

# IPCC AR6 粮食系统的影响与适应的新认知和新趋势

居辉<sup>①②</sup>,袁佳双<sup>③\*</sup>,张馨月<sup>①②</sup>,刘忠伟<sup>①</sup>,王建东<sup>①</sup>

① 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;

② 农业农村部农业环境重点实验室,北京 100081;

③ 中国气象局 国家气候中心,北京 100081

\* 联系人, E-mail: yuanjs@cma.gov.cn

2022-03-30 收稿, 2022-05-07 接受

国家重点研发计划项目(2019YFA0607403);国家自然科学基金资助项目(41961124007;51879277;41675115);中国农业科学院创新人才项目

**摘要** 解读政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)粮食系统的影响与适应,对科学认识国际气候变化对农业影响学科前沿动态具有重要意义。最新发布的IPCC AR6在深化阐述粮食生产能力、种植布局、病虫害影响的基础上,高度确信人类活动导致的气候变暖对粮食系统产生了负面影响,论述了粮食运输及消费中的气候风险,解析了粮食生产-存储-运输-消费的全链条气候变化影响,延展了影响评估归因内容并丰富了农业环境影响等相关科学认识。对于粮食系统的适应能力,强调适应及减缓协同发展的气候恢复力发展路径,适应评估从适应能力、适应方式等理论逐步转向适应实施行动和成效评估,并注重适应行动的区域特异性和有效性。本次评估强调了气候变化对作物影响的检测和归因、关注了气候和农业环境变化复合影响、倡导基于生态系统的适应方案和技术,评估了现有适应技术的可行性和成效。报告内容对中国强化农业影响评估能力及把握国际学科动态具有参考价值。

**关键词**

IPCC AR6;  
粮食系统;  
影响;  
适应;  
新认知;  
新趋势

IPCC 第二工作组(WGII)第六次评估报告(AR6)《气候变化2022:影响、适应和脆弱性》于2022年2月通过公约缔约方国家政府审核并正式发布,为气候变化影响和适应提供了最新的科学认识。WGII AR6对于农业影响评估主要集中于第五章,重点评述了气候变化对“食物、纤维及其他生态系统产品”的影响,及其适应和脆弱性最新科学进展。在WGII AR6第五章中,食物涵盖了粮食作物、蔬菜水果、畜牧产品和水产品等。报告详细阐述了气候变化与社会经济因素共同影响其生产能力、可获得性、购买能力和营养品质等,并评述了人类采取的适应行动及区域适应能力差异。评估中考虑到社会公平性、生态系统服务和气候治理等自然科学和社会科学的交互关联,同时与其他章节如自然生态系统、水资源、健康等主题章节有内容交叉与融合,遂以章节交叉知识窗予以综合阐述,全面系统评估

了气候变化对农业的综合影响与适应路径和脆弱性特征。

WGII AR6第五章中对于粮食系统评述不仅突出了粮食生产整体性和综合性,还着眼关注与其他部门的联系与互作效应。通过纳入粮食存储和消费视角,将粮食损失和浪费作为要点予以评述,并以粮食运输、市场流通、饮食消费、区域贸易等联系整合,系统地从食物链流动过程做了更为全面的影响评估。在粮食系统适应技术评估上,结合了区域经济、技术、政策、文化等区域社会和人文要素,引入了可行性与成效评估理念,更为有效提升与推动适应行动的落实,对实现全球可持续发展目标起到了积极的推进和贡献作用。

## 1 粮食系统评估新认知

粮食生产高度依赖气候条件,对气候变化敏感和

引用格式:居辉,袁佳双,张馨月,等,2022.IPCC AR6 粮食系统的影响与适应的新认知和新趋势[J].大气科学学报,45(4):481-488.

Ju H, Yuan J S, Zhang X Y, et al., 2022. New perceptions and trends in impacts and adaptations of food systems in IPCC AR6[J]. Trans Atmos Sci, 45(4):481-488. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220330007. (in Chinese).

脆弱。WGII AR6 对粮食作物影响评估不仅深化了以往对物候、产量、布局的科学认知,且在极端气候影响、气候变化风险、影响归因研究上都有了进一步的发展和完善。WGII AR6 第五章评估了气候变化对粮食系统的影响及其适应和脆弱性,同时扩展到与粮食系统相关的农业环境以及社会因素的综合影响及挑战。新的科学认识主要体现在强化了人类活动导致的气候变化影响、关注了气候连带的农业环境变化及其影响、并重了粮食产量和品质影响、扩展了粮食储存和消费评估范畴、鼓励基于农业生态学方法的适应方案、倡导具有气候恢复力的适应路径等方面。

