

# 气候变化对中国北方玉米种植及物候的影响

肖薇薇<sup>1,2,3</sup>

(1. 安康学院, 陕西 安康 725000; 2. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,  
石家庄 050021; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**通过分析北方地区玉米生产典型区 1992—2012 年 40 个有长时间序列记录站点的物候信息与年均温度及  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  有效积温之间的关系发现:随着年际之间气温波动,玉米自身进行着生育期的调整,年均温每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,玉米生育期大致缩短 3~5 d;年均温  $11^{\circ}\text{C}$  可能是春夏玉米的分界阈值,也可能是一年一作和一年两作两种种植方式的温度划分基线;东北和西北地区作物在 1992—2012 年间对气候变化响应程度强于华北地区,潜在适应性更强。通过本研究发现玉米物候对气候变化的响应规律,对于阐明玉米品种空间分布与气候变化的关系以及未来气候条件下玉米物候、品种及种植结构变化趋势具有重要意义。

**关键词:**气候变化; 物候; 玉米; 种植结构; 中国北方

中图分类号:S513;P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0167-06

## Impact of Climate Change on Maize Planting and Phenology in North China

XIAO Weiwei<sup>1,2,3</sup>

(1. Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2. Center for Agricultural  
Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences,  
Shijiazhuang 050021, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** North China is the main producing area of maize. Through analysis of relations between the phenological observations with naturally created climate change at 40 phenological observation sites during the period from 1992 to 2012, it is found that: (1) when the annual average temperature rises by  $1^{\circ}\text{C}$ , maize growing period is shortened by 3~5 days; (2) annual average temperature of  $11^{\circ}\text{C}$  is proved to be the dividing line between one-crops-per-year and two-crops-per-year planting patterns. During the observation period from 1992 to 2012, crops in northeast and northwest China had greater response to climate change than in North China Plain, indicating that stronger adaptability potentials existed in the cold climate condition.

**Keywords:** climate change; phenology; maize; planting structure; north China

中国北方地区是受气候变化影响最明显的区域,未来气候变化对该区的影响是不可忽视的。对农业生产影响而言,气候变化将引起作物生长和发育外在条件变化,即光照、热量和水分分配等因素变化,进而影响作物产量和质量、种植制度及农业布局的相应改变<sup>[1-4]</sup>。作物物候期作为重要的农业生态系统特征,是农业生产、田间管理、计划决策等的重要依据,也是作物模拟模型的重要参数<sup>[5]</sup>。作物物候对气候变化响应的研究有其广泛的实际意义,正在成为一个新的热点研究领域。

气候变化对农业物候的影响主要体现为春季物候

期提前,秋季物候期推迟,作物生长季相对延长,而作物生育期却缩短<sup>[6]</sup>。以中国北方农作物为例,1981 年以来,伴随温度不断变化,冬小麦种植北界不同程度北移西扩<sup>[7]</sup>;东北地区玉米中、晚熟品种潜在界限不同程度北移<sup>[8]</sup>;而华北地区喜温作物生育期延长,种植面积逐渐扩大<sup>[9]</sup>。这些物候变化一方面可以产生积极影响,提高单位面积粮食生产能力和增加农作物种植面积的潜力,但从另一方面来看,干旱和冷害等农业气象灾害发生风险却在显著增加<sup>[10-11]</sup>。所以,准确分析气候变化条件下物候的变化趋势,分析作物的适应机制,对于合理的从气候变化中获益是非常重要的。本文将

选用北方地区玉米生产典型区 1992—2012 年 40 个有长时间序列记录站点的物候信息与气象数据,分析发现玉米物候对气候变化的响应规律,阐明玉米品种空间分布与气候变化的关系,为未来气候条件下预估玉米物候、品种及种植结构变化趋势提供理论基础。

