

黄河流域甘肃段粮食生产全周期 碳平衡测量与区划

羊丽, 杨清

(甘肃农业大学 财经学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 对黄河流域甘肃段粮食生产全周期碳收支测度及分区开展研究, 为该区粮食安全和生态保护提供科学支撑。[方法] 以黄河流域甘肃段为研究对象, 基于 2000—2022 年多期数据, 构建粮食生产全周期碳平衡框架, 综合运用 IPCC 碳转换系数法、生命周期法与经验公式法, 测量粮食生产碳收支水平, 揭示其时空演变规律, 运用“动-静”结合的方法划分碳平衡分区。[结果] ① 研究区粮食生产碳排放呈“先增后减”趋势, 2015 年为转折点, 碳吸收量整体呈增加态势; ② 时序演变上, 动态平衡水平呈现“先降后升”的趋势, 2015 年后其平衡水平得以显著提升; 空间格局上, 各地区静态平衡水平空间差异化程度较高, 至 2022 年超过 90% 的区域实现静态平衡; ③ 碳平衡分区呈现“西高东低”的分布格局, 且 2015 年后以失衡良变为主导类型。[结论] 流域内粮食生产碳平衡总体呈积极改善趋势, 反映出区域治理在逐步完善, 为提升粮食生产碳平衡能力, 仍需进一步制定差异化的粮食绿色生产策略。

关键词: 粮食生产全周期; 碳排放; 碳吸收; 碳平衡分区; 黄河流域甘肃段

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)05-0167-10

中图分类号: S181

文献参数: 羊丽, 杨清. 黄河流域甘肃段粮食生产全周期碳平衡测量与区划[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 167-176. Yang Li, Yang Qing. Measurement and zoning of carbon balance in full life cycle of grain production in Gansu section of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 167-176. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.007; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.007.

Measurement and zoning of carbon balance in full life cycle of grain production in Gansu section of Yellow River basin

Yang Li, Yang Qing

(College of Finance and Economics, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The study conducted a full life cycle carbon budget assessment and zoning of grain production in the Gansu section of the Yellow River basin to provide scientific support for regional grain security and ecological conservation. [Methods] This study focused on the Gansu section of the Yellow River basin. Based on multi-period data from 2000 to 2022, a carbon balance framework for the entire grain production cycle was constructed. The IPCC carbon conversion coefficient method, life cycle method, and empirical formula method were comprehensively used to measure the carbon budget level of grain production, reveal its spatiotemporal evolution patterns, and divide the carbon balance zones using a combination of dynamic and static methods. [Results] ① Carbon emissions from grain production in the study area showed a trend of ‘first increasing and then decreasing’, with 2015 as the turning point. The overall carbon sequestration exhibited a rising trend. ② In terms of temporal evolution, the dynamic balance level showed a trend of ‘first decreasing and then increasing’, and significantly improved after 2015. In terms of spatial pattern, the static balance level varied greatly across regions, with more than 90% of the regions achieving static balance by 2022. ③ The carbon balance zoning showed a distribution pattern of ‘high in the west and low in the east’. Since 2015, the dominant trend has been a favorable transition from imbalance to balance. [Conclusion] The overall carbon balance of grain production in the basin shows a

收稿日期: 2025-03-19

修回日期: 2025-06-04

采用日期: 2025-06-04

资助项目: 甘肃省基础研究计划项目软科学专项“甘肃省实施“强省会”战略增长极效应及实现路径研究”(22JR4ZA090)

第一作者: 羊丽(1999—), 女(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士, 研究方向为区域与生态经济。Email: 2969472695@qq.com。

通信作者: 杨清(1980—), 女(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 副教授, 主要从事区域与生态经济方面的研究。Email: yangq@gsau.edu.cn。

positive trend of improvement, reflecting the gradual improvement of regional governance. To further improve the carbon balance of grain production, it is still necessary to develop differentiated green production strategies.

Keywords: full cycle of grain production; carbon emission; carbon sequestration; carbon balance zoning; Gansu section of the Yellow River basin

近年来,在全球气候变暖的背景下,碳排放问题已成为国际社会关注的焦点。粮食生产碳排放是农业碳排放的重要组成部分,黄河流域甘肃段作为西北主要的生态屏障核心区,降低粮食生产碳排放是实现粮食安全与生态保护协同发展的关键。为应对全球气候环境日益恶化的挑战,2021年《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》阐述了黄河流域在保障国家粮食安全中的作用^[1];2025年中央一号文件强调以耕地保护夯实粮食安全基础,推进生态治理和农业可持续发展,推广农业技术促进粮食生产低碳转型,实现耕地质量提升与生态修复协同增效^[2]。粮食生产活动具有产生碳源与吸收碳汇的双重效应,采用针对性政策和发展现代农业可有效实现粮食安全与固碳减排双赢。因此探究粮食生产碳平衡与生态保护的联系,可为协同推进区域低碳农业转型与粮食安全战略提供科学依据。

目前,已有诸多学者围绕“粮食生产碳排放”展开了广泛研究,主要集中于以下3个方面:①分析粮食生产碳收支评估范围。粮食生产碳排放所涵盖的评估范围在不断拓展,要素投入由起初的以化肥为主^[3],逐步拓展至农药、农用柴油、农膜、翻耕和灌溉等几个方面^[4];粮食作物的种植培育和秸秆焚烧仍聚焦于小麦、玉米和水稻^[5]。由于难以精细到每一种粮食作物,仅依靠以上3种作物来测算碳排放,可能导致计算结果存在偏差;其中,土壤和粮食作物作为碳源和碳汇,具有双重功效,有学者将土壤微生物通过分解碳源及作物光合固碳的过程纳入到粮食生产周期中^[6],进一步丰富了粮食生产碳排放核算环节。②分析粮食生产碳收支的核算方法。根据现有研究,主要运用碳排放系数法,投入产出分析法^[7]、混合生命周期法^[8]和碳生态承载系数法核算粮食从种植到消费各个领域的碳收支量,分析其时空演变特征,通过测算生态承载力水平来衡量粮食生产活动与生态系统之间实现动态平衡的阈值;然而,现有研究的分析方法大多聚焦于碳排放,且以静态时点的碳源和碳汇来分析碳平衡变化特征,其核算方法有碳平衡压力模型、碳平衡分析法^[9]和碳生态承载系数法等^[10]方面。③粮食生产碳排放的研究区域。学者主要基于国家和省级层面分析其碳收支水平,张青青等^[11]、邓明君等^[12]、何慧爽等^[13]基于我国不同时期碳排放水平,分析我国粮食生产碳排放的驱动因素、

