

中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展

赵彦茜¹, 肖登攀^{1*}, 柏会子¹, 陶福禄²

(1. 河北省科学院地理科学研究所 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011;
2. 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)

摘要:以气候变暖为主要特征的气候变化对作物物候产生了重要的影响,通常气温升高会导致作物生长速度加快,生育期缩短,而造成作物产量下降,不利于农业发展。同时,作物物候变化可以直接或间接反映气候变化情况,对于气候变化具有重要的指示意义。作物物候的研究对于农业气象灾害的预防、农业生产管理水平的进步以及农业产量提高都极为关键。随着全球地表气温的持续升高,作物物候相关研究也越来越引起科学家的关注。论文结合作物物候的主要研究方法,综述了中国近几十年来小麦、玉米、水稻以及棉花、大豆等主要农作物的生育期变化特征以及主要的驱动因子,得到以下主要结论:①在研究方法上,统计分析方法应用最为普遍,其他几种方法都需要与统计分析方法相结合使用。另外,作物机理模型模拟方法易于操作、可行性强,在物候研究中应用也比较多。遥感反演方法对作物生育期的特征规律要求较高,一般主要关注作物返青期。②整体上,小麦全生育期主要呈缩短趋势,而玉米和水稻全生育期以延长趋势为主。③作物物候变化的驱动因子主要是气候变化和农业管理措施改变,其中,气候变化是主导驱动因子,对作物物候变化起决定作用,而调整农业管理措施,在一定程度上抵消气候变化对作物生育期的不利影响。作物物候对气候变化的响应和适应研究可以为农业生产适应气候变化提供重要的理论依据和对策。

关键词:气候变化;作物物候;生育期;驱动因子;作物模型

近百年来,全球气候变暖趋势越来越明显,地表平均温度上升了 0.74°C ,而近50 a来温度上升速率更是达到了 $0.13^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (IPCC, 2013)。气候变化对自然环境以及人类的生产与生活活动都产生了重要影响,其中对生物物候的影响尤为明显。从广义上说,物候是指生物长期适应气候条件下的周期性变化,并形成与此相适应的生长发育规律;狭义上讲,物候是指植物在自己生长阶段内,随气候的季节性变化而产生萌芽、开花等规律性变化的自然现象(方修琦等, 2002)。物候现象可以客观反映植物生长过程中对外界气候、生态环境条件的响应及

适应性(Craufurd et al, 2009; Diskin et al, 2012),具体表现为植物生育期的提前、推迟以及生育阶段的延长、缩短等。物候变化可以直接或间接反映气候变化情况,是气候变化研究不可或缺的指示标志。气候变暖通常会导致作物生长速度加快,生育期缩短,而造成作物产量下降,相关研究指出气温升高尤其是春季平均气温的升高对于冬小麦抽穗期与开花期影响极为显著,德国、澳大利亚、阿根廷以及美国大平原等地的冬小麦抽穗期和开花期均有提前(Hu et al, 2005; Sadras et al, 2006; Eyshi et al, 2015)。Chmielewski等(2004)对德国1961—2000年

收稿日期:2018-05-18;修订日期:2018-12-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(41401104);河北省自然科学基金项目(D2015302017);河北省科学院高层次人才培养与资助项目(2018G03)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41401104; Natural Science Foundation of Hebei Province, No. D2015302017; High-level Talent Training and Support Project of Hebei Academy of Sciences, No. 2018G03.]

第一作者简介:赵彦茜(1992—),男,河北南和人,研究实习员,主要从事作物模型应用研究。E-mail: 18233181223@163.com

*通信作者简介:肖登攀(1982—),男,河北张北人,副研究员,主要从事气候变化与农业生态研究。

E-mail: xiaodengpan168@163.com

引用格式:赵彦茜,肖登攀,柏会子,等. 2019. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J]. 地理科学进展, 38(2): 224-235. [Zhao Y X, Xiao D P, Bai H Z, et al. 2019. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China. Progress in Geography, 38(2): 224-235.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.006

苹果、玉米等作物的拔节期和开花期等生育期进行分析,结果表明,气温升高导致作物生育期均呈提前趋势,早春时节的物候活动变化最为显著。Nicole等(2010)对德国20种多年生作物和单年生作物的物候进行对比研究,发现多年生作物对春季平均气温变化的响应比单年生作物更显著。Oteros等(2015)统计了西班牙1986—2010年燕麦、小麦等冬播作物以及玉米等夏播作物的主要物候变化趋势,发现冬播作物春季生育期提前,而夏播作物生育期变化较小。巴基斯坦主要作物(玉米、棉花、油菜和甘蔗等)物候对气候响应的相关研究指出,气候变化决定了作物生育期的变化趋势,而品种更新和播种期的调整则抵消了14%~30%的气候变化对生育期的影响(Ahmad et al, 2016; Abbas et al, 2017; Ahmad S, Abbas G et al, 2017; Ahmad S, Abbas Q et al, 2017)。在中国,通过利用长期观测资料系统分析全国各气候区小麦和玉米物候变化的时空特征,发现抽穗期和成熟期提前,营养生长期缩短,但生殖生长期延长(Tao et al, 2012; Tao, Zhang, Zhang et al, 2014)。Zhang等(2014)研究了中国水稻物候变化的时空特征及其与气候变化、播种期和品种等农业管理措施之间的关系,发现尽管气候增暖导致生长期缩短,但水稻(晚稻例外)品种更替使水稻生长期延长。

综上所述,气候变化背景下,作物物候产生了显著的变化。作物物候的变化势必会影响作物光合作用产物的积累,最终表现为作物产量的变化。因此,作物物候研究对于农业气象灾害的预防、农业生产管理水平的进步以及农业生产的安全都极为关键。在现阶段,国内外对作物物候研究逐渐增多,研究层次也在逐渐深入。本文综述了全球气候变暖背景条件下中国近几十年来主要农作物的物候变化状况,分析了物候变化规律特征,可为农业生产适应气候变化提供重要的理论依据。

1 作物物候变化的主要研究方法

一般来讲,对作物物候的研究主要通过田间试验观测、统计分析、模型模拟以及遥感反演等方法,下面分别对4种方法进行简单介绍和评价。

1.1 田间试验观测方法

通常情况下,作物物候期需要实地观测才能得到原始数据。因此,田间定位试验就成为研究作物

物候变化最直观的方法。田间试验方法主要涉及改变播种期、改变生长环境(以改变温度条件为主)以及改变作物品种等几个方面。在中国,全国范围内多达778个农业气象站从20世纪80年代就开始对各区域主要作物物候进行了观测记录,其观测数据为后来多数科学家分析作物物候变化趋势和特征奠定了数据基础(Tao et al, 2012; Tao, Zhang, Xiao et al, 2014)。另外,部分研究者还通过田间控制实验来研究不同因素对作物物候的影响。张彬等(2010)、陈金等(2010)和张鑫等(2014)在江苏省采用开放式或被动式增温系统对水稻和小麦进行夜间增温试验,来揭示夜间温度升高对水稻和小麦生育期的影响。杨洪宾等(2009)和张凯等(2012)分别通过设置不同播种期处理试验来研究播种期对小麦生育期变化的影响。Wang等(2016)于2012—2014年在中国农业大学吴桥试验站进行了夏玉米品种更换试验,通过种植20世纪50、70、90年代以及21世纪前10年等4个时期的不同夏玉米品种来研究品种变化情况下夏玉米生育期的变化特征。

