

岷江上游本地种油松和外来种辐射松造林对土壤磷的影响

周星梅^{1,2}, 潘开文^{1,*}, 王进闯¹

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过测定岷江上游 16 年生本地种油松和外来种辐射松人工林下不同土壤层次中各形态磷素含量以及磷酸酶活力, 阐述两种林分对土壤磷素含量及其分布的影响。结果表明, 在各个土层中, 两种林分下的土壤含水量、pH 值、有机碳的含量以及微生物生物量磷均无显著差异。在 0 ~ 20cm 土层中, 油松林与辐射松林土壤全磷、Al-P、Fe-P、Ca-P 含量以及磷酸酶活力均无显著差异, 而油松林土壤有效磷和有机磷显著高于辐射松林; 在 20 ~ 40cm 土壤中, 油松林土壤全磷、有效磷、有机磷、Al-P、Fe-P 含量与辐射松林差异不显著, 油松林土壤 Ca-P 含量、酸性磷酸酶和中性磷酸酶活力显著高于辐射松林; 在 40 ~ 60cm 土壤中, 油松林土壤除中性磷酸酶活力与辐射松林的差异不显著外, 其余各形态磷素含量和酸性磷酸酶活力变化与 20 ~ 40cm 土壤中的一致。此外, 随土壤深度的增加, 两种人工林土壤各形态磷素含量、磷酸酶活力都呈降低的趋势。单从土壤磷的状况看, 油松林土壤中磷素含量高于辐射松林。

关键词:油松; 辐射松; 造林; 土壤; 磷素

文章编号: 1000-0933(2009)12-6630-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effects of native *Pinus tabulaeformis* and exotic *Pinus radiata* afforestation on soil phosphorus in the upper reaches of Minjiang River

ZHOU Xing-Mei^{1,2}, PAN Kai-Wen^{1,*}, WANG Jin-Chuang¹

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6630 ~ 6637.

Abstract: This paper examined the contents of different phosphorus (P) pools and phosphatase activity in different soil layers under exotic *Pinus radiata* (PR) plantation and adjacent native *Pinus tabulaeformis* (PT) plantation. Results showed that there were no significant differences in soil total organic carbon (TOC), soil moisture content (SMC), pH and soil microbial biomass phosphorus (SMBP) in each soil layer between the two plantations. In the 0 — 20 cm depth soil, the contents of available phosphorus (AP) and total organic phosphorus (TPo) were significant higher in the PT plantation than the PR plantation, while in the 20 — 40 cm depth soil, the contents of Ca-P, acid and neutral phosphatase activities were significant higher in the PR plantation than the PT plantation. In the 40 — 60 cm depth soil, the PT plantation had significantly higher Ca-P and acid phosphatase activity than the PR plantation. In addition, with the increasing soil depth, the contents of different P pools and phosphatase activity decreased in both plantations. These results confirmed that the P content in the PT plantation was higher than in the PR plantation. Therefore, in terms of the supply of soil P, the PT could be superior to the PR as the tree species selection for the afforestation program in this region.

基金项目:中国科学院-乐山市院地科技合作资助项目;中国科学院西部之光联合学者资助项目;国家“十五”和“十一五”科技攻关项目子课题资助项目(2006BAC01A15, 2005BA807B09LA06);中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX2-XB2-02-01-03);四川省科技攻关资助项目

收稿日期: 2008-08-06; 修订日期: 2008-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pankw@cib.ac.cn

Key Words: *Pinus tabulaeformis*; *Pinus radiata*; afforestation; soil; phosphorus

土地利用变化影响土壤的理化和生物学特性^[1~3]。在新西兰,营造辐射松人工林可使草地土壤氮储量减少,但碳氮比不变^[4];造林还会导致土壤微生物生物量碳、微生物生物量磷、土壤呼吸以及土壤磷酸酶活力减小^[5],而这些因素的改变又会反作用于土壤质量等^[6~8]。

磷是生命现象的重要调控物质,土壤中磷素水平的高低会干扰生态系统的正常功能,进而影响生态系统安全。有研究^[9,10]发现造林会减少土壤中有有机磷的含量以及磷酸酶活力,也有研究认为造林会增加土壤中磷的含量^[11,12],因此,造林对土壤中磷素含量的影响并没有一致的结论,且这些研究多集中于湿润地区的草地和灌丛土壤表层^[12~14]。由于磷在土壤中移动性小,对植物忍受干旱有重要意义,且植物吸收磷酸根离子对土壤水分条件非常敏感,因此,研究干旱地区磷素的周转和形态就显得极为重要^[15,16],但目前这方面的研究相对较少。

