

沙地樟子松人工林根系及土壤养分分布特征

孔 涛¹, 吴 丹¹, 沈海鸥^{2†}, 任曦玥¹, 王东丽¹, 王 凯¹

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 123000, 辽宁阜新; 2. 吉林农业大学资源与环境学院, 130118, 长春)

摘要: 樟子松人工林在我国沙区发挥了显著的防风固沙作用, 其根系能够影响土壤的理化性质, 根系的生长及分布状况对樟子松的生长发育具有重要意义。为探讨樟子松根系分布与根系土壤养分分布及两者之间的关系, 针对科尔沁沙地 60 年的樟子松人工林根系及根系土壤, 研究距树干不同水平距离、不同土层、东南西北 4 个方位根系的分布特征及土壤养分的空间分布规律。结果表明: 1) 樟子松根系的根数量和直径大小随土层深度与水平距离的增加而递减, 根系主要在表层(0~40 cm)土壤聚集, 占 0~100 cm 土层范围内根系数量的 74.63%; 在水平方向上主要分布在距树干 0~0.5 m 范围内, 占 0~2.0 m 水平范围内根系数量的 44.78%。2) 樟子松根系土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷养分含量均随水平距离的增加而递增, 总体在 >1.0~2.0 m 范围内最高; 全钾和速效钾含量随着距树干水平距离的增加而递减。3) 随着土层深度的增加土壤各养分含量均呈递减趋势, 具有表聚性。各养分在不同方位上的变化规律并不一致, 速效养分主要在北方位上含量最高。通过相关性分析, 得出樟子松根系数量与直径大小均与土壤全氮含量呈显著正相关。综上所述, 樟子松根系和土壤养分分布呈现出了垂直方向上的表聚性, 土壤养分含量总体倾向于在树冠边缘土壤聚集, 土壤速效养分在树干北方位上最多。

关键词: 樟子松; 根系; 根系土壤养分; 沙地

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2020)04-0084-10

DOI: 10.16843/j.sswc.2020.04.010

Distribution characteristics of root system and soil nutrients under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy soil

KONG Tao¹, WU Dan¹, SHEN Hai'ou², REN Xiyue¹, WANG Dongli¹, WANG Kai¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, 123000, Fuxin, Liaoning China;

2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, 130118, Changchun, China)

Abstract: [Background] *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is the main tree species for the windbreak and sand fixation forests, soil and water conservation forests and farmland protection forests in arid and semi-arid sandy land of China. *P. sylvestris* var. *mongolica* has strong drought resistance and low nutrient demand. Its plantation has played a significant role in windbreak and sand fixation in China's sandy land. Mechanical interpenetration and root exudates of *P. sylvestris* var. *mongolica* root system affect the physical and chemical properties of soil. The growth and distribution of roots have important significance for the growth and development of *P. sylvestris* var. *mongolica*. [Methods] In order to explore the root

收稿日期: 2019-07-12 修回日期: 2019-09-10

项目名称: 国家重点研发计划资助项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900); 国家自然科学基金“黑土区坡耕地侵蚀沟发育及其形态特征研究”(41601281), “引种樟子松固沙林天然更新的种子限制性研究”(41701325); 辽宁省高等学校基本科研项目“根系分泌物与松球壳孢菌协同致樟子松枯梢病的分子生态学机制研究”(LJ2017QL015)

第一作者简介: 孔涛(1981—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 土壤养分。E-mail: kongtao2005@126.com

†通信作者简介: 沈海鸥(1986—), 女, 博士, 讲师。主要研究方向: 土壤侵蚀过程与机理, 水土保持措施效果评价。E-mail: shensusan@163.com

distribution of *P. sylvestris* var. *mongolica*, root soil nutrient distribution and the relationship between them, root system and soil nutrients distribution of different soil layers(0–20 cm, >20–40 cm, >40–60 cm, >60–80 cm and >80–100 cm), different orientations (east, south, west and north) and horizontal distances(0, 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 m) from the trunk of *P. sylvestris* var. *mongolica* of 60 years were studied. Root diameter and number of *P. sylvestris* var. *mongolica*, contents of soil water, organic matter, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, and available potassium were determined. [Results] 1) The root number and diameter of *P. sylvestris* var. *mongolica* decreased with the increase of soil depth and horizontal distance. The roots showed a phenomenon of aggregation in the surface layer (0–40 cm), accounting for 74.63% of the root numbers in the range of 0–100 cm soil layer. Meanwhile, the roots were mainly distributed in the horizontal direction within the range of 0–0.5 m from the trunk, accounting for 44.78% of the root numbers in the horizontal range of 0–2.0 m. 2) The contents of organic matter, total nitrogen, available nitrogen, total phosphorus and available phosphorus increased with the increase of horizontal distance. The overall nutrients indexes were the highest in range of >1.0–2.0 m. The contents of total potassium and available potassium in the roots soil of *P. sylvestris* var. *mongolica* decreased with the increase of the horizontal distance from the trunk. 3) With the increase of soil depth, the soil nutrients contents showed a decreasing trend. The variation law of nutrients in different orientations was not coincident, and the contents of available nutrients were the highest in the northern position. Correlation analysis showed that the root number and diameter of *P. sylvestris* var. *mongolica* were significantly positively correlated with soil total nitrogen content. [Conclusions] The roots and soil nutrient distribution of *P. sylvestris* var. *mongolica* tend to aggregate in the surface soil vertically and in the soil at the edge of the canopy horizontally, and soil available nutrients contents are the highest in the north orientation of the trunk.

