

引用格式:王蕾,王鹏新,李俐,等. 河北省中部平原玉米长势遥感综合监测[J]. 资源科学, 2018, 40(10): 2099–2109. [Wang L, Wang P X, Li L, et al. Integrated maize growth monitoring based on gray correlation analysis and remote sense data in the central plain of Hebei Province[J]. *Resources Science*, 2018, 40(10): 2099–2109.] DOI :10.18402/resci.2018.10.17

河北省中部平原玉米长势遥感综合监测

王 蕾^{1,2}, 王鹏新^{1,2}, 李 俐^{1,2}, 荀 兰^{1,2}, 孔庆玲^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 农业农村部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为了提高玉米的遥感长势监测的准确度, 以河北省中部平原地区为研究区域, 以MODIS遥感数据反演的条件植被温度指数(Vegetation Temperature Condition Index, *VTCI*)与叶面积指数(Leaf Area Index, *LAI*)作为玉米长势监测指标, 通过灰色关联度分析法确定玉米各生育时期(出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期与灌浆—成熟期)*VTCI*与*LAI*作为相应生育时期长势监测指标的权重值, 以及4个生育时期的玉米长势在总体长势与产量形成中的权重值, 并基于权重结果分别构建玉米在4个生育时期与主要生育期的长势综合监测指标, 进而评估研究区域2011—2016年间的玉米长势。结果表明, 各生育时期*VTCI*作为长势监测指标的权重值均大于*LAI*, 且以拔节—抽雄期最大, 抽雄—灌浆期次之, 说明玉米各生育时期的长势与最终产量较易受到水分胁迫的影响, 并以拔节—抽雄期与抽雄—灌浆期对水分胁迫最为敏感; 而玉米长势综合监测指标在4个生育时期的权重值较为接近, 并以灌浆—成熟期略大, 说明该时期的玉米长势与最终产量之间的关系较为密切。研究区域5市的县域尺度玉米长势综合监测指标与单产之间的决定系数(R^2)介于0.247~0.598之间, 均达到了极显著水平($P < 0.001$), 优于单一的*VTCI*或*LAI*指标, 表明基于长势综合监测指标的玉米长势监测结果准确度较高。研究年份间该区域的玉米长势以2011年的长势最好, 2014年与2015年长势最差, 且西部长势优于东部。

关键词: 灰色关联度分析; 综合监测; 叶面积指数; 玉米长势; 条件植被温度指数; 河北省中部

DOI :10.18402/resci.2018.10.17

1 引言

作物长势监测旨在为田间管理与早期估产提供先验知识与估算依据, 是农业遥感的重要任务^[1,2]。传统的作物长势监测是通过人工肉眼观察作物的几何形状、颜色等外观特征判别作物的生长情况, 虽然具有较好的可靠性与真实性, 但需要耗费大量的人力, 效率低下, 难以大面积开展。卫星遥感技术具有快速、宏观、准确、客观、及时、动态等特点^[3], 可以高效获取大范围的作物生长状况与环境信息, 在区域尺度作物长势监测和产量预测等方面具有得天独厚的优势^[4,5]。

基于遥感技术的作物长势监测一般通过选用

一些能够反映作物生长状况且与生长过程密切相关的遥感长势指标进行表征^[2], 并以能够反映植被绿度状态的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)及基于其改进的植被指数等的应用最为广泛^[6,7]。吴文斌等^[8]基于NOAA影像提取冬小麦生长区域的*NDVI*数据, 并通过年际间比较判断冬小麦在不同时间段的长势好坏。江东等^[9]研究了时序*NDVI*的曲线特征与作物长势的互动关系, 认为*NDVI*曲线积分与作物产量有较好的相关关系。李军玲等^[10]通过分析MODIS-*NDVI*与平均株高、群体密度等多种农学参数之间的相关关系, 确定了*NDVI*作为夏玉米的长势监测指标,

收稿日期: 2017-10-17, 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(2016YFD0300603-3)。

作者简介: 王蕾, 女, 河南太康人, 博士生, 主要从事遥感作物长势监测与产量估测研究。E-mail: leiwangcicc2015@cau.edu.cn

通讯作者: 王鹏新, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

并将其用于大面积的夏玉米长势监测。然而,作物生长除与本身的绿度状态相关外,还与气温、土壤湿度、作物生长状态等密切相关^[1],为了获取精度更高的作物长势监测模型,可通过综合考虑作物生长过程中的作物生长状态指标、水分胁迫指标等实现。其中,条件植被温度指数(VTCI)是基于地表温度(Land Surface Temperature, LST)与NDVI呈三角形区域分布的特征提出的^[12,13],被广泛应用于区域级的干旱监测与产量估测预测等^[14-16],可用于量化地反映作物生产过程中的水分亏缺信息。此外,叶面积指数(LAI)作为反映作物光合速率的重要指标之一,能够很好地表示作物的生长状态^[2]。通过多指标综合评价方法等将作物各生育时期VTCI与LAI等指标所反映的长势信息综合分析,势必能获得准确度更高的作物长势监测结果及产量早期估测信息^[17]。同样,作物单产是作物在整个生长阶段长势的综合反映,不同阶段的作物长势对作物单产产生的影响也不尽相同^[18,19],通过综合考虑多时相遥感数据所反映的有用信息,可获取作物主要生育期的综合长势及估产信息。

鉴于此,本研究以河北省中部平原为研究区域,将玉米主要生育期(7月上旬—9月下旬)划分为4个生育时期:出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期与灌浆—成熟期,以VTCI与LAI作为玉米长势的监测指标,采用多指标综合评价方法中的灰色关联度分析法确定玉米在4个生育时期的VTCI和LAI作为长势监测指标的权重值,以及各生育时期的综合长势在玉米主要生育期长势与产量形成中的权重,构建玉米各生育时期与主要生育期的长势综合监测指标,以期获取精度更高的玉米长势综合监测结果。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

