榆林沙区人工固沙林土壤微生物生态分布特征及酶活性研究

徐 恒[1],廖超英[1],李晓明[1],孙长忠[2],王彦武[1],李 亮[1]

(1 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2 中国林业科学研究院 华北林业实验中心,北京 102300)

[摘 要] 【目的】探讨固沙林土壤的生物性质,为制订合理可行的保持沙地森林持续经营的管理措施提供参考。【方法】以流沙地为对照,对毛乌素沙地榆林沙区 6 种主要人工固沙林(花棒×踏郎混交林、沙柳林、踏郎林、沙棘林、樟子松林、河北杨林)林地 0～5,5～20,20～40 cm 土层的土壤细菌、放线菌、真菌数量及 4 种酶(过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶)活性进行了研究,并对土壤微生物数量及酶活性相关性进行了分析。【结果】不同固沙林林地土壤微生物生态分布特征和酶活性表现出一定的差异。在 0～5 cm 土层中,花棒×踏郎混交林林地土壤细菌数量最多,樟子松和沙棘林林地 0～20 cm 土层放线菌、真菌数量均较多。在 0～5 cm 土层,花棒×踏郎混交林林地土壤碱性磷酸酶活性最强,沙柳林林地土壤过氧化氢酶活性最强,河北杨林林地土壤蔗糖酶和脲酶活性均最高。各种人工固沙林林地土壤细菌数量和酶活性总体上均随着土层深度的增加而递减;土壤细菌和放线菌的数量与过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性具有显著或极显著的相关性。【结论】人工植被建立后,土壤微生物数量增加,酶活性增强,土壤的生物性质得到改善,流沙开始朝着土壤肥力水平较高的方向发展。

[关键词] 人工固沙林;土壤微生物;土壤酶活性;毛乌素沙地;榆林沙区

[中图分类号] S727.23 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2008)12-0135-07

Soil microorganism and enzyme activities under different artificial sand-fixing vegetations in the sandy area of Yulin

XU Heng[1], LIAO Chao-ying[1], LI Xiao-ming[1], SUN Chang-zhong[2], WANG Yan-wu[1], LI Liang[1]

(1 *College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2 *Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 102300, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study explored the biological property of the sand-fixing vegetation soil in order to provide reference for seeking reasonable and feasible management measures of sandy forest. 【Method】 Take the wind-drift sand as the comparison, the soil bacteria, antinomies, fungus and catalase, sucrase, alkaline phosphatase, urease activities of 6 kinds of typical artificial sand-fixing vegetations in 0 — 5, 5 — 20, 20 — 40 cm soil layers in the sandland areas of Yulin were studied, and the soil microorganism quantities and the enzyme activities relevance were analyzed. 【Result】 The result indicated that the number of soil microorganisms and the enzyme activities varied in different forest lands. The bacteria under *Hedysarum scoparium* × *Hedysarum mongolicum* numbered most in 0 — 5 cm soil layer. The soil antinomie and fungus numbers under *Pinus sytvestris* var. *mongolica* and *Hippop haerhamnoides* were the high-

* [收稿日期] 2008-01-02
[基金项目] 国家自然科学基金项目(30670339)
[作者简介] 徐 恒(1982－),男,江苏徐州人,在读硕士,主要从事环境生物学研究。Email: 23heng@sina.com
[通讯作者] 廖超英(1959－),男,安徽宿州人,教授,博士生导师,主要从事林业生态工程研究。E-mail:chaoying95@163.com

est in 0 — 20 cm soil layer. In the 0 — 5 cm soil layer, the activity of soil alkaline phosphatase under *Hedysarum scoparium* × *Hedysarum mongolicum* and soil catalase of *Salix psammophila*, soil urease of *Ponulus hopeiensis* was bigger than those of others. Soil enzymatic activities decreased with soil depth. The correlations were significant between the quantities of soil bacterium, antinomies and the activities of catalase, sucrase, alkaline phosphatase. 【Conclusion】 After artificial plantations were established, the soil microorganism quantities were increased greatly, the enzyme activities were strengthened significantly, and the soil biological properties were improved obviously.

