

张蕾, 侯英雨, 郑昌玲, 等. 作物长势评估指数的设计与应用. 应用气象学报, 2019, 30(5): 543-554.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190503

作物长势评估指数的设计与应用

张蕾 侯英雨* 郑昌玲 刘维 何亮 郭安红 程路

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要

合理有效地开展作物长势评估,可以及时反映作物生长状况及其对天气气候条件的响应。由于 WOFOST 模型、ORYZA2000 模型在模拟冬小麦、玉米和水稻生长发育过程具备较强机理性,研究基于 2001 年以来全国冬小麦、玉米、水稻主产区逐日模拟的作物发育进程、叶面积指数和地上总生物量,通过隶属函数构建评估指数,开展高时空分辨率的作物长势评估。结果表明:长势综合评估指数在作物生长前期以发育进程、叶面积指数和地上总生物量三要素加权集合表征,中后期以发育进程和地上总生物量与穗重相关性的加权集合表征;长势评估指数与常规地面观测和遥感长势监测一致性较好,可以反映天气气候条件影响。在作物生长季内,以日为单位构建了作物长势评估指数数据库;根据长势评估指数将作物长势分为长势好、长势偏好、长势持平、长势偏差、长势差,实现空间上的长势监测、对比;以空间集成的方式,开展省级作物长势对比分析;利用长势评估指数变化反映典型天气气候条件对作物生长发育的影响。上述基于作物模型的作物长势评估指数符合现代化农业气象科研与业务服务发展的需求。

关键词: 作物模型; 冬小麦; 玉米; 水稻; 长势评估

引言

作物长势包括作物生长状况与变化趋势,可用个体与群体特征描述。个体特征是作物自身组成与结构特性参数,描述作物个体特征,包括根的长度与数量、株高、叶片数量与形状、叶片叶绿素含量、叶片氮素含量、穗籽粒数与千粒重等^[1-2]。群体特征主要是指作物生长态势在一定空间范围内的整体分布情况,描述作物群体特征参数,包括群体分布结构、密度、叶面积指数等。不同品种作物在不同地区和生长期有不同的个体特征和群体特征。快速获取作物个体及群体特征,了解并掌握作物的生长状况,可以为农业生产精准管理与产量预测提供支撑。

通常有两种途径来反映作物长势:一是常规地面观测,以定点定期观测为主,如中国气象局在全国主要农区设置了约 653 个农业气象观测站,定期观测小麦、玉米、水稻等大宗作物发育期、生长状况、生

长量、产量结构、根分布、作物生理参数、冠层光谱特性等,并实时上传观测数据,以实时苗情、发育期进度与常年对比等形式开展全国范围内的农作物长势监测评估^[3];二是卫星遥感监测,主要利用卫星遥感反演的农作物参数,如归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)或叶面积指数(leaf area index, LAI),实现作物生长状况、产量及动态变化大范围宏观、快速监测,可分为作物生长过程和空间分布状况监测^[4-5]。生长过程监测分析是基于 NDVI 时间序列生成作物生长过程曲线,通过比较当年与常年或上年曲线间的差异,得出当年作物长势等级^[6-7];空间分布监测是将当年的 NDVI 与往年的 NDVI 进行对比,反映作物长势状况空间分布变化情况。目前,上述两种途径均已应用到国家级和省级相关农业气象业务服务中^[8-9]。然而,地面观测受限于人工观测手段带来的误差,时间和空间精度较低;遥感手段依赖产品本身算法及反演手段,产品质量常受到天气条件影响,而且监测缺乏足够

2019-05-10 收到, 2019-07-24 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001), 国家重点研究发展计划(2017YFC1502402, 2017YFD0300101)

* 通信作者, 邮箱: yyou@cm.a.gov.cn

的地面校准。因而,这两种手段在满足业务服务的需求上仍有欠缺。

作物模型作为农业气象服务中的一种技术手段,从系统科学的观点出发,以气象、土壤等条件为环境驱动变量,动态模拟农作物生长发育及产量形成过程^[10-11]。由于作物模型具有机理性、解释性、动态性和综合性强的特点,可以逐日输出与作物生长相关的要素,满足业务服务的时效性需求。目前,作物模型已经成为国际上开展农业决策服务的重要支撑工具,欧洲联合研究中心、美国国际开发署等国际机构利用作物模型开展作物长势监测、产量预报等服务^[12]。在国内,不少学者利用作物模型开展本地化校验、修正、改进与应用^[10,13-18],但多侧重于理论研究,尚未将其应用到农业气象业务服务中。近年来,作为国家级农业气象业务服务单位,国家气象中心将作物模型引入并应用到服务工作中,开发了基于 WOFOST, ORYZA2000, WheatSM 和 ChinaAgrosys 等作物模型的中国作物生长模拟监测系统 (Crop Growth Simulating and Monitoring System in China, CGMS-China)^[19],开展了作物长势监测、农业气象灾害影响评估和作物产量预报等服务。

本文以冬小麦、玉米和水稻三大主要作物为主要研究对象,基于 WOFOST 和 ORYZA2000 逐日模拟输出结果,通过隶属度构建综合评估指数,开展作物长势评估与应用服务,以期为农业气象日常业务服务提供作物长势监测评估的决策支持。

1 模型与方法

1.1 作物模型简介

本文利用 WOFOST^[20] 模型开展冬小麦和玉米(春玉米、夏玉米)、ORYZA2000 模型^[21] 开展水稻(双季早稻、双季晚稻、一季稻)的生长发育过程模拟。作物模型根据作物品种特性参数、环境和土壤条件,以日为时间步长,模拟作物从播种到成熟的生长过程,主要包括 CO₂ 同化、干物质分配和水分平衡等动态过程^[22-24]。作物模型一般将发育期分成不同的阶段,采用无量纲模拟发育进程(the development stage, DVS),WOFOST 模型在冬小麦和玉米发育阶段模拟时将发育期划分为出苗(发育进程为 0)、开花(发育进程为 1)、成熟(发育进程为 2),ORYZA2000 模型将水稻发育阶段划分为出苗(发育进程为 0)、幼穗分化(发育进程为 0.65)、开花(发

育进程为 1)和成熟(发育进程为 2)。当有效温度累积值达到某一发育阶段所需的积温时,即认为作物完成某发育阶段的生长。根据全国农业气象试验站逐年的冬小麦、玉米、水稻发育期、产量结构要素等观测,目前已完成 WOFOST 模型在冬小麦和玉米主产区、ORYZA2000 模型在水稻主产区的参数本地化和适应性评估,实现了气象、土壤、作物参数多源数据层的组织管理与模型区域化模拟分析应用^[19],并分别利用实时观测的土壤湿度同化 WOFOST 模型的土壤水分模拟^[25],引入高温败育模型^[26]改进 ORYZA2000 模型高温影响,显著提高了模型模拟效果。

