

# 陕西省耕地碳收支时空变化及公平性

马超群<sup>1,2</sup>, 张莎莎<sup>1</sup>, 韩玲<sup>1,2</sup>, 员学锋<sup>1,2</sup>, 任朝霞<sup>1,2</sup>, 弋志强<sup>1</sup>, 张硕蒙<sup>1</sup>

(1.长安大学土地工程学院, 陕西西安710054; 2.陕西省土地整治重点实验室, 陕西西安710054)

**摘要:** [目的] 探讨区域农业生产碳收支和碳排放公平性的时空演变规律, 为制定差异化减排增汇对策提供科学参考。[方法] 基于2000—2020年陕西省农业统计数据, 采用碳排放系数法对全省连续21 a的耕地碳收支进行估算, 并构建碳排放公平性评价模型, 从生态承载系数及经济效率系数两个方面分析陕西省耕地碳排放公平性。[结果] ①21 a间, 陕西省耕地碳排放总量先增后减, 碳排放强度增幅达到48.15%, 其中化肥是主要的碳排放源。②碳吸收总量持续上升, 碳吸收强度年平均增长率13.67%, 其中蔬菜的碳吸收贡献率最高。③碳排放和碳吸收均呈现关中高、陕南陕北较低分布格局, 耕地碳排放生态承载能力表现为: 陕南>关中>陕北, 农业经济效率呈现: 陕南>陕北>关中; 碳排放公平性聚类分析结果显示, 陕南和西安市在一定程度上分担了陕西省其他地区的耕地碳减排压力, 而铜川市、宝鸡市、榆林市、渭南市等地区则加重了耕地碳减排压力。[结论] 陕西省耕地碳收支动态和公平性区域差异较大, 需要针对不同区域情况制定和完善差异化减排策略。

**关键词:** 耕地; 碳吸收; 碳排放; 碳收支; 陕西省; 公平性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0387-12

中图分类号: S210.3, X171.3

**文献参数:** 马超群, 张莎莎, 韩玲, 等. 陕西省耕地碳收支时空变化及公平性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 387-398. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.039; Ma Chaoqun, Zhang Shasha, Han Ling, et al. Spatiotemporal variation and fairness of cultivated land carbon budget in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 387-398.

## Spatiotemporal Variation and Fairness of Cultivated Land Carbon Budget in Shaanxi Province

Ma Chaoqun<sup>1,2</sup>, Zhang Shasha<sup>1</sup>, Han Ling<sup>1,2</sup>,

Yuan Xuefeng<sup>1,2</sup>, Ren Zhaoxia<sup>1,2</sup>, Yi Zhiqiang<sup>1</sup>, Zhang Shuomeng<sup>1</sup>

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054,

China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial evolution patterns of regional agricultural carbon budgets and carbon emission fairness were investigated, in order to provide scientific references for formulating differentiated emission reduction and carbon sequestration strategies. [Methods] Based on the agricultural statistical data of Shaanxi Province from 2000 to 2020, this study estimated the carbon budget of cultivated land in the province for 21 consecutive years using the carbon emission coefficient method. A carbon emission fairness evaluation model was constructed to analyze the carbon-emission fairness of cultivated land in Shaanxi Province from two aspects: ecological carrying capacity and economic efficiency coefficient. [Results] ① The total carbon emission of cultivated land in Shaanxi Province increased first and then decreased during 2000—2020, and the carbon emission intensity increased by 48.15%, with chemical fertilizers as the main source of carbon emissions. ② The total carbon absorption continued to rise, with an average annual growth rate of carbon absorption intensity of 13.67%, in which vegetables having the highest contribution to carbon absorption. ③ Both carbon emissions and carbon absorption showed a high distribution pattern in Central

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2024-09-14

资助项目: 国家自然科学基金秦岭专项资助项目“秦岭生态屏障格局与服务功能优化”(72349002); 国家自然科学基金项目“黄土高原生态系统服务与乡村居民福祉耦合机理与优化”(42371210); 陕西省重点研发项目(2022ZDLSF07-05); 陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(211927180168); 长安大学中央高校基金项目(300102354204, 300102354901)

第一作者: 马超群(1976—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 讲师, 主要从事农村变化方面的研究工作。Email: chaoqunm@chd.edu.cn.

Shaanxi Province and a low one in Northern and Southern Shaanxi, with the ecological carrying capacity of cultivated land carbon emissions being Southern Shaanxi > Central Shaanxi > Northern Shaanxi and the agricultural economic efficiency being Southern Shaanxi > Northern Shaanxi > Central Shaanxi. The results of carbon emission fairness cluster analysis showed that Southern Shaanxi and Xi'an shared the pressure of carbon emission reduction of cultivated land for other regions of Shaanxi Province to a certain extent, while Tongchuan City, Baoji City, Yulin City, and Weinan City regions increased the pressure of carbon emission reduction of cultivated land. [Conclusion] The dynamics and fairness of cultivated land carbon budget in Shaanxi Province vary greatly among different regions; thus, differentiated emission reduction strategies should be developed and improved according to different regional conditions.

**Keywords:** cultivated land; carbon absorption; carbon emissions; carbon budget; Shaanxi Province; fairness

IPCC 第六次评估报告显示,人类活动已明确导致全球变暖,使得当前的全球平均温度比工业化前高出 1.1 °C,极端天气事件也因此变得更加频繁和强烈,对全球每个地区的自然和人员造成了越来越危险的影响<sup>[1]</sup>。降低碳排放和实现碳中和成为世界上大多数国家发展的迫切需要<sup>[2]</sup>。中国政府为此率先提出了碳达峰与碳中和的“双碳”目标。农业是中国重要的温室气体排放源,约有 20% 的 CO<sub>2</sub>, 70% 的 CH<sub>4</sub> 和 90% 的 N<sub>2</sub>O 来源于农业活动和相关过程<sup>[3]</sup>。耕地作为农业中最重要的土地利用方式,一方面农作物通过光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 提升固碳效应;另一方面农业生产活动过程中排放大量 CO<sub>2</sub><sup>[4]</sup>,对区域碳平衡有着重要影响。

近年来,众多学者对农业碳效应的核算开展了系统研究<sup>[5-6]</sup>。碳排放测算方法上,讨论与应用最为广泛的是排放系数法<sup>[7]</sup>。测算指标上,赵荣钦等<sup>[8]</sup>从化肥、农机、灌溉等三个方面构建了农田碳排放的测算体系,王桂波等<sup>[9]</sup>基于此估算了陕西省耕地利用碳排放量。随着学者们对碳排放的研究日益成熟,后期研究在农业碳排放核算过程中还补充了农药和农膜两个指标,完善了碳排放测算体系<sup>[10]</sup>同时部分学者也关注到耕地利用的固碳作用,认为耕地具有碳汇功能<sup>[11]</sup>。田云等<sup>[12]</sup>较早地通过作物碳汇测算方法估算了全国农业碳吸收量。碳排放和碳汇测算的深入研究推动了对农业碳效应时空规律及更进一步的公平性的关注。时空规律方面,研究尺度逐渐多元化,如 Cui Yu 等<sup>[13]</sup>、Kenne G. J. 等<sup>[14]</sup>、王莉等<sup>[15]</sup>分别从全国、地区、省域等不同尺度开展研究。公平性研究中,从测算指标来看,部分学者多借鉴人均二氧化碳排放量来测度公平性,但也有学者对该指标持不同意见,提出应该以国内生产总值和累积历史排放为核心指标。关于公平性的测度方法,国外学者 Heil T. 等<sup>[16]</sup>最早使用基尼系数法分析全球不同国家的碳排放公平性,此后随着研究的不断深入,Clarke-Sather A. 等<sup>[17]</sup>利用变异系数来评估碳排放的公平性;国内卢俊宇等<sup>[18]</sup>

