

不同类型外源碳添加对灰漠土土壤碳储量的影响

陈新邦^{1,2}, 唐光木², 张云舒², 徐万里²

(1.新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830091; 2.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 为探究不同类型外源碳长期施用对耕层灰漠土土壤碳储存及固碳潜力的影响。通过田间定位试验设置秸秆不还田处理, 即 NPK 处理(CK); NPK+1.5 t 秸秆(NPKS); NPK+1.5 t 有机肥(NPKM); NPK+1.5 t 棉秆炭(NPKB1); NPK+3.0 t 棉秆炭(NPKB2), 选取 2013—2021 年采集的土壤为研究对象。对耕层灰漠土土壤容重(BD)、有机碳密度(SOCD)、有机碳累积速率、有机碳储量(SOCR)和施用年限与有机碳储量之间相关性进行分析。经过 9 年定位试验结果表明: (1) 从 2013—2021 年 BD 变化趋势来看, 施用 NPKS、NPKM、NPKB1、NPKB2 与 NPK 相比, 均呈现降低趋势, 与 NPK 相比平均分别降低 1.84%, 0.86%, 5.03%, 6.66%。(2) 相比 NPK, NPKS、NPKM、NPKB1、NPKB2 处理中土壤 SOCD 提升幅度平均分别为 12.21%, 11.04%, 24.14%, 46.95%, 其中, 棉秆炭提升效果显著; 累积速率分别提高 73.16%, 66.95%, 133.52%, 247.18%。(3) NPKS 和 NPKM 处理相比 SOCR 增幅分别为 11.67%~30.88%, 12.2%~33.24%; NPKB1 和 NPKB2 处理 SOCR 提升效果最为显著, 相较于 2013 年最高提升幅度分别为 29.28%, 45.44%。综合来看, 秸秆还田、施用有机肥和棉秆炭均是提高灰漠土土壤碳储量的有效措施, 其中, 添加施棉秆炭处理更有利于灰漠土短期快速提高土壤有机碳固存, 棉秆炭自身含有丰富的营养物质, 长期添加棉秆炭提高土壤碳固存以及改善土壤肥力、缓解温室效应, 从而作为实现碳中和的一种有效途径。

关键词: 生物炭; 灰漠土; 耕层; 有机碳密度; 有机碳储量

中图分类号: X825

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0330-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.042

Effects of Different Types of Exogenous Carbon Addition on Soil Carbon Storage in Grey Desert Soil

CHEN Xinbang^{1,2}, TANG Guangmu², ZHANG Yunshu², XU Wanli²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Xinjiang 830091; 2. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang 830091)

Abstract: In order to explore the effect of long-term application of different types of exogenous carbon on soil carbon storage and carbon sequestration potential of topsoil ash desert soil, the field positioning experiment, which included 5 treatment as no straw is returned to the field (NPK), NPK+1.5 t straw (NPKS), NPK+1.5 t organic fertilizer (NPKM), NPK+1.5 t cotton stalk carbon (NPKB1), and NPK+3.0 t cotton stalk carbon (NPKB2) was conducted. Soil collected from 2015 to 2021 was used as the research object. The correlation between soil bulk density (BD), organic carbon density (SOCD), organic carbon accumulation rate, organic carbon storage (SOCR), application years and organic carbon accumulation rate was analyzed. The results showed that (1) From the perspective of BD trend from 2013 to 2021, the application of NPKS, NPKM, NPKB1, and NPKB2 showed a consistent decreasing trend compared with NPK, with an average decrease of 1.84%, 0.86%, 5.03% and 6.66% compared with NPK, respectively. (2) Compared with NPK, soil SOCD increased by 12.21%, 11.04%, 24.14%, and 46.95% in NPKS, NPKM, NPKB1, and NPKB2 treatments, respectively, and cotton stalk carbon significantly improved soil SOCD. The cumulative rate increased by 73.16%, 66.95%, 133.52%, and 247.18%, respectively. (3) SOCR increased by 11.67% to 30.88% and 12.2%~33.24% in NPKS and NPKM treatments, respectively. NPKB1 and NPKB2 had the

收稿日期: 2022-09-28

资助项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02007)

第一作者: 陈新邦(1997—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事土壤固碳潜力研究。E-mail: 826701066@qq.com

通信作者: 徐万里(1971—), 男, 陕西凤翔人, 博士, 研究员, 主要从事新疆绿洲农田土壤碳氮研究。E-mail: wlxu2005@163.com

most significant SOCR improvement, with the highest improvement of 29.28% and 45.44% compared with 2013, respectively. Taken together, straw returned, cotton and organic carbon application is the effective measures to improve soil carbon of gray desert soil, in which addition of cotton carbon is more advantageous in short-term rapid increase soil organic carbon and carbon sequestration. Cotton charcoal itself contains rich nutrients. Long term cotton carbon addition increases soil carbon sequestration, improves soil fertility, alleviates the greenhouse effect, and is an effective way to achieve carbon neutrality.