## 1 研究区域及数据来源

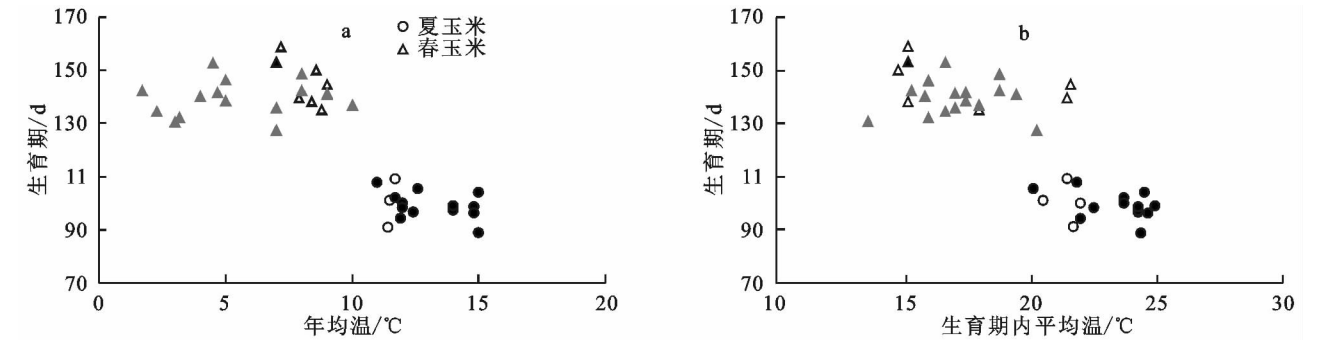
本研究选择的研究区是中国玉米的主要播种区—北方地区,介于东经 73. 4°—135. 3°、北纬 33. 24°—53. 28°,涵盖了西北、华北、东北三个区域。分析北方地区气候变化对作物物候影响时把中国北方划分为三个玉米生产典型区:西北地区(包括新疆和甘肃),东北地区(包括黑龙江、吉林和辽宁),华北地区(包括河北、山东、河南和北京)。在这三个区域,选取了 40 个有长时间序列记录的站点,获取玉米 1990—2012 年的物候信息,包括播种日期、收获日期,分析这 20 a 来玉米生育期的时空变化特点。选取了六个典型站(夏玉米:库尔勒、商丘和廊坊;春玉米:酒泉、瓦房店和富裕)代表三大区域的趋势,这六个站点有以下特点:(1) 位于各主要生产区,且满足春、夏玉米各自的南北和东西最大跨度,(2) 代表了中国典型的种植制度,(3) 地理位置和气候类型不同,(4) 具有良好的天气数据记录,(5) 具有完备的

物候数据。气象数据均来源于中国气象科学数据共享服务网,物候数据来源于中国农业生态观测站。其中,从 1990 到 2012 年的玉米物候资料和气象资料均已进行了初步质量控制。

## 2 结果与分析

### 2.1 北方玉米物候期对热量资源的响应

通过对北方地区三个区域的年均温、生育期内平均温度和生育期长度之间的关系分析,发现适合夏玉米生长的年均温度为 11~15℃,生长期为 89~109 d,主要分布在华北地区和西北部分地区;适合春玉米生长的年平均气温为 2~10℃,生长期为 127 d~159 d,主要分布在东北和西北地区(图 1a)。从夏玉米和春玉米需要的年均温度分布可以发现春夏玉米的分界阈值基本为 11℃,这个温度值可能是一年一作和一年两作两种种植方式的划分基线。图中可以看到东北春玉米播种台站年均温跨度从 2~10℃,生育期跨度从 127~159 d,可以推测东北区春玉米未来的调整空间更大,如当东北的瓦房店年均温逐渐达到 11℃时,种植模式可以变为一年两作。在玉米生育期内,夏玉米的生长平均温度是 24~26℃,而春玉米是 18~24℃;春玉米生育期内平均温度高于 18℃,而夏玉米则高于 24℃(图 1b)。



