黄河三角洲滩地不同造林模式的土壤酶活性

李传荣¹ 许景伟² 宋海燕¹ 李春艳¹ 郑莉¹ 王卫东² 王月海²

(1 山东农业大学林学院, 山东泰安 271018) (2 山东省林业科学研究院, 济南 251000)

摘要 该文对东营市垦利县柽柳(*Tamarix chinensis*)林、枣(*Ziziphus jujuba*)园、旱柳(*Salix matsudana*)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、白蜡(*Fraxinus chinensis*)林、桑(*Morus alba*)园土壤酶活性及其与土壤化学性质和土壤微生物的关系进行了分析。结果表明:在土壤空间上,脲酶和过氧化物酶活性随土层的增加而减小,多酚氧化酶和过氧化氢酶的活性在土层之间变化不明显。过氧化氢酶与脲酶和多酚氧化酶显著相关,脲酶与多酚氧化酶呈负相关。不同造林模式对土壤过氧化氢酶和过氧化物酶影响不大,对脲酶和多酚氧化酶活性有显著的影响。各种造林模式增加了脲酶的活性,均高于柽柳林,减小了多酚氧化酶的活性,除刺槐林外,均显著低于柽柳林;而造林模式对过氧化物酶和过氧化氢酶的影响较小。土壤酶活性与土壤养分有一定的相关,其中脲酶与全氮、有机质显著正相关,与速效氮正相关;多酚氧化酶与速效钾正相关,而过氧化氢酶与全氮、速效磷和有机质呈负相关,与土壤pH值相关性不显著;与微生物的相关系数不大,其中脲酶与固氮菌、纤维素分解菌显著正相关,与细菌正相关;多酚氧化酶与固氮菌和细菌负相关,过氧化氢酶与固氮菌显著负相关,与纤维素分解菌负相关。脲酶和多酚氧化酶可以作为滩地土壤质量评价的指标。

关键词 滩地 黄河三角洲 人工林 土壤酶活性 土壤微生物

SOIL ENZYME ACTIVITIES IN DIFFERENT PLANTATIONS IN LOWLANDS OF THE YELLOW RIVER DELTA, CHINA

LI Chuan-Rong¹ XU Jing-Wei² SONG Hai-Yan¹ LI Chun-Yan¹
ZHENG Li¹ WANG Wei-Dong² and WANG Yue-Hai²

(1 College of Forestry, Shandong Agriculture University, Tai'an, Shandong 271018, China)

(2 Shandong Academy of Forestry Sciences, Jinan 251000, China)

Abstract Background and Aims More attention is being paid to utilization of the ecological resources in the lowlands of the Yellow River Delta. However, most proposed measures emphasize breeding, irrigation and cultivation. Soil enzymes play an important role in soil biochemical processes, such as litter decomposition, nutrient fixation and nutrient release. Insufficient attention has been paid to the relationships among soil enzymes, soil microbes and soil physical-chemical quality, yet such study can indicate the dynamic process of soil nutrients and soil health. Our objectives were to determine: 1) the distribution of soil enzymes of different plantations at different soil depths, 2) the correlations among microbes, soil nutrients and soil physical and chemical characteristics and 3) soil enzymes that are key factors in maintaining soil fertility.

Methods We analyzed soil enzymes, soil chemical characteristics and soil microbes for six kinds of plantations (*Tamarix chinensis*, *Salix matsudana*, *Robinia pseudoacacia*, *Fraxinus chinensis*, *Ziziphus jujube* and *Morus alba*) in Kenli County, Dongying, Shandong Province. Soil samples were collected at 0–20 cm and 20–50 cm depths. Established methods were used to analyze soil enzymes and soil physical and chemical characteristics. Analysis was done using an integrative method combining correlation and component analyses in SPSS.

Key Results Soil urease and soil peroxidase decrease with increasing soil depth. There are positive relationships between soil peroxidase and soil urease, and soil peroxidase and soil polyphenol oxidase, while there is negative correlation between soil urease and soil polyphenol oxidase. The kind of plantation clearly affects soil urease and soil polyphenol oxidase, but not soil catalase and soil peroxidase. Soil urease activity of different plantations is higher than that of the *Tamarix chinensis* forest; the soil polyphenol oxidase activity is lower than that of the *Tamarix chinensis* forest, except for the *Robinia pseudoacacia* forest. There are close correlations among soil enzymes and soil nutrients, and few correlations with pH values and soil microbes. Among them,

soil urease shows positive relationships with total N , organic C and available C. Soil polyphenol oxidase shows a positive relationship with available K and negative relationships with soil catalase , total N , available P , organic C , peroxidase and soil urease .

