



郝小雨. 黑龙江省 30 年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化[J]. 黑龙江农业科学, 2021(8):97-104.

黑龙江省 30 年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化

郝小雨

(黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为明确黑龙江省农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化,基于 1990—2019 年黑龙江省农作物播种面积、产量和农业投入等数据,利用农田生态系统碳足迹模型,对黑龙江省农田生态系统碳排放、碳吸收和碳足迹进行估算。结果表明:黑龙江省农田生态系统碳排放呈“阶梯状”增加趋势,年均增加 7.0%,其中化肥施用和灌溉是碳排放的主要贡献因子。黑龙江省农田生态系统单位面积碳排放量在 164.8~313.7 kg·hm⁻²,低于全国平均水平。黑龙江省农田系统具有较强的碳汇能力,碳吸收量明显高于碳排放量,两者比例为 19.4:1,其中玉米、水稻和豆类作物碳吸收量较高,占比分别为 39.4%、31.4%和 14.0%。黑龙江省农业生态系统的碳足迹呈现波动增加趋势,但碳足迹占同时期作物播种面积的比例较低(4.2%~6.6%)。可见,黑龙江省农田生态系统处于良好的碳生态盈余状态,具有较好的生态屏障作用。

关键词:农田生态系统;碳排放;碳吸收;碳足迹;黑龙江省

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中指出,2011 年大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三种温室气体浓度远超冰芯记录的过去 80 万年以来最高浓度^[1],而农业生产活动贡献了全球范围内约 14% 的人为温室气体排放量和 58% 的非人为 CO₂ 排放^[2]。据测算,我国农田土壤 N₂O 总排放量约为 0.19~0.5 Tg·a⁻¹,占我国

农业源温室气体总排放量的 19%~25%^[3];我国稻田 CH₄ 总排放量为 7.7 Tg·a⁻¹,约占我国农业源温室气体总排放量的 20%^[4]。另一方面,农田生态系统是温室气体特别是 CO₂ 重要的汇,植物通过光合作用将大气中 CO₂ 变为有机碳进入土壤,进而稳定和增加土壤碳库^[5]。据郑聚锋等^[6]估算,中国农田土壤的表土理论固碳容量在 2 pg 水平。可见,农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,兼具碳源和碳汇双重作用,是陆地生态系统碳循环的重要环节^[7-9],正确评价农田生态系统碳源和碳汇强度,对于农业生产中制订合理的减排策略具有积极意义。

收稿日期:2021-04-20

基金项目:黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX1310);国家重点研发计划项目(2017YFD0300503-02);黑龙江省农业科学院高效、绿色现代农业示范项目(TGY-2020-37)。

作者简介:郝小雨(1981—),男,博士,副研究员,从事农田养分循环研究。E-mail: xiaoyuhao1981@sina.com。

Abstract: Shandong province is the key production area of grain crops and cash crops in China. In order to promote the construction of agricultural modernization in Shandong Province, this study constructed the evaluation index system of water poverty and agricultural modernization in Shandong province, and used the coupling coordination degree model to analyze the coupling coordination relationship between water poverty and agricultural modernization in various regions of Shandong province in 2018. The result found that most of the area per capita water resources in Shandong Province, ground water quantity, and water resource utilization efficiency were low. The water poverty and coupling coordination degree in most of the agricultural modernization was in a state of near disorders and barely coordination, in most areas of Shandong province water poverty and coupling coordination degree of agricultural modernization in a below average level, the regional poverty index and water index was below average level of agricultural modernization, and the regional water poverty and coupling obviously below the coordination degree of agricultural modernization. It is suggested that Shandong Province should continue to improve water resource utilization efficiency, and agricultural production efficiency, agricultural output value, and promote the coupled and coordinated development of water poverty and agricultural modernization.

