

耕作措施对双季稻田土壤碳及有机碳储量的影响

何莹莹¹, 张海林¹, 孙国锋¹, 汤文光², 李永³, 陈阜¹

(1.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 100094; 2.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3.湖南省宁乡县农业局, 长沙 410600)

摘要:针对不同耕作措施对双季稻田的固碳效应和固碳潜力问题, 选择湖南省宁乡县的双季稻区试验点进行了有机碳、活性有机碳以及耕层有机碳储量的研究, 以期制定适合于稻田条件下的合理耕作方式提供理论依据。结果表明, 耕作措施和秸秆还田对有机碳(SOC)和活性有机碳(AOC)含量均产生不同程度的影响。免耕处理下, 有机碳和活性有机碳含量皆随土壤深度的增加而减少, 土壤 0~5 cm 的 SOC 和 AOC 的含量最高, 且与其他层次达到显著性差异水平($P<0.05$), 具有明显的表层富集现象。与免耕相比, 旋耕和翻耕则更利于 5~10 cm 和 10~20 cm 土层的有机碳和活性有机碳的积累。比较秸秆还田对 SOC 和 AOC 的影响表明, 秸秆还田有效地提高了 0~10 cm 有机碳含量, 但对 10~20 cm 并未产生显著影响, 秸秆的输入并未增加土壤活性有机碳的含量。采用等质量方法计算了耕层土壤有机碳储量, 结果显示旋耕秸秆还田使有机碳储量明显增加, 而免耕只增加了土壤 0~5 cm 和 5~10 cm 土层有机碳储量, 10~20 cm 有机碳储量有所降低, 但耕作措施对有机碳储量的长效作用还有待于进一步研究。

关键词:耕作措施; 稻田; 有机碳; 活性有机碳; 有机碳储量

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0200-05

Effect of Different Tillage on Soil Organic Carbon and the Organic Carbon Storage in Two-crop Paddy Field

HE Ying-ying¹, ZHANG Hai-lin¹, SUN Guo-feng¹, TANG Wen-guang², LI Yong³, CHEN Fu¹

(1.College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University; Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; 2.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 3.Ningxiang Agricultural Bureau, Hunan Province, Changsha 410600, China)

Abstract: Soil organic carbon sequestration influence agroecosystem suitability and affects global warming, more and more is concerned by people now. Tillage not only affects soil organic carbon contents but also influence the components of SOC. In order to solve the problem of carbon sequestration that occurred in the double rice paddy field, four tillage practices were conducted from 2005 in Ningxiang County, the double rice paddy Hunan Province. Tillage practices included conventional tillage, rotary tillage and no tillage. Rice stubble was returned in conventional tillage(CTS), rotary tillage(RTS) and no tillage(NTS), 12 500 kg·hm⁻². Conventional tillage also includes plow tillage without stubble returned(CT). The tillage methods were the same of early rice and late rice. The total organic carbon(TOC), active organic carbon(AOC) and soil organic carbon storage were discussed in this paper with data of 2007. The results indicated that TOC and AOC were decreased with the depth of soil layer. The stratification ratios(SR) of TOC and AOC were increased significantly under no-tillage than that under minimum tillage and moldboard plow tillage at the 5% level. The storage of SOC and TOC at the 5~20 cm soil layer was enhanced under CTS and RTS compared to NTS. Straw returned could increase SOC storage in the 0~10 cm layer effectively, but no significant effect was found in the 10~20 cm soil layer. Furthermore, stubble returned had not significant effect on AOC under moldboard plow tillage. Rotary tillage had a great improvement on the storage of SOC, while, No-tillage increased SOC storage in the layer of 0~10 cm and reduced in the 10~20 cm layer by using the method of equivalent soil mass.

