

doi:10.11937/bfyy.20174392

不同外源碳对退化黑土微生物量碳、 土壤呼吸量及酶活性的影响

孟婷婷, 张宇飞, 马昱萱, 周 森, 王晓纯, 戴建军

(东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:为筛选能够提高退化黑土生物肥力的外源碳种类,以红糖、褐煤、腐殖酸钠等外源碳为试材,将不同外源碳设置为5个处理,分别为空白对照(CK)、红糖(T)、褐煤(H)、腐殖酸钠(F)以及红糖+褐煤(TH)进行室内土壤培养试验并运用主成分分析法筛选最优处理。研究了添加不同种类的外源碳对退化黑土的土壤呼吸量、微生物量以及相关酶活性的影响。结果表明:添加4种不同外源碳对土壤呼吸速率与呼吸积累量均有促进作用,培养前期表现为 $T>TH>F>H>CK$,后期T、H、F、CK处理差异不显著;添加4种不同外源碳都可以增加土壤微生物量碳,表现为 $T>TH>H>F>CK$;添加4种不同外源碳对土壤酶活性具有促进作用,随着时间变化,T处理对土壤酶活性的促进效果最强;主成分分析后综合评分排名为 $T>TH>F>H>CK$ 。因此,添加外源碳能够提高退化黑土微生物活性,提升其生物肥力。4种不同外源碳处理中,T处理效果最好,其次为TH处理。

关键词:外源碳;退化黑土;微生物量;土壤呼吸;土壤酶活性

中图分类号:S 154.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)20-0113-07

东北黑土区由于近年来高强度开垦导致黑土退化问题日益严峻,黑土层逐年变薄^[1],其有机质含量甚至不足1%^[2],严重制约了农作物产量的提高。因此,快速提高退化黑土的有机质含量,恢复其土壤肥力,构建肥沃耕层具有重大意义和生产价值^[3]。

随着对土壤微生物学组分的研究,ABBOOTT等^[4]提出了生物肥力的概念,并指出土壤生物肥力是土壤生态功能的核心。ANDERSON等^[5]研究认为土壤微生物群体以及微生物的生理生态指标变化可以表征土壤质量变化。

第一作者简介:孟婷婷(1994-),女,硕士研究生,研究方向为土壤与植物营养。E-mail:977956072@qq.com.

责任作者:戴建军(1968-),男,博士,副教授,研究方向为土壤质量和作物营养学。E-mail:daijianjunj@126.com.

基金项目:公益性行业(农业)科研专项资助项目(201503119-06-01)。

收稿日期:2018-03-05

MANJIAH等^[6]大量研究也表明,土壤微生物量碳和土壤有机质呈线性相关,微生物量氮与全氮、铵态氮和硝态氮呈显著正相关^[7];土壤酶来源于土壤微生物和动植物活体分泌,是一类具有催化能力的生物活性物质^[8],其活性可反映土壤中碳、氮分解的方向和强度。土壤酶作为土壤组分中最活跃的有机成分之一^[9],不仅可以表征土壤物质能量代谢旺盛程度,而且可以作为评价土壤肥力高低、生态环境质量优劣的一个重要生物指标;土壤呼吸主要由土壤动物、微生物与植物根系进行呼吸作用释放 CO_2 ,是土壤碳循环的重要环节,可以直接反映生物活性^[10]。因此土壤呼吸、微生物量碳氮以及土壤酶活性均可作为评价土壤肥力的重要指标。

关于添加外源碳改良低产土壤的研究已屡见不鲜,ANDERSON等^[5]研究表明,外加可溶性碳源可以增加土壤呼吸量,促进土壤的碳循环。目前,添加外源碳的种类研究主要集中在生物炭与

