

# 秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律

陈钦程<sup>1</sup>, 徐福利<sup>1,2\*</sup>, 王渭玲<sup>3</sup>, 程治文<sup>1</sup>

( 1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院, 水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 【目的】土壤养分对华北落叶松的生长具有重要作用, 钾素是植物所必需的大量营养元素之一, 土壤中钾素对植物最有效的形态为速效钾, 其能够直观地反映土壤可供植物利用的钾素水平。华北落叶松是北方人工林栽植的主要树种, 具有生长快、木材优质、耐寒性好、水土保持效果好等优点。研究表明华北落叶松人工林种植初期长势良好, 而近年来长势明显不良, 因此有必要对秦岭北麓不同林龄华北落叶松林地土壤的养分特别是速效钾的变化规律进行研究。【方法】本研究选择土壤性质与林分基本特征相似的幼龄林(5a, 10a), 中龄林(20a), 近熟林(30a)及成熟林(40a)等5种不同林龄华北落叶松人工林地。5a、10a、20a华北落叶松试验样地位于陕西省宝鸡市太白县太白林业局南滩实验苗圃林场, 30a、40a试验样地位于西北农林科技大学火地塘教学试验林场。从5月开始, 每月中旬采集各个样地的土壤样品, 直到10月中旬落叶为止。每个林龄林地选5个不同的20 m × 20 m样点, 用土钻取剖面0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm土层土壤, 5个点混合均匀成一个土样, 分析土壤速效钾含量。【结果】在不同月份, 不同林龄的华北落叶松土壤的速效钾含量随土壤深度的增加有下降趋势。0—20 cm土层的速效钾含量相对于其他土层含量较高, 其中, 近熟林(30a)及成熟林(40a)土壤速效钾含量明显高于其他林龄的土壤; 不同月份不同林龄华北落叶松土壤的速效钾含量差异显著( $P < 0.01$ )。研究区域不同林龄华北落叶松土壤速效钾含量达到中等及高水平。在不同华北落叶松生长季节0—20 cm土层速效钾含量呈先增加后降低的抛物线形变化。土壤速效钾含量与有机质含量有极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ), 与土壤含水量达显著相关( $P < 0.05$ ), 与土壤pH呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )。【结论】随林龄的增加, 华北落叶松人工林土壤速效钾的含量不会降低。土壤有机质含量, 土壤含水量与土壤pH会对土壤速效钾的含量产生影响。秦岭北麓华北落叶松人工林林地土壤速效钾含量丰富, 供钾充足。

关键词: 林龄; 华北落叶松; 土壤; 速效钾

中图分类号: S714.8

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2014)05-1243-07

## Seasonal dynamics of available K in soil for different ages of *Larix principis-rupprechtii* in the northern foot of the Qinling

CHEN Qin-cheng<sup>1</sup>, XU Fu-li<sup>1,2\*</sup>, WANG Wei-ling<sup>3</sup>, CHENG Zhi-wen<sup>1</sup>

( 1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** 【Objectives】Soil nutrients are important for growth of *Larix principis-rupprechtii*. The soil readily available K contents in 5a, 10a, 20a, 30a and 40a *Larix principis-rupprechtii* fields in northern foot of the Qinling were measured to find out their seasonal dynamics from May to October. 【Methods】The plantation with *Larix principis-rupprechtii* age of 5a, 10a, 20a, 30a and 40a was selected, where the basic stand characteristics of trees and soil properties were similar. The 5a, 10a and 20a plantations were located in Taibai County, Baoji in Shanxi Province in the northern foot of the Qinling Mountain, the 30a and 40a ones in the teaching experiment forest farm

