

气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析

姚凤梅¹ 张佳华² 孙白妮³ 许吟隆⁴ 林而达⁴ 门艳忠⁵

1 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 黑龙江省环境保护科学研究院, 哈尔滨 150056

4 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

5 黑龙江省科技学院, 哈尔滨 150027

摘要 采用了 DSSAT 作物模式和区域气候模式相连接, 模拟分析了 A2 和 B2 气候变化情景对中国主要地区灌溉水稻产量的影响。气候变化情景采用了 IPCC 发布的 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 系列的最新温室气体排放情景, 气候情景值采用区域气候模式 PRECIS (Provide Regional Climates for Impact Studies) 的模拟值。通过研究站点水稻对 A2 和 B2 增温梯度敏感性的分析表明: 温度增加, 水稻产量呈下降趋势, 随着温度增加, 产量下降幅度增大。且在同一增温水平下, 在南方热带地区的昆明和海口, 产量下降幅度大于其他站点。A2 和 B2 的产量相对于基准年 (1961~1990 年) 的变化分别为: 气候变化对不同站点的年代际水稻平均产量表现了正面或负面的影响 (A2 情景下为 2.3%~ -10.2%, B2 情景下为 4.0%~ -13.6%), 在某一些站点, 水稻高产年和低产年的概率明显增加, 产量分布趋于两极化。

关键词 A2 和 B2 情景 气候变化 水稻产量 中国南方

文章编号 1006-9585 (2007) 05-0659-08 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Simulation and Analysis of Effects of Climate Change on Rice Yields in Southern China

YAO Feng-Mei¹, ZHANG Jia-Hua², SUN Bai-Ni³, XU Yin-Long⁴,
LIN Er-Da⁴, and MEN Yan-Zhong⁵

1 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Heilongjiang Scientific Research Institute of Environment, Harbin 150056

4 Agricultural Environment and Sustainable Development Institute, Chinese
Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

5 Heilongjiang Science and Technology College, Harbin 150027

Abstract This study simulates and analyzes the impact of climate change on rice yields in Southern China using future (A2 and B2) climate scenarios data from PRECIS (Provide Regional Climates for Impact Studies) regional climate model (RCM) and crop model of irrigated rice flowering duration and yield. CERES-rice is first validated using farm experiments data in typical locations ranging in latitude, longitude, and elevation. The simulated results represent satisfactorily the trend of days to flowering and yields. The outputs of RCM are secondly validated

收稿日期 2006-07-31 收到, 2007-07-05 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40641003、40501049, 科技部项目 2006GB24160430、2006AA10Z213 和 2006BAD04B04 以及中国科学院研究生院院长基金

作者简介 姚凤梅, 女, 1968 年出生, 博士, 副教授, 主要从事全球变化及其响应研究。E-mail: yaofm@gucas.ac.cn

through crop model. The simulated flowering duration and yield with simulated weather data from RCM. Analysis sensitivity of rice yields represents increased alone brings more great than others (middle China B2 compared to the baseline at six rice stations). Results show 1) there are increased areas. Cumulative probability is used to analyze change of rice yields under A2 and or decreased (ranging 2.3%—10.2% under A2 scenario and 4.0%—13.6% under B2 scenario in six rice stations). 2) the probability of high or low yields year is higher than the baseline at some rice stations. Results from the impacts assessments suggest that climate change bring positive or negative impacts on averaged rice yields in various locations of study area, and high frequency being abnormal yields year compared to the baseline in some locations.

Key words SRES A2 and B2 scenarios, impact of climate change, rice yields, Southern China

