植物营养与肥料学报 2012,18(6):1404-1411
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施肥对塿土黑碳积累的影响

于小玲,佟小刚,杨学云,李 明,吴发启*
(西北农林科技大学资源环境学院,农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:通过长期定位试验,探讨了20年不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、秸秆和化肥配施(SNPK)、常量有机肥和化肥配施(M1NPK)以及高量有机肥和化肥配施(M2NPK)5个施肥处理对塿土中黑碳含量及积累的影响。结果表明:与CK处理相比,NKP处理对黑碳含量和积累没有明显影响;有机肥和化肥配施(M1NPK、M2NPK)对耕层(0—20 cm)土壤黑碳含量的影响较大,与CK处理相比,在土壤表层(0—5 cm),M1NPK、M2NPK分别提高了黑碳含量的108%和134%,5—10 cm土层中黑碳含量增幅最高,分别提高164%和176%,在整个土层,M1NPK、M2NPK处理分别增加了1.51和1.55倍;秸秆和化肥配施(SNPK)下表层黑碳含量也有所增加,但增加幅度相对施用有机肥来说明明显较小。施肥对黑碳含量的影响主要发生在土壤表层,深层土壤黑碳受施肥影响较小。

关键词:长期施肥;有机碳;黑碳;塿土
中图分类号:S153.6+21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)06-1404-08

Effects of long-term fertilization on soil black carbon accumulation in Lou soils

YU Xiao-ling, TONG Xiao-gang, YANG Xue-yun, LI Ming, WU Fa-qi*
(*College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment of the Agriculture Ministry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Effects of fertilization on content and accumulation of soil black carbon were investigated based on the 20-year long-term experiment on Lou soil. There were four fertilizer treatments, the control without applying any fertilizers (CK), single application of chemical fertilizer (NPK), straw returning combined with chemical fertilizers (SNKP) and organic manure combined with chemical fertilizers (M1NPK, M2NPK). Results show that compared with the CK, the single application of chemical fertilizer has no effect on the content and accumulation of black carbon, the treatments of organic manure combined with chemical fertilizers (M1NPK, M2NPK) significantly increase the contents of black carbon in the 0-20 cm soil depths and the black carbon contents are increased by 108% and 134% in the 0-5 cm soil depths and 164% and 176% in the 5-10 cm soil depths respectively, and the accumulations of black carbon in soil profiles are increased by 1.51 and 1.55 times respectively under M1NPK and M2NPK treatments. The black carbon contents in top soils are increased under the treatment of SNPK, but the increases are relatively small compared with the manure application. Effects of the fertilization on the black carbon mainly occur in the top soils, while the black carbon contents in the deep soils are less affected.

Key words: long-term fertilization; organic carbon; black carbon; Lou soil

土壤有机碳是土壤养分循环和土壤肥力的核心物质,在全球碳循环中具有重要作用。慢速周转库中有机质的稳定和转化机理研究有利于农业生产的持续发展,目前这部分研究主要集中在腐殖质方面。黑碳(black carbon)是化石燃料或生物物质不完全燃烧形成的一种含碳物质[1],近年来的研究表明,

收稿日期:2012-03-02　　**接受日期**:2012-08-06
基金项目:"十二五"国家科技支撑项目"黄土高原农果牧复合循环技术集成与示范"(2012BAD14B11)资助。
作者简介:于小玲(1986—),女,山东泰安人,博士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:yuxiaoling@nwsuaf.edu.cn
*通讯作者 E-mail:wufaqi@263.net

