

长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响*

王雪芬^{1,2} 胡锋^{1†} 彭新华² 周虎² 余喜初³

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 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)

(3 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘要 通过土壤有机质物理分组和室内培养的方法,研究了长期定位施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响。结果表明:平衡施肥(NPK, 2NPK)和施用有机肥(OM, NPKOM)显著提高玉米产量,降低产量年际变异系数,同时也显著提高了土壤有机碳(SOC)和活性有机碳(LOC)的含量。根据有机碳物理分组方法,将SOC分成五部分,其中,与矿物结合的有机碳占绝对优势,微团聚体中的粉黏粒(s+c_{mM})和大团聚体中的粉黏粒(s+c_M)分别占SOC的31%~53%和28%~38%,其次为微团聚体间的细颗粒有机质(iPOM)和微团聚体中的细颗粒有机质(iPOM_{mM}),分别占8%~15%和7%~21%,粗颗粒有机质(cPOM)仅占5%~12%。施有机肥(OM, NPKOM)显著提高了颗粒有机碳组分,包括cPOM, iPOM和iPOM_{mM}组分碳的数量,但是对矿物结合态碳(s+c_M, s+c_{mM})影响不明显。施无机肥对有机碳库组成(除s+c_{mM}外)影响不显著。在有机肥处理中(OM, NPKOM)土壤有机碳周转速率最快,相应的半衰期最短,是CK处理的0.47倍~0.70倍,是无机肥处理的0.11倍~0.95倍。原土有机碳周转时间与LOC/SOC呈显著正相关($r=0.66^*$)。研究表明平衡施肥和有机肥能提高土壤地力,同时还有利于土壤有机碳的积累。

关键词 长期定位施肥;有机碳库;周转率;物理分组

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

红壤是我国南方地区重要的土壤类型之一,面积达113万km²,占全国土地面积的11%。由于气候、降水等自然因素以及人为因素的影响,导致该土壤极易受到侵蚀,作物产量较低。大量研究证明,通过增加土壤有机碳(SOC)的含量以及提高土壤团聚体的稳定性,可以改善退化红壤的质量^[1-3]。

土壤有机碳作为土壤有机质的重要组成部分之一,在提高作物产量方面具有重要的作用^[4]。Wang等^[5]研究并分析了我国23个省市,耕种30年的16种主要类型土壤发现,无论水田还是旱地,长期施肥均有利于土壤有机碳含量的增加。尽管有关施肥对土壤有机碳含量和土壤结构影响的研究甚多,但这些研究主要针对的是土壤总碳库^[6-8],而有关长期施肥对土壤不同有机碳组分的影响报道较少^[9]。因此,本研究借助长期定位试验,对长期施肥条件下的红壤有机碳进行物理分组,分析不同土壤有机碳库大小,并通过恒温培养实验测定土壤

呼吸,计算不同土壤有机碳库SOC的周转速率,旨在探讨长期不同施肥制度下红壤旱地土壤有机碳库的变化及其周转规律。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

长期定位试验位于江西省进贤县江西省红壤研究所内(116°20'E, 28°15'N),该区属于亚热带季风气候,年均降雨量1727mm。年均温为17.7℃,其中1月平均温度5.5℃,7月平均温度29.9℃。试验开始于1986年,种植制度为早玉米-晚玉米-冬闲制。土壤母质为第四纪红黏土,分类上属于老成土(Soil Survey Staff, 1998),质地为粉砂质黏壤土。试前土壤基本性质为:pH(H₂O, 1:2.5)为6.0,有机碳含量为9.39g kg⁻¹,全氮、全磷、全钾分别为0.98、1.42和15.83g kg⁻¹,碱解氮、有效磷、速效钾

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B04)、中国科学院“百人计划”项目资助

† 通讯作者, E-mail: fenghu@njau.edu.cn

作者简介:王雪芬(1988—),女,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究。E-mail: yifutushu@163.com

收稿日期:2011-06-24;收到修改稿日期:2011-10-12

分别为 60.3、12.9 和 102 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验共设 10 个施肥处理: (1) 不施肥 (CK); (2) 施用氮肥 (N); (3) 施用磷肥 (P); (4) 施用钾肥 (K); (5) 施用氮、磷肥 (NP); (6) 施用氮、钾肥 (NK); (7) 施用氮、磷、钾肥 (NPK); (8) 施用 2 倍的

