

DOI: 10.20103/j.stxb.202308191793

丁也璐, 赵娜娜, 黎明, 梁梦茵, 高学睿, 王纪超, 赵西宁. 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征. 生态学报, 2024, 44(11): 4574-4583.

Ding Y L, Zhao N N, Li M, Liang M Y, Gao X R, Wang J C, Zhao X N. Carbon source/sink and carbon footprint estimation for field crop production and spatial characterization in northern Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4574-4583.

## 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征

丁也璐<sup>1</sup>, 赵娜娜<sup>2</sup>, 黎明<sup>2</sup>, 梁梦茵<sup>2</sup>, 高学睿<sup>3,\*</sup>, 王纪超<sup>1</sup>, 赵西宁<sup>3</sup>

1 西北农林科技大学, 水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

2 自然资源部国土整治中心, 北京 100032

3 西北农林科技大学, 水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 农作物生产过程既是碳源, 也是碳汇。研究作物生产过程中碳吸收、碳排放特征对区域农业碳减排具有重要意义。以陕北区域为例, 采用高分辨率遥感数据, 结合 GEE 遥感云平台 and 随机森林算法, 获取了作物种植分布信息, 并建立碳吸收排放测算模型, 分析了陕北地区 2021 年农田作物的碳源/汇效应、碳足迹及其空间分布格局。结果表明: ① 陕北种植的粮食作物主要为玉米、稻谷、薯类、豆类, 经济作物主要为蔬菜、苹果、枣树, 这七类作物集中分布在延安南部河谷区域和榆林西北部区域。② 除枣类外, 陕北地区其余作物的碳吸收量均高于碳排放量, 以碳汇功能为主, 其中, 玉米和苹果分别对该地区碳吸收、碳排放的贡献率最高, 碳吸收、排放量分别达到了  $189.74 \times 10^4$  t 和  $11.41 \times 10^4$  t, 苹果、薯类和枣类碳足迹较高, 分别达到了  $9.92 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>、 $8.77 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 和  $21.65 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 其余作物碳足迹处于  $0.26$ — $1.49 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 之间。③ 从空间上看, 研究区单位面积农田碳吸收量呈现西北高、南部低的分布格局, 而碳排放量、碳足迹分布正好相反, 南部高、西北低。④ 研究区可通过培育高产品种、优化施肥量、控制农膜农药用量、调整作物种植结构等措施, 提高作物固碳效应, 促进农业生产碳减排。

**关键词:** 种植结构; 碳排放; 碳吸收; 碳足迹

## Carbon source/sink and carbon footprint estimation for field crop production and spatial characterization in northern Shaanxi Province

DING Yelu<sup>1</sup>, ZHAO Nana<sup>2</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, LIANG Mengyin<sup>2</sup>, GAO Xuerui<sup>3,\*</sup>, WANG Jichao<sup>1</sup>, ZHAO Xining<sup>3</sup>

1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 China Land Consolidation and Rehabilitation, Beijing 100032, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Crop cultivation is a source as well as a sink of carbon emissions. It is necessary to investigate and measure the characteristics of carbon uptake and carbon emissions of crops during the production process in order to reduce carbon emissions in regional agriculture. In this study, the GEE remote sensing cloud platform was utilized to simulate the distribution of agricultural planting by using high-resolution remote sensing data and a random forest algorithm model. An analysis of the carbon source/sink effect, carbon footprint, and spatial distribution pattern of field crops in northern Shaanxi was conducted in 2021 using a carbon uptake carbon emission calculation model based on this assumption. The results were as follows: ① The primary grain crops cultivated in northern Shaanxi were maize, rice, potatoes, and beans, while the main cash crops were vegetables, apples, and jujube trees, according to the findings. These seven crops were concentrated in Yan'an's southern valley and Yulin's northwestern region. ② Except for jujubes, the remaining crops in northern Shaanxi absorbed more carbon than they emitted, and the carbon sink function was dominant. Maize and apples contributed the most

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFD1900701); 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20613)

**收稿日期:** 2023-08-19; **网络出版日期:** 2024-03-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoxr@nwsuaf.edu.cn

to carbon uptake and emissions in the region, with carbon uptake and emissions totaling  $189.74 \times 10^4$  t and  $11.41 \times 10^4$  t, respectively. Apples, potatoes, and jujubes had greater carbon footprints, reaching  $9.92 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,  $8.77 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ , and  $21.65 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ , respectively, whereas the rest of the crops had carbon footprints in the  $0.26$ — $1.49 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ . ③ Carbon uptake per unit area of agriculture in the research area was spatially distributed as high in the northwest and low in the south, but carbon emissions and carbon footprints were distributed in the other direction, high in the south and low in the northwest. ④ By cultivating high-yielding varieties, optimizing fertilizer application, controlling the amount of agricultural film and pesticide, and adjusting crop planting structure, the study area can improve crop carbon sequestration and promote carbon emissions reduction in agricultural production.

**Key Words:** planting structure; carbon emissions; carbon uptake; carbon footprint

根据世界气象组织的数据,在 1990 年至 2021 年间,全球主要温室气体二氧化碳、甲烷和氧化亚氮对气候产生的温室效应增加了近 50%,温室气体浓度达到了创纪录的水平<sup>[1]</sup>,大气中的温室气体持续积累,全球气候变化、温室气体减排等问题依旧严峻<sup>[2]</sup>,严重威胁地球生态环境和人类社会的发展<sup>[3-4]</sup>。作为农业大国,我国农业温室气体排放量约占温室气体总排放量的 11%<sup>[5]</sup>,是除能源消耗和工业生产外最大的温室气体排放源<sup>[6]</sup>,其中,农业温室气体总排放的 67%来源于农业种植<sup>[7]</sup>,如作物生长过程中灌溉、施肥、施用农膜等引起的温室气体排放。因此,评估农田作物碳效应,分析其生产活动中的碳足迹,对于农业增汇减排,以及“双碳”目标的实现具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

