

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 03. 002

沙地樟子松人工林土壤养分和酶活性变化研究^{*}

闫德仁, 张胜男, 黄海广, 胡小龙

(内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 樟子松是我国“三北”地区主要的固沙造林树种, 研究其如何影响着风沙土肥力变化过程具有现实意义。本文选择8–56年林龄的樟子松固沙林, 采用常规方法测定了不同林龄下土壤养分含量和酶活性, 以分析樟子松人工林对风沙土养分和酶活性的影响。结果表明, 与对照样地相比, 不同林龄樟子松的固沙林0–10cm土层有机质含量平均增加95.82%, 全氮0.09%、全磷260.00%、全钾2.30%、速效氮12.15%、速效磷219.23%、速效钾140.97%; 10–20cm土层有机质含量平均增加84.35%, 全氮380.00%、全磷314.29%、全钾13.60%、速效磷21.43%、速效钾71.43%, 速效氮则降低52.81%; 随着固沙林年龄的增加, 0–10cm土层有机质含量呈现增加趋势, 其它养分含量均表现出一定的波动特征。与对照样地相比, 樟子松固沙林0–10cm土层脱氢酶活性平均提高81.4%, 过氧化物酶提高455.7%, 多酚氧化酶提高120.6%, 磷酸酶提高828.6%; 10–20cm土层脱氢酶活性平均提高11.6%, 过氧化物酶提高349.6%, 多酚氧化酶提高309.5%, 磷酸酶提高514.3%。樟子松固沙林对不同土层养分含量和土壤酶活性具有显著影响, 且随着林龄增加养分含量和酶活性呈现出“∧”字型变化特征, 且土壤氮含量和蛋白酶活性低。

关键词: “三北”地区; 人工固沙林; 樟子松; 养分含量; 酶活性; 肥力变化特征; 林龄

中图分类号: S 791.253; S714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672–8246 (2019) 03–0010–06

Changes of Soil Nutrients and Enzyme Activities for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Sandy Land

YAN De-ren, ZHANG Sheng-nan, HUANG Hai-guang, HU Xiao-long

(Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot Inner Mongolia 010010, P. R. China)

Abstract: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is the main sand-fixing tree species in the “Three North Region” of China, and it has practical meaning to study how does this tree species affect the process of fertility in sandy soil. In this paper, 8–56 years old *P. sylvestris* var. *mongolica* was selected, and soil nutrient content and enzyme activity were determined by conventional methods. The results showed that, compared with the control, the organic matter content of 0–10cm soil layer of different forest ages increased by 95.82% in average, total nitrogen increased 0.09%, total phosphorus increased 260.00%, total potassium increased 2.30%, available nitrogen increased 12.15%, available phosphorus increased 219.23%, and available potassium increased by 140.97% respectively. The organic matter content of 10–20cm soil layer increased by 84.35%, total nitrogen increased 380.00%, total phosphorus increased 314.29%, total potassium increased 13.60%, available phosphorus increased 21.43%, available potassium increased 71.43%, while available nitrogen decreased by 52.81%. With the increase of the age of the fixation forest, the organic matter content of 0–10cm soil layer showed an increasing trend, and other nutrient contents showed fluctuation characteristics. The activity of dehydrogenase in the 0–10cm soil layer increased by 81.4%, the peroxidase increased by 455.7%, the polyphenol oxidase 120.6%, and the

^{*} 收稿日期: 2018–12–03

基金项目: 国家重点研发计划“浑善达克沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500803) 资助。

第一作者简介: 闫德仁(1962–), 男, 研究员, 博士, 主要从事沙漠治理方面研究。E-mail: nmglkydr@163.com

phosphatase 828.6%. For 10–20cm soil layer, dehydrogenase activity increased by 11.6%, peroxidase 349.6%, polyphenol oxidase 309.5%, phosphatase 514.3%. *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixing forest had significant effects on nutrient content and soil enzyme activity in different soil layers. With the increase forest age, nutrient content and enzyme activity showed a the characteristics of “^” shape change and with low soil nitrogen content and protease activity.

