

施肥对 I-107 杨树人工林土壤根际效应的影响

孔令刚¹, 刘福德¹, 王华田^{1†}, 姜岳忠², 董玉峰¹, 焦绪娟¹

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

摘要 通过研究施用有机肥、化学肥料和生物菌肥对 I-107 杨树人工林根际和非根际土壤微生物数量和土壤酶活性的影响, 分析土壤酶活性与土壤微生物数量的关系。研究结果表明: 不同种类肥料使用后 3 个月, 林地根际土壤和非根际土壤微生物总量均有显著增长, 其中有机肥处理土壤微生物数量增长幅度最大, 菌肥处理最小。施肥处理显著提高土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性, 但尿素和菌肥处理土壤多酚氧化酶活性降低。施用有机肥处理对土壤微生物和土壤酶根际效应值影响最明显, 菌肥处理影响最小。尿素处理土壤 pH 值高于对照, 有机肥和菌肥处理小于对照, 但不同处理间土壤 pH 值的根际效应值差异性不明显。土壤微生物数量与土壤酶活性之间存在一定的相关性, 其中: 土壤脲酶活性与好气性纤维素分解菌之间、土壤碱性磷酸酶活性与氨化细菌、真菌、放线菌、亚硝酸细菌之间, 土壤过氧化氢酶与好气性纤维素分解菌、真菌、放线菌之间相关性显著。

关键词 杨树人工林; 土壤微生物; 土壤酶; 根际效应

Effect of fertilization on soil microflora and enzyme rhizosphere effect in poplar forestland

Kong Linggang¹, Liu Fude¹, Wang Huatian¹, Jiang Yuezhong², Dong Yufeng¹, Jiao Xujuan¹

(1. Forestry College of Shandong Agricultural University, 271018, Taian, Shandong; 2. Shandong Academy of Forestry, 251000, Jinan: China)

Abstract Effect of fertilization on soil microflora mass and soil enzyme activity between rhizosphere and non-rhizosphere space in I-107 poplar forestland was studied, and the correlation between soil enzyme activity and soil microflora was analyzed. Results showed that, fertilization treatment increased both rhizosphere and non-rhizosphere total soil microflora amount significantly, compared with CK. Amount of soil microflora in organic fertilizer treatment was more than urea treatment and biological fungus fertilizer treatment. Activity of soil urease, alkaline phosphatase, catalase, peroxidase all increased significantly in every fertilization treatment, but activity of polyphenol oxidase in urea and biological fungus fertilizer treatment decreased. Soil enzyme and microflora rhizosphere effect of urea fertilizer treatment and biological fungus fertilizer treatment was less than organic fertilizer treatment. Soil pH value of urea fertilizer treatment was more than CK, and that of biological fungus and organic fertilizer treatment was less than CK. Rhizosphere effect value of soil pH in different treatment had no difference. Correlation between soil urease activity and cellulose decomposing bacterium, soil alkaline phosphatase activity and ammonificator, fungi, actinomyces, nitrosifying bacteria, soil catalase and cellulose decomposing bacterium, fungi, actinomyces was significant at 0.05 levels.

Key words poplar plantation; soil microflora; soil enzyme; rhizosphere effect

杨树是我国主要速生丰产树种之一, 是平原和湖区重要纸浆材造林树种和用材树种。随着杨树广

泛运用和用材林地的减少, 连作成为杨树人工林经营的必然措施。由于树种单一, 兼之该树种特有的

收稿日期: 2006-04-08 修回日期: 2006-08-05

第一作者简介: 孔令刚(1980—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 人工林生态。E-mail: klg2000_2000@163.com

† 责任作者简介: 王华田(1960—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生理生态。E-mail: wanght@sdau.edu.cn

