

极端气候对中国粮食生产的影响及其应对措施

许航^{1,2}, 刘盛², 刘磊^{1,2*}, 刘学军^{1*}

1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘要 随着全球气候变暖趋势加剧, 极端气候事件对粮食生产的影响愈发显著。2023年中国粮食生产遭受极端气候的严重冲击, 导致全国农田大面积减产, 对粮食安全构成了严重威胁。为应对频发的极端气候事件, 从全国农业布局调整、作物育种研发、农田水利设施建设、土壤质量优化、立法保障农业绿色发展、推广农业金融服务、建立农业灾害预警系统等7个方面提出了中国极端气候事件频发下的应对措施, 并通过与《“十四五”全国种植业发展规划》对比, 提出了中国应对极端气候事件的策略。中国未来粮食生产的核心任务是提高对各种灾害的长期防御能力, 重视气候变化给未来农业生产带来的挑战, 确保粮食生产的安全与稳定。

关键词 气候变化; 极端气候; 粮食生产

极端气候是指短期内某一区域的天气条件超出长期气候波动范围的现象, 多引发一系列极端气候事件, 包括极端高温、热浪、干旱, 极端低温、寒潮, 极端降雨、洪涝等, 具有极强的突发性和破坏性^[1]。全球大部分地区的作物产量变化与气候变化密切相关^[2-3], 极端气候事件将显著增加粮食不安全的风险^[4]。在全球气候变化的背景下, 中国平均

升温速度已高于全球平均水平^[5], 高温将带来更加频发的极端气候^[6]。近几十年来, 中国粮食生产受旱灾影响, 玉米和大豆产量下降了7.8%~11.6%, 受干旱和洪涝复合极端气候事件影响, 小麦产量下降了5.8%~6.1%, 水稻产量下降了4.5%~6.3%^[7]。自21世纪以来, 中国南部、西北部和东北部地区7天内连续发生极端气候事件的概率增加了5~10倍^[8],

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371324, 42001347, 41471343); 国家重点研发计划(2023YFD1900604, ZD20232320, 2017YFD0200101); 中国农业大学高水平团队建设项目

作者简介: 许航, 硕士研究生, 研究方向为农业环境效应, 电子信箱: hangx0917@163.com; 刘磊(通信作者), 教授, 研究方向为农业环境效应, 电子信箱: liuleigeo@lzu.edu.cn; 刘学军(共同通信作者), 教授, 研究方向为碳氮循环与全球变化, 电子信箱: liu310@cau.edu.cn

引用格式: 许航, 刘盛, 刘磊, 等. 极端气候对中国粮食生产的影响及其应对措施[J]. 科技导报, 2024, 42(16): 82-90;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01100

在全球升温 1.5℃ 的背景下,百年一遇的日最高气温和夜最低气温事件的风险预计将增加 14.4 倍和 31.4 倍^[9]。预计极端气候事件在中国的发生频率将越来越高,危及粮食安全计划。极端气候将引发农业资源显著变化,中国作为全球重要的粮食生产和进口国,国内粮食产量波动和农产品贸易政策调整都将对全球粮食贸易产生重大影响^[10]。全球变暖导致的气候变化和种植条件的改变,使中国农业部门面临着严峻的挑战,如何有效应对极端气候事件将成为未来中国粮食生产的关键问题之一。

1 极端气候事件对我国粮食生产的影响

受全球气候变暖和厄尔尼诺影响,北半球大部分地区遭遇高温热浪,多地高温纪录被刷新。2023 年夏季,中国华北、黄淮地区出现达到或超过极端高温阈值情况,部分地区甚至突破了历史极值,仅 6 月份中央气象台发布了超 40 次高温预警,北京最高气温达到 41.8℃,新疆吐鲁番高达 52.2℃^[11]。据统计,夏季全国耕地受旱面积达 2082 万亩(1 亩=0.0667 公顷。为尊重原始统计数据,本文“亩”未换算为“公顷”)^[12],持续高温给农作物生长发育带来挑战,导致产量减少、作物早熟,增加了对害虫和疾病的敏感性^[13-14]。“厄尔尼诺”改变了东亚夏季风的强度和路径,与京津冀和东北地区出现的暴雨密切相关^[15],导致极端天气的频次更多、范围更广、强度更大、不可预见性更强。同年受台风“杜苏芮”影响,河北省出现极端降水天气过程,石家庄、邢台、保定等 9 个区市和雄安新区发生洪涝灾害,此次强降雨造成河北省 87 个县 54 万人受灾,北方大面积农田遭受洪水淹没,造成小麦、玉米、水稻产量大幅下降,约有 400~500 万 t 玉米(占中国玉米年产量的 2%)受到损害^[16-17]。据《2023 年中国气候公报》统计,2023 年全国平均气温达到 10.71℃,为 1951 年以来历史最高;全国共出现 37 次区域性暴雨过程,55 个国家气象站日降水量突破历史极值;33 次区域性强对流天气过程和 33 次冷空气过程(8 次达到寒潮级别)^[18]。极端天气表现出破坏性强、反常性