注:东北、西北、华北地区分别用灰色、白色和黑色表示,下同。

图 1 研究站点不同温度与生育期长度的关系

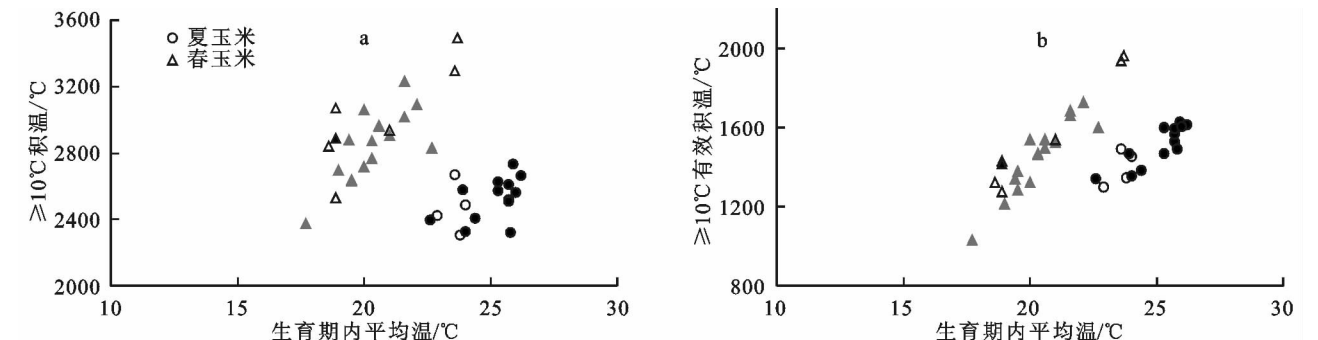
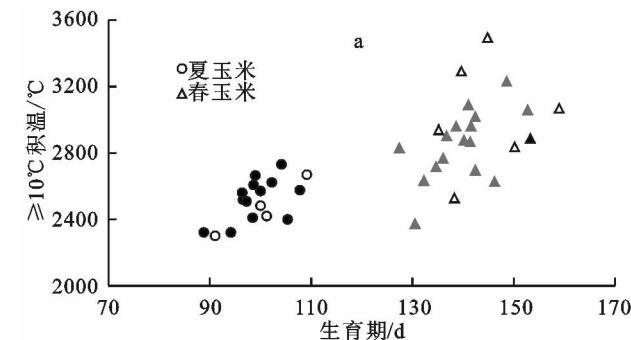


图 2 研究站点生育期内年均温与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温之间关系

根据图 2a 显示,适于春玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温范围是 2 372℃~3 495℃,夏玉米是 2 324~2 733℃,春玉

米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温范围是 1 213~1 724℃,夏玉米是 1 296~1 626℃(图 2b)。值得注意的是除了敦化、

乌苏、哈密三地,虽然春玉米和夏玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温不同,但 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温是相似的,这说明春玉米和夏玉米正常生长所需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温基本是相同的。玉米完成全生育期需要积温产生较大差异主要



是因为不同气候条件导致的,从而引发了春玉米和夏玉米的生长期长短差异,但春玉米的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温范围更广,这说明了春玉米区域的品种可调节空间可能比夏玉米区域要更大一些。

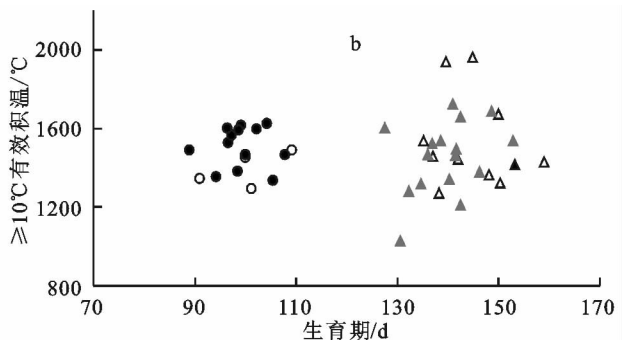


图 3 研究站点生育期长短分别与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温之间关系

图 3a 是生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温与生育期长度之间的关系。由于春玉米生育期长,所以春玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温比夏玉米多。图 3b 显示出的结果和图 2b 非常相似,除了敦化、乌苏、哈密三个地点,其他站点虽然生育期有很大不同,但夏玉米和春玉米 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温是类似的。

2.2 时间序列上玉米物候对气候变化的响应

图 4 是六个代表站(夏玉米:库尔勒、商丘和廊坊;春玉米:酒泉、瓦房店和富裕)1992—2012 年的年

均温度与生育期变化趋势。除了华北区域商丘站,其余各站年均温度均逐渐增加,增温区域集中在春玉米区。六个典型站无论春玉米还是夏玉米,年均温度和生育期长短都有较好的相关关系。从代表站区域上来看,西北的库尔勒和酒泉温度和生育期的负相关表现的最为明显,东北地区的富裕和瓦房店次之,华北区的商丘和廊坊趋势最小。东北地区和西北地区对气候变化更加敏感,这也说明了春玉米的适应空间更大一些。