黑碳可能是土壤腐殖质中高芳香化结构的组成成分[2]，有些土壤中黑碳甚至能达到土壤有机碳的45%以上[3]，因此黑碳被认为是化学性质上更稳定的土壤碳库，对稳定有机碳库可能有很大的作用，这引起了一些土壤学家对黑碳研究的浓厚兴趣[2-6]。Glaser 等[4]对巴西亚马逊地区肥沃的 Terra Preta 土壤进行研究，发现该土壤存在一个巨大、稳定的土壤有机质库，其土壤有机质库中黑碳含量高达35%，是相邻氧化土黑碳含量的 10 倍；Liang 等[5]对 Terra Preta 土壤的研究发现，该土壤保持一个巨大、稳定有机碳库的原因是黑碳的富集造成了土壤 CEC 增加；Kaiser 等[6]的研究表明，黑碳有利于土壤中可溶性碳的吸附，而在缺乏黑碳的土壤中，可溶性碳的吸附与土壤有机碳呈负相关，这说明黑碳可能对土壤有机质的保存有积极意义。黑碳的这种作用引起了研究者对黑碳的浓厚兴趣，研究者希望通过农业管理活动来培育出这种富碳土壤，因此关于黑碳在土壤中积累的各种影响因素和它与土壤有机碳之间的关系研究就有了重要意义。国外对火烧、土地利用方式和施肥对黑碳积累的影响进行了深入的研究，发现土壤黑碳的积累和这三种因素都有着密切的关系[7-9]。在农业生产活动中，Brodowski 等[7]研究发现，施用农家肥有可能会提高土壤黑碳含量，Merbach 等[8]研究认为，农家肥中黑碳含量占有机碳含量的9%～10%。国内关于黑碳的研究还处在探索和起步阶段，研究较为薄弱，只有少量的关于土地利用方式和皆伐火烧对黑碳影响的研究[10-12]，而对于农业管理措施特别是人类施肥活动对黑碳的影响还鲜见报道。鉴于此，本文以陕西杨凌长期定位施肥下的塿土为研究对象，对土壤剖面中的黑碳含量和密度进行了测定，以便了解长期施肥下土壤黑碳积累的特点、剖面分布特点以及对土壤有机碳库的贡献，以期为正确评价人类农业生产活动对黑碳的影响提供了依据。

1　材料和方法

1.1　试验地概况

长期试验点位于陕西杨凌“国家黄土肥力与肥料效益监测试验站”(34°17′51″N，108°00′48″ E)，该试验站海拔 5247 m，年平均气温 13℃，年平均降水量 550～600 mm，年平均蒸发量 993 mm；土壤为塿土。1990 年开始进行长期肥料试验，试验初始时，耕层土壤的基本理化性状为：有机碳 7.87 g/kg，全氮(N) 0.83 g/kg，全磷(P) 1.39 g/kg，全钾(K) 22.80 g/kg，碱解氮(N)61.3 mg/kg，速效磷(P)9.6 mg/kg，有效钾(K)191.0 mg/kg，pH 8.62。

1.2　试验设计

试验站共设有 11 个处理，小区面积 196 m^2(14 m×14 m)，无重复。本文选取其中 5 个处理：1) CK(对照，不施肥)；2)NPK(单施氮磷钾化肥)；3) M1NPK(氮磷钾化肥配施常量有机肥，有机肥为牛粪)；4)M2NPK(氮磷钾化肥配施高量有机肥，其中有机肥用量为处理 3 的 1.5 倍)；5)SNPK(施用氮磷钾化肥和作物秸秆)。M1NPK 和 M2NPK 处理在玉米生育期氮、磷、钾用量和 NPK 处理一样且全部来源于化肥；而在小麦生育期，M1NPK 和 M2NPK 处理中施氮量的 70% 由有机肥提供，按含 N 量折合牛粪施用(亦为秋播小麦时一次施入)，另外的 30% 源于化肥氮，M1NPK 中的 P、K 用量与 NPK 处理相同也全部源于化肥，而 M2NPK 处理氮、磷、钾用量则为 M1NPK 处理的 1.5 倍。各处理详细施肥量见表 1。所施用的化学肥料中氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为硫酸钾，施用有机肥的处理只考虑其中的氮与其它处理相同，未考虑磷、钾养分，有机肥为牛粪，还田的秸秆未考虑其养分含量。所有肥料、秸秆、牛粪均在播前一次施入。牛粪 N、P、K 平均含量分别为 0.96%、0.77%、1.08%；处理 M1NPK 和 M2NPK 平均每年随有机肥施入的 P、K 分别约为 130、200 和 210、315 kg/hm^2，亦未计入施肥量。试验点种植方式为小麦-玉米轮作，一年

表 1　试验处理方案

Table 1　The design of experimental treatments

处理 Treatment	施肥品种及施肥量 Fertilizer type and amount (kg/hm^2)	
	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer corn
CK	不施肥 No fertilization	不施肥 No fertilization
NPK	N-P-K 165-57.6-68.5	N-P-K 187.5-24.6-77.8
M1NPK	N-P-K 165-57.6-68.5	N-P-K 187.5-24.6-77.8
M2NPK	N-P-K 247.5-86.4-102.8	N-P-K 187.5-24.6-77.8
SNPK	N+P+K 165-57.6-68.5	N-P-K 187.5-24.6-77.8

注(Note)：M—牛粪 Cow manure；S—秸秆 Straw.

