

冬小麦叶片形状系数的变异性

周元刚^{1,2,3},姚宁^{1,3},冯浩^{3,4},白江平⁵,张体彬⁴,何建强^{1,5}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100;2.西安水务(集团)有限责任公司,陕西西安 710061);
3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;
5.甘肃农业大学甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室,甘肃兰州 730030)

摘要:研究了2014-10—2015-06生长季内6个不同熟性冬小麦品种全生育期内叶片形状系数的变化规律,将小麦生育期划分为出苗、返青、拔节、抽穗、开花、成熟等6个不同生长阶段,依次采样计算各个阶段的 α 均值,同时考虑 α 值在单个植株不同叶片之间的差异,以及不同冬小麦品种之间的差异。结果表明: α 值总体在0.59到0.71之间,随冬小麦生育期的变化而变化,自苗期到开花期波动增大,开花后缓慢下降;在单个植株之内, α 值变异性较大,开花期最为稳定,开花后变异性增加;不同熟性冬小麦品种之间, α 值在拔节、抽穗和开花期表现出显著差异,而在出苗、返青和成熟期,差异不显著。因此,建议最好在不同的作物生长阶段采用不同的叶片性状系数,以提高叶面积模拟和预测精度。对全生育期3种熟性6个冬小麦品种的1485个叶片的面积和长宽乘积进行线性回归分析,可知总体的冬小麦叶片形状系数值约为0.66。以叶面积模型 $LA = 0.66 \times L \times W$ 来估算冬小麦叶片面积,其总体的相对均方根误差(RRMSE)约为4.40%,绝对相对误差(absolute relative error, ARE)约为13.05%,在5种不同叶面积估算模型中精度最高,因此推荐该模型用于估算田间小麦叶片面积。

关键词:冬小麦;叶面积;形状系数;叶长;叶宽;变异性

中图分类号: S512.1+1 **文献标志码:** A

Variations of leaf shape coefficients of winter wheat

ZHOU Yuan-gang^{1,2,3}, YAO Ning^{1,3}, FENG Hao^{3,4}, BAI Jiang-ping⁵, ZHANG Ti-bin⁴, HE Jian-qiang^{1,5}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xi'an Water Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710061, China;

3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;

5. Gansu Key Laboratory of Crop Genetic and Germplasm Enhancement, Gansu Agricultural University Agronomy College, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In this study, the temporal and spatial variations of α values of winter wheat had been investigated through a field experiment conducted from October 2014 to June 2015. A total of six wheat cultivars (varieties) (two early ripening, two medium ripening, and two late ripening) were involved. The whole growth season of wheat was divided into six different stages, i. e. emergence, greening, jointing, heading, flowering and maturity. Wheat plants were randomly collected and all leaves were cut off and measured for their length, width, and area with a digital leaf area scanner. Then, α values were calculated for each leaf. The variations of α values were analyzed for different growth stages, among different wheat cultivars, and among different leaves of a single plant. The results showed that α value ranged from 0.59 to 0.71 and varied at different growth stages. It increased with fluctuations from emergence to flowering stage, and then decreased. The uncertainties of α values, measured by standard deviation and coefficient of variation, decreased first and then increased slightly. Within a single plant, α values varied at different stages but remained relatively stable at flowering stage. The uncertainty of α value increased after flowering. Among different wheat cultivars of various ripening traits, α values were significantly different at jointing, heading and flowering stages, but not significantly different at emergence, greening and maturity stages. Thus, it is better to adopt various α values at different growth stages so

收稿日期:2016-05-16

修回日期:2016-06-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2013AA102904);国家自然科学基金(51209176);高等学校学科创新引智计划(B12007)

作者简介:周元刚(1991—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为农业生态系统模拟。E-mail: yuangang-zhou@nwsuaf.edu.cn.

通信作者:何建强(1977—),男,甘肃天水人,教授,博士生导师,研究方向为农业生态系统模拟。E-mail: jiaqiang-he@nwsuaf.edu.cn.

as to improve the accuracy of simulation and prediction of leaf area of winter wheat. Based on linear regression analysis of leaf area and product of leaf length and width of 1 485 leaf samples of six different wheat cultivars, the general value of α was about 0.66. Then, when simulating wheat leaf areas with the model of $LA = 0.66 \times L \times W$, the relative root mean square error (RRMSE) and absolute relative error (ARE) were 4.40% and 13.05%, respectively. The accuracy was the highest among the five different models investigated for estimation of wheat leaf area. Thus, this model was recommended for the estimation of wheat leaf area and leaf area index in future field studies.

Keywords: winter wheat; leaf area; leaf shape coefficient; leaf length; leaf width; variation

叶面积指数(leaf area index, LAI)最早由 Watson 定义为单位土地面积上植物叶片单面面积的总和,它是作物生长状况的重要指标^[1]。叶片参与冠层光截留、光合作用、蒸发蒸腾、作物生长等过程^[2],与作物干物质积累、产量形成密切相关^[3]。因此,计算作物叶面积指数、预测作物产量、合理选育品种^[4],都需要准确测定全生育期内作物叶面积(leaf area, LA)。研究叶片生长过程需要在生育期内多次非破坏性地连续测定叶面积。Serdar 和 Demirsory^[5]研究表明使用便携设备测量或使用模型预测作物叶面积具有可行性。但便携设备造价昂贵,基于辐射测量或图像测量的光学仪器容易受到天气状况^[6]、人为操作、作物冠层生长状态^[7]等多重因素影响,误差较大。此外,研究还表明不同仪器测量结果有很大差异^[8-11],需要进行人工校正。

