

马玉平, 霍治国, 王培娟, 等. 中国农业气象模式(CAMM1.0)构建与应用. 应用气象学报, 2019, 30(5): 528-542.
DOI: 10.11898/1001-7313.20190502

中国农业气象模式(CAMM1.0)构建与应用

马玉平* 霍治国 王培娟 俄有浩 邬定荣 房世波 谭凯炎 张 祎
孙琳丽 杨建莹 赵俊芳 周梦子 赫 迪 徐嘉昕 毛 飞 姜朝阳
(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

为发展适宜中国区域农业种植特点的农业气象模式, 基于国外作物生长模拟方法, 通过模式机理过程改进或重构以及应用方式革新, 建立了中国农业气象模式(Chinese AgroMeteorological Model version 1.0, CAMM1.0)。CAMM1.0 利用平均温度和土壤水分改进了作物发育进程模式, 利用土壤水分改进了作物叶片光合作用、干物质分配和叶面积扩展过程模式, 通过蒸发比法扩展了作物蒸散过程模式; 自主建立了基于发育进程的冬小麦株高、基于遥感信息的作物灌溉、遥感数据同化、作物长势与灾害评价等模式。基于互联网技术构造了实时运转平台, 主要功能包括作物生长过程实时常规模拟与用户个性化定制模拟。CAMM1.0 的部分子模式采用多种方法构造, 便于多模式集成。CAMM1.0 对作物发育进程、光合过程、株高的模拟效果较好, 但对土壤水分变化过程的拟合略差, 模拟产量略偏低。CAMM1.0 评价淮河流域夏玉米年际干旱减弱而涝渍增加的趋势与实际基本相符。

关键词: 中国农业气象模式(CAMM1.0); 构建; 应用

引 言

农业气象学是研究农业生产与气象条件之间相互关系及其规律的科学^[1]。随着农业气象学的发展以及与系统科学的结合, 逐渐出现了描述农业气象学原理的模式^[2-4]。冯定原^[5]将农业气象模式定义为描述天气-作物和天气-土壤-作物等的相互作用过程, 龚绍先^[6]认为它是农业生产对象与气象气候和水文条件相互关系的数学表达式或文字逻辑图式, 冯秀藻等^[1]描述其为仿真的生物数学物理模式, 而朱履宽^[7]认为农业气象学是天气气候与农业生产的相关分析。基于以上认识以及作物生长模拟理论的发展, 本文将农业气象模式定义为基于农业气象学的基本原理, 描述农业气象要素(光、热、水、气)对农业生物生长发育、产量形成的影响过程, 并通过数学简化和计算机方法形成反映真实农业生产过程的

运转模型。

早在 20 世纪 50 年代, 随着统计学与植物生理学的蓬勃发展, 开始出现描述作物-天气相关关系的农业气象模式。60 年代以来, 借由计算机技术的兴起, 面向生长过程的动力学农业气象模式也随之诞生, 以 1965 年荷兰 de Wit 构建的作物冠层光合作用模式为标志^[8]; 1967 年美国 Duncan 等^[9]建立了植物群落光合作用模拟模型。70—80 年代农业气象模拟理论发展迅速, 荷兰 de Wit 学派的模式大多建成于这一阶段, 这些模式较为详细地描述了作物冠层的光合作用、呼吸作用和器官生长等机理过程^[10-15]; 美国科学家细化了光合作用理论, 增加了土壤湿度、籽粒生长模拟方法等^[16]; 高亮之等^[17]建立了作物生育期的钟模型。90 年代以来, 面向生长过程的农业气象模式开始进入发展应用阶段^[18-20]。21 世纪以来, 农业气象模式已广泛应用于田间生产管理、气候变化对农业生产的影响评估、农业气象条件

2019-05-10 收到, 2019-07-24 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金(2017Z004), 国家重点研究发展计划(2018YFC1508303), 国家重点研究发展计划(2018YFC1505605), 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61661136005)

* 邮箱: mayp@cma.gov.cn

评价、产量预测以及作物育种等多方面^[21-31],但对模式机理的研究进展比较缓慢。近年来,农业气象模式与基因测序及植物表型学等方法相结合^[32-33]而展现出新的发展前景。

我国学者曾大量引进国外农业气象机理模式,并借鉴重构或开展应用尝试^[34-42]。但将这些模式直接应用于中国区域,会因其描述的作物生长过程、遗传特性及气候生态类型不同而出现较大偏差,模式中一些具有中国种植特色(如越冬、连作、灌溉模式、产量集成等)的作物生长机制尚未解决,且多数模式缺乏特定逆境下作物响应的机理性描述。同时,模式最初建立在站点尺度上,通常适用于描述均一田块的作物生长状况^[26],而决策和管理部门一般更加关注大范围的作物生长过程及其长势状态。因此,在改进作物生长发育过程模拟的基础上,建立一个能够模拟区域作物生长发育的模式至关重要;另外,一般模式仅通过一定的机理过程描述作物生长的积累量,而不评价作物生长的好坏及灾害的影响,与实际需求存在较大差距。因此,亟需发展适宜中国区域农业种植特点的农业气象模式。

本研究基于国外作物生长模拟方法,以我国小麦、玉米为研究对象,改进或重构作物生长发育部分关键过程模式,构建中国区域种植特色模式、作物长势与灾害评价模式、数据同化模式,建立基于互联网技术的模式实时运转平台,集成建立中国农业气象模式(Chinese AgroMeteorological Model version 1.0, CAMM1.0),以期提升中国农业气象模拟理论水平,并为相关业务服务提供技术方案。

1 建模方法与研究数据

1.1 建模方法

中国农业气象模式(CAMM1.0)构建思路为不同作物生长发育的多数机理过程通用,而主要区别在于模式参数。各子模式构建,一是进行现有农业气象子模式机理过程的比较与改进,二是寻找新的理论依据或假设进行数学模式构造。

CAMM1.0采用插拔式方案构建,发育进程、光合作用、呼吸作用、干物质分配及叶面积扩展等作物生长过程为模式引擎,水肥影响、灾害影响、区域种植特色、生长评价、数据同化、参数优化等子模式及运转平台可插拔,插入后对模式产生影响,拔出后模式可独立运转。部分子模式还采用多重可选方式构

造,模拟结果可集成。

CAMM1.0对于作物生长及受灾状况的评价,首先根据模式机理过程或模拟结果构造长势和灾损模式,然后根据多年模拟结果的概率分布或与实际状况的比较确定指标阈值,最后利用实时数据驱动模式实现作物长势和灾损评价。

1.2 研究数据

作物数据包括农业气象常规观测、大田试验和野外调查数据等。常规观测数据为1982—2018年全国农业气象观测站小麦和玉米发育期和产量结构,主要用于计算或优化模式参数。大田试验数据为2009—2011年河北固城夏玉米水分控制试验数据,以及河北固城(1992—1994年、1999—2002年)、山东泰安(1985—1987年、1992—1994年)和河南郑州(1999—2002年)冬小麦田间试验数据,包括发育期、叶面积指数(LAI)、分器官生物量以及叶片光合试验(LI-6400)数据,主要用于农业气象子模式构建。野外调查数据为2010—2011年河南多点实地调查的LAI和地上总干重,主要用于遥感数据同化模式检验。

气象数据为农业气象数据对应年份及站点逐日最高气温、最低气温、降水量、日照时数、水汽压和风速等,主要用于子模式构建与检验。区域气象数据为2015—2018年陆面融合产品(CLDAS),包括2 m气温、2 m比湿、10 m风速、地面气压、降水、短波辐射等(空间分辨率 $0.625^{\circ} \times 0.625^{\circ}$),用于CAMM1.0运行和验证。

土壤湿度数据为CLDAS产品,包括0~5,0~10,10~40,40~100,100~200 cm各层土壤湿度,用于模式初值确定和验证。蒸散数据为2004年2月6日—2005年3月6日山东禹城试验站Lysimeter观测数据,用于蒸散模式验证。

遥感数据为2004—2005年MODIS LST数据、土地覆盖类型、2010—2011年风云三号气象卫星遥感反演LAI数据、2017年SMAP(Soil Moisture Active and Passive)土壤湿度产品等数据,主要用于蒸散模式、数据同化模式以及灌溉模式的模拟检验。

其中,作物、气象数据以及CLDAS产品均来自于国家气象信息中心。

2 机理过程

CAMM1.0借鉴WOFOST^[15,18]和APSIM^[19]

的作物生长模拟方法,在明确光、温、水、气等农业气象要素影响作物生长发育一般机制(图1)的基础上,改进作物发育、叶片光合、干物质分配、叶片扩展、作物水分运移等过程模式,重构株高与灌溉模