收稿日期: 2013-10-24

接受日期: 2014-07-17

基金项目: “十二五”国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB416902)项目资助。

作者简介: 陈钦程(1989—), 女, 山东枣庄, 硕士研究生, 主要从事土壤养分等方面的研究。E-mail: cheng7018718@126.com

\* 通信作者 E-mail: xfl@nwsuaf.edu.cn

of Northwest A&F University in the same region. The soil samples of 5a, 10a, 20a, 30a and 40a *Larix principis-rupprechtii* were collected in the middle of each month from May 2012 to October 2012. Each sampling area was 20 m × 20 m five points were chosen randomly in each plot and soil samples were collected after peel off the litter layer of soil surface. The 0–20, 20–40 and 40–60 cm soil samples were taken separately with 1 m soil drilling. The content of soil readily available K was analyzed. **【Results】** In different months content of soil available K for different ages of *Larix principis-rupprechtii* was declined from the soil depth of 0–20 cm to 20–40 cm. On the soil depth of 0–20 cm, soil available K content in 30 a and 40 a plantations are higher than that in other ages of plantations. Soil available K content varies significantly in the tested months ( $P < 0.01$ ). Without fertilization, the soil available K contents are in middle and high levels. In 0–20 cm of soil, soil available K contents show parabolic variation from spring to autumn. The soil available K content is extremely significant and positively correlated with the soil organic matter content ( $P < 0.01$ ), significantly with the soil water content ( $P < 0.05$ ), and significant negatively correlated with soil pH ( $P < 0.05$ ). **【Conclusions】** The elongation of *Larix principis-rupprechtii* growth ages will not reduce the soil available K content. The content of soil organic matter, water and pH affect the soil available K content. The soils in the *Larix principis-rupprechtii* plantations in the northern foot of the Qinling are abundant in available K, in other word, the supply of available potassium to *Larix principis-rupprechtii* is adequate.

**Key words:** *Larix principis-rupprechtii*; growth age; soil available K

钾是植物所必需的大量营养元素之一,而土壤中对植物最有效的钾为速效钾<sup>[1-6]</sup>。土壤速效钾含量能够直观反映土壤可供植物利用的钾素含量水平。已有研究表明土壤速效钾在土壤养分循环与利用方面具有重要地位,能直接反映土壤的钾素肥力状况<sup>[7-13]</sup>。

华北落叶松是北方人工林栽植的主要树种,具有生长快、木材优质、耐寒性好、水土保持效果好等优点<sup>[14-16]</sup>。研究表明华北落叶松人工林种植初期长势良好,而近年来长势明显不良<sup>[17]</sup>,因此需要合理发展与管理华北落叶松人工林。土壤养分水平对于林木的生长具有决定性影响,而目前有关华北落叶松林地氮、磷营养以及枯枝落叶对氮、磷及微生物量影响的研究<sup>[18-20]</sup>较多,却鲜有对华北落叶松林地钾素的研究,特别是林地土壤速效钾变化的报道也较少,且林地土壤速效钾含量的变化尚不明确<sup>[3]</sup>。因此,为了明确华北落叶松人工林土壤速效钾含量状况和提高人工林经营水平,探讨华北落叶松林下土壤速效钾的动态规律具有重要意义。本研究选取陕西省秦岭北麓不同林龄华北落叶松人工林林下土壤,进行不同季节土壤速效钾含量的分析,探讨不同林龄华北落叶松土壤速效钾的变化规律,评价不同林龄华北落叶松土壤速效钾的含量等级,为华北落叶松人工林的养管理提供理论依据。

## 1 研究材料

### 1.1 试验地概况

本试验在秦岭北麓选择 5 个不同林龄的华北落叶松人工林样地。其中 5a、10a、20a 华北落叶松试验样地位于陕西省宝鸡市太白县太白林业局南滩实验苗圃林场,地处太白县城东南 4 公里的秦岭西主峰鳌山脚下,东经 107°20′51.1″,北纬 34°02′18.1″,海拔 1600 ~ 1700 m,年均降水量 600 ~ 1000 mm,年均无霜期 158 d,年平均气温 7.6℃,最高气温 32.8℃,最低气温 -25.5℃,属秦岭谷地小气候带,林木生长期 166 d。试验样地土壤为棕壤,土壤有机质含量 18.68 g/kg ~ 25.89 g/kg,土壤含水量 13.94% ~ 15.63%,土壤 pH 6.52 ~ 6.71。