Keywords: biochar; gray desert soil; plough layer; soil organic carbon density; soil organic carbon storage

目前,全球气候变暖成为严重的环境问题,并对人类的生存发展产生威胁,为缓解全球气候恶化趋势,减少温室气体排放及寻找有效途径增加生态系统碳汇成为首要任务。土壤作为生态系统的一部分,是人类生存的主要场所,连接着大气圈、水圈和生物圈^[1],是全球生态系统碳库重要的“源”和“汇”,对全球碳平衡、碳交换和碳固存具有重要影响。土壤碳库作为地表生态系统中最大的碳库,碳储量达到 2.7 万亿^[2],分别是大气碳库(7 600 亿 t)的 3.5 倍,是生物碳库(5 600 亿 t)的 4.5 倍,且时常受人为活动影响,任何细微变化都会打破土壤碳平衡。因此,土壤碳固存是减缓温室效应的重要途径,进行土壤修复并提高土壤碳容量,对保障我国粮食安全具有重要战略意义^[3]。随着社会经济高速发展,人口增加对于粮食需求与日俱增^[4],大力开发干旱区农田并提升土壤碳库成为时代趋势。干旱区气候条件恶劣,生境的敏感性和脆弱性,缺水加剧土地退化。由于人类活动影响和植被退化导致土地荒漠化过程加剧,致使全球产生约 36 亿多公顷干旱土地^[5]。大量研究^[6]表明,通过长期培肥处理和土地管理可以改善土壤状况、增加土壤有机碳含量,有利于缓解全球气候变化。土壤有机质是影响土壤养分的储存和供给、土壤结构的稳定性、土壤保水能力以及维持土壤微生境的重要因素,因此,土壤有机碳作为评价土壤肥力和土壤质地的指标之一^[7-9]。土壤有机质长期作为许多学者研究内容,如今,在全球温室效应加剧的背景下,土壤有机碳又被赋予新的内容,作为大气中 CO₂ 排放源之一,如何减缓土壤中 CO₂ 的排放以及增加土壤中的碳固定,成为现阶段研究人员关注的焦点之一。

新疆位于亚欧大陆中部,中国腹地,远离大洋,属温带大陆性干旱气候,年降水量 0~300 mm,蒸发量大,土壤类型以灰漠土为主,易板结,保水保肥能力差,有机质含量低。灰漠土作为我国重要的后备资源耕地,如何改良灰漠土改善土壤质量,并提高土壤碳库是当前的研究方向。近年来,土壤碳储量作为新的研究热点,多以森林生态系统和城市生态系统为研究对象,而以农田为研究对象的较少,且基于长期定位

试验的研究更少。拟以灰漠土为研究对象,对土壤有机碳密度、有机碳密度变化速率以及有机碳储量进行研究,通过连续多年的定点观测,探究土壤碳的动态变化规律、不同施肥处理对干旱区土壤的碳储量以及蓄积特征,对于掌握干旱区土壤碳库动态变化特征并为改良干旱区盐碱地具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验始于 2013 年,新疆乌鲁木齐市新疆农业科学院综合实验场国家灰漠土肥力长期监测试验站(43°94'27"N,87°47'42"E),该试验站坐落于乌鲁木齐市北郊安宁渠镇,属于温带大陆性气候,海拔高度 620 m,年平均降水量 250 mm,年平均蒸发量 2 200 mm,年平均气温 7℃,年日照时间 2 600 h,无霜期 160 天。

试验前取基础土壤,测定砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 45.1%,47.04%和 7.86%,土壤质地为灰漠土,土壤 pH 约为 8.25,EC 为 0.22 mS/cm,有机质、全氮、全磷、全钾分别为 6.71,0.47,0.61,16.45 g/kg。种植作物为棉花,品种为“新陆早 45 号”。施用的棉秆炭由收获后的棉花秸秆自然风干后,由新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所自行烧制而成。

