

双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究

李琳^{1,2}, 伍芬琳¹, 张海林¹, 陈阜¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 农业部作物栽培与耕作学重点开放实验室, 北京 100094; 2. 北京市农业技术推广站, 北京 100029)

摘要: 本文以双季稻区保护性耕作定位试验为研究对象, 测定了保护性耕作下土壤不同层次总有机碳、活性碳的动态变化, 并计算了各处理的碳库活度、活度指数、碳库指数和碳库管理指数。结果表明, 土壤总有机碳和活性碳均随土层的增加而减少, 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤总有机碳分层受耕作方式影响大, 而活性碳分层受秸秆还田影响大。秸秆还田提高土壤各层总有机碳, 免耕提高土壤 0~10 cm 总有机碳, 而旋耕和翻耕提高土壤 10~20 cm 总有机碳; 其中旋耕提高土壤 0~10 cm 总有机碳, 以及翻耕和秸秆还田提高土壤各层总有机碳具有可持续增加的潜力。秸秆还田和少免耕提高土壤 0~20 cm 土层活性碳。秸秆还田提高土壤 0~10 cm 总有机碳、活性碳、稳态碳、碳库指数以及碳库管理指数, 同时提高了 10~20 cm 各项碳库指数, 但降低了 0~10 cm 碳库活度和活度指数; 免耕和旋耕分别提高土壤 0~10 cm 和 10~20 cm 的各项碳库管理指标。

关键词: 秸秆还田; 少免耕; 水稻田; 总有机碳; 活性碳; 碳库管理指数

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)01-0248-06

Organic Carbon and Carbon Pool Management Index in Soil Under Conservation Tillage in Two-crop Paddy Field Area

LI Lin^{1,2}, WU Fen-lin¹, ZHANG Hai-lin¹, CHEN Fu¹

(1. Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Beijing Agricultural Technological Extension Centre, Beijing 100029, China)

Abstract: The global soil organic carbon pool is the second largest terrestrial carbon reservoir, and soil carbon is a major determinant of agricultural system sustainability and changes can occur in both total and active, or labile, carbon pools. The experiment started in 2005 including four treatments: plow tillage without stubble returned, plow tillage with stubble returned, rotary tillage with stubble returned and no-tillage with stubble returned. The total organic carbon (TOC), active carbon (AC) pool and carbon pool management index (CPMI) under conservation tillage in paddy field area were discussed from 2005 to 2006. The results indicated that TOC and AC pool decreased with the depth of soil layer. The stratification ratios (SR) of TOC increased significantly under no-tillage and minimum tillage compared to moldboard plow tillage, while, the SR of AC under stubble returned was significantly higher compared to no stubble returned. Stubble returned increased TOC at 0~20 cm soil depth, while the TOC was increased in 0~10 cm soil layer under no-tillage, and in 10~20 cm layer under minimum tillage and moldboard plow tillage. Moldboard plow tillage and stubble returned can continually improve TOC in 0~20 cm layer, and minimum tillage enhanced TOC in 0~10 cm layer. The AC under stubble returned, minimum tillage and no-tillage was increased. Stubble returned advanced carbon pool index (CPI), CPMI in 0~10 cm layer and every index in 10~20 cm layer, but decreased active (A) and active index (AI) in 0~10 cm layer. Minimum tillage and no-tillage increased every index of 0~10 cm and 10~20 cm layer pool respectively.

Keywords: stubble returned; no-tillage; paddy field; TOC; AC; CPMI

收稿日期: 2007-03-13

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAD15B01); 农业部重点项目“保护性耕作技术模式及其对农业可持续发展影响”

