

引用格式:

郭振, 曹婷婷, 陈田庆, 王欢元. 玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳矿化特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 708–713.

GUO Z, CAO T T, CHEN T Q, WANG H Y. Soil organic carbon mineralization characteristics in compound soil with maize and potato rotation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(6): 708–713.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳矿化特征

郭振^{1,2,3}, 曹婷婷^{2,3}, 陈田庆^{1,2,3,4}, 王欢元^{1,2,3}

(1.陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安 710075; 2.陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 3.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710021; 4.陕西地建土地工程质量检测有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 以玉米和马铃薯轮作下的复配土为研究对象, 设计砒砂岩与风沙土体积比为 0 : 1(CK)、1 : 5(C1)、1 : 2(C2)和 1 : 1(C3)的 4 种复配农田(复配土), 采用碱液吸收法对复配土有机碳的矿化过程进行研究。结果表明: 相同复配比的土壤有机碳含量差异无统计学意义, 当季种植玉米和马铃薯的复配土有机碳含量较 CK 的分别提高了 27.27%~46.59%、42.47%~70.57%, 除种植玉米的 C1 外, 差异均有统计学意义($P < 0.05$); 培养过程中, 复配土有机碳矿化速率呈现急剧下降、缓慢下降、平稳的 3 个阶段, 在培养结束时, 均以 C3 的降幅最大; 复配土有机碳累积矿化量随培养时间的延长呈指数形式上升, 当季作物和复配比及互作效应均对有机碳累积矿化量影响显著, 种植玉米的 C1 的有机碳累积矿化量较大, 种植马铃薯的则 C3 的较大; 复配土有机碳累积矿化率在 2 种作物间的差异较大, 种植玉米的 C2 和种植马铃薯的 C1 的有机碳累积矿化率较低; 复配土有机碳矿化速率常数与半周转期变化趋势相反, 种植玉米的 C2 和种植马铃薯的 C1 的有机碳矿化半周转期较大。可见, 当季作物和复配比均对复配土有机碳矿化产生了影响, 玉米和马铃薯轮作以砒砂岩与风沙土体积比 1 : 2 较适, 可作为一种生产实践助推毛乌素沙地的生态化发展。

关键词: 玉米; 马铃薯; 风沙土; 砒砂岩; 复配土; 土壤有机碳矿化; 拟合参数; 毛乌素沙漠

中图分类号: S153.6; S156.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)06-0708-06

Soil organic carbon mineralization characteristics in compound soil with maize and potato rotation

GUO Zhen^{1,2,3}, CAO Tingting^{2,3}, CHEN Tianqing^{1,2,3,4}, WANG Huanyuan^{1,2,3}

(1.Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co. Ltd and Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2.Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3.Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 4.Shaanxi Construction Land Engineering Quality Inspection Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Taking compound soil under maize and potato rotation as the research objects, four sets of compound farmlands(compound soil) with soft rock to aeolian sandy soil were designed with their volume ratios of 0 : 1 (CK), 1 : 5(C1), 1 : 2(C2) and 1 : 1(C3). The mineralization process of organic carbon in compound soil was investigated using the alkali absorption method. The results showed that there was no statistically significant difference in soil organic carbon contents for the same compound ratio, and the organic carbon contents of the compounded soil planted with maize

收稿日期: 2023-06-05

修回日期: 2023-11-15

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2021JZ-57); 陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目(2021WHZ0087); 企业自设项目(DJNY2022-24); 陕西省创新能力支撑计划项目(2021PT-053)

