

DOI: 10.12357/cjea.20240340

CSTR: 32371.14.cjea.20240340

刘丹, 田俊, 段里成. 气候变暖背景下江西省稻油轮作模式中的水稻种植结构变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(4): 682–693

LIU D, TIAN J, DUAN L C. The change of rice planting structure in rice-oilseed rape rotation mode in Jiangxi Province under the background of climate warming[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(4): 682–693

气候变暖背景下江西省稻油轮作模式中的水稻种植结构变化*

刘 丹^{1,2}, 田 俊^{1,2**}, 段里成³

(1. 江西省气象科学研究所 南昌 330096; 2. 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室 南昌 330096;
3. 江西省农业气象中心 南昌 330096)

摘 要: 为解决江西省在大力发展油菜过程中出现的稻油争地问题, 利用江西省 85 个气象站 1961—2022 年气象资料, 研究了气候变暖背景下稻油轮作模式中水稻种植结构和双季稻熟性搭配的变化特征, 重点关注了 2011—2022 年水稻种植结构和双季稻熟性搭配。研究结果表明: 在保证油菜正常生长的情况下, 1) 油菜收获日期(水稻移栽)南北差异大, 南部收获(水稻移栽)早, 北部收获(水稻移栽)晚。在气候变暖条件下, 油菜收获日期(水稻移栽)整体呈提前的趋势, 2011—2022 年较 20 世纪 60 年代提前 13 d, 赣南地区(即赣州)油菜收获时间为 4 月上旬, 九江为 5 月上旬, 其他地区为 4 月中下旬; 赣南大部分地区水稻移栽时间为 4 月中旬, 赣北赣中大部为 4 月下旬—5 月上旬。2) 1961—1990 年, 一季稻、再生稻和双季稻种植区域变化不大; 1991 年开始, 再生稻和双季稻种植北界向北推进, 江西省一季稻种植范围逐渐缩小, 再生稻和双季稻种植范围逐渐扩大; 2011—2022 年, 吉安南部和赣南可种植双季稻, 赣北南部和赣中大部可种植再生稻, 其余地区可种植一季稻。3) 1991 年开始, 双季稻各熟性搭配在北界一直向北推移, 2011—2022 年, 早熟+早熟品种搭配种植区域分布在吉安南部和抚州南部边缘, 早熟+中熟品种搭配区域分布在赣北南部, 早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配区域分布在赣南中南部。本研究结论可为江西省水稻和油菜的均衡发展提供决策参考, 同时也利于气象部门针对性地做好稻油轮作生产模式下的气象服务。

关键词: 稻油轮作; 种植结构; 水稻; 气候变暖

中图分类号: S162.3

The change of rice planting structure in rice-oilseed rape rotation mode in Jiangxi Province under the background of climate warming*

LIU Dan^{1,2}, TIAN Jun^{1,2**}, DUAN Licheng³

(1. Meteorological Science Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China; 2. Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China; 3. Jiangxi Agricultural Meteorological Center, Nanchang 330096, China)

Abstract: Expanding oilseed rape production in winter fallow fields in Jiangxi has recently been promoted vigorously to satisfy the rapidly growing demand for edible vegetable oil in China; however, the phenomenon of rice and winter oilseed rape competing for

* 国家重点研发计划项目(2022YFD2300203)和江西省气象局面上项目(JX2023M07)资助

** 通信作者: 田俊, 主要从事农业气象研究。E-mail: tianjunccy@163.com

刘丹, 主要从事农业气候资源利用和农业气象灾害研究。E-mail: nuistdan@126.com

收稿日期: 2024-06-11 接受日期: 2024-09-20

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2300203) and the General Project of Jiangxi Meteorological Bureau (JX2023M07).

** Corresponding author, E-mail: tianjunccy@163.com

Received Jun. 11, 2024; accepted Sep. 20, 2024

land has emerged in different areas in the actual development process. This study investigated the changing characteristics of rice planting structure and double-season rice maturity collocation against the background of climate warming and focused on the combination of rice planting structure and double-season rice maturity collocation from 2011 to 2022 by considering the number of days required for agricultural activities, such as oilseed rape harvesting and rice transplanting, in actual rice-oilseed rape rotation mode using meteorological data from 85 meteorological stations in Jiangxi Province from 1961 to 2022. Under conditions of ensuring the normal growth of oilseed rape, the results showed that: 1) The harvest date of oilseed rape (rice transplanting) was different from north to south, which was early in the south and late in the north, and showed an advancing trend that was 13 days earlier from 2011 to 2022 than that in the 1960s under the background of climate warming. After 2011, oilseed rape were harvested in early April in southern Jiangxi, in early May in Jiujiang, and in middle and late April in other regions of the study area. The date of rice transplanting was middle April in most of the southern Jiangxi, and it was from late April to early May in northern and central Jiangxi. 2) The planting areas of single-season rice, ratooning rice, and double-season rice showed little change from 1961 to 1990; however, at the beginning of 1990s, the northern boundary of ratooning rice and double-season rice advanced to the north, and the planting area of single-season rice gradually shrank, whereas the planting area of ratooning and double-season rice gradually expanded under conditions of ensuring normal growth of oilseed rape. After 2011, double-season rice was grown in the south of Ji'an and southern Jiangxi, and ratooning rice was planted in the southern part of northern Jiangxi and most of central Jiangxi. Single-season rice was planted in the rest of Jiangxi. 3) Since 1991, the northern boundary of maturity collocation of double-season rice has moved northward. After 2011, the combination of early- and early-maturing varieties could be planted in the south of Ji'an and the southern edge of Fuzhou, the combination of early- and medium-maturing varieties could be planted in the north of southern Jiangxi, and the combination of early- and late-maturing varieties or medium- and medium-maturing varieties could be planted in the central and southern parts of southern Jiangxi. The results can provide a reference for the balanced development of rice and oilseed rape, and also help meteorological departments to improve the meteorological service of the rice-oilseed rape rotation mode in Jiangxi Province.

Keywords: rice-oilseed rape rotation; planting structure; rice; climate warming

联合国政府间气候变化专门委员会第六次报告指出, 当前气候变化以全球变暖为主, 1980—2021 年全球平均气温上升 0.8 °C, 未来全球气温仍呈上升趋势, 未来 20 年全球预计升温可达 1.5 °C^[1]。轮作体系是最主要的种植制度之一, 将不可避免地受到气候变暖影响^[2]。据估算, 到 2050 年几乎所有地区的农业种植制度都将发生较大变化。气候变暖将对我国轮作系统产生重大影响, 直接影响轮作系统的季节气候资源配置, 导致轮作系统种植界限、布局及其内部作物生长发育进程发生改变^[3]。前人针对气候变暖对中国种植制度和轮作系统等的可能影响开展了大量研究。全国尺度上, 气候变暖造成了全国种植制度界限不同程度北移^[4], 冬小麦 (*Triticum aestivum*)、双季稻 (*Oryza sativa*) 和热带作物^[5] 北界北移。据预测, 2011—2040 年和 2041—2050 年全国种植制度界限继续在不同程度上北移, 包括冬小麦种植北界北移西扩和热带作物种植北界北移^[6]; 区域尺度上, 种植界限也发生了变动, 长江中下游地区双季稻安全种植区域发生了明显变化^[7], 黑龙江寒地水稻安全种植北界北移^[8], 东北三省大豆 (*Glycine max*) 潜在种植区呈北移西扩趋势^[9]。气候变暖也导致作物生育期和产量等发生变化。1981—2002 年, 华北平原夏玉米 (*Zea mays*) 全生育期天数呈变幅为 0.27 d·a⁻¹ 的增加趋势, 但主要生育期变化不一致, 京津冀地区和山东省显著延迟, 河南省显著提前^[10]。1951—2007 年,