强的特点,非典型的极端天气在时空尺度上接连发生打破了季风气候的规律性^[19]。同时,极端天气呈现旱涝急转、冷暖急转等异常现象,极端复合气候事件增多^[19]。2023 年 6 月 1 日—7 月 28 日,华北大部分地区降水偏少,华北东部和南部经历高温天气;但是,7 月 29 日—8 月 1 日,华北大部分地区出现历史罕见的强降水过程,其中最大累计降水量达到 1003 mm(河北邢台临城县),降雨面积超过 17 万 km²^[19]。2023 年全国夏粮播种面积较上年增加 118 万亩(+0.3%),但全国夏粮总产量减少 25.5 亿斤(-0.9%),其中小麦播种面积较上年增加 146 万亩(+0.4%),产量减少 24.5 亿斤(-0.9%)^[20]。

应对极端天气,各地各部门采取措施,积极行动,防灾减灾。农业农村部、水利部、应急管理部、中国气象局等四部门联合印发通知部署农业防灾减灾工作,明确在保障防洪安全的前提下,统筹做好蓄水保水,积极储备抗旱水源,强化抗旱水源统一调度和灌区灌溉排水管理,因地制宜采取应急调水、打井取水等措施,保障农业灌溉用水^[21]。由于北方降雨有限且地表水资源匮乏,地下水灌溉在抗击干旱方面变得越来越重要。河南安阳滑县 6 月连续出现的高温天气影响 126 万多亩玉米生长,为及时补水,农机专员采用无人机给连片的玉米喷施抗旱保水剂或叶面肥,有助于降温增湿并为玉米叶片提供必需的水分养分;在江西省上饶市鄱阳县,四十里街镇太公岭调水站十台机组开机调水,有效保障该镇 4 万余亩晚稻等农作物防旱抗旱用水^[22]。针对可能出现的旱情,各地区组织各方及早做好农灌渠道修缮清淤,改善引水条件、确保引水畅通。在各方的共同努力下,除个别受干旱影响的地区外,中国大部分地区的农作物生长速度与往年相当。在国家层面,中国制定了灾后恢复计划,确保粮食安全,帮助受灾地区恢复农业生产,并加大资金和政策支持。财政部和水利部已向受灾地区拨款超过 20 亿元用于补偿受灾农田、房屋以及农用机械损失,努力排干低洼地区积水,鼓励农民种植短周期作物以保证秋收^[23-24]。中国政府还发起了全国性减少食物浪费运动,减少大豆和玉米在饲料中使用,以降低对粮食和饲料谷物的需求^[25]。此

外,通过多元化进口粮食种类、开辟新的供应路线和加强国际合作等方式增强外部粮食供应以保障国内的粮食供应安全。

2 中国极端气候事件频发下的应对措施

频繁发生的极端气候事件对中国的粮食生产构成了严重的威胁,直接影响农民生计,威胁社会稳定。为提高农业系统抵御极端气候的能力,我们

提出了以下应对措施:实施农业布局的战略性调整、研发新抗性新品种的高产作物、兴建农田水利工程,推广水资源管理和高效灌溉技术、关注土壤质量和土壤保肥保水能力、建立健全农业政策,注重生态环境的保护与恢复、发展和完善农业金融服务以及研发农业灾害预警系统(图1)。通过这些措施,以应对气候变化对农业生产带来的挑战,为未来的粮食安全和农业可持续发展提供科学而有效的指导。

