

气候变化背景下1981-2010年中国玉米物候变化时空分异

秦 雅^{1,2}, 刘玉洁², 葛全胜²

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054; 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: 基于中国玉米种植区内114个农气站1981-2010年的长序列物候观测数据, 量化分析了玉米8个连续物候期的时空分异特征和相应的生长阶段长度变化规律。结果表明: 1981-2010年间, 玉米生育期内平均温度和有效积温(GDD)呈现增加趋势, 降水量和日照时数呈现减少趋势。气候变化背景下, 玉米物候期发生了显著变化。春玉米物候期以提前趋势为主, 包括西北内陆玉米区春玉米、西南山地丘陵玉米区春玉米; 夏玉米和春夏播玉米各物候期在不同区域均呈现推迟的趋势, 西北内陆玉米区夏玉米各物候期推迟的幅度大于黄淮平原夏玉米各物候期推迟的幅度。玉米物候期的变化改变了相应生长阶段的长度, 中国春/夏/春夏播玉米营养生长期(播种期—抽雄期)呈现不同程度的缩短趋势, 而对应的生殖生长期(抽雄期—成熟期)呈现不同程度的延长趋势; 春玉米生育期(播种期—成熟期)延长, 夏/春夏播玉米生育期缩短。

关键词: 玉米; 物候; 气候变化; 时空分异; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201805010

1 引言

物候可以直观指示自然季节与气候环境的变化^[1-2], 是衡量区域气候变化的重要生物学指标。根据IPCC第五次评价报告^[3], 全球平均表面气温已上升了0.89℃(1901-2012年)。温度升高可促进酶的活性, 加快植物物候进程, 从而缩短植物生长季长度; 而植物生长季长度的变化反过来会引起植被生产力、结构组成及土壤—植被—大气系统水、热、碳交换的变化, 进而影响到气候系统, 加剧气候变化^[4]。农业生产受到气候变化最直接的影响^[5], 研究农作物物候变化规律对指导地区农业生产、减缓气候变化带来的负面影响具有重要的意义。

在气候变化背景下, 国内外学者开展了大量玉米物候方面的研究。Sacks等^[6]基于Agro-IBIS模型发现美国玉米带内玉米(1981-2005年)的播种期每年提前0.40 d, 成熟期每年推迟0.10 d。中国学者研究发现, 由于气候变暖, 全国范围内80%以上的玉米站点

收稿日期: 2017-09-12; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040103); 国家自然科学基金项目(41671037); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2016049); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC005); 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(2017RC101)[**Foundation:** The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19040103; National Natural Science Foundation of China, No.41671037; The Youth Innovation Promotion Association of CAS, No.2016049; The Key Research Program of Frontier Sciences, CAS, No.QYZDB-SSW-DQC005; The Program for "Kezhen" Excellent Talents in IGSNRR, CAS, No.2017RC101]

作者简介: 秦雅(1991-), 女, 硕士, 主要从事气候变化影响与适应研究。E-mail: qinya1212@163.com

通讯作者: 刘玉洁(1982-), 女, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进会会员, 主要从事气候变化影响与粮食安全研究。E-mail: liuyujie@igsrr.ac.cn

抽雄期和成熟期每 10 年平均分别提前了 3.2 d 和 6.0 d^[7]。东北地区 1981-2007 年玉米播种期提前而成熟期推迟了 4~21 d^[8]。内蒙古地区 1981-2009 年间玉米播种期提前 1.0 d/10a, 成熟期平均推迟了 3.3 d/10a^[9]。同一时期新疆地区春玉米和夏玉米物候期主要呈提前趋势, 夏玉米播种期提前的趋势达到 11.0 d/10a^[10]。付刚等^[11]在西藏自治区布设的增温试验研究发现, 增温使玉米各物候期出现不同幅度的提前趋势。在平均气温上升、降水趋势随纬度递减以及日照时数显著下降的影响下, 京津冀地区和山东省夏玉米播种期、吐丝期和成熟期显著推迟, 而河南省夏玉米的播种期、拔节期和吐丝期显著提前^[12]。

总结以上研究可以发现, 已有研究多针对气候变化背景下温度升高对物候期的影响, 除温度以外, 水分和光照也会影响作物生育进程, 如缩短光照能促进短日照植物开花, 使花期提前, 而延长光照时间则延迟花期。Zheng 等^[13]研究发现, 冬季和早春植物开花的主要影响因素是温度, 晚春和早夏植物开花受温度和日照同时影响, 而晚夏植物花粉的开始传播主要受日照的影响。而在一定光照条件下, 改变空气湿度也能引起植物物候变化^[4]。此外, 限于观测数据和模型模拟能力, 已有研究多集中在个别关键物候期的研究, 如播种期、抽雄期和成熟期, 缺乏对玉米生长过程中连续多个物候期变化规律的系统分析。并且, 受局地区域气候的影响, 同一作物相同物候期在不同地区间存在显著差异, 但已有研究多只针对局部区域或者少数几个站点进行分析, 如 Zhao 等^[14]围绕东北地区 5 个玉米站点 (黑龙江 2 个、吉林 2 个、辽宁 1 个) 探讨调整播期和改变品种对玉米生长季及产量形成的影响。Wang 等^[15]分别在东北地区、华北地区和西南地区选取 3~4 个代表站点探讨模型模拟玉米物候的不确定性因素。全国范围内玉米生长过程中受多个气候因子影响、连续多个物候期的变化规律, 尤其是玉米生长过程中每个物候节点变化趋势的空间分异规律有待研究。