也是利用相似方法测算了中国省际碳排放的公平性。以上研究虽深入分析了国内外不同尺度下碳排放的公平性,但在农业领域却容易忽视农业生产中碳排放与碳吸收同时变化的特点。近期汤李琛等<sup>[19]</sup>以农作物生产中的碳生态容量贡献是否公平,构建农作物生产碳公平系数,分析了国内省际碳公平情况。

综合而言,关于碳效应核算和碳公平性评估的研究逐渐完善且丰富,为本研究提供了良好的理论基础和实证参考。但总体来说,以往研究在研究内容上,多集中于区域碳收支总量及强度的比较,对农业公平性方面的关注度不高,兼顾碳源与碳汇以刻画耕地碳排放公平性的研究更为鲜见;此外在研究区域上,多着眼于大尺度区域的收支平衡与公平性,较少关注省级尺度水平上的问题。然而这对于如陕西省、甘肃省等省内农业区划类型差异显著的区域,针对性提出农业生产调整建议仍显太过宏观。鉴于此,本文以陕西省为例,基于 2000—2020 年陕西省农业生产投入数据,采用碳排放系数法对全省耕地碳收支进行估算,揭示其时空演变规律,并立足于公平性视角从生态承载能力及经济贡献能力两个方面对耕地碳排放进行评价,有利于了解陕西省各区域之间耕地碳排放存在的差距,避免减排政策出现“一刀切”现象,为制定差异化减排增汇对策提供依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

陕西省地处中国西北地区,位于东经 105°29'—111°15' 与北纬 31°42'—39°35' 之间,总面积达 2.06 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。陕西省农业生产条件差异较大,农林牧渔业生产类型多样,区域分异明显。全省地势南北高、中间低,北山和秦岭把陕西分为陕北黄土高原(榆林、延安)、关中平原(西安、咸阳、宝鸡、渭南、铜川市)和陕南秦巴山区(汉中、安康、商洛市)三大自然区,共辖 10 个地级市。陕北黄土高原以旱地作物为主,盛产玉米、谷、糜、豆类、荞麦及马铃薯等,农林牧综合发展颇具特





(3) 耕地碳强度测算。由于研究期内陕西省耕地面积变化较大,为了更客观反映碳收支的变化情况,需要进一步测算研究区各地市碳强度指标<sup>[25]</sup>。碳吸收强度( $C_s$ )、碳排放强度( $E_s$ )可分别通过碳吸收量( $C_i$ )、碳排放量与耕地面积( $S$ )的比值来表示。

$$C_s = C_i / S \quad (8)$$

$$E_s = E_i / S \quad (9)$$

1.3.2 耕地碳排放公平性评价 根据卢俊宇、王金南<sup>[26]</sup>等人的研究,采用碳排放生态承载系数和碳排放经济效率系数两个指标评价陕西省耕地碳排放公平性。

(1) 碳排放生态承载系数。碳排放生态承载系数( $ESC_i$ )是指各地区一定比例的农业碳排放需对应相应比例的农业碳吸收,具体计算公式为:

$$ESC_i = \frac{S_i}{T_i} = \frac{C_i}{C_i} / \frac{E_i}{E_i} \quad (10)$$

式中: $ESC_i$ 为*i*地区的耕地碳排放生态承载系数; $S_i$ 为*i*地区耕地碳吸收量占全省的比例; $T_i$ 为*i*地区耕地碳排放量占全省的比例; $C_i$ 为各地区耕地碳吸收量; $C_i$ 为全省耕地碳吸收总量; $E_i$ 为各地区耕地碳排放量; $E_i$ 为全省耕地碳排放总量。

若 $ESC_i > 1$ ,表示该地区耕地碳吸收比例大于碳排放比例,具有较强的生态承载能力,可以给其他地区带来正外部性效应,相对较公平;反之,则表明该地区具有较弱的生态承载能力,需要其他地区分担其产生的碳排放,对其他地区的利益造成了损失,公平性相对较差<sup>[26]</sup>。

(2) 碳排放经济效率系数。碳排放经济效率系数( $ECC_i$ )是指各地区一定比例的农业碳排放需对应相应比例的农业生产总值,具体计算公式为:

$$ECC_i = \frac{F_i}{T_i} = \frac{G_i}{G} / \frac{E_i}{E_i} \quad (11)$$

式中: $ECC_i$ 为*i*地区的耕地碳排放经济效率系数; $F_i$ 为*i*地区农业增加值占全省的比例; $T_i$ 为*i*地区碳排放量占全省的比例; $G_i$ 为各地区农业生产总值; $G$ 为全省农业生产总值; $E_i$ 为各地区耕地碳排放量; $E_i$ 为全省耕地碳排放总量。

若 $ECC_i > 1$ ,表示该地区农业增加值所占比例大于碳排放所占比例,农业经济效率较高,对其他区域有贡献;反之,若 $ECC_i < 1$ ,则表明该地区农业经济效率较低,公平性相对较差,侵害了其他区域的利益<sup>[26]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地碳排放特征

2.1.1 碳排放时间变化 从计算结果来看,2000—

2020年间陕西省耕地碳排放总量从2000年的 $1.70 \times 10^6$  t增长为2020年的 $2.35 \times 10^6$  t,增长了38.77%;碳排放强度从2000年的 $0.54$  t/hm<sup>2</sup>增长为2020年的 $0.80$  t/hm<sup>2</sup>,增长了48.15%。从阶段特征来看,陕西省21 a间碳排放整体上呈“上升—持平—下降”的趋势(图2),2000—2012年呈迅速增加趋势,年均增长幅度达到4.62%,2013—2019年呈阶梯式下降趋势,年均下降幅度达到1.95%,碳排放的变化与陕西省农业现代化“提升—稳定—下降”的阶段变化的演化趋势<sup>[27]</sup>,具有较高的一致性,这与“十三五”时期国家宏观经济增速放缓对农业生产产生的影响有关<sup>[28]</sup>。

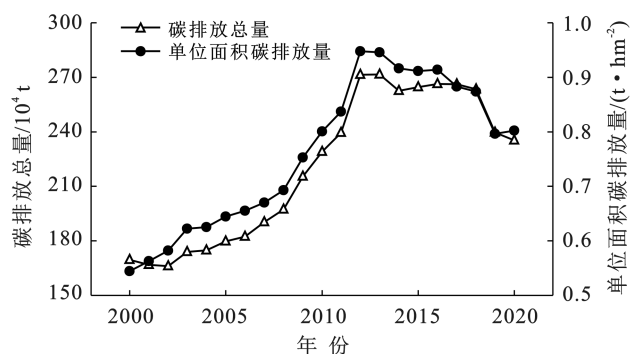


图2 2000—2020年陕西省耕地碳排放总量及碳排放强度  
Fig.2 Total carbon emissions and carbon emissions intensity in Shaanxi Province from 2000 to 2020

从主要碳源结构来看(图3),陕西省化肥、农膜、农机、农药、灌溉产生的碳排放量分别从2000年的 $1.13 \times 10^6$ ,  $1.31 \times 10^5$ ,  $7.69 \times 10^4$ ,  $5.09 \times 10^4$ 和 $3.12 \times 10^5$  t变化为2020年的 $1.73 \times 10^6$ ,  $2.37 \times 10^5$ ,  $7.28 \times 10^4$ ,  $5.90 \times 10^4$ 和 $2.59 \times 10^5$  t。其中(图4),化肥、灌溉和农膜的碳排放占比较大,年均贡献率分别达到72.37%,13.65%和7.86%,全省耕地碳排放总量与化肥产生的碳排放变化趋势基本一致。据研究,陕西省化肥用量远高于黄河流域平均水平<sup>[29]</sup>,化肥施用量增加对耕地碳排放总量增加起主导作用。而碳排放总量下降也主要与关于化肥减量化使用的相关政策影响有关<sup>[30]</sup>,施肥量与施肥方式发生转变,降低了碳排放。

