

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.55056

长江下游冬油菜区应对气候变化的育种和栽培策略研究

杨锐¹ 陈敬东¹ 黄郢¹ 张学昆^{1,2} 周登文³ 刘清云⁴ 徐劲松¹
谢伶俐¹ 许本波^{1,*}

¹ 长江大学农学院 / 农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建) / 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434025; ² 岳麓山实验室 / 湖南省农业科学院作物所, 湖南长沙 410128; ³ 湖北省荆州市农业技术推广中心, 湖北荆州 434020; ⁴ 湖北省黄冈市浠水县农业技术推广中心, 湖北黄冈 438021

摘要: 气候变化对油菜生产具有重要影响, 阐明气候变化条件下品种改良与栽培策略优化对保障油菜生产安全具有重要意义, 本研究基于 2009—2023 年长江下游油菜主产区多年多点国家区试数据, 采用混合线性模型(MLM)、线性回归与典型相关分析, 系统揭示气象因子与产量、产油量及抗性指标之间的关系。研究表明, 长江下游地区油菜生育期平均气温显著上升, 气温波动和降水不稳定性增强。平均气温上升整体有利于提升籽粒产量和产油量, 但极端天气显著削弱其正效应, 11 月低温对产量具有显著负面影响。典型相关分析识别出 2 类主要气象性状耦合模式: (1) 秋末未偏湿、春季温和、春末适度升温的气候条件有利于安全越冬、稳健返青和病害防控, 可显著提升产量, 但油分可能下降; (2) 冷春条件下产量与结构性状受抑, 病害风险增加。建议加强 11 月低温监测预警, 针对不同气候型采取差异化管理: 在温湿适宜年份优化密度与养分供应以提高含油量; 在冷春年份强化菌核病防控及花期到成熟期的养分补偿。育种上应同步选育稳产抗病型与高油高粒重型, 提升复杂气象条件下的适应力。建立气象-性状-产量多维预警体系, 结合历史气象型与未来预测, 实现品种选育与栽培管理的动态优化。

关键词: 油菜; 气象因子; 典型相关分析; 混合线性模型; 产量; 含油量; 菌核病

Study on breeding and cultivation strategies for winter rapeseed to cope with climate change in the lower reaches of the Yangtze River

Yang Rui¹, Chen Jing-Dong¹, Huang Ying¹, Zhang Xue-Kun^{1,2}, Zhou Deng-Wen³, Liu Qing-Yun⁴, Xu Jin-Song¹, Xie Ling-Li¹, and Xu Ben-Bo^{1,*}

¹ College of Agronomy, Yangtze University / Key Laboratory of Green and Efficient Crop Production in the Middle Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Engineering Research Center of Wetland Ecology and Agricultural Use, Ministry of Education, Jingzhou 434025, Hubei, China; ² Yuelu Mountain Laboratory / Institute of Crops, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410128, Hunan, China; ³ Agricultural Technology Extension Center of Jingzhou, Jingzhou 434020, Hubei, China; ⁴ Agricultural Technology Extension Center of Xishui County, Huanggang 438021, Hubei, China

Abstract: Climate change has a significant impact on rapeseed production, making it essential to clarify breeding and management strategies under evolving climatic conditions to ensure production stability. To systematically investigate the relationships between meteorological factors and yield, oil yield, and resistance-related traits, multi-year and multi-location national trial data from major production areas in the lower reaches of the Yangtze River during 2009–2023 were analyzed using a mixed linear model (MLM), linear regression, and canonical correlation analysis. Results showed a significant increase in mean temperature during the rapeseed growing season in this region, accompanied by greater temperature fluctuations and increased precipitation variability. Overall, the rise in mean temperature was beneficial for improving yield and oil production; however, extreme weather

本研究由农业生物育种重大项目(2023ZD04042)和农业农村部长江中游油菜单产提升技术集成示范项目(152304045)资助。

This study was supported by the Major Projects of Agricultural Biology Breeding of China (2023ZD04042), and the Ministry of Agriculture and Rural Affairs: Improving Rapeseed Yield Potential Ability in the Middle Reaches of the Yangtze River (152304045).

* 通信作者(Corresponding author): 许本波, E-mail: benboxu@yangtzeu.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: ruiyang.stu@yangtzeu.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-08-20; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-05.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260205.1631.008>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

events substantially weakened this positive effect, and low temperatures in November had a particularly negative impact on yield. Canonical correlation analysis revealed two dominant meteorology-trait coupling patterns: Type 1 (humid late autumn–moderately cool early spring–moderately warm late spring), which supported safe overwintering, strong regrowth, and effective disease control, thereby significantly boosting yield but potentially reducing oil content; and Type 2 (cold spring), which was associated with suppressed yield and structural traits, as well as increased disease risk. It is recommended to enhance monitoring and early warning systems for extreme weather, especially low temperatures in November, and to adopt targeted management strategies. Under different climatic scenarios, differentiated field practices and a “dual-target” breeding strategy should be implemented: in warm and moist favorable years, optimize planting density and nutrient management to enhance oil content and thousand-seed weight; in cold spring years, apply timely control measures for *Sclerotinia sclerotiorum* rot and reinforce nutrient supply during the flowering to maturity stages. Breeding efforts should focus simultaneously on developing high-yield, disease-resistant genotypes and high-oil, high-thousand-seed-weight genotypes to enhance adaptability under complex climate conditions. A multidimensional meteorology–trait–yield early warning system should be established, integrating historical climate patterns with future projections to enable dynamic optimization of cultivar selection and field management.

Keywords: rapeseed; climatic factors; canonical correlation analysis; mixed linear model; yield; oil content; *Sclerotinia* disease

油菜(*Brassica napus* L.)是我国最主要的油料作物之一,其产量长期占据国内食用植物油总产量的一半以上^[1-3]。近年来我国居民人均食用油消费量呈不断攀升趋势,植物油自给率仅为三分之一左右,2024 年我国进口油菜籽 639 万吨,菜籽油 188 万吨,供需矛盾突出^[4-5],油菜在保障国家粮油安全中的地位日益凸显。在此背景下,油菜的高产稳产对于应对全球农业市场不确定性、提高我国油料自给率以及实现油料自主可控具有重要的战略意义^[6-7]。长江流域冬油菜区是我国最大的油菜产区^[8],播种面积及总产占全国油菜的 90%左右^[9]。长江下游是我国传统油菜高产产区,其平均单产居长江流域各冬油菜主产区之首^[10]。在全球变暖背景下,长江流域近 40 年来平均气温整体呈显著上升趋势,特别是长江下游地区增幅较大,但气温日较差逐步缩小,极端天气频发^[11]。长江流域的极端天气频次增加,并存在明显的周期性波动^[12-13],2022 年长江流域经历了自 1979 年以来最强的高温事件,直接导致区域尺度的干旱,给作物产量造成巨大损失^[14]。长江流域气温总体呈上升趋势,但并未消除阶段性强冷空气、寒潮的发生^[15]。变暖并不一定降低冷害风险,晚春霜冻风险也呈上升趋势,导致植物在更脆弱的生长时期遭遇低温事件,从而增加冻害概率与损失幅度^[16]。长江下游地区无降水日数及极端降水事件的频率与强度均呈显著上升趋势^[17-19]。在长时间尺度下,长江下游的华东地区的全年日照时数总体呈下降趋势,尽管近年来观察到地表增亮现象,但在冬季仍呈下降趋势^[20-21],这些均成为威胁作物高产稳产的关键风险因素。

油菜在播种期、花期等关键时期对气象因子(气温、降水、日照)高度敏感^[22]。冻害、渍害及光照不

足常导致油菜单株角果数减少、生育期延长、病害发生率升高等。当前,针对不同时期气候胁迫的系统应对策略仍不健全,区域间管理措施也尚缺统一的气象适应性指导依据^[23-26]。本研究以 2009—2023 年长江下游典型油菜主产区为对象,整合多年多点田间试验数据,系统评估生育期内主要气象因子(包括平均气温、极端高低温、降水和日照时数)对油菜产量、产油量及关键农艺性状的影响规律,明确在气候变暖背景下各主要气象因子对油菜增产的影响,形成可操作的气象和性状耦合图谱,提出分气象因子的栽培管理要点与育种路径,旨在为区域化稳产与品质提升提供证据链与决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

在作物育种与多点试验数据分析中,混合线性模型(linear mixed model, LMM)已成为估计遗传效应与环境效应的标准方法^[27]。与固定效应模型不同,LMM 同时包含固定效应与随机效应,能合理处理重复测量、区组、点位效应以及基因型×环境互作等结构。其一般形式为:

