

华北农田不同耕作方式的固碳效益评价

王福军 张明园 张海林 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 为研究长期耕作措施下农田土壤碳储量以及潜在碳成本的情况,在中国科学院石家庄栾城生态系统试验站进行了长期耕作定位试验,设置免耕(NT)、旋耕(RT)和翻耕(CT)3个处理,并对各处理的固碳效益进行了评价。结果表明在秸秆还田、化肥投入的条件下各处理碳储量均呈现增长趋势,2004—2010年各处理间碳储量平均值由37 867.06增长到48 316.33 kg/hm²,SCS的大小为CT>NT>RT;潜在碳成本NT、RT与CT分别为499.50,516.91和564.84 kg/(hm²·a);通过效益评价可知,NT的生态效益最好,各处理间差异显著。RT的经济效益最好,与NT间差异不显著,但RT显著高于CT。建议华北麦玉两熟区农田优化当前农艺措施,提高机械覆盖面积,提升免耕作物经济产量,在此区域适当推广少免耕技术。

关键词 耕作方式; 土壤碳储量; 少免耕; 潜在碳成本; 效益评价

中图分类号 S 334.3; S 19

文章编号 1007-4333(2012)04-0040-06

文献标志码 A

Evaluation of tillage treatments on soil carbon sequestration in North China Plain

WANG Fu-jun, ZHANG Ming-yuan, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu*

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

Abstract The study was established at the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station with three tillage practices under winter wheat growing season: conventional tillage (CT), rotary tillage (RT), and no-tillage (NT). Farmland soil carbon storage, hidden carbon cost (HCC) and benefit evaluation in long-term tillage practice were studied. The results showed that,SCS was increased with times in the condition of straw back and fertilizer input. The average value of SCS was increased from 37 867.06 to 48 316.33 kg/hm² from 2004 to 2010. The amount of SCS followed the order,CT>NT>RT. HCC of each treatment (NT,RT and CT) was 499.50,516.91 and 564.84 kg/(hm²·a). Ecological benefit was the highest under NT. Economic benefit was the highest under RT, differences of economic benefit index values between NT and RT were not significant. It is better to adopt minimum and no tillage in North China Plain.

Key words tillage practice; soil carbon storage; minimum and no tillage; hidden carbon cost; benefit evaluation

农田生态系统是当前重要的固碳减排系统,拥有巨大的固碳潜力。耕作方式改变了土壤理化生性状,进而影响了农田土壤固碳能力和温室气体排放强度,最终改变了农田土壤碳储量(SCS)大小。目前国内外关于耕作措施下农田土壤碳储量现状及固碳潜力的研究较为常见,大部分研究主

要利用试验方法(等质量和等深度方法)以及模型模拟计算农田SCS^[1-2],同时进行各种情景假设对固碳潜力做出预测^[3]。但由于农田SCS是一动态指标,针对不同研究区域及年限,SCS亦不尽相同。农田生态系统中的潜在碳成本通常被人们忽视,每项农艺措施及农资投入都会留下自身的碳

收稿日期:2012-03-16

基金项目:公益性行业科研专项(200803028)

第一作者:王福军,博士研究生,主要从事土壤耕作与农田生态研究,E-mail:wfj2009@cau.edu.cn

通讯作者:陈阜,教授,博士生导师,主要从事农作制方面的研究,E-mail:chenfu@cau.edu.cn

足迹,如化肥和农药的生产过程要排放大量的温室气体,尤其是CO₂。生产每kg尿素要排放0.84 kg C^[4],由此看来农田生态系统的潜在碳成本(HCC)是十分巨大的,近些年逐渐受到科研工作者的关注^[5]。目前国内外对于HCC的研究多集中于农作区或国家尺度某项农艺措施所引起的潜在碳排放,而对长期耕作措施下SCS变化特征、整个农田系统HCC的变化研究较少。且大部分研究对农田土壤固碳效益进行评价的方法主要利用指数进行评估,如碳平衡指数生态系统生产力(NEP)、碳持续性指数、土壤净固碳速率等。土壤碳储量与有机碳含量不仅是农田土壤肥力的重要标准^[6-7],也是影响土壤温室气体排放的关键因素,因此研究不同耕作方式对农田SOC、SCS以及温室气体排放的影响具有重要意义。本研究利用碳持续性指数评价各处理的固碳效益,通过计算

