

# 气候变化对我国江南双季稻生产 可能影响的数值模拟研究\*

裘国旺 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

在利用田间试验资料对双季稻生长动力(态)模拟模型进行验证的基础上, 将基于 GCMs 的输出和历史气候资料相结合的气候变化情景与双季稻模式相连接, 就气候变暖对我国江南双季稻主产区水稻生产的可能影响进行网格化定量模拟和客观评估, 并就调整对策(改变播种日期和种植品种)在减缓气候变暖对双季稻生产影响中的作用作了初步的探讨. 结果表明, 在未来可能的气候变化情景下, 若维持目前的品种和生产技术措施, 双季稻产量将有不同程度的下降. 产量变化的地域分布既有一定的规律性, 又体现出气候变化影响的复杂性. 适应对策分析表明, 改种长生育期的品种能提高双季稻产量; 另外, 对播种日期的改变也进行了敏感性分析.

**关键词:** 气候变化 双季稻模式 可能影响 调整对策

## 引 言

有关气候变化的农业影响, 国内外作了大量的研究工作<sup>[1~9]</sup>. 近年来, 国外很多学者采用作物生长模式与 GCMs 的输出结果来进行有关气候变化的农业影响研究. 美国 EPA(1989)<sup>[2]</sup>将 GCMs 的输出结果作为 CERES(小麦和玉米)和 SOYGRO(大豆)模式的输入, 模拟计算并评估了气候变化对美国主要农业区作物产量的影响, 类似的研究很多<sup>[3~5]</sup>. 我国采用作物生长模式与 GCMs 连接进行气候变化的农业影响研究却不多. 金之庆等<sup>[9]</sup>以 CERES 模式为工具, 将 GCMs 的输出结果作为作物模式输入, 通过选取一些代表点进行模拟计算, 初步评估了气候变化对我国南方水稻生产的影响.

水稻是我国的主要粮食作物, 在我国农业生产中占有非常重要的位置. 本文探讨以双季稻生长动力(态)模拟模型<sup>[10]</sup>为工具, 与 GCMs 输出结果相连接, 对我国江南双季稻主产区水稻生产进行网格化定量模拟, 并尝试就气候变化对我国双季稻生产的可能影响进行客观评估.

\* 本文由国家“九五”重中之重点项目“我国短期气候预测系统的研究”96-908-03-01 课题资助.  
1996-12-23 收到, 1997-06-05 收到修改稿.

# 1 方法与资料

## 1.1 研究方法

关于气候影响评估的方法，在一些文献里已有专门的阐述<sup>[11]</sup>，早期的研究大多以经验统计评估为主，这类评估方法虽有其可取之处，但局限性也是不言而喻的。近年来，大多研究采用作物生长动力(态)模拟模型与 GCMs 输出相连接的方法，对研究地区进行定量模拟和评估，但这类方法还不成熟，在一些问题的处理上过于简化，还有待于作进一步的改进。

本文采用逐步订正的客观分析方法和一元 3 点分段等距插值方法<sup>[12~14]</sup>，利用 GCMs 的输出结果和台站历史气候资料生成 CO<sub>2</sub> 倍增下的可能气候变化情景(空间分辨率为 1° × 1°，时间步长为天)，在对双季稻模式进行验证的基础上，将气候变化情景输入双季稻模式，进行网格化定量模拟试验，并客观评估气候变化对我国双季稻生产的可能影响。整个模拟试验、诊断分析和评估方法与过程如图 1 所示：

