

我国主要农作物生产碳汇结构现状与优化途径

余玮¹, 黄璜¹, 官春云¹, 陈阜², 陈光辉¹

(1. 南方粮油作物协同创新中心, 湖南农业大学, 长沙 410128; 2. 中国农业大学, 北京 100094)

摘要: 大气中温室气体浓度的增加引起的全球气候变化成为威胁人类生存和发展的一大难题。农作物的碳汇功能对气候变化也起着重要的调节作用。农作物的生产过程既是碳源也是碳汇。本文收集整理分析了我国主要农作物农作系统的相关碳排放参数, 估算了农田碳汇碳源效应及其动态变化特征, 对作物生产系统的碳投入产出进行定量评价。为我国发展低碳农业规划、政策制定提供了依据, 并提出了我国农田碳汇结构的优化途径。

关键词: 农作物; 碳汇; 碳排放; 优化途径

中图分类号: S3 **文献标识码:** A

The Current Carbon Sink Structure of China's Staple Crop Production and Its Optimization Approach

She Wei¹, Huang Huang¹, Guan Chunyun¹, Chen Fu², Chen Guanghui¹

(1. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in ,Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; 2. China Agriculture University, Beijing 100094, China)

Abstract: The global warming caused by heavy emissions of greenhouse gases has posed a great threat to the existence and development of mankind. The carbon sink function of crops has an important regulating effect on climate changes. Actually the production of crops can be seen as the carbon source as well as the carbon sink. In this article, the authors gather and analyze the relevant carbon emission parameters of the staple crop production system in China, estimate the carbon sink effect of farmland and its dynamic change feature and quantitatively evaluate the carbon input and output of these crop production systems. In this way, the paper provides a basis for making the low-carbon agriculture planning and policies and proposes the approach to optimizing the carbon sink structure of the farmland in China.

Key words: crop; carbon sink; carbon emission; optimization ways

一、前言

大气中温室气体浓度的增加引起的全球气候变化, 已经威胁着人类的生存与社会经济的发展。气候变化的主要原因是由于人类活动向大气中排放过

量的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体^[1,2]。要解决这一问题就必须减少温室气体在大气中的积累, 其途径可从两个方面考虑, 一是减少碳源, 即温室气体的排放; 二是要增加碳汇, 即增加对温室气体尤其是二氧化碳的吸收^[3]。

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-01-09

作者简介: 余玮, 湖南农业大学, 副教授, 主要研究方向为作物学; E-mail: clregina@163.com

基金项目: 中国工程院咨询项目“我国主要农作物生产碳汇结构现状与优化途径”(2014-XY-33)

本刊网址: www.enginsci.cn

森林一直被公认为具有明显的碳汇功能,能够帮助吸收大气中的二氧化碳。除森林碳汇以外,在地球上面积最大的农作物同样也具有碳汇功能,对气候变化也起着重要的调节作用。

农作物的生产过程既是碳源也是碳汇。碳源主要包括农作物生产过程中化肥、农药、电力、柴油等投入物生产形成的碳排放,农田土壤呼吸碳排放以及作物的秸秆焚烧碳排放。碳汇主要包括作物自身生长碳吸收、农田土壤固碳和秸秆还田的固碳效应。农作物的碳汇和碳源相抵可得到净碳汇。在当前全球温室效应加剧、环境不断恶化的背景下,农作物的碳汇作用具备了显著的生态环境价值。农田生态系统作为受人类影响最大的自然生态系统,其固碳能力历来受到关注。

本项目根据我国不同农作区的差异,将全国划分为东北、华北、西北、长江中下游、西南、华南六大区域,各区域作物生产农田投入量来源于《全

国农产品成本收益汇编》、试验及调研数据、文献等。化肥、农药、电力、柴油等农资生产过程中的温室气体排放来源于中国生命周期数据库(CLCD)和Ecoinvent数据库。采用Microsoft Excel 2010对数据进行统计分析。

二、我国农田生态系统碳汇分析

(一) 我国农田生态系统表现为固碳效应

我国各区域主要农作物的农田生态系统主要表现为固碳效应,即净碳量为正值(见表1)。在研究的作物中,只有西北的棉花和西南的油菜表现为碳源,净碳量分别为 $-531.3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $-33.3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$,其他作物的净碳量差异较大,分布在 $404.7\sim 40\ 725.9 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同一区域内不同作物的净碳量差异明显,同一作物在不同区域之间净碳量差异也较大。以水稻而言,净碳量数值以

