

DOI: 10.11766/trxb201902180011

何伟, 王会, 韩飞, 胡国庆, 娄燕宏, 宋付朋, 潘红, 魏猛, 诸葛玉平. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 425–434.

HE Wei, WANG Hui, HAN Fei, HU Guoqing, LOU Yanhong, SONG Fupeng, PAN Hong, WEI Meng, ZHUGE Yuping. Effect of Long-term Application of Organic Manure Expanding Organic Carbon Fractions in Fluvo-aquic Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 425–434.

长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分*

何伟¹, 王会^{1†}, 韩飞¹, 胡国庆¹, 娄燕宏¹, 宋付朋¹, 潘红¹, 魏猛², 诸葛玉平^{1†}

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2. 江苏徐淮地区徐州农业科学研究所, 江苏徐州 221131)

摘 要: 借助潮土 36 a 长期定位施肥试验平台, 利用物理化学相结合的方法, 研究了不同施肥处理对耕层土壤有机碳组分的影响。试验处理包括不施肥 (CK)、施氮磷钾肥不同组合 (N、NP、NPK)、施有机肥 (M)、施氮肥和有机肥 (MN)、施氮磷肥和有机肥 (MNP) 及施氮磷钾肥和有机肥 (MNPK)。结果表明: 施肥能显著提高土壤易氧化有机碳 (EOC) 含量, 与 CK 相比, MNPK 处理提高效果最为显著, 增幅为 72.17%; NPK 处理对颗粒有机碳 (POC) 和矿物结合态有机碳 (MOC) 含量的提升效果高于 N 处理, 但低于施有机肥处理; 施有机肥处理的 POC 含量较不施有机肥处理平均增加 92.69%, 与 CK 相比, MNPK 处理的 POC 分配比例增加了 13.33%; 施有机肥条件下, 所增加的总有机碳对 MOC 的贡献率明显提高, MNPK 处理所增加的总有机碳可 1:1 进入 POC 和 MOC 组分。有机肥施用尤其是氮磷钾平衡施用并增施有机肥, 能有效改善土壤化学性质、提升土壤碳组分含量、促进新碳在各碳组分均衡分配。

关键词: 土壤碳组分; 有机无机配施; 平衡施肥; 潮土

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Effect of Long-term Application of Organic Manure Expanding Organic Carbon Fractions in Fluvo-aquic Soil

HE Wei¹, WANG Hui^{1†}, HAN Fei¹, HU Guoqing¹, LOU Yanhong¹, SONG Fupeng¹, PAN Hong¹, WEI Meng², ZHUGE Yuping^{1†}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Xuzhou Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District, Xuzhou, Jiangsu 221131, China)

Abstract: [Objective] Based on a 36-year fertilization experiment in a field of fluvo-aquic soil, effects of fertilization, especially application of organic manure, on organic carbon fractions in the plow layer were studied in an attempt to learn

* 国家自然科学基金项目 (41601237, 41701257, 41771273) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41601237, 41701257 and 41771273)

† 通讯作者 Corresponding author, Email: huiwang@sdau.edu.cn; zhugeyp@sdau.edu.cn

作者简介: 何伟 (1993—), 男, 山东德州人, 硕士研究生。主要从事土壤质量演变与退化治理方面研究。Email: hewei0534@163.com

收稿日期: 2019-02-18; 收到修改稿日期: 2019-04-02; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-05-10

comprehensively how soil carbon changes and explore effects of fertilization on the status of soil organic carbon through analysis and evaluation of soil organic carbon fractions, so as to better master the physico-chemical and biological mechanisms of the changes in soil organic carbon fractions as affected by long-term fertilization and to provide scientific basis for decision-making for fertilization in sustainable development of agriculture. 【 Method 】 In this study, physical means were used in combination with chemical ones to determine contents of organic carbon, easily oxidized organic carbon, particulate organic carbon and mineral incorporated organic carbon in soils, and effects of fertilization on soil organic carbon fractions were analyzed. To that end the experiment in the study was designed to have 8 treatments, that is, no fertilization (CK), application of N alone (N), application of N and P (NP), application of N, P and K(NPK), application of organic manure (M), application of nitrogen fertilizer plus organic manure (MN), application of nitrogen and phosphorus fertilizers plus organic manure (MNP), and application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers plus organic manure (MNPK). 【 Result 】 Results show that long-term fertilization significantly improved soil fertility. Application of organic manure was closely related to increase in soil organic carbon, particulate organic carbon and mineral incorporated organic carbon. Fertilization significantly increased the content of easily oxidized organic carbon (EOC) in the soil. The effect was the most significant in Treatment MNPK with an increase up to 72.13% as compared with CK, while EOC content in Treatment MN, MNP and MNPK increased by 23.18%, 12.53% and 25.92%, respectively, as compared with their respective chemical counterparts, Treatment N, NP and NPK. Fertilization (except for N application alone) significantly increased the content of soil particulate organic carbon (POC). The effect was particularly significant in organic manure-amended treatments, whose mean POC content was 92.69% higher than that of the treatments without organic manure. The content of mineral incorporated organic carbon (MOC) in the organic manure amended treatments was 10.06% higher than that in CK. The proportion of particulate organic carbon (POC/SOC) in Treatment MNPK increased by 13.33%, while the proportion of mineral incorporated organic carbon (MOC/SOC) decreased correspondingly, as compared with those in CK. Application of organic manure significantly enhanced the contribution of increased total organic carbon to MOC, especially Treatment MNPK where the increased total organic carbon and the native total organic carbon formed a ratio of 1: 1 in POC and MOC. 【 Conclusion 】 In conclusion, application of organic manure, especially when in combination with balanced nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers, is of great significance to improving soil physico-chemical properties, expanding the fractions of organic carbon, and promoting balanced distribution of newly-sequestered carbon in various carbon fractions. The findings in the study may serve as a theoretical basis for rational fertilization in sandy loam fluvo-aquic soils.