氮、磷、钾肥 (2NPK); (9) 施用氮、磷、钾肥同时施新鲜猪粪 (NPKOM); (10) 施新鲜猪粪 (OM)。肥料种类是尿素、钙镁磷肥、氯化钾和新鲜猪粪, 其中磷肥、钾肥和猪粪作为基肥, 氮肥用量的 2/3 为基肥, 1/3 为追肥。肥料分两季施用, 每季施用量如表 1 所示。小区随机排列, 3 次重复, 小区面积 22.22 m²。

表 1 供试土壤长期施肥试验的肥料投入量

Table 1 Fertilizer application rate for different fertilization treatments of the long-term fertilization experiment

处理 Treatments	每季的施肥量 Fertilizer application rate for each cropping (kg hm ⁻²)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	猪粪 Pig manure
CK	—	—	—	—
N	60	—	—	—
P	—	30	—	—
K	—	—	60	—
NP	60	30	—	—
NK	60	—	60	—
NPK	60	30	60	—
2NPK	120	60	120	—
NPKOM	60	30	60	1 500
OM	—	—	—	1 500

注: “—”表示 0; Note: “—” is 0

1.3 土壤样品采集与测定

于 2010 年 6 月采集 0~20 cm 耕层的土样, 每个小区按五点法采样并混匀, 将样品放入无菌袋尽快带回实验室。将土样风干后过 2 mm 筛备用。

有关项目测定均按常规方法^[10]进行。土壤有机碳 (SOC): H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法; 活性有机碳 (LOC): (1:3) H₂SO₄-(0.2 mol L⁻¹) K₂Cr₂O₇ 外加热法; 全氮: 半微量凯氏定氮法; 全磷: 氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法; 全钾: 氢氧化钠碱熔-火焰光度法; pH: 电位法 (H₂O, 1:2.5); 土壤阳离子交换量 (CEC): 乙酸铵法。

1.4 土壤有机质分组

土壤有机质的物理分组方法采用 Six 等^[11]和 Elliott 等^[12]的方法, 并略作修改 (图 1)。具体步骤如下:

称取 50 g 样品 (风干土, 并通过 2 000 μm 筛) 于 250 μm 筛子中, 并向筛子中加入直径为 4 mm 的玻璃珠 50 颗, 将筛子浸入适量的蒸馏水中 (以浸没

样品为宜), 左右震荡 50 次。将 <250 μm 的样品再通过 53 μm 的筛子进行湿筛处理, 方法类似, 无需再加入玻璃珠。保留在 250 μm 筛子上的物质为粗颗粒有机物 (cPOM, 250~2 000 μm), 保留在 53 μm 筛子上的物质为微团聚体 (mM, 53~250 μm), <53 μm 的组分为粉粒+黏粒 (s+c_M, <53 μm), 合称粉黏粒。将各组样品转移至铝盒中于 50℃ 下烘干, 称重。

称取上述微团聚体 (mM) 5 g (110℃ 烘干) 于 100 ml 离心管中, 加入相对密度为 1.85 g cm⁻³ 的 NaI 溶液 35 ml, 盖紧盖子, 上下倒置翻动 30 次, 之后再用 15 ml NaI 溶液冲洗离心管的盖子和内壁, 在 3500 r min⁻¹ 下离心 10 min。将上清液部分用 0.45 μm 滤膜过滤, 滤膜置于布氏漏斗 (接真空泵) 的玻璃滤器上, 先将 NaI 溶液过滤, 下接装 NaI 溶液的液瓶 (以便回收利用), 然后用蒸馏水冲洗滤膜上的样品 3~4 次, 该组分即为微团聚体间细颗粒有机物 (fPOM)。将重组部分移至 20 μm 筛子上, 用蒸馏水冲洗 3~4 次, 然后在 50 ml 浓度为 0.5% 的 HMP