传统的直接测量方法也在被广泛使用,但往往具有一定的破坏性^[12]。其中,方格法需要将采集的叶片放在方格纸上,用铅笔描出叶片轮廓,统计叶片轮廓内的格点数,计算面积,该方法耗时耗工,受人为因素影响较大,对于不规则叶片的测量精度降低;印相称重法,将叶片平铺在薄厚均匀的标准纸上用铅笔描绘叶片轮廓,用剪刀剪下得到纸模,通过称重计算叶面积,此方法需要精度很高的分析天平才能得到准确结果,对于不规则叶片的测量精度降低,也不适合苗期和具有较小叶片植物叶面积的测量;打孔称重法同样受叶片大小、厚薄、叶龄、打孔方式等的影响;而排水法受作物本身水分变化影响,特别是当叶片萎蔫时测定误差较大。图像法搭配了数码相机和计算机的使用,通过拍照获取作物图像,再选取灰度阈值对图像进行分割提取目标^[13]。关于图像分割算法的研究成果也越来越多,但是由于叶片图像的多样性以及图像分割本身所具有的难度,目前并没有一个对所有图像普遍适用的分割算法^[14-15]。基于手机的叶面积测量方法受手机和叶片平面夹角大小的影响,当手机和叶片平面夹角发生比较大的变化时,测量结果会产生较大偏差,该方法还受到拍摄距离、光照条件、硬件设备性能的影响,

又给叶面积计算带来更大的不确定性^[16-17]。同时作物叶片不可避免地存在交叉覆盖现象,这不仅增加了图像分割的难度,影响图像处理速度,还影响叶面积测量结果的精度^[16]。

此外,模型法由于简单易用,也被广泛采用。所谓模型法就是通过简单测量叶片形状参数并代入模型估算出作物叶面积。目前已经有多种基于叶片长度(L)和宽度(W)的线性、二次、指数叶面积模型,广泛应用于香蕉^[18]、樱桃^[19]、栗子^[5]、可可^[20]、榛子^[21]、猕猴桃^[22]、桃^[23]、核桃^[24]、蓝莓^[25]、椰子^[26]等作物。Lu^[27]对芋头的多个叶面积模型进行了验证和比较。Tsialtas 和 Maslaris^[28-29]对甜菜的线性叶面积模型进行了验证,指出基于一个叶片形状变量的线性模型由于其简洁性更适宜于田间测量和快速计算,但受不同发育阶段叶片伸展状态的影响,精度较低。一般地,叶片形状系数模型,即在田间简单测量作物叶片宽度和长度,然后利用线性函数来模拟计算作物叶面积,表现出更强的田间适用性^[18,22,24],其中 α 被称为叶片形状系数。

小麦是我国的第三大粮食作物,对于小麦叶片形状系数 α 的研究也进行了多年,但有关 α 的取值却存在很大的分歧,缺乏统一的指标,例如 Лавриенко 和于曾彦推荐的 α 值在 0.66 ~ 0.75 之间^[30];常鑫^[31]、何贤芳^[32]、谢琰^[33]等学者使用的 α 值为 0.83;李丕珩则建议 α 值为 0.77^[34];王义芹选用 0.70^[35],周始威选用 0.65^[36]。此外,这些研究的共同缺陷是将叶片形状系数视为一个常数,在全生育期进行使用,并未考虑该值在不同生育阶段的变异性,也没有考虑不同熟性品种之间的差异。这些都给叶片形状系数模型的应用带来了不便,也会造成较大的估算误差。

本研究通过田间试验,在整个生育期内测量不同生育阶段冬小麦叶片的长度(L)、宽度(W)、叶面积(LA),然后利用所测数据计算叶片形状系数 α 值,其目的在于(1)探究 α 值在不同生育阶段的变异性、同一植株不同叶片之间的变异性,以及不同熟性品种之间的变异性;(2)获取一般性的叶片形状系

数,建立适于田间应用的冬小麦叶面积模型,并验证模型的精度,从而为快速、准确测定冬小麦叶面积提供可靠的方法和依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2014年10月至2015年6月在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°17'N, 108°04'E,海拔506 m)进行。该地区为关中旱作类型区,属暖温带季风半湿润气候,多年平均气温12.9℃,全年无霜期为221 d,年日照时数2 163.8 h,大于10℃积温4 184℃,多年平均降水量635.1 mm。试验区土壤类型为塿土,0~20 cm土层的土壤pH值为8.14,有机碳含量8.20 g·kg⁻¹,全氮含量0.62 g·kg⁻¹。试验小区面积为60 m²。

