DOI: 10.5846/stxb201611202362

刘文茹,陈国庆,曲春红,居辉,刘勤.RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究.生态学报,2018,38(1):156-166. Liu W R, Chen G Q, Qu C H, Ju H, Liu Q.Variations in potential climatic productivity of wheat and rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River under RCP scenarios.Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):156-166.

RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化 特征研究

刘文茹¹,陈国庆¹,曲春红^{2,*},居 辉³,刘 勤³ 1山东农业大学农学院,泰安 271018 2中国农业科学院农业信息研究所,北京 100081 3中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081

摘要:基于 BCC_CSM 1.1 全球气候模式 RCP 气候情景输出的 2021—2050 年和基准年(1961—1990) 逐日气候资料,采用机制法 预估长江中下游地区稻麦气候生产潜力,并利用 Theil-Sen 斜率估计、MK 检验和 ArcCIS 空间分析等方法对稻麦气候生产潜力 的年际变化趋势和空间分布特征进行分析,旨在探明影响稻麦气候生产潜力变化的主要气候因子,对评价未来的作物潜在生产 能力和制定气候变化的适应性策略具有重要意义。结果表明:基准气候时段下(1961—1990年),长江中下游地区稻麦气候生 产潜力分别介于 10000—12000 kg/hm²和 8000—10500 kg/hm²之间,水稻气候生产潜力总体呈现上升趋势而小麦呈现下降趋 势。水稻气候生产潜力在空间上表现为自研究区域中部向南北逐渐增加,冬小麦则呈现北高南低的分布特征;未来两种气候情 景下(RCP 8.5 和 RCP 4.5),稻麦气候生产潜力总体均呈现显著线性增加趋势,表现为 RCP 8.5 情景大于 RCP 4.5。水稻气候生 产潜力的增加速率较冬小麦大两倍左右,且年际波动较小,稳定性强。RCP 4.5 气候情景下,研究区域内稻麦气候生产潜力总 体呈现明显的区域分异,与基准年相比分别增加了 3500—5000 kg/hm²和 5000—6500 kg/hm²。东部沿海地区、两湖平原地区和 江西为稻麦气候生产潜力高值区域。冬小麦气候生产潜力与基准时段相反呈现出由南向北递减趋势,南昌和长江三角洲部分 地区呈现出显著增加趋势(>80 kg hm⁻² a⁻¹),水稻则表现为自中西部向东南部沿海逐渐增加。在 RCP 8.5 情景下,冬小麦气候 生产潜力较基准年增加了 4000—6000 kg/hm²;从地域分布特征看,呈现自东向西逐渐减少的趋势,长江三角洲、南阳盆地和两 湖平原为高值区,庐山周边区域(近鄱湖阳湖)变化率高达 80 kg hm⁻² a⁻¹(P<0.05)。水稻气候生产潜力空间分布与基准年相 似, 仅较基准年增加 1000 kg/hm²左右, 两湖平原和庐山周边地区和江苏中部大于 11000 kg/hm², 较基准年高值区面积有所扩 大。长江中下游地区稻麦气候生产潜力受气候变化和地理位置的双重影响。作物生育期内≥10℃积温为主导因子,其次为太 阳总辐射,而降水量的影响较小。平原地区作物气候生产潜力较同一纬度地区大。区域农业气候资源在保证足够数量的同时 相互协调更是获得高气候生产潜力重要条件。

关键词:气候生产潜力;稻麦轮作;长江中下游地区;影响因素;时空变化特征

Variations in potential climatic productivity of wheat and rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River under RCP scenarios

LIU Wenru¹, CHEN Guoqing¹, QU Chunhong^{2,*}, JU Hui³, LIU Qin³

1 Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Based on daily meteorological data under the representative concentration pathway (RCP) climate scenarios

基金项目:农业部法制建设与政策调研项目;中国农业科学院科技创新工程;国家自然科学基金项目(41401510)

收稿日期:2016-11-12; 网络出版日期:2017-09-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: quchunhong@ caas.cn

