

DOI: 10.5846/stxb201211201634

田康,赵永存,徐向华,黄标,孙维侠,史学正,邓文靖.不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征——基于定位试验数据的 Meta 分析.生态学报, 2014, 34(13): 3735-3743.

Tian K, Zhao Y C, Xu X H, Huang B, Sun W X, Shi X Z, Deng W J. A meta-analysis of field experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different fertilization treatments in uplands of China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3735-3743.

不同施肥下中国旱地土壤有机碳变化特征 ——基于定位试验数据的 Meta 分析

田 康^{1,2}, 赵永存^{1,2,*}, 徐向华³, 黄 标¹, 孙维侠¹, 史学正¹, 邓文靖⁴

(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. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;
4. 香港教育学院科学与环境学系, 新界大埔)

摘要: 搜集 1994—2011 年国内外有关中国旱地施肥处理的 102 个定位试验点的 1146 对田间试验数据, 采用 Meta-analysis 方法定量分析了不同施肥条件下我国旱地耕层土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 的变化特征。结果表明, 与对照 (CK) 相比, 不同施肥措施均能显著提高耕层 SOC 含量, 但不同施肥措施的效应不同。氮磷钾肥配施有机肥处理下 SOC 增速最大, 为 $0.38 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 单施磷肥处理增速最小, SOC 增速仅为 $0.032 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; 添加有机肥的处理 SOC 增速远大于仅无机化肥投入的施肥处理。不同施肥处理下 SOC 增速存在一定的空间分异特征且不同时期试验 SOC 相对变化速率也不相同, 早期试验中 SOC 增速大于中、后期试验; 不同种植制度对 SOC 变化速率的影响亦不同, 有机肥的投入可以降低种植制度对 SOC 变化的影响。SOC 积累与否及其幅度并不完全取决于初始 SOC 含量; 随试验年限的增加, SOC 增加速率呈降低趋势, 仅采用短期试验 (<11 a) 数据可能高估施肥措施下的固碳潜力。

关键词: 旱地; 施肥试验; Meta 分析; SOC 相对变化速率

A meta-analysis of field experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different fertilization treatments in uplands of China

TIAN Kang^{1,2}, ZHAO Yongcun^{1,2,*}, XU Xianghua³, HUANG Biao¹, SUN Weixia¹, SHI Xuezheng¹, DENG Wenjing⁴

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 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

4 Department of Science and Environmental Studies, The Hong Kong Institute of Education, Tai Po, N.T., Hong Kong

Abstract: Soil organic carbon (SOC) pool is the largest carbon (C) reservoir in the terrestrial biosphere, and SOC storage in agricultural soils is extremely sensitive to the management practices such as tillage, fertilization, and crop residue management. Consequently, quantifying the changes in SOC resulting from the implementation of agricultural management practices is important for improving soil fertility, maintaining crop yield, and offsetting the emission of carbon dioxide. A total of 1146 paired-treatment data derived from the 102 published fertilization experiments (1994—2011) and meta-analysis method were employed in this study for characterizing the changes in topsoil organic carbon contents under different

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助 (XDA05050509); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-EW-QN404)

收稿日期: 2012-11-20; **网络出版日期:** 2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yczhao@issas.ac.cn

fertilization treatments in uplands of China. In order to identify the spatiotemporal changes in SOC and the variations of SOC change resulting from cropping system, initial SOC content, and duration of the experiments, meta-analysis was conducted by using the Meta package of R software (a language and environment for statistical computing and graphics), and then the changes in SOC contents were analyzed by taking the relative change rate (RC) of SOC as an appropriate effect size estimator in the analysis so that the treatment and control means of the experiments can be compared directly. Results showed that all fertilization treatments significantly sequestered C in soils when compared with the control treatment. The RC of SOC under NPKM (mineral nitrogen, phosphorus, potassium, and manure) treatment was the largest, with a rate of $0.38 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, while the P (mineral phosphorus only) treatment caused the lowest RC with $0.032 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$. The RC s of SOC under fertilization treatments with manure incorporation were obviously higher than those treated only by inorganic chemical fertilizers. The regional characters of RC s under manure or inorganic fertilizer treatments, presenting as a magnitude order, can be identified as South > North China (NC) > Northwest (NW) > Northeast (NE), but such magnitude order changed when manure and inorganic fertilizers were applied simultaneously. Moreover, the RC s of SOC derived from the experimental data that observed in the early stage of the experiments (before 1990) were obviously higher than those obtained in the middle (1991—2000) or later (2001—2010) stage of the experiment. Furthermore, the accumulating effects of SOC resulting from fertilization treatments were also different for single and double cropping system. In the situation of joint use of manure and inorganic fertilizer, the RC s of SOC under single-season cropping system were higher than those under double-season cropping system, otherwise, an opposite trend in SOC change can be observed. The application of manure may diminish the variations of changes in SOC for different cropping systems, but the impacts of initial SOC content on the RC s of SOC were unclear. The SOC sequestration potential may be overestimated when only short-term experiment (duration <11a) data were used for the estimation, because the experimental duration time had significant influences on the RC s of SOC under different fertilization treatments.

