

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^{*}

金之庆 葛道阔 石春林 高亮之

(江苏省农业科学院农业现代化所, 江苏南京 210014)

摘要 采用 GISS Transient B 模型和黑河、哈尔滨、长春、沈阳、延吉等 5 个样点近 40 年的逐日气候资料, 在计算机上生成了我国东北平原未来 10 年、30 年和 50 年的气候渐变情景; 将 CERES 系列模型(包括大豆、玉米、水稻 3 种作物)在上述各样点不同年份的气候渐变情景下运行, 并将模拟结果与当前气候条件下的模拟值相比较, 评价了气候变化及大气 CO₂ 浓度增长对研究区域作物布局和品种布局的阶段性影响; 还利用若干农业气候指标, 结合各样点的气候渐变情景, 分析了我国冬小麦安全种植北界在研究地区可能出现的地理位移。在此基础上, 就东北平原未来的作物与品种布局, 以及能否安全种植冬小麦等提出具体意见, 供有关部门在制定农业中、远期规划时参考。

关键词 全球气候变化; 东北平原; 粮食生产; 适应性对策

中图分类号: S162 **文献标识码**: A

Several Strategies of Food Crop Production in the Northeast China Plain for Adaptation to Global Climate Change—A Modeling Study

J N Zhi-Qing GE Dao-Kuo SHI Chun-Lin GAO Liang-Zhi

(Agricultural Modernization Institute, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract The gradual climate change scenarios in the Northeast China Plain in 2010, 2030 and 2050 were generated, using output of the GISS Transient B model and the mean daily climatic data near 40 years (1960~1997) taking from 5 sites, i.e., Heihe, Harbin, Changchun, Shenyang and Yanji. The CERES models involving soybean, maize and rice were run under both the baseline weather and the climate change scenarios. Then the effects of climate change and atmospheric CO₂ ascent on the crop and varietal dispositions were evaluated, based on comparison of the simulated yields of the 3 crops in these two cases. The possible geographical shift of the safe northern limit for winter wheat in the studied region was also assessed. Finally, several adaptation strategies for food crop production in the concerned region were advanced, which provide a scientific basis and serve as a reference for making the middle and long-term agricultural policies.

Key words Global climate change; Northeast China Plain; Food crop production; Adaptation strategy.

东北平原地势平缓、幅员辽阔、土壤肥沃, 特别是作物生长季内光热水集中程度高、配合好。但另一方面, 因所处纬度较高、冬季严寒漫长, 故较短的生长季仅适合种植单季作物, 品种亦以生育期短和感温性强的早熟或中早熟类型为主^[1~2]。

20 世纪 80 年代以来, 在全球气候变暖的大背景下, 东北平原已出现了持续而显著的增温现象。与 60~70 年代相比, 80~90 年代的平均气温已上

升了 1.0~2.5^[3~4]。增温幅度之大, 居全国各农区之首。预计这种大幅度增温趋势在未来几十年或更长的时间内将继续下去^[5~6]。因此, 东北平原的粮食生产应怎样顺应气候变化, 已成为人们普遍关心的问题。本文采用作物模拟模型与全球气候渐变模型相结合的方法, 并援引若干农业气候指标, 就研究区域的作物与品种布局何时应作怎样的调整, 以及我国冬小麦安全种植北界何时向东北平原北进

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39870531)。

作者简介: 金之庆, (1944-) 男, 安徽桐城人, 博士, 研究员。研究方向: 作物模拟、气候变化影响评价。

Received on (收稿日期): 2000-12-21, Accepted on (接受日期): 2001-04-22

多少幅度等提出具体意见, 供有关部门在制定农业发展的中远期规划时作参考。

1 研究方法

1.1 区域性气候渐变情景

尽管人们意识到人类活动排放的大量温室气体是造成全球气候变暖的主因, 但要预测这种变暖的速度却是件难事。因为大气温室气体今后的增长速度是最大的变数, 涉及到政治、经济、社会、环境和科技等各方面大量的问题。因此, 大气科学家不得不借助于某些假设将这个复杂的问题简化。本文选用的全球气候渐变模型(GCM Transient runs)^[7]即是建立在以下 3 种有关温室气体排放的假设上:

A 假设—未来大气温室气体的浓度呈指数增长;

B 假设—温室气体的增长速度维持在目前水平;

C 假设—今后, 温室气体的浓度将不再增加。显然, 上述 B 假设较为合理可信。因为一方面, 世界工业要继续发展, 人口要进一步增长, 全球森林资源的衰竭之势也一时难以遏制, 这将导致大气 CO₂ 和其他温室气体的继续增长; 但另一方面, 许多国家已经或将要采取严厉措施控制温室气体的过度排放, 有望使排放速度控制在目前水平。因此, 本文选择与上述 B 假设相对应的 GISS Transient B 做为生成研究区域气候渐变情景的主要工具。

