

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

张娟, 徐宁彤, 孟庆峰, 姜佰文*

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 松嫩平原西部土壤盐渍化现象普遍, 严重制约着农业的发展。施用有机肥能够提高土壤有机碳的含量, 这是改良盐碱土的核心。该研究依托盐碱土改良长期定位试验, 依据施用有机肥的年限, 共设置 4 个处理, 分别为: 施用有机肥 5a、9a 和 16a 的处理, 以未施肥的盐碱土壤作为对照处理。试验通过对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值、土壤有机碳组分、玉米产量、土壤 pH 和电导率等多项指标的测定, 量化玉米源及有机肥源有机碳对土壤总有机碳的贡献, 明确各有机碳组分的分配比例, 探讨长期施用有机肥对盐碱土壤有机碳来源、组分、玉米产量及盐碱程度的影响。结果表明: 长期施用有机肥与种植玉米的方式显著增加盐碱土壤的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值 ($P < 0.01$), 且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值随培肥年限的增加而增加; 同时以植物及土壤的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值为基础, 借助二元方程计算得出盐碱土壤有机培肥 9a 后土壤有机碳中来源于玉米残茬的比例为 14.36%, 来源于有机肥的比例为 25.92%, 盐碱土壤原有有机碳所占的比例为 59.72%; 长期施用有机肥显著增加玉米产量, 降低土壤 pH 和电导率, 并且随有机肥施用年限的增加玉米产量提高, 土壤 pH 和电导率呈下降趋势; 长期施用有机肥显著增加有机碳各组分碳密度, 0~40 cm 土层的活性 I、活性 II 和惰性有机碳的密度, 随有机肥施用年限的增加均呈现出递增的变化趋势; 土壤有机碳总量的增加来自于各组分含量的增加, 0~40 cm 土层有机碳含量的增加主要源于惰性和活性 II 有机碳, 其次是活性 I 有机碳。综上所述, 有机培肥是土壤有机碳及玉米产量提升的双赢措施, 且有机肥源有机碳对有机碳的贡献大于玉米源碳的输入。长期有机培肥可以丰富植物的直接碳源, 亦可促进碳素的长期固存, 增强盐碱土的碳汇功能。

关键词: 土壤; 有机碳; 有机肥; 玉米; 同位素分析; 盐碱土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.014

中图分类号: S15

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0107-07

张娟, 徐宁彤, 孟庆峰, 姜佰文. 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[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 107—113. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.014 http://www.tcsae.org

Zhang Juan, Xu Ningtong, Meng Qingfeng, Jiang Baiwen. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 107—113. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.014 http://www.tcsae.org

0 引言

中国盐碱土分布广泛, 面积约为 $3.70 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 主要分布在东北、华北、华东和西北四大区域^[1]。东北地区是世界三大苏打盐碱土分布区之一, 盐碱土面积约为 $3.84 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 其中耕作盐碱土面积为 $1.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全区耕地总面积的近十分之一^[2]。东北地区作为中国商品粮主要生产基地, 提高和保持土壤供肥能力, 始终是盐碱土壤改良工作的重点。

土壤有机碳 (SOC) 是保证土壤肥力的关键因素, 其含量高低直接影响作物生产。施用有机肥可增加 SOC 含量, 改善土壤养分状况^[3-6]。同时, 提高 SOC 含量也是施用有机肥改良盐碱土的核心。杨明等^[7-9]采用有机培肥措施改良盐碱土 1~2 a 后, SOC 总量有不同程度的增加,

增量在 1.97~4.10 g/kg 之间。然而, 以往研究多针对 SOC 总量变化, 对于长期施用有机肥措施下苏打盐碱土壤有机碳来源及其各组分递变规律的研究鲜少开展。

SOC 是由分解程度和周转时间各异的多种有机物质所组成, 各组分对外界环境条件、农田管理方式变化的响应时间差异较大。酸水解法是土壤有机碳组分的有效划分方法^[10], 其中能够被水解的部分按照水解的难易程度可划分为活性及慢性有机碳, 活性有机碳即有机碳源中能够被植物直接吸收利用的部分, 分解程度高, 周转时间短, 对外界条件变化的响应比 SOC 总量更加敏锐^[11-12]; 非水解部分被划分为惰性有机碳, 分解程度较低且周转时间极为漫长, 故可以反映有机碳的长期固存能力^[12-14]。

