

保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析 ——基于中国农业生态系统长期试验资料

王成己¹, 潘根兴¹, 田有国²

(1.南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095; 2.农业部土壤肥料质量监督检验测试中心, 北京 100026)

摘要:本文收集整理 1979—2008 年有关中国保护性耕作的长期试验文献,整合分析了长期保护性耕作下中国农田表土有机碳的变化特征。采用的 48 篇有效文献涉及 18 个省(区、市)的 59 个长期试验点,涵盖 12 种土类。总样本 88 个(其中旱地 51 个,水田 37 个)。结果表明,保护性耕作处理下旱地和水田表土有机碳年变化分别介于 $-0.30\sim 0.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-0.20\sim 2.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,平均增幅分别达 $0.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。可见长期保护性耕作下,农田表土有机碳含量总体呈上升趋势,水田下增长高于旱地。和少免耕相比,秸秆还田更有利于促进表土有机碳的积累。统计分析还表明,结合秸秆还田的综合保护性耕作措施可以使水田和旱地的有效固碳期限分别持续 27 a 和 23 a,水田在保持较高固碳速率的同时,延长了有效固碳年限。耕地表土有机碳含量在保护性耕作下特别是秸秆还田可以较大幅度地提高,实行保护性耕作可以具有农业稳产与土壤固碳的双重意义。

关键词:保护性耕作;农田土壤;长期试验;土壤有机碳;土壤固碳;产量

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2464-12

Characteristics of Cropland Topsoil Organic Carbon Dynamics Under Different Conservation Tillage Treatments Based on Long-term Agro-ecosystem Experiments Across Mainland China

WANG Cheng-ji¹, PAN Gen-xing¹, TIAN You-guo²

(1.Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Nanjing 210095, China;

2.Center of Soil and Fertilizer Quality Monitoring and Test, the Agricultural Ministry of China, Beijing 100026, China)

Abstract:Conservation tillage (CT) has become one of the most important measures of sustainable agriculture development, and it is a relatively new concept but widely adopted in China and has considerable benefits. In this paper data of topsoil soil organic carbon (SOC) in long-term field experiments of China from publications available from 1979 to 2008 was collected to summarize and analyze the dynamics of SOC. The data set comprised of 88 observations (51 and 37 from dry croplands and rice paddies, respectively) of SOC under different conservation tillage measures at 59 experiment sites (31 for dry croplands and 28 for rice paddies) across 18 provinces of mainland China. The soils represented by the experiments covered 12 dominant types of cropland soils from China. The relative increase in SOC content was analyzed with respect to initial SOC stock, and rice paddies and dry croplands soils were compared. This analysis was done for 2 different categories of long-term conservation tillage: no-tillage (reduced tillage) and straw mulching.

An overall increase in SOC was projected for both types of croplands, with a relative annual increment (RAI, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) of $-0.30\sim 0.75$ (0.21 on average) for dry cropland soils, and $-0.20\sim 2.71$ (0.51 on average) for rice paddy soils. Initial and final SOC values in rice paddies were higher significantly than that in dry croplands, and rice paddies can enhance SOC accumulation than dry croplands. Enhanced SOC accumulation was much higher under straw mulching than that in no-tillage and reduced tillage. Comprehensive conservation tillage (no-tillage with straw mulching) contained carbon sequestration durations of 27 and 23 years for rice paddies and dry croplands, respectively.

Conservation tillage is a key technique of sustainable agriculture, and carrying out research of application and extension of conservation tillage in China is of profound significance. It is necessary to strengthen the study for improving crop productivity, enhancing SOC accumulation and change the traditional idea of farmers so as to accelerate the application of conservation tillage in China.

Keywords: conservation tillage; cropland soil; long-term agro-ecosystem experiments; soil organic carbon; carbon sequestration; yield

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40710019002); 教育部基础研究重大项目资助

作者简介: 王成己(1972—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 长期从事农业生态系统试验研究。

通讯作者: 潘根兴 E-mail: pangexing@yahoo.com.cn

保护性耕作 (conservation tillage, CT) 于 20 世纪 30 年代起源于美国。狭义的土壤保护性耕作指土壤免耕播种和作物残茬覆盖等农田保护措施。西方国家的保护性耕作措施从环境保护和生态修复为出发点保护土壤不受强烈的耕作干扰破坏及防止水土流失, 而较少考虑作物产量。Mannering (1987) 将保护性耕作明确定义为: 在某种种植制度下, 能维持最少 30% 土壤覆盖, 并减少水土流失, 提高耕地产量的一种耕作方式^[1]。2002 年我国农业部将保护性耕作定义为: 在能够保证种子发芽的前提下, 通过少耕、免耕、化学除草技术措施的应用, 尽可能保持作物残茬覆盖地表, 减少土壤水蚀、风蚀, 实现农业可持续发展的一项农业耕作技术^[2]。它是以减少土壤体系破坏为原则, 考虑以较低能耗和物质投入来维持作物相对高产并可获取较高利润, 是一种具有生态保护意义的持续性农业形式^[3]。而以保护农田水土资源和环境健康为核心, 以建立土壤轮耕技术体系和多元化覆盖技术体系为关键, 减少水土侵蚀, 维持土地生产力, 改善农田生态系统功能的可持续农作制度称为保护性耕作制 (Conservation Farming System, CFS) (2005 年全国保护性耕作研讨会)。

翻耕普遍被认为是引起农田土壤有机质含量下降的主要原因, 大量的秸秆燃烧使得固定在作物残茬的养分转化为 CO_2 释放到大气中。加上肥料的不合理施用, 多年的传统耕作引起农田土壤有机碳储量不断地下降。Song 等^[4] (2005) 的研究表明, 垦耕可使土壤碳库损失达 1.74~2.07 Pg。这主要是耕作的机械作用和对农作物残留物的管理措施不合理造成的。据研究, 土壤碳库损失量 60%~70% 左右可通过采用合理的管理措施重新固定^[5]。IPCC 估算, 通过适当的农业管理措施, 每年能使土壤碳库提高 0.4~0.9 PgC, 持续 50 年, 土壤碳库累积增加 24~43 PgC^[6]。我国自 20 世纪 60 年代开始引进、试验、示范和推广少耕、免耕等保护性耕作技术, 先后在全国不同生态类型区进行了多方面的研究, 目前各地区均有进行保护性耕作研究的报道, 研究涉及的作物和栽培耕作模式覆盖了中国主要农作物生产系统。

农田长期定位试验是研究农田长期生态过程及其环境效应和调控措施的重要手段, 长期试验及其保存的样品记录了长时间尺度的农田生态系统和环境变化信息, 可以用来研究农田生态系统的长期变化过程以及生态过程对人为干扰和环境变化响应和反馈的长期效应^[7]。近年来, 许多国家开展了农业生态系统

土壤碳循环模型的研究, 对长期试验的土壤有机碳动态趋势进行了模拟分析、模型检验^[8-9]及模型比较^[10], 并继续推动着一些模型和模拟方法在农田土壤保护性耕作系统碳循环研究中的应用^[11-14]。但对长期保护性耕作下农田土壤有机碳变化的整合分析还鲜有报道。因此, 在对保护性耕作的土壤肥力效应、社会经济和生态效益的研究认识^[15-22]基础上, 通过比较不同保护性耕作下土壤有机碳的积累效应, 进而探讨耕作管理对农业土壤碳固定和 CO_2 减排潜力, 对发展应对气候变化的农业生产体系和技术具有重要的参考意义。本文收集我国长期保护性耕作试验的资料, 整合分析保护性耕作下农田土壤有机碳含量变化的定量特征, 试图揭示不同保护性耕作措施对土壤固碳的影响幅度, 为发展保护性耕作和促进耕地土壤碳汇进而应对气候变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