Keywords: agricultural modernization; water poverty; coupling coordination; Shandong Province

碳足迹(carbon footprint)是指一定的时间和空间边界内,某种活动引起的(或某种产品生命周期内积累的)直接或间接的CO₂排放量的度量,可用来评估农田系统或某项农业措施的优劣^[10-11]。农田碳足迹是指人类在农田上进行生产活动形成的碳流量,即吸收农田生产性投入而引起的直接或间接化石燃料燃烧所排放的CO₂量所需要的生产性土地面积,是生态足迹的一部分^[12]。刘巽浩等^[13]对1950年以来的全国性农田系统碳流进行分析并对典型案例加以验证,指出农田生态系统碳平衡都是固碳>耗碳,具有净固碳作用。还有学者分析了我国不同省份的农田生态系统碳足迹变化^[12,14-19],而黑龙江省农田生态系统碳足迹时序变化尚不明晰。

黑龙江省作为我国重要的粮食产区,粮食产量连续3年超过7500万t,2020年达到7541万t,占全国粮食总产量的11.3%。与此同时,随着农田耕作水平的持续提升,农业机械的大量使用,以及农用化学品的大量投入,农业生产引起的碳排放问题日益突出。因此,本研究以黑龙江省农田生态系统为研究对象,收集整理1990—2019年黑龙江省相关统计数据,计算和评估主要粮食作物、经济作物和蔬菜瓜果类作物的碳排放、碳吸收和碳足迹时序变化,明确影响碳足迹的主要因素,旨在为促进黑龙江省农田生态系统固碳减排、发展低碳农业和保障农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 确定系统边界

本研究中,以黑龙江省农田生产的技术系统为边界,将化肥施用、农药使用、农膜使用、农业机械应用、农业灌溉等作为主要的碳排放途径;将黑龙江省主要粮食作物(玉米、水稻、小麦、豆类、谷子、高粱、薯类)、经济作物(油料、甜菜、麻类、药材、烟叶、饲料)和蔬菜瓜果类作物全生育期吸收

的碳作为碳吸收的主要途径。

1.2 数据收集

黑龙江省农作物播种面积、经济产量、化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量、农用柴油使用量、农业机械总动力以及有效灌溉面积等数据参考1990—2020年《黑龙江统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

1.3 碳排放量计算

农田生态系统的碳排放主要由农业生产资料的投入(化肥、农药和农膜)、农业生产燃料动力(农用机械用电、农产品加工用电和农用机械柴油消耗)和农田耕作、灌溉等产生的间接碳排放。计算方法为^[14-15]:

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

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

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

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

$$E_c = (A_c \times D) + (W_c \times F) \quad (5)$$

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

式中: E 、 E_f 、 E_p 、 E_m 、 E_c 、 E_i 分别代表农田生态系统的碳排放总量以及化肥施用、农药使用、农膜使用、农业机械应用、农业灌溉产生的碳排放量,kg; G_f 、 G_p 、 G_m 、 A_c 、 W_c 、 A_i 分别代表化肥施用量,kg;农药使用量,kg;农膜使用量,kg;农作物种植面积,km²;农业机械总动力,kW;灌溉面积,km²;A、B、C、D、F、G分别为化肥(氮肥、磷肥、钾肥和复合肥)、农药、农膜、农作物、农业机械和灌溉的碳排放系数(表1)^[14-16,20-22]。

$$E_{qm} = E/A_i \quad (7)$$

$$E_{qf} = E/Y \quad (8)$$

式中: E_{qm} 代表农田生态系统单位面积碳排放强度,kg·hm⁻²; E_{qf} 代表农田生态系统单位产量碳排放强度,kg·t⁻¹; A_i 为农作物总播种面积,km²; Y 为农作物总产量,t。

表1 农田生态系统投入品碳排放系数

项目	化肥/(kg·t ⁻¹)				农药/ (kg·kg ⁻¹)	农膜/ (kg·kg ⁻¹)	农作物/ (kg·hm ⁻²)	灌溉/ (kg·hm ⁻²)	农业机械总动 力/(kg·kW ⁻¹)
	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	复合肥					
排放系数	1740	165.09	120.28	380.97	4.9341	5.18	16.47	266.48	0.18