研究区位于河北省中部的平原地区(图1),面积约5.3万km²,包括保定市、廊坊市、石家庄市、衡水市和沧州市,以及刘家庄示范区和均匀分布的多个气象站点,覆盖范围为114°32'E—117°36'E, 36°57'N—39°50'N。该区域是河北省重要的农耕地,自然条件优越,盛产小麦、玉米和棉花等,其主要种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,是中国一年两

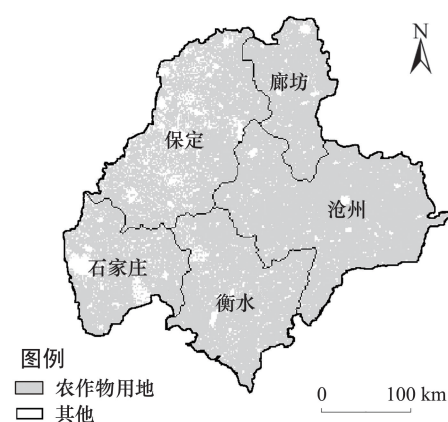


图1 研究区域农用地分布

Figure 1 The distribution of farmland in study area

熟作物种植区和重要的玉米生产基地^[20],玉米的播种期、生长期、收获期等物候特征较接近。该地区位于大陆季风带,属于半干旱半湿润气候区,地势西北高,东南低,海拔介于0~100m之间,年平均气温4~13℃,年辐射总量(4390~5180)MJ/m²,全年无霜期110~220d,年均降水400~800mm,且分布不均,由南向北逐渐减少,旱灾和涝灾对该地区的农作物长势及产量的影响较大^[21]。该区域年际间降水等环境条件与玉米长势也差异较大,研究年份(2011—2016年)涵盖了气象条件较好、较差等多种气象条件,玉米长势与产量也存在偏好(偏丰产)、偏差(偏歉)等不同长势与收获情况。其中,2011年墒情较好,播期集中,玉米长势好于往年;2012年受强降雨和低温冷冻天气的影响,玉米长势相对前一年较差;2013年受汛期暴雨等影响,玉米长势进一步变差;2014年的降水量大幅减少,且分布异常不均,部分区域的干旱持续时长突破历史同期极值,对玉米长势影响较大;2015年玉米生长季的降水偏少,玉米长势偏差;2016年接连发生涝灾和虫害,玉米长势受到影响。这为长势监测结果的精度验证提供了有利条件,因此将2011—2016年间该区域的玉米长势作为研究对象具有典型性。另外,该区域属于华北平原的一部分,其气候特征、种植制度和物候特征与华北平原等中国玉米主要播种区域较接近,通过对该区域玉米长势遥感监测方法的研究与推广,有助于为整个华北平原等中国主要玉米播种区的玉米长势信息的获取及产量的早期预估提供判断依据与决策信息。

2018年10月

2.2 数据获取与处理

2.2.1 条件植被温度指数

条件植被温度指数(VTCI)是基于归一化植被指数(NDVI)和地表温度(LST)特征空间呈三角形区域分布的特点提出的,是一种近实时的干旱监测方法,其定义为^[12,13]:

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

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; $LST_{\max}(NDVI_i)$ 和 $LST_{\min}(NDVI_i)$ 分别表示在研究区域内,当NDVI值为某一特定值时的所有像素地表温度的最大值和最小值,并被称作热、冷边界; $LST(NDVI_i)$ 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。

本研究获取的遥感数据为研究区域2011—2016年玉米主要生长季(7月上旬—9月下旬)的MYD11A1产品与MYD09GA产品,上述产品来源于美国国家航空与航天局(NASA)(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>),基于Aqua卫星观测所得,其中,MYD11A1为1000m地表温度L3产品,MYD09GA为500m/1000m的地表反射率产品,二者的时间分辨率均为1d。覆盖研究区域的MODIS产品行列编号为h26v4、h26v5、h27v4与h27v5,经过拼接、重采样、投影转换等处理后,反演日LST产品和计算日NDVI产品,然后采用最大值合成技术生成LST与NDVI的旬最大值合成影像,进而根据公式(1)—公式(3)计算生成以旬为单位的VTCI时间序列数据。

由于研究区域的玉米播种期、生育时期等较接近,因此本文按照一般年份玉米生育时期起止时间划分研究年份的玉米各生育时期,即将玉米主要生育期划分为出苗—拔节期(7月上旬—7月中旬)、拔节—抽雄期(7月下旬—8月中旬)、抽雄—灌浆期(8月下旬—9月上旬)和灌浆—成熟期(9月中旬—9月下旬)4个生育时期,逐像素取各生育时期所包含的多旬VTCI的均值作为各生育时期的VTCI。应用窗

口均值法统计研究区域2011—2016年间各县各生育时期的VTCI。

2.2.2 叶面积指数

玉米的长势与产量是由其营养生长与生殖生长期间的环境胁迫决定,而玉米生长期间的潜在光合作用量部分取决于各生长阶段的玉米叶面积,故将LAI作为玉米长势监测的遥感指标具有其适宜性。Aqua-MODIS 8d合成产品MYD15A2具有时间频率高和覆盖范围广的优势,可用于本研究中LAI时间序列数据的计算。下载并处理了2011—2016年玉米生长季(d185—d265)的MYD15A2产品,由于原始LAI影像的时间分辨率为8d,且在局部地区存在数据骤降的现象,为了实现LAI与VTCI时间分辨率的统一,并消除云、大气等的影响,改善数据质量,应用S-G滤波对研究区域的LAI时间序列进行了逐像素的重构,通过插值与求均值等,获得旬时间尺度的LAI时间序列数据,而且滤波后的LAI影像灰度值变化平稳,显著改善了原始数据所存在的质量问题。