作者简介: 李琳 (1979—), 女, 河南扶沟人, 博士研究生, 主要进行宏观农业及保护性耕作研究。E-mail: lilin991213@sina.com

通讯作者: 陈阜

土壤是仅次于海洋的全球第二大有机碳库,土壤
中储存的有机碳(SOC)高达 1 500 Pg(1 Pg=10¹⁵ g),是
大气 CO₂ 总量的 3 倍、陆地生物碳量的约 2.5 倍。土
壤是大气 CO₂ 和 CH₄ 的重要来源,土壤呼吸在全球
CO₂ 地-气交换和大气 CO₂ 浓度变化中起着重要作
用^[1,2]。Dalal 和 Chan,按化学性质把土壤有机碳分为
活跃碳库、非活跃碳库和惰性碳库。土壤总有机碳
可能在较短时间内对因农业管理措施导致的土壤
质量的变化反映不甚敏感^[3]。因此,前人试图用土壤
有机碳亚库来指示全碳变化^[4]。其中农业生产措施(如
土壤耕作管理、植物残体或有机物料的还田等)引起
土壤碳库的最初变化主要是易分解、矿化碳,即活性
碳部分^[5]。一些研究发现,土壤活性有机碳对耕作方式
和秸秆还田的反应更为迅速^[6-8]。尽管这部分碳素占全
碳的比例很小,但它们对土壤碳素的转化很重要,而且
与土壤生产力密切相关^[9]。在测定土壤活性有机碳
组分方面,人们提出过许多方法,如物理组分、化学氧
化和生物活性测定法等^[9]。这些方法中,KMnO₄ 氧化法
因简单易行,而被广泛用来研究农业生产措施对土壤
活性有机碳的影响。这个方法最早由 Loginow 等
(1987)提出,他根据高锰酸钾氧化强度来确定土壤有
机碳的活性部分。Blair 等对此方法进行了修改,并
在此基础上提出了表示土壤活性碳的一些相关概念^[10]。

保护性耕作泛指保土保水的耕作措施,其目的是
减少农田土壤侵蚀,保护农田生态环境。通过土壤少
耕、免耕、地表微地形改造技术及地表覆盖技术,通过
“少动土”、“少裸露”,达到“适度湿润”和“适度粗糙”
等土壤状态,从而减少农田土壤侵蚀,保护农田生态
环境,并获得生态效益、经济效益及社会效益协调发
展的可持续农业技术^[11]。近年来的研究表明,实行保
护性耕作有利于土壤 C 固定,保护性耕作由于减少
了耕作次数,降低了土壤有机质矿化的速率,同时由
于秸秆的覆盖使土壤温度降低,降低了有机质的腐
化,进而增加土壤有机碳含量,减少温室气体排放^[1,12]。

但是关于短期内保护性耕作对土壤有机碳的影响说
法不一,同时国内就土壤碳库管理指数的研究还不
多^[13-16],尤其是保护性耕作对土壤活性碳库及碳库管
理指数的影响报道更少^[17]。本研究针对双季稻区短期
保护性耕作对土壤有机碳、活性碳动态变化进行了研
究,并计算出了土壤碳库管理指数,旨在探讨土壤碳
库管理指数对长期保护性耕作下土壤碳库动态监测
的有效性,望能为深入研究和评价保护性耕作对土壤
有机碳的影响提供一些依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

双季稻区保护性耕作试验于 2005 年 7 月早稻收
获后在湖南省宁乡县回龙铺村进行。该地位于 112°
18'E, 28°07'N, 海拔 36.1 m, 年均气温 17.2℃, 年平均
降雨量 1 553.70 mm, 年蒸发量 1 353.9 mm。试验土壤
为水稻土,河沙泥土种,是典型的水稻两熟农作区。种
植制度为稻-稻-休闲,肥力中等,排灌条件良好。

1.2 试验设计

试验采用大田方法,共设 4 个处理:翻耕秸秆不
还田、翻耕秸秆还田、旋耕秸秆还田和免耕秸秆还田。
每个处理 3 次重复,每个重复 66.7 m²,田间随机排列
(具体试验处理见表 1)。试验前土壤 0~10 cm 有机碳
为 24.65 g·kg⁻¹、碱解氮 224.10 mg·kg⁻¹、速效磷 13.40
mg·kg⁻¹、速效钾 44.00 mg·kg⁻¹ 和 pH(H₂O)6.26。水稻
抛秧前施肥,29%的复混肥(N18-P₂O₅-K₂O6)742.5
kg·hm⁻²,尿素 78 kg·hm⁻¹。分别在 2005 年晚稻收获
后、2006 年早稻插秧前以及早晚稻收获后进行取土,
其中不同处理各点分 0~10 cm 和 10~20 cm 两个层
次,采集 5 个点的混合土样,当天运回实验室,捡去作
物根系和小石头,自然风干,过 0.25 mm 筛,用于土壤
总有机碳和活性碳的测定。

