

基于条件植被温度指数的冬小麦主要 生育时期干旱监测效果评价

——I. 因子权重排序法和熵值法组合赋权

李 艳^{1,2}, 王鹏新^{1*}, 刘峻明¹, 张树誉³, 李 俐¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 河北科技师范学院城市建设学院, 河北 秦皇岛 066004;
3. 陕西省气象局, 陕西 西安 710014)

摘 要: 选取关中平原冬小麦越冬后 2002—2009 年每年 3—5 月共 9 旬的条件植被温度指数 (VTCI) 遥感干旱监测结果, 将冬小麦越冬后分为四个主要生育时期, 分别运用因子权重排序法、熵值法及组合赋权法确定各生育时期干旱对产量的影响权重, 计算关中平原各市冬小麦每年的加权 VTCI, 并建立加权 VTCI 与冬小麦单产间的一元线性回归模型。结果表明, 关中平原大部分地区的加权 VTCI 与小麦单产密切相关。其中, 熵值法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性不显著, 渭南、咸阳及铜川的决定系数 R^2 值均低于 0.5; 因子权重排序法和组合赋权法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性显著, 咸阳、宝鸡及西安的 R^2 值接近或高于 0.6, 渭南接近 0.5, 铜川较差。且组合赋权法的结果中宝鸡和西安的 R^2 值接近 0.7, 优于因子权重排序法和熵值法的结果。

关键词: 条件植被温度指数; 因子权重排序法; 熵值法; 组合赋权法; 小麦单产; 关中平原

中图分类号: S165+.27; S512.1+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0159-05

Application of temperature condition index to evaluate the drought monitoring effect in main growing period of winter wheat:

—— I . factor weight sorting method and entropy method

LI Yan^{1,2}, WANG Peng-xin^{1*}, LIU Jun-ming¹, ZHANG Shu-yu³, LI Li¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. Institute of Urban Construction, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

3. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

Abstract: Selected the drought monitoring results of vegetation temperature condition index (VTCI) of winter wheat at the ten-days interval from March to May of year 2002—2009 in Guanzhong Plain, the main growth and development period of winter wheat was divided into four stages, and the impact rights of each stage's drought to the wheat yield was determined by using the factor weight sorting method, entropy method and combination weighting methods, calculated the rights VTCI and established a linear regression model between the rights VTCI and yield of winter wheat. The results shown that: There were significant linear correlations between the yield and the weights VTCI in most region of Guanzhong Plain. Among them, the linear correlations was not significant by the entropy method, the R^2 values of Weinan, Xianyang and Tongchuan total was less than 0.5. The linear correlations between the yield and the weights VTCI was significant by using the factor weight sorting method and combination weighting method, the R^2 values of Xi'an, Baoji and Xi'an were close or higher than 0.6, Weinan was close to 0.5, and Tongchuan was rather poor. While by using the combination weighting method, the R^2 values of Baoji and Xi'an were all close to 0.7, this result was better than the combination weighting method and entropy method.

收稿日期: 2013-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41071235); “十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2012BAD20B0103) 和高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20100008110031)

作者简介: 李 艳 (1987—), 女, 黑龙江大庆人, 硕士, 研究方向为定量遥感及其在干旱预测中的应用。E-mail: liyan3311@126.com。

* 通信作者: 王鹏新 (1965—), 男, 陕西礼泉人, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究。E-mail: wangpx@cau.edu.cn。

Keywords: vegetation temperature condition index; factor weight sorting method; entropy method; combination weighting method; wheat yield; Guanzhong Plain

