

评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响

金之庆 葛道阔 郑喜莲 陈华

(江苏省农业科学院农业现代化研究所, 江苏南京, 210014)

摘要 利用我国玉米带12个有代表性地点的作物、土壤和天气资料, 验证了CERES-Maize在我国的适用性, 确定了各地有代表性品种在模型中的遗传参数, 还对模型进行了敏感性分析。之后, 将CERES-Maize在各地当前气候以及在3种由平衡GCMs生成的气候变化情景下分别运行, 通过分析与比较模拟结果, 评价了当CO₂倍增时, 气候变化对我国各地玉米产量和灌溉需要量的可能影响, 对CO₂的直接影响也做了考虑。还应用若干农业气候指标, 评价了未来研究区域的干湿状况、耕作制度和品种布局的变化等。最后通过模拟试验, 分析了若干适应气候变化的栽培对策的可行性。本文提交的结果不是一种预测, 应将其理解为就未来气候变化影响我国玉米生产所作的合理估计。

关键词 气候变化; 中国; 玉米生产

IPCC^[14, 15]的科学家预言: 在未来几十年内, 随着大气CO₂和其他温室气体浓度的不断增加, 全球气候将明显变暖, 各地蒸发量和降水量的时空分布亦随之改变。因此, 本文在评价气候变化对我国玉米生产的影响时, 既考虑了大气CO₂浓度增加通过温室效应“加热”气候、进而对玉米生长发育和产量形成的间接影响, 又考虑了浓度增加本身的直接影响。本文提交的结果有助于认识未来气候变化影响我国玉米生产的趋势、范围和程度, 但不要将其理解成是一种预测。

本研究的重要性在于: ①玉米单产高、适应性广, 近40年来在我国发展迅速, 目前我国的玉米面积和产量均居世界第二位; ②玉米在食品、饲料、工业和医药等方面有着广泛用途; ③玉米是C₄作物, 当外界CO₂浓度较低时即具有较强的光合能力, 这种光合生理特征限制了它从日益增长的大气CO₂浓度中直接受益^[16], 却可能遭致增温带来的不利影响; 但另一方面, 高CO₂浓度可以增加气孔阻抗, 因而使玉米在水分利用方面获得某些好处^[17]。总之, 面临气候变化的威胁与挑战, 我国的玉米生产将受到怎样的影响? 将来有无切实可行的对策? 这是很值得研究的问题。

1.1 我国的玉米带

我国青藏高原平均海拔在4千米以上, 除少数低热河谷外, 一般不能种植玉米; 西北广大地区气候干燥、水资源奇缺, 亦不可能大范围种植玉米; 在热量丰富、雨量充沛的东南诸省, 更适合于种植水稻和其他经济作物。因此, 我国玉米作物多分布在自东北→华北→西南狭长

国家自然科学基金资助项目“全球气候变暖对我国粮食生产的影响”的部分内容, 批准号为39170467。承高亮之研究员悉心指导, 刘巽浩教授、曹永华与茅鸣皋研究员对本文初稿提出宝贵意见, 特此致谢
收稿日期: 1995-05-23, 终审完毕日期: 1995-11-07

的玉米带上,其播种面积和产量均占全国总数的85%以上^[1,2,3,4]。我国的玉米带可划分为3个种植区^[2,3,4,5],即东北春玉米区、黄淮海夏玉米区和西南玉米区。本研究在各区共选择12个有代表性地点(图1)加以分析。

1.2 生态环境描述

以吉林省为中心的东北春玉米区,具有与美国著名玉米带极为相似的光温水配置^[3]:生长季温度基本适宜、温差大,光照充裕,自然降水大致能满足玉米生长发育的需要,且年变率较小,加之地势平缓、土壤肥沃,是我国一年一熟玉米单产最高的地区;该区适宜种植中早熟或早熟品种,近些年来随着气候变暖,晚熟品种的种植面积正逐年扩大,但有些年份因受延迟型低温冷害的影响,常造成减产。黄淮海夏玉米区生长季的气候条件处于次适宜状态^[2,3,4],除最热月气温稍高外,降水与玉米需水季节同步,光照条件好,可实行冬小麦套种夏玉米,玉米种植面积居全国首位,总产仅次于东三省;但雨量不调匀,特别是北部水资源不足,常有春旱和伏、秋旱发生,致使产量不稳。西南玉米区冬暖春早、夏热秋凉,雨量充沛且变率小,气候呈垂直多样性分布,在广大丘陵坡地适于发展以玉米为主的各种套作熟制;但日照处于全国低值区(云南省除外),伏、夏旱时有发生,加之山区径流大、提灌条件差,土层