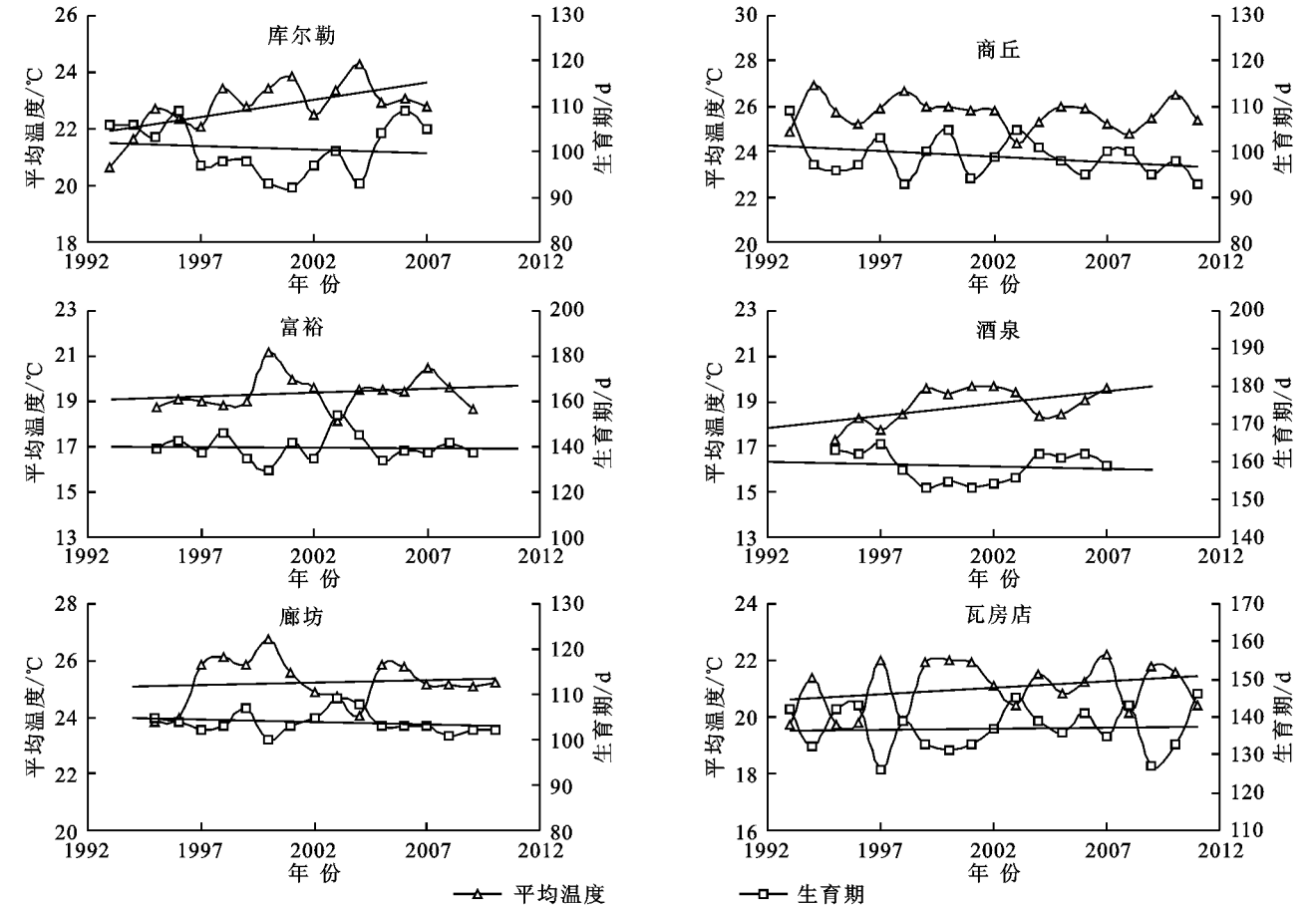
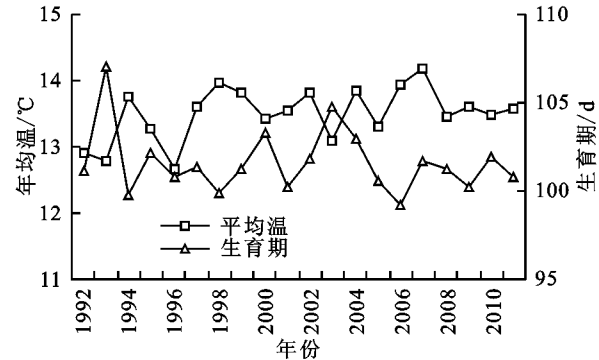


图 4 六个典型站 1992—2011 年生育期长度和生育期内平均温度的关系

表 1 六个代表站 1992—2011 年平均气温( $x$ )和生育期( $y$ )关系

站点	公式	$R^2$
西 库尔勒(夏玉米)	$y = -3.70x + 185.05$	0.33
北 酒泉(春玉米)	$y = -4.48x + 242.94$	0.71
华 商丘(夏玉米)	$y = -3.06x + 177.32$	0.25
北 廊坊(夏玉米)	$y = -1.64x + 145.00$	0.29
东 富裕(春玉米)	$y = -4.55x + 227.90$	0.34
北 瓦房店(春玉米)	$y = -5.32x + 248.88$	0.63

