(2012—2020 年)》《全国大型灌区续建配套与节水改造实施方案(2016—2020 年)》《节水灌溉工程技术规

范》等文件以及相关文献^[15]。同时借鉴国家及地方水资源管理和节约用水监督检查、计划用水管理、重点监控用水单位监督管理、国家节水行动实施方案等工作内容和要求,确定各项指标的评价等级标准(表 2)。

表 2 农业水资源利用综合评标指标体系及评价标准

目标层	准则层	指标层	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
农牧交错带 农业用水水平	用水水平准则 A	农业灌溉用水占比(A ₁)	0.95	0.85	0.75	0.65	0.50
		农业灌溉水利用系数(A ₂)	0	0.35	0.50	0.70	0.85
		公顷灌溉水量(A ₃)	0.40	0.35	0.30	0.20	0.10
	节水水平准则 B	节水作物种植面积比率(B ₁)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
		节水灌溉面积比率(B ₂)	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90
		高标准农田建设比率(B ₃)	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90
	用水效益准则 C	灌溉水生产效率(C ₁)	0	1	2	3	4
		主要农作物产量(C ₂)	0	3	5	7	10
		农业万元 GDP 用水量(C ₃)	400	600	800	1000	1200
		降水效率(D ₁)	30	25	20	15	10
	供水环境准则 D	供水模数(D ₂)	10	50	100	150	250
		农牧业用水量比率(D ₃)	25	15	10	5	2
		人均农业用水量(D ₄)	500	400	300	200	100

2.3 确定农业用水评价指标权重

以准则层权重确定为例,依据层次分析法的计算原则,同时结合专家咨询打分结果,得出评价指标体系准则层指标判断矩阵(E):

$$E = \begin{vmatrix} 1 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1/2 & 1 & 2 \\ 2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{vmatrix}$$

采用近似解法计算权重并进行一致性检验,得出准则层判断矩阵(E)的最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.243$, $C_I = 0.081$, $C_R = 0.09 < 0.1$,该矩阵通过一致性检验,得到主观权重值为 $P_A = 0.143$, $P_B = 0.462$, $P_C = 0.224$, $P_D = 0.170$ 。然后利用熵权法计算各指标信息熵确定信息权重,得到客观权重 $v_A = 0.210$, $v_B = 0.222$, $v_C = 0.218$, $v_D = 0.350$ 。最后通过乘数合成归一法得到准则层的综合权重 $a_A = 0.125$, $a_B = 0.425$,

$a_c=0.203,a_D=0.247$ 。指标层权重计算方法与准则层一致,判断矩阵及最大特征根均通过一致性检验,其判断矩阵、一致性检验见表 3。最终确定内蒙古农牧交错带农业用水综合评价指标权重见表 4。

表 3 判断矩阵及一致性检验结果

项目		判断矩阵				一致性检验
用水水平准则 A		A_1	A_2	A_3		$\lambda_{\max}=3.006$
	A_1	1	1/5	1/2		$C_I=0.003$
	A_2	5	1	2		$C_R=0.005<0.1$
	A_3	2	1/2	1		
		B_1	B_2	B_3		
节水水平准则 B	B_1	1	1/3	1/2		$C_I=0.005$
	B_2	3	1	2		$C_R=0.008<0.1$
	B_3	2	1/2	1		
		C_1	C_2	C_3		$\lambda_{\max}=3.009$
用水效益准则 C	C_1	1	1/3	1/2		$C_I=0.005$
	C_2	3	1	2		$C_R=0.008<0.1$
	C_3	2	1/2	1		
		D_1	D_2	D_3	D_4	
供水环境准则 D	D_1	1	3	2	2	$C_I=0.068$
	D_2	1/3	1	1/2	1/3	$C_R=0.076<0.1$
	D_3	1/2	2	1	2	
	D_4	1/2	3	1/2	1	

内蒙古农牧交错带农业用水评价指标的权重值可以较好地反映出当前各旗县节水的真实状况。用水水平准则层的权重为 0.125,节水水平准则层的权重为 0.425,用经济效益准则层的权重为 0.203,供水

环境准则层的权重为 0.247。在农业水资源利用效率评价体系中,节水措施发展的规模是影响农业用水效率的首要因素,因此节水准则层的权重明显高于其他 3 个准则层,而供水环境准则层权重大于用水效益准则层,主要由于内蒙古农牧交错带与其他农业种植区相比,具有其自然环境和经济结构的复杂性,环境因素和农业牧业交替发生,互相制约对农业节水措施的发展存在较大影响。而用水效益权重高于用水水平准则层,说明在评价体系中,各地在用水水平相近的情况下,更加关注农业用水所带来的经济效益。