熟制变化导致种植制度界限变化, 区域粮食单产可能增加, 基于当前各作物实际产量水平由一年一熟变为一年两熟, 粮食单产平均可增加 54%~106%, 由一年两熟变为一年三熟, 粮食单产平均可增加 27%~58%^[4]。1981—2019 年与 1961—1980 年相比, 东北三省大豆高产不稳产和低产稳产区面积增加, 高产稳产区和低产不稳产区面积减少^[9]。

江西省位于长江中下游地区, 高效利用气候资源的主要种植制度为稻油轮作。作为中国双季稻优势产区, 江西省双季稻种植面积占水稻种植面积的 90%, 是全国双季稻种植比例最高的省份, 在保障国家粮食安全方面占具极其重要的地位^[11]; 同时江西省也处在冬油菜 (*Brassica napus*) 长江流域主产区, 是油菜生产的适宜区域^[12]。气候变暖对江西省水稻和油菜种植具有一定影响。气候变暖使 1992—2021 年江西省双季早稻覆膜早育秧、覆膜湿润育秧和直播 3 种育秧方式的安全播种日期均呈显著提前趋势^[13], 1981—2022 年早稻和晚稻生长期均呈显著缩短趋势, 潜在产量均呈显著下降趋势, 平均每 10 年分别减少 181.30 和 276.16 kg·hm⁻²^[14], 鄱阳湖地区农户水稻种植次数增加, 导致双季稻比重升高^[15]。气候变暖造成双季早稻高温逼熟的次数呈明显上升趋势, 双季晚稻寒露风出现的几率越来越小^[16], 油菜冻害风险具有突发和重发等可能^[17]。前人针对气候变暖对江西水稻和油菜的研究, 大多数是分作物单独研究,

而将两者有机结合起来的研究不足。随着国际争端对我国油料作物进口的影响及植物油需求的快速增长,2022 年中央一号文件明确指出,我国必须坚守保障国家粮食安全底线,大力实施大豆和油料产能提升工程。《中共中央 国务院关于做好 2023 年全面推进乡村振兴重点工作的意见》中提到“统筹油菜综合性扶持措施,推行稻油轮作,大力开发利用冬闲田种植油菜。”因此,江西省也紧跟国家形势,大力发展油菜产业。2023 年,江西省委一号文件中提到“深挖冬闲田潜力扩种油菜,新增油菜播种面积 $6.6 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 以上”。《江西省人民政府关于印发江西省“十四五”农业农村现代化规划的通知》要求,重点建设 $4.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 油菜生产保护区,其中水稻和油菜籽复种区 $4.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$,但在实际发展过程中,不同地区都出现了稻油争地的现象。江西省地形地貌独特,东西南部三面环山,中部丘陵起伏,南北跨越近 6 个纬度 ($24^\circ 29' \sim 30^\circ 04'$),赣南、赣中和赣北气候条件存在显著差异。如何有效利用江西省气候资源,合理安排稻油轮作系统,保证稻油均衡发展是一个亟需解决的问题。

在江西省稻油轮作系统中,水稻种植结构比较多样,既可种植双季稻,也可种植一季稻,还可种植再生稻,再加上水稻不同熟性所需生育天数不同,水稻种植结构可调节性较强。随着水稻工厂化育秧的普及和农业机械化程度的提高,油菜收割和大田耕整时间变短,再加上水稻工厂化育秧可有效缩短秧苗在大田的时间,因此,大田可供作物生长期变长^[18];随着气候变暖,江西省各地可利用的农业气候资源均有所增加,尤其是热量资源增加明显,稻油轮作系统将不可避免地发生变化^[19-20]。本文认为,在保证油菜热量资源满足的情况下,调节水稻种植结构是一个既可以解决稻油争地现象,又可以最大限度利用气候资源的解决方式。因此,本文基于江西省 1961—2022 年的 85 个气象站气象资料,研究了气候变暖背景下,在保证油菜正常生长的前提下,水稻种植结构和双季稻熟性搭配的变化,为江西省耕作制度调整、引种、育种和栽培技术的制定、农业气候资源的评价与区划以及农业可持续发展规划制定等提供技术依据。

1 数据与方法

1.1 气象数据

气象数据来源于江西省气象数据中心,包含江西省 85 个国家气象观测站 1961—2022 年逐日平均

气温观测数据(图 1)。如果某个气象站气象数据整年缺失,则在计算当年数据时剔除此站;如果气象数据部分缺失,则用地理上最临近的 2 个站点数据平均值代替。

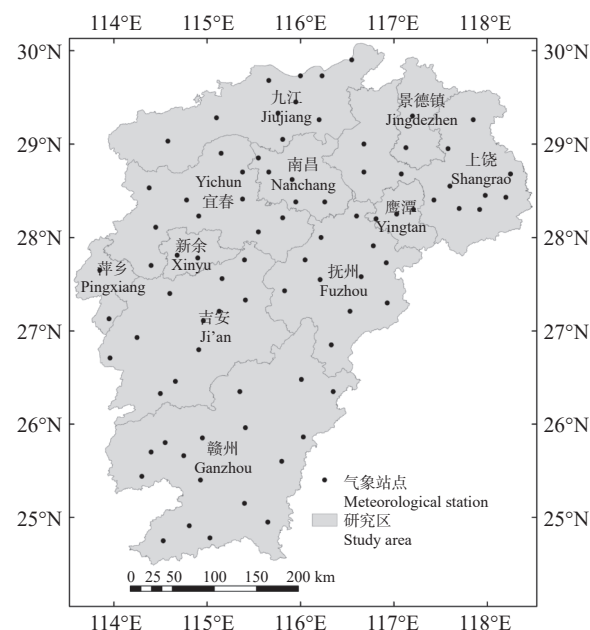


图 1 研究区和气象站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations

1.2 指标选择

1) 油菜播种日期及积温指标: 根据何永梅等^[21]和邹晓芬等^[22]研究成果及江西省水稻收割时间和实际生产状态,固定油菜播种日期为 10 月 20 日,并将此日期作为本研究油菜播种始期,播种方式为直播。早期油菜熟性为中晚熟和晚熟品种,其生育期较长,但随着油菜品种的不断改良,有学者^[23-26]开展了早熟品种和特早熟品种筛选,江西省目前已有适宜三熟区域内种植的优质、早熟高产双低油菜品种^[27]。郑伟等^[26]在安福县筛选出早熟高产油菜品种,其播种和成熟期积温为 $2\,128.9 \sim 2\,236.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$;李祥^[28] 2014—2017 年在华中农业大学开展的试验表明,19 种不同油菜品种从播种到成熟所需 $\geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温最低值为 $1\,875.46 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$;饶娜^[29] 在 2014—2016 年开展的试验结果表明,10 月 28 日播种的‘圣光 127’在不同施氮量下全生育期积温为 $1\,975.3 \sim 2\,064.4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,而江西省 2024—2025 年主推的早熟品种包括‘圣光 127’。综合上述研究及江西当前主推早熟油菜品种,本研究认为积温 $\geq 2\,100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 时,可以满足油菜生长成熟,且可以保证一定产量。因此,本文确定油菜最低安全生长积温为 $2\,100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

