



气候变化对农业地域系统的影响及其应对

刘彦随^{1,2*}, 赵雨^{1,3}, 李裕瑞²

1. 河南大学地理科学与工程学部, 郑州 450046

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3. 长安大学土地工程学院, 西安 710054

* 联系人, E-mail: liuys@igsnr.ac.cn

2024-10-31 收稿, 2025-01-17 修回, 2025-04-08 接受, 2025-04-18 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(42293271)资助

摘要 随着全球气温持续上升, 极端气候事件频繁发生, 气候系统变化的加剧正推动传统农业地域格局的转变, 致使农业地域系统面临前所未有的巨大挑战。气候变化重塑了地表环境过程与格局, 改变着农业地域特征与布局, 成为促进人地系统耦合与可持续发展的关键问题。应对气候变化带来的农业地域系统风险, 需要针对不同地域、不同尺度和不同阶段制定适宜的转型路径。农业地域系统的气候适应性转型研究要遵循气候变化的时空规律, 重点在于揭示农业-气候交互机理及其时空差异, 这是一个多目标协同的复杂过程与系统工程。本文基于对农业地域系统及其分异过程的科学探知, 从多要素与综合性、多尺度与差异性、多过程与动态性等三个维度梳理了气候变化对农业地域系统的影响。认为农业地域系统气候适应性转型需要综合变化模式与地域差异、推动全球合作到地方参与、做好短期应对与长期规划。未来研究需要深化农业地域系统认知, 研究气候-农业-经济-社会的空间交互作用机制; 健全风险综合评估体系, 探究预防保护-恢复提升-工程治理的分层应对模式; 聚焦农业新质生产力, 探明气候智慧型农业转型的途径和手段。

关键词 气候变化, 农业地域系统, 人地系统耦合, 气候适应, 农业转型

20世纪中叶以来, 以全球变暖为突出特征的气候系统变化正深刻重塑地球系统功能, 驱动全球人地关系发生重大调整。随着“前所未有”“千百年一遇”气象事件的频频发生, 气候极端化的趋势已经愈发明显^[1], 引发社会各界对气候-人类耦合过程的高度关注。农业作为地表人地系统耦合的关键载体, 正面临气候变化引发的系统性威胁, 其脆弱性与敏感性显著高于其他产业类型。尤其是在当今全球地缘政治风险上升的背景下^[2], 气候威胁通过农业生产系统的脆弱性, 向社会经济系统传导复合型风险, 迫使全球人地系统进入系统性重构新阶段。IPCC第六次评估报告(AR6)指出, 全球温升已经在不同程度上对全球的农业物候、农业产

量、农业格局等产生作用。《亚洲气候状况(2023)》指出, 亚洲变暖速度尤为突出, 近30年来的增温趋势几乎翻番, 加剧着极端天气事件的频率和严重程度, 使亚洲面临前所未有的农业风险和挑战。《国家适应气候变化战略2035》明确了中国农业面临复杂的气候变化状况, 如气象灾害增加、水资源供需矛盾突出、生物入侵增多等。随着全球气候系统加速异变, 常规季节性天气规律逐渐被打破, 旱涝交替、冷暖波动等极端天气事件频发, 对农业生产、生态系统和社会发展带来了巨大挑战。构建气候适应性农业系统, 增强气候韧性已成为亟待政府和学界协同破解的重大科学问题。

随着气候变化对农业系统的深刻影响, 农业地域

引用格式: 刘彦随, 赵雨, 李裕瑞. 气候变化对农业地域系统的影响及其应对. 科学通报

Liu Y, Zhao Y, Li Y. Impacts of climate change on agricultural areal systems and the mitigation strategies (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/TB-2024-1165

系统的风险性日益增强. 农业作为自然再生产过程与经济再生产交织的复合系统, 其地域分异本质上是自然要素与人文要素非线性耦合的结果, 这一过程通过物质能量循环与空间组织重构形成差异化农业地域格局^[3,4]. 农业地域系统因其敏感性和脆弱性的特征, 深受气温、降水、日照等诸多自然要素, 以及干旱、暴雨、冰雹、冷害等多种天气事件的直接和间接影响. 一方面, 平均气候状态变化直接影响作物的生长条件, 增加农业生产的不确定性. 积温带移动导致作物种植适宜区的动态变化, 影响着作物种植结构、熟制与种植方式^[5,6]; 降水变化直接对水资源利用产生影响, 进而改变灌溉制度和作物选择^[7,8]; 病虫害频率及严重程度增加又对农业生产带来了额外压力^[9]. 另一方面, 气候变率异常带来的极端天气直接冲击着农作物生长及其产量, 造成农业经济损失^[10]. 骤旱频率升高加速消耗土壤中的水分储备, 降水亏缺进一步加剧水分流失而导致减产^[11]; 极端降水引发农田洪涝, 破坏农田设施并损毁良田沃土; 冰雹和冷害等异常天气频率升高甚至对农作物造成毁灭性的冲击, 显著增加了农业生产成本及其经济社会风险.

面临多重复杂而严峻的挑战, 农业地域系统必须进行适应性转型, 以确保粮食安全和社会稳定. 农业地域系统的气候适应性转型是一个多目标协同的复杂过程和系统工程, 要遵循气候变化的时空规律和采取科学应对措施. 在农业作物选育方面, 耐旱、耐热、抗逆性强的品种能够适应不断变化的气候条件而保持产量和品质^[12]; 土壤改良方面, 改善土壤健康、增加有机质可以提高土壤保水能力和抵御极端天气的能力; 耕作技术方面, 节水灌溉技术、精准农业技术以及智慧农业系统可以提升区域有限水热资源的利用效率; 种植制度方面, 灵活的种植结构调整引导农业活动向更适宜的区域转移^[13]; 国际合作方面, 粮食贸易机制升级, 气候信息和实践案例共享, 探索共同应对跨国气候变化挑战方案^[14]. 这些致力于增强农业地域系统气候韧性的多方努力, 为应对气候变化提供了重要支撑.

气候变化对农业地域系统的影响具有明显的时空分异特征, 这就需要全球各地区注重因地制宜、因势利导的原则, 积极采取自相适应的转型应对策略. 实现气候变化共治、共享的系统目标, 重点在于揭示农业-气候交互机理及其区域差异. 因此, 本文基于现代人地系统科学理论, 着眼于农业地域系统的气候适应与科学应对, 系统梳理了气候变化对农业地域系统的深刻

影响, 深入探讨农业地域系统的气候适应性转型的科学路径.

1 农业与农业地域系统

农业是人类文明发展的基石, 是自然再生产与经济再生产过程的统一^[3]. 作为人类最早的生产活动之一, 农业为人类提供了最基本的衣食来源. 随着农业技术进步和生产力的提高, 农业剩余劳动力和产品增加, 商品交换和市场经济随之产生, 从而促进了手工业、商业和城市的兴起, 奠定了社会经济的基础. 在全球环境快速变化的时代背景下, 追求系统治理和公平转型逐渐成为农业可持续发展的核心目标. 现代人地关系和人地系统理论为农业生产的优化调控和适应发展提供了一种创新思路. 从人地关系的视角看, 农业生产可以视为地球表层一种基础而广泛的人地交互方式. 自然环境要素(本体系统)与社会经济要素(主体系统)在特定地域内耦合形成了独特的人地系统——农业地域系统. 系统内水、土、气、生、人等多要素的复杂结构及其作用模式差异, 促成了农业功能和农业格局的地域分异. 在现代人地系统理论框架下, 农业地域系统是按照一定区域多要素耦合原理及其分异规律而形成的具有特定农业功能和地域格局的复杂开放系统, 更强调其综合性、地域性和动态性的特点^[3,15,16]. 理解农业地域系统内各要素相互作用及其地带性、地域性、地方性分异规律, 是指导不同区域农业生产与农业区划的重要理论基础和决策依据.