1 引言

水稻是中国第二大作物, 尽管水稻面积占中国作物总面积的 29.1%, 但其产量占中国粮食总产的 43.7%。中国是世界上的最大水稻生产国, 水稻产量的变化不仅对中国, 乃至对亚洲和世界的粮食安全都将产生很大影响。一些学者利用 GCM (Global Climate Model) 模拟的气候变化情景和作物模式预测 CO₂ 倍增情况下的水稻产量的变化^[1~3]。但是由于 GCM 是一个全球模式, 其计算量和输出数据量巨大, 以目前计算机技术水平, 只能输出月值, 但是农业影响评价模型需要的是逐日的天气数据, 因此一些统计方法被采用, 把月值转换成日值水平^[4]。Mearns 等^[5]指出粗网格的 GCM 的模拟和细网格的区域模式 RCM (Regional Climate Model) 比较, 可能会平滑掉一些细小尺度的局地信息变化, 而这些细小区域的变化很大程度影响作物的生长发育。因此, GCM 不能满足提供气候变化影响和适应要求的局地时空尺度的信息^[6]。RCM 降尺度的一种方法, 相对于 GCM 模拟不但加入了局地尺度的气候信息, 而且可以反映气候本身的波动规律^[7,8]。利用 RCM 模拟结果进行气候变化影响评估可以得到可靠的气候变化信息^[9]。

本文采用 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 最新发展的温室气体排放情景 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 系列中代表中高和中低排放的情景 A2 和 B2^[10], 这些浓度情景驱动哈得雷中心的全球模式 HadCM3H 预测全球气候变化, 反过来这些预测的全球气候变化通过细网格 50 km×50 km 的区域气

候模式 PRECIS (Provide Regional Climates for Impact Studies) 区域化^[11~13], 高分辨率的 GCM-HadAM3H 驱动 PRECIS 产生中国区域气候变化情景。

本文用国际上比较普遍使用的 DSSAT 中的 CERES-rice 模式^[14], 模拟气候变化对我国灌溉水稻的影响。在对作物模式标定检验和遗传参数订正的基础上, 模拟各站点水稻产量对 A2 和 B2 情景下的 2020s, 2050s 和 2080s 的全球增温阈值的响应。同时用概率分布方法进一步分离了 2080s 期间水稻产量相对于基准年水稻产量水平下的年际间变化以及年代际的产量变化。本文所采用的作物模型为 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate change) 气候变化评价工具最终报告推荐的 DSSAT 模式中核心部分 CERES-rice 模式, 气候情景为 IPCC 第三次评估报告提供的最新情景。因此本文提供的气候变化对中国水稻的影响模拟结果将为国家和当地的决策者以及气候公约谈判提供科学依据。

2 材料和方法

2.1 研究区域概况

华南、西南和华中三大稻作区的种植面积和产量分别占中国总量的 89.5% 和 88%。本文根据地理分布以及土壤和气候特点选择 11 个站点进行作物模型检验 (表 1)。通过模拟研究站点水稻品种的开花期和产量 (开花期是指水稻从播种到开花的天数), 然后和实测值比较, 检验模型的可靠性, 其中 6 个代表性水稻站点用来模拟预测气候变化情景对产量的影响。华南稻区高温多雨, 夏季长而炎热。西南稻区地处低纬度高原, 为副热

带和温带湿润高原气候。华中稻区气候温暖湿润，夏季炎热，春夏多雨，秋高气爽，冬季较冷，四季分明。

2.2 气候变化情景选取

SRES 系列 CO₂ 浓度梯度增加范围：A2 情景（1859~2100 年）为 286.44~819.9 mL·m⁻³；B2 情景（1859~2100 年）为 286.4~660 mL·m⁻³^[15]。本文选 A2 情景（2071~2080 年）和 B2 情景（2071~2090 年）相对于基准年的情景（1961~1990 年）进行影响模拟分析。气候情景由区域气候模式 PRECIS 模拟产生。

2.3 DSSAT 作物模式介绍

美国的农业技术决策支持系统 DSSAT 模式是对气候变化对农业影响模拟分析领域被广泛使用的作物系列模式^[16~19]。DSSAT 中的 Ceres-Rice 是基于生理过程模拟水稻对气候变化的响应模式。在这个模型中，利用植被冠层辐射利用效率、叶面积指数、消光系数和光吸收来计算净光合速率。模型中设定温度 14~32 ℃ 为水稻的最适光合温度，超过这个范围，采用另一套方法计算积温，并考虑温度对水稻胁迫作用^[20]。模型要求输入逐日天气数据、土壤特性、农业管理措施和品种遗传参数。