2) 水稻种植结构分区指标: 根据一季稻、再生

稻和双季稻的最低生长天数、秧龄以及农事活动(即油菜收割、水稻移栽和收割)时间,利用水稻在大田最低生长天数=最低生长天数-最长秧龄+农事活动时间,得到一季稻、再生稻和双季稻在大田所需最低生长天数,然后以先满足双季稻,再满足再生稻,最后满足一季稻的天数要求进行分区,得到水稻种植结构的分区指标(表 1)。

3) 双季稻熟性搭配分区指标: 根据水稻早熟品种、中熟品种和晚熟品种所需生育天数^[30]、秧龄及农事活动时间(即油菜收割、水稻移栽和收割),利用双季稻大田生长期天数=双季稻生长天数-最长秧龄+农事活动时间,得到双季稻各熟性搭配在大田的生长天数,并以此作为水稻熟性搭配的分区指标(表 2)。

表 1 水稻种植结构分区指标
Table 1 Zoning indicator of rice planting structure d

种植结构 Planting structure	最低生长天数 Minimum growth day	秧龄 Seedling age	农事活动时间 Day of farming activities	分区指标 Zoning indicator
双季稻 Double-season rice	215	40~53	21	≥183
再生稻 Ratoon rice	190	23~28	14	176~182
一季稻 Single-season rice	130	23~28	14	116~175

表 2 双季稻熟性搭配分区指标
Table 2 Zoning indicator of maturity collocation of double season rice d

熟性搭配 Maturity collocation	生长天数 Growth day	秧龄 Seedling age	农事活动时间 Day of farming activities	分区指标 Zoning indicator
早+早 Early + early	215~220	40~53	21	183~188
早+中 Early + medium	220~225	40~53	21	189~193
早+晚(中+中) Early + late (medium + medium)	225~235	40~53	21	194~203
中+晚(晚+晚) Medium + late (late + late)	≥235	40~53	21	≥204

早: 早熟; 中: 中熟; 晚: 晚熟。Early: early maturing; medium: medium maturing; late: late maturing.

1.3 研究方法

1) 油菜收获日期及水稻移栽日期确定: 在固定油菜播种日期为 10 月 20 日的情况下, 先采用温度累积法判断各站点每年积温开始达到 2 100 ℃·d 的日期, 确定此日期为站点当年油菜收获日期, 再利用经验频率法确定 80% 保证率各站点油菜收获日期。根据江西水稻和油菜的生产调查发现, 从油菜收获、大田整耕到水稻移栽所需时间在 7 d 左右, 水稻移栽日期确定为油菜收获后的第 7 天, 早稻收获和晚稻移栽茬口时间与上述时间一致, 因此, 确定各作物轮作种植茬口生产所需时间为 7 d。

2) 大田可供水稻生长天数确定: 将油菜种植日期(10 月 20 日)及通过积温推算得到的油菜收获日期之间的天数作为大田可供水稻生长天数。

3) 水稻种植结构和双季稻熟性分区: 利用 Arc-GIS 10.2 对得到的全省各站点可供水稻生长天数采用反距离权重法进行插值, 再结合已有水稻种植结构指标和双季稻熟性分区指标对其进行分区。

2 结果与分析

2.1 在保证油菜积温条件下, 油菜收获日期和水稻移栽日期空间分布

在固定油菜播种日期为 10 月 20 日和满足油菜

积温达 2 100 ℃·d 的条件下, 80% 保证率的油菜收获日期在江西省南北部地区间差异较大, 收获日期由北向南逐渐提前(图 2)。最早收获的为赣南(即赣州)中南部, 时间为 4 月中旬; 最晚收获地区主要分布在九江市, 收获时间为 5 月中旬; 吉安南部和赣南北部在 4 月下旬, 其他地区大部分在 5 月上旬。通过计算油菜收获日期的年代际变化可知(表 3), 从 20 世纪 60 年代开始, 油菜收获日期不断提前, 2011—2022 年油菜收获日期较 20 世纪 60 年代提前 13 d, 水稻移栽日期为油菜收获后第 7 天, 因此较 20 世纪 60 年代也提前 13 d。在 80% 保证率下, 水稻移栽日期从北向南逐渐提前(图 2)。赣南东南角的寻乌县和定南县的水稻移栽日期最早, 在 4 月中旬; 九江市的彭泽县和瑞昌市的移栽日期最晚, 在 5 月下旬; 赣北和赣中北部大部分地区移栽日期在 5 月中旬, 赣中南部在 5 月上旬, 赣南大部在 4 月下旬。考虑到临近年代对实际生产的参考意义更大, 本文单独分析了 2011 年后(2011—2022 年)油菜收获期的分布。2011—2022 年(图 2)赣南油菜收获日期最早在 4 月上旬, 九江最晚, 大部分在 5 月上旬, 较 80% 保证率下最早和最晚的收获日期均提前, 这充分说明热量资源在增加, 油菜生长日期缩短了。2011—2022 年, 赣南龙

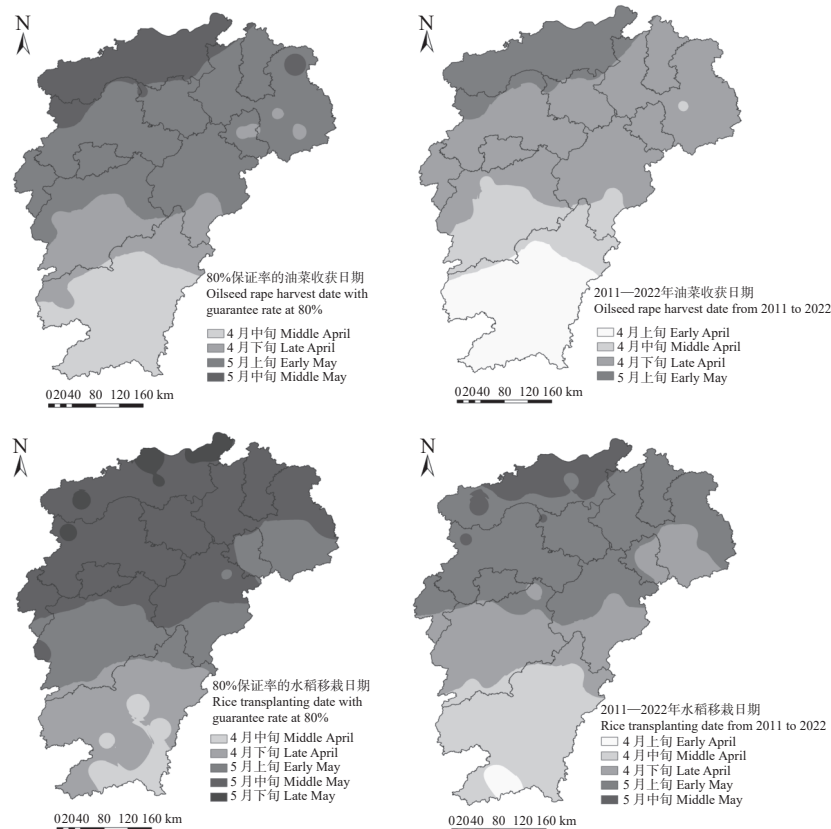


图 2 江西省油菜收获期和水稻移栽日期的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of rapeseed harvesting period and rice transplanting period in Jiangxi Province

