

长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响*

孟 磊^{1,2} 蔡祖聪¹ 丁维新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 华南热带农业大学农学院, 海南儋州 571737)

摘 要 利用长期定位试验研究有机肥、化肥以及有机肥和化肥混合施用对耕层土壤有机 C 储量变化和作物固定 C 的影响。处理包括化学肥料 NPK 不同组合 NPK、NP、NK、PK、全部施用有机肥(OM)、化学肥料氮和有机肥氮对半施用(1/2OM)及不施肥(CK)七个处理。均衡施用 N、P 和 K, 显著提高土壤有机 C 储量, 而养分缺乏的施肥, 土壤有机碳大量损失。抵消 N₂O 排放后, 只有外源有机碳输入的 OM 和 1/2OM 具有净的碳固定。土壤有机碳储量变化(Y)与土壤有机碳输入量(X)符合线性方程 $Y = 1.3231X - 1942.7$ ($r = 0.9840$, $n = 7$)。作物固定碳量和可以返还到土壤的根茬和秸秆中有机碳量都以 NPK、NP 和 1/2OM 施肥处理最多。若固定于根茬和秸秆的碳返还到原施肥土壤, 则这些处理的土壤有机碳储量最多。但从经济效益考虑, 最佳的施肥方式为有机和化学肥料配合施用。

关键词 长期定位试验; 土壤 C 储量; 全球变化

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

自然植被生长的土地被农用后, 导致土壤储存的有机碳大量损失而成为大气 CO₂ 重要源。据估算全球因土地利用方式变化损失的有机碳在 41Pg ~ 55Pg(1 Pg = 10¹⁵g) 之间^[1,2]。土壤有机 C 收支取决于土壤 C 输入和输出的平衡。植物生物量输入减少和农业管理活动干扰等加速土壤有机质分解是导致土壤有机 C 降低的主要原因^[3]。

N 是限制净初级生产力的重要因素^[4]。氮肥的投入促进作物产量提高使得返回农田的作物残留物增加。以 NO_x 和 NH₃ 形式逸出农田生态系统的氮, 随干湿沉降到发射源的附近, 同样导致初级生产力的提高^[5,6]。N 肥施用改善土壤有机物质, 增加土壤中 C 的存留时间^[7,8]。但是氮的施入促进 N₂O 排放。近 50 年来, 农田土壤中 N₂O 排放量与施入土壤的氮肥增量趋势一致^[9]。

秸秆可以作为土壤的改良物质并具有作物所需 N、P、K 以及所有必需微量养分元素^[10]。中国 1 亿 hm² 耕作土壤大约产生 0.6 Pg a⁻¹ 的秸秆。20 世纪 80 年代每年高达 80% 的秸秆被在田间或用作燃料燃烧^[11]。然而随着环保意识的增强和化石燃料如

煤和天然气在农村的推广, 用作燃料的秸秆变得越来越少。以秸秆为原料制成堆肥施入到农田土壤中是秸秆燃烧的有效替代途径。堆肥的施入提高土壤有机碳和氮含量^[12,13]。然而, 不少研究者报道, 土壤有机碳含量与 N₂O 生成量正相关^[14~16]。

这些研究表明, 农田土壤施用化学氮肥和施入有机肥增加了土壤固定碳而有利于降低大气 CO₂ 浓度, 但由于土壤碳的增加促进 N₂O 排放而降低了固定碳的效果。目前, 针对于施肥对土壤有机 C 含量的影响研究多与土壤肥力相关, 大都忽视了 N₂O 的排放, 其结果只能是表观碳固定, 只有去除 N₂O 的增温效应后才能真正体现土壤固定碳对减缓温室气体的作用。作物固定碳也是农田生态系统碳储量组成的一部分。固定于作物中未分解的作物残体含有的碳被认为是大气碳“汇”的组成部分。

我们利用布置于中国科学院封丘农业生态试验站内的“土壤养分循环和平衡的长期定位试验”, 对化学氮肥、有机肥料以及化学氮肥和有机肥料混合施用下农田土壤中碳储量变化以及作物固定 C 进行了研究, 结合 N₂O 排放情况, 评价不同施肥对农

