

养分缺乏下外源有机酸对暗棕壤脱氢酶活性的影响

马瑞¹, 黄文斌¹, 杨迪¹, 刘永², 宋金凤^{1*} (1. 东北林业大学, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 黑龙江出入境检验检疫局技术中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要 [目的] 研究养分缺乏下外源有机酸对暗棕壤脱氢酶活性的影响。[方法] 用不同比例 A₁ 和 B 层暗棕壤(A₁:B=1:2) 设置土壤养分缺乏条件, 栽植落叶松幼苗, 通过有机酸溶液外源添加, 系统研究不同浓度草酸、柠檬酸和琥珀酸对养分缺乏下暗棕壤脱氢酶活性的影响。[结果] 养分缺乏下, 暗棕壤的脱氢酶活性明显降低, 且胁迫时间越长降低幅度越大。对于养分缺乏的暗棕壤, 大多数有机酸处理均提高了土壤的脱氢酶活性, 提高程度因处理时间、有机酸种类和浓度而异。在处理 10、20 和 30 d 时, 最显著的有机酸处理浓度分别为 10.0、5.0 和 10.0 mmol/L; 不同处理时间内对脱氢酶活性的增幅为 30 d > 20 d > 10 d; 3 种有机酸的增加效果为: 琥珀酸 > 柠檬酸 > 草酸。[结论] 外源有机酸对养分缺乏暗棕壤的脱氢酶活性提高有很好的促进作用, 也一定程度上提高了暗棕壤的微生物活性和土壤肥力。

关键词 落叶松 (*Larix olgensis*); 养分缺乏; 有机酸; 暗棕壤; 脱氢酶活性

中图分类号 S714.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)34-13221-03

Effects of Exogenous Organic Acids on Dehydrogenase Activity in Dark Brown Forest Soils under Nutrient Deficiency

MA Rui et al (Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract [Objective] This study aimed to investigate the effects of exogenous organic acids on dehydrogenase activity in dark brown forest soils under nutrient deficiency. [Method] Different proportions of A₁ and B layer dark brown forest soils (A₁: B = 1: 2) were utilized to establish soil nutrient conditions for cultivation of *Larix olgensis* seedlings. The effects of oxalic acid, citric acid and succinic acid on dehydrogenase activity in dark brown forest soils under nutrient deficiency were studied systematically by adding different concentrations of organic acid solutions. [Result] Under nutrient deficiency, dehydrogenase activity in dark brown forest soils was reduced significantly, and the reduction increased with the extension of stress duration. Most organic acid treatments improved dehydrogenase activity in nutrient-deficient dark brown forest soils, and the effects varied with different treatment durations and types and concentrations of organic acids. On day 10, 20 and 30, 10.0, 5.0 and 10.0 mmol/L organic acid treatments exhibited the most significant effects, respectively. The increase of dehydrogenase activity in different durations showed a downward trend of 30 d > 20 d > 10 d; the improvement effects of three organic acids on dehydrogenase activity showed a downward trend of succinic acid > citric acid > oxalic acid. [Conclusion] Exogenous organic acids improved significantly dehydrogenase activity in dark brown forest soils under nutrient deficiency and also improved the microbial activity and soil fertility to a certain extent.

Key words *Larix olgensis*; Nutrient deficiency; Organic acid; Dark brown forest soils; Dehydrogenase activity

养分是土壤肥力的 4 大因子之一, 对植物的生长发育起极其重要的作用。但在农林业生产中, 植物常会遭受土壤养分缺乏等逆境条件, 即植物生长介质中养分含量低于植物正常生长所需要的范围而对植物形成胁迫, 包括养分不足、养分不协调和养分损失等^[1]。研究表明, 土壤养分缺乏直接限制植物的生长和生物量积累, 甚至对植物生存产生严重影响, 且不同植物对养分缺乏的反应不同^[2-3]。因此, 植物对土壤养分缺乏条件的响应规律和适应性一直是多学科关注的热点。