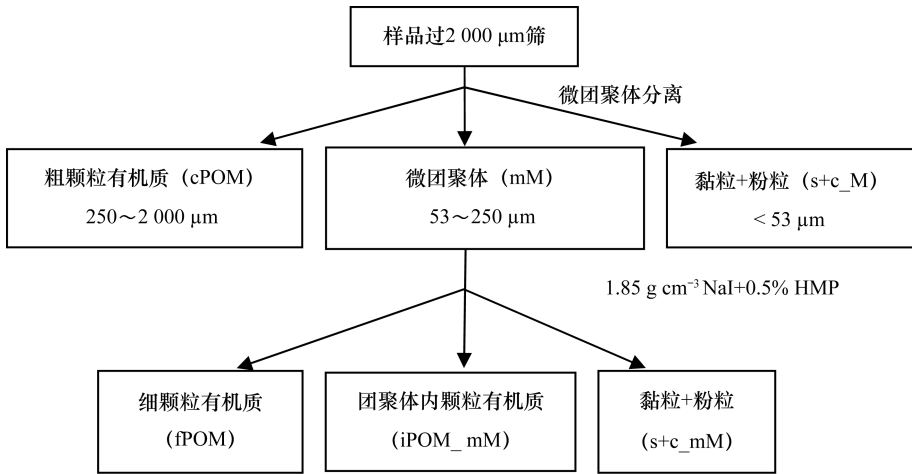


图1 团聚体有机质的物理分组流程(引自 Six 等^[11])

Fig. 1 Physical fractionation scheme to isolate organic matter fractions (modified from Six et al. ^[11])

注:HMP: hexametaphosphate, 六偏磷酸钠; cPOM: coarse particulate organic matter, 粗颗粒有机质 (250 ~ 2000 μm); s + c_M: silt plus clay fraction within macroaggregates, 大团聚体内粉粒和黏粒组分 (< 53 μm); mM: microaggregates within macroaggregates, 包被于大团聚体内的微团聚体 (53 ~ 250 μm); fPOM: fine inter-microaggregate POM, 微团聚体间的细颗粒有机质 (< 250 μm); iPOM_mM: fine intra-microaggregate POM within macroaggregates, 包被于大团聚体中微团聚体内的细颗粒有机质 (53 ~ 250 μm); s + c_mM: silt plus clay fraction within microaggregates occluded within macroaggregates, 包被于大团聚体中微团聚体内的粉粒和黏粒 (< 53 μm)

溶液中震荡 18 h (300 r min⁻¹)。分散后的重组通过 53 μm 的筛子, 即可分离得到微团聚体内细颗粒有机质 (iPOM_mM, 53 ~ 250 μm) 和微团聚体内粉黏粒 (s + c_mM, < 53 μm)。将分离出的上述各组分样品于 50 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干、称重, 进一步分析有机碳含量。

1.5 土壤有机碳半衰期

分别称取过 2 mm 筛的原土、53 ~ 250 μm 微团聚体 (mM) 和 < 53 μm 粉黏粒 (s + c_M) 30 ~ 40 g 于 50 ml 塑料瓶中, 将该塑料瓶和装有约 20 ml 蒸馏水的小塑料瓶, 以及装有 10 ml 0.1 mol L⁻¹ NaOH 的吸收瓶一并放入广口瓶中, 密封, 于 25 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内培养, 3 次重复。同时做空白试验, 即广口瓶中不放有土壤样品, 而其他均与试验组相同。在试验开始后 1、3、7、11、17、24、31、45 和 59 d 时更换吸收瓶, 用稀盐酸滴定法测定 NaOH 吸收的 CO₂。然后采用 Zimmerman ^[13] 提出来的生物碳一级矿化方程计算土壤有机碳半衰期:

$$\frac{dC}{dt} = -C_0k \quad (1)$$

式中, C 为有机碳含量, t 为时间, C_0 为 SOC 的初始含量, k 为有机碳的分解速率, 与时间具有如下关系:

$$\ln(-k) = m \ln(t) + b \quad (2)$$

式中, m 为斜率, b 为截距。将式 (2) 代入式 (1), 积分后可得到:

$$C_t = C_0 \left(1 - \frac{e^b}{m+1} t^{m+1} \right) \quad (3)$$

取 $C_t = C_0/2$, 进而可计算出土壤有机碳库的半衰期 ($t_{1/2}$):

$$t_{1/2} = \left(\frac{m+1}{2e^b} \right)^{1/(m+1)} \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 土壤有机碳库的半衰期与分解速率有关, 而与初始碳库大小无关。

1.6 数据统计

试验数据采用 SPSS 13.0 进行分析, 不同处理间差异的显著性检验 ($p < 0.05$) 采用 LSD 法。

2 结果与讨论

2.1 长期施肥处理对土壤基本性状和玉米产量的影响

长期不同施肥处理下红壤旱地土壤基本性状和玉米产量见表 2。经过 25 年的施肥, 所有处理土壤 pH 均明显降低。导致土壤酸化的原因很多, 其中有自然因素 (比如酸雨沉降) 和人为因素 (比如施肥)。如果将 CK 处理导致的土壤酸化看作是自然因素引起的, 那么, 25 年来 pH 下降了 2.02 个单位,

