

气候变化背景下的水资源管理与粮食安全保障

刘俊国^{1,2}, 刘明欢^{1,2}, 徐沙沙^{1,2}

(1. 华北水利水电大学黄河研究院, 450046, 郑州; 2. 河南省水圈与流域水安全重点实验室, 450046, 郑州)

摘要: 气候变化对全球水循环和粮食生产模式产生了深远影响, 从而增加了水资源管理和粮食安全的不确定性及挑战。分析了气候变化对降水、径流、蒸散发、土壤水及地下水等水循环要素的影响, 评估了温度上升、温室气体排放及极端天气事件对作物生长、产量以及粮食安全的潜在影响。针对上述挑战, 提出了包括推进国家水网建设、实施农业节水措施、减少农业排放及固碳、培育抗逆性强的作物品种和协同管理水-粮-能系统等应对策略, 并建议根据不同的气候模式和水资源管理条件进行差异化研究, 制定因地制宜的气候变化适应性策略。

关键词: 气候变化; 水资源管理; 粮食安全; 水安全

Water resource management and food security in the context of climate change//Liu Junguo, Liu Minghuan, Xu Shasha

Abstract: Climate change has profoundly impacted the global water cycle and food production patterns, increasing uncertainty and challenges in water resource management and food security. This paper analyzes the effects of climate change on various elements of the water cycle, including precipitation, runoff, evapotranspiration, soil moisture, and groundwater, and assesses the potential impacts of rising temperatures, greenhouse gas emissions, and extreme weather events on crop growth, yield, and food security. In response to these challenges, several strategies are proposed: advancing the construction of the national water network, implementing agricultural water-saving measures, reducing agricultural emissions and promoting carbon sequestration, cultivating crop varieties with high resilience, and managing the water-food-energy nexus in a coordinated manner. It is also recommended to conduct differentiated research based on various climate models and water resource management conditions to formulate climate-adaptive strategies tailored to local circumstances.

Keywords: climate change; water resource management; food security; water security

中图分类号: TV213.4+F316.11 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)17-0021-08

人类活动导致的气候变化对全球产生了深远影响。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告指出, 由于人类活动引发的温室气体排放, 与1850—1900年相比, 2011—2020年全球地表平均气温升高约1.1℃。报告还指出, 未来20年内全球平均

温度可能达到或超过1.5℃的增温。联合国秘书长古特雷斯在2023年7月描述全球气候变化趋势时表示, “全球变暖时代已经结束, 全球沸腾时代已经来临”。气候变化对水文循环和农业生产的影响已引起全球科学界的广泛关注。水资源和粮食作为保障人类基本生存的重要物质基础, 其安全是实现联合国2030年可持

收稿日期: 2024-08-15

作者简介: 刘俊国, 校长, 教授, 主要研究方向为水文学和水资源、生态修复、全球环境变化等。

基金项目: 国家自然科学基金(42361144001)。

续发展目标 (SDGs) 的核心。气候变化密切影响水资源保障和粮食安全,通过改变大气环流模式,进而影响降水、地表径流、蒸散发、地下水和土壤水的时空分布。此外,随着温度的上升、降水模式的变化以及温室气体浓度的上升,气候变化将显著影响粮食的生长和产量。极端天气事件的频率和强度增加也对作物生长和粮食生产构成了巨大威胁(见图1)。本文从降水、径流、蒸散发、地下水和土壤水等方面总结了气候变化对水循环要素的影响,分析了温度、温室气体排放和极端天气事件对粮食安全的影响,并进一步提出应对气候变化的措施,旨在提升国家水安全和粮食安全保障能力。

一、气候变化对水循环要素的影响

气候变化对降水、径流、蒸散发、地下水、冰川积雪、永久冻土及土壤水等水循环要素的时空分布特征产生显著影响。在全球变暖的背景下,客观理解这些水循环要素的响应特征是制定适应性水资源管理措施的先决条件。

1. 气候变化对降水和径流的影响

研究历史降水和径流变化的主要手段包括基于站点的数据统计分析和气候模型模拟。由于气候变化和人类活动的影响,全球的降雨模式和流域产流模式已经发生了显著变化。这些变化的主要特征包括极端事件频率的增加和强度的增强,加剧了流域的旱涝灾害。在城市中,极端暴雨事件的发生频率逐渐增加,城市降水的季节性变化加大,尤其是短时强降水给城市防洪系统带来更多挑战。然而,全球降水和径流变化的主要趋势呈现巨大的时空变异性,如我国西北部干旱区自2000年以后降水量明显增加,黄淮海流域等半湿润区的降水量却有所减少,研究者难以达成一致结论。