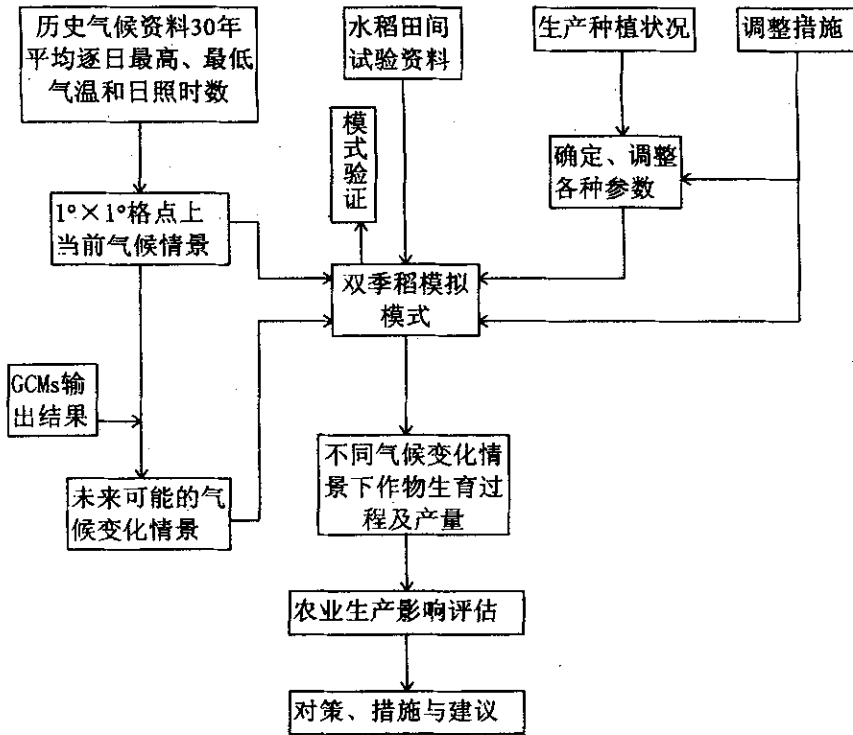


图 1 诊断分析研究流程

## 1.2 模式简介

双季稻生长动力(态)模拟模型是在荷兰农业大学和国际水稻研究所的 ORYZA1 水稻模式和水稻钟模型的基础上，利用实际田间试验资料，由中国气象科学研究院农气中

心研制的,该模型针对我国南方水稻种植制度的特点,把双季早稻、双季晚稻作为一个完整的系统来考虑,比以往的单季稻模型有较大的改进。从播种开始进行模拟是模式的特点,改变了以往模式从移栽开始模拟的做法,符合我国双季稻生产实际。该模式由发育期子模式、叶面积子模式、光合作用子模式、呼吸作用子模式及干物质分配子模式等组成。模式以日为模拟时间步长。该模式只需常规的气象资料和地理、作物因子(地理纬度、作物品种和作物参数),便能计算出双季早、晚稻逐日的发育进程、叶面积和各器官的干物重,可适合不同的地点和不同的年份,可用于预报作物产量和指导农田管理。模式要求输入的气象条件和地理、作物因子均以外部文件的形式输入。需要指出的是,该模式中没有考虑水肥条件和病虫害对水稻生产的影响,也没有考虑  $\text{CO}_2$  浓度增加的直接影响。

### 1.3 模式适应性分析

在利用双季稻生长模拟模型作气候变化影响评估之前,本文用江西靖安和湖南常德两地 1994 年水稻田间试验资料对其进行适应性分析。模拟计算结果表明,叶面积以及叶、茎、根、穗重和总干重的动态变化,总体来看,模拟值和实测值两者的变化趋势基本一致(除根重的模拟误差较大外)。两地最终穗重和总干重的平均相对误差,双季早稻为 7.9%、9.4%,双季晚稻为 5.4%、7.6%。双季稻穗重和总干重的平均相对误差分别为 6.7%和 8.5%。模拟的最大误差,双季早稻为 13.6%,双季晚稻为 12.9%,均在 15%以内。作为初步的试验研究,这一结果基本上是可以接受的。

利用田间试验资料和气象资料对双季稻模式进行敏感性分析<sup>[10]</sup>,结果表明:该模式对品种参数和气象条件比较敏感,可用于模拟不同品种和不同气象条件下水稻生长发育和产量形成过程,该模式基本上可适用于研究气候变化对我国双季稻生产的影响。