式,建立作物长势、旱涝和冷害评价、遥感数据同化模式。模式机理过程利用 FORTRAN 计算机语言编写。

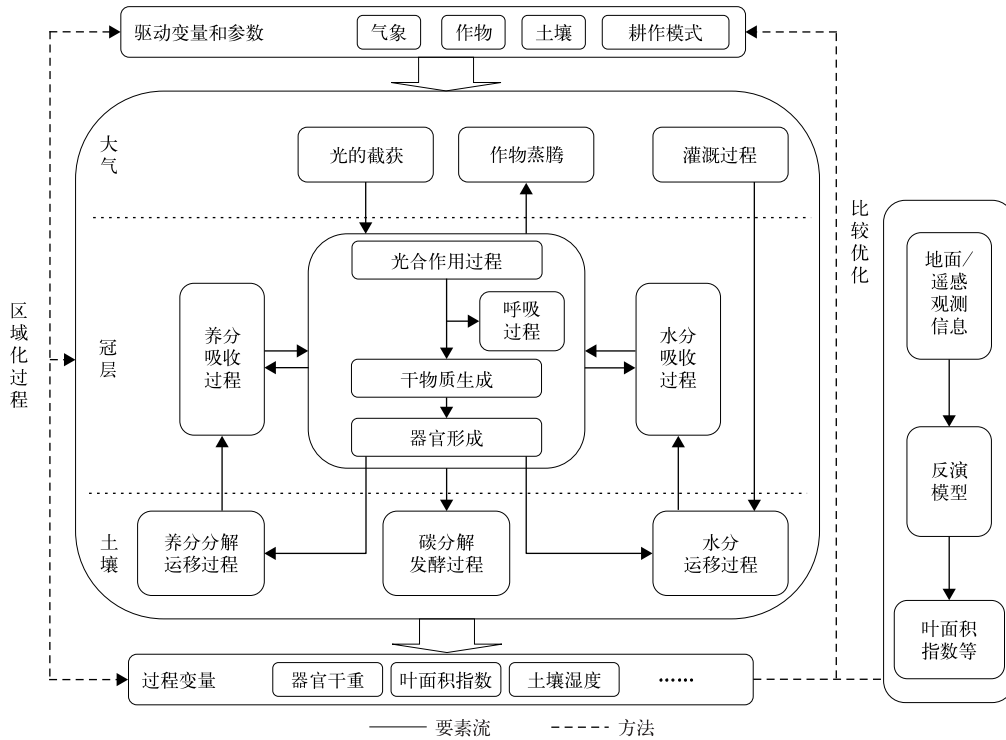


图1 中国农业气象模式(CAMM1.0)机理过程

Fig. 1 Mechanisms of Chinese AgroMeteorological Model(CAMM1.0)

2.1 发育进程模式

发育进程是农业气象模式的时间指针,作物不同发育期的生长速率差异较大。CAMM1.0的发育进程集成了积温(T_{SUM})、发育单位(C_{HU})^[43-44]和热量单位(T_{HU})^[45]等子模式。对它们的模拟比对表明, T_{HU} 的稳定性最高^[46]。鉴于作物分期播种而几乎同时成熟现象的存在,说明作物发育不仅与温度累积有关,而且可能与一定时段的平均温度有关,表明温度对发育速度的影响呈非线性,由此建立了发育进程的温度影响模式(T_{HUC})^[46]。田间试验发现土壤水分条件明显影响作物的发育进程,而农业气象观测站多年观测数据分析表明:土壤水分对作物发育进程的影响基本呈线性,据此建立了土壤水分影响发育进程模式($f(S_m)$)^[46]。再考虑光周期对发育进程的影响(p_d),则发育阶段(D_{VS})可描述为

$$D_{VS} = P_d \left(\frac{T_{HUC}}{T_{HUJ}} - f(S_m) \right), \quad (1)$$

$$T_{HUC} = T_{HU} / T_a, \quad (2)$$

$$f(S_m) = a_s \cdot S_m + b_s, S_m \leq S_{mc}, \quad (3)$$

$$f(S_m) = 1, S_m > S_{mc}, \quad (4)$$

$$S_{mc} = (1 - c_p)(S_{mfc} - S_{mwp}) + S_{mwp}, \quad (5)$$

$$p_d = \frac{D_L - D_{LC}}{D_{LO} - D_{LC}}. \quad (6)$$

其中, T_{HUJ} 为完成某一发育阶段所需的热量单位, T_a 为某发育阶段的平均温度(单位:°C), S_m 为实际土壤水分(单位: $cm^3 \cdot cm^{-3}$), S_{mc} 为临界土壤水分(单位: $cm^3 \cdot cm^{-3}$)^[47], S_{mf} 和 S_{mwp} 分别为田间持水量和凋萎系数(单位: $cm^3 \cdot cm^{-3}$)。 c_p 为土壤耗水系数,与作物种类和潜在蒸散有关。 a_s 和 b_s 为参数,华北夏玉米分别为0.08和-5.66。 D_L 为光长(单位:h), D_{LC} 为临界光长(单位:h), D_{LO} 为最适光长(单位:h)。

初始场(播种期等)是农业气象模式开展模拟的重要前提条件,对于区域模拟和未来评估更重要。

CAMM1.0 根据小麦物候对气温增暖的非线性响应特征建立了播种期/返青期模式,

$$D_v = a_d \cdot T_i^2 + b_d \cdot T_i + c_d, \\ D_{vmi} \leq D_v \leq D_{vma}. \quad (7)$$

式(7)中, D_v 为春小麦的播种期或冬小麦的返青期(年内日序), D_{vmi} 和 D_{vma} 分别为播种或返青的最早和最晚值。 T_i 为模拟发育期关键时段的平均温度(单位:°C),关键时段在各地有差异。 a_d, b_d, c_d 均为参数,各地不同。

CAMM1.0 根据我国小麦品种改良对物候的影响建立相关模式,

$$\Delta H_{U,i} = k_h y + d_h. \quad (8)$$

式(8)中, $\Delta H_{U,i}$ 为第*i*个发育阶段由于品种改良导致热量单位(H_U)的变化, y 为年份。 k_h, d_h 为参数,各地不同。

2.2 光合作用与呼吸作用模式

叶片光合作用是作物生长的物质和能量来源,也是作物产量形成的生理基础,主要决定于作物品种类型及作物吸收光合有效辐射、叶片表面 CO_2 浓度和温度等因素。CAMM1.0的叶片光合作用模式集成了负指数、直角双曲线和生化等子模式。前两者通过概括光合有效辐射与光合速率之间的相关关系建模^[48],

$$A_e = A_m (1 - e^{-\alpha I}) - R_d, \quad (9)$$

$$A_h = \frac{\alpha I A_m}{\alpha I + A_m} - R_d. \quad (10)$$

其中, A_e 和 A_h 均为叶片瞬时光合作用速率, A_m 为光饱和时光合作用速率, I 为吸收光合有效辐射, R_d 为暗呼吸速率,它们的单位均为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 α 为初始光能利用率。

田间试验表明:土壤湿度对叶片最大光合能力有明显影响,土壤湿度降低对夏玉米最大光合能力是负效应,其影响关系基本为线性^[49]。CAMM1.0由此建立了简化的土壤湿度影响作物叶片光合能力模式(A'_m)。

$$A'_m = A_m + f(S_m). \quad (11)$$

光合生化模式^[50-53]的机理过程比较复杂。它考虑了光或 CO_2 限制的羧化速率,Rubisco酶固定 CO_2 的能力等,其机理模式描述如下:

$$P_p = 44 \times 10^{-6} (1 - \Gamma_* / C_c) \min(V_c, V_j). \quad (12)$$

式(12)中, P_p 为潜在总光合速率(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), V_c 和 V_j 分别为Rubisco酶活性和电子传输限制下的 CO_2 羧化速率(单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), Γ_*

为 CO_2 补偿点, C_c 为羧化点的 CO_2 浓度。 V_c 主要与最大羧化速率、胞间含氧量、叶片温度有关。 V_j 受羧化点 CO_2 浓度和电子传输速率影响。光合生化模式的相关参数根据文献确定^[39,54]。

冠层光合作用是所有叶片的集成,主要受光辐射在冠层的分布以及叶面积扩展的影响。CAMM1.0在冠层内选定3个深度分别计算叶面积指数、吸收辐射和光合速率。光在冠层的分布采用经典的Monsi-Saeki方程,并考虑阳叶和阴叶的不同,阳叶吸收直接辐射和散射辐射,而阴叶只吸收散射辐射,阳叶面积等于到达该层叶片的直接辐射的比例,其余为阴叶,然后分别计算光合速率,最后采用Gaussian三点积分法获得冠层光合速率,日总光合速率也采用Gaussian三点积分法获得^[18,54]。

呼吸作用分为维持呼吸和生长呼吸两部分。维持呼吸用于维持生命机能,主要受温度和作物干物重的影响,CAMM1.0采用呼吸商模式;生长呼吸为同化物转化为结构物质时的消耗部分,与转化系数有关。

2.3 干物质分配模式

作物光合同化产物去除维持生命机能的呼吸消耗后转化为干物质,并分配到各器官。干物质分配的机理过程十分复杂,某些器官分配有优先性,但也需功能平衡。CAMM1.0采用较为简便的分配系数模式。试验表明冬小麦干物质分配系数随发育进程呈非线性变化,由此建立了分配系数演变模式(图2)。同时,夏玉米试验表明土壤水分对分配系数的影响基本呈线性^[49],建立了水分影响分配模式,并根据试验结果建立了淹水影响干物质分配模式。以叶分配为例,构建模式

$$P_l = \frac{\Delta W_l}{\Delta W}, \quad (13)$$

$$P_{xl} = k_1 D_{VS}^2 + k_2 D_{VS} + k_3, \quad (14)$$

$$P_{dl} = P_{xl} + f(S_m), \quad (15)$$

$$P_{wl} = P_{dl} + c_1. \quad (16)$$

其中, P_l 为叶分配系数, P_{xl} 为其非线性变化, P_{dl} 和 P_{wl} 分别为土壤水分和淹水对其影响。 ΔW_l 和 ΔW 分别为叶和总干重增量(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。 k_1, k_2, k_3, c_1 为参数。