时空效应和碳减排潜力;省级层面,主要集中于河南^[14]、山东省和黄淮海等^[15]地,从碳排放特征变化、碳排放效率评价和策略分析等方面分析碳减排的优化路径。综上所述,现有研究仍存在一些局限,评估范围以主粮作物为主,未涵盖多样化评估体系;核算方法多依赖静态分析,未能整合气候和耕作制度变化等动态因素的影响,较少采用动静态结合的方式测度碳平衡水平并划分分区。鉴于此,本研究以黄河流域甘肃段为研究对象,选取2000,2005,2010,2015和2022年的数据,运用IPCC碳转化系数法、生命周期法和碳生态承载系数法,结合碳源和碳汇时间点和时间段的变化量测算粮食生产碳收支“动-静”态平衡水平,据此对研究区进行划分,为黄河流域甘肃段粮食安全和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

黄河在甘肃省两进两出,干流流经兰州市、白银市、甘南藏族自治州和临夏回族自治州,支流流经定西市、天水市、平凉市、庆阳市和武威市,共跨9个市(州),总面积 $1.46 \times 10^5 \text{ km}^2$,占甘肃省总面积的32%^[16],本文以该9个市(州)为主要研究区。黄河流域甘肃段作为生态屏障核心区,其特殊的地理位置,决定其在黄河流域生态保护和粮食安全发展中的关键作用。在黄河流域生态保护的背景下,结合搜集数据测量粮食生产碳排放变化,识别其高排放环节,助力黄河流域甘肃段的生态平衡,缓解生态压力,确保粮食安全,对于提升黄河流域生态韧性及维持生态系统碳平衡有重要的意义。

2 研究方法

通过查阅相关文献进行总结分析,为本研究提供理论支撑;运用碳转化系数法、生命周期法、经验公式法等,对研究区碳收支变化特征、碳分区分类、时空分布等方面进行分析,探究实现低碳减排的意义。

2.1 数据来源

本研究数据包括粮食播种面积、主要农作物(水稻、小麦、玉米、薯类、大豆等)种植培育面积、粮食作物产量、农药、柴油、化肥使用量和有效灌溉面积等。其中黄河流域研究区的高程数据来源于地理空间数据云,行政区划图来从标准地图服务网站获取,空间

分布率为 30 m,年均温和年降水数据来源于国家环境信息中心,其余数据来源于市级统计年鉴、统计公报、《甘肃农村年鉴》《甘肃统计年鉴》,化肥使用量采用折纯量,作物翻耕面积和农业灌溉面积用粮食播种面积和有效灌溉面积代替,部分缺失数据采用插值法获得,市级农药、农用柴油数据依据省级农药、农业柴油和农业中间消耗量等数据进行估算。

2.2 粮食生产碳收支测算方法

2.2.1 估算碳源

粮食生产碳排放指作物在生产活动过程中,不同生长阶段直接或间接产生的温室气体。基于已有研究,将其碳排放过程分为要素投入(农药、化肥和柴油等)、种植培育(灌溉、翻耕等)、秸秆焚烧和土壤异养呼吸 4 个阶段,运用碳转化系数法和经验分析法测量粮食生产过程产生的碳排放量^[17]。计算公式为

$$PCE_i = \sum FU \cdot K_{FU} + \sum PU \cdot K_{PU} \quad (1)$$

式中:PCE 为粮食生产碳排放;PCE_i 为要素投入碳排放;FU 为化肥使用折纯量(t);K_{FU} 为化肥使用碳排放系数;PU 为塑料薄膜、农药和农用柴油使用量(t);K_{PU} 为对应要素投入的碳排放系数。

$$PCE_c = \sum I + K_i + \sum A \cdot K_A \quad (2)$$

式中:PCE_c 为粮食作物种植培育过程碳排放量,其中 I 为作物耕种灌溉面积(10³ hm²);K_i 为作物耕种碳排放系数;A 为作物种植培育面积(10³ hm²);K_A 为对应作物生长发育碳排放系数。

$$PCE_b = \sum Y \cdot C \cdot B \cdot R_{inc} \cdot K_{inc} \quad (3)$$

式中:PCE_b 为粮食作物秸秆焚烧碳排放量,其中 Y 为对应作物产量(t);C 为作物秸秆系数(谷草比);B 为作物燃烧效率;R_{inc} 为作物燃烧比例;K_{inc} 为对应作物秸秆焚烧碳排放系数。

$$PCE_s = 0.22 \times \left[e^{0.09127T} + \ln(0.3145M + 1) \right] \times 30 \times 0.465 \times A \quad (4)$$

$$PCE = PCE_i + PCE_c + PCE_b + PCE_s \quad (5)$$

式中:PCE_s 为土壤异养呼吸碳排放量,其中 T 为不同地区年均温(°C);M 为年降水量(mm);相关碳排放系数、谷草比、燃烧效率和燃烧比例详见表 1—2。

2.2.2 估算碳汇

粮食生产碳吸收指通过作物生长、土壤固碳和农业废弃物处理等自然或人工过程,将大气中的二氧化碳储存在作物、土壤或生态系统中的行为。基于已有研究,本文将粮食生产碳吸收过程分为光合固碳和土壤固碳两个过程(表 3)。在计算方法上,本文主要运用碳转化系数法测算作物光合作用碳吸收,结合经验模型计算土壤的有机碳储量^[18]。计算公式为:

$$PSC_c = \sum \left[Y \cdot F \times (1 - W) \times (1 + R) \right] / H \quad (6)$$

式中:PSC 为粮食作物碳吸收量;PSC_c 为作物进行光合作用吸收大气中二氧化碳的量;Y 为不同作物对应的产量(t);F 为不同作物碳吸收系数;W 为作物含水率;R 为作物根冠比;H 为作物经济系数;

$$PSC_s = \sum_C (SOCD_i \cdot F_{LUi} \cdot F_{MGi} \cdot F_{INi} \cdot A_{Ci}) \quad (7)$$

$$PSC = PSC_c + PSC_s \quad (8)$$

式中:PSC_c 为耕作土壤的碳储量;SOCD_i 为土壤的有机碳密度,根据各地区不同的土壤类型和单位面积内一定深度的土层所含有碳元素质量得出不同土壤的有机碳密度^[19],其相关影响因素基于以往研究得出^[20];F_{LUi} 为土地利用影响因素;F_{MGi} 为耕作制度影响因素;F_{INi} 为养分投入影响因素^[21];A_{Ci} 为用于粮食生产活动中的耕种土壤面积(10³ hm²)。涉及粮食生产碳吸收的相关系数详见表 3。

表 1 各类粮食作物的谷草比、燃烧效率和燃烧比例

Table 1 Grain-to-straw ratios, combustion efficiencies and combustion ratios for various grain crops

粮食作物	谷草比	燃烧效率	燃烧比例/%	数据来源
小麦	1.1	0.93	6.7	彭立群等 ^[22]
玉米	1.2	0.92	15.1	彭立群等 ^[22]
大豆	1.6	0.68	9.2	彭立群等 ^[22]
水稻	0.9	0.93	8.5	Yu Y 等 ^[21]
薯类	0.5	0.68	7.5	彭立群等 ^[22]
其他作物	1.6	0.81	8.2	彭立群等 ^[22]