通过对中国期刊网和维普科技期刊网收录文献的检索, 收集 1979 年 1 月至 2008 年 6 月间发表的有关保护性耕作长期试验的论文, 收集其中有关耕作处理、试验期限、有机质 (碳) 含量等数据, 整理为农田保护性耕作的农田有机碳数据集。采集数据符合如下原则: (1) 试验的保护性耕作措施为免耕、少耕、秸秆还田和包含耕作和秸秆还田的综合性措施一种或多种, 设有常规或传统耕作模式为对照; (2) 报道的试验研究起止年份清楚, 试验年限在 3 年以上, 试验研究期内管理方式不变; (3) 试验处理的小区面积不小于 10 m^2 ; (4) 土壤有机质 (碳) 的初始值和耕作处理下观测值明确, 且含量测定方法相同。构成满足上述要求的相关文献共有 48 篇, 形成原始数据集。

按照下节介绍的计算方法对原始数据集进行计算, 对结果进行概率分布统计, 平均年变化量超出平均值正负 3 倍标准差的数据及其试验点删去。同时, 也删去有机碳变化量明显超出土壤中积累速率的数据和试验点 (水田 1 例), 最后得到保护性耕作试验的有效数据集, 包括长期试验点 59 个, 耕作处理样本总数 88 个 (其中旱地 51, 水田 37) (图 1, 表 1 及附录)。

1.2 数据处理与统计方法

(1) 有机碳数据归一化

本文主要研究保护性耕作下农田表土 (0~20 cm) 有机碳变化, 首先按下式将原始数据集中土壤有机质 (SOM) 数据全部转化为土壤有机碳 (SOC) 数据:



图 1 供试农田保护性耕作试验点分布
Figure 1 Site distribution of long-term tillage experiments studied

表 1 保护性耕作长期试验样点和处理样本数分布
Table 1 Distribution of experimental sites and samples with long-term conservation tillage

农田类型 Cropland type	试验点数 Number of site	平均试验期 限/a Mean durations	样本数 Samples	
			少免耕 No-tillage	秸秆还田 Straw mulching
稻田	28	9.4±5.0	12	25
旱地	31	9.3±6.3	16	35
总数/平均	59	9.9±5.8	28	60

$$SOC(g \cdot kg^{-1}) = 0.58 \times SOM(\%) \quad (1)$$

个别文献记载的有机质测定的采样深度为 0~15 cm。尽管稻田土壤有精密深度采样的 SOC 深度分布研究^[23],但因缺乏旱地土壤有机质表土深度变化的研究资料,且本文主要研究相对变化,本文不对个别样本的有机质资料进行深度转化处理。计算结果也表明,深度转化与否对相对年变化量的值没有显著影响。

(2) 试验期间有机碳含量年变化计算

分别计算试验期限内对照和处理的有机碳平均年变化量($g \cdot kg^{-1} \cdot a^{-1}$),按下式:

$$AI = (SOC_t - SOC_0) / t \quad (2)$$

式中:AI 为平均年变化量, $g \cdot kg^{-1} \cdot a^{-1}$; t 为试验观测期限, a, 由试验观测的终止期与起始期的差值得到; SOC_0 和 SOC_t 分别为试验观测起始期和终止期的有机碳含量测定值。

(3) 耕作处理下有机碳含量相对年变化量计算

为了分辨耕作处理的实际影响,需要扣除非处理下表土有机碳的变化效应。这里提出相对年变化(RAI, $g \cdot kg^{-1} \cdot a^{-1}$)概念,即试验观测期限内任一保护性耕作处理(TR)扣除对照(CK)后的平均净年变化量,

其计算式为:

$$RAI = [(SOC_t - SOC_0)_{TR} - (SOC_t - SOC_0)_{CK}] / t \quad (3)$$

于是,有:

$$RAI = AI_{TR} - AI_{CK} \quad (4)$$

(4) 耕作处理的分类统计

将文献中报道的试验研究耕作处理归类为秸秆还田和少免耕等 2 类保护性耕作分别进行统计分析。前者包含所有秸秆还田量超过 30% 的耕作处理,否则归为后者。考虑到不同种植制度下农田土壤固碳的差异性,本文按农田土壤总体和旱地与水田两种农业利用类型分别进行统计分析。

(5) 数据统计和显著性差异检验

数据处理用 Microsoft Excel 2003 进行,不同耕作类型和土壤类型间的差异显著性采用 SPSS (Version 13.0) 进行差异显著性检验。

2 结果分析

2.1 保护性耕作试验下农田土壤有机碳含量分布

将所有试验点对照条件下的试验观测期间初始和终止有机碳含量的频度分布统计结果示于图 2。而保护性耕作处理下试验观测期终止有机碳含量频度分布统计结果示于图 3。可见,水田表土有机碳含量为拟正态分布,而旱地表土有机碳含量为偏正态分布。这说明旱地土壤的有机碳含量变异性明显大于稻田。表 2 归纳了对照和处理下表土有机碳含量的分布特点,无论是对照还是处理,稻田土壤 SOC 含量均显著高于旱地,无论是稻田还是旱地,处理下有机碳含量均较大幅度高于对照,而后者终止时也显著高于起始时。这里可以看出,无论是稻田还是旱地,有机碳含量处于提高中,且不管是对照还是处理,稻田的提高幅度明显高于旱地。

表 2 保护性耕作试验下观测期表土有机碳统计($g \cdot kg^{-1}$)
Table 2 Topsoil SOC content($g \cdot kg^{-1}$) in long-term conservation tillage experiments

农田类型 Cropland type	对照 Control		处理 Treatment
	SOC_0	SOC_t	SOC_t
稻田	13.02±5.18Ba	14.15±5.44Aa	17.84±6.15a
旱地	9.29±5.53Bb	10.01±5.36Ab	10.72±5.66b
总体/平均	11.43±5.88B	12.33±5.91A	13.78±6.76

注:不同大写字母表示观测期前后的显著性差异,而小写字母表示稻田和旱地的显著性差异($P < 0.01$)。

Different capital letters in same line mean difference with monitoring periods at $P < 0.01$. And lower characters in same column mean difference between rice paddies and dry croplands at $P < 0.01$.

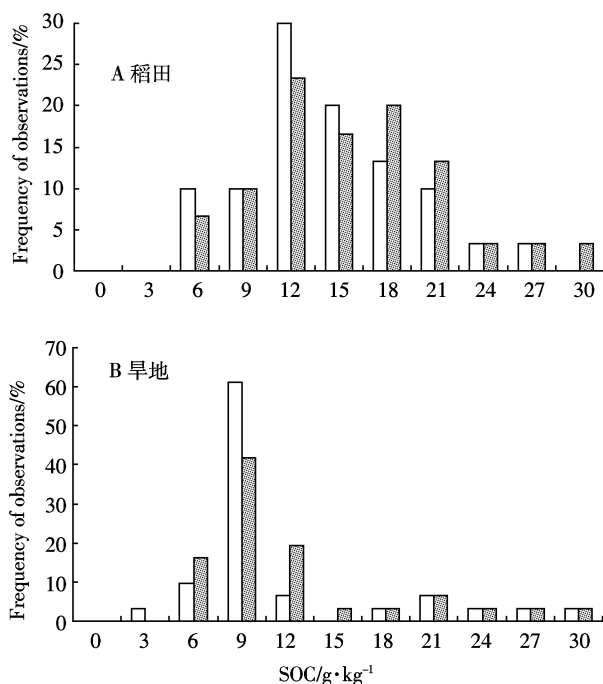


图 2 对照(常规耕作)下农田有机碳分布
Figure 2 Cropland SOC distribution of conventional tillage

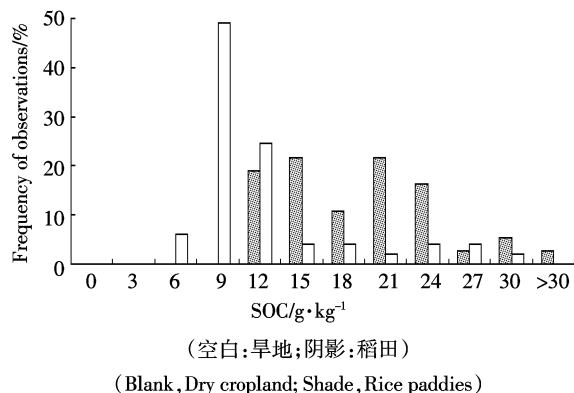


图 3 保护性耕作处理长期试验观测终止时表土有机碳含量分布
Figure 3 Final SOC distribution of conservation tillage