1.4 碳吸收量计算

农田生态系统中农作物全生育期的碳吸收量计算方法如下^[14-15]:

$$C_i = \sum C_i \times Y_i \times (1 - W_i) \times (1 + R_i) / H_i \quad (9)$$

式中: C_i 为农田生态系统作物碳吸收总量,t; C_i 为*i*类农作物的碳吸收率; Y_i 为*i*类农作物的经济产量,t; W_i 为*i*类农作物经济产品的含水率; R_i 为第*i*类农作物的根冠比系数; H_i 为*i*类农作物的经济系数(表2)^[12,14-16,23-25]。

$$C_{qm} = C_t / A_t \quad (10)$$

$$C_{qc} = C_t / Y \quad (11)$$

式中: C_{qm} 代表农田生态系统单位面积碳吸收

强度, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_{qc} 代表农田生态系统单位产量碳

吸收强度, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

表 2 主要农作物碳吸收率、含水率、经济系数和根冠比

作物	玉米	水稻	小麦	谷子	高粱	豆类	薯类	油料	麻类	甜菜	烟叶	蔬菜	瓜果
碳吸收率	0.471	0.414	0.485	0.450	0.450	0.450	0.423	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
含水率	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.70	0.09	0.13	0.70	0.17	0.90	0.90
经济系数	0.40	0.45	0.40	0.40	0.35	0.35	0.70	0.25	0.10	0.60	0.55	0.65	0.70
根冠比	0.16	0.60	0.40	0.20	0.27	0.13	0.18	0.04	0.40	0.72	0.32	-	-

1.5 碳足迹计算

碳足迹计算参考段华平等^[11]的方法。

$$C_{EF} = E / C_{qm} \quad (12)$$

式中: C_{EF} 为农田生态系统碳足迹, hm^2 。农田生态系统碳足迹如果大于该区域的生态承载力(播种面积),说明出现了碳生态赤字;如果小于该区域的生态承载力,则表明碳生态盈余。

$$C_{ER} = A_t - C_{EF} \quad (13)$$

式中: C_{ER} 为生态盈亏, 正值为生态盈余, 负值为生态赤字。

1.6 计算方法

采用 Excel 2016 进行数据统计。采用 SPSS 24 软件进行相关性分析(Pearson correlation coefficients)和回归分析。

2 结果与分析

2.1 黑龙江省农田生态系统碳排放特征

由图 1 可知, 1990—2019 年, 黑龙江省农田生态系统碳排放总量从 141.1 万 t 上升到 425.6 万 t,

增加了 201.6%, 年均增长 7.0%, 趋势为“阶梯状”增加趋势, 其中 1990—1997 年快速上升, 年均增长率 8.2%; 1997—2003 年平缓波动; 2004—2016 年急剧上升, 2016 年达到 462.1 万 t, 年均增长率 8.2%; 2017 年开始逐步回落, 2019 年较 2016 年下降了 7.9%, 这与黑龙江省严格实施农田“减肥减药”行动计划密切相关。从各排放因子来看, 化肥产生的碳排放为“波浪形”变化趋势, 1990—1998 年快速上升, 1998—2003 年稳中有降, 2004—2015 年快速上升, 2016 年开始回落。农药产生的碳排放为“抛物线”变化趋势, 1990—2014 年开始快速上升, 2015 年开始下降, 到 2019 年开始下降。黑龙江省农膜产生的碳排放也为“波浪形”变化趋势, 1990—1997 年迅速上升, 1998 年开始下降。黑龙江省机械产生的碳排放量呈“阶梯状”上升趋势, 1990—2004 年稳中有升, 2004—2008 年稳中有升, 2008—2012 年开始快速上升, 2012—2019 年基本稳定。黑龙江省灌溉产生的碳排放总体呈逐步上升的趋势。