表 2 不同施肥处理对土壤基本理化性质和玉米年产量的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties and annual yields

处理 Treatments	pH	CEC (cmol kg^{-1})	SOC	LOC	TN (g kg^{-1})	TP	TK	玉米年产量 yields of corn (kg hm^{-2})	产量变异 系数 C. V. (%)
CK	3.98 ± 0.07 de	10.77 ± 0.40 c	7.98 ± 0.39 e	3.48 ± 0.21 d	1.03 ± 0.26 abc	0.56 ± 0.04 ef	12.98 ± 0.20 b	1 686 ± 662 g	39.25
N	3.64 ± 0.07 f	11.37 ± 0.35 c	8.82 ± 0.17 cde	4.34 ± 0.22 c	1.06 ± 0.19 abc	0.51 ± 0.03 f	12.99 ± 0.08 b	3 325 ± 1 623 ef	48.81
P	4.21 ± 0.06 c	11.23 ± 0.95 c	8.54 ± 0.07 de	4.43 ± 0.30 c	0.85 ± 0.04 c	0.68 ± 0.02 cde	13.45 ± 0.25 a	2 273 ± 1 511 efg	66.46
K	4.04 ± 0.02 d	10.93 ± 0.06 c	8.58 ± 0.72 de	4.04 ± 0.14 c	0.88 ± 0.04 c	0.69 ± 0.09 cd	13.46 ± 0.33 a	2 562 ± 1 823 fg	71.16
NP	3.89 ± 0.11 e	11.57 ± 0.64 bc	8.93 ± 0.50 cde	4.27 ± 0.22 c	0.91 ± 0.09 bc	0.69 ± 0.06 cd	12.85 ± 0.21 b	4 549 ± 1 405 d	30.88
NK	3.68 ± 0.07 f	11.53 ± 0.15 bc	9.56 ± 1.09 bc	4.41 ± 0.15 c	0.95 ± 0.01 abc	0.64 ± 0.08 de	13.21 ± 0.26 ab	5 801 ± 1 861 c	32.09
NPK	3.90 ± 0.07 e	11.53 ± 0.23 bc	9.87 ± 0.50 bc	4.24 ± 0.33 c	1.04 ± 0.13 abc	0.68 ± 0.10 cde	13.53 ± 0.38 a	6 967 ± 1 723 b	24.73
2NPK	3.70 ± 0.03 f	12.40 ± 1.01 b	9.76 ± 0.80 bc	4.43 ± 0.03 bc	0.97 ± 0.10 abc	0.78 ± 0.02 c	13.57 ± 0.30 a	9 658 ± 2 055 a	21.28
NPKOM	4.83 ± 0.03 b	13.97 ± 0.47 a	12.10 ± 0.91 a	5.16 ± 0.34 a	1.17 ± 0.24 a	1.59 ± 0.08 a	13.56 ± 0.22 a	9 897 ± 2 216 a	22.39
OM	5.07 ± 0.05 a	14.03 ± 0.45 a	10.72 ± 0.89 b	4.88 ± 0.43 ab	1.14 ± 0.05 ab	1.36 ± 0.13 b	13.53 ± 0.28 a	6 855 ± 2 323 bc	33.88

注: 表中同一列不同字母表示各处理间分析差异显著 ($p < 0.05$) ($n = 3$)。Note: The different letters within the same column mean significant differences at 0.05 level ($n = 3$)

而施肥处理在此基础上引起的 pH 变化则为人为因素。经分析发现,施 N 肥(N、NP、NK、NPK、2NPK)处理 pH 均较 CK 的低(低 0.08 ~ 0.34),而施用 P、K 和 OM 的处理, pH 均较 CK 的高(高 0.06 ~ 1.09)。可见,近 25 年来,造成土壤酸化的主要原因是自然因素,占了 86%~96%,而施氮肥的作用仅为 4%~14%。而单施 P 肥未造成酸化,主要是当地施用钙镁磷肥。土壤全氮和全磷含量仅在施有机肥的情况下有所提高(分别提高 16.3%~19.4%和 0.7%~12.0%),而其他施肥处理中均下降,全钾含量较试前均有所降低(下降 14.3%~18.8%),同蔡泽江等^[14]研究结果一致。有机肥处理的 CEC 显著高于其他各处理,除 2NPK 处理外,其他施化肥处理同不施肥处理间没有显著差异,这与其他研究者对红壤的研究结果基本一致^[15-17]。有机肥处理对全钾的影响并不明显,这可能是由于有机肥自身含钾量低的缘故。

