

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.005

马子钰, 马文林. 施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究. 土壤, 2022, 54(5): 905–911.

施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究^①

马子钰, 马文林*

(北京建筑大学环境与能源工程学院北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 102616)

摘要: 本研究采用 Meta 分析方法研究施肥对中国农田 0~20 cm 表层土的土壤有机碳固定效果及影响因素。结果表明, 与不施肥相比, 施肥处理总体上年均土壤固碳速率为 0.23 g/(kg·a); 同时, 单施化肥、有机肥化肥混施和单施有机肥均能显著提高农田有机碳含量, 其中, 有机肥化肥混施固碳速率最高, 为 0.36 g/(kg·a), 单施化肥组的最低, 仅为 0.08 g/(kg·a)。研究还得出, 较低的年均温度(<9 °C)更有利于土壤固碳; 而在较高的初始土壤全氮(≥ 0.60 g/kg)和作物轮作条件下, 施用有机肥比单施化肥有更高的固碳速率。

关键词: Meta 分析; 中国农田; 土壤有机碳; 施肥; 影响因素

中图分类号: S146.1; S19 **文献标志码:** A

Effects of Fertilization on Soil Organic Carbon in Cropland of China

MA Ziyu, MA Wenlin*

(Beijing Climatic Change Response Research and Education Center, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

Abstract: In this paper, the Meta-analysis method was used to study the influence of fertilization on soil organic carbon (SOC) in the farmland topsoil (0-20 cm) in China. Overall, compared with the CK (no fertilizer) treatment, fertilization significantly increased SOC content by 0.23 g/(kg·a), and the practices of CF (inorganic fertilizer only), COF (inorganic combined with organic fertilizer), and OF (organic fertilizer only) significantly increased net annual change rates (NAC) of SOC. The NAC of SOC under COF treatment was the largest (0.36 g/(kg·a)), while the CF treatment caused the lowest NAC (0.08 g/(kg·a)). In addition, the effect was more significant under low mean annual temperature (<9 °C), applying organic fertilizer had a higher NAC of SOC than applying inorganic fertilizer alone under crop rotation or initial soil total nitrogen (STN) more than 0.60 g/kg condition.

Key words: Meta-analysis; Chinese farmland; Soil organic carbon; Fertilization; Influencing factors

土壤是陆地生态系统的最大碳库^[1], 其碳储量约为大气碳库的 3.3 倍^[2], 土壤碳库的微小变化可导致大气中 CO₂ 浓度的波动^[3-4], 从而影响全球气候。我国农田土壤有机碳(SOC)含量较低^[5], 具有较高的固碳潜力^[6-7], 增加农田土壤碳库容量, 对于缓解气候危机具有重要意义^[8]。

施肥对提升农田 SOC 含量具有重要意义^[9], 但现有田间试验结果相互矛盾。例如, 徐虎等^[10]在山西省玉米田试验中发现, 秸秆覆盖还田和粉碎还田可降低 0~100 cm 土层的 SOC 含量, 但秸秆过腹还田表现出增加作用; 蓝贤瑾等^[11]在江西省双季稻田试验中得出, 长期施肥主要通过改善农田 SOC 组分(如烷

基碳、烷氧碳等)以及促进土壤微生物繁殖和活性, 一定程度上加快了农田 SOC 的物质循环, 进而提升了 SOC 含量。但这些独立的研究结果, 仅代表在特定地理气候区和实验条件下的情况, 不能全面反映施肥对农田 SOC 固定效应。

Meta 分析对整合结果不一致的同类研究方面有较好的应用。Lu^[12]利用 Meta 分析法研究得出较长期的有机肥化肥配施可有效提升农田 SOC 含量, 但该研究未分析比较不同土壤初始理化性质(初始 SOC、初始全氮等)和作物轮作方式下施肥对 SOC 含量增幅的影响; 田康等^[9]利用 Meta 分析法研究了不同施肥处理对我国旱地 SOC 含量变化的影响, 得出 SOC 含

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0211703)和北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金(X19009)资助。

* 通讯作者(mawenlin1130@126.com)