Keywords: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; root system; root soil nutrients; sandy land

樟子松具有抗寒、抗旱、耐贫瘠等优良特性,防风固沙作用显著^[1],是我国干旱、半干旱风沙区营造防风固沙林、农田草场防护林、水土保持林和用材林的主要树种^[2]。学者们^[3–5]在樟子松人工林对土壤性质的影响研究方面,主要集中在土壤物理性质、土壤水分、土壤养分等,为进一步解决沙地土壤水分及养分含量亏缺的问题提供了依据。土壤是物质和能量交换的重要场所,是植物生长重要的基质,土壤养分状况直接影响植物的生长发育^[6]。在土壤影响根系的同时,也受到根系的影响。根系在土壤中的机械穿插改变了土壤的通透性,从而影响了土壤的理化性质^[7]。Hales^[8]第一次明确提出根系分布的研究意义,后续关于植物根系的相关研究不断出现,学者们^[9–10]在植物根系方面对根系的形态、分布、生长发育状况以及生物量等开展了大量研究工作。目前,国内对植物根系的研究主要集中在果树^[11]、农作物^[12–14]和灌木方面^[15–17],在樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)根系方面也有少量研究,主要集中在生产力、营养元素含量和分布及适应性等方面^[18–19],然而过熟林樟子松根系分布及与土

壤养分相关性方面尚未见报道。本研究以60年樟子松人工林根系为对象,分析根系分布规律及根系土壤养分含量分布规律,探讨两者之间的关系,为本地区的樟子松林培育、经营及管理提供理论依据。

1 研究区概况

试验地位于辽宁省固沙造林研究所章古台试验基地(E 122°23' ~ 122°33', N 42°39' ~ 42°43'),平均海拔226.5 m。处于科尔沁沙地东南部边缘,地处中温带,该区属于亚湿润大陆性季风气候,是最早引入樟子松的地区^[20]。年均气温4.6~6.3℃,极端最低气温-33.4℃,极端最高气温43.2℃,平均空气湿度60.4%,年降水量450~500 mm,60%~70%降水集中在6—8月,年平均蒸发量1 600 mm,无霜期平均154 d,年平均风速4.5 m/s。土壤以风沙土为主,pH值6.7左右,植被以抗旱性较强的沙生植物为主。代表性植物有樟子松、山里红(*Crataegus pinnatifida*)、榆树(*Ulmus pumila*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)、中华隐子草(*Cleistogenes*

chinensis) 等^[2]。

2 材料与方法

2.1 野外调查与采样

在章古台地区选择林龄为 60 年樟子松人工林作为试验地。2017 年 7 月踏查后选择标准地,共设置 3 块重复标准样地,标准地基本情况如表 1 所示。在每个标准地中选择 3 株标准木,沿着标准木树干正东、正西、正南、正北 4 个方向,从树干基

部沿水平方向 2 m 范围内挖取土壤剖面,剖面正对树干。在剖面上,按照距树干距离 0~0.5、>0.5~1.0、>1.0~1.5、>1.5~2.0 m 4 个水平范围采集根,并测定根直径,同时按照距树干距离为 0、0.5、1.0、1.5 和 2.0 m 5 个水平距离采集土样,按照不同深度(0~20、>20~40、>40~60、>60~80 和 >80~100 cm)采集根和土样。同一标准地内相同距离相同深度的土样混合均匀,采用四分法取样,测定土壤的含水率和养分含量。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic conditions of the plot

样地概况指标 Plot profile indicator	值 Value
林龄 Stand age/a	60
树高 Tree height/m	13.04
密度 Density/(Trees·hm ⁻²)	330
郁闭度 Canopy density	0.57
株行距 Planting space/m	6×5
平均胸径 Average DBH/cm	20.59
东西冠幅 East-west crown/m	4.62
南北冠幅 North-south crown/m	4.92
枯落物平均厚度 Average litter depth/cm	4.01
枯落物平均半分解层厚度 Average semi-decomposed layer depth of litter/cm	1.52
枯落物平均未分解层厚度 Average undecomposed layer depth of litter/cm	2.49
树干处枯落物厚度 Litter depth near the trunk/cm	2.10
树干处枯落物半分解层厚度 Semi-decomposed layer depth of litter near the trunk/cm	0.89
树干处枯落物未分解层厚度 Undecomposed layer depth of litter near the trunk /cm	1.31
树冠边缘处枯落物厚度 Litter depth at the edge of canopy/cm	4.76
树冠边缘处枯落物半分解层厚度 Semi-decomposed layer depth of litter at the edge of canopy/cm	1.84
树冠边缘处枯落物未分解层厚度 Undecomposed layer depth of litter at the edge of canopy/cm	2.92

2.2 土壤养分测定方法

土壤养分的测定方法根据《土壤农化分析》^[21]中方法进行。其中:土壤有机碳的测定采用重铬酸钾一外加热法,全氮的测定采用凯氏定氮法,碱解氮的测定采用碱解扩散法,全磷和速效磷的测定采用钼锑抗比色法,全钾的测定采用火焰光度法,速效钾的测定采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法。根的直径采用游标卡尺测量。

2.3 数据处理

所有数据均在土壤风干的基础上进行测定和计算。采用 SPSS(20.0) 软件对根的生长指标和土壤养分之间进行相关性分析,采用 Ducan 检验对各指标进行显著性差异分析,显著性水平为

0.05。采用变异系数分析土壤养分的变异程度,计算公式为: VC = (DS/M) × 100%。式中: VC 为变异系数; DS 为标准差; M 为平均值。采用 Excel 2010 进行绘图。

