

索文康,张红杰,姚万森,等. 不同浓度新型液态调理剂对土壤生物特性、有机碳及其组分的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):222-229.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.16.030

不同浓度新型液态调理剂对土壤生物特性、有机碳及其组分的影响

索文康¹, 张红杰¹, 姚万森², 田小明¹, 胡晨阳¹, 杨金翰¹, 史海潮¹

(1. 河北北方学院农林科技学院, 河北张家口 075000; 2. 河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北沧州 061000)

摘要:为揭示新型液态调理剂对张家口地区莜麦耕层土壤生物特性、有机碳及其组分的影响,以莜麦种植区 0 ~ 20 cm 土层为研究对象,采用室内培养试验的方法,研究在土壤质量含水量 15%、20%、25% 下新型液态调理剂对有机碳矿化过程的影响,分析不同浓度调理剂对土壤酶活性、有机碳矿化及其组分含量的变化规律。结果表明,添加调理剂可以提高土壤有机碳矿化速率、累计矿化量、潜在可矿化有机碳含量(C_0),而降低土壤矿化强度,其中以 P_3N 处理影响最为显著。在无机肥基础上添加调理剂可以显著提高蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性和有机碳及其组分含量。与 N 处理相比, P_1N 处理的 SOC、LOC 在不同含水量的土壤中分别增加 5.85% ~ 14.72% 和 1.72% ~ 29.84% ($P < 0.05$); P_2N 处理分别增加了 8.78% ~ 20.00% 和 13.22% ~ 45.16% ($P < 0.05$); P_3N 处理分别显著增加了 13.17% ~ 41.13% 和 49.71% ~ 75.00%,蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性与 SOC、LOC、CMI 均呈现显著正相关性。这表明在施用复合肥基础上添加调理剂通过提高土壤酶活性的方式,提高了土壤有机碳的矿化速率及矿化量,进而增加了土壤中有机碳及其组分含量。同时高浓度的调理剂可以更持久地提高有机碳的矿化速率和累计矿化量,提升土壤固碳能力。

关键词: 调理剂; 有机碳矿化速率; 累计矿化量; 有机碳及其组分含量; 土壤酶活性

中图分类号: S158.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2023)16-0222-08

调理剂是一类具有缓释作用的高分子聚合物,无毒无味,结构稳定^[1],合理施用可以改良土壤性状,提高土壤水肥利用率,降低肥料损失,影响作物产量^[2-3]。目前添加土壤调理剂已成为实现干旱地区农业可持续发展的重要措施之一^[4],但大部分研

究所提到的调理剂都是固体^[5-7],在滴灌条件下基本不能随水滴施,单独施用不但增加了农田作业次数和成本,并且与肥料难以全面接触,很难与肥料发生相互作用,从而影响实际使用效果。因此探讨液态调理剂施用和水分对土壤生物特性、有机碳组分含量的影响具有重要意义。

有机碳矿化是影响陆地生态循环的重要指标^[8],与全球气候变化、土壤养分循环和能量转换、温室气体排放等密切相关^[9-10]。近年来,关于调理剂对土壤质量、作物品质和产量的研究较为深入^[11],国内外学者一致认为调理剂对土壤养分含量和作物产量会产生重要的积极影响^[12]。然而关于土壤调理剂对有机碳矿化的研究相对较少,特别是

收稿日期:2022-10-10

基金项目:河北省自然科学基金(编号:D2020405002);河北省重点研发计划(编号:21326405D);河北北方学院校级科研项目(编号:JYT2021003)。

作者简介:索文康(1999—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事土壤调理剂方面的研究。E-mail:2995643957@qq.com。

通信作者:田小明,博士,讲师,主要从事土壤养分利用方面的研究。E-mail:txm7458103@163.com。

[23] 尹静,刘悦秋,于峰,等. 一株木质素降解菌的筛选鉴定及其在堆肥中的应用[J]. 中国土壤与肥料,2019(3):179-185.

[24] Bugg T D, Ahmad M, Hardiman E M, et al. The emerging role for bacteria in lignin degradation and bio-product formation[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22(3):394-400.

[25] 姜明国,黎海菲,陆冠颖,等. 木质素降解菌 Bax 的筛选及特性研究[J]. 生物技术通报,2011(3):200-203.

[26] 王茂成,李勇,李世忠,等. 木质素降解真菌的分离与相关酶活性测定及产酶条件优化[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(11):122-126.

[27] 李灵灵,王敬红,赵铎,等. 木质素降解菌 BYL-7 的筛选及降解条件优化[J]. 微生物学通报,2020,47(12):4059-4071.

[28] 泊翠翠. 木质素降解酶高产菌株的筛选及酶学性质研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018:41.

