



## 欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

## 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析

谢婷,张慧,苗洁,宋明伟,曾艳琴

引用本文:

谢婷,张慧,苗洁,等.湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):839-848.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0494

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究

田志会,马晓燕,刘瑞涵 农业资源与环境学报.2015(6):603-612 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0101

基于京津翼一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究 田志会,刘瑞涵

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 167-173 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0222

河北北戴河区农田生态系统服务功能价值测算研究

刘小丹,赵忠宝,李克国 农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 390-396 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0005

基于土地利用的北方农牧交错区碳固定和土壤保持时空变化

常虹,杨武,石磊,刘亚红,邱晓,伊风艳,孙海莲 农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 484-493 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0310

接种功能内生细菌降低作物体内POPs污染

孙凯,李舜尧 农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 397-404 https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0080



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业资源与环境学报 2021, 38(5): 839-848

Journal of Agricultural Resources and Environment

谢婷,张慧,苗洁,等.湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):839-848. XIE T, ZHANG H, MIAO J, et al. Greenhouse gas emission characteristics and source/sink analysis of farmland ecosystem in Hubei Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 839-848.



# 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析

## 谢婷1,张慧2,苗洁1\*, 宋明伟1,曾艳琴3

(1.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070;2.武汉工程大学化学与环境工程学院,武汉 430205;3.枝江市环境监测站, 湖北 宜昌 443200)

摘 要:为了深入了解湖北省农田生态系统的源/汇变化特征,采用《省级温室气体清单编制指南》和IPCC(政府间气候变化专门 委员会)2014年推荐的温室气体计算方法,利用2007—2017年湖北省农作物产量、耕地面积等相关统计数据及土壤检测数据,对 湖北省农田生态系统的源/汇特征进行分析。结果表明:湖北省农田生态系统的温室气体排放呈先增后降趋势,总体分为较快增 长阶段(2007—2010年)、缓慢增长阶段(2011—2014年)和缓慢下降阶段(2015—2017年)三个阶段;农作物碳吸收量波动较大,不 同农作物的碳吸收量不同,其中水稻、小麦、油菜籽、玉米的碳吸收量较高,分别占农田生态系统碳吸收总量的44.01%、14.11%、 10.66%、9.24%;单位年内,农作物碳吸收量高于温室气体排放量,湖北省农田生态系统具有较强的"汇"功能,然而农作物碳吸收 量并不稳定,容易受到微生物分解和秸秆燃烧的影响而减少;2007—2017年农田耕地土壤有机碳增量为13.52 Tg,耕地土壤呈现 "汇"的特征。研究表明,湖北省农田生态系统整体呈现"汇"的状态,农作物碳吸收量对农田生态系统源/汇特征变化具有较大影 响。适当增加水稻、玉米、芝麻等碳吸收强度较高的农作物种植量,减少秸秆燃烧量,有利于维持农田生态系统"汇"特征,减少向 系统外排放温室气体。

关键词:农田生态系统;源;汇;农作物碳吸收;温室气体排放

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)05-0839-10 **doi**: 10.13254/j.jare.2020.0494

#### Greenhouse gas emission characteristics and source/sink analysis of farmland ecosystem in Hubei Province

XIE Ting<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, MIAO Jie<sup>1\*</sup>, SONG Mingwei<sup>1</sup>, ZENG Yanqin<sup>3</sup>

(1.College of Resources and Environment of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.Wuhan Institute of Technology School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan 430205, China; 3. Zhijiang Environmental Monitoring Station, Yichang 443200, China)

Abstract: The greenhouse gas calculation method recommended by the *Provincial Greenhouse Gas Inventory Guidelines* and IPCC(2014) was adopted to analyze and understand the source/sink characteristics of farmland ecosystems in Hubei Province based on relevant statistical data such as crop yield, cultivated land area, and soil testing data from 2007 to 2017. Results showed that the greenhouse gas emission of farmland ecosystems in Hubei Province showed a trend of first increasing and then decreasing, which was generally divided into three stages: a rapid growth stage (2007—2010), slow growth stage (2011—2014), and slow decline stage (2015—2017). The carbon absorption capacity of crops fluctuated greatly, with different crops having different carbon absorption capacities. The rice, wheat, rapeseed, and corn had higher carbon absorption capacities, which respectively accountted for 44.01%, 14.11%, 10.66%, and 9.24% of the total carbon absorption of farmland ecosystem. In a unit year, crops absorbed more carbon than other greenhouse gases. Farmland ecosystems in Hubei Province had a strong sink function. However, the carbon absorption of crops was not stable and was easily reduced by microbial decomposition and straw burning. From 2007 to 2017, the organic carbon increment of farmland soil was 13.52 Tg and the cultivated soil

收稿日期:2020-09-07 录用日期:2020-11-19

\*通信作者:苗洁 E-mail:mjnx@mail.hzau.edu.cn

作者简介:谢婷(1995—),女,江西新余人,硕士研究生,主要研究方向为区域环境与生态系统。E-mail:2934778260 @qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41101494);中央高校基本科研业务费专项(2662018JC056)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41101494); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2662018JC056)

