

杉木人工林土壤酶活性与土壤性质的通径分析

吴永铃¹ 王兵² 戴伟¹ 王丹² 安晓娟¹

(1 北京林业大学水土保持学院 2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所)

摘要: 运用通径分析法对江西省大岗山杉木人工林土壤理化性质与土壤酶活性的关系进行了研究,探讨了不同土壤理化性质对土壤酶活性的影响程度和机理。结果表明:各种土壤性质不同程度影响着土壤酶活性的变化特征。土壤碱解氮含量通过强烈的直接作用及其与速效钾含量间的间接作用,在相当程度上决定着纤维素酶活性的变化;有机质含量在 β -葡萄糖苷酶活性的变化中发挥着极其重要的作用;强烈的直接作用及与其他土壤性质间的间接作用使总孔隙度成为影响蔗糖酶活性的主要因素。土壤碱解氮含量和田间持水量决定了多酚氧化酶活性的大部分变异。和简单相关与回归分析手段相比,通径分析能更客观、全面地评价土壤理化性质对土壤酶活性的影响。

关键词: 杉木人工林;土壤酶活性;土壤性质;通径分析

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2012)02-0078-06

WU Yong-ling¹; WANG Bing²; DAI Wei¹; WANG Dan²; AN Xiao-juan¹. **Path analysis of soil enzyme activity and soil properties of Chinese fir plantations.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) 34 (2) 78-83 [Ch, 26 ref.]

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

The Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in Dagang Mountain of Jiangxi Province, eastern China, were selected to study the relationship between soil physico-chemical properties and soil enzyme activity with path analysis method. The influence degree and the mechanisms of soil properties on soil enzyme activity were also explored. Results showed that the variation characteristics of soil enzyme activity were affected by soil properties. The variation characteristics of soil cellulose enzyme activity were determined directly by soil available nitrogen and indirectly by soil readily available potassium to a certain extent. The content of organic matter played a very important role in the β -glucosidase enzyme activity. Total porosity became main affecting factor of soil invertase activity because of its strong direct effect and indirect effects with other soil properties. The content of soil available nitrogen and field moisture capacity were dominant factors of polyphenol oxidase activity by determining most of its variation. Compared with correlation analysis and stepwise regression analysis, path analysis can objectively and comprehensively assess the influences of soil properties on soil enzyme activity.

Key words Chinese fir plantation; soil enzyme activity; soil property; path analysis

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)占我国人工林总面积的24%以上,是重要的森林生态系统类型之一。许多学者从凋落物、土壤理化性质和土壤微生物特征等多方面开展过较为深入研究^[1-8]。土壤酶是土壤生物化学反应的重要驱动者,其通过改变物

质转化的方向和强度对土壤特征产生深刻影响^[9-10]。掌握土壤酶特征对深入探讨和评价土壤质量、土壤生态功能以及土壤修复等相关问题具有重要理论意义。

长期以来,土壤酶活性与土壤理化性质的关系

收稿日期: 2011-04-28

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403201)、林业公益性行业科研专项(200804022)、 “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A0702)、国家自然科学基金项目(30590381)。

第一作者: 吴永铃。主要研究方向: 森林土壤。电话: 010-62338103 Email: wuyongling0810@126.com 地址: 100083 北京市清华东路35号北京林业大学111信箱。

责任作者: 戴伟, 副教授。主要研究方向: 森林土壤。电话: 010-62338103 Email: daiw163@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

作为土壤酶学的重要研究内容,一直受到研究者的广泛关注;但也应指出,目前研究所采用的分析手段多是简单相关分析或多元回归分析^[11-15],而这2种分析手段本身存在的局限性^[16-18]限制了人们对土壤酶活性和理化性质关系更深入和准确的认识。通径分析方法与相关分析和多元回归分析可以提供更多的因果信息,分析结果更符合实际,是研究多个相关变量之间关系的更为有效的方法^[19-21]。