依据玉米生育时期的划分,取4个生育时期多旬LAI的均值作为各生育时期的LAI,进而统计研究年份间各县各生育时期的LAI。

2.2.3 产量数据

本研究中各县的玉米播种面积、总产量数据来源于2007—2016年的《河北农村统计年鉴》^[22],某年的统计年鉴可查询该年前一年的玉米播种面积与总产量。玉米单产数据由总产量与播种面积计算获得。玉米单产的增(减)率是指玉米逐年的产量相对于之前5年平均产量的增减百分率^[22],正值为增产,负值为减产:

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_{i-1} + Y_{i-2} + Y_{i-3} + Y_{i-4} + Y_{i-5}}{5} \quad (4)$$

$$Y_{ki} = \frac{Y_i - \bar{Y}_i}{\bar{Y}_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中 Y_i 为某县第 i 年的玉米单产; \bar{Y}_i 为某县第 i 年之前5年的玉米单产均值; Y_{i-1} — Y_{i-5} 为第 i 年之前的1~5年的玉米单产; Y_{ki} 为某县第 i 年的玉米增(减)产率。

2.3 研究方法

2.3.1 灰色关联度分析法

灰色关联度分析法的基本思想是根据因素之

间发展态势的相似或者相异程度衡量因素间关联程度,序列曲线的几何形状越接近,说明相应序列之间的联系越紧密,关联度越大,反之越小^[23]。

基于灰色关联度分析的多指标综合评价需制定参考数列 X^* 及被比较数列 X^i :

$$X^*=[X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*] \quad (6)$$

$$X^i=[X_1^i, X_2^i, \dots, X_n^i] \quad (7)$$

式中 $X_k^*(k=1, 2, \dots, n)$ 为第 k 个指标的最优值; $X_k^i(i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个方案中第 k 个指标的原始数值。为了保证对不同量纲与数量级之间的指标比较结果的可靠性,需通过规范化处理将原始数据转换为无量纲值 C_k^i :

$$C_k^i = \frac{X_k^i - X_{k\min}}{X_{k\max} - X_{k\min}} \quad (8)$$

式中 $X_{k\min}$ 为第 k 个指标在所在方案中的最小值; $X_{k\max}$ 为第 k 个指标在所在方案中的最大值。

计算第 i 个方案中第 k 个指标与第 k 个最优指标之间的关联系数 $\xi_i(k)$:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |C_k^* - C_k^i| + \rho \max_k \max_i |C_k^* - C_k^i|}{|C_k^* - C_k^i| + \rho \max_k \max_i |C_k^* - C_k^i|} \quad (9)$$

式中 ρ 为分辨系数, ρ 的取值直接决定着 $\xi_i(k)$ 的分布区间,随着 ρ 取值趋向变大, $\xi_i(k)$ 的取值随之聚集于 1 而使关联程度难以分辨,为了使 $\xi_i(k)$ 的分布区间适宜,关联程度易于分辨,限制 ρ 的取值范围为 $[0, 1]$; 当 ρ 值在 0.5000~0.5463 之间时分辨力较好,且 $\xi_i(k)$ 分布区间适宜,在实际应用中适用性广泛,故通常取 $\rho=0.5$ 。由于关联系数反映各个时刻数据间的关联程度,数据较多,信息较分散,为了将各个时刻的关联系数集中为一个值,计算第 i 个方案的绝对关联度 r_i :

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (10)$$

绝对关联度 r_i 反映了第 i 个方案各指标与最优指标之间的关联程度, r_i 值越大,则第 i 个方案越优异,其权重值越大。因此依据各方案绝对关联度在所有方案绝对关联度总和中所占的比重确定各方案的权重系数 W_i ^[23] :

$$W_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i} \quad (11)$$

本研究以研究区域各县 2011—2015 年的玉米单产作为参考数列,相应时间段的 $VTCl$ 与 LAI 作为被比较数列,通过计算玉米各生育时期 $VTCl$ 序列、 LAI 序列与单产数据之间的绝对关联度,确定玉米各生育时期 $VTCl$ 与 LAI 作为长势监测指标的权重值;通过确定玉米 4 个生育时期的长势综合监测指数序列曲线与单产序列曲线之间的关联程度,计算各生育时期长势综合监测指数在玉米产量形成中的权重值,进而构建玉米各生育时期与主要生育期的长势综合监测指标 (G)。

2.3.2 回归分析法

回归分析是描述客观事物间关系密切程度并将其定量化表示出来的一种统计分析方法。其中,一元线性回归是用线性方程 $y=a+bx$ 拟合一系列对自变量 x 和因变量 y 的数据观察值的过程。可通过回归方程的决定系数 (R^2) 或显著性检验的 P 值等评价 y 与 x 之间的拟合优度。其中, R^2 的取值范围在 0 和 1 之间,越接近 1,表示自变量对因变量的解释程度越高,拟合效果越好。 P 值是将观察结果认为有效即具有总体代表性的犯错概率,表示总体结果的可信程度。通常认为 $0.05 \leq P < 0.01$ 时的显著性水平具有统计学意义, $P=0.01$ 时的显著性水平具有高度的统计学意义。

研究区域共包含河北省的 52 个县,应用窗口均值法逐像素统计 2011—2015 年各县 G 的平均值,构建保定市、石家庄市、沧州市、衡水市与廊坊市各县的玉米 G 和单产数据间的线性回归模型,根据回归方程的 R^2 与显著性检验的 P 值判断长势综合监测指标与玉米单产间的线性相关程度。

2.3.3 区间估计

区间估计是用一个随机区间估计未知参数的范围,并给出估计区间的可靠程度。设 $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 是来自总体 $\xi \sim F(\xi, \theta)$ 的样本,其中 θ 为未知参数, $T_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 与 $T_2(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为两个满足不等式 $T_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) < T_2(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的统计量,若存在常数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 使得:

$$P\{T_1 \leq \theta \leq T_2\} = 1 - \alpha \quad (12)$$

成立,则称 $[T_1, T_2]$ 是参数 θ 置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间, α 为显著性水平; $T_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为置信下限, $T_2(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 为置信上限。通常将可靠度与精

