

北京市主要农作模式的碳效益分析

卢小宏 黄晶 史磊刚 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 本研究利用投入产出法的理论和方法,研究了北京地区主要农作模式的碳投入、产出及碳效益情况。结果表明:氮肥和电能在总碳投入中占较大比重,达70%~90%;蔬菜类作物的碳投入远大于非蔬菜类作物,设施蔬菜模式的碳投入分别比麦-玉两熟、春玉米一熟、春花生一熟模式高80.4%、92.0%、94.3%,其余模式间差异较小。春玉米易于田间施肥等管理,资源利用率较高,其碳效益最高,为4.59;春玉米一熟模式的碳效益分别比麦-玉两熟、春花生一熟、蔬菜模式高30.8%、8.31%、96.8%。因此,北京地区种植春玉米有利于减少农田碳排放。

关键词 作物; 种植模式; 投入产出; 碳效益

中图分类号 S 51

文章编号 1007-4333(2012)02-0048-06

文献标志码 A

Analysis on carbon efficiency of the main cropping systems in Beijing

LU Xiao-hong, HUANG Jing, SHI Lei-gang, CHEN Fu*

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

Abstract This study determined the carbon input, carbon output and its efficiency for the main cropping systems in Beijing with the input-output method. The results showed that emissions from the fertilizers and electricity accounted for 70%~90% of the total emissions. Of which, the vegetable crops had higher carbon input than other crops, and the vegetables with facility system heightened its carbon input by 80.4%, 92.0%, 94.3% compared with wheat-maize system, spring maize monoculture system, peanut monoculture system, respectively. And there were no significant differences among these three traditional systems. As for the advanced field management and higher resource utilization rate, the spring maize was the most carbon efficient crop with a carbon efficiency of 4.59; and the spring maize monoculture system heightened its carbon efficiency by 30.8%, 8.31%, and 96.8% compared with wheat-maize pattern, peanut monoculture pattern, facilities vegetables pattern, respectively. The spring maize in Beijing could low carbon emissions from farming system.

Key words crop; cropping system; input-output; carbon efficiency

农业部门通过生产和使用农业机械、农药、化肥等向大气中排放了大量的CO₂。据报道,2008年,加拿大农业部门CO₂排放量就达62亿t,约占全国总排放量的8%^[1]。大量研究表明,合理的农作模式不仅有利于提高农田能量利用效率,减少农田病虫害,提高作物水分利用效率,增加作物净生产力等,而且有助于优化作物生产,实现农田的固碳减排^[2-3]。Jonathan Hillier^[4]等研究表明,豆科植物的

碳足迹显著低于土豆及谷类作物;Tanaka等^[5]研究表明,硬质小麦与豆科或油料作物轮作有利于减少农田碳足迹。目前国内关于不同农作模式碳排放的研究还较少。碳效益是农业生产中衡量碳排放的一个重要指标,在碳评价中占重要地位。Burney等提出将碳效益作为衡量农田可持续发展程度的一个指标。研究表明^[6],提高农作物的碳效率,可以增加农田碳汇能力,是农业节能减排的重要途径之一。

收稿日期:2011-09-20

基金项目:国家“973”计划项目(2010CB951502);农业部公益性行业(农业)科研专项(200903003)

第一作者:卢小宏,硕士研究生,E-mail:xiaohong31@126.com

通讯作者:陈阜,教授,主要从事农作制度和区域农业发展研究,E-mail:chenfu@cau.edu.cn

近年来,随着都市农业的发展,北京市农作物生产上出现了种植模式的多元化,蔬菜类作物的播种面积曾一度超过了小麦和玉米的播种面积,2007年设施蔬菜播种面积已达70 099.7 hm²,接近全市农作物播种面积的44.6%^[7]。设施蔬菜的经济效益高,但资源消耗量大,资源利用率低,不利于农田的可持续发展。比较分析不同农作模式碳效益情况,协调不同作物的种植比例和种植模式,充分发挥农田固碳减排潜力,实现都市农业的可持续发展,是一个亟待解决的课题。本研究以典型都市农业生产的北京市为例,比较分析几种主要农作物及种植模式的碳效益情况,以期为北京市优化农作模式、建设低碳农田提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 计算方法

1.1.1 碳投入量

碳投入量是指从播种到收获整个农田生产过程中由于投入农药、化肥、机械和灌溉等造成的间接和直接碳排放当量值。即:

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

式中: C_1 表示作物的碳投入总量, n 表示该作物从播种到收获整个过程消耗的农业生产资料(化肥、农药等)的种类, m 表示某种农资的消耗量, ∂ 表示某种农资的碳排放当量(表1)。其中,氮肥的碳排放包括生产和运输过程中的间接排放和N₂O的直接排放,N₂O排放系数按FAO测算值1.25%/0.636=1.97%计,即N₂O的碳排放当量=氮肥施入量×1.97%×298^[4]。

表1 各农资的碳排放当量值

Table 1 Index of carbon emission of different materials for agricultural production

项目	碳排放当量	参考文献
有机肥	0.008 kg/kg	[8]
氮肥	10.180 kg/kg	[9]
磷肥	1.500 kg/kg	[9]
钾肥	0.980 kg/kg	[9]
柴油	0.700 kg/(kW·h)	[9]
火电	0.950 kg/kg	[10]
农药	18.000 kg/kg	[10]

1.1.2 碳产出量

碳产出量是指作物生物产量中所含的碳当量值。即:

$$C_o = M \times (1 - \omega) \times C \times 3.667$$

式中: M 为作物生物产量,kg; ω 为作物含水率,%; C 为作物植株含碳百分数,%(表2);3.667为C转化为CO₂的当量系数。

表2 作物含水率和含碳百分率

Table 2 Water content and carbon content of crops %

作物	含水率	含碳百分率	参考文献
冬小麦	0.125	0.405	[11]
夏玉米	0.135	0.405	[12]
春玉米	0.135	0.405	[12]
春花生	0.090	0.389	[13]
西红柿	0.133	0.243	[13]
萝卜	0.133	0.243	[13]
油麦菜	0.133	0.243	[13]

1.1.3 碳效率

碳效率(C_e)指的是作物碳产出量(C_o)与碳投入量(C_1)的比值^[14]。即:

$$C_e = C_o / C_1$$

1.1.4 敏感度分析

敏感度分析法是指从众多影响因素中找出对系统碳投入有重要影响的敏感性因素,并分析、测算其对碳投入的影响程度,进而找出最大影响因子以提出最佳改进方案。反映敏感程度的指标是敏感系数,敏感系数绝对值越大,影响程度越大;反之则越小^[15]。

$$S_i = (\Delta C_i / C_i) / (\Delta m_i / m_i)$$

式中: m_i 为第*i*种碳投入因子, C_i 为相应碳投入值。当 m_i 值变化 Δm_i (如±10%)时, C_i 当相应变化 ΔC_i , S_i 即为 m_i 对 C_i 的敏感系数。

1.2 数据来源

本研究数据来源于本实验室2007年10月—2009年9月在北京市通州区农业高新技术示范基地的试验数据及调研数据。所选作物是北京地区大面积种植的粮食、经济作物,设施蔬菜模式指的是当地常规的大棚蔬菜种植模式。数据项目包括作物生产过程中化肥、灌溉、农药、机械等农资投入及作物产量等。

2 结果与分析

2.1 碳投入产出分析

2.1.1 不同作物碳投入产出分析

北京地区主要农作物的碳投入在 2 090.750 和 25 080.300 kg/hm² 之间,其中,西红柿等蔬菜作物水分、化肥、农药等需求量大,碳投入比冬小麦等高 4 倍左右;冬小麦耗水量大、降水耦合度差,其柴油、电能、氮肥等投入均较高,总碳投入比春玉米高 41.8%。碳产出分析表明,春玉米本身的含水率低,含碳量高,其碳产出最高,为 16 846.200 kg/hm²,其余依次为夏玉米>冬小麦>春花生>西红柿>萝卜>油麦菜。

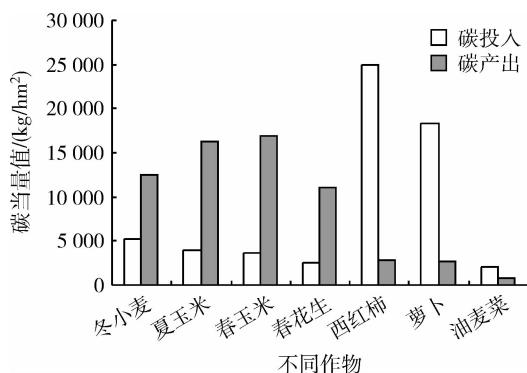


图 1 不同作物碳投入产出情况

Fig. 1 Carbon input and output of different crops

2.1.2 不同种植模式碳投入产出分析

北京市主要种植模式中,设施蔬菜模式各项投入均最高,其碳投入远远大于其他模式,达 45 516.320

kg/hm²;麦-玉模式的柴油、电能、化肥等投入高,总碳投入比春玉米一熟模式高 148.9%。碳产出分析表明,麦-玉模式的碳产出最高,为 28 765.410 kg/hm²,比蔬菜模式高 4 倍左右。