表 2 粮食生产碳排放系数

Table 2 Carbon emission factors for various types of grain production

碳源	碳排放系数	参考来源
化肥	0.896 0 t/t	张秀武等 ^[23]
农药	4.934 1 t/t	张秀武等 ^[23]
农膜	5.180 0 t/t	张秀武等 ^[23]
农用柴油	0.592 7 t/t	张秀武等 ^[23]
作物播种	3.126 0 kg/hm ²	张秀武等 ^[23]
灌溉	266.480 0 kg/hm ²	张秀武等 ^[23]
小麦生长	0.142 2 t/hm ²	张青青等 ^[23]
玉米生长	0.205 8 t/hm ²	路昌等 ^[10]
大豆生长	0.186 1 t/hm ²	路昌等 ^[10]
水稻生长	1.431 8 t/hm ²	张青青等 ^[11]
其他作物生长	0.131 7 t/hm ²	路昌等 ^[10]
小麦焚烧	0.160 0 t/hm ²	Yu Y 等 ^[21]
玉米焚烧	0.170 0 t/hm ²	Yu Y 等 ^[21]
大豆焚烧	0.150 0 t/hm ²	Yu Y 等 ^[21]
水稻焚烧	0.180 0 t/hm ²	Yu Y 等 ^[21]
其他作物焚烧	0.150 0 t/hm ²	Yu Y 等 ^[21]

表 3 粮食作物经济系数、碳吸收系数、含水率和根冠比
Table 3 Economic coefficients, carbon sequestration coefficients, water content, and root-to-shoot ratio of grain crop

作物类别	经济系数	碳吸收系数/ (t·t ⁻¹)	含水率/ %	根冠比	数据来源
小麦	0.40	0.485 0	7.00	0.39	薛秀峰等 ^[24]
玉米	0.40	0.470 9	7.71	0.16	路昌等 ^[10]
大豆	0.34	0.450 0	7.61	0.13	薛秀峰等 ^[24]
水稻	0.45	0.414 4	8.72	0.60	薛秀峰等 ^[24]
薯类	0.70	0.422 6	7.00	0.18	路昌等 ^[25]
其他作物	0.40	0.450 0	7.61	—	路昌等 ^[25]

2.3 碳平衡分区划分方法

2.3.1 估算静态平衡水平

静态平衡水平(SCBL)通常指某一特定区域,碳排放与碳吸收之间的平衡状态。本研究运用截面数据评估特定时间点粮食生产系统碳收支平衡状态,揭示碳排放空间异质性,反映黄河流域甘肃段在静态时间点的碳收支关系;当某一地区粮食生产碳汇可吸纳碳排放时,视为碳平衡,若碳汇无法吸纳该区域作物产生的碳排放时,视为碳失衡^[25],计算公式为:

$$SCBL_i = \frac{FCS_i / \sum FCS}{FCE_i / \sum FCE} \quad (9)$$

式中:SCBL_i代表特定区域静态平衡指数;FCS_i为特定区域粮食生产碳汇量;∑FCS为研究区域碳汇总量;FCE_i为特定区域粮食生产碳排放量;∑FCE为研究区域碳排放总量。若FCBL>1说明该地区粮食生产固碳能力较强,处于碳平衡状态,相反,若FCBL<1说明该地区粮食生产固碳能力较弱,处于碳失衡状态。

2.3.2 估算动态平衡水平

动态平衡水平(DCBL)指在生态系统中,碳排放与碳吸收之间不断变化但总体保持相对稳定的平衡状态,其平衡通过反馈机制或动态调节过程来实现,本研究动态平衡水平借鉴人口职住迁移过程发生动态变化的衡量方式^[26],反映某一特定时间段粮食生产碳收支向平衡或失衡转变的倾向及静态平衡水平的时序变化规律,若当期碳汇速率较上期明显增加或当期碳汇吸纳增速大于碳源排放速率,视为平衡,反之亦然。计算公式为

$$DCBL_i = R_{i(t_1, t_2)}(FCS) - R_{i(t_1, t_2)}(FCE) \quad (10)$$

式中:DCBL_i代表特定地区动态平衡指数,表示在研究期内粮食生产碳吸收和碳排放率;R_{i(t₁, t₂)}(FCS)表示i地区在(t₁, t₂)期间粮食生产碳排放变化水平;R_{i(t₁, t₂)}(FCE)为i地区在(t₁, t₂)期间碳吸收变化水平。

若DCBL>0,说明该地区粮食生产碳平衡能力提升,若DCBL<0,说明该地区粮食生产碳平衡能力下降。

2.3.3 “动-静”结合划分平衡分区

碳平衡水平分区指根据不同区域土地利用方式、生态系统类型及碳收支特点,将研究区域划分为不同的碳平衡分区,为不同区域碳管理提供科学依据。其静态数据可识别研究区内碳失衡区域,为动态模型提供初始参数,而动态平衡水平较高区域可通过提升资源利用效率推动静态平衡水平的优化,从而实现动-静态双平衡,运用动-静结合的方式可有效划分粮食生产碳排放分区类型,为制定区域差异化策略提供依据。本文依据碳平衡水平分区方法,结合特定地区粮食生产静态平衡水平(SCBL_i)初末期数值大小和动态平衡水平(DCBL_i)在不同时间段的数值变化趋势,得出以下几种碳平衡分区划分类型:在研究期(t₁, t₂)内,当基期(t₁)的静态平衡指数SCBL_(t₁)>1时,其处于“平衡”状态,可分为以下3种状态,DCBL_(t₁, t₂)>0时,研究区类型为平衡提升(BH);DCBL_(t₁, t₂)<0且SCBL_(t₂)>1时,为平衡衰退(BD);DCBL_(t₁, t₂)<0且SCBL_(t₂)<1时,为平衡异变(BV)。同理,当基期(t₁)的静态平衡指数SCBL_(t₁)<1时,其处于“失衡”状态,可得出研究区类型分别为失衡加剧(IA)、失衡良变(IT)和失衡缓和(IE)^[10]。

3 结果与分析

3.1 粮食生产碳排放时序特征

根据公式(5)估算出研究区2000,2005,2010,2015,2020和2022年粮食生产碳排放量,结果如图1所示。研究区内,武威市碳排放量高于其他区域,占黄河流域甘肃段粮食碳排放总量的17.81%,因玉米种植规模化及柴油耗能量较高,碳排放量居首位,甘南州因生态农业所占比例较大,碳排放速率较低。总体来看,各个地区粮食生产碳排放量呈倒V形趋势,分为两个阶段。第一阶段为2000—2015年粮食生产碳排放量呈增加态势,从2000年的1.07×10⁶t增至2015年的2.39×10⁶t,年均增速4.2%;由于早期随着“九五”计划方案的逐步推进,各地区粮食播种面积和种植规模不断扩大,要素投入种类增多,农民种植作物对农药和农用柴油依赖性较高,受传统耕作方式影响,仍以焚烧的方式处理农作物秸秆。农膜重复利用率低,农业生产处于粗放式经营状态,导致其碳排放量持续增加。第二阶段为2015—2022年各地区粮食生产碳排放量呈下降态势,年均降幅1.8%;近年来,随着生态文明建设的逐步推进以及全

