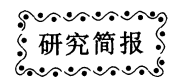


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.01485



华北平原主要作物生产的碳效率研究初报

史磊刚 范士超 孔凡磊 陈 阜*

中国农业大学农学与生物技术学院 / 农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193

摘 要: 提高农作物生产的碳效率是实现低碳农业的重要途径之一。为探明农业生产中的碳效率, 本文以河北吴桥县为例, 基于农户生产调查数据, 利用投入产出法, 对华北平原冬小麦、夏玉米和棉花 3 种主要作物生产的碳投入、碳产出和碳效率进行了评价。结果表明, 冬小麦、夏玉米和棉花生产的碳投入总量分别为 943.47 ± 225.14 、 525.74 ± 134.73 和 513.60 ± 138.94 kg CE hm^{-2} , 其中化肥和电能占总量的大部分, 分别约占 60% 和 25%。3 种作物碳的产出总量分别为 $8\,430.70 \pm 774.45$ 、 $7\,194.50 \pm 754.58$ 和 $5\,486.00 \pm 547.69$ kg CE hm^{-2} , 其中秸秆约占总量的 50%, 经济产量约占 34%, 根约占 17%。冬小麦、夏玉米和棉花碳的生产效率分别为 7.95 ± 2.55 、 15.90 ± 4.34 和 7.60 ± 2.92 kg kg^{-1} CE, 碳的经济效率分别为 13.28 ± 4.56 、 21.47 ± 5.86 和 76.70 ± 29.45 CHY kg^{-1} CE, 碳的生态效率分别为 9.59 ± 3.07 、 14.57 ± 3.98 和 11.69 ± 4.49 kg C kg^{-1} CE, 作物间的碳效率差异显著, 初步表明在华北平原, 夏玉米生产的碳综合效率最高, 棉花次之, 冬小麦最低。

关键词: 华北平原; 冬小麦; 夏玉米; 棉花; 碳效率; 低碳农业

Preliminary Study on the Carbon Efficiency of Main Crops Production in North China Plain

SHI Lei-Gang, FAN Shi-Chao, KONG Fan-Lei, and CHEN Fu*

College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University / Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China

Abstract: Improving the carbon efficiency of crop production is one of the important ways to realize the low-carbon agriculture. In order to get a clear understanding of carbon efficiency in agricultural production, this paper, based on the investigation data of the farmer's production, applying input and output calculation method, evaluated the carbon input, carbon output and carbon efficiency in production of the three major crops, winter wheat, summer maize and cotton, in Wuqiao County of Hebei Province in North China Plain. The results were as follows: the carbon input of winter wheat, summer maize and cotton was 943.47 ± 225.14 , 525.74 ± 134.73 , and 513.60 ± 138.94 kg CE ha^{-1} , of which fertilizers and electricity accounted for a majority, about 60% and 25% respectively. The carbon output of the three major crops was $8\,430.70 \pm 774.45$, $7\,194.50 \pm 754.58$, and $5\,486.00 \pm 547.69$ kg CE ha^{-1} respectively, of which straw accounted for 50%, economic yield accounted for 34%, and root accounted for 17%. The carbon production efficiency of winter wheat, summer maize and cotton was 7.95 ± 2.55 , 15.90 ± 4.34 , and 7.60 ± 2.92 kg kg^{-1} CE, respectively. The carbon economic efficiency of the three crops was 13.28 ± 4.56 , 21.47 ± 5.86 , and 76.70 ± 29.45 CHY kg^{-1} CE, respectively. The carbon ecological efficiency of the three crops was 9.59 ± 3.07 , 14.57 ± 3.98 , and 11.69 ± 4.49 kg C kg^{-1} CE, respectively. There were significant differences in the carbon efficiency of the three major crops. Preliminary results showed that the carbon integrated efficiency of summer maize was the highest, followed by cotton, which in turn had higher the efficiency than winter wheat in North China Plain.

