

# 气候及其变率变化对长江中下游稻区水稻生产的影响

葛道阔 金之庆\* (江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; \* 通讯联系人, E-mail: zhiqingjin@163.com)

## Impacts of Climate Change and Its Variability on Rice Production in the Middle and Lower Valley of the Yangtze River, China

GE Dao kuo, JIN Zhi qing\*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

\* Corresponding author, E-mail: zhiqingjin@163.com)

Abstract: Three hypothesis involving increase in climate variability(CV) in future (no change, 10% increase and 20% increase) were made, with which and outputs of the three GCMs (GISS, GFDL and UKMO), combined with the local Baseline weather at 19 sites in the middle and lower valley of the Yangtze River, China, 9 doubled CO<sub>2</sub> climate change scenarios with CV consideration were generated using the weather generator(WGEN) in the Decision Support System for Agriculture Transfer (DSSAT) at each site. The genetic parameters of the CERES Rice were modified using the Try and Error method and then calibrated and validated to examine its suitability in the studied regions, adopting the local statistical yield data (1979 - 1998), combined with the local rice ecological experiments or regional varietal trials, as well as the synchronous meteorological and soil data at each site. Finally, the CERES Rice was run again under the 9 scenarios and the Baseline, combined with the computation of evapotranspiration ratio ( ) and the fluctuation coefficient, the effects of both climate change and its variability (CC + CV) on rice production were assessed. The main results of this study were as follows: when CO<sub>2</sub> doubled, with increase of CV, the heat damage induced by high temperature would become increasingly acute for different patterns of rice cropping systems in the studied regions, meanwhile, the low temperature stress would be significantly weakened for both early and late rice; There might be no obvious change in moisture conditions during rice growing season, but the probabilities occurring seasonal drought and rainstorm would increase; Rice growth duration under different cropping systems or irrigation patterns in the studied regions would be significantly shortened, however, CV exerted no effect on rice growth duration; The simulated yields of both single and double cropping rice, including irrigated and rainfed rice would be obviously reduced under the CC + CV scenarios, compared with that under the CC scenarios and the yield reduction in the middle valley would be greater than that in the lower valley of the Yangtze River, single cropping and late rice would be more significant than early rice and decreasing yield under the UKMO and GISS scenarios would be more serious than that under the GFDL scenario; With increasing CV, not only the simulated yields further decreased compared with the control ( CV = 0%), but also the yield stability reduced, indicating that the yield fluctuation coefficient would increase, however, perfect irrigation conditions would mitigate the yield fluctuations differing in years.

Key words: rice production; climate change; climatic variability; air carbon dioxide enrichment; simulation model

摘要: 在长江中下游稻区选择 19 个样点, 将每个样点近 20 年(1979 - 1998 年)的水稻产量资料及同期气象资料分为两组, 一组结合当地水稻生态试验或品种区域试验资料用于 CERES Rice 模型中遗传参数的调试, 另一组用于检验该模型在研究区域的适用性。通过对未来气候变率变化( CV)的 3 种假设并利用 WGEN(天气生成器) 将每个样点基于 3 种平衡 GCM(大气环流模型)的 CO<sub>2</sub> 倍增气候变化情景文件改进为兼顾气候及其变率变化(CC+ CV)的 9 种情景文件。在上述各情景文件下分别运行 CERES Rice, 并将模拟结果与本底气候 (Baseline)下的模拟值进行比较, 再结合蒸散比( )和产量波动系数等算法, 评价了 CO<sub>2</sub> 有效倍增时 CC+ CV 对长江中下游稻区水稻生产的影响。结果表明, 当 CO<sub>2</sub> 有效倍增时, 随着 CV 的增大, 不同稻作制度下水稻高温热害将愈演愈烈, 早稻和晚稻受低温威胁将显著减轻; 水稻生长季内干湿状况较目前无明显差异, 但季节性干旱和暴雨的发生频次呈增加之势; 研究区域不同稻作制度下的水稻生育期均明显缩短, CV 增大对生育期无显著影响; 不论是单、双季稻, 还是灌溉或雨育水稻都显著减产, 其中中游稻区的减产幅度大于下游稻区, 单季稻和晚稻的减产幅度大于早稻, UKMO、GISS 情景下的减产幅度大于 GFDL 情景; 研究区域不同稻作制度下的水稻进一步减产, 且稳产性变差, 但良好的灌溉条件可以减缓水稻产量的年际波动。

关键词: 水稻生产; 气候变化; 气候变率变化; 大气二氧化碳浓度升高; 模拟模型

中图分类号: S161; S165; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2009)01-0057-08

长江中下游稻区河网纵横、土壤肥沃, 水稻生长季内温、光、水同步变化, 加之农民素有精耕细作习惯, 是中国乃至世界著名的水稻产区。该区稻作制度单、双季稻兼具, 品种类型粳、籼及杂交稻咸宜, 以占全国 19% 的耕地生产出约占全国 51% 的稻谷<sup>[1-2]</sup>。

20 世纪 80 年代以来, 受全球气候变暖的影响, 长江中下游稻区水稻生长季已出现持续增温现

象<sup>[3]</sup>。预计未来几十年, 随着气候迅速增暖以及气候变率 (climate variability, CV) 的增大, 长江中下游地区特别是湖北和湖南将成为我国南方稻区中增温最显著的区域之一, 高温、洪涝和季节性干旱等灾

收稿日期: 2008-02-25; 修改稿收到日期: 2008-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370815, 30470332)。