作者简介: 马子钰(1998—), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事土壤温室气体排放评估研究。E-mail: mzyBucea@126.com

量随时空变化而不同的结论,但该研究不包含旱地以外的其他土壤类型,研究结论具有一定的局限性。因此,本研究制定严格的文献收集筛选条件,从田间试验中英文文献中提取有效试验数据,采用 Meta 分析法研究土壤初始理化条件、地理气候条件等生态环境因素以及作物轮作、施肥量等人为影响因素对我国农田土壤的固碳效应,以达到增强农田土壤固碳能力的目的。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

本研究从中国知网、Science Direct、Web of Science 核心合集数据库和 Google Scholar 中,以土壤有机碳(SOC)、土壤有机质(SOM)、化肥(NPK, inorganic fertilizer)、有机肥(NPKM, organic fertilizer)、

牛粪(cow manure)、鸡粪(chicken manure)、猪粪(pig manure)和施肥(fertilization)等为检索词进行文献检索。文献筛选标准为:①研究区域为试验地点可定位的中国大田试验;②试验至少设置 3 个重复;③试验周期 ≥ 3 a;④有试验地点的主要气候条件(年平均温度、降水量);⑤有试验起止的土壤有机碳(或有机质)含量数据;⑥有无机肥、有机肥的施氮量数据,或可以通过文献数据计算得出;⑦对于多篇试验数据重复的文献,只保留数据最完整的一篇。以不施肥组(NF)为对照组(CG),以单施化肥组(CF)、单施有机肥组(OF)和有机肥化肥混施组(COF)为处理组(TG),采用 Excel 2016 建立信息表,包含年均降水量、年均气温、肥料类型、施肥量、试验初始 SOC 和初始全氮(TN)含量、试验末期 SOC 含量、土壤碳库等信息,表 1 为所收集文献的部分信息。

表 1 文献中田间试验信息
Table 1 Information of field experiments in published references

序号	试验地点 (省市县)	试验周期 (a)	年均气温 ($^{\circ}\text{C}$)	年均降水量 (mm)	初始 SOC (g/kg)	初始 TN (g/kg)	参考文献
1	吉林省公主岭	17	4.5	525	13.50	1.42	[13]
2	吉林省公主岭	23	7.2	552	13.50	1.40	[14]
3	吉林省公主岭	22	5.6	562	12.70	1.40	[15]
4	河北省栾城市	12	12.2	536	10.00	0.97	[16]
5	河北省衢州市	3	13.2	494	7.95	0.09	[17]
6	山西省襄垣市	11	9.5	550	4.20	0.50	[18]
7	河南省封丘县	18	13.9	615	4.42	0.45	[19]
8	河南省原阳市	23	14.8	646	6.38	0.60	[20]
9	河南省郑州市	17	14.3	632	6.70	0.67	[13]
10	河南省郑州市	26	14.4	640	6.70	0.65	[21]
11	河南省封丘市	23	13.8	240	4.42	0.44	[22]
12	湖南省祁阳市	17	18.0	1 250	7.89	1.07	[13]
13	湖南省祁阳市	38	18.0	1 255	11.72	0.90	[23]
14	湖南省长沙市	3	17.2	1 422	10.40	1.05	[24]
15	江苏省常州市	5	15.6	1 086	11.80	2.20	[25]
16	江苏省金坛市	5	15.3	1 064	13.46	1.60	[26]
17	安徽省萧县	30	14.4	855	6.40	1.18	[27]
18	山东省临朐市	4	12.4	710	7.21	0.45	[28]
19	山东省莱阳市	36	11.2	779	4.10	0.50	[29]
20	山东省禹城市	26	13.4	570	3.93	0.51	[30]
21	江西省南昌市	33	17.6	1 610	14.85	1.36	[11]
22	江西省南昌市	30	17.7	1 706	16.30	1.49	[31]
23	江西省南昌市	34	18.1	1 727	16.30	1.60	[32]
24	江西省南昌市	28	18.1	1 727	9.40	0.98	[33]
25	陕西省杨凌市	24	13.0	550	7.32	0.92	[34]
26	新疆自治区	5	7.0	211	9.86	1.25	[35]
27	新疆自治区	4	7.0	213	13.50	0.95	[36]
28	贵州省贵阳市	20	15.3	1 150	18.07	1.76	[37]
29	天津市武清区	9	11.6	590	10.83	1.18	[38]