2.4 农牧交错带用水灌溉综合评价

采用模糊综合评价法对内蒙古农牧交错带农业用水进行评价,以 2020 年多伦县为例,进行模糊综合评价计算,确定各指标隶属度,建立关系矩阵:

$R=$

0	0	0	0.357	0.643
0	0	0	0.597	0.403
0	0	0	0	1
1	0	0	0	0
0	0	0	0.089	0.911
0.542	0.458	0	0	0
0	0	0	0	1
0.984	0.016	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	0	0	1
1	0	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0.045	0.955	0

表 4 评价指标权重计算结果

目标层	准则层	主观权重	客观权重	综合权重	指标层	主观权重	客观权重	综合权重
农牧交错带 农业用水水平	用水水平(A)	0.143	0.210	0.125	农业灌溉用水占比(A_1)	0.018	0.081	0.019
					农业灌溉水利用系数(A_2)	0.085	0.071	0.077
					每公顷灌溉水量(A_3)	0.04	0.058	0.029
	用水水平(B)	0.462	0.222	0.425	节水作物种植面积比率(B_1)	0.075	0.058	0.054
					节水灌溉面积比率(B_2)	0.249	0.069	0.211
					高标准农田建设比率(B_3)	0.137	0.095	0.160
	经济效益(C)	0.224	0.218	0.203	灌溉水生产效率(C_1)	0.037	0.057	0.026
					主要农作物产量(C_2)	0.121	0.068	0.101
					农业万元 GDP 用水量(C_3)	0.067	0.093	0.076
	供水环境(D)	0.170	0.350	0.247	降水效率(D_1)	0.071	0.060	0.073
					供水模数(D_2)	0.018	0.053	0.017
					农牧业用水量比率(D_3)	0.045	0.122	0.095
					人均农业用水量(D_4)	0.035	0.115	0.070

以层次分析—熵权法确定的综合权重,建立权重矩阵:

$$P=|0.019\ 0.077\ 0.029\ 0.054\ 0.211\ 0.160\ 0.026\ 0.101\ 0.076\ 0.073\ 0.017\ 0.095\ 0.070|$$

通过将各影响因素的评价等级加权平均来确定农业灌溉用水效率综合评价结果。

$$F=(P_1\ P_2\ \cdots\ P_n)\begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{vmatrix}=(f_1\ f_2\ \cdots\ f_n)$$
$$=(0.333\ 0.075\ 0.003\ 0.139\ 0.458)$$
$$n=1,2,\cdots,5;m=1,2,\cdots,13$$

$$X = F \cdot T = \begin{vmatrix} 0.333 & 0.075 & 0.003 & 0.139 & 0.458 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 5 \\ 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{vmatrix} = 2.71$$

最后,计算出多伦县农业用水水平的综合评价值为 2.71,其值在 2~3,表明该区域的农业用水水平中等,水资源利用效率水平一般。按照相同计算方法对内蒙古农牧交错带剩余的 28 个旗县 2020 年农业灌溉用水水平进行综合评价,其评价分值和评价等级见表 5。从评价分值可以看出,内蒙古农牧交错带总体农业用水水平处于中等到较高水平之间,得分在 3~4 分用水水平为良好的有 13 个旗县,占总数的 44.80%,得分在 2~3 分用水水平为中等的有 16 个旗县,占比 55.20%。其中赤峰市的敖汉旗农业用水水平最高,评价得分为 3.67 分,达到农业用水较高效利用状态,锡林郭勒盟太仆寺旗的农业用水水平最低,得分为 2.26 分,仅高出临界值 0.26 分,处于中等偏下水平。呼和浩特市 5 个旗县中除武川县农业用水水平处于中等水平外,得分为 2.98 分,其余 4 个旗县均达到 3.00 分以上,处于较高用水水平。赤峰市的农业用水水平与其盟市相比整体较好,10 个旗县中有 9 个旗县处于较高水平,1 个旗县处于中等水平。乌兰察布市 10 个旗县农业用水水平整体处于中等水平,得分介于 2.37~2.94,农业水资源利用效率一般,包头市和锡林郭勒盟 4 个旗县农业用水均处于中等水平,水资源利用效率有待进一步提升。