目前针对农田作物的碳源/汇功能分析,已开展了大量的研究,研究多以土地利用<sup>[10-11]</sup>、作物种植结构<sup>[12]</sup>、生产资料投入<sup>[13]</sup>、经济发展<sup>[14]</sup>等作为变量,基于土地利用、生产资料投入等数据,建立作物碳核算模型<sup>[15]</sup>,从市级或县级角度出发,估算农业碳吸收、碳排放量的变化规律,也有利用遥感技术反演植被覆盖度来获取生态系统的碳源/汇特征<sup>[16-17]</sup>,或利用净初级生产力数据<sup>[18]</sup>,揭示碳源/汇时空变化规律,但鲜有从栅格尺度出发,从作物种植分布角度分析碳效应及其空间格局,为作物种植的碳源/汇特征提供理论研究支撑。此外,综合考虑了碳排放和清除的碳足迹,已成为众多学者关注的热点和评估碳排放的重要指标<sup>[19-20]</sup>,与其他指标相比,碳足迹更侧重于对作物生产活动全生命周期的评估,反映作物种植、灌溉、施肥到收获过程中碳吸收及排放情况<sup>[19, 21-22]</sup>,已有关于农业碳足迹特征的研究主要围绕农田生态系统<sup>[22-24]</sup>,或是针对某种单一作物种植系统的碳足迹评估<sup>[25-27]</sup>,缺乏对于区域种植的主要作物碳足迹评价及其空间格局分析。

本文分析了陕北地区七类主要农田作物的碳源/汇特征、碳足迹及其空间格局。陕北地区位于黄土高原中心区域,现代农业发展迅速,正在成为我国重要的粮果基地。本研究为准确把握陕北地区农田作物的碳效应,调整农业结构、实现农业碳减排及保证农业可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况

陕北地区地处黄土高原中部、陕西省北部( $34^{\circ}49'$ — $39^{\circ}35'N$ ,  $107^{\circ}10'$ — $111^{\circ}14'E$ ),包括延安市和榆林市的 25 个区县(图 1)。总面积约  $80280 \text{ km}^2$ ,平均海拔 1220 m,地势西高东低,耕地面积约  $9854 \text{ km}^2$ ,占总面积的 12%左右,农业开发潜力大,是我国玉米、马铃薯的优质产区,同时也是我国重要的粮果基地。该区域全年平均气温  $7$ — $11^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $350$ — $600 \text{ mm}$ ,多集中在  $7$ — $9$  月份,降水分布不均匀,属于典型的大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润。该区域的光热条件以及较大的昼夜温差,有利于作物干物质积累和瓜果着色。

## 2 数据集及预处理

### 2.1 Sentinel-2 卫星数据及处理

本研究选用的遥感影像数据为 Sentinel-2 MSI Level-2A 级数据产品,该数据来源于 GEE 平台的公开数据集

(<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>), 该数据时间范围是从 2017 年 3 月 28 日至今。Sentinel-2 是高分辨率多光谱成像卫星, 分为 2A 和 2B 两颗卫星, 两颗卫星分别在 2015 年和 2017 年发射升空, 两颗卫星同时运行后, 形成互补。此外, 卫星还携带了多光谱成像仪 (MSI), 共覆盖了 13 个光谱波段, 空间分辨率为 10 m、20 m 和 60 m, 可用于监测陆地、土壤、植被、水域等。L2A 级数据产品, 是经过了大气校正的大气底层反射率数据, 该类型数据包含了 12 个 UINT16 光谱波段和 3 个 QA 频段, 还包含了水蒸汽、气溶胶光学厚度以及部分降雪概率产品等。

## 2.2 样本数据

样本数据来源于实地采样调查和目视核对, 实地采样时间为 2021 年 6 月, 采用奥维互动地图 APP, 实地调查并标记各种作物的经纬度信息, 目视核对是在高分辨率遥感影像基础上, 对采集到的样点数据进行核对、补充, 形成具有代表性的样本数据集。样本点共计 14953 个 (图 2), 其中, 玉米像元 4521 个、稻谷像元 366 个、豆类像元 615 个、蔬菜像元 623 个、薯类像元 1414 个、苹果像元 2775 个、枣树像元 4070 个、其他像元 (包含其他类型作物和田间小路) 等 569 个。

