

青藏高原不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤养分变化特征

宋鑫¹, 张丽静¹, 代万安², 周志宇¹, 李晓忠², 周媛媛¹, 李金辉¹, 金茜¹

(1. 草地农业系统国家重点实验室 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020;

2. 西藏自治区农科院, 西藏 拉萨 850000)

摘要:选取西藏拉萨人工种植的紫穗槐(*Amorpha fruticosa*), 于2010—2012年分别对其1龄、2龄、3龄植株连续3年监测根际非根际土壤全氮、全磷、有机碳、硝态氮、铵态氮、pH和速效磷含量变化, 结果表明, 1) 1龄和2龄根际土壤所有测定指标均表现出了根际正效应, 而3龄除pH、速效磷外, 其余指标均未表现出明显的根际正效应。2) 根际和非根际全氮、全磷变化不明显。3) 根际和非根际硝态氮、铵态氮含量随着种植年限的增加而逐渐增加; pH和速效磷则逐年减小。4) 根际和非根际有机碳的变化表现为前两年逐年增加, 第3年则根际减小而非根际仍在增加。5) 根际全磷与全氮、速效磷呈极显著正相关($P < 0.01$); pH与铵态氮呈显著负相关($P < 0.05$), 与速效磷呈显著正相关; 铵态氮与硝态氮呈显著正相关。6) 非根际硝态氮与铵态氮呈显著正相关, 与pH、速效磷呈显著负相关; pH与铵态氮呈显著负相关, 与速效磷呈显著正相关。

关键词: 青藏高原; 紫穗槐; 根际土壤; 养分特征

中图分类号: S551⁺.306; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2014)07-1226-07*¹

Effects of *Amorpha fruticosa* planting on soil nutrient characteristics at rhizosphere and non-rhizosphere in Tibetan Plateau

SONG Xin¹, ZHANG Li-jing¹, DAI Wan-an², ZHOU Zhi-yu¹, LI Xiao-zhong²,
ZHOU Yuan-yuan¹, LI Jin-hui¹, JIN Qian¹

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China;

2. Tibet Autonomous Regional Academy of Agricultural Sciences, Lhasa 850000, China)

Abstract: The soil nutrients of *Amorpha fruticosa* cultivated in Lhasa, Tibet were measured in continuous three years from 2010—2012 when the plants were 1-year-age, 2-year-age and 3-year-age, respectively. The test indices included total nitrogen, total phosphorus, soil organic carbon, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, pH and available phosphorus from the rhizosphere and bulk soil. The results indicated that all parameters of the 1-year-age and 2-year-age *A. fruticosa* showed the positive rhizosphere impacts. However, all parameters except with pH and available phosphorus of the 3-year-age *A. fruticosa* didn't show positive rhizosphere impacts. There was no significant variation of soil total nitrogen and phosphorus in rhizosphere and bulk. With the extension of cultivation years, the nitrate nitrogen and ammonium nitrogen of both rhizosphere and bulk soil increased, however, the pH values and available phosphorus

。 收稿日期: 2013-07-11 接受日期: 2013-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31201849); 国家科技支撑计划资助项目(2007BAD80B05)

第一作者: 宋鑫(1989-), 男, 甘肃兰州人, 在读硕士生, 主要从事草地营养生物学研究。E-mail: songx12@lzu.edu.cn

通信作者: 周志宇(1952-), 男, 陕西靖边人, 教授, 主要从事草地营养学和草地恢复生态学的研究。E-mail: zyzhou@lzu.edu.cn

decreased. The organic carbon of bulk soil increase with the extension of cultivation years, however, the organic carbon of rhizosphere soil increase in the second year and decrease in the third year. The total phosphorus of rhizosphere soil had a extremely significant positive correlation with total nitrogen and available phosphorus ($P < 0.01$). The pH values of rhizosphere soil had a significant negative correlation with the ammonium nitrogen ($P < 0.05$) and had a significant positive correlation with available phosphorus ($P < 0.05$). The ammonium nitrogen of rhizosphere and bulk soil had a significant positive correlation with the nitrate nitrogen ($P < 0.05$). The ammonium nitrogen of bulk soil had a significant negative correlation with the pH values and available phosphorus ($P < 0.05$). The pH values of bulk soil had a negative correlation with ammonium nitrogen ($P < 0.05$) and a positive correlation with available phosphorus ($P < 0.05$).