1.2 试验设计与供试土壤

本试验为长期定位小区试验,共设置 5 个处理:(1)秸秆不还田处理,即 NPK 处理(CK);(2)NPK+1.5 t 秸秆(NPKS);(3)NPK+1.5 t 有机肥(NPKM);(4)NPK+1.5 t 棉秆炭(NPKB1);(5)NPK+3.0 t 棉秆炭(NPKB2)。每个处理重复 3 次,采用膜下滴灌栽培模式。不同处理化肥使用量相同,N 300 kg/hm²,30%基施,70%追施,P₂O₅和 K₂O 分别为 138,60 kg/hm²,磷肥和钾肥的 60%作为基肥一次性施入,40%追肥。以 2013—2021 年采集并保存的土壤样本为研究对象,对有机碳含量进行测定并分析耕层土壤有机碳含量的变化特征。供试土壤均采集于棉花收获后的 10 月,在小区内按照“S”形进行多点采样,每个处理采集 0—20 cm 深度土壤,多点土样进行充分混合,捡出肉眼可见的枝叶、石块以及薄膜残渣等,带回实验室自然风干,过 60 目筛装入透明封口袋备用。

1.3 数据处理

(1) 土壤有机碳密度(SOCD)的计算公式^[10]为:

$$\text{SOCD}_i = \text{SOC}_i \times \rho_i \times H \times 10^{-2}$$

式中: i 为 0—20 cm 土层; SOCD_i 为土壤有机碳密度(kg/m^2); SOC_i 为土壤有机碳含量(g/kg); ρ_i 为土壤容重(g/cm^3); H 为土层深度(cm); 10^{-2} 为单位转化系数。

(2) 土壤固碳速率代表某一时间段内土壤有机碳密度的变化速率^[10]:

$$V = (\text{SOCD}_{i2} - \text{SOCD}_{i1}) / \Delta t$$

式中: V 为 0—20 cm 土壤固碳速率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$, V 值为正时, 表明该处理有机碳密度为增加的即碳汇状态, V 值为负时, 表明该处理有机碳密度为减少的即碳源状态; Δt 为试验年限; 在计算土壤固碳速率前去除有机碳密度最大值和最小值, 避免数值波动过大或人为因素带来的误差; SOCD_{i1} 为起始年份土壤有机碳密度值; SOCD_{i2} 为现存土壤有机碳密度值。

(3) 土壤有机碳储量(SOCR)计算公式为^[10]:

$$\text{SOCR}_i = \text{SOCD}_i \times S$$

式中: SOCR_i 为土层有机碳储量(kg); S 为土壤面积

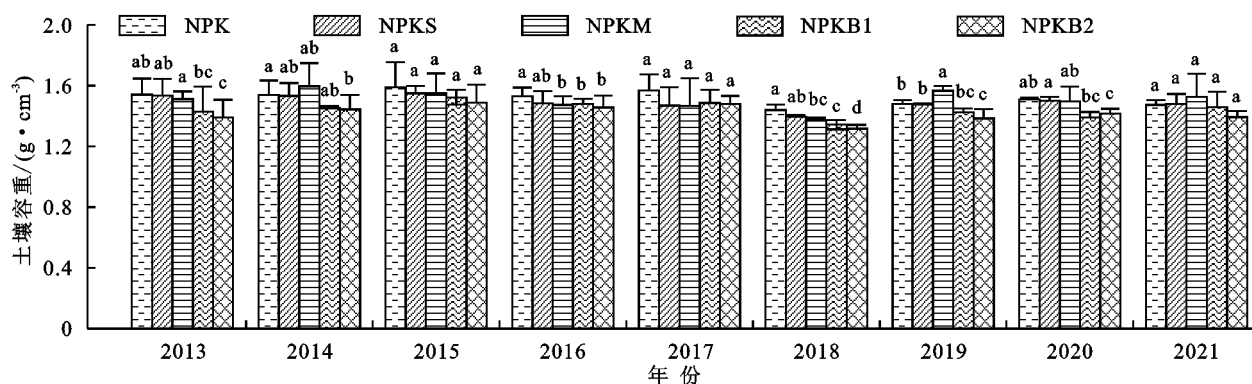
(m^2)。

采用 Excel 2016 软件和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析, 并用采用单因素(One-way ANOVA)-Duncan 法进行不同处理间的显著性差异分析, 差异显著性用不同字母表示, 并用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同外源添加物对耕层土壤容重的影响