第一作者简介: 葛道阔(1964-), 男, 副研究员, E-mail: Gedk@tom.com。

害性天气的发生频率亦将明显增加 [45]。但以往有关气候变化对作物生产影响评价的模拟研究,一般仅着眼于温、光、水、气等气象要素变化所带来的后果,对未来气候变率变化可能造成的影响则较少考虑 [4-9],而后者与灾害性天气的发生频率有关,对作物生产的影响至关重要。罗群英等 [10] 曾就气候变率改变对水稻产量的影响进行过简单分析,但因选点过少,各点的分析结果又大相径庭,难以给出明确结论。本研究在早先研究的基础上,选择研究区域内的 19 个样点,通过未来气候变率变化的 3 种假设,结合 3 种平衡 GCM (大气环流模型) 的有关输出值,并利用美国 DSSAT (Decision Support System for Agriculture Transfer) 中的 WGEN (weather generator),生成了每个样点 9 种兼顾气候及其变率变化的 CO<sub>2</sub> 有效倍增情景,然后在这些情景下分别运行 CERES Rice 模型,并将模拟结果与气候变率不变 (CV = 0) 情景下的模拟值进行比较,再结合气候学上的蒸散比 ( )、经济学中的产量波动系数等算法,就气候及其变率变化对研究区域水稻生产的影响做出定量评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 稻区划分及样点选择

以江西省鄱阳湖的湖口镇为界,将研究区域分为长江中游与下游两部分,共选择 19 个样点开展本

研究,各样点基本信息见表 1。

### 1.2 资料来源

水稻产量资料 (1979—1998 年) 取自 19 个样点所在省、市的农业年鉴或农业经济统计资料,主要用于调试确定 CERES Rice 模型中与产量有关的遗传参数并检验模型;模型其他输入资料,包括播种期、成熟期、株行距、种植密度等,分别取自中国水稻研究所和有关省、市农业科学院的水稻生态试验或品种区域试验 (1991—1994 年),主要用于模型输入和调试与生育期有关的其他遗传参数。近 40 年 (1961—2000 年) 的逐日气候资料 (Baseline) 取自《中国地面气象记录》和《中国太阳辐射资料逐年日值》,由本项目组的数据库中调用。各样点代表性土类、典型剖面资料,包括不同深度土壤特性及理化结构等,根据文献 [11] 加以确定。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 有效倍增时气候变化情景的生成

#### 1.3.1 不考虑气候变率 (CV) 的情景 (CC 情景)

本情景只考虑 CO<sub>2</sub> 有效倍增 (555 μmol/mol) 时各气候要素的变化,不考虑 CV 的可能变化,简称气候变化 (climate change, CC) 情景。CC 情景的生成主要参照文献 [4] 的方法,即首先提取 3 种平衡 GCM (GISS、GFDL 和 UKMO) 在研究区域的有关网格点值 (grid point value),包括 CO<sub>2</sub> 有效倍增时各月平均气温的增幅 (ΔT) 以及降水量和太阳辐射总量的变幅 (R 和 S),然后以之分别与各样点

表 1 长江中下游地区 19 个样点的稻作类型和土壤类型

Table 1. Rice cropping patterns and soil types at 19 sites in the middle and lower valley of the Yangtze River, China.

稻区与样点 Rice growing region and site	主要稻作类型 Rice cropping pattern	典型土壤类型 Typical soil type
长江下游 The lower valley of the Yangtze River		
江苏南京 Nanjing, Jiangsu	单季稻 Single cropping rice	黄棕壤 Yellow brown soil
江苏扬州 Yangzhou, Jiangsu	单季稻 Single cropping rice	水稻土 Paddy soil
江苏南通 Nantong, Jiangsu	单季稻 Single cropping rice	盐土 Solonchak
安徽合肥 Hefei, Anhui	单季稻 Single cropping rice	水稻土 Paddy soil
安徽芜湖 Wuhu, Anhui	单季稻 Single cropping rice	棕红壤 Brown red soil
安徽安庆 Anqing, Anhui	单季稻 Single cropping rice	黄棕壤 Yellow brown soil
上海 Shanghai	单季稻 Single cropping rice	水稻土 Paddy soil
浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	双季稻 Double cropping rice	水稻土 Paddy soil
浙江宁波 Ningbo, Zhejiang	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
浙江金华 Jinhua, Zhejiang	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
长江中游 The middle valley of the Yangtze River		
江西南昌 Nanchang, Jiangxi	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
江西九江 Jiujiang, Jiangxi	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
江西景德镇 Jingdezhen, Jiangxi	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
湖北武汉 Wuhan, Hubei	双季稻 Double cropping rice	黄棕壤 Yellow brown soil
湖北荆州 Jingzhou, Hubei	双季稻 Double cropping rice	水稻土 Paddy soil
湖北黄石 Huangshi, Hubei	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
湖南长沙 Changsha, Hunan	双季稻 Double cropping rice	红壤 Red soil
湖南岳阳 Yueyang, Hunan	双季稻 Double cropping rice	水稻土 Paddy soil
湖南常德 Changde, Hunan	双季稻 Double cropping rice	紫色土 Purplish soil

