

DOI: 10.5846/stxb201909221976

陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 2021, 41(7): 2918-2929.

Chen R S, Guo X N, Xiong B, Wang Y, Chen Q. Climate change, land degradation and food insecurity: linkages and potential solutions. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2918-2929.

气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径

陈睿山^{1,*}, 郭晓娜¹, 熊波¹, 王尧², 陈琼³

1 华东师范大学地理科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241

2 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

3 青海省高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008

摘要: 气候变化影响全球食物、水、能源生产和消费, 并直接威胁国家和区域粮食安全和社会稳定, 相关研究关系到国计民生与全球可持续发展。土地退化是近年来国际研究热点, IPCC、IPBES、UNCCD 等都开展了土地退化的专题评估, 高度关注土地退化的动态、趋势、影响及响应。尽管气候变化与土地退化具有密切关联, 但对其复杂关联机制及解决途径缺乏系统的研究。IPCC 于 2017—2019 年开展了第一次气候变化和土地退化评估, 并于 2019 年 8 月发布了《气候变化与土地》特别报告 (SRCLL)。基于此评估报告, 对其中气候变化、土地退化与粮食安全之间的关联机制、未来的变化趋势、可能的影响及对策等进行了系统的论述。特别报告的重要贡献在于厘清了气候变化与土地退化之间的复杂关联与反馈机制, 进一步证实土地利用是导致气候变化的主要因素, 指出日益增加的人口压力和粮食消费加剧了土地的退化和气候变化。尽管如此, 特别报告也强调土地可为当前全球变暖、生物多样性减少等诸多环境问题提供解决方案, 并重点指出改变人类饮食结构和消费习惯具有能够同时应对气候变化和土地退化的双赢效果。将全球升温幅度限制在 1.5℃ 以内的窗口期正在迅速缩短, 要解决当前日益凸显的气候变化和土地退化问题, 需要推动食物消费的转型、降低碳排放、实施可持续土地管理, 促进可同时减缓气候变化和土地退化的协同行动, 科学合理的应用负排放和碳储存技术。

关键词: 气候变化; 土地退化; 粮食安全; 未来情景; 应对措施

Climate change, land degradation and food insecurity: linkages and potential solutions

CHEN Ruishan^{1,*}, GUO Xiaona¹, XIONG Bo¹, WANG Yao², CHEN Qiong³

1 Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

3 College of Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: Climate change affects global production and consumption of food, water and energy, and directly threatens national and regional food security and social stability, thus the relative research is detrimental to the national human prosperity and global sustainable development. Land degradation is an international hot topic in recent years. Many international platforms like IPCC, IPBES and UNCCD have done assessments on the land degradation, especially have focused on the dynamics, trends, impacts, and responses. Although climate change and land degradation are

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFC1503001); 国家自然科学基金项目 (41771119); 国家社科基金重大项目 (20ZDA085); 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放课题

收稿日期: 2019-09-22; 修订日期: 2020-09-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenrsh04@gmail.com

interconnected, there is a lack of understanding of their complex relations and solutions. IPCC has performed its first climate change and land degradation assessment from 2017 to 2019, and released the special report in August of 2019. Based on the report, here we analyzed the complex interaction and feedback between climate change and land degradation, their potential change in the future, and solutions to deal with these problems. The main contribution of the special report is that it clarified the linkages and feedbacks between climate change and land degradation, further recognized that land use change was the main driver of climate change, and indicated that the increasing human pressure and food consumption aggravated climate change and land degradation. However, land is also a solution to many environmental problems we faced today. Changing the human diet can address climate change and land degradation simultaneously. The window of opportunity to restrict global warming with 1.5°C is rapidly shrinking. We need to promote the diet transition, reduce carbon emission, implement sustainable land management, enable synergies between climate change mitigation and land restoration, and apply smart carbon dioxide removal technologies in order to address the worsening climate change and land degradation.

Key Words: climate change; land degradation; food security; future scenarios; responses

气候变化与土地退化可影响全球粮食与水资源安全,增加灾害风险,对全球资源环境产生系统性影响,对实现全球可持续发展目标至关重要^[1],两者均位列世界经济论坛发布的 2019 年全球可能面对的 10 大风险^[2],也被列入可能导致地球系统发生临界转型的九大行星边界^[3]。土地是人类生活的地方,也是一种关键的资源,我们依靠其获得食物、水、健康和其他福利,使其承受着越来越多来自人类的压力,然而,土地也是解决诸多环境问题的途径之一,但仅靠土地无法满足一切目标。全球气候变化是当前世界关注的热点,关注焦点涉及从短期极端灾害性天气的归因到长期气候变化的趋势分析等多个方面。同时,近年来发布的若干国际评估报告也十分重视土地退化问题,如 IPBES 全球土地退化与恢复评估报告^[4],UNCCD 的全球土地展望及其区域报告等^[5]。土地退化表现形式多样,从地域分有沙漠化、石漠化、森林退化、湿地退化等,气候变化会对各类土地退化均造成重要影响,但大部分研究主要关注气候变化对沙漠化、耕地生产力及粮食安全的影响,对其他类型土地退化的影响缺乏系统的分析。同时,长期以来学界认为土地变化是与化石燃料燃烧一样导致全球温室气体排放的关键因素之一,然而,对土地系统变化如何影响气候变化缺乏定量分析和系统评价。因此,气候变化和土地退化之间存在哪些广泛的关联与反馈?在未来气候变化的情景下,2030 年全球将有近一半的人生活在用水压力高的地区^[1],全球温度增加 1.5°C 对这些地区的土地退化有哪些影响、其趋势如何及该如何应对等都需要进行系统分析。

自 1990 年 IPCC 开展气候变化评估以来,诸多研究已经表明气候变化会影响粮食安全,同时,农业、粮食生产和森林退化相关的土地系统变化是气候变化的主要驱动力。低效、粗放的粮食生产方式导致气候变化和土地退化,人类营养选择也决定着温室气体的排放和土地压力的大小^[1]。然而,粮食生产和消费对气候变化有多大贡献?保障粮食安全如何影响气候变化和土地退化及如何进行调控从而降低影响,也缺乏系统的了解。因此,应对气候变化,同时改善土地质量、保障粮食安全和营养健康需要揭示粮食安全与气候变化、土地退化之间的关联与反馈机制。

《IPCC 气候变化与土地》特别报告是与《全球升温 1.5°C》^[6]、《气候变化中的海洋和冰冻圈》^[7]并列的特别报告之一,是 IPCC 第一次系统地评估土地退化与气候变化之间的关联,主要关注气候变化、沙漠化、土地退化、可持续土地管理、粮食安全和陆地生态系统温室气体排放等。该报告由全球来自 52 个国家的 107 位专家撰写,共审阅 7000 余篇公开发表的文献,在 28275 条修改意见的基础上完善而成。报告自 2017 年 10 月 16 日在奥斯陆举行的第一次主要作者会议开始,至 2019 年 8 月 8 日在日内瓦发布《气候变化与土地》特别报告,历时近 2 年。本文以《IPCC 气候变化与土地评估报告》为基础,主要考察气候变化与土地退化的关联机制、未来动态格局与趋势、粮食安全与气候变化的关联、以及减缓气候变化与土地退化的响应对策等方面的进展,以期为我国增强土地系统的可持续性,应对气候变化和土地退化,实现粮食安全和可持续发展,开展“山