与试验开始前相比(9.39 g kg⁻¹),平衡施用化肥处理(NPK、2NPK)和施有机肥处理(NPKOM、OM)土壤有机碳含量提高了 3.9%~28.9%,NK 处理变化不大;其他各处理土壤有机碳含量下降了 4.9%~15.0%,其中 CK 处理下降幅度最大。活性有机碳由于试验前缺数据而无法进行比较,但其含量在 NPK、2NPK、NPKOM 和 OM 等处理中显著高于 CK 处理($p < 0.05$)。

长期不同施肥处理对玉米产量的影响较大,25 年玉米累计产量(1986 ~ 2010)均以 2NPK 和 NPKOM 处理为最高,玉米产量的顺序:平衡施肥处理(NPK、2NPK) > 二元施肥处理(NP、NK) > 一元施肥处理(N、P 和 K) > CK 处理。对不同施肥处理下双季玉米产量的变异情况分析表明,CK 处理和一元施肥处理玉米产量变异系数较大,早玉米平均为 60.6%,晚玉米为 63.7%;其次为二元施肥,而平衡施肥以及施有机肥的处理玉米产量变异系数均较低(21.3%~38.7%)。经统计分析发现,产量与变异系数呈极显著负相关($r = -0.84^{**}$),SOC 和 LOC 均与玉米年均产量呈显著正相关(相关系数分别为 $r = 0.88^{**}$ 和 $r = 0.74^{*}$)。因此,最佳施肥方式应为平衡施肥以及化肥配施有机肥,Dawe 等^[5,18-19]的研究也得出类似的结论。有研究表明,有机肥与化肥配合施用,还可减轻化肥对土壤物理性质的不良影响,是提高土壤肥力和实现作物增产的有效途径^[20-21]。由于人为施用有机肥不但直接增加了土壤有机碳含量,还可以通过促进作物根系生长间接

增加向土壤中归还有机碳的量^[8],从而提高了土壤肥力。

2.2 长期施肥处理对土壤有机碳库的影响

原土经过物理分组后,分成 5 个土壤有机碳库(图 2)。在土壤各有机碳库组成中,与矿物结合的有机碳占绝对优势,其中 s+c_mM 和 s+c_M 中的有机碳组分分别占土壤有机碳库的 31%~53%和 28%~38%,其次为 fPOM 和 iPOM_mM,分别占 8%~15%和 7%~21%,cPOM 的有机碳组分最低,仅占 5%~12%。从而,微团聚体的有机碳(fPOM、iPOM_mM 和 s+c_mM 之和)占土壤总有机碳的 50%以上(57%~66%)。

施肥制度明显改变了各土壤有机碳库的组成。与 CK 相比,有机肥处理显著增加了 184%~225%的 iPOM_mM 组分碳;对矿物结合态的有机碳没有明显的影响,减少了 5%的 s+c_mM 的有机碳,而略微增加了 1%~2%的 s+c_M。各无机肥处理也有类似的趋势,但是一元施肥提高的幅度低于二元施肥,而二元施肥低于平衡施肥。值得注意的是,无机肥处理显著降低了 s+c_M 组分碳的含量(19%~39%)。相关分析结果表明,原土总有机碳与 cPOM 有机碳组分以及 mM 有机碳组均呈极显著正相关(相关系数分别为 $r = 0.88^{**}$ 和 $r = 0.81^{**}$),而与 s+c_M 组分碳相关性不显著($p > 0.05$)。

由此可见,与不施肥处理相比,各无机肥处理对旱地红壤不同有机碳库(除 s+c_mM 外)无显著影响;而有机肥处理对 iPOM_mM 碳库的影响最大。很多研究报告,有机碳在土壤中受团聚体的保护,新鲜残留物的输入导致有机物质和土壤颗粒进入微团聚体中^[22-23],因此有机肥处理可以显著增加 iPOM_mM 的含量。cPOM 属于被保护的大团聚体内微团聚体之间的粗颗粒有机质,较易被分解,同时又由于深受耕作等人为因素的干扰,造成其在土壤有机碳库中含量最低。