秸秆还田^[11],然而生物碳的大规模推广受到其制备难度的制约,且生物碳的性质稳定,有机碳惰性难难以快速增加土壤生物肥力,秸秆还田则受到东北地区气候的制约,秋季秸秆还田后由于温度较低,秸秆腐解程度低,不仅难以达到提高土壤肥力的目的,反而可能会影响第2年的出苗情况。褐煤作为天然腐殖酸含量较高的非金属矿物,逐渐被应用于生物肥料^[12],腐殖酸钠活性高常被作为廉价的肥料基质,近年来,关于褐煤、腐殖酸类的肥料与土壤改良剂的研究备受关注^[13]。

前人对于外源碳改良土壤的相关研究大多集中在土壤基础肥力与土壤物理性质方面,却往往忽略了外源碳对土壤生物肥力相关指标的影响,而添加外源碳后,土壤呼吸量与土壤酶活性变化趋势以及微生物量碳氮等的影响与变化能直接或间接体现土壤生物肥力的变化,可以作为评价其土壤改良效果的重要依据。该试验拟向退化黑土

中添加红糖^[14-15]、褐煤、腐殖酸钠等不同活性的外源碳进行土壤培养试验,探究添加不同外源碳对退化黑土微生物量、土壤呼吸以及土壤酶活性的影响,从而为利用外源碳快速修复退化黑土,提高其生物肥力提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年4月于东北农业大学资源与环境学院新型肥料研究室进行。试验材料包括红糖(含碳量65%)、腐殖酸钠(含碳量59%)、褐煤(含碳量74%),由阿城某化肥厂提供。供试土壤取自哈尔滨市道外区向阳乡向阳农场坡耕地典型退化黑土-破皮黄土。供试土壤的基础养分含量见表1。

表1 土壤基础养分含量

Table 1 Soil basic nutrient content

碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	全氮	全磷	缓效钾	pH
Available nitrogen	Available phosphorus	Available potassium	Organic matter	Total nitrogen	Total phosphorus	Slowly available potassium	
/(g·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	
67.03	32.4	94.67	11.42	0.72	0.65	5.85	6.60

1.2 试验方法

试验共设置5个处理,分别为CK(对照)、T(红糖)、TH(20%红糖+80%褐煤)、H(褐煤)、F(腐殖酸钠),每处理设置5次重复,随机排列。将

供试土壤烘干研磨,过2 mm筛,模拟土壤有机质含量增加至3 g·kg⁻¹,向供试土壤中添加不同外源碳,并用1 mol·L⁻¹的尿素溶液调节碳氮比至25:1。每1 kg供试土壤具体添加含量见表2。

表2 外源碳添加量

Table 2 Exogenous carbon addition

g

处理 Treatment	CK	T	TH	H	F
红糖(含碳65%) Brown sugar(C65%)	—	15.32	3.24	0	0
褐煤(含碳74%) Lignite(C74%)	—	0	113	14.2	0
腐殖酸钠(含碳59%) Sodium humate(C59%)	—	0	0	0	17.82

注:—表示不添加外源碳。

Note:— means no exogenous carbon is added.

将处理后的土壤样品分别装至25 mL的西林瓶中,每个西林瓶中装20 g土,再将装土的西林瓶置于1 L的广口瓶中,每个广口瓶中8个西林瓶,另有2个小烧杯,分别装有0.5 mol·L⁻¹的NaOH溶液20 mL和一定体积的蒸馏水。同时设置装有空西林瓶的空白处理。将广口瓶瓶口

用凡士林密封,置于避光且恒温25℃的培养箱中,培养时间为60 d。

分别于培养开始的第2、5、10、15、25、35、45、60天取出广口瓶内装有NaOH溶液的小烧杯测定土壤呼吸量,并在试验培养的第5、15、35、60天在每个广口瓶中取出2个装土的西林瓶,放于

-20℃下恒温保存,用于测定土壤酶活性与微生物量碳含量。

1.3 项目测定

土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法^[15]测定;土壤呼吸采用碱液吸收滴定法^[11]测定;土壤酶活性采用关松荫^[16]的方法测定,土壤脲酶活性采用靛酚比色法^[16]测定,活性以24 h后1 g土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 毫克数表示;土壤转化酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[16]测定,活性以24 h后1 g土壤中葡萄糖毫克数表示;土壤多酚氧化酶活性采用碘量滴定法^[16]测定,活性以用于滴定相当于1 g土壤的滤液的0.01 NI_2 毫升数表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[16]测定,活性以20 min后1 g土壤消耗的0.1 NKMnO_4 的毫升数表示;微生物量碳含量采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法^[16],TOC自动分析仪进行测定。

