

# 落叶松人工林土壤酸度与有机磷形态的相关性

陈立新

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 通过东北东部山地落叶松人工林不同发育阶段土壤酸度变化规律以及与有机磷形态相关关系的研究发现, 不同发育阶段落叶松根际土壤水解性总酸度都高于非根际土壤, 而交换性酸与总酸度的比值则相反; 落叶松由幼龄林到成熟林随林龄的增大根际土壤活性酸(pH 值)呈降低趋势, 而非根际土壤活性酸(pH 值)(除成熟林外)、根际与非根际土壤的交换性酸、土壤交换性铝、土壤水解性总酸度和交换性酸/总酸度的比值随林龄的增大呈显著增大趋势。但由于暗棕壤具有较强的缓冲性能, 并且土壤活性酸(pH 值)由幼龄林到成熟林随林龄的变化范围为  $5.27 \pm 0.25 \sim 5.93 \pm 0.12$ , 因此, 在落叶松树种适生的范围之内, 不需施用石灰调节土壤的酸度。各年龄阶段森林根际土壤酸度与根际土壤有机磷形态相关密切。随着土壤潜性酸度的增加, 各年龄阶段森林土壤有机磷总量、中稳性有机磷和高稳性有机磷含量降低。活性有机磷分别与活性酸、水解性总酸度呈显著正相关, 其与水解性总酸度相关性随林龄的增大而降低。

**关键词:** 落叶松人工林; 土壤酸度; 有机磷形态; 相关性

**文章编号:** 1000-0933(2005)11-2841-07 **中图分类号:** S718.5 **文献标识码:** A

## Soil acidity in larch plantations and its correlation with organic phosphorus types

CHEN Li-Xin (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (11): 2841~2847.

**Abstract:** Changes in soil acidity and its correlation with organic phosphorus types were studied for larch (*Larix olgensis*) plantations with different development stages in mountainous area of eastern Northeast China. The results showed that total hydrolytic acidity in rhizosphere soil at different development stages were higher than those in non-rhizosphere soil, but the ratio of exchangeable acidity and total acidity in rhizosphere soil showed an opposite trend; The active acidity (pH value) in rhizosphere soil decreased with stand age increased. While active acidity in non-rhizosphere soil (except for mature stand), exchangeable acidity, exchangeable aluminum, total hydrolytic acidity, and the ratio of exchangeable acidity and total acidity in both rhizosphere soil and non-rhizosphere soil increased. Because dark brown soil had a strong buffering effect, the active acidity varied from  $5.27 \pm 0.25$  to  $5.93 \pm 0.12$  with stand ages, which suggested that larch be suitable to the variation of active acidity and lime application be unnecessary to adjust active acidity in soil. In rhizosphere soil, there was a strong correlation between soil acidity and organic phosphorus types in all development stages. With potential acidity increasing, total organic phosphorus, moderately resistant organic phosphorus, and highly resistant organic phosphorus in larch plantations decreased for all stands. There were significantly positive correlations between labile organic phosphorus and active acidity, labile organic phosphorus and total hydrolytic acidity. The correlation between labile organic P and total hydrolytic acidity decreased with stand age increasing.

**Key words:** Larch plantation; soil acidity; organic phosphorus types; correlation

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(30271070); 黑龙江省自然科学基金资助项目(C01-17)

**收稿日期:** 2004-08-31; **修订日期:** 2005-08-10

**作者简介:** 陈立新(1962~), 女, 河南开封人, 博士, 副教授, 主要从事森林土壤学和植物营养管理研究. E-mail: lxchen88@163.com

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 30271070) and Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. C01-17)

**Received date:** 2004-08-31; **Accepted date:** 2005-08-10

**Biography:** CHEN Li-Xin, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in forest soil science and plant nutrition management. E-mail: lxchen88@163.com

土壤酸碱性是土壤的一个重要属性,也是影响土壤肥力的一个重要因素,它不仅直接影响林木的生长,而且左右土壤一些性质的变化。1961 年在美国土壤学会第 25 届年会上,Hans Jenny 作了题为《土壤酸度研究问题的回顾与展望》的报告,概述了上世纪以来土壤酸度化学研究的重要进展,指出土壤酸度化学的发展道路是螺旋式上升<sup>[1]</sup>。据报道落叶松人工林存在着不同程度的地力下降问题<sup>[2,3]</sup>,落叶松人工林是否导致土壤酸化也引起了人们普遍关注<sup>[4~6]</sup>。在暗棕壤条件下落叶松人工林与阔叶林(或混交林)进行横向比较时,大多数研究者<sup>[7,8]</sup>发现落叶松人工林土壤酸化不明显,pH 值变化有正负双向波动,变幅一般不足 0.1 个单位。以前对落叶松人工林的研究主要集中在土壤活性酸(pH 值)的变化上,而对潜性酸中的交换性氢、交换性铝以及土壤水解性总酸度的研究较少。

土壤酸度变化直接影响有机磷各形态的含量<sup>[9]</sup>,从而也影响有机磷的有效性和植物磷素营养<sup>[10]</sup>。近年来,国内外学者对土壤有机磷组分及其有效性进行了较多的研究<sup>[11,12]</sup>。主要集中于施肥对土壤有机磷组分变化影响和有机磷分组方法的探讨、有机磷组分与土壤有效磷的关系<sup>[13,14]</sup>,以及 pH 值与有机磷的关系<sup>[15,16]</sup>,有机磷形态变化与林木生长的关系<sup>[17]</sup>,而没有涉及到土壤酸度与有机磷形态相关性的研究。因此,本文对落叶松人工林不同发育阶段根际与非根际土壤活性酸(pH 值)、交换性酸、土壤水解性总酸度变化规律以及其对土壤有机磷形态的影响进行研究,为落叶松人工林林地营养管理提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区自然概况