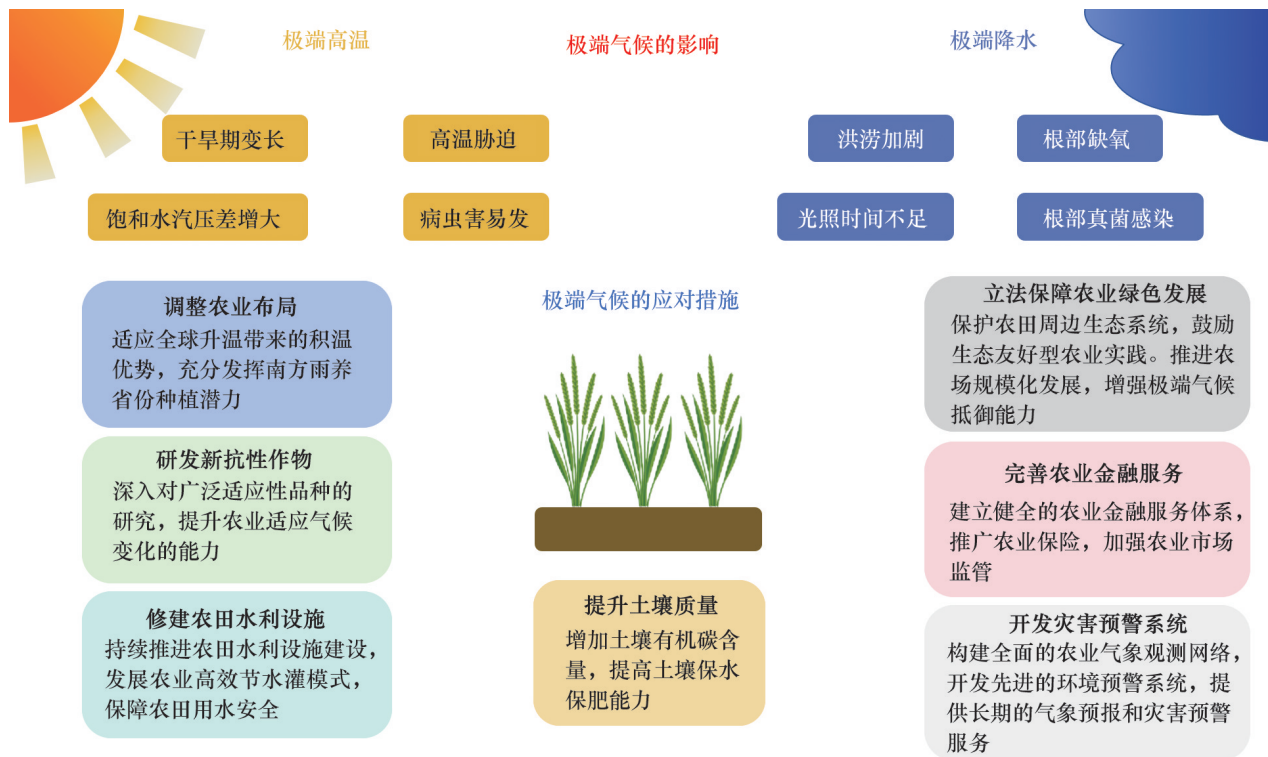


图1 极端气候农业生产的影响与应对措施

2.1 调整全国农业布局,适应国内气候变化

中国北方地区生产全国约60%的粮食,但只拥有24%的淡水资源,始终面临着水资源匮乏的问题,河南省、山东省和河北省的地表水资源仅占全国地表水资源的4%,却生产了中国24%的粮食,生产压力巨大,对极端干旱事件较为敏感。此外,随着中国北方灌溉面积的扩大,过度开采导致的地下水水位下降将会加剧干旱,对环境产生不利影

响。这种过度依赖地下水灌溉的农业模式无法支撑中国农业的未来发展需求。

中国目前的种植制度仍以热量为主导,随着气候变暖和积温增加,丰富的热量资源将导致种植北界向北移动,二熟制和三熟制的面积将会扩大^[26],华南地区三熟制北界将从长江流域移动至黄河流域^[27]。在这个趋势下,长江中下游地区的种植模式可以从一年一熟变成一年二熟,粮食单产平均有望

增加54%至106%,如果由一年二熟变成一年三熟,粮食单产平均有望增加27%至58%^[26]。在未来平均温度上升2℃的背景下,一熟区域面积将从62.3%减小至39.2%,三熟制区域面积将由13.5%扩大到35.9%,三熟制地区将向北移动500 km^[28-29]。对于南方满足种植双季稻的地区应利用气候变暖带来的升温优势,大力推广种植双季稻和再生稻以提高全国水稻产量。充分利用升温趋势,有望在一定程度上缓解中国北方粮食生产与水资源短缺的矛盾,并发挥南方水汽充足的天然条件。

