

气候变暖对中国水稻生产可能影响的研究*

张 宇 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

利用随机天气模型, 将大气环流模式预测的气候情景与水稻模式相链接, 研究了气候变暖对中国水稻生产的可能影响。结果表明, 大气中 CO_2 浓度加倍, 中国水稻主产区适宜水稻生长的日数将延长 6 ~ 11 d, 积温增加 220 ~ 330 °C·d。积温的相对增长率由南向北呈增长趋势。水稻产量形成期低温天气出现频率将减少, 而高温天气出现的频率增加。若品种与播种、移栽期不变, 水稻产量将下降; 而若通过改变品种使作物生育期基本保持目前的状况, 减产幅度将比品种不变时明显偏小, 部分地区还有可能增产。

关键词: 作物模式, 随机天气模型, 全球环流模式, 气候变暖, 水稻生产。

1 引 言

随着工农业生产的发展, 特别是石化燃料的利用, 大幅度地增加了二氧化碳、甲烷等温室气体在大气中的浓度。它们通过改变地球系统的辐射过程, 将使全球气候增暖^[1]。大气中 CO_2 浓度的变化及其引起的气候变化, 通过对作物生长发育过程影响、适宜种植区及灾害性因子的变化, 将对农业生产产生重大影响^[1~3]。

在世界粮食生产中, 水稻产量仅次于小麦, 中国是世界上最大的水稻生产国。稻谷产量在中国粮食生产中居于首位, 主要分布在东经 100 以东地区, 长江以南以双季稻为主(包括双季早稻和双季晚稻, 以下简称早稻和晚稻), 长江流域及其以北地区以中稻、一季稻为主(以下简称一季稻)。与早稻相比, 一季稻和晚稻生长期较长, 单产水平较高。从总产量看, 一季稻产量约占全国总产量的一半。大气中 CO_2 浓度增加及气候变化对水稻生产的影响引起了中国及世界的关注, 并进行了很多研究^[4~11]。试验表明, 在其它条件适宜, CO_2 浓度从 340 ppm 增加到 680 ppm 的控制试验条件下, 水稻产量平均增加 30%^[5], 但这种 CO_2 饲肥效应对大田作物影响的大小尚无定论^[1]。“ CO_2 浓度加倍”的含义在大多数气候预测与影响评估研究中存在一定差别。用于预测未来气候情景的大气环流模式(GCMs)所考虑的“ CO_2 加倍”包括了甲烷、氟氯烃等其它温室气体的相对作用, 一般以工业化之前大气中 CO_2 浓度(约 275 ppm)为基数加倍^[1, 12], 而在气候变化对作物和生态系统的影响分析中, 大多数是假设大气中实际 CO_2 浓度在目前的水平(约 340 ppm)上加

* 初稿时间: 1996 年 3 月 1 日; 修改稿时间: 1997 年 4 月 16 日。

资助课题: 国家攻关课题 85-913-03。

倍^[1, 4]。作物生长模式是研究气候变化对作物影响的有效方法^[4, 8, 9]。总体而言, 气候变暖将使作物发育加快, 生育期缩短, 产量降低。但其结果由于作物模式、所用气候情景及其它假设条件的不同而不同。也有人根据未来气候状况, 用一些统计方法估计气候变化对水稻生产的可能影响^[6, 7, 10]。

文中利用随机天气模型, 将 GCMs 预测的气候情景与水稻模式(ORYZA1)相链接, 以数值试验方法, 研究了气候变暖对中国水稻生产的可能影响。

2 方法与资料

2.1 研究方法

由于作物模式模拟的时间步长一般为 1 d, 需要输入逐日气象资料, 而 GCMs 预测的气候情景一般为季或年平均。因此本研究采用随机天气模型, 使 GCMs 的预测结果适合于作物模式的输入要求。研究的基本过程如图 1 所示。

