

基于遗传算法的条件植被温度指数的时间尺度转换方法

白雪娇¹, 王鹏新¹, 张树誉², 李 俐¹, 景毅刚², 刘峻明¹

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西省气象局, 西安 710014)

摘 要: 多时相 VTCI 遥感数据具有更多的旱情信息, 能充分反映旱情对作物生长及产量的影响。不同时段发生干旱导致的作物减产率不同, 研究基于多时相 VTCI 时间尺度转换的干旱影响评估的方法具有重要意义。针对关中平原冬小麦主要生育期 VTCI 的时间尺度转化问题进行了建模分析, 研究了求解该问题的基于因子权重排序法与熵值法的归一组合赋权法(CAFE)、穷举法(EA)和遗传算法(GA)的过程和结果, 其中 EA 可得到问题的最优权重值。结果表明: CAFE 确定的冬小麦不同生育时期干旱对产量影响的权重值与 EA 获得的最优权重值相差较大, 而 GA 获得的权重值等于或接近于最优权重值, 其获得的加权 VTCI 与冬小麦单产的回归分析结果亦接近于 EA 而优于 CAFE, 精度较高, 同时其运算过程的时间复杂度大大低于 EA。GA 对关中平原冬小麦各生育时期干旱对产量影响权重的确定较为合理, 更适合于关中平原多时相 VTCI 数据时间尺度转换研究和干旱对冬小麦生产的影响评估研究。

关键词: 条件植被温度指数; 穷举法; 遗传算法; 关中平原; 时间尺度转换; 干旱影响评估

中图分类号: S127; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0190-07

Time-Scale Transform of Multi-Temporal Vegetation Temperature Condition Index Based on the Genetic Algorithm

BAI Xuejiao¹, WANG Pengxin¹, ZHANG Shuyu², LI Li¹, JING Yigang², LIU Junming¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China)

Abstract: Vegetation temperature condition index (VTCI) is a remotely sensed drought indicator, and has been applied to drought monitoring, predication and impact assessment. Multi-temporal VTCIs can cover more drought information related with crop yields, and the drought occurred at different crop growth stages and its degrees lead to diverse yield reduction rate. Therefore, it is of great significance to explore how to integrate useful information from multi-temporal remote sensing data to improve the precision of drought impact assessment. The modeling for temporal scale transformation of VTCIs at the main growth stages of winter wheat in the Guanzhong Plain was carried out by using the normalized combination of factor weight sorting method and entropy method (CAFE), the exhaustive attack method (EA) and the genetic algorithm (GA). The results showed that the weights of impact of droughts at the main growth stages on wheat yields determined by the CAFE had the large differences from the optimal weights obtained by the EA, while the weights determined by the GA were in agreement with the optimal weights. The genetic algorithm was superior to the CAFE in the regression analyses between the weighted VTCIs and the yields, and greatly improved the efficiency and precision of the drought impact. Meanwhile, the GA had the same performance of the EA, but the computation time of the GA was significantly lower than that of the EA. These results indicated that the weight at each growth stage of winter wheat in the Guanzhong Plain determined by the genetic algorithm was quite reasonable, and could more accurately reflect the drought information of the stage, and the GA was more suitable for the study on drought impact assessment.

Keywords: vegetation temperature condition index; exhaustive attack method; genetic algorithm; Guanzhong Plain; temporal scale transform; drought impact assessment

干旱持续时间长、强度大、影响范围广,是影响农业生产能力的主要气候因素,加强干旱的监测预警和影响评估,对农业生产及其发展具有重要意义。随着具有空间连续性的多源遥感技术的发展,为实时、精确、动态和大范围反演地面信息提供了技术手段,在旱情监测预警和影响评估等方面得到广泛的应用^[1-2]。关中平原是陕西省自然条件最好的地区和农业、果业生产基地,但其地处内陆、远离海洋,对干旱的响应极为敏感,农业干旱的季节性和区域性特征明显,成为区域农业生产的主要障碍因子^[3-4]。国内外研究者利用改进型的垂直干旱指数(MPDI)、植被水分胁迫指数(VWSI)等指标和 CERES-Wheat 模型等进行了较多旱情的监测预警和影响评估研究^[5-7],发展了丰富的旱情遥感监测预警和影响评估的理论和方法。条件植被温度指数(VTCI)综合了反射和辐射信息,可准确地进行区域级干旱监测研究,已被国内外学者广泛应用于旱情监测、影响评估和作物产量估测^[8-11]。