1.3 测定方法

土壤总有机碳的测定采用常规方法。土壤活性有

表 1 双季稻区试验处理与设计

Table 1 Design of experiment treatments in the two-crop paddy field area

处理	耕作和秸秆还田方式
翻耕秸秆不还田	早晚稻收获后将秸秆移出田间,先翻耕地,再旋耕 2 遍后进行插秧(翻耕深 10 cm)
翻耕秸秆还田	早晚稻收获后先翻耕地,再旋耕 2 遍然后插秧(翻耕深 10 cm)
旋耕秸秆还田	早晚稻收获后旋耕 3 遍然后插秧(旋耕深 5 cm)
免耕秸秆还田	在早晚稻插秧前喷洒除草剂(克无踪)和免深松土壤调理剂,然后插秧

机碳测定:称量处理过约含 15 mg 有机碳的土样,放在塑料瓶(100 mL)内,用 333 mmol·L⁻¹KMnO₄ 溶液 25 mL 振荡处理 1 h,振荡后离心 5 min(4 000 r·min⁻¹),取上清液,用去离子水按 1:250 比例稀释,然后用分光光度计 565 nm 比色测定,根据 KMnO₄ 浓度的变化计算活性有机碳含量,单位 mg C·g⁻¹(即每 g 干土中含活性有机碳量)。

1.4 计算公式

碳库指数(CPI)=(农田土壤有机碳)/(参考农田土壤有机碳);

碳库活度(A)=(活性碳)/(稳态碳);

碳库活度指数(AI)=农田碳库活度/参考土壤碳库活度;

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100

2 结果与分析

2.1 保护性耕作对土壤总有机碳动态变化的影响

土壤总有机碳在层次上具有明显的规律性,各处理下土壤总有机碳都随土层的增加而降低,即均表现为 0~10 cm 大于 10~20 cm。保护性耕作对土壤总有机碳量有很大影响,其中翻耕和旋耕下除 2006 年 4 月份差异不显著外,其他都达到显著水平;而免耕下各测定时期差异都达到显著水平。这表明,在双季稻区 0~10 cm 和 10~20 cm 有机碳分层现象受秸秆还田影响较小,而受耕作方式影响较大,其中免耕更是加剧了土壤有机碳在 0~10 cm 和 10~20 cm 含量分布的不均。

耕作措施和秸秆还田对土壤总有机碳有很大的影响,就秸秆是否还田来讲,在 0~10 cm 土层土壤有

机碳在处理开始的前期表现为秸秆不还田高于秸秆还田,但到后期则相反,且差异仅在 2006 年 4 月达到显著水平;在 10~20 cm 下均表现为翻耕秸秆还田大于翻耕秸秆不还田,但差异均不显著。就 3 种耕作方式来讲,在 0~10 cm 土层土壤有机碳含量变化具有明显的规律性,土壤有机碳基本上都表现为免耕下最高,翻耕和旋耕次之,且仅在 2006 年 4 月达到显著水平;在 10~20 cm 土层土壤有机碳基本上都表现为旋耕>翻耕>免耕,且除个别时间外都达到显著水平。这说明,免耕有利于提高土壤 0~10 cm 总有机碳,而旋耕和翻耕有利于提高土壤 10~20 cm 土壤总有机碳,秸秆还田有利于提高土壤各层有机碳。

从表 2 中还可以看出,经过一次保护性耕作措施后(2005 年 10 月),秸秆还田并没有增加土壤有机碳,但是免耕却提高了土壤 0~10 cm 有机碳,旋耕则提高了土壤 10~20 cm 土壤有机碳,但差异均不显著。但是又经过一年的保护性耕作后(2006 年 10 月),免耕并没有大幅度提高表层的有机碳,年提高率仅为 24%,而旋耕和翻耕下年提高有机碳含量分别达到 34%和 31%,翻耕秸秆不还田最低仅为 18%;同时经过一年的保护性耕作,翻耕提高了 10~20 cm 土壤有机碳含量,年提高率达到 24%~25%,而免耕和旋耕下则仅有 14%和 13%。这说明,免耕提高土壤 0~10 cm 有机碳,以及旋耕提高土壤 10~20 cm 有机碳的潜力只在初期明显,但不具有可持续潜力;但是旋耕和翻耕提高土壤 0~10 cm 有机碳,以及翻耕提高土壤 10~20 cm 有机碳具有可持续增加的潜力;同时秸秆还田提高土壤有机碳含量具有可持续增加的潜力。

