氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

上海地区单季晚稻生长期降水量对产量的影响及产量预估

史艳姝 李军 谈建国 吴蔚 辛跳儿 周宇

Effect of Growing Season Precipitation on Yield of Single Cropping Late Rice in Shanghai and Yield Estimation

SHI Yanshu LI Jun TAN Jianguo WU Wei XIN Tiaoer ZHOU Yu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21041

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

中国区域平均降水量序列构建方法比较研究

Construction Method for Regionally Average Precipitation Time Series in China

气候与环境研究. 2021, 26(1): 45 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20012

短期大规模人口流动对上海市城市热岛效应的影响

Effects of Short-Term Massive Human Migration during the Chinese New Year on the Urban Heat Island Effect in Shanghai

气候与环境研究. 2017, 22(6): 708 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17041

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

1971~2013年我国四季开始日期及生长期长度的变化特征分析

Analysis of Changes in Starting Dates of the Four Seasons and the Length of the Growing Season in China during 1971 to 2013

气候与环境研究. 2017, 22(2): 203 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16030

华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估

Dynamical Downscaling Simulation and Projection of Extreme Precipitation over East China

气候与环境研究. 2019, 24(1): 86 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17169

模式降水订正法及未来年中国降水预估

CMIP5 Model Precipitation Bias-Correction Methods and Projected China Precipitation for the Next 30 Years

气候与环境研究. 2019, 24(6): 769 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19021

关注微信公众号，获得更多资讯信息

史艳姝, 李军, 谈建国, 等. 2021. 上海地区单季晚稻生长期降水量对产量的影响及产量预估 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 583−590. SHI Yanshu, LI Jun, TAN Jianguo, et al. 2021. Effect of Growing Season Precipitation on Yield of Single Cropping Late Rice in Shanghai and Yield Estimation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 583−590. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21041

上海地区单季晚稻生长期降水量对产量的影响及产量预估

史艳姝[1, 2] 李军[1] 谈建国[1, 2] 吴蔚[1, 2] 辛跳儿[1] 周宇[1, 2]

1 上海市气候中心，上海 200030
2 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室，上海 200030

摘 要 为探索上海地区单季晚稻生长期内降水量分配对产量的影响。采用降水集中度（Precipitation Concentration Degree, PCD）和集中期（Precipitation Concentration Period, PCP）研究 1971～2015 年单季晚稻全生育期内降水非均匀分布特征，运用趋势分析法研究单季晚稻全生育期降水分配情况及各生育期降水量与产量之间的关系，基于 CMIP5 全球气候模式情景下降水预估资料，估算 2020～2045 年上海地区单季晚稻生长期降水量对气象产量影响变化。结果表明：近 45 年单季晚稻生长季 PCD 变化趋势不显著，降水分布不均匀， PCP 主要集中在 7 月 27 日至 9 月 11 日，即孕穗期和抽穗期；在分蘖期的降水量占全生育期总量的 29.9%，孕穗期占 26.2%，抽穗期占 7.1%，成熟期占 10.8%，分蘖期和孕穗期降水占全生育期的 1/2 以上；孕穗期降水量与单季晚稻气象产量的负相关关系达显著水平（$p<0.05$）；未来 30 年内降水量对单季晚稻气象产量的负效应略大于正效应，即减产作用大于增产作用。未来气候变化情景下单季晚稻生长期内降水量的变化对产量有影响，应制定相应的适应措施。

关键词 上海 降水量 单季晚稻 产量 预估
文章编号 1006-9585(2021)05-0583-08 **中图分类号** S162.3 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21041

Effect of Growing Season Precipitation on Yield of Single Cropping Late Rice in Shanghai and Yield Estimation

SHI Yanshu[1, 2], LI Jun[1], TAN Jianguo[1, 2], WU Wei[1, 2], XIN Tiaoer[1], and ZHOU Yu[1, 2]

1 *Shanghai Climate Center*, *Shanghai* 200030
2 *Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai*, *China Meteorological Administration*, *Shanghai* 200030

Abstract In order to explore the effect of precipitation distribution on the yield of single cropping late rice in Shanghai, Precipitation Concentration Degree (PCD) and Precipitation Concentration Period (PCP) were used to study the nonuniform distribution characteristics of precipitation during the whole growth period of single cropping late rice from 1971 to 2015. The trend analysis method was used to study the precipitation distribution in the whole growth period of single cropping late rice and the relationship between the precipitation and yield in each growth period. Based on the

