

气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究*

张 宇

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

王石立 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

利用随机天气模型, 将气候模式对大气中 CO_2 倍增时预测的气候情景与 CERES-小麦模式相连接, 研究了气候变化对我国冬小麦和春小麦生产的可能影响. 结果表明, 气候变化后小麦发育将加快, 生育期缩短, 冬小麦平均缩短 7.3 天, 春小麦平均缩短 10.5 天, 春小麦生育期缩短的绝对数和相对数均大于冬小麦. 籽粒产量呈下降趋势, 冬小麦平均减产 7%~8%, 雨养条件下比水分适宜时减产幅度略大. 春小麦的减产幅度大于冬小麦, 水分适宜时平均减产 17.7%, 雨养时平均减产 31.4%.

关键词: 气候变化 小麦发育及产量 作物模式 随机天气模型 气候模式

引 言

随着工农业生产的发展, 特别是工业革命以来石化燃料的利用, 大气中二氧化碳、甲烷等温室气体浓度不断增加. 它们通过影响地球系统的辐射过程, 使全球气候增暖^[1]. 大气中 CO_2 浓度增加及气候变化, 通过作物生育过程、适宜种植区和灾害性因子等的变化, 将对农业生产产生很大影响^[1, 2, 3].

小麦是世界主要粮食作物之一. 我国小麦种植面积与水稻相近, 占粮食作物播种面积的 25%~30%, 产量与玉米接近, 占粮食产量的 20%~25%, 全国各地几乎均可种植小麦, 但主集中在长江以北的东部地区. 长城以北和东北地区以春小麦为主, 其余地区主要以冬小麦为主. 在整个小麦生产中, 冬小麦约占总产的 90%, 占播种面积的 85% 以上. 大气中 CO_2 浓度上升和气候变化对小麦生产的可能影响, 引起了我国及世界各国的关注, 已进行了很多研究^[4, 5, 6]. 所用方法有农业气候分析、多元回归与积分回归等统计分析方法、数值模拟计算等. 作物生长模式是研究气候变化对作物可能影响的有效方法^[2, 3]. 总体而言, 气候变暖将使作物发育加快, 种植区向北扩展, 但产量变化因作物模式、所用气候情景及其他假设条件不同而差异很大. 控制试验表明, CO_2 浓度增加将促进作物光合作用, 有利于作物生长和产量形成^[7], 而在大田中这种效应的大小尚不肯定^[1]. 在大多数气候预

* 本研究得到国家攻关 85-913-03 课题和国家研究(Country Study)的资助.
1999-04-26 收到, 1999-05-14 收到修改稿.

测和影响研究中,“CO₂ 浓度加倍”的含义不尽相同. 在气候预测中所考虑的“CO₂ 加倍”包括了甲烷、氟氯烃等 CO₂ 以外其他温室气体的作用,一般以工业化之前大气中 CO₂ 浓度(约 275×10^{-6})为基数加倍,而气候变化对农业和生态系统的影响研究中,大多是以目前大气中实际 CO₂ 浓度(约 340×10^{-6})加倍.

本文利用随机天气模型,将气候模式对大气中 CO₂ 浓度倍增时预测的气候情景与作物模式相连接,以数值试验方法,研究气候变化对我国小麦生产的可能影响.

1 研究方法

1.1 总体研究方法

由于作物模式所需的一般为逐日气象资料,而气候模式对未来气候的预测只是月、季的平均值. 因此本研究采用随机天气模型,使气候模式预测的气候情景适合于作物模式的输入要求,研究的基本方法和过程如图 1 所示.