1.2 作物长势评估指标确定

在作物不同生长阶段,长势通常以不同的表征指数评价。在作物生长前期,即营养生长阶段,气象条件对作物生长的影响主要体现在植株高度、生长速率等方面,发育进程和叶面积指数可以反映植被的各种生物物理过程,如光合作用、呼吸作用、植被蒸腾和降雨截留等^[27];随着作物进入生殖生长阶段,生理机能增强,开花、籽粒灌浆并逐渐形成产量,发育进程、地上总生物量可以反映作物生长发育状况。基于 2001—2018 年全国冬小麦、玉米、水稻主产区的气象站点和 10 km×10 km 格点的逐日模拟数据集,以发育进程、叶面积指数和地上总生物量为表征指数,构建单要素隶属度和综合隶属度来表征作物长势。具体运算以日为时间步长,将全国冬小麦、水稻、玉米主产区的站点 2001 年至评价年评价日的发育进程、叶面积指数、地上总生物量模拟值为该评价日的样本数据集,运用模糊隶属函数法^[28]进行分级评价,其中,评价要素隶属值为

$$\mu(D_i) = \frac{D_i - \min(D_i)}{\max(D_i) - \min(D_i)}, \quad (1)$$

$$\mu(L_i) = \frac{L_i - \min(L_i)}{\max(L_i) - \min(L_i)}, \quad (2)$$

$$\mu(T_i) = \frac{T_i - \min(T_i)}{\max(T_i) - \min(T_i)}。 \quad (3)$$

式(1)~(3)中, D_i, L_i, T_i 分别为站点 i 评价日发育进程、叶面积指数和地上总生物量, $\mu(D_i), \mu(L_i), \mu(T_i)$ 分别对应其隶属函数值, $\max(D_i), \min(D_i), \max(L_i), \min(L_i), \max(T_i), \min(T_i)$ 分别为 2001 年至评价当年评价日发育进程、叶面积指数、地上总生物量的最大值、最小值。一般情况下,发育进程、叶面积指数、地上总生物量大,即表示作物长势偏好,反之则偏差。

对发育进程、叶面积指数、地上总生物量单要素分析的基础上,对其进行集成,得到第*i*站点的长势综合评价指数:

$$H_i = \omega_D \times \mu(D_i) + \omega_L \times \mu(L_i) + \omega_T \times \mu(T_i) \quad (4)$$

式(4)中, ω_D , ω_L , ω_T 分别为发育进程、叶面积指数、地上总生物量隶属函数值的权重系数。这里分为两个阶段开展权重系数的评价:在作物生育前期作物没有穗重时,根据发育进程、叶面积指数、地上总生物量对长势的可决性,采取专家打分法分别给予权重系数0.3,0.3,0.4;随着作物生长发育,叶面积指数逐渐降低,籽粒开始充实、穗重逐渐形成,叶面积指数不能较好地表征作物长势,因而考虑发育进程和地上总生物量集成综合评估指数,权重通过2个要素隶属函数值与穗重的相关系数构建权重系数:

$$\omega_k = \frac{r_k}{\sum_{k=1}^2 r_k} \quad (5)$$

式(5)中, k 取值为1和2,分别为发育进程和地上总生物量, r_k 为要素隶属函数值与穗重的相关系数。

以定量评价指数开展定性评级时,基于单要素和综合隶属度,依据隶属度区间[0,20]、(20,40]、(40,60]、(60,80]、(80,100]分别对应长势差、长势偏差、长势持平、长势偏好和长势好,与国家级农业气象业务服务中作物遥感长势监测评价分级相一致^[29]。

1.3 作物长势评估指数应用

在作物长势监测评估业务服务中,根据不同的服务需求,从不同的空间尺度上依据作物长势评估指数开展长势评价。全国尺度上,分析长势评估指数的空间分布得到作物长势在空间上的差异,通过分析长势评估指数的变化,评估气象条件对作物长势的影响;省级尺度上,对各省内站点的模拟要素隶属函数值通过空间集合平均的方式得到省级隶属函数值,确定评估指数,开展省级作物长势评价。

2 结果与分析

2.1 作物长势评估指标库构建

基于发育进程、叶面积指数和地上总生物量隶属函数和综合评估指数及其评价等级划分方法,构建了2001年以来冬小麦、春玉米、夏玉米、双季早稻、双季晚稻和一季稻长势评估指标库。在作物主

要生长季(冬小麦为上年11月—当年5月,春玉米为5—9月,夏玉米为6—9月,早稻为4—7月,一季稻为5—9月,双季晚稻为8—10月)内任意监测日期,通过指标筛选、隶属函数值构建、要素权重系数判定等流程确定评估指数,建立作物长势评估指标库,并随着序列增长,实时动态更新,在实时监测日期、历史时段内开展站点、格点、省级等尺度作物长势评估。

2.2 作物长势评估指数与验证

2.2.1 与常规地面监测和遥感监测的对比

利用作物长势评估指数与常规地面观测和遥感长势反演进行比对验证。常规地面观测中,通过人工观测的作物发育程度可以掌握作物生长状况。2018年5月30日黑龙江南部、吉林大部、辽宁西部、河北北部、山西中部、陕西北部、四川盆地北部和东部等地春玉米长势较差,而黑龙江东部和北部、山西北部、宁夏、甘肃东北部、四川盆地中部和南部长势较好(图1a)。与人工观测的发育期距平的对比(图1b)表明:在评估指数显示长势偏差的地区春玉米发育日期普遍偏晚,而在长势正常或偏好的地区普遍接近常年同期或偏早。可见,作物生长前期发育进程可以较好反映作物长势。

遥感长势监测是基于MODIS的NDVI差值,将作物长势分为5级^[29],弥补常规地面观测空间尺度的不足。2018年3月20日北方冬麦区大部冬小麦处于越冬后的返青起身生长阶段,长势综合评估指数结果(图2a)显示:河北中部、陕西中部、河南北部、山东中部和南部、安徽西北部和江苏东北部等地冬小麦长势差或偏差,其余地区长势持平,其中长势好、偏好、持平、偏差、差的面积比例分别为3.9%,4.5%,65.7%,24.6%,1.3%;3月中旬遥感长势监测结果(图2b)表明:河北中部、陕西中部、河南北部、山东中北部等地冬小麦长势略偏差,其余大部长势为正常,偏好、略偏好、持平、略偏差、偏差的面积比例分别为0.1%,2.7%,74.6%,22.3%,1.3%。总体上,长势评估指数反映的冬小麦长势与遥感长势监测的结果较为一致。

