应用生态学报 2012年12月 第23卷 第12期
Chinese Journal of Applied Ecology, Dec. 2012,**23**(12): 3393-3401

福建省水稻生育期气温与降水的时空分布及其对稻作制度的影响*

江 敏[1] 金之庆[2] 杨 慧[3] 石春林[2] 朱朝枝[1] 林文雄[1**]
([1]福建农林大学作物学院, 福州 350002; [2]江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 南京 210014; [3]中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008)

摘 要 为了研究气候变化对福建省水稻生产及稻作制度的影响,根据IPCC排放情景特别报告(SRES)的A2、B2和A1B方案,分析了未来不同情景下,福建省水稻生育期气温及降水的时空分布特征及水稻种植布局变化.结果表明:未来福建省水稻生育期的温度将呈上升趋势,随着时间的推移,增温幅度加大.单季稻生育期增温幅度最大,2011—2030年和2031—2050年分别增加0.3~2.4 ℃和1.5~3.4 ℃;早稻生育期两个时段分别增加0.2~0.9 ℃和0.7~1.7 ℃;后季稻生育期两个时段分别增加0.3~2.1 ℃和0.5~3.6 ℃,且日均温的年际波动幅度最大.降水多呈增加趋势,早稻、单季稻和后季稻生育期降水分别增加10%~40%、10%~30%和10%~20%;闽东南早稻生育期的降水年际波动最大.未来气温的上升导致了10 ℃以上积温增加,水稻生长季延长,使用晚熟品种替代早熟和中熟品种及单季稻种植区改种双季稻成为可能.

关键词 气候变化 时空分布 积温 种植制度 水稻
文章编号 1001-9332(2012)12-3393-09 **中图分类号** P467; S16 **文献标识码** A

Spatiotemporal distribution of air temperature and precipitation in rice growth period in Fujian Province of East China and the effects of this distribution on rice planting pattern.

JIANG Min[1], JIN Zhi-qing[2], YANG Hui[3], SHI Chun-lin[2], ZHU Chao-zhi[1], LIN Wen-xiong[1]
([1]*College of Crop Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*; [2]*Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing* 210014, *China*; [3]*College of Resources and Geo-sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221008, *Jiangsu*, *China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, **23**(12): 3393-3401.

Abstract: In order to investigate the effects of climate change on the rice production and rice planting pattern in Fujian Province, an analysis was made on the spatiotemporal distribution of air temperature and precipitation in rice growth period in the Province, and the possible changes of the local rice planting pattern in the future, based on the A2, B2, and A1B scenarios of IPCC Special Report on Emission Scenario (SRES). In the future, the rice growth period's air temperature in the Province tended to be increased, and the increment would be increased with time, with the maximum for single cropping rice and being 0.3-2.4 ℃ and 1.5-3.4 ℃ in 2011-2030 and 2031-2050, respectively. For early rice and late rice, the increment of their growth period's air temperature would be 0.2-0.9 ℃ and 0.7-1.7 ℃ in 2011-2030 and 0.3-2.1 ℃ and 0.5-3.6 ℃ in 2031-2050, respectively, but the annual fluctuation of the mean daily temperature would be most obvious for late rice. The rice growth period's precipitation in most parts of the Province also tended to be increased, and the increment for early rice, single cropping rice, and late rice would be 10%-40%, 10%-30%, and 10%-20%, respectively. The annual fluctuation of the precipitation would be most obvious for the early rice in southeastern Fujian. The elevated air temperature in the future could induce the increase of ≥10 ℃ accumulated temperature, and lengthen the rice growth season, making it possible to replace early and medium-maturity varieties with late-maturity varieties, and to adopt double-rice planting pattern instead of single-rice planting pattern.

* 福建省科技计划重点项目(2010R0028)、福建省教育厅自然科学基金项目(JA10112)和国家自然科学青年基金项目(41001230)资助.
** 通讯作者. E-mail: wenxiong181@163.com
2012-08-21 收稿,2012-11-05 接受.

Key words: climate change; spatiotemporal distribution; accumulated temperature; planting pattern; rice.

近几十年来,众多学者对中国短期气候变化做了较为细致的研究,在未来气候情景生成方面取得了一些进展[1-4]. 全球气候模式被认为是预测由温室气体排放持续增加导致的未来气候变化的唯一有效方法. 国际上开发的影响较大的有 CCSR/NIES[5]、CGCM1/2[6]、CSIRO-MK2[7] 和 HadCM2/3[8]等. 不同学者根据 GCMs 的输出结果,结合当地历史气候资料,设置未来气候变化情景,或利用天气发生器生成未来气候变化情景,进行气候变化影响评估[9-10]. 高分辨率网格点的区域气候模型(RCM)可以很好地反映影响局地气候的地面特征量,反映气候本身未来的波动规律,被认为是获取高分辨率局地气候变化信息的最好降尺度分析方法. 我国学者在这方面做了大量的研究工作[11-13]. 近年来,英国 Hadley 气候预测与研究中心研究了 RCM 系统 PRECIS(providing regional climates for impacts studies)[14]. 该系统包含了 RCM 预测的 SRES 情景下的气候情景数据库,以生成驱动 RCM 的侧边界条件、RCM 本身和运行 RCM 所需要的各种相关数据库. 其生成的数据资料网格点由原来的几百千米降尺度到 50 km,大幅度提高了未来气候情景的网格点数,成为许多学者进行气候变化影响评价的依据[15-17].