2.4 水稻品种选择、参数标定和作物模式的检验

本文的田间试验数据由国家气象中心资料室提供。在研究站点选择 4 个水稻品种种植资料，

其分别是籼优 63、籼稻 898、冈优 22 和广优 136。其中籼优 63 在多个站点多年种植，籼稻 898、冈优 22 和广优 136 在一个站点至少被两年种植，这样可以获得一个稳定、完善的品种遗传参数和保证模型检验的可靠性（表 1）。

作物遗传参数是品种间特性差异的反映，主要表现在作物品种达到一个特定生长阶段所需要的积温、分蘖系数和温度容忍系数。每个水稻品种有 8 个遗传参数：P1 为作物基本营养生长期所需要的温时，P2O 为以最大速率发育的关键光合期，P2R 开始抽穗的光合敏感期，P5 为完成灌浆期所需温时，G1 为潜在穗数系数，G2 和 G3 为理想情况下的千粒重和分蘖系数，G4 温度容忍系数。在确定品种遗传参数时，首先将品种的田间试验数据输入模型，设定品种遗传参数初始值，并运行模型，然后对比模拟值和观测值间的误差，订正遗传参数，直至模拟值和观测值接近为止。

4 个品种的水稻田田间试验被用来标定模型计算各品种遗传参数，另外 19 个水稻大田试验被用来检验作物模型（不包括用来计算遗传参数年份的试验）。这些实验数据主要包括播种期、出苗期、开花期和成熟期、叶面积以及产量构成要素（包括单位面积生物量、穗数、粒数和产量等）和田间管理措施（施肥等）。本文采用均方根法模拟分析作物模型的精度，这种方法在农业试验调查研究中普遍使用的。

表 1 检验、标定模型和预测产量的研究站点信息

Table 1 Stations selected for calibration and validation of crop model and projection of yields

编号	站点	经纬度	海拔/m	品种	年份	土壤类型
1	武汉 *	30°37'N, 114°08'E	23.3	籼优 63	1992, 2000	砂粘土
2	合肥 *	31°52'N, 117°14'E	27.9	籼稻 898	1996 ^c , 1999, 2000	砂质粘壤土
3	南昌	28°36'N, 115°55'E	46.7	籼优 63	1994	粘壤土
4	南宁	22°49'N, 108°21'E	73.0	籼优 63	1999	砂粘土
5	成都 *	30°40'N, 104°01'E	506.1	冈优 22	1999, 2000 ^c	粘土
6	贵阳	26°19'N, 105°45'E	1274.0	籼优 63	1994, 1998, 1999	砂粘壤土
7	金华	29°07'N, 119°39'E	62.6	籼优 63	1994	粘壤土
8	昆明 *	25°01'N, 102°41'E	1891.4	广优 316	1988, 1989 ^c	粘壤土
9	海口 *	20°02'N, 110°21'E	14.1	籼优 63	1986, 1987, 1991	砂质粘壤土
10	贵州	23°08'N, 113°19'E	66.0	籼优 63	1995, 1996, 1998	粘壤土
11	福州 *	26°05'N, 119°17'E	83.8	籼优 63	1991 ^c , 1992	粘壤土

注：c 为标定作物品种遗传参数的试验，* 指用来预测水稻产量的站点

2.5 检验 PRECIS 输出驱动物物模式的能力

天气是影响作物生长的关键因素。对气候模式输出驱动物物模式的能力进行模拟分析时是十分必要的。Jones 等^[21]利用 GCM 模拟分析气候变化对欧洲甜菜的影响时,通过作物模式检验气候模式输出的可靠性。本文利用 ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) 15 年 (1979~1993 年)再分析数据作为准观测边界条件驱动 PRECIS 模拟再现 1979~1993 年的天气数据,利用被订正和未被订正模拟天气数据驱动物物模式模拟 1982~1993 年研究站点的水稻产量和开花期,然后通过对产量和开花期模拟和观测值的对比,模拟分析 PRECIS 输出驱动物物模式的能力和订正方法的可行性。对模拟的温度和降雨天气数据分别采用增量和比值订正法。

2.6 气候变化对水稻产量影响的模拟分析

根据 IPCC 提供的气候变化影响模拟分析思想和国际上的相关研究^[22,23]:以基准年 1961~1990 年的 30 年平均为标准,可以用未来的某一年或某一时段和基准年的 30 年平均相比较来模拟分析气候变化的影响。