Key Words: uplands; fertilization experiments; meta-analysis; relative change rate of soil organic carbon

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耕层碳库受人类活动影响最为强烈^[2-3],同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节^[4-5]。施肥可以提高作物产量和生物量来增加土壤有机物的投入,从而可以提高农田土壤有机碳(SOC)含量^[1,6-8]。因此,研究不同施肥措施对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。

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^[9-10]。Kapkiyai等^[11]通过长期试验研究发现,SOC含量随耕作年限的延长而降低,其中以单施化肥处理土壤有机碳损失最多,施用有机肥和秸秆还田的损失量比单施化肥少49%,化肥和有机肥配施加上秸秆还田有机碳损失最少;Dendoncker等^[12]的研究结果则表明,在

施用 $10 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 有机肥的情况下,比利时农田土壤平均固碳速率为 $350 \text{ kg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;通过45a的长期定位试验,Ogunwale^[13]发现有机肥和无机肥配施条件下SOC从 6.39 g/kg 升高到 11.37 g/kg ;沈宏等^[14]研究也认为长期施用有机肥或有机肥和NPK矿质肥料配合施用,有利于土壤总有机碳的提高;陈义等^[15]通过浙江省黄岩水稻土26a的长期施肥定位试验研究发现,长期施用有机肥可以促使土壤有机质持续增长,增长幅度随有机肥用量增加而增加;周萍等^[16]研究结果表明,不同的施肥处理主要影响耕层土壤SOC含量,化肥与猪粪配施处理SOC含量显著高于单施化肥和不施肥2种处理;Wu等^[17]通过20a试验研究表明施用有机肥 $75 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,有机肥和化肥配施比对照处理表层(0—20 cm)SOC增加 4.5 Mg C hm^{-2} 。不同施肥措施均能改变耕层SOC含量,其中施有机肥能提高SOC含量,尤以化肥有机肥配施更为显著^[18-20]。

针对目前SOC变化研究大多集中在单个试验点

尺度,而大尺度多个试验点综合研究相对较少的问题,本研究通过系统搜集我国旱地长期施肥试验下的 SOC 变化研究文献,采用 Meta-analysis 方法定量估算了不同施肥措施下中国旱地耕层 SOC 变化速率、时空分异特征及其潜在影响因素,以便为制定农田管理培肥政策、保障国家粮食安全、缓解气候变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

收集整理 1994—2011 年国内外有关中国旱地长期施肥试验的研究文献并对文献进行筛选,提取试验站点位置、土壤类型、种植制度、试验时间、施肥处理以及 SOC 数据,建立中国旱地耕层 SOC 数据库。

本研究中文献筛选的标准如下:1) 研究区域为中国旱地;2) 施肥措施包括对照(CK);施无机化肥,如单施氮肥(N)、单施磷肥(P)、施氮磷肥(NP)、施氮钾肥(NK)、施磷钾肥(PK)、施氮磷钾肥(NPK);施有机肥(M);无机化肥有机肥配施,如施氮肥和有机肥(NM)、施氮磷肥和有机肥(NPM)、施氮磷钾肥和有机肥(NPKM)等的一个或多个,其中对照(CK)是只种作物不施肥;3) 试验为长期定位田间试验,观测年限 $\geq 3a$;4) 土样采自耕层土壤,且有机碳含量测定方法相同;5) 试验时段的起止年份清楚;6) 试验时段的各施肥措施下 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 180 篇,共 102 个试验站点,1146 对数据,分布于我国 18 个省(区、市),涵盖 17 种土类。长期试验点位置分布如图 1。