表 1 是六个代表站 1992—2012 年平均气温( $x$ )和生育期( $y$ )关系,这六个站点都有显著的负相关,也就是说,在过去的 20 a 中,每当温度升高 1℃,玉米生育期就缩短 3~5 d。从站点分布地区来看,东北和西北地区的作物对气候变化响应大于华北地区,适应



性更强一些。

将所有夏玉米台站逐年的年均温、生育期、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温求平均得到时间序列上的变化趋势(图 5)。分析发现夏玉米地区的年均温度是逐年升高的,生育期随之缩短,但生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温却是逐年增加的, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温波动范围是 1 300~1 600℃。生育期随年均温上升而缩短,说明夏玉米受气候变化的影响较大,可能未产生自适应力。通过分析 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的时间序列上的变化趋势, $R^2$  为 0.1175,有略微的增加趋势,但未达到显著水平,这说明了夏玉米的适应力较弱,未来气候条件下可调节的范围可能要小一些。

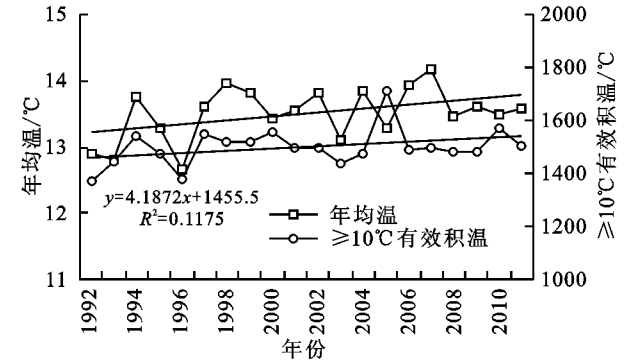


图 5 夏玉米台站时间序列上年均温度与生育期及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化趋势

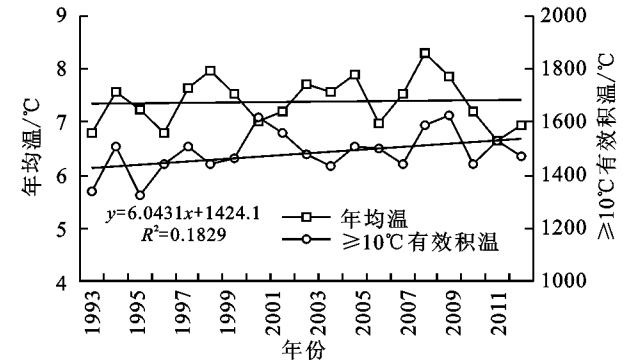
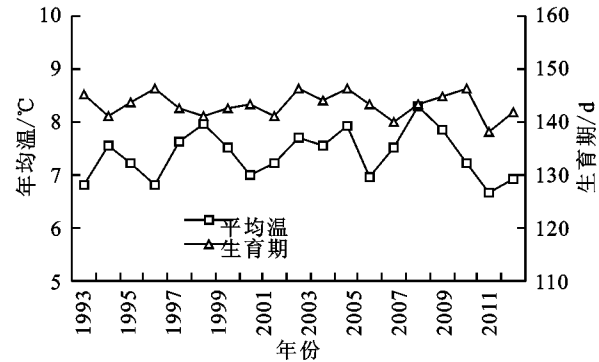


图 6 春玉米台站时间序列上年均温度与生育期及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温变化趋势

将所有春玉米台站逐年的年均温、生育期、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温求平均得到出时间序列上的变化趋势(图 6)。分析发现春玉米地区的年均温度小幅上升,生育期变化趋于平稳,并未随着温度增加而缩短,说明春玉米对气候变化有一定的自适应力。春玉米生育期内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温逐年增加, $R^2$  为 0.182 9,并达到显著水平( $p < 0.05$ ),说明春玉米在适应气候变化,在未来适应气候变化潜力方面可能具有更大调节空间。

将春玉米台站按照种植区域分开来计算不同区域逐年的年均温、生育期、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温,求平均得出时间序列上的变化趋势(图 7)。分析发现东北地区的春玉米台站年均温度没有明显增加趋势, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温有略微逐年增加的趋势, $R^2$  为 0.125 7,但并未达到显著水平,说明从东北地区春玉米的时间序

