

东北三省农业净碳汇变化及增汇潜力研究

刘嘉文¹ 滕泽宇¹ 陈智文^{1, 2}

1. 吉林师范大学 吉林四平 136000

2. 新型肥料吉林省高校工程研究中心 吉林四平 136000

摘要: 农业碳排放是基础性排放, 我国农业以较低的碳排放强度, 保障粮食和重要农产品稳定安全供给, 东北是我国重要的粮食主产区, 粮食产量连续多年占全国总产量的20%以上。本文利用2000–2020年中国东北三省农业统计数据, 对其农业碳源碳汇的发展特征及三省间差异进行分析。结果表明: 2000–2020年期间东北三省的农业系统为净碳汇, 其净碳汇经过逐年波动增长后稳定在9000万吨左右。农业碳吸收的增长幅度明显高于农业碳排放, 东北三省净碳汇总体呈现稳定态势。在增加农作物和农业耕地面积提升农业碳汇潜力的同时, 通过改变传统的耕作方式、重视秸秆资源利用、强化土壤生态修复等技术增加农业净碳汇, 建立经济激励机制来保持农业经济增长与增汇减排平衡的目标。

关键词: 农业碳源; 农业碳汇; 低碳农业; 东北三省

Change and potential increase of agricultural net carbon sink in three northeastern provinces

Jiawen Liu¹, Zeyu Teng¹, Zhiwen Chen^{1,2}

1. Jilin Normal University, Siping 136000, China

2. New Fertilizer Engineering Research Center of Jilin University, Siping 136000, China

Abstract: Agricultural carbon emissions are fundamental emissions. China's agriculture maintains a relatively low carbon emission intensity to ensure stable and secure supply of staple foods and important agricultural products. The northeastern region of China is a significant grain-producing area, with grain production accounting for over 20% of the national total output for consecutive years. This paper utilizes agricultural statistical data from the three northeastern provinces of China for the years 2000 to 2020 to analyze the development characteristics of carbon sources and sinks in their agricultural sector, as well as the disparities among the three provinces. The results indicate that during the period from 2000 to 2020, the agricultural systems in the three northeastern provinces acted as net carbon sinks. After experiencing fluctuating growth over the years, the net carbon sink has stabilized at around 90 million tons. The growth rate of carbon absorption in agriculture significantly surpassed that of carbon emissions. Overall, the net carbon sink in the three northeastern provinces has shown a stable trend. While increasing the area of crops and agricultural land to enhance the potential for carbon sequestration, this paper proposes strategies such as altering traditional cultivation methods, emphasizing the utilization of crop residues, and strengthening soil ecological restoration techniques to increase net agricultural carbon sinks. Additionally, establishing economic incentive mechanisms is suggested to maintain a balance between agricultural economic growth and the goals of increasing carbon sequestration and reducing emissions.

Keywords: agricultural carbon source; Agricultural carbon sink; Low-carbon agriculture; The three northeastern provinces

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28080105)

东北有良好的资源禀赋与区位优势，一直以来作为我国粮食生产的“稳定器”和“压舱石”，在我国农业生产发展中处于全国领先地位。研究表明东北黑土地地区农田土壤有机碳库储量近年来持续下降^{[1][2]}，一些学者通过对中国农田土壤碳库演变趋势分析后发现，在未来三十年的气候变化下，北方地区农田土壤有机碳库储量亦呈下降趋势^[3]。作为我国土壤最肥沃的黑土区在发展低碳农业中面临着保持经济增长与农业碳汇平衡的巨大挑战，因此，研究东北三省农业净碳汇变化及增汇潜力，是探究东北黑土区碳循环机理及其碳汇发展潜力的重要课题。

一、研究背景

土壤作为陆地生态系统中最大的碳库，其中农业土壤在较短的时间内可被快速调节，受到强烈人为干扰后表现的最为活跃。在被过度或不适时使用后会导导致有机质含量的下降和土壤固碳量减少^[4]。农业活动能够通过作物的种植、生产、施肥、收获和残余物管理，实现并改善局地气候和土壤条件，以改变土壤碳的源汇，因此它密切影响着大气组成成分与全球气温的变化，对农业碳的增汇减排中有着重要地位和作用。诸多学者关于我国农业碳源碳汇方面进行了大量研究。潘根兴等^[5]指出我国农田土壤具有显著的固碳减排潜力，其中稻田土壤固碳潜力十分突出；杨学明等^[7]基于全国第二次土壤普查数据，论证了未来30-50年内中国农业土壤固碳将替代新能源缓解工业碳排放压力。