冬小麦越冬后的生育时期包括返青、拔节、抽穗、灌浆和乳熟等时期。干旱发生时段和程度不同造成的减产率也不同,拔节期和抽穗期受旱会影响穗粒数及成熟期提前,灌浆期和成熟期受旱会影响千粒重和籽粒品质^[12]。研究冬小麦生长规律及不同生育时期干旱对产量的影响程度能在一定程度上提供干旱对产量影响的有用信息,如能综合利用不同生育时期多时相 VTCI 对产量的影响信息,对其赋予一定的权重进行时间尺度转换为一个综合了多时相干旱信息的加权 VTCI 值,势必可以提高冬小麦估产和干旱影响评估的精度。关键是如何确定不同生育时期旱情对冬小麦产量影响的权重系数。多指标权重的确定方法大致分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法如专家调查法、层次分析法等,是基于决策者经验判断或主观认识决定指标权重,主观因素介入过多而使得评价结果主观性和随意性较大;客观赋权法如变异系数法、主成分分析法,是基于指标间关系和其包含的信息量通过建立一定的数学模型来确定指标权重,评价结果数学基础较强而忽略了实际情况^[13-14]。为兼顾两类方法的优点同时规避其局限性,综合集成主、客观信息的组合赋权法和其他权重集成优化模型得到了广泛应用。迟道才等^[15]运用博弈论的综合赋权方法将主客观赋权法相融合对东港灌区的运行状况进行了评价研究。王书吉等^[16]综合主客观赋权法的优点提出基于单位化约束条件的综合集成赋权法,确定了关中大型灌区的节水改造综合评价指标。曹永强等^[17]采用一种基于离差最大化原理的组合赋权方法确定了农业干旱风险综合评价指标的权重。

本文采用穷举法(EA)和遗传算法(GA)求算各生育时期权重系数对冬小麦主要生育期内多时相 VTCI 进行时间尺度转换以评估干旱对产量的影响。穷举法的基本思想是依题目的条件确定问题解的大致搜索范围,对所有可能的情况逐个验证^[18]。穷举法应用很多,如公元五世纪我国数学家张丘建在其《算经》一书中提出的“百鸡问题”,一些密码破译、删余卷积码好码的搜索等。穷举法可得到问题的最优解且算法简单,但运算量大导致计算效率低下。遗传算法是一种基于自然选择的模拟优化算法,它模拟自然进化的高效率搜索解决复杂的优化问题,因其通用、实用和高效的特点而被应用于各个领域,尤其对解决一些机器学习、信号处理和组合优化问题如旅行商问题^[19]、作业车间调度问题^[20]等有独特的优越性。本文利用遗传算法解决最优权重搜索,可实现快速收敛至全局最优解之目的。当前基于穷举法和遗传算法原理的算法在电子、电力和人工生命等领域应用较多,但应用于多时相遥感数据的时间尺度转换研究方面还不多见。

以关中平原冬小麦为研究对象,基于关中平原 2008—2014 年 Aqua MODIS VTCI 时间序列数据,以不同生育时期干旱对冬小麦单产的影响为基准,首先采用穷举法、遗传算法和课题组前期研究成果基于因子权重排序法与熵值法的归一组合赋权法(CAFE)^[10]求解不同生育时期干旱对产量的影响的权重值,然后根据 3 种方法获得的权重值对冬小麦主要生育期多时相 VTCI 进行时间尺度转换获取综合加权 VTCI 值,对其进行精度评价。以穷举法所得结果为参考对比分析遗传算法和基于因子权重排序法与熵值法的归一组合赋权法,为高效求解不同生育时期干旱对产量的影响的最佳权重提供可行的方法,提高基于多时相 VTCI 遥感数据时间尺度转换的干旱影响评估研究的精度。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

关中平原位于陕西省中部,海拔高度 325~800 m,总面积约 5.55 万 km²。关中平原质疏松肥沃,又有泾、渭和洛等河流提供水源,十分适宜耕作,是陕西省最重要的农耕区。关中平原年平均温度 6~13.6℃,年均降水量 500~600 mm,属暖温带半干旱气候,四季分明,雨热同期,冬春降水较少,是气候变化的敏感区,春、伏旱频繁发生,受旱成灾面积总体在波动中上升,造成粮食减产。将各市行政边界的矢量图与研究区域的遥感影像叠加,对研究区域按照各市的行