两熟,其作物产量和地上生物量见表2。SNPK处理秸秆用量在1990～1998年为小麦秸秆(干重)4500 kg/hm^2,1998年以后为当季处理的全部玉米秸秆,平均为3700 kg/hm^2(变幅2629～5921 kg/hm^2),用铡刀切成约3 cm长,秋播小麦时一次施入,随秸秆施入的N、P、K量每年平均分别为35.4、3.4、81.0 kg/hm^2,未计入施肥量小麦秸秆N、P、K含量分别为0.52%、0.06%、1.93%;玉米秸秆N、P、K含量分别为1.10%、0.11%、1.88%)。

表2 玉米和小麦作物产量和地上生物量

Table 2 Grain yields and above ground biomass of corn and wheat

处理 Treatment	夏玉米 Summer corn		冬小麦 Winter wheat	
	产量 Grain yield (kg/hm^2)	地上生物量 Above ground biomass (kg/hm^2)	产量 Grain yield (kg/hm^2)	地上生物量 Above ground biomass (kg/hm^2)
CK	3500	5486	907	1920
NPK	6189	11131	6567	13585
SNPK	6493	11434	6112	12975
M1NPK	6182	13318	7135	15582
M2NPK	7254	13301	7061	16636

1.3 样品采集及测定

2010年5月小麦收获后,采集0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm、15—20 cm、20—40 cm、40—60 cm共6个土层土样。由于每小区面积较大,取样时人为将小区分为3个假重复,以弥补没有重复之不足。在每个假重复小区内按"S"型分布,用直径10 cm土钻采集6点土样,然后混合作为该小区待测土样,同时采用环刀法测定各层土壤容重。土样经自然风干、研磨、过>2 mm筛后备用。在研磨过程中弃去大于2 mm的有机物和砂砾。

土壤黑碳含量采用Lim和Cachier[13]及Song[14]等介绍的方法,并作改进。具体测定过程为:称取3 g过0.15 mm筛的烘干土样于离心管中,加入15 mL 3 mol/L HCl,并对其进行超声分散处理15～30 min。静置24 h后,对样品进行反复的离心和清洗,接着加入15 mL 10 mol/L HF和15 mL 1 mol/L HCl。24 h后再对样品进行离心和清洗,直到清洗溶液pH值变为4～5时,加入15 mL 10 mol/L HCl。24 h后,将样品烘干直到样品重量不再发生变化为止。称取上述烘干的土样于离心管中,加入15 mL 0.1 mol/L K_2CrO_7和15 mL 2 mol/L H_2SO_4,并立即进行超声分散处理10 min(40℃),然后将其转移到水浴锅中在55±1℃水浴温度下反应60 h,最后得到的剩余物即为黑碳样品,离心、烘干后直接用TOC元素分析仪(High Temperature TOC)测定黑碳含量。土壤有机碳同样采用TOC分析仪测定。

1.4 数据分析

土壤黑碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤黑碳的储量,与土壤深度和土壤厚度有关,其中某一土层的黑碳密度计算公式为:

$$BC_s = \sum_{i=1}^{n} (C_i \times \rho_i \times H_i)/10$$

式中:BC_s为特定深度的土壤黑碳密度(t/hm^2);C_i为第i层土壤的BC含量(g/kg);ρ_i为第i层土壤容重(g/cm^3);H_i为第i层土壤厚度(cm);n为土层数。

实验结果的统计与分析采用Excel和SPSS16.0软件进行。不同施肥处理有机碳和黑碳的含量、密度及分配比例差异显著性采用邓肯法进行检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤总有机碳含量的影响

由表3可以看出,在垂直分布上,不同处理土壤表层(0—5 cm)有机碳含量最大,且随土层深度的增加而逐渐降低,CK、NPK和SNPK处理有机碳含量在垂直方向上的递减相对缓慢,M1NPK和M2NPK处理在0—20 cm土层垂直递减相对较快。相对于CK处理,各施肥处理均增加了土壤有机碳含量,主要表现在土壤表层(0—20 cm),20 cm以下