生物学特性,致使种植该树种地区地力衰退现象十分严重。有关土壤微生物区系与人工林地力衰退关系的研究,是学者们十分重视的问题。多代连栽的杉木、杨树人工林土壤微生物数量都呈逐渐降低趋势^[1-2],但人工林土壤微生物的研究大都侧重于数量分布研究,而林木根系代谢活动较敏感区域—根际微生物区系的变化则报道甚少。在自然生态系统中,植物根系一直和土壤紧密接触,形成了变异性大的土壤微区,此微区真菌、细菌、放线菌等极其活跃,使根际微生物的数量远远超过原土体^[3]。土壤微生物是土壤中最活跃的部分,对林木根部营养有着重要意义,对调节化感物质化感效应具有关键作用^[4]。土壤酶能催化土壤中复杂的有机物质,转化为简单的无机化合物,供植物再利用,并且参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环^[5]。植物根系和土壤微生物是土壤酶的2个主要来源,植物根际环境和土壤微生物区系发生变化必然影响土壤酶活性。植物对土壤微生物、土壤酶的影响,主要是通过根系而起作用的,这种影响即根际效应,可以用根际与非根际土壤微生物数量、土壤酶活性的根际效应值表示^[6]。

施肥是杨树人工林经营中有效的地力维持技术,不同施肥类型对杨树林地土壤微生物区系影响以及所引起土壤酶活性的变化,对改善土壤肥力及指导维护杨树人工林持续发展具有重要意义。笔者通过研究杨树人工林不同施肥类型林地根际和非根际土壤微生物变化,揭示施肥对林地土壤微生物根际效应的影响,从而为防止杨树人工林地力衰退、改良土壤性质、制订合理的森林经营措施提供可靠的科学参考。

1 研究区概况

试验地位于宁阳县高桥林场,北纬 35°53',东经 116°50',海拔 78.9 m,属大陆性暖温带大陆性季风气候。年平均气温 13.4℃,极端最高气温 40.7℃,极端最低气温 -19℃,大于 0℃的平均积温为 5 008.8℃;大于 10℃的年平均积温 4 493.3℃。年总辐射量 527.12 kJ·cm⁻²。年均日照时间 2 679.3 h,无霜期 199 d。年降水量 689.6 mm。

试验地位于河滩中部,土壤为粗沙质河潮土,颗粒较粗,保肥保水性差,地下水位 5~8 m。试验地前茬为 214 杨,2002 年采伐,2003 年 3 月栽植 I-107 杨。造林后连续间作 2 年,间作物为花生和小麦,林地土壤管理水平中等。

试验材料为 3 年生 I-107 杨 (*Populus euramerica* 'Neva') 人工林,株行距 3 m × 4 m,南北行向。林分生长均匀,平均高 7.0 m,平均胸径 8.3 cm,平均冠幅 2.4 m。

2 研究方法

试验设置尿素(每株 0.8 kg)、有机肥(每株风干猪圈肥 5 kg)、生物菌肥(北京牧禾生物菌肥制剂,每株 24 g)3 个处理,以不施肥为对照。随机区组设计,15 株小区,6 次重复,小区之间设置 2 行保护行。以树干基部为中心,半径 30 cm、挖宽 20 cm、深 40 cm 的环状沟:有机肥直接埋入;尿素拌土后埋入;生物菌肥制剂兑水 5 kg 后浇灌;封穴后灌溉。2005 年 6 月底施肥。

土壤取样:2005 年 10 月初采土样。在小区内机械抽取 6 株样木,距树干基部 0.5 m 呈梅花形分布挖取根系周围 0~20 cm、20~40 cm 土样,分层充分混合后作为非根际土壤样品。同时采集各层直径小于 0.2~0.5 cm 细根上粘附的土壤,分层充分混合作为根际土壤。供微生物分析的鲜土样装入已消毒过的密封塑料袋,带入实验室。用于土壤酶活性测定的土壤经风干后,过 1 mm 筛。

样品分析:土壤脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶活性采用比色法测定;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法(2)测定^[5]。真菌采用平板法,PDA 培养基;放线菌采用平板法,改良高氏 1 号培养基^[7]。氯化细菌采用平板培养法,牛肉汁蛋白胨琼脂培养基;亚硝酸细菌采用稀释法,改良的斯蒂芬逊;硝酸细菌采用稀释法,培养基 1;好气性自生固氮菌采用平板法,改良的阿须贝(Ashby)无氮琼脂培养基;好气性纤维素分解菌采用平板法,赫奇氏逊培养基;芳香族化合物分解菌采用稀释法,培养基 2;磷细菌采用稀释法,磷脂培养基^[8]。土壤 pH 值测定采用便携式 pH 计,水土质量比 5:1。