政边界进行市属的划分,得到关中平原分市概况图(图 1)。由于杨凌示范区面积较小,故将其划分到咸阳市境内。

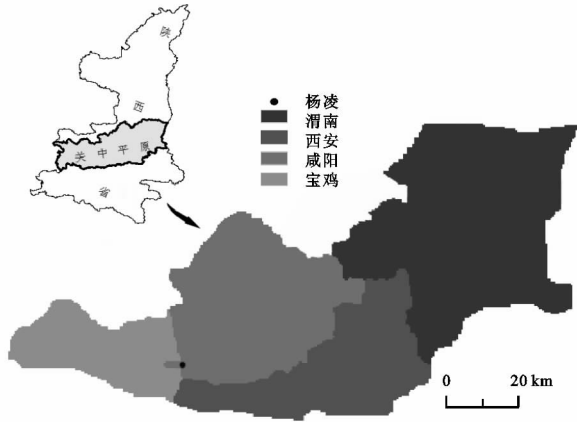


图 1 研究区概况图

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 数据来源 本文数据源主要是 2008—2014 年 3—5 月 Aqua MODIS 数据产品,包括日反射率产品(MYD09 GA)和日 LST 产品(MYD11 A1)。冬小麦单产数据来源于历年的《陕西省统计年鉴》。

1.2.2 条件植被温度指数的生成 条件植被温度指数(VTCI)是基于遥感反演的归一化植被指数(NDVI)和地表温度(LST)的散点图呈三角形区域分布的基础上提出的,主要用于监测旱情。计算方法为^[2,9]:

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

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

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

式中: $NDVI_i$ 为第 i 个时期(旬)某一像素的 NDVI 值; $LST(NDVI_i)$ 为某一像素的 NDVI 值为 $NDVI_i$ 时的 LST 值; $LST_{\max}(NDVI_i)$ 为研究区域内当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时 LST 的最大值; $LST_{\min}(NDVI_i)$ 为研究区域内当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时 LST 的最小值; a, b, a' 和 b' 为待定系数,由研究区域内的 NDVI 和 LST 的散点图近似获得。

应用多年的旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品确定每旬多年共同热边界 LST_{\max} , 应用多年的旬 NDVI 最大值合成产品和 LST 最大、最小值合成产品确定每旬多年共同的冷边界 LST_{\min} 。VTCI 取值范围为 0, 1, VTCI 值越小,旱情越严重, VTCI 值越大,则相反。

计算关中平原从 2008—2014 年 3—5 月共 63 旬的 VTCI 数据。根据越冬后冬小麦的生长情况,将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)4 个主要生育时期,取某一生育时期内多旬 VTCI 的平

均值作为该生育时期的 VTCI,再依据关中平原分市 VTCI 概况图统计出关中平原各市主要生育时期的 VTCI。铜川市由于占所选研究区域内面积较小,统计结果代表性差,因此文中不做研究。

1.3 研究方法

不同生育时期发生的干旱对冬小麦生长发育的影响是不同的,对最终产量的影响程度也是不同的。所以在实际应用中需考虑不同生育时期的干旱对冬小麦生长的影响程度,将不同生育时期多时相 VTCI 遥感数据进行时间尺度转换生成综合 VTCI 值以合理评估干旱对冬小麦生产的影响。

时间尺度转换权重优化的目标是使基于各生育时期干旱对产量的影响权重获得的加权 VTCI 与冬小麦单产的相关性最大,数学模型为:

$$VTCI_{wi} = w_T \times VTCI_T + w_E \times VTCI_E + w_H \times VTCI_H + w_M \times VTCI_M \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (VTCI_{wi} - \overline{VTCI_w})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (VTCI_{wi} - \overline{VTCI_w})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

$$w_T + w_E + w_H + w_M = 1 \quad (6)$$

式中: $VTCI_{wi}$, $\overline{VTCI_w}$ 为研究区域内第 i 年的加权 VTCI 值和多年平均加权 VTCI 值; Y_i , \bar{Y} 为研究区域内第 i 年的统计单产和多年平均统计单产; $VTCI_T$, $VTCI_E$, $VTCI_H$, $VTCI_M$ 为返青期、拔节期、抽穗—灌浆期和乳熟期的 VTCI 值; w_T , w_E , w_H , w_M 为返青期、拔节期、抽穗灌浆期和乳熟期的权重值。

