

碳排放约束下耕地利用推动粮食生产的逻辑关联、现实矛盾与路径优化

程 鹏¹, 柳 可², 张 杨^{3*}, 唐厚田⁴, 吴诗嫚¹, 向美来¹

(1. 武汉工程大学管理学院, 武汉 430205; 2. 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070; 3. 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070; 4. 厦门大学公共事务学院, 厦门 361005)

摘 要: 耕地利用是国家粮食安全的重要保障, 在碳排放约束背景下探究其与粮食生产之间的有机关联有助于揭示“土-碳-粮”三要素复杂的逻辑关系。该研究基于归纳演绎法与理论分析法, 在梳理碳约束下耕地利用与粮食生产逻辑关系的基础上, 深入分析粮食安全与碳减排背景下中国耕地可持续利用面临的挑战, 并提出促进耕地绿色转型升级与粮食综合生产能力提高的优化路径。结果表明: 1) 碳排放约束下耕地利用与粮食生产之间紧密的逻辑关联形成了复杂的“土-碳-粮”要素系统; 2) 当前农业生产条件下实施耕地利用碳减排对国家粮食安全具有不确定性影响, 但粮食稳产与增产仍将造成大量碳排放; 3) 为有效改善碳排放约束下耕地利用与粮食生产的紧平衡状态, 从耕地保护、碳减排、粮食生产三方面通过耕地资源配置优化、碳交易市场构建、粮食生产结构调整等方式实现“土-碳-粮”要素协调路径优化。未来需合理规划耕地空间利用格局, 采取多种政策工具, 转变耕地利用方式, 促进耕地低碳、绿色利用与国家粮食安全的可持续协同发展。

关键词: 碳排放; 耕地利用; 粮食生产; 逻辑关联; 路径优化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311126

中图分类号: F323.211; F326.11

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-12-0246-09

程鹏, 柳可, 张杨, 等. 碳排放约束下耕地利用推动粮食生产的逻辑关联、现实矛盾与路径优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 246-254. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311126 <http://www.tcsae.org>

CHENG Peng, LIU Ke, ZHANG Yang, et al. Logical correlation, realistic contradictions and path optimization for promoting grain production through cultivated land utilization under carbon emission constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(12): 246-254. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311126 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

耕地作为粮食生产的基础性载体, 其数量、质量与利用方式直接决定粮食生产能力, 深度影响国家粮食安全^[1-2]。中国耕地面积不足全球的 7%, 但能养活全球 22% 的人口^[3], 并于 2023 年实现了粮食产量的“二十连丰”。在粮食产量连丰的背后, 却也导致了严重的环境后果, 其中耕地由于受到资源环境的压力和约束, 加上受到长期以来的自然灾害、水土资源不匹配等制约因素的影响, 阻碍了中国耕地粮食生产潜力和可持续生产能力的进一步提高^[4-5]。在此基础上, 碳约束的气候背景造成了耕地利用与粮食生产之间极为复杂的因果关系, 一方面, 人多地少的耕地资源困局使中国长期处于粮食供

给与需求的结构性紧平衡状态^[6], 即通过在面积有限的耕地上提高农药化肥等农业生产性要素的投入, 短期内能有效提高粮食总产量, 但将直接造成农田生态环境污染与碳排放量增加; 另一方面, 随着居民膳食结构的变化, 中国粮食消费需求呈现日益强劲且结构多样化的趋势^[7], 以现有农业生产模式实现粮食增产目标需要投入更多的农业生产资源, 而这将进一步加剧环境污染与增加碳排放。本文在此背景下试图解决 3 个重要问题: 耕地利用与粮食生产有何内在逻辑关系; 在碳排放约束下, 盘活现有耕地资源以提高粮食产量存在哪些现实矛盾; 如何实现路径优化。解决此类重要问题将有助于转变农业生产方式, 提高耕地综合利用效率与粮食生产能力, 实现耕地利用的绿色可持续发展, 有效保障碳排放约束背景下的粮食安全。

梳理现有文献, 发现当前学界对耕地利用与粮食生产关系的研究多从耕地利用碳排放测度、时空耦合关系、影响因素与“水-粮-能-土-碳”协同管理等 4 个方面展开^[5,8-9]。在耕地利用碳排放测度方面, 目前已形成 3 种主流测度方法: 一是采用学界普遍认可的土地利用碳排放系数进行核算, 但由于不同地区耕地的地形、质量等方面存在差异, 导致测算结果的精准度难以保障^[9-11]; 二是通过仿真模型模拟测算耕地利用碳排放量, 尽管结

收稿日期: 2023-11-17 修订日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42101284); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJA790083); 湖北省社科基金一般项目(后期资助项目)(HBSKJJ20233267); 武汉工程大学校级教育研究项目(2023YB06); 武汉工程大学科学研究基金项目(K2023099)

作者简介: 程鹏, 博士, 讲师, 主要研究方向为耕地利用与碳排放。

Email: chengpeng1141@wit.edu.cn

*通信作者: 张杨, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为耕地利用与粮食安全。Email: geozhangyang@yeah.net

果较为精确，但研究尺度受限^[12-13]；三是参照农业碳排放核算清单进行耕地利用碳排放量测算，此种方法当前应用最为广泛^[14-15]。在耕地利用与粮食生产的时空耦合关系上，多尺度研究是学界关注的重点：一是以国家尺度为视角立足中国特殊复杂的地理环境，探究不同地区气候环境如何通过气温、降水量、日照时数等因素影响耕地利用方式，以及其对粮食生产的投入要素、生产方式与产量的影响^[15-17]；二是在省域范围内探究各省份的耕地利用与粮食生产关系的时空变化，如河北省耕地利用变化对粮食生产的影响格局差异^[18]，湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率的耦合协调水平^[19]，云南省主要粮食作物种植面积和产量的时空格局变化差异^[20]，河南省农业碳排放效率与粮食安全的时空异质性^[21]；三是关注特殊地理区域的耕地利用与粮食生产关系^[22]，如已有研究发现叶尔羌河平原绿洲耕地利用转型极大提高了粮食综合生产能力^[23]，太湖流域近几年随着耕地数量的减少导致粮食减幅加大，危及地区粮食安全^[8]。然后就耕地利用与粮食生产关系的影响因素而言，有研究认为农户行为^[24]、气候变化^[16]、耕地质量^[25]等因素对两者关系产生一定的影响。“水-粮-能-土-碳”要素的系统研究，主要考察不同要素之间的相互关系，以及其对粮食生产的影响。部分学者最早从“粮-水-能”三要素关系中探究其对农业灌溉的影响^[26]，后逐渐拓展探究“水-土-能-碳”“水-能-粮-碳”四要素的系统关系^[27-28]；现已将“水-土-能-粮-碳”五要素适配概念引至粮食投入与生产分析中，探究其对粮食生产的影响^[29]。