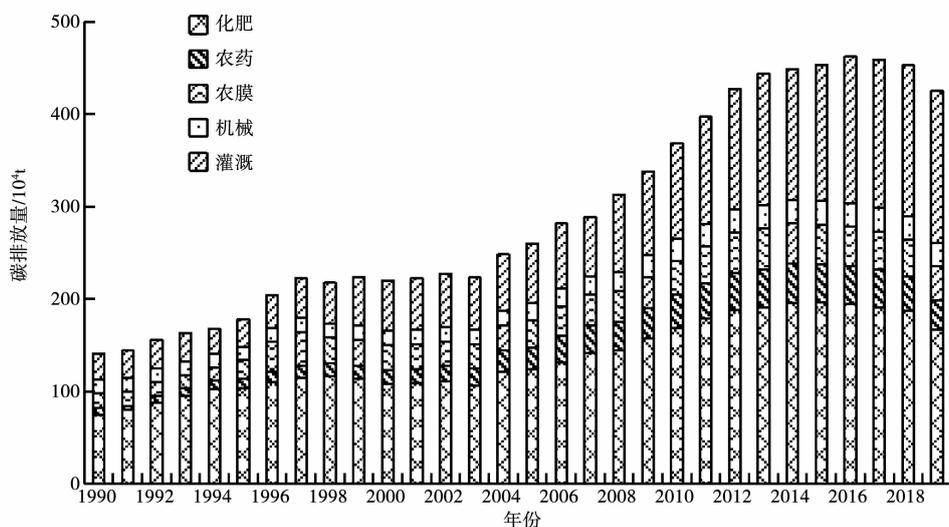


图 1 黑龙江省农田生态系统碳排放变化

计算 1990—2019 年各个排放因子农田生态系统碳排放平均比例(图 2),化肥所占比例最高,达到 48.7%(其中氮肥占比最高 81.2%,复合肥 12.7%,磷肥 4.4%,钾肥 1.7%),其次为灌溉 25.7%,农膜 10.9%,农药 7.7%,最低为机械 7.0%。可以看出,施用化肥对粮食稳产增产有积极作用,而由此也导致碳排放增加。此外,近年来黑龙江省农业灌溉产生的碳排放持续增加,所占比例不断上升,2019 年占比达到 38.7%,接近化肥所占比例(39.2%),也需引起足够重视。

将黑龙江省农田生态系统碳排放精确到单位面积和单位产量尺度,更易于直观了解黑龙江省碳排放状况。从黑龙江省碳排放强度来看(图 3),黑龙江省农田生态系统单位面积碳排放量呈

波动上升趋势($y = 4.5645x + 177.07$, $R = 0.937$, $P < 0.05$),2019 年达到 $288.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 1990 年的 $164.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升了 74.8%。其中,1990—1997 年单位面积碳排放量持续增加,年均增加 7.0%;1998—2009 年波动变化;2009—2013 年快速上升,达到 $302.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增加 6.0%;2013—2018 年相对稳定;2019 年快速下降,较上一年降低 6.6%。黑龙江省农田生态系统单位产量碳排放量波动较为剧烈,总体呈上升趋势($y = 0.4369x + 42.835$, $R = 0.842$, $P < 0.05$),2019 年达到 $50.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,较 1990 年的 $38.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 上升了 30.9%。其中 1990—2009 年单位产量碳排放量在波动中上升,2009 年到达最高值 $57.7 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,之后开始下降。