Key words: Soil organic carbon fraction; Combination of chemical and organic fertilizers; Balanced fertilization; Fluvo-aquic soil

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,全球约有 1 500 Gt 的碳以有机质形态固持在土壤中^[1]。土壤碳固持对保持土壤肥力和缓解温室效应具有重要意义,影响着食品安全以及生态环境安全^[2-3],因而受到研究者的广泛关注。施肥等农业管理措施是影响农田土壤碳储量的重要因素,但在土壤背景值较大的条件下,很难利用土壤总有机碳来评价不同施肥模式对土壤碳动态的影响^[4]。因此,利用土壤碳组分含量变化能更好地把握施肥对土壤有机碳的影响。土壤有机碳作为农作物生产重要的肥力因素,各碳组分含量与土壤肥力密切相关,其中易氧化有机碳 (EOC) 和颗粒有机碳 (POC) 是土壤有机碳中周转速度快、较不稳定的部分,能反映土壤碳库

的短期变化,是植物营养元素的主要来源,控制着土壤养分的流失;矿物结合态有机碳 (MOC) 能稳定储存于土壤中,维持土壤肥力^[5-7]。

近年来,国内外关于长期不同施肥下土壤有机碳及碳组分的演变特征已做了大量的研究。Liu 等^[8]研究了连续 16 a 黄绵土大豆-玉米轮作体系下不同施肥对土壤有机碳含量的影响,发现长期施用有机肥能显著增加土壤总有机碳含量,而长期单施化肥能减少土壤总有机碳含量;兰宇等^[9]利用棕壤长期定位 31 a 试验研究了不同施肥条件下表层土壤有机碳的含量和储量特点以及土壤固碳速率,结果表明有机 (猪廄肥) 无机肥配施有助于土壤固碳速率的提高;李文军等^[10]研究了 26 a 不同施肥模式对洞庭

湖区典型双季稻轮作水稻土总有机碳及组分的影响,表明长期不同施肥有利于提升土壤总有机碳及组分含量,且以氮磷钾化肥配施有机肥处理效果最好;王玲莉等^[11]通过 26 a 不同施肥对棕壤有机碳组分的影响研究发现,长期单施化肥能降低土壤游离态颗粒有机碳含量,施用猪廄肥和猪廄肥配施化肥能增加土壤有机碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量,且增加效果优于单施化肥。受肥料种类、施肥年限、种植方式、土壤类型等因素影响,对于长期不同施肥(如有机肥和化肥、NPK 平衡施用和不平衡施用)如何影响土壤碳组分尚未得出统一的结论,尤其是潮土上的研究尚鲜有报道。

本研究借助潮土长期定位施肥试验平台,探讨长期不同施肥处理对土壤化学性质及易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MOC)等有机碳组分的影响,通过对土壤有机碳组分的分析与评价全面了解施肥对土壤有机碳状况的影响,以期农业可持续发展提供施肥决策依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于江苏徐淮地区徐州农业科学研究所第 13 耕作区(117°17'E, 34°16'N)。该地处于苏、鲁、豫、皖四省接壤区,属暖温带半湿润气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年平均气温 14℃,全年无霜期约 210 d 左右,年降水量 860 mm。

1.2 供试土壤与作物

试验土壤为黄泛冲积母质发育的砂壤质潮土。试验从 1980 年秋播开始,试验前进行了 2 季作物的匀地试验。2001 年前采用小麦-玉米一年两熟轮作制,2002 年后改为小麦-甘薯一年两熟轮作制。试验开始前表层土壤主要理化性状为:pH 8.01,有机质 10.80 g·kg⁻¹,全氮 0.66 g·kg⁻¹,有效磷 12.00 mg·kg⁻¹,速效钾 63.00 g·kg⁻¹^[12]。

1.3 试验设计

试验采用复因子裂区设计,主处理为不施有机肥和施有机肥,共设 8 个处理:①对照(CK,不施肥),②施氮肥(N),③施氮磷肥(NP),④施氮磷

钾肥(NPK),⑤施有机肥(M),⑥施氮肥和有机肥(MN),⑦施氮磷肥和有机肥(MNP),⑧施氮磷钾肥和有机肥(MNPK)。每处理重复 4 次,随机区组排列,小区面积 33.33 m²。