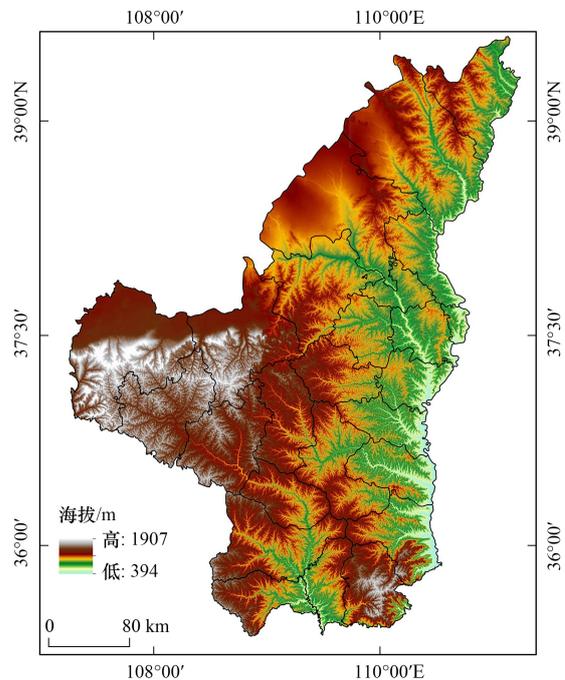


图 1 研究区范围示意图

Fig.1 The location of the research area

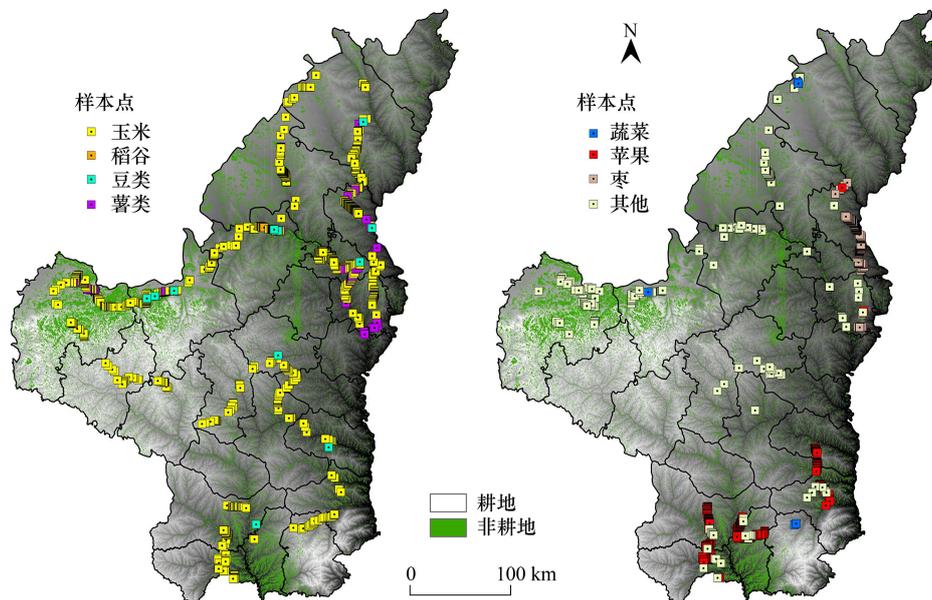


图 2 样点分布图

Fig.2 Sample point distribution

## 2.3 土地覆盖数据

土地覆盖数据选用的是全球 10 m 土地覆盖数据产品, 该数据来源于 GEE 平台公开数据集, 是在 sentinel-1、sentinel-2 数据基础上制作而成的, 是有关 11 种地类的 2020 年 10 m 分辨率的全球土地覆盖数据。这 11 类

分别为:林地、灌木、草地、农田、建筑、荒漠、冰雪、水体、湿地、红树林、苔藓和地衣。

## 2.4 统计数据

作物种植、产量统计数据以及农业生产消耗数据来源于《陕西省统计年鉴》、《延安市统计年鉴》、《榆林市统计年鉴》、《全国农产品成本收益汇编》和《中国农村统计年鉴》。

## 3 研究方法

### 3.1 作物种植信息提取

利用遥感数据进行观测时,由于作物在不同波段的光谱反射不同,从播种到收获的整个生育期内,其反射率变化较大,这个特征在影像上能够较好地区分该植被与其他植被地物,因此,不同光谱波段以及利用光谱波段比值运算产生的植被指数特征,可以作为区分不同作物的依据,本研究具体采用的特征值见技术路线图(图3)。对遥感影像进行镶嵌裁剪、云量筛选等预处理,结合土地覆盖数据,根据处理后的样本数据集,采用随机森林分类算法建立提取模型,该方法组合了多个单独的分类树,是一种较稳定的集成方法<sup>[28-29]</sup>,被广泛应用于作物识别分类。

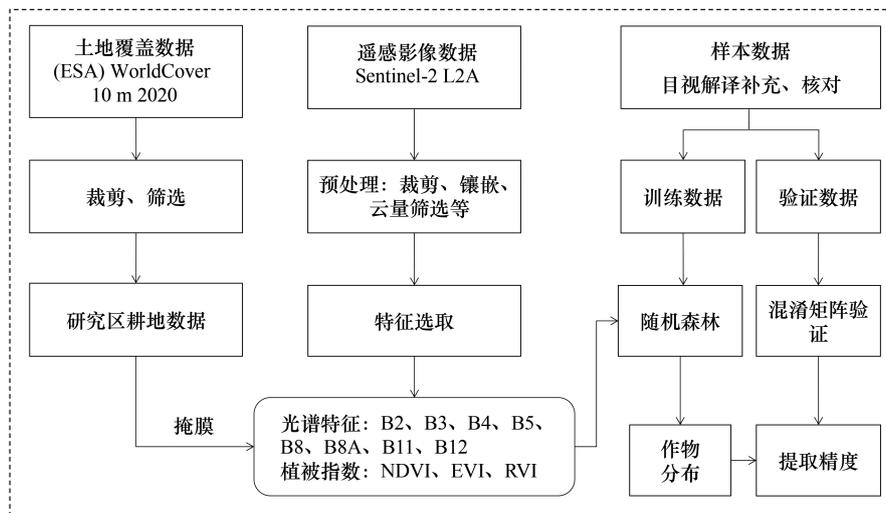


图3 技术路线图

Fig.3 Technical process

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; EVI:增强植被指数 Enhanced vegetation index; RVI:比值植被指数 Ratio vegetation index

### 3.2 碳收支及净碳汇测算模型

#### 3.2.1 碳吸收测算模型

农田作物生产过程中的碳吸收主要是作物在生长过程中通过光合作用形成的净初级生产量<sup>[30]</sup>,其计算公式如下:

$$C_A = \sum_i \frac{Y_i \times C_i \times (1 - F_i)}{E_i} \quad (1)$$

式中, $C_A$ 表示碳吸收总量,即作物在生长过程中通过光合作用固定的二氧化碳总量(t); $Y_i$ 表示第*i*种农作物的经济产量(t); $C_i$ 表示第*i*种作物通过光合作用合成单位有机质的碳吸收率; $F_i$ 表示第*i*种作物的果实水分系数; $E_i$ 表示第*i*种作物的经济系数,指作物的经济产量与生物产量的比例。各类作物的碳吸收率、果实水分系数和经济系数(表1)参考相关文献获得<sup>[31-33]</sup>。

