

辽西北风沙区典型人工防护林土壤微生物群落功能特征

张岩^{1,2} 邓娇娇^{1,2} 朱文旭^{1,2} 殷有^{1,2} 魏亚伟^{1,2} 周永斌^{1,2*}

(¹沈阳农业大学林学院, 沈阳 110161; ²中国森林生态系统监测网络辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站, 辽宁昌图 112500)

摘要 运用 Biolog-Eco 技术对辽西北风沙区樟子松人工林、油松人工林、杨树人工林的土壤微生物群落功能特征进行研究,同时测定土壤化学特性,探究该地区不同树种人工防护林土壤微生物群落的代谢活性和功能特征及其与土壤化学特性的相关性。结果表明,与樟子松和油松人工林相比,杨树人工林能显著提高土壤 pH、土壤可溶性有机碳和速效磷含量,降低土壤 C/N。该地区不同人工防护林的土壤微生物群落代谢活性差异显著,对碳源的利用能力(AWCD)依次为杨树人工林>樟子松人工林>油松人工林,杨树人工林土壤微生物的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数分别为 3.27、0.96 和 8.13,均显著高于樟子松和油松人工林($P<0.05$)。不同人工防护林土壤微生物对六大碳源的利用存在差异,其中杨树人工林对六大碳源的利用率均显著高于樟子松和油松人工林($P<0.05$)。主成分分析和聚类分析表明,针叶树种(油松和樟子松)和阔叶树种(杨树)人工林下的土壤微生物分属两个不同的功能类群,起分异作用的碳源主要包括丙酮酸甲酯、i-赤藓糖醇、2-羟基苯甲酸。土壤 pH、可溶性有机碳、C/N、速效磷是影响微生物群落 AWCD 值、Shannon 指数、Simpson 指数、McIntosh 指数的主要因素。综上所述,该地区杨树人工林土壤微生物群落的代谢活性和功能多样性都优于油松人工林和樟子松人工林,应保持杨树人工林种植。

关键词 辽西北风沙区; 人工林; 微生物群落功能多样性; 主成分分析

Functional characteristics of soil microbial community of the typical artificial shelter forests in the windy-sandy region of northwest Liaoning Province, China. ZHANG Yan^{1,2}, DENG Jiao-jiao^{1,2}, ZHU Wen-xu^{1,2}, YIN You^{1,2}, WEI Ya-wei^{1,2}, ZHOU Yong-bin^{1,2*} (¹College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; ²Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem, Chinese Forest Ecosystem Research Network, Changtu 112500, Liaoning, China).

Abstract: We analyzed functional characteristics of soil microbial community in three typical artificial shelter forests, including *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Pinus tabulaeformis* and *Populus × canadensis* in the windy-sandy region of northwest Liaoning Province, China, by Biolog-Eco method. Soil chemical properties were measured to explore their correlations with the metabolic activity and functional characteristics of soil microbial community. The results showed that compared with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabulaeformis*, *Populus × canadensis* had higher soil pH, dissolved organic C and available P concentrations, and lower C/N. There were significant differences in soil microbial community metabolic activities among different forests. The capacity of C source utilization by soil microbial communities (AWCD) was in the order of *Populus × canadensis* forest > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest > *Pinus tabulaeformis* forest. The Shannon diversity index, Simpson diversity index, and McIntosh diversity index of soil microbial com-

林业公益行业科研专项(201404303-05)、国家科技支撑计划(2015BAD07B30103)、辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2015047)和辽宁省宜林地营林决策平台构建及示范项目(201304216)资助。

收稿日期: 2018-09-21 接受日期: 2019-03-19

* 通讯作者 E-mail: yzyb@163.com

munity in the *Populus × canadensis* forest were 3.27, 0.96, and 8.13, respectively, and significantly higher than those of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabuliformis* forests ($P < 0.05$). There were significant differences in the utilization of the six types of carbon sources by soil microorganisms among different forests. The utilization rates of six carbon sources of *Populus × canadensis* forest were significantly higher than those of the other two forests ($P < 0.05$). Results of principal component analysis and cluster analysis showed that soil microbial communities could be divided into two different functional groups, coniferous forests (*Pinus*) and broadleaf forest (*Populus*), characterized by different principal carbon sources including pyruvic acid methyl ester, i-erythritol, and 2-hydroxybenzoic acid. Soil pH, DOC, C/N and available P were the main factors affecting AWCD value, Shannon index, Simpson index and McIntosh index. In conclusion, the metabolic activities and functional diversity of soil microbial community in *Populus × canadensis* plantation were better than those in *P. tabuliformis* and *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations. The plantation of *Populus × canadensis* is suitable for this region.

Key words: windy-sandy region of northwest Liaoning Province; plantation forest; microbial community functional diversity; principal component analysis.