表 3 江西省油菜收获日期的年代际变化

Table 3 Interdecadal variation of oilseed rape harvest date in Jiangxi Province

	年份 Year					
	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2010	2011—2022
油菜收获日期(日序)	126	125	125	119	114	113
Oilseed rape harvest date (daily order)						

南市水稻移栽期(图 2)最早,在 4 月上旬,九江市东北部最晚,在 5 月中旬;赣北中南部和赣中北部大部分在 5 月上旬,赣中南部大部分在 4 月下旬,赣南大部分在 4 月中旬。

2.2 在保证油菜生长的情况,大田可供水稻生长天数及积温空间分布

图 3 表明,大田可供水稻生长天数由北向南逐渐增多,九江地区为 154~160 d,赣北大部、吉安北部和抚州市大部为 160~170 d,吉安南部和赣南北部为 170~180 d,赣南中南部为 180~191 d。80% 保证率下大田可供水稻生长积温由北向南逐渐增多,赣南 >4 900 °C·d,九江市最少(<4 600 °C·d),部分地区 <4 300 °C·d,其余大部分地区为 4 600~4 900 °C·d。2011—2022 年,大田可供水稻生长天数也是由北向南逐渐增多,赣北北部地区为 160~170 d,赣北中南部

和赣中北部为 170~180 d,赣中南部大部为 180~190 d,赣南大部为 190~200 d。2011—2022 年,赣南中南部大田可供水稻生长积温为 5 300~5 642 °C·d,江西省中南部和东北部大部为 4 900~5 300 °C·d,九江市大部为 4 300~4 600 °C·d,其余地区积温在 4 600~4 900 °C·d,总体高于 80% 保证率的积温。

2.3 稻油轮作模式中水稻种植结构的时空变化

1961—2022 年,稻油轮作模式中,80% 保证率下,一季稻区分布在赣北、抚州市和吉安中北部地区,再生稻区分布在吉安南部和赣南北部,双季稻区分布在赣南中南部地区(图 4)。1961—1990 年,一季稻区、再生稻区和双季稻区种植区域变化不大,再生稻区北界在赣南北部边缘上下小幅移动,双季稻区北界在赣南中南部上下小幅度移动。1991—2022 年,再生稻区北界和双季稻区北界一直向北移动,其中

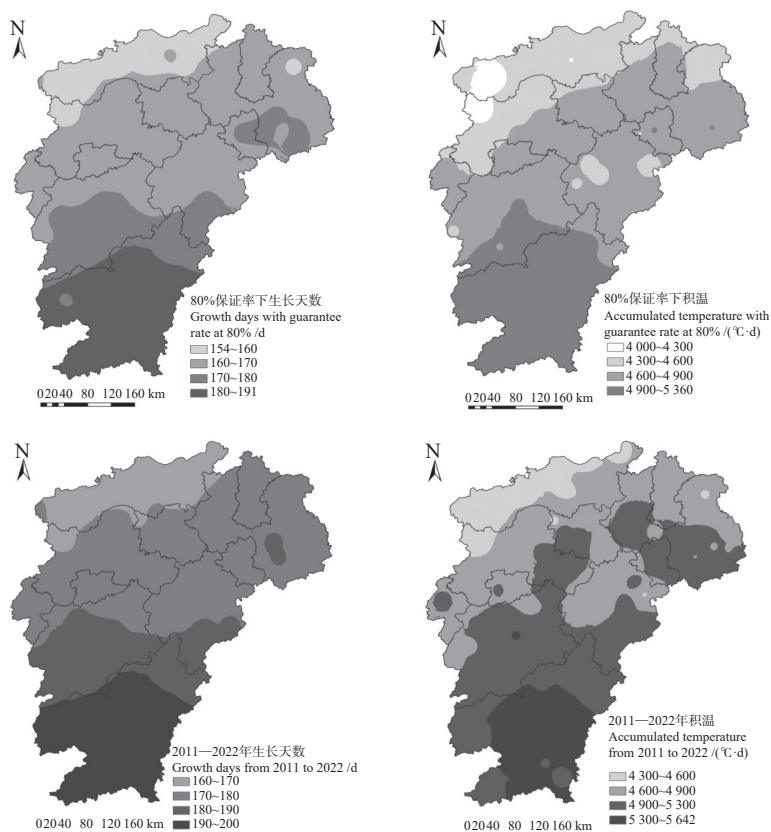


图3 江西省大田可供水稻生长天数及积温空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of rice growth days and accumulated temperature in the field in Jiangxi Province

1991—2000年,再生稻区北界在吉安南部和抚州南部一线,双季稻区北界在赣南北部边缘;2001—2010年,再生稻北界北移至吉安北部、抚州中部和赣北东南角一线,双季稻区北界北移至吉安南部和抚州南部一线,再生稻和双季稻种植区域扩大明显;2011—2022年,再生稻区北界移动至赣北南部和赣北东南部一线,种植区域扩大明显,双季稻区北界基本维持在吉安南部和抚州南部一线,与2001—2010年大致保持一致,只是略微向北移动,种植区域变化不明显。

表4结果显示,稻油轮作模式下,水稻种植结构中水稻种植比例在1961—1990年间变化不大,一季稻维持在74%~79%,再生稻维持在10%~11%,双季稻维持在11%~15%;1991—2022年,一季稻种植比例逐渐缩小,再生稻和双季稻种植比例逐渐增多。一季稻种植比例由1981—1990年的79%降至2011—2022年的23%,1991—2000年与1981—1990年再生稻种植比例相同,均为10%左右,2011—2022年增至47%,双季稻由1981—1990年的11%增至2011—2022年的30%。

综上可知,1961—1990年一季稻、再生稻和双季稻种植区域变化不大;1991年开始,再生稻和双季

稻的种植北界一直向北推进,一季稻种植范围逐渐缩小,再生稻和双季稻种植范围逐渐扩大;2011—2022年,吉安南部和赣南可种植双季稻,赣北南部和赣中大部可种植再生稻,其余地区可种植一季稻。

2.4 双季稻种植区水稻熟性搭配时空变化

图5显示,1961—1970年、1971—1980年和1981—1990年双季稻可种植区域大部仅可采用早熟+早熟品种搭配。1991—2000年,早熟+早熟品种搭配种植区域变小,而早熟+中熟品种搭配和早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域变大,其中早熟+中熟品种搭配种植区域北界在赣南中南部一线,早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域北界在赣南东南角一线;2001—2010年,早熟+早熟品种搭配种植区域北界北移至吉安南部和抚州南部一线,而早熟+中熟品种搭配种植区域北界移至赣南北部一线,但区域面积较1991—2000年缩小,早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域北界移至赣南中南部一线,区域面积较1991—2000年明显扩大;2011—2022年,各品种搭配种植区域北界相较于2001—2010年北界略北移,但变化不明显,早熟+早熟品种搭配种植区域分布在吉安南部和抚州南部边缘附近,早熟+中熟品种