### 3.2.2 碳排放测算模型

农田作物生产过程中的碳排放来源主要包括化肥、农药、农膜、农业机械、灌溉、农业柴油六类<sup>[32, 34]</sup>, 本文依据陕北地区生产资料投入情况仅考虑前五种碳源。

表 1 农作物碳吸收、碳排放相关系数

Table 1 Crop carbon uptake and carbon emissions correlation coefficient

作物种类 Crop type	碳吸收率 $C_i$ Carbon uptake rate	果实水分系数 $F_i$ Fruit water coefficient	经济系数 $M_i$ Economic coefficient
稻谷 Rice	0.414	0.120	0.450
玉米 Maize	0.471	0.130	0.400
大豆 Beans	0.450	0.130	0.340
蔬菜 Vegetables	0.450	0.900	0.600
薯类 Potatoes	0.4226	0.700	0.650
苹果 Apples	0.450	0.900	0.700
枣 Jujubes	0.450	0.900	0.700

$$C_E = C_{\text{fert}} + C_{\text{pest}} + C_{\text{film}} + C_{\text{mach}} + C_{\text{irri}} \quad (2)$$

$$C_i = U_i \times L_i \quad (3)$$

式中,  $C_E$  表示农田作物生产过程中产生的碳排放;  $C_{\text{fert}}$  为化肥投入所产生的碳排放;  $C_{\text{pest}}$  为农药投入所产生的碳排放;  $C_{\text{film}}$  为农膜投入所产生的碳排放;  $C_{\text{mach}}$  为农业机械使用所产生的碳排放;  $C_{\text{irri}}$  为农业灌溉过程中消耗电能所产生的碳排放;  $U_i$  表示每种碳源的使用量;  $L_i$  表示每种碳源的碳排放系数, 参考相关文献<sup>[31-34]</sup> 获得五种碳排放系数, 分别为:  $L_{\text{fert}} = 0.8956 \text{ kg/kg}$ ,  $L_{\text{pest}} = 4.9341 \text{ kg/kg}$ ,  $L_{\text{film}} = 5.18 \text{ kg/kg}$ ,  $L_{\text{mach}} = 0.18 \text{ kg/kW}$ ,  $L_{\text{irri}} = 266.48 \text{ kg/hm}^2$ 。其中, 化肥、农药、农膜、灌溉四种碳源排放量可采用碳源使用量与相应系数乘积(公式 3)来计算, 农业机械使用所产生的碳排放利用  $C_{\text{mach}} = (A \times D) + (U_{\text{mach}} \times L_{\text{mach}})$  来计算<sup>[32]</sup>, 其中,  $A$  为农作物种植面积;  $D$  为农作物种植面积碳排放系数,  $D = 16.47 \text{ kg/hm}^2$ 。

### 3.2.3 净碳汇及碳足迹测算模型

农田作物碳汇主要是指农作物从空气中吸收并固定二氧化碳的能力, 净碳汇是指农作物碳吸收总量和产生的碳排放总量之差, 计算公式如下:

$$N = C_A - C_E \quad (4)$$

式中,  $N$  是指净碳吸收效应;  $C_A$  为碳吸收量;  $C_E$  为碳排放量。

碳足迹的概念未有统一的定义, 目前学者对其的定义主要分为两大类, 一类将其定义为人类活动产生的碳排放量<sup>[35]</sup>, 另一类认为是通过光合作用吸收碳所需的生产性土地(植被)面积<sup>[36]</sup>。由于作物兼具碳源和碳汇功能, 因此, 农业碳足迹可定义为: 消纳农业碳排放所需要的耕地面积<sup>[37-38]</sup>, 计算公式如下:

$$CF = C_E / NEP \quad (5)$$

$$NEP = C_A / A \quad (6)$$

式中,  $CF$  为碳足迹 ( $\text{hm}^2$ );  $NEP$  表示作物单位面积碳吸收量 ( $\text{t/hm}^2$ );  $C_E$ 、 $C_A$  分别为作物的碳排放、碳吸收量 ( $\text{t}$ );  $A$  为农作物种植面积 ( $\text{hm}^2$ )。

## 4 结果与分析

### 4.1 陕北地区作物种植结构及空间分布特点

根据建立的提取模型, 在 GEE 平台中获取陕北地区作物种植分布情况, 如下图(图 4)所示。总体来看, 粮食作物分布较多是榆林市西北部区域, 包括定边县、靖边县、横山区和榆阳区, 该区域广泛种植着玉米、薯类和豆类, 也是榆林市主要的苹果产区, 其中, 横山区无定河沿岸的稻谷分布较多, 无定河沿岸的米脂、绥德县以

及佳县、清涧县和子洲县是主要的枣树种植区域;延安市耕地集中在南部河谷地区,但由于该区域苹果产业兴盛,占据了大量耕地,粮食作物主要以玉米和蔬菜为主。

利用混淆矩阵对识别精度进行验证,结果表明,随机森林分类识别陕北作物的总体精度为 0.877, Kappa 系数为 0.837,玉米、稻谷、豆类、蔬菜、薯类、苹果和枣树这七类作物用户精度分别为 0.84、0.95、0.92、0.92、0.87、0.91 和 0.86,生产者精度分别为 0.91、0.91、0.88、0.93、0.80、0.94 和 0.76。因此,该识别结果,能够较精准的反映陕北地区七种主要农作物的分布情况,可以在此基础上分析该地区作物的碳源/汇及碳足迹空间特征。