* 国家杰出青年基金(40125004)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-05)资助

作者简介: 孟 磊(1973~), 男, 中国科学院南京土壤研究所博士生, 从事农田土壤碳氮循环与温室气体排放研究

收稿日期: 2004-07-12; 收到修改稿日期: 2005-01-24

田土壤净固定碳及作物固定碳的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄淮海平原内,土壤类型为黄河沉积物发育而成的潮土。该区属半干旱、半湿润的暖温带季风气候,年均降水量 605mm,年均温度 13.9℃。长期定位试验开始于 1989 年秋季,采用夏玉米—冬小麦的轮作方式。试验开始时土壤有机碳 5.83 g kg^{-1} 、全 N 0.445 g kg^{-1} 、全 P (P_2O_5) 9.51 g kg^{-1} 、速效 K (K_2O) 78.8 g kg^{-1} , pH 8.65。土壤缺 N 和 P,但富 K。

1.2 试验设计

试验包括:(1)化学肥料 NPK(NPK)、(2)化学肥

料 NP(NP)、(3)有机肥料氮和化肥氮各半(1/2OM)、(4)有机肥(OM)、(5)化学肥料 PK(PK)、(6)化学肥料 NK(NK)和(7)不施肥(CK)共 7 个处理,每处理 4 次重复。随机区组排列。化学氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。有机肥以粉碎的小麦秸秆为主,加入适量的饼肥堆制发酵而成,以等量氮为标准。有机肥中磷钾不足的部分由化学磷肥和钾肥补充至足量,OM 和 1/2OM 添加化肥 P 和化肥 K 的量分别为 45 kg hm^{-2} 、 115 kg hm^{-2} 和 20 kg hm^{-2} 、 80 kg hm^{-2} ,OM 和 1/2OM 每年随有机肥进入土壤的有机碳量大约分别为 $8\ 077 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $3\ 643 \text{ kg hm}^{-2}$ 。具体施肥量和施肥时间见表 1。

表 1 试验田肥料用量与施肥时间

Table 1 Fertilization rate and timing in the experiment

作物 Crop	施肥时期 Fertilization time	氮肥 N fertilizer (N kg hm^{-2})	磷肥 P fertilizer ($\text{P}_2\text{O}_5 \text{ kg hm}^{-2}$)	钾肥 K fertilizer ($\text{K}_2\text{O kg hm}^{-2}$)
玉米 Maize	基肥(6月上旬) Basal fertilization (early Jun.)	90	75	150
	追肥(7月下旬) Topdressing (Late Jul.)	60	0	0
小麦 Wheat	基肥(10月上旬) Basal fertilization (early Oct.)	60	60	150
	追肥(3月上旬) Topdressing (early Mar.)	90	0	0

1.3 土壤和植株样品采集及分析

试验小区设置及田间管理在文献[17]有详细报道。土壤样品分别于 1989 年和 2002 年小麦种植前,用土钻采集耕层(0~20cm)土壤,自然风干处理后采用重铬酸钾容量法分析土壤有机碳(该值乘以 1.724 即是土壤有机质含量)。植株样的采集于收获前进行。小麦植株采用多点取样,每个小区采集 1 kg 左右。玉米每个小区采集 5 株,皆连根拔起,人工脱粒,籽粒和秸秆分开,风干粉碎后采用与土壤样品相同的方法测定植物样品碳含量。定位试验从 1989 年开始直至 2002 年,共 13a 时间。植株数据采用 13a 的平均值。

1.4 N_2O 的采集及分析

采用静态密闭箱技术采集田间 N_2O ,密闭箱参照文献[18]设计而成。种子播下后,即在各小区作物行间放置采样框(0.3m×0.3m),置于玉米/小麦

的两株/两行的中间部位,深度约为 5 cm。采气箱和采样框由 PVC 塑料制成。在箱顶中间部位有一硅胶塞制成的采气孔。样品在施肥后 7d 内每天进行一次采样,降雨或灌溉后连续采集 2~3 次,除玉米的成熟期每 7d 1 次以及小麦过冬期每 2 周 1 次外,其余时间为 1 周 2 次。采样时,采气箱置放于采样框架上,并用水密封,用 50ml 注射器从采集箱中部的采气孔处插入,来回抽动 3 次,接着抽出 20 ml 气体注入体积为 18 ml 真空瓶内。每箱气样采集 4 次,分别在箱子放入采气框后的 0、10、20 和 30 min 进行。

采集的样品立即带回实验室进行分析。 N_2O 的测定应用岛津气相色谱分析仪(Shimadzu GC-14B)进行。检测器为 ^{63}Ni 电子捕获检测器(ECD)。色谱柱为 80/100 目 Porapak Q 的填充柱。进样器、检测器以及填充柱的温度分别为:100℃、300℃和 65℃。氮