水林田湖草”系统治理和生态文明建设提供理论支持。

1 气候变化和土地退化的关联机制

1.1 气候变化对土地退化的作用

《IPCC 气候变化与土地》特别报告中,土地退化被定义为土地状态因直接或间接的人为过程影响而呈现负面趋势,表现为生物生产力、生态完整性或对人类利用价值的长期减少或损失。气候变化包括气温升高干旱加剧,极地范围缩小,极端天气(干旱、热浪、特大降雨、强风)频发等,在不同时空尺度上影响土地的功能和状态进而导致土地退化^[8-10]。一般来说,气温每增加1℃,空气湿度可增加约7%。因此,气候变暖可能会导致某些区域强降水频率、强度和数量增加,进而增加土壤侵蚀的速率。以印度中部为例,1950—2015年极端降雨事件增加了3倍^[1]。降水增加和土壤侵蚀可能会带来次生灾害,如滑坡、泥石流发生概率增加^[6]。强降水和洪水还可造成土壤压实(含水量越高土壤越易压实),影响植物生长和动物生存。极端强降水通过重新分配流域地表水和地下水,改变土壤饱和度,造成土壤养分流失、植物生产力下降,增加土壤温室气体排放,影响微生物生长和微生物群落组成等,对土壤氧化还原产生负面影响,导致土壤质量下降^[11-14]。

全球变暖会改变地表过程和陆地生态系统及其组成、结构和功能^[15-16],进而导致土地退化。气候变暖有利于喜热物种生长,但会造成耐寒生态系统退化^[17]。极端高温和干旱频率及强度的变化将导致生态系统碳吸收能力降低、生态系统退化和恢复力丧失^[18]。气候变化尤其是地表温度升高和蒸散增加将加剧旱地土地退化和沙漠化进程,这一过程难以扭转。气候变化可能提高植物呼吸速率,降低土壤有机碳库的输入,并加速土壤有机质的分解,进而降低土壤有机碳含量,增加局部地区盐碱化风险。极端高温天气事件的次数和强度增加,特别是频繁且长时间的干旱,极易引发森林火灾进而造成森林退化。2001—2015年,全球森林退化主要归因于商品驱动的森林砍伐((27±5)%),林业发展((26±4)%),农田开垦((24±3)%),野火((23±4)%),城市扩张((0.6±0.3)%)^[19]。极端高温通过减少树木光合作用,限制叶片生长速度,进而影响森林生长。极端干旱和高温事件频发,降低了森林抵抗未来热压力的能力,可能直接引发局部大量树木死亡。气候变化使森林面积在热带呈净减少趋势,在温带和寒带地区呈净增加趋势^[20-21]。气候变化还会增加极端复合事件的发生概率,包括同时发生的多种灾害事件或有因果关联的灾害链事件^[22-24]。随着全球气温上升,多重风险相互叠加和耦合作用会增加极端复合事件的风险。如,降水增加导致滑坡泥石流频发,进而破坏耕地、减少作物产量。台风强度增加毁坏森林,风暴潮导致海水倒灌增加农田盐碱化程度,台风风浪侵蚀海岸线导致土地面积减少等。气温升高可能会对植被覆盖产生深远影响。若气温比工业化前(1850—1900年平均值)升高2℃,将只有2/3的关键生物多样性区域保持完整,若升高4.5℃,则只剩1/3^[1]。缺少植被防止地表侵蚀将加剧土地退化。

总之,气候变化通过影响土地结构、功能、过程造成土地退化,增加土地应对气候压力的敏感性,降低农业产量和收入。为满足生存需求,人类开垦更多的土地,这进一步加剧了土地的退化及气候敏感性。土地变化通过改变大气生物物理、生物地球化学过程,影响气候变化(图1)。气候变化加速了许多土地退化过程,除非土地管理得到改善,否则气候变化将加剧土地退化。然而,土地退化是受多种因素影响的复杂现象,与气候、生态、土地类型和管理有关。将土地退化归因于气候变化或要证明气候变化确实影响土地退化还面临诸多挑

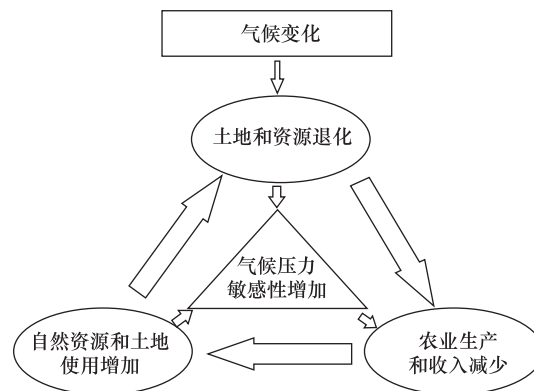


图1 土地退化与气候变化的相互作用^[1]

Fig. 1 Interaction between land degradation and climate change^[1]

战。尽管部分研究表明气候变化会增加土地退化的风险,但将土地退化明确归因于气候变化的研究并不多见。

1.2 土地退化对气候变化的影响

土地在气候系统中起着重要作用。土地退化通过改变地表特征、大气成分、地表温度来减缓(负反馈)或加剧(正反馈)气候变化。当前全球 77% 的土地已被人类利用,由此引起的土地利用变化对气候变化有重要影响^[25]。土地退化通过不同时空尺度胁迫的多种生物物理和生物地球化学过程对气候变化产生影响。陆地与大气之间的水和能量交换称作生物物理相互作用,与大气之间的温室气体交换称为生物地球化学相互作用。陆地生物圈通过淡水、营养物质、碳和颗粒物的流入与海洋相互作用,影响降雨的时间、地点、频率和强度,并受到全球和区域气候变化的影响。生物地球化学作用主要促进植物光合作用和呼吸作用之间的平衡,以及微生物对土壤有机质的分解。土地光合作用通过影响二氧化碳吸收和水分蒸散发导致全球温差及降水变化,并通过不断与大气交换温室气体而改变大气组成。

陆地生态系统结构和功能变化影响地方、区域和全球气候(图 2)。土地是温室气体的源和汇,土地退化将改变二氧化碳、甲烷和二氧化氮等的吸收和排放量,引起大气组成变化,进而影响气候变化。2008—2017 年,土地利用变化产生的碳排放总量约为 15×10^{12} kg/a。甲烷在过去百年时间内产生的温室效应比二氧化碳强 32 倍,自 1961 年以来增加了 1.7 倍,其中水稻田是甲烷排放的主要来源。大部分二氧化氮来自氮肥使用,自 1961 年以来,全球化肥使用量增加了 9 倍^[1]。合理利用土地和使用化肥在一定程度上可以减轻土地退化对气候变化的影响。尽管土地利用变化的排放量较高,但目前土地碳吸收量仍高于排放量,2007—2016 年,土地的碳净吸收量约为 60×10^{12} kg/a。