各处理肥料施用情况如表 1。肥料种类为尿素(N 460 g·kg⁻¹)、磷酸二铵(N 180g·kg⁻¹, P₂O₅ 460 g·kg⁻¹)、硫酸钾(K₂O 500 g·kg⁻¹)。种植甘薯时,肥料作为基肥一次性施入;种植小麦时,肥料分为基肥和追肥两次施入,基追比 1:1。有机肥为堆积制腐的廄肥,每年施用量(鲜基)为 1981—1984 年施马粪 75 t·hm⁻²;1985 年以后改为施牛粪 37.50 t·hm⁻²。有机肥平均含纯 N 为 6.31 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 5.14 mg·kg⁻¹、K₂O 7.39 mg·kg⁻¹,C/N 为 20.30。

表 1 不同施肥处理肥料施用情况

处理 Treatment	有机肥年施用① / (kg·hm ⁻² ·a)	化肥(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)年施用量② / (kg·hm ⁻² ·a)
CK	0	0-0-0
N	0	300-0-0
NP	0	300-150-0
NPK	0	300-150-225
M	37 500	0-0-0
MN	37 500	300-0-0
MNP	37 500	300-150-0
MNPK	37 500	300-150-225

注:CK:不施肥;N:施氮肥;NP:施氮磷肥;NPK:施氮磷钾肥;M:施有机肥;MN:有机肥+氮肥;MNP:有机肥+氮磷肥;MNPK:有机肥+氮磷钾肥。下同。Note:CK: no fertilization, N: nitrogen fertilizer, NP: nitrogen and phosphorus fertilizers, NPK: nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers, M: organic manure, MN: organic manure + nitrogen fertilizer, MNP: organic manure + nitrogen and phosphorus fertilizers, MNPK: organic manure + nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. ①Organic manure application rate, ②Chemical fertilizer application rate (N-P₂O₅-K₂O). The same below.

1.4 样品采集及测定方法

土壤采样时间为 2016 年 10 月甘薯收获后,按之字型采集各小区耕层(0~20 cm)的混合土样,样品风干后过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用。

土壤酸碱度(pH)和电导率(EC)采用 pH 计

(雷磁 PHS-3C, 上海) 和电导率仪 (雷磁 DDSJ-308A, 上海) 测得; 土壤全氮 (TN) 用半微量凯氏法测定; 土壤有机碳 (SOC) 用重铬酸钾氧化—外加热法测定; 有效磷用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠溶液浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵溶液浸提, 火焰光度计法测定^[13]; 土壤易氧化有机碳采用 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化法^[14]测定; 颗粒有机碳采用六偏磷酸钠分散, 重铬酸钾氧化—外加热法测定, 矿物结合态有机碳采用差值法求得^[15-16]。

1.5 数据处理

试验结果统计与分析采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件进行, 所有数据测定结果均以平均值±标准差 (Mean ± SD) 表示。不同施肥处理之间采用邓肯 (Duncan) 新复极差法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 长期不同施肥下土壤化学性质的变化

长期不同施肥对土壤化学性质影响显著(表 2)。与 CK 相比, NP、NPK、MN、MNP 和 MNPK 处理均使土壤 pH 显著降低 ($P < 0.05$); 单施化肥处理 (N、NP 和 NPK) 电导率降低幅度为 7.74%~56.35%, 施用有机肥处理 (M、MN、MNP、MNPK) 电导率降低幅度为 55.47%~71.27%。施肥能显著增加土壤全氮和有效磷含量 ($P < 0.05$), 施有机肥处理土壤全氮、有效磷含量分别较不施有机肥处理平均高 75%和 10.94 倍; NP 和 NPK 处理的土壤有效磷含量较不施肥处理分别高 3.9 倍和 4.4 倍。MNPK 处理土壤速效钾含量最高, 常年不施钾肥的 CK、N、NP 处理土壤速效钾含量显著低于 NPK 处理和有机肥处理 ($P < 0.05$)。

表 2 不同施肥处理的土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties relative to treatment

处理 Treatment	pH	EC / ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TN / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AK / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	7.96±0.02a	350.0±3.88a	0.72±0.04f	4.42±2.07e	52.87±0.46e
N	7.90±0.01ab	319.9±12.05b	0.92±0.01e	7.27±1.91de	47.90±1.46f
NP	7.84±0.04bc	260.6±8.81c	1.02±0.02de	21.67±3.96cd	47.07±1.04f
NPK	7.82±0.03c	131.0±3.60de	1.12±0.02d	25.37±5.46c	99.90±2.05b
M	7.94±0.01a	72.97±5.82g	1.48±0.02c	213.6±7.48a	79.77±0.07c
MN	7.82±0.02c	94.93±3.62f	1.64±0.09b	172.4±4.76b	73.60±1.02d
MNP	7.78±0.01c	110.9±6.15ef	1.82±0.03a	157.5±1.95b	73.30±0.21d
MNPK	7.80±0.01c	134.4±8.54d	1.66±0.03b	157.7±7.77b	138.7±1.19a

注: EC: 土壤电导率, TN: 全氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾; 表中数值均为平均值±标准误差; 同列中不同字母表示处理间差异达 0.05 显著性水平。下同。Note: EC: Electronic conductivity, TN: Total nitrogen, AP: Available phosphorus, AK: Available potassium; The values in the table are means ± SD ($n=4$); Different letters in the same column mean significant difference between treatments at the 0.05 level. The same below.

