

DOI: 10.12357/cjea.20240797

CSTR: 32371.14.cjea.20240797

王晨, 肖登攀, 路杨, 陈鑫敏, 谭浩楠, 孙茂源. 气候变化下大豆生产的响应与适应研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(8): 1506–1516

WANG C, XIAO D P, LU Y, CHEN X M, TAN H N, SUN M Y. Research progress on response and adaptation of soybean production to climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(8): 1506–1516

气候变化下大豆生产的响应与适应研究进展*

王 晨, 肖登攀**, 路 杨, 陈鑫敏, 谭浩楠, 孙茂源

(河北师范大学地理科学学院/河北省环境演变与生态建设重点实验室 石家庄 050024)

摘 要: 以气候变暖为主要特征的气候变化对全球范围内的大豆生产造成了重要影响。本文基于国内外相关文献, 归纳了目前应用于评估气候变化对大豆生产影响研究的主要方法, 综述了大豆物候与产量对气候变化的响应与适应, 得出以下主要结论: 1) 气候变化影响大豆生产的研究方法主要包括田间试验观测、统计分析方法与作物模型模拟。其中, 田间试验观测方法最为准确, 但鉴于试验设计的局限性, 很难有效揭示不同气候变化或不同气候因子综合作用对大豆生产的影响; 一定程度上, 统计方法能够保障结果的可靠性与客观性, 但该方法对于统计分析的观测数据的数量和质量有较高要求; 作物机理模型模拟方法虽然机理性强, 外推效果好, 但应用前需要对模型进行参数校正和评价。2) 由于气候变化的区域差异性, 全球范围内大豆物候和产量对气候变化的响应程度具有显著的空间异质性。总体而言, 温度每升高 1 °C, 大豆全生育期缩短 5.9 d, 产量下降 6.85%; 降水量每降低 10 mm, 大豆产量下降 2.13%; 然而, CO₂ 浓度每升高 10 μmol·mol⁻¹, 产量增加 0.52%。3) 为有效应对气候变化, 品种更新、播期调整、以及田间管理措施改善等均可提高大豆产量潜力, 减缓气候变化的负面影响。

关键词: 气候变化; 大豆; 物候; 产量; 农业管理措施

中图分类号: S162.5+3

Research progress on response and adaptation of soybean production to climate change*

WANG Chen, XIAO Dengpan**, LU Yang, CHEN Xinmin, TAN Haonan, SUN Maoyuan

(College of Geographical Sciences, Hebei Normal University / Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: Climate change, characterized by climate warming, has had a significant impact on soybean production worldwide. Based on a comprehensive review of relevant domestic and international literature, this study systematically summarizes current research methods on climate change and soybean production, illustrates the response of soybean phenology and yield to climate change, and proposes adaptive management suggestions. The main conclusions are as follows: 1) Research methods for the impact of climate change on soybean production mainly include field experiment observations, statistical analysis, and crop model simulation. The observation method of the field experiment is the most intuitive, and the statistical analysis method can guarantee the reliability and objectivity of the results. The model simulation method has strong mechanical rationality and a good extrapolation effect. Currently, ar-

* 国家自然科学基金项目 (42377483)、河北省杰出青年基金项目 (D2022205010) 和河北省自然科学基金项目 (D2023205034) 资助

** 通信作者: 肖登攀, 研究方向为气候变化及农业生态研究。E-mail: xiaodp@sjziam.ac.cn

王晨, 主要从事气候变化对作物生产的影响评估。E-mail: wangc1689@163.com

收稿日期: 2024-12-10 接受日期: 2025-05-09

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (42377483), the Hebei Provincial Science Foundation for Distinguished Young Scholars (D2022205010), and the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2023205034).

** Corresponding author, E-mail: xiaodp@sjziam.ac.cn

Received Dec. 10, 2024; accepted May 9, 2025

tificial intelligence (AI) technologies such as machine learning, deep learning, and reinforcement learning can be utilized to enhance the accuracy of model simulations. Future research should integrate multiple methodologies to reduce the error of a single method and increase the accuracy of research on the response and adaptation of soybean production to climate change. 2) The impact of climate change on soybean production mainly stems from fluctuations in key climatic factors such as temperature, precipitation, radiation, and CO₂ concentration. These factors directly affect the entire growth process of soybean, not only causing changes in the phenological period and yield but also influencing quality. At present, research on the impact of climate change on soybean production has mainly focused on two aspects: changes in the growth period and fluctuations in yield. Due to regional differences in climate change, the degree of response of soybean phenology and yield to climate change worldwide shows significant spatial heterogeneity. Overall, for every 1 °C increase in temperature, the entire growth period of soybean will be shortened by 5.9 days and the yield will decrease by 6.85%. Both precipitation and sunshine duration can shift the phenological period of soybean. Meanwhile, for every 10 mm decrease in precipitation, the soybean yield decreases by 2.13%. However, owing to global warming, the concentration of CO₂ continues to increase. The fertilization effect of CO₂ can offset the negative impacts of climate change on soybean yield to some extent. Specifically, for every 10 μmol·mol⁻¹ increase in CO₂ concentration, the yield will increase by 0.52%. 3) In terms of adjustment management measures, practices such as variety replacement, sowing date adjustment, and technology upgrades should be implemented to improve soybean yield potential and compensate for the negative impacts of climate change. In addition, policy subsidies, agricultural insurance, the application of the Internet of Things, and artificial intelligence technologies are important measures to compensate for the damage to soybean production caused by climate change.

Keywords: climate change; soybean; phenology; yield; agricultural management measures

自工业化以来,地球表面一直呈变暖的趋势。IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)于2023年发布的第六次气候变化评估报告(AR6综合报告)指出,与1850—1900年相比,全球地表温度在2001—2020年间上升了0.99 °C,且2011—2020年上升达1.09 °C^[1]。气候变化主要表现为全球气温升高,降水时空差异增大,以及极端降水和干旱事件频繁发生^[2-4]。目前,以全球变暖为主要特征的气候变化,以及由此诱发的极端气候事件,已经成为当今世界农业生产面临的最严峻挑战之一。

气候变暖通常会导致作物生长速度加快,生育期缩短,从而造成作物产量下降。近几十年来,作物物候对历史气候变化的响应在世界各地得到了广泛研究,特别是在德国和中国,因为这两个国家有系统和完整的物候观测^[5]。在德国,78种农艺和园艺作物的物候期对温度的反应为-3.73~4.31 d·°C⁻¹^[6]。在中国,通过利用长期观测资料系统分析全国各气候区小麦和玉米物候变化的时空特征,发现抽穗期和成熟期提前,营养生长期缩短,但生殖生长期延长^[7-8]。历史上高达50%的粮食产量下降是由气候变化造成的^[9],其中,温度和降雨变化可以解释全球粮食产量波动的32%~39%^[10]。相关研究指出,气温升高1 K,小麦、玉米、水稻和大豆产量将分别降低(2.9±2.3)%、(7.1±2.8)%、(5.6±2.0)%和(10.6±5.8)%^[11-12]。气候变化对作物生长的影响具有明显的区域差异。在低纬度热带地区,温度升高会缩短作物生长期或加剧干旱导致减产;而在高寒地区,温度升高导致作物生育期延长,有利于作物增产^[13-14]。