#### 农业资源与环境学报·第38卷·第5期

showed sink characteristics. Results showed that the farmland ecosystem in Hubei Province was in an overall sink state and the amount of crop carbon absorption had a great influence on the change of the source/sink characteristics of farmland ecosystems. Appropriately increasing crops with high carbon absorption intensity, such as rice, corn, and sesame, and reducing straw burning is conducive to maintaining the sink characteristics of farmland ecosystems and reducing the emission of greenhouse gases out of the system. **Keywords**: farmland ecosystem; source; sink; crop carbon absorption; greenhouse gas emissions

气候变化及其不利影响已经成为人类共同关心 的问题",大多数学者的研究集中于温室气体来源、 减排及碳固定。农田生态系统是人类活动最为频繁 的系统,是主要的大气"源"与"汇"。定量分析区域农 田生态系统的"源"与"汇"差异及特征是研究该区域 温室减排与碳固定措施的前提。目前有关农田生态 系统"源"与"汇"的研究比较丰富,主要的研究方向有 农田生态系统的碳循环[2-3]、碳收支[4]、碳足迹[5-8]、碳结 构<sup>191</sup>、碳平衡<sup>1101</sup>、碳源/汇<sup>111-121</sup>等,具体为农田生态系统 "源"与"汇"的时空特征分析[13-14]、结构特征分析、影 响因素分析[15-16]等。在现有的农田生态系统"源"与 "汇"研究<sup>[8-11]</sup>中,通常未考虑耕地土壤的碳固定作用, 有关农作物与耕地土壤整体的农田生态系统"源"与 "汇"的研究较少。对温室气体"源"与"汇"的定义也 不统一,部分研究将温室气体"源"与"汇"定义为碳源 与碳汇[13-14],也有研究仅将含碳元素的温室气体"源" 与"汇"定义为碳源与碳汇[15-16]。

农田生态系统主要温室气体包括CO2、CH4、N2O, 主要排放源包括稻田CH4排放、农用地N2O排放、土 壤呼吸带来的CO2排放等。土壤呼吸可以分为自养 呼吸和异养呼吸,自养呼吸主要来自根呼吸,是根系 通过呼吸作用把光合作用合成的碳水化合物氧化分 解并释放出能量和CO2的过程<sup>[17]</sup>;土壤异养呼吸则是 土壤微生物对有机碳的分解,包括土壤有机质分解时 的微生物呼吸、凋落物呼吸及根际微生物呼吸118,是有 机质进入土壤后,在土壤微生物分泌的胞外酶的作用 下降解,然后在微生物体内发生代谢,最终彻底分解释 放出CO<sub>2</sub>的过程<sup>[17]</sup>。根据IPCC(政府间气候变化专门 委员会)第五次气候变化评估报告,农业温室气体排放 仅包括稻田CH4排放、农用地N2O排放,不包括CO2排 放。这是由于土壤呼吸带来的CO<sub>2</sub>排放过程复杂、影 响因素众多,且与植物光合作用处于动态平衡。因此, 本研究界定的农田生态系统温室气体仅包括稻田 CH4 排放和农用地N<sub>2</sub>O排放。

为避免概念混淆,采用《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)<sup>[19]</sup>的"源"与"汇"定义,即"源"指向大 气排放温室气体、气溶胶或温室气体前体的任何过 程或活动;"汇"指从大气中清除温室气体、气溶胶或 温室气体前体的任何过程、活动或机制,并考虑了农 作物与耕地土壤的温室气体排放及碳固定变化特 征。本研究在省域尺度上研究农田生态系统的"源" 与"汇",分析农田生态系统"源"与"汇"变化特征及其 地区差异,可为区域温室气体减排和碳固定提供理论 依据。

## 1 材料与方法

#### 1.1 农田生态系统源计算

1.1.1 温室气体排放计算

本研究界定的农田生态系统温室气体排放仅包括稻田CH4排放和农用地N2O排放。根据《省级温室 气体清单编制指南》<sup>[20]</sup>和IPCC(2014)<sup>[21]</sup>推荐计算方法,温室气体排放量(*C*emissions,以CO<sub>2</sub>-eq计)计算公式如下:

$$C_{\text{emissions}} = \left(\sum_{i}^{n} F_{\text{CH}_{4}-i} \times A_{i}\right) \times 28 + (E_{\text{N},0-\text{[f]}} + E_{\text{N},0-\text{[f]}}) \times 265$$
(1)

 $E_{N_{2}0-\underline{i}} = (N_{\ell \mathbb{R}} + N_{\sharp \mathbb{R}} + N_{\hbar \overline{H}}) \times F_{\underline{i}}$  (2)

(3)