具体来看, 农业地域系统的形成和发展既受到地形地貌、土壤类型、气候条件等自然环境要素的制约, 也受到人口结构、农业生产力水平、产业政策与市场需求等社会经济要素的影响(图1). 不同地区在农业生产要素、生产方式和功能上的差异, 致使农业发展在空间上呈现出明显的地域分异. 自工业文明以来, 全球农业正进入受信息化、智能化等影响的现代农业阶段. 人类通过技术革新不断提高农业生产率, 在不同尺度上塑造了新的农业景观, 改变了传统的农业地域格局, 加快了农业地域的分异过程, 并增强了农业系统的抗风险能力. 尽管技术进步和产业转型对农业地域系统分异的主导作用逐渐增强, 但自然环境变化对农业地域系统的强烈作用仍然毋庸置疑. 尤其是全球变暖驱动的气候模式变化, 通过影响水热平衡、生物生长繁育过程和种植适宜区等, 导致农业地域系统的要素、结构和功能发生明显变化, 对农业地域系统的分异产



图1 农业地域系统人地耦合及其分异

Figure 1 Human-earth coupling and its differentiation of agricultural areal system

生重要影响,使得农业生产面临的气候风险逐渐超过非气候风险^[17]。

在自然驱动力的持续影响下,农业地域系统不仅表现出不同的适应能力,还伴随着明显的地理格局变迁。气候变化通过重塑地表环境过程与格局,改变着农业地域特征与布局。秦岭-淮河亚热带北界的快速北移,致使中国传统的自然地理格局被打破,农业地域分异不断加剧,并带来了农业生产与区域布局、水土资源配置与粮食安全等极具挑战性的现实问题。应对气候变化对农业地域系统的影响,需要厘清系统关键要素的响应过程、交互效应及其复合风险,从而评估系统的适应能力和转型潜力。本文重点针对农业地域系统的要素响应、尺度差异和阶段特征进行归纳和总结,尝试探讨不同地域、不同尺度、不同阶段的农业气候适应性转型路径和应对策略。

2 气候变化对农业地域系统的影响

2.1 多要素与综合性

气候变化的影响几乎波及农业地域系统的全部要素,温度、降水以及大气状态的变化共同作用于不同的农业要素并产生不同的影响及结果(图2)。综合多要素可能面临的潜在气候风险,理解不同地域类型的主要威胁,对分类指导和科学决策具有重要参考价值。

(1) 作物产量影响。无论是平均气候变化,还是异常气候变率都将直接影响农作物产量^[18]。一些积极作用可能使得作物产量获得增益,例如CO₂等温室气体

(GHG)浓度升高对于部分作物的施肥效应可能被放大^[19],热量条件改善可能延长温带和寒带的作物生长期并加速作物发育,但政府和社会各界仍然担忧气候资源和农业灾害的不确定性对于作物产量的冲击^[20]。尤其是极端气候事件造成的灾害风险与产量威胁不仅加剧了难以预见的整体粮食损失^[10,21,22],更加大了小农家庭的生计脆弱性^[22,23]。Fu等人^[10]认为极端降雨和高温引起的减产效应使中国的水稻产量降低了8%。尽管产量损失的估计存在着不确定性,但大量观测数据和模型实验都在试图在验证这一效应^[24,25]。Ray等人^[26]在具有这种显著关系的地区发现32%~39%的玉米、水稻、小麦和大豆年际产量变化可以由气候变解释。田间情景试验的结果可能具有更强的说服力,Asseng等人^[27]的试验估计气温每进一步升高1℃,全球小麦产量将下降6%;Mourtzinis等人^[28]认为生长季温度每升高1℃,美国的大豆产量就会下降约2.4%;Hou等人^[29]的试验认为平均气温每增加1℃,中国的玉米籽粒将会减产5.8%。

(2) 病虫害风险。全球暖化导致的植物病原体感染风险增加、昆虫代谢和虫群活动增强、害虫越冬存活率提高可能加剧了全球作物的减产效应。Wang等人^[9]认为气候变化导致中国病虫害发生率每年上升约3%。Deutsch等人^[30]认为气温每上升1℃,病虫害造成的产量损失将增加10%~25%。

(3) 林业冲击。气候变化对林业系统造成的负面影响程度增大。木材作为全球重要的自然资源,自21世纪以来遭受野火损毁的面积至少超过1850万公顷^[31],而



图2 气候变化对农业地域系统的多要素威胁

Figure 2 The multifactorial threat of climate change to agricultural areal systems

日益严重的气候变化及其影响将显著增加这一趋势。Appelt等人^[32]的分析认为在气候变化加剧趋势下，东南亚国家的椰子、油棕和橡胶种植面积将会发生显著的结构调整，并强调了其对小农生计的严重威胁。

(4) 畜牧生产挑战。天然牧场能够使反刍动物利用直接消费价值有限的初级生产力为人类提供食物来源，并降低土地利用生产成本。然而天然牧草生长高度依赖于气候因素，降水变异性增加可能使得全球牧场的干旱风险升高^[33]，导致牧场面积萎缩。另外，热应激反应将带来畜禽采食量下降、增重率降低、繁殖性能降低等挑战。

(5) 水产渔业威胁。水产渔业作为不断增长的食物供给源，同样遭受着气候变化的直接或间接威胁^[34]，长期的温度胁迫可能会以降低生物量为结果的各种方式影响水产渔业生境与养殖生产力。冷水栖息地丧失、变温性鱼类死亡率升高、海洋酸性环境变异、陆内生物入侵风险升高都对水产渔业产生严重威胁^[35]。

(6) 土壤退化。降水和蒸发控制着土壤的水盐运动过程，气候变化则加剧了土壤水分的供需不平衡，导致积盐的可能性增加^[36]。伴随着全球旱地扩张^[37]和海平

面上升，干旱、半干旱和沿海农业区或将面临更加突出的盐渍化威胁^[38]。同时，气候变化也将导致中高纬度地区受到的更严重的荒漠化挑战^[19]。Ma等人^[39]的研究发现，从1980年到2019年，气候变暖可能导致全球土壤侵蚀加剧了2.1%。

(7) 作物迁移。气候变化导致的作物(潜在)迁移已经被大量研究证实^[5]。全球升温使得作物的适生区更可能向高纬度、高海拔扩展，尤其在雨养农业地区可能更加明显。中国不同种植制度界限持续北移、黄土高原双季种植适宜区扩展、东北平原水稻面积扩张^[6,40,41]都与气候变暖密切相关。尽管作物朝着农业气候条件改善的地区迁移会在一定程度上弥补整体粮食损失^[13]，但北方干旱地区可能面临更加严重的水资源权衡，并可能加剧作物种植的空间冲突^[42]。同时，作物分布格局变化意味着土地利用和农业结构转型的可能性增加，引起全球温室气体排放的变化^[5](既存在通过减少进口依赖的抑制过程，又存在农田扩张的碳源增加过程)，并间接影响着地区社会经济结构的调整和布局。

(8) 灌溉失衡。农业灌溉作为最大的淡水资源消耗

系统,必然受到气候变化的影响.由于降水模式的空间变异性,将直接导致灌溉需求在空间上发生变异.尤其是依赖地下水补给的农灌地区,这种供需关系将受到更为复杂的挑战. Liu等人^[43]的研究表明中国农业灌溉用水量可能会持续增加,特别是西北和华北区域.全国灌溉用水到2050年预计最高将增加17.1%,这将带来额外的经济成本.另外,降水变化导致灌溉增大的同时,也可能进一步影响灌溉基础设施和能源系统^[8].