1.2 试验处理

小麦于2014年10月19日播种,采用条播种植,东西行向,行距25 cm,播种深度5 cm,播种密度400万株·hm⁻²,各品种施用N 140 kg·hm⁻²和P₂O₅ 50 kg·hm⁻²为底肥,之后不再追肥,于2015年6月5日收获。根据试验小麦的冬性和生育期天数,供试小麦品种分为早熟、中熟、晚熟三种熟性,每个熟性各2个品种,不设重复。其中早熟品种为濮麦9号、西高2;中熟品种为西农979、小偃22;晚熟品种为新麦23、郑麦7698。全生育期内无灌溉。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片形状系数 将冬小麦全生育期划分为出苗、返青、拔节、抽穗、开花、成熟等6个不同的生育阶段,在每个生育阶段连续测定各小麦品种叶片参数,计算叶片形状系数。从小麦出苗开始,在苗期每隔20天采样一次,测定叶片各参数,随着生育期推进,从返青开始采样频率改为5 d一次。每次采样时,每个小麦品种随机选取3株代表性植株,将每株小麦的全部叶片剪下进行编号,压平2 h后,测量各叶片叶领到叶尖的长度 L ,垂直于叶脉方向叶片最宽处宽度 W ,以及叶面积 LA 。采用叶面积测量仪(YMJ-C型,浙江托普仪器有限公司)进行测量,其技术参数为:叶片长度范围为0~29 cm,叶片宽度范围为0~22 cm,分辨率0.01 cm,测量精度0.3%。全生育期内6个小麦品种共采集测量1 485片叶片。单片叶子的形状系数 α 的计算公式为^[37]:

$$\alpha = \frac{LA}{L \times W} \quad (1)$$

式中, LA 为测得的单片叶面积(cm²); L 为叶片从叶领到叶尖的长度(cm); W 为垂直于叶脉方向叶片最

宽处宽度(cm)。

1.3.2 物候期 试验期间观察并记录冬小麦的生育期,各生育期划分参照Zadoks划分法^[38],以50%植株进入某一时期认定试验区内作物进入此时期。

1.4 叶片面积估算模型的建立和评价

以所有采集的1 485片叶片的长度和宽度的乘积($L \times W$)为自变量,以实测叶面积(LA)为应变量,进行线性回归,求得冬小麦整体的叶片形状系数 α' ,然后以 α' 为常数,按照下面的公式依次模拟估算每个叶片的面积,并将模拟结果和实测结果整体进行对比评估,以确定该模型的模拟精度。

$$LA' = \alpha' \times L \times W \quad (2)$$

式中, LA' 为模拟的单片叶面积(cm²); α' 为回归所得的冬小麦整体叶片形状系数;其它参数如前所示。

类似地,以所有叶片叶长(L)、叶宽(W)及其二次方(L^2 、 W^2)为自变量,实测叶面积(LA)为因变量,采用Matlab 7.0进行拟合,参考现有的其它作物线性^[24]、二次^[5,18-19]、对数^[20]等类型的叶面积模型,建立下列模型并验证其模拟效率。

$$LA' = a_1 \times L + b_1 \times W + c_1 \quad (3)$$

$$LA' = a_2 \times L \times W + b_2 \times L + c_2 \times W + d_2 \quad (4)$$

$$LA' = a_3 \times L^2 + b_3 \times W^2 + c_3 \times L \times W + d_3 \times L + e_3 \times W + f_3 \quad (5)$$

$$\lg LA' = a_4 \times \lg L + b_4 \quad (6)$$

式中, LA' 为模拟的单片叶面积(cm²); L 为叶片从叶领到叶尖的长度(cm); W 为垂直于叶脉方向叶片最宽处宽度(cm);其它参数均为回归分析所得的经验系数。

本研究采用叶片面积模拟值 LA' 和实测值 LA 之间的均方根误差(root mean square error, RMSE)、相对均方根误差(relative root square error, RRMSE),以及绝对相对误差(absolute relative error, ARE)来对上述叶面积估算模型进行评价。这些统计量越小则表明模型模拟精度越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100\% \quad (8)$$

$$ARE = \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \times 100\% \quad (9)$$

式中, $RMSE$ 为均方根误差; $RRMSE$ 为相对均方根误差; ARE 为绝对相对误差; S_i 为第 i 个模拟值; O_i 为第 i 个观测值; \bar{O} 为观测值的平均值; n 为数据个数。

1.5 统计分析

利用 EXCEL2007 软件进行数据处理, SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析和 Duncan 多重比较 ($\alpha = 0.05$), sigmaplot12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 小麦叶片形状系数的变异性

小麦叶片形状系数 α 值在不同生育阶段表现出一定的变异性(表 1)。相同雨养条件下, 不同熟性 6 个小麦品种的 α 均值总体在 0.59 到 0.71 之间。整体上出苗、返青期 α 值较小, 在 0.59 ~ 0.66 之间; 拔节期 α 值增大, 抽穗期和开花期达到最大为 0.62 ~ 0.71; 成熟期 α 值逐渐减小, 在 0.63 ~ 0.69 之间。对于早熟品种濮麦 9 号, 开花和成熟期

α 值显著高于生育早期, 而另一早熟品种西高 2 则差异不显著; 中熟品种小偃 22, 抽穗期 α 值显著高于其它生育期, 西农 979 则差异不显著; 晚熟品种新麦 23 和郑麦 7698, 抽穗期 α 值均显著高于其它生长阶段。上述这种不同生育期 α 值的变异性主要是因为苗期营养生长阶段根、叶、分蘖同为生长中心^[39], 光合产物向根系和分蘖的运输使叶片伸展受限, 使得 α 具有较大的变异性; 在拔节 ~ 开花期, 营养生长和生殖生长并进, 幼穗作为生长中心, 此时叶片快速生长, 叶片形状系数较为稳定, 变异性较小; 在开花后生殖生长阶段, 籽粒作为生长中心, 小麦茎叶中储存的养分被活化向籽粒运输, 中下部叶片呈现不同程度的萎蔫和衰老, 又增大了叶片形状系数的变异性。

表 1 不同熟性小麦品种在不同生育阶段的叶片形状系数

Table 1 Leaf shape coefficients of six winter wheat cultivars of different ripening traits at different growth stages.