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (1)$$

式中, y 为观测向量, X 与 Z 分别为固定、随机效应设计矩阵, β 为固定效应参数, $u \sim N(0, G)$ 为随机效应向量, $\varepsilon \sim N(0, R)$ 为残差,故 $\text{Var}(y) = V = ZGZ^T + R$ 。

其中, y 为观测向量, $\text{Var}(y)/V$ 为 y 的方差-协方差矩阵, Z 为随机效应设计矩阵, G 为随机效应 u 的协方差矩阵, Z^T 为 Z 的转置矩阵, R 为残差协方差矩阵。

由于传统极大似然(maximum likelihood, ML)在存在固定效应时易低估方差分量,本文采用限制极大似然(restricted maximum likelihood, REML)估计

方差分量;在此基础上得到随机效应的最佳线性无偏预测(best linear unbiased prediction, BLUP):

$$\hat{\beta} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} y \tag{2}$$

$$\hat{u} = G Z^T V^{-1} (y - X \hat{\beta}) \tag{3}$$

式中 y 为观测向量, V 为 y 的方差-协方差矩阵, X 为固定效应设计矩阵, β 为固定效应参数, 其估计 $\hat{\beta}$ 为广义最小二乘或最佳线性无偏估计; u 为随机效应, 其估计值 $\hat{u}$ 为最佳线性无偏预测, G 为随机效应协方差矩阵, Z 为随机效应设计矩阵。

BLUP 具备“最佳、线性、无偏”3 项性质, 该研究选用 2009—2023 年国家区试对照品系沔油 737、秦优 10 号、秦优 7 号、越优 1203 等油菜品系为研究对象。采用混合线性模型(mixed linear model, MLM)对 2009/2010 年(以下均用参试播种年, 如 2009 年表示 2009/2010 年数据)至 2023/2024 年(2023 年)以来对照品系表现数据进行分析, 将品系(Line)、年份(Year)、地点(Location)及年份与地点互作(Year × Location)设为随机效应, 建立以下模型:

品系表现 = ~ (1 | 品系) + (1 | 年份) + (1 | 地点) + (1 | 年份:地点) (4)

式中, (1 | A)表示对因子 A 设定随机截距。

模型采用 REML 方法估计参数, 在此基础上,

提取各品系的 BLUP 值^[28-30] (表 1), 作为品系综合表型指标, 因“沔油 737”在保持较好的性状表现同时, 还表现出良好的稳产性, 所以将“沔油 737”作为参照品系, 计算其他品系相对于参照品系的性状差异, 转换逻辑为:

$$L_{(\text{沔油 737})} = L_{(x)} + \text{BLUP}_{(x)} - \text{BLUP}_{(\text{沔油 737})} \tag{5}$$

式中, $L_{(\text{沔油 737})}$ 为各品系转换为沔油 737 的表现性状; $L_{(x)}$ 为各品系的实际表现性状; $\text{BLUP}_{(x)}$ 为各品系表现性状对应的 BLUP 值; $\text{BLUP}_{(\text{沔油 737})}$ 为沔油 737 对应的 BLUP 值。

试验地点为长江下游合肥(31°15'N, 117°16'E)、铜陵(30°92'N, 117°97'E)、芜湖(30°54'N, 118°27'E)、扬州(32°42'N, 119°20'E)、南京(31°07'N, 118°05'E)、上海(30°88'N, 121°38'E)、嘉兴(30°83'N, 120°72'E)、杭州(30°32'N, 119°08'E)共 8 个国家区域试验点。

1.2 田间种植

观测点均为上述 8 个国家油菜区域试验点, 试验田灌溉系统与排水系统配套全面, 畦面宽 2 m, 畦沟宽 20 cm, 采取随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 20 m², 种植行距为 30 cm, 株距为 5 cm。其他管理技术参照当地大田栽培措施。全生育期防虫不防病, 油菜八成黄熟时采用人工割晒后分段收获。

表 1 各对照品系 BLUP 换算值
Table 1 BLUP conversion value for each CK line

品系 Line	产量 Yield	株高 Plant height	单株角果数 Siliqua number per plant	每角粒数 Seed number per siliqua	千粒重 Thousand seeds weight	全生育期 Whole growth period
沔油 737 Fengyou 737	224.18	-11.74	12.99	-1.04	0.106	-3.91
秦优 10 号 Qinyou 10	15.22	11.66	-34.88	0.28	0.005	-1.53
秦优 7 号 Qinyou 7	-104.12	8.04	-51.42	1.79	0.036	0.13
越优 1203 Yueyou 1203	508.78	1.67	8.52	0.10	0.284	-0.11

品系 Line	含油量 Oil content	菌核病指数 Sclerotium index	选育单位 Breeding institution	作为对照品系年度 Years served as a control line
沔油 737 Fengyou 737	1.02	1.41	湖南省作物研究所 Crop Research Institute of Hunan province	2018, 2020-2022
秦优 10 号 Qinyou 10	1.76	1.07	咸阳市农业科学研究所 Xianyang Institute of Agricultural Sciences	2011-2019
秦优 7 号 Qinyou 7	1.93	-2.63	陕西杂交油菜研究中心 Hybrid Rapeseed Research Center of Shaanxi province	2009-2011
越优 1203 Yueyou 1203	-0.02	-0.98	浙江省农业科学院 Zhejiang Academy of Agricultural Sciences	2022-2023

1.3 试验方法

1.3.1 气象数据 从美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 国家环境信息中心网站 (NCEI; NOAA-National Centers for Environmental Information, <https://www.ncei.noaa.gov/>) 获取气象数据。气象因子为油菜生长各时期 (表 2) 的气象因子, 气温为日平均气温, 降水量为月平均降水量, 日照时数为月平均日照时数。

1.3.2 生育期 参照前人对生育期的划分标准, 记录生育期。

1.3.3 病害鉴定 收获前 10 d, 参照《NY/T 3068-2016 油菜品种菌核病抗性鉴定技术规程》、《ISBN/S1676 农作物抗病虫性鉴定方法》, 逐小区逐行逐株调查油菜菌核病发病情况, 对菌核病发病程度进行分级。计算菌核病病情指数 (sclerotium index, SI)。

$$\text{菌核病病情指数 (SI): } SI = \frac{\sum (s \times n)}{N \times S} \times 100\% \quad (6)$$

式中, s 为各病情级别, n 为对应各病情级别的株数, N 为调查总株数, S 为最高病情级别。按 0~4 级进行病情分级: 0 表示无病斑; 1 表示全株 1/3 以下分枝 (含果轴) 发病或主茎有小型病斑, 或受害角果数 < 1/4; 2 表示全株 1/3~2/3 分枝发病, 或分枝发病 ≤ 1/3 而主茎中上部有大型病斑, 或受害角果数达 1/4~2/4; 3 表示全株 ≥ 2/3 分枝发病, 或分枝发病 ≤ 2/3 而主茎中下部有大型病斑, 或受害角果数达 2/4~3/4; 4 表示绝大多数分枝发病, 或主茎有多个病斑或下部大型绕茎病斑, 或受害角果数 ≥ 3/4。

1.3.4 农艺性状和产量 油菜成熟后每小区定点

取 10 株进行考种, 考察单株角果数、每角粒数、千粒重、株高等指标。油菜成熟后全区收获、脱粒, 分小区单收、单晒、单独计产。

1.3.5 品质检测 所有参试品种 (系) 均统一进行品质分析。根据 NY/T 1285-2007 标准, 采用索氏抽提法测量油菜籽含油量。

1.4 数据统计及分析

采用 Microsoft Excel 2021 进行原始数据录入、计算和整理, 利用 DPS 9.5 和 SPSS 29.0 数据处理系统进行统计分析。采用最小显著差异法 (least significant difference, LSD) 进行处理间比较。采用 R 语言 (version 4.4) 完成图形绘制, 主要使用 ggplot2、dplyr 和 showtext 等包进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 年际气候变化与油菜产量和产油量的相关性

2009—2023 年期间, 油菜主要生长季节 (10 月至翌年 4 月) 的平均气温在 8 个长江下游试验点整体呈上升趋势 (图 1)。线性回归分析结果显示, 平均气温年际变化呈显著正相关, R^2 为 0.70, 年际变动具有较强的规律性。2009—2023 年年平均气温最大值为 2019 年的 12.01℃, 最小值为 2009 年的 10.00℃。最高气温变化在 2009—2023 年期间波动较大, 日最高气温最大值为 2022 年的 39.74℃, 最小值为 2015 年的 29.76℃; 日最低气温的最大值为 2019 年的 -4.13℃, 最小值为 2017 年的 -12.72℃。气温日较差在 2009—2023 年期间变化趋势较为平缓, 最大值为 2010 年的 8.54℃, 最小值为 2018 年的 6.94℃。