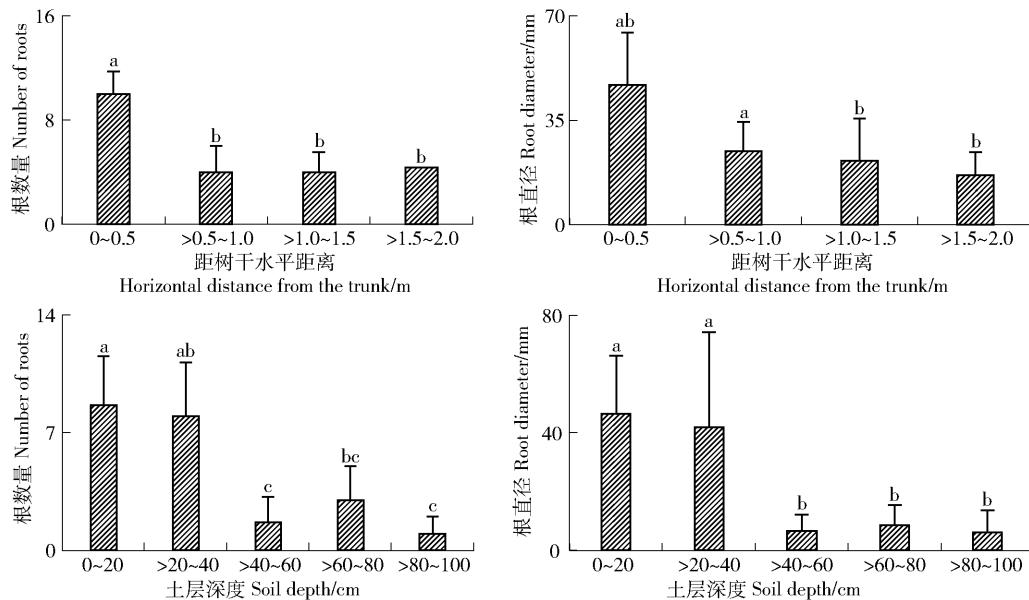
3 结果与分析

3.1 樟子松根系的空间分布特征

60 年樟子松根系的水平和垂直空间分布如图 1 所示。在距离树干 2.0 m 水平范围内,根主要分布在 0~0.5 m 范围内,根数量占研究范围根总量的 44.78%,显著高于其他 3 个水平范围,而 >0.5~1.0、>1.0~1.5 和 >1.5~2.0 这 3 个水平范围根数量分别占研究范围总量的 17.92% 和 17.91% 和

19.44%, 之间无显著差异; 根直径在 0~0.5 m 水平范围内最大, 均值为 46.9 mm, 显著高于 >0.5~

1.0、>1.0~1.5 和 >1.5~2.0 m 水平范围的根直径, 后者直径最小。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Notes: Different lowercase letters at the same figure indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 樟子松根数量和根直径空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of roots number and root diameter with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

从土层角度分析, 在 100 cm 深度范围内, 根数量和直径均随土层深度增加而降低。樟子松根系集中分布在 0~40 cm 土层范围内, 数量占研究土层范围根总量的 74.63%。其中 0~20 和 >20~40 cm 土层分别占总量的 38.81% 和 35.82%, 之间无显著差异, 但皆显著多于其他土层。其他土层间无显著差异, 其中 >80~100 cm 土层根数量最少, 仅占总量的 4.48%。根直径在 0~40 cm 土层最大, 0~20 和 >20~40 cm 均值分别为 46.42 和 41.85 mm, 显著高于 >40~100 cm 各个土层, 且 >40~100 cm 各土层间无显著差异。

3.2 樟子松根系土壤养分水平分布特征

3.2.1 土壤含水率分布特征 樟子松根系土壤含水率分布特征如图 2 所示, 距树干不同水平距离土壤含水比例范围为 2.29%~5.41%, 其变异系数为 19.5%。随着水平距离的增加, 除 80~100 cm 呈逐渐递减外, 其余土层均呈现出逐渐递增趋势, 1.5~2 m 范围处含水率均显著大于 0~0.5 m。随着土层深度的加深, 除 0.5 与 2.0 m 处各土层含水率呈现先上升后下降趋势外, 其余各水平距离处含水率均呈逐渐下降趋势。

3.2.2 土壤有机质含量分布特征 樟子松根系土壤有机质含量分布特征如图 3, 距树干不同水平距

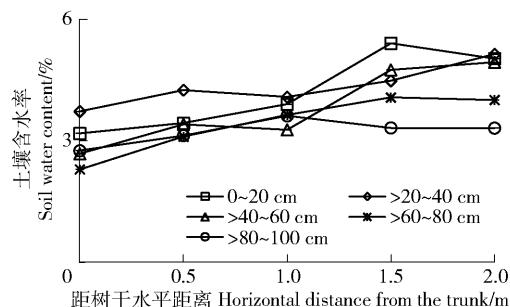


图 2 樟子松根系土壤含水率分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil water content in roots of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

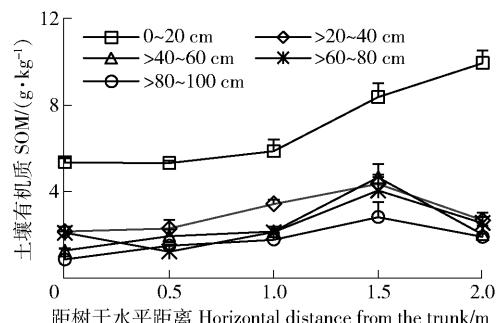


图 3 樟子松根系土壤有机质含量分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of SOM (soil organic matter) content in roots system with soil *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