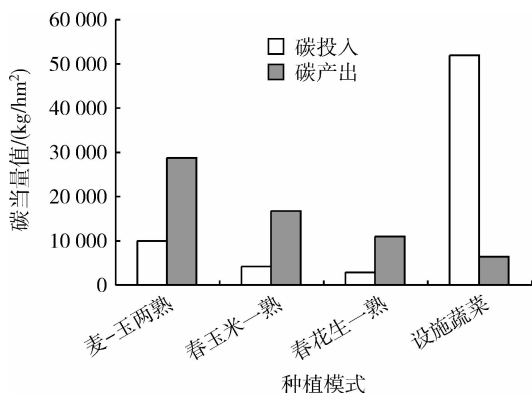


图 2 不同种植模式碳投入产出情况

Fig. 2 Carbon input and output of different cropping systems

2.2 碳投入构成分析

2.2.1 不同作物碳投入构成分析

不同作物碳投入构成分析表明(表 3),蔬菜类作物氮肥、电能等投入高,由氮肥施入引起的直接和间接投入是非蔬菜类作物的 4~5 倍,电能是 4~17 倍;冬小麦柴油、电能、化肥投入分别比春花生的高 249.9%、100%、118.5%,其余作物间差异不大。敏感度分析表明,各投入因素的敏感系数在 0~0.890 之间,氮肥的敏感系数最大,在 0.639~0.888 之间,有机肥的敏感系数最小,在 0.003~0.007 之间,不同作物间碳投入敏感系数差异不大。

表 3 不同作物碳投入清单

Table 3 List of carbon input of different crops

项目	冬小麦	夏玉米	春玉米	春花生	西红柿	萝卜	油麦菜
柴油/(kg/hm ²)	124.900	16.440	47.250	35.700	30.600	31.510	32.920
敏感系数	0.023	0.004	0.013	0.014	0.001	0.001	0.016
电能/(kg/hm ²)	855.170	213.790	427.580	427.580	3 724.250	1 282.750	1 654.750
敏感系数	0.163	0.050	0.055	0.169	0.148	0.070	0.791
氮肥/(kg/hm ²)	2 524.640	2 107.260	1 832.400	1 018.000	12 266.900	10 332.700	NS
氧化亚氮/(kg/hm ²)	1 455.910	1 215.210	1 056.710	587.060	7 074.070	5 958.660	NS
敏感系数	0.758	0.854	0.780	0.639	0.771	0.888	NS
磷肥/(kg/hm ²)	169.500	157.500	157.500	180.000	210.000	150.000	NS
敏感系数	0.032	0.040	0.043	0.072	0.008	0.008	NS

续表

项目	冬小麦	夏玉米	春玉米	春花生	西红柿	萝卜	油麦菜
钾肥/(kg/hm ²)	39.200	73.500	73.500	132.300	156.800	156.800	NS
敏感系数	0.007	0.019	0.020	0.053	0.006	0.009	NS
有机肥/(kg/hm ²)	NS	NS	NS	NS	171.400	50.700	NS
敏感系数	NS	NS	NS	NS	0.007	0.003	NS
农药/(kg/hm ²)	81.540	108.180	108.180	151.160	1446.280	382.120	403.080
敏感系数	0.016	0.028	0.029	0.060	0.058	0.021	0.193
总计/(kg/hm ²)	5 250.860	3 891.880	3 703.120	2 513.800	25 080.300	18 345.240	2 090.750

2.2.2 不同种植模式碳投入构成分析

模式间碳投入构成分析表明(表 4),氮肥和电能的投入最高,占总碳投入的 54.5%~71.9%,有机肥的最低,仅占 0.4%左右。设施蔬菜模式的各投入均较高,其中化肥、电能等投入分别比麦-玉模

式高 368.9%、523.2%;麦-玉模式柴油、电能、化肥投入分别比春玉米一熟模式高 759.7%、150.0%、152.8%。敏感度分析表明,各碳投入的敏感系数在 0~0.720 之间,氮肥的敏感系数最大,依次是电能 > 农药 > P₂O₅ > K₂O > 机械 > 有机肥,不同模式间

