

长期施用化肥对我国南方水田表土有机碳含量的影响*

谭炳昌^{1,2,3} 樊剑波^{1,3} 何园球^{1,3†}

(1 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 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200)

摘要 利用 meta 分析研究水田土地利用方式下化肥对土壤有机碳含量的影响。结果显示: 长期施用化肥处理的表层水稻土土壤有机碳含量较不施肥处理显著提高 $1.00 \pm 0.23 \text{ g kg}^{-1}$, 是不施肥处理的 $1.06 \text{ 倍} \pm 1.01 \text{ 倍}$ 。分析认为施肥处理下, 较高的根系生物量导致较高的碳输入水平, 另外相对充足的养分供应提高土壤固碳效率, 这是施肥处理下土壤具有较高有机碳含量的两个原因。但不同轮作制度下, 化肥对有机碳含量提升作用有差异: 稻-稻-旱轮作制下化肥的作用不显著, 而稻-旱轮作与稻-稻轮作制度下化肥对有机碳含量的提升作用显著。方差分析发现相同施肥措施下, 稻-稻-旱轮作体系下土壤有机碳含量在三种轮作制度中最高, 而稻-旱轮作与稻-稻轮作没有显著差异。尽管施用化肥能增加土壤有机碳含量, 但评价施用化肥对温室效应的影响还需要综合考虑化肥生产、运输与施用过程中的温室气体排放三要素。

关键词 长期试验; 化肥; 水田表土; 土壤有机碳含量; meta 分析

中图分类号 S15 **文献标识码** A

随着温室气体排放增加与温室效应的加剧, 利用土壤固定大气二氧化碳成为应对全球气候变化的重要途径之一^[1]。农业生产对土壤生态系统干扰剧烈, 需要准确评价农业生产措施对农田土壤有机碳库的影响。虽然目前众多的独立研究为该评价过程提供基础, 但是各个独立研究的结果存在较大差异甚至争议。因此, 有必要对多个独立研究进行定量化综合评价。Meta 分析作为一种对多个单独研究进行综合分析的工具, 可为多个独立研究找到普遍性的结论。目前, 该方法逐渐在全球变化等领域得到重视与应用^[2]。Luo 等^[3]利用 meta 分析研究翻耕措施对土壤有机碳库的影响时发现: 相对常规耕作而言, 免耕只改变 0~40 cm 土层土壤有机碳的垂直分布, 总体上没有增加 0~40 cm 土层的有机碳库。对我国农田土壤有机碳变化的 meta 分析也显示: 双季稻能显著提高土壤有机碳储量, 但单季稻与水旱轮作下土壤有机碳库没有显著变化^[4];

而平衡施用化肥、有机肥单施、有机无机配施与秸秆还田措施下均能显著提升土壤有机碳库^[4-6]。

随着人口的增加与耕地的减少, 提高土地作物单产成为保证我国粮食安全的重要措施, 而化肥作为粮食增产的决定因子在我国农业生产中发挥了举足轻重的作用^[7]。我国化肥使用量巨大, 据联合国粮食及农业组织统计, 2002 年中国的氮肥使用量居世界首位, 占全球氮肥总施用量的 30%^[8]。近几年化肥的使用量也不断增加, 2008 年化肥用量已超过 5 000 万 t^[9]。

施用化肥对我国农田土壤固碳潜力的影响已经受到广泛关注, 并被认为我国农田表土有机碳含量增加的主要原因之一^[10]。有报道认为化肥使用比不施肥对照处理显著提高土壤有机碳含量^[11-12], 但也有报道发现使用化肥没有显著提高, 甚至可能降低土壤有机碳含量^[13-14]。究竟化肥如何影响土壤有机碳含量? 为更准确认识化肥对土

* 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B04, 2011BAD41B01, 2012BAD05B04)和公益性行业(农业)科研专项(201203050-31)共同资助

† 通讯作者, E-mail: yqhe@issas.ac.cn

作者简介: 谭炳昌(1982—), 男, 广东佛山人, 博士研究生, 主要研究方向为农田土壤固碳能力评价及有机碳模型。E-mail: tanbch@163.com