2.1.2 碳排放空间变化 陕西省耕地碳排放空间上整体呈现“中心高,南北低”的分布格局(图5)。其中,关中地区自然条件适宜,区位优势优越,是全省重要的粮食及农副生产基地,农作物种植面积大,农业生产要素等投入较高,是全省碳排总量和强度的双高中心,全省碳排放贡献最大的渭南市、咸阳市和西安市均集中在这个区域,在全省碳排放总量的比例分别

达到 25.5%, 19.4% 和 12.31%; 陕北地区土地广阔, 但水资源相对制约性强, 生产相对粗放, 近年来随着科技进步, 农业投入不断增加, 是全省碳排放量和强度相对较低, 但增长迅速的区域, 榆林市、延安市在全省碳排放总量的比例分别达到 7.5%, 5.85%; 陕南地区山多地少, 河谷、盆地是传统精耕细作地区, 而山地区域生产相对粗放, 农业生产的外部投入相对稳定, 汉中市、安康市、商洛市在全省碳排放总量的比例分别达到 7.57%, 4.87%, 3.04%。

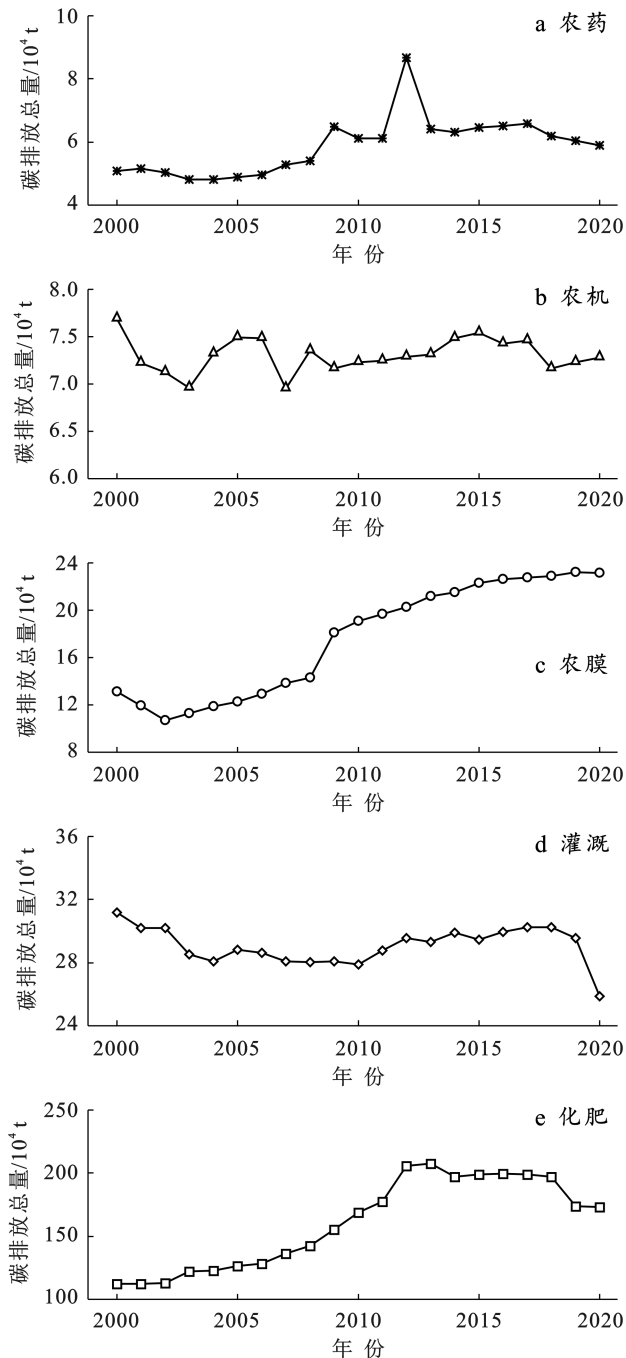


图3 2000—2020年陕西省各农业投入碳排放量  
Fig.3 Carbon emissions from agricultural inputs in Shaanxi Province from 2000 to 2020

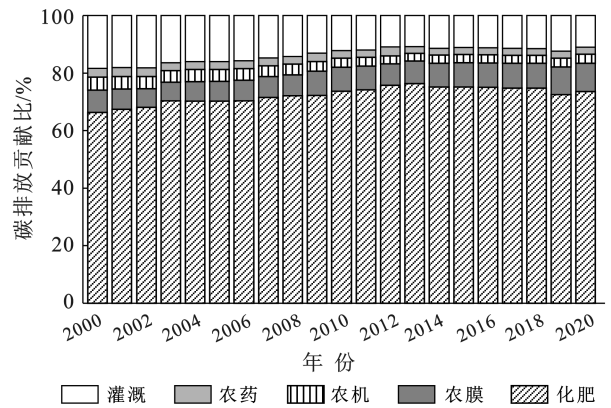


图4 2000—2020年陕西省各农业投入碳排放贡献比例  
Fig.4 Carbon emission contribution ratio of each agricultural input in Shaanxi Province from 2000 to 2020

从全省耕地碳排放的空间变化来看, 2000—2020年各地市的耕地碳排放变化量总体与全省趋势保持一致, “中间高, 南北低”的格局未发生大的改变, 但区域格局发生了较大的转换。其中, 关中地区排放量和排放强度持续提升, 中心地位不断加强, 渭南市、咸阳市和西安市的碳排放量增幅分别达到 53.34%, 26.94% 和 17.88%, 年平均增长率 2.42%, 1.22% 和 0.81%, 年均碳排放强度均超过全省平均水平, 分别为 1.09, 1.18 和 1.04 t/hm<sup>2</sup>。全省空间格局变化最大和最快的集中在陕北, 21 a 间陕北在农业技术发展的推动下, 土地开发与整治效果显著, 耕地数量和质量大幅增长, 产生的碳排放也相应增加, 其中榆林市碳排放量增幅达 125.41%, 年平均增长率 5.70%, 为全省最高, 年均碳排放强度仅 0.26 t/hm<sup>2</sup>, 但增幅达到 67.59%; 延安市次之, 碳排放量增幅为 106.62%, 年平均增长率 4.85%, 年均碳排放强度为 0.50 t/hm<sup>2</sup>, 增幅达到 82.43%; 陕北由全省排放量和排放强度最低的地区升至全省中游水平。陕南受生产方式和自然条件影响, 碳排放保持长期稳定, 特别在近几年, 在环境保护和绿色发展思想的影响下, 化肥用量逐渐减少, 汉中市、商洛市碳排放强度不断降低, 其中, 汉中市的碳排放量增幅为 7.16%, 而商洛市的碳排放量呈下降趋势, 降幅为 13.81%, 年均碳排放强度分别为 0.74 和 0.49 t/hm<sup>2</sup>, 均低于全省平均水平, 逐渐成为全省耕地碳排放最低的区域。

## 2.2 耕地碳吸收特征

2.2.1 碳吸收时间变化 陕西省耕地固碳能力总体上呈持续上升的趋势(图 6)。碳吸收总量从 2000 年的  $1.20 \times 10^7$  t 增至 2020 年的  $4.37 \times 10^7$  t, 21 a 间增加了  $3.17 \times 10^7$  t, 年平均增长率为 12.62%; 碳吸收强度从 2000 年的 3.85 t/hm<sup>2</sup> 增至 2020 年的 14.90 t/hm<sup>2</sup>, 增加了 11.05 t/hm<sup>2</sup>, 年均增长为 13.67%, 碳吸收能力显著提升。碳吸收能力的提升一方面源自农产品产

量的增加。如玉米 21 a 间单产提升 34.34%。更主要的原因源自农作物种植结构的改变。其中,蔬菜的种植面积从 2000 年的  $2.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$  增至 2020 年的  $5.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 21 a 间增加了 1.28 倍,玉米的种植面积增幅也达到 11.59%,而小麦的种植面积却在逐渐