尽管当前学界围绕耕地利用与粮食生产的耦合关系、影响因素、要素协同等方面展开了较广泛的研究，已有部分文献实证检验碳约束条件下耕地利用与粮食生产关系的时空变化特征，但缺乏对两者间复杂关系的理论梳理。因此，本文基于碳排放约束背景下耕地利用与粮食生产的逻辑关系，识别其现实矛盾并提出优化路径，推动耕地绿色转型升级与粮食综合生产能力提升。

1 碳排放约束下耕地利用与粮食生产的逻辑关联

1.1 “土-碳-粮”要素解析

耕地、碳排放与粮食不仅是农业生产活动中的重要组成要素，更是社会经济发展的基础^[30]。耕地既为农业生产活动提供空间场所，也为粮食作物生长提供空间载体；粮食生产是重要的人类活动，不仅是巨大的碳排放源，又是一个潜在的碳汇系统；粮食是人类最基本的生活性资料，对人类社会的可持续发展具有重要保障作用。

碳排放约束下的粮食生产活动由耕地资源、生产要素投入与粮食生产各要素组成，共同作用于自然、社会、经济与环境复合系统，构成了“土-碳-粮”要素关联系统。粮食生产是耕地利用碳排放的主要来源^[31]，在中国粮食供给与需求紧平衡状态持续加剧的背景下，“土-碳-粮”三要素间存在复杂且矛盾的关系。一方面，“土-碳-粮”三要素组成了互相作用的内部系统，各要素相互反馈与调节；另一方面，“土-碳-粮”系统还受到生产性

要素投入量与组合方式的外部影响，通过改变碳元素循环流动与资源要素配置对粮食生产产生重要影响，推动形成内外双向循环。基于这一复杂矛盾关系，本文以耕地利用碳排放为核心，构建包含耕地资源、生产要素投入与粮食生产的“土-碳-粮”三要素复合交互作用系统（图 1），梳理碳排放约束下耕地利用与粮食生产的逻辑关系，并通过区域碳补偿机制实现两者间的动态平衡格局。

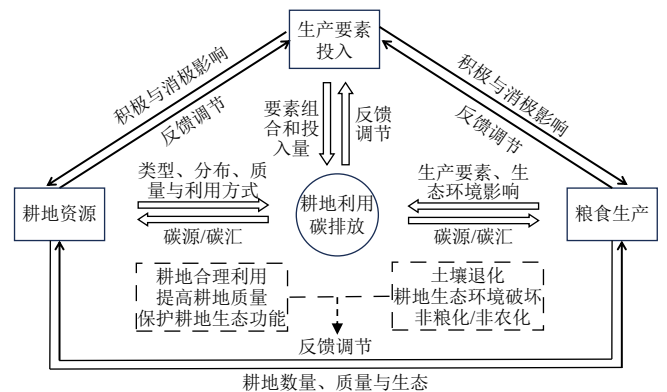


图 1 “土-碳-粮”要素逻辑关系

Fig.1 Logical relationship among the elements of "soil-carbon-grain"

1.2 “土-碳-粮”关联探索

1.2.1 耕地资源是粮食生产与碳排放的基础

耕地资源是粮食生产与碳排放的基础性载体^[32]。一方面，耕地作为粮食生产的空间载体，数量足、质量高与生态好的耕地方能稳定或提高粮食产量，保障国家粮食安全；另一方面，耕地利用碳排放产生于耕地利用的生产活动，与耕地资源密切相关，只有利用耕地进行农作物生产时，探究耕地利用碳排放才有实际意义。当前，在中国有限耕地资源的约束下，耕地利用在碳减排与粮食安全两大目标中不断协同权衡，在其他限制性约束条件的影响下形成不同的资源配置方式和目标权衡结果。其中，耕地资源对粮食生产的影响主要体现在耕地数量、质量与生态中。一是耕地数量直接决定粮食作物的可播种面积与耕地利用碳排放量，且由于耕地资源的稀缺性，其数量并不会随社会经济水平的增长而增加，反而会因为城市建设、农田污染等因素导致耕地数量的减少，进一步限制了粮食作物的种植面积。二是耕地质量包含土壤养分、地形状况、有机质含量等诸多要素，反映了耕地实际粮食综合生产能力，而不同地区耕地由于地理环境要素的差异，其质量也呈现出一定的异质性，这些差异将呈现不同的单位粮食产量与粮食品质。三是耕地生态环境对粮食生产至关重要，良好的生态环境有助于提升粮食产量和质量，而耕地生态环境恶化则可能威胁粮食生产的稳定与安全。值得注意的是，为尽可能地提高粮食产量，生产性要素的投入及其组合方式将会受到不同耕地质量差异的影响，而不同的投入将直接造成耕地利用碳排放量的差异。基于中国当前整体的农业生产条件，生产者会按照粮食产量目标与市场供需水平调整生

产性要素的投入量和组合方式,以促进耕地综合生产能力的提高、增加经济效益。然而,此类行为不仅将改变土壤有机碳存储量,还将影响耕地的自然种植条件,甚至可能对耕地质量产生持久性的危害。