本研究依托盐碱土改良长期定位试验, 以不同培肥年限的耕作盐碱土壤作为研究对象, 通过对土壤和植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值、土壤有机碳组分、玉米产量、土壤盐碱性等多项指标的测定, 借助二元方程量化玉米源及有机肥源有机碳对土壤总有机碳的贡献, 明确各有机碳组分的分配比例, 探讨长期施用有机肥对盐碱土壤有机碳来源、有机碳组分、玉米产量及盐碱程度的影响。研究结果将丰富对苏打盐碱土壤碳素累积过程的认识, 并为中国盐碱土壤固碳和地力提升技术的选择提供科学依据。

收稿日期: 2018-04-21 修订日期: 2018-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (41501316) 和 (41501315), 东北农业大学“青年才俊”计划 (16QC11), 青年创新人才计划 (UNPYSCT-2017025), 国家重点研发计划项目子课题 (2016YFD0300806-3)

作者简介: 张娟, 讲师, 博士, 主要从事碳循环相关研究。

Email: zhangjuan2080@163.com

*通信作者: 姜佰文, 教授, 博士, 主要从事植物营养与施肥技术相关研究。

Email: jbwneau@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东北农业大学盐碱土长期定位试验站位于黑龙江省肇州县永乐镇太丰村 (125.06°E, 45.40°N), 该区地处松嫩平原西部, 属典型的中温带大陆性季风气候, 年均温为 3.70 °C, 年均降水量为 425 mm, 年均蒸发量为 1 800 mm。土壤类型为苏打型草甸碱土和碱化草甸土, 呈复区分布。典型自然植被为羊草和芦苇。开垦前土壤基本理化性质为: pH 值 9.56, 电导率 6.23 dS/m, SOC 为 6.36 g/kg, 全氮含量 0.37 g/kg。

1.2 试验设计

试验开始于 2000 年, 依据开垦年限共设置 4 个处理, 开垦即配合有机肥施用, 各处理分别为: 施用有机肥 5a (Y5)、施用有机肥 9a (Y9) 和施用有机肥 16a (Y16), 以未施肥的土壤作为对照处理 (CK)。小区采用随机区组设计, 每个处理 3 次重复, 每个小区面积为 65m², 其中垄长 10 m, 垄宽 0.65 m, 共 10 垄。有机肥种类为腐熟的牛粪, 牛粪的养分含量为: 有机质 334.21 g/kg, 全氮 11.21 g/kg、全磷 10.67 g/kg 和全钾 13.85 g/kg, 每年秋整地前施用 45 m³/hm²。供试植物为玉米 (龙丹 288), 拔节期追施尿素 450 kg/hm², 玉米生育期内无灌溉。玉米生育期结束后, 小区内玉米全部收获用于玉米产量测定, 并折算成国际单位 kg/hm²。

1.3 土壤样品采集与制备

土壤样品于 2016 年 4 月玉米播种前采集, 每个试验小区分别采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤样品。将土壤样品摊成 2 cm 左右厚度的薄层, 适当的压碎, 翻动, 剔除植物残体等外侵物。在室内阴凉通风处自然风干后, 部分样品磨细过 0.25 mm 筛, 用于 SOC 总量及其各组分的测定; 部分样品过 0.10 mm 筛, 用于土壤 δ¹³C_{SOC} 值的测定。

1.4 测定方法

土壤 pH 选用 5:1 水土比, 采用 MP512-03 型精密 pH 分析仪测定; 电导率 (EC) 选用 5:1 水土比, 采用 MP515-01 精密电导率仪测定。土壤有机碳组分采取酸水解两步法测定^[10]: 土壤样品在 105 °C 条件下, 用 2.50 mol/L 的 H₂SO₄ 水解, 制得的上清液供活性 I 有机碳测定; 土壤样品再经 13 mol/L H₂SO₄ 水解, 制得的待测液供活性 II 有机碳测定; 惰性有机碳含量由差减法测得。有机碳总量与各有机碳组分含量采用 Analytikjena 2100s multi N/C 分析仪进行测定。

土壤 δ¹³C_{SOC} 值 (VPDB) 利用 Finnigan MAT Delta Plus XP 同位素质谱仪进行测定: 样品测定前需利用 HCl 预处理 12 h 去除无机碳干扰, 然后在 1020 °C 的纯氧环境下高温燃烧确保有机物氧化完全。

1.5 土壤有机碳密度计算

$$SOC_t = \sum_{i=2}^n SOC_i \times \rho_i \times H_i (1 - \partial_{2mm} / 100) / 10$$

式中 SOC_t 为土壤有机碳密度, t/hm²; SOC_i 为第 i 层土壤有机碳含量, %; ρ_i 为第 i 层土壤容重, g/cm³; H_i 为第 i