国2015—2030年农业绿色可持续发展方案的实施,农业发展模式逐步由粗放式经营转向集约式经营,这一转型过程通过种植结构优化、生产技术升级和资源利用效率提升等途径,一定程度上抑制了粮食生产碳排放量。

3.2 粮食生产碳吸收及其强度分析

根据公式(8)估算出研究区粮食生产吸收量,结果如图1所示。其碳吸收量整体呈现增加态势,从2020年的 6.03×10^6 t增至2022年的 1.31×10^7 t,增幅高达117.03%,其中2005—2010年碳汇环比增速最快,增幅为17.28%。究其原因,一方面随着耕地面积的扩张,玉米等碳吸收系数较高的粮食作物种植面积扩大,使得土壤固碳速率提升、作物光合作用能力增强,推动碳汇增长;另一方面由于坚守耕地红线战略,耕地结构更加优化,农药化肥等生产要素从高投入高污染转向低投入低污染,农业要素结构不断优化。

近年来,除庆阳市碳吸收量有所降低外,其余地区碳吸收量呈增加态势。其中平凉市和定西市碳吸收量较高,兰州市和甘南州碳吸收量相对较低。由于兰州市主要以工业为发展重心,受到工业用地挤占耕地及农业方面投入力度较低等因素影响,其碳吸收量年均下降1.5%;甘南州以畜牧业为主导产业,作为农业绿色发展先行区,其碳汇来源以牧草和草地固碳为主,该地区通过推进“牧旅融合”发展模式,间接导致粮食作物种植面积减少;而庆阳市近年来碳吸收量下降的主要原因是耕地面积逐渐减少,而耕地是土壤碳汇的主要载体,其直接影响了粮食作物的碳汇能力。

3.3 粮食生产碳平衡分析

3.3.1 静态平衡水平分析

总体来看,黄河流域甘肃段在2000—2020年静态碳平衡水平(SCBL)得到了显著提升(图2)。西北地区静态平衡水平呈现出高一低—高一波动的态势,早期高值区域主要集中于武威市、兰州市、白银市和甘南藏族自治州。这些地区由于耕地面积较少,部分地区从事工业生产,碳排放水平相对较低;东南地区则呈现出“低—高一低—高一波动”的态势,2000年和2015年碳平衡水平平均小于1,表明碳源贡献水平大于碳汇贡献水平。2000—2015年各地区平衡水平处于不断变化中,但自2015—2022年平衡水平有所上升,生态污染状况得以改善,2022年除平凉市以外,其余地区静态平衡水平平均大于1,表明这些地区具有较强的碳生态承载能力,粮食生产碳汇贡献水平高于碳源贡献水平。这一变化趋势体现了该区域在生态保护方面的显著作用。

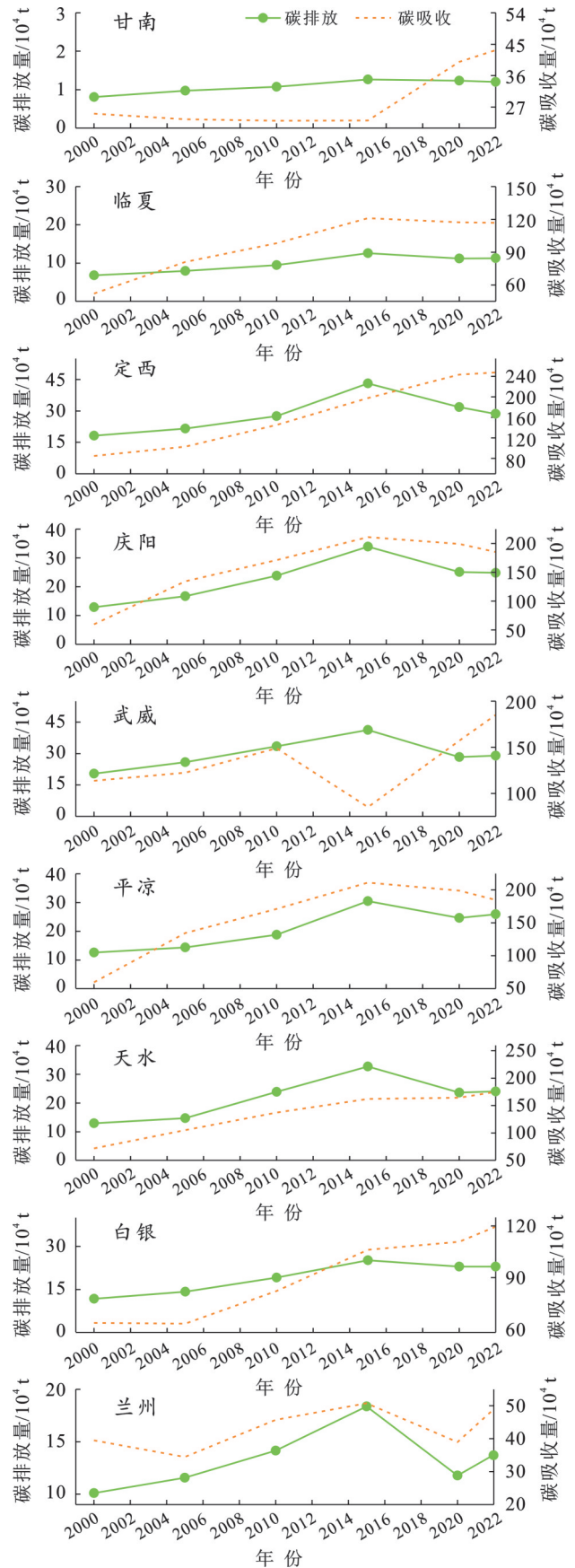


图1 黄河流域甘肃段2000—2022年粮食生产碳收支变化
Fig.1 Changes in carbon budget of grain production in Gansu section of Yellow River basin from 2000 to 2022

