

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 ——Ⅱ.改进的层次分析法和变异系数法组合赋权

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: 运用改进的层次分析法、变异系数法及主客观组合赋权法确定关中平原冬小麦越冬后主要生育时期干旱对产量的影响权重, 建立关中平原五市 2002—2009 年每年的加权条件植被温度指数 (VTCI) 与冬小麦单产的一元线性回归模型, 分析 VTCI 与产量间的线性关系。结果表明, 变异系数法确定的加权 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; 改进的层次分析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, 除铜川外其余四市的 R^2 值接近 0.5, 或者高于 0.6, 且组合赋权法的结果中西安的 R^2 值达到 0.7。基于改进的层次分析法和变异系数法的归一组合赋权法的结果优于其它主客观组合赋权法的结果, 为最优赋权方法, 可用于评价冬小麦主要生育时期的干旱监测效果。

关键词: 条件植被温度指数; 改进的层次分析法; 变异系数法; 组合赋权法; 小麦单产; 关中平原

中图分类号: S165+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0236-04

Evaluation of drought monitoring effects in the main growing stages of winter wheat by using the vegetation temperature condition index ——Ⅱ. Improved analytic hierarchy process and variation coefficient method

LI Yan^{1,2}, WANG Peng-xin¹, LIU Jun-ming¹, ZHANG Shu-yu³, LI Li¹

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

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

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

Abstract: Using the improved analytic hierarchy process, variation coefficient method and combination weighted methods, the impact weights of drought to the yield of winter wheat in main growing stage after winter was determined. During 2002 to 2009 in Five Cities of Guanzhong Plain, a linear regression model of annual weighted VTCI to the yield of winter wheat was established and analyzed the linear relation of VTCI with yield. The results showed that the linear relativity of weighted VTCI to yield of winter wheat determined by the variation coefficient method was not remarkable, the decision coefficient R^2 value was total less than 0.5 in Weinan, Xianyang and Tongchuan. But the linear relativity of weighted VTCI to yield of winter wheat determined by the improved analytic hierarchy process and combination weighted method was remarkable, and the R^2 values of the Four Cities except Tongchuan was close to 0.5 or larger than 0.6, and the R^2 values in Xian by the combination weighted method was larger than 0.7. The results of improved analytic hierarchy process and variation coefficient method was better than the combination weighted method, so they were the good methods and can be used to evaluate the drought monitoring effects in the main growing period of winter wheat.

Keywords: vegetation temperature condition index; improved analytic hierarchy process; variation coefficient method; combination weighted method; wheat yield; Guanzhong Plain

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2012BAD20B0103); 国家自然科学基金资助项目 (41371390, 41071235); 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, 在读硕士, 主要从事定量遥感及其在干旱预测中的应用研究。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。

干旱是制约我国农业生产发展的主要因素之一,近年来,随着耕地面积的减少和成灾面积的增加,我国的粮食总产量逐年下降。干旱监测是制定灾区救助方案和采取防灾减灾策略的基础^[1],有效地监测干旱和评估干旱影响可以为相关部门制定抗旱减灾决策提供科学依据。关中平原是陕西省粮食的主产区,因此,监测关中平原作物的旱情并评估干旱的强度及范围对陕西省农业生产有重要意义^[2]。

研究作物生长规律及不同生育时期干旱对产量的影响程度,能够为减轻旱灾及作物稳产提供参考依据^[3]。水分亏缺是限制作物生长的主要因素之一,干旱导致土壤水分亏缺,影响作物冠层叶面积的发育及叶片光合速率,抑制作物正常生长,进而致使作物减产^[4-5]。干旱的发生时段和程度不同,造成作物减产率也不同。在农业气象学中把小麦拔节到孕穗期称为水分临界期^[6-7],拔节期是干旱对小麦生长影响的关键生育时期,其次是灌浆期,也是小麦生长需水量较大的时期。这两个时期土壤水分的状况对小麦生长发育至关重要,如果发生水分胁迫会引起小麦生理生态的一系列变化,进而对产量造成影响^[8]。返青期主要是生根、长叶和分蘖,水量不宜过大。乳熟期穗粒结构已经形成,对一定的水分亏缺表现出较强的忍受力。返青期和乳熟期干旱对产量的影响相对较小^[9]。