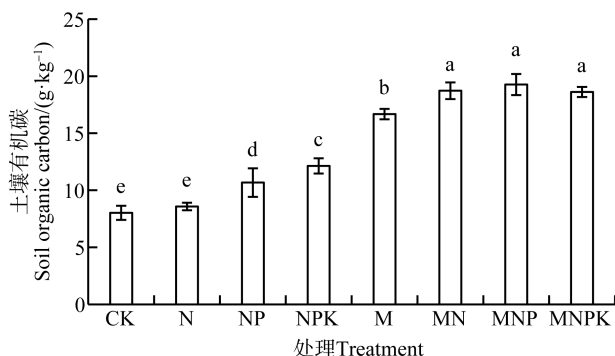
2.2 长期不同施肥对土壤有机碳的影响

施肥 (N 处理除外) 使土壤有机碳 (SOC) 含量显著增加 ($P < 0.05$) (图 1)。施有机肥处理 SOC 含量较不施有机肥处理 (CK、N、NP 和 NPK) 平均增加 86.03%, M、MN、MNP 和 MNPK 处理的 SOC 含量分别较 CK 处理高 107.9%、133.4%、140.2%、132.1%; 对比化肥不同施用模式, 不施有

机肥情况下, SOC 含量总体表现为: NPK > NP > N ($P < 0.05$), 施有机肥情况下, 三种化肥施用模式的 SOC 含量无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 长期不同施肥对土壤易氧化有机碳的影响

与 CK 相比, 施肥显著增加土壤易氧化有机碳 (EOC) 含量, MNPK 处理对 EOC 含量的提高效果最为显著, 提高比例达 72.17% ($P < 0.05$) (图 2),



注：图柱上不同字母表示处理间差异达 0.05 显著性水平。下同。
Note: Different letters above the bars denote significant differences between treatments based on one-way analysis of variance ($P < 0.05$). The same below.

图 1 长期不同施肥下土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content relative to treatment

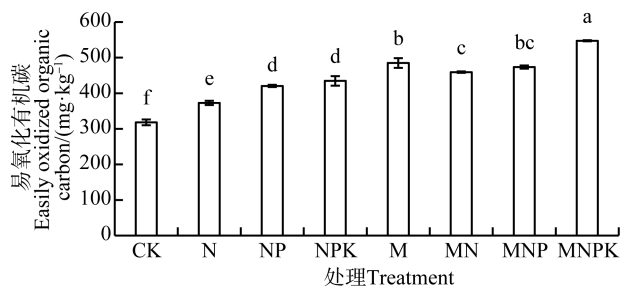
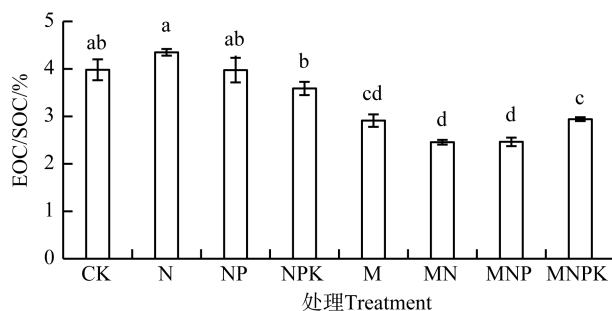


图 2 长期不同施肥下土壤易氧化有机碳含量

Fig. 2 Soil easily oxidized organic carbon content relative to treatment

其次为 M 处理，MN 和 MNP 处理的 EOC 含量无显著差异，但显著高于不施有机肥处理。在化肥施用模式一致的情况下，增施有机肥可显著提高土壤 EOC 含量，MN、MNP 和 MNPK 处理 EOC 含量分别较 N、NP 和 NPK 处理提高 23.18%、12.53% 和 25.92% ($P < 0.05$)。

土壤中易氧化有机碳分配比例是指 EOC 在 SOC 含量中的占比，可反映土壤中易被微生物分解利用的有机碳含量。各施肥处理土壤易氧化有机碳分配比例介于 2.45%~4.35% 之间，N 处理的土壤易氧化有机碳分配比例最高，为 4.35%，MN 处理最低，为 2.45%。施加有机肥后土壤中易氧化有机碳分配比例明显降低 ($P < 0.05$)；对比化肥不同施用模式，不施有机肥条件下 EOC 分配比例总体表现为： $N \geq NP \leq NPK$ ，施有机肥条件下则表现出相反的规律，即 $MNPK > MNP = MN$ ($P < 0.05$) (图 3)。



注：EOC：易氧化有机碳；SOC：土壤有机碳。Note: EOC: Easily oxidized organic carbon; SOC: Soil organic carbon.