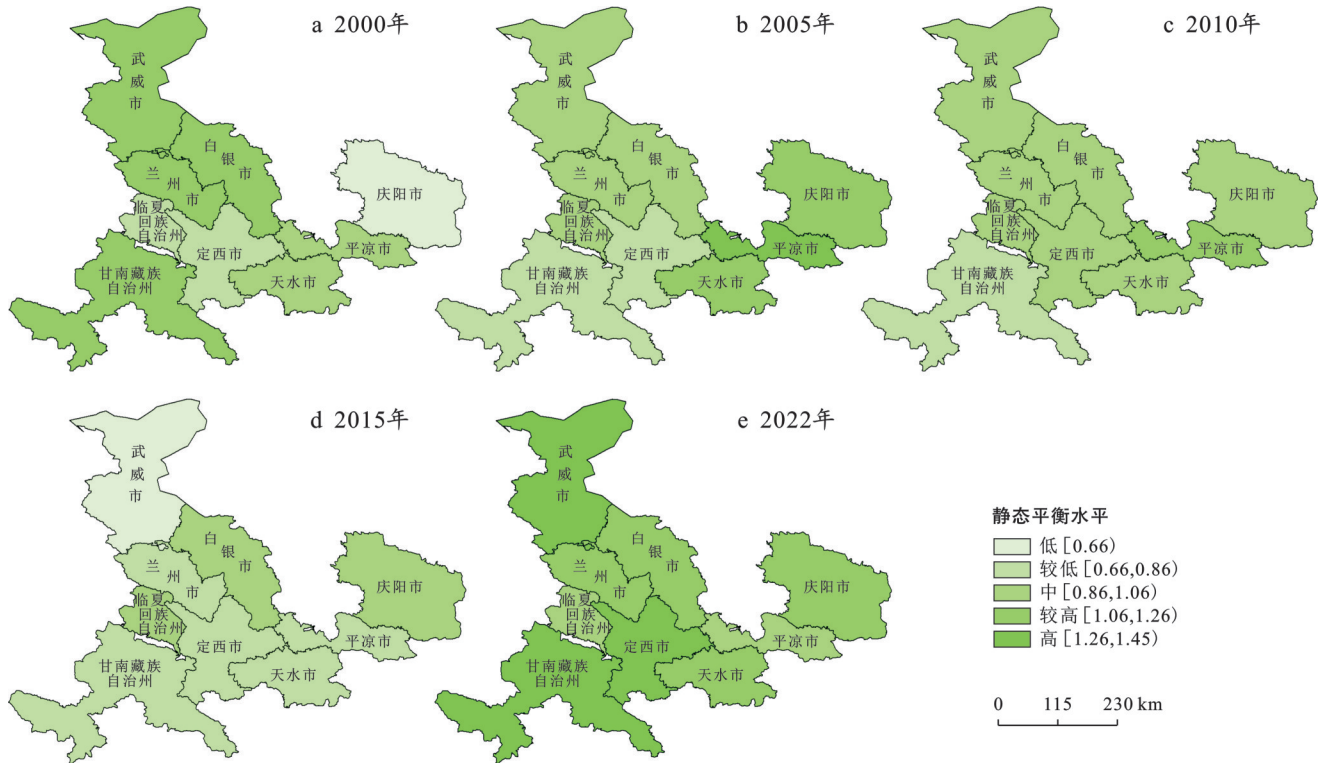


图2 黄河流域甘肃段2000—2022年粮食生产碳收支静态平衡水平时空演变
Fig.2 Spatiotemporal evolution of static balance level of carbon budget in Gansu section of Yellow River basin from 2000 to 2022

3.3.2 动态平衡水平分析

黄河流域甘肃段粮食生产碳排放动态平衡水平如图3所示。2000—2022年粮食生产碳收支动态平衡水平整体上呈“先降后升”的趋势,从0.1639(2000—2005年)增至0.3606(2015—2022年),2000—2015年动态平衡水平降幅最大。从时间角度分析,2000—2005年,庆阳市(0.953)和平凉市(0.6721)动态平衡水平较高,由于此时期农药化肥投入量较低,土壤储备碳汇水平较高,具备较好的碳吸收能力,而兰州市、白银市、武威市和甘南地区普遍为负值,因该时段遭受自然灾害,优质种源稀缺等因素的影响,粮食产量和土壤呼吸新陈代谢速率大幅度降低^[27];2005—2010年,除兰州市和定西市动态平衡水平有所提升外,其余地区平衡水平均有不同程度的下降,由于这段时期兰州市和定西市玉米种植面积增加,取代传统的小麦种植,显著增强了碳吸收能力,而部分地区农业生产方式未能满足低碳经济发展的要求,工业用地的扩张挤占耕地,碳吸收量减少;2010—2015年,各地区动态平衡水平均为负值,整体碳平衡形势较为严峻,由于这段时期粮食生产追求高产,化肥农药施用量增加,化肥利用率低,农业灌溉依赖传统漫灌,加剧了碳排放强度^[28];2015—2022年动态平衡水平均为正值,由于该时期测土配方施肥技术覆盖率增加,大范围普及覆膜保墒和滴灌技术,减少

了氮肥流失和灌溉能耗,提升了碳平衡水平。

3.4 粮食生产碳平衡水平分区

基于“动-静”结合的分区方法将研究区划分为6种类型,其具有显著的空间分异特征,结果如图4所示。依据初期静态平衡指数与数值“1”进行比较,结合动态平衡指数和末期静态平衡指数关系,将黄河流域甘肃段粮食生产碳平衡水平进行分区,整体上呈现“西高东低”的梯度。2000—2005年分区类型主要以失衡良变和平衡异变为主,而武威市因耕地面积扩张及玉米种植面积的增加,碳吸收增速显著,出现大规模平衡提升区;2005—2010年大部分地区以“西部失衡,东部平衡”为主,西部地区失衡面积逐步扩大,其中临夏回族自治州分区类型转变为平衡提升,由于农业部门开始推广土壤检测技术,精准施肥覆盖率不断提升;2010—2015年黄河流域甘肃段失衡加剧区面积占据60%以上,主要集中在东部地区,该时期工业建成区面积不断扩张,农业耕地面积减少,削弱农业碳汇;2015—2022年分区类型主要为失衡良变,随着黄河流域生态保护纲要的提出,治理体系逐步完善,碳排放强度显著降低^[1]。

4 讨论

粮食生产系统作为农业碳排放的子系统,其碳足迹的测算对保障国家粮食安全和实现农业低碳发

展具有重要的理论和实践价值。根据研究结果,粮食生产碳排放总量呈现阶段性波动增长的特征,要素投入和秸秆燃烧是其主要的碳排放源,这与张青青等^[11]测算的中国粮食生产碳排放总量变化趋势一致;共同点在于早期取消了农业税且增加了农资补贴,导致粮食生产碳排放量的增加,且为追求粮食产量,农民在生产中投入大量化肥农药,后期甘肃省农业部门出台了化肥零增长方案^[29],并提出发展生态农业推进黄河流域生态保护和高质量发展;因此,可以通过完善政策体系,加强技术研发,推广碳汇交易来降低碳排放。