作者简介: 郭振(1992—), 男, 陕西大荔人, 博士研究生, 工程师, 主要从事土地整治工程及碳循环研究, 675334047@qq.com

and potato in the current season were increased by 27.27% to 46.59% and 42.47% to 70.57% compared to that of the CK, respectively, and the differences were statistically significant ($P < 0.05$), except for the C1 planted with maize. The rate of organic carbon mineralization in the compound soil during the incubation showed three stages of sharp decline, slow decline and plateau, all of which were greatest at the end of the incubation for C3. The cumulative mineralization of organic carbon in the compound soil increased exponentially with the extension of incubation time, and the crop of the season and the compound ratio as well as the intercropping effect all had a significant effect on the cumulative mineralization of organic carbon, which was greater in C1 for maize cultivation and in C3 for potato cultivation. The cumulative organic carbon mineralization rates of the compounded soils varied considerably between the two crops, with lower cumulative organic carbon mineralization rates in C2 for maize and C1 for potatoes grown. The organic carbon mineralization rate constants of the compounded soils showed the opposite trend to the half turnover period, with C2 for maize and C1 for potato planted having larger half turnover periods for organic carbon mineralization. It could be seen that both the crop of the season and the compound ratio affected the organic carbon mineralization of the compound soil, and the rotation of maize and potato with the volume ratio of soft rock to aeolian sandy soil of 1 : 2 was more suitable, which could be used as a production practice to help promote the ecological development of the Mu Us sandy land.

Keywords: maize; potato; aeolian sandy soil; soft rock; compound soil; soil organic carbon mineralization; fitting parameter; Mu Us Desert

土壤中的有机碳矿化是一个复杂而缓慢的自然过程,且受到土地利用情况、温度、pH 值、水分和矿质元素等多种因素的影响,不同地区、不同土层有机碳含量存在很大差异^[1-6]。蒋小董等^[5]研究发现,在固沙森林的形成发展中,土壤中的碳稳定性随林龄的增长而增强,乔木林固碳比灌木丛更有效。CHENG 等^[6]研究指出,放线菌的相对丰度随植被恢复度的增加而增加,与之共存的关键类群微生物的相互作用可增加有机碳的矿化作用,这与微生物的多样性指数和微生物量碳直接相关。在同一耕作条件下,不同地力玉米地有机质的释放速度随培植时间的增加逐渐降低,最终达到一个稳定值,而随着肥效水平的下降,土壤有机质的矿化速率也逐渐下降^[7]。乌达木等^[8]研究发现,在不同的耕作方式下,单作的土壤及团聚体中的有机碳矿化强度均高于相应的套作的,而在单作条件下,土壤中的有机碳累积释放量以大豆单作的最高。在中国西北,主要施行一年两作种植模式,在玉米-小麦、大豆-小麦、花生-小麦、红薯-小麦等 4 种轮作方式下,土壤净硝化量和净矿化量都以前茬作物的较高,矿化差异尤其与豆类植物的固氮效应密切相关^[9]。闫美霞等^[10]的研究结果表明,典型草原不同植物群落都促进了有机碳的矿化作用,其中,大针茅对有机碳矿化的促进作用最大。可见,不同种植方式下,土壤有机碳的矿化作用存在差异。

毛乌素沙地主要分布在陕西、内蒙古、宁夏 3

省(区)交界的毛乌素沙漠中,该区域广泛分布着砒砂岩和风沙土资源,将两者进行一定体积比例的复配可以形成非均质复配土壤。研究^[11-14]表明,复配土不仅具有较好的物理、化学性质,且对作物具有明显的增产效果。对于毛乌素沙地而言,在经过砒砂岩工程措施改良后实现了复垦功能,但对于轮作模式下的复配土其矿化特征和生态效应如何还需进一步研究。笔者以毛乌素沙地砒砂岩与风沙土复配土的长期野外科学观测站的定位试验为基础,探究玉米和马铃薯轮作模式下复配土壤有机碳的矿化特征,旨在为该地区的农业生产探索可持续、环保、低碳的种植方式提供依据。

1 试验地概况

以陕西省榆林市小纪汗乡大纪汗村为研究区(109°32'54.62"E, 38°27'16.81"N),其地处毛乌素沙地的西南边缘,属于北方的风沙草滩地带,地势南部高、北部低。研究区属温带陆相季风地区,年平均气温 13 °C,年光照时间 2390 h,年无霜期 165 d,气候干热,降水较少。由于受到西北大风的干扰,春天多有沙尘天气。研究区土壤属于风沙土土类、草原风沙土亚类、草原半固定风沙土土属,是一种表层疏松、肥力较差的土壤,其颗粒组成主要是细小的砂粒,黏粒和粉粒含量较少。植被类型以干旱、中等干旱类型的草本类居多。