荒漠化一直是世界干旱半干旱地区的一个重要生态问题(Li *et al.*, 2004; Becerril-Piña *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2015)。中国干旱、半干旱地区面积广阔,约占国土面积的 52.5%(周维博, 2003),大气干燥,风沙活动频繁,土地质量退化严重(彭茹燕, 2004)。风沙区生态环境脆弱(缙倩倩等, 2013),严重制约了经济的发展。自 20 世纪 50 年代以来,中国一直在实施大规模的沙漠化治理工程(Zou *et al.*, 2002; Piao *et al.*, 2005; Qadir *et al.*, 2010),进行大面积的人工造林(Nunez-Mir *et al.*, 2015),1978 年以来,中国启动了世界上最大的造林项目“三北防护林建设计划”(Li *et al.*, 2012)。防护林体系的构建是改善沙区生态环境的有效措施,不仅有助于减轻风沙危害(王振伟, 2013),防止土壤退化,而且防护林种植有助于改良土壤,增加有机质质量分数(吴祥云等, 2002),提高土壤微生物活性(周智彬等, 2002)。

土壤微生物是土壤生物地球化学循环中最核心的组成部分,对生态系统有决定性的影响(王清奎等, 2005)。土壤微生物对土壤中物质循环起重要的调节作用(李香真等, 2002),是控制生态系统中 C、N 和其他养分流的关键(张乃莉等, 2007)。同时,土壤微生物也是植物生长养分的一个重要来源(王国兵等, 2016),是土壤养分的储备库,能够参与调控植物的生长,是土壤生态系统中极为重要和最为活跃的部分(铁展畅等, 2014)。相比土壤理化性质,土壤微生物更能对土壤质量的变化做出灵敏迅速的反映,是土壤生态系统变化的预警及敏感指标(任天志等, 2000),而土壤微生物的活性是表征土

壤微生物功能的常用指标(Jenkinson *et al.*, 2004)。已有的研究表明,不同人工林会促使土壤微生物群落组成及多样性发生变化(Ren *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2017; Gunina *et al.*, 2017)。

辽西北风沙区位于科尔沁沙地南缘,是典型的生态脆弱区,该区气候干燥、大风频繁、水资源不足、植被覆盖率低,是三北防护林体系建设工程的重点治理区域。近几十年来,该地区营造了大面积防护林,在生态修复中起着重要的作用。目前,针对辽西北地区防护林的研究主要集中在不同防护林土壤 C、N、P 垂直分布特征(周永斌等, 2016),土壤水稳性团聚体质量分数和有机质质量分数方面(王凯等, 2014),而有关该地区土壤微生物的研究尚处于稀缺状态,有关不同人工防护林土壤微生物群落功能特征尚不清楚。因此,本研究以辽宁省西北部的昌图县付家林场典型的人工防护林,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林、油松(*Pinus tabuliformis*)人工林、杨树(*Populus × canadensis*)人工林为研究对象,探讨不同人工防护林下土壤微生物群落功能特征,以期为该地区的植被恢复和人工林的可持续管理提供参考,同时本研究也对半干旱区未来固沙造林树种的选择具有重要的理论和现实意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

该研究区位于辽宁铁岭市昌图县城西北部境内的付家林场(43° 21' 143" N—42° 53' 623" N, 123° 53' 623" E—123° 53' 623" E),地处科尔沁沙地东南边缘,辽宁、吉林、内蒙古三省区交汇处,地势平

表1 样地信息

Table 1 Site information

树种	林分密度 (plants · hm ⁻²)	树高 (m)	胸径 (cm)	郁闭度 (%)
杨树人工林 <i>Populus × Canadensis</i>	1100	15.1	13.3	60
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	275	14.1	33.56	65
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	575	10.56	18.5	70

坦,地貌属辽河冲积平原兼有少量沙丘。该区属温带半湿润半干旱大陆性季风气候,最高气温为 35.6 °C,最低气温为-31.5 °C,降雨集中 7—8 月,平均年降水量为 400~550 mm,年蒸发量 1843 mm,远高于年降水量,极度干旱。土壤类型大部分为风沙土。该地区的原生植被为灌木和草本,现植被以樟子松和杨树等形成的防风固沙林为主。

1.2 土壤样品的采集与处理

2018 年 7 月,分别在试验区的杨树人工林、樟子松人工林、油松人工林设置 3 块 20 m×20 m 样方,在每个样方内采用“S”型布点取样,利用土钻采集 15~20 个 0~10 cm 土层样品,将其混匀放入无菌自封袋内,做好标记。土样采集完放入冰盒,迅速带回实验室,将土壤样品中的石砾、植物残根等杂物去除,研碎混匀,过 2 mm 筛,装入对应编号的无菌样品袋,于 4 °C 冰箱内进行冷藏保存,供 Biolog-Eco 测定分析。

1.3 土壤化学性质的测定

pH 值用电位计法测定,采用 2.5 : 1 的水土比;土壤全氮含量采用元素分析仪(杜马斯催化燃烧法)测定;土壤可溶性有机碳含量采用德国 Elementar 公司生产的碳氮元素分析仪(TOC)测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定。

1.4 Biolog-Eco 测定

采用 Biolog-Eco(31 种碳源)鉴定不同防护林土壤微生物群落代谢功能的特点,微平板接种液的制备方法参照文献(Classen *et al.*, 2003)。将鲜土预先活化(25 °C 培养箱内 24 h),后在超净台上称取相当于含有 10 g 烘干土壤样品的新鲜土壤,置于 250 mL 锥形瓶中,加入玻璃珠(灭菌),加 90 mL (0.154 mol · L⁻¹) 灭菌的 NaCl 溶液,置于回旋振荡器振荡 30 min(平动 150 r · min⁻¹,晃动 200 r · min⁻¹),静置 10 min 后,取上清液 1 mL,将其用 NaCl 溶液稀释为 10⁻³ 土壤悬浮液,向 Biolog-Eco 板中加入悬浮液

150 μL,3 次重复,接种完成后,将 Biolog-Eco 板放置于 25 °C 恒温培养箱中培养。每隔 24 h 用多功能酶标分析仪(Infinite-M200 PRO)读取各孔在 590 nm 波长下的光密度值,连续测定 9 d。