叶(P_l)、茎(P_s)、穗(P_h)和根(P_r)分配系数的关系为

$$P_l + P_s + P_h + P_r = 1. \quad (17)$$

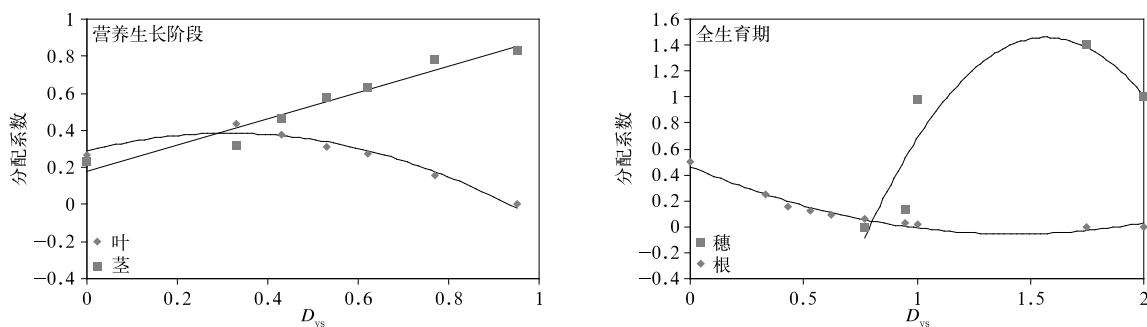


图2 小麦干物质分配系数随发育进程(D_{vs})的变化
Fig. 2 Changes of dry matter partitioning coefficients of wheat with development stage(D_{vs})

2.4 叶片扩展模式

叶片是作物进行光合作用的器官,叶面积扩展一般与品种性能(如比叶面积)、干重增长、死亡速率以及灾害胁迫有关。CAMM1.0采用比叶面积模式^[18]描述作物叶面积扩展。试验表明:土壤水分对作物比叶面积(S_{LA})一般为负效应,土壤水降低使 S_{LA} 增大,则叶片变薄,从而在一定程度上弥补了由于水分缺少导致光合产物不足引起的叶片扩张乏力问题^[49]。由此建立了土壤水分影响比叶面积模式(S'_{LA})。

$$\Delta L_{AI} = S_{LA} \cdot \Delta W_1, \quad (18)$$

$$S'_{LA} = S_{LA} + f(S_m). \quad (19)$$

其中, ΔW_1 为叶面积增重(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.5 株高模式

株高是衡量作物生长速率的重要标志之一。利

用中国农业气象站观测数据分析冬小麦株高变化规律发现,冬小麦株高与累积热量单位(T_{HU})之间有很高的相关性,其变化呈明显的 Logistic 生长趋势(图3)。

研究冬小麦越冬前后株高的变化(图4),结果表明:我国大部分地区冬小麦返青高度一般低于越冬停止生长时的高度。陕甘宁和华北地区冬小麦越冬株高变化与平均热量单位(A_{HU})呈对数相关(达到0.1显著性水平),但中东部冬小麦无此特征。新疆冬小麦的情况相当特殊,冬小麦返青高度随 A_{HU} 的增加而降低(达到0.1显著性水平),这需要进一步探究其原因。此外,还分析了中国冬小麦越冬开始时株高与累积热量单位(T_{HU})的统计关系,可以看到,两者间基本上呈线性相关(达到0.001显著性水平)。

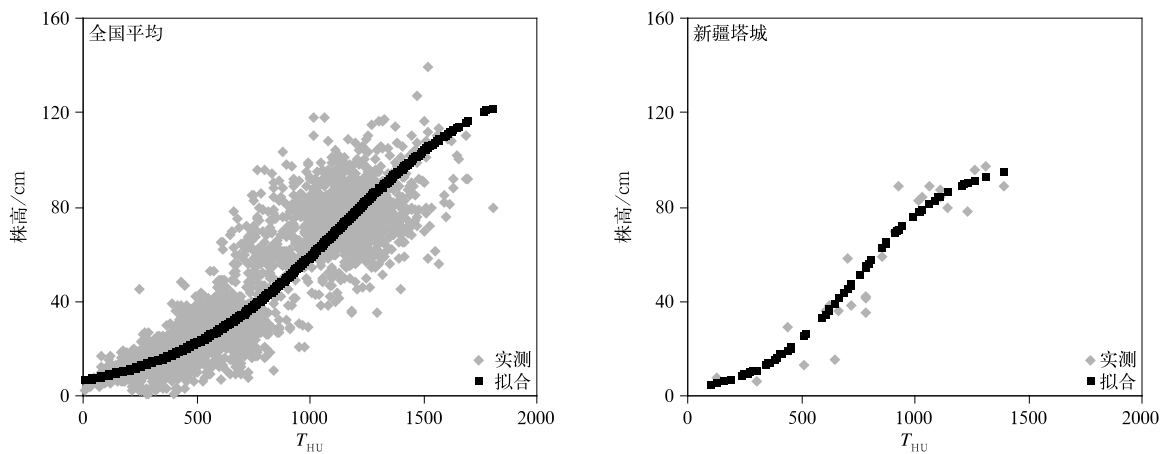


图3 冬小麦株高随累积热量单位(T_{HU})变化趋势
Fig. 3 Trends of winter wheat plant height with accumulated heat unit(T_{HU})

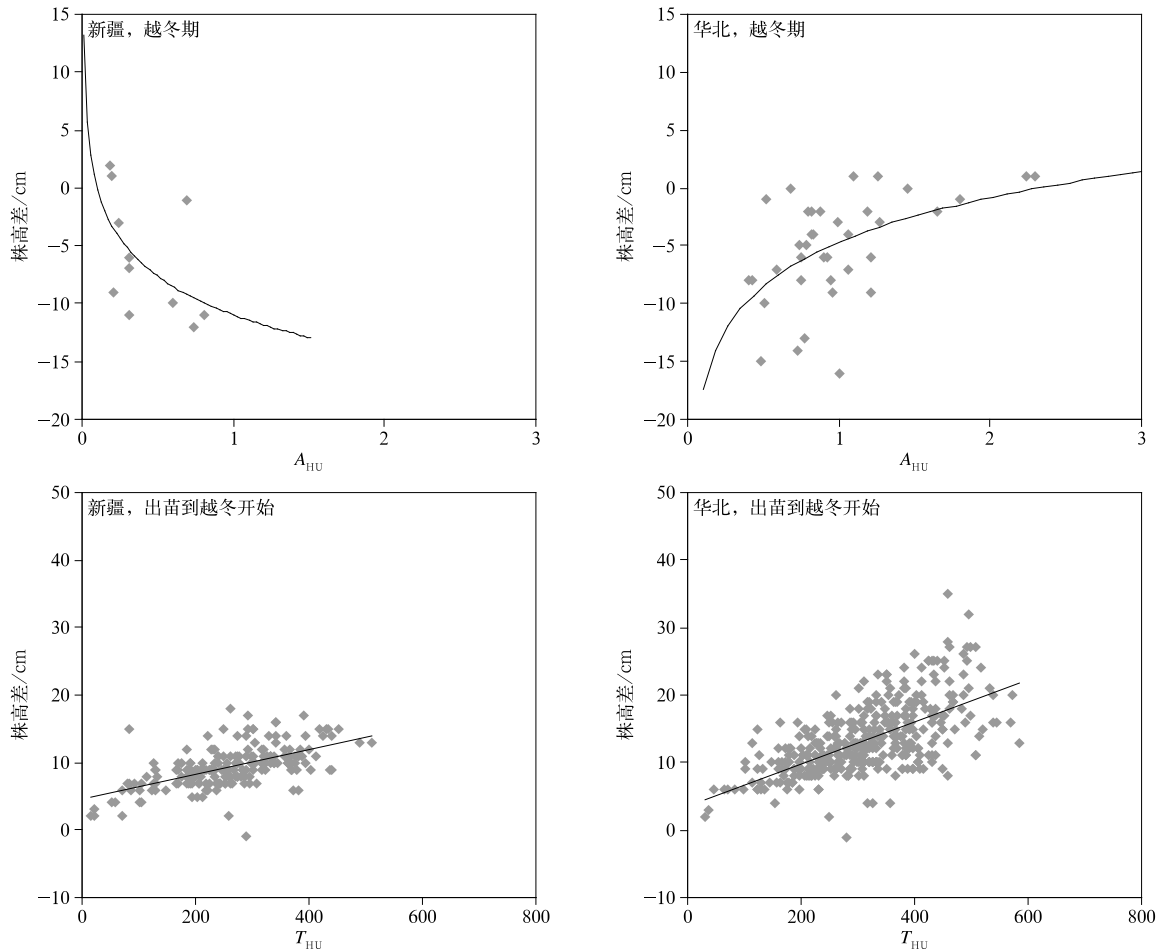


图 4 冬小麦生长株高差与平均(A_{HU})及累积热量单位(T_{HU})关系
 Fig. 4 The relationship of winter wheat plant height difference to average(A_{HU}) and accumulated heat unit(T_{HU})