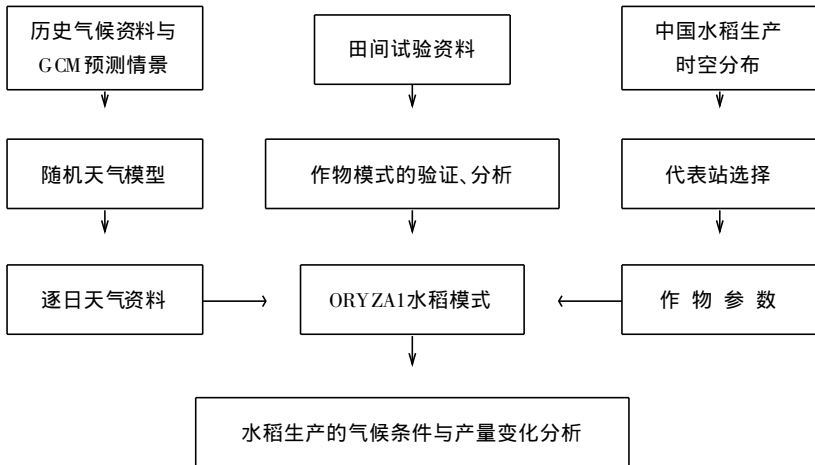


图 1 模拟研究流程图

首先对水稻模拟模式 ORYZA1 进行了验证和敏感度分析, 然后根据气候资料和 GCMs(GFDL, UKMO 和 MPI) 预测的气候情景, 利用随机天气模型分别产生 200 a 逐日天气资料。根据对气候条件的分析和模式计算, 研究气候变暖对中国水稻生产农业气候条件和产量的可能影响。

2.2 作物模式及其实用性分析

作物模式采用国际水稻研究所(IRRI)和荷兰瓦赫宁根农业大学理论生产生态系共同研制的 ORYZA1(V1.0) 模式。模式考虑了作物的发育过程、光合作用、呼吸作用和同化物分配等基本生理过程。但模式没有考虑 CO₂ 对作物的直接影响。在中国的水稻生产中, 稻田的水分状况多与人工灌溉和排水有关, 简单地考虑大气降水是很不够的, 因此在计算中也没有考虑水分的影响。

田间试验分别设在江西靖安和湖南衡阳, 这里水稻生产比较集中。1992~1993 年在两个试验点进行了早、中、晚稻共 7 个品种、20 个播种期的试验。观测项目包括发育期(播种、移栽、抽穗、成熟等)、田间管理措施、产量结构和生长动态过程(从移栽开始每隔 5~

10 d 观测一次叶面积系数和茎、叶、穗的干物重)。气象资料取自本站或就近观测站。

根据田间试验资料对 ORYZA1 水稻模式进行了验证。表 1 中列出了 1992 年叶面积系数和各器官干重模拟值与实测值之间的平均相关系数(早稻为 2 个播期,一季稻为 5 个播期,晚稻为 2 个播期)。从中可见, ORYZA1 模式对各器官生物量时间变化趋势的模拟效果较好,叶重和叶面积系数的相关系数偏低,主要是由于移栽后初期模拟值偏高。但对作物各要素的模拟往往都有一定的系统误差(略偏高)。同时还对模式进行了一些敏感度试验,结果表明模式对品种特性和气象条件(温度和太阳辐射)比较敏感,详见文献[11]。

表 1 1992 年叶面积系数和各器官干重模拟值与实测值之间的平均相关系数

	早稻	一季稻	晚稻	平均
叶面积系数	0.808	0.524	0.684	0.672
叶重	0.770	0.437	0.459	0.555
穗重	0.903	0.901	0.807	0.870
茎重	0.991	0.987	0.974	0.984
地上总量	0.965	0.960	0.971	0.965