Keywords: North China Plain; Winter wheat; Summer maize; Cotton; Carbon efficiency; Low-carbon agriculture

资源效率是指消耗或占有单位数量的资源所产生的有效价值量, 农业资源效率是衡量农业可持续发展的重

要指标之一^[1-2]。碳作为农业生产系统中的一种重要资源, 其效率是指投入单位数量碳所产出的经济产量和经济价

本研究由国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951502)和国家公益性行业(农业)科研专项(200903003)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 陈阜, E-mail: chenfu@cau.edu.cn, Tel: 010-62733316

第一作者联系方式: E-mail: shileigang923@126.com

Received(收稿日期): 2011-01-24; Accepted(接受日期): 2011-04-27; Published online(网络出版日期): 2011-06-13.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20110613.1452.007.html>

值等有效价值量,提高碳效率是农业节能减排的重要途径之一^[3-4]。国内外学者对土地、光照、水和肥等资源在农业生产中的效率,以及如何提高资源效率进行了广泛的研究^[5-6]。但是,对碳效率的研究是随着人类对气候变暖重视程度的提高才逐步开展的,目前还处于起步阶段。Canadell 等^[4]研究表明,人类活动过程中碳效率的降低是大气中 CO₂ 浓度增加的一个重要原因。Burney 等^[7]指出通过提高农业中的碳效率,可以增加农业的碳汇能力。Mrini 等^[8]在摩洛哥研究了甜菜不同种植规模的碳效率,并发现小规模碳效率大于大规模。Dubey 等^[9]测算了美国俄亥俄州和印度旁遮普邦农业的碳效率,并对两地农业生产的可持续性进行了评价。国内学者已经开始研究农业生产的“隐型碳消耗量”问题^[10],部分学者对水稻-油菜和双季稻模式的碳固定量与碳投入和经济收入的关系进行了研究^[11-12]。作物生产系统的碳源/碳汇总量均很大,并且具有巨大的固碳减排潜力。目前,有关作物生产的碳效率研究鲜有报道。本研究从计算作物生产过程中碳投入和产出的总量和构成出发,对华北平原冬小麦、夏玉米和棉花 3 种主要作物生产中碳的生产、经济和生态效率及其差异性进行初步的分析。研究结果可以进一步深化对农业固碳减排的认识,为实现低碳农业提供科学依据。

1 研究对象与方法

本研究以河北省吴桥县为典型区域(东经 116°19′~116°24′,北纬 37°29′~37°47′之间),对华北平原冬小麦、夏玉米和棉花从播种到收获整个农业生产过程中的碳投入量和产出量进行实地调研,并基于投入产出法,初步探讨这 3 种作物生产的碳效率。

1.1 碳的投入量

作物的碳投入量是指从播种到收获整个农业生产过程中由于投入种子、农药、化肥、机械和灌溉造成的间接碳排放总量^[3,9]。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n (m\beta)_i$$

式中, C₁ 为某种作物的碳投入总量, n 表示该作物从播种

到收获整个过程消耗了 n 种能源(柴油和电能等)或农业生产资料(化肥、农药和种子等), C_i 表示第 i 种能源或农资的碳排放量, m 为消耗第 i 种能源或农资的量, β 为第 i 种能源或农资的碳排放参数,碳投入量统一用碳当量来表示,单位是 kg CE,各种农资或能源的碳排放参数见表 1。

表 1 各种农业资料的碳排放系数
Table 1 Index of carbon emission of different material for agricultural production

项目 Item	碳排放参数 Index of carbon emission	参考文献 Reference
氮肥 N	1.74 kg CE kg ⁻¹	[13]
磷肥 P ₂ O ₅	0.20 kg CE kg ⁻¹	[3]
钾肥 K ₂ O	0.15 kg CE kg ⁻¹	[3]
除草剂 Herbicides	6.30 kg CE kg ⁻¹	[3]
杀虫剂 Insecticides	5.10 kg CE kg ⁻¹	[3]
灭菌剂 Fungicides	3.90 kg CE kg ⁻¹	[3]
柴油 Diesel	0.94 kg CE kg ⁻¹	[3]
电能 Electricity	0.25 kg CE kW h ⁻¹	[13,14]
小麦种子 Wheat seed	0.11 kg CE kg ⁻¹	[15]
玉米种子 Maize seed	1.05 kg CE kg ⁻¹	[15]
棉花种子 Cotton seed	0.65 kg CE kg ⁻¹	[15]

1.2 碳的产出量

本研究中作物的碳产出量是指作物通过光合作用固定在总生物量中的 C 量。作物的生物量由经济产量、秸秆产量和根量组成(棉花的经济产量为籽棉)^[3,9],秸秆产量、根量和生物总量均是由经济产量推算得到。