试验样地设在吉林九台市行政区域土们岭铁路林场,北纬 44°06′;东经 126°02′。本区是长白山向西部松辽平原过渡的丘陵地带,最高山峰马鹿头山海拔为 542m。本地区属大陆性季风气候,最高气温为 42℃,最低气温为-36℃,年平均气温为 5℃,年降水量 200~849mm,无霜期约为 130~140d。原始植被为红松阔叶混交林,经过人为活动形成了天然柞木次生林和各种人工林植被。地带性土壤为暗棕壤,呈微酸性。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和样品采集 选择了相似立地条件不同发育阶段落叶松人工纯林(即幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林)4 个林分类型,各设置 3 块固定标准地,在每块标准地内进行每木检尺,调查林木生长状况。林地立地条件、林木生长调查结果和土壤养分状况见表 1 和表 2。每块标准地各选择 3 株标准木,并在每一株标准木的周围(1~2m)按不同方位(东、西、南、北、西南)设置 5 个采样点,挖出表层细根,采用抖落法收集根际土壤混合样品。非根际土壤的采集是在各标准地内,沿 S 形曲线进行布点,采集 0~20cm、20~40cm、40~60cm 的土壤进行实验分析,将其 0~20cm、20~40cm、40~60cm 的土壤测得的结果作为非根际土壤进行统计分析。

表 1 不同发育阶段落叶松人工林林分状况表

Table 1 Stand general condition of larch plantation at different development stages

| 样地号<br>Sample No. | 龄组<br>Age Group | 林龄<br>Stand age (a) | 坡位<br>Slope position | 坡度<br>Slope | 坡向<br>Slope aspect | 郁闭度<br>Canopy density | 平均直径<br>Average diameter (cm) | 平均高<br>Average height (m) | 密度<br>Density (ind./hm <sup>2</sup> ) | 林分蓄积量<br>Measurement of stand volume (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 林下灌木<br>Shrubs under trees  |                     | 林下草本<br>Herbs under trees   |                     |
|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|-------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
|                   |                 |                     |                      |             |                    |                       |                               |                           |                                       |                                                                         | 平均高度<br>Average height (cm) | 覆盖度<br>Coverage (%) | 平均高度<br>Average Height (cm) | 覆盖度<br>Coverage (%) |
| No. 1             | 幼龄林             | 16                  | 下坡*                  | 5           | 半阴坡**              | 0.8                   | 8.7                           | 10.8                      | 2550                                  | 88.5126                                                                 | 65.8                        | 29                  | 40.1                        | 15                  |
| No. 2             | Young stand     |                     | 中坡                   | 5           | 半阴坡                | 0.85                  | 8.5                           | 10.6                      | 2650                                  | 86.4209                                                                 | 76.3                        | 35                  | 32.5                        | 17                  |
| No. 3             |                 |                     | 上坡                   | 5           | 半阴坡                | 0.9                   | 9.6                           | 10.9                      | 2850                                  | 118.8727                                                                | 87.6                        | 40                  | 29.3                        | 19                  |
| No. 4             | 中龄林             | 23                  | 下坡                   | 8           | 半阴坡                | 0.75                  | 13.1                          | 14.2                      | 1375                                  | 134.2646                                                                | 100.8                       | 8                   | 16.0                        | 25                  |
| No. 5             | Half-mature     |                     | 中坡                   | 12          | 半阴坡                | 0.8                   | 12.6                          | 14.9                      | 1450                                  | 139.7450                                                                | 139.5                       | 9                   | 17.8                        | 24                  |
| No. 6             | stand           |                     | 下坡                   | 12          | 半阴坡                | 0.7                   | 13.8                          | 15.7                      | 1175                                  | 141.1193                                                                | 143.9                       | 11                  | 17.2                        | 26                  |
| No. 7             | 近熟林             | 34                  | 下坡                   | 5           | 半阴坡                | 0.7                   | 16.4                          | 17.0                      | 825                                   | 147.0728                                                                | 86.1                        | 28                  | 35.0                        | 78                  |
| No. 8             | Near mature     |                     | 下坡                   | 6           | 半阴坡                | 0.6                   | 17.6                          | 17.4                      | 650                                   | 134.7498                                                                | 92.3                        | 28                  | 36.0                        | 72                  |
| No. 9             | stand           |                     | 中坡                   | 8           | 半阴坡                | 0.65                  | 17.0                          | 17.3                      | 670                                   | 129.8152                                                                | 101.7                       | 29                  | 37.7                        | 75                  |
| No. 10            | 成熟林             | 49                  | 中坡                   | 5           | 半阴坡                | 0.65                  | 22.3                          | 20.7                      | 575                                   | 220.6634                                                                | 97.2                        | 35                  | 26.5                        | 40                  |
| No. 11            | Mature          |                     | 中坡                   | 5           | 半阴坡                | 0.65                  | 22.5                          | 20.6                      | 550                                   | 213.2187                                                                | 86.8                        | 31                  | 28.6                        | 36                  |
| No. 12            | stand           |                     | 下坡                   | 6           | 半阴坡                | 0.7                   | 21.8                          | 20.9                      | 580                                   | 216.2594                                                                | 78.4                        | 30                  | 27.1                        | 38                  |