Keywords: tillage; paddy field; soil organic carbon; active organic carbon; organic carbon storage

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家十一五支撑计划(2006BAD15B01); 2008 年公益性行业(农业)科研专项(200803028)

作者简介: 何莹莹(1982—), 女, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事保护性耕作方面的研究, E-mail: heyinying121@163.com

通讯作者: 陈阜 E-mail: chenfu@cau.edu.cn

陆地土壤是全球最大的有机碳库,土壤有机碳的积累不仅可以提高土壤生产力,还能减缓大气 CO₂ 浓度的提高。农业生态系统的土壤碳库是全球碳库中最活跃的一个组成部分,受人为因素干扰最为强烈,频率最高,具有一定的可控性。因而,农田土壤有机碳的变化动态也越来越受到科学工作者的重视。采用合理有效的农田管理措施,保持和提高有机碳含量,是提高陆地生态系统生产力、保持系统稳定和减缓环境压力的重要途径^[1]。

耕作是对土壤扰动的主要措施,水稻土作为一种特殊利用方式下形成的人为耕作土壤,具有较高的碳密度和较大的固碳潜力^[2-3]。就水稻生产来说,世界大多数雨养稻作系统的土壤有机碳库有下降的趋势^[4]。因而,研究不同耕作措施下,稻田系统有机碳的固持问题,对于正确评价农业对气候变化的影响具有重要的理论意义,为制定合理的农田管理措施提供相应的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自湖南省长沙市宁乡县回龙铺村,地处 112°18'E,28°07'N,年均温 17.2℃,年平均降雨量为 1 553.70 mm,是典型的双季稻区。试验田长期以旋耕为主要耕作方式。土壤类型为水稻土,质地为河沙泥,试验前,各处理土壤理化性状均相同,其基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

该试验于 2005 年 10 月开始,共设 4 个处理(表 2):翻耕秸秆不还田(CT)、翻耕秸秆还田(CTS)、旋耕

秸秆还田(RTS)和免耕秸秆还田(NTS),见表 2。采取随机区组排列方案,每个处理 3 次重复,每个小区面积为 66.7 m²。

1.3 样品测定项目与方法

供试土壤样品采用 5 点取样法,分为 0~5 cm,5~10 cm,10~20 cm 3 个层次,当日运回实验室,捡去其中作物根系和小石头,自然风干,过 0.25 mm 筛子,用于土壤各项指标的测定。

主要测定项目为有机碳、活性有机碳、容重。测定方法:容重采用环刀法^[5];有机碳测定采用 K₂Cr₂O₇ 释热法^[6];土壤活性有机碳采用 0.333 mol·L⁻¹ 高锰酸钾比色法^[7]。

1.4 土壤有机碳储量的计算方法

有机碳储量计算有等深度和等质量两种方法。耕作措施对同等深度土壤质量产生影响,因而对耕层有机碳储量的计算采用等质量法,以消除以往有关耕作引起有机碳含量变化的研究结果中存在的偏差。

Ellert 和 Bettany^[8]提出了土壤有机碳储量(Mg·hm⁻²,1 Mg=10³ kg)的计算公式:

$$M_{\text{element}}=M_{\text{soil}}\times\text{conc}\times0.001\tag{1}$$

$$M_{\text{soil}}=\rho_b\times T\times10\,000\tag{2}$$

式中: M_{soil} 为单位面积土壤质量,Mg·hm⁻²; conc 为土壤有机碳(SOC)含量,kg·Mg⁻¹; ρ_b 为土壤容重,Mg·m⁻³; T 为土壤深度,m。

根据公式(2)可以得到各层土壤质量,即各层土壤容重及其相应的土层厚度乘积。特定研究土层的土壤质量即为各层次土壤质量之和。以不同耕作处理下土壤质量最大的那个值作为统一的土壤质量,然后采用公式(3)计算其他耕作处理方式为达到同质量的

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Basic physical and chemical properties of studied soil

土壤性状 Soil properties	容重 Bulk density/g·cm ⁻³	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	全钾 Total K/g·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 CEC/cmole·kg ⁻¹
数值 Value	1.21	20.24	1.29	1.23	17.63	97.1	4.38	7.44