Key words: Three North Region; sand-fixing tree plantation; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; nutrient content; enzyme activity; fertility changes; forest age

樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*), 又称海拉尔松, 是欧洲赤松 (*P. sylvestris*) 的地理变种, 为第三纪孑遗植物, 是北温带成分中达斡里植物区系的代表成分。从 1955 年开始, 科研人员在科尔沁沙地南缘辽宁省彰武县章古台沙地上引种樟子松并获得成功, 樟子松成为我国“三北”地区主要的固沙造林树种。目前, 樟子松人工固沙林研究主要表现在樟子松育苗技术^[1]、造林技术^[2-3]、生长特征以及樟子松人工固沙林生态功能^[4-6]、人工天然更新和生长衰退^[7]、土壤理化性质^[8-11]、土壤微生物^[12-15]等几个方面, 并且研究者结合本地区对沙地樟子松人工林开展了诸多相关研究, 对指导沙地樟子松人工林、经营抚育以及评价其生态功能具有积极作用。但是, 从沙地退化生态系统功能恢复, 特别是樟子松人工固沙林风沙土肥力动态变化方面的研究相对较少。为此, 本项目人员在章古台固沙研究所试验林选择了长时间尺度的沙地樟子松人工固沙林林分, 测定其土壤养分和酶活性的动态变化, 探讨樟子松人工固沙林生态系统功能恢复过程中是如何影响风沙土肥力的变化, 以便指导沙地樟子松人工固沙林的科学经营活动。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

辽宁省章古台位于科尔沁沙地的东南边缘, 地理坐标 42°43'N, 122°22'E, 平均海拔 226.5m, 属亚湿润干旱区, 年降水量 450–550mm, 多集中于 6–8 月份, 年蒸发量 1 200–1 450mm, 空气相对湿度 60.4%。年平均气温 5.7℃, ≥10℃ 有效积温 2 890℃, 无霜期 154d, 日照时数 2 680–2 853h。主要土壤类型为风沙土, 代表性植物种有色木槭 (*Acer mono Maxim.*)、家榆 (*Ulmus pumila L.*)、山里红 (*Crataegus pinnatifida Bunge*)、山杏 [*Armeniaca sibirica (L.) Lam.*]、胡枝子 (*Lespedeza bicolor Turcz.*)、黄柳 (*Salix gordejewii Chang et SkV.*)、差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron*) 和中华隐子草 [*Cleistogenes chinensis (Maxim.) Keng*] 等。

1.2 研究方法

根据章古台固沙研究所造林小班分布图以及造林立地相似原则, 2018 年 6 月 12 日选择 8 年、15 年、30 年、36 年、42 年、49 年和 56 年林龄的沙地樟子松人工固沙林样地, 每个林龄设置 1 个小班, 样地面积 0.3–1.0hm², 见表 1。

表 1 樟子松固沙林样地基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of *P. sylvestris* var. *mongolica* fixing forest plot

林龄 /a	土壤类型	平均树高 /m	平均胸径 /cm	草本植被盖度 /%	地理坐标
8	固定风沙土	3.5	6.5	70.5	N42°43'13", E122°29'39"
15	固定风沙土	4.8	11.2	70.6	N42°43'03", E122°29'36"
30	固定风沙土	9.2	13.5	70.5	N42°42'56", E122°28'42"
36	固定风沙土	7.5	16.5	75.0	N42°42'39", E122°29'18"
42	固定风沙土	10.2	17.7	75.0	N42°43'19", E122°29'10"
49	固定风沙土	10.3	19.2	90.0	N42°42'47", E122°28'53"
56	固定风沙土	12.5	20.7	90.0	N42°42'44", E122°28'58"

在每个样地内分别进行树木生长和草本植被覆盖度调查, 采集 0–2cm、2–10cm 和 10–20cm 土层土壤样本, 同时以非林地作为对照样地。每个样地采集 3 个不同位置的土壤样本, 带回室内风干, 土壤

混合后作为每个林龄样地的分析测定样品。

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定, 土壤全氮、速效氮含量采用 K1100 全自动凯氏定氮仪测定, 土壤全磷、速效磷含量采用 UV-1800 紫

外-可见分光光度计测定,土壤全钾、速效钾含量采用 PinAAcle-900H 原子吸收光谱仪测定。土壤酶活性使用 UV-1800 紫外-可见分光光度计,按照《土壤酶及其研究法》^[16]中的方法进行测定。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据统计及分析。

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化特征

土壤养分含量是土壤肥力的基础,随着沙地人

工造林时间的延长,且受到林地枯落物、植物根系等生物小循环作用的影响,固沙林土壤养分含量整体呈现出增加的趋势。

从表 2 看出,樟子松固沙林对不同土层养分含量变化具有明显影响,并且 0-2cm 土层全氮、全磷、速效磷、速效钾含量相对较高,特别是 0-10cm 土层有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量(加权平均值)高于 10-20cm 土层各养分含量,表明樟子松固沙林土壤养分‘表聚’现象明显。