分析流域未来降水变化的主要方法是使用基于全

球气候模型(GCM)或区域气候模型(RCM)输出的动力降尺度或统计降尺度数据产品。模型预测的降水结果密切依赖于选用的大气环流模式和模型机理。由于单一的大气环流模式难以准确刻画特定区域的降水模式,因此,综合多个模型的输出结果并筛选最适合某一区域的模型成为当前最常用的预估方法。例如,研究者通过欧洲协同区域气候降尺度试验(EURO-CORDEX)的区域气候模型分析了欧洲的极端降水频率和均值的趋势变化,发现欧洲的极端降水频率在冬季上升尤为明显。

气候变化对河川径流的影响主要体现在年均值、极值和季节性三个方面。降水模式的变化直接影响了径流的循环模式。由于高强度、高密度的水资源开发与气候变化的复合效应,径流变化比降水呈现出更大的不确定性。研究者通常采用统计学方法(如经验统计模型和回归分析)、物理过程模型(如IPCC使用的全球气候模型)、遥感与地理信息系统结合的方法以及水文模型等预测未来径流变化。在高排放情景下,全球径流预估普遍呈现上升趋势,其中陆面过程和气候变化协同作用促进了径流量增加,陆面过程是全球径流量增加趋势的主导因素,而气候变化对径流量增加的贡献估计在19%~27%。此外,气温上升正在推动河流流量季节性的巨大变化。升温导致的早期积雪减少、冰川和永久冻土面积减少,会导致河流流量的季节性持续大幅下降。这对未来的气候缓解战略和适应规划提出了更大挑战。

2. 气候变化对蒸散发和土壤水的影响

全球陆地蒸散发量呈现上升趋势。作为连接地表和大气的关键纽带,蒸散发是水循环和能量循环的重要组成部分。区域乃至全球蒸散发主要估算方法包括模型模拟、遥感反演和地统计方法。多场地的涡度协方差观测系统显示,蒸散发量呈现持续上升趋势。据估算,全球陆地蒸散发1982—2011年的增加速率为 $0.66 \pm 0.38 \text{ mm/a}$,而在2001—2020年增加速率提高至 $1.19 \pm 0.31 \text{ mm/a}$ 。这一变化主要由温度上升和植被变绿(即叶面积指数LAI的增加)驱动。

全球平均土壤含水率的下降主要由大气蒸发能力增强和植被需水量的增加所驱动。土壤含水量不仅受到其本身质地和粒径组成的影响,还受到降水、温度、土地利用类型、植被、高程和潜在蒸散发等外在因素的影响,使得精确描述

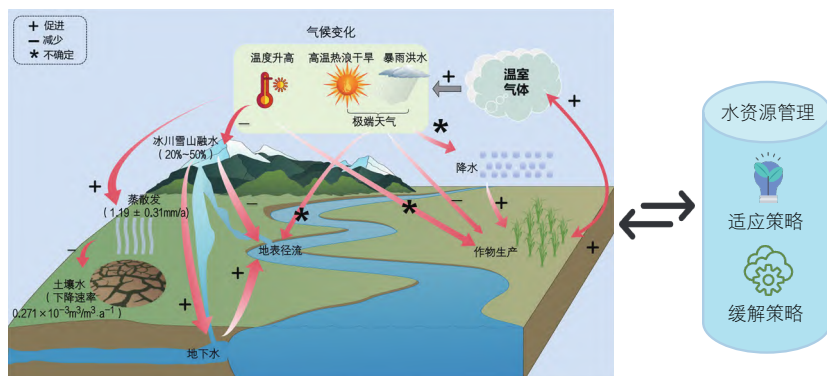


图1 水资源管理为提升气候变化下水安全和粮食安全保障能力提供解决方案

其时空分布特征极为困难。基于多源遥感数据、再分析数据和模型模拟而生成的土壤含水量数据产品,为分析过去和预测未来土壤含水率的变化趋势提供了重要依据。据估算,1979—2000年,全球土壤含水率的下降速率为 $0.046 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,而2001—2017年的下降速率加快至 $0.126 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,裸地的下降速度最为显著。在全球变暖背景下,土壤干燥化的趋势预计将进一步加剧,尤其是在干旱区域将更为明显。