Conclusions This study suggests that plantation type affects soil enzyme activities . The activities of soil urease and soil polyphenol oxidase can be regarded as indexes to assess soil quality in the lowlands .

Key words Lowland , Yellow River delta , Plantation , Soil enzyme , Soil microbe

近年来 ,黄河三角洲地区环境恶化 ,该区土地资源的合理利用引起科研和生产单位的高度重视。多年来的研究着重于适宜品种的选育 ,以及以水压盐、工程整地和生物措施改良土壤等方面。然而这些措施并不能彻底实现黄河三角洲地区土壤资源的持续利用 ,其中一个重要原因是忽视了土壤肥力维持与改善的主导因子与限制因子 ,导致所采取的经营措施存在盲目性。

土壤环境中 ,土壤酶类参与土壤中一切复杂的甥物化学过程 ,包括枯落物的分解、腐殖质及各种有机化合物的分解与合成、土壤养分的固定与释放以及各种氧化还原反应 ,具有特殊的催化能力(关松荫 ,1986) ,在一定程度上反映了土壤养分转化的动态情况(张猛和张健 ,2003)。不同森林植被下土壤酶活性存在差异(姜培坤等 ,1995 ;Kerstin & Egbert ,2003)。一般随土层深度增加 ,土壤脲酶活性显著降低 ,过氧化氢酶升高 ,而多酚氧化酶随土层加深不表现规律性(王成秋等 ,1999 ;赵林森和王九龄 ,1995)。在评价土壤肥力、环境监测、评价土地利用等方面有广泛的作用 ,可为土壤健康管理提供科学依据。通过文献分析 ,缺乏黄河三角洲地区土壤酶活性研究的相关报道。在该区域土地利用模式的选择过程中 ,哪些土壤酶是土壤肥力维持与改善的关键因子 ,它们与土壤环境中其它因子有什么样的关系 ,等等这些问题还不清楚。因此本文选择了黄河三角洲滩

地的不同造林模式 ,探讨土壤酶活性的变化规律 ,分析土壤酶和土壤微生物、土壤养分的关系 ,旨在为黄河滩地最优造林模式的选择和土壤肥力的维持与改善提供科学依据。

1 研究地点与研究方法

1.1 研究地点概况

研究地点位于山东省东营市垦利县境内。该区位于山东省北部黄河三角洲地区 ,属于暖温带半湿润地区 ,大陆性季风气候 ,年均气温 12.5 ℃ ,无霜期长达 206 d ,≥ 10 ℃ 的积温约 4 300 ℃ ,年降水量 550 ~ 600 mm ,多集中在夏季 ,7 ~ 8 月降水量约占全年降水量的一半 ,且多暴雨 ,易形成旱、涝灾害。土壤 pH 值较高 ,垦利县境内黄河滩地主要造林模式有怪柳(*Tamarix chinensis*)林、旱柳(*Salix matsudana*)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、白蜡(*Fraxinus chinensis*)林、果园、荒地 ,以及最近几年大规模发展的杨树(*Populus × euramericana* cl ‘ 74/76 ’)人工林等。

1.2 研究方法

2005 年 8 月中旬 ,在黄河口镇选择具有代表性的 6 种造林模式(表 1) ,建群种分别为怪柳、枣(*Ziziphus jujuba*)、旱柳、刺槐、白蜡和桑树(*Morus alba*)。各造林模式的样地中 ,选择根区挖 2 ~ 3 个土壤剖面 ,采用十分法分两层取样 ,即 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 50 cm ,相应层次取混合样约 1 kg ,实验室内风

表 1 林分概况
Table 1 General situation of the forest stands

林型 Type	株行距(m × m) Row spacing	树高 Height (m)	胸径 DBH (cm)	林龄 Age (a)	备注 Notes
旱柳林 <i>Salix matsudana</i> forest	3.0 × 2.5	10.8	12.9	7	林下草盖度 45% Underground covered by 45% grass
怪柳林 <i>Tamarix chinensis</i> forest	1.0 × 1.0	1.8		50	海边 ,疏于管理 Seaside , loose management
枣园 <i>Ziziphus jujuba</i> forest	2.0 × 2.6	3.2	8.6 (Base)	7	未套种 ,定期翻土 Not interplanting of another plant , spading periodically
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	2.0 × 2.0	16.5	13.1	20	经过两次间伐 ,草本植物稀少 ,地面有腐殖质层 ,保留 680 株 · hm ⁻² Intermediate cutting twice , rare herbage , mould cover , 680 plant · hm ⁻²
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	2.0 × 3.0	5.7	7.2	7	林下草本植物发育 Herbage developed in the underground
桑园 <i>Morus alba</i> forest	1.0 × 1.0	1.8		15	漫灌 ,树上多螳螂卵块 Flood irrigation , a lot of egg mass of mantis on the tree