1.4 数据分析

采用SPSS 22.0、Excel 2010 软件进行数据处理,采用Sigma Plot 12.5 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率与积累量的变化

由图1a可知,培养的前25 d,各处理土壤呼吸速率的变化趋势均为前期快速增加,达到峰值后开始下降并于培养的中后期达到相对平衡状态,培养第2天时,T处理的呼吸速率达到峰值为 $3.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (24\text{h})^{-1}$,各处理关系为 $\text{T} > \text{TH} > \text{H} > \text{F} > \text{CK}$,T、TH、H、F处理较CK显著高出592.26%、257.37%、111.90%、52.77%,培养第5天时,F、TH与CK处理达到峰值,各处理关系为 $\text{T} > \text{TH} > \text{F} > \text{H} > \text{CK}$,其中T、TH、H、F处理较CK显著高出311.47%、144.41%、38.50%、42.68%,而H与F处理差异不显著,培养的第5~25天,各处理呼吸速率迅速下降,均表现为 $\text{T} > \text{TH} > \text{F} > \text{H} > \text{CK}$ 。在培养的25~60 d, H、F、CK处理呼吸速率变化较小,且三者之间差异不显著。由图1b可以看出,土壤呼吸积累量随着培养时间的推移逐渐增加,积累速率逐渐降低,后期逐渐持平,各处理表现为 $\text{T} > \text{TH} > \text{H} > \text{F} > \text{CK}$ 。培养第60天时,T、TH、H、F处理的呼吸积累量较CK显著高出714.07%、352.02%、76.00%、58.88%,而H与F处理差异不显著。

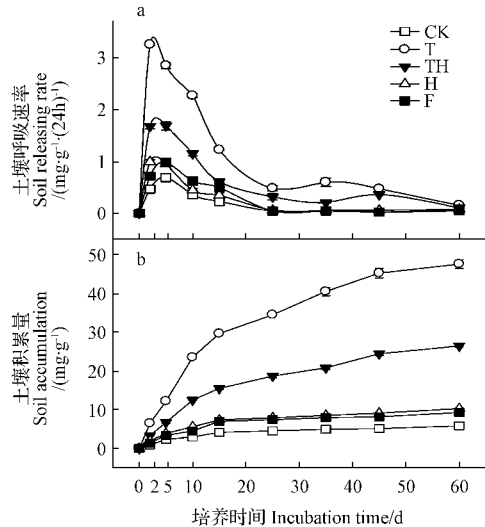


图1 添加外源碳对土壤呼吸速率与土壤呼吸积累量的影响

Fig. 1 Effects of adding exogenous carbon on soil respiration rate and soil respiration accumulation

2.2 土壤微生物量碳的变化

由图2可知,在整个培养时期内,各处理的微生物量碳的变化趋势均表现为前期升高后逐渐平稳,其中各处理表现为 $\text{T} > \text{TH} > \text{H} > \text{F} > \text{CK}$,培养的第60天时,T、TH、H、F处理较CK分别高出156.55%、125.38%、23.67%、20.72%;整个培养时期内T与TH处理显著高于其它处理,H、F、CK处理三者之间差异不显著。添加4种外源碳均使得微生物量碳显著高于CK,4种不同处理对微生物量碳的增加作用体现为 $\text{T} > \text{TH} > \text{H} > \text{F}$ 。