土壤碳储量和农田生态系统的HCC分析农田生态系统碳循环,旨在为华北麦-玉两熟农作区固碳减排提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(N37°53',E114°41')进行,该站位于河北省栾城县境内,地处冀中平原中南部,属暖温带半湿润地区,为太行山前平原小麦-玉米两熟农业区的代表。试验站海拔高度50.1 m,年平均气温12.2℃,年平均降水量530 mm。供试土壤类型为潮褐土,土壤质地为粉质壤土,黏粒质量分数为15.01%。耕层土壤平均体积质量为1.39 g/cm³,土壤pH 7.8,表层土壤有机碳质量分数为9.11 g/kg。试验地基础肥力情况见表1所示。

表1 试验地土壤基础肥力状况

Table 1 Status of basic fertility of the experimental soil

土壤层次/cm	全氮/(g/kg)	碱解氮/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)	速效磷/(mg/kg)	有机碳/(g/kg)
0~10	0.74	37.95	115.02	62.90	9.11
10~20	0.64	30.58	90.11	39.62	8.22

1.2 试验设计

试验设置翻耕、免耕和旋耕3个处理,每个处理3次重复,小区面积0.33 hm²。具体处理如下:翻耕(CT),玉米收获后秸秆粉碎全量还田,秸秆粉碎机粉碎秸秆并破除根茬,还田量9 182.86 kg/hm²,秸秆粉碎粒径约0~20 cm,施撒化肥,翻耕1遍(耕深15~20 cm),旋耕耱平后播种小麦。联合收割机收获小麦后秸秆平铺还田,并留茬30 cm左右,还田秸秆长度在5~20 cm之间,还田量为6 636.51 kg/hm²;旋耕(RT),玉米收获后秸秆粉碎全量还田,还田量为8 646.80 kg/hm²,施撒化肥,旋耕机旋耕2遍(耕深8~10 cm,粉碎秸秆并破除根茬)播种小麦。小麦秸秆处理与翻耕相同,还田量为6 539.56 kg/hm²;免耕(NT),玉米秸秆粉碎全量还田,玉米收获后使用秸秆粉碎机粉碎秸秆并破除根茬,还田量为8 955.54 kg/hm²,小麦免耕播种机一次性完成施肥、播种及镇压等作业。小麦秸秆还田量为

5 965.85 kg/hm²。各处理玉米均为点播,麦-玉种植模式是套种。该试验开始于2001年。

各处理均使用相同的作物品种,小麦品种使用冀麦22,玉米品种为郑单958。小麦播量约为150 kg/hm²,玉米点播量50 kg/hm²。冬前小麦基本苗为413万/hm²,穗数为586万/hm²,并采用相同的水肥管理措施。小麦生长季农田管理措施为:播种期基肥尿素和磷酸二铵施量分别为150和300 kg/hm²,拔节期追施尿素300 kg/hm²。播种期、越冬期、拔节期和扬花期喷灌浇水,每次600 m³/hm²。玉米生长季农田管理措施为:拔节期追施尿素375 kg/hm²;苗期和拔节期灌水600 m³/hm²。冬小麦平均产量为5 672.32 kg/hm²,玉米平均产量为7 362.37 kg/hm²^[8]。

1.3 试验及评价方法

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)。采用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。利用K₂Cr₂O₇

氧化土壤有机质, 剩余 $K_2Cr_2O_7$ 用硫酸亚铁滴定^[9]。

土壤容重(Bulk Density, BD)。采用环刀法测定。挖取土壤剖面, 选取 0~5、5~10、10~20 和 20~30 cm 4 个层次进行环刀取土, 带回实验室 105 °C 烘干 12 h, 进行称重并计算土壤容重。

土壤碳储量(Soil Carbon Storage, SCS)。本研究分别计算耕层 0~10、10~20、20~30 cm 土壤碳储量, 加和后成为 0~30 cm 的碳储量。其计算公式如下^[9]：

$$SCD_i = C_i \times B_i (1 - \delta_{2mm}) \times H \times 10^3$$

式中： i 表示土壤层次； SCD_i 表示 i 层土壤的碳储量， $C/(kg/hm^2)$ ； C_i 为 i 层土壤有机碳含量， $C/(g/kg)$ ； B_i 是 i 层土壤容重， g/cm^3 ； δ_{2mm} 为土壤中大于 2 mm 砾石的比例，%； H 代表 i 层土壤深度，cm； 10^3 是转换系数。