 $E_{N_20-m} = N_{\pi} + N_{\pi}$ 

式中: $F_{CH_4-i}$ 为不同水稻类型的CH<sub>4</sub>排放因子,kg·hm<sup>-2</sup>; $A_i$ 为对应该排放因子水稻的播种面积,hm<sup>2</sup>;  $E_{N_2O-\bar{a}}$ 、 $E_{N_2O-\bar{m}}$ 分别表示农用地直接、间接N<sub>2</sub>O排放。  $E_{N_2O-\bar{a}}$ 包括化肥氮N<sub>4</sub>舰(氮肥和复合肥中的氮)、粪肥 氮N<sub>类</sub>肥、秸秆还田氮N<sub>4</sub>舰(地上秸秆还田氮和地下根 氮); $F_{\bar{a}k}$ 为N<sub>2</sub>O的直接排放因子; $E_{N_2O-\bar{m}}$ 包括施肥土 壤、粪便氮氧化物和氨挥发经过大气氮沉降而引起的 N<sub>2</sub>O排放,以及土壤淋溶或径流损失进入水体而引起 的N<sub>2</sub>O排放,具体相关排放因子及参数采用《省级温室 气体清单编制指南》推荐值(表1和表2);28和265分 别为IPCC(2014)报告<sup>1211</sup>推荐的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的全球变暖 潜能值。

1.1.2 温室气体排放强度

单位种植面积下的温室气体排放强度(CF<sub>c</sub>,t・hm<sup>-2</sup>,以CO<sub>2</sub>-eq计)和单位产量下的温室气体排放强度(CF<sub>x</sub>,t・t<sup>-1</sup>,以CO<sub>2</sub>-eq计)<sup>[22]</sup>,表达式如下:

#### 表1 稻田甲烷排放因子推荐值(kg·hm<sup>-2)[20]</sup>

区域	单季稻Single cropping rice		双季早稻 Double season rice		双季晚稻Double cropping late rice	
Area	推荐值Recommended value	范围Range	推荐值 Recommended value	范围Range	推荐值 Recommended value	范围Range
中南、华南	236.7	170.2~320.1	241.0	169.5~387.2	273.2	185.3~357.9

注:表中数据以稻田单位面积排放的CH4计。

Note: Data in the table are calculated in CH4 amount per hectare of rice field.

#### 表2 农用地氧化亚氮排放因子推荐值(kg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>

Table 2 The emission factor of nitrous oxide from agricultural land

 $(kg \cdot kg^{-1})^{[20]}$ 

区域Area	推荐值 Recommended value	范围Range
湖北	0.010 9	0.002 6~0.022 0

注:表中数据以单位N输入量排放的N2O-N计。

Note: Data in the table are calculated in  $N_2\mathrm{O}\text{-}N$  amount per kilogram of N input.

 $CF_c = C_{emissions} / A$  (4)

 $CF_{Y} = C_{\text{emissions}} / Y \tag{5}$ 

式中:A表示播种面积,hm<sup>-2</sup>;Y为农作物产量,t。

1.2 农田生态系统汇估算

#### 1.2.1 农作物碳吸收

农作物在整个生长发育周期内,通过光合作用吸收 CO<sub>2</sub>并合成含碳有机物,其中部分有机物作为农作物的组织及器官而沉积下来;一部分含碳有机物通过 呼吸作用及根分泌物的形式又再次释放到外界。通过植物干质量计算农作物在生长发育过程中吸收和 固定的碳量,公式如下;

$$C_{\rm P} = \sum_{i}^{n} [C_i \times Q_i \times (1 - W_i) / H_i] \times \frac{44}{12}$$
(6)

式中:*i*为第*i*种作物类型;*C*<sub>P</sub>为作物全生育期碳的吸 收总量;*C*<sub>i</sub>为第*i*种作物合成单位有机质(干质量)所 吸收的碳;*Q*<sub>i</sub>为第*i*种作物经济产量;*W*<sub>i</sub>为第*i*种作物 收获部分的含水率;*H*<sub>i</sub>为第*i*种作物的经济系数。各 农作物经济系数和含水率系数见表3。44/12为C与 CO<sub>2</sub>的换算比。

$$N_{\rm t} = C_{\rm emissions} - C_{\rm P} \tag{7}$$

式中:N,为农田生态系统农作物净碳固定量;C<sub>emissions</sub>为系统温室气体排放量。

## 1.2.2 农田土壤有机碳储量

土壤样品采自耕层(0~20 cm),土壤有机质指标 采用油浴加热重铬酸钾氧化-容量法进行检测分析。 土壤有机碳含量由 Bemmelen 转换系数法<sup>[23]</sup>计算得 出。农田系统土壤碳汇来源主要为农作物残骸、化肥 与农家肥的投入,由于土壤碳汇是动态的,其内部运

