中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

安徽稻油两熟制不同种植方式下气候资源配置和演变

金文俊，陈小飞，陈金华，韦　志，雷伟侠，孔令聪，杜祥备

Climate resource allocation and evolution of rice-oilseed rape double cropping system under different planting patterns in Anhui Province

JIN Wenjun, CHEN Xiaofei, CHEN Jinhua, WEI Zhi, LEI Weixia, KONG Lingcong, and DU Xiangbei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20230478

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化对安徽省两熟制粮食作物物候期及周年气候资源分配与利用的影响

Effects of climate change on phenophases and annual climate resources distribution and utilization of major food crops under a double-cropping system in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(2): 355–365

江淮区域稻麦两熟制周年资源分配、利用特征

Characteristics of resource allocation and utilization of rice-wheat double cropping system in the Jianghuai Area

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1078–1087

气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析

Suitability analysis of key potato growth stages in Inner Mongolia under climate change

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(1): 38–48

气候变化对蔬菜品质的影响及其机制

The effects and mechanism of climate change on vegetables quality: a review

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(12): 2034–2045

多模式集合模拟气候变化对玉米产量的影响

Multi-model ensemble for simulation of the impact of climate change on maize yield

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(6): 941–948

中华猕猴桃在中国潜在分布及其对气候变化响应的研究

Potential distribution of *Actinidia chinensis* in China and its predicted response to climate change

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(1): 27–37

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2024 年 3 月 第 32 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2024, 32(3): 436−445

DOI: 10.12357/cjea.20230478

金文俊, 陈小飞, 陈金华, 韦志, 雷伟侠, 孔令聪, 杜祥备. 安徽稻油两熟制不同种植方式下气候资源配置和演变[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2024, 32(3): 436−445

JIN W J, CHEN X F, CHEN J H, WEI Z, LEI W X, KONG L C, DU X B. Climate resource allocation and evolution of rice-oilseed rape double cropping system under different planting patterns in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(3): 436−445

安徽稻油两熟制不同种植方式下气候资源配置和演变*

金文俊[1], 陈小飞[1], 陈金华[2], 韦 志[1], 雷伟侠[1], 孔令聪[1], 杜祥备[1**]

(1. 安徽省农业科学院作物研究所 合肥 230031; 2. 安徽省农业气象中心 合肥 230031)

摘 要: 安徽沿江地区稻-油复种模式下茬口衔接紧密、光温资源紧张, 季节间气候资源配置备受关注。移栽和直播是补充和调配气候资源的有效种植方式, 而稻油两熟制中不同种植方式下不同作物生长季气候资源配置、演变特征以及对未来气候变化的适应性尚不清晰。本研究以安徽沿江地区 27 个气象站 1992—2022 年的气温、日照时数、总辐射和降水等气象资料为基础, 分析了不同种植方式下稻-油复种季节间气候资源配置与演变特征以及光温生产潜力。结果表明, 近 30 年稻-油复种模式下季节间总辐射量、日照时数和光合生产潜力均呈下降趋势, 气温、降水量和光温生产潜力呈上升趋势。水稻季移栽和直播方式下总辐射量倾向率分别为−27.9 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−28.8 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$, 油菜季分别为−40.5 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−26.6 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$。水稻季移栽和直播方式下平均日最高气温倾向率分别为 0.30 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05) 和 0.24 ℃·(10a)$^{-1}$, 最高达 32.70 ℃ (2022 年, 青阳)。油菜季移栽和直播方式下平均气温倾向率分别为 0.36 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) 和 0.39 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01), 移栽方式下平均气温较直播方式高 0.96~1.43 ℃。稻油两熟制两季均面临光资源持续下降和气温不断上升等问题, 采用移栽方式可通过延长作物生育期优化光、温资源配置, 提高光温生产潜力。同时, 适当推迟移栽期将有利于应对油菜苗期和水稻花期的高温。直播方式下宜采用高光效品种和构建光资源高效利用作物群体。

关键词: 稻-油复种; 资源配置; 气候变化; 种植方式

中图分类号: S511.4+1; S565.4

Climate resource allocation and evolution of rice-oilseed rape double cropping system under different planting patterns in Anhui Province*

JIN Wenjun[1], CHEN Xiaofei[1], CHEN Jinhua[2], WEI Zhi[1], LEI Weixia[1], KONG Lingcong[1], DU Xiangbei[1**]

(1. Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2. Anhui Agricultural Meteorological Center, Hefei 230031, China)

Abstract: Because the rice-oilseed rape double cropping system along the Yangtze River in Anhui Province shows tight stubble convergence together with light and temperature resources, it has attracted a lot of attention with regard to inter-seasonal climate resource allocation. Although transplanting and direct seeding are effective planting strategies for supplementing and deploying climate

* 国家重点研发计划项目 (2022YFD2301401) 资助

** 通信作者: 杜祥备, 主要研究方向为作物生理生态和资源高效利用。E-mail: duxiangbei@126.com
金文俊, 主要研究方向为作物生理生态和资源高效利用。E-mail: jinwenjun@aaas.org.cn

收稿日期: 2023-08-31 接受日期: 2023-10-30

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2022YFD2301401).