### 1.1 人类活动导致的气候变化对粮食生产造成负面影响

WGII AR6 农业评估高度确信,气候变化对作物产量、品质和市场的影响具有区域差异,且以负面影响为主。评估中突出强调了人为气候变化造成的影响水平,引入了影响的检测与归因评估,且确定自工业化革命以来,人类引起的气候变暖对全球作物生产造成了显著的负面影响,降低了粮食生产的增长幅度(Iizumi et al., 2018; Moore, 2020)。据估算,自 1961 年以来,人为导致的气候变化使农业全要素生产率增长放缓了 21% (Ortiz-Bobea et al., 2021)。利用经验模型研究表明,1961—2017 年人类活动导致的气候变暖造成三大粮食作物平均减产 5.3%,其中玉米、小麦和水稻分别减产 5.9%、4.9% 和 4.2% (Moore, 2020); 基于作物动态机理模型研究发现,即使考虑了 CO<sub>2</sub> 的肥效作用,1981—2010 年人类活动导致的气候变暖使玉米和大豆产量分别减低 4.1% 和 4.5% (Iizumi et al., 2018)。从区域影响来看,人类活动导致的 1 °C 左右气候增暖可加剧西非极端高温和极端降雨事件,造成谷子和高粱产量分别减产 10% ~ 20% 和 5% ~ 15% (Sultan et al., 2019)。由于目前气候变化对粮食作物影响研究,大多结果还是来自气候要素和非气候因子(如田间管理)的共同作用,对于人类活动影响评估的研究方法和具体科学问题解析,都还需要做大量的研究论证,科学剥离人为气候变化对粮食系统的影响仍存在很大挑战。

### 1.2 并重气候变化对作物产量和品质影响

气候变化、作物种类、田间管理对作物产量和品质具有复杂的互作影响 (Kimball, 2016; Toreti et al., 2020)。温度升高条件下,大豆、小麦和水稻的 CO<sub>2</sub> 肥效作用明显减低 (Gray et al., 2016; Wang et al., 2018; Wang et al., 2019), 但不同栽培品种对

CO<sub>2</sub> 浓度升高响应存在差异。气候变化背景下,培育高效利用 CO<sub>2</sub> 肥效的品种,可提升作物的产量潜力 (Ainsworth and Long, 2021)。如果不采取其他适应措施,预估到 21 世纪末,即使考虑 CO<sub>2</sub> 对作物增产效应,气候变化对主要粮食均显现出减产作用,每十年减产中值在 1% ~ 3% 之间,其中玉米减产中位数为 2.3%/(10 a),大豆减产 3.3%/(10 a),小麦和水稻分别为 1.3%/(10 a) 和 0.7%/(10 a) (IPCC, 2022)。极端气候事件将变得更加频繁,并迫使目前一些粮食生产区超出安全的生产气候空间。预估到 21 世纪末,在 SSP1-26 和 SSP5-85 情景下,极端气候造成全球作物适宜种植面积分别减少 8% 和 30% (Kummu et al., 2021)。

CO<sub>2</sub> 浓度升高会减少粮食中一些重要营养元素含量,如蛋白质、铁、锌和一些维生素,这与作物种类和栽培品种有关 (Jin et al., 2019; Ujiie et al., 2019; Toreti et al., 2020; Ainsworth and Long, 2021)。试验研究表明,CO<sub>2</sub> 与温度之间存在某些复杂的相互作用,温度可能抵消 CO<sub>2</sub> 升高对小麦、大豆和水稻营养元素的不利影响,但 CO<sub>2</sub> 与温度对粮食品质的相互作用还需要更为深入研究,如作物种类和生育阶段等,以确保气候变化下的粮食营养安全 (Köhler et al., 2019)。整体而言,气候变化对作物产量、品质造成了不同影响,且存在作物种类和品种间差异,大多综合结果为负面影响。

### 1.3 深化粮食生产-运输-加工-消费的全链条影响评估

气候变化对粮食系统全链条影响包括生产过程以及收获后的储存、流通和加工过程,各部分间相互作用并连锁响应。目前气候变化对粮食收获后的影响研究,主要集中于食用安全、存储和区域间贸易。气候变化对这些过程会造成直接或间接地影响 (Davis et al., 2021)。气候变化对食品储存(如冷藏库电力供应)和运输基础条件(如极端天气对道路阻塞)的不利影响,会极大降低易腐食品的营养价值和食用安全性,并增加成本损耗 (Ickowitz et al., 2019)。在零售过程和家庭消费中,气候变化也可能造成食物浪费,如较高温度、湿度或两者共同作用,造成销售和消费中的营养流失或变质 (Galford et al., 2020)。较高的温湿度会加重病虫害的影响,增加食源性疾病和污染概率,并增加冷藏和净化等的存储成本,形成较大的经济损耗。气候变化可造成粮食收获后,在运输送达终端消费者过程中,由于食物处理不当而导致微生物、昆虫、啮齿动物或鸟类

的侵害,食物质量受到损失(Hodges et al., 2011; Medina et al., 2015)。极端天气气候事件可导致粮食运输网络和储存基础设施正常运行受阻或中断;气候变化也可能造成核心产区或存储地点的地理中心位移,影响粮食系统的稳定性和品质特性。对生产者和消费者来说,由此连带影响可造成粮食价格发生变化,具体影响也取决于当地的社会环境和政策。

