

全球变化下作物物候研究进展

刘玉洁^{1,2}, 葛全胜^{1,2}, 戴君虎^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 作物物候是农作物重要的植物属性, 不仅反映作物的生长发育状况, 其变化也影响作物产量, 是一种能够指示气候变化的综合响应指标。以气温升高为主要标志的全球气候变化对作物物候产生了重要影响, 开展全球气候变化下作物物候变化特征及其影响机制研究对于揭示全球变化对作物生长发育过程影响及其产量形成机制具有重要的理论意义和实践价值。目前, 作物物候变化及其影响因素是国内外研究的焦点和热点问题, 前人已开展了大量而卓有成效的研究工作。本文侧重介绍全球气候变化下作物物候变化的主要研究进展, 包括作物物候变化的驱动因子及其影响机制和作物物候主要研究方法, 并探讨未来研究仍亟待解决的关键科学问题, 以期为深入认识全球气候变化对农业物候的影响机理以及指导区域农业生产实践提供理论依据。

关键词: 全球变化; 作物物候; 驱动因子; 响应; 研究进展

DOI: 10.11821/dlxb202001002

1 引言

物候学 (Phenology) 是研究自然界的植物 (包括农作物)、动物和环境条件 (气候、水文和土壤条件) 的周期变化及其相互关系的科学^[1-2]。动植物如何响应过去以及将来的气候变化是气候变化研究的焦点之一^[3]。由于作物物候变化不仅能够反映作物的生长发育状况, 还能直接影响作物的产量形成过程和产量高低^[4-7], 作物物候变化及其影响机制研究对于应对气候变化和指导区域农业生产有重要意义。在当前全球变化背景下, 作物物候对气候变化的响应及其模拟已成为国际上研究的热点^[8-9]。国内外学者在这方面开展了大量研究工作, 取得了丰富成果。其中, 许多研究结果表明, 温度升高加快了作物生长发育速度, 导致物候期提前, 生长季缩短^[4-5, 9-12]。降水^[13-14]、光照^[15-16]等气候因子的变化同样对作物物候产生了重要影响。但多数研究主要集中在单一影响因子尤其是温度升高对作物物候的影响上。实际上, 作物物候由于同时受气候和农艺等管理因素的共同作用, 较自然植被物候变化更为复杂。如果只考虑单一气候因子的影响, 而忽略气候因子

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671037); 国家重点研发计划(2018YFA0606102); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2016049); 中国科学院地理科学与资源研究所“可桢杰出青年学者计划”项目(2017RC101); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC005) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41671037; National Key R&D Program of China, No.2018YFA0606102; The Youth Innovation Promotion Association of CAS, No.2016049; The Program for "Kezhen" Excellent Talents in Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, No.2017RC101; Strategic Priority Research Program of the CAS, No.QYZDB-SSW-DQC005]

作者简介: 刘玉洁(1982-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化影响与适应研究。E-mail: liuyujie@igsnr.ac.cn

间的交互作用, 以及农艺等管理因素等的作用, 就会加大研究结果的不确定性。此外, 由于缺乏足够的长序列实验观测数据或者受限于模型模拟能力, 已有研究大多针对部分站点作物的少数几个关键物候期开展, 区域及以上尺度作物物候变化研究仍有待深入^[17]。因而, 明晰作物物候对关键气候因子变化的响应, 探索作物物候变化的驱动因子及其影响机制, 梳理主要研究方法, 并在此基础上分析亟待解决的关键科学问题, 对于深入认识全球变化对作物物候的影响、指导地区农业生产具有实际意义。

2 全球变化背景下的作物物候变化

工业革命以来的人类活动加剧了气候变化, 如在北半球, 1983—2012年可能是过去1400年来最暖的30年^[18]。在气候变化背景下, 作物生长发育的热量条件会发生改变, 进而会导致作物物候发生变化。前人深入研究了全球变化对作物物候的影响^[19-20]。有学者利用长时间序列的物候观测数据进行分析, 发现升温对物候变化有显著作用, 作物各物候期的发生日期与其前期气温变化显著相关^[4-5, 21], 如生长季前期气温升高使播期提前和总生育期缩短^[22]。Sadras等^[23]利用作物模型模拟发现澳大利亚东部和阿根廷彭巴斯小麦在气候变化背景下, 播种至开花和从开花至成熟的各物候期均呈现提前趋势。Fujisawa等^[24]的研究发现3月气温和苹果树发芽期呈显著负相关关系, 其中平均气温、最高气温、最低气温和发芽期的相关系数分别高达-0.88、-0.9、-0.79 ($P < 0.001$); 3月和4月气温的上升使得苹果开花期显著提前, 开花期对3—4月期间平均气温、最高气温和最低气温的敏感度分别为 $-4.4 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $-3.7 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $-4.5 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