30a、40a 华北落叶松试验样地位于西北农林科技大学火地塘教学试验林场,地处秦岭南坡宁陕县境内,北纬 33°18′ ~ 33°28′,东经 108°21′ ~ 108°39′,坡度一般在 20° ~ 50°,海拔 1420 ~ 2474 m,属于北亚热带气候,年均降水量 1000 mm,多集中于 7、8 月份,年平均温度 12.7℃,绝对最高温度 28.6℃,绝对最低温度 -9.5℃,年日照时数 1327.5 h,林木生长期 6 个月。土壤主要为山地棕壤、暗棕壤和山地草甸土,以山地棕壤为主,其土层厚度大于 50 cm。土壤有机质含量为 39.55 g/kg ~ 51.14 g/kg,土壤含水量为 17.54% ~ 18.76%,土壤 pH 为 6.17 ~ 6.46。

## 1.2 试验林木

供试林木为林场 5 年、10 年、20 年、30 年、40 年

生的华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*), 每个样地面积均为 20 m × 20 m。样地的基本特征见表 1。

表 1 样地基本特征

Table 1 General characteristic of the sampling plots

林龄 Age (a)	林分类型 Forest types	坡向 Exposure	坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	海拔 Elevation (m)	平均树高 ATH (m)	平均胸径 ADBH (cm)
5	幼龄林 Young forest	东北 Northeast	坡中 Mesoslope	20 ~ 25	1680 ~ 1700	4.8	14.46
10	幼龄林 Young forest	东北 Northeast	坡中 Mesoslope	20 ~ 25	1650 ~ 1690	8.6	22.32
20	中龄林 Middle-aged forest	西北 Northwest	坡下 Baseslope	10 ~ 15	1620 ~ 1700	10.23	10.23
30	近熟林 Nearly mature forest	东北 Northeast	坡中 Mesoslope	25 ~ 30	1700 ~ 1850	19.1	18.44
40	成熟林 Mature forest	东 East	坡下 Baseslope	20 ~ 25	2100 ~ 2360	25.2	19.2

注( Note): ATH—Average tree height; ADBH—Average diameter at breast height.

## 2 研究方法

### 2.1 采样与分样

试验于 2012 年 2 月 ~ 3 月进行样地考察, 4 月 10 日开始布设样地、选取标准木(样地面积 20 × 20 m), 并于 4 月 15 日采集样地林下土壤, 从 5 月 15 日开始, 每月中旬采集各个样地华北落叶松土壤样品, 直到 10 月中旬落叶为止。土壤样品采集时拨开土壤表层的枯枝落叶层, 用 1 m 土钻分别取 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层和剖面土样, 每个样随机选取 5 个点, 各层分别混合均匀为一个土壤样品, 土样拣去石砾与动植物残体, 装入塑封袋。每次取样在每个样地的相同地点, 保证土壤样品的均一性。将采回的土壤样品在实验室自然风干, 进一步拣去可见的动植物残体与碎屑, 磨碎过 1 mm 筛。土壤速效钾含量用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提(1:10 土液比)<sup>[21]</sup>, 火焰光度法(型号 AP1200)测定。

### 2.2 数据处理

数据采用 DPS7.05 版进行统计分析, 分别取 5 个不同林龄的华北落叶松 0—20 cm 土层土壤的速效钾含量的平均值, 用 LSD 法分析不同月份、不同林龄之间的差异; 采用 DPS 多元分析软件对不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层的速效钾与土壤含水量、土壤 pH、土壤有机质含量的之间的相关关系进