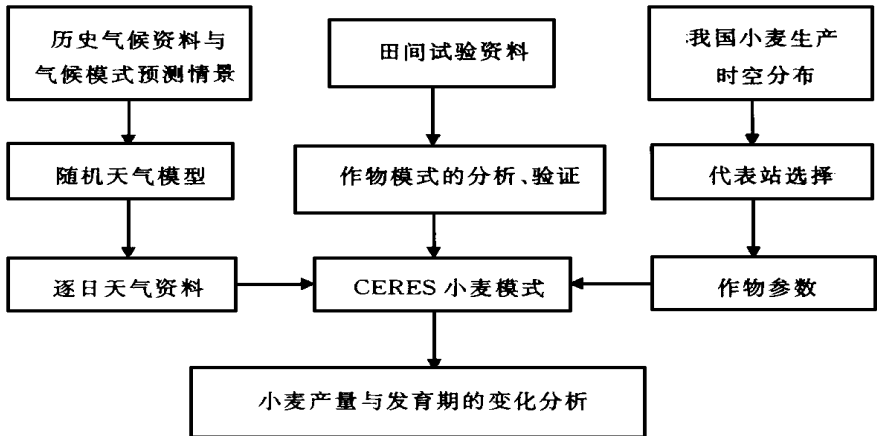


图 1 研究的基本方法和过程

整个研究过程为: (1) 根据区域气候模式得到大气中 CO₂ 浓度倍增时预测的气候情景; (2) 随机天气模式的建立、检验和产生逐日天气; (3) CERES 小麦模式的分析、验证; (4) 根据我国小麦生产的分布情况, 选择代表点, 确定有关参数; (5) 分析气候变化对冬小麦和春小麦发育过程和产量的影响, 分雨养和无水胁迫两种情况计算.

1.2 气候情景与随机天气模型

未来气候情景是根据 IPCC 1992 年提出的一个温室气体排放方案 (IS92a)^[1], 分别由 GFDL、UKMOH、和 MPI3 个气候模式在两倍 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 $5^\circ \times 5^\circ$ ^[6].

随机天气模型是在美国 WGEN 模型^[8]数学结构基础上, 根据中国的实际资料修改而成的^[6]. 可以产生逐日最高、最低温度, 降水量和太阳辐射. 用全国 51 个站点近 30 年的气候资料对模式进行了验证^[6]. 根据近 30 年的历史气候资料和 GCM 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和 CO₂ 加倍时的逐日天气资料. 对当

前 3 种气候模式预测的气候情景各产生 200 年逐日天气资料。

1.3 代表站选取与计算

根据我国小麦生产的分布情况^[9],对冬小麦和春小麦分别计算。春小麦考虑了东北、西北、内蒙古和西藏等大部分春麦区,选 20 个代表站。冬小麦主要考虑我国东部长江以北地区,选 12 个代表站计算。长江以南虽然也有冬小麦种植,但涝渍和病虫害等对这里小麦的生长发育过程和产量影响较大,而作物模式在这方面的考虑还不太成熟,所以没有计算长江流域以南地区(这里小麦产量占全国的比例也较小)。

水分是影响我国小麦生产的重要因素,而不同地区灌溉条件差别很大,在实际生产中也可能有很大变化,为了使研究简便统一,并有一定代表性,选完全没有灌溉(雨养)和水分供应适宜(无水分胁迫)两种情况进行模拟。在实际中往往是介于它们之间。计算中没有考虑养分的影响。

2 作物模式与随机天气模型

2.1 作物模式的分析验证

本研究先用 CERES-小麦模式(V2.1)进行计算。CERES-小麦模式可以模拟作物品种特性、耕作措施、土壤水分和养分状况对作物生长发育和产量形成过程的影响^[10,11]。计算的时间步长为一天,自 20 世纪 80 年代推出以来,在包括我国在内的世界许多国家进行了分析、验证和应用^[12,13]。它较好地兼顾了模式的机理性与适用性,软件化程度较高,并注重在世界各地的广泛验证和应用,使之在作物模型中有较高的权威性。

为了验证 CERES-小麦模式在我国的适用性,我们用 1984~1985 年江苏省镇江农业气象试验站(4 个播期)和 1988~1989 年固城农业气象试验基地(4 个播期)的小麦试验资料,对 CERES 模式进行了验证。观测项目包括作物发育期、器官生物量、叶面积变化过程及籽粒产量等。结果表明,模式模拟结果与观测值比较接近。对发育期模拟的平均误差为 4~5 天,对成熟时籽粒产量及其构成(千粒重、每穗粒数和每平方米穗数)、地上生物量和最大叶面系数的模拟误差一般小于 15%,各器官生物量和叶面积系数变化过程的模拟结果与模拟值也非常接近。表 1 为部分模拟结果比较,详细情况见文献^[10,11]。

表 1 镇江和固城农业气象试验基地的模拟误差(发育期为天,其余为%)