甲烷为载体(95% 氙气 + 5% 甲烷),流速为 40 ml min⁻¹。高纯氮气作为反吹气。N₂O 的保留时间为 3.7 min。N₂O 标准气体由日本国家农业环境研究所提供。通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体的浓度。

N₂O 通量计算公式为:

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中, F 为 N₂O-N 排放通量,单位为 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下 N₂O-N 密度,值为 1.25 kg m⁻³; V 是采气箱内有效空间体积(m³); A 为采气箱覆盖的土壤面积(m²); Δc 为气体浓度差($\mu\text{L L}^{-1}$); Δt 为时间间隔(h); T 为采样时箱内温度(°C)。

1.5 土壤 N₂O 累积排放量的计算

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

M 为 N₂O 累积排放量,单位为 N₂O-N kg hm⁻² h⁻¹; F 为 N₂O 排放通量,单位为 N₂O-N kg hm⁻² h⁻¹; i 为采样次数; t 为采样时间即播种后天数(d)。

2 结 果

2.1 施肥对土壤有机 C 储量的影响

根据 2002 年小麦种植前耕层土壤(0~20 cm)有机 C 含量和土壤容重以及 1989 年秋试验初始时有机 C 含量和土壤容重计算出 13a 耕层土壤有机 C 收支状

况^[19]。结果表明(表 2),均衡施肥有利于土壤有机碳储量的增加。而有外源有机碳加入的有机肥处理效果显著高于化学肥料,有机肥用量的差异也显著影响着有机碳储量的增加。反之养分缺乏的 NK、PK 和不施肥 CK 处理下有机碳大量损失。土壤有机碳储量增加可以抵消因 N₂O 排放产生的温室效应。根据 IPCC^[20]的结果,百年尺度下,以 1mol CO₂ 的增温潜能为 1, N₂O 为 296。以我们田间测定 N₂O 年排放量为依据,计算出 13a 来不同施肥的农田耕层土壤对大气 CO₂ 的作用(表 2)。OM 和 1/2OM、NPK 和 NP 等由于耕层土壤有机碳储量的增加,可以抵消 N₂O 排放产生的温室效应,但处理间却存在着较大的差异。OM 耕层土壤碳储量的净增加量达到 8731 kg hm⁻²,远高于 1/2OM 的 3 934 kg hm⁻²,依据碳“汇”的标准判断,耕层土壤充当着大气碳“汇”的功能,而且这种“汇”的功能随着农业的持续经营还将继续存在。而 NPK 耕层土壤有机碳增加不能完全抵消 N₂O 排放所产生的温室效应,表现为大气温室气体的源,13a 来向大气贡献了相当于 CO₂-C 的量为 236 kg hm⁻²; NP 尽管仍担当着汇的功能,但量很小。而对于 NK、PK 和 CK,由于耕层有机碳储量的降低不但不能抵消土壤 N₂O 排放所产生的温室效应,相反还因耕层土壤有机碳损失加剧了温室气体的效果。其中 NK 高于 PK,表明当地施用 P 肥减轻农业土壤对大气温室效应气体源的贡献。

表 2 耕层土壤有机 C 累积量及其相应的 N₂O 量

Table 2 Accumulation of soil organic C in plough layer (kg hm⁻²) and corresponding flux of N₂O emission

处理 Treatment	有机 C 累积量 Accumulation of organic carbon (kg hm ⁻²)	N ₂ O 排放量 Flux of N ₂ O emission (N ₂ O-N kg hm ⁻² a ⁻¹)	净温室效应 Net greenhouse effect (C kg hm ⁻²)
OM	10 149 ± 590a	0.86	8 731
1/2OM	5 286 ± 648b	0.82	3 934
NPK	1 034 ± 428c	0.77	- 236
NP	1 011 ± 329c	0.59	38
NK	- 2 822 ± 147e	0.59	- 3 792
PK	- 650 ± 474d	0.14	- 881
CK	- 2 618 ± 411e	0.15	- 2 865

注:列中不同字母代表差异达到 0.05 差异显著水平。“+”为固定 C,“-”为释放 C。

净温室效应 = 有机碳累积量 - 13 × 296 × N₂O-N 排放量 / 14 × 44 Note: The different letters that follow the digits indicate significant difference at p = 0.05. “+” means fixation of carbon and “-” means release of carbon. Net greenhouse effect = Accumulation of organic carbon - 13 × 296 × amount of N₂O-N emitted / 14 × 44