1.2 数据分析方法

本文主要分析施肥措施对中国旱地耕层 SOC 变化速率的影响。

(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),前者乘以有机碳转换系数 0.58。

(2) 不同施肥处理下 SOC 平均变化速率

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

$$M = (SOC_t - SOC_0) / t \quad (1)$$

式中, M 为年平均变化速率($g\ kg^{-1}\ a^{-1}$); t 为试验观

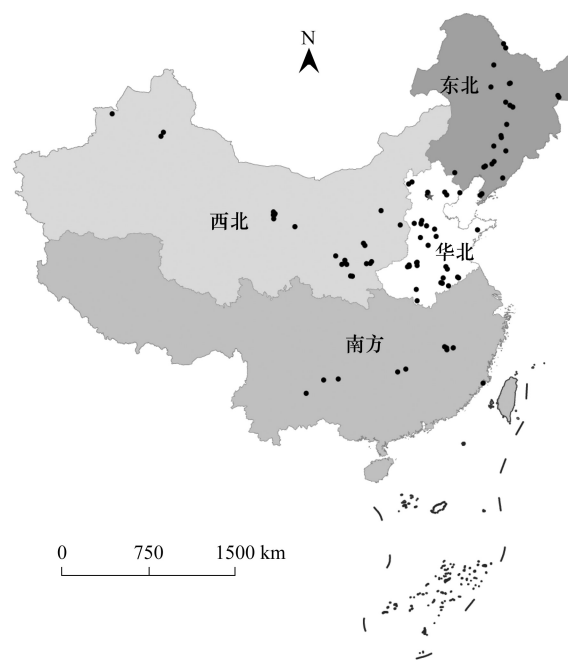


图1 农田类型区和长期施肥试验点分布图(审图号:JS(2013)002)

Fig.1 Cropland regions and locations of long-term fertilization experiments in China

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 SOC 含量测定值(g/kg)。

(3) 不同施肥处理下 SOC 相对变化速率

为消除试验点之间的气候条件、土壤性质、耕作及栽培措施等区域差异的随机影响,在计算不同施肥措施下 SOC 的变化速率时,采用 SOC 相对变化速率 $RC(g\ kg^{-1}\ a^{-1})$,即,试验观测期限内任一施肥处理(e)扣除相应对照(c)后的平均变化速率差值:

$$RC = \frac{(SOC_t - SOC_0)_e - (SOC_t - SOC_0)_c}{t} \quad (2)$$

因此,有: $RC = M_e - M_c$ 。

式中 RC 为正值时, SOC 速率表现为增加; RC 为负值时, SOC 速率则表现为降低。

(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^[21],特别适合于大尺度生态现象的研究^[22]。本研究利用 R(一种数据分析、处理和制图的语言或环境)中的 Meta 软件包进行分析^[23],以 SOC 相对变化速率(RC)为效应值,得到不同施肥处理的 SOC 相对变化速率及其 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>0,说明该处理能提高 SOC 含量,且达到显著水平。反之,则该处理导致 SOC 含量降低且达到显著水平。

1.3 数据分类

中国耕地面积大,覆盖地区广,不同区域气候、土壤质地、耕作制度等条件差别较大,导致 SOC 变化在时间和空间尺度上也存在一定的差异,所以不能

将不同长期定位试验的数据简单平均得到中国旱地耕层 SOC 变化速率。本研究对所搜集的数据进行分类处理,便于准确分析旱地耕层 SOC 的变化情况。由于 P、PK、NK、NM 4 个施肥处理数据较少,本文仅对 N、NP、NPK、M、NPM 和 NPKM 处理进行分类分析。数据分类如表 1。

表 1 数据分类及依据

Table1 Groups used in the meta-analysis

分类方式 Grouping method	组 Group
空间位置 ^① Geographic location	华北(NC, North China);东北(NE, Northeast of China);西北(NW, Northwest of China);南方(South of China)
时间顺序 ^② Time Sequence	1990 以前(Early);1991—2000 年(Middle);2001—2010 年(Recent)
试验年限 Experiment duration (a)	<11;11—20;>20
种植制度 Crop Rotation System	一年一熟(Single);一年两熟(Double)

①考虑到长期定位试验点的数量限制及我国旱地分布特点,本研究共划分了 4 个农田类型区,分别为华北区(NC)、东北区(NE)、西北区(NW)、南方(South),如图 1(由于港、澳、台地区无相关数据,因此未计算在内)

②考虑到试验点数据时间跨度达 30 多年(1977—2010),本研究以试验点结束年份进行分组,分为早期试验(试验 1990 年以前结束,Early)、中期试验(试验在 1990—2000 年结束, Middle)、后期试验(试验在 2000—2010 年结束, Recent)3 个时期

2 结果

2.1 不同施肥处理下耕层 SOC 相对变化速率

长期试验中不同施肥措施对 SOC 含量变化的影响不同。Meta 分析结果表明(图 2,不同处理对应的点代表 SOC 相对变化速率 RC,横线长短代表 95%的

置信区间),与 CK 相比,不同施肥措施均能不同程度地提高农田耕层 SOC 含量,且达到显著水平。其中 P 处理下 SOC 增速最低,平均为 $0.032 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$;NPKM 处理 SOC 增速最快,达 $0.38 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。不同施肥处理中,有机肥组(M、NM、NPM 和 NPKM)的 SOC 增速远大于无机肥组(N、P、NP、NK、PK、NPK),SOC 平均变化速率分别为 $0.335 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.062 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,前者是后者的 5.4 倍。有机肥的投入直接或间接将有机质加入土壤从而提高了 SOC 含量。单施无机肥处理中,以 NPK 处理增加最高为 $0.099 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,变化范围为 $0.070\text{—}0.128 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,其它处理为 $0.032\text{—}0.093 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。金琳等^[24]研究表明化肥与有机肥配施的增碳作用最大,达到 $0.889 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次为施有机肥 $0.545 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而施化肥的作用仅为 $0.129 \text{ Mg C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。而 Wang 等^[25]研究表明 NPK 处理 SOC 变化速率为 $0.100 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。