2.3 长期施肥处理对土壤有机碳周转速率的影响

经过 59 d 的室内好气培养,原土(未分级的土壤)中通过呼吸释放的 CO₂-C 的累积量达到 79.3 ~ 270.1 mg kg⁻¹,微团聚体中为 94.3 ~ 358.3 mg kg⁻¹,而粉黏粒中只有 58.8 ~ 205.9 mg kg⁻¹。从表 3 可以看出,同一施肥处理中,不同土壤有机碳库的周转速率以及半衰期是不同的;而同一粒级土壤有机碳库中,不同施肥处理下土壤有机碳的周转速率以及半衰期的影响也存在一定的差异。在原土中,与 CK 处理相比,有机肥处理土壤呼吸释放的 CO₂-C 的

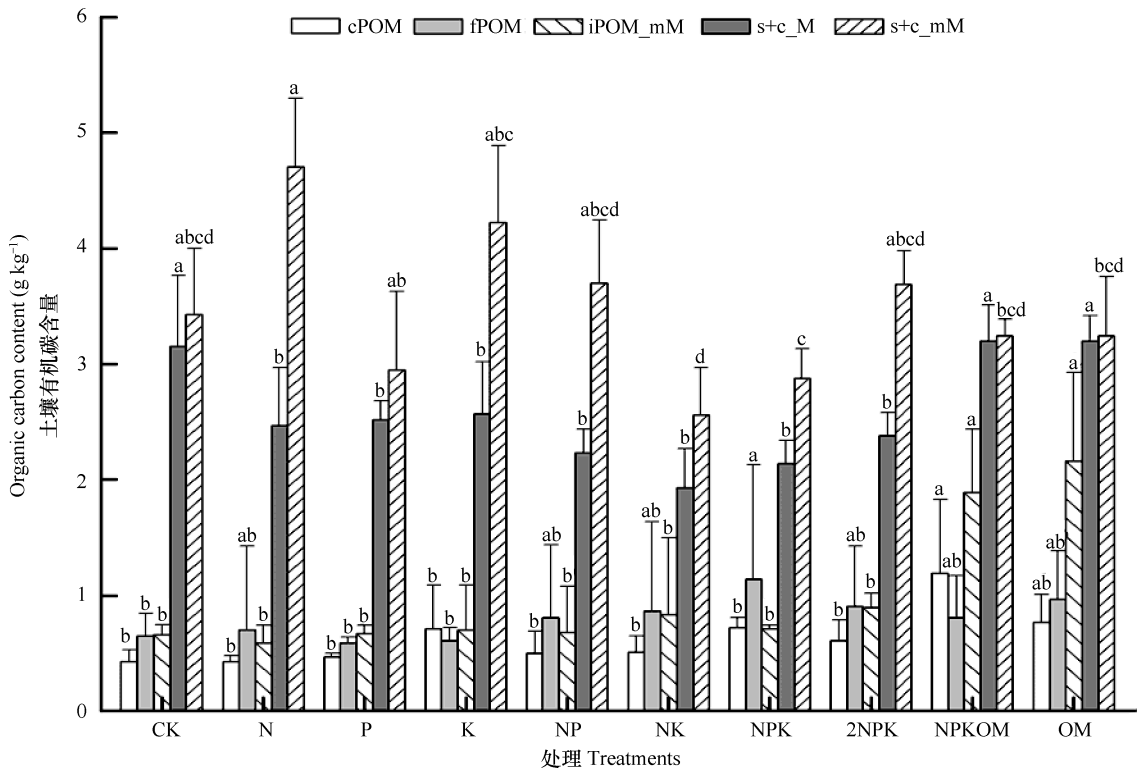


图 2 不同施肥处理对土壤不同有机碳库有机碳含量的影响

Fig. 2 Effects of long-term fertilization on carbon concentrations of different soil organic carbon pools

注:同一碳库不同字母表示不同施肥处理之间差异显著 ($p < 0.05$); 误差线为平均值的标准误差 ($n = 3$) Note: Values followed by a different lowercase letter for the same organic carbon pool of different treatments are significantly different. Bars represent mean standard error ($n = 3$)

表 3 原土、微团聚体以及粉粒和黏粒呼吸释放 $\text{CO}_2\text{-C}_t$ 累积量 ($\text{CO}_2\text{-C}_t$) 及其半衰期

Table 3 Cumulative $\text{CO}_2\text{-C}_t$ of soil, microaggregate and silt and clay respiration ($\text{CO}_2\text{-C}_t$) and half-life time ($t_{1/2}$)