(9) 社会经济发展.气候变化如何通过影响农业而进一步冲击社会和经济系统仍然是一个不确定性的话题.但可以肯定的是,这种影响已经通过一系列连锁反应发生.尽管全球经济正在快速地从传统的农业经济中转型,但仍然不可忽视农业在绝大多数发展中国家和新兴工业化国家中的重要地位.农业产量波动、生产成本上升和食物供应压力上涨可能加剧粮食市场波动,增加经济不确定性.农民既是农业系统的生产主体又是利益主体,尤其是对于小农家庭来说,气候风险造成的农民跨地区和跨部门的流动也成为普遍现象^[23].

从复杂系统看,农业生产可以概念化为一个复杂的关系网络,气候变化则通过直接或间接的方式改变这些交互过程的正负反馈机制(图3).简单来说,受广泛关注的作物生理过程往往不单单取决于相对主动变化的气候环境,更依赖于气候参与其他环境要素产生的共变效应^[44].同时,气候变化通过愈发复杂的人地关系,在不同时空尺度上与社会经济系统发生作用.随着

农业生产结构与经营方式的不断升级,农业生产对气候环境的反馈作用也得到了极高的重视^[45].可以认为,无论是从综合性或系统性的角度来看,还是从系统整体分解到局部过程,深入揭示气候变化与农业系统的其他成分之间的复杂因果关系仍是一项极具挑战性的工作.在普遍认可的气候变化背景下,农业系统面临的脆弱性风险仍然存在着高度的不确定性,或者说难以跨场景迁移,气候趋势也并非一致地朝着更具破坏性的方向发展^[17].仅仅考虑某一环境要素变化造成的农业风险而采取过激的或毫无目标的适应措施,可能并不能提高系统整体的抗风险能力,对单一气候胁迫有效的适应也可能并不适用于复合胁迫^[44],并带来额外的经济成本.因此,理解气候变化的综合性影响和地域性差异,有助于因地制宜地制定适应性农业调整策略,并减少因气候变化带来的区域不平等.

2.2 多尺度与差异性

考虑到农业系统复杂的要素组成和结构特征,气候-农业的交互过程在不同尺度上形成独特的反馈机制,并主要取决于农业地域类型,其通常呈现出明显的尺度效应和空间差异(图4).农业地域系统的风险可能因其在空间尺度上的多样性变化而异,并随着尺度的增加而愈发复杂.认识气候变化带来的多尺度农业地域系统风险,对于从全球到地方层面制定相应的气候适应性转型策略具有重要指导意义.

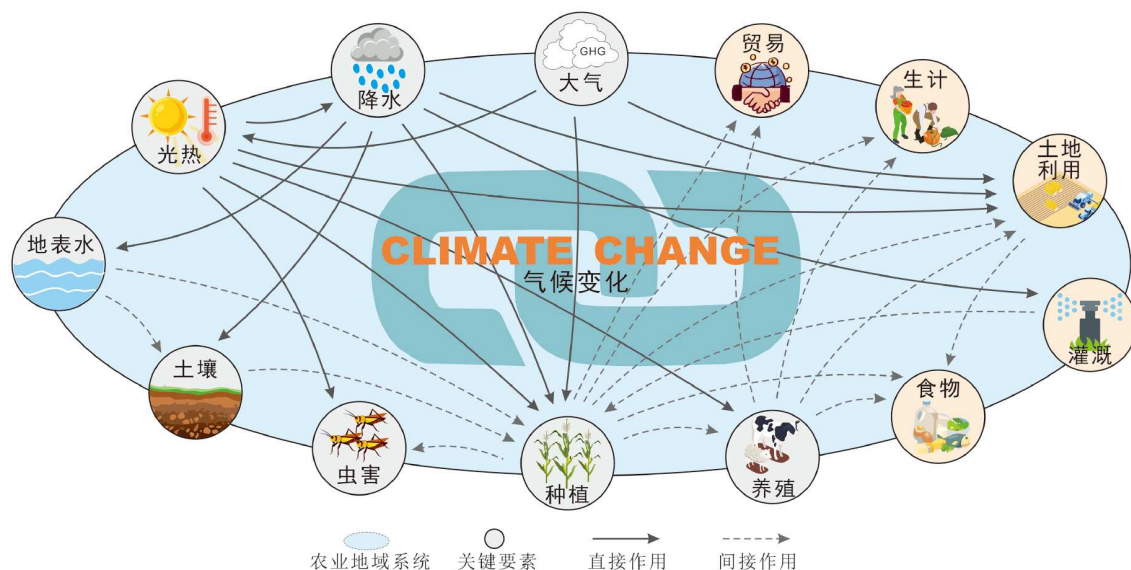


图3 气候变化与农业地域系统关键要素的复杂作用

Figure 3 The interactions between climate and other elements within agricultural areal system