2.2 SOC 相对变化速率的空间特征

不同施肥措施对 SOC 的影响不同,相同措施在不同区域的作用也存在差异。我国不同农田区的气候、地形、土壤类型、土壤质地、耕作制度等条件的差异使得 SOC 的变化对各种施肥措施的响应不尽相同。从图 3 的 Meta 分析结果可以看出,除单施 N 处

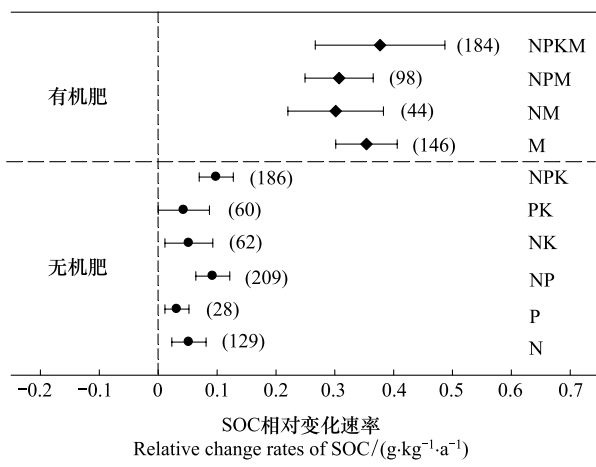


图 2 不同施肥处理下 SOC 相对变化速率

Fig. 2 Relative change rates of SOC under different fertilization treatments

N:单施氮肥;P:单施磷肥;NP:施氮、磷肥;PK:施磷、钾肥;NK:施氮、钾肥;NPK:施氮、磷、钾肥;M:单施有机肥;NM:施氮肥和有机肥;NPM:施氮、磷肥和有机肥;NPKM:施氮、磷、钾肥和有机肥,括号中数字为试验点样本数

理下东北区外,仅施化肥(N、NP、NPK)处理下4个农田类型区域的SOC含量均呈现增加趋势,但仅华北区的增速达到了显著水平。SOC变化速率的区域分异特征表现为南方($0.10 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > 华北区($0.079 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > 西北区($0.057 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$) > 东北区($0.024 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$)。在施有机肥(M、NPM、NPKM)处理下,4个农田类型区域的SOC含量均显著增加。单施M处理下,SOC增率以南方增加最大,为 $0.45 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,而东北最低,为 $0.26 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。NPM处理中平均SOC变化速率表现为华北>东北>西北,而NPKM处理下的大小关系则与此相反。因南方地区

样本数较少,所以其置信区间较大,变异较大。

4个农田类型区中,华北区在M处理下SOC增速最快,平均速率为 $0.33 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,NPM处理($0.32 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$)次之;东北、西北以及南方区均在NPKM处理下SOC增速最大,分别为 0.38 、 0.47 、 $0.45 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$;而单施N处理下4个农田类型区的SOC变化速率均最小,分别为 $-0.003 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (东北)、 $0.035 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (西北)、 $0.052 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (华北)、 $0.052 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (南方),其中东北区单施N处理,出现负增长现象,但未达到显著降低程度。