干旱是指降水偏少导致土壤缺水的一种水量相对亏缺现象,直接影响农作物的正常生长和发育,造成粮食减产。据统计,我国受旱面积 20 世纪 50 年代年均 0.11 亿 hm^2 , 损失粮食年均 43.5 亿 kg , 90 年代增至 0.24 亿 hm^2 和 209.4 亿 kg , 2000 年以来损失粮食高达 372.8 亿 kg ^[1]。近年来,由于我国气候复杂多变,干旱灾害频发。2011 年年初我国北方冬麦区发生严重干旱之后,长江中下游又发生了罕见的春夏连旱,对农作物产量造成严重影响,因此,农业干旱现象依然严峻。陕西省地形复杂,降水量偏少,是我国发生气象灾害种类最多、频率最高的地区之一,近几年旱灾更趋于频繁^[2]。

传统的干旱监测方法是单点监测,速度慢,范围有限,空间代表性差。遥感技术以宏观快速、准确客观、灵活机动等优势,广泛应用到灾害的动态监测和损失评估中。目前应用遥感方法进行干旱监测的指标多样,方法不一。国内外广泛应用的遥感监测模型有基于植被指数的监测方法、基于地表温度的监测方法、综合植被指数和地表温度的监测方法及微波方法等^[3-4]。在大多数气候条件和地表覆盖条件下,NDVI 和 LST 的相对变化与土壤含水量的关系是相对稳定的,二者的结合使信息互补,为区域土壤湿度监测提供了潜力。王鹏新等^[5]在 NDVI 和 LST 的散点图呈三角形区域分布的基础上,提出了条件植被温度指数 (Vegetation Temperature Condition Index, VTCI) 的干旱监测方法,并验证了采用 VTCI 进行干旱监测的有效性。

国内外学者通过建立多种干旱指标与单产的关系,研究了干旱对作物产量的影响。Quamay 等^[6]用作物生育时期内的 NDVI 累积值计算作物产量,取得了较高的精度。李凤霞等^[7]将地面监测、气候监测及遥感监测相结合,建立了“监测-评估-预测、预警”信息服务系统,及时评估干旱对产量的影响。

多指标权重的确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法两大类^[8]。主观赋权法是由决策者根据经验判断决定各属性的重要程度并赋予一定的权重,如因子权重排序法^[9]是根据专家意见,将各因子对评价目标的重要性的差异进行因子排序,确定各指标的权重,这种赋权方法反映了决策者的意向,评价结果有较大的主观性。客观赋权法是根据数据之间的关系通过一定的数学方法来确定权重,如熵值法^[10]是由各个样本的实际数据求得权重,系统的某

项指标携带的信息越多,表示该指标对决策的作用就越大,此时熵值越小,赋予的权重越大,这种方法能够反映指标信息熵值的效用价值,评判结果有较强的数学理论依据,但不能体现评判者对不同指标的重视程度。因此,两类赋权方法都有一定的局限性。为兼顾对属性的偏好又尽量减小主观随意性,实现主观赋权法和客观赋权法的统一,多种主、客观组合赋权法得到广泛应用^[11-13]。其中,应用最多的归一组合赋权法^[14-15]是对主观赋权法的权重和客观赋权法的权重进行归一化处理,作为组合权重,计算简单。另外,杨雅勋等^[16]在桥梁加固方案优选的应用中提出了一种最优组合赋权的方法,是确定一组权重,使其与主观赋权法的权重和客观赋权法的权重之间的总距离最大。杜俊慧等^[17]提出了一种基于灰关联度的组合赋权法,以主观偏好值和客观偏好值与决策值之间的灰色关联度最大为原则,进行组合赋权,并通过一个新产品投资方案优选的案例证明了这种组合赋权法的可行性和有效性。

本文选用因子权重排序法和熵值法分别计算关中平原各市冬小麦主要生育时期干旱对产量的影响权重,并以此为基础,应用归一组合赋权法、最优组合赋权法和基于灰关联度的组合赋权法计算各生育时期的组合权重;通过建立加权 VTCI 与小麦单产的一元线性回归模型,评价冬小麦主要生育时期的干旱监测效果。