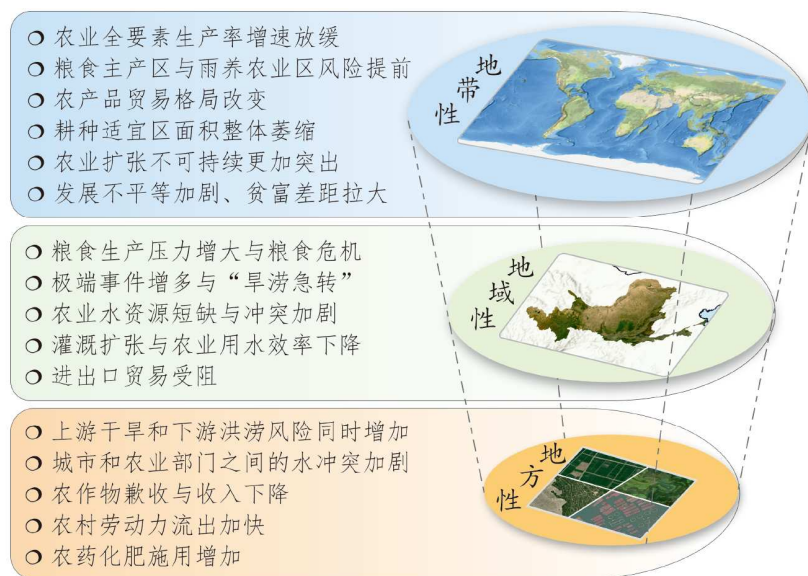


图4 气候变化在多尺度上的主要影响

Figure 4 The primary challenges of climate change across multiple scales

(1) 地带性作用. 温度升高、降水模式变化和极端天气频率增加影响着全球农业系统的生产力. 伴随着不断增长的全球人口变化, 食物危机加剧与饥饿风险上升, 无疑阻碍了可持续发展目标的实现进程^[46]. 尽管观测数据和模型预测表明, 北半球高纬度地区可能因变暖获得额外的农业机遇, 但全球整体农业生产力下降与气候变化的联系正在不断被夯实^[25]. 据估算, 自1961年以来人为气候变化已经使全球农业全要素生产力的增速减缓了约21%^[47]. Zhao等人^[18]的预测结果表明, 在没有适应措施的情况下, 1°C的变暖会导致全球主要作物产量下降3.1%~7.4%. Hu等人^[25]对全球101个气候-产量研究案例的荟萃分析也印证了这一趋势(玉米7.5%±5.3%、小麦6.0%±3.3%、大豆6.8%±5.9%、水稻1.2%±5.2%). 可以肯定的是这种影响存在明显空间差异, 在耕种适宜区面积萎缩的影响下^[48], 粮食主产区或许会更早地遭遇产量损失风险. 此外, 全球约60%的粮食生产来自雨养农业系统^[7,49], 意味着降水变化导致的绿水短缺将给这些地区带来不可忽视的粮食损失, 并因此增加蓝水的消耗(如灌溉)和农业扩张而远离可持续农业的目标^[46,50]. 同时, 全球目前约有30%的灌溉农田受到次生盐碱化的威胁^[51], 气候变化驱动下的灌溉扩张和海水入侵或许将加剧这一影响. 此外, 农民对抗气候风险而使用过多的化肥可能进一步加剧全球变暖, 从而陷入恶性循环的状态. 还有, 产量差距可能在

低收入国家和高收入国家间更加突出^[52], 且受制于全球农业系统适应能力的地域差异, 气候-农业互馈的影响可能会加剧全球不平等^[53], 扩大区域差距并带来更突出的极化趋向. 发达国家可以通过专项资金、技术研发以及国际合作等手段缓解气候变化带来的农业损失. 但对于发展中国家或经济落后的国家来说, 这些能力往往是有限的^[24]. 特别是农业基础设施薄弱、技术水平低、应对能力有限, 使他们容易受到更为严重的冲击而加剧农业损失和加大贫困发生率. 气候变化驱动的农业资源重新分配可能导致落后的地区需要承受更多的额外生产成本^[54], 相反, 发达的地方可能因更早地建立气候韧性而提高农业生产力. 同时, 伴随着不断变化的国际形势和全球地缘冲突, 气候变化带来的不平等性及其全球化影响可能会被进一步放大.

(2) 地域性作用. 中国作为世界上最大的发展中国家, 农业生产一直是国家经济建设和维系社会稳定的最基础、最重要的部门. 仅靠不到10%的耕地养活了全球近20%的人口, 意味着中国无论是过去还是未来都面临巨大的农业生产压力^[55]. 高温胁迫、农田旱涝、病虫害加剧、极端事件增多等无一不冲击着中国的农业系统. 气候暖干化、降水异常愈发明显, 罕见的“旱涝急转”致使华北地区的粮食生产在2023年遭受重创^[56]. 即使农业投入不断增加, 气候变化仍然会长期困扰中国粮食主产区的农业生产力. 中国92.23%的粮食

产量来自水稻、玉米、小麦(国家统计局2023年粮食产量公报),然而谷类作物因气候变化导致的减产已经被多项研究报道^[9,10,21]。尽管灌溉扩张可以缓解气候变化对粮食生产的不利影响,但其发生在水资源短缺地区却是普遍存在的问题^[43,57]。Xiang等人^[58]研究发现西北地区的灌溉扩张导致水资源利用效率下降,“高灌低产”窘境使得灌溉用水生产力仅为全国平均水平的15%。另外,粮食生产力下降以及粮价波动或许将导致国家贸易的明显变化,其中高温将对出口有强烈的负面影响^[59]。中国农业地域类型丰富,面临的气候风险可能更加复杂。相对于其他地区,东北地区的农业地域系统对气候变化的响应可能最为敏感,温升造成的作物迁移在暖干化的气候背景下会进一步强化该地区的水资源冲突,并导致产量下降^[40]。西北地区的气候模式可能会出现暖湿化倾向^[60],但并不代表农业水资源短缺的现状可以得到缓解,干旱甚至极端干旱可能仍然是农业系统面临的主要风险。气候异常背景下的黄土高原春夏连旱、秋雨连绵加剧了作物减产或绝收、农田损毁和作物裂果等农业多灾损失。华南地区则可能遭受更加频繁的极端气候事件,对粮食作物和经济作物带来极大的挑战。

(3) 地方性作用。气候变化对农业地域系统的影响在更小的尺度上仍然不可忽视。Wu等人^[61]认为降水强度的增加会导致河流上游严重干燥,土壤储水量、产水量和基流减少,而下游则增加。这种鲜明的差距意味着上游干旱和下游洪涝风险同时增加,威胁着地方的水安全和粮食安全。小流域由于降水过剩引发的洪涝风险还可能因为径流入侵而威胁到邻近流域。Flörke等人^[62]认为伴随着城市不断扩张,到2050年城市用水将增加80%,气候变化引发的水资源重新分配可能会加剧城市和农业部门之间的水冲突。干旱或热浪等极端气候事件直接导致农作物歉收,并威胁到农业生产者的生计状况^[22]。农业比较收益下降可能会促使农业产能下降,促进农村劳动力跨部门、跨地区流动。Wang等人^[23]的调查研究表明,干旱和暴雨冲击分别导致中国农村家庭平均减产8.4%和10.3%,使得家庭收入减少3.7%和4.2%,并分别造成1655万和1473万的劳动力流动。不仅如此,气候变化对于农村家庭的影响往往由其自身的适应能力决定,然而适应能力的地方差距可能会进一步加剧贫富差距。农户对于作物减产做出的回应也可能导致化肥、农药施用量增加^[14],不仅带来额外的农业生产成本,还可能造成土壤健康和环境问题。

2.3 多过程与动态性

气候变化对农业地域系统的影响不仅导致极端温度、旱涝等短期后果,更引发农业格局变迁等长期趋势。伴随着气候变化短期和长期的复杂交错过程,农业地域系统的响应速度和模式并非具有线性规律,而是一个不断改变的动态过程。短期与长期影响相互作用,形成了农业气候适应的全过程和动态性特征。这种特征决定了应对复杂气候变化的巨大挑战性。理解短期的气候威胁和长期的格局演变有助于制定及时的防治策略和长远的战略规划。

(1) 短期影响。气候变化通常以极端天气事件的方式对农业地域系统造成快速而严重的冲击。Chen等人^[17]的研究表明,尽管这种冲击可能正在下降(可能得益于农业生产管理和技术的改进),但其对农业系统的主导作用正在不断上升。Lesk等人^[44]综合了作物产量对于极端事件的快速响应过程,认为高温或干旱可以通过抑制光合作用的碳吸收、增加呼吸作用的碳损失和限制蒸腾作用来降低作物产量,而过度的水分胁迫使作物将更多的能量用于生存而非产量的增加。此外,伴随着极端事件更多地出现在同一生长期,意味着土壤侵蚀、洪涝雹灾、低温冻害等农业气象灾害可能导致农田环境遭受更加频繁的物理侵害,加剧农田系统的脆弱性,带来剧烈的产量波动。气温升高、湿度变化等因素会导致病虫害在短期内暴发,进一步威胁到农作物的健康与产量。当作物面临减产时,农户往往会迅速增加化肥和农药的使用量以挽救作物,这种短期的应急措施虽可能带来暂时的补偿经济,但会破坏土壤结构,增加环境负担,形成恶性循环。同时,市场的快速反应可能导致农业生产者和消费者面临更大的经济不确定性,进而影响农业生产决策和贸易干预。