潜在碳成本(Hidden Carbon Cost, HCC)。农田生态系统潜在碳成本是由于化肥、燃料、电力、农药以及人畜力等的投入造成的。这些小尺度产品碳足迹的计算采用 Bottom-up Life-Cycle Assessment (LCA) 方法, 其生命周期包括了生产、加工以及运输 3 个过程^[10]。

农田生态系统碳足迹。农田生态系统的范围尺度较大, 采用 Top-down input-output analysis (IOA) 分析宏观系统中各组分的碳足迹情况^[11]。

碳持续性指数(Index of Sustainability, IS)。IS 是评价一个系统固碳效率的指数, 其表达式如下^[12]：

$$IS = \left(\frac{C_U + C_F}{C_E + C_T} \right)_i \quad (1)$$

式中： C_U (C uptake), C_F (C fixation) 代表 C 吸收和 C 固定, 农业生态系统的碳吸收大部分来自于作物, 作物固碳大部分来自于大气, 也就是光合作用, 因此 C_U 为光合固碳量, C_F 为 C 沉积量。 C_E (C emission) 为土壤碳排放、淋失与潜在碳成本。 C_T (C transport) 为生物量收获部分, 这部分生物量主要用于秸秆焚烧或者谷物消费。

C_U 的计算利用 DNDC (denitrification-decomposition) 模型得出, C_E 中土壤呼吸、C 淋失也采用此模型计算, 而潜在碳成本的计算使用自下而上的生命周期评估^[4, 13-14] (表 2), 数据来自于试验或

农户调查。 C_T 的获得来自于实际测产。 C_F 为大气中碳沉积到农田土壤量, 这部分数值较小, 本研究忽略不计。种子的投入并未计算在潜在碳成本中, 而是从作物产量中减去了相应播种量。

表 2 农田投入产品碳当量转化参数表

Table 2 Carbon footprint conversion factors of farm input

产 品	碳当量(CE)/kg
人力劳动/h	1.80×10^{-2}
化肥	
氮肥/kg	0.84
P_2O_5 /kg	0.10
K_2O /kg	0.08
燃料	
柴油/L	0.94
汽油/L	0.85
电力/kWh	7.25×10^{-2}
农药	
杀虫剂/kg	4.93
除草剂/kg	4.70

理论上公式(1)是个等式： $C_U + C_F = C_E + C_T$ 。但由于不同系统对于各项的处理不同, 因此这个等式通常会被打破。对于发展中国家的资源型农业来说, 一般 $IS < 1$; 而对于发达国家环境友好型农业来说, $IS > 1$, 主要是由于控制了秸秆焚烧, 集约了农资投入等措施提高了农业碳生产效率, 减少了农业生态系统温室气体排放。

碳生产率(Carbon Productivity, CP)。是 C_T 与潜在碳成本的比值, 是指投入单位碳成本所得到的产量碳, 这个指标可以衡量产量的生产效率。CP 计算公式如下^[15]：

$$CP = C_T / HCC \quad (2)$$

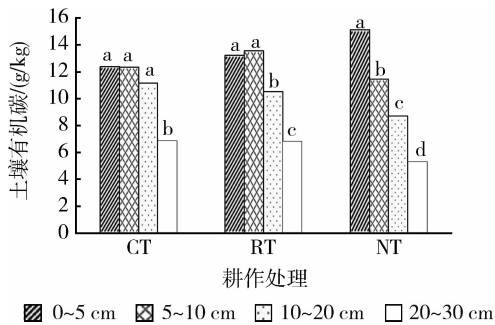
本研究中试验数据的处理及差异显著性分析等均使用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件。

2 结果与分析

2.1 农田土壤有机碳储量现状

图 1 为 2007 年玉米收获期各处理 SOC 值。从图中可知 CT 处理在 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层中 SOC 分布均匀, 3 个层次无显著性差异, 而在