表 4 不同种植模式碳投入清单

Table 4 List of carbon input of different cropping systems

项目	麦-玉两熟	春玉米一熟	春花生一熟	设施蔬菜
柴油/(kg/hm ²)	141.340	16.440	47.250	95.030
敏感系数	0.015	0.004	0.019	0.002
电能/(kg/hm ²)	1 068.960	427.580	427.580	6 661.750
敏感系数	0.117	0.116	0.168	0.146
氮肥/(kg/hm ²)	4 631.900	1 832.400	1 018.000	22 599.600
氧化亚氮/(kg/hm ²)	2 671.120	1 056.710	587.060	13 032.730
敏感系数	0.799	0.787	0.631	0.783
磷肥/(kg/hm ²)	327.000	157.500	180.000	360.000
敏感系数	0.036	0.043	0.070	0.008
钾肥/(kg/hm ²)	112.700	73.500	132.300	313.600
敏感系数	0.012	0.020	0.052	0.007
有机肥/(kg/hm ²)	NS	NS	NS	222.130
敏感系数	NS	NS	NS	0.005
农药/(kg/hm ²)	189.720	108.180	151.160	2231.480
敏感系数	0.021	0.029	0.059	0.049
总计/(kg/hm ²)	9 142.740	3 672.310	2 543.350	45 516.320

碳投入敏感系数差异不大。

2.3 碳效益分析

2.3.1 不同作物碳效益分析

碳效益分析表明(图 3),蔬菜类作物水分和化

肥需求量大,生产成本低,其碳投入远远高于碳产出,碳效益最低,为 0.13 左右;春玉米易于田间施肥等管理,资源利用率较高,其碳效益分别比春花生、夏玉米、冬小麦高 3.9%、9.2%和 47.1%。

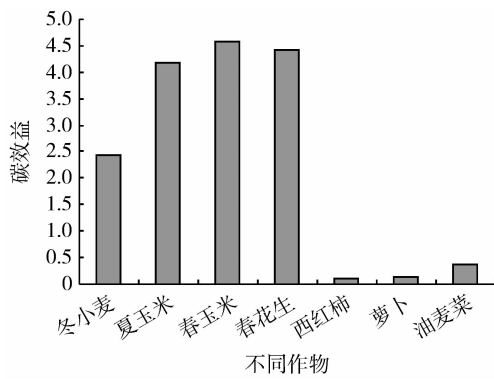


图3 不同作物碳效益情况

Fig. 3 Carbon efficiency of different crops

2.3.2 不同种植模式碳效益分析

对不同种植模式碳效益进行分析得出(图4),设施蔬菜模式由于复种指数高,相应的生产成本高,碳投入高,其碳效益远远低于其他模式,为0.13;春玉米一熟模式的碳效益分别比麦-玉两熟、春花生一熟、蔬菜模式高30.8%、8.31%、96.8%。

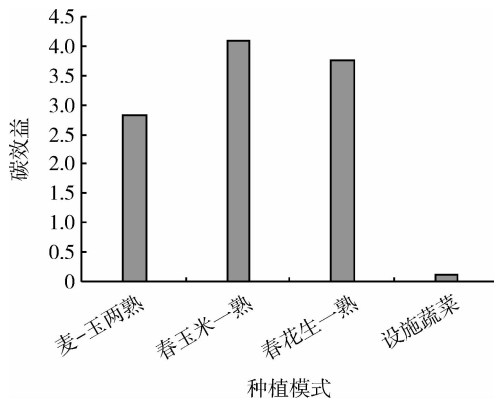


图4 不同种植模式碳效益情况

Fig. 4 Carbon efficiency of different cropping systems

3 讨论

结果表明,春玉米生长季节降水耦合度好,且易于田间施肥等管理,资源利用率相对较高,农田碳投入低,加上作物本身碳产出量高,因此其碳效益最高,达4.59,比冬小麦高47.1%;设施蔬菜模式延长了生长季节,增加了复种指数,客观上增加了对化肥、水分等的需求,因此其碳投入远大于麦-玉两熟等模式,其碳效益最低,仅为0.13。由此可见,作物生产过程中,作物碳投入越低,碳产出越高,作物碳效益就越高。数据分析表明,北京地区不同农作模式碳效益差异主要由碳投入差异所致,其中,冬小麦

碳投入比春玉米高41.8%左右,设施蔬菜模式分别比麦-玉两熟、春玉米一熟、春花生一熟模式高80.4%、92.0%、94.3%。

本研究中70%以上的碳投入是由氮肥的施用引起的,不同作物及种植模式碳投入的差异也主要取决于氮肥投入的差异,这与Jonathan Hillier等的研究结果相似^[4]。数据分析表明,北京地区蔬菜类作物的氮肥投入所引起的碳排放高达19340 kg/hm²,是春玉米等作物的5倍左右。其次,电能投入在总碳投入中也占15%左右,这主要是由于近几年北京市地下水位迅速下降,季节性降水不均,客观上加大了作物生产过程中电能等投入造成的。