#### 表3 农作物经济系数和含水率系数<sup>[6,8-9]</sup>

Table 3 Crop economy coefficient and moisture content

 $\mathrm{coefficient}^{\scriptscriptstyle[6,8-9]}$ 

作物类型 Crops	经济系数 Economic coefficient(H)	根冠比 Root top ratio	碳吸收率 Carbon absorption rate(C <sub>i</sub> )	含水率 Water content (W <sub>i</sub> )
水稻	0.450	0.125	0 414 4	0.12
小麦	0.434	0.166	0.485 3	0.12
玉米	0.438	0.170	0.470 9	0.13
大豆	0.350	0.130	0.450 0	0.13
油菜籽	0.250	0.150	0.450 0	0.10
花生	0.430	0.200	0.450 0	0.10
芝麻	0.145	0.200	0.450 0	0.15
棉花	0.100	0.200	0.450 0	0.08
薯类	0.675	0.050	0.422 6	0.70
甘蔗	0.500	0.260	0.450 0	0.50
麻类	0.100	0.200	0.450 0	_
烟草	0.550	0.200	0.450 0	0.85
蔬菜	0.625	0.250	0.450 0	0.90
瓜果	0.700		0.450 0	0.90

作机制极为复杂,而且短时间内不能形成稳定的碳 汇,因此本研究采用2017年与2007年的检测数据,分 析10年间的地区土壤碳固定水平,公式如下:

 $SOCD=SOCC \times H \times BD(1-V)/100$ (8)

 $SOCS = (A_i \times SOCD_i) \times 10$ (9)

$$d(SOCS) = SOCS_n - SOCS_1 \tag{10}$$

式中:SOCD为土壤有机碳(以C计)密度,kg·m<sup>-2</sup>;*i*为 不同地区或农作物类别;SOCC为土壤有机碳(以 C计)含量,g·kg<sup>-1</sup>;*H*为土层厚度,cm;BD为土壤容重, g·cm<sup>-3</sup>;*V*为土壤中直径>2 mm的砾石所占的体积比 例,%,由于抽样农田中的砾石量可忽略不计,因此*V*= 0。SOCS为土壤有机碳存储量,t;*A*;为第*i*种耕地土壤 面积,hm<sup>2</sup>;SOCD<sub>i</sub>为相对应耕地的有机碳密度均值, kg·m<sup>-2</sup>;*d*(SOCS)是土壤有机碳蓄积量在*n*-1年的变 化量<sup>[24]</sup>:正值表示固碳量;负值表示过去*n*-1年有机 碳库的损失量;SOCS<sub>i</sub>和SOCS<sub>a</sub>分别表示基准年(2007 年)和2017年的SOCS值。

#### 1.3 数据来源

农业活动水平数据,包括农作物产量、种植面积、 化肥(农家肥)施用量等,来源于《湖北农村统计年 鉴》<sup>[25]</sup>;土壤数据来源于2007年与2017年湖北全省 5727个耕地土壤监测数据。

## 2 结果与分析

## 2.1 农田生态系统温室气体排放特征

## 2.1.1 农作物生产温室气体排放特征

2007—2017年湖北省农田生态系统温室气体排 放量(以CO<sub>2</sub>-eq计)变化趋势可分为三个阶段:第一 阶段为2007—2010年,处于较快增长阶段,排放量 由2007年的2243.50万t增长到2010年的2600.14 万t,年均增长率为5.05%;第二阶段为2011—2014 年,处于缓慢增长阶段,排放量年均增长率为1.53%; 第三阶段则为缓慢下降阶段(2015—2017年),温室 气体排放量由2015年的2594.78万t下降到2017年 的2480.34万t,年均增长率为-2.93%。2007—2017 年,湖北省农田生态系统温室气体排放量最高值出现 在2014年,总体变化趋势较为稳定(图1a)。 稻田甲烷排放和农用地氧化亚氮排放是农田生态系统温室气体排放的两大来源。根据图 1b,稻田 甲烷排放量明显高于农用地氧化亚氮排放量,甲烷排 放量年均占比约为61.08%。2007—2017年,湖北省 农田生态系统稻田甲烷排放量年际波动量小,总体变 化趋势较为稳定,农用地氧化亚氮排放量总体波动较 大,说明农用地氧化亚氮排放量的变化是引起农田生 态系统温室气体排放总量波动的主要原因。 2.1.2 农作物生产温室气体排放强度特征

农田生态系统的温室气体排放强度总体波动值 区间较小(图2),2007—2017年,单位种植面积温室 气体排放强度(CFc)为5.11~5.56 t·hm<sup>-2</sup>,波动差值为 0.45 t·hm<sup>-2</sup>,年均CFc为5.47 t·hm<sup>-2</sup>。2013年以前,CFc 基本维持在5.55 t·hm<sup>-2</sup>,2013年后,CFc总体呈下降趋 势,并且下降趋势明显,单位播种面积所释放的温室 气体逐渐减少。

2007—2017年单位粮食产量温室气体排放强度 (CF<sub>Y</sub>)波动区间为 $0.87\sim0.97$ t·t<sup>-1</sup>,相对于CF<sub>c</sub>,CF<sub>Y</sub>的 波动极为不规律,这可能与粮食产量波动较大有关。 CF<sub>Y</sub>总体呈现分段式变化:2007—2010年为第一阶