20~30 cm 土壤层次中下降明显,20~30 cm 土壤层次与其他 3 个层次差异显著;RT 处理 SOC 在 0~5、5~10 cm 土层中分布均匀,在 10~20、20~30 cm 土层中连续下降;而 NT 处理 SOC 含量在 0~5 cm 最高,且依次在 5~10、10~20、20~30 cm 土层中下降,表层有机碳富集,深层有机碳较低,呈现出直线下降的趋势。呈现这种分布特征主要是由于各处理的耕层不同,秸秆还田的深度不同。CT 处理耕层约为 0~20 cm,土层中秸秆分布均匀;RT 处理耕层 0~10 cm 秸秆分布均匀,而 NT 处理秸秆集中在表层,秸秆腐解后使得各层次 SOC 值不同,而产生各处理间这种 SOC 分布特征。



字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异性显著,CT、RT 和 NT 分别代表翻耕、旋耕和免耕。下图同。

图 1 2007 年玉米收获期各处理土壤有机碳分布
Fig. 1 Soil organic carbon of each treatments in corn harvest time in 2007

耕作方式对于土壤容重有一定影响,同一处理各层次年间变化较小。不同处理土壤容重的差异主要体现在免耕土壤扰动轻微,使得 0~5、5~10、10~20 cm 土壤容重大于 CT 与 RT,而 20~30 cm 土壤容重各处理相近。从图 2 可看出:0~5、5~10 cm 土壤层次中 CT 处理均为最小,NT 处理为最大;10~20 cm 土层中 CT 处理与 RT 处理相近,均小于 NT 处理。20~30 cm 土层中各处理土壤容重相近,在 1.7 g/cm^3 左右。

秸秆还田使得土壤有机碳呈现了逐年增加的趋势,大量研究表明:秸秆还田有利于土壤有机碳、碳储量的增加,是一项重要的固碳减排农艺措施。本研究利用等深度法计算了 2004—2010 年 7 年间土

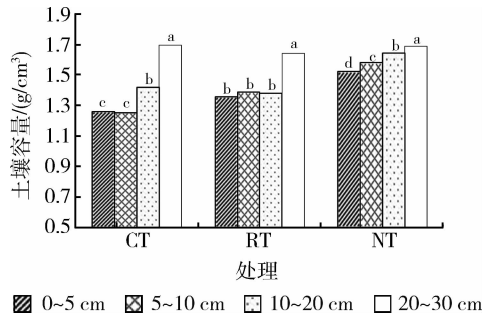


图 2 2011 年玉米收获期各处理土壤容重
Fig. 2 Soil bulk density of each treatments in corn harvest time in 2011

壤碳储量的动态变化趋势(图 3):在连续秸秆还田措施下,SCS 呈逐年增加趋势,CT 处理 SCS 为最大。CT 处理由 2004 年的 $39\ 182.96 \text{ kg/hm}^2$ 增长到 2010 年的 $49\ 348.73 \text{ kg/hm}^2$,增长速率较大。

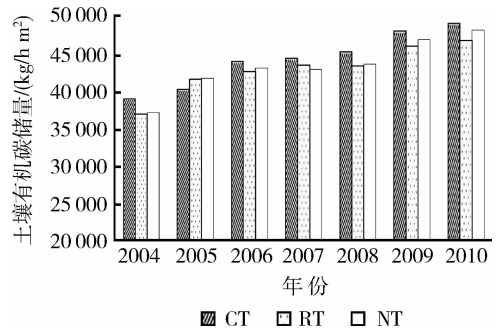


图 3 农田土壤碳储量变化特征
Fig. 3 Characteristics of soil carbon storage in farmland

SCS 主要受 SOC 积累和分解的影响,其大小代表了农田土壤肥力的高低。各处理土壤碳储量均呈上升的趋势。持续的秸秆还田以及连年的肥料投入等措施使 SCS 逐年增高,增加了土壤 SOC 的同时也增强了农田土壤作为“碳”汇的功能^[16]。

2.2 农田生态系统潜在碳成本

农田生态系统中化石燃料的消耗和农资的投入所引起的温室气体排放是重要的一类潜在碳成本。在粉碎秸秆、整地、播种、中耕、灌溉、施肥、收获到干燥等一系列过程中,主要的潜在碳成本有:化肥、燃料、电力、农药以及人畜力。表 3 为各耕作处理潜在碳成本的碳当量值。