2.2 保护性耕作对土壤活性碳动态变化的影响

土壤活性碳在层次上也具有明显的规律性,各处

表 2 保护性耕作对各层土壤总有机碳的影响

Table 2 Effect of conservation tillage on total organic carbon in soil

层次	处理	2005-10-13	2006-04-08	2006-07-05	2006-10-10
0~10 cm	翻耕秸秆不还田	25.05a	30.56a	29.16a	29.65a
	翻耕秸秆还田	23.05a	26.33b	29.94a	30.26a
	旋耕秸秆还田	22.68a	24.54b	29.37a	30.47a
	免耕秸秆还田	25.01a	31.36a	31.06a	31.02a
10~20 cm	翻耕秸秆不还田	17.35a	23.82a	22.67a	21.57a
	翻耕秸秆还田	17.46a	23.96a	23.93a	21.81a
	旋耕秸秆还田	19.03a	24.28a	24.98a	21.43a
	免耕秸秆还田	17.19a	22.35b	20.50b	19.60b

注:同一栏内平均值后不相同字母表示方差分析差异显著(P<0.05),单位为 g·kg⁻¹。

理下土壤活性碳都随土层的增加而降低,即均表现为 0~10 cm 大于 10~20 cm。保护性耕作对土壤活性碳量有很大影响,其中翻耕秸秆不还田、旋耕(除 2006 年 7 月份)和免耕(除 2006 年 4 月份)处理基本上都达到显著水平;而翻耕秸秆还田(除 2006 年 10 月份外)都不显著。这表明,在双季稻区 0~10 cm 和 10~20 cm 活性碳分层现象受耕作方式影响较小,而受秸秆还田影响较大,其中翻耕秸秆还田降低了土壤活性碳在 0~10 cm 和 10~20 cm 含量的分布的不均。

从表 3 可以看出,耕作措施和秸秆还田对土壤活性碳有很大的影响,就秸秆是否还田来讲,在 0~20 cm 土层土壤活性碳基本上都表现为翻耕秸秆还田大于

翻耕秸秆不还田(2005 年 10 月份 10~20 cm 土层除外),但差异均不显著。就 3 种耕作方式来讲,在 0~20 cm 土层土壤活性碳含量变化具有明显的规律性,基本上都表现为旋耕和免耕下最高,翻耕最低,且仅在 2006 年 7 月达到显著水平;但 2005 年 10 月份 10~20 cm 土层表现为翻耕>旋耕>免耕,差异不显著。这说明,少免耕和秸秆还田有利于提高土壤 0~20 cm 土层活性碳。

2.3 保护性耕作对土壤碳库管理指数的影响

在早稻收获后取土时,取田边未进行人工开垦和管理的土壤作为参考土壤进行土壤碳库管理指数分析。从表 4 可以看出,秸秆是否还田和不同耕作措施

表 3 保护性耕作对各层土壤活性碳的影响
Table 3 Effect of conservation tillage on active carbon in soil

层次	处理	2005-10-13	2006-04-08	2006-07-05	2006-10-10
0~10 cm	翻耕秸秆不还田	4.16a	4.09a	3.88b	4.07a
	翻耕秸秆还田	4.17a	4.27a	4.01b	4.18a
	旋耕秸秆还田	4.29a	4.81a	4.77a	4.80a
	免耕秸秆还田	4.66a	4.65a	4.41ab	4.49a
10~20 cm	翻耕秸秆不还田	3.74a	2.75a	3.03c	2.32a
	翻耕秸秆还田	3.60a	3.20a	3.27bc	2.37a
	旋耕秸秆还田	3.52a	3.61a	4.38a	2.51a
	免耕秸秆还田	3.28a	3.67a	3.45b	2.87a