中国学者也进行了很多气候变暖背景下农作物物候方面的研究, 所涉作物包括玉米、小麦、水稻、大豆、棉花等。李正国等^[25]研究表明, 在1991—2009年间东北三省大部分地区温度普遍升高导致 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 初日提前而初霜日推迟的背景下, 水稻和玉米均出现出苗期提前、成熟期推迟和生育期延长的趋势; 大豆则出现出苗期和成熟期提前、生育期缩短的趋势; 而春小麦典型物候期的变化趋势不明显。Mo等^[26]发现1992—2013年在温度升高的背景下, 黄土高原春小麦和玉米营养生长期、生殖生长期和整个生育期长度均呈现不同程度的缩短趋势。彭维英等^[27]的研究发现, 2001—2009年间陕西省棉花物候期从出苗到成熟各物候期均出现不同程度的提前趋势。郭海英等^[28]研究表明陇东黄土高原冬小麦的越冬期出现缩短趋势, 春季各物候期也普遍提前。在其他研究地区, 如华北平原^[29]、内蒙古^[10]、新疆^[11]、黄土高原^[30]等地, 也观测到作物物候相似的变化趋势, 但各地变化幅度有所不同。

3 作物物候变化的驱动因子及其影响机制

3.1 关键气候因子对作物物候的影响

3.1.1 温度影响 作物生长发育过程中除了对温度的下限有一定要求外, 对温度的上限也有一定的要求。温度升高可以促进作物的发育, 使作物物候期缩短^[33-37]。当环境温度超过了发育温度上限, 会对其生长发育起到抑制作用^[38]。因此, 温度变化对作物生长的影响取决于环境温度是否超过作物生长的最适温度。Porter等^[15]总结了冬小麦各物候期对温度的响应范围, 指出冬小麦生长致死最低温度为 $-17.2 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高温度为 $47.5 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。王展^[16]在进行作物生育期的模拟过程中发现, 冬小麦和夏玉米在不同生育期和生育阶段的上限、下限以及最适温度存在较大差异。以往研究中, 作物物候对温度的响应研究更多

关注对均温的响应,对极端温度的影响研究较少。然而,随着极端温度事件的发生频率不断升高,极端温度对作物物候的影响机制在物候模拟中起到重要作用。Lobell等^[39]发现极端高温显著加速作物成熟,其对作物物候的影响超过了平均气温升高的影响。由于作物在不同的发育阶段对温度需求不同,因此对温度的敏感性也存在较大差异。Wang等^[40]对冬小麦的研究发现日最低温度每升高1℃,出苗—拔节阶段长度缩短4.3 d,相反,拔节—孕穗阶段长度和开花—乳熟阶段长度分别延长3.3 d和3.6 d;而乳熟—成熟阶段长度的缩短则和日最高气温高度相关。孟林等^[41]研究也发现日平均温度每上升1℃,华北平原夏玉米全生育期和生殖生长期长度分别缩短2.71 d和1.07 d。Liu等^[42]研究结果表明温度每上升1℃华北平原玉米物候缩短3.2~10 d不等。

3.1.2 光照影响 光照对作物物候的影响,主要表现为光周期对作物发育进程的影响。有研究表明,作物的发育速度(播种到开花持续时间的倒数)在很大程度上是由作物对温度和光周期的响应决定的^[43]。Carberry等^[44]研究了作物生长期受光照的影响,发现作物生长在诱导期对光周期非常敏感。但Tao等^[45]研究发现中国过去几十年日照时数的减少对小麦开花期提前的影响较小,开花期提前主要是由气温升高造成。Guo等^[46]研究表明光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)变化对板栗始花期影响较小,板栗花期提前主要与2月6日至次年5月31日期间温度升高有关,其温度变化可解释41%的花期提前趋势,其次是相对湿度;而由于PAR、温度以及相对湿度之间存在相关关系,温度效应也可用来解释PAR和相对湿度对花期的影响。一些物候模型中,光温也是对作物发育速率进行模拟的关键因素,如Setiyono等^[47]将非线性 β 函数引入大豆物候模型中,替代了原有的线性光温函数,并且在每个发育阶段所使用的模型各异,使得模拟精度大大提高。