为此,本文以江西大岗山杉木人工林土壤为研究对象,在土壤酶活性与主要土壤理化性质相关分析的基础上,进一步运用通径分析方法,探讨各土壤性质对土壤酶活性的影响程度和作用机理,为揭示杉木人工林土壤生态系统特征提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地区位于27°30'N,114°30'E,隶属中国林业科学研究院大岗山国家级森林生态系统定位站,属中亚热带季风气候,年平均气温17.5℃,年均降水量1590.9mm,且多集中在4—6月份,无霜期为268d。地貌特征为低山丘陵地形,主要母岩种类为

页岩,土壤均为红壤,土壤厚度在100cm以上。杉木人工林主要分布在海拔800m以下,其主要林下植被有狗脊(*Blechnum japonica*)、悬钩子(*Rubus trianthus*)、毛药红淡(*Adinandra millettii*)、欏木(*Loropetalum chinense*)、连蕊茶(*Camellia fraternal*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、木荷(*Schima superba*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、油茶(*Camellia oleifera*)、飞蓬(*Erigeron acris*)、土茯苓(*Smilax glabra*)等。

在经营方式、土壤类型相同以及海拔、坡向、坡度等自然状况相似的地区,根据《中国森林》^[22]分类标准,选择不同林龄的杉木人工林地作为研究样地(表1),各样地内分别设置面积为20m×20m的3个标准地。

1.2 土壤样品采集

1.2.1 土壤样品采集

2009年3月,利用S型取样法分别采集各标准地0~20cm的混合土壤样品和环刀样品,每块标准地5个采样点,根据《森林土壤分析方法》^[23]处理后,供土壤理化性质测定。另外,分取部分新鲜土样置于4℃下保存,用于土壤酶活性的测定。

表1 研究样地概况

Tab. 1 General situation of different forest stands

林分类型	林龄/a	土壤类型	坡向	坡度/(°)	平均树高/m	平均胸径/cm	林分密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度	林下植被盖度/%
幼龄林	7	红壤	东	30	7.0	9.5	2988	0.4	59
中龄林	16	红壤	东	25	9.0	11.2	3316	0.6	12
近熟林	24	红壤	东北	22	13.0	14.5	1467	0.3	67
成熟林	28	红壤	东北	30	14.8	18.5	1129	0.5	77
过熟林	50	红壤	东	26	32.6	30.8	1020	0.5	94

1.3 测定方法

1.3.1 土壤酶活性测定方法

β-葡糖苷酶活性:2,6-二溴靛氯亚胺滴定法测定;纤维素酶活性:3,5-二硝基水杨酸比色法测定;多酚氧化酶活性:邻苯三酚比色法测定;淀粉酶活性:蒽酮比色法测定^[24-25]。

1.3.2 土壤理化性质测定方法

土壤全氮含量:KDY-9830凯氏定氮仪法;土壤有机碳含量:K₂Cr₂O₇外加热法;土壤碱解氮含量:扩散法;土壤有效磷含量:0.03mol/LNH₄F-0.025mol/LHCl浸提后钼锑抗比色法;土壤速效钾含量:中性NH₄AC浸提-火焰光度法^[26]。

土壤总孔隙度:计算法;土壤密度、田间持水量:环刀法。

1.4 数据处理

所得数据采用SPSS软件对数据进行相关分析、通径分析和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段土壤酶活性变化

随着林木的生长发育,不同种类土壤酶活性显示出不同的变化特征(图1)。纤维素酶活性在杉木人工林整个发育过程中表现出增加的趋势,特别在近熟林和成熟林2个发育阶段,增加尤为明显,与中龄林阶段相比,增幅分别为66%和150%,达到差异显著水平;β-葡糖苷酶活性表现出不同的变化特点。在幼龄林阶段,土壤酶活性较高,为0.148mg/(g·h),中龄林阶段显著下降,达到整个发育阶段的最低点(0.116mg/(g·h)),进入近熟林阶段后开始出现明显的增加,并在成熟林阶段达到0.256mg/(g·h)的最高值,虽然其后出现一定的下降,仍然保持较高水平。土壤β-葡糖苷酶活性的阶段性变化和土壤理化性质的变化特点表现出相当程度的一致性,和其他3种酶活性相比,显示出较强的对林下