2.2 施肥对作物固定大气 CO₂ 的影响

植物光合作用是大气 CO₂ 转变成有机碳化合物的关键过程,由此开始了 C 在生态系统中的循环。表

3 列出了不同施肥处理下进入作物中 C 的年均量。对于玉米和小麦,化学肥料的组合: NPK 和 NP 以及有机肥和无机肥配合的 1/2OM 处理作物固定碳总

量最高,NPK、NP 和 1/2OM 三者间的差异不显著,但显著高于施用有机肥处理(OM)。而养分缺乏的NK、PK 和 CK 的作物固定 C 量远低于上述 4 处理。

籽粒中的碳含量和秸秆中的碳含量占作物碳固定总量的比例因施肥而异。提供均衡 N、P 和 K 养分的施肥,籽粒碳含量的比例高于养分不足的施肥处理。而提供等量 N、P 和 K 前提下,化肥 NPK、NP 和化肥和有机肥配合(1/2OM)施用的作物籽粒碳含量高于有机肥(OM)的。NPK、NP 和 1/2OM 的玉米籽粒含碳量分别占作物固定碳总量的 41.92%、42.19% 和 42.19%,而 OM 为 39.57%,养分缺乏的处理 PK、NK 和 CK 的比例更少,分别为 29.86%、25.61% 和 25.00%,小麦具有和玉米相似的规律,NPK、NP、1/2OM、OM、PK、NK 和 CK 等处理籽粒含碳量占小麦固定碳总量分别为 39.26%、40.00%、39.40%、38.63%、37.15%、33.57% 和 34.38%。而秸秆碳含量与籽粒碳含量结果相反,养分不足的施肥处理,秸秆碳相对含量高于均衡施肥。而提供等

量 N、P 和 K 的处理,OM 秸秆碳的相对含量高于 NPK、NP 和 1/2OM。因此均衡施用化肥或化肥与有机肥配合施用,作物固定碳总量最多,并且因籽粒被收获而离开了农田系统,滞缓籽粒含碳进入碳循环的速率;相反,养分供应不足的施肥不但固定碳总量少,而且分配到秸秆中的碳相对较多,对于降低大气碳的作用相对弱于均衡施肥的处理。

作物向土壤输入有机碳的方式有两种,一是作物生长期间的凋落物及收获后归还的秸秆和根茬,二是作物生长期根系释放的有机物质,即根际沉积。我们可计算出的只有作物通过根茬输入的碳量(表 3)。通过根茬输入到土壤的有机碳的比较结果也是以化学肥料(NPK、NP)和有机肥料和化学肥料配合(1/2OM)施用的处理最多,有机肥(OM)次之,不施肥(CK)和养分缺乏的施肥处理(NK 和 PK)最少。因此从作物固定碳和通过根茬输入到土壤碳的数量考虑,以 NPK、NP 和 1/2OM 最多,OM 次之,CK 和 NK 及 PK 的量最少。

表 3 作物年均固 C 量

Table 3 Amount of carbon fixed by the crop and distribution of carbon in different organs of the crops(C kg hm⁻² a⁻¹)

作物 Crop	处理 Treatment	籽粒碳量 Amount of carbon in seed	秸秆碳量 Amount of carbon in straw	根茬碳量 Amount of carbon in stubble	合计 Total carbon
玉米 Maize	OM	2 172 ± 18a	2 539 ± 61a	777 ± 6b	5 489 ± 72a
	1/2OM	2 675 ± 37b	2 707 ± 27b	957 ± 13a	6 340 ± 35b
	NPK	2 717 ± 17b	2 791 ± 61b	972 ± 12a	6 481 ± 103b
	NP	2 680 ± 33b	2 686 ± 82b	959 ± 12a	6 352 ± 120b
	NK	341 ± 11c	869 ± 34c	122 ± 9c	1 332 ± 35c
	PK	528 ± 26d	1 048 ± 38d	189 ± 4d	1 768 ± 60d
	CK	301 ± 26c	793 ± 54 c	108 ± 9d	1 204 ± 88c
小麦 Wheat	OM	1 415 ± 32a	1 694 ± 28a	554 ± 13b	3 663 ± 70a
	1/2OM	1 826 ± 28b	2 091 ± 46b	714 ± 11a	4 632 ± 85b
	NPK	1 873 ± 13c	2 162 ± 9b	733 ± 5a	4 770 ± 18b
	NP	1 849 ± 15bc	2 048 ± 25b	723 ± 6a	4 621 ± 41b
	NK	240 ± 5d	380 ± 18c	173 ± 7c	715 ± 22c
	PK	441 ± 17e	572 ± 14d	94 ± 2d	1 187 ± 38d
	CK	229 ± 16d	347 ± 21c	90 ± 6d	666 ± 43c