3. 气候变化对地下水的影响

气候变化对地下水的影响主要体现在地下水补径排模式的改变上。气候变化改变了地下水的补给强度,目前全球平均地下水补给量估计为 $12\,000 \sim 17\,000 \text{ km}^3/\text{a}$ 。此外,气候变化伴随的全球变暖导致冰川融水对河流的贡献减少,预计到2100年,冰川量将比2015年减少20%~50%。随着变暖的持续,多年冻土的退化将通过土壤入渗补给地下水,增加地下水循环的深度,并引起地下水向河流排泄量的增大。未来地下水储量和水位的预估精度极大程度上依赖于未来降水和径流的模拟预估结果,而模型的不确定性也随着水文过程的概化不断传递。

气候变化还可能引起地下水水质的恶化。首先,海平面上升导致的海水入侵可能引起滨海地区地下水的咸化现象;其次,降水或径流极值的增大导致地表污染物有更高的概率淋洗进入地下水,从而污染水源。此外,气候变化还会引起潜水含水层地下水温度的上升,在中等排放路径下,2000—2100年的潜水含水层温度会上升 2.1°C ,进一步影响河流热状况、地下水依赖型生态系统(Groundwater-Dependent Ecosystem)、水生生物地球化学过程、地下水质量和地热潜力。由于地下水对气候变化的响应存在滞后性,因此应加强对地下水,尤其是生态脆弱区地下水的监测,以应对气候变化带来的潜在风险。

4. 气候变化下的水资源管理

气候变化正在加剧全球水资源的供需矛盾。降水和径流模式的变化增加了供水系统的不确定性。特别是在我国,地表水利用率已达到或超过生态预警线,而地下水超采现象也广泛存在于人口密集区。此外,农业种植面积的扩张、区域耗水量的增加、人口的快速增长、城市化进程和经济的快速发展都将进一步增加社会用水需求。在地表水和地下水开发利用接近极限的情况下,供水和用水的矛盾将更为明显。

气候变化还导致极端天气事件的频率和强度增

加,降雨变得更加集中,这为旱涝灾害防治带来更大挑战。改变的不仅是降水的均值和极值,还包括降水在年内的分配,短期内破纪录的强降水事件日益频繁。现有基于历史水文和气象资料制定的防洪排涝和抗旱标准及水利基础设施设计,难以适应日益复杂多变的气候变化环境。应定期更新观测资料,维护和提高工程标准,增强水利基础设施的抗灾能力。

此外,基于模型的预估结果存在极大不确定性。未来降水、径流、蒸散发、土壤水和地下水的预估均基于模型模拟,这些结果虽然从全球视角提供了未来趋势的指导,但在具体流域水资源管理中,需要根据各流域实际情况进一步优化模型输出,减少模拟误差和不确定性,以获得更准确的流域预估结果,因地制宜制定适应性策略。

二、气候变化对粮食安全的影响

气候变化对粮食安全的影响主要表现在温度上升、温室气体排放增加以及极端天气事件的频率和强度上升,这些因素均对作物的生长和产量造成显著影响(见图2)。

1. 温度上升对作物生长和产量的影响

温度升高对主要粮食作物如玉米、小麦和水稻的产量产生显著影响。虽然气候变暖可能通过提前种植时间和延后收获时间来延长作物的潜在生育期,但它也使得作物在较短时间内满足从萌芽到成熟的积温需求,从而缩短实际生育期并导致减产。作物减产的程度取决于温度升高是否超过作物的适宜生长温度。如果超过,将引起减产;如果低于适宜生长温度,适度增温可能提高产量。此外,气温升高还会增加作物耗水量,导致水分亏缺,这也是减产的一个重要因素。在全球尺度上,气温每升高 1°C ,玉米和小麦的产量预计分别减少3%~12%和3%~9%;对水稻而言,温度升高在中高纬度地区可能增产0.9%,而在低纬度地区则可能减产1.9%。