收稿日期: 2012-11-21; 收到修改稿日期: 2013-02-22

壤有机碳库的影响,需要充分利用这些独立研究进行整合分析。

尽管上述研究通过 meta 分析方法对施肥措施对土壤有机碳库的影响得到相似的结论,但这些研究较多反映在特定措施下终止状态与初始状态间

土壤有机碳库的变化。为研究平衡施用化肥,即同时施用氮(N)、磷(P)、钾(K)对有机碳含量的影响,有必要利用长期平衡施肥与不施肥作为成对试验,通过 meta 分析研究使用化肥对土壤有机碳含量的影响。

表 1 长期施肥试验概况
Table 1 Description of long-term experiments

编号 ID	试验点 Sites	轮作制度 Rotation system	采样深度 Depth (cm)	年限 Year (a)	文献 References
1	浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	稻-稻-麦	20	15	[12]
2	湖南宁乡 Ningxiang, Hunan	稻-稻-麦	15	17	[16]
3	湖南桃江 Taojiang, Hunan	稻-稻-麦	15	17	[16]
4	湖南临澧 Linli, Hunan	稻-稻-绿	20	16	[11]
5	湖南武冈 Wugang, Hunan	稻-稻-绿	20	17	[11]
6	湖南汉寿 Hanshou, Hunan	稻-稻-绿	15	17	[11]
7	湖南新化 Xinhua, Hunan	稻-稻-麦	20	17	[16]
8	湖南株洲 Zhuzhou, Hunan	稻-稻-绿	20	16	[11]
9	湖南南县 Nanxian, Hunan	稻-稻-油	20	17	[11]
10	江苏吴江 Wujiang, Jiangsu	稻-油	15	15	[17]
11	江苏常熟 Changshu, Jiangsu	稻-麦	20	10	[18]
12	江苏镇江 Zhenjiang, Jiangsu	稻-麦	20	14	[19]
13	湖北武昌 Wuchang, Hubei	稻-麦	20	18	[20]
14	四川武胜 Wusheng, Sichuan	稻-麦	20	16	[21]
15	重庆北碚 Beibei, Chongqing	稻-麦	15	15	[12]
16	四川遂宁 Suining, Sichuan	稻-麦	20	16	[22]
17	云南楚雄 Chuxiong, Yunnan	稻-麦	15	12	[23]
18	湖南祁阳 Qiyang, Hunan	稻-稻	20	16	[24]
19	湖南望城 Wangcheng, Hunan	稻-稻	15	23	[20]
20	湖南桃源 Taoyuan, Hunan	稻-稻	15	17	[25]
21	江西鹰潭 Yingtan, Jiangxi	稻-稻	15	15	[26]
22	江西南昌 Nanchang, Jiangxi	稻-稻	15	24	[20]
23	江西进贤 Jinxian, Jiangxi	稻-稻	20	26	[20]
24	福建福州 Fuzhou, Fujian	稻-稻	20	25	[27]
25	福建南平 Nanping, Fujian	稻-稻	20	10	[28]
26	广东广州 Guangzhou, Guangdong	稻-稻	20	22	[29]

注:将轮作制度分类为:稻-稻-旱(R-R-U,如试验点1—9),稻-旱(R-U,如试验点10—17),稻-稻(R-R,如试验点18—26) Note: all the rotation systems are categorized as Rice-rice-upland crop (R-R-U, ID 1—9), Rice-upland crop (R-U, ID 10—17) and Rice-rice (R-R, ID 18—26)

1 材料与方法

1.1 数据来源及选择标准

本研究搜集查阅了截止至2012年11月我国南

方水田长期实验研究报道。选择标准如下:(1)由于长期试验研究更能反映不同处理的效果^[15],因此选择10年以上长期定位试验的研究报道;(2)对于相同长期试验不同年份结果的数据,原则上优先选择最后年份的数据用于本研究,但如果靠后年份数