因而, 本文基于 1981-2010 年中国 4 个玉米种植区内 114 个农气站详实的玉米物候观测数据, ① 量化分析玉米生长季内包括播种期、出苗期、三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期、成熟期等 8 个物候期过去 30 年来的时空分异特征; ② 探讨不同区域、不同种植类型玉米物候期和各生长阶段长度在关键气候因子 (平均温度、降水量、日照时数) 变化背景下的分异规律, 以期为地区农业生产实践提供理论参考。

2 数据和方法

2.1 数据

按照已有的中国玉米种植区划^[16], 结合现有物候实测数据, 本文覆盖中国西北内陆玉米区、北方春玉米区、黄淮平原春夏播玉米区和西南山地丘陵玉米区 4 个主产区的春玉米、夏玉米和春夏播玉米, 春玉米播期在 4 月下旬至 5 月上旬, 夏玉米为 6 月上旬至 7 月中旬, 而春夏播玉米为 4 月和 6 月间隔播种或 5 月和 6 月间隔播种, 主要受前季作物种植时间的影响。

区域内研究站点的选择满足以下 4 个条件: ① 具有典型性和代表性, 能够代表当地玉米的农业生产状况; ② 拥有长序列 (1981-2010 年) 玉米物候观测资料; ③ 有对应的气象观测站点; ④ 各站点有对应的田间管理记录, 如品种、灌溉以及施肥情况等。根据数据质量, 遴选出 114 个具有完整观测记录的站点 (图 1), 包括: 西北内陆玉米区 (17 个)、北方春玉米区 (54 个)、黄淮平原春夏播玉米区 (32 个) 和西南山地丘陵玉米区 (11 个)。将玉米的生长季划分为 3 个关键的生长阶段, 分别为营养生长期 (播种期—抽雄期)、生殖生长期 (抽雄期—成熟期)、生育期 (播种期—成熟期), 分别计算这 3 个生长阶段长度。对应站点同期气象数据由数据共享网获得 (<http://data.cma.cn/site/index.html>)。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

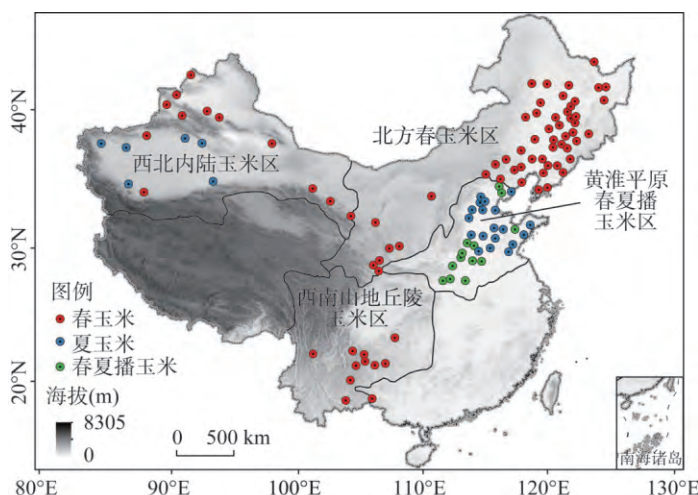


图1 中国农业气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of agro-meteorological stations of China

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 观测到的玉米物候期和生长阶段长度的变化趋势可以利用线性回归方程进行计算，将年份作为自变量，观测到的玉米物候期或生长阶段长度的变化趋势，计算公式如下：

$$\theta_k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (k \times P_{i,k}) - \sum_{i=1}^n k \times \sum_{i=1}^n P_{i,k}}{n \times \sum_{i=1}^n k^2 - (\sum_{i=1}^n k)^2} \quad (1)$$

式中： n 为分析时段的年数； $P_{i,k}$ 表示观测站点在 i 年的 k 物候期（Day of year, DOY）或生长阶段长度（days）； i 表示第 i 年； θ_k 表示 k 物候期或生长阶段长度的变化趋势（d/a）。若 θ_k 大于0，表示物候期或生长阶段长度推迟或延长，反之提前或缩短。利用双尾 t 检验对回归系数进行显著性检验。

2.2.2 积温计算 有效积温（Growing degree days, GDD）是一个分析作物生长的热量指标，本文指日均温度大于10℃的有效积温，具体计算公式^[17]如下：

$$GDD = \sum_{d_s}^{d_e} \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) - T_{base} \right] \quad (2)$$

式中： d_s 代表研究阶段开始的日期； d_e 代表研究阶段结束的日期； T_{\max} 代表日最高温度； T_{\min} 代表日最低温度； T_{base} 代表玉米生育期内生物学下限温度。