3.1.3 水分影响 不同作物在不同生长阶段对水分的需求不同,因此对降水的响应也存在较大差异。不少研究表明,干旱发生时,尽管光、热条件充分,作物的生长发育也会受到水分的影响^[48]。在东北地区中部开展的春玉米春季水分胁迫试验表明,播种—出苗期间土壤含水量在田间持水量以下时,耕层土壤湿度越大,玉米出苗越快,而干旱会推迟出苗^[13]。遗传特性和生育规律的差别导致不同作物在不同生育阶段对干旱的敏感程度存在差异。比如,在甘肃黄土高原,冬小麦在孕穗—开花期对干旱最敏感,其次是冬前苗期和返青拔节期;春小麦对干旱最敏感的时期是拔节—开花期;玉米在拔节—抽雄期对干旱最敏感,抽雄—灌浆期次之^[14]。鲍小娟^[49]分析了2001—2009年陕西省气候变化对几种经济作物物候的影响,发现苹果和梨春季物候生长期(如芽期、花期)和春季降水呈正相关,苹果和梨果实着色期以及果实成熟期和7—8月份降水呈正相关,叶变色及落叶期和10—11月份降水呈负相关;而棉花则和气温和日照时数的关系较大,降水对其影响不大。梁灿盛等^[50]发现白梨各物候期时间与温度变化关系密切,与降雨没有明显关系;但幼果的数量多少和3—4月份的降水有关,降水对果实的品质和数量影响较大,特别是在7—8月白梨需水期(8月是白梨的膨大期)。

3.2 人为管理措施对作物物候的影响

气候变化对作物物候的影响在不同国家和地区表现各异,这除了由于各地区的气候和其他自然条件不同外,在很大程度上还因为人为管理因素和适应措施差异^[4, 51-52],如播种期调整、品种更替、灌溉管理等适应管理措施与气候变化影响的交互作用使得不同作物在各地区和各阶段的物候期变化表现出差异^[53-57]。正因如此,同气候变暖和CO₂浓度升高一样,管理措施越来越被认为是影响作物生长发育变化的最重要驱动因素之一^[58]。如杨洪宾等^[59]研究了不同播期对冬小麦生长及积温需求的影响,发现随着播期的推迟,

出苗期后延, 播种一出苗阶段天数及 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上积温增加, 冬前主茎叶龄及每长1叶所需 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的积温大幅度减少, 说明晚播的积温利用率更高, 并可为上茬秋作物节省较多积温让其充分灌浆和成熟。Wang等^[34]研究了1981—2010年华北平原气候变化和品种更替对夏玉米物候期的影响, 发现气候变暖加速了玉米生长并且缩短了玉米的生育期长度。更换生长季长度较长品种可以使华北平原玉米更好适应气候变暖对作物生长带来的影响。Moradi等^[60]研究了气候变化背景下伊朗霍拉桑地区玉米灌溉和播种日期管理对气候变化的适应策略, 发现播种期提前和在开花期缩短灌溉间隔时间会使玉米产量增加, 据此管理灌溉和播种日期, 有助于提高玉米对区域气候变化的适应能力。类似地, 对中国华北平原冬小麦^[61]、中国晚稻^[19]、美国玉米^[9]和中国东北地区的玉米^[62]等的相关研究也同样发现具有更长生长季的作物品种已被引入, 以应对气候变化。还有研究指出, 气候变化会促使小麦的春化阶段发育特性向弱冬性转变, 生育期内的变暖趋势尤其是收获前的高温, 可能会使种植者对早熟及耐热品种的需求增加^[63]。Zhao等^[64]的研究也发现通过调整播种日期和更换作物品种可以延长东北地区春玉米的生长季长度并提高玉米产量。Xiao等^[61]发现播种期提前可以降低春小麦生长期间的增温趋势的幅度, 从而延长生长季长度并潜在地提高小麦产量。同样为了适应温度上升的气候条件, 在黑龙江南部, 农民利用中熟品种的玉米代替早熟品种, 在辽宁北部, 则利用晚熟品种取代中熟品种^[62]。Zhang等^[19]对全国水稻物候变化的研究发现, 农民通过种植更短生育期的晚稻以及更长生育期的一季稻和早稻来适应气候变暖。尽管已有学者开始从作物生理的角度进行适应机理的研究, 关注适应措施对作物生长发育的影响, 但是对作物物候期应对气候暖干化适应机理的研究仍然十分有限^[65-66]。

4 作物物候及其变化观测和研究的主要方法

作物物候期信息及其变化可以通过实验观测、遥感监测以及模型模拟等多途径实现^[67]。

4.1 实验观测

中国现代物候观测研究以竺可桢在1934年组建物候观测网作为开端, 这一物候网以21种植物和大多数农作物作为观测对象, 断续观测至1940年, 对农作物较为正式和连续的物候观测开始于1952年, 全国范围的观测工作自1957年开始^[1], 目前物候观测网以植被物候观测为主。中国气象局系统所属各农业气象观测网络的长期观测资料是作物物候研究的重要资料来源。此外, 也有学者通过实地大田试验来分析作物对气候变化的响应, 例如Zhang等^[35]在中国华北平原进行了一个大田增温试验, 通过红外加热器控制温度, 研究大豆物候、光合作用及产量对气候变暖的响应。虽然这种实地大田试验的试验结果理论上相比统计方法或作物模型会更可靠, 但因为试验条件难以控制、周期长、价格昂贵、场地要求高等原因, 难以推广应用。另一方面, 由于作物的生长发育和产量形成是许多气候和管理因素交互作用的结果^[61], 很难找到相对独立的试验条件去研究单个影响因素对作物生长发育的内在影响和作用机制, 使气候变化对作物物候影响的内在机理和贡献程度尚难清晰确定, 加大了气候变化影响和预测的不确定性^[65]。