### 1.4 资料和 GCMs 预测结果的可靠性

(1) 资料来源 本文选用长江以南,南岭以北地区 20 个基本站点的 30 年(1961~1990)逐日最高、最低气温和日照时数资料。2 个最新的(IPCC 1995)大气海洋耦合模式 CGCMs(DKRZ OPYC、DKRZ LSG(德国))的输出结果由北京大学地球物理系提供。

(2) GCMs 预测结果的可靠性分析 当用 DKRZ OPYC 和 DKRZ LSG 模式模拟时,温室气体变化采用 IPCC 1992 A 方案。OPYC 和 LSG 的空间分辨率分别为  $5.6^\circ \times 5.6^\circ$ 、 $4^\circ \times 4^\circ$ 。模式输出为季平均值。李晓东等的研究表明<sup>[15]</sup>,DKRZ OPYC 和 DKRZ LSG 两个海气耦合模式都能较好地模拟出某些变量在某些季节的主要分布特征,但都存在明显的系统误差。另外,模拟效果冬季优于夏季,温度优于降水。在其所评估的 5 个海气耦合模式(NCAR、GFDL、OPYC、LSG 和 HADL)中,从总体上讲,在模拟东亚和中国气候方面,OPYC 是目前相对最好的海气耦合模式,而 LSG 则较差。在模拟季平均气候变量场上,不同的模式各有优缺点。

(3) 当前气候情景的产生 为克服研究地区台站稀疏、分布不均匀以及大量站点逐日资料难以获得的问题,适应地区气候变化农业影响评估的需要,本研究采用逐步订正的客观分析方法<sup>[13,14]</sup>,将 20 个站点的气候资料(本文取 30 年逐日最高、最低气温和日照时数的平均值作为基准值)内插到  $1^\circ \times 1^\circ$  网格点上(区域为:  $25^\circ \sim 30^\circ \text{N}$ ,  $110^\circ \sim 118^\circ \text{E}$ , 总共 54 个格点)。各网格点上的太阳总辐射采用祝昌汉的经验公式计算。

(4) CO<sub>2</sub> 倍增的气候情景的产生 为产生满足双季稻模式输入要求的各网格点上未来可能气候变化情景的逐日资料, 本文先将 GCMs 的输出结果按多维拉格朗日内插法统一插值到 1°×1° 的标准格点上<sup>[14]</sup>; 然后采用一元 3 点分段等距插值方法<sup>[14]</sup>, 将 GCMs 输出的季平均增温值(最高、最低温度)内插到月、旬, 并假定旬内增温均衡. 将内插得到的 1°×1° 网格点上的旬增温值与 1°×1° 网格点上的当前气候情景的逐日资料(最高、最低气温)相结合, 产生 CO<sub>2</sub> 倍增下的气候变化情景. 在假定未来可能气候变化情景下的日照时数与当前气候下基本一致的基础上, CO<sub>2</sub> 倍增时, 各网格点上太阳辐射日总量仍采用祝昌汉的经验公式求得.

考虑到地形影响和农业生产本身的复杂性, 作为初步的尝试性工作, 本研究并未直接考虑地形影响.

## 2 全国及双季稻主产区未来可能的气候变化情景

表 1 给出了 GCMs 输出的全国、双季稻主产区未来年、季温度的可能变化. 结果表明: 全国和双季稻主产区年平均气温变化相差不大, 都变暖 1.7℃ 左右; 但各季气温的变化还是有一定的差异. 从季节上来说, 冬春增温多, 夏秋增温少. 从变暖的空间分布来看, 东部增温少, 西部增温多; 从南向北, 增温逐渐递增.