土层表现不明显,其中最为明显的是 M2NPK 处理,0—20 cm 土层有机碳含量显著提高 56%～111%;其次为 M1NPK 处理,0—20 cm 土层有机碳含量提高 48%～82%; SNPK 处理 0—20 cm 土层有机碳含量提高 25%～38%; NPK 处理最不明显,有机碳含量提高 14%～34%。

表 3　长期施肥下土壤有机碳含量(g/kg)

Table 3　Contents of soil organic carbon under the long-term fertilization

处理 Treatment	样本数 Sample No.	土层深度 Soil depth (cm)					
		0—5	5—10	10—15	15—20	20—40	40—60
CK	15	8.68 ±0.17 e	8.52 ±0.30 c	7.61 ±0.08 d	5.95 ±0.12 c	5.61 ±0.14 b	5.28 ±0.21 c
NPK	15	10.81 ±0.79 d	9.99 ±0.31 b	8.69 ±0.43 c	7.95 ±0.32 b	6.41 ±0.52 ab	6.26 ±0.31 ab
SNPK	15	11.98 ±0.83 c	10.68 ±0.79 b	9.76 ±0.13 b	7.41 ±0.78 b	6.63 ±0.75 ab	5.92 ±0.65 ab
M1NPK	15	15.78 ±0.56 b	14.35 ±0.88 a	11.33 ±0.36 a	9.25 ±0.22 a	6.62 ±0.69 ab	5.50 ±0.29 b
M2NPK	15	18.27 ±0.44 a	15.26 ±0.37 a	11.89 ±0.96 a	9.47 ±0.18 a	7.08 ±0.40 a	6.65 ±0.38 a
变异系数 *CV* (%)		29.54	24.70	18.10	17.97	8.34	9.38

注(Note): 表中同列数字后不同字母代表不同施肥处理间在 5% 水平下差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments at the 5% level.

2.2　长期施肥对土壤黑碳含量的影响

在剖面分布上,各处理土壤黑碳含量随着土层深度的增加而降低(表 4)。相对于 CK 处理,单施化肥(NPK)处理下黑碳含量在各个土层都没有明显变化; 秸秆还田(SNPK)处理下黑碳含量在各个土层略有上升,但上升幅度较小,为 0.04 ～ 0.23 g/kg; 配施常量有机肥(M1NPK)和配施高量有机肥(M2NPK)处理显著提高了表层黑碳含量,且以 0—10 cm 土层更加显著,其中,0—5 cm 土层,黑碳含量分别提高 108% 和 134%,5—10 cm 土层,黑碳含量分别提高 164% 和 176%。在 40—60 cm 土层,各个处理间黑碳含量差异不显著($P < 0.05$),说明施肥对黑碳的影响基本表现在土壤表层,而深层土壤黑碳受施肥的影响较小。

表 4　长期施肥下土壤黑碳含量 (g/kg)

Table 4　Contents of soil black carbon under the long-term fertilization

处理 Treatment	样本数 Sample No.	土层深度 Soil depth (cm)					
		0—5	5—10	10—15	15—20	20—40	40—60
CK	15	0.96 ±0.03 d	0.70 ±0.09 c	0.67 ±0.02 b	0.62 ±0.05 b	0.47 ±0.01 b	0.35 ±0.01 b
NPK	15	0.92 ±0.02 d	0.70 ±0.06 c	0.69 ±0.02 b	0.62 ±0.03 b	0.48 ±0.03 b	0.36 ±0.02 b
SNPK	15	1.19 ±0.04 c	0.98 ±0.04 b	0.75 ±0.03 b	0.69 ±0.03 b	0.61 ±0.02 a	0.39 ±0.03 a
M1NPK	15	2.00 ±0.10 b	1.85 ±0.05 a	1.21 ±0.05 a	0.88 ±0.08 a	0.64 ±0.06 a	0.40 ±0.05 a
M2NPK	15	2.25 ±0.05 a	1.93 ±0.07 a	1.43 ±0.04 a	0.93 ±0.06 a	0.63 ±0.03 a	0.38 ±0.02 a
变异系数 *CV* (%)		42.25	49.68	36.62	19.68	14.81	5.52

注(Note): 表中同列数字后不同字母代表不同施肥处理间在 5% 置信水平下差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments at the 5% level.