收稿日期 2021-02-22；**网络预出版日期** 2021-08-10
作者简介 史艳姝，女，1986 年出生，硕士，工程师，研究方向为农业气候资源评价、农业气象灾害风险评估和特色农产品气候品质评估等。E-mail: sys3331@sina.com
资助项目 科技部公益性行业（气象）科研专项 GYHY201306052，上海市气象局科技开发项目 TD201804
Funded by Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201306052), Shanghai Meteorological Bureau Science and Technology Development Project (Grant TD201804)

CMIP5 Global Climate Model scenario's precipitation forecast data, the precipitation on meteorological yield of single cropping late rice in Shanghai from 2020 to 2045 was estimated. The results showed that the changing trend of PCD in single cropping late rice-growing season was insignificant in the recent 45 years, and the distribution of precipitation was uneven. The PCP mainly concentrated from 27 July to 11 September, the booting and heading stages. The precipitation at tillering, booting, heading, and maturity stages were accounted for 29.9%, 26.2%, 7.1%, and 10.8% of the total growth period, and the precipitation at tillering and booting stages was accounted for more than half of the total growth period. There was a significant negative correlation between the precipitation at the booting stage and the meteorological yield of single-season late rice ($p<0.05$). In the next 30 years, the negative effect of precipitation on the meteorological yield of single cropping late rice will be slightly larger than the positive effect. That is to say, the effect of reducing production will be greater than that of increasing production. The precipitation variation during the single cropping late rice will impact the yield in the future climate change scenario, and the corresponding adaptive measures should be formulated.

Keywords Shanghai, Precipitation, Single cropping late rice, Production, Forecast

1 引言

在全球气候变化背景下，自 20 世纪以来，突发性持续降水事件发生频率逐年升高（IPCC, 2014），并有加剧的趋势，农业生产脆弱性增加，上海地属亚热带地区，降水丰沛，是持续性降水多发区（贺芳芳和赵兵科, 2009; 史艳姝等, 2020）。近年来，上海地区粮食总产量稳定在 90 万吨以上，单季晚稻作为上海最主要的粮食作物之一，在粮食生产中占有非常重要的地位。就上海地区单季晚稻生育期降水变化而言，过分集中的降水，会给单季晚稻发育带来不利的影响。史艳姝等（2019）的分析表明，上海地区 1961～2015 年近 55 年上海地区单季晚稻生长季年降水量随时间呈增加趋势，大雨和暴雨量的增加以及大雨和暴雨降水日数的增加造成单季晚稻需水分配合理利用的负担，生产面临的风险加大。

国内外很多研究学者在降水因子与水稻产量的关系方面做了许多研究，孔维财和尤明双（2021）研究发现，影响长江中下游水稻产量最主要的因子为降水；李茂芬等（2018）研究表明，10 月上旬降水量、平均相对湿度为影响海口晚稻产量的主要限制因子；顾品强等（2009）研究表明，上海地区单季晚稻幼穗分化期遇水分不足会对产量产生不利的影响，可能与此时降水强度呈现增强的变化趋势有关，导致水分利用率偏低。这些研究都为分析单季晚稻产量与降水因子的关系提供了借鉴，在以往的研究中，多以简单的年、月、旬、季等平均降水量来分析降水时空分布特征，不能很好地反应降水量的时空分布特征非均匀分布特征，因此，本研究从上海市主要粮食作物——单季晚稻为切入点，着重分析单季晚稻生长季降水非均匀分布特征，各生育期需水分配情况及降水与产量之间的关系，明确上海单季晚稻生长期降水对关键生育期的影响程度，对着重关注单季晚稻生育期降水效应明确了新的方向。

基于气象因子对单季晚稻产量预测方法较多，本研究从降水因子角度，建立了降水影响下适用于上海的产量模拟模型，对 2020～2045 年上海地区单季晚稻气象产量正负效应进行预估。以此来丰富粮食产量评价和预报方法，稳定预报准确率，以期为单季晚稻生产过程中合理利用农业气候资源、农业气象防灾减灾和气候变化研究提供一定的技术依据。

2 资料与方法

2.1 数据资料

1971～2015 年上海地区单季晚稻实际产量资料来源于上海市统计局。逐日降水资料来源于上海市气象信息与技术支持中心，以 1971～2015 年 10 个郊区气象站（闵行、宝山、嘉定、浦东、金山、松江、青浦、浦东惠南、奉贤和崇明）的平均降水量作为郊区降水量，上海地区单季晚稻生长季常年为 6 月 11 日至 10 月 31 日。

未来气候变化预估数据资料来源于采用 CDF-T 方法（Michelangeli et al., 2009）对 8 个适用于华东区域的 CMIP5 全球气候模式情景数据进行误差订正后（吴蔚等, 2018），得到的 2020～2045 年年降水量数据。