注:列中不同字母代表达到 0.05 显著差异 Note: The different letters that follow the digits indicate significant difference at $p = 0.05$

3 讨论

3.1 土壤有机碳储量与碳输入

联合国气候变化框约(UNFCCC)把温室气体

“汇”定义为从大气中清除温室气体的过程、活动和机制。按照 UNFCCC 对温室气体“汇”的定义,土壤包括农业土壤只要其中碳储存的增加都可以认为起到了碳“汇”的作用。在 IPCC 1996 年更新的指南中,在“土地利用变化和森林”一章也增加了一个新

的子项,即“矿质土壤碳贮量的变化”,这是一次较大的变化,使大气“汇”概念逐渐演变为“碳贮量变化”。这就为通过农田管理措施的实施使得农田土壤碳贮量增加而使之成为大气 CO₂“汇”提供了理论依据。

国内的很多研究者对不同土壤类型、气候条件和利用方式下的施肥方式进行了研究,结果大都表明了有机肥或有机肥和化肥的配合施用能显著提高土壤有机 C 含量^[21,22],而单独施用化学肥料所得出的结果则不尽相同,马成泽等^[21]和祝华明等^[22]认为化肥施用只能使土壤有机碳保持现有水平或略有下降,而张付申^[23]则认为在一定程度上提高有机碳含量。肥料的施用改变了土壤容重。土壤碳储量是碳含量与容重的函数。由于他们没有提供土壤容重指标而无法与我们的结果进行碳储量的比较。施入有机质和加强养分管理可以维持或提高土壤有机碳储量^[24-26]。

本研究结果同样证实了施用有机肥或有机肥和化学肥料配合可以提高土壤有机 C 储量,同样均衡施用化学肥料对于土壤有机碳储量的增加也有一定的促进作用。而养分缺乏的土壤其中的有机碳大量损失。有效的养分管理,促进作物产量增加,提高了返还土壤的作物残余物量而实现土壤碳储量的增加^[27-31]。本研究中,NPK、NP 和 1/2OM 的生物产量最高,由根茬而归还到土壤有机碳量亦是最多。但是如果考虑到外源碳的输入,则输入到土壤有机碳量的高低顺序为 OM > 1/2OM > NPK ≈ NP > PK > NK ≈ CK,可计算碳输入量(根茬碳 + 有机肥碳)分别为 9 408 kg hm⁻¹ a⁻¹、5 315 kg hm⁻² a⁻¹、1 705 kg hm⁻² a⁻¹、1 682 kg hm⁻² a⁻¹、362 kg hm⁻² a⁻¹、216 kg hm⁻² a⁻¹和 198 kg hm⁻² a⁻¹。土壤有机碳储量增加与此变化的规律基本一致。通过相关分析,发现线性方程 $Y = 1.3231X - 1942.7$ ($r = 0.9840, n = 7$) 能很好表达土壤有机碳储量变化(Y)与碳输入量(X)的关系。Graham 等^[32]发现,表层以下 10cm 土壤有机 C 储量随作物残留物输入量增加而提高。因此在当地的管理条件下,农田土壤有机碳储量取决于碳输入量。Hakamata 等^[33]认为管理方式的改变可以使陆地生态系统成为大气 CO₂ 的汇。本研究也证实了这一点,即增加土壤碳输入量是增加土壤有机碳储量的关键。Kapkiyai 等^[34]的长期试验表明,土壤有机 C 随耕作年限的延长而降低。其中以单施化肥处理土壤有机 C 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%,化肥和有机肥结合施用加上秸秆还田有机 C 损失最少。造成

这一现象的主要原因是由于他们选择自然林地作为试验地,林地农用后,因耕作及碳输入量少于原林地土壤而导致土壤有机 C 的损失。但碳输入多的土壤碳损失少,从反面证实了碳输入对有机 C 储存的作用。