3 结果与分析

3.1 施肥对根际和非根际微生物区系的影响

施肥对林地土壤微生物数量和土壤微生物根际效应有着明显的影响。不同施肥类型对林地土壤微生物和土壤微生物根际效应的影响也各不相同。从表 1 可以看出:施尿素、有机肥和菌肥林地与对照相比无论在根际还是非根际均提高了土壤微生物总量,根际土壤依次增长 35.5%、55.0%、52.0%,非根际土壤依次增长 33.8%、221.3%、59.6%,经方差分

表 1 施肥对林地土壤微生物的影响
Tab.1 Effect of fertilization on soil microflora

微生物类群	对照		尿素		有机肥		菌肥	
	S	R	S	R	S	R	S	R
好气性自生固氮菌/(10^4 个· g^{-1})	2.36	4.49	5.44	4.74	4.75	4.62	26.89	56.34
氨化细菌/(10^4 个· g^{-1})	55.10	95.40	36.40	90.10	144.18	116.20	75.72	106.13
好气性纤维素分解菌/(10^4 个· g^{-1})	0.39	0.47	0.87	0.67	0.92	0.59	0.21	0.45
真菌/(10^4 个· g^{-1})	9.15	11.75	12.87	19.36	26.10	17.22	13.82	16.28
放线菌/(10^4 个· g^{-1})	33.42	40.16	78.56	89.83	144.71	96.99	37.80	45.25
磷细菌/(10^4 个· g^{-1})	0.94	1.16	1.45	3.16	4.96	2.13	7.33	8.73
芳香族化合物分解菌/(个· g^{-1})	26	149	48	405	42	199	100	162
亚硝酸细菌/(个· g^{-1})	30	31	42	95	216	199	42	43
硝酸细菌/(个· g^{-1})	89	209	41	158	199	209	74	206
微生物总量/(10^4 个· g^{-1})	101.37	153.47	135.60	207.92	325.67	237.81	161.79	233.22

注:S—非根际,R—根际;下表相同。

析检验,各施肥处理与对照林地之间差异性显著。说明这 3 种类型施肥有利于土壤微生物数量的提高。与对照林地相比,在根际和非根际土壤中,施尿素、有机肥、菌肥处理林地提高了土壤好气性自生固氮菌、真菌、放线菌、磷细菌、芳香族化合物分解菌、亚硝酸细菌的数量;施尿素和有机肥处理林地提高了土壤好气性纤维素分解菌;施有机肥和菌肥处理林地提高了土壤氨化细菌;施有机肥处理林地提高了硝酸细菌的数量。施尿素和菌肥处理对某些类型的土壤微生物也存在着负效应,施入尿素降低了硝酸细菌、氨化细菌数量,施入菌肥林地降低了硝酸细菌、好气性纤维素分解菌的数量。可以看出,有机肥对林地土壤微生物数量影响优于尿素和菌肥,其原因可能是有机肥富含丰富的有机质,带入了大量可被微生物分解利用的碳源,为微生物的繁殖提供了物质基础,赵廷宁^[9]曾指出土壤有机质是土壤微生物生命活动营养的重要来源。

植物根系对土壤微生物繁衍和生存有着重要的影响,其原因可能是杨树在生长过程中根系分泌的有机物质多,其特殊的根际环境利于土壤微生物繁衍和生存^[10]。从图 1 可以看出,对照林地的各微生物的根际效应值均大于 1,这正说明了杨树根系对土壤微生物的影响。经施肥处理后,不同施肥林地土壤微生物根际效应发生了变化。施尿素处理林地土壤好气性自生固氮菌、好气性纤维素分解菌的根际效应值小于 1,而土壤氨化细菌、磷细菌、亚硝酸细菌、硝酸细菌的根际效应值则明显高于对照。其原因可能是受土壤有效氮影响较大的土壤微生物,