改进的层次分析法^[10-11]是一种客观赋权法,它通过对传统的层次分析法中的 1-9 标度进行改进优化,建立新的三标度评判矩阵,能够较容易地对两两因素做出相对重要性的比较。张天军等^[12]在煤与瓦斯突出危险等级预测中应用改进的层次分析法更合理地确定了影响煤与瓦斯突出因素的权重,较准确地进行等级预测。变异系数法^[13]是一种客观赋权法,它的基本思想是:在多指标综合评价中,如果某项指标在所有被评价对象上观测值的变异程度较大,说明该指标能够明确区分开各参评样本,对评价结果影响较大,则该指标应赋予较大的权重;反之,则应赋予较小的权重。刘洪顺^[14]和王永弟等^[15]在测量平差中应用变异系数法进行定权平差,提高了平差精度。

根据关中平原冬小麦主要生育时期的干旱对产量的影响差异,选用改进的层次分析法和熵值法分别计算关中平原各市冬小麦主要生育时期的主客观权重和客观权重,运用归一组合赋权法、最优组合赋权法及基于灰关联度的组合赋权法等进行组合赋权,分析加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性,并根据两者间的决定系数最大原则,确定最优赋权方法。

1 研究方法

1.1 改进的层次分析法

改进的层次分析法采用新的三标度建立评判矩阵,通过一系列稳定的传递矩阵使之自然满足一致性检验,直接确定权重。具体步骤为:

(1) 比较矩阵 B 的建立

比较关中平原冬小麦越冬后 4 个生育时期之间的相对重要程度(表 1),建立比较矩阵 $B(b_{ij})_{4 \times 4}$:

$$B(b_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中,0 表示第 i 个生育时期没有第 j 个生育时期重要;1 表示第 i 个生育时期与第 j 个生育时期同等重要;2 表示第 i 个生育时期比第 j 个生育时期重要。

表 1 改进的层次分析法的比较标度

Table 1 Comparison scale for the improved analytic hierarchy process

生育时期 Growing stage	返青期 Turning green	拔节期 Elongation	抽穗 - 灌浆期 Heading - filling	乳熟期 Dough
返青期 Turning green	1	0	0	0
拔节期 Elongation	2	1	2	2
抽穗 - 灌浆期 Heading-filling	2	0	1	2
乳熟期 Dough	2	0	0	1

(2) 判断矩阵 C 的构建

在计算冬小麦 4 个生育时期重要性系数($r_j = \sum_{i=1}^4 b_{ij}$)的基础上,构建判断矩阵 C , C 中的元素 c_{ij} 应满足:

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} \times (k - 1) + 1 & r_i \geq r_j \\ \left[\frac{|r_i - r_j|}{r_{\max} - r_{\min}} \times (k - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i < r_j \end{cases} \quad (1)$$

式中, $r_{\max} = \max\{r_j\}$, $r_{\min} = \min\{r_j\}$, $k = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$ 。

(3) 传递矩阵 D 的计算

判断矩阵 C 的最优传递矩阵记为 D , D 中元素 d_{ij} 应满足:

$$d_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \left(\lg \frac{c_{it}}{c_{jt}} \right) \quad (2)$$

(4) 拟优一致矩阵 C^* 的计算

判断矩阵 C 的拟优一致矩阵 C^* 中元素 c_{ij}^* 应满足: $c_{ij}^* = 10^{d_{ij}}$ 。

(5) 权重的计算

计算拟优一致矩阵 C^* 的最大特征值和最大特征向量,经归一化处理得到各生育时期的权重。

1.2 变异系数法

变异系数法是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重。基本步骤为:

(1) 均值和标准差的计算

整理 n 年 4 个生育时期的 VTCI 数据,构建 VTCI 数据矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times 4}$,计算各生育时期 n 年的均值 $\bar{A}_j$ 和标准差 S_j :

$$\bar{A}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, 2, \cdots 4 \tag{3}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{A}_j)^2}, j = 1, 2, \cdots 4 \tag{4}$$