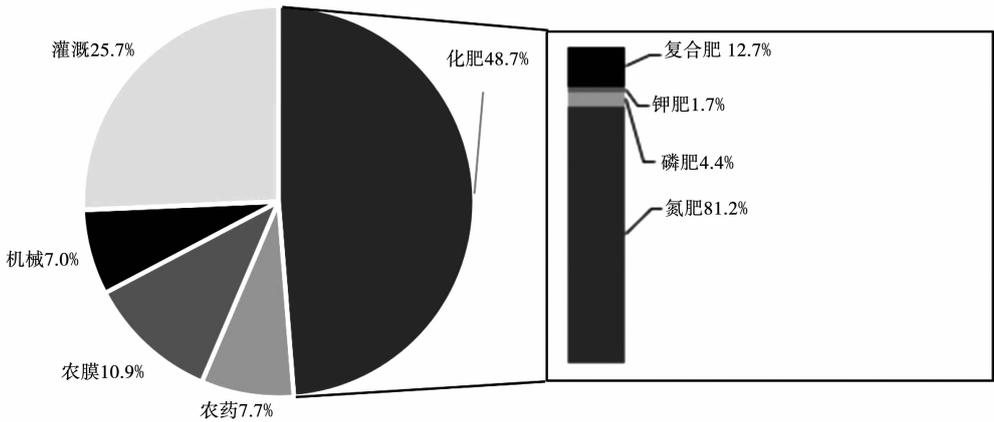


图 2 黑龙江省农田生态系统碳排放构成

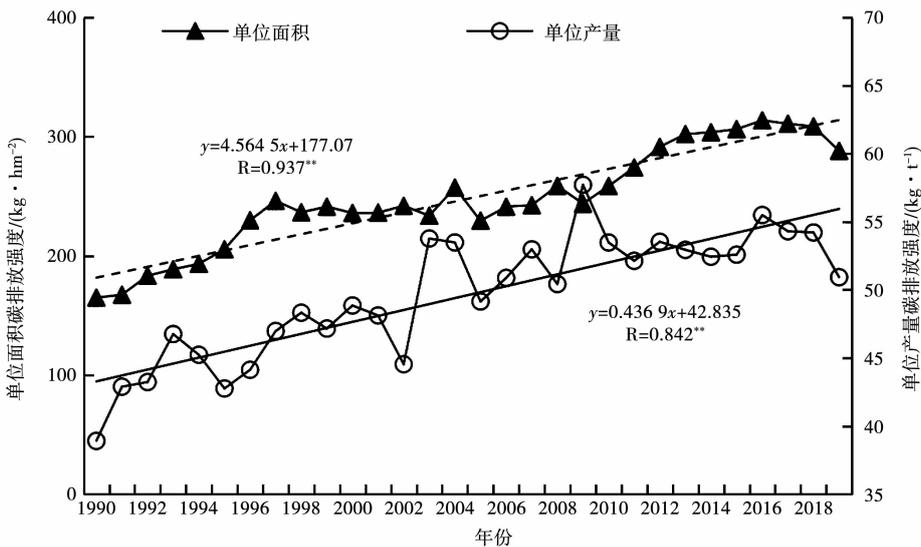


图 3 黑龙江省农田生态系统碳排放强度

注: ** 表示在 1% 水平相关性显著,下同。

2.2 黑龙江省农田生态系统碳吸收特征

黑龙江省农田生态系统碳吸收总量呈现“阶梯状”增加趋势(图4),30年来增加181.7%,年均增加6.3%,其中1990—2003年波动起伏变化较小,2003—2015年快速上升,从3377.5万t增加到9437.9万t,年均增长率15.0%,2015—2019年相对稳定。从不同作物类型来看,粮食作物碳吸收量变化趋势与黑龙江省农田生态系统碳吸收总量变化一致。黑龙江省经济作物碳吸收量表现为逐步下降的趋势,从1990年的416.3万t下降到2019年的106.0万t,年均降低2.6%。黑龙江省蔬菜瓜果类作物碳吸收量表现为“抛物

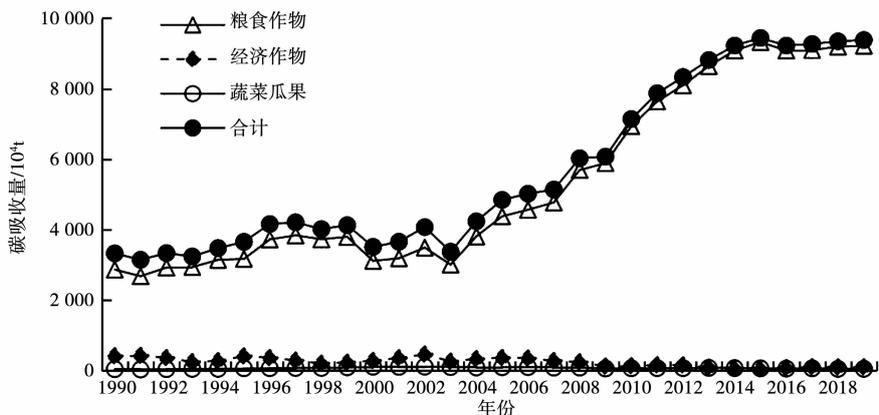


图4 黑龙江省农田生态系统碳吸收变化

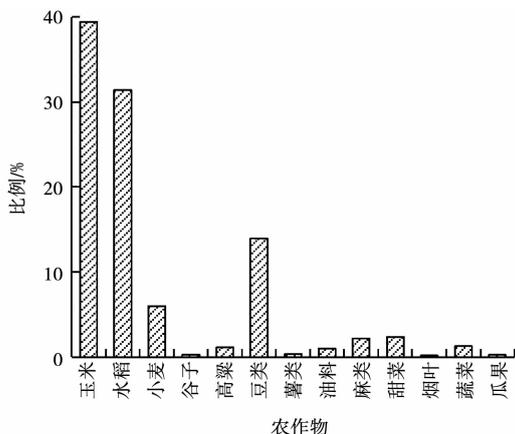


图5 黑龙江省农田生态系统碳吸收比例

如图6所示,黑龙江省农田生态系统单位面积碳吸收量呈波动上升趋势($y=93.857x+3339.2$, $R=0.864$, $P<0.05$),2019年达到 $6350.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较1990年的 $3890.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升了63.2%。其中,1990—1996年单位面积碳排放量波动上升,1996年达到 $4682.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,年均增加3.4%;1997—2003年波动下降;2003—2015年波动上升,达到 $6379.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,年均增加6.7%;2015—2019年相对稳定。黑龙江省农