4.2 遥感观测

与田间观测相比, 遥感监测具有覆盖范围广、监测频率高等优点, 缩短了使用人力观测物候期的时间, 已成为物候数据获取的重要途径^[68]。将遥应用于物候研究扩大了物候观测范围, 较高分辨率的遥感数据提高了物候观测的时间分辨率^[67]。长时间序列遥感数据有助于反演植被物候并进一步得到物候的时空变化趋势, 为分析全球气候变化对

植被物候的影响提供数据基础。很多学者利用遥感数据对物候变化进行分析,发现升温对物候变化具有明显的作用^[69-70]。目前用于植被物候研究的最常用的遥感数据是归一化植被指数(NDVI),其主要数据来源包括NOAA/AVHRR-NDVI、SPOT/VGT-NDVI和MODIS-NDVI等。与NOAA数据相比,MODIS数据改进了光谱通道、传感器姿势,提高了空间和光谱分辨率,增强了大气校正和去云等功能,因此具有更大的应用潜力。目前,越来越多的学者采用MODIS数据进行物候期提取和相关研究。例如,徐岩岩等^[71]基于2008年EOS-MODIS多时相卫星遥感数据,利用Symlet11小波滤波识别东北地区水稻的主要物候期,结果显示移栽期的识别误差在16 d左右,而对抽穗期和成熟期的识别精度更高,误差在8 d以内。基于2010年MODIS-NDVI序列,杨琳等^[72]提取了江西省冬小麦关键物候期信息,返青期、抽穗期、成熟期的提取结果和观测数据相比其均方根误差分别为6 d、10 d和8 d,提取精度很高;同时他们也发现全省内抽穗期、成熟期大体上表现出从南到北逐渐延迟的趋势。

总体上,基于遥感数据来反演植被物候信息的方法,可以归结为模型拟合法、时间序列提取法、阈值法等。其中阈值法的应用最为广泛,包括相对阈值法和动态阈值法^[73]。相对阈值法是根据预先定义的NDVI参考值来确定典型物候期,而动态阈值法则在考虑NDVI季节变化趋势的基础上,根据NDVI的变化速度进行动态设定。目前,阈值法已经被广泛应用在很多区域的物候研究工作中,并且取得了较好的应用结果。例如,Guo等^[74]分别利用相对阈值法和动态阈值法提取并分析1993—2008年期间中国冬小麦春季物候发生日(返青期)的变化趋势。但限于时间分辨率和空间分辨率,遥感反演的物候信息往往与观测物候差别较大^[75],因而如何融合地面物候观测和遥感观测物候数据也是未来研究的重要方向。高光谱遥感作为近几年来迅速发展起来的一种全新遥感技术,能够获取作物冠层或叶片的精细的光谱数据,利用高光谱遥感提供的光谱数据可以了解和掌握作物长势、品质和产量等信息^[76]。祁亚琴等^[77]基于高光谱数据提取棉花冠层特征信息的研究中发现,“红边”位置在棉花现蕾以后(以营养生长为主的阶段)会向长波方向移动,即所谓的“红移”现象;而当进入生殖生长为主的阶段后,“红边”位置向短波方向移动,出现“蓝移”现象。吴琼等^[78]在利用高光谱遥感估测大豆冠层生长的研究中发现,不同生育期可见光和近红外区域的光谱反射率与大豆的叶面积指数及产量均显著相关,尤其在盛荚期和鼓粒始期相关性最高。

4.3 模型模拟

除了实验观测、遥感监测等方法外,通过作物模型模拟作物物候也是当前研究的重要手段。作物模型作为一种系统分析方法,综合考虑了基因型、温度、日长等因子对作物发育的影响,在帮助理解农业系统和气候因子的相互作用方面起到了很大作用。从荷兰科学家建立的强调光合作用及理论系统性的WOFOST^[79]模型到更注重实用性、强调作物发育期模拟的CERES^[80]和APSIM^[81]等模型,至今世界上已建立了多种适用于不同粮食作物、经济作物的作物生长模拟模型,并在气候变化对农业影响评价领域得到广泛运用^[82-83]。作物模型也是IPCC第四次和第五次评估报告中用来估计气候变化对农业生态潜在影响的主要工具^[3]。作物生育期模拟是作物模型的重要组成部分,作物生育期控制着作物生长模拟在不同发育阶段相应的子模型或模型参数,进而影响到作物产量的形成^[84]。值得注意的是,气候变化和人为管理措施对作物物候影响的量化精度很大程度上是由模型模拟的精度决定的。由于模型模拟中的参数是需要通过大量的观测数据来确定,其区域推广往往比较困难;当在不同地区直接应用模型进行模拟和预测时,会给预测结果带