(2) 长期影响。长期的气候变化影响表现为农业系统的深层次结构调整和环境演变。累积效应往往难以逆转,影响到农业生产的根本模式。作物迁移对于维持全球粮食安全具有重要意义,但同时也会与原有农业区域或非农区域产生空间冲突,如Bousfield等人^[42]预测所示,到2100年全球约3亿公顷的林地将成为农业扩张的热点区域。气候变化带来土壤有机质含量下降、微生物活性减弱、土壤退化加剧的长期趋势将逐渐体现在产量的下降和土地资源的恶化上。为了应对持续的气候变化,农民可能逐步改变作物种植模式,更多地种植抗旱、耐高温的作物,或者采用保护性耕作和轮

作制度。这一过程往往伴随着农业投入的增加以及耕作制度的变化,长远来看,有可能明显改变某一地区的农业地域系统结构,并影响到全球的农业生产格局,通过供给侧比较优势的变化进而影响(或正在影响)传统的农业贸易格局^[63]。

3 农业地域系统气候适应性转型路径

气候变化的强劲趋势已经显而易见,农业系统必须及时适应以面对可预见的粮食危机和全球变暖风险^[14]。农业地域系统的适应性转型顺应气候变化的影响,是一个多尺度和多目标的复杂过程、系统工程。在气候智慧型农业框架下,可持续的转型不仅需要考虑地域差异,也需要自上而下和自下而上的“双向驱动”,以及合适的短期应对方案和长期战略规划(图5)。

3.1 综合变化模式与地域差异

气候变化与人类活动的耦合作用关系决定了农业系统的地域性特征。气候模式及其地域差异带来要素组成和交互过程的明显分化,不同类型,不同级别的农业地域系统在适应气候变化时需要考虑不同的目标和适应策略。因此,农业地域系统的气候适应性转型需要从系统的要素、结构和功能出发,基于农业气候风险精细区划,优化农业气候资源利用格局。例如,雨养农业受气候变化影响的严重程度已经达成共识,尤其在

干旱及其过渡地带,强化这些地区的水资源管理对于减轻未来可能面临的绿水短缺风险至关重要。尽管补充灌溉可以减缓绿水短缺风险,但其对蓝水或区域水循环造成的威胁仍然有很大的不确定性^[57]。另外考虑到扩大灌溉的经济和排放成本,一些可行的方案如改种C₄作物、优化播种日期、实施光伏农业、推行保护性耕作(如免耕或少耕、覆盖作物等),以及建设小规模集水设施可能更适合这些地区^[49]。水分充足的雨养地区面临着农田洪涝、作物病变和虫害等风险,意味着农业水利设施需要强化对洪水的调控能力以应对降水的不确定性和极端状况。合理的水位管理能避免洪涝灾害对农田作物的影响,并确保作物在雨季或洪水过后迅速恢复生长。同时,推广改良作物品种、优化田间管理技术、发展生态农业和减少农药投入以应对病虫害和环境压力的增加。灌溉农业区不仅需要考虑水资源利用效率,还要防范土壤次生盐渍化的风险。因此发展智慧节水灌溉系统、培育耐旱作物、适度增施有机肥和土壤改良剂、改善土壤透水和保水能力以应对未来可能的高温胁迫和水分过剩。高山丘陵地带由于起伏的地势条件,极端气候造成的滑坡、山洪、水土流失等频发灾害将是亟需应对的挑战。推广梯田和植被保育等水土保持措施、优化生产空间、发展立体农业、强化小流域综合治理等有助于提高山地丘陵地带的农业气候适应能力。草原畜牧区更可能面临草场退



图5 农业地域系统的气候适应性转型路径

Figure 5 Transformation strategies for climate adaptation in agricultural areal systems

化、草料短缺等风险,可以通过优化牧草种植、推广划区轮牧、建设调温舍圈、适当增加补饲来提升气候韧性.水产渔业区可能需要发展混合生态养殖、强化水质调节、分散捕捞压力等适应气候变化带来的海洋环境和淡水系统紊乱.由于气候变化带来的影响存在明显空间差异,挑战和机遇孰强孰弱可能取决于特定地区的农业系统结构.因此,适应性策略往往具有不同的目标并可能因要素间的相互作用而产生意外的后果.正如Han等人^[64]认为,单一的适应机制可能难以完全弥补气候变化对农业的复杂影响.对于不同地区 and 不同农业系统来说,理解其主导的气候风险和地域模式仍然是制定针对性适应策略的关键.

3.2 推动全球合作到地方参与

气候变化对农业系统的影响日益严峻,促使全球各地开展多层面的研究和探究适应措施,科学应对不同程度的气候变化威胁.这种适应转型不仅需要全球合作框架下的行动策略,还包括国家和地方层面的具体实施,有效推进全球人才引智工程与合作网络体系建设.在国际层面,适应性转型需要建立完善国际合作框架,包括研究国际政策、发展国际合作组织、完善国际贸易体系与合作机制等.国际政策研究需要考虑国情和地区差异,公平开展气候谈判与合作共享,不断完善总体方向和优先目标.国际合作组织的发展对于加快全球气候资金流动和数据技术经验共享至关重要,尤其是农业适应性转型依赖的大量专项资金和实践经验.而良好且公平的国际贸易体系与合作机制创新在弥补气候变化引起的区域农业比较优势变化方面发挥着特殊重要的作用.Janssens等人^[65]估计贸易政策调整例如降低关税和更便利的贸易通道可以缓解全球约60%的饥饿和营养不良风险.在国家和地区层面,气候适应型作物布局可以在满足食物需求的同时缓解水资源短缺和减少温室气体排放.土地利用转型可以通过适当的灌溉和雨养农田转换,以及新的可持续生产经营模式来缓解气候变化的影响,Rosa等人^[7]认为将可持续灌溉引入现有的雨养农田可以至少满足额外3亿人口的粮食需求.农业基础设施投资也是提升气候适应能力的基础手段,尤其在应对极端气候事件时更加重要.重点在于发展智慧水利、改善水资源管理、提升农业生产效率和增强农业系统的抗灾能力.推广技术和专业知识教育同样至关重要^[14],普及金融支持政策、农业风险管理经验和作物优选技术能够促进适应

性实践落地并刺激农业生产.地方层面,农业气候适应型综合体工程示范既推动了气候转型理论的地方实践^[66],又为大尺度气候适应提供了经验模式.地方社区为推动实施气候适应实践做出了关键贡献,社区合作和集体行动在提高气候适应方面的作用不容忽视.农业生产者则需要适量调整灌溉策略^[67]、使用气候适应型栽培品种^[12]、优化种植日期^[68]来提高农业地域系统的韧性.此外,消费者的膳食结构也决定了全球粮食生产的压力和适应气候变化的能力,引导形成植食型膳食结构对于减缓和适应气候变化影响具有巨大潜力.