(2) 权重的计算

计算各生育时期的变异系数($V_j = S_j/\bar{A}_j$),对变异系数 V_j 进行归一化处理,得到各生育时期的权重 w_j :

$$w_j = V_j / \sum_{j=1}^4 V_j, j = 1, 2, \cdots 4 \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 主、客观赋权法及组合赋权法的结果对比

分别应用改进的层次分析法和变异系数法确定的权重计算关中平原各市 2002—2009 年每年的加权 VTCI,与小麦单产建立线性相关分析(表 2)。结果表明,改进的层次分析法确定的回归模型中除铜川外其余四市均通过 F 检验,宝鸡和西安的决定系数 R^2 值接近 0.7,咸阳接近 0.6,渭南次之, R^2 值接近 0.5;变异系数法的回归模型中咸阳、宝鸡和西安通过 F 检验,宝鸡和西安的决定系数 R^2 值大于 0.6,其余各市的 R^2 值均未达到 0.5。这说明应用改进的层次分析法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性较为显著。对比因子权重排序法与改进的层次分析法两种主观赋权方法及熵值法与变异系数法两种客观赋权方法,发现应用主观赋权法计算的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析结果中大部分地区的决定系数 R^2 值接近或超过 0.6,而客观赋权法的结果中只有宝鸡和西安的 R^2 值接近或达到 0.6,其余各市均较低^[16]。表明主观赋权法能够更好地反映冬小麦加权 VTCI 与产量之间的线性关系,应用主观赋权法确定的冬小麦各生育时期的权重比客观赋权法较为合理,在关中平原冬小麦主要

生育时期的干旱监测效果评价中有较大适用性。

表 2 应用改进的层次分析法和变异系数法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析结果

Table 2 Linear correlation analysis of wheat yield to weighted VTCI by the improved analytic hierarchy process and variation coefficient method

市 City	改进的层次分析法 Improved analytic hierarchy process		变异系数法 Variation coefficient 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	0.466	4.367	0.260	1.760
咸阳 Xianyang	0.592	7.248	0.470	4.426
宝鸡 Baoji	0.667	10.025	0.694	11.326
西安 Xi'an	0.666	9.949	0.621	8.195
铜川 Tongchuan	0.068	0.364	0.012	0.061

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

以改进的层次分析法和变异系数法确定的权重为基础,分别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冬小麦各生育时期的组合权重,并分析加权 VTCI 与小麦单产间的线性相关性(表 3)。结果表明,应用三种组合赋权法确定的回归模型中,除铜川外其余四市的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性均较显著,咸阳、宝鸡及西安的决定系数 R^2 值接近或超过 0.7,渭南接近 0.5。对比分析组合赋权法与主、客观赋权法的决定系数 R^2 值及 F 检验值,组合赋权法的结果均优于改进的层次分析法和变异系数法(表 2),也优于因子权重排序法和熵值法,见文献[16]。因此,组合赋权法优于主观赋权法和客观赋权法,且归一组合赋权法计算简单,回归效果最好。

2.2 不同组合方式的归一组合赋权结果对比

对于关中平原冬小麦主要生育时期的 VTCI 时间序列,选用不同的主观赋权法和客观赋权法进行归一组合赋权,通过对比分析加权 VTCI 与产量间的线性关系,发现除铜川外其余四市冬小麦的加权 VTCI 与单产间均有较好的线性相关性,决定系数 R^2 值均较高^[16],因子权重排序法与熵值法的归一组合赋权法^[16]和改进的层次分析法与熵值法的归一组合赋权法(表 4)的相关分析结果中,咸阳、宝鸡及西安的 R^2 值接近或超过 0.6,但渭南的 R^2 值均未达到 0.5;改进的层次分析法与变异系数法的归一组合赋权法(表 3)和因子权重排序法与变异系数法的归一组合赋权法(表 4)的相关分析结果中,除

铜川外其余四市的 R^2 值均超过 0.5, 咸阳、宝鸡及西安的 R^2 值均接近 0.7。对比四组归一组合赋权法的结果, 改进的层次分析法与变异系数法的组合中各市的决定系数 R^2 值明显高于其它主、客观法组合赋权的结果。即应用改进的层次分析法与变异