2.3 气候情景与随机天气模式

未来气候情景是根据 IPCC1992 年提出的一个温室气体排放方案(IS92a)^[11], 分别由 GFDL, UKMOH 和 MPI 3 个 GCM 在两倍 CO₂ 浓度(相当值)时平衡响应得到的季平均温度和降水, 水平分辨率为 5 经度 × 5 纬度^[12]。

随机天气模型是在美国 WGEN^[13] 模型数学结构的基础上, 根据中国的实际资料修改而成的^[14]。可以产生逐日最高、最低温度, 降水量和太阳辐射。用全国 51 个点近 30 a 的气候资料对模式进行了多种项目的验证。根据近 30 a 的历史气候资料和 GCMs 预测的气候情景分别确定随机天气模型中的参数, 即可产生相当于当前与 CO₂ 加倍时的逐日天气资料。对当前与 3 种 GCMs 预测的气候情景各产生 200 a 逐日天气资料。

3 结果分析

3.1 水稻适宜生长期及其积温的变化

气候变暖, 适宜于作物生长的日数会有所延长, 积温也会有所增加。水稻适宜生长的温度一般为日平均气温大于等于 12^[16]。选 5 个代表点分别计算当前及 GCMs 预测情景下日平均气温大于等于 12 的日数、积温及其变化(见表 2)。

表 2 GCMs 预测情景下水稻适宜生长期及其积温的变化

站名	生长期的变化		适宜生长期积温的变化	
	(d)	(%)	(·d)	(%)
长春	+ 5.7	+ 4.0	+ 208.1	+ 7.2
北京	+ 6.0	+ 3.2	+ 249.9	+ 6.2
武汉	+ 11.3	+ 4.9	+ 330.3	+ 6.3
南昌	+ 8.3	+ 3.3	+ 240.0	+ 4.6
广州	+ 0.0	+ 0.0	+ 278.5	+ 3.4

由表 2 可见,各站点水稻适宜生长期将延长 6~11 d(广州多年平均逐日气温均在 12 以上,所以适宜生长期不可能再延长),各地差异不大。积温增加约 200~330 ·d,相对增长率由南向北呈增长趋势。从绝对变化看,适宜生长期与积温均以武汉增长最大。适宜生长期及其积温的这种变化趋势对水稻种植区扩大和种植制度调整是很有意义的。

3.2 水稻产量形成期高温与低温天气出现频率的变化

从幼穗分化到灌浆成熟,水稻产量形成对温度比较敏感。幼穗分化到开花授粉期间,温度过高和过低都会影响幼穗分化和结实率,而温度过高还会影响籽粒灌浆^[16]。即使不考虑 CO₂ 倍增对气候变率的影响,气候变暖也将改变水稻产量形成期高温与低温天气出现的频率。以开花前 30 d 到开花后 10 d(共 40 d)日平均气温小于 22 的日数大于等于 5 d 作为低温天气指标,从开花前 30 d 到开花后 40 d(共 70 d)日最高气温大于等于 35 的日数大于等于 20 d 作为高温天气指标,分别计算当前与未来气候情景下高温与低温天气出现的频率及其变化(见表 3)。

表 3 水稻产量形成期高温与低温天气出现频率的变化(%)

站名	低 温 天 气			高 温 天 气			
	当前	未来	变化	当前	未来	变化	
早 稻	武汉	5.5	1.7	- 3.8	8.2	31.8	+ 23.6
	南昌	8.0	3.7	- 4.3	74.7	87.0	+ 12.3
	广州	12.4	5.9	- 6.5	0.0	0.2	+ 0.2
晚 稻	武汉	33.3	20.3	- 13.0	0.0	0.1	+ 0.1
	南昌	25.0	12.7	- 12.3	0.8	2.5	+ 1.7
	广州	5.3	0.9	- 4.4	0.0	0.0	+ 0.0
一季稻	长春	56.0	12.7	- 43.3	0.0	0.0	+ 0.0
	北京	6.1	1.7	- 4.0	1.0	9.4	+ 8.4
	武汉	0.0	0.0	- 0.0	25.8	60.1	+ 34.3