表3 各耕作处理潜在碳成本

Table 3 Hidden carbon cost of tillage treatments kg/(hm²·a)

处理	化肥	燃油	电力	农药	人畜力	总计
CT	385.71	141.77 a	2.79	24.57	10.00	564.84 a
RT	385.71	93.92 b	2.79	24.57	9.74	516.91 b
NT	385.71	63.72 c	2.79	32.40	14.88	499.50 c

注:同列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。CT、RT 和 NT 分别代表翻耕、旋耕和免耕。下表同。

2.3 不同耕作措施固碳减排效益评价

2.3.1 各耕作措施碳效益指数评价

碳足迹作为评价环境影响的指数,不同尺度的计算采用不同的方法。农田生态系统的范围尺度较大,其碳足迹的研究采用 Top-down input-output analysis(IOA)。

潜在碳成本的存在使得净固碳量并不能直观代表某个系统固碳效率的高低,仅代表了这个系统固碳能力的大小。为了计算不同耕作方式农田土壤碳生产效率的高低,本研究引入 C 持续性指数(I_s),并采用 IOA 分析各处理的碳生产效率(表4)。

NT 处理 I_s 值最大,CT 处理最小。说明 NT 处

表4 各处理 I_s 值及其组分Table 4 Values and components of I_s

处理	C_U /(kg/(hm ² ·a))	C_F	C_E /(kg/(hm ² ·a))	C_T /(kg/(hm ² ·a))	I_s
RT	24 778.86	—	7 221.52	6 093.90	1.79 b
CT	25 058.27	—	10 371.40	6 222.00	1.47 c
NT	23 060.23	—	6 513.26	5 279.15	1.86 a

理农田生态系统碳固定的效率最大,在这种耕作措施下最有利于提高农田土壤碳固定的效率。虽然 CT 处理的光合固碳量最大,但是由于其 C_E 值较高,土壤呼吸作用较强,致使 CT 处理下 I_s 值最小。

农田生态系统中各组分碳足迹大小不同,光合作用 C_U 所占比例最大, C_E 、 C_T 次之, C_F 最小到可以忽略不计。 C_E 包含了土壤呼吸、淋失与潜在碳成本,谷物产量是用于食用消费,因此置于 C_T 中算作碳排放。

2.3.2 各耕作措施碳生产效率评价

免耕处理较 CT 和 RT 处理有减产的效应,从图4可发现在华北麦-玉两熟农田作物产量构成中玉米几乎占了60%,小麦占40%左右。在两季作物产量中,免耕较翻耕和旋耕均出现减产现象。

RT、CT 以及 NT 处理的 CP 值分别为 12.03、11.35 和 10.93,RT>CT>NT。对于这3种耕作处理,投入单位农资碳成本后 RT 处理产量收益最大,NT 处理最低。这个指标把 NT 处理的减产现象凸显了出来。

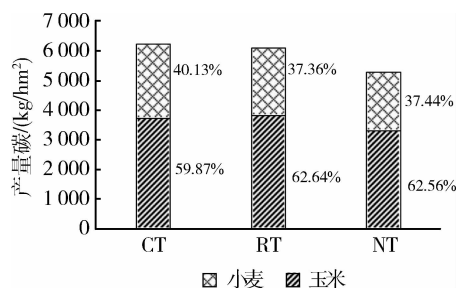


图4 各处理产量构成

Fig. 4 Yield component of each treatment

3 讨论

土壤容重受到耕作措施的影响,翻耕、旋耕处理在其耕层中土壤容重较为均匀。而免耕处理在0~5、5~10、10~20以及20~30 cm土壤层次中出现递增的趋势。其原因主要是由于土壤扰动小,使得各层次土壤容重增加。但各处理在深层土壤容重相当。SOC分布也具有类似特征,各处理在耕层中分布均匀^[8],NT处理SOC随土壤层次加深而递增。秸秆还田增加了土壤有机碳含量,耕作措施把秸秆