2 材料与方法

2.1 试验设计

田间试验于 2010 年启动,在研究区建立野外试验田,并设置试验小区,每个小区 12 m×5 m。在试验小区 0~30 cm 深度铺设砒砂岩与风沙土混合的复配土,30 cm 以下为原始风沙土。将砒砂岩与风沙土按 0:1(CK)、1:5(C1)、1:2(C2)和 1:1(C3)的体积比进行混合,建成 4 个砒砂岩与风沙土复配农田(复配土)处理。采取一年一熟制、一年一收的栽培方式,同一小区马铃薯和玉米轮作,一半小区先种植玉米,另一半小区先种植马铃薯。同一季每种作物每个处理 3 个重复,共 24 个试验小区。采用人工种植的方式已种植 13 年。耕作期间内仅施化学肥料,不添加有机肥料。供试化肥类型为尿素、磷酸二铵、氯化钾,每年施 N、P₂O₅、K₂O 量分别为 250、325、150 kg/hm²。

2.2 样品采集

2022 年 10 月,在玉米、马铃薯收获期,按“S”形取样方式对 0~30 cm 的土层进行取样。土样除去动物和植物残体之后,分为 2 部分:一部分放入 4 °C 冰箱中保存,用于有机碳矿化培育试验;另一部分经自然风干之后过孔径 0.149 mm 的筛子,用于土壤有机碳测量。

2.3 测定方法

采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[15]测定土壤有机碳含量。采用室内恒温培养-碱液吸收法^[16]测定土壤有机碳矿化量,其中,在培养 1、3、7、9、11、15、22、25、44、60 d 时进行滴定测量,并计算土壤有机碳累积矿化量、矿化速率和累积矿化率。

2.4 数据统计分析

运用 Origin 2018 的数据分析中的一级动力学方程对累积矿化量进行拟合,获得矿化参数。运用

Excel 2016 对数据进行初步整理,并运用 SPSS 19.0 进行方差分析。

3 结果与分析

3.1 复配土的有机碳含量

从表 1 可知:同一复配比不同当季作物间及同一当季作物的 C1、C2 和 C3 间的土壤有机碳含量的差异无统计学意义;种植玉米的 C2 的土壤有机碳含量较高,与 CK 相比,C1 的土壤有机碳含量提高了 27.27%,但差异无统计学意义,C2 和 C3 的则显著提高,分别增加了 46.59% 和 38.92%;种植马铃薯的 C1 的土壤有机碳含量较高,C1、C2 和 C3 的土壤有机碳含量均较 CK 的显著提高,分别增加了 70.57%、42.47% 和 44.48%。

表 1 玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳含量

Table 1 Organic carbon contents of the compound soils with maize and potato rotation

复配比处理	有机碳含量/(g kg ⁻¹)	
	玉米	马铃薯
CK	(3.52±0.09)b	(2.99±0.04)b
C1	(4.48±0.23)ab	(5.10±0.13)a
C2	(5.16±0.38)a	(4.26±0.15)a
C3	(4.89±0.06)a	(4.32±0.06)a