** Corresponding author, E-mail: duxiangbei@126.com

Received Aug. 31, 2023; accepted Oct. 30, 2023

resources, the climate resource allocation and evolutionary characteristics in each growing season of different crops in rice-oilseed rape double cropping systems under different planting patterns as well as their adaptation to future climate change remain unclear. In this study, the inter-seasonal climate resource allocation and evolution characteristics as well as radiation-temperature production potential of the rice-oilseed rape double cropping system under different planting patterns were analyzed on the basis of meteorological datasets, such as air temperature, sunshine hours, total radiation, and precipitation, recorded from 1992 to 2022 at 27 meteorological stations along the Yangtze River in Anhui Province. The results showed that in the last 30 years, the inter-seasonal total radiation, sunshine hours, and photosynthetic production potential had decreased while the air temperature, rainfall, and radiation-temperature production potential had increased under the rice-oilseed rape double cropping system. In the rice season, the total radiation tendency rates under the transplanting and direct seeding pattern were −27.9 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ and −28.8 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$, respectively. In the oilseed rape season, the total radiation tendency rates under the transplanting and direct seeding pattern were −40.5 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ and −26.6 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$, respectively. During the rice season, the mean daily maximum temperature tendency rates under the transplanting and direct seeding pattern were 0.30 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05) and 0.24 ℃·(10a)$^{-1}$, respectively. The highest mean daily maximum temperature in the rice season reached 32.70 ℃ in 2022 (Qingyang County, Anhui Province, China). During the oilseed rape season, the mean temperature tendency rates were 0.36 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) and 0.39 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) under the transplanting and direct seeding patterns, respectively, with the mean temperature being higher under the transplanting pattern than under direct seeding. The tendancy rate of radiation-temperature production potential under direct seeding pattern was 170.2 kg·hm^{-2}·(10a)$^{-1}$ in the oilseed rape season, which was higher than that under transplanting pattern. Thus, it appears that the direct seeding pattern has more potential to be explored for increasing yields in the oilseed rape season in the future. Both crop seasons within this double cropping system have faced problems, such as a continuous decline in light resources and a constant rise in air temperature. Adopting the transplanting pattern could increase the allocation of light and temperature resources to improve the radiation-temperature production potential by extending the crop reproductive period. Hence, the adoption of transplanting in both crop seasons would be an effective measure to cope with climate change and yield more production potential along the Yangtze River in Anhui Province. Meanwhile, delaying the transplanting date would be helpful to cope with warming at the oilseed rape seedling and rice flowering stages. Direct seeding resulted in less allocation of climatic resources than transplanting, and using high light-efficient varieties and building crop populations with efficient use of light resources are desirable.

Keywords: Rice-oilseed rape double cropping system; Resource allocation; Climate change; Planting pattern

长江中下游是我国重要的农业区, 该区域充沛的光、温和水资源为多熟种植制度奠定了基础, 如粮油轮作、棉油轮作和粮菜轮作等。水稻-油菜两熟制是长江中下游地区主要种植制度之一, 也是响应我国粮油发展重大战略的重要种植模式, 对提高单位面积产量、气候资源利用率和促进油料产业发展具有重要意义[1]。然而, 长江中下游的安徽地区油菜种植面积从 2003 年 101.5 万 hm^2 缩减至 2021 年的 37.3 万 hm^2[2-3], 稻油复种模式逐渐向稻麦轮作模式转变[4]。这一方面是由于政策变化和经济效益等诸多原因导致农民种植积极性不高[5]; 另一方面, 水稻收获期晚占用较多气候资源严重影响油菜种植。因此, 合理分配稻-油复种模式中各生长季的气候资源是实现稻-油复种模式稳定发展的重要前提。

合理分配季节间气候资源在多熟制中已被广泛研究, 比如麦-玉两熟系统下的“双晚”技术[6] 和稻麦两熟系统的双季适时晚播技术[7] 均可实现周年丰产和资源高效利用。但是, 稻-油复种模式下季节间气候资源合理配置方式尚不清晰。对于安徽沿江地区来说, 以水稻 (*Oryza sativa*) 生产为中心, 提高气候资源分配可以实现稻麦周年增产和资源高效利用[8]。但油菜 (*Brassica napus*) 产量和品质与播期存在明显负相关关系[9-10], 水稻季气候资源分配过多不利于油菜生产。减少水稻季资源分配可有效提高直播方式下油菜产量和光温生产效率, 但是会导致水稻产量下降[11]。因此, 为保证水稻生产中足够的气候资源, 生产上常用移栽方式解决油菜季气候资源不足问题。移栽种植方式有利于衔接茬口, 并通过秧田时期补充光温资源[12-13]。相对于移栽方式, 直播方式可缩短作物生育期, 同时也能保证产量和提高经济效益[14-15], 在生产上同样被大量运用。然而, 目前针对稻-油复种模式中移栽和直播方式下季节间光、温和降水资源配置的研究较少。

光、温和降水等气候资源是作物生产的重要因子, 其变化对作物生长发育、生产具有重要影响[16-18]。受全球气候变化影响, 长江中下游地区光资源逐年减弱[19], 气温逐年升高、降水量逐年上涨[20], 周年气候生产潜力呈下降趋势[21]。气候资源变化在未来可能成为限制农业生产的重要因素之一, 但目前鲜有研究从气候变化角度分析两种种植方式面临的气候问题。因此, 本研究通过分析安徽省沿江地区近 30 年的气象数据, 明确稻-油复种模式中不同种植方式

水稻季和油菜季气候资源分配、变化特征和面临的气候问题, 为安徽沿江地区稻-油复种周年资源优化配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究以安徽省沿江地区近 30 年气候数据为研究对象, 选取 1992—2022 年数据较完整的 27 个气象站点数据 (图 1)。所有气象数据源于安徽省气象研究中心, 包括总辐射、日照时数、积温、平均气温、平均日最高气温、平均日最低气温和降水量。

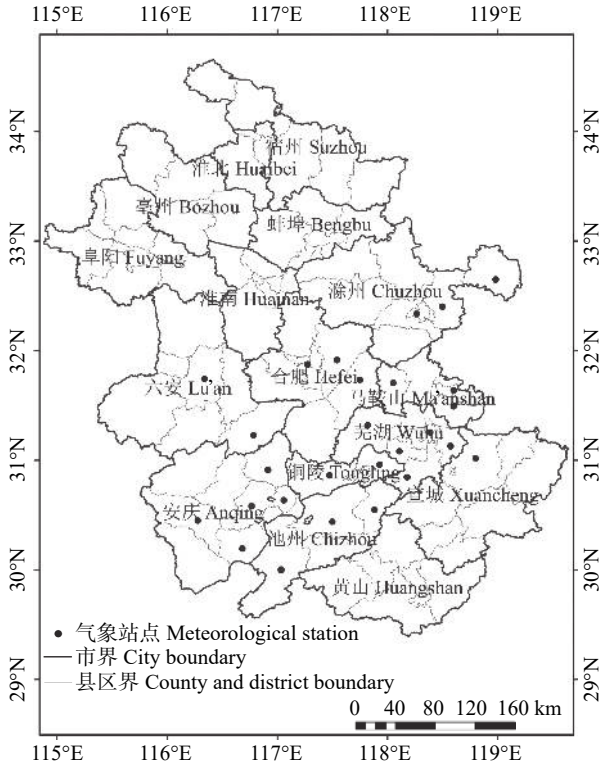

图 1 研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations in the study area

