doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.025

基于双参数和 Morlet 多时间尺度特性的冬小麦单产估测

张　悦[1]　王鹏新[1]　张树誉[2]　梅树立[1]　李红梅[2]　陈　弛[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: 为进一步研究冬小麦在不同时间尺度下长势及产量变化情况,以陕西省关中平原为研究区域,选择与作物长势密切相关的条件植被温度指数(VTCI)和叶面积指数(LAI)作为研究指数,Morlet 小波作为函数,利用小波变换和交叉小波变换分别分析不同时间尺度下冬小麦各生育时期 VTCI 和 LAI 与单产时间序列间的主振荡周期和共振周期。通过计算小波互相关度,确定各生育时期 VTCI 和 LAI 的权重,从而分别构建基于加权 VTCI、加权 LAI 的单参数和双参数估产模型。结果表明,不同生育时期 VTCI 和 LAI 与单产间存在不同的主振荡周期和共振周期;通过小波变换构建的基于加权 VTCI、加权 LAI 单产估测模型的归一化均方根误差(NRMSE)分别为 16.88%、13.58%,决定系数(R^2)分别为 0.259、0.520,基于双参数的估产模型 NRMSE 为 13.52%,R^2 为 0.531,表明基于双参数估产模型精度更高。通过交叉小波变换构建的基于加权 VTCI、加权 LAI 单产估测模型的 NRMSE 分别为 16.83%、13.56%,R^2 分别为 0.263、0.522,基于双参数的估产模型 NRMSE 为 13.40%,R^2 为 0.533,表明基于交叉小波构建的估产模型比基于小波变换的估产模型精度均有所提高。利用共振周期构建的双参数估产模型对关中平原 2011—2018 年冬小麦的单产进行估测,结果显示,产量分布呈现西部高东部低的空间分布特征。

关键词: 冬小麦; 估产; 条件植被温度指数; 叶面积指数; 小波变换; 交叉小波变换
中图分类号: TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0243-12　　**OSID**:

Yield Estimation of Winter Wheat Based on Two Parameters and Morlet Multi-scale Characteristics

ZHANG Yue[1]　WANG Pengxin[1]　ZHANG Shuyu[2]　MEI Shuli[1]　LI Hongmei[2]　CHEN Chi[1]
(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Shaanxi Provincial Meteorological Bureau*, *Xi'an* 710014, *China*)

Abstract: In order to further study growth trend and yield changes of winter wheat at different time scales, remotely sensed vegetation temperature condition index (VTCI) and leaf area index (LAI) which are closely related to crop water stress and crop growth were selected as two key variables for indicating crop growth condition and estimating crop yields in the Guanzhong Plain, China. Taking Morlet wavelet as a function, wavelet transform and cross wavelet transform were used to analyze the main oscillation period and resonance cycle between VTCI, LAI and time series yield at different time scales. The weights of VTCI and LAI at each growth stage were determined by calculating the wavelet cross-correlation degree, which were used to construct the single-parameter and double-parameter yield estimation models, respectively. The results showed that VTCI, LAI and yield had different main oscillation periods and resonance cycles. The normalized root mean square errors (NRMSE) of the weighted VTCI and weighted LAI yield estimation models constructed by the wavelet transform were 16.88% and 13.58%, respectively, the values of the coefficient of determination (R^2) were 0.259 and 0.520, respectively, and the NRMSE and R^2 of the double-parameter estimation model were 13.52% and 0.531, respectively. These results indicated that the yield estimation model based on double-parameters had higher accuracy. For the cross wavelet transform, NRMSEs based on weighted VTCI and weighted LAI yield estimation model were 16.83% and 13.56%, R^2 were 0.263 and 0.522, respectively. NRMSE

收稿日期: 2020-10-13　修回日期: 2020-12-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(41871336)
作者简介: 张悦(1998—),女,博士生,主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究,E-mail: 2581194673@qq.com
通信作者: 王鹏新(1965—),男,教授,博士,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

based on double-parameter estimation model was 13.40% and R^2 was 0.533. Therefore, it can be concluded that the estimation models based on the cross wavelet transform had higher accuracy than those based on the wavelet transform. The double-parameter yield estimation model constructed by resonance cycles was used to estimate the yields in the Guanzhong Plain from 2011 to 2018, and the results showed that the yield was high in the west and low in the east.

Key words: winter wheat; yield estimation; vegetation temperature condition index; leaf area index; wavelet transform; cross wavelet transform

0 引言

与传统的监测方式相比,遥感技术具有获取信息量大、快速、覆盖面积大的优势,是及时掌握农业资源、作物长势、农业灾害等信息的最佳手段[1],广泛应用于作物估产研究。利用遥感进行作物产量估算的方法主要包括:遥感统计估产模型、干物质-产量模型和作物模型模拟等[2]。遥感统计模型主要指利用产量与遥感参数进行相关统计分析从而实现作物估产,常用的遥感参数包括归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)[3]、叶面积指数(Leaf area index, LAI)[4]、植被状态指数(Vegetation condition index, VCI)[5]等。干物质-产量模型通过遥感信息数据估测作物地上干物质质量,再依据作物干物质质量与果实部分间的关系得到作物产量[6]。遥感作物模型模拟是将遥感数据作为模型校正的数据源之一,对作物模型进行参数本地化标定后,在气象、土壤、种植信息等数据的驱动下进行作物生长模拟和产量估算[7-10]。相较于遥感统计估产模型,由于上述两种模型方法所需的部分驱动参数在大范围内定量获取目前存在一定困难,导致上述两种方法在大区域应用中仍然受到一定限制。因此,本文选用遥感统计估产模型进行单产估测。

根据遥感统计估产模型中输入遥感参数的个数可以分为基于单参数的统计估产模型和基于多参数(两个及两个以上)的统计估产模型。对基于单参数的遥感统计估产模型,已广泛应用于作物长势监测、田间环境监测及产量估测[11-16]。对于多参数遥感统计模型,研究人员利用其对水稻[17]、油菜[18]、玉米[19]等作物产量进行估测和预测。作物生长是一个由多种因素共同作用的复杂过程,相较于单参数的统计模型,基于多参数的统计模型更能全面考虑不同因素对作物生长及最终产量的影响,因此,本文选择与作物生长过程密切相关的 VTCI 和 LAI 作为遥感参数进行估产模型的构建与分析。

目前,我国对作物估产多立足于单时间尺度进行研究,而多时间尺度有助于分析不同时间尺度对最终结果的影响程度,揭示隐含在序列中的潜在规律。小波分析作为一种有效的时间序列分析方法,具有时频多分辨率特征,可以对时间序列的内部结构给以更加详细的说明[20-24]。因此,将小波分析用于作物估产具有明显的优势。

本文以陕西省关中平原为研究区域,以冬小麦主要生育期 VTCI、LAI 和单产时间序列作为研究对象,开展基于 Morlet 的连续小波变换和交叉小波变换,通过计算小波互相关度,进一步分析在不同时间尺度下各生育时期 VTCI、LAI 和单产间的相关性,确定 VTCI、LAI 在不同生育时期的权重,进而分别构建基于加权 VTCI、加权 LAI 的单参数和双参数冬小麦估产模型,以期获得更好的能用于作物产量估测的模型。

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,北到陕北黄土高原,南达秦岭,位于106°22′~110°24′E,33°57′~35°39′N 之间,其行政区域包括西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市 5 个省辖市和杨凌示范区(图 1)。该地区地势西高东低,土壤肥沃,光照条件较好,种植模式主要为冬小麦与夏玉米轮作,是陕西省主要的粮食生产基地和全国重要的商品粮产区。关中平原为典型大陆性季风气候区,年平均温度 6~13℃,年均降水量 550~700 mm,受季风气候影响,降水主要集中在 7—9 月,且在空间分布不均匀,年际变化与年内变化均较大,因此冬小麦在全生育时期内存在不同程度的水