农业可持续生产需要通过提高土壤有机碳储量来实现，但实际的农业生产活动由于自然因素与人为活动空间的差异性，客观上导致投入种植、加工等农业生产过程中不可避免的产生碳排放，因此普遍表现出范围广、能耗高、排放源多，且难以控制的特点^[8]。现今已有研究通过对农业碳排放进行不同角度的测算，得到不同农业碳源。主流观点认为农业碳排放主要源于化肥、农药、灌溉和作物种植过程耗费的能源^[9]，有学者根据中国农业碳排放生产要素投入的实际情况，将碳源分为化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉和农地翻耕^[10]，另有研究着重总结了对农用物资与农地利用的划分，区别在于农业机械包括电力的碳排放^[11]；有研究还考虑了土壤、农作物、农业废弃物、农业能源等多方面的碳排放，这些之前被忽略的碳源在原本农业碳排放中占有较大的比重^[12]。

综上，近年来学者们对我国农业碳源碳汇类型特征进行了比较深入的研究，但对东北地区农业生态系统的碳源碳汇问题仍有待进一步探讨。本文利用2000-2020年东北三省的作物碳吸收和种植生产过程中的碳排放数

据，分析20年来东北三省农业碳源碳汇时空特征变化差异及其碳汇潜力，以期为东北三省增汇减排与经济协调发展提供依据及相应对策。

二、农业净碳汇效应评估

1. 农业碳吸收能力估算

农业碳汇机制主要通过对农田生态系统的有效管理来提高土壤碳固存潜力。因此，农作物的干物质积累反映出其含碳量，参考李克让等^[13]的评估方法，根据土壤固碳及农作物全生育期固碳，测算公式如下：

$$D_w = \frac{Y_w(1-r)}{H_i} \quad (1)$$

$$C_d = C_f D_w = \frac{C_f Y_w (1-r)}{H_i} \quad (2)$$

式(1)中， D_w 为生物产量(作物总干物质)， H_i 为经济系数， Y_w 为经济产量(作物总干粒物质)， r 为作物含水量；式(2)中， C_d 为农作物全生育期碳吸收量， C_f 为农作物合成单位重量有机物所需吸收的碳。根据上述计算公式，利用《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》中农作物产量，农作物全生育期碳经济系数(H)和吸收率(C_f)计算东北三省主要农作物的碳吸收能力^[14]

表1 农作物全生育期碳经济系数(H)、含水量(r)和吸收率(C_f)

品种	H	r	C_f
稻谷	0.45	12	0.4144
小麦	0.40	12	0.4853
玉米	0.40	13	0.4709
豆类	0.35	13	0.450
薯类	0.70	70	0.4226
甜菜	0.70	75	0.4072
蔬菜	0.60	90	0.450
瓜类	0.70	90	0.450
花生	0.43	10	0.450
棉花	0.10	8	0.450
向日葵	0.30	10	0.450
其他	0.40	12	0.450

2. 农业活动的碳排放估算

农业碳排放是农业生产经营活动过程中向外界排放的温室气体总量的过程，其排放的温室气体为 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等。现今农业碳排放计算遵循国际标准ISO14064，参考李政通等^[15-16]采用农业活动碳排放总量测算公式如下：

$$E = \sum E_i = \sum (G_i \cdot \mu_i) \quad (3)$$

其中， E 为农业活动碳排放总量， 10^4t ； E_i 为各碳源因子碳排放总量， 10^4t ； G_i 为各碳源量， 10_4t ； μ_i 为各碳源因子碳排放系数。所用数据均来源于2000—2020年的