层土层厚度, cm; ∂_{2mm} 为粒径 ≥ 2 mm 的砾石含量, 由于盐碱区砾石含量极低, 该值忽略未计。

1.6 土壤有机碳来源计算

当原始盐碱土开垦种植玉米后, 玉米残体 (根和残茬) 随之输入到土壤之中, 此时土壤有机碳既包括原有土壤的有机碳, 又包括来源于玉米残体的有机碳。由于原始盐碱土壤自然植被的 δ¹³C_{SOC} 值与玉米的 δ¹³C_{SOC} 值有较大差异, 所以盐碱土壤开垦种植玉米后, 就相当于对土壤中的有机碳进行了原位标记。据此可以根据质量守恒原理, 利用公式 (1) 估算盐碱土壤种植玉米后, 土壤有机碳中来源于盐碱地固有有机碳和玉米残体的有机碳的比例^[15]。

$$\delta_5 = f\delta_A + (1-f)\delta_0 \quad (1)$$

式中 δ₅ 为盐碱土壤开垦种植玉米后土壤有机碳的 δ¹³C 值, δ_A 为玉米 δ¹³C 值, δ₀ 为未开垦盐碱土壤的 δ¹³C 值, f 为来源于玉米残体的有机碳占土壤有机碳的比例, (1-f) 为来源于盐碱土壤固有的有机碳的比例。

对于没有添加有机肥的处理, 玉米源有机碳可用下式计算

$$SOC_{maize} = SOC \times f \quad (2)$$

$$SOC_{original} = SOC \times (1-f) \quad (3)$$

式中 SOC_{maize}、SOC_{original} 分别为玉米源和盐碱土原有有机碳所占的比例, SOC 为土壤有机碳总量。对于有机肥处理, 有机肥来源的 SOC 可利用总有机碳与原有有机碳和玉米源有机碳之间的差值进行计算。

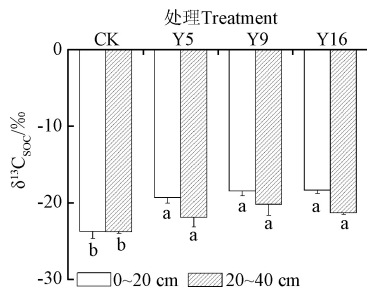
2 结果与讨论

2.1 土壤稳定性同位素对长期施用有机肥的响应

稳定性同位素可反映 SOC 的来源, 分解程度及土壤肥力变化等诸多过程。因此, 土壤有机碳稳定性同位素技术常用于有机碳周转及累积特征的研究^[16]。长期施用有机肥显著影响盐碱土壤 δ¹³C_{SOC} 值 (图 1), 表现为: 有机培肥后, 0~20 cm 土层, 处理 Y5, Y9, Y16 的土壤 δ¹³C_{SOC} 值显著高于 CK 处理 (P<0.05), 各培肥处理间尽管差异不显著, 但土壤 δ¹³C_{SOC} 值随培肥年限的增加表现出增加的趋势, 这与 Ma 等^[24]研究结果相似; 20~40 cm 土层的土壤 δ¹³C_{SOC} 值低于 0~20 cm 土层, 但各处理的土壤 δ¹³C_{SOC} 值亦显著高于 CK 处理 (P<0.05), 各施肥处理的 δ¹³C_{SOC} 值比 CK 处理增加 1.87~2.43‰, 低于 0~20 cm 土层的增量, 且各施肥年限间的土壤 δ¹³C_{SOC} 值差异不显著。

不同植被的 δ¹³C 值相差较大。一般而言, C₄ 植物 δ¹³C 值在 -9‰~19‰ 之间, 平均为 -13‰, C₃ 植物 δ¹³C 值在 -23‰至 -40‰ 之间, 平均为 -27‰^[17-18], 土壤 δ¹³C_{SOC} 值与其上长期生长的植被的 δ¹³C 值十分相近, 一般略高于植被 δ¹³C 值 0.5‰~3‰, 同时也受外界环境条件、农田管理措施及微生物分馏等多种因素影响 (差异 ≤ 3‰)^[4,19-22]。试验区开垦前地表植被为羊草 (C₃ 植物), CK 处理 0~20 cm 土层 δ¹³C_{SOC} 值为 -23.72‰, C₃ 植物是 SOC 的主要来源。开垦后种植玉米 (C₄ 作物), 玉米秸秆作为饲料,

产出的牛粪用于改良盐碱土，这显著影响各土层 SOC 的来源，施用有机肥 16a 后 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值分别增加 5.35‰ 和 2.43‰，说明在 C_4 作物种植及施用牛粪的作用下土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值显著增加，这与 Dou 等^[23]和 Zhang 等^[15]的研究结果相一致。



注：不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著，下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments in the same soil layer, the same below.