基于观测到的物候期发生日确定生育期的初始日（即播种期发生日）和终止日（即成熟期发生日），利用逐日气象数据计算各站点每年玉米生育期内的平均温度、降水量、日照时数和GDD。1981-2010年间玉米生育期内平均温度、降水量、日照时数和GDD的变化趋势也可以建立类似式（1）的方程进行计算。

3 结果分析

3.1 气候因子时空变化

(C)1994-2021 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1981-2010年期间，研究区各站点玉米生育期内的平均温度、降水量、日照时数和

GDD 变化趋势的空间分布如图 2 所示。从全国范围来看, 玉米生育期内的平均温度和 GDD 呈现增加的趋势, 增加的趋势分别为 0.03 °C/a 和 4.92 °C d/a; 降水量和日照时数呈现降低的趋势, 速率分别为-0.16 mm/a 和-2.07 h/a (表 1)。全国分别有 90% 和 83% 的站点玉米生育期内的平均温度和 GDD 呈升高趋势, 且高纬度地区增温幅度大于低纬度地区。

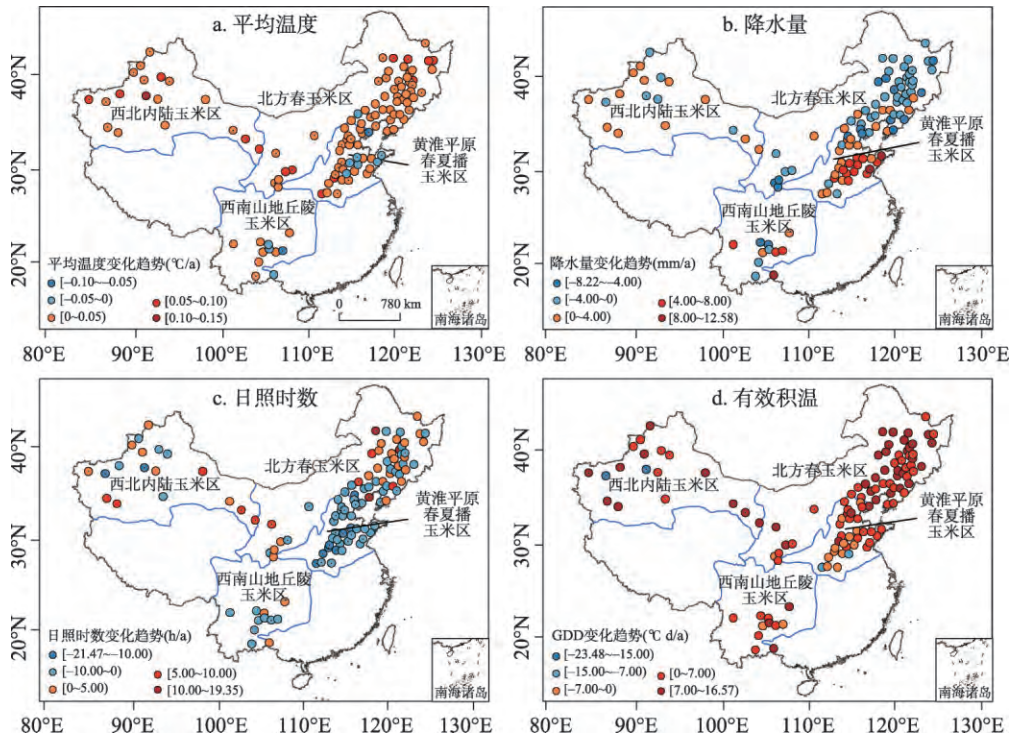
玉米生育期内的降水量呈现明显的地域差异性 (图 2b), 全国大部分地区玉米生育期内降水量呈现减少趋势 (55%), 主要分布在北方春玉米区、西北内陆玉米区和西南山地丘陵玉米区; 黄淮平原春夏播玉米区降水量则以增加趋势为主。从种植类型来看, 春玉米生育期内的降水量以每年 1.30 mm 的趋势在减少; 夏玉米和春夏播降水量分别以 2.49 mm/a 和 1.44 mm/a 的趋势增加。全国范围内 63% 的站点玉米生育期内的日照时数减

表 1 不同种植区玉米生育期内气候因子变化趋势

Tab. 1 Trends of climate factors in the whole growth period of maize in different regions

种植区域	平均温度变化(°C/a)	降水量变化(mm/a)	日照时数变化(h/a)	GDD 变化(°C d/a)
全国	0.03**	-0.16	-2.07**	4.92**
西北内陆玉米区	0.05**	0.14	-0.99	5.26**
北方春玉米区	0.04**	-2.26**	0.51	7.01**
黄淮平原春夏播玉米区	0.02**	2.61**	-7.30**	0.87
西南山地丘陵玉米区	-0.001	1.53	-1.15	5.81**

