

# 2006~2020年江苏省农田生态系统碳足迹分析

朱莉瑶, 陈祎茗, 魏婧萱, 丁莹

南京财经大学, 江苏 南京

收稿日期: 2023年1月23日; 录用日期: 2023年2月21日; 发布日期: 2023年2月28日

## 摘要

利用2006~2020年江苏省农业生产统计数据,以江苏省13个地级市为研究单元,对全省农业生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹进行估算和分析,研究影响碳排放和碳吸收的因素,并提出对策和建议。结果表明:水稻是江苏省第一大粮食作物,同时也是农田生态系统中碳吸收第一大来源,截至2020年,其全生命周期碳吸收量达到 $1.59143 \times 10^7$  t, 占全省农田生态系统碳吸收量的41%;农田生态系统碳足迹占同时期播种面积的比例也趋于下降,由2006年13.6%下降到2020年10.63%,即约1/10的耕地播种面积可以消纳掉农田生产产生的碳排放;江苏省农田生态系统处于碳盈余状态,2020年碳生态盈余达到了 $6.3258 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,江苏省农田生态系统的碳汇功能逐步提升。

## 关键词

江苏省农田生态系统, 碳排放, 碳吸收, 碳足迹

# Carbon Footprint Analysis of Farmland Ecosystem in Jiangsu Province from 2006 to 2020

Liyao Zhu, Yiming Chen, Jingxuan Wei, Ying Ding

Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing Jiangsu

Received: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on the statistical data of agricultural production in Jiangsu Province from 2006 to 2020, 13 prefecture-level cities in Jiangsu Province were used as research units to estimate and ana-

lyze the carbon emission, carbon absorption and carbon footprint of agricultural ecosystems in Jiangsu Province, study the factors affecting carbon emission and carbon absorption, and put forward countermeasures and suggestions. The results showed that rice was the largest grain crop in Jiangsu Province, and also the largest source of carbon uptake in farmland ecosystem. By 2020, the carbon uptake of rice during its whole life cycle reached  $1.59143 \times 10^7$  t, accounting for 41% of the total carbon uptake of farmland ecosystem in Jiangsu Province. The ratio of farmland ecosystem carbon footprint to the planted area in the same period also tended to decline, from 13.6% in 2006 to 10.63% in 2020, that is, about 1/10 of the planted area could absorb the carbon emissions generated by farmland production. The farmland ecosystem of Jiangsu Province is in a state of carbon surplus, and the carbon ecological surplus reaches  $6.3258 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> in 2020. The carbon sink function of the farmland ecosystem of Jiangsu Province is gradually improved.

## Keywords

Farmland Ecosystem in Jiangsu Province, Carbon Emissions, Carbon Absorption, Carbon Footprint

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国制定“3060”双碳战略和“1+N”政策体系，习近平总书记在党的二十大报告中强调：“积极稳妥推进碳达峰碳中和。”同时指出，“必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。”农业生产是碳排放的重要来源，来自农业生产的碳排放占全球人为碳排放的10%~12% [1]。同时，农田生态系统的碳储存量占全球碳储存量的10%左右，约为170 Pg [2]。据联合国粮食与农业组织(FAO)的统计，农业用地释放出的温室气体超过全球人为温室气体排放总量的30%，相当于每年产生150亿吨的二氧化碳。如何降低农业生产过程中的碳排放成为人类的一大难题。在段华平等[3]对中国农田生态系统的分析中，已出现以碳足迹表征农田生态系统的碳流变化及其与生态承载力的比较研究。

中国作为第一农业大国，农业碳排放量始终高于欧美，国内学者越来越关注农业生产的碳排放问题和碳足迹研究。笔者利用2006~2020年江苏省农业生产相关统计数据，对江苏省农田生态系统中主要碳排放来源以及10种主要粮食作物的碳吸收和碳足迹进行估算分析，并根据分析结果得出对策和建议。本研究将为江苏省发展低碳绿色农业提供参考价值，为将来更好地研究农田生态系统碳足迹的变化规律，实现碳中和碳达峰，提供科学依据，对于推动农田生态系统的绿色发展具有重要意义。纵观全国，对江苏省农田生态系统碳足迹开展分析和研究，为其提出低碳发展的举措和建议，也能够为其他类似的地区提供借鉴意义，推动绿色发展的理念，为保护生态环境提供理论基础，有利于中国实现3060战略目标，实现减排增汇。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 区域概况及数据来源

江苏省位于中国大陆东部沿海，地跨东经116°18'~121°57'，北纬30°45'~35°20'，是中国综合发展水平

最高的省份之一[4]。江苏省气候具有明显的季风特征,属亚热带和暖温带过渡地带。截至2020年,全省农作物总播种面积7478.39千公顷,其中粮食作物、经济作物、其他作物种植面积分别占农作物种植总面积的72.28%,4.13%,23.59%,粮食作物主要以种植小麦、稻谷、薯类为主。2020年江苏省农林牧渔业总产值7952.59亿元,总产值比上年增长2.0%。在近几年发展江苏省农业现代化水平不断提升,农业发展正在朝着新的方向前进。