气候变暖对作物生长和产量的影响还与灌溉模式密切相关。在低纬度地区的雨养农业中,气候已接近或略超过作物的适宜生长温度,进一步的温度升高将加剧热胁迫,显著降低作物产量。而中高纬度的灌溉农业中,大气温度通常未超过作物生长的最佳温度极限,适度增温有助于提高产量。同时,这些地区的灌溉农业可以利用充足的灌溉资源来抵消气候变暖的负面效应。另一方面,随着气候变化,对气候敏感的病菌和害虫也逐渐

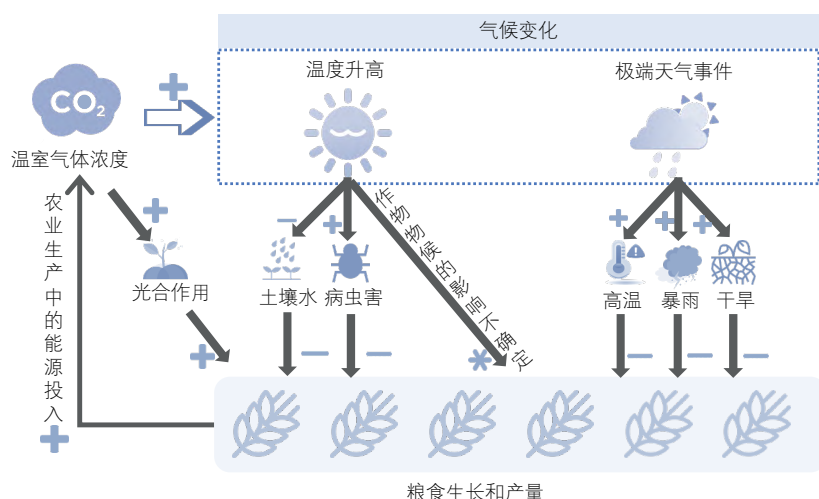


图2 气候变化对粮食安全造成显著影响

向高纬度迁移,这可能给粮食生产带来新的挑战。

2. 温室气体浓度增加与作物生长和产量的互馈影响

温室气体浓度的增加对作物产量具有复杂的影响,尤其是二氧化碳浓度对作物生长和产量影响最显著。二氧化碳浓度的增加会影响作物的光合作用代谢路径,从而影响产量,具体表现在C3作物(如春小麦)和C4作物(如玉米)上的反应不同。田间试验数据显示,当大气中的二氧化碳浓度升高时,作物叶片可以通过较少的气孔开放达到充足的光合作用需求,这会引起气孔导度的下降,从而降低作物的蒸腾率。同时,二氧化碳浓度升高也促使作物叶面积指数增加,这可能会增加作物的蒸腾,从而在一定程度上抵消气孔导度下降的影响。此外,二氧化碳浓度的升高可提高作物的光合利用效率并增加产量,因二氧化碳本身具有肥料效应,有助于促进作物生长和产量的提升。

为了保障食物供应,增加作物种植面积、化肥和粪肥的使用以及农业生产中能源的输入,都会增加温室气体排放,从而加剧温室气体浓度与作物生长之间的互馈作用。当前的研究通常在温室条件下进行,长期暴露于高二氧化碳浓度下的作物逐渐适应这些条件,导致其对高二氧化碳浓度的响应减弱。因此,实际的作物产量增量可能低于田间观测到的产量增量。

3. 极端天气事件对作物生长和产量的影响

极端天气事件,包括暴雨、高温和干旱,其发生频率和强度都在逐渐上升,对粮食安全构成的威胁越来越大。田间实验显示,高温胁迫可显著破坏作物如玉米和水稻的叶绿体结构和功能,从而降低光合作用效

率和光合产物的合成,减少保护酶活性,最终导致产量下降。高温还可能引起作物器官发育异常,进一步降低产量。此外,极端降水引发的洪水直接破坏农田,影响作物生长;连续的降水导致土壤含水率过饱和,从而减少土壤含氧量,引起作物根部的无氧呼吸,长期影响可能导致作物死亡,严重威胁粮食安全。研究预测显示,在21世纪末,中等与高排放场景下极端降雨事件的发生频率将比现在分别增加32%和55%,且在温度上升的背景下,极端降雨可能导致全球粮食产量降低约8%。

干旱对作物产量的影响主要体现为水分胁迫。在干旱条件下,当土壤含水率低于作物需水量时,将限制作物的正常生长,导致生长势衰退和产量减少。作物为了生存会调节气孔导度,减少水分蒸发,同时减少二氧化碳的摄入量,从而限制光合作用和有机质合成,进一步减少产量。研究发现,1964—2007年,干旱和极端高温事件导致全球谷物产量下降了9%~10%。基于1979—2015年我国历史产量数据,干旱事件导致的玉米、小麦和水稻产量分别下降7.8%、5.8%和4.5%~6.3%。