3.3 做好短期应对与长期规划

立足于气候变化的短期冲击和长期影响,农业气候适应性转型既需有效应对当前紧迫的气候挑战,也应制定基于未来气候情景的弹性战略规划.短期应对措施应聚焦于频发的极端气候事件,增强气候韧性.通过加强农业气候监测能力建设,特别是AI气象大模型的高时空分辨率示范应用^[69],以构筑一体化、系统化、精准化的气象监测网络.完善灾害诊断与评估技术,根据风险类型、强度以及应对能力制定不同区域的减灾预案.投资建设防洪堤坝、排水系统、抗旱灌溉设备,以及山洪防控等抵御气候冲击的农田基础设施和水土保持设施.同时,推广普及精准农业与智能灌溉等现代农业技术,创新推进综合地理工程技术,推动农业系统数智化、工程化转型.建立应急农业保险机制是提升农民抵御自然灾害经济风险能力的关键措施,有助于减轻极端气候事件对农户造成的经济损失.提供灾后农业恢复的政策支持以及技术指导,强化短期农田恢复与土壤管理.长期战略规划可能包括推广气候适应型作物、适度提高中高纬度复种指数、扩大低纬度地区冬种规模,以优化调整作物品种、种植结构和农业格局.提前布局作物品种的改良与研发,尤其是基因编辑和生物工程技术亟需农业新质生产力的支撑.推广保护性耕作、轮作和生态农业等可持续耕作方式,对于减缓气候变化的影响已经得到了广泛重视. Costa等人^[70]认为多样化轮作可以补偿气候变化对谷类作物产量的影响,特别是在极端气候条件下,这一效应可能带来额外的产量收益.高标准农田可以通过现代农业手段增强农业生产效率和抗灾减灾能力,但长期的目标可能需要在农业多样化与集约高效性之间考虑权衡协同效应^[16,71],以维持农田生态系统的恢复力和碳汇能

力。水资源的分配管理对农业适应气候变化同等重要,需要持续评估跨区域水资源调配系统、特定区域水系连通与水网建设和农业水利工程的调节效应与潜力。低碳农业转型是应对和缓解气候变化影响的有效途径,需要针对不同的经济和环境差异制定适宜的转型方向。国际合作与农业政策的制定与调整应具备长期性和动态性,以适应不断变化的气候条件和致灾环境。简而言之,无论是短期措施还是长期目标,减缓和适应气候变化都旨在呼吁逐步建立从全球到地方的气候智慧型农业系统,以应对当下挑战和未来可预见的全球变暖与粮食安全威胁。

4 未来研究展望

4.1 空间交互作用类型与农业地域系统认知

气候变化正对全球农业生产造成普遍影响,但由于地区环境、经济、社会 and 文化的差异形成了独特的地域交互模式。气候变化如何通过农业影响社会 and 经济发展以及潜在的反馈机制已发展成为一个复杂的人地系统问题,增强对其耦合过程的地域性认知有助于揭示人地系统耦合变化的时空过程和规律。因此,基于关键过程(如作物生理过程、农业-经济交互过程、系统动力学过程)开发农业地域系统关键指标体系,精确识别和探测气候-农业-经济-社会交互作用型和地域类,进而重塑现代农业认知、重构农业格局和重建农业模式,对于保障全球气候适应性转型的公平性与针对性至关重要。关键指标的获取和集成模型的构建需要解决跨场景、普适性的科学问题,亟需创建地理工程实景大模型,深入开展农业地域系统场景模拟、情景预测和工程实践,推动传统地理学从“解释问题”向“解决问题”转型,实现全球和地区共识进而支撑资源合理化配置,服务现代可持续农业的科学决策。深入探究模拟预测结果的不确定性因素^[72],集成多模型的预测结果以降低模拟误差是准确量化气候变化影响的重要前提。加强对复杂地域系统跨区域、多尺度传导机理的科学认知,也是优化全球人地关系和实现可持续发展的重要保障。

4.2 风险综合评估与分区分类分级应对模式

农业地域系统是一种典型的人地关系地域系统,自然地理条件与生产经营方式共同作用决定着系统的功能状态。在人地交互的正负反馈作用下,农业系统呈现不同的分化特征,进而引起系统功能的分异。已有的

研究往往侧重于单一要素(如产量损失等)的风险评估和模拟,亟需开展系统性的综合评价,需要考虑诸如灌溉、土壤、多样性、农户生计、土地利用等其他要素的共变效应。不仅仅局限于粮食生产,农业系统的碳汇、生态保护等多功能属性也日益受到高度重视。伴随着旱涝交替、冷暖异动等非常规天气频率不断上升,农业系统的可预测性可能遭受更加复杂多样的挑战^[73]。针对复杂的要素传导与交互机制,理解和评估气候风险需要更加综合的视角来探测和模拟农业系统的气候韧性^[74]。特别是对农业系统状态和动态的地域划分,是细化风险分区和优化农业格局的重要基础。制定气候适应性转型策略,也需要考虑农业地域系统的内生适应水平和外缘调控潜力。因此,未来研究需要推进创建气候适应性人地系统耦合模式与智能模拟体系,创新农业地域系统韧性增强与反馈机制,进一步加强对农业地域系统的气候风险分区、分类、分级认知,尤其是自上而下和自下而上的传导过程,例如“全球-地区-地方-农户”的正向或逆向传导链,有助于决策者制定从自然保护到恢复提升,再到工程治理的系统化和体系化应对策略。分层级风险综合评估和适宜性评价,对于分区指导、分类推进和分步实施农业适应性转型具有重要的科学价值与实践指导意义。

4.3 农业新质生产力与气候智慧型农业转型

培育和壮大农业新质生产力需要因地制宜地将高科技、高效能、高质量赋能农业生产新技术、新要素、新模式,助推气候智慧型农业转型,推进中国式现代化农业强国建设。得益于物联网技术和人工智能技术的逐渐成熟^[75],数智化转型赋予了农业系统独特的气候适应能力,助推气候智慧型农业成为现实。信息技术革命带领人类进入AI时代,人工智能灌溉、施肥、育种、监测和预警技术的应用场景和气候反馈机制仍然有很大的创新空间。天空地网多传感器信息融合技术和系统集成智能决策系统是快速响应气候变化与极端天气的有力保障。系统研究基于特定地域气候模式的机器学习模型可能在农户决策层面比大模型更加具有优势^[75]。尽管农业信息技术和设备拥有巨大的应用前景,但收益和成本之间的权衡可能成为农业生产降本增效的关键挑战^[76]。因此,创新兼顾“绿色农业”与“韧性农业”的气候智慧型农业转型途径是应对气候变化和实现可持续发展的关键,也是未来研究持续聚焦的科学命题和战略主题。