干、磨碎、过筛,然后保存在冰箱中待测。在两周内完成土壤微生物和酶活性的测定,并分析土壤理化性质。

脲酶采用扩散法测定,结果以培养 15 h 后每克土样转化生成 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的“ μg ”数表示;用邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,多酚氧化酶以 20 min 后 1 g 土壤消耗的 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4$ 的 ml 数表示,过氧化物酶以 2 h 后 1 g 土壤中生成的紫色没食子素的 mg 数表示;用滴定法测定过氧化氢酶的活性,以每克土所消耗的 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KMnO}_4$ 的 ml 数表示。有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮、 FeSO_4 容量法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,碱解氮用碱解扩散法测定,速效磷用 Olsen 法测定,速效钾用中性 NH_4AC 浸提、火焰光度法测定。用牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌,马铃薯蔗糖培养基培养真菌,淀粉铵盐培养基培养放线菌,赫奇逊培养基培养纤维素分解菌,瓦克斯曼培养基培养自生固氮菌。每个培养基浓度重复 3 次,然后置于恒温箱中培养,操作过程在无菌条件下进行。

研究所获得的数据采用 SPSS11.5 进行相应的统计和分析。

2 实验结果

2.1 不同造林模式对土壤酶活性的影响

4 种酶中,过氧化氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和脲酶的平均值分别为 0.955、0.536、0.403 和 0.166,变异系数分别为 0.02、0.12、0.18 和 0.38(表 2)。可见变化范围较大的是脲酶和多酚氧化酶,过氧化氢酶变动很小。

以空地作为对照,桤柳林位于海边,盐分含量高,造林后疏于管理,有机质积累量较少;刺槐林除经过几次间伐外,很少受到人为扰动,而其它类型的造林初期均有不同程度的间作和套种现象,耕作层中土壤肥力高。土壤酶活性对各种造林模式的反映有差异。脲酶是一种专性比较强的酶,它能促进尿素水解生成氨、二氧化碳和水(关松荫,1986),它的活性与土壤中氮素转化的强弱关系密切。各类型造林地的脲酶活性均大于空地,活性顺序由大到小为白蜡、枣园、桤柳、桑园、刺槐和旱柳。多酚氧化酶参与土壤有机组分中芳香族化合物的转化作用,是腐殖化的一种媒介。土壤中的酚类物质在多酚氧化酶的作用下生成醌,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素酸分子(关松荫,1986),多酚氧化酶活性顺序依次为刺槐、桤柳、旱柳、桑园、枣园和白蜡,均显著低于空地,体现出随经营强度的增加而下降,这可能与芳香族化合物减少有关。过氧化物酶能氧化土壤有机物质,在腐殖质的形成过程中具有重要作用,各种类型差异不大。过氧化氢酶能促进过氧化氢分解生成分子氧和水,有利于防止它对生物体的毒害作用,它与土壤有机质含量和微生物数量也有关,过氧化氢酶活性为桤柳林>刺槐林>桑园>白蜡>枣园>柳林。上述的分析揭示了各种造林模式都不同程度地增加脲酶活性,降低多酚氧化酶的活性,对过氧化物酶和过氧化氢酶影响较小。

在我们的研究区域,脲酶与多酚氧化酶呈负相关,与过氧化氢酶呈显著负相关,而与多酚氧化酶与过氧化氢酶呈正相关关系(表 3)。

表 2 各种类型的酶活性及其变异系数

Table 2 The soil enzyme activities and their coefficient of variation (CV) of different plantations in the lowlands of the Yellow River delta