图 3 长期不同施肥下土壤易氧化有机碳分配比例

Fig. 3 EOC/SOC in the soil relative to treatment

2.4 长期不同施肥对土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响

与 CK 相比，施肥 (N 处理除外) 显著增加土壤颗粒有机碳 (POC) 含量 ($P < 0.05$) (图 4)，施有机肥处理的 POC 含量较不施有机肥处理平均增加 92.69%。对比施有机肥处理，MNPK 处理的 POC 含量显著高于 M 处理和 MN 处理 ($P < 0.05$)，其他处理间 POC 含量的差异未达到显著性水平 ($P > 0.05$)。对比化肥不同施用模式，NP、NPK 处理的 POC 含量显著高于 N 处理 ($P < 0.05$)。

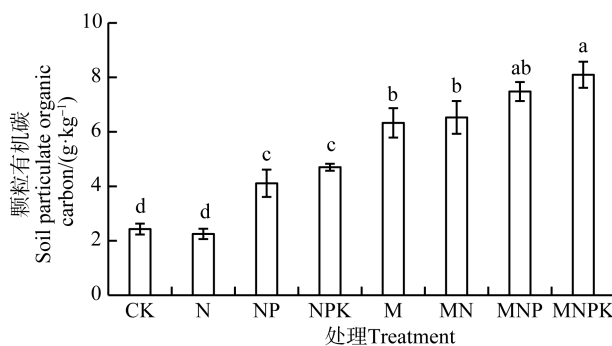


图 4 长期不同施肥下土壤颗粒有机碳含量

Fig. 4 Soil particulate organic carbon content in the soil relative to treatment

施有机肥处理的矿物结合态有机碳 (MOC) 含量较 CK 平均增加 10.06% ($P < 0.05$) (图 5)，单施化肥不能增加土壤 MOC 含量 ($P > 0.05$)。在化肥施用模式一致的情况下，增施有机肥可显著提高土壤 MOC 含量，MN、MNP 和 MNPK 处理 MOC 含量分别较 N、NP 和 NPK 处理高 93.04%、79.45% 和 41.59%，不同化肥施用模式间 MOC 含量无显著差异。

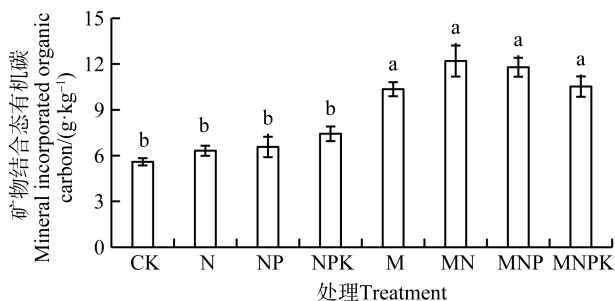


图5 长期不同施肥下土壤矿物结合态有机碳含量

Fig. 5 Soil mineral incorporated organic carbon content in the soil relative to treatment

与 CK 相比, 各施肥处理中仅 MNPK 处理的 POC 分配比例和 MOC 分配比例有显著变化 ($P < 0.05$) (图 6), 其中 POC 分配比例增加了 13.33%, MOC 分配比例相应降低; N 处理的 POC 分配比例显著低于除 MN 处理之外的其他施肥处理, 其他各施肥处理的 POC 分配比例和 MOC 分配比例无显著差异 ($P > 0.05$)。

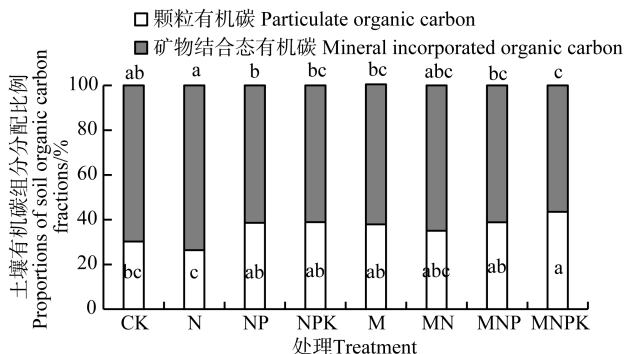


图6 长期不同施肥下土壤有机碳组分分配比例

Fig. 6 Proportions of soil organic carbon fractions relative to treatment

2.5 长期不同施肥对土壤有机碳组分的贡献

采用下式计算长期不同施肥模式下土壤中增加的总有机碳进入不同有机碳组分的比例: 施肥对有机碳组分的贡献率 (%) = (施肥处理土壤中某有机碳组分含量 - CK 处理中某有机碳组分含量) ÷ (施肥

处理土壤总有机碳含量 - CK 处理土壤总有机碳含量) × 100^[17]。结果表明, 单施化学 N 肥条件下, 增加的总有机碳基本全部进入 MOC 组分; 施 NP 和 NPK 肥条件下, 增加的总有机碳主要进入 POC 组分; 施 M、MN、MNP 条件下, 增加的总有机碳主要进入 MOC 组分; 氮磷钾平衡施用并增施有机肥 (MNPK) 条件下, 所增加的总有机碳可 1:1 进入 POC 和 MOC 组分 (图 7)。

