

气候变化下东北春玉米品种熟型分布格局及其气候生产潜力

袁彬^①, 郭建平^{①*}, 冶明珠^②, 赵俊芳^①

① 中国气象科学研究院, 北京 100081;

② 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036

* 联系人, E-mail: gjp@cma.gov.cn

2011-12-28 收稿, 2012-02-23 接受

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106020)资助

摘要 利用 1971~2000 年东北三省 101 个气象站逐日气象资料以及国家气候中心发布的未来气候变化情景(A1B)下区域气候模式(RegCM3)模拟的东北地区 1951~2100 年 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格点气象资料, 结合东北玉米生长发育对气候条件的需求, 分析了气候变化下东北三省农业气候资源的变化趋势以及气候变化对东北三省玉米品种熟型布局、玉米气候生产潜力的影响, 并通过调整播种期来寻求提高玉米气候生产潜力的有效途径. 农业气候资源要素包括: $\geq 10^\circ\text{C}$ 初日、初霜日、生育期日数、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温、生育期内总辐射及降水量. 结果表明: (1) 气候变化使未来 100 年东北地区 $\geq 10^\circ\text{C}$ 初日逐渐提前、初霜日延后、生育期日数延长、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温显著增多、生育期内总辐射有所增加、降水变化不明显. (2) 气候变化使东北地区适宜种植的玉米品种熟型由早熟型向晚熟型过渡, 不同品种的种植界限不断北移东扩. (3) 气候变化使东北玉米气候生产潜力发生了显著变化, 其高值区将逐渐向东北方向移动. (4) 适当的调整播种期是一种提高玉米气候生产潜力的有效途径.

关键词

气候变化
农业气候资源
品种布局
气候生产潜力
调整播种期

近年来, 全球气候变化已成为人们关注的热点问题, 据 IPCC 第四次评估报告显示, 近百年来全球平均温度升高了 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ ^[1], 而近 50 年的线性趋势几乎是近 100 年的 2 倍^[2]. 研究表明: 未来气候变化将使农业生产布局和农作物种植制度发生改变、农业生产成本和投资成本增加^[3,4], 对粮食安全生产有重要影响^[5]. 在气候变暖的影响研究中, 东北地区因其纬度偏高、增暖明显、降水量减少, 干旱显著增加, 农业生产受到较大影响^[6,7]. 20 世纪 80 年代以来, 在全球气候变暖的大背景下, 东北平原已经出现了持续而显著的增温现象. 与 20 世纪 60~70 年代相比, 80~90 年代的平均气温已经上升了 $1.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$ ^[8], 增温幅度之大, 居全国各农区之首. 因此, 东北平原的粮食生产应怎样适应气候变化, 已成为人们普遍关心

的问题. 目前, 东北三省的温度、降水及其农业气候资源变化规律等相关领域已进行了很多研究^[9~13], 气候变化对作物的影响也主要侧重于对作物产量的模拟研究^[14], 但针对未来长时间序列我国东北三省玉米农业气候资源变化以及由此导致的玉米品种布局和玉米气候生产潜力变化方面的研究还鲜见报道. 而东北三省的玉米播种面积占全国玉米播种面积的 26.6%, 在我国的粮食生产中占据重要地位^[15]. 为此, 本研究基于 1971~2000 年东北三省 101 个气象站的逐日气象资料以及 RegCM3 模式模拟的东北地区 1951~2100 年格点气象资料, 系统分析了该区农业气候资源变化趋势以及由此引起的玉米品种熟型布局和玉米气候生产潜力的变化特征, 并通过调整播种期来探求提高气候生产潜力的有效方式, 以期东

英文版见: Yuan B, Guo J P, Ye M Z, et al. Variety distribution pattern and climatic potential productivity of spring maize in Northeast China under climate change. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5135-x

北三省充分合理地利用农业气候资源进行玉米品种布局调整,从而得到最大收益提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

1971~2000年东北三省101个气象站的逐日气象资料,包括日平均气温、日最高和最低气温、日降水量、日平均风速、日平均相对湿度,资料来自国家气象信息中心。RegCM3模式模拟A1B情景下的东北地区1951~2100年 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格点气象资料日值,包括日平均气温、日最高和最低气温、日降水量、日平均风速、日平均相对湿度、日总辐射、日净辐射,资料来自国家气候中心。

1.2 研究方法

(i) 气候模式数据订正。气候模式模拟的数据与实际观测数据存在一定的误差,所以在利用模式资料之前必须利用实际观测资料(1971~2000年)对其进行误差订正。由于实际站点资料的限制,只对日平均温度、日最高和最低温度、旬降水量、日相对湿度和日平均风速进行了误差订正。其中在东北三省均匀选取70个站用于插值订正,其余31个站用于订正效果检验。

采用双线性插值方法,将格点数据插值到已知的站点上,然后用实测的站点资料对插值结果进行订正。双线性插值法的原理如下^[16]:假设某站点经纬度坐标为 (x,y) ,其周边预报格点坐标为 (x_1,y_1) , (x_1,y_2) 和 (x_2,y_2) ,格点预报值分别为 F_1, F_2, F_3 和 F_4 ,则该站点的预报值 F 为

$$F = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \times \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \times F_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \times F_2 + \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \times \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \times F_3 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \times F_4, \quad (1)$$

其中, x_1, x_2 为纬度; y_1, y_2 为经度。

选用均方根误差(S)、平均相对误差(RE)作为精度检验指标。S, RE均用以反映插值场数值的偏差,但S侧重于描述插值场与实测场的离散程度,而RE则侧重于数值的偏差大小的描述。S, RE的值越小,则插值的效果越好^[17]。

(ii) 稳定通过界限温度的起止日期。界限温度

起止日期采用5日滑动平均法^[18]来确定。一般把 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日作为喜温作物开始播种和生长的日期,因此本研究把 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日作为玉米的适宜播种期;而霜冻是限制玉米生长的重要气象灾害,一般情况下,初霜冻出现日期与玉米停止生长日期一致,故把初霜日(最低气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 初日)作为玉米生长的终止期;把 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日和初霜日期间的日数作为玉米的可能生育期天数; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温可以反映玉米完成整个发育期对热量的总要求^[19]。多年初终日采用经验频率法^[18]按80%保证率进行取值。