2.2.2 作物长势与天气气候条件对应关系的验证

作物模型对气象条件较为敏感,通过作物模型长势评估指数对天气气候条件的反映可以有效对比验证该指数的可行性,以2018年7月—8月中旬辽宁中北部主要农区发生轻至中度、局部重度干旱事件为例。2018年7月下旬—8月上旬辽宁康平的干

旱日数为 16 d, 干旱强度(作物水分亏缺距平指数)为 2.5, 干旱日数和强度为近 5 年最高值(图 3a), 期间又出现 6~10 d 的高温天气, 实际地块调研发现, 高温干旱导致春玉米拔节不充分, 植株矮化明显, 叶片出现卷叶, 下部叶片变黄、枯死, 长势明显偏差。该阶段康平春玉米的综合评估指数(图 3b)表明: 长势持续偏差(评估指数为 0.45~0.52), 明显低于长

势较好的 2014 年(0.71~0.77)和 2016 年(0.69~0.75)。

2018 年 4 月—5 月中旬, 东北地区西部、内蒙古东部等地阶段性春旱导致春玉米春播受阻, 已播春玉米长势偏弱。由吉林和辽宁省 10 cm 土壤站点缺墒百分比(图 4a)可以看到, 5 月 25 日前降水量少、缺墒站点百分比为 40%~60%, 而 25—30 日出现了

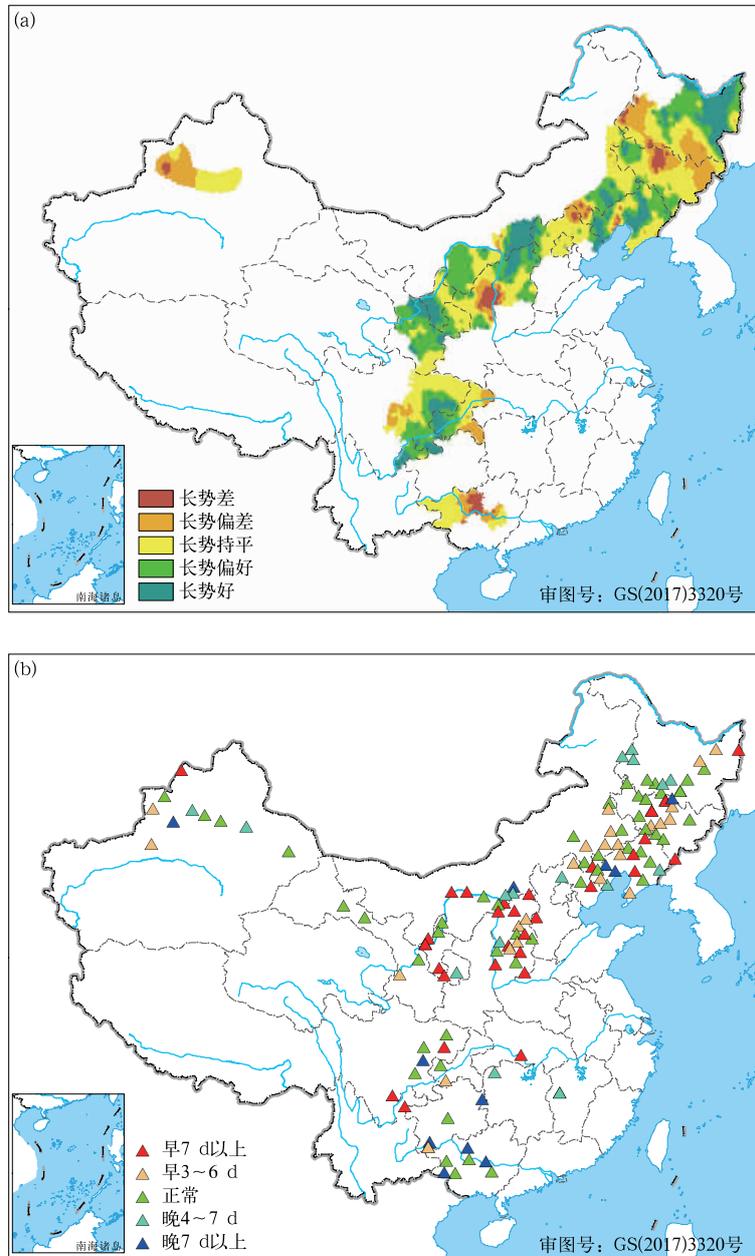


图1 2018年5月30日春玉米长势评估(a)、
田间常规观测的春玉米发育期距平(b)

Fig. 1 Growth assessment for spring maize on 30 May 2018(a) and anomaly of observed phenology at agro-meteorological experiment stations(b)

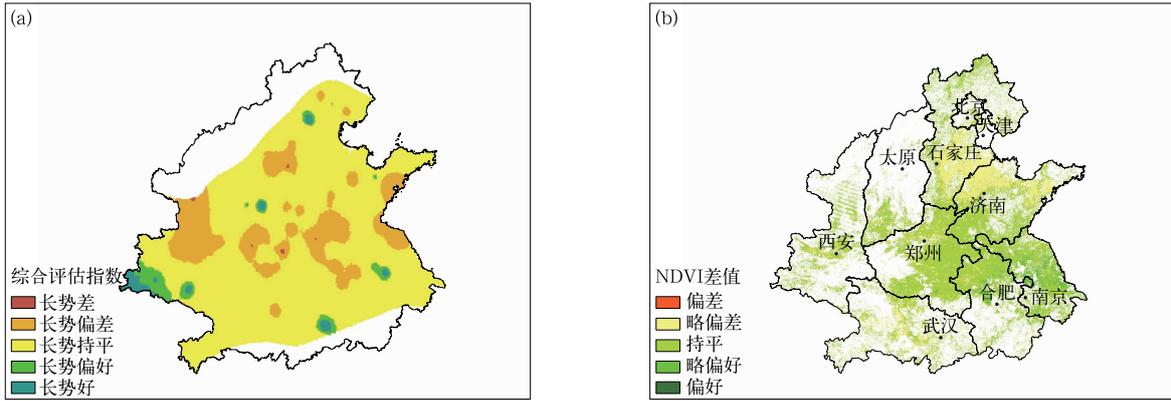


图 2 2018 年 3 月 20 日冬小麦长势综合评估(a)与遥感长势监测(b)

