

中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究

——基于长期试验点的 Meta 分析*

田 康^{1,2} 赵永存^{1,2†} 邢 喆^{1,3} 孙维侠¹ 黄 标¹ 胡文友¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 中南大学隆平分院,长沙 410125)

摘 要 保护性耕作对于培肥地力、保障粮食安全、缓解气候变化等具有重要意义。本研究搜集了 1980~2012 年 8 月有关中国农田保护性耕作的 157 个试验点的 303 对田间定位试验数据,采用 Meta 分析方法定量分析了保护性耕作下我国农田耕层土壤(旱地 0~20cm,水田 0~15cm)有机碳(SOC)变化特征。结果表明:与传统耕作(CT)相比,传统耕作+秸秆还田(CTS)、免耕(NT)和免耕+秸秆还田(NTS)三种保护性耕作均能显著提高 SOC 含量,变化速率分别为 NTS($0.52 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > NT($0.35 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > CTS($0.22 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$);三种保护性耕作下 SOC 变化速率为水田 > 旱地,一年两熟制 > 一年一熟制;保护性耕作下,SOC 积累与否及其幅度并不完全取决于其初始有机碳含量,短期试验($\leq 5\text{a}$)SOC 增加速率是长期试验($> 5\text{a}$)的 1.75 倍,如果仅采用短期试验结果可能高估保护性耕作的固碳潜力。

关键词 保护性耕作;农田土壤;长期试验;有机碳变化;Meta 分析

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

农田土壤拥有相当可观的固碳能力而在全球碳循环中具有难以取代的地位^[1]。农田土壤碳库尤其是表层碳库受人类活动影响最为强烈,同时也可以在较短的时间尺度上进行人为调节^[2-3]。不合理的农田耕作措施,如秸秆移除、有机肥低投入、土地频繁翻耕等均会导致农田土壤碳的净损失从而成为碳源^[4-6]。相反,合理的耕作管理措施,如少免耕、增施有机肥、秸秆还田等则可以有效提高农田土壤有机碳含量^[1,4,7-8]。因此,研究耕作措施改变对农田土壤有机碳(SOC)变化速率的影响对于稳定和提高土壤肥力及作物产量、实现土壤资源的可持续利用具有重要的意义。

保护性耕作是保持一定的地表覆盖,减少水土流失,提高耕地产量的耕作措施,主要包括秸秆覆盖、少免耕、深松、浅耕等措施^[9]。Smith 等^[10]通过欧洲 17 个耕作试验点的研究发现,传统耕作改为免耕后 SOC 含量的年均增加速率为 $7.3 \pm 3.9 \text{ g kg}^{-1}$,SOC 达到新的平衡可能需要 50~100 年的时间。West 和 Post^[11]对全球 67 个长期定位试验 276 个处

理的分析则表明,免耕替代传统耕作之后,SOC 密度增加速率为 $57 \pm 14 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。Metay 等^[12]的研究也表明,免耕加秸秆覆盖可提高表层(0~10 cm)SOC 含量,平均增加速率为 $0.35 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。金琳等^[13]通过搜集国内长期定位试验数据估算出秸秆还田、施有机肥和免耕的 SOC 变化速率分别为 0.597、0.545 和 $0.514 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。Lu 等^[8]以中国长期试验数据为基础,估算出免耕、秸秆还田措施下,我国 SOC 储量平均增速分别为 0.80 Tg a^{-1} 和 9.76 Tg a^{-1} 。王成已等^[14]通过搜集到的 59 个试验点的 88 个数据研究表明,秸秆还田、少免耕等保护性耕作下,农田表层 SOC 含量呈上升趋势,旱地和水田 SOC 含量变化速率分别为 $0.21 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.51 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。Rui 和 Zhang^[15]则利用了 26 个长期定位试验的 86 对数据,对长江三角洲冲积平原土壤表层 SOC 变化进行研究,结果表明秸秆还田、有机肥施用对土壤有机碳固定作用明显(增加速率分别 $0.41 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.34 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),而少免耕措施则影响不显著。

* 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050509)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN404)资助

† 通讯作者,E-mail: yczhao@issas.ac.cn

作者简介:田 康(1986—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事资源环境遥感及土壤有机碳动态模拟研究。E-mail: tiank@issas.ac.cn