(iii) 不同熟型品种热量指标。玉米品种的熟型可以用品种的叶片数来表示,越晚熟品种叶片数越多。根据不同玉米品种不同发育期所需的热量指标来确定不同品种的栽培界限,并以80%年份能够完全成熟作为划定栽培界限的标准来进行一个地区玉米品种的布局,具体指标如表1。

(iv) 气候生产潜力。作物气候生产潜力估算是研究粮食综合生产能力的基础,可为农业生产布局,农业结构调整以及合理利用气候资源提供重要的理论指导^[21,22]。本文利用“作物生长动态统计”模型,按常用的三级(光合潜力、光温潜力、气候潜力)订正来计算。首先按照玉米的发育期计算,然后累加整个生长期的作物生产潜力。在进行发育期分别计算时,本文采用了品种布局中根据热量指标计算出的各个发育期的起止日期,将玉米全生育期分为萌发-出苗、出苗-抽雄、抽雄-成熟3个时段,分别计算不同时段不同品种布局之下的玉米气候生产潜力。具体计算公式如下:

$$(1) \text{ 温度订正系数 } f(T) \quad [23,24]$$

以玉米生长发育和实现高产的三基点温度指标为基准,按下式确定:

$$f(T) = \left[\frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \right], \quad (2)$$

$$B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1), \quad (3)$$

式中, T 是发育期的平均气温, T_1, T_2 和 T_0 分别是该发育期内作物生长发育的下限温度、上限温度和产量形成的最适温度。且令当 $T \leq T_1$ 时, $f(T) = 0$ 。各发育期的上、下限温度和最适温度如表2。

$$(2) \text{ 水分订正函数 } f(R) \quad [25]$$

$f(R)$ 是作物生长发育和产量形成的水分订正函数,采用下式计算:

表1 玉米生长发育的热量指标^[20]

发育时期	热量指标	说明
种子萌发	10.0℃	可以在气温稳定通过 10.0℃前播种
萌发-出苗	≥10.0℃有效积温 100℃ d	适用于各个熟型的品种
出苗-抽雄	y=30.2x+31.8 1100℃ d (14片叶) 1150℃ d (15片叶) 1200℃ d (16片叶) 1250℃ d (17片叶)	y, 出苗-抽雄所需≥10.0℃有效积温; x, 玉米品种叶片数(计算时扣除无效积温)
抽雄-成熟	1300℃ d (18片叶) 1350℃ d (19片叶) 1400℃ d (20片叶) 1450℃ d (21片叶) 1500℃ d (22片叶)	指≥10.0℃活动积温, 以7月16日为标准抽雄日计算, 若抽雄日提前或延后1d, 积温相应的增加或减少13℃ d

表2 东北春玉米各发育期三基点温度^[23]

	T ₀ (℃)	T ₁ (℃)	T ₂ (℃)
萌发-出苗	25.0	10.0	35.0
出苗-抽雄	26.0	12.0	35.0
抽雄-成熟	24.0	15.0	30.0

$$f(R) = \begin{cases} 1 & \text{当 } R_j \geq E_{0j} \\ R_j / E_{0j} & \text{当 } R_j < E_{0j} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $E_{0j} = \alpha_j \times E_j$, R_j 是 j 时段的降水量, E_{0j} 是总蒸发量, E_j 是采用 FAO Penman-Monteith 方法计算的可能蒸散量^[26], α_j 为作物系数^[27].

(3) 农业气候生产潜力^[24,25]

光合生产潜力 Y_1 的计算公式如下:

$$Y_1 = C \cdot f(Q) = C\Omega\varepsilon\varphi(1-\alpha)(1-\beta)(1-\rho)(1-\gamma)(1-\omega)(1-\eta)^{-1}(1-\xi)^{-1} \cdot s \cdot q^{-1} f(L) \sum Q_j, \quad (5)$$

式中, C 为单位换算系数, Q_j 为太阳总辐射(MJ m⁻²), 其他参数如表 3.

在光合生产潜力的基础上进行温度和生育日数的订正, 得到光温生产潜力 Y_2 :

$$Y_2 = f(T) \cdot f(N) \cdot Y_1, \quad (6)$$

式中, $f(T)$ 是温度订正函数; $f(N)$ 是生育日数订正函数, 根据东北地区的实际情况, 采用如下形式计算:

$$f(N) = 1 + (N - N_0) / (1.7N_0), \quad (7)$$

式中, N 为作物有效生育日数(日平均气温 ≥ 10℃ 的日数), N_0 为 5~9 月的日数(165). 因为它可完全满足作物最晚熟品种的要求, 故 $f(N > 165) = f(165)$.

在光温生产潜力的基础上, 进行水分订正可得到气候生产潜力 Y_3 :

$$Y_3 = f(R) \cdot Y_2, \quad (8)$$

式中, $f(R)$ 为水分订正函数.

2 结果与分析

2.1 模式数据订正结果分析

误差订正前后日平均温度、旬降水量 30 年平均值比较(图 1)可见, 日平均温度和旬降水量在误差订正之前和实际观测资料存在一定的误差, 降水误差尤其较大. 误差订正后的插值场基本上和实测场达到了吻合, 误差显著减小. 日平均温度、旬降水量订

表3 光合生产潜力计算时所用参数的意义和取值

参数	物理意义	取值	参数	物理意义	取值
ε	光合辐射占总辐射的比例	0.49	η	成熟谷物的含水率	0.15
φ	光合作用量子效率	0.224	ξ	植物无机灰分含量比例	0.08
α	植物群体反射率	0.68	s	作物经济系数	0.40
β	植物繁茂群体透射率	0.06	q	单位干物质含热量(MJ kg ⁻¹)	17.2
ρ	非光合器官截获辐射比例	0.10	Ω	作物光合固定 CO ₂ 能力的比例	1.00
γ	超过光饱和点光的比例	0.01	$f(L)$	作物叶面积动态变化订正值	0.58
ω	呼吸消耗占光合产物的比例	0.30			

正前后实测场与模拟场的平均误差比较(图 2)可以看出, 误差订正后实测场与模拟场的平均误差明显减小. 同时, 均方根误差也明显减小(图略). 因此, 可认为, 经过误差订正的模式资料可以较好地反映东北地区 1971~2000 年的气候状况. 其他要素的订正结果类似, 故不再赘述. 假设气候模式模拟产生的误差是系统性的, 因此, 气候模拟输出的所有资料都存在相同的误差且不随时间变化, 由此可以对气候模式资料进行相同的误差订正, 从而获得 1951~2100 年新的资料序列, 该资料可以用于分析气候变化趋势及其对农业的影响.