注: “+”、“-” 分别表示气候因子增加或减少; “*”、“**” 分别表示达到 0.01 和 0.05 的显著性水平。



注: 图中黑色圆点表示达到 $P < 0.05$ 的显著性水平。

图 2 1981-2010 年中国玉米生育期内气候因子变化趋势的空间分布

少,在黄淮平原春夏播玉米区表现的最集中,减少的幅度为 -7.30 h/a (图2c,表1);相反,北方春玉米区玉米生育期内的日照时数呈现增加的趋势(0.51 h/a)(表1)。平均水平上,春玉米生育期内的日照时数增幅为 0.31 h/a ,夏/春夏播玉米生育期内的日照时数则呈现减少趋势(-5.37 h/a 、 -10.03 h/a)。

3.2 玉米物候期时空分异

全国范围内,玉米物候期以推迟趋势为主,分别有68%、54%、53%、54%、55%、74%和77%的站点玉米播种期、出苗期、三叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期呈现推迟的趋势,而有54%的站点玉米七叶期呈现提前的趋势。播种期、出苗期、三叶期、拔节期和抽雄期呈现推迟趋势的站点主要分布在黄淮平原春夏播玉米区的大部分以及北方春玉米区东部和西北内陆玉米区的部分站点。七叶期提前的站点主要位于北方春玉米区东南部(图3d)。

区域间玉米物候期的变化存在显著差异(图3,表2)。相同种植区内,不同种植类型玉米的物候期变化差异明显。在西北内陆玉米区,春玉米从播种期至拔节期各物候期均呈提前趋势($0.05\text{ d/a} < \theta < 0.24\text{ d/a}$),而抽雄期、乳熟期和成熟期推迟,推迟幅度分别为 0.02 d/a 、 0.12 d/a 和 0.06 d/a ;夏玉米从播种期至成熟期各物候期均推迟($0.21\text{ d/a} < \theta < 0.87\text{ d/a}$)。西南山地丘陵玉米区春玉米各物候期均提前($0.13\text{ d/a} < \theta < 0.53\text{ d/a}$);与此相反,北方春玉米各物候期以推迟为主($0.01\text{ d/a} < \theta < 0.30\text{ d/a}$),仅七叶期提前(-0.14 d/a)。在黄淮平原春夏播玉米区内,夏玉米从播种至成熟各物候期推迟($0.09\text{ d/a} < \theta < 0.35\text{ d/a}$),春夏播玉米各物候期也推迟,播种期推迟趋势显著(0.96 d/a);春夏播玉米播种期显著推迟,导致整个生育期缩短,由于该地区实施春玉米—冬小麦—夏玉米的轮作制度,玉米播种期除了受气候因子的影响外,还会受到前季作物播种以及收获时间的影响。

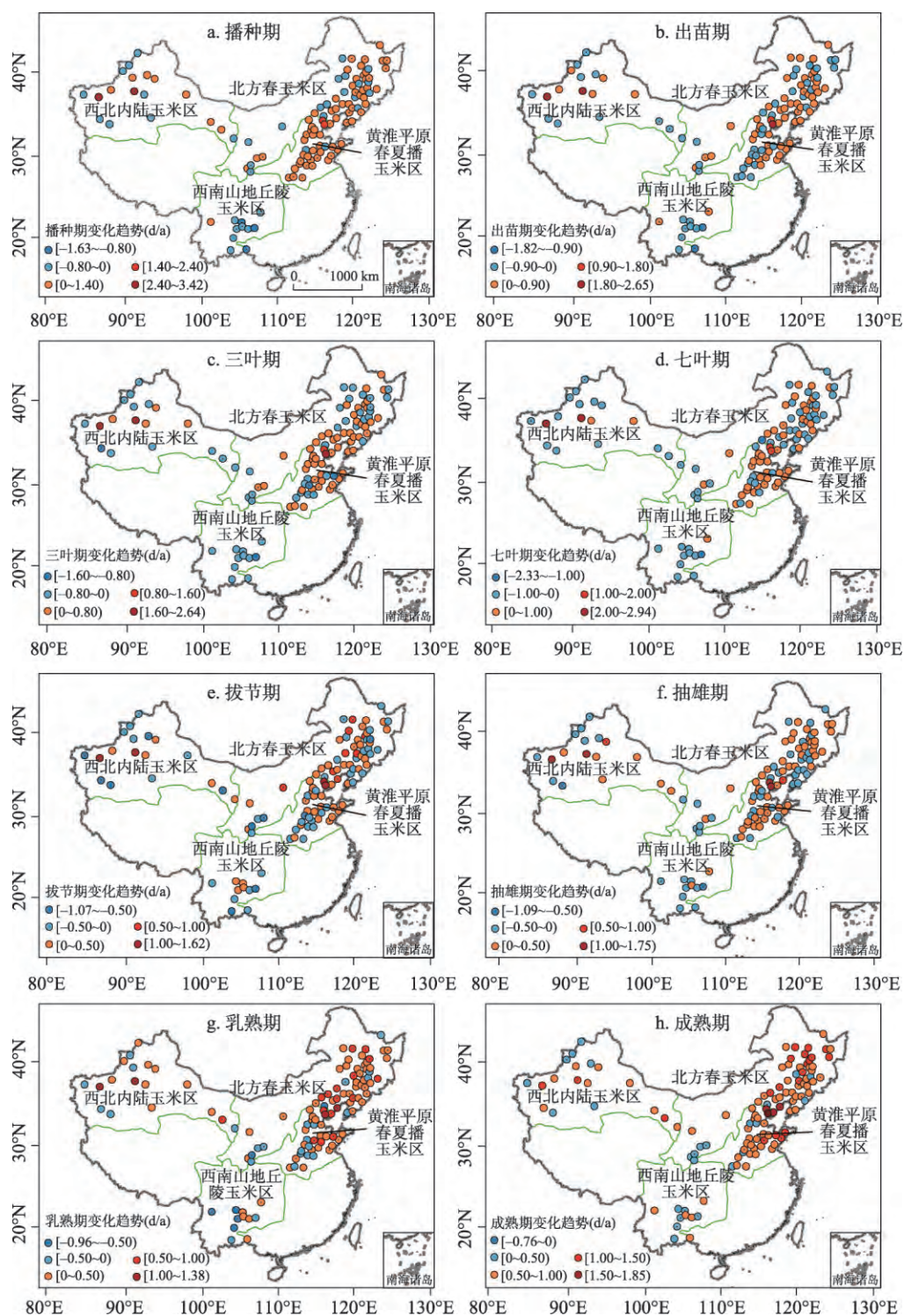
不同种植区内,相同种植类型的玉米物候期变化趋势的方向和幅度也存在明显差异,如西南山地丘陵玉米区春玉米物候期以提前为主,而北方春玉米区玉米物候期则以推迟为主;西北内陆夏玉米($0.21\text{ d/a} < \theta < 0.87\text{ d/a}$)各物候期推迟的幅度明显大于黄淮平原春夏播玉米区夏玉米各物候期推迟的幅度($0.09\text{ d/a} < \theta < 0.35\text{ d/a}$)。