表 2 不同林龄的土壤养分含量变化

Tab. 2 Changes of soil nutrient content in different forest ages

林龄 /a	土层 /cm	有机质 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	全钾 /g · kg ⁻¹	速效氮 /mg · kg ⁻¹	速效磷 /mg · kg ⁻¹	速效钾 /mg · kg ⁻¹
8	0-2	14.70	0.99	0.10	23.90	47.00	2.00	108.00
	2-10	14.20	0.23	0.21	21.90	28.00	0.80	56.00
	10-20	13.60	0.17	0.13	23.50	56.00	0.50	34.00
	0-10*	14.30	0.38	0.19	22.30	43.20	1.04	66.40
15	0-2	16.30	0.36	0.26	24.40	57.00	1.20	44.00
	2-10	17.10	0.23	0.19	22.70	41.00	1.00	38.00
	10-20	16.80	0.22	0.17	23.70	27.00	0.20	18.00
	0-10*	16.94	0.26	0.20	23.04	44.20	1.04	39.20
30	0-2	19.20	1.18	0.21	23.20	86.00	10.00	12.00
	2-10	18.20	0.44	0.10	24.00	34.00	0.20	31.00
	10-20	18.00	0.31	0.06	24.10	14.00	0.20	27.00
	0-10*	18.40	0.59	0.12	23.84	44.40	2.16	27.20
36	0-2	20.60	1.20	0.31	22.80	94.00	1.00	130.00
	2-10	20.60	0.46	0.17	23.80	71.00	0.30	46.00
	10-20	19.00	0.19	0.07	24.60	41.00	0.20	29.00
	0-10*	20.60	0.61	0.19	23.60	75.60	0.44	62.80
42	0-2	28.70	0.85	0.23	22.50	63.50	0.55	112.00
	2-10	20.90	0.60	0.16	23.20	42.00	0.30	59.00
	10-20	21.10	0.45	0.20	23.60	79.00	0.30	35.00
	0-10*	22.46	0.65	0.17	23.06	46.30	0.35	69.60
49	0-2	33.10	0.99	0.29	22.10	41.00	0.70	83.00
	2-10	19.20	0.29	0.14	22.80	92.00	0.30	36.00
	10-20	15.50	0.15	0.12	22.80	23.00	0.10	24.00
	0-10*	21.98	0.43	0.17	22.66	81.80	0.38	45.40
56	0-2	40.80	1.42	0.27	21.80	22.00	0.80	135.00
	2-10	20.20	0.37	0.21	18.00	54.00	0.30	25.00
	10-20	17.30	0.19	0.12	23.10	54.00	0.20	25.00
	0-10*	24.32	0.58	0.22	18.76	47.60	0.40	47.00
对照	0-2	10.70	0.05	0.05	21.80	56.00	0.50	26.00
	2-10	10.00	0.05	0.05	22.00	47.00	0.20	20.00
	10-20	9.40	0.05	0.03	20.80	89.00	0.20	16.00
	0-10*	10.14	0.05	0.05	21.96	48.80	0.26	21.20

注: *表示加权平均值,下同。

和对照样地相比，不同林龄樟子松固沙林各养分含量均表现出不同程度增加的趋势。其中，0-10cm 土层有机质含量平均增加 95.82%，全氮增加 0.09%、全磷增加 260.00%、全钾增加 2.30%、速效氮增加 12.15%、速效磷增加 219.23%、速效钾增加 140.97%；10-20cm 土层有机质含量平均增加 84.35%，全氮增加 380.00%，全磷增加 314.29%，全钾增加 13.60%，速效磷增加 21.43%，速效钾增加 1.43%，速效氮则降低 52.81%。张日升研究表明^[11]，对照样地 0-10cm 土层速效氮含量为 18.92mg/kg，而樟子松固沙林为 18.49 mg/kg；陈伏生等^[9]认为沙地造林后随着林龄的增大出现了大量的林分衰退的现象，而林分衰退与养分失衡之间存在很好的相关性，其中 N 的缺乏是樟子松林分衰退的重要因素之一。

从相同林龄样地樟子松固沙林不同土层养分含量的变化特征看，0-2cm 土层有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量均高于 2-10cm 土层，同样表明了土壤养分含量的表聚特征。