1.2 水稻、油菜不同种植方式下生育期界定

本文主要针对安徽沿江地区水稻-油菜复种模式中水稻季和油菜季移栽 (T) 与直播 (D) 两种种植方式下农业气候资源分配和演变特征。根据生产经验, 安徽沿江地区稻油两熟制高产栽培模式下油菜需要在 10 月 15 日前播种, 次年 5 月 20 日之前收获, 油菜移栽时秧田期一般为 30 d; 水稻为单季稻, 5 月 30 日之前播种, 一般选生育期为 150 d 左右的水稻品种, 直播方式下水稻生育期缩短 8 d [14,22], 水稻移栽时秧田期一般为 15~20 d。根据高产栽培经验和资源不浪费原则, 本研究中水稻移栽播种节点设为 5 月 10 日, 收获节点设为 10 月 10 日; 水稻直播播种节点设为 5 月 25 日, 收获节点设为 10 月 17 日; 油菜直播播种节点设为 10 月 10 日, 收获节点设为次年 5 月 20 日; 油菜移栽播种节点设为 9 月 15 日, 收获节点设为次年 5 月 20 日。本研究从整体角度设定水稻和油菜播种和收获的平均日期, 未考虑作物播期和生育期在不同纬度、海拔地区、作物品种和农事操作之间的细微差异。

1.3 数据分析

1.3.1 气候倾向率

将气候资源 (辐射、温度、积温、降水和日照时数) 与时间进行线性回归 ($Y=a+bX$)。其中, $b\times10$ 为气候倾向率, 即为每 10 年气候因子变化率。

1.3.2 气候生产潜力

光合生产潜力根据邓根云等[23], 采用温度函数[24]订正光合生产潜力得到。安徽沿江地区油菜季雨水基本满足生产, 水稻季均需补充灌溉, 除极端天气外降水量不会限制生产潜力, 因此本文不采用水分函数继续订正光温生产潜力。相关计算公式如下:

光合生产潜力:

$$Y_{\mathrm{p}}=\frac{10^4}{C}\times F\times E\times Q \tag{1}$$

光温生产潜力:

$$Y_{\mathrm{pt}}=Y_{\mathrm{P}}\times\begin{cases}0 & T<T_{\min}\text{或}T>T_{\max}\\ \dfrac{T-T_{\min}}{T_{\mathrm{s}}-T_{\min}} & T_{\min}\leqslant T<T_{\mathrm{s}}\\ \dfrac{T_{\max}-T}{T_{\max}-T_{\mathrm{s}}} & T_{\mathrm{s}}\leqslant T\leqslant T_{\max}\end{cases} \tag{2}$$

式中: Y_{p} 为光合生产潜力, kg·hm^{-2}; C 为干物质发热量, 水稻取 16.9 MJ·kg^{-1}, 油菜取 17.7 MJ·kg^{-1}; F 为光能利用率, 取 2%; E 为经济系数 (水稻: 0.5; 油菜: 0.35); Q 为太阳总辐射 (MJ·m^{-2}); Y_{pt} 为光温生产潜力 (kg·hm^{-2}); T 为平均温度 (℃); $T_{\min}$、T_{s} 和 $T_{\max}$ 分别为作物三基点温度 (水稻分别取 10 ℃、30 ℃ 和 42 ℃, 油菜分别取 4 ℃、20 ℃ 和 30 ℃)[24-25]。

油菜季积温为平均温度≥0 ℃ 的温度总和, 水稻季积温为平均温度≥10 ℃ 的温度总和。本文通过 Excel 2021 和 R 4.1.2 软件进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 稻油两熟制不同种植方式下季节间光资源分布特征

不同种植方式下水稻季和油菜季总辐射量和日照时数均呈下降趋势 (图 2)。水稻季移栽方式下总辐射和日照时数分别为 1413.05~3033.77 MJ·m^{-2} 和

294.50~1389.40 h, 气候倾向率分别为−27.9 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−18.7 h·(10a)$^{-1}$; 水稻季直播方式下总辐射和日照时数分别为 1375.07~2869.26 MJ·m^{-2} 和 321.20~1333.50 h, 气候倾向率分别为−28.8 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−19.4 h·(10a)$^{-1}$; 油菜季移栽方式下总辐射和日照时数分别为 1745.41~3849.33 MJ·m^{-2} 和 527.90~2212.10 h, 气候倾向率分别为−40.5 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−36.6 h·(10a)$^{-1}$; 油菜季直播方式下总辐射和日照时数分别在 1369.25~3205.63 MJ·m^{-2} 和 354.60~1843.10 h 之间, 气候倾向率分别为−26.6 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$ 和−26.2 h·(10a)$^{-1}$。水稻季和油菜季总辐射和日照时数最低值和最高值均出现在 2019—2020 年的周年内, 且分别在当涂和宣城两地。其中, 水稻季和油菜季移栽方式下日照时数和总辐射量均高于直播方式。油菜季光资源分布高于水稻季, 与其生育期较长有关。

