

## 气候变化对我国小麦产量的影响

居辉<sup>1,2</sup> 熊伟<sup>1</sup> 许吟隆<sup>1</sup> 林而达<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; <sup>2</sup> 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 本研究采用英国 Hadley 中心的区域气候情景 PRECIS (Providing Regional Climate for Impacts Study), 结合校正的 CERES-Wheat 模型, 对 21 世纪 70 年代(2070s)气候变化情景下我国小麦的产量变化进行了研究。结果表明, 在 PRECIS 预测的 2070s 气候变化条件下, 我国雨养小麦和灌溉小麦的平均单产较基准年(1961 - 1990 平均值)约减少 20%。其中雨养小麦的减产幅度略高于灌溉小麦, 春小麦或春性较强的冬小麦减产明显, 减产的区域主要集中在东北春麦区和西南冬麦区。

**关键词:** 小麦; 气候变化; 影响

**中图分类号:** S512

## Impacts of Climate Change on Wheat Yield in China

JU Hui<sup>1,2</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, XU Yin-Long<sup>1</sup>, LIN Er-Da<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science Beijing 100081; <sup>2</sup> Open Laboratory on Climate Research, Chinese Meteorology Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Wheat (*Triticum aestivum* L.) is the second most important grain crop in China. Understanding the relationship between climate change and wheat yields will not only help to optimize agricultural practices, but also benefit to adapt climate change. The regional climate mode PRECIS (Providing Regional Climate for Impacts Study) and CERES-wheat model were used to simulate wheat yield change under future climate change scenarios. The preliminary results indicated that both the yields of rain-fed and irrigated wheat would be decreased in 2070s by about 20% with climate change. The yields of rain-fed wheat loss more than irrigated wheat, and spring wheat or spring-habit winter wheat would be decreased more than winter wheat and winter-habit wheat with climate change in 2070s. The areas that yield decreased remarkable are located in Northeast China where plants with spring wheat and Southwest China with winter wheat.

**Key words:** Wheat; Climate change; Impacts

地球温室气体增加导致的全球气候变暖已成为人们关注的焦点。政府间气候变化专业委员会(IPCC)第三次评估报告明确指出, 如果不采取任何行动, 到 21 世纪末, 人类活动造成的温室气体增加将使地表平均气温比 1990 年增加 1.4 ~ 5.8℃, 平均海平面增高 9 ~ 88 cm<sup>[1]</sup>, 尽管预测的结果中还有一定的不确定性, 但气候变化对人类的影响已成为公认的事实。

小麦是我国仅次于水稻的第二大作物, 其播种面积占全国耕地面积的 20% ~ 30%。随着全球气候的变化, 我国小麦生产条件势必受到影响, 尤其在我国北方的小麦主产区<sup>[2,3]</sup>。目前, 在气候变化对小麦的影响研究方面, 我国已取得了一些初步结果, 但由于受到气候变化情景以及作物模型的限制, 大多数研究基本采用大气环流模型(GCM)与作物模型耦

合的方法<sup>[4-6]</sup>, 研究中也很少能将 CO<sub>2</sub> 的肥效作用单独考虑。近几年来, 区域气候情景研究的深入及作物模拟技术的提高, 使影响研究得到了深化和发展。本研究采用 PRECIS 输出的区域气候情景和校正的 CERES-Wheat 模型对我国 21 世纪 70 年代(2070s)的小麦产量状况进行了研究, 并对应用过程中出现的一些问题进行了讨论。

### 1 方法

#### 1.1 作物模型

选用美国的 CERES-Wheat 模型, 在未来气候情景下进行模拟, 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、栽培管理等对作物生长发育和产量的影响, 在国家“八五”、“九五”攻关研究及许多相关研究中广泛

\*基金项目: 国家科技攻关项目(2004BA611B02)和中国气象局“气候变化专项”资助(CCSF 2005-2-QH33)。

作者简介: 居辉(1970 -), 博士, 副研究员, 通讯作者, 主要从事气候变化对农业影响评价研究。E-mail: juhui@cjac.org.cn

Received(收稿日期): 2004-03-08, Accepted(接受日期): 2004-12-29.