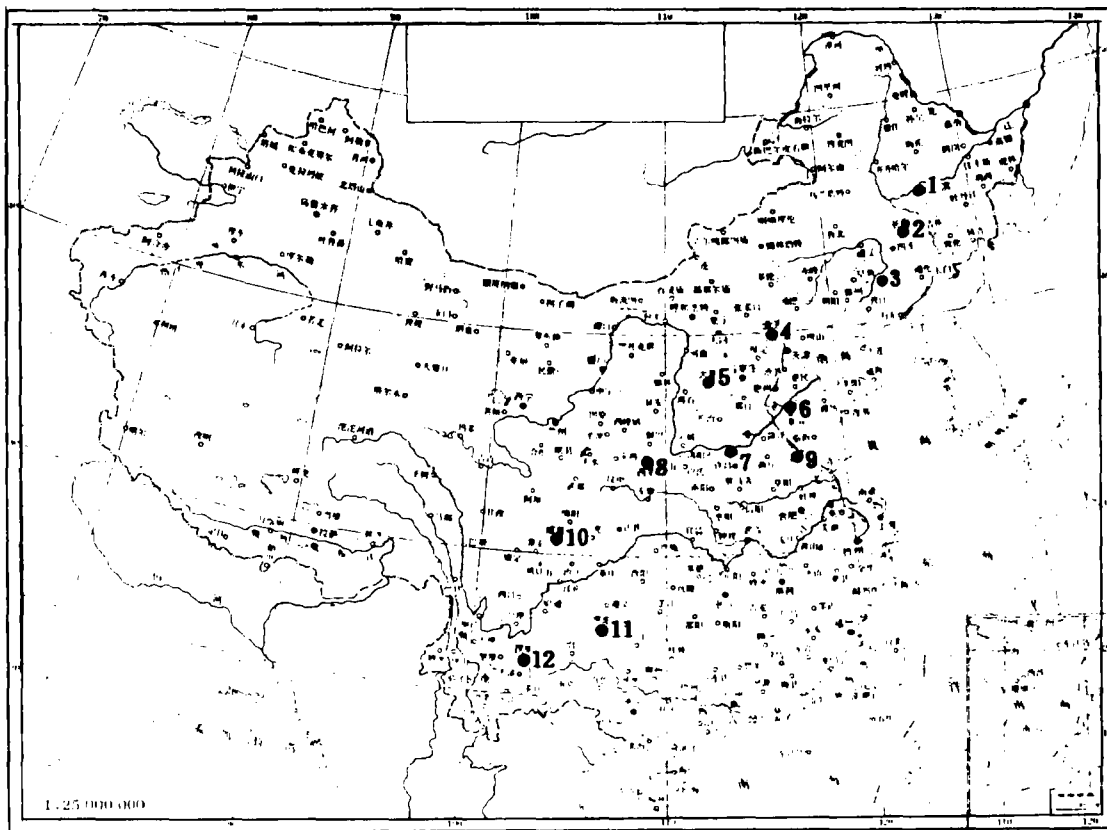


图1 我国的玉米带及其12个有代表性的地点

Fig. 1 China maize belt and its 12 representative sites

1 哈尔滨 2 长春 3 沈阳 4 北京 5 太原 6 济南 7 郑州 8 西安 9 徐州 10 成都 11 贵阳 12 昆明

瘠薄、耕作半径大、管理粗放, 不易获得高产^[1, 2, 3, 4]。

2 研究方法设计

本文在评价未来气候变化对我国玉米生育期、产量和灌溉需要量的影响时, 分两部分进行: ① 利用未施 CO₂ 直接影响订正的作物模型, 在各地由 3 种平衡 GCMs 生成的气候变化情景下运行, 并与在当前气候(BASELINE)下的运行结果相比较, 评价气候变化的单独影响; ② 利用订正后的作物模型, 在 BASELINE 和 3 种平衡情景下运行, 并估计当 CO₂ 有效倍增时, 浓度增加和气候变化的综合影响。在分析时, 还考虑了雨育和灌溉两种供水方式。

在评价未来气候变化对研究区域干湿状况、品种布局和耕作制度等方面的影响时, 采用了若干成功的农业气候指标或计算方法, 分别在 BASELINE 和平衡情景文件中检索, 经两相比较, 作出合理估计。

在对策制定方面, 通过改变作物模型的输入项, 即改变播种日期、改善灌溉条件、“引进”新品种, 或几者兼而有之, 再在不同平衡情景下运行模型, 并分析模拟产量是否较现行管理方式下的增产? 若增产, 即认为对今后适应气候变化可能是行之有效的。

2.1 作物模型

2.1.1 CERES-Maize 模型简述 CERES-Maize^[18]是 CERES 模型系列中研制最早的、以日为时间尺度的大型作物模型, 它可以模拟玉米以下的主要生理、生态过程: ① 物候发育受基因型和天气的影响, ② 叶面积扩展及茎、根的伸长, ③ 干物质的积累与分配, ④ 土壤水分平衡及作物对水分的利用, ⑤ 土壤氮素平衡及作物对氮素的吸收。因此, CERES-Maize 的应用不限于特定的地点、品种、气候、土壤和栽培方法, 迄今它已在世界主要的玉米生产国得到了广泛的验证。

2.1.2 模型输入 1) 作物资料: 包括各地有代表性品种的播种日期与深度、种植密度与行距、成熟期和籽粒产量等, 取自 12 个有代表性地点连续种植 3 年以上(一般为 1981~1986 年)的玉米区试资料, 分别由中国农科院作物所和江苏省农科院粮作所等单位提供。本资料主要用于验证 CERES-Maize, 确定供试品种的遗传参数和进行敏感性分析。本文在评价气候变化对各地玉米生育期、产量和灌溉需要量的影响时, 均假设未来品种和栽培管理与目前相同; 在分析适应性对策时, 则变换了品种和播期等管理变量。2) 土壤资料: 包括土壤类型、地面反射率, 不同深度土层的有机质含量、土壤颗粒结构和容重等。其中供试地点有代表性的土类, 根据文

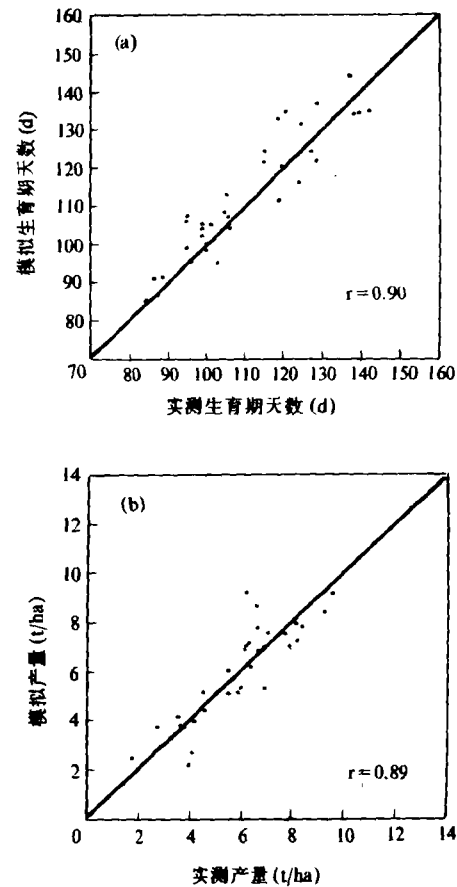


图2 CERES-Maize 的模拟值与实测值之比较
Fig. 2 Comparison between the simulated CERES-Maize values and the observations.