本研究的数据主要来源于2006~2020年《江苏统计年鉴》,包括了化肥施用量、农药施用量、农膜和农用柴油用量、灌溉、农作物机耕面积、各类农作物播种面积和经济产量等指标。

## 2.2. 概念界定

碳排放是指向大气释放碳的过程、活动或机制;将碳吸收定义为从空气中清除二氧化碳的过程、活动、或机制。农田生态系统是指由农业生物群落和农业无机环境构成的生态整体,在一定程度上受人工控制。通过人为的播种、灌溉、施肥等活动,产生了碳源和碳汇。在本研究中,在估算江苏省农田生态系统碳源、碳汇时,以农田生产的技术系统为边界,主要的碳排放路径为农田中的化肥农药使用,农业机械及燃料使用,农田灌溉、土壤翻耕,碳吸收的主要途径为农田作物全生育期碳吸收。

碳足迹这个概念源自于“生态足迹”,生态足迹的概念由Wackernagel [5]提出。目前国内外碳足迹主要有2种定义:一是指某种活动(或某种产品生命周期内累积的)引起的直接或间接的二氧化碳排放量或温室气体转化的二氧化碳等价物排放量;二是指吸收第一种定义中的二氧化碳所需的生产性土地的面积,即碳排放的占地面积。前者指碳排放量,后者指消纳碳排放所需要的土地(植被)面积,即碳排放的生态足迹(CF)。本研究将“农田碳足迹”定义为吸收农田生产投入引起的直接或间接的化石燃料燃烧排放的二氧化碳所需的生产性土地面积(hm<sup>2</sup>),即采用后一种定义。

## 2.3. 农田生态系统估算方法

### 2.3.1. 农田碳排放量估算

农田生态系统碳源主要为农业生产要素投入产生的碳排放,包括化肥、农药、农膜、灌溉、农机、土地翻耕等,本文运用排放因子法对农田生态系统中化肥、农药、农膜生命周期隐含碳以及农业灌溉和农业机械使用过程中产生的碳排放进行估算。

借鉴段华平[3]等的研究,计算公式如下:

$$E = E_f + E_p + E_m + E_e + E_i \quad (1)$$

$$E_f = G_f \times A \quad (2)$$

$$E_p = G_p \times B \quad (3)$$

$$E_m = G_m \times C \quad (4)$$

$$E_e = (A_e \times D) + (W_e \times F) \quad (5)$$

$$E_i = A_i \times G \quad (6)$$

其中, $E$ 为农田生态系统碳排放总量, $E_f$ 为生产和使用化肥过程中引起的碳排放量, $E_p$ 为生产和使用农药过程中引起的碳排放量, $E_m$ 为生产和使用农膜过程中引起的碳排放量, $E_e$ 为使用农业机械过程中引起的碳排放量, $E_i$ 为农业灌溉产生的碳排放量; $G_f$ 、 $G_p$ 、 $G_m$ 分别为化肥、农药、农膜使用量; $A_e$ 为农作物种植面积; $W_e$ 为农业机械总动力; $A_i$ 为灌溉面积; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $G$ 为相应碳排放源的碳排放系数[6][7][8][9][10]。江苏省农业碳排放系数见表1。

**Table 1.** Agricultural carbon emission source coefficient in Jiangsu Province  
**表 1.** 江苏省农业碳排放源系数

碳源	碳排放系数
化肥	0.8956 kg/kg
农药	4.9341 kg/kg
农膜	5.1800 kg/kg
农业机械	0.5927 kg/kg
土地翻耕	312.6000 kg·hm <sup>-2</sup>
农业灌溉	20.4760 kg·hm <sup>-2</sup>

### 2.3.2. 农作物碳吸收量估算

农田生态系统不仅是碳排放源，对于碳的吸收也有显著作用。其碳汇类型主要为农田生态系统中所有农作物全生育期对碳的吸收。本文对江苏省农田生态系统碳吸收量进行估算，公式如下[11] [12]：

$$C_i = \sum_i C_d = \sum_i C_f D_w = \sum_i C_f Y_w (1 - W_i) / H_i \quad (7)$$

公式中， $i$  表示第  $i$  类农作物； $C_i$  表示农田生态系统碳吸收量； $C_d$  表示第  $i$  类农作物全生育期的碳吸收量； $C_f$  表示第  $i$  类农作物通过光合作用合成单位质量干物质所需要吸收的碳，也就是作物的碳吸收率； $D_w$  表示生物产量； $Y_w$  表示第  $i$  类农作物的经济产量； $W_i$  表示作物的含水率； $H_i$  表示第  $i$  类农作物的经济系数。

### 2.3.3. 农田生态系统碳足迹核算

根据碳足迹的定义，农田生态系统可表示为农田利用的碳排放总量与单位面积碳吸收量的比值。用以下公式表示[3]：

$$C_{EF} = E_i / N_{EP}, N_{EP} = C_i / S \quad (8)$$

$C_{EF}$  为农田生态系统碳足迹； $E_i$  表示农田生态系统的碳排放量； $N_{EP}$  为单位面积植被的碳吸收量，代表了农作物的固碳能力； $C_i$  表示农田生态系统碳吸收量，与式(7)的  $C_i$  含义相同； $S$  表示耕地面积。

$$C_{ED} = C_{EF} - C_{EC}, C_{ER} = C_{EC} - C_{EF} \quad (9)$$

将区域农田生态系统碳足迹与区域生态承载力(耕地面积) ( $C_{EC}$ ) 相比，若前者大于后者，则为碳生态赤字( $C_{ED}$ )；若前者小于后者，则为碳生态盈余( $C_{ER}$ )。农田生态系统主要农作物的经济系数和碳吸收率见表 2。