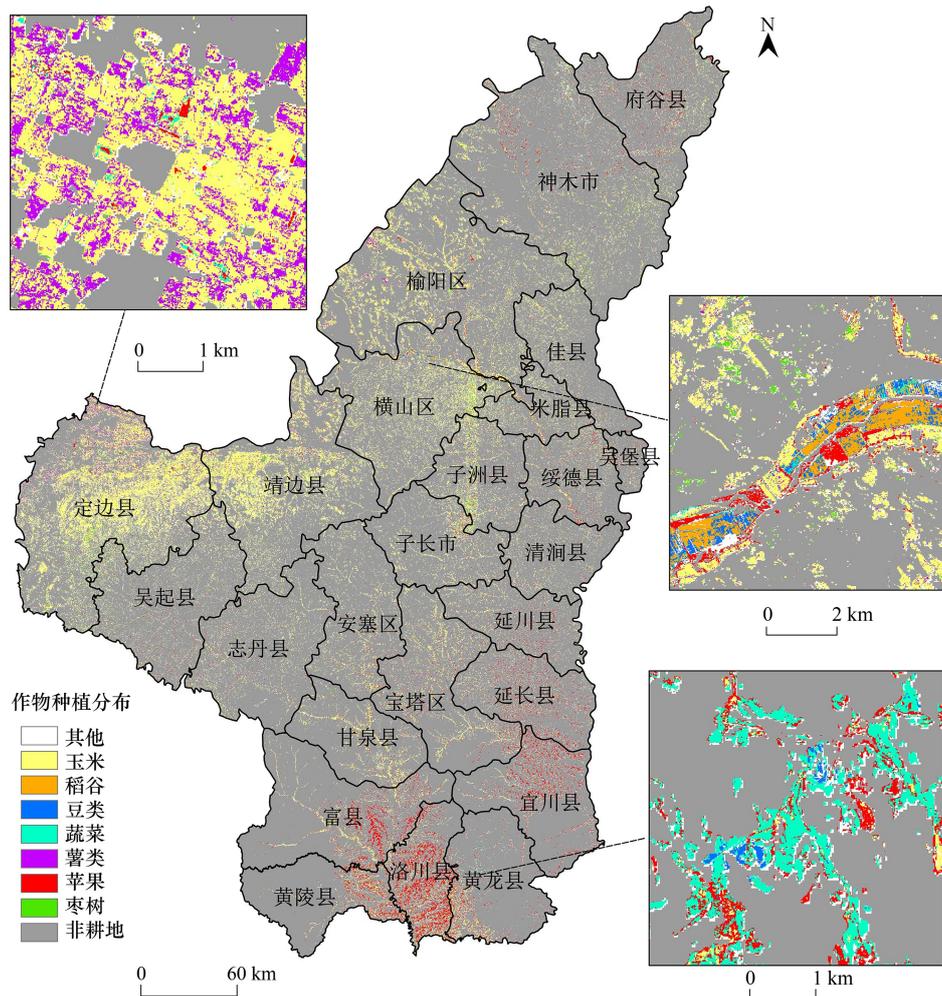


图 4 作物分布图

Fig.4 Map of crop type

#### 4.2 农田作物碳效应、碳足迹

陕北地区 2021 年不同作物碳吸收量、碳排放量及碳足迹见下表(表 2)。由于陕北地区玉米的种植比例最高,玉米的碳吸收量最高,达到了  $189.74 \times 10^4$  t, 稻谷、枣树碳吸收量较少,仅为  $7.46 \times 10^4$  t 和  $5.10 \times 10^4$  t, 其余作物吸收量处于 10—35 万 t 之间;该区域作物整体碳排放量较少,排放量最多的苹果碳排放也仅有  $11.41 \times 10^4$  t;除枣类的净碳吸收量为负值外,其余作物的碳吸收量均大于碳排放量。从单位面积碳效应来看,玉米仍旧是所有作物中单位面积净碳吸收量最高的,达到了  $5.39$  t/hm<sup>2</sup>, 薯类和苹果单位面积净碳吸收量较少,为  $0.39$  t/hm<sup>2</sup> 和  $0.75$  t/hm<sup>2</sup>, 仅枣类的单位面积净碳吸收量为负值,为  $-0.05$  t/hm<sup>2</sup>, 其余作物处于  $2.11$ — $2.38$  t/hm<sup>2</sup> 之间,相差较小;由于枣类、苹果、薯类这三类作物的单位面积产量较少,化肥、农膜等投入产生的碳排放较高,这三类作物碳足迹远高于其他作物,分别达到了  $21.65 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>、 $9.92 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>、 $8.77 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 其余

作物碳足迹处于  $0.26\text{--}1.49\times 10^4\text{ hm}^2$  之间。

### 4.3 碳效应、碳足迹空间格局分析

图 5 分别从空间上体现了陕北地区单位面积农田的碳吸收、碳排放的空间格局,总体来看,西北区域单位面积农田碳吸收量较多,而碳排放量分布正好相反,南部及东北部区域较多,西北区域最少。由于玉米单位面积碳吸收量最高,玉米分布较多的区县,如定边县、靖边县、横山区、榆阳区、子洲县的农田碳吸收量高于其他区县,延安市的南部河谷地区,包括黄陵县东部、洛川县南部和黄龙县西部区域,主要种植玉米和蔬菜,其单位面积碳吸收量较高。碳排放方面,延安市整体远高于榆林市,单位面积碳排放量贡献较多的主要是苹果和蔬菜,这两种作物广泛分布在洛川县、黄陵县、富县、黄龙县和宜川县,这些区县的农田碳排放量较高。