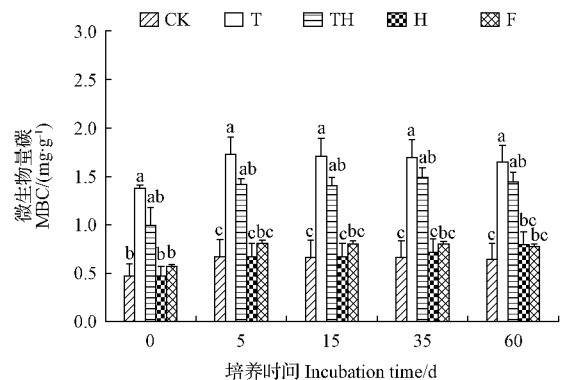


图2 添加外源碳对土壤微生物量碳的影响

Fig. 2 Effects of exogenous carbon on soil microbial biomass carbon

2.3 土壤酶活性的变化

2.3.1 土壤转化酶活性

由图 3a 可以看出,T 处理与 TH 处理的土壤转化酶活性变化趋势为 0~15 d 逐渐升高,15~35 d 略有下降,而后 35~60 d 逐渐上升与第 15 天基本持平;H 处理的土壤转化酶活性逐渐上升,CK 与 F 处理的转换酶活性变化趋势为 0~15 d 逐渐上升,15~60 d 逐渐下降,培养第 0 天时,各处理转化酶活性表现为 T>CK>TH>F>H,T 处理显著高出 CK 12.31%,CK 分别显著高于 TH、H、F 处理 24.41%、122.86%和 78.16%,而培养第 60 天时,各处理之间活性表现为 T>TH>H>CK>F,T、TH、H 处理分别显著高于 CK 64.11%、51.45%、62.54%。

2.3.2 土壤脲酶活性

由图 3b 可以看出,各处理间随时间变化土壤脲酶活性变化趋势均为 0~15 d 逐渐上升,15~35 d 稍有下降,35~60 d 基本趋于平稳。培养第 0 天,各处理活性关系表现为 T>TH>CK>F>H,且 T、TH、CK 处理之间差异不显著;各处理均在第 15 天时达到峰值,活性关系表现为 H>T>TH>F>CK,H、T、TH、F 处理分别显著高出 CK 24.76%、16.87%、10.07%、7.40%,培养的 15~60 d,T、TH、H、F 处理之间差异不显著。

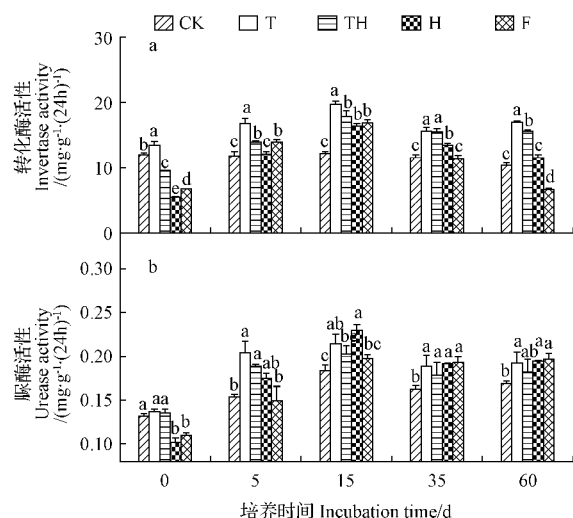


图 3 添加外源碳对土壤转化酶与脲酶活性的影响

Fig. 3 Effects of exogenous carbon addition on soil invertase and urease activities

2.3.3 土壤过氧化氢酶活性

由图 4a 可以看出,培养的 0~5 d,各处理的过氧化氢酶活性迅速提高,5~15 d 逐渐下降,15~60 d 趋势基本持平不变。培养的第 5 天,各处理之间关系为 T>TH>H>CK>F,T、TH 处理较 CK 显著高出 53.67%、22.46%,CK 较 F 处理显著高出 42.03%,CK 与 H 处理差异不显著。培养的第 60 天时,各处理之间活性表现为 TH>T>H>F>CK,TH、T、H、F 处理分别显著高于 CK 25.06%、20.57%、18.35%、15.65%,T、H、F 处理之间差异不显著。