在气候变暖的背景下,不同类型的极端气候事件之间的关联性增强,呈现出正反馈的耦合放大效应,形成复合极端事件,这对粮食安全造成了更大威胁。

三、气候变化应对措施

1. 稳健推进国家水网工程,保障供用水安全和粮食安全

我国北方水资源紧缺,但粮食生产的重心持续北移。北方的粮食产量占全国总产量的比重从2000年的36.7%增加至2020年的63.3%。随之而来的是北方地区粮食生产用水的供需矛盾日益突出。国家水网工程作为解决我国水资源时空分布不均和保障国家水安全及粮食安全的关键举措,发挥了重要作用。跨区域调水工程显著改善了受水区的生态环境,确保了受水区的供用水安全。面对未来气候变化可能带来的水循环要素时空分布变化,国家水网工程的运行和维护面临巨大的不确定性。因此,如何有效减少区域水量转移对区域水循环和生态环境的负面影响,以及如何高

效运营国家水网工程,将成为未来研究的重点。

2. 持续推进农业节水,提高农业用水效率

农业节水是减少用水量、缓解用水矛盾的关键策略。随着人口增长和相应粮食需求的上升,水资源的竞争和供需矛盾将日益激烈。全球变暖加剧了作物耗水的不确定性,对农业生产构成了巨大挑战。在极端气候事件如高温和干旱情况下,农业灌溉是一种有效的应对手段,而充足的灌溉水供应是实现这一目标的基础条件。我国农业用水量大且效率较低。《中国水资源公报》显示,2023年农业用水为3672.4亿 m^3 ,占用水总量的62.2%。近十年间,我国灌溉水利用系数从0.530提升至0.576,尽管取得了一定进步,但与发达国家相比仍有不小的差距。因此,持续推进农业节水,减少农业用水总量并提高用水效率,是应对未来农业用水缺口的有效策略。

3. 推动农业减排固碳,助力“双碳”目标达成

农业减排固碳是应对气候变化的有效策略。作物的光合作用和土壤固碳是农田生态系统的主要碳汇来源,而灌溉、化肥、农药使用、能源投入和农艺管理措施则构成主要的碳排放源。根据研究,2019年我国三大粮食作物的固碳量和碳排放量分别达到42 790.46万t和7967.69万t。目前,高化肥施用量和低化肥利用效率是导致农田生态系统碳排放居高不下的主要原因。另一方面,未来剧增的粮食需求将使化肥尤其是氮肥的施用量显著上升。到21世纪中叶,在高变暖气候情景下(RCP8.5),全球潜在的平均小麦产量需求将增加52%,肥料施用量比目前增加4倍,这将不可避免地扩大小麦等谷物生产对碳排放和碳达标的影响。为助力实现“双碳”目标,未来应采取措施削减化肥施用量,调整高碳排放作物的种植结构与轮作模式,并提高农业管理技术水平。这些措施不仅能有效减少农业碳排放,还能增强农田生态系统的固碳能力,进一步促进农业的可持续发展。

4. 培育新作物品种,提高作物抗逆性

在气候变暖背景下,随着大气温度逐渐超过作物的适宜生长温度,高温、热浪和干旱等极端天气事件对作物产量的负面影响日益加剧。作物育种主要包括自然选择育种和基因育种。在作物育种领域,研发筛选对二氧化碳浓度升高适应性更强、高温耐受性更强,且具有高抗病性、高抗菌性和高抗旱能力的品种,是应对未来变化的主要手段。运用分子育种技术、分子标记辅助育种技术以及常规育种方法培育(选育)出具有抗逆性的

基础作物品种,增强作物对高温干旱的抵抗能力。研究作物在高温、干旱等逆境条件下的生理和生化反应,了解抗逆性机制,以指导育种工作。部分研究者也借助现代基因编辑手段,识别出明显胁迫耐受性的基因或发现潜在基因作为靶向遗传修饰的基础,以提高作物的抗逆性。然而,大范围的基因编辑作物育种推广的安全性还有待进一步研究。通过多样化的种植模式,如间作、轮作等,也可以提高作物系统的整体抗逆性和生产力。此外,研究调研发现,单个作物在总作物面积系统的比例变化速率高于气候变化速率,因而灵活改变作物类型来适应不断变化的社会经济和环境条件也可能是适应气候变化的另一种选择,如我国北方的玉米经受洪灾死亡以后可适当补种豆类来减少生产力损失。实际应用中,也可调整农业措施应对气候变化可能带来的灾情。