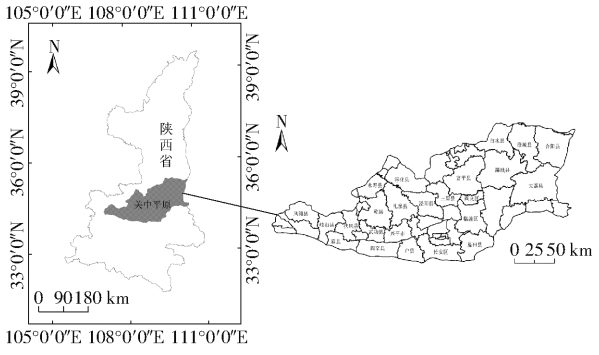


图 1 陕西省关中平原位置及研究区域分布图

Fig. 1 Location and study area boundaries of Guanzhong Plain in Shaanxi Province

分不足现象。

1.2　数据来源与预处理

1.2.1　数据来源

采用的遥感数据为 MODIS 的地表覆盖类型产品(MCD12Q1)、日地表温度产品(MYD11A1)、日地表反射率产品(MYD09GA)和叶面积指数产品(MCD15A3H);所采用的 2011—2017 年冬小麦单产数据来自陕西省各市统计局发布的统计年鉴;所使用的降水量数据从陕西省气象局获得。由于铜川市位于关中平原向陕北黄土高原的过渡地带,冬小麦面积相对较小,且主要分布在其南部的渭北旱塬,因此,选用关中平原 2011—2018 年其余 4 市共 24 县的主要生育期旬时间尺度的 VTCI、LAI 和冬小麦单产数据进行相关研究。

1.2.2　冬小麦种植区域提取

利用 MODIS Terra + Aqua 三级地表覆盖类型年度全球 500 m 产品 MCD12Q1 提取冬小麦种植面积。根据国际地圈生物圈计划(IGBP)的分类方案,将 MCD12Q1 地表覆盖类型产品与研究区行政边界矢量图进行叠加,得到关中平原县(区)的小麦种植区分布图。

1.2.3　生育时期 VTCI 计算

基于 2011—2018 年每年 3—5 月 Aqua - MODIS 的日地表温度产品(MYD11A1)和日地表反射率产品(MYD09GA),得到每年关中平原日 LST 和日 NDVI;应用最大值合成法,以旬为时间尺度,生成每年 3—5 月的 NDVI 和 LST 最大合成产品;利用多年某一旬的 NDVI 和 LST 的最大值合成产品,采用最大值合成技术分别生成多年的旬 NDVI 和 LST 的最大值合成产品;基于每年 3—5 月以旬为单位的 LST 最大值合成产品,逐像素取最小值,生成多年旬 LST 最大-最小值合成产品,并以此计算旬时间尺度的 VTCI[15,25] 为

$$VTCI = \frac{L_{\max}(N_i) - L(N_i)}{L_{\max}(N_i) - L_{\min}(N_i)} \tag{1}$$

其中

$$L_{\max}(N_i) = a + bN_i \tag{2}$$

$$L_{\min}(N_i) = a' + b'N_i \tag{3}$$

式中　$L(N_i)$——研究区域内某一像素的 NDVI 值为 N_i 时的地表温度

$L_{\max}(N_i)$、$L_{\min}(N_i)$——研究区域内当 NDVI 值等于 N_i 时所有像素地表温度的最大值和最小值,称作热边界和冷边界

a、b、a'、b'——待定系数,由研究区域 NDVI 和 LST 的散点图近似获得

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—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—下旬),并将这 4 个生育时期称为冬小麦主要生育期[26]。取某一生育时期包含的多旬 VTCI 的平均值作为该生育时期的 VTCI 值;依据关中平原各县的冬小麦种植区分布图,取各县域内种植区所包含像素的 VTCI 平均值作为该区域该年该生育时期的 VTCI 值。

1.2.4　生育时期 LAI 计算

选取研究区域 2011—2018 年每年 3—5 月 MODIS MCD15A3H 产品进行叶面积指数提取,该产品是基于 Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS 传感器获得的,与 MOD15A2 和 MYD15A2 产品相比,MCD15A3H 产品既有较高的时间分辨率(4 d)又有较高的空间分辨率(500 m),有利于作物长势监测及产量估测。该产品由于云和大气等因素的影响存在数据骤降现象,因此通过上包络线 Savitzky - Golay(S - G)滤波对原始叶面积指数产品进行平滑处理[27],经上包络线 S - G 滤波平滑处理后的叶面积指数更加符合冬小麦实际生长情况。

为使 LAI 与 VTCI 具有相同的取值范围,将 S - G 滤波后的 LAI 进行归一化处理;将冬小麦各旬所包含的多时相 LAI 的最大值作为各旬的 LAI 值,取某一生育时期包含的多旬 LAI 的平均值作为该生育时期的 LAI 值;依据关中平原各县的冬小麦种植区分布图,取各县域内种植区所包含像素的 LAI 平均值作为该区域该年该生育时期的 LAI 值。

1.2.5　时间序列生成

考虑到时间序列过长的问题,依据关中平原各县分布的方位,分为 3 次,每次均匀不重复,选择 8 县为 1 组,分别依次构建各县 2011—2017 年各生育时期 VTCI、LAI 和单产时间序列。最终形成均包含4 个生育时期的 3 组 VTCI、LAI 时间序列及其与每组相对应的单产时间序列,共计 27 个时间序列,各时间序列长度均为 56 a,时间间隔为 1 a。

1.3　研究方法

1.3.1　Morlet 连续小波变换

1.3.1.1　Morlet 小波

利用小波对时间序列进行分析时,为使处理后得到平滑连续的小波振幅,通常使用非正交小波对时间序列进行变换分析。同时在利用小波分析时希望得到更多信息,而复数小波具有实部和虚部,可以得到时间序列的振幅和相位信息,因此选用复数且具有非正交性的小波。Morlet 小波既具有非正交

性,同时是由 Gaussian 函数调制的指数复数小波,能够满足本文对时间序列的分析要求。Morlet 小波表示为[28]

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0} e^{-\frac{t^2}{2}} \tag{4}$$

对应的频率域小波函数为

$$\psi(\omega) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{\frac{-(s\omega-\omega_0)^2}{2}} H(\omega) \tag{5}$$

其中

$$H(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega > 0) \\ 0 & (\omega \leqslant 0) \end{cases}$$

式中 t——时间

ω_0——无量纲角频率

ω——角频率 s——伸缩尺度

$H(\omega)$——Heavyside 函数

当 $\omega_0 = 6$ 时满足容许性条件,在该条件下,Morlet 小波的伸缩尺度 s 与傅里叶分析中周期 T 的关系为:$T = 1.03\ s$,两者差距较小,因此在本文中假设两者相等。

1.3.1.2 小波变换

利用 Morlet 小波函数对各生育时期 VTCI、LAI 和单产时间序列进行连续小波变换[28],计算式为

$$W_n(s) = \sqrt{\frac{d_t}{s}} \sum_{n'=0}^{M-1} x_{n'} \Psi_0^* \left(\frac{(n'-n)d_t}{s} \right) \tag{6}$$