大豆作为重要农作物之一,在农业生产与经济生活中扮演着重要角色。然而,全球气温和降水格局的改变对大豆物候和产量产生了显著影响。温度作为大豆生长发育的主要决定因素,其升高往往会加速大豆生长过程,进而导致生育期缩短,最终使得产量下降^[15]。另外,大豆物候期和关键生育期对降水和日照时数的敏感性差异较大,出苗期和生殖期对降水的敏感性最大;随着日照时数增加,除结荚期外,物候期均提前,但关键生育期延长^[16]。随着气候变化的加剧,极端气候事件的发生频率和强度也显著增强,对大豆产量产生了更为显著的负面影响。相关研究表明,1980—2009年复合干热胁迫导致全球大豆产量下降2.3%~3.2%^[17]。

本文论述世界范围内大豆物候和产量对气候变化响应的相关研究与区域差异,并揭示关键气候因子对大豆物候和产量的影响;提出为应对气候变化对大豆生产带来的挑战而应采取的适应措施,以期为保障大豆生产和粮食安全提供科学依据。

1 气候变化影响大豆生产的研究方法

研究气候变化影响大豆生产的主要方法包括田间试验观测方法、统计分析方法与作物模型模拟方法。

1.1 田间试验观测方法

田间试验观测方法是获取第一手真实田间数据最直观的方法,通过田间试验,可以获得作物生长的原始数据。全球有数十万个农业气象站点对作物进行着定点观测,这些观测数据为统计分析作物物候

与产量变化提供数据支持。

研究者可以通过田间控制试验研究不同气候因素对作物物候与产量的影响^[8]。降水对大豆的影响可以利用控制土壤水分条件试验进行研究,通过水分控制装置设置降水量,对不同降水条件下的大豆物候和产量变化进行试验模拟^[18]。田间温室试验则可以用来确定温度、湿度、水汽压等多种气候变量对大豆物候和产量的影响,Ogunkanmi 等^[19]利用田间温室试验,并设计不同水处理,分别得出不同温度条件与水环境下的大豆生产状况。大豆作为 C3 植物,大气中的 CO₂ 浓度会直接影响其生长发育和产量形成,开放式 CO₂ 富集系统 (FACE) 是常用的 CO₂ 浓度控制系统。利用大豆 FACE 实验的结果,有学者证明 CO₂ 浓度升高可以部分但不能完全抵消气候变化给大豆产量带来的不利影响^[20]。

田间试验观测方法为量化气候变化对作物生产的影响提供了原始数据支持,但其准确性与可靠性受限于自然条件等外部因素。此外,该方法通常耗时耗力,一定程度上增加了试验的成本与复杂性,因此该方法并不适用于大规模、长时间的作物生长变化研究,局限性较大。

1.2 统计分析方法

统计分析可以获取大范围、长时间序列的作物物候与产量变化趋势,适用于较大的时空尺度,是研究气候变化对作物生产影响的基本方法之一^[21]。目前,在作物生长对气候变化的响应这一研究领域,田间试验观测与模型模拟等方法均要与统计分析方法相结合。

利用相关分析、线性或面板回归分析,以及机器学习等方法,能够确定历史大豆物候和产量以及生长期不同气候因子的变化趋势,揭示其相互关系^[22-23]。长时期研究中,大豆物候和产量除受到气候变化的影响外,还受到播期、品种、灌溉和施肥等农业管理措施的影响,需要利用一定的统计方法分析不同因素的影响^[24]。通常情况下,多元回归或一阶差分法用来量化气候与管理措施对大豆生长发育的影响^[25]。当前,随着机器学习方法的发展和流行,相关研究也基于不同机器学习方法来揭示不同因素对作物物候和产量的影响。

统计分析方法是目前使用最为普遍的方法,是各种研究方法的基础,能够在很大程度上保障结果的可靠性、准确性与客观性,且支持对更广地理范围、更长时间跨度数据的处理。但对数据质量要求高,且通常基于一定的假设。

1.3 作物机理模型

作物机理模型被广泛应用于作物生长模拟,以解释气象要素、作物品种和管理措施之间复杂的交互效应^[26]。目前,已有一系列模型用来模拟大豆在不同气候情景下的生长发育和生产力形成过程,主要包括 Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM)、Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)、World Food Studies (WOFOST)、Crop Water Productivity Model (AquaCrop)、Model for Nitrogen and Carbon in Agroecosystems (MONICA)、Root Zone Water Quality Model (RZWQM)、Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS)、Joint UK Land Environment Simulator (JULES) 和 Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) 等模型 (表 1)。

在评估气候变化对大豆生长的影响时,研究者会基于模型特性和研究目标来选择合适的作物模型。APSIM 模型因其在模拟土壤过程和复杂种植系统方面的卓越表现而受到青睐,尤其是在研究土壤对作物生长影响或模拟不同的农作制度时。当模拟地区参数不易获得时,AquaCrop 模型则因其所需输入参数较少而更受欢迎,尽管这可能会增加模拟结果的不确定性,尤其是与参数更为详尽的 DSSAT 和 WOFOST 模型相比。此外,为实现作物模型模拟中升尺度与区域预测的关键环节,当前许多模型,如 EPIC,通过与地理信息系统 (GIS) 耦合,增强了空间分析能力,从而能够评估大豆在不同地区的生长差异。

作物模型机理性强,可以对气候变化和作物生长过程之间的关系进行定量描述,准确度较高,同时外推效果好,预测未来作物物候和产量可信度较高^[35]。但作物模型仍存在问题,如模型结构和模型输入存在较大不确定性,参数获取与校准难等^[36]。

当前,人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术,包括机器学习、深度学习和强化学习等,在作物模型的数据预处理、模型优化、参数校正、结果分析和预测中发挥着重要作用,能够有效提升作物模型的模拟精度和效率。随着 AI 技术的发展和进步,可以进一步推动作物机理模型从站点尺度向区域尺度的方向发展,实现区域尺度模型模拟的智能化和高效化。

2 气候变化对大豆生产的影响

气候变化对大豆生产的影响主要源于温度、降水、辐射和 CO₂ 浓度等关键气候因子的波动和变化,

表1 大豆作物生长模型特征及其应用
Table 1 Characteristics of soybean crop growth models and their application