1 材料与方法

1.1 研究区域

关中平原位于陕西省中部的渭河流域,西起宝鸡,东至潼关,西窄东宽,地势西高东低,土壤肥沃,水源丰富,是陕西省的农业基地,也是我国以小麦为主的粮食主要生产地之一。关中平原位于季风区的边缘,属于暖温带半干旱或半湿润气候,热量东部优于西部,而降水则西部优于东部。由于降水量偏少,年均降水量为 550~700 mm,且分布不均匀,关中平原出现春旱、伏旱的机率较高。因此,选取该地区作为干旱监测的研究区域具有代表性^[18-19]。

1.2 VTCI 时间序列的生成

所用遥感数据为关中平原 2002—2009 年每年 3—5 月间的 NOAA/AVHRR 影像,选取东经 106°22′到 110°24′,北纬 33°57′到 35°39′之间的区域。首先对遥感影像进行辐射校正、定标、几何校正等预处

理,根据地理坐标裁剪出关中平原的影像。对研究区域的遥感影像计算条件植被温度指数(VTCI):

$$VTCI = \frac{LST_{\max}(NDVI_i) - LST(NDVI_i)}{LST_{\max}(NDVI_i) - LST_{\min}(NDVI_i)} \quad (1)$$

其中:

$$LST_{\max}(NDVI_i) = a + bNDVI_i \quad (2)$$

$$LST_{\min}(NDVI_i) = a' + b'NDVI_i \quad (3)$$

式中, $NDVI$ 为归一化植被指数; LST 为地表温度; $LST_{\min}(NDVI_i)$ 和 $LST_{\max}(NDVI_i)$ 分别表示在研究区域内,当 $NDVI_i$ 等于某一特定值时的 LST 的最小值和最大值; $LST(NDVI_i)$ 表示某一像素的 $NDVI$ 值为 $NDVI_i$ 时的地表温度; a 、 b 、 a' 和 b' 为待定系数,由研究区域的 $NDVI$ 和 LST 散点图近似获得^[20]。

研究区域包括渭南、咸阳、宝鸡、西安和铜川五市。将陕西行政区县边界的矢量图与研究区域的遥感影像叠加,获得研究区域的分市图。根据VTCI的计算方法,生成2002—2009年每年3—5月以旬为单位的VTCI时间序列数据。

结合关中平原冬小麦的生长情况,将冬小麦越冬后的生育时期划分为返青期(3月上旬—3月中旬)、拔节期(3月下旬—4月中旬)、抽穗—灌浆期(4月下旬—5月上旬)和乳熟期(5月中旬—5月下旬)四个主要生育时期^[21]。根据关中平原的分市图,取各市区内VTCI的平均值作为该市冬小麦的旬VTCI值。依据冬小麦生育时期的划分,取各生育时期内所包含的多旬VTCI的平均值作为该生育时期的VTCI值。运用不同的赋权方法对关中平原各市冬小麦的VTCI进行加权统计,并与小麦单产建立一元线性回归模型。

1.3 研究方法

1.3.1 因子权重排序法

(1) 因子权重排序的确定

返青期干旱对小麦产量的影响最小,权重不超过0.1;拔节期为亏缺敏感期,这一时期干旱对小麦产量的影响最大,设定权重范围为0.4~0.5;其次是抽穗—灌浆期,权重范围为0.3~0.4;乳熟期权重不超过0.2。

(2) 相对重要性的计算

设权重排序最小的返青期权重 $w_1 = \omega_0$,根据各生育时期的相对重要程度,设拔节期权重 $w_2 = \alpha\omega_0$,抽穗—灌浆期权重 $w_3 = \beta\omega_0$,乳熟期权重 $w_4 = \gamma\omega_0$ 。

(3) 权重的计算

各生育时期的权重,应满足以下条件:

$$\begin{cases} (1 + \alpha + \beta + \gamma)\omega_0 = 1 \\ 0 < \omega_0 < 0.1, 0.4 < \alpha\omega_0 < 0.5, 0.3 < \beta\omega_0 < 0.4, 0 < \gamma\omega_0 < 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