Baseline 中相应月份的逐日气候资料叠加或相乘，以形成长度与 Baseline(40 年)相同的 CC 情景文件。这也是国内外学者最常用的方法。

### 1.3.2 考虑 CV 的情景 (CC + CV)

本情景是在 CC 情景的基础上，对温度和降水变率的可能变化做进一步考虑，故简称 CC + CV 情景。其生成步骤如下：假定研究区域未来 CV 的可能变化服从 3 种假设，即：CV = 0% (对照)，CV = 10%，CV = 20%；将各样点不考虑 CV 变化的 CC 情景文件分别输入 WGEN，并提取温度和降水量的方差，根据以上假设，不改变温度和降水量的均值，仅改变其方差；将改变后的方差回代 WGEN，以生成各样点基于 3 种 GCM、长度各为 40 年的 CC + CV 情景文件，分别用 CV0% (对照)、CV10%、CV20% 来表示。需说明的是，改变温度方差较为简单，只要将原方差直接乘以 100%、110% 和 120% 即可，但改变降水量方差比较复杂，因为 WGEN 中的雨量模型(分布)涉及 2 个参数，即形状参数和尺度参数。本研究采用的方法是将分别除以 100%、110% 和 120% 的平方，分别乘以 100%、110% 和 120% 的平方<sup>[11-12]</sup>。

## 1.4 效应模型

效应模型 (effect model) 选用美国的 CERES Rice。它是一种机理性较强的水稻生长模型，可以模拟气候、土壤、基因型和栽培管理对水稻生长发育和产量的影响，已在美国和东南亚国家广泛使用<sup>[4,14]</sup>，20 世纪 90 年代开始应用于气候变化影响评价研究。本研究针对研究目标，在模型中还考虑了大气 CO<sub>2</sub> 浓度增长对水稻光合作用与蒸腾作用的直接影响，即假定水稻在 CO<sub>2</sub> 有效倍增 (555 μmol/mol) 下的光合速率等于它在参比浓度 (330 μmol/mol) 下的光合速率乘以光合作用订正系数 C (本文取 C = 1.17)<sup>[4,15]</sup>；水稻在 CO<sub>2</sub> 有效倍增时的蒸腾速率与其气孔阻抗( )增大有关 (本文取 = 49.7 s/m)<sup>[4]</sup>。CERES Rice 有多种灌溉方式可供用户选择，由于缺少详细灌溉资料，本文选择充分灌溉和雨育两种供水方式，分别代表研究区域的平原稻田和山区天水田。

### 1.4.1 遗传参数的调试与确定

参照金之庆等<sup>[16]</sup>的方法，采用“地区性参数”来代替 CERES Rice 模型的遗传参数。两者形式虽相同，调试时都采用“试错法”，但因资料来源不一而有不同含义。遗传参数是针对某个具体品种的，调试时通常采用该品种在某个样点连续种植 3 年以上的

生育期和产量资料加以实现，“地区性参数”则是针对整个地区的水稻而言，调试时采用面上长序列产量资料，并从中扣除科技进步的影响。显然，就气候变化影响评价这类宏观研究而言，使用“地区性参数”更符合面上水稻生产实际。

### 1.4.2 效应模型检验

利用 19 个样点近 20 年 (1979—1998 年) 面上统计的逢单年份的水稻产量资料调试与产量有关的地区性参数，再用逢双年份的产量资料对 CERES Rice 在研究区域的适用性进行了可靠性检验 (图 1)。由图 1 可见，产量模拟值和统计值之间有较好的一致性，决定系数 ( $R^2$ ) 达 0.82，在 0.001 统计水平上极显著，均方根差 (RMSE) 为 0.51 t/hm<sup>2</sup>。对不同稻作制度下水稻生育期的检验 (图略) 也表明，模拟值和实测值之间的  $R^2$  高达 0.95，RMSE 为 2.4 d，说明调试出的“地区性参数”符合各地水稻面上生产情况，亦说明 CERES Rice 模型在长江中下游稻区是适用的，作为评价气候变化影响水稻生产的工具是合理的。

### 1.4.3 效应模型的灵敏度分析

前述已在 CC + CV 情景中考虑了 CV 的可能变化，但效应模型能否对它做出合理响应呢？这既是衡量模型性能的重要指标之一，也涉及到气候影响评价结果的可靠性。因此，有必要就 CERES Rice 对 CV 改变的响应进行灵敏度分析。具体做法是按前述生成 CC + CV 情景的方法，分别改变各样点 Baseline 中温度与降水量的方差 (增加 10% 和

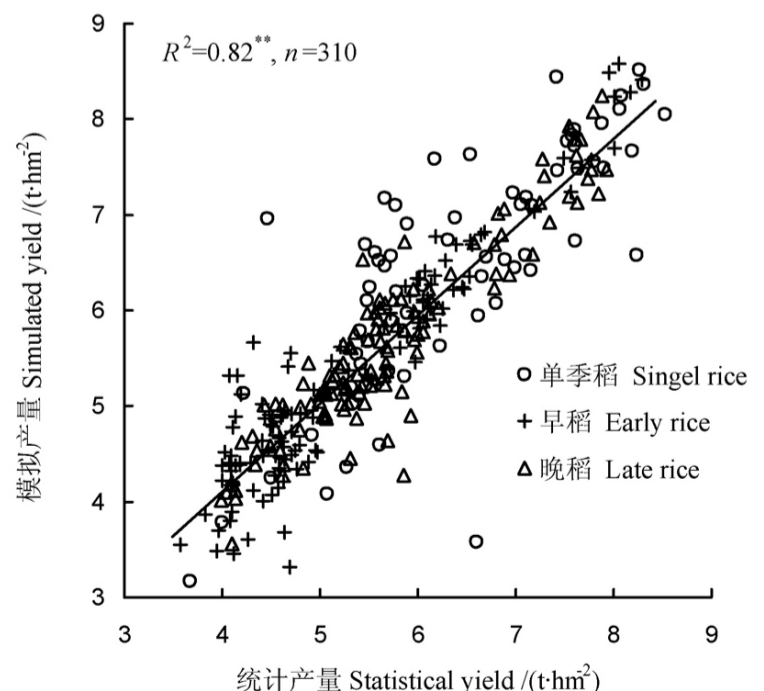


图 1 长江中下游地区 CERES Rice 模拟产量与统计产量的比较

Fig. 1 Comparison between the CERES Rice yields and statistical yields in the middle and lower valley of the Yangtze River, China.