土壤酶是土壤的重要组成部分, 主要来源于土壤微生物活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解, 土壤中绝大多数生化过程是在这些酶的参与下完成的^[4]。脱氢酶是土壤中的主要酶类之一, 能酶促有机物脱氢, 起氢的中间传递体作用, 其活性高低是表征土壤微生物活性和功能多样性的重要指标^[4-5]。研究表明, 不同的环境条件下, 土壤的脱氢酶活性有一定差异^[6-8], 特别是土壤逆境条件对其影响更明显^[9], 其活性可作为衡量土壤污染程度的重要指标之一^[4]。

目前, 有一些外界污染物对土壤脱氢酶活性影响的报道, 包括 DDT^[10]、有机农药^[9]、增塑剂^[5]和铬^[4]等, 土壤类型涉及风沙土、红壤和黄棕壤^[4-5]等, 且影响程度与处理时间、土壤中是否栽种植物等关系密切^[5]。

在我国东北林区有大量需人工造林的荒山荒地, 这些立地条件下, 土壤养分缺乏常普遍存在, 暗棕壤是此区的地带性森林土壤类型。对于这些养分缺乏的荒山暗棕壤, 造林和林业复垦的优选树种是落叶松 (*Larix olgensis*)。有机酸是森林生态系统中普遍存在的一类高活性有机物, 主要来源于有机质分解、植物根系分泌和微生物分泌^[11-12]。磷、铁等某些养分缺乏条件还诱导植物根系大量地分泌有机酸, 这是植物对养分缺乏环境产生的一种主动性生理适应机制^[13-15], 且在不同程度的养分缺乏条件下, 植物根系分泌的有机酸数量和种类都不同^[16]。前期研究发现, 暗棕壤养分缺乏亦明显诱导落叶松根系对多种有机酸的分泌。这些有机酸进入土壤后, 又通过多种机制明显影响土壤的一系列生物学过程, 包括微生物活动等^[17-18]。微生物活动和植物根系分泌物还是土壤脱氢酶的主要来源, 其活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度。所以推测暗棕壤养分缺乏亦通过影响土壤微生物活性和落叶松根系有机酸的分泌状况, 进而影响土壤脱氢酶活性。但目前, 关于有机酸与暗棕壤脱氢酶活性的关系及相互影响的研究鲜有报道。笔者用不同比例的 A₁ 层和 B 层暗棕壤(A₁:B=1:2) 设置土壤养分缺乏条件, 栽植落叶

基金项目 国家自然科学基金项目(31370613); 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB403202); 国家质检总局课题(2009IK177); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DL12CA01)。

作者简介 马瑞(1991-), 男, 内蒙古海拉尔人, 硕士研究生, 研究方向: 森林土壤学。* 通讯作者, 副教授, 从事森林土壤与土壤生态学研究。

收稿日期 2013-11-01

松幼苗,通过系列浓度草酸、柠檬酸和琥珀酸等有机酸外源添加,系统研究不同浓度有机酸对养分缺乏下暗棕壤脱氢酶活性的影响,以期填补林业领域中有机酸对土壤脱氢酶活性影响研究的空白,并为揭示植物与土壤环境间相互作用的实质、更好指导农林业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 试验在东北林业大学帽儿山实验林场温室内进行。分别在有机酸处理后 10、20 和 30 d,采集落叶松林下根系主要分布区的暗棕壤(5~10 cm),风干,粉碎,过 1 mm 尼龙筛,用三苯基四唑氯化物(TTC)比色法测定脱氢酶活性(以 20 g 土壤中 H^+ 的微升数表示)。

1.2 方法

1.2.1 样品的初处理。落叶松种子经选种、消毒后,进行催芽、播种,覆土料为质地均一、无杂质的 A_1 层暗棕壤。选择生长一致的苗木栽植在塑料盆内(底径 16.2 cm,上口径 18.4 cm,高 20.0 cm),每盆 60 株,土壤基质为 A_1 层与 B 层暗棕壤按 1:2 比例充分混合,钵上沿土壤空出 2~3 cm,以浇水和有机酸处理,再在土壤表层洒一层沙子以减少水分蒸发。供试 A_1 层与 B 层暗棕壤的基本性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本性质