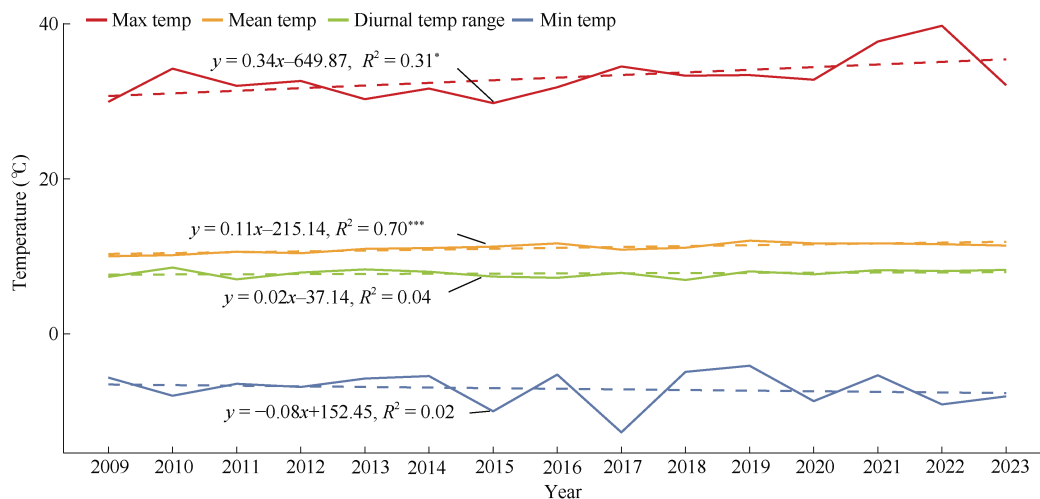


图 1 2009—2023 年温度变化趋势

Fig. 1 Temperature trends over the years from 2009 to 2023

R^2 上星号表示 F 检验显著性。*表示 $P < 0.05$, ***表示 $P < 0.001$ 。

Asterisks above R^2 values indicate significance levels based on the F -test. * indicates $P < 0.05$, *** indicates $P < 0.001$.

日照时数(图 2)在 2009—2023 年期间变化较为平缓,月平均日照时数最大值为 2010 年的 116.24 h,最小值为 2018 年的 91.03 h。降水量在 2009—2023 年期间变动幅度较大(图 2)。月平均降水量最大值为 2016 年的 88.83 mm,最小值为 2010 年的 37.70 mm。

2009—2023 年,油菜产量、产油量呈现一定的波动性上升趋势(图 3)。其中,最高产量出现在 2021 年,达 $2957.9 \text{ kg hm}^{-2}$,最低产量为 2009 年的 $2314.8 \text{ kg hm}^{-2}$,总体平均产量约为 $2637.4 \text{ kg hm}^{-2}$ 。产油量数据波动明显,变化趋势与产量高度一致,最高产油量出现年份也为 2021 年,达 $1303.7 \text{ kg hm}^{-2}$;最低产油量为 2009 年的 $1032.8 \text{ kg hm}^{-2}$ 。以这 15 年产量

和产油量的均值为标准,产量和产油量高于均值 5% 为丰产年,低于均值 5% 为减产年,变化幅度在 5% 以内为稳产年。近 15 年来有 5 年为丰产年、5 年为减产年,5 年为稳产年。丰产年平均产量为 $2842.3 \text{ kg hm}^{-2}$ 、平均产油量为 $1282.9 \text{ kg hm}^{-2}$,与 15 年平均产量、产油量相比,平均增产 7.77% 和 8.25%,5 个丰产年分别为 2012 年(8.36% 和 10.01%)、2018 年(6.72% 和 7.49%)、2019 年(5.56% 和 6.05%)、2020 年(6.06% 和 7.74%)、2021 年(12.13% 和 9.97%)。减产年平均产量为 $2394.6 \text{ kg hm}^{-2}$,平均产油量为 $1080.6 \text{ kg hm}^{-2}$,与 15 年平均产量、产油量相比,平均减产 9.21% 和 8.82%,5 个减产年分别为 2009 年

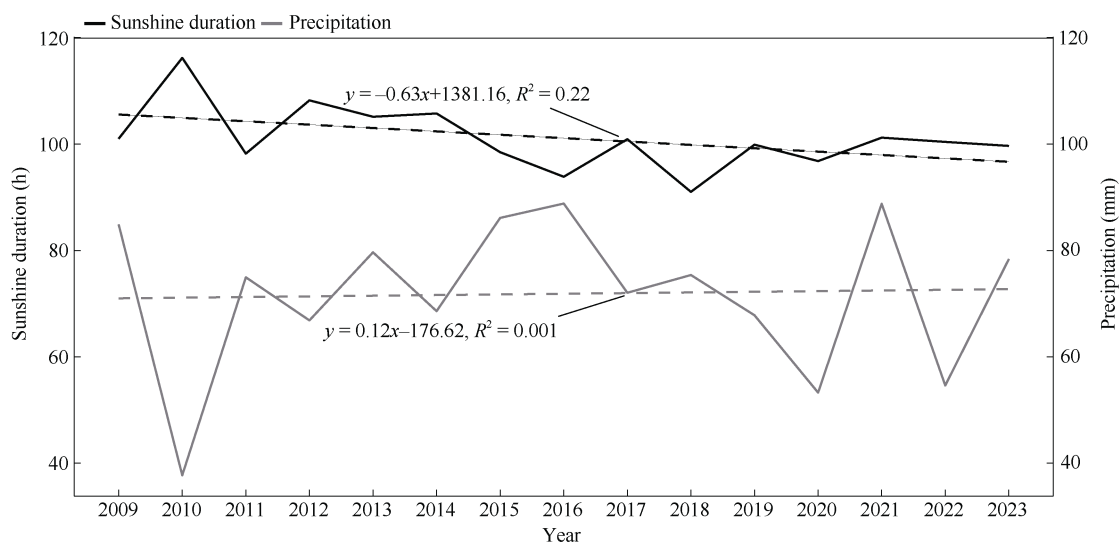


图 2 2009—2023 年降水量和日照时数变化趋势

Fig. 2 Precipitation and sunshine duration trends over the years from 2009 to 2023

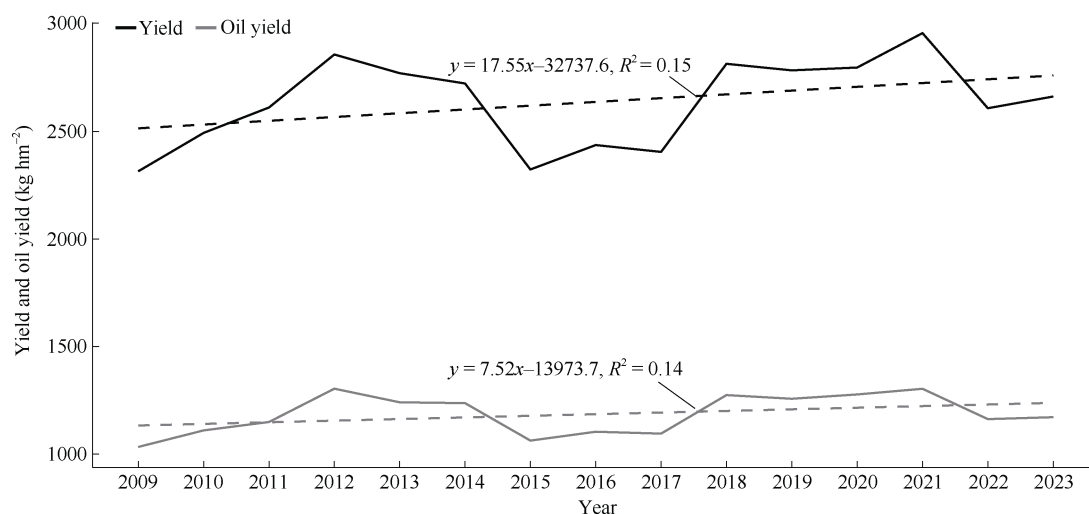


图 3 2009—2023 年产量、产油量变化

Fig. 3 Yield and oil yield change in 2009—2023

(-12.23%和-12.85%)、2010 年(-5.46%和-6.36%)、2015 年(-11.91%和-10.37%)、2016 年(-7.61%和-6.89%)、2017 年(-8.81%和-7.62%)。

15 年中, 丰产年集中出现在平均温度高且无极端高温、无极端低温、无极端降水、气候稳定的年份, 产量、产油量表现良好。反之, 平均温度低或有极端天气(极端高温、极端低温、极端降水)的年份易