其中

$$s = s_0 2^{jd_j} \quad (j = 0, 1, \cdots, J) \tag{7}$$

$$J = \frac{1}{d_j} \mathrm{lb} \frac{Md_t}{s_0} \tag{8}$$

式中 $W_n(s)$——小波变换函数

d_t——时间序列的时间间隔,取 $d_t = 1$

Ψ_0^*——共轭复数

$x_{n'}$——某一特定时间指数下的时间序列

n'——某一特定的时间指数

n——时间指数

M——时间序列数据个数

s_0——最小尺度,取 $s_0 = 2d_t$

d_j——离散尺度间距,取 $d_j = 0.125$

J——时间尺度个数

1.3.1.3 小波全谱

通过伸缩小波尺度 s 并沿着时间指数 n 进行局部化,获得在不同时间尺度下对应的能量密度在时间域中的分布,即通过小波功率谱 $|W_n(s)|^2$ 显示时间序列在时频域的振动能量[28]。将其在周期上进行时间平均得到小波全谱(Global wavelet spectrum)

$$\overline{W}^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{M-1} |W_n(s)|^2 \tag{9}$$

小波全谱可以用来反映时间序列波动能量随尺度的分布情况。通过各生育时期 VTCI、LAI 与单产时间序列的小波全谱图,可以识别每个时间序列的周期波动特征及波动强度,其振荡能量峰值对应的周期为该序列的主振荡周期,表明在该周期下小波系数的振荡最强烈,最能代表原序列的周期性变化规律。

1.3.2 交叉小波变换及显著性检验

1.3.2.1 交叉小波功率谱

交叉小波变换是将小波变换和交叉谱分析相结合而产生的一种信号分析技术,是表征两个时间序列在不同时间尺度上关联程度与位相关系的重要指标[29-30],交叉小波功率谱重点突出序列之间在时频域中高能量区的相互关系,反映时间序列间的共振周期。各生育时期 VTCI 时间序列或 LAI 时间序列与单产时间序列 y 之间的小波交叉谱为[31]

$$W_{x_n y}(s) = W_{x_n}(s) W_y(s)^* \tag{10}$$

式中 $W_{x_n}(s)$——VTCI 序列或 LAI 序列的小波变换系数

$W_y(s)^*$——单产序列的小波变换系数的复共轭

交叉小波功率谱($|W_{x_n y}(s)|$)越大,说明两序列在该时间尺度的相关性越强,用以确定冬小麦不同生育时期 VTCI 或 LAI 与单产序列之间的共振周期。

1.3.2.2 显著性检验

交叉小波的置信度水平来源于两个 χ^2 分布的小波功率谱乘积的平方根[28],概率计算式为

$$P = \sigma_{x_n} \sigma_y \frac{Z_v(p)}{v} \sqrt{P_k^{x_n} P_k^y} \tag{11}$$

式中 P——概率 v——自由度

σ_{x_n}、σ_y——生育时期时间序列 x_n 和单产时间序列 y 的标准差

$Z_v(p)$——P 的置信水平

$P_k^{x_n}$、P_k^y——生育时期时间序列 x_n 和单产时间序列 y 的背景功率谱

选用的 Morlet 是复数小波,$v = 2$,则 $Z_2(95\%) = 3.999$。如果 $|W_{x_n y}(s)| > P$,说明对应的周期是显著共振周期。

1.3.3 小波互相关分析方法

各生育时期 VTCI 或 LAI 时间序列 x_n 与单产时间序列 y 之间的小波互相关系数[32]可表示为

$$C_{WR_n}(s) = \frac{C_{ov}(W_{x_n}, W_y)_s}{\sqrt{\sigma^2(W_{x_n}(s))}\sqrt{\sigma^2(W_y(s))}} \tag{12}$$

式中 $C_{WR_n}(s)$——小波互相关系数

$\sigma^2(W_{x_n}(s))$——尺度 s 对应的 VTCI 与单产时间序列小波系数的方差

$\sigma^2(W_y(s))$——尺度 s 对应的 LAI 与单产时间序列小波系数的方差

$C_{ov}(W_{x_n},W_y)_s$——尺度 s 对应的 VTCI 或 LAI 与单产序列小波系数的协方差

基于 $C_{WR_n}(s)$，定义各生育时期 VTCI 或 LAI 与单产的小波互相关度（Wavelet cross-correlation degree，WCCD）[32] 为

$$C_{WCCD_{x_ny}}=\int C_{WR_n}(s)f(C_{WR_n}(s))\mathrm{d}s \quad (13)$$

式中　$f(C_{WR_n}(s))$——尺度 s 下各生育时期 VTCI 或 LAI 与单产的 $C_{WR_n}(s)$ 的权重

1.4　数据分析指标

选用决定系数（R^2）和归一化均方根误差（Normalized root mean square error，NRMSE）作为精度评价指标对估产模型精度进行评价。

2　结果与分析

2.1　主振荡周期分析

运用 Morlet 小波对 2011—2017 年关中平原 3 个组别的各生育时期 VTCI、LAI 和单产时间序列进行多尺度特征分析获得小波功率谱，并将小波功率谱在各时间尺度上取平均，得到小波全谱。依据不同生育时期 VTCI、LAI 及冬小麦单产在不同时间尺度下全谱的变化，以第 1 组为例进行分析说明（图 2），峰值对应的时间尺度为该时间序列的主振荡周期。

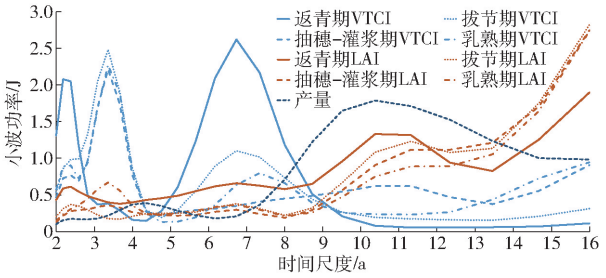


图 2　冬小麦各生育时期 VTCI、LAI 和单产的小波全谱

Fig. 2　Global wavelet spectra of yield, VTCIs and LAIs at four growth stages of winter wheat

2.1.1　生育时期 VTCI 与冬小麦单产的主振荡周期分析

利用小波变换对第 1 组各生育时期 VTCI 和单产进行多尺度分析（图 2），确定主振荡周期。在返青期，VTCI 全谱在 2～3 a、3～4 a 和 6～8 a 处达到峰值，即存在 2～3 a、3～4 a 和 6～8 a 的主振荡周期；在拔节期，VTCI 有 2～3 a、3～4 a 及 6～8 a 的主振荡周期，其中，全谱在 3～4 a 处达到最高点，全谱振荡最为强烈；在抽穗–灌浆期，VTCI 呈 2～3 a、3～4 a 和 10～12 a 的主振荡周期，且随着时间尺度的增大，VTCI 全谱在 14 a 后呈上升趋势；乳熟期 VTCI 全谱在时间尺度 2～3 a、3～4 a 和 6～8 a 下达到峰值，即存在 2～3 a、3～4 a 和 6～8 a 的主振荡周期；单产存在 2～3 a、4～5 a 和 10～12 a 的主振荡周期。通过以上分析可知，在不同的生育时期，VTCI 在整体上表现出主振荡周期的一致性，各生育时期的 VTCI 和单产均存在 2～3 a 的主振荡周期。

2.1.2　生育时期 LAI 与冬小麦单产的主振荡周期分析

通过对第 1 组各生育时期 LAI 和单产全谱随时间尺度变化（图 2）的特征进行分析可知，返青期，LAI 在整个时间尺度上存在 2～3 a、6～8 a 和 10～11 a 的主振荡周期；拔节期，LAI 分别在 2～3 a、3～5 a、6～8 a 和 11～12 a 处达到峰值，其中在 10～12 a 处振荡最为强烈；抽穗–灌浆期，LAI 存在 3～4 a、6～8 a和 11～12 a 的主振荡周期；乳熟期 LAI 全谱存在 3～4 a 和 6～8 a 的主振荡周期，单产存在 2～3 a、4～5 a 和 10～12 a 的主振荡周期。在各生育时期 LAI 均有 3 a 和 6～8 a 的主振荡周期，且在 14 a 后随时间尺度的增大，各生育时期 LAI 的小波功率不断增大，说明在不同的生育时期，LAI 全谱随时间尺度的变化具有相似性，即在各生育时期 LAI 有相似的主振荡周期。

