

农业物候动态对地表生物物理过程及气候的反馈研究进展

刘凤山^{1,2}, 陈莹², 史文娇^{1,3}, 张帅^{1,3}, 陶福禄^{1,3}, 葛全胜^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 福建农林大学 国家菌草工程技术研究中心, 福州 350002;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 地表过程对全球变化的响应和反馈是地球系统科学研究的核心课题之一, 目前的研究多关注全球变化对地表过程的影响, 而地表动态过程对地表生物物理过程及气候的反馈研究较少。系统认识地表物候动态对生物物理过程及气候的反馈对深化地球系统科学研究有着重要的意义。本文从农业物候动态的事实、农业物候动态在陆面过程模型中的参数化表达、农业物候动态对地表生物物理过程及气候的反馈等方面进行综述, 发现在气候变化和管理措施影响下, 以种植期和灌浆期为代表的农业物候期发生了显著的规律性变化; 耦合农业物候动态, 改善了模型对地表动态过程、生物物理过程和大气过程的数字化表达; 农业物候变化对地表净辐射、潜热、感热、反照率和气温、降水、环流等过程产生了影响, 并表现出以地表能量分配为主的气候反馈机理。针对农业物候动态对地表生物物理过程及气候效应的时空重要性, 需要继续开展以下方面的工作: ① 加强全球变化对地表物候动态的影响及其反馈的综合研究; ② 不同光谱波段地表反射率与农业物候动态的关系研究; ③ 农业物候动态引起的作物生理学特征变化在地表生物物理过程中的贡献; ④ 重视不同气候区物候动态对气候反馈效应的差异。

关键词: 农业物候; 地表生物物理过程; 陆面过程模型; 气候反馈

DOI: 10.11821/dlxb201707001

1 引言

陆地地表过程和气候是紧密耦合在一起的。气候强烈影响生物分布和地表特征; 地表特征变化通过改变陆—气之间能量和水分交换及大气化学组成(如 CO_2 、 CH_4 、 O_3 等)影响气候。目前全球变化对地表动态过程的影响研究较多, 而地表动态对地表生物物理过程及气候的反馈研究较少^[1]。受全球气候变化(如温度升高、降水变率增加等)和人类活动(如土地利用变化、土地管理变化等)的影响, 地表要素的变化范围和强度日益提升, 通过改变地表水热收支等过程而成为局地、区域和全球尺度气候变化的重要驱动力^[2-5]。地表动态过程对气候的长期扰动进一步影响生态系统结构和功能^[6], 并潜在威胁人类的粮食安全和生活质量。深入理解地表动态对地表生物物理过程及气候的反馈, 可望提高全

收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-03-24

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M601115); 国家自然科学基金项目(41571088, 41371002) [Foundation: China Postdoctoral Science Foundation, No.2016M601115; National Natural Science Foundation of China, No.41571088, No.41371002]

作者简介: 刘凤山(1986-), 男, 山东潍坊人, 博士, 助理研究员, 研究领域为生态治理和农业气象学。

E-mail: liufs.11b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 陶福禄(1970-), 男, 研究员, 研究方向为农业气象学。E-mail: taofl@igsrr.ac.cn

葛全胜(1963-), 男, 研究员, 主要从事全球变化研究。E-mail: geqs@igsrr.ac.cn

球变化与地表过程相互作用研究。

农业生态系统是与人类生产和生活密切相关、并受气候变化和人类活动影响最频繁的生态系统。增加农田面积和提高单位面积产量是满足人类对粮食需求增加的主要方式,两种粮食增产方式均极大地改变了农业生态系统的地表动态过程。有研究表明,通过地表反照率和粗糙度机制,土地管理变化与土地利用变化对温度的影响具有相似的强度^[7];农田具体的管理措施在一定时期内对温度、降水和大气环境产生了影响^[8-12]。考虑到未来人口增长和生活标准提高会继续推动粮食需求的持续增加,在有限的土地资源和稀缺的宜耕种农田条件下,提高单位面积产量将成为保障粮食安全的主要方式,研究农田地表动态通过地表生物物理过程对气候的调节功能和时空特征,将成为缓解气候变化和保障粮食安全的重要课题。

在植物物候对地表生物物理过程和气候的影响研究中,目前关注较多的是自然物候的贡献,尤其是全球变暖背景下森林物候与气候变化的相互作用^[13-15]。最新的研究表明,欧洲森林展叶时间提前,显著降低了全球变暖^[16]。通过定义作物的种植期、苗期、灌浆期、开花期、成熟期和收获期等关键时期,农业物候为人类主观控制下的农田生态系统提供了客观的研究依据。在生物物理过程研究中,农业物候与农业生态系统地表动态过程、地表水热平衡和作物—大气物质交换等过程具有密切联系,为农业与气候之间的交互作用提供了规律性的研究依据。例如农业物候的季节动态与归一化植被指数 (NDVI) 和叶面积指数 (LAI) 等密切相关^[17];反照率在玉米的不同生育期(发芽、开花和成熟等)具有不同的差别,并受种植日期影响^[18];陆面过程模型中对农业生态系统能量、水分和碳收支的模拟精度最终依赖于物候的模拟,模型中作物的提前发育会造成物质和能量模拟的过大误差^[19]。

通过控制陆—气界面的物质、能量和动量交换过程,农业物候信息不仅对历史气候变化研究提供了依据,而且影响未来气候变化的程度和方向。利用档案资料,Ge等^[20]重建了过去170年华东地区的春季物候指数,其变化为区域植物—物候关系和长期气候变化对生物物理系统的影响提供了重要信息^[21]。利用CanESM2模型耦合静态物候和动态物候进行模拟,发现未来生长季延长造成更高的植物生产力和生物量;动态物候造成北美春季主要受反照率降低引起的增温效应影响;同时在美国东南部,在RCP 8.5(到2100年辐射能增加 8.5 W m^{-2})条件下,将会造成温度上升和降水下降,抵消二氧化碳的施肥效应,从而强调了动态物候通过生物物理过程对气候的调节^[22]。