模型 Model	开发单位 Development unit	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	应用 Application
APSIM	澳大利亚联邦科学工业研究组织和昆士兰大学 CSIRO, The University of Queensland	模块化结构, 灵活性高; 以土壤为核心, 可模拟不同耕作方式; 对极端环境下的产量变化有充分敏感性 Modular structure, high flexibility; with soil as the core, it can simulate different farming methods; it is sensitive to yield changes in extreme environments	缺乏冠层温度模块 Canopy temperature module is lacking	模拟1995—2004年和2085—2094年CO ₂ 升高条件下极端气候对美国大豆生产的影响 ^[20] Simulation of the effects of extreme climate on soybean production in the United States during 1995—2004 and 2085—2094 under elevated CO ₂ ^[20]
DSSAT	美国佛罗里达大学的农学研究所 Institute of Agronomy, University of Florida	管理参数详细; 包括CERES系列模型、CROPGRO豆类作物模型等系列作物模型 Detailed management parameters; including CERES series model, CROPGRO beans crop model and other series of crop models	模拟水分胁迫下的作物生长时存在局限性 Modeling crop growth under water stress has limitation	分析气候变化和技术对中国大豆产量的历史和预测影响 ^[27] Analysis of the historical and projected impacts of climate change and technology on soybean production in China ^[27]
WOFOST	荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心 Wageningen University & Research, CWFS	可计算作物干物质形成并分配到不同器官; 可重复性强 Crop dry matter formation can be calculated and distributed to different organs; strong repeatability	未考虑环境胁迫和干旱、霜冻、病虫害等外部因素; 模型输入参数过多 External factors such as environmental stress, drought, frost, pests and diseases are not considered; too many input parameters to the model	分析2004—2021年升温对中国海陵大豆产量的影响 ^[28] The effects of rising temperature on yield of Hailun soybean from 2004 to 2021 were analyzed ^[28]
AquaCrop	联合国粮农组织 FAO	所需输入参数少; 界面简单, 直观性强 Fewer input parameters; the interface is simple and intuitive	雨养地区模拟结果不稳定; 难以很好地模拟水盐和温度胁迫的影响 The simulation results in rain-fed areas are not stable; it is difficult to simulate the effects of water, salt and temperature stress	模拟2041—2100年, 并与1961—1990年相比, 塞尔维亚的大豆产量变化 ^[29] Simulation of soybean yield changes in Serbia in 2041—2100 compared to 1961—1990 ^[29]
MONICA	荷兰瓦赫宁根大学 Wageningen University & Research	描述作物生长对CO ₂ 浓度和温度胁迫反应方面功能较强; 配备自动触发的施肥和灌溉程序 The function of describing the response of crop growth to CO ₂ concentration and temperature stress is strong; equipped with automatically triggered fertilization and irrigation programs	未充分考虑作物品种的差异, 需拓宽作物参数集 The difference of crop varieties is not fully considered, and the crop parameter set needs to be broadened	模拟2015—2019年和2035—2040年间, 气候变化和作物管理对亚马逊南部大豆产量的影响 ^[30] Simulation of the effects of climate change and crop management on soybean yields in the southern Amazon between 2015—2019 and 2035—2040 ^[30]
RZWQM	美国农业部农业研究服务局 ARS	包含多种作物模型; 对土壤水分和氮素状况的模拟效果好 Includes multiple crop models; the simulation effect of soil water and nitrogen is good	对叶面积指数的模拟效果较差 The simulation effect of leaf area index is poor	利用RZWQM中的CROPGRO和HERMES模型分别模拟2015—2018年气温升高条件下美国的大豆产量变化 ^[31] CROPGRO and HERMES models in RZWQM were used to simulate soybean yield changes in the United States during 2015—2018 under temperature increase ^[31]
STICS	法国农业科学院 INRA	对N ₂ O排放、土壤水分动力、土壤温度等参数模拟效果好, 在土壤管理系统及免耕系统方面性能良好 The simulation results of N ₂ O emission, soil water dynamics, soil temperature and other parameters are good, and the performance of soil management system and no-till system is good	在干旱胁迫下的作物生长模拟方面存在局限性 There are limitations in simulating crop growth under drought stress	模拟1971—2000年和2041—2100年气候变化下加拿大的大豆生育期变化 ^[32] Simulation of soybean growth period in Canada during 1971—2000 and 2041—2100 under climate change ^[32]
JULES	英国生态与水文中心、英国地质调查局和国家大气科学中心共同开发 CEH&BGS&NCAS	能够校准臭氧损害参数, 量化臭氧对大豆的影响 It can calibrate ozone damage parameters and quantify the effect of ozone on soybeans	在灌溉、病虫害及氮循环过程的模拟方面存在不足; 用于作物模型的参数来自全局设置, 因此可能不是场地模拟的最佳参数 There are deficiencies in the simulation of irrigation, pests and diseases and nitrogen cycle; the parameters used for crop models come from global settings and therefore may not be the best parameters for field simulation	量化1961—2005年和2005—2100年O ₃ 、CO ₂ 浓度和气象对全球大豆生产的影响和相对重要性 ^[33] To quantify the effects and relative importance of O ₃ , CO ₂ concentrations, and meteorology on global soybean production during 1961—2005 and 2005—2100 ^[33]
EPIC	美国农业部 USDA	在极端干旱对作物的影响评估方面有优势; 对于水盐的模拟精度较高 Advantages in assessing the impact of extreme drought on crops; the simulation accuracy of water and salt is higher	模型对数据质量要求较高; 部分复杂模块的运算效率低; 针对特定作物的精细化程度有待提高 The model requires high data quality; the operation efficiency of some complex modules is low; the degree of refinement for specific crops needs to be improved	将EPIC模型与GIS、机器学习结合, 降低全球未来大豆产量预测不确定性 ^[34] The EPIC model is combined with GIS and machine learning to reduce the uncertainty of global future soybean yield forecast ^[34]

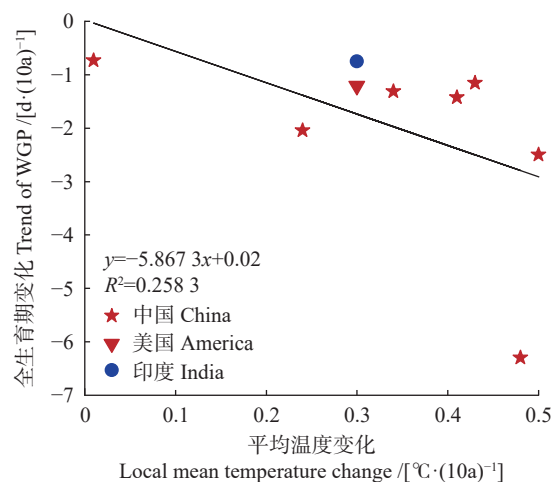
这些因子直接作用于大豆的整个生长过程,不仅会使物候期和产量发生变化,也会对品质产生影响。比如,CO₂浓度升高会减少大豆中的蛋白质含量,从而降低其品质^[37]。另外,气候变化也会引发病虫害,干扰大豆光合作用与养分吸收,最终抑制植株生长甚至导致凋萎死亡。有研究指出,到21世纪末,气候变化将导致SSP 126和SSP 585情景下病虫害发生率分别增加243%±110%和460%±213%,对大豆生产造成严重威胁^[38]。目前,气候变化对大豆生产影响的研究主要集中在生育期改变和产量波动两方面。因此,本研究通过分析相关文献,主要从气候变化对大豆物候和产量的影响两方面进行综述。

本研究收集了1980—2024年已发表的关于气候变化下大豆生产的响应与适应的文献,其中英文文献来自Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com/>),中文文献来自中国知网 (<http://www.cnki.net/>)。本研究所用英文关键词包括 climate change, soybean, phenology, yield, crop model, CO₂ concentration, climate extremes, diseases 和 pests 等及其组合;中文关键词包括气候变化、大豆、物候、产量、作物模型、CO₂浓度、极端气候、病虫害等及其组合。在此基础上,使用以下标准对文献进行筛选:1)以全球主要大豆产区为核心,兼顾高纬度和低纬度区域的对比分析;2)英文文献需发表于SCI/SSCI收录期刊,中文文献主要选自CSCD核心库期刊与北大核心期刊;3)剔除非同行评议文献、重复发表数据及与研究主题关联性低的文献。