\* 下坡 Lower slope; 中坡 Middle slope; 上坡 Upper slope; \*\* 半阴坡 Half shade slope

1.2.2 土壤酸度与有机磷形态测定 交换性酸, 1mol·L<sup>-1</sup> KCl 交换-中和滴定法<sup>[18,19]</sup>; 活性酸, 电位法测定; 土壤水解性总酸度, 醋酸钠水解-中和滴定法<sup>[20]</sup>; 有机 P, 灼烧 0.2mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[18]</sup>; 有机磷形态, Bowman-Cole 法<sup>[21]</sup>。

表 2 落叶松人工林不同发育阶段 0~ 60cm 土壤养分状况

| Table 2 Soil nutrition condition of larch plantation at different development stages between 0~ 60cm |                          |                |                              |                       |                          |                              |                                |                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 林型<br>Forest types                                                                                   | 龄组<br>Age Groups         | 年龄<br>Ages (a) | 有机质<br>Organic matter (g/kg) | 全磷<br>Total P (mg/kg) | 有机磷<br>Organic P (mg/kg) | 有效磷<br>A vailable P (m g/kg) | 水解氮<br>Hydrolysable N (m g/kg) | 速效钾<br>A vailable K (m g/kg) |
| 落叶松<br>人工林<br>Larch<br>plantation                                                                    | 幼龄林<br>Young stand       | 16             | 21. 19±6 7                   | 326. 856±56. 68       | 178. 434±49. 38          | 11. 133±2. 4                 | 57. 835±21. 84                 | 114. 818±10 04               |
|                                                                                                      | 中龄林<br>Half-mature stand | 23             | 36. 5±8 98                   | 458. 801±110. 3       | 292. 696±53. 9           | 12. 670±1. 98                | 97. 521±33. 08                 | 98. 475±14 6                 |
|                                                                                                      | 近熟林<br>Near mature stand | 34             | 52. 94±28 7                  | 429. 612±41. 66       | 242. 755±43. 64          | 17. 479±4. 98                | 66. 644±31. 28                 | 81. 118±19 16                |
|                                                                                                      | 成熟林<br>Mature stand      | 49             | 31. 87±14 24                 | 474. 247±56. 74       | 274. 538±48. 48          | 11. 334±1. 12                | 69. 570±31. 84                 | 65. 776±13. 1                |

2 结果与分析

2.1 土壤活性酸(pH 值)的变化

土壤活性酸影响土壤溶液中铝化合物的溶解与沉淀以及离子的吸附和代换。从表 3 可见,落叶松人工林除近熟林外其他年龄阶段均为根际土壤活性酸(pH 值)高于非根际土壤,分别高 0.66 单位、0.23 单位和 0.04 单位。近熟林根际土壤的 pH 值低于非根际,两者差异显著,说明落叶松在幼龄林、中龄林和成熟林根际并没有出现酸化现象,而在近熟林根际土壤出现了 pH 值降低现象。

不同发育阶段落叶松人工林根际土壤活性酸(pH 值)由幼龄林到成熟林随林龄的增大呈降低趋势,差异达到极显著水平( $F=6.44>F_{0.01}(3,32)=4.46$ ),而非根际土壤活性酸(pH 值)变化则相反,差异达到显著水平( $F=3.59>F_{0.05}(3,32)=2.90$ )。这可能是林下植物种类和林分密度的不同会导致凋落物量及其本身的酸碱度不同,以及根系分泌物和根系对土壤阴阳离子吸收不平衡而产生的酸碱差异等。各年龄阶段土壤活性酸(pH 值)在  $5.27\pm0.25\sim5.93\pm0.12$  之间,在落叶松树种适生的范围之内,因此,不需施用石灰调节土壤的酸度。