约束条件:干旱的发生时段和程度不同,对作物生长发育和产量的影响也不同。返青期主要是生根、长叶和分蘖,需水量较小,干旱对小麦产量的影响最小,甚至在某种情况下会促进冬小麦生长速率;拔节期为水分亏缺敏感期,这一时期干旱对小麦产量的影响最大;抽穗—灌浆期小麦以生殖生长为主,也是需水的关键期;乳熟期由于穗粒结构已经形成,对水分亏缺表现出一定的耐旱性,干旱对产量影响相对较小。各生育时期干旱对产量影响的权重值范围如下:

$$\begin{aligned} -0.5 < w_T < 0.5 \\ 0 < w_E < 0.9 \\ 0 < w_{FH} < 0.9 \\ -0.5 < w_M < 0.5 \end{aligned} \quad (7)$$

1.3.1 穷举法 穷举法(Exhaustive Attack Method, EA)是基于计算机特点而进行解题的思维方法。一般是根据问题中的约束条件,在研究对象是由有限个元素构成的集合时,将所有可能的情况一一列举出来,然后逐一加以分析、处理,并验证结果是否满足给定的条件,列举完所有对象,问题将最终得以解

决^[18]。算法的工作流程:(1) 确定搜索空间,即列举出所有符合情况的 w_T, w_E, w_{HF} 和 w_M ; (2) 确定符合穷举规则的条件; (3) 确定能使搜索过程优化的条件,以缩小搜索范围,减少搜索时间; (4) 遍历所有解,获取符合条件的最优解。

1.3.2 遗传算法 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)通过选择、交叉和变异三个基本算子模拟自然界的選擇与遗传机理寻求最优解。以 GA 为代表的智能算法较传统优化算法如穷举法和启发式算法等,具有很好的收敛性,计算时间少且鲁棒性高,在优化计算中得到广泛的应用。算法的工作流程:(1) 随机产生一组初始群体,其中的每个个体(染色体)代表问题的一个潜在解,即一组 w_T, w_E, w_{HF} 和 w_M ,并设置迭代次数 $k_{\max}=200$; (2) 确定控制参数 p_x 和 p_m ,计算群体中每个个体相应的适应度值以找出最优个体; (3) 随机从种群中选择个体按一定概率交叉和变异; (4) 计算目标函数,判断进化是否结束,否则转步骤(2)。

1.4 精度评价方法

本文应用 Pearson 相关系数(Correlation coefficient)、估计值的标准误差(Std. Error of the estimate)和 F 检验分析比较回归模型精度,并应用相对误差(relative error, RE)与均方根误差(root mean square error, RMSE)比较冬小麦的估测单产与年鉴统计单产之间的差异,以此评价不同赋权方法确定的权重应用于关中平原冬小麦主要生育期多时相 VT-CI 时间尺度转换的精度。

$$RE = \frac{|Y_i - G_i|}{G_i} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - G_i)^2}{n}} \quad (9)$$

式中: G_i 是冬小麦估测单产; n 是样本个数。

2 结果与分析

2.1 不同赋权方法获取的权重结果对比

分别采用 CAFE, EA 和 GA 获取关中平原各市和 4 市整体的冬小麦返青期、拔节期、抽穗—灌浆期和乳熟期干旱对产量的影响权重值,见表 1。3 种方法获得的拔节期干旱对产量的影响的权重值最大,其次是抽穗—灌浆期的权重值,乳熟期和返青期的权重值较小(除 4 市整体),这与冬小麦实际生长规律和他人研究结果相一致^[21]。在拔节期冬小麦的营养器官生长旺盛,对水分吸收利用越加明显,是生长的关键期,在该生育时期发生干旱会造成根、茎、叶生长速率降低和影响冬小麦的有效小穗数。抽穗灌浆期,冬小麦由营养生长转向生殖生长,在抽穗灌浆期发生干旱