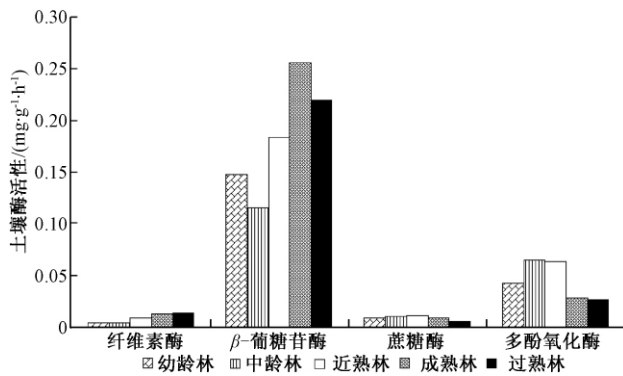


图1 杉木人工林不同发育阶段土壤酶活性的变化

Fig. 1 Variation of soil enzyme activity at different development stages of Chinese fir plantations

环境和土壤性质变化的敏感性。蔗糖酶活性及多酚氧化酶活性变幅分别在 $0.006 \sim 0.012 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $0.027 \sim 0.066 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 范围内,均表现出幼龄

林阶段后逐渐增加,成熟林阶段后显著降低的变化趋势。

2.2 土壤理化性质与土壤酶活性简单相关分析

土壤酶活性(图1)和土壤理化性质(表2)相关分析结果表明:土壤纤维素酶活性与土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量及总孔隙度均表现出极显著或显著正相关,与土壤密度及田间持水量的相关性并不显著; β -葡萄糖苷酶活性除与土壤密度相关性不显著外,和土壤其他理化性质均达到极显著或显著的正相关关系;蔗糖酶及多酚氧化酶活性与有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、速效钾含量、总孔隙度及田间持水量表现出极显著或显著的负相关,与土壤密度表现出极显著的正相关关系,但与有效磷含量的相关性未达到显著水平(表3)。

表2 杉木人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化特征

Tab. 2 Variation characteristics of soil physico-chemical properties at different development stages of Chinese fir plantations

林分类型	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	田间持水量/%
幼龄林	$32.61 \pm 3.93\text{c}$	$1.56 \pm 0.12\text{c}$	$152.65 \pm 3.90\text{d}$	$0.032 \pm 0.01\text{c}$	$31.09 \pm 1.89\text{d}$	$0.97 \pm 0.05\text{d}$	$63.02 \pm 1.77\text{b}$	$58.95 \pm 1.22\text{a}$
中龄林	$21.02 \pm 5.81\text{d}$	$1.28 \pm 0.17\text{d}$	$127.92 \pm 2.48\text{e}$	$0.043 \pm 0.01\text{b}$	$24.19 \pm 1.95\text{e}$	$1.24 \pm 0.02\text{a}$	$55.68 \pm 1.03\text{d}$	$33.61 \pm 1.02\text{e}$
近熟林	$38.17 \pm 5.43\text{bc}$	$1.85 \pm 0.36\text{b}$	$155.90 \pm 3.36\text{c}$	$0.055 \pm 0.01\text{a}$	$38.89 \pm 1.81\text{c}$	$1.15 \pm 0.03\text{c}$	$57.95 \pm 1.09\text{c}$	$36.17 \pm 0.80\text{d}$
成熟林	$41.82 \pm 5.93\text{b}$	$1.99 \pm 0.16\text{b}$	$223.62 \pm 3.41\text{b}$	$0.051 \pm 0.01\text{ab}$	$44.14 \pm 2.71\text{b}$	$1.09 \pm 0.05\text{c}$	$62.24 \pm 1.04\text{b}$	$49.27 \pm 1.31\text{c}$
过熟林	$50.19 \pm 5.93\text{a}$	$2.49 \pm 0.19\text{a}$	$243.27 \pm 3.36\text{a}$	$0.052 \pm 0.01\text{ab}$	$54.73 \pm 1.26\text{a}$	$0.82 \pm 0.06\text{e}$	$68.38 \pm 1.85\text{a}$	$56.50 \pm 1.53\text{b}$