Fig. 2 Growth assessment(a) and remote monitoring(b) for winter wheat on 20 Mar 2018

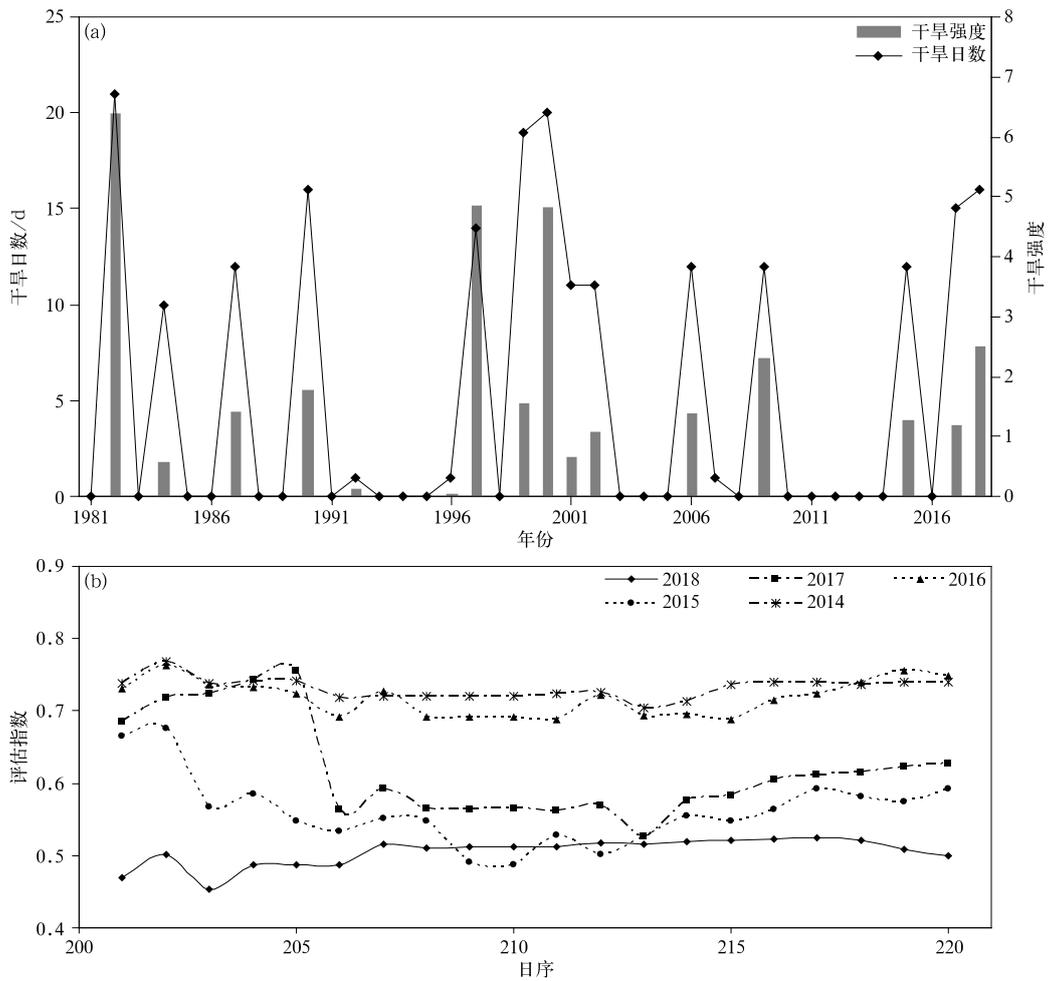


图 3 1981—2018 年 7 月 21 日—8 月 10 日辽宁康平干旱日数与春玉米干旱强度(a)、2014—2018 年 7 月 21 日—8 月 10 日辽宁康平春玉米长势评估(b)

Fig. 3 Drought days with intensity from 21 Jul to 10 Aug during 1981—2018(a) and growth assessment for spring maize from 21 Jul to 10 Aug during 2014—2018(b) at Kangping in Liaoning

明显降水过程,缺墒站点比例明显下降,受干旱影响,省级尺度的春玉米长势综合评估指数持续下降(图4b),在降雨之后有所增大,且辽宁的指数普遍比吉林高,这主要因为辽宁比吉林降水多、土壤缺墒

站点百分比少(5月11—25日辽宁、吉林平均降水量分别为1.46 mm,1.37 mm,土壤缺墒站点百分比分别为50.5%和52.6%)。可见,省级尺度的长势指数可以较好地反映天气条件对作物长势的影响。