表 2 不同作物碳吸收、碳排放量及碳足迹

Table 2 Different crops' carbon uptake, emissions, and carbon footprint

作物类别 Crop type	碳吸收量 Carbon uptake/ ( $\times 10^4\text{t}$ )	单位面积 碳吸收量 Carbon uptake per unit area/ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	碳排放量 Carbon emissions/ ( $\times 10^4\text{t}$ )	单位面积 碳排放量 Carbon emissions per unit area/ ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	净碳吸收量 Net carbon uptake/ ( $\times 10^4\text{t}$ )	单位面积净 碳吸收量 Net carbon uptake per unit area/( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	碳足迹 Carbon footprint/ ( $\times 10^4\text{hm}^2$ )
稻谷 Rice	7.46	2.62	0.67	0.23	6.80	2.38	0.26
玉米 Maize	189.74	5.64	8.40	0.25	181.34	5.39	1.49
大豆 Beans	19.75	2.26	1.30	0.15	18.45	2.11	0.57
蔬菜 Vegetables	14.00	2.72	2.39	0.47	11.60	2.26	0.88
薯类 Potatoes	13.70	0.69	6.05	0.31	7.64	0.39	8.77
苹果 Apples	32.62	1.15	11.41	0.40	21.22	0.75	9.92
枣 Jujubes	5.10	0.28	5.98	0.32	-0.88	-0.05	21.65
合计 Total	282.37		36.20		246.17		15.00
均值 Mean		2.41		0.31		2.10	

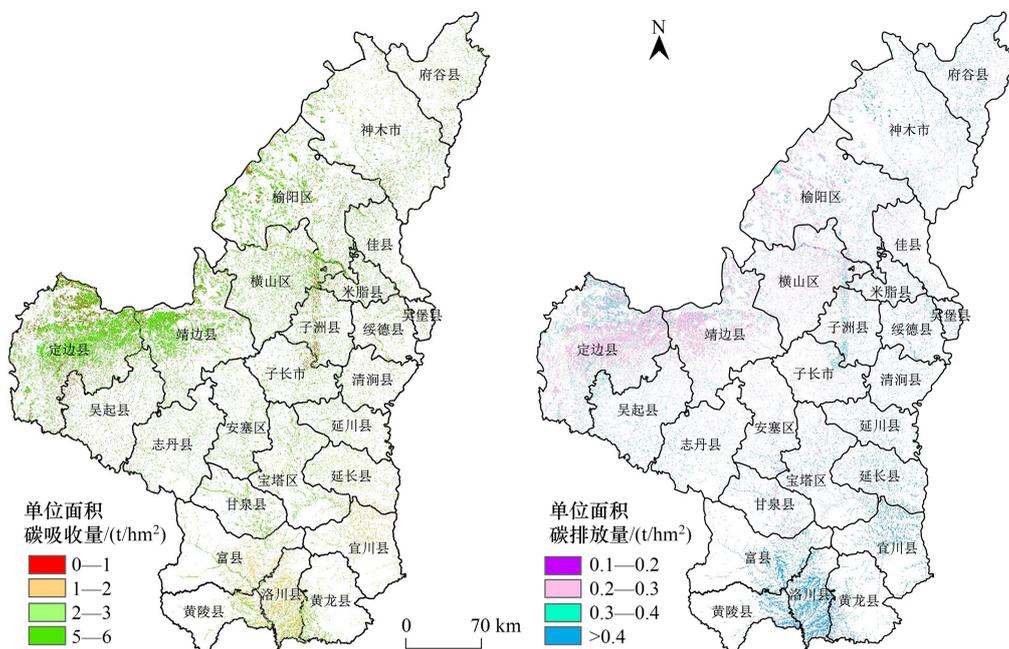


图 5 农田作物单位面积碳吸收量和碳排放量空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of farmland carbon uptake and carbon emissions

农田作物净碳吸收量及碳足迹分布特征如图 6 所示,除了枣类净碳吸收量为负值外,其余作物单位面积碳吸收量均大于碳排放量,相较于碳吸收量,大部分区域净碳吸收量变化不大,而在苹果、蔬菜种植比例较高的区域,如洛川县、黄陵县南部、富县东南部、黄龙县西南部、宜川县北部等区域,单位面积净碳吸收量与单位面积碳吸收量相差较大。碳足迹空间分布与净碳吸收量分布相反,由于苹果、蔬菜、枣类的碳足迹远大于其他作物,这三类作物分布的区域碳足迹较高,包括洛川县、黄陵县南部、富县东南部、黄龙县西南部、宜川县北部和无定河沿岸的米脂、绥德县以及佳县、清涧县和子洲县等,其余地区碳足迹均处于  $0-2 \times 10^4 \text{ hm}^2$  之间。