注:同一栏内平均值后不相同字母表示方差分析差异显著($P<0.05$),单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 4 保护性耕作对土壤碳库管理指数的影响
Table 4 Effect of conservation tillage on carbon pool management index in soil

层次	处理	总有机碳 $\text{TOC/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	活性碳 $\text{AC/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	稳态碳 $\text{UAC/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碳库活度 A	活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CPMI
0~10 cm	参考土壤	20.72c	3.67b	17.05c	0.22a	1.00a	1.00c	100.00c
	翻耕秸秆不还田	29.16b	3.88ab	25.28ab	0.15b	0.71c	1.41b	100.39b
	翻耕秸秆还田	29.94ab	4.01ab	25.93ab	0.15b	0.72c	1.44ab	103.86b
	旋耕秸秆还田	29.37b	4.41ab	24.95b	0.18b	0.82b	1.40b	116.44ab
	免耕秸秆还田	31.06a	4.77a	26.28a	0.18b	0.84b	1.50a	126.44a
10~20 cm	参考土壤	11.63c	2.29d	9.34c	0.25a	1.00a	1.00d	100.00d
	翻耕秸秆不还田	22.67a	3.03c	19.64a	0.15c	0.63c	1.95b	122.28c
	翻耕秸秆还田	23.93a	3.27bc	20.65a	0.16c	0.65c	2.06ab	132.83c
	旋耕秸秆还田	24.98a	4.38a	20.60a	0.21b	0.86b	2.15a	185.69a
	免耕秸秆还田	20.50b	3.45b	17.06b	0.20b	0.82b	1.76c	145.06b

注:同一栏内不相同字母的平均值表示方差分析差异显著($P<0.05$)

对土壤各形态碳及碳库管理指数影响很大。就秸秆是否还田的两块翻耕地进行比较,秸秆还田有利于提高土壤 0~10 cm 总有机碳、活性碳、稳态碳、碳库指数以及碳库管理指数,却降低了碳库活度和活度指数;同时提高了 10~20 cm 各项碳库指标。

比较不同耕作措施对土壤碳库管理指数的影响,结果表明在 0~10 cm 土层土壤总有机碳、稳态碳和碳库指数表现为免耕>翻耕>旋耕>参考土样,且 3 个耕作处理显著高于参考土样,这说明无论哪种农田耕作方式与弃耕土壤相比,均能提高土壤总有机碳、稳态碳和碳库指数,且免耕最高,其次是翻耕和旋耕;但是活性碳、碳库活度、活度指数和碳库管理指数表现为免耕>旋耕>翻耕,差异基本上都达到显著水平。这说明免耕提高土壤 0~10 cm 的各项有机碳以及土壤碳库管理指数;翻耕提高土壤 0~10 cm 总有机碳,但却降低了土壤活性碳及碳库管理指数;而旋耕降低了土壤总有机碳,但却提高了土壤活性碳和碳库管理指数。由此可以看出尽管翻耕比旋耕提高的土样总有机碳高,但却没有旋耕提高的活性碳和碳库管理指数高,说明翻耕条件下提高的土壤总有机碳主要是稳态碳。在 10~20 cm 土层土壤总有机碳、稳态碳和碳库指数基本表现为旋耕>翻耕>免耕>参考土样,且 3 个耕作处理显著高于参考土样,但是活性碳、碳库活度、活度指数和碳库管理指数表现为旋耕>免耕>翻耕,差异基本上都达到显著水平。这说明旋耕提高土壤 10~20 cm 各项碳库指标,而翻耕则提高土壤稳态碳指标,免耕提高土壤活性碳和碳库管理指数。