Key words: Tibetan Plateau; *Amorpha fruticosa*; rhizosphere soil; nutrient characteristics

Corresponding author: ZHOU Zhi-yu E-mail: zyzhou@lzu.edu.cn

青藏高原平均海拔 4 000~5 000 m,素有“世界屋脊”、“地球第三级”之称。青藏高原高寒草地面积辽阔,形成独特的高寒草地生态系统^[1],对该区域的生态环境具有十分重要的意义。近年来,“温室效应”的持续增强、气候变暖以及过度放牧等因素严重破坏了青藏高原脆弱的生态系统,高寒草地退化严重、土壤持续沙漠化^[2-3]。控制青藏高原土壤沙化的问题是目前研究的热点。

根际是植物根系活动影响最强烈、最直接的土壤微区域,是植物根系吸收养分的直接平台^[4]。植物在生长过程中,根系会向土壤中释放质子,改变根际土壤 pH,以活化难溶态养分,同时通过吸收根际土壤养分来使其发生变化^[5]。目前对于荒漠区灌木的根际研究报道较多。任伟等^[6]研究发现,干旱荒漠区灌木根际 pH、中量元素、微量元素与非根际各养分性状之间存在复杂的相关性;詹媛媛等^[7]发现干旱荒漠区不同灌木根际土壤 pH 比非根际土壤 pH 值平均低 0.14。但是目前对于高寒地区紫穗槐根际的研究较少。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)别称“棉槐、椒条、棉条、穗花槐”,是一种豆科落叶灌木,原产于美国,现广泛分布于我国东北、华北、西北等地区。紫穗槐具有耐寒、耐旱、耐瘠薄,根系发达等特性,在防风固沙、改良土壤以及保持水土等方面具有显著的作用^[8]。研究表明,一棵 2 龄的紫穗槐具有 300~400 个根瘤,在缺乏有机质的沙荒地上连续种植 5 年以上可使土壤有机质增加 4 倍^[9]。本研究对西藏拉萨人工种植的紫穗槐连续 3 年对其根际、非根际土壤全氮、全磷、有机碳、硝态氮、铵态氮、pH 和速效磷含量变化进行分析,拟为通过种植紫穗槐来改善青

藏高原土壤沙漠化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于西藏拉萨,地处 36°02′45.3″ E, 103°51′17.4″ N。海拔 3 497 m,昼夜温差大,年均温 7.4 °C,年日照时数 3 000 h 以上,年无霜期 100~120 d;年降水量 500 mm 左右,且多集中在 6—9 月,年蒸发量 2 200 mm;年平均风速 2.5 m·s⁻¹,最大风速 32.3 m·s⁻¹,全年大风日数 39.8 d;土壤的主要类型是潮土^[10]。

1.2 样品采集

分别于 2010 年 9 月、2011 年 9 月和 2012 年 9 月选取株龄分别为 1 龄、2 龄、3 龄的紫穗槐样地 3 块(样地土壤沙化比较严重,养分比较缺乏),每块样地随机选取 5 株中等大小的样株用于分析,采用抖落法采集土样^[11],根际土壤记为 R,非根际土壤记为 B。将采集的土样带回实验室自然风干后,将其碾碎,过 2 mm 孔径筛去除土样中的石块和植物残根等杂质,封袋备用。

1.3 土样理化分析

土壤全氮、全磷采用凯氏消化法消化,流动注射分析仪测定;有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;硝态氮、铵态氮采用流动注射法测定;速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 钼锑抗比色法测定;pH 值采用电极法测定(为了方便操作,采用 GB7859-87《森林土壤 pH 值的测定》规定下土水比 1:1 的方法)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 进行数据统计

与分析作图。对根际与非根际各测定指标进行配对样本 t 测验;对不同株龄间各指标差异采用单因素方差分析(ANOVA);对全氮、全磷、有机碳、硝态氮、铵态氮、pH 和速效磷进行相关性分析。