		脲酶		多酚氧化酶		过氧化物酶		过氧化氢酶	
		Urease		Polyphenol oxidase		Peroxidase		Hydrogen peroxidase	
		活性 Activity ($\text{NH}_3^{-1}\text{-N}\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	变异系数 CV (%)	活性 Activity ($0.1\text{ mol KMnO}_4\cdot\text{ml}\cdot\text{g}^{-1}$)	变异系数 CV (%)	活性 Activity (2 h Galnut $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	变异系数 CV (%)	活性 Activity ($0.1\text{ mol KMnO}_4\cdot\text{ml}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	变异系数 CV (%)
旱柳林	<i>Salix matsudana</i> forest	0.018	20.00	0.542	1	0.602	8.00	1.000	0
桤柳林	<i>Tamarix chinensis</i> forest	0.155	34.00	0.120	6	0.553	18.00	0.925	3.00
枣园	<i>Ziziphus jujuba</i> forest	0.256	37.00	0.476	14	0.484	25.00	0.900	6.00
刺槐林	<i>Robinia pseudoacacia</i> forest	0.126	63.00	0.771	32	0.543	8.00	0.993	1.00
白蜡林	<i>Fraxinus chinensis</i> forest	0.295	17.00	0.068	30	0.569	2.00	0.938	1.00
桑园	<i>Morus alba</i> forest	0.147	57.00	0.442	25	0.466	12.00	0.975	3.00
空地	Barren	0.012	0.42	0.789	25	0.577	1.27	1.025	3.50
均值	Average	0.166	0.38	0.403	0.18	0.536	0.12	0.955	0.02

2.2 各种酶的垂直分布及变化

同一种酶在垂直空间上的变化也各不相同。一般来说,在肥力水平较高的土壤中(如果园、茶园生态区)其酶活性均高于肥力水平较低的土壤(如森林、荒地生态区)(林静,1999)。本研究中发现脲酶随土层深度的增加,其活性显著降低。但不同的造林模式下降的幅度不同,柳林和桑园下降的幅度比较大,柽柳林下降的幅度较小。多酚氧化酶的活性随土层深度的增加,柳林、白蜡、桑园升高,而柽柳、枣园、刺槐林下降。过氧化物酶活性差异不大,其中柳林下降的幅度比较大,其次为枣园、桑园、柽柳、刺槐,白蜡下降的幅度最小。过氧化氢酶则有升有降,但幅度较小(表2)。

2.3 土壤酶活性与土壤养分及 pH 值的关系

在所研究的各类型中,除速效钾外,其它的营养元素均较低。各种营养元素的含量与酶活性的变化趋势基本一致。随土层增加,全氮、速效氮、速效磷和有机质的含量都是下降的,这与脲酶和过氧化物酶在垂直分布上的变化一致(表4)。随土层深度的增加,柳林、刺槐、柽柳、枣园与脲酶的下降幅度顺序是一致的。

本研究中,脲酶与土壤养分的关系与前人研究的结果一致,但是其它酶要复杂的多(表5)。酶与土壤养分的相关性主要表现为脲酶与全氮、有机质显著正相关,与速效氮正相关,多酚氧化酶与速效钾正相关,而过氧化氢酶与全氮、速效磷和有机质呈负相关。本研究中土壤 pH 值的变化范围较小,其中上层在 7.90~8.30,下层在 7.86~8.64 之间,因而各种酶活性与 pH 的相关性不大。

表 3 4 种酶之间的相关性
Table 3 The relationships among the four kinds of soil enzymes

	脲酶 Urease	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	过氧化物酶 Peroxidase	过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase
脲酶 Urease	1.000	-0.560*	0.174	-0.784**
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase		1.000	-0.117	0.673**
过氧化物酶 Peroxidase			1.000	0.027
过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase				1.000

* $\alpha=0.05$ ** $\alpha=0.01$

表 4 土壤的养分含量及 pH 值
Table 4 The contents of soil nutrient and their pH values

类型 Type	层次 Layer (cm)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (mg·kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic C (%)	pH
旱柳林 <i>Salix matsudana</i> forest	0~20	0.029	0.388	31.249	6.998	128.791	0.506	8.03
	20~50	0.010	0.456	15.625	5.020	68.065	0.147	7.88
柽柳林 <i>Tamarix chinensis</i> forest	0~20	0.034	0.309	42.067	4.533	68.065	0.350	8.32
	20~50	0.010	0.420	23.437	6.141	118.670	0.197	7.86
枣园 <i>Ziziphus jujuba</i> forest	0~20	0.070	0.494	51.081	11.821	199.638	1.380	7.89
	20~50	0.033	0.402	25.240	5.926	159.154	0.517	7.94
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	0~20	0.065	0.458	52.884	5.283	230.001	0.764	8.12
	20~50	0.017	0.341	27.644	3.675	149.033	0.180	8.64
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	0~20	0.069	0.462	57.691	7.711	149.033	0.877	8.35
	20~50	0.020	0.410	27.000	5.200	132.350	0.400	8.10
桑园 <i>Morus alba</i> forest	0~20	0.053	0.418	72.114	5.604	118.670	0.728	8.22
	20~50	0.020	0.400	35.000	5.200	103.360	0.400	8.10