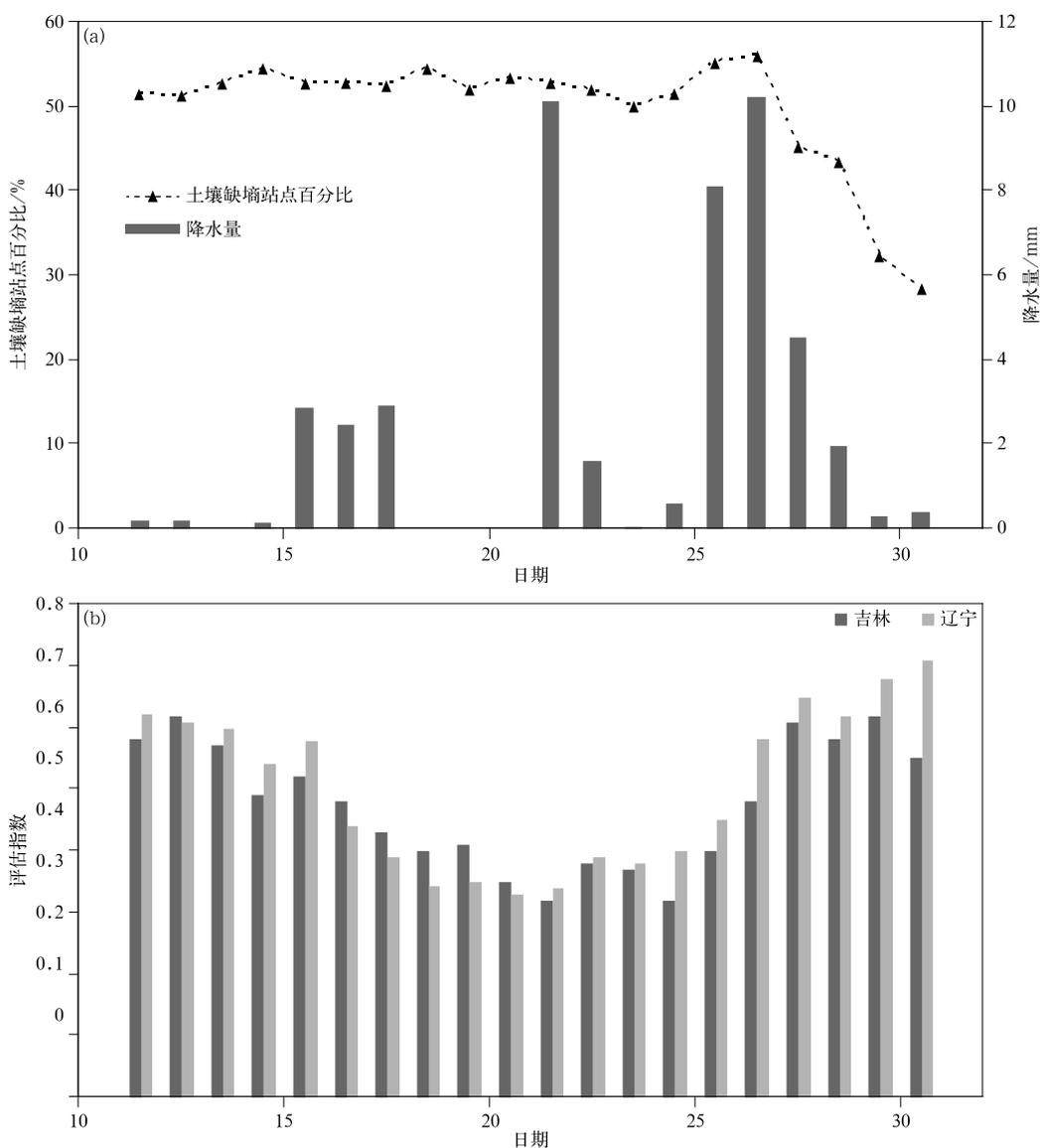


图4 2018年5月11—30日吉林和辽宁省10 cm土壤缺墒站点百分比与降水量(a)、春玉米长势评估指数(b)

Fig. 4 The percentage of station in soil water deficit at 10 cm depth and surface precipitation(a) and growth assessment for spring maize(b), in Jilin and Liaoning during 11—30 May 2018

2.3 作物长势实时监测评估

基于作物长势评估指标库,在国家级业务服务过程中可以开展任意日期冬小麦、玉米和水稻生长长势评价。以2018年6月30日为例,一季稻处在

分蘖期,长势综合评估指数采用专家打分法厘定的权重系数集成发育进程、叶面积指数、地上总生物量(图5a),结果显示:湖北中西部、四川盆地、贵州北部、云南中北部一季稻长势偏好或好,黑龙江东部、

辽宁东部、江苏、安徽、湖北东部、浙江和福建等地偏差或差,其余地区正常。此时,江南、华南双季早稻处于抽穗灌浆至乳熟阶段,长势综合评估指数以发育进程和地上总生物量与穗重的相关系数加权集

成,其中地上总生物量的权重系数一般超过 0.4,指数结果(图 5b)显示,浙江中部、江西中北部、湖南东部、广西东北部长势持平,其余大部地区较好。

由于冬小麦、玉米、水稻覆盖范围广,不同地区

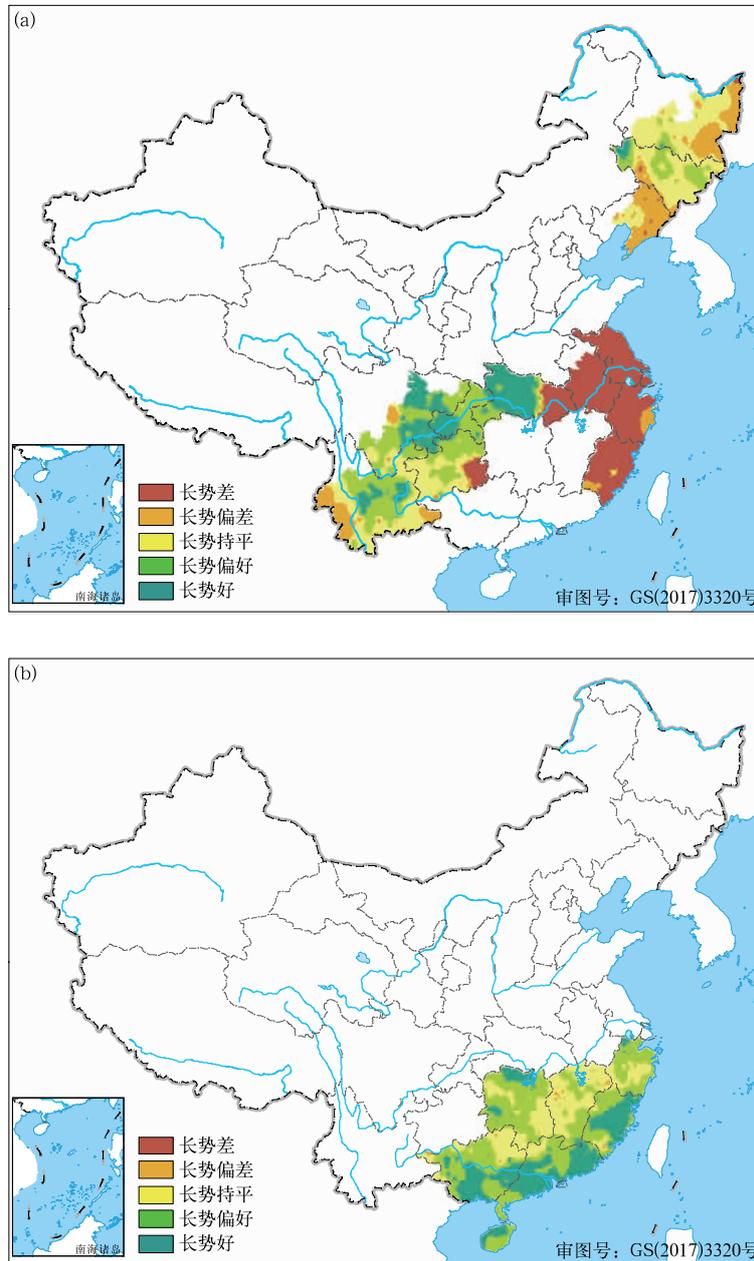


图 5 2018 年 6 月 30 日一季稻(a)、双季早稻(b)长势评估

Fig. 5 Growth assessment for single-season rice(a) and double-season early rice(b) on 30 Jun 2018