2.1 气候变化对大豆物候的影响

温度升高可以加速大豆生长发育,从而缩短关键生长阶段之间过渡所需的时间^[39-41],这是影响大豆物候变化的主要因素^[42]。近年来,对大豆物候的研究分为营养生长期(VGP)、生殖生长期(RGP)和全生育期(WGP)。

温度通常被认为是影响大豆物候变化的最关键因子。气候变化主要通过改变积温对大豆物候产生影响,温度升高会更快满足大豆各阶段生长的积温要求。总体而言,大豆WGP长度与平均温度呈负相关,温度每上升1℃,大豆WGP将缩短5.9 d(图1)。但温度对物候的影响存在着区域差异。2000—2018年,美国肯塔基州气温上升0.54℃,导致大豆WGP缩短2.16 d^[43]。而在1992—2018年,中国平均气温上升(0.34±0.09)℃·(10a)⁻¹,大豆WGP的变化趋势则为-(1.32±0.3) d·(10a)⁻¹^[16]。Liu等^[25]将中国大豆种植区划分为北方春大豆区、夏大豆区和南方春大



中国和印度数据来自历史评估;印度数据来自未来期预测。Data for China and America were based on historical assessment; while data for India were based on future prediction.

图1 平均温度与大豆全生育期的相关性

Fig. 1 Correlation between mean temperature and whole growth period of soybean

豆区,1992—2011年,三大种植区气温分别上升0.41±0.25、0.01±0.36和(0.48±0.27)℃·(10a)⁻¹,大豆WGP分别缩短1.43、0.74和6.3 d·(10a)⁻¹。

降水对大豆物候也有显著影响(表2)。持续的降水增多会导致土壤湿度过高,降低土壤氧气含量,引发种子缺氧,从而延长大豆种子发芽时间;同时抑制其根系发育,往往会导致大豆物候期延迟,生长周期延长。在所有关键生育阶段中,大豆在RGP对水分需求达到高峰,对降雨敏感性最大。1992—2018年,中国全域降水延长了大豆关键生长期,而RGP的敏感性高于其他生育期,为(0.10±0.02) d·(10 mm)⁻¹^[16]。降水对大豆物候的影响相较于温度来说,空间异质性更加明显。2008—2010、2017和2018年加拿大马尼托巴省南部比安大略省东部更长时间的降水延迟了其大豆开花期^[44];而1981—2010年中国东部主要大豆产区开花期对累计降水量呈-0.628 d·(100 mm)⁻¹的负敏感性^[45]。

大豆是典型的光周期敏感短日照作物,日照时数通过影响其光合作用与光周期来改变大豆物候期。充足的日照时数会促进大豆叶片进行光合作用,可能会使其生育期缩短;相反,若日照时数不足,光合作用受限,大豆生育期则会延长。目前,全球范围内关于日照时数对大豆物候的影响评估主要集中在我国,且同样具有明显空间异质性。1992—2011年,中国大豆主产区,日照时数每增加10 h,北方春大豆、夏大豆及南方春大豆RGP全部缩短,VGP分别呈现出-0.05、0.03和-0.17 d的变化,WGP则为-0.01、

表 2 降水对不同地区大豆物候的影响
Table 2 Effects of precipitation on soybean phenology in different regions

研究区 Study area	研究时期 Study period	主要结果 Result	文献 Reference
加拿大 Canada	2008—2010 2017—2018	马尼托巴省南部比安大略省东部更长时间的降水延迟了其大豆开花期 Longer periods of precipitation in southern Manitoba than in eastern Ontario delayed soybean flowering	[44]
美国肯塔基州 Kentucky, USA	2000—2018	大豆播种期与收获期均与降水量呈 $0.03 \text{ d}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的正相关性; 全生育期长度与生长季累计降水量呈 $0.01 \text{ d}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的正相关性 There was a positive correlation between sowing date and harvest date of soybean and precipitation of $0.03 \text{ d}\cdot\text{mm}^{-1}$; There was a positive correlation between whole growth period length and accumulated precipitation in the growing season at $0.01 \text{ d}\cdot\text{mm}^{-1}$	[43]
中国 China	1992—2018	播种期(54.90%的站点)、出苗期(58.86%的站点)、三叶期(64.71%的站点)和开花期(54.90%的站点)对降水呈正敏感性, 而结荚期(50.98%的站点)和成熟期(52.94%的站点)呈负敏感性; 全国降水延长了关键生长期, 生殖生长期的敏感性最大 $[(0.10\pm0.02) \text{ d}\cdot(10 \text{ mm})^{-1}]$ Sowing (54.90% of sites), emergence (58.86% of sites), third node (64.71% of sites) and flowering (54.90% of sites) were positively sensitive to precipitation, while podding (50.98% of sites) and maturity (52.94% of sites) were negatively sensitive; the precipitation in China extended the key growth period, and the sensitivity of reproductive growth period was the highest $[(0.10\pm0.02) \text{ d}\cdot(10 \text{ mm})^{-1}]$	[16]
中国 China	1981—2010	在东部主要大豆产区, 出苗期 $[-0.515 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 、开花期 $[-0.628 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 以及营养生长期 $[-0.03 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 对累计降水量呈负敏感性; 播种期 $[0.007 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 、成熟期 $[0.875 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 及生殖生长期 $[0.897 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 和全生育期 $[0.499 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ 则均对降水表现出正敏感性 In the main soybean producing areas in eastern China, emergence $[-0.515 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$, flowering $[-0.628 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ and vegetative growth period $[-0.03 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ showed negative sensitivity to accumulated precipitation; sowing $[0.007 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$, maturity $[0.875 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$, reproductive growth period $[0.897 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ and whole growth period $[0.499 \text{ d}\cdot(100 \text{ mm})^{-1}]$ showed positive sensitivity to precipitation	[45]

-0.07 和 0.11 d [25]。而东北地区大多数站点 1981—2010 年大豆的 VGP、RGP、WGP 长度与累计日照时数呈显著正相关, 累计日照时数平均每增加 100 h , 生育期延长 3 d 以上 [46]。

2.2 气候变化对大豆产量的影响

气候变化主要通过温度、降水及 CO_2 浓度等影响大豆产量。现有研究表明, 受气候变化影响的作物产量预计在不同地区有所不同, 这取决于该地区的纬度和灌溉应用 [47]。在影响大豆产量的所有气候因子中, 温度占主导地位。

目前, 全球变暖已成为影响大豆产量的关键因素, 并且预计未来几十年全球地表温度都将持续上升。总体上大豆产量与气温呈负相关, 全球气温每上升 1°C , 产量将下降 6.85% (图 2a)。但对一些国家来说, 纬度位置及灌溉等适应条件抵消了气候变化造成的产量损失。目前, 大量研究得出的一致结论为, 气候变化将使高纬地区大豆产量增加, 低纬地区产量减少 [48]。这是因为高纬地区温度较低, 生长季温度升高可以延长大豆的生长时间, 促进光合作用和养分积累, 从而提高产量。而低纬地区温度升高容易超出大豆适宜生长的温度范围, 造成减产 [49]。