1.2.2 粮食生产目标影响耕地利用过程中的碳排放

中国耕地资源有限性与粮食需求不断增长的矛盾关系,导致了增加耕地生产性要素投入来提高现有耕地粮食综合生产能力的“激进性”生产方式^[33]。虽然在粮食生产过程中,相比降水、气温等其他自然因素,有效提高农药、化肥、农膜、翻耕、灌溉、农业机械等生产性要素投入能在短期内提高粮食总产量,但一方面农药、化肥、农膜等要素的生产与使用将导致碳排放量增长与农田环境恶化,另一方面农业机械生产、耕地有效灌溉所需的机械动力因消耗汽油、柴油等化石燃料造成碳排放量增长,再者耕地翻耕导致土壤有机碳结构被破坏,这些都将导致碳排放量的增加。值得注意的是,耕地生产性要素投入量与粮食产量整体呈正态分布态势(图2),前期伴随耕地生产要素投入量的持续增长,耕地粮食生产能力不断提高,粮食产量持续增长,但“投入-回报”率持续降低;当达到临界峰值后,耕地生产性要素投入量的增长将导致耕地粮食生产能力持续降低,严重的甚至会威胁耕地质量,影响粮食生产的稳定性和可持续性。

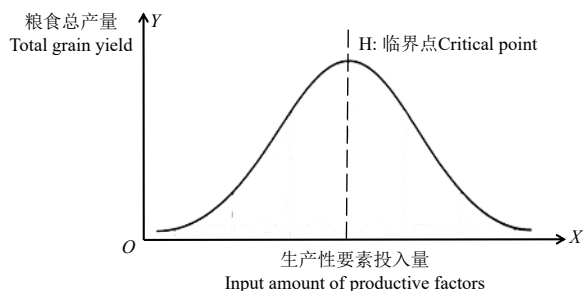


图2 生产性要素投入量与粮食总产量的关系

Fig.2 Relationship between productive factors input amount and total grain yield

粮食生产状况也将直接影响耕地利用方式。在权衡耕地利用碳减排与粮食安全这两大目标时,应优先考虑粮食安全,且其兼具正向与负向反馈调节作用,具体为政府通过设定粮食产量目标来调控耕地生产性要素的投入量,或通过倡导调整耕作方式、鼓励使用新型农业技术来降低耕地生产性要素的使用量;相反,为短期提高粮食产量而采取不合理的耕地利用方式,将导致土壤退化、耕地生态环境破坏乃至“非粮化”“非农化”现象。粮食是最基本的民生保障,其产量与品质关系着民生福祉。在保障粮食产量目标的前提下统筹协调生产性要素投入,兼顾碳减排的气候目标。

1.2.3 碳排放反馈调节耕地利用与粮食生产

在“双碳”战略目标下,为实现既定碳减排目标,就要通过多种行政规制手段降低各行业的碳排放量,而农业是其中重要的部门。“土-碳-粮”三要素构成的系统中,不仅耕地利用方式能通过调节土壤碳储存和碳循环对碳排放形成差异化影响,碳排放对耕地利用与粮食

生产同样也具有调节作用。事实上,碳排放的反馈调节作用主要体现在“存储”和“减排”两方面,前者在于变革耕作方式,推行绿色化耕作,增加有机碳存储量;后者表现为调整耕地利用的生产性要素投入量及其组合方式,减少耕地利用总碳排放量。具体而言,一方面,在粮食生产的整个生命周期中,各种生产活动均会产生碳排放,主要包含粮食作物的种植与生长、粮食作物秸秆还田与露天焚烧、农业机械化化石燃料消耗等^[34-37],并影响粮食生产环境。因此,不仅要优化农业生产方式、减少农药化肥等生产性要素使用以降低粮食生产碳排放量;而且要开发秸秆固碳技术,使粮食作物在生长过程中通过光合作用充分发挥固碳效用,形成碳汇。另一方面,耕地利用碳排放通过反馈调整农业低碳技术研发、耕地利用方式与强度等技术、产业、政策方面,以实现耕地利用的减碳增汇。政府基于“双碳”约束目标,在保障粮食安全不受影响的前提条件下,有意识、有计划的对粮食生产过程中的碳排放进行宏观把控,降低碳排放总量。这种反馈作用需要通过政府行政规制手段落实,以农业技术更新、耕地制度改良等为基础,不能以牺牲粮食安全为代价。因此,以上通过干预粮食生产来降低碳排放的农业活动不仅需要保障粮食产量,同时也需要重视粮食作物在减碳增汇方面的重要作用。

2 碳排放约束下耕地利用推动实现粮食可持续增产的现实矛盾

在中国“双碳”战略目标的约束下,耕地是碳源与碳汇的重要来源,而在当前农业生产条件下,耕地利用碳减排策略与粮食生产具有复杂的矛盾关系。

2.1 耕地利用碳减排对国家粮食安全的影响具有不确定性

当前,中国耕地利用仍高度依赖农药、化肥、农膜等农业生产性要素,而这些生产性要素是农业碳排放的重要来源。在碳排放约束下,耕地利用碳减排对中国粮食安全的影响仍具有不确定性。首先,农业生产需要一定碳排放维持土壤碳平衡以保障土壤结构、保水性和保肥性,而过度实施碳减排行为可能导致土壤有机质的减少、土壤肥力的降低,进而影响粮食作物的健康生长和粮食产量的稳定。其次是耕地利用碳减排与新技术应用的矛盾。耕地利用低碳转型意味着要大幅度降低农药、化肥和机械等传统农业生产性要素投入,但新要素、新技术和新耕作制度的研发和应用具有滞后性,在实现全面推广和应用之前的过渡期将造成粮食供给波动。再者,耕地利用结构调整压缩了农业减排固碳空间。在乡村全面振兴战略背景下,土地集约化、机械化水平将不断提高,三产融合速度加快,粮食生产、加工、储存和消费等环节产生的能源消耗碳排放将会大幅增加。最后,耕地利用低碳技术储备不足。总体来看,推动中国粮食生产深度脱碳涉及的环节高度复杂,技术种类繁多、集成困难,尤其是化石能源降碳技术、秸秆固碳技术等,同时经营主体对新技术应用缺乏积极性。因此,在大规模

模推进耕地利用碳减排时，首要任务是平衡碳减排和粮食安全之间的复杂关系^[38]，具体可采取科学合理的农业管理措施，如推广有机肥、改良土壤质量、完善水利设施和提高灌溉效率等，以保护耕地生产能力和提高粮食产量。