通过对比不同生育时期的 VTCI 和 LAI 全谱与单产时间序列全谱随时间尺度的变化发现，相较于 VTCI，LAI 与单产时间序列在不同时间尺度上的变化更为相似，因此，在不同的生育时期 LAI 与单产随时间尺度的变化更具有一致性。

由以上结果可知，各生育时期 VTCI 和 LAI 与单产序列间均有 2～3 a 的主振荡周期，但小波功率谱的方法主要针对单个时间序列进行分析，对于两序列间的相关性无法直观表达，因此，为进一步验证上述结果，利用交叉功率谱确定各生育时期 VTCI、LAI 与冬小麦单产间的共振周期，分析 VTCI 和 LAI 与单产间的相互关系。

2.2　共振周期分析

2.2.1　生育时期 VTCI 与冬小麦单产的共振周期分析

采用交叉小波变换分析各生育时期 VTCI 与单产序列在不同时间尺度的关联性及位相关系，突出时间序列之间在时频域中高能量区的相互关系。通过 Morlet 小波函数对每组各生育时期 VTCI 和单产时间序列进行交叉小波能量谱计算，揭示两时间序列的位相关系，得到序列之间的共振周期并以第 1 组为例进行分析说明（图 3）。图中粗的黑实线圈闭区域为功率谱值通过置信水平为 95% 的标准背景

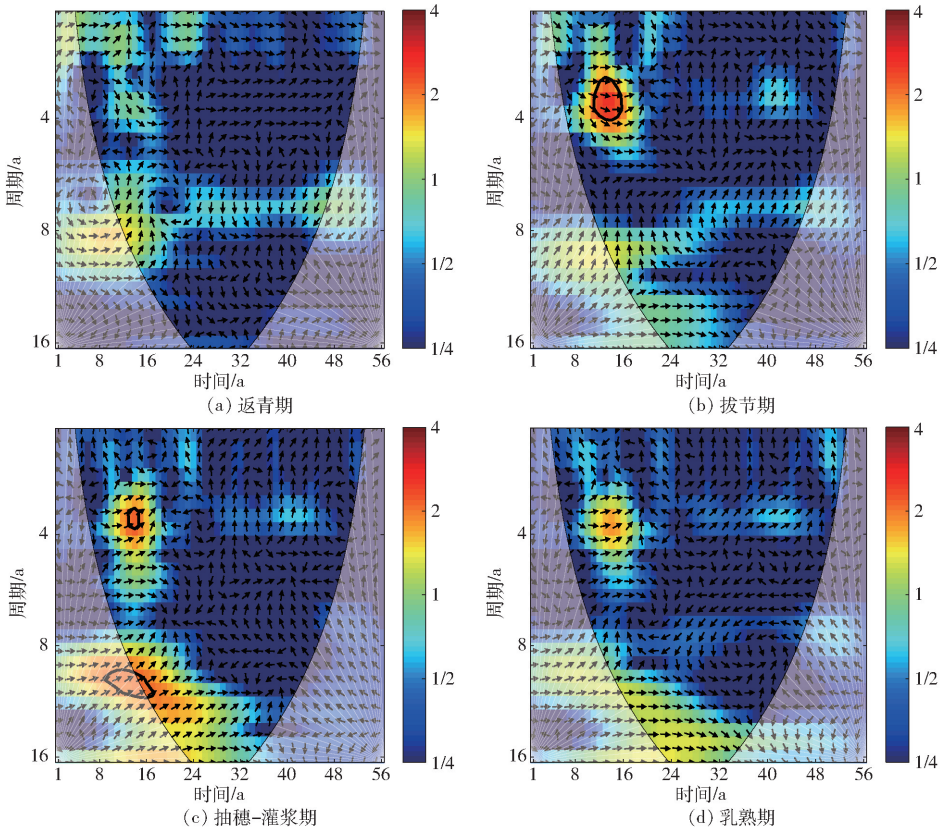


图 3 冬小麦主要生育期 VTCI 与单产的交叉小波功率谱

Fig. 3 Cross wavelet power spectra of yield and VTCIs at four growth stages of winter wheat

谱检验;细的黑实线为小波边界效应影响锥线,其包络区域为有效值。图中箭头表示位相关系,→表示单产与 VTCI 同位相,说明两者为正相关关系;←表示单产与 VTCI 反位相,说明两者为负相关关系;↗、↙表示 VTCI 滞后单产变化且分别为正相关关系、负相关关系;↘、↖表示 VTCI 超前单产变化且分别为正相关关系、负相关关系。在返青期,VTCI 与单产间存在 2 ~ 3 a 和 8 ~ 10 a 的共振周期,其中在 8 ~ 10 a 的相关性更显著,在此时间尺度下,返青期 VTCI 与单产间的关系表现为 VTCI 滞后于单产变化的正相关关系,说明在返青期,水分胁迫对于单产的影响存在滞后效应,对产量的影响可延期至拔节期;在拔节期,VTCI 与单产间存在 3 a 左右的共振周期,同时主要表现为 VTCI 与单产同位相的正相关关系,并通过了 95% 的显著性检验,说明在拔节期,VTCI 对单产的影响具有实时性且影响较大;在抽穗-灌浆期,VTCI 与单产存在 3 a 和 8 ~ 10 a 的共振周期,主要表现为 VTCI 滞后于单产变化的正相关关系并通过了 95% 的显著性检验,说明 VTCI 变化晚于产量的变化,对产量的影响可延期至乳熟期,且在抽穗-灌浆期 VTCI 对单产的影响较为显著;在乳熟期,VTCI 与单产存在 3 ~ 4 a 的共振周期,VTCI 与单产间的相互关系主要表现为同位相正相关关系,说明 VTCI 与单产两者间变化具有同步性。

通过对各生育时期 VTCI 与单产间的共振周期分析可知,在不同的时间尺度下,各生育时期的 VTCI 与单产间的共振周期不同,但在拔节期均表现出 VTCI 对单产的影响较为显著的特性。

2.2.2 生育时期 LAI 与冬小麦单产的共振周期分析

对 3 组各生育时期 LAI 与冬小麦单产进行交叉小波能量谱计算,并以第 1 组为例进行分析说明(图 4)。图中粗的黑实线圈闭区域为功率谱值通过置信水平为 95% 的标准背景谱检验;细的黑实线为小波边界效应影响锥线,其包络区域为有效值。图中箭头表示位相关系,→表示单产与 LAI 同位相,说明两者为正相关关系;←表示单产与 LAI 反位相,说明两者为负相关关系;↗、↙表示 LAI 滞后单产变化且分别为正相关关系、负相关关系;↘、↖表示 LAI 超前单产变化且分别为正相关关系、负相关关系。返青期 LAI 与单产明显存在 11 ~ 12 a 的共振周期,且表现为 LAI 超前于单产变化的正相关关系并通过了 95% 的显著性检验,说明在返青期,LAI 的变化先于单产的变化,表明冬小麦早期的长势对后期的长势有显著的影响;在拔节期,LAI 与单产主要存在10 ~ 11 a 的共振周期,且 LAI 先于单产变化,同样表明拔节期的长势对后期的长势有较大的影响;在抽穗-灌浆期,LAI 与单产存在 9 ~ 10 a 共振周期,两者之间是同位相正相关关系,说明在抽穗-灌浆期,LAI 与单产同时变化且