2.3.4 土壤多酚氧化酶活性

由图 4b 可以看出,各处理之间活性在不同取样时间大小关系均表现为 T>TH>F>H>CK,T 处理的土壤多酚氧化酶活性变化趋势为 0~35 d 逐渐上升,在第 35 天时达到峰值,35~60 d 逐渐下降,而其它处理的变化趋势为随培养时间的增长而逐渐升高,在培养的第 60 天,CK、T、TH、H、F 处理的多酚氧化酶活性较第 0 天分别高出 38.78%、32.48%、26.48%、14.50%、54.39%。T、TH、F、H 处理分别显著高于 CK 95.26%、62.25%、29.25%、10.19%。

2.4 土壤酶与 MBC、土壤呼吸之间 Spearman 相关性分析

众多研究表明,土壤呼吸、微生物量碳氮以及

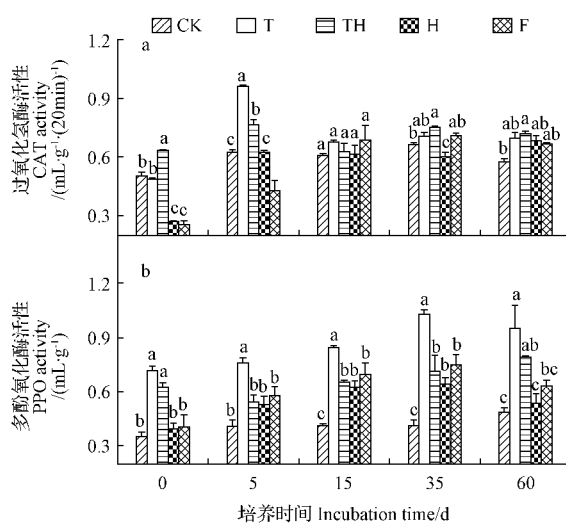


图 4 添加外源碳对土壤 CAT 与 PPO 活性的影响

Fig. 4 Effects of exogenous carbon addition on CAT and PPO activities

土壤酶活性均可作为评价土壤肥力的重要指标。土壤呼吸既是土壤中异养微生物与植物根系进行生命活动的标志,也是碳循环的重要部分;土壤微生物不仅参与养分循环和物质代谢过程,还是土壤中物质代谢旺盛的指标之一。土壤酶作为土壤组分中最活跃的有机成分之一,不仅可以表征土壤物质能量代谢旺盛程度,而且可以作为评价土壤肥力高低、生态环境质量优劣的一个重要生物指标。MBC、呼吸速率及积累量与该试验所测定的 4 种酶之间的相关关系如表 3 所示。

由表 3 可以看出,试验中所测定的 4 种酶与 MBC、呼吸速率及积累量之间,除了脲酶与 MBC 以及土壤呼吸速率之间呈现显著相关外,其它 3 种酶均呈现极显著相关关系。

表 3 土壤酶与 MBC、土壤呼吸之间
Spearman 相关分析

Table 3 Spearman correlation analysis between soil enzyme,
MBC and soil respiration

项目 Items	转化酶 Su.	脲酶 Ur.	过氧化氢酶活性 CAT activity	多酚氧化酶活性 PPO activity
微生物量碳 MBC	0.588 **	0.266 *	0.467 **	0.541 **
土壤释放速率 Soil releasing rate	0.689 **	0.286 *	0.493 **	0.508 **
土壤积累量 Soil accumulation	0.652 **	0.697 **	0.728 **	0.717 **

注: * 代表差异达到显著 ($P < 0.05$), ** 代表差异达到极显著 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significantly different at level of $P < 0.05$, ** indicates significantly different at level of $P < 0.01$.