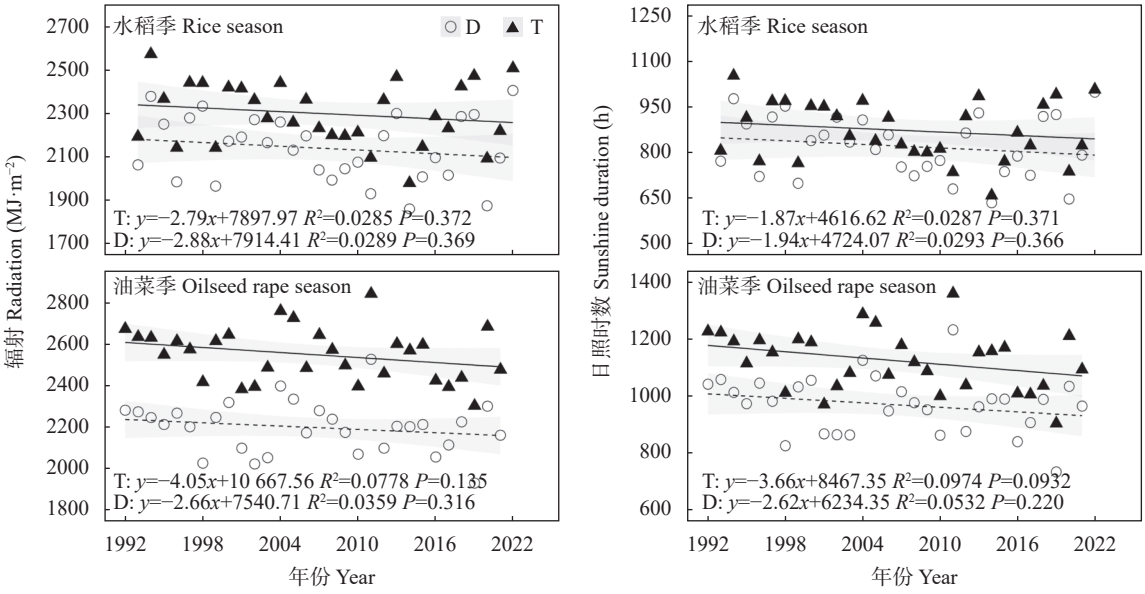

图 2　不同种植方式下稻油两熟制不同作物生长季光资源演变

Fig. 2　Evolution of light resources in each growing season of different crops in rice-oilseed rape double cropping system under different cultivation patterns

D: 直播; T: 移栽。D: direct seeding; T: transplanting.

2.2　稻油两熟制不同种植方式下季节间热量资源分布特征

1992—2022 年, 安徽沿江地区热量资源呈逐渐增加趋势, 两季移栽方式下积温均高于直播方式(图 3)。水稻季移栽和直播方式下平均气温倾向率分别为 0.25 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05) 和 0.21 ℃·(10a)$^{-1}$, ≥10 ℃ 积温倾向率为 36.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$ 和 28.7 ℃·d·(10a)$^{-1}$; 油菜季移栽和直播方式下平均气温倾向率分别为 0.36 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) 和 0.39 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01), ≥0 ℃ 积温倾向率分别为 85.6 ℃·d·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) 和 80.0 ℃·d·(10a)$^{-1}$ (P<0.001)。水稻季平均气温和≥10 ℃ 积温最高值分别为 27.60 ℃ 和 4227.30 ℃·d (2022 年, 铜陵), 最低值分别为 23.55 ℃ (1993 年, 来安) 和 3453.50 ℃·d (2015 年, 滁州); 油菜季平均气温和≥0 ℃ 积温最高值分别为 14.02 ℃ 和 3406.90 ℃·d (2007 年, 安庆), 最低值分别为 7.91 ℃ 和 1727.90 ℃·d (1996 年, 来安)。水稻季直播和移栽方式下平均气温无显著差别, 而移栽方式下≥10 ℃ 积温高于直播方式。油菜季移栽方式下平均气温和≥0 ℃ 积温明显高于直播方式, 移栽方式下平均气温较直播方式高 0.96~1.43 ℃。近 30 年, 油菜季热量资源上升趋势明显强于水稻季。

如图 4 所示, 水稻季平均日最高气温和最低气温在两种种植方式间无明显差别, 移栽和直播方式下平均日最高气温倾向率分别为 0.30 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05) 和 0.24 ℃·(10a)$^{-1}$, 平均日最低气温倾向率分别为 0.23 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05) 和 0.21 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.05)。水稻季平均日最高气温最高值为 32.70 ℃ (2022 年, 青阳), 平均日最低气温最低值为 19.97 ℃ (1993 年, 来安)。油菜季平均日最高气温和最低气温在两种种植方式间有明显差别, 移栽方式下平均日最高气温和最低气温较直播方式分别高 0.82~1.59 ℃ 和 0.97~1.44 ℃。油菜季移栽和直播方式下平均日最高气温倾向率分别为 0.37 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) 和 0.42

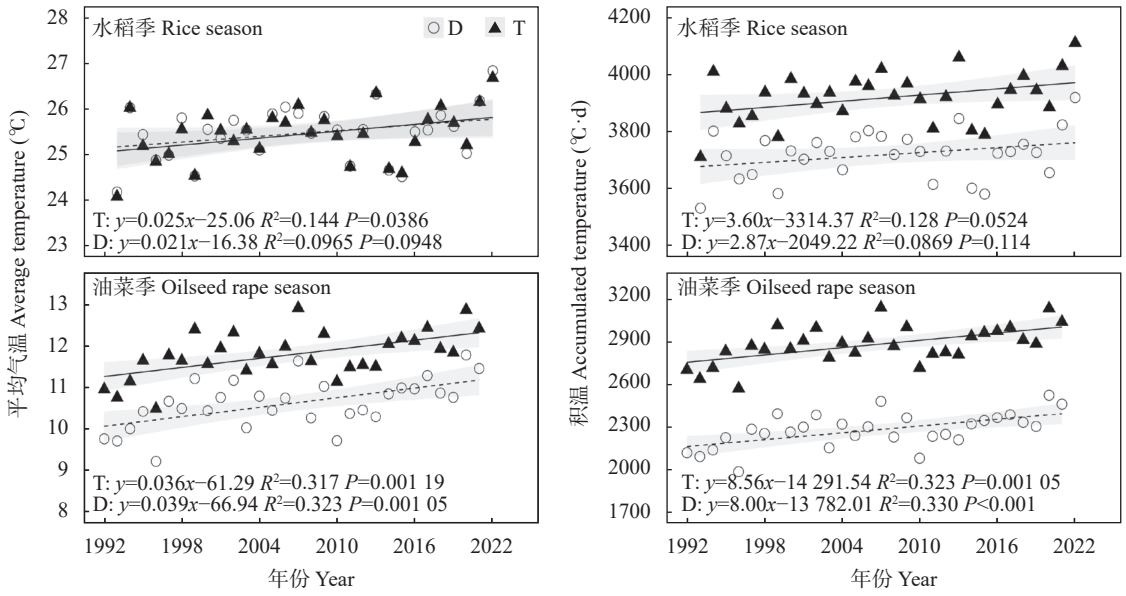

图 3 不同种植方式下稻油两熟制不同作物生长季热量资源演变

Fig. 3 Evolution of heat resources in each growing season of different crops in rice-oilseed rape double cropping system under different cultivation patterns

D: 直播; T: 移栽。油菜季: ≥0 ℃ 的积温; 水稻季: ≥10 ℃ 的积温。D: direct seeding; T: transplanting. Oilseed rape season: ≥0 ℃ accumulated temperature; rice season: ≥10 ℃ accumulated temperature.