2.3　长期施肥对土壤黑碳的密度及其分配比例的影响

由表 5 可见,与 CK 相比,不同施肥处理间土壤黑碳密度存在着显著差异($P < 0.05$)。对整个土层而言,各施肥处理土壤黑碳密度和黑碳含量表现的规律基本相同,从大到小依次为 M2NPK > M1NPK > SNPK > NPK,其中前两种施肥处理下的土壤黑碳密度明显较高,分别是 CK 的 1.55 和 1.51 倍,M2NPK 处理储存的黑碳最多,达 6.73 t/hm^2,NPK 处理储存的黑碳最少,为 4.31 t/hm^2,与 CK 处理(4.35 t/hm^2)之间差异不显著。

表5 长期施肥下土壤黑碳密度(t/hm²)

Table 5 Soil black carbon density under the long-term fertilization

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)					
	0—5	5—10	10—15	15—20	20—40	40—60
CK	0.59 ±0.02 d	1.05 ±0.03 d	1.51 ±0.04 d	1.96 ±0.02 d	3.32 ±0.04 d	4.35 ±0.05 d
NPK	0.57 ±0.03 d	1.02 ±0.04 d	1.48 ±0.06 d	1.92 ±0.05 d	3.29 ±0.03 d	4.31 ±0.06 d
SNPK	0.74 ±0.09 c	1.39 ±0.05 c	1.91 ±0.05 c	2.40 ±0.11 c	4.16 ±0.07 c	5.31 ±0.09 c
M1NPK	1.16 ±0.07 b	2.30 ±0.06 b	3.11 ±0.08 b	3.70 ±0.04 b	5.44 ±0.09 b	6.55 ±0.07 b
M2NPK	1.27 ±0.11 a	2.43 ±0.07 a	3.36 ±0.07 a	3.98 ±0.09 a	5.68 ±0.08 a	6.73 ±0.11 a

注(Note):表中同列数字后不同字母代表不同施肥处理间在5%置信水平下差异显著 Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments at the 5% level.

由土壤黑碳密度在不同深度土壤中的分配比例(图1)可以看出,与CK相比,NPK处理下各个土层土壤黑碳密度贡献率基本与之持平;SNPK处理下黑碳密度贡献率在0—40 cm各土层略有增加,但增幅较小;M2NPK和M1NPK处理使0—15 cm各土层黑碳密度贡献率明显提高,尤其以5—10 cm最为显著,分别提高了62.0%和64.8%,而在20—40 cm和40—60 cm土层贡献率则显著下降。在0—20 cm土层,所有处理的土壤黑碳密度贡献率为44.47%～56.48%,占到整个土层的一半,说明施肥对耕层黑碳的影响最为明显。

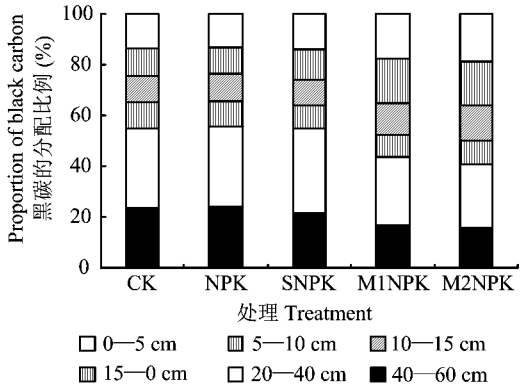

图1 长期施肥下黑碳在不同深度土壤中的分布

Fig. 1 Distribution of black carbon in the different soil depths under the long-term fertilization

2.4 长期施肥土壤黑碳和有机碳的关系

土壤剖面中黑碳占有机碳的比例在5%～13%之间(图2)。0—20 cm土层所有处理的BC/SOC比值变化较大,20 cm以下,BC/SOC比值随着深度的加深而下降。在0—20 cm土层,M2NPK和M1NPK处理下的BC/SOC比值明显高于NPKS、NPK和CK