经济产量的含 C 量: C_G=M×(1-w)×0.45

秸秆含 C 量: C_S= C_G/H-C_G

根含 C 量: C_R= (C_G+ C_S)×R

总生物量中的含 C 量: C_O= C_G+C_S+C_R

上述公式中, C_G、C_S、C_R 和 C_O 的单位均是“kg C”; M 为经济产量,单位是 kg, w 为经济产量的含水量, H 为经济系数, R 为根冠比系数, 0.45 为生物量与含 C 量的转化系数^[16],各参数主要参考 Lal 等^[9]和 Fang 等^[16]的研究结果(表 2)。

表 2 作物的经济系数、含水率和根冠比
Table 2 Economic coefficient, water content, and root-shoot ratio of crops

参数 Parameter	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	棉花 Cotton	参考文献 Reference
经济系数 Economic coefficient	0.37	0.49	0.35	[16]
含水量 Water content	0.13	0.14	0.08	[16]
根冠比 Root-shoot ratio	0.14	0.16	0.30	[9]

1.3 碳效率

1.3.1 碳的生产效率 作物生产中碳的生产效率是经济产量与碳投入量的比值,是衡量碳投入的经济产量的效率指标,以下简称“生产效率”,用 C_C 表示,单位是“kg kg CE⁻¹”。生产效率越高,表明投入单位数量碳,产出的

经济产量越多。

本研究中作物生产过程中碳的生产效率: C_C=M/C₁

1.3.2 碳的经济效率 作物生产中碳的经济效率是经济产值与碳投入量的比值,是测量作物生产经济效益的指标,以下简称“经济效率”。经济效率越高,表明作物生

产中投入单位数量碳获得的经济价值越多^[4]。本研究中用经济产量的经济价值表示作物碳的经济效益,其值为经济产量与单价的乘积。

本研究中 3 种作物生产过程中碳的经济效率:
 $C_E=(M \times P)/C_1$

C_E 的单位是“CHY kg⁻¹ CE”, M 为经济产量, P 为经济产量的价格。依据 2009 年的《全国农产品成本收益资料汇编》^[17],小麦、玉米和棉花(籽棉)的单价分别为 1.76、1.35 和 10.09 CHY kg⁻¹。

1.3.3 碳的生态效率 作物生产中碳的生态效率是指作物通过光合作用固定在体内的碳量与碳投入量的比值,是评估农业生产可持续性的指标之一^[9],以下简称“生态效率”,用 C_S 表示,单位是“kg C kg⁻¹ CE”。其值小于 1,表明农业生产投入的碳量大于产出碳量,该农业生产系统是碳源,数值越接近 0,说明碳排放强度越大,农业生产的可持续性越低;碳的生态效率大于 1,表明固定的碳量大于投入量,该农业生产系统是碳汇,数值越大,表明碳汇能力越强,农业生产可持续性越高。

本研究中 3 种作物生产中碳的生态效率: $C_S= C_0/C_1$

1.4 数据来源与分析方法

本研究数据来源于河北吴桥县的农户生产调查,在吴桥县随机选取 4 个乡镇,每个乡镇随机选取 3 个村,每个村选取 15 户左右农户(包括农业技术员、农机大户和普通农户),调查内容包括作物单产、化肥用量、灌溉用电量、农机投入消耗的柴油量、播种量和农药用量。共获取冬小麦的有效问卷 136 份,夏玉米有效问卷 136 份,棉花有效问卷 106 份,采用 SPSS13.0 和 Microsoft Excel 2007 统计软件进行方差分析和作图。

2 结果与分析

2.1 碳的投入量及构成

冬小麦、夏玉米和棉花 3 种作物从播种到收获整个

过程中,碳的投入包括化肥、农药、柴油、电能和种子五大部分,依据实地调研获取的各种农资和能源的投入量,利用 1.1 中的公式,计算出这 3 种作物的碳投入量清单(表 3)。种植 1 hm² 冬小麦、夏玉米和棉花的总的碳投入量分别是 943.47±225.14、525.74±134.73 和 513.60±138.94 kg CE,冬小麦生产的碳投入量最高,夏玉米和棉花的差异不显著。