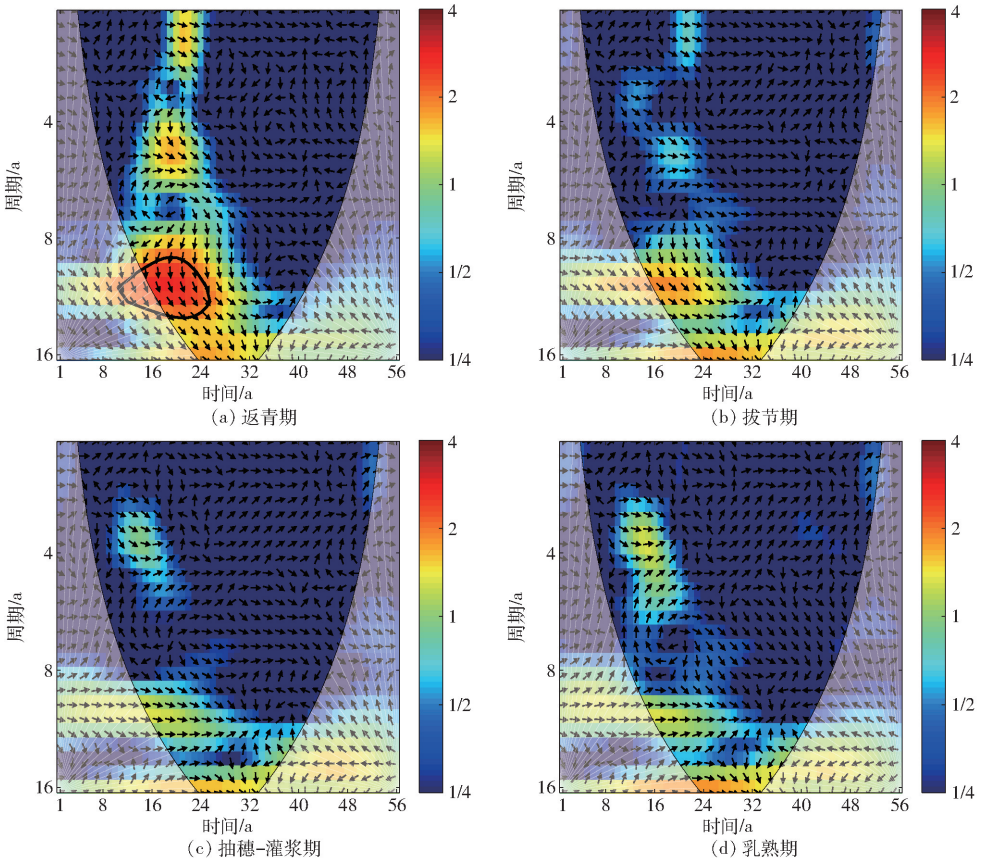


图 4　冬小麦主要生育期 LAI 与单产的交叉小波功率谱

Fig. 4　Cross wavelet power spectra of yield and LAIs at four growth stages of winter wheat

为正相关;在乳熟期,LAI 与单产存在 3 a 和 10 a 的共振周期,均表现为两者同位相正相关关系。

通过对各生育时期 LAI 与单产间共振周期的分析可知,在不同的时间尺度下,各生育时期的 LAI 与单产的相关关系不同,但基本上表现出在返青期和拔节期,LAI 超前于单产变化,在抽穗–灌浆期和乳熟期 LAI 与单产同时变化,表明冬小麦返青后,返青期和拔节期的长势对后期的长势有较大的影响,抽穗–灌浆期和乳熟期的长势对单产有较大的影响。

2.3　小波互相关分析

2.3.1　生育时期 VTCI 与单产特征尺度和相关度分析

小波互相关系数可以反映两个时间序列在整个时间域中不同尺度的相关程度。利用 Morlet 小波获取不同组别各生育时期 VTCI 和冬小麦单产之间的小波互相关系数并以第 1 组为例进行说明(图 5)。通过分析可知,随着时间尺度的变化,各生育时期的 VTCI 与单产间的小波互相关系数发生改变且存在负相关系数。依据 VTCI 值越小,旱情越严重,产量越低的客观规律,选择各生育时期 VTCI 与单产呈正相关对应的主振荡周期和共振周期作为分析各生育时期 VTCI 对单产的相对重要程度的特征时间尺度,通过主振荡周期确定的特征时间尺度为:返青期

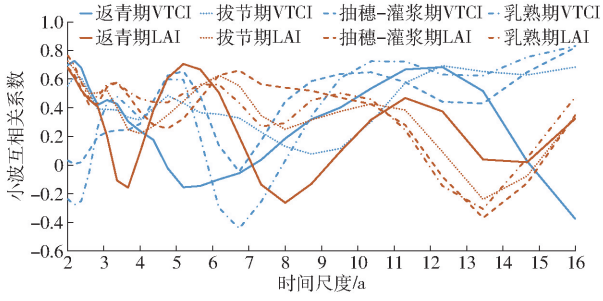


图 5　冬小麦各生育时期 VTCI、LAI 与单产间的小波互相关系数

Fig. 5　Wavelet cross-correlation of yield, VTCIs and LAIs at four growth stages of winter wheat

2 ~ 3 a、3 ~ 4 a 和 7 ~ 8 a,拔节期为 2 ~ 3 a、6 ~ 7 a,抽穗–灌浆期 2 ~ 3 a 和 10 ~ 11 a,乳熟期为 3 a;通过共振周期确定的特征时间尺度为:返青期 8 ~ 10 a,拔节期为 3 a,抽穗–灌浆期 3 a 和 8 ~ 9 a,乳熟期为 3 ~ 4 a。

分别计算在不同特征时间尺度下的加权期望,得出各生育时期 VTCI 与单产间的小波互相关度并进行归一化,得到各生育时期 VTCI 权重并对不同组别中得到的各生育时期的 VTCI 权重取平均值作为最终各生育时期 VTCI 的权重(表 1)。可知,经过小波变换和交叉小波变换得到的各生育时期 VTCI 与单产的相关性大小相一致,即拔节期 VTCI 与单产间的小波互相关度最大,其次为抽穗–灌浆期,返

表 1 冬小麦各生育时期 VTCI 与单产小波互相关度及权重

Tab. 1 Wavelet cross-correlation degrees of yield and VTCIs at four growth stages of winter wheat and weights of VTCIs

组别	参数	主振荡周期确定的时间尺度				共振周期确定的时间尺度			
		返青期	拔节期	抽穗-灌浆期	乳熟期	返青期	拔节期	抽穗-灌浆期	乳熟期
第 1 组	小波互相关度	0.467	0.519	0.518	0.477	0.328	0.423	0.395	0.372
	权重	0.236	0.262	0.261	0.241	0.216	0.279	0.260	0.245
第 2 组	小波互相关度	0.663	0.699	0.677	0.673	0.631	0.742	0.677	0.671
	权重	0.244	0.258	0.250	0.248	0.232	0.273	0.249	0.247
第 3 组	小波互相关度	0.543	0.618	0.592	0.555	0.542	0.640	0.568	0.555
	权重	0.235	0.268	0.256	0.240	0.235	0.278	0.246	0.241
平均权重		0.239	0.262	0.256	0.243	0.228	0.276	0.252	0.244

青期和乳熟期较小。拔节期是冬小麦根、茎、叶生长的主要阶段,对土壤中水分的吸收利用最为迫切,土壤中水分亏缺将显著影响根茎叶干物质及植株干物质质量的累积速率,从而影响冬小麦最终的长势及产量。冬小麦在抽穗-灌浆期主要进行生长方式的转变,由营养生长转向生殖生长,水分的亏缺会显著影响其进行光合作用的速率,减少淀粉、蛋白质和有机质的合成,造成冬小麦粒重明显降低,因此抽穗-灌浆期对最终产量的影响位于第 2 位。在乳熟期阶段,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;返青期冬小麦的叶、茎、根等器官增长较为缓慢且干物质量积累不大,其水分亏缺对株高、最终的分蘖、叶面积及干物质累积量的影响不大,因此返青期和乳熟期水分亏缺程度对产量的影响相对较小。综上,通过主振荡周期和共振周期确定的各生育时期 VTCI 的权重是合理的。