田生态系统单位产量碳吸收量表现为“U型”变化趋势,总体呈上升趋势($y=8.7442x+822.35$, $R=0.751$, $P<0.05$),2019年达到 $1122.4\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$,较1990年的 $918.0\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 上升了22.3%。其中1990—2000年单位产量碳排放量在波动中下降,年均下降1.5%,2000年后开始迅速上升,到2019年达到 $1122.4\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$,年均增加2.3%。

线”变化趋势,1990—2002年缓慢上升,从43.9万t上升到114.4万t,之后逐年下降至2019年的53.8万t。

从1990—2019年黑龙江省不同作物碳吸收平均比例来看(图5),玉米为碳吸收量最高的作物,占比达到39.4%,其次为水稻31.4%,豆类作物居于第3位为14.0%,第4位小麦6.0%,之后依次为甜菜、麻类作物、蔬菜、高粱、油料作物、薯类作物、谷子、瓜果类作物、烟叶,占比均低于3%。玉米、水稻、豆类、小麦四大类作物总占比达到90.8%,对黑龙江省农田生态系统碳吸收贡献最大,其他作物总占比不足10%,贡献较小。

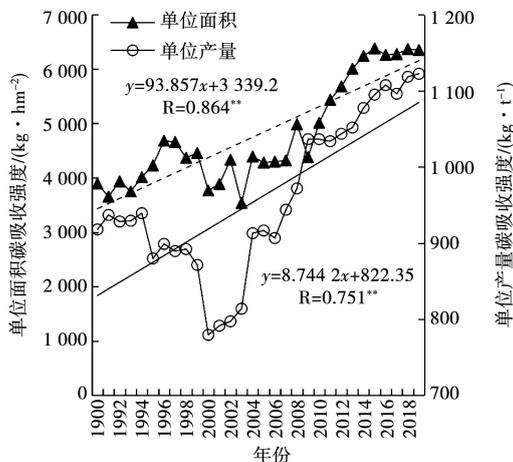


图6 黑龙江省农田生态系统碳吸收强度

2.3 黑龙江省农田生态系统碳足迹变化

由图7可以看出,黑龙江省农业生态系统的碳足迹呈现波动增加趋势($y = 1.3896x + 37.732$, $R = 0.933$, $P < 0.05$),2019年达到67.0万 hm^2 ,较1990年的36.3万 hm^2 上升了84.8%。其中1990—2009年增长较快,年均增加5.9%,且2009年达到了最高值77.2万 hm^2 ;2009年后开始缓慢下降,年均下降1.3%。从农田生态系统碳足迹占同时期种作物播种面积的比例来看,1990—2009年碳足迹占比在4.2%~6.6%,说明黑龙江省农业生态系统碳汇功能较强。1990—2019年黑龙江省农田生态系统均表现为碳盈余,且在2010年之后处于较高水平。

由表3可以看出,碳足迹与化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量、农业机械总动力、

有效灌溉面积和农作物总产量均为极显著相关。

将1990—2019年黑龙江省农业生态系统的碳足迹作为因变量,将同时期化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量、农业机械总动力、有效灌溉面积以及农作物总产量作为自变量,进行逐步回归分析,得到回归方程如下:

$$y = 0.829x_1(\text{化肥}) + 1.003x_2(\text{农药}) + 0.236x_3(\text{农膜}) - 0.962x_4(\text{农业机械总动力}) + 1.496x_5(\text{灌溉}) - 1.649x_6(\text{产量}) \quad (R=0.982, n=210, P<0.05) \quad (14)$$

由公式(14)可以看出,在影响碳足迹的相关因素中,黑龙江省农作物总产量的标准系数绝对值最大,说明农作物总产量对碳足迹的影响最大,其次为有效灌溉面积、农药使用量、农业机械总动力、化肥施用量和农用塑料薄膜使用量。