会使得穗粒数减少,籽粒瘪小,粒重明显降低,是影响小麦生长发育的又一关键时期。在返青期冬小麦生长缓慢,对水分的需求量较小,由于作物的补偿生效应,在返青期发生干旱对产量影响不大,在某种情况下甚至可以促进冬小麦生长发育和提高产量。冬小麦在乳熟期,营养物质向籽粒运输的过程结束,植株逐渐枯萎,根系开始死亡,因此在乳熟期发生干旱对产量影响较小。各市同一生育时期干旱对产量影响的权重值不同,这是由于不同地理位置、地形地貌影响下的旱情的主要影响因子气温和降水的时间分布和空间分布不同,同时各市灌溉地分布和面积不同。宝鸡和 4 市整体采用 EA 和 GA 获得的返青期干旱对产量影响的权重值分别为 -0.01 和 -0.05,但其绝对值较小,这是由于干旱后的复水补偿效应,关中平原易发生春旱,严重影响小穗数和穗粒数,而根据历年实地调研发现,关中平原大部分地区会在此期间进行春灌,正好解除了返青期水分胁迫和缓解了土壤水分的不足,有利于冬小麦生长发育。咸阳采用 EA 和 GA 获得的乳熟期干旱对产量影响的权重值均为 0,西安采用 EA 和 GA 获得的乳熟期干旱对产量影响的权重值分别为 0, 0.01,均小于其返青期的权重值,这是由于咸阳和西安两市地处关中平原中部,冬小麦生长后期降水较多,同时,地下水储量丰富、灌溉渠系发达,灌溉面积较大缺灌溉条件较好,冬小麦生长后期水分供应充分,使得其乳熟期干旱对产量影响的权重值小于返青期。渭南由于其境内旱作地分布较多而使得拔节期干旱对产量影响的权重值远大于其他生育时期,采用 EA 和 GA 获得权重值相等,为 0.83。

根据 3 种方法的计算原理,关中平原冬小麦不同生育时期干旱对产量影响的最优权重值可由 EA 获得。CAFE 确定的干旱对产量影响的权重值与 EA 确定的权重值相差较大,同时其经时间尺度转换后获得的加权 VT-CI 与冬小麦单产的相关性整体低于 EA 和 GA,这可能是受 CAFE 中因子权重排序法数据处理过程中权重范围设置区间和熵值法忽略了不同生育时期发生干旱对冬小麦产量的不同影响程度的影响。而 GA 获得的不同生育时期干旱对产量的影响的权重值与最优权重值相等或相近,相关性亦均较高,可见,赋权方法 GA 获取的不同生育时期干旱对产量影响的权重值的精度和性能几乎与穷举法相同,且优于 CAFE。从数据处理过程及其耗时上看,GA 搜索到的最优解比 EA 和 CAFE 的方案简约易行,以咸阳市为例,EA 用了 18h13m,而 GA 只用 41 s,时间比为 1 600 倍。综合实际算例的统计来看,GA 获得的干旱对产量影响的权重值与最优权重值的最大相差

不超过 0.01,与 EA 相比,GA 的时间代价比穷举法大为降低,计算效率是 EA 的几百倍不等。从实际问

题角度,GA 求解冬小麦生育时期优化赋权问题远优于 EA 和 CAFE。

表 1 不同赋权方法获得的权重值及其精度分析

地区	方法	返青期	拔节期	抽穗—灌浆期	乳熟期	相关系数	估计值标准误差/ (kg·hm ⁻²)	p 值
渭南	EA	0.00	0.83	0.09	0.08	0.58	301.07	0.2307
	GA	0.01	0.83	0.09	0.07	0.58	301.09	0.2307
	CAFE	0.03	0.50	0.30	0.17	0.45	328.72	0.3677
咸阳	EA	0.18	0.62	0.20	0.00	0.93***	116.85	0.0079
	GA	0.19	0.61	0.20	0.00	0.93***	116.97	0.0079
	CAFE	0.05	0.48	0.30	0.17	0.83**	175.21	0.0428
宝鸡	EA	-0.01	0.47	0.40	0.14	0.80*	236.49	0.0538
	GA	-0.01	0.47	0.40	0.14	0.80*	236.49	0.0538
	CAFE	0.03	0.50	0.30	0.17	0.78*	247.82	0.0659
西安	EA	0.13	0.61	0.26	0.00	0.90**	161.06	0.0139
	GA	0.13	0.61	0.25	0.01	0.90**	161.18	0.0139
	CAFE	0.05	0.48	0.30	0.17	0.89**	172.15	0.0183
4 市	EA	-0.05	0.55	0.25	0.25	0.79***	294.86	<0.0001
	GA	-0.05	0.54	0.26	0.25	0.79***	294.87	<0.0001
	CAFE	0.03	0.50	0.30	0.17	0.77***	301.79	<0.0001