2.3.2 生育时期 LAI 与单产的特征尺度和相关度分析

利用 Morlet 小波计算不同组别各生育时期 LAI 与单产之间的小波互相关系数并以第 1 组为例进行分析说明(图 5)。可以看出,各生育时期的 LAI 与单产间的小波互相关系数存在负数。依据在一定范围内,冬小麦叶面积指数与单产呈正相关的先验知识,选择各生育时期 LAI 与单产呈正相关对应的主振荡周期和共振周期作为分析各生育时期 LAI 对单产的相对重要程度的特征时间尺度,通过主振荡周期确定的特征时间尺度为:返青期 2 ~ 3 a、6 ~ 7 a 和 10 ~ 11 a,拔节期为 2 ~ 3 a、4 ~ 5 a、6 ~ 7 a 和 11 ~ 12 a,抽穗-灌浆期为 3 ~ 4 a、6 ~ 7 a 和 11 ~ 12 a,乳熟期为 3 a 和 6 ~ 7 a;通过共振周期确定的特征时间尺度为:返青期为 11 ~ 12 a,拔节期为 10 ~ 11 a,抽穗-灌浆期为 9 ~ 10 a,乳熟期为 3 a 和 10 a。

基于 Morlet 确定的时间尺度,分别对不同特征时间尺度的小波互相关系数求解其加权期望值,得到 4 个生育时期 LAI 的小波互相关度,进行归一化,得到各生育时期 LAI 权重,并对不同组别中得到的各生育时期的 LAI 权重取平均值作为最终各生育时期 LAI 的权重(表 2)。可以看出,基于主振荡周期和共振周期得出的小波互相关度均表现为 LAI 在抽穗-灌浆期和乳熟期与冬小麦单产的小波互相关度大于其在返青期和拔节期与单产的小波互相关度,说明在冬小麦的生长过程中 LAI 在抽穗-灌浆期、乳熟期对于单产的影响较大,而在返青期和拔节期,LAI 对于冬小麦单产的影响较小。在抽穗-灌浆期和乳熟期,冬小麦主要进行生殖生长,主要决定了籽粒质量,相较于其他阶段,与单产间的相关性更大。

表 2 冬小麦各生育时期 LAI 与单产小波互相关度及权重

Tab. 2 Wavelet cross-correlation degrees of yield and LAIs at four growth stages of winter wheat and weights of LAIs

组别	参数	主振荡周期确定的时间尺度				共振周期确定的时间尺度			
		返青期	拔节期	抽穗-灌浆期	乳熟期	返青期	拔节期	抽穗-灌浆期	乳熟期
第 1 组	小波互相关度	0.398	0.490	0.621	0.539	0.427	0.407	0.449	0.520
	权重	0.194	0.239	0.303	0.263	0.237	0.226	0.249	0.288
第 2 组	小波互相关度	0.744	0.851	0.885	0.888	0.865	0.887	0.931	0.964
	权重	0.221	0.253	0.263	0.264	0.237	0.243	0.255	0.264
第 3 组	小波互相关度	0.606	0.782	0.799	0.720	0.748	0.766	0.778	0.794
	权重	0.209	0.269	0.275	0.248	0.242	0.248	0.252	0.257
	平均权重	0.208	0.254	0.280	0.258	0.239	0.239	0.252	0.270

2.4 单产估测模型的构建与应用

2.4.1 单产估测模型的构建与精度分析

根据主振荡周期和共振周期确定的冬小麦与各生育时期 VTCI 的权重,分别建立基于加权 VTCI 与小麦单产间的一元线性回归模型(表 3)。分析可知,基于主振荡周期和共振周期建立的单产估测模

型决定系数(R^2)分别达到了 0.259 和 0.263,并通过显著性检验,达极显著水平。基于主振荡周期和共振周期建立的加权 VTCI 与单产的估测模型归一化均方根误差(NRMSE)分别为 16.88% 和 16.83%,表明基于共振周期确定的产量估测模型精度高于基于主振荡周期所确定的产量估测模型,说明利用交叉小波变换能够更好地发现各生育时期 VTCI 与单产间的相互关系。

表 3　单产估测模型与精度评价结果

Tab.3　Yield estimation models and accuracy evaluation results

振荡周期	参数	线性回归方程	归一化均方根误差/%	决定系数 R^2	显著性检验
主振荡周期	VTCI	$Y=6\,533.1VTCI+1\,067.8$	16.88	0.259	$P<0.01$
	LAI	$Y=7\,639.9LAI+2\,575.9$	13.58	0.520	$P<0.01$
	VTCI 和 LAI	$Y=1\,673.0VTCI+6\,828.5LAI+1\,992.1$	13.52	0.531	$P<0.05$
共振周期	VTCI	$Y=6\,642.7VTCI+1\,016.6$	16.83	0.263	$P<0.01$
	LAI	$Y=7\,811.0LAI+2\,567.1$	13.56	0.522	$P<0.01$
	VTCI 和 LAI	$Y=1\,691.2VTCI+6\,974.3LAI+1\,907.7$	13.40	0.533	$P<0.05$

利用主振荡周期和共振周期在特征时间尺度下确定的冬小麦各生育时期 LAI 的权重,计算关中平原的冬小麦加权 LAI,分别建立加权 LAI 与小麦单产间的估产模型(表 3)。基于主振荡周期和共振周期建立的单产估测模型 R^2 分别为 0.520 和 0.522,并通过显著性检验。同时,基于主振荡周期和共振周期建立的加权 LAI 与单产的估测模型 NRMSE 分别为 13.58% 和 13.56%,表明基于共振周期确定的产量估测模型精度与基于主振荡周期所确定的产量估测模型的精度相近。通过与上述利用加权 VTCI 构建的估产模型精度对比分析可知,利用加权 LAI 构建的估产模型精度更高。

根据 Morlet 确定的主振荡周期和共振周期分别建立基于双参数的加权 VTCI 和加权 LAI 与小麦单产间的线性回归模型(表 3)。结果表明,基于主振荡周期和共振周期确定的加权 VTCI 和加权 LAI 与小麦单产的相关性达到显著性水平($P<0.05$),建立的单产估测模型 R^2 分别达到 0.531 和 0.533,均高于基于单产数构建的估产模型精度。基于主振荡周期和共振周期建立的加权 VTCI 和 LAI 与单产的估测模型归一化均方根误差分别为 13.52% 和 13.40%,表明基于双参数构建的估产模型误差均小于单参数构建的估产模型且基于共振周期确定的产量估测模型精度比基于主振荡周期所确定的产量估测模型精度略高。两者虽估产结果基本相近,但研究 VTCI 和 LAI 与冬小麦单产间相互关系的思路不同,基于主振荡周期确定的估产模型重点研究单个时间序列的振荡变化情况,而共振周期重点考虑各生育时期 VTCI 或 LAI 与单产间的相关关系,因此,使用共振周期构建的 VTCI 和 LAI 双参数的估产模型更为合理。