熟性 Ripening	品种 Cultivar	出苗 Emergency	返青 Greening	拔节 Jointing	抽穗 Heading	开花 Flowering	成熟 Maturity
早熟 Early	濮麦 9 号 Pumai No.9	0.65 aA	0.59 aA	0.63 abAB	0.66 abBC	0.69 bA	0.69 bA
	西高 2 Xigao 2	0.62 aA	0.57 aA	0.63 aAB	0.66 aBC	0.67 aAB	0.65 aA
中熟 Medium	西农 979 Xinong 979	0.62 aA	0.62 aA	0.67 aA	0.67 aABC	0.68 aAB	0.64 aA
	小偃 22 Xiaoyan 22	0.59 aA	0.59 aA	0.60 abB	0.71 bA	0.66 abAB	0.63 abA
晚熟 Late	新麦 23 Xinmai 23	0.61 aA	0.62 aA	0.66 abAB	0.70 bAB	0.65 abAB	0.65 abA
	郑麦 7698 Zhengmai 7698	0.61 aA	0.66 abA	0.65 abA	0.68 bC	0.62 abB	0.66 abA

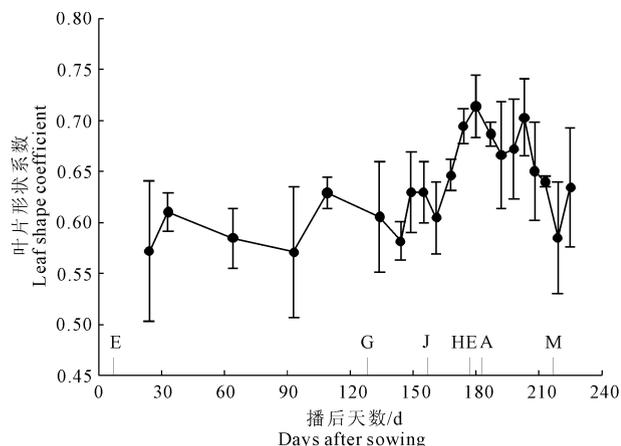
注: 表中每行不同小写字母表示同一小麦品种不同生育阶段的叶片形状系数均值存在显著差异, 每列不同大写字母表示同一生育阶段不同小麦品种的叶片形状系数均值存在显著差异 ($\alpha = 0.05$)。

Note: For the same wheat cultivar, values of leaf shape coefficient followed by different lowercase letters within each row are significantly different, while for the same growth stage, values followed by different capital letters within each column are significantly different at $\alpha = 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

不同冬小麦品种之间, 小麦叶片形状系数 α 值在拔节、抽穗和开花期表现出显著差异性, 而在出苗、返青和成熟期, 不同品种之间差异不显著(表 1)。这是因为在出苗和返青期虽然小麦品种不同, 但各个品种小麦叶片都未完全发育, 因此 α 值差异不显著; 而在成熟期, 不同品种的小麦叶片由于养分的转移, 都出现萎蔫和衰老, α 值也差异不显著。

2.2 小偃 22 全生育期叶片形状系数变异性

在小麦物候期内共进行了 22 次采样, 为了更清楚地描述小麦叶片形状系数 α 值随时间的变异性, 本研究以中熟品种小偃 22 为例, 具体分析其 α 值在整个生育期内的变化过程(图 1)。全生育期内 α 值随生育期的变化而变化, 苗期最小, 开花期达到最大, 开花后缓慢下降。在出苗 ~ 返青期, 小麦叶片未完全伸展, α 值为生育期内最小值 0.56, 对应的标准差和变异系数为生育期内最大值, 分别为 0.14 和 26%, 表明此时 α 值的变异性或不确定性最大。随着生育期的推进, α 值逐渐增大, 标准差和变异系数



注: 字母 E、G、J、HE、A、M 分别为出苗、返青、拔节、抽穗、开花、灌浆和成熟期。误差棒为标准差。

Note: The letters E, G, J, HE, A, F, and M stand for the different growth stages of emergence, greening, jointing, heading, anthesis, filling, and maturity, respectively. Error bars are standard deviations.