1.5 数据处理

Biolog-Eco 板中不同人工防护林下土壤微生物代谢功能多样性特征采用培养 72 h OD 值表征,不同人工防护林土壤微生物的 Shannon 指数(H)、Simpson 指数(D)、McIntosh 指数(U)的计算公式分别为:

$$H = - \sum P_i \times \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

$$U = \sqrt{\left(\sum n_i^2 \right)}$$

Biolog-Eco 板各孔中溶液吸光值平均颜色变化率:

$$AWCD = \sum n_i / n$$

式中: P_i 为第 i 孔与对照孔的相对吸光值差与整个平板相对吸光值总和的比值, $P_i = (i - R) / \sum (C_i - R)$; n_i 和 R 是第 i 孔和对照孔的相对吸光值, n 值为 31。

采用 Excel 2012、SPSS 19 和 R 语言对数据进行统计分析,并对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、主成分分析(PCA)和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同人工林土壤化学特性

不同类型人工林土壤化学性质差异显著,杨树人工林土壤 pH 值为 5.92,显著高于油松和樟子松人工林($P < 0.05$);杨树人工林土壤可溶性有机碳和速效磷的含量分别为 105.46 和 16 mg · kg⁻¹,均显著高于樟子松和油松人工林($P < 0.05$),樟子松人工林下土壤的全氮含量最高,为 1.05 g · kg⁻¹,显著高于杨树和油松人工林($P < 0.05$),杨树人工林土壤 C/N 为 9.15,显著低于樟子松和油松人工林($P < 0.01$)。由此可见,与樟子松和油松人工林相比,杨树人工林能显著提高土壤 pH、土壤可溶性有机碳和速效磷的含量,降低土壤 C/N。

2.2 土壤微生物群落对碳源的利用特征

不同人工防护林土壤微生物的 AWCD 值如图 1 所示,在培养的第一天,所有的样品土壤微生物的

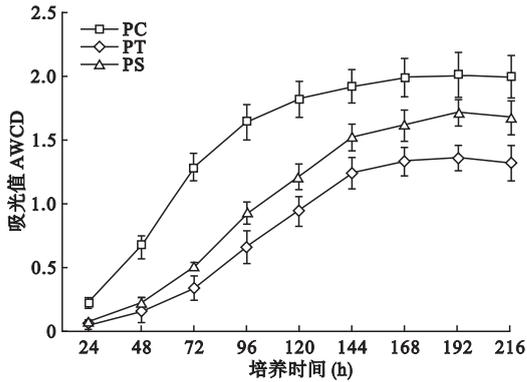


图 1 土壤微生物群落 AWCD 随培养时间的变化

Fig.1 AWCD changes of soil microbial communities with incubation time.

PA: 杨树人工林 *Populus ×canadensis*; PT: 油松人工林 *Pinus tabulaeformis*; PS: 樟子松人工林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*.下同。

AWCD 的吸光值都比较低,随后,不同人工防护林土壤微生物的 AWCD 值随时间推移逐渐上升,表明随土壤微生物群落活性提高,对总碳源的利用呈逐渐增加趋势,但增长速率不同,在培养 72 h 时,各样品土壤微生物对碳源的利用率都最高。在培养 186 h 时,杨树人工林和油松人工林土壤微生物对碳源的 AWCD 达到峰值,土壤微生物的 AWCD 值逐渐平稳,并于 192 h 后出现下降趋势。而樟子松人工林于培养后的 192 h,土壤微生物的 AWCD 值达到峰值,之后呈下降趋势。不同培养阶段杨树人工林

的 AWCD 值均为最高,对碳源的利用率最高,表明其微生物代谢活性最强,樟子松人工林次之,油松人工林最低。

2.3 土壤微生物群落功能多样性指数的变化

由表 3 可以看出,不同人工防护林土壤微生物群落代谢活性呈显著差异,对总碳源的利用能力 (AWCD)依次为杨树人工林>樟子松人工林>油松人工林;杨树人工林土壤微生物的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数分别为 3.27、0.96 和 8.13,均显著高于樟子松人工林和油松人工林 ($P < 0.05$),油松的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数均最低,分别为 2.86、0.92 和 2.91。

2.4 土壤微生物碳源利用特征

Biolog-Eco 微孔板上 31 种碳源可分成 6 大类,即糖类、氨基酸类、酯类、醇类、胺类及酸类。不同人工林土壤微生物对 6 类碳源类型利用程度见表 4。由表 4 可知:不同人工林土壤微生物对碳源的利用程度差异较大,杨树人工林对糖类、氨基酸类、脂类、醇类、胺类和酸类的利用率都显著高于樟子松和油松人工林 ($P < 0.05$)。对杨树人工林微生物利用碳源程度分析发现,酯类碳源的利用率最高 (1.60),其次为氨基酸类 (1.38),酸类碳源利用率最低 (1.04),通过对樟子松人工林土壤微生物分析发现,醇类碳源的利用率最高 (0.77),其次为酯类 (0.63),糖类碳

表 2 不同人工林下土壤化学性质

Table 2 Soil properties under different plantation forests

树种	pH 值	可溶性有机碳 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳氮比	速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
杨树人工林 <i>Populus ×canadensis</i>	5.92±0.11 aA	105.46±7.81 aA	0.85±0.08 bA	9.15±0.26 bB	16.00±1.80 aA
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	5.57±0.21 bA	83.42±18.42 abA	1.05±0.10 aA	11.41±0.31 aA	3.77±1.43 bB
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	5.53±0.17 bA	80.10±32.32 bB	0.97±0.07 abA	11.79±0.49 aA	3.09±0.98 bB