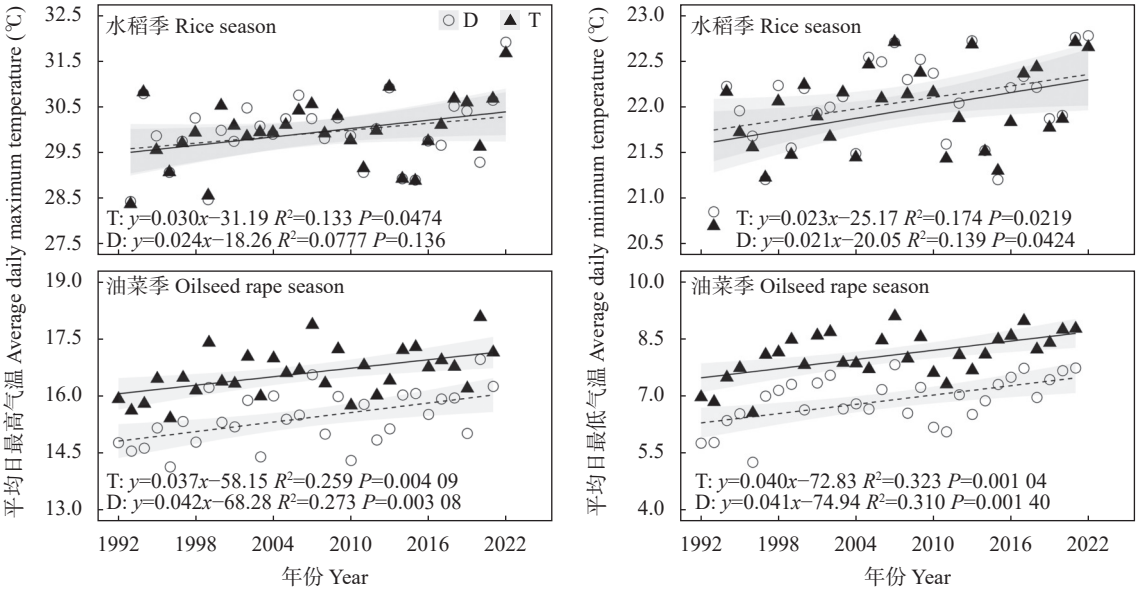

图 4 不同种植方式下稻油两熟制不同作物生长季平均日最高气温和最低气温变化

Fig. 4 Evolution of average daily maximum and minimum temperatures in each growing season of different crops in rice-oilseed rape double cropping system under different cultivation patterns

D: 直播; T: 移栽。D: direct seeding; T: transplanting.

℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01), 平均日最低气温倾向率分别为 0.40 ℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01) 和 0.41℃·(10a)$^{-1}$ (P<0.01)。油菜季平均日最高气温最高值为 19.19 ℃ (2007 年, 冬至), 平均日最低气温最低值为 3.24 ℃ (1996 年, 来安)。

2.3 稻油两熟制不同种植方式下季节间降水资源分布特征

1992—2022 年, 安徽沿江地区降水量呈逐渐增加趋势 (图 5)。水稻季移栽和直播方式下降水倾向率分别为 45.4 mm·(10a)$^{-1}$ 和 55.7 mm·(10a)$^{-1}$, 油菜季分别为 21.5 mm·(10a)$^{-1}$ 和 12.5 mm·(10a)$^{-1}$。近 30 年, 降水量在地区与年际之间差异较大, 水稻季降水量最低值为 166.50 mm (1994 年, 滁州), 最大值为 1872.3 mm (1999 年, 青阳); 油菜季最低值为 134.7 mm (2011 年, 滁州), 最高值为 1197.2 mm (2016 年, 望江)。

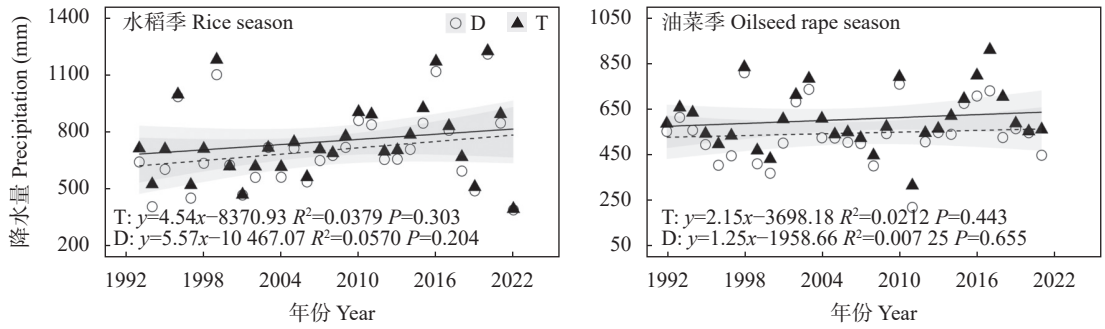

图 5　不同种植方式下稻油两熟制不同作物生长季降水资源变化

Fig. 5　Evolution of precipitation resources in each growing season of different crops in rice-oilseed rape multiple cropping system under different cultivation patterns

D: 直播; T: 移栽。D: direct seeding; T: transplanting.

2.4　稻油两熟制不同种植方式下作物生产潜力

近 30 年, 安徽沿江地区水稻季和油菜季光合生产潜力 (Y_p) 呈下降趋势, 光温生产潜力 (Y_{pt}) 呈上升趋势, 其中油菜直播方式下光温生产潜力每 10 年显著上升 170.2 kg·hm^{-2}(表 1)。水稻直播方式下光合生产潜力下降速度略高于移栽方式, 而光温生产潜力上升速率低于移栽方式。油菜直播方式下光合生产潜力下降速率低于移栽方式, 而光温生产潜力上升速率高于移栽方式。与直播方式相比, 水稻移栽方式下平均光合生产潜力和光温生产潜力分别提高 7.46% 和 7.26%, 油菜移栽方式下光合生产潜力和光温生产潜力平均提高 15.98% 和 36.61%。

表 1　不同种植方式下水稻季和油菜季气候生产潜力

Table 1　Climate production potential in rice season and oilseed rape season under different cultivation patterns