2.2 农业气候资源变化

将整个时间序列分成 5 个时段: 1951~1980 年、

1981~2010 年、2011~2040 年、2041~2070 年、2071~2100 年, 并以 1981~2010 年为基准时段进行东北地区农业气候资源变化分析.

结果表明: 1951~2100 年间, 东北全区 80% 保证率下日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日提前、初霜日推迟、生育期日数延长, 生育期内总辐射及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温增加, 且自 2011 年后这种变化趋势愈加显著. 其中, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温增加趋势尤为明显(图 3). 基准时段 80% 保证率下日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温呈从南到北、从西到东逐渐减少的分布趋势, 最大值区位于辽西走廊和辽东半岛一带, 达到了 3400°C d 以上, 最低值区位于小兴安岭和长白山地区, 其值在 2100°C d 以下. 与基准时段相比, 2011 年后 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温的增加量呈从东到西逐渐增多趋势, 东北平原及辽

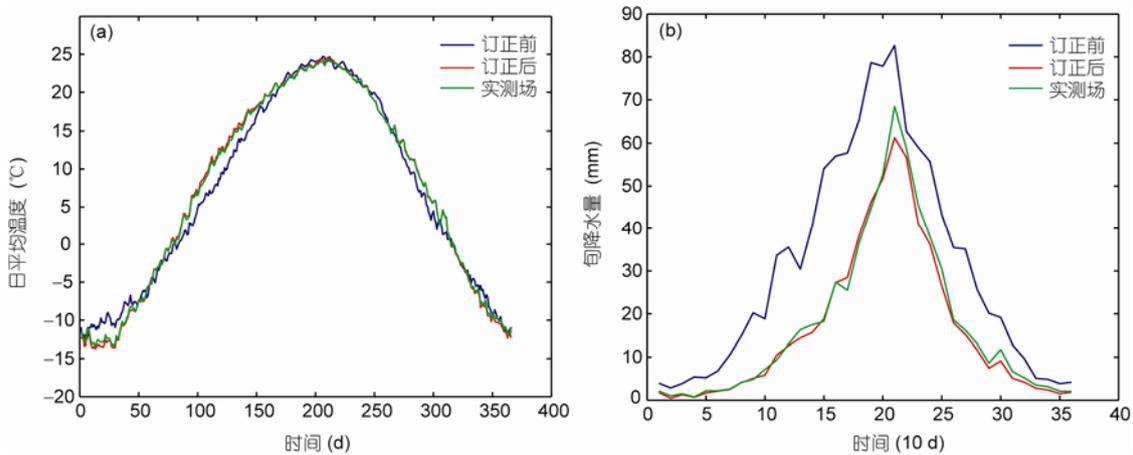


图 1 订正前后实测场与模拟场比较

(a) 日平均温度; (b) 旬降水量

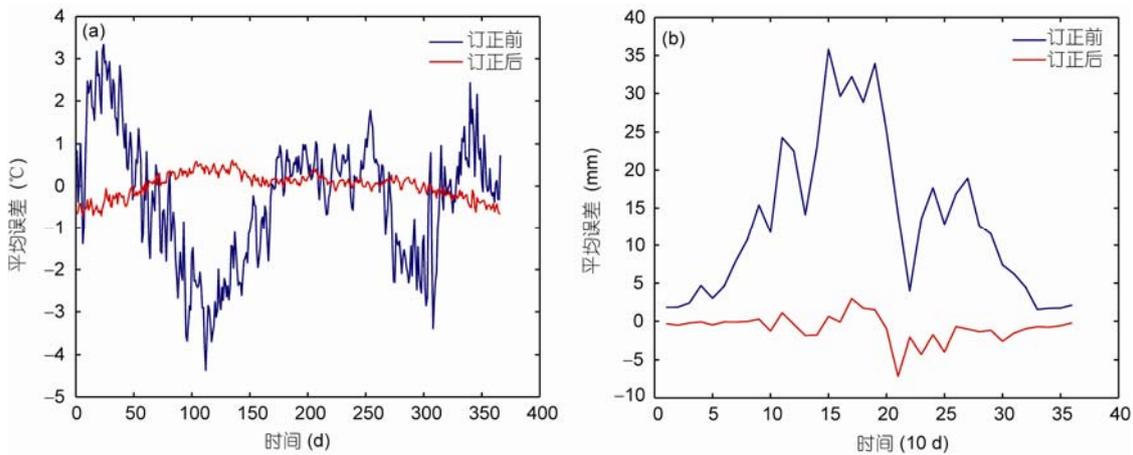


图 2 订正前后平均误差比较

(a) 日平均温度; (b) 旬降水量

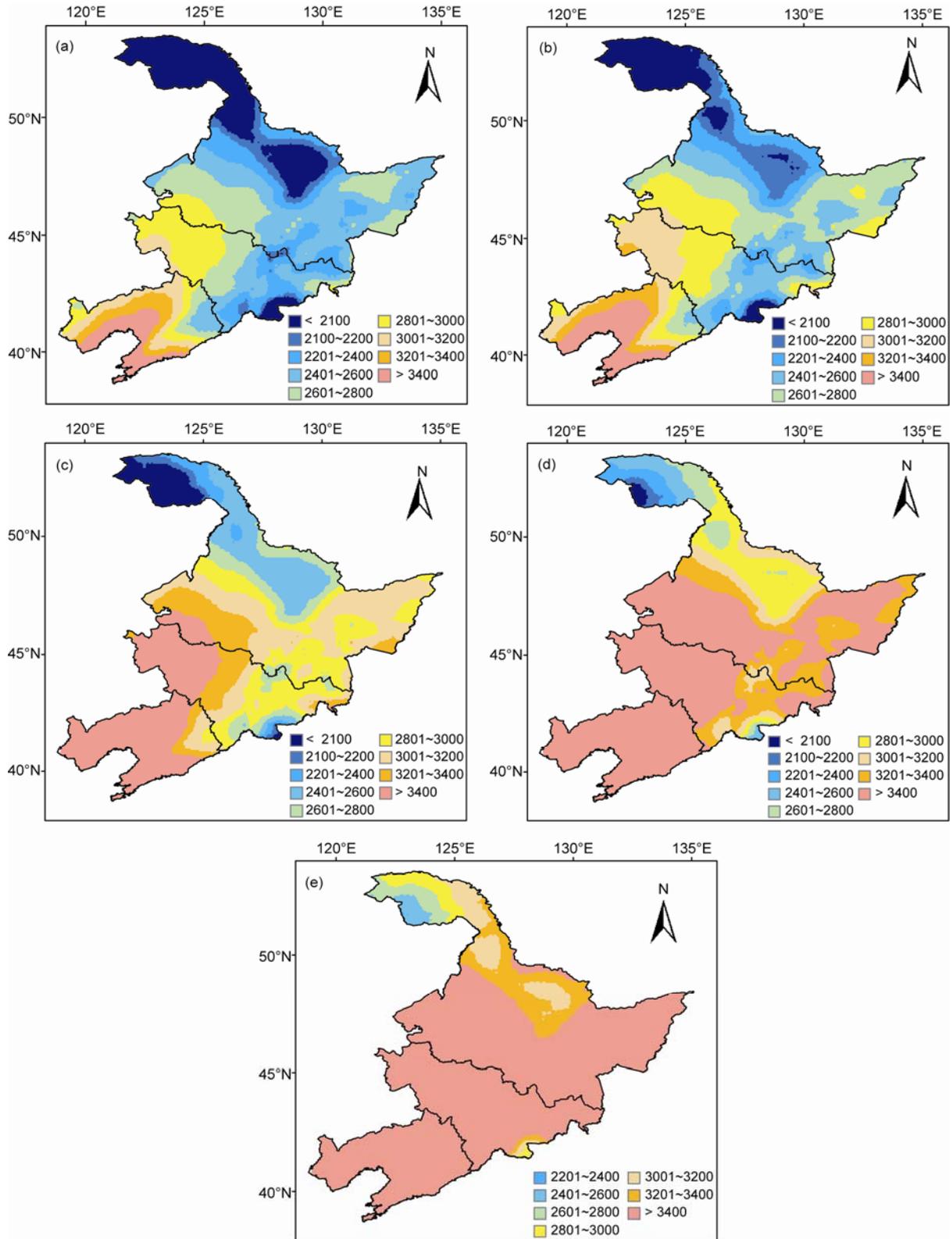


图3 东北不同时段80%保证率下 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温(单位: $^{\circ}\text{C}$)
 (a) 1951~1980年; (b) 1981~2010年; (c) 2011~2040年; (d) 2041~2070年; (e) 2071~2100年

宁省增加较多. 到 2071~2100 年, 辽宁省全省、吉林省中西部和黑龙江省西南部小部分地区已达到 4000~5000 °C d, 长白山一带也由原来的 2200~2500 °C d 增加到了 3400 °C d, 完全可以满足春玉米生长发育对热量的要求. 而生育期内降水量在 1951~2100 年间略有波动, 但整体变化趋势并不明显.