献^[17]并结合与作物资料相匹配的土壤资料加以确定;典型的土壤剖面资料取自己发表的土壤普查资料或有关土壤学书刊。上述资料输入后,模型可在微机自动产生当地土壤文件,供 CERES-Maize 运行时调用。本文还假定,当 CO₂ 有效倍增时,各供试地点的土壤状况未发生变化。3) 天气资料:与作物、土壤资料相匹配的天气资料(1981~1986年)有:逐日极端最高、最低气温,降水量和太阳辐射。分别根据北京气象中心资料室出版的《中国地面气象记录》和《中国太阳辐射资料逐年日值》,建立分年的逐日天气文件。

2.1.3 遗传参数及其确定 在 CERES-Maize 中,共有 5 个遗传参数分别描述特定基因型的发育和产量性状^[18],即: P1——完成非感光幼龄期的大于 8 C 的度·日需要量(100~400); P2——光诱导期每大于临界日长(12.5h)1 小时的光周期(日长加曙暮光)导致抽雄延迟的天数(0~4); P5——灌浆期大于 8 C 的度·日需要量(600~1000); G2——单株玉米的最大可能籽粒数(750~850); G3——在最适灌浆条件下的籽粒灌浆速度(5.0~12.0 mg·d⁻¹)。被确定的不同品种的遗传参数,均存放在数据文件 Genetics.Mz9 中,供模型运行时调用。本文采用“试错法”^[19]对不同品种的遗传参数逐个加以确定。

2.1.4 模型的验证 重点是验证玉米的生育期和产量。在供试的大多数地点与年份,模拟值与实测值取得了良好的一致(图 2);整个研究区域的模拟误差:生育期为 6.2 天,产量为 0.9 t/ha。以上结果说明, CERES-Maize 基本上适用于我国。虽然尚无法证明当气候变化后该模型将继续在我国适用,但考虑到我国玉米带幅员辽阔,气候千差万别,以上结果似能说明 CERES-Maize 对变化的气候有较好的适应性。

2.1.5 模型的敏感性分析 假定未来各地现行推广的玉米品种不变,且生长季的增温幅度(ΔT)依次为+2 C 和+4 C,降水量变幅(ΔP)依次为-20%和+20%,分别运行 CERES-Maize,并以模拟结果与当前气候条件下(即 ΔT=0 C, ΔP=0%)的模拟值(以 BASE 记之)相比较,以检验 CERES-Maize 对气候条件改变的敏感性,并判明模拟结果是否合理。表 1 以三个种植区的哈尔滨、西安和贵阳为例,给出敏感性分析的结果。

由表 1 可见,哈尔滨的模拟产量对 ΔP 相当钝感;在 ΔT=0、+2 和+4 C 三种温度水平上,即使 ΔP=±20%,产量也没有明显变化。这与该地目前生长季雨量相对充沛(约 400

表 1 当气候条件改变时, CERES-Maize 模拟产量的变化百分比(未计 CO₂ 浓度的直接影响)

Table 1 CERES-Maize percentage changes in maize yield with changed climatic conditions (direct effects of CO₂ were not included)

地点 Site	ΔP	ΔT=0 C	ΔT=+2 C	ΔT=+4 C
哈尔滨 Harbin	0%①	0	-19.7	-28.4
	+20%②	0	-19.7	-29.2
	-20%②	-0.6	-19.9	-29.5
西安 Xian	0%①	0	-17.8	-30.9
	+20%②	16.1	-11.7	-31.9
	-20%②	-17.1	-35.0	-48.2
贵阳 Guiyang	0%①	0	-11.1	-29.8
	+20%②	0	-11.1	-29.8
	-20%②	0	-11.1	-29.8

① 灌溉方式, irrigated; ② 雨育方式, rainfed

mm)、变率较小有关。但模拟产量对增温却十分敏感:当 ΔT=+2 C 时,模拟产量较之 BASE 产量下降了近 20%;当 ΔT=+4 C 时,下降了近 30%。西安的模拟产量对 ΔT 也很敏感:当 ΔP=0% 时,若增温 2 C,模拟产量下降了近两成;若增温 4 C,则减产三成多。与哈尔滨不同的是,西安的模拟产量对 ΔP 同样敏感:当 ΔT=0 C 时,如 ΔP=+20%,将增产一成多;如 ΔP=-20%,则减产近两成。原因是该地生长季的降水量偏少(约 300mm),故较多的降水量有利于增产。如增温和干旱并发,可造成

严重减产。再看贵阳, 由于生长季雨量充沛(698mm), 变率较小, 故模拟产量对 $\Delta P = \pm 20\%$ 的变化钝感, 但对 ΔT 却相当敏感: 增温 2 C 将减产 1 成, 增温 4 C 减产近 3 成。总之, 在整个研究区域, CERES-Maize 的模拟产量对增温很敏感, 气温愈高, 减产幅度愈大; 在某些少雨地区, 模拟产量对降水量的变化也很敏感, 增加雨量可提高玉米产量。这和我国玉米产量与生长季的平均气温呈负相关, 在黄淮海平原(特别是西部)与降水量呈正相关的规律^[3, 5]相符。说明 CERES-Maize 作为评价气候变化影响的工具在我国是适用的。

2.1.6 CO_2 的直接影响 拟采用“系数订正法”模拟 CO_2 浓度变化对玉米光合作用和蒸腾作用的直接影响, 即假定 CO_2 有效倍增时(浓度取 555ppm), 玉米的光合(或蒸腾)速率等于参比浓度(330 ppm)下的乘以订正系数。参照文献^[17, 20, 23, 24, 25], 本文取有效倍增时玉米的光合作用订正系数为 1.06。其实验依据是: 当其他条件都一致、仅当 CO_2 浓度不同时, 完全相同的玉米群体在有效倍增时的光合速率较之在参比浓度下的提高了 6%。对蒸腾作用订正系数的确定, 主要采用 Penman-Monteith 方程^[14]计算两组完全相同的玉米群体在有效倍增和参比浓度下的蒸散量之比。当 CO_2 浓度变化、其他外界条件均不变时, 该方程中仅有群体水汽传力一项因气孔阻力增大而发生变化, 其他各项均保持不变^[17]。因此, 只要确定了两种浓度下的气孔阻抗之比, 就可以计算出蒸腾作用的订正系数。参照文献^[20, 23, 25, 26], 本文取玉米在 CO_2 有效倍增及参比浓度下的气孔阻抗比为 87.4/55.8。