2.2 现有农业生产条件下的粮食增产目标仍将产生大量碳排放

在中国现有粮食生产条件下，要实现粮食的稳产与增产，仍需大量使用农药、化肥等生产性要素，进而产生大量碳排放。目前，粮食增产途径具体分为扩大粮食耕种面积与提高粮食单产量两种方式，中国耕地资源面积的有限性决定了提高粮食单产量是较佳的粮食增产方式。由于低碳技术的研发与应用、耕作制度的变革与推广并非一蹴而就，因此提高农药、化肥等生产性要素的投入在保障粮食安全中仍占据重要地位，而粮食增产在一定程度上将加剧耕地利用碳排放量增加^[39-40]。具体而言，一是生产要素的投入对粮食生产具有正向促进作用，如农药的大量使用在一定时期内能有效减少粮食作物的病虫害进而防止粮食的减产，化肥中的氮磷钾等元素对植物生长的养分供给至关重要，然而这些生产性要素的大量生产与使用不仅将导致碳排放量增加，还将造成

农田生态环境污染，影响耕地质量，降低粮食产量和质量。二是城市化进程带动农业人口大量向城市转移，耕地抛荒情况频繁发生，这种情况下通过增加农业机械投入来提高农业生产效率是实现粮食增产的必然途径；但大量使用机械设备将加剧能源的消耗，在清洁能源无法完全替代传统化石能源情况下，这种能源消耗将增加碳排放量。因此，为增加粮食产量，亟需在农业生产中合理组合和投入农业生产性要素，以提高耕地的综合生产能力。同时，可采取精细化管理措施，如推广精准施肥技术、提高机械化作业能效、优化灌溉管理等，在降低耕地利用碳排放的同时提高农业生产效益。

3 耕地碳减排与国家粮食安全双目标实现的路径优化

为推动实现耕地碳减排与国家粮食安全双目标，本文构建了治理路径优化体系（图 3）。该体系的治理路径以耕地“三位一体”保护和耕地利用碳减排为前提，从耕地保护、碳减排、粮食生产三个方面通过耕地资源配置优化、碳交易市场构建、农业技术升级促进耕地资源保护、粮食生产结构优化、激励农业碳减排、增强农业碳固存等，共同促进耕地碳减排与粮食生产的协同发展。

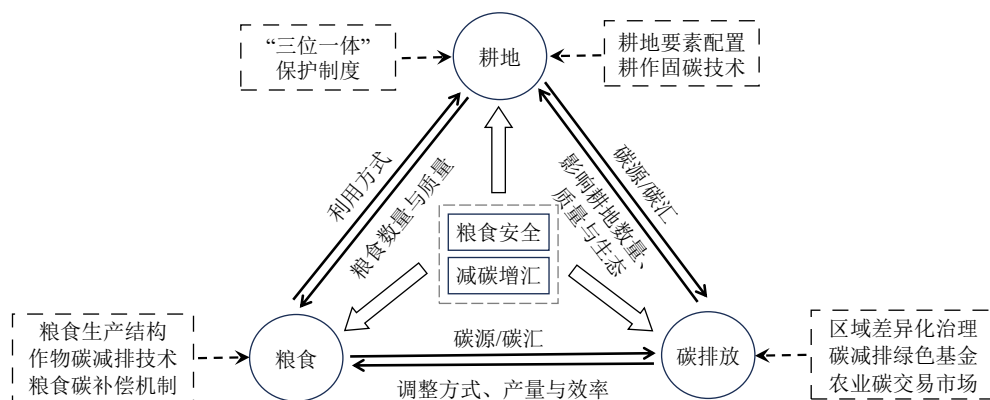


图 3 耕地碳减排与国家粮食安全双目标实现的路径优化

Fig.3 Path optimization for achieving the dual goals of reducing carbon emissions in cultivated land and ensuring national food security

3.1 优化耕地资源配置，兼顾粮食安全与碳减排

3.1.1 严格落实耕地“三位一体”保护制度

健全耕地数量、质量、生态“三位一体”保护制度体系有助于推动粮食稳产与增产，实现耕地利用碳减排目标。首先，需加强耕地数量保护。严格执行“18 亿亩耕地红线”，防止非农建设占用耕地，确保耕地面积不减少；通过土地整治、复垦等措施，增加有效耕地面积，提高土地利用率；加强耕地占补平衡管理，确保补充耕地数量与质量双到位。其次，注重耕地质量提升。推广科学耕作方法，提高土壤肥力，改善耕地生产条件；通过实施测土配方施肥、秸秆还田等措施，减少农药化肥使用，保护耕地生态环境；加强耕地质量监测与评价，实现耕地质量的长期有效监管。最后，强化耕地生态保护。在耕地利用过程中，注重生态平衡，防止水土流失和土壤污染；通过建设生态农田、推广生态农业等措施，提高

耕地生态系统的稳定性和服务功能；加强耕地生态补偿机制构建，对保护耕地生态的农民或地区给予经济补偿。

3.1.2 优化耕地要素配置，开发耕作固碳技术，发展绿色农业

绿色农业生产模式是实现粮食安全与农业碳减排平衡的重要举措，以加大农业科技投入和变革农业生产方式的手段实现中国农业的绿色发展。尽管当前中国绿色农业生产方式在技术体系、资金投入等方面存在一定不足，但通过政府、企业、农户等主体的共同参与和持续有效推动，能有效弥补这些不足，并推动实现农业生产方式的绿色化转变。一方面，在保障粮食生产稳定的前提下，鼓励和推广有机肥料和生物防治等手段的应用，并结合现代科技手段对农业生产进行精准施肥、精准用药、智能化管理等，降低农药、化肥、农膜等生产性要素的使用量，打造农业废弃物循环利用网络，提高农业

投入与产出效率;另一方面,政府应贯彻绿色发展理念,优化耕地要素配置,加强农业监管,推动精细化管理,对农业污染进行长期性、集中性整治,对不符合规范的农业生产方式进行处罚或整改,以降低农田生态环境污染、保障农产品质量安全,实现农业生产的绿色可持续发展。打造绿色优质农产品供应链不仅能保证农产品的供应质量,还能进一步提高农业生产者的经济收入,激励其长期采用农业绿色生产方式,构建一个良性的“绿色生产-经济激励”循环系统。