表 5 农牧交错带各旗县农业用水综合评价结果

地区	评价 分值	评价 等级	地区	评价 分值	评价 等级
武川县	2.98	中等	多伦县	2.71	中等
和林格尔县	3.18	较高	太仆寺旗	2.26	中等
清水河县	3.09	较高	固阳县	2.64	中等
托克托县	3.37	较高	土默特右旗	2.98	中等
土默特左旗	3.24	较高	集宁区	2.74	中等
松山区	3.23	较高	丰镇市	2.55	中等
林西县	3.17	较高	兴和县	2.37	中等
宁城县	3.24	较高	凉城县	2.52	中等
翁牛特旗	3.09	较高	化德县	2.71	中等
阿鲁科尔沁旗	2.88	中等	商都县	2.94	中等
巴林左旗	3.16	较高	察哈尔右翼前旗	2.55	中等
巴林右旗	3.14	较高	察哈尔右翼中旗	2.92	中等
克什克腾旗	3.19	较高	察哈尔右翼后旗	2.48	中等
喀喇沁旗	3.13	较高	卓资县	2.68	中等
敖汉旗	3.67	较高			

3 讨论

3.1 农业用水评价指标体系建立

农业用水综合评价具有明显的区域特性,受到地区经济结构、农业种植结构、节水管理措施等多方面因素的影响,具有很大的不确定性和模糊性。评价体系指标的选取在很大程度上决定评价结果,因此科学地选择评价指标并确定指标权重是农业水资源利用评价的首要问题。内蒙古农牧交错带位于我国北方,地处干旱半干旱气候区,东西跨度大,涉及范围广,涵盖内蒙古自治区的 5 个盟市。而现实环境中,各盟市旗县由于所处的地理位置,导致其自然生态环境和经济产业结构差异较大,农牧交错带东部旗县和西部差异明显。因此,针对各盟市旗县农业发展规模和自然环境特征,在考虑各地区经济发展情况的基础上,以各旗县的农业耕地灌溉用水、高标准农田建设、农业种植结构、灌溉水利用效率、农业灌溉投入产出等数据为基础,确定农业用水评价体系的基本框架。并在基本框架上额外考虑农牧交错带自然环境及农业牧业相互竞争对农业用水水平的影响。最终确定内蒙古农牧交错带农业用水综合评价体系,形成农业用水、农业节水、经济效益和供水环境等 4 方面的评价准则。

在评价过程中为了突出农牧交错带与其他农业种植地区农业水资源利用环境的差异,本研究以农业供水环境中的 4 项指标代表内蒙古农牧交错带的区域特征。其中降水效率指标(D_1)重点表现农牧交错带的自然环境特征对农业用水的影响,交错带中降水量由东向西递减,东部旗县降水多,可利用水资源丰富,而西部旗县受降水等自然因素限制,其农业用水更依赖于地表水和地下水灌溉。农业牧业用水量比率指标(D_3)主要体现农牧交错带中农牧业发展结构以及相互竞争的关系对农业用水所产生的影响,农牧交错带可利用的水资源有限,而当地居民为了实现利益最大化,在不同的时间选择效益高的农业或牧业,使二者呈现出竞争关系,而农业牧业的交错存在,则不利于高标准农田的建设和大规模节水措施的推广,使得农业高效用水受到限制。供水模数(D_2)和人均农业用水量(D_4)是从社会经济角度出发,考虑各旗县区域面积和人口数量对农业用水的影响,在农牧交错带中区域面积直接影响农业种植面积和农业灌溉规模,往往区域面积较大的旗县其牧业发展较多,而人口数量的增加则加速城镇化,对农业和牧业发展起到相反的作用。因此,本研究的农业水资源利用评价体系总共构建 4 个准则层 13 个指标,该指标体系的建立思路与王美慧等^[15]在对长三角地区农业用水效率评价时较为接近,其在节水层面选取的指标更多地偏重于作物结构所造成的节水效果,而本研究在考虑