经筛选整理，最终得到符合标准的文献 27 篇、有效数据 102 对。试验地点主要分布在我国东北、华北、华中、华东、西北和西南地区，各文献的 SOC 采样深度主要集中在农田 0~20 cm 表层土。若文献中土壤碳库以 SOM 形式表示，将 SOM 值乘以转换系数 0.58 转换为 SOC 值^[39-40]；采用 Metawin 2.1 对提取数据进行 Meta 分析，采用 Origin Pro 2017 对 Meta 分析结果绘图。

1.2 数据分析

1.2.1 效应值选取 本研究选取随机效应模型，考虑到 CG 组的 SOC 变化效应^[41]，将按照式(1)计算得到的 SOC 年净变化量(NAC)作为效应值：

$$NAC = \frac{(SOC_t - SOC_0)_{TG} - (SOC_t - SOC_0)_{CG}}{t} \quad (1)$$

式中：SOC_t和 SOC₀分别为 TG 组和 CG 组的试验末期和初始 SOC 含量(g/kg)，t 为试验周期(a)。

1.2.2 效应值的 95% 置信区间计算 因有多篇文献缺少试验结果的标准差，对此，按照式(2)得到各有效数据对的权重 w^[42]。

$$w = \frac{N_{CG} N_{TG}}{N_{CG} + N_{TG}} \quad (2)$$

式中：N_{CG}、N_{TG}分别为 CG 组和 TG 组试验的重复次数。

采用 Metawin 2.1 中自助法(Bootstrap)通过 64 999 次迭代计算得出效应值的 95% 置信区间。若 95% 置信区间不与 0 重合，表明该处理对 SOC 含量影响具有显著效应(P<0.05)。

1.3 亚组分析

由于不同农田所处气候条件存在较大差异，且土壤初始理化性质、土壤管理措施和试验周期均影响 SOC 含量变化，因此，按照表 2 所示的分组方法对各种影响因素进行亚组分析，亚组满足至少有 10 条研究数据或至少来自 3 篇独立研究文献则结果可信^[43-44]。若各分组合并效应值的 95% 置信区间不重合，说明分组间具有显著差异^[45]。

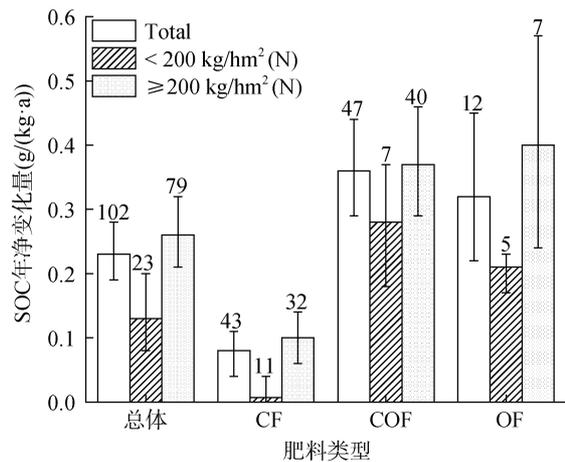
表 2 亚组分组方法
Table 2 Subgrouping analysis for Meta-analysis

影响因素	亚组 1	亚组 2	亚组 3
施氮量(N, kg/hm ²)	[99, 200)	[200, 1 126]	
年平均温度(°C)	[4.5, 9.0)	[9.0, 18.1]	
年平均降水(mm)	[211, 300)	[300, 800)	[800, 1 727]
轮作制度	轮作	非轮作	
初始 SOC(g/kg)	[3.93, 11.00]	[11.00, 18.07]	
初始 TN(g/kg)	[0.09, 0.60)	[0.60, 2.2]	