行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林龄华北落叶松生育前期林地土壤速效钾含量的变化

从图 1 可以看出, 在 6 月, 不同林龄华北落叶松人工林土壤 0—60 cm 剖面的速效钾含量并非随着林龄的增加而明显地减少, 且不同土层的土壤速效钾含量主要处于中等与低水平, 其中 0—20 cm 土层的土壤速效钾含量较高, 处于中等与高水平, 成熟林(40a)土壤速效钾达到高水平, 为 138.67 mg/kg, 其他林龄土壤的速效钾含量在 84 ~ 116 mg/kg 范围内, 达到中等水平; 由 0—20 cm 到 20—40 cm 土层, 土壤速效钾含量明显下降; 在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层其速效钾含量变化不大。

### 3.2 不同林龄华北落叶松生育中后期土壤速效钾含量的变化

图 2 显示, 在 0—20 cm 土层, 近熟林(30a)土壤的速效钾含量较其他林龄高, 达到 264.67 mg/kg, 成熟林(40a)次之, 达到 193.33 mg/kg, 其次是幼龄林(5a, 10a)与中龄林(20a), 中龄林(20a)的含量最小, 但仍达到 84 mg/kg, 属于中等含量水平, 仍不缺钾。从 0—20 cm 到 20—40 cm 土层, 不同林龄土壤的速效钾含量的变化趋势与 7 月份大体一致, 在

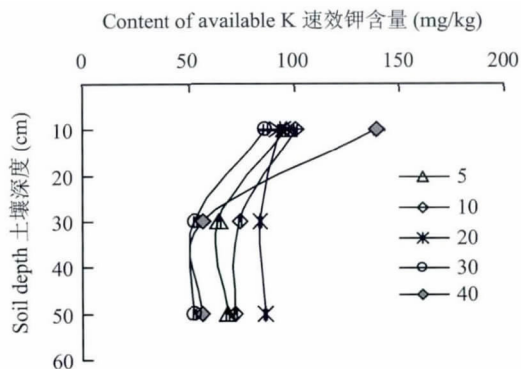


图1 不同林龄华北落叶松生育前期林地土壤速效钾含量

Fig.1 Soil available K content in different ages of *Larix principis-rupprechtii* before growth period

20—40 cm 土层,不同林龄土壤的速效钾含量仍主要处于中等水平。40—60 cm 与 20—40 cm 土层的土壤速效钾含量所处等级相同,均处于中等水平。8 月份整体土壤速效钾含量水平较高,表明林地土壤速效钾含量处于动态变化状态,与土壤水热条件有关,由于土壤干湿交替可导致固定态钾增多,干燥使土壤溶液浓度增加,钾离子容易到交换位置上来,增加了渗入层间孔穴的机会,钾离子就能被吸持。如果溶液中钾离子很少,则湿润后固定钾就会返渗出来。而在 8 月份,试验区处于多雨季节,土壤温度和水分含量均较高,所以速效钾含量较 6 月份高。

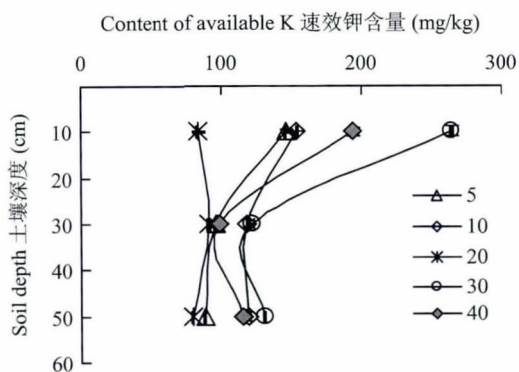


图2 不同林龄华北落叶松生育中期土壤速效钾含量变化  
Fig.2 Soil content of available K for different ages of *Larix principis-rupprechtii* in growth period

由图 3 可知,成熟林(40a)与近熟林(30a)后期较其他林龄的 0—20 cm 土层土壤的速效钾含量高,分别为 212.7 mg/kg 与 199.0 mg/kg。从 0—20 cm