目前,气候变化及其对人类生存环境可能带来的影响已引起世界各国政府和科学家的高度关注. 农业是强烈依赖气候资源的产业,气候变化势必对农业生产造成巨大冲击[18-19]. 福建省由于地势复杂、山地丘陵面积大,气象要素的空间分布更为复杂,导致各地种植制度差异明显. 本研究根据政府间气候变化委员会(IPCC)最新发布的排放情景特别报告(SRES)中 A2、B2 和 A1B 方案,利用英国 Hadley 气候预测与研究中心的高分辨率区域气候模式(PRECIS)[20]构建了福建省 17 个区域的气象数据库. 在此基础上分析了未来不同情景下水稻生育期气温与降水的时空分布特征,并根据积温指标计算了水稻生长季的长度,结合降水条件的变化,分析了未来的水稻种植布局,以期为气候变化过程中福建省水稻生产布局调整提供科学依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

福建省地形复杂,海拔高差大,农业气候层次丰富,历来有"八山一水一分田"之称. 福建两大山带及海洋对气候有明显影响,尤其闽中大山带的戴云山和博平岭成为福建亚热带和南亚热带两个农业气候区的天然分界[21]. 在纬度、高度、季节基本相同的情况下,因地形不同气候也各异,使各地农事季节出现了明显差异. 水稻种植条件在纬度、海拔上亦表现出较大差异.

1.2 稻区划分与区域选择

按照福建省农业气候资源分布特征及福建省作物精细区划和优化布局研究结果[22-23],将福建省水稻种植区按不同地形和稻作制度划分为 3 个稻区,共选择 17 个样点进行研究(图 1). 各点的稻区划分见表 1.

1.3 气候变化情景的生成

本研究选用英国 Hadley 中心研制的区域气候模式 PRECIS,生成基准时段(1961—1990 年)和未来时段(2021—2050 年)的 A2、B2 和 A1B 气候变化情景,并经 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)分析订正[15],获得了研究区域 17 个样点的逐日气象数据,包括最高温度、最低温度、降水量、太阳总辐射等. IPCC 最新发布的排放情景特别报告(SRES)中 4 种框架分别表达了未来温室气体和硫化物气溶胶的排放情况[24-25],本研究选用了其中 A2、B2 和 A1B 气候情景进行研究.

为了评价气候变化过程中各气象要素对水稻生产的影响,本研究将气候变化情景分为近期

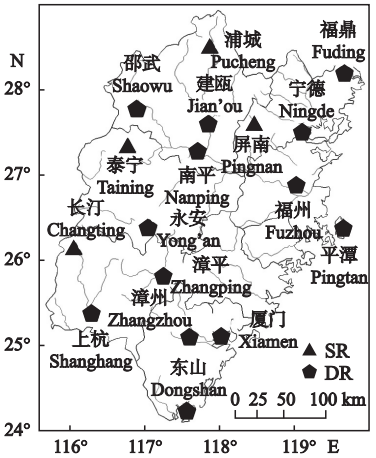


图 1 福建省水稻种植区域分布

Fig. 1 Distribution of rice planting areas in Fujian Province. SR:单季稻 Single rice; DR:双季稻 Double rice.

表 1　福建省稻作类型区划及代表性区域

Table 1　Classification for rice patterns and 17 representative sites in different rice regions in Fujian Province

稻作区 Rice region	≥10 ℃积温 ≥10 ℃ accumulated temperature (℃)	区域 Area
Ⅰ	6000～7700	福州、平潭、漳州、厦门、东山
Ⅱ	5200～6700	邵武、建瓯、福鼎、南平、宁德、上杭、漳平、永安
Ⅲ	3800～5200	浦城、泰宁、长汀、屏南

Ⅰ：闽东南双季稻区 Double-rice region in southeastern Fujian；Ⅱ：闽西北双季稻区 Double-rice region in northwestern Fujian；Ⅲ：闽西北山地单季稻区 Single rice region in mountain area of northwestern Fujian. 下同 The same below.

(2011—2030 年) 和远期 (2031—2050 年) 两个时段,并将基准时段(1961—1990 年,简称 BASE)及订正后的未来不同时段气象文件与作物模型 CERES-Rice 嵌套,假设未来水稻种植制度与栽培措施与当前相同,模拟出 BASE 及未来不同情景下水稻的生育期,进而分析各稻区水稻生育期气象要素变化的时空分布特征及渐变情况.

在对不同情景下水稻生育期内气象要素的变化规律进行分析前,首先对 PRECIS 的模拟数据进行检验和订正. 订正方法参照文献[26]. 先计算出经 PRECIS 模拟生成并经 ECMWF 分析订正的(1961—1990 年)情景文件中各区域日均温的月平均值和月降水总量,然后用相同方法得到在未来不同情景下(2021—2050 年)模拟所得各区域的日均温月平均值和月降水总量. 再进一步计算出未来情景与当前情景下各月均温的差值,未来情景下各月降水总量与当前情景下相应月份降水总量的比值,将气温的差值分别与当前实际观测值中相应月份的气温日值相加,将降水比值与当前相应月份的观测日值相乘,即可得到当地经过订正后未来不同排放情景下的相关数据.

1.4　水稻生长季长度的温度指标

福建省的水稻生产气象灾害主要来自于播种期的“倒春寒”天气、孕穗期的“梅雨寒”天气和齐穗期的“寒露风”天气,故生长季长度需考虑水稻的安全播种期和安全齐穗期. 因此对水稻生长季的长度可以定义为:从当地水稻安全播种期到齐穗期的天数,再加上一个常数(籼稻为 30 d,粳稻为 40 d)[26],考虑到福建省水稻种植品种以籼稻为主,本文选择该常数为 30 d. 安全播种期是指日均温稳定通过 10 ℃且具有 80% 保证率的初日;安全齐穗期是指秋季日均温稳定在 22 ℃以上,且不连续 3 d 以上低于该临界温度的终日. 根据这些指标就可以分别对福建省未来气候变化情景下的日均温进行计算,分析未来气候变化对福建省水稻生长季长度的影响.