本研究中所使用的“富集率”(Enrichment ratio, E),表示紫穗槐根际土壤对养分的富集程度,即 E 值的大小反映紫穗槐根际效应的强弱。富集率公式为 $E_{R/B}=[(根际含量-非根际含量)/非根际含量] \times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤氮素含量变化特征

2.1.1 全氮含量 土壤全氮含量是衡量土壤改良效果的一个重要指标。2 龄根际和非根际的全氮含量均最大,分别达到 2.79 和 $2.73\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1)。根际全氮含量大小表现为 2 龄>1 龄>3 龄,非根际表现为 2 龄>3 龄>1 龄。1 龄和 2 龄根际全氮含量分别比非根际高 16.2%和 2.2%,3 龄根际小于非根际。非根际全氮含量 2 龄显著高于 1 龄和 3 龄($P<0.05$)。各龄植物根际与非根际间差异不显著($P>0.05$)。1 龄、2 龄穗粮根际土壤对全氮的富集率分别为 16.11%和 5.28%,3 龄未表现出富集(表 1)。

2.1.2 硝态氮含量 根际、非根际硝态氮含量均随着株龄的增加而逐年增加(图 1)。根际硝态氮 2 龄比 1 龄增加 81.8%、3 龄比 2 龄增加 40.9%;非根际硝态氮 2 龄比 1 龄增加 275%,3 龄比 2 龄增加 44%,3 龄显著高于 1 龄($P<0.05$)。各龄植物根际与非根际间差异不显著($P>0.05$)。只有 1 龄对硝态氮有富集效应,富集率为 88.54%(表 1)。

2.1.3 铵态氮含量 根际和非根际铵态氮含量随着株龄增加也呈现逐年增加的趋势(图 1)。3 龄根际和非根际铵态氮含量均显著高于 1 龄和 2 龄($P<0.05$),但 1 龄、2 龄的根际铵态氮含量分别比非根际高 4.3%和 29.7%,而 3 龄根际比非根际低 10.6%。各株龄根际与非根际间差异不显著,只有 1 龄、2 龄有富集效应,富集率分别为 4.30%和 29.77%(表 1)。

2.2 不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤磷素含量变化特征

2.2.1 全磷含量 根际、非根际全磷 1 龄、2 龄、3 龄差异均不显著(图 2)。随着株龄的增加,根际全磷含量有下降的趋势,其变化在 $3.05 \sim 3.86$

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但差异均不显著($P>0.05$)。非根际全磷含量 3 龄最大,达到 $3.70\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但与其他株龄间差异不显著。3 个株龄的根际与非根际间差异均不显著。1 龄、2 龄对全磷有富集,富集率分别为 9.35%和 1.48%(表 1)。