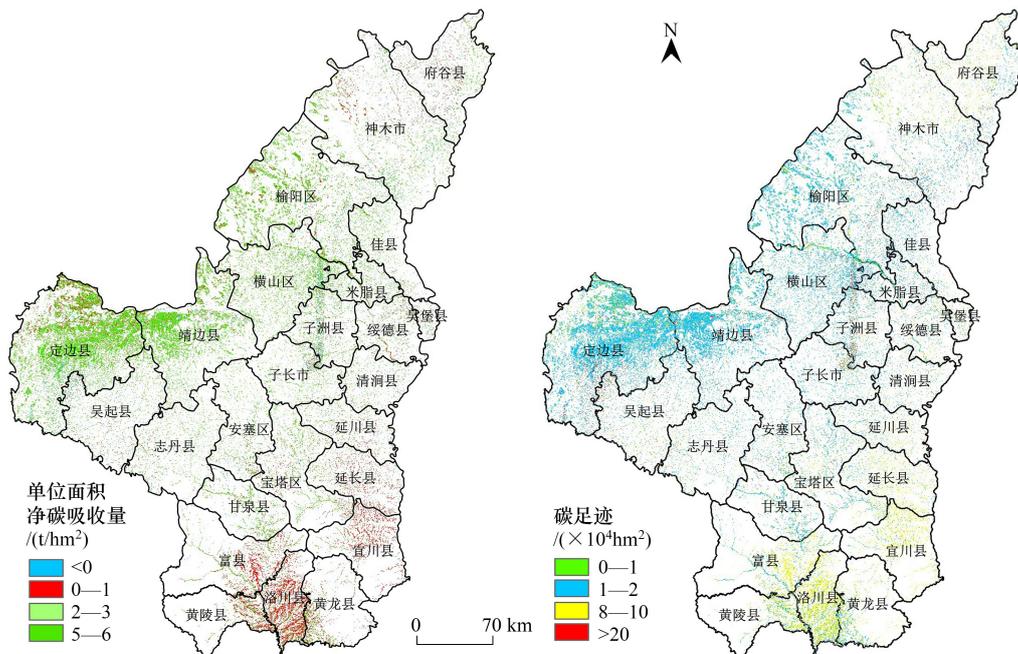


图 6 农田作物净碳吸收量及碳足迹分布特征

Fig.6 Field crop distribution features of net carbon uptake and carbon footprint

## 5 讨论与结论

本研究表明,粮食作物的固碳能力强,碳足迹较低,经济类作物碳排放量较高,碳足迹也较高。作物碳吸收主要与作物产量相关,粮食作物因其种植面积广泛,经济总产量高,且果实水分系数较低,固碳能力强,玉米、稻谷、大豆三种粮食作物的碳吸收量占碳吸收总量的 77%,而碳排放主要取决于化肥、农药、农膜、农业机械的使用以及灌溉过程,其中,化肥和农膜施用产生的碳排放占总碳排放的 80%左右,是主要的碳排放源,经济类作物蔬菜、苹果和枣类由于每亩化肥折纯用量和每亩农膜用量均较高,导致碳排放量较高,约占总碳排放的 55%。碳足迹综合考虑了碳排放量和单位面积碳吸收量,因此,经济类作物碳足迹普遍较高,而蔬菜由于单产远高于其他作物,其单位面积碳吸收量较高,是经济类作物中碳足迹较少的。

研究区单位面积农田碳吸收量呈现西北高、南部低的分布格局,单位面积碳排放量、碳足迹呈现南部高、西北低的分布格局。西北部区域,如定边县、靖边县、横山区和榆阳区,地势较平坦,耕地分布广泛,广泛种植玉米、薯类等粮食作物,农田碳吸收量较高;南部区域,属黄土高原丘陵沟壑区,地形起伏较大,是苹果的优势产区,农田碳吸收量相对于西北部区域较低;无定河沿岸的米脂、绥德县以及佳县、清涧县和子洲县的枣树分布区,由于呈现净碳排放效应,该区是整个陕北地区碳足迹最高的区域。

陕北地区主要农作物普遍呈现净碳吸收效应,这与余玮等<sup>[39]</sup>、王雅楠等<sup>[40]</sup>的研究结论一致,本文从更精细的栅格尺度对其空间格局进行了分析,并从作物角度评估了该区域作物的碳足迹。该区域平均碳足迹为

$15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 低于汾渭平原农田生态系统碳足迹<sup>[22]</sup>和四川省生态系统碳足迹<sup>[23]</sup>, 主要是因为陕北地区耕地分布较为分散, 存在土壤沙化、盐渍化现象, 作物种植面积相对于平原区域较小, 作物碳排放总量较少; 另一方面, 计算碳排放量所采用的计算公式存在不确定性, 作物的化肥折纯用量、耕种收综合机械化率以及农膜用量采用的是全国的平均值, 虽能体现出作物的生产资料投入平均用量及作物间的差异, 但与研究区作物实际生产消耗量之间存在差异。

通过对研究区碳效应的分析, 实现该区农业增汇减排可通过以下几个途径: 首先, 不断完善农业基础生产条件, 培育优良高产作物品种, 增加作物产量, 提高作物固碳能力。其次, 可采用优化施肥量、施用缓释肥料, 深度施肥<sup>[41]</sup>以及控制农膜用量等农田管理措施有效的减少碳排放, 同时, 优化灌溉方式、推广节水灌溉, 并减少化学农药的使用。最后, 由于不同作物在生产过程中的固碳量、农业生产资料的投入有较大差异, 研究区域也可通过种植结构的优化措施来提高农业碳汇, 控制碳排放, 例如, 保证碳吸收量较高的粮食作物的种植面积, 控制碳排放量较高的经济作物的面积以及推广高产品种等。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] World Meteorological Organization (WMO), State of the Global Climate in 2022. [ 2023-07-26 ]. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.
- [ 2 ] 中国气象局. 中国温室气体公报. (2023-01-09). [ 2023-07-26 ]. [https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202301/t20230119\\_5274988.html](https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202301/t20230119_5274988.html).
- [ 3 ] Symonds M E. Faculty opinions recommendation of IPCC, 2021: summary for policymakers. In: climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Faculty Opinions Ltd, 2021(2021-08-10).
- [ 4 ] 杨阳, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安绍山. 黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策. 生态学报, 2023, 43(21): 9071-9081.
- [ 5 ] Nayak D, Saetan E, Cheng K, Wang W, Koslowski F, Cheng Y F, Zhu W Y, Wang J K, Liu J X, Moran D, Yan X Y, Cardenas L, Newbold J, Pan G X, Lu Y L, Smith P. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 108-124.
- [ 6 ] 李梦琦, 肖辉, 张慧, 程文娟, 赵杰, 王立艳, 董昱辰. 中国农田生态系统碳收支动态——以 2010—2020 年为例. 农业与技术, 2023, 43(10): 1-5.
- [ 7 ] Li M Q, Liu S L, Sun Y X, Liu, Y X. Agriculture and animal husbandry increased carbon footprint on the Qinghai-Tibet Plateau during past three decades. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123963.
- [ 8 ] Zhang Y, Fang G. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in Suzhou city, Anhui Province, China. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 291/292/293/294: 1385-1388.
- [ 9 ] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展. 生态学报, 2022, 42(23): 9405-9416.
- [ 10 ] 周圣杰. 土地利用数据对动态植被模式模拟中国陆地生态系统碳源汇影响的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [ 11 ] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [ 12 ] Sun T, Feng X M, Lal R, Cao T H, Guo J R, Deng A X, Zheng C Y, Zhang J, Song Z W, Zhang W J. Crop diversification practice faces a tradeoff between increasing productivity and reducing carbon footprints. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 321: 107614.
- [ 13 ] 王才军, 孙德亮, 张凤太. 基于农业投入的重庆农业碳排放时序特征及减排措施研究. 水土保持研究, 2012, 19(5): 206-209.
- [ 14 ] 宁成佳, 杨松. 基于 ARDL 模型的中国农业经济发展驱动因素与农业碳排放关系研究. 西南科技大学学报: 哲学社会科学版, 2020, 37(3): 47-52.
- [ 15 ] Wu H Y, Huang H J, Chen W K, Meng Y. Estimation and spatiotemporal analysis of the carbon-emission efficiency of crop production in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371: 133516.
- [ 16 ] 张祯祺, 蔡惠文, 张平平, 王泽琳, 李婷婷. 基于 GEE 遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 231-242.
- [ 17 ] 张璐, 王静, 施润和. 2000—2010 年东北三省碳源汇时空动态遥感研究. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2015(4): 164-173.
- [ 18 ] 李朝晖, 单楠, 王琪, 李文静, 王增龙, 包萨茹, 窦华山, 敖文, 庞博, 王文林. 2013—2020 年呼伦湖流域植被碳源/汇估算及影响因子分析. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1437-1446.