3.2 实现碳减排目标,调整耕地利用与粮食生产

3.2.1 基于“土-碳-粮”协调关系实施区域差异化治理

当前,中国粮食生产与需求呈现显著的空间错位,各地区受“18 亿亩耕地红线”等政策的影响,区域发展权受到不同程度限制,亟需依据地区“土-碳-粮”协调关系实行差异化治理。以不同地区区域特征与资源禀赋为基础制定差异化的耕地利用碳减排措施,充分发挥各地区资源优势,平衡耕地利用、碳减排和粮食生产的关系。具体而言,一是根据各地区农业特点和资源状况,优化耕地利用方式,科学确定粮食产量增长的目标和要求。不同地区粮食生产能力和碳排放量受土壤类型、气候条件、水资源情况等多种因素的共同影响,因此需针对各地区特点,制定耕地利用方式、调整种植结构等相应政策,在提高粮食产量的同时降低碳排放量。二是因地制宜建立行之有效的农业碳排放监测和评估机制。以各地区农业碳排放量的准确监测和评估为基础制定差异化管理策略,监测结果还可以指导农民合理使用农药、科学施肥、优化耕作方式、实施节水灌溉等,以更科学、更精准的耕作方式和生产行为降低耕地利用碳排放量。

3.2.2 设立农业碳减排绿色基金

通过设立农业碳减排绿色基金将为耕地可持续利用与粮食生产碳减排提供稳定的资金支持,推动农业向低碳、高效、可持续的方向发展。通过基金支持,不仅可引入先进的农业技术和管理模式,优化耕地利用结构,提高耕地利用效率,减少农药、化肥等农业生产性要素的使用,从而降低碳排放量;还能有效支持粮食生产的绿色化转型,推广节水灌溉、精准施肥等环保型农业生产方式,减少粮食生产过程中的碳排放。因此,首先需明确农业碳减排绿色基金的目标和定位,确保资金能够精准投放到耕地利用与粮食生产的碳减排项目中;其次是加强基金的筹集和管理,以政府为主导,吸引企业、居民等社会资本广泛参与到绿色基金建设中,形成多元化的资金来源,保障资金稳定;最后是建立健全的项目筛选和评估机制,明确项目筛选和评估标准,建立专业的评估团队或委托第三方机构进行项目评估,使项目筛选和评估公开透明,并对已获得基金支持的项目进行定期跟踪和评估,根据实际情况进行必要的调整和优化。同时,还应加强与国际社会的合作与交流,借鉴先进经验和技术,提升自身项目资金利用效率与评估能力。

3.2.3 加快构建农业碳交易市场

农业既是温室气体重要排放源,又是巨大的碳汇

系统。在保障粮食安全、减少农业碳排放、应对气候变化的过程中,加快构建农业碳减排交易市场是激励农民实施低碳农业的重要措施之一。农业碳交易市场不仅能为农业生产者提供经济激励,激发其环保意识和创新动力,还能通过激发农民的减碳意识和行为有效降低农业生产碳排放量。当前,全国首个农业碳汇交易平台由厦门产权交易中心设立,提供农业碳汇开发、测算、交易、登记等一站式服务,在一定程度上促进了农业生产转化为碳交易产品,但在制度设计上仍需完善。具体而言,一是建立碳减排标准和认证机制。目前,农业碳减排交易市场亟需制定适应农业领域的碳减排标准,明确各项指标和计量方法,确保碳减排量的真实、可靠和可比性;同时,政府应当推动建立第三方认证机构,对农业碳减排项目进行审核和认证,为碳交易提供可信度保障。二是推动设立全国性的农业碳减排配额和交易规则。在农业碳减排交易市场中引入碳减排配额制度,确定每个农业生产单位的碳减排权益,并制定相应的交易规则和机制;通过省域内甚至跨省市场配额的配置和交易,激励农业生产者主动减少碳排放并获得经济回报,实现农业低碳可持续发展。三是加强宣传和培训。农业生产者是农业碳减排的主要实施者,政府应通过宣传、培训等多种方式提高农业生产者和相关利益方对碳交易市场的认可度和参与度,不断提升碳减排项目开发和管理的能

3.3 保障粮食生产安全,推进耕地资源可持续利用与碳减排

3.3.1 调整粮食生产结构,适应多元化需求

尽管中国当前粮食生产处于较高水平,但粮食多元化、高质量、绿色化需求对粮食生产数量与质量均提出了较高的要求。粮食生产受限于土地、劳动力、水资源等多种因素,而这些因素的有限性直接导致了高质量粮食产品供给不足,进一步造成了供需错配问题。为解决这些问题,一是加强粮食生产供给侧结构性改革。在全面落实国家粮食安全战略的前提下,加快粮食生产端供给侧结构性改革,通过规模化经营提高生产效率、降低生产成本,提高粮食生产的有效供给水平。二是优化粮食种植结构。根据市场实际需求状况引导粮食生产结构调整,合理安排种植作物类型和品种,增加优质、高效、特色作物比例,积极发展绿色全谷物、有机食品等中高端粮食产品,不断增加针对老年人、婴幼儿等特定人群的粮食产品供给。三是培育粮食新品种。通过加大科技投入等多种方式培育高产、优质、抗病、抗逆基因的粮食新品种,既实现粮食总量的增产,又保障粮食品质的提升。同时,就种植技术而言,可以发展适应不同地区特点的耐干旱、抗病虫害的新作物品种,提高农作物抗逆能力、保障粮食产量的稳定。

3.3.2 加强碳减排技术研发,降低固碳减排技术应用门槛

科技创新具备稳产保供和减排固碳的双重效益,在农业固碳领域具有广泛的应用价值,如种植业减排固碳、畜牧业减污降碳、农村可再生能源替代等领域。然而,

当前农业科技发展存在资金投入量大、关键人才稀缺、技术推广难等问题,需要构建政府主导、企业和农民共同参与的解决模式。具体而言,一是加强科技研发的资金支持。政府通过增加资金支持、鼓励科研机构和企业合作等手段推动农业碳减排科技研发工作的发展;同时建立科技创新平台,加强国际合作和技术交流,引进国外先进农业技术和经验,推动国内农业碳减排科技研发和固碳减排技术的应用。二是加大先进机械设备的补贴与推广力度。政府通过加大财政补贴等政策支持,鼓励农民和企业购买与使用先进农机设备,并建立完善的农业技术推广体系,将先进固碳减排技术推广到农村地区,提高技术的普及率和覆盖率。三是加强技术培训和人才培养。政府可通过设立培训机构、提供在线课程等方式,加强对农民和技术人员的培训,通过技术培训和人才培养,提高农民和技术人员的科技素质和技术应用能力。四是开发农村可再生能源。政府可推动太阳能、风能、生物质能等可再生能源在农村的普及与应用,实现传统燃料的替换,在为农村地区提供清洁能源的同时,还能在一定程度上解决农村废弃物处理问题,实现社会、经济与环境综合效益的提高。