上海地区单季晚稻关键生育期主要选取近年来降水对产量影响的主要时段，每年生育期波动存在年度差异，通过整理关键生育期记载资料，选取生育期普遍时期。所以本文选取单季晚稻生长季为 6 月中旬至 10 月下旬，分蘖期为 6 月 21 日至 7 月 20 日，孕穗期为 8 月 1~31 日，抽穗期为 9 月 6~15 日，成熟期为 9 月 21 日至 10 月 20 日。

2.2　研究方法

2.2.1　降水量集中度和集中期计算

采用 Zhang and Qian（2003）定义的降水集中度（Precipitation Concentration Degree, PCD）和集中期（Precipitation Concentration Period, PCP），对单季晚稻生长季降水量分配特征进行分析。

$$\mathrm{PCD}=\frac{\sqrt{R_{xi}^2+R_{yi}^2}}{R_i}, \tag{1}$$

$$\mathrm{PCP}=\arctan\left(\frac{R_{xi}}{R_{yi}}\right), \tag{2}$$

$$R_{xi}=\sum_{j=1}^{n} r_{ij}\cdot\sin\theta_j, \tag{3}$$

$$R_{yi}=\sum_{j=1}^{n} r_{ij}\cdot\cos\theta_j, \tag{4}$$

其中，R_{xi} 和 R_{yi} 分别为某站单季晚稻生长季内降水量在相互垂直的 x 轴和 y 轴上的分量；i 代表年份（i=1971, 1972, ..., 2015）；j 代表日序（j=1, 2,..., 143，即从 6 月 11 日至 10 月 31 日的序号，n=143）；r_{ij} 为某日降水量；θ_j 为各日对应的方位角（即 143 天看作一个圆周，方位角为 360°）；PCD 和 PCP 分别为研究时段内降水量集中度和集中期。PCD 可反映单季晚稻生长季内降水量的集中程度，取值范围在 0.0～1.0，越小表示降水量越均匀；越大表示降水越集中。PCP 为向量合成后重心指示的角度，反应单季晚稻生长季内日降水量最大出现时段。该方法排除单季晚稻生长季内日对应方位角 0°和 360°的降水集中情况。

2.2.2　气象产量提取

一般把作物的实际产量 y 分解为趋势产量 y_t、气象产量 y_w 和随机误差因素造成的产量 Δy（杨继武, 1994），即

$$y=y_\mathrm{t}+y_\mathrm{w}+\Delta y, \tag{5}$$

趋势产量主要是反映生产力发展水平的长周期产量分量，气象产量主要是受以气象要素为主的短周期变化因子影响的产量分量。由于 Δy 是一些偶然因素影响造成的产量随机变化，在作物产量中占的比例较小，一般在计算中可不考虑。

本研究采用二次多项式拟合得到上海地区 1971～2015 年单季晚稻趋势产量模型：

$$Y_\mathrm{t}=-1.0861i^2+131.02i+4855.8, R^2=0.8651, \tag{6}$$

其中，Y_t 是本次研究的 1971~2015 年的趋势产量，i 是年份序列（取值范围为 1～45；1 代表 1971 年，2 代表 1972 年，…，45 代表 2015 年）。

3　结果与分析

3.1　单季晚稻生长期的降水集中度和集中期

PCD 和 PCP 能够较好地反应生长季内降水量的时空分布非均匀特征，PCD 越大表示当年降水量越集中，越小表示当年降水量越均匀；PCP 超过均值表示最大降水出现得较晚，低于均值表示最大降水提前。由图 1 可知，近 45 年单季晚稻生长季降水 PCD 趋势不显著，PCD 均值为 0.295，变化范围为 0.119～0.537，其中有 21 年的 PCD 超过了均值，占 0.467；1987～1990 年和 1995～1997 年连续 3 年以上 PCD 超过均值，这些年份降水连续趋于集中；有 5 年 PCD 超过 0.45，这些峰值年的 PCD 均值高达 0.47，气象产量负效应大于正效应；有 16 年 PCD 介于 0.295～0.4 之间，气象产量正效应大于负效应；有 17 年 PCD 低于 0.295，说明这 17 年降水较均匀，气象产量负效应大于正效应。近 45a 单季晚稻生长季的 PCP 主要集中在 7 月 27 日至 9 月 11 日，此阶段为单季晚稻生长孕穗期和抽穗期，均值在 8 月 20 日，最早与最迟相差 47 d，当 PCP 高于 45 a 均值，则说明该年降水 PCP 出现的较晚，当 PCP 低于 45 a 均值，则说明该年 PCP 提前。