注:土壤基础样品取自试验前田块,土壤均匀一致,测定层次为 0~20 cm。

表 2 试验处理与设计
Table 2 Design of experiment treatments

处理(Treatment)	设计(Design)
翻耕秸秆不还田(CT)	早晚稻收获后将秸秆移出田间,先翻耕地,再旋耕 2 遍然后进行插秧(翻耕深度 12~18 cm)
翻耕秸秆还田(CTS)	早晚稻收获后秸秆全量还田,先翻耕地,再旋耕 2 遍,然后插秧(翻耕深度 12~18 cm)
旋耕秸秆还田(RTS)	早晚稻收获后秸秆全量还田,旋耕 3 遍,然后插秧(旋耕深度为 8 cm)
免耕秸秆还田(NTS)	早晚稻收获后秸秆全量,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

注:试验开始时秸秆来源为 2005 年 7 月早稻收获所得,秸秆还田量约为 12 500 kg·hm⁻²。

土壤需要另加的土壤深度。

$$T_{\text{dl}} = \frac{(M_{\text{soil,max}} - M_{\text{soil,layer}})}{\rho_{\text{b,extra}}} \quad (3)$$

式中: T_{dl} 为要达到等质量土壤需要另加的下层土壤深度, m; $M_{\text{soil,max}}$ 为相等的土壤质量(最大的土壤质量), $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $M_{\text{soil,layer}}$ 为所求的层次土壤质量之和, $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $\rho_{\text{b,extra}}$ 为另加的下层土壤容重, $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.5 数据处理

试验数据处理采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对土壤有机碳的影响

土壤有机碳是反映土地肥力状况的重要指标。研究结果表明(表 3), 连续两年试验后, 处理各层次的有机碳含量比试验前有所提高, 但从各处理有机碳的增加数量来看, 早稻期间表层 0~5 cm 以 NTS 处理增加幅度最大, 为 $8.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, CTS 次之, 为 $7.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, RTS 为 $6.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而翻耕秸秆不还田增幅最小; 晚稻期间规律则有所不同, 表现为 $\text{NTS} > \text{RTS} > \text{CTS} > \text{CT}$ 。然而, 比较 10~20 cm 各处理的有机碳增量则发现: 早稻期间为 $\text{CT} > \text{CTS} > \text{NTS} > \text{RTS}$, 晚稻时期表现为 $\text{CT} > \text{CTS} > \text{RTS} > \text{NTS}$, 两次测定结果均表现为秸秆不还田有机碳的增量最大。

耕作措施与秸秆还田分别对土壤总有机碳有着不同程度的影响。相同秸秆还田条件下, 对比 CTS、

RTS 和 NTS 3 个不同耕作处理, 早晚稻时期土壤 0~5 cm 层次均以 NTS 最高, 且与其他处理达到显著性差异水平, 耕作使土层内有机碳受到搅动, 使其在 0~5 cm 和 5~10 cm 层次上得到重新分布, 降低了 0~5 cm 的有机碳含量。而 5~10 cm 和 10~20 cm 土壤有机碳含量均为 CTS 和 RTS 处理较高, 在早稻收获时 $\text{CTS} > \text{RTS}$, 且达到显著性差异, 晚稻收获时, 表现为 $\text{RTS} > \text{CTS}$, 但 5~10 cm 层次差异不显著。

翻耕条件下, 对比 CT 和 CTS 两个秸秆还田方式不同的处理, 早稻收获时, 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤有机碳含量为 CTS 显著高于 CT 处理, 晚稻收获时差异不显著。10~20 cm 土层的有机碳为 CT 显著高于 CTS 处理。晚稻收获后, 各处理的有机碳含量均比早稻收获后有所下降。

从有机碳随土壤深度的变化趋势来看, 连续免耕条件下, 有机碳随土层深度的增加而有规律的逐渐递减, 表层含量极显著高于下层, 具有明显的表层富集现象, 这与张锡洲^[9]的研究结果一致, 而其他 3 个处理均表现为 5~10 cm 土有机碳含量最高。

2.2 不同耕作措施对土壤活性有机碳的影响

在较短时间内, 土壤有机碳总量对人为活动和环境因子变化的反映不是很敏感^[10-11], 而活性有机碳是土壤中活跃的化学组成, 对农田管理措施反应敏感度高于有机碳。