Key words: artificial sand-fixing vegetation; soil microorganism; soil enzymes activity; Maowusu sandland; sandy area of Yulin

已有的研究表明，在沙区建立人工植被，防止土壤风蚀，不仅能促进土壤有机质及粘粒积累，使地表结皮形成，对流沙起到固定作用，而且能促进沙土的成土过程[1-3]。在风沙土成土过程中，土壤微生物是其中的活跃成员，其几乎与所有土壤发育过程有关，不仅是土壤有机质、土壤养分转化和循环的主要动力，而且还参与有机质的分解、腐殖质的形成、植物养分的转化和循环等各个生化过程[4]。土壤酶参与土壤许多重要的生物化学过程和物质循环，土壤酶活性的增强加速了沙土中各种有机物质的酶促反应，促进了有机化合物的循环，改良了沙土的性质[5]。土壤微生物与土壤酶一起推动着土壤的生物化学过程，以土壤微生物特征和土壤酶活性为代表的土壤生物学肥力，是揭示土壤变化规律和演变趋势的重要指标[6-8]。土壤微生物和酶作为全面指示土壤肥力的生物指标，是近年来土壤科学的一个主要研究内容。以往对毛乌素沙地榆林沙区土壤性质的研究，主要集中在理化性质的分析上[9-10]，而对土壤生物的性质未见进行系统的研究，尤其是对人工林固沙林土壤微生物和酶活性的研究很少有报道。本试验以榆林沙区人工固沙林林下土壤为对象，研究土壤细菌、放线菌、真菌 3 大菌的数量，土壤酶活性分布特征以及它们之间的相关性，探讨固沙林土壤的生物性质，以期为制订合理可行的、保持沙地森林持续经营的管理措施提供参考。

1 研究区概况

榆林红石峡地区地处毛乌素沙地东南部，东经 109°12′，北纬 38°26′，海拔 1 100 m，总面积 178.3 hm^2。该地地处内陆，属于温带半干旱大陆性季风气候，季风显著，日照充足，热量丰富，气温冷热巨变。年均气温 7.9 ℃，绝对最高温 37.6 ℃，绝对最低温－32.7 ℃，年均无霜期 159 d。年均降水量 397 mm，雨量分配不均，干湿季节明显，终年盛行西北风。土壤以风沙土为主，地表土层疏松，由浮沙覆盖，区域性植被稀少，能形成群落的主要植被有踏郎（*Artemisia sphaerocephala*）、花棒（*Hedysarum scoparium*）、沙柳（*Salix psammophila*）、柠条（*Caragana korshinskii*）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）、沙蒿（*Artemisiaarenaria DC*）、沙棘（*Hippop haerhamnoides*）等，另外乔木固沙林树种有樟子松（*Pinus sytvestris* var. *mongolica*）、河北杨（*Ponulus hopeiensis*）等。

2 研究方法

2.1 样地设置

于 2007-04 在红石峡珍稀沙生植物保护基地，分别选取立地条件、种植年限相似的人工固沙林 6 块和流沙地（对照，CK）1 块进行试验，其中灌木林有花棒×踏郎混交林、沙柳林、踏郎林、沙棘林；乔木林有河北杨林和樟子松林。每块样地设 3 个重复，灌木林设置 10 m×10 m 样方，乔木林设置 20 m×20 m 样方，进行林地状况调查（表 1）。

2.2 土壤采样

土壤采样采用多点混合法，每个样品由“S”型 6 个样点的土样混合而成。取样时，除去表层枯枝落叶，分别在 0～5、5～20、20～40 cm 土层取样。土样去除植物根系和机械沙障碎屑，迅速带回室内分为两份，一份风干后粉碎，分别过孔径 1 mm 和 0.25 mm 筛，以备测定土壤酶活性；另一份迅速过孔径 1 mm 筛，4 ℃条件下保存，供测定土壤微生物数量。

2.3 测定项目及方法

细菌、真菌和放线菌数量采用稀释平板法测定[11]；分离细菌采用牛肉膏-蛋白胨培养基，真菌用 PDA＋体积分数 0.3％的灭菌乳酸，放线菌采用改良高氏一号培养基[12]。脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定，酶活性以 1 g 土壤 24 h 酶促反应催化底物产生 NH_3-N 的质量（mg）表示；过氧化氢

酶活性采用 $KMnO_4$ 滴定法测定，酶活性以 20 min 后每克土消耗 0.1 mol/L $KMnO_4$ 的体积(mL)表示；碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠法比色法测定，酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中酶促反应催化底物产生酚的质量(mg)表示；蔗糖酶活性采用菲林滴定法测定，酶活性以 24 h 后 1 g 土壤消耗 0.1 mol/L $Na_2S_2O_3$ 的体积(mL)表示[13]。