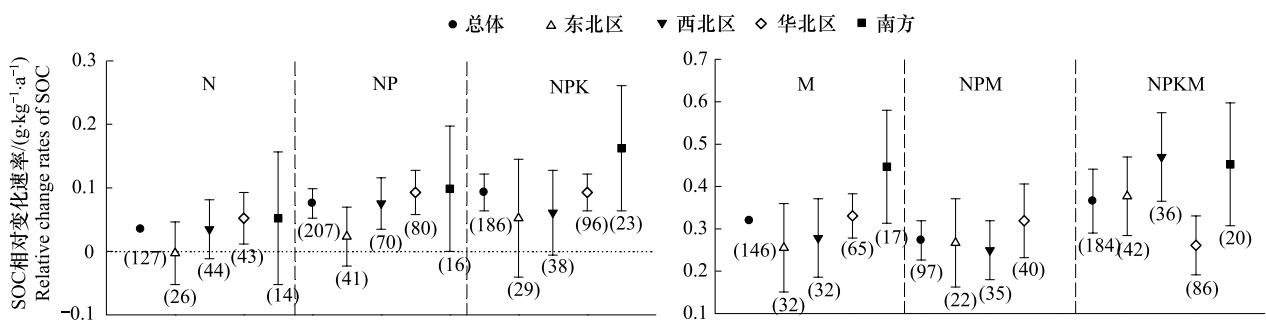


图3 不同区域SOC相对变化速率

Fig.3 Relative change rates of SOC in different cropland regions

括号中数字为试验点样本数

2.3 SOC 相对变化速率的时间特征

由于不同时期农业管理措施、耕作管理制度等都不尽相同,因此相同施肥处理在不同时期SOC变

化速率也不尽相同。从图4的结果可以看出,3个时期SOC的变化明显不同,随着时间的推移呈递减趋势,SOC增速依次为早期试验>中期试验>

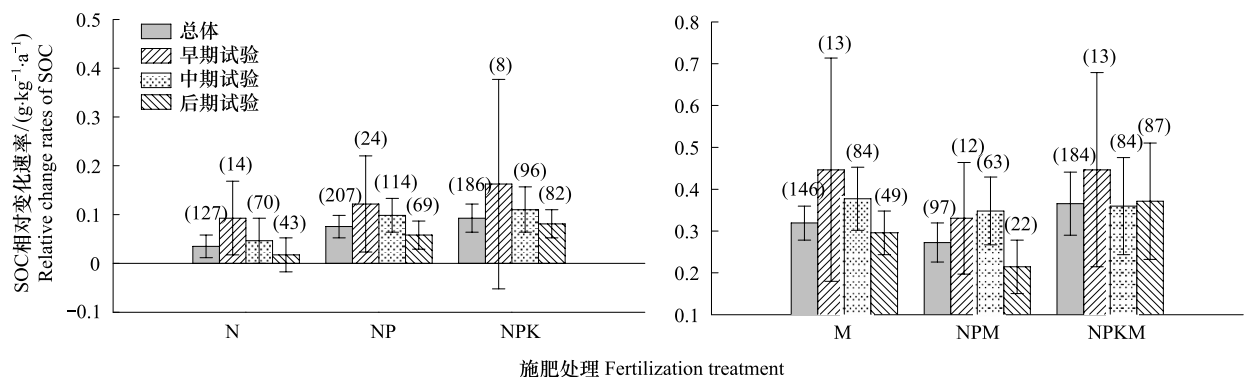


图4 不同时期SOC相对变化速率

Fig.4 Relative change rates of SOC in different times

早期试验:试验在1990年前结束;中期试验:试验在1991—2000年结束;后期试验:试验在2001—2010年结束;括号中数字为样本数

后期试验。除N处理的后期和NPK处理的早期外,3个时期在各施肥措施下均能提高SOC含量且达到显著水平。3个时期中,NPKM处理下SOC变化速率最大,分别为 0.45 、 0.36 、 $0.37 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$,N处理

SOC变化速率最小,分别为 0.093 、 0.046 、 $0.017 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。由于早期样本数较少,其95%的置信区间较大,变异也较大。

2.4 不同种植制度下 SOC 的变化

从不同种植制度下 SOC 相对变化速率(图 5)可以看出,除 N 处理外,各施肥处理下 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,长期施肥均能显著提高农田耕层 SOC 含量,但在一年一熟制下,仅施 N 并不能显著提高耕层 SOC 含量。不同种植制度下,耕层 SOC 变化速率存在一定差异, N、NP、NPK、M 4 个处理中,一年一熟制度下 SOC 变化速率小于一年两熟制度。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,生态系统养分循环通量增加,土壤有机质有明显的提高。Halvorson 等^[26]的研究也表明一年一熟

转化为轮作后由于增加作物根茬进而提高了 SOC 含量。但对于 NPM 和 NPKM 处理,一年一熟制度下 SOC 变化速率大于一年两熟制度。这可能是由于一年一熟主要集中在东北和西北地区,由于冬季水热条件较差,且处于休闲状态,土壤有机质的矿化比较缓慢,加上有机肥的投入,使耕层 SOC 较高。同时,研究发现在仅施无机肥的 3 个处理(N、NP、NPK)中,一年两熟制下 SOC 变化速率平均是一年一熟制下的 1.9 倍;而有机肥投入的 3 个处理(M、NPM、NPKM)中,一年一熟制下 SOC 变化速率平均是一年两熟的 1.1 倍;因此,有机肥(或者有机物料)的投入可以降低或者是减弱种植制度对 SOC 变化的影响。