图 1 不同培肥处理土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值的变化情况

Fig.1 Dynamic of $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ in different fertilization treatment

2.2 有机肥长期施用对土壤有机碳来源的影响

原始盐碱土壤自然植被的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值与玉米的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值差异很大，根据质量守恒原理，可计算玉米源有机碳所占的比例。本研究以开垦 9a 种植玉米，单施无机肥料不施有机肥的处理为对照，结果表明：有机培肥 9a 后，土壤有机碳总量中来源于玉米残茬的比例为 14.36%，来源于有机肥的比例为 25.92%，盐碱土壤原有有机碳比例为 59.72%。相似的研究在中国其他区域也有开展：Zhang 等^[15]在江西红壤长期定位实验站的研究表明，红壤有机培肥 11a 后，玉米源有机碳的比例约为 11.00%，有机肥源的有机碳比例约为 21.00%，其研究结果与本研究相近，但有机肥源有机碳的比例略低于本研究，其原因可能与本研究中较高的有机肥施用量直接相关；武宁^[25]研究表明，自然植被开垦种植麦-玉两熟作物 9a 后，来源于小麦及玉米的有机碳比例约为 12.00%，由于一年种植两季作物，故来源于玉米的有机碳比例低于本研究。

2.3 长期施用有机肥对土壤有机碳密度的影响

土壤有机碳的动态变化体现了土壤中碳源物质输出与输入之间的动态平衡。伴随有机肥施入，外源碳的输入量不断增加，土壤有机碳密度亦随之增加，如图 2 所示，0~20 cm 土层，Y5、Y9 和 Y16 处理的土壤有机碳密度比 CK 处理分别增加 49.81%，47.51% 和 68.99%。方差分析结果表明：0~20 cm 土层有机碳密度随培肥年限的增加而增加，Y16 处理的有机碳密度达到最高，各培肥处理有机碳密度均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)；20~40 cm 土层的有机碳密度与 0~20 cm 土层相似，各培肥处理有机碳密度亦显著高于 CK 处理，然而各培肥处理间有机碳密度差异不显著。

有机肥作为长效碳源可显著增加土壤有机碳密度^[26-28]，且随培肥年限的增加而增加，利用盐碱土壤有机碳密度折算有机碳的年增长速率为 1.33 t/hm²。许多学者在其他

区域也开展过相似研究。尤孟阳等^[29]在海伦实验站的研究结果表明，黑土有机培肥 14a 后土壤有机碳密度由未培肥时的 53.80 t/hm² 增加到 62.90 t/hm²，有机碳年增长速率 0.65 t/hm²；胡诚等^[30]在武汉南湖实验站的研究亦表明，黄棕壤有机培肥 25a 后，土壤有机碳密度由 44.50 t/hm² 增加到 60.5 t/hm²，有机碳年增长速率 0.64 t/hm²。相比较而言，盐碱土壤有机碳的年增长速率大于黑土和黄棕壤的年增长速率，这可能与黑土 (28.1 g/kg) 和黄棕壤 (15.91 g/kg) 长期定位试验开展时较高的土壤有机碳含量密切相关。

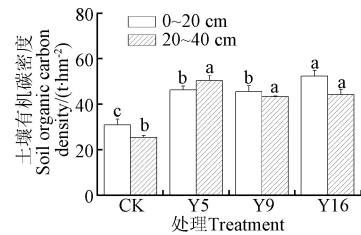


图 2 不同培肥处理 SOC 密度的变化情况

Fig.2 Dynamic of soil organic carbon density in different fertilization treatment

2.4 长期施用有机肥对 SOC 各组分土壤有机碳密度的影响

土壤活性有机碳作为植物的直接碳源，易于作物吸收利用。有机培肥后，0~20 cm 土层，处理 Y5、Y9 和 Y16 的活性 I 有机碳密度显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)，各施肥处理间差异不显著（图 3a）。在 20~40 cm 土层，其活性 I 有机碳密度低于 0~20 cm 土层，各施肥处理活性 I 有机碳密度亦显著高于 CK。

土壤活性 II 有机碳的分解程度介于活性 I 有机碳及惰性有机碳之间，可水解，但难度高于活性 I 有机碳，即通常所理解的缓效性有机碳。经过长期的有机培肥，土壤活性 II 有机碳亦呈现随土层深度增加而降低，随培肥年限增加而增加的趋势（如图 3b 所示）。在 0~20 cm 土层，培肥处理 Y5、Y9 和 Y16 的土壤活性 II 有机碳密度比 CK 处理分别增加 5.64、4.18 和 7.07 t/hm²，方差分析结果表明，施肥处理土壤活性 II 有机碳密度显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)，各施肥处理间差异不显著。在 20~40 cm 土层，土壤活性 II 有机碳密度的增量低于 0~20 cm 土层，但各处理土壤活性 II 有机碳密度均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)。