未来由于温室气体增加而导致温度增加是气候变化最主要特征,IPCC 提供的 SRES 系列 A2 和 B2 情景下的 GCM 预测的 2020s (2010~2039 年)、2050s (2040~2069 年)和 2080s (2070~2099 年)温度增加阈值: +0.9 °C, +1.5 °C, +2 °C, +2.6 °C 和 +3.9 °C。应用这些温度增量分别订正基准年气候资料的温度要素,而其他气候要素不变,就得到 5 种相对于基准年气候要素改变 (温度要素)的简单组合,在这些组合下运行作物模型模拟不同站点水稻产量,模拟分析不同站点水稻产量对不同增温阈值的响应。应用概率分布的方法分析 A2 (2071~2079 年)和 B2 (2071~2090 年)气候变化下水稻产量分布。

3 结果与分析

3.1 DSSAT 作物模式和 PRECIS 输出检验

通过开花期和产量的模拟和实测值的对比分析可以看出 (图 1、2):观测和模拟值之间有很好的 consistency。对开花期和产量的模拟误差分布在 ±10% (RMSD=880 kg·hm⁻²) 和 ±15% (RMSD

=7.6 d) 的观测值范围内。

如果不考虑病害和害虫的影响,参考国际上其他国家对此模型的应用结果^[22],模型模拟误差在合理的范围内。需要说明的是由于试验资料的限制,本文用来检验模型的样本试验有的地点只有 1~2 个,还有待于采用更多的样本进行模拟检验。图 3 和 4 是分别用模拟的天气数据和观测的天气数据驱动物物模式的模拟结果作对比,结果表明订正后的天气数据明显好于未被订正的。

这两个模拟值 (用订正的和观测的天气数据模拟开花期和产量) 的对比分布在 1:1 趋势线附近,呈现出很好的线性相关,其相关方程为 $y = 0.995x$ ($r = 0.88$, 开花期) 和 $y = 0.996x$ ($r = 0.76$, 产量),通过 $F_{0.01}$ 水平的显著性检验。这表明订正后的 PRECIS 输出值能较满意驱动物物模式。

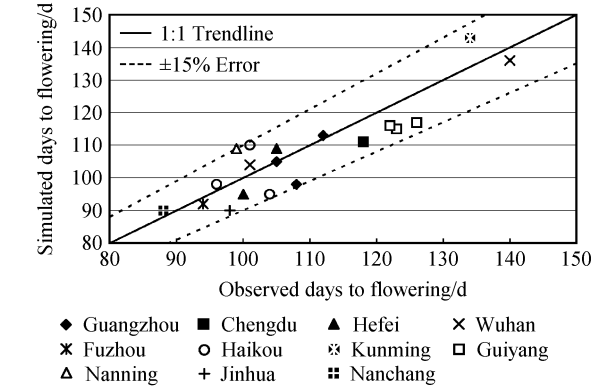


图 1 模拟和观测开花期对比结果
Fig. 1 Comparative the results from simulated and observed days to flowering