本文以农业物候动态为例,从农业物候动态的事实、农业物候动态在陆面过程模型中的表达、对生物物理过程的影响及其气候效应等方面进行了综合分析,并指出了未来需要细化研究的4个问题。该综述对于提高地表物候动态在陆面过程模型和大气环流模型中的认识有一定的帮助。

2 农业物候动态的事实

小麦、玉米和大豆是种植面积最广泛的作物^[23]。根据作物产量和收获面积数据,世界五大主要产粮基地和作物分别为美国中西部玉米、南美洲东南部大豆、西非玉米、中亚小麦带和东亚小麦^[24]。但是这3种作物物候变化特征的研究集中在中国、美国和欧洲等农业比较发达的地区,对于西非和中亚等地区物候的研究进展较少(表1)。这些地区的站点观测资料证明,过去半个世纪,小麦、玉米和大豆等作物的物候发生了显著的变

表 1 世界主要作物在主要分布区的物候变化特征及其驱动因素

Tab. 1 Characteristics of phenological change and controlling factors for the staple crops around the world				
分布区	作物	物候期变化	驱动因素	文献
中国	冬小麦	种植期、出苗期、休眠期分别延迟 1.5 d/decade、1.7 d/decade 和 1.5 d/decade；春季发芽、开花和成熟分别提前 1.1 d/decade、2.7 d/decade 和 1.4 d/decade。	温度增加缩减生长期、品种积温增加延长生殖生长期、日照长度降低延长营养生长期。	[29-31]
中国	夏玉米	36.6%站点成熟期延长，41.1%站点生育期延长；生殖生长期延长 2.4~3.7 d/decade。	平均温度增加降低生育期，品种更新延迟开花期和成熟期；适应温度增加的种植期提前策略。	[32-34]
中国	玉米	种植、拔节和开花期提前，成熟期推迟，营养生长期缩短，生殖生长期和生育期延长。	全球变暖加快玉米发育和缩短生长期；降水减少一定程度缩短生长期；品种更新延长生长期。	[34]
美国	玉米	种植期提前 4.2 d/decade；种植—收获期增长 5 d/decade；成熟—收割期变短 3 d/decade。	生殖生长期有效积温需求增加 14%；生长期更长的玉米品种；灌溉增加和施肥增加与品种更新的交互作用。	[25]
美国	大豆	种植期提前 4.9 d/decade；收割期提前 4.9 d/decade。	气温升高造成种植期提前，并有助于维持成熟期的稳定；品种更新造成更长的生殖生长期。	[25]
欧洲中部和北部	禾本科(小麦、燕麦和玉米)	种植期提前 1~3 周；开花期和成熟期提前 1~3 周。	根据超过 1500 条站点记录设定模型，燕麦和小麦种植期—开花期发育依赖温度和昼长，玉米依赖温度；3 种植物的开花期—成熟期发育仅依赖温度。	[26]
西班牙	禾谷类作物(燕麦、小麦、黑麦、大麦和玉米)	冬小麦春季的物候期提前；小麦和燕麦旗叶鞘肿提前 30 d/decade；开花期提前 10 d/decade。	物候开始之前的温度变化是物候趋势的主要因素；人类干预降低物候变化对产量的影响。	[27]
德国	玉米	播种期、出苗期、开始收获期分别提前 1.7 d/decade、3.3 d/decade 和 1.3 d/decade；播种—出苗间隔减小 1.6 d/decade；出苗—收获增加 2.1 d/decade。	春季温度增加使提前播种成为可能；5 月份强烈增温加速了植物发育，对出苗期影响最严重。	[28]
哈萨克斯坦	小麦	NDVI 峰值提前 4~7 d	积温增加；苏联解体的影响。	[38]

化。如在 1981-2005 年期间，美国玉米和大豆的种植期分别提前了 10 d 和 12 d^[25]；欧洲小麦和玉米的种植时间提前近 3 周^[26-28]；中国农业气象站点的农业物候观测资料，其统计规律普遍达到显著水平^[29-34]。农业物候较为一致的变化规律为种植时间的提前和灌浆期的延长^[25-26, 33]。灌浆期延长增加了有机物积累的时间；提前种植有助于延长作物生长期和生育期，提高 LAI 和干物质固定过程。虽然不同地区物候的变化幅度存在差异，但是这种地区差异性并不能改变农业物候变化存在的事实，引起了人们探究其变化机理的强烈兴趣。

农业物候变化的原因主要包括两方面：以温度升高为代表的全球气候变化和以品种更新为代表的人为管理措施^[35-36]。温度的升高致使作物在春季的种植时间提前成为可能，也成为秋季收获时间延迟的必要条件。但是，温度的升高加快了作物的发育速度和有效积温的积累过程，在作物品种不变条件下，作物的成熟时间和中间的各个生育时期将会提前，成为产量降低的潜在威胁。通过选择生育期长和积温需求大的作物品种，搭配合理的施肥、灌溉、种植密度等管理措施，更加充分利用增加的农业气候资源^[37]，有效延长了作物生育期，尤其以提高产量为目的对生殖生长期的延长成为农业物候的重要特征。在人为干预较少的地区（如哈萨克斯坦^[38]），温度升高将主导农业物候的变化；重视