辐射松(*Pinus radiata*)起源于加利福尼亚州,已成为世界上重要的造林树种。有研究发现营造辐射松人工林后,土壤中有有机碳、全碳、有机磷、微生物生物量磷含量以及磷酸酶活力降低^[9];辐射松的凋落物对菊科茼蒿属、禾本科鸭茅属以及豆科车轴草属植物种子的萌发以及幼苗的生长有负面影响^[17]。油松(*Pinus tabulaeformis*)是干旱半干旱地区最重要的乡土树种之一^[18],与辐射松同属松科松属植物。

岷江上游干旱河谷是我国生态环境十分脆弱的地区,由于降水少、蒸发量大、降水分布不均,所以植被恢复十分困难^[19];而且该区域因地形破碎,山高坡陡,滑坡、泥石流、崩塌等自然灾害十分突出,因此,恢复该区域的植被生态系统,提高植被生态系统的服务功能,减少水土流失,对于区域的社会经济发展和生态安全有十分重要的意义。自20世纪80年代,在岷江上游营造了大面积油松林,同时,引种了辐射松,并在汶川、茂县、理县等营造了大面积的辐射松林,成为我国引种辐射松种植面积最大的区域。该区域的次生灌丛与油松人工林土壤理化性质以及灌丛、油松、辐射松凋落物分解的比较研究已有报道^[20,21],但目前尚未见对油松人工林和辐射松人工林影响土壤磷素的比较研究报道。

本研究通过对岷江上游干旱地区的辐射松和油松人工林以及天然灌丛土壤剖面中不同形态磷素与土壤磷酸酶活力的垂直分布状况的比较,探讨外来种和当地种对土壤剖面磷素垂直分布影响的差异,从对土壤磷素影响的角度评价是否亲缘关系较近的本地种比外来种更加适于当地造林,以降低外来种所带来的生态风险,为该区域土地利用以及人工林的经营管理提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

本研究的油松和辐射松林位于四川省阿坝州茂县,地理位置 E 103°51'04" ~ 56°52", N 31°42'20" ~ 44°53"。根据中国科学院成都生物研究所茂县生态站多年气象观测的数据,该地区年均温为 8.9℃, ≥10℃ 积温为 2690.8℃,年降水量为 900mm,年蒸发量为 795.8mm。该地区为典型的岷江上游干旱河谷地貌,生态环境恶化。为改善当地生态环境,近 20 多年来,在该区域营造了大量的人工纯林,主要包括油松(*Pinus tabulaeformis*)林、辐射松(*Pinus radiata*)林等。这两种人工林均为砍伐次生灌丛后营造的第一代人工林,林龄均为 16a,海拔为 1600 ~ 1780m,阳坡,均为褐土,颜色在浅褐与暗褐色之间。

同时,在该区域还保持有大量次生天然灌丛。主要物种为黄栌(*Cotinus coggygria*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、川榛(*Corylus heterophylla*)、绢毛蔷薇(*Rosa sericea*)、多苞蔷薇(*Rosa multibracteata*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、杭子梢(*Campylotropis macrocarpa*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、平枝栒子(*Cotoneaster horizontalis*)、薹草(*Carex baccans*)、竹节草(*Chrysopogon aciculatus*)、小柴胡(*Bupleurum tenue*)等。本文所测试的油松人工林、辐射松人工林、次生灌丛 3 种群落都处于同一坡面并相邻。油松林平均树高为 12.8m,平均胸径为 10.2cm,郁闭度为 0.7;辐射松林平均树高为 13.5m,平均胸径为 13.5cm,郁闭度为 0.7。在营造前,自然生态环境条件较为一致。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查取样

采样方法参照 Zhao 等^[10]和 Wang 等^[22]的方法。2007 年 9 月,分别在 3 种林分内,选择 5 个 10m × 10m 的样地,在每块样地内随机布 5 点,按 0 ~ 20cm、20 ~ 40cm 和 40 ~ 60cm 分层取样,去除石块、植物残体及根系,每块样地内相同层次土壤混合均匀,约 1000g 土壤组成一个混合土样,装入可密封的塑封袋中带回实验室。然后将采集的每个土壤样品分成 3 部分:一部分立即测定土壤自然含水量;一部分过 2 mm 筛,装入保鲜袋,于 4 °C 冰箱中保存,供微生物生物量和酶活性的测定;一部分风干后研磨,过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于全磷(TP)、有效磷(AP)、有机碳(TOC)及其它形态磷素的测定。