- [19] Liu Z, Tian J L, Wang K X, Lan J. The impact of farmland circulation on the carbon footprint of agricultural cultivation in China. *Economic Analysis and Policy*, 2023, 78:792-801.
- [20] 张传红, 韩露, 谢佳男, 靳浩, 刘翠英, 樊建凌. 江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2022, 14(1): 110-119.
- [21] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 逯承鹏, 秦明周, 卢谦成. 农田生态系统碳足迹时空变化——以河南省为例. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 3050-3060.
- [22] 张露, 何雨霏, 陈坦, 杨婷, 张冰, 金军. 2011—2020 年汾渭平原农田生态系统碳足迹的时空格局演变. *生态环境学报*, 2023, 32(6): 1149-1162.
- [23] 李华, 袁鹏飞, 王洁, 李晓英, 王文玉. 四川省农田生态系统碳足迹和碳生态效率时空变化. *江苏农业科学*, 2023, 51(11): 192-201.
- [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. *生态经济*, 2023, 39(07), 107-116.
- [25] 侯相成, 李涵, 董思奇, 于清军, 冯国忠, 李晓宇, 高强. 东北地区玉米种植系统碳足迹及氮足迹研究. *吉林农业大学学报*. [2023-07-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20220913.1936.006.html>
- [26] 蒋榕, 徐强, 李京咏, 戴林秀, 敖弟彩, 窦志, 高辉. 稻虾共作模式碳足迹评价的敏感性和不确定性分析. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(10): 1577-1587.
- [27] 任筱童, 柴以潇, 张莹, 谢凯柳, 王敏, 郭俊杰, 郭世伟. 县域稻麦轮作系统碳足迹分析——以江苏兴化为例. *中国土壤与肥料*, 2023(4):67-75.
- [28] 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 程湫雅, 程泳铭. 基于 GEE 和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 165-174.
- [29] Immitzer M, Atzberger C, Koukal T. Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band worldview-2 satellite data. *Remote Sensing*, 2012, 4(9): 2661-2693.
- [30] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2002.
- [31] 段华平, 张悦, 赵建波, 卞新民. 中国农田生态系统的碳足迹分析. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 203-208.
- [32] 谢思董. 中国东北三省种植业结构变化对碳排放的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [33] 徐玥, 王辉, 韩秋风. 中国农业净碳效应与农业经济发展的时空耦合规律研究. *新疆农垦经济*, 2023(7): 1-12.
- [34] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国种植业碳排放时空分异研究. *统计与决策*, 2020, 36(15): 92-95.
- [35] Wiedmann K-P, Hennigs N, Siebels A. Measuring consumers' luxury value perception: a cross-cultural framework. *Academy of Marketing Science Review*, 2007(7), 24.
- [36] Song M, Zhang L Y, Gao Y, Li E X. Spatiotemporal evolution and influence mechanism of the carbon footprint of energy consumption at county level in the Yellow River Basin. *Science of the Total Environment*, 2023, 883: 163710.
- [37] 崔瑜. 中国农业碳足迹与经济发展协调性研究——纳入碳汇效应的分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [38] Cui Y, Khan S U, Sauer J, Zhao M J. Exploring the spatiotemporal heterogeneity and influencing factors of agricultural carbon footprint and carbon footprint intensity: embodying carbon sink effect. *Science of The Total Environment*, 2022, 846: 157507.
- [39] 余玮, 黄璜, 官春云, 陈阜, 陈光辉. 我国主要农作物生产碳汇结构现状与优化途径. *中国工程科学*, 2016, 18(1): 114-122.
- [40] 王雅楠, 张琪琳, 陈伟. 基于碳汇功能的省域农业碳排放及减排潜力研究——以中国三种主要粮食作物为例. *重庆社会科学*, 2022(5): 58-75.
- [41] Yang Y Y, Liu L, Bai Z H, Xu W, Zhang F, Zhang X Y, Liu X J, Xie Y W. Comprehensive quantification of global cropland ammonia emissions and potential abatement. *Science of The Total Environment*, 2022, 812: 151450.