2.2 当前气候和气候变化情景

2.2.1 当前气候 当前气候(BASELINE)用 12 个供试地点近 30 年(1958~1985)的逐日气候资料来代表, 所含气象要素同前文“天气资料”一节。同样也建立了各地分年的气候数据文件, 不仅供 CERES-Maize 在模拟过程中调用, 还被用来与 GCMs 的输出值一道, 生成各地当 CO_2 有效倍增时的气候变化情景^[8]。

2.2.2 气候变化情景 本研究对每个供试地点都产生 3 种当 CO_2 有效倍增时的气候变化

表 2 3 个玉米种植区在 3 种平衡气候变化情景下玉米生长季的平均温度和降水总量的变化

Table 2 Changes in temperature and precipitation during maize growing season in the three maize regions under the three GCM equilibrium scenarios

种植区 Planting region	地点 Site	温度增幅 ΔT (C)			雨量变幅 ΔP (%)		
		GISS	GFDL	UKMO	GISS	GFDL	UKMO
东北春玉米区 NE China Spring Maize Region	哈尔滨	2.9	3.5	7.7	-17	-21	-24
	长春	3.1	3.4	6.5	-17	-4	-22
	沈阳	3.9	4.6	6.5	+26	0	-9
	(平均)	(3.3)	(3.8)	(6.9)	(-3)	(-8)	(-18)
黄淮海夏玉米区 H. H. H. Summer Maize Region	北京	3.6	3.7	6.1	+32	+1	-8
	太原	2.8	2.3	5.1	-33	-28	-22
	济南	4.1	3.6	5.1	+42	0	-5
	郑州	3.9	2.1	4.7	-9	+93	+5
	(平均)	(3.8)	(2.9)	(5.4)	(+10)	(+19)	(-9)
西南玉米区 SW China Maize Region	成都	4.0	3.4	7.2	-60	+6	-19
	贵阳	4.4	3.7	5.2	-15	+5	-31
	(平均)	(5.2)	(3.4)	(6.1)	(-48)	(+4)	(-11)

注: GISS--由美国哥达德空间研究所研制的平衡 GCM 生成的气候变化情景的缩写; GFDL 和 UKMO--含义与上相同, 所采用的 GCMs 分别由美国地球物理流体动力学实验室和联合王国(英)气象局研制。

情景, 它们分别是 GISS、GFDL 和 UKMO 三种平衡 GCMs 在研究区域相应网格点上的输出值和当地 BASELINE 相结合的产物, 可通过编制程序由计算机自动生成。有关生成这些平衡情景的方法和步骤, 作者等^[8]已做过详尽描述, 在此从略。由表 2 可见: 三种情景在增温方面趋势较为一致, 但在降水量方面, 则相当不一致, 有的甚至相左, 这就增加了评价结果的不确定性。根据现有知识, 尚无法确定哪种情景更为可信, 亦无法弄清它们今后出现的概率。因此本文强调利用 CERES-Maize 在三种平衡情景下同时运行, 然后再比较模拟结果。凡趋势一致的, 即认为今后出现的可能性较大, 反之则较小。

2.3 农业气候指标

2.3.1 气候干湿状况的变化 玉米生长期的蒸散比(β)被用来作为衡量各地玉米气候干湿的指标^[9], 即

$$\beta = \sum ET / \sum ET_0 \quad (\beta \leq 1) \quad (1)$$

式中, $\sum ET$ 为雨育玉米全生育期的实际蒸散总量, $\sum ET_0$ 为同期潜在蒸散量之和。逐日的 ET_0 采用 Priestly-Taylor 方程^[22]计算, 而 ET 为土壤蒸发量(E_s)与群体蒸腾量(E_p)之和。 E_s 取决于土壤温度和表层可供蒸发的水分, E_p 则是根长密度与土壤含水量的函数^[13, 19]。 β 值愈大, 说明实际蒸散量愈接近潜在蒸散量, 可供蒸散的水分越多, 地面越湿润; 反之则越干燥。通过比较各地在 BASELINE 以及在不同平衡情景下的 β 值, 即可估计研究区域未来气候的干湿变化。

2.3.2 品种布局的演进 我国玉米带不同品种类型的玉米所要求的有效积温指标^[3, 4, 5]如下:

$$\square \text{早熟品种: } \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}, 1800-2200 \text{ C} \quad \square \text{中熟品种: } \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}, 2200-2600 \text{ C}$$

$$\square \text{晚熟品种: } \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} > 2600 \text{ C}$$

此外, 春、夏、秋玉米的实际分布除受耕作制度的约束外, 还受到温度条件的限制, 其指标^[2, 3, 5]如下: \square 春玉米区: $\sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} < 3500 \text{ C}$ \square 夏玉米区: $3500 \text{ C} \leq \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} \leq 5300 \text{ C}$ \square 秋玉米区: $\sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} > 5300 \text{ C}$

根据上述指标, 可在 BASELINE 和 3 种平衡情景文件中验证当前并分析当 CO_2 倍增时我国玉米带各种品种类型和不同熟型的玉米之分布概况。

2.4 关于适应性对策

在前述分析中, 均假定当 CO_2 有效倍增时, 研究区域的玉米品种与生产管理等和现在保持一致, 这主要是为了便于与当前(BASE)相比较。然而, 随着气候变暖和降水类型的改变, 生产部门和农民将会采用与现在不同的生产技术和方式以管理方式以适应气候变化, 并采用一些可能是有效的对策, 如改善灌溉条件、改变播种期、培育或引进抗旱、耐高温和生育期长的新品种, 调整种植结构和品种布局、提高复种指数、扩大种植面积以及加强病虫害的综合防治等。本节拟根据 CERES-Maize 在各种平衡情景下运行的结果, 着重分析通过改变播期、引进新品种、调整种植结构, 或采用几者兼而有之的方法以适应气候变化的可行性。对于东北春玉米区和华北夏玉米区的各点, 将选择 UKMO 情景进行模拟试验; 对于西南玉米区的各点, 则选择 GISS 情景进行分析。这是因为 UKMO 情景在北方, GISS 情景在西南, 都表现得“极端”(见表 2), 因此对策研究也就愈显得重要。在上述两种情况下, 都考虑了 CO_2 对玉米