出现减产。气温日较差、日照时数在年际间变化小, 对产量和产油量影响较小。

2.2 气象因子逐月变化特征

采用变异系数(CV)作为衡量标准, 对 2009—2023 年不同月份的气象因子年际波动特征进行分析, 各气象因子逐月变化趋势见图 4。次年 3 月平均气温(图 4-A)呈极显著上升趋势, 10 月最高气温(图 4-C)

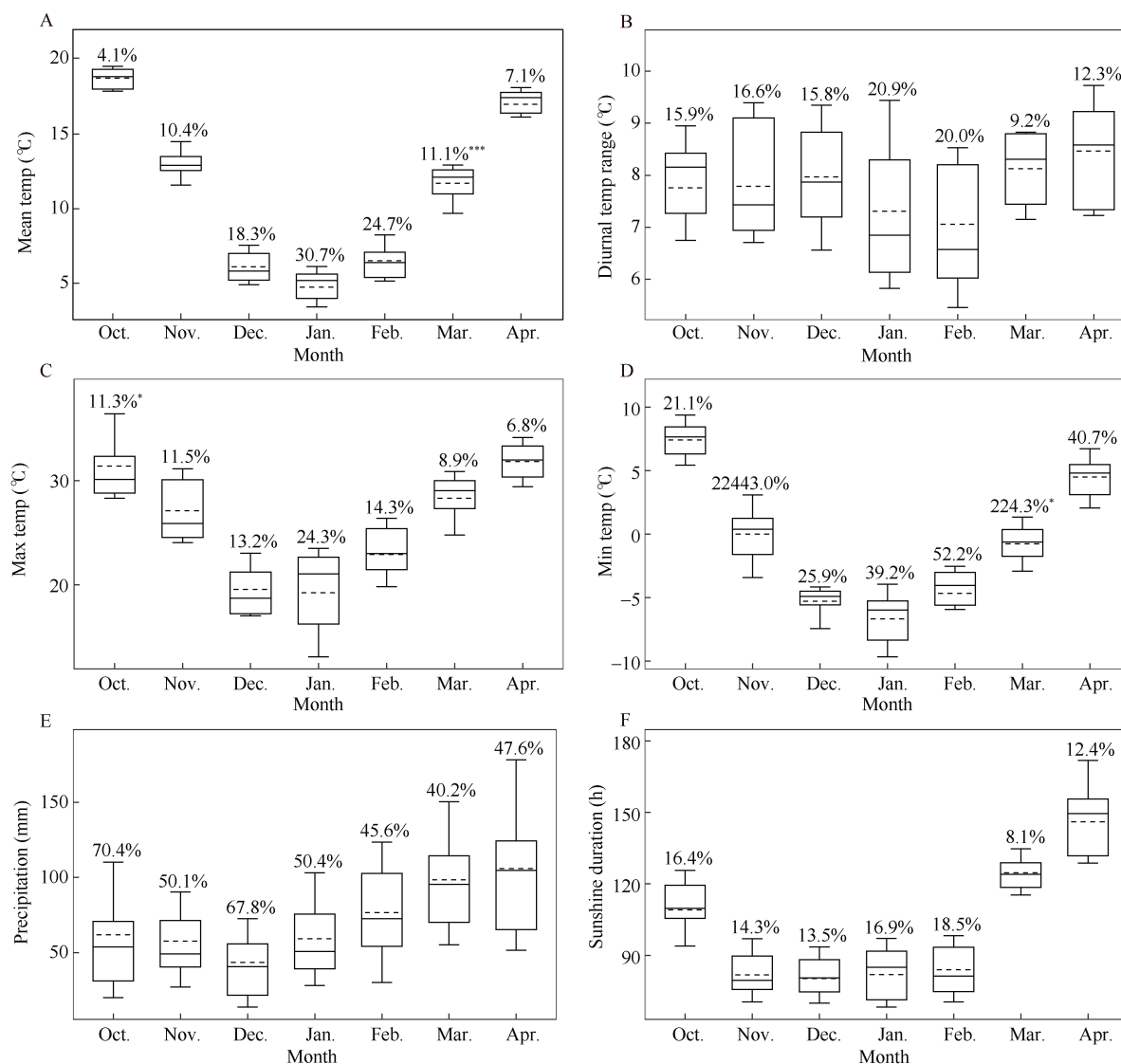


图 4 2009—2023 年油菜生育期内各气象要素逐月变化趋势

Fig. 4 Monthly variation trends of meteorological factors during the growth period of rapeseed from 2009 to 2023

A: 平均气温逐月变化趋势; B: 气温日较差逐月变化趋势; C: 最高气温逐月变化趋势; D: 最低气温逐月变化趋势; E: 降水量逐月变化趋势; F: 日照时数逐月变化趋势。每个箱体的上下界分别表示 25%和 75%分位, 箱体外的上下短线分别表示 10%和 90%分位, 箱体内部的实线和虚线分别表示中值和平均值; F 检验检测是否存在显著线性趋势, 箱体上方*表示各月份年际间变化趋势的显著性, 以***、*分别表示 $P < 0.001$ 、 $P < 0.05$; 图中百分数表示变异系数。

A: monthly variation trend of mean temperature; B: monthly variation trend of diurnal temperature range; C: monthly variation trend of maximum temperature; D: monthly variation trend of minimum temperature; E: monthly variation trend of precipitation; F: monthly variation trend of sunshine duration. For each box, the upper and lower edges represent the 75th and 25th percentiles, respectively; the whiskers represent the 90th and 10th percentiles. The solid line inside the box denotes the median, while the dashed line represents the mean. Significance of interannual variation among months is tested using the F method. Asterisks above the boxes indicate statistical significance. ***: $P < 0.001$; *: $P < 0.05$. The percentages shown in the figure denote the coefficients of variation (CV).

呈显著上升趋势, 次年 3 月最低气温(图 4-D)呈显著上升趋势。值得注意的是, 最低气温尽管在某些月份的变异系数极高(如 11 月高达 22,443.0%), 但由于该变量的平均值趋近于 0, 其变异系数受分母放大效应影响, 不具备参考意义。平均气温与最高气温在各月份的波动不均, 次年 1—2 月的变异系数显著高于其他月份, 其中 1 月平均气温 CV 为 30.7%, 最高气温 CV 为 24.3%, 表明冬季阶段的平均气温与最高气温存在较大不确定性。降水量平均变异系数达到 53.16%, 是大部分月份中波动最大的气象因子, 尤其是在 10 月(CV = 70.4%)和 12 月(CV = 67.8%)波动强烈(图 4-E)。日照时数为年际波动最小的气象因子, 变异系数整体维持在较低水平(8.1%~18.5%), 表明光照条件年际变化相对平稳(图 4-F)。气温日较差(昼夜温差)则在次年 1 月波动最大(CV = 20.9%), 次年 3 月最小(CV = 9.2%), 较为稳定(图 4-B)。

2.3 气象因子对油菜主要农艺性状的影响

不同月份的气象因子对油菜性状的影响存在显著差异, 由表 2 可知, 在油菜生长前期, 极端气温、

降水对油菜的生长发育具有较大影响, 11 月至 12 月期间, 降水量和日照时数对油菜性状的影响较为明显, 12 月降水量与菌核病指数呈显著正相关($r = 0.55^*$), 说明冬季降水偏多易诱发病害; 12 月日照时数与菌核病指数呈显著负相关($r = -0.55^*$), 说明日照不足亦加剧病害发生。

在油菜生长后期(次年 1 月至 4 月), 早春气温对油菜生长的影响尤为显著。次年 1 月平均气温对产量构成因子的影响尤为显著, 与单株角果数($r = 0.59^*$)、千粒重($r = 0.54^*$)均呈显著正相关, 与每角粒数呈极显著负相关($r = -0.70^{**}$), 次年 1 月份最低气温与产量呈显著正相关($r = 0.53^*$)。次年 2 月平均气温与含油量($r = 0.53^*$)呈显著正相关。次年 3 月平均气温与单株角果数($r = 0.66^{**}$)和产量($r = 0.52^*$)均呈显著正相关, 而与生育期呈显著负相关($r = -0.76^{**}$), 此外, 次年 3 月的最低气温也与油菜单株角果数($r = 0.60^*$)呈显著正相关, 而与生育期呈显著负相关($r = -0.59^*$), 说明春季温度回升有利于油菜结实和产量提高, 但同时缩短了生育期。

表 2 冬油菜生育时期内各月份气象因子与油菜产量、品质等重要农艺性状的相关性分析
Table 2 Correlation analysis between monthly meteorological factors and yield and quality traits of winter rapeseed during the growth period