1.5　不同生态区水稻品种布局的积温指标

根据积温学说,一地能否种植水稻,首先要考虑该地温度条件是否能够满足水稻的生长需求,此外还要兼顾前述的几个安全期. 福建省双季早稻如果选择日均温≥10 ℃的初日为安全播期,秋季≥22 ℃的终日为后季稻安全齐穗期,则可将早稻安全播期到后季稻安全齐穗期内的积温指标,即≥10 ℃的初日到≥22 ℃的终日之间 10 ℃以上积温指标作为研究区域水稻品种布局的依据. 这不但考虑了水稻的热量需求,也同时兼顾了几个安全期.

2　结果与分析

2.1　未来不同情景下福建省水稻生育期气象要素的时空变化

2.1.1 水稻生育期气温变化　图 2 为福建省 17 个区域未来 3 种情景下水稻生育期日均温相对 BASE 的变化情况,分别用不同时段日均温相对 BASE 的差值表示.

各区域水稻生育期气温在不同情景下均呈上升趋势,且随时间推移,升温幅度加大. 近期各区域升温幅度在 0.2～2.5 ℃之间,远期变化则达到了 0.5～3.6 ℃. 这可能导致未来水稻生育期缩短. 不同稻作制度下升温幅度亦不同:近期,单季稻生育期增温幅度最大(0.3～2.4 ℃),后季稻略小(0.3～2.1 ℃),早稻最小(0.2～0.9 ℃);远期变化也表现出相似的规律,单季稻(1.5～3.4 ℃)和后季稻(0.5～3.6 ℃)增温幅度较大,早稻增温幅度较小(0.7～1.7 ℃). 不同稻区中,闽东南沿海稻区的升温幅度略高于闽西北双季稻区,相差幅度小于 0.1 ℃. 综上分析,意味着本就易于遭受高温危害的后季稻,未来高温对其威胁将愈加严重;但增温可能使后季稻秋季遭遇“寒露风”的危害变小. 单季稻生育期的增温可能为未来改种双季稻提供了条件.

不同情景下,各稻区 A2 和 B2 情景下增温幅度平均值均比较接近,仅各区域有所差异. 在双季稻区,早稻生育期增温幅度在 A2 和 B2 情景下近期平均值分别为 0.4 和 0.6 ℃,远期分别为 1.0 和 1.1 ℃;后季稻生育期两种情景下近期分别增温 0.6 和 0.9 ℃,远期均为 1.9 ℃. 单季稻生育期在两种情景下近期增温幅度分别为 0.8 和 1.2 ℃,到远期变化幅度又趋于相同,均为 2.0 ℃. A1B 情景的增温幅度较另两种情景略大,近期早稻、后季稻和单季稻生

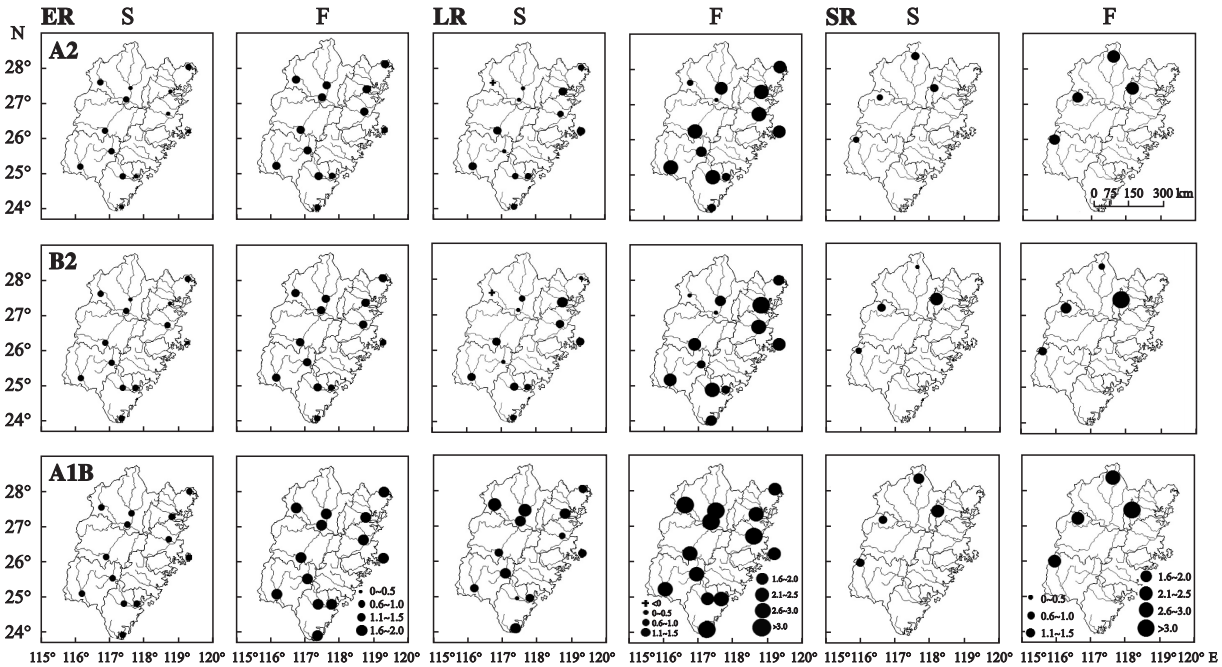


图 2 不同情景下福建省水稻生育期日均温相对基准时段的差值

Fig. 2 Differences of mean daily temperature relative to baseline in growth period of rice in Fujian Province under different scenarios (℃).