施入尿素后可能会降低这些土壤微生物的根际效应值,而对根际环境依赖性高,根际效应强的土壤微生物,施入尿素后可能会促进土壤微生物的根际效应。施有机肥处理林地土壤好气性自生固氮菌、氨化细菌、好气性纤维素分解菌、真菌、放线菌、磷细菌、亚硝酸细菌的根际效应值均小于 1,而土壤硝酸细菌的根际效应值大于 1,但小于对照,可见施入有机肥后降低了各类土壤微生物的根际效应。其原因可能是施入有机肥后有利地改善了林地土壤环境的有机物质和氨基酸含量,使土壤环境更适合这些微生物生存和繁衍,而降低了根际环境对微生物的影响;施入菌肥后各微生物区系的根际效应值均大于 1,说明单纯向土壤中施加微生物对根际效应影响较小,大量微生物还是趋向于根际环境。

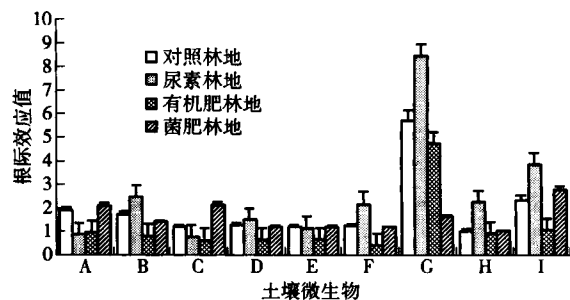


图 1 不同施肥林地土壤微生物根际效应值
Fig.1 Rhizosphere effect value in different fertilization treatment

根据施肥林地土壤微生物根际效应的大小,采用系统聚类的类平均法将以上土壤微生物分为 4 类

(图 2):第 1 类好气性自生固氮菌、好气性纤维素分解菌;第 2 类氨化细菌、真菌、放线菌、磷细菌、亚硝酸细菌;第 3 类硝酸细菌;第 4 类芳香族化合物分解菌。其中:第 4 类细菌的根际效应最强,施肥对根际效应影响小;其次是第 3 类硝酸细菌;再次是第 2 类细菌;受根际效应影响最小的是第 1 类。

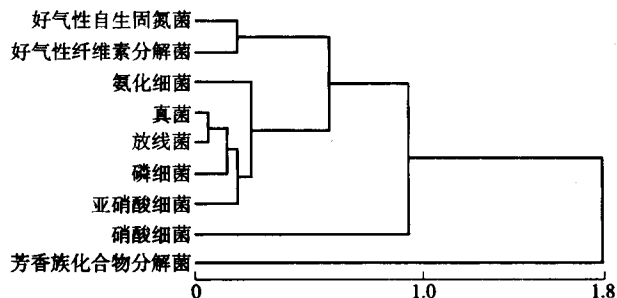


图 2 施肥林地土壤微生物系统聚类树形图

Fig.2 System cluster dendrogram of fertilization forestland

3.2 施肥对根际和非根际土壤酶及土壤 pH 值的影响

不同施肥对土壤酶的影响是不同的,从表 2 可以看出,施肥林地土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性无论在根际土壤还是在非根际

土壤均大于对照林地,土壤多酚氧化酶在尿素和菌肥处理林地活性降低,而在有机肥处理林地活性增强。经方差检验,各施肥处理与对照间在 0.05 水平上差异性显著。其中施尿素林地土壤脲酶活性显著高于对照林地、有机肥林地、菌肥林地。说明尿素在一定程度上有利于脲酶活性的提高。侯彦林等^[11]的研究发现,在肥土质量比小于 1:200 时,脲酶活性显著提高。土壤 pH 值在不同处理间根际土壤均小于非根际土壤,差异性显著,与落叶松人工林结果一致^[12]。尿素处理与对照相比土壤 pH 值增大,而有机肥、菌肥处理土壤 pH 值降低,其中有机肥降低幅度最明显。经方差检验,各施肥处理与对照间在 0.05 水平上差异性显著。