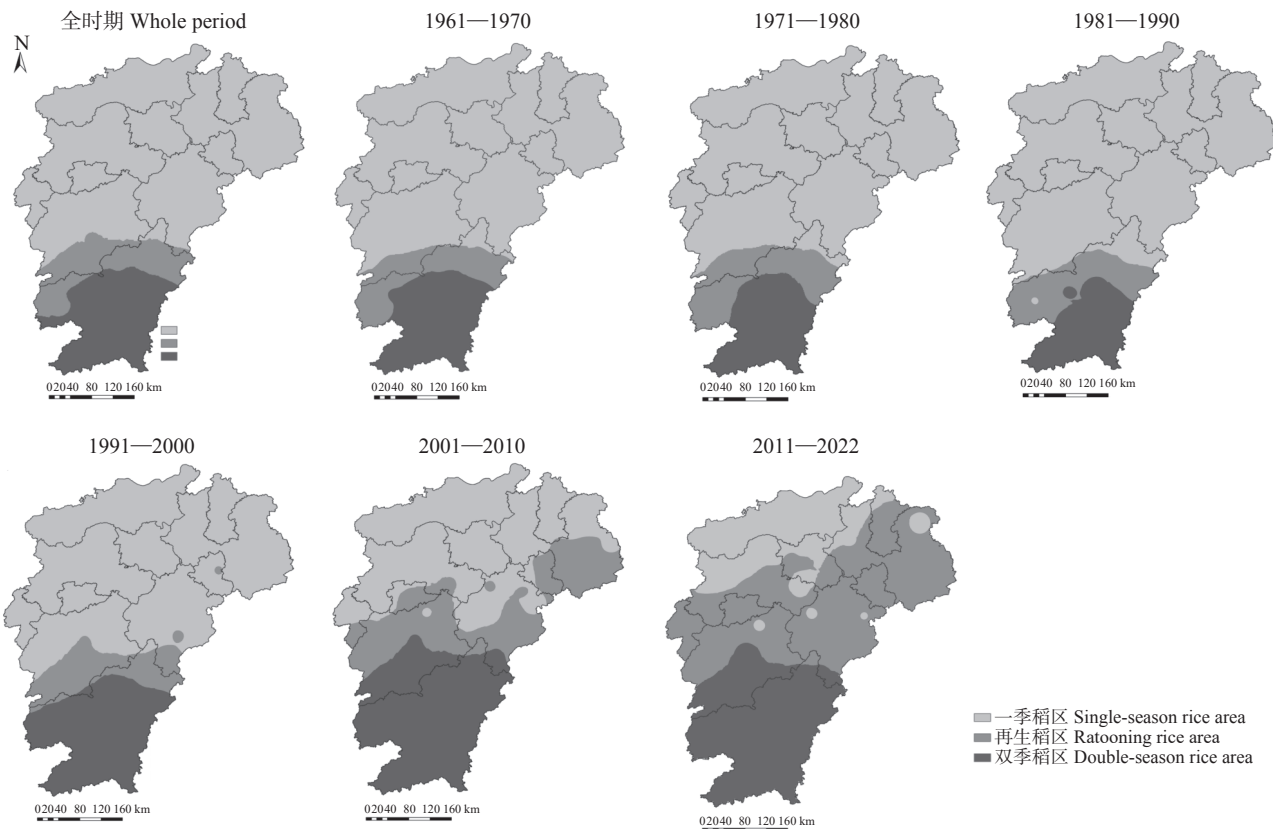


图 4 江西省稻油轮作模式中水稻种植结构的时空变化

Fig. 4 Spatial change of rice planting structure in rice-oilseed rape rotation mode in Jiangxi Province

表 4 江西省稻油轮作系统中的水稻种植结构和双季稻熟性搭配

Table 4 Rice planting structure and maturity collocation of double season rice in rice-oilseed rape rotation mode in Jiangxi Province

%

年份 Year	种植结构 Planting structure			双季稻熟性搭配 Maturity collocation of double season rice		
	一季稻 Single-season rice	再生稻 Ratooning rice	双季稻 Double-season rice	早+早 Early + early	早+中 Early + medium	早+晚或中+中 Early + late or medium + medium
1961—1970	75	10	15	14	1	0
1971—1980	74	11	13	13	0	0
1981—1990	79	10	11	10	0	0
1991—2000	70	10	20	8	11	1
2001—2010	47	24	29	9	7	13
2011—2022	23	47	30	9	7	15

早: 早熟; 中: 中熟; 晚: 晚熟。 Early: early maturing; medium: medium maturing; late: late maturing.

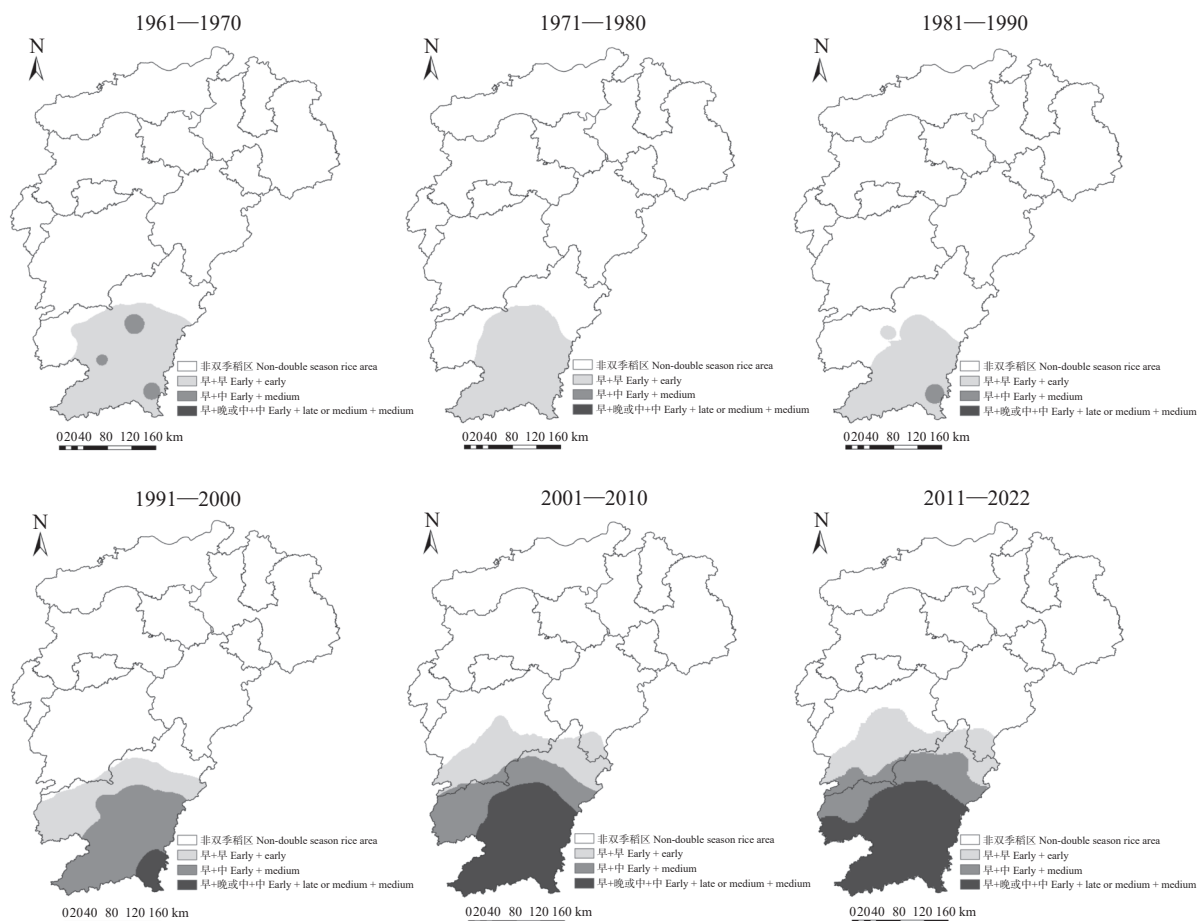
搭配区域分布在赣南北部, 早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域分布在赣南中南大部。