土壤容重作为评估土壤有机碳储量的重要影响因素, 因此, 不同处理间土壤容重的变化至关重要。不同外源有机物处理, 灰漠土土壤容重都产生差异(图 1)。各处理从 2013—2021 年土壤容重变化来看, 施用外源有机物与单施化肥相比, 均表现降低趋势(图 1), 能有效降低土壤容重。配施处理相比单施化肥处理平均值降低 3.6%, 棉秆炭处理降低幅度值最大, 2 个处理平均降幅达 5.84%; 从土壤容重年际变化中看, 均在第 6 年中各处理降低幅度最大, 平均降幅达 5.73%。配施处理与单施化肥相比平均分别降低 0.86%, 1.84%, 5.03% 和 6.66%, 土壤容重平均值大小顺序为 $\text{NPK} > \text{NPKM} > \text{NPKS} > \text{NPKB1} > \text{NPKB2}$ (图 2)。



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间各年份土壤容重差异显著($p < 0.05$); 平均值表示各处理 9 年中各数值的平均值。下同。

图 1 各年份不同处理土壤容重变化

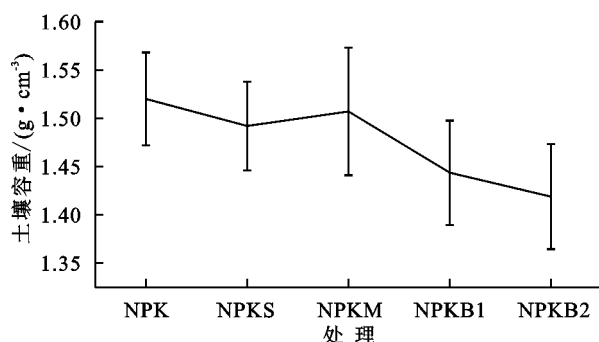


图 2 不同处理各年份土壤容重平均值

2.2 不同外源添加物对耕层土壤有机碳密度的影响

土壤有机碳密度是评价土壤中有机碳储量的重要指标, 通过 2013—2021 年土壤样品进行分析, 结果表明, 以单施化肥有机碳含量为对照, 其余 4 个处理均促进耕层土壤有机碳密度的提升, 且 NPKB1 和 NPKB2 处理的增幅最高效果最显著(图 3)。

在耕层土壤中, 不同处理有机碳密度含量为 2.95~6.54 kg/m^2 , NPK、NPKS 和 NPKM 处理中, 土壤 SOCD 均随年限的增加先上升后降低, 各处理提升幅度分别为 4.22%~30.53%, 11.67%~31.57% 和 12.2%~33.24%; NPKB1 和 NPKB2 处理中土壤有机碳密度均随着年限增加而增加, 但 NPKB1 处理在 2020 年较其他年份土壤有机碳密度提升最显著, NPKB2 处理有机碳密度较其他处理均提升最为显著, 提升幅度分别在 3.22%~29.28% 和 9.92%~45.44%; 与 NPK 相比, NPKS、NPKM、NPKB1 和 NPKB2 处理有机碳含量平均值均有提升, 且 NPKB1 和 NPKB2 处理提升较显著, 各处理分别增加 12.21%, 11.04%, 24.14% 和 46.95%, 各处理土壤有机碳密度平均值大小顺序为 $\text{NPKB2} > \text{NPKB1} > \text{NPKS} > \text{NPKM} > \text{NPK}$ 。