生产的直接影响。

2.5 本研究中的不确定性

在作物模型的应用方面: ① 尚无法验证 CERES-Maize 在未来高温和高 CO₂ 浓度下是否还适用? ② 假设未来农业技术保持当前水平, 没有明显土壤问题, 养分不是限制性因素, 病虫害都得到良好控制, 这显然使很复杂的问题过于简化; ③ 没有充分考虑未来灾害性天气对玉米生产的影响; ④ 将控制条件下有关 CO₂ 直接影响的实验结果应用于大田模拟, 势必会增加评价结果的不确定性。

在气候变化情景的应用上, 将 3 种平衡 GCMs 的输出结果引入了研究。但现有 GCMs 对于极为复杂的气候系统的描述, 特别是在海洋动力学、云物理和地面水文状态等方面, 都过于简单。并且, GCMs 不是为研究区域性气候变化而设计的, 分辨力都比较低, 对当前区域性气候(1×CO₂)、特别是雨量的模拟还并不理想, 也无法估算未来气候变率的可能改变。上述种种都与人类目前对有关机制和动因还缺乏透彻的认识有关。

3 结果与讨论

以下各节拟分两种情况展开讨论: ① 仅考虑气候变化(CC)的单独影响—用 330 ppm 表示, 意即假定未来 CO₂ 浓度没有变化, 或对这种变化的直接影响(PE)不作考虑; ② 同时考虑 CC 的间接影响和 CO₂ 有效倍增的直接影响(CC+PE)—用 555 ppm 表示, 意即考虑了两者的综合影响。所谓 CO₂ 倍增, 是指在当前(1951~1980)浓度水平(330 ppm)上加一倍; 有效倍增之所以取 555 ppm, 是因为还考虑了其他温室气体如甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)和氟氯烃(CFCs)等对大气的增温作用, 即假定在此浓度水平上, CO₂ 和其他温室气体的综合效应相当于倍增的效果。

3.1 气候变化对我国玉米带干、湿状况的影响

当 CO₂ 有效倍增时, 我国玉米带的干湿状况将发生某些变化。不过这种变化在比较湿润的东北春玉米区并不明显: 在 GISS 和 GFDL 两种平衡情景下, 无论作 330 ppm 或 555 ppm 考虑, β 值均与当前值(0.97)接近, 说明水分条件仍能满足需要; 在 UKMO 情景下, 如作 330 ppm 考虑, β 值降至 0.94, 表明尚需轻度灌溉, 如作 555 ppm 考虑, 则 β 值又恢复到当前值上。黄淮海夏玉米区在 UKMO 情景下, 如作 330 ppm 考虑, 6 个点的 β 值均较当前值明显下降, 由平均 0.88 下降到 0.77, 说明将进一步变旱; 但如作 555 ppm 考虑, β 值则回升到 0.84。在另外两种情景下, 如作 330 ppm 考虑, 除西安、郑州在 GISS、太原在 GISS 和 GFDL 情景下 β 值显著下降外, 在其余各点均维持现有水平; 如作 555 ppm 考虑, 所有各地的 β 值皆回升到当前值。在西南玉米区, 贵阳在三种情景下无论作 330 ppm 或 555 ppm 考虑, β 值均接近当前值, 说明今后依然湿润; 昆明和成都在 GFDL 和 UKMO 情景下 β 值变化甚小, 但在 GISS 情景下, 如作 330 ppm 考虑, 则由当前的 1.0 下降到 0.87, 说明气候变旱; 如作 555 ppm 考虑, β 值将有所回升。

3.2 气候变化对玉米生育期的影响

在 GISS、GFDL 和 UKMO 3 种平衡情景下, 东北春玉米区的平均模拟生育期较之 BASE 依次缩短 24、27 和 36 天; 在黄淮海夏玉米区, 依次缩短 14、12 和 17 天; 在西南玉米区, 则分别缩短 27、17 和 28 天。东北春玉米区目前气候相对冷凉, 现行推广的品种以感温性较强的中早熟或早熟为主, 因而对大幅度增温反应敏感。黄淮海夏玉米区目前生长季气温偏高, 现行品

种对高温有较好的适应性,因而进一步增温造成的生育期缩短的程度较轻。西南玉米区的情况较复杂:在地势高亢、气候凉爽的云贵高原,生育期缩短的程度较炎热的盆地和丘陵明显。

3.3 气候变化对产量的影响

3.3.1 雨育玉米 如果作 330 ppm 考虑,在 GISS、GFDL 和 UKMO 3 种平衡情景下,除西安外绝大多数地点的模拟产量都较之 BASE 产量明显下降。在较为湿润的东北春玉米区,减产原因主要是增温缩短了模拟生育期、特别是灌浆期的长度,使光合时间减少、灌浆不充分。在黄淮海夏玉米区,除生育期缩短可造成减产外,生长季模拟雨量的变化也是造成模拟产量变化的主要原因之一。如目前较为干燥的西安,在 GFDL 情景下模拟雨量增加了 44% (表 2),即使生长季增温 2.1℃、生育期缩短了 11 天,仍可增产 14%;但在其余地点或其他情景下,模拟雨量的增加并不足以抵消增温带来的负效应,而雨量的减少则会加强减产作用。西南玉米区在 GFDL 情景下,模拟降雨量有所增加,因而增温造成的减产作用较轻;但在 GISS 和 UKMO 情景下,增温与干旱并发,将造成明显减产。图 3(a)给出了在 330 ppm 考虑下,各种植区在不同情景下,模拟产量相对于 BASE 的平均减产百分比。由图可见,黄淮海夏玉米区在 UKMO 情景下减产最烈,其次是 GISS 情景, GFDL 最轻;西南玉米区在 GISS 情景下减产最烈,其次是 UKMO 情景, GFDL 仍最轻;而东北春玉米区在 3 种情景下减产程度均相对较轻。