离土壤有机质质量分数范围为 $0.84\sim9.94\text{ g/kg}$,其变异系数为10.7%。随着水平距离的增加,各土层土壤有机质的含量总体均呈上升趋势。其中,表层土($0\sim20\text{ cm}$)在 $0\sim1.0\text{ m}$ 水平距离范围内有机质含量变化缓慢,在 $>1.0\sim2.0\text{ m}$ 范围内有机质含量上升趋势明显且显著高于 $0\sim1.0\text{ m}$ 。其他4个土层有机质含量随水平距离增加呈现先增加后降低的趋势,在水平距离 1.5 m 处最高,且显著高于其他水平距离。随着土层深度的增加,各水平距离处有机质含量总体均呈下降趋势。表层($0\sim20\text{ cm}$)土壤有机质含量显著高于深层($>20\sim100\text{ cm}$)土壤。深层土壤中,各土层之间

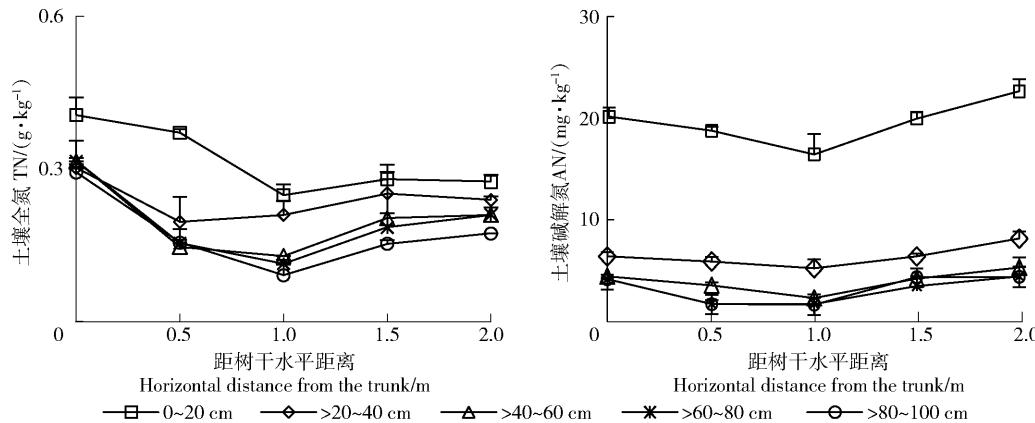


图4 樟子松根系土壤全氮与碱解氮含量分布特征

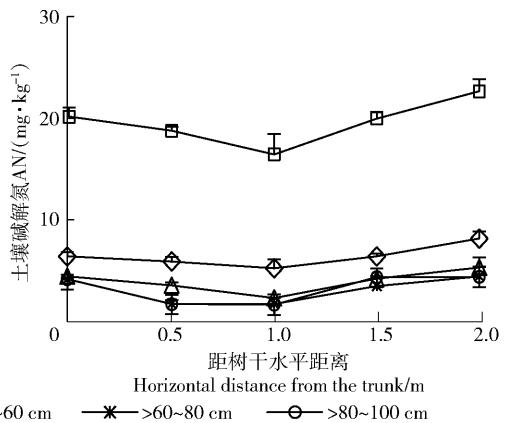
Fig. 4 Distribution characteristics of soil TN (total nitrogen) and AN (available nitrogen) contents in roots system soil with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

距树干不同水平距离土壤碱解氮的质量分数范围为 $1.66\sim22.61\text{ mg/kg}$,其变异系数为10.9%。随着水平距离的增加,各土层碱解氮含量呈现先下降后上升的趋势,均在 1.0 m 处含量最低。表层($0\sim20\text{ cm}$)土壤碱解氮含量在 2.0 m 处最高。深层($>20\sim100\text{ cm}$)土壤在 0 m 处最高。随着土层深度的加深,各水平距离处土壤碱解氮含量不断降低,表层($0\sim20\text{ cm}$)土壤碱解氮含量显著高于深层($>20\sim100\text{ cm}$)土壤。而深层土壤中, $>20\sim40\text{ cm}$ 土层土壤碱解氮含量显著高于 $>40\sim100\text{ cm}$ 土层, $>40\sim100\text{ cm}$ 中各土层之间土壤碱解氮含量没有显著差异。

3.2.4 土壤全磷和速效磷含量变化特征 樟子松根系土壤全磷和速效磷含量分布特征如图5,距树干不同水平距离土壤全磷的质量分数范围为 $0.27\sim1.7\text{ g/kg}$,其变异系数为10.4%。随着水平距离的增加,各土层土壤全磷含量总体均呈现平稳-上升-下降-平稳的趋势,各土层均在 1.0 m 处含量最高,

土壤有机质含量没有显著差异。

3.2.3 土壤全氮和碱解氮含量分布特征 樟子松根系土壤全氮和碱解氮含量分布特征如图4,距树干不同水平距离土壤全氮质量分数范围为 $0.09\sim0.41\text{ g/kg}$,其变异系数为11.1%。随着水平距离的增加,各土层土壤全氮含量均呈现先下降后上升的趋势,在水平距离 1.0 m 处含量最低。表层($0\sim20\text{ cm}$)土壤全氮含量在各水平距离处均显著高于深层($>20\sim100\text{ cm}$)土壤。随着土层加深,不同水平距离处全氮含量均呈下降趋势。表层($0\sim20\text{ cm}$)土壤全氮含量显著高于深层($>20\sim100\text{ cm}$)土壤。



且 $>1.0\sim2.0\text{ m}$ 范围内土壤全磷含量显著高于 $0\sim0.5\text{ m}$ 。随着土层深度的加深, 0 和 0.5 m 距离处土壤全磷含量总体均呈下降趋势,其他距离处土壤全磷含量没有明显规律。