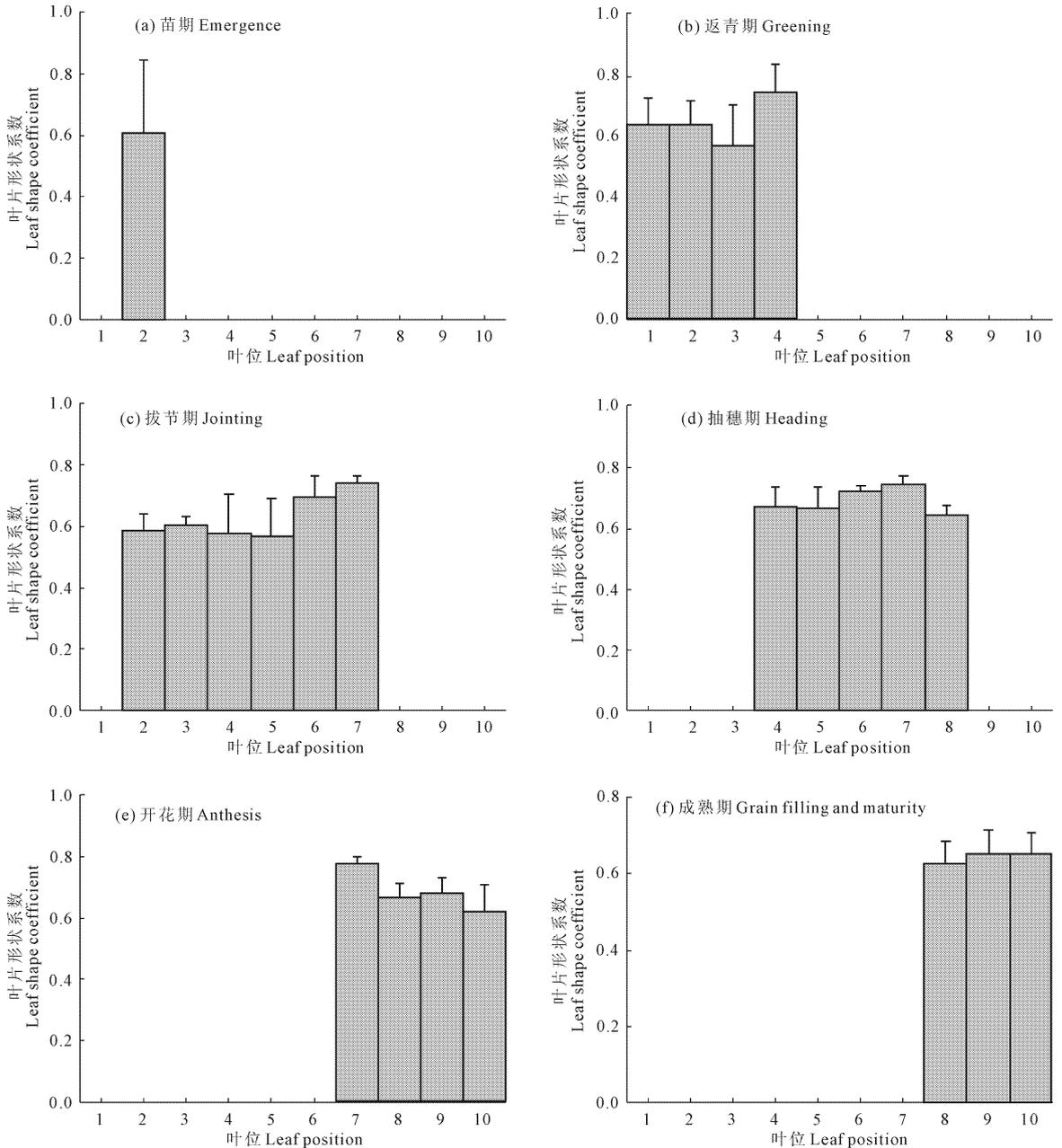
图 1 小偃 22 叶片形状系数在整个生育期内的变化过程
Fig.1 Changes of leaf shape coefficient of winter wheat cultivar of Xiaoyan 22 during the whole growth season

逐渐减小。在抽穗~开花期,小麦叶片完全伸展, α 值达到全生育期内最大值 0.72,对应的标准差和变异系数分别为 0.04 和 6%,此时 α 值变异性最小,最为稳定。开花后一直到成熟阶段, α 值逐渐减小,对应的标准差和变异系数则逐渐增大。到成熟期,小麦中下部叶片萎焉, α 值降低至 0.66,对应的标准差和变异系数逐渐升高为 0.09 和 14%。总体而言,在开花期前后,小偃 22 叶片性状系数值最大,且变

异性最小,而叶片幼苗期和衰老期则表现出较大的变异性。

2.3 小麦不同叶位叶片形状系数的变异性

为了分析方便,仍以中熟品种小偃 22 为例,分析出苗、返青、拔节、抽穗、开花、成熟等 6 个不同生育阶段,小麦植株不同叶位各叶片之间形状系数的变异性(图 2)。在苗期(图 2a),叶片未完全伸展, α 值较小在 0.6 以下,同时对应的标准差较大在 0.15



注:横轴从左向右表示小麦植株自下而上的叶位,误差棒为标准差。图中只给出具有光合作用完整叶片的叶片性状系数,萎焉死亡或不完整的叶片未予考虑。

Note: The X axis from left to right represents the bottom-up leaf positions. Error bars are standard deviations. Only the leaf shape coefficients of complete leaves that can carry out photosynthesis were given, without consideration of wilted and senescent leaves.