作物发育期存在一定差异,综合评估指数的建立与发育期状况有关。以 2019 年 3 月 15 日冬小麦长势评估为例,西北、华北、黄淮地区冬小麦处于越冬后

返青生长阶段,江淮、江汉地区处于拔节期,西南地区处于抽穗开花至乳熟阶段。西南、江淮、江汉地上总生物量权重系数较高(图 6a),表明有穗重形成,

综合评估指数以发育进程和地上总生物量加权集成而得,且发育期越往后的站点总生物量所占的权重越大;而西北、华北、黄淮冬小麦尚未有穗重形成,综合评估指数仍以专家打分法厘定的权重系数集成发育进程、叶面积指数、地上总生物量得到。因此,不

同集成方式得到的综合评估指数结果(图 6b)表明:新疆、华北东部、江淮南部、四川盆地长势偏好或好,河南中部、陕西中部、云南、贵州南部偏差或差,其余地区持平。

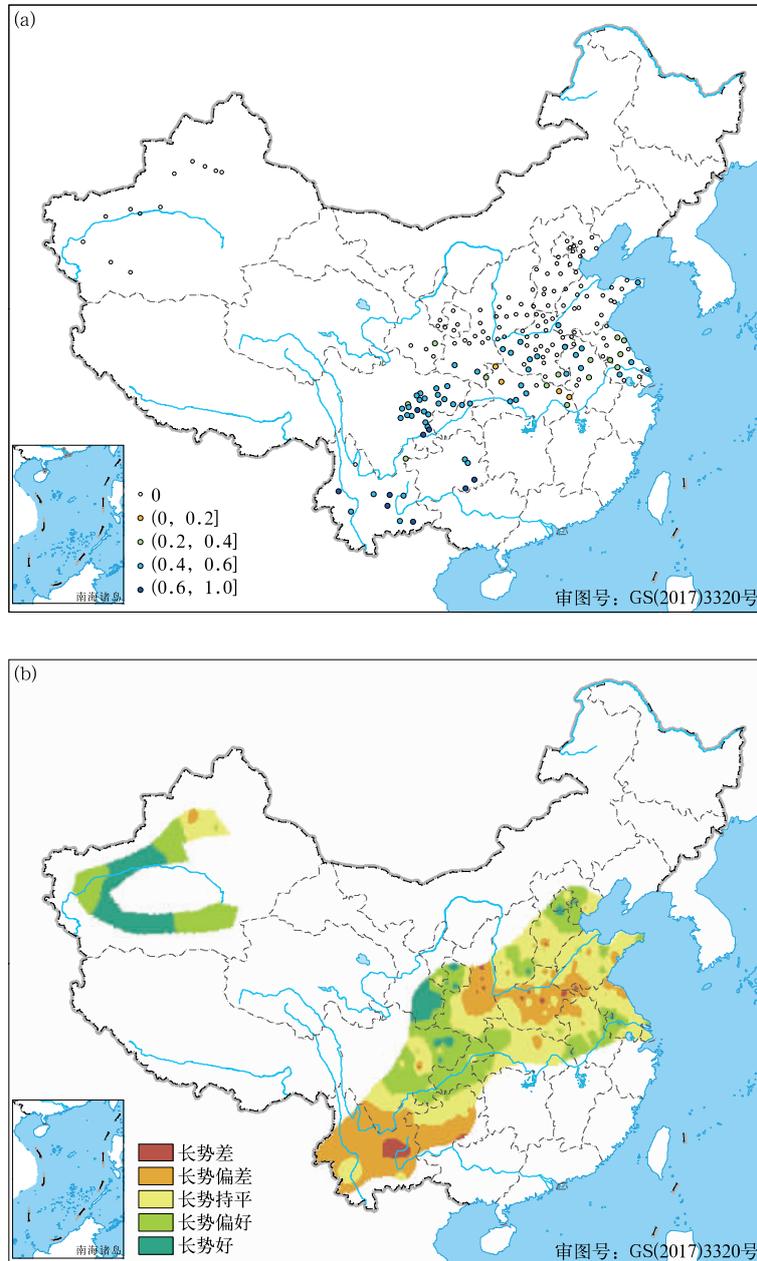


图 6 2019 年 3 月 15 日冬小麦地上总生物量权重系数(a)和长势评估(b)

Fig. 6 Weight of total aboveground production(a) and growth assessment(b) for winter wheat on 15 Mar 2019

2.4 作物长势评估应用

应用长势评估指数可以评估天气气候条件对作

物长势的影响,尤其是典型灾害年份、灾害过程的定量评估。2018 年 7 月下旬—8 月上旬,长江中下游

地区出现高温天气,安徽、江苏、湖北、湖南、江西 5 省高温日数普遍有 10~16 d,影响一季稻灌浆结实;8 月 5 日一季稻长势综合评估指数(图 7a)反映出安徽中部、江苏西南部、浙江西部和北部、福建中北部等地

长势偏差。而 2013 年 7 月上旬—8 月中旬,长江中下游地区大部出现持续晴热高温少雨天气,高温伏旱范围大、持续时间长,一季稻结实率和籽粒重低(图 7b),长江中下游地区的一季稻长势明显偏差。