2018年10月

确度作为评价某一区间估计好坏的标准,其中,置信水平 $1-\alpha$ 反映了区间估计的可靠概率, $1-\alpha$ 越大,估计的可靠程度越高;置信区间的长度可用于表示区间估计的精确度。对于给定的样本,可靠度与精确度之间是此消彼长的关系,在实际应用中,一般以区间 $[T_1, T_2]$ 有 $1-\alpha$ 的置信度为前提,寻求精确度较高的区间估计。

设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 为 $\xi \sim N(\mu, \sigma^2)$ 的样本, $\bar{\xi}$ 与 S^2 为样本均值和样本方差,则 μ 的置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间为:

$$[\bar{\xi} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1), \bar{\xi} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1)] \quad (13)$$

式中 n 为样本个数; μ 为总体均值; $t_{\alpha/2}(n-1)$ 是自由度 $(n-1)$ 的 t 分布关于 $\alpha/2$ 的上侧分位数。

《主要粮食作物产量年景等级》是由中国气象局发布的《中华人民共和国气象行业标准》^[24],该标准依据某一年国家级、省级的粮食作物单产与总产相对前五年平均产量的增(减)率,将该年份玉米等主要粮食作物的产量年景划分为6个等级:丰年、偏丰年、持平略增、持平略减、偏歉年与歉年。全国尺度和省级尺度的粮食作物的产量年景等级及其对应的总产或单产增(减)率(P_y)的区间分布如表1,由于目前暂未发布市(县)级的粮食作物产量年景等级,本研究以该划分标准中分省单产对应的产量年景划分标准确定各县每年的玉米产量年景,进而根据某年某县玉米的产量年景等级,将该年该县对应的长势综合监测指标(G)划分为好、偏好、持平稍好、持平稍差、偏差或差;取置信水平 $1-\alpha$ 为0.95,统计分析每一等级 G 的均值、标准差、置信区间等,依据各等级置信区间的上(下)限,制定玉米长势综合监测指标的等级划分标准。

表1 玉米产量年景等级及其产量增(减)率指标

Table 1 Categories of year's harvest in maize yields and their percentage increases (decreases) (%)

产量年景等级	全国单产	全国总产	分省总产	分省单产
丰年	$P_y > 7$	$P_y > 11$	$P_y > 14$	$P_y > 11$
偏丰年	$3 < P_y \leq 7$	$4 < P_y \leq 11$	$5 < P_y \leq 14$	$4 < P_y \leq 11$
持平略增	$0 < P_y \leq 3$	$0 < P_y \leq 4$	$0 < P_y \leq 5$	$0 < P_y \leq 4$
持平略减	$-3 \leq P_y \leq 0$	$-4 \leq P_y \leq 0$	$-5 \leq P_y \leq 0$	$-4 \leq P_y \leq 0$
偏歉年	$-7 \leq P_y < -3$	$-11 \leq P_y < -4$	$-14 \leq P_y < -5$	$-11 \leq P_y < -4$
歉年	$P_y < -7$	$P_y < -11$	$P_y < -14$	$P_y < -11$

2.3.4 玉米长势综合监测指标的构建

由2.3.1章节计算每个生育时期 $VTCl$ 与 LAI 的权重值及4个生育时期的综合权重值,根据权重结果分别构建出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期与灌浆—成熟期的玉米长势综合监测指数 G_j ($j=1, 2, 3, 4$) 与主要生育期的长势综合监测指标 G (表2)。可以看出, $VTCl$ 与 LAI 在不同的生育时期的权重值不同,且在每个生育时期 $VTCl$ 的权重值均大于 LAI , 并以拔节—抽雄期 $VTCl$ 的权重最大,抽雄—灌浆期次之,这是由于研究区域降水的时空分布不均,在玉米生长季的伏旱期高温干旱气候频发,致使该地区的玉米长势较易受到水分胁迫的影响,拔节—抽雄期所处的生育阶段为孕穗期,该时期是玉米营养生长与生殖生长并进的时期,也是植株需水与需肥的高峰期,该时期土壤缺水会造成果穗发育不良,并最终导致减产,故玉米在拔节—抽雄期的生长对水分胁迫最为敏感。此与前人的研究结论一致, Yilmaz 等^[25]对玉米各生育时期土壤水分含量与长势之间的关系进行了研究,认为玉米在拔节期与抽雄期发生水分胁迫会造成 LAI 的显著降低,对长势的影响最大;李德等^[26]通过研究夏玉米关键生育阶段的降水效应,得出了8月上旬—9月上旬(对应本文的拔节—抽雄期与抽雄—灌浆期)为降水影响的关键时段。

表2 主要生育期的玉米长势综合监测指标

Table 2 Integrated maize growth monitoring indices at the main growth stage

生育时期	长势综合监测指标(G)
出苗—拔节期	$G_1=0.510VTCl_1+0.490LAI_1$
拔节—抽雄期	$G_2=0.532VTCl_2+0.468LAI_2$
抽雄—灌浆期	$G_3=0.512VTCl_3+0.488LAI_3$
灌浆—成熟期	$G_4=0.509VTCl_4+0.491LAI_4$
主要生育期	$G=0.251G_1+0.247G_2+0.247G_3+0.255G_4$

注: $VTCl_1$ 、 $VTCl_2$ 、 $VTCl_3$ 、 $VTCl_4$ 与 LAI_1 、 LAI_2 、 LAI_3 、 LAI_4 分别表示玉米在出苗—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—灌浆期、灌浆—成熟期的 $VTCl$ 和 LAI ; G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 与 G 分别表示4个生育时期与主要生育期的长势综合监测指标。

4个主要生育时期的玉米长势在产量形成中的权重值较为接近,玉米长势在灌浆—成熟期的权重值相对其他生育时期略大,说明不同生育时期的玉米长势对最终产量形成的贡献率相似,且4个生育

