

保水剂对侧柏容器苗根际土壤微生物种群结构及干旱适应能力的影响*

马海林^{1**} 刘方春¹ 马丙尧¹ 杜振宇¹ 井大炜² 邢尚军¹

¹山东省林业科学研究院, 山东省森林植被生态修复工程技术研究中心 济南 250014

²德州学院 德州 253023

摘要 为更好地将保水剂应用到干旱山地的容器苗造林中, 以丙烯酰胺-丙烯酸钾交联共聚物型保水剂作为供试材料, 设置育苗时 (NS) 和造林时 (AS) 各加4.0 g保水剂的两种保水剂应用方式, 利用传统的平板计数法和现代的末端限制性片段长度多态性分析 (Terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 技术, 研究NS和AS对侧柏容器苗造林一年后根际土壤微生物种群结构及对侧柏干旱适应能力的影响。结果表明: 保水剂可显著提高侧柏根际土壤细菌、真菌的数量和微生物量碳、氮的含量, 且NS处理根际土壤的细菌数量和微生物量碳分别比AS处理提高21.65%和8.04%; 保水剂及其应用方式对造林初期侧柏根际土壤的细菌群落结构产生较大影响, 保水剂显著增加了根际土壤中细菌群落结构的多样性, NS处理具有最高的丰富度指数、多样性指数和最低的优势度指数; 此外, 同对照相比, NS处理还显著提高了侧柏容器苗的造林成活率、叶片的净光合速率和相对含水量, 降低了相对电导率; 同AS处理相比, NS处理的造林成活率和叶片相对含水量分别提高了11.64%和8.33%, 而相对电导率降低 (降低12.19%)。综上所述, 保水剂通过改善侧柏容器苗根际土壤的微生物种群结构而提高植物的干旱适应能力, 利用添加保水剂的容器苗造林具有更好的应用效果。(图2 表2 参25)

关键词 保水剂; 侧柏容器苗; 造林; 根际; 微生物种群结构; 干旱适应能力

CLC S728.2 : Q945.79

Effects of super-absorbent polymer on the microbial community structure in rhizosphere soil and drought resistance of *platycladus orientalis* container seedlings*

MA Hailin^{1**}, LIU Fangchun¹, MA Bingyao¹, DU Zhenyu¹, JING Dawei² & XING Shangjun¹

¹Shandong Academy of Forest, Shandong Engineering Research Center for Ecological Restoration of Forest Vegetation, Jinan 250014, China

²Dezhou University, Dezhou 253023, China

Abstract This paper discusses the effects of super-absorbent polymer (SAP) on biological activity in the rhizosphere soil and drought resistance of *platycladus orientalis* container seedlings to verify the utilization suitability of SAP for container seedlings in arid mountainland afforestation. Acrylamide acrylic acid potassium cross-linked copolymer was used as SAP in this study. Four afforestation treatments were designed, including NS (4.0 g SAP added in the nursery substrate) and AS (4.0 g SAP added during afforestation). The effects of SAP and its utilization on microbial populations, diversity of bacterial community structure in the rhizosphere soil of *Platycladus orientalis*, and the drought resistance of *P. orientalis* container seedlings at the initial afforestation stage were studied by the traditional plate culture method and the modern terminal restriction fragment-length polymorphism analysis. The results showed that SAP addition significantly increased bacterial and fungal populations, as well as soil microbial biomass carbon and biomass nitrogen contents in the rhizosphere soil of *P. orientalis*. The bacterial populations and soil microbial biomass carbon content in the NS treatment were 21.65% and 8.04%, respectively, higher than in the AS treatment. SAP and its utilization was found to significantly affect the bacterial community structure. The diversity of the bacterial community structure in rhizosphere soil of *P. orientalis* was significantly increased by SAP addition. Among the 3 treatments, the highest Margalef and Shannon indexes and the lowest Simpson index were observed in the NS treatment. SAP addition also increased the survival rate, net photosynthetic rate, and relative water content, but decreased the relative electric conductance of the leaves of *P. orientalis* container seedlings. The survival rate and relative water content in the AS treatment was 11.64% and 8.33%, respectively, higher than in the NS treatment, whereas the relative electric conductance was 12.19% lower. Therefore, SAP addition and its utilization in arid mountain afforestation has the

收稿日期 Received: 2015-04-07 接受日期 Accepted: 2015-05-12

*山东省科技发展计划项目 (2010GSF10621) 和山东省农业重大应用技术创新项目资助 Supported by the Science and Technology Development Project of Shandong (2010GSF10621) and the Major Special Project for Agricultural Application Technology of Shandong

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: mahlin@163.com)

potential to alleviate drought stress by improving biological activity in the rhizosphere soil of *P. orientalis*. Addition of SAP is more effective in the nursery substrate than during afforestation.