2.2 保护性耕作下农田表土有机碳相对变化幅度

应用公式(3)计算的保护性耕作处理下相对年变化幅度的统计结果示于图 4。与有机碳含量的分布不同,处理下稻田增幅的频度分布为偏正态分布,而旱地却呈正态分布。与许兴旺^[24](2008)对大田的统计研究结果不同,保护性耕作下(与对照相比)有机碳含量下降的样本在旱地不到 5%,在稻田不到 10%。因此,保护性耕作普遍收到了提高土壤有机碳含量的效果。

保护性处理下旱地表土有机碳相对年增量介于 $-0.30 \sim 0.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,而稻田介于 $-0.20 \sim 2.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 3 保护性耕作处理下表土有机碳相对年变化量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
Table 3 Relative annual increment ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) of SOC with long-term conservation tillage

农田类型 Cropland types	对照 Control	保护性耕作处理 Conservation tillage treatments		
		总体 Total	秸秆还田 Straw return	少免耕 Reduced tillage
稻田 Rice paddy	$0.15 \pm 0.26a$	$0.51 \pm 0.51a$	$0.65 \pm 0.88aA$	$0.10 \pm 0.29aB$
旱地 Dry cropland	$0.08 \pm 0.20b$	$0.21 \pm 0.24b$	$0.17 \pm 0.18bA$	$0.04 \pm 0.11bB$
总体/平均 Total/average	0.11 ± 0.23	0.33 ± 0.35	$0.38 \pm 0.48A$	$0.06 \pm 0.18B$

注:不同大写字母表示不同保护性耕作处理间显著性差异,而小写字母表示稻田和旱地间显著性差异($P < 0.05$)。

Different capital letters in same line mean difference between the treatments at $P < 0.05$. And lower characters in same column mean difference between rice paddies and dry croplands at $P < 0.05$.

a^{-1} 。按照划分的两种保护性耕作处理类型的统计结果(表3)显示,不同的保护性耕作对土壤有机碳的积累效果明显不同。无论是稻田还是旱地,秸秆还田少于 30%或不还田的保护性耕作相对于对照的有机碳增加效果甚微,其 $>200\%$ 的变异系数显示,其有机碳积累效果依不同条件而有极大差异,即以耕作管理为主的少免耕对农田土壤有机碳的积累作用具有极大的不确定性。但是,30%以上秸秆还田的保护性耕作对有机碳的积累幅度平均高于前者的 4~5 倍,且变异性也明显降低。因此,无论是稻田还是旱地,以增加有机质投入为前提的,结合秸秆还田的保护性耕作才能收到土壤有机碳快速积累的效果。

2.3 保护性耕作下有机碳积累随试验观测期限和起始含量的变化

对照条件下有机碳含量变化与试验观测期限没有明显的关系。而图 5 表明,秸秆还田超过 30%的保护性耕作处理下表土有机碳年变化(RAI 的绝对值)与试验观测期限存在显著的负相关关系,尽管秸秆还田少或不还田的少免耕处理下也没有观察到这种关系。应用这种关系估算,结合秸秆还田的保护性耕作的有效固碳期限在稻田和旱地可分别持续 27 a 和 23 a,如果以相对积累 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 为保护性耕作相对效应的观察下限,则其有效固碳期限可分别 18 a 和 13 a。这里同样表明,短期($<5 \text{ a}$)试验观察得到的有机碳积累速率的估计要高于长期($>10 \text{ a}$)的 1 倍以上,因此,短期试验结果可能高估保护性耕作的固碳潜力。

图 6 是保护性耕作处理下有机碳年积累与其起始有机碳含量的关系。可见,保护性耕作下表土有机碳积累与否及其程度并不取决于其原有有机碳含量。在 20 和 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的起始有机碳含量范围内,保护性耕作对稻田和旱地有机碳积累的调控幅度很大,这从

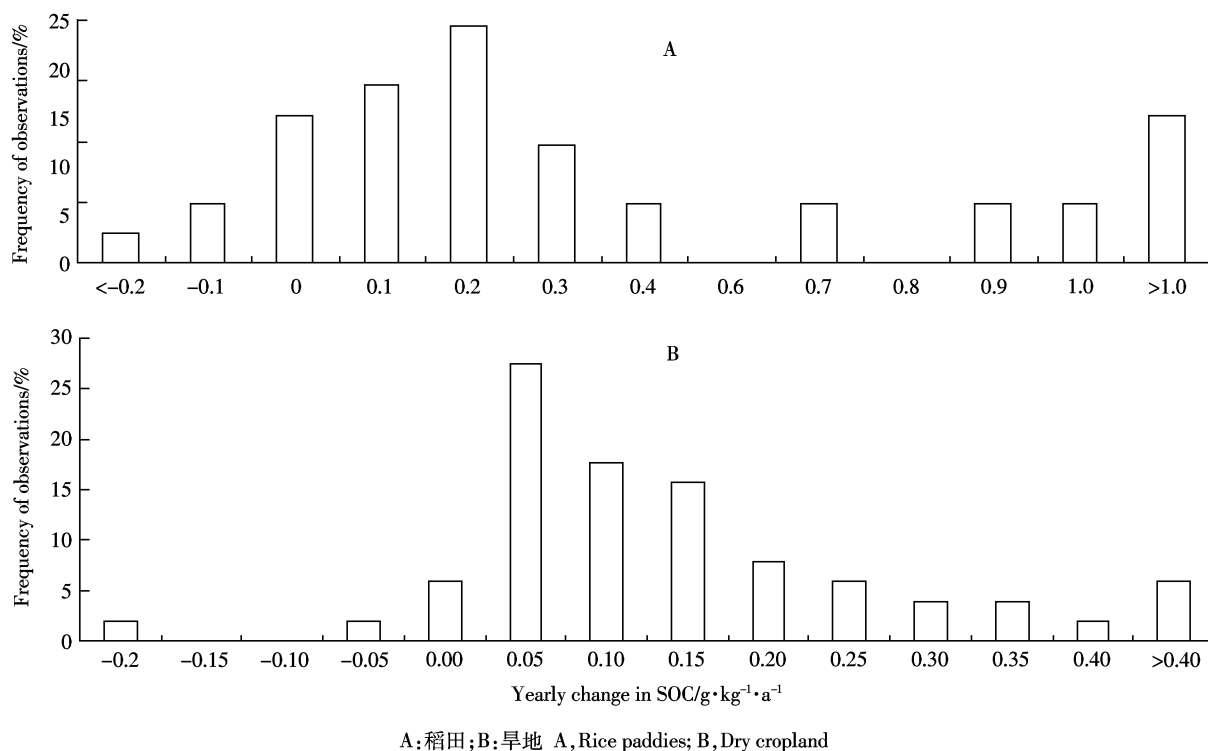


图 4 保护性耕作处理下农田表土有机碳含量的相对变化量

Figure 4 Relative annual increment of topsoil SOC with different conservation tillage