土壤惰性有机碳即有机碳的非水解部分，主要由木质素、腐殖质、多糖及多酚等组分构成，在 SOC 总量中所占比例较大。长期有机培肥措施影响土壤惰性有机碳密度。如图 3c 所示，在 0~20 cm 土层，Y5、Y9 和 Y16 处理的惰性有机碳密度均显著高于 CK 处理，且 Y16 处理的惰性有机碳密度显著高于其他处理 ($P<0.05$)。在 20~40 cm 土层，各处理惰性有机碳密度的增幅高于 0~20 cm 土层，且施肥处理惰性有机碳密度显著高于 CK 处理，施肥处理间差异不显著。

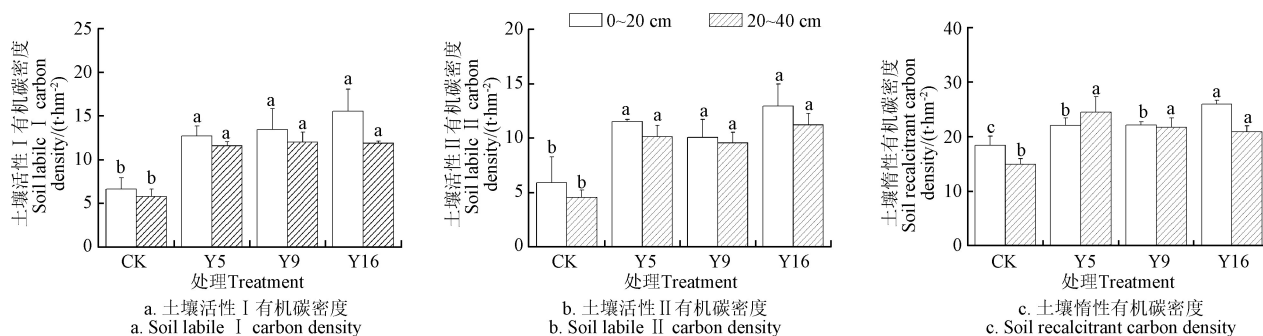


图3 不同培肥处理土壤活性 I、II 有机碳和惰性有机碳密度变化

Fig.3 Dynamic of soil labile I, II and recalcitrant carbon density in different fertilization treatment

土壤有机碳密度的增加源于有机碳各组分密度的增加,从各组分对土壤有机碳密度增加的贡献情况来看(表1),0~20 cm 土层,惰性有机碳>活性 II 有机碳>土壤活性 I 有机碳,可见有机培肥初期活性有机碳贡献较大,而长期培肥条件下惰性有机碳贡献较大;而 20~40 cm 土层,活性 II 有机碳>惰性有机碳>活性 I 有机碳,变化特征与 0~20 cm 土层有所差异,活性 II 有机碳贡献较大。有机肥施入影响有机碳各组分的碳密度,其分配特征在不同区域略有差异。例如, Dou 等^[23]在吉林公主岭的研究表明,黑土有机培肥 25a 后土壤有机碳密度由 49.50 t/hm² 增加到 56.10 t/hm²,且各组分中以惰性有机碳密度增加为主,以土壤活性有机碳密度的增加为辅; Zhang 等^[11]的研究表明,灰漠土开垦为农田 60 a,期间适当配合有机肥施入,0~30 cm 土层内土壤有机碳密度增加 26.00 t/hm²,其中活性 I、活性 II 和惰性有机碳密度分别增加 3.00、3.00 和 20 t/hm²。有机培肥后土壤有机碳密度及各组分的碳密度均显著增加,其原因一方面为牛粪作为碳源物质直接施入到土壤^[31];一方面为施用有机肥能够增加作物根系和凋落物归还土壤的数量^[32];另外,牛粪中纤维素、半纤维素和木质素的含量较高,可增加惰性碳源的比例;同时,牛粪作为新鲜碳源施入到土壤之中可以激发 SOC 的矿化^[33],这在一定程度上也促进了有机碳的周转。