研究结果表明(表 4): 耕作方式对土壤活性有机碳含量的影响规律与总有机碳基本相同, 这主要是因为土壤活性有机碳含量很大程度上取决于总有机

表 3 不同耕作方式下土壤有机碳含量变化($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Changes of SOC contents induced by different tillage systems($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

取样时间	耕作方式	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
实验开始后 第一季晚稻 收获 2005-10-10	免耕秸秆还田(NTS)	25.01a(a)		17.19a(a)
	翻耕秸秆还田(CTS)	23.05a(a)		17.46a(a)
	旋耕秸秆还田(RTS)	22.68a(a)		19.03a(a)
	翻耕秸秆不还田(CT)	25.05a(a)		17.45a(a)
早稻收获 2007-07-13	免耕秸秆还田(NTS)	33.87a(a)	28.66b(b)	21.86c(c)
	翻耕秸秆还田(CTS)	32.48b(a)	31.22a(a)	23.22b(b)
	旋耕秸秆还田(RTS)	29.98c(a)	25.44c(b)	21.15c(c)
	翻耕秸秆不还田(CT)	29.26a(a)	29.56b(a)	24.28a(b)
晚稻收获 2007-10-15	免耕秸秆还田(NTS)	31.26a(a)	25.38b(b)	17.56c(c)
	翻耕秸秆还田(CTS)	26.83c(b)	28.49a(a)	24.53b(c)
	旋耕秸秆还田(RTS)	28.30b(a)	28.92a(a)	25.99a(b)
	翻耕秸秆不还田(CT)	27.00c(b)	28.48a(a)	26.41a(b)

注: a, b, c 不同代表各处理间差异显著($P < 0.05$); 括号内的 a, b, c 不同代表层次间差异显著($P < 0.05$), 下同。

表 4 不同耕作方式下土壤活性有机碳含量变化($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Changes of AOC contents induced by different tillage systems($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

取样时间	耕作方式	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
实验开始后 第一次早稻 收获 2005-10-10	免耕秸秆还田(NTS)	4.66a(a)		3.28a(a)
	翻耕秸秆还田(CTS)	4.17a(a)		3.60a(a)
	旋耕秸秆还田(RTS)	4.29a(a)		3.52a(a)
	翻耕秸秆不还田(CT)	4.16a(a)		3.74a(a)
早稻收获后 晚稻插秧前 2007-07-13	免耕秸秆还田(NTS)	5.68a(a)	4.22a(b)	3.13a(b)
	翻耕秸秆还田(CTS)	5.42ab(a)	5.16a(a)	3.61a(b)
	旋耕秸秆还田(RTS)	4.52b(a)	4.27a(a)	2.36a(b)
	翻耕秸秆不还田(CT)	4.75ab(a)	4.70a(a)	3.80a(a)
晚稻收获后 2007-10-15	免耕秸秆还田(NTS)	3.69a(a)	2.45b(b)	1.57c(c)
	翻耕秸秆还田(CTS)	2.44b(b)	3.22a(a)	3.20b(a)
	旋耕秸秆还田(RTS)	3.15a(a)	3.61a(a)	3.14b(a)
	翻耕秸秆不还田(CT)	3.49a(a)	3.59a(a)	3.61a(a)

碳^[12]。分析早晚稻期间试验结果发现,NTS 处理的土壤活性碳在层次上也具有明显的规律性,随土层的加深而减少,且表层 0~5 cm 与其他层次达到显著性差异水平。早稻期间,除翻耕秸秆还田处理外,CT、CTS 和 RTS 处理的土壤活性碳在 0~5 cm、5~10 cm 土层分布较均匀,两个层次间差异不显著,10~20 cm 则明显降低,特别是早稻时期 CTS 处理下该层次的活性有机碳降低最大,而 CT 处理在 0~20 cm 层次活性有机碳的分布最为均匀。

比较耕作措施对土壤活性有机碳含量的影响,结果表明:在 0~5 cm 层次下,活性有机碳含量均以免耕最高;而 10~20 cm 的土壤活性碳含量,除晚稻 NTS 的含量显著低于其他 3 个处理外,其他差异不显著。总体说来,土壤耕作初期增加了土壤 0~5 cm、5~10 cm 的土壤活性有机碳,秸秆还田反而降低土壤各层次的活性有机碳含量。