冬小麦生产中化肥和电能的投入量均显著高于夏玉米和棉花,夏玉米和棉花的差异不显著;冬小麦生产中柴油部分的碳投入量也是最多,棉花次之,夏玉米最少;夏玉米生产中种子部分的碳投入量最多,小麦次之,棉花最少;夏玉米生产中农药部分的碳投入量最多,棉花次之,冬小麦最少。

图 1 表明,总体上,3 种作物的碳投入构成中,均以化肥部分所占比例最大,占总量的一半以上;灌溉消耗电能部分所占比例次之,约为 1/4;机械投入消耗柴油部分的碳投入较少,冬小麦和棉花约占各自总量的 1/10,夏玉米约占 2%;种子部分的碳投入占各自总量的 5%左右;农药部分碳投入占总碳投入量的比例最小,均在 3%以下。

2.2 碳的产出量及构成

作物生产中碳产出量是指作物整个生育期过程中通过光合作用积累的生物量中的含 C 量,依据实地调查获得的作物经济产量,利用 1.2 中相关公式,分别计算出种植 1 hm² 冬小麦、夏玉米和棉花的生物产量及经济产量、秸秆和根各部分的含 C 量(表 4)。由表 4 可知,冬小麦、夏玉米和棉花生产的碳产出总量分别是 8 430.70±774.45 kg CE hm⁻²、7 194.50±754.58 kg CE hm⁻² 和 5 486.00±547.69 kg CE hm⁻²。

3 种作物间碳产出的构成中,经济产量部分是夏玉米最多,冬小麦次之,棉花最少;秸秆部分是冬小麦最多,夏玉米次之,棉花最少;根部分是棉花最多,冬小麦次之,夏玉米最少。作物内碳产出的构成情况均是秸秆部分所占

表 3 碳投入量清单
Table 3 List of carbon input (mean±SD, kg CE hm⁻²)

项目 Item		冬小麦的碳投入量 C_1 of winter wheat	夏玉米的碳投入量 C_1 of summer maize	棉花的碳投入量 C_1 of cotton
化肥 Fertilizer	氮肥 N	429.11±112.31	299.92±105.92	287.63±105.61
	磷肥 P ₂ O ₅	36.02±17.65	18.76±10.68	22.36±15.20
	钾肥 K ₂ O	11.40±7.36	9.63±5.54	17.38±7.72
农药 Pesticide	除草剂 Herbicides	0.22±0.25	11.99±7.86	4.93±2.20
	杀虫剂 Insecticides	0.93±1.08	1.90±1.98	2.78±2.56
	灭菌剂 Fungicides	1.42±1.49	1.30±1.97	3.36±4.05
柴油 Diesel	秸秆还田 Returning straw to field	39.08±7.43	0	0
	旋耕 Rotary tillage	35.96±4.99	0	33.52±6.38
	播种 Sowing	10.25±2.77	9.60±3.60	10.83±2.61
	收获 Harvesting	34.37±5.27	0	0
灌溉 Irrigation	电能 Electricity	309.01±181.44	125.87±96.10	106.92±83.97
种子 Seed		35.72±4.54	46.77±8.83	23.88±7.92
合计 Sum		943.47±225.14	525.74±134.73	513.60±138.94

C_i: input of C.

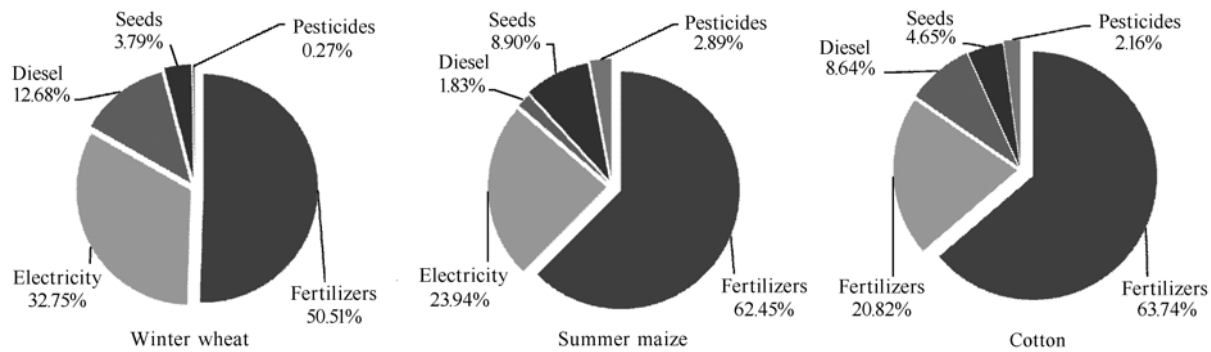


图 1 作物生产的碳投入的组成
Fig. 1 Composition of the carbon input in crop production

表 4 碳产出清单
Table 4 List of carbon output (mean±SD, kg CE hm⁻²)