粮食生产的地区,强烈的人为干预活动抵消温度升高的影响,直至反转物候期变化实现对特定生育阶段(如生殖生长期)的延长和产量的增加。中国冬小麦和夏玉米物候的变化同时受到轮作系统的影响,即冬小麦只能在秋末夏玉米收获后才能种植,夏玉米也只能在春末冬小麦收获后方能播种,作物的物候期受到上一茬作物的影响。

3 农业物候动态监测及其在陆面过程模型中的表达

农业物候动态的监测方法主要有地面观测法、遥感监测法和模型模拟法^[39]。地面观测方法是对个体和小区域范围的作物生长节律利用人工观察进行记录的方法,具有时间精度高、易于操作等优点,是物候研究中最基本的方法;主要问题是提供的信息具有时空局限性^[40]。遥感监测方法主要是根据任何目标物都具有发射、反射和吸收电磁波的性质,利用传感器对地物波谱信息进行记录,具有监测尺度广、反映作物群体特征等优点;该方法需要结合地面观测数据对其加以本地化,并存在一定的误差^[41-42]。模型模拟法主要是指在个体和种群水平上通过研究植物生长节律的生理发生机制,建立物候模型来研究植物物候的时空变化;农业物候的参数化和数字化为研究物候动态与环境的作用和反作用提供了便利,有助于从机理上反映作物的生长过程;存在的问题是模型在模拟地表物候动态方面还有较大的误差^[43]。

受外在环境因素影响造成的数据和过程的不确定性,地面观测法和遥感监测法获取的记录很难验证物候在生物物理过程及其气候效应中的作用。模型模拟法是陆面过程和气候变化研究中常用的方法,对作物生长的数字化表达具有明显的优势^[19, 44]:在空间尺度上,模型模拟法可以符合大气研究中从小气候、局地气候、区域气候到全球气候等各种尺度,提供研究范围内地表与大气的物质和能量通量以及研究范围外通过侧向交换提供的物质和能量通量;时间尺度上,不仅可以分析历史物候变化的贡献,更为未来作物种植的方向及其气候变化的走势和调控提供指导依据。

陆面过程模型中表达农业物候动态主要通过两种方法:环境控制方案和人为设定方案。环境控制方案是根据物候与环境变量的关系(尤其是气象环境),当环境变量到达一定程度,则某一特定物候期就会发生。有效积温和日长是控制作物发育的关键因子,当这2个参数达到设定的临界值,则意味着某个物候期的发生。在CLM3.5-CornSoy模型中,有效积温控制了玉米和大豆从出苗—展叶—灌浆等时期的发展,收获则由日长控制^[19];冬小麦的发育受制于温度、春化作用和光周期^[45];SiBcrop模型中,作物发芽和后续生育期的进展根据有效积温和种植日期设定^[46-47]。人为设定方案是指某些物候期的发生根据模型开发者和使用者的实际情景进行人为设定,不随外界环境条件变化而变化。如模型中进入特定物候期的有效积温阈值是不同的,通常根据实际情况或研究需要进行人为设定^[19];对于最适温度和极端温度等有效积温的计算依据、农业物候期出现的判定依据等参数,都具有固定的属性和数值,但受到人为因素的控制并具有一定的地域性^[48]。

现有的模拟农业物候和生长的模型通常具有详细的物候学特征和生理学过程算法。如CROPGRO和CERES作物模型,具有详细的生理学和物候学特征,在气象、土壤和管理数据驱动下,可估算谷类和豆科等作物的光合作用、干物质分配和水热通量等参数^[49]。Gervois等^[44]和de Noblet-Ducoudr'e等^[50]在全球动态植被模型(ORCHIDEE)中耦合作物模型(STICS),从而提高玉米、小麦和大豆等作物的生长过程及其对碳和水分交换的模拟精度。这些作物模型的开发为物候的数字化表达及其对环境的定量影响提供了便利。

4 农业物候动态对地表生物物理过程的影响

地表物候模型的引入对陆面过程的影响是多方面的。首先,物候参数是作物生长最基础的表达。作物模型的耦合表达了作物的生长和发育过程,主要包括物候学(阶段发育)和形态学(作物生长和器官)发育。物候学发展包括生育阶段的变化,同时改变生物量的分配格局;形态学发展涉及作物生命周期中各种器官发育的开始和结束,对形态学的模拟试图提供对叶片、分蘖和籽粒等的信息^[51]。其次,地表物候动态引起地表过程的变化。模型根据季节发育阶段把光合固碳分配到作物不同部位^[47],如分配到根部改变土壤水分供给过程;分配到叶片改变LAI和冠层结构;分配到茎部改变株高;生殖生长期的发生和果实的出现,极大地限制其他器官的生长和地表特征的变化。不同物候期对光合物质的分配决定了地表LAI及作物结构的动态,成为地表形态学过程的重要控制因素。再次,生理特征同样受到物候的影响。尤其以冠层导度和Rubisco活性,是模型中光合作用、呼吸作用、蒸散发过程等的主要控制机制^[46, 48]。因此,农业物候动态对形态学和生理学等参数都具有显著的控制作用,为陆面过程模型中LAI、地表反照率、辐射收支、水分移动等过程的模拟提供动态且精确的计算依据。