3.3 关键生长阶段长度变化

全国范围内分别有34%、71%和57%的站点玉米营养生长期、生殖生长期和生育期呈现延长的趋势,延长的幅度分别集中在 0.08 d/a ~ 0.76 d/a 、 0.61 d/a ~ 0.97 d/a 和 0.03 d/a ~ 1.07 d/a 之间。平均水平上,春玉米营养生长期缩短,缩短幅度为 0.06 d/a ;生殖生长期和生育期均延长,延长幅度分别为 0.18 d/a 和 0.16 d/a 。西北内陆春玉米和西南山地丘陵春玉米对应3个生长阶段均呈现延长的趋势;北方春玉米的营养生长期缩短,生殖生长期和生育期呈延长趋势(表2)。夏玉米的营养生长期和生育期均缩短,缩短幅度为 0.20 d/a 和 0.05 d/a ;生殖生长期延长,延长幅度为 0.14 d/a ;其中,西北内陆夏玉米3个生长阶段均缩短,而黄淮平原夏玉米营养生长期缩短,生殖生长期和生育期延长(表2)。黄淮平原春夏播玉米的生殖生长期延长(0.14 d/a),营养生长期和生育期长度均缩短,缩短幅度分别为 0.83 d/a 和 0.60 d/a (图4)。

4 讨论

气候变化背景下,1981-2010年间,中国春/夏/春夏播玉米生育期内的平均温度均呈现上升的趋势($0.03\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/a}$)。一般而言,温度升高影响作物的生长及



注: 图中黑色圆点表示达到 $P < 0.05$ 的显著性水平。

图3 1981-2010年中国玉米物候期变化趋势的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of maize phenology trends in China from 1981 to 2010

表2 1981-2010年中国不同区域玉米物候期/生长阶段长度变化趋势(d/a)

Tab. 2 Trends of phenology / growing stages length of maize in different regions of China from 1981 to 2010 (d/a)