《中国农村统计年鉴》。

结合东北三省历年秸秆燃用及秸秆二次利用情况，依托农业部、国家能源局、中国统计局历年秸秆资源相关政策及文献估算秸秆焚烧量比例。按照《生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南（试行）》^[17-19]采用式（4）计算秸秆露天焚烧活动水平 G_0 ：

$$G_0 = P \cdot N \cdot R \cdot \rho \quad (4)$$

其中，P为农作物产量， 10^4t ；N为草谷比，%；R为秸秆露天焚烧比例，%； ρ 为燃烧效率，%。

通过排放系数法计算各省当年农作物秸秆露天燃烧产生的碳排放量参考如表2所示的农用物资与农地利用、农作物活动水平与农作固体废物利用计算参数，作出式（5）如下：

$$E_j = \sum (P_{j,k} \cdot R_j \cdot N_k \cdot \rho_k \cdot \mu_k) \quad (5)$$

其中， E_j 为j省区秸秆焚烧的碳排放量， 10^4t ；K为农作物类别； $P_{j,k}$ 为j省区农作物K的产量， 10^4t ； N_k 为农作物K的草谷比，%； R_j 为j省当年秸秆露天焚烧比例，%； ρ_k 为燃烧效率，%； μ_k 为农作物K秸秆露天燃烧的排放因子， $Kg CE \cdot Kg^{-1}$ 。

东北农业碳源碳排放系数详参表2：

表2 农业碳源碳排放系数

农业生产类型	碳源/属地	碳排放系数		参考来源
		数值	单位	
农用物资与农地利用	化肥	0.8956	$Kg CE \cdot Kg^{-1}$	ORNL
	农药	4.9341	$Kg CE \cdot Kg^{-1}$	ORNL
	农膜	5.18	$Kg CE \cdot Kg^{-1}$	IREEA
	柴油	0.5927	$Kg CE \cdot Kg^{-1}$	IPCC
	灌溉	266.48	$Kg CE \cdot hm^{-2}$	段华平，等 ⁰
	翻耕	312.60	$Kg CE \cdot hm^{-2}$	IABCAU
	电力	0.25	$Kg CE \cdot Kwh^{-1}$	夏建德，等 ⁰
农作物与土壤	土壤	大豆	$139.5779 Kg CE \cdot hm^{-2}$	熊正琴，等 ⁰
	N_2O 排放	玉米	$458.9756 Kg CE \cdot hm^{-2}$	王少彬，等 ⁰
	稻田	黑龙江省	$56.6742 G CE \cdot m^{-2}$	闵继胜，等 ⁰
		吉林省	$37.9874 G CE \cdot m^{-2}$	
		辽宁省	$63.0168 G CE \cdot m^{-2}$	
固体废物利用	秸秆焚烧	稻谷	$2.0138 Kg CE \cdot Kg^{-1}$	彭立群，等 ^[24]
		玉米	$1.5236 Kg CE \cdot Kg^{-1}$	
		小麦	$1.4454 Kg CE \cdot Kg^{-1}$	
		豆类	$1.5083 Kg CE \cdot Kg^{-1}$	
		薯类	$1.5421 Kg CE \cdot Kg^{-1}$	

注：ORNL 为美国橡树岭国家实验室，IREEA 为南京农业大学农业资源与生态环境研究所，IPCC 为联合国政府间气候变化专门委员会，IABCAU 为中国农业大学农学与生物技术学院。

表3 农作物活动水平计算参数

种类	草谷比	燃烧效率
稻谷	0.9	0.93
小麦	1.1	0.93
玉米	1.2	0.92
大豆	1.6	0.68
薯类	0.5	0.68

3. 农业净碳汇估算

将作物生长吸收碳作为农业碳吸收，各种农用物资、农地土壤和农作固体废物利用过程中产生的碳作为农业碳排放，得到农业净碳汇。

三、农业碳源碳汇效应评估与分析

1. 农业碳吸收分析

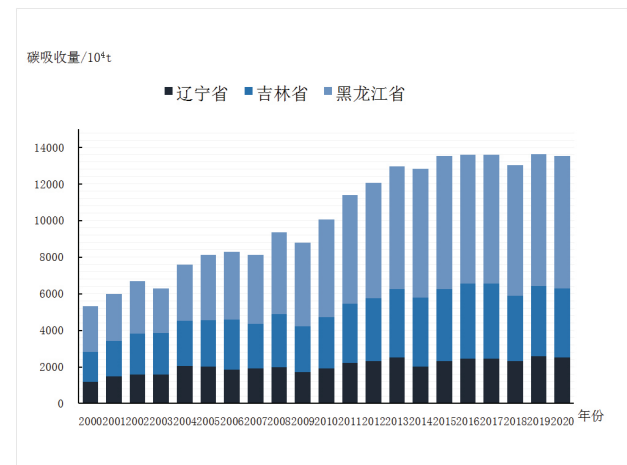


图1 2000-2020年东北三省农业碳吸收量

2000-2020年来东北三省农作物碳吸收能力波动式提高，至2020年逐渐平稳（图1）。一方面由于东北三省耕地面积扩大、种植技术提升，另一方面是由于种植结构和生产策略调整变化。