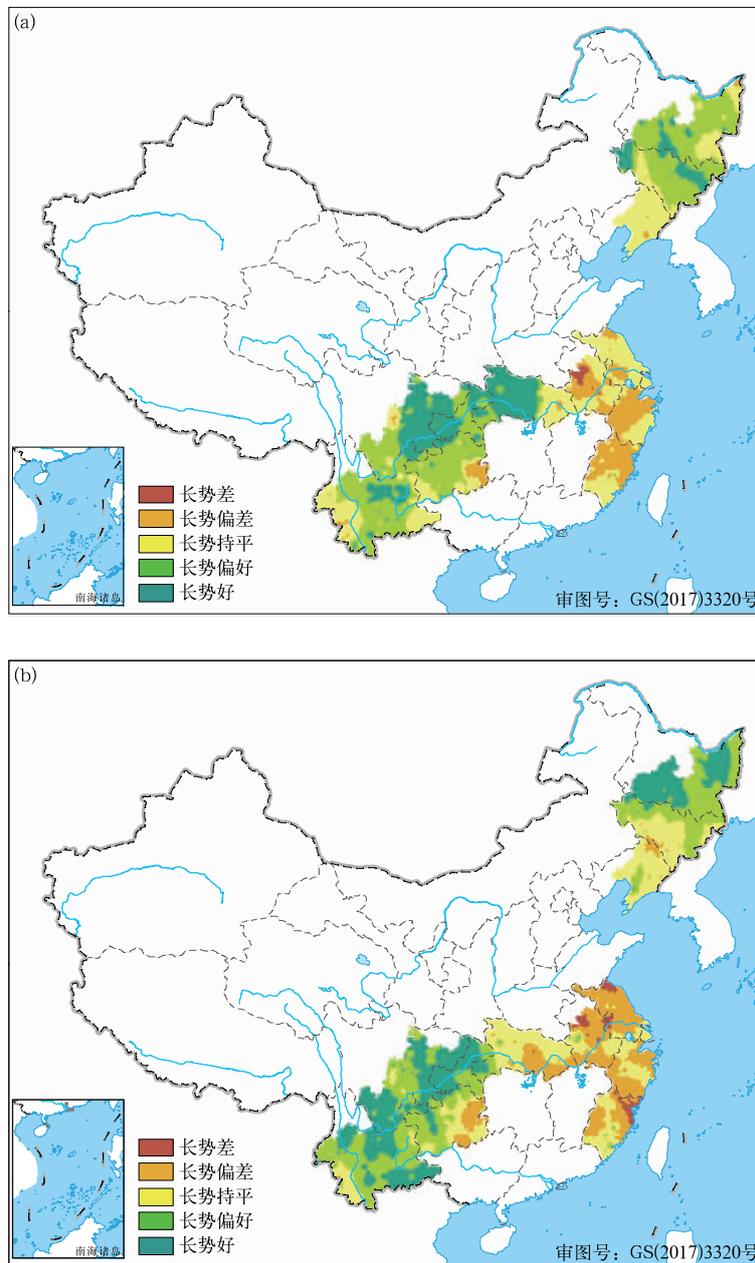


图 7 2018 年 8 月 5 日(a)和 2013 年 8 月 5 日(b)一季稻长势评估

Fig. 7 Growth assessment for single-season rice on 5 Aug 2018(a) and 5 Aug 2013(b)

在空间区域长势评估的基础上,可集成省级尺度指数开展作物长势评估。2018 年 5 月 31 日春玉米省级尺度长势评估(图 8)显示,发育进程、叶面积

指数、地上总生物量单因子和综合评估指数均显示甘肃和宁夏春玉米长势最好,其次是辽宁、山西、内蒙古、河北、重庆、四川、黑龙江、北京、吉林,陕西、广

西和新疆偏差;就单因子而言,发育进程、叶面积指数、地上总生物量在各个省的评价程度总体变化幅度较小,四川、重庆和广西发育进程体现的作物长势

明显高于叶面积指数和地上总生物量,与这三省春玉米长势偏快一致。

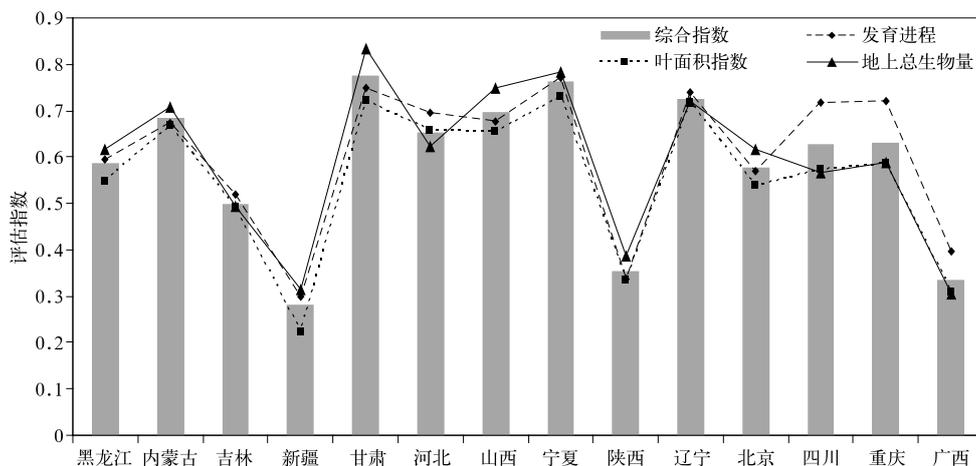


图8 2018年5月31日省级尺度春玉米长势评估

Fig. 8 Growth assessment for spring maize in provinces on 31 May 2018

3 结论与讨论

考虑到常规地面观测和卫星遥感监测作物长势准确性方面的不足,本文基于作物模型逐日模拟结果,构建长势评估指数,开展冬小麦、玉米(春玉米、夏玉米)、水稻(一季稻、双季早稻、双季晚稻)长势评估。得到以下主要结论:

1) WOFOST, ORYZA2000 模型逐日输出的发育进程、叶面积指数和地上总生物量可较好地反映冬小麦、玉米、水稻长势。穗重未形成前,以发育进程、叶面积指数、地上总生物量隶属函数值与 0.3, 0.3, 0.4 的权重系数集成构建综合评估指数;穗重形成后,以发育进程、地上总生物量隶属函数值与其与穗重的相关作为权重系数集成构建综合评估指数,并构建了作物长势评估指标库。

2) 作物长势综合评估指数与常规地面观测、遥感长势监测一致性较好,并能反映天气气候条件对作物长势的影响。

3) 在冬小麦、玉米、水稻生长季内,开展任意时间多空间尺度作物长势评估,既可实时监测评估,又可与历史情况开展对比分析。

作物模型对作物生长发育过程的机理性有较强的描述能力,且时效性高,在作物长势评估中具备一定的优势。基于发育进程、叶面积指数、地上总生物

量构建的长势评估指标建立数据库并应用到国家级业务平台,能够快速有效地开展作物长势评估,从时间和空间尺度上均能满足农业气象业务服务的精细化、量化的需求。当然,作物模型模拟是计算机数学模拟的过程,本身存在一定的不确定性,有待借助精细化、针对性试验资料的积累和完善,通过作物模型参数厘定、算法模块改进等过程,优化作物模型在我国主要作物产区的应用。在灾害天气评估中,除了利用农业气象灾害指数^[30-31]开展评估外,基于作物模型的长势指标也能反映出高温、干旱、低温等典型灾害性天气的影响。然而,作物模型对风雹、短时强降水等灾害性天气和病虫害的反映不敏感,在评估分析和应用上存在不足。作物长势的评估从定性到定量、不同评价方式和指标之间都存在一定差异,因而需要进一步加强标准化、规范化的长势监测,以更好地开展量化、指标化的长势评估,为农业气象科研和业务服务提供支撑。

参考文献

- [1] 杨邦杰,裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214-218.
- [2] 李树强,孙红,张彦娥,等. 作物长势信息空间分析系统设计. 农业机械学报, 2013, 44(11): 234-240.
- [3] 中国气象局. 生态气象观测规范(试行). 北京:气象出版社, 2005: 53-59.
- [4] 李颖,陈怀亮,李耀辉,等. 一种利用 MODIS 数据的夏玉米物