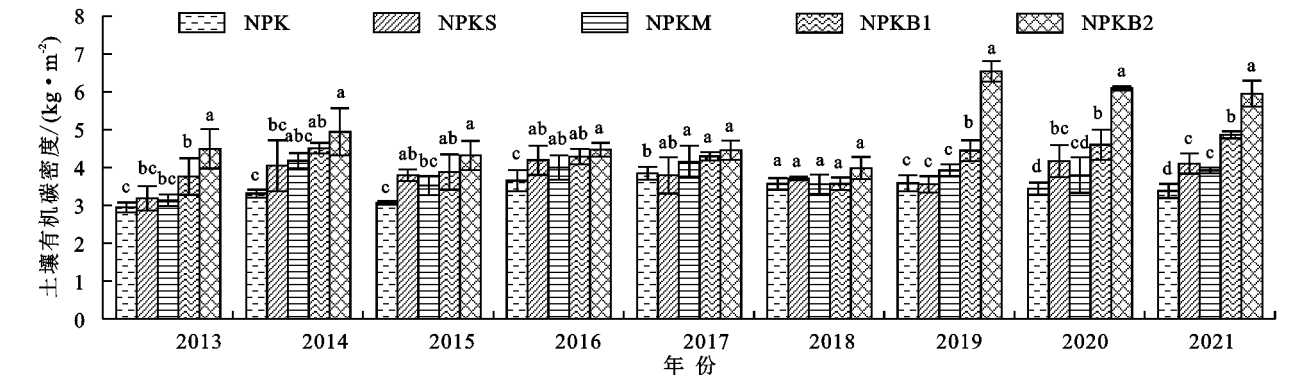


图 3 各年份不同处理下土壤有机碳密度变化

2.3 不同外源添加物对耕层土壤有机碳累积速度的影响

各配施处理组有机碳密度 9 年平均累积速率均高于单施化肥处理,且 NPKB1 和 NPKB2 处理累积速率最为显著,各处理土壤有机碳密度平均值大小顺序为 NPKB2>NPKB1>NPKS>NPKM>NPK,累积速率分别提高 247.18%,133.52%,73.16 和 66.95%(图 4)。

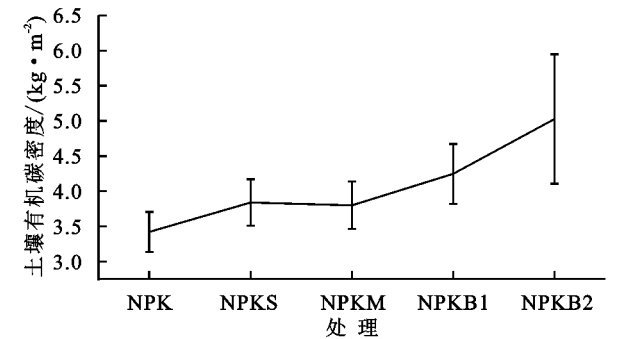


图 4 不同处理各年份土壤有机碳密度平均值

2.4 不同外源添加物对耕层土壤有机碳储量的影响

由图 5、图 6 可知,各处理土壤有机碳储量在耕层土壤中,均随着施用年限增加,其中,NPKM 处理在后 3 年土壤有机碳储量有所降低。NPK 处理中土壤有机碳储量随着年限增加而上升并呈平稳趋势,增量最高达到

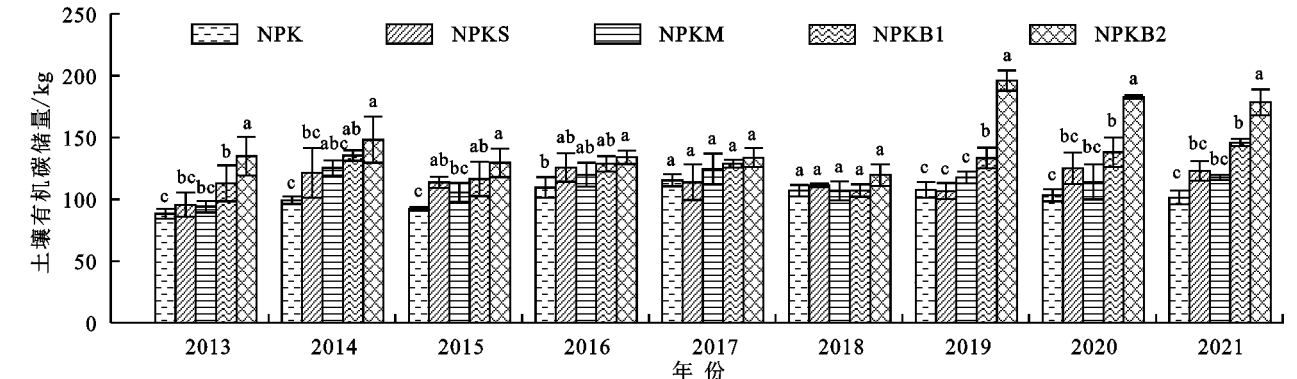


图 6 各年份不同处理下土壤碳储量

2.5 土壤有机碳储量与施用年限的关系

不同处理土壤有机碳储量(x)与施用年限(y)的关系均可用非线性回归方程拟合(图 7),变量之间呈现显著的幂函数关系($p<0.05$),每个处理的处理回

30.53%;NPKS 处理中土壤有机碳储量随着年限增加而上升并呈平稳趋势,土壤有机碳储量增量为 11.67%~30.88%;NPKM 处理中土壤有机碳储量是先上升后降低但总体呈增加趋势,在 2017 年有机碳储量有最大值,增量幅度为 12.2%~33.24%;NPKB1 和 NPKB2 处理施用 9 年,土壤有机碳储量提升效果最为显著,相较于第 1 年最高提升幅度分别为 29.28%,45.44%;虽然,一些处理中某一年份碳储量比第 1 年低,但并不影响整体趋势,NPKS、NPKM、NPKB1 和 NPKB2 处理的平均值均高于 NPK 处理,其中,NPKB1 和 NPKB2 处理的差异最为显著,增幅分别为 24.14%,46.94%,增幅大小顺序为 NPKB2>NPKB1>NPKS>NPKM>NPK。