#### 1.4 鼓励基于农业生态学方法的适应方案

目前农业适应主要以自发行动为主,包括变更种植时间、品种选择、改进技术和基础设施、采用生态系统的适应方法等(Beveridge et al., 2018; Aggarwal et al., 2019)。预估到21世纪中叶,现有的农田管理适应措施可降低8.6%的产量损失,但还不足以抵消气候变化的不利影响;越来越多的证据表明,基于生态系统的适应方案(EbA, Ecosystem-based Approaches)由于注重生态系统整体建设和生物多样性保护,对提升农业气候恢复力具有较高潜力(Brugère et al., 2019; Galappaththi et al., 2020)。良性可持续的土地利用管理措施,如农林混合体系、间套作、土壤有机改良、作物覆盖等可实现生物多样性与农业系统健康协同发展;在农业系统中适当考虑生物质生产,可为生物质能源和其他生物产品获得更多收益,这些生态学系统方法有助于调控集约化农业生产对环境的压力,同时保持或提高土地生产力和作物产量(HLPE, 2019; Zalesny et al., 2019; Englund et al., 2020)。例如物种群体的生物多样性可增强农业系统对气候灾害的防御能力,提高系统稳定性和生产力;复合农业生产模式可提高对病虫害的抵御力,并获得系统协同收益(Rosa-Schleich et al., 2019; Holt-Giménez et al., 2021);采用气候智慧农业模式可提高作物产量,增强气候韧性并减少温室气体排放(Verkerk et al., 2020; Singh and Chudasama, 2021)。

#### 1.5 倡导具有气候恢复力的适应发展路径

气候恢复力发展路径(Climate-Resilient Development Pathways, CRDPs)是指“气候变化背景下,注重可持续发展、努力消除贫困、减少不平等并积极提升公平性和多层级适应与恢复力的发展过程”,由此要求在伦理、公平性和可行性上实现社会深度变革,通过大幅降低温室气体排放以控制全球增暖,并实现理想的未来人类宜居和福祉目标(IPCC, 2022)。农业气候恢复力发展路径需要持续应对粮食安全和气候变化多重挑战,综合考虑适应和减缓

对策以达到2030年联合国可持续发展目标的零饥饿及消除贫困等要求。粮食系统可采用自上而下、参与式、定性和定量等多种方法,将不同部门、不同参与者与不同应对措施有机整合联系,根据特定地域和利益相关者做细化部署、针对性决策、具体行动落实(Loboguerrero et al., 2020; Stringer et al., 2020)。例如,通过气候变化背景下对尼加拉瓜咖啡生产的适宜性和品质分析,警示对于依赖咖啡生产的当地农户,其咖啡生计仅能维持到21世纪中叶,需要有前瞻性的适应发展变革(Läderach et al., 2017)。虽然人们普遍共识CRDPs理念很有意义,但在其路径识别、实施、监测和评估方面仍存在巨大挑战。比如,目前还缺乏普遍接受且易于衡量的指标来确定适应进展成效,还不明确未来全球粮食系统预期发展模式及实现方法(Lin et al., 2017; Bloemen et al., 2018),且缺乏对粮食系统适应过程中,参与者的角色定位和作用反馈对于CRDPs适应行动成败重要性的认识(Bosomworth and Gaillard, 2019; Gerten et al., 2020)。

## 2 粮食系统评估中的新趋势

粮食系统评估在很大程度上需要与自然环境紧密联系起来,明确对粮食和营养安全产生影响的驱动机理。气候变化往往加剧了粮食系统相关驱动因素的影响,进一步限制了人类社会安全运行和繁荣发展的环境基础。气候变化对粮食系统的影响、适应和脆弱性还存在诸多尚不明确的科学问题,许多科学问题及研究方法还需要较长和深入的探索过程。

### 2.1 气候变化影响的检测与归因

气候变化影响归因是评估一个或多个因果要素对观察到的影响变化或事件的扰动过程及其影响程度(IPCC, 2022)。越来越多证据表明,极端天气气候事件与温室气体排放紧密相关,并确定对社会、生态和经济造成影响。由于影响归因研究包含了很多复杂的社会关系逻辑,通过估算气候变化造成的成本损失和损害,可延伸到气候风险管理成效以及潜在的气候损害补偿争议,需要尤其谨慎和科学的评估过程(Marjanac et al., 2017; Frame et al., 2020)。对于粮食系统而言,归因包括“气候变化对观测到的作物产量变化的作用幅度多大?产量变化中来自农业管理的贡献有多少?”等影响驱动要素的剥离和评估问题。目前对于粮食生产力影响归因,主要研究方法包括限定前提的经验或动态模型模拟、剔