2.2 研发新抗性新品种作物,适应极端气候

通过培育和推广能够适应气候变化的新品种作物,深入对抗旱、抗涝、抗病虫害等特性作物种类的研究,提升农业适应气候变化的能力。传统育种技术使得作物产量大幅增长,并提高了对病虫害以及非生物胁迫的耐受性^[30-31]。据估计,到21世纪末全球39%(SSP5-8.5)的农田可能需要新的作物品种以避免气候变化造成的产量损失^[32],但开发新品种作物的时间和成本阻碍了粮食生产对气候变化的响应^[33]。尽管基因知识的不断丰富和基因编辑技术的不断进步使得生物育种有所突破,但育种工作者仍面临遗传基础狭窄和全球气候变化不确定性带来的挑战^[32]。育种工作通常拥有多个目标,气候变化已将抗逆性育种置于重中之重。但是,由于对未来极端气候事件的发生和影响程度难以预测^[34],无法开展目标明确的针对性育种。解决这个问题一个实用方案是根据给定种植系统中预期的最恶劣天气情况来确定植物所需的适应性,开发具有广泛适应性的品种,使植物能够承受在同一区域或同一年内发生的干旱、洪水和其他可能极端气候事件^[35]。这种广泛适应性的育种计划与当前狭窄遗传背景的育种计划形成了鲜明对比。在未来气候多变的背景下,需要国家加大对于作物育种、选种工作的支持,研发出更多种类、更多特性的新品种作物。组织各地区高校、科研院所和农业企业进行科研交流和成果互惠,加快农业科技进步和技术迭代更新,构建创新、多元的农业科研环境。

2.3 完善农田水利设施建设,保障农田用水安全

完善农田水利建设是防范极端干旱和洪涝灾

害的有效途径。目前部分地区农田水利设施仍存在配套设施不完善、数量不充分,用水不科学、不高效等问题,受经济条件等因素限制,部分地区的农田水利基础无法抵御极端气候,一旦遇到干旱或洪涝灾害,将无法及时灌溉或排水。根据《2023年水利乡村振兴工作要点》要求:实施水旱灾害防御基础设施建设,强化洪水调蓄能力建设,加快蓄滞洪区建设与布局优化调整,保障区域防洪安全,实施大中型灌区续建配套与现代化改造,开展骨干灌排工程设施除险加固、配套达标,推动优先将灌区建成高标准农田^[36]。截至2023年9月,中国已建成耕地灌溉面积10.55亿亩,占全国耕地面积的55%,生产了全国77%的粮食和90%以上的经济作物,农田水利建设稳步提升^[37]。全国在农田水利建设方面已取得了显著成就,农田水利硬件设施建设逐步完善,但目前仍存在需要排队几天才能轮上抽水浇地的局面^[38]。未来应持续推进农田水利设施建设,提高工程标准,保障农田用水排水安全,在提升农田水利设施建设的同时,也应配套节水设施建设,实施科学的保水用水管理措施,采用农业高效节水灌溉模式。基于当地水资源分布特征和用水特点制定科学的农业用水方式和公平高效的水资源分配策略,协调好每一户农民用水。

2.4 提升土壤质量,抵御极端气候

土壤中的有机碳含量占陆地生态系统碳含量的60%以上^[39],是陆地生态系统中最大的有机碳库^[40],土壤有机碳含量的变化显著影响着大气中CO₂的变化^[41-42],对气候变化有着重要影响。此外,土壤有机碳是土壤质量的核心,是衡量土壤肥力的重要指标,影响着作物的发育和健康^[43]。增加土壤有机碳对于应对极端气候至关重要^[44]:(1)提高土壤肥力和生产力,增加作物产量。将全球土壤有机碳提高到最优阈值,水稻、玉米、小麦全球三大粮食作物将增加1.2亿t产量,相当于全球三大粮食作物产量的4.3%,可以为6.4亿人提供卡路里需求,有望解决全球86%的粮食短缺问题^[43]。同时中国农田土壤固碳增产有着巨大理论潜力,将中国的热点区域(土壤固碳增产效应前25%的地区)的土壤有机碳提高到最优阈值,将增产1200万t玉米、1400

万 t 小麦和 500 万 t 水稻, 约占粮食总产量的 5.3%^[43]。(2) 提高土壤生物多样性。土壤生物多样性提高了土壤的恢复力, 即土壤在严重干扰后恢复的能力, 土壤有机碳的数量和质量是决定土壤生物多样性的重要因素, 为土壤微生物提供着必需的能量和食物, 反过来土壤微生物能够通过分解腐殖质促进土壤有机碳的形成^[45]。(3) 提高土壤有机碳的数量和质量可以改善土壤结构稳定性、保水能力、孔隙度和对水的利用效率, 提高对干旱、热浪和气候突变的耐受性^[46-48]。研究表明, 在高有机碳含量的情况下, 所有类型土壤的保水性均有所增加, 沙质和粉质土壤的增幅最大^[48]。秸秆还田和免耕已被证实能够有效提升土壤有机碳含量, 通过秸秆还田能够有效提升土壤团聚体稳定性, 有利于增加土壤团聚体有机碳含量, 对于土壤颗粒有机碳含量提升具有促进作用^[49], 能够显著提升 16.1% 的土壤有机碳含量^[50]。同时, 耕作方式也会显著影响土壤有机碳含量, 相较于传统耕作方式, 免耕土壤的有机碳含量显著提升了 14.1%^[50], 秸秆还田与免耕结合可以更加有效地提升土壤有机碳含量 (4.1%~22.3%)^[51]。