3.3.3 建立合理的区域粮食生产碳补偿机制

实施耕地利用碳减排具有公共政策的外部性特征,部分农户会因粮食生产过程中的碳减排行为,如使用绿色材料和清洁能源等造成“私人权益”受损,而粮食消费者在这过程中却因从事非粮生产行业而获取正外部性收益,市场配置失灵,造成了明显的收益分配不公现象。因而,建立与之匹配的粮食生产区域碳补偿机制是纠正外部不经济的有效政策工具。鉴于粮食生产区域碳补偿问题具有高度的复杂性、模糊性与不确定性,因此本文结合多种政策工具提出解决方案与实施路径。具体而言,一是推动建立多样化农业补贴政策。对于粮食生产地区,政府应提高农业补贴力度,通过设立节能减排补贴等举措,鼓励农民采取低碳、可持续的农业生产方式。二是构建粮食生产横向生态补偿政策。中央政府将全国合理划分为粮食主产区、主销区与产销平衡区三大区域,并推动构建府际间的粮食生产横向生态补偿制度,如粮食主销区地方政府每年应向粮食主产区支付一定的生态补偿资金以支持粮食主产地区的碳减排。值得注意的是,由于不同粮食主产区的实际情况差异明显,故应因地制宜确定不同区域的补偿方式,综合采用多种手段为粮食主产区域提供碳补偿。

4 结 论

长期以来,中国粮食供给与需求结构一直处于紧平衡状态。随着粮食需求结构的多元化趋势日益凸显,保障粮食安全至关重要。在耕地利用碳减排的前提下进行粮食生产,就是要通过协调粮食安全与碳减排的双重目标,在巩固与提高粮食生产能力的同时,有效降低耕地利用碳排放量,实现耕地利用与粮食生产的协调发展。基于此,本文在阐述碳排放约束下耕地利用与粮食生产

逻辑关系的基础上,进一步分析了粮食安全与碳减排目标背景下中国耕地利用面临的挑战,并提出“土-碳-粮”三要素协调优化的治理路径。在中国当前农业生产条件下,尽管耕地利用碳减排对中国粮食安全具有高度不确定性,但协调农业领域“双碳”目标与粮食安全目标仍具有极高的可行性。合理控制粮食生产性要素的投入、比例与数量,就能在保障国家粮食安全与重要农产品有效供给的前提下实现耕地利用碳减排,在有效提升耕地的固碳减排潜力的同时保障粮食生产的安全线、稳定性和可持续性。此外,落实耕地“三位一体”保护制度有助于保护耕地资源,实施差异化耕地利用碳减排政策能有效应对不同区域特征,设立农业碳减排绿色基金能保障稳定资金支持,构建农业碳减排交易市场有助于引入市场机制、提高耕地利用碳减排效率,变革农业生产方式将有效推动绿色农业生产模式发展,降低固碳技术应用门槛将有效提高耕地固碳能力,而落实粮食主产区域碳补偿政策能纠正负外部性问题。耕地是粮食安全“压舱石”,面对耕地利用碳减排目标下粮食生产的新需求与新问题,在厘清两者逻辑关系的基础上,亟待广泛展开实证研究以推进耕地利用转型的实践,为践行耕地利用碳减排与粮食生产提供科学和有效的支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 党昱譞,孔祥斌,温良友,等.中国耕地生态保护补偿的省级差分分区及补偿标准[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 254-263.
DANG Yuxuan, KONG Xiangbin, WEN Liangyou, et al. Provincial eco-compensation zonings and standards of cultivated land in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 254-263. (in Chinese with English abstract)
- [2] 柳可,张安录.耕地利用效率研究进展——基于文献计量视角[J]. *资源科学*, 2023, 45(3): 494-511.
LIU Ke, ZHANG Anlu. Research progress and hotspots of cultivated land use efficiency in China and internationally: Based on a bibliometric analysis[J]. *Resources Science*, 2023, 45(3): 494-511. (in Chinese with English abstract)
- [3] HUANG Z, DU X, CASTILLO C. How does urbanization affect farmland protection? Evidence from China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 139-147.
- [4] HAN H, ZHANG X. Static and dynamic cultivated land use efficiency in China: A minimum distance to strong efficient frontier approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119002.
- [5] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.中国耕地多功能耦合协调时空演变及其驱动因素[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 244-255.
ZHANG Yue, DAI Yaqiang, CHEN Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land multifunctional coupling coordination development in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(7): 244-255. (in Chinese with English abstract)