减少,由  $1.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$  变化至  $9.64 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,降幅达到 37.28%。研究表明,这种种植结构变化主要受到市场需求、产品差异化等经济因素和政府规划政策共同影响<sup>[31]</sup>。因而,耕地碳汇成为一个可在一定范围内实现社会和经济调节的能力。

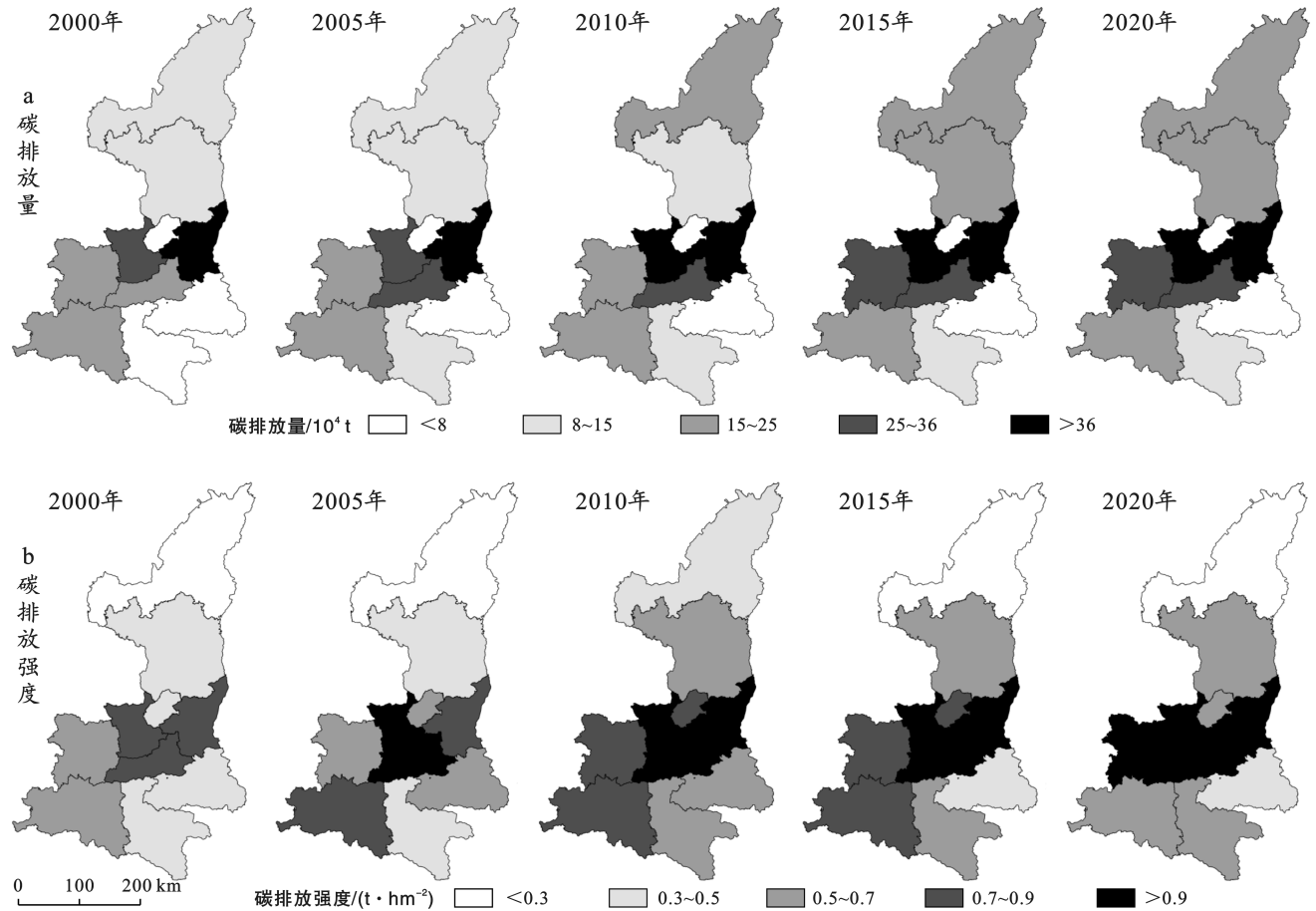


图5 2000—2020年陕西省耕地碳排放(a)及碳排放强度(b)空间变化

Fig.5 Spatial changes of carbon emission(a) and carbon emission intensity(b) of cultivated land in Shaanxi Province from 2000 to 2020

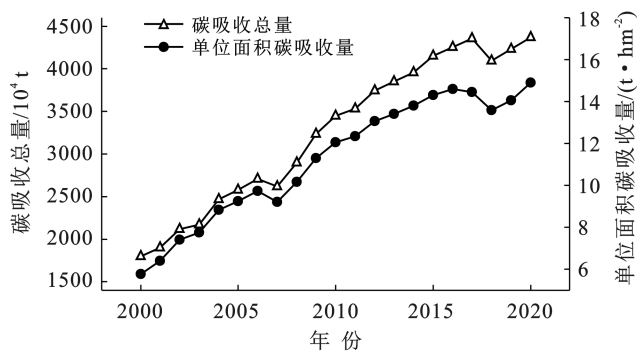


图6 2000—2020年陕西省耕地碳吸收总量及碳吸收强度

Fig.6 Total carbon absorption and carbon absorption intensity in Shaanxi Province from 2000 to 2020

从碳汇结构上来看(图7),源于蔬菜、玉米、油菜和花生的碳吸收量不断增长,分别从2000年的

$6.00 \times 10^6$ ,  $4.87 \times 10^6$ ,  $4.03 \times 10^5$  和  $7.67 \times 10^4 \text{ t}$  增至 2020 年的  $2.94 \times 10^7$ ,  $7.30 \times 10^6$ ,  $6.75 \times 10^5$  和  $1.30 \times 10^5 \text{ t}$ ;相比之下源于小麦、稻谷和大豆的碳吸收量呈波动状态;而源于棉花和高粱的碳吸收量不断减少。其中蔬菜、玉米和小麦的年均碳吸收贡献比位居前3(图8),分别占全部碳汇的 55.54%, 19.72% 和 17.09%;其他几种农作物的碳吸收贡献比较低,年均贡献比之和为 7.65%。

这与玉米和小麦作为陕西省最重要的两大粮食作物,种植面积较为广泛,且近年来单产不断提升有关;而源自蔬菜的碳吸收的比例逐渐增加,是在市场需求推动下,农户调整生产结构,选择效益高的经济作物有关。