作物结构的同时,更多地考虑农牧交错带特有的自然因素和经济结构因素所造成的节水效果。

3.2 评价指标权重确定

内蒙古农牧交错带农业用水评价指标体系采用层次分析—熵权法确定各项指标权重,在用水准则层中农业灌溉用水权重为 0.019,灌溉水利用系数权重为 0.077,单位面积灌溉水量权重为 0.029。在农业灌溉用水过程中,水资源利用效率作为首要关注问题,是农业水资源高效利用的核心,其权重占比较高,符合农业用水评价的实际需求。该结果与白惠婷等^[16]对京津冀城郊农业园区水资源利用效率评估较为一致,在用水层面中,均将水资源利用效率放在首要位置。在节水准则层中节水作物种植比率、节水灌溉面积比率、高标准农田建设比率的权重分别为 0.054, 0.211, 0.160, 总体体现出农业灌溉过程中节水措施的重要性。就目前而言,在内蒙古农牧交错带,由于高标准农田的建设处于初始阶段,农田建设面积较小,更多灌溉农田主要采用喷灌、滴灌、防渗输水等各类节水灌溉措施,所以在本研究中节水灌溉率的权重要高于高标准农田建设比率权重。在经济效益准则层中灌溉水生产效率、主要农作物产量、农业万元 GDP 用水量等指标的权重分别为 0.026, 0.101, 0.076, 主要由于经济效益评价中更加关注农业灌溉用水后所产生的作物量和其所带来的 GDP 贡献,直接体现农业水资源的生产效率,所以其权重占比较高,该趋势也与刘学智等^[4]对宁夏农业用水效率的研究结果较为一致。在供水环境准则层中降水效率的权重为 0.073,供水模数的权重为 0.017,农牧业用水量比率的权重为 0.095,人均农业用水量的权重为 0.070。除供水模数外,其他指标的权重较为接近,主要由于农牧交错带自然环境与社会环境存在众多因素对农业用水产生影响,而最关键的影响因素还是农业与牧业之间协调发展,如何妥善处理农业牧业之间竞争关系,也是农牧交错带今后主要的研究方向之一。

3.3 农业用水水平综合评价

内蒙古农牧交错带农业用水水平综合评价采用模糊综合评价法确定各旗县的评分结果,得分在 0~5 分,得分越高,其水资源利用水平越高。在评价结果为用水水平较高的 13 个旗县中,评价结果在 3.5 以上的仅有敖汉旗一地,评价结果在 3.0~3.2 有 8 个旗县,其分值与中等用水水平的临界阈值较接近,需引有关主管部门的注意,在部分极端气候年份,其用水水平有掉落到中等水平的风险。对于评价结果为中等水平的 16 个旗县中,武川县、土默特右旗、商都县、察哈尔右翼中旗、阿鲁科尔沁旗等 5 个旗县评价分值为 2.8~3.0,较接近较高用水水平的临界阈值,

可以通过推广节水器具、改变种植结构、加强灌溉用水管理、建设高标准农业等方式改善农业用水现状,使其达到较高水平。

内蒙古农牧交错带农业用水综合评价从农牧交错带区域特征出发得出评价结果。将综合评价结果与农业水资源利用效率研究中最常采用的指标作物水分利用效率(WUE)进行对比参考,利用 Spearman 等级相关系数进行相关分析。由图 2 可以看出,综合评价的等级排序与作物水分利用效率(WUE)等级排序间的相关系数为 0.67,两者存在一定的相关性。主要由于作物水分利用效率(WUE)是从农作物单位耗水量的角度出发,以降低水量投入提升作物产量为目标去评估农业水资源的利用状况,其评价结果更多地考虑水资源成本效益问题。而本研究进行综合评价,在考虑成本效益的基础上,考虑自然环境、节水管理等方面对农业用水的影响,所以其评价结果与作物水分利用效率(WUE)存在相关性,但又有所区别,导致相关系数仅达到 0.67。

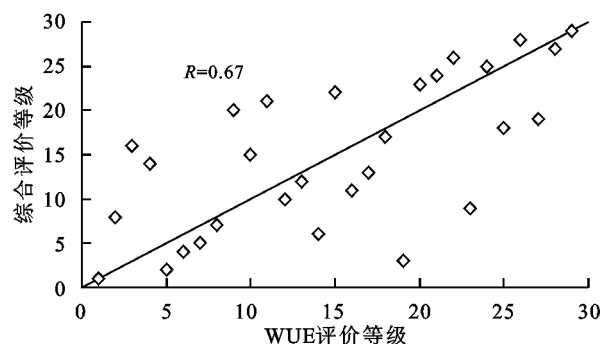


图2 各旗县2种评价等级相关关系

以往的农业用水评价更多地集中地理环境简单、产业结构单一、以种植业为主的单纯农业区^[4],其构建的农业用水评价指标体系对于存在牧业竞争影响、地理环境变化较大的农牧交错带并不适用。而本研究在考虑内蒙古农牧交错带农业节水特征、供水环境特征、经济效益特征的前提下,基于层次分析—熵权法构建信息覆盖相对全面的农牧交错带农业用水综合评价,是对农牧混交区域农业用水综合评价的大胆尝试,首次将内蒙古草原畜牧业对地区农业用水的影响列入评价指标,构建具有农牧交错带区域特色的农业用水评价体系,为更真实地反映农牧交错带农业水资源利用状况,为后续农牧交错区域农业用水的研究提供支持。

4 结论

(1)内蒙古农牧交错带各旗县间农业灌溉用水量相差较大,整体呈现东高西低趋势,灌溉水量为 582.41~4 905.86 m³/hm²,平均灌溉用水量为 2 585.04 m³/hm²,变异系数为 0.38,各旗县农业灌溉水利用效率整体水平