表 1　榆林沙区人工固沙林样地的基本情况

Table 1　General features of plots of Yulin sandy area

编号 Code	林分类型 Type of stands	种植年限/a Age	地形 Terrain	平均高度/m Average height	坡度/(°) Slope degree	郁闭度 Canopy closure
Ⅰ	花棒×踏郎 *Hedysarum scoparium*×*Hedysarum mongolicum*	25～20	迎风坡 Windward of sand dune	1.60～1.80	6～9	60～70
Ⅱ	沙柳 *Salix psammophila*	20～25	丘间地 Land between dunes	1.50～1.70	0～2	45～50
Ⅲ	河北杨 *Ponulus hopeiensis*	12～18	丘间地 Land between dunes 迎风坡 Windward of sand dune	3.45～4.00	10	55～70
Ⅳ	踏郎 *Hedysarum mongolicum*	20～30	丘间地 Land between dunes	0.1～0.25	0	50～60
Ⅴ	樟子松 *Pinus sytvestris* var. *mongolica*	20～25	迎风坡 Windward of sand dune	6.10～6.90	12	70～75
Ⅵ	沙棘 *Hippop haerhamnoides*	15～20	丘间地 Land between dunes	1.70～2.10	0	50～65
CK	流沙地 Drifting sand dune	—	迎风坡 Windward of sand dune	—	8	—

2.4　数据处理

用 SAS(8.0)统计分析软件，对数据进行相关分析及 One-Way ANOVA 方差分析。

3　结果与分析

3.1　不同人工固沙林林地土壤微生物的生态分布特征

3.1.1　土壤细菌　图 1 显示，固沙林植物种类不同，土壤微生物的数量和组成也不同。在 0～5 cm 土层中，与流沙地相比，花棒×踏郎混交林(Ⅰ)和沙棘林(Ⅵ)林地的土壤细菌数量均较多，分别为 4.02×10^6 和 3.33×10^6 g^{-1}，分别是流沙地土壤细菌数量的 77 和 64 倍，且与其他固沙林地土壤细菌数量有极显著差异($P<0.01$)；沙柳林(Ⅱ)和樟子松林(Ⅴ)林地次之；结构单一的踏郎林(Ⅳ)林地为最少。在 5～20 cm 土层中，沙棘林(Ⅵ)林地的土壤细菌数量最多，为 3.03×10^6 g^{-1}，是流沙地的 30 倍；其次是花棒×踏郎混交林(Ⅰ)和樟子松林(Ⅴ)林地，其与踏郎林(Ⅳ)、沙柳林(Ⅱ)、河北杨林(Ⅲ)林地及流沙地(CK)的差异均达显著水平($P<0.05$)。在 20～40 cm 土层中，沙棘林(Ⅵ)林地土壤细菌数量最多，为 1.38×10^6 g^{-1}；土壤细菌数量由高到低顺序为：沙棘林(Ⅵ)＞花棒×踏郎混交林(Ⅰ)＞河北杨林(Ⅲ)＞踏郎林(Ⅳ)＞樟子松林(Ⅴ)＞沙柳林(Ⅱ)。在 0～40 cm 土层，土壤细菌数量垂直变化规律为：花棒×踏郎混交林(Ⅰ)、沙柳林(Ⅱ)、樟子松林(Ⅴ)和沙棘林(Ⅵ)林地的土壤细菌数量均随土层深度的增加而递减。在 0～20 cm 土层，河北杨林(Ⅲ)和踏郎林(Ⅳ)林地土壤细菌数量均随土层深度的增加而递减；在 20～40 cm 土层中，土壤细菌数量均又有所回升。可知，榆林沙区人工固沙林林地土壤细菌数量有明显的垂直分布特征，且土壤细菌主要分布在 0～20 cm 土层。