**Table 2.** Economic coefficients and carbon absorption rates of major crops in farmland ecosystems  
**表 2.** 农田生态系统主要农作物的经济系数和碳吸收率

作物名称	经济系数	碳吸收率	含水率
水稻	0.45	0.414	0.12
小麦	0.40	0.485	0.12
玉米	0.40	0.471	0.13
薯类	0.70	0.423	0.70
大豆	0.35	0.450	0.13

Continued

棉花	0.10	0.450	0.80
油菜	0.25	0.450	0.10
花生	0.43	0.450	0.10
蔬菜	0.65	0.450	0.90
瓜果	0.70	0.090	0.90

### 3. 结果分析

#### 3.1. 作物产量及播种面积

2006~2020年江苏省主要农作物播种面积如表所示,由表3可以看出,从2006~2020年,水稻播种面积保持平稳,稳定在 $22.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。水稻总产量呈波动上升,增长了9.7%,在2021年达到 $196.57 \times 10^5 \text{ t}$ 。小麦、玉米、蔬菜和瓜果的播种面积均有增加,随着播种面积的增加,总产量迅速增加,小麦和蔬菜总产量分别增长了63.1%和56.6%,到2020年分别达到 $133.39 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $572.81 \times 10^5 \text{ t}$ 。2018~2019年玉米播种面积的减少对于玉米总产量影响不大,总产量稳中有升。薯类、大豆、棉花、油菜和花生的播种面积均有明显的降低。从产量上看,水稻、小麦和蔬菜是江苏省最主要的农作物。

**Table 3.** Sown area and yield of major crops in Jiangsu Province

**表 3.** 江苏省主要农作物播种面积及产量

年份	水稻		小麦		玉米		薯类		大豆	
	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$
2006	22.16	179.27	19.13	81.78	3.78	19.72	0.76	5.34	2.13	5.37
2007	22.21	176.11	20.39	97.38	3.93	19.73	0.69	4.22	2.21	5.64
2008	22.23	177.19	21.17	99.82	4.33	20.30	0.67	4.17	2.30	6.02
2009	22.24	180.29	21.45	100.44	4.34	21.62	0.68	4.24	2.31	6.09
2010	22.25	180.79	22.00	100.81	4.40	21.85	0.62	3.95	2.24	5.98
2011	22.28	186.42	22.46	102.31	4.48	22.62	0.61	3.86	2.23	5.76
2012	22.29	190.01	23.04	104.88	4.54	23.02	0.61	3.93	2.17	5.53
2013	22.30	192.23	23.44	110.13	4.68	21.64	0.58	3.78	2.07	4.70
2014	22.37	191.20	23.73	116.04	5.20	23.90	0.41	3.39	2.02	4.73
2015	22.50	195.25	24.11	117.40	5.41	25.22	0.35	3.29	1.96	4.83
2016	22.56	193.14	24.37	111.96	5.40	23.40	0.27	3.28	1.97	4.71
2017	22.38	192.49	24.13	117.09	5.43	27.55	0.26	2.87	1.94	4.60
2018	22.15	195.96	24.04	131.75	5.16	31.11	0.36	2.39	1.94	5.13
2019	21.84	195.96	23.47	131.75	5.04	31.11	0.36	2.39	1.92	5.13
2020	22.03	196.57	23.39	133.39	5.10	30.83	0.39	2.58	1.96	5.19

Continued

年份	棉花		油菜		花生		蔬菜		瓜果	
	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$	播种面积/ $\times 10^5 \text{ hm}^2$	总产量/ $\times 10^5 \text{ t}$
2006	3.55	3.81	6.09	14.94	1.92	6.68	11.61	365.77	1.26	41.38
2007	3.27	3.48	4.34	10.95	0.96	3.38	10.42	331.80	1.25	41.69
2008	3.00	3.26	4.54	11.28	1.02	3.56	10.93	354.47	1.26	44.83
2009	2.52	2.55	4.76	12.17	1.06	3.87	11.48	383.78	1.35	48.03
2010	2.36	2.61	4.60	11.24	1.03	3.77	12.30	423.40	1.37	50.15
2011	2.39	2.47	4.41	10.52	1.00	3.70	12.60	458.69	1.40	48.85
2012	1.71	2.20	4.21	10.91	0.96	3.60	13.23	498.46	1.43	51.48
2013	1.55	2.09	4.14	11.33	0.94	3.53	13.55	523.78	1.45	53.96
2014	1.32	1.60	3.98	11.01	0.92	3.48	13.72	542.11	1.50	55.55
2015	0.94	1.17	3.76	10.63	0.91	3.51	14.31	559.57	1.63	61.47
2016	0.63	0.74	3.36	9.36	0.94	3.67	14.30	559.39	1.57	59.67
2017	0.42	0.51	3.12	8.86	0.92	3.62	14.08	554.05	1.62	63.37
2018	0.17	0.21	1.59	4.57	0.98	3.93	14.25	562.59	1.64	64.55
2019	0.12	0.16	1.74	5.05	1.04	4.27	14.24	564.37	1.63	66.14
2020	0.08	0.11	1.73	5.12	0.10	4.06	14.43	572.81	1.57	73.54