表3 土壤理化性质与土壤酶活性的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between soil properties and soil enzyme activity

	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	密度	总孔隙度	田间持水量	纤维素酶	β -葡萄糖苷酶	蔗糖酶	多酚氧化酶
有机质	1	0.886**	0.730**	0.293*	0.827**	-0.401**	0.760**	0.511**	0.733**	0.657**	-0.465**	-0.595**
全氮	0.886**	1	0.715**	0.330*	0.833**	-0.526**	0.736**	0.466**	0.774**	0.532**	-0.470**	-0.610**
碱解氮	0.730**	0.715**	1	0.275	0.731**	-0.371**	0.606**	0.492**	0.784**	0.715**	-0.409**	-0.775**
有效磷	0.293*	0.330*	0.275	1	0.281*	0.288*	-0.127	-0.362**	0.430**	0.294*	0.173	0.014
速效钾	0.827**	0.833**	0.731**	0.281*	1	-0.570**	0.725**	0.518**	0.794**	0.569**	-0.533**	-0.704**
密度	-0.401**	-0.526**	-0.371**	0.288*	-0.570**	1	-0.659**	-0.660**	-0.318*	-0.167	0.543**	0.587**
总孔隙度	0.760**	0.736**	0.606**	-0.127	0.725**	-0.659**	1	0.860**	0.518**	0.420**	-0.625**	-0.707**
田间持水量	0.511**	0.466**	0.492**	-0.362**	0.518**	-0.660**	0.860**	1	0.264	0.292*	-0.530**	-0.719**

注: * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上显著相关。

2.3 土壤理化性质与土壤酶活性的通径分析

2.3.1 土壤性质对土壤酶活性的直接和间接通径系数

表4显示,土壤碱解氮含量和速效钾含量对纤维素酶活性较高的直接和间接通径系数反映出两者主要是通过直接和间接作用影响纤维素酶的活性。土壤全氮含量、总孔隙度和有效磷含量对纤维素酶活性的直接通径系数较小,仅为 0.266、0.150、0.008;但间接通径系数却显著高于直接通径系数,增幅分别达到 90.98%、146.0%、和 517.8%,表明 3 种因素对纤维素酶活性的影响是由间接作用所导致的。土壤有机质含量和密度对纤维素酶活性的间接

作用虽部分被反向直接作用所抵消,但仍是 2 种因素影响酶活性的主要途径。田间持水量通过直接与间接作用影响纤维素酶活性,但 2 种作用方向相抵。

土壤有机质含量、碱解氮含量对 β -葡萄糖苷酶活性的直接通径系数分别为 0.688、0.575,但间接通径系数较小(-0.031、0.140)。表明 2 种土壤性质的直接作用是影响 β -葡萄糖苷酶活性变化的主要方式,而土壤全氮含量、总孔隙度和田间持水量则是通过较强烈的间接作用对该酶活性产生影响。土壤有效磷含量和速效钾含量同样是通过较小的直接作用和较为强烈的间接作用共同影响着 β -葡萄糖苷酶的活性变化。土壤密度和其他土壤因子相比,无论是

直接通径系数还是间接通径系数均表现出较低水平。

总孔隙度对土壤蔗糖酶活性的直接通径系数为 -0.544 , 反映出该因素的直接作用是最主要的影响途径。而土壤田间持水量、全氮含量、有机质含量和碱解氮含量的间接通径系数分别为: -0.774 、