CO₂ 是最重要的温室气体。目前, 全球每年因燃烧化石燃料和生命活动而释放到大气中的碳为 6×10^9 吨, 其中约有一半被海洋吸收^[7-9]。按照上述 B 假设可以推算, 到 2010 年大气 CO₂ 浓度将升至 $405 \mu\text{molmol}^{-1}$, 2030 年将升至 $460 \mu\text{molmol}^{-1}$, 2050 年为 $530 \mu\text{molmol}^{-1}$ ^[18]。将上述不同年份的大气 CO₂ 浓度值代入 Transient B, 即可计算 2010、2030 和 2050 年, 全球各网格点上逐月的平均气温、

太阳辐射和降水量等气候要素值。

Transient B 将全球划分为 828 个网格(分辨率 7.83 纬度 × 10 经度), 整个东北地区以 E125 和 N47 为界, 被其中 4 个网格完全覆盖。本文选择农业较发达且具有代表性的 3 个样点, 即黑河(E127°27', N50°15')、哈尔滨(E126°37', N45°41')和沈阳(E123°26', N41°48')分别从 Transient B 的输出软件中下载 2010、2030 和 2050 年各月相对于当前各月平均温度的增幅, 以及降水和太阳辐射总量相对于当前各月的变幅。Transient B 的这些输出值, 构成了本研究的气候学基础。限于篇幅, 表 1 仅列出 3 个样点各气候要素的年平均值。

由于 Transient B 是以月值形式输出的, 无法满足以日为时间单元的作物模型的运行需要, 故选用研究区域有代表性的黑河、哈尔滨、长春、沈阳和延吉 5 个样点近 40 年(1960~1997)的逐日历史气候资料(Baseline), 按下式对 Transient B 输出的有关网格点值施加订正, 以生成每个样点以日为时间单元的 2010、2030 和 2050 年的气候渐变情景:

$$\Delta T_{i20??} = T_{i20??} - T_{iCN TL} \quad (1)$$

$$S_{i20??} = S_{i20??} / S_{iCN TL} \quad (2)$$

$$R_{i20??} = R_{i20??} / R_{iCN TL} \quad (3)$$

式(1)~(3)中, T_i 、 S_i 和 R_i 分别代表 Transient B 在有关网格点上输出的第 i 月的平均气温、太阳辐射与降水总量; 下标 20?? 代表年份, 即 2010、2030 或 2050 年; 下标 CN TL 代表对当前气候(Baseline)的模拟值。故 $\Delta T_{i20??}$ 表示 20?? 年第 i 月同比当前第 i 月平均气温的增幅, $S_{i20??}$ 和 $R_{i20??}$ 分别表示太阳辐射与降水总量的同比变幅。将 $\Delta T_{i20??}$ 分别与 Baseline 中相应月份的日平均气温相加, 将 $S_{i20??}$ 和 $R_{i20??}$ 分别与 Baseline 中相应月份的太阳辐射和降

表 1 GISS Transient B 在东北地区 3 个样点所在网格 2010、2030 年和 2050 年的输出值
Table 1 Outputs of the GISS Transient B at 3 sites of Northeast China in 2010, 2030 and 2050

地点 Site	温度增幅 Temp. diff ()			降水量变幅 Prec. ratio			太阳辐射变幅 Sol. ratio		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050	2010	2030	2050
黑河 Heihe	2.42	3.26	4.56	1.17	1.14	1.23	0.95	0.98	0.95
哈尔滨 Harbin	2.22	2.79	4.37	1.06	1.07	1.00	0.99	1.02	1.03
沈阳 Shenyang	1.89	3.17	4.37	1.08	0.98	1.00	0.99	1.01	1.03

水量的日值相乘,即得到各样点在20??年以日为基础的气候变化情景。

1.2 作物模拟模型及其订正

本文在分析全球气候变化对研究区域作物布局与品种布局的阶段影响时,选用了美国的CERES模型系列,包括大豆^[10]、玉米^[11]和水稻^[12]等作物模型,分别在上述气候渐变情景下进行模拟试验,然后再与当前气候条件下的模拟结果作比较。CERES模型可以较好地模拟天气、土壤、栽培管理和品种遗传特性等对作物生长发育和产量的影响^[13],而且经作者等^[14-17]广泛检验,被证明适用于研究区域。但这些模型本身并没有考虑大气CO₂浓度变化对作物光合作用和蒸腾作用的直接影响,而这些影响又是气候变化评价研究中不容忽视的问题,因此对CERES模型进行了必要的订正。

1.2.1 大气CO₂浓度对作物光合作用的影响

大气CO₂浓度增长有利于作物的光合作用^[18]。但C₃和C₄作物在生化和解剖学上有显著差异,它们从外界摄取CO₂的方式和途径不一,故对CO₂浓度增长会作出不同响应^[18-21]。