在雨水相对欠缺的冀西北地区。因此,本研究以自主研发的液态调理剂(具有保水、缓释作用)为研究对象,同时设置 3 种不同质量含水量,探讨在调理剂与复合肥配施条件下土壤 CO_2 的释放规律及土壤酶活性、有机碳组分的变化,揭示调理剂对土壤生物特性的影响,判定新型液态调理剂作用于干旱地区土壤的可行性,为调理剂在实际生产中的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北北方学院南校区实验站(40°50'N,114°45'E)。该地区属于石灰性栗钙土,pH 值在 7.2~7.4 之间。由于水土流失、耕作粗放,土壤退化严重。其气候特点为四季分明,冬季寒冷时间长;春季干燥沙尘天气居多;夏季高温集中,降雨不均匀;秋季风沙较大气温较低。海拔高度一般在 500~800 m,地势较低。年降水量为 330~400 mm。

1.2 试验设计

供试土壤为张家口地区典型的石灰性栗钙土,于 2020 年 8 月采自河北北方学院南校区实验站苜蓿种植区,采用五点法取 0~20 cm 耕层土壤,去除土样中杂质过 2 mm 筛,风干待测。采用室内模拟的方法进行双因素试验,因素 1 为不同材料处理,分别为 CK(不施肥)、N(单施 10 g/kg 复合肥)、 P_1N (0.008 g/kg 调理剂 + 10 g/kg 复合肥)、 P_2N (0.016 g/kg 调理剂 + 10 g/kg 复合肥)、 P_3N (0.024 g/kg 调理剂 + 10 g/kg 复合肥);因素 2 为不同土壤质量含水量(15%、20%、25%),每个处理 5 个重复。其中调理剂是将聚丙烯酰胺和聚乙烯醇制成溶液,在一定温度下通过硫酸锰进行交联合成,有效成分为 2%,其中 C 含量占 0.2%;复合肥由尿素和磷酸二胺配制而成(质量比:N:P:K=15%:10%:8%)。

1.3 测定方法

土壤有机碳矿化培养采用碱液吸收法进行:称取过 2 mm 筛的风干土壤样品 50.0 g,将调理剂、复合肥和土壤充分混合,用去离子水调节至相应的土壤含水量,均匀铺置于 1 000 mL 培养瓶底部,再将盛有 10 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液吸收瓶悬置于广口瓶中,用聚乙烯膜密封广口瓶,于 25℃ 培养箱内培养。分别在试验开始后 1、3、6、9、12、15、18、21、

24、27、31、35、39、43、47、50、53、56、59、62 d 时更换吸收瓶,吸收瓶中加入 1 mol/L BaCl_2 溶液 2 mL,加 1 滴酚酞指示剂,用标准酸(约 0.05 mol/L HCl)滴定至褪色,同时在培养期间用称量法对土壤含水量进行调整^[13]。培养结束后,将部分土壤风干测定土壤有机碳组分含量,部分湿土冰箱贮存用于测定土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法进行测定^[14];活性有机碳含量用 KMnO_4 氧化法进行测定^[15];蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, β -葡萄糖苷酶活性测定采用分光光度法,过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法,多酚氧化酶活性测定采用比色法^[16]。

1.3.1 土壤有机碳矿化速率 有机碳矿化速率 $[\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$ 以单位质量土壤在单位时间内矿化释放的总碳量表示。计算公式为:

土壤有机碳矿化速率 = 培养时间内有机碳累计矿化量/培养天数。

1.3.2 土壤有机碳累计矿化量 有机碳累计矿化量(C_t ,mg/kg)以单位质量土壤在一段培养期内矿化释放的总碳量表示,同时采用一级动力学方程,对土壤累计矿化量进行函数方程拟合^[17]。有机碳累计矿化量的计算公式为:

$$C_t = [(V_0 - V) \times C_{\text{HCl}}/2] \times 44 \times 12/44 \times 1/m(1 - w) \times 1\,000。$$

式中: C_t 代表有机碳累计矿化量; C_{HCl} 代表标准盐酸浓度,mol/L; V_0 代表空白标定时消耗的标准盐酸体积,mL; V 代表样品滴定时消耗的标准盐酸体积,mL; m 代表每个广口瓶中的鲜土质量,g; w 代表土壤水分质量分数,%。

1.3.3 碳库管理指数

$$\text{CNL} = \text{SOC} - \text{LOC};$$

$$\text{CMI} = (\text{TOC}_{\text{样品}}/\text{TOC}_{\text{参考}}) \times (\text{LOC}_{\text{样品}}/\text{CNL}_{\text{样品}}) \times (\text{CNL}_{\text{样品}}/\text{LOC}_{\text{参考}}) \times 100。$$

式中:CMI代表土壤碳库管理指数;SOC代表土壤有机碳含量,mg/g;LOC代表土壤活性有机碳含量,mg/g;CNL代表土壤非活性有机碳含量,mg/g。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2018 软件对试验数据进行初步整理;使用 Origin 2022 软件进行作图和方程拟合;采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和 LSD (Duncan's)多重比较,检验不同处理之间的显著差

异性。

2 结果与分析

2.1 调理剂对土壤有机碳矿化速率的影响

由图 1 可知,在不同含水量条件下,各处理之间土壤有机碳矿化速率的变化规律基本类似。培养前 3 d,单施肥处理(N)的有机碳矿化速率最大,随着培养时间的延长,调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)的有机碳矿化速率逐渐增大。在培养 9 d 时,调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)矿化速率均较单施肥(N)有不