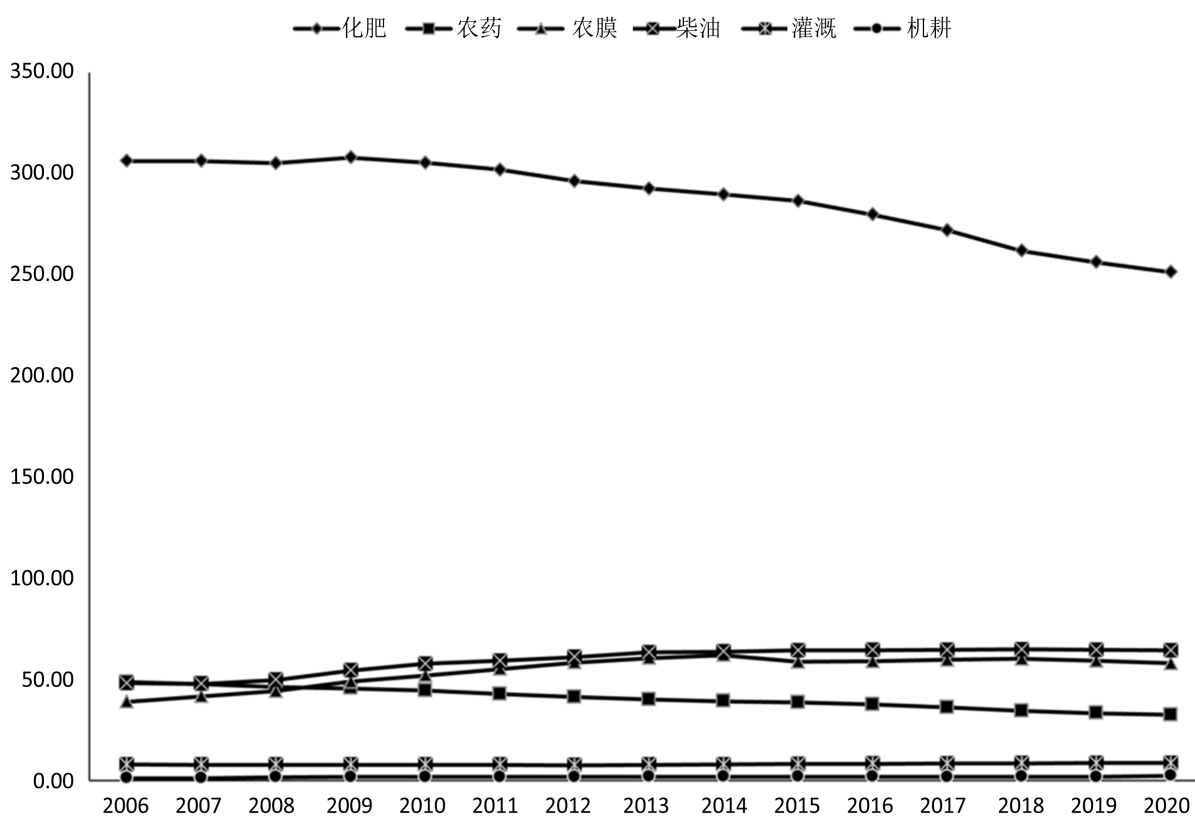
### 3.2. 农田碳排放结构与强度分析

由表 4 可知, 2006~2020 年江苏省农田生态系统碳排放总量呈现先增加后减少的趋势。2006 年江苏省农田生态系统碳排放总量为  $4.51 \times 10^6 \text{ t}$ ; 2010 年碳排放总量为  $4.69 \times 10^6 \text{ t}$ , 同比增长 4.01%; 2016 年碳排放总量回落至  $4.51 \times 10^6 \text{ t}$ ; 2020 年碳排放总量降至  $4.17 \times 10^6 \text{ t}$ , 较 2010 年减少 11.09%。根据 2006~2020 年碳排放总量的变化趋势, 可分为 3 个阶段: 2006~2010 年为快速增长期, 十一五期间, 江苏省不断推广农业机械化新技术、新机具, 生产机械化程度明显提高, 由于农膜、机耕、柴油的使用量逐年增加, 碳排放量呈现快速增长的趋势, 并于 2010 年达到峰值; 2011~2016 年为缓慢下降期, 化肥、农药的使用量逐年减少, 主要是因为江苏省推广使用有机肥、进一步加强农业源污染减排等政策的作用; 2017~2020 年为快速减少期, 这一阶段碳排放总量迅速下降, 化肥、农药、农膜的使用量均明显减少, 各市、县(市、区)重视农业污染排放治理, 大力推广节约型农业技术, 推进农业清洁生产。