同列不同字母示不同复配比间的差异有统计学意义(P<0.05)。

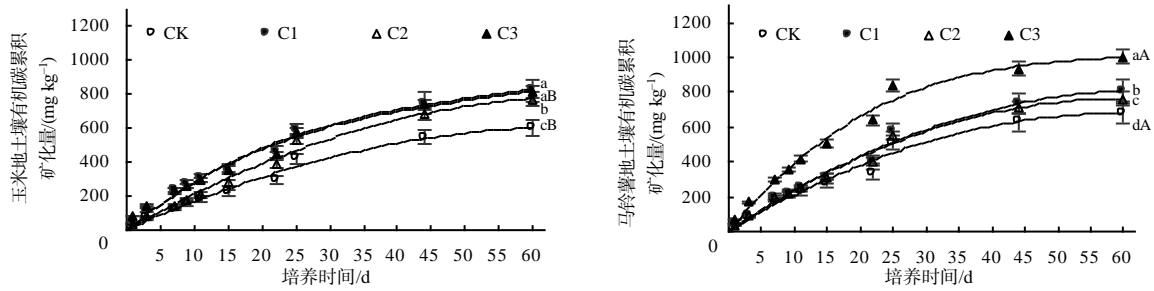
3.2 复配土的有机碳累积矿化量

从表 2 可知,当季作物、复配比及其互作效应均对土壤有机碳累积矿化量有显著影响。从图 1 可知:土壤有机碳累积矿化量随培养时间的延长呈指数增长模式,且增长速率由快至慢;60 d 时,种植马铃薯的 CK 和 C3 的有机碳累积矿化量显著高于种植玉米的,2 种作物的 C1、C2、C3 的有机碳累积矿化量均显著高于 CK 的;种植玉米的 C1、C3、C2、CK 的有机碳累积矿化量依次降低,种植马铃薯的 C3、C1、C2、CK 的依次降低。

表 2 玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳累积矿化量方差分析结果

Table 2 The results of variance analysis of cumulative mineralization of organic carbon in compound soil with maize and potato rotation

变异来源	平方和	均方	F	P
当季作物	22 958.100	22 958.101 8	200.502	0.000 1
复配比	227 946.344	75 982.114 8	663.580	0.000 1
当季作物×复配比	42 627.350	14 209.115 4	124.093	0.000 1



不同小写字母示 60 d 时同一当季作物不同复配比间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 不同大写字母示 60 d 时同一复配比下不同当季作物间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

图 1 玉米和马铃薯轮作的复配土有机碳的累积矿化量

Fig.1 Cumulative mineralization of organic carbon in the compound soil with maize and potato rotation

3.3 复配土的有机碳矿化速率

种植 2 种作物的土壤有机碳矿化速率变化趋势较为一致, 均表现为随着培养时间的延长而降低, 可划分为急速降低、缓慢降低和平缓稳定 3 个阶段 (图 2): 第 1 阶段为 0~3 d (培养开始后第 1~4 天), 此时各处理的土壤有机碳矿化速率均急剧下降, 种植玉米的 C3 的降幅最大, 种植马铃薯的 CK 的降

幅最大; 第 2 阶段为 4~25 d, 此时矿化速率缓慢波动下降, 种植玉米的各处理间的差异不明显, 而种植马铃薯的 C3 的较大, CK 的最小; 第 3 阶段为 26~60 d, 此时矿化速率下降较为平缓, 与 1 d 时相比, 培养 60 d 时 C3 的矿化速率降幅最大, 种植玉米的 C2 和马铃薯的 C1 的降幅较低。