表 3 显示,气候变暖将使低温天气出现的频率减少,而高温天气出现的频率增加。从几个代表点来看,早稻、晚稻和一季稻低温天气出现的频率分别减少 4.9%, 9.9% 和 15.8%, 高纬地区减小的幅度大于低纬地区。这样将缓解或消除低温天气对水稻的危害,有利于水稻生产。而除东北及南部沿海外,高温天气出现的频率将增加,特别是长江流域的早稻与一季稻最为明显,将对水稻生产构成较大威胁。

3.3 生产措施及品种不变时产量与发育期的变化

假设各地水稻品种及播种和移栽期保持不变,利用 ORYZA 1 水稻模式逐年模拟当前及 3 种 GCMs 预测情景下的作物产量,对各种情景下 200 a 的水稻产量排序,计算 90% 年份的最高产量 Y_i (即 200 a 中,有 180 a 产量低于 Y_i , i 取 0, 1, 2 和 3, 分别代表当前及 GFDL, UKMOH 和 MPI 预测情景)。则产量的相对变化可表示为:

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

式中, ΔY_i 为第 i 种情景下产量的相对变化。一季稻选 18 个代表点, 双季早稻和晚稻选 17 个代表点进行计算。结果表明, 气候变暖, 水稻产量均呈下降趋势, 早稻产量减产幅度较小, 晚稻和一季稻减产幅度较大。虽然根据不同 GCMs 预测情景计算的产量变化不同, 但从多点变化综合来看, 它们的变化趋势又有不同程度的相似性(见表 4)。温度升高, 水稻发育加快, 水稻生长期都有不同程度的缩短。平均来看, 早稻发育期缩短 2.9%, 晚稻和一季稻缩短 5.99% 和 6.5%。这种变化幅度与产量降低的幅度有一定对应关系。对 O-RYZA1 模式的敏感度试验也表明, 水稻发育期缩短, 产量降低^[11]。因此, 生育期缩短可能是水稻产量降低的主要原因。

表 4 不同 GCMs 预测气候情景下水稻产量的可能变化及各 GCMs 之间的相关系数

		早稻	晚稻	一季稻
各点产量平均的变化(%)	GFPL	- 4.0	- 9.6	- 9.7
	UKMO	- 5.2	- 12.9	- 13.7
	MPI	- 1.9	- 8.8	- 8.0
	平均	- 3.7	- 10.4	- 10.5
各种 GCMs 情景下产量变化间的相关系数	GFDL ~ UKMO	0.6430	0.9034	0.7164
	GFDL ~ MPI	0.4326	0.7118	0.7569
	UKMO ~ MPI	0.3430	0.7445	0.4998