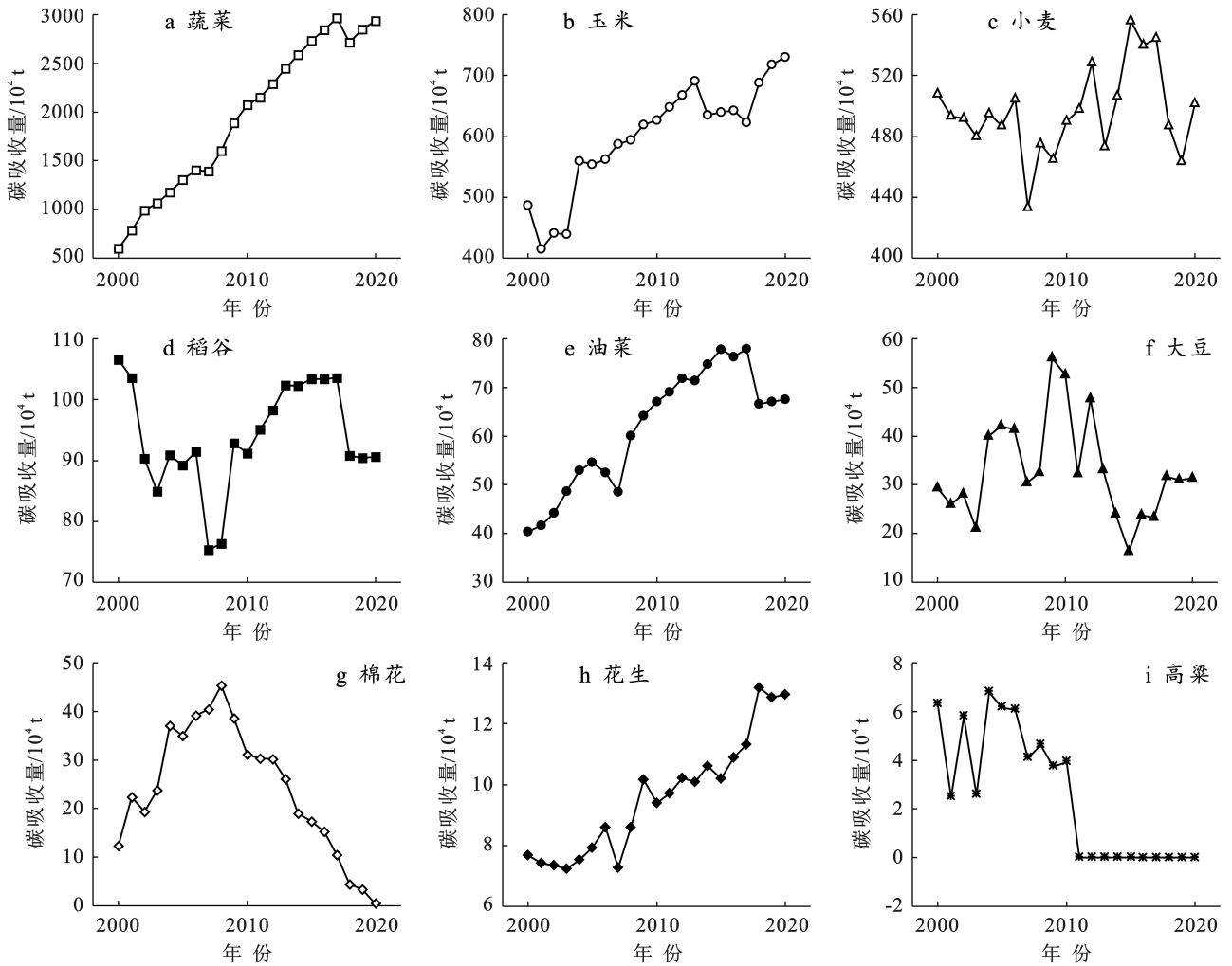


图 7 2000—2020 年陕西省主要农作物碳吸收量

Fig.7 Carbon absorption of major crops in Shaanxi Province from 2000 to 2020

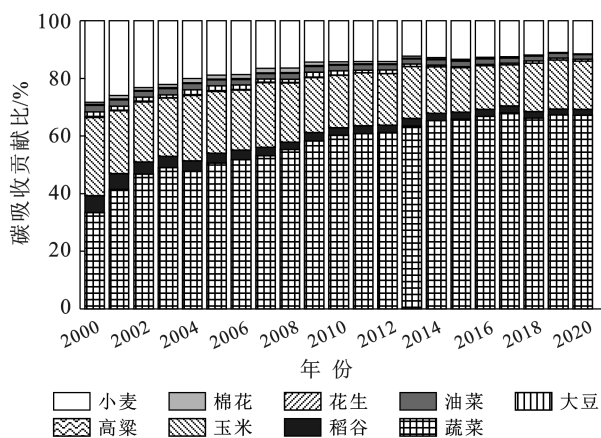


图 8 2000—2020 年陕西省主要农作物碳吸收比例贡献

Fig.8 Contribution of carbon absorption ratio of major crops in Shaanxi Province from 2000 to 2020

2.2.2 碳吸收空间变化 陕西省耕地碳吸收空间上整体也呈现“中心高,南北低”的分布格局(图 9)。其中,关中地区耕地广阔,农业生产能力优越,且以碳汇能力较强的蔬菜、玉米、小麦为主,是全省碳吸收的中

心,其中全省碳吸收贡献最大的咸阳市、西安市和渭南市年均碳吸收量为  $6.35 \times 10^6$ ,  $5.75 \times 10^6$  和  $5.30 \times 10^6$  t, 在全省碳吸收总量的比例分别达到 19.81%, 17.92% 和 16.51%; 陕北地区地广人稀,近年来现代农业飞速发展,大力引进优良品种,逐步发展成为玉米主要产区,是全省碳吸收量和强度相对较低,但增长快速的区域,榆林市、延安市年均碳吸收量为  $1.89 \times 10^6$ ,  $1.76 \times 10^6$  t, 占全省碳吸收总量的比例分别为 5.89%, 5.49%; 陕南地区受限于地形条件,耕地面积有限,主要种植小麦、玉米和稻谷,是全省碳吸收总量和强度相对稳定,略微增长的区域,汉中市、安康市和商洛市年均碳吸收量为  $3.73 \times 10^6$ ,  $2.70 \times 10^6$  和  $1.21 \times 10^6$  t, 在全省碳吸收总量的比例分别达到 11.62%, 7.50% 和 3.78%。

从全省耕地碳吸收的空间变化来看,2000—2020 年各地市的耕地碳吸收变化总体与全省的趋势基本一致,总量和强度均有所提升,但“中心高,南北低”的格局不断弱化。其中,关中地区碳吸收量和强度逐渐增长,渭南市、咸阳市和西安市的碳吸收量分别增加



了2.42倍,2.23倍和2.11倍,年平均增长率为11.02%,10.15%和9.61%,年均碳吸收强度达到10.50,18.03和22.84 t/hm<sup>2</sup>;陕北是全省空间格局变化最大和最快的地区,近年来农业发展不断壮大,玉米与蔬菜的种植面积和产量大幅增长,碳吸收量和强度急剧上升,其中榆林市和延安市的碳吸收量分别增加了7.54和

4.02倍,年均碳吸收强度分别达到2.89和6.96 t/hm<sup>2</sup>,年平均增长率为34.27%,18.27%,增速为全省最快;陕南地区碳吸收量和强度稳定提升,汉中市、安康市和商洛市的碳吸收量分别增长了2.89,2.66和0.86倍,年均碳吸收强度达到16.46,12.21和9.06 t/hm<sup>2</sup>,年平均增长率为13.14%,12.09%和3.91%。