表1 有机碳各组分碳密度所占土壤有机碳密度的比例

Table 1 Contribution rate of each SOC fraction to SOC density

土层深度 Depths/cm	处理 Treatment	对土壤有机碳密度增加的贡献率 Contribution rate of each SOC fraction/%		
		活性 I 有机碳 Soil labile I carbon	活性 II 有机碳 Soil labile II carbon	惰性有机碳 Soil recalcitrant carbon
0~20	Y5	39.95	36.53	23.52
	Y9	36.60	30.62	32.78
	Y16	30.94	32.50	36.56
20~40	Y5	27.80	26.91	45.29
	Y9	35.00	27.87	37.13
	Y16	31.13	34.95	33.92

由此可见,苏打盐碱土壤长期有机培肥既可以提高土壤肥力,增加植物生长所需的直接碳源,又有利于土壤碳素的长期固存,增强土壤的碳汇功能。

2.5 长期施用有机肥对玉米产量的影响

长期有机培肥显著影响玉米产量(图4),玉米产量

随培肥年限增加呈现递增趋势,Y16 处理的玉米产量最高,其次是 Y5 和 Y9 处理,CK 处理的玉米产量最低,这与 Meng 等^[34]的研究结果相一致。方差分析结果表明:各培肥处理玉米产量均显著高于 CK 处理,培肥处理间以 Y16 处理的产量为最高。

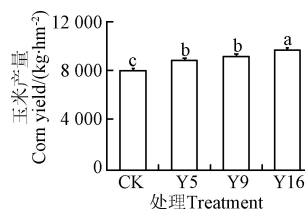


图4 不同培肥处理玉米产量的变化情况

Fig.4 Dynamic of corn yield in different fertilization treatment

2.6 长期施用有机肥对土壤盐碱性的影响

长期施用有机肥显著影响土壤盐碱性。土壤 pH 随有机肥施用年限的增加呈现出递减的变化趋势,CK 的土壤 pH 最高,处理 Y16 的土壤 pH 最低(图 5a)。施用有机肥各处理的土壤 pH 均显著低于 CK 处理($P<0.05$),各施肥处理之间的土壤 pH 差异不显著。

土壤电导率与 pH 具有相似的变化趋势(图 5b),CK 的电导率最高,其次是处理 Y5、Y9,而处理 Y16 的电导率最低。经统计分析可知,施用有机肥各处理的电导率与 CK 间呈显著性差异($P<0.05$),而施用有机肥的各处理间差异不显著。

可见,采用有机培肥措施,伴随土壤有机碳含量增加,土壤盐碱程度显著减低,其原因主要是土壤施用有机肥可改善土壤通透性,利于表层土壤盐分向土体下层淋洗^[35],同时有机肥中的有机组分分解形成的有机酸可以降低土壤中的碱性物质^[35]。

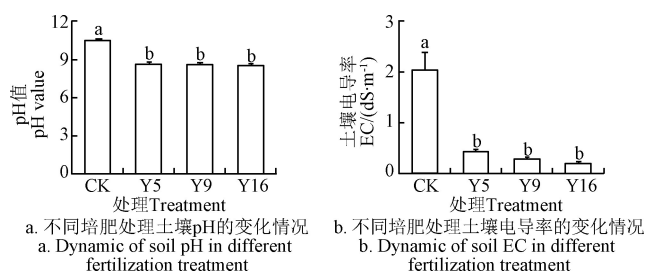


图5 土壤 pH 值、电导率变化情况

Fig.5 Dynamic of soil pH and EC

3 结 论

1) 长期施用有机肥与种植玉米的方式显著增加盐碱土壤的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值。随有机肥施用年限的增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值呈现上升趋势。

2) 有机培肥 9a 后, 盐碱土壤有机碳中来源于玉米残茬的比例为 14.36%, 来源于有机肥的比例为 25.92%, 盐碱土壤原有有机碳的比例为 59.72%, 可见有机肥源有机碳对土壤有机碳的贡献大于玉米源有机碳。

3) 长期施用有机肥显著增加土壤有机碳密度及各组分的有机碳密度, 0~40 cm 土层有机碳含量的增加主要源于惰性和活性 II 有机碳, 其次是活性 I 有机碳。