(2021-2050) and baseline climatic conditions (1961-1990) extracted from the Beijing Climate Center Climate System Model version 1-1 (BCC CSM1), global climate patterns for the middle and lower Yangtze River and potential climatic productivity of winter wheat and rice were estimated using the attenuation method. The spatial and temporal characteristics of potential climatic productivity over the next 30 years were estimated using the Theil-Sen's slope estimator and the Mann-Kendall statistical method. The sequential driving factors of the dynamics of potential climatic productivity were determined. The results showed that the estimated potential climatic productivity of winter wheat was 10000-12000 kg/hm², whereas that of rice was 8000—10500 kg/hm². The potential productivity of wheat tended to increase from the central to the southern areas, whereas the potential productivity of rice exhibited the opposite tendency, decreasing from north to south during the baseline period. The climatic production potential of winter wheat and rice increased significantly, with greater annual increases and less fluctuations for rice than for winter wheat under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. In the RCP4.5 scenario, the potential climatic productivity of rice and winter wheat exhibited strong regional characteristics, increasing by 3500-5000 kg/hm² and 5000-6050 kg/hm², respectively, from those under the baseline scenario. With high values in the Two-lake plains and Jiangxi Province, and significantly increasing tendencies for Nanchang of ≥ 80 kg hm⁻² a⁻¹, the potential climatic productivity of winter wheat slightly decreased from south to north. In the RCP8.5 scenario, the overall potential climatic productivity of rice and winter wheat exhibited significantly increasing amplitudes of 4000-6000 kg/hm² and 11000 kg/hm², respectively, from those under the baseline scenario. The potential climatic productivity of winter wheat tended to decrease gradually from east to west in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The highest values were predicted in the Yangtze River delta, Nan yang basin, and Two-lake plains, and an increment of over 80 kg/hm² was predicted in the area surrounding Mount Lu (P < 0.05). Potential climatic productivity was affected by both agricultural meteorological elements and geographical location. The potential climatic productivity of crops in the plains was greater than that in other areas at the same latitude. During the growth period, accumulated temperature was the most important factor affecting plant growth, followed by solar radiation. Accordingly, sufficient and harmonious climatic resources are thought to be the essential conditions for obtaining high potential climatic productivity.

Key Words: climatic potential productivity; rice-wheat rotation; middle and lower Yangtze River; influencing factor; variation characteristics

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第一工作组第五次评估报告 AR5 指出:迄今为止,大气中温 室气体浓度仍持续上升,在自然和人为影响因素共同作用下全球气候系统持续变暖是毋庸置疑的事实^[1]。 未来气候变化将导致全球年平均气温继续升高,至 2050 年中国可能升高 2.3—3.3℃,降水量增加 5%— 7%^[2]。气候资源的数量、质量及组合特征的改变,极端气候事件和自然灾害将频繁发生,从而直接或间接的 影响了作物的生产潜力^[3]。作物气候生产潜力是评价粮食生产能力重要指标,同时反映气候资源与作物之 间的协调程度^[3-5]。长江中下地区是我国粮食主产区之一,水稻和小麦又均为我国主要粮食作物^[6],在国家 安全粮食问题中起着举足轻重的作用。因此,在气候变化大背景下针对长江中下游稻麦周年气候生产潜力的 研究对评价未来的作物潜在生产能力和制定气候变化的适应性策略具有重要意义。

迄今为止,在气候变化大背景下诸多研究者采用不同方法针对作物气候生产潜力的进行了一系列的研究,并取得相应成果^[7-13]。国内"作物生长动态模型模拟"和"潜力衰减法"等方法应用较为广泛^[14]。王秀芳等^[15]和王宗明^[16]应用"潜力衰减法"分别计算东北地区玉米气候生产潜力并分析相应影响因素,结果指出温度升高,光温生产潜力呈增加趋势,气候生产潜力则随降水量的减少而减少,由于降水变率大,导致气候生产 潜力的年际波动较大。黄川容等^[17]和刘建栋等^[18]分别应用 WOFOST 和 ARIDCROP 模型对中国黄淮海地区 冬小麦、夏玉米的气候生产潜力进行了数值模拟研究,结果表明黄淮海地区夏玉米气候潜力均呈现下降趋势, 冬小麦气候潜力呈现上升趋势,表现为北低南高,水分是黄淮海北部地区冬小麦气候生产力的一个重要限制 以往的研究大多基于历史资料来分析气候生产潜力的时空分布特征、资源利用情况以及对气候变化的响应等^[20-22],但针对未来长江中下游地区稻麦轮作气候生产潜力时空变化的研究鲜见报道,关键影响因素也尚不明确。本研究基于典型浓度路径 RCPs 排放情景,由于 RCP 4.5 和 RCP 6.0 均属于中等浓度排放路径,RCP 2.6 属于较理想排放路径,故选择 RCP 8.5(到 2100 年当量浓度所引起的辐射强迫达到 8.5 W/m²以上,并将持续上升)和 RCP 4.5(辐射强迫达到 4.5—6.0 W/m²左右),因此,以长江中下游地区水稻、冬小麦为研究对象,运用"潜力衰减法"模拟 2021—2050 年作物气候生产潜力,利用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kennal 趋势检验法分析比较 RCP 8.5 和 RCP 4.5 情景下未来 30 年稻麦气候生产潜力相对基准年的时空变化特征,试图探明影响稻麦气候生产潜力变化的主导因素,为进一步挖掘稻麦气候生产潜力提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