收稿日期:2012-10-10;收到修改稿日期:2012-11-30

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,可以用来研究农田生态系统的长期变化过程和生态过程对人为干扰、环境变化响应及反馈的长期效应^[16-17]。为了更为准确、全面的研究保护性耕作对我国农田 SOC 变化速率的影响,本研究通过系统搜集我国保护性耕作下 SOC 含量变化研究文献,采用 Meta 分析方法定量分析了不同保护性耕作措施下我国 SOC 含量变化速率、时空分异特征及其潜在影响因素,以便为稳定和提高了土壤肥力及固碳潜力、保障国家粮食安全提供科学依据。

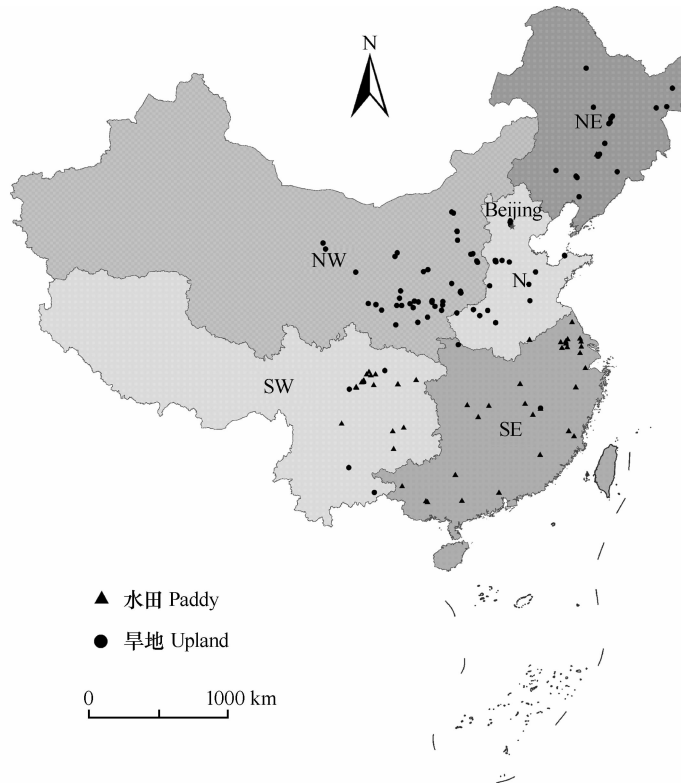
1 材料与方法

1.1 数据来源

收集整理 1980 ~ 2012 年 8 月国内外有关中国

农田保护性耕作的田间定位试验研究论文并对文献进行筛选,提取试验站点位置、土壤类型、种植制度、试验时间、耕作处理以及 SOC 数据,建立中国农田耕层 SOC 数据库。

本研究中文献筛选的标准如下:1) 研究区域为中国农田土壤;2) 农田耕作措施包括常规耕作(CT)、常规耕作 + 秸秆还田(CTS)、免耕(NT)、免耕 + 秸秆还田(NTS)以及其他保护性耕作措施等,其中常规耕作作为对照;3) 试验为长期定位田间试验,试验年限 ≥ 2 年,试验时段的起止年份清楚;4) 土样采自耕层土壤,且 SOC 的初始值 and 变化值明确。经过筛选,最终获得符合标准的有效文献 145 篇,共 157 个保护性耕作试验站点,303 个数据,分布于我国 24 个省(区、市),涵盖 15 种土类。保护性耕作试验点位置分布如图 1。



注: NE-东北区; N-华北区; NW-西北区; SE-东南区; SW-西南区 Note: NE, Northeast China; N, North China; NW, Northwest China; SE, Southeast China; SW, Southwest China

图 1 保护性耕作试验点分布图

Fig. 1 Distribution map of the conservation tillage field experiment sites in China

1.2 农田分区

农田 SOC 变化受气候、作物种类、施肥、耕作措施、土壤性质和种植制度等诸多因素影响,而这些影响因素往往难以定量表达,因此,本研究采用农

田分区方法讨论 SOC 变化的空间差异性,以便反映耕作管理措施对农田 SOC 变化速率潜在影响的区域特征。考虑到长期定位试验点的数量限制及我国耕地分布特点,本研究共划分了 5 个农田区(表 1