距树干不同水平距离土壤速效磷的质量分数范围为 $13.94\sim28.34\text{ mg/kg}$,其变异系数为1.9%。随着水平距离的增加,各土层土壤速效磷含量总体呈上升趋势,深层土上升幅度较大,而表层土较小。深层土中各土层土壤速效磷含量均在 $0\sim1.5\text{ m}$ 水平距离范围内呈显著增加趋势,在 $>1.5\sim2.0\text{ m}$ 水平距离范围内变化平稳。随着土层深度的加深, 0 m 处土壤速效磷含量随土层深度增加而下降,其他水平距离处土壤有效磷含量没有明显规律。

3.2.5 土壤全钾和速效钾含量分布特征 樟子松根系土壤全钾和速效钾含量分布特征如图6,距树干不同水平距离土壤全钾的质量分数范围为 $3.19\sim5.31\text{ g/kg}$,其变异系数为3.5%。随着水平距离的增加,各土层土壤全钾含量总体呈下降-上升-下降-平稳的趋势,各土层均在 1.0 m 处含量最高,

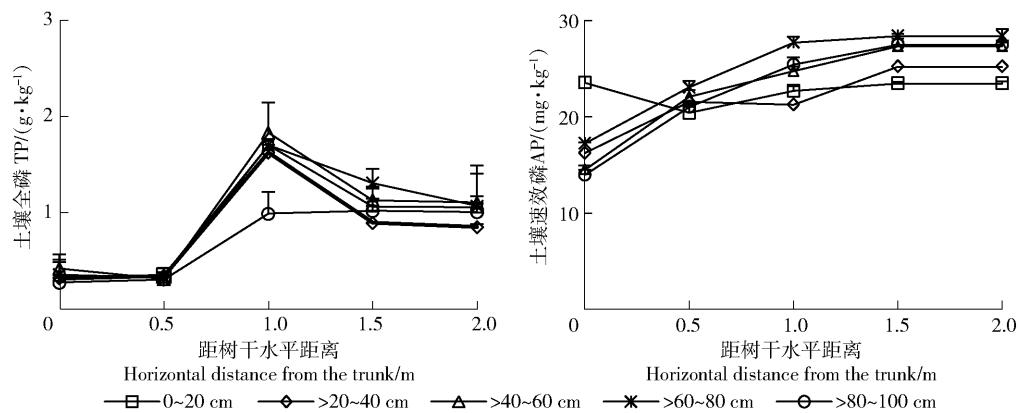


图5 樟子松根系土壤全磷与速效磷含量分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of soil TP (total phosphorus) and AP (available phosphorus) contents in roots system soil with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

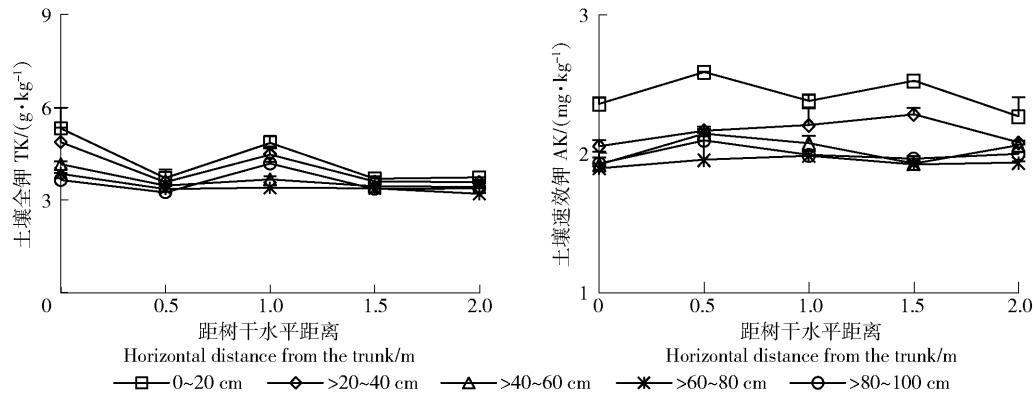


图6 樟子松根系土壤全钾与速效钾含量分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of soil TK (total potassium) and AK (available potassium) contents in roots system soil with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

平稳的趋势,在0 m和1.0 m处含量较高,在0.5 m和1.5 m处含量较低。其中>40~80 cm土层呈现在0.5 m处下降而后基本保持平稳的趋势。随着土层深度的加深,各水平距离全钾含量均呈下降趋势。各水平距离处土层间全钾含量差异显著。

距树干不同水平距离土壤速效钾的质量分数范围为1.9~2.59 mg/kg,其变异系数为2.2%。随着水平距离的增加,各土层土壤速效钾含量总体呈波

浪式缓慢波动的趋势。随着土层深度的加深,各水平距离土壤全钾含量均呈下降趋势。其中,0~40 cm深度2个土层间土壤速效钾含量差异显著,>40~100 cm深度3个土层间土壤速效钾含量无明显差异。

3.3 土壤养分含量空间分布特征

如表2所示,樟子松标准株4个方位土壤养分相比较,土壤有机质、全钾和速效钾含量在南方位最

表2 不同方位土壤养分含量

Tab. 2 Soil nutrient contents in different orientations

方位 Orientations	含水率 Water content/%	有机质 SOM/ (g·kg⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg⁻¹)	碱解氮 AN/ (mg·kg⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg⁻¹)	速效磷 AP/ (mg·kg⁻¹)	全钾 TK/ (g·kg⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg⁻¹)
北 North	4.01 ± 0.04a	2.15 ± 0.5d	0.25 ± 0.01b	9.53 ± 0.05a	0.85 ± 0.02a	23.79 ± 0.39c	3.84 ± 0.03b	2.16 ± 0.01b
南 South	1.40 ± 0.01b	8.30 ± 0.22a	0.11 ± 0.01c	7.29 ± 0.02d	0.54 ± 0.01b	29.66 ± 0.10b	4.16 ± 0.05a	2.37 ± 0.02a
东 East	2.96 ± 0.01b	4.17 ± 0.09b	0.27 ± 0.01a	8.37 ± 0.08b	0.33 ± 0.01c	32.21 ± 0.44a	2.19 ± 0.09d	2.18 ± 0.01b
西 West	2.70 ± 0.01b	2.77 ± 0.12c	0.26 ± 0.01a	7.67 ± 0.10c	0.34 ± 0.01c	31.54 ± 0.12a	2.71 ± 0.04c	2.19 ± 0.01b

注:不同小写字母表示不同方位差异显著($P < 0.05$)。Notes: Different lowercase letters at the same column of data in the table indicate significant differences among different orientations ($P < 0.05$).