3.2 农田生态系统固定碳的潜力

农田管理措施不能无限增加土壤有机碳储量。当土壤碳输入与输出相等时土壤有机碳储量就达到一个新的平衡^[35]。新的平衡取决于采用的管理措施,土壤类型和气候条件。从上述有机碳储量(Y)与碳输入量(X)的关系方程 $Y = 1.3231X - 1942.7$ 可看出土壤有机碳储量变化与碳输入量随碳输入量的增加而升高。因此保持高的碳输入可能提高了土壤有机碳储量的平衡值。土壤有机碳达到平衡时,几乎不再有有机碳的累积。因此通过增加土壤有机 C 储量来抵消因 N 肥施用而带来的 N₂O 排放而产生的温室效应也就存在着一个上限。当 N₂O 累积排放量的增温效应与土壤增加的 C 储存量所抵消的增温效应相当时,农田土壤从温室气体的“汇”转向温室气体“源”。因此从控制温室效应考虑,不但要求人们通过农业措施的实施来最大限度地提高土壤有机 C 的储量,同时也要从农业措施上着手以减少 N₂O 排放,使土壤从温室效应的汇(CO₂ 固定和 N₂O 排放两者的净汇)转变成源的时间尽可能的延长。

植物光合作用是大气 CO₂ 向有机碳化合物转化的关键过程,并由此开始了 C 在生态系统中的循环。植物碳很少,但它是农田生态系统有机碳输入的源头。增加农田生产力,增加并维持着高的作物碳储量,相对于低水平的生产力来讲,增加了植物中碳的储存;作物生产力的高低同时决定着土壤碳输入量,也就影响了土壤有机碳储量。

不同营养管理影响着作物固定转化大气 CO₂ 的能力,因而也影响着作物固定大气 CO₂ 的量。提供等量 N、P 和 K 营养下,小麦施用化学肥料,固碳总量高于施用有机肥。而徐琪^[36]对太湖地区稻麦系统的碳循环进行研究后发现,施用有机肥的小麦净固碳量高于施用化学肥料的处理。太湖地区土壤有机质水平高达 30 mg kg⁻¹,可以提供比化学氮肥较多的养分供给作物生长需要,而本研究中,OM 的有机质只有 15 mg kg⁻¹,矿化作用提供的养分少于施用化学肥料的处理。作物固定碳量上基本相等,但碳在植物各部位分配上有所差异。两地籽粒碳含量上接近,而本研究得出秸秆碳量低,根茬碳高。

在考虑作物固 C 总量的同时,还需分析作物各

部分的碳分配。一般只有作物籽粒碳进入社会生活领域,可以使其中的碳暂时脱离出碳循环,减缓了碳循环的速度,而有利于暂时性缓解其对全球变暖的贡献。从这方面考虑,均衡施用化学肥料或有机和化学肥料混施对缓解全球变暖的贡献更大,OM次之。在等量施用 N、P 和 K 时,OM 通过有机质的矿化作用来提供作物所需要的养分,在作物旺盛生长期,OM 提供的养分不能满足作物的需要,使得 OM 籽粒产量和籽粒含碳量受到影响;而化学肥料或化学肥料和有机肥料的配施由于氮肥的追施而能满足作物生长的需要。不考虑根系分泌物的前提下,作物可以输入到土壤的碳通过秸秆还田和根系实现。秸秆和根系含碳量仍以化学肥料或化学肥料和有机肥料混合施用的多,OM 次之。因此从作物固定 C 考虑,化学肥料或有机和化学肥料配合施用对减少大气 CO₂ 的贡献最大。如果把各施肥处理小区固定的秸秆碳返还到原处理,则化学肥料或有机和化学肥料配合施用的处理归还到土壤的碳量最高。根据上述对碳输入量和土壤有机碳储量的关系,则土壤碳储量最高的应该是化学肥料或有机和化学肥料配合施用。由农田土壤碳和生物碳构成农田生态系统储存的碳仍应为化学肥料或有机和化学肥料配合施用的处理,从经济考虑则应选择有机和化学肥料处理的施肥类型。