如图 1,长江中下游(27°33′—34°9′N、110°49′—122°30′E)属南方冬麦区、双单季稻亚区,北抵秦岭淮河, 西至鄂西山地及湘西丘陵区,东至东海海滨,南至南岭,包括江苏、安徽、湖北大部,上海市全部以及湖南、江 西、浙江和河南省的部分地区。气候湿润,降雨充沛,生长季降水为 700—1300 mm,气候大部分属北亚热带。 光照资源丰富,年≥10 ℃积温约 4500—5500℃,年日照时数约 1300—1500 h。安徽和江苏、湖北北部地区属 于华北单季稻作区,其余大部分属于华中单双季稻稻作区^[23]。由于经济发展、劳动力的转移、气候气候变化 等多方面因素影响,该种植结构和配置均发生了改变,双季稻面积下降,单季稻面积增加,双季稻向稻麦两熟 发展,稻一麦轮作成为了主要种植方式之一^[24]。稻麦周年轮作种植体系中,水稻于六月份插秧,十一月份水 稻收获后种植冬小麦,翌年6月收获^[25]。



Fig.1 The location of meteorological stations in the middle and lower Yangtze River Basin

1.2 资料来源

本文选用国家气象局提供的 BCC-CSM1-1 模式 RCPs(RCP 8.5 和 RCP 4.5)情景输出的 1961—1990 年 (基准时段)和 2021—2050(未来时段)0.5°×0.5°逐日格点数据资料集,包括降水(P,mm)、太阳总辐射(RS, KJ/cm²)、平均温度(Ta,℃)、相对湿度(RH,%)、风速(WS,m/s)等。应用双线性内插法降尺度到长江中下游 及邻近区域 62 个基本气象站点。以 1961—1990 为基准年,根据同期等长模拟数据和观测数据的非线性函数

http://www.ecologica.cn

关系建立订正模型,并利用方差订正法对 2021—2050 年模拟数据进行误差订正,获得可信度更高的预估数据^[26]。

1.3 研究方法:

1.3.1 机制法估算气候生产潜力

机制法又称为潜力衰减法或逐级订正法,是目前计算气候生产潜力广泛应用的方法之一^[27]。本文基于研究区域各气象站点订正后主要气象要素的逐日资料,通过温度、水分校正系数光合生产潜力、光温生产潜力,进行修正后获得,由光温水共同作用下得到的站点逐年气候生产潜力。计算得到站点多年稻麦气候生产 潜力平均值,利用 ArcGIS 软件的形成稻麦气候生产潜力空间分布图,同时计算出逐年区域平均值,形成稻麦 气候生产潜力时间变化趋势图。ETO 采用 FAO 推荐的公式计算,计算公式如下^[28-31]

$$YW = YQ \cdot f(t) \cdot f(w)$$
(1)

$$YQ = 0.219 \cdot Rs \cdot C$$
(2)

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_{\min}, t > t_{\max}) \\ \frac{t - t_{\min}}{t_s - t_{\min}} & (t_{\min} \le t < t_s) \\ \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_s} & (t_s \le t \le t_{\max}) \end{cases}$$
(3)

$$f(w) = \begin{cases} \frac{P}{ET_c} & (0, \le P < ET_c) \\ 1 & (P \ge ET_c) \end{cases}$$
(4)

$$ET_c = K \cdot ET$$
(5)

 $ET_c = K_c \cdot ET_0 \tag{5}$

式中: *YW* 为气候产量潜力(kg/hm²); *YQ* 为光合生产潜力(kg/hm²); *f*(t)为温度订正函数, *f*(w)为水分订正 系数, 0.219 为黄秉维系数, *C* 为作物经济系数, *Rs* 为作物生长季内太阳总辐射(MJ/m²)。经济系数 *C* 的取值 依作物而定,本文中冬小麦和水稻经济系数 *C* 分别为 0.45、0.5。*P* 为该时段内的降水量(mm); ETc 为作物 需水量(mm), *ET*。为作物蒸散量(mm), *K*。为作物系数冬小麦和水稻分别取 0.45、0.5, 温度三基点(T_{min} , T_s 、 T_{max})分别 3℃、22℃、32℃和 10℃、30℃、42℃^[32]。

1.3.2 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kennal 趋势检验

Theil-Sen 斜率(*TS*_{slope})估计是一种非参数估计法,常用于估计长时间序列数据的长时间序列趋势变化^[33],本文采用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kennal 趋势检验法,分别获取区域稻麦气候生产潜力的趋势变化情况。

Theil-Sen 斜率的计算公式^[34-35]:

$$TS_{\text{slope}} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}\right)$$
(6)

式中, median 表示中位数函数; x_i、x_j为序列数据, t_i、t_j为与序列数据对应的时间序列数据; 序列长度为 n, 有 i<j ≤ n 当 TS_{Slope}>0 时表示上升趋势, 反之, TS_{Slope}<0 表示下降趋势; | TS_{Slope} | 值越大表示上升或下降的强度越大。 通过 Mann-Kennal 趋势检验来判断上升或下降变化趋势是否显著。