和图 1): 东北区 (NE)、华北区 (North)、西北区 (NW)、东南区 (SE) 和西南区 (SW)。在实际估算 SOC 速率时,有些耕作措施(如 CTS)的资料较少且

分布较集中,因此,将东南区 (SE) 和西南区 (SW) 进行合并计算(由于港、澳、台地区无相关数据,因此未计算在内)。

表 1 中国农田区域划分及作物类型

Table 1 Zoning of farmlands in China and main crop types in each zone

农田区 Cropland region	包括的省市 Provinces in the region	主要作物类型 Main crops
东北 (NE) Northeast	黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古东北部 Heilongjiang, Jilin, Liaoning and Northeast Inner Mongolia	玉米、大豆、春小麦一熟 Single cropping system, Corn, Bean, Spring wheat
华北 (N) North China	北京市、天津市、河北省、河南省、山东省、安徽省北部、江苏省北部 Beijing, Tianjin, Hebei, Henan, Shandong, North Anhui and North Jiangsu	冬小麦与玉米、水稻等两熟(或一熟) Double or single cropping system, Winter wheat, Corn, Rice
西北 (NW) Northwest	陕西省、甘肃省、山西省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、青海省 Shaanxi, Gansu, Shanxi, Ningxia, Inner Mongolia, Xinjiang and Qinghai	冬小麦与玉米等两熟(或一熟) Single cropping system, Winter wheat, Corn
东南 (SE) Southeast	上海市、福建省、江西省、浙江省、湖北省、湖南省、广东省、广西壮族自治区、安徽省大部 分、江苏省大部分、海南省、香港、澳门、台湾 Shanghai, Fujian, Jiangxi, Zhejiang, Hubei, Hunan, Guangdong, Guangxi, most of Anhui, most of Jiangsu, Hainan, Hong Kong, Macao and Taiwan	冬小麦、油菜与水稻两熟(或三熟) Double or triple cropping system, Winter wheat, Rape, Rice
西南 (SW) Southwest	四川省、云南省、重庆市、贵州省、西藏自治区 Sichuan, Yunnan, Chongqing, Guizhou and Tibet	冬小麦、油菜与水稻两熟(或三熟) Double or triple cropping system, Winter wheat, Rape, Rice

1.3 数据分析方法

本研究主要分析常规耕作 (CT)、常规耕作 + 秸秆还田 (CTS)、免耕 (NT) 以及免耕 + 秸秆还田 (NTS) 四种耕作措施对 SOC 变化速率的影响,具体计算方法如下:

1) SOC 原始数据归一化处理

原始数据中土壤有机质 (SOM) 数据全部转化为 SOC 数据 (g kg^{-1}),前者乘以有机碳转换系数 0.58。耕层 SOC 含量依据文献数据中的全国旱地和水田平均耕层深度(旱地 0 ~ 20cm,水田 0 ~ 15cm)分别进行归一化处理,对于试验数据中具有多个层次划分的数据,比如 0 ~ 10cm、10 ~ 25cm 等,则按土层厚度分别加权平均到全国旱地和水田的平均耕层深度。

2) 不同耕作处理下 SOC 平均变化速率

分别计算试验期间内对照和处理的 SOC 平均变化速率 ($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$),按下式:

$$M = (\text{SOC}_t - \text{SOC}_0) / t \quad (1)$$

式中, M 为年平均变化速率 (Mean, $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$); t 为试验观测年限,由试验观测的终止年与起始年的差值得到; SOC_0 和 SOC_t 分别为试验观测起始年和终止年的耕层(旱地 0 ~ 20cm,水田 0 ~ 15cm) SOC 含量测定值 (g kg^{-1})。

3) 不同耕作处理下 SOC 相对变化速率

为消除试验点之间的气候条件、土壤性质、施肥及栽培措施的区域差异的影响,在计算各耕作措施下 SOC 的变化速率时,为消除对照处理的 SOC 变化效应,因此采用 SOC 相对变化速率 (Relative Change Rate, RC, $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$),即试验观测期限内任一耕作处理 (e) 减去相应对照 (c) 后的平均变化速率的差值:

$$\text{RC} = \frac{(\text{SOC}_t - \text{SOC}_0)_e - (\text{SOC}_t - \text{SOC}_0)_c}{t} \quad (2)$$