3.2　单季晚稻生长期降水量与气象产量的关系

通过分析上海地区 1971～2015 年单季晚稻气象产量与降水量的关系（图 2），得出在孕穗期和抽穗期，气象产量随着降水量的增加而下降。其中孕穗期降水量与单季晚稻气象产量的负相关达到显著水平（p=0.04），表明孕穗期降水量越多，减产越多。在单季晚稻全生育期、分蘖期、抽穗期和成熟期间，其降水量多少与气象产量间的相关性不显著，说明此时降水不是单季晚稻产量的主要制约因子。

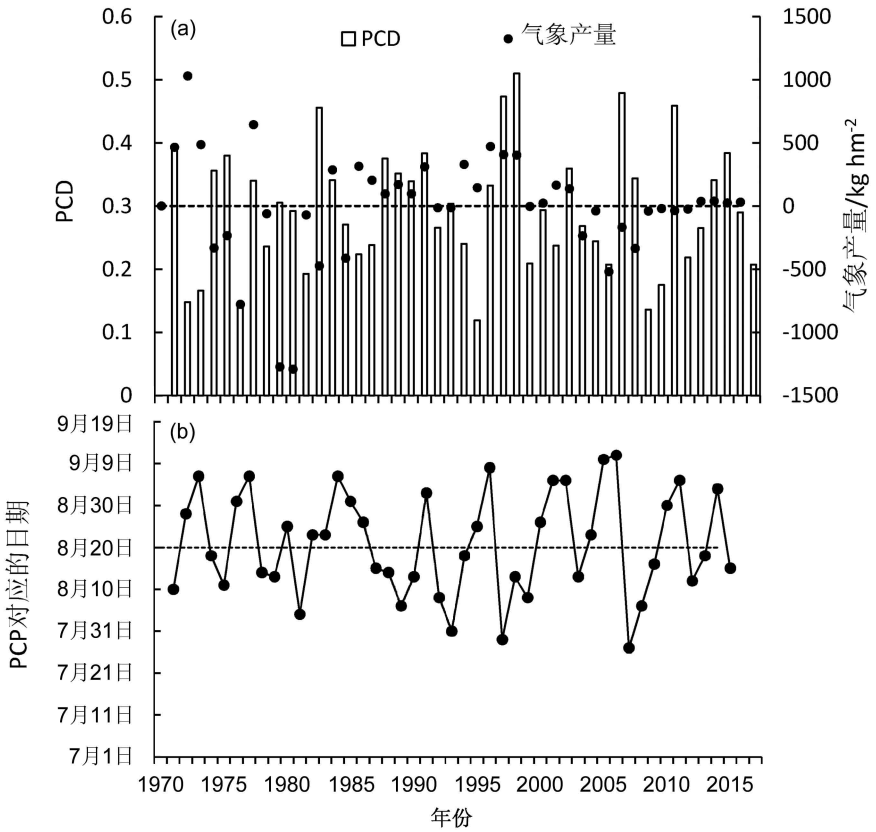

图 1 1971～2015 年上海地区单季晚稻生长季（a）降水集中度（PCD）和（b）降水集中期（PCP）年际变化

Fig. 1 Interannual variations of (a) Precipitation Concentration Degree (PCD) and (b) Precipitation Concentration Period (PCP) in the crop growing season of the single cropping late rice in Shanghai from 1971 to 2015

表 1 1971 ~ 2015 年上海地区单季晚稻生长期降水量

Table 1 Statistics of annual precipitation during the key growth period of single cropping late rice in Shanghai from 1971 to 2015

生长期	最低降水量/mm	最高降水量/mm	平均降水量/mm	降水量线性倾向率/mm (10 a)$^{-1}$
分蘖期	47.5	429.3	182.0	1.1
孕穗期	31.8	390.8	160.7	2.0**
抽穗期	4.9	161.8	43.3	−0.9
成熟期	10.7	250.5	65.7	0.3
全生育期	306.3	990.0	609.7	2.2

注：**表示通过0.05显著性水平检验。

3.3 单季晚稻生长期降水资源变化特征

上海单季晚稻生长关键期恰逢雨季，降水量直接影响单季晚稻的产量。通过分析上海地区单季晚稻各生育期 1971～2015 年的降水趋势（表 1）可见，近 45 年来单季晚稻各生育期内降水变化相对平稳，分蘖期、孕穗期和成熟期降水量呈增加的趋势，增加趋势分别为 1.1 mm/10 a、2.0 mm/10 a 和 0.3 mm/10 a，其中孕穗期降水量呈显著增加趋势，趋势相关系数为 0.312；抽穗期降水量呈减少趋势。