田间试验所得到的观测数据是作物物候研究的第一手资料,比较精确可靠。但是,田间观测试验通常情况下需要耗费大量人力、财力、物力和时间,不适合作为作物物候长期研究的方法。此外,田间试验方法在区分和量化气候、品种和播种期等不同因素对作物物候的影响时存在一定的困难,试验设计需要不断完善才能获得较高精度的结果。

1.2 统计分析方法

统计分析方法是通过对一段时间内作物物候的变化趋势及其影响因素的相关关系进行分析,从而得到作物生育期变化特征的研究方法。统计分析方法可以获取大范围、长周期的作物物候变化趋势,是研究作物物候变化最常用的方法。通常情况下,田间试验观测方法、模型模拟方法和遥感反演方法的使用均要与统计方法相结合。Tao等(2012)利用线性回归分析和皮尔森相关系数分析对中国小麦种植区内的冬小麦和春小麦的生育期变化趋势以及生育期变化与生育阶段内的平均温度和AT-DU(accumulated thermal development unit, 表示品种的热量需求、春化作用需求和光周期敏感度等特性)的相关性进行了深入研究。Li等(2014)利用相似统计分析方法对东北地区的玉米物候变化特征进行了研究。一般而言,统计数据显示的作物物候变化是气候变化、作物管理措施调整等多种因素综

合影响下的变化,为了研究各影响因子对作物物候影响的具体程度,普遍采用一阶差分法来量化区别气候与作物管理措施对作物生育期的影响(Lobell et al, 2005; Verón et al, 2015)。Liu 等(2018)对小麦物候的研究中利用一阶差分法建立经验公式如下:

$$T_{\text{phe,cli}} = S_{\text{tem}} \times T_{\text{tem}} + S_{\text{pre}} \times T_{\text{pre}} + S_{\text{ssd}} \times T_{\text{ssd}} \quad (1)$$

$$T_{\text{phe,man}} = T_{\text{phe}} - T_{\text{phe,cli}} \quad (2)$$

式中: $T_{\text{phe,cli}}$ 表示单纯气候变化下生育期或生育阶段长度的变化趋势; S_{tem} 、 S_{pre} 、 S_{ssd} 分别表示小麦物候对温度、降水和日照时数的响应程度; T_{tem} 、 T_{pre} 、 T_{ssd} 分别表示相应生育期内平均温度、累积降水量、累积日照时数的变化趋势; $T_{\text{phe,man}}$ 表示单纯作物管理措施调整情况下生育期或生育阶段长度的变化趋势; T_{phe} 表示小麦物候变化的观测趋势。

Zhang 等(2014)通过计算中国主要水稻种植区内不同生育期(营养生长期、生殖生长期和全生育期)水稻的 ATDU, 根据 1981 年水稻各生育阶段的 ATDU 并结合 1981—2009 年水稻的移栽期估算了历年的水稻抽穗期和成熟期, 获得单纯气候变化影响下的水稻生育期变化结果, 水稻生育期观测数据结果与单纯气候变化影响下的结果之间的差值就是单纯品种更新影响下的水稻生育期变化结果。Mo 等(2016)用上述方法对黄土高原的春小麦和夏玉米的生育期进行了研究。作物各生育阶段光热需求不仅可以通过计算 ATDU 得到, 也可以通过计算生长度日(Growing degree days, GDD)得到(Grigorieva et al, 2010, Hu et al, 2015)。Hu 等(2017)根据 Gao 等(1992)的研究方法获取了水稻生育期 GDD 参考值, 然后基于 GDD 参考值计算历年水稻参考生育期, 最后利用经验公式量化气候、品种以及播种期对水稻物候的影响。

统计分析方法是作物物候研究中应用最普遍的一种研究方法, 可操作性强, 研究周期长, 范围广, 信息量大, 是了解历史气候背景下作物物候变化最有效的研究方法。相比于作物模型, 统计模型所需数据更为简单, 便于获取, 但机理性不足, 对许多影响因素考虑不充分, 在量化影响因素作用时容易相互混淆。同时, 统计模型外推效果较差, 在预测未来气候情景下作物物候的变化趋势方面有很大局限性。

1.3 模型模拟方法

作物机理模型, 是指对作物的生长、发育以及

产量形成的过程和对环境反应能进行定量和动态描述的一种计算机模拟程序(李军, 1997), 它可以在已有研究资料基础上对在多种模拟条件下的作物生长情况进行模拟, 预测未知风险, 优化农业资源管理措施。早在 20 世纪 60 年代后期, 荷兰、美国等国就已经开始对作物模型进行开发研究, 并开发出了一些较为单一的基础作物模型; 之后, 英国、澳大利亚等国也对作物模型进行了开发利用。经过几十年的发展, 作物模型发展趋于完善, 涌现出很多功能齐全、结构复杂的作物模型, 例如澳大利亚的 APSIM 模型和美国的 DSSAT 模型等。

Wang 等(2013)、He 等(2015)和 Xiao, Tao 等(2016)利用 APSIM 模型分别对华北平原、黄土高原冬小麦和北方春小麦物候变化驱动因子进行归因研究。Wang X 等(2017)对利用 ORCHIDEE-crop 模型量化了气候变化和移栽期调整对水稻生育期的影响。Liu L 等(2012, 2013)利用 RiceGrow 模型设置了 2 种模拟试验, 针对对象为气候因子和品种类型, 移栽期等管理措施保持同一水平。

作物模型机理性很强, 对作物生长影响因素考虑比较充分, 可以定量描述不同气候因子作用, 同时外推效果好, 预测未来作物产量可信度较高。但作物模型结构复杂, 需要大量的作物生长发育过程、土壤条件以及管理措施等详细输入数据, 作物模型本地化处理有一定难度。同时, 作物模型输入数据主要为单点数据, 应用于区域尺度上的代表性不足。本土化处理和尺度代表性等是作物模型应用中不可避免的问题, 需要进一步研究讨论。