本文采用“系数订正法”^[14-17]处理不同作物的光合作用对CO₂浓度响应上的差异,即假定某种作物在某个CO₂浓度水平上的光合速率等于它在参比浓度(330 μmolmol⁻¹)下的光合速率乘以光合作用订正系数。表2列出了研究区域各主要农作物的光合作用订正系数^[9]。显然,就CO₂浓度增长对光合作用的直接影响而言,受益最大的是大豆,其次是稻麦,而玉米最小。

表2 不同CO₂浓度下各种作物的光合作用订正系数
(根据美国环保局^[9])

Table 2 Photosynthetic coefficients for various crops at different CO₂ levels (According to US EPA^[9])

CO ₂ 浓度(μmolmol ⁻¹) CO ₂ concentration	水稻/小麦 Rice/W heat	玉米 M aize	大豆 Soybean
330	1.00	1.00	1.00
405	1.05	1.02	1.07
460	1.10	1.04	1.12
530	1.15	1.05	1.18

1.2.2 大气CO₂浓度对蒸腾作用的影响 高CO₂浓度使得叶片气孔开度变小,导致蒸腾作用受抑,因而有利于提高作物的水分利用效率。C₃与C₄作物之间也同样存在着差异^[18-21]。本节仍采用“系数订正法”来模拟大气CO₂浓度增加对作物蒸腾作

用的直接影响,并假定某个CO₂浓度水平上的作物蒸腾速率等于它在参比浓度下的蒸腾速率乘以蒸腾作用订正系数(R)。R可定义为作物在某个CO₂浓度下与参比浓度下的潜在蒸散量(ET)之比,当采用Penman-Monteith方程计算ET时,R可简化为以下形式^[6, 15, 17]:

$$R = \frac{ET}{ET^c} = \frac{S + \gamma \cdot (1 + g_a/g_c)}{S + \gamma \cdot (1 + g_a/g_c^c)} \quad (4)$$

式中,S为“饱和水汽压-温度”曲线的斜率,γ为湿度常数,g_a为群体边界层传力,g_c为群体水汽传力,上标c代表不同的CO₂浓度水平。对于两组完全相同的作物群体,仅当外界CO₂浓度变化且其他环境条件不变时,方程(4)中仅有变量g_c(或g_c^c)一项发生变化,并可按下式计算^[12]:

$$g_c \text{ (或 } g_c^c) = LA I / (\gamma + \gamma_b) \quad (5)$$

这里γ为叶片气孔阻抗,γ_b为叶片边界层阻抗。同样,当外界CO₂浓度变化且其他条件均相同时,方程(5)中只有γ一项发生变化。故只要测定不同CO₂浓度下的γ值,即可计算相应的R值。表3给出研究区域主要作物在CO₂有效倍增浓度(555 μmolmol⁻¹)以及参比浓度(330 μmolmol⁻¹)下的γ值^[9, 18]。由于γ值与CO₂浓度值之间有良好的相关关系,故不难推算其他浓度下的γ值。

表3 用于模拟CO₂直接影响的叶片气孔阻抗测定值
(γ_L) [根据美国环保局^[81]]

Table 3 Stomata resistance (γ_L) used to simulate the direct effects of CO₂ (According to US EPA^[81])

CO ₂ 浓度(μmolmol ⁻¹) CO ₂ concentration	大豆 Soybean	水稻/小麦 Rice/W heat	玉米 M aize
330	34.4	34.4	55.8
555	49.7	49.7	87.4

由表3可见,玉米不仅在参比浓度下具有较高的γ值,而且随着浓度增加其增幅亦较大。这表明在高CO₂浓度条件下,玉米的水分利用效率可以明显提高,其耐旱性也将显著增强。在这方面,稻、麦和大豆等C₃作物直接获益的程度远不如玉米。

1.3 冬小麦安全种植北界的气候指标

种植冬小麦可以充分利用冬季气候资源,提高复种指数,其单产通常也高于春小麦。目前,我国冬小麦的安全种植北界大致与长城一线吻合^[1-2]。东北平原因冬温过低,绝大部分地区无法保证冬小麦安全越冬,故只能种植春小麦。近些年来,随着气候不断增暖,特别是冬半季气温持续偏高,能否

将上述北界适度北推, 颇令人注目。本文同时采用两组气候指标并结合气候渐变情景, 分析未来 50 年内我国冬小麦安全种植北界在研究区域可能出现的地理位移, 目的是提高所得结论的可靠性。

第一组采用文献^[24]提出的有关我国冬小麦安全种植北界的气候指标, 即: 1 月平均温度 = -8; 冬季最低温度 -20 的天数等于 3 天;