据不完整(如缺少标准差数据),则优先选用数据完整的其他年份的数据;(3)表土采样深度为 15 或 20 cm。共获得 26 个水田长期实验研究。

1.2 数据分析

原始数据包括化肥处理与不施肥对照处理的土壤有机碳平均含量、重复数(n)及标准差(Standard Deviation, SD)。如果文献中土壤有机碳含量以土壤有机质形式表示,则将土壤有机质含量折算为土壤有机碳含量(有机碳 = $0.58 \times$ 有机质)。一些文献只提供土壤有机碳含量平均值与试验重复,但没有提供标准差,参考 Ladha 等^[30]与 Luo 等^[31]的研究,使用已有的每一组标准差与土壤有机碳含量之比的平均值估算未知标准差。从本研究所用文献数据的预处理可知:SD = $0.04 x$, x 表示土壤有机碳含量(g kg^{-1})。一些文献提供标准误(Standard Errors, SE)数据,可以通过以下公式转换为标准差:

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

效应值(Effect Size)是 meta 分析中评价不同处理差异时的评价指标。本研究采用均值差(Mean Difference, MD)与响应比(Response Ratio, RR)两指标评价化肥处理对土壤有机碳含量的影响^[32]。

均值差:

$$MD = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \quad (2)$$

均值差反映不同处理结果的差值。式中, \bar{x}_1 表示化肥处理下土壤有机碳含量平均值, \bar{x}_2 表示不施肥处理下土壤有机碳含量平均值。

Meta 分析首先计算每个独立研究的不同处理结果的均值差(方程(2))及该组均值差的标准误(SE_{MD})。均值差的标准误计算如下:

$$S^2_{\text{pooled}} = \frac{(n_1 - 1)SD_1^2 + (n_2 - 1)SD_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3)$$

$$V_{MD} = \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} S^2_{\text{pooled}}$$

$$SE_{MD} = \sqrt{V_{MD}}$$

式中, n_1, n_2 分别表示化肥处理与不施肥处理的重复数, SD_1 与 SD_2 分别表示化肥处理与不施肥处理的有机碳含量标准差。

响应比:

$$RR = \bar{x}_1 / \bar{x}_2 \quad (4)$$

响应比反映某一处理下的结果与对照处理结果的倍数关系。值得注意的是,meta 分析使用每个独立研究响应比的自然对数值($\ln(RR)$)及该对数

值的标准误($SE_{\ln RR}$)进行计算,因此在最终结果分析时,将 meta 分析结果取自然指数值得到响应比。响应比自然对数值的标准误计算如下:

$$V_{\ln RR} = \frac{1}{n_1 \bar{x}_1^{-2} + n_2 \bar{x}_2^{-2}} S^2_{\text{pooled}} \quad (5)$$

$$SE_{\ln RR} = \sqrt{V_{\ln RR}}$$

计算每组独立研究的效应值以及效应值标准误后,再根据每一组效应值标准误按照权重大小进行整合计算。效应值标准误越小,权重越大。

研究用 Comprehensive Meta Analysis 2.0 软件的随机模型进行 meta 分析,用 Origin 8.0 软件进行其他常规数据分析与作图。

2 结果

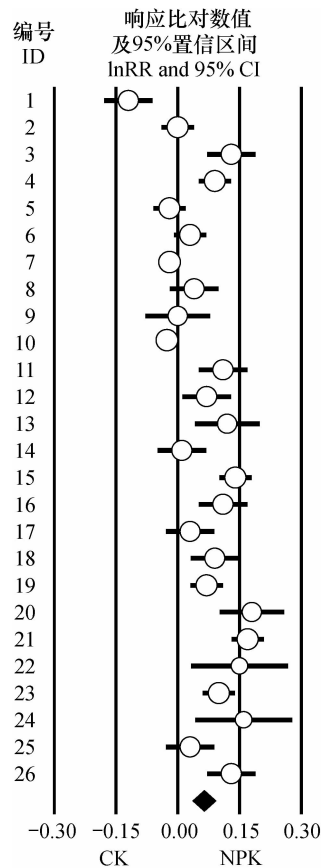
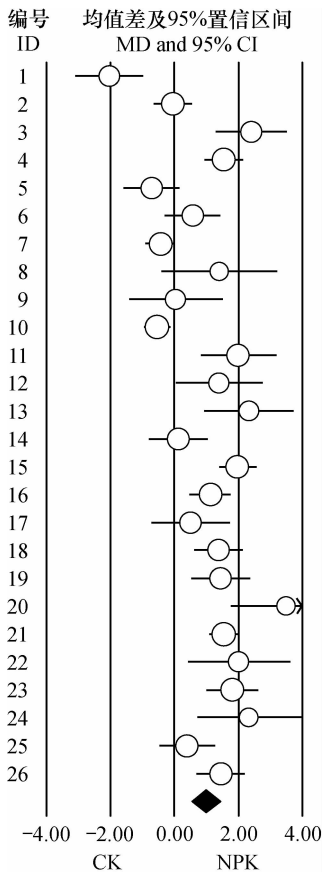
2.1 施肥对水田有机碳含量的影响