表1 各区域农作物生产净碳量及其组分单位

($\text{kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$)

区域	作物	作物固碳	土壤固碳	碳成本	净碳量
东北	水稻	5 174	-6.5	1 861	3 207.7
	玉米	3 766	-6.5	452	3 307.4
	大豆	2 164	-6.5	142	2 015.6
华北	小麦	2 334	859.8	2 248	945.8
	玉米	3 141	859.8	1 446	2 554.8
西北	小麦	4 271	-231.3	817	3 222.7
	玉米	5 560	-231.3	1 437	3 891.7
	马铃薯	5 598	-231.3	955	4 411.7
	棉花	1 823	-231.3	2 123	-531.3
西南	水稻	3 003	228.7	1 660	1 571.7
	小麦	2 537	228.7	762	2 003.7
	玉米	1 768	228.7	1 592	404.7
	油菜	740	228.7	1 002	-33.3
华南	水稻	2 573	142.9	889	1 826.9
	甘蔗	44 425	142.9	3 842	40 725.9
长江中下游	水稻	4 327	167.3	910	3 584.3
	玉米	2 476	167.3	1 040	1 603.3
	小麦	1 136	167.3	699	6 04.3
	油菜	2 474	167.3	998	1 643.3

长江中下游地区最大，为 $3.5843 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，西南地区数值最小，为 $1.5717 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。以小麦而言，西北地区数值最大，达 $3.2227 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而在长江中下游地区数值仅为 $6.043 \times 10^2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。以玉米而言，净碳量以西北地区数值最大，达 $3.8917 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，碳汇功能明显；而在西南地区数值仅为 $4.047 \times 10^2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(二) 我国主要农作物生产系统碳效率呈基本稳定并提升的趋势

在我国农业从粗放到集约的超过半个世纪的历史进程中，主要农作物生产碳效率基本大于1，农田生态系统动态的碳平衡始终处于正平衡状态（见图1）。1952—1980年为以牛耕铁犁为代表的传统农作阶段，1980—2010年为以半机械化为代表的半现代化集约农作阶段，进入21世纪后，我国部分地区开始向准现代化农业阶段过渡，对这段时间我国主要农作物生产碳效率分析可知：无论是低水平的传统农作还是较高水平的准现代农作，农田生态系统碳平衡都是作物生产固碳大于碳成本，农田生态系统都表现为“固碳效应”。另外，纵观主要农作物生产碳效率随时间的变化情况可以发现，随着时间推移，作物生态碳效率变化并不太大，较为稳定，同时有缓慢增长的趋势。

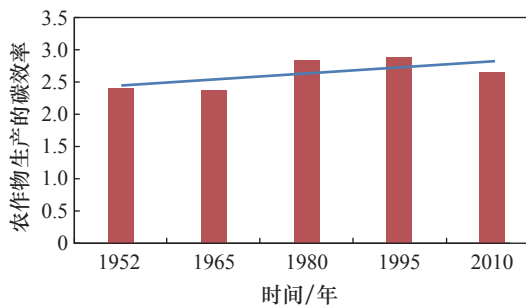


图1 我国不同年份全国主要农作物生产的碳效率

三、我国各区域主要农作物碳结构分析

(一) 各区域主要农作物生产的碳成本

表2为各区域主要农作物生产的碳成本。东北地区水稻的灌溉量较大，造成其碳足迹远大于玉米和大豆。水稻的单位面积碳足迹最高，为 $1.86068 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，远高于玉米 ($4.5228 \times 10^2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和大豆 ($1.4234 \times 10^2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$)。单位产量的碳足迹也表现为单位面积碳足迹类似的

情况，以水稻最高，大豆最低。大豆的碳足迹最低主要是由于其施肥量较小，以及其他农田投入品使用量低造成的。

表2 各区域主要农作物生产的碳成本

区域	作物	产量碳足迹 ($\text{kgC}\cdot\text{kg}^{-1}$)	面积碳足迹 ($\text{kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$)
东北	水稻	0.235	1 860.68
	玉米	0.062	452.28
	大豆	0.057	142.34
华北	小麦	0.476	2248
	玉米	0.252	1 446
西北	小麦	0.159	816.5
	玉米	0.137	1 431.64
	马铃薯	0.136	954.64
	棉花	1.28	2 122.99
华南	水稻	0.148	888.82
	甘蔗	0.055	3 841.54
西南	水稻	0.264	1 659.45
	小麦	0.284	762.12
	玉米	0.354	1 592.00
	油菜	0.543	1 002.09
长江中下游	水稻	0.132	910.07
	玉米	0.209	1 040.50
	小麦	0.157	699.21
	油菜	0.210	998.01