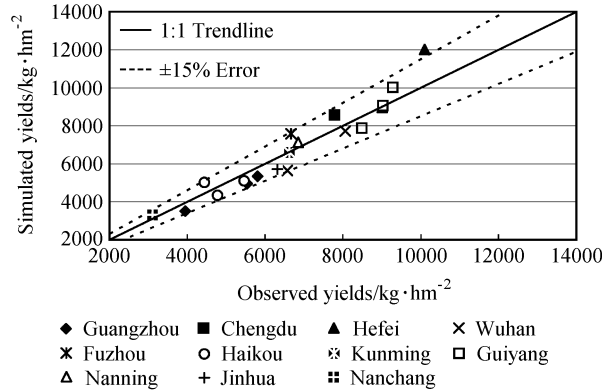


图 2 模拟和观测产量对比
Fig. 2 Comparative the results from simulated and observed yields

3.2 气候变化对水稻产量的影响

图 5 给出了相对于基准年不同增温幅度下模拟的水稻产量变化，模拟结果表明：随着温度增

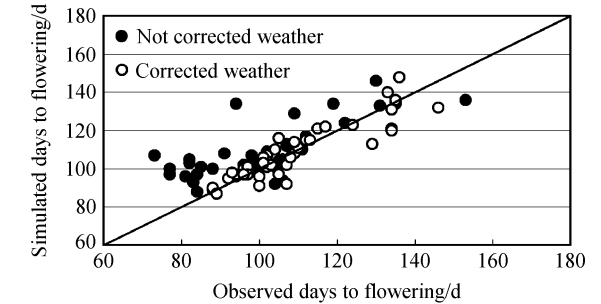


图 3 分别用订正和未订正 PRECIS 输出值模拟开花期和观测开花期的对比结果

Fig. 3 Comparative the results from observed days to flowering and simulated days to flowering with not-corrected and corrected daily weather simulated by PRECIS

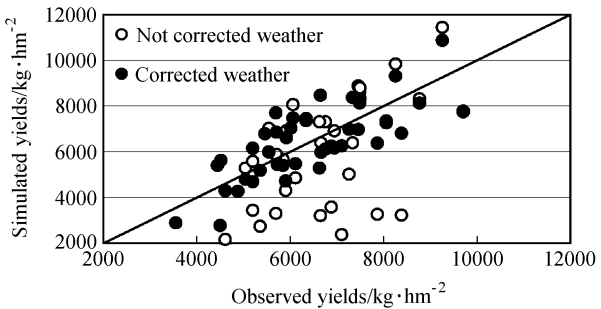


图 4 分别用订正和未订正 PRECIS 输出值模拟产量和观测产量的对比结果

Fig. 4 Comparative the results from observed yields and simulated yields with not-corrected and corrected daily weather simulated by PRECIS

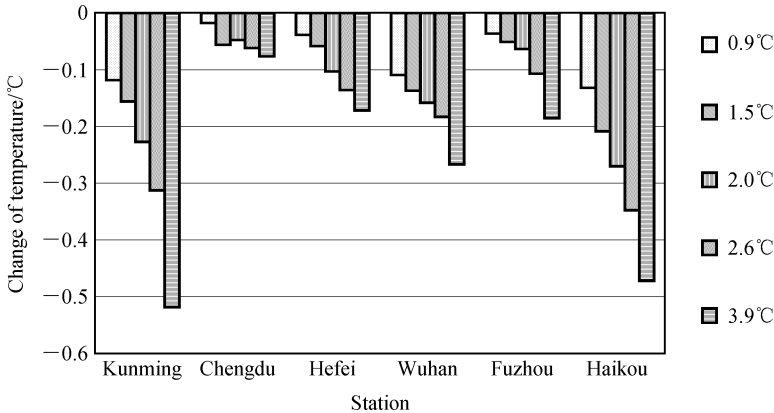


图 5 相对基准年增温度分别为 0.9℃、1.5℃、2℃、2.6℃ 和 3.9℃ 时水稻产量相对变化

Fig. 5 Relative changes of rice yield when temperature increased 0.9℃, 1.5℃, 2℃, 2.6℃ and 3.9℃ over baseline climate compared with baseline yields

加，模型模拟的产量呈减少趋势，对于同一增温水平，不同品种和同一品种不同站点的水稻产量对温度的响应程度不同。产量降低的幅度由大到小排列次序是昆明、海口、武汉、合肥、福州和成都站点，相对于基准年的情景增温范围（+0.9℃，+1.5℃，+2℃，+2.6℃ 和 +3.9℃），各站相应的产量下降分别为 11.8～51.8%，1.7～76%，3.8～17.2%，10.8～26.7%，3.6～18.5% 和 13.1～47.2%。其中高温（+3.9℃）对昆明、海口和福州产生较大的负面影响。

图 6～11 是基准年和气候情景年际产量变化的概率分布。这里把产量降序排列，基准年的产量发生概率为 25%，50% 和 75% 定义为第一（高产）、第二（平年）和第三产量（低产）水平。