如图 1 所示, 农田生态系统的各类碳源中, 化肥产生的碳排放占比最大, 占比为 63.63%, 其余占比依次为柴油 13.18%、农膜 12.05%、农药 8.95%、灌溉 1.79%和机耕 0.39%。2006~2020 年使用化肥和农药产生的碳排放量总体呈现下降趋势, 而农业机械产生的碳排放量呈上升趋势, 主要是因为江苏省致力于转变农业发展方式、提高农村生产力, 加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级, 实现农业机械化与“三农”融合发展。农膜和灌溉产生的碳排放量逐渐增加, 但增幅平稳, 也与江苏省农业农村现代化水平不断提高有关。

**Table 4.** Carbon emission and carbon emission intensity of farmland ecosystem in Jiangsu Province  
**表 4.** 江苏省农田生态系统碳排放量和碳排放强度

年份	碳排放量/ $10^4$ t						碳排放总量	碳排放强度
	化肥	农药	农膜	柴油	有效灌溉	机耕		
2006	306.30	48.65	38.90	48.16	7.86	1.22	451.09	0.611
2007	306.32	47.76	41.65	47.79	7.84	1.21	452.57	0.611
2008	305.18	46.28	44.24	49.72	7.82	1.66	454.90	0.606
2009	308.09	45.54	48.85	54.45	7.81	1.72	466.44	0.617
2010	305.50	44.46	51.90	57.78	7.82	1.73	469.19	0.616
2011	302.01	42.68	55.12	59.25	7.82	1.76	468.62	0.612
2012	296.39	41.30	58.33	61.03	7.58	1.83	466.46	0.610
2013	292.70	40.06	60.50	63.30	7.75	1.86	466.18	0.607
2014	289.83	39.23	62.06	63.69	7.97	1.91	464.67	0.605
2015	286.58	38.54	58.64	64.36	8.09	1.90	458.10	0.591
2016	279.89	37.60	59.00	64.43	8.30	1.86	451.08	0.590
2017	272.13	36.12	59.62	64.58	8.46	1.82	442.73	0.586
2018	261.92	34.34	60.14	64.82	8.56	1.94	431.71	0.574
2019	256.33	33.26	59.16	64.55	8.61	1.84	423.74	0.569
2020	251.44	32.42	57.91	64.34	8.65	2.39	417.15	0.558



**Figure 1.** Carbon emissions from various carbon emission sources of farmland ecosystem in Jiangsu Province, 2006~2020  
**图 1.** 2006~2020 年江苏省农田生态系统各类碳排放源碳排放情况



由图2可以看出,2006~2020年江苏省农田生态系统碳排放强度呈现下降趋势且均低于 $1\text{ t/hm}^2$ 。2006年碳排放强度为 $0.611\text{ t/hm}^2$ ,2020年碳排放强度下降至 $0.558\text{ t/hm}^2$ 。2006~2020年全国平均碳排放强度在 $0.57\sim 0.71\text{ t/hm}^2$ ,总体来说,江苏省农田生态系统碳排放水平位于全国平均水平之内。

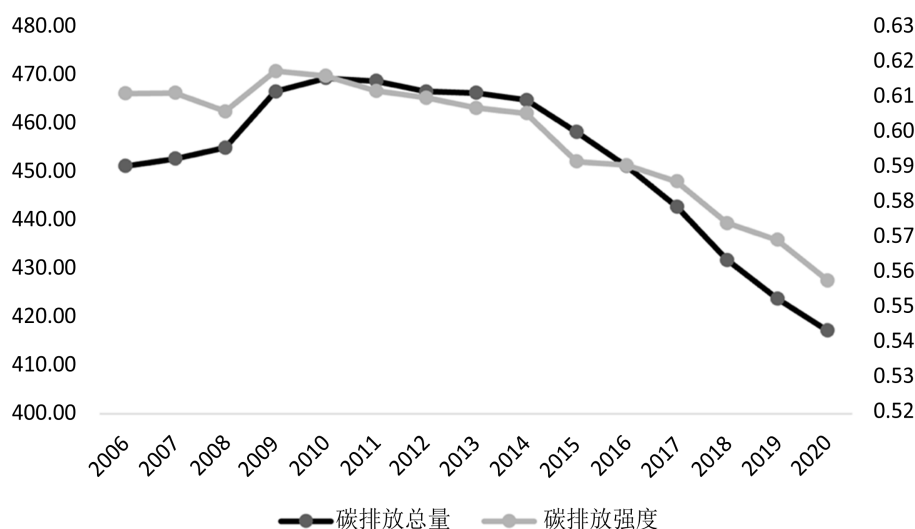


Figure 2. Changes of farmland ecosystem carbon emission intensity in Jiangsu Province, 2006~2020