-0.566 、 -0.506 、 0.320 , 达到直接通径系数的 3.1 、 5.8 、 12.3 和 3.5 倍。表明 4 种因素均是通过间接作用影响着蔗糖酶活性变化特征。土壤密度、速效钾含量和土壤有效磷含量的直接作用和间接作用在对土壤蔗糖酶活性的影响中作用效果相当, 没有表现出明显的差异。

表 4 土壤理化性质对土壤酶活性的直接通径系数和间接通径系数

Tab. 4 Direct and indirect path coefficients of soil properties on soil enzyme activity

因变量	自变量	有机质 $x_1 \rightarrow y$	全氮 $x_2 \rightarrow y$	碱解氮 $x_3 \rightarrow y$	有效磷 $x_4 \rightarrow y$	速效钾 $x_5 \rightarrow y$	密度 $x_6 \rightarrow y$	总孔隙度 $x_7 \rightarrow y$	田间持水量 $x_8 \rightarrow y$	总和
纤维素酶	x_1	<u>-0.112</u>	0.236	0.331	0.002	0.359	-0.029	0.114	-0.168	0.733
	x_2	-0.099	<u>0.266</u>	0.325	0.003	0.361	-0.038	0.110	-0.153	0.774
	x_3	-0.082	0.190	<u>0.454</u>	0.002	0.317	-0.027	0.091	-0.162	0.784
	x_4	-0.033	0.088	0.125	<u>0.008</u>	0.122	0.021	-0.019	0.119	0.430
	x_5	-0.093	0.222	0.332	0.002	<u>0.434</u>	-0.042	0.109	-0.170	0.794
	x_6	0.045	-0.140	-0.168	0.002	-0.247	<u>0.073</u>	-0.099	0.217	-0.318
	x_7	-0.085	0.196	0.275	-0.001	0.314	-0.048	<u>0.150</u>	-0.283	0.518
	x_8	-0.057	0.124	0.223	-0.003	0.224	-0.048	0.129	<u>-0.328</u>	0.264
β -葡萄糖苷酶	x_1	<u>0.688</u>	-0.351	0.419	0.007	0.026	-0.002	-0.110	-0.019	0.657
	x_2	0.610	<u>-0.396</u>	0.411	0.008	0.026	-0.002	-0.107	-0.017	0.532
	x_3	0.502	-0.283	<u>0.575</u>	0.006	0.023	-0.002	-0.088	-0.018	0.715
	x_4	0.201	-0.131	0.158	<u>0.023</u>	0.009	0.001	0.018	0.013	0.294
	x_5	0.569	-0.330	0.420	0.007	<u>0.031</u>	-0.003	-0.105	-0.019	0.569
	x_6	-0.276	0.208	-0.213	0.007	-0.018	<u>0.004</u>	0.096	0.024	-0.167
	x_7	0.523	-0.291	0.348	-0.003	0.022	-0.003	<u>-0.145</u>	-0.031	0.420
	x_8	0.351	-0.185	0.283	-0.008	0.016	-0.003	-0.125	<u>-0.037</u>	0.292
蔗糖酶	x_1	<u>0.041</u>	0.085	-0.065	0.059	-0.226	-0.064	-0.421	0.125	-0.465
	x_2	0.037	<u>0.096</u>	-0.064	0.067	-0.227	-0.083	-0.408	0.114	-0.470
	x_3	0.030	0.068	<u>-0.089</u>	0.056	-0.200	-0.059	-0.336	0.120	-0.409
	x_4	0.012	0.031	-0.025	<u>0.203</u>	-0.077	0.046	0.070	-0.088	0.173
	x_5	0.034	0.080	-0.065	0.057	<u>-0.273</u>	-0.091	-0.402	0.127	-0.533
	x_6	-0.017	-0.050	0.033	0.058	0.156	<u>0.159</u>	0.365	-0.161	0.543
	x_7	0.031	0.070	-0.054	-0.026	-0.198	-0.105	<u>-0.554</u>	0.210	-0.625
	x_8	0.021	0.045	-0.044	-0.073	-0.141	-0.105	-0.477	<u>0.244</u>	-0.530
多酚氧化酶	x_1	<u>0.233</u>	-0.031	-0.387	0.004	-0.240	-0.028	0.092	-0.237	-0.595
	x_2	0.206	<u>-0.035</u>	-0.380	0.004	-0.242	-0.037	0.089	-0.216	-0.610
	x_3	0.170	-0.025	<u>-0.531</u>	0.003	-0.212	-0.026	0.074	-0.228	-0.776
	x_4	0.068	-0.011	-0.146	<u>0.012</u>	-0.082	0.020	-0.015	0.168	0.014
	x_5	0.192	-0.029	-0.388	0.003	<u>-0.290</u>	-0.040	0.088	-0.240	-0.704
	x_6	-0.093	0.018	0.197	0.004	0.166	<u>0.070</u>	-0.080	0.306	<u>0.587</u>
	x_7	0.177	-0.025	-0.322	-0.002	-0.211	-0.046	<u>0.121</u>	-0.399	<u>-0.707</u>
	x_8	0.119	-0.016	-0.261	-0.004	-0.150	-0.046	0.104	<u>-0.464</u>	-0.719