图 2 小偃 22 不同生育阶段叶片形状系数

Fig.2 Variations of leaf shape coefficient of winter wheat cultivar of Xiaoyan 22 at different growth stages

以上;返青期(图 2b)、拔节期(图 2c)叶片继续伸展,植株之内, α 值随叶面积的增大而增大到 0.75,相应的标准差减小到 0.15 以下;抽穗期(图 2d), α 值稳定到 0.65 ~ 0.75 之间,由于叶片完全伸展,相同叶位叶片形状系数的变异性减小,标准差减小到 0.1 以下;开花期(图 2e), α 值稳定在 0.65,标准差为 0.05。成熟期(图 2f),由于植株养分的转移,叶片呈现不同程度的衰老萎蔫, α 值变异性较大在 0.60 ~ 0.75 之间,对应的标准差为 0.08 ~ 0.13,大于抽穗期和开花期。

2.4 小麦叶片形状系数模型的验证

以 6 个小麦品种全生育期内所有 1 485 片叶片的长宽乘积($L \times W$)为自变量,实测叶面积(LA)为应变量,进行线性回归分析,设定截距为 0,所得曲线斜率即为冬小麦整体的叶片形状系数 α' (图 3)。可见叶片的长宽乘积($L \times W$)和实测面积 LA 之间具有较强的线性相关性($R^2 = 0.96$),冬小麦总体叶片形状系数 α' 值约为 0.66。

类似地,以 6 个小麦品种全生育期内 1 485 片叶片数据为基础,通过回归分析分别建立了线性、二次、对数 5 个不同的小麦叶面积估算模型(表 2)。利用上述不同模型估算所有叶片的面积,并与实测叶片面积相比较。利用 RMSE、RRMSE、ARE 三个统

计指标进行分析比较,发现各模型对叶面积的模拟存在较大差异。其中线性模型(公式 3)的 RMSE、RRMSE、ARE 分别为 7.22、57.38%、27.00%,整体上模拟精度不高。而二次模型(公式 2、4、5)模拟精度差异较大,其中以叶片形状系数为基础的二次模型(公式 2)模拟精度最高, RMSE、RRMSE、ARE 分别为 0.52、4.40%、13.05%。对数模型(公式 6), RMSE、RRMSE、ARE 分别为 12.72、101.11%、24.72%,模拟精度不高,同时其计算过程也较为复杂。

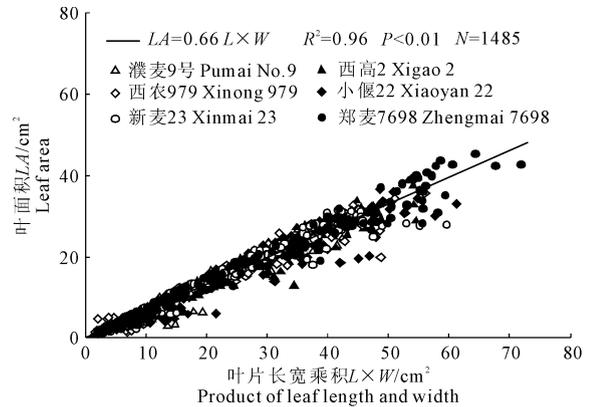


图 3 小麦叶面积和叶片长宽乘积的线性回归分析
Fig.3 Linear regression between leaf area and product of leaf length and width of winter wheat

表 2 不同类型小麦叶面积模型模拟结果比较

Table 2 Comparisons of simulation results of leaf areas with different leaf area models

类别 Type	模型 Model	公式 Equation	R^2	P	RMSE	RRMSE /%	ARE /%
线性 Linear	$LA' = 0.78L + 9.40W - 9.79$	(3)	0.94	< 0.01	7.22	57.38	27.00
	$LA' = 0.66L \times W$	(2)	0.96	< 0.01	0.52	4.40	13.05
二次 Quadratic	$LA' = 0.55L \times W + 0.17L + 1.26W - 1.93$	(4)	0.96	< 0.01	3.66	29.07	14.81
	$LA' = 0.72W^2 + 0.006L^2 + 0.45L \times W - 0.13L + 1.25W - 1.81$	(5)	0.96	< 0.01	17.09	135.76	40.71
对数 Logarithmic	$\lg LA' = 1.90 \lg L - 1.18$	(6)	0.87	< 0.01	12.72	101.11	24.72

注:表中缩写 RMSE、RRMSE、ARE 分别代表均方根误差、相对均方根误差、绝对相对误差。

Note: The acronyms of RMSE, RRMSE, ARE stand for root mean square error, relative root mean square error, and absolute relative error, respectively.

3 讨论

小麦叶片形状系数 α 并非一个定值,而是随着冬小麦生育期的变化而变化。苗期 α 值最小,开花期最大,开花后缓慢下降。同时发现 α 值在苗期具有很大变异性或不确定性,其标准差和变异系数都较大;开花期形状系数最大,叶片完全发育,标准差和变异系数均最小;开花后养分向籽粒输送,中下部叶片出现萎蔫和衰老现象,又增加了形状系数的不确定性,但 α 值和稳定性均高于苗期。不同熟性冬

小麦品种之间,小麦叶片形状系数 α 值在拔节、抽穗和开花期表现出差异性,而在出苗、返青和成熟期,不同品种之间差异不显著。对于同一小麦植株,其冠层内叶片的形状系数并非定值,也存在一定的变异性。其中,苗期变异性最大,在 0.54 ~ 0.75 之间。拔节期最大叶片往往对应最大形状系数,到开花期这种现象更为明显。乳熟期下部叶片死亡,中部叶片萎蔫。此时虽然中部叶片面积最大,但对应的形状系数有所减小,形状系数的变异性增大。

小麦叶片长宽之积和实测叶面积之间具有很好

的线性相关关系,拟合所得的冬小麦整体的叶片形状系数 α' 约为 0.66。这一结果与 Лаврико 和于曾彦推荐的 α 值范围(0.66 – 0.75)^[25] 的下限一致,但明显低于其他学者推荐的 α 值^[26–30]。本研究还发现在冬小麦全生育期内, α 的均值基本在 0.6 ~ 0.7 之间变化,因此 Лаврико 和于曾彦推荐的 α 值具有较高的可靠性。