Keywords super-absorbent polymer; *Platycladus orientalis* container seedlings; afforestation; rhizosphere; community structure; drought resistance

目前,全世界干旱半干旱地区的面积已超过地球陆地总表面积的1/3^[1-2],我国干旱半干旱地区约占国土总面积的1/2^[3]。造林作为干旱/半干旱地区的一种重要的生态恢复手段,已在世界范围引起重视和关注^[4]。保水剂(Super-absorbent polymer)技术作为提高干旱半干旱地区造林成活率的有效手段之一,已在国内外逐渐得到重视并取得了良好的效果^[5-6]。

保水剂是一种具有较强吸水能力的新型高分子材料,在农田抗旱保水、作物保苗增产和干旱山地造林等方面取得了良好的效果^[7]。研究表明,保水剂吸持和释放水分的胀缩性,可使周围土壤变疏松,减缓土壤释放水的速度,抑制水分蒸发,减少养分流失^[5],具有抗旱保墒、改良土壤^[8]、水土保持、促进养分吸收、提高造林成活率^[9]等多重功能。目前保水剂在直播造林和裸根苗造林中的研究很多,并取得了良好的应用效果。Liu等人将保水剂和容器育苗技术相结合,发现保水剂在提高水分利用效率的同时促进了植物对养分的吸收^[5]。但迄今为止,保水剂与容器苗相结合用于造林的相关研究还鲜见报道。

根际土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,也是最为活跃的部分。微生物新陈代谢过程中所进行的硝化作用和氨化作用,不仅为植物提供良好的营养条件,而且还加速了营养元素在土壤微生态环境中的循环^[10]。然而,国内外关于保水剂对土壤微生物影响的研究甚少,保水剂对造林植物根际土壤微生物种群结构的影响过程、机制及效应尚待阐明。研究表明,植物的干旱适应能力越强,在受到干旱胁迫时其叶片的光合速率、相对含水量和相对电导率的改变幅度越小,植物生长受到抑制程度也就越小^[11-12]。因此,本研究以侧柏(*Platycladus orientalis*)容器苗作为试材,研究保水剂对侧柏根际土壤微生物种群结构及干旱适应能力(光合速率、相对电导率、相对含水量和生长状况)的影响,以期保水剂在造林工程中的合理使用提供依据。

1 材料与方法

1.1 侧柏容器苗的培育

育苗基质材料按照体积比草炭:蛭石:珍珠岩=3:1:1的比例混合后作为基础育苗基质。基质密度为0.39 g/cm³,全氮、全磷和全钾含量分别为15.37、1.30和6.02 g/kg, pH为5.22,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别为89.3%、70.9%和18.4%;育苗所用肥料为树脂包衣控释肥,全量氮、磷和钾的含量分别为20%、10%和10%,控释期为6个月,来自山东金正大生态工程股份有限公司。

试验用保水剂为XL型丙烯酸胺-丙烯酸钾交联共聚物,来自北京汉力葆科贸中心,其粒径为1.6-4 mm,其阴离子度为12.3%,含水率为9.7%,表观密度为0.78 g/cm³,吸纯水倍数为350,吸10⁻³ NaCl水溶液倍数为180。

参考刘方春等人的方法^[5],将基础育苗基质和控释肥按

比例充分混匀后平均分成两部分,其中的一部分添加保水剂完全混匀,另一部分不加保水剂。肥料和保水剂的加入量为基础育苗基质重量的1%。利用山东省林业科学研究院研制的LKY-1型无纺布育苗成型机生产育苗容器(育苗容器为圆柱形,容器直径12 cm,高9 cm),置专用带孔托盘上于山东省林业科学研究院实验苗圃,浇水至饱和。侧柏种子经催芽后播种,具体的催芽、播种及管理方法参照刘方春等人的方法^[6]。

1.2 造林区域概况

在莱芜市莱城区苗山镇北苗山村的牛旺泉北山安排造林试验。该地区地处暖温带半湿润季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年平均气温13.0℃,平均降水量695.1 mm,降水时空分布不均匀,70%主要集中在夏季,年平均相对湿度为63%。造林后每十天测定一次土壤含水量,试验期间土壤的平均含水量为田间持水量的37.24%±12.64%,造林后侧柏容器苗长期处于中度干旱至重度干旱的环境中。土壤类型为褐土,地上植被以芒草(*Miscanthus giganteus*)、羊茅(*Festuca ovina*)和稗(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.)为主。土壤碱解氮、速效磷和速效钾的含量分别为70.29、10.00和260 mg/kg, pH为7.99,有机质含量为0.68%,环刀法测定的田间持水量为32.54%。