	镇江(1984~1985年)				固城(1988~1989年)				平均
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
开花期	- 7	2	4	5	-	-	-	+ 7	5
成熟期	- 9	- 2	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	+ 5	- 1	4
籽粒产量	20.01	0.83	22.15	2.62	0.71	15.68	7.01	27.02	12.0
千粒重	2.41	2.62	0.00	1.22	1.75	17.89	2.07	0.05	3.50
每平方米穗数	23.10	1.91	22.17	6.99	2.46	2.77	5.09	27.39	11.49
每穗粒数	9.98	7.56	15.05	1.61	1.44	31.87	31.14	44.49	17.89
最大叶面积系数	3.88	13.50	5.44	6.65	12.55	14.14	19.67	5.74	10.20
成熟时地上生物量	28.10	26.35	6.69	2.56	9.20	6.89	5.04	23.48	13.54

2.2 参数选取

CERES-小麦模式需要输入土壤水分、养分、品种参数等资料,但在气候变化影响分析中,一方面难以获得各点的详细资料,另一方面,输入资料应有较好的时空代表性,而不是特定地点、年份和特定品种的情况。所以在选取参数时采用如下处理方法:没有考虑养分状况,在输入控制中设为不考虑养分;根据农业区划资料(土壤质地、颜色等)确定土壤水分参数。根据多年平均给出播种前一个月的土壤含水量,经过一个月的计算(蒸发和降水等水分过程),使土壤水分逐步达到平衡,以减小初值的影响,从而使播种时土壤的初始水分较为客观;假定播种期和作物品种基本不变,根据区划资料^[9]确定作物发育参数。

2.3 随机天气模型与资料

本文所用的随机天气模型是根据美国 WGEN 模型^[8]的数学原理,利用我国 51 个站点近 30 年的逐日气象资料建立、调试而成的^[6]。它可以产生逐日最高、最低温度,降水量和太阳辐射资料。根据历史资料对模式进行了大量的验证,其中包括:日平均降水量,平均降水日数(日降水量 ≥ 0.1 mm),大雨(日降水量 ≥ 25 mm)和暴雨(日降水量 ≥ 50 mm)日数,平均日最高、最低气温,最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的日数,最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的日数,平均太阳辐射等,从而使模型有较好的普适性,产生的随机天气资料能基本代表当地的天气状况^[6]。

在根据历史气候资料对模型调试、验证的同时,也得到了一组代表当前气候状况的模型参数。根据区域气候模式对 CO_2 倍增后的气候预测结果,修改相应的模型参数,即可产生 CO_2 倍增后的随机天气资料。为了增强资料的代表性和计算结果的可靠性,对当前和未来气候情景各产生 200 年逐日天气资料,输入作物模式进行计算,然后分析作物发育期和产量的变化(为了避免极端年份数值的影响,取中值进行分析)。

3 结果分析

3.1 发育期变化

水分条件对小麦发育过程影响不大,模式设计中也主要考虑温度的作用。如图 2 为水分适宜条件下春小麦和冬小麦发育期的变化情况(缩短天数)。由图可见,气候变化后,由于温度升高,发育加快,生长期都有不同程度的缩短。冬小麦生长期缩短 1~12 天,平均缩短 7.3 天,春小麦缩短 5~17 天,平均缩短 10.5 天,春小麦生长期缩短较多,考虑到春小麦生长期比冬小麦要短,春小麦生长期缩短的比例要大于冬小麦。这可能是由于春小麦主要分布于北方高纬度地区,这里气候变化后增温幅度较大,同时春小麦生长期较短,对温度变化也更为敏感。

3.2 产量变化

图 3 为水分适宜与雨养条件下冬小麦和春小麦籽粒产量的变化情况(减产百分率),我国西北地区降水较少,没有人工灌溉作物很难生长,所以没有考虑这里的雨养情况。

可见,气候变化后产量均呈下降趋势。对冬小麦而言,水分适宜条件下产量减少 1.6%~12.5%,平均减产 7.0%,雨养条件下减产 0.2%~23.3%,平均减少 7.7%,雨养比水分适宜时减产略大。春麦无水分胁迫条件下减少 7.2%~29.0%,平均减产 17.7%,雨养条件下(没有考虑西北地区)减少 19.8%~54.9%,平均减少 31.4%,雨养条件下减