因此,有: $\text{RC} = M_e - M_c$ 。其中 RC 为正值时, SOC 速率表现为增加, RC 为负值时, SOC 速率表现为降低。

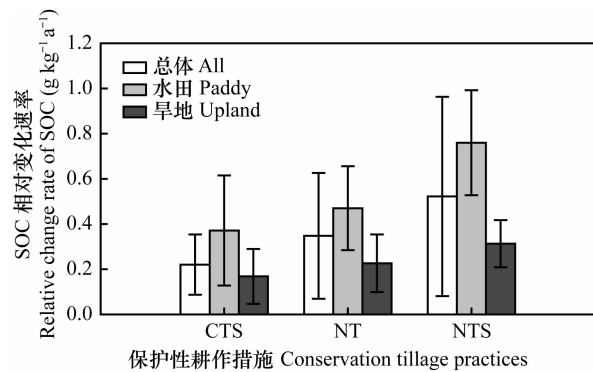
4) Meta 分析

Meta 分析是一种定量综合研究结果的统计方法,能够将若干独立研究的统计结果进行综合分析^[18],特别适合于大尺度生态现象的研究^[19]。本研究利用 R 软件中的 Meta 包进行分析^[20],以 SOC 相对变化速率 RC 为效应值,得到不同耕作处理的 SOC 变化速率及其 95% 置信区间。若置信区间包含 0,则说明与对照相比,该处理不能使 SOC 的变化达到显著水平;若置信区间全部大于 0,说明该处理能提高 SOC 含量,且达到显著水平。反之,则能降低 SOC 含量,且达到显著水平。

2 结果

2.1 不同保护性耕作下 SOC 的变化速率

长期试验点数据的 Meta 分析结果表明(图 2),与传统耕作相比,CTS、NT、NTS 三种耕作措施效应值 RC 的 95% 置信区间范围均大于 0,表明这 3 种保护性耕作措施均能显著提高农田表层 SOC 含量。无论水田还是旱地,3 种保护性耕作措施下 SOC 速率增幅均依次表现为 NTS > NT > CTS,具体的速率增加值分别为 0.22 (0.09 ~ 0.35)、0.35 (0.07 ~ 0.63) 和 0.52 (0.08 ~ 0.96) $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。3 种保护性耕作下水田 SOC 的速率增幅要明显高于旱地,CTS、



注: CTS: 传统耕作+秸秆还田; NT: 免耕; NTS: 免耕+秸秆还田。
下同 Notes: CTS: conventional tillage with straw mulching; NT: no tillage;
NTS: no tillage with straw mulching. The same with below

图 2 不同保护性耕作下 SOC 变化速率

Fig. 2 Relative change rates of SOC under different conservation tillage practices