3.1.2　土壤放线菌　图 2 显示，人工固沙林林地 0～5 cm 土层土壤放线菌数量较流沙地显著增加，这是因为人工固沙林建立后，土壤有机质含量增加，放线菌能分解多数真菌和细菌不能分解的化合物[14]，所以放线菌数量迅速增加。在 0～5 cm 土层，土壤放线菌数量由大到小依次为：沙棘林(Ⅵ)＞踏郎林(Ⅳ)＞河北杨林(Ⅲ)＞樟子松林(Ⅴ)＞沙柳林(Ⅱ)＞花棒×踏郎混交林(Ⅰ)，分别是流沙地的 23.9，20.2，17.9，17.3，16.6 和 11.3 倍。在 5～20 cm 土层中，樟子松林(Ⅴ)林地的土壤放线菌数量最高，达到 6.6×10^4 g^{-1}；沙棘林(Ⅵ)林地的土壤放线菌数量次之，为 5×10^4 g^{-1}。在 20～40 cm 土层中，不同人工固沙林林地的土壤放线菌数量差异较为明显，土壤放线菌数量由大到小依次为：花棒×踏郎混交林(Ⅰ)＞踏郎林(Ⅳ)＞沙棘林(Ⅱ)＞沙柳林(Ⅵ)＞樟子松林(Ⅴ)＞河北杨林(Ⅲ)。

不同人工固沙林林地的土壤放线菌数量垂直分

布特征非常明显。在 0～40 cm 土层中，河北杨林(Ⅲ)和沙棘林(Ⅵ)林地的土壤放线菌数量，随土层深度的增加均呈递减趋势。在 0～20 cm 土层中，花棒×踏郎混交林(Ⅰ)、沙柳林(Ⅱ)和踏郎林(Ⅳ)林地的土壤放线菌数量均随土层深度的增加而递减，在 20～40 cm 土层，土壤放线菌数量均又呈递增的趋势，而樟子松林(Ⅴ)林地土壤放线菌数量变化趋势则与此相反。沙棘林(Ⅵ)、踏郎林(Ⅳ)、河北杨林(Ⅲ)、沙柳林(Ⅱ)林地 0～5 cm 土层的土壤放线菌数量分别为 6.38×10^4，5.4×10^4，4.77×10^4，4.43×10^4 g^{-1}，是其 20～40 cm 土层的 3.4，2.9，13.6，3.2 倍。这是由于放线菌较耐旱，适宜在气候干燥、pH 值较高的条件下生存，所以土壤表层的放线菌数量较多。在 5～20 cm 土层，四季常绿的樟子松林林地土壤放线菌数量最多，明显高于 0～5 cm 土层，这可能是由于樟子松树木高大，林分郁闭，导致林分内光照条件差，表层土壤放线菌活动受到抑制所致。

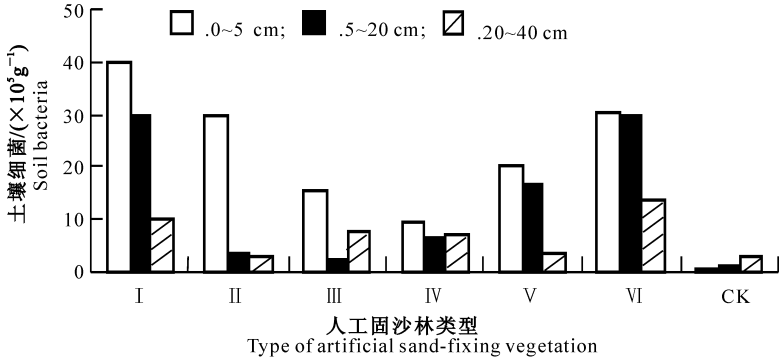

图 1　不同人工固沙林林地的土壤细菌数量

Fig. 1　Soil bacteria populations under different artificial sand-fixing vegetations

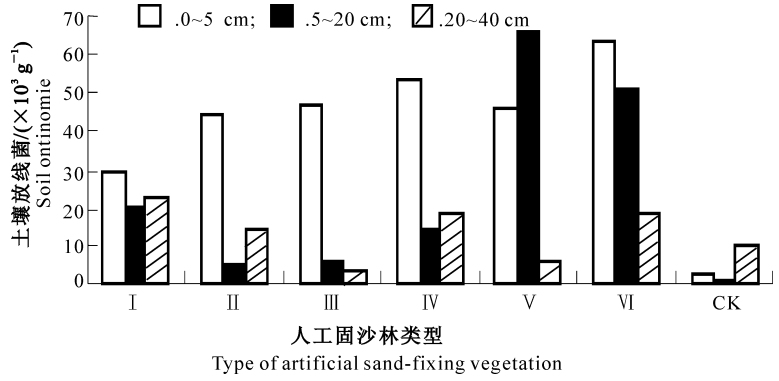

图 2　不同人工固沙林林地的土壤放线菌数量

Fig. 2　Soil antinomie populations under different artificial sand-fixing vegetations