同程度的增加,且以 P_1N 提高效果最显著,分别提高 12.65% ($P < 0.05$,图 1-a)、10.39% ($P < 0.05$,图 1-b)、10.02% ($P < 0.05$,图 1-c)。到 35 d 时,与单施肥(N)相比, P_2N 的提高幅度最大,分别增加 13.19% ($P < 0.05$,图 1-a)、12.5% ($P < 0.05$,图 1-b)、12.17% ($P < 0.05$,图 1-c)。在培养 50 d 后,各处理之间差异逐渐减小并趋于稳定,以 P_3N 的有机碳矿化速率最高,与单施肥处理(N)相比,不同土壤含水量(15%、20%、25%)下 P_3N 分别增加 20.97%、8.01%、7.15% ($P < 0.05$)。

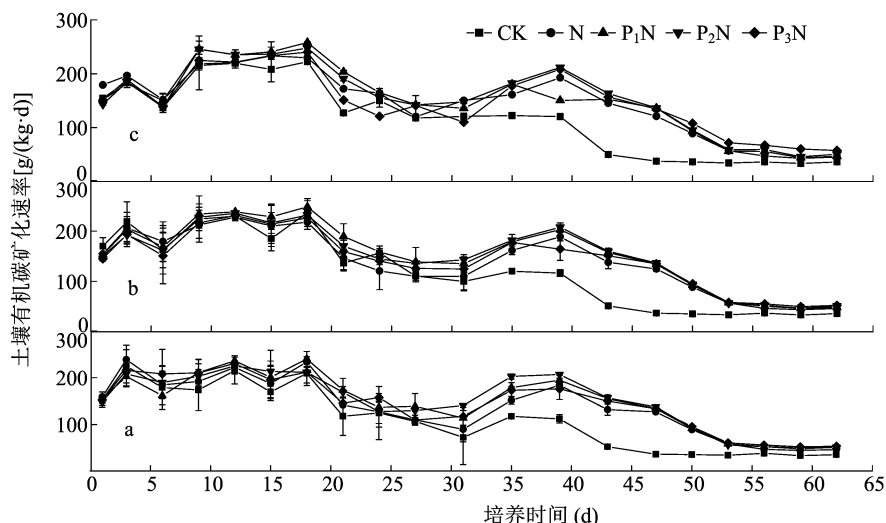


图1 调理剂对不同含水量(a:15%; b:20%; c:25%)土壤有机碳矿化速率的变化

2.2 调理剂对土壤有机碳累计矿化量的影响

由图 2 可知,不同处理的土壤有机碳累计矿化量变化规律类似于有机碳矿化速率。在培养前 31 d,单施肥处理(N)的有机碳累计矿化量最高。随着培养时间的延长,调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)的有机碳累计矿化量逐渐增大。培养 35 d,各调理剂处理在含水量为 15% 和 20% 土壤中的有机碳累计矿化量均显著高于单施肥处理(N),但在含水量为 25% 的土壤中差异不明显;培养结束后(62 d),各施肥处理与 N 之间的差异更为明显。其中在 15% 含水量条件下, P_1N 、 P_2N 和 P_3N 较 N 分别增加了 14.81%、17.50% 和 20.40% ($P < 0.05$,图 2-a);20% 含水量条件下, P_1N 、 P_2N 和 P_3N 处理较 N 分别增加了 2.69%、4.91% 和 10.24% ($P < 0.05$,图 2-b);25% 含水量条件下 P_1N 、 P_2N 和 P_3N 较 N 分别增加了 0.86%、4.04% 和 6.19% ($P < 0.05$,图 2-c)。

2.3 调理剂对土壤有机碳矿化动力学参数的影响

利用动力学模型对土壤有机碳矿化数据进行拟合发现,方程决定系数(R^2)均达极显著水平,说

明一级动力学方程能很好地描述有机碳矿化动态(表 1)。与单施复合肥(N)相比,不同土壤含水量(15%、20%、25%)下 P_3N 处理的 C_0 分别显著增加 2.78%、10.29%、5.24% ($P < 0.05$)。从潜在可矿化有机碳含量占总有机碳含量的比值来看(C_0/SOC),在含水量为 15% 和 20% 的土壤中,各施肥处理(N、 P_1N 、 P_2N 和 P_3N)的 C_0/SOC 显著高于 CK;在含水量为 25% 的土壤中,仅有 N 处理显著高于 CK。不同施肥处理间对比发现, P_1N 、 P_2N 和 P_3N 处理的 C_0/SOC 在不同含水量(15%、20%、25%)土壤中均低于 N 处理,并且在含水量为 15% 和 25% 的土壤中存在显著差异。

2.4 调理剂对土壤有机碳组分的影响

由图 3 可知,不同含水量下,各处理(CK、N、 P_1N 、 P_2N 、 P_3N)对土壤 SOC、LOC、CMI 的影响结果趋于一致,顺序整体表现为 $CK < N < P_1N < P_2N < P_3N$,说明调理剂可以进一步提高有机碳及其组分含量。与单施复合肥(N)相比,调理剂处理均不同程度提高了土壤有机碳、活性有机碳含量。其中,