大豆产量对降水量呈正相关关系, 降水量每增加 10 mm , 大豆产量增加 2.13% (图 2b), 这与 Cai 等 [50] 报告的结果相符。降水对大豆产量的作用主要通过影响其土壤水分状况、光合作用及结实率和籽粒饱满度实现。充足的水分使大豆叶片保持舒展状态, 气孔张大, 有利于光合作用的进行, 合成更多有机物

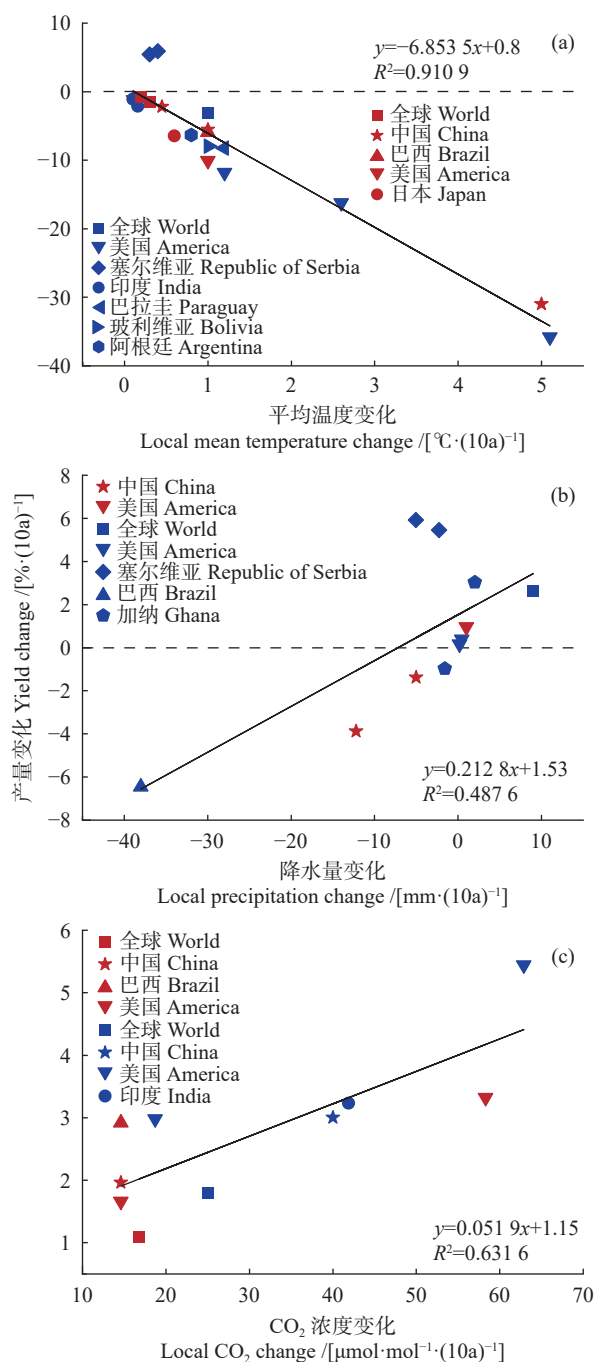
质, 为产量增加提供物质基础。在生殖生长阶段, 降水增加能提高大豆结实率, 保证籽粒充分灌浆, 增加产量。全球范围内, 在不同大豆产区 and 气候情景下, 降水变化趋势很难一概而论。在 1981—2017 年的历史时期, 中国东北地区降水量减少 43.99 mm , 导致大豆产量降低 14.0% [51]。2040—2070 年, 加纳和巴西降水量将分别减少 1.59 和 $38 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 大豆产量则下降 $0.59\%\sim 1.39\%$ 和 $6.48\%\cdot(10\text{a})^{-1}$ [52-53]。

全球气候变暖背景下, CO_2 浓度不断增加。较高的 CO_2 浓度会影响大豆的气孔行为, 导致较少的水分通过蒸腾损失, 从而提高水分利用效率以及光合作用 [54]。先前的研究表明, 到 2050 年, 全球 CO_2 浓度上升 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 使大豆产量上升 $1.8\%\cdot(10\text{a})^{-1}$, CO_2 施肥效应可以部分但不完全抵消气温升高给大豆产量带来的负面影响 [55]。根据对世界大豆主产区的研究数据统计, 全球范围内 CO_2 浓度每升高 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 产量升高 $0.52\%\cdot(10\text{a})^{-1}$ (图 2c)。不同地区、不同品种大豆对 CO_2 浓度升高的响应不同。2002—2006 年, 美国、巴西和中国 CO_2 浓度上升 $14.6 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的条件下, 大豆分别增加 1.67 、 2.91 和 $1.96\%\cdot(10\text{a})^{-1}$ [56]。

2.3 极端气候对大豆生产的影响

极端气候事件对大豆生产的影响往往更严重。其中, 大豆产量主要受到极端高温、极端干旱, 以及两者复合胁迫的影响 (表 3)。

历史极端气候事件已经对大豆产量产生了显著的负面影响。1961—2014 年, 干旱条件下, 全球大豆



红色: 历史期评估; 蓝色: 未来期预测。Red: historical period; Blue: future period.

图 2 平均温度、降水及 CO₂ 浓度与大豆产量的相关性
Fig. 2 Correlation between mean temperature, precipitation, CO₂ concentration and soybean yield

产量效应为-10.7%^[58]。1980—2009 年, 当大豆生长季节内极端天气天数偏离长期平均值 1.5 倍标准差时, 复合干热胁迫导致全球大豆产量下降 2.3%~3.2%; 而复合冷湿胁迫使得产量下降 0.3%~1.1%^[17]。国家尺度上, 1961—2010 年, 中国东北地区开花期高温胁迫度日指数增加 1 °C·d 将导致大豆产量损失 3.7 kg·hm⁻²^[57]。1981—2017 年, 日最高温度在 30 °C 以上

的高温日数每 10 年增加 2.39 d, 导致中国东北地区大豆产量下降 5.75%^[51]。1980—2008 年, 高温、低降水和高太阳辐射的同时发生引起的干热事件导致中国干旱和半干旱地区大豆产量损失高达 50%^[62]。1979—2019 年, 在关键生长阶段发生的中度干旱事件导致美国东南部大豆产量下降 11.86%; 随着干旱强度增加, 在严重与极端干旱条件下, 大豆产量分别下降 19.82% 与 25.39%^[63]。2008—2009 年, 阿根廷发生严重程度的干旱事件, 大豆生产的相对损失为 2000 年大豆产量的 33.2%^[64]。