5. 协同管理水-粮-能系统,助力社会持续发展

将水、粮食和能源视为一个相互关联的耦合系统(Nexus)并理解其相互作用,是解决水、粮食和能源安全问题的有效途径,为政策制定者、商业领袖、投资者、非政府组织和广大公众提供了解决全球资源安全问题的机会。然而,对于联系的全面应用仍存在一些挑战,缺乏系统的分析工具来有效地应用联系思维。

开发以整体方式评估协同效应和权衡的研究方法,并提供决策支持工具来解决这些问题,对于避免冲突、最小化投资风险以及最大化经济回报非常重要。协同效应和权衡不仅涉及关系中的货币价值,还涉及非货币价值,往往难以衡量其市场价值,例如水、环境和污染。为了全面评估水、能源和粮食部门之间的协同作用和权衡,需要建立综合模型,以探索各种联系维度与其他相关主题之间的相互依赖关系,如经济增长、贫困、生物多样性、可持续发展之间的相互依赖及其与全球安全的关系。然而,目前所应用的工具仍然主要局限于个别部门,不适合解开这些复杂的相互联系,特别是在高于地方规模的尺度上。

此外,连接边界很少与传统的管理单位或行政边界相一致。例如,河流流域、城市地区,甚至地缘政治划分。这种边界和管理单元的对齐为访问和协同有关连接维度之间的交叉信息带来了更多的困难。事实上,每个维度边界(水、粮食和能源)都有不同的领域,这使得描述和管理超出任何给定维度的控制和影响范围的相互作用都相当具有挑战性。

水-粮-能关联关系的价值在于认识到这三个方面的耦合性质,并特别关注其相互联系。水、能源和土


地等自然资源是有限的,人类对这些资源的需求应放在受到限制的背景下。促进这三个领域之间的协同和减少权衡是可持续发展的一个关键方面。

耦合系统与外部因素如何相互作用,以及耦合系统响应外部系统变化的动力学机制是当前耦合系统研究的科学难题。目前对于耦合系统中元素间相互作用及其对气候变化响应的研究还不够深入,主要原因在于缺乏耦合定量关系模拟模型和实用决策支持工具,还不能够解决耦合系统中不同子系统之间的相互依赖性以及“系统的系统”的综合性、适应性、复杂性和多尺度性质。

四、结论与展望

气候变化造成了水循环和粮食生产模式的显著变化,这为水资源管理和粮食安全带来了巨大的不确定性和挑战。一方面,气候变化和人类活动导致全球降雨模式和流域产流模式发生显著变化,极端事件(例如极端降水、高温、干旱等)的频率和强度增加。此外,气温上升导致的早期积雪减少、冰川和永久冻土面积减少,造成了河流流量的季节性巨大变化,给未来的气候缓解战略和适应规划带来更大挑战。温度上升增加了全球陆地蒸散发量,加剧了土壤干燥化的趋势。随着变暖的持续,多年冻土的退化将通过土壤入渗补给地下水,增强地下水的补给强度,并增加地下水向河流的排泄量。冰川融化和多年冻土退化也可能释放被冰封的细菌或病毒,引起地下水水质恶化。另一方面,温度升高会缩短主要粮食作物实际生育期并导致减产,也会使气候敏感的病菌和害虫逐渐向高纬度迁移。温室气体浓度的增加有助于提高作物的光合利用效率和产量,同时农业生产中的能源输入也会增加温室气体排放,加剧温室气体浓度与作物生长之间的互馈作用。与之相反,气候变化引起的极端天气事件对粮食生产构成了不可忽视的威胁,且复合极端事件对于这种后果也呈现出正反馈的耦合放大效应。

为应对这些挑战,推进国家水网工程、提高农业用水效率、推动农业减排固碳、培育抗逆性强的作物品种,以及将水、粮食和能源纳入统一的耦合系统管理,都是有效的措施。然而,水资源和粮食系统对气候变化的响应存在显著的时空差异,需要研究者根据不同的气候模式和水资源管理条件进行差异化研究,并制定因地制宜的气候变化适应性策略。