水田利用方式下,26 个长期试验的有机碳含量均值差幅度为 $-2.03 \sim 3.50 \text{ g kg}^{-1}$,其中 15 个试验平衡施肥处理的土壤有机碳含量显著高于不施肥处理,2 个试验(实验点 1 与 10)平衡施肥有机碳含量显著低于不施肥处理,这可能是系统误差造成,其余试验点差异不显著。26 个试验的 meta 分析显示,施用化肥较不施肥处理高 $1.00 \pm 0.23 \text{ g kg}^{-1}$,达到极显著水平($p < 0.01$)(图 1)。

分析不同施肥措施下土壤有机碳含量响应比可知,响应比自然对数值幅度为 $-0.12 \sim 0.18$,26 个独立研究的 meta 分析结果为 0.06 ± 0.01 (图 2),即独立研究的响应比介于 $0.89 \sim 1.19$ 间,整合响应比为 1.06 ± 1.01 。因此,施用化肥有机碳含量是不施肥处理的 1.06 倍 ± 1.01 倍($p < 0.01$)。

2.2 不同轮作制度下土壤有机碳含量对施肥响应的差异

26 个长期实验研究的轮作制度中,9 个稻-稻-旱轮作制,8 个稻-旱轮作,9 个为稻-稻轮作(表 1)。分别对三种轮作制度下有机碳含量对施肥的响应的 meta 分析可知,在稻-稻-旱轮作体系下,两种施肥处理的有机碳含量没有显著差异,而稻-旱轮作与稻-稻轮作体系下,施用化肥均能分别显著提高有机碳含量 $1.08 \pm 0.46 \text{ g kg}^{-1}$ 与 $1.55 \pm 0.20 \text{ g kg}^{-1}$,是不施肥的 1.07 倍 ± 1.03 倍与 1.12 倍 ± 1.02 倍(表 2)。



注:森林图反映每组独立研究的均值差、置信区间、权重及 meta 分析结果。每组横线没有跨越 0.00 g kg⁻¹ 无效线表示差异显著,跨越则不显著。圆大小反映权重大小:效应值标准误差越大,权重越小,则圆越小。末行菱形表示整合结果,菱形没有跨越无效线,表示处理间差异显著;菱形宽度反映整合结果及其置信区间。下同 Note: The forest plot reflects the mean difference in SOC, the 95% confidence interval (CI), relative weight for each studies and final meta-analysis. The CI bars that do not go across the 0.00 g kg⁻¹ line mean significant difference between treatments, or otherwise. Circles stand for relative weights used in meta-analysis. The bigger the standard error, the lower the weight and the smaller the circle. Diamond at the last row shows the result of meta-analysis. The diamond that does not go across the 0.00 g kg⁻¹ line means significant difference between treatments. Width of the diamond presented result of the meta-analysis and the CI. The same below

图 2 有机碳含量响应比自然对数值

Fig. 2 ln (RR) of SOC content

表 2 有机碳含量对施肥的响应差异

Table 2 Response of SOC content to fertilization

轮作制度 Rotation system	均值差 MD (g kg ⁻¹)	SE	p	轮作制度 Rotation system	响应比 RR	SE	p
稻-稻-旱 R-R-U	0.27	0.40	0.50	稻-稻-旱 R-R-U	1.01	1.04	0.46
稻-旱 R-U	1.08	0.46	0.02	稻-旱 R-U	1.07	1.03	0.02
稻-稻 R-R	1.55	0.20	<0.01	稻-稻 R-R	1.12	1.02	<0.01