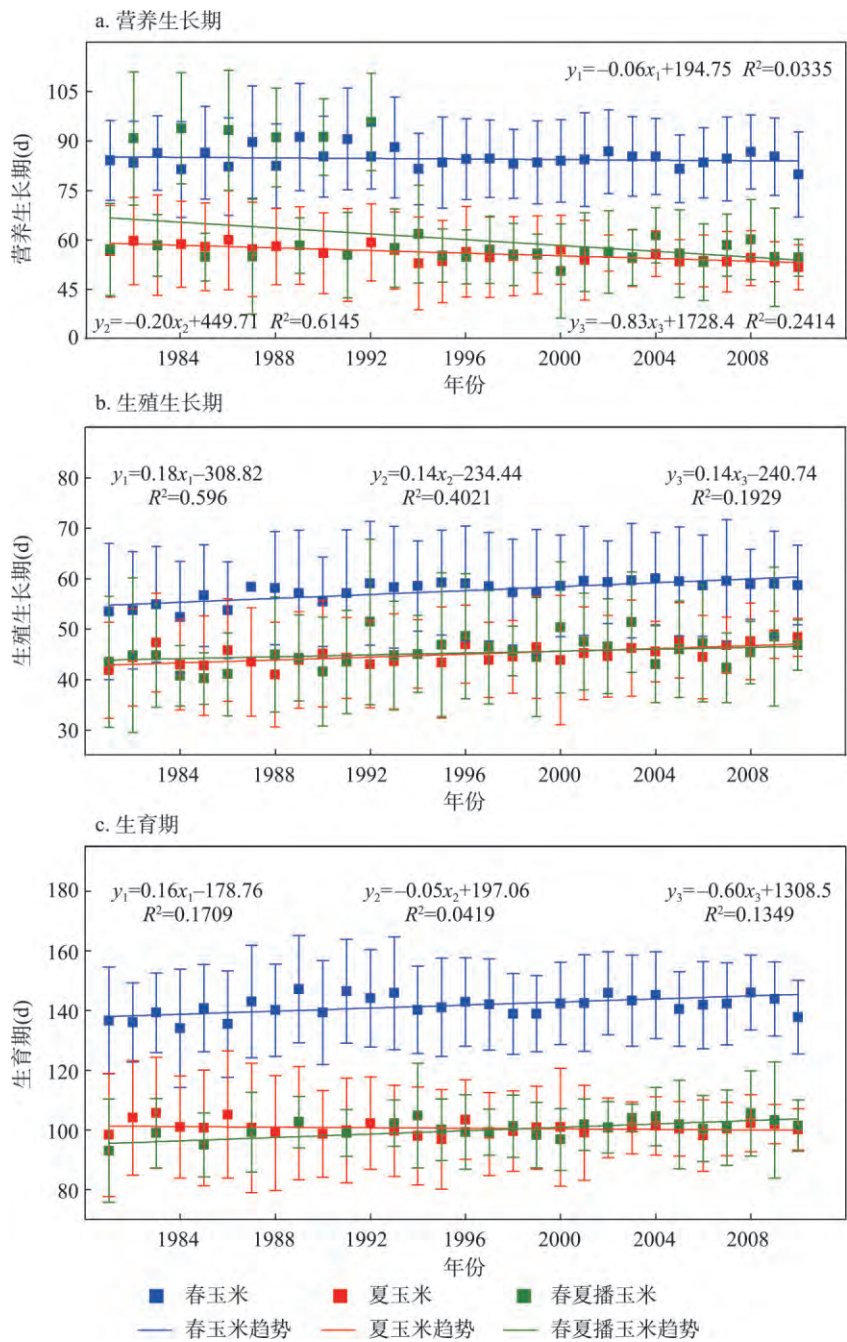
研究区域	种植类型	播种期	出苗期	三叶期	七叶期	拔节期	抽雄期	乳熟期	成熟期	营养生长期	生殖生长期	生育期
西北内陆玉米区	春玉米	-0.05	-0.20**	-0.16*	-0.24**	-0.18**	0.02	0.12	0.06	0.02*	0.03	0.10
	夏玉米	0.87**	0.66**	0.64**	0.73**	0.21	0.46**	0.39**	0.22*	-0.46	-0.24**	-0.65**
北方春玉米区	春玉米	0.18**	0.04	0.01	-0.14**	0.10**	0.05*	0.23**	0.30**	-0.12	0.25**	0.11**
西南山地丘陵玉米区	春玉米	-0.52**	-0.53**	-0.45**	-0.32**	-0.24*	-0.24*	-0.13	-0.18	0.35**	0.10	0.41**
黄淮平原春夏播玉米区	夏玉米	0.20**	0.17**	0.22**	0.15**	0.09*	0.09*	0.25**	0.35**	-0.11*	0.26**	0.14**
	春夏播玉米	0.96**	0.17**	0.13	0.18*	0.12*	0.23**	0.22**	0.37**	-0.83	0.14*	-0.60**

注：“+”表示物候期/生长阶段长度推迟或延长；“-”表示物候期/生长阶段长度提前或缩短；*、*分别表示达到0.01和0.05的显著性水平。

其发育的各个阶段，包括出苗、开花以及成熟期等^[18-19]。当作物生长从一个阶段进入下一个阶段时，需要积累足够的有效积温，温度升高可以加快有效积温的积累、缩短各生长阶段持续的时间^[20-22]，导致物候期提前或生育期缩短^[23-25]，作物在生长过程中所需的降水量和日照时数的变化同样会影响作物的生长。