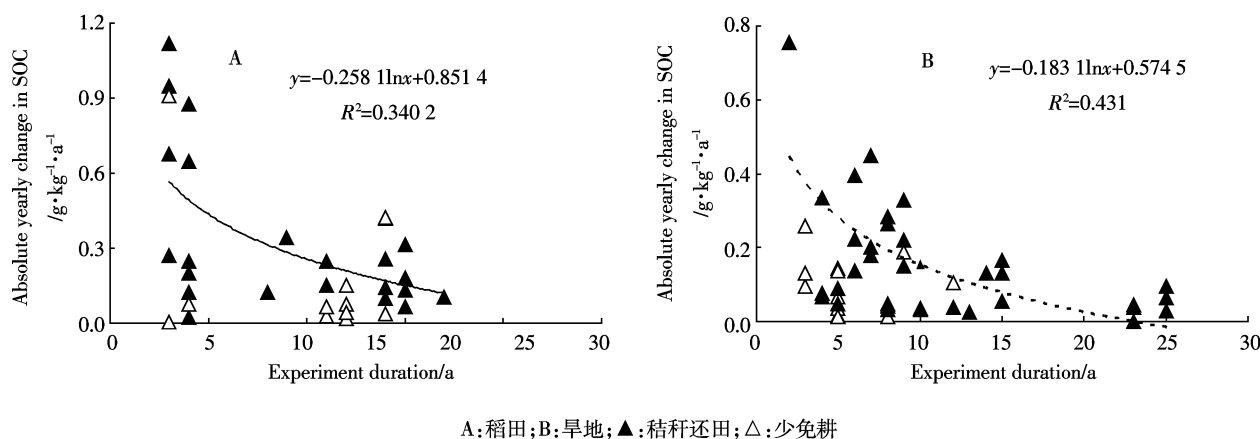


图 5 保护性耕作处理下有机碳年变化量(绝对值)与试验观测期限的关系

Figure 5 Correlation of absolute RAI values and monitoring durations with long-term conservation tillage

试验观察角度提供了通过保护性耕作提高土壤有机碳库的巨大的潜在空间,这在我国当前农业土壤管理中具有特定意义。

同时也说明,无论是秸秆还田,还是秸秆少还田,保护性耕作的固碳效果并不总是随原有有机碳含量增加而降低。潘根兴等^[25](2003)和许信旺^[24](2008)的多尺度统计都提出了土壤有机碳含量的积累将因起

始有机碳含量的升高而减弱。这提示保护性耕作条件下有机碳保持和积累的机制与起始状态的不同。潘根兴等(2006)^[26]及周萍等(2008)^[27]对太湖地区某少免耕的稻油稻田生态系统的研究也说明,保护性耕作下土壤有机质积累中微生物区系发生了变化,这种变化可能带来有机质更新的速率改变。因此,常规耕作下大田有机质变化的过程可能难以演绎和预测保护性

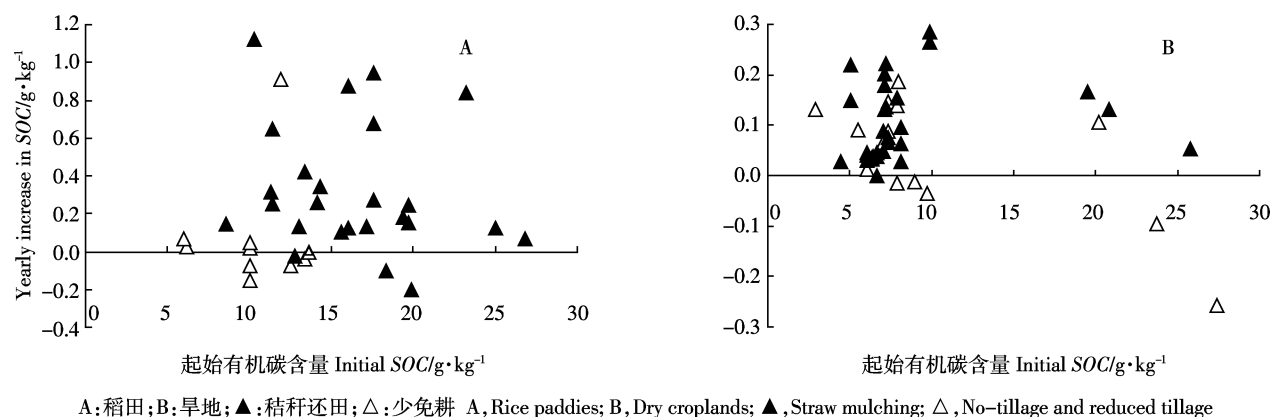


图 6 保护性耕作处理下有机碳年变化量与起始有机碳含量的关系

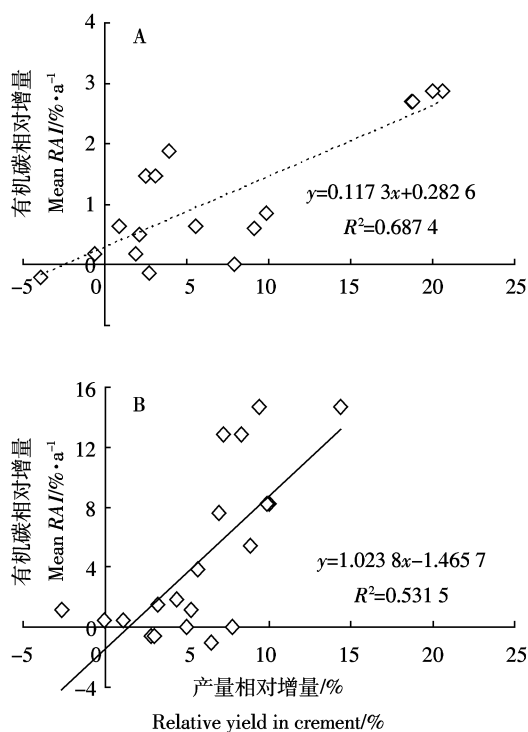
Figure 6 Correlation of relative annual increment of SOC and initial SOC content

耕作下的积累和稳定能力。

3 讨论

3.1 保护性耕作下土壤固碳与作物生产力的关系

将不同处理下产量的相对变化与有机碳的相对变化按旱地和水田分别统计,其结果示于图 7。显然,无论旱地还是水田,保护性耕作处理下作物产量增量与土壤有机碳增量表现为极显著的正相关关系。土壤



A:旱地;B:水田 A and rice paddies B

图 7 保护性耕作下作物产量增量与土壤有机碳增量的关系

Figure 7 Correlation between relative yield increment and mean RAI values for dry croplands

碳积累与输入土壤的有机物直接相关^[28],作物产量直接决定进入土壤的有机物数量。潘根兴等^[26](2006)对太湖地区一个长期肥料试验的研究结果同样表明了作物生产力提高与土壤有机碳输入增加的共轭关系。这里的结果还显示,在单位产量增量下,水田比旱地有机碳增长幅度更大,更有利于 SOC 积累。这可能是因为稻田淹水条件下有机质矿化速率较低,而旱地因土壤更多地暴露,土壤呼吸较强,有机质分解更快^[29]。实行保护性耕作具有提高土地生产力和作物生产力的双重意义。农田管理在土壤固碳减排、提高作物生产力进而减缓气候变化方面发挥了越来越重要的作用^[30]。这支持了 Lal^[31](2004)提出的土壤固碳可以增进食物生产从而有助于解决全球食物安全的论断。