2 结果与分析

2.1 肥料类型和施肥量对农田土壤 SOC 含量的影响

肥料类型和施肥量对农田 SOC 的影响见图 1。其中，COF 组有机肥替代化肥的平均比例为 46.94%(10%~78.74%)。由图 1 得出，以不施肥为对照，施肥处理总体的农田 SOC 含量变化率为 0.23 g/(kg·a)。对总体按照施氮量<200 kg/hm²和 ≥200 kg/hm²进行亚组分析得出，两种施氮量条件下的农田 SOC 含量变化率分别为 0.13 和 0.26 g/(kg·a)，且二者之间差异显著；对总体按照肥料类型 CF、COF 和 OF 进行亚组分析得出，3 种施氮量条件下的农田 SOC 含量变化率分别为 0.08、0.36 和 0.32 g/(kg·a)，其中，CF 和 COF、OF 分别差异显著，而 COF 和 OF 间差异不显著。



(Total 表示不考虑施肥量，仅按照肥料类型分组的各组样本均值；误差线为用 Bootstrap 方法得到的 95% 置信区间，误差线上数字代表样本量，下同)

图 1 肥料种类和施肥量对 SOC 含量的影响

Fig.1 Effects of fertilizer types and fertilizing rate on SOC content

进一步比较相同肥料类型下不同施氮量的效应值得出，高施氮量(≥200 kg/hm²)比低施氮量(<200 kg/hm²)均能增加农田 SOC 含量，对 OF 组和 CF 组，不同施氮量的影响具有显著差异，而 COF 组的差异不显著。同时考虑肥料类型和施氮量两种因素的影响得出，CF 组和 OF 组的 4 个亚组(CF<200、CF≥200、OF<200 和 OF≥200)具有显著差异，CF 组的 2 个亚组(CF<200、CF≥200)对于 COF 的两个亚组(COF<200、COF≥200)分别具有显著差异，COF 组的高施氮量亚组(COF≥200)与 OF 组的低施氮量亚组(OFF<200)之间具有显著差异。

2.2 影响施肥固碳作用的因素

2.2.1 气候因素 年均气温对施肥固碳效果的影响见图 2。由图 2 可知,对于年均气温 $< 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况,施肥处理总体均显著增加农田 SOC 含量,变化率分别达到 0.37 和 $0.21\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$ 。分析 CF、COF 和 OF 各种施肥处理组内不同温度亚组间的情况发现,均不具有显著差异;分析 3 种施肥处理组在年均温度 $\geq 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的情况得出,CF 组的 SOC 含量变化率最低($0.07\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$),且与 COF 组和 OF 组都具有显著差异,而 COF 与 OF 组间差异不显著。

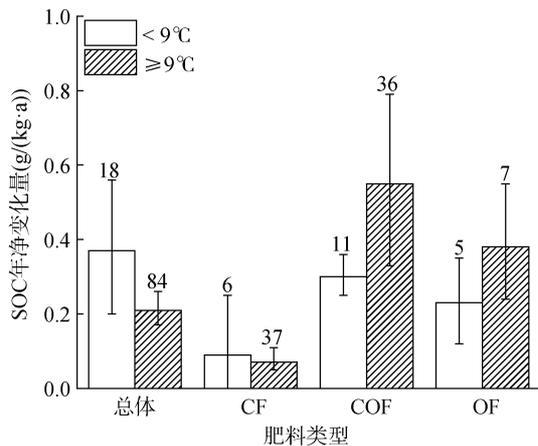


图 2 年平均温度对 SOC 含量的影响

Fig. 2 Effect of mean annual temperature on SOC content

年均降水量对施肥固碳效果的影响见图 3。由图 3 可知,对于年均降水量为 < 300 、 $300 \sim 800$ 和 $\geq 800\text{ mm}$ 的情况,施肥处理总体均能显著增加农田 SOC 含量,变化率分别为 0.36 、 0.20 和 $0.23\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,但不同降水量之间不具有显著差异。同时,CF、COF 和 OF 各施肥处理组内不同降水量之间也不具有显著差异;对于年均降水量为 $300 \sim 800$ 和 $\geq 800\text{ mm}$ 两种情况下,CF 和 COF、OF 分别差异显著,而 COF 和 OF 间差异不显著。