下面分别就 A2 和 B2 情景相对于基准年进行分析。A2 情景（2071～2080）：在昆明和武汉站（图 6 和 9），气候变化对年际内产量总是带来负面影响。在合肥、武汉、成都和昆明（图 7～9），第三产量水平的概率小于基准年，表明 A2 情景气候变化使低产年出现的概率大于基准年。在福州和海口站点，情景产量概率分布曲线大部分分布在基准年的上方，这表明 A2 气候变化情景带来正面影响年份多。从多年平均来看，合肥、海口、成都、福州、昆明和武汉各站点的产量偏移分别是 2.3%，1.5%，0.17%，-1.1%，-5.4% 和 -10.2%（图 12）。

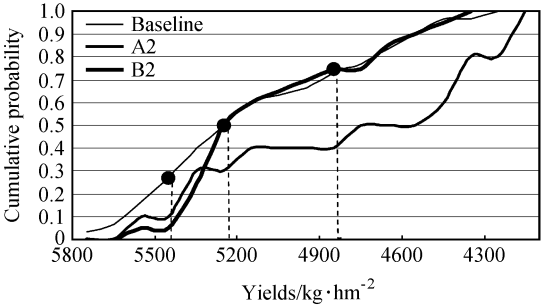


图 6 昆明站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 6 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Kunming. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

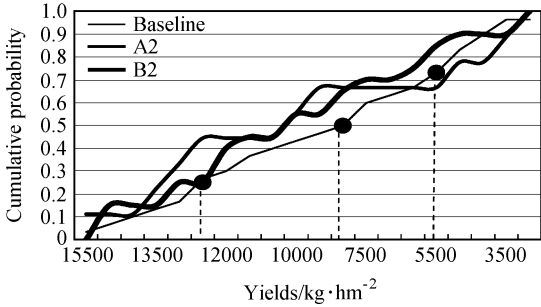


图 8 合肥站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 8 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Hefei. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

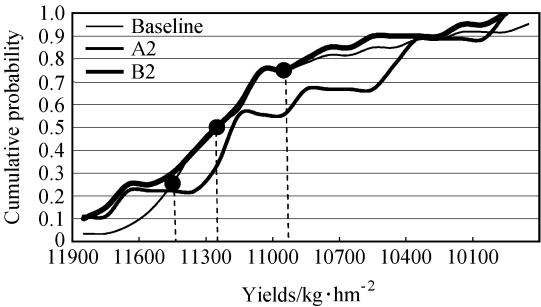


图 7 成都站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 7 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Chengdu. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

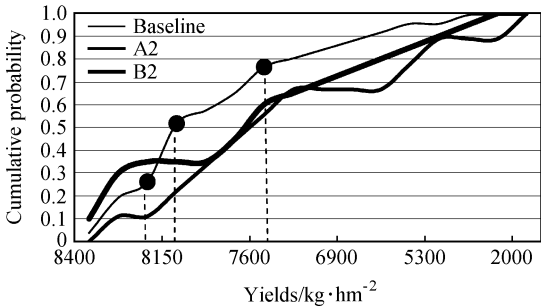


图 9 武汉站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 9 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Wuhan. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

B2 情景 (2071~2090 年): 在海口、武汉和福州, 第三产量水平出现的概率相对于基准年减少, 而第一产量水平出现的概率相对于基准年增加, 这表明气候变化增加了极端产量 (高产或低产) 的概率 (图 9、10 和 11)。在合肥, B2 气候变化情景带来正面影响年份多 (图 8)。在成都和昆明, 第二和第三产量水平的产量年出现概率接近于基准年, 第一产量水平的产量年出现概率分

别大于和小于基准年 (图 6 和 7)。合肥、成都、昆明、武汉、海口和福州多年产量平均偏移分别是 4.0%、1.9%、-0.15%、-3.3%、-7.1% 和 -3.6% (图 12)。

4 结语和讨论

基于以上分析可以看出, 增加温度, 水稻产

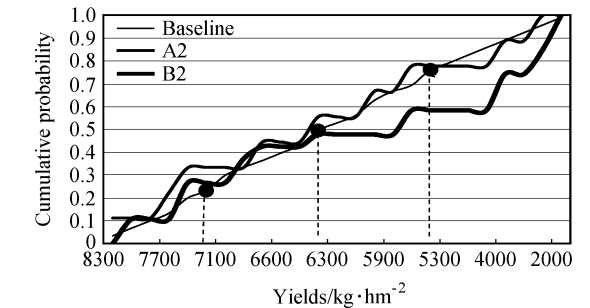


图 10 福州站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 10 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Fuzhou. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