地表生物物理过程响应农业物候变化具有以下基本特征。在物候早期,地上作物叶片覆盖面积少,地表生物物理过程各分量如地表反照率、净辐射、潜热通量等受土壤因素的贡献较大,但是作物生长速度快,作物的贡献比重迅速增加;作物高度和冠层结构简单,地表粗糙度和零平面位移等变量较低,动量交换过程不活跃。物候盛期,作物高度和冠层发育完整,地表粗糙度、零平面位移、净辐射和潜热通量最高,地表反照率、感热通量和土壤热通量最低,并具有相对的稳定性。物候末期,作物生理过程下降明显,主要影响地表能量分配过程,造成净辐射主要用于感热分配。收获期对作物的收割和移除,对地表特征和生物物理过程的改变是急速的,造成地表粗糙度、零平面位移和地表反照率等变量显著降低,作物残茬对土壤水分和蒸发有一定的保护作用。对山东省位山站冬小麦地表水热通量的研究表明,净辐射与潜热通量在冬小麦不同生长期表现为:越冬期<拔节抽穗期<灌浆成熟期;感热通量表现为:拔节抽穗期<灌浆成熟期<越冬期^[52]。冬小麦越冬期感热最大,潜热最小,体现了该时期冬小麦净辐射主要分配到感热,灌浆成熟期比拔节抽穗期更加复杂的冠层结构和LAI,有利于蒸腾作用和对太阳辐射的捕获。

在站点和区域尺度陆面过程研究中,众多的作物模型或农业物候算法被耦合进陆面过程模式中。根据收集的资料(表2),共有7种作物生长模型、5种农业物候算法被耦合进9种陆面过程模型中,用于表达农业生态系统的地表动态。改进后的陆面过程模型,实现了对多种农业种植系统的模拟(单作、轮作、休耕等);通过敏感性分析和统计分析方法,证明了农业物候动态对生物物理过程的重要性;提高对农业物候和生长过程的表达,降低对LAI、碳通量、地表水热通量及冠层截流等分量的模拟误差。农业物候算法的耦合,增强了模型在农业生态系统研究的通用性,对不同地区农田地表上的水热平衡具有更强的表达能力。如SiBcrop模型同时提高了美国小麦、大豆、玉米和中国的冬小麦一夏玉米轮作系统的模拟精度^[46-47]。

地表物候动态的耦合为生物物理过程提供了更多的细节,使得利用陆面过程模型分析历史物候期变化对地表水热平衡的影响成为可能。美国玉米种植期提前,造成6月份的潜热增加,感热减少;成熟期至收割期间隔时间的缩短增强了10月份的净辐射^[25]。在Agro-IBIS中延长物候期,发现物候期延长前后对总体生物物理过程的影响不大;但在

表2 陆面过程模型耦合作物模型对改进地表水热平衡理解的贡献

Tab. 2 Contribution of land surface and crop model coupling to understanding surface energy and water balance				
模型 ^a	研究对象	结果	原因	文献
Agro-IBIS 作物动态 生长模型	美国玉米和大豆	农业物候变化改变了地表水热平衡，种植期提前造成6月份潜热增加，感热降低；成熟期—收割期降低增加10月份净辐射。	利用有效积温实现物候期的变化。	[25]
BATS CERES3.0	中国农田	冠层截流、作物蒸腾、土壤蒸发、潜热和感热通量都具有显著的影响；降低LAI和表层土壤水分系统误差，提高地表通量模拟精度。	增加了作物生长和发育过程。	[51]
BATS CERES- Maize	美国玉米	LAI从5变为1，潜热变化30%~45%，感热变化20%~35%；蒸发和蒸腾对潜热贡献受LAI强烈影响。	基于生理学的物候期和有 机质积累及分配过程。	[53]
CLASS 碳氮模型	加拿大农田	提高了NEP模拟与实测数据的决定系数；有机质分配过程更加合理。	添加了农业物候方案和农 田管理措施的查找表	[54]
CLM CornSoy	美国大豆和玉米	碳通量的模拟与物候模拟有紧密大量联系；对LAI、能量和碳通量的模拟与实测值的相关性更好。	利用有效积温精确表达出 苗—灌浆期和灌浆期—收 割期；解除对LAI最大值的 限制。	[19]
CLM农业 物候模型	北美洲玉米、 大豆和谷类	更加真实的作物LAI；更清晰的展示春季种植和秋季收割；在低LAI期更好的影响潜热通量；展示了物候的重要性。	利用温度驱动农业物候和 碳分配的季节变化。	[55]
ISAM 作物动态 生长模型	美国玉米—大豆 轮作系统 2001-2004年	与静态作物比较，LAI季节变化、冠层高度、根深、土壤水分吸收和蒸腾、碳通量、水热通量、对生长季潜热和碳通量提高较多，对感热影响较小。	作物动态包含了考虑了 光、水和养分胁迫；LAI 季节动态模拟的提升；根 系分布过程更好的模拟土 壤水分吸收和蒸腾。	[56]
JULES InfoCrop	印度农田	蒸散发模拟误差，湿润季节从7.5~24.4 mm month ⁻¹ 下降到5.4~11.6 mm month ⁻¹ ，干旱季节从10~17 mm month ⁻¹ 下降到2.2~3.4 mm month ⁻¹ 。	添加了作物生长的模型。	[48]
JULES SUCROS	欧洲农田	显著提高农田模拟与实测数据的相关性；更好的捕获欧洲作物生长状态的时空特征；表明作物结构和物候对陆—气交互作用的重要性。	作物动态生长；包含果实 器官、从种植到收割的物 候周期等特征的农业系统 特征过程。	[57]
LPJ DGVMs	全球农田	温带禾本科种植日期、作物冠层季节发育更好；产量和碳积累过程更好；农业扩张造成蒸腾降低5%，蒸发增加40%	物候的具体参数化，并与 叶面积发育结合起来。	[58]
ORCHI - DEE STICS	法国和美国 冬小麦和玉米	对不同气候区中的蒸散发、生物量积累过程模拟更好。	增加了对叶面积、养分胁 迫、植物高度的模拟；改 善了有机质分配、水分胁 迫、羧化作用等过程。	[44]
SiB2农业 物候模型	美国小麦、 大豆、玉米	提高LAI和碳通量；更好的模拟生长季的开始和结束、收割、轮作系统的季节动态。	针对特定作物开发出的物 候方案和对应的生理学参 数，取代旧的基于NDVI 计算通量的算法。	[46]
SiB2农业 物候模型	华北平原冬小麦 —夏玉米轮作	精确模拟LAI、碳通量、潜热通量、土壤水分含量和产量。	针对特定作物开发出的物 候方案和对应的生理学参 数，取代旧的基于NDVI 计算通量的算法。	[47]