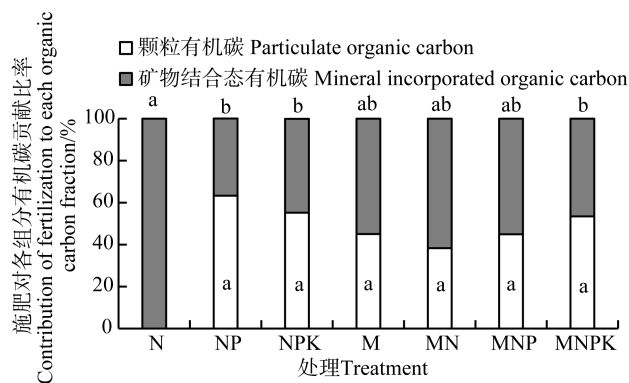


图7 施肥所增加有机碳进入 POC 和 MOC 组分的比例

Fig. 7 Distribution of increased soil organic carbon in POC and MOC relative to treatment

3 讨论

3.1 长期不同施肥对土壤化学性质的影响

陆海飞等^[18]在长期定位施肥 30 a 的红壤性水稻土上的研究得出, 与 CK 处理相比, 各施肥处理中仅 MNPK 处理能提升土壤全氮含量, N 和 NPK 处理不能显著提升土壤全氮含量。本研究发现, 与 CK 相比, 各施肥处理的土壤全氮含量均显著提升 (表 2), 这可能是由于各施肥样地长期进行施氮处理和作物根茬、秸秆还田的缘故。相比 CK 处理, 施磷钾肥或有机肥的处理 (NPK、M、MN、MNP 和 MNPK) 土壤有效磷和速效钾含量增加, 而不施磷钾肥或有机肥的处理 (N 和 NP) 土壤速效钾含量降低, 有机无机肥配施的 MNPK 处理有效养分含量最高 (表 2), 导致这种现象的原因可能是作物生长要不断吸收土壤中的有效养分, 根茬和秸秆还田的有效养分少于作物吸收的量, 长期有机无机肥配施可以更好地补充土壤速效养分^[19-22]。与 CK 相比, 各施肥处理能显著降低土壤 pH 和电导率, 其中有机无机肥配施对土壤电导率的降低效果优于单施化肥 (表

2), 这可能是由于常年施用有机肥后, 土壤中有胶体数量增加, 吸附盐基离子能力增强。

3.2 长期不同施肥对土壤碳组分的影响

本研究结果表明, 各施肥处理对土壤有机碳含量的提升效果由高到低依次为有机无机肥配施处理、单施有机肥处理、单施化肥处理(图 1)。龚伟等^[23]对华北平原小麦-玉米轮作农田的 18 a 田间施肥试验研究表明, 施用有机肥及有机无机肥配合施用是增加土壤有机碳的关键, 与本研究结果一致。在仅施化肥的情况下, 与 CK 相比, NP 和 NPK 处理也显著增加了土壤有机质含量, 可能与化肥能促进根系和微生物活动、增加作物生物量和秸秆归还等有关, 但增加幅度不如施用有机肥的大; 单施氮肥处理的土壤有机碳含量与 CK 无显著差异(图 1), 这与 Treseder^[24]和 Liu 等^[25]的研究结果——单施氮肥能减少土壤有机碳含量不一致, 分析原因可能一方面与试验年限有关, 周晶等^[26]总结前人研究发现 10 a 以上的定位施肥试验的结论均支持施氮肥能增加土壤有机碳, 另一方面可能与秸秆、根茬等是否还田有关。

易氧化有机碳具有移动快、稳定性差与易氧化的特点, 可以表征土壤有机质短暂的波动情况。本研究中, 在不施有机肥的情况下, 单施氮肥可促进土壤 EOC 含量增加, 但效果不如 NPK 平衡施用(图 2); 在施入有机肥时, 所配施化肥的种类对土壤 EOC 含量有很大的影响, MN 和 MNP 处理间无显著差异, MNPK 处理提升效果最为显著, 原因可能是加入有机肥后, 供给微生物底物增多, 加速了有机物质的周转, 释放更多的土壤易氧化有机碳。李忠徽等^[27]研究了有机肥施用对黄绵土有机碳组分的影响, 发现施有机肥处理土壤 EOC 含量较不施有机肥处理增加 7.8%; 陈涛等^[28]通过湖南省 3 个稻田长期定位施肥试验发现, 化肥配施有机肥处理的土壤 EOC 含量显著高于不施肥对照, 本研究结果表明施有机肥处理土壤 EOC 含量较不施有机肥处理增加 27.12%, 这也证实了前人的研究结论。但赵玉皓等^[29]在褐土长期施肥研究中发现, 尽管化肥和有机肥配合施用明显提升了土壤 EOC 含量, 但单施化肥或有机肥对土壤 EOC 无明显影响, 出现这种现象的原因可能是肥料养分形态影响了土壤微生物的活动, 可能会使土壤 EOC 的生物消耗变大, 土壤 EOC 总量变化不明显。