来较大不确定性^[85]。并且模型模拟中多假设品种和管理措施不变, 这样得到的普遍结论是, 温度升高导致作物生育期缩短, 进一步导致干物质积累减少。而实际情况中, 作物的品种和管理措施(灌溉、施肥等)一直在变化, 尤其是品种, 每隔几年就会更替一次, 且表现出很大的地区差异性。如Liu等^[5]利用CERES模型研究了中国冬小麦物候的变化情况, 结果表明新品种的采用和播种日期的变化抵消了部分由于气候变化所带来的不利影响。He等^[30]利用APSIM研究了黄土高原冬小麦的物候变化, 发现采用长生长期品种也抵消了由于气候变暖所导致的生育期缩短。而气候模式输出的不确定性, 尺度转换过程中存在的不确定性, 以及模型模拟的不确定性(包括模拟尺度、过程、参数化以及输入的不确定性)都会引起模拟结果的不确定性^[83, 86]。此外, 不同的作物模型也各有侧重点, 如美国的CERES模型充分考虑了不同作物的生长特点, 每种作物模拟都有对应的模块, 环境因素和农田管理措施在模型中也都有相应的参数输入。而WOFOST模型对各种作物发育过程的描述一致, 属于通用作物模型, 对不同作物模拟的区别主要在于干物质分配和遗传参数的不同, 但对作物的生理生态机制过程考虑详细, 这也是荷兰瓦格宁根(Wageningen)学派模型的共同特点。与CERES和WOFOST相比, 澳大利亚的APSIM模型更侧重于模拟土壤过程, 也即通过天气和农业管理措施引起土壤特征的变化, 进一步来模拟土壤特征变化下的作物生长。因而, 在利用作物模型模拟之前, 首先应根据不同模型的模拟特点来选择模型; 在进行升尺度模拟之前, 应尽可能多的利用多点、长序列的观测数据来确定不同品种下的遗传参数值; 并采用多模型、多情景对模型和不同模式的模拟结果进行比较, 如基于贝叶斯理论的概率预测方法, 尽可能降低研究结果的不确定性。

5 研究展望

综上所述, 作物物候变化及其影响因素已成为近年来国内外全球变化和资源环境领域的研究热点。但以下几方面研究仍有待于进一步深入。

(1) 大部分气候变化对作物物候的影响研究中, 仍将温度作为主要的限制因子, 未来在结合作物模型研究光、温、水分等因素对作物物候的综合影响方面仍需进一步加强。

(2) 气候变化和人为管理措施对作物物候的综合影响研究有待加强。作物生长发育同时受到多个因素的综合作用, 既有气候变化(光、温、降水等)影响, 也有人为管理措施作用。如果忽略了播期调整、品种更替、以及施肥和灌溉等管理措施对作物生长的影响, 就有可能高估气候变化对作物生长的影响, 从而低估人为适应气候变化不利影响所采取的适应措施的提升能力。

(3) 由于研究方法和实测数据的限制, 以往研究多基于站点尺度和统计模型, 难以定量区分气候变化和管理措施对作物物候的影响。此外, 许多研究结果多为确定性结论, 没有给出变化的阈值, 从而加大了研究结果的不确定性。因而, 以长序列历史观测和实验观测为基础, 结合作物模型、遥感反演等多手段研究我国粮食主产区主要作物物候时空变化特征及其影响机制将有助于深入认识作物物候对气候和管理措施变化的响应机理, 为区域农业生产和适应气候变化提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] Zhu Kezhen, Wan Minwei. Phenology. Beijing: Science Press, 1973. [竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973.]