- [6] 耿献辉, 张文文, 彭世广. 基于生存分析法的中国粮食进口稳定性研究[J]. 世界农业, 2022(10): 5-17.
GENG Xianhui, ZHANG Wenwen, PENG Shiguang. Analysis on the stability of China's grain import from the perspective of survival analysis[J]. World Agriculture, 2022(10): 5-17. (in Chinese with English abstract)
- [7] 于昊辰, 曾思燕, 王庆宾, 等. 多情景模拟下新时代中国耕地保护底线预测[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1222-1233.
YU Haochen, ZENG Siyan, WANG Qingbin, et al. Forecast on China's cultivated land protection baseline in the new era by multi-scenario simulations[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1222-1233. (in Chinese with English abstract)
- [8] 潘佩佩, 杨桂山, 王晓萌, 等. 太湖流域粮食生产对耕地利用变化动态响应分析及预测[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2364-2375.
PAN Peipei, YANG Guishan, WANG Xiaomeng, et al. Analysis and forecast on dynamic response of grain production to cropland use changes in Taihu Lake Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2364-2375. (in Chinese with English abstract)
- [9] 移明昊, 闫庆武, 张定祥, 等. 吉林省耕地利用碳排放测度及其与粮食生产脱钩分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(4): 45-56.
YI Minghao, YAN Qingwu, ZHANG Dingxiang, et al. Measurement of carbon emissions from cultivated land use and analysis of its decoupling from grain production in Jilin Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(4): 45-56. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨斌, 杨俊, 王占岐, 等. 长江经济带耕地绿色低碳利用的时空格局及其成因分析[J]. 中国土地科学, 2022, 36(10): 63-71.
YANG Bin, YANG Jun, WANG Zhanqi, et al. Spatial-temporal pattern and attribution of cultivated land green and low-carbon utilization in the Yangtze River Economic Belt[J]. China Land Science, 2022, 36(10): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- [11] KUANG B, LU X, ZHOU M, et al. Provincial cultivated land use efficiency in China: Empirical analysis based on the SBM-DEA model with carbon emissions considered[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 151: 119874.
- [12] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 261-270.
WU Aibin, ZHAO Yanxia, GUO Xiaoping, et al. Evolution and multi scenario simulation of land use carbon emission pattern in Hebei Province under carbon neutral target[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 261-270. (in Chinese with English abstract)
- [13] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288-296.
GU Hanlong, MA Tianjun, QIAN Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 288-296. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 360-368.
WU Haoyue, MENG Yue, HUANG Hanjiao, et al. Spatiotemporal coupling between the net carbon sequestration of cropland use and agricultural production in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 360-368. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李继霞, 王华春, 樊骋琳. “双碳”目标下中国耕地利用生态效率的区域差异、动态演进及收敛性[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2023(5): 167-181.
LI Jixia, WANG Huachun, FAN Chenglin. Regional differences dynamic evolution and convergence of ecological efficiency of cultivated land use in China under the dual carbon target[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023(5): 167-181. (in Chinese with English abstract)
- [16] 侯孟阳, 邓元杰, 姚顺波. 城镇化、耕地集约利用与粮食生产——气候条件下有调节的中介效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(10): 160-171.
HOU Mengyang, DENG Yuanjie, YAO Shunbo. Urbanization, intensive cropland use, and grain production: A moderated mediating effect test under climate conditions[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(10): 160-171. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩天富, 李亚贞, 曲潇林, 等. 中国农田小麦和玉米产量时空演变及驱动因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 100-108.
HAN Tianfu, LI Yazhen, QU Xiaolin, et al. Spatio-temporal evolutions and driving factors of wheat and maize yields in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 100-108. (in Chinese with English abstract)
- [18] 潘佩佩, 王晓旭, 赵倩石, 等. 河北省耕地利用变化对粮食生产的影响效应及时空格局分析[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 85-92.
PAN Peipei, WANG Xiaoxu, ZHAO Qianshi, et al. Effect of cropland change on grain production in Hebei Province: The spatial-temporal pattern[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, 34(6): 85-92. (in Chinese with English abstract)
- [19] 卢新海, 崔海莹, 柯善淦, 等. 湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率的耦合协调及其驱动机制研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(8): 75-84.
LU Xinhai, CUI Haiying, KE Shangan, et al. Coupling coordination and driving mechanism of green transition of farmland use and total factor productivity of grain in Hubei Province[J]. China Land Science, 2022, 36(8): 75-84. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王贞妍, 何云玲, 林晨. 近 30 年云南省主要粮食作物种植面积与产量变化分析[J]. 热带地理, 2023, 43(7): 1288-1301.