1.4 遥感反演方法

通常情况下, 田间试验法、统计分析法以及模型模拟法等主要基于站点研究尺度, 对于区域的物候变化差异反映存在一定偏差, 而遥感反演方法则可以通过遥感数据提取作物物候期进行大范围研究, 从而更好地反映区域尺度上作物物候变化的特征和规律。一般而言, 遥感反演方法主要是基于归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据提取作物物候期的方法。NDVI 计算公式为:

$$\text{NDVI} = (B_{\text{nir}} - B_{\text{red}}) / (B_{\text{nir}} + B_{\text{red}}) \quad (3)$$

式中: B_{nir} 、 B_{red} 分别为近红外波段、红光波段的反射值。

Fang 等(2005)利用 NOAA/AVHRR 的 MVC NDVI 数据提取了华北平原 1982—2000 年冬小麦

的出苗期和收获期,结果表明该方法在冬小麦生育期提取上具有较好的适用性。Cong等(2013)基于GIMMS3g NDVI数据汇总分析了5种方法提取的中国春季生长作物返青期,由此获得更为精确合理的研究结果。Wang S等(2017)基于NOAA/AVHRR的GIMMS3g NDVI数据和改进的返青期提取算法提取了华北平原1982—2013年冬小麦的返青期,验证表明提取结果拥有较高的精度。Liu Z等(2017)对比分析了基于GIMMS3g NDVI和SPOT-VGT NDVI数据4种返青期提取方法所提取结果的可靠度,研究表明基于SPOT-VGT NDVI数据的返青期提取结果较基于GIMMS3g NDVI数据的提取结果相关性更好,准确度更高。

遥感反演方法突破了其他几种方法以站点研究为主的限制,可以有效反映大范围区域作物物候变化的整体状况。但遥感反演方法对地面作物的区分要求较高,特征不明显的作物生育期很难与其他作物生育期区分开,例如对冬小麦等春季生长作物生育期的提取集中在越冬返青期,该时期春季作物提取较易。

2 中国典型作物物候的响应与适应

小麦、玉米和水稻是中国种植的主要粮食作物。因此,本文的研究重点集中在小麦、玉米和水稻三大粮食作物物候变化上。此外,对棉花、大豆等经济作物物候变化也有阐述。

2.1 小麦物候的响应与适应

小麦是中国三大粮食作物之一,种植范围广,面积大,产量高(中国农业年鉴编辑委员会,2011)。根据播种时间的差异,全国小麦种植类型主要分为春小麦和冬小麦,春小麦主产区与冬小麦主产区大致以长城为界,长城以北为春小麦,长城以南为冬小麦。小麦物候研究集中在播种期、出苗期、抽穗期、开花期、成熟期等生育期以及营养生长期(播种期/出苗期至抽穗期/开花期)、生殖生长期(抽穗期/开花期至成熟期)和全生育期(播种期/出苗期至成熟期)等生育阶段(表1)。在区域尺度上,华北平原地区冬小麦物候研究居多,其次是西北地区。华北平原冬小麦物候变化特征为:播种期/出苗期推迟,抽穗期/开花期以及成熟期提前,营养生长期与全生育期缩短,而生殖生长期延长。华北平原冬小麦物候变化主要受气候变暖的影响,气温升高加快了小

麦生长发育速度,缩短了小麦生育期,为了保证小麦产量而调整农业管理措施,最终导致营养生长期缩短,生殖生长期延长(Tao et al, 2013; Li et al, 2016; Tao et al, 2017)。西北地区冬小麦物候变化特征研究结果差异较大,这可能主要与品种变化有关。在品种保持不变的情况下,气温升高、降水减少导致冬小麦播种期、开花期与成熟期推迟,全生育期缩短(Xiao et al, 2008);在气候变暖与作物品种更换共同作用下,冬小麦播种期、出苗期分别推迟1.2 d/10 a、1.3 d/10 a,开花期、成熟期提前3.1 d/10 a和3.7 d/10 a,全生育期和营养生长期分别缩短4.3 d/10 a、5.0 d/10 a,生殖生长期则延长0.7 d/10 a,通过作物模型模拟研究表明,单纯气候变化情况下小麦生育期变化更为显著,这表明晚播和小麦品种更换一定程度上抵消了气候变化对小麦生育期的影响(He et al, 2015)。

从整体研究上看,由于区域气候、地理环境和农业管理措施的差异,区域间物候变化趋势不尽相同。在中国众多农业气象试验站中,40%的站点春小麦和冬小麦抽穗期和成熟期显著提前,60%的站点生殖生长期显著延长,30%的站点全生育期和营养生长期显著缩短,华北平原、黄土高原和四川盆地等地区全生育期缩短最为显著(Tao et al, 2012; Tao, Zhang, Zhang et al, 2014)。春小麦和冬小麦生长季不同,因此物候变化程度也有较大差异。1980—2009年,冬小麦抽穗期平均提前12.4 d/10 a,成熟期提前速率小于抽穗期,营养生长期缩短,生殖生长期延长6.0 d/10 a,全生育期缩短11.3 d/10 a(Xiao et al, 2015)。相对于冬小麦,春小麦生育期变化幅度明显更小。在1980—2009年,中国北方地区的春小麦开花期和成熟期提前,生殖生长期延长,营养生长期和全生育期缩短(Xiao, Tao et al, 2016)。春小麦变化幅度远不及冬小麦,这说明区域间气候变化程度以及小麦生长季内各生育阶段气候变化程度都存在较大差异。

2.2 玉米物候的响应与适应

玉米在粮食作物构成中仅次于水稻和小麦,居杂粮作物之首,在东北、华北、西北以及西南地区广泛种植,分布范围较广(表2)。根据播种时间的差异,中国玉米种植类型主要分为春玉米和夏玉米,其中春玉米主要分布在东北和西北地区;而华北和西南地区为春玉米与夏玉米混种区,其中,华北地区夏玉米种植居多,西南地区则主要是春玉米。玉

表1 中国小麦物候变化特征及驱动因子
Tab.1 Characteristics of change and driving factors of wheat phenology in China