对照林地土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性的根际效应值大于 1,杨树根系对其影响为正效应,多酚氧化酶活性根际效应值小于 1,杨树根系对其影响为负效应,这与杉木土壤酶根际效应一致^[13](图 3)。经过施肥后,由于施肥种类不同,其根际效应值也不尽相同。尿素处理林地土壤脲酶、过氧化氢酶的根际效应值小于 1,土壤磷酸酶、过氧化物酶的根际效应值大于 1,但小于对照。

表 2 施肥对土壤酶及土壤 pH 值的影响

Tab.2 Effect of fertilization on soil enzyme and pH

土壤酶	对照		尿素		有机肥		菌肥	
	S	R	S	R	S	R	S	R
脲酶	0.109	0.168	0.278	0.225	0.217	0.201	0.154	0.209
碱性磷酸酶	16.94	24.30	26.76	29.03	39.03	29.85	28.57	30.03
过氧化氢酶	0.043	0.054	0.116	0.074	0.150	0.088	0.060	0.056
过氧化物酶	0.342	0.458	0.504	0.570	0.524	0.501	0.522	0.593
多酚氧化酶	0.329	0.268	0.028	0.039	0.372	0.361	0.015	0.024
土壤 pH	7.380	6.900	7.490	7.150	6.920	6.430	7.070	6.590

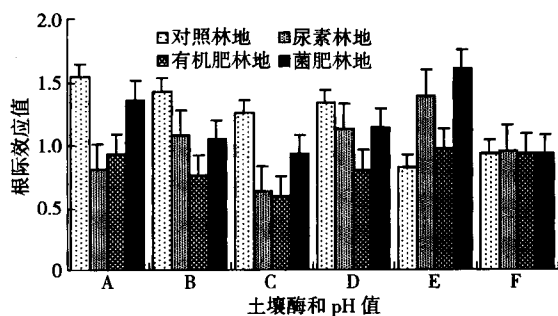
注:土壤酶活性表示:脲酶— $\text{NH}_2\text{-N}$ (mg/g 土样);碱性磷酸酶— P2O5 (mg/100 g 土样);过氧化氢酶— 0.1NKMnO_4 (mL/g 土样);过氧化物酶—紫色没食子素(mg/g 土样);多酚氧化酶—紫色没食子素(mg/g 土样)。

有机肥处理林地脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶的根际效应值小于 1。菌肥处理林地土壤脲酶、磷酸酶、过氧化物酶、多酚氧化酶的根际效应值大于 1,土壤过氧化氢酶的根际效应值小于 1。可以看出,有机肥处理林地对土壤酶的根际效应影响比较大,根际效应值均小于 1,尿素处理次之,菌肥处理对土壤酶根际影响最小,根际效应值均大于 1。各处理土壤 pH 值的根际效应值均小于 1,土壤 pH 值的根际效应为负效应,尿素处理大于对照林地,有机肥和菌肥处理小于对照,但各处

理与对照间差异很小,均为 1%。这说明施肥对土壤 pH 值的根际效应影响较小。

3.3 土壤酶与土壤微生物的相关性

土壤酶和土壤微生物存在一定的相关性(表 3)。土壤脲酶和磷酸酶活性与各微生物区系均呈正相关,并且土壤脲酶与好气性纤维素分解菌的相关性达到显著水平,土壤碱性磷酸酶与氨化细菌、真菌、放线菌、亚硝酸细菌的相关性达到显著水平。土壤过氧化氢酶与氨化细菌、好气性纤维素分解菌、真菌、放线菌、亚硝酸细菌呈正相关,并且与好气性纤



A.脲酶; B.碱性磷酸酶; B.过氧化氢酶; D.过氧化物酶;
E.多酚氧化酶; F.土壤 pH。

图 3 施肥林地土壤酶和 pH 值的根际效应值

Fig.3 Rhizosphere effect value of soil enzyme
and pH in fertilization forestland

纤维素分解菌、真菌、放线菌的相关性显著,而与好气性自生固氮菌、磷细菌、芳香族化合物分解菌呈负相关,这与 I-107 杨苗圃地的土壤酶和土壤微生物的相关性研究基本一致^[14]。过氧化物酶与好气性自生固氮菌、真菌、磷细菌、芳香族化合物分解菌呈正相