表 2 CERES Rice 模拟产量对 CV 的灵敏度分析

Table 2 .Sensitivity analysis for CERES Rice yield on CV .

地点 Site	主要稻作类型 Main rice cropping pattern	相对于 CV = 0 的产量变化百分比 Percentage change in yield compared with the CV = 0			
		雨育水稻 Rainfed rice		灌溉水稻 Irrigated rice	
		CV = 10%	CV = 20%	CV = 10%	CV = 20%
		江苏南京 Nanjing , Jiangsu	单季稻 Single cropping rice	- 1 .96	- 4 .94
浙江杭州 Hangzhou , Zhejiang	双季稻 Double cropping rice	- 5 .46	- 9 .23	- 2 .47	- 4 .32
湖南长沙 Changsha , Hunan	双季稻 Double cropping rice	- 3 .18	- 7 .30	- 1 .99	- 4 .69

20%) ,然后运行 CERES Rice ,并将模拟结果与 CV 不变(对照)的模拟产量相比较。表 2 以南京、杭州和长沙为例 ,给出了灵敏度分析的结果。由表 2 可见 ,随着 CV 增大 ,水稻模拟产量有下降趋势 ,雨育水稻的减产幅度总体上大于灌溉水稻 ,单季稻对 CV 的敏感度要小于双季稻。这些都与研究区域水稻生产实际情况相符 ,说明 CERES Rice 对 CV 有良好的敏感度 ,用于评价气候及其变率变化对研究区域水稻生产的影响具有合理性。

### 1.5 水稻温度逆境指标

鉴于研究区域单季稻受低温危害的可能性不大 ,故主要考虑生长季日极端最高气温  $\geq 35$  的天数(简称高温日数) ;早稻和晚稻 ,除考虑高温危害外 ,还分别考虑播种期(3 月下旬至 4 月中旬<sup>[17]</sup>)日均温  $\leq 10$  的低温天数和抽穗扬花期(9 月中旬至 9 月下旬<sup>[17]</sup>)日均温  $\leq 20$  的低温天数。利用上述温度逆境指标对各点 Baseline 文件以及基于 3 种 GCM 的 9 种 CC + CV 情景文件进行检索 ,并取稻区平均值 ,即可分析 CO<sub>2</sub> 有效倍增时研究区域温度逆境的演变趋势。

### 1.6 水稻水分逆境指标及蒸散比的计算

水稻水分逆境指标主要考虑季节性干旱发生频次和暴雨日数。季节性干旱发生频次定义为水稻生长季连续 20 d 降水总量  $\leq 5$  mm 的次数<sup>[18]</sup> ,暴雨日数是指日降雨量  $\geq 50$  mm 的天数。根据上述指标对各点 Baseline 文件以及基于 3 种 GCM 的各种 CC + CV 情景文件进行检索 ,并按稻区取平均值 ,即可分析研究区域水分逆境的演变趋势。

此外 ,还采用蒸散比( )作为评价各地水稻生长季气候干湿的指标<sup>[4]</sup> ,即

$$= ET / ET_0 \quad (1);$$

式中 , ET 为水稻全生育期内雨育水稻的实际蒸散量 , ET<sub>0</sub> 为同期潜在蒸散量。值愈大 ,说明实际蒸散量愈接近潜在蒸散量 ,可供蒸散的水分越多 ,地面越湿润 ;反之则越干燥。通过比较各稻区在

Baseline 以及在不同 CC + CV 情景下的平均值 ,即可估计研究区域未来气候的干湿变化趋势。

### 1.7 水稻稳产性计算

采用产量波动系数( F)描述水稻的稳产性 ,即

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \bar{Y}|}{n\bar{Y}}; \quad (2)$$

式中 , Y<sub>i</sub> 为某样点第 i 年 (i = 1, 2, ..., n) 的水稻产量 ; n 为产量序列的年份长度 ;  $\bar{Y}$  为 n 年的平均产量。F 值的大小可以反映水稻的稳产程度 ,即 F 值愈大 ,年际间产量波动愈大 ,反之则愈小。本研究通过比较不同 CC + CV 情景下模拟产量的 F 值 ,即可判断水稻稳产性的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 CC + CV 情景下温度逆境演变趋势

从表 3 可以归纳以下几个特点 :1) 早稻播种期低温冷害明显趋缓。目前播种期日均温  $\leq 10$  的天数下游稻区为每年 12.9 d ,中游为 7.9 d ,一定程度上都会造成烂秧 ; CV0% 情景下 ,中游早稻播种期的低温天数将锐减至 0.3 ~ 2.2 d ,下游稻区 2.3 ~ 5.3 d ,对水稻危害明显减轻 ;随着 CV 增大 ,低温天数有所反弹 ,但中游最多不超过 3.2 d ,下游不超过 7.5 d。2) 晚稻抽穗期低温危害将不构成威胁。目前晚稻抽穗期日均温  $\leq 20$  的天数中游为 5.8 d ,下游为 7.6 d ,对开花结实和籽粒灌浆均有一定影响 ;在各种 CC + CV 情景下低温天数将锐减至 2.3 d 以下。3) 水稻高温热害愈演愈烈。目前中游水稻生长季日极端最高气温  $\geq 35$  的天数 ,早稻与晚稻分别为 15.4 d 和 21.8 d ,下游单季稻、早稻与晚稻的高温日数依次为 12.8、6.8 和 10.1 d ,如出现在抽穗扬花期 ,会造成一定程度的热害 ;在 CV0% 情景下 ,两稻区不同稻作制度下的高温日数将激增至 1 ~ 2 个月或以上 ,其中晚稻甚于早稻 ,中游稻区甚于下游稻区 ,UKMO 和 GISS 情景甚于 GFDL 情景。由于晚稻的高温日数主要出现在早、中期 ,因