本文的研究表明，除了在西南山地丘陵玉米区玉米生育期内平均温度出现微弱的下降趋势（-0.001 °C/a），其余4个玉米种植区内的平均温度和GDD均呈现增加的趋势。区域间降水量以增加趋势为主，日照时数以减少趋势为主。总体上，过去30年中国春玉米物候期以提前趋势为主，如西北内陆春玉米播种期—拔节期各物候期均提前（0.05 d/a < θ < 0.24 d/a）；营养生长期、生殖生长期和生育期均延长（0.02 d/a、0.03 d/a、0.10 d/a）；这与肖登攀等^[10]的研究结论一致。西南山地丘陵玉米区春玉米播种—成熟期各物候期均提前（0.13 d/a < θ < 0.53 d/a）。北方春玉米仅七叶期呈提前趋势（-0.14 d/a），播种期、出苗期和成熟期均推迟，推迟速率分别为0.18 d/a、0.04 d/a、0.30 d/a；这与李荣平等^[26]研究结论一致。1961-2010年东北农作区玉米生育期内温度显著升高^[27]，从1991年开始，东北地区玉米生长季（4-9月）降水量持续减少；1971年以来，东北地区 ≥ 10 °C积温增加了262.8 °C， ≥ 10 °C积温带（以2700 °C为例）平原区向北推进约200~300km左右，向东扩展50~150 km^[28]，东北地区以春玉米种植为主，其玉米生育期内气候因子的变化规律与本文北方春玉米区内各气候因子在东北地区的空间变化规律相同，相应的东北三省1990-2009年春玉米出苗期表现为提前态势（0.02 d/a < θ < 0.15 d/a）、成熟期推迟（0.18 d/a < θ < 0.38 d/a）^[29]。Liu等^[8]研究也得出相似的结论，即1981-2007年中国东北地区播种期提前，成熟期推迟。全国平均水平上，春玉米营养生长期缩短（-0.06 d/a）、生殖生长期和生育期均呈延长趋势（0.18 d/a、0.16 d/a）。夏玉米以及春夏播玉米播种至成熟期各物候期均呈现推迟的趋势，但受局地区域性气候的影响，区域间差异显著（图3，表2），且西北内陆夏玉米和黄淮平原春夏播玉米生育期均缩短（-0.65 d/a、-0.60 d/a），而黄淮平原夏玉米生育期延长（0.14 d/a），已有研究发现华北平原夏玉米1981-2009年生育期内升温趋势随纬度递减，日照时数呈极显著下降趋势，全生育期天数显著增加^[12]，与本文黄淮平原夏玉米整个生育期内的日照时数变化趋势相同，所以日照时数减少很可能是促使玉米生育期延长的重要原因。

本文研究了气候变化背景下中国玉米物候变化时空分异以及各生长阶段长度的变化，限于篇幅，未考虑品种更替、施肥、灌溉、播期调整等对玉米物候的影响；未来结



注：实心方块表示各生长阶段长度的平均值；各种颜色的线段表示对应的标准差，线段长度越长，表示标准差越大。

图4 1981-2010年不同种植类型玉米3个生长阶段长度变化趋势

Fig. 4 Trends of three growing stages length of different planting types of maize from 1981 to 2010

合作物模型模拟气候因子、管理措施（品种更替、施肥、灌溉）等对作物生长的影响研究仍有待进一步深入。此外，玉米各生长阶段长度的变化是由相应的物候期变化引起的，从不同尺度如站点水平、平均水平以及区域间差异和不同种植类型的角度分析玉米物候期和生长阶段长度的变化，也有助于深入了解气候变化对作物物候的影响。

5 结论

在气候变化背景下, 1981-2010年间, 中国玉米生长季内各物候期发生了显著变化, 且存在明显地域差异。主要表现在春玉米物候期提前, 具体为西北内陆玉米区春玉米播种期—拔节期提前 ($0.05 \text{ d/a} < \theta < 0.24 \text{ d/a}$), 西南山地丘陵玉米区春玉米播种—成熟期提前 ($0.13 \text{ d/a} < \theta < 0.53 \text{ d/a}$), 北方春玉米仅七叶期提前, 提前速率为 0.14 d/a 。夏玉米各物候期在不同区域均呈现推迟的趋势, 在西北内陆玉米区夏玉米各物候期推迟的幅度 ($0.21 \text{ d/a} < \theta < 0.87 \text{ d/a}$) 普遍大于黄淮平原春夏播玉米区夏玉米各物候期推迟的幅度 ($0.09 \text{ d/a} < \theta < 0.35 \text{ d/a}$)。黄淮平原春夏播玉米各物候期均呈推迟趋势 ($0.12 \text{ d/a} < \theta < 0.96 \text{ d/a}$)。玉米物候期的变化改变了相应的生长阶段长度, 春玉米的营养生长期呈现缩短的趋势 (-0.06 d/a), 生殖生长期和生育期呈现延长的趋势 (0.18 d/a 、 0.16 d/a); 夏玉米和春夏播玉米的营养生长期 (-0.20 d/a 、 -0.83 d/a) 和生育期 (-0.05 d/a 、 -0.60 d/a) 均缩短, 生殖生长期均延长 (0.14 d/a 、 0.14 d/a)。总体上, 中国春玉米物候期以提前趋势为主, 夏/春夏播玉米各物候期以推迟为主, 玉米各生长阶段长度在不同区域间以延长趋势为主。

参考文献(References)