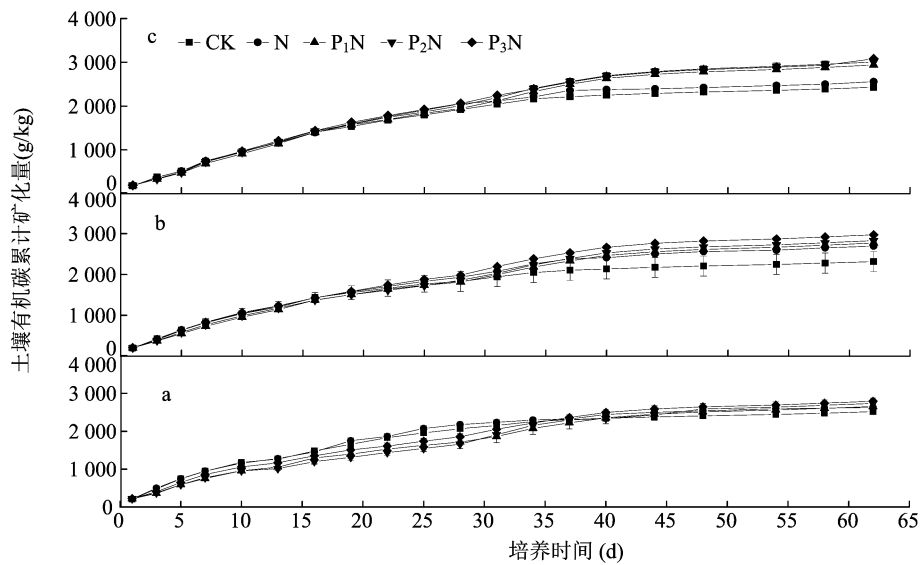


图2 调理剂对不同含水量(a:15%; b:20%; c:25%)土壤有机碳矿化量的变化

表 1 土壤有机碳累积矿化量的拟合参数

处理	C_0	K	C_0/SOC	R^2
含水量 15%				
CK	2 586 ± 28c	0.048 ± 0.001a	15.69 ± 0.004d	0.997 **
N	3 530 ± 85b	0.032 ± 0.002b	20.06 ± 0.003a	0.996 **
P ₁ N	3 549 ± 98b	0.031 ± 0.002c	19.02 ± 0.003b	0.995 **
P ₂ N	3 596 ± 97b	0.031 ± 0.002c	18.81 ± 0.002b	0.995 **
P ₃ N	3 628 ± 71a	0.033 ± 0.001b	17.14 ± 0.004c	0.997 **
含水量 20%				
CK	2 360 ± 20c	0.057 ± 0.001a	12.05 ± 0.001b	0.997 **
N	3 109 ± 67b	0.038 ± 0.002b	15.16 ± 0.003a	0.995 **
P ₁ N	3 201 ± 86ab	0.034 ± 0.002c	14.78 ± 0.002a	0.994 **
P ₂ N	3 305 ± 107ab	0.033 ± 0.002c	14.85 ± 0.001a	0.992 **
P ₃ N	3 429 ± 95a	0.034 ± 0.002c	14.78 ± 0.001a	0.993 **
含水量 25%				
CK	2 568 ± 33d	0.058 ± 0.002a	10.13 ± 0.001b	0.995 **
N	3 014 ± 78c	0.039 ± 0.002b	11.36 ± 0.001a	0.992 **
P ₁ N	3 089 ± 114b	0.033 ± 0.002c	10.16 ± 0.001b	0.987 **
P ₂ N	3 115 ± 117ab	0.034 ± 0.003c	9.18 ± 0.001c	0.986 **
P ₃ N	3 172 ± 109a	0.035 ± 0.002bc	8.49 ± 0.001d	0.988 **

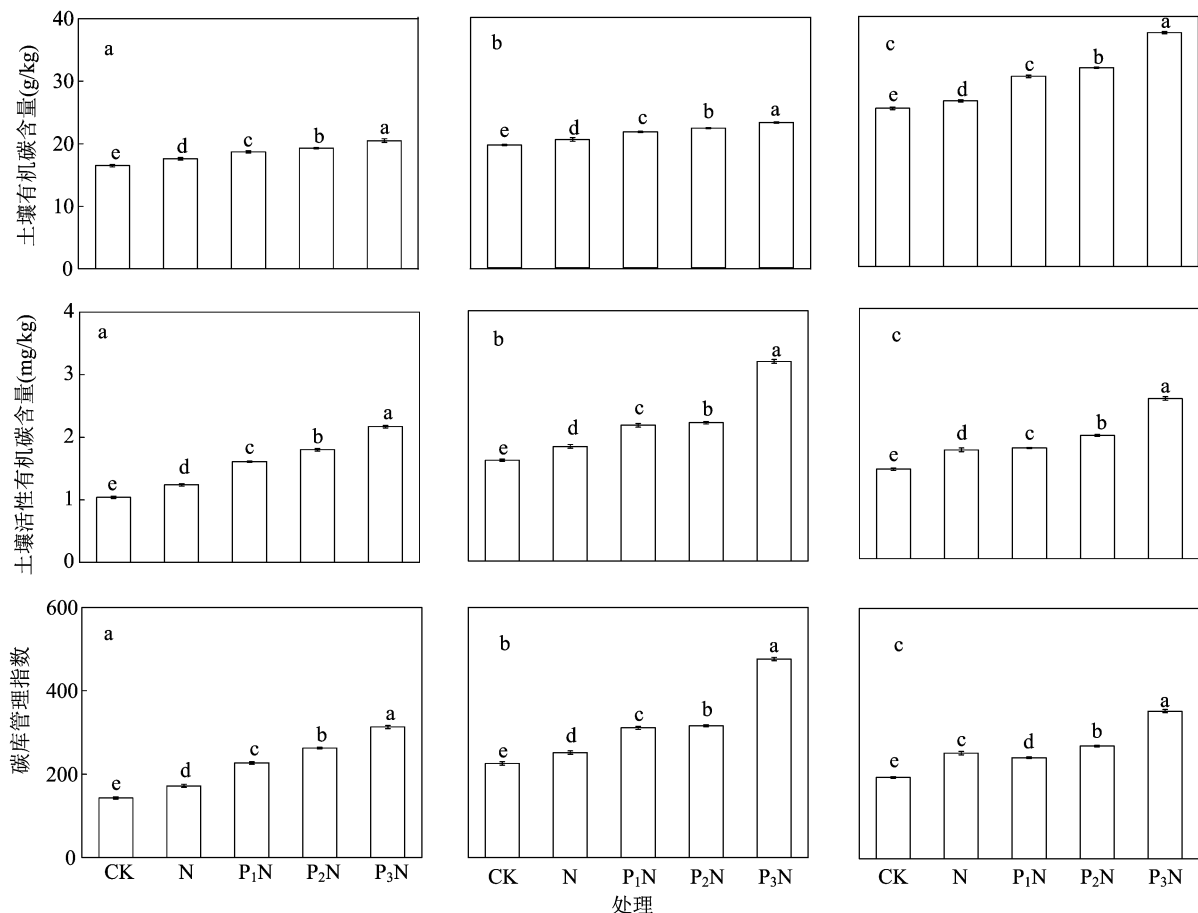
注: C_0 表示土壤潜在可矿化有机碳含量; K 表示矿化速率常数; C_0/SOC 表示潜在可矿化有机碳含量占总有机碳含量的比值; ** 表示 1% 水平显著性差异; 数据后不同小写字母表示同一含水量不同处理之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