Figure 1 Temporal trend and composition structure of greenhouse gas emissions in farmland ecosystem

http://www.aed.org.cn





Figure 2 Trend of greenhouse gas emission intensity of farmland ecosystem

段,CF<sub>Y</sub>呈下降趋势,仅在2010年出现轻微上升;第二 阶段(2011—2015年)和第三阶段(2016—2017年)均 呈递减趋势,并且每一新的阶段的初期CF<sub>Y</sub>值都高于 前一阶段的末期CF<sub>Y</sub>值,出现CF<sub>Y</sub>值回升现象。

2.1.3 农作物生产温室气体空间分布

以2007、2012、2017年为时间节点,农田温室气 体排放空间分布比较稳定,但不同地区存在明显的差 异(图3)。2007—2017年,襄阳市、荆州市、黄冈市是 湖北省农田生态系统温室气体排放的主要贡献城市, 湖北省中部的天门市、潜江市、仙桃市三市和山地林 区的农田生态系统温室气体排放量偏低。CFc较高 水平地区主要集中在湖北省东部及中部地区,CFc基 本维持在6t·hm<sup>-2</sup>以上。农田生态系统温室气体排放 量较高地区的CFc明显低于温室气体排放量较低区 域的CFc:襄阳市、黄冈市的农田温室气体排放量虽 然较高,但单位播种面积和单位粮食产量所排放的温 室气体量却很少;随州市温室气体排放量相对较低, 年排放量处于75~150万t,但其CFc与CFy却较高;潜 江市、鄂州市、天门市等地区的农田温室气体排放量 较少,但相比温室气体排放量较大的地区(如黄冈 市),其CFc与CFy偏高。

## 2.2 农田生态系统碳吸收特征

2.2.1 农作物碳吸收总量特征

农田生态系统农作物的碳吸收随时间变化波动 幅度较大(图4a),2007—2013年,农作物碳吸收呈波 动增长趋势,但自2013年后,农作物碳吸收量总体呈 下降趋势。农田生态系统农作物碳吸收量最高值出 现在2013年,为12834.94万t。2013年以后,农作物 碳吸收量出现负增长,最低负增长率出现在2016年, 为-7.63%,这与当年粮食产量较低有关。农作物的 碳吸收量与农作物种植类别相关,不同的农作物碳吸 收量差异较大(图4b)。碳吸收量较高的4种作物分 别为水稻、小麦、油菜籽、玉米,分别占农田生态系统 碳吸收总量的44.01%、14.11%、10.66%、9.24%。其中 水稻、玉米和蔬菜的碳吸收量随时间表现出比较为明 显的增长趋势,农作物碳吸收总量受水稻等碳吸收量 占比较高的农作物的影响。

#### 2.2.2 地区农作物碳吸收量特征

由图5可知,2007—2017年湖北省单位面积的农 作物碳吸收量(碳吸收强度)年均约为28.57 t·hm<sup>-2</sup>, 整体呈现递增趋势。除十堰市、宜昌市、咸宁市、恩施 自治州、神农架林区外,其他地区的碳吸收强度均高 于湖北省均值。同地区不同时间节点的农作物碳吸 收强度波动较大,其中鄂州市波动最为明显。不同农 作物碳吸收强度随时间波动较大(图6),水稻碳吸收 强度最高,从2007年的22.51 t·hm<sup>-2</sup>上升至2017年的 24.18 t·hm<sup>-2</sup>,增幅为7.42%。其次为玉米,玉米碳吸 收强度随时间呈下降趋势,2017年的碳吸收强度为 16.86 t·hm<sup>-2</sup>,比2007年下降了18.04%。

#### 2.3 农田生态系统土壤碳储量特征

2007、2017年的湖北省土壤有机碳储量见表4, 2017年土壤有机质均值为24.21g·kg<sup>-1</sup>,高于2007年 土壤有机质均值,有机质数据的变异系数均较低;耕 地SOCD的变化不明显,从2007年的3.40 kg·m<sup>-2</sup>到 2017年的3.57 kg·m<sup>-2</sup>,增量仅为0.17 kg·m<sup>-2</sup>(以C 计)。农田土壤有机碳储量由2007年的130.59 Tg增 长到2017年的144.11 Tg,耕地有机碳储量总体呈现 增长趋势,但升幅较小。

## 3 讨论

## 3.1 农田生态系统"汇"特征变化影响因素分析

目前在农田生态系统碳源/汇的研究中,农作物

2021年9月

农业资源与环境学报·第38卷·第5期





Figure 3 Spatial distribution of greenhouse gas emissions in farmland ecosystem

http://www.aed.org.cn







的碳吸收量通常远高于农田温室气体排放量,农田生态系统表现为较强的碳汇功能<sup>[26]</sup>。这与本研究结果 一致:湖北省农田生态系统中的农作物碳吸收量远高 于温室气体排放量,并且年均碳吸收量是温室气体排 放量的4.7倍;耕地土壤有机碳储量从130.59 Tg (2007年)增加到144.11 Tg(2017年),增长了13.52 Tg。湖北省农田生态系统总体呈现"汇"的状态。