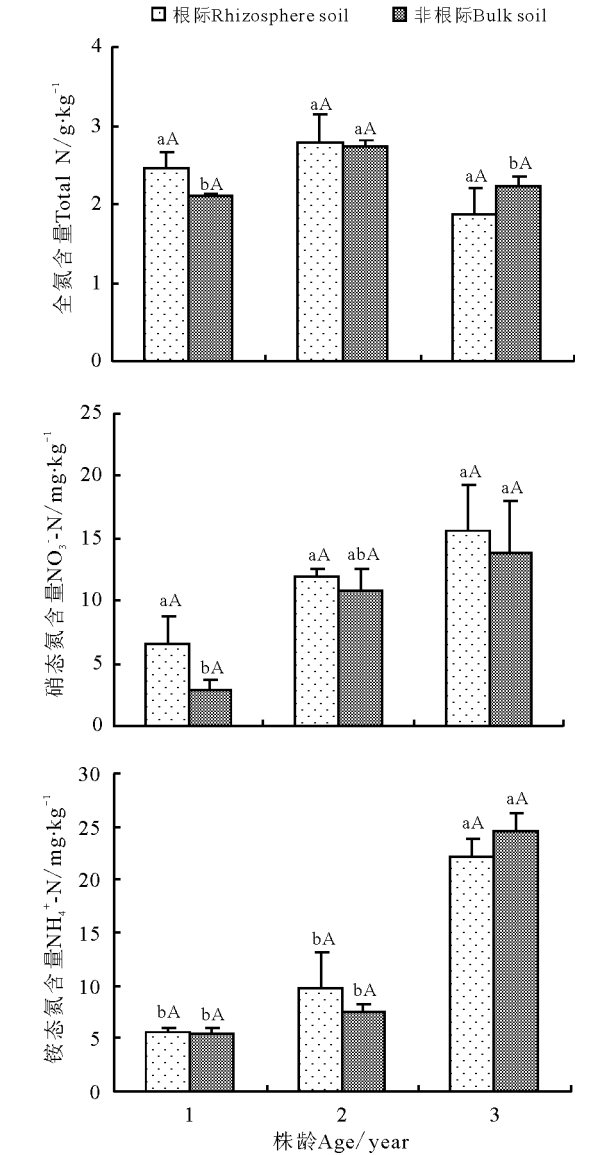


图 1 不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤氮素养含量的变化
Fig. 1 Change of N in rhizosphere and bulk soil in different *Amorpha fruticosa* ages

注:不同小写字母表示同一部位不同株龄间差异显著($P>0.05$),不同大写字母表示同一株龄根际与非根际间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lower case letters for the same part mean significant difference among different ages at 0.05 level. Different capital letters for the same age mean significant difference between rhizosphere and bulk soil at 0.05 level. The same below.

表 1 不同株龄紫穗槐根际与非根际各养分的富集率

Table 1 Enrichment ratio of rhizosphere and bulk soil for different ages of *Amorpha fruticosa*

测定指标 Items	株龄 years	富集率 Enrichment/%
全氮 Total nitrogen	1-year	16.11
	2-year	5.28
	3-year	-16.59
全磷 Total phosphorus	1-year	9.35
	2-year	1.48
	3-year	-17.57
有机碳 Organic carbon	1-year	37.89
	2-year	30.64
	3-year	-14.38
硝态氮 Nitrate nitrogen	1-year	88.54
	2-year	-8.79
	3-year	-10.79
铵态氮 Ammonium nitrogen	1-year	4.30
	2-year	29.77
	3-year	-9.64
pH	1-year	-8.06
	2-year	-6.73
	3-year	-3.35
速效磷 Available phosphorus	1-year	-12.49
	2-year	-2.91
	3-year	-21.14

2.2.2 速效磷含量 紫穗槐根际和非根际土壤速效磷含量均随株龄增加而逐年递减(图 2),其中 1 龄根际和非根际均显著高于 2 龄、3 龄($P<0.05$)。非根际速效磷含量均大于根际,1 龄、2 龄、3 龄非根际比根际高 14.3%、11.6%和 26.8%。另 1 龄非根

际显著高于根际($P<0.05$)。3 个株龄均未表现出富集效应(表 1)。

2.3 不同株龄紫穗槐根际与非根际有机碳含量的变化

不同株龄间根际土壤有机碳与不同株龄间非根际有机碳含量差异均不显著($P>0.05$)(图 3)。1 龄、2 龄根际有机碳含量均高于非根际,3 龄根际有机碳小于非根际。根际有机碳含量大小顺序依次为 2 龄>1 龄>3 龄,其中 2 龄根际有机碳含量最高,达到了 $16.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。非根际有机碳含量则表现出了随着株龄增加而逐渐增加的趋势,即 3 龄>2 龄>1 龄。3 个株龄根际与非根际间差异不显著,只有 1 龄、2 龄对有机碳有较强富集效应,且富集率分别为 37.89%和 30.64%(表 1)。

2.4 不同株龄紫穗槐根际与非根际 pH 值的变化

不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤 pH 值均小于 7,表现为酸性(图 3),根际 pH 在 5.07 ~ 6.45;非根际 pH 在 5.24 ~ 6.97。根际、非根际 pH 均随株龄增加而逐年递减,其中 1 龄根际和非根际土壤 pH 均显著高于 2 龄和 3 龄($P<0.05$);1 龄、2 龄、3 龄均为根际土壤 pH 小于非根际土壤 pH,但差异不显著($P>0.05$)。只有 2 龄根际显著低于非根际,各株龄均未表现出富集效应(表 1)。