在单季晚稻全生育期，1971～2015 年，上海地区年际降水量变化范围是 306.3～990.0 mm，年际差异大，45 a 的平均值为 609.7 mm；在单季晚稻各生育期，1971～2015 年，分蘖期、孕穗期、抽穗期和成熟期的年际降水量变化范围分别为 47.5～429.5 mm、31.8～390.8 mm、4.9～161.8 mm、10.7～250.5 mm，年际差异均较大，45 a 平均值分别为 182.0 mm、160.7 mm、43.3 mm、65.7 mm。从全生育期降水量的各生育期分配来分析，分蘖期

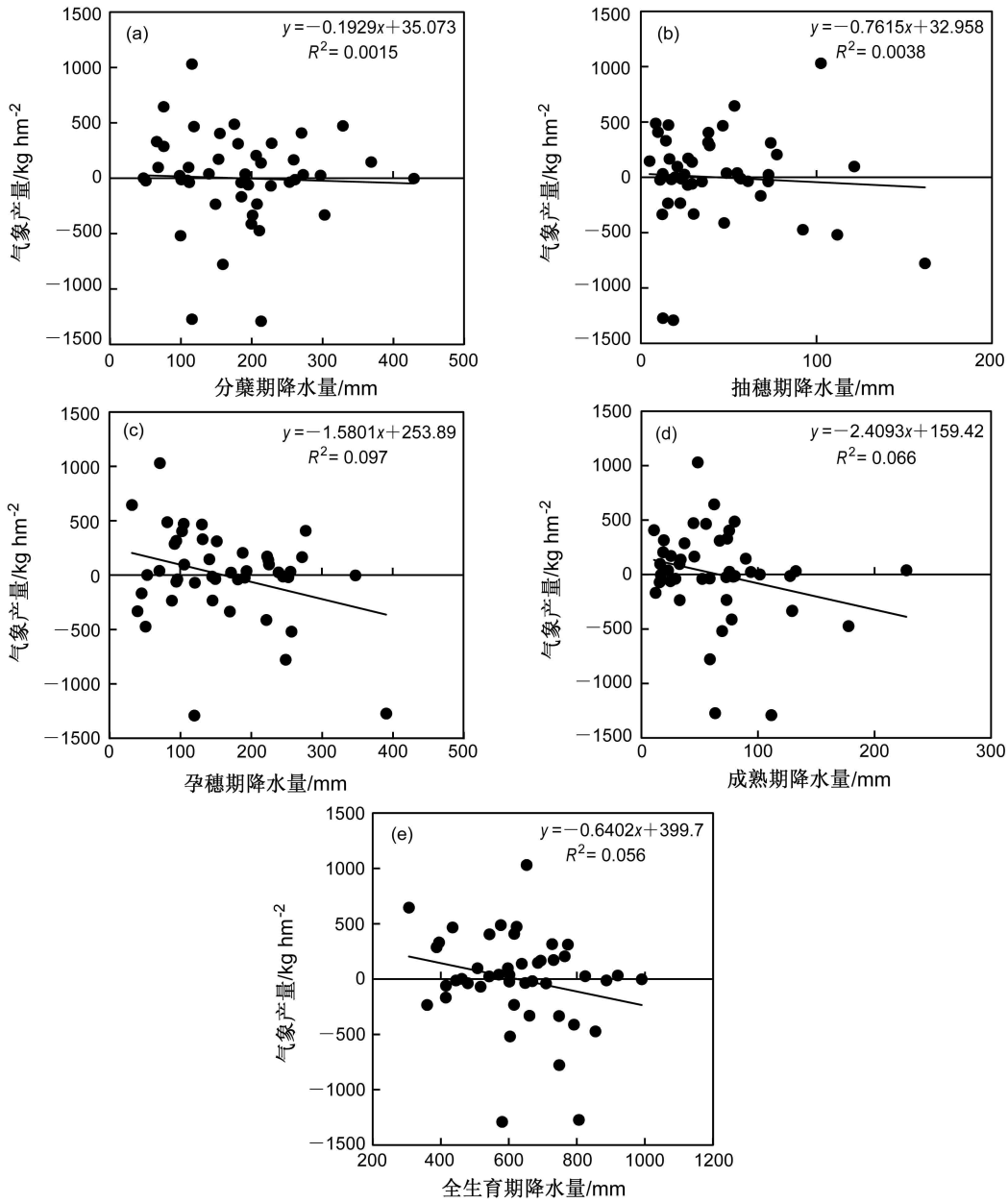

图 2　1971～2015 年上海地区单季晚稻（a）分蘖期、（b）孕穗期、（c）抽穗期、（d）成熟期、（e）全生育期降水量与气象产量的关系

Fig. 2　Relationships between the meteorological yield and annual precipitation during (a) tillering stage, (b) booting stage, (c) heading stage, (d) maturity stage, and (e) whole growth period of single cropping late rice in Shanghai from 1971 to 2015