时期中以灌浆—成熟期的长势与玉米的最终产量关系更为密切,这是由于该生育时期是玉米籽粒形成并逐渐饱满的关键时期,此时若能满足玉米生长所需的水分、养分等要求,能有效地增加产量和提高品质,而养分缺乏或过早采收等则会造成产量下降和品质偏差。综上,不同的长势监测指标或不同生育时期的玉米长势对玉米总体长势与最终产量的影响不同,仅仅通过单一的长势影响因子或单一的生育时期得到的长势监测结果容易存在偏差,本研究综合考虑了 *VTCI* 与 *LAI* 两种指标对玉米4个生育时期长势的影响,得到的各生育时期与主要生育期的长势监测结果更加全面可靠。

3 结果与分析

3.1 玉米长势综合监测结果

采用所构建的长势综合监测指标,逐像素统计研究区域各县2011—2016年的综合长势指标的均值。根据公式(4)、公式(5)计算2011—2015年各县玉米的增(减)产率,基于产量年景等级的划分标准(表1),将研究年份各县的玉米产量年景划分为丰年、偏丰年、持平略增、持平略减、偏歉年与歉年,并按照研究年份各县的产量年景将对应年份县域尺度的长势综合监测指标(*G*)进行分级。在偏差、持平稍差、持平稍好和偏好的等级中,分别计算了各级 *G* 的均值、标准差与置信区间(置信水平为95%)。根据单侧置信区间原理,确定了差等级的置信上限与好等级的置信下限。根据标准差的统计结果,好等级区间估计的标准差较之差的更小,说明好等级对其置信下限估计的精度更高,因此将各等级置信区间的下限作为下一等级的划分依据,即长势等级为好时,*G* 对应的置信下限即为长势等级

为偏好时的上限。取偏差、持平稍差、持平稍好、偏好与好这4个等级的置信区间下限值作为划分标准,确定基于 *VTCI*、*LAI* 与灰色关联度分析法的玉米长势综合监测指标的等级划分标准(表3)。可以看出,玉米长势被划分为差、偏差、持平稍差、持平稍好、偏好和好6个等级,其长势监测指数的均值分别为0.427、0.432、0.450、0.465、0.491与0.515,呈现递增的趋势,标准差较小,介于0.032~0.044之间,且每一等级的 *G* 对应的置信区间较窄,说明在95%的置信水平上区间估计的误差较小,精确度较高,长势综合监测指标的等级划分标准具有理论意义。

基于玉米长势综合监测结果与长势分级标准(表3),得到研究区域2011—2016年的玉米长势综合监测分级结果(图2)。可以看出,玉米长势最好的年份为2011年,该年份河北中部平原西部与南部(保定市、石家庄市和衡水市)地区的玉米长势好于正常年份,而东部与东北部的(廊坊市与沧州市)的玉米长势与正常年份相比为持平稍好或偏好;2012年衡水市大部分区域的玉米长势为好,局部区域为偏好,沧州与廊坊的玉米长势以持平稍好与持平稍差为主,局部长势存在偏差与差,石家庄与保定的玉米长势差别较大,长势以差与好所占比例最大;2011—2014年间玉米长势逐年变差,2014年廊坊和沧州大片区域的玉米长势较之正常年份均为差,保定与石家庄的玉米长势等级为差的面积比重也较大,为4年中长势最差年份,这与研究区域各市的玉米年鉴产量自2011年起逐年下降,并在2014年达到最低的事实较符合;2015年衡水市等地的玉米长势等级为差的区域所占面积相对2014年有所增加,总体长势相对上一年略差,这是由于2015年的河北

表3 长势综合监测指数的量化分析与等级划分标准

Table 3 Quantitative analysis on integrated growth monitoring index and its classification criteria

		长势综合监测指数(<i>G</i>)				分级标准
		均值	标准差	置信下限	置信上限	
长势等级	差	0.427	0.044	—	0.440	$G < 0.418$
	偏差	0.432	0.043	0.418	0.447	$0.418 \leq G < 0.435$
	持平稍差	0.450	0.038	0.435	0.466	$0.435 \leq G < 0.453$
	持平稍好	0.465	0.032	0.453	0.476	$0.453 \leq G < 0.480$
	偏好	0.491	0.041	0.480	0.501	$0.480 \leq G < 0.503$
	好	0.515	0.037	0.503	—	$G \geq 0.503$