使用,被证明适用于中国大部分地区<sup>[4,6]</sup>。模型中用“系数订正法”考虑了大气中 CO<sub>2</sub> 浓度对作物产量的影响,即假定某种作物在某个 CO<sub>2</sub> 浓度水平上的光合速率等于它在参比浓度下的光合速率乘以光合作用的订证系数。

由于 CERES 是基于站点计算的模型,在评价过程中对数据的精度要求较高,在区域计算中耗时也较多,所以本研究对 CERES 模型进行了相应的改造,使其能满足区域计算的要求。区域计算步骤包括:在每一网格单元读取相应的气象文件、土壤文件、作物品种参数文件、种植管理文件和社会经济数据,对每一网格单元进行 3 次模拟,分别在优质壤土、黏土和砂土条件下进行,其他初始条件相同,然后根据 3 种土质在网格单元中所占比例进行加权计算,最终得出相应网格单元的产量值。

### 1.2 气候情景

由于高分辨率网格点的区域气候模式可以很好地反映局地气候的地面特征量以及气候本身的变化规律,在影响研究中被认为是一种理想的获取气候变化信息的方法。本研究中采用了英国哈德里中心(Hadley Center)区域气候模型 RCM-PRECIS (Providing Regional

Climates for Impacts Studies),该模型分辨率 50 km × 50 km。许吟隆(2003)对 PRECIS 模型在中国区域模拟能力进行了验证和订正,由 PRECIS 输出的气象资料结果可以表示为日值,直接应用于小麦的模拟。

### 1.3 田间管理措施

小麦的管理措施资料来源于 1998 - 2000 年全国 200 多个农业气象站点的观测数据,资料可以反映我国主要的小麦种植区生产的总体情况,也符合作物模型运行对管理措施的信息要求。

## 2 结果

### 2.1 小麦遗传参数的确定

任何一个小麦品种在生产应用中都具有—定的地区性,特别是我国幅员辽阔,小麦分布广,各地自然环境条件和耕作制度差别很大,对品种的要求也就各不相同。根据各地的气候条件、耕作制度、社会经济要求等差别,我国小麦种植主要分成了 10 个生态类型区(图 1)。研究中假设同一区内种植管理较为一致,所用的品种类型也相对一致,这样便于合理引用相同的基础信息数据,并因地制宜地运用耕作栽培技术,进行产量变化的模拟。

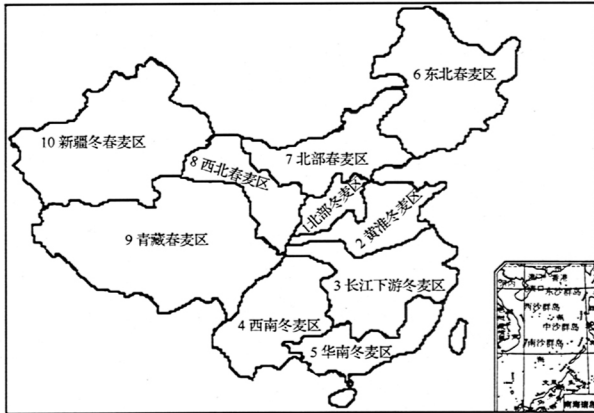


图 1 我国小麦种植的生态类型区  
Fig.1 Chinese wheat planting agro-ecological zones

在 CERES-Wheat 模型中,首先必须确定品种的遗传参数,其计算可应用模型中的 GENCAL 模块。其原理是根据经验初设参数值,然后应用试错法,模型不断计算到误差最小时的参数取值即是品种的遗传参数。遗传参数是品种本身的遗传特征,并在不同环境条件下有不同的发育表现和产量结果。

为了验证遗传参数的代表性,研究采用计算输出的品种参数进行了作物产量的模拟,结果表明(表 1),遗传参数的结果可以代表区域的品种特征,基本上能够反映出产量的动态变化。在计算过程中,生态区 2~9 遗传参数的计算结果模型运转顺利,模拟结果和实际观测结果接近,所有的参数变化幅度也

都在作物模型的原定范围内,但生态区1和10的结果略有出入。北部冬麦区的产量模拟结果和实际结果比较吻合,但其品种遗传参数的变化超过了作物模型遗传参数计算模式中的一般确定范围,分析认为,可能由于输入文件部分观测数据有偏差,导致模

型运算结果误差,另一可能是气象资料、土壤资料和作物试验站点的地理位置上有一定的差异(可能不位于经纬度完全相同的站点上),造成结果的误差,但总体的模拟结果表明,选择的参数可以应用到具体的产量模拟中。

表1 不同生态区域小麦的遗传参数

Table 1 Wheat genotype parameters of different ecological zone

生态区 AEZ	品种 Cultivar	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	模拟产量 Simulated yield	观测产量 Observed yield
1	京411 Jing 411	0.5	4.4	0.1	18.4	9.3	1.9	6 484	6 697
2	鲁麦22 Lumai 22	2.1	3.9	2.0	5.7	3.2	2.2	6 696	6 584
3	881	2.2	3.5	0.4	4.1	2.9	7.5	4 099	3 800
4	绵阳26 Mianyang26	3.0	2.0	2.0	2.3	2.0	1.5	5 363	5 012
5	新59 Xin 59	2.2	2.4	7.5	2.1	2.8	7.2	6 761	6 970
6	克早9 Kehan 9	1.0	8.9	7.3	6	6.5	2.5	5 226	5 176
7/8	水良4 Yongliang 4	0.5	4.7	6.5	3.5	2.5	4.9	3 831	3 705
9	肥麦 Feimai	2.0	5.9	9.8	9.4	1.8	6.3	6 099	6 081
10A	新春6 Xinchun 6	0.1	4.5	9.0	5.6	9.9	2.5	5 986	7 381
10B	冀麦5418 Jimai5418	2.5	5.2	9.8	9.6	9.5	1.0	7 853	8 015