2.5 土壤微生物活性因子的主成分分析

运用主成分分析法^[11]对该试验测定的 7 项指标进行降维的因子分析、用 KMO 和 Bartlett 球形度检验分析指标选取的适宜性,经检验, KMO 值 = 0.774 > 0.6,说明各指标之间有较强的偏相关性,通过 Bartlett 的球形检验得到显著性 = 0.00 < 0.01,说明所选取的几个指标之间可以进行因子分析。

如表 4 所示,所选取的 3 个公因子累计贡献率达到了 83.60% > 80%,说明降维得到的因子信息损失度 < 20% 在允许范围内,既选取 3 个因子可以代表此次主成分分析所包括的土壤活性因子指标。

表 4 旋转因子载荷矩阵与初始特征值

Table 4 Rotated component matrix and initial eigen values

项目 Items	F1	F2	F3
土壤积累量 Soil accumulation	0.905	0.170	0.022
微生物量碳活性 MBC activity	0.776	0.096	0.459
多酚氧化酶活性 PPO activity	0.619	0.551	0.158
脲酶 Ur.	0.009	0.928	0.189
转化酶 Su.	0.431	0.812	0.137
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.011	0.174	0.925
土壤呼吸释放速率 Soil releasing rate	0.448	0.180	0.768
特征根 λ	3.730	1.104	1.017
方差贡献率 Variance contribution rate	53.29	15.78	14.53
累积贡献率 Accumulating contribution rate/%	53.29	69.06	83.60

经过主成分分析,可以将测定的几个指标归类为 3 个公因子,第 1 个公因子 F1 包含了呼吸积累量与 MBC、PPO 这 3 个指标信息,第 2 个公因子包含脲酶与转化酶,第 3 个公因子包含了 CO_2 释放速率与 CAT 的指标信息,将旋转因子载荷矩阵中的载荷向量转化为特征向量,可以得到能够体现土壤生物活性的 3 个主成分因子得分的表达式: $F1 = 0.469X_1 + 0.402X_2 + 0.321X_3 + 0.005X_4 + 0.223X_5 + 0.005X_6 + 0.232X_7$, $F2 = 0.162X_1 + 0.091X_2 + 0.524X_3 + 0.883X_4 + 0.773X_5 + 0.166X_6 + 0.171X_7$, $F3 = 0.022X_1 + 0.455X_2 + 0.157X_3 + 0.187X_4 + 0.136X_5 + 0.917X_6 + 0.762X_7$ 。其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 \dots 、 X_7 分别指呼吸积累量、MBC、PPO、Ur.、Su.、CAT、呼吸速率各指标进行数据标准化后的数据值。将 3 个因子得分以方差贡献率为权数进行加权求和,即得到表 5 所示的代表生物活性的主成分分析综合得分与排名情况。

根据主成分分析可以看出,在包含 7 个指标的 3 个公因子得分进行综合排名后,各处理排名为 $T > TH > F > H > CK$ 。

表 5 主成分分析综合得分及排名

Table 5 Principle components analysis (PCA) synthesis
score and standing list

处理 Treatment	F1	F2	F3	综合得分 Composite score	综合排名 Rank
CK	-1.135	-0.868	-0.260	-0.932	5
T	1.095	0.739	1.524	1.102	1
TH	0.208	0.116	0.195	0.189	2
H	-0.356	0.529	-0.507	-0.215	4
F	-0.129	0.066	-0.773	-0.204	3