3.2 保护性耕作的固碳效应

本研究表明,保护性耕作下,无论是水田还是旱地有机碳含量都在增加,提高幅度分别为 0.51 和 0.21 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,且不管是对照(常规耕作)还是处理,水田的提高幅度明显高于旱地。黄耀和孙文娟^[32](2006)对常规农田的统计分析表明,近 20 年来中国大陆 60%表土有机碳呈上升趋势。许兴旺^[24](2008)基于 Meta-analysis 统计的常规农田有机碳平均增幅分别为 0.65%·a⁻¹ 和 0.72%·a⁻¹。Wang 等^[33](2009)对长期施肥试验数据的跨区域交叉整合分析表明,长期施肥处理下水田和旱地土壤有机碳的提高幅度分别为 0.19 和 0.13 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。金琳等^[34](2008)统计研究表明,中国在过去的 20 a 中,施化肥、有机肥、有机无机配施、秸秆还田和免耕 5 种管理情景下土壤有机碳每年分别增加 0.129、0.545、0.889、0.597 和 0.765 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。韩冰等^[35](2008)统计显示,我国采用秸秆还田农田的固碳现状为 23.89 $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,全国平均固碳速率为

224.62 kg·hm⁻²·a⁻¹,通过提高秸秆还田量土壤固碳潜力可达到 42.23 Tg·a⁻¹,而采用免耕则使土壤的固碳能力由其目前的 1.17 Tg·a⁻¹ 提高到 3.58 Tg·a⁻¹。李长生等^[36](2003)研究指出,如果地面秸秆还田比率由当前的 15%增加到 80%,中国农田的 C 平衡将会由亏转盈。在美国,仅改进耕作方式和农作制就能使土壤每年拥有 3 000~15 000 万 t 的有机碳固定潜力^[37]。Vleeshouwers 等^[38]研究认为,如果欧洲所有农田均采用秸秆还田措施,欧洲农田土壤的总固碳能力可达 34 Tg·a⁻¹,单位面积的平均固碳速率为 150 kg·hm⁻²·a⁻¹。Lal 和 Bruce^[39]估算出全球应用保护性耕作措施的适宜面积大约为 400 Mhm²,农田土壤总固碳能力为 80 Tg·a⁻¹,如采用秸秆还田措施全球农田土壤的总固碳能力可达 200 Tg·a⁻¹。

本研究表明,随监测时间的延长,RAI 呈先增加后降低的趋势。保护性耕作开始实施的 3~5 a 内,SOC 含量变化较小,6~10 a 的时段 SOC 含量变化较大,此后又逐渐降低。West & Post (2002)^[40]分析了全球 67 个长期定点试验的 276 对处理的数据,发现免耕替代传统耕作之后,平均每年增加土壤有机碳 57±14 gC·m⁻²;在最初的 5~10 a 间土壤有机碳的贮存变化最大,而后逐渐减小,在 15~20 a 间达到新的平衡。依赖于土壤特性、气候条件和管理,SOC 含量的增长趋势会持续 25~50 a,但如果在持续很长一段时期的保护性耕作措施后,采取耕翻,则贮存的 SOC 在很短时间内就会分解^[41]。Huggins 研究认为,短期的 SOC 增长,主要依赖于更多的碳输入及不稳定碳库的固定效率,加强作物残留物的还田可以促进 SOC 库的增长^[42]。Six 等^[43]认为,对传统耕作农田实行免耕,在刚开始阶段会导致土壤碳库的降低,而长期免耕则有利于增加土壤碳库。Huggins^[42]发现,农田土壤有机质的动态变化与其初始水平及干扰历史有关,虽然保护性耕作可以增加土壤有机质含量,但它只能部分恢复前期碳损失,如果在耕种初期土壤有机质含量较高,那么试图通过农田管理来恢复到耕种前的水平,并使之保持相对稳定是非常困难的^[44]。

3.3 保护性耕作下土壤固碳持续期估测

本研究表明,结合秸秆还田的保护性耕作有效固碳期限在稻田和旱地可分别持续 27 a 和 23 a。许兴旺^[24](2008)利用 Meta-analysis 方法对中国常规农田的多尺度统计分析表明(利用公式 $RAI_a = at + b$ 计算,RAI_a 为有机碳变化的绝对值, t 为监测时间, a, b 为系数),旱作土和水稻土碳固定的有效时间分别为 36.0

a 和 28.6 a,旱作土固碳率低,但有效时间长于水稻土,而水稻土固碳率较高,有效固碳时间则小于旱作土。IPCC 认为土壤碳的变化对温室气体影响的持续时间超过 20 a^[6,45],IPCC AR4 第三工作组认为碳固定的有效持续时间是 25 a^[46]。然而,当使用所有 RAI 数据(有机碳增加和降低)时,美国耕地土壤的有效持续时间接近 40 a^[47]。因此,使用绝对值数据预测固碳的潜在持续时间可能偏高,出现这种情况是因为下降的趋势被纳入估算的净增加。相对于旱作土而言,水稻土在较短的有效时间内有机碳就达到了一个新的稳定的水平^[48],且表土具有较高的碳储存,并一直增加,所以中国农业的稻田田间管理对于土壤固碳和减缓气候变化起着重要的作用。

4 结论

通过对长期保护性耕作文献数据的整合分析,得出如下结论:(1)长期保护性耕作下,中国农田表土有机碳含量总体呈上升趋势,水田比旱地更有利于促进有机碳积累;(2)和少免耕相比较,秸秆还田能显著增加土壤有机碳含量;(3)结合秸秆还田的综合保护性耕作措施可以使稻田和旱地的有效固碳期限分别持续 27 a 和 23 a,稻田在保持较高固碳速率的同时,延长了有效固碳年限。本研究是分析前人的研究结果,尽管各自的研究目的、研究对象以及研究方法有所差异,但研究样本基本覆盖了中国保护性耕作的研究领域,研究结果能够反映中国保护性耕作下农田表土有机碳变化的总体趋势和基本规律,能为推广应用保护性耕作技术,从农田管理进而农田固碳来应对和减缓全球气候变化提供理论参考。

参考文献:

- [1] Mannering J V, Fenster C R. What is conservation tillage?[J]. *Soil Water Conservation*, 1987, 38: 141-143.
- [2] 蔡典雄,王小彬,高绪科.关于持续性保持耕作体系的探讨[J]. *土壤学进展*, 1993, 21(1): 1-8.
CAI Dian-xiong, WANG Xiao-bin, GAO Xu-ke. Concerning sustainability of farming systems to maintain[J]. *Pedology Progress*, 1993, 21(1): 1-8.
- [3] 农业部农业机械化管理局编.保护性耕作技术手册[M]. 2002年5月,北京.
Ministry of Agriculture, Agricultural Mechanization Management Division prepared. Conservation tillage technical manual. May 2002, Beijing.
- [4] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil Organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47-62.