土壤层次	pH	阳离子交换量 mmol/kg	有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	有效磷* mg/kg
A_1 层	5.36	40.5	108.0	6.41	2.10	46.1
B 层	5.10	21.0	12.2	1.10	1.32	10.3

注:* 为 30 mmol/L NH_4F + 25 mmol/L HCl 浸提法提取。

1.2.2 试验设计。落叶松幼苗在温室内正常光照和浇水,充分缓苗后进行有机酸处理,具体如下:用喷壶向苗木叶片上、下表面喷施有机酸溶液(草酸、柠檬酸和琥珀酸,浓度分别为 0、0.2、1.0、5.0 和 10.0 mmol/L),以叶面均匀湿润为止,同时进行灌根处理。3 种有机酸均以有机盐形式添加(pH 5.16,仿凋落物淋洗液平均 pH),每天处理 1 次,共 7 次,均在早晨 8:00 进行,每处理 5 盆。在上述相同条件下,用 A_1 层暗棕壤栽植苗木、不加有机酸而进行蒸馏水处理为对照。

2 结果与分析

2.1 有机酸处理 10 d 时暗棕壤的脱氢酶活性测定 图 1 表明,与对照(肥沃的 A_1 层)相比,土壤养分缺乏处理(即有机酸 0 处理, A_1 层与 B 层暗棕壤 1:2 混合土壤)后,暗棕壤脱氢酶活性下降,降幅为 2.83%。在养分缺乏的暗棕壤中,用不同浓度有机酸处理 10 d 时,脱氢酶活性先降后升:草酸、柠檬酸、琥珀酸分别在 1.0、5.0 和 0.2 mmol/L 时降幅最大,这说明,有机酸浓度较低时脱氢酶活性的变化以养分缺乏的降低效应为主;随有机酸浓度增加,脱氢酶活性又逐渐增加,并在 10.0 mmol/L 时达到最大,此时的酶活性明显高于有机酸 0 处理组。而同浓度不同的有机酸处理间未表现出明显规律。

2.2 有机酸处理 20 d 时暗棕壤的脱氢酶活性测定 图 2 表明,与对照相比,在养分缺乏条件下,有机酸处理 20 d 时,有机酸 0 处理组的暗棕壤脱氢酶活性也降低,降幅达 32.11%。随有机酸浓度增加,暗棕壤脱氢酶活性大体表现出先升后降

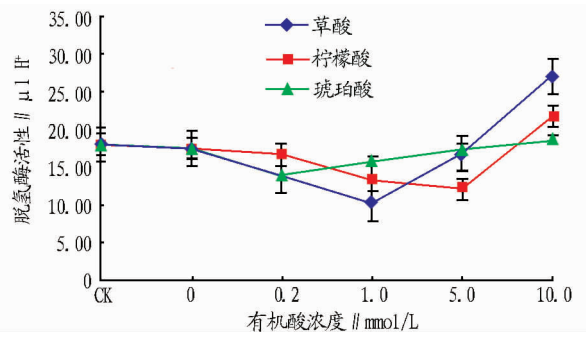


图 1 有机酸处理 10 d 时暗棕壤的脱氢酶活性

的趋势,3 种有机酸均在 5.0 mmol/L 时达峰值,浓度再高又下降,但整体仍高于或持平于有机酸 0 处理组。从有机酸种类看,琥珀酸处理效果强于同浓度的柠檬酸和草酸。