关,与氨化细菌、好气性纤维素分解菌、放线菌、亚硝酸细菌呈负相关。多酚氧化酶与氨化细菌、好气性纤维素分解菌、真菌、放线菌、亚硝酸细菌呈正相关,与好气性自生固氮菌、磷细菌、芳香族化合物分解菌呈负相关。由以上分析可以看出,土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性受土壤微生物数量的影响比较大,而土壤过氧化物酶、多酚氧化酶活性受土壤微生物的影响相对较小。土壤 pH 值与土壤微生物和土壤酶之间也存在一定的相关性:土壤 pH 值与各种土壤酶活性均呈负相关,与氨化细菌、好气性纤维素分解菌、真菌、放线菌、芳香族化合物分解菌和亚硝酸细菌呈负相关,且与芳香族化合物分解菌和亚硝酸细菌的相关性达到显著性水平,与酸细菌也呈负相关,且与芳香族化合物分解菌和亚硝酸细菌的相关性达到显著性水平,而与好气性自生固氮菌和磷细菌呈正相关。可以看出,土壤 pH 值对土壤酶和土壤微生物影响较大,但与有机质相比,土壤 pH 值对土壤酶活性的影响小于有机质。

表 3 土壤酶与土壤微生物之间的相关性

Tab.3 Correlation between the soil enzymes and the soil microbes

项 目	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	过氧化物酶	多酚氧化酶	pH 值
好气性自生固氮菌	0.011	0.169	-0.324	0.618	-0.551	0.387
氨化细菌	0.470	0.744 *	0.357	-0.089	0.461	-0.472
好气性纤维素分解菌	0.774 *	0.529	0.878 **	-0.166	0.190	-0.510
真菌	0.460	0.929 **	0.732 *	0.015	0.176	-0.470
放线菌	0.575	0.787 *	0.904 **	-0.218	0.357	-0.598
磷细菌	0.040	0.508	-0.036	0.508	-0.474	0.348
芳香族化合物分解菌	0.226	0.124	-0.223	0.622	-0.309	-0.643 *
亚硝酸细菌	0.277	0.723 *	0.700	-0.303	0.574	-0.638 *
硝酸细菌	0.070	0.438	0.047	0.041	0.437	-0.599
速效氮	0.787 *	0.423	0.043	-0.283	-0.719 *	0.053
有机质	0.437	0.564	0.144	0.644	0.882 **	0.553
土壤 pH 值	-0.460	-0.359	-0.324	-0.127	-0.301	1.000

注: * 相关性在 0.05 水平上显著, ** 表示相关性在 0.01 水平上显著。

施肥对土壤酶的影响从土壤酶的活性与土壤微生物相关性可以看出:一是通过养分含量对土壤酶活性产生作用,速效氮对土壤脲酶产生积极作用,对多酚氧化酶产生负作用,而有机肥对多酚氧化酶产生积极作用;二是通过施肥后提高了土壤微生物的数量,对土壤酶活性产生影响,土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、多酚氧化酶活性均受土壤微生物的影响;三是通过施肥后影响了土壤 pH 值而对土壤酶活性产生影响。由此可见,施肥对土壤微

生物产生影响,而土壤微生物的变化及土壤 pH 值也会对土壤酶产生重要的影响。

4 结论与讨论

施肥不仅影响土壤微生物数量、土壤酶活性和土壤 pH 值,而且也会影响土壤微生物和土壤酶的根际效应。在不同的施肥处理中,施有机肥处理对土壤微生物数量、土壤酶活性和土壤 pH 值的影响最强,菌肥处理最弱。施有机肥处理土壤微生物和