2.4 土壤酶与土壤微生物的关系

土壤是一个不断进行着复杂生物化学反应的生态系统,土壤微生物扮演着重要的作用(李延茂等,2004),对土壤养分有密切的影响(Seemen *et al.*, 1998),并且土壤微生物与土壤酶活性有较好的相关

关系(龙健等,2004;Gallo *et al.*, 2004),它能分解土壤中的动植物残体,释放无机养分。

土壤微生物在空间上的分布有一定规律可循(Nunan *et al.*, 2002;Jeffries *et al.*, 2003)。本研究中,各种微生物区系的数量比例差异很大,各种造林

模式中细菌的比例除了旱柳林、枣园以及刺槐林下层土壤外,其余均占 85% 以上;放线菌的比例也很大,其它几种菌的比例则非常小。各模式表层和底层土壤固氮菌的数量均大于桤柳林的,其中固氮菌表层白蜡、柳林较大,底层枣园和柳林较大,固氮菌总的数量为白蜡>柳林>枣园>刺槐>桑园>桤柳。纤维素分解菌的数量为白蜡>枣,底层为柳林和桑园较大。真菌一般耐酸性,在酸性土壤的有机质转化中起重要作用,在研究区域内以桑园为最大,总的真菌数量大小为桑园>枣园>刺槐>桤柳>白蜡>柳林。放线菌数量则与其它菌种不同,柳林和

桤柳数量较高。放线菌比较适合在碱性、较干旱和有机质丰富的土壤中繁殖,柳林有机质含量高,所以其放线菌数量最多。细菌是土壤中数量最多的微生物。在土壤的表层分布最多。0~20 cm 上细菌数量为白蜡>桑园>刺槐>桤柳>枣园>柳林,20~50 cm 上为白蜡>枣园>桑园>柳林>刺槐>桤柳。细菌大部分是在中性、弱酸性和弱碱性的环境中发育最好。在 0~50 cm 土壤中细菌的数量为白蜡>桑园>枣园>刺槐>柳林>桤柳。6 种林地微生物总的数量顺序为白蜡>桑园>枣园>刺槐>柳林>桤柳(表 6)。

表 5 酶与土壤养分及 pH 值的相关性分析
Table 5 The relationships among the soil enzyme activities, soil nutrients and pH values

	pH	全氮 Total N	全磷 Total P	速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	有机质 Organic C
脲酶 Urease	0.178	0.788**	0.416	0.652*	0.456	0.447	0.760**
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	-0.085	-0.097	-0.162	-0.186	-0.304	0.476*	-0.054
过氧化物酶 Peroxidase	0.129	0.277	0.143	0.182	0.165	-0.330	0.140
过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase	0.229	-0.473*	-0.373	-0.316	-0.587*	-0.265	-0.471*

* $\alpha = 0.05$ ** $\alpha = 0.01$

表 6 各造林模式的土壤微生物数量
Table 6 The amounts of soil microbes of different plantations

类型 Type	层次 Layer (cm)	固氮菌 Nitrogen fixer (10^4 cfu·g ⁻¹ DW)	纤维素分解菌 Cellulose decomposer (10^3 cfu·g ⁻¹ DW)	真菌 Fungi (10^6 cfu·g ⁻¹ DW)	放线菌 Actinomyce (10^6 cfu·g ⁻¹ DW)	细菌 Bacteria (10^8 cfu·g ⁻¹ DW)
旱柳林 <i>Salix matsudana</i> forest	0~20	0.4	10	2	1344	10.3
	20~50	0.2	5	12	40	0.4
桤柳林 <i>Tamarix chinensis</i> forest	0~20	44.0	150	18	74	9.5
	20~50	43.0	5	6	136	23.9
枣园 <i>Ziziphus jujuba</i> forest	0~20	170.0	50	5	1391	6.4
	20~50	18.0	60	2	345	4.4
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	0~20	21.0	40	15	227	25.1
	20~50	17.0	5	5	92	2.2
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	0~20	230.0	1700	5	263	33.5
	20~50	9.0	1	5	533	32.0
桑园 <i>Morus alba</i> forest	0~20	20.0	60	72	413	30.5
	20~50	15.0	20	27	25	12.5