贺美等^[30]对黑土的研究发现, 长期有机无机配施对土壤 POC 含量提高显著, 且有机肥用量越多提高效果越明显。本研究表明, 施肥(单施氮肥除外)能显著提高土壤 POC 含量, 有机无机肥配施较单施化肥或有机肥效果显著(图 4)。主要是因为有机肥进入土壤后与部分砂粒结合, 直接提供了与 POC 组成相近的有机碳组分, 再加上化肥的配施, 也在一定程度上促进了外源有机物料的分解和原有有机物质的周转^[31-32], 对 POC 的形成和转化起到了促进作用。各施肥处理(N 处理除外)均能在一定程度上增加土壤 MOC 和 POC 含量, 但从碳组分分配比例来看, 有机无机肥配施处理 POC 分配比例较单施化肥大, 其中 MNPK 处理最高(图 6), 主要是因为该处理新鲜有机物料年投入量最大, 而新鲜有机物料在逐渐分解过程中优先进入 POC 组分^[33]。施肥对有机碳组分的贡献度因化肥施用模式和有机肥施用与否而不同, 单施 N 肥增加的总有机碳量较少; 施 NP 和 NPK 肥增加的总有机碳大多进入 POC(图 7), 可能与碳输入以根茬和秸秆为主, 更有利于 POC 组分周转有关^[34]; 施有机肥条件下, 增加的总有机碳在 MOC 组分的分配率明显提高(图 7), 可能与施有机肥能直接提供与 MOC 组成相近的有机碳组分有关^[35]。不同施肥模式对有机碳组分的贡献度不同, 分析原因可能是: 一方面土壤碳输入类型(如秸秆、有机肥等)的相对比例因施肥处理不同而不同, 而不同外源有机物料对 POC 和 MOC 的贡献可能是不一致的^[36]; 另一方面, 不同施肥处理对土壤微生物数量和群落结构的影响不同, 施有机肥更有利于微生物数量增加和细菌群落占优势^[37], 从而更有利于新碳在 MOC 组分的分配。

4 结 论

长期施肥可显著改善土壤化学性质, 施有机肥处理的土壤有机碳、全氮和有效磷含量较不施有机肥处理平均高 86%、75%和 10.94 倍; 施有机肥能有效降低土壤 pH 和电导率, 有机无机肥配施效果优于单施化肥或单施有机肥。施肥能显著提高土壤易氧化有机碳的含量, MNPK 处理对土壤易氧化有机碳含量的提升效果最好, 提升比例达 72.17%。NPK 平衡施用对颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含

量的提升效果优于仅施氮肥,但差于有机无机配施。MNPk 处理所增加的总有机碳在颗粒有机碳与矿物结合态有机碳的分配率基本相等。由此可见,有机肥施用尤其是氮磷钾平衡施用并增施有机肥,对于改善土壤化学性质、提升土壤碳组分含量、促进新碳在各碳组分均衡分配有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10 (2): 423—436.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627.
- [3] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478 (7367): 49—56.
- [4] Garten C T, Wullschlegel S D. Soil carbon inventories under a bioenergy crop (Switchgrass): Measurement limitations. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28 (4): 1359—1365.
- [5] Ren C, Wang T, Xu Y, et al. Differential soil microbial community responses to the linkage of soil organic carbon fractions with respiration across land-use changes. *Forest Ecology & Management*, 2018, 409: 170—178.
- [6] Ma J, Kang F, Cheng X, et al. Moderate thinning increases soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantations. *Geoderma*, 2018, 329: 118—128.
- [7] Xu J H, Gao L, Sun Y, et al. Distribution of mineral-bonded organic carbon and black carbon in forest soils of Great Xing'an Mountains, China and carbon sequestration potential of the soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 236—246. [徐嘉晖, 高雷, 孙颖, 等. 大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力. *土壤学报*, 2018, 55 (1): 236—246.]
- [8] Liu H F, Zhang J Y, Ai Z M, et al. 16-Year fertilization changes the dynamics of soil oxidizable organic carbon fractions and the stability of soil organic carbon in soybean-corn agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 320—330.
- [9] Lan Y, Asshraf M I, Han X R, et al. Effect of long-term fertilization on total organic carbon storage and carbon sequestration rate in a brown soil. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (1): 264—270. [兰宇, Asshraf M I, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响. *环境科学学报*, 2016, 36 (1): 264—270.]
- [10] Li W J, Peng B F, Yang Q Y, et al. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (3): 488—500. [李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响. *中国农业科学*, 2015, 48 (3): 488—500.]
- [11] Wang L L, Han X R, Yang J F, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions in a brown soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (1): 79—83. [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. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (1): 79—83.]
- [12] Wei M, Zhang A J, Zhu Ge Y P, et al. Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2017, 23 (2): 304—312. [魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (2): 304—312.]
- [13] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [14] Weil R R, Islam K R, Stine MAGruver J B, et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, 18 (1): 3—17.
- [15] Jr C T G, Iii W M P, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 1999, 45 (2): 115—145.
- [16] Adams J L, Tipping E, Bryant C L, et al. Aged riverine particulate organic carbon in four UK catchments. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 648—654.
- [17] 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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (4): 831—836. [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. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4): 831—836.]
- [18] Lu H F, Zheng J W, Yu X C, et al. Microbial community diversity and enzyme activity of red paddy soil under long-term combined inorganic-organic fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21 (3): 632—643.