随着全球气候变暖, 未来极端气候事件增多增强^[65]。相较于 1981—2005 年, 极端气候影响下, 2040—2099 年全球大豆产量的变化范围为-10.89%~4.39%, 美国、阿根廷和巴西的产量变化较为显著, 分别为-24.66%、-12.55% 和-14.43%^[66]。到 21 世纪 90 年代, 全球范围内大豆生殖阶段热胁迫对产量的影响在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下分别为-1.3% 和-4.6%^[49]。相关研究预测热胁迫在 2050 年后将成为美国大豆的重要限制因素, 年总产量从目前的 45 Mt 下降到本世纪末的 35 Mt, 下降达 22%^[63]。到 2100 年, 由于干热胁迫频率增加, 在不考虑 CO₂ 增强的情况下, 美国印第安纳州大豆实际产量相对于产量潜力将下降 8%~21%^[61]。2080—2094 年, 大豆生长期日最高温度预计在 RCP4.5 和 RCP8.5 下分别上升 2.0 和 3.5 °C, 将导致美国大豆产量分别损失 20.4% 和 33.3%^[20]。

3 大豆生产应对和适应气候变化的管理措施

为有效应对和缓解气候变化对大豆生产的负面影响, 我们应当积极采取合理措施和制定相应策略来保障全球大豆生产的安全。

3.1 品种更替

引进和选育优良品种是农业应对气候变化最根本的适应对策之一^[24]。为了减轻温度升高的不利影响, 选择具有耐热特性或高热需求的大豆品种将有效降低大豆生长和产量的温度敏感性, 而具有更长营养期、生殖期和种子灌浆期的品种将有利于利用大豆生长地区的额外热量^[16]。近年来, 气候变化引起的高温 and 干旱胁迫发生频率增加, 因此, 培育耐高温、具有强抗旱能力等抗逆性强的品种有效提高了大豆产量潜力^[67]。通常情况下, 经过基因编辑技术改良的大豆品种往往拥有更强的抗逆性。目前, 以 CRISPR/Cas9 技术为代表的基因编辑技术已快速成为大豆基因功能研究、改造及农艺性状遗传改良的重要工具^[68]。此外, 不同地区气候和土壤条件各不相同, 所适宜的

表 3 极端气候事件对不同地区大豆产量的影响
Table 3 Effects of extreme climatic events on soybean yield in different regions

研究时期 Research period	气候事件 Climatic event	研究区域 Study area	研究结果 Result	文献 Reference
历史时期 Historical period	极端高温 Extreme high temperature	中国东北 Northeast China	1961—2010年, 开花期高温胁迫日指数增加1 °C·d将导致大豆产量损失3.7 kg·hm ⁻² From 1961 to 2010, an increase of 1 °C·d in the degree day index of high temperature stress during flowering period resulted in a loss of 3.7 kg·hm ⁻² in soybean yield	[57]
	极端干旱 Extreme drought	全球 World	1961—2014年, 干旱条件下, 大豆产量效应为-10.7% From 1961 to 2014, under drought conditions, the yield effect of soybean was -10.7%	[58]
		中国东北 Northeast China	1961—2017年间的中度干旱年份, 大豆产量损失10.4%; 1998—2017年, 干旱强度增加7.8%, 大豆产量损失增加21.8% During the moderate drought years from 1961 to 2017, soybean yield lost 10.4%; during 1998 to 2017, drought intensity increased by 7.8% and soybean yield loss increased by 21.8%	[59]
	复合胁迫 Combined stress	全球 World	1980—2009年, 复合干热胁迫导致大豆产量下降2.3%~3.2%; 复合冷湿胁迫使得产量下降0.3%~1.1% From 1980 to 2009, combined dry heat stress resulted in a decrease of 2.3%~3.2% in soybean yield; Combined cold and wet stress reduced yield by 0.3%~1.1%	[17]
未来时期 Future period	极端高温 Extreme high temperature	全球 World	到2090s, 大豆生殖阶段热胁迫对产量的影响在RCP4.5和RCP8.5下分别为-1.3%和-4.6% By 2090s, the effect of heat stress on soybean yield at reproductive stage was -1.3% and -4.6% at RCP4.5 and RCP8.5, respectively	[49]
		美国 America	预计热胁迫在2050年后将成为大豆的重要限制因素, 大豆年总产量从目前的45 Mt下降到21世纪末的35 Mt, 下降22% Heat stress is expected to be a significant limiting factor for soybean after 2050, with total annual soybean production declining 22% from the current 45 Mt to 35 Mt by the end of the century	[60]
	复合胁迫 Combined stress	美国印第安纳州 Indiana (USA)	到2100年, 由于干热胁迫频率增加, 在不考虑CO ₂ 增强的情况下, 大豆产量相对于产量潜力将下降8%~21% By 2100, soybean yield will decline by 8%~21% relative to yield potential without taking into account CO ₂ enhancement due to increased frequency of dry heat stress	[61]

大豆品种也有差别, 因此, 要培育符合不同种植区实际情况的品种, 才能更好地缓解热量和水分胁迫。

3.2 播种期调整

播种期调整是作物适应气候变化的有效措施。一般而言, 播种期调整可以改变大豆关键生育期内的气候条件, 使大豆能够避开高温、冷害、干旱或强降水等不利影响, 从而提高热量和水分资源的利用效率, 最终提高大豆生产潜力^[16]。不同种植区, 气候基础条件和变化程度存在较大差异, 播期调整需要结合当地大豆生长过程中的具体气候变化特征来进行。例如, 美国南部大豆的早播可以增加其生产潜力^[62,69]; 但在干旱半干旱环境中, 夏季的高温干旱会增加热害风险, 延迟播种结合灌溉能够有效防止作物遭受致命的干热损害, 是解决水分胁迫的有效方法^[70]。

3.3 调整种植结构及其他措施

气候变化及更频繁的极端气候现象必然会对大豆种植结构产生影响, 因此, 需要结合不同种植区实际情况, 合理调整作物种植结构。比如, 通过间作、套作、轮作等不同种植模式, 优化作物组合, 提高资源利用效率, 增强生态系统稳定性, 缓解气候变化造成的减产^[71-72]。2014—2020年, 在中国黑龙江省进行的长期田间试验结果表明, 与单一栽培大豆相比, 大豆-玉米-玉米作物序列中的大豆产量提高0.21 t·hm⁻²^[73]。此外, 政府应结合当地情况制定合理政策和投资精

准农业, 如实施精准施肥和灌溉作业, 增施有机肥优化土壤质量, 采用先进的机械设备提高效率等^[74-75]。另外, 政策补贴和农业保险等措施也可用于弥补气候变化对大豆生产的损害。因此, 需要结合地区气候条件和生产实际, 实施差异化补贴政策, 同时通过扩大保险覆盖范围、引入气候指数保险等, 提高大豆抗风险能力, 促进大豆生产的健康发展^[76]。物联网和人工智能技术也可以应用于大豆田间精准管理, 实时监测气象、土壤及作物生长数据, 实现数据的精准采集, 同时可对大豆生长过程进行灌溉、施肥、病虫害防治等自动化管理, 提高资源利用与管理效率。

4 结论与展望

通过分析大豆对气候变化的响应与相关研究方法, 得出以下结论:

1) 研究气候变化对大豆生产影响的主要研究方法包括田间试验观测、统计分析方法与作物模型模拟方法。其中, 田间试验观测方法最为直观, 能够获取作物生长的原始数据, 但成本高, 周期长。统计方法是各种研究方法的基础, 能够保障结果的可靠性、准确性与客观性, 但对数据质量要求高, 且通常基于一定假设。模型模拟方法机理性强, 外推效果好, 如 APSIM、DSSAT、WOFOST、AquaCrop 和 MONICA 等模型在大豆对气候变化的响应研究中得到广泛应用, 但存在模型参数获取与校准较难等问