2. 农业碳排放分析

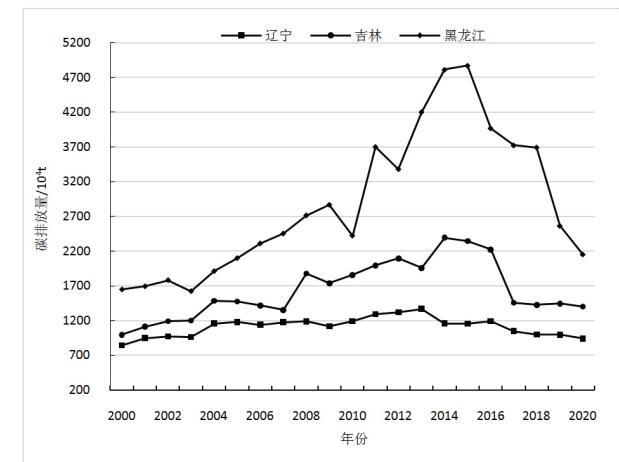


图2 2000-2020年辽宁、吉林、黑龙江各省农业碳排放量

依据表2得到东北三省碳排放结构(图2),在2000-2015年间,东北三省农业碳排放总量呈波动趋势逐年上升,并自2015年呈阶梯式下降。随着东北三省农业生产大力发展,2000-2015年间碳排放量呈现持续显著增长趋势。东北三省中碳排放量最大的黑龙江省自2003年与吉林、辽宁两省的差距逐年扩大;黑龙江碳排放量增速依然远胜于其他两省,表4中,黑龙江2020年碳排放总量分别是吉林和辽宁的2.29倍和1.35倍,较2000年的比值仍有明显提升,这表明黑龙江省不仅是东北三省中农业碳排放量最大的省份,也是农业碳排放变率最快的省份。

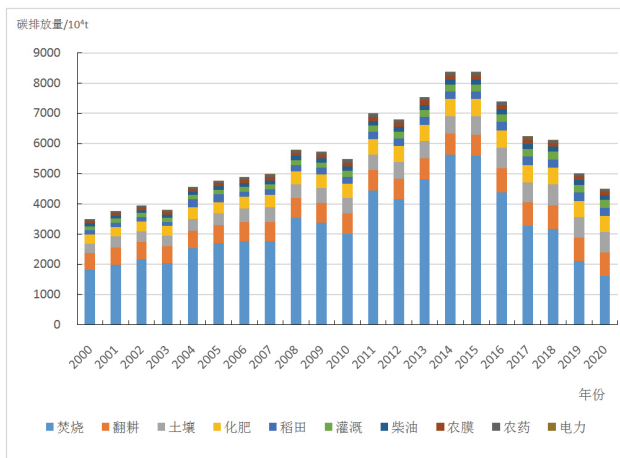


图3 2000-2020年东北三省碳排放结构

如图3所示,从碳排放结构来看,东北三省农业活动碳排放主要来自于秸秆焚烧、土地翻耕、土壤N₂O排放以及化肥,其次是稻田CH₄排放、灌溉、农机柴油、农膜及农药施用,其中农机用电比重最少。

表4 东北三省2020年农业碳排放结构及其比重

指标	东北三省		辽宁省		吉林省		黑龙江省	
	数值 (10 ⁴ t)	比重 (%)	数值 (10 ⁴ t)	比重 (%)	数值 (10 ⁴ t)	比重 (%)	数值 (10 ⁴ t)	比重 (%)
焚烧	1612.02	35.87	367.68	39.10	630.54	44.96	613.80	28.54
翻耕	792.41	17.63	134.04	14.25	192.28	13.71	466.09	21.67
土壤	668.33	14.87	127.60	13.57	204.90	14.61	335.84	15.62
化肥	525.81	11.70	123.23	13.10	201.78	14.39	200.79	9.34
稻田	284.04	6.32	32.79	3.49	31.80	2.27	219.44	10.20
灌溉	254.07	5.65	38.07	4.05	51.54	3.67	164.46	7.65
柴油	156.18	3.48	35.09	3.73	39.00	2.78	82.09	3.82
农膜	122.38	2.72	59.25	6.30	26.61	1.90	36.52	1.70
农药	75.20	1.67	22.07	2.35	23.16	1.65	29.97	1.39
电力	3.29	0.07	0.62	0.07	0.97	0.07	1.69	0.08