通过回归分析分别建立的 5 个不同的小麦叶面积估算模型,表现出不同的模拟精度,其中基于叶片形状系数的模型(公式 2)的模拟精度最高。线性模型和对数模型模拟结果均不理想,而且这些模型包含的系数较多,会降低模型在不同地点的适用性,因此不适于田间使用。这在一定程度上证明了利用小麦叶片形状系数估算叶片面积的合理性和可靠性。

4 结 论

本文通过田间试验,研究了全生育期内 6 个不同熟性冬小麦品种叶片形状系数 α 的时空变异性,根据研究结果可得出以下主要结论:

1) 冬小麦叶片形状系数 α 并非一个定值,而是表现出一定的时间和空间变异性。因此,如果采用形状系数模型来估算叶片面积和叶面积指数,建议在冬小麦不同生长阶段采用不同的叶片性状系数,这样才能提高模拟和预测的精度。

2) 基于本研究 6 个小麦品种全生育期内 1 485 片叶片的数据,通过线性回归分析所得的冬小麦整体的叶片形状系数值 α' 约为 0.66。我们推荐该值用于田间小麦叶面积的估算。

3) 利用基于叶片形状系数的模型估算小麦叶面积,误差最小精度最高。我们推荐该模型用于田间小麦叶面积的估算。

参 考 文 献:

- [1] Watson D J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. *Annals of Botany*, 1947, 11(41):41-76.
- [2] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises[R]. Kluwer academic publishers, 1994.
- [3] McKee G W. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn[J]. *Agronomy Journal*, 1964, 56(2):240-241.
- [4] Zhu Y, Chang L, Tang L, et al. Modelling leaf shape dynamics in rice[J]. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57(1):73-81.
- [5] Serdar Ü, Demirsoy H. Non-destructive leaf area estimation in chestnut[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(2):227-230.
- [6] 史泽艳,高晓飞,谢云. SUNSCAN 冠层分析系统在农田生态系统观测中的应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4):78-82.
- [7] 李宗南,陈仲新,王利民,等. 2 种植物冠层分析仪测量夏玉米 LAI 结果比较分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(7):84-88.
- [8] Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 1997, 102(D24):29429-29443.
- [9] Martens S N, Ustin S L, Rousseau R A. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis[J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, 61(1):91-108.
- [10] Hyer E J, Goetz S J. Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(3):157-174.
- [11] Levy P, Jarvis P. Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in HAPEX – Sahel[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 97(3):199-212.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 高等教育出版社, 2006.
- [13] Chianucci F, Puletti N, Giacomello E, et al. Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2):377-382.
- [14] 张荣霞. 不同作物多种叶面积指数获取方法对比研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [15] Mora M, Avila F, Carrasco-Benavides M, et al. Automated computation of leaf area index from fruit trees using improved image processing algorithms applied to canopy cover digital photographs[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123(c):195-202.
- [16] 龚爱平,吴武豪,袁正军,等. 基于 Android 系统手机的叶面积测量方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9):203-208.
- [17] Zhao Z Q, Ma L H, Cheung Y M, et al. ApLeaf: An efficient android-based plant leaf identification system[J]. *Neurocomputing*, 2015, 151:1112-1119.
- [18] Poldar M, Pawar K. Non-destructive leaf area estimation in banana[J]. *Scientia Horticulturae*, 1991, 45(3):251-254.
- [19] Demirsoy H, Demirsoy L. A validated leaf area prediction model for some cherry cultivars in Turkey[J]. *Pak J Bot*, 2003, 35(3):361-367.
- [20] Asomaning E J A, Lockard R G. Note on estimation of leaf areas of cocoa from leaf length data[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1963, 43(2):243-245.
- [21] Cristofori V, Roupheal Y, Mendoza – de Gyves E, et al. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(2):221-225.
- [22] Mendoza – de Gyves E, Roupheal Y, Cristofori V, et al. A non-destructive, simple and accurate model for estimating the individual leaf area of kiwi (*Actinidia deliciosa*) [J]. *Fruits*, 2007, 62(3):171-176.
- [23] Demirsoy H, Demirsoy L, Uzun S, et al. Non-destructive leaf area estimation in peach[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2004, 69(4):144-146.