题。当前,机器学习、深度学习和强化学习等 AI 技术,在作物模型的数据预处理和参数优化等方面发挥着重要作用,能够提高模型模拟的准确性和实用性。未来的研究中需要将多种方法结合,彼此支撑,互相验证,对比择优,从而尽量减少田间试验观测、统计分析、模型模拟等单一方法的不确定性与误差,增加大豆对气候变化响应预测的准确性。

2) 气候变化与极端气候对各国大豆生产均产生重要影响,主要体现在物候和产量变化上。温度的升高加快大豆的生长速度,造成大豆物候期提前,并缩短大豆关键生育期。对产量而言,气温每上升 1°C ,大豆产量将下降 6.85%;降水量每降低 10 mm,产量将减少 2.13%; CO_2 浓度每升高 $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,产量将增加 0.52%。鉴于气候变化对大豆影响的空间异质性,相关研究应充分考虑地理环境差异的影响,更多关注不同地理区域内大豆生长对气候变化的响应,对比不同种植区大豆物候和产量的变化趋势与程度。因此,研究范围可以从某个特定区域扩大到全国乃至全球,进行国家和世界范围内、更长时间跨度的综合研究。同时,通过制定全球统一的数据采集和存储标准、建立数据共享平台等方式,确保各地区数据的可比性与一致性,利用数据共享和技术合作,形成全球范围内的多中心合作研究网络,使气候变化对大豆生产影响的研究更加完善。

3) 为缓解气候变化给大豆生产带来的负面影响,可以采取更新品种、改变播期、优化灌溉、调整种植结构等有效措施。例如,利用基因编辑技术培育抗逆品种,并依据实际气候条件选择最适宜的品种均能有效改善大豆遗传性能与产量潜力,进而提高大豆产量。另外,政策补贴、农业保险、物联网和人工智能技术应用等也是弥补气候变化对大豆生产造成损害的重要措施。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report[R]. Geneva: IPCC, 2023
- [2] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713–718
- [3] DUAN W L, TAKARA K. Extreme precipitation events, floods, and associated socio-economic damages in China in recent decades[M]// Impacts of Climate and Human Activities on Water Resources and Quality: Integrated Regional Assessment. Singapore: Springer Singapore, 2020: 11–29
- [4] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Assessing the impacts of extreme agricultural droughts in China under climate and socioeconomic changes[J]. *Earth's Future*, 2018, 6(5): 689–703
- [5] WU D R, WANG P J, JIANG C Y, et al. Measured phenology response of unchanged crop varieties to long-term historical climate change[J]. *International Journal of Plant Production*, 2019, 13(1): 47–58
- [6] ESTRELLA N, SPARKS T H, MENZEL A. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(8): 1737–1747
- [7] XIAO D P, MOIWO J P, TAO F L, et al. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(7): 1191–1202
- [8] TAO F L, ZHANG S, ZHANG Z, et al. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3686–3699
- [9] LESK C, ANDERSON W, RIGDEN A, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(12): 872–889
- [10] RAY D K, GERBER J S, MACDONALD G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5989
- [11] WANG X H, ZHAO C, MÜLLER C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 908–916
- [12] WANG B, FENG P Y, LIU D L, et al. Sources of uncertainty for wheat yield projections under future climate are site-specific[J]. *Nature Food*, 2020, 1(11): 720–728
- [13] HEINO M, PUMA M J, WARD P J, et al. Two-thirds of global cropland area impacted by climate oscillations[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1257
- [14] RAY D K, WEST P C, CLARK M, et al. Climate change has likely already affected global food production[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0217148
- [15] 邱泽萱, 马树庆, 李秀芬. 吉林春大豆生育期变化及其对气候变暖的响应[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 715–724
QIU Y X, MA S Q, LI X F. Changes of growth stage for spring soybean in Jilin Province and its response to climate warming[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(11): 715–724
- [16] TAN Q H, LIU Y J, DAI L, et al. Shortened key growth periods of soybean observed in China under climate change[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 8197
- [17] HEINO M, KINNUNEN P, ANDERSON W, et al. Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 3583
- [18] 韩晓增, 乔云发, 张秋英, 等. 不同土壤水分条件对大豆产量的影响[J]. *大豆科学*, 2003, 22(4): 269–272
HAN X Z, QIAO Y F, ZHANG Q Y, et al. Effects of various soil moisture on the yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2003, 22(4): 269–272
- [19] OGUNKANMI L, MACCARTHY D S, ADIKU S G K. Impact of extreme temperature and soil water stress on the growth and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill][J]. *Agriculture*,

- 2022, 12(1): 43
- [20] JIN Z N, ZHUANG Q L, WANG J L, et al. The combined and separate impacts of climate extremes on the current and future US rainfed maize and soybean production under elevated CO₂[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2687–2704
- [21] LOBELL D B, BURKE M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443–1452
- [22] ODEY G, ADELODUN B, CHO G, et al. Modeling the influence of seasonal climate variability on soybean yield in a temperate environment: South Korea as a case study[J]. *International Journal of Plant Production*, 2022, 16(2): 209–222
- [23] SILVA D S, ARIMA E Y, DOS REIS T N P, et al. Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2023, 21(1): 2173370
- [24] 于水, 张晓龙, 王妍, 等. 气候变化对中国东北三省主要粮食作物影响研究综述[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2024, 32(6): 970–985
- YU S, ZHANG X L, WANG Y, et al. Review of research on the impacts of climate change on staple grain crops in the three provinces of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(6): 970–985
- [25] LIU Y J, DAI L. Modelling the impacts of climate change and crop management measures on soybean phenology in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121271
- [26] 李林超. 气候变化对作物生长和产量影响的模拟及不确定性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
- LI L C. Crop growth and yield predictions and uncertainty analysis under climate change[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023
- [27] ZHANG H Q, ALI CHANDIO A, YANG F, et al. Modeling the impact of climatological factors and technological revolution on soybean yield: Evidence from 13-major provinces of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5708
- [28] HAO W, SHEN G H, SHI Z Z, et al. Effects of climate and price on soybean production: Empirical analysis based on panel data of 116 prefecture-level Chinese cities[J]. *PLoS One*, 2023, 18(3): e0273887
- [29] TOVJANIN T M, DJURDJEVIC V, PEJIC B, et al. Modeling the impact of climate change on yield, water requirements, and water use efficiency of maize and soybean grown under moderate continental climate in the Pannonian lowland[J]. *Idojaras*, 2019, 123(4): 469–486
- [30] GUO S B, ZHANG Z T, GUO E J, et al. Historical and projected impacts of climate change and technology on soybean yield in China[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 203: 103522
- [31] 张徐莹, 李琪, 梁媛媛, 等. 升温对海伦地区大豆生长发育影响的模拟研究[J]. *气象与减灾研究*, 2023, 46(3): 213–220
- ZHANG X Y, LI Q, LIANG Y Y, et al. Simulation of the effect of warming on the growth and development of soybeans in Hailun area[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2023, 46(3): 213–220
- [32] HAMPF A C, STELLA T, BERG-MOHNICKE M, et al. Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 177: 102707
- [33] SIMA M W, FANG Q X, BURKEY K O, et al. Field and model assessments of irrigated soybean responses to increased air temperature[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(6): 4849–4860
- [34] JING Q, HUFFMAN T, SHANG J L, et al. Modelling soybean yield responses to seeding date under projected climate change scenarios[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2017: 0065
- [35] 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 317–326
- ZHAO Y X, XIAO D P, TANG J Z, et al. Effects of climate change on the yield of major grain crops and its adaptation measures in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 317–326
- [36] 侯英雨, 何亮, 靳宁, 等. 中国作物生长模拟监测系统构建及应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 165–175, 312
- HOU Y Y, HE L, JIN N, et al. Establishment and application of crop growth simulating and monitoring system in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 165–175, 312
- [37] HAO X Y, GAO J, HAN X, et al. Effects of open-air elevated atmospheric CO₂ concentration on yield quality of soybean [*Glycine max* (L.) Merr][J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 192: 80–84
- [38] WANG C Z, WANG X H, JIN Z N, et al. Occurrence of crop pests and diseases has largely increased in China since 1970[J]. *Nature Food*, 2021, 3(1): 57–65
- [39] AHMAD S, ABBAS Q, ABBAS G, et al. Quantification of climate warming and crop management impacts on cotton phenology[J]. *Plants*, 2017, 6(1): 7
- [40] REZAEI E E, SIEBERT S, MANDERSCHIED R, et al. Quantifying the response of wheat yields to heat stress: The role of the experimental setup[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 93–103
- [41] DENG H Y, YIN Y H, WU S H. Divergent responses of thermal growing degree-days and season to projected warming over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(15): 5605–5618
- [42] ASSENG S, EWERT F, MARTRE P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 5(2): 143–147
- [43] YANG Y J, TAO B, LIANG L, et al. Detecting recent crop phenology dynamics in corn and soybean cropping systems of Kentucky[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1615
- [44] ORT N W W, MORRISON M J, COBER E R, et al. A comparison of soybean maturity groups for phenology, seed yield, and seed quality components between eastern Ontario and southern Manitoba[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2022, 102(4): 812–822
- [45] HE L, JIN N, YU Q. Impacts of climate change and crop management practices on soybean phenology changes in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 707: 135638
- [46] XIAO D P, ZHANG Y, BAI H Z, et al. Trends and climate response in the phenology of crops in Northeast China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 811621
- [47] KANG Y H, KHAN S, MA X Y. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security — A review[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1665–1674