通过酶与微生物的相关分析,脲酶与固氮菌、纤维素分解菌显著正相关,与细菌正相关;多酚氧化酶与固氮菌和细菌负相关,过氧化氢酶与固氮菌显著负相关,与纤维素分解菌负相关(表 7)。与其它几种微生物的相关系数不大。证明本研究区域土壤微生物数量的多少不一定与土壤酶的总活性强弱一致,与 Gallo 等(2004)的结果一致。原因可能:一是林分的不同;二是人为因素的影响,施肥促进了某些微生物的

大量繁殖;三是林下植被的影响,由于各种林分下植被丰富,影响土壤生物活性的因子极为复杂。

2.5 土壤质量的评价指标分析

为了更好地分析不同土壤层次的酶活性与土壤化学性质和土壤微生物的关系,从而选择用于滩地造林的评价指标,我们对研究区域的土壤信息系统的土壤酶、微生物、土壤养分和 pH 值共 16 个指标进行了主成分分析(表 8)。由于各种酶、微生物和养

分之间的相关性的原因,需要 5 个主成分才可解释超过 85% 的信息。第一主成分主要解释了氮的合成和分解,如有机质、全氮,分解有机质的脲酶和氮合成有关的固氮菌的信息,方差的贡献率为 39.870% ;第二主成分则主要解释了土壤养分转化有关的土壤微生物的信息,方差的贡献率为 17.905% ;第三主成分主要解释了有机质的转化的

多酚氧化酶的信息,方差的贡献率为 13.176% ;第四主成分主要解释了土壤真菌和土壤含盐量的信息,方差的贡献率为 8.908% ;第五主成分主要解释了土壤过氧化物酶的信息,方差的贡献率为 7.339%。从评价土壤质量的角度看,土壤酶扮演着重要的角色,其中脲酶和多酚氧化酶是可选的指标。

表 7 土壤酶活性与微生物的相关性分析
Table 7 The relationships between soil enzyme activities and microbes

	固氮菌 Nitrogen fixer	纤维素分解菌 Cellulose-decomposer	真菌 Fungi	放线菌 Actinomyce	细菌 Bacteria
脲酶 Urease	0.814 **	0.653 **	- 0.180	0.432	0.521 *
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	- 0.525 *	- 0.345	0.087	- 0.094	- 0.517 *
过氧化物酶 Peroxidase	0.135	0.163	- 0.094	0.357	0.107
过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase	- 0.841 **	- 0.516 *	0.231	- 0.320	- 0.375

* $\alpha = 0.05$ ** $\alpha = 0.01$

表 8 不同造林模式的土壤信息系统主成分分析
Table 8 The principal component analysis of soil information system in different plantations

	第一主成分 1st Component	第二主成分 2nd Component	第三主成分 3rd Component	第四主成分 4th Component	第五主成分 5th Component
特征根 Eigenvalues	6.379	2.865	2.108	1.425	1.184
方差贡献率 Rate of variance	39.870	17.905	13.176	8.908	7.339
累积贡献率 Cumulative rate	39.870	57.775	70.951	79.860	87.258

$x_1 \sim x_4$ 分别代表脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶; $x_6 \sim x_{12}$ 分别代表全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾、有机质和 pH 值; $x_{13} \sim x_{17}$ 分别代表自生固氮菌、纤维素分解菌、真菌、放线菌和细菌。 $x_1 - x_4$ represent urease, polyphenol oxidase, peroxidase and hydrogen peroxidase, respectively. $x_6 - x_{12}$ represent total N, total P, available N, available P, available K, organic C and pH, respectively. $x_{13} - x_{17}$ represent nitrogen fixer, cellulose-decomposer, fungi, actinomyce and bacteria, respectively

3 讨 论

不同造林模式对土壤酶活性有一定的影响。各种造林模式增加了脲酶的活性,减小了多酚氧化酶活性,对过氧化物酶和过氧化氢酶影响较小。在土壤空间上,脲酶和过氧化物酶活性随土层的增加而减小,多酚氧化酶和过氧化氢酶的活性在土层之间变化不明显。土壤脲酶的活性顺序为白蜡>柳林>枣园>刺槐>桑园>桤柳;土壤多酚氧化酶活性顺序为刺槐>桤柳>柳林>桑园>枣园>白蜡。总的土壤酶的活性顺序为桤柳>柳林>桑园>刺槐>白蜡>枣园。脲酶与多酚氧化酶可以作为土壤质量的评价指标。