2.3 耕作措施对土壤耕层有机碳储量的影响

采用等质量方法计算了耕层土壤有机碳储量。根据计算,确定了不同耕作处理下目标土层的最大土壤质量为 2 212.283 Mg·hm⁻²,计算结果如表 5、表 6。

表 5 不同深度的土壤有机碳含量、土壤容重以及土壤质量
Table 5 Soil organic carbon, bulk density and soil mass by depth

土壤深度 Soil depth/cm	免耕秸秆 还田(NTS)	翻耕秸秆 还田(CTS)	旋耕秸秆 还田(RTS)	翻耕秸秆 不还田(CT)
土壤容重 Soil bulk density/g·cm ⁻³				
0~5	0.84	0.84	0.85	0.97
5~10	1.11	0.88	1.05	1.01
10~20	1.24	1.19	1.15	1.01
20~30	1.48	1.35	1.38	1.31
土壤质量 Soil mass/Mg·hm ⁻²				
0~5	419.300	420.017	425.250	485.667
5~10	553.717	441.117	524.483	507.450
10~20	1 239.267	1 187.733	1 146.667	1 010.267
Total	2 212.283	2 048.867	2 096.400	2 003.283
有机碳储量 SOC storage/Mg·hm ⁻²				
0~5	13.107	11.267	12.035	13.113
5~10	14.055	12.566	15.170	14.451
10~20	21.757	29.138	29.796	26.683

表 6 不同耕作处理达到等质量(2 212.283 Mg)需要增加的土壤深度及其对应的 SOC 数量

Table 6 The additional soil thickness used to calculate SOC storage on the equivalent mass basis and associated SOC quantity

耕作处理 Tillage treatments	免耕秸秆还田(NTS)	翻耕秸秆还田(CTS)	旋耕秸秆还田(RTS)	翻耕秸秆不还田(CT)
增加的土壤深度 The addition soil thickness/cm	0	1.21	0.84	1.60
对应的 SOC 数量 SOC quantity/Mg·hm ⁻²	0	4.01	3.01	5.52
有机碳总储量 The storage of SOC/Mg·hm ⁻²	48.918	56.981	60.013	59.765

结果表明,在等质量(2 212.283 Mg·hm⁻²)时,土壤耕层有机碳储量以 NTS 处理最低,RTS 处理最高,也就是说免耕并没有提高土壤耕层有机碳储量。通过分析各个层次对耕层有机碳总储量的贡献率发现:NTS 处理在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层,有机碳储量含量贡献最大,但在 10~20 cm 土层中,由于没有土壤扰动和植物残体的输入,使得土壤容重增加,有机碳含量降低。国外大量的研究也表明,免耕处理在短期内(3~5 a)对有机碳的积累仅限于表层(<10 cm),因为免耕的固碳相应存在滞后效应,5~10 a 才能有明显反应^[13]。对比 CT 和 CTS 两个翻耕处理发现,秸秆还田在短时间内没有增加土壤有机碳储量。

3 结论与讨论

3.1 结论

长期免耕可以培肥地力,显著改善土壤化学性质。但耕作对土壤有机碳的短期影响因土壤质地、气候、生物量以及采集时间等因素的不同而不同^[14]。因而对此研究的说法也大不相同^[15]。本研究总结连续两年的免耕试验结果发现:

(1)所有处理下土壤有机碳含量均比试验前有所提高;有机碳在 NTS 处理下随土壤深度的增加而递减,在 0~5 cm 最高,有明显的表面富集现象,而旋耕和翻耕有利于提高土壤 5~10 和 10~20 cm 土壤总有机碳;秸秆还田有效地提高了土壤 0~5 cm 和 5~10 cm 有机碳含量,但却降低了 10~20 cm 的有机碳含量。

(2)活性有机碳的变化情况与有机碳大体相同,免耕处理下,对土壤进行耕作的初期增加了土壤 0~5 和 5~10 cm 的土壤活性碳。秸秆还田反而降低土壤各层的活性有机碳,