除自然气候环境要素的田间对比试验、长期原位观测和监测、遥感技术动态比较、Meta分析等。归因研究还要与当地管理习惯和知识模式结合,通过估算在没有气候变化情况下可能存在的基线,比较影响作物生产的农业技术和经济成效,择取出气候变化的影响(Hochman et al., 2017; Butler et al., 2018)。当前由于缺乏长期观测数据以及粮食系统生产环境、技术和政策作用的复杂性,粮食作物影响的检测和归因仍在发展过程中,需要做更多的理论深化和技术研发,具有很大挑战性(Phalkey et al., 2015; Cooper et al., 2019)。

## 2.2 气候环境变化对粮食作物综合影响

气候变化不仅单纯指大气组成和气候要素变化,还涵盖其间接带来的环境改变,如增加大气 $O_3$ 产生、作物病虫害演变、土壤退化等农业环境问题(IPCC, 2022)。1850—2010年由于人类活动导致的气候变化,小麦、玉米、水稻及大豆四种主要作物的净产量损失为 $(9.5\% \pm 3.0\%)$ ,此评估结果中已综合考虑了 $CO_2$  ( $6.5\% \pm 1.0\%$ )的积极影响、以及变暖( $10.9\% \pm 3.2\%$ )和对流层 $O_3$ 浓度升高( $5.0\% \pm 1.5\%$ )的负面作用,超过一半的产量损失来自甲烷排放导致的气候变暖和 $O_3$ 浓度升高(Shindell, 2016)。2010—2012年 $O_3$ 浓度升高导致全球大豆、小麦、水稻和玉米分别平均减产12.4%、7.1%、4.4%和6.1%(Mills, 2018),加剧了气候变化对作物的负面影响。模型模拟研究表明,综合温度、水分、 $CO_2$ 及 $O_3$ 的气候环境变化,全球大豆和小麦分别减产2%~10%和0~39%(Schauberger et al., 2019)。此外,气候变化和 $CO_2$ 浓度升高,影响粮食系统中病虫害生物学特性,减低药效、缩短药效持续期,农药投入量增大,增加环境负重和防治成本(Zhang et al., 2018; Matzrafi, 2019; Refatti et al., 2019)。为提高粮食生产能力,过量使用有毒农用化学品对人类健康和环境都具有危害风险(IPBES, 2019),气候变化及连带环境响应的综合影响评估依然是农业生产的重点关注。

## 2.3 粮食-能源-水-健康等交互影响评估

粮食与水、能源及其他重要自然资源和社会要素之间的联系,对于客观科学评估粮食安全尤为重要,且粮食系统往往处于关联链的核心环节(Caron et al., 2018)。集约化农业寻求高效利用资源并提高生产能力,降低对水、土地、农用物质超额需求,实现生态系统服务和人类福祉良性持续发展(Rasmussen et al., 2018)。气候变化背景下粮食生

产力的提升,如果仅依赖增加投入品的使用,包括化肥、灌溉、耕地、农药等,极可能抵消适应的积极作用并造成土壤退化和地下水枯竭(Foster et al., 2018; Flörke et al., 2019)以及农业温室气体增量排放(Hickman et al., 2017; McGill et al., 2018)等气候环境风险。在气候变化背景下,满足日益增长的粮食、水、能源和营养需求,必须科学规划多重压力的权衡解决方案。粮食生产可考虑育种、灌溉模式、合理施肥等技术措施,同时匹配间套作、作物布局、种植结构等协同资源和产量的农业生态学途径,提高水-土-气等环境要素的产量响应能力(Nhamo et al., 2018; Soto-Golcher and Visseren-Hamakers, 2018)。此外,通过多方机构协调合作改善农业资源的跨境、跨部门分配,特别是与水有关的资源调配,实现有限资源下农业生产供需平衡(Nhamo et al., 2018; Amjath-Babu et al., 2019)。尽管目前的科学研究仅涉及少数关联要素之间的评估联系,但系统性的综合解决方案将改善整体发展和环境成效,整合多要素的研究仍需要持续的研发投入(Weitz et al., 2017; Shannak et al., 2018)。

## 2.4 适应措施的可行性和成效评估

针对粮食系统的适应措施包括品种改良、区域适应规划、气候服务、作物系统管理等。当前不同社会经济、文化和地理条件下已应用的合理适应措施,对应对气候变化影响都具有一定成效。本次WGII AR6评估中引入了适应措施可行性和成效评估。可行性评估采用了五个评价维度,包括地理区域、生态环境、技术能力、经济水平、社会制度(Singh et al., 2020; Williams et al., 2021);此外,可行性界定了适应行动的特定外延条件,如地方治理能力、公众意识、利益相关方意愿以及社会权限分配等具体境况,综合评估确定具体的量化分值(IPCC, 2022)。目前对于适应行动的成效量化评估则相对局限。由于具体适应成效案例研究采用了不同的评价指标,且具有局地社会经济个例特征,增加了适应成效综合评价的难度和复杂性。对于成功适应措施的判断,也还取决于适应实施的时空尺度、关注对象和风险水平(Dilling et al., 2019),其可能因气候风险的增加,导致以往成功适应的案例变得有效性骤减或可能演化为不良适应,这也降低了适应措施改进动力或限制了适应有效性作用(UNEP et al., 2021)。此外,适应成效评估还需要特别考虑成效的连带影响、适应规模及与其相关要素变化过程的复杂作用。目前对于适应成效的“监测与评估”研究还在发展完善