2.2.2 农田土壤初始碳氮含量 农田初始 SOC 和 TN 含量对试验末期农田 SOC 含量的影响见图 4 和图 5。从图 4 可知,对于施肥处理总体,农田初始 SOC 含量 $< 11\text{ g}/\text{kg}$ 和 $\geq 11\text{ g}/\text{kg}$ 两种情况下的 SOC 含量变化率分别为 0.18 和 $0.31\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,且两者间差异显著;对于不同施肥处理组,CF 组和 COF 组组内不同初始 SOC 亚组之间不具有显著差异,而 OF 组随初始 SOC 含量增加, SOC 含量变化率具有下降趋势。分析不同施肥处理组之间的情况,在初始 SOC 含量 $< 11\text{ g}/\text{kg}$ 时,CF 处理的农田 SOC 含量变化率最低($0.07\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$),OF 处理的最高($0.35\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$),同时 CF 与

OF 和 COF 均具有显著差异,COF 和 OF 处理差异不显著;在农田初始 SOC 含量 $\geq 11\text{ g}/\text{kg}$ 时,COF 处理 SOC 含量变化率最高($0.43\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$),并与 CF 差异显著,而 CF 与 OF 处理间差异不显著。

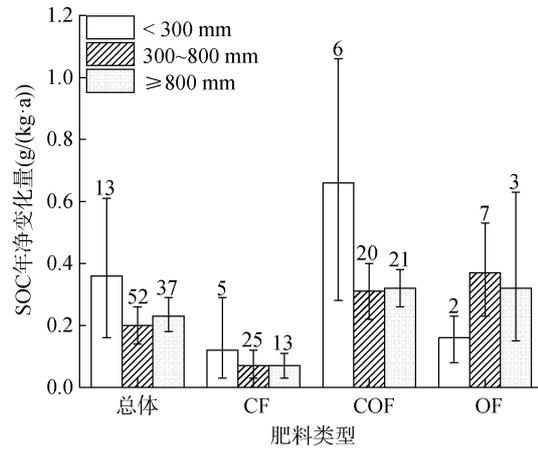


图 3 年平均降水量对 SOC 含量的影响

Fig. 3 Effect of mean annual precipitation on SOC content

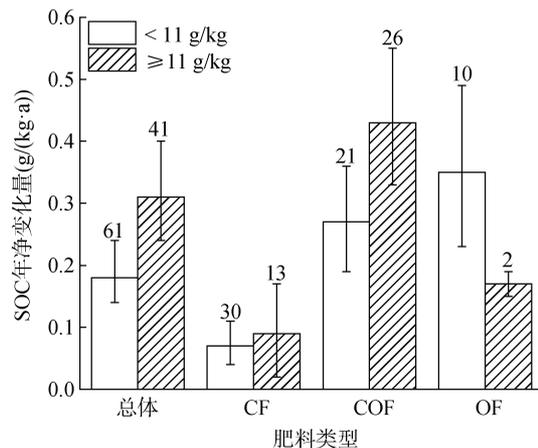


图 4 土壤初始有机碳对 SOC 含量的影响

Fig. 4 Effect of initial SOC content on SOC content

从图 5 可知,对于施肥处理总体,农田初始 TN 含量 $< 0.60\text{ g}/\text{kg}$ 和 $\geq 0.60\text{ g}/\text{kg}$ 两种情况下,施肥处理的 SOC 含量变化率分别为 0.22 和 $0.24\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,但两者间差异不显著。当农田初始 TN 含量 $< 0.60\text{ g}/\text{kg}$ 时,CF、COF 和 OF 处理对农田 SOC 含量变化率分别为 0.09 、 0.32 和 $0.37\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,其中 CF 与 OF 处理差异显著;当农田初始 TN 含量 $\geq 0.60\text{ g}/\text{kg}$ 时,CF、COF 和 OF 处理 SOC 含量变化率分别为 0.06 、 0.37 和 $0.26\text{ g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$,其中 CF 与 COF 处理差异显著。