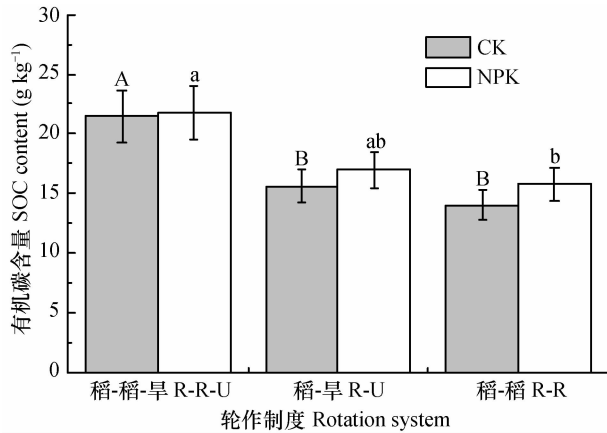
图 1 不同处理的土壤有机碳含量均值差

Fig. 1 Mean difference between treatments in soil organic carbon (SOC) content

2.3 轮作制度对土壤有机碳含量的影响

由于不是成对试验,因此分析三种不同轮作制度对有机碳含量的影响时没有用 meta 分析。利用 LSD 方差分析研究相同施肥处理下不同轮作制度土壤有机碳含量差异可知,在施用化肥条件下,稻-稻-旱轮作体系下土壤有机碳含量与稻-旱轮作有机碳

含量没有显著差异,但显著高于稻-稻轮作有机碳含量,而稻-稻轮作与稻-旱轮作下有机碳含量没有显著差异;在不施肥条件下,稻-稻-旱轮作下有机碳含量显著高于稻-旱轮作与稻-稻轮作制度的含量,而该两种轮作制度下有机碳含量没有显著差异(图 3)。



注:不同大写字母表示不施肥处理下三种不同轮作制度有机碳含量 $p < 0.05$ 水平差异显著;不同小写字母表示化肥处理下三种不同轮作制度有机碳含量在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Different capital letters denote significant differences in SOC content at $p < 0.05$ level between the three rotation systems under CK treatment, and different lowercase letters mean significant differences in SOC content at $p < 0.05$ level between the three rotation schemes under NPK treatment

图3 不同轮作制度下土壤有机碳含量差异

Fig. 3 Difference in SOC content between different rotation systems

3 讨 论

相对不施肥而言,平衡施用化肥具有更高的土壤有机碳含量。本研究结果显示,水田利用方式下,平衡施用化肥使土壤有机碳含量较不施肥显著提高 $1.00 \pm 0.23 \text{ g kg}^{-1}$,相当于不施肥处理的 $1.06 \text{ 倍} \pm 1.01 \text{ 倍}$ 。但不同轮作制度下,化肥对有机碳含量的提高程度不同:稻-稻-早轮作方式提升作用不显著,而稻-早与稻-稻两种轮作体系下化肥的提升作用显著。

3.1 施用化肥对土壤固碳的影响

在不使用有机肥或秸秆还田条件下,根分泌物与根茬是碳输入土壤的主要途径。虽然根分泌物为土壤提供可观的碳来源^[33],但是由于根际分泌物的激发作用促进土壤原有土壤有机碳的降解,因此根际分泌物激发作用造成的土壤有机碳损失可能会抵消分泌物对土壤的碳输入^[34],可见根茬是导致土壤有机碳变化的主要碳源因素。最优分配理论认为,当植物生长因胁迫受到限制时,光合作用新合成有机物质将优先分配于与胁迫因素密切相关的组织,例如,弱光胁迫下,光合作用产物优先分配至叶组织,而在低养分供应胁迫下,光合产物将优先分配至根组织^[35]。尽管如此,因养分供应不足而