ER:早稻 Early rice; LR:后季稻 Late rice; SR:单季稻 Single rice. S:近期 Short term (2011-2030); F:远期 Forward (2031-2050). 下同 The same below.

育期气温的平均增幅依次为 0.9、1.4 和 1.7 ℃,远期依次为 1.7、2.9 和 2.8 ℃. 近期在 A2 与 B2 情景下,邵武地区的后季稻生育期分别出现了 0.2 和 0.4 ℃的负增幅,远期变化中转为升温.

2.1.2 水稻生育期降水量变化 图 3 为未来 3 种情景下各区域水稻生育期降水相对基准时段的比率,分别用未来不同情景下水稻生育期降水总量相对 BASE 的比值表示.

在未来情景下,福建省水稻生育期降水在大部分区域均有所增加,且近期与远期的变化幅度相似,但在不同排放情景下有所差异. A2 与 B2 情景下,近期闽东南双季稻区的早稻生育期降水平均增加 10% ~40%,后季稻增加 10% ~20%;闽西北双季稻区早稻生育期降水变化与闽东南稻区相似,后季稻生育期降水增加略多,有的站点增幅达 60%;单季稻生育期的降水增加 10% ~30%. 远期变化与近期变化相似. 当前福建省早稻生育期(2—6 月)恰逢春雨及梅雨期,而后季稻生育期(6—10 月)是台风雨季,降水均比较丰沛. 但从地区分布来看,由于地形影响,闽东南双季稻区降水较闽西北少,在气温最高的 7—9 月,由于晴天多、雨日少、蒸发大,降水常常来自台风雨,但台风正面登陆区降水强度大、雨时短、流失快、有效性小,因此各地普遍存在后季稻得不到足够降水的现象,所以未来降水增加将有利于后季稻的生长,但要预防短时间台风雨带来的暴雨灾害.

A1B 情景下,尽管各稻区平均降水量较当前略有增加(10% 左右),但是许多区域出现降水减少的现象. 早稻生长期间平均减少 10% 左右. 后季稻生育期,近期变化中降水减少最多的地区是福州和福鼎,减少了 20%;远期变化中福州地区降水较基准年份减少了 30% 左右,福鼎和漳平地区均减少 20%. 未来随着气温升高,农田蒸散量可能增大,降水的减少必将给水稻生长带来不利影响. 对于地处东南沿海的福州地区,当前后季稻生育期降水就常常出现短缺现象,A1B 情景下可能出现更为不利的影响.

2.2 水稻生育期气温和降水的年际间波动幅度

图 4 为未来(2021—2050 年)不同情景下不同稻区水稻生育期气温和降水与 BASE 的对比及波动情况. A2 情景下,后季稻生育期日均温的年际间波动幅度较大,尤以闽西北后季稻为甚,其次是单季稻;早稻年际波动幅度较小. B2 情景与 A2 情景相似,仅闽西北稻区波动幅度略大.

A1B 情景下各稻区水稻生育期的增温幅度均大于A2和B2情景,气温年际波动规律与前两种情

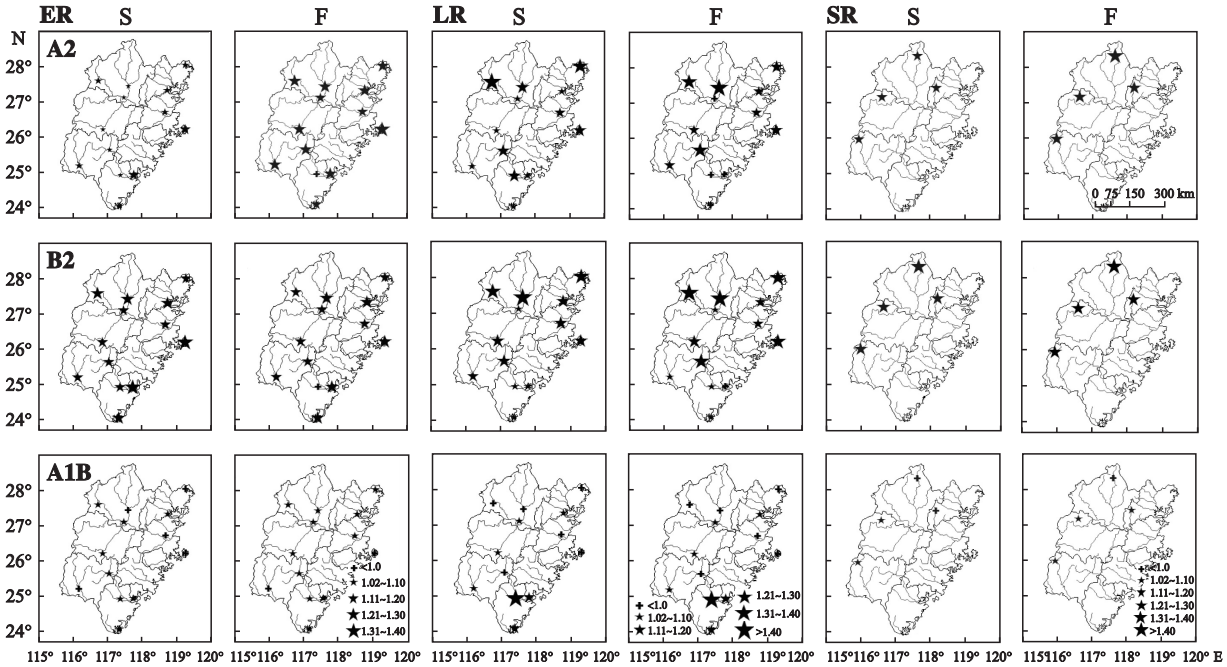


图 3　不同情景下福建省水稻生育期降水总量相对基准时段的比率

Fig. 3　Ratios of total precipitation relative to baseline in growth period of rice in Fujian Province under different scenarios.