系数法的归一组合赋权法计算的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性最为显著, 确定的关中平原冬小麦各生育时期的权重最为合理, 可用于评价关中平原冬小麦主要生育时期的干旱监测效果及开展干旱对冬小麦生产的影响评估研究。

表 3 应用基于改进的层次分析法和变异系数法的三种组合赋权法确定的加权 VTCI 和小麦单产的线性相关分析

Table 3 Linear correlation analysis between wheat yields and weighted VTCI by three combination weighted methods based on the improved analytic hierarchy process and variation coefficient 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	0.561	6.385	0.466	4.370	0.498	4.967
咸阳 Xianyang	0.669	10.116	0.612	7.885	0.627	8.411
宝鸡 Baoji	0.654	9.450	0.688	11.013	0.662	9.788
西安 Xi'an	0.700	11.667	0.671	10.206	0.723	13.074
铜川 Tongchuan	0.173	1.042	0.064	0.342	0.043	0.224

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

表 4 应用归一组合赋权法确定的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析

Table 4 Linear correlation analysis between wheat yield and weighted VTCI by the normalized combination method

市 City	因子权重排序法与变异系数法组合 Factor weight sorting method and variation coefficient method		改进的层次分析法与熵值法组合 Improved analytic hierarchy process and 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	0.529	5.611	0.466	4.364
咸阳 Xianyang	0.644	9.045	0.592	7.250
宝鸡 Baoji	0.678	10.530	0.667	10.020
西安 Xi'an	0.693	11.260	0.665	9.929
铜川 Tongchuan	0.136	0.788	0.068	0.364

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

3 结论与展望

选取关中平原冬小麦 2002—2009 年的 VTCI 时间序列数据, 分别应用主观赋权法中的因子权重排序法和改进的层次分析法, 客观赋权法中的熵值法和变异系数法及归一组合赋权法、最优组合赋权法和基于灰关联度的组合赋权法等主客观组合赋权法计算关中平原五市的加权 VTCI, 并与小麦单产建立线性相关分析。结果表明, 所采用的客观赋权法均不能很好地反映冬小麦 VTCI 与产量间的线性相关性, 部分地区的决定系数 R^2 值低于 0.4。应用主观赋权法和主客观组合赋权法计算的加权 VTCI 与小麦单产的线性相关性显著, 大部分地区的 R^2 值接近 0.6, 甚至达到 0.7, 对冬小麦各生育时期权重的

确定较合理, 且组合赋权法的结果优于主观赋权法的结果。选用不同的主、客观赋权法按照三种组合赋权法的原理进行组合赋权, 对比分析加权 VTCI 与小麦单产的线性相关分析结果, 发现归一组合赋权法的结果优于其他两种组合赋权方法, 且改进的层次分析法与变异系数法的归一组合赋权结果最理想, 为最优赋权方法。

运用主、客观赋权法及组合赋权法分析关中平原冬小麦 VTCI 与产量之间的线性关系, 渭南、西安、咸阳和宝鸡均取得较显著的线性相关性, 证实了用 VTCI 监测关中平原冬小麦主要生育时期内干旱情况的可行性。铜川由于地形复杂、气候差异等原因, 回归效果较差。

(下转第 262 页)

参 考 文 献:

[1] Sakuma Yoh, Liu Qiang, Dubouzet Joseph G, et al. DNA-binding specificity of the ERF/AP2 domain of Arabidopsis DREBs, transcription factors involved in dehydration- and cold-inducible gene expression[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2002,290(3):998-1009.

[2] 陈立栋.冬小麦节水栽培生理生态研究[D].泰安:山东农业大学,2002.

[3] 高世庆.抗逆相关 *DREB* 基因转化小麦及功能鉴定[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2004.

[4] 张双喜,徐兆师,张改生,等.转 *W16* 小麦抗旱新品系的创制及抗旱生理机制分析[J]. 中国农业科学,2011,44(24):4971-4979.

[5] 南炳东,陈耀锋,闵东红,等.不同水分胁迫下转 *TaEBP* 基因小麦株系拔节期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(4):23-28.