注：^a前面为陆面过程模型，后面为作物模型。

NDVI提高0.1条件下，潜热、感热和土壤热通量的最大变化幅度分别达到45 W m⁻²、-20 W m⁻²和-25 W m⁻²^[10]，这种现象是由于物候期的变化时间在总生长期的占比偏低，地

表生物物理过程的波动集中在物候期发生变化的时间。物候期变化对地表反照率也有一定的影响, 农业物候期延长增加 LAI 和冠层高度, 通过叶冠内对短波辐射的多重反射降低反照率^[59], 作物收割造成土壤裸露出来对反照率的影响受土壤反照率的影响, 土壤反照率比冠层反照率低(高), 则地表反照率下降(上升)^[60]。

陆面过程模型耦合作物模型研究物候动态对地表能量平衡的影响成为地表动态过程对气候反馈的重要内容。但是, 已开展的研究集中在地表形态学特征变化(如 LAI、NDVI)对地表反照率和水热平衡的影响, 忽略了生理学特征变化对冠层导度及其控制下的能量分配的影响, 更缺少对气象数据和物候变化交互作用的研究。气候变化背景下, 作物生理特征的变化是提高特定物候期光合效率和维持产量的重要保证^[61-65], 尤其在生殖生长期对气孔与大气间水分和 CO₂ 交换的影响, 必将改变冠层导度和潜热分配比例, 并受到气象条件的制约。系统研究特定气象条件下作物形态学和生理学变化对生物物理过程的影响, 有助于正确评估农业物候动态在气候变化中的贡献。

5 农业物候动态通过调节地表生物物理过程对气候的反馈

在大气环流模型中研究气候对农业物候的影响, 通常借助温度—物候响应函数^[66], 如 GDD_{10, 30}, 提取物候期中位于 10~30 °C 区间温度并减去 10 °C 后得到的有效积温作为物候的预测指标^[67]; APSIM 模型利用 0~44 °C 区间温度—物候的多重线性函数表达玉米物候期动态^[68]; Parent 等建立了酶促反应公式表达高、中和低纬度地区各种玉米基因型对温度的反应^[69]等。虽然不同响应函数和模型结构对农业物候的数字化结果存在差异^[66, 70], 但是气候变化对农业物候的影响引起了学术界的重视, 成为作物适应和产量预测的重要兴趣点。

通过耦合农业物候模型, 提高了陆面过程模型和大气环流模型中陆—气界面物质和能量交换过程的模拟精度, 增强了对农业生态系统气候效应的认识和理解^[71]。例如, 通过植被蒸腾作用, 春季作物提前生长对东亚地区的温度升高具有强烈的抑制作用^[72]。利用站点和局地尺度数据^[7]及模型模拟结果^[10], 温带地区农业物候期延长的生物物理过程通常表现出蒸腾—冷却效应超过反照率—升温效应, 造成物候期延长总体以降温为主。通过对比华北平原单作和轮作系统, 6 月份是轮作收获期和单作生育盛期, 两种农业生态系统的差异造成了潜热通量、气温、降水和区域环流的显著变化^[8]。物候期提前改变了作物蒸腾作用和土壤水分循环等过程, 通过向大气供给更多水分影响龙卷风年际变化^[73]; 通过径流过程成为洪水的影响因子^[74]。因此, 更多的研究结果表明地表能量分配是农业物候动态的主要影响过程, 是温度、水分、环流等过程发生变化的主要机理。

在大气环流模型中耦合农业物候模型, 不仅为大气边界层中水热通量交换提供了更准确的数据, 而且为研究气候与作物间的交互作用提供了可能。气候在季节、年际和年代际尺度的变化影响农业地表动态过程, 改变的地表动态经由边界层特征对大气施加影响, 这种交互式的气候—物候模型更加真实的反应气候与农田生态系统的相互关系^[56, 71]。ECHAM5 和 JSBACH 耦合模型模拟结果表明, 很多地区物候超过土壤水分对降水的贡献, 与降水具有很高的结合强度^[75]。Osborne 等^[76]把 GLAM 中一年生作物模型加入到 HadAM3 气候模型中的 MOSES 陆面过程方案中, 该耦合模型中大气条件和作物生长二者之间交互作用, 作物通过影响低层大气条件影响气候, 改变的气候同时影响作物的生长和发育; 该模型真实的模拟了气候对一年生作物季节生长的影响, 再现了降雨和作物产量之间的关系。

6 展望

本文的结构框架图如图1所示。在全球气候变化和人为管理措施影响下,农业物候期发生了显著的变化。种植期和灌浆期响应春季温度升高而提前,生殖生长期迎合产量增加而延长,其他物候期也发生了相应的变化。农业物候期的波动幅度可以达到1个月,从而对区域范围内的地表特征和生物物理过程及其对气候的反馈产生了不可忽略的影响。在陆面过程模型和大气环流模型中耦合作物模型是研究物候变化

对地表水热平衡和陆—气边界层特征影响的重要手段。作物模型中详细的生长和发育机理算法提供了农业物候学和生理学过程的准确动态,改善了陆面过程模型和大气环流模型中对地表动态过程的表达,进而增强了对地表反照率、净辐射、潜热、感热等生物物理过程和气温、降水、环流等大气过程的模拟,并实现了地表物候动态对生物物理过程影响和物候与气候相互作用关系的定量研究。