地表反射率决定了被陆地吸收并反射到大气中的太阳辐射量。地表特征受自然过程和土地管理的双重影响^[26]。陆地生态系统通过排放和吸收温室气体和陆地短期气候前兆因子来调节大气成分。由这些前兆因子形成的大气气溶胶通过影响云的形成和发展影响降水量,改变到达陆地表面的辐射量,进而影响区域气候^[27]。此外,气溶胶特别是炭黑在冰雪表面的沉积会降低反照率,增加地表温度。土地退化还会通过改变地表物理特征影响大气的状态(如空气质量、化学成分、温度和湿度)和动力(如水平和垂直风力)进而影响气候变化。例如,巴西砍伐热带雨林降低了森林的固碳能力,释放大量温室气体导致全球变暖,同时增强对流与海陆间的相对温差,促进海洋上的水分水平流动,从而使降雨进一步向内陆地区移动^[1]。

荒漠化将通过改变植被覆盖、气溶胶和温室气体通量等多种机制而加剧气候变化。干旱会使大气中的二氧化碳含量急剧升高,1948—2012 年干旱导致相关区域二氧化碳增加了 6%,预计到 2050 年至少还会增加 8%,使得这些地区净碳吸收比其他地区低 27%。荒漠化通过改变相关温室气体的吸收和排放,增加反照率,降低地表温度,减少地表的可用能源,对气候变化产生负反馈。此外,荒漠化将减少土壤有机质,增加地表裸露程度,减少地表植被覆盖,增加地表干燥程度,加剧沙尘暴发生的频率和强度^[1]。

总之,土地退化通过改变地表覆盖、地表粗糙度、地表温度、大气成分和温室气体通量等改变地表和大气之间的生物物理和生物地球化学过程,从而影响气候变化。尽管土地变化是气候变化的主要驱动因素之一,但是目前土地仍是重要的碳汇。

1.3 气候变化与土地退化的未来情景

《IPCC 升温 1.5℃》特别报告称,相比工业化前(1850—1900)平均值,2006—2015 年全球平均气温升高了 0.86℃,2009—2018 年升高了约 0.93℃,而 2014—2018 年的平均气温则升高了 1.04℃,表明近年来全球变暖趋势逐渐加剧。若全球升温 1.5℃,旱地缺水、火灾频发、多年冻土退化和粮食系统不稳定的风险将均会增加^[6]。

由于气候变化,预计未来人类遭遇土地退化的风险会增加。IPCC 先后发布排放情景特别报告(The Special Report on Emissions Scenarios, SRES)(2000 年),典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)(2010 年),共享社会经济途径(The Shared Socio-Economic Pathways, SSPs)(2014 年)等不同情景来预

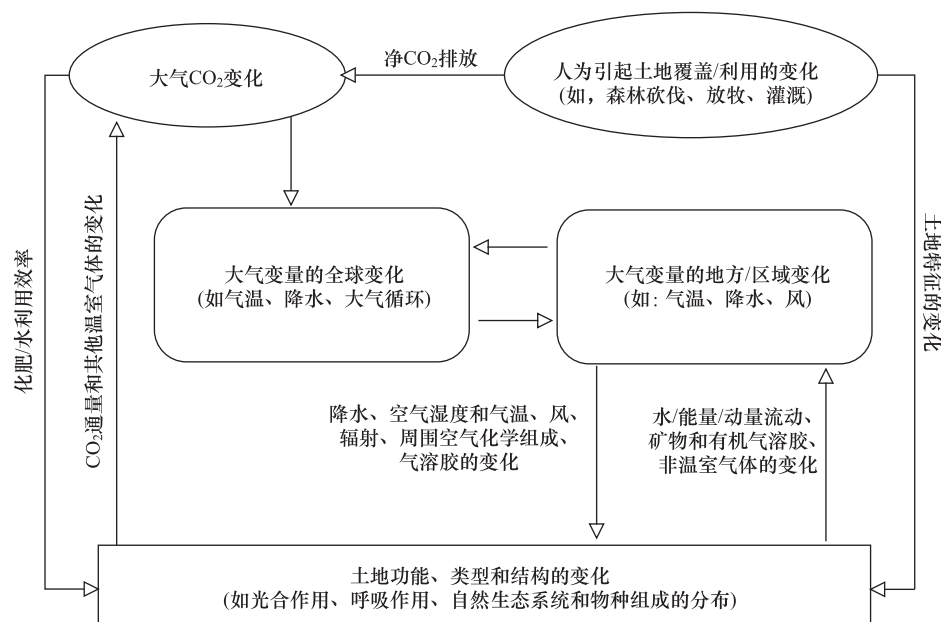
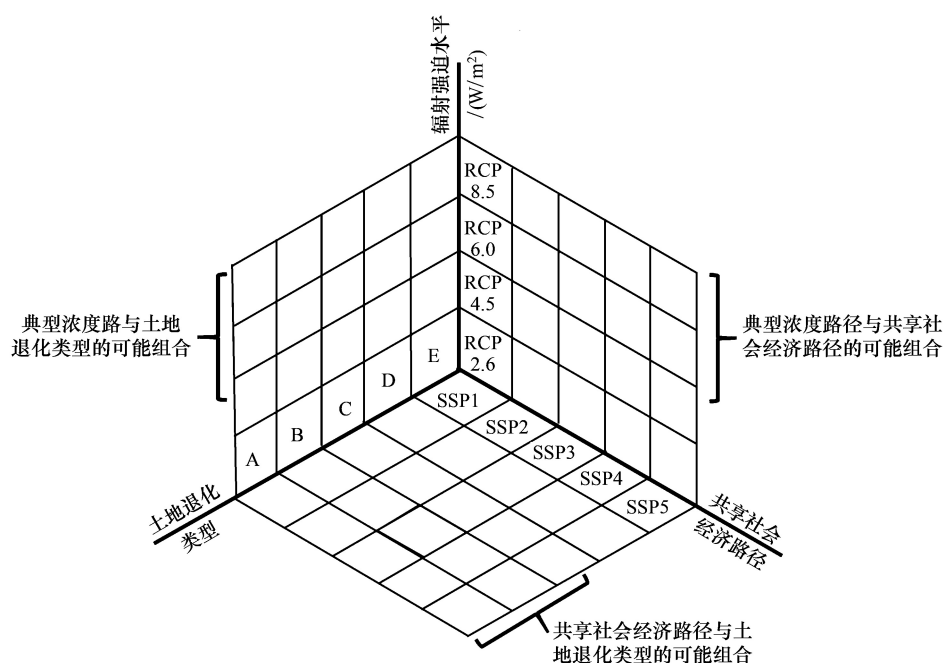
图2 气候与土地相互作用机制^[1]Fig.2 Interaction mechanism between climate and land ^[1]