种植季 Cropping season	种植方式 Planting pattern	生产潜力 Production potential	最小值 Minimum value (kg·hm^{-2})	最大值 Maximum value (kg·hm^{-2})	均值 Mean value (kg·hm^{-2})	倾向率 Tendency rate [kg·hm^{-2}·(10a)$^{-1}$]
水稻季 Rice season	T	Y_p	8361.2	17 951.3	13 601.9	−165.0
		Y_{pt}	6592.8	14 139.0	10 532.4	48.2
	D	Y_p	8136.5	16 977.8	12 657.2	−170.2
		Y_{pt}	6376.5	13 355.2	9819.4	8.3
油菜季 Oilseed rape season	T	Y_p	6902.7	15 223.3	10 085.8	−160.0
		Y_{pt}	3423.0	8585.0	4895.0	156.4
	D	Y_p	5415.1	12 677.7	8696.1	−105.3
		Y_{pt}	2298.4	6264.4	3583.2	170.2*

D: 直播; T: 移栽; Y_p: 光合生产潜力; Y_{pt}: 光温生产潜力。*表示回归模型在P<0.05水平显著。D: direct seeding; T: transplanting; Y_p: photosynthetic production potential; Y_{pt}: radiation-temperature production potential. * indicate that linear regression is significant at 0.05 level.

3　讨论与结论

近 30 年, 稻-油复种模式下水稻季和油菜季光资源 (总辐射、日照时数) 呈下降趋势 (图 2)。这与长江中下游流域光资源周年变化趋势一致[26], 主要归因于阴天数增加和直接辐射量下降[19]。光资源的下降减少了作物可吸收光能, 不利于作物生产。移栽方式可延长作物生育期, 优化光资源配置和资源利用效率[13]。从光资源倾向率来看, 水稻季移栽方式下总辐射和日照时数下降速率低于直播方式, 而油菜季移栽方式下光资源下降速率高于直播方式。这可能是由于稻-油复种模式下水稻生长季主要处于春分至秋分之间, 而油菜生长季主要处在秋分至春分之间。春分之后长江中下游地区光资源逐渐增强, 当水稻生育期延长时便可获得更多更稳定的光资源, 而油菜季与之相反。

近 30 年, 稻-油复种模式下水稻季和油菜季有效积温均呈上升趋势 (图 3), 这归因于气候变暖导致的平均气温持续上升和气温≥10 ℃、≥0 ℃ 的天数增加[27]。水稻季移栽和直播两种方式下气温差异较小, 移栽方式主要通过水稻生育期的延长增加积温。此外, 李建等[28] 研究发现水稻季高温天气的积温增加了部分积温, 导致积温利用效率下降。本研究发现水稻季移栽方式下平均日最高气温以 0.30 ℃·(10a)$^{-1}$ 速度上升 (P<0.05), 近几年平均日最高气温已超过 30 ℃ (图 4), 这将对水稻生产产生不利影响[29-30]。对于油菜季, 移栽方式下其平均气温、平均日最高气温和平均日最低气温均增加, 致使其在移栽方式下

积温更高。本研究中油菜季移栽方式下气温较直播方式的增加主要集中在生育前期的延长阶段(9—10 月)。虽然随着气温升高油菜季低温冻害发生次数和持续天数减少[31], 但是油菜容易在冬前现蕾开花或苗期生长过旺进而不利于越冬和抵抗倒春寒。丛日环等[32] 研究表明, 长江中下游两熟区 9—11 月平均气温每增加 0.1 ℃, 油菜产量减少 53 kg·hm^{-2}。由此看来, 移栽方式可增加有效积温, 但其伴随的气温上升也导致水稻和油菜生产面临其他重要问题。

光温生产潜力是指作物在其他条件不受限的情况下充分利用光、温资源的潜在生产力[33]。本研究发现稻-油复种模式下水稻季近 30 年光温生产潜力变化幅度较小, 油菜季光温生产潜力则明显上升 (表 1)。生产潜力变化趋势与罗海平等[34] 研究相似, 虽然光资源的下降降低了光合生产潜力, 但是温度资源上升对气候生产潜力具有促进作用。水稻季气候生产潜力受光温综合影响显著[35], 热量资源上升的影响与光资源下降的影响相当, 导致光温生产潜力变化较小, 移栽方式则通过延长水稻生育期补充光、热资源进而提高光温生产潜力。对于油菜季, 气温上升的影响能够完全抵消光资源下降的影响并使光温生产潜力增加, 而移栽方式通过延长生育期和提高平均气温增加光温生产潜力。

从气候变化角度来看, 稻-油复种周年生产主要面临光资源持续下降和气温不断上升等问题。稻油两熟制下采用移栽方式可增加水稻季和油菜季光、温资源配置, 提高光温生产潜力, 在安徽沿江地区两季移栽方式将是应对气候变化且具有更高生产潜力的有效种植方式。但是, 该方式下平均日最高气温呈显著上升趋势的现象值得被关注 (图 4)。随着全球增温, 水稻花期高温热害[36] 和油菜提前现蕾开花[37-38] 等问题日益突出, 可以借鉴稻-麦轮作模式中双季适时晚播技术[7]。油菜季移栽方式下适当晚播推迟移栽, 一方面可以有效应对苗期气温升高, 减少苗期由于生长过旺导致的冻害; 另一方面将更多光温资源分配于水稻季, 水稻季则可以选用生育期更长、增产潜力更大的品种, 以便推迟水稻花期而避开高温热害。相比移栽方式, 油菜季直播方式下光温生产潜力显著上升, 播种期相对较晚可应对苗期气温升高问题, 未来该方式在稻油两熟生产模式下更具有产量挖掘潜力。但直播方式下由于作物生育期缩短导致光、温资源配置较少, 该方式下需要采用高光效品种和构建光资源高效利用群体。此外, 基于直播方式下油菜产量与播期呈负相关[10] 的前提, 采用直播方式时应适当早播, 但也不宜过早, 防止冬前生长过旺、根颈上抬或过早抽薹, 增加越冬冻害风险。

本研究仅从未来气候适应性和气候资源配置等角度探讨了稻-油复种周年内移栽方式和直播方式适配问题, 而两种种植方式下还涉及到产量、养分利用效率、经济效益和作物抗性[10,39-42] 等问题还需进一步权衡。此外, 考虑到安徽沿江地区降水量较多且呈增加趋势, 水资源相对充足, 田间排水条件较好, 本文仅对光合生产潜力与光温生产潜力的变化趋势进行了比较, 未分析包括光、温和水等要素在内的气候生产潜力。然而, 特大洪涝、高温和干旱等重大灾害对作物生长和气候生产潜力也具有严重影响, 且播种季降雨资源的增加不利于直播方式进行。气候变化对农业生产的影响远不止于此, 比如全球气候变暖改变作物播期和缩短作物生育期[43-44]、增加油菜病虫害发生[45-46]、CO_2 浓度升高产生 CO_2 施肥效应[47-48]。因此, 有关气候变化对长江中下游稻-油复种系统气候生产潜力和实际生产的影响有待于进一步研究。