3 讨论

该试验添加的4种不同种类外源碳在培养时期内呼吸速率以及呼吸积累量均高于CK,这表明4种处理均对微生物的呼吸作用有促进作用。添加外源碳,促进了土壤呼吸的正向进行,外源碳的分解向土壤中的微生物提供了营养,促进了微生物的生命活动,添加外源碳的处理微生物量碳的含量均显著高于对照,这证明添加外源碳有利于微生物活动,对土壤生物肥力的提高有促进作用,这与尚杰等^[11]、黄剑等^[17]在施用生物炭对土壤微生物量碳含量的影响得出结论相同。焦伟^[18]同样认为,施用碳源物质对土壤中的真菌、细菌、放线菌有富集作用即有益于微生物量碳含量的增加。而对4种酶活性变化情况的分析可以得出,添加外源碳均显著增加了土壤酶活性,添加外源碳,促进了蔗糖分解的正向进行,土壤转化酶活性增加,促进了土壤的碳循环,继而增强了微生物的生命活动,可以表征土壤生物肥力的提高^[19]。结果表明,前期糖类迅速分解使转化酶活性迅速增高,后期略有降低逐渐趋于平稳。这与黄剑^[17]、贺婧等^[20]的研究结果一致。脲酶可以将土壤中的有机物进行分解,其酶促产物—氨是植物氮源之一^[17,21]。因此添加外源碳后,脲酶活性的提高意味着土壤有机质含量的增加,其结果是土壤中氮素的正向积累,该试验结果表明添加外源碳后,各处理脲酶活性迅速升高中后期趋于稳定,这与翟修彩等^[22]在添加秸秆对红壤脲酶影响的研究中结果一致。土壤过氧化氢酶能够利用土壤中氧化物中的氧,从而氧化土壤中的有机物质,而土壤中的酚类物质在多酚氧化酶作用下氧化生成醌^[23]。醌与氨基酸等通过一系列生物化学过程缩合成最初的胡敏酸分子,该试验中外源碳的增加提高了土壤过氧化氢酶以及多酚氧化酶的活性,证明了添加外源碳后土壤中有机质与腐殖质含量的正向积累,即土壤肥力的显著提升。这与李猛等^[23]、陈强龙等^[24]研究结果一致。添加外源碳均提高了以上4种土壤酶活性,然而活性增长率以及作用周期取决于碳源的易分解程度。从外源碳对土壤酶活性的影响来看,红糖处理为增益最显著处理,红糖+褐煤处理为第二,而褐煤与腐殖酸钠之间差异不显著。可以认为,红

糖(T)处理在前期的迅速分解,短时间内提高了土壤各种酶的生物活性,大量的微生物也促进了褐煤的分解,这4种酶活性变化进一步证明了添加外源碳有利于提高土壤生物肥力提升,有效增加退化黑土微生物量。通过Spearman相关性分析可以发现,土壤转化酶Su、土壤脲酶Ur、土壤过氧化氢酶CAT以及土壤多酚氧化酶PPO的活性与土壤的生物肥力呈现正相关,不仅能够表征土壤生物学活性强度,也可以做为评价土壤熟化程度和土壤肥力水平的一个指标。而添加外源碳后,退化黑土的土壤基础养分含量变化、腐殖质含量、碳组分的改变及其有机质含量的相关关系也是外源碳对退化黑土有机质含量影响的重要指标,将另著文分析。

4 结论

该试验中添加的4种外源碳均对土壤呼吸量,土壤微生物量碳含量以及4种土壤酶(土壤转化酶、土壤脲酶、土壤过氧化氢酶、土壤多酚氧化酶)有促进作用,间接证明了添加外源碳可以增加土壤微生物生命活动,提高土壤生物肥力。红糖(T)、红糖+褐煤(TH)、褐煤(H)、腐殖酸钠(F)之间比较得出,4种外源碳对土壤生物肥力的提升效果明显,其中红糖(T)的效果最好,红糖+褐煤(TH)其次、褐煤(H)与腐殖酸钠(F)之间差异不显著。红糖价格高,产量低,腐殖酸钠则工艺复杂,均不适合大面积应用。而褐煤储量大、价格相对较低,同时考虑到红糖+褐煤处理比单独褐煤处理效果更好且价格相对红糖单独处理要低,可以作为最适处理,适合大面积推广施用,改良退化黑土,快速修复其生物肥力。

参考文献

- [1] 徐晓斌. 东北黑土退化研究现状及展望[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(8): 54-56.
- [2] 张兴义, 隋跃宇, 宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物, 2013, 2(1): 1-6.
- [3] 王小兵, 吴元元, 邓玲. 东北黑土区黑土退化防治与保护研究[J]. 资源与产业, 2008, 10(3): 81-83.
- [4] ABBOOTT L K, MYRPHY D V. What is soil biological fertility? [M]. US: Springer Netherlands, 2007.
- [5] ANDERSON T H, DOMSCH K H. The metabolic quotient for CO₂ as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of

forest soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1993, 25(3): 393-395.