2.5 立法保障农业绿色发展

中国作为全球氮肥生产与消耗大国, 其农业生产每年消耗氮肥占全球氮肥总量的 1/3^[52]。由于施肥方式不科学导致氮肥利用效率低下, 过量的氮肥造成了严重的土壤、水、大气污染。中国同时还是农药生产与消耗大国, 农药使用不科学、不合理导致过量的有毒农药残留, 威胁着生产生活安全。过去, 为养活日益增长的全国人口, 粮食生产模式存在不科学、不可持续等问题, 经济效益低下并对环境造成了严重压力。为此, 有必要通过立法手段保护农田周边生态系统, 淘汰高污染落后产能。发展绿色农业, 减少化肥、农药的使用量, 鼓励生态友好型农业实践和可持续的农业管理, 不仅能增强生态系统抵御干旱和洪水等自然灾害的能力, 还能恢复其生产力, 发挥生态系统的生态服务功能, 促进生态平衡和生物多样性^[53]。

中国耕地破碎化现象普遍存在, 人均耕地资源有限, 农业生产仍以小农为主^[54]。此外, 这些破碎

的农田只贡献了作物总产量的 8%, 却使用了 15% 的氮肥, 导致了 12% 的氮肥损失^[55]。氮肥大量施用导致的氧化亚氮等温室气体排放将会进一步加剧升温速度, 提高极端气候事件的发生概率^[6]。与现代规模化农场相比, 这些破碎的农田设施配套不全面, 生产经营方式不科学, 生产力和抵御风险的能力低下。规模化的农场在应对极端气候事件时拥有更加专业有效的解决方案和更加完善的灌溉、排水设施。同时, 更大规模的农场意味着能够获取更多的贷款等资金支持, 拥有更强的风险抵御能力。相较于小农生产, 扩大农场规模能够提高氮肥利用效率并降低农业污染。农场平均规模每增加 1%, 农田氨挥发排放量平均减少 0.07%^[56]。如果将中国破碎的农田搬迁形成规模化农场, 畜牧业、蔬菜和水果产量将分别增加 8%、3% 和 14%。活性氮和温室气体排放量将减少 16% 和 5%, 并带来每年 440 亿美元的净收益^[55]。

2.6 发展农业金融服务, 保障农民基本收入

《关于加快农业保险高质量发展的指导意见》提出了农业保险在现代农业体系中的重要地位, 农业保险作为分散农业生产经营风险的重要手段, 对推进现代农业发展、促进乡村产业振兴、改进农村社会治理、保障农民收益等具有重要作用^[57]。通过农业保险转移农业风险, 可以提高农民种植效率和积极性^[58], 并且在农业风险越高的地区对粮食生产安全水平的提升效果越明显^[59]。建立完善的农业金融服务体系是保障农民利益和农业稳定的关键。农民承担风险的能力往往较弱, 完善的农业金融服务体系可以为农民提供多样化的金融服务, 如贷款、担保、保险等, 提高农民的经济实力和风险抵抗能力。发展农业保险需要加强对农民的宣传教育, 强调极端气候对农业生产的影响。同时, 还应充分考虑保险定价问题。由于农民收入水平普遍较低, 高昂的保费可能会抑制农民购买农业保险的积极性, 进而削弱其在保障农民利益和农业稳定方面的作用。

在农业市场的监管方面, 防止农作物价格出现不合理波动, 确保市场价格的稳定和公平。保障紧急救济粮食及时发放, 维持作物绝收期间的物价稳

定和分配公平,同时适当增强外部粮食供应,多元化进口粮食种类,拓展新的粮食供应途径,与国际粮食生产大国建立稳定的合作关系,共同增强抵御极端气候的能力。

2.7 建立农业灾害预警系统,战略调度抗灾力量

人工智能的发展极大促进了精准气象预报服务^[60]。通过构建完善的农业气象观测网络,为农业生产活动提供长期的气象预报服务,这有助于农民开展农事活动,也为政府和相关机构决策提供了支持,使其能够提前规划和部署应对措施。开发先进的环境预警系统能够实时监测和评估气候变化对农业生产的影响,及时发现潜在的风险和隐患,科学应对极端气候事件,降低灾害损失。同时加强人工干预天气的能力和办法,通过现代科技手段改变天气条件,如人工增雨、人工消雨、人工消雹等,以缓解干旱、洪涝等极端气候对农业生产的影响。除硬件层面,各地还需要制定充分预案,开展相关演练,充分应对突发的极端气候事件。通过宏观战略调度和整合区域抢险抗灾力量,协同行动、共享人力和资源、加强区域合作和联合应对极端气候事件。