2.4.2　冬小麦单产估测

利用 2011—2017 年数据确定共振周期构建的加权 VTCI 和加权 LAI 双参数的估产模型对关中平原 2011—2018 年单产进行逐像素估测(图 6)。通过分析可知,关中平原产量分布具有明显的空间分布特征,即西部地区产量最高,中部地区次之,东部地区产量最小。其中西部和中部地区是关中平原种植作物的主要区域,估产空间分布特征与实际情况相符。在西部地区,2011—2018 年冬小麦单产估测范围为 3 800 ~ 6 200 kg/hm^2,其中,最高产量是 2015 年凤翔县,为 6 171.88 kg/hm^2,最低产量是 2013 年眉县,为 3 839.01 kg/hm^2,平均 4 901.80 kg/hm^2;在中部地区,2011—2018 年单产估测范围为 3 500 ~ 5 900 kg/hm^2,其中单产最低是 2013 年永寿县,为 3 516.16 kg/hm^2,最高产量是 2017 年阎良区,为 5 821.86 kg/hm^2,平均单产 4 411.49 kg/hm^2;在东部地区,2011—2018 年冬小麦单产平均估测范围为 3 000 ~ 4 400 kg/hm^2,其中,最高产量是 2015 年蒲城县,为 4 394.17 kg/hm^2,最低产量是 2013 年澄城县,为 3 047.18 kg/hm^2,平均单产 3 666.65 kg/hm^2。在对 2011—2018 年估产时发现,2013 年产量最低。2013 年冬小麦在生育期内研究区域平均降水量为 243.78 mm,明显低于 2011—2018 年生育时期内平均降水量(284.88 mm),进一步验证了本文所得出的 2013 年产量最低的结论。

3　讨论

选择与作物长势密切相关的条件植被温度指数(VTCI)和叶面积指数(LAI)作为研究指数,Morlet 小波作为函数,利用小波变换和交叉小波变换分别分析不同时间尺度下冬小麦各生育时期 VTCI 和 LAI 与单产时间序列间的主振荡周期和共振周期,从而分别构建基于加权 VTCI、加权 LAI 的单参数和双参数估产模型。经过比较得出,基于双参数的估

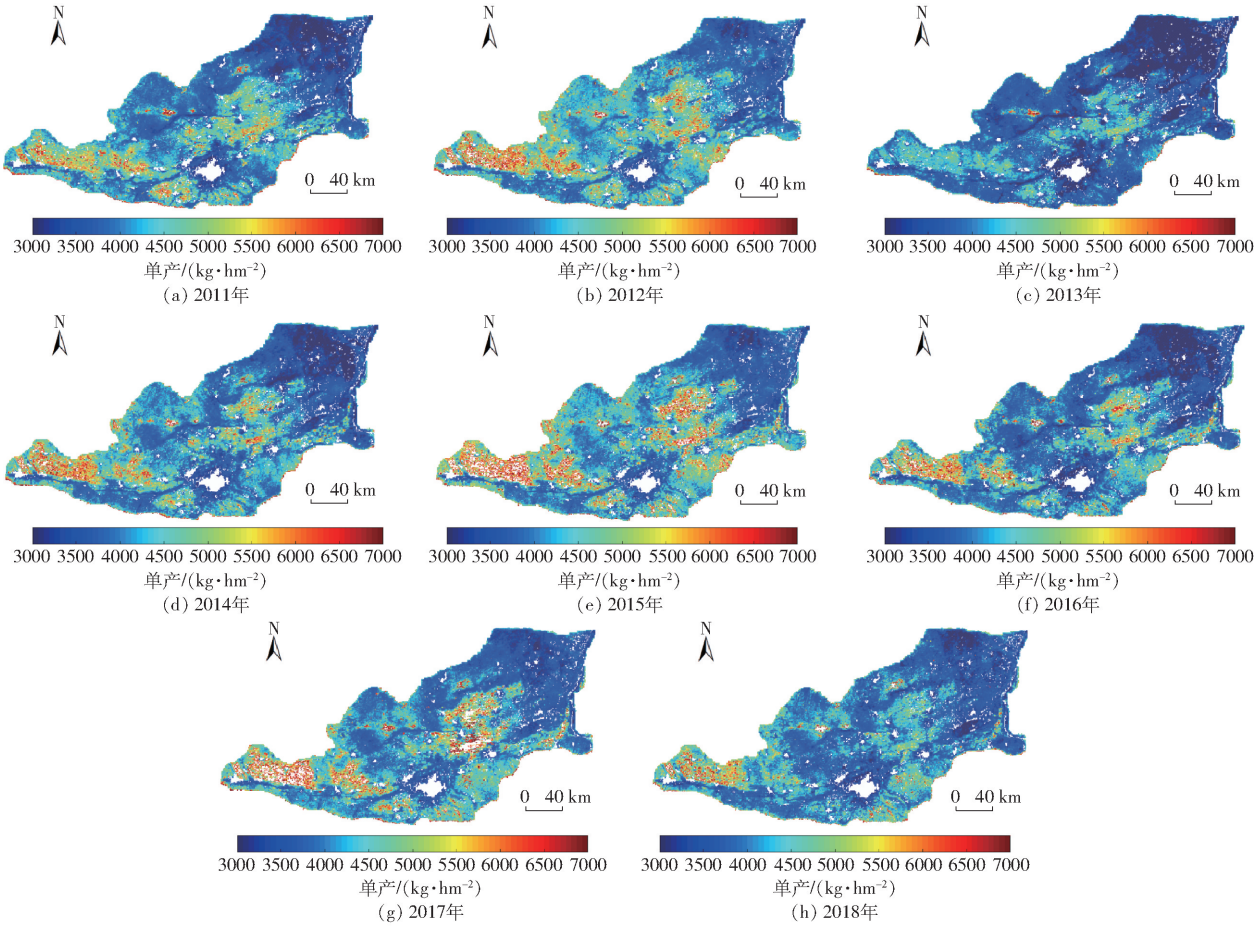


图 6 关中平原 2011—2018 年冬小麦区域单产估测结果

Fig. 6 Regional yield estimation of winter wheat in Guanzhong Plain from 2011 to 2018

产模型 R^2 均大于 0.53，明显高于王鹏新等[24]在市域尺度利用 VTCI 构建的估产模型（R^2 = 0.437）和本文利用 VTCI、LAI 构建的单参数估产模型的决定系数，原因是基于双参数的估产模型能更充分反映冬小麦在生长过程中水分胁迫和叶面积指数等因素对于产量的影响，但在作物生长过程中受到多种因素的影响，在今后的研究中还需进一步充分考虑其他因素的影响。

通过将本文获得的 VTCI 各生育时期权重与王鹏新等[24]利用小波分析进行市域尺度 VTCI 多尺度分析得出的权重比较发现，其所确定的 VTCI 各生育时期权重间的差异性高于本文基于县域尺度得出的 VTCI 权重，原因可能为，在利用小波对县域尺度 VTCI 进行多尺度分析时，VTCI 在空间维度中复杂性明显增加，进而增加了小波进行多尺度分析时的误差，最终对 VTCI 权重的计算造成了影响。

在利用小波变换对 VTCI 和 LAI 进行多尺度分析实现特征提取时，发现基于 LAI 构建的产量估测模型精度高于基于 VTCI 构建的估产模型，原因可能是 LAI 在整个生育期内有明显的先增大后减小的变化趋势和主要特征，而 VTCI 在整个生育期间变化规律不明显且存在大量的细节特征，因此，在利用 Morlet 小波对 VTCI 和 LAI 进行多尺度分析时，对有明显主要特征的 LAI 的表达效果更好，相比之下对 VTCI 进行特征提取较难。因此，在今后的研究过程中将针对时间序列的变化特性选择更为适宜的小波函数进行多尺度分析以提高估产精度。此外，本研究采用 MCD12Q1 产品中国际地圈生物圈计划（IGBP）的分类方案对研究区冬小麦种植区域进行提取。然而，由于该方案仅对“农用地或农用地/自然植被”类型进行分类，因此，在对冬小麦分布信息提取时可能产生误差，进而对冬小麦的估产结果造成一定影响，今后需要进一步对作物分布提取信息支持下的冬小麦单产估测进行精细化研究。

4 结论

（1）通过小波变换和交叉小波变换分别确定冬小麦各生育时期 VTCI、LAI 与单产的主振荡周期和共振周期基本具有一致性，不同生育时期 VTCI、LAI 与单产间存在不同的主振荡周期和共振周期，但基本上均在 2 ~ 3 a 有明显的振荡周期。利用交叉小波分析各生育时期 LAI 与单产之间的关系发现，在返青期和拔节期，LAI 先于单产变化，在抽穗–灌浆期和乳熟期，LAI 与单产同步变化，因此，LAI 在后