表3 长江中下游稻区在 Baseline 和基于 3 种 GCM 的 CC + CV 情景下温度逆境、季节性干旱、暴雨和水稻生长季节内蒸散比的演变趋势

Table 3 Trend of temperature stress, frequencies of seasonal drought (FSD) and rainstorm (FR) and evapotranspiration ratio during rice growing season ( ) under the Baseline weather and the three GCM based CC + CV scenarios in the middle and lower valleys of the Yangtze River, China.

气候指标 Parameter	Baseline	GISS			GFDL			UKMO			
		CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	
长江中游稻区 The middle valley of the Yangtze River											
早稻 Early rice											
35 日数 Days 35 /d	15.4	47.0	48.4	48.6	32.8	33.3	33.9	52.8	53.9	54.3	
10 日数 Days 10 /d	7.9	2.2	2.4	3.2	0.4	0.5	0.7	0.3	0.6	0.7	
干旱发生频次 FSD	0.4	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	
暴雨发生频次 FR	3.3	4.1	4.2	4.3	4.6	5.2	5.5	3.6	4.0	4.4	
水稻生长季蒸散比	0.894	0.839	0.837	0.835	0.894	0.893	0.893	0.807	0.806	0.805	
晚稻 Late rice											
35 日数 Days 35 /d	21.8	69.4	70.0	71.0	36.0	36.3	37.1	69.1	69.9	70.3	
20 日数 Days 20 /d	5.8	0.5	0.7	0.9	1.6	2.0	2.3	0.1	0.1	0.3	
干旱发生频次 FSD	0.6	0.5	0.7	0.8	0.4	0.5	0.7	0.4	0.7	0.9	
暴雨发生频次 FR	2.0	1.5	1.6	1.8	1.8	2.3	2.6	1.5	1.6	1.7	
水稻生长季蒸散比	0.833	0.802	0.804	0.800	0.834	0.830	0.828	0.794	0.790	0.788	
长江下游稻区 The lower valley of the Yangtze River											
单季稻 Single rice											
35 日数 Days 35 /d	12.8	44.9	46.4	47.8	34.4	38.5	41.4	58.0	61.0	64.3	
干旱发生频次 FSD	0.7	0.4	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	0.4	0.6	0.8	
暴雨发生频次 FR	3.1	4.6	5.2	5.8	3.2	3.6	4.0	4.6	5.0	5.2	
水稻生长季蒸散比	0.878	0.839	0.838	0.840	0.857	0.858	0.863	0.827	0.830	0.831	
早稻 Early rice											
35 日数 Days 35 /d	6.8	30.5	31.1	32.6	27.2	30.7	31.3	32.7	33.4	35.8	
10 日数 Days 10 /d	12.9	3.9	5.4	7.5	2.3	2.9	4.6	5.3	4.5	6.6	
干旱发生频次 FSD	0.4	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.3	
暴雨发生频次 FR	1.7	3.0	3.9	4.6	2.4	2.9	3.1	4.1	4.5	4.6	
水稻生长季蒸散比	0.892	0.880	0.880	0.881	0.889	0.890	0.890	0.827	0.829	0.833	
晚稻 Late rice											
35 日数 Days 35 /d	10.1	46.8	47.9	48.6	37.4	39.5	40.3	49.4	50.6	50.9	
20 日数 Days 20 /d	7.6	0.5	1.1	1.3	0.9	1.1	1.6	0.4	0.5	0.6	
干旱发生频次 FSD	0.5	0.1	0.4	0.4	0.3	0.5	0.7	0.3	0.3	0.4	
暴雨发生频次 FR	1.7	2.0	2.4	2.8	1.0	1.1	1.5	1.9	2.0	2.2	
水稻生长季蒸散比	0.904	0.881	0.880	0.881	0.903	0.896	0.895	0.873	0.871	0.867	

此,抽穗扬花期受热害肆虐的程度不如早稻。长江下游单季稻抽穗扬花期(8月中旬)由于难以避开高温峰值期(图略),故受害程度亦较严重。随着 CV 的增大,水稻生长季 35 的高温日数将有增多趋势。

## 2.2 CC+ CV 情景下水分逆境演变趋势

由表 3 可见,长江中下游稻区目前每年平均出现季节性干旱的次数不足 1 次;在 CV0% 情景(即 CC 情景)下,除下游单季稻区在 GFDL 情景下季节性干旱出现的频次略高于 Baseline 外,其余均呈明显下降趋势,下游早稻生长季甚至不会出现季节性干旱,这主要与各种 GCM 所模拟的降雨量均较 Baseline 增多有关;随着 CV 增大,各稻区不同稻作类型水稻生长季的季节性干旱出现频次较之对照(CV0% 情景)有增加趋势。表 3 还显示,研究区域早稻和单季稻生长季的暴雨次数在 CV0% 情景下普遍增多,而晚稻则有减少趋势;随着 CV 增大,不同稻区和稻作类型在各种情景下,其生长季的