景相似. 表明在未来气候变化过程中,后季稻生育期除了要面对增温带来的影响,还可能面对更多极端气温及其所带来的灾害性天气的影响,这必将不利于水稻生长发育及产量的稳定性. 3 种情景相比,B2 情景对水稻生长最为不利.

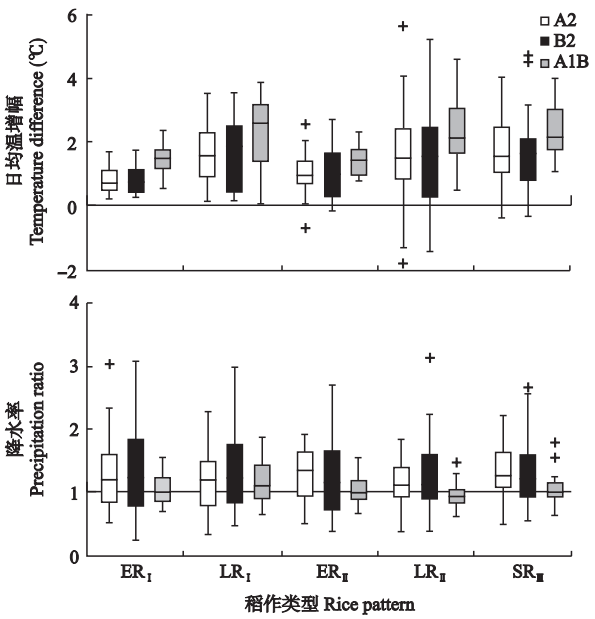


图 4　不同情景下福建省不同稻作区水稻生育期日均温和降水总量相对基准时段的变化及波动幅度

Fig. 4　Changes of mean daily temperature and total precipitation relative to baseline in growth period of rice and fluctuation range in different rice regions of Fujian Province based on different scenarios.

Ⅰ:闽东南双季稻区 Double-rice region in southeastern Fujian; Ⅱ:闽西北双季稻区 Double-rice region in northwestern Fujian; Ⅲ:闽西北山地单季稻区 Single rice region in mountain area of northwestern Fujian.

降水变化表现为未来闽东南稻区水稻生育期的降水年际间变率大于闽西北双季稻及单季稻区. 在双季稻区,早稻生育期的降水变率略大于后季稻. 当前闽东南地区因受到沿海台风影响,已经表现出较大的降水变率及旱涝频发现象,未来这种情况依旧存在. 早稻生育期恰逢福建省的春雨及梅雨期,较大的降水变率还可能导致涝灾发生. A1B 情景下水稻生育期降水量波动幅度较 A2 和 B2 情景小.

2.3　不同气候变化情景对福建省稻作制度的影响

根据前述积温指标,各区域当前气候条件下的水稻品种搭配见表 2. 根据日均温和降水量数据,可以分别对 BASE 及未来时段(2021—2050 年)不同情景下的逐日天气资料进行计算分析,得出不同情景下各种植区域水稻生长季的开始日期、生长季持续天数及 10 ℃(始日)~22 ℃(终日)内≥10 ℃活动积温的变化情况(表 3,表 4).

由表 3 可知,A2 与 B2 情景下,随温度增高,水稻生长季持续天数加长,平潭、厦门和东山地区有 11 个月左右的时间可以生长水稻. 水稻安全播种期的起始日期平均提前 10 d 以上,尤以漳州地区较高,在两种情景下分别提前了 17 和 23 d,所以未来气候变化中提早水稻播期是充分利用热量资源的有

表 2 福建省水稻种植积温指标及品种布局

Table 2 Accumulated temperature index of rice cultivation and rice variety arrangement in Fujian Province

水稻种植区 Rice planting area	热量条件 Heat conditions	≥10 ℃积温 ≥10℃accumulated temperature (℃)	品种布局 Variety arrangement	区域 Area
双季稻区 Double-rice area	热量充足 Abundant heat	≥4970	早稻与后季稻均采用晚熟品种	漳州、厦门、东山、平潭
	热量较充足 Sufficient heat	4969 ~ 4710	早稻采用晚熟品种、后季稻采用中熟品种	上杭、福州
	热量一般 Ordinary heat	4709 ~ 4540	早稻与后季稻均采用中熟品种	永安
	热量缺乏 Deficiency heat	4539 ~ 4100	早稻采用中熟品种、后季稻采用早熟品种,或两季均采用早熟品种	漳平、福鼎、宁德、邵武、建瓯、南平
单季稻区 Single rice area		4099 ~ 2700	只能种植单季稻	浦城、泰宁、屏南、长汀
水稻生长不宜区 Not suitable for rice growth area		<2700	不宜种植水稻	