月份与气象因子 Month and climatic factors	菌核病病指 Sclerotium index	单株角果数 Silique number per plant	株高 Plant height	每角粒数 Seed number per silique	
11 月最高气温 Max. temp. in Nov.	-0.22	0.10	-0.42	0.02	
11 月最低气温 Min. temp. in Nov.	0.16	0.30	0.29	-0.12	
11 月平均气温日较差 DTD in Nov.	-0.30	-0.07	0.03	0.22	
11 月降水量 Precipitation in Nov.	0.19	0.03	-0.07	-0.20	
11 月日照时数 Sunshine duration in Nov.	-0.38	-0.17	0.04	0.28	
12 月降水量 Precipitation in Dec.	0.55 [*]	0.15	0.29	-0.01	
12 月日照时数 Sunshine duration in Dec.	-0.55 [*]	-0.34	-0.03	0.10	
1 月平均气温 Mean temp. in Jan.	0.30	0.59 [*]	-0.19	-0.70 ^{**}	
1 月最低气温 Min. temp. in Jan.	0.21	0.29	0.23	-0.36	
2 月平均气温 Mean temp. in Feb.	-0.21	0.34	-0.20	-0.26	
2 月最高气温 Max. temp. in Feb.	-0.28	0.25	-0.31	-0.27	
2 月最低气温 Min. temp. in Feb.	0.07	0.46	-0.33	-0.45	
3 月平均气温 Mean temp. in Mar.	0.26	0.66 ^{**}	-0.33	-0.44	
3 月最低气温 Min. temp. in Mar.	0.15	0.60 [*]	-0.29	-0.48	
4 月平均气温 Mean temp. in Apr.	0.31	0.11	-0.10	-0.12	
月份与气象因子 Month and climatic factors	千粒重 Thousand seeds weight	全生育期 Whole growth period	含油量 Oil content	产量 Yield	产油量 Oil yield
11 月最高气温 Max. temp. in Nov.	0.53 [*]	-0.20	-0.20	-0.20	-0.39
11 月最低气温 Min. temp. in Nov.	-0.05	-0.14	0.02	0.52 [*]	0.41
11 月平均气温日较差 DTD in Nov.	0.23	-0.43	-0.56 [*]	0.47	0.23
11 月降水量 Precipitation in Nov.	-0.13	0.52 [*]	0.43	-0.45	-0.26

(续表 2)

月份与气象因子 Month and climatic factors	千粒重 Thousand seeds weight	全生育期 Whole growth period	含油量 Oil content	产量 Yield	产油量 Oil yield
11 月日照时数 Sunshine duration in Nov.	0.16	-0.31	-0.53*	0.43	0.26
12 月降水量 Precipitation in Dec.	-0.30	0.31	0.31	-0.03	-0.05
12 月日照时数 Sunshine duration in Dec.	0.08	-0.12	-0.40	0.05	0.14
1 月平均气温 Mean temp. in Jan.	0.54*	-0.17	0.04	0.38	0.23
1 月最低气温 Min. temp. in Jan.	0.14	0.28	-0.22	0.53*	0.48
2 月平均气温 Mean temp. in Feb.	0.48	-0.10	0.53*	0.01	0.08
2 月最高气温 Max. temp. in Feb.	0.59*	-0.30	0.13	0.09	0.05
2 月最低气温 Min. temp. in Feb.	0.57*	-0.03	-0.11	0.39	0.19
3 月平均气温 Mean temp. in Mar.	0.51	-0.76**	0.09	0.52*	0.16
3 月最低气温 Min. temp. in Mar.	0.39	-0.59*	0.08	0.45	0.21
4 月平均气温 Mean temp. in Apr.	0.02	-0.58*	-0.13	0.09	-0.12

*表示在 $P < 0.05$ 水平相关性显著, **表示在 $P < 0.01$ 水平相关性显著。
*, ** indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

2.4 主要气象因子对产量和产油量的影响

基于年际油菜产量和产油量变化分析中的丰产年和减产年年份,以 15 个年份各个月份平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差、降水量、日照时数的均值为标准,高于均值 50%为偏高,低于均值 50%为偏低年份,与“丰产年”和“减产年”年份比较,识别出特定月份的偏高或偏低气象因子与“丰产年”或“减产年”的共性重合的特征(表 3)。丰产年中,11 月的最低气温偏高,可能导致田间壮苗,主要年份包括 2012、

2018、2019、2020、2021 年,次年 3 月的最低气温偏高也在多个丰产年(2018、2019、2020、2021 年)出现,显示出温暖晚秋和初春气候可能对丰产具有积极作用。减产年中,11 月最低气温偏低在 2009、2015 和 2016 年也多次出现,次年 3 月的最低气温在 2009、2015 和 2017 年连续偏低,显示减产年份晚秋初春有低温冷害或者冻害发生。同时,次年 2 月的降水量偏低频繁出现在 2010、2015 和 2016 年,表明冬末春初的干旱可能是造成减产的关键因子之一。

表 3 偏高或偏低气象因子所在年份和月份分布
Table 3 Distribution of years and months with above- or below-normal meteorological factors

气象因子 Factor	偏高或偏低 Above or below	年份 Year	月份 Month	气象因子 Factor	偏高或偏低 Above or below	年份 Year	月份 Month
最低气温 Min. temp.	偏高 Above	2010	11	平均气温 Mean temp.	偏高 Above	2020	2
	偏高 Above	2011	11	最高气温 Max. temp.	偏高 Above	2010	1
	偏高 Above	2012	11		偏高 Above	2010	1
	偏高 Above	2014	11		偏高 Above	2013	10
	偏高 Above	2017	11		偏高 Above	2016	10
	偏高 Above	2018	11		偏高 Above	2009	11
	偏高 Above	2019	11		偏高 Above	2015	11
	偏高 Above	2020	11		偏高 Above	2012	12
	偏高 Above	2021	11		偏高 Above	2018	12
	偏高 Above	2018	1		偏高 Above	2015	1
	偏高 Above	2019	1		偏高 Above	2017	1
	偏高 Above	2019	2		偏高 Above	2019	1
	偏高 Above	2016	3		偏高 Above	2013	2
	偏高 Above	2018	3		偏高 Above	2018	2
	偏高 Above	2019	3		偏高 Above	2023	2
	偏高 Above	2020	3		偏高 Above	2009	3

(续表 3)

气象因子 Factor	偏高或偏低 Above or below	年份 Year	月份 Month	气象因子 Factor	偏高或偏低 Above or below	年份 Year	月份 Month
最低气温 Min. temp.	偏高 Above	2021	3	降水量 Precipitation	偏高 Above	2021	3
	偏高 Above	2022	3		偏高 Above	2015	4
	偏高 Above	2011	4		偏高 Above	2023	4
	偏高 Above	2015	4		偏低 Below	2009	10
	偏低 Below	2009	11		偏低 Below	2018	10
	偏低 Below	2013	11		偏低 Below	2019	10
	偏低 Below	2015	11		偏低 Below	2023	10
	偏低 Below	2016	11		偏低 Below	2010	11
	偏低 Below	2022	11		偏低 Below	2013	11
	偏低 Below	2023	11		偏低 Below	2011	12
	偏低 Below	2023	12		偏低 Below	2014	12
	偏低 Below	2017	1		偏低 Below	2020	12
	偏低 Below	2017	2		偏低 Below	2021	12
	偏低 Below	2009	3		偏低 Below	2010	1
	偏低 Below	2011	3		偏低 Below	2013	1
	偏低 Below	2012	3		偏低 Below	2010	2
	偏低 Below	2015	3		偏低 Below	2015	2
	偏低 Below	2017	3		偏低 Below	2016	2
	偏低 Below	2023	3		偏低 Below	2010	3
	偏低 Below	2010	4		偏低 Below	2010	4
	偏低 Below	2012	4		偏低 Below	2019	4
	偏低 Below	2014	4				

高于均值 50%为偏高, 低于均值 50%为偏低。
Values greater than the mean by 50% were defined as “above” and values lower than the mean by 50% were defined as “below”.