图3 典型浓度路径、共享社会经济路径与土地退化类型的组合

Fig.3 The combination of RCPs, SSPs and types of land degradation

A 沙漠化, B 土壤侵蚀, C. 森林火灾和森林退化, D. 草地退化, E. 多年冻土消融

测未来气候变化,这些情景为未来土地退化趋势分析提供了重要的工具(图3)。在所有典型浓度路径(RCPs)下,由于地表温度升高和地表水汽亏缺,潜在蒸散量(PET)将在全球范围内增加,从而进一步增加干旱地区荒漠化风险^[28]。在全球范围内,气候变化将加剧干旱发生的频率和严重程度^[29-36]。《IPCC第五次评估报告》指出,相对于1850—1900年,在所有情景下(RCP2.6情景除外),21世纪末全球地表温度变化可能超

过 1.5℃,且 2100 年之后变暖还会持续^[37]。在 RCP8.5 情景下,中亚中部和北部以及中国西北地区荒漠化呈加速趋势^[37-38]。有学者运用修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)模型计算土壤侵蚀变化,发现 20 世纪土壤侵蚀潜力增加了约 17%,未来气候变化还将进一步加剧土壤侵蚀^[39]。根据《IPCC 气候变化与土地》特别报告,在中间路径(SSP2)及 1.5℃、2℃和 3℃的全球变暖情景下,预计 2050 年干旱区受水分胁迫,干旱强度增加,栖息地退化的暴露人口和脆弱人口将分别达到 9.51 亿(1.78 亿)、11.52 亿(2.2 亿)和 12.85 亿(2.77 亿)。即使在可持续路径(SSP1)下,全球升温 2℃时分布在干旱(脆弱)地区的暴露人口和脆弱人口也将达 9.74 亿和 3500 万,而在区域竞争路径(SSP3)下,则可达 12.67 亿(522 万)。大约一半的弱势群体分布在南亚,其次是中亚、西非和东亚^[1,40]。

根据《联合国全球土地展望》报告,在所有共享社会经济路径下,撒哈拉以南非洲、中东和北非、南亚以及东南亚地区,未来土地退化风险将会增加。预计至 2050 年,生物多样性将丧失(4—12)%,并持续至 21 世纪下半叶。土地覆被和土壤质量下降将使洪涝和干旱的发生频率增加,这种现象在旱地将更加明显,而旱地还面临高于全球平均水平的人口增长。在气候变化影响下,撒哈拉以南非洲近 20%的土地面积已出现生产力下降,全球其他大多数地区则为 5%至 10%^[41]。预计到 2050 年,全球农田面积需要再增加 5%,才能弥补生产力的损失^[5]。

总之,根据 IPCC 典型浓度路径,未来全球温度将进一步升高,在所有共享社会经济路径下,土地退化的风险将进一步加剧,影响土地生产力。即使在可持续路径(SSP1)下,2050 年全球升温 2℃时分布在干旱地区的暴露人口和脆弱人口也将达到 9.74 亿和 3500 万,这将严重影响全球实现可持续发展的程度。

2 粮食消费与气候、土地变化的互馈机制

2.1 粮食消费对土地退化和气候变化的影响

粮食安全与土地退化、气候变化密切相关。当前,占地球 77%以上的土地(不包括南极洲)和 87%的海洋已受人类活动直接影响而改变^[25]。粮食系统贡献了全球 30%的碳排放,80%的全球森林退化,使用了全球 70%的可用淡水资源^[1]。随着人口增长、城市化发展和饮食结构的变化,人类消费的粮食数量在增加,其中肉类的消费量对土地的需求量更大,而其产生的碳排放量也较大。2019 年 IPBES 发布的全球评估报告指出消费是生态系统退化的关键驱动力之一。在过去 30 年间,全球贸易量增长 8 倍,全球经济量增加 6 倍,致使人们对自然资源的需求提高了 1 倍^[42]。估计到 2050 年,人口增加、城市化导致的食物消费结构变化会导致粮食需求比 2010 年增加 56%^[43],从而需要更多的土地来满足人类的需求,这将进一步加剧对土地系统带来的压力。

每年被浪费的粮食大约占全球产量的 1/3^[44]。粮食损失和浪费的原因在发达国家和发展中国家之间以及各区域之间差别很大。减少粮食损失和浪费可减少温室气体排放并改善粮食安全现状。当前,保证长期粮食安全所需的许多农作物的野生近缘种都缺乏有效保护,驯养哺乳动物和鸟类的野生近缘种的状况也正在恶化。栽培作物种类、作物野生近缘种和驯养品种多样性的减少将降低农业对未来气候变化、害虫和病原体的抵抗力。虽然现在比以往任何时候都有更多的食物、能源和原材料供给大多数地区的人们,但未来大自然提供这些贡献的能力在削弱。

至 2050 年,动物产品消费的增加可能会突破气候安全、生物地球化学循环和土地系统三个行星边界^[45]。因此,减少动物产品消费,转向以植物为基础的饮食,改变饮食习惯可以限制气候变化和生物多样性损失^[46]。减少农业向生物多样性丰富地区的扩张和集约化^[47],避免大片土地因农业、畜牧业扩张而退化,可以降低气候变化的幅度。

2.2 气候变化对粮食安全的影响

气候变化正在影响粮食安全的四大支柱:可用性(产量和生产)、可获取性(价格和获取食物的能力)、可利用性(营养和烹饪)和稳定性(供应链中断)。未来气候变化将日益影响粮食安全,体现在产量下降(特别在