采用非参数的曼-肯德尔法(Mann-Kendall)检验法计算 UF 和 UB 两个统计量来揭示时间序列中稻麦气候 生产潜力的长期变化趋势,突变特征。其优点是不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的干扰,检测 范围宽、定量化程度高,计算方便^[36-37]。

1.3.3 相关分析及 Pearson 相关系数

皮尔逊积矩(Pearson)相关系数主要用来度量区间变量之间的线性相关,通过相关系数进行两个变量间 线性关系的分析,计算样本相关系数 r,然后对线性相关的显著程度进行推断。

$$r = \frac{N \sum x_{i} y_{i} - \sum x_{i} \sum y_{i}}{\sqrt{N \left(\sum x_{i}\right)^{2} - \left(\sum x_{i}\right)^{2}} \sqrt{N \sum y_{i}^{2} - \left(\sum y_{i}\right)^{2}}}$$
(7)

式中,*n*为样本数,*x_i*和*y_i*分别为两样本的变量值.相关系数取值范围−1≤*r*≥1,|*r*|表明两个变量间的相关程度,当-1≤*r*<0时,表示负相关;当0<*r*≥1时,表示正相关;当*r*=0时,表示零相关。

2 结果与分析

2.1 长江中下游地区稻麦气候生产潜力空间变化特征

2.1.1 基准气候时段长江中下游地区稻麦气候生产潜力空间变化特征

由图 2 可见,基准气候时段(1961—1990 年)下,长江中下游大部分地区水稻气候生产潜力(10000—12000 kg/hm²)和冬小麦气候生产潜力(8000—10500 kg/hm²)的空间分布各异。水稻总体呈现自研究区域中部向南北逐渐增加趋势,低值区位于武汉、南京、合肥地区周边区域,而湖北和江苏部分地区大于 12000 kg/hm²,高低区最大产量差为 2927 kg/hm²。就倾向率空间分布可得,庐山周边区域变化倾向率≥50 kg/hm²(P<0.05),其他大部分地区显著性较小,且多通过显著性检验;冬小麦气候生产潜力总体上呈现出北高南低,变化倾向率均为负值,表明呈现出显著降低趋势,长江三角洲、庐山周边区域通过显著性检验。高值区位于江苏省中部沿海地区、南昌、长沙附近区域,均大于 10500 kg/hm²,河南省部分地区冬小麦气候生产潜力小于 8000 kg/hm²且变化率相对较大,且未通过显著性检验。



图 2 基准气候时段(1961—1990)长江中下游地区稻麦气候生产潜力的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of potential climatic productivity (PCP) of wheat-rice rotation in middle and lower Yangtze River under the baseline climate condition(1961-1990)

2.1.2 RCP4.5 情景下长江中下游地区稻麦气候生产潜力空间变化特征

由图 3 可见,未来时段(2021—2050 年),RCP4.5 情景下长江中下游地区模拟稻麦气候生产潜力较基准 时段分别增加了 3500—5000 kg/hm²和 5000—6500 kg/hm²,大部分气候生产潜力均在 15500—17000 kg/hm² 之间。未来 30 年研究区域大部分地区稻麦气候生产潜力区域分布差异较大,东部沿海地区,两湖平原地区, 江西省部分区域属稻麦气候生产潜力高值区(>15000 kg/hm²),可能是地理位置优越多靠近湖泊或位于平原 地区,加上≥10℃积温、降水量和辐射量等气象要素协调,而大别山西部地区和武汉临近区域相对略低。冬小 麦(低温长日照)气候生产潜力表现为由南向北递减趋势,南昌、长江三角洲部分地区呈现出显著增加趋势(> 80 kg hm⁻² a⁻¹),冬小麦南部温度高,降水量大,日照短,导致小麦生育期缩短,提前开花结实,造成小麦气候生 产潜力较低;水稻则表现为自中西部向东南部沿海逐渐增加,研究区域西部地区变化倾向率 111 kg hm⁻² a⁻¹ 且(*P*<0.05),东部地区未通过显著性检验。原因可能是东南沿海地区水分充足,≥10℃积温高而太阳总辐射 低,利于水稻(高温短日照植物)高气候生产潜力的形成。



Fig.3 Spatial distribution of potential climatic productivity (PCP) and variation rate of wheat (B)-rice (A) rotation under RCP 4.5 scenario over the middle and lower Yangtze River during 2021-2050