华北地区玉米的产量碳足迹和面积碳足迹都要低于小麦，即 $0.252 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2} < 0.476 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ， $1 446 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2} < 2 248 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，主要原因为玉米的产量水平较高，而需要的灌溉量较少。小麦碳足迹比较高，是由于其灌溉需要的电力较多。

由于地膜的使用，西北地区玉米和棉花的面积碳足迹均较高，分别为 $1.43164 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2.12299 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，小麦的面积碳足迹最低，为 $8.165 \times 10^2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而棉花由于农药施用量较大，其碳足迹水平远高于其他作物。作物产量碳足迹与面积碳足迹情况类似，仍以棉花 ($1.28 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最大，小麦 ($0.159 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$) 最小。

由于农资投入水平较高，西南地区水稻和玉米

的面积碳足迹较高,均在 $1.5 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。油菜的面积碳足迹 ($1.002\ 09 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处于中等水平,而产量碳足迹 ($0.543 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 却高于其他作物,主要由其单产过低引起的。

华南地区甘蔗的面积碳足迹较高,为 $3.841\ 54 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,大于水稻的 $8.888\ 2 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。但由于其单产水平远远高于水稻,致使其产量碳足迹较低,只有水稻产量碳足迹的三分之一左右。

长江中下游地区玉米面积碳足迹 ($1.040\ 5 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高于其他三种作物,油菜产量碳足迹 ($0.210 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$) 高于其他三种作物。与其他地区相比,水稻表现出了相对较低的碳足迹,说明该地区水稻灌溉等投入量水平并不高。

(二) 作物碳足迹的构成因素

如图2所示,西北地区的作物碳足迹普遍较高,主要是由地膜的使用引起的。构成华北地区作物生产的碳足迹主要为电力,这与华北平原的灌溉方式有关,其他地区的作物生产的碳足迹主要是化肥的施用。

(三) 我国各区域主要粮食作物生态系统净生产力

如图3所示,水稻生态系统净生产力在各区域变异不明显,在东北地区表现最好为 $5.174 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是长江中下游地区,水稻生产生态系统净生产力为 $4.327 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明这两个地区种植水稻具有较强的作物生产固碳能力。玉米生产的生态系统净生产力变化较大,在西北地区最大达到 $5.560 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,而在西南地区只有 $1.768 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦生态系统净生产力同

样表现出了不同区域的明显变化,在西北地区最高为 $4.271 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,而在长江中下游地区只有 $1.136 \times 10^3 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从全国平均水平来看,三种主要粮食作物的生态系统净生产力差别不大,表现为玉米 > 水稻 > 小麦。

四、我国粮食主产区作物系统碳汇功能典型实证研究

(一) 华北平原粮食作物生产的碳汇结构与功能评价

1. 粮食作物生产系统碳足迹大小及构成

华北平原粮食作物生产系统近32年的碳足迹大小和变化趋势见图4。总体上,粮食作物生产系统的碳足迹呈增加趋势,从1978年的 $2.926\ 8 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2009年的 $4.679\ 9 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增长率为 $7.02 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

依据碳足迹在年季间的变化特征,粮食作物生产系统的碳足迹变化可分为4个时期:第一稳定期(1978—1984年,简称为“S1”)、快速增长期(1984—1997年,简称为“S2”)、第二稳定期(1997—2002,简称为“S3”)和缓慢增长期(2002—2009,简称为“S4”)。4个时期的碳足迹大小见表3,第一个稳定期的粮食作物生产系统碳足迹在 $290 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上下波动;快速增长期间,粮食作物生产系统的碳足迹从 $2.870\ 2 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $4.238\ 2 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增长率为 $12.69 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,12年间增加了近1倍;第二个稳定期碳足迹基本停滞在 $4.25 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$;2003年后碳足迹处于缓慢增长期,粮食作物生