到 20—40 cm 土层,不同龄林土壤速效钾含量变化趋势与前期一致,仍呈下降趋势。在 20—40 cm 土层,近熟林(30a)的速效钾含量最高,为 130.0 mg/kg。在 40—60 cm 土层,近熟林(30a)土壤速效钾含量仍最高,与其他不同林龄土壤速效钾含量均处在中等水平。庞凤等<sup>[24]</sup>研究表明,土壤速效钾含量与有机质含量呈显著正相关。原因主要是随着枯枝落叶被土壤微生物分解的增多,导致土壤有机质增加。土壤有机质不但提供了植物生长所需要的养分,也通过影响土壤物理、化学和生物学性质改善土壤的养分状况,从而提高了土壤的速效钾含量。

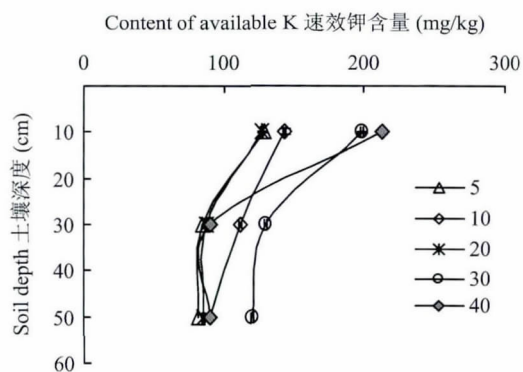


图3 不同林龄华北落叶松生育后期土壤速效钾含量变化  
Fig.3 Soil available K content in different ages of *Larix principis-rupprechtii* after growth period

### 3.3 不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层速效钾含量的变化规律

结合图 1、图 2 和图 3 0—20 cm 土层不同林龄华北落叶松速效钾含量差异较大,是土壤速效钾含量变化活跃的区域,主要受土壤有机质、土壤温度与土壤含水量变化的影响,分析不同月份不同林龄华北落叶松土壤速效钾含量的动态变化(表 2)表明,在 5 月~10 月份为华北落叶松生长季节,0—20 cm 土层成熟林与近熟林的土壤速效钾含量较其他小林龄高。在 5 月、7 月和 8 月,近熟林土壤的速效钾含量最高,与含量第二高的 40a 林龄差异极显著;在 9 月和 10 月,成熟林的土壤速效钾含量最高,与当月速效钾含量第二高的 10a 与 30a 林龄也达极显著差异水平。在不同月份,近熟林与成熟林土壤速效钾含量与其他林龄差异极显著。总的来说,不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层速效钾含量不同,在不同月份土壤速效钾含量差异显著。在 5~10 月华北落叶松生长季节同一树龄 0—20 cm 土层速效钾含

表 2 5~10 月份不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层速效钾含量 (mg/kg)  
Table 2 Soil available K contents in different standing ages of *Larix principis-rupprechtii* in 0—20 cm soil layer from May to October

林龄 (a) Age	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
5	103.0 bB	96.0 bAB	145.0 cC	145.0 cC	131.0 dD	128.7 cC
10	117.7 aA	101.7 aA	153.7 cC	153.7 cC	175.3 bB	143.3 cC
20	59.0 dD	93.0 bB	104.3 dD	83.0 dD	90.7 eE	127.0 dD
30	119.3 aA	86.0 cC	264.7 aA	264.7 aA	153.7 cC	199.0 bB
40	77.3 cC	52.3 dD	193.3 bB	193.3 bB	289 aA	212.7 aA

注 (Note): 同列数据后不同小、大写字母分别表示林龄间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