表 1 CO<sub>2</sub> 倍增气候情景下全国和双季稻主产区未来温度的可能变化(℃)

GCMs	全 国					双季稻主产区				
	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬	年
DKRZ OPYC	1.9	1.5	1.8	2.2	1.9	2.6	1.1	0.6	3.3	1.9
DKRZ LSG	1.4	1.1	1.4	2.1	1.5	1.3	1.4	1.6	1.5	1.5
模式平均	1.6	1.3	1.6	2.1	1.7	1.9	1.2	1.1	2.4	1.7

## 3 计算过程及结果

### 3.1 当前品种、生产状况下的计算过程

(1) 利用正多面体加速寻优法<sup>[16]</sup>, 就目前的品种、生产状况<sup>[17]</sup>和气候条件, 确定各网格点上的水稻发育参数(双季早稻为籼稻, 双季晚稻为杂交稻).

(2) 分别将网格点上当前气候情景下的逐日资料和未来可能气候变化情景下的逐日天气资料输入双季稻模拟模式, 在品种和生产状况都保持不变的情况下, 逐日模拟当前和未来气候情景下水稻生长发育及产量形成过程, 然后计算未来可能的气候变化情景下产量的相对变化( $\Delta Y_i$ ), 即:

$$\Delta Y_i = (Y_i - Y_0) / Y_0 \times 100\%$$

其中,  $i=1, 2$  分别代表 DKRZ OPYC 和 DKRZ LSG 预测情景下的水稻产量.

### 3.2 采取调整措施情况下的计算过程

(1) 适应性对策的选定 可以采取各种调整对策以适应气候的可能变化, 但是, 在

实际生产条件下,由于受各种自然、人为和社会条件的影响和制约,故所能采用的适应性对策也极其有限.由于受模式本身的制约,故本文只选择了两种简单易行的适应性对策,即改变播种日期和种植品种.

(2) 敏感性分析 在研究地区采取调整对策之前,必须先进行调整对策的敏感性分析:① 调整播种日期.图2为在未来气候变化情景下双季稻产量随播种日期调整的变化,播种日期以5天为步长进行调整(试验点:26°N, 116°E).本文中双季稻种植方式都是采用移栽方式,而非直播.结果表明:改变播种日期并不能明显提高双季早稻的产量;而双季晚稻的产量对播种日期的改变则较双季早稻敏感.这可能与水稻发育的光温特性有关,不完全取决于温度的影响.由于播种日期改变对水稻产量影响的复杂性,故本文没有全面计算及分析评价调整播种日期对整个地区的双季稻生产可能带来的具体影响.② 改种长生育期水稻品种.表2为改种长生育期水稻品种后,双季稻产量的变化情况.从表中可以看出,品种改变后,双季早稻和双季晚稻的产量有明显的提高.

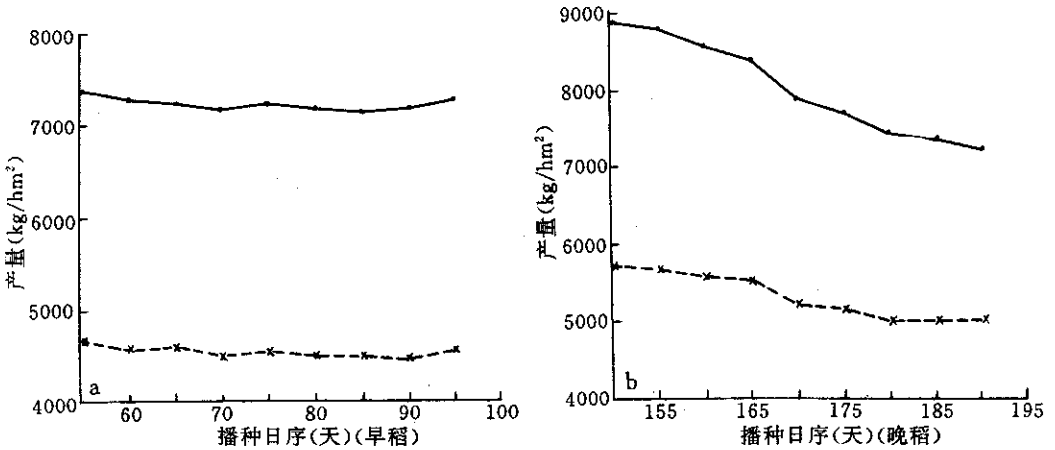


图2 双季早稻(a)、双季晚稻(b)对播种日期变化的敏感性(26°N, 116°E)  
(实线:总干重,虚线:穗重)