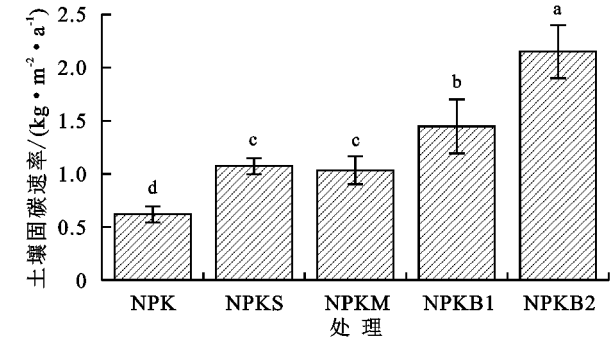


图 5 各年份不同处理下土壤固碳速率变化

归方程决定系数(R^2)分别为 0.699,0.638,0.392,0.524 和 0.586,表明非线性回归方程可分别解释 5 个处理 69.9%,63.8%,39.2%,52.4%和 58.6%的变异。由图 8 可知,除 NPK 处理外其他处理均随着施用年

限呈逐步增加趋势,土壤有机碳储量是逐步增加,且后期碳固存速率逐渐提高,若要维持并提高土壤碳储量需增加碳投入或改善土壤进行培肥处理。进一步分析表明,预计下一年的土壤有机碳增量分别是-21.43,73.24,35.67,84.51,42.9 kg。

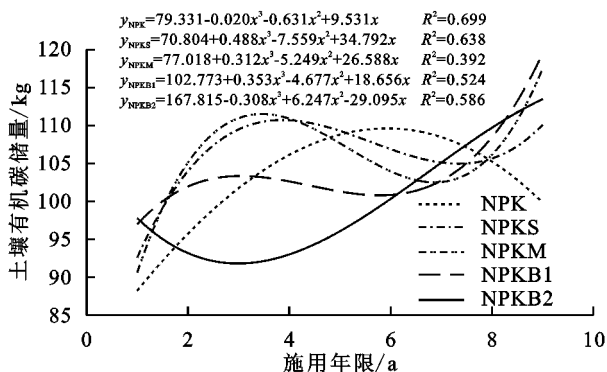


图 7 各处理施用年限与土壤碳储量的关系

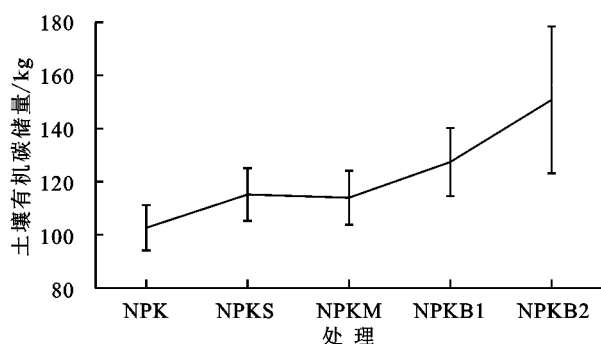


图 8 不同处理各年份土壤有机碳储量平均值

3 讨论

3.1 不同外源添加物对耕层土壤容重的影响

土壤容重是反映土壤理化性质重要指标,同时,作为土壤碳储量的影响因素之一^[11-12],其变化不可忽视。容重受自然因素和人为因素的影响,容重变化能直接影响耕层厚度进而影响碳储量。有研究^[13-14]表明,三江平原有机碳储量难以估算,原因是耕层土壤的厚度的不确定性,而土壤容重变化能直接影响土层厚度。本研究表明,化肥配施有机物有效降低容重,同时,长期耕种棉花经过人为管理,从配施处理长期来看,处于下降趋势。化肥配施秸秆和有机物能增大土壤空隙度,熊云明等^[15]研究发现,长期稻田轮作随着耕种年限,土壤容重表现出降低趋势;温延臣等^[16]通过长期定位试验发现,施用不同的有机肥与单施化肥相比均可有效降低土壤容重。施用生物炭可降低土壤容重,陈红霞等^[17]研究发现,施用生物炭土壤容重降幅最大达到 6.0%,本研究中低量棉秆炭平均降幅达 8.7% 而高量棉秆炭添加降幅达 10.88%,与前人^[17]研究结果基本一致,棉秆炭的添加能改善土结构,显著提高土壤孔隙度,从而降低土壤容重。