参考文献

- 1 Huang S, Wang S, Gan Y, et al. Widespread global exacerbation of extreme drought induced by urbanization. *Nat Cities*, 2024, 1: 597–609
- 2 Han J, Luo Y, Zhang Z, et al. Planting area and production decreased for winter-triticeae crops but increased for rapeseed in Ukraine with climatic impacts dominating. *Geography Sustainability*, 2025, 6: 100226
- 3 Liu Y S, Zhang Z W, Wang J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China (in Chinese). *Acta Geograph Sin*, 2018, 73: 203–218 [刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. *地理学报*, 2018, 2073: 2203–2218]
- 4 Burney J, McIntosh C, Lopez-Videla B, et al. Empirical modeling of agricultural climate risk. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2215677121
- 5 Gu W, Ma G, Wang R, et al. Climate adaptation through crop migration requires a nexus perspective for environmental sustainability in the North China Plain. *Nat Food*, 2024, 5: 569–580
- 6 Liu Z, Liu Y, Li Y. Extended warm temperate zone and opportunities for cropping system change in the Loess Plateau of China. *Intl J Climatol*, 2019, 39: 658–669
- 7 Rosa L, Chiarelli D D, Sangiorgio M, et al. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3°C warmer climate. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 29526–29534
- 8 Yang Y, Jin Z, Mueller N D, et al. Sustainable irrigation and climate feedbacks. *Nat Food*, 2023, 4: 654–663
- 9 Wang C, Wang X, Jin Z, et al. Occurrence of crop pests and diseases has largely increased in China since 1970. *Nat Food*, 2022, 3: 57–65
- 10 Fu J, Jian Y, Wang X, et al. Extreme rainfall reduces one-twelfth of China's rice yield over the last two decades. *Nat Food*, 2023, 4: 416–426
- 11 Yuan X, Wang Y, Ji P, et al. A global transition to flash droughts under climate change. *Science*, 2023, 380: 187–191
- 12 Zabel F, Müller C, Elliott J, et al. Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties. *Glob Change Biol*, 2021, 27: 3870–3882
- 13 Sloat L L, Davis S J, Gerber J S, et al. Climate adaptation by crop migration. *Nat Commun*, 2020, 11: 1243
- 14 Yang Y, Tilman D, Jin Z, et al. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. *Science*, 2024, 385: eadn3747
- 15 Liu Y, Liu Y, Ou C. Scientific cognition and detection methods of modern human-earth system (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 447–463 [刘彦随, 刘亚群, 欧聪. 现代人地系统科学认知与探测方法. *科学通报*, 2024, 69: 2447–2463]
- 16 Meuwissen M P M, Feindt P H, Spiegel A, et al. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agric Syst*, 2019, 176: 102656
- 17 Chen X, Anderson W, You L, et al. Observed trends in multiple breadbasket yield shocks. *Environ Res Lett*, 2024, 19: 104005
- 18 Zhao C, Liu B, Piao S, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 9326–9331
- 19 Burrell A L, Evans J P, De Kauwe M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nat Commun*, 2020, 11: 3853
- 20 Rezaei E E, Webber H, Asseng S, et al. Climate change impacts on crop yields. *Nat Rev Earth Environ*, 2023, 4: 831–846
- 21 Shun Chan F K, Zhu Y G, Wang J, et al. Food security in climatic extremes: challenges and opportunities for China. *Cell Rep Sustain*, 2024, 1: 100013
- 22 Vogel E, Donat M G, Alexander L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environ Res Lett*, 2019, 14: 054010
- 23 Wang H, Chen B, Shen X. Extreme rainfall, farmer vulnerability, and labor mobility—Evidence from rural China. *Sci Total Environ*, 2024, 918: 170866
- 24 Challinor A J, Watson J, Lobell D B, et al. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nat Clim Change*, 2014, 4: 287–291
- 25 Hu T, Zhang X, Khanal S, et al. Climate change impacts on crop yields: a review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods. *Environ Model Software*, 2024, 179: 106119
- 26 Ray D K, Gerber J S, MacDonald G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat Commun*, 2015, 6: 5989
- 27 Asseng S, Ewert F, Martre P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 143–147
- 28 Mourtzinis S, Specht J E, Lindsey L E, et al. Climate-induced reduction in US-wide soybean yields underpinned by region- and in-season-specific responses. *Nat Plants*, 2015, 1: 14026
- 29 Hou P, Liu Y, Liu W, et al. Quantifying maize grain yield losses caused by climate change based on extensive field data across China. *Resour Conservation Recycling*, 2021, 174: 105811
- 30 Deutsch C A, Tewksbury J J, Tigchelaar M, et al. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 2018, 361: 916–919
- 31 Bousfield C G, Lindenmayer D B, Edwards D P. Substantial and increasing global losses of timber-producing forest due to wildfires. *Nat Geosci*, 2023, 16: 1145–1150
- 32 Appelt J L, Saphangthong T, Malek Ž, et al. Climate change impacts on tree crop suitability in Southeast Asia. *Reg Environ Change*, 2023, 23: 117
- 33 Nandintsetseg B, Chang J, Sen O L, et al. Future drought risk and adaptation of pastoralism in Eurasian rangelands. *npj Clim Atmos Sci*, 2024, 7: 82

- 34 Pallezo R, Da-Rocha J M, Palomares M L D, et al. Building climate resilience, social sustainability and equity in global fisheries. *npj Ocean Sustain*, 2023, 2: 10
- 35 Maulu S, Hasimuna O J, Haambiya L H, et al. Climate change effects on aquaculture production: sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Front Sustain Food Syst*, 2021, 5: 609097
- 36 Mukhopadhyay R, Sarkar B, Jat H S, et al. Soil salinity under climate change: challenges for sustainable agriculture and food security. *J Environ Manage*, 2021, 280: 111736
- 37 Koppa A, Keune J, Schumacher D L, et al. Dryland self-expansion enabled by land-atmosphere feedbacks. *Science*, 2024, 385: 967–972
- 38 Perri S, Molini A, Hedin L O, et al. Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization. *Nat Geosci*, 2022, 15: 375–381
- 39 Ma X, Zhao C, Zhu J. Aggravated risk of soil erosion with global warming – A global meta-analysis. *Catena*, 2021, 200: 105129
- 40 Liu Y, Liu X, Liu Z. Effects of climate change on paddy expansion and potential adaption strategies for sustainable agriculture development across Northeast China. *Appl Geography*, 2022, 141: 102667
- 41 Gao J, Liu Y. Climate warming and land use change in Heilongjiang Province, Northeast China. *Appl Geography*, 2011, 31: 476–482
- 42 Bousfield C G, Morton O, Edwards D P. Climate change will exacerbate land conflict between agriculture and timber production. *Nat Clim Chang*, 2024, 14: 1071–1077
- 43 Liu K, Bo Y, Li X, et al. Uncovering current and future variations of irrigation water use across china using machine learning. *Earths Future*, 2024, 12: e2023EF003562
- 44 Lesk C, Anderson W, Rigden A, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. *Nat Rev Earth Environ*, 2022, 3: 872–889
- 45 Abdo A I, Sun D, Shi Z, et al. Conventional agriculture increases global warming while decreasing system sustainability. *Nat Clim Chang*, 2025, 15: 110–117
- 46 Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, et al. IPCC, 2023: climate Change 2023: synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J, eds. IPCC, Geneva, Switzerland. In: Proceedings of the 2023
- 47 Ortiz-Bohea A, Ault T R, Carrillo C M, et al. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nat Clim Chang*, 2021, 11: 306–312
- 48 Kummu M, Heino M, Taka M, et al. Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space. *One Earth*, 2021, 4: 720–729
- 49 He L, Rosa L, Whalen J. Solutions to agricultural green water scarcity under climate change. *Proc Natl Acad Sci USA Nexus*, 2023, 2: pgad117
- 50 Huang Z, Hejazi M, Tang Q, et al. Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. *J Hydrol*, 2019, 574: 242–256
- 51 Hopmans J W, Qureshi A S, Kisekka I, et al. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. In: sparks D L, ed. *Advances in Agronomy*, Vol 169. Amsterdam: Elsevier, 2021. 1–191
- 52 Song L, Tao Y, van Groenigen K J, et al. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations increase gaps of rice yields between low- and middle-to-high-income countries. *Nat Food*, 2024, 5: 754–763
- 53 Paglialunga E, Coveri A, Zanfei A. Climate change and within-country inequality: new evidence from a global perspective. *World Dev*, 2022, 159: 106030
- 54 Gu W, Wang F, Siebert S, et al. The asymmetric impacts of international agricultural trade on water use scarcity, inequality and inequity. *Nat Water*, 2024, 2: 324–336
- 55 Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China (in Chinese). *Chin J Eco-Agr*, 2010, 18: 905–910 [刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. 中国生态农业学报, 2010, 18: 2905–2910]
- 56 Sun L, Zhu X, Li W, et al. State of China's climate in 2023. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2024, 17: 100519
- 57 Mehta P, Siebert S, Kummu M, et al. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. *Nat Water*, 2024, 2: 254–261
- 58 Xiang W, Tan M, Yang X, et al. The impact of cropland spatial shift on irrigation water use in China. *Environ Impact Assessment Rev*, 2022, 97: 106904
- 59 Li C, Xiang X, Gu H. Climate shocks and international trade: evidence from China. *Economics Lett*, 2015, 135: 55–57
- 60 Zhang Q, Yang J, Wang P, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1814–1828 [张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望. 科学通报, 2023, 1868: 1814–1828]
- 61 Wu Y, Yin X, Zhou G, et al. Rising rainfall intensity induces spatially divergent hydrological changes within a large river basin. *Nat Commun*, 2024, 15: 823
- 62 Flörke M, Schneider C, McDonald R I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nat Sustain*,