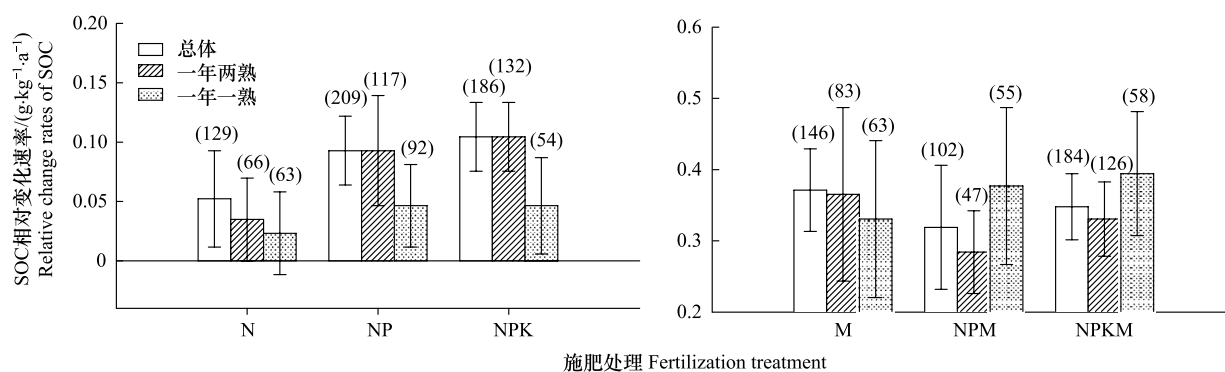


图 5 不同种植制度下 SOC 相对变化速率(括号中数字为样本数)

Fig.5 Relative change rates of SOC under different crop rotation systems (number of observations is in parentheses)

3 讨论

3.1 初始 SOC 含量

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^[27]。潘根兴等^[28]和 Huang 等^[29]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 6 种施肥处理下 SOC 变化速率与其初始有机碳含量的关系来看(图 6),耕层 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,不同施肥处理的固碳效果并非总是随初始有机碳含量增加而降低。SOC 变化可能与饱和 SOC 含量与初始 SOC 含量的差值存在一定的关系。

3.2 试验年限

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

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^[8,30-31]。土壤碳储量存在一个上限并最终会达到动态平衡^[32]。从不同试验年限下 SOC 变化速率(图 7)的结果可以看出,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^[33],这与 Stewart 等^[34]、West 和 Six^[31]的相关研究结果类似。同时,短期(<11 a)试验观测获得的 SOC 变化速率估计结果要高于中期(11—20 a)和长期(>20 a)观测的结果。N 处理中,短期(<11 a)观测估算的 SOC 变化速率分别是中期和长期(11—20 a 和>20 a)观测的 3.3 和 13 倍。而除 N 处理外,其他处理的短期(<11 a)观测估算的 SOC 变化速率平均分别是中期(11—20 a)和长期(>20 a)观测的 1.6 和 2.4 倍。因此,如果仅采用短期试验结果可能高估施肥处理的固碳潜力。