注: * 表示在 0.1 水平显著, ** 表示在 0.05 水平显著, *** 表示在 0.01 水平显著。渭南、咸阳、宝鸡和西安的样本量 $n=6$, 4 市综合的样本量 $n=24$ 。 $F_{4,0.1}=0.729, F_{4,0.05}=0.811, F_{4,0.01}=0.917, F_{22,0.1}=0.344, F_{22,0.05}=0.404, F_{22,0.01}=0.515$ 。

除渭南市的权重值外,由 3 种方法确定的干旱对冬小麦各生育时期产量影响的权重值时间尺度转换后获得的 VTCI 与冬小麦单产的线性相关性均达到显著相关,均通过了 F 检验,其中 EA 和 GA 确定地权重值获得的尺度转换后的 VTCI 与冬小麦单产的相关系数均大于 CAFE,估计值标准误差均小于 CAFE,因此 EA 和 GA 能更好的反映关中平原冬小麦各生育时期 VTCI 与产量的线性相关性,在分析冬小麦主要生育时期干旱对产量的影响中具有较大的适用性,而 CAFE 的计算结果略差。GA 与 EA 仅估计值标准误差和显著系数值存在微小差异,以综合实际算例的统计来看,GA 与 EA 的估计值标准误差最大相差为 0.12 kg/hm²,显著系数值均相等,结合上文时间复杂度和计算效率分析,说明 GA 对关中平原各生育时期权重值的确定较为合理,能够较准确地反映关中平原冬小麦主要生育时期的旱情对产量的影响程度,可用于开展基于多时相 VTCI 数据的时间尺度转换的关中平原干旱影响评估研究。

2.2 不同赋权方法获取的冬小麦估测单产和精度评价

采用 CAFE,EA 和 GA 确定的干旱对产量影响的权重值经时间尺度转换后获得加权 VTCI 值,计算 2008—2014 年关中平原各市的估测单产,结合历年《陕西省统计年鉴》的单产统计数据对估产结果的精度进行评价(表 2)。结果表明,关中平原各市的单产估测结果与年鉴统计的单产较均为接近。GA 获取的单产的 RMSE 和 RE 均较低且皆小于 CAFE,与 EA 的

结果相近或相等。各市及 4 市综合的估测单产的 RMSE 均小于 300 kg/hm²,RE 除 4 市综合外均小于 5.0%,其中咸阳和西安的 RMSE 仅分别为 102.98 kg/hm²和 123.64 kg/hm²,RE 仅分别为 1.95%和 1.93%。GA 与 EA 相比 RMSE 的最大相差为 0.18 kg/hm²,RE 最大相差为 0.02%。进一步表明了采用 GA 获取的关中平原冬小麦生育时期的干旱对产量的影响的权重较为合理,应用于估产的精度较高,GA 更适合于基于多时相 VTCI 数据的时间尺度转换的关中平原干旱影响评估。

表 2 2008—2014 年冬小麦估测单产与统计单产对比

地区	赋权方法	均方根误差/ (kg·hm ⁻²)	相对 误差/%
渭南	EA	227.62	4.51
	GA	227.62	4.53
	CAFE	254.84	5.74
咸阳	EA	102.97	1.95
	GA	102.98	1.95
	CAFE	163.68	2.80
宝鸡	EA	244.41	4.30
	GA	244.41	4.30
	CAFE	272.24	4.67
西安	EA	123.64	1.93
	GA	123.64	1.93
	CAFE	141.74	2.42
4 市	EA	287.72	5.18
	GA	287.90	5.18
	CAFE	289.82	5.56

以上结果均表明采用 GA 求解冬小麦生育时期优化赋权问题优于 EA 和 CAFE,其结果应用于估产的精度较高。估算分析干旱年 2013 年和 2014 年关中平原各市冬小麦的产量(据气象部门报道,2013 年陕西省遭遇了自 1961 年以来最严重的一次气候干旱,所以采用 2013 年和 2014 年产量进行精度评价),并与年鉴统计单产对比分析进行精度评价,见表 3。结果表明,除 2014 年宝鸡市估测结果外,各市的单产估测结果与年鉴统计的单产较为接近,精度较高。2013 年各市估测单产与统计产量的绝对误差的值域范围为 12.32~120.95 kg/hm²,相对误差的值域范