降水量占全生育期总量的 29.9%；孕穗期占 26.2%；抽穗期占 7.1%；成熟期占 10.8%。由此可见，分蘖期和孕穗期降水占全生育期的 1/2 以上。这主要是由于孕穗期前正处上海夏季多雨水阶段，降水充沛，抽穗期后已过夏季主要降水时段，降水日渐减少。

3.4　未来气候变化情景下单季晚稻气象产量正负效应预估

3.4.1　单季晚稻气象产量预估模型的建立

水稻稳产增产以及水稻产量预估对我国农业政策调整和保障我国粮食安全问题具有重要意义。利用 1971～1995 年气象产量与降水量数据建立上海地区单季晚稻气象产量模拟模型：

$$y_w = 0.001x^2 - 2.3661x + 1039.1, \qquad (7)$$

其中 x 是降水量，1996～2015 年数据作为测试集用于检验模型预测效果。从图 3 可看出，单季晚稻模拟效果较好，引入准确率检验回归模型准确性（李涵茂等, 2015），准确率=（1－|模拟产量－实际产量|/实际产量）×100%。模型检验结果得出，

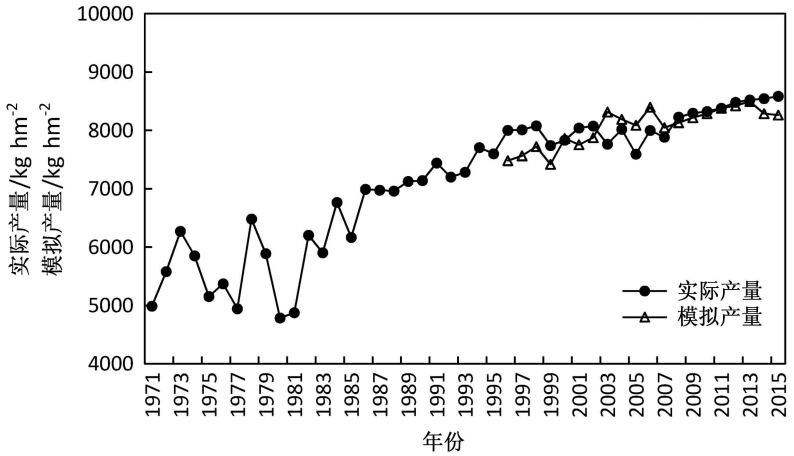

图 3　1971～2015 年上海地区单季晚稻模拟产量与实际产量的对比

Fig. 3　Comparison of the simulated yield and the actual yield of single cropping late rice in Shanghai from 1971 to 2015

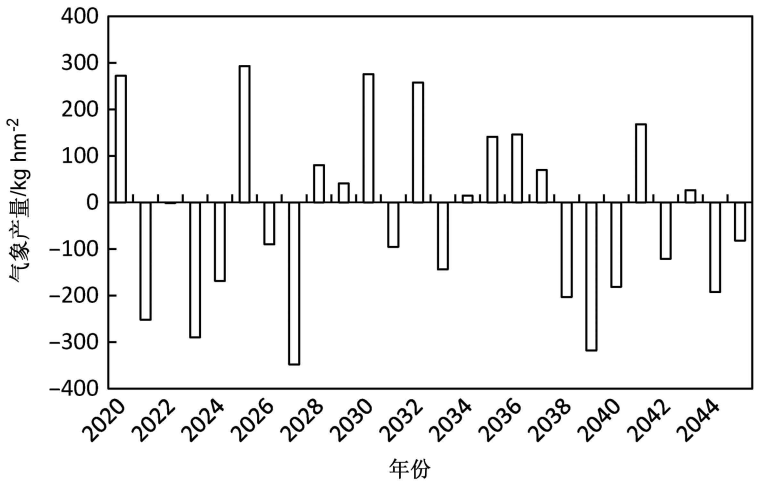

图 4　上海地区在 CMIP5 全球气候模式情景下的单季晚稻气象产量

Fig. 4　Meteorological yield of single cropping late rice in Shanghai using CMIP5 Global Climate Model