处理 Treatments	原土 Soil (< 2000 μm)			微团聚体 mM (53 ~ 250 μm)			粉黏粒 s + c_M (< 53 μm)		
	$\text{CO}_2\text{-C}_t$ (mg kg^{-1})	$\text{CO}_2\text{-C}_t/\text{SOC}$ (%)	$t_{1/2}$ (year)	$\text{CO}_2\text{-C}_t$ (mg kg^{-1})	$\text{CO}_2\text{-C}_t/\text{SOC}$ (%)	$t_{1/2}$ (year)	$\text{CO}_2\text{-C}_t$ (mg kg^{-1})	$\text{CO}_2\text{-C}_t/\text{SOC}$ (%)	$t_{1/2}$ (year)
CK	79	0.99	53	94	2.04	278	59	1.86	655
N	85	0.97	80	96	1.95	119	62	2.53	218 ¹⁾
P	84	0.95	200	110	2.39	80 ¹⁾	78	3.10	35 ¹⁾
K	109	1.23	219	104	1.78	104	85	3.32	63
NP	132	1.49	225	109	1.79	197	86	3.87	94
NK	106	1.19	141	109	1.83	64	79	4.11	204
NPK	127	1.43	72	118	1.58	526	78	3.62	190
2NPK	138	1.56	39	147	2.47	50	83	3.46	113
NPKOM	270	3.04	25	358	4.99	18	206	6.44	93
OM	203	2.28	37	287	4.20	28	163	5.08	91

1) 由于 $p > 0.05$, 故不参加讨论 ($n = 3$); $p > 0.05$ the data is excluded for discussion

累积量较高,并且其周转速率较大,相应的半衰期也较短(为 25 ~ 37 a),其次为平衡施肥(NPK、2NPK),并且随着施肥量的增加,有机碳的周转速率加快,而单施肥以及二元施肥处理的周转速率最慢,半衰期最长。在微团聚体中,与 CK 相比,也是有机肥处理的(OM、NPKOM)周转速率最大,半衰期最短(18 ~ 28 a)。除 2NPK 和 NK 处理外,其他施肥处理周转速率均较慢,半衰期较长,其中 NPK 处理的周转速率最慢,半衰期最长,为有机肥处理的 18 倍 ~ 29 倍。在粉黏粒中,K 处理的周转速率最快,半衰期最短(约为 63 a),有机肥处理的次之,而平衡施肥和 CK 处理的均较长。

同一粒级的有机碳库中,土壤呼吸释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的累积量占土壤有机碳的比例越大,相应的半衰期越短,呈指数下降的趋势。这也与上述分解速率与时间成线性对数的关系相符。此外,在不同粒度土壤中,无机肥处理(一元施肥、二元施肥以及平衡施肥)土壤呼吸释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的累积量占土壤有机碳的比例,仅为有机肥处理的 1/2 ~ 1/3,而相应的半衰期则是有机肥处理的 2 倍 ~ 29 倍。

与对照相比,施用有机肥显著提高了土壤有机碳库的周转速率(34% ~ 52%),从而促进有机肥处理的各有机碳库的更新。一元或者二元无机肥配施,土壤有机碳虽然只提高了 7% ~ 20%,但是由于分解速率慢,半衰期延长了 1.5 倍 ~ 2.4 倍。统计结果表明,原土的半衰期与原土中 SOC 和 LOC 无显著相关性($p > 0.05$),而与 LOC/TOC 之间的比值呈显著的正相关($r = 0.66^*$)。可见,有机碳的周转与其碳库的组成以及有机质的性质有关,这部分还有待进一步探讨。施入周转速度较快的有机肥不仅可以为作物生长提供养分,而且使部分有机质在土壤中积累,提高土壤有机质的含量。有机肥无机肥配合施用,对土壤呼吸具有促进作用,能显著提高土壤养分的有效性,改善土壤的供肥能力。

3 结 论

长期施肥处理导致红壤酸化加剧,尤其以施氮处理(N、NP、NK、NPK、2NPK)酸化程度最高;而有机肥(NPKOM、OM)的施用不但可以减缓土壤酸化,还可以保障玉米的高产、稳产。