1.3 试验设置

造林试验的侧柏容器苗育苗时加入保水剂和不加保水剂两种处理。不加保水剂的容器苗在造林时再分成两部分处理,一部分处理直接造林(简称CK),一部分处理在造林时加入保水剂(简称AS);加入保水剂的侧柏容器苗直接造林(简称NS)。2012年7月10日,选择生长基本一致的一年生侧柏容器苗[平均株高为(20.38±1.09) cm,平均地径为(2.64±0.13) mm]造林,造林的株行距为2 m×2 m,每处理150株,重复3次。采用鱼鳞坑块状方式整地,其中AS处理将侧柏容器苗放入鱼鳞坑后,将与NS处理每容器相同重量的保水剂与土壤充分混匀,均匀施用于育苗容器的周围。

牛旺泉北山没有水浇条件,参考邢尚军(2012)等人的方法^[13],在山上修建约160 m³的联通式集雨系统,于2012年夏季收集雨水。为整体上保证侧柏容器苗的造林成活率,所有处理均于2013年4月份和5月份各浇灌1次,每次每株25 L水。

1.4 样品采集和数据测定

2013年9月12日,各处理随机选取20株侧柏容器苗作为一个重复,测定株高和地径,并利用英国产的ADC Lci型便携式光合作用仪测定叶片的光合速率,同时收集侧柏根际土壤样品(此时CK、AS和NS处理的土壤含水量分别为田间持水量的28.67%、28.14%和29.92%)。根际土的收集方法参考Liu等人的方法^[5],将侧柏容器苗整体拔出,轻轻抖落大块不含根系的土壤,然后用力将根表面附着的土壤及部分基质全部抖落到塑料袋中作为根际土,将侧柏叶片和收集到的根际土迅速装入液氮罐内,带回实验室立即进行三大功能微生物

数量、细菌群落结构多样性及相关生理指标的测定。三大功能微生物数量的测定采用稀释平板法。其中细菌的测定采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基；放线菌的测定采用改良高氏1号培养基+重铬酸钾；真菌的测定采用马丁培养基+孟加拉红+硫酸链霉素。采用重量法测定侧柏叶片的相对含水量^[14]；采用电导法测定叶片的相对电导率^[15]。土壤微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸、K₂SO₄浸提法。细菌群落结构多样性的分析采用末端限制性片段长度多态性分析 (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism, T-RFLP) 技术, T-RFs的物种推测及细菌多样性指数的计算参考宋洪宁等的方法^[16]。

1.5 统计分析

数据处理使用SPSS11.5软件, 采用one-way ANOVA (单因素差异显著性分析法) 中的LSD (最小显著法) 在 $\alpha = 0.05$ 水平下检验不同处理对可培养微生物数量、造林成活率、生长指标及各生理指标的影响。结果为3次重复试验的算术平均值。

2 结果与分析

2.1 根际土壤微生物数量及微生物量碳氮含量

保水剂及其利用方式 (育苗时加入和造林时加入) 对土壤中可培养细菌、真菌的数量和微生物量碳、氮的含量影响显著 (表1)。同CK处理相比, AS处理的细菌和真菌数量分别增加18.39%和22.05%, 差异显著。同AS处理相比, NS处理的细菌数量显著增加21.65%。3个处理侧柏容器苗根际土壤的放线菌含量差异不显著。保水剂显著提高了侧柏容器苗根际土壤微生物碳和氮的含量。同CK相比, AS和NS处理的微生物量碳分别提高7.41%和16.04%, 微生物量氮分别提高7.51%和11.27%, 差异显著。此外, 同AS处理相比, NS处理还显著提高了微生物量碳的含量, 但微生物量氮的含量差异不显著。以上分析认为, 保水剂可显著提高侧柏容器苗根际土壤微生物量碳和氮的含量, 增加部分可培养微生物的数量, 而利用育苗时加入保水剂的容器苗造林更有利于土壤微生物, 尤其是细菌和真菌的生长和繁殖。