- WANG Zhenyan, HE Yunling, LIN Chen. Spatio-temporal variation of the grain planting area and yield in Yunnan Province in the last 30 years[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(7): 1288-1301. (in Chinese with English abstract)
- [21] GU R, DUO L, GUO X, et al. Spatiotemporal heterogeneity between agricultural carbon emission efficiency and food security in Henan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(17): 49470-49486.
- [22] CHENG P, TANG H, DONG Y, et al. Knowledge mapping of research on land use change and food security: A visual analysis using CiteSpace and VOSviewer[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 13065.
- [23] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲耕地利用转型与粮食产量耦合关系研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 63-69.
- MALIKA Amat, MANSUR Shabiti, ZHANG Xueqi. The coupling relationship between the transformation of cultivated land utilization and grain yield in Yarkant River Plain Oasis[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(10): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [24] 盖庆恩, 王美知, 石宝峰, 等. 土地比较优势、农户行为与农业生产效率——来自种植结构调整的考察[J]. *经济研究*, 2022, 57(10): 138-155.
- GAI Qingen, WANG Meizhi, SHI Baofeng, et al. Land comparative advantage, farmer behavior and agricultural productivity: A Study on the adjustment of planting structure[J]. *Economic Research Journal*, 2022, 57(10): 138-155. (in Chinese with English abstract)
- [25] 邹利林, 梁一凡, 冯培明, 等. 广东省耕地利用质量评价、时空跃迁及障碍因子诊断[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 256-266.
- ZOU Lilin, LIANG Yifan, FENG Peiming, et al. Evaluation, spatial-temporal transition and obstacle factor diagnosis of cultivated land use quality in Guangdong Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(17): 256-266. (in Chinese with English abstract)
- [26] HUA E, HAN X, BAI Y. Synergy of water use in water-energy-food nexus from a symbiosis perspective: A case study in China[J]. *Energy*, 2023, 283: 129164.
- [27] 江文渊, 曾珍香, 张征云. 考虑“水—土—能—碳”关联的我国工农业碳排放效率及减排潜力研究[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 120-129.
- JIANG Wenyuan, ZENG Zhenxiang, ZHANG Zhengyun. China's industrial and agricultural carbon emission efficiency and reduction potential considering the water-land-energy-carbon nexus[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 120-129. (in Chinese with English abstract)
- [28] REN H, LIU B, ZHANG Z, et al. A water-energy-food-carbon nexus optimization model for sustainable agricultural development in the Yellow River Basin under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2022, 326: 120008.
- [29] 陈红, 周思姝, 韩哲英. “水—土—能—粮—碳”适配度的空间异质性及其影响因素研究[J]. *生态经济*, 2023, 39(6): 115-122.
- CHEN Hong, ZHOU Sishu, HAN Zheyang. The spatial heterogeneity and the influencing factors of “water-soil-energy-grain-carbon” suitability[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(6): 115-122. (in Chinese with English abstract)
- [30] SUŠNIK J, MASIA S, INDRIKSONE D, et al. System dynamics modelling to explore the impacts of policies on the water-energy-food-land-climate nexus in Latvia[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 775: 145827.
- [31] 吴昊玥, 黄瀚蛟, 陈文宽. 中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(6): 85-91.
- WU Haoyue, HUANG Hanjiao, CHEN Wenkuan. Decoupling effects between carbon emissions from cropland use and grain production in the major grain-production areas in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(6): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [32] YU D, HU S, TONG L, et al. Spatiotemporal dynamics of cultivated land and its influences on grain production potential in Hunan province, China[J]. *Land*, 2020, 9(12): 510.
- [33] 刘颖, 刘芳, 秦安琪. 水土资源约束下灌溉和机械投入对水稻生产效率的影响[J]. *华中农业大学学报 (社会科学版)*, 2023, 165(3): 67-78.
- LIU Ying, LIU Fang, QIN Anqi. Effects of irrigation and mechanical inputs on rice production efficiency under constraints of water and soil resources[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2023, 165(3): 67-78. (in Chinese with English abstract)
- [34] XIA L, CAO L, YANG Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. *Nature Food*, 2023, 4(3): 236-246.
- [35] WANG R, CHEN J, LI Z, et al. Factors analysis for the decoupling of grain production and carbon emissions from crop planting in China: A discussion on the regulating effects of planting scale and technological progress[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 103: 107249.
- [36] 王如如, 张郁, 房艳刚, 等. 农业生产转型视角的东北三省农业碳排放格局特征与作用机制[J]. *地理研究*, 2023, 42(8): 2264-2282.
- WANG Ruru, ZHANG Yu, FANG Yangang, et al. The pattern characteristics and mechanisms of agriculture carbon emissions from the perspective of agricultural production transition in Northeast China[J]. *Geographical Research*, 2023, 42(8): 2264-2282. (in Chinese with English abstract)
- [37] 李强, 高威, 魏建飞, 等. 中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 239-249.
- LI Qiang, GAO Wei, WEI Jianfei, et al. Spatiotemporal evolution and comprehensive zoning of net carbon sink in cultivated land use in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(11): 239-249. (in Chinese with English abstract)
- [38] CHENG P, TANG H, LIN F, et al. Bibliometrics of the nexus between food security and carbon emissions: Hotspots and

- trends[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(10): 25981-25998.
- [39] 陈梦涵, 唐莹. 中国耕地利用碳排放时空特征与影响因素分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 236-243.
CHEN Menghan, TANG Ying. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of carbon emission from cultivated land utilization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 236-243. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王梦成, 董又铭, 林娜娜, 等. 双碳背景下耕地利用转型对耕地利用碳排放的影响及其空间溢出效应——以黄淮海平原为例[J]. 自然资源学报, 2024, 39(2): 352-371.
WANG Mengcheng, DONG Youming, LIN Nana, et al. Impact of farmland use transition on farmland use carbon emissions and its spatial spillover effects under the double carbon background: A case study of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(2): 352-371. (in Chinese with English abstract)

Logical correlation, realistic contradictions and path optimization for promoting grain production through cultivated land utilization under carbon emission constraints

CHENG Peng¹, LIU Ke², ZHANG Yang^{3*}, TANG Houtian⁴, WU Shiman¹, XIANG Meilai¹

(1. School of Management, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2. School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Urban Economics and Public Administration, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China; 4. School of Public Affairs, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Cultivated land is the most important carrier of grain production. Quantity, quality, and utilization rate can also determine the production capacity of grain for national grain security. Among them, agricultural carbon emission has been one of the important sources of greenhouse gases. There is a complex logical relationship among land use, land use carbon reduction, and grain production under the strategic context of climate change response to the overall layout of ecological civilization. In response to the growing demand for grain, agricultural production factors in the short term have caused ecological pollution and carbon emissions in cultivated land. The demand for diversified agricultural products has also intensified the excessive investment of production resources, further deteriorating the ecological environment of cultivated land and carbon emissions. Therefore, this study aims to explore the relationship between cultivated land utilization and grain production in the context of carbon emission constraints, in order to reveal the complex logical relationship among the three elements of "soil-carbon-grain". The challenges were also proposed to sustainably utilize the cultivated land under the goals of grain security and carbon emission reduction. Furthermore, the optimal paths were constructed to promote the green transformation and upgrading of cultivated land use for better grain production. The results showed that: (1) A complex "soil-carbon-grain" factor system was obtained to form the logical connection between cultivated land utilization and grain production under carbon emission constraints. (2) The carbon reduction was implemented to utilize the cultivated land under current agricultural production. There were uncertain impacts on national grain security. But the ever-increasing grain production still resulted in a large amount of carbon emissions. (3) There was a better balance between cultivated land utilization and grain production under carbon emission constraints. A coordinated optimal path was established for the "soil-carbon-grain" elements from three aspects: cultivated land protection, carbon reduction, and grain production. The cultivated land resources were allocated to construct a carbon trading market for the structure of grain production. According to the current agricultural production, it was still feasible to coordinate the "Carbon Peaking and Carbon Neutrality" goals with grain security goals, although there was a high degree of uncertainty on carbon emissions that were reduced from cultivated land utilization. The proportion and quantity of input were optimized from the factors of grain production, in order to implement the "Trinity" protection system for the cultivated land, differentiated carbon reduction for cultivated land use, and stable support of agricultural funding. A mature trading market of agricultural carbon was established to innovate the green technologies of agricultural production. The carbon emissions were reduced from the cultivated land use for the national grain security, the carbon sequestration emission reduction potential of cultivated land, and grain production. It is very necessary to plan the spatial patterns of cultivated land using various policy tools, in order to promote the sustainable and synergistic development of low-carbon and green utilization of cultivated land and national food security.

Keywords: carbon emission; cultivated land utilization; grain production; logical correlation; path optimization