同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$),下同。

表 3 土壤微生物群落 72 h AWCD 和多样性指数

Table 3 AWCD of soil microbial communities in 72 h and diversity indices

树种	72 h 平均颜色变化率	物种丰富度指数	优势度指数	均匀度指数
杨树人工林 <i>Populus ×canadensis</i>	1.28±0.11 aA	3.27±0.01 aA	0.96±0.01 aA	8.13±0.56 aA
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	0.51±0.03 bB	3.04±0.04 bBC	0.94±0.02 bAB	3.88±0.32 bB
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.33±0.10 cB	2.86±0.07 cC	0.92±0.01 cB	2.91±0.74 cB

表 4 土壤微生物对 6 种不同类型碳源的利用率

Table 4 Utilization rate of 6 different types of carbon sources by soil microorganisms

树种	糖类	氨基酸类	酯类	醇类	胺类	酸类
杨树人工林 <i>Populus ×canadensis</i>	1.36±0.26 aA	1.38±0.21 aA	1.60±0.18 aA	1.13±0.08 aA	1.28±0.31 aA	1.04±0.22 aA
樟子松人工林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	0.14±0.02 cB	0.40±0.09 bB	0.63±0.17 bB	0.77±0.29 bAB	0.42±0.01 bB	0.18±0.089 bB
油松人工林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.50±0.16 bB	0.36±0.05 bB	0.85±0.17 bB	0.49±0.045 bB	0.76±0.37 abAB	0.36±0.09 bB

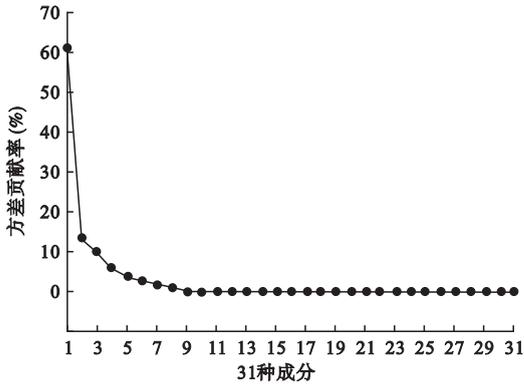


图2 31种成分的方差贡献率

Fig.2 Variance contribution percent of 31 components.

源利用率最低(0.14),通过对油松人工林土壤微生物分析发现,酯类碳源的利用率最高(0.85),氨基酸和酸类碳源利用率最低(0.36)。

表5 31种碳源的主成分载荷因子

Table 5 Loading factors of principal components of 31 sole-carbon sources

碳源化学类别	碳源类型	PC1	PC2
糖类	D-木糖 D-xylose	0.908	0.276
	α -D-乳糖 α -D-lactose	0.861	-0.286
	β -甲基-D-葡萄糖苷 β -methyl-D-glucoside	0.700	-0.267
	α -D-葡萄糖-1-磷酸 α -D-glucose-1-phosphate	0.753	-0.390
	α -环式糊精 α -cyclodextrin	0.943	0.193
	肝糖 Glycogen	0.940	0.147
	D-纤维二糖 D-cellobiose	0.965	-0.128
氨基酸类	L-精氨酸 L-arginine	0.867	-0.141
	L-天门冬酰胺 L-asparagine	0.961	-0.186
	L-苯基丙氨酸 L-phenylalanine	0.741	0.195
	L-丝氨酸 L-serine	0.833	0.282
	L-苏氨酸 L-threonine	0.687	-0.408
	甘氨酸-L-谷氨酸 Glycyl-L-glutamic acid	0.312	-0.595
酯类	丙酮酸甲酯 Pyruvic acid methyl ester	0.709	0.624
	吐温 40 Tween 40	0.712	0.190
	吐温 80 Tween 80	0.952	0.090
	D-半乳糖酸- γ -内脂 D-galactonic acid γ -lactone	0.732	-0.373
醇类	i-赤藓糖醇 i-erythritol	-0.183	0.547
	D-甘露醇 D-mannitol	0.806	0.312
	D,L- α -磷酸甘油 D,L- α -glycerol phosphate	0.806	0.128
胺类	苯乙胺 Phenylethylamine	0.915	0.094
	腐胺 Putrescine	0.785	-0.506
酸类	N-乙酰-D-葡萄糖胺 N-acetyl-D-glucosamine	0.283	0.245
	D-半乳糖醛酸 D-galacturonic acid	0.804	-0.468
	D-葡萄糖胺酸 D-glucosaminic acid	0.861	-0.360
	2-羟基苯甲酸 2-hydroxybenzoic acid	0.556	0.734
	4-羟基苯甲酸 4-hydroxybenzoic acid	0.962	0.018
	γ -羟基丁酸 γ -hydroxybutyric acid	0.663	0.404
	衣康酸 Itaconic acid	0.822	0.450
	α -丁酮酸 α -ketobutyric acid	0.473	-0.639
	D-苹果酸 D-malic acid	0.882	0.214

2.5 不同人工防护林土壤微生物对碳源利用多样性的主成分分析

采用培养 72 h 后的 AWCD 值,对不同人工防护林土壤微生物对 31 种单一碳源的利用特征进行主成分分析(PCA),如图 2 所示,前 3 个主成分的方差累计贡献率达到 84.35%,其中 PC1 的方差贡献率为 60.87%,PC2 的方差贡献率为 13.45%,PC3 的方差贡献率为 10.03%。