2018年10月

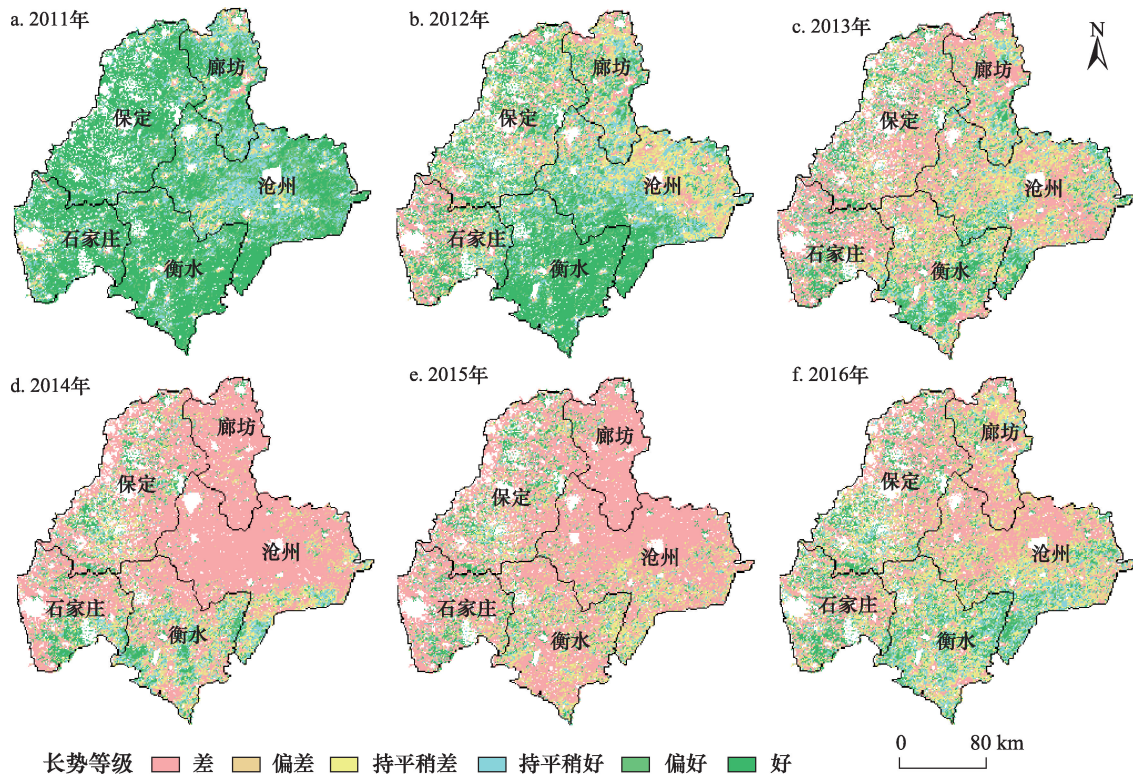


图2 2011—2016年河北5市玉米长势综合监测结果示意

Figure 2 Integrated maize growth monitoring of 5 cities of Hebei from 2011 to 2016

主汛期降水量较常年同期大幅偏少,旱情较重;2016年河北5市的玉米长势相近,大部分区域相对正常年份为偏差或差,原因在于2016年河北省部分县市在玉米苗期发生雹灾,7月下旬又有涝灾和病虫害的发生,导致玉米的生长发育受到影响,这与实际情况均较相符。

3.2 长势综合监测指标的适用性分析

分别构建研究区域5市2011—2015年县域尺度玉米的 $VTCI$ 、 LAI 及长势综合监测指标(G)与单产数据之间的线性回归模型(表4)。研究区域各县的 $VTCI$ 与玉米单产之间的线性回归分析结果表明,5市中以廊坊市各县的 $VTCI$ 与玉米单产之间的相关性最好($R^2=0.616, P<0.001$),优于 LAI 和 G ;以保定市各县的 $VTCI$ 与单产之间的回归结果最差($R^2=0.147, P=0.002$),劣于其它两个指标的回归结果,说明单一的 $VTCI$ 指标与玉米单产之间相关程度不稳定,易受到除水分外其他长势影响因素的干扰。5市各县的 LAI 与玉米单产之间线性回归结果以沧州市最优($R^2=0.688, P<0.001$),石家庄市最差($R^2=$

$0.195, P=0.001$),除沧州市外其余4市的决定系数(R^2)均小于 G 与单产之间的决定系数,说明应用单一的 LAI 指标反映的玉米的长势与产量估测信息不够全面。河北省5市各县的 G 与玉米单产之间均具有较好的正相关性,决定系数(R^2)分别达到了0.300、0.247、0.341、0.450与0.598,显著性检验的 P 值均小于0.001,除沧州市与廊坊市外,其余3市 G 与玉米单产之间的回归模型均优于单一的 $VTCI$ 与 LAI ,表明相对于单一的 $VTCI$ 或 LAI 指标,通过灰色关联度分析法构建的玉米长势综合监测指标与玉米长势及最终产量之间的关系更为密切,原因在于长势综合监测指标同时考虑了各生育时期 $VTCI$ 和 LAI 对玉米长势影响的权重,以及不同生育时期的长势对总体长势与产量形成的影响,因此 G 可以更准确更全面地反映玉米长势。

为了进一步验证 G 在玉米长势监测与产量估测中的适用性,统计了2011—2015年间各县基于 $VTCI$ 、 LAI 和 G 的产量估测结果与实际产量之间的相对误差,结果表明,研究年份间基于 $VTCI$ 、 LAI 和

表4 2011—2015年的玉米各长势监测指标与县域
尺度单产的线性回归模型

Table 4 The linear regression models between several maize growth monitoring indices and yields of maize at county level from 2011 to 2015

市	回归模型	决定系数(R^2)	P值
保定	$Y_{vtc1}=4754.2X_{vtc1}+4205.1$	0.147	=0.002
	$Y_{lai1}=12014X_{lai1}+3185.9$	0.281	<0.001
	$Y_{G1}=9803.7X_{G1}+2503.1$	0.300	<0.001
石家庄	$Y_{vtc2}=2726.6X_{vtc2}+2726.6$	0.206	<0.001
	$Y_{lai2}=5344.1X_{lai2}+5344.1$	0.195	=0.001
	$Y_{G2}=4977.3X_{G2}+4977.3$	0.247	<0.001
沧州	$Y_{vtc3}=5428.1X_{vtc3}+2031.8$	0.210	<0.001
	$Y_{lai3}=21524X_{lai3}+130.9$	0.688	<0.001
	$Y_{G3}=14445X_{G3}-937.1$	0.341	<0.001
衡水	$Y_{vtc4}=4434.5X_{vtc4}+3341.3$	0.389	<0.001
	$Y_{lai4}=7264.2X_{lai4}+3876.1$	0.304	<0.001
	$Y_{G4}=6735.9X_{G4}+2923.7$	0.450	<0.001
廊坊	$Y_{vtc5}=6815.3X_{vtc5}+2036.4$	0.616	<0.001
	$Y_{lai5}=14315X_{lai5}+2431.9$	0.487	<0.001
	$Y_{G5}=10842X_{G5}+1381.5$	0.598	<0.001

注: X_{vtc1} — X_{vtc5} 、 X_{lai1} — X_{lai5} 和 X_{G1} — X_{G5} 分别表示研究区域5市各县玉米主要生育期的VTCl、LAI和G; Y_{vtc1} — Y_{vtc5} 、 Y_{lai1} — Y_{lai5} 和 Y_{G1} — Y_{G5} 分别表示以VTCl、LAI和G作为长势监测指标时玉米的估测产量。