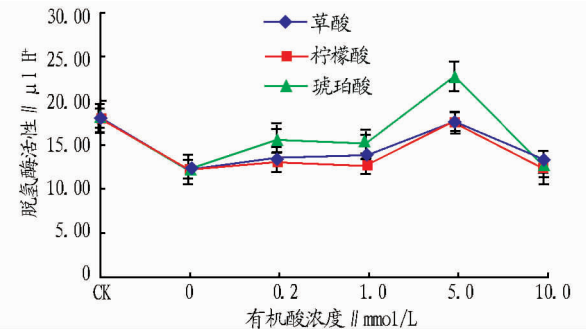


图 2 有机酸处理 20 d 时暗棕壤的脱氢酶活性

2.3 有机酸处理 30 d 时暗棕壤的脱氢酶活性测定 图 3 表明,与对照相比,有机酸 0 处理组的脱氢酶活性迅速降低,降幅达 50.94%。有机酸处理后,土壤的脱氢酶活性均增加,且随有机酸浓度升高逐渐增大,草酸、柠檬酸和琥珀酸均在 10.0 mmol/L 时最大,分别达 13.52、20.88 和 24.62 $\mu l H^+$ 。从有机酸种类看,琥珀酸处理效果强于同浓度柠檬酸,柠檬酸强于草酸。

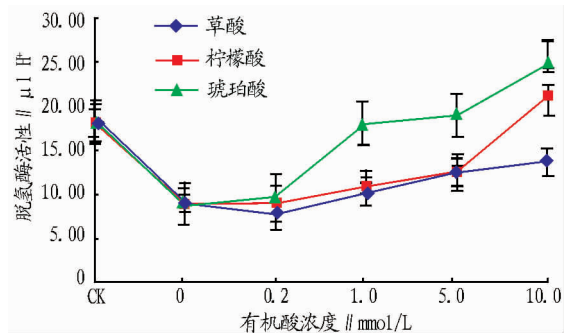


图 3 有机酸处理 30 d 时暗棕壤的脱氢酶活性

2.4 不同处理时间内暗棕壤脱氢酶活性的对比 图 1~3 表明,与对照相比,在分别处理 10、20 和 30 d 时,有机酸 0 处理组的脱氢酶活性均降低,且随时间延长降幅增大。在不同的处理时间,同浓度、同种类有机酸处理的脱氢酶活性都不同。从脱氢酶活性的绝对数值看,不同处理时间的结果未表现出明显规律。例如,不同处理时间时,0.2 mmol/L 柠檬酸和草酸处理结果为 10 d > 20 d > 30 d (柠檬酸 10 d 处理结果分别是 20 d 和 30 d 的 1.27 倍和 1.34 倍,草酸分别是 1.03 倍和 1.12 倍),0.2 mmol/L 琥珀酸处理结果为 30 d > 20 d >

10 d(30 d 是 20 d 的 1.19 倍,是 10 d 的 1.37 倍)(图 4),而 5.0 mmol/L 柠檬酸、草酸和琥珀酸处理结果为 20 d > 10 d > 30 d(图 5)。但从脱氢酶活性的相对数值看,不同处理时间时,脱氢酶活性的增加幅度表现出明显规律,为 30 d > 20 d > 10 d。如 1.0 mmol/L 时,30 d 时草酸、柠檬酸和琥珀酸处理的增幅分别为 20 d 的 1.25 倍、4.61 倍和 4.31 倍(10 d 增幅为负)。因此,比较不同时间时有机酸处理的脱氢酶活性变化时,用酶活性与有机酸 0 处理组的相对数值(即变化幅度)表示更科学,也更有现实意义。