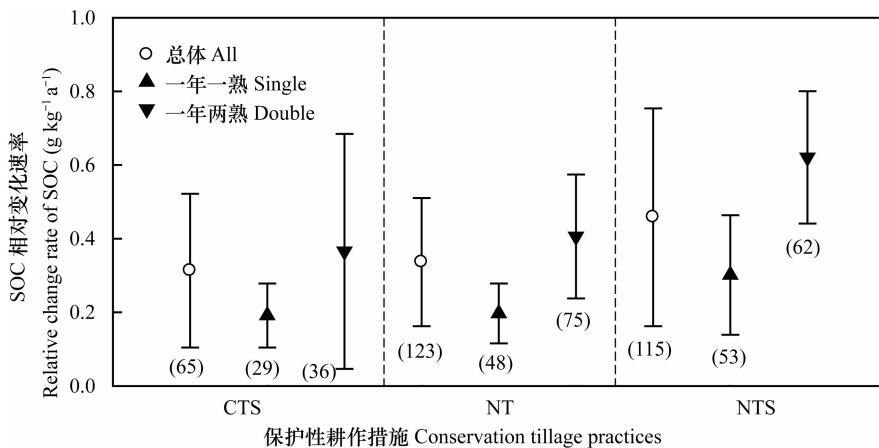


图 3 不同种植制度下 SOC 变化速率

Fig. 3 Relative change rates of SOC under different cropping systems

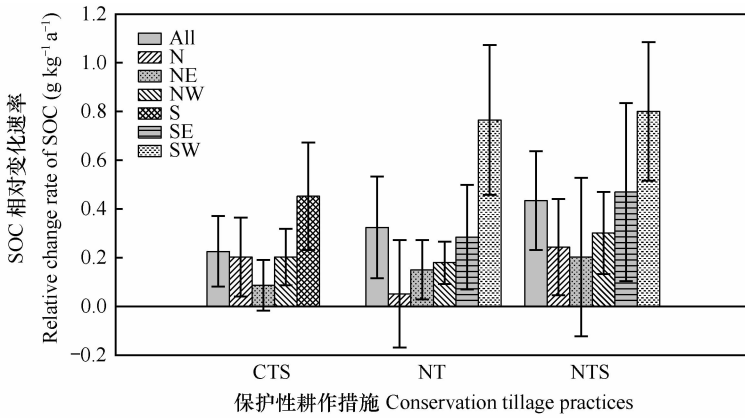
NT、NTS 三种耕作下分别是旱地的 2.0、1.5、2.2 倍,这可能是由于稻田特殊的厌氧环境有利于有机碳的固定和保护所致^[21]。

2.2 种植制度与 SOC 变化速率

从图 3 的结果可以看出,保护性耕作下 SOC 变化速率的置信区间均大于 0,这表明,无论哪种种植制度下,采取保护性耕作均能显著提高农田耕层 SOC 含量。但不同种植制度下,耕层 SOC 变化速率存在一定差异。一年一熟制度下 SOC 变化速率小于一年两熟制度。CTS 处理下一年一熟制和一年两熟制下 SOC 变化速率分别为 0.19 和 0.37 $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$,后者约为前者的 2 倍。NT 和 NTS 处理下一年两熟制的 SOC 变化速率是一年一熟制下的约 2 倍。一年两熟种植一方面作物产量增加,从土壤中移走的物质也随之增多,但另一方面,一年两熟制度下留给土壤的作物根茬以及可能直接或间接归还土壤的有机质也相应增多。Luo 等^[22]的研究表明,由于两熟制增加了有机肥和化肥的肥料投入,秸秆和根茬的数量相应得到提高,从而增加了土壤有机质。Halvorson 等^[23]的研究也表明一年一熟转化为轮作后由于作物根茬的增加从而提高了 SOC 含量。

2.3 SOC 变化速率的区域特征

不同保护性耕作措施对表层 SOC 变化速率的影响强度不同,同时,由于不同区域的气候、地形、土壤类型、土壤质地、施肥管理等条件差异使得 SOC 变化速率对不同保护性耕作措施的响应也不尽相同,从而表现出一定的区域特征(图 4)。



注: All: 总体; N: 华北区; NE: 东北区; NW: 西北区; SE: 东南区; SW: 西南区; S: 南方区 (包括SW和SE)
Notes: All: Overall; N: North China; NE: Northeast China; NW: Northwest China; SE: Southeast China; SW: Southwest China; S: South China (including Southeast China and Southwest China)

图 4 不同农田区 SOC 变化速率

Fig. 4 Relative change rates of SOC in different farming zones

从图 4 中的 Meta 分析结果可以看出,不同农田区中,3 种耕作措施均能提高 SOC 含量,但 CTS 和 NTS 耕作下东北地区以及 NT 耕作下华北地区的 SOC 速率增幅未达到显著水平,而其他区域则均达到显著增加水平。其中南方地区(西南和东南)耕层 SOC 增加速率最大,东北地区最小。不同农田区 SOC 变化速率大小顺序为 South(SW 和 SE) > NW > North > NE,平均速率增幅分别为 0.55、0.23、0.17 和 0.15 $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 初始有机碳含量与 SOC 变化

土壤有机碳初始含量是影响有机碳变化趋势的重要因素之一^[24]。潘根兴等^[25]和许信旺^[26]的研究表明 SOC 变化速率随试验初始有机碳含量的升高而呈减弱趋势。而本研究中,从 3 种保护性耕作处理下 SOC 变化速率与其初始有机碳含量的关系(图 5)可以看出,保护性耕作条件下表土 SOC 积累速率与初始 SOC 含量的关系并不明显,SOC 积累与否及其幅度并不完全取决于其初始有机碳含量,即,保护性耕作的固碳效果并非总是随初始有机碳含量增加而降低。