随着固沙林年龄的增加，0-10cm 土层有机质含量呈现增加趋势，其它养分含量均表现出一定的波动特征。其中，土壤全氮 (0.65g/kg)、速效钾 (69.6mg/kg)、全钾 (23.06g/kg) 含量在 42 年林龄固沙林达到最高，而后开始下降，土壤速效磷 (2.16mg/kg) 含量在 30 年林龄固沙林达到最高，而后开始逐渐下降到 0.4mg/kg 左右，全磷含量基本保持在 0.2g/kg 左右。同样，10-20cm 土层有机质 (21.1g/kg)、全氮 (0.45g/kg)、全磷 (0.2g/kg)、速效氮 (79mg/kg)、速效磷 (0.3mg/kg) 和速效钾 (35mg/kg) 含量在 42 年林龄固沙林达到最高，而后开始下降。表明樟子松固沙林系统土壤肥力状况并不理想，如果不采取科学的经营措施，其林分存在着潜在的肥力衰退趋势。

2.2 土壤酶活性变化特征

土壤酶参与土壤中各种生物化学过程，其活性大致反映了某一种土壤生态状况下生物化学过程的相对强度。其中，磷酸酶是能够将对应底物去磷酸化的一种水解酶，即通过水解磷酸单酯将底物分子上的磷酸基团除去，并生成磷酸根离子和自由的羟基。蔗糖酶，又称转化酶，能酶促土中蔗糖水解成葡萄糖和果糖，为生物活动提供碳源。蛋白酶参与

土壤中存在的氨基酸、蛋白质以及其他含蛋白质氮的有机化合物的转化，其水解产物是植物生长的氮源之一。因此，测定相应酶的活性可以间接地了解某种物质在土壤中的转化情况^[16]。

从表 3 可以看出，樟子松固沙林土壤酶活性均高于对照样地，且随着林龄的增加不同酶的活性表现出不同的变化趋势，而不同林龄下 0-10cm 土层或 0-2cm 土层酶活性总体高于其它土层，表明土壤酶促反应主要发生在养分含量较高的土壤层。和对照样地相比，樟子松固沙林 0-10cm 土层脱氢酶活性平均提高 81.4%，过氧化物酶提高 455.7%，多酚氧化酶提高 120.6%，磷酸酶提高 828.6%，而对对照样地则没有检测到蔗糖酶、蛋白酶活性；樟子松固沙林 10-20cm 土层脱氢酶活性平均提高 11.6%，过氧化物酶提高 349.6%，多酚氧化酶提高 309.5%，磷酸酶提高 514.3%，而对对照样地则没有检测到蔗糖酶、蛋白酶活性。说明樟子松固沙林对不同土层土壤酶活性具有显著影响，并由此改善了土壤的肥力水平。

此外，从樟子松固沙林地不同土壤酶活性及其和林龄变化关系看，0-10cm 土层脱氢酶、过氧化物酶和蔗糖酶活性随着林龄增加而增加，但当林龄达到 42 年后则呈现降低趋势；磷酸酶活性在 15 年林龄样地最高，以后随着林龄增加呈现降低趋势；多酚氧化酶活性在 36 年林龄样地达到最高 (13.20 μ g/2h·g 土)，42 年林龄时最低 (1.1 μ g/2h·g 土)，以后又逐渐提高到 2.6-3.3 μ g/2h·g 土。同样，10-20cm 土层脱氢酶、蔗糖酶活性随着林龄增加而增加，过氧化物酶、多酚氧化酶和磷酸酶活性和在 42 年林龄样地达到最高，而后酶活性呈现降低趋势。蛋白酶活性无论是在 0-10cm 土层，还是 10-20cm 土层随着林龄增加均无明显的变化规律，甚至有些林地没有检测到蛋白酶活性，说明风沙土环境下，固沙林土壤蛋白酶参与土壤存在的氨基酸、蛋白质以及其他含蛋白质氮的有机化合物的转化能力相对较弱，容易导致土壤中水解产物氮素的缺乏，并印证了陈伏生等^[9]的结论，“林分衰退与养分失衡之间存在很好的相关性，其中氮的缺乏是樟子松林分衰退的重要因素之一”。