高,土壤含水率、全磷和碱解氮含量在北方位最高,土壤全氮和速效磷含量在东方位最高。土壤含水率、全氮和碱解氮含量在南方位最低,土壤有机质、速效磷和速效钾含量在北方位最低,土壤全磷和全钾含量在东方位最低。

3.4 相关性分析

对60年樟子松北方位根系分布与土壤养分含量进行相关性分析,不同指标相关性关系见表3。根数

量与根直径呈极显著正相关。根数量和根直径与土壤全氮含量呈显著正相关。根直径与土壤速效磷含量呈显著负相关,根数量和根直径与土壤其他养分相关性不显著。土壤有机质含量与碱解氮含量、速效钾含量呈极显著正相关,与土壤含水率呈显著正相关。土壤碱解氮含量与全氮含量呈显著正相关,与速效钾含量呈极显著正相关。土壤全氮含量与全磷含量呈显著负相关,与速效磷含量呈极显著负相关。

表3 根系分布与土壤养分含量相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between root distribution and soil nutrients

指标 Index	根数量 Number of roots	根直径 Root diameter	含水率 Water content	有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	全磷 TP	速效磷 AP	全钾 TK	速效钾 AK
根数量 Root number	1									
根直径 Root diameter	0.957 **	1								
含水率 Water content	-0.248	-0.198	1							
有机质 SOM	0.174	0.194	0.647 *	1						
全氮 TN	0.651 *	0.611 *	-0.031	0.328	1					
碱解氮 AN	0.502	0.467	0.428	0.886 **	0.603 *	1				
全磷 TP	-0.413	-0.297	0.255	0.185	-0.649 *	-0.107	1			
速效磷 AP	-0.547	-0.644 *	0.194	-0.237	-0.744 **	-0.490	0.345	1		
全钾 TK	-0.051	-0.087	0.003	0.173	-0.238	0.146	0.599	-0.313	1	
速效钾 AK	0.400	0.455	0.577	0.815 **	0.328	0.764 **	0.278	-0.325	0.385	1

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。Notes: * indicates significant correlation at 0.05 level, and ** indicates significant correlation at 0.01 level.

4 讨论

4.1 根系的空间分布特征

根系是林木吸收养分和水分的主要器官^[22]。根系的空间结构是反映地下部分协调生长的重要指标,也是植物营养能力的基本体现^[7]。在多数森林生态系统中,根系分布状况受到土壤资源的异质性和植物自身内在特性共同的影响,根系主要在土壤表层分布,其数量随土层深度增加而减小^[23]。本研究结果也表明,随着土层深度的增加,樟子松根系在土壤中的分布呈现减少的趋势。王凯等^[24]的研究表明,根系主要集中分布于接近土壤表层,这与本研究结果一致。造成这种结果的原因是:其一,樟子松为浅根性树种^[25];其二,相关性结果表明全氮含量与根的数量和直径大小呈显著正相关。这与Cavellier^[26]研究发现根系的垂直分布主要由土壤中氮含量控制是一致的,氮素的输入主要依赖于植物残体的归还,大部分氮素会随着植物组织的衰老和凋落

回归土壤^[27],因此林地浅层土壤氮含量比深层丰富,为根系生长营造了良好的土壤环境。

从水平分布分析:根系主要集中分布在0~0.5 m范围内,占调查总量的41.67%,而>0.5~1.0 m、>1.0~1.5 m与>1.5~2.0 m水平范围内根数量和根直径大小间差异不大,分别占17.9%、17.9%、19.4%。导致该结果的原因主要是樟子松根系在沙地土壤中的分布具有异质性,使根系的生长和分布受到植物自身内在特性与土壤环境的双重影响,而土壤环境异质性为影响根系分布空间异质性的主要原因^[23]。0~0.5 m范围内全氮含量最高,诱导了根的生长发育,因而根在该范围内分布最为密集。

4.2 根系土壤养分含量分布特征

本研究发现,樟子松林下土壤中各种养分含量均受土层深度和水平距离的影响。从土层角度分析,土壤养分存在明显的表聚效应^[28]。土壤中各养分含量随着土层深度增加而递减。其原因主要是,枯落物对表层土壤养分含量的影响较大,北方针叶

林的枯枝落叶主要通过微生物分解,土壤湿度作为调节微生物活动的因素,是调节枯枝落叶周转速率最重要的环境因子之一^[29]。研究区表层土壤水分含量显著高于深层,而土壤水分参与酶类催化及氨基酸水解等反应,能够提高土壤酶活性和微生物数量,从而促进了枯枝落叶的加速分解,有利于植物根系及时吸收大量水分和养分,促进植物根系生长发育。根系分泌物增加了土壤中的生物活性物质,利于活化土壤中的难溶养分,分解形成较多的土壤速效养分^[30-31]。同时死亡的根系和枯枝落叶分解转化成有机质、氮素和其他养分,使表层土壤养分能够积累。