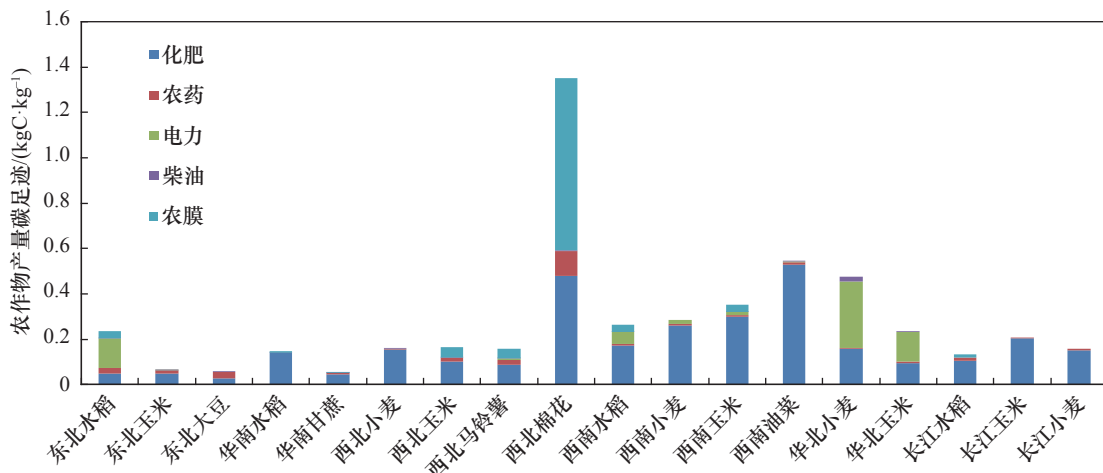


图2 各地区作物产量碳足迹构成比较

产系统的碳足迹从 $4.2331 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $4.6799 \times 10^2 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2}$, 年均增长 $5.85 \text{ kgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,