2.2 根际土壤细菌群落结构多样性

2.2.1 T-RFLP图谱 不同处理侧柏根际土壤的T-RFLP图谱如图1所示。可以看出, 3种不同处理在67 bp、148 bp和222 bp条带下具有优势T-RFs。在共有条带中, 不同处理的相对峰面积差异很大。以67 bp为例, 在CK、AS和NS和3个处理中的相对峰面积分别为4.06%、6.48%和6.68%。加入保水剂后, 288 bp下的优势条带消失, 但同时也导致部分共有条带的相对峰面

积增加。此外, 保水剂的加入还导致一些新的条带出现。比如育苗时加入保水剂造林处理在64 bp、81 bp、86 bp、129 bp和138 bp出现新的条带, 而在造林时加入保水剂处理在128 bp、138 bp、198 bp和199 bp下出现新的条带。以上分析认为, 育苗过程中和造林时加入保水剂均对侧柏容器苗造林初期的根际土壤细菌群落结构存在较大影响。

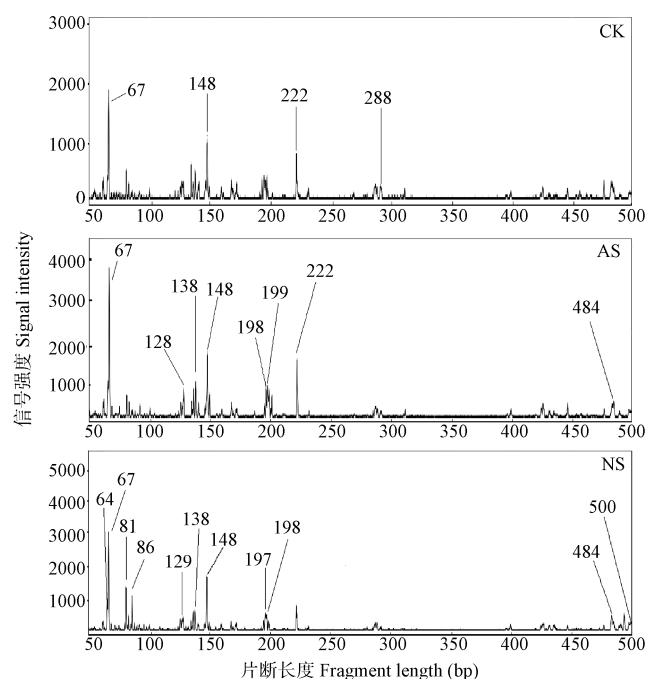


图1 保水剂的应用方式对侧柏根际土壤T-RFLP图谱的影响。CK: 不加保水剂; AS: 造林时添加保水剂; NS: 育苗时加入保水剂。

Fig. 1 Effect of SAP utilization on the T-RFLP profiles in *P. orientalis* rhizosphere soil. CK: no SAP addition; AS: addition of SAP during afforestation; NS: addition of SAP in the nursery substrate.

2.2.2 多样性指数 细菌群落物种的丰富度、多样性和优势度分别用Margalef指数、Shannon指数和Simpson指数表示 (图2)。可以看出, CK处理具有最低的Margalef指数、Shannon指数和最高的Simpson指数, 同其他两个处理差异显著。同AS处理相比, NS处理的Margalef指数和Shannon指数分别提高25.93%和25.58%, 而Simpson指数则显著降低31.83%。可见, 加入保水剂可增加造林初期根际土壤的细菌群落结构的多样性, 而育苗过程中添加保水剂处理的效果更为显著。

2.2.3 T-RFLP中主要片段的定性分析 将T-RFs数据输入Phylogenetic Assignment Tool数据库进行比对, 对图谱中

表1 保水剂对根际土壤微生物数量及微生物量碳氮含量的影响

Table 1 Effects of SAP on the microbial population, microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen of *P. orientalis* rhizosphere soil

处理 Treatment	细菌 Bacteria ($n/10^6$ CFU g^{-1})	放线菌 Actinomycetes ($n/10^5$ CFU g^{-1})	真菌 Fungus ($n/10^4$ CFU g^{-1})	微生物量碳 SMBC (w/mg kg^{-1})	微生物量氮 SMBN (w/mg kg^{-1})
CK	4.35 ± 0.38 c	8.68 ± 1.53 a	8.98 ± 0.56 b	744.28 ± 25.71 c	39.57 ± 1.74 b
AS	5.15 ± 0.42 b	8.37 ± 0.83 a	10.96 ± 0.62 a	799.43 ± 31.04 b	42.54 ± 2.06 a
NS	6.24 ± 0.49 a	8.89 ± 0.92 a	11.21 ± 0.71 a	863.67 ± 35.48 a	44.03 ± 1.59 a