综上可知, 1961—1990 年, 在双季稻可种植区域中大部分仅可以采用早熟+早熟品种搭配; 但从 1991 年开始, 双季稻各熟性搭配的北界一直向北推移, 2011—2022 年早熟+早熟品种搭配种植区域分布在吉安南部和抚州南部边缘, 早熟+中熟品种搭配种植区域分布在赣南北部, 早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域分布在赣南中南大部。

3 讨论

3.1 气候变暖对油菜的影响

油菜是国产植物油中最大的油源作物, 对保障国家粮油安全具有重要战略意义。气候变化最显著的特征是气温升高, 侯树敏^[31] 和黄稳清等^[32] 研究结果均表明, 温度是油菜生长最重要的影响因子, 因此气候变化会对油菜物候期、种植区域、产量等产生影响。黄稳清等^[32] 结果显示, 冬油菜生长期温度



早: 早熟; 中: 中熟; 晚: 晚熟。Early: early maturing; medium: medium maturing; late: late maturing.

图5 江西省双季稻种植区水稻熟性搭配空间变化

Fig. 5 Spatial change of rice maturity collocation in double season rice growing area in Jiangxi Province

每增加 1℃, 现蕾期、开花期和成熟期分别提前 6.05、1.94 和 0.43 d; 祝梦全^[33] 研究表明, 1965—2014 年油菜温度适宜度随时间推移呈上升趋势, 2023—2049 年油菜全生育期平均气温也呈上升趋势; 本文研究结果显示, 在气候变暖背景下, 固定油菜播种日期和油菜积温, 油菜收获日期不断提前, 油菜生育期不断缩短, 这与黄稳清等^[32] 和祝梦全^[33] 的研究结果相似。贺亚琴^[34] 研究表明, 历史气候变化对长江中游地区油菜种植面积的增长不利, 主要原因可能是气候变暖造成双季稻种植界线北移, 压缩了油菜生长空间, 但其未考虑种植熟制随着气候变化也可能发生变化。随着油菜生育期变短、早熟和特早熟油菜品种的出现以及“稻-稻-油”三熟制机插技术等研发, 稻油轮作两熟制地区可变为稻油轮作三熟制区, 油菜面积不会因双季稻的挤压而变小, 这正是本文的研究重点。在保证油菜种植面积的情况下, 优化水稻种植制度, 研究结果显示, 2011—2022 年吉安南部和赣南均能实现“稻-稻-油”三熟制度。王涛^[35] 研究结果表明, 平均气温对油菜产量的影响系数为正, 平均气温每升

高 1%, 油菜产量平均提高 0.018%; 日降水量 ≥ 0.1 mm 时, 其日数和日照时数对油菜产量影响为负, 日照时数每下降 1%, 油菜产量平均上升 0.159%, 但本研究仅考虑满足油菜安全生长的积温, 未考虑油菜高产问题。本文认为对于农业来说, 最大效率地利用气候资源需要保证农作物能够在大田中进行最长时间的光合作用, 进而转换为人类所需生产物质。对于油菜来说, 油菜籽是人类所需的生产物质, 保证其产量很重要, 但油菜开花和油菜秆对人类同样很重要。油菜开花期间形成的风景可以有效促进生态旅游发展^[36], 油菜秆还田有利于提高土壤有机质和速效钾含量, 改善土壤肥力^[37], 这些都是利用气候资源的表现, 而不仅仅是追求油菜产量最大化。

3.2 气候变暖对水稻种植及品种搭配的影响

水稻是我国主要的粮食作物之一, 其播种面积约占全国粮食总面积的 30%, 稻谷产量约占粮食总产量的 40%, 水稻在粮食生产中占据极其重要的地位, 是我国粮食安全的基础^[38]。气候条件是水稻生产的最主要限制因子, 不少学者在气候变暖对水稻种

植面积、品种搭配及生产影响等方面做了大量研究。Liu 等^[39] 研究结果显示, 由于气候变暖, 我国农作物生长等积温线在 1980—2010 年不断北移, 水稻种植适宜区逐渐向北扩张, 面积增幅达 4%。赵锦等^[40] 研究结果则显示, 长江中下游两熟区(稻麦轮作或双季稻轮作) 北界也存在北移现象, 水稻可种植面积扩大。王学林等^[41]、谢远玉等^[42] 和张蕾等^[43] 的研究结果显示, 气候变暖背景下长江中下游地区双季稻温度生长期及安全生长期的热量资源均呈明显增多趋势, 双季早稻适播期越早, 晚稻安全齐穗时间越晚, 一季稻温度适宜度高于其他地区。这与本文研究结果基本一致, 即随着气候变暖, 水稻生育期内积温增加, 1990 年后再生稻和双季稻种植北界往北推进, 双季稻种植面积逐渐增加, 相较于 1961—1990 年, 2011—2022 年再生稻、双季稻安全种植面积分别增加 6.1×10^6 和 2.9×10^6 hm^2 , 同时原双季稻区的早稻播种(移栽) 时间提前。陈先茂等^[44] 研究发现, 在全球气候变暖的大背景下, 不同熟期品种合理搭配, 适当延长双季周年生育期, 不但有利于提高双季稻总产量, 还有利于提高光温和肥水资源利用效率。谢远玉等^[42]、陈先茂等^[44]、艾治勇^[45] 和黄文婷^[46] 均对长江中下游乃至江西省水稻品种搭配进行了研究。黄文婷^[46] 研究结果表明, 长江中下游地区从北向南最优水稻熟性搭配的生育期逐渐变长, 所占比重最大的熟性搭配为中熟早稻+晚熟晚稻, 其次为中熟早稻+中熟晚稻的搭配。陈先茂等^[44] 认为, 在江西南部, “早籼(中熟)+晚籼(迟熟)”及“早籼(中熟)+晚粳”模式较佳; 在江西北部, “早籼(早熟)+晚粳” “早籼(中熟)+晚籼(中熟)”及“早籼(中熟)+晚粳”模式较佳。但上述研究均只考虑了水稻种植品种搭配, 并未考虑冬季种植其他作物对水稻品种搭配造成的影响; 本文是在考虑冬季种植油菜且保证油菜安全生长积温的条件下, 研究水稻种植结构和水稻品种搭配, 这是本文与其他研究的差异。本研究结果显示, 在保证油菜积温条件下, 1991 年后, 双季稻各熟性搭配在北界逐渐向北推移, 2011—2022 年, 早熟+早熟品种搭配分布在吉安南部和抚州南部边缘, 早熟+中熟品种搭配分布在赣南北部, 早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配分布在赣南中南部大部。2011—2022 年的稻油轮作分区结果是基于 2011—2022 年数据得到的, 数据时间较长, 具有一定可靠性, 但气候变暖并非持续平稳上升, 而是波动性上升, 因此, 2011—2022 年区划结果的应用仍存在一定风险, 需结合当地实际生产情况和当年天气情况进行适当调整。