表3 不同林龄土壤酶活性变化

Tab. 3 Changes of soil enzyme activity in different forest ages

林龄 /a	土层 /cm	脱氢酶 / $\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	过氧化物酶 / $\mu\text{g} \cdot 2\text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	多酚氧化酶 / $\mu\text{g} \cdot 2\text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	磷酸酶 / $\text{mg} \cdot 2\text{h}^{-1} \cdot 100\text{g}^{-1}$	蔗糖酶 / $\text{mg} \cdot 24\text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$	蛋白酶 / $\text{mg} \cdot 24\text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$
8	0-2	10.44	7.20	2.40	0.18	60.50	0.00
	2-10	3.44	12.00	0.00	0.06	5.20	0.00
	10-20	3.79	6.20	0.00	0.04	2.60	0.00
	0-10*	4.84	11.04	0.48	0.08	16.26	0.00
15	0-2	6.58	9.30	0.00	0.06	22.80	3.40
	2-10	3.83	7.10	0.00	0.47	20.40	2.80
	10-20	3.42	2.50	0.76	0.02	4.20	0.00
	0-10*	4.38	7.54	0.00	0.39	20.88	2.92
30	0-2	11.65	2.50	1.40	0.29	126.80	0.00
	2-10	3.74	2.10	0.00	0.12	22.40	0.00
	10-20	3.93	8.70	9.70	0.06	9.10	0.00
	0-10*	5.32	2.18	0.28	0.15	43.28	0.00
36	0-2	15.91	3.80	18.00	0.29	139.60	0.00
	2-10	4.34	7.80	12.00	0.23	32.40	1.70
	10-20	3.26	5.30	4.40	0.06	5.10	2.00
	0-10*	6.65	7.00	13.20	0.24	53.84	1.36
42	0-2	7.04	1.70	2.40	0.59	0.00	3.00
	2-10	5.16	19.00	9.50	0.29	52.10	0.60
	10-20	3.56	17.00	9.80	0.18	13.30	2.70
	0-10*	5.54	15.54	8.08	0.35	41.68	1.08
49	0-2	10.56	12.00	1.10	0.20	80.20	2.00
	2-10	3.38	12.00	3.90	0.18	4.10	0.50
	10-20	3.63	11.00	11.00	0.04	0.00	3.30
	0-10*	4.82	12.00	3.34	0.18	19.32	0.80
56	0-2	12.90	8.50	13.00	0.04	75.60	1.80
	2-10	3.60	10.00	0.00	0.06	23.60	2.30
	10-20	3.56	2.80	1.60	0.03	0.00	2.00
	0-10*	5.46	9.70	2.60	0.06	34.00	2.20
对照	0-2	3.24	1.50	0.00	0.01	0.00	0.00
	2-10	3.33	1.60	1.70	0.02	0.00	0.00
	10-20	3.22	1.70	1.30	0.01	0.00	0.00
	0-10*	3.31	1.58	1.36	0.02	0.00	0.00

注：脱氢酶：三苯甲月 $\mu\text{g}/\text{h} \cdot \text{g}$ 土；过氧化物酶和多酚氧化酶：紫色没食子素 $\mu\text{g}/2\text{h} \cdot \text{g}$ 土；磷酸酶： P_2O_5 $\text{mg}/2\text{h} \cdot 100\text{g}$ 土；蔗糖酶：葡萄糖 $\text{mg}/24\text{h} \cdot \text{g}$ 土；蛋白酶：氨基酸 $\text{mg}/24\text{h} \cdot \text{g}$ 土。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤养分含量是土壤肥力的基础，而土壤酶参与土壤中各种生物化学过程，其活性大致反映了某一种土壤生态状况下生物化学过程的相对强度，所以测定不同林龄下固沙林土壤养分含量及相关酶活性变化过程，能够从土壤生物化学基础上探讨固沙林对土壤的改良作用。赵燕娜等^[13]认为樟子松固沙林林龄增加到32年时，土壤蔗糖酶、过氧化氢

酶、磷酸酶、脲酶活性均达到最大，而多酚氧化酶活性则随林龄增加而减小，32年时酶活性达到最低，同时蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶和多酚氧化酶不仅与土壤养分因子相关性较强，相互之间也呈极显著相关性。徐恒^[14]认为樟子松固沙林达到40年后，土壤养分状况得到显著改善，并随着种植年限的延长其改善作用越大，同时，土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性含量都增加，在种植后50年都达到了最大值。王少昆等^[15]认为20年樟子松固沙林可以显著改善风沙土性状，提高土壤微生物数量，提高土壤脱氢酶、过氧化物