2.3 玉米品种布局

根据不同地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和不同玉米品种对热量资源的需求, 分析了不同时段 80% 保证率下东北玉米品种熟型的理论布局(图 4). 基准时段辽宁省全省基本都可种植晚熟(21, 22 片叶子)品种, 从吉林省的西南部向东北部(黑龙江省)种植品种逐渐由 22 片叶子过渡到 14 片叶子. 三江平原地区可以种植 17~18 片叶子的品种.

1951~1980 年与基准时段相比, 适合种植的玉米品种界限要比基准时段偏南. 三江平原此时段只适合种植 16~17 片叶子的品种. 2011~2040 年各品种的种植界限发生了明显的北移. 辽宁省的全部、东北平原已经可种植最晚熟 22 片叶子的品种, 长白山地区可种植 19 片叶子的品种. 到 2041~2070 年东北玉米各个品种的种植北界更加明显的北移东扩. 东北全区除小兴安岭和长白山小部分地区外, 其余地区都可种植最晚熟品种(22 片叶子). 2071~2100 年, 随着积温的进一步增多, 除小兴安岭以北地区外, 理论上东北全区都可种植最晚熟品种的玉米. 以上品种种植界限明显北移东扩的趋势和前人的研究结果基本吻合^[28,29].

2.4 气候生产潜力

以 1981~2010 年为基准年, 由于玉米品种布局的改变, 使各年份相对于基准时段东北三省玉米气候生产潜力在时间(图 5)和空间上(图 6)都发生了明显的变化.

辽宁省玉米气候生产潜力 1951~2010 年间基本上是一个稳定的状态, 不同年份上下略有波动, 2010 年开始气候生产潜力明显下降. 其原因主要是辽宁省目前的热量资源已能满足晚熟玉米的生长发育, 并能得到较高产量. 而随着温度的逐渐升高, 虽然热量资源在不断增加, 但是部分地区过高的温度超出了玉米生长发育的上限温度. 特别是到了 2051 年后, 在玉米的抽雄-成熟阶段, 日平均气温已经高

于此阶段玉米形成产量的最高温度, 故导致玉米气候生产潜力大大降低. 可见, 虽然理论上过多的热量资源可以满足春玉米栽培的要求, 但如果仍然采取现行的以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日确定播种期的方法, 对于气候生产潜力而言, 不但没有增加, 反而减少. 因此, 从获得收益的角度来讲, 2050 年之后, 辽宁地区应该适当调整春玉米的播种期, 使玉米的生长避开不利的高温期, 从而提高产量.