表 3 落叶松人工林不同发育阶段土壤酸度的变化

| Table 3 Soil acidity change of larch plantation in different development stages |                          |             |                                                |                                                                   |                                                                    |                                                                                           |                                                              |                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 林型<br>Forest types                                                              | 龄组<br>Age groups         | 区域<br>Spots | 活性酸<br>(pH 值)<br>A ctive acidity<br>(pH value) | 交换性酸<br>( $\text{mol H}^+/\text{kg}$ )<br>Exchangeable<br>acidity | 交换性氢<br>( $\text{mol H}^+/\text{kg}$ )<br>Exchangeable<br>hydrogen | 交换性铝<br>( $\text{mol } \frac{1}{3}\text{Al}^{3+}/\text{kg}$ )<br>Exchangeable<br>aluminum | 水解性酸<br>( $\text{mol H}^+/\text{kg}$ )<br>Hydrolytic acidity | 交换性酸/总酸度<br>Exchangeable<br>acidity/<br>total acidity |
| 落叶松人<br>工纯林<br>Pure larch<br>plantation                                         | 幼龄林<br>Young stand       | 根 R         | $5.93\pm0.12$                                  | $0.1283\pm0.049$                                                  | $0.088\pm0.0282$                                                   | $0.039\pm0.0222$                                                                          | $8.583\pm0.0926$                                             | $1.500\pm0.058$                                       |
|                                                                                 |                          | 非 NR        | $5.27\pm0.25$                                  | $0.4317\pm0.1822$                                                 | $0.1689\pm0.108$                                                   | $0.2628\pm0.1834$                                                                         | $7.1733\pm1.478$                                             | $6.428\pm2.90$                                        |
|                                                                                 | 中龄林<br>Half-mature stand | 根 R         | $5.83\pm0.24$                                  | $0.1717\pm0.0134$                                                 | $0.1083\pm0.0094$                                                  | $0.0633\pm0.0222$                                                                         | $9.7000\pm1.146$                                             | $1.863\pm0.388$                                       |
|                                                                                 |                          | 非 NR        | $5.59\pm0.25$                                  | $0.1583\pm0.068$                                                  | $0.0394\pm0.0088$                                                  | $0.1189\pm0.067$                                                                          | $6.8889\pm1.041$                                             | $2.414\pm1.006$                                       |
|                                                                                 | 近熟林<br>Near mature stand | 根 R         | $5.59\pm0.15$                                  | $0.2308\pm0.078$                                                  | $0.1033\pm0.0134$                                                  | $0.1275\pm0.0696$                                                                         | $9.9917\pm0.8518$                                            | $2.315\pm0.686$                                       |
|                                                                                 |                          | 非 NR        | $5.81\pm0.164$                                 | $0.3356\pm0.0434$                                                 | $0.0864\pm0.025$                                                   | $0.2491\pm0.0656$                                                                         | $5.5244\pm0.6386$                                            | $6.453\pm2.0$                                         |
|                                                                                 | 成熟林<br>Mature stand      | 根 R         | $5.48\pm0.134$                                 | $0.2917\pm0.0858$                                                 | $0.1042\pm0.0594$                                                  | $0.1875\pm0.0734$                                                                         | $10.7333\pm0.845$                                            | $2.730\pm0.766$                                       |
|                                                                                 |                          | 非 NR        | $5.45\pm0.298$                                 | $1.4183\pm0.1186$                                                 | $0.1544\pm0.1096$                                                  | $1.2639\pm0.116$                                                                          | $7.5233\pm1.309$                                             | $5.843\pm0.868$                                       |

R 根际土;NR 非根际土;下同, R and NR mean rhizosphere soil and non-rhizosphere soil respectively; the same below

2.2 土壤交换性酸的变化

根际土壤交换性酸随林龄的增加而增大(表 3),并且各年龄阶段间根际土壤交换性酸差异达到极显著水平( $F=5.06>F_{0.01}(3,32)=4.46$ );非根际土壤交换性酸幼龄林到中龄林降低,中龄林以后开始增加,但各年龄阶段间差异不显著( $F=2.54<F_{0.05}(3,32)=2.90$ )。表明落叶松人工林根际微域土壤随着林龄的增加土壤胶体所吸附的交换态的  $\text{H}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等离子量增加,意味着土壤胶体所吸附交换态的盐基离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )量减少,盐基饱和度降低,土壤肥力也降低。这可能是随着林龄的增加落叶松根系分泌的有机酸以及土壤中各种有机质分解的中间产物如草酸、柠檬酸等低分子有机酸,特别在通气不良和在真菌活动下出现有机酸在根际土壤中累积<sup>[22]</sup>,同时土壤中的胡敏酸和富里酸的增加,尤其是富里酸量的增加,使土壤中的氢离子浓度增加<sup>[23]</sup>。其中,一部分氢离子进入土壤,被土壤胶体吸附,当土壤有机矿质复合体或铝硅酸盐粘粒矿物(蒙脱石、高岭石)表面吸附的氢离子超过一定限度时,这些胶粒的晶体结构就会遭到破坏,有些铝八面体被解体,使铝离子脱离了八面体晶格的束缚,变成活性铝离子,被吸附在带负电荷的粘粒表面,转变为交换性铝离子,增加了土壤中交换性铝离子含量。铝离子被交换而大量存在时,可引起植物根系的营养条件变坏,而使植物生长和微生物活动受损<sup>[21]</sup>,因此,随着林龄的增加根际微域土壤交换性铝离子含量增加对落叶松人工林生长不利。

**2.2.1 土壤交换性铝的变化** 落叶松幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林根际土壤交换性铝离子含量占交换性酸的百分含量,分别为 30.94%、36.87%、55.24% 和 64.28%,呈现出随林龄的增大而增大的趋势。非根际土壤中,幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林对应百分数分别为 60.88%、75.11%、74.23% 和 89.11%,呈现出幼龄林到成熟林随林龄的增大而增大的趋势,中龄林到近熟林略有降低,但仍高于幼龄林 13.35%。

成熟林根际与非根际土壤中铝离子含量明显比其他年龄阶段高(表 3),这与成熟林土壤酸度最低有直接关系。交换性铝离子含量随着林龄的增大而增大是造成交换性酸增大的主要原因。另外不同发育阶段土壤交换性 A1 含量的变化与土壤 A1-P 含量变化并不一致<sup>[24]</sup>,说明交换性 A1 不只来源于 A1-P,可能还有其它游离或矿物态 A1。

**2.2.2 土壤交换性氢的变化** 落叶松幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林根际土壤交换性氢离子含量占交换性酸的百分含量,分别为 69.13%、63.08%、44.76% 和 35.72%,呈现出随林龄的增大而减小的趋势。对应林分非根际土壤分别为 39.12%、24.89%、25.74% 和 10.89%,也呈现出随林龄的增大而减小趋势(表 3)。成熟林根际与非根际土壤中氢离子含量占交换性酸的百分含量明显减小,与该阶段土壤交换性铝离子增大有直接关系。