基于以上结果, CAMM1.0 利用分区拟合方法建立了中国冬小麦株高变化模式:

$$H_s = H_e + a_h \cdot T_{HU} + b_h, \quad (20)$$

$$H_t = H_s + k_{th} \cdot \ln A_{HU} + s_h, \quad (21)$$

$$H_i = \frac{p_{ih}}{e^{(m_h - n_h \cdot T_{HU})}}. \quad (22)$$

其中, H_e, H_s, H_t, H_i 分别为冬小麦出苗、越冬停止生长、返青、其他物候期株高(单位: cm); $a_h, b_h, k_{th}, s_h, m_h, n_h, p_{ih}$ 为参数。

2.6 作物生长水分运移模式

水分常常是作物生长发育的限制因素, 因此, 合理描述水分运移过程是农业气象模式的重要内容。CAMM1.0 中水分过程主要包括灌溉、蒸散以及土壤水分运移等。

中国北方多数作物生产离不开灌溉, 生育期内是否灌溉、灌溉次数和灌溉量构成的灌溉场是作物

产量空间分异的重要影响因素, 甚至是决定因素, 也直接影响农业气象模式的模拟结果。CAMM1.0 利用多时相光学和微波卫星遥感技术反演日、旬尺度的土壤水分及其时空变异, 结合降水观测, 进行了灌溉区域分布、灌溉次数识别和灌溉量估算。灌溉模式的初步算法描述如下:

$$\Delta S_{m,n} = S_{m,n+1} - S_{m,n}, \quad (23)$$

$$I_g = \Delta S_{m,n} \times H_{ig}, \Delta S_{m,n} > 0 \text{ 且}$$

$$P_n \leq P_{rs}, P_{n+1} \leq P_{rs}. \quad (24)$$

其中, S_m 和 P 分别为土壤湿度(单位: $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)和降水量(单位: mm), n 为年内日序, P_{rs} 为遥感反演对降水量的敏感度(单位: mm), H_{ig} 为灌溉可能渗透深度(单位: mm), I_g 为灌溉量(单位: mm)。

蒸散是植被及地面向大气输送的水汽总量, 主要包括土壤蒸发和植被蒸腾。作为能量平衡及水分循环的重要组成部分, 蒸散在影响植物生长发育与

产量形成方面具有重要作用^[55]。CAMM1.0 集成了双源能量平衡模型 TSEB^[56-57] 和 FAO 蒸散模式^[58], 并采用改进的蒸发比法^[59] 将 TSEB 模型计算的瞬时潜热通量扩展为逐日的实际蒸散^[60]。

土壤水分是作物生长的水分来源, CAMM1.0 的土壤水分过程集成了土壤水分运移模式^[61-62] 与土壤水分平衡模式^[18]。

2.7 作物生长评价模式

CAMM1.0 不仅描述也评价作物的生长过程。利用模拟不同年份生物量动态累积过程与同期平均气候下生物量的比较, 建立了生育期内各时段或全生育期作物长势时间评价模式(G_t), 它是某站点(格点)与历史生长状况的比较:

$$G_t = 100 \times \frac{T_{AGP} - T_{AGA}}{T_{AGA}} \quad (25)$$

式(25)中, T_{AGP} 为评价年份某时间点模拟地上总干重(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), T_{AGA} 为对应的多年平均(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。作物长势时间评价分为好、正常、差 3 级, 根据多年多点(格点)模拟 G_t 的概率分布确定不同等级阈值。

利用 CAMM1.0 模拟当年地上总干重与基于实测地上总干重建的苗情指标(T_{AGM})比较, 建立了生育期内各时段或全生育期作物长势空间评价模式(G_s), 它描述的是作物当年空间上的生长差异。苗情指标分为一类苗、二类苗、三类苗。

$$G_s = 100 \times \frac{T_{AGP} - T_{AGM}}{T_{AGM}} \quad (26)$$

CAMM1.0 以水分胁迫(过少或过多)造成模拟成熟期贮存器官干重的损失建立旱涝评价模式。根据实际灾害等级(减产率)出现的概率确定旱涝等级的分级阈值。旱涝等级共分 8 级, 即特旱、重旱、中旱、轻旱、正常、轻涝、中涝和重涝。

$$D_1 = 100 \times \frac{W_{SOP} - W_{SOD}}{W_{SOP}} \quad (27)$$

$$W_1 = 100 \times \frac{W_{SOD} - W_{SOW}}{W_{SOD}} \quad (28)$$

其中, D_1 和 W_1 分别为干旱和涝渍指数, W_{SOP} , W_{SOD} 和 W_{SOW} 分别为潜在、干旱和涝渍条件下的作物贮存器官干重(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

CAMM1.0 综合玉米抽雄期推迟日数、抽雄后热量单位的减少、全生育期低温对贮存器官干重的影响、早霜冻影响贮存器官干重构建了玉米冷害评

价模式, 再根据实际出现冷害年份的频率确定了冷害等级阈值^[44, 63-64]。

3 模式运转

3.1 参数/变量初值区域化

CAMM1.0 描述作物生长发育的机理过程是垂直一维的, 因此, 其区域化主要是获得作物参数、状态变量初值以及土壤参数的空间(格点)分布。对于发育参数及发育初值, 首先根据站点参数的空间分布特征及地形, 并参照我国农业气候生态区划结果进行分区。但由于相邻区域交界处人为分割的差异, 导致模式模拟结果存在明显区别。为了避免这种不连续, 同时考虑到发育参数与温度密切相关, 利用空间插值方法实现了发育参数的区域化。CAMM1.0 目前制作了全国范围共 78 景参数数据, 包括不同分辨率的冬/春小麦播种区、海拔高度、田间持水量、凋萎系数、饱和导水率、发育参数、发育初值等。

CAMM1.0 假定作物生长在全国范围的差异由某几个品种参数确定, 将其定义为区域性参数。基于参数的敏感性和约束性分析, 区域性参数主要包括叶片最大光合能力、比叶面积以及叶片生命周期等。每个生长季模式开始运转之前, 开展站点参数自动优化, 然后进行空间插值, 从而实现生长参数区域化。

3.2 遥感数据同化模式

同化卫星遥感数据可以部分解决 CAMM1.0 在区域上的初值和参数获取问题。开展了观测数据与模式同化方法的正确性验证, 通过模式状态变量对不同参数或变量初值的敏感性分析、观测数据对敏感参数的约束性分析, 确定了模式的待优化参数, 利用优化算法实现遥感数据与模式的同化^[65], 由此建立了遥感数据同化模式。

3.3 运转平台

基于互联网技术建立了 CAMM1.0 运转平台(图 5)。平台设计采用 C/S(客户机/服务器)与 B/S(浏览器/服务器)混合技术框架, 结合两种架构的优点完成了高计算量模式的运转和高并发产品定制与浏览。平台前端利用的 JavaScript 语言结合 Angular 框架、后端利用的 Java 语言结合 Spring 框架编写。