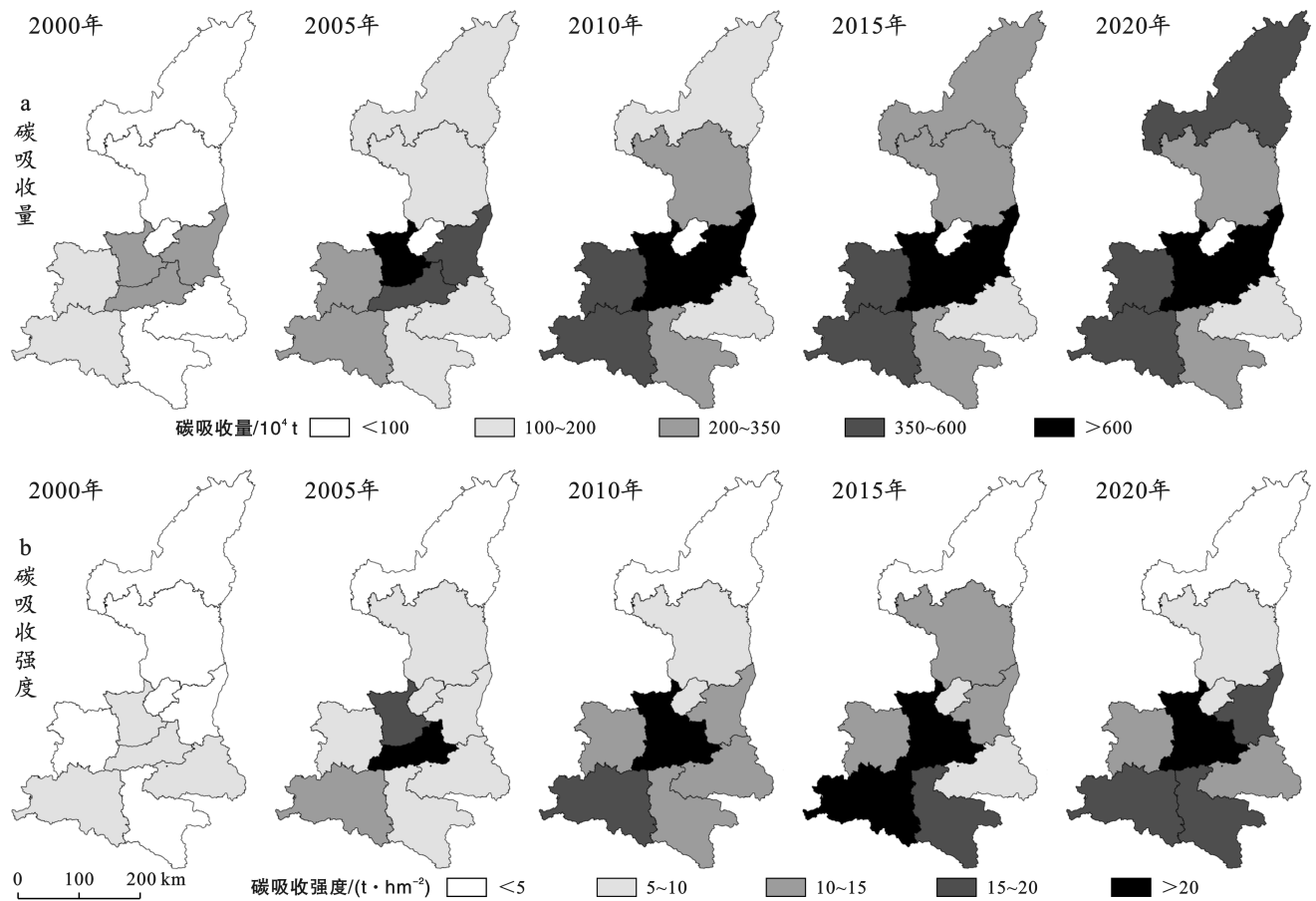


图9 2000—2020年陕西省耕地碳吸收及碳吸收强度的空间变化

Fig.9 Spatial changes of carbon absorption and carbon absorption intensity of cultivated land in Shaanxi Province from 2000 to 2020

## 2.3 碳排放公平性分析

### 2.3.1 碳排放生态承载系数与经济效率系数分析

2000—2020年,陕西省耕地碳排放生态承载系数总体呈波动状态,且各地市差异显著(图10)。根据多年均值来看,由系数反映出的耕地碳排放生态承载能力表现为陕南(1.45)>关中(0.94)>陕北(0.80)。其中(图10a),陕南地区保持稳定高位,安康市、汉中市和商洛市的年均生态承载系数分别为1.51,1.47和1.30,生态承载能力较强,在一定程度上帮助其他地区分担了耕地碳排放压力;关中地区承载能力稳中略降,西安市和咸阳市的年均生态承载系数都大于1,而宝鸡市和铜川市的生态承载系数从2000年的1.10,1.14下降到2020年的0.96,0.74,发生由强变弱

的变化;陕北地区承载力呈波动变化,榆林市和延安市的年均生态承载系数为0.72,0.90,为全省最低水平,但从2000年的0.57,0.79变化为2020年的0.80,0.90,生态承载能力较弱,给其他地区的利益造成了影响。

2000—2020年,陕西省耕地碳排放经济效率总体呈上升趋势,全省三大区域的经济系数排序为:陕南(1.44)>陕北(1.17)>关中(0.87)。其中(图10b),陕南地区高位态势稳健,安康市、汉中市和商洛市农业经济效率为全省最高水平,年均碳排放经济效率为1.49,1.36和1.57;陕北地区经济效率整体上稳定增长,但延安市、榆林市两地变化趋势相反,延安市的年均经济效率系数为1.46,多年来呈阶段性下降趋



势,从 2000 年的 1.63 降至 2020 年的 1.38,而榆林市则从 2000 年的 0.58 提升至 2020 年的 1.13,发生由弱变强的变化;关中地区虽然碳排放和碳吸收均属全省最高,但其经济效率却相对较低,21 a 来波动变化且各地

市差异显著,西安市和咸阳市的经济效率相对较高,年均农业经济效率系数分别为 1.19,1.09,而铜川市、宝鸡市和渭南市则明显偏低,农业经济效率系数均小于 1。

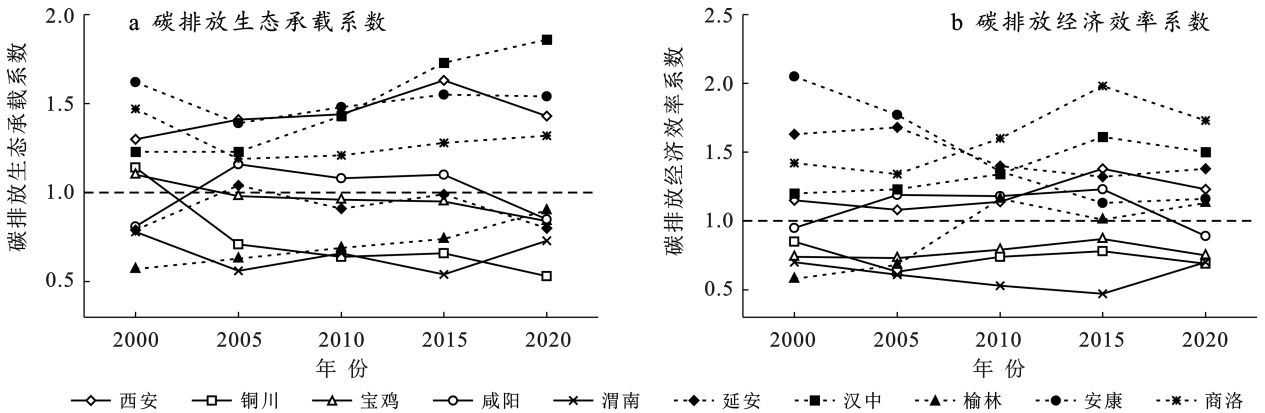


图 10 陕西省耕地碳排放生态承载系数(a)及经济效率系数(b)的变化  
Fig.10 Changes of ecological carrying coefficient (a) and economic efficiency coefficient (b) of agricultural carbon emission in Shaanxi Province

2.3.2 碳排放公平性分析 从全省来看,无论在碳排放、碳吸收,或是生态承载能力还是经济效率,除了地区差以外,各地市之间的差异也十分显著。以生态承载力为例,其中 5 个地区(安康市、汉中市、商洛市、西安市、咸阳市)的生态承载系数大于 1,这些地区的耕地碳排放量占陕西省的 48.35%,但实现了 60.92%的耕地碳吸收量;而生态承载系数低于 1 的 5 个地区,仅完成了 39.08%的耕地碳吸收量,却产生了 51.65%的耕地碳排放量。从经济层面剖析,生态承载系数大

于 1 的 6 个地区耕地碳排放量占陕西省的 54.15%,但贡献了 67.91%的农业增加值;而经济效率系数低于 1 的 4 个地区,仅贡献了 32.09%的农业增加值,却产生了 45.85%的碳排放量。故而无论从“碳吸收—碳排放”角度,还是“生态承载—经济效率”角度,陕西省都存在“不公平”现象。

基于生态承载系数、经济效率系数的数值差异,借助 SPSS 软件,采用 K-means 算法对陕西省各地市进行农业碳排放公平性聚类分析,结果详见表 3。

表 3 陕西省 2000—2020 年耕地碳排放公平性聚类分析结果

Table 3 Fairness cluster analysis of cultivated land carbon emission in Shaanxi Province from 2000 to 2020