表2 品种不变和品种改变情况下双季稻产量的变化(27°N、28°N, 116°E)

		早稻产量变化(%)			晚稻产量变化(%)		
		OPYC	LSG	平均	OPYC	LSG	平均
品种不变	27°N	-19.0	-12.6	-15.8	-12.0	-17.5	-14.8
	28°N	-18.9	-13.3	-16.1	-11.2	-17.0	-14.1
品种改变	27°N	23.1	11.6	17.4	-7.0	3.8	-1.6
	28°N	19.4	14.5	17.0	-5.6	10.1	2.3

### 3.3 计算结果

(1) 品种和生产状况都保持不变的情况下,2个GCMs(DKRZ OPYC, DKRZ LSG)预测气候情景下双季稻(早、晚稻)产量变化的空间(地区)分布在图3中给出.由图3可见,2个GCMs气候情景下我国双季早稻、双季晚稻产量的变化有如下几个特点:①从

产量变化幅度来看：双季早稻产量的变化幅度为-7.9%~-21.6%，相对较小，但均呈减产趋势；双季晚稻的变化幅度较大，从+12.3%~-32.9%，增减产波动明显(图3)。

② 从减产的空间分布情况来看：对双季早稻而言，产量变化的地域分布很复杂，东部减产较少(10%左右)，中部及西北部产量下降较多(15%以上)，西部从北到南有一个中等减产区(12.5%左右)。而对双季晚稻来说，产量变化的地域性分布表现得很明显，产量变化基本呈纬向分布，南部减产多，北部减产少；但在西北部的一小块地区，双季晚稻反而呈增产趋势，增产幅度最大可达12.3%(图3)。