- [5] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116:353-362.
- [6] IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 1996.
- [7] 潘根兴. 全球土壤变化暨生态系统长期试验国际研讨会侧记[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2):219-220.
PAN Gen-xing. Global changes in the soil ecosystems, long-term trial-cum-International Symposium on Sidelights[J]. *Earth Science*, 2008, 23(2):219-220.
- [8] 汪业勋, 赵士洞. 陆地碳循环研究中的模型方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6):658-664.
WANG Ye-xu, ZHAO Shi-dong. Modelings of terrestrial carbon cycling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):658-664.
- [9] 骆世明. 农业生态学近年研究动向[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(10):42-44.
LUO Shi-ming. Research direction of agricultural ecology in recent years[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2000, 22(10):42-44.
- [10] Smith P, Smith J U, Powlson D S. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using data sets from seven long-term experiments[J]. *Geoderma*, 1997, 81:153-225.
- [11] Fernandes E C M, Motavalli P P, Castilla C, et al. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land use systems[J]. *Geoderma*, 1997, 79(1):49-67.
- [12] Carvalho Leite L F, Mendonça E S, Machado P L O A, et al. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model[J]. *Geoderma*, 2004, 120:283-295.
- [13] Hill M J. Generating generic response signals for scenario calculation of management effects on carbon sequestration in agriculture: approximation of main effects using CENTURY. Environ[J]. *Modeling & Software*, 2003, 18(10):899-913.
- [14] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, et al. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂[J]. *Field Crops Res*, 2004, 85(2):85-102.
- [15] 王甲辰, 刘学军, 张福锁, 等. 不同土壤覆盖物对旱作水稻生长和产量的影响[J]. 生态学报, 2002, 22:922-930.
WANG Jia-chen, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo, et al. The effect of different soil mulch materials on the growth and yield of rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22:922-930.
- [16] 刘冬青, 辛淑荣, 张世贵. 不同覆盖方式对旱地棉田土壤环境及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2):18-21.
LIU Dong-qing, XIN Shu-rong, ZHANG Shi-gui. Effects of difference mulching on the soil environment and cotton yield of cotton in dry land field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(2):18-21.
- [17] 赵燮京, 吴 萧. 川中丘陵区小麦不同覆盖栽培条件下土壤水分及增产效果研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1):66-69.
ZHAO Xie-jing, WU Xiao. The study of soil water and wheat production under different covering methods in the hilly areas of central Sichuan[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1):66-69.
- [18] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):15-19.
GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7):15-19.
- [19] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3):1-4.
GAO Huan-wen, LI Wen-ying, LI Hong-wen. Conservation tillage technology with Chinese characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(3):1-4.
- [20] 吴崇友, 金诚谦, 魏佩敏, 等. 保护性耕作的本质与发展前景[J]. 中国农机化, 2003(6):8-11.
WU Chong-you, JIN Cheng-qian, WEI Pei-min, et al. Innate characters and development foreground of conservation tillage[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2003(6):8-11.
- [21] 师江澜, 刘建忠, 吴发启. 保护性耕作研究进展与评述[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3):205-212.
SHI Jiang-lan, LIU Jian-zhong, WU Fa-qi. Research advances and comments on conservation tillage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(3):205-212.
- [22] 王小彬, 蔡典雄, 华 璐, 等. 土壤保持耕作——全球农业可持续发展优先领域[J]. 中国农业科学, 2006, 39:741-749.
WANG Xiao-bin, CAI Dian-xiong, HUA Luo, et al. Soil conservation tillage — the highest priority for global sustainable agriculture[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2006, 39:741-749.
- [23] Pan Genxing, Wu Laosheng, Li Lianqing, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:456-463.
- [24] 许兴旺. 不同地理尺度下中国农田土壤有机碳分布与变化[D]. 南京: 南京农业大学研究生院, 2008:54-81.
XU Xing-wang. Different geographical scales China soil organic carbon distribution and change[D]. Graduate School of Nanjing Agricultural University, Nanjing, 2008:54-81.
- [25] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 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, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4):609-618.
- [26] 潘根兴, 周 萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报, 2006, 26(11):3704-3710.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, et al. Effect of different fertilization practices on crop assimilation and soil carbon sequestration: a case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3704-3710.
- [27] 周 萍, 宋国菡, 潘根兴. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I·团聚体物理保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1063-1071.
ZHOU Ping, SONG Guo-han, PAN Gen-xing, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south China I. physical protection I soil micro-aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6):1063-1071.

- [28] 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. Straw mechanism and technical models[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [29] Stevenson F J. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients[J]. *John Wiley & Sons*, 1986: 1-44.
- [30] 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]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 384-393.
- [31] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [32] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 750-763.
- HUANG Yao, SUN Wen-juan. Over the past 20 years, the Chinese mainland farmland topsoil organic carbon content trends [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 750-763.
- [33] Wang C J, Pan G X, Smith P, et al. Topsoil organic carbon dynamics under different fertilization schemes in China's croplands: an analysis with long-term agro-ecosystem experiments[J]. *Agric, Ecosys & Environ*, 2009, in press.
- [34] 金琳, 李玉娥, 高倩竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 734-743.
- JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2008, 41(3): 734-743.
- [35] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612-619.
- HAN Bing, WANG Xiao-ke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [36] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23: 493-503.
- LI Chang-sheng, XIAO Xiang-ming, Frolking S, et al. Greenhouse gas emissions from cropland of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23: 493-503.
- [37] Puleman M M, Bouma J, van Essen E A, et al. Soil Organic Matter Content as a Function of Different Land Use History[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 689-693.
- [38] Vleeshouwers L M, Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 519-530.
- [39] Lal R, Bruce J P. The potential of world crop land soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect[J]. *Environmental Science & Policy*, 1999(2): 177-185.
- [40] West T O, Post W M. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1930-1946.
- [41] 王燕, 王小彬, 刘爽, 等. 保护性耕作及其对土壤有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 766-771.
- WANG Yan, WANG Xiao-bin, LIU Shuang, et al. Conservation tillage and its effect on soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 766-771.
- [42] Huggins D R, Buyanovsky G A, Wagner G H, et al. Soil organic C in the tall grass prairie derived region of the corn belt: effects of long-term crop management[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998(47): 219-234.
- [43] Six J, Ogle S M, Breidt F J, et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 155-160.
- [44] 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): 787-795.
- YANG Jing-cheng, HAN Xing-guo, HUANG Jian-hui, et al. The dynamic of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 787-795.
- [45] IPCC. Special Report on "Carbon Dioxide Capture and Storage" Expert/ Government Review 10-01-2005 to 07-03-2005[EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/Last update 2005-03-15>.
- [46] Smith Tristram O West & Johan Six. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climatic Change*, 2007, 80: 25-41.
- [47] West T O & Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity [J]. *Climatic Change*, 2007. 80: 25-41.
- [48] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of top soil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79-92.
- [49] 刘枫, 张辛未, 王春水. 皖南双季稻区长期施肥效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 224-230.
- LIU Feng, ZHANG Xin-wei, WANG Chun-shui. Study on the effect of long-term fertilization in double rice cropping system of southern Anhui[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 224-230.
- [50] 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.
- GAO Yun-chao, ZHU Wen-shan, CHEN Wen-xin. The relationship between soil microbial biomass and the transformation of plant nutrients in straw mulched no-tillage soils[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 1994, 27(6): 41-49.
- [51] 李秀英, 李燕婷, 赵秉强, 等. 褐潮土长期定位不同施肥制度土壤生产功能演化研究[J]. 作物学报, 2006, 32(5): 683-689.
- LI Xiu-ying, LI Yan-ting, ZHAO Bing-qiang, et al. The dynamic of crop yield under different fertilization systems in drab fluvo-aquic soil[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(5): 683-689.
- [52] 宋明伟, 李爱宗, 蔡立群, 等. 耕作方式对土壤有机碳库的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 622-626.
- SONG Ming-wei, LI Ai-zong, CAI Li-qun, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 622-626.
- [53] 江泽普, 黄绍民, 韦广波, 等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 362-365.
- JIANG Ze-pu, HUANG Shao-min, WEI Guang-po, et al. Effects of different no-tillage modes on rice yield and properties of paddy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 362-365.