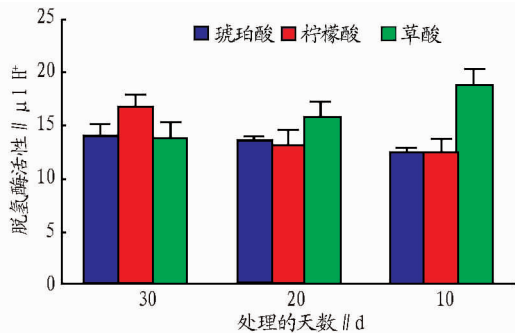


图 4 0.2 mmol/L 有机酸处理时的暗棕壤脱氢酶活性

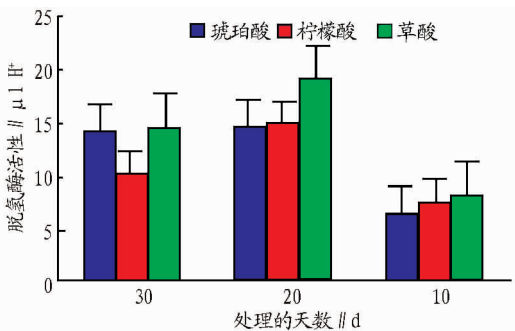


图 5 5.0 mmol/L 有机酸处理时的暗棕壤脱氢酶活性

3 结论与讨论

土壤酶是土壤的重要组成部分,对土壤肥力的形成与提高、物质循环等都具有重要意义,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度^[4]。早在 1844 年,Liebig 就在《化学通讯》中提到了土壤具有催化某些底物的作用。Woods(1898)首次从土壤中检测出过氧化氢酶活性,1899 年 Woods 又提出土壤中存在胞外酶。20 世纪 50 年代以后,各种土壤中共检测出 40 余种土壤酶,土壤酶学逐步发展成土壤学的一个重要分支^[19-20]。80 年代中期,约有 60 种土壤酶被检测,之后土壤酶学与林学、生态学、农学和环境科学等学科相互渗透,土壤酶活性的检测已成为所有陆地生态系统研究中必不可少的测定指标^[21-22]。

土壤酶是指土壤中的聚积酶,包括游离酶、胞内酶和胞外酶等^[23]。土壤脱氢酶是土壤中一种重要的胞内酶,只存在于活细胞的内部,不像其他酶那样能在细胞外显示出活性^[5]。土壤脱氢酶能催化脱氢反应,起着氢的中间传递体作用,其活性大小直接反映了土壤微生物的数量和活性,是微生物活性较好的度量和生物学表征。作为重金属污染监测的指示物,土壤脱氢酶还能用于简单的毒性监测^[4]。目前,

研究者考察了外界污染物对土壤脱氢酶活性的影响,如在 DDT 含量为 50 mg/kg 的土壤,脱氢酶活性受到抑制^[10]。有机农药对硝基酚对土壤脱氢酶活性有很大影响^[9]。秦华等发现,邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP,一种工业上广泛使用的酞酸酯,主要用作聚氯乙烯的增塑剂,也是农膜的主要成分)对脱氢酶活性有破坏作用,能明显抑制江苏省句容市蔬菜的人为土(黄棕壤)的脱氢酶活性,与对照相比,30 d 时结果降低了约 30%;60 d 时由于土壤自身的修复作用酶活性有缓慢回升,但仍明显低于对照($P < 0.05$)^[5]。蔡少华等也证实,六价铬能明显抑制陕西榆林市风沙土、江西中科院土壤研究所鹰潭生态试验站红壤的脱氢酶活性,其与六价水溶态铬含量呈极显著负相关,且随土壤肥力水平降低明显递减^[4]。试验结果表明,与 A₁ 层暗棕壤(即对照)相比,A₁ 层与 B 层(1:2)混合的土壤脱氢酶活性降低,这与上述研究结果一致。究其原因,可能是与养分充足的 A₁ 层对照相比,将 A₁ 层与 B 层暗棕壤按 1:2 比例混合处理后,土壤会出现养分缺乏状况,有机质含量和各种养分有效性均下降,土壤微生物的数量和活性也降低,所以脱氢酶活性下降。

污染物对土壤脱氢酶活性的影响与处理时间密切相关。例如,邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)对黄棕壤脱氢酶活性的影响,随时间推移而变化:初期影响不明显,中期强烈抑制,然后又缓慢地自身修复^[5];经六价铬处理后,随培养时间延长,风沙土的脱氢酶活性表现出递减的规律性变化^[4]。试验发现,随养分缺乏处理时间延长,混合暗棕壤的脱氢酶活性不断降低,即出现明显抑制,这与上述研究结果有同有异,可能与处理物和土壤类型、处理时间等不同有关。