预测准确率范围 92.9%～100.0%，平均预测准确率 97.0%，模型模拟效果可信度高。

3.4.2　未来气候变化情景下单季晚稻气象产量正负效应预估

近 45 年，随着单季晚稻全生育期降水量的增加气象产量呈下降趋势。基于建立的气象产量预估模型，利用 CMIP5 全球气候模式情景下预估的上海地区 2020～2045 年单季晚稻全生育期降水量资料，驱动上海地区单季晚稻气象产量预估模型，得到 2020～2045 年上海地区单季晚稻气象产量。从图 4 可看出，上海地区未来 30 年降水变化对单季晚稻产量的负效应略大于正效应，即减产作用大于增产作用。在近 30 年内，约有 14 年左右为减产年，占全部研究年份的 53.8% 左右。上海地区单季晚稻在 CMIP5 全球气候模式情景下减产年平均值为 177.65 kg hm^{-2}，增产年平均值为 148.75 kg hm^{-2}，减产年的减产幅度略大于增产年的增产幅度。

4　结论与讨论

根据 1971～2015 年单季晚稻全生育期降水非均匀分布特征的分析得出，上海地区单季晚稻生长季 PCD 变化趋势不显著，降水分布不均匀，1982～1990 年和 1995～1997 年连续 3 年以上连续年份的降水趋于集中。当 PCD 处于峰值和谷值时，即 PCD 超过 0.45 和低于 0.295 时，气象产量负效应大于正效应；当 PCD 介于 0.295～0.45 之间，气象产量正效应大于负效应。单季晚稻生长季 PCP 主要集中在 7 月 27 日至 9 月 11 日，即孕穗期和抽穗期。通过对关键生育期降水量与单季晚稻气象产

量的影响得出，降水影响上海单季晚稻气象产量的主要关键生育期是孕穗期和抽穗期。这与许多研究学者研究结果相似，如顾品强等（2009）研究发现，孕穗期降水过多导致上海地区单季晚稻不利颖壳容积增大，影响产量；孔维财和尤明双（2021）研究得出，降水是影响南京单季晚稻产量拔节—抽穗扬花期的的主要气象因子之一；吴红庭（1999）研究表明，孕穗期是早稻一生中对外界环境最敏感的时期，此时受淹会引起部分稻穗死亡以及无效穗的增加，且会产生大量的高位分蘖和分枝。近 45 年分蘖期、孕穗期和成熟期降水逐年呈增加趋势，其中孕穗期降水量增加趋势显著，抽穗期降水量呈减少趋势。通过对单季晚稻全生育期降水总量的各主要生育期分配进行分析得出，分蘖期的降水量占全生育期总量的 29.9%，孕穗期占 26.2%，抽穗期占 7.1%，成熟期占 10.8%，分蘖期和孕穗期降水占全生育期的 1/2 以上。上海地区未来近 30 年内降水变化对单季晚稻气象产量的负效应略大于正效应，减产年的减产幅度略大于增产年的增产幅度。利用 1971～1995 年气象产量与降水量数据建立的上海地区单季晚稻气象产量模拟模型，以实际产量对模拟模型进行检验，预测准确率范围 92.9%～100.0%，平均预测准确率 97.0%，结果表明，该模型适用于上海地区降水对单季晚稻气象产量的预测工作中。

光合作用是决定水稻生长发育和物质积累的重要因素。7～8 月是上海地区的集中降雨时期，雨水导致田间涝渍和光照不足，均会使得水稻叶片光合能力下降，导致水稻结实率、千粒质量和籽粒产量降低（江晓东等, 2019）。孕穗期降水过多，对幼穗分化十分不利，颖花退化，群体光合产物积累少，不利颖壳容积增大，影响大穗的形成（顾品强等, 2009）。抽穗期遇降水过多会影响单季晚稻开花、受精和结实，主要表现在花药破裂，颖花退化增多及影响水稻的正常授粉，特别是单季晚稻扬花期间降水集中，不利于开颖受精，影响水稻的结实率。

本研究的预测模型只考虑降水因子对上海地区单季晚稻产量的影响，分析方法为经验统计模型，未考虑各气象因子之间相互的影响和叶片光合情况，与实际水稻生长的复杂性相比较为简单，对此需要进一步深入研究气象因子相互作用对单季晚稻产量的影响。