③ 不同的 GCMs(DKRZ OPYC 和

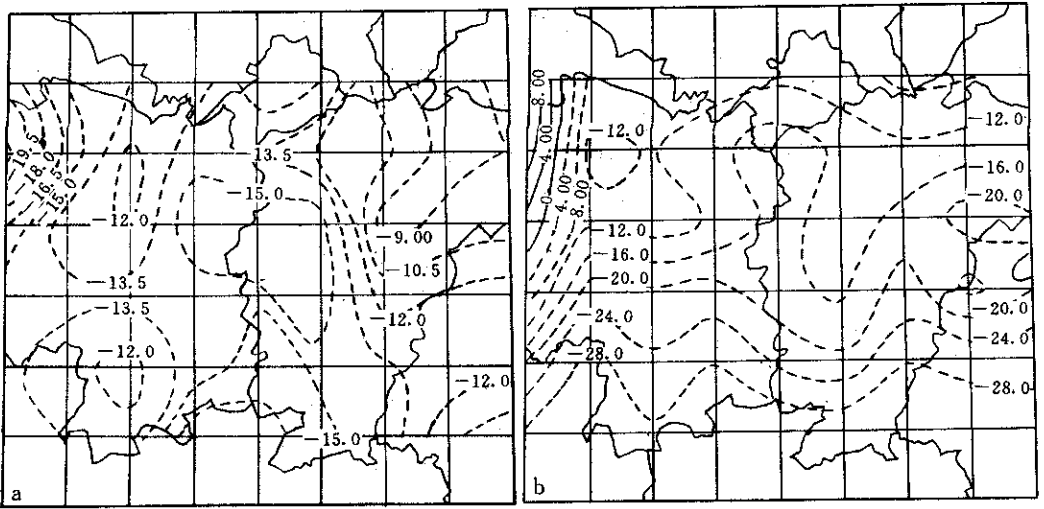


图3 两种 GCMs 气候情景下双季稻产量变化(%)的分布(a) 双季早稻(b) 双季晚稻

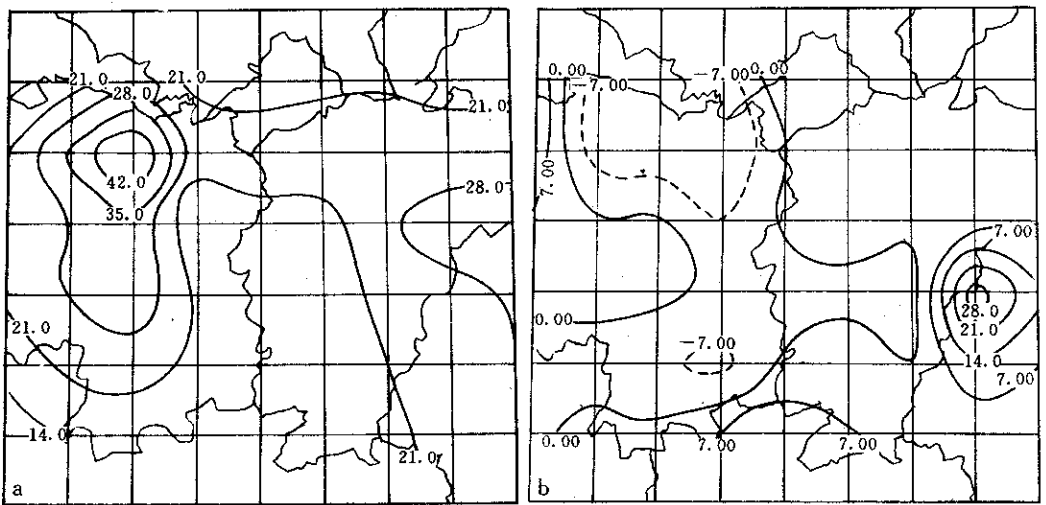


图4 两种 GCMs 气候情景下改变种植品种后双季稻产量变化(%)的分布  
(a) 双季早稻 (b) 双季晚稻

DKRZ LSG) 预测气候情景下双季稻(早、晚稻)产量变化的地域分布十分相似, 但不同 GCMs 预测气候情景下双季稻产量变化的量值存在一定差异(图略)。

(2) 改变水稻品种的情况下, 双季稻产量的变化在图 4 中给出。由图 4 可见, 在未来可能气候变化情景下, 若改种长生育期的水稻种植品种, 对双季早稻而言, 不但不减产, 反而增产, 且增产幅度较大。对双季晚稻来说, 减产幅度也明显下降, 大部分地区呈增产趋势。

## 4 结果的初步分析

### 4.1 双季稻减产的主要原因分析

(1) 生育期缩短可能是双季稻减产的主要原因。根据 DKRZ OPYC 和 DKRZ LSG 的输出结果, 在  $\text{CO}_2$  倍增的气候变化情景下, 双季稻主产区的各季温度都有不同程度的升高, 全年平均升高  $1.7^\circ\text{C}$ , 双季早稻生长期升高  $1.6^\circ\text{C}$ , 双季晚稻生长期升高  $1.1^\circ\text{C}$ 。敏感性分析研究表明<sup>[10]</sup>, 温度升高, 发育速度加快, 生育期缩短; 主要表现为: 分蘖速度加快, 有效分蘖减少, 导致总干重和穗重都有不同程度地下降。生育期长度缩短的幅度, 双季早稻为 11 天, 双季晚稻为 6~7 天。

(2) 温度升高, 在促进同化物的转化传输的同时, 加快了枝梗的老化和颖花的衰落, 促使水稻的灌浆速度加快, 缩短灌浆籽粒充实期, 致使空秕粒增加, 结实率下降, 千粒重下降, 产量降低。

(3) 如上所述, 温度升高, 即增强光合作用效率, 也使呼吸消耗增大(呼吸消耗与温度呈指数关系), 但若超出适宜温度范围, 呼吸消耗的增大将超过光合作用效率的提高; 并且夜温升高, 可使维持呼吸大大加强, 致使净光合产物减少, 转化合成的生物量下降。抽穗后, 向穗部转移的同化物减少, 产量将因此受到影响。