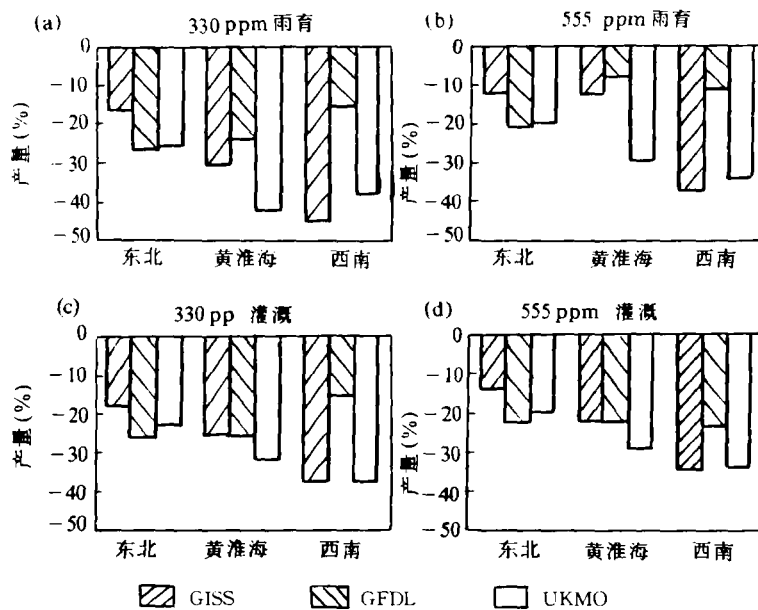


图 3 在 3 种气候变化情景下,我国 3 个玉米种植区的模拟产量相对于 BASE 产量的变化百分比

Fig. 3 Percentage changes in CERES-Maize simulated yields related to the BASE yield for the three main maize producing regions of China, under the three climate change scenarios

如作 555 ppm 考虑,在 3 种平衡情景下,大多地点模拟产量的下降趋势均较前述在 330 ppm 考虑下有所缓和,但与 BASE 相比,仍明显下降。3 个种植区在各情景下模拟产量的平均减产百分比如图 3(b)所示。显然,这与作者先对水稻^[10]、小麦^[11]和 大豆^[12]作物的分析结果很不一致。对于 C₃作物来说,CO₂浓度增加本身有益于光合生产和产量形成,一般都能补

偿或明显缓解增温带来的负效应;但对玉米这类 C₄ 作物来说,情况却不是这样,其光合作用和产量并不能从日益增加的 CO₂ 浓度中直接获益。

3.3.2 灌溉玉米 对灌溉玉米进行分析一般可排除雨量变化的干扰。在 330 ppm 考虑下,所有供试地点在 3 种平衡情景下的模拟产量都无一例外地较之 BASE 产量下降了。按气候变化情景来算,减产最重的仍是 UKMO, GISS 次之, GFDL 最轻;按种植区来考虑,减产严重的仍是西南玉米区和黄淮海夏玉米区,而东北春玉米区则相对较轻(见图 3(c))。以上结果进一步说明,增温是造成玉米减产的首要原因,即使是良好的灌溉条件也无法补偿增温造成的减产效应。图 3(d)给出了在 550 ppm 考虑下各种种植区的模拟结果。它同样说明:CO₂ 浓度增加不能补偿增温给灌溉玉米带来的减产效应。本节和上节都一致说明,全球气候变化将对我国玉米单产带来不利影响。

3.4 气候变化对灌溉需要量(WD)的影响

当 CO₂ 有效倍增时,在 UKMO 情景下,如果作 330 ppm 考虑(意即不考虑 CO₂ 的直接影响,下同)研究区域大多数地点玉米的 WD 都大幅增加了。按平均计算,东北春玉米区较之当前增加了 92%,黄淮海夏玉米区增加了 61%,西南玉米区增加了 78%。东北和西南玉米区的 WD 之所以增幅较大,与增温加速蒸散作用、模拟降水量变少以及当前 WD 的基数较低有关。但如果作 555 ppm 考虑,则各地的 WD 将较之作 330 ppm 考虑的情况大幅减少:东北春玉米区较之当前仅增加 4%,黄淮海夏玉米区增加 14%,而西南玉米区反而减少了 13%。WD 减少的原因是在高浓度 CO₂ 条件下,叶片气孔阻抗增大,蒸腾量减少,水分利用效率明显提高。

在 GFDL 情景下,如果作 330ppm 考虑,东北春玉米区的 WD 较之当前增加了 7%,黄淮海夏玉米区和西南玉米区因生长季模拟降水量一般增多(见表 2),故 WD 分别增加 3%和减少 12%;如作 555 ppm 考虑,3 个种植区的 WD 均较当前值显著下降,依次为~58%,~37%和~68%。

在 GISS 情景下,如作 330 ppm 考虑,东北春玉米区的 WD 较之当前值平均减少 1%,黄淮海夏玉米区平均增加 9%;如作 555 ppm 考虑,以上两个种植区依次减少了 76%和 27%。西南玉米区的情况至为复杂:成都和昆明因目前生长季雨水充沛,玉米几乎无需灌溉;但 CO₂ 浓度有效倍增后,两地降雨量将锐减 60%~69%。因此在 330 ppm 考虑下,WD 将增至 106~114 mm;在 555 ppm 考虑下,也需要 72~77 mm 的灌溉量。贵阳在 330 ppm 考虑下,WD 较之当前值增加 3%,在 555ppm 考虑下则减少 54%。

上述结果说明:CO₂ 浓度增加可明显减少玉米的灌溉需要量,提高水分利用效率,因而玉米将具有更广泛的气候适应性(尽管产量有所下降),不仅可以向高纬度和高海拔地区发展,而且可以在比较干旱的地区发展。