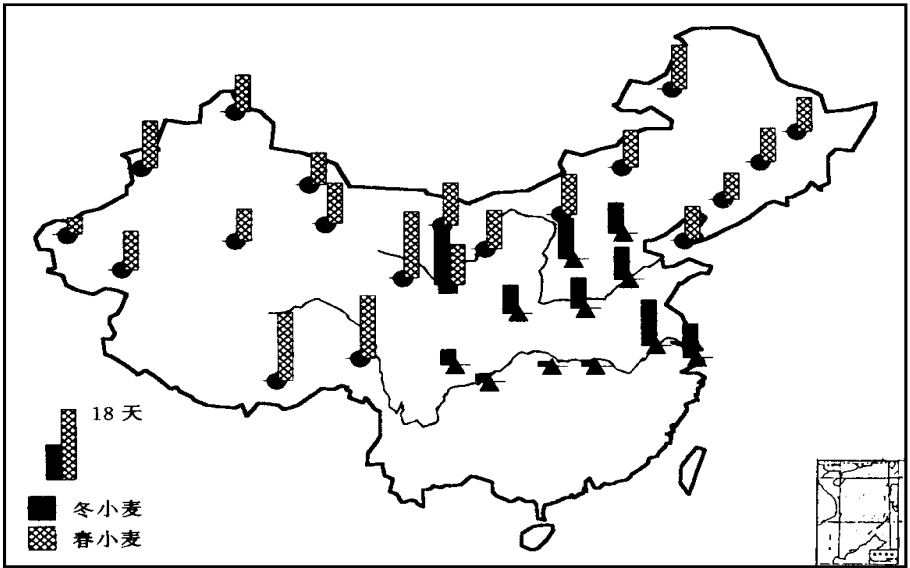


图 2 水分适宜时冬小麦与春小麦生长期的变化
(图例为缩短天数)

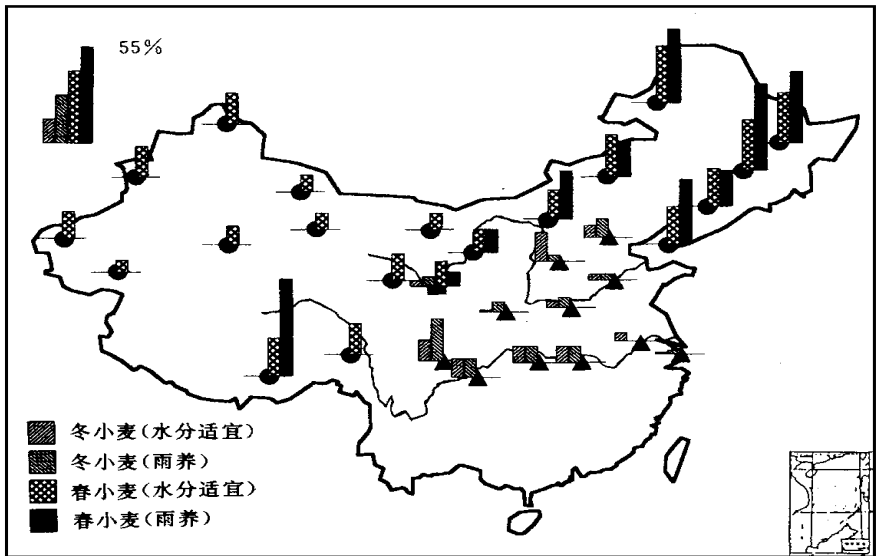


图 3 水分适宜与雨养条件下小麦产量的变化
(图例为减产百分率)

产幅度比水分适宜时明显偏大. 无论在水分适宜或雨养条件下, 春小麦的减产幅度都明显大于冬小麦. 这种差别与生长期的缩短是一致的. 因为作物生长期缩短, 叶面积形成与光合作用时段缩短, 不利于生物量的积累. 可见生长期的缩短可能是造成冬春小麦产量变化

幅度不同的主要原因。

4 结论与讨论

根据区域气候模式对大气中 CO_2 浓度倍增后我国气候情景的预测, 我国主要小麦生产区温度将升高, 大部分地区降水有所增加。若不考虑品种和播种期的变化, 气候变化将使小麦发育加快, 生育期缩短, 冬小麦平均缩短 7.3 天, 春小麦平均缩短 10.5 天, 春小麦生育期缩短的绝对数和相对数均大于冬小麦。籽粒产量呈下降趋势, 冬小麦平均减产 7%~8%, 雨养条件下比水分适宜时减产幅度略大。春小麦的减产幅度大于冬小麦, 水分适宜时平均减产 17.7%, 雨养时平均减产 31.4%。