根据本研究结果,湖北省农田生态系统温室气体

排放量总体波动较小,近几年(2014—2017年)出现 缓慢下降趋势,农田土壤碳储量总体升幅较小。两者 对农田生态系统"汇"特征变化影响较小,农田温室气 体排放量不会增强农田生态系统由"汇"向"源"转变 趋势。然而,农作物碳吸收总量年际波动较大,并且 固碳并不稳定。农作物固碳的主要部位是作物的茎 叶,农作物秸秆的主要成分为纤维素、半纤维素和木 质素,这些秸秆组成成分经过微生物水解及好氧厌氧







Figure 6 Carbon absorption per unit area of different crops

表4 农田土壤碳储量

Table 4	Carbon	reserves	of	farm	land	soil	
---------	--------	----------	----	------	------	------	--

年份Year	$SOM/(g \cdot kg^{-1})$	CV/%	$SOCD/(kg \cdot m^{-2})$	SOCS/Tg
2007	23.19±0.22	36.51	3.40	130.59
2017	24.21±1.27	32.34	3.57	144.11

注:SOM(有机质)为均值±标准误;CV为SOM的变异系数。

Note: SOM (Soil organic matter) is the mean±SE; CV is the variation coefficient of SOM.

发酵后会再次产生二氧化碳排放到大气中<sup>[27]</sup>。因此 在一定周期下,农作物吸收的碳并不能持久稳定,农 作物秸秆分解和燃烧会削弱并改变农作物碳吸收的 状态,进而改变农田生态系统整体"汇"的状态。缓解 全球气候变暖问题是一个长期的过程,农作物固碳稳 定性比多年生林木低很多。农作物秸秆残骸和所生 产的农业产品最终都会通过燃烧、沤肥、生物肠道消 化及微生物分解等方式将固定的碳又释放到大气 中<sup>[28]</sup>,农作物碳吸收在很大程度上会转变为碳排放。 因此农作物碳固定量是影响农田生态系统"汇"特征 变化的重要因素。

农作物碳吸收量受诸多因素的影响,农作物产量 越高,其碳吸收量也越高<sup>[29]</sup>。除农作物产量外,农作 物的种植类型对作物碳吸收也具有较大影响。由于 不同种类农作物或同种作物不同品种的光合作用速 率、自身理化性质具有差异,它们的碳吸收能力也有 所不同。朱燕茹<sup>[30]</sup>定量分析了不同种类作物对碳吸 收的影响,通过对作物播种面积与相应作物碳吸收量 进行回归分析,发现作物播种面积与碳吸收量具有线 性关系,并且多种粮食作物碳吸收量与播种面积呈正 相关,但不同作物每增加一单位播种面积,其作物碳 吸收量变化都不同。然而,不同农作物的播种面积并

的播种面积这一指标来分析农作物种类对碳吸收的 影响,具有一定的局限性。本研究通过对农作物碳吸 收特征的分析,发现粮食作物的碳吸收总量远高于经 济作物、油料作物,其中水稻碳吸收量最高,这是由于 水稻种植面积远高于其他作物并且水稻是人们主要 的粮食来源。排除面积干扰,通过对比不同农作物的 碳吸收强度,发现不同种类农作物的碳吸收能力有较 大差异。水稻的碳吸收强度最高,年均约为23.28 t· hm<sup>-2</sup>,其次是玉米(18.70 t · hm<sup>-2</sup>)和棉花(15.58 t · hm<sup>-2</sup>)。同样作为粮食作物种植,水稻碳吸收强度是 玉米的1.24倍、小麦的1.49倍;而油料作物中,芝麻的 碳吸收强度较高,年均约为14.61 t·hm<sup>-2</sup>,是花生的 1.26倍、油菜籽的1.17倍。在保证经济社会需求的前 提下,合理地规划农作物种植种类,增加碳吸收强度 较高的农作物的种植面积,在一定程度上可以提高农 作物碳吸收总量,达到农田生态系统增汇的目的。

#### 3.2 农田生态系统固碳减排途径分析

湖北省农田生态系统温室气体排放量整体年际 波动较小,自2014年起,呈现较明显的下降趋势。湖 北省温室气体排放量整体波动较小,但其不同地区温 室气体排放量差异明显。由于在地理气候、社会经济 等方面存在一定差异,不同地区温室气体排放也具有 地区特征,因此不同的地区应当根据其区域特点采取 不同的固碳减排措施。

温室气体排放量低但排放强度高的地区应当优 化产业结构,通过调整农作物种植规模、种植种类对 产业结构进行合理的调整,对耕地面积进行合理规 划,提高单位耕地面积农作物产量。