2.5 紫穗槐根际和非根际土壤养分之间的关系

相关性分析表明(表 2),根际全磷与全氮和速效磷均具有极显著的正相关关系($P<0.01$);铵态氮与硝态氮具有显著正相关关系($P<0.05$),与 pH 具有显著负相关关系($P<0.05$);速效磷与 pH 呈显著正相关关系($P<0.05$)。非根际土壤硝态氮与

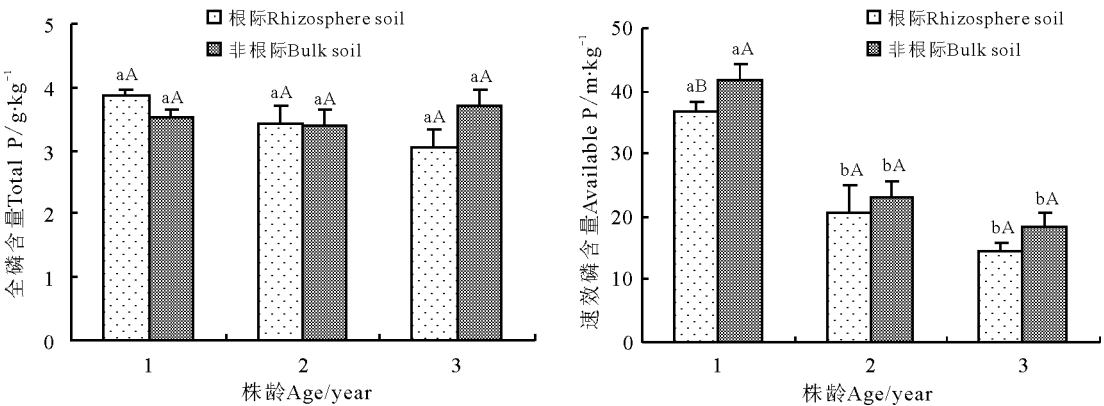


图 2 不同株龄紫穗槐根际与非根际土壤磷素含量的变化

Fig. 2 Change of P in rhizosphere and bulk soil in different *Amorpha fruticosa* ages

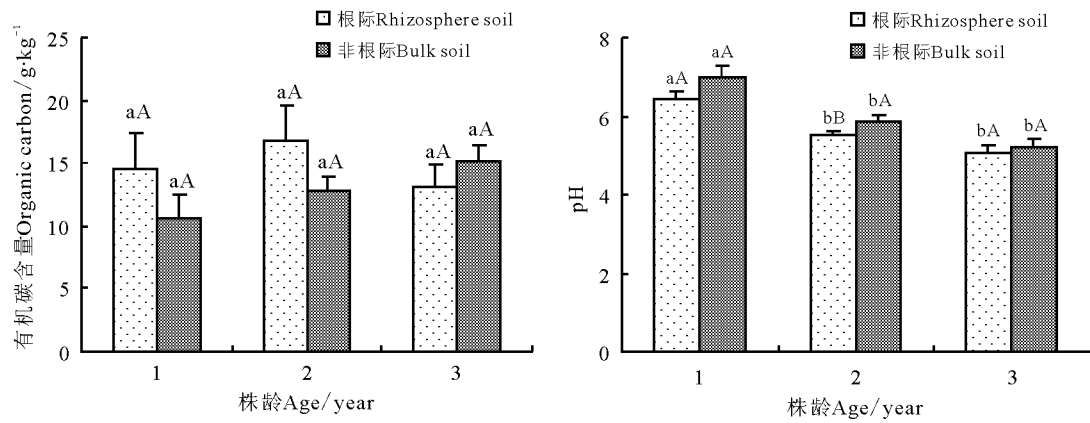


图3 不同株龄紫穗槐根际与非根际有机碳和pH值含量的变化

Fig. 3 Change of soil organic carbon in and pH in rhizosphere and bulk soil in different *Amorpha fruticosa* ages