热带地区)、价格上涨、营养质量下降和供应链中断(图4)。

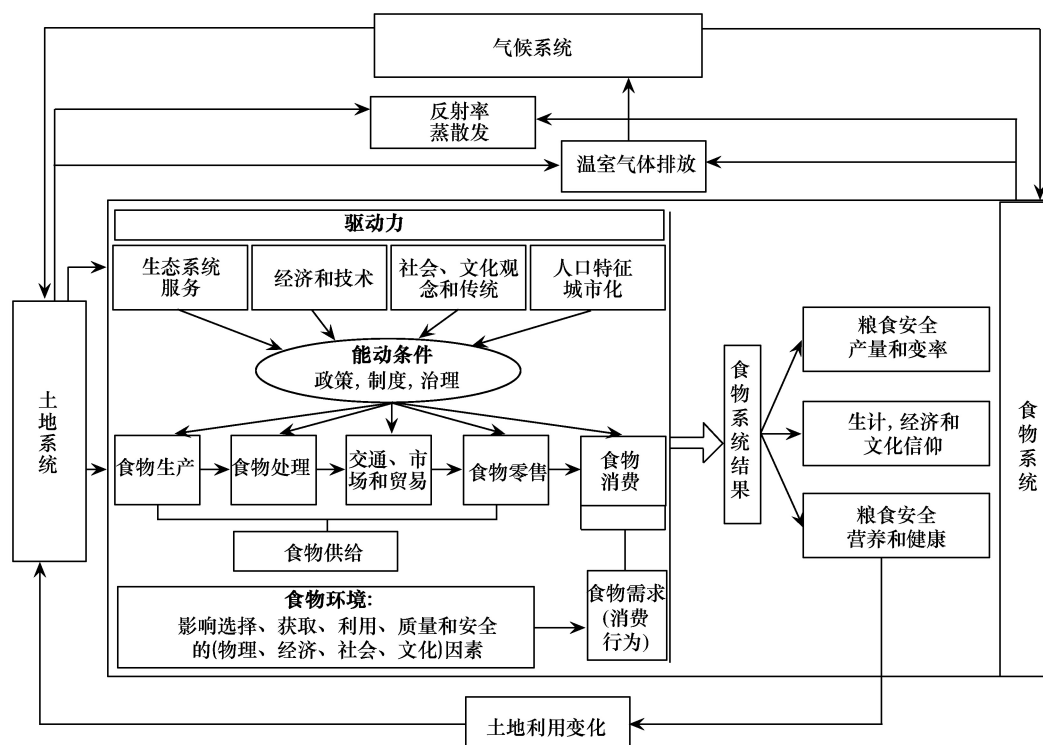


图4 气候、土地与食物系统间关联^[1]

Fig.4 linkages among climate, land and food system^[1]

气候变化会改变粮食适宜种植区域,而干旱、极端气象灾害会减少粮食产量^[48]。气候变暖和降雨模式变化可改变作物生长季的开始和结束日期、以及作物种类和品种,使区域淡水供应减少,作物减产,树木死亡率增加,降低生物多样性。近几十年来,由于极端天气事件,全球谷物产量平均减产约10%。气温升高提高了高纬度地区部分作物(玉米、棉花、小麦、甜菜)的产量,却降低了低纬度地区部分作物(玉米、小麦、大麦)的产量。在亚洲,气候变暖使中国东北地区水稻产量增加,却使印度小麦产量在1981—2009年减少了5.2%,而整个非洲大陆的主要作物如玉米、小麦、高粱和水果的产量近年都有所下降。气候变化还可能增加病虫害发生率,加剧土壤侵蚀,降低土壤质量,影响农业产量。同时,气候变化也可能影响畜牧业生产,如热浪的增加可能导致动物的发病率和死亡率上升^[1]。

气候变化还可降低粮食质量。大气中二氧化碳浓度升高会降低作物的营养成分,如蛋白质和锌等。极端干旱使喀麦隆的撒哈拉地区农业减产、营养元素摄入量减少,营养不良现象日益严重^[1]。由于气候变化,2050年谷物价格可能会上涨1%—29%,导致粮食危机和饥饿风险增加。气候变化对低收入国家和低收入人群构成更直接威胁。气候变化通过减产或减少高营养作物的供应,降低低收入人口的营养摄取,低收入人口也可能通过改吃韧性较强但营养价值较低的粮食来适应气候变化,进而影响其营养状况。在发达国家,贫穷通常意味着消费高热量但低营养的食品,引起饮食不良、肥胖和其他相关疾病。气候变化还会改变人类消费模式,增加对粮食、饲料和水以及资源密集型产品的生产和消费需求,导致旱地水资源短缺、土地退化和粮食不安全的风险增加。减少不平等、提高收入和确保公平获取粮食可使一些地区(土地无法提供足够的粮食)摆脱不利地位,适应气候变化的不利影响。

气候变暖会影响粮食供应。IPBES估计到2050年,气候变化和土地退化将减少全球10%的粮食生产,而在一些区域可以达到50%。土地生产力的下降将会影响一些区域特别是干旱区的社会经济稳定性。连续多年的干旱少雨将使干旱区暴力冲突增加45%。土地退化导致全球每年国内生产总值(GDP)损失5%,暴力冲

突发生的可能性增加 12%。土地退化和气候变化可能迫使全球 5000 万至 7 亿人口迁移^[4]。厄尔尼诺等气候自然变化也可能对粮食供应产生深远影响^[49]。发生在 2015 年末至 2016 年初的强厄尔尼诺现象,导致埃塞俄比亚严重干旱,大面积作物歉收,超过 1000 万人需要粮食援助。粮食产量减少会使粮食价格上升,减少低收入群体的粮食供给,引发社会冲突。如 2010 年中国和俄罗斯干旱导致了全球粮食价格上升和阿拉伯之春的爆发^[50]。同时,气候变化还会加剧病虫害和流行病爆发,从而影响粮食安全和社会稳定。中国历史上多次干旱导致了蝗虫爆发,影响了粮食安全和朝代的更替^[51]。而近年多发的各类传染性疾病也影响了食物的价格和供给,如 2018 年开始在中国、越南等国爆发的非洲猪瘟,导致 500 多万只亚洲生猪死亡,从而影响了猪肉的供给和价格^[52]。

2.3 食物消费转型的潜在贡献

采用应对气候变化的协调行动可同时改善土地状况、粮食安全和营养健康,并有助于消除饥饿。转向以植物为主的饮食可以解决气候变化问题。一些饮食选择,相比其他的选择会消耗更多的土地和水,并排放更多的温室气体(图 5)。要实现《巴黎协定》的气候变化目标需要食物系统的转型^[46]。以植物性食物(如粗粮、豆类、水果和蔬菜)和低碳的动物性食品为特色的平衡饮食,可适应和限制气候变化。2019 年发布的《柳叶刀》报告对粮食安全、营养及全球变化之间的关联进行了系统分析,推荐了营养价值高但环境影响小的食物搭配,从餐桌上开始改善环境^[53]。通过饮食变化或通过灾害的早期预警确保各种作物可持续生产,可以防止土地进一步退化,并增加应对极端或不断变化的天气的抵御能力^[1]。