G的估测产量与实际产量之间的相对误差的均值分别为9.3%、9.2%和8.6%,说明相对单一的VTCl和LAI指标,基于长势综合监测指标的玉米单产估测精度更高。

综上所述,认为基于灰色关联度分析法的玉米长势综合监测指标优于单一的VTCl或LAI指标,基于该综合指标的长势监测结果与实际产量的年际变化和空间分布规律等更为相符,可以为玉米长势信息的获取及产量的早期预估提供判断依据与决策信息。

4 讨论

VTCl与LAI能够反映近实时的玉米水分胁迫信息与生长状况等,运用灰色关联度分析法构建的VTCl与LAI的玉米长势综合监测指标,考虑了多年的VTCl时间序列、LAI时间序列与单产时间序列数据之间的关联度,能准确表述各生育时期玉米长势的空间分布状况,在一定程度上克服了目前多数研究在作物长势监测中指标单一、难以全面反映作物长势的弊端。玉米的最终产量取决于各生育时期

长势的综合作用,通过比较不同生育时期的长势指标序列与产量序列的关联度,确定各生育时期长势在产量形成中的权重值,由此构建的玉米主要生育期长势指标与产量之间相关性显著,符合长势的实际分布与变化情况,可用于反映年度间玉米长势的差异。

然而,在构建长势综合监测指标时未考虑VTCl与LAI之间的相关性,可能导致回归分析中存在多重共线性等问题,可在今后通过主成分分析等消除指标间的相关性,以构建更合理的玉米长势综合监测指标。本文研究区域的种植制度较一致,玉米播种期等较接近,然而不同年份间玉米各生育时期的起止时间仍略有不同,将所有年份的玉米生育时期起止时间统一划定可能导致异常年份(如偏暖、偏旱等)的玉米生育时期划分结果与实际存在偏差,进而影响玉米长势监测精度,可在今后的研究中尝试结合实地调研数据或参考相关的史料记载实现玉米生育时期的准确划分,进而进一步提高玉米长势监测精度。另外,主要生育期的长势综合监测指标是基于数据的客观分析得到的,未结合农学先验知识与专家的主观判断,其权重确定结果与实际情况可能存在一定的差异,今后可通过综合主观评价与客观分析的多指标综合评价方法,实现更加科学、合理的玉米主要生育期长势监测。

以往的作物长势监测研究一般采用当前的遥感影像与去年同期影像对比,将差值影像按照灰度值区间划分为若干等级以获取作物长势的分级结果。由于研究年份较少,且每一景影像的分级标准均不同,这不利于长势监测的精确化与定量化。本研究选取了多年的遥感数据与玉米单产数据,在确定长势分级标准时综合考虑了近5年的产量与长势变化规律,由此制定的分级标准具有理论意义,对多年多景影像的长势监测结果均适用,利于年际间长势空间分布情况与时间演变规律的对比分析。今后可尝试结合田间实测玉米生长情况等,提高长势分级结果的定量化水平与可信度。

5 结论

(1)应用灰色关联度分析法确定的4个生育时期与主要生育期的玉米长势综合监测指标,能较好地反映玉米生长过程中的多种因子对其长势的综

2018年10月

合影响。长势综合指标与县域尺度玉米单产之间回归模型的拟合效果较好,对玉米长势与产量信息的反映更加准确全面,优于单一的 $VTCl$ 或 LAI 指标。

(2)玉米长势综合监测指数(G)的等级划分标准为: $G < 0.418$ 、 $0.418 \leq G < 0.435$ 、 $0.435 \leq G < 0.453$ 、 $0.453 \leq G < 0.480$ 、 $0.480 \leq G < 0.503$ 与 $G \geq 0.503$,对应的长势级别分别为差、偏差、持平稍差、持平稍好、偏好与好。

(3)近年来玉米主要生育期长势的年际波动较大,总体长势以2011年最好,2012年次之,2014年与2015年的玉米长势最差;在空间分布上具有西部长势优于东部,南部优于北部的特点,这与玉米产量的年际变化规律及灾害发生程度等实际情况相符,表明基于 $VTCl$ 、 LAI 与灰色关联度分析的玉米长势综合监测结果精度较高,适用于区域玉米长势的综合监测。

参考文献(References):