图2. 2006~2020年江苏省农田生态系统碳排放强度变化

### 3.3. 农作物碳吸收结构与强度分析

江苏省主要农作物全生育期的碳吸收量在2006~2020年的变化情况如表5所示。碳吸收总量由2006年的 $3.31695 \times 10^7\text{ t}$ 增长到2021年的 $4.26251 \times 10^7\text{ t}$ ,年均增长率为1.8%。水稻是江苏省第一大农作物,也是农田生态系统中碳吸收第一大来源。2020年,水稻全生育期碳吸收量达 $1.59143 \times 10^7\text{ t}$ ,占整个农田生态系统碳吸收量的41%;小麦和玉米的碳吸收量呈上升趋势且占整个农业生态系统的碳吸收量的比例均有增加,小麦由2006年的 $8.7259 \times 10^6\text{ t}$ 增加到2020年的 $1.42327 \times 10^7\text{ t}$ ,增长了63.1%,玉米由2006年的 $2.0202 \times 10^6\text{ t}$ 增加到2020年的 $3.1583 \times 10^6\text{ t}$ ,增长了56.3%。随着薯类、大豆、棉花、油菜和花生播种面积的日益萎缩,它们在农业生态系统碳吸收的占比也在下降,碳吸收量分别下降了51.7%、3.4%、97.1%、65.7%和39.2%。蔬菜和瓜果因播种面积的扩大,碳吸收量也逐渐增大,蔬菜由2006年的 $2.5323 \times 10^6\text{ t}$ 增长到2020年的 $3.9656 \times 10^6\text{ t}$ ,增长了56.6%,瓜果的碳吸收量增长了77.8%。

如表6所示,分析江苏省农田生态系统单位产量碳吸收量和单位面积碳吸收量发现:单位产量碳吸收量在2007年达到高峰值 $479.00\text{ kg/t}$ ,随后逐年下降,在2016年达到 $378.45\text{ kg/t}$ ,随后开始逐年上升,2020年稳定在 $383.23\text{ kg/t}$ 左右,较2007年的高峰值下降了20.0%;单位面积碳吸收量在2020年达到峰值,较2006年单位面积碳吸收量增长了21.0%,导致这一现象的原因可能是总产量的增长速度大于播种面积的缩减速度。

Table 5. Carbon uptake of major crops in Jiangsu Province (Unit:  $\times 10^4\text{ t}$ )

表5. 江苏省主要农作物碳吸收量(单位:  $\times 10^4\text{ t}$ )

年份	水稻	小麦	玉米	薯类	大豆	棉花
2006	1451.37	872.59	202.02	9.68	60.07	157.73
2007	1425.79	1039.04	202.12	7.65	63.09	144.07



Continued

2008	1434.53	1065.08	207.96	7.56	67.34	134.96
2009	1459.63	1071.69	221.48	7.69	68.12	105.57
2010	1463.68	1075.64	223.84	7.16	66.89	108.05
2011	1509.26	1091.65	231.72	7.00	64.43	102.26
2012	1538.32	1119.07	235.82	7.12	61.86	91.08
2013	1556.29	1175.09	221.69	6.85	52.57	86.53
2014	1547.96	1238.15	244.84	6.15	52.91	66.24
2015	1580.74	1252.66	258.36	5.96	54.03	48.44
2016	1563.66	1194.61	239.72	5.95	52.68	30.64
2017	1558.40	1249.35	282.23	5.20	51.45	21.11
2018	1586.49	1405.77	318.70	4.33	57.38	8.69
2019	1586.49	1405.77	318.70	4.33	57.38	6.62
2020	1591.43	1423.27	315.83	4.68	58.05	4.55
年份	油菜	花生	蔬菜	瓜果	总碳吸收量	
2006	242.03	62.92	253.23	5.32	3316.95	
2007	177.39	31.83	229.71	5.36	3326.05	
2008	182.74	33.53	245.40	5.76	3384.86	
2009	197.15	36.45	265.69	6.18	3439.65	
2010	182.09	35.51	293.12	6.45	3462.43	
2011	170.42	34.85	317.55	6.28	3535.42	
2012	176.74	33.91	345.09	6.62	3615.63	
2013	183.55	33.25	362.62	6.94	3685.37	
2014	178.36	32.78	375.31	7.14	3749.82	
2015	172.21	33.06	387.39	7.90	3800.75	
2016	151.63	34.57	387.27	7.67	3668.40	
2017	143.53	34.10	383.57	8.15	3737.10	
2018	74.03	37.02	389.49	8.30	3890.21	
2019	81.81	40.22	390.72	8.50	3900.55	
2020	82.94	38.24	396.56	9.46	3925.02	

**Table 6.** Unit output of main agricultural products and carbon absorption of crops per unit area in Jiangsu Province  
**表 6.** 江苏省主要农产品单位产量及单位面积作物生产碳吸收量

年份	单位产量碳汇量/(kg·t <sup>-1</sup> )	单位面积碳汇量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
2006	458.10	4582.06
2007	479.00	4774.01
2008	466.94	4737.39
2009	450.76	4764.72

Continued

2010	430.36	4732.03
2011	418.29	4786.65
2012	404.42	4873.47
2013	397.49	4933.56
2014	393.47	4988.45
2015	386.91	5008.90
2016	378.45	4867.18
2017	383.29	5029.74
2018	388.17	5382.13
2019	387.60	5462.96
2020	383.23	5545.38