温带地区开展的研究表明,农业物候动态在区域范围内对特定时期的地表水热平衡产生了显著影响,地表能量分配机制超过反照率机制,主导了物候变化对气候的反馈效应。未来农田地区气候变化需要重视农业生态系统动态及其通过地表生物物理途径的气候效应,并需要继续开展以下方面的工作:

(1) 通过完善耦合作物模型的陆面过程模型,加强全球变化对地表农业物候动态的影响及其反馈综合研究。由于农业生态系统的复杂性,现有的陆面过程模型对农业生态系统的模拟还远远不足,需要结合地表物候和陆—气水热通量的观测资料,发展完善耦合作物模型的陆面过程模型。

(2) 受近红外反射率与LAI成正比关系的影响,地表反照率与LAI在野外观测中经常表现出正比关系^[59],但是模型模拟结果极少呈现或分析这种关系。更多地关注不同光谱波段地表反射率与作物动态的关系有助于提高模型参数的优化,更准确地刻画物候变化前后的辐射收支动态。

(3) 物候变化不仅仅改变了作物形态学特征,更引起了其生理学特征的变化^[61-65]。由于形态学数据的易获取性和生理学参数的难量化,造成模型的研究偏向于形态学的影响规律。但是生理学特征是控制地表能量分配的主要机制,过去几十年新的作物品种引起的生理学特征变化及其对地表水热平衡和气候效应的影响是一个重要的机理探讨过程,并对日和月尺度的生物物理过程有直接的贡献。

(4) 需要重视不同气候区农业物候变化对气候反馈效应的差异。如有冰雪覆盖的高纬度地区,种植期提前对地表反照率和能量分配的影响,地表反照率机制是否超过地表能量分配机制,从而造成该区域的温度升高?在干旱和湿润地区农业物候延长的气候效应有何差别?基于它们的表现,应该采取不同的物候管理策略应对或缓解区域气候变暖。

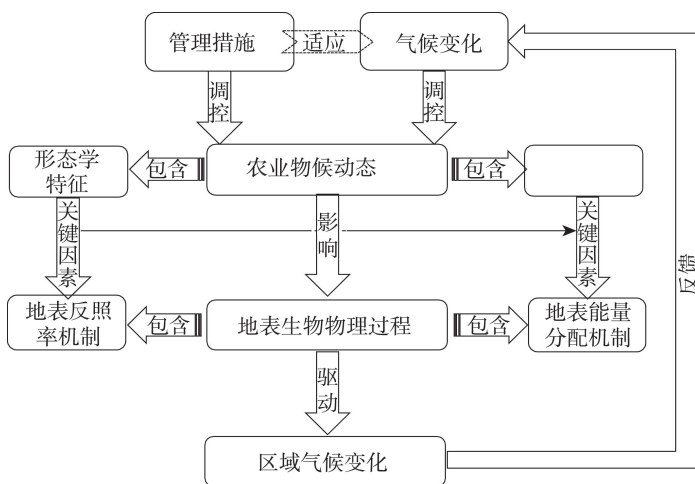


图1 农业物候动态对地表生物物理过程的影响及气候反馈示意图

Fig. 1 Flowchart of the influences of agricultural phenology dynamic on biophysical process and climate feedback

参考文献(References)

- [1] Bright R M, Zhao K, Jackson R B, et al. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3246-3266.
- [2] Pielke R A, Adegoke J, Beltran-Przekurat A, et al. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2007, 59(3): 587-601.
- [3] Liu J Y, Shao Q Q, Yan X D, et al. The climatic impacts of land use and land cover change compared among countries. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 889-903.
- [4] Liu F S, Tao F L, Liu J Y, et al. Effects of land use/cover change on land surface energy partitioning and climate in Northeast China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 123(1/2): 141-150.
- [5] Kowalczyk E A, Stevens L E, Law R M, et al. The impact of changing the land surface scheme in ACCESS (v1.0/1.1) on the surface climatology. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(8): 2771-2791.
- [6] McGuire A D, Chapin F S, Walsh J E, et al. Integrated regional changes in arctic climate feedbacks: Implications for the global climate system. *Annual Review of Environment and Resources*, 2006, 31: 61-91.
- [7] Luyssaert S, Jammet M, Stoy P C, et al. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 389-393.
- [8] Jeong S J, Ho C H, Piao S, et al. Effects of double cropping on summer climate of the North China Plain and neighbouring regions. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 615-619.
- [9] Mueller N D, Butler E E, McKinnon K A, et al. Cooling of US Midwest summer temperature extremes from cropland intensification. *Nature Climate Change*, 2016, 6(3): 317-324.
- [10] Bagley J E, Miller J, Bernacchi C J. Biophysical impacts of climate-smart agriculture in the Midwest United States. *Plant Cell and Environment*, 2015, 38(9): 1913-1930.
- [11] Zhang X, Tang Q, Zheng J, et al. Warming/cooling effects of cropland greenness changes during 1982-2006 in the North China Plain. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024038.
- [12] Lobell D B, Bala G, Duffy P B. Biogeophysical impacts of cropland management changes on climate. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6): L06708. doi: 10.1029/2005GL025492.
- [13] Korner C, Basler D. Phenology under global warming. *Science*, 2010, 327(5972): 1461-1462.
- [14] Penuelas J, Rutishauser T, Filella I. Phenology feedbacks on climate change. *Science*, 2009, 324(5929): 887-888.
- [15] Dai Junhu, Wang Huanjiong, Ge Quansheng. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 593-601. [戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近50年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. *地理学报*, 2013, 68(5): 593-601.]
- [16] Fu Y S H, Zhao H F, Piao S L, et al. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 2015, 526(7571): 104-107.
- [17] Guillevic P, Koster R D, Suarez M J, et al. Influence of the interannual variability of vegetation on the surface energy balance: A global sensitivity study. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3(6): 617-629.
- [18] Oguntunde P G, van de Giesen N. Crop growth and development effects on surface albedo for maize and cowpea fields in Ghana, West Africa. *International Journal of Biometeorology*, 2004, 49(2): 106-112.
- [19] Chen M, Griffis T J, Baker J, et al. Simulating crop phenology in the Community Land Model and its impact on energy and carbon fluxes. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2015, 120(2): 310-325.
- [20] Ge Q S, Wang H J, Zheng J Y, et al. A 170 year spring phenology index of plants in eastern China. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2014, 119(3): 301-311.
- [21] Zheng J Y, Liu Y, Ge Q S, et al. Spring phenodate records derived from historical documents and reconstruction on temperature change in Central China during 1850-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 696-704. [郑景云, 刘洋, 葛全胜, 等. 华中地区历史物候记录与1850-2008年的气温变化重建. *地理学报*, 2015, 70(5): 696-704.]
- [22] Garnaoud C, Sushama L. Biosphere-climate interactions in a changing climate over North America. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, 120(3): 1091-1108.
- [23] Leff B, Ramankutty N, Foley J A. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1): GB1009. doi: 10.1029/2003GB002108.
- [24] Bagley J E, Desai A R, Dirmeyer P A, et al. Effects of land cover change on moisture availability and potential crop yield in the world's breadbaskets. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 014009. doi: 10.1088/1748-9326/7/1/014009.
- [25] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the US Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882-894.