区域类型	地区	生态承载系数	经济效率系数	主要分布区域
I	西安、汉中、安康、商洛	[1.30,1.51]	[1.19,1.57]	陕南
II	延安、咸阳	[0.90,1.00]	[1.09,1.46]	陕北、关中
III	铜川、宝鸡、榆林、渭南	[0.65,0.96]	[0.59,0.94]	关中

(1) I 类区域。包括西安、汉中、安康和商洛,属于高承载高效区。该类地区的耕地碳吸收所占比例大于耕地碳排放所占比例,生态承载能力较强,能够通过农业生产吸纳较多碳排放,缓解其他地区的减排压力,有效改善大气环境;同时农业经济效率较高,农业增加值所占比例大于耕地碳排放所占比例,具有良好的正向生态环境效益。

(2) II 类区域。包括延安和咸阳,属于低承载高效区。一方面,这两个地区除了种植粮食作物,还大量种植油料、蔬菜等经济作物,农业经济效率较高。另一方面,该类地区的耕地碳吸收贡献率小于耕地碳

排放贡献率,生态承载能力相对较弱,但两地之间成因有所不同:延安低承载源于生态环境本身较为薄弱,农户生产需要更多投入;而咸阳市地处关中平原,耕地面积广泛,是重要的农产品产区,但地块破碎、权属复杂、利用方式多样,制约了先进农业生产技术的推广与使用,通过增施化肥和农药来提高产量仍是主流,农作物的固碳能力不足以抵消过量的碳排放。

(3) III 类区域。包括铜川市、宝鸡市、榆林市和渭南市,属于低承载低效区。该类地区内的耕地碳吸收及农业增加值均小于耕地碳排放增长,生态承载能力和农业经济效率都较低。生态承载方面,铜川市

受制于耕地面积,榆林市由于地理环境等因素生态本底脆弱,而宝鸡市和渭南市耕地碳排放较大,农作物碳吸收能力有限;经济效率方面,该类地区以粮食作物为主,经济效率较低。

### 3 结论

(1) 2000—2020年,陕西省耕地碳排放总量整体上呈先上升后下降的趋势,“中心高,南北低”的分布格局正在发生中心性加强,南北排放位次对调的转变。全省碳排放增加的主要原因与化肥超量使用以及利用效率低有关,今后通过提升农业生产技术降低碳排放有巨大潜力。

(2) 2000—2020年,陕西省耕地碳吸收量显著上升,且“中心高,南北低”的分布格局在不断弱化,陕北成为全省碳吸收增长最显著的区域。不同碳吸收源头中,蔬菜、玉米和小麦的碳吸收量较高,经济、社会的转变对农业碳吸收变化影响较大。

(3) 由于各地区生态承载能力和经济效率的差异性变化,导致陕西省耕地碳收支存在不公平现象。其中,西安市、汉中市、安康市和商洛市等4个地区属于“高承载—高效”型地区;延安市、咸阳市等2个地区属于“低承载—高效”型地区;铜川市、宝鸡市、榆林市和渭南市等4个地区属于“低承载—低效”型地区。

### 4 讨论

本研究以2000—2020年的统计资料为主,从农业生产要素投入入手分析陕西省耕地碳收支的变化,数据的空间分辨能力较弱,数值没有实验手段获取的准确,可能对计算结果造成一定的误差,但整体上能够更清晰反映全省和各地市的宏观变化过程。通过分析得出陕西省耕地碳收支21 a整体呈波动上升趋势,该结果与相关研究的结果趋势基本一致<sup>[32]</sup>,同时指出碳收支变化主要源于两方面:一是农业生产中化肥施用长期超量;二是农业生产结构调整,蔬菜、玉米占比逐年增加。

综合多方面因素来看,碳收支变化是一个系统问题。一方面化肥超量使用既有生产技术落后、利用效率低的原因,也有在农村“空心化”和“老龄化”背景下,农户通过改变农业生产要素投入以替代劳动投入的减少的原因<sup>[33]</sup>;另一方面,种植结构的变化会随着城乡对比关系与农产品市场需求而发生变化,农户或选择用工量少,产量高的作物,或选择经济价值更高的作物。故而陕西省未来农业双碳目标的实现不仅应着眼于提高化肥利用效率、降低因化肥而产生的碳排放,还应认识到耕地碳收支变化也是对城乡关系变

化、土地流转制度变化、农产品需求结构变化、农业转型升级以及农户家庭因素等宏观政策和微观农户家庭环境变化的响应<sup>[34]</sup>。

碳收支空间分布上呈现“中间高,南北低”的空间格局,这也与相关研究的结果基本一致<sup>[35]</sup>。但同地理区内不同地市公平性状态差异显著,反映出制约地区碳收支平衡不仅限于自然生产条件的差异,农业投入水平、产品结构和农业发展方式等社会经济因素的影响程度在不断提升。因此要根据不同地区情况因地制宜制定相关政策,避免“一刀切”。

本研究旨在为优化陕西省农业生产“双碳”目标策略提供参考依据。针对陕西省耕地碳收支的时空变化及其突出问题,提出以下建议。

(1) 借助碳排放权交易体系维护耕地碳排放公平性。在控制耕地碳排放总量的前提下,陕西省可以根据一定的分配原则将碳排放额度分配给各个地区。初步分配有两种选择:一是农业增加值在陕西省的所占比例,二是耕地碳吸收量在陕西省的所占比例。具体采用哪种方法应根据实际情况来确定。初步分配后,对于超出排放额度的地区,需要向未达到排放额度的地区支付相应的碳排放权购买费用,来进行优化配置。

(2) 产业结构优化与提高农用物资利用率协同推进。在保障粮食安全的前提下,可以根据各地区不同特点来调整农作物种植结构;农作物生长过程中,因地制宜实施化肥农药农膜减量增效行动,统筹推进利用有机肥、秸秆还田等多元替代部分化肥方式,并分区域、分作物、分农时制定科学的施肥指导意见,提高化肥利用率。

### 参考文献 (References)

- [1] IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 阿如早,牡丹,苏德苏日古格,等.内蒙古多伦县土地利用碳排放及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):17-22.  
A Ruhan, Mu Dan, Su D, et al. Analysis on land use carbon emissions and influencing factors in Duolun County, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(4):17-22.
- [3] Bouwman A F. The role of soils and land use in the greenhouse effect [J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1989,37(1):13-19.
- [4] 宾津佑,唐小兵.广东省农田生态系统碳源汇效应时空分异及驱动因素[J].水土保持通报,2023,43(3):382-389.  
Bin Jinyou, Tang Xiaobing. Spatio-temporal differentiation and driving factors of farmland ecosystem carbon