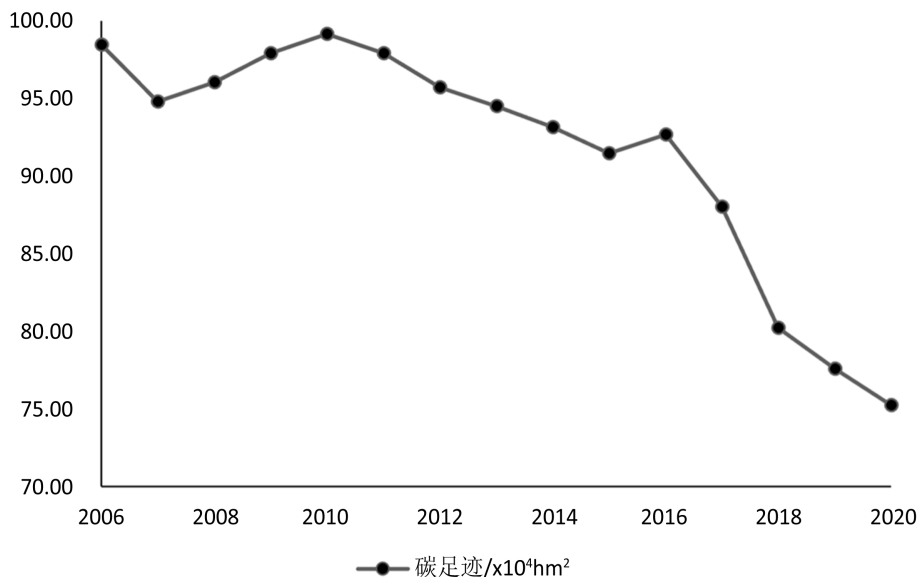
### 3.4. 农田碳足迹

2006~2020年江苏省农田生态系统碳足迹的变化情况见表7、图3。碳足迹最高值出现在2010年,达到 $9.915 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。随着农业减排措施的实行,从2010年开始,江苏省主要农作物生产的碳足迹呈逐年减少的趋势,到2020年减少到 $7.522 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,农田生态系统碳足迹占同时期播种面积的比例也呈现下降趋势,由2006年13.6%下降到2020年10.63%,即农田生产产生的碳排放需要约1/10的耕地播种面积来消纳,这说明江苏省农田生态系统处于碳盈余状态;2020年碳生态盈余达到了 $6.3258 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,表明江苏省农田生态系统的碳汇功能进一步得到了提升。这对于改善江苏省工业发展中的碳生态赤字有积极意义。

**Table 7.** Carbon footprint of major crop production in Jiangsu Province, 2006~2020

**表 7.** 2006~2020年江苏省主要农作物生产的碳足迹

年份	播种面积/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	碳足迹/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	碳生态盈余/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	碳足迹占播种面积比例/%
2006	723.9	98.45	625.45	13.60%
2007	696.7	94.80	601.90	13.61%
2008	714.5	96.02	618.48	13.44%
2009	721.9	97.90	624.00	13.56%
2010	731.7	99.15	632.55	13.55%
2011	738.6	97.90	640.70	13.26%
2012	741.9	95.71	646.19	12.90%
2013	747	94.49	652.51	12.65%
2014	751.7	93.15	658.55	12.39%
2015	758.8	91.46	667.34	12.05%
2016	753.7	92.68	661.02	12.30%
2017	743	88.02	654.98	11.85%
2018	722.8	80.21	642.59	11.10%
2019	714	77.57	636.43	10.86%
2020	707.8	75.22	632.58	10.63%



**Figure 3.** Changes of farmland ecosystem carbon footprint in Jiangsu Province from 2006 to 2020

**图 3.** 2006~2020 年江苏省农田生态系统碳足迹变化

#### 4. 结论与讨论

对 2006~2020 年江苏省农田生态系统碳足迹进行估算后得出：

江苏省农田生态系统碳排放总量呈逐年减少的趋势，碳排放总量由 2006 年的  $451.09 \times 10^4$  t 减少至 2020 年的  $417.15 \times 10^4$  t，降幅为 7.57%。农田生态系统碳排放中，化肥的贡献率最大，因化肥的使用而产生的碳排放量占总碳排放量的 63.63%，尽管化肥使用量逐年下降，但仍远远高于其他排放源产生的碳排放量，化肥使用过程中会产生一氧化二氮、甲烷等温室气体的排放，其生产、运输过程也会产生碳排放。随着江苏省大力推动农业农村现代化发展，农业机械的使用率越来越高，因此增加了柴油、农膜等的碳排放，使用过程中会产生二氧化碳等温室气体。

农田生态系统的作物产量对碳吸收量影响显著，是因为在农作物生长过程中，能够通过光合作用将二氧化碳固定在农作物体内，农作物的固碳量随着作物产量的增加而增加；作物的种类会造成光合速率的差异，从而影响到作物的碳吸收速率[4]。

本研究中，江苏省农田生态系统碳吸收量明显高于碳排放量，体现了江苏省农田生态系统较强的碳汇能力，且碳汇功能在缓慢增强，单位面积碳汇量从 2006 年的  $4582.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  增长到 2020 年的  $5545.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因为受到城市建设用地扩张的影响，导致耕地面积不断减少，所以江苏省农田碳汇增长较为缓慢。此外，碳吸收量呈现上升趋势，而碳排放量呈现下降趋势，导致农田生态系统碳足迹呈现下降趋势，农田生态系统表现出较大的碳生态盈余，可以为江苏省工业发展提供绿色保障，对保护环境、促进生态建设具有十分重要的意义。