列的适应趋势上来看,目前还未对气候变化做出大幅度的自适应;西北地区的年均温有明显增加趋势, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温逐年增加, $R^2$  为 0.448 9,并达到极显著水平( $p < 0.01$ ),说明在春玉米种植区域,西北地区的春玉米品种差异比东北区的要大,在适应气候变化时可能比东北地区的春玉米更敏感一些。

### 2.3 空间序列上玉米物候对气候变化的响应

在这 40 个台站中,其中 32 个站的生育期内年平均气温有上升趋势,增长幅度在 0.1~2.2℃,尤其在东北和西北地区表现明显。另外 8 个站出现轻微的下降,这可能是由生长季节发生变化造成的(图 8a)。生育期明显缩短的有 25 个站,缩短幅度是 1~13 d(最短为长岭),延长的有 15 个站,延长幅度是 1~9 d(最长为泰来)(图 8b)。在图 8c 中,23 个春玉米的站中有 22 个站 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积

温有增加的趋势,其中 9 个站增幅超过 100℃,叶柏寿和哈密增幅超过 200℃。夏玉米播种站中,11 个站有增加的趋势,其中 6 个增幅超过 100℃。生育期内≥10℃有效积温在 35 个站中增加了 1%~10%,5 个站中减少了 1%~15%。同样,在 23 个春玉米站中 22 个站的≥10℃有效积温增加,只有 2 个站≥10℃有效积温增加超过 100℃,9 个站积温增加超过 50℃。夏玉米播种站中,12 个站≥10℃有效积温增加,其中只有 5 个站增加超过 100℃,2 个站积温增加超过 50℃(图 8e)。这也表明了北

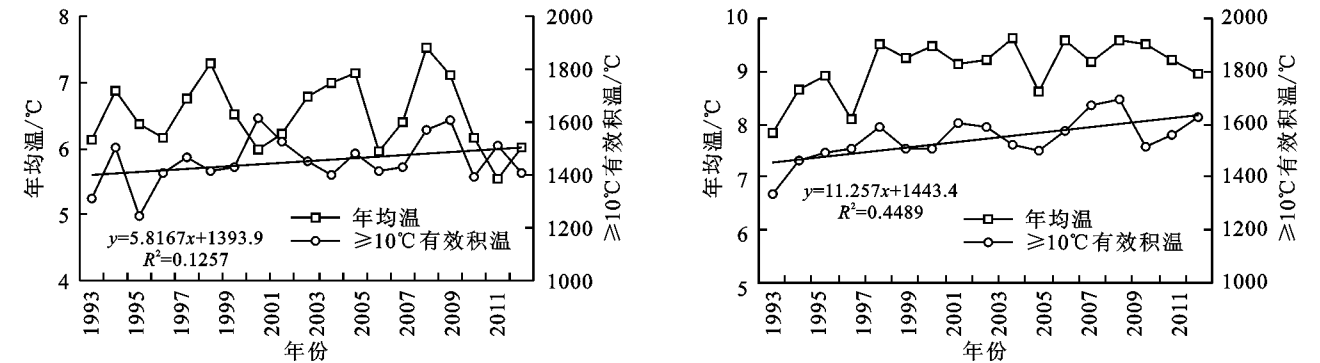
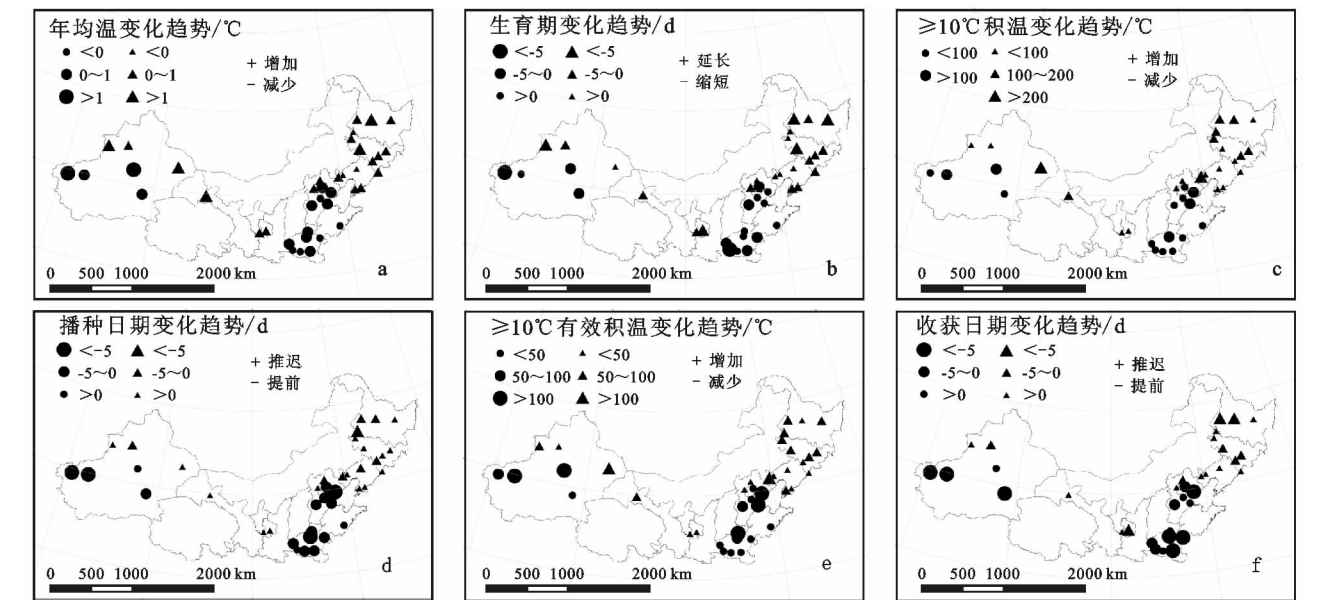