在土壤中,碳水化合物和有机酸的脱氢酶比较活跃,可作为氢的供体,脱氢酶能自基质中析出氢而进行氧化作用。在养分缺乏下,外源有机酸处理较长时间时(20 和 30 d),暗棕壤的脱氢酶活性明显提高,所有浓度处理结果均高于有机酸 0 处理组,甚至高于对照组。这说明,在一定时间内,有机酸处理明显降低了土壤养分缺乏对脱氢酶活性的抑制作用,使其大幅回升。原因可能是土壤养分缺乏处理时,有机酸能为植物提供 P、N 等营养成分,从而增强了植物的根系活力,提高了脱氢酶活性;有机酸还作为可被微生物利用的碳源被逐渐降解,并促进这类微生物生长、增强微生物活性,进而提高脱氢酶活性。脱氢酶活性能很好地表征土壤的生物学特征,并作为衡量土壤污染程度的重要指标之一。试验结果说明,外源有机酸在一定程度上提高了暗棕壤的微生物活性和生化活性,减轻了土壤的养分缺乏状况,提高了养分缺乏下暗棕壤的土壤肥力,这必将对其上植物的生长发育产生积极影响。

另外,秦华等在研究 DEHP 对土壤脱氢酶活性的影响时发现,由于土壤自身的修复作用,与 30 d 时酶活性的降低作用相比,60 d 时又有缓慢增加,且种植绿豆处理比无植物处理增加更明显^[5]。这表明植物对土壤脱氢酶活性有较强影响,栽种绿豆明显提高了土壤脱氢酶活性,并加速了土壤的

(下转第 13289 页)

从表 3 可以看出,利用 T-P 传递函数所作的预报模型误差要小,但也不难发现,利用 T-P 传递函数所作的预报模型学习训练时需要大量时间。

4 结论

由于人工神经网络方法是处理非线性问题,对样本不要独立或遵守正态分布,能把所有样本的情况包括进来,还具有较强的容错能力,与以往的预报方法不同,因此工作有一定的意义。但它也有不足的方面,如收敛较慢,训练花费时间多,不能如一般统计方法及专家系统那样,可以明确地表达出输出与输入之间的关系,由于网络结构复杂,因果转换关系像是“暗箱”,使读者无法了解。另外,如其他气象预报统计方法一样,人工神经网络是从历史气象要素资料获得规律,存在“拟合好,预报差”的现象。人工神经网络在气象预报方面的应用还是初步阶段,还有大量问题有待研究,且有适用范围。人工神经网络在处理图像识别问题上已取得较好效果,但气象预报问题十分复杂,气象要素处于不断变化状态中,涉及的信息量巨大,而现在的计算机条件限制了

人工神经网络不可能对气象预报对象所有的信息进行训练,其长处还不能完全显示。目前只能依靠专家提取有关少量因子进行训练。而 BP 网络也有其局限性,如学习率较小,学习训练速度太慢,学习率的选择缺乏有效的方法,而其训练过程也很可能陷于局部最小^[6]。因此,要想准确预报夏季的高温,除了需要对数值预报产品进行释用之外,还要考虑一些局地因素,如下垫面性质、热容量等;再加上预报员对该地区的预报经验,才能作出更有效、更准确的预报。