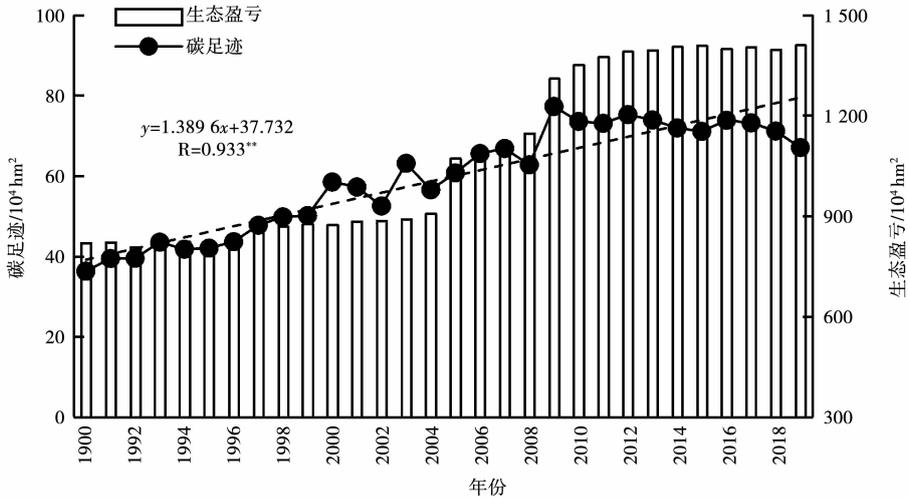


图7 黑龙江省农业生态系统的碳足迹和生态盈亏

表3 黑龙江省农业生态系统的碳足迹与各驱动因子的相关性

项目	碳足迹	化肥施用量	农药使用量	农膜使用量	农业机械总动力	有效灌溉面积	农作物总产量
碳足迹	1.000	0.918**	0.952**	0.862**	0.851**	0.852**	0.857**
化肥施用量		1.000	0.981**	0.912**	0.971**	0.964**	0.982**
农药使用量			1.000	0.903**	0.930**	0.920**	0.946**
农膜使用量				1.000	0.847**	0.861**	0.916**
农业机械总动力					1.000	0.991**	0.976**
有效灌溉面积						1.000	0.980**
农作物总产量							1.000

3 讨论

本研究中,黑龙江省农田生态系统单位面积碳排放量较低,在164.8~313.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均低于

同时期全国460~710 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的碳排放量^[11]。还需注意的是,1990—2019年黑龙江省农田生态系统碳排放总量从141.1万t上升到425.6万t,

增加了201.6%,其中排放占比较高的为化肥施用和农业灌溉,其中氮肥贡献较大。尽管近年来黑龙江省实施农田“减肥减药”行动成果显著,例如2019年较2015年化肥减施32万t,但黑龙江省碳排放强度依旧较高,2019年黑龙江省农田生态系统单位面积碳排放量和单位产量分别达到 $288.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $50.9 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$,较1990年分别增加74.8%和30.9%,且化肥碳排放所占比例依然较高(2019年为39.2%),可见,降低单位耕地面积和单位产量的碳排放量,仍然是黑龙江省农业生产中需要解决的问题。此外,农业灌溉所产生的碳排放逐年上升,2019年占比达到38.7%。化肥和灌溉碳排放占比较高,也体现在河南省^[14]、云南省^[15]、湖南省^[16]等地区的农田生态系统中,因此,农业生产中在保证农作物产量的前提下,需进一步加强化肥(特别是氮肥)施用和灌溉的科学管理,减少化肥施用量,强化农田水利基本建设,优化灌溉排水措施。但在北京市^[12]农田生态系统的研究表明,农业化学品(化肥、农膜和农药)的碳排放占比达到85.4%,而灌溉仅占3.7%,原因一方面是农业种植结构存在差异,另一方面是碳排放计算的公式和系数也不同。

黑龙江省农田生态系统碳吸收量明显高于碳排放量,平均约为20倍,同时农田生态系统碳足迹占同时期农作物播种面积的比例较低(4.2%~6.6%),表现为明显的碳汇效应,说明黑龙江省农田生态系统处于良好的碳生态盈余状态,农业开发利用在其生态承载力范围之内,可发挥较好的生态屏障作用,对于补偿其他行业的碳生态赤字具有积极意义。