平台主要功能包括常规模式实时运转, 模拟结

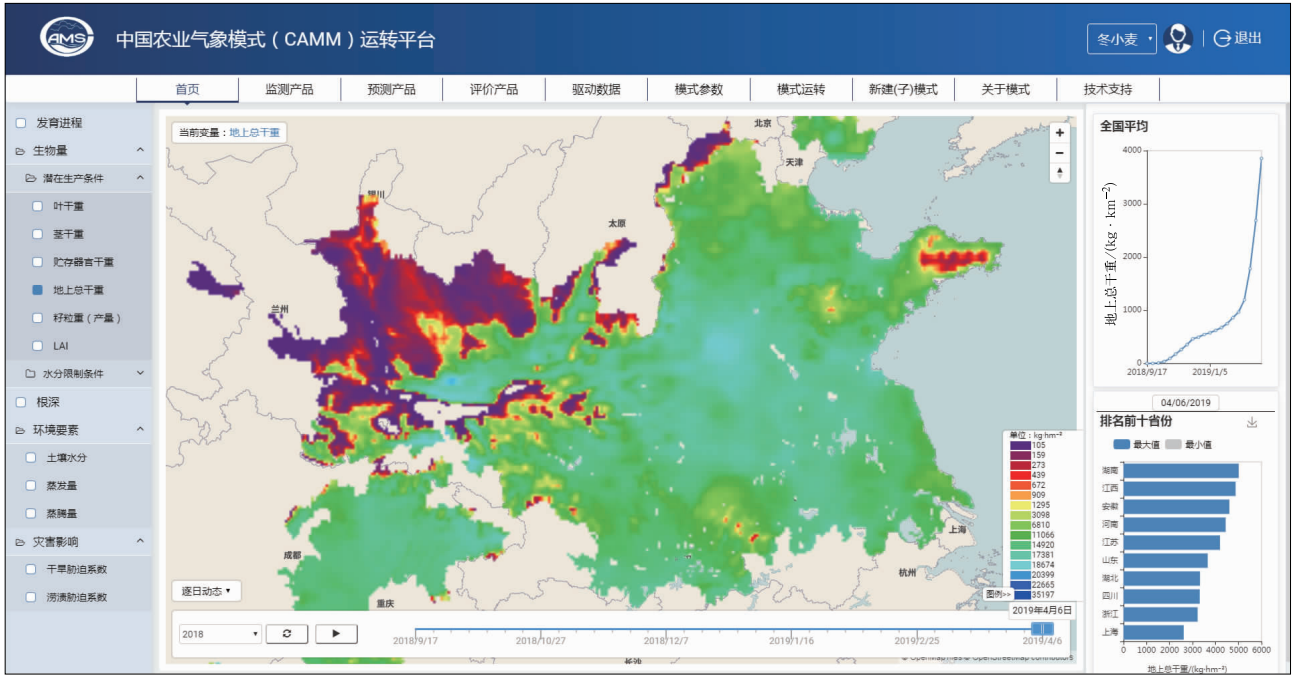


图 5 中国农业气象模式(CAMM1.0)运转平台

Fig. 5 Running platform of Chinese AgroMeteorological Model(CAMM1.0)

果、驱动数据、参数以及实测结果展示,不同用户个性化模式定制运转,模式介绍以及技术支持等。CAMM1.0 与国家气象业务 CIMISS 数据库建立了实时连接。常规模式的逐日输出产品包括作物生长的状态变量(发育期、各器官生物量、叶面积指数、产量等)、环境变量(土壤湿度、蒸散等)、生长及灾害影响评价等。CAMM1.0 包括日常准业务和不同用户的个性化定制两种运行方式。前者的模拟范围为全国农作物种植区,空间分辨率为 $0.625^{\circ} \times 0.625^{\circ}$,模式每日运行 1 次,输出日常产品。个性化定制根据用户级别具有不同的访问权限。普通用户可查询、浏览、统计日常产品;气象业务用户还可重新配置模式,提交模拟任务;模式研制用户还可上传自己研制的插拔式模块;模式管理用户拥有所有权限,并承担后台管理。CAMM1.0 运行配置包括作物种类、模拟区域、时段、参数、初始场、子模式以及输出变量的选择。

4 模式检验及初步应用

4.1 CAMM1.0 模拟检验

对 CAMM1.0 的部分子模式开展模拟检验,并对最终模拟冬小麦产量和地上总干重进行检验,以评价模式的模拟性能。

4.1.1 发育进程模拟检验

利用 2002—2008 年华北地区农业气象观测站的夏玉米发育期数据进行 T_{HUC} 子模式的模拟检验,模拟抽雄期的偏差为 -0.2 d,绝对偏差为 2.26 d,模拟结果与实测值相关系数较高,线性回归方程的斜率接近 1^[46]。利用 1980—2005 年东北地区春玉米发育期观测对 G_{HU} 子模式进行模拟检验,抽雄期、成熟期的模拟值与实测值的相关系数分别为 0.69 和 0.57 ,模拟抽雄期和成熟期的偏差分别为 0.3 d 和 1.8 d,绝对偏差分别为 3.6 d 和 5.9 d,均方根误差分别为 0.16 d 和 0.26 d^[44]。利用 2006—2012 年中国冬小麦发育数据确定参数,并利用 2017—2018 年生长季发育数据进行 T_{HU} 子模式的模拟检验(图 6),其模拟开花期和成熟期的偏差分别为 -3.0 d 和 4.7 d,绝对偏差分别为 6.5 d 和 6.6 d,均方根误差分别为 0.82 d 和 0.74 d。总体表明, T_{HU} 模式对作物发育进程的模拟性能可以接受,但仍有改进空间。

4.1.2 叶片光合作用模拟检验

利用固城夏玉米光合试验数据对光合负指数模式、直角双曲线模式和光合生化模式^[51-52]进行初步模拟检验(图 7)。可以看到,3 个模式模拟夏玉米叶片光合速率与实测值的相关系数大小相当,但光合生化模式的总体拟合效果更好。

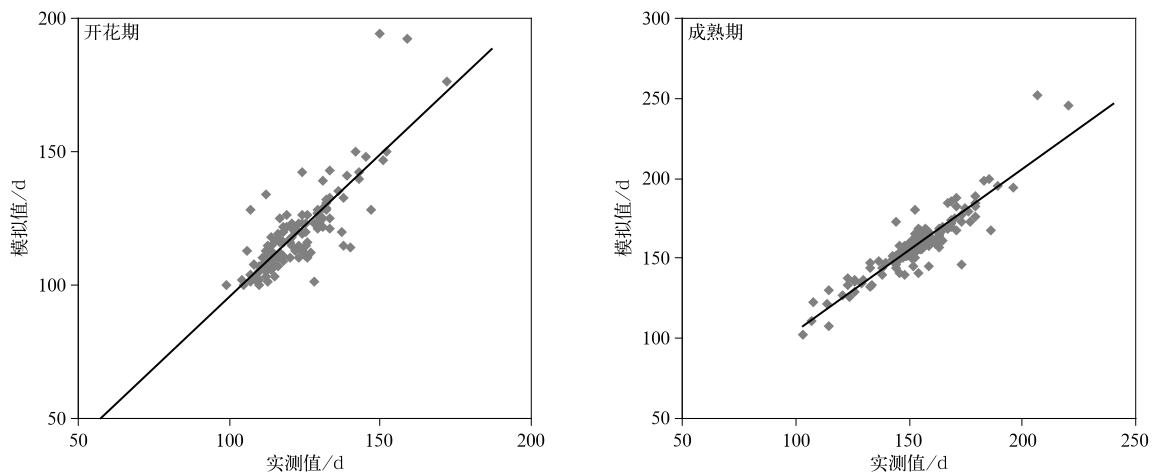


图6 CAMM1.0模拟的2017—2018年度中国冬小麦发育期与实测值比较

Fig. 6 Relationship between measured and simulated winter wheat developments in China by CAMM1.0 from 2017 to 2018

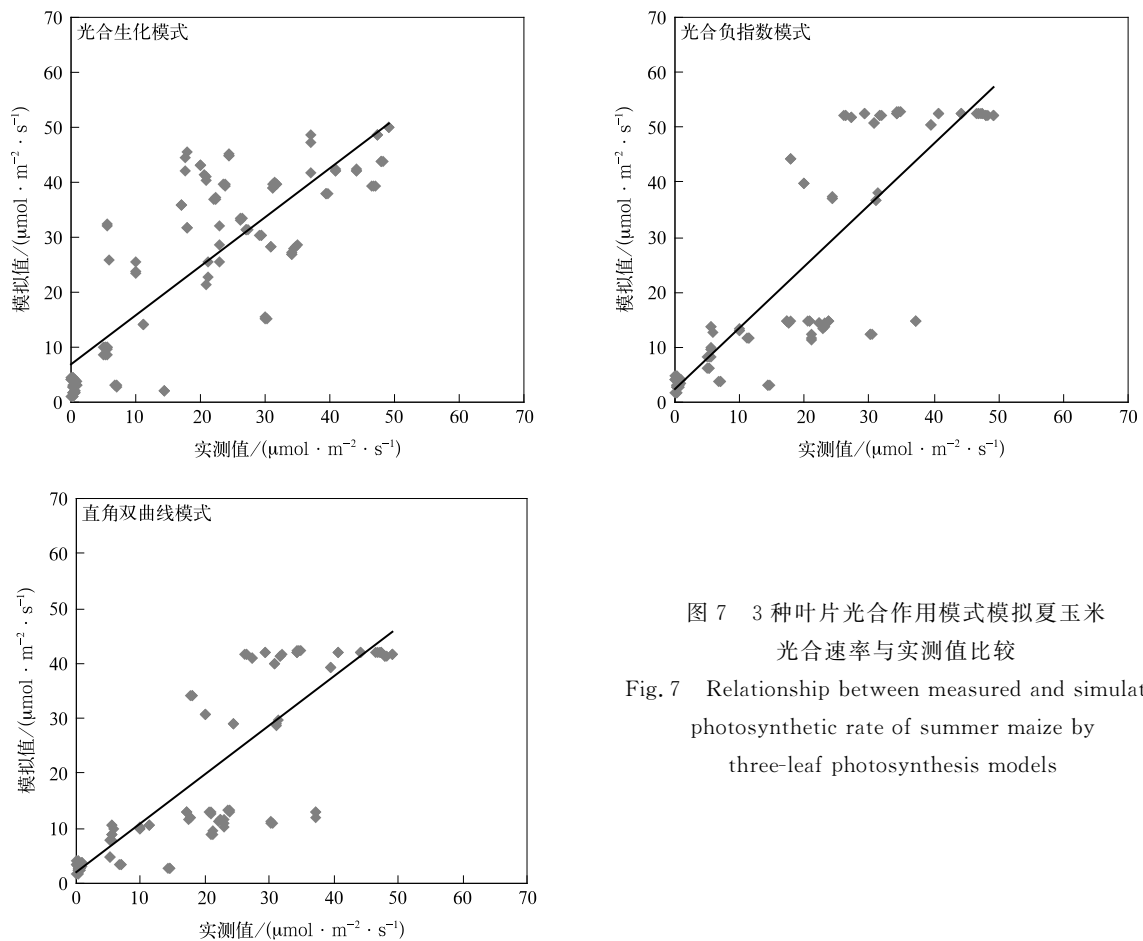


图7 3种叶片光合作用模式模拟夏玉米
光合速率与实测值比较

Fig. 7 Relationship between measured and simulated photosynthetic rate of summer maize by three-leaf photosynthesis models