3.5 对种植结构和品种布局的影响

研究区域各地目前(BASE)以及在 3 种平衡情景下,全年大于 10℃的积温($\Sigma T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$)之变化如表 3 所示。根据 2.3 节所列的指标,目前太原→沈阳一线以北,因热量条件不足,仅能种植春玉米;在上述一线以南、成都→长沙一线以北,可种夏玉米,但不能种植秋玉米。当 CO₂ 有效倍增时,在 GISS 和 GFDL 情景下,夏玉米可在哈尔滨、却不能在最北的黑河种植;但根据 UKMO 情景,我国将不存在夏玉米的种植北界。秋玉米按 GISS 情景,可发展到西安→石家庄一线;按 GFDL 情景,可发展到西安→石家庄→北京一线;按 UKMO 情景,则可发展到

太原→沈阳一线。至于品种布局,目前东北北部以早中熟或早熟为主的品种类型在三种情景下都将被生育期较长的晚熟品种所代替。 $\geq 10\text{C}$ 有效积温的增加,将有利于我国多熟制的发展。根据作者^[11]等早先的研究,当 CO_2 倍增时,辽南、河套平原、银川平原、河西走廊和新疆大部分年降水量 $>100\text{mm}$ 或具有灌溉条件的地区都将可以种植冬小麦。因此上述地区将来可推行“冬小麦+夏玉米”等种植制度,以取代目前的一熟制。在黄淮海夏玉米区,早三熟将取代现行的两年三熟或一年两熟,在灌溉条件良好的地区,亦适宜种植麦+稻+稻;在西南玉米区,套种各种经济作物(蔬菜、西瓜、蚕豆、草莓等)的多熟制将会得到较大的发展。

3.6 关于适应性对策

3.6.1 调整播种期和种植结构 假定各地现行推广的品种不变,适当调整当地播种期(步长取10天),利用CERES-Maize对北方各点在UKMO情景下,西南各点在GISS情景下进行了计算机模拟试验。结果表明:在绝大多数地点,提前播种可以减缓玉米灌浆期的高温危害,但效果不明显,模拟产量由原先的平均减产30%回升到减产24%。但如果将当地播种期推迟1~2个月,在东北春玉米区(部分改为夏播玉米)和华北夏玉米区部分改种秋玉米,模拟产量可由播期不变的平均减产25%,戏剧性地变为减产3%,说明这种对策对于适应气候变化可能是很有效的。对此,一种可能性解释是:气候明显变暖后,温和且温差较大的秋季更适于玉米的灌浆,全生育期天数亦较之播期不变的情况明显增加。在云贵高原(昆明和贵阳),

表3 研究区域各地目前(BASE)以及在3种情景下,全年大于 10C 的积温($\Sigma T_{\geq 10\text{C}}$)之变化

Table 3 Changes in annual accumulated temperature with a base temperature of 10C under current weather (BASE) and under three climate change scenarios

地点	Sites	BASE	GISS	GFDL	UKMO
黑河	Heihe	2170	2879	3211	3705
哈尔滨	Harbin	2792	3641	3918	4777
长春	Changchun	2977	3837	4140	5030
沈阳	Shenyang	3518	4287	4696	5747
北京	Beijing	4217	5197	5504	6352
太原	Taiyuan	3569	4773	4758	5677
石家庄	Shijiazhuang	4585	5819	5875	6827
济南	Jinan	4943	6240	6412	7254
郑州	Zhengzhou	4790	6152	6282	7160
西安	Xian	4528	5871	5810	7142
徐州	Xuzhou	4529	5967	6208	6985
成都	Chengdu	5322	7330	6736	8216
贵阳	Guiyang	4868	7242	6324	7650
昆明	Kunming	4768	6939	6301	7366

适当推迟播期可使模拟产量由原先的平均减产44%回升到减产20%;但在成都,将播期推迟1~2个月仍不能取得同样效果,有时模拟产量甚至比播期不变的情况更低,原因是灌浆期并没有避开高温阶段。如果索性将播种期再推迟一些(变为秋玉米),情况将大为改善,成都的模拟产量由原先播期的平均减产17%,回升到与目前几乎持平。

3.6.2 引进新品种 假定现有播期和其他生产管理方式不变,单纯地改变品种,例如将耐高温和生育期长的品种“引入”北方的UKMO情景下以及西南的GISS情景下去“种植”,结果表明:采用这种适应性对策,只要品种选择得当,一般都能在较大程度上缓和模拟产量

下降的趋势,甚至还可能取得明显的增产效果。例如,将国外3个玉米品种Garst 8808、PB8和Dekalb XL45分别“引入”昆明的GISS情景下“种植”,模拟产量与原先的勋单一号在同样情景下的相比,分别增产132%、127%和107%;和目前产量(BASE)相比,亦能依次增产24%、21%和10%。可见培育或引进对高温、干旱抗性强的适宜品种可能是适应气候变化的有效途径。

3.6.3 调整播种期和引进新品种并举 将上述两种对策合并进行,即同时调整播期(提前播种,或在东北将春播改为夏播,在华北和西南将夏播改为秋播)和“引进”适应性强的品种,一般可取得更为显著的增产效果。

4 结语

- 4.1 当 CO₂ 有效倍增时, 如果仅考虑气候变化(CC)的单独影响, 东北春玉米区仍将保持相对湿润; 黄淮海夏玉米区的西部将有旱象发展趋势, 而东部这种趋势不明显; 西南玉米区的西部在 GISS 情景下, 将有变旱趋势, 但东部或全区在其他情景下仍将保持湿润状态。如果同时考虑气候变化和 CO₂ 浓度增加的综合效应(CC+PE), 上述变旱地区的干旱逆境将基本上缓解。
- 4.2 如果仅考虑 CC 影响, 在我国玉米带的大多数地点, 模拟产量将大幅度下降, 其中以西南玉米区和黄淮海夏玉米区的减产幅度较大, 东北春玉米区较小。如果考虑 CC+PE 影响, 各区的减产幅度将趋缓, 但不明显。对玉米作物来说, CO₂ 的增益效应不足以补偿增温带来的负效应, 这是它与 C₃ 作物(水稻、小麦和大豆等)的不同之处。
- 4.3 研究区域玉米的模拟生育期将因增温而明显缩短, 这是造成模拟产量下降的首要原因; 在黄淮海夏玉米区和西南玉米区的西部, 除生育期缩短外, 生长季气候变旱亦是造成减产的另一项原因。
- 4.4 在某些气候干燥地区, 模拟降雨量的增加将有利于雨育玉米的增产。但在大多数供试地点, 即使是良好的灌溉条件充其量也只能缓和、但不能抵消增温造成的减产效应。
- 4.5 如果仅考虑 CC 影响, 各地玉米的灌溉需要量(WD)将大幅度增加; 但如果考虑 CC+PE 影响, WD 将明显减少。由于 CO₂ 浓度增加可以减少玉米叶片的蒸腾量, 提高其水分利用效率, 将使得玉米具有更广泛的气候适应性。
- 4.6 气候变暖在缩短生育期的同时, 将延长玉米的生长季, 因而有利于我国多熟制的发展, 我国夏播玉米的种植北界将向高纬地区位移, 整个玉米带的种植结构、品种布局将趋于多样化。
- 4.7 适当地调整播种期(包括提前或推迟播种), 使灌浆期避开高温危害, 可能是适应气候变化的行之有效的措施之一。
- 4.8 适当地调整品种布局, 培育和引进耐高温、抗干旱和生育期长的玉米品种, 将可能有效地适应气候变化。
- 4.9 将前两项农艺措施结合起来, 将可能更有效地克服气候变化带来的不利影响。