气候变化不仅直接影响作物的生长发育和产量形成过程, 而且还可能影响作物布局、种植制度和农技措施等。研究表明^[5,6], CO_2 增加引起的气候变化将使我国冬小麦向北扩展, 适宜栽培的品种向减弱冬性方向演化, 这将有助于我国小麦总产的稳定和提高, 当然实际生产还取决于土壤和水分状况。 CO_2 浓度增加通过提高光合效率和水分利用效率将有助于生物量的积累, 但不同试验及模式的具体考虑差异很大, 本文没有考虑 CO_2 的这种直接效应。本研究以数值模拟的方法得到了气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的定量结果, 但这一结果直接取决于气候情景和作物模式的准确性。虽然本研究采用了 3 个 GCM 的预测结果, 但实际上气候模式的预测结果有很大的不确定性, 这种不确定性可能来源于 GCM 本身(模式结构、计算方案、陆面、云和气溶胶的考虑等)和对未来社会经济状况及温室气体排放的假设。目前作物生长模式对物候发育、光合和呼吸作用等主要过程有较强的模拟能力, 但对水分和养分胁迫、灾害性天气及病虫害影响等仍难以很好地定量考虑。因此模式必要的改进和发展都可能使最终结果发生很大变化。可见本研究只是在目前对气候变化及作物生长发育机理认识水平下的大致结果。气候模式和作物模式中众多的因子、过程及简化和假设, 显示了气候变化及其影响研究的复杂性。

致谢: 感谢林而达和王京华同志提供逐日随机天气资料。

参 考 文 献

- 1 Houghton J T, Callander B A, Varney S K (ed). Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 200.
- 2 马丁 P. 气候变化与世界农业. 周光前译. 北京: 气象出版社, 1994.
- 3 张宇. 温室效应与气候变化对农业的影响研究概况. 山东气象, 1991, 3: 1~7.
- 4 Wang Futang, Wang Shili, Li Yuxiang, et al. A preliminary modeling 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. University of California, Davis, California. 1991. 115~126.
- 5 戴晓苏. 气候变化对我国小麦生产影响的模拟研究. 见: 丁一汇, 石广玉主编. 中国的气候变化与气候影响的研究. 北京: 气象出版社, 1997. 513~519.
- 6 林而达, 张厚宣, 王京华, 等. 全球气候变化对中国农业影响的模拟研究. 北京: 中国农业科技出版社, 1997. 142.
- 7 Kimbal B A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. J. A-

- gronol.*, 1983, 75: 779~ 788.
- 8 Richardson C W. Weather simulation for crop management models. *Trans. A. S. A. E.*, 1985, 28(5): 1602~ 1606.
- 9 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.
- 10 张宇. CERES 小麦模式中作物发育过程及器官建成的计算. 见: 气候异常对我国农业影响研究课题组编. 中国气候变化对农业影响的试验与研究. 北京: 气象出版社, 1991. 157~ 162.
- 11 张宇. CERES 小麦模式中土壤水分平衡的计算方法. *气象科技*, 1991, (2): 81~ 85.
- 12 张宇, 赵四强. CERES 小麦模式在我国的初步应用. *中国农业气象*, 1991, 12(3): 11~ 14.
- 13 赵四强, 张宇, 王建林. DSSAT 简介及其应用结果的初步分析. 见: 气候异常对农业影响的试验研究课题组编. 中国气候变化对农业影响的试验与研究. 北京: 气象出版社, 1991. 163~ 169.

RESEARCH ON THE POSSIBLE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON GROWTH AND YIELD OF WHEAT IN CHINA

Zhang Yu

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Wang Shili Wang Futang

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

Abstract

The possible effects of climate change on winter wheat and spring wheat of China are analyzed by using the stochastic weather generator and combining the CERES-wheat model with the climate change scenarios predicted by the climate model with the amount of CO₂ doubled. The results indicate that owing to climate change, the growing season of wheat is shortened, with the growing seasons of winter wheat and spring wheat shortened by 7.3 days and 10.5 days, respectively. Both the absolute and relative values of the shortened quantity for spring wheat are greater than those for winter wheat. Furthermore, the yield decreased due to the climate change. Winter wheat yield decreased by 7% - 8% and decreased more greatly in the rainfed condition than in the optimal water condition. Spring wheat yield decreased more greatly than winter wheat, with a decrease of 17.7% in the optimal water condition and 31.4% in the rainfed condition.

Key words: Climate change Development and yield of wheat Crop simulation model Stochastic weather generator Climate model