3.2 不同外源添加物对耕层土壤有机碳固存效应

土壤碳密度反映土壤有机碳在某一段时间内变

化程度的重要参数^[15,18]。陈云峰等^[19]通过长期定位试验研究发现,长期施肥提高有机碳的累积,土壤有机碳的固存效率得到提高,因此,提高土壤固碳能力;Dou 等^[20]研究显示,通过添加有机物对土壤进行培肥处理后,灰漠土中惰性有机碳储量有所增加。本研究中,通过分析 9 年试验数据得出,尽管单施 NPK 处理未添加外源有机物,但是土壤有机碳密度仍然呈现低量上涨,可能与试验地种有棉花有关,因为存在少量花苞、棉秆和根茬等凋落物还田现象。干旱半干旱荒漠气候条件,使得新疆灰漠土外源物质输入量少,表层有机碳含量变动为 9.19~29.81 g/kg^[21]。施肥是影响土壤碳库水平的重要因素之一,大量研究^[19]表明,长期施用有机肥料均能促进土壤有机碳储量,本研究发现,在耕层有机碳含量提升效果更为明显,各处理存在差异,NPKB1 和 NPKB2 处理与其他处理差异性显著。秸秆还田、有机肥和棉秆炭处理的有机碳固存速率均高于单施化肥处理,不同外源添加物相比单施化肥提高 10.12%~46.61%,因此,对固碳效果提升更显著。

施用有机肥能促进土壤碳库的稳定增长^[19]。本研究中,经过 9 年的定位试验,添加有机物能有效提高土壤碳储量,不同处理土壤碳储量平均增加幅度为 11.93%~57.48%,与大多数研究结果相接近,Zhang 等^[22]研究发现,在双季稻和稻麦轮作模式中,添加有机物料,土壤碳储量每年增幅达到 0.2~4.7,0.6~0.88 t。Fan 等^[23]研究发现,有机物料还田模式能让土壤每年固碳量达 0.51 t。由于生物炭自身含有丰富的稳定性芳香碳能在土壤中千年存在^[2],但也有研究^[24]指出,生物炭施入土壤中具有激发效应(图 8),NPKB1 和 NPKB2 均在第 2 年碳储量开始降低,可能由于棉秆炭的施入前期会出现正激发效应加速有机碳的矿化作用;土壤有机碳的矿化速率也随着施入量的增加而加快^[24],NPKB2 较 NPKB1 提前进入累积阶段,NPKB2 在第 3 年开始曲线呈稳定并累积趋势,而 NPKB1 在第 4 年开始出现稳定并累积趋势,可能是土壤中原有易矿化的有机碳在大致相同的情况下,棉秆炭随着施入量的增加对于易矿化的有机碳作用强度越强,矿化速度也越快,因此,出现 NPKB2 较 NPKB1 提前进入碳储量的累积。施用棉秆炭显著提高有机碳储量,说明棉秆炭对于土壤培肥、改良土壤质地的同时,还能起到稳定的土壤固碳源,具有改良干旱区农田的积极作用。土壤有机碳作为生态系统中重要的生态因子,当作为碳源时能直接影响全球碳平衡^[25],随着时间变化,有机碳在土壤微环境中的发生分解,最终影响在土壤中的累积,本研究中 5 组处理有机碳储量与时间呈多元函数关系,具有显著相关性($p < 0.05$)。此外,增加农田

土壤碳储量不仅能有效缓解温室效应、助力我国的碳中和国家战略,还能提高土壤肥效,改善土壤质量,从而提高作物产量。因此,如何科学有效地改良土壤并提高土壤利用效率是当前亟待解决的,对于保障我国粮食安全具有重要意义。