稻后复种油菜是稻田传统的农作制度之一, 优质高效和生态安全的水稻-油菜复种模式可以挖掘高产潜力, 降低生产成本, 还可提高光热资源利用效率、养分利用效率与土地产出率, 有效推进耕作制度优化和产业升级^[47-48]。本文区划的宗旨是尽可能通过调整水稻熟性, 最大限度实现稻油轮作的两熟制和三熟制, 但熟制增加也会增加农业生产成本, 并不能保证经济效益增加。本文的区划只是从油菜安全生长积温满足以及气候资源利用角度给出意见, 后续将进一步开展与江西稻油轮作实际生产的差异及原因分析, 以增强对实际生产的指导意义。

4 结论

在保证油菜积温满足条件下, 油菜收获日期(水稻移栽) 南北差异大, 南部收获(水稻移栽) 早, 北部(水稻移栽) 收获晚。在气候变暖条件下, 油菜收获日期(水稻移栽) 整体呈提前的趋势, 2011—2022 年较 20 世纪 60 年代提前 13 d; 2011—2022 年, 赣南油菜收获在 4 月上旬, 九江在 5 月上旬, 其他地区在 4 月中下旬; 赣南大部水稻移栽在 4 月中旬, 赣北赣中大部在 4 月下旬—5 月上旬。随着气候变暖, 1991 年开始, 再生稻和双季稻的种植北界向北推进, 江西省一季稻种植范围逐渐缩小, 再生稻和双季稻种植范围逐渐扩大; 2011—2022 年, 吉安南部和赣南可种植双季稻, 赣北南部和赣中大部可种植再生稻, 其余地区可种植一季稻; 双季稻各熟性搭配种植区域北界一直向北推移, 2011—2022 年, 早熟+早熟品种搭配种植区域分布在吉安南部和抚州南部边缘, 早熟+中熟品种搭配种植区域分布在赣南北部, 早熟+晚熟或中熟+中熟品种搭配种植区域分布在赣南中南部。

参考文献 References

- [1] 杨蕊, 王小燕, 刘科. 湖北省小麦潜在产量时空异质性特征及驱动因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 616-626
YANG R, WANG X Y, LIU K. Analysis of spatiotemporal heterogeneity of wheat potential yield and the driving factors in Hubei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 616-626
- [2] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 等. 北方农牧交错带气候变化对粮草轮作生产的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 77-89
YANG X, JIA P F, HOU Q Q, et al. Investigating the impacts of climate change on the production of crop and forage rotational fields in the agro-pastoral interlaced zone in Northern-China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(1): 77-89
- [3] 刘欢, 熊伟, 李迎春, 等. 气候变化对中国轮作系统影响的研究

- 究进展[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(10): 613–631
- LIU H, XIONG W, LI Y C, et al. Advances of impacts and adaptation of climate change on crop rotations in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(10): 613–631
- [4] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329–336
- YANG X G, LIU Z J, CHEN F. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329–336
- [5] 李勇, 杨晓光, 王文峰, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 V. 气候变暖对中国热带作物种植北界和寒害风险的影响分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(12): 2477–2484
- LI Y, YANG X G, WANG W F, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China V. The possible effects of climate warming on geographical shift in safe northern limit of tropical crops and the risk analysis of cold damage in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(12): 2477–2484
- [6] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响: VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1562–1570
- YANG X G, LIU Z J, CHEN F. The possible effects of global warming on cropping systems in China VI. Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1562–1570
- [7] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 IX. 长江中下游地区单双季稻高低温灾害风险及其产量影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(19): 3997–4006
- LI Y, YANG X G, YE Q, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China IX. The risk of high and low temperature disasters for single and double rice and its impacts on rice yield in the Middle-Lower Yangtze Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(19): 3997–4006
- [8] 王晓煜, 杨晓光, 吕硕, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 XII. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1859–1871
- WANG X Y, YANG X G, LÜ S, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XII. the possible effects of climate warming on geographical shift in safe planting area of rice in cold areas and the risk analysis of chilling damage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1859–1871
- [9] 郭世博, 张方亮, 张镇涛, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 XIV. 东北大豆高产稳产区及农业气象灾害分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(9): 1763–1780
- GUO S B, ZHANG F L, ZHANG Z T, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XIV. distribution of high-stable-yield zones and agro-meteorological disasters of soybean in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(9): 1763–1780
- [10] 孟林, 刘新建, 邹定荣, 等. 华北平原夏玉米主要生育期对气候变化的响应[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 375–382
- MENG L, LIU X J, WU D R, et al. Responses of summer maize main phenology to climate change in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(4): 375–382
- [11] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 等. 近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(3): 323–334
- LÜ W S, ZENG Y J, SHI Q H, et al. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice in Jiangxi Province in recent 30 years[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(3): 323–334
- [12] 吕伟生, 肖国滨, 叶川, 等. 油-稻-稻三熟制下双季稻高产品种特征研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 37–48
- LÜ W S, XIAO G B, YE C, et al. Characteristics of high-yield double rice varieties in rice-rice-rapeseed cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 37–48
- [13] 张方亮, 刘文英, 田俊, 等. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对江西双季稻生长期和产量的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(10): 2614–2624
- ZHANG F L, LIU W Y, TIAN J, et al. Simulating effects of climate change on growth season and yield of double cropping rice in Jiangxi Province based on DSSAT model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(10): 2614–2624
- [14] 吴珊珊, 王怀清, 黄彩婷. 气候变化对江西省双季稻生产的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(2): 207–215
- WU S S, WANG H Q, HUANG C T. Influence of climate change on double-harvest rice yield in Jiangxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(2): 207–215
- [15] 章起明, 易艳红, 廖满庭, 等. 气候变暖背景下江西不同育秧方式双季早稻安全播期分析[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(11): 893–901
- ZHANG Q M, YI Y H, LIAO M T, et al. Analysis on safe sowing date of double-cropping early rice with different seedling raising methods in Jiangxi under climate warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(11): 893–901
- [16] 曹大宇, 陈昭玖, 蔡波. 气候变化对江西水稻种植模式的影响——基于鄱阳湖地区村级数据的实证分析[J]. *生态经济*, 2015, 31(11): 56–59, 69
- CAO D Y, CHEN Z J, CAI B. The impact of climate change on rice planting patterns in Jiangxi Province: An empirical research based on village level data of Poyang Lake area[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(11): 56–59, 69
- [17] 吴昊, 邵明阳, 沈福生, 等. 低温冻害对江西油菜产量的影响及其变化特征研究[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(11): 14–19
- WU H, SHAO M Y, SHEN F S, et al. Effects of low temperature and freezing injury on rapeseed yield and its variation characteristics in Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(11): 14–19
- [18] WANG Y J, LIU G Y, ZHANG B B, et al. Coordinated development of farmland transfer and labor migration in China: Spatio-temporal evolution and driving factors[J]. *Land*, 2022, 11(12): 2327
- [19] 郭瑞鸽, 蔡哲, 刘文英. 早春热量资源变化及对双季早稻早播的可行性分析[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(9): 12–22
- GUO R G, CAI Z, LIU W Y. Thermal resources variation in early spring and feasibility analysis on early rice sowing in advance in double cropping system[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(9): 12–22