量呈先增加后降低的抛物线形变化。建议在生产实际中用速效钾含量作为林地土壤钾素肥力指标时, 应注意取样时间。

### 3.4 不同林龄华北落叶松林地速效钾与土壤水分, 土壤 pH 和土壤有机质含量的关系

土壤养分的变化与土壤其他理化性质有密切关系。不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层土壤速效钾含量分别与土壤含水量、土壤 pH 和土壤有机质含量进行相关分析, 结果表明, 土壤速效钾含量与有机质含量的相关系数为 0.9259, 达到极显著正相关水平 ( $P < 0.01$ ), 与土壤含水量的相关系数为 0.8495, 达到显著相关水平 ( $P < 0.05$ ), 与土壤 pH 的相关系数为 -0.8288, 达到显著负相关水平 ( $P < 0.05$ )。

## 4 讨论与结论

不同季节不同林龄华北落叶松林地土壤速效钾的变化是一个复杂过程, 土壤速效钾含量变化受到林龄、季节、土壤温度、水分和其他理化性状等多个因素的影响。首先, 已有研究表明, 土壤速效钾含量受温度、施肥、土壤酸碱度及土壤有机质含量的影响<sup>[22-26]</sup>。本研究结果表明, 土壤速效钾含量与土壤含水量呈显著正相关 ( $r = 0.8459$ ), 即土壤含水量的变化会显著影响土壤速效钾含量。因为土壤干湿交替会引起粘土矿物的收缩与膨胀, 影响速效钾的固定与释放, 进而对土壤速效钾的含量产生影响。不同林龄华北落叶松土壤速效钾与有机质含量呈极显著正相关 ( $r = 0.9259$ ), 可能是因为枯落物具有很好的保持水土、涵养水源的作用。李良等研究<sup>[20]</sup>表明, 随着林龄的增加, 华北落叶松人工林林下枯落物的厚度在逐渐增加, 平均厚度介于 3.5~6.0 cm 之间, 总储量也在增加, 介于 42.23~65.00 t/hm<sup>2</sup> 之

间。胡诚等<sup>[27]</sup>研究表明, 在 0—20 cm 土层, 施用有机肥可以提高土壤速效钾的质量分数。Stainislaw Mercik 等<sup>[28]</sup>的研究结果显示, 施用有机肥可以提高钾的有效性。本研究也发现, 随着林龄的增加, 枯枝落叶的厚度增加, 土壤表层的有机质增加, 进而提高了土壤速效钾的含量。不同林龄华北落叶松土壤速效钾与土壤 pH 呈显著负相关, 由于在酸性条件下, 粘土矿物层间形成的羟基铝离子基团具有阻止膨胀性粘土矿物硅氧层塌陷的作用, 从而提高层间钾的强度。庞凤等<sup>[24]</sup>的研究表明, 土壤速效钾含量与土壤 pH 呈极显著负相关, 与本研究结果相一致。

张汉春等<sup>[29]</sup>的研究结果说明, 随着林龄的增加, 土壤总体养分水平随林龄的增加而降低, 尤其是速效钾的下降趋势明显, 而本研究的结果与其不同, 华北落叶松生长中, 对土壤速效钾含量的降低不明显。在华北落叶松人工林的生长过程中不施肥, 林木从土壤中不断吸收钾素营养, 随着林龄的持续增加, 土壤速效钾并非与林龄呈正相关关系, 成熟林与近熟林的土壤速效钾含量并非小于幼龄林与中龄林。在各土层, 华北落叶松土壤速效钾含量在不同生育期并非随着林龄的增加而减少, 表明华北落叶松的生长并没有减少土壤中的速效钾含量, 而且结合图 1 至图 3 的结果, 在 0—20 cm 土层, 成熟林与近熟林的土壤速效钾含量明显高于其他林龄, 且达显著性差异水平 ( $P < 0.05$ )。

纪萱等<sup>[30]</sup>的研究结果表明, 不同林型不同深度非根际土壤速效钾质量分数除 45 年生红松人工林和红松混交林以外, 其他林型没有表现出随土层深度加深而降低的情况。而本研究结果不同的是, 不同林龄土壤速效钾含量在 0—20 cm、20—40 cm 与 40—60 cm 土层的变化趋势大致相同, 20—40 cm 土