目前,作物氮肥利用率仅为30%~50%,大量研究表明,过量的氮肥并不能固持更多的有机碳,只会增加土壤氧化亚氮的排放和生产氮肥的温室气体排放。降低氮肥施用量、无机肥和有机肥结合、氮磷钾肥合理搭配才是降低农田温室气体排放的重要途径^[16]。因此,提高作物生产的碳效益,首先要充分利用作物生长期间水肥等自然资源,在适宜的产量范围内,确定相应的水肥投入量,以减少不必要的投入。其次,合理的种植模式可以有效地整合光、温、水等自然资源,提高资源利用效率,改善土壤理化性质,减少农田温室气体排放。结果表明,北京地区种植春玉米有利于实现农田的固碳减排。设施蔬菜模式资源消耗量大,碳效益低,不利于农田的固碳减排,但由于其集约了光、温和土壤等资源,实现了多季节连续生产,经济效益高,大幅度提高了种植业综合效益等社会经济因素,近年来发展迅猛,生产过程中,应优化管理,逐步减少化肥等的大量投入,在磷钾肥配施有机肥的基础上,年化肥氮投入量控制在370~740 kg/hm²之间,利于稳定土壤-蔬菜系统氮素平衡,降低氮素表观损失^[17]。同时选种耐旱、高携氮量型填闲作物,有利于避免夏季土壤剖面硝态氮累积,提高蔬菜的资源利用率^[18]。

4 结论

春玉米碳效益最高,为4.59,分别比春花生、夏玉米、冬小麦高3.9%、9.2%和47.1%;春玉米一熟模式的碳效益比蔬菜模式高96.8%。因此,北京地区种植春玉米有利于实现农田的固碳减排。

作物碳效益的高低取决于碳产出与碳投入的比值。结果表明,北京地区不同农作模式碳效益差异主要取决于碳投入的差异,冬小麦碳投入比春玉米

高 41.8%左右,设施蔬菜模式分别比麦-玉两熟、春玉米一熟、春花生一熟模式高 80.4%、92.0% 和 94.3%。

碳投入构成分析表明,氮肥和电能所占比重较大,达 70%~90%,不同作物及种植模式碳投入的差异大部分也是由氮肥投入的差异所致。其中,冬小麦的化肥投入比春花生高 118.5%,设施蔬菜模式比麦-玉模式高 368.9%。

参 考 文 献

- [1] Yantai Gan, Chang Liang, Brian McConkey. Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122: 199-206
- [2] Zentner R P, Campbell C A, Biederbeck V O. In search of a sustainable cropping system for the semiarid Canadian prairies [J]. *Sust Agric*, 2001, 18: 117-136
- [3] Krupinsky J M, Bailey K L, McMullen M P. Managing plant diseases risk in diversified cropping systems[J]. *Agron*, 2002, 94: 198-209
- [4] Jonathan Hillier, Cathy Hawes, Geoff Squire, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(2): 107-118
- [5] Tanaka D L, Krupinsky J M, Merrill S D. Dynamic cropping systems for sustainable crop production in the northern Great Plains[J]. *Agron*, 2007, 99: 904-911
- [6] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 12052-12057
- [7] 北京市统计局,国家统计局北京调查队.北京市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2008
- [8] Stout B A. *Energy Use and Management in Agriculture*[M]. North Scituate MA: Breton Publishers, 1984
- [9] 胡致远.车用生物柴油生命周期评价及多目标优化[D].上海:同济大学博士后研究报告,2006:21-39
- [10] 梁龙,吴文良,孟凡乔.华北集约高产农田温室气体净排放研究初探[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(3): 612-617
- [11] Fang J Y, Wang G G, Liu G H. Forest biomass of China: an estimation based on the biomass-volume relationship [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1084-1091
- [12] Fang J Y, Oikawa T, Kato T. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947-1995 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): 121-130
- [13] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D. Consistent land-and atmosphere-based US carbon sink estimates[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2316-2320
- [14] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environ Int*, 2004, 30(5): 981-990
- [15] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等.中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136-2144
- [16] Ismail I, Blevins R L, Frye W W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58(3): 193-198
- [17] 李俊良,崔德杰,孟祥霞,等.山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(2): 126-128
- [18] 李晓林,张福锁,米国华.平衡施肥与可持续优质蔬菜生产[M].北京:中国农业大学出版社,2000

责任编辑:袁文业