11 月平均温度 = 2; 第二组采用文献^[1]提出的积温指标, 即最冷月平均最低气温 -15, 极端最低气温 -22 ~ -24。上述两组指标只有同时满足, 才能最后定界。共选择我国东北、华北近 100 个气象台站的多年月平均气候资料, 按一定程序生成未来不同年份的气候渐变情景, 并按上述指标加以搜寻, 即可推算到 2010、2030 和 2050 年, 我国冬小麦安全种植北界在研究区域北推的可能幅度。

2 资料来源

用试错法^[6, 10~12]确定 5 个样点有代表性品种遗传参数所需要的作物资料, 包括玉米、大豆和水稻的播种日期、种植密度与行距、成熟期和产量等, 均取自当地连续种植 3 年以上的作物品种区域试验(通常取对照品种), 分别由中国农科院作物所、吉林省农科院和江苏省农科院等单位提供; 与作物资料同期的逐日天气资料由当地气象台站提供; 用于生成区域性气候渐变情景并运行作物模型的近 40 年(1960~1997)的逐日气候资料, 以及为估算冬小麦安全种植北界所使用的东北、华北近 100 个站点的多年月平均气候资料, 均取自我国气象部门公布的资料; 各样点有代表性的土壤资料, 包括土壤类型、不同深度土层的有机质含量、土壤颗粒结构和容重等, 取自文献^[25~26]以及当地土壤普查出版物。

3 结果与讨论

3.1 关于东北地区的作物布局问题

研究区域的大豆和玉米生产均有明显的气候优势。近 20 年来, 随着气候明显增暖, 产量较高的玉米有迅速扩种之势, 这也是东北地区玉米显著增产的重要原因; 但另一方面, 营养价值高、产量较低的大豆则相对萎缩。针对作物布局的这种变化, 本节利用 SOYGROW 和 CERES-Maize 模型在未来不同年份的气候变化情景下运行, 并假定现有品种和栽培管理方法不变(这种假定只是为了便于和 BASE 进行比较), 就气候变化对东北平原大豆和

玉米产量的阶段性影响进行了模拟试验。考虑到研究区域雨水相对较丰, 灌溉系统还欠发达, 故选择雨育方式运行作物模型。

图 1 给出了未来不同年份的气候变化情景下, 5 个样点大豆模拟产量的变化趋势图。由图可见: 从 2010 年、2030 年至 2050 年, 最北的黑河地区模拟产量有大幅度增长, 其余各点相对于 BASE 的模拟产量亦呈持续增长趋势; 但随着时间推移, 产量增幅趋缓, 其中哈尔滨、沈阳、长春和延吉 4 个点相对于 BASE 的平均增幅由 2010 年的 20%, 增至 2030 年的 21% 以及 2050 年的 24%。增产的原因, 主要得益于大气 CO₂ 浓度的持续增长对大豆光合作用和产量的增益作用, 它可以很大程度地补偿、克服增温带来的诸如生育期缩短、呼吸消耗加剧等负效应。产量增幅之所以趋缓, 主要是因为持续增温带来的负效应与日俱增, 一定程度地抵消了 CO₂ 浓度的增益效应, 延吉 2050 年甚至减产 6%。黑河地区的产量增幅之所以最大, 一是因为除了 CO₂ 的增益作用外, 气候增暖本身也可以明显改善当地热量条件不足的现状, 两种正效应迭加有利于大豆增产; 另一方面, 也与该地目前大豆产量水平相对较低有关, 产量水平愈低, 增产潜力也就愈大。

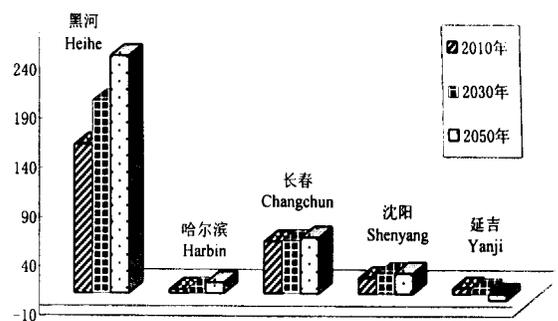


图 1 东北地区未来 50 年受气候变化影响大豆产量的变化百分比
Fig 1 Percentage change in soybean yield due to climate change, compared with the base yield in the next 50 years in the Northeast China

玉米的情况恰好相反: 除最北的黑河之外, 在其他各样点, 不同年份的模拟产量大多呈持续下降趋势(图 2)。整个研究区域(不包括黑河)的平均模拟产量与 BASE 相比, 减幅由 2010 年的 9%, 增至 2030 年的 14% 以及 2050 年的 24%。减产原因: 持续增温明显缩短了模拟生育期(尤其是灌浆期)天数, 使光合时间减少、灌浆不充分; 研究区域南部(沈阳、延吉)气候有变旱趋势; 玉米是 C₄ 作