由于东北地区特别是黑龙江省碳足迹研究不够深入,本研究中参考数据均来自于文献和统计年鉴,碳排放和碳吸收有关系数均采用定值,但在农业生产中受气候条件、土壤类型、种植制度、作物品种及田间管理等因素影响,会随时间产生变化,进而影响研究结果的精确性。另外,本研究也未考虑土壤呼吸及其固碳效应,也会对研究结果造成不确定性。下一步将深入研究黑龙江省不同生态区、不同种植制度及不同土壤类型条件下的

碳排放和碳吸收系数,充分考虑土壤温室气体排放和固碳作用,以期为本地区发展低碳农业提供更加丰富和准确的数据。

4 结论

尽管近年来黑龙江省农田生态系统碳排放有下降趋势,但化肥施用和农田灌溉的碳排放比例依然较高,需强化化肥施用和农田灌溉的科学管理。黑龙江省农田生态系统碳吸收量明显高于碳排放量,农田生态系统碳足迹占农作物播种面积的比例较低,表现为明显的碳汇效应,说明黑龙江省农田生态系统处于良好的碳生态盈余状态,具有较好的生态屏障作用。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔, 等. 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(1): 43-48.
- [3] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 834-841.
- [4] YAN X Y, AKIYAMA H, YAGI K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23: GB2002. doi: 10.1029/2008GB003299.
- [5] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [6] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [7] LAL R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 70(2): 103-116.
- [8] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.
- [9] YIN S, ZHANG X, LYU J, et al. Carbon sequestration and emissions mitigation in paddy fields based on the DNDC model: A review[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2020(4): 140-149.
- [10] PETERS G P. Carbon footprint and embodied carbon at

- multiple scales[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 38(9): 4856-4859.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(6): 1-11.
- [14] 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.
- [15] 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及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8822-8834.
- [16] 杭晓宁,张健,胡留杰,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.
- [17] 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.
- [18] 李玉波,刘国辉,许清涛,等. 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.
- [19] 孟成民,王建武. 广东省农田生态系统碳足迹时空差异分析[J]. *广东农业科学*, 2014(9): 174-178.
- [20] 逮非,王效科,韩冰,等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239-2250.
- [21] 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 and Environment*, 2002, 91(1-3): 217-232.
- [22] 伍芬琳,李琳,张海林,等. 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.
- [23] 李会霞,郑植尹,田岗,等. 7个谷子杂交种及其亲本的抗旱性分析[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(7): 20-28.
- [24] 王岩,孙大为,李兆波,等. 不同品种高粱根系形态特征与产量形成的关系[J]. *园艺与种苗*, 2011(3): 84-86.
- [25] 黄文功,姜卫东,姚玉波,等. 低钾胁迫对亚麻生长发育的影响[J]. *中国麻业科学*, 2020, 42(6): 273-282.

Changes of Carbon Source/Sink Intensity and Carbon Footprint of Farmland Ecosystem in Heilongjiang Province in Recent 30 Years

HAO Xiao-yu

(Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to clarify the carbon source / sink intensity and carbon footprint change of farmland ecosystem in Heilongjiang Province, based on the data of crop planting area, yield and agricultural input in Heilongjiang Province from 1990 to 2019, the carbon emissions, carbon absorption and carbon footprint of farmland ecosystem were estimated by using the carbon footprint model of farmland ecosystem. The results showed that farmland ecosystem carbon emissions showed a "step-like" increasing trend, with an average annual increase of 7.0%, among which chemical fertilizer and irrigation were the main contributing factors in Heilongjiang Province. The carbon emissions per unit area of farmland ecosystem in Heilongjiang Province ranged from 164.8 to 313.7 kg·hm⁻², which was lower than the national average. The farmland system in Heilongjiang Province had a strong carbon sink capacity, and the carbon absorption was significantly higher than the carbon emission, with a ratio of 19.4:1, among which the carbon absorption of corn, rice and legumes was higher, accounting for 39.4%, 31.4% and 14.0%, respectively. The carbon footprint of agroecosystem in Heilongjiang Province showed a fluctuating increasing trend, but the carbon footprint accounted for a relatively low proportion (between 4.2% and 6.6%) of the sown area of crop in the same period. Based on the above analysis, the farmland ecosystem in Heilongjiang Province was in a good state of carbon ecological surplus and had a good ecological barrier effect.

Keywords: farmland ecosystem; carbon emissions; carbon absorption; carbon footprint; Heilongjiang Province