从空间分布看, 一季稻减产幅度由南向北逐步增加, 再向北又有所减少。对早稻而言,

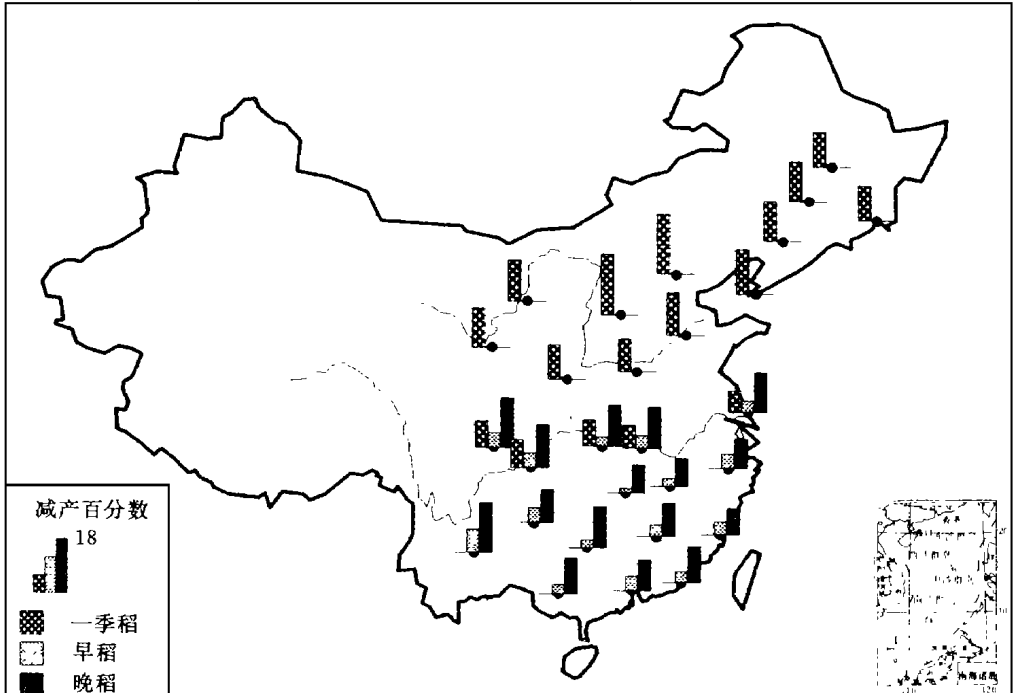


图 2 水稻产量变化(减少百分数)的空间分布情况(3 种 GCM 的平均)

长江以南的南方稻区中部产量下降较少,而其周边地区,特别是西部地区产量下降较多,对晚稻而言,上述南方稻区的西北部产量下降较多,而其东南部产量下降较少。如图 2 为水稻产量变化(减少百分数)的空间分布情况(3 种 GCM 的平均)。

3.4 改变品种使水稻发育期保持基本不变时产量的变化

气候变暖,将使热量资源趋于丰富,因此可以通过改变品种来适应这种变暖的气候条件。假设在未来气候条件下,通过改变品种参数,使播种、移栽、开花与成熟期仍基本维持目前状况(根据 3.1 节,生长期仅延长 6–11 d),逐年模拟水稻的生长过程,然后计算各种气候情景下水稻产量的平均值与均方差的变化,结果如表 5。

表 5 保持发育期不变时气候变暖对产量的影响

	站名	平均产量的变化		均方差的变化
		(kg/ha)	(%)	(kg/ha)
早 稻	武汉	+ 126.6	+ 1.73	- 45.4
	南昌	- 36.4	- 0.5	+ 5.1
	广州	- 69.9	- 0.9	- 86.0
晚 稻	武汉	- 173.6	- 1.81	- 27.4
	南昌	- 87.7	- 0.9	- 63.2
	广州	- 69.9	- 0.9	- 71.2
一季稻	长春	+ 325.5	+ 3.0	- 125.8
	北京	- 446.2	- 3.6	- 86.9
	武汉	- 135.9	- 1.6	- 44.0

由表 5 可见,大部分地区水稻产量呈下降趋势,但产量的下降幅度比品种不变时要小得多。而长春的一季稻和武汉的早稻(分别位于一季稻与早稻种植区北界),产量将比目前有所增加。产量的均方差大多呈减少趋势,即气候变暖后产量波动将有所减小。

4 结论与讨论

根据 GCMs 对大气中 CO₂ 浓度倍增时预测的气候情景,中国水稻主产区热量资源将趋于丰富,适宜于水稻生长的日数将延长 6~11 d,积温增加 220~330 °C·d,积温的相对增长率从南向北呈增长趋势。产量形成期低温天气出现的频率减少,而高温天气出现的频率增加。若品种和播种、移栽期不变,水稻产量将下降,一季稻和晚稻的减产幅度大于早稻。作物发育加快,生育期缩短可能是产量减少的重要原因。若通过改变品种使作物发育期基本保持目前的状况,早稻与一季稻种植的北界地区产量将有所增加,而其它地区虽然仍呈减产趋势,但减产的幅度要比品种不变时明显偏小。