从水平分布分析,土壤含水率、有机质、碱解氮、全磷、速效磷含量总体均随水平距离的增加而递增,远离树干处的枯落物厚度、土壤水分和养分含量均高于近树干处。土壤水分分布不均有3方面的原因:1)远树干处枯落物厚度及半分解层厚度均高于近树干处,凋落物厚度增加其持水能力也随之增加,提高了远树干处土壤水分含量;2)近树干处土壤中根系分布较多,根系吸收土壤水分,降低了近树干处土壤的含水率;3)远树干处由于树冠影响了降水的再分配,该处的土壤含水率较高。研究区土壤水分含量普遍偏低,而远树干处较高的土壤含水率有利于提高土壤微生物活性,加速将凋落物分解成腐殖质,因而远树干处枯落物半分解层厚度高于近树干处,因此该处有机质含量较高;同时,微生物分泌的低分子有机酸能够活化土壤中难溶养分,导致土壤中速效养分的增加。土壤全氮含量在树干处最高,这是由于在树干处根数量较多,而根数量与土壤全氮含量呈显著正相关,从而促进了氮含量的固定与返还。

从方位上分析,土壤含水率、全磷、碱解氮、速效磷含量均在北方位最高,这种特征与太阳辐射量的分布相反。太阳辐射通过影响地面蒸发散改变土壤含水率从而影响了土壤的化学性质^[32],北方位土壤含水率显著高于其他方位,促进了根系的生长发育,根系分泌的低分子有机酸能够活化土壤中的难溶养分,从而导致了该方位速效养分含量的提高。有机质含量在南方位上最高,原因在于各方位光照条件存在差异,南方位日光照射时间长,光合作用强烈,枝叶相对繁茂,枯枝落叶多,因而分解形成的有机质含量显著高于其他方位。

5 结论

1) 樟子松根系的数量和直径大小随土层深度

与水平距离的增加而递减,根系主要分布在表层土壤和近树干处。在土层深度上,根系主要集中分布在表土层(0~40 cm),占研究范围根系数量的74.63%。而水平上则集中在0~0.5 m范围内,占研究范围根系数量的44.78%。

2) 土壤中各养分含量随着土层深度增加而递减,具有表聚性。在水平方向上,含水率、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷含量随距树干距离的增加而增加,全钾与速效钾含量随着距树干距离的增加而递减。在不同方位上,树干南方位处土壤有机质含量较高,土壤速效养分在北方位处最高,

3) 樟子松根系数量和直径大小与全氮呈显著正相关,根的直径与速效磷呈显著负相关。

6 参考文献

- [1] 王妍. 呼伦贝尔沙地天然樟子松林更新研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009:108.
WANG Yan. Regeneration of the natural Mongolian pine forest in Hulun Buir Sandland [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009:108.
- [2] 曾泽群,雷泽勇,魏晓婷. 基于水分变化的沙地樟子松人工林土壤分层特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12):161.
ZENG Zequn, LEI Zeyong, WEI Xiaoting. Soil layered characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations based on the change of soil moisture content [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(12):161.
- [3] 张继义,赵哈林,崔建垣,等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3):1.
ZHANG Jiyi, ZHAO Halin, CUI Jianyuan, et al. Community structure, soil water dynamics and community stability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin Sandy Land [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(3):1.
- [4] 杨涛,徐慧,李慧,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.
YANG Tao, XU Hui, LI Hui, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in *Pinus sylvestris* plantations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3):50.
- [5] 牛沙沙,周永斌,刘丽颖,等. 不同林龄樟子松人工林土壤理化性质[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(2):47.
NIU Shasha, ZHOU Yongbin, LIU Liying, et al. Soil