中,期望通过多重努力实现预定适应目标(Eriksen et al.,2021)。

### 3 对我国相关研究的启示

IPCC AR6 高度确信,人类活动引致的气候变化对生态系统和人类社会造成广泛和严重负面影响,且对气候变化脆弱的人群和生态系统冲击更为剧烈。气候变化对粮食系统的影响直接关系到粮食安全保障及其关键过程的连锁效应,如粮食价格、家庭收入、粮食安全和弱势群体的营养(Peri,2017; Ubilava,2018)。如果不采取适应行动,气候变化造成的不利影响将持续恶化(IPCC,2022)。在 WGII AR6 中倡导基于生态系统的适应解决方案,如种植作物多样化、土地培育与修复、资源协同调配等,更倾向于提高系统自身的气候变化恢复力,增强长期的生产力提升和系统功能性,包括病虫害控制、土地健康、生态良性授粉、减轻极端气候影响等。但由于各区域社会及自然基础条件差异,适应成效也不尽相同,因此各地需要因地制宜,开发具有积极成效的适应对策战略。

我国作为人口大国,粮食安全保障能力始终是

社会稳定的基石。纵观 WGII AR6 气候变化对粮食系统影响的评估内容,我国相关研究贡献主要集中于三大粮食作物的生育进程、地理分布、产量和营养及适应技术能力,但对于粮食收获后的影响评估研究相对薄弱;其次,粮食影响评估多集中于区域尺度,尤其国内不同粮食产区的评估较多,但具有亚洲和全球尺度的研究成果相对有限,也阻碍了我国研究成果更广泛的国际影响力;此外,适应能力的理论评估相对比较充实,但对适应措施实践的可行性和成效研究还有不足,需要学科之间更为广泛的交叉融合,不仅限于自然科学水-土-气等环境要素影响,也需要在适应过程中系统纳入社会科学内容;再者,目前粮食系统评估的技术方法主要基于国外的模型基础,我国具有自主知识产权的作物模型还在发展壮大中,也亟须国家在科研体系建设过程中予以重视和扶植。

气候变化是具有延续效应的环境和发展问题,涉及国家发展模式和国际利益空间的博弈。客观、科学地认识气候变化,将造福全人类的福祉权益,任重道远且具有极大的挑战性,需要人类社会共同不懈的努力。

### 参考文献(References)

- Aggarwal P, Vyas S, Thornton P, et al., 2019. How much does climate change add to the challenge of feeding the planet this century? [J]. *Environ Res Lett*, 14(4): 043001. doi: 10.1088/1748-9326/aafa3e.
- Ainsworth E A, Long S P, 2021. 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): what have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? [J]. *Glob Chang Biol*, 27(1): 27-49. doi: 10.1111/gcb.15375.
- Amjath-Babu T S, Sharma B, Brouwer R, et al., 2019. Integrated modelling of the impacts of hydropower projects on the water-food-energy nexus in a transboundary Himalayan River Basin [J]. *Appl Energy*, 239: 494-503. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.147.
- Beveridge L, Whitfield S, Challinor A, 2018. Crop modelling: towards locally relevant and climate-informed adaptation [J]. *Climatic Change*, 147(3): 475-489. doi: 10.1007/s10584-018-2160-z.
- Bloemen P, Reeder T, Zevenbergen C, et al., 2018. Lessons learned from applying adaptation pathways in flood risk management and challenges for the further development of this approach [J]. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 23(7): 1083-1108. doi: 10.1007/s11027-017-9773-9.
- Bosomworth K, Gaillard E, 2019. Engaging with uncertainty and ambiguity through participatory 'Adaptive Pathways' approaches: scoping the literature [J]. *Environ Res Lett*, 14(9): 93007.
- Brugère C, Aguilar-Manjarrez J, Beveridge M C M, et al., 2019. The ecosystem approach to aquaculture 10 years on a critical review and consideration of its future role in blue growth [J]. *Rev Aquacult*, 11(3): 493-514. doi: 10.1111/raq.12242.
- Butler E E, Mueller N D, Huybers P, 2018. Peculiarly pleasant weather for US maize [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115(47): 11935-11940. doi: 10.1073/pnas.1808035115.
- Caron P, Ferrero Y de Loma-Osorio G, Nabarro D, et al., 2018. Food systems for sustainable development: proposals for a profound four-part transformation [J]. *Agron Sustain Dev*, 38(4): 41. doi: 10.1007/s13593-018-0519-1.
- Cooper M W, Brown M E, Hochrainer-Stigler S, et al., 2019. Mapping the effects of drought on child stunting [J]. *PNAS*, 116(35): 17219-17224. doi: 10.1073/pnas.1905228116.
- Davis K F, Downs S, Gephart J A, 2021. Towards food supply chain resilience to environmental shocks [J]. *Nat Food*, 2(1): 54-65. doi: 10.1038/s43016-020-00196-3.
- Dilling L, Prakash A, Zommers Z, et al., 2019. Is adaptation success a flawed concept? [J]. *Nat Clim Change*, 9(8): 572-574. doi: 10.1038/s41558-019-0539-0.