数据为平均值 ± 标准差; CK: 不加保水剂; AS: 造林时添加保水剂; NS: 育苗时加入保水剂。同一列不同英文小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Data are means ± standard deviations. CK: no SAP addition; AS: addition of SAP during afforestation; NS: addition of SAP in the nursery substrate. Different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

表2 不同保水剂的应用方式对侧柏造林成活、生长及生理指标的影响
Tab. 2 Effect of SAP utilization on the survival rate, growth, and physiological index of *P. orientalis*

处理 Treatment	成活率 Survival rate (<i>r</i> /%)	基径 Ground diameter (<i>D</i> /mm)	株高 Plant height (<i>h</i> /cm)	净光合速率 (<i>P_n</i> /μmol m ⁻² s ⁻¹)	相对含水量 Relative water content (<i>φ</i> /%)	相对电导率 Relative electric conductance (κ/%)
CK	78.46 ± 5.73 b	4.24 ± 0.35 b	36.94 ± 2.16 b	4.56 ± 2.95 b	63.34 ± 3.45 c	53.82 ± 3.54 a
AS	80.29 ± 4.97 b	4.61 ± 0.26 ab	35.92 ± 1.89 b	4.96 ± 2.10 ab	68.16 ± 3.23 b	49.56 ± 2.47 b
NS	89.64 ± 6.17 a	4.87 ± 0.33 a	40.97 ± 2.74 a	5.24 ± 1.94 a	73.84 ± 3.87 a	43.52 ± 1.72 c

数据为平均值 ± 标准差; CK: 不加保水剂; AS: 造林时添加保水剂; NS: 育苗时加入保水剂。同一列不同英文小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
Data are means ± standard deviations. CK: no SAP addition; AS: addition of SAP during afforestation; NS: addition of SAP in the nursery substrate. Different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

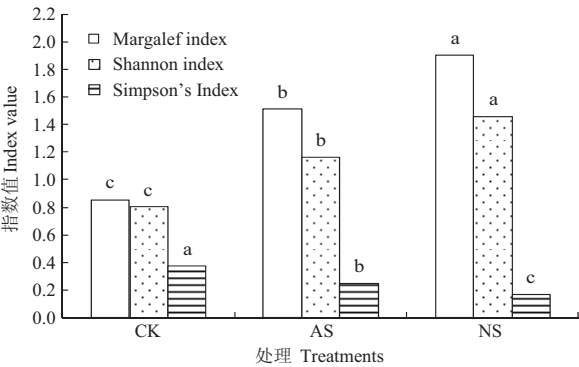


图2 不同保水剂的应用方式下侧柏根际土壤细菌多样性。CK: 不加保水剂; AS: 造林时添加保水剂; NS: 育苗时加入保水剂。同组中英文小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。
Fig. 2 Bacterial diversity in *P. orientalis* rhizosphere soil in different SAP treatments. CK: no SAP addition; AS: addition of SAP during afforestation; NS: addition of SAP in the nursery substrate. Different letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

的一些优势峰可能代表的物种进行了推测。结果表明, 图中的一些优势峰可能代表的物种为: Firmicutes (厚壁菌门) (64 bp)、Actinobacteria (放线菌门) (67 bp)、Firmicutes/Bacteroidetes (拟杆菌门) /β-Proteobacteria (β-变形菌) /δ-Proteobacteria (δ-变形菌) (81 bp)、Bacteroidetes/γ-Proteobacteria (γ-变形菌) (86 bp)、α-Proteobacteria/Firmicutes/γ-Proteobacteria/β-Proteobacteria/Actinobacteria (128 bp)、α-Proteobacteria/Firmicutes/γ-Proteobacteria/β-Proteobacteria (129 bp)、γ-Proteobacteria/Firmicutes (138 bp)、Firmicutes /Actinobacteria (148 bp)、Actinobacteria (197 bp)、Actinobacteria (198 bp)、Actinobacteria/γ-Proteobacteria (199 bp)、Firmicutes (222 bp)、Firmicutes (288 bp)、β-Proteobacteria/γ-Proteobacteria/δ-Proteobacteria/Firmicutes/Bacteroidetes (484 bp)、β-Proteobacteria/γ-Proteobacteria/Bacteroidetes (500 bp)。由T-RFLP中主要片段的定性分析认为, 侧柏容器苗造林初期, 其根际土壤中优势菌群为厚壁菌门、放线菌门、拟杆菌门和变形菌。保水剂主要是影响了厚壁菌门 (菌群消失)、γ-变形菌和放线菌门 (新出现的菌群)。