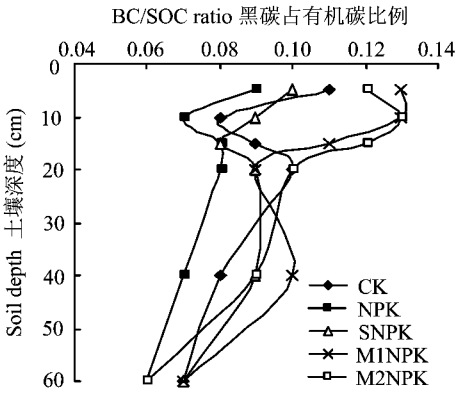

图2 长期施肥下土壤黑碳占有机碳的比例的剖面分布

Fig. 2 Distribution of soil black carbon/organic carbon (BC/SOC) ratio under the long-term fertilization

处理,并且在5—10 cm土层的BC/SOC比值要高于0—5 cm土层,这可能由于有机碳容易发生降解而造成下层有机碳减少,而黑碳比较稳定,从而造成比值升高;CK、NPK和SNPK处理下的BC/SOC比值先减小后增大,可能由于各个土层积累的黑碳化学性质稳定,而有机碳却是不断发生降解的缘故。

相关分析表明(表6),土壤黑碳和有机碳之间的相关系数随着土层的加深而逐渐减小,0—20 cm和20—40 cm土层黑碳和有机碳之间呈极显著的正相关关系,而在40—60 cm土层二者之间几乎没有相关性,说明有机碳积累对黑碳积累的影响主要发生在土壤耕层,而深层黑碳的积累和有机碳并无太大的关系;各土层黑碳占有机碳的比例(BC/SOC)与黑碳含量之间呈显著的相关性,且相关系数随着土层的加深而减小,但BC/SOC比值与有机碳含量之间除了在0—20 cm土层呈显著正相关,20 cm以下土层二者之间均呈现负相关,且随土层的加深,这

种相关性逐渐增大，说明浅层有机碳的积累可增加黑碳的积累，但深层黑碳的积累与有机碳的积累无太大的关系，黑碳的积累并不完全取决于有机碳的积累，进一步说明施肥对黑碳的影响主要发生在土壤耕层，剖面下部的黑碳则受施肥影响较小。土壤有机碳积累的下降说明有机碳受环境影响较大，容易发生降解，而黑碳是一种化学性质稳定的惰性物质，可长时间保留在土壤内。

表 6　土壤中不同土层有机碳(SOC)、黑碳(BC)及黑碳占有机碳比例(BC/SOC)的相关关系

Table 6　Correlations between organic carbon, black carbon and the proportion of black carbon in total soil organic carbon in different soil depths

指标 Index	土层深度 Soil depth (cm)								
	0—20 cm			20—40 cm			40—60 cm		
	SOC	BC	BC/SOC	SOC	BC	BC/SOC	SOC	BC	BC/SOC
SOC	1.000			1.000			1.000		
BC	0.939**	1.00		0.641**	1.00		0.005	1.00	
BC/SOC	0.741**	0.921**	1.00	−0.066	0.651**	1.00	−0.789**	0.418*	1.00

注(Note)：* 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3　讨论

长期不同施肥 20 年后，土壤耕层有机碳含量都有所增加，尤以施加有机肥效果更加显著，这与许多研究的结果相符合[15,17-18]。本试验表明，有机肥和化肥配施以及秸秆还田和化肥配施均能提高土壤中有机碳含量，有机肥和化肥配施增加效果最为显著，这可能因为秸秆中含有纤维素、木质素等富碳物质，而有机肥本身就含有大量有机碳，施用有机肥和秸秆还田为土壤提供了直接的碳源，因此长期施肥管理下会导致土壤有机碳的上升[15,17]；施用化肥对有机碳的影响则还没有定论，有研究认为施用化肥对有机碳没有作用或作用减少[15]，而有研究则认为施用化肥会提高土壤中的有机碳[16-17]。本试验研究结果表明，长期施用化肥会明显提高土壤耕层(0—20 cm)有机碳含量，这与古巧珍等[18]的研究结果一致。