- [20] 刘宁. 长江中游双季稻区稻田三熟制优化复种方式研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023
LIU N. Study on the optimized multiple cropping pattern of triple cropping system in double cropping rice region of the middle reaches of the Yangtze River[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023
- [21] 何永梅, 张有民, 王迪轩. 油菜优质高产问答[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2021
HE Y M, ZHANG Y M, WANG D X. Questions and Answers on High Quality and High Yield of Rapeseed[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2021
- [22] 邹晓芬, 张建模. 播期对双季稻区油菜熟期、产量及抗性的影响[J]. 江西农业学报, 2011, 23(3): 67–68
ZOU X F, ZHANG J M. Effects of sowing date on yield, maturing and resistance of rapeseed in double cropping rice region[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(3): 67–68
- [23] 张尧锋, 余华胜, 曾孝元, 等. 早熟甘蓝型油菜研究进展及其应用[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(2): 258–266
ZHANG Y F, YU H S, ZENG X Y, et al. Progress and application of early maturity in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(2): 258–266
- [24] 李才厚, 欧阳凤仔. 三熟制区域早熟油菜品种筛选[J]. 农业与技术, 2013, 33(2): 108–109
LI C H, OUYANG F Z. Screening of regional early-maturing rapeseed varieties with triple cropping system[J]. *Agriculture and Technology*, 2013, 33(2): 108–109
- [25] 袁卫红, 高海军. 江西三熟制产区早熟高产多抗油菜新品种(组合)的筛选[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(3): 78–79, 83
YUAN W H, GAO H J. Selection of new rape varieties (combinations) with early ripening, high yield and multi-disease resistance in triple-cropping system region of Jiangxi Province[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(3): 78–79, 83
- [26] 郑伟, 陈明, 吕伟生, 等. 油稻稻三熟制早熟高产油菜品种筛选[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 205–211
ZHENG W, CHEN M, LÜ W S, et al. Screening of early-maturing and high-yielding rapeseed varieties under rapeseed-rice-rice cropping system[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(2): 205–211
- [27] 孙明珠, 乐丽红, 龙珑, 等. 江西省 2014—2015 年“双低”油菜品种早熟性对比试验小结[J]. 江西农业, 2016(13): 24–28
SUN M Z, LE L H, LONG L, et al. Summary of comparative experiment on early maturity of “double low” rapeseed varieties in Jiangxi Province from 2014 to 2015[J]. *Jiangxi Agriculture*, 2016(13): 24–28
- [28] 李祥. 不同播期条件下气象因子对各类油菜品种生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017
LI X. Effects of meteorological factors on development of rapeseed varieties under different sowing dates[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017
- [29] 饶娜. 早中熟油菜生长发育的温度要求及光温生产效率研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017
RAO N. Study on temperature requirement and light energy and temperature production efficiency of early and middle maturing rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017
- [30] 石庆华, 潘晓华. 双季水稻生产技术问答[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2010
SHI Q H, PAN X H. Q&A on Double Cropping Rice Production Technology[M]. Nanchang: Jiangxi Science & Technology Publishing House, 2010
- [31] 侯树敏. 气象和生理等因素对甘蓝型油菜产量品质性状影响的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2004
HOU S M. Study on the meteorological and physiological factors etc. effecting yield and quality characters of rapeseed (*B. napus*, L.)[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2004
- [32] 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
- [33] 祝梦全. 气候变化对江苏省油菜气候资源及适宜度的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023
ZHU M Q. Effects of climate change on the climatic resources and suitability of oilseed rape in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023
- [34] 贺亚琴. 气候变化对中国油菜生产的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016
HE Y Q. Study on the climate change impact on Chinese oilseed rape production[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016
- [35] 王涛. 气候变化对中国油菜产量的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021
WANG T. Research on the impact of climate change on China's rape production[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021
- [36] 李春晖, 张晓芳, 蔡哲, 等. 基于有效积温法改进婺源油菜花期预报模型[J]. 中国农业气象, 2024, 45(3): 281–292
LI C H, ZHANG X F, CAI Z, et al. Improvement of flowering prediction model of rape in Wuyuan based on effective integrated temperature method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(3): 281–292
- [37] 陈忠平, 龙昌智, 朱树伟, 等. 油菜秆还田和氮肥种类对水稻生长过程中土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(21): 73–81
CHEN Z P, LONG C Z, ZHU S W, et al. Effect of rape stalk returning and nitrogen fertilizer types on soil nutrients during rice growth[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(21): 73–81
- [38] 刘水长. 近年来我国稻米需求和生产情况[J]. 中国粮食经济, 2005(5): 27–29
LIU S C. Domestic rice demand and production in recent years[J]. *China Grain Economy*, 2005(5): 27–29
- [39] LIU B, ASSENG S, MÜLLER C, et al. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1130–1136
- [40] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 II. 南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1860–1867
ZHAO J, YANG X G, LIU Z J, et al. The possible effect of

- global climate changes on cropping systems boundary in China II. The characteristics of climatic variables and the possible effect on northern limits of cropping systems in South China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1860–1867
- [41] 王学林, 曾凯, 柳军, 等. 长江中下游地区双季稻生长季内热量资源的变化特征及温度适宜度分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 27–37
- WANG X L, ZENG K, LIU J, et al. Variation characteristics of heat resources and temperature suitability for double cropping rice growing seasons in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 27–37
- [42] 谢远玉, 黄淑娥, 田俊, 等. 长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2950–2958
- XIE Y Y, HUANG S E, TIAN J, et al. Spatial-temporal characteristics of thermal resources and its influence on the growth of double cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2950–2958
- [43] 张蕾, 李森, 郭安红, 等. RCP 情景下中国一季稻热量资源变化动态[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1533–1542
- ZHANG L, LI S, GUO A H, et al. Thermal resource change dynamics for single-season rice in China under RCP scenarios[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(10): 1533–1542
- [44] 陈先茂, 张力红, 陈金, 等. 江西双季稻不同品种搭配模式对产量与效益的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 54–58
- CHEN X M, ZHANG L H, CHEN J, et al. Effects of varietal collocation patterns on grain yield and benefits of double-cropping rice in Jiangxi Province[J]. *Hybrid Rice*, 2021, 36(1): 54–58
- [45] 艾治勇. 长江中游地区气候变化特点及双季稻适应性高产栽培技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012
- AI Z Y. Studies on climate change in middle reach of Yangtze River and adaptive technique for high yielding production of double-cropping rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012
- [46] 黄文婷. 基于模拟产量的长江中下游优化水稻种植制度的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016
- HUANG W T. Study on optimization of rice cropping system in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on simulated yield[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016
- [47] 李立军. 中国耕作制度近 50 年演变规律及未来 20 年发展趋势研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004
- LI L J. Involving regularities in recent 50 years and future trends in 2020 on farming system in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004
- [48] 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