表2 根际与非根际土壤养分之间的相关系数

Table 2 The correlation coefficient matrix of nutrition's concentrations in rhizosphere and bulk soil

部位 Location	土壤养分 Soil nutrition	全氮 Total N	全磷 Total P	有机碳 Soil organic carbon	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	pH
根际 Rhizosphere soil	全磷 Total P	0.802**					
	有机碳 Soil organic carbon	0.539	0.339				
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	-0.173	-0.372	-0.267			
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	-0.372	-0.496	-0.196	0.748*		
	pH	0.193	0.536	-0.225	-0.578	-0.721*	
	速效磷 Available P	0.429	0.816**	0.250	-0.606	-0.593	0.773*
非根际 Bulk soil	全磷 Total P	0.170					
	有机碳 Soil organic carbon	0.327	0.585				
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.359	0.239	0.589			
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	-0.177	0.286	0.632	0.686*		
	pH	-0.293	-0.146	-0.439	-0.779*	-0.697*	
	速效磷 Available P	-0.419	0.112	-0.567	-0.741*	-0.621	0.795*

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平显著相关。
Note: * and ** means correlation is significant at 0.05 and 0.01 level (2-tailed).

速效磷、pH 呈显著负相关($P<0.05$),与铵态氮呈显著正相关($P<0.05$);pH 与铵态氮呈显著负相关($P<0.05$),与速效磷呈显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论与结论

本研究发现 1 龄和 2 龄紫穗槐根际土壤全氮、全磷、有机碳、硝态氮、铵态氮、pH 和速效磷富集率均表现出“根际正效应”(是指养分在根际的富集,表示根际“肥岛效应”的强弱^[12]),而 3 龄紫穗槐除 pH、速效磷外,其余指标均未表现出根际正效应。

土壤全氮含量是衡量土壤肥力的一个重要指标,其大小取决于氮素的输入量和输出量的相对大小^[13]。氮素的输入量大小主要依靠植物残体的归还、生物固氮和水流的输入^[14]。紫穗槐作为豆科植物,其根部发达,能够被根瘤菌侵染结成根瘤进行生物固氮。1 龄、2 龄紫穗槐根际、非根际土壤全氮含量有增加趋势,且根际均高于非根际。这可能是由于紫穗槐通过生物固氮以及土壤中生物残体的分解使得根际非根际土壤全氮含量增加;3 龄紫穗槐与 1 龄、2 龄相比,根际、非根际全氮含量均下降,但基本

保持稳定。造成这种结果可能是由于 3 龄紫穗槐长旺盛,根部吸收氮素的速度超过了土壤中生物残体的分解速度和生物固氮速度,再加上土壤氮素的挥发、氮素向土壤深层淋洗等原因,最后造成 3 龄根际含量比非根际低。

本研究中,不同株龄紫穗槐根际和非根际土壤硝态氮含量和铵态氮含量均随着株龄的增加而增加,其原因是土壤中的硝化细菌和反硝化细菌通过“硝化和反硝化作用”不断的形成硝态氮和铵态氮,并且二者之间可以相互转化^[15]。段英华等^[16]研究发现,影响根际土壤硝态氮含量的因素有土壤通气性和硝化细菌的活性;一些国外学者研究发现,土壤酸碱度是影响硝化细菌活性的重要因素^[17-18]。同时有研究表明,温度也会影响硝化细菌的活力,温度较低,土壤中硝化细菌活力较低,硝化作用较弱,造成土壤硝态氮含量较低^[19],而在本研究中,3 龄根际和非根际土壤铵态氮含量明显高于硝态氮,这与前人研究结果^[20]一致。而 1 龄和 2 龄紫穗槐根际非根际土壤的硝态氮、铵态氮含量却相差不大,造成这一结果的原因不明,还有待于进一步研究。根际和非根际硝态氮、铵态氮含量均随种植年限增加逐渐增加,3 龄紫穗槐根际、非根际含量均显著高于 1 龄和 2 龄。但相同株龄根际与非根际含量有所差异:1 龄根际硝态氮含量大于非根际,而 2 龄、3 龄均表现为非根际大于根际;1 龄、2 龄根际铵态氮含量均高于非根际,3 龄根际低于非根际。产生上述结果的原因可能是种植前期紫穗槐根系尚不发达,对根际土壤中硝态氮、铵态氮的吸收较少,因此 1 龄紫穗槐根际硝态氮含量、铵态氮含量均高于非根际;但随株龄的增加,紫穗槐根系生长逐渐加快,对根际土壤中硝态氮和铵态氮的吸收增强,同时由于根系不断生长,使得土壤通气状况改善,增强了硝化细菌的活性,使硝化作用不断进行;根系分泌物不断进入土壤,促进反硝化细菌活性的增强,硝化作用也为反硝化作用提供了电子受体使得土壤反硝化作用更为活跃^[21],再加上根瘤菌的生物固氮为硝化作用和反硝化作用提供了反应原料,使得硝化作用和反硝化作用持续进行,所以造成 2 龄和 3 龄根际、非根际硝态氮、铵态氮含量显著增加。相关性分析发现根际、非根际