暴雨次数较对照均呈增加趋势。

由表 3 可以看出,如果不考虑 CV 变化,各稻作类型的 值在 GISS 和 UKMO 情景下都下降了,尤以长江中游稻区在 UKMO 情景下最为明显,原因是剧烈增温导致的蒸散量增大甚于降雨量的增加;在 GFDL 情景下,除长江下游稻区单季稻的 值略有下降外,其余都与当前值持平。总体上看,CO<sub>2</sub> 有效倍增时,研究区域水稻生长季的水分条件将不会得到改善,甚至有变差的可能。由表 3 还可见,随着 CV 的增大, 的平均值与对照无明显差异,说明 CV 增大对水稻生长季平均干湿状况影响不显著,原因可能是季节性干旱和暴雨的出现频次都在增加,对 值的影响被相互抵消了。

## 2.3 气候及其变率变化对水稻生育期的影响

由表 4 可以看出,如果不考虑 CV,研究区域不论何种稻作制度在何种 CC 情景下,水稻模拟生育期的平均天数均因增温而有不同程度缩短。其中,单季稻与晚稻缩短的天数要甚于早稻,长江中游

表 4 基于 3 种 GCM 的 CC + CV 情景下水稻模拟生育期较 Baseline 生育期平均缩短的天数

Table 4 Mean decrease in rice growth duration under the CC + CV scenarios based on the three GCMs, compared with the Baseline growth durations.

稻区与稻作类型 Rice growing region and rice cropping pattern	GISS			GFDL			UKMO		
	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%
长江中游 The middle valley of the Yangtze River									
早稻 Early rice	12	11	11	8	8	8	15	15	14
晚稻 Late rice	19	19	18	10	10	10	20	20	19
长江下游 The lower valley of the Yangtze River									
单季稻 Single rice	18	17	17	16	15	15	20	19	19
早稻 Early rice	10	10	9	8	7	7	11	11	10
晚稻 Late rice	14	14	13	12	12	11	17	16	15

表 5 基于 3 种 GCM 的 CC + CV 情景下灌溉水稻模拟产量相对于 Baseline 产量的变化百分比

Table 5 Percentage change in irrigated rice yields under the CC + CV scenarios based on the three GCMs compared with the Baseline yields.

稻区与稻作类型 Rice growing region and rice cropping pattern	GISS			GFDL			UKMO		
	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%
长江中游 The middle valley of the Yangtze River									
早稻 Early rice	-9	-11	-12	-4	-5	-5	-11	-12	-14
晚稻 Late rice	-17	-18	-19	-1	-2	-3	-14	-15	-17
长江下游 The lower valley of the Yangtze River									
单季稻 Single rice	-4	-5	-5	-3	-4	-5	-13	-15	-16
早稻 Early rice	-6	-8	-9	-4	-5	-6	-6	-7	-10
晚稻 Late rice	-10	-11	-12	-5	-6	-7	-14	-16	-17

稻区要甚于长江下游稻区, UKMO 情景要甚于 GISS 和 GFDL 情景。这主要与不同情景下各区水稻生长季的增温幅度有关。如果进一步考虑 CV 的变化, 在 CV10% 情景下, 模拟生育期在多数情况下较之对照 (CV0% 情景) 不变, 少数则延长 1 d; 在 CV20% 情景下, 模拟生育期一般较对照延长 1 ~ 2 d。这可能是因为 CV 增大后, 35 的高温日数增多, 从而延滞了水稻的发育进程。不过, 总体上看, CV 对水稻生育期的长短无显著影响或影响甚微。

## 2.4 气候及其变率变化对水稻产量的影响

### 2.4.1 灌溉水稻

#### 2.4.1.1 单季稻

由表 5 可见, 在 GISS、GFDL 和 UKMO 三种情景下, 如果不考虑 CV, 长江下游稻区灌溉单季稻的平均模拟产量较 Baseline 产量减少 3% ~ 13%, 这与金之庆等<sup>[4]</sup> 早先分析的结果基本一致。减产的原因主要是增温缩短了生育期, 使光合时间减少、灌浆不充分, 而 CO<sub>2</sub> 增益效应和良好的灌溉条件不足以补偿增温带来的减产效应。如果进一步考虑 CV, 灌溉单季稻的平均模拟产量在 CV10% 情景下较对照 (CV0%) 减少 1% ~ 2%, 在 CV20% 情景下减少 1% ~ 4%, 说明 CV 增大对水稻产量不

利。

#### 2.4.1.2 早稻

从表 5 可见, 如果不考虑 CV, 在 3 种基于 GCM 的情景下, 长江中游和下游稻区灌溉早稻的减产幅度分别为 4% ~ 11% 和 4% ~ 6% (表 5), 同样说明 CO<sub>2</sub> 增益效应和良好的灌溉条件无法抵消高温的负效应。长江中游稻区灌溉早稻在 GISS 和 UKMO 情景下的减产幅度之所以大于下游稻区, 主要与生长季增温幅度较大、生育期缩短的天数较多有关。但在 GFDL 情景下, 中游和下游稻区的增温幅度相近, 生育期缩短的天数相近 (表 4), 故减产幅度也接近。如进一步考虑 CV, 在 CV10% 和 CV20% 情景下, 长江中、下游稻区灌溉早稻的模拟产量较对照进一步下降, 这可能与 CV 增大后早稻生长季 35 的高温日数增多 (表 3) 有关。