3.1.3　土壤真菌　图 3 显示，在 0～5 cm 土层中，土壤真菌数量由高到低依次为：樟子松林(Ⅴ)＞沙棘林(Ⅵ)＞河北杨林(Ⅲ)＞沙柳林(Ⅱ)＞花棒×踏郎混交林(Ⅰ)＞踏郎林(Ⅳ)＞流沙地(CK)。盖度较大的樟子松林(Ⅴ)、沙棘林(Ⅵ)、河北杨林(Ⅲ)林地土壤真菌数量均较多，盖度较小的沙柳林(Ⅱ)林地土壤真菌数量较小，流沙地最少。在 5～20 cm 土层中，土壤真菌数量由高到低依次为：樟子松林(Ⅴ)＞河北杨林(Ⅲ)＞花棒×踏郎混交林(Ⅰ)＞踏郎林(Ⅳ)＞沙棘林(Ⅵ)＞沙柳林(Ⅱ)＞流沙地(CK)。在流沙地(CK)0～20 cm 土层中几乎未见真菌出现，在 20～40 cm 土层中才有较多的真菌出现，这可能是由于流沙地上没有植被，真菌是异氧型微生物，适宜在偏酸性的土壤条件下生长发育，流沙地上层土壤偏碱性，养分少，限制了真菌的生长[15]。土壤真菌数量垂直变化的规律为：在 0～40 cm 土层中，沙柳林(Ⅱ)、河北杨林(Ⅲ)和沙棘林(Ⅵ)林地土壤真菌数量均随土层深度的增加而递减；在花棒×踏郎混交林(Ⅰ)、踏郎林(Ⅳ)和樟子松林(Ⅴ)林地中，土壤真菌数量均在 5～20 cm 土层出现峰值，然后随土层深度的增加而递减。

综上所述，土壤真菌的垂直分布规律与植被的

盖度有关。植被盖度较大的人工固沙林林地，0～20 cm 土层的土壤真菌数量均较多，在 20～40 cm 土层中，不同人工固沙林林地土壤真菌数量明显减少。

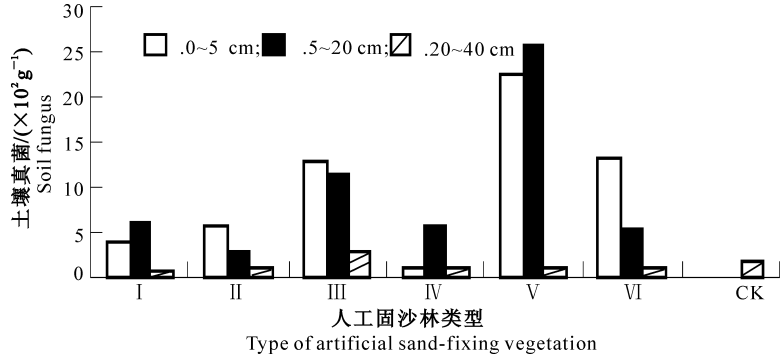

图 3　不同人工固沙林林地的土壤真菌数量

Fig. 3　Quantity of soil fungus under different artificial sand-fixing vegetations

3.2　不同人工固沙林林地土壤酶活性的变化特征

表 2 显示，不同人工固沙林林地土壤酶的活性表现出明显的差异。在 0～5 cm 土层，河北杨林（Ⅲ）林地的土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶活性均较高，而樟子松林（Ⅴ）和沙棘林（Ⅵ）林地 4 种土壤酶活性均较低，这是因为土壤酶活性与林内的光照条件、湿度条件以及微生物含量有关。河北杨林（Ⅲ）处于沙丘的阳坡，由于空隙度较大，林内光照条件较好，湿度较适宜，有利于有机物质的分解和微生物的活动，故酶促反应活跃，土壤酶活性较高。樟子松林（Ⅴ）树木高大，林分郁闭，导致林分内的光照条件差，加之地势平坦，土壤湿度太高，好氧微生物活动可能受到抑制，故其土壤酶活性较低。沙棘林（Ⅵ）林地 4 种土壤酶活性均较低，可能与沙棘林凋落物有机质含量较低有关。在 5～20 cm 土层，沙柳林（Ⅱ）林地的土壤碱性磷酸酶活性最强，且与其他固沙林林地的碱性磷酸酶活性有明显差异。在 20～40 cm 土层，沙柳林（Ⅱ）林地的过氧化氢酶和脲酶活性均最高，花棒×踏郎混交林（Ⅰ）林地的碱性磷酸酶活性最强。从表 2 还可以看出，在榆林沙区流动沙地上固沙造林，0～40 cm 土层土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性总体上均比流沙地有明显增加，说明土壤肥力水平向较好的方向发展。