注: P1V = 春化作用特征参数; P1D = 光周期特征参数; P5 = 灌浆特征参数; G1 = 籽粒数特征参数; G2 = 潜在灌浆速率参数; G3 = 花期潜在单茎穗重参数。10A: 新疆春麦, 10B: 新疆冬麦。

Notes: P1V = vernalization parameter; P1D = photoperiod parameter; P5 = grain filling duration parameter; G1 = grain parameter at anthesis; G2 = grain filling rate parameter; G3 = dry weight of a single stem and spike. 10A: spring wheat in Xinjiang; 10B: winter wheat in Xinjiang.

## 2.2 水分条件对小麦单产的影响

IPCC根据社会和人口发展水平,将未来温室气体的排放情景分为4种框架模式,其中A2是非持续模式,B2是区域可持续模式。根据PRECIS模型预估,我国2071-2079年的A2情景较基准年(1961-1990)的平均温度升高3.89℃,降水增加12.86%,B2情景下温度升高3.20℃,降水增加10.23%。总体模拟表明,在PRECIS输出的A2气候变化情景下,2070s我国雨养小麦单产平均减少23.7%,区域间产量变化趋势不同(图略)。

雨养小麦在华北和长江中下游地区有部分增加趋势,增加的幅度在0%~30%。华北地区是我国主要的冬小麦产区,实际种植面积和产量都占到了全国的50%以上,当前该区小麦生产的主要限制因素之一是水分的匮乏,一般小麦生长的灌溉用水量占农业用水量的80%<sup>[9]</sup>。分析认为,华北区雨养小麦在未来气候变化情景下的增产趋势,部分原因可能是降水量的增加。据本研究采用的情景预估,在A2和B2情景下,未来2070s我国华北区的降水量平均增加10%~14%,温度升高3.5~4℃,本区雨养小麦增产趋势说明温度的增加可能还不足以成为小麦生长的决定性限制因素,或是降水增加带来的有利影响足以抵消温度增加的负面作用。长江中下游地区通常雨量和热量充沛,在未来气候变化条件下虽

然温度升高2~3℃,但仍然可以保证当前小麦品种的春化要求,同时又受益于降水的增加,因此也表现一定的增产趋势。

在我国东北、西北春麦区和西南冬麦区,小麦明显减产,减产幅度在30%~60%。目前,西北和东北的小麦生产以春小麦为主,由于温度的升高,如果依然维持当前的种植管理模式,产量会有明显的下降趋势。已有研究建议<sup>[2]</sup>,在未来温度升高的条件下,冬小麦的种植北界可以北移,如在东北适宜的地区改种冬小麦品种或适当提前播种期,都可以降低气候变化对春小麦生产的不利影响。西南冬麦区的减产是由于当前该区种植的小麦多为春性较强的冬麦,其生产的不利因素之一是温度偏高,不利于春化作用和分蘖形成,之二是降水增多阻碍了产量的形成,因此该区也表现出减产的趋势。

在未来气候变化的条件下,如果当前小麦的生态类型区适应性品种没有更替,则全国的春冬小麦普遍减产,春小麦大约平均减产30%~35%;冬小麦平均减产10%~15%,同时研究表明,灌溉可以部分补偿气候变化对小麦的不利影响,补偿的幅度基本在5%之内,但对春小麦的补偿作用略高于冬小麦。

从全国的小麦生产来看,气候变化对灌溉小麦依然存在不利影响,全国平均减产大约20.2%。在灌溉条件下,虽然增产的区域较雨养的多,即使是减产的区域,其幅度也低于雨养小麦,但两者总体产量

变化趋势的区域分布依然类似。

### 2.3 不同气候情景以及 CO<sub>2</sub> 肥效对小麦的影响

从 A2 和 B2 不同气候情景下小麦的产量变化水平看(表 2),两者无论是在变化趋势和变化幅度上差别都不大,说明在 PRECIS 采用的气候模式下,温室气体排放情景 A2 和 B2 对小麦的影响程度基本相似,没有特别显著的差异。如果不考虑 CO<sub>2</sub> 的肥效作用,小麦的减产趋势非常显著,但如果考虑 CO<sub>2</sub> 的肥效作用,则未来小麦的生产仍然表现略微的增长。

表 2 不同气候变化情景下的灌溉小麦产量变化(2070s)  
Table 2 Irrigated wheat yield change under different climate change scenarios (2070s)