致谢:本研究得到国家自然科学基金委员会、河南省水圈与流域水安全重点实验室和河南省“水-粮-能-碳”协同治理外籍科学家工作室资助。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021—the physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M].Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 张宗勇,刘俊国,王凯,等.水-粮食-能源关联系统述评:文献计量及解析[J].科学通报,2020,65(16):1569-1581.
- [3] HOSSEINZADEHTALAEI P, TABARI H, WILLEMS P.Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity-duration-frequency curves over Europe[J].Journal of Hydrology, 2020, 590: 125249.
- [4] FENG B, ZHANG Y, BOURKE R.Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models[J].Natural Hazards, 2021, 106(1):613-627.
- [5] TAN X, WU X, HUANG Z, et al.Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions[J].Nature Communications, 2023, 14(1):2796.
- [6] YOOSEFDOOST I, KHASHEI S A, Tabari H, et al.Runoff Simulation Under Future Climate Change Conditions: Performance Comparison of Data-Mining Algorithms and Conceptual Models[J].Water Resources Management, 2022, 36(4):1191-1215.
- [7] DIMRI T, AHMAD S, SHARIF M.Time series analysis of climate variables using seasonal ARIMA approach[J].Journal of Earth System Science, 2020, 129(1):149.
- [8] MESHRAM S G, SHARMA S K, TIGNATH S.Application of remote sensing and geographical information system for generation of runoff curve number[J].Applied Water Science, 2017, 7(4):1773-1779.
- [9] FANTA S S, SIME C H.Performance assessment of SWAT and HEC-HMS model for runoff simulation

- of Toba watershed, Ethiopia[J].Sustainable Water Resources Management, 2022, 8(1):8.
- [10] MIAO C, WU Y, FAN X, et al.Projections of Global Land Runoff Changes and Their Uncertainty Characteristics During the 21st Century[J].Earth's Future, 2023, 11(4):3286.
- [11] MULLER O V, MCGUIRE P C, VIDALE P L, et al. River flow in the near future: a global perspective in the context of a high-emission climate change scenario[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(10): 2179–2201.
- [12] ZHOU S, YU B, LINTNER B R, et al.Projected increase in global runoff dominated by land surface changes[J].Nature Climate Change, 2023, 13(5): 442–449.
- [13] WANG H, LIU J, KLAAR M, et al. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality[J].Science, 2024, 383(6686):1009–1014.
- [14] HARMSSEN E W, MILLER N L, SCHLEGEL N J, et al.Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico[J].Agricultural Water Management, 2009, 96(7):1085–1095.
- [15] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al.Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J].Nature, 2010, 467(7318):951–954.
- [16] USOWICZ B, LIPIEC J, ŁUKOWSKI M, et al.Improvement of Spatial Interpolation of Precipitation Distribution Using Cokriging Incorporating Rain-Gauge and Satellite (SMOS) Soil Moisture Data[J].Remote Sensing, 2021, 13(5): 1039.
- [17] YANG Y, RODERICK M L, GUO H, et al. Evapotranspiration on a greening Earth[J].Nature Reviews Earth&Environment, 2023, 4(9):626–641.
- [18] DENG Y, WANG S, BAI X, et al.Variation trend of global soil moisture and its cause analysis[J]. Ecological Indicators, 2020, 110:105939.
- [19] ABEL C, HORION S, TAGESSON T, et al.The human-environment nexus and vegetation-rainfall sensitivity in tropical drylands[J].Nature Sustainability, 2021, 4(1):25–32.
- [20] KUANG X, LIU J, SCANLON B R, et al.The changing nature of groundwater in the global water cycle[J].Science, 2024, 383(6686):630.
- [21] EVANS S G, GE S, VOSS C I, et al.The Role of Frozen Soil in Groundwater Discharge Predictions for Warming Alpine Watersheds[J].Water Resources Research, 2018, 54(3):1599–1615.
- [22] JASECHKO S, PERRONE D, SEYBOLD H, et al.Groundwater level observations in 250 000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion[J].Nature Communications, 2020, 11(1): 3229.
- [23] WANG R, LIU Z, YAO Z, et al.Modeling the risk of nitrate leaching and nitrate runoff loss from intensive farmland in the Baiyangdian Basin of the North China Plain[J].Environmental Earth Sciences, 2014, 72(8):3143–3157.
- [24] BIGGS E M, BRUCE E, BPRUFF B, et al.Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods[J]. Environmental Science&Policy, 2015, 54:389–397.
- [25] DONG X, JIANG L, ZENG S, et al.Vulnerability of urban water infrastructures to climate change at city level[J].Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161:104918.
- [26] PIAO S, FANG J, ZHOU L, et al.Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J].Global change biology, 2006, 12(4): 672–685.
- [27] KHRIR A M S, ELBAROUDY A, AIAD M A, et al.Impacts of rising temperature, carbon dioxide concentration and sea level on wheat production in North Nile delta[J]. Science of the Total Environment, 201, 651:3161–3173.
- [28] LOBELL D B, FIELD C B.Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J].Environ Res Lett, 2007, 2:14002.
- [29] FAN X, ZHU D, SUN X, et al.Impacts of Extreme Temperature and Precipitation on Crops during the Growing Season in South Asia[J].Remote Sensing,