Lin 等对中国农田生态系统有机 C 的产生、消耗和储存情况统计发现中国土壤 C 储量占全球总储量的 12%。从 1990 到 2000 年间,中国农田土壤是温室气体 CO₂ 的汇而不是源^[37]。这主要是由于我国 1/2 以上的国土为低或贫有机 C 的土壤。造成这一结果的原因归因于我国农耕历史悠久,传统精耕细作的农田管理措施增加了土壤有机质的分解,作物秸秆因作为燃料燃烧而使还田数量减少,土地利用改变过程中缺乏因地制宜的措施和科学合理的规划等导致我国土壤资源受到严重破坏,致使总耕地中约有 1/3 为低产田,而 2/3 的中高产土壤也由于常年缺少培肥使肥力严重损耗。据估算,如果中国土壤有机 C 提高 30%~40%,全国仅耕地就可增加有机 C 储量 1Pg^[38]。因此我国农田土壤固 C 潜力巨大。同时因为 C、N 存在着密切关系,也将导致土壤全 N 的增加。值得注意的是,储存于土壤中的有机碳是非永久性和可逆转的。如果增加碳储存的措施中断,先前储存于土壤中的碳会重新以 CO₂ 形式返回到大气中^[39,40]。

参考文献

- [1] Houghton R A, Skole D L. Carbon. *In*: Lal R, Kimble J M, Levine E, *et al.* eds. *Soils and Global Change*. Boca Raton: CRC/Lewis Publishers, 1995. 131 ~ 142
- [2] Cole C V K. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. *In*: Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H. eds. *Climate Change 1995—Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Intergovernmental Panel on Climate Change*. London: Cambridge University Press, 1996. 1 ~ 27
- [3] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils. *Science*, 2000, 284: 2095
- [4] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea—how can it occur. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87 ~ 115
- [5] Chapin F S. The mineral-nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11: 233 ~ 260
- [6] Bergh J, Linder S, Lundmark T, *et al.* The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 1999, 119: 51 ~ 62
- [7] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1988, 63: 433 ~ 462
- [8] Bryant D M, Holland E A, Seastedt T R, *et al.* Analysis of litter decomposition in an alpine tundra. *Canadian Journal of Botany—Revue Canadienne De Botanique*, 1998, 76: 1295 ~ 1304
- [9] Mosier A R, Kroeze C. Contribution of agro-ecosystems to the global atmospheric N₂O budget. *In*: Desjardins R L, Keng J C, Haugen-Kozyra K. eds. *Proceedings of the International N₂O Workshop on Reducing Nitrous Oxide Emissions from Agro-ecosystems*. Banff, Alberta, Canada, March 3 ~ 5, 1999. 3 ~ 15
- [10] Edmeades D C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: A review. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2003, 66: 165 ~ 180
- [11] Cheng H, He X W. *Handbook of Natural Resources in China*. Beijing: Science Press, 1990. 616 ~ 617
- [12] Keener H M, Dick W A, Hoitink H A J. Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. *In*: Power J F, Dick W A. eds. *Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal by-Products*. SSSA, Madison, WI, 2000. 315 ~ 341
- [13] Stratton M L, Recheigl J E. Organic mulches, wood products and composts as soil amendements and conditioners. *In*: Wallace A, Terry R E. eds. *Handbook of Soil Conditioners*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1998. 43 ~ 95
- [14] Bremner J M, Blackmer A M. Terrestrial nitrification as a source of atmospheric nitrous oxide. *In*: Delwiche C C. ed. *Denitrification, Nitrification and Atmospheric N₂O*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 1981. 151 ~ 170
- [15] Eaton L J, Patriquin D G. Denitrification in low bush blueberry soils. *Can J Soil Sci*, 1989, 69: 303 ~ 312
- [16] Iqbal M. Potential rates of denitrification in 2 field soils in southern England. *J. Agric. Sci*, 1992, 118: 223 ~ 227