吉林省玉米气候生产潜力在 2000 年之前略偏小, 2000 年之后, 随着晚熟品种的应用, 气候生产潜力开始逐渐增加, 特别是 2051~2070 年之间, 生产潜力达到了最高, 之后又开始逐渐下降, 但总体上仍比基准时段高. 由此可见, 热量资源的增加对吉林省玉米气候生产潜力的影响为正效应. 随着热量的增加, 生长季延长, 吉林省的玉米品种逐渐过渡到晚熟品种, 热量资源得到了充分的利用.

黑龙江省是我国纬度最高的农业区, 热量资源缺乏是限制农业高产稳产的主要因素. 因此, 在未来气候变暖, 有效积温增加的有利条件下, 晚熟品种将逐渐得到应用, 其玉米的气候生产潜力也将随气候变暖而不断增加. 因此, 热量资源的增加对黑龙江的玉米生产总体上是有益的.

由于不同阶段的热量资源发生了显著变化, 使得玉米品种熟型的布局也随着发生相应的变化, 从而导致玉米气候生产潜力的空间分布也产生明显的差异(图 6).

1981~2010 年气候生产潜力与 1951~1980 年相比总体有所增加, 比较明显的区域为三江平原以及黑龙江的南部地区, 而辽西走廊一带有所下降. 2011~2040 年辽西走廊的气候生产潜力继续下降, 逐渐退出高值区. 辽宁省大部以及吉林中部仍然处在气候生产潜力的高值区, 黑龙江省气候生产潜力有明显的增加趋势, 增加比较明显的地区为小兴安岭一带. 到 2041~2070 年辽宁省生产潜力减小的趋势变得十分明显, 其中辽西走廊一带已经变成了气候生产潜力的低值区, 而气候生产潜力的高值区逐渐向吉林省移动. 整体来看, 气候生产潜力的高值区有由西向东、由南向北移的趋势. 到 2071~2100 年, 这一变化趋势更加明显, 辽宁省大部以及东北平原大部已经由 1981~2010 年的气候生产潜力高值区变成了低值区. 气候生产潜力的高值区继续向东北方向移动.

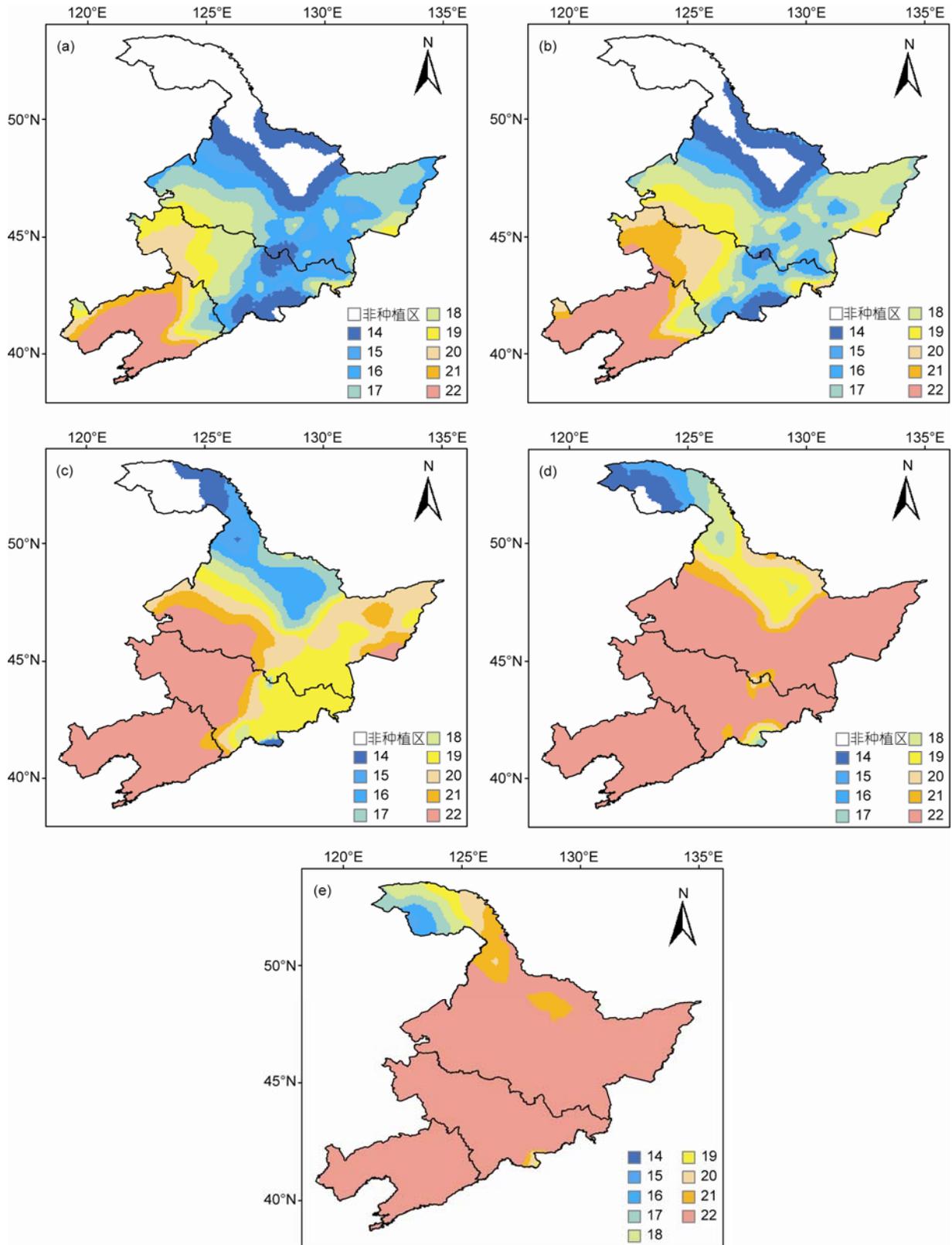


图4 东北不同时段80%保证率玉米熟型布局(单位:片)
 (a) 1951~1980年; (b) 1981~2010年; (c) 2011~2040年; (d) 2041~2070年; (e) 2071~2100年