与 N 处理相比, P_1N 处理的土壤 SOC 和 LOC 含量在土壤含水量为 15%、20%、25% 时分别增加了 6.25%、5.85%、14.72% 和 29.84%、18.58%、1.72% ($P < 0.05$); P_2N 处理的土壤 SOC 和 LOC 含量在土壤含水量为 15%、20%、25% 时分别增加了 9.66%、8.78%、20.00% 和 45.16%、20.77%、13.22% ($P < 0.05$); P_3N 处理的土壤 SOC 和 LOC

含量在土壤含水量为 15%、20%、25% 时分别显著增加了 16.48%、13.17%、41.13% 和 75.00%、74.31%、49.71%。

2.5 调理剂对土壤酶活性的影响

由图 4 可知, P_3N 处理的土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性均显著高于 N 处理, 说明添加调理剂可以显著提高土壤酶活性。与单施肥处理(N)相比, 不同



柱上不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。图4同
图3 不同含水量(a:15%; b:20%; c:25%)下土壤有机碳组分的变化特征

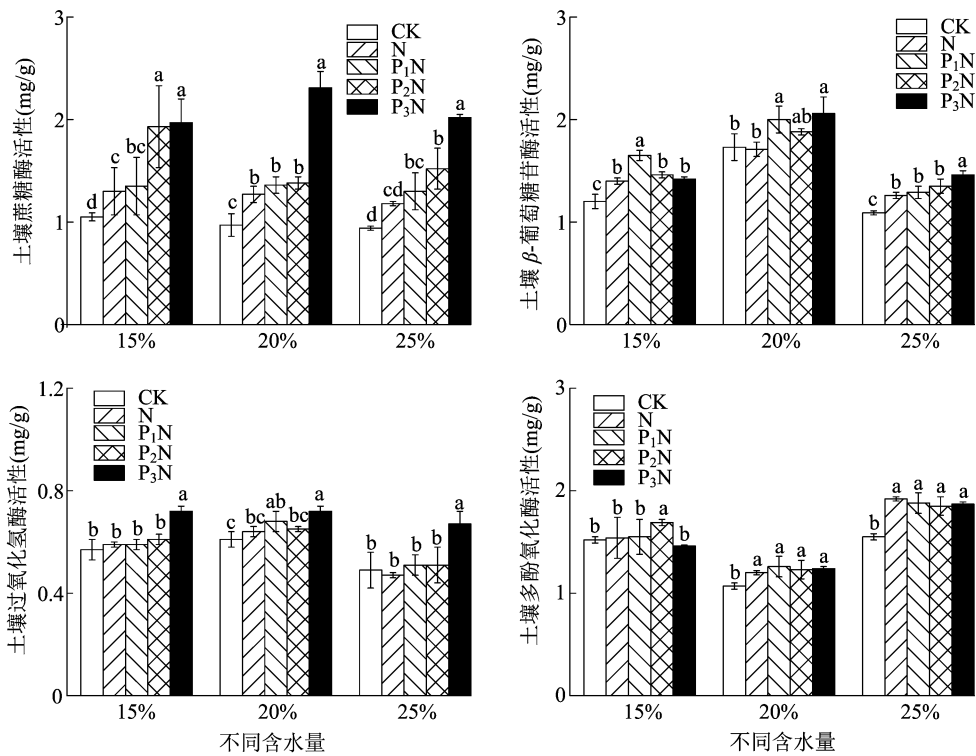


图4 不同含水量(a:15%; b:20%; c:25%)土壤酶活性的变化特征

含水量(15%、20%、25%)下 P_1N 处理的土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性分别增加了 3.85% ~ 10.17%、2.38% ~ 70.94%、6.25% ~ 8.51%; P_2N 处理的土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性分别增加了 8.66% ~ 48.46%、4.29% ~ 9.94%、1.56% ~ 8.51%; P_3N 处理的土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性分别增加了 51.54% ~ 81.94%、1.43% ~ 20.47%、12.50% ~ 42.55% ($P < 0.05$)。并且在 20%、25% 含水量下,与 N 处理相比,调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)对于土壤多酚氧化酶活性的影响效果并不显著。