1.2.2 测定方法

土壤自然含水量用质量法(GB 7830-87);pH 值用 2.5:1 的土水比测定(GB 7859-87);有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7857-87);全磷用浓硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法(GB 7852-87);有效磷用盐酸-硫酸浸提-钼锑抗比色法(GB 7853-87);土壤酸性磷酸酶以及中性磷酸酶活力用磷酸苯二钠比色法^[23];微生物量磷用氯仿熏蒸后 NaHCO₃ (pH = 8.5) 浸提,转换系数为 0.4^[23];无机磷的分离用改进的 Chang-Jackson 方法,分别用 0.5 mol/L 的 NH₄F 提取 Al-P,0.1 mol/L 的 NaOH 提取 Fe-P,0.5 mol/L 的 H₂SO₄ 提取 Ca-P^[24];有机磷用 Saunder-Williams 干烧法测定^[24]。

1.2.3 数据处理

采用 SPSS(11.5) 进行方差分析,如果差异显著($P < 0.05$),进一步采用最小极差法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

在 0 ~ 20cm 土壤中,油松林土壤自然含水量显著低于辐射松林和灌丛,但辐射松林和灌丛间无显著差异。在 20 ~ 40cm 以及 40 ~ 60cm 土层中,各林分土壤自然含水量均无显著差异。随着土壤深度的增加,3 种林分土壤含水量均呈下降趋势(表 1)。

在每一土壤层次中,3 种林分土壤 pH 值的差异均不显著,都为微酸性,随土壤深度的增加,变化不显著。

表 1 不同林下土壤剖面基本理化性质

Table 1 Basal physical and chemical properties of soil profile under different plantations

土壤层次 Depth (cm)	植被 Vegetation	SMC (%)	pH	TOC (g·kg ⁻¹)
0 ~ 20	灌丛 Shrub	22.12 ± 1.13a	5.87 ± 0.16a	36.49 ± 0.31a
	辐射松林 <i>Pinus radiata</i>	19.97 ± 0.84a	6.09 ± 0.05a	20.74 ± 2.84b
	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	13.90 ± 0.96b	6.07 ± 0.10a	27.85 ± 2.51b
20 ~ 40	灌丛	15.67 ± 2.33a	6.10 ± 0.17a	16.31 ± 1.16b
	辐射松林	13.35 ± 0.40a	6.16 ± 0.06a	18.79 ± 0.26a
	油松林	12.82 ± 1.02a	6.17 ± 0.25a	20.46 ± 0.20a
40 ~ 60	灌丛	13.45 ± 0.89a	6.16 ± 0.18a	12.73 ± 0.96b
	辐射松林	11.74 ± 0.93a	6.31 ± 0.14a	14.68 ± 1.80ab
	油松林	10.25 ± 2.43a	6.20 ± 0.03a	17.53 ± 0.69a

表中数值为平均值 ± SE ($n = 5$), 数值后的字母表示进行 LSD 多重比较时在 $\alpha = 0.05$ 水平上的差异显著性,同一列中不同字母表示差异显著 The data in the table indicates means ± SE ($n = 5$); The letter after the number stands for significant difference at $\alpha = 0.05$ level respectively in the process of LSD multiple comparisons, that are not followed by the same letter in the same row mean significantly different; 下同 the same below

3 种林分土壤有机碳的含量随土壤深度的增加而减少。在 0 ~ 20cm 土层,灌丛有机碳含量最高,显著高于油松林和辐射松林,但油松林与辐射松林差异并不显著;在 20 ~ 40cm 土壤中,辐射松林和油松林土壤有机碳含量差异不显著,但均显著高于灌丛;在 40 ~ 60cm 土壤中,油松林有机碳含量最高,显著高于灌丛,但与辐