均匀混入耕层土壤,在长时间的微生物作用下腐解,增加土壤有机质含量,进而增加 SCS^[16]。

农田土壤碳储量是一动态变化的过程,受秸秆还田、化肥投入、作物类型等因素的影响,不同时期不同区域 SCS 不尽相同。研究表明河北省 1998 年 SCS 为 15 536.05 kg/hm²,而全国平均值为 40 990 kg/hm²^[17]。考虑到土壤有机碳储量逐年增加,本研究计算所得碳储量值基本符合实际。研究表明^[12,18]土壤翻耕会加速有机碳的分解释放,而免耕有利于减缓土壤有机碳分解,提高土壤有机碳储量。本研究表明截止到 2010 年土壤碳储量仍为 CT 处理最高,NT 处理次之。在未来若干年份各耕作处理的变化特征还需进一步监测。

农田生态系统中由于整地、播种、中耕、化肥、农药、收获、运输及后加工等过程产生了大量的温室气体排放,同时由于秸秆还田而增加的农田土壤温室气体排放也是很多研究所没有核算的,这部分排放相当可观^[19]。因此核算农田土壤 HCC 很有必要。通过本研究对农田土壤 HCC 的核算发现,化肥尤其是 N 肥、燃油动力 2 项占据了 HCC 80% 以上的份额。而除草剂、杀虫剂、真菌杀剂、人畜力、电力共同占据不到 20% 的份额。化学试剂投入的转换系数很大,但因其用量很小,因此这部分的 HCC 占很小部分。人畜力及电力亦是农田生态系统中投入量比较少的部分。上述研究结论与国内外研究基本相符^[12,14]。合理施肥、减少肥料损失以及少免耕有利于减少农田生态系统中的 HCC,提高农田土壤生态系统的固碳效率。

4 结 论

在长期秸秆还田、化肥投入等农艺措施实施下,农田土壤有机碳处理呈现增加趋势。7 年间土壤碳储量增加了近 10 000 kg/hm²。目前碳储量现状基本为 CT>NT>RT。

华北地区大面积采用的旋耕潜在碳成本为 516.91 kg/(hm²·a)。农田生态系统的潜在碳成本并不容忽视。各处理大小顺序为 CT>RT>NT。

效益评价表明:NT 处理的生态效益最好,处理间差异显著;RT 处理的经济效益最好,RT 与 NT 处理差异不显著。建议在华北麦-玉两熟区改善免耕农艺措施,增加免耕配套技术和机具,增加产量,同时实施以少免耕为主的耕作制度。

参 考 文 献

- [1] 刘清,孙波,解秀丽,等. 县域尺度红壤丘陵水稻土有机碳模拟[J]. 土壤学报,2009,46(6):1059-1066
- [2] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes [J]. Canadian Journal of Soil Science,1995,75(4):529-538
- [3] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状及潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):612-619
- [4] 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 Agriculture [J]. Ecosystems and Environment,2002,91:217-232
- [5] 韩冰,王效科,欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. 农村生态环境,2005,21(4):6-11
- [6] 李秀英,赵秉强,李絮花,等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1591-1599
- [7] 孔凡磊,陈卓,张海林,等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(8):150-155
- [8] 张明园,魏燕华,孔凡磊,等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(28):203-211
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999:107-108,147-148
- [10] Stone J J, Dollarhide C R, Benning J L, et al. The life cycle impacts of feed for modern grow-finish Northern Great Plains US swine production[J]. Agricultural Systems,2012,106:1-10
- [11] Larsen H N, Hertwich E G. Analyzing the carbon footprint from public services provided by counties [J]. Journal of Cleaner Production,2011,19:1975-1981
- [12] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2004,70:103-116
- [13] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. Environment International,2004,30:981-990
- [14] 伍芬琳,李琳,张海林,等. 保护性耕作对农田生态系统净碳排放量的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(12):2035-2039
- [15] Tabatabaefar A, Emamzadeh H, Varnamkhasti M G, et al. Comparison of energy of tillage systems in wheat production [J]. Energy,2009,34:41-45
- [16] 高云超,朱文珊,陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤微生物生物量与养分转化的研究[J]. 中国农业科学,1994,27(6):41-49
- [17] 王立刚,邱建军. 高产粮区农业生态系统土壤碳氮循环的模拟研究:以河北省曲阳县为例[J]. 中国农业大学学报,2003,8(增刊):31-35
- [18] 王立刚,邱建军,马永良,等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. 中国农业大学学报,2004,9(6):15-19
- [19] 逯非,王效科,韩冰,等. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力[J]. 生态学报,2009,29(9):4993-5006