表 3 福建省各稻区代表性区域在基准时段及 A2 和 B2 情景下水稻生长季的起始日期、持续天数及全年≥10 ℃积温

Table 3 Initial time, length of rice growth duration and ≥10 ℃ accumulated temperature of total year based on BASE, A2 and B2 scenarios in representative areas of Fujian Province

稻区 Rice region	区域 Area	BASE			A2			B2		
		日期 Date	天数 Days	积温 $\sum T$ (℃)	日期 Date	天数 Days	积温 $\sum T$ (℃)	日期 Date	天数 Days	积温 $\sum T$ (℃)
Ⅰ	福州 Fuzhou	03-12	240	4896.0	02-25	271	5668.4	02-20	271	5729.7
	平潭 Pingtan	01-05	324	6558.4	01-01	334	7074.5	01-01	334	7086.7
	漳州 Zhangzhou	02-23	256	5058.5	01-06	290	5852.3	01-31	290	6007.5
	厦门 Xiamen	01-01	331	6942.2	01-01	340	7375.5	01-01	340	7397.7
	东山 Dongshan	01-02	327	6659.9	01-01	334	7043.3	01-01	334	7056.7
Ⅱ	邵武 Shaowu	03-23	199	4155.7	03-14	226	4597.9	03-10	226	4542.5
	建瓯 Jian'ou	03-23	198	4120.7	03-14	221	4364.6	03-09	221	4281.0
	福鼎 Fuding	03-27	212	4137.2	03-18	236	4794.7	03-13	236	4849.2
	南平 Nanping	03-24	198	4144.8	03-17	220	4378.7	03-12	220	4299.5
	宁德 Ningde	03-15	227	4520.6	03-04	252	5177.0	03-02	252	5229.4
	上杭 Shanghang	02-26	292	4937.4	02-15	267	5572.9	02-12	267	5604.3
	永安 Yong'an	03-05	236	4664.7	02-20	258	5302.7	02-20	258	5360.1
	漳平 Zhangping	03-11	221	4157.0	02-22	249	4909.1	02-22	249	4903.7
Ⅲ	浦城 Pucheng	03-24	198	3772.4	03-17	227	4617.0	03-11	227	4584.6
	泰宁 Taining	03-25	202	3828.2	03-15	220	4529.2	03-12	220	4389.2
	长汀 Changting	03-18	236	3800.0	02-24	255	4428.2	02-24	255	4485.2
	屏南 Pingnan	03-27	182	3122.1	03-19	214	4076.4	03-17	214	3992.4
平均 Average		03-03	240	4675.0	02-21	259	5280.1	02-19	260	5282.3

效途径. 未来 10 ~ 22 ℃初终日之间≥10 ℃积温全年可增加 690 ℃左右,将导致水稻品种布局发生变化. 闽东南双季稻区所有区域的早稻与后季稻均可采用晚熟品种(≥10 ℃积温∑T≥4970 ℃),以替代当前某些地区采用的中熟品种. 闽西北双季稻区的宁德、上杭、永安种植的早稻与后季稻品种也可由当前的中熟品种改为晚熟品种;而福鼎和漳平则可用中熟品种取代早熟品种(∑T≥4540 ℃);甚至较高海拔的邵武、南平、建瓯未来双季稻也有望其中一季采用中熟品种来替代现有的两季早熟品种. 而当前单季稻区中 3 个区域(浦城、泰宁、长汀)未来积温均可满足双季稻种植要求.

结合未来情景下降水的变化趋势,A2 与 B2 情景下双季稻生育期降水平均增长 20% ~30%,降水量的增加完全可以满足采用晚熟品种后水稻的生长需要. 单季稻种植区降水也可增加 30% 左右,结合热量条件的增加,亦可以满足品种及稻作制度的变更需求.

由表 4 可知,A1B 情景下水稻安全播种期平均提前了 12 d,平潭和宁德提前了 15 d 以上;生长季长度平均延长了 21 ~ 36 d. 积温的平均增长幅度较 A2 和 B2 情景更为极端,达到了 910.8 ℃,在该种情景下可利用的热量资源会更多. 未来闽东南稻区早稻与后季稻均可采用晚熟品种,甚至在闽西北双季稻区,除福鼎以外的 7 个区域两季均可采用晚熟品种;而海拔较高的单季稻种植区,未来不仅可种植双

表 4　福建省各稻区代表性区域在基准时段和 A1B 情景下水稻生长季的起始日期、持续天数及全年≥10 ℃积温
Table 4　Initial time, length of rice growth duration and ≥10 ℃ accumulated temperature of total year based on BASE and A1B scenarios in representative areas of Fujian Province

稻区 Rice region	区域 Area	BASE			A1B		
		日期 Date	天数 Days	积温 $\sum T$ (℃)	日期 Date	天数 Days	积温 $\sum T$ (℃)
Ⅰ	福州 Fuzhou	02-22	254	5204.4	02-09	275	6013.0
	平潭 Pingtan	01-26	296	5977.7	01-12	323	6959.1
	漳州 Zhangzhou	02-07	276	5535.1	01-24	300	6402.6
	厦门 Xiamen	01-30	288	6018.7	01-17	312	6915.3
	东山 Dongshan	01-29	290	6023.0	01-15	315	6948.0
Ⅱ	邵武 Shaowu	03-17	209	4150.8	03-03	243	4999.7
	建瓯 Jian'ou	03-09	228	4479.5	02-26	255	5392.8
	福鼎 Fuding	03-18	211	4172.6	03-05	238	4952.9
	南平 Nanping	03-02	239	4800.4	02-22	260	5608.6
	宁德 Ningde	03-03	238	4860.5	02-15	267	5781.1
	上杭 Shanghang	02-17	247	4681.8	02-03	284	5819.2
	永安 Yong'an	03-03	234	4526.8	02-21	258	5349.2
	漳平 Zhangping	02-27	233	4411.2	02-18	261	5364.1
Ⅲ	浦城 Pucheng	03-20	204	3830.1	03-06	239	4888.6
	泰宁 Taining	03-11	228	4058.7	02-27	251	4876.4
	长汀 Changting	02-27	236	4031.6	02-19	263	4985.2
	屏南 Pingnan	03-19	201	3657.2	03-06	234	4648.1
平均 Average		02-26	242	4730.6	02-14	269	5641.4