[6] 周永斌,闵东红,徐兆师,等.不同水分胁迫下转 *W16* 小麦回交株系基因表达特性及其抗旱机制[J]. 农业生物技术学报,2012,20(11):1271-1281.

[7] 王 刚,刘曙东,闵东红,等. *W16* 转亲麦 19 小麦株系抽穗期抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):1-6.

[8] Hoagland D R. The water-culture method for growing plants without soil[M]. America San Francisco: California Agriculture Experiment Station, 1950:8-8.

[9] 周晓果,景蕊莲,郝转芳,等.小麦幼苗根系性状的 QTL 分析[J]. 中国农业科学,2005,38(10):1951-1957.

[10] 李秧秧,张萍萍,赵丽敏,等.不同氮素形态下小麦叶片光合气体交换参数对蒸汽压亏缺的反应[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1299-1305.

[11] 张建军,王 勇,李尚忠.农业生物节水研究进展[J]. 作物杂志,2006,(6):4-8.

[12] 马瑞昆,蹇家利,贾秀领,等.供水深度与冬小麦根系发育的关系[J]. 干旱地区农业研究,1991,9(3):1-10.

[13] 周桂莲.小麦抗旱性鉴定的形态指标及其分析评价[J]. 陕西农业科学,1996,(4):33-34.

[14] 张士昌,郭进考,底瑞耀,等.不同水分条件下不同抗旱基因型小麦的产量及旗叶光合特性[J]. 河北农业科学,2009,13(8):4-6.

[15] 吕丽华,李雁鸣,胡玉昆.水分胁迫对不同抗旱性小麦品种光合特性及产量性状的影响[J]. 河北农业大学学报,2005,28(3):1-5.

[16] 杨兆生,阎素红,王俊娟,等.不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究[J]. 麦类作物学报,2000,20(1):47-50.

(上接第 239 页)

确定权重的方法较多,今后的研究可尝试采用其它赋权方法获取权重,评价干旱监测效果并开展干旱影响评估研究.干旱监测效果的评价是一项复杂的工作,不仅需要合适的干旱监测模型,确定各生育时期合理的权重,还需要综合气候特征、人类活动等多种影响因素做出更合理地评估。

参 考 文 献:

[1] 张树誉,杜继稳,陈晓楠.陕西省干旱影响评估业务系统[J]. 陕西气象,2008,(4):40-43.

[2] 陈 旭,郝明德,许晶晶,等.干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):159-163.

[3] 赵世伟,管秀娟,吴金水.不同生育期干旱对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水,2001,20(4):56-59.

[4] 景蕊莲.作物抗旱研究的现状与思考[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(2):79-85.

[5] 张林刚,邓西平.小麦抗旱性生理生化研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2000,18(3):87-92.

[6] 龚绍先.粮食作物与气象[M]. 北京:中国农业大学出版社,1988:66.

[7] 周苏孜,马元喜,王晨阳,等.干旱胁迫对小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. 华北农学报,2002,15(2):57-62.

[8] 韩绍林.旱作农业与河南旱地小麦栽培[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010:142-146.

[9] 陈学留,王志芬,余美炎,等.小麦不同生育期的光合速率及光合产物分配[J]. 核农学通报,1993,14(5):225-228.

[10] 杨永清,许先云.改进的层次分析法用于矿井安全管理的综合评价[J]. 系统工程理论与实践,1999,(6):121-125.

[11] 石 龙,张瑞芳,谢启源,等.改进层次分析在公共建筑火灾风险分析中的应用[J]. 科技通报,2009,54(3):329-336.

[12] 张天军,苏 琳,乔宝明,等.改进的层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J]. 西安科技大学学报,2010,30(5):536-542.

[13] 陈述云.综合评价中指标的客观赋权方法[J]. 统计方法研究,1995,6:16-17.

[14] 刘洪顺.变异系数赋权法对水准网平差定权方法的改进[J]. 地理空间信息,2012,10(4):142-143.

[15] 王永弟,许承权,范 千,嫡权、变异系数及模糊多准则决策在测量中平差中的综合应用[J]. 工程勘察,2012,(9):58-61.

[16] 李 艳,王鹏新,刘竣明,等.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 因子权重排序法和嫡值法组合赋权[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):159-163.