2.2.3 轮作制度 不同轮作制度下,施肥对土壤有机碳固定的影响如图 6 所示。从图 6 可知,对于作物轮作和非轮作两种轮作制度,施肥处理总体上 SOC

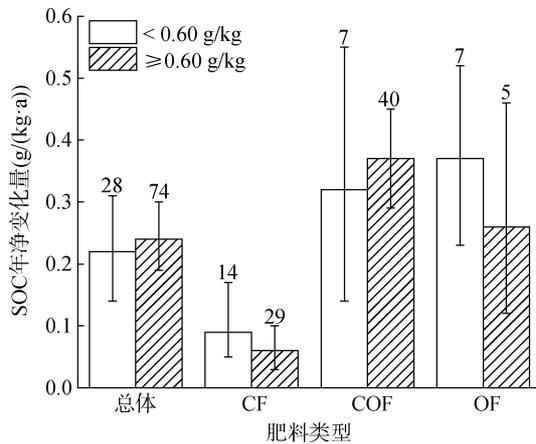


图 5 土壤初始全氮对 SOC 含量的影响

Fig. 5 Effect of initial STN content on SOC content

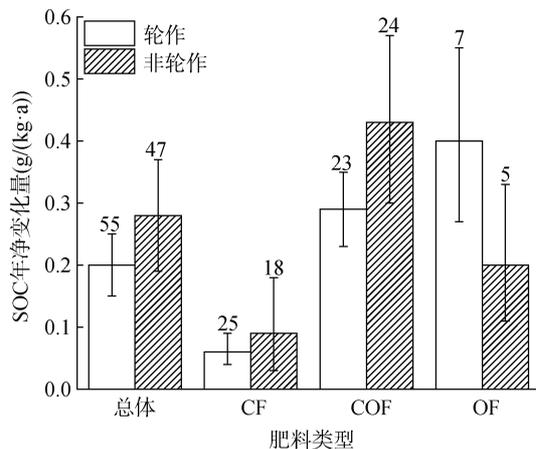


图 6 轮作制度对 SOC 含量的影响

Fig. 6 Effect of crop rotation on SOC content

含量变化率分别为 0.20 和 0.28 g/(kg·a)，但二者差异不显著。对于不同施肥处理组，在作物轮作条件下，OF、CF 和 COF 处理均显著增加农田 SOC 含量，其中 OF 处理的 SOC 含量变化率(0.40 g/(kg·a))相比 CF 处理的(0.06 g/(kg·a))显著较高；而在非作物轮作条件下，CF、COF 和 OF 处理下农田 SOC 含量变化率分别为 0.09、0.43 和 0.20 g/(kg·a)，其中，CF 与 COF 差异显著，而 COF 和 OF 之间差异不显著。

3 讨论

3.1 肥料类型和施肥量对农田 SOC 含量的影响

作物养分需求范围内，单独多施化肥或有机肥均比少施肥可以显著提高农田 SOC 含量，而化肥有机肥配施的固碳效果最佳。分析认为，多施有机肥或化肥均可通过促进作物根系生长来提升 SOC 含量^[37]，而施有机肥不仅直接向土壤补充有机质，还可改善土壤团聚体结构^[46]，但有机肥释放养分的速率较慢^[47]，配施化肥可以长效补充土壤养分，因而取得最佳 SOC

增加效果。

3.2 施肥固碳作用的影响因素

3.2.1 自然气候因素 施肥处理总体在年均温度较低时表现出较高的土壤固碳效果。温度升高可明显提高微生物的呼吸作用强度，促进 SOC 的分解^[48]。但在较高温度条件下，施用有机肥比单施化肥可以显著提升 SOC 含量(图 2)，表明施有机肥可以补给由于温度升高而导致的土壤碳库流失。

在低降水量条件下，施肥处理的固碳速率较高。降水量主要通过土壤含水率影响 SOC 含量^[49]，土壤在含水率低时通气性较好，好氧微生物活性高，分解 SOC 作用强，从而不利于 SOC 积累^[50]。我国降水量分布南多北少，呈现显著区域性特征^[50]，表明我国北方地区的施肥处理可取得较好的土壤固碳效果。