- [17] 钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. 土壤学报, 1998, 35(3): 365 ~ 375. Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 365 ~ 375
- [18] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1990, 36: 599 ~ 610
- [19] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330 ~ 332. Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330 ~ 332
- [20] IPCC. *Climate Change 2001*. London: Cambridge University Press, 2001. 388
- [21] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布. 土壤学报, 1994, 31(1): 34 ~ 41. Ma C Z, Zhou Q, He F. Surplus-deficit distribution of organic carbon in soil under combined fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 34 ~ 41
- [22] 祝华明, 王美琴, 吴樟梅. 施肥对红砂田有机质及土壤养分演变与作物产量的影响研究. 土壤通报, 1995, 26(2): 76 ~ 77. Zhu H M, Wang M Q, Wu Z M. The effect of fertilization on organic matter and nutrient evolution in sandy loamy paddy soil and crop yield (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(2): 76 ~ 77
- [23] 张付申. 不同施肥对娄土和黄壤土易氧化态有机质稳定性的影响. 河南农业大学学报, 1996, 30(1): 80 ~ 84. Zhang F S. Effect of different application of fertilizers to Lou soil and Yellow loamy soil on the oxidable stability of soil organic matter (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural University*, 1996, 30(1): 80 ~ 84
- [24] Singh B, Singh Y, Maskina M S, *et al.* The value of poultry manure for wetland rice grown in rotation with wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 47: 243 ~ 250
- [25] Kumar V, Ghosh B C, Bhat R. Recycling of crop wastes and green manure and their impact on yield and nutrient uptake of wetland rice. *Journal of Agricultural Science*, 1999, 132: 149 ~ 154
- [26] Yadav R L, Yadav D S, Singh R M, *et al.* Long term effects of inorganic fertilizer inputs on crop productivity in a rice-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51: 193 ~ 200
- [27] Raun W R, Johnson G V, *et al.* Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 323 ~ 330
- [28] Huggins D R, Buyanovsky G A, Wagner G H, *et al.* Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: Effects of long-term crop management. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47: 219 ~ 234
- [29] Paustian K, Six J, Elliott F T, *et al.* Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 147 ~ 163
- [30] Smith P, Powlson D S, Glendining M J, *et al.* Opportunities and limitations for C sequestration in European agricultural soils through change in management. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* eds. *Management of Carbon Sequestration in Soil*. Boca Raton: CRC Press, 1997, 143 ~ 152
- [31] Fernandes E C M, Motavalli P P, Castilla C, *et al.* Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. *Geoderma*, 1997, 79: 49 ~ 67
- [32] Graham R J, Haynes J, Meyer H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 93 ~ 102
- [33] Hakamata T, Matsumoto N, Ikeda H, *et al.* Do plant and soil systems contribute to global carbon cycling as a sink of CO₂. Experience from research projects in Japan. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 287 ~ 293
- [34] Jane J Kapkiyai, Nancy K Karanja, *et al.* Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1777 ~ 1782
- [35] Paustian K J. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 147 ~ 163
- [36] 徐琪, 等编. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998. 55. Xu Q, *et al.* eds. *Rice Field Ecosystem of China* (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998, 55
- [37] Lin E D, Liu Y F, Li Y. Agricultural C cycle and greenhouse gas emission in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 295 ~ 299
- [38] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳—缓解全球变暖与提高土壤生产力. 土壤与环境, 2000, 9(4): 311 ~ 315. Yang X M. Carbon sequestration in farming land soils: An approach to buffer the global warming and to improve soil productivity (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4): 311 ~ 315
- [39] Stockfisch N, Forstreuter T, Ehlers W. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research*, 1999, 52: 91 ~ 101
- [40] Dick W A, Blevins R L, Frye W W, *et al.* Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern Corn Belt. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47: 235 ~ 244

CARBON CONTENTS IN SOILS AND CROPS AS AFFECTED BY LONG-TERM FERTILIZATION

Meng Lei^{1,2} Cai Zucong¹ Ding Weixin¹

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

(2 *College of Agriculture, South China University of Tropical Agriculture, Danzhou, Hainan 571737, China*)

Abstract A long-term stationary field experiment was carried out to study the effect of application of organic manure, chemical fertilizers or their mixture on soil carbon storage and carbon fixation by plants. The experiment was designed to have 7 treatments: organic manure (OM), half organic manure plus half fertilizer N (1/2OM), fertilizer NPK (NPK), fertilizer NP (NP), fertilizer NK (NK), fertilizer PK (PK) and control (CK). The treatments, supplied with balanced nutrients of N, P and K, showed a marked increase in the storage of soil organic carbon, while those deficient in nutrient supply a significant decrease. Only in Treatments OM and 1/2OM, where additional organic carbon was supplied, a net increase in organic carbon in the soil was observed. The relationship between the storage of organic carbon (Y) and the input of organic carbon (X) can be well described by the following linear equation: $Y = 1.3231X - 1942.7$ ($r = 0.9840, n = 7$). Treatments NPK, NP and 1/2OM were the highest in both crop carbon fixation and organic carbon contents in crop straws and stubbles that can be returned to the soil. So, if the fixed carbon in the straws and stubbles return to the soil, Treatments NPK, NP and 1/2OM would have the biggest storage of organic carbon in the experiment. However, the combined application of chemical fertilizer and organic manure is the optimal for agricultural field based on economic consideration.

Key words Long-term plot experiment; Soil carbon storage; Global change