粮食生产碳吸收总量呈现增加态势,这与童荣鑫等^[21]研究的中国土壤碳汇潜力的结论相呼应,主

要因通过退耕还林、水土保持等工程提升了农田生态系统的碳汇能力^[30];因此,可以推广叶绿体基因组转录蛋白质机器构造的技术^[31],提升作物碳吸收能力,通过秸秆还田、增加有机肥施用、施用生物质炭等措施增强土壤的固碳能力^[32]。本研究还发现,黄河流域甘肃段粮食生产碳平衡分区整体呈现“西高东低”的梯度,这与路昌等^[10]研究的黄河流域下游碳平衡分区特征类似,2015年后失衡加剧范围逐渐减小,得益于碳减排策略的逐步落实,因此应针对不同的碳平衡分区类型采取差异化的调控策略,对于平衡提升区,重点强化高碳汇作物种植,对于失衡加剧区,则需优化施肥灌溉等生产实践,实施耕地轮作休耕和有机肥补贴。

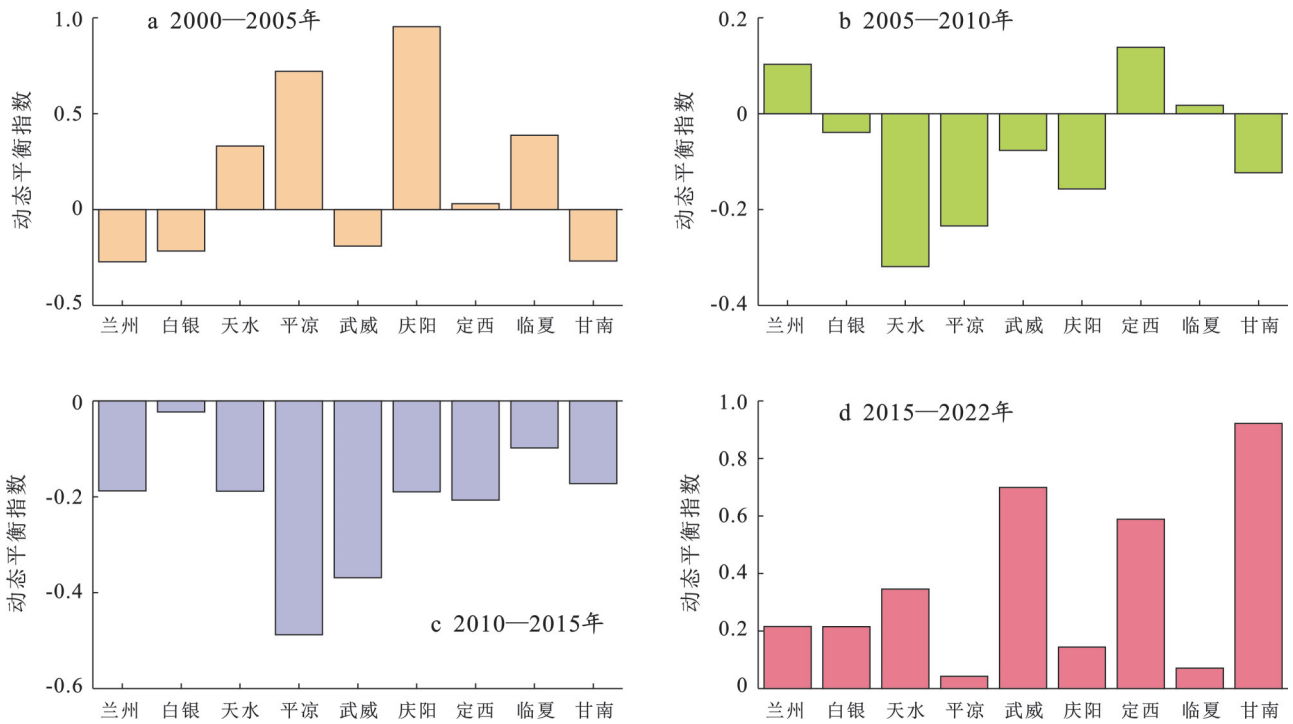


图 3 黄河流域甘肃段 2000—2022 年粮食生产碳收支动态平衡水平演变趋势
 Fig.3 Evolutionary trend of dynamic balance level of carbon budget for grain production in Gansu section of Yellow River basin from 2000 to 2022

本研究基于粮食生产全周期构建碳收支评估框架,该核算体系与路昌等^[10]测算净碳汇的方法类似,但在系统边界界定上进一步拓展了土壤异养呼吸的过程,较传统的投入产出法具有显著优势;其分析方法采用“动-静”结合的方式划分碳平衡分区,既克服了王之语等^[23]仅以静态碳源碳汇差值法测量的局限性,又与路昌等^[10]对黄河流域中下游碳平衡分区的研究方法相呼应,实现对传统静态碳平衡测量方法的升华,可为制定差异化的区域碳排放策略提供依据。

本研究仍存在不足之处:研究中部分参数(秸秆

燃烧比例、土壤有机碳密度等)参考文献经验值,可能削弱地区适用性,土壤异养呼吸碳汇依赖经验模型,未考虑微生物活动、土壤质地等微观因素,可能导致碳源碳汇测算存在偏差;年鉴部分数值缺失,采用插值法和已有数据估算法得出数据值存在误差;本研究未考虑粮食运输过程碳排放,未来应注重粮食生产与消费整个供应链系统、外卖服务等行业的研究^[33];本文主要以市域尺度为主,未来可考虑与全国或其他区域尺度数据融合,探索黄河流域碳平衡的跨区域协同路径。