如表 5 所示,对 PC1 贡献率大的碳源有 27 种,分别为 7 种糖类,5 种氨基酸类,4 种酯类,2 种醇类,2 种胺类,其中,对 PC1 贡献率最大的是 D-纤维二糖(0.965)。而对 PC2 贡献率大的碳源有 3 种,分别为 1 种酯类,为丙酮酸甲酯;1 种醇类,为 i-赤藓糖醇;1 种酸类,为 2-羟基苯甲酸,其中,对 PC1 贡献率最大的是 2-羟基苯甲酸(0.734)。

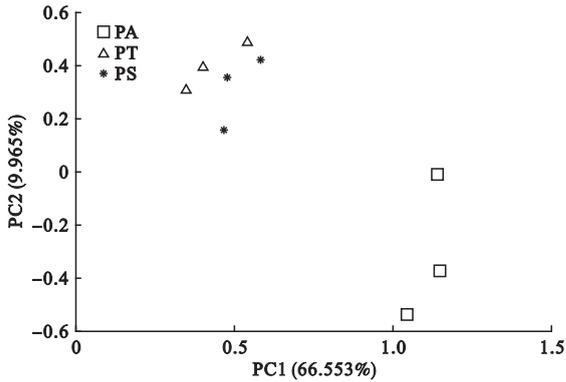


图3 碳源利用图谱主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of carbon utilization

由PCA分析可知,所有处理均位于PC1正轴,杨树人工林的值位于PC2的负轴,而油松和樟子松位于PC2的正轴(图3)。起分异作用的碳源主要包括丙酮酸甲酯、i-赤藓糖醇、2-羟基苯甲酸。培养72 h,根据不同人工防护林土壤微生物对碳源利用进行聚类分析,对聚类后的各样品对31种不同碳源

利用的AWCD值做热图(图4),该图能够反映不同人工防护林土壤微生物对不同碳源利用的差异性,由图4可以看出,不同人工林土壤微生物对碳源的利用可以划分为2个聚类,其中樟子松人工林和油松人工林为一类,杨树人工林为一类。由此可知,樟子松人工林和油松人工林土壤微生物群落功能特征较相似,与杨树人工林土壤微生物群落功能特征差异较大。

2.6 土壤化学性质和微生物群落72 h AWCD和多样性指数Pearson相关性分析

如图5所示,对微生物群落72 h AWCD和多样性指数和土壤化学性质进行Pearson相关性分析,微生物群落的AWCD值($r=0.773, P<0.05$)、Shannon指数($r=0.670, P<0.05$)、McIntosh指数($r=0.755, P<0.05$)均与pH呈显著正相关;可溶性有机碳含量与AWCD值($r=0.703, P<0.05$)、Shannon指数($r=0.750, P<0.05$)、Simpson指数($r=0.678, P<0.05$)、McIntosh指数($r=0.687, P<0.05$)均呈显著