表 2　不同人工固沙林林地的土壤酶活性

Table 2　Soil enzyme activity of different artificial sand-fixing vegetations

编号 Code	过氧化氢酶/(mL·g⁻¹) Catalase			蔗糖酶/(mL·g⁻¹) Sucrase			碱性磷酸酶/(mg·g⁻¹) Alkaline phosphatase			脲酶/(mg·g⁻¹) Urease		
	0～5 cm	5～20 cm	20～40 cm	0～5 cm	5～20 cm	20～40 cm	0～5 cm	5～20 cm	20～40 cm	0～5 cm	5～20 cm	20～40 cm
Ⅰ	1.80 a	0.75 ab	0.50 c	4.27 d	1.10 c	1.05 c	26.99 a	5.88 c	9.51 a	1.30 b	1.18 ab	1.16 b
Ⅱ	1.99 a	0.65 b	0.95 b	2.77 d	1.53 b	0.30 d	22.58 a	11.27 a	9.35 a	1.37 b	1.06 ab	1.58 a
Ⅲ	1.77 ab	0.85 a	0.37 d	5.50 a	1.20 c	0.40 d	20.56 a	10.78 a	4.44 bc	2.82 a	1.16 ab	0.48d
Ⅳ	1.42 c	0.64 b	0.40 d	3.40 b	1.13 c	0.45 d	23.63 a	5.72 c	6.01 b	1.70 b	1.21 ab	1.02 b
Ⅴ	1.60 bc	0.85 a	0.58 c	1.70 f	2.10 a	0.15 d	15.33 b	7.75 b	3.76 bc	1.23 bc	0.51 c	0.97 b
Ⅵ	1.58 bc	0.93 a	0.62 c	2.40 e	0.60 d	1.20 c	12.94 b	2.55 d	5.29 b	1.30 bc	0.72 bc	0.56 cd
CK	0.58 d	0.48 c	0.32 d	0.07g	0.46 d	1.65 b	6.67 c	3.01 d	2.03 bc	0.56 d	0.39 c	0.79 bc

注：同列数据后标不同字母者表示差异达显著水平（$P<0.05$），标相同字母者表示差异不显著（$P>0.05$）。

Note: The different letters indicate significant difference at $P<0.05$ level. The same letters indicate not significant difference at $P>0.05$ level.

表 2 表明，榆林沙区人工固沙林林地土壤酶活性的垂直分布特征非常明显，4 种土壤酶活性均基本随着土层深度的增加呈减弱的趋势，其中不同人工固沙林林地 0～5 cm 土层土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性是 20～40 cm 土层的 2～7 倍。造成这种结果的原因主要有：首先，在沙地中随土层深度的增加土壤通气状况较差，而土壤酶活性与土壤氧的摄取量呈正相关，故导致土壤酶活性减弱；其次土壤有机质随土层深度的增加而显著减少，而土壤酶主要以物理或化学结合的形式吸附在土壤有机、无机颗粒上或与腐殖质络合[16-18]。榆林沙区人工固沙林林地土壤酶活性的垂直分布特点与其他土壤类型基本类似[19-20]。

3.3 土壤微生物数量与土壤酶活性的相关性分析

由表 3 可知，土壤细菌数量与过氧化氢酶活性间呈极显著正相关（$P<0.01$），与蔗糖酶和碱性磷酸酶呈显著正相关（$P<0.05$）；土壤放线菌数量与过氧化氢酶和蔗糖酶活性呈极显著正相关，与碱性磷酸酶活性间呈显著正相关关系；土壤真菌数量与过氧化氢酶活性呈显著正相关关系，与蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶呈正相关性，但相关性不显著。沙区人工固沙林林地 4 种土壤酶活性间的相关性均达极显著水平。说明在土壤有机物质转化过程中，土壤酶间的作用并不是孤立的，而是存在着相互制约、相互促进的复杂关系[19]。土壤脲酶活性与土壤细菌、放线菌、真菌之间无显著的相关性，这说明在榆林沙区土壤脲酶可能主要来源于植物根系。