情景 Scenario	A2	B2
无 CO <sub>2</sub> 肥效 Without CO <sub>2</sub> fertilization effects	-20.2%	-19.4%
考虑 CO <sub>2</sub> 肥效 With CO <sub>2</sub> fertilization effects	+4.0%	+3.5%

需要特别指出的是,CO<sub>2</sub> 的肥效是否能够表现,与具体的栽培管理措施和水肥条件密切相关。只有在水肥条件充分得到满足的条件下,CO<sub>2</sub> 的肥效才能表现出来。本研究在对 CO<sub>2</sub> 肥效考虑的时候,是假设小麦生长的水肥要求能够完全得到满足,而且小麦生长的周边环境非常适宜,而在现实的生产中,要完全达到这种理想状态,还存在相当大的困难。因此,在考虑未来气候变化影响的时候,对 CO<sub>2</sub> 肥效的评估只是一种参考,具体生产中还要有保守的考虑。

### 3 讨论

遗传参数是 CERES 模型中一个特别关键的指标,正因其为遗传属性,才能保证品种特征不受时间干扰,并在不同的环境条件下有不同的表现规律。虽然遗传参数在理论上存在,并且在具体的试验中也可以得到验证,但往往受到主观因素的作用以及客观环境的干扰,在具体模型计算过程中,研究者根据同一品种不同管理技术下的试验资料,往往很难得到不同试验间相对一致的遗传参数结果。对此问题,CERES 开发人员认为,利用不同观测数据,通过 GENCAL 计算的遗传参数对同一品种而言,应该是一致的;如果结果之间有出入,最大的可能就是输入的基本信息资料不准确。如果研究者能够保证 1 年的资料绝对准确可靠,也可以作为输入信息进行遗传参数的确定。本研究也是基于这样一种理论,完成了小麦遗传参数的确定,对于具体的模拟结果可能会有一定的偏差,但对于相对的变化数值来讲,研究结果还是确定的,可以说明一些问题。应该明确的是,本文中估算的减产程度,并没有考虑到技术进

步和适应措施对小麦产量的补偿作用,而只是基于目前的小麦种植品种、技术和管理条件,只是未来可能的情形之一,如果随着适应措施的应用,气候变化对小麦产量的影响还要乐观一些。

另外,气候变化影响的研究常常由于应用不同的 GCM 而得到不同的结果。本文仅仅应用了一种气候模式探讨未来的小麦产量变化,只能作为未来气候变化影响的情形之一以供参考,如果要得出明确的我国小麦产量变化趋势,还需要作其他气候模式影响结果的分析比较,结果才更科学和完善。

### References

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Working Group II. Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. IPCC WG2 Third Assessment Report (TAR). 2001
- [2] Jin Z-Q (金之庆), Ge D-K (葛道阔), Shi C-L (石春林), Gao L-Z (高亮之). Several strategies of food crop production in Northeast China plain for adaptation to global climate change: a modeling study. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, 28(1):24-31 (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhao X-Y (赵昕奕), Zhang H-Y (张惠远). Sustainable of Chinese agriculture with climate change impacts. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2000, 3:224-227 (in Chinese with English abstract)
- [4] Shi C-L (石春林), Jin Z-Q (金之庆), Ge D-K (葛道阔), Su G-L (苏高利). Gradual effects of climate change on food production and adaptation strategies in the middle and lower valley of Yangtze River. *Jiangsu J of Agri Sci* (江苏农业科学), 2001, 17(1):1-6 (in Chinese with English abstract)
- [5] Wu J-D (吴金栋), Wang S-L (王石立), Zhang J-M (张建敏). A numerical simulation of climate change on water and thermal resource in Northeast China. *Resource Science* (资源科学), 2000, 22(6):36-42 (in Chinese with English abstract)
- [6] Lin E-D (林而达), Zhang H-X (张厚斌), Wang J-H (王京华). Simulation the impacts of global climate change on Chinese agriculture. Beijing: Chinese Agricultural Sci-Tech Press, 1997 (in Chinese)
- [7] Research Team of China Climate Change Country Study. China Climate Change Country Study (中国气候变化国别研究). Beijing: Tsinghua University Press, 1999 (in Chinese)
- [8] Nakicenovic Nebojsa, Rob Swart. Special reports on emissions scenarios. A special reports of working group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge. Unite Kingdom and New York, USA, 2001.599
- [9] Lan L-W (兰林旺), Zhou D-X (周殿玺). Study on Water Saving Technology of High Yield Wheat (小麦节水高产研究). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1995 (in Chinese)
- [10] Xu Y-L (许吟隆), Xue F (薛峰), Lin Y-H (林一骅). Analyses of surface air temperature and precipitation change under different greenhouse emission transient scenarios during 21<sup>st</sup> century over China. *Climate and Environment* (气候与环境), 2003, 8(2):209-217 (in Chinese with English abstract)