3.2 试验年限与 SOC 变化

土壤碳库容量取决于特定土壤在一定生物气候条件下有机碳输入与输出的平衡水平,这种水平是生物量生产下土壤能够转化进入土壤的有机物

碳的能力与微生物分解释出碳的能力的平衡^[27]。土壤碳储量存在一个上限并最终会达到动态平衡^[28]。从表 2 的 Meta 分析结果可以看出,试验初期 SOC 含量急剧增加,经历一定时间的碳积累阶段后,SOC 含量增速减缓,其最终将趋于相对稳定状态^[29],这与 Stewart 等^[30]、West 和 Six^[31]的相关研究结果类似。同时,短期($\leq 5\text{a}$)试验观测获得的 SOC 变化速率估计结果要高于长期($> 5\text{a}$)观测的结果,CTS、NT、NTS 三种保护性耕作处理中,短期观测估算的 SOC 变化速率分别是长期观测的 2.1 倍、1.4 倍和 1.7 倍,平均高估约 75%,因此,如果仅采用短期试验结果可能高估保护性耕作的固碳潜力。

3.3 不确定性

本研究获取的长期定位试验站点文献数据覆盖了我国的主要农田土壤类型区,具有较好的代表性。然而,由于研究者经验偏好、试验条件限制、研究方法等原因,来自文献报道的同类数据间也可能存在较强的数据质量不一致性,并且这种不一致性很难消除^[32],从而导致 Meta 分析获得的 SOC 变化速率存在一定的不确定性。不同地区土壤类型、施肥差异也对 SOC 变化估算存在一定的影响,同时,SOC 变化是多种因素共同作用的结果,各影响因素之间并非完全相互独立的,而可能存在一定的交互作用,因此,尽管本研究通过 Meta 分析方法能够在一定程度上定量保护性耕作下 SOC 变化速率及其置信区间,但其潜在的不确定性及其来源等仍有待于进一步深入研究。