图 7 不同区域春玉米台站时间序列上年均温度与≥10℃有效积温变化趋势



注:三角代表春玉米,圆圈代表夏玉米。

图 8 1992—2012 年玉米生育期内年均温、生育期、播种日期、收获日期和生育期内≥10℃积温、≥10℃有效积温时空变化趋势

2.4 玉米物候及品种对气候变化的时空响应

通过分析北方地区 40 个站点 1993 年和 2011 年玉米品种的变化发现(图 9),春玉米 23 个台站中,20 a 间有 5 个站点由早熟变为中熟品种,分别是海伦、佳木斯、桦甸、平凉、西峰镇,集中分布在黑龙江中部、吉林省东部和甘肃省东部地区;有 6 个站点由中熟变为晚熟品种,分别是泰来、白城、伊宁、长岭、瓦房店和庄河;甘肃省的酒泉站从早熟变为晚熟品种;有 11 个站点品种熟制未发生变化,其中保持早熟品种的有敦化 1 个站点,保持中熟品种的有富裕、梅河口、丰宁、和集安 4 个站点,保持晚熟品种的有乌

方区域在 1992—2012 年的整体升温趋势,其中东北和西北区域玉米的适应潜力要大于华北地区。图 8d 显示了播种期的变化,其中 18 个站播种提前,提前幅度是 1~11 d,19 个站播种期发生了延迟,延迟幅度为 1~10 d,3 个站(白城,南阳,黄骅)没有变化。收获日提前的有 18 个站,提前天数是 2~21 d,延迟的有 22 个站,延迟天数为 1~9 d(图 8f)。收获和播种日期的变化,主要受到当年温度变化的影响,另外也受到 20 a 间品种变更、降水变化以及人为因素的影响。

苏、哈密、朝阳、叶柏寿、新民和怀来 6 个站点。

夏玉米 17 个台站中,20 a 间有 2 个站点由早熟变为中熟品种,分别是新疆的库尔勒和喀什;有 2 个站由中熟变为晚熟品种,分别是唐山和郑州;有 2 个站由晚熟变为中熟品种,分别是巴楚和西峡,这可能是由于年际温度差异造成的;有 11 个站点品种熟制未发生变化,其中保持中熟品种的有若羌、密云、卢氏和莒县 4 个站点,保持晚熟品种的有新乡、遵化、廊坊、黄骅、商丘、南阳和驻马店 7 个站点。