2.1.3 RCP 8.5 情景下长江中下游地区稻麦气候生产潜力空间变化特征

如图 4 所示, RCP 8.5 情景下长江中下游地区冬小麦气候生产潜力空间分布呈现自东向西逐渐减少的趋势,大部分地区气候生产潜力介于 12000—17000 kg/hm²总体,较基准年增加了 4000—6000 kg/hm²,高值区位 于长江三角洲,南阳盆地,两湖平原部分地区(>17000 kg/hm²),庐山周边区域靠(近鄱湖阳湖)变化率高达 80 kg hm⁻² a⁻¹且(P<0.05),其余地区变化率较小且为通过显著性检验。水稻气候生产潜力大部分地区(9000—13000 kg/hm²)较基准年增加 1000 kg/hm²左右,且空间分布相似。南京和武汉北部地区属低值区气候生产潜力小于 9000 kg/hm²。两湖平原和庐山周边地区和江苏中部部分区域水稻气候生产潜力>11000 kg/hm²,较基 准年高值区面积有所扩大。苏中地区变化率较大(130 kg hm⁻² a⁻¹)并通过 0.05 水平显著性检验,其余两地且 变化率较小且未通过显著性检验。研究表明,由于地理位置和地形的双重影响,平原区域作物气候生产潜力 较同一纬度地区大。

2.2、长江中下游地区稻麦气候生产潜力时间变化趋势

2.2.1 基准气候时段长江中下游地区稻麦气候生产潜力时间变化趋势

由图 5 可知,基准年长江中下游地区水稻气候生产潜力的年际波动较冬小麦大。基准年水稻气候生产潜力呈现上升趋势而小麦呈现下降趋势,稻麦气候生产潜力的变化率分别为 5.5 kg hm⁻² a⁻¹和-11.2 kg hm⁻² a⁻¹ (*P*<0.05)。分析可得冬小麦气候生产潜力自 1978—1990 年高低年交替出现,而 1969—1977 年波动相对较小。水稻气候生产潜力无明显规律,1961、1971、1973 年出现 3 个高值年。

2.2.2 未来气候时段长江中下游地区稻麦气候生产潜力时间变化趋势

图 6 为 RCP 8.5 和 RCP 4.5 排放情景下 2021—2050 年长江中下游地区稻麦气候生产潜力距基准时段 (1961—1990)区域年平均值的差值序列。为了探明未来气候变化大背景下区域内稻麦气候生产潜力的年际 变化趋势,用 Mann-Kendall 检验分析发现水稻和冬小麦气候生产潜力总体均呈现显著线性增加趋势,说明二



图 4 RCP8.5 情景下 2021—2050 年长江中下游地区稻麦气候生产潜力的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of potential climatic productivity (PCP) of wheat-rice rotation under RCP 8.5 scenario over the middle and lower Yangtze River during 2021—2050

者都具有一定的开发潜力。由图可得,两种排放情景下 稻麦气候生产潜力增加幅度均表现为 RCP 8.5>RCP 4.5。冬小麦上升幅度分别为 61 kg hm⁻² a⁻¹和 34 kg hm⁻² a⁻¹(*P* <0.05),且年际变化较大。水稻气候生产潜 力的稳定性强,年际变化率较小,但增加速率较冬小麦 气候生产潜力变化率约大两倍,且均在 2023 年出现极 低值。

2.3 作物气候生产潜力的主要影响因子

为探明导致未来作物气候生产潜力变化的主导因 子,分析未来不同情景下≥10℃积温、降水量、太阳总辐 射等气象要素距平时间变化趋势,并通过 Theil-Sen 斜 率估计和 Mann-Kennal 趋势检验未来各情景下气象要 素及气候生产潜力的变化率,并利用 Pearson 相关分析 气候生产潜力与气象要素相关系数。

-O- Baseline小麦 -- Baseline水稻 3000 距平气候生产潜力 potential productivity/(kg/hm² $y_r = 5.521x - 10907$ 2000 1000 0 -1000-2000 = -11.20x + 22141-3000 Climatic -4000 960 963 969 978 966 972 975 984 987 990 98] 年份 Year

图 5 基准年(1961—1990 年)长江中下游地区气候生产潜力的 年际变化趋势

Fig. 5 Annual Variations of potential climatic productivity (PCP) under baseline scenario over the middle and lower Yangtze River during 1961—1990

由图 7 可知, RCP 8.5 和 RCP 4.5 情景下 2021— 2050 年长江中下游地区稻麦生育期内≥10℃积温、降水量、太阳总辐射量较基准年相比三者均呈现增加趋势,≥10℃积温增加最为明显,降水量年际波动较大。冬小麦生育期内太阳总辐射量,降水量较基准年的增加 幅度较水稻大,≥10℃积温则与之相反。RCP 8.5 情景下,稻麦生育期太阳总辐射量及冬小麦生育期内≥ 10℃积温总体上高于 RCP 4.5 情景。