自然界中的黑碳一般来源于生物物质和化石燃料的燃烧，据 Kuhlbusch 和 Crutzen[19] 估算，全球每年燃烧产生的黑碳大约在 50 ～270 Tg 左右，其中生物物质燃烧形成的黑碳大部分残留在地表，约有 50 ～200 Tg 进入到土壤，化石燃料燃烧形成的黑碳以烟尘的形式存在于大气中，它会随着大气沉降等作用直接落入土壤中。农业土地中的黑碳积累除受田地中秸秆直接焚烧影响外，受大气沉降的作用相对来说较小，但是受田地中有机肥投入的作用可能较大。有研究发现，施肥会对土壤黑碳的积累产生一定的影响。Brodowski 等[7] 研究发现，3 块试验地施用无机肥(N、P、K、NP、PK 或 NPK)，黑碳含量并没有发生明显的变化，其原因尚不清楚；而在施用农家肥后，虽然有两个样地表层土壤中黑碳的含量没有发生明显的变化，但另一个样地中黑碳含量却有明显的上升，在施用农家肥 20 和 30 t/hm^2 两年后，黑碳含量分别从 2.16 g/kg 上升至 2.68 g/kg 和 2.86 g/kg，这表明农家肥中可能存在黑碳类物质，但具体物质还需做进一步研究。Merbach 等[8] 研究则认为，农家肥中黑碳含量占有机碳含量的 9% ～10%。戴婷等[12] 调查了 5 个施用有机肥 10 年的田块和 4 个只施化肥的田块，结果发现，长期施用有机肥农田土壤黑碳含量为 3.75 ～6.90 g/kg，单施无机肥农田本土壤黑碳含量为 2.52 ～4.28 g/kg，长期施用有机肥土壤中黑碳含量明显高于单施化肥土壤。本研究发现，单施化肥的土地黑碳含量并没有发生变化，而配施农家肥后黑碳含量明显上升，这个结果与 Brodowski 等[7] 及国内戴婷等[12] 的报道一致。秸秆还田处理下黑碳含量也略有上升，具体原因不明，国内外也没有相关的不同耕作方式对黑碳积累造成的影响的报道，这可能和黑碳的降解和迁移有关，需要做进一步的研究。大气沉降到地表的黑碳颗粒进入到土壤后，会缓慢地进行降解[20]，有研究发现质地较粘的土壤更有利于黑碳的积累，黑碳主要存在于细颗粒土壤中[11]，另外土壤黑碳含量在剖面分布上依然表现出耕层(0—20 cm)较高的特性，这是因为黑碳是一种惰性物质，深层土壤黑碳受外界影响小，变化小，这部分黑碳的含量主要受历史施肥积累的影响，也有可能是黑碳的垂直迁移和

物理降解所造成。

Rumpel 等[21]研究的不同利用方式下土壤黑碳占有机碳的比例在 10%～15%之间。何跃和张甘霖[10]研究发现南京城市土壤黑碳占有机碳的比例在 16%～46%之间。张履勤等[11]研究表明,不同土地利用方式下红壤和黄壤黑碳占有机碳的比例在 8%～26%之间。戴婷等[12]研究了浙北平原农业土壤黑碳分布特征,结果表明黑碳占有机碳的比例在 11.3%～53.2%之间。本研究结果与上述结果基本吻合,即长期施肥的农业土壤中黑碳含量占有机碳的比例在 5%～13%的范围内。已有研究表明,BC/SOC 比值大小在一定程度上反映了土壤的污染程度[22-23],同时也与特定的人为活动过程相关。据报道,如果土壤中 BC/SOC 值在 0.5 左右,则认为黑碳的来源主要是化石燃料的燃烧; 如果在 0.11 ±0.03 之间,则黑碳的主要来源是生物质的燃烧[10]。而本研究中 BC/SOC 比值是否也反映了黑碳这种来源,值得进一步的研究分析。

4 结论

黑碳含量的变化表现为耕层土壤含量较高,随着土层的加深而逐渐减少。单施无机肥对土壤黑碳无影响; 无机肥和有机肥配施对土壤黑碳的影响最为明显,且增加有机肥施用量也会造成土壤黑碳含量的增加。

长期施肥 20 年后,配施高量有机肥和配施常量有机肥处理 0—60 cm 土壤黑碳储量显著增加,并且造成 0—20 cm 土壤黑碳密度的贡献率明显提高,而 20 cm 以下土层黑碳密度的贡献率明显下降。这说明长期施用有机肥有利于耕层土壤黑碳的积累,但深层土壤受其影响则较小。

土壤黑碳与有机碳良好的相关性表明,长期施用有机肥造成土壤黑碳的积累,反过来黑碳的积累可能对有机碳的固定起着重要作用,具体黑碳对有机碳的固定起着怎样的作用以及黑碳对土壤的改良作用等还没有统一的结论,需要进一步研究。

参 考 文 献:

[1] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution[M]. New York: John Wiley&Sons, 1985. 1-7.