注: 有下划线的数据为直接通径系数, 其他为间接通径系数。

土壤碱解氮含量和田间持水量的直接通径系数远高于其他因子, 直接通径系数分别为 -0.531 、 -0.464 , 而且其间接通径系数也为负值; 但和间接影响相比, 两者的直接作用是影响多酚氧化酶活性最主要的方式。土壤有机质含量和总孔隙度对多酚氧化酶活性也同样表现出强烈的负作用; 但与土壤碱解氮含量和田间持水量不同的是, 两者的间接通径系数均高达 -0.828 , 高出直接通径系数 3.5 、 6.8 倍, 显示出间接作用的重要地位。土壤全氮含量、速

效钾含量和密度对多酚氧化酶活性的影响主要是通过间接作用来体现, 但其自身的直接作用也表现出一定的重要性。土壤有效磷含量的直接和间接通径系数均接近于零, 对多酚氧化酶活性的影响很小。

2.3.2 土壤性质对土壤酶活性的决定系数

各因素决定系数大小反映了影响程度的强弱。土壤性质对土壤酶活性决定系数分析结果表明(表 5): 碱解氮—速效钾含量间的互相作用以及碱解氮含量的直接作用对土壤纤维素酶活性的影响最为强

烈, 决定系数分别达到 0.288 和 0.206, 其他土壤性质虽也利用直接或间接作用影响着纤维素酶活性, 但影响程度相对较弱; 土壤有机质含量通过其自身的直接作用及其与碱解氮含量、土壤全氮量间的相互作用深刻影响着土壤 β -葡萄糖苷酶活性, 决定系数分别为 0.577、0.483 和 0.473, 显示出其在各项土壤因子中的主导作用; 各项土壤性质对土壤蔗糖酶活性影响顺序表现为: Dyx_7 (0.307) > Dyx_7x_8 (0.233) > Dyx_5x_7 (0.219) > Dyx_6x_7 (0.116) > Dyx_2x_7 (0.078) > 其他。该序列表明, 土壤总孔隙度不仅通过自身的直接作用对土壤蔗糖酶活性产生强

烈影响(决定系数 0.307), 同时还通过与田间持水量、速效钾含量等其他土壤性质间的相互作用对酶活性产生影响, 在排名前 5 位的影响因子中都体现出该项因子的作用; 在多酚氧化酶活性的影响因素中, 以碱解氮含量的单一影响最大, 决定系数为 0.282, 其次为碱解氮含量与田间持水量间的间接作用(0.242)、与速效钾含量间的间接作用(0.226) 以及田间持水量的直接作用(0.215)。可以看出, 碱解氮含量、田间持水量和速效钾含量是影响土壤多酚氧化酶活性的主要因素。