由表可知(表1),RCP 8.5 和 RCP4.5 情景下冬小麦气候生产潜力与≥10℃积温相关系数分别为 0.7 和 0.51(P<0.01)呈现极显著正相关。与太阳总辐射相关系数分别为 0.52(P<0.01)和 0.38(P<0.05)相关系数略 小但均通过显著性检验。水稻气候气候生产潜力与太阳总辐射相关系数较小并未通过显著性检验,而与≥ 10℃积温相关系数分别为 0.35 和 0.42(P< 0.05)呈现极显著低度相关。即作物生育期≥10℃积温是影响稻 麦气候生产潜力的主导因子,其次为太阳总辐射,而降水量与作物气候生产潜力无明显线性关系。





Fig.6 Annual Variations of potential climatic productivity (PCP) of winter wheat and rice under RCP 8.5 and RCP 4.5 scenarios over the middle and lower Yangtze River during 2021—2050



图 7 未来时段 RCP 情景主要气候要素较基准时段变化趋势

Fig.7 The variations of main meteorological elements under RCP scenarios over the middle and lower Yangtze River during 2021-2050 compared with baseline

由表可知(表 2),较基准年相比, RCP 8.5 情景下稻麦气候生潜力的变化幅度分别为 101.3 kg hm⁻² a⁻¹ (*P*<0.01)和 70.0 kg hm⁻² a⁻¹(*P*<0.01), RCP 4.5 情景下分别为 71.7 kg hm⁻² a⁻¹(*P*<0.05)和 34.0 kg hm⁻² a⁻¹ (*P*<0.05),即稻麦气候生产潜力增加幅度均表现为 RCP 8.5>RCP 4.5,且麦季大于稻季, RCP 8.5 情景下气候 生产潜力水平较 RCP 4.5 高,变化率却与之相反,但是水稻季≥10℃积温变化率 RCP 4.5 远大于 RCP 8.5,表 明未来 30 年稻麦气候生产潜力与作物生育期内主要气候资源变化趋势一致,气候生产潜力随着气候资源的 增加而增加;但是并非单一气候资源的增加速率越大越好,而是多个气候资源相互协调,且变化幅度趋于一致 是促进高气候生产潜力的主要关键因素。

表 1	气候生产	潜力与主要	要气象要	素的相关	系数
-----	------	-------	------	------	----

Table 1	The correlation index of	notential climatic	productivity (PCP)) and the main	meteorological	elements
I HOIC I	The correlation mach of	potential chinade	productivity (1 Gr	/ unu une mum	meteororor	cicilicitu.

气象要素	RCP 8.5		RCP 4.5	
Meteorological elements	冬小麦 Winter wheat	水稻 Rice	冬小麦 Winter wheat	水稻 Rice
降水量 Precipitation	0.05	0.14	0.07	0.16
太阳辐射量 Solar radiation	0.52 **	0.32	0.38 *	0.00
≥10℃ 积温 Accumulated temperature	0.70 **	0.35 *	0.51 **	0.42 *

* :P<0.05, ** :P<0.01

表 2 气候生产潜力及主要气象要素的变化率

Table 2 The variations rate of main meteorological elements and potential climatic productivity (PCP)					
变化倾向率	RCP 8.5		RCP 4.5		
Variations rate	冬小麦 Winter wheat	水稻 Rice	冬小麦 Winter wheat	水稻 Rice	
降水量 Precipitation/(mm/a)	0.67	2.18	0.34	0.51	
太阳辐射量 Solar radiation/(MJ m ⁻² a ⁻¹)	8.1 **	5.8 **	9.6**	6.9 **	
≥10℃ 积温/(℃/a) Accumulated temperature	4.1 **	8.5 **	41.3 **	52.7 **	
气候生产潜力/(kg hm ⁻² a ⁻¹) Climate potential productivity	70.0 **	101.3 **	34.0*	71.7 *	
* :P<0.05, ** :P<0.01					

3 结论与讨论

(1)基准年(1961—1990年),长江中下游地区水稻气候生产潜力呈现上升趋势而小麦呈现下降趋势,且 二者变化率较小,大都未通过显著性检验。冬小麦气候生产潜力在空间上总体呈现出北高南低,高值区 (≥10500 kg/hm²)位于江苏省中部沿海地区、南昌和长沙附近区域。水稻表现出自研究区域中部向南北逐 渐增加趋势,低值区位于武汉、南京和合肥周边区域,而湖北和江苏部分地区大于12000 kg/hm²。

(2)在 RCP 8.5 和 RCP 4.5 两种情景下,稻麦气候生产潜力总体均呈现显著线性增加趋势,这与赵俊芳 等^[13]关于黄淮海地区的冬小麦在 B2 情景下 2021—2050 年气候生产潜力结果相似,却与陶苏林等^[28]结果相 反。冬小麦总体表现为 RCP 8.5 稻麦气候生产潜力大于 RCP 4.5. 原因可能为在 RCP 8.5 情景,随着气候变 暖,冬前生育期呈推迟趋势,而越冬之后各生育期呈提早趋势,越冬期缩短,抑制分蘖,抽穗开花,提前穗粒数 减少[38],水稻气候生产潜力的稳定性强,年际变化率较小。