温室气体排放量高但排放强度低的地区应着重 提高固碳量。不同农作物的碳吸收能力不同,可通过 适当调整不同品种的农作物种植规模,提高农作物总

体碳吸收量。有研究表明土壤呼吸强度会因为高强度的农业生产活动而出现明显的增强趋势,并且较高的土壤呼吸强度会加快土壤有机质的分解,释放所固定的碳<sup>[16]</sup>。因此建议耕地不宜过度频繁地进行农业生产活动,应合理规划种植时间及强度。土壤碳封存主要由植物碳输入驱动,因此可以通过增加农作物产量和采用农作物混合种植方式提高土壤碳储量,例如油菜籽与燕麦混合种植,能够有效地固定有机碳<sup>[31]</sup>。不同植物碳的输入量与其在土壤中分解量和残留比例之间存在差异,HALLAM等<sup>[32]</sup>的研究表明玉米和大豆秸秆在土壤中的残留量与其输入量呈正相关,输入量越多,土壤中的残留比例越高<sup>[32]</sup>。因此选择合适的作物秸秆还田来增加土壤碳输入能够极大地提高农田土壤的碳固定水平。

温室气体排放量和排放强度均较高的地区更应 采取措施减少温室气体的排放量。农田生态系统温 室气体主要为稻田甲烷和农用地氧化亚氮。2007— 2017年农用地氧化亚氮排放量的波动较大,可调控 性较高,因而可以通过加强化肥施用量监控、合理减 少化肥使用量来以及施用长效缓释氮肥的方法来减 少氧化亚氮的排放。本研究发现稻田甲烷排放占农 田生态系统温室气体排放的比例较高,在降低稻田甲 烷排放量方面,水稻田间歇灌溉所排放的甲烷比淹灌 少59%,比常规灌溉少46%<sup>131</sup>。因此可以通过推广间 歇灌溉来减少稻田甲烷排放。水稻的品种不同,在种 植后所排放的甲烷量也会有所不同,通常有1.5~3.5 倍的差别<sup>1341</sup>。因此也可以通过选育和种植新的水稻 品种来达到减少甲烷排放的目的。

#### 4 结论

(1)湖北省农田生态系统温室气体排放量整体呈缓慢下降趋势,农田碳储量升幅较小。

(2)湖北省农田生态系统整体呈现"汇"的状态, 农作物碳吸收量对农田生态系统源/汇特征变化具有 较大影响。

(3)适当增加水稻、玉米、芝麻等碳吸收强度较高的农作物种植面积、减少秸秆燃烧量,有利于维持农田生态系统"汇"特征。

#### 参考文献:

 [1] SUN X Z, ZHOU H L, XIE G D. Ecological functions and their values in Chinese cropland ecosystem[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(4):55–60.

- [2] 尹钰莹, 郝晋珉, 牛灵安, 等. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及 碳效率研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5):918-928. YIN Y Y, HAO J M, NIU L A, et al. Carbon cycle and carbon efficiency of farmland ecosystems in Quzhou, Hebei Province[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 918-928.
- [3] 朱鸿杰, 闫晓明, 何成芳, 等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究 进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 344-351. ZHU H J, YAN X M, HE C F, et al. Effect of returning straw on soil carbon cycle in cropland ecosystem[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(2): 344-351.
- [4] 康霞. 甘肃省农田生态系统碳收支动态[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 123-128. KANG X. Dinamics of carbon absorption and emission of crops in Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6): 123-128.
- [5] 田志会, 马晓燕, 刘瑞涵.北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究[J].农业资源与环境学报, 2015, 32(6):603-612. TIAN Z H, MA X Y, LIU R H, et al. Interannual variations of the carbon footprint and carbon eco-efficiency in agro-ecosystem of Beijing, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32 (6):603-612.
- [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. WANG L, ZHAO J, CHEN S Y. Analysis of ecosystem carbon sources/sinks and carbon footprint in farmland ecosystem of Shandong Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(7):133-141.
- [7] SHE W, WU Y, HUANG H, et al. Integrative analysis of carbon structure and carbon sink function for major crop production in China's typical agriculture regions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 702-708.
- [8] 许萍萍, 赵言文, 陈颢明, 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. XU P P, ZHAO Y W, CHEN H M, et al. Dynamic change of carbon source/sink and carbon footprint of farmland ecosystem in Jiangsu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 238-243.
- [9] 佘玮,黄璜,官春云,等.我国主要农作物生产碳汇结构现状与优化 途径[J].中国工程科学,2016,18(1):114-122. SHE W, HUANG H, GUAN C Y, et al. The current carbon sink structure of China's staple crop production and its optimization approach[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(1):114-122.
- [10] 牛海生,李大平,张娜,等.不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳 平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):749-755. NIU H S, LI D P, ZHANG N, et al. Effect of irrigation modes on carbon budget in winter wheat field[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23 (5):749-755.
- [11] 张婷, 蔡海生, 张学玲. 基于碳足迹的江西省农田生态系统碳源/ 汇时空差异[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6):767-773. ZHANG T, CAI H S, ZHANG X L. Spatial - temporal dynamics of farmland ecosystem carbon source/sink based on carbon footprint in Jiangxi Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6):767-773.
- [12] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 等. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化

#### 2021年9月

及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24):8822-8834. LI M Q, LIU S L, WU X, et al. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24):8822-8834.