固定 $\omega_0 = 0.03$,使其以0.01的步长增长至0.1,计算满足条件的 α 、 β 和 γ 组合及相应的权重 w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 ,选择加权VTCI与小麦单产间线性相关性最显著的一组权重作为因子权重排序法的权重。

1.3.2 熵值法 整理关中平原冬小麦 n 年4个生育时期的VTCI数据,构建VTCI数据矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times 4}$,其中 a_{ij} 表示第 i 年第 j 个生育时期的VTCI值。

(1) 熵的计算

$$h_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \ln \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right) \quad (5)$$

式中, h_j 表示第 j 个生育时期的熵。当 $\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} = 0$ 时,

$$\ln \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} = 0。$$

(2) 权重的计算

$$\text{第 } j \text{ 个生育时期的差异性系数 } g_j = \frac{1 - h_j}{4 - \sum_{j=1}^4 h_j},$$

将差异性系数归一化处理得到第 j 个生育时期的权重

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^4 g_j} \quad (0 < w_j < 1, \sum_{j=1}^4 w_j = 1)。$$

1.3.3 归一组合赋权法 设主观赋权法(因子权重排序法)确定的第 j 个生育时期的权重为 w_j^1 ,客观赋权法(熵值法)确定的第 j 个生育时期的权重为 w_j^2 ,则应用归一组合赋权法确定的第 j 个生育时期的权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{w_j^1 w_j^2}{\sum_{j=1}^4 w_j^1 w_j^2}, j = 1, 2, \dots, 4 \quad (6)$$

1.3.4 最优组合赋权法 $W^1 = (w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1)$ 、 $W^2 = (w_1^2, w_2^2, w_3^2, w_4^2)$ 分别表示主、客观权重,为使其与组合权重尽可能贴近,构造优化模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^4 (1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^4 (w_j - w_j^k)^2}) \\ \sum_{j=1}^4 w_j = 1 \end{cases} \quad (7)$$

利用该模型求解出最优组合权重 w_j 。

1.3.5 基于灰关联度的组合赋权法

(1) 主、客观偏好值的计算

根据构建的 VTCI 数据决策矩阵 $A(a_{ij})_{n \times 4}$, 利用 $Z = \sum_{j=1}^4 a_{ij} \times w_j$ 分别计算出主观偏好值 Z^1 和客观偏好值 Z^2 。

(2) 关联系数的计算

灰关联系数表示主观偏好值和客观偏好值与决策值的相似度,计算方法为:

$$\delta_{ij}(s) = \frac{\min_j \min_s |Z_{i1}(s) - A_{ij}(s)| + \rho \max_j \max_s |Z_{i1}(s) - A_{ij}(s)|}{|Z_{i1}(s) - A_{ij}(s)| + \rho \max_j \max_s |Z_{i1}(s) - A_{ij}(s)|} \tag{8}$$

式中, $\delta_{ij}(s)$ 为主、客观偏好值与 A_{ij} 在第 s 点的关联系数, $|Z_{i1}(s) - A_{ij}(s)|$ 表示偏好值数列 Z 与决策值数列 A_{ij} 在 s 点的绝对差值, ρ 为分辨系数, 在 0 - 1 之间取值, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

(3) 组合权重的计算

组合权重 w_j 应使决策者的主观偏好值和客观偏好值与决策值的总相似度最大, 为兼顾主、客观偏好, 建立如下目标最优化模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 (\delta_{ij}^1 + \delta_{ij}^2) w_j \\ 0 < w_j < 1, \sum_{j=1}^4 w_j = 1 \end{cases} \tag{9}$$

根据此模型求解出灰关联组合权重 w_j 。

2002—2009 年关中平原各市冬小麦的单产来自于陕西省统计年鉴 2003—2010。根据加权 VTCI 与冬小麦单产间的线性决定系数最大的原则, 选择较为合适的赋权方法。