- [1] 杨邦杰,裴志远.农作物长势的定义与遥感监测[J].农业工程学报,1999,15(3):214-218. [Yang B J, Pei Z Y. Definition of crop condition and crop monitoring using remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(3): 214-218.]
- [2] 吴炳方,张峰,刘成林,等.农作物长势综合遥感监测方法[J].遥感学报,2004,8(6):498-514. [Wu B F, Zhang F, Liu C L, et al. An integrated method for crop condition monitoring[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 498-514.]
- [3] 刘红辉.资源遥感-从区域调查到全球变化研究[J].资源科学,2000,22(3):34-38. [Liu H H. Resources remote sensing-from regional inventory to global change studies[J]. *Resources Science*, 2000, 22(3): 34-38.]
- [4] Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 548-559.
- [5] Doraiswamy P C, Moulin S, Cook P W, et al. Crop yield assessment from remote sensing[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(6): 665-674.
- [6] 高林,李长春,王宝山,等.基于多源遥感数据的大豆叶面积指数估测精度对比[J].应用生态学报,2016,27(1):191-200. [Gao L, Li C C, Wang B S, et al. Comparison of precision in retrieving soybean leaf area index based on multi-source remote sensing data [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 191-200.]
- [7] 赵虎,杨正伟,李霖,等.作物长势遥感监测指标的改进与比较分析[J].农业工程学报,2011,27(1):243-249. [Zhao H, Yang Z W, Li L, et al. Improvement and comparative analysis of indices of crop growth condition monitoring by remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 243-249.]
- [8] 吴文斌,杨桂霞.用NOAA图像监测冬小麦长势的方法研究[J].中国农业资源与区划,2001,22(2):58-61. [Wu W B, Yang G X. A study of method of monitoring the winter wheat growth by using NOAA image[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2001, 22(2): 58-61.]
- [9] 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):247-253. [Jiang D, Wang N B, Yang X H, et al. Principles of the interaction between NDVI profile and growing situation of crops[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 247-253.]
- [10] 李军玲,张弘,曹淑超.夏玉米长势卫星遥感动态监测指标研究[J].玉米科学,2013,21(3):149-153. [Li J L, Zhang H, Cao S C. Dynamic monitoring on the summer maize growth based on satellite remote sensing[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 149-153.]
- [11] Wu B F, Meng J H, Li Q Z, et al. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's cropwatch system[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(2): 113-137.
- [12] 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 P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412-418.]
- [13] 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.
- [14] Patel N R, Parida B R, Venus V, et al. Analysis of agricultural drought using vegetation temperature condition index (VTCI) from Terra/MODIS satellite data[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(12): 7153-7163.
- [15] 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III-干旱对冬小麦产量的影响评估[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):218-222. [Li Y, Wang P X, Liu J M, et al. Evaluation of drought monitoring effects in the main growth and development stages of winter wheat using vegetation temperature condition index III-impact evaluation of drought on wheat yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 218-222.]
- [16] 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. [Tian M, Wang P X, Zhang S Y, et al. Winter wheat yield forecasting based on vegetation temperature condition index[J]. *Transactions of the Chi-*

- nese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 239–245.]
- [17] 苏涛, 王鹏新, 刘翔阿, 等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 186–192. [Su T, Wang P X, Liu X G, *et al.* Spring maize yield estimation based on combination of forecasting of entropy method and multi-temporal remotely sensed data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 186–192.]
- [18] de Wit A J W, Van Diepen C A. Crop model data assimilation with the ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1–2): 38–56.
- [19] 解毅, 王鹏新, 刘峻明, 等. 基于四维变分和集合卡尔曼滤波同化方法的冬小麦单产估测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 187–195. [Xie Y, Wang P X, Liu J M, *et al.* Winter wheat yield estimation based on assimilation method combined with 4DVAR and EnKF[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 187–195.]
- [20] 徐玲玲, 吕厚荃, 方利. 气候变化对黄淮海地区下玉米气候适宜度的影响[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 782–787. [Xu L L, Lv H Q, Fang L. Effect of climate on the climate suitability of summer maize on the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Resources Science*, 2014, 36(4): 782–787.]
- [21] 陈超, 于强, 王恩利, 等. 华北平原作物水分生产力区域分异规律[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1477–1485. [Chen C, Yu Q, Wang E L, *et al.* Modeling the spatial distribution of crop water productivity in the North China Plain[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1477–1485.]
- [22] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007–2016. [General office of the people's government of Hebei province, Hebei provincial bureau of statistics. Hebei Rural Year Book[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007–2016.]
- [23] 杜栋, 庞庆华, 吴炎, 等. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. [Du D, Pang Q H, Wu Y, *et al.* Modern Comprehensive Evaluation Method and Case Selection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.]
- [24] 谭凯炎, 宋迎波, 刘涛. QX/T 335–2016, 主要粮食作物产量年景等级[M]. 北京: 气象出版社, 2016. [Tan K Y, Song Y B, Liu T. QX/T 335–2016, The Grade of Year's Harvest in Grain Yields of Staple Crops[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016.]
- [25] Yilmaz E, Akcay S, Gurbuz T, *et al.* Effect of different water stress on the yield and yield components of second crop corn in semiarid climate[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2010, 8 (3–4): 415–421.
- [26] 李德, 祁宦, 马晓群. 安徽省淮北平原下玉米主要生育时期旱涝指标与影响评估[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 208–216. [Li D, Qi C, Ma X Q. The climate index and assessment about drought and flood in maize's key growth stage in Huaibei Plain in Anhui province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(17): 208–216.]

Integrated maize growth monitoring based on gray correlation analysis and remote sense data in the central plain of Hebei Province

WANG Lei^{1,2}, WANG Pengxin^{1,2}, LI Li^{1,2}, XUN Lan^{1,2}, KONG Qingling^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve maize growth monitoring accuracy, the central plain of Hebei Province (PR China) was chosen as the study area. The gray correlation analysis method was implemented to calculate the weight coefficients of vegetation temperature condition index (VTCI) and leaf area index (LAI) at four maize growth stages (emergence- jointing, jointing- booting, booting- filling, and filling- mature), as well as the weight coefficients of growth at the 4 stages during maize growth and yield formation. Thus, the integrated growth monitoring indices (G) at the 4 stages and main growth stage could be derived. Linear regression models between maize yields and G s of counties in the years from 2011 to 2015 were established to analyze the precision of maize growth monitoring. The results showed that the weight coefficients of VTCI at the 4 stages were greater than those of LAI, and the joint-booting stage was the highest, the booting-filling stage was followed. The results further indicated that maize growth and yield formation were likely impacted by water stress, especially at the joint-booting and the booting-filling stage. The weight coefficients of maize growth at the 4 stages were similar. It is noted that growth at the filling-mature stage was the highest. It illustrated that maize growth at the filling-mature stage was most closely related to maize production. Coefficients of determination (R^2) of the linear regression analysis between G s and maize yields of counties in 5 cities all passed the significant test at 0.01 level, and R^2 values were greater than those between maize yields and VTCIs or LAIs. The findings of current study demonstrated a high accuracy of the g s derived from gray correlation analysis method. Based on the maize growth monitoring data, this study implies that the best year was 2011, the worst year were 2014 and 2015, and the maize growth in the western plain was better than the eastern part.

Key words: gray correlation analysis; integrated monitoring; leaf area index; maize growth; vegetation temperature condition index; the central plain of Hebei Province