- [2] Helmut L P D. Phenology and seasonality modeling. *Ecological Studies*, 1975, 120(6): 461.
- [3] IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2014: 1132.
- [4] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, et al. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 518-526.
- [5] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, et al. Effects of climate change and agronomic practice on changes in wheat phenology. *Climatic Change*, 2018, 150(3/4): 1-15.
- [6] Siebert S, Ewert F. Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 152(6): 44-57.
- [7] Larson S C. Losing arable land, China faces stark choice: Adapt or go hungry. *Science*, 2013, 339(6120): 644-645.
- [8] Li Z G, Yang P, Tang H J, et al. Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 39-48.
- [9] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882-894.
- [10] Xiao Dengpan. Changes of crop phenology in Inner Mongolia under the background of climate warming. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(26): 216-221. [肖登攀. 气候变暖背景下内蒙古作物物候变化研究. *中国农学通报*, 2015, 31(26): 216-221.]
- [11] Xiao Dengpan, Qi Yongqing, Wang Rende, et al. Changes in phenology and climatic conditions of wheat and maize in Xinjiang during 1981-2009. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 189-194, 202. [肖登攀, 齐永青, 王仁德, 等. 1981—2009年新疆小麦和玉米物候期与气候条件变化研究. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 189-194, 202.]
- [12] Li Zhengguo, Yang Peng, Tang Huajun, et al. Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5818-5827. [李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等. 近20年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应. *生态学报*, 2013, 33(18): 5818-5827.]
- [13] Ma Shuqing, Wang Qi, Lv Houquan, et al. Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3378-3385. [马树庆, 王琪, 吕厚荃, 等. 水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响. *生态学报*, 2012, 32(11): 3378-3385.]
- [14] Yang Xiaoli, Liu Gengshan, Yang Xingguo. The sensitivity of main crops to water stress in Loess Plateau region in Gansu. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(4): 90-93. [杨小利, 刘庚山, 杨兴国. 甘肃黄土高原主要农作物水分胁迫敏感性. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(4): 90-93.]
- [15] Porter J R, Semenov M A. Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2005, 360(1463): 2021.
- [16] Wang Zhan. Study on simulation model of developmental stages for major crops in Henan Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012. [王展. 河南省主要作物生育期模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.]
- [17] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010. *Science China: Earth Sciences*, 2018, 61(8): 1088-1097.
- [18] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [19] Zhang T Y, Huang Y, Yang X. Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 563-570.
- [20] Tao F L, Zhang Z, Xiao D P, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981-2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190(3): 91-104.
- [21] Li De. Variation characteristics of winter wheat phenophases in Huaibei Plain in recent 30 years. *Meteorological Science and Technology*, 2009, 37(5): 607-612. [李德. 近30年淮北平原冬小麦物候期演变特征. *气象科技*, 2009, 37(5): 607-612.]
- [22] Estrella N, Sparks T H, Menzel A. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 2007, 13(8): 1737-1747.