表 5 土壤理化性质对土壤酶活性途径分析决定系数的绝对值

Tab. 5 Absolute values of determinative coefficients of path analysis between soil properties and soil enzyme activity

次序	纤维素酶	β -葡萄糖苷酶	蔗糖酶	多酚氧化酶	次序	纤维素酶	β -葡萄糖苷酶	蔗糖酶	多酚氧化酶
1	Dyx_3x_5 0.288	Dyx_1x_3 0.577	Dyx_7 0.307	Dyx_3 0.282	6	Dyx_5x_8 0.148	Dyx_2 0.157	Dyx_5 0.074	Dyx_5x_8 0.139
2	Dyx_3 0.206	Dyx_1x_2 0.483	Dyx_7x_8 0.233	Dyx_3x_8 0.242	7	Dyx_3x_8 0.147	Dyx_1x_7 0.152	Dyx_5x_8 0.069	Dyx_1x_5 0.112
3	Dyx_2x_5 0.192	Dyx_1 0.473	Dyx_5x_7 0.219	Dyx_3x_5 0.226	8	Dyx_8 0.108	Dyx_3x_7 0.101	Dyx_3x_7 0.060	Dyx_1x_8 0.110
4	Dyx_5 0.188	Dyx_3 0.330	Dyx_6x_7 0.116	Dyx_8 0.215	9	Dyx_5x_7 0.094	Dyx_2x_7 0.085	Dyx_8 0.060	Dyx_7x_8 0.097
5	Dyx_2x_3 0.173	Dyx_2x_3 0.325	Dyx_2x_7 0.078	Dyx_1x_3 0.180	10	Dyx_7x_8 0.085	Dyx_1x_5 0.035	Dyx_6x_8 -0.051	Dyx_5 0.084

注: 1) x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 分别为有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、密度、总孔隙度、田间持水量; 2) 只列出前 10 位。

3 结论与讨论

1) 随着林木的生长发育, 土壤中不同酶活性的变化特征不同, 纤维素酶活性表现出从幼龄林到过熟林逐渐增加的变化趋势; β -葡萄糖苷酶活性表现为幼龄林至中林龄降低, 近熟林至成熟林升高, 过熟林降低的变化趋势; 蔗糖酶活性及多酚氧化酶活性除最高值出现的发育阶段不同外, 均表现出先增加后降低的变化趋势。

2) 土壤碱解氮含量和速效钾含量通过直接和间接作用共同影响着纤维素酶的活性变化; 全氮含量、总孔隙度、有效磷含量和密度的间接作用是影响纤维素酶活性的主要方式; 土壤有机质含量也主要是通过间接作用发挥其对纤维素酶活性的影响。

土壤有机质含量和碱解氮含量主要利用直接作用, 而全氮含量、总孔隙度和田间持水量则通过间接作用, 改变着土壤 β -葡萄糖苷酶活性特征。

总孔隙度对蔗糖酶活性的影响途径主要为直接作用。田间持水量、全氮含量和有机质含量等因子则依赖各自的间接作用对蔗糖酶活性产生影响。土壤密度、速效钾含量和土壤有效磷含量的直接作用

和间接作用在对土壤蔗糖酶活性的影响中没有表现出明显的效果差异。

碱解氮含量和田间持水量同时通过直接作用和间接作用两种方式影响着土壤多酚氧化酶活性, 但直接作用的影响更为明显; 而有机质含量和总孔隙度对多酚氧化酶活性的影响途径为间接作用。土壤全氮含量、速效钾含量和密度的影响虽主要是通过间接作用来体现, 但其自身的直接作用也表现出一定的重要性。