#### 2.4.1.3 晚稻

由表 5 可知, 如果不考虑 CV, 长江中游稻区在 GISS 和 UKMO 情景下灌溉晚稻的减产幅度达 14% ~ 17%, 主要原因是这 2 种 GCM 预测的生长季增温幅度较大; 而在较温和的 GFDL 情景下, 灌溉晚稻的模拟产量与 Baseline 产量基本持平。长江下游稻区灌溉晚稻的产量变化趋势基本上同中游稻区, 即 GISS 和 UKMO 情景下减产较多, 而 GFDL

表 6 基于 3 种 GCM 的 CC + CV 情景下雨育水稻模拟产量相对于 Baseline 产量的变化百分比

Table 6 . Percentage change in rainfed rice yields under various CC + CV scenarios based on the three GCMs compared with the Baseline yields . %

稻区与稻作类型 Rice growing region and rice cropping pattern	GISS			GFDL			UKMO		
	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%
长江中游 The middle valley of the Yangtze River									
早稻 Early rice	- 13	- 15	- 17	- 4	- 5	- 6	- 15	- 16	- 18
晚稻 Late rice	- 20	- 21	- 23	- 5	- 6	- 7	- 22	- 24	- 26
长江下游 The lower valley of the Yangtze River									
单季稻 Single rice	- 11	- 12	- 14	- 7	- 11	- 13	- 16	- 17	- 19
早稻 Early rice	- 6	- 7	- 8	- 6	- 7	- 8	- 7	- 9	- 11
晚稻 Late rice	- 9	- 10	- 11	- 7	- 8	- 9	- 20	- 21	- 23

表 7 3 种基于 GCM 的 CC + CV 情景下雨育水稻模拟产量的波动系数

Table 7 Fluctuation coefficient of the rainfed rice yields simulated under different CC + CV scenarios based on the three GCMs .

稻区与稻作类型 Rice growing region and rice cropping pattern	GISS			GFDL			UKMO		
	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%	CV0%	CV10%	CV20%
长江中游 The middle valley of the Yangtze River									
早稻 Early rice	0 .09	0 .10	0 .11	0 .08	0 .09	0 .10	0 .11	0 .13	0 .15
晚稻 Late rice	0 .14	0 .14	0 .16	0 .15	0 .17	0 .19	0 .19	0 .22	0 .24
长江下游 The lower valley of the Yangtze River									
单季稻 Single rice	0 .12	0 .12	0 .14	0 .14	0 .16	0 .18	0 .11	0 .12	0 .13
早稻 Early rice	0 .07	0 .08	0 .08	0 .06	0 .07	0 .09	0 .08	0 .09	0 .11
晚稻 Late rice	0 .09	0 .09	0 .10	0 .10	0 .11	0 .12	0 .13	0 .14	0 .16

情景下减产幅度较小。随着 CV 的增大,减产趋势有所加强,这主要与生长前中期 35 的高温日数增多有关。

#### 2.4.2 雨育水稻

由表 6 可以看出,如果不考虑 CV,长江下游稻区的雨育单季稻在 3 种 GCM 情景下均减产,其中以 UKMO 情景减幅最大,主要是因为增温幅度大、值减少明显;长江中、下游稻区的雨育早稻在 3 种 GCM 情景下亦表现减产,其中中游稻区的减产幅度在 GISS 和 UKMO 情景下要明显大于下游稻区,在 GFDL 情景下与后者相当,亦主要与各情景所预测的增温幅度不一有关,雨育晚稻同样以 GISS 和 UKMO 情景下的减产幅度较为显著。随着 CV 增大,各区不同稻作制度下雨育水稻的减产趋势加剧,一方面与生长季 35 的高温日数增多有关,另一方面也归因于水稻生长季季节性干旱的出现频率增大(表 3)。

#### 2.5 气候及其变率变化对水稻稳产性的影响

由表 7 可见,如果不考虑 CV,长江中下游稻区在 3 种 GCM 情景下均以早稻的产量波动系数最小,这与早稻生长季所处的春夏季雨水较丰且 35 的高温日数相对较少有关;中游稻区晚稻的 F 值比下游稻区明显偏大,主要是因为中游稻区在

GISS 和 UKMO 情景下,生长季 35 的高温日数高达 70 d 左右,加之季节性干旱出现频次较高,故造成产量不稳;下游单季稻与同区双季稻相比,产量波动系数一般偏大,可能是因为种植双季稻的抽穗扬花期比较容易避开高温阶段。由表 7 还可见,随着 CV 增大,不同稻作类型的产量波动系数均有增大趋势,高温日数、季节性干旱发生频次和暴雨日数的增加是造成水稻稳产性进一步降低的主要原因。灌溉水稻的产量波动系数(表略)明显要小于雨育水稻,说明良好的灌溉条件可以减缓产量的年际波动。

### 3 结论与讨论

本研究采用国际上通用的 3 种 GCM 的有关输出值和 19 个样点的 Baseline,结合未来 CV 变化的假设,并利用 WGEN,生成了每个样点 9 种 CC + CV 情景。进而将经过验证的 CERES Rice 模型分别在各情景和 Baseline 下运行,通过比较模拟结果,并结合蒸散比( )和产量波动系数的计算,评价了 CO<sub>2</sub> 有效倍增时气候及其变率变化对长江中下游稻区水稻生产的影响。与过去的研究相比,一是在气候变化情景中增加了 CV 的考虑,尽管所作的假设带有一定人为性,但有助于理解未来气候变