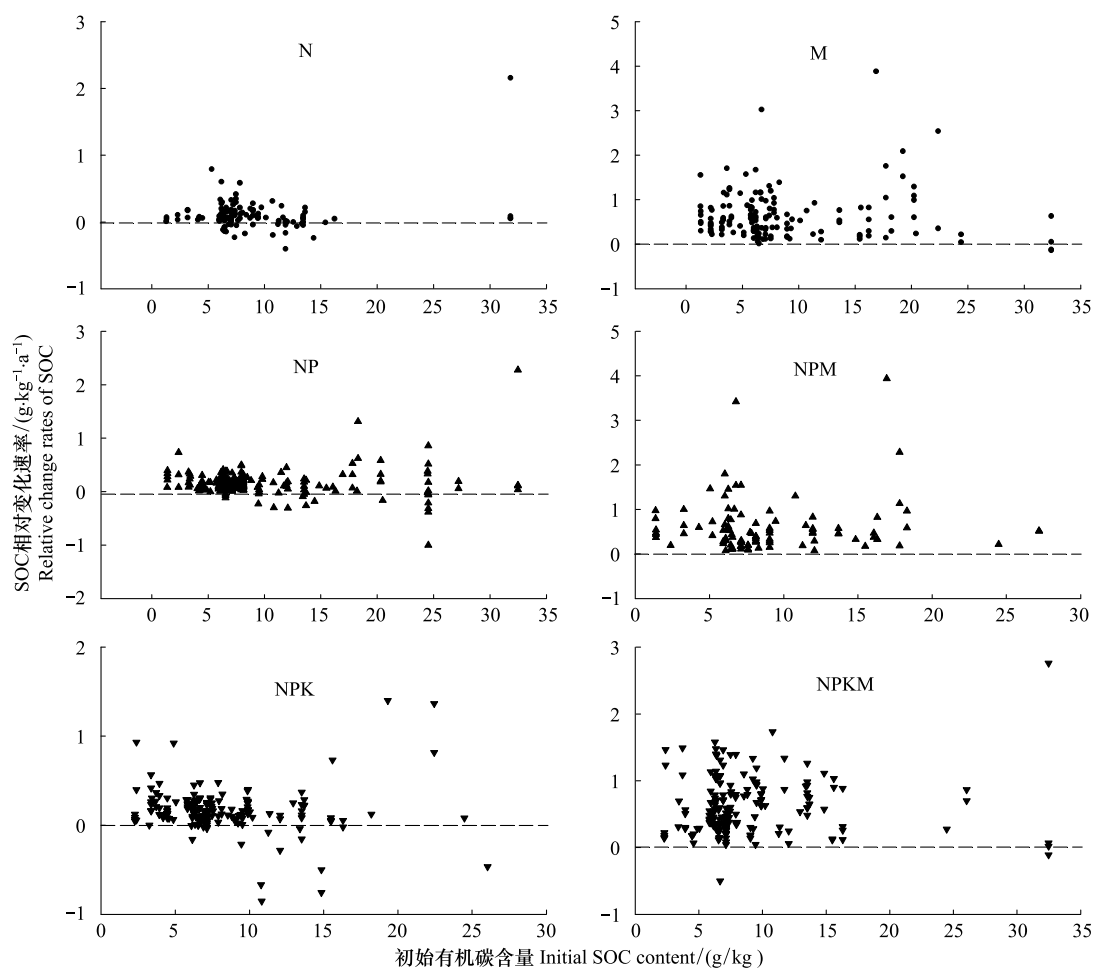


图 6 SOC 相对变化速率与初始 SOC 含量的关系

Fig.6 Relationship between initial SOC contents and relative change rates of SOC

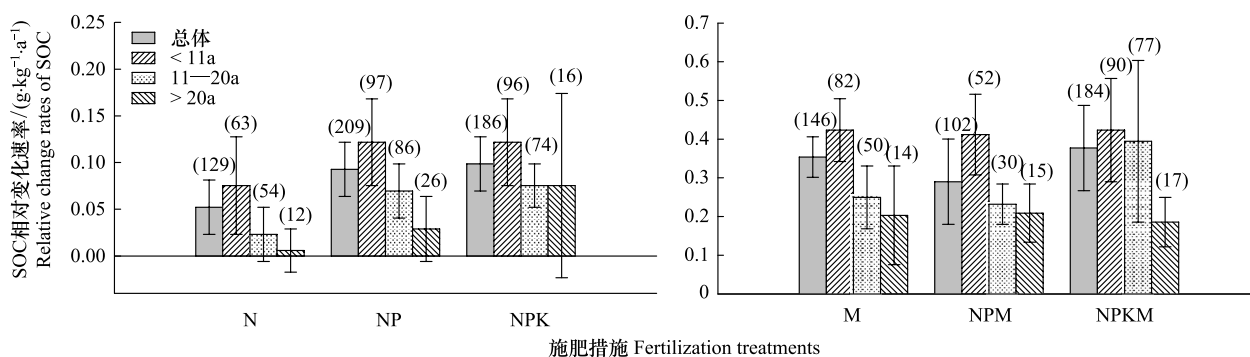


图 7 不同试验年限下 SOC 变化速率

Fig.7 Relationship between experiment period and relative change rates of SOC

括号中数值为试验点样本数

3.3 不确定性讨论

本研究获取的长期定位试验站点文献数据覆盖了中国的主要旱地农田土壤类型区,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^[35],从而导致 Meta 分析获得的 SOC 变化速率存在一定的不确定性。另外,文献中数据是长期试验站点某一年的测定数据,由于每年气候、耕作管理措施等的不同,或遇到自然灾害等原因,本身

存在一定的偶然性,也可能带来一定的不确定性。同时,SOC 变化是多种因素共同作用的结果^[2-3],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 分析方法能够一定程度上定量长期施肥下 SOC 变化速率及其置信区间,但其潜在的不确定性及来源等仍有待于进一步深入研究。

4 结论

(1)与对照(CK)相比,不同施肥措施均能显著增加耕层 SOC 含量,但不同措施 SOC 增加的幅度不同。NPKM 处理 SOC 增速最快($0.38\text{g kg}^{-1}\text{a}^{-1}$),P 处理为最慢($0.032\text{g kg}^{-1}\text{a}^{-1}$);投入有机肥的处理 SOC 增速远大于仅施无机肥处理。

(2)不同施肥措施下耕层 SOC 固碳效果既存在空间分异特征,也存在时间分异特征;不同时期试验 SOC 相对变化速率也不相同,早期试验的 SOC 增速大于中、后期试验。

(3)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;而有机无机肥配施下则相反。同时,有机肥的投入可以降低种植制度对 SOC 变化的影响。