落叶松根际土壤交换性氢从幼龄林到中龄林随着林龄的增加而增大,中龄林以后随林龄的变化不明显。非根际土壤交换性氢从幼龄林到中龄林随着林龄的增加而降低,中龄林以后随林龄的增加而增大。

### 2.3 土壤水解性总酸度的变化

水解性总酸度也是潜在酸的一种,其酸度大于交换性酸,是土壤形成过程特征参数之一,对林木生长、土壤肥力评价以及进行土壤改良有重要意义。

从表 3 可见,不同发育阶段落叶松人工林根际土壤水解性总酸度随着林龄的增大而增大,且不同年龄阶段之间的差异达到了极显著水平( $F = 4.55 > F_{0.01}(3, 32) = 4.46$ )。非根际土壤水解性总酸度幼龄林到近熟林随着林龄的增大而减小,近熟林到成熟林增大,但差异不显著( $F = 2.27 < F_{0.05}(3, 32) = 2.90$ )。

### 2.4 土壤交换性酸与总酸度比值的变化

从表 3 可见,不同发育阶段落叶松人工林根际土壤交换性酸与总酸度比值随着林龄的增大而增大,且这种差异达到了显著水平。非根际土壤中该比值幼龄林到中龄林随着林龄的增大而减小,中龄林以后土壤交换性酸与总酸度比值增大,到成熟林时达到最大值,但不同年龄阶段间的差异没有达到显著水平。

### 2.5 土壤酸度与有机磷形态的相关关系

土壤有机磷是土壤磷的一个重要组成部分,一般占土壤全磷的 10%~50%。张为政等<sup>[25]</sup>研究表明,土壤有效磷和用 Bowman-Cole 分级法测得的活性有机磷、中活性有机磷以及中稳性有机磷呈显著相关。活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷直接影响着土壤有效磷含量<sup>[10]</sup>,有机磷是土壤有效磷的一个重要来源<sup>[26]</sup>。同时土壤酸度变化直接影响有机磷各形态的含量<sup>[9]</sup>。由此可见,弄清土壤酸度对土壤有机磷的形态变化的影响,对落叶松人工林土壤肥力和评价土壤供磷能力将有重要的意义。

由表 4 可见,各年龄阶段根际土壤酸度与有机磷形态相关密切,非根际土壤酸度与有机磷形态相关不密切。各年龄阶段根际土壤有机磷总量、中等活性有机磷、高稳性有机磷与活性酸(pH 值)呈正相关,并且根际土壤中活性有机磷与活性酸(pH 值)相关性各年龄阶段均达到显著水平,而非根际土壤有机磷总量、高稳性有机磷与活性酸(pH 值)相关性只有中龄林达到显著水平,这与有关资料 pH 值与有机磷呈负相关的结果相反<sup>[27,28]</sup>;各年龄阶段除中龄林外根际土壤有机磷总量、中等活性有机磷、中稳性有机磷、高稳性有机磷与根际土壤交换性酸、交换性氢、交换性铝呈负相关,并且各年龄阶段根际土壤有机磷总量与根际土壤交换性氢相关系数均达到了显著水平。表明随着根际土壤酸度尤其是根际土壤潜性酸度的增加落叶松人工林根际土壤有机磷降低;各年龄阶段除中龄林外,根际土壤活性有机磷与根际土壤活性酸、水解性总酸度呈极显著或显著相关,其中活性有机磷与水解性总酸度幼龄林、近熟林、成熟林呈显著正相关,其相关性随年龄的增大而降低,表明活性有机磷随水解性总酸度的增大而增大,然而如果水解性总酸度再增大活性有机磷将会降低。活性有机磷与活性酸幼龄林到中龄林呈正相关,随着年龄的增长相关系数减少,到了近熟林和成熟林转变为负相关,并随着年龄的增长负相关性增大。表明根际土壤 pH 值在 5.93~5.83 区间(幼龄林、中龄林),根际土壤活性有机磷随 pH 值降低而降低。根际土壤 pH 值在 5.59~5.48 区间(近熟林、成熟林),根际土壤活性有机磷随 pH 值降低而增大。这与 Dalal RC<sup>[27]</sup>提出的结论相一致。由于活性有机磷是能完全溶解于 0.5mol/L NaHCO<sub>3</sub> 溶液中的有机磷主要是核酸类、磷脂类和磷糖等易矿化易为植物吸收的组分<sup>[29]</sup>,并且在酸性土壤含有较多的植酸铁、铝盐,易使有机磷形成沉淀,故酸性土壤比碱性土壤容易积累有机磷<sup>[30]</sup>。

## 3 结论

不同发育阶段落叶松人工林根际土壤活性酸(pH 值)由幼龄林到成熟林随林龄的增大而降低,而非根际土壤水解性总酸度、交换性酸、交换性铝则相反;非根际土壤活性酸(pH 值)幼龄林到近熟林随林龄的增大而增加,近熟林到成熟林则降低,水解性