(3)耕作措施对有机碳储量的影响结果表明:土壤耕层范围内的有机碳储量以 NTS 处理最低,RTS 处理最高。NTS 提高了 0~5 cm 和 5~10 cm 的有机碳储量,但 10~20 cm 土层中,由于没有土壤扰动和植物残体的输入,使得土壤容重增加,有机碳含量降低。在短时间内,秸秆还田对有机碳储量的影响不大。

3.2 讨论

(1)一般认为农田有机碳含量与有机质的输入和耕作程度线性相关^[6],稻草根系的残留、秸秆还田等是导致试验实施后有机碳有所增加的主要原因。而分析有机碳分布随土壤深度变化的规律则认为:耕作深度的不同改变了有机碳在耕层范围内的分布有所差异,旋耕和翻耕将表层部分有机碳与下层相混合,因此与免耕相比,表层较低,而下层则高于免耕。

(2)试验结果显示,晚稻收获后各处理的有机碳含量均明显低于早稻,分析有机碳下降的原因为早稻生育期间,田间秸秆为上一季晚稻收获后所留下,经过了近6个月后基本腐解^[7],其对土壤有机碳增加的程度较大;而晚稻生育期间,田间秸秆为早稻收获后还田所致,秸秆腐解与上一季作物相比时间较短,没有经过充分的腐解,早、晚稻的生长又会消耗一部分有机养分,因而导致其有机碳含量下降。

(3)针对耕作措施对耕层土壤有机碳储量的影响结果,作者认为耕作方式和秸秆还田同时改变了土壤的容重和有机碳含量,因而在各个层次的有机碳储量有所差异,但对土壤有机碳储量不一定有较大影响,仅是有机碳在空间分布上有所改变而已。

参考文献:

- [1] Mosier A R. Soil processes and global change[J]. *Biol Fertil Soil*, 1998, 27:221-222
- [2] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4):384-393.
PAN Gen-xing, ZHAO Qi-guo. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4):384-393.
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4):609-618.
PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamic in agricultural lands[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4):609-618.
- [4] Naklang K, Whitebread A, Lefroy R, et al. The management of rice straw, fertilizer and leaf litters in rice cropping systems in Northern Thailand: I Soil carbon dynamics[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209:21-28.
- [5] 中国科学院土壤研究所. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978:1-76.
Soil physical research room in the institute of soil science, the Chinese academy of science. Methodology on determination of physical characteristics of soil[M]. Beijing: Science Press, 1978:1-76.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003:56-58.
BAO Shi-dan. Soil agriculture chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003:56-58.
- [7] 李琳, 李素娟, 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.
LI Lin, LI Su-juan, et al. Study on soil C pool management index of conservation tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):106-109.
- [8] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995:529-538.
- [9] 张锡洲, 李廷轩, 等. 水旱轮作条件下长期自然免耕对土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6):145-147.
ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Effects of long-term natural no-tillage on soil physiochemical properties in rice/wheat rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6):145-147.
- [10] 徐阳春, 沈其荣, 储国良, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4):549-552.
XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, CHU Guo-liang, et al. Effect of long term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/ wheat rotation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):549-552.
- [11] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[J]. *Advances in Agronomy*. 2005, 85:221-268.
- [12] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21:471-479.
- [13] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116:439-444.
- [14] 李琳, 伍芬琳, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1):248-253
LI Lin, WU Fen-lin, et al. Organic carbon and carbon pool management index in soil under conservation tillage in two-crop paddy field area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):248-253.
- [15] 冯跃华. 免耕直播对一季晚稻田土壤特性和杂交水稻生长及产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(11):1728-1736.
FENG Yue-hua. Effects of no-tillage and direct broadcasting on soil physical and chemical properties and growth and yield formation in hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(11):1728-1736.
- [16] 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
LIU Xun-hao, GAO Wang-sheng, ZHU Wen-shan. The mechanism of straw and technical model[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [17] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
WANG Ming-xing. Methane emission in China paddy[M]. Beijing: Science Press, 2001.