- Englund O, Börjesson P, Berndes G, et al., 2020. Beneficial land use change: strategic expansion of new biomass plantations can reduce environmental impacts from EU agriculture [J]. *Glob Environ Change*, 60: 101990. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2019.101990.
- Eriksen S, Schipper E L F, Scoville-Simonds M, et al., 2021. Adaptation interventions and their effect on vulnerability in developing countries: help, hindrance or irrelevance? [J]. *World Dev*, 141: 105383. doi: 10.1016/j.worlddev.2020.105383.
- Flörke M, Bärlund I, van Vliet M T, et al., 2019. Analysing trade-offs between SDGs related to water quality using salinity as a marker [J]. *Curr Opin Environ Sustain*, 36: 96-104. doi: 10.1016/j.cosust.2018.10.005.
- Foster S, Pulido-Bosch A, Vallejos Á, et al., 2018. Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions [J]. *Hydrogeol J*, 26(8): 2781-2791. doi: 10.1007/s10040-018-1830-2.
- Frame D J, Wehner M F, Noy I, et al., 2020. The economic costs of Hurricane Harvey attributable to climate change [J]. *Climatic Change*, 160(2): 271-281. doi: 10.1007/s10584-020-02692-8.
- Galappaththi E K, Ichien S T, Hyman A A, et al., 2020. Climate change adaptation in aquaculture [J]. *Rev Aquacult*, 12(4): 2160-2176. doi: 10.1111/raq.12427.
- Galford G L, Peña O, Sullivan A K, et al., 2020. Agricultural development addresses food loss and waste while reducing greenhouse gas emissions [J]. *Sci Total Environ*, 699: 134318. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134318.
- Gerten D, Heck V, Jägermeyr J, et al., 2020. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries [J]. *Nat Sustain*, 3(3): 200-208. doi: 10.1038/s41893-019-0465-1.
- Gray S B, Dermody O, Klein S P, et al., 2016. Intensifying drought eliminates the expected benefits of elevated carbon dioxide for soybean [J]. *Nat Plants*, 2: 16132. doi: 10.1038/nplants.2016.132.
- Hickman J E, Huang Y X, Wu S L, et al., 2017. Nonlinear response of nitric oxide fluxes to fertilizer inputs and the impacts of agricultural intensification on tropospheric ozone pollution in Kenya [J]. *Glob Chang Biol*, 23(8): 3193-3204. doi: 10.1111/gcb.13644.
- HLPE, 2019. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition [R] // High level panel of experts on food security and nutrition of the committee on world food security. Rome, Italy: 163.
- Hochman Z, Gobbett D L, Horan H, 2017. Climate trends account for stalled wheat yields in Australia since 1990 [J]. *Glob Change Biol*, 23(5): 2071-2081. doi: 10.1111/gcb.13604.
- Hodges R J, Buzby J C, Bennett B, 2011. Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: opportunities to improve resource use [J]. *J Agric Sci*, 149(S1): 37-45. doi: 10.1017/S0021859610000936.
- Holt-Giménez E, Shattuck A, van Lammeren I, 2021. Thresholds of resistance: agroecology, resilience and the agrarian question [J]. *J Peasant Stud*, 48(4): 715-733. doi: 10.1080/03066150.2020.1847090.
- Ickowitz A, Powell B, Rowland D, et al., 2019. Agricultural intensification, dietary diversity, and markets in the global food security narrative [J]. *Glob Food Secur*, 20: 9-16. doi: 10.1016/j.gfs.2018.11.002.
- Iizumi T, Shiogama H, Imada Y, et al., 2018. Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981—2010 compared with pre-industrial levels [J]. *Int J Climatol*, 38(14): 5405-5417. doi: 10.1002/joc.5818.
- IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on biodiversity and ecosystem services [M]. Bonn, Germany: IPBES secretariat.
- IPCC, 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability [R]. Cambridge, U K and New York, USA: Cambridge University Press. (in press).
- Jin J, Armstrong R, Tang C X, 2019. Impact of elevated CO<sub>2</sub> on grain nutrient concentration varies with crops and soils: a long-term FACE study [J]. *Sci Total Environ*, 651: 2641-2647. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.170.
- Kimball B A, 2016. Crop responses to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 31: 36-43. doi: 10.1016/j.pbi.2016.03.006.
- Köhler I H, Huber S C, Bernacchi C J, et al., 2019. Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO<sub>2</sub> concentrations [J]. *Plant J*, 97(5): 872-886. doi: 10.1111/tpj.14166.
- Kummu M, Heino M, Taka M, et al., 2021. Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space [J]. *One Earth*, 4(5): 720-729. doi: 10.1016/j.oneear.2021.04.017.
- Läderach P, Ramirez-Villegas J, Navarro-Racines C, et al., 2017. Climate change adaptation of coffee production in space and time [J]. *Climatic Change*, 141(1): 47-62. doi: 10.1007/s10584-016-1788-9.
- Lin B B, Capon T, Langston A, et al., 2017. Adaptation pathways in coastal case studies: lessons learned and future directions [J]. *Coast Manag*, 45(5): 384-405. doi: 10.1080/08920753.2017.1349564.
- Loboguerrero A M, Thornton P, Wadsworth J, et al., 2020. Perspective article: actions to reconfigure food systems [J]. *Glob Food Secur*, 26: 100432. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100432.
- Marjanac S, Patton L, Thornton J, 2017. Acts of God, human influence and litigation [J]. *Nat Geosci*, 10(9): 616-619. doi: 10.1038/ngeo3019.
- Matzrafi M, 2019. Climate change exacerbates pest damage through reduced pesticide efficacy [J]. *Pest Manag Sci*, 75(1): 9-13. doi: 10.1002/ps.5121.