参考文献（References）

顾品强, 金巧玲, 汪祖国. 2009. 气候变暖背景下气象灾害对单季晚稻生产的影响及应对措施 [J]. 上海农业科技, (4): 34−36. Gu Pinqiang, Jin Qiaoling, Wang Zuguo. 2009. Effects of meteorological disasters on single cropping late rice production under the background of climate warming and countermeasures [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology (in Chinese), (4): 34−36. doi:10.3969/j.issn.1001-0106.2009.04.020

贺芳芳, 赵兵科. 2009. 近 30 年上海地区暴雨的气候变化特征 [J]. 地球科学进展, 24(11): 1260−1267. He Fangfang, Zhao Bingke. 2009. The characteristics of climate change of torrential rains in Shanghai region in recent 30 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24(11): 1260−1267. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.11.011

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability [M]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 40−43.

江晓东, 华梦飞, 杨沈斌, 等. 2019. 喷施钾钙硅制剂改善高温胁迫水稻叶片光合性能提高产量 [J]. 农业工程学报, 35(5): 126−133. Jiang Xiaodong, Hua Mengfei, Yang Shenbin, et al. 2019. Spraying exogenous potassium, calcium and silicon solutions improve photosynthetic performance of flag leaf and increase the yield of rice under heat stress condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese), 35(5): 126−133. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.05.015

孔维财, 尤明双. 2021. 南京单季晚稻生育期气象因子对产量的影响 [J]. 浙江农业科学, 62(3): 498−500. Kong Weicai, You Mingshuang. 2021. Effect of meteorological factors on yield of single late rice in growth period in Nanjing city [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences (in Chinese), 62(3): 498−500. doi:10.16178/j.issn.0528-9017.20210312

李涵茂, 帅细强, 戴平, 等. 2015. 基于关键气象因子的湘北早稻产量动态预报 [J]. 湖南农业科学, (1): 114−116, 119. Li Hanmao, Shuai Xiqiang, Dai Ping, et al. 2015. The dynamic prediction of early rice yield based on key meteorological factors in northern Hunan [J]. Hunan Agricultural Sciences (in Chinese), (1): 114−116, 119. doi:10.16498/j.cnki.hnnykx.2015.01.036

李茂芬, 邓吉良, 邓春梅, 等. 2018. 海口晚稻生育期气象因子变化特征及其对晚稻产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 46(14): 50−57. Li Maofen, Deng Jiliang, Deng Chunmei, et al. 2018. Variation characteristics of meteorological factors during growth period of late rice in Haikou city and its effects on late rice yield [J]. Jiangsu Agricultural Sciences (in Chinese), 46(14): 50−57. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.14.013

Michelangeli P A, Vrac M, Loukos H. 2009. Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions [J]. Geophys. Res. Lett., 36(11): L11708. doi:10.1029/2009GL038401

史艳姝, 李军, 辛跳儿, 等. 2019. 长江下游地区作物生长季水分资源变化特征及影响分析——以上海地区为例 [J]. 中国农学通报,

35(15): 40−48. Shi Yanshu, Li Jun, Xin Tiaoer, et al. 2019. Variation characteristics and influence of precipitation resources during crop growing season in lower reaches of the Yangtze River: A case study of Shanghai [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 35(15): 40−48. doi:10.11924/j.issn.1000-6850.casb18010098

史艳姝, 李军, 辛跳儿, 等. 2020. 涝害对夏季青菜叶片损失和产量影响的模拟 [J]. 上海农业学报, 36(5): 109−114. Shi Yanshu, Li Jun, Xin Tiaoer, et al. 2020. Simulation of effects of waterlogging to the damage of leaves and yield of Chinese cabbage in summer [J]. Acta Agriculturae Shanghai (in Chinese), 36(5): 109−114. doi:10.15955/j.issn1000-3924.2020.05.21

吴红庭. 1999. 涝害对早稻生长发育和产量影响的研究 [J]. 浙江农业科学, (2): 68−71. Wu Hongting. 1999. Research on the effects of submergence on growth and yield of early rice [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences (in Chinese), (2): 68−71.

吴蔚, 梁卓然, 刘校辰. 2018. CDF-T 方法在站点尺度日降水预估中的应用 [J]. 高原气象, 37(3): 796−805. Wu Wei, Liang Zhuoran, Liu Xiaochen. 2018. Projection of the daily precipitation using CDF-T method at meteorological observation site scale [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(3): 796−805. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00064

杨继武. 1994. 农业气象预报和情报 [M]. 北京: 气象出版社, 247 –258. Yang Jiwu. 1994. Agrometeorological Forecast and Information (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 247–258.

Zhang Lujun, Qian Yongfu. 2003. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 17(2): 146−163.