参考文献

- [1] 金龙. 神经网络气象预报建模理论与应用[M]. 北京:气象出版社, 2004.
- [2] 雷蕾,秦侠,姚小丽. 基于 Matlab 的 BP 神经网络在大气污染预报中的应用[J/OL]. <http://www.docin.com/p-230582984.html>.
- [3] 黄嘉佑. 气象统计分析方法与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [4] 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.
- [6] 周开利,康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 朱南文,阎航,陈美慈,等. 甲胺磷对土壤中磷酸酶和脱氢酶活性的影响[J]. 农村生态环境,1996,12(2):22-24.
- [8] 沈标,李顺鹏,赵硕伟,等. 氯苯、对硝基酚对土壤生物活性的影响[J]. 土壤学报,1997,34(3):309-314.
- [9] MEGHERAJ M,BOUL H L,THIELE J H. Effects of DDT and its metabolites on soil algae and enzymatic activity[J]. Biology and Fertility of Soils,1999,29:130-134.
- [10] VAN HEES P A W,JONES D L,GODBOLD D L. Biodegradation of low molecular weight organic acids in coniferous forest Podzolic soil[J]. Soil Biol Biochem,2002,34:1261-1272.
- [11] STROBEL B W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution-a review[J]. Geoderma,2001,99:169-198.
- [12] TOLRÁ R P,POSCHENRIEDER C,LUPPI B,et al. Aluminium-induced changes in the profiles of both organic acids and phenolic substances underlie Al tolerance in *Rumex acetosa* L[J]. Environ Exp Bot,2005,54:231-238.
- [13] ZENG F R,CHEN S,MIAO Y,et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress[J]. Environ Pollut,2008,155:284-289.
- [14] LIU Y,MI G H,CHEN F J,et al. Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability[J]. Plant Science,2004,167:217-223.
- [15] 俞元春,余健,房莉,等. 缺磷胁迫下马尾松和杉木苗根系有机酸的分泌[J]. 南京林业大学学报,2007,31(2):9-12.
- [16] NARDI S,SESSI E,PIZZEGHELLO D,et al. Biological activity of soil organic matter mobilized by root exudates[J]. Chemosphere,2006,65:190-200.
- [17] PIZZEGHELLO D,ZANELLA A,CARLETTI P,et al. Chemical and biological characterization of dissolved organic matter from silver fir and beech forest soils[J]. Chemosphere,2006,65:190-200.
- [18] BOHLEN P J. Earthworm effects on carbon and nitrogen dynamics of surface litter in corn agroecosystems [J]. Ecol Appl,1997,4:1341-1349.
- [19] BRIONES M J I,INESON P. Decomposition of eucalyptus leaves in litter mixture[J]. Soil Biol Biochem,1996,28(10/11):1381-1388.
- [20] 杨万勤,王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学,2004,40(2):152-159.
- [21] 杨万勤,钟章成. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征、季节动态及其与四川大头茶关系的研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,1999,24(3):318-324.
- [22] 徐恒. 榆林沙区人工固沙林土壤养分、微生物数量和酶活性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.

(上接第 13223 页)

自身修复。其原因可能是植物分泌物的作用影响了土壤微生物的生长,或者由于植物对 DEHP 的吸收作用导致对微生物的毒害减小,这些都减轻了 DEHP 的毒害作用。试验采用栽植落叶松幼苗的方式进行,同样也能起到类似的作用和功能,实际指导意义也更明显。

试验结果表明,与肥沃的 A₁ 层土壤相比,养分缺乏的暗棕壤脱氢酶活性下降,且胁迫时间越长降幅越大。对于养分缺乏处理的暗棕壤,除较低浓度有机酸处理 10 d 外,其余所有浓度的外源有机酸均提高了暗棕壤的脱氢酶活性。外源有机酸对养分缺乏暗棕壤脱氢酶活性的影响,因处理时间、有机酸种类和浓度而异。在处理 10、20 和 30 d 时,提高脱氢酶活性最显著的有机酸浓度分别为 10.0、5.0 和 10.0 mmol/L;不同处理时间的增幅为 30 d > 20 d > 10 d;3 种有机酸的增加效果大体为琥珀酸 > 柠檬酸 > 草酸。

参考文献

- [1] 杨玉娟. 养分胁迫下麻栎的生长和生理变化研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.
- [2] JOHNSON J F,VANCE C P,ALLAN D L. Phosphorus deficiency in *Lupinus albus*[J]. Plant Physiol,1996,112:31-41.
- [3] FAN W G,YANG H Q. Nutrient deficiency affects root architecture of young seedlings of *Malus hupehensis* (Pamp)Rehd. under conditions of artificial medium cultivation[J]. Agricultural Sciences in China,2007,6(3):296-303.
- [4] 蔡少华,和文祥. 六价铬对土壤脱氢酶活性的影响[J]. 西北农业学报,2008,17(5):208-214.
- [5] 秦华,林先贵,陈瑞蕊,等. DEHP 对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报,2005,42(5):830-834.
- [6] 关松荫. 我国主要土壤剖面酶活性状况[J]. 土壤学报,1984,21(4):368-381.
- [7] TU C M. Effect of four experimental insecticides on enzyme activities and levels of adenosine triphosphate in mineral and organic soils[J]. J Environ Sci Health,1990,25(6):787-800.