3 结论

《“十四五”全国种植业发展规划》(以下简称“发展规划”)为我国2020—2025年农业发展设定了明确的目标,为当前农业发展提供了有力指导^[61]。但该发展规划针对极端气候进行规划指导较少,对极端气候的重视程度仍显不足。我们提出的应对策略对该发展规划在应对极端气候方面提供了补充,为制定下一个发展规划提供了参考。

“十四五”发展规划仅描述了全国各区域目前主体的作物熟制情况,但未强调如何利用积温优势。全球升温带来热量资源将改变中国的作物熟制,建议在当前升温背景下尝试新的作物熟制以应对极端气候事件。发展规划针对不同地区和不同粮食作物,制定具体的育种要求。当前的育种计划仍以狭窄遗传背景为主,难以承受干旱、洪水等极端气候事件的冲击。未来应加强对广泛适应性品

种的研发,增强作物的抵御能力。发展规划强调了科技手段在农业发展中的应用,通过遥感、人工智能和大数据等技术,构建实时预警体系,提高自然灾害的预报能力和科学防灾减灾水平。然而,极端气候事件的产生往往具有突发性,各地还需要制定充分预案,开展相关演练,充分应对突发的极端气候事件。对于构建农业保险数据信息服务平台,发展规划强调提高理赔服务的效率,为农业生产提供风险保障。发展农业保险的重点是加强对农民的宣传教育,同时考虑好保险定价问题,以避免高昂保费限制农业保险发展。发展规划提及农业生产的集约化、组织化和规模化经营,推动肥料和农药的合理化施用。但未讨论集约化、组织化和规模化经营对于应对极端气候的优势。相比于传统小农业生产,规模化农场经营拥有更加完善的硬件设施、科学环保的生产方式,以及更强的抵御极端气候事件的能力。发展规划中建议推广秸秆还田和保护性耕作,但未考虑推广秸秆还田和保护性耕作对应对极端气候的积极影响,土壤直接影响着作物的健康和产量。提高土壤有机碳含量能够增强作物抵抗极端气候的能力,提高产量。发展规划中提到要进一步提高农田高效节水灌溉面积,以实现农业的可持续发展。目前全国农田水利硬件设施配套逐渐完善,但如何妥善分配好这些农田水利设施仍是一个关键问题。面对用水心切的农民,如何保证已建成的农田水利设施惠及每一户受灾农民仍需要制定公平高效的水资源分配策略。

气候变化已对中国农业生产造成了深刻影响,切合实际的解决方案显得尤为迫切^[62]。中国粮食生产未来的核心任务在于提升长期抵御多种灾害的能力,制定更为完善的极端气候的农业应对战略,以减轻极端气候对作物产量的影响,确保粮食安全。中国应当持续推进作物对极端气候事件的响应机制研究,提供持续的资金支持和政策引导,促进农学、生态学、遗传学等多学科的深度融合。通过深入探索作物对极端气候事件响应与适用机制,为农业生产提供更为精确和高效的科学指导。同时,加强科研机构与企业的紧密合作,加快科技研发和成果转化,创造出多样化且切实有效的人工

干预手段,有效应对气候变化给农业生产带来的复杂挑战。全球化的背景下,应积极寻求与其他国家和地区的合作,通过分享经验、交流技术、联合研究等方式,提升全球农业适应气候变化的能力,共同应对气候变化带来的挑战。

参考文献(References)