表 3 土壤微生物数量与土壤酶活性的相关系数

Table 3 Interrelation coefficients between soil microorganism and soil enzyme activity

项目 Item	细菌 Bacterium	放线菌 Antinomies	真菌 Fungus	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	脲酶 Urease
细菌 Bacteria	1.000	0.643**	0.332	0.672**	0.485*	0.476*	0.195
放线菌 Antinomies		1.000	0.641**	0.691**	0.588**	0.491*	0.365
真菌 Fungi			1.000	0.436*	0.344	0.208	0.159
过氧化氢酶 Catalase				1.000	0.775**	0.874**	0.646**
蔗糖酶 Sucrase					1.000	0.828**	0.719**
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase						1.000	0.669**
脲酶 Urease							1.000

注：** 代表相关性在 0.01 水平显著，* 代表相关性在 0.05 水平显著。

Note: ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed), * Correlation is significant at the 0.05 level.

4 结 论

（1）榆林沙区不同人工固沙林下土壤微生物分布存在差异，在 0～40 cm 土层，花棒×踏郎混交林（Ⅰ）和沙棘林（Ⅵ）林地的土壤细菌数量均较多，樟子松林（Ⅴ）和沙棘林（Ⅵ）林地土壤放线菌和真菌数量均较多。榆林沙区人工固沙林林地土壤微生物垂直分布特征非常明显，总体上随着土壤深度的增加，土壤微生物数量递减。

（2）榆林沙区不同人工固沙林林地土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶活性存在明显差异。在 0～5 cm 土层中，河北杨林（Ⅲ）林地 4 种土壤酶活性均较高，而樟子松林（Ⅴ）和沙棘林（Ⅵ）林地 4 种土壤酶活性均较低。不同人工固沙林林地 0～5 cm 土层，4 种酶活性是 20～40 cm 土层的 2～7 倍。可见，4 种土壤酶活性基本均随土层深度的增加而呈减弱趋势，其中以碱性磷酸酶的减弱幅度最大。

（3）在榆林沙区人工固沙林林地中，土壤细菌和放线菌与土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性呈显著或极显著正相关；真菌与过氧化氢酶活性具有显著正相关关系。4 种土壤酶活性间的相关性均达极显著水平。

（4）毛乌素沙地榆林沙区建立人工固沙林后，0～40 cm 土层土壤微生物数量增加，土壤酶活性增强，明显高于流沙地，表明人工植被建立后成土过程发生了变化，土壤的生物性质得到改善，流沙开始朝着土壤肥力水平较高的方向发展。

[参考文献]

[1] 邵玉琴，赵 吉，包青海. 库布齐固定沙丘土壤微生物生物量的垂直分布研究 [J]. 中国沙漠，2001，21(2)：89-92.
Shao Y Q，Zhao J，Bao Q H. Vertical distribution of soil microbial biomass in the stabilized sand dune of the Hobq desert [J]. Journal of Desert Research，2001，21(2)：89-92. (in Chinese)

[2] 顾峰雪，文启凯，潘伯荣. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被下土壤微生物的初步研究 [J]. 生物多样性，2000，8(3)：297-303.
Gu F X，Wen Q K，Pan B R. A preliminary study on soil microorganisms of artificial vegetation in the center of Taklimakan Desert [J]. Chinese Biodiversity，2000，8(3)：297-303. (in Chinese)

[3] 陈祝春，李定淑. 科尔沁沙地奈曼旗固沙造林沙丘土壤微生物区系的变化 [J]. 中国沙漠，1992，12(3)：16-21.
Chen Z C. Li D S. Microf lora variations of afforested sand dune soil in Naiman Banner，Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research，1992，12(3)：16-21. (in Chinese)

[4] 单娜娜，赖 波. 风沙土成土演变过程中土壤微生物生物学特性研究进展与展望 [J]. 新疆环境保护，2004，26(增刊)：79-82.
Shan N N，Lai B. Study progresses and prospect on the ecological characteristics of soil-inhabiting microorganism in soil forming process of aeolian sand soil [J]. Environmental Protection of Xinjiang，2004，26(Suppl)：79-82. (in Chinese)