分布区	物候变化	驱动因子	文献
全国春小麦/冬小麦种植区	1981—2009年,40%站点春/冬小麦HD和MD显著提前,30%站点WGP和VGP显著缩短,60%站点RGP显著延长 1980—2009年,冬小麦HD提前12.4 d/10 a,MD提前天数少于HD,VGP缩短,RGP延长6 d/10 a,WGP缩短11.3 d/10 a 1981—2010年,春/冬小麦平均SD和EMD推迟,平均AD和MD提前,VGP与WGP缩短,RGP延长	平均气温升高导致生育期提前,WGP和VGP缩短,品种变化延长RGP,日照长度缩短延长VGP 气候变暖导致生育期变化	Tao et al, 2012; Tao, Zhang, Xiao et al, 2014 Xiao et al, 2015
北部地区	2001—2009年,冬小麦EMD和MD推迟,HD提前,WGP与VGP缩短,RGP延长 1980—2009年,春小麦AD和MD分别提前1.8 d/10 a,1.7 d/10 a,VGP和WGP分别缩短2.1 d/10 a和1.9 d/10 a,RGP延长0.2 d/10 a	气候变暖导致春/冬小麦VGP和WGP缩短,RGP延长;品种变化导致小麦变化与观测结果趋势基本一致 品种保持不变,气候变暖为主要影响因子	Liu et al, 2018 高辉明等, 2013
西北半干旱区	1981—2005年,冬小麦SD、ELD、AD、MD分别推迟0.3~0.4 d/a、0~0.2 d/a、0.3 d/a、0.2~0.4 d/a,WGP缩短0.6~1.3 d/a 1981—2009年,冬小麦SD、EMD推迟,AD、MD提前;WGP、VGP缩短,RGP延长	气温升高,降水减少导致生育期缩短 气候变暖导致生育期变化,播种期和品种变化减小了气候变暖对生育期的影响	Xiao et al, 2008 He et al, 2015
华北地区	1981—2009年,冬小麦EMD推迟,AD和MD提前,WGP缩短,AD至MD延长 1982-2000年,冬小麦EMD和HAD均提前,HAD提前幅度更大,EMD—HAD缩短 1980-2009年,冬小麦SD至ELD、SD至AD、SD至MD缩短,其他生育阶段变化在站点间并不统一显著; 1981—2009年,冬小麦SD、EMD推迟,AD、MD提前,AD至MD延长,WGP缩短 1981—2005年,冬小麦WGP、VGP缩短,RGP延长 1982—2013年,冬小麦78%的区域GUD提前,平均提前1.8 d/10 a	气候变暖为主导因子,品种、播种期和农业管理措施变化等因素也有一定影响 气候变暖为主要影响因子 气温升高导致SD至ELD、SD至AD、SD至MD缩短,晚播导致SD至ELD缩短,品种变化对各站点影响不一 气候变暖促使生育期变化,品种变化导致AD至MD略微延长 气候变暖缩短WGP、VGP,延长RGP,品种变化延长WGP和VGP,RGP在多数站点延长 气候变化为物候变化主因,但土壤水分因素不能忽略,对返青期影响较大	Tao et al, 2017 Fang et al, 2005 Wang et al, 2013 Tao et al, 2013 Li et al, 2016 Wang S et al, 2017

注:SD为播种期,EMD为出苗期,DD为越冬期,GUD为返青期,ELD为拔节期,HD为抽穗期,AD为开花期,MD为成熟期,HAD为收获期,RGP为生殖生长期,VGP为营养生长期,WGP为全生育期。

米物候研究集中在播种期、出苗期、抽穗期/抽雄期、开花期、成熟期等生育期以及营养生长期、生殖生长期和全生育期等生育阶段(表2)。东北地区春玉米物候研究较多,但由于各地农业管理措施等差异,物候变化也有不同。41.5%的站点春玉米出苗期显著提前达10.0 d/10 a,在17%的站点则显著推迟;抽雄期在41.5%的站点显著提前,在13.2%的站点则显著推迟达到10.5 d/10 a;43.4%的站点成熟期显著推迟。生育阶段方面,43.4%的站点营养生长期缩短,56.6%的站点延长;生殖生长期在22.6%的站点缩短,77.4%的站点延长;全生育期在33.9%的站点显著延长(Li et al, 2014)。东北地区区域间的物候变化并不平衡,但总体的趋势较为明显,1981—2007年,东北地区播种期提前,成熟期推迟,全生育期延长,区域间物候变化起伏较大(Liu Z et

al, 2013)。西北地区春玉米生育期的延长主要归结于晚熟品种的使用,玉米品种的变换抵消了气候变暖对玉米生育期的不利影响(Bu et al, 2015)。华北平原玉米物候研究主要集中在对夏玉米物候的研究上。在1980—2010年,华北平原夏玉米物候变化特征大致为:成熟期推迟,营养生长期缩短,生殖生长期和全生育期延长(Wang et al, 2016; Xiao, Qi et al, 2016)。不同气候因子对玉米生育期的影响不同,玉米生育期与平均温度呈负相关关系,但与降水、日照时间和有效积温日等气候因子呈正相关关系(Liu Y J et al, 2017)。

生育期与气候变化之间复杂的耦合关系以及农业管理措施的多元性导致了各地区玉米物候变化的不均衡。在种植玉米的农业气象站点中,西北、东北和西南的春玉米播种期显著提前,58.9%的站点玉

表2 中国玉米物候变化特征及驱动因子

Tab.2 Characteristics of change and driving factors of maize phenology in China

分布区	物候变化	驱动因子	文献
全国玉米 种植区	1981—2009年,西北、东北、西南的春玉米SD显著提前,58.9%站点HD提前;东北和华北地区玉米MD显著延迟;41.1%站点玉米WGP显著延长	气温升高导致大约80%站点HD和MD提前,WGP缩短,品种变化则使得超过90%站点HD和MD推迟,WGP延长;除此之外,推迟播期也可以延长WGP	Tao, Zhang, Zhang et al, 2014
东北地区	1981—2007年,玉米SD提前,MD推迟4~21 d,RGP延长,WGP延长2~38 d	气候变暖导致VGP、RGP和WGP缩短,品种变化则导致VGP、RGP和WGP延长,早播导致RGP缩短,VGP延长,但不显著	Liu Z et al, 2013
	1990—2012年,春玉米VGP在43.4%站点缩短,在56.6%站点延长;RGP在22.6%站点缩短,77.4%站点延长;WGP在33.9%站点显著延长	气候、品种、农业管理措施等因子综合影响导致区域生育期变化	Li et al, 2014
西北地区	1980—2010年,春玉米平均VGP、RGP和WGP延长	气候变暖缩短WGP,晚熟品种的使用则延长了WGP	Bu et al, 2015
华北地区	1981—2010年,夏玉米SD至ELD和ELD至AD在多数站点呈缩短趋势,RGP和WGP在92.6%站点呈延长趋势	平均温度与WGP呈负相关,降水量则呈正相关;气候变暖缩短玉米WGP,而品种变化则延长了玉米VGP、RGP和WGP	Wang et al, 2016
	1981—2008年,夏玉米MD推迟,VGP缩短,RGP延长	气候变暖使得AD和MD提前,RGP缩短,品种变化则导致MD推迟,RGP延长2.4 d/10 a~3.7 d/10 a	Xiao, Qi et al, 2016
	1981—2009年,夏玉米SD推迟,EMD、ELD、TAD、AD和MD提前,VGP缩短0.9 d/10 a,RGP延长1.7 d/10 a,WGP延长0.4 d/10 a	生育期长度与平均温度呈负相关,但与降水、日照时间和有效积温日呈正相关	Liu Y J et al, 2017