长期施肥增加了 SOC 和 LOC 的含量,其中以 NPKOM 处理最为显著。根据有机碳物理分级,有机肥的施用提高了 cPOM、fPOM、iPOM_mM 组分碳

的含量,而对矿物结合态有机碳(s + c_M、s + c_mM)无显著影响;而无机肥对有机碳组分(除 s + c_mM 组分碳外)影响不显著。

有机肥处理的微团聚体中 SOC 的周转速率最高,这与微团聚体在土壤中含量高有关,其次为原土,而粉黏粒中的周转速率最低;原土中有机碳的半衰期与 LOC/TOC 的比值呈显著正相关,而与 SOC 关系不显著。由此可见,SOC 的积累不但与碳的输入有关,还与碳的组分及其性质有关。然而,长期不同施肥条件下,SOC 周转机制与土壤各组分碳的关系还有待进一步探究。

参 考 文 献

- [1] Zhang M K, Xu J M. Restoration of surface soil fertility of an eroded red soil in southern China. *Soil Tillage Research*, 2005, 80: 13—21
- [2] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系. *土壤学报*, 2006, 43(6): 926—933. Huang Q R, Hu F, Li H X, et al. Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 926—933
- [3] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675—682. Xu J B, Li C L, He Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 675—682
- [4] 詹其厚, 陈杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究. *土壤学报*, 2006, 43(1): 124—132. Zhan Q H, Chen J. Continual nutrient supplying capacity and crop responses based on long-term fertilizer experiment in vertisol (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 124—132
- [5] Wang C J, Pan G X, Tian Y G, et al. Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agroecosystem experiments across mainland China. *Science China: Life Sciences*, 2010, 53(7): 858—867
- [6] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123—137
- [7] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environmental Management*, 2003, 33: 528—544
- [8] Yan X Y, Gong W. The role of chemical and organic fertilizers on yield, yield variability and carbon sequestration—results of a 19-year experiment. *Plant Soil*, 2010, 331(1/2): 471—480
- [9] Sleutel S, De Neve S, Németh T, et al. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 280—288
- [10] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry

- (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [11] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 981—1 987
- [12] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627—633
- [13] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1 295—1 301
- [14] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 71—78. Cai Z J, Sun N, Wang B R, et al. Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 71—78
- [15] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43(3): 723—729. Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 723—729
- [16] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 459—465. Xu M G, Yu R, Sun X F, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 459—465
- [17] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响. *土壤*, 2010, 24(3): 364—371. Zhang J G, Qin J T, Yao W Q, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils (In Chinese). *Soils*, 2010, 24(3): 364—371
- [18] Dawe D, Dobermann A, Ladha J K, et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 191—213
- [19] Jiang D, Hengsdijk H, Dai T B, et al. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize system in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 25—32
- [20] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 82—85. Wang G L, Duan J N, Jia N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in Loess Hilly area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 82—85
- [21] 王锋有, 董旭. 长期定位施肥对耕地土壤物理性状与玉米产量的影响. *农业科技与装备*, 2008(2): 19—21. Wang F Y, Dong X. Effect of long-term located fertilization on cultivated soil characteristics and corn yield (In Chinese). *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2008(2): 19—21
- [22] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 1984, 76: 319—337
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1 367—1 377

EFFECTS OF LONG-TERM FERTILIZATION ON SOIL ORGANIC CARBON POOLS AND THEIR TURNOVERS IN A RED SOIL

Wang Xuefen^{1,2} Hu Feng^{1†} Peng Xinhua² Zhou Hu² Yu Xichu³

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

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

(3 Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract Effects of long-term fertilization on SOC pools and their turnover rates of a red soil were studied using soil organic carbon (SOC) physical fractionation and chemical analysis methods. Results showed that balanced fertilization (NPK, 2NPK) and organic fertilizer application (NPKOM, OM) significantly enhanced maize yield and reduced the temporal variation of yields, and increased the contents of SOC and labile organic carbon (LOC) as compared with control (CK). Based on the five physically fractionated SOC pools, s + c_{mM} and s + c_M associated C accounted for 31%~53% and 28%~38% of SOC, followed by fPOM (8%~15%) and iPOM_{mM} (7%~21%), and then by cPOM (5%~12%)。 Organic fertilizer application (NPKOM, OM) significantly increased POM associated C pools (cPOM, fPOM and iPOM_{mM}), but had no significant effect on mineral associated C pools (s + c_M and s + c_{mM}). As a result, the turnover rates of SOC were the fastest in the two treatments. The turnover rate was positively related with the ratio of LOC to SOC ($r = 0.66^*$), but not with SOC. We can conclude that the balanced fertilization and organic fertilizer application can improve soil fertility but also benefit SOC accumulation.

Key words Long-term fertilization; Organic carbon pool; Turnover rate; Physical fractionation