3.2.2 农田土壤初始碳氮含量 初始 SOC 含量较低的土壤，其固碳速率相对较高。当农田初始 SOC 含量远低于土壤饱和碳库值时，农田 SOC 固定效应强于分解效应，显示出较高的 SOC 含量增速；而当农田初始 SOC 含量较高甚至接近碳库饱和值时，土壤固碳潜力变小，SOC 固定量与分解量趋于接近，SOC 含量增速降低甚至达到平衡状态^[51-52]。

在土壤初始全氮含量较高情况下，施有机肥相比单施化肥可以显著提高 SOC 含量。崔宏浩等^[53]、陈瑞州等^[51]研究均指出有机肥相比化肥，可以显著调节土壤碳氮比，促进微生物代谢和繁殖作用更强，从而更有利于 SOC 周转。因此，土壤全氮含量较高时，通过施有机肥保持土壤碳氮比例平衡，可能是提升 SOC 含量的有效措施。

3.2.3 作物轮作 作物轮作条件下施有机肥比单施化肥更有利于 SOC 含量增加(图 6)。作物轮作使土壤养分周转均衡，此时因有机肥较化肥更有利于作物根系发育^[52]，每季作物收获后，土壤中保留有更多作物根茬，从而增加土壤 SOC 含量。

4 结论

施肥可以显著提高我国农田 0~20 cm 的 SOC 含量，在作物生长养分需求范围内，单独多施化肥或有机肥能促进土壤固碳，而有机肥化肥配施则固碳效果最佳。此外，较低的年均温度有利于农田 SOC 含量增加，而较高的土壤初始全氮含量和轮作制度下施加有机肥有利于土壤固碳。综上，在不同的施氮量、年平均温度和降水量、初始 SOC 含量和轮作制度条件下，施肥对农田 SOC 含量的影响不同，本研究结果可为今后合理制定农田施肥措施、增加土壤碳库提供科学依据。

参考文献:

- [1] 吴小刚, 王文平, 李斌, 等. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1539–1547.
- [2] 孙娇, 周涛, 郭鑫年, 等. 添加秸秆及生物质炭对风沙土有机碳及其活性组分的影响[J]. 土壤, 2021, 53(4): 802–808.
- [3] 郑小俊, 陈明, 刘友存, 等. 土壤有机碳流失现状分析[J]. 现代化工, 2020, 40(2): 7–11.
- [4] 赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 191–197.
- [5] 龚雪蛟, 秦琳, 刘飞, 等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403–1416.
- [6] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组化化学测定方法及碳指数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 252–259.
- [7] 张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 273–282.
- [8] 朱连奇, 朱小立, 李秀霞. 土壤有机碳研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2006, 36(3): 72–75.
- [9] 田康, 赵永存, 徐向华, 等. 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[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3735–3743.
- [10] 徐虎, 蔡岸冬, 周怀平, 等. 长期秸秆还田显著降低褐土底层有机碳储量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 768–776.
- [11] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810–819.
- [12] Lu X L. Fertilizer types affect soil organic carbon content and crop production: A meta-analysis[J]. Agricultural Research, 2020, 9(1): 94–101.
- [13] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 532: 635–644.
- [14] Wu H L, Cai A D, Xing T T, et al. Fertilization enhances mineralization of soil carbon and nitrogen pools by regulating the bacterial community and biomass[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(4): 1633–1643.
- [15] Song Z W, Gao H J, Zhu P, et al. Organic amendments increase corn yield by enhancing soil resilience to climate change[J]. The Crop Journal, 2015, 3(2): 110–117.
- [16] Zhou H, Fang H, Hu C S, et al. Inorganic fertilization effects on the structure of a calcareous silt loam soil[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(6): 2871–2880.
- [17] Zhang Y L, Li C H, Wang Y W, et al. Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 85–94.
- [18] Cao H B, Xie J Y, Hong J, et al. Organic matter fractions within macroaggregates in response to long-term fertilization in calcareous soil after reclamation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(6): 1636–1648.
- [19] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in Northern China[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 318–324.
- [20] Wei K, Bao H X, Huang S M, et al. Effects of long-term fertilization on available P, P composition and phosphatase activities in soil from the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237: 134–142.
- [21] Ai C, Zhang S Q, Zhang X, et al. Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation[J]. Geoderma, 2018, 319: 156–166.
- [22] Xin X L, Zhang J B, Zhu A N, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 166–172.
- [23] Qaswar M, Huang J, Ahmed W, et al. Linkages between ecoenzymatic stoichiometry and microbial community structure under long-term fertilization in paddy soil: A case study in China[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 161: 103860.
- [24] Zhou G P, Gao S J, Lu Y H, et al. Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in Southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104499.
- [25] Gai X P, Liu H B, Zhai L M, et al. Vegetable yields and soil biochemical properties as influenced by fertilization in Southern China[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 170–181.
- [26] Huang X L, Kang W J, Wang L, et al. Preservation of organic carbon promoted by iron redox transformation in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103425.
- [27] Zhang X, Zhang J, Zheng C Y, et al. Significant residual effects of wheat fertilization on greenhouse gas emissions in succeeding soybean growing season[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 7–15.
- [28] Zhu Z L, Bai Y, Lv M L, et al. Soil fertility, microbial biomass, and microbial functional diversity responses to four years fertilization in an apple orchard in North China[J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(4): 223–230.
- [29] Tian J, Lou Y L, Gao Y, et al. Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(5): 523–532.
- [30] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91–99.
- [31] Zhou H, Fang H, Mooney S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. Geoderma, 2016, 266:

- 66–74.
- [32] 李奕, 刘玲玲, 房焕, 等. 长期施肥对水稻土碳氮矿化与团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 451–457.
- [33] Liu K L, Li Y Z, Zhou L J, et al. Comparison of crop productivity and soil microbial activity among different fertilization patterns in red upland and paddy soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 262–267.
- [34] 杨文静, 张树兰, 杨学云. 不同管理措施土娄土无机碳储量及其与有机碳含量的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 74–82.
- [35] Zhang P P, Xu S Z, Zhang G J, et al. Carbon cycle in response to residue management and fertilizer application in a cotton field in arid Northwest China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(5): 1103–1119.
- [36] Li R, Tao R, Ling N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 30–38.
- [37] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1168–1174.
- [38] 刘红梅, 安克锐, 王慧, 等. 不同施肥措施对华北潮土区玉米田土壤微生物碳源代谢多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2336–2344.
- [39] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980—2000年中国耕作土壤有机碳的动态变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 123–130.
- [40] 董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1290–1298.
- [41] 朱利群, 王春杰, 陈利根, 等. 长江下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1249–1261.
- [42] de GRAAFF M A, van GROENIGEN K J, Six J, et al. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2077–2091.
- [43] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, et al. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: A quantitative meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 396–424.
- [44] Feng Z Z, Wang S G, Szantoi Z, et al. Protection of plants from ambient ozone by applications of ethylenediurea (EDU): A meta-analytic review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(10): 3236–3242.
- [45] Chen H H, Li X C, Hu F, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2956–2964.
- [46] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978–988.
- [47] Ning C C, Gao P D, Wang B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1819–1831.
- [48] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta 分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 99–107.
- [49] 李金全, 李兆磊, 江国福, 等. 中国农田耕层土壤有机碳现状及控制因素[J]. 复旦学报(自然科学版), 2016, 55(2): 247–256, 266.
- [50] 赵家臻, 王爱慧, 王会军. 中国地区土壤湿度记忆性及其与降水特征变化的关系[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 799–818.
- [51] 陈瑞州, 李静, 范家慧, 等. 不同施肥配比对芒果园土壤养分、微生物数量和酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(6): 1055–1060.
- [52] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995–3004.
- [53] 崔宏浩, 朱青, 陈正刚, 等. 酒糟沼渣对辣椒产质量及土壤养分的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(3): 519–525.