物,其光合作用很少能够象大豆那样直接从日益增长的大气CO₂浓度中获益。黑河的情况之所以例外,主要是持续增温改善了热量条件,而低温冷害是目前限制当地玉米生长发育的主要障碍因素。平原西缘的丘陵地区可能是另一个例外,因为气候原本就较干燥,加之水源匮乏,增温会进一步加重旱象^[27]。在这种情形下,种植比较耐旱的玉米可能较之种植大豆更为适宜。因资料限制,本文未做这方面的分析。

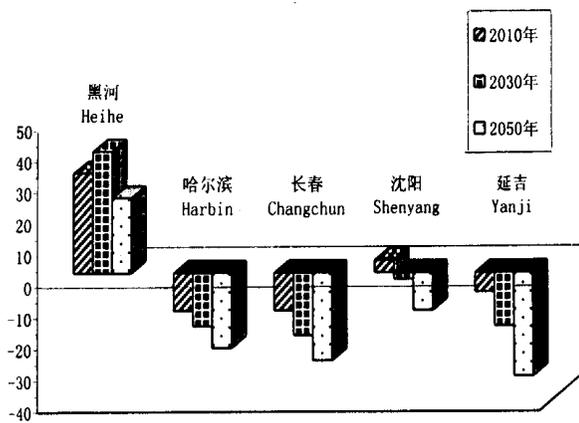


图2 东北平原未来50年受气候变化影响玉米产量的变化百分比
Fig. 2 Percentage changes in maize yield due to climate change, compared with the base yield in next 50 years in the Northeast China Plain

综上所述,今后50年内气候变化对东北平原的大豆生产是有利的,对玉米生产除最北部和西部丘陵地区外,在大多数平原地区则弊多利少。因此,作为一种适应气候变化的长远对策,在平原地区逐步扩种大豆,适度压缩玉米面积,而不是相反,看来是合理的。

3.2 关于东北平原改善灌溉条件问题

根据 Transient B 的预测结果(表1),今后50年北部三江平原的降水量将增加1~2成,中部松嫩平原基本上与目前持平或略有增加,而南部辽河平原则略为减少。由于气候变暖会强化蒸发,因此特别是在研究区域南部,可供作物利用的降水量实际上将会减少。加之降水年际变率将增大,因而干旱和洪涝的发生几率也将增加。

本节针对玉米和大豆两种主要作物,分别在上述5个样点不同年份的气候变化情景下进行雨育/灌溉的模拟对比试验,再通过比较模拟产量,分析灌溉条件的改善可否减缓气候变化带来的负面影响。结果表明(表4):在研究区域中,北部,灌溉玉

米的模拟产量与雨育玉米几乎完全相同,说明灌溉效益甚微。原因是模拟降雨量相对充裕,能满足玉米生长发育需要而无需灌溉;但在南部地区,雨育玉米的模拟产量则明显要低于灌溉玉米,且稳产性亦差(表略),说明改善灌溉条件可以一定程度地补偿气候变化的不利影响。大豆的模拟结果与玉米类似(表5):在研究区域北部,雨育大豆与灌溉大豆的产量差异一般较小;愈往南移,产量差异就愈加明显。以上结果表明,随着气候不断增暖,东北平原受干旱威胁的程度南部地区要明显大于北部。因此,兴建水利和引水工程的重点应放在西部和南部地区。

表4 在未来不同年份的气候渐变情景下雨育玉米和灌溉玉米相对于BASE的模拟产量变化百分比

Table 4 Percentage changes in simulated yields of rainfed and irrigated maize under the climate change scenarios in 2010, 2030 and 2050

样点 Site	雨育玉米 Rainfed maize			灌溉玉米 Irrigated maize		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050
黑河 Heihe	32	39	24	32	39	24
哈尔滨 Harbin	-12	-17	-24	-12	-17	-24
长春 Changchun	-12	-20	-28	-12	-20	-28
沈阳 Shenyang	4	-2	-12	17	5	-6
延吉 Yanji	-6	-17	-33	5	-6	-14

表5 在未来不同年份的气候渐变情景下雨育大豆和灌溉大豆相对于BASE的模拟产量变化百分比

Table 5 Percentage changes in simulated yields of rainfed and irrigated soybean under the climate change scenarios in 2010, 2030 and 2050

样点 Site	雨育大豆 Rainfed soybean			灌溉大豆 Irrigated soybean		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050
黑河 Heihe	151	196	242	158	201	245
哈尔滨 Harbin	4	5	11	8	9	19
长春 Changchun	53	54	57	54	56	61
沈阳 Shenyang	16	16	21	35	27	23
延吉 Yanji	6	5	-6	24	19	0