- [1] 杨扬, 常伟, 张兴东. 新疆极端气候时空变化及其与棉花生产关联研究[J/OL]. 中国农业资源与区划, 2024: 1-18. (2024-03-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240229.1413.014.html>.
- [2] Frieler K, Schauburger B, Arneth A, et al. Understanding the weather signal in national crop-yield variability[J]. *Earth's Future*, 2017, 5(6): 605-616.
- [3] 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.
- [4] Hasegawa T, Sakurai G, Fujimori S, et al. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs[J]. *Nature Food*, 2021, 2(8): 587-595.
- [5] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2022) [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [6] Wang X X, Jiang D B, Lang X M. Future extreme climate changes linked to global warming intensity[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(24): 1673-1680.
- [7] Shi W J, Wang M L, Liu Y T. Crop yield and production responses to climate disasters in China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141147.
- [8] Chen Y, Liao Z, Shi Y, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961-2018[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2021GL092549.
- [9] Shi C, Jiang Z H, Zhu L H, et al. Risks of temperature extremes over China under 1.5°C and 2°C global warming[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(3): 172-184.
- [10] Huang J K, Wei W, Cui Q, et al. The prospects for China's food security and imports: Will China starve the world via imports[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2933-2944.
- [11] 中国气象局. 气象预警[EB/OL]. [2024-05-24]. <https://weather.cma.cn/web/alarm/map.html>.
- [12] 国新办举行防汛抗旱工作情况国务院政策例行吹风会 [EB/OL]. (2023-07-25) [2024-05-06]. https://www.mem.gov.cn/xw/xwfbh/2023n7y25rxwfbh_5610.
- [13] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84-87.
- [14] Tian B L, Yu Z Z, Pei Y C, et al. Elevated temperature reduces wheat grain yield by increasing pests and decreasing soil mutualists[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(2): 466-475.
- [15] CGTN. China prepared for floods and drought as El Nino is here[EB/OL]. (2023-06-20) [2024-05-24]. <https://news.cgtn.com/news/2023-06-20/China-prepared-for-floods-and-drought-as-El-Nino-is-here-1kMV4o6u1JC/index.html>.
- [16] “杜苏芮”何以“千里北上”致河北罕见强降雨[EB/OL]. (2023-08-01) [2024-05-24]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2023/08-01/10053689.shtml>.
- [17] REUTERS. China floods hit rice, corn crops; trigger food inflation worries[EB/OL]. (2023-08-11) [2024-05-24]. <https://www.reuters.com/world/china/china-floods-hit-rice-corn-crops-trigger-food-inflation-worries-2023-08-11>.
- [18] 中国气象局. 2023 中国气候公报[EB/OL]. (2024-02-23) [2024-05-24]. https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202402/t20240223_6084527.html.
- [19] 2023 年气候变化绿皮书亮点速览: 积极稳妥推进碳达峰碳中和需凝聚共识形成合力 [EB/OL]. (2023-12-29) [2024-05-24]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqkj/2011xkjdt/202312/t20231229_5984295.html.
- [20] 国家统计局关于 2023 年夏粮产量数据的公告[EB/OL]. (2023-07-15) [2024-05-24]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202307/t20230715_1941239.html.
- [21] 农业农村部部署做好当前农机防灾减灾救灾工作[EB/OL]. (2023-07-27) [2024-05-24]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202307/t20230727_6433064.htm.
- [22] 邱海峰. 粮食生产如何应对今夏“大烤”[N]. 人民日报海外版, 2023-07-27(4).
- [23] 财政部、水利部紧急下达 15 亿元水利救灾资金支持受灾地区做好水利水毁设施修复工作[EB/OL]. (2023-08-10) [2024-05-24]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6897698.htm.
- [24] 财政部、水利部再次预拨 5 亿元支持国家蓄滞洪区受灾居民尽快恢复正常生产生活秩序[EB/OL]. (2023-08-21) [2024-05-24]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202308/content_6899263.htm.
- [25] East Asia Forum. Climate change threatens China's rice bowl[EB/OL]. (2023-08-08) [2024-05-24]. <https://inter>