2.3 侧柏的造林成活率及干旱适应能力

保水剂的不同利用方式对侧柏容器苗造林一年后的成活率、生长及生理特征产生不同影响 (表2)。同CK相比, AS处理容器苗的造林成活率差异不显著, 但NS处理较CK和AS处理显著提高14.25%和11.65%。保水剂显著提高了侧柏叶片的相对含水量, 降低了相对电导率。同CK处理相比, AS处理

的相对含水量增加7.61%, 而相对电导率降低7.92%, 差异显著。同AS处理相比, NS处理的相对含水量增加8.33%, 而相对电导率降低12.19%, 差异同样达显著水平。此外, 同CK和AS处理相比, NS处理的株高显著增加10.91%和14.06%, 净光合速率显著提高14.91%和5.65%。由此可见, 保水剂可提高侧柏容器苗的干旱适应能力, 而保水剂的利用方式是关键因素, 育苗时加入保水剂的侧柏容器苗造林后显然具有更强的干旱适应能力。

3 结论与讨论

3.1 保水剂与根际土壤微生物种群结构

保水剂在增加土壤含水率、改善土壤团聚体结构等土壤性状的有益效果已得到共识^[17-18]。不同的环境条件, 诸如气象、土壤性质或其他土著微生物活力等均会对细菌生长造成影响^[19]。已有研究表明, 保水剂的使用会导致土壤结构及含水量的变化^[20], 这必然会对土壤中的可培养微生物数量产生影响。植物根际土壤由于受根系的直接影响, 在理化性质和生物特性方面与土壤主体有很大差异^[21], 本研究重点探讨了根际土壤微生物数量的变化。结果表明, 两种保水剂利用方式均可在一定程度上提高微生物数量, 但很明显, 育苗时加入保水剂对土壤微生物数量的影响大于造林时添加保水剂。此外, 育苗时添加保水剂也更有利于侧柏根际土壤中微生物量碳、氮含量的提高。微生物量碳、氮是土壤有机质养分的一种短暂而最有效的贮存形式, 是土壤养分的源和库^[22], 其含量的提高也是导致根际土壤微生物数量增加的主要原因之一。

目前国内外比较注重保水剂对土壤水分、植物生长及造林成活率影响的研究^[2, 19], 而关于其对植物根际土壤细菌群落结构多样性特征影响的研究鲜见报道^[10]。稀释平板计数法难以全面客观地揭示土壤中的微生物多样性, T-RFLP技术克服了传统方法的限制, 可以很好地揭示土壤细菌群落结构^[16]。稀释平板计数法结果可以看出, 保水剂的不同利用方式对土壤细菌影响最为显著, 因此, 本研究在保证其他外在条件基本一致的前提下, 着重研究了两种保水剂利用方式对细菌群落结构多样性的影响。在3个不同处理侧柏根际土壤的T-RFLP图谱中, 部分T-RFs差异很小, 说明在干旱生境中侧柏容器苗根际土壤中有相对稳定的细菌群落。但保水剂同样也导致了部分T-RFs出现、消失或含量发生较大变化, 说明部分不稳定细菌群落容易受到外在环境的影响。两种保水剂利用方式中, 在育苗过程中添加保水剂处理具有最高的Margalef

指数、Shannon指数和最低的Simpson指数,显著提高了侧柏根际土壤的细菌群落结构多样性。此外,T-RFLP图谱主要片段的定性分析结果认为,保水剂的加入主要是对厚壁菌门、 γ -变形菌和放线菌门产生了较大影响。其原因可能是育苗过程中添加保水剂的容器苗根系与保水剂接触面积大,促进了植物根系的生长发育^[6],增加根际土壤根系分泌物含量,从而为细菌生长繁殖提供充足的营养,促进了细菌群落结构多样性的提高。有研究表明,干旱会导致植物根际土壤中的微生物数量下降,细菌群落结构多样性降低^[23-24]。因此,利用育苗过程中添加保水剂的容器苗造林,提高根际土壤中可培养微生物数量及细菌群落结构多样性,对稳定土壤性质,提高植物在干旱环境中的适应能力具有重要意义。