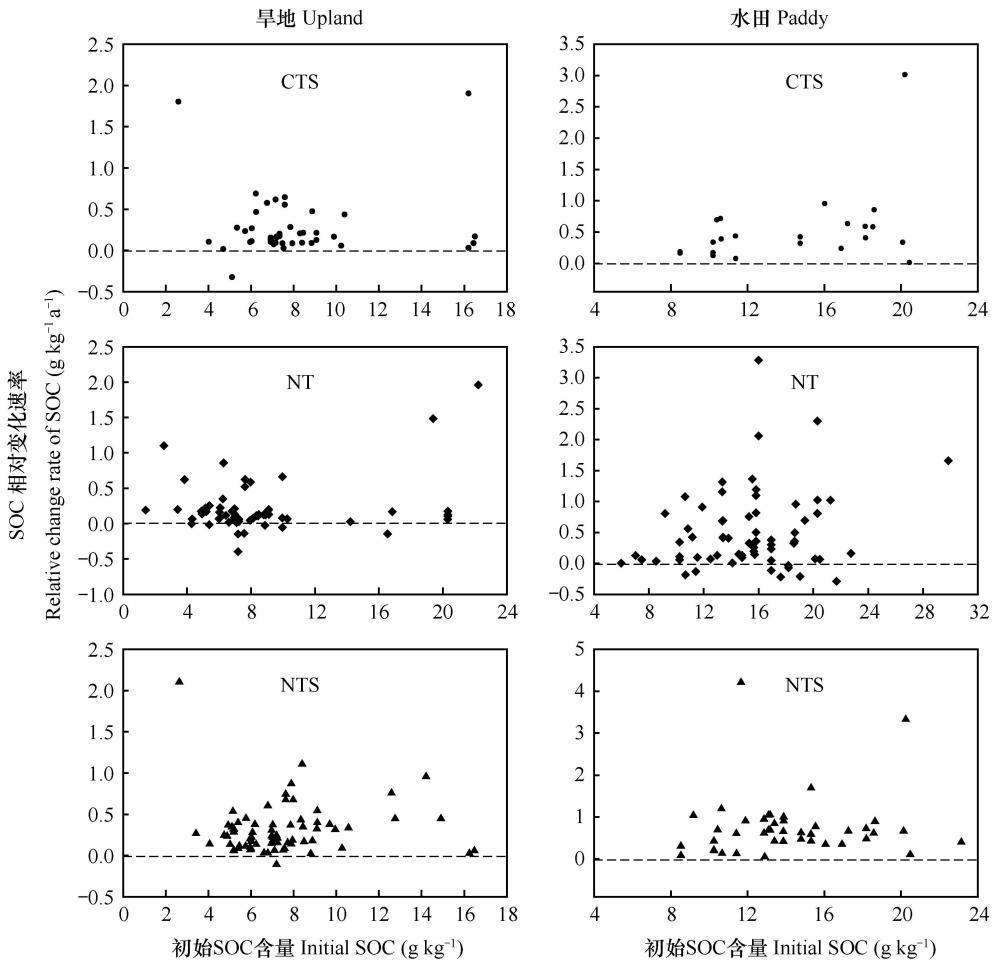


图5 SOC 相对变化速率与初始有机碳含量的关系

Fig. 5 Relationship between relative change rates of SOC and initial SOC content

表2 试验年限与 SOC 变化速率关系

Table 2 Relationship between experiment period and relative change rates of SOC

耕作措施 Tillage	分组 Group	样本数 Sampling number	SOC 相对变化速率 Relative change rate of SOC ($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	95% 置信区间 95% confidence interval	
				下限 Lower limit	上限 Upper limit
				—————($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)—————	
常规耕作 + 秸秆	All	65	0.26	0.04	0.49
还田	$\leq 5\text{a}$	53	0.33	0.16	0.50
CTS	$> 5\text{a}$	12	0.16	0.08	0.23
免耕 NT	All	123	0.37	0.24	0.49
	$\leq 5\text{a}$	87	0.35	0.21	0.49
	$> 5\text{a}$	36	0.24	0.10	0.39
免耕 + 秸秆还田 NTS	All	115	0.48	0.34	0.63
	$\leq 5\text{a}$	84	0.53	0.39	0.67
	$> 5\text{a}$	31	0.31	0.19	0.45

4 结 论

CTS、NT、NTS 3 种保护性耕作措施均能显著提高我国农田 SOC 含量,3 种保护性耕作措施下 SOC 的相对增加速率分别为 0.22、0.35 和 0.52 $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。3 种保护性耕作措施下,水田的 SOC 速率增幅要高于旱地;不同种植制度对 SOC 变化速率的影响不同,一年一熟制下 SOC 增加速率小于一年两熟,并且 SOC 变化速率具有一定的区域分异特征。保护性耕作下,SOC 积累与否及其幅度并不完全取决于其初始有机碳含量;短期试验($\leq 5\text{a}$)SOC 增加速率是长期试验($> 5\text{a}$)的 1.75 倍,如果仅采用短期试验结果可能高估保护性耕作的固碳潜力。

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!

参 考 文 献

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623—1627

[2] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384—393. Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 384—393

[3] Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Sci China: Life Sci*, 2010, 53(7): 766—775

[4] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Till Res*, 2001, 61(1/2): 77—92

[5] Li C S, Zhuang Y H, Frolking S, et al. Modeling soil organic carbon change in croplands of China. *Ecol Appl*, 2003, 13(2): 327—336

[6] Bellamy P H, Loveland P J, Bradley R I, et al. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978—2003. *Nature*, 2005, 437(7056): 245—248

[7] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context. *Eur J Agron*, 2004, 20(3): 229—236

[8] Lu F, Wang X K, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biol*, 2009, 15(2): 281—305

[9] Mannering J V, Fenster C R. What is conservation tillage. *J Soil Water Conserv*, 1983, 38(3): 140—143

[10] Smith P, Powlson D S, Glendining M J, et al. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol*, 1998, 4(6): 679—685

[11] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(6): 1930—1946

[12] Metay A, Moreira J A A, Bernoux M, et al. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil Till Res*, 2007, 94(1): 122—132

[13] 金琳,李玉娥,高清竹,等. 中国农田管理土壤碳汇估算. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734—743. Jin L, Li Y E, Gao Q Z, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China (In Chinese). *Scientia Agricultural Sinica*, 2008, 41(3): 734—743

[14] 王成己,潘根兴,田有国. 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. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2464—2475. Wang C J, Pan G X, Tian Y G. Characteristics of cropland topsoil organic carbon dynamics under different conservation tillage treatments based on long-term agro-ecosystem experiments across mainland China (In Chinese). *J Agro-Environ Sci*, 2009, 28(12): 2464—2475

[15] Rui W Y, Zhang W J. Effect size and duration of recommended management practices on carbon sequestration in paddy field in Yangtze Delta Plain of China: A meta-analysis. *Agr Ecosyst Environ*, 2010, 135(3): 199—205