层较 0—20 cm 土层的土壤速效钾含量低, 40—60 cm 较 20—40 cm 土层土壤速效钾含量变化不稳定。40—60 cm 土层土壤速效钾含量明显受生物富集或表聚作用的影响<sup>[21]</sup>, 因此变化较不稳定。总的来说, 秦岭北麓区域华北落叶松人工林土壤速效钾含量都很丰富, 供钾充足。

不同林龄华北落叶松 0—20 cm 土层土壤的速效钾含量不同, 不同月份不同林龄华北落叶松土壤速效钾含量差异显著。在 5 月~10 月份华北落叶松生长季节同一树龄 0—20 cm 土层的速效钾呈先增加后降低的抛物线形变化趋势, 因此生产实际中用速效钾作为林地土壤钾素肥力指标时, 应考虑取样时间这一因素。

### 参 考 文 献:

- [1] 范钦桢, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 591-599.  
Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 591-599.
- [2] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 94-101.  
Jin J Y. Advances in soil potassium research [J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(1): 94-101.
- [3] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 1(5): 886-893.  
Tan D S, Jin J Y, Huang S W *et al.* Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 1(5): 886-893.
- [4] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定影响的机理[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1009-1014.  
Zhang H M, Xu M G, Lü J L *et al.* Effects of long-term potassium fertilization on potassium fixation in soils under different ecological conditions: A mechanism study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 1009-1014.
- [5] Zhang H L, Zhang X Y, Liu X B. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available potassium [J]. Nutrition Cycling Agroecosystem, 2013, 95: 319-331.
- [6] Ahmad N, Cornforth I S, Walmsley D. Methods of measuring available nutrients in west Indian soil [J]. Plant and Soil, 1973, 39: 635-647.
- [7] 李娟, 张世熔, 孙波, 等. 湫水河流域生态修复过程中土壤速效钾的时空变异[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 88-92.  
Li J, Zhang S R, Sun B *et al.* Temporal spatial variability of soil available potassium in processing of restoration ecosystem in Lianshui basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 88-92.
- [8] 李晓燕, 张树文. 吉林省德惠市土壤速效钾的空间分异及不同插值方法的比较[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 97-100.  
Li X Y, Zhang S W. Spatial heterogeneity and comparison of different methods of interpolation of soil available K in Dehui city, Jilin province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 97-100.
- [9] 陈相宇, 程凤科, 徐长亮, 等. 庐山土壤速效钾的垂直分布特征研究[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(24): 98-101.  
Chen X Y, Cheng F K, Xu C L *et al.* Vertical distribution characteristics of soil available potassium in Lushan Mountains [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2012, 18(24): 98-101.
- [10] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明, 等. 我国不同水热梯度带农田土壤速效钾含量的时空变异特征[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 1-4.  
Yu S P, Yang J S, Liu G M *et al.* Temporal spatial variability of soil available potassium in field along gradients of precipitation and temperature in China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2): 1-4.
- [11] Blake L, Mercik S, Koerschens M. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments [J]. Plant and Soil, 1999, 216: 1-14.
- [12] Gideon O A, Akinol G. Critical levels for soil pH, available P, K, Zn and Mn and maize ear-leaf content of P, Cu and Mn in sedimentary soils of South-Western Nigeria [J]. Fertilizer Research, 1985, 6: 65-71.
- [13] Simonis A D, Nimeth K. Comparative study on EUF and other methods of soil analysis for the determination of available potassium in soils from Northern Greece [J]. Plant and Soil, 1985, 83: 93-106.
- [14] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35-40.  
Zhang J T, Meng D P. Spatial pattern analysis of individuals in different age classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya mountain reserve, Shanxi, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 35-40.
- [15] 隋玉龙, 陈丽艳, 马莉. 不同林龄日本落叶松与华北落叶松生长的比较[J]. 河北林果研究, 2009, 24(4): 362-365.  
Sui Y L, Chen L Y, Ma L. Comparative study on the growth of different age of *Larix kaempferi* and *Larix principis-rupprechtii* [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2009, 24(4): 362-365.
- [16] 翟洪波, 呼和牧仁, 周梅, 等. 不同年龄华北落叶松光合、蒸腾生理生态特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31(2): 66-71.  
Zai H B, Hu H M R, Zhou M *et al.* Studies on photosynthetic physiological characteristics of different ages of *Larix principis-*