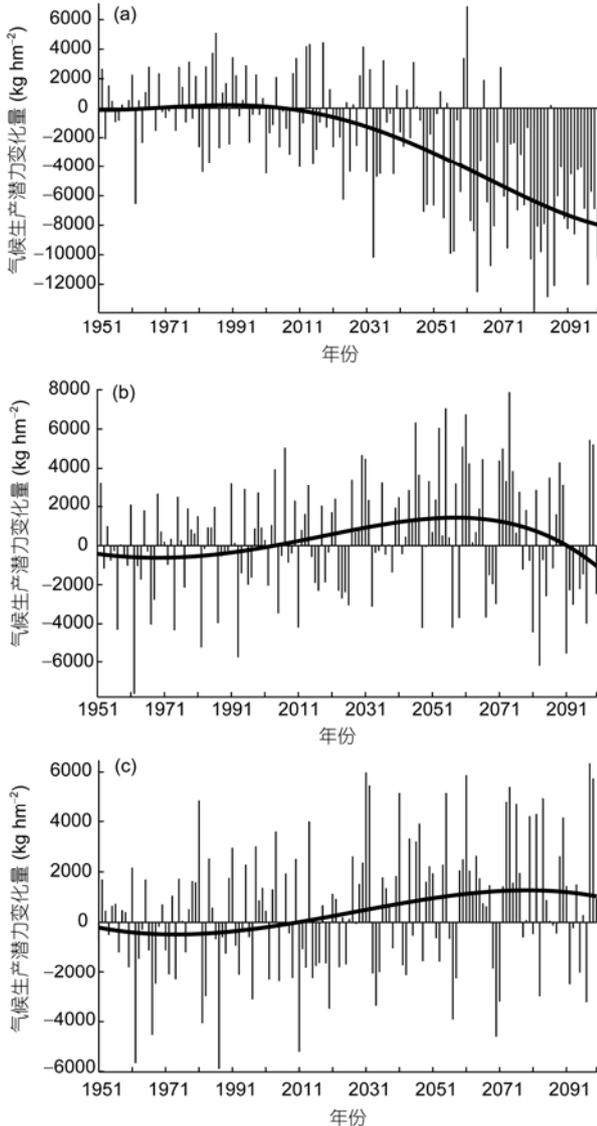


图5 东北各省 1951~2100 年玉米气候生产潜力变化
(a) 辽宁省; (b) 吉林省; (c) 黑龙江省

以上现象的出现和热量资源增加密切相关。目前热量比较充足的地区随着热量资源的增加,春玉米如仍采取以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日播种的方法,会造成生产潜力下降。而目前热量资源相对不足的地区,随着热量资源的增加、生长季的延长,玉米品种不断由早熟向晚熟过渡,热量资源得到充分的利用,生产潜力不断增加。

2.5 调整播种期对气候生产潜力的作用

由以上分析可知,2011年后由于温度的不断升高,辽宁省春玉米的气候生产潜力开始不断下降。为了使玉米生长避开不利的高温期,采用推迟播种期

的方法,来寻求使玉米生产获得最高收益的途径。由于不同地区处于不同的经纬度和海拔高度,气候资源状况有很大差异,很难确定一个统一的播种期推迟天数。因此,在辽宁省选取两个试验点为研究对象,在保证玉米能够完全成熟的前提下,分别在传统的播种期基础上将播种期推迟 10, 20, 30, 40, 50 d,来分析播种期推迟不同天数后玉米气候生产潜力相对于未推迟播种期时的变化率。

由图7可见,在2045年之前,对于热量资源相对不足的试验点 b (123.25°E , 41.5°N),播种期暂不能推迟;而试验点 a (122.25°E , 39.5°N)热量资源相对充足,可将播种期推迟适宜天数,从而有效提高气候生产潜力。从 2045 年后,推迟播种期的作用对于两个试验点都开始愈加显著,且随着气温的逐步升高,推迟的天数越多,越有利于气候生产潜力的提高,但各年份之间仍存在很大的波动。可见,随着东北地区气候不断变暖,对于热量资源过高的地区,适当的将播种期推迟,可以有效地提高玉米的气候生产潜力。但对于整个辽宁省而言,一些地区的热量资源要少于试验点 b,调整播种期对于这些地区暂不可取。而整个东北地区由于地理位置及气候条件差异很大、各年间存在较大温度波动,如何确定一个最适宜的播种期推迟天数仍是一个比较复杂的问题,需要综合考虑多方面的因素。

3 结论与讨论

随着气候不断变暖,东北地区农业气候资源发生了显著变化,特别是热量资源明显增加。与 1981~2010 年相比,2011 年之后东北地区玉米适宜播种期显著提前,到 2100 年全区普遍提前 20 d 左右。全区初霜日明显延后,生长季延长,到 2100 年全区生长季普遍延长 30~40 d。东北地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温呈显著的增加趋势,热量资源的增加使得东北的玉米品种布局发生了变化,早熟品种逐渐被晚熟品种代替。理论上 2041 年后,除了小兴安岭小部分地区外,东北全区基本上都可种植最晚熟的品种。各品种的种植界限不断向北向东推移,目前热量不足而不能种植玉米的地区也开始逐渐适宜玉米的种植。

随着热量资源的增加,玉米早熟品种逐渐被晚熟品种代替,玉米气候生产潜力发生了明显变化。目前热量比较充足的辽宁省由于气候不断变暖,传统的以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 来确定春玉米播种期的方法开始出现弊