2.6 土壤有机碳组分含量与酶活性相关性分析

施用复合肥-调理剂处理的土壤酶活性与土壤有机碳组分含量的相关关系如图 5 所示。在土壤含水量为 15%、20%、25% 时 LOC、SOC、CMI 均相关系数较高,其中土壤含水量为 15%、25% 时,蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性与 LOC、SOC 之间相关系数较高;土壤含水量为 20% 时,蔗糖酶活性、 β -葡萄糖苷酶活性、过氧化氢酶活性与 LOC、SOC 之间相关系数较高。

3 讨论

曾雄等研究表明,施用生物炭对土壤有机碳矿化速率、累计矿化量均存在显著提升作用^[18]。本研究各处理之间变化差异较大,在培养后 9 ~ 31 d,调理剂处理的有机碳矿化速率均显著高于单施肥处理(N),具体表现为 $P_1N > P_2N > P_3N > N > CK$,在培养 31 ~ 50 d 以 P_2N 效果更为显著,表现为 $P_2N > P_3N > P_1N > N > CK$ 。随着培养时间的延长,50 d 后土壤有机碳矿化速率的大小顺序为 $P_3N > P_2N > P_1N > N > CK$,说明在施用复合肥基础上添加液态调理剂可以更持久地提高有机碳的矿化速率,并且调理剂浓度越高对后期碳矿化的影响效果越显著。通过对土壤有机碳累计矿化量的分析发现,土壤有机碳累积矿化量随培养时间的延长呈指数函数变化趋势,与单施复合肥(N)相比,添加调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)提高了 0.86% ~ 20.40%。这说明调理剂的添加更有利于有机碳矿化量的提高。有研究表明,土壤含水量也会对有机碳矿化速率和矿化量造成影响^[19]。本试验通过定义不同的土壤含水量(15%、20%、25%),在培养期内,随着土壤含水量的减少,调理剂对碳矿化和碳累计矿化量的作用更为明显,并且调理剂处理(P_1N 、 P_2N 、 P_3N)受水

a

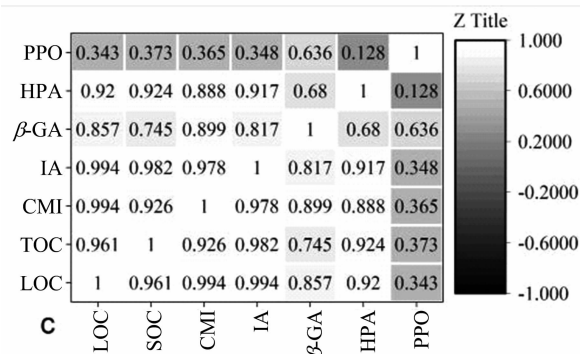
PPO	0.079	0.091	0.116	0.346	-0.078	-0.474	1
HPA	0.821	0.806	0.803	0.65	-0.019	1	-0.474
β -GA	0.139	0.17	0.119	-0.191	1	-0.019	-0.078
IA	0.903	0.906	0.916	1	-0.191	0.65	0.346
CMI	0.999	0.993	1	0.916	0.119	0.803	0.116
TOC	0.995	1	0.993	0.906	0.17	0.806	0.091
LOC	1	0.995	0.999	0.903	0.139	0.821	0.079

LOC SOC CMI IA β -GA HPA PPO

b

PPO	0.188	0.348	0.181	0.016	0.605	0.546	1
HPA	0.886	0.83	0.878	0.844	0.873	1	0.546
β -GA	0.856	0.879	0.859	0.681	1	0.873	0.605
IA	0.954	0.809	0.95	1	0.681	0.844	0.016
CMI	0.999	0.91	1	0.95	0.859	0.878	0.181
TOC	0.918	1	0.91	0.809	0.879	0.83	0.348
LOC	1	0.918	0.999	0.954	0.856	0.886	0.188

LOC SOC CMI IA β -GA HPA PPO



IA 表示蔗糖酶活性; β -GA 表示 β -葡萄糖苷酶活性; HPA 表示过氧化氢酶活性; PPO 表示多酚氧化酶活性

图5 不同含水量(a:15%; b:20%; c:25%)下有机碳组分含量与酶活性相关关系

分条件的影响较小,这可能是调理剂对水分的吸附作用,减弱了水分对土壤有机碳矿化的影响。

潜在可矿化有机碳 C_0 可以在一定程度上反映土壤微生物对碳源的利用能力^[20]。本研究中,不同调理剂处理(P_1N 、 P_2N 和 P_3N)的潜在可矿化有机碳含量(C_0)较单施肥处理(N)均有不同程度的提高。其中与单施复合肥(N)相比, P_3N 处理的 C_0 在含水量为 15%、20%、25% 土壤中分别显著增加了 2.78%、10.29%、5.24%。这表明施用无机肥可以显著提高土壤有机碳矿化的底物供给,调理剂的添加可为土壤微生物提供更多的营养物质,促进微生物活动,从而提高对土壤碳库的利用。有研究表明,潜在可矿化有机碳含量占总有机碳含量的比值