- [54] 贾树龙, 孟春香, 任图生, 等. 耕作及残茬管理对作物产量及土壤性状的影响[J]. 河北农业科学, 2004, 8(4): 37-42.
JIA Shu-long, MENG Chun-xiang, REN Tu-sheng, et al. Effect of tillage and residue management on crop yield and soil properties[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2004, 8(4): 37-42.
- [55] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 236-241.
MA Jun-yong, LI Ke-jiang, CAO Cai-yun, et al. Effects of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 236-241.
- [56] 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.
LI Lin, LI Su-juan, ZHANG Hai-lin, CHEN Fu. Study on Soil C Pool Management Index of Conservation Tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 106-109.
- [57] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.
WU Fen-lin, LI Lin, ZHANG Hai-lin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [58] 韩志卿, 张电学, 陈洪斌, 等. 长期定位施肥小麦-玉米轮作制度下土壤有机质质量演变规律[J]. 河北职业技术师范学院学报, 2003, 17(4): 10-14.
HAN Zhi-qing, ZHANG Dian-xue, WANG Jie-yuan, et al. The evolution rule of soil organic matter quality under the condition of long-term and oriented fertilization of wheat-corn rotation system[J]. *Journal of Hebei Vocation-Technical Teachers college*, 2003, 17(4): 10-14.
- [59] 韩志卿, 张电学, 王介元, 等. 长期施肥对土壤有机质氧化稳定性动态变化及其与肥力关系的影响[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 31-35.
HAN Zhi-qing, ZHANG Dian-xue, WANG Jie-yuan, et al. The effect of long-term fertilization on the relationship between dynamic changes of oxidation stability of soil organic matter and soil fertility [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3): 31-35.
- [60] 张洁, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 半湿润偏旱区坡耕地保护耕作土壤碳素转化及增产机理[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 297-301.
ZHANG Jie, YAO Yu-qing, LV Jun-jie, et al. Soil carbon change and yield increase mechanism of conservation tillage on sloping drylands in semi-humid arid area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 297-301.
- [61] 张玉兰, 王俊宇, 陈振华, 等. 草甸白浆土水解酶活性和动力学特性对保护性耕作方式的响应[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 163-167.
ZHANG Yu-lan, WANG Jun-yu, CHEN Zhen-hua, et al. Effects of Different Tillage on Soil Enzymes Activity of Meadow Albic Soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3): 163-167.
- [62] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 154-155.
ZHANG Zhen-jiang. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(4): 154-155.
- [63] 田秀平, 陶永香, 王立军, 等. 不同耕作处理对白浆土养分状况及农作物产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2002, 14(3): 9-11.
TIAN Xiu-ping, TAO Yong-xiang, WANG Li-jun, et al. The effect of different cultivating on nutrient and crop yield in albic soils[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2002, 14(3): 9-11.
- [64] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278-282.
LIU Shou-long, XIAO He-ai, TONG Cheng-li, et al. Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(4): 278-282.
- [65] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
XU Ming-gang, YU Rong, WANG Bo-ren. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723-729.
- [66] 王光华, 齐晓宁, 金剑, 等. 施肥对黑土农田土壤全碳、微生物量碳及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 661-666.
WANG Guang-hua, QI Xiao-ning, JIN Jian, et al. Effect of fertilization on total soil C, microbial biomass C and soil enzyme activities in farmland black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 661-666.
- [67] 何奇镜, 佟培生. 吉林省中部地区玉米少耕法研究报告 I. 不同土壤玉米少耕法试验报告[J]. 吉林农业科学, 1998(4): 9-13.
HE Qi-jing, TONG Pei-sheng. *Jilin Agricultural Sciences*, 1998(4): 9-13.
- [68] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 等. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2006, 38(4): 422-428.
LI La-mei, LU Qin, YAN Wei-dong, et al. Effect of long-term straw incorporation on enzyme activity in paddy soil under rice-wheat rotation in Taihu region[J]. *Soils*, 2006, 38(4): 422-428.
- [69] 吴华, 张礼康, 刘雪基. 稻麦双免双套连作方法及其对耕地质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2007(1): 27-28.
WU Hua, ZHANG Li-kang, LIU Xue-ji. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007(1): 27-28.
- [70] 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.
ZHUANG Heng-yang, LIU Shi-ping, SHEN Xin-ping, et al. Effect of long term minimal and zero tillages on rice and wheat yields, soil organic matter and bulk density[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, 32(4): 39-44.
- [71] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 27-30.
GAO Ya-jun, ZHU Pei-li, HUANG Dong-mai, et al. Long-term impact of different soil management on organic matter and total nitrogen in rice-based cropping system[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 27-30.
- [72] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 1-7.
XU Yang-chun, SHEN Qi-rong. Influence of long term application of

- manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle sizes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5):1-7.
- [73] 张璐, 沈善敏, 宇万太. 辽西褐土施肥及养分循环再利用中长期试验Ⅳ. 土壤肥力变化[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11):1413-1416. ZHANG Lu, SHEN Shan-min, YU Wan-tai. A long-term field trial on fertilization and on use of recycled nutrients in farming systems IV. Soil fertility changes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1413-1416.
- [74] 李焕珍, 韩宏儒, 吴芝成, 等. 有机肥培肥水稻土效果的研究[J]. 土壤通报, 1986(6). LI Huan-zhen, HAN Hong-ru, WU Zhi-cheng, et al. Effect of organic fertilizer in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986(6).
- [75] 颜丽, 宋杨, 贺靖, 等. 玉米秸秆还田时间和还田方式对土壤肥力和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(2):143-148. YAN Li, SONG Yang, HE Jing, et al. Effects of maize stems returning back to the field on the yield of plants and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2):143-148.
- [76] 赵秀兰, 许大志, 高云. 玉米根茬还田对土壤肥力的影响研究简报[J]. 土壤通报, 1998, 29(1):14-16. ZHAO Xiu-lan, XU Da-zhi, GAO Yun. Effects of maize stubble return to soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(1):14-16.
- [77] 康红, 朱保安, 洪利辉, 等. 免耕覆盖对旱地土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2001(9):1-3. KANG Hong, ZHU Bao-an, HONG Li-hui, et al. Effects of no tillage and straw mulched on soil fertility and wheat yield[J]. *Shannxi Journal of Agricultural Science*, 2001(9):1-3.
- [78] 方日尧, 同延安, 耿增超, 等. 黄土高原区长期施用有机肥对土壤肥力及小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2):47-49. FANG Ri-yao, TONG Yan-an, GEN Zeng-chao, et al. Effect of a long-term organic fertilization on wheat yield and soil fertility on loess plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(2):47-49.
- [79] 高瑞, 吕家珑, 张素霞. 长期施肥对壤土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5):64-67. GAO Rui, LV Jia-long, ZHANG Su-xia. Effect of long term fertilization on fertility of loess soil and crop yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5):64-67.
- [80] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 长期定位施肥对壤土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J]. 西北农业学报, 2004, 13(3):121-125. GU Qiao-zhen, YANG Xue-yun, SUN Ben-hua, et al. Effects of long-term fertilization on soil nutrition and land productivity in topsoil of loess soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2004, 13(3):121-125.
- [81] 汪寅虎, 柯福源, 张明芝, 等. 长期定位条件下秸秆还田的综合效应研究[J]. 土壤通报, 1994, 25(7):53-56. WANG Yan-hu, KE Fu-yuan, ZHANG Ming-zhi, et al. Integrated Research on straw return to soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(7):53-56.
- [82] 杨佩珍, 沈金川, 张文献. 稻麦秸秆全量直接还田对产量及土壤理化性状的影响[J]. 上海农业学报, 2003, 19(1):53-57. YANG Pei-zhen, SHEN Jin-chuan, ZHANG Wen-xian. Effects of the straw of rice and wheat return to field wholly and directly on the crop yields and the physical and chemical properties of soil[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2003, 19(1):53-57.
- [83] 严洁, 邓良基, 黄剑. 保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 中国农机化, 2005, (2):31-34. YAN Jie, DENG Liang-ji, HUANG Jian. Effect of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yields[J]. *Chinese Agriculture Mechanization*, 2005, (2):31-34.
- [84] 朱钟麟, 舒丽, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对水稻土微形态特征的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2):682-687. ZHU Zhong-lin, SHU Li, LIU Ding-hui, et al. Effect of straw mulched and no tillage to paddy soils on micro-morphology features[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):682-687.
- [85] 熊凡, 徐风来, 童风. 丘陵旱坡耕地多熟作物覆盖少耕的研究[J]. 西南农业学报, 1989, 2(4):43-47. XIONG Fan, XU Feng-lai, TONG Feng. Research on multiple cropping and less tillage on dry sloping land of hills in Sichuan basin[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 1989, 2(4):43-47.
- [86] 王昌全, 魏成明, 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(20):152-154. WANG Chang-quan, WEI Cheng-ming, LI Ting-qiang, et al. Effect of different zero tillage on the crop yield and soil property[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(20):152-154.
- [87] 钱华菊, 王晓玲, 陈岗. 不同轮作制的秸秆全量直接还田技术[J]. 湖北农业科学, 2003(6):59-61. QIAN Hua-ju, WANG Xiao-ling, CHEN Gang. Different crop rotation system for the whole amount of straw to field technology directly[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2003(6):59-61.
- [88] 周斌, 乔木, 王周琼. 长期定位施肥对灰漠土农田土壤质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2):33-36. ZHOU Bin, QIAO Mu, WANG Zhou-qiong. Effects of a long-term located fertilization on soil quality of grey desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2):33-36.
- [89] 张伟梅, 吕周林, 姚宏. 旱地多熟间套作不同培肥方法对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2006(4):25-28. ZHANG Wei-mei, LV Zhou-lin, YAO Hong. Effect of crop yield and soil fertility on different fertilization methods in dry farmland multiple seasons and relay intercropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(4):25-28.
- [90] 吴槐泓, 张连佳, 张杭英. 长期施用不同肥料对红壤稻田产量和土壤有机质品质的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(3):25-26. WU Huai-hong, ZHANG Lian-jia, ZHANG Hang-ying. Long-term application of different fertilizers on red rice yield and quality of soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(3):25-26.
- [91] 黄雪夏, 唐晓红, 魏朝富, 等. 不同利用方式对紫色水稻土微生物量碳的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6):250-254. HUANG Xue-xia, TANG Xiao-hong, WEI Chao-fu, et al. Effect of land use pattern on soil microbial carbon of purple paddy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(6):250-254.