季稻，而且积温达到了一季晚熟品种一季中熟品种的要求($\sum T \geqslant 4710$ ℃).

A1B 情景下降水的变化则不利于水稻的生长，一些区域降水较当前减少 10% ~20%，尤其是闽东南地区，后季稻生育期当前因为地形影响降水偏少，未来降水的减少不利于晚熟品种的生长. 所以未来对品种及种植制度调整时，在一些降水减少的地区需采取一定的灌溉措施以保证水稻的生长.

3　讨　论

一般来说，分辨率越高的模拟，其拟合精度越差，这种气象因子模拟的误差不可避免会增加气候影响评价结果的不确定性，所以通过订正可以在一定程度上予以弥补. PRECIS 可以模拟出当前及未来不同浓度下的气候情景，在当前及未来情景下模拟出的气象要素值必然会产生一定的差异，原因在于温室气体浓度增加所引起的气候变化. 因此可将这两种情况下各气象要素的差值或比值订正到当前各样点的逐日气象要素的观测值上. 这种订正可以将一些区域气候模型尚未考虑而确实对当地气候产生影响的因子都包括到其模拟的未来情景中去[26]. 因为一个地点的多年气候正是这些因子和大气环流特征等其他因子综合作用的结果，而后者已经由区域气候模型本身加以考虑了. 但是将气象要素的月平均增幅或比率订正到日值上，忽略了一个月内每日气象要素的增幅或比率也会有变化，故这种误差亦可能增加分析结果的不确定性. 相信随着未来区域气候模型的不断改进，对未来气候情景的模拟精度将会不断提高.

对福建省水稻生育期气温与降水时空变化的研究采用了 17 个代表性样点进行模拟分析，但是由于全省以山地丘陵为主，造成了不同山地垂直气候特点对水稻生长的影响常常在很小的县域范围内也会有明显差异. 有学者利用 PRECIS 生成的网格点气候情景，结合相关 GIS 技术，对各地气候变化的影响进行评估[16,27]. 因此今后需对不同地形影响下更密集网格点内的气象要素变化开展全面研究，以便科学合理地分析未来气候变化特点及对福建省水稻生产精细区划及优化布局的影响，进一步分析不同海拔高度与稻作制度、品种布局之间的关系.

稻作制度的改变是一个复杂的过程，牵涉到大量社会、经济、环境和科技进步等问题，根据人类现有的认识，尚无法对今后这些因素的变化做出合理估计，因此只能着重考虑气象要素的可能变化对此做出预估. 可以通过气候变化情景与作物模型嵌套的方法进一步分析不同情景下改变稻作制度及品种布局后水稻生产及产量的改变. 此外，各种种植措施的调整也是一种较缓慢的过程，因此，需要根据未来

气候可能的变化进行研究,以引导农民和生产部门适应新的环境变化. 笔者采用的 IPCC 的 SRES 排放方案中 A2、B2 和 A1B 情景虽然描述了未来可能的社会发展方向及温室气体的排放情况, 但是任何情景都只是未来社会经济发展路径的一种可能, 所以未来气候变化的结果并不完全一致,不仅各地增温幅度不一,降水的时空改变也有一定差异,根据现有的技术发展以及减排现状,很难说今后哪一种情景更容易出现. 所以在气候变化情景生成方面还存在着一定的不确定性. 对 3 种排放浓度下 PRECIS 模拟的气候情景同时进行分析,若趋势相同,则认为将来出现的可能性较大.

4 结 论

未来福建省水稻生育期的气温呈上升趋势,近期(2011—2030 年)各区域的升温幅度在 0.2 ~ 2.5 ℃,远期(2031—2050 年)则达到了 0.5 ~ 3.6 ℃. 单季稻生育期增温幅度最大,近期和远期增温幅度依次为 0.3 ~ 2.4 ℃和 1.5 ~ 3.4 ℃;早稻生育期增温幅度最小,两个时段依次为 0.2 ~ 0.9 ℃和 0.7 ~ 1.7 ℃;后季稻生育期增温幅度介于中间,两个时段依次为 0.3 ~ 2.1 ℃和 0.5 ~ 3.6 ℃. 未来 3 种情景中 A1B 情景增温幅度最大. 3 种情景下都表现为后季稻生育期日均温年际波动幅度较大,其次是单季稻,早稻生育期日均温年际波动较小.

福建省未来水稻生育期降水在大部分区域都有所增加,A2 和 B2 情景下早稻生育期降水增加最多,为 10% ~40%,后季稻增加 10% ~20%;单季稻增加 10% ~30%. 远期变化与近期变化相似. A2 和 B2 情景下闽东南稻区降水变率大于闽西北双季稻及单季稻区. 双季稻区早稻生育期的降水变率略大于后季稻. A1B 情景下水稻生育期降水量与基准年份相比变化较小,波动幅度亦较小.