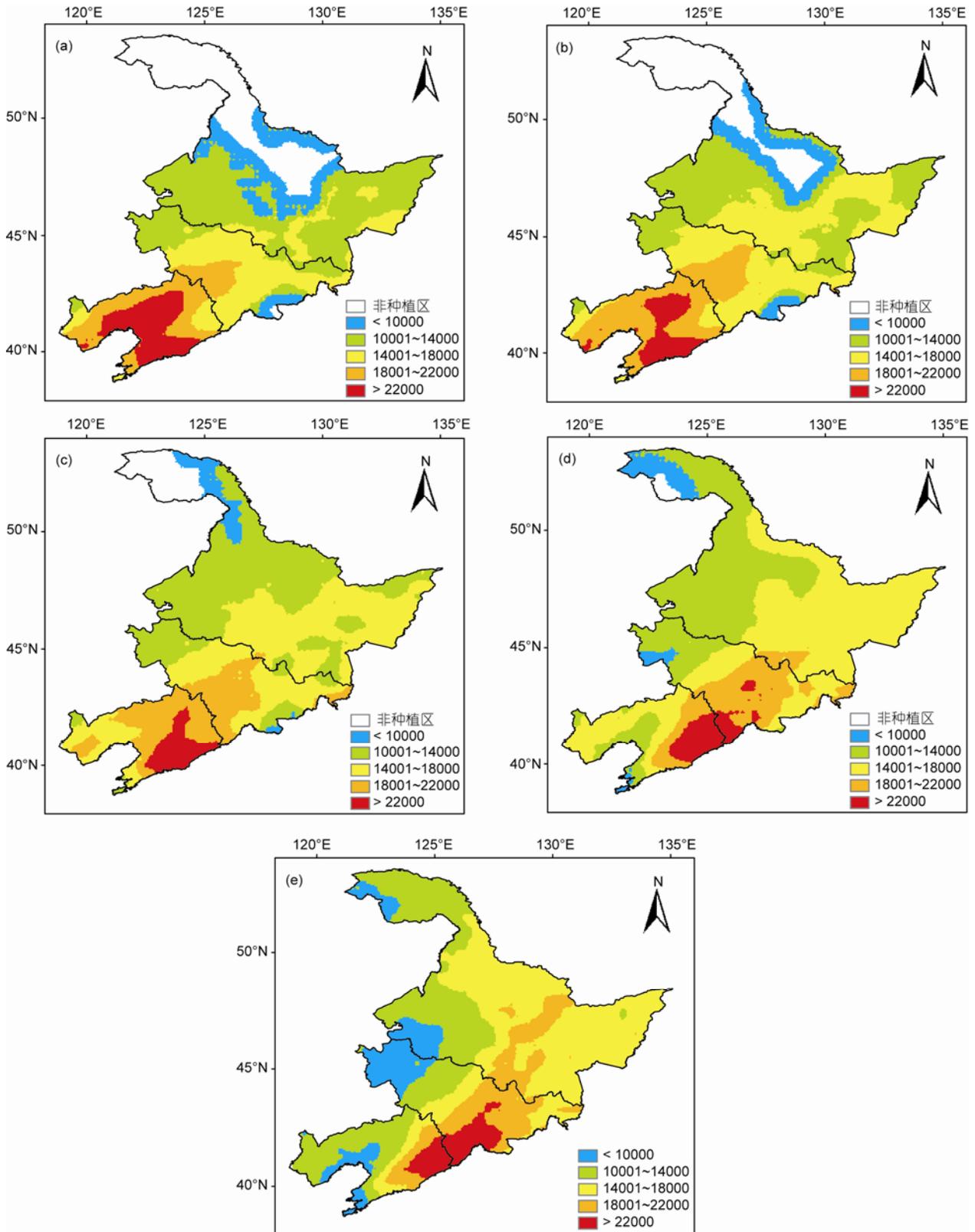


图6 东北不同时段玉米气候生产潜力分布(单位: kg hm^{-2})
(a) 1951~1980年; (b) 1981~2010年; (c) 2011~2040年; (d) 2041~2070年; (e) 2071~2100年