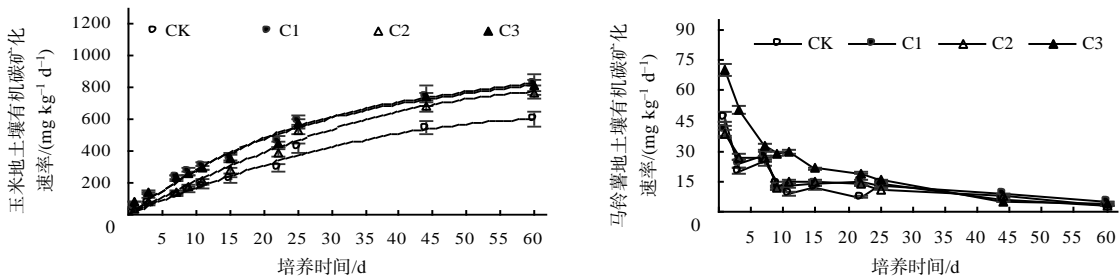


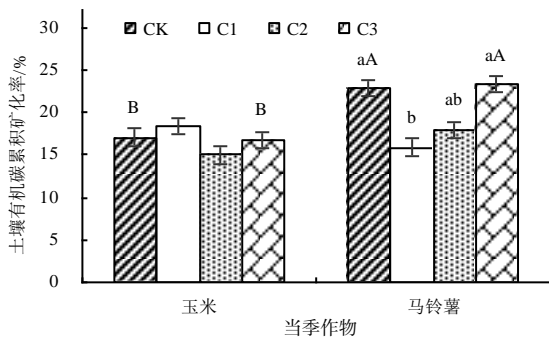
图 2 玉米和马铃薯轮作的复配土有机碳的矿化速率

Fig.2 Mineralization rates of organic carbon in the compound soils with maize and potato rotation

3.4 复配土的有机碳累积矿化率

从图 3 可知, 种植玉米的 C2 的土壤有机碳累积矿化率低于其他处理的, 但 4 个不同复配比处理间

的差异无统计学意义; 与 CK 相比, 种植马铃薯的 C2 和 C3 的有机碳累积矿化率无显著变化, C1 的则显著降低。说明种植玉米的 C2 和马铃薯的 C1 有助于固碳减排, 有机碳较为稳定。不同当季作物相比, C1 和 C2 的种植马铃薯和玉米间的土壤有机碳累积矿化率的差异均无统计学意义, 但种植马铃薯的 CK、C3 的土壤有机碳累积矿化率均显著大于种植玉米的 CK、C3 的, 说明种植玉米可促进有机碳的积累。



不同小写字母示同一当季作物不同复配比间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 不同大写字母示同一复配比下不同当季作物间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

图 3 玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳累积矿化率

Fig.3 Cumulative mineralization rate of organic carbon in the compound soils with maize and potato rotation

3.5 复配土的有机碳矿化参数

利用一级动力学方程对有机碳累积矿化量进行拟合得到系列矿化参数 (表 3), 拟合效果均极显著 ($P < 0.01$)。从表 3 可知: C1、C2、C3 的潜在可矿化有机碳含量 (C_0) 均显著高于 CK 的, 其中, 种植玉米的复配土的 C_0 较 CK 的增加了 13.75%~31.64%,

种植马铃薯的增加了 12.99%~31.94%; 矿化速率常数(k)与半周转期($T_{1/2}$)的变化规律相反, k 越大, $T_{1/2}$ 越小, 种植玉米的 C2 的 $T_{1/2}$ 较 C1 和 C3 的显著增加, 增幅分别为 58.16% 和 59.48%, 种植马铃薯的 C1 的 $T_{1/2}$ 最大, 显著高于其他处理的, 较 CK 的增

加了 15.74%, C3 的最小, 显著低于其他处理的。可见, 不同当季作物和复配比下复配土有机碳的周转过程存在差异, 其中, 种植玉米的 C2 和马铃薯 C1 的有机碳周转时间较长。

表 3 玉米和马铃薯轮作的复配土的有机碳矿化拟合参数

Table 3 Fitting parameters of organic carbon mineralization of the compound soils with maize and potato rotation					
当季作物	复配比处理	C_0 (mg kg ⁻¹)	k (d ⁻¹)	$T_{1/2}$ /d	R^2
玉米	CK	(808.42±89.80)b	(0.023 9±0.004 3)bB	(29.00±3.25)aA	0.980 4**
	C1	(934.11±48.00)aB	(0.035 9±0.003 5)aA	(19.31±3.02)bB	0.988 5**
	C2	(1064.20±17.24)aA	(0.022 7±0.003 9)bB	(30.54±2.04)aA	0.983 4**
	C3	(919.56±64.42)aB	(0.036 2±0.004 8)aB	(19.15±2.19)bA	0.976 9**
马铃薯	CK	(822.20±86.26)b	(0.030 9±0.005 7)bA	(22.30±3.77)bB	0.966 5**
	C1	(1033.65±96.64)aA	(0.026 7±0.004 2)cB	(25.96±1.58)aA	0.981 6**
	C2	(929.01±69.08)aB	(0.030 6±0.004 0)bA	(22.65±2.55)bB	0.984 0**
	C3	(1084.84±55.65)aA	(0.046 0±0.004 9)aA	(15.07±1.97)cB	0.981 3**