两个生育时期对单产的影响更为显著。

(2)利用小波变换和交叉小波变换获得的权重,建立加权 VTCI、加权 LAI 单参数和双参数 3 种单产估测模型,结果表明,基于加权 VTCI、加权 LAI 双参数构建的单产估测模型精度均高于单参数估产模型,基于共振周期确定的双参数估产模型精度略高于基于主振荡周期构建的双参数估产模型,说明基于双参数的共振周期建立的估产模型能够更充分反映作物在生长过程中受到的各种因素的影响,能更好地反映作物生长的实际情况。

参 考 文 献

[1] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247 - 260.
SHI Zhou, LIANG Zongzheng, YANG Yuanyuan, et al. Status and prospect of agriculture remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247 - 260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150237&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.037. (in Chinese)

[2] 郭锐, 朱秀芳, 李石波, 等. 山东省冬小麦单产监测与预报方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 156 - 163.
GUO Rui, ZHU Xiufang, LI Shibo, et al. Monitoring and forecasting method of winter wheat yield in Shandong Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 156 - 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200718&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.018. (in Chinese)

[3] CALERA A, GONZALEZ-PIQUERAS J, MELIA J. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 97 - 109.

[4] 任建强, 陈仲新, 周清波, 等. 基于叶面积指数反演的区域冬小麦单产遥感估测[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2883 - 2888.
REN Jianqiang, CHEN Zhongxin, ZHOU Qingbo, et al. LAI-based regional winter wheat yield estimation by remote sensing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2883 - 2888. (in Chinese)

[5] KOGAN F. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405 - 1419.

[6] 徐新刚, 吴炳方, 蒙继华, 等. 农作物单产遥感估算模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 290 - 298.
XU Xin'gang, WU Bingfang, MENG Jihua, et al. Research advances in crop yield estimation models based on remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 290 - 298. (in Chinese)

[7] XIE Yi, WANG Pengxin, SUN Huitao, et al. Assimilation of leaf area index and surface soil moisture with the CERES - Wheat model for winter wheat yield estimation using a particle filter algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(4): 1303 - 1316.

[8] XIE Yi, WANG Pengxin, BAI Xuejiao, et al. Assimilation of the leaf area index and vegetation temperature condition index for winter wheat yield estimation using Landsat imagery and the CERES - Wheat model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 194 - 206.

[9] 杜文勇, 何雄奎, SHAMAILA Z, 等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4):174 - 178, 183.
DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 174 - 178, 183. (in Chinese)

[10] PALOSUO T, KERSEBAUM K C, ANGULO C, et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(3): 103 - 114.

[11] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. 生态学报, 2002,22(2): 247 - 252.
JIANG Dong, WANG Naibin, YANG Xiaohuan, et al. Principles of the interaction between NDVI profile and the growing situation of crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(2): 247 - 252. (in Chinese)

[12] TUNCA E, KOKSAL E S, CETIN S, et al. Yield and leaf area index estimations for sunflower plants using unmanned aerial vehicle images[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(11):682.

[13] FU Z, JIANG J, GAO Y, et al. Wheat growth monitoring and yield estimation based on multi-rotor unmanned aerial vehicle[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 508.

[14] 何亚娟, 潘学标, 裴志远, 等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 226 - 231.
HE Yajuan, PAN Xuebiao, PEI Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 226 - 231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130539&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.039. (in Chinese)

[15] 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.
WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412 - 418. (in Chinese)

[16] 李艳, 王鹏新, 刘峻明, 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——Ⅱ. 改进的层次分析法和变异系数法组合赋权[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 236 - 239.

LI Yan, WANG Pengxin, LIU Junming, et al. 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[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 236 - 239. (in Chinese)

[17] SON N T, CHEN C F, CHEN C R, et al. Prediction of rice crop yield using MODIS EVI - LAI data in the Mekong Delta, Vietnam[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(20): 7275 - 7292.

[18] 刘雅婷, 龚龑, 段博, 等. 多时相 NDVI 与丰度综合分析的油菜无人机遥感长势监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(2): 265 - 272.
LIU Yating, GONG Yan, DUAN Bo, et al. Combining multi-temporal NDVI and abundance from UAV remote sensing data for oilseed rape growth monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(2): 265 - 272. (in Chinese)

[19] 王鹏新, 齐璇, 李俐, 等. 基于随机森林回归的玉米单产估测[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 237 - 245.
WANG Pengxin, QI Xuan, LI Li, et al. Estimation of maize yield based on random forest regression[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 237 - 245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190726&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.026. (in Chinese)

[20] 李瑞平, 史海滨, 张晓红, 等. 基于小波变换的最大冻深期气温与土壤水盐特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 82 - 87.
LI Ruiping, SHI Haibin, ZHANG Xiaohong, et al. Characteristic analysis of temperature, soil water and salt during maximum freezing depth period based on wavelet transform[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 82 - 87. (in Chinese)

[21] LIANG S, GE S, WAN L, et al. Can climate change cause the Yellow River to dry up? [J]. Water Resources Research, 2010, 46(2): 228 - 236.

[22] 刘晓琼, 刘彦随, 李同昇, 等. 基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J]. 地理科学, 2015, 35(2): 211 - 217.
LIU Xiaoqiong, LIU Yansui, LI Tongsheng, et al. Evolution law of the runoff and sediment discharge of the Weihe River based on wavelet multi-scale transform[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(2): 211 - 217. (in Chinese)

[23] 卢晓宁, 曾德裕, 黄玥, 等. 四川省伏旱及驱动因子多尺度分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 138 - 146.
LU Xiaoning, ZENG Deyu, HUANG Yue, et al. Multi-scale analysis of drought and its driving factors in Sichuan[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 138 - 146. (in Chinese)

[24] 王鹏新, 冯明悦, 梅树立, 等. 条件植被温度指数的多尺度特性分析与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 915 - 921.
WANG Pengxin, FENG Mingyue, MEI Shuli, et al. Analysis and application of the multi-scale characteristics of vegetation temperature condition index[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(6): 915 - 921. (in Chinese)

[25] 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.
SUN Wei, WANG Pengxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 22 - 26. (in Chinese)

[26] 李艳, 王鹏新, 刘峻明, 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. 因子权重排序法和熵值法组合赋权[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 159 - 163.
LI Yan, WANG Pengxin, LIU Junming, et al. 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[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 159 - 163. (in Chinese)

[27] 王鹏新, 荀兰, 李俐, 等. 基于时间序列叶面积指数傅里叶变换的作物种植区域提取[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 207 - 215.
WANG Pengxin, XUN Lan, LI Li, et al. Extraction of planting areas of main crops based on Fourier transformed characteristics of time series leaf area index products[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 207 - 215. (in Chinese)

[28] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61 - 78.

[29] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5 - 6): 561 - 566.

[30] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 1(4): 479 - 487.
SUN Weiguo, CHENG Bingyan. Application of cross wavelet transformation to analysis on regional climate variations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 1(4): 479 - 487. (in Chinese)

[31] 王亚敏, 张勃, 郭玲霞, 等. 地磁 Ap 指数与太阳黑子数的交叉小波分析及 R/S 分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 747 - 752.
WANG Yamin, ZHANG Bo, GUO Lingxia, et al. Cross wavelet analysis and R/S analysis of relationship between geomagnetic Ap index and sunspot number[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 747 - 752. (in Chinese)

[32] 桑燕芳, 王栋, 吴吉春, 等. 水文时间序列小波互相关分析方法[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1272 - 1279.
SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun, et al. Wavelet cross-correlation method for hydrologic time series analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1272 - 1279. (in Chinese)