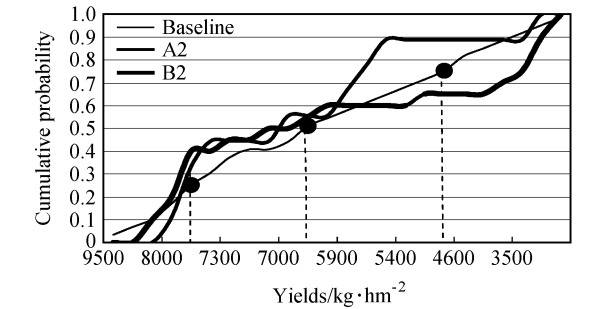


图 11 海口站点在一定产量水平下的产量累计概率分布, 和 x 轴相交的点分别指基准年产量概率分布分别是 25%, 50% 和 75% 时的产量水平, 实心圈指在此产量水平下的基准年产量累计概率

Fig. 11 Cumulative probability distribution of being more than certain yields level in Haikou. The rice yields levels of probability being 25%, 50% and 75% are indicated by the dash in X axes. The probability of being more than certain yields levels with baseline are indicated by the dot in the baseline case

量呈下降趋势, 随着温度不断增加, 产量下降幅度也越大。且同一增温水平下, 在中国南方地区的昆明和海口, 产量下降幅度大于其他站点。A2 和 B2 的产量相对于基准年 (1961~1990 年) 的变化分别为: 气候变化对不同站点的年代际水稻平均产量表现了正面和负面的影响 (A2 情景下为 2.3% ~ -10.2%, B2 情景下为 4.0% ~ -13.6%), 在某些站点, 水稻高产年和低产年的

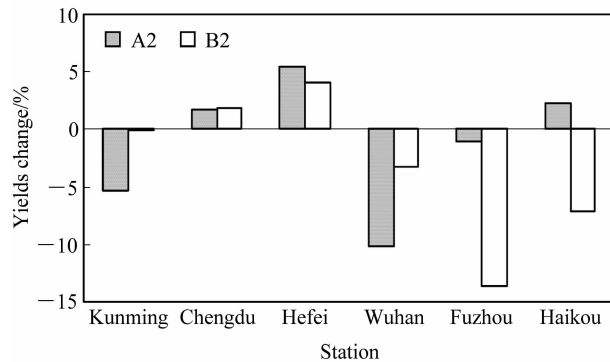


图 12 A2 和 B2 气候变化情景下各站点水稻平均产量相对于基准年的产量偏离

Fig. 12 The deviation of rice yields compared A2 and B2 scenarios with the baseline at rice ecological stations

概率明显增加, 产量分布趋于两极化。

在本研究区, A2 和 B2 气候变化情景对水稻产量既有正面也有负面的影响, 视不同地点而异。一些站点年际间的产量水平概率分布表明, 异常天气气候事件发生频率加大导致产量异常年的增加。因此, 国家制定农业对气候变化的适应措施时, 应因地制宜, 结合各地区和当地农业对气候变化的响应, 本文目的亦是为国家和地方的农业决策者在制定适应气候变化方案时提供科学依据。

参考文献 (References)

[1] Jin Z, Geng D, Chen H, et al. Effects of Climate Change on Rice Production and Strategies for Adaptation in Southern China. Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modelling Study, U. S. Climate Change Division Report, EPA, 230-B-94-003, 1994. 1~24

[2] 姚凤梅, 许吟隆, 冯强, 等. CERES-Rice 模型在中国主要水稻生态区的模拟及其检验. 作物学报, 2005, 31 (5): 545~550

Yao Fengmei, Xu Yinlong, Feng Qiang, et al. Simulation and Validation of CERES-Rice Model in Main Rice Ecological Zones in China. *Acta Agronomica Sinica* (in Chinese), 2005, 31 (5): 545~550