射松林差异不显著,辐射松林和灌丛的差异也不显著。

2.2 土壤中不同形态磷素含量

在 0~20 cm 土壤中,3 种林分的土壤全磷、Al-P 和 Fe-P 的含量均无显著差异;油松林土壤有效磷的含量显著高于灌丛和辐射松林,但辐射松林与灌丛差异并不显著;3 种林分的土壤有机磷含量存在显著差异,油松林的含量最高,灌丛的最低;Ca-P 在油松林土壤中含量最高,显著高于灌丛,但与辐射松林无显著差异,辐射松林与灌丛也无显著差异。在 20~40 cm 土壤中,3 种林分的土壤 Fe-P 含量无显著差异;土壤全磷含量在油松林中最高,显著高于灌丛,但与辐射松林差异不显著,辐射松林与灌丛的也不显著;土壤有效磷在油松林中最高,与辐射松林差异不显著,但二者均显著高于灌丛;油松林和辐射松林土壤有机磷含量差异不显著,但二者均显著高于灌丛;Al-P 含量在辐射松林中最高,显著高于灌丛,但与油松林无显著差异,油松林与灌丛的差异也不显著;土壤 Ca-P 含量在 3 种林分中存在显著差异,其中油松林最高,灌丛最低。在 40~60 cm 土壤中,3 种林分的土壤 Al-P 和 Fe-P 的含量无显著差异;土壤全磷在油松林中含量最高,显著高于灌丛,与辐射松林无显著差异,辐射松林与灌丛的差异也不显著;油松和辐射松林土壤有效磷和有机磷含量差异均不显著,均显著高于灌丛;另外,3 种林分土壤的 Ca-P 也存在显著差异,其中,油松林含量最高,辐射松林含量最低。

表 2 不同林下土壤层次各形态磷素含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 Phosphorus in different soil layers under different plantations

土层 Depth (cm)	植被 Vegetation	TP	AP	TPo	Al-P	Fe-P	Ca-P
0~20	灌丛	149.93±14.92a	3.67±0.04b	33.22±3.48c	1.97±0.35a	4.86±0.82a	53.86±4.60b
	辐射松林	177.78±10.04a	4.00±0.26b	73.57±5.36b	2.39±0.20a	4.21±0.52a	65.44±1.98ab
	油松林	185.50±8.64a	6.01±0.27a	87.93±2.46a	2.19±0.06a	5.51±0.37a	72.61±3.22a
20~40	灌丛	135.74±15.72b	2.20±0.36b	8.43±1.17b	1.63±0.28b	1.29±0.42a	38.78±3.39c
	辐射松林	143.90±2.87ab	3.97±0.23a	62.42±1.71a	2.43±0.10a	2.79±0.27a	50.51±2.99b
	油松林	173.17±6.68a	4.97±0.28a	58.78±2.04a	2.01±0.13ab	1.53±0.67a	70.24±3.37a
40~60	灌丛	108.18±8.63b	2.15±0.22b	6.70±1.29b	1.30±0.13a	1.30±0.13a	34.29±3.39b
	辐射松林	130.92±4.72ab	3.18±0.26a	28.80±3.23a	1.14±0.23a	1.27±0.18a	20.38±2.37c
	油松林	152.36±13.86a	3.62±0.18a	21.70±1.90a	1.20±0.09a	1.70±0.82a	52.19±0.93a

TP:全磷 Total phosphorus ; AP:有效磷 Available phosphorus; TPo:总有机磷 Total organic phosphorus

2.3 土壤生物学性质

2.3.1 土壤磷酸酶

土壤中性磷酸酶活力随土壤深度的增加而减少。在 0~20cm 土壤中,中性磷酸酶的活力在灌丛中最高,显著高于辐射松林和油松林,但辐射松林和油松林差异不显著。在 20~40cm 土壤中,油松林中性磷酸酶活力显著高于辐射松林和灌丛,但辐射松林和油松林无显著差异。在 40~60cm 土壤中,3 种林分土壤中性磷酸酶活力差异均不显著(图 1)。

土壤酸性磷酸酶活力也随土壤深度的增加而降低。在 0~20cm 土壤中,3 种林分酸性磷酸酶活力无显著差异;在 20~40cm 土壤中,油松林酸性磷酸酶活力最高,辐射松林的最低,油松林与灌丛无显著差异,但二者均显著高于辐射松林;在 40~60cm 土壤中,油松林酸性磷酸酶活力显著高于灌丛和辐射松林,其在辐射松林中最低,但灌丛与辐射松林无显著差异(图 2)。