通过比较发现,在近 20 a 间,玉米种植区中春玉

米站点熟制发生变化的占 52%，夏玉米的仅有 35%，这说明了春玉米地区对气候变化的响应程度可能高于夏玉米种植区。玉米生产在近 20 a 间，通过熟制

的变化即从早熟品种调整为中熟品种、中熟品种调整为晚熟品种来适应气候变化，未发生变化的站点可能是因为温度年际波动较大造成的。

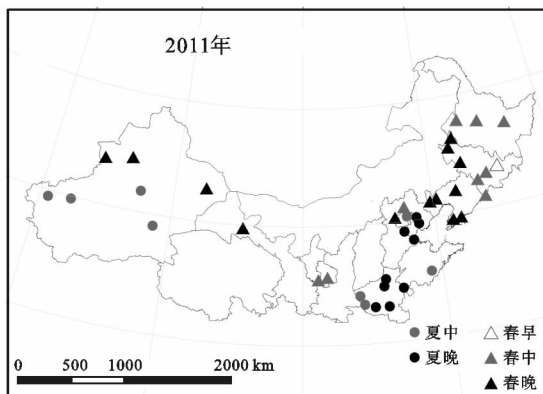
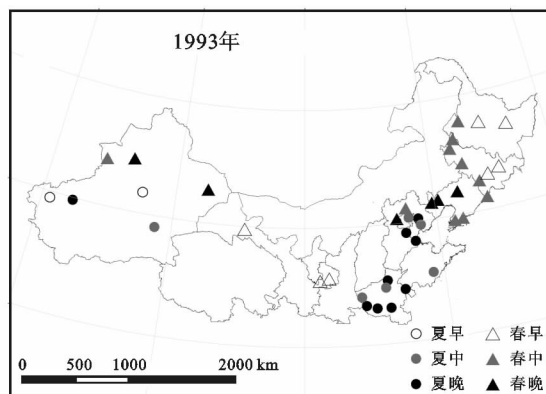


图 9 1993 年和 2011 年北方地区玉米品种分布

### 3 结论与讨论

随着气候不断变暖，北方地区热量资源发生了显著变化，玉米作为喜温作物随着温度的波动生育期也发生了明显的变化。当年均温升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，北方地区玉米生育期就缩短 3~5 d。肖风劲等<sup>[7]</sup>指出，在全国范围内年均温升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，玉米生育期会缩短 7 d，而马树庆等<sup>[8]</sup>研究得出，东北地区在正常水分条件下，同样升温幅度玉米生育期会缩短 9 d 左右。这些结果存在差异是因为研究区域不同造成的，但都得出了玉米生育期随温度上升而缩短的结论。

在本研究区域范围内，年均温  $11^{\circ}\text{C}$  可能为春、夏玉米的种植的分界阈值，也就是一年一作和一年两作两种种植方式的温度划分基线。前人的研究虽然多以积温、作物生长的极限低温作为划分作物种植方式的基线<sup>[9]</sup>，但未来年均温  $11^{\circ}\text{C}$  也许可以作为一个划分种植方式的参考值在北方地区进行应用。本研究尚未考虑其他气象要素的影响，在下一步研究中可能还需要更多的数据对该结论进行验证。虽然春玉米和夏玉米的  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温不同，但  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  有效积温相似，这意味着春玉米和夏玉米正常生长所需的  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  有效积温一般是相似的，说明某一作物品种有效积温是固定的，而活动积温是变化的。同一品种在不同地区、不同年份所需活动积温差异很大，所以有效积温是作物品种鉴定时非常重要的指标。如能标定某品种有效积温，那么它不同地区、不同年份对有效积温的需求相对稳定。如果有效积温发生了变化，则表示该作物品种具有一定的差异性，可进行品种的适当调整。

通过比较不同区域玉米对气候变化的响应程度，发现东北和西北地区的作物对气候变化响应大于华北地区，也意味着春玉米的潜在适应性可能比夏玉米的更强；而比较东北区和西北区的春玉米差异的话，

西北区的玉米  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  有效积温变化趋势比东北区更明显，这意味着西北区的玉米品种差异较大，应对气候变化上敏感性更大，潜在适应性强一些。通过分析北方地区 40 个站点近 20 a 间玉米品种的变化，可以看到各个区域的玉米生产可以通过熟制的变化来适应气候变化。未来气候条件下，在选择适应气候变化的玉米品种时，或许能以 2011 年的品种分布图作为参考，选取与当时气候资源相适应的玉米品种。

致谢：感谢杨永辉研究员、张佳华研究员和周新尧博士对本研究数据采集、分析及结果讨论等关键步骤的倾力支持和点拨。

#### 参考文献：

- [1] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [2] 唐国平, 李秀彬, Fischer G, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 129-138.
- [3] 王铮, 郑一萍. 全球变化对中国粮食安全的影响分析[J]. *地理研究*, 2001, 20(3): 282-289.
- [4] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [5] Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030[J]. *Science*, 2008, 319(5863): 607-610.
- [6] 杨晓光, 刘志娟, 陈卓. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329-336.
- [7] 肖风劲, 张海东, 王春乙, 等. 气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 327-331.
- [8] 马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米生长发育和产量的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2131-2139.
- [9] 刘巽浩, 韩湘玲. 中国的多熟种植[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1987.