参 考 文 献

- 1 山东省农科院主编, 1962, 中国玉米栽培, 上海科技出版社, 上海。
- 2 佟屏亚主编, 1992, 中国玉米种植区划, 中国农业科技出版社, 北京。
- 3 刘巽浩、牟正国主编, 1993, 中国耕作制度, 农业出版社, 北京。
- 4 崔读昌、刘洪顺、闵瑾如、贺菊美编著, 1984, 中国主要农作物气候资源图集, 气象出版社, 北京, 119~156。
- 5 崔读昌, 1991, 气候与粮食生产——玉米, 见程纯枢主编: 中国的气候与农业, 第五章, 第三节, 气象出版社, 北京, 205~223。
- 6 中国科学院南京土壤研究所, 1986, 中国土壤图集, 地图出版社, 北京, 9~18。
- 7 熊毅、李庆逵, 1987, 中国土壤(第二版), 科学出版社, 北京, 12~19。
- 8 金之庆、陈华等, 1992, 中国农业气象, 13(5), 13~27。
- 9 陆渝蓉、高国栋, 1982, 农业气象, 3, 14~18。
- 10 金之庆、葛道阔等, 1991, 南京林业大学学报, 生态专辑, (15)增刊, 11~19。
- 11 金之庆、方娟等, 1994, 作物学报, 20(2), 186~197。
- 12 金之庆、葛道阔等, 1994, 大豆科学, 13(4), 302~311。

- 13 France, J. and J. H. M. Thornley, 1984. 见: 金之庆、高亮之主译, 1991. 农业中的数学模型, 农业出版社, 北京
- 14 IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University.
- 15 IPCC, 1992. Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University.
- 16 Rose, E., 1989. The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. Appendix C-Agriculture. U. S. EPA, Washington. (3)7-1-7-7.
- 17 Peart, R. M., J. W. Jones, R. B. Curry, et al. 1989. The Potential Effects of Global Climate Change On the United States - Report to Congress. U. S. EPA, Washington. 2-1-2-54.
- 18 Ritchie, J., 1986. The CERES-Maize Model. in: C. A. Jones and J. R. Kiniry, CERES-Maize - A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press.
- 19 Ritchie, J., U. Singh, D. Godwin et al., 1989. A User's Guide to CERES-Maize - V2. 10. International Fertilizer Development Center, Alabama, U. S.
- 20 Rosenzweig, C. and A. Iglesias, 1994. The use of crop models for international climate change impact assessment; study design, methodology, and conclusions. in: Rosenzweig, C. and Iglesias, A. (eds), 1994. Implications Of Climate Change For International Agriculture: Crop Modeling Study. U. S. EPA, Washington, D. C.
- 21 Rosenzweig, C., 1989. The Potential Effects of Global Climate Change on the United States; Appendix C - Agriculture. Published by U. S. EPA. (3)1~43.
- 22 Priestly, C. H. B. and R. J. Taylor, 1972. Monthly Weather Review 100, 81~92.
- 23 Acock, B and L. H. Allen Jr., 1985. Crop responses to elevated carbon dioxide concentrations. in: B. R. Strain and J. D. Cure(eds). Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation. U. S. Department of Energy. DOE ER-0238. Washington, D. C.
- 24 Cure, J. D., 1985. Carbon dioxide doubling responses: A crop survey. in: B. R. Strain and J. D. Cure(eds). Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation. U. S. Department of Energy. DOE ER-0258. Washington, D. C. 33~97.
- 25 Cure, J. D. and B. Acock, 1986. Ag. and For. Meteor. 38, 127~145.
- 26 Rogers, H. H., G. E., Bingham, J. D. Cure, J. M. Smith and K. A. Surano, 1983. Journal of Environmental Quality, 12, 569~574.

Assessing the Potential Impacts of Global Climate Change on Maize Production in China

Jin Zhiqing Ge Daokuo Zheng Xilian Chen Hua

*Institute of Agricultural Modernization, Jiangsu Academy of
Agricultural Sciences, Nanjing Jiangsu, 210011*

Abstract The CERES-Maize model was calibrated and validated for 12 locations in China's Maize Belt to examine its suitability to model maize production in the region, using the local agronomic, soil and weather data for three or more successive years. After making sensitivity analysis and determining the genetic coefficients for the local cultivars, the CERES-Maize was run again for the same locations under the current climates and the three doubled CO₂ climate change scenarios generated from the GISS, GFDL and UKMO equilibrium GCMS. Based on the simulated results analysis, the impacts of climate change with a doubling of CO₂ on maize growth duration, yield and irrigation demand in China's Maize Belt were evaluated. Also, changes in moisture status, the northern limits for summer- and autumn-sowing maize, as well as varietal disposition were estimated by employing several agroclimatic indices. Finally, some strategies were advanced for adapting climate change in future. The results presented in this study should not be regarded as predictions, but as plausible assessments of the potential impact effects of climate change on maize production in China.

Key words Global climate change; China; Maize production