[3] 夏祥鳌, 王馥棠. 大气环流模式与春玉米生长模拟模式联接的影响评估模拟试验. 气候与环境研究, 1998, 3 (3): 247~252

Xia Xiang'ao, Wang Futang. Simulation Experiment of Impact Assessing on Linking of GCM and Spring Growth Simulation Model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, 3 (3): 247~252

- [4] Semenov M A, Barrow E M. Use of stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 1997, **35**: 397~414
- [5] Mearn L O, Easterling W, Hays C, et al. Comparison of agricultural impacts if climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios. Part I: The Uncertainty due to Spatial Scale. *Climatic Change*, 2001, **51**: 131~172
- [6] Laprise R, Jones R, kirtman R, et al. Atmospheric regional climate models (RCMs): A multi-purpose tool? Report of the Joint WGENE/WGCM ad hoc Panel on Regional Climate Modeling, 2002. 19pp
- [7] Wilby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: Review of method and limitations. *Prog. Phys. Geog.*, 1997, **21**: 530~548
- [8] Met Office. The Hadley Centre regional climate modeling system, PRECIS-Update 2002. 16pp
- [9] 符淙斌, 王淑瑜, 熊喆, 等. 亚洲区域气候模式比较计划的进展. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 225~239
Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. Progress report on regional climate model inter-comparison project for Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 225~239
- [10] IPCC. Climate Change 2001: *The Scientific Basis Climate Change 2001 Synthesis Report*. UK: Cambridge University Press, 2001. 61~70
- [11] Gordon C, Cooper C, senior C A, et al. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Center coupled model without flux adjustments. *Climate Dyn.*, 2000, **16**: 147~168
- [12] Noguier M, Jones R, Hassell D, et al. Ed. *PRECIS Workbook: Workbook on Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS*. Bracknell, UK: The Hadley Center for Climate Prediction and Research, Met Office. 2002
- [13] Wilson S S, Hassell D C, Hein D, et al. *Installing and Using the Hadley Centre Regional Climate Modeling System PRECIS* (Version 1.0). Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004
- [14] Singh U, Godwin D C, Ritchie J T. CERES-rice in DS-SAT v3. In: *DSSAT v3*. Tsuji G. Y, Uehara G and Balas S, Ed. USA, Hawaii, Honolulu: University of Hawaii, 1994
- [15] IPCC. Emissions Scenarios. Special Report on Emissions Scenarios. In: *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Joseph A, Gerald D, et al, Eds. New York: Cambridge University Press, 2000. 24~29
- [16] Weiss A, Cynthia J, Hays C, et al. Assessing winter wheat responses climate change scenarios: A simulation study in the U. S. Great Plain. *Climatic Change*, 2003, **58**: 119~147
- [17] Aggarwal P K, Mall L R K. Climate change and rice yield in diverse agro-environments of Indian. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. *Climatic Change*, 2002, **52**: 331~343
- [18] 姚凤梅, 张佳华. 中国北方农牧交错带农作物产量时空格局与情景预测研究进展. 农业工程学报, 2005, **21** (1): 173~177
Yao Fengmei, Zhang Jiahua. Progresses of study on pattern of crop production of Northern China Agriculture and Animal Husbandry Interlaced Zone and prediction under climate changes on spatial-temporal scales. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (in Chinese), 2005, **21** (1): 173~177
- [19] Rosenzweig C, Iglesias A. The use of crop models for international climate change impact assessment. In: *Understanding Options for Agricultural Production*, Tsuji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K, Eds. London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 267~292
- [20] Ritchie J T, Singh U, Godwin D C, et al. Cereal growth, development and yield. In: *Understanding Options for Agricultural Production*, Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton P K, Eds. Doordrecht the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. 79~98
- [21] Jones P D, Lister D H, Jaggard K W, et al. Future climate impact on the productivity of sugar beet in Europe. *Climatic Change*, 2003, **58**: 93~108
- [22] Ghaffari A, Cook H F, Lee H C. Climate change and wheat management: A modeling scenarios for South-eastern England. *Climatic Change*, 2002, **55**: 509~533
- [23] Mearns L O, Rosenzweig C, Goldberg R. Effect of changes in interannual climatic variability on CERES-wheat yields: Sensitivity and $2 \times \text{CO}_2$ general circulation model studies. *Agriculture for Meteorology*, 1992, **62**: 159~189