注:SD为播种期,EMD为出苗期,ELD为拔节期,HD为抽穗期,TAD为抽雄期,AD为开花期,MD为成熟期,RGP为生殖生长期,VGP为营养生长期,WGP为全生育期。

米抽穗期提前;东北和华北平原地区玉米成熟期显著延迟,41.1%的站点玉米全生育期显著延长。在单纯气温升高(农业管理措施保持不变)的情况下,全国大约80%的站点抽穗期和成熟期提前,全生育期缩短。为了保证玉米产量,通过更换玉米品种使得超过90%的站点抽穗期和成熟期推迟,从而延长全生育期,保证了玉米产量;此外,推迟播种期也可以延长全生育期(Tao, Zhang, Zhang et al, 2014)。

2.3 水稻物候的响应与适应

水稻是中国总产最高的粮食作物,广泛分布于长江流域、珠江流域以及东北地区等。水稻种植类型主要分为单季稻和双季稻(早熟稻和晚熟稻),单季稻大致分布于长江以北地区、东北地区 and 西南地区,双季稻则主要分布在长江以南湿润地区(表3)。东北平原地区单季稻生育期变化趋势较为明显:播种期呈提前趋势,成熟期呈推迟趋势,营养生长期、生殖生长期以及全生育期均呈延长趋势(Tao et al, 2013)。气候变暖与品种的更新换代是导致东北平原地区水稻生育期变化的主要因素。东北平原9月份气温升高在一定程度上会延长作物全生育期长度,而7月份温度升高则可能导致作物生育期缩短;同时,新育成长生育期品种是导致吉林省水稻生育期延长的主要影响因素,品种更换对黑龙江影响次之,对辽宁影响最小(侯雯嘉等, 2015)。长江中下游

平原地区单季稻生育期变化趋势与东北平原变化趋势一致,移栽期平均提前2.11 d/10 a,抽穗期与成熟期分别推迟1.37 d/10 a和0.073 d/10 a,营养生长期、生殖生长期以及全生育期分别延长3.03 d/10 a、1.53 d/10 a、4.28 d/10 a,其变化趋势较东北平原单季稻更为突出;双季稻生育期变化特征与单季稻生育期有较大不同,移栽期、抽穗期、成熟期均提前,营养生长期与全生育期缩短,生殖生长期延长(Tao et al, 2013)。

区域间气候变化、地理环境、种植制度和农业管理水平等的差异导致区域间水稻生育期变化特征的不同。从全国范围来看,单季稻和双季稻的移栽期、抽穗期、成熟期提前,早熟稻、晚熟稻和单季稻全生育期延长(Zhang et al, 2014; Wang X et al, 2017)。气候变化对水稻生育期变化的贡献比例与移栽期变化、品种更替等农业管理措施对水稻生育期变化的贡献比例相差较小,其中气候变暖对于单季稻、早熟稻、晚熟稻生育期变化的贡献比例分别为-40%、-45%、-35%,品种更新对生育期变化的贡献比例则分别为58%、44%以及-37%,二者对水稻生育期的影响均不可忽视(Hu et al, 2017)。

2.4 其他典型作物物候的响应与适应

国内对农作物物候的研究主要集中于小麦、玉米、水稻三大主要粮食作物上,对棉花、大豆等经济

表3 中国水稻物候变化特征及驱动因子
Tab.3 Characteristics of change and driving factors of rice phenology in China

分布区	物候变化	驱动因子	文献
全国水稻 种植区	1981—2009年,单季稻WGP在信阳、镇江延长显著,在武昌略有延长,在汉源变化较小	气候变暖缩短水稻生育期,品种变化延长了生育期,品种变化影响略大于气候变化影响	Liu et al, 2012
	1981—2009年,除衡阳晚熟稻WGP延长外,南昌、衡阳和高要的早熟稻和晚熟稻的WGP均缩短	气候变暖缩短水稻生育期,品种变化则延长了生育期,但气候变暖对生育期影响要大于品种变化的影响	Liu L et al, 2013
	1981—2006年,单季稻和双季稻平均情况下,VGP缩短3.3 d/℃,RGP缩短1.2 d/℃,WGP缩短4.1 d/℃	气候变暖导致生育期缩短;单季稻和早熟稻品种变化影响不明显,晚熟稻VGP缩短0.9 d/℃,表明晚熟稻品种变化为短生育期品种	Zhang et al, 2013
	1981—2009年,单季稻和双季稻的TPD、HD、MD提前,VGP、RGP、WGP变化程度相同	气温升高导致VGP和RGP缩短;品种变化使得单季稻VGP延长,双季稻VGP缩短,单季稻和早熟稻RGP延长	Zhang et al, 2014
	1981—2012年,单季稻和双季稻的VGP变化幅度大于RGP变化幅度	气温升高对于单季稻、早熟稻以及晚熟稻的生育期变化的平均贡献比例分别为-40%、-45%、-35%,品种变化则为58%、44%、-37%	Hu et al, 2017
东北地区	1991—2012年,早熟稻WGP平均延长(1.0±4.8) d/10 a,晚熟稻WGP平均延长(0.2±4.5) d/10 a,单季稻WGP平均延长(2.0±6.0) d/10 a	气候变暖导致早熟稻生育期缩短,晚熟稻延长;移栽期的改变等农业管理措施是早熟稻和单季稻生育期变化的主导因素	Wang X et al, 2017
	1981—2009年,单季稻HD、MD推迟,但单季稻、早熟稻和晚熟稻的平均TPD、HD、MD均提前;单季稻的VGP、RGP、WGP均延长,长江中下游平原双季稻则为VGP与WGP缩短,RGP延长	气候变暖导致80%站点水稻生育期缩短,但品种变化延长了单季稻和长江中下游平原早熟稻的RGP,而晚熟稻WGP由于气候变化和品种变化共同作用而缩短	Tao et al, 2013
	1989—2009年,单季稻SD提前,MD推迟,VGP、RGP与WGP显著延长	气候变暖和新增成品种是1989—2009年影响东北地区水稻生育期延长的主要因素	侯雯嘉等, 2015
华北地区	1981—2007年,单季稻SD和TPD显著提前,SD至TPD逐渐缩短,TPD至HD和HD至MD延长,其中TPD至HD显著延长,气候倾向率达4.4 d/10 a	信阳地区水稻生育期的变化主要受4—5月温度变化的影响	薛昌颖等, 2010

注:SD为播种期,EMD为出苗期,TPD为移栽期,ELD为拔节期,HD为抽穗期,AD为开花期,MD为成熟期,RGP为生殖生长期,VGP为营养生长期,WGP为全生育期。