(4)长期施肥导致 SOC 积累与否及变化幅度并不完全取决于其初始有机碳含量;随着试验年限的增加,SOC 相对变化速率也呈下降趋势,短期试验(<11 a)SOC 增加速率分别是中期试验(11—20 a)和长期(>20 a)的 1.6 和 2.4 倍,因此,短期试验结果可能高估施肥措施下的旱地土壤固碳潜力。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Lohila A, Aurela M, Regina K, Laurila T. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 303-317.
- [3] Gesch R W, Reicosky D C, Gilbert R A, Morris D R. Influence of tillage and plant residue management on respiration of a Florida Everglades Histosol. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1/2): 156-166.
- [4] Huang Y, Sun W J, Zhang W, Yu Y Q. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Science China-Life Sciences*, 2010, 53(7): 766-775.
- [5] 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. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 384-393.
- [6] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(1/2): 77-92.
- [7] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3): 229-236.
- [8] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305.
- [9] Shen S M. A review on long-term fertilizer experiments abroad (I). *Chinese Journal of Soil Science*, 1984, 15(2): 85-91.
- [10] Pan G X. Sidelights of international symposium on global soil change and long-term ecosystem experiments. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(2): 219-220.
- [11] Kapkiyai J J, Karanja N K, Qureshi J N, Smithson P C, Woomer P L. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(13): 1773-1782.
- [12] Dendoncker N, Van Wesemael B, Rounsevell M D A, Roelandt C, Lettens S. Belgium's CO₂ mitigation potential under improved cropland management. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2004, 103(1): 101-116.
- [13] Ogunwole J O. Changes in an Alfisol under long-term application of manure and inorganic fertilizer. *Soil Use and Management*, 2005, 21(2): 260-261.
- [14] Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 166-173.
- [15] Chen Y, Wu C Y, Shui J G, Wang J Y. Emission and fixation of CO₂ from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2468-2473.
- [16] Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of Huangnitou from the Tai Lake region, China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765-771.
- [17] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, Qian P Y, Malhi S S, Shi Y C, Xu F L. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(1): 59-68.
- [18] Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term located fertilization on contents of soil humus. *Soils and Fertilizers*, 2002, (1): 15-19, 22-22.
- [19] Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 769-776.
- [20] Zhou B, Qiao M, Wang Z Q. Effects of a long-term located fertilization on soil quality of grey desert soil. *Chinese Journal of*

- Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 33-36.
- [21] Werf V E. Lack clutch size hypothesis: an examination of the evidence using meta-analysis. *Ecology*, 1992, 73 (5): 1699-1705.
- [22] 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.
- [23] R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. [2012-06-24]. <http://www.R-project.org/>.
- [24] Jin L, Li Y E, Gao Q Z, Liu Y T, Wan Y F, Qin X B, Shi F. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734-743.
- [25] Wang C J, Pan G X, Tian Y G, Li L Q, Zhang X H, Han X J. Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agro-ecosystem experiments across mainland China. *Science China-Life Sciences*, 2010, 53(7): 858-867.
- [26] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 906-912.
- [27] Janzen H H, Campbell C A, Gregorich E G, Ellert B H. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems // Lal R, ed. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. New York: CRS Press Inc., 1998: 57-80.
- [28] Pan G X, Li L Q, Zhang X H, Dai J Y, Zhou Y C, Zhang P J. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 609-618.
- [29] Huang S, Sun Y N, Zhang W J. Changes in soil organic carbon stocks as affected by cropping systems and cropping duration in China's paddy fields: a meta-analysis. *Climatic Change*, 2012, 112(3/4): 847-858.
- [30] Pan G X, Zhou P, Zhang X H, Li L Q, Zheng J F, Qiu D S, Chu Q H. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3704-3710.
- [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] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [33] Johnson M G, Levine E R, Kern J S. Soil organic matter: distribution, genesis, and management to reduce greenhouse-gas emissions. *Water Air and Soil Pollution*, 1995, 82 (3/4): 593-615.
- [34] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19-31.
- [35] Qin Z C, Huang Y. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland: A model approach. *Science China-Life Sciences*, 2010, 53(7): 868-884.

参考文献:

- [5] 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. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393.
- [9] 沈善敏. 国外的长期肥料试验(一). *土壤通报*, 1984, 15(2): 85-91.
- [10] 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.
- [14] 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. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166-173.
- [15] 陈义, 吴春艳, 水建国, 王家玉. 长期施用有机肥对水稻土 CO₂ 释放与固定的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2468-2473.
- [16] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 765-771.
- [18] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质含量的影响. *土壤肥料*, 2002, (1): 15-19, 22-22.
- [19] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响. *土壤学报*, 2005, 42(5): 769-776.
- [20] 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. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 33-36.
- [24] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 刘运通, 万运帆, 秦晓波, 石锋. 中国农田管理土壤碳汇估算. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734-743.
- [28] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 代静玉, 周运超, 张平究. 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.
- [30] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 李恋卿, 郑聚锋, 邱多生, 储秋华. 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.