- [23] Sadras V O, Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research*, 2006, 99(2/3): 136-146.
- [24] Fujisawa M, Kobayashi K. Apple (*Malus pumila* var. *domestica*) phenology is advancing due to rising air temperature in northern Japan. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2651-2660.
- [25] Li Zhengguo, Yang Peng, Tang Huajun, et al. Trend analysis of typical phenophases of major crops under climate change in the three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4180-4189. [李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等. 气候变化背景下东北三省主要作物典型物候期变化趋势分析. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4180-4189.]
- [26] Mo F, Sun M, Liu X Y, et al. Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau. *Field Crop Research*, 2016, 196: 337-347.
- [27] Peng Weiyang, Yin Shuyan, Bao Xiaojuan, et al. Impacts of climate change on cotton phenophase of a county: Take Dali in Shaanxi Province for example. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 154-161. [彭维英, 殷淑燕, 鲍小娟, 等. 气候变化对县域棉花物候期影响: 以陕西大荔为例. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 154-161.]
- [28] Guo Haiying, Zhao Jianping, Suo Anning, et al. Response of agricultural phenospectrum to global climate change in Loess Plateau of east Gansu province. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4): 608-614. [郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. *自然资源学报*, 2006, 21(4): 608-614.]
- [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] He L, Asseng S, Zhao G, et al. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200(4): 135-143.
- [31] Hu Q, Weiss A, Song F, et al. Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U.S. Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1-4): 284-290.
- [32] Rezaei E E, Siebert S, Ewert F. Intensity of heat stress in winter wheat-phenology compensates for the adverse effect of global warming. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024012.
- [33] Ahmad S, Abbas Q, Abbas G, et al. Quantification of climate warming and crop management impacts on cotton phenology. *Plants*, 2017, 6(1): 7-22.
- [34] Wang Z, Chen J, Li Y, et al. Effect of climate change and cultivar on summer maize phenology. *International Journal of Plant Production*, 2016, 10(4): 509-525.
- [35] Zhang L, Zhu L, Yu M, et al. Warming decreases photosynthates and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] in the North China Plain. *The Crop Journal*, 2016, 4(2): 139-146.
- [36] Therond O, Hengsdijk H, Casellas E, et al. Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 142(1): 85-94.
- [37] Zheng H F, Chen L D, Han X Z, et al. Classification and regression tree (CART) for analysis of soybean yield variability among fields in Northeast China: the importance of phosphorus application rates under drought conditions. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 132(1/2): 98-105.
- [38] Anandhi A, Hutchinson S, Harrington J, et al. Changes in spatial and temporal trends in wet, dry, warm and cold spell length or duration indices in Kansas, USA. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(12): 4085-4101.
- [39] Lobell D B, Sibley A, Ortiz-Monasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 186-189.
- [40] Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, et al. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8): 1242-1251.
- [41] Meng Lin, Liu Xinjian, Wu Dingrong, et al. Responses of summer maize main phenology to climate change in the North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 375-382. [孟林, 刘新建, 邬定荣, 等. 华北平原夏玉米主要生育期对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 375-382.]
- [42] Liu Y J, Qin Y, Ge Q S, et al. Responses and sensitivities of maize phenology to climate change from 1981 to 2009 in Henan Province, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(9): 1072-1084.
- [43] Craufurd P Q, Wheeler T R. Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2529-2539.
- [44] Carberry P S, Ranganathan R, Reddy L, et al. Predicting growth and development of pigeonpea: Flowering response to photoperiod. *Field Crops Research*, 2001, 69: 151-162.
- [45] Tao F L, Zhang S, 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.
- [46] Guo L, Hu B, Dai J, et al. Response of chestnut flowering in Beijing to photosynthetically active radiation variation and change in recent fifty years. *Plant Diversity and Resources*, 2014(4): 523-532.
- [47] Setiyono T D, Weiss A, Specht J, et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, 2007, 100(2/3): 257-271.
- [48] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, 1998: 56.
- [49] Bao Xiaojuan. Impacts of climate change on economic crop phenology in Shaanxi Province [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012. [鲍小娟. 陕西省气候变化对经济作物物候的影响: 以苹果、梨、棉花为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.]
- [50] Liang Chansheng, Yin Shuyan, Li Meirong, et al. Variation of Climate and its impact on phenological period and growth of *Pyrus bretschneideri* Rehd in Binxian of Shaanxi Province in last 53 years. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 190-194. [梁灿盛, 殷淑燕, 李美荣, 等. 陕西省彬县近53年来气温及降水变化对白梨物候的影响. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 190-194.]
- [51] Challinor A J, Simelton E S, Fraser E D G, et al. Increased crop failure due to climate change: Assessing adaptation options using models and socio-economic data for wheat in China. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(3): 034012.
- [52] Tester M, Langridge P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 2010, 327(5967): 818-822.
- [53] Wang J, Wang E, Yang X, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climatic Change*, 2012, 113(3): 825-840.
- [54] Liu B H. Spatiotemporal change in China's climatic growing season: 1955-2000. *Climatic Change*, 2010, 99(1): 93-118.
- [55] Chen C, Baethgen W E, Wang E, et al. Characterizing spatial and temporal variability of crop yield caused by climate and irrigation in the North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 106(3): 365-381.
- [56] Sacks W J, Deryng D, Foley J A, et al. Crop planting dates: An analysis of global patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 607-620.
- [57] Bolson J, Martinez C, Breuer N, et al. Climate information use among Southeast US water managers: Beyond barriers and toward opportunities. *Regional Environmental Change*, 2013, 13: 141-151.
- [58] Rost S, Gerten D, Hoff H, et al. Global potential to increase crop production through water management in rainfed agriculture. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 044002.
- [59] Yang Hongbin, Xu Chengzhong, Li Chunguang, et al. Growth and required accumulated temperature of winter wheat under different sowing time. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 201-203. [杨洪宾, 徐成忠, 李春光, 等. 播期对冬小麦生长及所需积温的影响. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 201-203.]
- [60] Moradi R, Koocheki A, Mahallati M N, et al. Adaptation strategies for maize cultivation under climate change in Iran: Irrigation and planting date management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, 18(2): 265-284.
- [61] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 112-122.
- [62] Li Z T, Yang P, Tang H J, et al. Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(1): 39-48.
- [63] Ceccarelli S, Grando S, Maatougui M, et al. Plant breeding and climate changes. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 148: 627-637.
- [64] Zhao J, Yang X G, Dai S W, et al. Increased utilization of lengthening growing season and warming temperatures by adjusting sowing dates and cultivar selection for spring maize in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 2015, 67: 12-19.
- [65] Sun Z, Jia S F, Lv A F, et al. Impacts of climate change on growth period and planting boundaries of spring wheat in China under RCP4.5 Scenario. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(1): 1-11.
- [66] Karlsen S R, Høgda K A, Wielgolaski F E, et al. Growing-season trends in Fennoscandia 1982-2006, determined from satellite and phenology data. *Climate Research*, 2009, 39(3): 275-286.
- [67] Chen Xiaoqiu, Wang Linhai. Research progress in remote sensing phenology. *Progress in Geographical Sciences*, 2009, 28(1): 33-40. [陈效逖, 王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.]
- [68] Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Recent progresses in monitoring crop spatial patterns by using remote