- 2018, 1: 51–58
- 63 Costinot A, Donaldson D, Smith C. Evolving comparative advantage and the impact of climate change in agricultural markets: evidence from 1.7 million fields around the world. *J Political Economy*, 2016, 124: 205–248
 - 64 Han X, Roy A, Moghaddasi P, et al. Assessment of climate change impact on rainfed corn yield with adaptation measures in Deep South, US. *Agr Ecosyst Environ*, 2024, 376: 109230
 - 65 Janssens C, Havlík P, Krisztin T, et al. Global hunger and climate change adaptation through international trade. *Nat Clim Chang*, 2020, 10: 829–835
 - 66 Liu Y S, Li Y R. Engineering philosophy and design scheme of gullyland consolidation in Loess Plateau (in Chinese). *Transact Chin Soc Agric Engin*, 2017, 33: 1–9 [刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术. *农业工程学报*, 2017, 2017: 2011–2019]
 - 67 Minoli S, Müller C, Elliott J, et al. Global response patterns of major rainfed crops to adaptation by maintaining current growing periods and irrigation. *Earths Future*, 2019, 7: 1464–1480
 - 68 Franke J A, Müller C, Minoli S, et al. Agricultural breadbaskets shift poleward given adaptive farmer behavior under climate change. *Glob Change Biol*, 2022, 28: 167–181
 - 69 Bi K, Xie L, Zhang H, et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 2023, 619: 533–538
 - 70 Costa A, Bommarco R, Smith M E, et al. Crop rotational diversity can mitigate climate-induced grain yield losses. *Glob Change Biol*, 2024, 30: e17298
 - 71 Wanger T C, Raveloaritiana E, Zeng S, et al. Co-benefits of agricultural diversification and technology for the environment and food security in China. *Nat Food*, 2024, 5: 965–968
 - 72 Wang B, Jägermeyr J, O’Leary G J, et al. Pathways to identify and reduce uncertainties in agricultural climate impact assessments. *Nat Food*, 2024, 5: 550–556
 - 73 Wu H, Su X, Huang S, et al. Decreasing dynamic predictability of global agricultural drought with warming climate. *Nat Clim Chang*, 2025, doi: [10.1038/s41558-025-02289-y](https://doi.org/10.1038/s41558-025-02289-y)
 - 74 Tscholl S, Candiago S, Marsoner T, et al. Climate resilience of European wine regions. *Nat Commun*, 2024, 15: 6254
 - 75 Qazi S, Khawaja B A, Farooq Q U. IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture: a critical review, current challenges and future trends. *IEEE Access*, 2022, 10: 21219–21235
 - 76 Raihan A, Ridwan M, Rahman M S. An exploration of the latest developments, obstacles, and potential future pathways for climate-smart agriculture. *Clim Smart Agr*, 2024, 1: 100020

Summary for “气候变化对农业地域系统的影响及其应对”

Impacts of climate change on agricultural areal systems and the mitigation strategies

Yansui Liu^{1,2*}, Yu Zhao^{1,3} & Yurui Li²

¹ Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

³ School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

* Corresponding author, E-mail: liuys@igsnr.ac.cn

Climate change has remarkably affected Earth's systems, driving transformations in global human-earth relationships. The rise in global mean temperature, coupled with more frequent extreme events, presents unprecedented both challenges and opportunities for agricultural production. Amid escalating geopolitical risks, climate change has intensified its effects on agricultural sectors and socioeconomic systems worldwide. By altering agricultural environments and spatial patterns, climate change has transformed regional agricultural systems, making it a critical issue for human-earth systems and sustainable development. Previous studies have provided valuable insights and suggestions regarding the diverse potential threats posed by climate change. Addressing these risks to agricultural systems requires the development of comprehensive and adaptive strategies for different regions, scales, and stages. Modern human-earth relationship theory and human-earth system frameworks provide innovative perspectives for optimizing and adapting agricultural production. As a unique human-earth system, the agricultural areal system serves as a comprehensive framework for understanding climate-resilient agricultural transformation. Climate-resilient agricultural transformations require a deeper understanding of the interactions between agriculture and climate change, particularly in terms of regional patterns and variations. This can be considered as a multi-objective process and systematic engineering approach. Here, based on an understanding of the agricultural areal system and its differentiation processes, this study aimed to synthesize existing research to advance the conceptual understanding of climate-resilient agricultural transformation.

The effects of climate change on agricultural areal systems can be analyzed from three perspectives: multiple element comprehensiveness, multiple scale differentiation, and multiple process dynamics. In addition to the direct threats to traditional agriculture, forestry, livestock, and fisheries, existing research indicates that climate change indirectly affects the agricultural sector through pests, soil degradation, crop patterns, and changes in irrigation practices. Spatially, the effects of climate change manifest differences at global, regional, and local scales. For instance, climate change poses varying degrees of threat to global food supply, regional equity, agricultural resource allocation, production layouts, local farmer livelihoods, and wealth disparities. Additionally, the immediate risks posed by short-term climate shocks and foreseeable threats associated with long-term climate trends will become key considerations for the transformation of agricultural systems.

The agricultural sector must promptly adapt and implement mitigation measures in the face of systemic climate risks. However, adaptation strategies often include diverse objectives and may lead to unintended consequences due to interactions among system elements. In conclusion, climate-resilient agricultural transformations should integrate regional climate patterns and geographical differences to ensure their effectiveness. Optimizing agricultural climate resource allocation requires consideration of variations in elements, structures, and functions within agricultural areal systems. Simultaneously, addressing the scale effects of climate risk requires fostering global cooperation, formulating regional strategies, and promoting local participation. Furthermore, considering both imminent climate threats and foreseeable long-term trends, developing corresponding short-term measures and long-term plans remains crucial.

Future research should deepen the understanding of regional agricultural systems and explore the patterns and mechanisms governing climate-agriculture-society-economy interactions. Additionally, comprehensive risk assessments and the development of preventive, protective, and engineering measures are required. Notably, adaptive agricultural transformations should focus on innovative farming practices and establish pathways for transitioning to climate-smart agricultural systems. By leveraging technological advancements and fostering multiscale collaboration, the agricultural sector can enhance its resilience and contribute to global sustainability goals amid escalating climate change challenges. To address both the immediate risks and foreseeable challenges posed by climate change, it is imperative to develop regionally tailored, categorically prioritized, and incrementally implemented climate-smart agricultural transformation strategies.

climate change, agricultural areal system, human-earth system coupling, climate adaption, agricultural transformation

doi: [10.1360/TB-2024-1165](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1165)