(3)两种情景下,研究区域内稻麦气候生产潜力总体呈现明显的区域分异,冬小麦气候生产潜力增加幅 度和年际变化均较大,具有较大的开发潜力。冬小麦气候生产潜力表现为自东向西,自南向北递减趋势,这与 黄爱军研究结果一致[22]。冬小麦(低温长日照植物)南部温度高,降水量大,日照短,导致小麦生育期缩短, 提前开花结实,造成小麦气候生产潜力较低;水稻气候生产潜力表现为自中部向东部沿海逐渐增加,与葛亚宁 对中国玉米生产潜力的变化特征一致^[39],高值区面积较基准年有所扩大。原因可能是东南沿海地区水分充 足,≥10℃积温高而太阳总辐射低,利于水稻(高温短日照植物)高气候生产潜力的形成。

(4)研究表明稻麦气候生产潜力受农业气象要素和地理位置的双重影响。未来 30 年稻麦气候生产潜力 气候生产潜力随着气候资源的增加而增加,作物生育期≥10℃积温是影响稻麦气候生产潜力的主导因子,其 次为太阳总辐射,而降水量与作物气候生产潜力无明显线性关系。小许艳研究指出江苏省玉米气候生产潜力 主要受太阳有效辐射和温度的影响,不受降水因素的限制[26]。然而潘虹等[40]研究认为降水是限制气候生产 力的主要因素。导致结果不符的原因可能是研究时段和区域差异长江中下游地区降水量充沛。气象要素年 际变化率越大,气候生产潜力增加速率越低,反之则越高。区域单一气候资源的增加速率并非越大越好,在保 证足够数量的同时相互协调的基础上,变化幅度趋于一致是获得高气候生产潜力重要条件[41-42]。未来 30 年 长江中下游地区稻麦气候生产潜力的高值区多位于多靠近湖泊海洋或属平原区域。平原地区作物气候生产 潜力较同一纬度地区大。农业气候资源本研究区域跨度略大纬度、海拔有所不同,导致生育期差异,本文统一 作物生育期标准,由于逐个站点确定生育期有些困难,这将导致气候生产潜力略有偏差,但是总体趋势影响甚 微。本文为进一步挖掘稻麦气候生产潜力和制定合理应对策略提供科学依据^[43-44]。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Summary for policy makers//Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,任贾文,王绍武,伍荣生,杨修群,王苏民,刘时银,董光荣,卢琦,黄镇国,杜碧兰,罗勇.中国气候与环境 演变评估(I)——中国气候与环境变化及未来趋势.气候变化研究进展,2005,1(1):4-9.
- [3] 王宗明,张柏,宋开山.东北地区农业土地资源潜力评价模型及其应用.生态科学,2007,26(4):351-360.
- [4] 黄进勇,李新平,孙敦立.黄淮海平原冬小麦-春玉米-夏玉米复合种植模式生理生态效应研究.应用生态学报, 2003, 14(1):51-56.
- [5] Chavas D R, Izaurralde R C, Thomson A M, Gao X J. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 1118-1128.
- [6] 钟新科,刘洛,徐新良,游松财.近30年中国玉米气候生产潜力时空变化特征.农业工程学报,2012,28(15);94-101.
- [7] 李秀芬,赵慧颖,朱海霞,王萍,王秋京,王铭,李宇光.黑龙江省玉米气候生产力演变及其对气候变化的响应.应用生态学报,2016, 27(8):2561-2570.
- [8] 罗永忠,成自勇,郭小芹.近40a甘肃省气候生产潜力时空变化特征.生态学报,2011,31(1):221-229.
- [9] 林文鹏, 陈逢珍, 陈霖婷, 陈金华. GIS 支持下的漳州市水稻气候生产潜力研究. 福建地理, 2000, 15(1): 30-33, 36-36.
- [10] 褚荣浩,申双和,吕厚荃,李萌,喻丽,沙修竹. RegCM3下 1951-2100 年江苏省热量资源及一季稻气候生产潜力. 江苏农业学报, 2015, 31(4):779-785.
- [11] 郑海霞, 封志明, 游松财. 基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究. 地理科学进展, 2003, 22(4): 400-408.
- [12] 王小平. 气候变化背景下黄淮海地区冬小麦气候生产潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [13] 赵俊芳, 郭建平, 邬定荣, 房世波, 俄有浩. 2011—2050 年黄淮海冬小麦, 夏玉米气候生产潜力评价 应用生态学报, 2011, 22(12): 3189-3195.
- [14] 党安荣, 阎守邕, 吴宏歧, 刘亚岚. 基 GIS 的中国土地生产潜力研究 生态学报, 2000, 20(6): 910-915.
- [15] 王秀芬,杨艳昭,尤飞.黑龙江省气候变化及其对玉米生产潜力的影响.干旱地区农业研究,2012,30(5):25-29.
- [16] 王宗明. 黄土塬区农田生产力模拟与潜力开发试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [17] 黄川容,刘洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响. 中国农业气象, 2011, 32(S1): 118-123.
- [18] 刘建栋,傅抱璞,金之庆,卢其尧,林振山.应用 ARID CROP 模型对中国黄淮海地区冬小麦气候生产力的数值模拟研究.自然资源学报,1997,12(3):282-287.
- [19] 钟新科,刘洛,宋春桥,徐新良,游松财. 1981 年至 2010 年中国东北地区春玉米气候潜力时空变化分析.资源科学, 2012, 34(11): 2164-2169.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith D. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [21] 胡玮,严昌荣,李迎春. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.
- [22] 黄敬峰, 王秀珍, 蔡承侠. 新疆冬小麦物候与气候条件研究. 中国农业气象, 2000, 21(1): 14-19.
- [23] 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 赵艳霞, 许吟隆, 王主玉, 刘娟, 张玮玮. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响. 作物学报, 2010, 36 (9): 1519-1528.
- [24] 辛良杰,李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示. 自资源学报, 2009, 24(1): 58-65.
- [25] 黄爱军. 江淮地区近 50 年农业气候资源时空变化及稻麦生产响应特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [26] 刘文茹, 居辉, 陈国庆, 刘恩科, 刘勤. 典型浓度路径(RCP)情景下长江中下游地区气温变化预估. 中国农业气象, 2017, 38(2): 65-75.
- [27] 庞艳梅,陈超,马振峰.未来气候变化对四川省水稻生育期气候资源及生产潜力的影响.西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43 (1):58-68.
- [28] 赵俊芳, 郭建平, 邬定荣, 房世波, 俄有浩. 2011-2050 年黄淮海冬小麦、夏玉米气候生产潜力评价. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3189-3195.
- [29] 许艳, 濮励杰, 朱明. 基于作物生长期的江苏省沿海地区气候生产潜力估算. 地理科学, 2015, 35(5): 658-664.
- [30] 尹海霞, 张勃, 张建香, 孙力炜, 何旭强. 甘肃省河东地区春玉米气候因子及气候生产潜力时空变化. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1504-1510.