3.2 保水剂与侧柏容器苗的干旱适应能力

相对含水量是反映植物水分状况最直接有效的指标,与植物抗旱性关系最为密切。研究表明,随着干旱胁迫强度的加剧,植物叶片的相对含水量逐渐降低。本研究结果显示,不加保水剂处理的侧柏叶片相对含水量显著最低,说明侧柏容器苗造林一年后,两种保水剂的利用方式均可抑制叶片的水分亏缺。干旱胁迫下,植物由于持续脱水,膜蛋白受到伤害导致细胞膜脂透性增加,其大小可代表植株受伤害的程度,通常以相对电导率表示质膜的相对透性^[11]。通常耐旱品种比不耐旱品种具有较低的电解质外渗率^[25]。从侧柏的相对电导率结果也可以看出,侧柏容器苗造林一年后,同造林时添加保水剂相比,育苗过程中添加保水剂侧柏叶片的相对电导率更低,体现了其在提高植物干旱适应能力中的优势。侧柏容器苗造林后,根系受伤害虽小,但其根系由容器内部伸展到容器周围的土壤中需要一定时间,造林时添加的保水剂是施用到育苗容器周围,由于根系无法接触到保水剂,导致保水剂吸持的部分水分是无效的,并不能为植物根系吸收。而育苗中添加保水剂的侧柏容器苗,其根系已穿透吸水后的保水剂,干旱环境下保水剂吸持的水分更容易被植物吸收利用,这可能是育苗时添加保水剂的侧柏容器苗具有较强干旱适应能力的主要原因之一。

育苗过程中添加保水剂侧柏容器苗的干旱适应能力增强,也直接导致了其造林成活率的提高和生长状况的改善。但应当注意的是,同造林时添加的保水剂相比,育苗过程中添加的保水剂使用了更长的时间。保水剂的使用是有寿命的,与浇水的次数、浇灌水的盐分含量等密切相关^[24]。本研究的造林试验仅仅是经历了一个生长周期。因此,在更长的造林生长周期内,由于造林时添加的保水剂使用时间较短,可能更有利于造林苗木后期的生长。因此,根据不同的造林目的,合理选择保水剂的利用方式,将是保水剂在容器苗造林中高效利用的途径之一。

参考文献 [References]

- Arzanesh MH, Alikhani HA, Khavazi K, Rahimian, HA, Miransari M. Wheat (*Triticum aestivum* L.) growth enhancement by *Azospirillum* sp. under drought stress [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2011, **27** (2): 197-205
- 胡义, 胡庭兴, 胡红玲, 陈洪, 王彬, 李晗. 干旱胁迫对香樟幼树生长及光合特性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20** (4): 672-685 [Hu Y, Hu TX, Hu HL, Chen H, Wang B, Li H. Effects of drought stress on growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora* saplings [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (4): 672-685]
- 杨晓红, 陈晓阳, 王颖, 周伟, 肖铃, 宋雅丹. 干旱胁迫对转*SacB*基因、转*BADH*基因的美丽胡枝子的影响[J]. *林业科学*, 2010, **46** (7): 64-68 [Yang XH, Chen XY, Wang Y, Zhou W, Xiao L, Song YD. Effects of drought stress on *Lespedeza formosa* plants expressing *SacB* gene and *BADH* gene [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (7): 64-68]
- 胡亚林, 曾德慧, 范志平, 艾桂艳. 半干旱区沙质退化草地造林对土壤质量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, **18** (11): 2391-2397 [Hu YL, Zeng DH, Fan ZP, Ai GY. Effects of degraded sandy grassland afforestation on soil quality in sem-arid area of northern China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (11): 2391-2397]
- Liu F, Ma H, Du Z, Du, Z., Ma B, Jing D. Effects of super-absorbent polymer on dry matter accumulation and nutrient uptake of *Pinus pinaster* container seedlings [J]. *J For Res*, 2013, **18** (3): 220-227
- 李倩, 刘景辉, 张磊, 陈勤, 于健. 适当保水剂施用和覆盖促进旱作马铃薯生长发育和产量提高[J]. *农业工程学报*, 2013, **29** (4): 83-90 [Li Q, Liu JH, Zhang L, Chen Q, Yu J. Using water-retaining agent and mulch to improve growth and yield of potato under dry farming [J]. *T Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29** (4): 83-90]
- Han Y, Yu X, Yang P, Li B, Xu L, Wang C. Dynamic study on water diffusivity of soil with super-absorbent polymer application [J]. *Environ Earth Sci*, 2013, **69** (1): 289-296
- Omidian H, Rocca JG, Park K. Advanced in superporous hydrogels [J]. *J Control Release*, 2005, **102** (1): 3-12
- 王乃江, 刘建军, 冠世强. 土壤改良保水剂在造林和育苗中的应用研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **33** (3): 183-186, 195 [Wang NJ, Liu JJ, Kou SQ. Study on application of retaining agent in forestation and seedling culture [J]. *J Soil Water Conserv*, 2008, **33** (3): 183-186, 195]
- 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正. 保水剂性能及其农用安全性评价研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35** (1): 394-400 [Li X, Liu YR, Zhen YM, He JZ. Characterization and soil environmental safety assessment of super absorbent polymers in agricultural application [J]. *Environ Sci*, 2014, **35** (1): 394-400]
- 覃炳醒, 姚丽萍, 周志强, 张玉红. 干旱胁迫对黄槿幼苗生理及叶片中小檗碱含量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, **34** (3): 26-30 [Qin BX; Yao LP; Zhou ZQ, Zhang YH. Influence of drought stress on plant physiology and berberine content of leaves in *Phellodendron amurense* seedlings [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, **34** (3): 26-30]
- Guerfel M, Baccouri O, Boujnah D. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars [J]. *Sci Hort*, 2009, **119** (3): 257-263
- 邢尚军, 徐振, 刘方春, 马丙尧, 马海林, 杜振宇. 干旱山地集雨装置系统研制及其应用效应分析[J]. *水土保持学报*, 2012, **26** (6): 215-218, 223 [Xing SJ, Xu Z, Liu FC, MaBY, Ma HL, Du ZY. Effect analysis and development of the rainwater-collecting products in arid mountain [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26** (6): 215-218, 223]
- Lu SY, Guo ZF, Peng XX. Effects of ABA and S-3307 on drought resistance and antioxidative enzyme activity of turfgrass [J]. *J Hort Sci Biotech*, 2003, **78** (5): 663-666