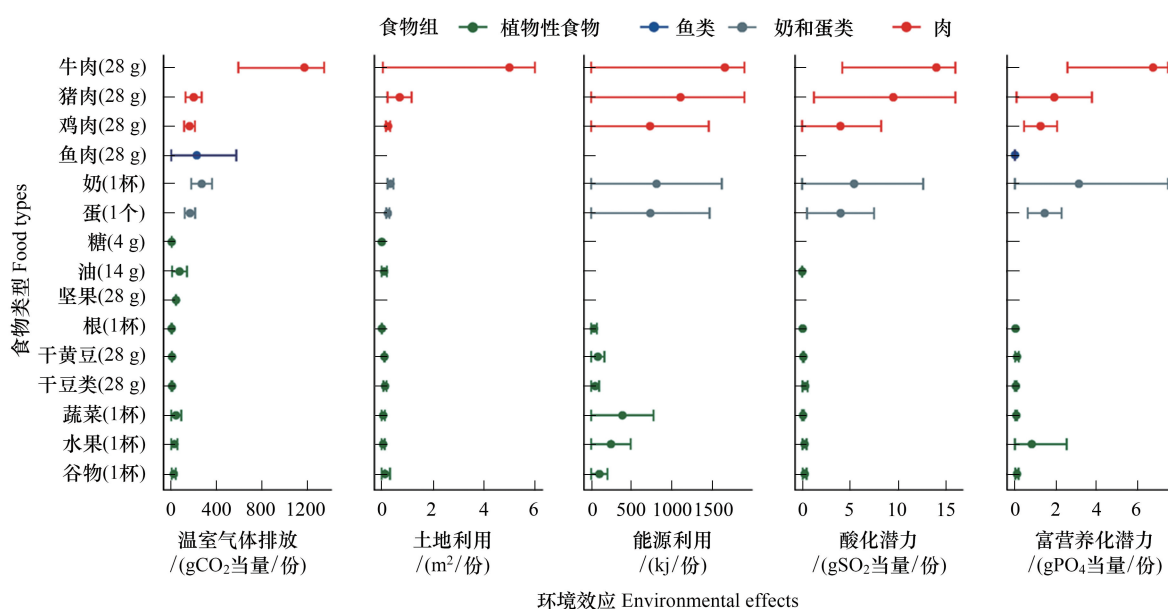


图 5 食物消费的环境效应^[53]

Fig.5 Environmental effects of food consumption^[53]

3 气候变化与土地退化应对措施的权衡与协同

3.1 协调政策措施间的冲突与权衡

土地退化会加剧气候变化,进而增加自然灾害的频率与强度,降低粮食安全程度。但土地也为诸多生态环境问题提供解决方案,从土地及其提供的产品和服务入手可减轻气候变化和土地退化。主要的途径包括(可持续)土地管理,价值链管理和风险管理(图 6)。

可持续土地管理可以帮助减缓和适应气候变化,保护土地免受土壤侵蚀和山体滑坡等影响。价值链管理强调从需求和供应角度改变管理方式,将系统调整到高效状态。风险管理通过损失的转移、分散与分担来增

强人类对极端事件的抵御和恢复能力,如早期预警系统和保险可以保障作物产量及经济收入,并降低土地和粮食系统的脆弱性。三大管理模式下有不同的措施可供选择,部分措施在应对气候变化和实现可持续发展目标方面可能存在权衡机制。如,使用生物能源替代化石燃料可以减少温室气体排放,但生物能源的大规模扩张也可能造成森林退化、减少粮食生产^[54-56]。

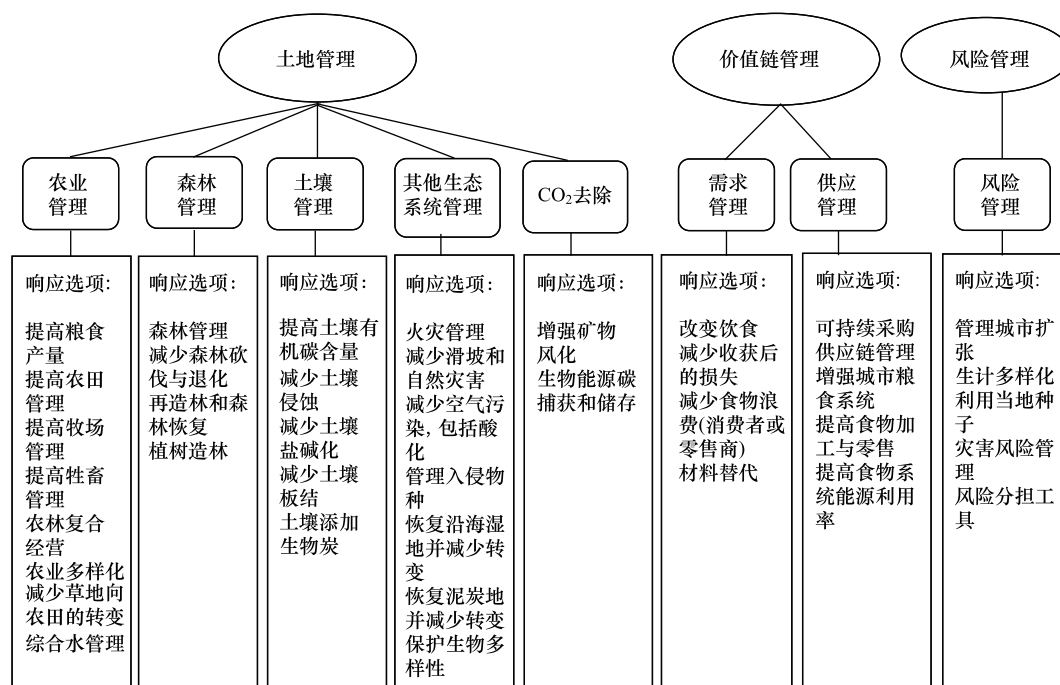


图6 应对土地退化和气候变化的策略^[1]

Fig.6 Strategies to address land degradation and climate change^[1]

通过增加土壤有机质含量和多年生植被,增加地上和地下的碳储量,可缓解气候变化,这与实现粮食安全和土地恢复之间存在权衡关系。相关的措施包括:如减少粮食种植面积或土地休耕来减轻土地压力,通过造林、农林复合经营来增加地上和地下碳储存,以及通过牲畜或氮肥管理减少温室气体排放源。适应气候变化的土地措施有系统性的(如灌溉和排水系统,洪水和滑坡控制)、技术性的(如作物改良,天气预报)和体制的(如管理土地利用和农民之间的关系)。一些适应性选择(如灌溉,生物燃料)可能对水资源和生物多样性产生负面影响,需要结合自上而下的规划方案和自下而上的适应方案(如地方的技术和知识)。

3.2 促进改善气候和土地的协同行动

一些应对土地退化和气候变化的行动与措施往往具有协同效应。多种政策组合可以节约资源,增强社会韧性,促进生态恢复,从而更好地减缓、适应气候变化,减轻土地退化。另外,多个政策有效组合共同作用于同一土地的减缓潜力,一般会大于单个政策减缓潜力之和。许多土地管理措施有助于气候变化的适应和减缓,防治沙漠化和土地退化,并加强粮食安全,解决其他环境挑战。大面积种植单一生物能源作物会加剧土地竞争,而融入可持续管理的农业景观可以改善这种状况。减少干扰(如火灾管理)与植树造林结合可以增加陆地碳汇,从而增强缓解气候变化与土地退化的潜力,降低减缓成本^[57]。减少粮食浪费和肉食性饮食将减少碳排放,实现土地利用的可持续管理、粮食安全和低碳排放。禁止毁林和过度采伐与改善农村能源环境也可以同时降低土壤侵蚀、减缓气候变化。在解决土地退化和气候变化问题上没有完美的政策组合,只有不断寻求最大协同效益。

成功的土地、农业和环境政策,需要多利益相关者共同参与,尤其是容易受到忽视的当地居民和社区等当地利益相关者。应对方案在实施过程中会面临各种障碍,需要多个参与者采取一致行动才能克服。此外,促