增速仅约为快速增长期的 1/2。

1978—2009 年粮食作物生产系统碳足迹构成情

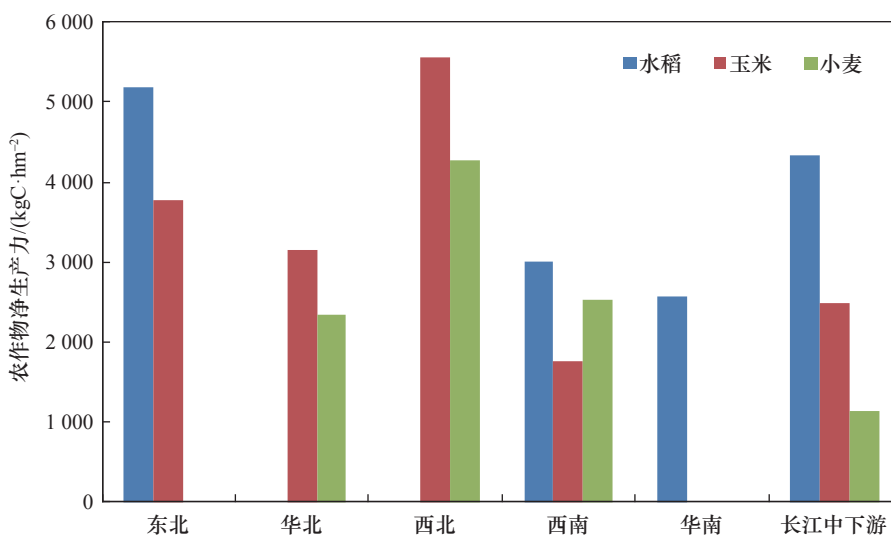


图 3 各地区主要粮食作物生态系统净生产力

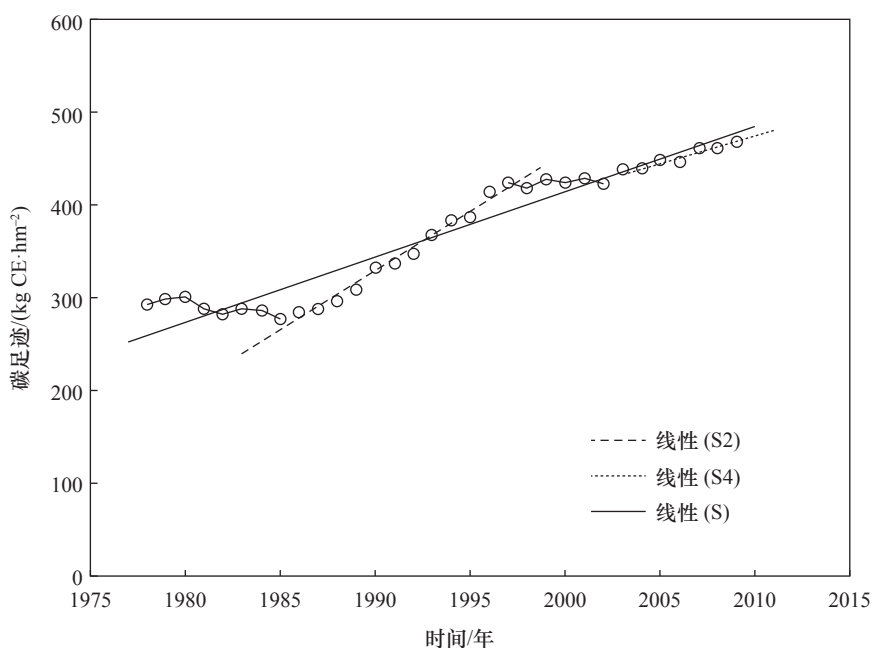


图 4 1978—2009 年粮食作物生产系统碳足迹的变化趋势

表 3 粮食作物生产系统不同时期碳足迹大小及构成

年份	碳足迹 / ($\text{kgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	构成 /%					
		化肥	灌溉	机械	人工	种子	农药
1978—1984	291.14	21.97	25.64	7.77	24.11	18.96	1.54
1984—1997	338.07	34.19	28.87	10.09	10.19	14.66	2.01
1997—2002	424.50	40.05	28.25	12.02	5.83	11.47	2.38
2002—2009	448.28	40.93	29.98	12.48	4.22	9.96	2.43
1978—2009	367.81	35.08	28.61	10.79	9.97	13.43	2.12

况见表3。总体上,粮食作物生产系统碳足迹的大小为 $367.81 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中化肥、灌溉、机械、人工种子和农药的碳足迹分别为 $129.02 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $105.23 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $39.69 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $36.66 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $49.41 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $7.80 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,化肥所占的比重最大,约占总量的1/3,灌溉约占总量的近1/3,化肥和灌溉两项占总量的63.69%;机械、人工和种子所占碳足迹总量比重差异不显著,均约占10%;农药所占比重最少,不足3%。

2. 粮食作物生产系统固碳量历史动态

由图5可知,总体上近30年粮食作物生产系统的固碳量呈增长趋势,从1978年的 $1.77891 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到2009年的 $4.60902 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$,增加1倍多,年平均固碳量增加了 $91.42 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1978—2009年华北平原粮食作物生产系统中,经济产量、秸秆和根的固碳量分别为 $(1251.71 \pm$

$332.76) \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $(1394.58 \pm 378.28) \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $(582.29 \pm 166.16) \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别占粮食作物生产系统固碳量的38.77%、43.19%和18.04%,经济产量和秸秆的固碳量差异不显著,但均显著高于根的固碳量。

3. 粮食作物生产系统碳生态效率动态变化

由图6可知,1978—2009年粮食作物生产系统碳的生态效率为 $(8.67 \pm 1.15) \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CE}$ 。依据粮食生产系统碳的生态效率的变化趋势,可以将粮食作物生产系统碳的生态效率分为3个时期,第一增长期(1978—1985年)、稳定期(1985—2000年)和第二增长期(2000—2009年)。第一增长期粮食作物生产系统碳的生态效率为 $(7.19 \pm 1.39) \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CE}$,平均年增长率为 $0.51 \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CE}$;稳定期碳的生态效率为 $(9.07 \pm 0.32) \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CE}$;第二增长期粮食生产系统碳的生态效率为 $(9.27 \pm 0.58) \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{CE}$,