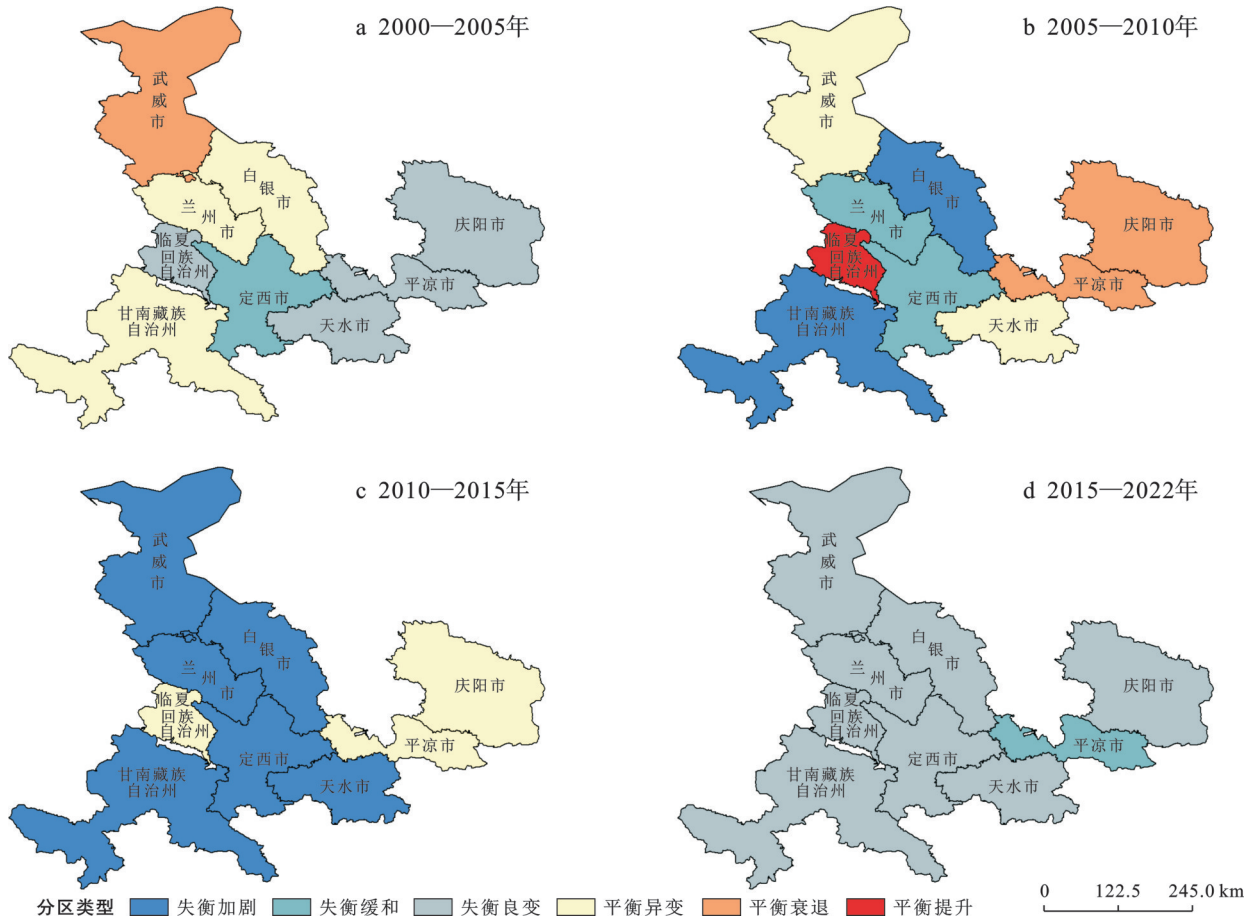


图 4 黄河流域甘肃段 2000—2022 年粮食生产碳平衡水平分区时空演变

Fig.4 Spatiotemporal evolution of carbon balance zoning levels of grain production in Gansu section of Yellow River basin from 2000 to 2022

5 结论

(1) 研究区粮食生产碳排放量以 2015 年为拐点,呈现先增后减的趋势,反映出低碳政策干预与技术革新的协同减排效应;碳吸收量总体呈稳步增长趋势,主要驱动力来自耕地结构的优化及高碳汇作物的种植。

(2) 研究区粮食生产碳收支在静态平衡水平上呈现显著的区域差异性:西部地区静态平衡水平呈现 N 形波动特征,东部地区则呈现 W 形交替变化的趋势,至研究末期,超过 90% 的区域静态平衡水平达到较高标准;动态平衡水平的负值范围随时间的推移呈现扩张趋势,2010—2015 年全部转变为负值,但在 2015 年后持续改善并转为正值状态。表明研究区域碳收支平衡状态正从异质分化向整体优化转型。

(3) 基于“动-静”碳平衡分析,将研究区划分为 6 种典型区域。其空间上整体呈现“西高东低”的梯度,且 2015 年后分区类型以失衡良变为主。反映出实施差异化调控策略对于实现区域粮食低碳生产的必要性。

参考文献 (References)

- [1] 方兰,李军.粮食安全视角下黄河流域生态保护与高质量发展[J].中国环境管理,2019,11(5):5-10.
Fang Lan, Li Jun. Ecological protection and high quality development of the Yellow River basin from the perspective of food security [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(5): 5-10.
- [2] 姜长云.2025 年中央一号文件的突出亮点[J].农村金融研究,2025(2):3-18.
Jiang Changyun. Highlights of the No. 1 Central Document in 2025 [J]. Rural Finance Research, 2025(2): 3-18.
- [3] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素:基于 1996—2015 年 31 个省份的面板数据分析[J].中国农村经济,2018(1):46-62.
Wang Baoyi, Zhang Weiguo. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996—2015 [J]. Chinese Rural Economy, 2018 (1): 46-62.
- [4] 田旭,王善高.中国粮食生产环境效率及其影响因素分析[J].资源科学,2016,38(11):2106-2116.

- Tian Xu, Wang Shangao. Environmental efficiency and its determinants regarding China's grain production [J]. *Resources Science*, 2016, 38(11):2106-2116.
- [5] 鲁庆尧,杨春红.我国粮食种植碳排放量变化趋势与驱动因素研究[J].*经济问题*,2023(1):114-121.
- Lu Qingyao, Yang Chunhong. A study on the changing trend and driving factors of carbon emissions from grain planting in China [J]. *On Economic Problems*, 2023(1): 114-121.
- [6] 鲍丽然,李瑜,张风雷,等.重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献[J].*中国地质*,2024, 51(5):1501-1512.
- Bao Liran, Li Yu, Zhang Fenglei, et al. Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China [J]. *Geology in China*, 2024, 51(5): 1501-1512.
- [7] 杨本晓,刘夏青,梁思哲.基于投入产出法的中国食品工业碳排放核算分析[J].*食品工业科技*,2023,44(12): 108-115.
- Yang Benxiao, Liu Xiaqing, Liang Sizhe. Carbon emission accounting analysis of the Chinese food industry based on the input-output method [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12):108-115.
- [8] 刘金良,王长波,杨子彦,等.基于混合生命周期评价模型的我国食物系统水资源消耗及二氧化碳排放核算[J].*中国环境管理*,2022,14(6):88-99.
- Liu Jinliang, Wang Changbo, Yang Ziyan, et al. Accounting of water consumption and CO₂ emissions in China's food system based on an hybrid LCA model [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2022, 14(6):88-99.
- [9] 魏燕茹,陈松林.福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J].*生态学报*,2021,41(14):5814-5824.
- Wei Yanru, Chen Songlin. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [10] 路昌,王之语,郭沁林,等.“动-静”结合视角下黄河中下游粮食生产全周期碳平衡测度及分区[J].*中国土地科学*,2024,38(8):109-123.
- Lu Chang, Wang Zhiyu, Guo Qinlin, et al. Measurement and zoning of the full-cycle carbon balance of food production in the middle and lower reaches of the Yellow River from the dynamic and static perspectives [J]. *China Land Science*, 2024, 38(8):109-123.
- [11] 张青青,曲衍波,展凌云,等.中国粮食生产碳排放动态演进及驱动效应[J].*地理学报*,2023,78(9):2186-2208.
- Zhang Qingqing, Qu Yanbo, Zhan Lingyun, et al. Dynamic evolution and driving effects of carbon emissions from grain production in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9):2186-2208.
- [12] 邓明君,邓俊杰,刘佳宇.中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J].*资源科学*,2016,38(3): 534-544.
- Deng Mingjun, Deng Junjie, Liu Jiayu. On the space-time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application [J]. *Resources Science*, 2016, 38(3):534-544.
- [13] 何慧爽,付帮杰.我国粮食主产区农业碳排放测度与减排压力研究[J].*生态经济*,2019,35(11):99-104.
- He Huisuang, Fu Bangjie. Measurement of agricultural carbon emission and pressure of emission reduction in main grain-producing areas of China [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(11):99-104.
- [14] 钟章奇,吴乐英,陈志建,等.区域碳排放转移的演变特征与结构分解及减排对策分析:以河南省为例[J].*地理科学*,2017,37(5):773-782.
- Zhong Zhangqi, Wu Leying, Chen Zhijian, et al. Evolution characteristics and structural decomposition of regional carbon emission transfer and implications for carbon-reduction policy: Taking Henan Province as an example [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(5): 773-782.
- [15] 苗青,翟一杰,胡路路.黄淮海5省粮食生产碳排放效率空间分异及动态演变[J].*水土保持通报*,2024,44(1):389-398.
- Miao Qing, Zhai Yijie, Hu Lulu. Spatial differentiation and dynamic evolution of carbon emission efficiency of grain production in five provinces of Huang-Huai-Hai Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):389-398.
- [16] 吴翠霞,颀继珍,包琼,等.基于“活力-组织力-恢复力-贡献力”框架的甘肃省黄河流域生态安全格局构建[J].*中国水土保持*,2024(7):53-58.
- Wu Cuixia, Xie Jizhen, Bao Qiong, et al. Construction of ecological security pattern in the Yellow River basin of Gansu Province based on the framework of vigor, organization, resilience and contribution [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(7):53-58.
- [17] 王菲,曹永强,周姝含,等.黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J].*生态学报*,2023,43(6): 2501-2514.
- Wang Fei, Cao Yongqiang, Zhou Shuhan, et al. Estimation of vegetation carbon sink in the Yellow River basin ecological function area and analysis of its main meteorological elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6):2501-2514.
- [18] 童荣鑫,梁迅,关庆锋,等.2000—2020年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J].*地理学报*,2023,78(9):2209-2222.