3 结语与讨论

长期保护性耕作可以提高土壤有机物质的输入量,减少土壤有机质的矿化分解,增加土壤有机碳含量,从而使农业土壤成为大气 CO₂ 的“汇”。但是耕作对土壤有机碳的短期影响(≤10 a)因土壤质地、气候、生物量以及采样时间等因素的不同而不同。关于短期保护性耕作是否能提高土壤有机碳的说法不一,有人认为短期保护性耕作并不提高土壤有机碳^[18~20];也有人认为短期免耕造成土壤有机碳的分层^[18~20],同时只提高土壤表层有机碳^[21],但并不提高土壤总有机碳储量^[21,22];也有一部分学者认为短期免耕也能增加土壤有机碳^[23]。本试验研究认为在双季稻区 0~10 cm 和 10~20 cm 有机碳分层现象受秸秆还田影响较小,而受耕作方式影响较大,其中免耕加剧了土壤有机碳在 0~10 cm 和 10~20 cm 含量的分布的不均,这与

McCarty G^[19]和庄恒扬^[20]的研究是一致的。同时本研究还认为保护性耕作一年后免耕提高了土壤 0~10 cm 总有机碳,而旋耕和翻耕能够提高土壤 10~20 cm 土壤总有机碳,秸秆还田提高土壤各层有机碳,这与前人认为秸秆还田和少免耕增加土壤有机碳一致。但是免耕提高土壤 0~10 cm 有机碳,以及旋耕提高土壤 10~20 cm 有机碳的潜力不具有可持续潜力;而旋耕和翻耕提高土壤 0~10 cm 有机碳,翻耕提高土壤 10~20 cm 有机碳以及秸秆还田提高 0~20 cm 土壤有机碳具有可持续增加的潜力。

秸秆还田有利于提高土壤 0~10 cm 总有机碳、活性碳、稳态碳、碳库指数以及碳库管理指数,同时提高了 10~20 cm 各项碳库指数,这与李琳等^[18]的研究相同。本试验研究认为双季稻区一年少免耕能提高土壤 0~20 cm 土层的活性碳,同时免耕提高土壤 0~10 cm 的各项有机碳以及土壤碳库管理指数;旋耕提高土壤 10~20 cm 各项碳库指标,这与李琳等对华北平原连续少免耕 5 年的试验结果不完全相同,可能和土壤类型、种植制度以及耕作年限有关。而长期保护性耕作会造成土壤有机碳、活性碳以及碳库管理指数的变化还有待于研究。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(11):1623-1627.
- [2] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等.土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J].*生态学报*, 2003,23(4):787-796.
- [3] Blair G J, Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems[J].*Australian Journal Agricultural Research*, 1995,46:1459-1466.
- [4] Jenkinson, Rayner J H. The turn over of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments[J]. *Soil Science*, 1977, 123:298-305.
- [5] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. Loss of organic carbon from different density fractions [J]. *Australian Journal Soil Research*, 1986, 24:301-309.
- [6] 邵月红,潘剑君,孙波.不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J].*水土保持学报*, 2005, 19(3):24-28.
- [7] 皱桂霞.美国有关耕作措施对土壤有机碳影响的研究[J].*水土保持科技情报*, 2002,5:15-17.
- [8] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].*生态学报*, 2005,25(3):513-519.
- [9] Blair G J, Lefroy R, Whitbread A, et al. The development of the oxidation technique to determine labile carbon in soil and its use in a carbon management index [C]//Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. *Assessment methods for soil carbon* Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 2001. 323-337.

- [10] Conteh A, Blair G J. The distribution and relatives losses of soil organic carbon fraction in aggregate size fractions from cracking clay soils under cotton production[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 257–71.
- [11] 张海林, 高旺盛, 陈 阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(1): 16–20.
- [12] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳——缓解全球变暖与提高土壤生产力[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 311–315.
- [13] 沈 宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166–173.
- [14] 沈 宏, 曹志洪. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 663–668.
- [15] 苏 静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 50–53.
- [16] 王 晶, 朱 平, 张 男, 等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 394–397.
- [17] 李 琳, 李素娟, 张海林, 等. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 106–109.
- [18] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 437–445.
- [19] McCarty G, W Lysenko N, Starr J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1564–1571.
- [20] 庄恒扬, 刘世平, 沈新平, 等. 长期少免耕对稻麦产量及土壤有机质与容重的影响[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 39–44.
- [21] Yang X M, Wander M M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a silt loam soil in Illinois [J]. *Soil Tillage Research*, 1999, 52: 1–9.
- [22] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287–1293.
- [23] 王昌全, 韦成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2001, 19(2): 152–154.