- national.thenewslens.com/article/186459.
- [26] 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.
- [27] 胡延斌, 肖国举, 李永平. 气候带北移及其对中国作物种植制度的影响研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 269-274.
- [28] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [29] 吴志祥, 周兆德. 气候变化对我国农业生产的影响及对策[J]. 华南热带农业大学学报, 2004(2): 7-11.
- [30] Snowden R J, Wittkop B, Chen T W, et al. Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding[J]. TAG Theoretical and Applied Genetics Theoretische Und Angewandte Genetik, 2021, 134(6): 1613-1623.
- [31] Galluzzi G, Seyoum A, Halewood M, et al. The role of genetic resources in breeding for climate change: The case of public breeding programmes in eighteen developing countries[J]. Plants, 2020, 9(9): 1129.
- [32] Zabel F, Müller C, Elliott J, et al. Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties[J]. Global Change Biology, 2021, 27(16): 3870-3882.
- [33] Lenaerts B, Collard B C Y, Demont M. Review: Improving global food security through accelerated plant breeding[J]. Plant Science, 2019, 287: 110207.
- [34] Whitfield S, Chapman S, Mahop M T, et al. Exploring assumptions in crop breeding for climate resilience: Opportunities and principles for integrating climate model projections[J]. Climatic Change, 2021, 164(3): 38.
- [35] Xiong W, Reynolds M, Xu Y B. Climate change challenges plant breeding[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2022, 70: 102308.
- [36] 水利部办公厅关于印发2023年水利乡村振兴工作要点的通知[EB/OL]. (2023-02-21) [2024-05-24]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/202302/t20230223_1646635.html.
- [37] 扎实推动新阶段水利高质量发展[EB/OL]. (2023-09-14) [2024-05-24]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202309/content_6903824.htm.
- [38] 高温干旱下的农民、农田与农作物[EB/OL]. (2023-07-16) [2024-05-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1771572834148152156&wfr=spider&for=pc>.
- [39] Scharpenseel H W, Pfeiffer E M. Carbon turnover in different climates and environments[M]//Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton: CRC Press, 2018: 577-590.
- [40] Salehi A, Fallah S, Sourki A A. Organic and inorganic fertilizer effect on soil CO₂ flux, microbial biomass, and growth of *Nigella sativa* L[J]. International Agrophysics, 2017, 31(1): 103-116.
- [41] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [42] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22(2): 151-184.
- [43] Ma Y Q, Woolf D, Fan M S, et al. Global crop production increase by soil organic carbon[J]. Nature Geoscience, 2023, 16: 1159-1165.
- [44] Lal R. Soil health and carbon management[J]. Food and Energy Security, 2016, 5(4): 212-222.
- [45] Laban P, Metternicht G, Davies J. Soil biodiversity and soil organic carbon: Keeping drylands alive[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2018.
- [46] Milne E, Banwart S A, Noellemeyer E, et al. Soil carbon, multiple benefits[J]. Environmental Development, 2015, 13: 35-38.
- [47] Fu Z H, Hu W, Beare M, et al. Land use effects on soil hydraulic properties and the contribution of soil organic carbon[J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: 126741.
- [48] Rawls W J, Pachepsky Y A, Ritchie J C, et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention[J]. Geoderma, 2003, 116(1/2): 61-76.
- [49] 刘晖, 吴红艳, 冯建, 等. 秸秆还田量对半干旱区褐土团聚体稳定性及有机碳组分的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 219-225.
- [50] 李扬, 张梦歌, 王震, 等. 耕作和秸秆还田对球囊霉素和土壤生态化学计量特征的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 118-123.
- [51] 蔡丽君, 张敬涛, 刘婧琦, 等. 长期免耕秸秆还田对寒地土壤有机碳及大豆产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(6): 189-192.
- [52] FAO. FAOSTAT Database-agriculture production[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [53] 朴英姬. 气候变化下的全球粮食安全: 传导机制与系统转型[J]. 世界农业, 2023(10): 16-26.
- [54] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363-366.

- [55] Deng O P, Ran J Y, Huang S, et al. Managing fragmented croplands for environmental and economic benefits in China[J]. *Nature Food*, 2024, 5(3): 230–240.
- [56] Wang C, Duan J K, Ren C C, et al. Ammonia emissions from croplands decrease with farm size in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(14): 9915–9923.
- [57] 关于印发《关于加快农业保险高质量发展的指导意见》的通知[EB/OL]. (2019–09–19) [2024–05–24]. https://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg201901/wg201909/202005/t20200507_3509097.htm.
- [58] 罗向明, 张伟, 丁继锋. 收入调节、粮食安全与欠发达地区农业保险补贴安排[J]. *农业经济问题*, 2011, 32(1): 18–23.
- [59] 华坚, 杨梦依. 乡村振兴背景下粮食主产区农业保险发展对粮食生产安全的影响[J]. *农林经济管理学报*, 2023, 22(5): 535–545.
- [60] Dewitte S, Cornelis J P, Müller R, et al. Artificial intelligence revolutionises weather forecast, climate monitoring and decadal prediction[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3209.
- [61] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《“十四五”全国种植业发展规划》的通知[EB/OL]. (2022–04–11) [2024–05–24]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2022/202202/202204/t20220401_6395092.htm.
- [62] Liu L, Xu H, Liu S, et al. China's response to extreme weather events must be long term[J]. *Nature Food*, 2023, 4(12): 1022–1023.

The impact of extreme climate on China's grain production and countermeasures

XU Hang^{1,2}, LIU Sheng², LIU Lei^{1,2*}, LIU Xuejun^{1*}

1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract With the intensified global warming trend, frequent extreme climatic events have an increasingly significant impact on China's grain production. In 2023, China's grain production was severely impacted by extreme climate, resulting in nationwide output reduction, posing a serious threat to food security. In response to the frequent occurrence of extreme weather, seven countermeasures are proposed: adjusting the national agricultural layout, conducting research and development on crop breeding, constructing agricultural water conservancy facilities, optimizing soil quality, legislating to ensure green agricultural development, promoting agricultural financial services, and establishing an agricultural disaster early warning system. By juxtaposing these measures with the objectives outlined in the 14th Five-Year Plan for National Planting Industry Development, this article provides reference for crafting strategies to response future extreme climatic events in China. The core task for China's future grain production is enhancing long-term capabilities against various disasters and advocating further attention to the challenges of climate change posed on future agricultural production, to ensure secure and stable grain production.

Keywords climate change; extreme climate; grain production ●



(责任编辑 赵庆圆)