- sensing technologies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14): 2879-2888. [唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 农作物空间格局遥感监测研究进展. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2879-2888.]
- [69] Zhang Jiahua, Li Li, Yao Fengmei. Progress in retrieving vegetation water content under different vegetation coverage condition based on remote sensing spectral information. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1638-1642. [张佳华, 李莉, 姚凤梅. 遥感光谱信息提取不同覆盖下植被水分信号的研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1638-1642.]
- [70] Shimono H. Earlier rice phenology as a result of climate change can increase the risk of cold damage during reproductive growth in northern Japan. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1): 201-207.
- [71] Xu Yanyan, Zhang Jiahua, Yang Limin. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2091-2098. [徐岩岩, 张佳华, Yang Limin. 基于MODIS-EVI数据和Symlet11小波识别东北地区水稻主要物候期. *生态学报*, 2012, 32(7): 2091-2098.]
- [72] Yang Lin, Gao Ping, Ju Weimin. Detecting phenophases of winter wheat based on MODIS NDVI data in Jiangsu Province. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016(1): 315-320. [杨琳, 高苹, 居为民. 基于MODIS NDVI数据的江苏省冬小麦物候期提取. *江苏农业科学*, 2016(1): 315-320.]
- [73] Li Zhengguo, Tang Huajun, Yang Peng, et al. Progress in remote sensing of vegetation phenology and its application in agriculture. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(5): 20-28. [李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 植被物候特征的遥感提取与农业应用综述. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(5): 20-28.]
- [74] Guo L, An N, Wang K. Reconciling the discrepancy in ground- and satellite-observed trends in the spring phenology of winter wheat in China from 1993 to 2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(3): 1027-1042.
- [75] Song Xiaoyu, Wang Jihua, Yan Guangjian, et al. Winter wheat growth spatial variation study based on temporal airborne high-spectrum images. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 1820-1824. [宋晓宇, 王纪华, 阎广建, 等. 基于多时相航空高光谱遥感影像的冬小麦长势空间变异研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1820-1824.]
- [76] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zhang Lifu. Current progress of hyperspectral remote sensing in China. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 689-707. [童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿发展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 689-707.]
- [77] Qi Yaqin, Lv Xin, Chen Guanwen, et al. Research of cotton canopy characteristic information by hyperspectral remote sensing data. *Cotton Science*, 2011, 23(2): 167-171. [祁亚琴, 吕新, 陈冠文, 等. 基于高光谱数据提取棉花冠层特征信息的研究. *棉花学报*, 2011, 23(2): 167-171.]
- [78] Wu Qiong, Qi Bo, Zhao Tuanjie, et al. A tentative study on utilization of canopy hyperspectral reflectance to estimate canopy growth and seed yield in soybean. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 309-318. [吴琼, 齐波, 赵团结, 等. 高光谱遥感估测大豆冠层生长和籽粒产量的探讨. *作物学报*, 2013, 39(2): 309-318.]
- [79] Supit I, Hooijer A A, van Diepen C A. System Description of the WOFOST 6.0 Crop simulation model implemented in CGMS, Vol. 1: Theory and algorithms. Luxembourg: Joint Research Centre of the Commission of the European Communities, 1994.
- [80] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [81] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50(3): 255-271.
- [82] Xiong Wei, Lin Erda, Yang Jie, et al. Comparison of two calibration approaches for regional simulation of crop model. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2140-2147. [熊伟, 林而达, 杨婕, 等. 作物模型区域应用两种参数校准方法的比较. *生态学报*, 2008, 28(5): 2140-2147.]
- [83] Liu Yujie, Tao Fulu. Probabilistic change of wheat productivity and water use in china for global mean temperature changes of 1, 2, and 3 °C. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(1): 114-129.
- [84] Zhang T, Zhu J, Yang X. Non-stationary thermal time accumulation reduces the predictability of climate change effects on agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1412-1418.
- [85] Andrej C, Zalika Č, Lučka K B, et al. The simulation of phenological development in dynamic crop model: The Bayesian comparison of different methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 101-115.
- [86] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443-1452.

Research progress in crop phenology under global climate change

LIU Yujie^{1,2}, GE Quansheng^{1,2}, DAI Junhu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As one of the most important plant traits of crops, crop phenology reflects the characteristics of crop growth and development; its variation also affects crop production. Therefore, crop phenology is a reliable and comprehensive biological indicator reflecting global climate change. Global climate change, marked by rising temperatures, has exerted significant impacts on crop phenology. Under the background of global climate change, revealing the mechanism of global climate change impacts on crop phenology and growth as well as the formation of crop yield is of theoretical and practical significance. At present, crop phenology shifts and their influencing factors have become a hot research topic and an important international issue, thus a large number of studies have been carried out, and achieved rich and effective results. In this paper, we mainly focus on the research progress of crop phenological changes under the background of climate change, including the driving factors and their influencing mechanisms of crop phenological changes as well as methods of research on crop phenology, and the key scientific issues which need to be solved in future study are also discussed. The conclusions of this research could provide a theoretical basis for understanding the impacts and mechanisms of global climate change on crop phenology and for guiding regional agricultural production practices.

Keywords: global climate change; crop phenology; driving factors; response; progress