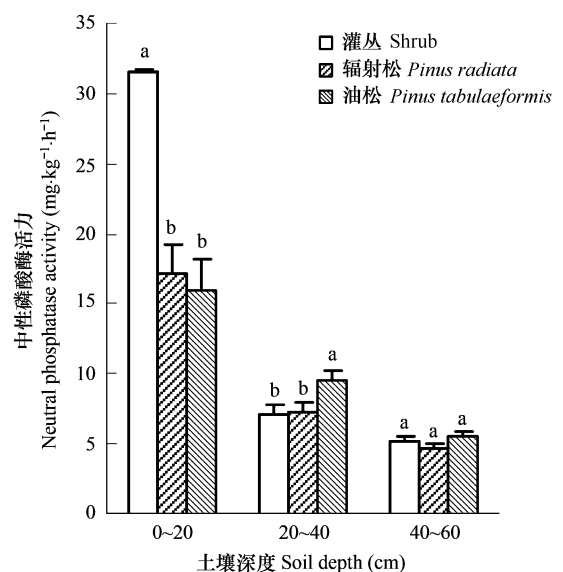


图 1 不同植被下土壤中性磷酸酶活力
Fig. 1 Neutral phosphatase activity under different plantations

2.3.2 土壤微生物生物量磷

图3表明,各林分土壤微生物生物量磷(soil microbial biomass phosphorus SMBP)含量都随土壤深度的增加而减少。在0~20cm土壤中,灌丛林SMBP的含量显著高于辐射松林和油松林,油松林与辐射松林无显著差异。在20~40cm土壤中,SMBP含量的变化与0~20cm土壤中的一致;在40~60cm土壤中,3种林分的SMBP含量无显著差异。

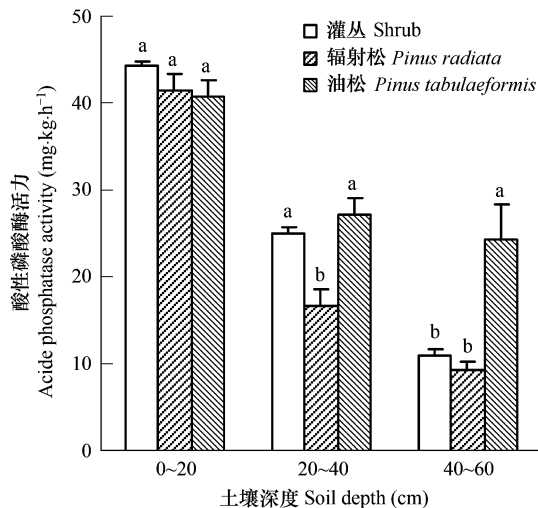


图2 不同植被下土壤酸性磷酸酶活力

Fig. 2 Acid phosphatase activity under different plantations

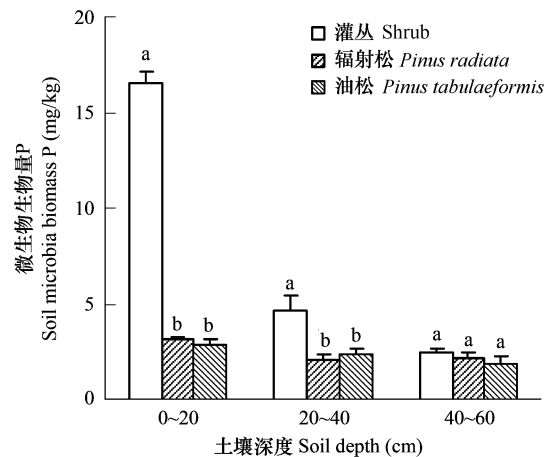


图3 不同植被下微生物生物量磷的含量

Fig. 3 Content of microbial biomass P under different plantations

3 讨论

3.1 土壤基本理化性质

3种林分土壤含水量均随土壤深度的增加而减少,0~20cm土层中,油松林土壤自然含水量显著低于辐射松林和灌丛,而在20~40cm以及40~60cm土层中,各林分土壤自然含水量均无显著差异,这是因为灌丛林地内物种丰富,凋落物持水能力强,蒸发较少,土壤水分集中在土壤表层,而两个人工林内凋落物单一,凋落物持水能力较弱,导致灌丛土壤的含水率高于人工林,而3种林分下层土壤含水率差异不显著^[20]。

酸碱性对土壤肥力有较大影响,是影响植物生长的重要因素之一。本研究表明,3种林分土壤pH值无显著差异,都呈微酸性,且随土壤深度的增加酸性略有减弱,这与其它研究结果相似^[20,25]。