2.5 主要气象因子与油菜重要性状的典型相关分析

以 2009—2023 年气象因子为 X 集合, 重要性状指标为 Y 集合进行典型相关分析(图 5)。结果表明, 前 2 对典型变量的相关系数分别为 1.00 (U_1 - V_1)和 0.93 (U_2 - V_2), 均显示气象因子组与产量性状组之间存在极强的整体线性关联。

第 1 对典型变量(U_1 - V_1)的相关系数为 1.00, 表明 2 组变量在该典型维度上的变动几乎完全同步。 U_1 主要由 11 月降水量(+0.36)正向贡献, 2 月最高气温(-0.24)、11 月最低气温(-0.24)和 4 月平均气温(-0.20)为主要负载荷。该组合反映出“秋末偏湿、春前不过暖、春末升温节奏适中”的气候型, 这种条件有利于越冬安全和春季稳健返青。 V_1 由多个产量及构成性状共同决定, 其中产量(+1.19)和株高(+0.39)为正载荷主因子, 而产油量(-0.76)、含油量(-0.33)、千粒重(-0.64)、每角粒数(-0.81)、单株角果数(-0.38)、全生育期(-0.75)及菌核病指数(-0.40)均呈

负载荷。

第 2 对典型变量(U_2 - V_2)的相关系数为 0.93, 反映另一类显著气象-性状耦合模式。 U_2 主要由 2 月平均气温(-0.67)、4 月平均气温(-0.43)和 11 月降水量(-0.21)构成, 表现为“冷春”的气象特征。 V_2 的主要贡献因子包括产油量(-1.08)、菌核病病指(+1.04)、单株角果数(-0.82)、产量(+0.52)、每角粒数(-0.50)及株高(-0.50), 在这个综合模式中, 11 月降水贡献较弱, 主导作用来自冷春(低温)因子, 而冷春延迟花期并可能导致冻害, 导致后期菌核病加重, 表明在冷春条件下, 产油量显著下降、病害风险显著升高, 角果数、粒数和株高下降, 而产量出现小幅上升。

3 讨论

3.1 各阶段极端天气对产量和产油量的影响

油菜在不同生育阶段对气象要素的敏感性存在显著差异。播种至始花期油菜生长受光温因子的控

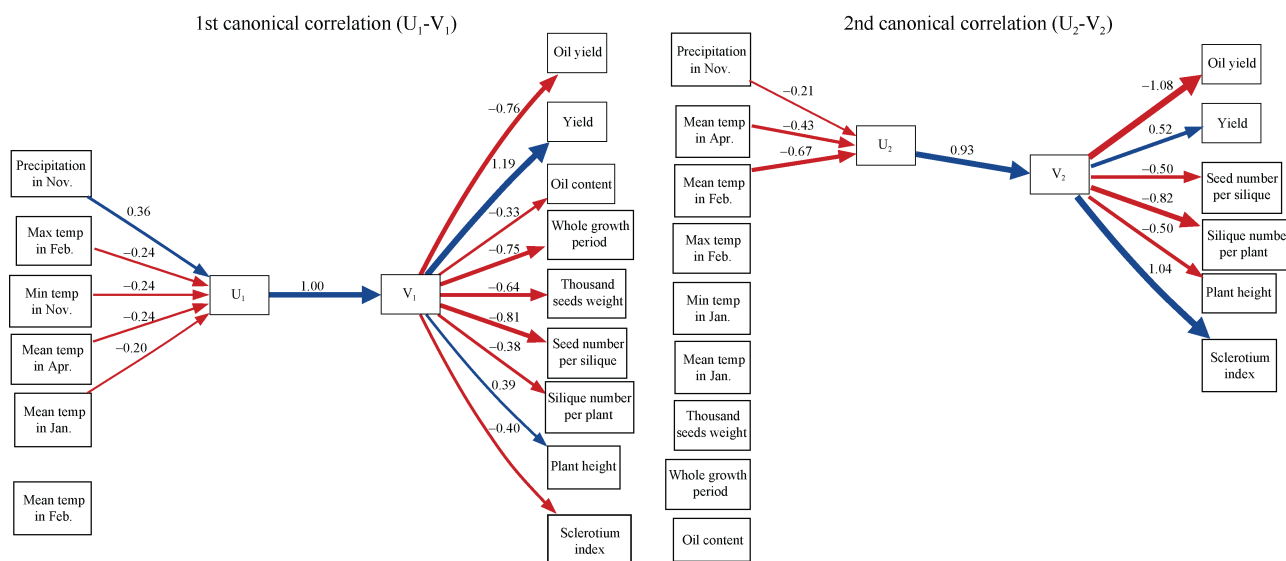


图 5 重要性状和气象条件间典型相关结构图

Fig. 5 Structure diagram of the typical correlation between important traits and meteorological condition

图中展示了 2 对典型变量对: U_1-V_1 与 U_2-V_2 。箭头表示变量之间的相关作用; 蓝色为正相关, 红色为负相关。U 表示由气象因子组合构成的典型变量, V 表示由性状组合构成的典型变量。箭头上的数字为典型载荷(权重), 越大表示变量对 U/V 贡献越显著。|系数| < 0.2 时: 不绘制箭头、认为它对典型变量的贡献可忽略。

The figure shows two pairs of canonical variables: U_1-V_1 and U_2-V_2 . Arrows indicate the correlations between variables, with blue representing positive correlations and red representing negative correlations. U represents canonical variables derived from combinations of meteorological factors, while V represents those derived from trait combinations. The numbers on the arrows are canonical loadings (weights); higher absolute values indicate a greater contribution to the corresponding U or V variable. When |coefficient| < 0.2, arrows are omitted, indicating negligible contribution to the canonical variable.

制, 在田间水分条件适宜的情况下, 温度是决定种子萌发和出苗的主要因素, 干旱或高温会对出苗产生负面影响^[31], 油菜从出苗至茎伸长阶段对干旱或高温等气候变化极为敏感^[32]。晚秋与初冬偏冷有助于增产, 暖冬会对一些地区的油菜产量产生负面影响^[33]。日照时数常与温度协同影响油菜生长和产量形成, 越冬至开花阶段的辐射亏缺往往通过降低冠层对有效辐射的吸收与干物质积累, 从而导致产量下降^[34]。开花期(始花至终花)油菜生长主要受温度支配^[31], 平均气温和降水量是与开花时间高度相关的气候因子^[35]。极端高温, 特别是花期结束前极端高温对油菜产量具有重要影响; 低温冻害也会直接抑制代谢反应, 阻止植物遗传潜力的表达, 冻害还可影响油菜茎部的养分运输, 导致产量下降^[36]。花期和角果期降水异常增多则导致角果数下降、菌核病加重^[37]。油菜在花期处于冷凉、潮湿、阴蔽条件下时常被菌核病侵染, 最易造成严重的产量损失^[38]。干旱胁迫在开花期持续时间较长或在角果形成期持续时间较短时, 也会引起显著的减产效应^[25]。成熟期(终花至成熟), 成熟早期油菜产量对热胁迫尤其敏感, 但千粒重和含油量对高温表现出较强的耐受性^[39]。跨物种(含油菜)的荟萃分析进一步给出最低

气温对品质的影响, 成熟期最低气温偏低往往提高菜籽油不饱和脂肪酸比例, 偏高则相反^[40]。

本研究进一步揭示了长江下游冬油菜在不同生育阶段对气象因子的响应差异及其产量和品质权衡机制。结果表明, 油菜在生长前期(11—12 月)主要受降水量和日照时数影响; 生长后期(次年 1—3 月)则以气温变化为主导。丰产年份普遍具有 11 月最低气温偏高的特征, 说明温暖晚秋有利于越冬安全与后期结实; 而减产年份常伴随 11 月最低气温偏低, 提示晚秋冷害是关键风险。典型相关分析表明, 第 1 对典型变量对应“秋末偏湿-春前不过暖-春末升温节奏适中”的气候型, 体现出高产稳产与高油高粒重之间的权衡关系。第 2 对典型变量反映“冷春型”气象模式, 揭示了低温背景下产量、品质与病害的复杂平衡。本研究的结论与前人研究在主要方向上高度一致。首先, 本研究识别的油菜生长前期光照和降水效应与前人研究中播种至始花期受干旱和光温等因子的控制的结论相呼应, 均强调秋末偏湿、春前不过暖对次年产量稳定的重要作用, 春末升温节奏适中也与前人油菜生长在开花期主要受温度影响的结论高度匹配。其次, 在“冷春型”气象条件下观察到的病害上升与产油量下降, 与既有研究中关于湿

冷环境易诱发菌核病流行的结论相一致,强化了“低温-延迟花期-病害风险”的作用关系。

3.2 极端天气削弱平均气温升高带来的增产效应

气候变化背景下,平均气温升高对冬季作物(主要包括冬小麦和冬油菜)表现出一定的增产效应。中国主要冬小麦产区,气温升高 2°C 后,冬小麦实测增产 13% ^[41]。夜间气温升高 1°C 可使小麦产量平均提高约 10.1% ^[42]。在稻麦轮作体系中,气温升高使小麦产量显著增加 4.8% ,而水稻产量下降 14.8% ^[43],该结果表明作物类型及其生育季节对气温升高的响应存在差异。对于冬油菜而言,长江下游地区生育期内热量资源充足,平均气温每10年升高 0.37°C ,在一定程度上有助于提升冬季作物产量^[44]。但极端天气的出现,也给油菜增产带来了非线性的负面影响,如极端高温对油菜产量有负面影响^[45],特别是高温与遮阴的复合胁迫显著降低产量与品质稳定性^[46]。低温冻害可导致油菜减产 $13.4\%\sim 63.3\%$ ^[47]。阶段性强降水(如暴雨)对产量的直接影响有限,但高频降雨常伴随低辐射和病虫害等间接减产风险^[48-49]。日照时数也可能是限制长江流域油菜产量的关键气候因子^[34],其在多个生育阶段对产量具有显著正效应,尤其在生长后期至关重要^[50]。