同列不同小写字母示同一种种植模式下不同复配比间的差异有统计学意义($P<0.05$); 同列不同大写字母示同一复配比下不同种植模式间的差异有统计学意义($P<0.05$); “**”示拟合极显著($P<0.01$)。

4 结论与讨论

有机碳的矿化分解是随着作物整个生命周期的推进而不断发生的动态平衡过程, 其不仅决定着有机质的数量和质量, 也决定着有机质的结构、组成和功能^[17]。本研究中, 以玉米-马铃薯轮作为研究模式, 基于多年的长期定位试验, 研究 2 种作物轮作模式及不同复配比下土壤有机碳的变化规律, 结果表明, 虽然相同复配比的 2 种当季作物间的土壤有机碳含量差异无统计学意义, 但无论是种植哪种作物, 复配土有机碳含量均明显高于风沙土(CK)的, 种植玉米的 C2 和马铃薯的 C1 处理的有机碳含量较高。这可能是长期轮作及不同复配土长期发育的结果。在作物根系、耕作管理等措施长期作用下, 复配农田在风化过程中逐渐释放养分, 促进作物生长及有机碳归还。马铃薯是根茎类作物, 疏松的土壤物质层更易于马铃薯的生长, 而加入低量的砒砂岩(C1)促进了风沙土的保水保肥性能^[18]。中量的砒砂岩(C2)加入风沙土后, 由于砒砂岩的物理机械作用, 促进了作物凋落物的保蓄, 减少了风蚀, 增强了土体颗粒之间的力学特性, 同时由于玉米根系物的分泌及微生物的丰富, 使得有机碳含量较高^[19]。

种植 2 种作物的复配农田的土壤有机碳矿化速率具有同样的变化趋势, 均随矿化时间的增加而下降, 这一点与张振华等^[20]、李英臣等^[21]的研究结论

相似。在前期, 复配农田土壤具有较高的有机碳矿化速率且随时间的延长急剧下降。矿化速率较高可能是由于适当的水温条件激发了微生物的活性所致, 急剧下降是由于活性有机物质在微生物的作用下快速分解^[22]所致。整体均以 C3 的矿化速率降幅最大, 这可能是由于 C3 的有机碳含量较高, 可能伴随着多糖、溶解性有机碳及氨基酸等活性组分较丰富^[23], 同时 C3 具有较高的砒砂岩含量, 使得土壤孔隙较为发达^[24], 更易于有机碳矿化分解。

种植马铃薯的有机碳累积矿化量高于种植玉米的, 可能是马铃薯的膨大初期及收获期对养分需求较大, 吸收土壤中的氮、磷、钾等, 根据“低氮假说”, 种植马铃薯的土壤处于低氮水平, 进而促进了有机碳的矿化^[25], 且方差分析结果显示, 复配比、当季作物及其交互作用均对有机碳累积矿化量影响显著。

运用一级动力学方程对有机碳累积矿化量进行拟合, 得到理想状态下的矿化量及周转时间, 种植玉米的复配农田土壤以 C2 的潜在矿化碳量较高且周转时间长, 而种植马铃薯的以 C1 的潜在矿化碳量较高且周转时间长。种植玉米的 C2 和马铃薯的 C1 的累积矿化率较低, 说明此时单位有机碳的矿化强度弱, 有利于有机碳的固存。这主要是由于在 2 种处理下大团聚体颗粒与大气的接触面积较小, 导致其表面的有机碳或黏性物质被分解的概率

较低;同时,大团聚体在形成后其内部的孔隙变得较小,孔隙水也随之变得较少,这使得大团聚体与矿物颗粒之间的相互作用变得更为密切,起到矿物保护作用^[26-27],进而降低了有机碳的分解,增加了碳存储。