- rupprechtii* [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(2): 66–71.
- [17] 雷瑞德, 党坤良, 张硕新, 等. 秦岭南坡中山地带华北落叶松人工林对土壤的影响[J]. 林业科学, 1997, 33(5): 463–470.
- Lei R D, Dang K L, Zhang S X *et al.* Effect of a *Larix principis-rupprechtii* forest plantation on soil in middle zone of south-facing slope of the Qinling mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997, 33(5): 463–470.
- [18] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5500–5506.
- Yang K, Zhu J J, Zhang J X *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5500–5506.
- [19] 王欣, 高明达, 杨飞, 等. 不同林龄华北落叶松人工林凋落物分解及养分动态比较[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 56–61.
- Wang X, Gao M D, Yang F *et al.* Litter decomposition and nutrient dynamics of *Larix principis-rupprechtii* plantations of different ages [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(10): 56–61.
- [20] 李良, 翟洪波, 姚凯, 等. 不同林龄华北落叶松人工林枯落物储量及持水特性研究[J]. 中国水土保持, 2010, 3(4): 32–34.
- Li L, Zai H B, Yao K *et al.* Litter reserves and water-holding capacity of *Larix principis-rupprechtii* with different stand ages [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, 3(4): 32–34.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. 107.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis(3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. 107.
- [22] Cui W W, Liu J P. Study on the differences of village-level spatial variability of agricultural soil available K in the typical black soil regions of northeast China [J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2010, Part II, IFIP AICT 345: 674–681.
- [23] Pracilio G, Adams M L, Smettem K R J. Determination of spatial distribution patterns of clay and plant available potassium contents in surface soils at the farm scale using high resolution gamma ray spectrometry [J]. Plant and Soil, 2006, 282: 67–82.
- [24] 庞夙, 陶晓秋, 张英, 等. 会理县新植烟区土壤速效钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(1): 32–36.
- Pang S, Tao X Q, Zhang Y *et al.* Spatial variability characteristic and influencing factors of soil available potassium in new tobacco plantation district in Huili County [J]. Chinese Tobacco Science, 2012, 33(1): 32–36.
- [25] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828–1835.
- Zhang W, Chen H S, Wang K L *et al.* The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst Region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(9): 1828–1835.
- [26] Halevy J. Estimation of available potassium for cotton by soil analysis [J]. Plant and Soil, 1977, 47: 363–373.
- [27] 胡诚, 宋家咏, 李晶, 等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 673–676.
- Hu C, Song J Y, Li J *et al.* Profile distribution of soil available phosphorus and available potassium concentrations and crop yields in long-term fertilization experiment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(4): 673–676.
- [28] Mercik S, Stepień W, Labetowicz J. The fate of nitrogen, phosphorus and potassium in long term experiments in Skierniewice [J]. Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163: 273–278.
- [29] 张汉春. 华北落叶松人工林土壤肥力的研究[J]. 科学大众·科学教育, 2012, (1): 177–178.
- Zhang H C. *Larix principis-rupprechtii* forests plantation fertility research [J]. Popular Science, 2012, (1): 177–178.
- [30] 纪萱, 陈立新, 薛洪祥, 等. 不同林龄红松人工林土壤养分及微量元素的变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(7): 27–29.
- Ji X, Chen L X, Xue H X. Change of soil nutrients and microelements in Korean pine plantations of different ages [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(7): 27–29.