- Properties in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation of different ages [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2) : 47.
- [6] 唐洁, 汤玉喜, 杨艳, 等. 洞庭湖区杨树人工林不同龄林土壤养分特征研究 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(25) : 5.
- TANG Jie, TANG Yuxi, YANG Yan, et al. Soil nutrient characteristics of different age poplar artificial forests in Dongting Lake Area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(25) : 5.
- [7] 侯晓娟, 李志, 崔诚, 等. 武功山芒根系垂直分布及其与土壤养分的关系 [J]. 草业科学, 2017, 34(12) : 2428.
- HOU Xiaojuan, LI Zhi, CUI Cheng, et al. Vertical distribution characteristics of *Miscanthus sinensis* roots and its relationship to soil nutrients in the Wugong Mountains [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12) : 2428.
- [8] HALES S. Vegetable staticks [J]. Oldbourne, 1969, 8(9) : 1677.
- [9] VOGT K A, MOORE E E, VOGT D J, et al. Conifer fine root and mycorrhizal root biomass within the forest floors of Douglas-fir stands of different ages and site productivities [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, 13(3) : 429.
- [10] 杨丽韫, 李文华. 长白山不同生态系统地下部分生物量及地下C贮量的调查 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2) : 204.
- YANG Lizhen, LI Wenhua. The underground root biomass and C storage in different forest ecosystems of Changbai Mountains in China [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2) : 204.
- [11] 陈高安, 潘存德, 王世伟, 等. 间作条件下杏树吸收根空间分布特征 [J]. 新疆农业科学, 2011, 48(5) : 821.
- CHEN Gaoan, PAN Cunde, WANG Shiwei, et al. Spatial distribution characteristics of absorbing roots of apricot trees in the intercropping systems [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(5) : 821.
- [12] 楚轶欧, 郑毅, 卢国理, 等. 间作对水稻根系分布特征的影响 [J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(6) : 887.
- CHU Yiou, ZHENG Yi, LU Guoli, et al. Effects of rice cultivars intercropping on root distribution characters [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007, 22(6) : 887.
- [13] 方怡向, 赵成义, 串志强, 等. 膜下滴灌条件下水分对棉花根系分布特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(5) : 96.
- FANG Yixiang, ZHAO Chengyi, CHUAN Zhiqiang, et al. Root distribution characteristics of cotton in different drip irrigation amounts irrigation under mulched [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5) : 96.
- [14] 刘凤山, 周智彬, 陈秀龙, 等. 应用根系生态位指数研究不同灌溉量棉花根系分布特征 [J]. 棉花学报, 2011, 23(1) : 39.
- LIU Fengshan, ZHOU Zhibin, CHEN Xiulong, et al. Using RENI to study the distribution characteristics of cotton roots in different amounts of drip irrigation under film [J]. Cotton Science, 2011, 23(1) : 39.
- [15] 张莉, 吴斌, 丁国栋, 等. 毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3) : 158.
- ZHANG Li, WU Bin, DING Guodong, et al. Root distribution characteristics of *Salix psammophyla* and *Caragana korshinskii* in Mu Us sandy land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(3) : 158.
- [16] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应 [J]. 生态学报, 2009, 29(1) : 130.
- XU Guiqing, LI Yan. Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1) : 130.
- [17] 赵岩, 周文渊, 孙保平, 等. 毛乌素沙地三种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(4) : 129.
- ZHAO Yan, ZHOU Wenyuan, SUN Baoping, et al. Root distribution of three desert shrubs and soil moisture in Mu Us Sand Land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4) : 129.
- [18] 邱俊, 谷加存, 姜红英, 等. 樟子松人工林细根寿命估计及影响因子研究 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(9) : 1066.
- QIU Jun, GU Jiacun, JIANG Hongying, et al. Factors influencing fine root longevity of plantation-grown *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(9) : 1066.
- [19] 刁淑清, 沈海龙, 丛健. 樟子松林木养分元素含量与分布 [J]. 东北林业大学学报, 2016, 37(1) : 15.
- DIAO Shuqing, SHEN Hailong, CONG Jian. Content and distribution of nutrient elements in trees of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 37(1) : 15.
- [20] 雷泽勇, 韩艳刚, 赵国军, 等. 辽宁章古台樟子松生长过程分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2) : 324.
- LEI Zeyong, HAN Yangang, ZHAO Guojun, et al.

- Growth of Mongolica pine in Zhanggutai of Liaoning province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, 35(2):324.
- [21] 鲍士旦,土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2005:50.
- BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:50.
- [22] 徐振邦,李昕,戴洪才,等.长白山阔叶红松林主要树种根系分布规律的研究[J].生态学杂志,1987(4):19.
- XU Zhenbang, LI Xin, DAI Hongcui, et al. Root distributions of dominant trees in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology, 1987(4):19.
- [23] 李继伟,左海涛,李青丰,等.柳枝稷根系垂直分布及植株生长对土壤盐分类型的响应[J].草地学报,2011, 19(4):644.
- LI Jiwei, ZUO Haitao, LI Qingfeng, et al. Response of root spatial pattern and growth characteristics of switchgrass to soil saline type [J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(4):644.
- [24] 王凯,宋立宁,吕林有,等.不同林龄沙地樟子松人工林细根垂直分布特征[J].东北林业大学学报,2014, 42(3):1.
- WU Kai, SONG Lining, LV Linyou, et al. Fine root vertical distribution characters of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(3): 1.
- [25] 苏芳莉,刘明国,郭成久,等.沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J].中国水土保持,2006(1):20.
- SU Fangli, LIU Mingguo, GUO Chengjiu, et al. Characteristics of vertical distribution of root system of Mongolian Scotch pine growing in sandy area and influence to the soil [J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(1):20.
- [26] CAVELIER J. Fine-root biomass and soil properties in a semideciduous and a lower montane rain forest in Panama[J]. Plant and Soil, 1992, 142(2):187.
- [27] 徐华山,赵同谦,贺玉晓,等.滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果[J].生态学报,2010, 30(21):5759.
- XU Huashan, ZHAO Tongqian, HE Yuxiao, et al. Effect of different vegetation types on agricultural non-point nitrogen pollution in riparian wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21):5759.
- [28] 胡慧蓉,胡庭兴,谭九龙,等.华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响[J].土壤,2014,46(4):630.
- HU Huirong, HU Tingxing, TAN Jiulong, et al. Effects of different vegetation types on soil nitrogen, phosphorus, potassium and organic carbon in rainy area of west China [J]. Soils, 2014, 46(4):630.
- [29] 杨曾奖,曾杰,徐大平,等.森林枯枝落叶分解及其影响因素[J].生态环境,2007, 16(2):649.
- YANG Zengjiang, ZENG Jie, XU Daping et al. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: A review [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2):649.
- [30] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌.黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):50.
- HAN Fengpeng, ZHENG Jiyong, ZHANG Xingchang. Plant root system distribution and its effect on soil nutrient on slope land converted from farmland in the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (2): 50.
- [31] 张锡洲,李廷轩,王永东.植物生长环境与根系分泌物的关系[J].土壤通报,2007, 38(4):785.
- ZHANG Xizhou, LI Tingxuan, WANG Yongdong. Relationship between growth environment and root exudates of plants: A Review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4):785.
- [32] 王新星,赵国平,史社强,等.陕西榆林樟子松细根分布特征[J].东北林业大学学报,2014, 42(10):16.
- WANG Xinxing, ZHAO Guoping, SHI Sheqiang, et al. Distribution characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* fine roots in Yulin city, Shaanxi province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(10): 16.