[16] 沈善敏. 国外的长期肥料试验. *土壤通报*, 1984, 15(2): 85—91. Shen S M. A review on long-term fertilizer experiments in other countries (In Chinese). *Journal of Soil Science*, 1984, 15(2): 85—93

[17] 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. *地球科学进展*, 2008, 23(2): 219—220. Pan G X. Global changes in the soil ecosystems, long-term trial cum-International Symposium on Sidelights (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2008, 23(2): 219—220

[18] Vanderwerf E. Lack clutch size hypothesis: An examination of the evidence using meta-analysis. *Ecology*, 1992, 73(5): 1699—1705

[19] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population decline: A meta-analysis of the patch size effect. *Ecology*, 1998, 79(2): 517—533

[20] R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. 2012—10—26 [2012—7—18]. <http://www.R-project.org/>

[21] Guo L P, Lin E D. Carbon sink in cropland soils and emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China. *Chemosphere-Global Change Science*, 2001(3): 413—418

[22] Luo Z K, Wang E L, Sun O J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 211—223

[23] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(3): 906—912

[24] Janzen H H, Campbell C A, Gregorich E G, et al. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems // Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. *Advances in soil science. Soil Processes and*

- the Carbon Cycle. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, CRC Press, 1998: 57—80
- [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. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609—618. Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 609—618
- [26] 许兴旺. 不同地理尺度下中国农田土壤有机碳分布与变化. 南京:南京农业大学研究生院, 2008:54—81. Xu X W. Different geographical scales China soil organic carbon distribution and change (In Chinese). Nanjing: Graduate School of Nanjing Agricultural University, 2008:54—81
- [27] 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. 生态学报, 2006, 26(11):3704—3710. Pan G X, Zhou P, Zhang X H, et al. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China (In Chinese). Acta Ecol Sinica, 2006, 26(11): 3704—3710
- [28] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant Soil, 2002, 241(2): 155—176
- [29] Johnson M G, Levine E R, Kern J S. Soil organic matter: distribution, genesis, and management to reduce greenhouse-gas emissions. Water Air Soil Poll, 1995, 82(3/4): 593—615
- [30] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry, 2007, 86(1): 19—31
- [31] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. Climatic Change, 2007, 80(1/2): 25—41
- [32] Qin Z C, Huang Y. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland: A model approach. Sci China: Life Sci, 2010, 53(7): 868—884

A META-ANALYSIS OF LONG-TERM EXPERIMENT DATA FOR CHARACTERIZING THE TOPSOIL ORGANIC CARBON CHANGES UNDER DIFFERENT CONSERVATION TILLAGE IN CROPLAND OF CHINA

Tian Kang^{1,2} Zhao Yongcun^{1,2†} Xing Zhe^{1,3} Sun Weixia¹ Huang Biao¹ Hu Wenyong¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Long Ping Branch, Central South University, Changsha 410125, China)

Abstract Conservation tillage of farmlands is very important to soil building, guarantee of food security and mitigation of global warming. A total of 303 sets of field experiment data collected from 157 long-term (1980—2012) conservation tillage experiment sites for meta-analysis to characterize quantitatively transformation of SOC (soil organic carbon) in the topsoil (0~15cm for paddy and 0~20cm for upland) of farmlands under conservation tillage. Results show that the practices of conventional tillage plus straw incorporation (CTS), no tillage (NT), and no tillage plus straw incorporation (NTS) significantly increased SOC content in the topsoil with a relative change rate (RC) being 0.22, 0.35, and 0.52 g kg⁻¹ a⁻¹, respectively, as compared with the practice of conventional tillage (CT). The effect was more significant in paddy fields than in uplands and in farmlands under the double cropping system than in those under the single cropping system. It seems, however, that SOC accumulation and its amplitude is not fully related to the initial content of organic carbon in the soil. The SOC increase rate in short-term field experiments (≤5a) is about 1.75 times as high as that in long-term ones (>5a). It is, therefore, possible to overestimate SOC sequestering potential of the conservation tillage practices just based on short-term field experiments.

Key words Conservation tillage; Cropland soil; Meta-analysis; Long-term field experiments; Dynamics of soil organic carbon

(责任编辑:檀满枝)