- 候期监测方法. 应用气象学报, 2018, 29(1): 111-119.
- [5] 吴炳芳, 张峰, 刘成林, 等. 农作物长势综合遥感监测方法. 遥感学报, 2004, 8(6): 498-514.
- [6] 江东, 王乃斌, 杨小焱, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律. 生态学报, 2002, 22(2): 247-253.
- [7] 钱永兰, 侯英雨, 延昊, 等. 基于遥感的国外作物长势监测与产量趋势估计. 农业工程学报, 2012, 28(13): 166-171.
- [8] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务技术进展. 应用气象学报, 2018, 29(6): 641-656.
- [9] 王建林. 现代化农业气象业务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [10] 马玉平, 王石立, 王馥棠. 作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探. 应用气象学报, 2005, 16(3): 293-303.
- [11] 帅细强, 陆魁东, 黄晚华. 不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较. 应用气象学报, 2015, 26(1): 103-111.
- [12] Supit I, Hoojer A A, Diepen C A V. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS. Theory and Algorithms. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1994.
- [13] Ma Y P, Wang S L, Li W J. Monitoring and predicting of maize chilling damage based on crop growth model in North-east China. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1868-1878.
- [14] Li Z H, Jin XL, Zhao C J, et al. Estimating wheat yield and quality by coupling the DSSAT-CERES model and proximal remote sensing. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 53-62.
- [15] Li H, Jiang Z W, Chen Z X, et al. Assimilation of temporal-spatial leaf area index into the CERES-Wheat model with ensemble Kalman filter and uncertainty assessment for improving winter wheat yield estimation. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 60345-7.
- [16] Yao F M, Tang Y J, Wang P J, et al. Estimation of maize yield by using a process-based model and remote sensing data in the Northeast China Plain. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 87: 142-152.
- [17] 张建平, 王靖, 何永坤, 等. 基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 451-459.
- [18] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴. 不完整气象资料下基于作物模型的产量预报方法. 应用气象学报, 2016, 27(4): 407-416.
- [19] 侯英雨, 何亮, 靳宁, 等. 中国作物生长模拟监测系统构建及应用. 农业工程学报, 2018, 34(21): 165-175.
- [20] Diepen C A, Wolf J, Keulen H, et al. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 1989, 5(1): 16-24.
- [21] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. Los Baños: International Rice Research Institute, 2003.
- [22] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 山东省冬小麦产量动态集成预报方法. 应用气象学报, 2016, 27(2): 191-200.
- [23] 帅细强, 王石立, 马玉平, 等. 基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测. 应用气象学报, 2008, 19(1): 71-81.
- [24] 孙琳丽, 马玉平, 俄有浩, 等. 基于约束性分析的数据与作物模型同化方法. 应用气象学报, 2013, 24(3): 287-296.
- [25] 刘维, 王冬妮, 侯英雨, 等. 基于吉林省观测土壤水分的 WOFOST 模型模拟研究. 气象, 2018, 44(10): 1352-1359.
- [26] 宣守丽, 石春林, 刘杨, 等. 自然环境高温对长江中下游地区中稻结实率的影响及模拟. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 73-77.
- [27] 董姝娜, 庞泽源, 张继权, 等. 基于 CERES-Maize 模型的吉林西部玉米干旱脆弱性曲线研究. 灾害学, 2014, 29(3): 115-119.
- [28] 胡标林, 余守武, 万勇, 等. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定. 作物学报, 2007, 33(3): 425-432.
- [29] 钱永兰, 侯英雨, 延昊, 等. 基于遥感的国外作物长势监测与产量趋势估计. 农业工程学报, 2012, 28(13): 166-171.
- [30] 王培娟, 霍治国, 杨建莹, 等. 基于热量指数的东北春玉米冷害指标. 应用气象学报, 2019, 30(1): 13-24.
- [31] 宋艳玲, 王建林, 田靳峰, 等. 气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进. 应用气象学报, 2019, 30(1): 25-34.

The Construction and Application of Assessing Index to Crop Growing Condition

Zhang Lei Hou Yingyu Zheng Changling Liu Wei
He Liang Guo Anhong Cheng Lu

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

It is generally accepted that crop growing assessment can reveal its temporary condition and response to weather and climate when crop growing condition is assessed in a reasonable and effective way. To address this, normal field observation and remote sensing monitoring are the major techniques to quantify the crop growing condition. However, limited by their time-efficiency and uncertainties in algorithm, there are some deficiencies within them. Crop model, as an alternative way, is proposed to detect crop growing condition, with the advantage of its better mechanism and timeliness. Currently, WOFOST and ORYZA2000 are widely used to simulate the growth of winter wheat, spring maize, summer maize, single-season rice and double-season rice. Derived from WOFOST and ORYZA2000, the daily outputs, i. e., the development stage, leaf area index and total aboveground production, are simulated from 2001. Three outputs are selected as impacted variables for crop growing, and quantified through membership function. In the initial stage of crop growth, development stage, leaf area index and total aboveground production generate comprehensive effect, and they are weighted aggregated to a integrated index by the respective weight of 0.3, 0.3 and 0.4 according to expert scoring method. In the later stage, development stage and total aboveground production are the major factors influencing crop condition, and they are aggregated to a integrated index by the weight derived from their relative relationship with dry weight of storage organs. The assessing index is keeping well with experimental observation and remote sensing monitoring, implying its effectivity in evaluation service. The crop growing condition is assessed on any day during the growing season, and the corresponding daily integrated index is built in datasets under Crop Growth Simulating and Monitoring System in China (CGMS-China). According to daily integrated index, crop growing condition is divided into 5 levels, i. e., better, good, normal, bad and worse. Based on CGMS-China, daily crop growing condition is illustrated in the spatial distribution, which can distinguish the regional or local distinction of condition. Moreover, assessing index is spatially aggregated to the index at the province scale, which is a base quantity for comparing the provincial crop growing condition, corresponding to the assessing scale of yield prediction in agrometeorological services. Under the typical weather conditions, assessing index is efficient in specific regions and even local stations. For example, impacts of high temperature and drought from 21 July to 10 August in 2018 are well performed in the assessing index change at spatial and temporal scales. The assessing index for crop growing assessment based on crop model can provide more accurate and quantifier outputs, fitting with the demand of modern agriculture and agrometeorological service.

Key words: crop model; winter wheat; maize; rice; crop growing assessment