- Tong Rongxin, Liang Xun, Guan Qingfeng, et al. Estimation of soil carbon storage change from land use and management at a high spatial resolution in China during 2000—2020 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9):2209-2222.
- [19] 李春亮,王翔,张炜,等.黄土高原西段表层土壤有机碳储量及时空变化规律[J].*现代地质*,2022,36(2):655-661.
Li Chunliang, Wang Xiang, Zhang Wei, et al. Topsoil organic carbon storage and its spatial and temporal variation in the western Loess Plateau [J]. *Geoscience*, 2022, 36(2):655-661.
- [20] Lai Li, Huang Xianjin, Yang Hong, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11):e1601063.
- [21] Yu Yongqiang, Huang Yao, Zhang Wen. Projected changes in soil organic carbon stocks of China's croplands under different agricultural managements, 2011—2050 [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 178:109-120.
- [22] 彭立群,张强,贺克斌.基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J].*环境科学研究*,2016,29(8):1109-1118.
Peng Liqun, Zhang Qiang, He Kebin. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8):1109-1118.
- [23] 张秀武,郭孝阳,杨静怡.中国农业碳排放量估算及趋势预测[J].*统计与决策*,2025,41(10):83-89.
Zhang Xiuwu, Guo Xiaoyang, Yang Jingyi. Estimates and trend forecasts of agricultural carbon emissions in China [J]. *Statistics & Decision*, 2025, 41(10):83-89.
- [24] 薛秀峰,张仕超,张焯赟,等.近24年三峡水库库尾重庆市江津区耕地利用碳汇及碳足迹变化[J].*中国农业资源与区划*,2024,45(1):139-149.
Xue Xiufeng, Zhang Shichao, Zhang Xuanyun, et al. Carbon sink and carbon footprint change of cultivated land use in Jiangjin District at the end of Three Gorges reservoir in recent 24 years [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(1):139-149.
- [25] 路昌,王之语,郭沁林,等.山东省黄河流域粮食生产碳平衡研究[J].*农业与技术*,2024,44(17):82-86.
Lu Chang, Wang Zhiyu, Guo Qinlin, et al. Study on carbon balance of grain production in the Yellow River basin of Shandong Province [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(17):82-86.
- [26] 牛强,伍磊,盛富斌,等.基于个体职住迁移的武汉郊区新城职住动态平衡测度方法[J].*地理学报*,2023,78(12):3095-3108.
Niu Qiang, Wu Lei, Sheng Fubin, et al. Analytic approach for the jobs-housing dynamic balance in suburban new cities based on individual migration: A case study of Wuhan, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(12):3095-3108.
- [27] 赵建萍.农业灾害对庆阳市冬小麦生产的影响[J].*陕西农业科学*,2006,52(2):61-63.
Zhao Jianping. Impact of Agricultural disasters on winter wheat production in Qingyang City [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 52(2):61-63.
- [28] 林旭.农业领域新质生产力的生态内涵及发展方式[J].*商讯*,2024(24):171-174.
Lin Xu. Ecological connotation and development mode of new quality productive forces in agriculture [J]. *Business News*, 2024(24):171-174.
- [29] 杨肃昌.以化肥农药的减量增效推进甘肃农业绿色发展迈上新台阶[J].*甘肃政协*,2021(4):54-58.
Yang Suchang. Fertiliser and pesticide reduction and efficiency to promote the green development of Gansu agriculture to a new level [J]. *Gansu Provincial Committee of the Chinese People's Political Consultative Conference*, 2021(4):54-58.
- [30] 丁宏宇,李亚波,吴占华,等.国内水土保持措施碳汇研究进展综述[J].*水土保持应用技术*,2025(2):62-64.
Ding Hongyu, Li Yabo, Wu Zhanhua, et al. An overview of the progress of research on carbon sinks from domestic soil and water conservation measures [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2025(2):62-64.
- [31] 卢力媛,王春.我科学家成功解析叶绿体基因转录机器构造[N].*科技日报*,2024-03-02(3).
Lu Liyuan, Wang Chun. Chinese scientists have successfully deciphered the transcription machine structure of chloroplast genes [N]. *Science and Technology Daily*, 2024-03-02(3).
- [32] 黄浪,李小梅,蒋小华,等.高标准农田固碳价值转化机制与策略[J].*农业工程*,2025,15(3):119-125.
Huang Lang, Li Xiaomei, Jiang Xiaohua, et al. Mechanism and strategy of carbon sequestration value transformation in high-standard farmland [J]. *Agricultural Engineering*, 2025, 15(3):119-125.
- [33] 宋子康,黄甘霖.中小城市家庭交通和饮食选择的碳排放差异:以山东省滨城区为例[J].*生态学报*,2025,45(3):1261-1274.
Song Zikang, Huang Ganlin. Study on carbon emission differences of urban households' transportation and diet choices in small and medium-sized cities: A case study of Bincheng District in Shandong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3):1261-1274.