根据本研究结果,未来福建省后季稻生育期遭遇高温与极端天气的频率将增加;而早稻生长可能受到降水量增多导致的阴雨寡照天气的影响. 气温上升也导致了 10 ℃以上积温增加及水稻生长季延长,加之高温导致水稻生育期缩短,在降水或灌溉条件满足水稻生长要求的情况下,两者的综合效应将使某些单季稻区转为双季稻区成为可能,各稻区的品种布局和播期等农事制度也需做出相应调整,如用晚熟品种替代中熟或早熟品种,以充分利用未来水稻生长季的热量资源,尽量延长水稻生长与光合时间,以弥补生育期缩短导致的光合积累减少及产量的降低.

参考文献

[1] Li K-R (李克让), Chen Y-F (陈育峰). The progress in methodologies to study impacts of global climate change in China. *Geographical Research* (地理研究), 1999, **18**(2): 214-219 (in Chinese)

[2] Lin X-C (林学椿), Yu S-Q (于淑秋). Climatic trend in China for the last 40 years. *Meteorological Monthly* (气象), 1990, **16**(10): 16-22 (in Chinese)

[3] Tu Q-P (屠其璞), Deng Z-W (邓自旺), Zhou X-L (周晓兰). Studies on the regional characteristics of air temperature abnormal in China. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 2000, **58**(3): 288-296 (in Chinese)

[4] Chen L-X (陈隆勋), Shao Y-N (邵永宁), Zhang Q-F (张清芬), *et al*. Preliminary analysis of climatic change during the last 39 years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 1991, **2**(2): 164-174 (in Chinese)

[5] Emori S, Nozawa T, Abe-Ouchi A, *et al*. Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999, **77**: 1299-1307

[6] Flato GM, Boer GJ, Lee WG, *et al*. The Canadian centre for climate modeling and analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, 2000, **16**: 451-467

[7] Gordon HB, Farrell SPO. Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. *Monthly Weather Review*, 1997, **125**: 875-907

[8] Cullen MJP. The unified forecast climate model. *Meteorological Magazine*, 1993, **122**: 81-94

[9] Jin Z-Q (金之庆), Ge D-K (葛道阔), Gao L-Z (高亮之), *et al*. Food crop production strategies for adaptation to global climate change in the sampling zones of eastern China: A modeling study. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 1998, **31**(4): 51-58 (in Chinese)

[10] Liu T-J (刘桃菊), Yin X-Y (殷新佑), Qi C-H (戚昌瀚), *et al*. Relationships between climate change and rice development and its yield formation: A simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(3): 486-490 (in Chinese)

[11] Xiong W (熊 伟), Xu Y-L (许吟隆), Lin E-D (林而达), *et al*. Regional simulation of rice yield change under two emission scenarios of greenhouse gases. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(1): 65-68 (in Chinese)

[12] Luo Y (罗 勇), Zhao Z-C (赵宗慈). Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR RegCM2. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 1997, **8**(suppl. 1): 124-133 (in Chinese)

[13] Wei H-L (魏和林), Fu C-B (符淙斌), Wang W-Q (王维强). The effect of lateral boundary treatment of

regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 1998, **22**(5): 104–115 (in Chinese)

[14] Jones RG, Noguer M, Hassell DC. Generating High Resolution Climate Change Scenarios using PRECIS. Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004

[15] Xu Y-L (许吟隆), Jones R. Validating PRECIS with ECMWF reanalysis data over China. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2004, **25**(1): 5–9 (in Chinese)

[16] Yang S-B (杨沈斌), Shen S-H (申双和), Zhao X-Y (赵小艳), *et al*. Impacts of climate changes on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2010, **36**(9): 1519–1528 (in Chinese)

[17] Jiang M (江　敏), Jin Z-Q (金之庆), Yang H (杨慧), *et al*. Simulation research of rice production under IPCC SRES A1B scenario in Fujian Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012 (5): 625–634 (in Chinese)

[18] Xiao G-J (肖国举), Zhang Q (张　强), Wang J (王静). Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(8): 1877–1885 (in Chinese)

[19] Zhang J-P (张建平), Zhao Y-X (赵艳霞), Wang C-Y (王春乙), *et al*. Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(7): 1179–1184 (in Chinese)

[20] Xu YL, Huang XY, Zhang Y. Statistical analysis of climate change scenarios over China in the 21st century. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2**: 50–53

[21] Zeng C-S (曾从盛). Ecological Environment in Fujian Province. Beijing: China Environmental Science Press, 2005 (in Chinese)

[22] Tong W-X (童万享). Fujian Agricultural Resources and Regional Planning. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1990 (in Chinese)

[23] Meteorological Bureau of Fujian (福建省气象局). Fujian Agricultural Climatic Resources and Regional Planning. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1990 (in Chinese)

[24] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers [EB/OL] (2007-02-02) [2010-11-14]. http://www.ipcc.ch

[25] IPCC. The Scientific Assessment, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[26] Jin Z-Q (金之庆). Impacts of Global Climate Change on Food Production in China. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 1996 (in Chinese)

[27] Xiong W (熊　伟), Xu Y-L (许吟隆), Lin E-D (林而达), *et al*. Simulation experiment of RCM and crop model combination and its uncertainty assessment. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(7): 741–746 (in Chinese)

作者简介　江　敏, 女, 1967 年生, 副教授, 博士研究生. 主要从事气候变化与作物模拟研究, 发表论文 10 余篇. E-mail: fjaujm@163.com

责任编辑　张凤丽