土壤酶的根际效应值除土壤硝酸细菌外均小于 1, 降低了杨树的根际效应。菌肥处理对土壤微生物和土壤酶根际效应值的影响较有机肥和尿素处理相对较小, 除土壤过氧化氢酶外, 均大于 1, 在一定程度上维持和提高了杨树的根际效应。尿素处理对土壤微生物和土壤酶根际效应值影响与有机肥和菌肥处理相比正、负效应明显。由此看出, 在提高土壤微生物和土壤酶根际效应方面与肥料的肥效性有关, 所以, 在杨树人工林施肥过程中注重有机肥与化学肥料, 化学肥料与生物菌肥的混合使用。

研究根际微区土壤微生物及土壤微生物的根际效应, 对进一步揭示人工林的地力衰退实质和加强地力维持技术作用有着重要的意义。杨树根系吸收养分与土壤微生物有着密切的关系, 布雷迪^[15]曾研究指出, 营养元素的溶解度和有效性, 并不是植物只被动地吸收所出现的土壤现象, 营养元素的溶解度深受根系分泌物和根系附近微生物活动的影响。Kuiters^[16], Patrick^[17]和 Patterson^[18]研究指出: 植物自身毒素的积累主要是酚酸类物质, 不仅对植物生长有害, 而且对土壤微生物活动也有一定的影响, 但同时土壤微生物在酚酸类物质的降解过程中起着重要的作用。人工林土壤微生物的根际效应反映出了土壤微生物在根际的变化情况, 其变化原因一方面受根系分泌物的影响而改变土壤微生物的根际效应, 另一方面受土壤环境的变化而改变土壤微生物的根际效应。所以, 在研究人工林地力衰退问题中, 必须重视和研究根际土壤微生物, 根际土壤微生物状况有可能是反映人工林地力衰退的关键因素。

5 参考文献

- [1] 杜国坚, 张庆荣, 洪利兴, 等. 杉木连栽林地土壤微生物区系及其生化特性和理化性质的研究. 浙江林业科技, 1995(5): 14-19
- [2] 刘福德, 姜岳忠, 王华田, 等. 杨树人工林连作效应的研究. 水土保持学报, 2005, 19(2): 102-105
- [3] 张福锁, 龚元石, 李晓林. 土壤与植物营养研究新动态: 第 3 卷. 北京: 中国农业出版社, 1995
- [4] Jeffrey D, John T. Allelochemicals of *Polygonella myriophylla*: Chemistry and soil degradation. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30(5): 1067-1082
- [5] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986
- [6] 麦克拉伦. 土壤生物化学. 闵九康, 译. 北京: 农业出版社, 1984
- [7] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985
- [8] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986
- [9] 赵廷宁, 曹子龙, 郑翠玲, 等. 平行高立式沙障对严重沙化草地土壤有机质含量及颗粒组成的影响. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 73-77
- [10] 姜培坤, 蒋秋怡, 董林根, 等. 杉木樟树根际土壤生化特性比较分析. 浙江林学院学报, 1995, 12(1): 1-5
- [11] 侯彦林, 王曙光, 郭伟. 尿素施肥量对土壤微生物和酶活性的影响. 土壤通报, 2004, 35(3): 303-306
- [12] 陈立新. 落叶松人工林土壤酸度变化与无机磷形态的关系. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 108-114
- [13] 陈竑竣, 李传涵. 杉木根际与非根际土壤酶活性比较. 林业科学, 1994, 30(2): 170-175
- [14] 刘福德, 姜岳忠, 刘颜泉, 等. 连作 I-107 杨树无性系苗圃地的土壤酶活性特征. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 119-124
- [15] 布雷迪. 土壤的本质与性状. 南京农学院土化系, 译. 北京: 科学出版社, 1982
- [16] Kuiters A T. Leaching of phenolic compounds from leaf and needle litter of several deciduous and coniferous trees. Soil Boil Biochemistry, 1985, 18(5): 475-480
- [17] Patrick Z A. Phytotoxic substance associated with the decomposition in soil plant residues. Soil Science, 1971, 111(1): 13-19
- [18] Patterson D T. Effects of allelopathic chemicals on growth and physiological responses of soybean (*Glycine max*). Weed Science, 1981, 29(1): 53-58