- [26] Olesen J E, Borgeisen C D, Elsgaard L, et al. Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry Analysis Control Exposure and Risk Assessment*, 2012, 29(10): 1527-1542.
- [27] Oteros J, Garcia-Mozo H, Botey R, et al. Variations in cereal crop phenology in Spain over the last twenty-six years (1986-2012). *Climatic Change*, 2015, 130(4): 545-558.
- [28] Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 69-78.
- [29] Xiao D P, Tao F L, Liu Y J, et al. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981-2009. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(2): 275-285.
- [30] Xiao D P, Moiwu J P, Tao F L, et al. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(7): 1191-1202.
- [31] Tao F L, Zhang S A, Zhang Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 201-212.
- [32] Xiao D P, Qi Y Q, Shen Y J, et al. Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(3/4): 653-661.
- [33] Tao F L, Zhang S, Zhang Z, et al. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3686-3699.
- [34] Wang Z, Chen J, Li Y, et al. Effects of climate change and cultivar on summer maize phenology. *International Journal of Plant Production*, 2016, 10(4): 509-525.
- [35] Eyshi Rezaei E, Siebert S, Ewert F. Climate and management interaction cause diverse crop phenology trends. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 55-70.
- [36] Mirschel W, Wenkel K O, Schultz A, et al. Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. *European Journal of Agronomy*, 2005, 23(2): 123-135.
- [37] Zhou G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2015, 38(1): 80-94. [周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望. *气象与环境科学*, 2015, 38(1): 80-94.]
- [38] de Beurs K M, Henebry G M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 497-509.
- [39] Fan Deqin, Zhao Xuesheng, Zhu Wenquan, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 304-319. [范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 304-319.]
- [40] Schwartz M D, Ahas R, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 343-351.
- [41] Ge Quansheng, Dai Junhu, Zheng Jingyun. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3): 310-316. [葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战. *中国科学院院刊*, 2010, 25(3): 310-316.]
- [42] Chen Xiaoqiu, Wang Linhai. Progress in remote sensing phenological research. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 33-40. [陈效述, 王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.]
- [43] Morin X, Lechowicz M J, Augspurger C, et al. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 961-975.
- [44] Gervois S, de Noblet-Ducoudre N, Viovy N, et al. Including croplands in a global biosphere model: Methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions*, 2004, 18: GB1009. doi: 10.1029/2003GB002108.
- [45] Wang E, Engel T. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems*, 1998, 58(1): 1-24.
- [46] Lokupitiya E, Denning S, Paustian K, et al. Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands. *Biogeosciences*, 2009, 6(6): 969-986.
- [47] Lei H, Yang D, Lokupitiya E, et al. Coupling land surface and crop growth models for predicting evapotranspiration and carbon exchange in wheat-maize rotation croplands. *Biogeosciences*, 2010, 7(10): 3363-3375.
- [48] Tsarouchi G M, Buytaert W, Mijic A. Coupling a land-surface model with a crop growth model to improve ET flux estimations in the Upper Ganges Basin, India. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(10): 4223-4238.
- [49] Shi Wenjiao, Tao Fulu, Zhang Zhao. Identifying contributions of climate change to crop yields based on statistical models: A review. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1213-1222. [史文娇, 陶福禄, 张朝. 基于统计模型识别气候

变化对农业产量贡献的研究进展. 地理学报, 2012, 67(9): 1213-1222.]