2 结果与分析

应用因子权重排序法得到多组权重, 选择与小麦单产线性相关分析中决定系数 R^2 值最大的一组作为因子权重排序法的权重。分别用因子权重排序法和熵值法确定的权重计算关中平原各市的加权 VTCI, 并与小麦单产建立回归模型, 进行线性相关分析(表 1)。结果表明, 因子权重排序法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性显著, 咸阳、宝鸡和西安均通过 F 检验, 决定系数 R^2 值均超过 0.5, 渭南次之, R^2 值为 0.421, 宝鸡较差。熵值法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性不显著, 只有宝鸡和西安通过 F 检验, 决定系数 R^2 值超过 0.5, 其余三市 R^2 值均未达到 0.4。且熵值法的相关分析结果中各市的决定系数 R^2 值均低于因子权重排序

法的结果。因此, 因子权重排序法能较好地反映关中平原冬小麦 VTCI 与产量的线性相关性, 在分析冬小麦主要生育时期的相对重要性及评价冬小麦主要生育时期的干旱监测效果中具有较大的适用性, 熵值法对各生育时期权重的计算较不合理。铜川由于地形复杂、气候差异等原因, 两种赋权方法的结果均未通过 F 检验, 决定系数 R^2 值偏小。

表 1 应用因子权重排序法和熵值法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析结果

Table 1 Linear correlation between wheat yields and weights VTCI determined by the factor weight sorting method and entropy method

市 City	因子权重排序法 Factor weight sorting method		熵值法 Entropy method	
	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value
渭南 Weinan	0.421	3.640	0.195	1.212
咸阳 Xianyang	0.555	6.243	0.391	3.204
宝鸡 Baoji	0.663	9.854	0.621	8.207
西安 Xi'an	0.649	9.224	0.554	6.206
铜川 Tongchuan	0.036	0.187	0.001	0.003

注: $F_\alpha(1, n-2) = 4.06, \alpha = 0.10, n = 7$ 。

应用三种组合赋权方法分别计算因子权重排序法与熵值法的组合权重, 建立加权 VTCI 与小麦单产的回归模型, 对其进行线性相关分析(表 2)。结果表明, 除铜川外, 三种组合赋权法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性均较为显著, 咸阳、宝鸡和西安均通过 F 检验。对比分析决定系数 R^2 值, 三种组合赋权法的结果中宝鸡和西安的 R^2 值接近 0.7, 咸阳的 R^2 值接近 0.6, 渭南次之, 也达到 0.4。且组合赋权法的结果均高于因子权重排序法和熵值法的结果。这些结果说明, 组合赋权法比因子权重排序法和熵值法能够更好地反映关中平原冬小麦 VTCI 与产量的线性相关性, 即应用组合赋权法能够较准确地反映关中平原冬小麦主要生育时期的旱情。

3 讨论与结论

选取关中平原 2002—2009 年的 VTCI 数据, 首先运用因子权重排序法和熵值法分别计算冬小麦越冬后主要生育时期的权重, 对比分析加权 VTCI 与小麦单产的一元线性回归结果。结果表明, 主观赋权法(因子权重排序法)能够较好地反映加权 VTCI 与小麦单产间的线性相关性, 大部分地区的决定系数 R^2 值接近 0.6; 客观赋权法(熵值法)确定的加权 VTCI 与小麦单产间的线性关系不明显, 部分地区的

R^2 值未达到 0.4。为兼顾主观偏好又减小客观随意性,以主、客观权重为基础,运用三种组合赋权方法计算各生育时期的组合权重,加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性均有所提高,除铜川外各市的 R^2 值均超过 0.4,部分地区接近 0.7。因此,组合赋权法

优于单一的主观赋权法和客观赋权法,对冬小麦各生育时期权重的计算更合理。其中,归一组合赋权法计算简单,能够很好地反映加权 VTCI 与小麦单产间的线性相关性,可用于冬小麦主要生育时期干旱监测效果的评价。