项目 Item	冬小麦的碳产出量 C _O of winter wheat	夏玉米的碳产出量 C _O of summer corn	棉花的碳产出量 C _O of cotton
经济产量 Economic yield	2736.28±251.36	3039.05±318.75	1477.00±147.45
秸秆 Straw	4659.07±427.99	3163.10±331.76	2743.00±273.84
根 Root	1035.35±95.12	992.34±104.08	1266.00±126.39
生物产量 Biomass	8430.70±774.45	7194.50±754.58	5486.00±547.69

C_O: carbon output.

比例最高, 约占 50%; 经济产量部分约占 34%; 根部分所占比例最低, 约占 17%。

2.3 碳效率及差异性分析

基于实地调查所得的冬小麦、夏玉米和棉花的生产数据, 利用 1.3 中的相关计算公式, 分别得到 3 种作物生产中碳的生产效率、经济效率和生态效率(图 2)。

由图 2 可知, 冬小麦、夏玉米和棉花生产中碳的生产效率分别为 7.95±2.55、15.90±4.34 和 7.60±2.92 kg kg⁻¹ CE, 夏玉米的碳生产效率最高, 冬小麦次之, 棉花最少; 碳的经济效率分别为 13.28±4.56、21.47±5.86 和 76.70±29.45

CHY kg⁻¹ CE, 可见种植棉花碳的经济效率最好, 是种植夏玉米的 3 倍多, 是冬小麦的近 6 倍, 种植夏玉米碳的经济效率也显著高于冬小麦; 碳的生态效率分别是 9.59±3.07、14.57±3.98 和 11.69±4.49 kgC kg⁻¹ CE, 3 种作物碳的生态效率均显著大于 1, 表明种植冬小麦、夏玉米和棉花的生产系统均有显著的碳汇作用, 并且夏玉米生产系统的碳汇能力最强, 棉花次之, 冬小麦最弱。表明 3 种作物间的碳效率差异显著, 并且可以初步断定在华北平原, 夏玉米生产的碳综合效率最高, 棉花次之, 冬小麦最低。

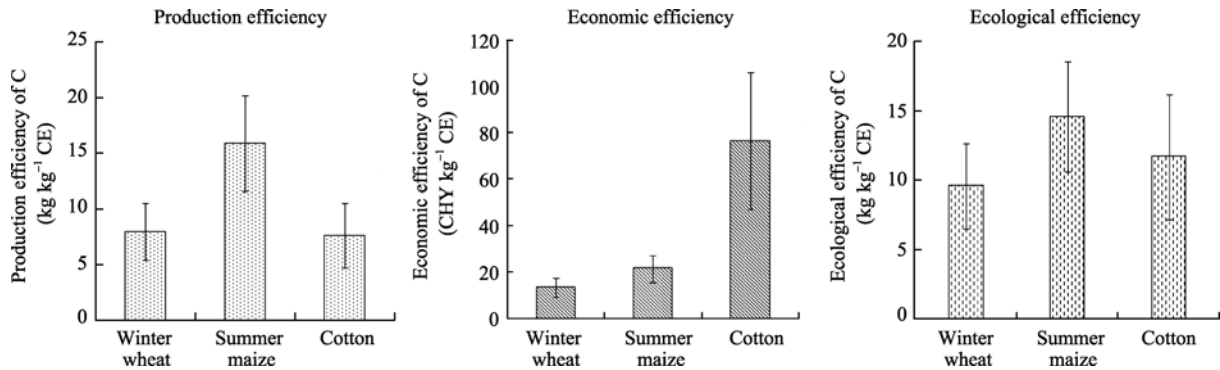


图 2 作物生产的碳效率
Fig. 2 Carbon efficiency of crop production

3 讨论

3.1 碳效率的区域差异

农业生产中碳的效率受种植模式、生产管理方式及

社会经济条件等多方面因素的影响, 故而不同区域农业生产的碳效率差异显著。Mrini 等^[8]在摩洛哥研究甜菜在小农场的碳效率是 6.3 kg C kg⁻¹ CE, 而在大农场里碳效率是 4.1 kg C kg⁻¹ CE。Dubey 等^[9]测算了美国俄亥俄州