生长受限的作物总根生物量仍然可能低于正常生长的作物根系生物量。苗圃田等^[36]研究发现,在9个不同施肥处理中,不施肥对照处理下碳在玉米根茬的分配比例显著高于其他处理(除与N及NP处理差异不显著外),但是总根茬量显著低于其他处理。因此,低养分供应胁迫下,作物根系生物量较低,从而降低对土壤的碳输入水平,最终导致不施肥处理下土壤有机碳含量低于施肥处理。此外,氮素供应是影响碳循环的主要控制因素^[37],相应也影响土壤有机碳的固持。在低氮供应下,土壤微生物通过加速土壤有机质降解矿化获得氮养分,造成土壤低氮胁迫下有机质的含量降低,即降低土壤有机碳含量^[38]。因此,即使在一些条件下,例如高浓度大气 CO_2 ,植物根系生物量提高,增加对土壤的碳输入水平,但是因为土壤氮素供应不足,土壤有机碳含量也没有相应显著增加^[15]。由此可见,较低的碳输入水平与较低的固碳效率是不施肥处理下土壤有机碳含量低的原因;而平衡施肥下,较高的作物根系生物量提供较高碳输入水平,与相对足够的养分供应共同作用提高土壤有机碳含量。

3.2 轮作制度对有机碳含量的影响

轮作制度对有机碳含量有影响。本文结果显示,相同施肥措施,三季作物轮作制度下有机碳含量均最高,而两季作物有机碳含量没有显著差异,可能是因为三季轮作制度具有更高的碳输入水平。但是稻-稻-早轮作制度下施用化肥对土壤有机碳含量的提升作用不显著,而另外两种轮作制度下,施用化肥显著提高土壤有机碳含量。原因可能是三季作物轮作过程中进行相对较频繁的翻耕措施,反而不利于有机碳的进一步积累。但综合而言,从本文结果看,增加土地复种指数仍然有利于土壤有机碳含量的提升,因此被认为是缓解温室气体排放的一种措施^[39]。

3.3 施用化肥对温室效应的影响

尽管平衡施肥有利于提高土壤有机碳含量,但化肥生产与使用过程中产生温室气体泄露^[40]。逯非等^[41]研究发现,仅生产 1t 氮肥所产生的温室气体泄露足以完全抵消使用氮肥在农田土壤中的固碳效果,因此综合考虑生产与运输等过程的温室气体排放因素,使用氮肥作为土壤固碳措施不可行,增加氮肥施用量将加剧温室效应。而化肥对农田温室气体的排放影响较复杂,与化肥种类、施肥方式与用量有关^[42]。例如施用硫酸铵能降低稻田 CH_4 排放,深施尿素也降低 CH_4 排放,但表施尿素则

增加 CH_4 排放。而施用量对 CH_4 排放的影响,研究结果相差很大,难以定论^[43]。同样, N_2O 的排放量与化肥种类有关,表现为: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{尿素} > (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 > \text{氨水}$ 。施用尿素较不施肥显著增加 CO_2 的排放^[42]。因此,施用化肥对温室效应的影响仍需更多的综合研究。

4 结 论

本研究探讨平衡施用化肥对土壤有机碳含量的影响,得到以下结论:(1)平衡施用化肥下土壤有机碳含量显著高于不施肥处理;(2)不同轮作制度下化肥的土壤有机碳含量提升作用有差异,这可能与翻耕强度有关;(3)相同施肥条件下,稻-稻-旱轮作体系下有机碳含量最高,而稻-旱轮作体系与稻-稻轮作体系没有显著差异。