土壤铵态氮和硝态氮均呈显著正相关关系。所以,连续种植紫穗槐能够有效地增加土壤中无机态氮的含量,提高土壤肥力。

本研究中,随紫穗槐株龄的增加,不同株龄间根际非根际土壤全磷含量差异不明显,这与张彦东等^[22]对落叶松(*Larix gmelinii*)的研究结果一致。根际土壤全磷含量有随种植年限的增加而减少的趋势,说明紫穗槐在生长过程中吸收利用了一定量的磷。1 龄、2 龄非根际全磷含量变化不明显,且均小于根际;3 龄非根际全磷含量高于根际,说明随着种植年限的增加,紫穗槐根际全磷出现了亏空现象,即非根际大于根际。随种植年限的增加,紫穗槐根际、非根际速效磷含量均出现显著下降,其中非根际速效磷含量均大于根际,这与孙磊^[23]、张学利等^[24]研究结果相一致。原因可能是紫穗槐在生长过程中根部吸收根际土壤的速效磷,形成根际速效磷的“亏缺区”^[25]。土壤 pH 值是衡量土壤性状的一个重要指标,它决定着土壤中养分的有效性,同时对植物耐重金属能力、土壤微生物活性、土壤酶活性等也有重要的影响^[26-27]。本研究结果显示,不同株龄紫穗槐根际土壤 pH 值均低于非根际,且表现出逐年下降的趋势,这与叶功富等^[28]研究结果相一致。植物根系分泌有机酸以及吸收阴阳离子不平衡是造成土壤 pH 逐渐下降的主要原因^[29]。相关性分析表明根际速效磷和根际 pH 值、根际全磷之间具有显著的正相关关系。

土壤有机碳是土壤重要的组成部分,是衡量土壤品质和土壤肥力重要的指标^[30]。土壤有机碳的来源复杂,包括动植物残体、排泄物、分泌物以及腐殖质等。影响根际土壤有机碳变化的因素主要有温度、植被、土地利用方式、根系分泌物、根际微生物活动^[20,31]。本研究结果显示,紫穗槐根际非根际有机碳含量变化表现为:1 龄和 2 龄根际非根际土壤有机碳含量均呈增加趋势且根际均高于非根际;3 龄根际土壤有机碳含量出现了下降趋势,且根际低于非根际,这一结果原因不明,尚待进一步证实。但从非根际土壤有机碳含量来看,随着种植年限的增加而提高,从中可以看出青藏高原种植紫穗槐对培肥土壤有明显的实效。