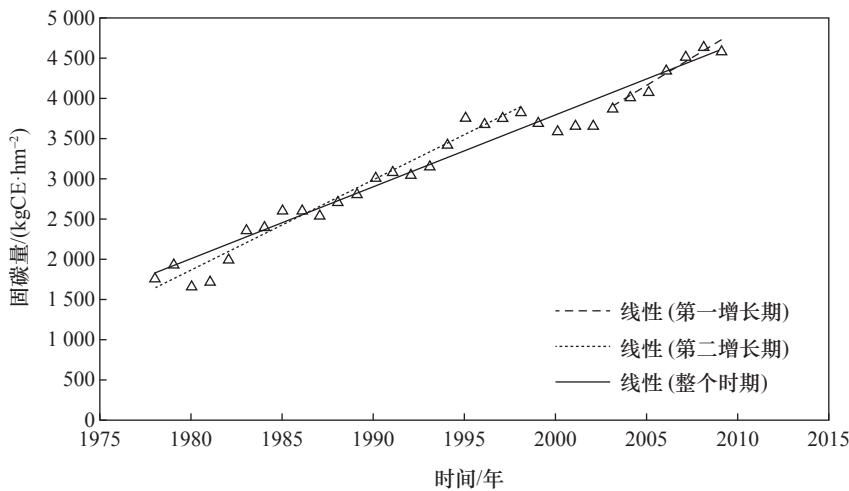


图5 1978—2009年粮食作物生产系统的固碳量

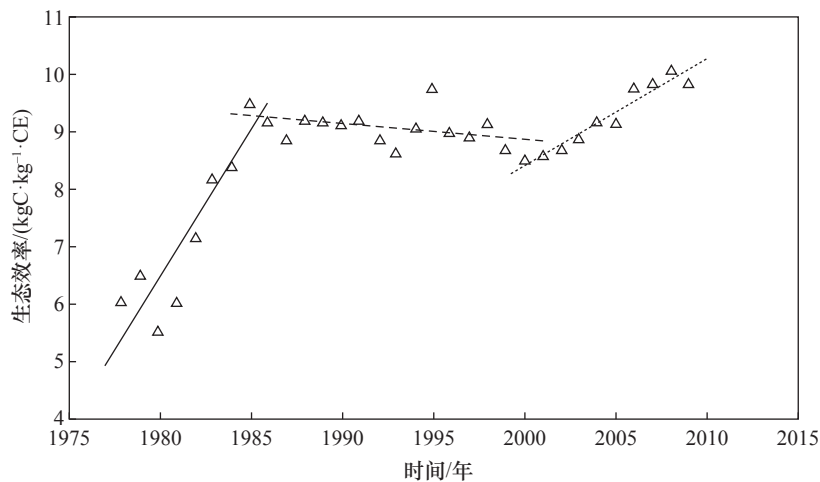


图6 1978—2009年粮食作物生产系统碳效率

平均年增长率为 $0.19 \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ CE}$ 。稳定期和第二增长期粮食生产系统碳的生态效率差异不显著,均显著高于第一增长期。

(二) 长江中下游双季稻作物生产系统的碳汇结构与功能评价

1. 双季稻作物生产系统碳足迹数值大小及构成变化

2004—2012年长江中下游地区双季稻生产系统碳足迹数值大小及构成情况见表4,双季稻作物生产系统碳足迹呈增长趋势,从2004年的 $1.83926 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到2012年的 $2.20008 \times 10^3 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$,年平均碳足迹增加了 $25.9 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中化肥、种子、农药、农膜、灌溉和机械近十年碳足迹平均值分别为 $968.0 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $9.9 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $218.6 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $35.1 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $818.4 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $22.2 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。碳足迹构成中化肥所占的比重最大,约占总量的45%,灌溉约占总量的40%,两者数值占总碳足迹的85%左右,其次是农药,所占比例为10.5%,机械、农膜和种子所占碳足迹总量的比重最少,合计不足4%。

2. 双季稻作物生产系统固碳量大小及构成动态变化

2004—2012年长江中下游地区双季稻生产系统固碳量大小及构成情况见表5,总体上看,双季稻作

物生产系统固碳量年际间变化不明显,年均固碳量在 $1.06 \times 10^4 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上下波动。作物生产系统固碳量由籽粒、秸秆和根的固碳量组成,其中以籽粒和秸秆的固碳量所占比例较多,均占到约40%以上,籽粒固碳量呈缓慢上升趋势,年均增加量为 $14.9 \text{ kgC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,双季稻根系固碳量相对最少,占到15.3%左右。