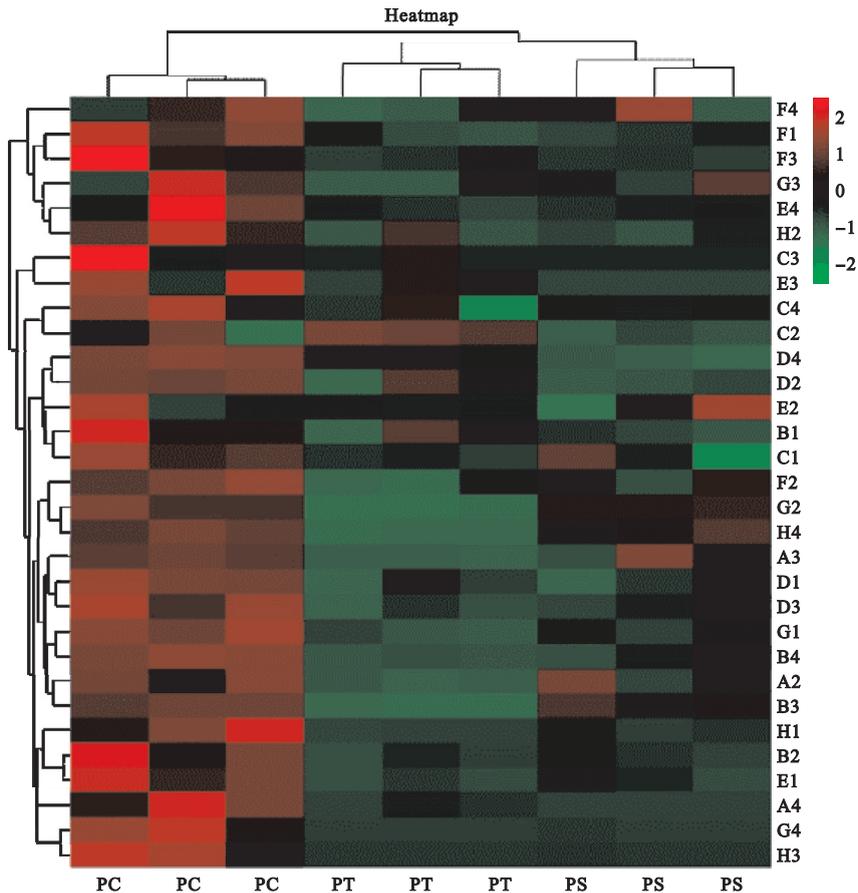


图4 基于72 h的AWCD值构建的热图

Fig.4 Heatmap tree based on the AWCD of soil microbial communities in 72 h

图中,红色表示对应样本AWCD值较高,绿色表示AWCD值较低。图例数值表示多组值之间两两的差异程度。

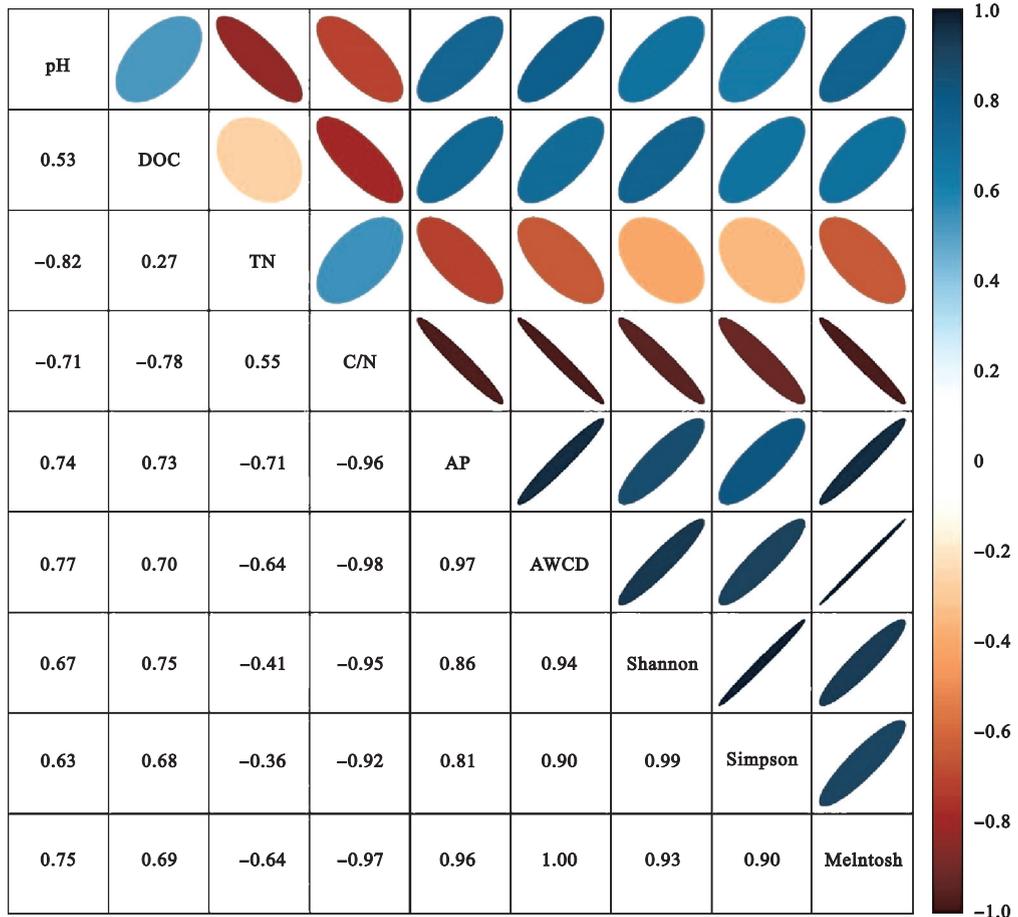


图 5 微生物群落 72 h AWCD 和多样性指数和土壤理化性质进行 Pearson 相关性分析

Fig.5 Pearson correlation analysis of AWCD of soil microbial communities in 72 h and diversity indices and soil properties under different plantation forests

pH:pH 值;DOC: 可溶性有机碳;TN:全碳;AP:速效磷。蓝色表示两个变量成正相关,红色表示变量为负相关,椭圆越扁表示相关性系数的绝对值越大,椭圆越圆,表示相关性系数的绝对值越小,椭圆长轴的方向表示相关系数的正负。

正相关;AWCD 值($r=-0.978, P<0.01$)、Shannon 指数($r=-0.949, P<0.01$)、Simpson 指数($r=-0.915, P<0.01$)、McIntosh 指数($r=-0.972, P<0.01$)与 C/N 均呈极显著负相关,AWCD 值($r=0.966, P<0.01$)、Shannon 指数($r=0.863, P<0.01$)、Simpson 指数($r=0.811, P<0.01$)、McIntosh 指数($r=0.963, P<0.01$)与速效磷含量均呈极显著正相关。

3 讨论

不同人工防护林会显著改变土壤化学特性,与樟子松和油松人工林相比,杨树人工林 pH 值最高(表 1),Yoshimura 等(2008)的研究结果也表明,松林土壤与橡树和桦树林相比,具有较低的 pH 值,可能是由于针叶林凋落物含有较高的酸性物质(Augusto *et al.*, 2002)。不同森林类型土壤 C/N 差异显

著(McGroddy *et al.*, 2004)。本研究中,土壤 C/N 依次为油松>樟子松>杨树人工林,以往的研究结果也表明松树林土壤 C/N 高于阔叶林(Yoshimura *et al.*, 2008)。由此可见,在同一土壤气候条件下,不同人工林树种对土壤特性具有重要的影响,尤其是在阔叶林和针叶林之间,这可能是由于不同树种向土壤输入的凋落物的质量和数量的不同(Jahed *et al.*, 2014)。

微生物对不同碳源的利用可以反映微生物的代谢功能类群,也可以反映生态系统受干扰后的细小变化,是土壤肥力的重要生物指标,对土壤科学管理有着重要的指示作用(秦旭等,2014)。本研究运用 Biolog-Eco 技术探究辽西北风沙区不同树种人工防护林土壤微生物群落的代谢活性和功能特征。Biolog-Eco 微孔板上,31 种碳源在主成分上的载荷