- [1] Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin, et al. Changes of spring phenology in Yangtze River Delta Region in the past 150 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 45-52. [郑景云, 葛全胜, 郝志新, 等. 过去 150 年长三角地区的春季物候变化. *地理学报*, 2012, 67(1): 45-52.]
- [2] He Liang, Asseng Sentholt, Zhao Gang, 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: 135-143.
- [3] IPCC. Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 5-7.
- [4] Wang Lianxi, Chen Huailiang, Li Qi, et al. Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 447-454. [王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展. *生态学报*, 2010, 30(2): 447-454.]
- [5] Guo Jianping. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 1-11. [郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11.]
- [6] Sacks William J, Kucharik Christopher 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.
- [7] Tao Fulu, Zhang Shuai, Zhang Zhao, 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.
- [8] Liu Zhijuan, Hubbard Kenneth G, Lin Xiaomao, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, 2013, 19(11): 3481-3492.
- [9] 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.]
- [10] Xiao Dengpan, Qi Yongqing, Wang Rende, et al. Changes in phenology and climate conditions of wheat and maize in Xinjiang during 1981-2009. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 190-202. [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): 190-202.]
- [11] Fu Gang, Zhong Zhiming. Initial response of phenology and aboveground biomass to experimental warming in a maize system of the Tibet. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7): 1093-1097. [付刚, 钟志明. 西藏高原玉米物候和生态特征对增温响应的模拟试验研究. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1093-1097.]

- [12] 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.]
- [13] Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(21): 1826-1831.
- [14] Zhao Jin, Yang Xiaoguang, Dai Shuwei, 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.
- [15] Wang Na, Wang Jing, Wang Enli, et al. Increased uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 19-33.
- [16] Tong Pingya. Maize Planting Regionalization in China. Beijing: Press of Chinese Agriculture Science and Technology, 1992: 6-24. [佟屏亚. 中国玉米种植区划. 北京: 中国农业科学出版社, 1992: 6-24.]
- [17] McMaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(4): 291-300.
- [18] Hou Peng, Liu Yue'e, Xie Ruizhi, et al. Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*, 2014, 158: 55-64.
- [19] Liu Yuan, Wang Enli, Yang Xiaoguang, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2287-2299.
- [20] Dong Jinwei, Liu Jiyuan, Tao Fulu, et al. Spatio-temporal changes in annual accumulated temperature in China and the effects on cropping systems, 1980s to 2000. *Climate Research*, 2009, 40(1): 37-48.
- [21] Xiao Dengpan, Tao Fulu, Liu Yujie, 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.
- [22] Zhang Tianyi, Huang Yao, Yang Xiaoguang. 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.
- [23] Zheng Haifeng, Chen Liding, Han Xiaozeng, 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.
- [24] Vitasse Y, Francois C, Delpierre N, et al. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 969-980.
- [25] Xiao Dengpan, Tao Fulu. Impact of climate change in 1981-2009 on winter wheat phenology in the North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1539-1545. [肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1539-1545.]
- [26] Li Rongping, Zhou Guangsheng, Shi Kuiqiao, et al. Phenological characteristics of maize and their response to the climate from 1980 to 2005. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(31): 15197-15199, 15267. [李荣平, 周广胜, 史奎桥, 等. 1980-2005 年玉米物候特征及其对气候的响应. *安徽农业科学*, 2009, 37(31): 15197-15199, 15267.]
- [27] Yin Xiaogang, Wang Meng, Kong Qingxin, et al. Impacts of high temperature on maize production and adaptation measures in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015(1): 186-198. [尹小刚, 王猛, 孔青鑫, 等. 东北地区高温对玉米生产的影响及对策. *应用生态学报*, 2015(1): 186-198.]
- [28] Ji Ruipeng, Zhang Yushu, Jiang Lixia, et al. Effect of climate change on maize production in Northeast China. *Geographical Research*, 2012, 31(2): 291-298. [纪瑞鹏, 张玉书, 姜丽霞, 等. 气候变化对东北地区玉米生产的影响. *地理研究*, 2012, 31(2): 291-298.]
- [29] 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.]

Spatiotemporal variations in maize phenology of China under climate change from 1981 to 2010

QIN Ya^{1,2}, LIU Yujie², GE Quansheng²

(1. Xi'an University of Science and Technology, College of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the long-term phenology observation data of 114 agro-meteorological stations in the maize growing areas of China, the temporal and spatial differentiation characteristics of 8 consecutive phenology periods and the corresponding phenological stages length were quantitatively analyzed. The results showed that the average temperature and GDD (Growing degree days) during the growing seasons from 1981-2010 showed an increasing trend, and the precipitation and sunshine duration showed a decreasing trend in national scale. The maize phenology has changed significantly under the climate change background: Spring maize phenology was mainly advanced, especially in Northwest inland and Southwest mountain hills maize zone. While summer maize and spring-summer maize phenology were all delayed, and the delay trend of summer maize in the Northwest inland changed more than that in the Huanghuai plain. The variations of maize phenology changed the corresponding phenological stages length, the length of vegetative growth period (days from sowing date to tasseling date) of spring/summer/spring-summer maize all showed a trend of shorten in different degrees, and the corresponding reproductive growth period (days from tasseling date to mature date) showed a trend of extension. The whole growth period (days from sowing date to mature date) of spring maize were prolonged, but the whole growth period of summer/spring-summer maize shortened.

Keywords: maize; phenology; climate change; spatio-temporal variation; China