近15年来长江下游地区油菜生长季节的平均气温显著升高,降水量、最低气温、最高气温波动较大,产量、产油量呈现一定的波动性上升趋势,平均温度高且无极端降水、极端低温、极端高温气候稳定的年份,产量、产油量表现良好,这与长江油菜带生长季热资源增强的事实相吻合,说明热量盈余确可在一定范围内提升冬季作物产量。有极端天气的年份,特别是有极端降水和极端低温的年份易出现减产,与前述多源证据一致。气温日较差、日照时数在年际间变化小,对产量和产油量的影响较小。这15年中,产量、产油量有随平均气温升高而呈现增长趋势,但极端天气(降水、低温、高温)的出现削弱了平均气温升高带来的增产影响。前人研究的相关湿热及低辐射引起的减产事件,也解释了本研究个别年份在增温背景下仍然减产的情形。

3.3 未来气候变化趋势及应对措施

气候变化对中国油菜生产产生了显著影响。作为中国油菜籽主产区,长江流域预计到21世纪50年代油菜生产潜力平均增幅将会达到292万吨,增产最显著的地区将包括长江下游的安徽中部和江苏

东部^[51],极端气候事件频率和强度的增加将导致油菜增产更加不稳定使产量预测复杂化^[52-53]。有研究者指出,建议选择高产品种和优化栽培管理^[54-56],以适应气候变化^[34,57-58]。

本研究表明,在气候变暖背景下,长江下游冬油菜生产对气候异常的敏感性显著,尤其是晚秋、冬末和春季的温湿变化,对产量、品质及病害形成具有决定性作用。第1对典型变量正负载荷的高度正相关表明,在有利气象型下,产量和株高显著提高,病害发生风险降低,但油分、粒重、粒数及生育期缩短。由此可见,高产稳产与高油高粒重之间存在一定权衡关系。第2对典型变量揭示了低温背景下产量、品质与病害之间的复杂平衡:延迟花期可能在部分年份支撑产量,但品质和结构性状受抑,同时病害发生加重。2类气候型对性状的差异性作用揭示了未来生产需根据气候型特征实施针对性管理与育种。应注重气候预测与农艺调控结合,在温湿适宜年份,应利用稳产和低病害风险的优势,优化密度和施肥结构,提升含油量和粒重;在预测到冷春时,应提前实施精准的菌核病防控,花期—成熟期加强肥水管理,适度调整密度以减轻品质下降与病害压力。此外应有双目标育种策略:针对不同生态年的气象型特征,选育既适应高 U_1 年份的稳产抗病型,也保留低 U_1 年份下的高油高粒重型,同时强化对冷春条件下粒重稳定性、粒数构成能力及抗病性的遗传改良,提升对复杂气象型的适应力。另外,还应加强气候风险管理,建立气象-性状-产量多维预警体系,结合历史气象型与未来预测,实现播期优化、品种适配与管理措施的动态调整。

4 结论

在气候变化背景下,气温升高总体有利于油菜产量和产油量的提升,但极端天气(如极端降水、极端低温)的出现削弱了这一正向效应。不同生育阶段的极端气象因子对产量与品质的作用具有阶段性和方向性,各阶段极端天气中11月份的极端低温对油菜的影响较大,应加强气象预测,采取不同的针对性措施。在2类主要气象-性状耦合模式(秋末偏湿-春前不过暖-春末升温适中、冷春-干燥越冬)下,需兼顾气候预测、农艺调控与育种改良,建议在温湿适宜年份优化密度与养分供应,重点提升含油量与粒重;在冷春年份提前实施精准病害防控与花期—成熟期肥水补偿。

References

- [1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略. 中国油料作物学报, 2018, 40: 613–617.
Wang H Z. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy. Chin J Oil Crop Sci, 2018, 40: 613–617 (in Chinese with English abstract).
- [2] 周香玉, 徐劲松, 谢伶俐, 等. 甘蓝型油菜苗期响应渍害胁迫的生理调控机制. 作物学报, 2024, 50: 1015–1029.
Zhou X Y, Xu J S, Xie L L, et al. Physiological mechanisms in response to waterlogging during seedling stage of *Brassica napus* L. Acta Agron Sin, 2024, 50: 1015–1029 (in Chinese with English abstract).
- [3] 宁宁, 莫娇, 胡冰, 等. 长江流域不同生态区油菜籽关键品质比较研究. 作物学报, 2023, 49: 3315–3327.
Ning N, Mo J, Hu B, et al. Comparative study on the processing quality of winter rape in different ecological zones of the Yangtze River valley. Acta Agron Sin, 2023, 49: 3315–3327 (in Chinese with English abstract).
- [4] Jannat A, Ishikawa-Ishiwata Y, Furuya J. Does climate change affect rapeseed production in exporting and importing countries? evidence from market dynamics syntheses. Sustainability, 2022, 14: 6051.
- [5] 李谷成, 牛秋纯, 冷博峰, 等. 新时代十年: 我国油菜产业发展与路径选择. 中国油料作物学报, 2024, 46: 228–235.
Li G C, Niu Q C, Leng B F, et al. The decade of rapeseed industry in the new era: development and its path choice. Chin J Oil Crop Sci, 2024, 46: 228–235 (in Chinese with English abstract).
- [6] Mohamed I A A, Shalby N, El-Badri A M, et al. Multipurpose uses of rapeseed (*Brassica napus* L.) crop (food, feed, industrial, medicinal, and environmental conservation uses) and improvement strategies in China. J Agric Food Res, 2025, 20: 101794.
- [7] 王瑞元. 我国粮油产销情况喜人. 中国油脂, 2025, 50(5): 1–4.
Wang R Y. Production and consumption of China's grain and oil. China Oils Fats, 2025, 50(5): 1–4 (in Chinese).
- [8] 殷艳, 廖星, 余波, 等. 我国油菜生产区域布局演变和成因分析. 中国油料作物学报, 2010, 32: 147–151.
Yin Y, Liao X, Yu B, et al. Regional distribution evolution and development tendency of Chinese rapeseed production. Chin J Oil Crop Sci, 2010, 32: 147–151 (in Chinese with English abstract).
- [9] 谢雄泽, 谢捷, 褚乾梅, 等. 长江流域冬油菜需水量及水分盈亏特征分析. 作物学报, 2024, 50: 1829–1840.
Xie X Z, Xie J, Chu Q M, et al. Analysis of water requirement and water surplus/deficit characteristics of winter rapeseed in Yangtze River Basin. Acta Agron Sin, 2024, 50: 1829–1840 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张智. 长江流域冬油菜产量差与养分效率差特征解析. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2018.
Zhang Z. Characteristic Analysis of Yield Gap and Nutrient Use Efficiency Gap of Winter Oilseed Rape in Yangtze River Basin. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [11] Pithan F, Schatt L. Diurnal temperature range trends differ below and above the melting point. Geophys Res Lett, 2024, 51: e2024GL109751.
- [12] Pineda M, Barón M. Health status of oilseed rape plants grown under potential future climatic conditions assessed by invasive and non-invasive techniques. Agronomy, 2022, 12: 1845.
- [13] Zhang S Q, Ren G Y, Zheng X, et al. Changes in the mean and extreme temperature in the Yangtze River Basin over the past 120 years. Weather Clim Extrem, 2023, 40: 100557.
- [14] Huang H J, Zhu Z W, Li J. Disentangling the unprecedented Yangtze River Basin extreme high temperatures in summer 2022: combined impacts of the reintensified La Niña and strong positive NAO. J Clim, 2024, 37: 927–942.
- [15] 张学昆, 张春雷, 廖星, 等. 2008 年长江流域油菜低温冻害调查分析. 中国油料作物学报, 2008, 30: 122–126.
Zhang X K, Zhang C L, Liao X, et al. Investigation on 2008'low temperature and freeze injure on winter rape along Yangtze River. Chin J Oil Crop Sci, 2008, 30: 122–126 (in Chinese with English abstract).
- [16] Zohner C M, Mo L D, Renner S S, et al. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 12192–12200.
- [17] Sun B, Xue R F, Li W L, et al. How does Mei-yu precipitation respond to climate change? Natl Sci Rev, 2023, 10: nwad246.
- [18] Wei S Z, Hsu P C, Xie J H. Effects of intraseasonal oscillation on timing and subseasonal predictability of Mei-yu onset over the Yangtze River Basin. J Clim, 2024, 37: 2277–2295.
- [19] Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies. Adv Atmos Sci, 2021, 38: 1980–1993.
- [20] Shi H R, Zhang J Q, Zhao B, et al. Surface brightening in eastern and central China since the implementation of the clean air action in 2013: causes and implications. Geophys Res Lett, 2021, 48: e2020GL091105.
- [21] Song Z Y, Chen L T, Wang Y J, et al. Effects of urbanization on the decrease in sunshine duration over Eastern China. Urban Clim, 2019, 28: 100471.
- [22] Raza A. Eco-physiological and biochemical responses of rapeseed (*Brassica napus* L.) to abiotic stresses: consequences and mitigation strategies. J Plant Growth Regul, 2021, 40: 1368–1388.
- [23] Fahim A M, Cao L R, Ma L, et al. Integrated transcriptome and metabolome analysis revealed hub genes and metabolites associated with subzero temperature tolerance following cold acclimation in rapeseed (*Brassica rapa* L.). Plant Physiol Biochem, 2025, 221: 109647.
- [24] Ghafoor A, Karim H, Asghar M A, et al. Effect of high-temperature, drought and nutrients availability on morpho-physiological and molecular mechanisms of rapeseed; an overview. Pak J Bot, 2021, 53: 2321–2320.
- [25] Secchi M A, Fernandez J A, Stamm M J, et al. Effects of heat and drought on canola (*Brassica napus* L.) yield, oil, and protein: a meta-analysis. Field Crops Res, 2023, 293: 108848.
- [26] 谢伶俐, 李永铃, 许本波, 等. 油菜耐渍机理解析及遗传改良研究进展. 作物学报, 2025, 51: 287–300.
Xie L L, Li Y L, Xu B B, et al. Progress on waterlogging tolerance mechanism and genetic improvement in rapeseed. Acta Agron Sin, 2025, 51: 287–300 (in Chinese with English abstract).
- [27] Piepho H P, Möhring J, Melchinger A E, et al. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. Euphytica,