值越高,表示该种碳源对主成分的影响越大(周文新等,2008)。AWCD 曲线的斜率越大,表明土壤微生物对碳源的利用率最高(Kong *et al.*, 2013),在培养过程中,土壤微生物群落代谢活性大小为杨树人工林>樟子松人工林>油松人工林(图 1),物种的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数大小均为杨树人工林>樟子松人工林>油松人工林(表 3),表明杨树人工林的土壤微生物群落代谢活性最强,利用单一碳源的能力最强,且在数值上显著高于油松人工林和樟子松人工林($P<0.05$)。由此可见,阔叶树种林下的土壤微生物群落活性高于针叶树种,这与杨秉珣等(2017)在研究嘉陵江流域不同土地利用类型土壤微生物功能多样性特征时得出的结论一致。董莉丽等(2008)发现,杨树在土壤酶活和土壤修复等方面均优于油松。可能是由于阔叶林的凋落物质量高于针叶林凋落物质量,也与针叶树叶片中含有一定数量的单宁、树脂等阻碍代谢的酸性物质有关(李国雷,2008)。在针叶林中,樟子松人工林土壤微生物对碳源利用及多样性指数都显著高于油松人工林($P<0.05$)(表 3),表明樟子松人工林土壤微生物的代谢活性较高,可能是与樟子松相比,油松人工林所含的灰分较少,单宁含量高,不易分解,不利于土壤中养分元素的转化和积累(李国雷,2008),油松人工林土壤有机质含量较低,致使油松人工林土壤微生物代谢活性较弱。由此可见,植被类型是影响土壤微生物的关键因素,不同植被凋落物的数量和质量不同;与阔叶树相比,针叶树凋落物养分释放需要时间较长,归还量较少,进而影响微生物群落功能多样性特征。从根系分泌物角度分析,及利等(2017)研究发现,由于凋落物和树种特性的差异,针叶人工林的总酚含量普遍高于阔叶人工林,酚酸物质是影响微生物群落和结构的最重要因子之一。

不同的林分土壤微生物对 6 种碳源利用能力差异较大,主成分分析和聚类分析结果表明,不同人工防护林土壤微生物群落划分为 2 个功能类群(图 3),樟子松人工林和油松人工林土壤微生物群落功能较为相似,与油松人工林相比,樟子松人工林对 γ -羟基丁酸、*i*-赤藓糖醇和 L-丝氨酸的利用较高,其余无显著差异。杨树人工林土壤微生物群落功能特征较针叶林有显著差异,其对 D-木糖、 α -D-乳糖、 α -环式糊精、肝糖、D-纤维二糖、L-精氨酸、L-天门冬酰胺、L-丝氨酸、吐温 80、苯乙胺和 4-羟基苯甲酸的代

谢能力显著高于油松人工林和樟子松人工林($P<0.01$)。由此可见,针叶树种和阔叶树种土壤微生物明显属于不同功能类群。这与王卫霞(2013)的研究结果相一致。曹永昌等(2016)的研究结果也表明,微生物群落结构功能特征在针叶林(油松、华山松和云杉)之间差异不显著,与阔叶林相比差异显著,这一现象的产生可能是由于林分结构的极大差异所造成的。本研究通过研究辽西北地区典型人工防护林下土壤微生物的代谢特征来探究其微生物群落的功能特征,以后应结合高通量测序技术来研究微生物群落(细菌、真菌)结构及代谢功能特性,为改良土壤组分,提高土壤肥力,建立防护林优等体系提供理论依据。

4 结 论

辽西北风沙区樟子松、油松和杨树人工林的土壤特性及土壤微生物群落的代谢活性和功能特征具有显著差异。与樟子松和油松人工林相比,杨树人工林能显著增加土壤 pH、土壤可溶性有机碳和速效磷的含量,降低土壤 C/N。杨树人工林土壤微生物的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数均显著高于樟子松和油松人工林。杨树人工林土壤微生物代谢活性最强,樟子松人工林次之,油松人工林最低,且杨树人工林与油松和樟子松人工林下土壤微生物分属两个不同的功能类群。土壤 pH、可溶性有机碳、C/N、速效磷是影响微生物群落多样性的主要因素。

参考文献

- 曹永昌,谭向平,和文祥,等. 2016. 秦岭地区不同林分土壤微生物群落代谢特征. 生态学报, **36**(10): 2978-2986.
- 董莉丽,郑粉莉. 2008. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤酶活性和养分特征. 生态环境学报, **17**(5): 2050-2058.
- 猴倩倩,屈建军,韩致文. 2013. 西北干旱半干旱区生态系统碳循环研究进展. 中国农学通报, **29**(35): 205-210.
- 及利,杨立学. 2017. 采煤沉陷区不同造林树种恢复土壤酚酸物质对土壤微生物的影响. 应用生态学报, **28**(12): 4017-4024.
- 李国雷,刘勇,李瑞生,等. 2008. 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应. 北京林业大学学报, **30**(5): 52-57.
- 李香真,曲秋皓. 2002. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征. 土壤学报, **39**(1): 97-104.
- 彭茹燕. 2004. 沙地资源开发中土地质量的响应——以靖边县北部风沙区为例(博士学位论文). 北京:北京师范大学