- [50] de Noblet-Ducoudre N, Gervois S, Ciais P, et al. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, 2004, 24(6/7): 397-407.
- [51] Chen F, Xie Z. Effects of crop growth and development on land surface fluxes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4): 927-944.
- [52] Yuan Zaijuan, Shen Yanjun, Chu Yingmin, et al. Characteristics and simulation of heat and CO₂ fluxes over a typical cropland during the winter wheat growing in the North China Plain. *Environmental Science*, 2010, 31(1): 41-48. [袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟. *环境科学*, 2010, 31(1): 41-48.]
- [53] Tsvetinskaya E A, Mearns L O, Easterling W E. Investigating the effect of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part I: Simulation of surface fluxes over the growing season. *Journal of Climate*, 2001, 14(5): 692-709.
- [54] Chang K H, Warland J S, Bartlett P A, et al. A simple crop phenology algorithm in the land surface model CN-CLASS. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 297-308.
- [55] Levis S, Bonan G B, Kluzek E, et al. Interactive crop management in the Community Earth System Model (CESM1): Seasonal influences on land-atmosphere fluxes. *Journal of Climate*, 2012, 25(14): 4839-4859.
- [56] Song Y, Jain A K, McIsaac G F. Implementation of dynamic crop growth processes into a land surface model: Evaluation of energy, water and carbon fluxes under corn and soybean rotation. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8201-8201.
- [57] Van den Hoof C, Hanert E, Vidale P L. Simulating dynamic crop growth with an adapted land surface model-JULES-SUCROS: Model development and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 137-153.
- [58] Bondeau A, Smith P C, Zaehle S, et al. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 2007, 13(3): 679-706.
- [59] Hammerle A, Haslwanter A, Tappeiner U, et al. Leaf area controls on energy partitioning of a temperate mountain grassland. *Biogeosciences*, 2008, 5(2): 421-431.
- [60] Erb K H, Luyssaert S, Meyfroidt P, et al. Land management: data availability and process understanding for global change studies. *Global Change Biology*, 2016, 23(2): 512-533.
- [61] Xiao Y G, Qian Z G, Wu K, et al. Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. *Crop Science*, 2012, 52(1): 44-56.
- [62] Koester R P, Nohl B M, Diers B W, et al. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean breeding? An examination of historical soybean cultivars. *Plant Cell and Environment*, 2016, 39(5): 1058-1067.
- [63] Balota M, William A P, Evett S R, et al. Morphological and physiological traits associated with canopy temperature depression in three closely related wheat lines. *Crop Science*, 2008, 48(5): 1897-1910.
- [64] Aisawi K A B, Reynolds M P, Singh R P, et al. The physiological basis of the genetic progress in yield potential of CIMMYT spring wheat cultivars from 1966 to 2009. *Crop Science*, 2015, 55(4): 1749-1764.
- [65] Sharma K D, Pannu R K. Physiological response of wheat (*Triticum durum* L.) to limited irrigation. *Journal of Agrometeorology*, 2008, 10(2): 113-117.
- [66] Kumudini S, Andrade F H, Boote K J, et al. Predicting maize phenology: Intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal*, 2014, 106(6): 2087-2097.
- [67] Gilmore E C, Rogers J S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, 1958, 50(10): 611-615.
- [68] Wilson D R, Muchow R C, Murgatroyd C J. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research*, 1995, 43(1): 1-18.
- [69] Parent B, Tardieu F. Temperature responses of development processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytologist*, 2012, 194(3): 760-774.
- [70] Asseng S, Ewert F, Rosenzweig C, et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 827-832.
- [71] Betts R A. Integrated approaches to climate-crop modelling: Needs and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2049-2065.
- [72] Jeong S J, Ho C H, Jeong J H. Increase in vegetation greenness and decrease in springtime warming over east Asia. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2): L02710. doi: 10.1029/2008GL036583.

- [73] Raddatz R L, Cummine J D. Inter-annual variability of moisture flux from the prairie agro-ecosystem: Impact of crop phenology on the seasonal pattern of Tornado Days. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 106(2): 283-295.
- [74] Jackson B M, Wheeler H S, McIntyre N R, et al. The impact of upland land management on flooding: Insights from a multiscale experimental and modelling programme. *Journal of Flood Risk Management*, 2008, 1(2): 71-80.
- [75] Bali M, Collins D. Contribution of phenology and soil moisture to atmospheric variability in ECHAM5/JSBACH model. *Climate Dynamics*, 2015, 45(9): 2329-2336.
- [76] Osborne T M, Lawrence D M, Challinor A J, et al. Development and assessment of a coupled crop-climate model. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 169-183.

Influences of agricultural phenology dynamics on land surface biophysical processes and climate feedback: A review

LIU Fengshan^{1,2}, CHEN Ying², SHI Wenjiao^{1,3}, ZHANG Shuai^{1,3},
TAO Fulu^{1,3}, GE Quansheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The response and feedback of land surface processes to climate change constitute a research priority in the field of geosciences. Previous studies have focused on the impacts of global climate change on land surface processes; however, the feedback of land surface processes to climate change remains unknown. It has become increasingly meaningful under the framework of Earth system science to understand systematically the relationships between agricultural phenology dynamics and biophysical processes, as well as their feedback to climate change. This study summarized research progress in this field, including agricultural phenology change, parameterization of phenology dynamics in land surface process models, and the influence of agricultural phenology dynamics on biophysical processes, as well as its feedback to climate. The results showed that the agricultural phenophase, represented by paramount phenological phases such as sowing, flowering, and maturity, has shifted significantly because of the impacts of climate change and agronomic management. Digital expressions of dynamic land surface processes, as well as biophysical and atmospheric processes, have been improved by coupling phenology dynamics in land surface models. Agricultural phenology dynamics influence net radiation, latent heat, sensible heat, the albedo, temperature, precipitation, and circulation, thus, play an important role in surface energy partitioning and climate feedback. Considering the importance of agricultural phenology dynamics in land surface biophysical processes and climate feedback, the following research priorities have been identified: (1) interactions between climate change and land surface phenology dynamics, (2) relationships between agricultural phenology dynamics and different land surface reflectivity spectra, (3) contributions of changes in crop physiological characteristics to land surface biophysical processes, and (4) regional differences of climate feedback from phenology dynamics in different climatic zones. This review will be helpful in accelerating the understanding of the role of agricultural phenology dynamics in land surface processes and climate feedback.

Keywords: agricultural phenology; land surface biophysical processes; land surface process model; climate feedback