- McGill B M, Hamilton S K, Millar N, et al., 2018. The greenhouse gas cost of agricultural intensification with groundwater irrigation in a Midwest US row cropping system [J]. *Glob Chang Biol*, 24(12): 5948-5960. doi: 10.1111/gcb.14472.
- Medina Á, Rodríguez A, Magan N, 2015. Climate change and mycotoxigenic fungi: impacts on mycotoxin production [J]. *Curr Opin Food Sci*, 5: 99-104. doi: 10.1016/j.cofs.2015.11.002.
- Mills E N, 2018. Implicating 'fisheries justice' movements in food and climate politics [J]. *Third World Q*, 39(7): 1270-1289. doi: 10.1080/01436597.2017.1416288.
- Moore F, 2020. The fingerprint of anthropogenic warming on global agriculture [J]. *EarthArXiv*, doi: 10.31223/x5q30z.
- Nhamo L, Ndlela B, Nhemachena C, et al., 2018. The water-energy-food nexus: climate risks and opportunities in southern Africa [J]. *Water*, 10(5): 567. doi: 10.3390/w10050567.
- Ortiz-Bobea A, Ault T R, Carrillo C M, et al., 2021. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth [J]. *Nat Clim Change*, 11(4): 306-312. doi: 10.1038/s41558-021-01000-1.
- Peri M, 2017. Climate variability and the volatility of global maize and soybean prices [J]. *Food Sec*, 9(4): 673-683. doi: 10.1007/s12571-017-0702-2.
- Phalkey R K, Aranda-Jan C, Marx S, et al., 2015. Systematic review of current efforts to quantify the impacts of climate change on undernutrition [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112(33): E4522-E4529. doi: 10.1073/pnas.1409769112.
- Rasmussen L V, Coolsaet B, Martin A, et al., 2018. Social-ecological outcomes of agricultural intensification [J]. *Nat Sustain*, 1(6): 275-282. doi: 10.1038/s41893-018-0070-8.
- Refatti J P, de Avila L A, Camargo E R, et al., 2019. High CO<sub>2</sub> and temperature increase resistance to cyhalofop-butyl in multiple-resistant *Echinochloa colona* [J]. *Front Plant Sci*, 10: 529. doi: 10.3389/fpls.2019.00529.
- Rosa-Schleich J, Loos J, Mußhoff O, et al., 2019. Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems; a review [J]. *Ecol Econ*, 160: 251-263. doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.03.002.
- Schauberger B, Rolinski S, Schaphoff S, et al., 2019. Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects [J]. *Agric For Meteorol*, 265: 1-15. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.004.
- Shannak S, Mabrey D, Vittorio M, 2018. Moving from theory to practice in the water-energy-food nexus; an evaluation of existing models and frameworks [J]. *Water Energy Nexus*, 1(1): 17-25. doi: 10.1016/j.wen.2018.04.001.
- Shindell D T, 2016. Crop yield changes induced by emissions of individual climate-altering pollutants [J]. *Earth's Future*, 4(8): 373-380. doi: 10.1002/2016ef000377.
- Singh C, Ford J, Ley D, et al., 2020. Assessing the feasibility of adaptation options; methodological advancements and directions for climate adaptation research and practice [J]. *Climatic Change*, 162(2): 255-277. doi: 10.1007/s10584-020-02762-x.
- Singh P K, Chudasama H, 2021. Pathways for climate change adaptations in arid and semi-arid regions [J]. *J Clean Prod*, 284: 124744. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124744.
- Soto Golcher C, Visseren-Hamakers I J, 2018. Framing and integration in the global forest, agriculture and climate change nexus [J]. *Environ Plan C Politics Space*, 36(8): 1415-1436. doi: 10.1177/2399654418788566.
- Stringer L C, Fraser E D G, Harris D, et al., 2020. Adaptation and development pathways for different types of farmers [J]. *Environ Sci Policy*, 104: 174-189. doi: 10.1016/j.envsci.2019.10.007.
- Sultan B, Defrance D, Iizumi T, 2019. Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models [J]. *Sci Rep*, 9(1): 12834. doi: 10.1038/s41598-019-49167-0.
- Toreti A, Deryng D, Tubiello F N, et al., 2020. Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops [J]. *Nat Food*, 1(12): 775-782. doi: 10.1038/s43016-020-00195-4.
- Ubilava D, 2018. The role of El Niño Southern Oscillation in commodity price movement and predictability [J]. *Am J Agric Econ*, 100(1): 239-263. doi: 10.1093/ajae/aax060.
- Ujiiie K, Ishimaru K, Hirotsu N, et al., 2019. How elevated CO<sub>2</sub> affects our nutrition in rice, and how we can deal with it [J]. *PLoS One*, 14(3): e0212840. doi: 10.1371/journal.pone.0212840.
- UNEP, 2021. Adaptation gap report 2020 [R]. Nairobi.
- Verkerk P J, Costanza R, Hetemäki L, et al., 2020. Climate-Smart Forestry: the missing link [J]. *For Policy Econ*, 115: 102164. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102164.
- Wang W L, Cai C, Lam S K, et al., 2018. Elevated CO<sub>2</sub> cannot compensate for japonica grain yield losses under increasing air temperature because of the decrease in spikelet density [J]. *Eur J Agron*, 99: 21-29. doi: 10.1016/j.eja.2018.06.005.
- Wang J Q, Hasegawa T, Li L Q, et al., 2019. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short-term increased CO<sub>2</sub> and temperature of canopy air in a paddy from East China [J]. *New Phytol*, 222(2): 726-734. doi: 10.1111/nph.15661.
- Weitz N, Strambo C, Kemp-Benedict E, et al., 2017. Closing the governance gaps in the water-energy-food nexus: insights from integrative governance [J]. *Glob Environ Change*, 45: 165-173. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.06.006.
- Williams P A, Simpson N P, Totin E, et al., 2021. Feasibility assessment of climate change adaptation options across Africa: an evidence-based review