参 考 文 献

- [1] [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627
- [2] 雷相东,彭长辉,田大伦,等. 整合分析(Meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究. *科学通报*, 2006, 51(22): 2587—2597. Lei X D, Peng C H, Tian D L, et al. Meta-analysis and its application in global change research (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(22): 2587—2597
- [3] Luo Z K, Wang E L, Sun O J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 139 (1/2): 224—231
- [4] 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): 847—858
- [5] 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. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3): 199—205
- [6] 金琳. 农田管理对土壤碳储量的影响及模拟研究. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2008. Jin L. Effect of cropland management on soil carbon stock and modeling study (In Chinese). Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008
- [7] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915—924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915—924
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Total fertilizer consumption and consumption of N, P_2O_5 , K_2O //FAO Statistical Yearbook Vol A. http://www.fao.org/statistics/yearbook/vol_1_1/xls/a07.xls
- [9] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(2011). 北京: 中国农业出版社, 2012. The Committee of China Agriculture Yearbook. *China Agriculture Yearbook (2011)* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2012
- [10] 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. *科学通报*, 2006, 51(7): 750—763. Huang Y, Sun W J. Change trend of topsoil organic carbon content in mainland of China in recent 20 years (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 750—763
- [11] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, et al. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1): 8—14
- [12] Zhang H M, Xu M G, Zhang W J, et al. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15-year long-term fertilization. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(10): 1773—1780
- [13] Zhu P, Ren J, Wang L C, et al. Long-term fertilization impacts on corn yields and soil organic matter on a clay-loam soil in Northeast China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(2): 219—223
- [14] 柳燕兰. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009. Liu Y L. Study on the enzyme activities and fertility change of soil by a long-term located utilization of different fertilizers (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009
- [15] van Groenigen K J, Six J, Hungate B A, et al. Element interactions limit soil carbon storage. *PNAS*, 2006, 103(17): 6571—6574
- [16] Hao X H, Liu S L, Wu J S, et al. Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81(1): 17—24
- [17] 邱多生,李恋卿,焦少俊,等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土肥力的变化. *土壤肥料*, 2005, 10(4): 28—32. Qiu DS, Li LQ, Jiao SJ, et al. Change of soil fertility under long-term different fertilization practices in a paddy soil from the Tai Lake region (In Chinese). *Soil and Fertilizer*, 2005, 10(4): 28—32
- [18] 倪进治,徐建民,谢正苗,等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究. *土壤学报*, 2003, 40(5): 724—730. Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, et al. Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 724—730
- [19] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤,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. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549—552. Xu Y C, Shen Q R, Lie B K, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation (In Chinese).

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 549—552
- [20] Kramer S B, Reganold J P, Glover J D, et al. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *PNAS*, 2006, 103(12): 4522—4527
- [21] 郑兰君, 曾广永, 王鹏飞. 有机肥、化肥长期配合施用对水稻产量及土壤养分的影响. *中国农学通报*, 2001, 17(3): 48—50. Zheng L J, Zeng G Y, Wang P F. The effect of long term organic-chemical fertilization on the rice yield and soil nutrient (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(3): 48—50
- [22] 孙锡发, 秦鱼生, 冯文强, 等. 长期施肥石灰性紫色土肥力演变规律//徐明岗, 梁国庆, 张夫道, 等. *中国土壤肥力演变*. 北京: 中国农业科技出版社, 2006: 137—150. Sun X F, Qin Y S, Feng W Q, et al. The fertility change of calareous purple soil under long-term fertilization (In Chinese)// Xu M G, Liang G Q, Zhang F D, et al. *Soil fertility change in China*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006: 137—150
- [23] 王绍明. 不同施肥方式下紫色水稻土壤肥力变化规律研究. *农村生态环境*, 2000, 16(3): 23—26. Wang S M. Relationship between fertilization methods and soil fertility of purplish paddy soil (In Chinese). *Rural Eco-Environmen*, 2000, 16(3): 23—26
- [24] 王伯仁, 李冬初, 徐明岗. *农田生态系统卷(湖南祁阳站)*//孙鸿烈, 于贵瑞, 欧阳竹, 等. *中国生态系统定位观测与研究数据集*. 北京: 中国农业出版社, 2010. Wang B R, Li D C, Xu M G. *Agroecosystem (Qiyang, Hunan)* (In Chinese)// Sun H L, Yu G R, Ouyang Z, et al. *Observation and research database of Chinese ecosystem research*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2010
- [25] Chen Z, Hou H J, Zheng Y, et al. Influence of fertilisation regimes on a nosZ-containing denitrifying community in a rice paddy soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1064—1072
- [26] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施对红壤水稻土有机碳和养分含量的影响. *生态环境*, 2008, 17(5): 2019—2023. Wu X C, Li Z P, Zhang T L. Long-term effect of fertilization on organic carbon and nutrients content of paddy soils in red soil region (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2019—2023
- [27] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 283—290. Wang F, Lin C, Li Q H, et al. Effects of long-term fertilization on rice grain qualities and soil fertility factors in yellow paddy fields of southern China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 283—290
- [28] 刘振兴, 杨振华, 邱孝煊, 等. 肥料增产贡献率及其对土壤有机质的影响. *植物营养与肥料学报*, 1994, 1(1): 19—26. Liu Z X, Yang Z H, Qiu X X, et al. Contribution of fertilization to yield increase and its effect on soil organic matter (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, 1(1): 19—26
- [29] 黄小红, 张磷, 肖妙玲, 等. 施肥制度对土壤肥力的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 200—206. Huang X H, Zhang L, Xiao M L, et al. Effects of fertilization systems on soil fertility (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13): 200—206
- [30] Ladha J K, Reddy C K, Padre A T, et al. Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(6): 1756—1766
- [31] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53—63
- [32] Borenstein M, Hedges L V, Higgins J P T, et al. *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons, 2009: 450
- [33] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(4): 421—431
- [34] Dijkstra F A, Cheng W X. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition. *Ecology Letters*, 2007, 10(11): 1046—1053
- [35] Luo Y Q, Weng E S, Yang Y H. *Ecosystem ecology*// Hastings A, Gross L. *Sourcebook in theoretical ecology*. California: The University of California Press, 2011: 219—229
- [36] 苗惠田, 张文菊, 吕家珑, 等. 长期施肥对潮土玉米碳含量及分配比例的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(23): 4852—4861. Miao H T, Zhang W J, Lü J L, et al. Effects of long-term fertilization on assimilated carbon content and distribution proportion of maize in fluvio-aquic soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23): 4852—4861
- [37] Gårdens A I, Ågren G I, Bird J A, et al. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions - From molecular to global scale. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(4): 702—717
- [38] Pendall E, Del Grosso S, King J Y, et al. Elevated atmospheric CO₂ effects and soil water feedbacks on soil respiration components in a Colorado grassland. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1046—1057
- [39] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B—Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789—813
- [40] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 82(1): 121—127
- [41] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239—2250. Lu F, Wang X K, Han B, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239—2250
- [42] Guo J P, Zhou C D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2): 270—277
- [43] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策. *生态环境*, 2004, 13(4): 656—660. Huang G Q, Wang X X, Qian H Y, et al. Negative impact of in-