- 2022, 14(23):6093.
- [30] WANG J, MENDELSON R, DINAR A, et al. The impact of climate change on China's agriculture[J]. *Agricultural Economics*, 2009, 40(3):323–337.
- [31] CHALONER T M, GURR S J, BEBBER D P. Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8):710–715.
- [32] AINSWORTH E A, LONG S P. 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(1):27–49.
- [33] HE H, WU Z, LIU C, et al. An Elevated CO₂ Concentration Improves the Photosynthetic Efficiency and Grain Yield of Rice Plants but Concurrently Increases the Nitrogen Fertilizer[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(2):3377–3388.
- [34] REZAEI E E, WEBBER H, ASSENG S, et al. Climate change impacts on crop yields[J]. *Nature Reviews Earth&Environment*, 2023, 4(12):831–846.
- [35] LESK C, COFFEL E, WINTER J, et al. Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields[J]. *Nature Food*, 2021, 2(9):683–691.
- [36] HAN J, ZHANG Z, XU J, et al. Threat of low-frequency high-intensity floods to global cropland and crop yields[J/OL]. *Nature Sustainability*[2024-07-24]. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01375-x>.
- [37] THACKERAY C W, HALL A, NORRIS J, et al. Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(5):441–448.
- [38] FU J, JIANY, WANG X, et al. Extreme rainfall reduces one-twelfth of China's rice yield over the last two decades[J]. *Nature Food*, 2023, 4(5):416–426.
- [39] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584):84–87.
- [40] SHI W, WANG M, LIU Y. Crop yield and production responses to climate disasters in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750:141147.
- [41] LI MM, HUANG X, YAN D, et al. Coping with the concurrent heatwaves and ozone extremes in China under a warming climate[J/OL]. *Science Bulletin*[2024-08-10]. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.05.034>.
- [42] 康绍忠. 中国农业节水十年:成就、挑战及对策[J]. *中国水利*, 2024(10):1–9.
- [43] 李亚宁, 吴秀芹. 中国三大粮食作物耕地生态系统碳足迹分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(3):575–584.
- [44] MARTRE P, DUERI S, GUARIN J R, et al. Global needs for nitrogen fertilizer to improve wheat yield under climate change[J]. *Nature Plants*, 2024, 10(7):1–10.
- [45] WESTENG O T, BRYSTING A K. Crop adaptation to climate change in the semi-arid zone in Tanzania: the role of genetic resources and seed systems[J]. *Agriculture&Food Security*, 2014, 3:1–12.
- [46] EYSHI R E, GAISER T, SIEBERT S, et al. Adaptation of crop production to climate change by crop substitution[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(7):1155–1174.
- [47] LIU J, YANG H, CUDENNEC C, et al. Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus[J]. *Hydrological Sciences Journal* 2017, 62(11):1714–1720.
- [48] HOWELLS M, HERMANN S, WELSCH M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7):621–626.
- [49] PERRONE D, MURPHY J, HORNBERGER G M. Gaining Perspective on the Water–Energy Nexus at the Community Scale[J]. *Environmental Science&Technology*, 2011, 45(10):4228–4234.
- [50] LIU J, BRIDGET R. Food–energy–water nexus for multi-scale sustainable development[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154:104565.

责任编辑 熊 璠