综上所述,当季作物和复配比均对有机碳矿化产生了影响,玉米和马铃薯轮作,砒砂岩与风沙土体积比 1:2 的复配土更能促进有机碳的积累,可作为一种生产实践助推毛乌素沙地的生态化发展。

参考文献:

- [1] 尹艳,刘岩,尹云锋,等. 生物质炭添加对杉木人工林土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1389-1396.
- [2] WHITMAN T, PEPE-RANNEY C, ENDERS A, et al. Dynamics of microbial community composition and soil organic carbon mineralization in soil following addition of pyrogenic and fresh organic matter[J]. The ISME Journal, 2016, 10(12): 2918-2930.
- [3] ZHU R H, ZHENG Z C, LI T X, et al. Dynamics of soil organic carbon mineralization in tea plantations converted from farmland at Western Sichuan, China[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e0185271.
- [4] CHEN X, LUO M, TAN J, et al. Salt-tolerant plant moderates the effect of salinity on soil organic carbon mineralization in a subtropical tidal wetland[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 837: 155855.
- [5] 蒋小董,郑嗣蕊,杨咪咪,等. 毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2567-2574.
- [6] CHENG H T, ZHOU X H, DONG R S, et al. Priming of soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in response to vegetation restoration in a karst area of Southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 851: 158400.
- [7] 王永慧,杨殿林,红雨,等. 不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 590-599.
- [8] 乌达木,范茂攀,赵吉霞,等. 不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1519-1528.
- [9] 王温澎. 不同种植模式下作物根际土活性碳氮组分的变化[D]. 新乡:河南师范大学, 2018.
- [10] 闫美霞,张敏,高永春,等. 典型草原不同植物群落土壤有机碳矿化特征[J]. 北方园艺, 2022(23): 106-112.
- [11] 张海欧,曹婷婷,杨晨曦. 砒砂岩与沙复配土壤组成变化及玉米产量可持续性分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 275-280.
- [12] 李裕瑞,范朋灿,曹智,等. 毛乌素沙地砒砂岩与沙复配农田的固沙效应及其微观机理[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 421-430.
- [13] 罗林涛,程杰,王欢元,等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 58-61.
- [14] WANG H Y, TONG W, LIU J B, et al. Soil wind erosion resistance analysis for soft rock and sand compound soil: a case study for the Mu Us Sandy Land, China[J]. Open Geosciences, 2022, 14(1): 824-832.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [16] 陈晓芬,刘明,江春玉,等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(17): 3325-3334.
- [17] 周伟,孙向阳,李素艳,等. 有机覆盖对城市森林土壤有机碳矿化及其氧化稳定性特征的影响[J]. 土壤, 2022, 54(4): 779-786.
- [18] 程杰,王欢元,解建仓,等. 不同配比下复配土的土壤颗粒组成、分形维数与质地变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 30-34.
- [19] 郭航,韩霖昌,张扬,等. 基于拉曼光谱研究砒砂岩与沙复配土的胶结作用力[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 436-442.
- [20] 张振华,刘振杰,陈白洁,等. 枯落物添加对三江源区退化高寒草甸土壤碳矿化的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 156-164.
- [21] 李英臣,侯翠翠,刘月皓,等. 玉米秸秆不同构件混合分解的非加和效应及其对土壤有机碳矿化的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 233-239.
- [22] YAN Y X, DONG X H, LI R S, et al. Wollastonite addition stimulates soil organic carbon mineralization: evidences from 12 land-use types in subtropical China[J]. Catena, 2023, 225: 107031.
- [23] GUO Z, LI J, GE L, et al. The relationship between bacterial diversity and organic carbon mineralization in soft rock and sand compound soil[J]. Journal of Microbiology, 2020, 58(9): 750-760.
- [24] WANG H Y, HAN J C, TONG W, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiency for maize(*Zea mays* L.) grown on soft rock and sand compound soil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(8): 2553-2560.
- [25] 郭洁芸,王雅歆,李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4823-4833.
- [26] 刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447-455.
- [27] 徐香菇,汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523-1529.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正