- [2] 黄占斌,辛小桂,宁荣昌,等.保水剂在农业生产中的应用与发展趋势[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):11-14.
- [3] 李云开,杨培岭,刘洪禄.保水剂农业应用及其效应研究进展[J].农业工程学报,2002,18(2):182-187.
- [4] Jenkinson D D. The effects of plant cover and soil type on the loss of C from ¹⁴C Labelled ryegrass decomposing under field conditions[J]. Soil Sci,1977,28(3):424-434.
- [5] 李吉进,邹国元,王美菊,等.膨润土保氮增产效果研究[J].中国土壤与肥料,2006,(3):27-30.
- [6] 刘海忠,栾文楼.膨润土固氮机理及膨润土碳铵对土壤养分的影响[J].河北农业科学,2003,7(4):21-24.
- [7] 马毅杰.膨润土资源性质及其利用[J].土壤学进展,1994,22(2):21-28.
- [8] 易杰祥,刘国道,孙水芬,等.膨润土的土壤改良效果及其对作物生长的影响[J].安徽农业科学,2006,34(10):2209-2212.
- [9] Heijnen C E, Hok - A - Hin C H, Veen J A. Improvements to the use of bentonite clay as a protective agent, increasing survival levels of bacteria introduced into soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(6):533-538.
- [10] Heijnen C E, Hok - A - Hin C H, Veen J A. Protection of Rhizobium by bentonite clay against predation by flagellates in liquid cultures [J]. FEMS Microbiology Letters, 1991,85(1):65-71.
- [11] 彭杨伟,孙燕.国内外膨润土的资源特点及市场现状[J].金属矿山,2012,41(4):95-99.
- [12] 吴金水.土壤微生物生物量的测定方法及应用[M].北京:气象出版社,2006:54-79.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:274-323.
- [14] 王光华,金 剑,韩晓增,等.不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响[J].应用生态学报,2007,18(6):1275-1280.
- [15] 焦 婷,常根柱,周学辉,等.高寒草甸草场不同载畜量下土壤酶与土壤肥力的关系研究[J].草业学报,2009,18(6):98-104.
- [16] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987:201-204.
- [17] Koch H J, Stockfisch N. Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage[J]. Soil & Tillage Res, 2006,86(1):73-83.
- [18] 高云超,朱文珊,陈文新.秸秆覆盖免耕土壤微生物量与养分转化的研究[J].中国农业科学,1994,27(6):41-49.
- [19] 苏雪萍,刘景辉,李立军,等.春秋施沙质土壤改良剂对旱作玉米抗旱保苗增产效应[J].中国农学通报,2014,30(15):201-206.
- [20] 田 露,李立军,郭晓霞,等.不同保水材料对内蒙古黄土高原旱作玉米幼苗生长及土壤贮水特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):54-60.
- [21] 李吉进,徐秋明,倪小会.施用膨润土对土壤含水量和有机质含量的影响[J].华北农学报,2002,17(2):88-91.
- [22] 杨彦明,刘景辉,李立军,等.膨润土对土壤含水量及蒸发特性和燕麦产量的影响[J].麦类作物学报,2014,34(8):1118-1125.
- [23] 刘慧军,刘景辉,徐胜涛,等.沙地改良剂对土壤水分及燕麦产量和品质的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):174-179.
- [24] 胡丽华.棉花施用膨润土的效应与技术[J].江西棉花,1995,(3):10-12.
- [25] 白世红,马风云,李树生,等.黄河三角洲不同退化程度人工刺槐林土壤酶活性、养分和微生物相关性研究[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1478-1483.
- [26] 孙 建,刘 苗,李立军,等.不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤微生物量和作物指标的影响[J].生态学杂志,2009,28(11):2279-2285.
- [27] 李阜棣,喻子牛,何绍江.农业微生物实验技术[M].北京:中国农业出版社,1996.

(上接第 7 页)

- [24] Whitworth J L, Mauromoustakos A, Smith M W. A nondestructive method for estimation of leaf area in pecan[J]. HortScience, 1992, 27(7):851-851.
- [25] NeSmith D S. Nondestructive leaf area estimation of rabbiteye blueberries[J]. HortScience, 1991,26(10):1332-1332.
- [26] Nakamura S, Nitta Y, Watanabe M, et al. Analysis of leaflet shape and area for improvement of leaf area estimation method for sago palm (Metroxylon sagu Rottb.) [J]. Plant production science, 2005, 8(1):27-31.
- [27] Lu H Y, Lu C T, Wei M L, et al. Comparison of different models for nondestructive leaf area estimation in taro[J]. Agronomy Journal, 2004,96(2):448-453.
- [28] Tsialtas J, Maslaris N. Leaf shape and its relationship with Leaf Area Index in a sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivar[J]. Photosynthetica, 2007,45(4):527-532.
- [29] Tsialtas J, Maslaris N. Leaf area prediction model for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars[J]. Photosynthetica,2008,46(2):291-293.
- [30] Ю. А. Лавренко, 于增彦.小麦叶面积快速测定法[J].麦类作物学报,1983,(2):31-32.
- [31] 常 鑫,李法计,张兆萍,等.小麦旗叶长、宽及面积的 QTL 分析[J].西北植物学报,2014,34(5):896-901.
- [32] 何贤芳,赵 莉,朱昭进,等.小麦株型性状与产量性状及生物学产量关系的初步研究[J].园艺与种苗,2011,(4):6-10.
- [33] 谢 琰.氮肥和密度对不同穗型小麦穗粒数形成的影响[D].南京:南京农业大学,2012.
- [34] 李丕珩.小麦叶面积测算方法商榷[J].农业科技通讯,1982,12:002.
- [35] 王义芹,杨兴洪,李 滨,等.小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J].华北农学报,2008,23(S2):10-15.
- [36] 周始威,胡笑涛,王文娥,等.基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J].农业工程学报,2016,32(6):121-129.
- [37] Watson D J. The estimation of leaf area in field crops[J]. The Journal of Agricultural Science, 1937,27(3):474-483.
- [38] Zadoks J C, Chang T T, Konzak C F. A decimal code for the growth stages of cereals[J]. Weed Res, 1974,14(6):415-421.
- [39] 曹卫星.农业·作物学通论[M].北京:高等教育出版社,2001.