[6] MANJAJIAH K M, VORONEY R P, SEN U. Soil organic carbon stocks, storage profile and microbial biomass under different crop management systems in a tropical agricultural ecosystem[J]. Biology & Fertility of Soils, 2000, 32(4): 273-278.

[7] 马万里, JOSQUIN, TIBBITS, 等. 土壤微生物多样性研究的新方法[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 103-107.

[8] DODD J C, BODDINGTON C L, RODRIGUEZ A, et al. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: Form, function and detection[J]. Plant & Soil, 2000, 226(2): 131-151.

[9] JASTROW J D, MILLER R M, OWENSBY C E. Long-term effects of elevated atmospheric CO₂ on below-ground biomass and transformations to soil organic matter in grassland[J]. Plant & Soil, 2000, 224(1): 85-97.

[10] 吴丹娜, 江洪, 张金梦. 农田生态系统土壤呼吸作用的研究进展[J]. 北方园艺, 2015(6): 178-182.

[11] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对(土娄)土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1142-1151.

[12] 傅雪海, 路露, 葛燕燕, 等. 我国褐煤资源及其物性特征[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 104-107.

[13] 武丽敏. 褐煤腐植酸的增产效益及改良土壤作用[J]. 煤炭加工与综合利用, 1996(1): 24-26.

[14] 张涛, 李素艳, 孙向阳, 等. 磷石膏、红糖等对蚯蚓改良滨海盐土的促进作用[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 255-264.

[15] 庞荔丹, 孟婷婷, 张宇飞, 等. 玉米秸秆配氮还田对土壤酶活性、微生物量碳含量及土壤呼吸量的影响[J]. 作物杂志, 2017(1): 107-112.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[17] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

[18] 焦伟. 土壤有机营养添加剂对土壤微生物的修复效果与机制分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.

[19] 关松荫. 土壤酶活性影响因子的研究: I. 有机肥料对土壤中酶活性及氮磷转化的影响[J]. 土壤学报, 1989(1): 72-78.

[20] 贺婧, 钟艳霞, 颜丽. 不同来源腐殖酸对土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 258-261.

[21] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007(2): 162-171.

[22] 翟修彩, 刘明, 李忠佩, 等. 不同添加剂处理秸秆腐解物对红壤性质的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 868-874.

[23] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 44-53.

[24] 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.

Effects of Different Exogenous Carbon on Soil Respiration, Microbial Biomass Carbon and Enzyme Activity in Degraded Black Soil

MENG Tingting, ZHANG Yufei, MA Yuxuan, ZHOU Sen, WANG Xiaochun, DAI Jianjun

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

Abstract: In order to screen exogenous carbon species that could improved biofertility of degraded black soil, brown sugar, lignite, sodium humate were used in this experiment. Soil incubation experiments were carried out by setting different exogenous carbon into 5 treatments and used PCA (principal component analysis) to screen the best treatment. The treatments include blank control (CK), sugar (T), lignite (H), sodium humate (F) and brown sugar + lignite (TH). The effects of different exogenous carbon on soil respiration, microbial biomass carbon and related enzyme activities in degraded black soil werestudied. The results showed that soil respiration rate and respiration accumulation added four different exogenous carbon in incubation earlier stage showed $T > TH > F > H > CK$, but later H, F and T had no significant difference between CK. Soil microbial biomass carbon increased as $T > TH > H > F > CK$ by adding four kinds of exogenous carbon. Adding exogenous carbon could promote soil enzyme activities. With time changing, the soil enzyme activities in brown sugar treatment were the strongest. Comprehensive score ranking of principal component analysis showed result for $T > TH > F > H > CK$. Therefore, the exogenous carbon would improve degraded black soil microbial activity and biological fertility. Effect of brown sugar treatment (T) was the most significant in the four kinds of exogenous carbon treatments, followed by brown sugar + lignite (TH) treatment.

Keywords: exogenous carbon; degraded black soil; microbial biomass; soil respiration; soil enzyme activity