总体来看, 安徽沿江地区稻油两熟制中移栽方式较直播方式可获得更多光、温资源配置, 并提高光温生产潜力, 可作为应对未来光资源持续下降的首选种植方式。但移栽方式下平均日最高气温显著上升的问题不容忽视, 油菜季应适当晚播推迟移栽应对苗期增温, 水稻季采用耐高温和生育期较长品种并推迟移栽以避免花期高温热害。相比移栽方式, 直播方式下光、温资源减少, 该方式下需要采用高光效品种和构建光资源高效利用作物群体。

参考文献 References

[1] ZHANG B B, WANG Y J, LIU H J, et al. Optimal phosphorus management strategies to enhance crop productivity and soil phosphorus fertility in rapeseed–rice rotation[J]. Chemosphere, 2023, 337: 139392

[2] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴2004[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004: 318
Anhui Provincial Bureau of Statistics. Anhui Statistical Yearbook 2004[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004: 318

[3] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022: 340
Anhui Provincial Bureau of Statistics. Anhui Statistical Yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022: 340

[4] 孟宇辉. 稻油和稻麦模式对作物氮素利用和土壤氮素转化影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 13
MENG Y H. Effects of rice-rape rotation and rice-wheat

rotation on nitrogen use of crop and nitrogen transformation of soil[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 13

[5] 刘磊. 安徽油菜生产现状与制约因素对策[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(10): 61−62, 64
LIU L. Situation of oilseed rape production and constraints countermeasures in Anhui Province[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(10): 61−62, 64

[6] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 等. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1708−1714
FU X L, ZHANG H, JIA J Z, et al. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1708−1714

[7] 习敏, 杜祥备, 吴文革, 等. 稻麦两熟系统适期晚播对周年产量和资源利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 165−172
XI M, DU X B, WU W G, et al. Effects of late sowing of two season crops on annual yield and resource use efficiency in rice-wheat double cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 165−172

[8] 杜祥备, 孔令聪, 习敏, 等. 江淮区域稻麦两熟制周年资源分配、利用特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1078−1087
DU X B, KONG L C, XI M, et al. Characteristics of resource allocation and utilization of rice-wheat double cropping system in the Jianghuai Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1078−1087

[9] 龚德平, 赵永刚, 王天尧, 等. 不同播期对双低油菜品种产量及品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1): 263−265
GONG D P, ZHAO Y G, WANG T Y, et al. Effects of different sowing dates on yield and quality of double-low rapeseed varieties[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(S1): 263−265

[10] 冯云艳, 冷锁虎, 冯倩南, 等. 油菜毯苗移栽与直播对比研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 9−15
FENG Y Y, LENG S H, FENG Q N, et al. A comparative study on transplanting and direct seeding of rapeseed blanket seedling[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(2): 9−15

[11] 陶玥玥, 盛雪雯, 徐坚, 等. 长三角水稻-油菜周年两熟温光资源分配与利用特征[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1327−1338
TAO Y Y, SHENG X W, XU J, et al. Characteristics of heat and solar resources allocation and utilization in rice-oilseed rape double cropping systems in the Yangtze River Delta[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(5): 1327−1338

[12] 孟宇辉, 金文俊, 董召荣, 等. 江淮地区不同水旱轮作模式的资源利用效率与经济效益比较[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3357−3365
MENG Y H, JIN W J, DONG Z R, et al. Comparison of resource utilization efficiency and economic benefit of different paddy-upland rotation systems in Jianghuai region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3357−3365

[13] XING Z P, WU P, ZHU M, et al. Temperature and solar radiation utilization of rice for yield formation with different mechanized planting methods in the lower reaches of the Yangtze River, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(9): 1923−1935

[14] 匡炜, 魏征, 戴力, 等. 不同种植方式对双季稻生育期及产量的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(6): 142−149
KUANG W, WEI Z, DAI L, et al. Effects of different planting patterns on growth period and yield of double-cropping rice[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(6): 142−149

[15] 池忠志, 姜心禄, 郑家国. 不同种植方式对水稻产量的影响及其经济效益比较[J]. 作物杂志, 2008(2): 73−75
CHI Z Z, JIANG X L, ZHENG J G. Comparison of yield and economic effect of rice under different planting patterns[J]. Crops, 2008(2): 73−75

[16] ZHAO H Y, GUO J Q, ZHANG C J, et al. Climate change impacts and adaptation strategies in Northwest China[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 5(1): 7−16

[17] MORISON J I L. Climate change and crop growth[J]. Environmental Management and Health, 1996, 7(2): 24−27

[18] 刘二华, 周广胜, 武炳义, 等. 1981—2010年长江中下游地区单季稻生殖生长期对气候变化和技术进步的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1305−1315
LIU E H, ZHOU G S, WU B Y, et al. Response of reproductive growth period length to climate warming and technological progress in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 1981−2010 in single-cropping rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(5): 1305−1315

[19] 宣守丽, 石春林, 金之庆, 等. 长江中下游地区太阳辐射变化及其对光合有效辐射的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1444−1450
XUAN S L, SHI C L, JIN Z Q, et al. Variation of solar radiation over the middle and lower reaches of the Yangtze River and its influence on photosynthetically active radiation[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(6): 1444−1450

[20] 文想成, 张泰, 王学梅, 等. 长江中下游地区气候生产潜力及粮食产量响应[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 196−203
WEN X C, ZHANG T, WANG X M, et al. Climate productivity potential and food production response in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(6): 196−203

[21] 卢燕宇, 王胜, 田红, 等. 近50年安徽省气候生产潜力演变及粮食安全气候承载力评估[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 428−435
LU Y Y, WANG S, TIAN H, et al. Spatial and temporal variation of climatic potential productivity and its population capacity of food supply in Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 428−435

[22] 郭保卫, 唐闯, 王岩, 等. 两种机械化种植方式对优质晚籼稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(20):

3910−3925
GUO B W, TANG C, WANG Y, et al. Effects of two mechanical planting methods on the yield and quality of high-quality late indica rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(20): 3910−3925