### 4.2 产量变化地区差异的原因及其复杂性

在  $\text{CO}_2$  倍增的可能气候变化情景下, 我国的双季稻产量将可能下降, 但地区间存在差异, 且双季早稻、双季晚稻产量变化的分布规律不尽相同, 差别很大。双季稻产量变化分布的特征主要取决于作物的品种特性、地区的气候条件和各地的自然地理条件。对双季早稻而言, 生长期平均温度越高, 气候变暖对产量的影响越明显; 平原或低地, 气候变暖对双季早稻产量的影响比丘陵山地要大。双季晚稻产量变化的分布与其生长期内的平均温度变化的分布基本吻合, 均呈纬向分布; 即生长期平均温度高, 产量变化多, 反之则减产少。西北部, 由于当前气候下晚稻生长期内的平均温度较低, 热量条件不足, 气候变暖后, 改善了热量条件, 故此地区双季晚稻反而可能增产。

但是, 由于本区地处季风气候带, 气候和自然地理条件很复杂, 而且各地生产、种植制度和作物品种差异很大, 因而, 在  $\text{CO}_2$  倍增的可能气候变化情景下, 我国双季稻产量变化的时空分布也呈现出其相应的特殊性和复杂性。

### 4.3 调整对策在缓解气候变暖对双季稻生长影响中的作用

(1) 和其它作物不同的是, 水稻的发育进程不仅受温度的影响, 而且日长也是一个支配因子, 即水稻的发育进程是光温共同作用的结果。日长作用的大小, 由水稻品种本

身的特性所决定,即水稻的感光性.若感光性强,则受日长的影响大,反之则小.因此,改变播种日期对缓解气候变暖对水稻生长的影响比较复杂.

(2)若改种长生育期水稻品种,则双季稻(早、晚稻)产量都可能不同程度的提高.对双季早稻而言,不但不减产,反而增产.而双季晚稻也能在很大程度上补偿因气候变暖而引起的减产,虽然部分地区仍将有所减产.究其原因,可能是因为更换了适应性强的品种后,光合作用增强超过呼吸消耗的增大,致使净光合产物增多;成穗时,向穗部转移的同化物增多,产量就可能提高;同时,高温下同化物运转速度加快,而灌浆期并不缩短,籽粒灌浆充分,空秕粒减少,千粒重增加,导致最终产量提高(同当前的种植品种相比较而言).

## 5 小结与讨论

(1)本文将双季稻生长动力(态)模拟模式与GCMs的区域输出结果相连接,对我国双季稻主产区的水稻生产进行网格化模拟计算和诊断分析;尝试性地评估了气候变暖对我国双季稻主产区水稻生产的可能影响;并探讨了造成这些影响的可能原因.

(2)根据GCMs输出的CO<sub>2</sub>倍增的气候变化情景,我国双季稻主产区未来的热量资源将更为丰富,作物潜在生长季延长;但是,若在气候变化情景下仍维持目前的品种和生产技术措施,则不但不能充分利用丰富的热量资源,而且还有可能导致双季稻减产.生长适宜温度时段减少,生育期缩短,灌浆速度加快,呼吸消耗增多和净光合产物减少可能是导致双季稻减产的一些主要原因.

(3)双季稻(早、晚稻)产量变化的地域分布既有一定的规律性,同时也表现出明显的复杂性,这主要与各地的生产种植情况、季风气候条件、自然地理环境和增温区域特征有关.改变种植品种,即改种晚熟品种,能提高双季稻产量,部分或较多地补偿由于气候变暖而引起的减产.这可为以后采用适宜品种和指明遗传育种方向提供借鉴和参考.

(4)气候变暖将对我国农业生产带来诸多不利的影响,为使我国农业生产在未来气候变暖的条件下持续发展,充分利用气候资源,应重视以下几个方面:①选育适应气候变暖的优良品种;②加强气候变化对农业影响的研究;③加强研究高温热害或干旱等灾害的危害机制和规律,加强病虫害和草害的防治工作,规划适应、抗御的途径和措施,以减少其可能引起的减产.④对农田的痕量气体的排放量进行监测,并采取措施控制和减少痕量气体的排放.