http://www.ecologica.cn

[31]	庞艳梅,陈超,潘学标,韦潇宇.未来气候变化对四川盆地玉米生育期气候资源及生产潜力的影响.中国生态农业学报,2013,21(12)
	1526-1536.

- [32] 张玉芳, 庞艳梅, 刘琰琰, 陈超, 董孝. 近 50 年四川省水稻生产潜力变化特征分析. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 813-820.
- [33] 李翔翔, 居辉, 严昌荣, 刘勤, 李迎春. 1961-2013 年黄淮海平原降蒸差的时空变化特征. 中国农业气象, 2015, 36(3): 254-262.
- [34] 王梅,杨倩,郑江华,刘志辉. 1963—2012 年新疆棉花需水量时空分布特征. 生态学报, 2016, 36(13): 4122-4130.
- [35] Fernandes R, Leblanc S G. Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil-Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 303-316.
- [36] 黄蕊,徐利岗,刘俊民.中国西北干旱区气温时空变化特征.生态学报,2013,33(13):4078-4089.
- [37] 杨建莹, 刘勤, 严昌荣. 近 48a 华北区太阳辐射量时空格局的变化特征. 生态学报, 2011, 31(10): 2748-2756.
- [38] 李祎君,梁宏,王培娟. 气候变暖对华北冬小麦种植界限及生育期的影响. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 382-388.
- [39] 葛亚宁,刘洛,徐新良,张学霞,袁兰兰,张晓峰.近50 a 气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征.自然资源学报,2015,30 (5):784-795.
- [41] 潘虹,邱新法,廖留峰,周寅,龚敬瑜.近50年贵州省气候生产潜力时空变化特征.干旱区资源与环境,2014,28(11):158-163.
- [42] Yang X G, Chen F, Lin X M, Liu Z J, Zhang H L, Zhao J, Li K N, Ye Q, Li Y, Lv S, Yang P, Wu W B, Li Z G, Lal R, Tang H J. Potential benefits of climate change for crop productivity in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208: 76-84.
- [43] Tatsumi K, Yamashiki Y, da Silva R V, Takara K, Matsuoka Y, Takahashi K, Maruyama K, Kawahara N. Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios. Hydrological Processes, 2011, 25(17): 2715-2725.
- [44] 周允华,项月琴,李俊,林忠辉,周智泉.一级生产水平下冬小麦、夏玉米的生产模拟.应用生态学报,1997,8(3):257-262.
- [45] 王连喜,陈怀亮,李琪,余卫东.植物物候与气候研究进展.生态学报,2010,30(2):447-454.