2000—2004 年间农业碳效率在 29~43 kg C kg⁻¹ CE 之间, 而相同时期印度旁遮普邦的农业的碳效率在 11.6~16.5 kg C kg⁻¹ CE 之间。Canadell 等^[4]计算 2000 年全球碳的经济效率为 4.17 US\$ kg⁻¹ C。李洁静等^[12]评价红壤农田生态系统和太湖农田生态系统中碳的生产效率分别为 5.56 kg kg⁻¹ CE 和 2.94 kg kg⁻¹ CE。本研究结果与前人研究结果存在着差异, 主要原因是本研究所选的河北吴桥县是典型的农业大县, 种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟制, 生产管理方式高度集约化, 在水肥等投入及经济产量等方面与国外的一年一熟制和国内的水稻生产系统均存在显著差异。此外, 华北平原各个亚区之间在生产管理措施等方面也存在差异, 冬小麦、夏玉米和棉花生产的碳效率也有所不同, 因此本研究的结果仅适用于河北吴桥区域, 在研究华北平原其他亚区中作物生产的碳效率时需要重新分析。总之, 由于农业的碳效率研究尚处起步阶段, 各研究结果是在不同的情景下得到的, 并且相对粗糙。因此建议今后加强研究相同种植模式和作物, 以及相同区域内不同种植模式的碳效率, 以便提炼共性问题, 使农业生产的碳效率研究成果更有效地为低碳农业服务。

3.2 不同作物间碳效率的差异性

本研究发现 3 种作物生产的碳效率差异显著。冬小麦碳的经济和生态效率均最低, 生产效率居中, 夏玉米碳的生产和生态效率均最高, 经济效率居中, 棉花碳的经济效率最高, 生态效率居中, 生产效率最低。碳投入量不同是造成 3 种作物碳效率不同的主要原因, 冬小麦生育期自然降雨少, 因此需要大量的人工灌溉, 同时冬小麦在当地已经实现机械化播种和收获, 而夏玉米和棉花生育期内降雨多, 所需人工灌溉量少, 同时还是人工收获; 另外由于冬小麦、夏玉米和棉花本身的特性和社会经济需要造成作物间的经济产量、生物产量和经济产值各不相同, 这也是造成作物间碳效率差异的重要原因。

3.3 提高碳效率的途径

冬小麦、夏玉米和棉花生产的碳投入构成中, 化肥均占总量的一半以上, 灌溉消耗的电能约占总量的 1/4, 化肥和灌溉两部分约占总量的 85%, 而我国农业尤其是集约高产区, 化肥和水分普遍存在浪费的现象^[18-19], 因此, 降低肥水的投入量, 提高利用效率是提高作物生产的碳效率的关键; 3 种作物的碳产出量构成中, 秸秆部分约占总量的一半, 而目前我国农业生产中秸秆有效利用率较低^[20], 因此, 拓展秸秆有效利用的方式是提高农业的碳效率的新途径; 3 种作物生产的碳效率优劣差异显著, 因此, 选择种植化石能耗少, 生态适应性好, 能够更好地满足社会经济需求的作物, 是提高农业生产碳效率的重要途径之一。

3.4 研究中存在的不足

本研究计算了作物生产中主要的碳投入和产出, 初步评价了华北平原冬小麦、夏玉米和棉花 3 种主要作物生产的碳效率, 研究结果加深了对农业固碳减排的认识,

为今后开展低碳农业研究提供了科学依据。但是本研究中所用参数是借鉴前人研究结果, 土壤碳库和前季作物的影响尚未考虑, 碳投入总量没有包括人力、畜力和机械磨损, 所得结果与实际值之间会有一定的差异, 因此, 本研究室将通过布置试验, 实测数据来完善参数和排除背景影响, 获取更科学的试验结果, 同时也将进一步开展碳效率差异原因及如何提高碳效率方面的研究, 为最终构建低碳农田生态系统做铺垫。