围为 0.32%~3.66%,精度均较高。2014 年各市绝对误差的值域范围为 7.70~440.93 kg/hm²,相对误差的值域范围为 0.22%~10.46%,除宝鸡市外,渭南市、咸阳市和西安市的精度均较高。这是由于 2014 年 3 月中、下旬和 4 月上旬宝鸡市地区发生了较严重的干旱,对处于返青期末期和拔节期的冬小麦的生长产生了严重的影响,根、茎和叶生长速率降低且有效小穗数减少,虽然抽穗—灌浆期和乳熟期水分条件较好,但仍对产量产生了严重的影响。综上所述 GA 应用于估产的精度较高且鲁棒性较好,适合于基于多时相 VTCI 数据的时间尺度转换的关中平原干旱影响评估。

表 3 基于遗传算法的 2013 年、2014 年冬小麦估测单产与统计单产对比

地区	年份	单产/(kg·hm ⁻²)	估测单产/(kg·hm ⁻²)	绝对误差/(kg·hm ⁻²)	相对误差/%
渭南	2013	3307	3427.95	120.95	3.66
	2014	3555	3562.70	7.70	0.22
咸阳	2013	3966	3906.95	59.05	1.49
	2014	4283	4422.60	139.59	3.26
宝鸡	2013	3879	3891.32	12.32	0.32
	2014	4215	4655.93	440.93	10.46
西安	2013	4153	4110.02	42.98	1.04
	2014	4510	4565.16	55.15	1.22

3 讨论

3 种方法中 EA 可得到最优解,GA 和 CAFE 只能得到近似最优解或满意解。CAFE 兼顾了主观赋权法的主观偏好和减小了客观赋权法的客观随意性,其经时间尺度转换后获得的加权 VTCI 除渭南市外均与冬小麦单产的相关性较高,但 CAFE 确定的权重值与 EA 确定的最优权重值相差较大,且其经时间尺度后获得的加权 VTCI 与冬小麦单产的回归分析结果精度较差,这可能是由于 CAFE 中因子权重排序法将返青期、拔节期、抽穗—灌浆期和乳熟期干旱对产量的影响权重范围分别设置为 0~0.1,0.4~0.5,0.3~0.4,0~0.2^[10],区间范围较小,赋权过程中不能遍历到所有结果,同时,熵值法不能体现不同生育时期的干旱对小麦的生长发育的影响的不同程度,使得此方法只能获得满意解,结果精度较差。虽然 EA 可以得到最优的权重,从而获得最准确的能够反映关中平原冬小麦不同生育时期干旱对冬小麦生产及其单产的影响的权重值以进行时间尺度转换研究,且运算简单,但是 EA 由于需要遍历每一组可能的权重值寻找最优结果,其运算复杂度随权重范围呈指数增长,计算量大而使得有效性差,所以 EA 多用于评价其他方法的参考。而 GA 将问题参数编码为染色体后进行优化,从一个种群开始,不断地产生和

测试新一代的种群,扩大了搜索范围,且可以利用染色体长度控制数据精度,可较精确、快速地完成最优权重值优化问题的求解,GA 能较好地解决了 EA 和 CAFE 的限制问题,在多时相 VTCI 数据时间尺度转换的实际应用中更简单、有效、适用。

本文研究发现渭南市 3 种赋权方法的结果均未通过 F 检验,可能是渭南市旱作地较多,发生干旱后恢复能力差^[4],同时,近些年果业的发展,大量农田变为园地或果树与农作物间种,使得 3 种赋权方法确定的权重值获得尺度转换后的 VTCI 与冬小麦产量的相关性较差。

返青期适度旱后及时复水不会造成产量较低,反而由于复水补偿效应促进冬小麦的生长发育和收获指数的提高,说明返青期发生一定程度内干旱后适度供水,有利于冬小麦产量和水分利用效率的提高,实现水资源的高效利用和指导农业生产。不同生育期干旱对产量的影响权重值的大小能够反映各生育时期 VTCI 数据所携带干旱对产量影响程度的信息,可依此权重值大小来确定能有效反映旱情对冬小麦产量影响的敏感 VTCI 时相,以指导田间管理和选择少数关键遥感时相开展干旱影响评估和冬小麦估产。同时,考虑冬小麦生长机理及非干旱因素对冬小麦产量的影响,更加准确合理的确定冬小麦各主要生育时