- [48] PARRY M, ROSENZWEIG C, IGLESIAS A, et al. Climate change and world food security: A new assessment[J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9: S51–S67
- [49] LIN T S, SONG Y, LAWRENCE P, et al. Worldwide maize and soybean yield response to environmental and management factors over the 20th and 21st centuries[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(11): e2021JG006304
- [50] CAI C Z, LV L Y, WEI S, et al. How does climate change affect potential yields of four staple grain crops worldwide by 2030?[J]. *PLoS One*, 2024, 19(5): e0303857
- [51] GUO S B, GUO E J, ZHANG Z T, et al. Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield components in Northeast China[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 838: 156284
- [52] MACCARTHY D S, TRAORE P S, FREDUAH B S, et al. Productivity of soybean under projected climate change in a semi-arid region of west Africa: Sensitivity of current production system[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2614
- [53] FERNANDES R D M, DE MELO D M, ELLI E F, et al. Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in Brazil's new agricultural frontier[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 147(1): 803–816
- [54] LOBELL D B, FIELD C B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1): 014002
- [55] LOBELL D B, GOURDJI S M. The influence of climate change on global crop productivity[J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 1686–1697
- [56] SAKURAI G, IIZUMI T, NISHIMORI M, et al. How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past soybean production?[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4978
- [57] YIN X G, OLESEN J E, WANG M, et al. Climate effects on crop yields in the northeast farming region of China during 1961–2010[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(7): 1190–1208
- [58] MATIU M, ANKERST D P, MENZEL A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961–2014[J]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0178339
- [59] WANG C Y, LINDERHOLM H W, SONG Y L, et al. Impacts of drought on maize and soybean production in Northeast China during the past five decades[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2459
- [60] YANG M J, WANG G L. Heat stress to jeopardize crop production in the US Corn Belt based on downscaled CMIP5 projections[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 211: 103746
- [61] BOWLING L C, CHERKAUER K A, LEE C I, et al. Agricultural impacts of climate change in Indiana and potential adaptations[J]. *Climatic Change*, 2020, 163(4): 2005–2027
- [62] TAO F L, ZHANG Z, ZHANG S, et al. Variability in crop yields associated with climate anomalies in China over the past three decades[J]. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(6): 1715–1723
- [63] NGUYEN H, THOMPSON A, COSTELLO C. Impacts of historical droughts on maize and soybean production in the southeastern United States[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 281: 108237
- [64] THOMASZ E O, VILKER A S, PÉREZ-FRANCO I, et al. Impact valuation of droughts in soybean and maize production: The case of Argentina[J]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2024, 16(1): 63–90
- [65] 许吟隆, 赵明月, 李阔, 等. 农业适应气候变化研究进展回顾与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1155–1170
- XU Y L, ZHAO M Y, LI K, et al. Review on the research progress of agricultural adaptation to climate change and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(8): 1155–1170
- [66] SUN Q, ZHANG Y, CHE X H, et al. Coupling process-based crop model and extreme climate indicators with machine learning can improve the predictions and reduce uncertainties of global soybean yields[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1791
- [67] HAMED R, VAN LOON A F, AERTS J, et al. Impacts of compound hot–dry extremes on US soybean yields[J]. *Earth System Dynamics*, 2021, 12(4): 1371–1391
- [68] 刘佳瑞, 张钰, 彭国庆, 等. 基因编辑技术在大豆基因功能鉴定及遗传改良上的应用[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(6): 919–930
- LIU J R, ZHANG Y, PENG G Q, et al. The application of gene editing technology to soybean in gene function identification and genetic improvement[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(6): 919–930
- [69] GONG L J, LIU D, JIANG L Q, et al. Distribution characteristics of climate potential productivity of soybean in frigid region and its response to climate change[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(5): 7452–7464
- [70] MALL R K, LAL M, BHATIA V S, et al. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: A simulation study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 113–125
- [71] BATEMAN N R, CATCHOT A L, GORE J, et al. Effects of planting date for soybean growth, development, and yield in the southern USA[J]. *Agronomy*, 2020, 10(4): 596
- [72] ZHANG Z X, YU K L, SIDDIQUE K H M, et al. Phenology and sowing time affect water use in four warm-season annual grasses under a semi-arid environment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269: 257–269
- [73] YUAN M, BI Y D, HAN D W, et al. Long-term corn–soybean rotation and soil fertilization: Impacts on yield and agronomic traits[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2554
- [74] SETIYONO T D, WEISS A, SPECHT J, et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(2/3): 257–271
- [75] RISING J, DEVINENI N. Crop switching reduces agricultural losses from climate change in the United States by half under RCP 8.5[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4991
- [76] SENTELHAS P C, BATTISTI R, CÂMARA G M S, et al. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for sustainable production[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(8): 1394–1411