高于自治区平均水平,利用效率平均值为 68%,变异系数为 0.14,东中西部地区中乌兰察布市和锡林郭勒盟农业灌溉用水最少,灌溉水利用效率较高。

(2)基于层次分析—熵权法的农业用水水平评价体系可以较好地反映内蒙古农牧交错带农业用水水平的指标权重,指标体系不仅体现农牧交错带各旗县所处自然环境差异,而且从准则层和指标层均体现出农牧交错带区域特征。主观客观相结合的权重确定方法也提高了评价精准性和科学性。

(3)内蒙古农牧交错带农业用水水平整体处于中等偏上水平,利用模糊综合法对 29 个旗县农业水资源利用进行综合评价,得出用水水平较高的旗县占比 44.80%,中等水平占比 55.20%,农业水资源利用水平为中等地区仍需大力发展节水措施,提升水资源利用效率。

参考文献:

- [1] 康健,王建华,王素芬.海河流域农业水资源承载力评价研究[J].水利水电技术,2020,51(4):47-56.
- [2] 王考,姚云峰,包玉海,等.内蒙古农牧交错带县域耕地健康评价及障碍因素分区研究[J].东北师大学报(自然科学版),2020,52(1):153-164.
- [3] 阳眉剑,吴深,于赢东,等.农业节水灌溉评价研究历程及展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(3):210-218.
- [4] 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):46-55.
- [5] Riady R R, Wilopo W, Warmada I W. Evaluation of surface water for agricultural irrigation in Lobalain District, Rote Ndao Regency, East Nusa Tenggara Province, Indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 930(1): e012057.
- [6] 贺天明,王春霞,何新林,等.基于完全成本水价的农业水价承受力和节水潜力评估[J].节水灌溉,2021(3):89-93.
- [7] Aki Kubota. Study in effects of water-saving agriculture and intercropping system for increasing food production and the technology development in the Nile Delta, Egypt[J]. Research for Tropical Agriculture, 2018, 11(1): 32-34.
- [8] 范习超,秦京涛,徐磊,等.大型灌区节水水平评价指标体系构建与实证[J].农业工程学报,2021,37(20):99-107.
- [9] Sun H Y, Wang S F, Hao X M. An improved analytic hierarchy process method for the evaluation of agricultural water management in irrigation districts of north China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 179(1): 324-337.
- [10] 陈娟,王晓昕.基于层次分析法的农业用水水平评估[J].水电能源科学,2021,39(9):50-53.
- [11] 庞爱萍,易雨君,李春晖.基于生态需水保障的农业用水安全评价:以山东省引黄灌区为例[J].生态学报,2021,41(5):1907-1920.
- [12] 赵令,雷波,苏涛,等.我国粮食主产区农业灌溉节水潜力估算研究[J].节水灌溉,2019(8):130-133.
- [13] 陶泽涪,王世清,孙丕苓,等.中国北方农牧交错带耕地时空分异及驱动因素[J].干旱区地理,2022,45(1):153-163.
- [14] 魏子涵,魏占民,张健,等.区域灌溉水利用效率测算分析[J].水土保持研究,2015,22(6):203-207.
- [15] 王美慧,唐德善,尚静.改进模糊综合评价模型在长江三角洲地区农业用水效率评价中的应用[J].水电能源科学,2021,39(9):58-62.
- [16] 白惠婷,刘玉春,赵晗,等.京津冀城郊农业园区水资源利用效率评价方法及实例[J].中国农村水利水电,2019(10):84-92.
- (上接第 214 页)
- [26] Jiang Y, Xiang D X, Li Z, et al. Study on soil and water erosion of Xiang Xi Watershed based on 3S dynamic monitoring[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2018, 7: 173-177.
- [27] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 2013-2026.
- [28] Lowe M A, Mcgrath G, Leopold M. The impact of soil water repellency and slope upon runoff and erosion[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104756.
- [29] 朱丽琴,黄荣珍,李凤,等.南方红壤丘陵区经果林开发对水土流失的影响:以江西省为例[J].中国水土保持,2019(5):38-41,69.
- [30] 郎燕,刘宁,刘世荣.气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究[J].生态学报,2021,41(13):5106-5117.
- [31] 张俊,高雅琦,徐卫立,等.长江流域极端降雨事件时空分布特征[J].人民长江,2019,50(8):81-86,135.
- [32] Duan J, Liu Y J, Tang C J, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 278: e111537.
- [33] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水土保持措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.