由于对气候变化认识与预测的不确定性以及作物模式的局限性,特别是本文没有考虑 CO₂ 对作物生长的直接效应以及水分状况及病虫害等对水稻生产的影响,故还必须做更为深入的研究。

致谢: 林尔达和王京华同志提供了逐日随机天气资料,特此致谢。

参考文献

- 1 Houghton T T, Callander B A and Varney S K. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 1992. 200pp
- 2 张宇. 温室效应与气候变化对农业影响研究概况. 山东气象, 1991, 3 1~7
- 3 Rosenzweig Cynthia. Predicted effects of climate change on agricultural ecosystem. In: Richard G Zapp, eds. Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change. New York. John Wiley and Sons, Inc, 1994
- 4 Matthews R B, Kropff M J, Bachelet D, et al. Modelling the impact of climate change on rice production in Asia. Wallingford, UK: CAB international, 1995
- 5 Kimbal B A. Carbon dioxide and agricultural yield. An assemblage and analysis of 430 prior observations. Agron J 1983. 75 779 ~ 788
- 6 气候变化与作物产量课题组. 气候变化与作物产量. 北京: 中国农业出版社, 1992. 78 ~ 140
- 7 程延年. 气候变化对我国水稻生产的影响. 见: 邓根云主编. 气候变化对中国农业的影响与作物产量. 北京: 北京科学技术出版社, 1993, 282 ~ 296
- 8 Parry M L, Blarlan M de Rozari, Chong A L, et al. The potential socio-economic effects of climate change in south-east Asia. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP), 1992. 1 ~ 9
- 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 ~ 28
- 10 Wang Futang, Wang Shili, Li Yuxiang, et al. A preliminary modelling of the effects of climatic change on food production in China. In: Geng S and Cady C W, eds. Climatic variations and change: Implications for agriculture in the Pacific Rim. Davis, California: University of California, 1991. 115 ~ 126
- 11 张宇, 王馥棠. ORYZA1 水稻模式及其在我国水稻主产区应用的适应性分析. 大气科学研究与应用, 1995, 2 35 ~ 41
- 12 休姆·迈克, 赵宗慈, 王馥棠等. 温室效应引起的气候变化以及对中国的影响. 伦敦: 班松出版(Banson Production), 1992. 57pp
- 13 Richardson C W. Weather simulation for crop management models. Transaction of the ASAE, 1985, 28(5): 1602 ~ 1606
- 14 林而达. 适用于奶牛环境热交换模式的随机天气模型. 中国农业气象, 1990, 11(2) 52 ~ 54
- 15 崔读昌, 刘洪顺, 闵谨如等. 中国主要作物气候资源图. 北京: 气象出版社, 1984. 177pp
- 16 北京农业大学农业气象专业, 农业气象学. 北京: 科学出版社, 1982, 175 ~ 192

ON THE POSSIBLE IMPACTS OF CLIMATE WARMING ON RICE PRODUCTION IN CHINA

Zhang Yu Wang Futang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

Abstract

The possible impacts of climate warming on rice production in China are studied by using numerical experiments of a rice simulation model (ORYZA1) based on climate change scenarios projected from GCMs (GFDL, UKMO and MPI). A stochastic weather generator is used to make the projected climatic change scenarios suitable to the input of ORYZA1. The results show that, when CO₂ concentration in the atmosphere is doubled, the duration of rice growing season would be lengthened by 6~11 days and the accumulated temperature would increase by about 220~330 °C·d. The possibility of cool injury in rice yield forming period would decrease while that of heat stress would increase. Rice yield would decrease if cultivars and farming practice are unchanged. If the dates of rice development stages could be maintained unchanged through variety adjustment, the rice yield in most of the areas would decrease, the decrements are considerably less than that when cultivars and farming practice are unchanged.

Key words: Crop model, Stochastic weather generator, GCMs, Climate warming, Rice production.