3.3 关于作物品种类型的更换问题

本文采用的方法是在计算机上做“南种北植”的模拟试验,即:将纬度较低的某个样点(称为原产地)的有代表性品种“引入”另一个纬度较高的样点(称为引种地点),然后在引种地点未来不同年份的气候变化情景下运行作物模型,并比较所引品种的多年平均模拟产量是否较引种地原有品种在相同情景下的多年平均模拟产量有所提高。如果增产,则说明这种“引种”可能是成功的。结果表明(表6):该试验在不少样点都取得了成功,增产幅度最高可

达 21% ~ 40%，并且随着时间推移，增产效果愈加明显。对此一种合理的解释是：时间愈往后，增温幅度愈大，“南种北植”的风险性也就愈小。当然，本模拟试验也有不成功的，例如将徐州当前种植的水稻品种盐粳 2 号引入沈阳 2010 年情景下运行，就因气候条件不适宜（生长季温度较低，无法安全齐穗）而绝收。但同一品种在沈阳 2030 年和 2050 年情景下运行，平均模拟产量就比现有品种中丹 2 号在同样情景下的模拟产量明显提高。由此可见，引种工作应把握气候变化规律循序渐进，切忌过急、地理跨度过大。还应强调的是：品种感光性是引种工作中不容忽视的问题。尽管气候增暖了，各地日长变化规律并没有改变。因此，对水稻、玉米和大豆这些喜温的短日作物，宜选用感温性强或较强、感光性弱且基本营养生长期相对较长的中晚熟品种^[28]。如果引进的品种对日长敏感，即使温度条件再适宜，也会因短日要求得不到满足而无法由营养生长期进入生殖生长期。冬小麦是长日照作物，也有类似问题。

3.4 关于冬小麦的种植北界问题

我国冬小麦的安全种植北界目前大致与长城一

线吻合^[1-2]。随着气候不断增暖，预计到 2010 年，冬小麦的安全种植北界将移至东北平原及其毗邻地区的赤峰 阜新 沈阳 本溪 宽甸一线，到 2030 年将移至通辽 双辽 四平 抚顺 宽甸一线，到 2050 年，将移至扎鲁特旗（鲁北）通榆 长岭 集安 安图 延吉一线（图 3）。这意味着在未来 50 年内，研究区域冬小麦的适种面积将由目前的近乎为零逐步扩大到辽南乃至整个研究区域南部，包括辽宁省的大部、吉林省的东南部，这一地区的复种指数将会明显提高。考虑到冬小麦产量通常要比春小麦高，加上夏半季还可以种植大豆、玉米、水稻或高粱等其他喜温作物，因此该地区的粮食总产可望大幅度增加。不过须强调的是：尽管气候增暖是大的趋势，但并不排除低温年的可能出现，何况随着气候不断增暖，气候变率也势必增大^[6-8]。这意味着今后 50 年，研究区域的干旱、洪涝、低温冷害等灾害的发生概率和受灾程度都可能增大。这方面的研究还有待于深入开展。因此，在推广冬小麦的过程中务必持慎重态度，不能因为一两年冬季气候变暖了就盲目扩种。较稳妥的办法是参照图 3 给出的安全种植北界的地理位移来掌握冬小麦的适种范围。