4 结论

(1)不同外源添加物处理相比于单施化肥,均能降低土壤容重,在5个处理中低量棉秆炭和高量棉秆炭处理降低效果最明显,分别降低5%,7%。

(2)添加不同有机物均能提升土壤有机碳密度、固碳速率,其中,添加棉秆炭处理提升效果最为显著,较单施化肥处理分别提升24%和47%,134%和247%。

(3)秸秆还田、有机肥和棉秆炭等措施均有不同程度地提高土壤碳储量;秸秆还田处理在第2016年时,碳储量最高提升32%;低量棉秆炭处理,在2021年达到最大值,较第1年提升幅度达25%;高量棉秆炭处理,在2019年碳储量最高较第1年提升幅度达45%;棉秆炭处理对于土壤固碳效果较秸秆还田和有机肥较优,且高量棉秆炭效果极为显著,最高提升平均幅度较单施氮磷钾处理达47%。

综上所述,合理利用农业有机物对于增加土壤碳储量,改善土壤环境、提高土壤肥力具有明显效果,其中棉秆炭处理最为显著。因此,应用棉秆炭对于改良干旱区土壤、提高土壤固碳减排能力具有重要意义。

参考文献:

- [1] 薛成杰,方战强.土壤修复产业碳达峰碳中和路径研究[J].环境工程,2022,40(8):231-238.
- [2] 刘天,云菲,蒋伟峰,等.农田施用生物炭的固碳减排效应及其影响因素综述[J].江苏农业科学,2021,49(18):7-13.
- [3] 廖洪凯,李娟,龙健,等.土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(1):240-247.
- [4] Wang Y G, Li Y. Land exploitation resulting in soil salinization in a desert-oasis ecotone[J]. Catena, 2013, 100:50-56.
- [5] Lal R. Carbon sequestration in drylands[J]. Annals of Arid Zone, 2000, 39(1):1-10.
- [6] Batjes N H. Options for increasing carbon sequestration in West African soils: An exploratory study with special focus on Senegal[J]. Land Degradation and Development, 2001, 12(2):131-142.
- [7] 石小霞,赵诣,张琳,等.华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J].环境科学,2017,38(1):301-308.
- [8] Zhao W, Hu Z M, Li S G, et al. Impact of land use conversion on soil organic carbon stocks in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(8):999-1010.
- [9] 常帅,于红博,曹聪明,等.锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J].干旱区研究,2021,38(5):1355-1366.
- [10] 王玉竹,肖和艾,周萍,等.江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例[J].环境科学,2015,36(9):3422-3428.
- [11] 李成,王让会,李兆哲,等.中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素[J].环境科学,2021,42(5):2432-2439.
- [12] 李金全,李兆磊,江国福,等.中国农田耕层土壤有机碳现状及控制因素[J].复旦学报(自然科学版),2016,55(2):247-256,266.
- [13] 许泉,芮雯奕,何航,等.不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异[J].中国农业科学,2006,39(12):2505-2510.
- [14] 张文菊,吴金水,童成立,等.三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析[J].自然资源学报,2005,20(4):537-544.
- [15] 熊云明,黄国勤,王淑彬,等.稻田轮作对土壤理化性状和作物产量的影响[J].中国农业科技导报,2004,6(4):42-45.
- [16] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.
- [17] 陈红霞,杜章留,郭伟,等.施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J].应用生态学报,2011,22(11):2930-2934.
- [18] 董林林,杨浩,于东升,等.引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率[J].生态学报,2014,34(3):690-700.
- [19] 陈云峰,韩雪梅,胡诚,等.长期施肥对黄棕壤固碳速率及有机碳组分影响[J].生态环境学报,2013,22(2):269-275.
- [20] Dou X L, He P, Cheng X L, et al. Long-TERM fertilization affects chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):1-9.
- [21] 新疆维吾尔自治区农业农村厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室.新疆土壤[M].北京:科学出版社,1996:182-198,235-245.
- [22] Zhang J, Wang X J, Wang J. Impact of land use change on profile distributions of soil organic carbon fractions in the yanqi basin[J]. Catena, 2014, 115:79-84.
- [23] Fan J L, Ding W X, Xiang J, et al. Carbon sequestration in an intensively cultivated sandy loam soil in the North China Plain as affected by compost and inorganic fertilizer application[J]. Geoderma, 2014, 230:22-28.
- [24] 唐光木,徐万里,顾美英,等.棉秆炭特性及其对灰漠土壤有机碳矿化的效应[J].生态学报,2019,39(5):1795-1803.
- [25] 肖烨,黄志刚.环境因子对湿地土壤有机碳的影响因素研究进展[J].遵义师范学院学报,2020,22(1):87-91.