致谢: 本文数据来自发表的文献, 在此对文献作者表示衷心的感谢!

附录 长期保护性耕作试验站点情况

Appendix long-term conservation tillage experimental sites used in this study

试验站点 Site	土壤类型 Soil type	作物系统 Crop system	耕作处理 Tillage	监测时间 Duration	文献 Literature
安徽黄山	水稻土	早稻-晚稻	对照, 秸秆还田	1987-1995	[49]
北京	褐土	冬小麦-夏玉米	对照, 免耕	1978-1987	[50]
北京昌平	潮土	冬小麦-夏玉米	对照, 秸秆还田	1990-2004	[51]
甘肃定西	黄绵土	小麦-豌豆	对照, 免耕, 秸秆还田, 综合	2001-2006	[52]
广西南宁	水稻土	早稻-晚稻	对照, 免耕	2003-2006	[53]
河北衡水	潮土	小麦-玉米	对照, 免耕, 少耕, 秸秆还田	1991-1999	[54]
河北衡水	潮土	冬小麦-夏玉米	对照, 秸秆还田	1981-2004	[55]
河北栾城	褐土	小麦-玉米	对照, 秸秆还田, 综合	2001-2005	[56]
河北栾城	褐土	小麦-玉米	对照, 免耕, 少耕	2001-2006	[57]
河北遵化	褐土	小麦-玉米	对照, 秸秆还田	1995-2002	[58]
河北昌黎	褐土	小麦-玉米	对照, 秸秆还田	1990-1998	[59]
河南孟津	褐土	冬小麦	对照, 少耕, 免耕	1999-2004	[60]
黑龙江 853 农场	白浆土	大豆	对照, 少耕, 免耕	2002-2005	[61]
黑龙江黑河	暗棕壤	麦-麦-豆	对照, 秸秆还田	1979-1994	[62]
黑龙江密山	白浆土	玉米/小麦/大豆	对照, 免耕	1986-1998	[63]
湖南长沙	水稻土	玉米-水稻	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
湖南宁乡	水稻土	玉米-水稻	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
湖南祁阳	红壤	小麦-玉米	对照, 秸秆还田	1990-2001	[65]
湖南桃江	水稻土	玉米-水稻	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
湖南武冈	水稻土	稻-稻-肥	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
湖南新化	水稻土	稻-稻-肥	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
湖南株州	水稻土	稻-稻-肥	对照, 秸秆还田	1986-2001	[64]
吉林德惠	黑土	玉米	对照, 秸秆还田	1999-2005	[66]
吉林公主岭	黑土	玉米	对照, 少耕	1980-1985	[67]
江苏常熟	水稻土	水稻-小麦	对照, 秸秆还田	1990-2001	[68]
江苏江都	水稻土	水稻-小麦	对照, 免耕	2002-2005	[69]
江苏吴江	水稻土	水稻-油菜	对照, 秸秆还田	1987-2004	[26]
江苏扬州	水稻土	水稻-小麦-蚕豆	对照, 少耕, 免耕	1985-1996	[70]
江苏张家港	潮土	水稻-小麦	对照, 免耕	1983-1995	[71]
江苏镇江	水稻土	早稻-晚稻	对照, 秸秆还田	1983-1997	[72]
辽宁喀左	褐土	棉花	对照, 秸秆还田	1987-1998	[73]
辽宁盘锦	水稻土	玉米	对照, 秸秆还田	1978-1985	[74]
辽宁沈阳	棕壤	玉米	对照, 秸秆还田	1997-2000	[75]
辽宁瓦房店	草甸土	玉米-大豆	对照, 秸秆还田	1988-1994	[76]
辽宁瓦房店	棕壤	玉米-大豆	对照, 秸秆还田	1986-1995	[76]
陕西白水	褐土	小麦	对照, 免耕	1994-1999	[77]
陕西合阳	褐土	小麦	对照, 秸秆还田	1990-2000	[78]
陕西杨凌	褐土	小麦-玉米	对照, 秸秆还田	1977-2002	[79]
陕西杨凌	褐土	冬小麦-夏玉米	对照, 秸秆还田	1990-2002	[80]
上海郊区	水稻土	小麦-水稻-水稻	对照, 秸秆还田	1979-1993	[81]
上海青浦	水稻土	水稻-小麦	对照, 秸秆还田	1998-2001	[82]
四川成都	水稻土	水稻-小麦	对照, 免耕, 秸秆还田	1999-2003	[83]
四川成都	水稻土	水稻-小麦	对照, 秸秆还田	2003-2007	[84]
四川川中	紫色土	花生-豌豆	对照, 少耕	1983-1986	[85]
四川简阳	水稻土	水稻-小麦	对照, 秸秆还田	2003-2007	[84]
四川名山	水稻土	水稻-小麦	对照, 免耕	1992-1999	[86]
四川西昌	水稻土	水稻-小麦-蚕豆	对照, 秸秆还田	1996-1999	[87]
新疆阜康	灰漠土	小麦	对照, 秸秆还田	1991-2004	[88]
浙江缙云	红壤	马铃薯/玉米/甘蔗	对照, 秸秆还田	2000-2003	[89]
浙江衢州	水稻土	小麦-水稻-水稻	对照, 秸秆还田	1983-1997	[90]
重庆北碚	水稻土	水稻-油菜	对照, 免耕, 秸秆还田	1990-2004	[91]