- [陆海飞, 郑金伟, 余喜初, 等. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响. 植物营养与肥科学报, 2015, 21 (3): 632—643.]
- [19] Wei M , Zhang A J, ZhuGe Y P, et al. Effects of long-term fertilization on soil fertility in yellow fluvo-aquic soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (3): 838—846. [魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥方式对黄潮土肥力特征的影响. 应用生态学报, 2017, 28 (3): 838—846.]
- [20] Xia X, Shi K, Huang Q R, et al. The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 697—705. [夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化. 土壤学报, 2015, 52 (3): 697—705.]
- [21] Liu Z L, Yu W T, Zhou H, et al. Effects of long-term fertilization on aggregate size distribution and nutrient content. Soils, 2011, 43 (5): 720—728. [刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响. 土壤, 2011, 43 (5): 720—728.]
- [22] Fang C Y, Tu N M, Zhang Q Z, et al. Effects of fertilization modes on available nutrient contents of reddish paddy soils and rice yields. Soils, 2018, 50 (3): 462—468. [方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响. 土壤, 2018, 50 (3): 462—468.]
- [23] Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on soil particulate organic carbon and nitrogen in a wheat maize cropping system. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2375—2381. [龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响. 应用生态学报, 2008, 19 (11): 2375—2381.]
- [24] Treseder K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies. Ecology Letters, 2008, 11 (10): 1111—1120.
- [25] Liu Y, Shi G, Mao L, et al. Direct and indirect influences of 8 year of nitrogen and phosphorus fertilization on *Glomeromycota* in an *Alpine meadow* ecosystem. New Phytologist, 2012, 194 (2): 523—535.
- [26] Zhou J, Jiang X, Ma M C, et al. Effects of long-term nitrogen fertilization on soil fertility and microorganism: A review. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(6): 8—13. [周晶, 姜昕, 马鸣超, 等. 长期施氮对土壤肥力及土壤微生物的影响. 中国土壤与肥料, 2016 (6): 8—13.]
- [27] Li Z H, Wei B M, Liu D, et al. Effect of calcium carbonate content and composted manure application on soil organic carbon fractions and CO₂ emissions in loessal soil. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2498—2505. [李忠徽, 魏彬萌, 刘丹, 等. 黄绵土中碳酸钙含量和有机肥施用对土壤有机碳组分及 CO₂ 排放的影响. 环境科学学报, 2018, 38 (6): 2498—2505.]
- [28] Chen T, Du L J, Hao X H, et al. Effect of long-term fertilization on soil active organic carbon in paddy soils. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 809—814. [陈涛, 杜丽君, 郝晓晖, 等. 长期施肥对水稻土活性有机碳的影响. 土壤通报, 2009, 40 (4): 809—814.]
- [29] Zhao Y H, Zhang Y J, Li G C, et al. Soil organic carbon stock and active carbon fractions under four kinds of long-term fertilization. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35 (7): 1826—1833. [赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分. 生态学杂志, 2016, 35 (7): 1826—1833.]
- [30] He M, Wang L G, Zhu P, et al. Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6379—6389. [贺美, 王立刚, 朱平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化. 生态学报, 2017, 37 (19): 6379—6389.]
- [31] He M, Wang Y C, Wang L G, et al. Effects of subsoiling combined with fertilization on the fractions of soil active organic carbon and soil active nitrogen, and enzyme activities in black soil in Northeast China. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 446—456. [贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响. 土壤学报, 2020, 57(2): 446—456.]
- [32] Wang X F, Hu F, Peng X H, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon pools and their turnovers in a red soil. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (5): 954—961. [王雪芬, 胡锋, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响. 土壤学报, 2012, 49 (5): 954—961.]
- [33] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 281—290.
- [34] Xu M, Li X L, Cai X B, et al. Impact of land use type on soil organic carbon fractionation and turnover in southeastern Tibet. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(19): 3714—3725. [徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周

- 转变化特征. 中国农业科学, 2018, 51 (19): 3714—3725.]
- [35] Zhang J, Xu N T, Meng Q F, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (2): 107—113. [张娟, 徐宁彤, 孟庆峰, 等. 有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响. 农业工程学报, 2019, 35 (2): 107—113.]
- [36] Duval M E, Galantini J A, Capurro J E, et al. Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. Soil & Tillage Research, 2016, 161: 95—105.
- [37] Wei M, Hu G, Wang H, et al. 35 years of manure and chemical fertilizer application alters soil microbial community composition in a Fluvo-aquic soil in Northern China. European Journal of Soil Biology, 2017, 82: 27—34.

(责任编辑: 陈荣府)