总酸度则相反; 非根际土壤交换性酸、交换性铝、交换性氢幼龄林到中龄林降低, 中龄林到成熟林则增加。

表 4 落叶松人工林不同发育阶段土壤有机磷形态与土壤酸度的相关系数

Table 4 The correlation coefficient between different types of organic P of larch plantations at different development stages and soil acidity

| 项目<br>Item s                                           | 龄组<br>A ge<br>group s | 活性酸                          | 交换性酸                                               | 交换性氢                                                | 交换性铝                                                         | 水解性总酸度                                                         | 活性酸                          | 交换性酸                                               | 交换性氢                                                | 交换性铝                                                         | 水解性总酸度                                                         |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                        |                       | (pH 值)<br>A ctive<br>acidity | Exchange<br>acidity<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) | Exchange<br>hydrogen<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) | Exchangeable<br>alum in ium<br>(mol<br>Al <sup>3+</sup> /kg) | Total<br>hydro lytic<br>acidity<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) | (pH 值)<br>A ctive<br>acidity | Exchange<br>acidity<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) | Exchange<br>hydrogen<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) | Exchangeable<br>alum in ium<br>(mol<br>Al <sup>3+</sup> /kg) | Total<br>hydro lytic<br>acidity<br>(mol<br>H <sup>+</sup> /kg) |
| 根际 Rhizosphere                                         |                       |                              |                                                    |                                                     |                                                              | 非根际 Non-rhizosphere                                            |                              |                                                    |                                                     |                                                              |                                                                |
| 有机磷总量<br>(mg/kg)<br>Total organic P                    | 幼龄林                   | 0.257                        | - 0.976**                                          | - 0.926**                                           | - 0.999**                                                    | - 0.205                                                        | - 0.061                      | - 0.267                                            | - 0.286                                             | - 0.261                                                      | 0.426                                                          |
|                                                        | 中龄林                   | 0.998**                      | 0.912**                                            | 0.993**                                             | 0.957**                                                      | 0.988**                                                        | - 0.071                      | - 0.260                                            | 0.151                                               | - 0.306                                                      | 0.692*                                                         |
|                                                        | 近熟林                   | 0.338                        | - 0.280                                            | - 0.781*                                            | - 0.158                                                      | 0.164                                                          | 0.451                        | 0.424                                              | 0.209                                               | 0.459                                                        | - 0.155                                                        |
|                                                        | 成熟林                   | 0.308                        | - 0.563                                            | - 0.937**                                           | - 0.416                                                      | 0.369                                                          | 0.390                        | - 0.493                                            | - 0.585                                             | - 0.483                                                      | 0.207                                                          |
| 活性有<br>机磷<br>(mg/kg)<br>Labile organic P               | 幼龄林                   | 0.841**                      | 0.093                                              | - 0.074                                             | 0.304                                                        | 0.994**                                                        | - 0.268                      | 0.324                                              | 0.405                                               | 0.307                                                        | 0.327                                                          |
|                                                        | 中龄林                   | 0.647                        | 0.218                                              | - 0.500                                             | 0.339                                                        | - 0.470                                                        | 0.522                        | - 0.098                                            | 0.646                                               | - 0.282                                                      | 0.291                                                          |
|                                                        | 近熟林                   | - 0.989**                    | 0.561                                              | 0.077                                               | 0.610                                                        | 0.898**                                                        | 0.523                        | - 0.478                                            | - 0.136                                             | - 0.556                                                      | 0.858**                                                        |
|                                                        | 成熟林                   | - 0.992**                    | 0.710*                                             | 0.238                                               | 0.770*                                                       | 0.796*                                                         | 0.339                        | - 0.567                                            | - 0.737*                                            | - 0.550                                                      | 0.037                                                          |
| 中等活性有机磷<br>(mg/kg)<br>Moderately<br>labile organic P   | 幼龄林                   | 0.999**                      | - 0.450                                            | - 0.592                                             | - 0.248                                                      | 0.899**                                                        | - 0.206                      | - 0.140                                            | - 0.013                                             | - 0.162                                                      | 0.060                                                          |
|                                                        | 中龄林                   | 0.740*                       | 0.968**                                            | 0.849**                                             | 0.929**                                                      | - 0.866**                                                      | 0.047                        | - 0.415                                            | 0.126                                               | - 0.457                                                      | 0.694                                                          |
|                                                        | 近熟林                   | 0.869**                      | - 0.273                                            | - 0.286                                             | - 0.248                                                      | - 0.518                                                        | - 0.337                      | - 0.766*                                           | - 0.490                                             | - 0.787*                                                     | 0.750*                                                         |
|                                                        | 成熟林                   | 0.800**                      | - 0.624                                            | - 0.648                                             | - 0.563                                                      | - 0.237                                                        | 0.550                        | - 0.549                                            | - 0.494                                             | - 0.552                                                      | - 0.101                                                        |
| 中稳性有机磷<br>(mg/kg)<br>Moderately<br>resistant organic P | 幼龄林                   | 0.132                        | - 0.940**                                          | - 0.871**                                           | - 0.992**                                                    | - 0.327                                                        | 0.001                        | - 0.293                                            | - 0.354                                             | - 0.280                                                      | 0.424                                                          |
|                                                        | 中龄林                   | 0.467                        | 0.825**                                            | - 0.618                                             | 0.747*                                                       | - 0.645                                                        | - 0.051                      | - 0.146                                            | 0.388                                               | - 0.258                                                      | 0.745*                                                         |
|                                                        | 近熟林                   | - 0.063                      | - 0.469                                            | - 0.979**                                           | - 0.329                                                      | 0.457                                                          | 0.161                        | 0.286                                              | 0.268                                               | 0.262                                                        | 0.144                                                          |
|                                                        | 成熟林                   | 0.134                        | - 0.618                                            | - 0.989**                                           | - 0.467                                                      | 0.489                                                          | 0.228                        | - 0.295                                            | - 0.416                                             | - 0.283                                                      | 0.435                                                          |
| 高稳性有机磷<br>(mg/kg)<br>Highly<br>resistant organic P     | 幼龄林                   | 0.196                        | - 0.961**                                          | - 0.901**                                           | - 0.998**                                                    | - 0.266                                                        | - 0.004                      | - 0.160                                            | - 0.209                                             | - 0.150                                                      | 0.434                                                          |
|                                                        | 中龄林                   | 0.927**                      | 0.645                                              | 0.844**                                             | 0.736*                                                       | 0.826**                                                        | - 0.266                      | - 0.163                                            | - 0.627                                             | 0.010                                                        | - 0.035                                                        |
|                                                        | 近熟林                   | 0.477                        | - 0.009                                            | - 0.467                                             | 0.083                                                        | 0.006                                                          | 0.724*                       | 0.672*                                             | 0.222                                               | 0.770*                                                       | - 0.723                                                        |
|                                                        | 成熟林                   | 0.364                        | - 0.401                                            | - 0.804**                                           | - 0.261                                                      | 0.307                                                          | - 0.165                      | - 0.093                                            | - 0.330                                             | - 0.071                                                      | 0.201                                                          |