土壤酶活性与土壤微生物、土壤养分存在一定的相关性。其中脲酶与固氮菌、纤维素分解菌和细菌正相关,多酚氧化酶与固氮菌和细菌负相关。过氧化氢酶和过氧化物酶与土壤微生物关系不大。脲酶与全氮、有机质与速效氮正相关,而过氧化氢酶与

全氮、速效磷和有机质呈负相关。

本研究中造林年龄较小的几种模式在造林之前为农田地,造林初期曾有间作,而后疏于管理,特别是枣园造林 4 年,尚未郁闭,地上地下枯枝落叶较少,在黄河三角洲这个特殊的土壤环境下,土壤含盐量高,研究中发现一些研究结果与其它研究地点的结果有很大的不同。主要表现在如下几方面:

土壤酶活性与土壤养分、土壤微生物的关系较为复杂。在一般的自然土壤中,土壤有机质和各类酶活性均有较好的相关性(关松荫,1986;徐秋芳和姜培坤,2000;胡海波等,2001;邱莉萍等,2004),通常过氧化物酶与速效磷呈正相关,与速效氮呈极显著负相关,与全氮、全磷、速效钾、有机质相关性不大,过氧化氢酶与全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾、有机质呈负相关。姜培坤等(2000)认为过氧化氢酶和蔗糖酶可作为竹林退化的指标。本研究证实增加全氮和有机质的含量,可以提高土壤脲酶的活性。但是其它酶与土壤养分相关性不大,与上述学

者的研究结果出现不符的情况,其原因需在今后的研究中进一步考证。

酶活性在空间上差异较大。各种酶活性均高于对照土壤,但有的酶活性在不同的土层和造林模式中相差达到 1 个以上的数量级。本研究中各种造林模式中,植物的根系发育程度差异很大,根区范围内的植物根系量明显不同,耕作管理水平也不同,这些因素可能导致酶活性在空间上的较大差异。今后的研究中,测试分析根际土壤的酶活性对揭示造林模式对其影响,能获得更为理想的结果。

细菌是土壤中的主要微生物类群。细菌数量偏高,最大细菌数量达到 3.3×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ 土,高于大多数农田和森林土壤中的细菌数量。这主要是由细菌个体的生化特性所决定的。细菌个体小,繁殖方法简单,速度快,耐高温、耐酸碱、抗逆性强。有学者研究发现细菌的数量在某些土壤中很高,如祁连山山杨(*Populus davidiana*)灌木林的细菌数量达到 4.27×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ 土(郭银宝和许小英,2005),四川洪雅县退耕还林模式下土壤细菌在秋季也达到 1.86×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ 土(刘子雄等,2005)。研究中测试的土壤为根区,调查取样的时间为 8 月中旬,水热条件适宜,有利于细菌发育。但是细菌数量比率及在空间上的分布特征,到底是由于滨海盐分含量高所致还是其它原因引起的还有待于进一步研究。

土壤状况是影响林木生长的一个重要因素,而林木的生长水平反过来也影响着土壤状况。土壤酶活性是否可以作为评价土壤肥力的参数,仍存在争议(张猛和张建,2003)。有的学者不支持把土壤酶活性作为评价林地土壤肥力的参数,主要因其不能提供土壤生物状况的完整描述,且酶活性测定不能提供鉴定土壤总生物活性的恒值(孙秀山等,2001)。黄河三角洲垦利县境内属于盐碱地,土壤盐分影响了土壤养分、土壤水分的有效性,导致土壤酶、土壤微生物和土壤养分之间的关系较为复杂。本研究中关于多酚氧化酶的活性变化,以及土壤酶活性与土壤微生物、土壤养分的相关关系与许多文献的结果存在不一致的情况,说明在盐碱地条件下它们之间的关系尚待进一步深入研究。

参 考 文 献

Gallo M, Amonette R, Lauber C, Sinsabaugh RL, Zak DR (2004). Microbial community structure and oxidative enzyme activity in nitrogen-amended north temperate forest soils. *Microbial Ecology*, 48, 218 – 229.