应该指出的是,本文受模式和时间的限制,只是一个初步的尝试和探索,研究中作了许多简化处理.此外,本文还没有考虑CO<sub>2</sub>增加的直接效应、水分和氮素胁迫以及病虫害和异常天气的影响等,尚有待于作进一步改进和完善,以期能更好地模拟双季稻生长的实际情况并应用于研究气候变化对双季稻生产的影响.

## 参考文献

- 1 Parry M L. Climate change and world agriculture. Earthscan publications Ltd, London, IIASA, UNEP, 1990.
- 2 Smith J B & Tirpak D (eds.). The potential effects of global climate change on the United States, US/EPA, 1989.
- 3 Parry M L, et al(eds.). The potential socio-economic effects of climate change in south-east Asia, UNEP, 1992.



- 4 Special Issue: Methodology for assessing regional agricultural consequences of climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, **59**(1~2): 53~127.
- 5 Wolf J and Diepen C A V. Effects of climate change on grain maize yield potential in the European Community. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **71**(1~2): 33~60.
- 6 Hulme M, Zhao Zongci, Leemans R, et al. Climate change due to the greenhouse effect and its implications for China. CRU/WWF/SMA, Banson Production, London, UK, 1992.
- 7 邓根云主编. 气候变化对中国农业的影响. 北京: 北京科学技术出版社, 1993. 263~312.
- 8 丁一汇, 高素华主编. 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 121~166.
- 9 金之庆, 葛道阔. 全球气候变暖对我国南方水稻生产的影响及其适应性对策. *南京林业大学学报(生态专辑)*, 1991, **10**: 17~18.
- 10 高 翔, 王馥棠. 双季稻生长动态模拟模式的研究. 见: 王馥棠主编. 气候变化对中国农业影响的研究. 北京: 气象出版社, 1996. 1~8.
- 11 Carter T R, et al. Climate change: Preliminary guidelines for assessing impacts of climate change. ECU/CGRE. 28, 1992.
- 12 郑良杰主编. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟. 北京: 气象出版社, 1989. 13~15.
- 13 丁一汇编著. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京: 科学出版社, 1989. 12~15.
- 14 徐萃薇编. 计算方法引论. 北京: 高等教育出版社, 1990. 18~21, 29~35.
- 15 Li Xiaodong, et al. Evaluation of CGCM and simulation of regional climate change in east Asia. *ACTA Meteorological Sinica*, 1995, **9**(4): 385~401.
- 16 韦鹤平编著. 最优化技术应用. 上海: 同济大学出版社, 1987. 159~162.
- 17 崔读昌, 刘洪顺, 闵瑾如等编著. 中国主要作物的气候资源图. 北京: 气象出版社, 1984. 83~87, 101~106.

## NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE POTENTIAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON DOUBLE CROPPING OF RICE IN THE SOUTH OF YANGTZE RIVER VALLEY OF CHINA

Qiu Guowang      Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Based on the validation of dynamic growth simulation model for double-rice through field experimental data, and jointing the climatic change scenarios derived from GCMs outputs and historical climatic data (1960~1990) with double cropping of rice model, objective impact assessment and quantitative simulation experiments on grid points are carried out in the main double-rice areas of the south of Yangtze river valley. Moreover, the effect of agrotechnical adjustment (such as, changes of sowing date and cultivars) on alleviating the impact of climate change are preliminarily estimated and discussed.

The results indicate that in the future climatic change scenarios, and under the current planting varieties and agrotechniques, the output of double-harvest rice would be reduced to a different extent. The spatial distributions of yield variation have not only some regularity, but also obvious complexity. Adjustable countermeasure analyses show that the used varieties with long growth duration could increase double-rice yield. Apart from the mentioned above, the sensitivity test with changes of sowing date is also conducted.

**Key words:** Climate change    Double-rice model    Potential impact    Adjustment countermeasures