作物物候研究相对较少。Wang等(2008)对1983—2004年间中国西北地区的春棉花生育期变化进行了统计分析,研究表明,气候变暖导致春棉花的出苗期、发芽期、开花期、吐絮期分别提前10.9 d、9.0 d、13.9 d、16.4 d,出苗期至五叶期缩短5.3 d,五叶期至发芽期延长9.2 d,发芽期至开花期和开花期至吐絮期均延长,全生育期延长达到9.0 d。气候变化对棉花生长具有重要影响,尤其是生育期内最低温度与生育期变化紧密相关,但变化程度受具体生长环境条件以及种植品种特性影响。新疆干旱地区绿洲的棉花生育期变化幅度更为显著,播种期至出苗期、吐絮期至吐絮盛期分别缩短1.76 d和5.19 d,全生育期延长超过22 d(Huang et al, 2015)。相对而言,华北平原棉花生育期变化特征没有西北干旱地区突出,全生育期除北部偏干旱站点延长外,其余多数站点缩短(Wang Z et al, 2017)。棉花是华北地区和西北地区主要的经济作物,而东北地区的主要经济作物则是大豆。东北地区大豆生育期变化受气候变化影响较大,气候变暖导致大豆出苗期提前0.01~0.61 d/a,成熟期提前0.18~0.19 d/a,全生育期

缩短0.06~0.17 d/a,变化幅度较小(李正国等, 2011)。

无论是粮食作物还是经济作物,作物物候变化的驱动因子主要是气候变化和农业管理措施变化(品种变化、作物播种期变化等)两大影响因子,其中,气候变化是主导驱动因子,对作物物候变化起决定作用。

2.5 未来气候变化下作物物候的预测

气候变暖对作物物候的影响不单指气温升高的影响,降水、日照时数等其他气候因子对作物生育期的影响也不容忽视(Tao et al, 2006)。此外,中国现阶段对作物生育期的研究集中在过去几十年作物物候变化规律特征上,但随着研究方法不断改进和完善,对未来气候变化情况下作物物候的预测研究在逐渐增多。准确模拟预测作物生育期,可以为作物各生育阶段的农业气象条件评估以及产量预报等活动提供理论支撑(李树岩等, 2015)。翟治芬等(2012)建立了不同农业种植区域气候变化与玉米物候期变化的回归方程,并将PRECIS模型(Providing Regional Climate for Impact Study)中的情景

数据代入方程预测21世纪30年代中国玉米的生育期,结果表明,中国玉米全生育期变化趋势以延长为主。Lv等(2013)利用WheatGrow作物模型,结合高分辨率全球气候模式(Global Climate Model, GCM)对中国冬小麦主产区21世纪30、50以及70年代3种温室气体排放情况下冬小麦的开花期和灌浆阶段持续时间进行了模拟预测,在模拟预测试验中,小麦品种和播种期保持不变。预测结果表明,随着气温升高,开花期逐步提前,开花期提前幅度同气温升高程度相关性较强,灌浆阶段持续时间在未来变化比较平稳,缩短幅度较小。Chen等(2014)利用MIROC-RegCM3气候模型模拟预测了2030—2090年鲁西北平原地区气候,将预测气候数据代入CERES-Maize模型中,对2030—2090年鲁西北地区玉米生育期进行了预测模拟,结果表明,在品种和播种期保持不变的情况下,玉米灌浆阶段将会缩短,对玉米产量造成不利影响。

3 结论与展望

农作物物候研究对于农业环境评估、农业灾害预防以及农作物产量的稳定等均有重要意义。本文通过分析汇总中国近几十年主要农作物生育期的变化特征及其相应的研究方法,得出以下结论:

(1) 作物物候的研究方法主要是田间试验观测方法、统计分析方法、模型模拟方法和遥感反演方法等,其中使用最普遍的是统计分析方法,其他3种方法都需要结合统计分析方法。模型模拟方法易于操作、可行性强,在物候研究中应用也比较多。遥感反演方法对生育期特征要求较高,研究的生育期一般为春季作物的返青期等。

(2) 中国对作物物候的研究主要集中在小麦、玉米、水稻等主要粮食作物以及棉花、大豆等主要经济作物上。各区域主要农作物生育期特征在气候变暖的背景下均产生了变化,但变化程度不同,这主要是由区域间气候条件、生态环境以及农业管理水平的差异造成的。

(3) 农作物的播种期/出苗期(水稻为移栽期)、抽穗期/开花期、成熟期、营养生长期、生殖生长期以及全生育期是物候变化研究的重点生育期。整体上,小麦物候变化特征为:抽穗期/开花期和成熟期以提前为主,营养生长期和全生育期缩短,生殖生长期延长;玉米抽穗期和成熟期变化特征不显著,

营养生长期缩短,生殖生长期和全生育期以延长为主要趋势;水稻则由于区域间生长条件的不同导致区域间作物生育期变化趋势存在较大差异,总体上,全生育期呈延长趋势。

(4) 作物物候变化的驱动因子主要是气候变化和农业管理措施变化两大影响因子,其中,气候变化是主导驱动因子,对作物物候变化起决定作用。气候变暖通常会造成作物生育期缩短,影响作物生长发育,减少作物产量。调整农业管理措施,例如种植长生育期品种、提前或推迟播种期等,提高管理水平,延长作物生育期,可以一定程度上抵消气候变化对作物生育期的不利影响,保证农业生产的安全。

作物物候研究意义重大。未来作物物候研究趋向于田间试验观测、作物模型以及统计分析等多种研究方法的结合使用,从而进一步提高研究结果的可靠性。在未来的研究中,主要应开展以下3个方面的工作:其一,进一步完善作物物候研究方法,通过改进作物模型和统计模型等提高模型模拟结果精度;其二,当下物候研究偏重于作物形态学研究,对作物生理学特征研究不足,作物生理学特征定量化难度较大是研究的一大难点;其三,不同地区作物物候对气候变化的响应机制是不同的,针对不同地区物候变化特征,采取相应的管理措施去应对气候变化,这也是未来作物物候研究的主要方向之一。

参考文献(References)

- 陈金, 杨飞, 张彬, 等. 2010. 被动式夜间增温设施设计及其增温效果[J]. 应用生态学报, 21(9): 2288-2294. [Chen J, Yang F, Zhang B, et al. 2010. Passive nighttime warming (PNW) system, its design and warming effect. Chinese Journal of Applied Ecology, 21(9): 2288-2294.]
- 方修琦, 余卫红. 2002. 物候对全球变暖响应的研究综述[J]. 地球科学进展, 17(5): 714-719. [Fang X Q, Yu W H. 2002. Progress in the studies on the phenological responding to global warming. Advance in Earth Sciences, 17(5): 714-719.]
- 高辉明, 张正斌, 徐萍, 等. 2013. 2001—2009年中国北部冬小麦生育期和产量变化[J]. 中国农业科学, 46(11): 2201-2210. [Gao H M, Zhang Z B, Xu P, et al. 2013. Changes of winter wheat growth period and yield in Northern China from 2001-2009. Scientia Agricultura Sinica, 46(11): 2201-2210.]
- 侯雯嘉, 耿婷, 陈群, 等. 2015. 近20年气候变暖对东北水稻