(C_0/SOC) 越小, 土壤有机碳的固存量就相对较多^[21]。本研究中, P_1N 、 P_2N 和 P_3N 处理的 C_0/SOC 在不同含水量 (15%、20%、25%) 土壤中均低于 N 处理, 并且在含水量为 15% 和 25% 的土壤中存在显著差异。说明调理剂可以降低土壤有机碳矿化能力, 提高土壤有机碳的固存。这可能是调理剂本身的黏着性和对养分的吸附性, 减少了土壤中有机碳组分含量的散失。

土壤有机碳 (SOC) 及其组分含量是维持土壤生态稳定、协调土壤平衡、促进土壤可持续循环利用的重要因素^[22]。Tian 等通过小区试验研究发现, 与常规施肥 (有机-无机配合施用) 相比, 在此基础上添加调理剂可显著增加土壤有机碳含量 32.9% 和活性有机碳含量 20.2%^[23]。本研究结果与之类似, 与单施复合肥 (N) 相比, P_1N 处理的 SOC 和 LOC 在不同含水量 (15%、20%、25%) 土壤中分别增加了 5.51% ~ 14.6% 和 1.72% ~ 29.8% ($P < 0.05$); P_2N 处理分别增加了 8.43% ~ 19.7% 和 13.2% ~ 45.2% ($P < 0.05$); P_3N 处理分别显著增加了 13.1% ~ 40.8% 和 47.1% ~ 75.0%。这表明调理剂可以显著提高土壤中有机碳及其组分含量, 且与调理剂浓度呈显著正相关。大量研究表明, 水分对土壤有机碳有一定的影响, 在提高土壤含水量条件下, 土壤有机碳含量会增加^[24-25]。本研究也得出相似的结论, 不同处理的 SOC 含量在土壤含水量为 25% 时最高, 其次是土壤含水量为 20%, 最后则是土壤含水量为 15%。同时还发现, 各处理的 LOC 均在土壤含水量为 20% 时最高, 原因可能是过高的水分含量降低了土壤呼吸作用, 从而抑制了微生物对土壤有机碳的分解。

土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性能直观反映土壤有机质的积累与转化, 是表征土壤肥力、影响作物产量的重要指标^[26-27]。有研究表明, 土壤调理剂能提高土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性, 并保持较高状态^[28-29]。本研究也得出相应结论, 与 N 相比, 添加调理剂处理 (P_1N 、 P_2N 和 P_3N) 蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性分别提高了 3.85% ~ 81.94%、1.43% ~ 70.94% 和 1.56% ~ 42.55%。这可能是调理剂对土壤养分及水分的缓释作用, 改良了土壤物理性状, 提高了土壤养分含量, 为土壤酶繁殖提供了良好的生活环境。各处理在不同土壤含水量条件下酶活性也存在差异, 表现为 20% > 25% > 15%, 这

可能是调理剂对水分及养分的固持作用, 过多的水分容易造成土壤板结, 抑制微生物活动。

有研究表明, 土壤酶活性能显著影响土壤肥力, 决定土壤性质^[30-31]。本研究表明, 土壤 SOC、LOC 和 CMI 相关系数较高。不同含水量条件下, 土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性与土壤 LOC、SOC 和 CMI 均存在一定的相关关系。其中 25% 含水量下, 土壤蔗糖酶活性与土壤 LOC、SOC 和 CMI 相关关系较高; 多酚氧化酶活性与土壤各组分含量之间呈现不相关性。这与陈强龙等研究结论^[32]基本一致, 说明新型液态调理剂通过提高土壤微生物活性的方式, 促进了土壤有机碳的矿化速率及矿化量, 进而增加了土壤中有机碳及其组分含量。而刘秀清等认为多酚氧化酶和过氧化氢酶活性与土壤有机质组分含量呈显著负相关关系^[33-34], 这可能是因为酶活性同时受土壤质地、水分含量、微生物活性、土壤类型等多因素的影响。

4 结论

(1) 调理剂的添加可以显著增加土壤的有机碳、活性有机碳含量, 且与调理剂的添加量呈正相关。同时含水量对土壤有机碳及其组分含量也存在一定影响, 随着土壤含水量的增加, 土壤有机碳、活性有机碳含量也有不同程度的提高。

(2) 在施用复合肥基础上添加调理剂可以更持久地提高有机碳的矿化速率和累计矿化量, 提高土壤有机碳固存。并且随着土壤含水量的减少, 调理剂对有机碳矿化和累计矿化量的作用更为明显, 其中以 20% 含水量 P_3N 处理 (0.024 g/kg 调理剂 + 10 g/kg 复合肥) 效果最为显著。

(3) 调理剂可以显著提高土壤蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶活性, 以 20% 含水量 P_3N 处理 (0.024 g/kg 调理剂 + 10 g/kg 复合肥) 效果最为显著, 但对多酚氧化酶活性的影响并不显著。

参考文献:

- [1] 索文康, 胡晨阳, 杨金翰, 等. 不同施肥措施对土壤养分及酶活性的影响[J]. 新疆农垦科技, 2022, 45(3): 57-61.
- [2] 赵晨浩. 新型保水剂和保水型控释肥的研制及对土壤持水性状改良的机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020: 7-10.
- [3] 王罕博. 耕作方法和保水剂对黄绵土特性及冬小麦产量水氮利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 1-5.
- [4] 王 鼎. 复合土壤调理剂对内蒙古河套灌区盐碱土治理效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 2-7.