- 2008, 161: 209–228.
- [28] Pathy T L, Mohanraj K. Estimating best linear unbiased predictions (BLUP) for yield and quality traits in sugarcane. *Sugar Technol*, 2021, 23: 1295–1305.
- [29] Zorić M, Gunjača J, Galić V, et al. Best linear unbiased predictions of environmental effects on grain yield in maize variety trials of different maturity groups. *Agronomy*, 2022, 12: 922.
- [30] 常世豪, 耿臻, 杨青春, 等. 基于 BLUP 值的夏大豆产量与农艺性状的相关分析. *作物杂志*, 2023(5): 10–15.
- Chang S H, Geng Z, Yang Q C, et al. Correlation analysis of yield and agronomic traits of summer soybean based on BLUP value. *Crops*, 2023(5): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- [31] Marjanović-Jeromela A, Terzić S, Jankulovska M, et al. Dissection of year related climatic variables and their effect on winter rapeseed (*Brassica napus* L.) development and yield. *Agronomy*, 2019, 9: 517.
- [32] Pullens J W M, Kersebaum K C, Böttcher U, et al. Model sensitivity of simulated yield of winter oilseed rape to climate change scenarios in Europe. *Eur J Agron*, 2021, 129: 126341.
- [33] Brown J K M, Beeby R, Penfield S. Yield instability of winter oilseed rape modulated by early winter temperature. *Sci Rep*, 2019, 9: 6953.
- [34] Li X H, Chen C, Yang X, et al. The optimisation of rapeseed yield and growth duration through adaptive crop management in climate change: evidence from China. *Ital J Agron*, 2022, 17: 2104.
- [35] Han X, Tang Q Q, Xu L P, et al. Genome-wide detection of genotype environment interactions for flowering time in *Brassica napus*. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 1065766.
- [36] Li L L, Qiao J W, Yao J, et al. Automatic freezing-tolerant rapeseed material recognition using UAV images and deep learning. *Plant Methods*, 2022, 18: 5.
- [37] 陈于婷, 丁晓雨, 许本波, 等. 气候变暖对冬油菜产量、品质及重要农艺性状的影响. *作物学报*, 2025, 51: 516–525.
- Chen Y T, Ding X Y, Xu B B, et al. Effects of climate warming on yield, quality-related and agronomic traits of winter rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 516–525 (in Chinese with English abstract).
- [38] O'Sullivan C A, Belt K, Thatcher L F. Tackling control of a cosmopolitan phytopathogen: *Sclerotinia*. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 707509.
- [39] Verdejo J F, Calderini D F. Resilience of rapeseed to temperature increase during early grain filling in a high yielding environment. *Field Crops Res*, 2025, 330: 109950.
- [40] Alberio C, Aguirrezábal L A N. Meta-analysis unravels common responses of seed oil fatty acids to temperature for a wide set of genotypes of different plant species. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1476311.
- [41] Wang R S, Zhao C, Asseng S, et al. Winter dormant wheat will benefit from mean temperature increase of 2°C when well-watered and fertilized in the main producing regions of China. *Glob Change Biol*, 2025, 31: e70324.
- [42] Zheng C Y, Zhang J, Chen J, et al. Nighttime warming increases winter-sown wheat yield across major Chinese cropping regions. *Field Crops Res*, 2017, 214: 202–210.
- [43] Zhou Y J, Xu L, Xu Y Z, et al. A meta-analysis of the effects of global warming on rice and wheat yields in a rice–wheat rotation system. *Food Energy Secur*, 2021, 10: e316.
- [44] 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. *中国油料作物学报*, 2019, 41: 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. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 894–903 (in Chinese with English abstract).
- [45] Canales J, Verdejo J F, Calderini D F. Transcriptome and physiological analysis of rapeseed tolerance to post-flowering temperature increase. *Int J Mol Sci*, 2023, 24: 15593.
- [46] Rivelli G M, Calderini D F, Abeledo L G, et al. Yield and quality traits of wheat and rapeseed in response to source-sink ratio and heat stress in post-flowering. *Eur J Agron*, 2024, 152: 127028.
- [47] Liu S S, Xiong L X, Fang W, et al. Effects of nitrogen, phosphorous, and potassium fertilization on rapeseed yield under freeze stress. *Crop Environ*, 2025, 4: 143–153.
- [48] Liang J P, Li H, Li N, et al. Analysis and prediction of the impact of socio-economic and meteorological factors on rapeseed yield based on machine learning. *Agronomy*, 2023, 13: 1867.
- [49] Soni S, Kumar S, Sood A K, et al. Modeling of aphid complex and its associated natural enemies in rapeseed-mustard in relation to climatic factors. *J Agrometeorol*, 2021, 23: 207–212.
- [50] He Y Q, Revell B J, Leng B F, et al. The effects of weather on oilseed rape (OSR) yield in China: future implications of climate change. *Sustainability*, 2017, 9: 418.
- [51] Tian S, Ji Y H, Sun L X, et al. Changes in production potentials of rapeseed in the Yangtze River Basin of China under climate change: a multi-model ensemble approach. *J Geogr Sci*, 2018, 28: 1700–1714.
- [52] Han J C, Zhang Z, Luo Y C, et al. The RapeseedMap10 database: annual maps of rapeseed at a spatial resolution of 10 m based on multi-source data. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13: 2857–2874.
- [53] Rajković D, Marjanović Jeromela A, Pezo L, et al. Yield and quality prediction of winter rapeseed: artificial neural network and random forest models. *Agronomy*, 2022, 12: 58.
- [54] Abebaw S E. A global review of the impacts of climate change and variability on agricultural productivity and farmers' adaptation strategies. *Food Sci Nutr*, 2025, 13: e70260.
- [55] Butkevičienė L M, Kriauciūnienė Z, Pupalienė R, et al. Influence of sowing time on yield and yield components of spring rapeseed in Lithuania. *Agronomy*, 2021, 11: 2170.
- [56] Wu W, Shah F, Ma B L. Understanding of crop lodging and agronomic strategies to improve the resilience of rapeseed production to climate change. *Crop Environ*, 2022, 1: 133–144.
- [57] Guo C Y, Bai Z H, Wang X Z, et al. Spatio-temporal assessment of greenhouse gas emission from rapeseed production in China by coupling nutrient flows model with LCA approach. *Food Energy Secur*, 2022, 11: e398.
- [58] HabibTabar Shiadeh S S, Feizabadi Y, Kosari-Moghaddam A. To what extent cultivar selection can affect the environmental impact of rapeseed production? *Environ Sustain Indic*, 2025, 26: 100619.