- 生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 26(1): 249-259. [Hou W J, Geng T, Chen Q, et al. 2015. Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in Northeast China during recent two decades. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(1): 249-259.]
- 李军. 1997. 作物生长模拟模型的开发应用进展[J]. 西北农业大学学报, (4): 102-107. [Li J. 1997. The progress in the development and application of crop growth simulation models. *Journal of Northwest A&F University*, (4): 102-107.]
- 李树岩, 王靖, 余卫东, 等. 2015. 气候变化对河南省夏玉米主栽品种发育期的影响模拟[J]. 中国农业气象, 36(4): 479-488. [Li S Y, Wang J, Yu W D, et al. 2015. Modelling the impacts of climate change on phenology of representative maize varieties in Henan Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 36(4): 479-488.]
- 李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等. 2011. 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[J]. 中国农业科学, 44(20): 4180-4189. [Li Z G, Yang P, Tang H J, et al. 2011. Trend analysis of typical phenophases of major crops under climate change in the three provinces of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 44(20): 4180-4189.]
- 薛昌颖, 刘荣花, 吴骞. 2010. 气候变暖对信阳地区水稻生育期的影响[J]. 中国农业气象, 31(3): 353-357. [Xue C Y, Liu R H, Wu Q. 2010. Effect of climate warming on rice growing stages in Xinyang. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 31(3): 353-357.]
- 杨洪宾, 徐成忠, 李春光, 等. 2009. 播期对冬小麦生长及所需积温的影响[J]. 中国农业气象, 30(2): 201-203. [Yang H B, Xu C Z, Li C G, et al. 2009. Growth and required accumulated temperature of winter wheat under different sowing time. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 30(2): 201-203.]
- 翟治芬, 胡玮, 严昌荣, 等. 2012. 中国玉米生育期变化及其影响因子研究[J]. 中国农业科学, 45(22): 4587-4603. [Zhai Z F, Hu W, Yan C R, et al. 2012. Change of maize growth period and its impact factor in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 45(22): 4587-4603.]
- 张彬, 郑建初, 田云录, 等. 2010. 农田开放式夜间增温系统的设计及其在稻麦上的试验效果[J]. 作物学报, 36(4): 620-628. [Zhang B, Zheng J C, Tian Y L, et al. 2010. System design of Free Air Temperature Increased (FATI) for field nighttime warming experiment and its effects on rice-wheat cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 36(4): 620-628.]
- 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 2012. 播期对春小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 31(2): 324-331. [Zhang K, Li Q Z, Wang R Y, et al. 2012. Effects of sowing date on the growth and yield of spring wheat. *Chinese Journal of Ecology*, 31(2): 324-331.]
- 张鑫, 陈金, 江瑜, 等. 2014. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 25(5): 1349-1356. [Zhang X, Chen J, Jiang Y, et al. 2014. [Impacts of nighttime warming on rice growth stage and grain yield of leading varieties released in different periods in Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(5): 1349-1356.]
- 中国农业年鉴编辑委员会. 2011. 中国农业年鉴2011[M]. 北京: 中国农业出版社. [China Agricultural Yearbook Editorial Committee. 2011. *China agriculture yearbook 2011*. Beijing, China: Agricultural Publishing House.]
- Abbas G, Ahmad S, Ahmad A, et al. 2017. Quantification the impacts of climate change and crop management on phenology of maize-based cropping system in Punjab, Pakistan[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247: 42-55.
- Ahmad S, Abbas G, Fatima Z, et al. 2017. Quantification of the impacts of climate warming and crop management on canola phenology in Punjab, Pakistan[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 203(5): 442-452.
- Ahmad S, Abbas Q, Abbas G, et al. 2017. Quantification of climate warming and crop management impacts on cotton phenology[J]. *Plants*, 6(4): 1-16.
- Ahmad S, Nadeem M, Abbas G, et al. 2016. Quantification of climate warming and crop management impact on sugarcane phenology[J]. *Climate Research*, 71(1): 47-61.
- Bu L, Chen X, Li S, et al. 2015. The effect of adapting cultivars on the water use efficiency of dryland maize (*Zea mays*, L.) in northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 148: 1-9.
- Chen P, Liu Y. 2014. The impact of climate change on summer maize phenology in the northwest plain of Shandong Province under the IPCC SRES A1B scenario[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 17(1), doi: 10.1088/1755-1315/17/1/012053.
- Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1): 69-78.
- Cong N, Wang T, Nan H, et al. 2013. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multimethod analysis[J]. *Global Change Biology*, 19(3): 881-891.
- Craufurd P Q, Wheeler T R. 2009. Climate change and the flowering time of annual crops[J]. *Journal of Experi-*