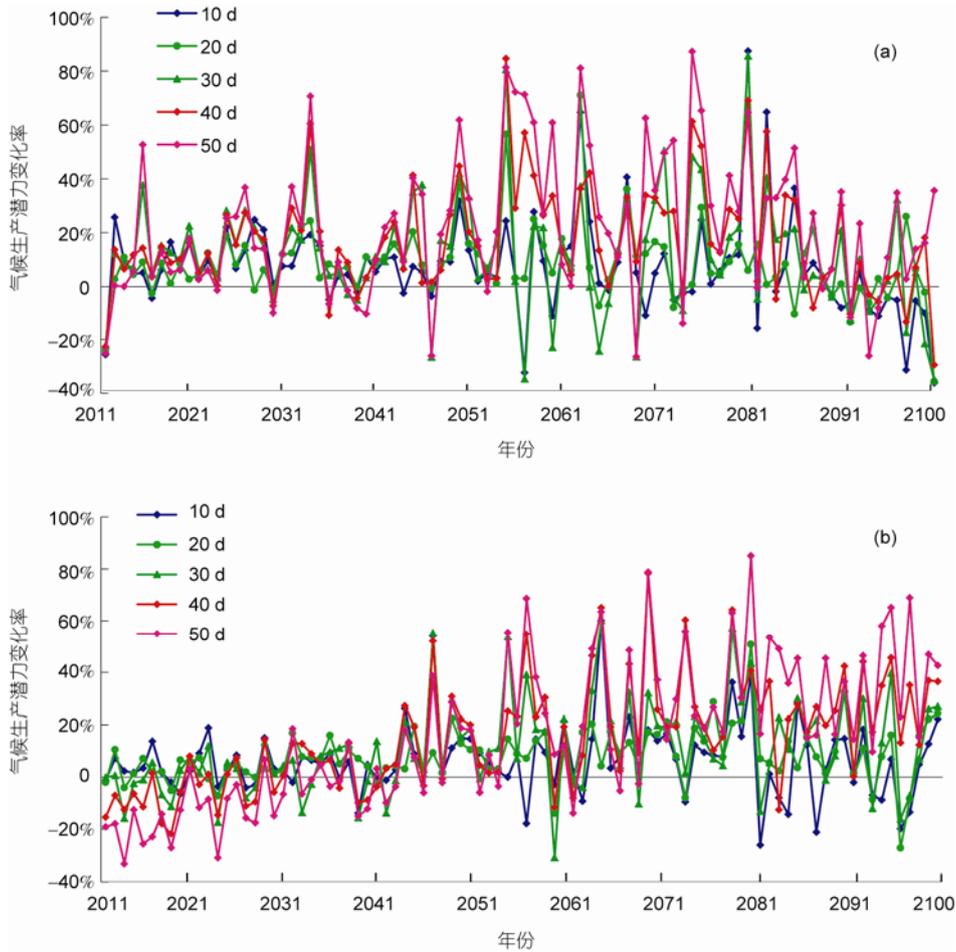


图7 播种期推迟不同天数后气候生产潜力变化率
(a) 122.25°E, 39.5°N; (b) 123.25°E, 41.5°N

端。从气候生产潜力的变化可以看出，按 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 初日播种，当温度上升到一定程度时，辽宁省的玉米生长过程中特别是成熟期会遇到高温的不利影响，造成产量下降。为了使玉米的生长避开不利的高温阶段，可以采用调整播种期或者采用耐高温的夏玉米品种等方法来提高玉米的生产效益。而热量相对不足的吉林省和黑龙江省，随着热量资源的增加，2000年之后玉米气候生产潜力不断增加。但由于不同地区不同年份气候资源有很大差异，如何确定一个适宜的播种期推迟天数是一个比较复杂的问题，仍需进行多方面综合因素的考虑。

由于未来气候数据来自气候模式的模拟结果，虽然前期对数据进行了误差订正，但仍然会与实际存在一定的差异，对研究结果会有一定影响。同时受实际台站的资料限制，前期只对温度、降水、相对湿

度、风速进行了订正，辐射资料直接取自模式结果。因此，研究结果仍有不确定性。

本研究只是从玉米气候资源的角度出发来分析未来100年气候变化对东北玉米品种布局及气候生产潜力的影响，保证在80%的年份能满足玉米生长发育要求，具有一定的科学依据。但关于播种期的调整，具体不同地点不同年份适宜调整的天数有所不同，因此有关于最适播种期的确定还有待于进一步研究。同时，实际的玉米生产还要受到社会生产力因素以及人为因素的影响，理论与实际还存在一定差异。一个地区的实际产量受气候、土壤、社会经济等众多因素的影响，而气候生产潜力只是评价农业气候资源的重要依据之一，气候生产潜力与实际产量并不是完全的对应关系。因此，如何合理考虑社会经济因素对粮食产量的贡献也将是未来研究的重要任务之一。

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 1-996
- 2 高学杰, 石英, Giorgi F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40: 911-922
- 3 赵俊芳, 郭建平, 张艳红, 等. 气候变化对农业影响研究综述. 中国农业气象, 2010, 31: 200-205
- 4 周曙东, 周文魁, 朱红根, 等. 气候变化对农业的影响及应对措施. 南京农业大学学报, 2010, 10: 34-39
- 5 姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 等. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及其处理方法. 科学通报, 2011, 56: 547-555
- 6 张建平, 王春乙, 杨晓光, 等. 温度导致的我国东北三省玉米产量波动模拟. 生态学报, 2009, 29: 5516-5522
- 7 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征. 应用气象学报, 2010, 21: 266-278
- 8 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究. 作物学报, 2002, 28: 24-31
- 9 高鹏, 穆兴民, 王飞, 等. 中国东北地区近百年来降水量变化趋势分析. 水文, 2010, 30: 80-84
- 10 付长超, 刘吉平, 刘志明, 等. 近 60 年东北地区气候变化时空分异规律的研究. 干旱区资源与环境, 2009, 23: 60-65
- 11 赵俊芳, 郭建平, 马玉平, 等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策. 应用生态学报, 2010, 21: 2922-2930
- 12 王宗明, 宋开山, 李晓燕, 等. 近 40 年气候变化对松嫩平原玉米带单产的影响. 干旱区资源与环境, 2007, 21: 112-117
- 13 龚强, 汪宏宇, 张运福, 等. 气候变化背景下辽宁省气候资源变化特征分析. 资源科学, 2010, 32: 671-678
- 14 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化背景下东北地区玉米产量变化模拟. 中国生态农业学报, 2008, 16: 1448-1452
- 15 李荣平, 周广胜, 王宇. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应. 科学通报, 2010, 55: 1247-1254
- 16 张冰, 魏建苏, 裴海瑛. 2006 年 T213 模式在江苏的降水和温度检验评估. 气象科学, 2008, 28: 468-472
- 17 李兆芹, 姚益平, 姚克敏. NCEP/NCAP 再分析温度资料在农业气象中的应用可行性. 南京气象学院学报, 2004, 27: 420-427
- 18 孙卫国. 气候资源学. 北京: 气象出版社, 2008. 100
- 19 马树庆, 安刚, 王琪, 等. 东北玉米带热量资源的变化规律研究. 资源科学, 2000, 22: 41-45
- 20 罗新兰, 周立宏, 任传友, 等. 东北地区春玉米品种熟型搭配的决策研究. 沈阳农业大学学报, 2002, 33: 327-330
- 21 魏凤英, 冯雷, 马玉平, 等. 东北地区玉米气候生产潜力时空分布特征. 气象科技, 2010, 38: 243-247
- 22 罗永忠, 成自勇, 郭小芹. 近 40 a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征. 生态学报, 2011, 31: 221-229
- 23 王宗明, 张柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究. 中国农业气象, 2005, 26: 1-6
- 24 郭建平, 高素华, 潘亚茹. 东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策. 气象, 1994, 21: 3-9
- 25 刘勤, 严昌荣, 何文清. 山西寿阳县旱作农业气候生产潜力研究. 中国农业气象, 2007, 28: 271-274
- 26 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析. 中国农业气象, 2011, 32: 35-40
- 27 Doorenbos J, Kassam A H. Yield Response to Water(Food and Agriculture Organization Irrigation and Drainage Series). Rome: Food and Agriculture Organization, 1979. 29
- 28 李祎君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响. 气候变化研究进展, 2010, 6: 123-129
- 29 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响分析 IV. 未来气候变暖对东北三省春玉米的可能影响. 中国农业科学, 2010, 43: 2088-2097