表4则依据表2所列东北三省2020年农业碳排放量和所占比例。从东北三省整体来看,秸秆焚烧、农地翻

耕、土壤N₂O排放、化肥碳排放累计占比六成以上,这与图3中东北三省历年农业碳排结构相符;但从农业碳排放构成来看,辽宁省柴油和农膜导致的农业碳排放量占比超过其他两省,吉林与辽宁两省的施用农药化肥导致的农业碳排放量占省总量的比重偏高,而作为三省中种植面积最广、作物产量最大的黑龙江有6种碳源所产生的碳排放高于吉林和辽宁,这与其他两省不同的农地利用方式和作物类型密不可分。

3. 农业活动的净碳汇

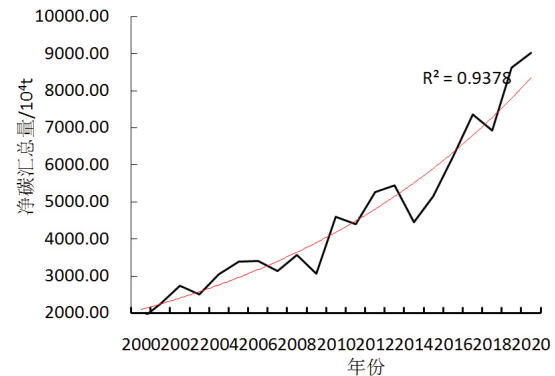


图4 东北三省农业净碳汇(2000-2020年)

注:图中红线为2000-2020年东北三省农业净碳汇指数趋势曲线。

据图4可知,东北三省2000-2020年期间农业净碳汇总体呈现上升态势,2000-2020年期间东北三省的农业系统仍是个净碳汇,其净碳汇经过逐年波动增长稳定在9000万吨左右。

四、东北三省农业碳汇潜力提升对策

1. 农业碳汇潜力有限

近年来东北三省农业增产得益于农田播种面积增加,农用机械研发成果的转化投入、化肥和农药的有效施用,同时也会增加农业活动的碳排放,因此,积碳固碳于作物、集碳藏碳于土壤,提高农田的净碳汇能力,就必须做到“减碳”与“增汇”有机结合,提高土地的自然生产力、减少不必要的农田碳源^[20-21]。

2. “减排增汇”的技术对策

基于上面的研究结果,可知农业活动碳排放主要源于秸秆焚烧、土地翻耕、土壤N₂O排放以及不合理施肥,仍需发展资源节约型、环境友好型循环农业,对此应实施增汇减排的农业技术措施,例如轮作免耕、秸秆还田、配方施肥,创新耕作方式以增加农业固碳潜力^[22-23]。结合东北三省的生态农业建设,通过改良传统耕作方式、实施低碳作物栽培、强化土壤修复和农业废弃物综合利用,保证农作物持续增产的情况下,达到保护农田生态系统。

(1) 改良传统的耕作方式。推广少耕免耕的新型低碳节能种植模式可以延缓土壤中秸秆等有机质的循环周期,起到藏碳于土壤的作用;实施不同作物替代轮作模式能够提高作物对自然资源利用率,起到固碳于植物的作用^[24-26]。东北三省农业逐渐将以精准播种施肥、节水灌溉、生态防治为主要手段,保护环境、培肥地力、节水保墒,提高农业生产资料利用率、减少水土流失的保护性耕作推广各县。

(2) 加强农作物低碳栽培技术创新。随着地理信息技术和农用机械化水平的日趋成熟,利用构建GIS技术形成精准农作物栽培种植调控系统。

(3) 重视秸秆资源再利用。将秸秆还田能培育土壤肥力、提高土壤有机质含量,但土壤在秸秆自然分解过程中会消耗大量氮素,因此将秸秆腐熟、酸解或碱解后再还田;二则是将秸秆离田处理,进行秸秆集中加工^[27-28]。东北三省具有丰富的秸秆资源,每年秸秆焚烧贡献了东北三省农业总碳排放量的半数及以上,近年来辽宁省、吉林省秸秆资源化利用率较高,黑龙江秸秆肥料化利用率较高。