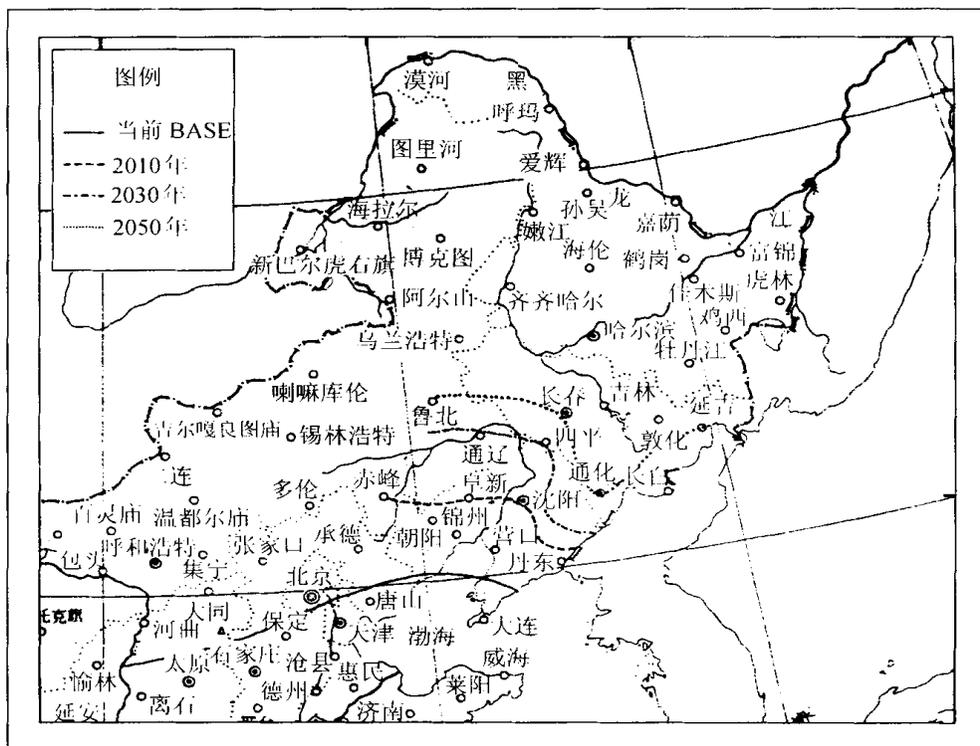


图 3 未来 50 年我国冬小麦的安全种植北界在东北平原上的地理位移

Fig. 3 Geographic shifts for the safe northern limit of winter wheat in the Northeast China Plain in the next 50 years

表 6 几种作物自南向北“引种”模拟试验的结果

Table 6 Simulation experimental results of "introducing varieties" from south to north for several crops

作物 Crop	供试品种 Variety	品种类型 Varietal type	原产地点 Origin	引种地点 Introduced site	气候变化情景 Climate scenario	产量变化百分比 Change in yield (%)
大豆 Soybean	铁丰 18 Tiefeng 18#	中晚熟 M. & L. maturity	沈 阳 Shenyang	长 春 Changchun	2010	2
					2030	10
					2050	14
	铁丰 18 Tiefeng 18#	中晚熟 M. & L. maturity	沈 阳 Shenyang	哈 尔 滨 Harbin	2010	- 2
					2030	14
					2050	9
	烟 7445 Yan7445	早熟 Early maturity	石 家 庄 Shijiazhuang	沈 阳 Shenyang	2010	13
					2030	14
					2050	21
玉米 Maize	中单 1 号 Zhongdan 1#	中熟 Medium maturity	长 春 Changchun	哈 尔 滨 Harbin	2010	7
					2030	3
					2050	8
	京杂 6 号 Jingza 6#	中晚熟 M. & L. maturity	北 京 Beijing	沈 阳 Shenyang	2010	9
					2030	19
					2050	17
水稻 Rice	盐粳 2 号 Yangeng 2#	中粳 Medium Japonica	徐 州 Xuzhou	沈 阳 Shenyang	2010	*
					2030	21
					2050	40

* 无法安全齐穗。 Can not be safely heading

4 结语

4.1 根据作物模拟试验的结果, 今后 50 年, 全球气候变暖和大气 CO₂ 浓度的持续增长将给整个东北平原, 特别是其中、北部的大豆生产带来较为有利的影响; 而玉米的情况不容乐观, 除目前热量不足的北部地区可能大幅度增产外, 在其余地区均表现为明显减产。因此, 在降水或灌溉条件较好的平原地区适当压缩玉米面积、逐步扩种大豆将不失为适应气候变化的一项良策。在较干旱的西部地区, 则适于种植耐旱性较强的玉米。

4.2 今后 50 年, 不断增暖的气候将加剧水份蒸发, 东北平原西部和南部地区受干旱威胁的程度将明显增大。良好的灌溉条件可以一定程度地缓解或补偿气候变暖造成的不利影响。因此, 应重点在这些地区兴建大型水利工程, 加强农田基本建设。

4.3 东北平原适应气候变化的另一项对策是选育或引进一些生育期相对较长、感温性强或较强、感光性弱的中晚熟品种, 逐步取代目前盛行的生育期短、产量较低的早熟品种。这样做将有利于充分利用当地气候资源, 提高作物产量。在引种过程中, 忌操之过急, 忌用感光性强的品种, 也不能搞大跨度的纬向引种。

4.4 随着全球气候变暖, 我国冬小麦的安全种植北界在未来 50 年内将由目前的长城一线逐渐北进

至研究区域南部, 约跨 3 个纬度。这意味着今后东北平原南部可循序渐进地种植产量较高的冬小麦, 以取代目前盛行的春小麦。该地区的复种指数可望明显提高。

References

- [1] Cui D C (崔读昌), Cao G C (曹广才), Zhang W (张文), Zhang C Q (张成琦). A Climatic-ecological classification for wheat in China (中国小麦气候生态区划), Guizhou Sci & Tech Press, 1991
- [2] Liu X H (刘翼浩), Mou Z G (牟正国). Farming systems in China (中国耕作制度), Chi A gri Press, 1993
- [3] Ye D Z (叶笃正). Study on predicting global climate change in China Part I. General principle (中国的全球变化预测研究 第一部分 总论), Chi M eteo Press, 1992
- [4] Ding Y H (丁一汇). Research progress of climate change and adaptation strategies In: Ding Y H (丁一汇), Markham A A ed. Challenges of environment and climate change to China (环境和气候变化对中国的挑战), Chi M eteo Press, 1993
- [5] IPCC. Climate change: The supplementary report to the IPCC scientific assessment, London: Cambridge Univ, 1992
- [6] Jin Z Q (金之庆). Impacts of global climate change on food production in China—A modeling study (全球气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究), Nanjing A gri Univ, 1996
- [7] Smith J B, Tipak D A. The potential effects of global climate change on the United States—Report to Congress Washington D C, U S EPA, 1989, 2-1-2-54