3) 土壤性质通过各自途径对土壤酶活性产生不同程度的影响。碱解氮—速效钾含量间的互相作用及碱解氮自身作用对土壤纤维素酶活性的影响最强烈; 有机质含量及其与碱解氮含量、全氮量间的相互作用在 β -葡萄糖苷酶活性的变化中起着重要的影响作用; 在土壤蔗糖酶活性的各项影响因子中, 总孔隙度显示出明确的主导作用, 其通过自身的直接和间接作用在相当程度上决定了土壤蔗糖酶的活性特征。碱解氮含量、田间持水量以及碱解氮含量与田间持水量、速效钾含量间的相互作用是土壤多酚氧化酶活性最重要的影响因子。

4) 和简单相关分析相比, 运用途径分析法研究

土壤酶活性与土壤理化性质关系可获得更多的信息,能更深入评价土壤理化性质对土壤酶活性的影响程度和影响机理;但目前由于尚缺少能够准确诠释这种相互作用内在机理的手段,限制了对相关问题更深入的认识。

参 考 文 献

- [1] 王丹,王兵,戴伟,等.不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J].林业科学研究,2009,22(5):667-671.
- [2] 李萍,王兵,戴伟,等.亚热带几种林分类型的土壤肥力评价研究[J].北京林业大学学报,2010,32(3):52-58.
- [3] 王丹,戴伟,王兵,等.杉木人工林不同发育阶段土壤性质变化的研究[J].北京林业大学学报,2010,32(3):59-63.
- [4] 王丹,王兵,戴伟,等.杉木生长及土壤特性对土壤呼吸速率的影响[J].生态学报,2011,31(3):680-688.
- [5] 吴永铃,王兵,戴伟,等.杉木人工林不发育阶段土壤肥力综合评价研究[J].西北农林科技大学学报,2011,39(1):69-75.
- [6] 盛伟彤,范少辉,马祥庆,等.杉木人工林长期生产力保持机制研究[M].北京:科学出版社,2005:76-110.
- [7] 焦如珍,杨承栋.杉木人工林不同发育阶段根际与非根际土壤微生物变化趋势[J].林业科学,1999,35(1):53-59.
- [8] 焦如珍,杨承栋,孙启武,等.杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化[J].林业科学,2005,41(6):163-165.
- [9] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [10] BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semiarid tropical regions [J]. *Applied soil Ecology*, 2001, 18(3): 229-238.
- [11] SRIVASTAVA S C, SINGH J S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land uses and nutrient flux [J]. *Soil Biol Biochem*, 1991, 23(2): 117-124.
- [12] ABDUL K S, KATAYAMA A, KIMURA M. Activities of some soil enzymes in different land use system after deforestation in hilly areas of west Lampung, South Sumatra, Indonesia [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1998, 44: 93-103.
- [13] 张昌顺,李昆,马姜明,等.施肥对印楝幼林土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].林业科学研究,2006,19(6):750-755.
- [14] GAGNON B, LALANDE R, SIMARD R R, et al. Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation [J]. *Can J Soil Sci*, 2000, 80: 91-97.
- [15] MONREAL C M, BERGSTROM D M. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality [J]. *Can J Soil Sci*, 2000, 80: 419-428.
- [16] 明道绪.通径分析的原理与方法[J].农业科学导报,1986,1(1):39-43.
- [17] 刘广深,徐冬梅,许中坚,等.用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J].土壤学报,2003,40(5):756-762.
- [18] 安韶山,黄懿梅,李壁成,等.黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J].土壤通报,2006,37(1):45-50.
- [19] 盛志廉,吴常信.数量遗传学[M].北京:中国农业出版社,1995:17-26.
- [20] 袁志发,孟德顺.多元统计分析[M].西安:天则出版社,1993:133-220.
- [21] 明道绪.通径分析[M].雅安:四川农业大学出版社,1990.
- [22] 中国森林编辑委员会.中国森林:第1卷[M].北京:中国林业出版社,1997:132-134.
- [23] 国家林业局.森林土壤分析方法[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [24] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986.
- [25] 周礼凯.土壤酶学[M].北京:中国科学出版社,1987.
- [26] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学出版社,2000.

(责任编辑 赵 勃)