4.1.3 冬小麦株高模拟检验

利用1991—2007年中国各地农业气象观测站

冬小麦株高数据校准了CAMM1.0株高模式的系数,利用2008—2012年不同区域冬小麦株高数据进

行模拟检验。结果表明:大部分地区的冬小麦株高模拟效果较好,模拟值与实测值的相关系数均在 0.83 以上(达到 0.01 显著性水平)。西南地区模拟误差偏大,主要原因在于该区冬小麦无越冬停止生长现象,前期无株高观测数据,因此,利用生长曲线拟合效果较差,有待下一步搜集更多数据进行参数校准。

4.1.4 作物生长水分运移过程模拟检验

基于被动微波遥感 SMAP 土壤水分产品提取的河南省 2017 年 10 月中旬灌溉区域,发现河南新乡到开封一带农田土壤水明显升高,但该期无有效降水,由此可确定该区域内发生了灌溉。

利用 2004—2005 年山东禹城试验站 Lysimeter 冬小麦夏玉米连作生长季观测数据对 TSEB 模拟逐日实际蒸散进行检验^[60],二者的相关系数为 0.782 (达到 0.01 显著性水平),相关性较好。两者的时间变化趋势也较为吻合,但模拟实际蒸散的波动相对较小。

利用 2009 年河北固城夏玉米试验的根层土壤水分观测值进行土壤水分模拟检验。结果表明:水

分运移模式与水分平衡模式模拟结果与实测值的相关系数基本相同,平均绝对误差也大体相当,分别为 $0.038 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $0.034 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,但水分平衡模式模拟结果与实测值离差较大,而水分运移模式则较小。进一步检验了两模式对干旱和较好水分条件下的模拟性能。当实际水分较低时,水分平衡模式模拟偏高较多,而水分运移模式模拟效果较好;当实际水分较高时,水分平衡模式模拟效果较好,而水分运移模式模拟偏低。总体来看,水分平衡模式的反应更灵敏,水分运移模式的模拟值变化较小,但更稳定。

4.1.5 遥感同化模拟检验

利用 2010—2011 年河南夏玉米多点实地观测地上总干重数据进行遥感同化模式模拟检验,并与模式单独模拟结果进行比较(图 8),结果表明:同化基于风云三号气象卫星数据反演的 LAI 产品后,CAMM1.0 模拟夏玉米地上总干重在河南省有所升高,与实测值更接近,模拟值与实测值的线性相关系数有所提高,对高值区的模拟效果有一定程度改善。

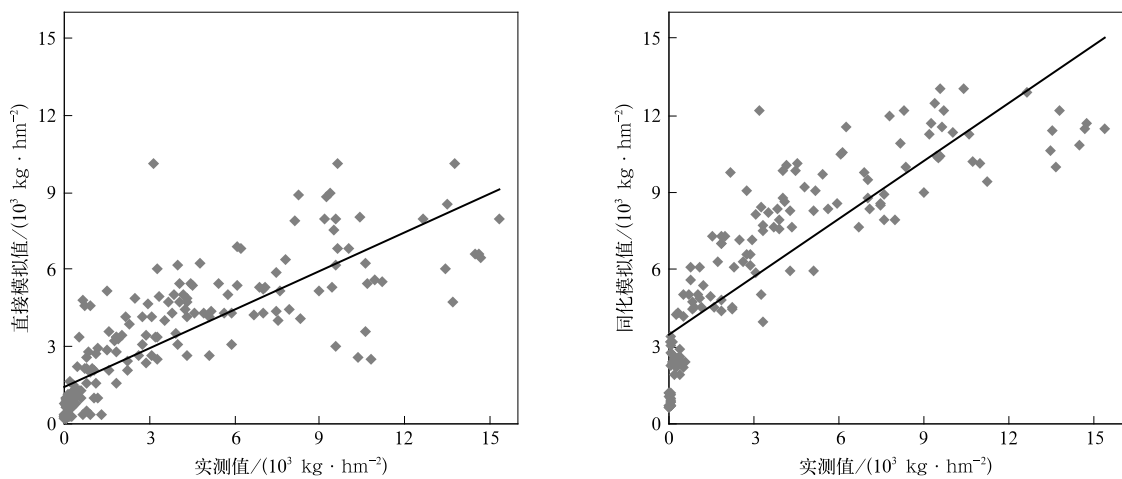


图 8 遥感数据同化模式模拟 2010—2011 年河南夏玉米地上总干重与实测值比较

Fig. 8 Relationship between measured and simulated total aboveground dry weight of summer maize in Henan by remote sensing data assimilation model from 2010 to 2011

4.1.6 产量和地上总干重模拟检验

利用 2015—2016 年农业气象观测站冬小麦产量数据以及对应 CLDAS 大气驱动场数据开展全国 73 个站点的 CAMM1.0 生长参数自动优化,并利用

2017—2018 年数据进行生长模拟检验(图 9)。结果表明:模拟产量与实测值的相关系数为 0.59(达到 0.01 显著性水平),模拟产量略偏低。

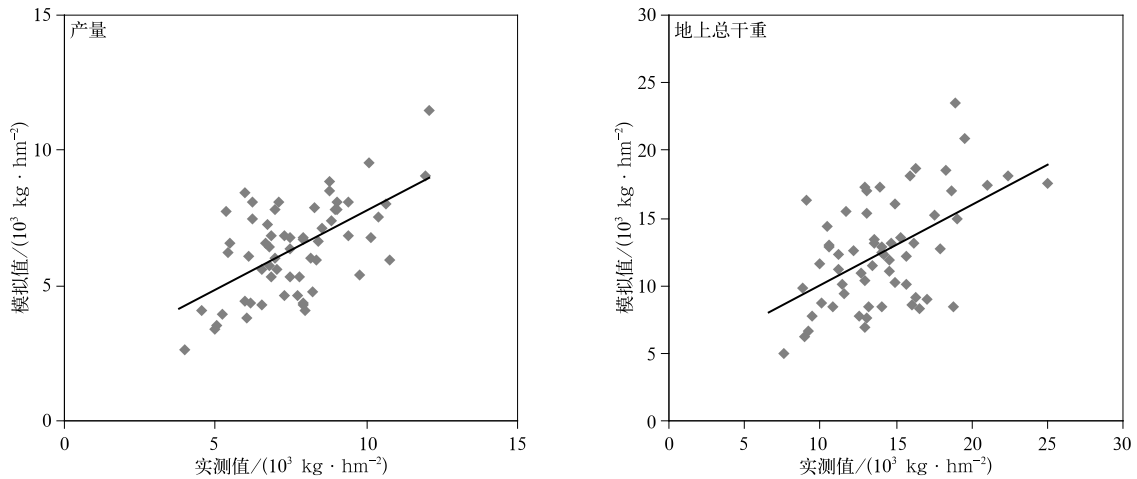


图9 CAMM1.0模拟的2018年中国冬小麦产量和地上总干重与实测值比较

Fig.9 Relationship between measured and simulated winter wheat yield and total dry weight aboveground in China by CAMM1.0 in 2018

4.2 作物生长评价应用

4.2.1 作物生长评价

利用CAMM1.0遥感数据同化模式及长势评价模式,开展了2013年华北夏玉米长势评价(图

10)。可以看到,该年度华北地区夏玉米长势呈插花分布,等级从差到好均有一定比例,而夏玉米苗情基本为二类苗、三类苗。

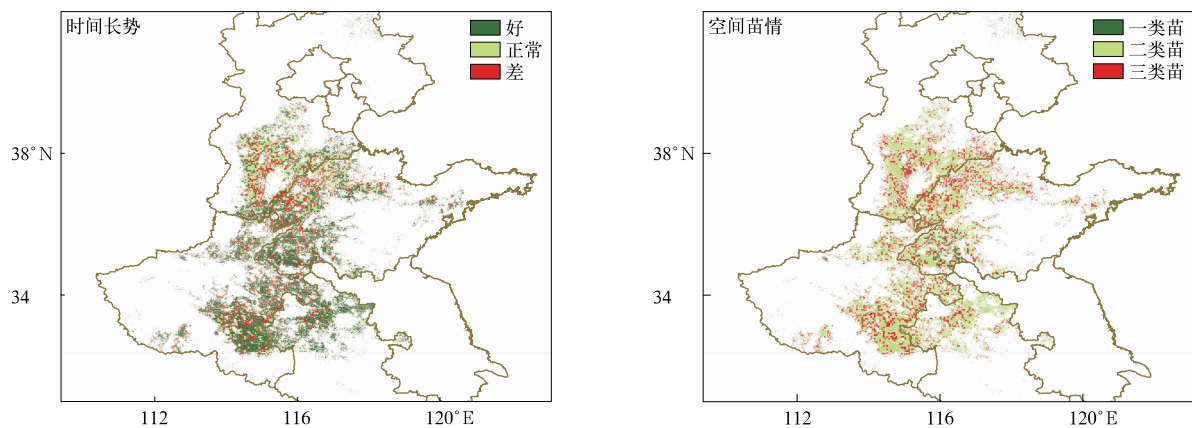


图10 CAMM1.0对2013年华北夏玉米时间长势和空间苗情的评价

Fig.10 Evaluation of growth in time trend and spatial distribution of summer maize in North China by CAMM1.0 in 2013