3. 长江中下游地区双季稻作物生产系统碳效率动态变化

由图7可知,2004—2012年长江中下游地区双季稻作物生产系统碳生态效率持续大于1,表明双季稻作物生产固定碳量大于投入碳量,农田生态系统表现为碳汇。随着年份增加,双季稻作物碳生态效率呈下降趋势,由2004年的 $5.8 \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$ 下降到2012年的 $5.0 \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$,年均下降 $0.09 \text{ kgC}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}\cdot\text{a}^{-1}$,

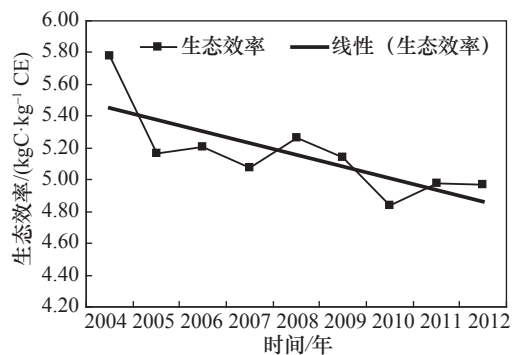


图7 1978—2009年粮食作物生产系统碳的生态效率

表4 2004—2012年长江中下游地区双季稻生产系统碳足迹构成 (kgC·hm⁻²)

项目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
化肥	865.7	1031.2	985.9	996.3	963.2	954.6	995.8	954.2	965.1	968.0
种子	5.0	9.0	8.8	9.3	10.8	10.7	11.3	11.9	12.7	9.9
农药	102.7	116.4	136.0	175.2	253.6	271.5	290.6	299.9	321.4	218.6
农膜	61.4	54.4	39.6	38.1	28.0	29.5	21.0	22.5	21.8	35.1
灌溉	790.5	802.0	802.2	803.2	820.6	822.7	832.7	842.4	849.1	818.4
机械	14.0	12.3	14.2	17.8	21.5	29.8	31.3	29.2	29.9	22.2
总碳足迹	1 839.3	2 025.2	1 986.8	2 039.9	2 097.7	2 118.8	2 182.7	2 160.1	2 200.1	2 072.3

表5 2004—2012年长江中下游地区双季稻生产系统固碳量构成 (kgC·hm⁻²)

项目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
籽粒	4 591.0	4 521.7	4 469.9	4 473.7	4 775.6	4 707.9	4 563.9	4 644.8	4 724.9
秸秆	4 410.9	4 344.4	4 294.6	4 298.3	4 588.3	4 523.2	4 384.9	4 462.6	4 539.6
根	1 620.3	1 595.9	1 577.6	1 579.0	1 685.5	1 661.6	1 610.8	1 639.3	1 667.6
总生物量	10 622.3	10 462.0	10 342.0	10 351.0	11 049.4	10 892.7	10 559.6	10 746.7	10 932.1

下降趋势并不明显,碳汇功能保持较为稳定。

五、我国农田碳汇结构评价与优化途径

1. 农作系统碳汇功能提升的技术方向

一是选择优良品种,研究表明超级稻不仅增产而且利于稻田 CH_4 的减排。二是耕作栽培的调整,研究表明增密减氮不仅稳产而且可使温室气体减排。增密指的是扩行缩株;减氮指的是控前促后。三是土壤增碳,研究表明有机肥增碳明显,但常规的秸秆还田、免耕、大豆轮作的增碳效果不显著。

2. 各区域作物生产减排需要因地制宜

通过对我国各区域主要作物生产的碳成本的构成分析,针对性地提出各区域作物生产节能减排的重点。

东北。水稻生产碳足迹明显高于其他两种作物,该区域应当在优化生产技术减少化肥和农膜的基础上重点研究采取高效的灌溉措施,提高效率减少灌溉等的耗电量,降低水稻生产的碳足迹。

华北。小麦、玉米系统生产的碳足迹主要通过提高灌溉效率和肥料利用效率来实现区域作物生产的碳成本的减少。

西北。该地区减排的重点应在减少农膜、化肥以及农药的使用量,提高效率,降低该区域棉花、玉米、马铃薯生产的碳足迹,尤其棉花通过优化农膜的使用而减少碳足迹的潜力明显。

西南。各主要作物的生产碳足迹差别不明显,且都主要为化肥投入贡献,该区域应当重点提高肥料的利用率减少作物生产的碳足迹,降低碳成本。

华南。该区域减排重点应在研究如何减少作物生产的化肥投入量,降低甘蔗,水稻生产的碳足迹以降低区域作物生产的碳成本。

长江中下游。本区域通过减少肥料和农药投入而实现减排的潜力较大,应当重点提高其利用效率减少实物使用量。

六、提高我国作物固碳减排能力的建议

(一) 提高区域固碳减排能力

1. 发挥宏观布局与调控的作用

应对气候变化,调整我国作物优势产业区(带),将耗水作物南移,高效水分利用作物北移、西移;