酶和蛋白酶活性。从本文的测定结果看，樟子松固沙林无论是土壤养分含量，还是土壤酶活性变化均表现出特定的变化特征，并和上述研究的变化趋势有一定的差异。不同林龄樟子松固沙林各养分含量均表现出不同程度增加的趋势，但0-10cm土层有机质含量增加明显，其它养分含量在42年林龄或30年林龄固沙林样地达到最高，而后开始逐渐下降；土壤酶促反应也主要发生在养分含量较高的土壤层，并和上述研究变化趋势不同。0-10cm土层脱氢酶、过氧化物酶和蔗糖酶活性到42年林龄样地达到最高，磷酸酶活性在15年林龄样地最高，多酚氧化酶活性在36年林龄样地达到最高。10-20cm土层脱氢酶、蔗糖酶活性随着林龄增加而增加，过氧化物酶、多酚氧化酶和磷酸酶活性在42年林龄样地达到最高，蛋白酶活性无论是在0-10cm土层，还是10-20cm土层随着林龄增加均无明显变化规律，甚至有些林地没有检测到蛋白酶活性。表明在风沙环境下，随着樟子松固沙林年龄的增加，土壤养分含量或相关的酶活性均呈现出“Λ”字型或波浪型变化特征，如果不采取科学的施肥措施，林分有潜在的地力衰退趋势。

3.2 结论

(1) 和非林地(对照)相比，不同林龄樟子松固沙林各养分含量均表现出不同程度增加的趋势，且土壤养分表聚现象明显；樟子松固沙林对不同土层养分含量变化具有明显影响，随着固沙林年龄的增加，0-10cm土层有机质含量呈现增加趋势，其它养分含量在42年林龄或30年林龄固沙林样地达到最高，而后开始逐渐下降。

(2) 樟子松固沙林对不同土层土壤酶活性具有显著影响，而土壤酶促反应主要发生在养分含量较高的土壤层，且随着林龄的增加不同酶的活性呈现出“Λ”字型变化特征。

(3) 土壤蛋白酶活性随樟子松固沙林林龄的增加无明显变化规律，甚至有些林地没有检测到蛋白酶活性，表明土壤蛋白酶参与土壤含氮有机化合物转化的能力相对较弱，容易导致土壤中氮素的缺乏。

参考文献：

- [1]康宏樟,朱教君,许美玲.沙地樟子松人工林营林技术研究进展[J].生态学杂志,2005,24(7):799-806.
- [2]尤国春,于洪军,王林.沙地樟子松人工林经营密度研究[J].防护林研究,2002,52(3):11-13.
- [3]张秋良,常金宝.沙地樟子松人工林初植密度及其调控研究[J].中国生态农业学报,2001,9(3):35-37.
- [4]白雪峰,王国晨,张日升,等.章古台沙地樟子松人工林土壤水分动态研究[J].辽宁林业科技,2004(2):11-13.
- [5]赵晓彬,刘光哲.沙地樟子松引种栽培及造林技术研究综述[J].西北林学院学报,2007,22(5):86-89.
- [6]黄刚,赵学勇,苏延桂,等.科尔沁沙地樟子松人工林对微环境改良效果的评价[J].干旱区研究,2008,25(2):212-218.
- [7]宋晓东.章古台沙地樟子松人工林衰退机理与营林措施控制技术[D].沈阳:沈阳农业大学,2005.
- [8]任凤伟,张日升,王敏.章古台地区沙地樟子松人工林土壤中磷素研究进展[J].防护林科技,2016,149(2):78-79.
- [9]陈伏生,曾德慧,范志平,等.章古台沙地樟子松人工林土壤有效氮的研究[J].北京林业大学学报,2005,27(3):6-11.
- [10]张柏习,韩辉,张学利,等.沙地樟子松人工林矿质营养循环的初步研究[J].辽宁林业科技,2014(4):16-19.
- [11]张日升.章古台沙地针叶人工林对土壤养分的影响[J].防护林科技,2016,159(12):10-12.
- [12]李陆平,廖超英,李晓明,等.毛乌素沙地樟子松人工林土壤微生物数量变化[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):157-160.
- [13]赵燕娜,廖超英,李晓明,等.毛乌素沙地不同林龄樟子松人工林土壤酶活性变化特征[J].西北林学院学报,2014,29(2):1-5.
- [14]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.
- [15]王少昆,赵学勇,张铜会,等.造林对沙地土壤微生物数量、生物量碳及酶活性的影响[J].中国沙漠,2013,33(2):529-535.
- [16]关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986.

(编辑：胡光辉)