土壤有机碳主要集中在土壤表层,灌丛有机碳含量最高,这是因为灌丛表层凋落物较为丰富^[18],生物归还量大,微生物活动和一些生化反应在土壤表层最为活跃,且灌丛林下的凋落物分解转化比针叶简单,分解周期短,易积累较多的有机碳^[26]。在各土层中,辐射松林和油松林土壤有机碳的差异均不显著,这是因为二者种植年限相同,郁闭度也相同,且针叶林养分归还速度都较慢,造成二者有机碳差异不显著。

3.2 辐射松林与油松林土壤磷素含量

土壤全磷包括各种形态的磷素,它代表着土壤长期供磷能力^[27]。刘西军等^[28]的研究表明,不同植被类型中全磷的含量受土壤母质影响较大。本结果与其一致,在各土层中,辐射松林和油松林土壤全磷含量均无显著差异,是因为两种林分土壤母质相似,且两种人工林生长时间不长,导致由不同林分造成的全磷含量差异不显著。

植物吸收磷素的直接形式是土壤有效磷,它可以表征土壤磷素的现实供应以及土壤短期供磷能力^[29]。在0~20cm土壤中,油松林土壤有效磷的含量显著高于辐射松林,但在20~40cm、40~60cm土壤中差异不显著,这与有机磷的变化趋势一致。前人研究表明,土壤中植物可利用的有效磷主要来自有机磷的矿化^[10]。因此,本研究结果说明,油松林土壤比辐射松林土壤含有较多的有机磷,它通过矿化作用能为植物的生长提供较

多的有效磷。从这一方面来说,油松对当地土壤磷素水平的改善优于辐射松。

土壤无机磷的形态受酸碱度的影响,在酸性土壤中活性铁、铝的含量较高,对磷的吸附固定和沉积作用较强,降低了土壤中磷的有效性和供磷水平。因此,降低土壤酸度可以降低无机磷组分中的 Fe-P、Al-P 的含量,提高 Ca-P 的含量,增加土壤有效磷^[30]。该结果与 Lajtha 等^[11]对于旱荒漠的研究结果一致,即:土壤磷以无机磷为主,其中,Ca-P 含量远远高于 Al-P 和 Fe-P 的含量。本文中土壤呈微酸性,但是 Ca-P 含量却最高,这可能是由于 9 月份当地雨水比较充沛,土壤含水量较大,使土壤 pH 值有所下降,增加了磷酸钙的溶解度并促使铁、铝形成氢氧化物沉淀,减少了它们对磷的固定所致^[31]。油松和辐射松林土壤 Al-P 和 Fe-P 的含量在不同深度的土壤中均无显著差异,这是由于 Al-P 和 Fe-P 是土壤中可溶性无机磷的重要来源,而可溶性无机磷在针叶林中差异不显著,从而导致土壤中 Al-P 和 Fe-P 含量的差异不显著^[10];而 Ca-P 在 20 ~ 40cm、40 ~ 60cm 土层中均为油松林显著高于辐射松林,这说明油松林土壤中 Ca-P 较多,可为植物生长提供较多的可利用磷,因此,它对土壤磷素水平的改善优于辐射松^[11,30]。

在森林生态系统中,表层土壤的有机磷可占全磷的 50% 以上,是速效磷的重要源和库,有机磷的矿化控制着土壤磷的循环^[10],而这一过程是由土壤磷酸酶催化完成的^[32]。本研究表明,灌丛土壤表层磷酸酶活力较高、有机磷含量也最高,这是由于其细根周转以及微生物代谢较针叶林的快,可以不断补充被矿化掉的有机磷,以至于表层虽然矿化速率高但有机磷含量仍然保持最高^[33]。根据 Chen 等^[5]研究,通过提高辐射松林根际土壤中磷酸酶和微生物的活性可以促进有机磷的矿化。因此,油松林土壤有机磷含量以及磷酸酶活力较高,矿化作用较辐射松林的强,能够为植物生长提供较多的有效磷。

土壤微生物生物量磷(SMBP)是土壤有机磷最为活跃的一部分^[34],与土壤有机磷化合物相比,它更容易矿化为植物可利用的有效磷^[35]。因此,SMBP 作为有机磷转变为植物可吸收磷的一个重要枢纽和途径,其含量的高低在一定程度上反应土壤供磷水平^[36]。在 3 个土壤层次中,油松和辐射松林的 SMBP 含量均低于灌丛,但二者差异不显著。Chen^[30]研究表明,土壤微生物的活性与土壤的湿度呈正相关,土壤干燥会引起微生物死亡,从而导致微生物量中的磷向土壤中释放。本文结果与其一致,灌丛中土壤含水量较高,SMBP 向土壤中转化释放较少,所以灌丛中 SMBP 含量最高。油松林和辐射松林之间 SMBP 差异不显著是由于二者生长年限相同,针叶分解周期较长,营养元素循环较慢,滞留在土壤表层的针叶量相似,且土壤中的含水量差异不大,所以两种林分 SMBP 含量相似^[10]。