4.2.2 作物生长灾害影响评价

利用玉米实际减产率等级对CAMM1.0模拟1971—2008年的旱涝评价的8个等级进行检验。结果表明:总体模拟效果较好,模拟结果与实际减产率等级相吻合的格点占44.3%,若定义等级差不超过1为准确,则模拟准确率为80.9%。

利用CAMM1.0旱涝评价模式进行淮河流域夏玉米历年灾害评价(图11)。结果表明:夏玉米干

旱程度随时间有降低的趋势,而涝渍有增加趋势。但自20世纪90年代以来,旱涝的波动性更明显。近些年,玉米出现旱灾损失较大的年份主要包括1994,1997,1999,2002年和2013年,产量损失均在20%以上;涝渍灾害损失较大的年份主要包括2000,2003,2005,2006年和2007年,与实际情况较相符。

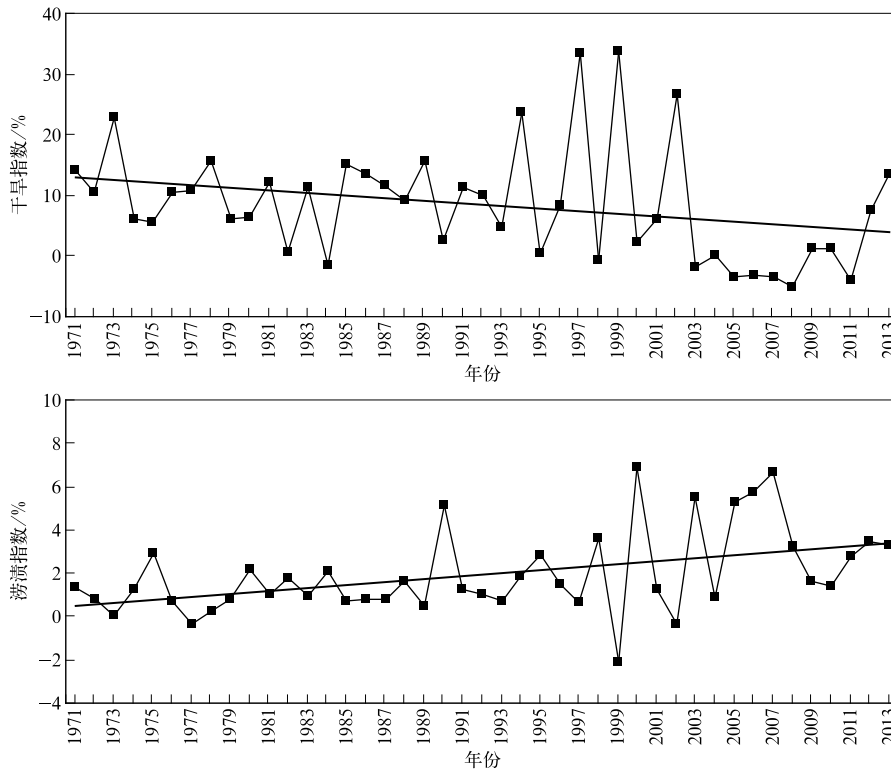


图 11 CAMM1.0 对淮河流域夏玉米旱涝灾害的评估

Fig. 11 Assessment of summer maize drought and flood disasters in Huaihe River Basin by CAMM1.0

5 结论与讨论

借鉴国外作物生长模拟方法,通过模式机理过程改进或重构以及应用方式革新,建立了中国农业气象模式(CAMM1.0),运行结果表明:

1) 对作物生长关键机理过程的改进提升了CAMM1.0对作物环境要素的响应能力。作物发育进程考虑了平均温度和土壤水分的影响,作物叶片光合作用、干物质分配和叶面积扩展过程增加了土壤水分的影响,通过蒸发比法实现了作物逐日蒸散过程的描述。

2) 区域特色模式的构建提升了CAMM1.0对中国农作物生长过程的模拟能力,并实现了模式区域化。模式实现了对作物株高、作物灌溉时间及灌溉量的模拟、对作物长势和灾害影响的动态评价,模式同化遥感数据解决了区域性参数的获取问题。

3) 基于互联网的用户个性化定制模式运转平台是农业气象业务服务的有效技术方案。用户通过对作物种类、模拟区域、时段、参数、初始场、子模式以及输出变量的配置,可以获取定制的作物生长的

状态变量(发育期、各器官生物量、LAI、产量等)、环境变量(土壤湿度、蒸散等)、长势以及灾害影响评价等。

CAMM1.0的机理过程远未完善。其发育进程模式还不能全面响应变化环境,也可能高估品种变化对发育期的影响^[66];对光合作用、干物质分配、土壤水分运移子模式的改进以及灌溉等子模式的构建及验证仍有很大提升空间,其中,光合作用的冠层模式可以利用冠层辐射传输模式进行改进。鉴于作物光合同化物分配依照经验参数调配的不确定性,需要研究基于根冠功能性平衡原理建立同化物分配和再分配机理模式,以解决目前农业气象模式普遍在作物生长后期难以较快提升籽粒重量积累的问题。水分运移模式与水分平衡模式的模拟效果存在较大差异,可能是由于前者的敏感性较低以及参数的不确定性造成。遥感反演土壤水分精度和空间分辨率的提高需要结合主动、被动微波遥感达成。这均需搜集更多区域、作物、土壤数据进行模式检验并进行机理改进。CAMM1.0从模式构造上进行了新的尝试。多模式集成是目前农业气象模式应用的一个重要方向,但不同模式的机理完善程度、参数确定方式差异

很大,导致模拟结果的不确定性很高。CAMM1.0 部分子模式采用多重方法构造,便于多种方法集成,其不确定性更可控,模拟效果更可靠。CAMM1.0 探索了一种新的模式应用方式,基于互联网技术构造了模式的实时运转平台,建立了以应用为导向的模式机制改进与重构方式,以及插拔式的模式构造方法,使模式应用推广和核心模块的进一步研发更新十分便捷。CAMM 建模将继续遵循研究中推进应用、应用中持续改进的原则展开,目标是构建具有中国区域种植特色的农业气象模式,并能够反映农业生产对气候变化和多种气象灾害的响应机制。下一步将继续改进作物发育进程、冠层光合同化模式,改进水分、养分影响作物生长过程模式,简化叶面积扩展与消亡模式,建立 CO₂ 浓度影响作物生长、机理型干物质分配再分配、越冬、病虫害影响、产量归并、品质影响等模式。