- [5]Awad Y M, Blagodatskaya E, Ok Y S, et al. Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by ^{14}C and enzyme activities[J]. *European Journal of Soil Biology*,2012,48:1–10.
- [6]Luo J Q, Wang L L, Li Q S, et al. Improvement of hard saline – sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) [J]. *Soil and Tillage Research*,2015,149:12–20.
- [7]Lu S Y, Chen F X, Ngo H H, et al. Effect of straw and polyacrylamide on the stability of land/water ecotone soil and the field implementation[J]. *Ecological Engineering*,2016,94:12–21.
- [8]龚玲玄,王丽丽,赵建宁,等. 不同覆盖作物模式对茶园土壤理化性质及有机碳矿化的影响[J]. *生态环境学报*,2022,31(6):1141–1150.
- [9]陈甜,元方慧,张琳梅,等. 不同化学性质叶凋落物添加对土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. *应用生态学报*,2022,33(10):2602–2610.
- [10]陈心悦. 长期干旱后亚热带森林土壤有机碳矿化对干湿交替事件的响应及机制[D]. 上海:华东师范大学,2022:43–45.
- [11]郭丽欣,王越,杜雨婷,等. 生物炭与秸秆配施对设施土壤有机碳矿化及理化性质的影响[J]. *北京农学院学报*,2022,37(1):43–50.
- [12]张敬业,张文菊,徐明岗,等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. *植物营养与肥料学报*,2012,18(4):868–875.
- [13]郭振,王小利,段建军,等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*,2018,55(1):225–235.
- [14]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [15]Bhattacharyya R, Kundu S, Srivastva A K, et al. Long term fertilization effects on soil organic carbon pools in a sandy loam soil of the Indian sub – Himalayas[J]. *Plant and Soil*,2011,341(1):109–124.
- [16]关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [17]汪洋,杨殿林,王丽丽,等. 茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响[J]. *农业资源与环境学报*,2020,37(3):371–380.
- [18]曾雄,肖欣娟,夏建国,等. 茶渣生物质炭对名山茶园土壤有机碳矿化特征的影响[J]. *四川农业大学学报*,2022,40(5):738–745.
- [19]李雪,董杰,李培广,等. 降雨量和降雨时间共同调控黄河三角洲典型盐沼湿地土壤碳矿化[J]. *应用生态学报*,2021,32(2):581–590.
- [20]马天娥,魏艳春,杨宪龙,等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究[J]. *中国生态农业学报*,2016,24(1):8–16.
- [21]卢韦,王小利,邬磊,等. 长期施肥条件下黄壤有机碳矿化对温度变化的响应[J]. *中国农学通报*,2019,35(25):101–107.
- [22]刘慧. 油菜绿肥还田对盐碱土壤有机碳及酶活性的影响[D]. 石河子:石河子大学,2020:29–30.
- [23]Tian X M, Fan H, Wang J Q, et al. Effect of polymer materials on soil structure and organic carbon under drip irrigation [J]. *Geoderma*,2019,340:94–103.
- [24]薄欣,臧淑英,张玉兰,等. 松嫩平原北部不同含水量梯度下土壤有机碳含量空间特征分析[J]. *城市地理*,2017(4):130.
- [25]魏万玲,程永毅,周志峰,等. 水分含量对紫色土自养微生物丰度与活性的影响[J]. *生态学杂志*,2020,39(2):541–548.
- [26]李倩,巴图,刘景辉,等. 保水剂施用方式对土壤酶活性及马铃薯产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(5):116–122.
- [27]赵睿宇,李正才,王斌,等. 不同年限地表覆盖对毛竹林土壤酶及土壤养分的影响[J]. *江西农业大学学报*,2019,41(4):741–750.
- [28]徐沛东. 施肥和土地利用影响红壤和水稻土中有机质矿化的特征及潜在机制[D]. 武汉:华中农业大学,58–70.
- [29]许云翔,何莉莉,刘玉学,等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. *应用生态学报*,2019,30(4):1110–1118.
- [30]胡华英,殷丹阳,曹升,等. 生物炭对杉木人工林土壤养分、酶活性及细菌性质的影响[J]. *生态学报*,2019,39(11):4138–4148.
- [31]马南,陈智文,张清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. *江苏农业科学*,2021,49(3):53–57.
- [32]陈强龙,谷洁,高华,等. 秸秆还田对土壤脱氢酶和多酚氧化酶活性动态变化的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2009,27(4):146–151.
- [33]刘秀清,章铁,孙晓莉. 沿江丘陵区土壤酶活性与土壤肥力的关系[J]. *中国农学通报*,2007,23(7):341–344.
- [34]周江涛,吕德国,秦嗣军. 不同有机物覆盖对冷凉地区苹果园土壤水温环境及速效养分的影响[J]. *应用生态学报*,2014,25(9):2551–2556.