[23] 邓根云, 冯雪华. 我国光温资源与气候生产潜力[J]. 自然资源, 1980(4): 11−16
DENG G Y, FENG X H. The light and temperature resources and climate productivity of China[J]. Natural Resource, 1980(4): 11−16

[24] 王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等. 基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2099−2109
WANG M T, QU H H, YANG X G, et al. Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2099−2109

[25] 牛文娟. 主要农作物秸秆组成成分和能源利用潜力[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 46−66
NIU W J. Physicochemical composition and energy potential of main crop straw and stalk[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 46−66

[26] 刘长坤, 王艳君, 郭媛. 1960年以来长江流域太阳总辐射的时空变化[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(3): 233−240
LIU C K, WANG Y J, GUO Y. Spatial-temporal variations of global solar radiation over the Yangtze River basin since 1960[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 4(3): 233−240

[27] 张立波, 娄伟平. 气候变暖对长江中下游地区热量资源分布的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1361−1372
ZHANG L B, LOU W P. Impact of climate warming on the distribution of thermal resources in the lower-middle reaches of the Changjiang River[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1361−1372

[28] 李建, 江晓东, 杨沈斌, 等. 长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 99−107
LI J, JIANG X D, YANG S B, et al. Changes of agricultural climate resources during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(1): 99−107

[29] FAHAD S, ADNAN M, HASSAN S, et al. Rice responses and tolerance to high temperature[M]//HASANUZZAMAN M, FUJITA M, NAHAR K, et al. Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 201−224

[30] KRISHNAN P, RAMAKRISHNAN B, REDDY K R, et al. High-temperature effects on rice growth, yield, and grain quality[J]. Advances in Agronomy, 2011, 111: 87−206

[31] 侯雯嘉, 陈长青, 乔辉, 等. 1980~2009年长江下游地区油菜冻害时空特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1501−1508
HOU W J, CHEN C Q, QIAO H, et al. Temporal-spatial characteristics of rape freezing injury in the lower reaches of the Yangtze River during 1980−2009[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1501−1508

[32] 丛日环, 张智, 鲁剑巍. 长江流域不同种植区气候因子对冬油菜产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(6): 894−903
CONG R H, ZHANG Z, LU J W. Climate impacts on yield of winter oilseed rape in different growth regions of the Yangtze River Basin[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(6): 894−903

[33] 李威, 王学林, 杨太明, 等. 江淮分水岭地区一季稻气候生产潜力评估[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 276−283
LI W, WANG X L, YANG T M, et al. Climate production potential assessment of single-season rice in Jianghuai Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 276−283

[34] 罗海平, 邹楠, 王圣云. 1981~2015年我国粮食主产区气候生产潜力的时空分异与演化[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1724−1733
LUO H P, ZOU N, WANG S Y. Spatiotemporal differentiation and evolution of climatic production potential in Chinese major grain area from 1981 to 2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(7): 1724−1733

[35] 卢燕宇, 孙维, 方砚秋, 等. 基于种植结构的安徽省气候生产潜力估算及粮食安全气候承载力分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1293−1305
LU Y Y, SUN W, FANG Y Q, et al. Estimating the climatic potential productivity and the climatic capacity of food security based on the cropping structure in Anhui Province[J]. Ecology and Environment, 2022, 31(7): 1293−1305

[36] ZHANG Z, WANG P, CHEN Y, et al. Global warming over 1960–2009 did increase heat stress and reduce cold stress in the major rice-planting areas across China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 49−56

[37] 黄稳清, 黄洪宇, 蒋范晨, 等. 气候变化影响下我国冬油菜物候期时空演变分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 34−41
HUANG W Q, HUANG H Y, JIANG F C, et al. Spatial-temporal evolution of winter rapeseed phenology under climate change in China[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2022, 39(4): 34−41

[38] 张佩, 高苹, 钱忠海, 等. 油菜花期物候主要限制因子分析及预报模型的构建[J]. 气象, 2020, 46(2): 234−244
ZHANG P, GAO P, QIAN Z H, et al. Analysis on limiting factors and construction of prediction model of oilseed rape flowering phenology[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(2): 234−244

[39] 赵政峰, 梁森, 张健, 等. 灌溉和栽培模式对水稻生长产量及倒伏性状的影响[J]. 江苏水利, 2023(6): 22−26, 31
ZHAO Z F, LIANG S, ZHANG J, et al. Effects of irrigation and cultivation mode on growth yield and lodging traits of rice[J]. Jiangsu Water Resources, 2023(6): 22−26, 31

[40] 王寅, 汪洋, 鲁剑巍, 等. 直播和移栽冬油菜生长和产量形成对氮磷钾肥的响应差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 132−142
WANG Y, WANG Y, LU J W, et al. Response differences in growth and yield formation of direct-sown and transplanted winter oilseed rape to N, P and K fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(1): 132−142

[41] 吴汉, 吴含, 钱娜, 等. 江淮地区不同灌溉与种植方式对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 39−46, 71
WU H, WU H, QIAN N, et al. The effects of different combinations of irrigation and planting method on yield and water use efficiency of rice in Jianghuai Region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 39−46, 71

[42] 陈秀芳. 油菜栽培方式与倒伏关系的研究[J]. 湖北农业科学, 1985(10): 20−23
CHEN X F. Study on the relationship between cultivating methods and lodging of oil-seed rape[J]. Hubei Agricultural Sciences, 1985(10): 20−23

[43] HE L, ASSENG S, ZHAO G, et al. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 135−143

[44] HU X Y, HUANG Y, SUN W J, et al. Shifts in cultivar and planting date have regulated rice growth duration under climate warming in China since the early 1980s[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 34−41

[45] FRICKE U, REDLICH S, ZHANG J, et al. Earlier flowering of winter oilseed rape compensates for higher pest pressure in warmer climates[J]. Journal of Applied Ecology, 2023, 60(2): 365−375

[46] EVANS N, BAIERL A, SEMENOV M A, et al. Range and severity of a plant disease increased by global warming[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2007, 5(22): 525−531

[47] LIN E D, XIONG W, JU H, et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO_2 fertilization in China[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 360(1463): 2149−2154

[48] ZHU C W, WOLF J, ZHANG J S, et al. Rising temperatures can negate CO_2 fertilization effects on global staple crop yields: a meta-regression analysis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 342: 109737