Guan SY (关松荫) (1986). *Soil Enzyme and Its Study Methods*

(土壤酶及其研究方法). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)

Guo YB (郭银宝), Xu XY (许小英) (2005). 3 kinds of soil microbe community quantity distribution in differ vegetable soil. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry* (青海农林科技), (1), 16 – 18. (in Chinese with English abstract)

Hu HB (胡海波), Zhang JC (张金池), Gao ZH (高智慧), Chen SW (陈顺伟), Zang TL (臧廷亮) (2001). Study on quantitative distribution of soil microorganism and relationship with enzyme activity and physical, chemical property of shelter-forest in rocky coastal area. *Forest Research* (林业科学研究), 15(1), 88 – 95. (in Chinese with English abstract)

Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, Turnau K, Barea JM (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37, 1 – 16.

Jiang PK (姜培坤), Jiang QY (蒋秋怡), Dong LG (董林根), Qian XB (钱新标), Jin RG (金荣根) (1995). Comparison of biochemical properties of rhizosphere soil between Chinese fir and Chinese sasafra. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 12, 1 – 5. (in Chinese with English abstract)

Jiang PK (姜培坤), Yu YW (俞益武), Zhang LQ (张立钦), Xu XW (许小婉) (2000). Study on enzyme activities of soil under *Phyllostachys precox* f. *prevelnalis*. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 17, 132 – 136. (in Chinese with English abstract)

Kerstin M, Egbert M (2003). Response of enzyme activities to nitrogen in forest floors of different C-N ratios. *Biology and Fertility of Soils*, 38, 102 – 109.

Li YM (李延茂), Hu JC (胡江春), Wang SL (汪思龙), Wang SJ (王书锦) (2004). Function and application of soil microorganisms in forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 1943 – 1946. (in Chinese with English abstract)

Lin J (林静) (1999). Study on the relationship between soil enzyme activities and soil fertilities in different red soil ecotypes. *Fujian Agricultural Science and Technology* (福建农业科技), (Suppl.), 23 – 24. (in Chinese with English abstract)

Liu ZX (刘子雄), Zhu TH (朱天辉), Zhang J (张健) (2005). Analysis on communities of soil microbes under forest rehabilitation. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition) (南京林业大学学报(自然科学版)), 29(4), 45 – 48. (in Chinese with English abstract)

Long J (龙健), Huang CY (黄昌勇), Teng Y (滕应), Yao HY (姚槐应) (2004). The microbial biomass and enzyme activities of reclaimed mine soil in the heavy metal pollution area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 12(3), 146 – 148. (in Chinese with English abstract)

Nunan N, Wu K, Young IM, Crawford JW, Ritz K (2002). *In situ* spatial patterns of soil bacterial populations, mapped at mul-

multiple scales, in an arable soil. *Microbial Ecology*, 44, 296 – 305.

Qiu LP (邱莉萍), Liu J (刘俊), Wang YQ (王义权), He WX (和文祥) (2004). Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility. *Plant Nutrient and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 10, 277 – 280. (in Chinese with English abstract)

Seemen H, Laitamm H, Pikk J (1998). The influence of nutritional conditions on forest-soil microflora. *Baltic Forestry*, 4, 2 – 7.

Sun XS (孙秀山), Feng HS (封海胜), Wan SB (万书波), Zuo XQ (左学青) (2001). Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 27, 617 – 621. (in Chinese with English abstract)

Wang CQ (王成秋), Wang SL (王树良), Yang JH (杨剑虹), Wei CF (魏朝富), Qu M (屈明), Xie DT (谢德体) (1999). Study on the soil enzyme activity and its affecting factors in *Citrus* orchard with purple Soil. *South China Fruit* (中国南方果树), 28(5), 7 – 10. (in Chinese)

Xu QF (徐秋芳), Jiang PK (姜培坤) (2000). Effects of fertilizing on biological properties of root region soil under *Phyllostachys pubescens* forest. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 17, 364 – 368. (in Chinese with English abstract)

Zhang M (张猛), Zhang J (张健) (2003). Advance in research on microbe and enzyme activity in forest soil. *Journal of Sichuan Agricultural University* (四川农业大学学报), 21, 347 – 351. (in Chinese with English abstract)

Zhao LS (赵林森), Wang JL (王九龄) (1995). Research on relations between growth effect and soil enzyme activities and soil nutrient factors in mixed polar and black locust plantations. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 17(4), 1 – 7. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：欧阳 华 责任编辑：刘丽娟