进社会学习、保障妇女权利对方案的实施也很重要,可以调动农村居民参与气候变化和土地退化的积极性,通过社会学习可以增强其应对气候变化和土地退化的能力。城市绿色基础设施也是一种缓解气候变化的解决方案^[58-59],通过垂直绿化、屋顶花园、郊区农业、垂直农业等^[60],既可满足城市的部分粮食需求,又可减轻农村土地退化压力^[61]。此外,通过改善市场进入,确保土地所有权,将环境成本纳入粮食安全、生态补偿有助于实现可持续土地管理和消除贫困,是适应气候变化的重要方式。另外,交通方式的改变也可减缓气候变化。

3.3 科学应用负排放与碳固存技术

《IPCC 升温 1.5℃》特别报告指出,要将全球变暖控制在安全限度内,需要一定程度的负排放。负排放泛指从大气中捕获二氧化碳并储存在陆地或海洋中的办法,包括植树造林等自然方法和人工固碳等技术。许多将全球变暖限制在 1.5℃ 的途径依赖生物能源碳捕获和储存技术(Biomass Energy Carbon Capture and Storage, BECCS),《IPCC 第四次评估报告》中认为 BECCS 是降低大气二氧化碳浓度的关键技术。英国皇家学会估计 BECCS 可使全球大气二氧化碳浓度降低 0.005% 至 0.015%^[62]。Bastin 等研究发现,如果在全球增加近 10 亿 hm^2 森林,就能吸收 2/3 的大气二氧化碳^[63]。然而,如果大规模应用碳吸收技术,以每年几十亿 t 的规模去除大气二氧化碳,将不可避免变更土地用途,挤占野生动植物栖息地和耕地,影响可持续发展。

4 结论与讨论

本文以 IPCC 气候变化与土地特别评估为基础,分析了气候变化与土地退化的关联机制、气候变化对粮食安全的响应及气候变化与土地退化的应对策略等,指出土地退化受气候变化影响,同时土地退化也是驱动气候变化的关键因素。土地利用所排放的温室气体,占人类排放温室气体总量的 23%,而土地自然吸收二氧化碳的数量约相当于人类燃烧化石燃料和工业排放二氧化碳总量的 1/3^[1]。但是滥伐森林、过度放牧等导致的森林退化和土地荒漠化影响了土地碳储存能力,从而加剧气候变化。气候变化也改变了陆地生态系统,通过极端事件等加剧了土地退化的过程。

食物与气候变化密切相关。粮食系统贡献了全球 30% 的碳排放,80% 的全球森林退化,使用了全球 70% 的可利用淡水资源^[1]。随着人口的增长、城市化的发展和饮食结构的变化,保障未来粮食安全将对气候变化构成更大的影响。因此食物系统的转型对气候变化减缓具有重要作用,包括减少肉类消费、转向以植物类产品为主的营养结构。

将全球气候变化控制在 1.5℃ 以内的窗口期正在迅速缩短^[64],相关的措施需要综合考量其权衡与协同效果。加强粮食安全和减少营养不良,抑制和扭转沙漠化和土地退化,在不牺牲土地的非物质利益前提下适应和减缓气候变化影响,是重大的社会挑战。随着气候变化加剧,一些土地管理方案的潜力会降低,例如,气候变化可能会改变土壤和植被固碳的能力,减少土壤有机碳增加的机会。土地具有粮食生产、提供生物多样性和淡水、为数十亿人提供工作,并吸收数十亿 t 碳等多功能性,是解决诸多可持续发展问题的方案,但还需要在政策、社会和技术等角度综合应对。

参考文献(References):

- [1] IPCC. IPCC Special Report: Climate Change and Land. Geneva, Switzerland: IPCC, 2019.
- [2] WEF. The Global Risks Report 2019. Geneva, Switzerland: WEF, 2019.
- [3] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263): 472-475.
- [4] IPBES. Land Degradation and Restoration Assessment. Bonn, Germany: IPBES, 2018.
- [5] UNCCD. Global Land Outlook. Bonn, Germany: UNCCD, 2017.
- [6] IPCC. Global Warming of 1.5℃ IPCC Special Report. Incheon, South Korea: IPCC, 2018.
- [7] IPCC. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Monaco: IPCC, 2019.
- [8] Chan D, Wu Q G. Significant anthropogenic-induced changes of climate classes since 1950. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13487.

- [9] Chen D L, Chen H W. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901-2010. *Environmental Development*, 2013, 6: 69-79.
- [10] Spinoni J, Vogt J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(9): 2210-2222.
- [11] Bossio D A, Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Microbial Ecology*, 1998, 35(3): 265-278.
- [12] Niu S L, Luo Y Q, Li D J, Cao S H, Xia J Y, Li J W, Smith M D. Plant growth and mortality under climatic extremes: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 98: 13-19.
- [13] Barnes C J, van der Gast C J, McNamara N P, Rowe R, Bending G D. Extreme rainfall affects assembly of the root-associated fungal community. *New Phytologist*, 2018, 220(4): 1172-1184.
- [14] Sánchez-Rodríguez A R, Nie C R, Hill P W, Chadwick D R, Jones D L. Extreme flood events at higher temperatures exacerbate the loss of soil functionality and trace gas emissions in grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130: 227-236.
- [15] Gauthier S, Bernier P, Kuuluvainen T, Shvidenko A Z, Schepaschenko D G. Boreal forest health and global change. *Science*, 2015, 349(6250): 819-822.
- [16] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [17] Rumpf S B, Hülber K, Klöner G, Moser D, Schütz M, Wessely J, Willner W, Zimmermann N E, Dullinger S. Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(8): 1848-1853.
- [18] Trumbore S, Brando P, Hartmann H. Forest health and global change. *Science*, 2015, 349(6250): 814-818.
- [19] Curtis P G, Slay C M, Harris N L, Tyukavina A, Hansen M C. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 2018, 361(6407): 1108-1111.
- [20] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [21] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F, Townshend J R. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.
- [22] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [23] Paine R T, Tegner M J, Johnson E A. Compounded perturbations yield ecological surprises. *Ecosystems*, 1998, 1(6): 535-545.
- [24] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, Seneviratne S I, Ward P J, Pitman A, AghaKouchak A, Bresch D N, Leonard M, Wahl T, Zhang X B. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.
- [25] Watson J E M, Venter O, Lee J, Jones K R, Robinson J G, Possingham H P, Allan J R. Protect the last of the wild. *Nature*, 2018, 563(7729): 27-30.
- [26] Anderson R G, Canadell G J, Randerson T J, Jackson B R, Hungate B A, Baldocchi D D, Ban-Weiss A G, Bonan G B, Caldeira K, Cao L, Diffenbaugh N S, Gurney K R, Kueppers L M, Law B E, Luysaert S, O'Halloran T L. Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(3): 174-182.
- [27] Suni T, Guenther A, Hansson H C, Kulmala M, Andreae M O, Arneth A, Artaxo P, Blyth E, Brus M, Ganzeveld L, Kabat P, de Noblet-Ducoudré N, Reichstein M, Reissell A, Rosenfeld D, Seneviratne S. The significance of land-atmosphere interactions in the Earth system—iLEAPS achievements and perspectives. *Anthropocene*, 2015, 12: 69-84.
- [28] Sherwood S, Fu Q. A drier future? *Science*, 2014, 343(6172): 737-739.
- [29] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [30] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [31] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics*, 2008, 31(1): 79-105.
- [32] Swann A L S, Hoffman F M, Koven C D, Randerson J T. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(36): 10019-10024.
- [33] Wang G L. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics*, 2005, 25(7/8): 739-753.
- [34] Zhao T B, Dai A G. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario. *Journal of Climate*, 2015, 28(11): 4490-4512.
- [35] Carrão H, Naumann G, Barbosa P. Global Projections of drought hazard in a Warming climate: a prime for disaster risk management. *Climate Dynamics*, 2017, 50(5): 2137-2155.
- [36] Naumann G, Alfieri L, Wyser K, Mentaschi L, Betts R A, Carrao H, Spinoni J, Vogt J, Feyen L. Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(7): 3285-3296.
- [37] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [38] Miao L J, Moore J C, Zeng F J, Lei J Q, Ding J L, He B, Cui X F. Footprint of research in desertification management in China. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(5): 450-457.