References

- [1] Xie G-D(谢高地), Qi W-H(齐文虎), Zhang Y-S(章予舒), Leng Y-F(冷允法). A study on utilization efficiency of main agriculture resources. *Resour Sci* (资源科学), 1998, 20(5): 7-11 (in Chinese with English abstract)
- [2] Jin J(靳京), Wu S-H(吴绍洪), Dai E-F(戴尔阜). Assessment on agricultural resources efficiency: comparison on methods and integrated approaches. *Resour Sci* (资源科学), 2005, 27(1): 146-152 (in Chinese with English abstract)
- [3] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environ Int*, 2004, 30: 981-990
- [4] Canadell J G, Le Quere C, Raupach M R, Field C B, Buitenhuis E T, Ciais P, Conway T J, Gillett N P, Houghton R A, Marland G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18866-18870
- [5] Shi Y-L(石玉林), Feng Z-M(封志明). Developing the study of high efficient utilization of agricultural resources. *J Nat Resour* (自然资源学报), 1997, 12(4): 293-298 (in Chinese with English abstract)
- [6] Fu X-L(付雪丽), Zhang H(张惠), Jia J-Z(贾继增), Du L-F(杜立丰), Fu J-D(付金东), Zhao M(赵明). Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(9): 1708-1714 (in Chinese with English abstract)
- [7] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 12052-12057
- [8] Mrini M, Senhaji F, Pimentel D. Energy analysis of sugar beet production under traditional and intensive farming systems and impacts on sustainable agriculture in Morocco. *J Sustainable Agric*, 2002, 20: 5-28
- [9] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA. *J Crop Improvement*, 2009, 23: 332-350
- [10] Han B(韩冰), Wang X-K(王效科), Lu F(逯非), Duan X-N(段晓男), Ou-yang Z-Y(欧阳志云). Researches on the greenhouse gas leakage and net mitigation potentials of soil carbon sequestration measures in croplands. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, 29(9):

- 4494–5006 (in Chinese with English abstract)
- [11] Li J-J(李洁静), Pan G-X(潘根兴), Zhang X-H(张旭辉), Fei Q-H(费庆华), Li Z-P(李志鹏), Zhou P(周萍), Zheng J-F(郑聚锋), Qiu D-S(邱多生). An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2009, 20(7): 1664–1670 (in Chinese with English abstract)
- [12] Li J-J(李洁静), Pan G-X(潘根兴), Li L-Q(李恋卿), Zhang X-H(张旭辉). Estimation of net carbon balance and benefits of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学学报), 2009(12): 2520–2525 (in Chinese with English abstract)
- [13] Lu F(逯非), Wang X-K(王效科), Han B(韩冰), Ou-yang Z-Y(欧阳志云), Duan X-N(段晓男), Zheng H(郑华). Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil. *Chin J App Ecol* (应用生态学报), 2008, 19(10): 2239–2250 (in Chinese with English abstract)
- [14] Xia D-J(夏德建), Ren Y-F(任玉珑), Shi L-F(史乐峰). Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain. *Stat Res* (统计研究), 2010, 27(8): 82–89 (in Chinese with English abstract)
- [15] 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. *Agric Ecosyst Environ*, 2002, 91: 217–232
- [16] Fang J Y, Guo Z D, Pu S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000. *Sci China* (Ser D: Earth Sci), 2007, 50(9): 1341–1350
- [17] The Prices Division of National Development and Reform Commission (国家发展和改革委员会价格司). Data Compilation of the National Agricultural Costs and Returns (全国农产品成本收益资料汇编). Beijing: China Statistics Press, 2009. pp 119–163 (in Chinese)
- [18] Zhang Z-F(张智峰), Zhang W-F(张卫峰). The situation and trend of fertilizer application in China. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 2008, 23(6): 9–12 (in Chinese with English abstract)
- [19] Luo Q-Y(罗其友), Tang H-J(唐华俊), Jiang W-L(姜文来). Strategies of high efficient and sustainable allocation of water and land resources for agricultural purposes. *Resour Sci* (资源科学), 2001, 23(2): 42–45 (in Chinese with English abstract)
- [20] Han L-J(韩鲁佳), Yan Q-J(闫巧娟), Liu X-Y(刘向阳), Hu J-Y(胡金有). Straw resources and their utilization in China. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2002, 18(3): 87–91 (in Chinese with English abstract)