(4) 强化土壤生态修复。研究表明,化肥过量施用加快了东北三省农田土壤碳流失,从而导致土壤有机碳含量显著下降,造成土壤表面板结,土壤固碳能力减弱,因此应对耕作土壤进行生态性修复。

3. 形成经济鼓励机制

农业耕作方式可分为“碳源型”和“碳汇型”。传统“碳源型”耕作不利于环境保护但节时省工;“碳汇型”有利于环境保护和土壤固碳的新型耕作方式,往往消耗更多人力和财力,在缺乏政策和经济激励时,农户为节约成本必然选择“碳源型”耕作方式。构建和完善农业碳汇交易市场并降低碳汇交易的相关风险,使农户通过增加农田净碳汇而获得长期稳定的收益。由此鼓励发展农业碳金融市场形成新经济增长点,从根本上促进农业净碳汇量增加,农户将积极主动地将耕作方式转变为“碳汇型”^[29-31]。

参考文献:

[1]李忠佩,林心雄,车玉萍.中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J].土壤,2002(39):351-360
[2]王充,于东升,张海东,等.典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子显著性变化特征研究[J].土壤学报,2014,51(4):845-852.
[3]张旭博.中国农田土壤有机碳演变及其增产协同效应[D].中国农业科学院博士论文(2016)

[4]金琳,李玉娥,高清竹,等.中国农田管理土壤碳汇估算[J].中国农业科学,2008(3):734-743.

[5]潘根兴,李恋卿,张旭辉.土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题[J].南京农业大学学报,2002,25(3):100-109.

[6]杨学明,张晓平,方华军.农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J].地理科学,2003,23(1):101-106.

[7]NURSE J. An ecological approach to promoting population mental health and well-being—A response to the challenge of climate change[J]. Perspectives in Public Health,2010,130(1):27-33.

[8]李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放与经济发展的实证研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(12):8-13.

[9]TIAN Y, ZHANG J, HE Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J].Journal of Integrative Agriculture.2014,13(6):1393-1403.

[10]GOLDSTEIN B,HAUSCHILD M,FERNANDEZ J, et al. Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates[J].Journal of Cleaner Production,2016,135:984-994.

[11]田云,张俊飏,何可,丰军辉.农户农业低碳生产行为及其影响因素分析——以化肥施用和农药使用为例[J].中国农村观察,2015(04):61-70.

[12]张丹,张卫峰.低碳农业与农作物碳足迹核算研究述评[J].资源科学,2016,38(7):1395-1405.

[13]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[M].北京:气象出版社,2002.

[14]吴嘉莘,杨红娟.农业净碳汇测算方法研究综述[J].农业经济,2020,402(10):29-31.

[15]国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2001-2021.

[16]国家统计局.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2000-2020.

[17]李政通,白彩全,肖薇薇.基于LMDI模型的东北地区农业碳排放测度与分解[J].干旱地区农业研究,2017(35):145-152

[18]中国环保部.生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[M].2014.

[19]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.

[20]夏德建,任玉珑,史乐峰.中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J].2010, 27(8): 82-89.

[21]熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J].中国农业科学, 2002, 35(9): 1104-1108.

[22]王少彬,苏维翰.中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算[J].环境科学, 1993, 14(3): 42-46.

[23]闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口.资源与环境, 2012, 22(7): 21-27.

[24]彭立群,张强,贺克斌.基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J].环境科学研究, 2016, 29(8): 1109-1118.

[25]马子钰,马文林.秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究[J/OL].土壤: 1-6[2023-03-20].<https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2023.01.025>.

[26]宋秋来,王峭然,王麒等.玉米秸秆还田对黑土碳排放的影响[J].江苏农业科学, 2017, 45(13): 219-222.

[27]金琳,李玉娥,高清竹,等.中国农田管理土壤碳汇估算[J].中国农业科学, 2008(3): 734-743.

[28]罗怀良.中国农田作物植被碳储量研究进展[J].生态环境学报, 2014, 23(4): 692-697.

[29]米松华,黄祖辉,朱奇彪,等.农户低碳减排技术采纳行为研究[J].浙江农业学报, 2014, 26(3): 797-804.

[30]王金武,唐汉,王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J].农业机械学报, 2017, 48(05): 1-21.

[31]郭朝先.2060年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J].北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(05): 64-77.