[5] 邵玉琴，赵 吉. 内蒙古库布其油蒿固定沙丘土壤微生物数量的季节动态分布研究 [J]. 中国草地，2001，21(1)：88-92.
Shao Y Q，Zhao J. Distributions in number of soil microorganism in fixed sand dunes with artemisiaordosica in the Kubuqi of

Inner Mongolia [J]. Grassland of China, 2001, 21(1): 88-92. (in Chinese)

[6] 肖慈英,阮宏华,屠六邦. 宁镇山区不同森林土壤生物学特性的研究 [J]. 应用生态学报,2002,13(9):1077-1081.
Xiao C Y, Ruan H H, Tu L B. Biological characteristics of different forest soils in Nanjing Zhenjiang mountan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1077-1081. (in Chinese)

[7] 杨 涛,徐 慧,杨 慧,等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究 [J]. 水土保持学报,2005,19(3):50-53.
Yang T, Xu H, Yang H, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in Pinus sylvestris plantations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 50-53. (in Chinese)

[8] 胡 斌,段昌群,王震洪,等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响 [J]. 土壤学报,2002,39(4):604-608.
Hu B, Duan C Q, Wang Z H, et al. Effect of vegetation rehabilitation measures on soil fertility and soil enzymatic activity in degraded ecosystem [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 604-608. (in Chinese)

[9] 王彦武,廖超英,徐 恒. 毛乌素沙地固沙林土壤物理性状研究 [J]. 西北林学院学报,2008,23(3):36-39.
Wang Y W, Liao C Y, Xu H. Soil physical properties of sand-fixing forests in Maowusu Sandland [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(3): 36-39. (in Chinese)

[10] 尚爱军,卜耀军,艾海舰,等. 榆林沙区土壤水分时空格局及动态变化规律研究 [J]. 水土保持学报,2008,22(4):86-89.
Shang A J, Bo Y J, Ai H J, et al. Research on temporal and spatial patterns and dynamic laws of soil moisture in Yulin sand district [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 86-89. (in Chinese)

[11] 程丽娟,薛泉宏. 微生物学实验技术 [M]. 西安:世界图书出版公司,2000:63-68.
Cheng L J, Xue Q H. Microbiology laboratory technicians [M]. Xi'an: World Book Publishing Company, 2000: 63-68. (in Chinese)

[12] 杨文博. 微生物学实验 [M]. 北京:化学工业出版社,2004:217-218.
Yang W B. Laboratory experiments in microbiology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 217-218.

[13] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京:中国农业出版社,1986:256-312.
Gan S Y. Soil enzyme and their research method [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986: 256-312. (in Chinese)

[14] Blair J M. Paramalee R W, Beare M H. Decay rates, nitrogen fluxes and decomposer communities of single and mixed species foliar litter [J]. Ecol, 1990, 71(5): 1976-1985.

[15] 单娜娜,潘伯荣,文启凯,等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤微生物生态学特性研究 [J]. 干旱区研究,2001,18(4):51-56.
Shan N N, Pan B R, Wen Q K, et al. Study on the ecological characteristics of soil-inhabiting microorganisms of the artificial vegetation in the hinterland of Taklamakan Desert [J]. Arid Zone Research, 2001, 18(4): 51-56. (in Chinese)

[16] Croquet S, Tagger S, Vogt G, et al. Laccase activity of forest litter [J]. Soil Biol Biochem, 1999, 31: 1239-1244.

[17] Sarkar J M. Formation of 14C-cellulase-humic complexes and their stability in soils [J]. Soil Biol Biochem, 1986, 18: 251-254.

[18] Tabatabai M A, Fu M. Extraction of enzymes from soils [M]// Stotzky D, Bollag J M. Soil biochemistry. New York: Marcel Dekker, 1992: 197-227.

[19] 高祥斌,刘增文. 岷江上游典型森林生态系统土壤酶活性初步研究 [J]. 西北林学院学报,2005,20(3):1-5.
Gao X B, Liu Z W. Preliminary studies on soil enzymes activities of typical forest ecosystem in Minjiang Areas [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 1-5. (in Chinese)

[20] 许光辉,郑洪元,张德生,等. 长白山北坡自然保护区森林土壤微生物生态分布及其生化特性的研究 [J]. 生态学报,1984,4(3):207-223.
Xu G H, Zheng H Y, Zhang D S, et al. Study on ecological distribution and biochemical properties of forest soil microorganisms on the northern slope of the Changbaishan mountain natural reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(3): 207-223. (in Chinese)