率影响研究区域水稻生产的趋势、范围和程度 ;二是调试确定 CERES Rice 模型的遗传参数时 ,采用了各样点面上统计的长序列水稻产量资料 ,并从中扣除科技进步因素的影响 ,这不仅提高了模型区域应用的准确性和合理性 ,还为今后遗传参数升尺度在方法上提供了借鉴 ;三是评价过程中 ,同时使用了 3 种基于 GCM 的气候变化情景 ,并假设 3 种情景下的模拟结果如一致 ,则今后出现的可能性就较大 ,反之则较小。考虑到现有 GCM 所预测的区域气候变化常有较大差异 ,而根据现有知识很难判断哪种预测更准 ,因此 ,有必要使用多种 GCM。本研究的局限性主要是对一些极端气象事件 (高温、洪涝、台风等) 及其对水稻生产的影响还缺乏深入研究 ,今后研究重点应放在提高作物生长模型对极端气象事件的响应能力上。

本研究结果表明 ,当 CO<sub>2</sub> 有效倍增时 ,随着 CV 的增大 ,将会发生下面的情形 :1) 研究区域不同稻作制度下的水稻高温热害将愈演愈烈 ,但早稻和晚稻受低温危害的程度将显著减轻 ;2) 水稻生长季的水分状况 (用 值表征) 与当前相比虽无明显改变 ,但季节性干旱和暴雨的发生频次将呈增加之势 ;3) 不同稻作制度下的水稻生育期都不同程度缩短 ,这也是造成水稻减产的主要原因之一 ,但 CV 对水稻生育期的影响不显著 ;4) 在 3 种基于 GCM 的情景下 ,研究区域不论是单、双季稻 ,也不论是灌溉或雨育水稻都表现为减产 ,其中长江中游稻区的减产幅度要甚于下游稻区 ,单季稻与晚稻的减产幅度要甚于早稻 ,这说明 CO<sub>2</sub> 增益效应和良好的灌溉条件只能缓解但无法补偿增温带来的负效应 ;5) CV 增大不仅会造成水稻进一步减产 ,而且使稳产性变差 ,但良好的灌溉条件可以有效减缓水稻产量的年际波动。

#### 参考文献 :

- [1] 国家统计局 . 中国统计年鉴 . 北京 : 中国统计出版社 , 2000 .
- [2] 熊振民 , 蔡洪法 . 中国水稻 . 北京 : 中国农业科技出版社 , 1992 : 273-383 .
- [3] 陈 辉 , 施 能 , 王永波 . 长江中下游气候的长期变化及基本态特征 . 气象科学 , 2001 , 21(1) : 44-53 .
- [4] 金之庆 . 全球气候变化对中国粮食生产影响的模拟研究 [学位论文] . 南京 : 南京农业大学 , 1996 : 90-93 .
- [5] Jin Z Q , Ge D K , Chen H , et al . Assessing the impacts of climate change on rice production and strategies for adaptation in southern China // Peng S , Ingram K T , Neue H U . Climate Change and Rice . Los Banos , Manila , Philippines : IRRI , 1995 : 303-313 .
- [6] 葛道阔 , 金之庆 , 石春林 , 等 . 气候变化对中国南方水稻生产的阶段性影响及适应性对策 . 江苏农业学报 , 2002 , 18(1) : 1-8 .
- [7] 裘国旺 , 王馥棠 . 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 . 应用气象学报 , 1998 , 9(2) : 151-159 .
- [8] Iglesias A , Rosenzweig C , Pereira D . Agricultural impacts of climate change in Spain : Developing tools for a spatial analysis . *Global Environ Change* , 2000 , 10 : 69-80 .
- [9] 张 宇 , 王石立 , 王馥棠 . 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究 . 应用气象学报 , 2000 , 11(3) : 264-270 .
- [10] 罗群英 , 林而达 . 区域气候变化情景下气候变率对我国水稻产量影响的模拟研究 . 生态学报 , 1999 , 19(4) : 557-559 .
- [11] 朱克贵 . 中国土种志 . 北京 : 中国农业出版社 , 1995 : 12-670 .
- [12] Richardson C W , Wright D A . WGEN : A Model for Generating Daily Weather Variables . Washington DC : United States Department of Agriculture , Agricultural Research Service , 1984 : 1-83 .
- [13] 陈 超 , 金之庆 , 郑有飞 , 等 . CO<sub>2</sub> 倍增时气候及其变率变化对黄淮海平原冬小麦生产的影响 . 江苏农业学报 , 2004 , 20(1) : 7-12 .
- [14] Ritchie J T , Alcocilja E C , Singh U , et al . IBSNAT and the CERES Rice Model // IRRI . Weather and Rice . Manila , Philippines : IRRI , 1987 : 271-281 .
- [15] Rosenzweig C , Allen L H Jr , Harper L A , et al . Climate Change and Agriculture : Analysis of Potential International Impacts . ASA Special Publication Number 59 . Madison , WI : American Society of Agronomy , Inc , 1995 .
- [16] 金之庆 , 石春林 . 江淮平原小麦渍害预警系统 (WWWS) . 作物学报 , 2006 , 32(10) : 1458-1465 .
- [17] 崔读昌 , 刘洪顺 , 闵谨如 , 等 . 中国主要农作物气候资源图集 . 北京 : 气象出版社 , 1984 : 83-104 .
- [18] 黄道友 , 王克林 , 黄 敏 , 等 . 我国中亚热带典型红壤丘陵区季节性干旱 . 生态学报 , 2004 , 24(11) : 2516-2523 .