3.3 结语

油松林、辐射松林和天然次生灌丛土壤各种磷素含量以及磷酸酶活力存在一定差异,表明造林树种和群落组成对土壤磷素有影响。辐射松林与油松林土壤各种磷素的含量明显高于灌丛,表明辐射松、油松两种人工林均对当地土壤磷素状况有所改善。灌丛土壤微生物生物量以及磷酸酶活力较高,说明在此灌丛基础上发展起来的两个人工林还处于对土壤养分消耗较大、凋落物归还营养物质较低的阶段^[37]。在 0 ~ 20cm 土壤中,油松林土壤有机磷和有效磷含量均显著高于辐射松林;在 20 ~ 60cm 土壤中,油松林土壤磷酸酶活力以及 Ca-P 的含量明显高于辐射松林,反映了油松林土壤中有较多的有机磷可以转化为可被植物吸收利用的有效磷。因此,就土壤磷素水平而言,乡土树种油松比外来物种辐射松更适于作为当地的造林树种。但是,要比较这两种人工林对当地退化土壤的改善状况,还需要长期的定位研究。

References:

- [1] Richards A E, Dalal R C, Schmidt S. Soil carbon turnover and sequestration in native subtropical tree plantations. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 2078 — 2090.
- [2] Tate K R, Ross D J, Saggart S, *et al.* Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1437 — 1449.
- [3] Pan K W, Xu Z H, Blumfield T, *et al.* In situ mineral ¹⁵N dynamics and fate of added ¹⁵NH₄⁺ in hoop pine plantation and adjacent native forest in subtropical Australia. *J Soil Sediments*, 2008, 8: 398 — 405.

- [4] Kirschbaum M U F, Guo L B, Gifford R M. Observed and modelled soil carbon and nitrogen changes after planting a *Pinus radiata* stand onto former pasture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 247—257.
- [5] Chen C R, Condon L M, Xu Z H. Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: A review. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 396—409.
- [6] Ross D J, Tate K R, Scott N A, *et al.* Land-use changes: effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 803—813.
- [7] Chen C R, Condon L M, Davis M R, *et al.* Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil and Biology Biochemistry*, 2002, 34: 487—499.
- [8] Fahey B, Jackson R. Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 84: 69—82.
- [9] Chen C R, Condon L M, Davis M R, *et al.* Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. *Plant and Soil*, 2000, 220: 151—163.
- [10] Zhao Q, Zeng D H, Lee D K, *et al.* Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* afforestation on soil phosphorus status of the Keerqin Sandy Lands in China. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69: 569—582.
- [11] Attiwill P M, Adams M A. Nutrient cycling in forests. *New Phytologist*, 1993, 124: 561—582.
- [12] Cross A F, Schlesinger W H. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry*, 2001, 52: 155—172.
- [13] Jaiyeoba I A. Changes in soil properties related to conversion of savannah woodland into pine and eucalyptus plantations, northern Nigeria. *Land Degradation and Development*, 1998, 9: 207—215.
- [14] Lajtha K, Schlesinger W H. The biochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. *Ecology*, 1988, 69: 24—39.
- [15] Smith F W. The phosphate uptake mechanism. *Plant and Soil*, 2002, 245: 105—114.
- [16] Walbridge M R. Phosphorus biogeochemistry. *Ecology*, 2000, 81: 1474—1475.
- [17] Pablo C G, Ramiro O B. Can native tree species regenerate in *Pinus radiata* plantations in Chile? Evidence from field and laboratory experiments. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253: 97—102.
- [18] Li W B, Bao W K, He B H, *et al.* Biomass compositions of *Pinus tabulaeformis* plantation and their relationships in the Dagou Valley of the Upper Minjiang River. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25 (2): 236—244.
- [19] Pan K W, Wu N, Pan K Z, *et al.* A discussion on the issues of the re-construction of ecological shelter zone on the upper reaches of the Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (3): 617—629.
- [20] Bao W, Bao W K. Soil physical and chemical properties under secondary shrub and artificial Chinese pine forest in middle-mountain areas of upper reaches of the Minjiang River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24 (5): 10—13.
- [21] Li W, Pan K W, Wu N, *et al.* Effects of mixing pine and broadleaved tree/shrub litter on decomposition and N dynamics in laboratory microcosms. *Ecological Research*, online, 2009, 24: 761—769.
- [22] Wang F E, Chen Y X, Tian G M, *et al.* Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68: 181—189.
- [23] Wu J S. Measurement and application of soil microbial biomass. Beijing: Weather Press, 2006. 1—88.
- [24] Lao J C. Handbook of soil agricultural chemistry analysis. Beijing: Agricultural Press, 1988. 266—281.
- [25] Deng R J, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of the subalpine forests in Western Sichuan. *Chinese Journal Applied & Environmental Biology*, 2007, 13 (4): 492—49.
- [26] Chi G Y, Wang J, Chen X, *et al.* Dynamic changes of soil organic carbon (SOC) of different land use types in SanJiang plain. *Soils*, 2006, 38 (6): 755—761.
- [27] Zhao Q, Zeng D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (1): 153—163.
- [28] Liu X J, Huang Q F, Nie Ch W, *et al.* Research on nitrogen and phosphorus content in soil of different forest types in Xiaokeng. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35 (1): 124—12.
- [29] Chen Y Zh, Gong Y B, Chen L W, *et al.* Comparison of soil organic matter and phosphorus of different patterns of vegetation rehabilitation in Northern Sichuan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (6): 208—211.
- [30] Chen L X. Soil acidity change of larch plantations and relation between change and inorganic phosphorus types. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3 (4): 108—114.