期的权重,结合气候特征、人类活动的影响等以得到更加科学、合理的干旱对农业生产的影响评估。

4 结论

作物长势和最终产量与其主要生育期发生的干旱程度密切相关,VT-CI是综合地表主要参数归一化植被指数和地表温度的干旱指标,能够准确地监测旱情状况。本文针对关中平原冬小麦主要生育期 VT-CI的时间尺度转化问题进行了建模分析,研究了求解该问题的 CAFE,EA 和 GA 3 种方法获取的权重值。3 种方法获取的冬小麦返青期、拔节期、抽穗—灌浆期和乳熟期干旱对产量的影响的权重值均较为合理。为提升求解效率,以 EA 计算得的全局最优解为标准,对比分析了 3 种赋权方法,CAFE 确定的干旱对产量影响的权重值与最优权重值相差较大,且其经时间尺度转换后获得的 VT-CI 与冬小麦单产的回归分析精度整体低于 EA 和 GA。GA 获得的权重与最优权重值基本吻合,精度均较高,同时,GA 获得的关中平原各市的单产估测结果与年鉴统计的单产较为接近,RMSE 和 RE 均较低。GA 接近于 EA 的精度和性能,而时间复杂度大大低于 EA。GA 能够为基于多时相 VT-CI 数据时间尺度转换的干旱影响评估研究提供有效的赋权方法。

参考文献:

- [1] Kongan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. *Advances in Space Research*, 1995,15(11):91-100.
- [2] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2001,26(5):412-418.
- [3] 白雪娇,王鹏新,解毅,等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J]. *农业机械学报*, 2015,46(11):348-354.
- [4] 李梦娜,钱会,乔亮. 关中地区农业干旱脆弱性评价[J]. *资源科学*, 2016,38(1):155-165.
- [5] 冯海霞,秦其明,蒋洪波,等. 基于 HJ-1A/1BCCD 数据的干旱监测[J]. *农业工程学报*, 2011,27(S1):358-365.
- [6] Ghulam A, Li Z L, Qin Q M, et al. Estimating crop water stress with ETM+NIR and SWIR data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008,148(11):1679-1695.
- [7] 曹阳,杨婕,熊伟,等. 1962—2010 年潜在干旱对中国冬小麦产量影响的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2014(7):

128-139.

- [8] Patel N R, Parida B R, Venus V, et al. Analysis of agricultural drought using vegetation temperature condition index(VT-CI)from Terra/MODIS satellite data [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011,184(12):7153-7163.
- [9] Sun W, Wang P X, Zhang S Y, et al. Using the vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(17/18):5133-5144.
- [10] 王蕾. 基于条件植被温度指数的冬小麦生育时期干旱影响评估研究[D]. 北京:中国农业大学信息与电气工程学院, 2015.
- [11] 田苗,王鹏新,张树誉,等. 基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测[J]. *农业机械学报*, 2014,45(2):239-245.
- [12] Foulkes M J, Sylvester-Bradley R, Weightman R, et al. Identifying physiological traits associated with improved resistance in winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2007,103(1):11-24.
- [13] 陈华友. 多属性决策中基于离差最大化的组合赋权方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2004,26(2):194-197.
- [14] 倪九派,李萍,魏朝富,等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. *农业工程学报*, 2009,25(5):202-209.
- [15] 王书吉,费良军,雷雁斌,等. 综合集成赋权法在灌区节水改造效益评价中的应用[J]. *农业工程学报*, 2008,24(12):48-51.
- [16] 迟道才,马涛,李松. 基于博弈论的可拓评价方法在灌区运行状况评价中的应用[J]. *农业工程学报*, 2008,24(8):36-39.
- [17] 曹永强,李香云,马静,等. 基于可变模糊算法的大连市农业干旱风险评价[J]. *资源科学*, 2011,33(5):983-988.
- [18] 黄国强,陆宇平,南英,等. 多目标连续小推力深空探测器轨道全局优化[J]. *系统工程与电子技术*, 2012,34(8):1652-1659.
- [19] Lin W, Delgadofirs Y G, Gause D C, et al. Hybrid newton-raphson genetic algorithm for the traveling salesman problem[J]. *Cybernetics and Systems*, 1995,26(4):387-412.
- [20] Park B J, Choi H R, Kim H S. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2003,45(4):597-613.
- [21] 祁有玲,张富仓,李开峰,等. 不同生育期水分亏缺及氮营养对冬小麦生长和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009,28(1):24-27.