4) 长期施用有机肥显著增加玉米产量, 降低土壤 pH 和电导率, 并且随有机肥施用年限的增加玉米产量提高, 土壤 pH 和电导率呈下降趋势。

参 考 文 献

- [1] 王利民, 陈金林, 梁珍海, 等. 盐碱土改良利用技术研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(1): 143—148.
Wang Limin, Chen Jinlin, Liang Zhenhai, et al. Research progress of improvement and utilization of saline and alkali soil[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(1): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [2] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 东北地区盐碱土特征及其农业生物治理[J]. 土壤, 2006, 38(3): 256—262.
Yao Rongjiang, Yang Jinsong, Liu Guangming. Characteristics and agro-biological management of saline-alkalized land in northeast China[J]. Soils, 2006, 38(3): 256—262. (in Chinese with English abstract)
- [3] Xu Y M, Liu H, Wang X H, et al. Changes in organic carbon index of grey desert soil in northwest China after long-term fertilization[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 554—561.
- [4] Yang X Y, Sun B H, Zhang S L. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13: 402—414.
- [5] 李辉, 张军科, 江长胜, 等. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 247—255.
Li Hui, Zhang Junke, Jiang Changsheng, et al. Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 247—255. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥处理对玉米生长期潮土微生物生物量和活度的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 122—130.
Chen Ji, Zhao Bingxin, Zhang Jiabao, et al. Effect of long-term fertilization on microbial biomass and activity in fluvo-aquic soil during maize growth period[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 122—130. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨明, 孙毅, 高玉山, 等. 有机肥对苏打盐碱土的改良效果研究[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(3): 43—46, 62.
Yang Ming, Sun Yi, Gao Yushan, et al. Effects of organic manure on improving soda saline-alkali soil[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2013, 38(3): 43—46, 62. (in Chinese with English abstract)
- [8] 燕新红. 不同改良方法对碱化草甸土理化性状的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
Yan Xinhong. Effect of Different Improvement Measures on Physicochemical Characteristics[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [9] Bhatti A U, Khan Q, Gurmani A H, et al. Effect of organic manure and chemical amendments on soil properties and crop yield on a salt affected entisol[J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 46—51.
- [10] Rovira P, Vallejo V R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach[J]. Geoderma, 2002, 107(1/2): 109—141.
- [11] Zhang Juan, Wang Xiujun, Wang Jiaping. Impact of land use change on profile distributions of soil organic carbon fractions in the Yanqi Basin[J]. Catena, 2014, 115: 79—84.
- [12] Banger K, Kukal S S, Toor G, et al. Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farm yard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 27—35.
- [13] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(2): 207—222.
- [14] 吴庆标, 王效科, 欧阳志云. 活性有机碳含量在凋落物分解过程中的作用[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1295—1299.
Wu Qingbiao, Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun. Effects of labile organic carbon on the litters decomposition process[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1295—1299. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhang Wenju, Liu Kailou, Wang Jinzhou, et al. Relative contribution of maize and external manure amendment to soil carbon sequestration in a longterm intensive maize cropping system[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1—12.
- [16] 牛晓音, 王延华, 杨浩. 滇池双龙流域不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分分异[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 1043—1050.
Niu Xiaoyin, Wang Yanhua, Yang Hao, et al. Effects of different land uses on soil erosion and soil nutrient variability in the Shuanglong catchment of Dianchi Watershed[J].

- Research of Environmental Sciences, 2014, 27(9): 1043—1050. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wang Jinzhou, Wang Xiujun, Xu Minggang, et al. Contributions of wheat and maize residues to soil organic carbon under long-term rotation in north China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11409.
- [18] 赵亚南. 长期不同施肥下紫色水稻土有机碳变化特征及影响机制[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Zhao Ya'nan. Characteristic and Mechanism of Organic Carbon Sequestration of Purple Paddy Soil under Long-term Fertilization[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [19] Powers J S, Schlesinger W H. Geographic and vertical patterns of stable carbon isotopes in tropical rain forest soils of Costa Rica[J]. Geoderma, 2002, 109(1): 141—160.
- [20] Wynn J G, Bird M I. C₄-derived soil organic carbon decomposes faster than its C₃ counterpart in mixed C₃/C₄ soils[J]. Global Change Biology, 2007, 13(10): 2206—2217.
- [21] 李志鹏, 潘根兴, 张旭辉. 改种玉米连续 3 年后稻田土壤有机碳分布和 ¹³C 自然丰度变化[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 244—251.
- Li Zhipeng, Pan Genxing, Zhang Xuhui. Topsoil organic carbon pool and ¹³C natural abundance changes from a paddy after 3 years corn cultivation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 244—251. (in Chinese with English abstract)
- [22] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成极其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- Leng Yanhui. Effect of Long-term Fertilization on Composition and Stability of Aggregates in Brown Earth and Black Soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [23] Dou Xiaolin, He Ping, Cheng Xiaoli, et al. Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses[J]. Scientific Reports, 2016, 1: 1—9.
- [24] Ma Li, Yang Linzhang, Xia Lizhong, et al. Long-term effects of inorganic and organic amendments on organic carbon in a paddy soil of the Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 186—196.
- [25] 武宁. 耕作措施与秸秆还田对麦-玉两熟农田土壤有机碳来源的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- Wu Ning. Effect of Tillage and Straw Returning on Sources of Soil Organic Carbon in Wheat-maize Crop System[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [26] Li Juan, Wen Yanchen, Li Xuhua, 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[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175: 281—290.
- [27] He Y T, He X H, Xu M G, et al. Long-term fertilization increases soil organic carbon and alters its chemical composition in three wheat-maize cropping sites across central and south China[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 177: 79—87.
- [28] Benbi Dinesh, Brar Kiranvir, Toor Amardeep, et al. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system[J]. Pedosphere, 2015, 25: 534—545.
- [29] 尤孟阳, 李海波, 韩晓增. 土地利用变化与长期施肥对黑土有机碳密度的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 155—159.
- You Mengyang, Li Haibo, Han Xiaozeng. Land use change and long-term fertilization impact on SOC density in black soil of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 155—159. (in Chinese with English abstract)
- [30] 胡诚, 乔艳, 李双来, 等. 长期不同施肥方式下土壤有机碳的垂直分布及碳储量[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 689—692.
- Hu Cheng, Qiao Yan, Li Shuanglai, et al. Vertical distribution and storage of soil organic carbon under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 689—692. (in Chinese with English abstract)
- [31] Yang Z H, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95: 161—171.
- [32] Bhattacharyya R, Chandra S, Singh R D, et al. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94: 386—396.
- [33] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 118—127.
- Qi Ruimin, Zhao Bingqiang, Li Juan, et al. Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 118—127. (in Chinese with English abstract)
- [34] Meng Qingfeng, Li Dawei, Zhang Juan, et al. Soil properties and corn (*Zea mays* L.) production under manure application combined with deep tillage management in solonchic soils of Songnen Plain[J]. Northeast China Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(4): 879—890.
- [35] Chang C, Sommerfeldt T G, Entz T. Soil chemistry after eleven annual applications of cattle feedlot manure[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20: 475—480.

Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield

Zhang Juan, Xu Ningtong, Meng Qingfeng, Jiang Baiwen^{*}

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Soil salinization is common phenomenon in Songnen Plain of northeast China, which seriously restricts the development of agriculture. Long-term manure application can significantly increase the content of soil organic carbon, which is the major method for saline-sodic soils amelioration. According to the cattle manure application history, manure applied to saline-sodic soils for 5, 9 and 16 years were used as the experimental treatments, and soil without manure application was used as a control. Based on long-term experimentation, soil $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ value, soil organic carbon fraction, corn yield, soil pH and soil EC were determined. The relative contribution of plant residue and organic manure to soil carbon sequestration was quantified. Furthermore, the distribution ratio of soil organic carbon fraction was explicit. Simultaneously, the characteristic of soil organic carbon fraction distribution were discussed in saline-sodic soils. Our results indicated that corn (*Zea mays* L.) with long-term manure application significantly ($P<0.05$) increased the $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ value in saline-sodic soils ($P<0.05$), and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ was increased with the duration of manure application. On the other hand, the contribution of corn-derived carbon (below-ground roots and residues) and the manure-derived carbon to soil organic carbon can be calculated from $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ value of plant and soil by using a two-end member mixed model. Our results showed that after nine years manure application, corn-derived soil organic carbon comprised about 14.36% of total soil organic carbon and manure-derived soil organic carbon accounted for 25.92%, and the other part was from original soil organic carbon of saline-sodic soils. Long term manure application significantly resulted in an increase in corn yield and decreases in soil pH and EC, and corn yield increased with the number of year of manure application. Conversely, soil pH and EC decreased with the number of year of manure application. Generally, soil organic carbon can be chemically divided into labile I, labile II and recalcitrant carbon that have different sensitivities to changes of environmental conditions. Changes in SOC fractions may provide an early indicator of changes in total SOC. Long-term manure application also significantly increased the density of each soil organic carbon fraction, and the density of soil organic carbon fractions, such as labile I carbon, labile II carbon and recalcitrant carbon, was increased with the number of year of manure application at the 0-20 and 20-40 cm, respectively. The density of soil organic carbon fractions was the highest in the treatment with manure application for 16 years. Increased contents of soil organic carbon was most contributed by soil recalcitrant carbon and soil labile II carbon, followed by soil labile I carbon at the 0-20cm and 20-40cm, respectively. Summarily, long-term manure application can directly enrich the carbon source of plant, promote the long-term sequestration of soil carbon, and enhance the carbon sink function of saline-sodic soils. Long term manure application was necessary to a win-win strategy for both SOC sequestration and corn production. The contribution of manure derived carbon to SOC increase was larger than corn derived carbon.

Keywords: soils; organic carbon; manure fertilizer; corn; isotope analysis; saline-sodic soils