[J]. Environ Res Lett, 16(7):073004. doi:10.1088/1748-9326/ac092d.

Zalesny R S Jr, Berndes G, Dimitriou I, et al., 2019. Positive water linkages of producing short rotation poplars and willows for bioenergy and phytotechnologies[J]. WIREs Energy Environ, 8(5). doi:10.1002/wene.345.

Zhang Y W, McCarl B A, Luan Y B, et al., 2018. Climate change effects on pesticide usage reduction efforts: a case study in China[J]. Mitig Adapt Strateg Glob Change, 23(5):685-701. doi:10.1007/s11027-017-9755-y.

## New perceptions and trends in impacts and adaptations of food systems in IPCC AR6

JU Hui<sup>1,2</sup>, YUAN Jiashuang<sup>3</sup>, ZHANG Xinyue<sup>1,2</sup>, LIU Zhongwei<sup>1</sup>, WANG Jiandong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup>National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Interpreting the impacts and adaptations of food systems in the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group II (WGII) is important for the scientific understanding of the frontiers of the international discipline of climate change impacts on agriculture. The newly released IPCC AR6, on the basis of further elaboration of food production capacity, planting layout, pest and disease impacts, further confirms the negative impacts of anthropogenic warming on food systems, discusses climate risks in food processing, transportation and consumption, extends the review of food impacts in complex ecosystems, and expands the analysis of climate change impacts on the entire chain of food production-processing-transportation-consumption. It extends the attribution of impacts and enriches the scientific understanding of agro-environmental impacts. As for the adaptation capacity of food systems, it emphasizes the development pathway of climate resilience based on the synergy of adaptation and mitigation, the adaptation assessment has gradually shifted from the theoretical aspects of adaptation capacity and adaptation methods to the assessment of adaptation implementation and effectiveness, and the regional specificity and effectiveness of adaptation actions are identified. This assessment emphasizes the detection and attribution of climate change impacts on crops, focuses on the impacts of climate and agro-environmental change, introduces ecosystem-based adaptation schemes and technologies, and assesses the feasibility and effectiveness of existing adaptation technologies. The contents of the report are important references for China to strengthen its capacity in agricultural impact assessment and to catch the international dynamics of the discipline.

**IPCC AR6; food system; impact; adaptation; new perception; new trend**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220330007

(责任编辑:张福颖)