- [13] 范大莎,杨旭,吴相利,等.东北三省农田生态系统碳排放时空分 异特征及驱动因素研究[J].环境科学学报,2017,37(7):2797-2804. FAN D S, YANG X, WU X L, et al. Spatial-temporal differentiation of agro-ecosystem carbon emissions in northeast China and its driving factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7):2797-2804.
- [14] 翁翎燕,朱振宇,韩许高,等.江苏省农田植被净碳汇时空格局分析[J].农业工程学报,2018,34(6):233-241. WENG LY, ZHU ZY, HAN XG, et al. Spatial-temporal pattern of net carbon sink of farmland vegetation in Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6):233-241.
- [15] 徐昔保,杨桂山,孙小祥.太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳 交换及影响因素[J].生态学报,2015,35(20):6655-6665. XU X B,YANG G S, SUN X X. Analysis of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20):6655-6665.
- [16] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907. MA X Z, WANG Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17):5898-5907.
- [17] 王兵,姜艳,郭浩,等. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究[J]. 土壤 通报, 2011, 42(2):483-490. WANG B, JIANG Y, GUO H, et al. Soil respiration and its three biological processes[J]. *Chinese Journal* of Soil Science, 2011, 42(2):483-490.
- [18] KUZYAKOV Y, GAVRICHKOVA O. Review: Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: A review of mechanisms and controls[J]. Global Change Biology, 2010, 16:3386-3406.
- [19] UN. United Nations framework convention on climate change[R]. Rio de Janeiro: UN Conference on Environment and Development, 1992.
- [20] 郭旋, 张良茂, 胡荣桂, 等. 华中地区种植业生产碳排放驱动因素 分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5):695-701. GUO X, ZHANG L M, HU R G, et al. Influencing factor decomposition of planting carbon emission in central China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(5):695-701.
- [21] IPCC. Climate change 2014:Synthesis report[R]//Pachauri R K, Meyer L A. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva:IPCC, 2014:87.
- [22] DENG X F, CHEN X J, MA W Z, et al. Baseline map of organic carbon stock in farmland topsoil in east China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 254:213–223.
- [23] 陈富荣,梁红霞,邢润华,等.安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇 (源)研究[J].土壤通报,2017,48(4):843-851. CHENFR,LIANG H X, XING R H, et al. Soil carbon sequestration potential and organic carbon sink/source in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Soil Sci-

ence, 2017, 48(4):843-851.

- [24] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储 量的变化[J]. 地理学报, 2019, 73(11):2150-2167. XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 73(11):2150-2167.
- [25] 湖北省统计局. 湖北农村统计年鉴(2007—2017)[M]. 北京:中国统计出版社, 2008—2018. Hubei Provincial Bureau of Statistics. Hubei rural statistics yearbook(2007—2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008—2018.
- [26] 刘巽浩,徐文修,李增嘉,等.农田生态系统碳足迹法:误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率(续)[J].中国农业资源与规划,2014,35(1):1-7. LIUXH,XUWX,LIZJ, et al. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(1):1-7.
- [27] HAN Y, YAO S H, JIANG H, et al. Effects of mixing maize straw with soil and placement depths on decomposition rates and products at two cold sites in the mollisol region of China[J]. *Soil Tillage Research*, 2020, 197:104519.
- [28] ZHANG Y, JIANG Y, LI Z J, et al. Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH<sub>4</sub> emissions[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 208:86–93.
- [29] 王元林. 应用腐杆剂对于玉米秸秆腐熟速度及土壤养分含量的影响[J]. 农业与技术, 2016, 36(22): 34-35, 79. WANG Y L. Effect of straw rot agent on the ripening rate and soil nutrient content of corn stalk[J]. Agriculture & Technology, 2016, 36(22): 34-35, 79.
- [30] 朱燕茹. 山东省农田生态系统碳源碳汇时空格局演变[D]. 济南: 山东师范大学, 2019. ZHU Y R. Spatial-temporal pattern evolution of carbon source and carbon sink in farmland ecosystem of Shandong Province[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019.
- [31] FAN J, MCCONKEY B G, LIANG B C et al. Increasing crop yields and root input make Canadian farmland a large carbon sink[J]. Geoderma, 2019, 336:49-58.
- [32] HALLAM M J, BARTHOLOMEW W V. Influence of rate of plant residue addition in accelerating the decomposition of soil organic matter [J]. Soil ence Society of America Journal, 1953, 17:365–368.
- [33] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 稻田甲烷排放及其控制[J]. 作物杂志, 1998(3):10-11. WANG Z Y, XU Y C, LI Z, et al. Methane emission from rice fields and its control[J]. *Crops*, 1998(3):10-11.
- [34] 黄耀.中国的温室气体排放、减排措施与对策[C]//全国环境立法 与可持续发展国际论坛.北京:全国人大环境与资源保护委员会, 2005:555-565. HUANG Y. China's greenhouse gas emissions, mitigation measures and countermeasure[C]//National international forum on environmental legislation and sustainable development. Beijing: Environment and Resources Protection Committee of the NPC, 2005:555-565.