organic fertilizers application on agricultural environment and its
countermeasures (In Chinese). Ecology and Environment,

2004, 13(4): 656—660

EFFECT OF LONG-TERM APPLICATION OF CHEMICAL FERTILIZERS ON SOIL ORGANIC CARBON CONTENT IN TOP LAYER OF PADDY FIELDS IN SOUTH CHINA

Tan Bingchang^{1,2,3} Fan Jianbo^{1,3} He Yuanqiu^{1,3†}

(1 Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

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

(3 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China)

Abstract Effect of long-term application of chemical fertilizers on content of organic carbon (SOC) in paddy soil was analyzed with the meta-analysis method. Results show that the practice increased SOC content in the top soil layer of the paddy field by $1.00 \pm 0.23 \text{ g kg}^{-1}$, or by 1.06 ± 1.01 times as compared with control (CK). Analysis reveals that fertilization increased root biomass of the crop and hence input of carbon, and relatively sufficient nutrient supply from chemical fertilizer led to higher soil carbon sequestration efficiency. These two are believed to be the causes of higher SOC content in paddy field under long-term chemical fertilization. However, the effect of chemical fertilization varied with the rotation system. It was not so significant under the rotation system of rice-rice-upland crop, but was under the systems of rice-upland crop and rice-rice. One-way ANOVA analysis shows that in paddy fields, the same in fertilization, SOC content was the highest in the field under the system of rice-rice-upland crop, and little difference in SOC content was found between the other two rotation systems. Although application of chemical fertilizer significantly increases SOC content, it is essential to take into account comprehensively the emissions of greenhouse gases from the processes of manufacturing and transporting chemical fertilizers, besides the contribution of fertilization to global warming.

Key words Long-term experiment; Chemical fertilizer; Topsoil of paddy field; Soil organic carbon content; Meta-analysis

(责任编辑:卢萍)