自由度 = 7,  $p_{0.05} = 0.666$ ,  $p_{0.01} = 0.798$ ; Degree of freedom = 7; \* 表示显著相关, \*\* 表示极显著相关; \* indicates that the correlation reaches significant level at  $p = 0.05$ ; \*\* indicates that the correlation reaches highly significant level at  $p = 0.01$

不同发育阶段落叶松人工林(中龄林除外)根际土壤有机磷总量、中稳性有机磷和高稳性有机磷含量随土壤交换性酸含量增加而降低。活性有机磷与活性酸(中龄林除外)、水解性总酸度(中龄林除外)呈极显著或显著相关,与水解性总酸度相关性随林龄的增大而降低。根际土壤中等活性有机磷与活性酸呈显著或极显著正相关。根际土壤中稳性有机磷和高稳性有机磷与潜在酸中的交换性酸、交换性氢、交换性铝相关密切。

References

[ 1 ] Grant W. Thomas New advance of research problems of soil acidity. *A dvance of Soil Science*, 1992, 14~ 17.

[ 2 ] Cui G F. Depletion Mechanism of Forest Plantation Productivity and Preventive Strategy. *World Forestry Research*, 1996, 9(5): 61~ 69

[ 3 ] Chen L X, Chen X W, Duan W B. Larch litteraand soil fertility. *Chin. J. Appl. Ecol*, 1998, 9(6): 581~ 586

[ 4 ] Cui G F, Cai T J, Yang W H. Soil acidity of *Larix gmelinii* plantation. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(3): 33~ 36

[ 5 ] Bai S B, Zhang Y D, Wang Z Q. The relationship between pH changes and P availability in rhizosphere of *Larix gmelinii*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 129~ 133

[ 6 ] Chen G L, Shao S W, Chen Y L. Comparison on pH change of rhizosphere soil between pure ash or larch forests and mixed forests. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(2): 102~ 104

[ 7 ] Wang X S. Study on transformation regularity of soil factors in larch plantation. *Jilin Forestry Science and Technology*, 1982, (4): 1~ 11

[ 8 ] Chen X Q, Guo Q H, Wang Z Q. Physical and chemical properties of soil under larch and larch-walnut mixed forests. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, 19(special issue): 258~ 274

[ 9 ] Lai L, Hai M D, PENG L F. Development of researches on soil phosphorus. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 65

~ 67.

- [10] Ma H S, Ma H R, ZHAO C S. Fractionation of organic phosphorus in rhizosphere soil and analysis on its availability. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, **29**(3): 116~ 118
- [11] Li X L, Yu Q Y, CEN H R M. Bio-availability of Different Forms of Soil Organic Phosphorus. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, **34**(2): 98~ 101
- [12] Liu S L, JIE X L, LI Y T. Study on the fractionation and availability of organic phosphorus in crop rhizosphere soil. *Journal of Heilongjiang Agricultural University*, 2002, **36**(1): 27~ 31
- [13] Zhang Y L, Shen Q R. Effects of organic manure on soil organic phosphorus fractions and their bio-availability. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1998, **21**(3): 59~ 63
- [14] He T, LI S J. Study on Bowman Cole's method of soil organic phosphorus fractionation. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, **24**(2): 152~ 159
- [15] Pei H K, ZHU Z H, QIAO Y M, *et al*. Humus in soil and type of organic phosphorus of soil on different alpine meadow vegetation. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2001, **10**(4): 18~ 23
- [16] Qiu F J. Distribution of organic carbon, nitrogen, phosphorus forms in three types of black soils and their relationship between them. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 1983, (1): 21~ 29
- [17] Chen L X. Relationship between soil organic phosphorus forms in larch plantations and tree growth. *Chin. J. Appl. Ecol*, 2003, **14**(12): 2157~ 2161
- [18] Specialty Committee of Agricultural Chemistry of Chinese Soil Association, eds. General analytical method of soil agricultural chemistry. Beijing: Science Press, 1983. 104~ 108
- [19] Liu J X, Zhou G Y, Wen D Z. Study on the method by using KCl exchange-neutralization titration to determine exchangeable acid in forest soil. *Environment and Development*, 2000, **15**(4): 38~ 39
- [20] Institute of Soil Science of Nanjing, Chinese Academy of Science, eds. *Soil Physics and Chemistry Analysis*. Shanghai: Shanghai's Science and Technology Press, 1978
- [21] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from Grassland Soils. *Soil Sci*, 1978, **125**(2): 95~ 101
- [22] Zhang Y D, WANG Q C, ZHANG G Z. Soil phosphorus activation mechanism in the mixture plantation of Ash and Larch. In: Sheng G F, Zhai M P, eds. *Research on Mixed Forest Plantations*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1997. 136~ 139
- [23] Chen L X. Succession of soil quality of plantations and its control. Beijing: Science Press, 2004. 24~ 26
- [24] Chen L X, Yang C D. Succession of various types of phosphorus, phosphatase activity, and relationship with tree growth in larch plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, **40**(3): 12~ 18
- [25] Zhang W Z, CHEN K Q. Effect of organic fertilizers on soil organic phosphorus fractionation and their availability. *Journal of Northeast Agricultural College*, 1988, **19**(2): 112~ 117
- [26] Sharpley A N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1985, **49**: 905~ 911
- [27] Dalal R. C. Soil organic phosphorus. *Advance of Soil Science*, 1980, **8**(4): 15~ 28
- [28] Harrison A. F. Review on soil organic phosphorus. *Advance of Soil Science*, 1990, **18**(4): 11~ 19
- [29] Shen S M. Fertility of China Soils. Beijing: China Agricultural Press, 1998. 121~ 122
- [30] Zhao S H, YU W T, ZHANG L. Research advances in soil organic phosphorus. *Chin. J. Appl. Ecol. Nov.*, 2004, **15**(11): 2189~ 2194