表 2 应用基于因子权重排序法和熵值法的三种组合赋权方法确定的
加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析结果

Table 2 Linear correlation between wheat yield and weights VTCI determined by three combination
weighting methods using the factor weight sorting method and entropy method

市 City	归一组合赋权法 Normalized combination method		最优组合赋权法 Optimal combination method		基于灰关联度的组合赋权法 Combination method based on grey correlation degree	
	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value
渭南 Weinan	0.421	3.643	0.433	3.814	0.443	3.970
咸阳 Xianyang	0.599	7.469	0.556	6.270	0.598	7.430
宝鸡 Baoji	0.556	6.272	0.677	10.467	0.688	11.025
西安 Xi'an	0.680	10.606	0.653	9.422	0.697	11.508
铜川 Tongchuan	0.083	0.450	0.064	0.343	0.027	0.138

注: $F_{\alpha}(1, n - 2) = 4.06, \alpha = 0.10, n = 7$ 。

主观赋权法和客观赋权法均有多种方法,本文选用了因子权重排序法和熵值法进行组合赋权,加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析取得较好的结果,但所采用的赋权方法中渭南均未通过 F 检验。今后的工作中可以尝试选用其它主、客观法的组合进行组合赋权,对比分析不同组合方式计算的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性,得到更好的赋权方法,以监测冬小麦主要生育时期的干旱情况并评估干旱对冬小麦生产的影响。

参 考 文 献:

[1] 黄会平. 1949—2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 94-98.

[2] 方建刚, 白爱娟. 陕西春季干旱的环流特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 247-253.

[3] 刘 欢, 刘荣高, 刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 232-237.

[4] 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 892-897.

[5] 王鹏新, WAN Zheng-ming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-531.

[6] Quarmay N A, Milnes M, Hinde T L, et al. The use of multi-temporal NDVI measurement from AVHRR data for crop yield estimation and prediction[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(2): 199-210.

[7] 李凤霞, 伏 洋, 张国胜. 青海省干旱预警服务系统设计与建立[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 1-5.

[8] 徐泽水, 达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究[J]. 中国管

理科学, 2002, 10(2): 84-87.

[9] 何大义, 孔 锐. 顾客满意度调查中因子权重的排序估计法[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 63-65.

[10] 李志兰. 基于熵值法的浙江省“十一五”基础研究热点分析与思考[J]. 浙江大学学报(理学版), 2011, 38(5): 606-610.

[11] 曾宪报. 组合赋权法新探[J]. 理论与方法研究, 1997, (5): 69-72.

[12] Li Huan, Xiao Xinping. Study on the combination weighting method of hybrid multiple attribute decision-making. 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, Sept 15 - 18, 2011: 561-565.

[13] 张 良, 陈克隆, 曹生奎. 青海东部主要农业区县域农业生态系统健康评价[J]. 干旱地区农业研究, 30(1): 204-210.

[14] 王书吉, 费良军, 雷雁斌, 等. 灌区节水改造综合评估指标权重确定方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 101-106.

[15] Fu Xinping, Zou Min. Application of combination weighting method in contract risk's evaluation of third party logistics[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2007, 23: 128-132.

[16] 杨雅勋, 李子青, 郝宪武. 组合赋权灰关联法在桥梁加固方案优选中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(4): 84-88.

[17] 杜俊慧, 李晋红. 基于灰色关联度的组合赋权方法研究[J]. 经济师, 2010, (5): 31-32.

[18] 李俊霖, 延军平, 孙 虎, 等. 关小平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 131-134.

[19] 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 221-229.

[20] 孙 威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26.

[21] 孙月青, 王鹏新, 张树誉, 等. 基于层次分析法的加权 VTCI 和小麦产量分析[J]. 遥感信息, 2010, (2): 83-87.