在满足国家进口粮油产品需求的前提下,鼓励进口高碳产品、高水足迹产品、低废弃物产品。

2. 加强抗逆研究与成果应用

加强抗逆种质资源,特别是抗旱种质资源的挖掘,培育抗旱高产品种、推广抗旱品种;加强抗旱栽培技术研究并加大推广力度,包括节水、保水、蓄水技术,以增加作物种植面积、提高作物单产,实现固碳减排。

(二) 提高碳生产效益

1. 技术推广和政策扶持并重,稳定南方双季稻种植面积,开发利用南方冬闲田

要推进冬闲田开发的产供销、农工贸一体化体系,构建支持以发展冬季农业为导向的专业合作社,提高社会化服务水平和订单农业,切实保障冬季农业增效和农民增收。建议切实增加南方冬闲田开发利用的科技研发和技术推广投入,加强农业基础设施建设和土地流转,实施冬闲田开发利用专项补贴和政策性保险制度,促进作物面积,特别是多熟制面积的增加,增强碳汇的功能、提高碳生产的效率。

2. 推进水稻-小麦、小麦-玉米、水稻-油菜等主体种植模式的全程机械化进程

有效推进农业主产区水稻-小麦、水稻-油菜、小麦-玉米等主体种植模式的全程机械化生产,完善农田全程机械化周年高产技术集成、作物秸秆还田配套耕作机械及种植方式、栽培耕作技术等,是现阶段我国耕作制度发展迫切需要解决的问题。建议加大相关技术研发和示范推广力度,在粮食、油料主产区快速推动作物生产全程机械化进程,促进主体种植模式的发展,提高碳汇功能。

3. 建立联合攻关机制,实现主体种植制度的节本高效

结合国家优势农产品区域布局及商品粮基地建设,建立联合攻关队伍,研究制定相应的技术规程和技术补贴政策,将多熟高产高效、秸秆还田与地力提升、旱作节水与养分管理等集成配套,探索建立适合不同类型区域的资源低耗高效耕作制度,增加生物产量,提高碳汇功能。

4. 重视南方水网密集地区的环境保护型耕作制度建设

在农业面源污染严重的水网密布农区,要在确保高产高效前提下进行作物周年优化配置,进行农

田有害生物综合防治、有毒物质阻控和消减综合控制、农田流失性养分减排，构建环境友好的标准化种植模式与技术规范，建立基于生态补偿机制的新型环保型耕作制度。

（三）提高产后碳利用的效率

1. 启动实施国家秸秆成型燃料产业示范工程

选择秸秆资源能源化利用基础条件较好、市场需求量大的地区，建设一批秸秆成型燃料产业开发示范点，培育一批秸秆成型燃料龙头企业，支持关键技术和设备升级研发与示范应用。

2. 采取财政补贴措施引导农户使用秸秆成型燃料

将秸秆成型燃料设备、配套炉具和使用成型燃料的农户纳入财政转移支付补贴的范围，引导和鼓励农民使用节能炉具和成型燃料，扩大农村生物质能源的消费需求。

3. 适当降低秸秆成型燃料企业补贴的政策门槛

调减秸秆能源化利用补贴企业的注册资金和秸秆量的消耗量标准，使大、中、小秸秆成型燃料企业都能够纳入财政的补贴范围，引导更多的社会资金投入秸秆成型燃料产业，快速壮大这一新型产业的发展。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269–273.
Dong H M, Li Y E, Tao X P. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269–273.
- [3] 李颖, 葛颜祥, 刘爱华, 等. 基于粮食作物碳汇功能的农业生态补偿机制研究[J]. 农业经济问题, 2014, 35(10): 33–40.
Li Y, Ge Y X, Liu A H, et al. Agricultural ecological compensation mechanism research based on the carbon sink function of grain crops [J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(10): 33–40.