- [31] Chen H J. Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year old Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*. 2003, 178, 301 — 310.
- [32] Criquet S, Ferre E, Farnet A M, *et al.* Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter; influence of biotic and abiotic factors. *Soil Biology Biochemistry*, 2004, 36: 1111 — 1118.
- [33] Chen C R, Condron L M, Davis M R, *et al.* Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177: 539 — 577.
- [34] Kouno K, Lukito H P, Ando T, *et al.* Microbial biomass P dynamics in soil. *Transaction of 15th World Congress of Soil Science*, 1994, 5: 85 — 86.
- [35] Jonasson S, Michelsen A, Schmidt I K, *et al.* Microbial biomass C, N and P in two arctic soils and response to addition of NPK fertilizer and sugar; implications for plant uptake. *Oecologia*, 1996, 106: 507 — 515.
- [36] Gong W, Hu T X, Gong Y B, *et al.* A summary of soil microbial biomass P. *Sichuan Forestry Exploration and Design*, 2005, 6 (2): 1 — 5.
- [37] Turner J, Kelly J. Effect of radiata pine on soil chemical characteristics. *Forest Ecology and Management*, 1985, 11: 257 — 270.

参考文献:

- [18] 李武斌,包维楷,何丙辉,等. 岷江上游大沟流域油松人工幼林生物量组成及其影响因素. *山地学报*, 2007, 25 (2): 236 ~ 244.
- [19] 潘开文,吴宁,潘开忠,等. 关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论. *生态学报*, 2004, 24(3): 617 ~ 629.
- [20] 鲍文,包维楷. 岷江上游中山区此生灌丛与人工油松林土壤理化性质比较研究. *水土保持通报*, 2004, 24 (5): 10 ~ 13.
- [23] 吴金水. 土壤微生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006. 1 ~ 88.
- [24] 劳家桢. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988. 266 ~ 281.
- [25] 邓仁菊,杨万勤,张健,等. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征. *应用与环境生物学报*, 2007, 13 (4): 492 ~ 49.
- [26] 迟光宇,王俊,陈欣,等. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化. *土壤*, 2006, 38 (6): 755 ~ 761.
- [27] 赵琼,曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. *植物生态学报*, 2005, 29 (1): 153 ~ 163.
- [28] 刘西军,黄庆丰,聂昌伟,等. 肖坑不同森林类型土壤氮、磷含量研究. *安徽农业大学学报*, 2008, 35 (1): 124 ~ 127.
- [29] 程永珍,宫渊波,陈林武,等. 嘉陵江上游低山暴雨区不同植被类型土壤磷素的比较. *水土保持研究*, 2007, 14 (6): 208 ~ 211.
- [36] 龚伟,胡庭兴,宫渊波,等. 土壤微生物量 P 研究综述. *四川林勘设计*, 2005, 6 (2): 1 ~ 5.