- 15 Wan X, Tan J, Lu S, Lin C, Hu Y, Guo Z. Increased tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco expressing a wheat oxalate oxidase gene via induction of antioxidant enzymes is mediated by H₂O₂ [J]. *Physiol Plant*, 2009, **136** (1): 30-44
- 16 宋洪宁, 杜秉海, 张明岩, 路晓萌, 李正华, 丁延芹. 环境因素对东平湖沉积物细菌群落结构的影响[J]. *微生物学报*, 2010, **50** (8): 1065-1071 [Song HN, Du BH, Zhang MY, Lu XM, Li ZH, Ding YQ. Effect of environmental factors on bacterial community in lake Dongping sediment [J]. *Acta Microbiol Sin*, 2010, **50** (8): 1065-1071]
- 17 Islam MR, Hu Y, Mao S, Mao JZ, Eneji AE, Xue X, . Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters [J]. *J Sci Food Agric*, 2011, **91** (11): 1998-2005
- 18 Arbona V, Iglesias DJ, Jacas J, Primo-Millo E, Talon M, Gómez-Cadenas, A. Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants [J]. *Plant Soil*, 2005, **270** (1): 73-82
- 19 Ahmad F, Ahmad I, Khan MS. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities [J]. *Microbiol Res*, 2008, **163** (2): 173-181
- 20 Bai W, Zhang H, Liu B, Wu Y, Song J. Effects of super-absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles [J]. *Soil Use Manage*, 2010, **26** (3): 253-260
- 21 Yang SJ, Du ZY, Yu Y, Zhang ZL, Sun X, Xing SJ. Effects of root pruning on physico-chemical characteristics and biological properties of winter jujube rhizosphere soil [J]. *Plant Soil Environ*, 2011, **57** (11): 493-498
- 22 郭甜, 何丙辉, 蒋先军, 马云, 吴咏, 向明辉, 湛芸, 唐春霞. 新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用[J]. *生态学报*, 2012, **32** (1): 190-197 [Guo T, He BH, Jiang XJ, MaY, Wu Y, Xiang MH, Zhen Y, Tang CX. Effect of *Leucaena leucocephala* on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (1): 190-197]
- 23 刘方春, 邢尚军, 马海林, 陈波, 丁延芹, 杜秉海. 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响[J]. *生态学报*, 2014, **34** (3), 642-649 [Liu FC, Xing SJ, Ma HL, Chen B, Ding YQ, Du BH. Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (3): 642-649]
- 24 Liu X, Lindeman WC, Whitford WG, *et al.* Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan Desert [J]. *Biol Fert Soils*, 2000, **32** (3): 243-249
- 25 孙继亮, 李六林, 陶书田, 张绍铃. 干旱胁迫和复水对梨幼树生理特性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18** (2): 218-223 [Sun JL, Li LL, Tao ST, Zhang SL. Effects of drought stress and rewatering on physiological characteristics of pear seedlings [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (2): 218-223]