参考文献

- [1] 冯秀藻,陶炳炎. 农业气象学. 北京:气象出版社,1991.
- [2] 王馥棠. 农业气象作物产量预报概述. 气象科技,1983,6(2):36-41.
- [3] 刘树泽. 有关农业气象数值模拟和模式的研究. 气象科技,1980,3(4):14-16.
- [4] 刘树泽. 国外农业气象模式的研究与应用. 世界农业,1986(6):31-33.
- [5] 冯定原. 农业气象模式的应用. 世界农业,1984(11):61-63.
- [6] 龚绍先. 谈谈农业气象模式. 甘肃气象,1985(3):12-16.
- [7] 朱履宽. 我国在农业气象模式方面的研究概况. 中国农业气象,1993,14(2):46-50.
- [8] de Wit C T. Photosynthesis of Leaf Canopies // Agricultural Research Report No. 663. Wageningen: PUDOC, 1965: 57.
- [9] Duncan W G, Loomis R S, Williams W A, et al. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 1967, 38: 181-205.
- [10] van Keulen H. Simulation of Water Use and Herbage Growth in Arid Regions // Simulation Monographs. Wageningen: PUDOC, 1975: 176.
- [11] de Wit C T. Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops // Simulation Monographs. Wageningen: PUDOC, 1978: 141.
- [12] de Wit C T, Brouwer R, Penning de Vries F W T. The Simulation of Photosynthetic Systems // Proceedings of the International Biological Program/Plant Production Technical Meeting. Wageningen: PUDOC, 1970: 47-70.
- [13] Penning de Vries F W T, Jansen D M, Ten Berge H F M, et al. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops // Monographs. Wageningen: PUDOC, 1989: 271.
- [14] Penning de Vries F W T, van Laar H H. Simulation of Growth Processes and the Model BACROS // Simulation Monographs. Wageningen: PUDOC, 1982: 114-135.
- [15] van Diepen C A, Wolf J, Van Keulen H, et al. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use Manage*, 1989, 5: 16-24.
- [16] Duncan W G, Hesketh J D. Net photosynthetic rates, relative leaf growth rates, and leaf numbers of 22 races of maize grown at eight temperatures. *Crop Sci*, 1968: 670-674.
- [17] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 等. 水稻计算机模拟模型及其应用之一 水稻钟模型——水稻发育动态的计算机模型. 中国农业气象, 1989, 10(3): 3-10.
- [18] Supit I, Hooyer A A, van Diepen C A. System Description of the WOFOST 6. 0. Crop Simulation Model Implemented in CGMS, Vol 1: Theory and Algorithms. EUR Publication 15956, Agricultural Series, 1994.
- [19] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur J Agron*, 2003, 18(3/4): 267-288.
- [20] Hoogenboom G, Wilkens P W, Tsuji G Y. DSSAT V3 Volume 4. Hawaii: University of Hawaii, 1999: 286.
- [21] Kapetanaki G, Rosenzweig C. Impact of climate change on maize yield in Central and Northern Greece: A simulation study with *ceres-maize*. *Mitig Adapt Strat Gl*, 1997, 1(3): 251-271.
- [22] Ceglar A, Bogataj L K. Simulation of maize yield in current and changed climatic conditions: Addressing modelling uncertainties and the importance of bias correction in climate model simulations. *Eur J Agron*, 2012, 37(1): 83-95.
- [23] 金之庆, 葛道阔, 郑喜莲, 等. 评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响. 作物学报, 1996, 22(5): 513-524.
- [24] Yin X, Chasalow S D, Dourleijn C J, et al. Coupling estimated effects of QTLs for physiological traits to a crop growth model: Predicting yield variation among recombinant inbred lines in barley. *Heredity*, 2000, 85(6): 539-549.
- [25] 王石立, 马玉平. 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考. 气象, 2008, 34(6): 3-10.
- [26] 高亮之. 农业模型学基础. 香港: 天马图书有限公司, 2004: 1-320.
- [27] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 郭建平. 农业气象灾害监测预测技术研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 620-630.
- [31] 王馥棠. 中国气象科学研究院农业气象研究 50 年进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 778-785.
- [32] Yin X, Struik P C. Modelling the crop: From system dynamics to systems biology. *J Exp Bot*, 2010, 61(8): 2171-2183.
- [33] Parent B, Tardieu F. Can current crop models be used in the

- phenotyping era for predicting the genetic variability of yield of plants subjected to drought or high temperature? *J Exp Bot*, 2014, 65(21): 6179-6189.
- [34] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型. *棉花学报*, 1996, 8(4): 180-188.
- [35] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究. *作物学报*, 1997, 23(4): 418-424.
- [36] 王恩利, 段向荣, 吴连海, 等. 作物生产力估算与评价软件(CPAM)的设计与应用. *计算机农业应用*, 1991(1): 18-23.
- [37] 高亮之, 金之庆. RCSODS-水稻栽培计算机模拟优化决策系统. *计算机农业应用*, 1993(3): 14-20.
- [38] 殷新佑. 水稻生长日历模拟模型及其应用的研究——I. “源活性”子模型——水稻干物质生产、消耗、分配与积累的模拟. *江西农业大学学报*, 1991, 13(2): 107-112.
- [39] 吴玮, 马玉平, 俄有浩, 等. GECROS 模型在黄淮海地区模拟夏玉米生长的适应性评价. *作物学报*, 2015, 41(1): 123-135.
- [40] 孙琳丽, 景元书, 马玉平, 等. 基于 Downhill-Simplex 算法的观测数据与作物生长模型同化方法研究. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 555-566.
- [41] 马玉平, 王石立, 张黎, 等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(2): 204-215.
- [42] 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.
- [43] Brown D M, Chapman L J. Soybean Ecology. II. Development-temperature-moisture relationships from field studies. *Agron J*, 1960, 52(9): 496-499.
- [44] 马玉平, 王石立, 李维京. 基于作物生长模型的玉米生殖期冷害致灾因子研究. *作物学报*, 2011, 37(9): 1642-1649.
- [45] Matthews R B, Hunt L A. GUMCAS: A model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz). *Field Crop Res*, 1994, 36(1): 69-84.
- [46] 马玉平, 张黎, 孙琳丽, 等. 持续性温强和土壤水分对玉米发育进程的影响及其模拟. *中国农学通报*, 2015, 3(3): 186-193.
- [47] van Diepen C A, Rappoldt C, Wolf J, et al. Crop Growth Simulation Model WOFOST. Wageningen: Centre for World Food Study, 1988: 299.
- [48] Thornley J H M. *Mathematical Models in Plant Physiology*. 1976.
- [49] 马玉平, 孙琳丽, 马晓群. 黄淮海地区夏玉米对于干旱和涝渍的生理生态反应. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 85-93.
- [50] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [51] Farquhar G D. On the nature of carbon isotope discrimination in C₄ species. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1983, 10: 205-226.
- [52] Collatz G J, Ribas Carbo M, Berry J. A Coupled photosynthesis stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1992, 19: 519-538.
- [53] Goudriaan J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agric For Meteorol*, 1986, 38(1): 249-254.
- [54] Yin X Y, Laar H H V. Crop Systems Dynamics: An Ecophysiological Simulation Model for Genotype-by-environment Interactions. Wageningen: PUDOC, 2005: 1-45.
- [55] Suyker A E, Verma S B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. *Agric For Meteorol*, 2008, 148(3): 417-427.
- [56] Kustas W P, Norman J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agric For Meteorol*, 1999, 94(1): 13-29.
- [57] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agric For Meteorol*, 1995, 77(3): 263-293.
- [58] Richard A G, Pereira S L, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 1998, 56: 300.
- [59] Yann C, Thomas A. Improving Spatial Resolution of ET Seasonal for Irrigated Rice in Zhanghe, China. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 2001.
- [60] Xia W, Wang P, Huo Z, et al. Crop drought identification index for winter wheat based on evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Agr Ecosyst Environ*, 2018, 263: 18-30.
- [61] 季劲钧, 胡玉春. 一个植物冠层物理传输和生理生长过程的多层模式. *气候与环境研究*, 1999, 4(2): 25-37.
- [62] 黄玫. 中国陆地生态系统水、热通量和碳循环模拟研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [63] 刘布春, 王石立, 庄立伟, 等. 基于东北玉米区域动力模型的低温冷害预报应用研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 616-625.
- [64] 马玉平, 王石立, 李维京. 基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测. *作物学报*, 2011, 37(10): 1868-1878.
- [65] 孙琳丽, 马玉平, 景元书, 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.
- [66] Wu D, Wang P, Jiang C, et al. Measured phenology response of unchanged crop varieties to long-term historical climate change. *Int J Plant Prod*, 2018, DOI: 10. 1007/s42106-018-0033-z.

The Construction and Application of Chinese AgroMeteorological Model(CAMM1.0)

Ma Yuping Huo Zhiguo Wang Peijuan E Youhao Wu Dingrong Fang Shibo
Tan Kaiyan Zhang Yi Sun Linli Yang Jianying Zhao Junfang Zhou Mengzi
He Di Xu Jiaxin Mao Fei Jiang Chaoyang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

In order to develop an agrometeorological model suitable for regional agricultural planting in China, China AgroMeteorological Model version 1.0(CAMM1.0) is established by improving and reconstructing the process and innovative application of existing oversea simulation methods.

CAMM1.0 makes several improvements in process of agrometeorological model. It improves crop development process model by using average temperature intensity and soil moisture, improves crop leaf photosynthesis, dry matter distribution and leaf area expansion process model by using soil moisture, expands crop evapotranspiration process model by evaporation ratio method, establishes winter wheat plant height model based on development process. Based on the remote sensing information, the crop irrigation model, data assimilation model, crop growth and assessment model are also constructed. Main functions of CAMM1.0 include real-time crop growth simulation and customized user simulation. The former outputs real-time crop growth state variables, environmental variables and growth evaluation day by day. And the latter can produce customized products. CAMM1.0 can simulate the crop development, photosynthesis and plant height very well. However, the simulation is slightly weak on the process of soil moisture change, and the simulated yield is also slightly low. The assessed trend of summer maize in drought decreasing and waterlogging increasing by CAMM1.0 in Huaihe River Basin is consistent with the observation. Improving the key mechanism of crop growth enhances the response of CAMM1.0 to the environment. The construction of characteristic regional model improves its ability to simulate the growth process of Chinese crops, and realizes the regionalization of the model. The customized operation platform via the Internet is convenient for the agrometeorological application.

CAMM1.0 constructs an online real-time operation platform to make the application and extension of the model and further development of the core module more convenient. Some of its sub-modules are constructed by multiple methods, which is more convenient for multi-model integration. The plugin method makes it easy for the model applying, developing and updating. However, the mechanism of CAMM1.0 is still far from perfect, and the next step is to work on the response of agricultural production to climate change and various meteorological disasters. CAMM1.0 is expected to improve the theoretical level of agrometeorological simulation in China and provide technical solutions for related operational services.

Key words: Chinese AgroMeteorological Model(CAMM1.0); construction; application