- [39] Yang D W, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiake K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17(4): 2913-2928.
- [40] Byers E, Gidden M, Leclère D, Balkovic J, Burek P, Ebi K, Greve P, Grey D, Havlik P, Hillers A, Johnson N, Kahil T, Krey V, Langan S, Nakicenovic N, Novak R, Obersteiner M, Pachauri S, Palazzo A, Parkinson S, Rao N D, Rogelj J, Satoh Y, Wada Y, Willaarts B, Riahi K. Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(5): 055012.
- [41] Van der Esch S, ten Brink B, Stehfest E, Bakkenes M, Sewell A, Bouwman A, Meijer J, Westhoek H, Van Den Berg M, van den Born G J, Doelman J, Berkhout E, Goldewijk K K, Bouwman A F, Beusen A, van Zeist W J, Stoorvogel J J, Schut A G T, Biemans H, Candel J J L, Van Beek R, Tabreau A A, van Meijl J C M, Caspari T M, van Egmond F M, van Lynden G W J, Mantel S. Exploring Future Changes in Land Use and Land Condition and the Impacts on Food, Water, Climate Change and Biodiversity: Scenarios for the UNCCD Global Land Outlook. The Hague: PBL: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.
- [42] IPBES. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. Paris, France: IPBES, 2019.
- [43] Searchinger T D, Wiersenius S, Beringer T, Dumas P. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 2018, 564(7735): 249-253.
- [44] Spang E S, Moreno L C, Pace S A, Achmon Y, Donis-Gonzalez I, Gosliner W A, Jablonski-Sheffield M P, Momin A, Qusted T E, Winans K S, Tomich T P. Food loss and waste: measurement, drivers, and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 2019, 44: 117-156.
- [45] Bowles N, Alexander S, Hadjikakou M. The livestock sector and planetary boundaries: a 'limits to growth' perspective with dietary implications. *Ecological Economics*, 2019, 160: 128-136.
- [46] Lee H, Brown C, Seo B, Holman I, Audsley E, Cojocaru G, Rounsevell M. Implementing land-based mitigation to achieve the Paris Agreement in Europe requires food system transformation. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 104009.
- [47] Henry R C, Alexander P, Rabin S, Anthoni P, Rounsevell M D A, Arneeth A. The role of global dietary transitions for safeguarding biodiversity. *Global Environmental Change*, 2019, 58: 101956.
- [48] Aguirre-Liguori J A, Ramírez-Barahona S, Tiffin P, Eguiarte L E. Climate change is predicted to disrupt patterns of local adaptation in wild and cultivated maize. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, 286(1906): 20190486.
- [49] Anderson W B, Seager R, Baethgen W, Cane M, You L. Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Science Advance*, 2019, 5(7): eaaw1976.
- [50] Sternberg T. Chinese drought, bread and the Arab Spring. *Applied Geography*, 2012, 34: 519-524.
- [51] Stige L C, Chan K S, Zhang Z B, Frank D, Stenseth N C. Thousand-year-long Chinese time series reveals climatic forcing of decadal locust dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(41): 16188-16193.
- [52] FAO. ASF Situation in Asia Update. Rome, Italy: FAO, 2019.
- [53] Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon L J, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera J A, De Vries W, Sibanda L M, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustina R, Branca F, Lartey A, Fan S G, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell S E, Reddy K S, Narain S, Nishtar S, Murray C J L. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 2019, 393(10170): 447-492.
- [54] Humpenöder F, Popp A, Bodirsky B L, Weindl I, Biewald A, Lotze-Campen H, Dietrich J P, Klein D, Kreidenweis U, Müller C, Rolinski S, Stevanovic M. Large-scale bioenergy production: how to resolve sustainability trade-offs? *Environmental Research Letters*, 2018, 13(2): 024011.
- [55] Ahlgren E O, Börjesson Hagberg M, Grahn M. Transport biofuels in global energy-economy modelling-a review of comprehensive energy systems assessment approaches. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(7): 1168-1180.
- [56] Harris E, Ladreiter-Knauss T, Butterbach-Bahl K, Wolf B, Bahn M. Land-use and abandonment alters methane and nitrous oxide fluxes in mountain grasslands. *Science of the Total Environment*, 2018, (628-629): 997-1008.
- [57] Le Page Y, Hurr G, Thomson A M, Bond-Lamberty B, Patel P, Wise M, Calvin K, Kyle P, Clarke L, Edmonds J, Janetos A. Sensitivity of climate mitigation strategies to natural disturbances. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 015018.
- [58] Davies Z G, Edmondson J L, Heinemeyer A, Leake J R, Gaston K J. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1125-1134.
- [59] Edmondson J L, Davies Z G, Gaston K J, Leake J R. Urban cultivation in allotments maintains soil qualities adversely affected by conventional agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(4): 880-889.
- [60] Gerster-Bentaya M. Nutrition-sensitive urban agriculture. *Food Security*, 2013, 5(5): 723-737.
- [61] Wilhelm J A, Smith R G. Ecosystem services and land sparing potential of urban and peri-urban agriculture: a review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2017, 33(5): 481-494.
- [62] Shepherd J. *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. London: The Royal Society, 2009.
- [63] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C M, Crowther T W. The global tree restoration potential. *Science*, 2019, 365(6448): 76-79.
- [64] Mathias J D, Anderies J M, Janssen M A. On our rapidly shrinking capacity to comply with the planetary boundaries on climate change. *Scientific Report*, 2017, 7(1): 42061.