- 学.
- 秦旭, 高文胜, 周周杰, 等. 2014. 控释肥对苹果园土壤微生物碳源利用能力的影响. *果树学报*, (5): 809-814.
- 任天志, Grego. 2000. 持续农业中的土壤生物指标研究. *中国农业科学*, **33**(1): 68-75.
- 铁展畅, 罗明, 阿不都克尤木, 等. 2014. 塔吉克斯坦不同土地利用方式对土壤微生物群落功能多样性的影响. *干旱区地理*, **37**(5): 1019-1028.
- 王凯, 王道涵, 张成龙, 等. 2014. 辽西北防护林对林下土壤理化性状的影响. *东北林业大学学报*, **42**(10): 77-79.
- 王国兵, 郭娇娇, 曹国华, 等. 2016. 不同施肥模式对杨树人工林土壤微生物生物量 C、N、P 的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, **40**(5): 9-13.
- 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 2005. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. *生态学报*, **25**(3): 513-519.
- 王卫霞. 2013. 南亚热带不同树种人工林生态系统碳氮特征研究(博士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
- 王振伟. 2013. 农田防护林的小气候效应浅析. *现代农业*, (7): 97-97.
- 吴祥云, 刘广, 韩辉. 2002. 不同类型樟子松人工固沙林土壤质量研究. *北华大学学报: 自然科学版*, **3**(1): 15-17.
- 杨秉珣, 刘泉, 董廷旭. 2017. 嘉陵江流域不同土地利用类型土壤微生物功能多样性特征. *水土保持研究*, **24**(5): 14-20.
- 张乃莉, 郭继勋, 王晓宇, 等. 2007. 土壤微生物对气候变暖 and 大气 N 沉降的响应. *植物生态学报*, **31**(2): 252-261.
- 周维博. 2003. 干旱半干旱地域提高灌区水资源综合效益研究进展与思考. *干旱区资源与环境*, **17**(5): 91-96.
- 周文新, 陈冬林, 卜毓坚, 等. 2008. 稻草还田对土壤微生物群落功能多样性的影响. *环境科学学报*, **28**(2): 326-330.
- 周永斌, 郭鑫炜, 魏亚伟, 等. 2016. 辽西北半干旱区典型人工林土壤 C、N、P 的垂直分布特征. *沈阳农业大学学报*, **47**(4): 418-424.
- 周智彬, 李培军, 徐新文, 等. 2002. 塔里木沙漠公路防护林土壤微生物的生态分布特征. *水土保持学报*, **16**(3): 47-50.
- Augusto L, Ranger J, Dan B, *et al.* 2015. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, **59**: 233-253.
- Becerril-Piña R, Mastachi-Loza CA, González-Sosa E, *et al.* 2015. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, **120**: 4-13.
- Classen AT, Boyle SI, Haskins KE, *et al.* 2003. Community-level physiological profiles of bacteria and fungi: Plate type and incubation temperature influences on contrasting soil. *FEMS Microbiology Ecology*, **44**: 319-328.
- Deng Q, McMahon DE, Xiang Y, *et al.* 2017. A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation. *New Phytologist*, **213**: 181-192.
- Gunina A, Smith AR, Godbold DL, *et al.* 2017. Response of soil microbial community to afforestation with pure and mixed species. *Plant and Soil*, **412**: 357-368.
- Jahed RR. 2014. The effect of natural and planted forest stands on soil fertility in the Hyrcanian region, Iran. *Biodiversitas*, **15**: 206-214.
- Jenkinson DS, Brookes PC, Powlson DS. 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 5-7.
- Kong X, Wang C, Ji M. 2013. Analysis of microbial metabolic characteristics in mesophilic and thermophilic biofilters using Biolog plate technique. *Chemical Engineering Journal*, **230**: 415-421.
- Li MM, Liu AT, Zou CJ, *et al.* 2012. An overview of the "Three-North" Shelterbelt project in China. *Forestry Studies in China*, **14**: 70-79.
- Li XR, Ma FY, Xiao HL, *et al.* 2004. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, **57**: 1-16.
- McGroddy ME, Daufresne T, Hedin LO. 2004. Scaling of C : N : P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, **85**: 2390-2401.
- Nunez-Mir GC, Iannone BVI, Curtis K, *et al.* 2015. Evaluating the evolution of forest restoration research in a changing world: A "big literature" review. *New Forests*, **46**: 669-682.
- Piao S, Fang J, Liu H, *et al.* 2005. NDVI-indicated decline in desertification in China in the past two decades. *Geophysical Research Letters*, **32**: 347-354.
- Qadir M, Qureshi AS, Cheraghi SAM. 2010. Extent and characterisation of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation and Development*, **19**: 214-227.
- Ren C, Zhao F, Kang D, *et al.* 2016. Linkages of C : N : P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland. *Forest Ecology and Management*, **376**: 59-66.
- Torres L, Abraham EM, Rubio C, *et al.* 2015. Desertification research in Argentina. *Land Degradation and Development*, **26**: 433-440.
- Yoshimura C, Gessner MO, Tockner K, *et al.* 2008. Chemical properties, microbial respiration, and decomposition of fine particulate organic matter (FPOM) in streams. *Journal of the North American Benthological Society*, **27**: 664-673.
- Zou XY, Li S, Zhang CL, *et al.* 2002. Desertification and control plan in the Tibet Autonomous Region of China. *Journal of Arid Environments*, **51**: 183-198.

作者简介 张岩,女,1995年生,硕士研究生,主要从事森林土壤微生物研究。E-mail: zhangyyy36@163.com
责任编辑 张敏