- source-sink effects in Guangdong Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):382-389.
- [5] Guo Xiaomin, Fang Chuanglin. Integrated land use change related carbon source/sink examination in Jiangsu Province [J]. *Land*, 2021,10(12):1310.
- [6] Luo Xiang, Ao Xinhe, Zhang Zuo, et al. Spatiotemporal variations of cultivated land use efficiency in the Yangtze River economic belt based on carbon emission constraints [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020,30(4):535-552.
- [7] 钱凤魁,王祥国,顾汉龙,等.东北三省农业碳排放时空分异特征及其关键驱动因素[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2024,32(1):30-40.
- Qian Fengkui, Wang Xiangguo, Gu Hanlong, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics and key driving factors of agricultural carbon emissions in the three northeastern provinces of China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024,32(1):30-40.
- [8] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J].*生态与农村环境学报*,2007,23(2):1-6.
- Zhao Rongqin, Qin Mingzhou. Temporospatial variation of partial carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007,23(2):1-6.
- [9] 王桂波,南灵.陕西省耕地利用碳源/汇时空差异分析[J].*中国农学通报*,2012,28(2):245-249.
- Wang Guibo, Nan Ling. Research on the spatio-temporal difference of carbon source/sink of arable land resource use in Shaanxi Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012,28(2):245-249.
- [10] 付伟,徐媛媛,王福利,等.中国省域农田生态系统碳足迹时空演变分析[J].*生态经济*,2024,40(1):88-94.
- Fu Wei, Xu Yuanyuan, Wang Fuli, et al. Temporal and spatial evolution of carbon footprint of farmland ecosystems in China [J]. *Ecological Economy*, 2024,40(1):88-94.
- [11] Dachraoui M, Sombrero A. Effect of tillage systems and different rates of nitrogen fertilisation on the carbon footprint of irrigated maize in a semiarid area of Castile and Leon, Spain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,196:104472.
- [12] 田云,张俊彪.中国省级区域农业碳排放公平性研究[J].*中国人口·资源与环境*,2013,23(11):36-44.
- Tian Yun, Zhang Junbiao. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013,23(11):36-44.
- [13] Cui Yu, Khan S U, Deng Yue, et al. Regional difference decomposition and its spatiotemporal dynamic evolution of Chinese agricultural carbon emission: Considering carbon sink effect [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(29):38909-38928.
- [14] Kenne G J, Kloot R W. The carbon sequestration potential of regenerative farming practices in South Carolina, USA [J]. *American Journal of Climate Change*, 2019,8(2):157-172.
- [15] 王莉,刘莹莹,张亚慧,等.河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J].*环境科学学报*,2022,42(12):410-422.
- Wang Li, Liu Yingying, Zhang Yahui, et al. Spatial and temporal distribution of carbon source/sink and decomposition of influencing factors in farmland ecosystem in Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(12):410-422.
- [16] Heil M T, Wodon Q T. Future inequality in CO<sub>2</sub> emissions and the impact of abatement proposals [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2000,17(2):163-181.
- [17] Clarke-Sather A, Qu Jiansheng, Wang Qin, et al. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO<sub>2</sub> emissions in China 1997—2007 [J]. *Energy Policy*, 2011,39(9):5420-5428.
- [18] 卢俊宇,黄贤金,戴靓,等.基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析[J].*自然资源学报*, 2012,27(12):2006-2017.
- Lu Junyu, Huang Xianjin, Dai Liang, et al. Spatio-temporal scale analysis on the equality of energy consumption carbon emission distribution in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012,27(12):2006-2017.
- [19] 汤李琛,曾贤刚,陈慧,等.中国省际农作物生产碳公平及其驱动因素研究[J/OL].*中国环境科学*,2024(2024-06-19). <https://link.cnki.net/urlid/11.2201.X.20240618.1506.022>.
- Tang Lichen, Zeng Xiangang, Chen Hui, et al. Study on carbon fairness and its driving factors in inter provincial crop production in China [J/OL]. *China Environmental Science*, 2024 (2024-06-19). <https://link.cnki.net/urlid/11.2201.X.20240618.1506.022>.
- [20] 张露,何雨霏,陈坦,等.2011—2020年汾渭平原农田生态系统碳足迹的时空格局演变[J].*生态环境学报*, 2023,32(6):1149-1162.
- Zhang Lu, He Yufei, Chen Tan, et al. The spatial and temporal pattern evolution of carbon footprint of farmland ecosystem in Fenwei Plain from 2011 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(6):1149-1162.
- [21] 王静,冯永忠,杨改河,等.山西农田生态系统碳源/汇时空差异分析[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010,38(1):195-200.

- Wang Jing, Feng Yongzhong, Yang Gaihe, et al. Temporospatial variation analysis of carbon source/sink of farm land ecosystem in Shanxi [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2010, 38(1):195-200.
- [22] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/2/3):217-232.
- [23] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):203-208.
- Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5):203-208.
- [24] 白福臣, 高鹏, 郑沃林. 粮食主产区农田生态系统碳足迹的时空演化与脱钩效应[J]. 生态经济, 2023, 39(7):107-116.
- Bai Fuchen, Gao Peng, Zheng Wolin. Spatial-temporal pattern evolution and decoupling effect of farmland ecosystem carbon footprint in major grain-producing areas [J]. Ecological Economy, 2023, 39(7):107-116.
- [25] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 等. 农田生态系统碳足迹时空变化: 以河南省为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9):3050-3060.
- Zhang Pengyan, He Jianjian, Pang Bo, et al. Temporal and spatial differences in carbon footprint in farmland ecosystem: A case study of Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9):3050-3060.
- [26] 王金南, 逯元堂, 周劲松, 等. 基于 GDP 的中国资源环境基尼系数分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1):111-115.
- Wang Jinnan, Lu Yuantang, Zhou Jinsong, et al. Analysis of China resource-environment Gini coefficient based on GDP [J]. China Environmental Science, 2006, 26(1):111-115.
- [27] 杨华, 芮阳, 李炬霖, 等. 陕西省农业现代化水平时空特征及障碍因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1):172-183.
- Yang Hua, Rui Yang, Li Julin, et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province [J]. Resources Science, 2020, 42(1):172-183.
- [28] 刘世薇, 张平宇, 宋凤斌, 等. 黑龙江垦区农业现代化水平评价[J]. 地理科学, 2018, 38(7):1051-1060.
- Liu Shiwei, Zhang Pingyu, Song Fengbin, et al. Measuring the agricultural modernization level of Heilongjiang reclamation areas in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7):1051-1060.
- [29] 闫晨健, 栗萌, 卓拉, 等. 1989—2019 年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. 资源科学, 2023, 45(1):158-173.
- Yan Chenjian, Li Meng, Zhuola, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989—2019 [J]. Resources Science, 2023, 45(1):158-173.
- [30] 陈佩, 蔡荣. 农业化肥回弹效应演变趋势及其影响机制: 以陕西省为例[J]. 资源科学, 2023, 45(4):750-761.
- Chen Pei, Cai Rong. Evolution trend and mechanism of the rebound effect of agricultural chemical fertilizer: An empirical analysis of Shaanxi Province [J]. Resources Science, 2023, 45(4):750-761.
- [31] 刘冬, 余侃华, 师小燕, 等. 陕西省种植业结构变化及时空演变分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(9):251-261.
- Liu Dong, Yu Kanhua, Shi Xiaoyan, et al. Analysis of structural changes and spatial-temporal evolution of planting industry in Shaanxi [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(9):251-261.
- [32] 李彦娥, 王化齐, 马红娜. 陕西省农田土壤生态系统碳汇时空演变特征[J]. 北方园艺, 2024(3):63-70.
- Li Yan'e, Wang Huaqi, Ma Hongna. Spatial-temporal evolution characteristics of carbon sink in farmland soil ecosystem in Shaanxi Province [J]. Northern Horticulture, 2024(3):63-70.
- [33] 胡浩, 杨泳冰. 要素替代视角下农户化肥施用研究: 基于全国农村固定观察点农户数据[J]. 农业技术经济, 2015(3):84-91.
- Hu Hao, Yang Yongbing. Study on chemical fertilizer application of farmers from the perspective of factor substitution: Based on the data of farmers in fixed observation points in rural areas of China [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015(3):84-91.
- [34] 廖柳文, 龙花楼, 马恩朴. 乡村劳动力要素变动与耕地利用转型[J]. 经济地理, 2021, 41(2):148-155.
- Liao Liuwen, Long Hualou, Ma Enpu. Rural labor change and farmland use transition [J]. Economic Geography, 2021, 41(2):148-155.
- [35] 李园园, 郝长军, 薛彩霞, 等. 陕西省保护性耕作净碳汇的时空演变及差异性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23):123-132.
- Li Yuanyuan, Xi Changjun, Xue Caixia, et al. Spatiotemporal evolution and distribution of net carbon sink under conservation tillage in Shaanxi Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(23):123-132.