[2] Haumaier L, Zech W. Black carbon-possible source of highly aromatic components of soil humic acids[J]. Org. Geochem., 1995, 23(3): 191-196.

[3] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt E, Kögel-Knabner I. Charred organic carbon in German chernozemic soils[J]. Eur. J. Soil Sci., 1999, 50: 351-365.

[4] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. Naturwissenschaften, 2001, 88: 37-41.

[5] Liang B, Lehmann J, Solomon D *et al*. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70(5): 1719-1730.

[6] Kaiser K, Haumaier L, Zech W. The sorption of organic matter in soils as affected by the nature of soil carbon[J]. Soil. Sci., 2000, 165(4): 305-313.

[7] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils [J]. Geoderma, 2007, 139: 220-228.

[8] Merbach W, Garz J, Schliephake W *et al*. The long-term fertilization experiments in Halle (Saale), Germany - Introduction and survey[J]. Plant Nutr. Soil Sci., 2000, 163: 629-638.

[9] Czimczik C I, Schmidt M W I, Schulze E D. Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests[J]. Eur. J. Soil Sci., 2005, 56: 417-428.

[10] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 177-182.
He Y, Zhang G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43 (2): 177-182.

[11] 张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 662-665.
Zhang L Q, Zhang M K. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils [J]. Chin. J. Soil Sci., 2006, 37(4): 662-665.

[12] 戴婷, 李艾芬, 章明奎. 浙北平原农业土壤中黑碳分布特征的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1321-1324.
Dai T, Li A F, Zhang M K. Distribution characteristics of black carbon in agriculture soils of northern Zhejiang plain[J]. Chin. J. Soil Sci., 2009, 40(6): 1321-1324.

[13] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays [J]. Chem. Geol., 1996, 131: 143-154.

[14] Song J Z, Peng P A, Huang W L. Black carbon and kerogen in soils and sediments. 1. Quantification and characterization[J]. Environ. Sci. Technol., 2002, 36(18): 3960-3967.

[15] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 65-71.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes[J]. Sci. Agric. Sin., 2000, 33(5): 65-71.

[16] 王玲莉, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 79-83.
Wang L L, Hang X R, Yang J F *et al*. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions in a brown soil[J]. Plant

Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(1): 79-83.

[17] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(14): 831-836.
Tong X G, Huang S M, Xu M G *et al*. Effects of the different long-term fertilizations on fractions of organic carbon in fluvo-aquic soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(14): 831-836.

[18] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 长期定位施肥对塿土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J]. 西北农业学报, 2004, 13(3): 121-125.
Gu Q Z, Yang X Y, Sun B H *et al*. Effects of Long-term fertilization on soil nutrition and land productivity in topsoil of Loess soils[J]. Northwest China J. Agric. Sci., 2004, 13(3): 121-125.

[19] Kuhlbusch T A J, Crutzen P J. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide [A]. Levine J S. Biomass burning and global change[C]. Cambridge MA, I: MIT Press, 1996. 160-169.

[20] 韩永明, 曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环[J]. 海洋地质与第四地质, 2005, 25(1): 125-132.
Han Y M, Cao J J. Black carbon in the environments and its global biogeochemical cycle [J]. Mar. Geol. Quat. Geol., 2005, 25(1): 125-132.

[21] Rumpel C, Alexis M, Chabbi A *et al*. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land and slash and burn agriculture[J]. Geoderma, 2006, 130: 35-46.

[22] Gatari M J, Boman J. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa[J]. Atmos. Environ., 2003, 37(8): 1149-1154.

[23] Muri G, Cermelj B, Faganeli J, Brancelj A. Black carbon in Slovenian alpine lacustrine sediments [J]. Chemosphere, 2002, 46(8): 1225-1234.