- [8] Wang S W (王绍武). Introduction to climatic system (气候系统引论), China Meteorological Press, 1994
- [9] Rosenzweig C, Ritchie J T, Jones J W, et al. Climate change and agriculture: Analysis of potential international impacts, ASA Special Publication 59, Madison, Wisconsin, 1995
- [10] Jones J W, Boote K J, Jagtap S S, et al. SOYPRO V5.4-technical documentation, Agri Eng Dep Res Rep, Univ of Florida, Gainesville, 1987
- [11] Ritchie J T. The CERES-Maize model. In: Jones C A and Kiniry J R (eds). CERES-Maize-A simulation model of maize growth and development, Texas A & M Univ Press, 1986
- [12] Ritchie J T, Abcilja E C, Singh U, Uehara G. BSNAAT and the CERES-Rice model. In: IIRI Weather and rice, Manila, IIRI, 1986, 271~ 282
- [13] John H, Ritchie J T. Modeling plant and soil systems, Madison Wisconsin, 1991
- [14] Jin Z Q, Ge D K, Chen H, Zheng X L. Assessing impacts of climate change on rice production: strategies for adaptation in Southern China. In: Peng S, Ingram K T, Neue H. U. Ziska L H. Climate change and rice, Manila, IIRI, 1995, 303~ 313
- [15] Jin Z Q (金之庆), Fang J (方娟), Ge D K (葛道阔), et al. Prospect to the impacts of climate change on winter wheat production in China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1994, 20: 186~ 197
- [16] Jin Z Q (金之庆), Ge D K (葛道阔), Chen H (陈华), Zheng X L (郑喜莲). Positive and negative effects of global climate change on soybean production in China. *Soybean Sci* (大豆科学), 1994, 13: 302~ 311
- [17] Jin Z Q (金之庆), Ge D K (葛道阔), Zheng X L (郑喜莲), Chen H (陈华). Assessing the potential impacts of global climate change on maize production in China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1996, 22: 513~ 524
- [18] Jin Z Q (金之庆). Different responses of C3 and C4 crops to increase of CO₂ concentration in the atmosphere. *J of World Agriculture* (世界农业), 1995, 9: 36~ 37
- [19] Peart R M, Jones J W, Curry R B, et al. Impact of climate change on crop yields in the southeastern U S A: A simulation study. In: Smith J B, Tipak D A. The potential effects of global climate change on the United States, Appendix C, Agriculture, Vol 1. U S EPA, Washington D C, 1989
- [20] Rose E. Direct (Physiological) effects of increasing CO₂ on crop plants. In: Smith J B, Tipak D A. The potential effects of global climate change on the United States, Appendix C, Agriculture, Vol 2, U S EPA, Washington D C, 1989
- [21] Acock B, Allen L H Jr. Crop responses to elevated carbon dioxide concentration. In: Strain B R, Cure J D. Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. U S Dep of Energy. DOE/ER-0238. Washington D C, 1985
- [22] Priestly C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 81~ 92
- [23] France J, Thornley J H M. Mathematical Models in Agriculture. London, Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1984
- [24] Wang H (王宏). Studies on the northern limits of agricultural climate for winter wheat in Liaoning, Beijing and Hebei regions in China. In: Beijing agroecological experimental station, Academia Sinica. Researches on Agroecological Environment (农业生态环境研究), Beijing Meteorological Press, 1989, 94~ 101
- [25] Xiong Y (熊毅), Li Q K (李庆远). China Soil (Second printing) (中国土壤(第二版)). Beijing: Sci Press, 1987
- [26] Institute of Soil Science, Academia Sinica. The Soil Atlas of China (中国土壤图集), Beijing Cartographic Press, 1986
- [27] Jin Z Q (金之庆), Chen H (陈华), Ge D K (葛道阔), et al. Generating climate change scenarios with doubled CO₂ in China using GCM outputs and historic weather data. *China Agricultural Meteorology* (中国农业气象), 1992, 13: 13~ 20
- [28] Jin Z Q (金之庆), Ge D K (葛道阔), Gao L Z (高亮之), Shi C L (石春林). Food crop production strategies for adaptation to global climate change in the sampling zone of Eastern China—a modeling study. *Sci Agr Sinica* (中国农业科学), 1998, 31: 51~ 58