- tal Botany, 60(9): 2529-2539.
- Diskin E, Proctor H, Jebb M, et al. 2012. The phenology of *rubus fruticosus* in Ireland: Herbarium specimens provide evidence for the response of phenophases to temperature, with implications for climate warming [J]. *International Journal of Biometeorology*, 56(6): 1103-1111.
- Eyshi Rezaei E, Siebert S, Ewert F. 2015. Intensity of heat stress in winter wheat-phenology compensates for the adverse effect of global warming [J]. *Environmental Research Letters*, 10(2). doi: 10.1088/1748-9326/10/2/024012.
- Fang W, Chen J, Shi P, et al. 2005. Variability of the phenological stages of winter wheat in the North China Plain with NOAA/AVHRR NDVI data (1982-2000) [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005. IGARSS '05. Proceedings. IEEE Xplore: 3124-3127.
- Gao L, Jin Z, Huang Y, et al. 1992. Rice clock model: A computer model to simulate rice development [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60(S1-S2): 1-16.
- Grigorieva E A, Matzarakis A, Freitas C R D. 2010. Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude [J]. *Climate Research*, 42(2): 143-154.
- He L, Asseng S, Zhao G, et al. 2015. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200(4): 135-143.
- Hu Q, Weiss A, Song F, et al. 2005. Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U.S. Great Plains [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135(1): 284-290.
- Hu X, Huang Y, Sun W, et al. 2017. Shifts in cultivar and planting date have regulated rice growth duration under climate warming in China since the early 1980s [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247: 34-41.
- Hu Z, Liu Y, Huang L, et al. 2015. Premature heading and yield losses caused by prolonged seedling age in double cropping rice [J]. *Field Crops Research*, 183: 147-155.
- Huang J, Feng J. 2015. Effects of climate change on phenological trends and seed cotton yields in oasis of arid regions [J]. *International Journal of Biometeorology*, 59(7): 877-888.
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li K N, Yang X, Tian H, et al. 2016. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. *International Journal of Biometeorology*, 60(1): 21-32.
- Li Z G, Yang P, Tang H J, et al. 2014. Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012 [J]. *Regional Environmental Change*, 14(1): 39-48.
- Liu L, Wang E, Zhu Y, et al. 2012. Contrasting effects of warming and autonomous breeding on single-rice productivity in China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 149(7): 20-29.
- Liu L, Wang E, Zhu Y, et al. 2013. Effects of warming and autonomous breeding on the phenological development and grain yield of double-rice systems in China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 165(3): 28-38.
- Liu Y, Chen Q, Ge Q, et al. 2018. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248: 518-526.
- Liu Y J, Qin Y, Ge Q S, et al. 2017. Responses and sensitivities of maize phenology to climate change from 1981 to 2009 in Henan Province, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(9): 1072-1084.
- Liu Z, Hubbard K G, Lin X, et al. 2013. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China [J]. *Global Change Biology*, 19(11): 3481-3492.
- Liu Z, Wu C, Liu Y, et al. 2017. Spring green-up date derived from GIMMS3g and SPOT-VGT NDVI of winter wheat cropland in the North China Plain [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 130: 81-91.
- Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico [J]. *Field Crops Research*, 94(2): 250-256.
- Lv Z, Liu X, Cao W, et al. 2013. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172(3): 234-248.
- Mo F, Sun M, Liu X Y, et al. 2016. Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau [J]. *Field Crops Research*, 96: 337-347.
- Nicole E, Timh S, Annette M. 2010. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany [J]. *Global Change Biology*, 13(8): 1737-1747.
- Oteros J, García-Mozo H, Botey R, et al. 2015. Variations in cereal crop phenology in Spain over the last twenty-six years (1986-2012) [J]. *Climatic Change*, 130(4): 545-558.
- Sadras V O, Monzon J P. 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina [J]. *Field*

- Crops Research, 99(2): 136-146.
- Tao F L, Xiao D P, Zhang S, et al. 2017. Wheat yield benefited from increases in minimum temperature in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 239: 1-14.
- Tao F L, Yokozawa M, Xu Y, et al. 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 138 (1): 82-92.
- Tao F L, Zhang S, Zhang Z, et al. 2014. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift [J]. Global Change Biology, 20(12): 3686-3699.
- Tao F L, Zhang S, Zhao Z. 2012. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics [J]. European Journal of Agronomy, 43(43): 201-212.
- Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. 2013. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981-2009 in China, and late rice was just opposite [J]. Global Change Biology, 19 (10): 3200-3209.
- Tao F L, Zhang Z, Xiao D P, et al. 2014. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981-2009 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 189-190(189): 91-104.
- Verón S R, Abelleira D D, Lobell D B. 2015. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas [J]. Climatic Change, 130(2): 235-245.
- Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, et al. 2008. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in Northwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 148(8): 1242-1251.
- Wang J, Wang E, Feng L, et al. 2013. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain [J]. Field Crops Research, 144(6): 135-144.
- Wang S, Mo X, Liu Z, et al. 2017. Understanding long-term (1982-2013) patterns and trends in winter wheat spring green-up date over the North China Plain [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 57: 235-244.
- Wang X, Ciais P, Li L, et al. 2017. Management outweighs climate change on affecting length of rice growing period for early rice and single rice in China during 1991-2012 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 233: 1-11.
- Wang Z, Chen J, Li Y, et al. 2016. Effects of climate change and cultivar on summer maize phenology [J]. International Journal of Plant Production, 10(4): 509-526.
- Wang Z, Chen J, Xing F, et al. 2017. Response of cotton phenology to climate change on the North China Plain from 1981 to 2012 [J]. Scientific Reports, 7(1): 6628.
- Xiao D P, Mo J P, Tao F L, et al. 2015. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China [J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 20(7): 1191-1202.
- Xiao D P, Qi Y Q, Shen Y J, et al. 2016. Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain [J]. Theoretical & Applied Climatology, 124(3-4): 653-661.
- Xiao D P, Tao F L, Liu Y J, et al. 2013. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981-2009 [J]. International Journal of Biometeorology, 57(2): 275-285.
- Xiao D P, Tao F L, Shen Y J, et al. 2016. Combined impact of climate change, cultivar shift, and sowing date on spring wheat phenology in Northern China [J]. Journal of Meteorological Research, 30(5): 820-831.
- Xiao G, Qiang Z, Yao Y, et al. 2008. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 127(1): 37-42.
- Zhang S, Tao F L, Zhang Z. 2014. Rice reproductive growth duration increased despite of negative impacts of climate warming across China during 1981-2009 [J]. European Journal of Agronomy, 54: 70-83.
- Zhang T, Huang Y, Yang X. 2013. 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 [J]. Global Change Biology, 19(2): 563-570.

Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China

ZHAO Yanxi¹, XIAO Dengpan^{1*}, BAI Huizi¹, TAO Fulu²

(1. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Climate change with warming as the main characteristic has important influence on crop phenology. Rising temperature usually leads to faster crop growth and shortened growth period that causes loss of crop yield, which is not conducive to agricultural development. Meanwhile, crop phenological changes can reflect climate change directly or indirectly, which has important significance for detecting climate change. Research on crop phenology is crucial for preventing agricultural meteorological disasters, the progress of agricultural production management, and the safety of agricultural production. With the continuous increase of global surface temperature, research on crop phenology has attracted increasingly more attention of scientists. Based on the key research methods of crop phenology, this article summarizes the studies on the change of crop growth period and the main driving factors of change of major crops, including wheat, corn, rice, cotton, and soybean, in recent decades in China. The following conclusions are drawn: 1) Statistical analysis methods have been most widely used and several other methods were combined with statistical analysis methods in application. Model simulation method has also been widely used in phenological research, and such method is easy to operate. Remote sensing inversion has a high requirement on the characteristics of the growth period, and the focus is generally on green-up period of spring crops. 2) Overall, the whole growth period of wheat is mainly shortened, and the main trend of whole growth period of maize and rice is prolonged. 3) The driving factors of main crop phenological change is climate change and agricultural management. Climate change is the dominant driving factor, which decides crop phenological change, and adjusting agricultural management measures can partly offset the negative impact of climate change on crop growth period. The study of response and adaptation of crop phenology to climate change can provide an important theoretical basis for agricultural production to adapt to climate change.

Keywords: climate change; crop phenology; growth period; driving factor; crop model