## 参考文献:

- [1] Grant W. Thomas. 土壤酸度研究问题的新进展. *土壤学进展*, 1992, 14~ 17
- [2] 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策. *世界林业研究*, 1996, **9**(5): 61~ 69
- [3] 陈立新, 陈祥伟, 段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究. *应用生态学报*, 1998, **9**(6): 581~ 586
- [4] 崔国发, 蔡体久, 杨文化. 兴安落叶松人工林土壤酸度的研究. *北京林业大学学报*, 2000, **22**(3): 33~ 36
- [5] 白尚斌, 张彦东, 王政权. 落叶松根际 pH 值与供磷水平及土壤磷有效性的关系. *林业科学*, 2001, **37**(4): 129~ 133
- [6] 程国玲, 邵士文, 陈永亮. 水曲柳落叶松纯林与混交林根际土壤 pH 值变化对比. *东北林业大学学报*, 2001, **29**(2): 102~ 104
- [7] 王秀石. 落叶松人工林土壤因子变化规律的研究. *吉林林业科技*, 1982, (4): 1~ 11
- [8] 陈喜全, 郭秋慧, 王政权. 落叶松纯林与落叶松胡桃楸混交林下土壤理化性质的研究. *东北林业大学学报*, 1991, **19**(水胡黄楸专刊): 258~ 274
- [9] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展. *水土保持研究*, 2003, **10**(1): 65~ 67

- [10] 李和生, 马宏瑞, 赵春生 根际土壤有机磷的分组及其有效性分析 土壤通报, 1998, 29(3): 116~ 118
- [11] 李孝良, 于群英, 陈如梅 土壤有机磷形态的生物有效性研究 土壤通报, 2003, 34(2): 98~ 101
- [12] 刘世亮, 介晓磊, 李有田 作物根际土壤有机磷的分组及有效性研究, 2002, 36(1): 27~ 31
- [13] 张亚丽, 沈其荣, 曹翠玉 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响 南京农业大学学报, 1998, 21(3): 59~ 63
- [14] 贺铁, 李世俊, Bowman Cole 土壤有机磷分组法的探讨 土壤学报, 1987, 24(2): 152~ 159
- [15] 裴海昆, 朱志红, 乔有明, 等 不同草甸植被类型下土壤腐殖质及有机磷类型探讨 草业学报, 2001, 10(4): 18~ 23
- [16] 邱凤琼等 三种黑土中有机碳、氮、磷的形态分布与肥力的关系 土壤学报, 1983, (1): 21~ 29
- [17] 陈立新 落叶松土壤有机磷形态与林木生长量的关系 应用生态学报, 2003, 14(12) 2157~ 2161
- [18] 中国土壤学会农业化学专业委员会编 土壤农业化学常规分析方法 北京: 科学出版社, 1983
- [19] 刘菊秀, 周国逸, 温达志 氯化钾交换-中和滴定法测定森林土壤交换性酸的研究 环境与开发, 2000, 15(4): 38~ 39
- [20] 中国科学院南京土壤研究所编 土壤理化分析 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [22] 张彦东, 王庆成, 张国珍 水曲柳落叶松混交林土壤磷活化机理 见: 沈国舫, 翟明普主编 混交林研究 北京: 中国林业出版社, 1997. 136~ 139
- [23] 陈立新著 人工林土壤质量演变与调控 北京: 科学出版社, 2004, 24~ 26
- [24] 陈立新, 杨承栋 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究 林业科学, 2004, 40(3): 12~ 18
- [25] 张为政, 陈魁卿 有机肥对土壤有机磷组分及其有效性影响 东北农学院学报, 1988, 19(2): 112~ 117
- [27] Dalal R. C. 土壤有机磷 土壤学进展, 1980, 8(4): 15~ 28
- [28] Harrison A. F. 土壤有机磷——文献述评 土壤学进展, 1990, 18(4): 11~ 19
- [29] 沈善敏 中国土壤肥力 北京: 中国农业出版社, 1998 221~ 222
- [30] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等 土壤有机磷研究进展 应用生态学报, 2004, 15(11) 2189~ 2194