参考文献

- [1] 李娜,王根绪,高永恒,籍长志. 青藏高原生态系统土壤有机碳研究进展[J]. 土壤,2009,41(4):512-519.
- [2] 李森,董玉祥,董光荣,杨萍,张春来. 青藏高原土地沙漠化区划[J]. 中国沙漠,2001,21(4):418-427.
- [3] 李春桃,楚可要,刘经星,易美桂,梁玉祥. 西藏东部沙化土壤改性研究[J]. 科技资讯,2008(33):92-94.
- [4] 董兆佳,孟磊. 海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征[J]. 中国农学通报,2010,26(6):309-312.
- [5] 曾曙才,苏志尧,陈北光,俞元春. 植物根际营养研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2003,27(6):79-83.
- [6] 任伟,周志宇,詹媛媛,薛梓瑜. 阿拉善荒漠灌木根际中、微量元素含量特征[J]. 生态学报,2009,29(7):3759-3767.
- [7] 詹媛媛,薛梓瑜,任伟,周志宇. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. 生态学报,2009,29(1):59-66.
- [8] 刘雪云,周志宇,郭霞,王瑞,梁坤伦. 生长期紫穗槐含水量和生长量变化规律及与土壤水分的关系[J]. 草原与草坪,2011,31(4):10-14.
- [9] 孙耀清,阎腾飞. 紫穗槐的特征特性及育苗造林技术[J]. 农技服务,2012,29(6):691-692.
- [10] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土种志[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [11] 厉婉华. 栓皮栎、杉木和火炬松根际与非根际土壤氮素及 pH 差异的研究[J]. 南京林业大学学报,1996,20(2):49-52.
- [12] 苏永中,赵哈林,张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(7):802-806.
- [13] 吴志祥,谢贵水,陶忠良,周兆德,王旭. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1484-1491.
- [14] 高俊琴,欧阳华,白军红. 若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征[J]. 水土保持学报,2006,20(1):76-79,86.
- [15] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:193-196.
- [16] 段英华,张亚丽,沈其荣. 水稻根际的硝化作用与水稻的硝态氮营养[J]. 土壤学报,2004,41(5):803-809.
- [17] Carlyle J C, Malcolm D C. Nitrogen availability beneath pure spruce and mixed larch spruce stands growing on a deep peat[J]. Plant and Soil,1986,93:95-113.
- [18] Pastor J, Post W M. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles[J]. Biogeochemistry,1986(2):3-27.
- [19] 黄娟,李稹,张健,朱砺之,崔明勋,李卓宪. 低温域湿地植物根际氮转化强度[J]. 东南大学学报(自然科学版),2011,41(6):1231-1235.
- [20] 杜明新,张丽静,周志宇,郭霞,卢鑫,陶晓慧. 高寒沙化草地不同灌木根际与非根际土壤氮素、有机碳含量特征[J]. 中国草地学报,2011,33(4):18-23.
- [21] 李振高,李良谟,潘映华,吴胜春. 小麦苗期根系分泌物对根际反硝化细菌的影响[J]. 土壤学报,1995,32(4):408-413.
- [22] 张彦东,白尚斌,王政权,王庆成. 落叶松根际土壤磷的有效性研究[J]. 应用生态学报,2001,12(1):31-34.
- [23] 孙磊. 不同连作年限对大豆根际土壤养分的影响[J]. 中国农学通报,2008,24(12):266-269.
- [24] 张学利,杨树军,张百习,袁春良. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比[J]. 福建林学院学报,2005,25(1):80-84.
- [25] 刘芷宇. 植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性[J]. 土壤,1992(2):97-101.
- [26] 王水良,王平,王趁义. 铝胁迫下马尾松幼苗有机酸分泌和根际 pH 值的变化[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(1):87-91.
- [27] 李粉茹,于群英,邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. 农业工程学报,2009,25(1):217-222.
- [28] 叶功富,侯杰,张立华,卢昌义,陈胜,黄荣钦. 不同年龄木麻黄林地根际土壤养分含量和酶活性动态[J]. 水土保持学报,2006,20(4):86-89.
- [29] 张福锁. 植物根引起的根际 pH 值变化的原因及效应[J]. 土壤通报,1993,24(1):43-45.
- [30] 王清奎,汪思龙,高洪,刘艳,于小军. 土地利用方式对土壤有机质的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(4):360-363.
- [31] 王朴,王雅洁,胡红青,刘凡. 红壤和黄褐土根际土壤养分变化的研究[J]. 华中农业大学学报,2006,25(5):520-523.