本文依据统计数据，在计算碳吸收总量时选取了研究区内的 10 种主要的农作物，并未把全部农作物种类计算在内，一定程度上影响到了计算的精度。其次，本文以相关统计数据为计算依据，相关数据均来自国内外相关文献和统计年鉴数据，在江苏省农田生态系统碳足迹计算中不一定完全适用，计算结果尚存在一定的不确定性。农业生产过程中各项投入品的碳排放系数是一个变量，会随着时间、区域和作物类型的不同而发生变化，但由于关于碳排放系数研究的缺乏，本研究中均采用的现有研究文献中常用的计算系数，未能将所有的农业生产活动和所有的农作物计算在内，这也在一定程度上影

响了计算的准确性。此外,随着农作物品种的更新迭代,计算中的经济系数存在一定的误差,如部分超级稻的经济系数已经超过 0.60,而本研究中的计算系数则偏低,可能导致农作物的碳吸收量被高估;此外,没有考虑土壤固碳、土壤呼吸和农田温室气体排放,这也会影响结果的精确度。鉴于这些可能会影响农田生态系统碳足迹估算的因素,要求进一步深入研究符合区域环境的碳排放系数,确定作物经济系数和农田温室气体的直接排放等,以便于计算区域乃至全国农田生态系统碳排放量提供更准确的数据资料。

基于以上研究结论,为促进江苏省农田生态系统固碳减排,尽早实现碳达峰,提出以下对策和建议:

一是大力发展低碳农业。推动江苏省农田生态系统减排增汇,增加农业废弃物资源化利用。改良农作物种植方式,提高农作物产量的同时,减少化肥农药使用。按照因地制宜的原则施用化肥,大力研发和施用高品质有机肥,减少化肥盲目滥用的现象[13]。积极推广施用低毒、低残留的农药,通过改良施肥技术,持续削减农药施用量。全面回收农药包装废弃物,使用可降解农膜,提高农膜重复利用率。推行高效生态循环种养模式和养殖场标准化建设,推广秸秆还田,实行保护性耕作等措施,有效减少温室气体排放,增强农田生态系统碳汇能力。

二是改良灌溉模式,转变传统的漫灌,采用滴灌、喷灌等方法大大减少碳排放;加快推动农村用能革新,大力开发清洁能源,改良能源消费结构,减少柴油使用量。加大农村散煤治理力度,逐步实现无煤化。通过政策补偿和实施差别电价等政策,逐步推行天然气、电力及可再生能源等清洁能源代替柴油和散煤,形成多途径、多渠道减少农村民用柴油、散煤使用的局面,在保持经济稳定增长的同时,减少能源消费引起的碳排放。

三是改良农作物品种,培育良种,大面积推广种植新品种,增加农作物的碳吸收量,增强农田生态系统碳汇能力,减少碳足迹,增大碳生态盈余。改善农业生产技术和管理方式,提高农作物复种指数,既有利于江苏省粮食安全,又可以进一步增强江苏省农田生态系统碳储量的稳定性;其次,要加强农田基础设施建设,尤其是农田水利设施建设,提高农田抵御自然灾害的能力,稳定和提高农作物单产,以增强农田碳汇能力。

## 参考文献

- [1] 杭晓宁,张健,等. 2006-2015年重庆市农田生态系统碳足迹分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(5): 524-531.
- [2] Paustian, K., Andr n, O., Janzen, H.H., et al. (2010) Agricultural Soils as a Sink to Mitigate CO<sub>2</sub> Emissions. *Soil Use and Management*, **13**, 230-244. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>
- [3] 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[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208.
- [4] 许萍萍,赵言文,陈颀明,等. 江苏省农田生态系统碳源/汇、碳足迹动态变化[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 238-243.
- [5] Wackernagel, M. (1999) Ecological Economics Forum: Why Sustainability Analyses Must Include Biophysical Assessments. *Ecological Economics*, **29**, 13-15. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00071-8)
- [6] 王梁,赵杰,陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 133-141.
- [7] 伍芬琳,李琳,张海林,陈阜. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [8] 田云,李波,张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2011, 11(1): 59-63.
- [9] West, T.O. and Marland, G. (2002) A Synthesis of Carbon Sequestration, Carbon Emissions, and Net Carbon Flux in Agriculture: Comparing Tillage Practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **91**, 217-232. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00233-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00233-X)
- [10] 李波,张俊飏,李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86.

- [11] 杨皓然, 宋戈, 杨光, 张雪, 周春风. 潍坊市农田生态系统碳源(碳汇)及其碳足迹变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 82-88.
- [12] 李玉波, 刘国辉, 许清涛, 刘诚敏, 王硕, 崔祥龙. 吉林省农田生态系统碳源/汇及碳足迹分析[J]. 白城师范学院学报, 2020, 34(5): 37-44.
- [13] 曹明霞, 高珊, 李丹. 农业农村碳排放及其与现代化水平的关系——基于江苏省的实证分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 219-221, 236.