

# 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系

侯爱敏<sup>1</sup>, 彭少麟<sup>2</sup>, 周国逸<sup>2</sup>

(1. 苏州科技大学资源与城市科学系, 苏州 215011; 2. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

**摘要:** 分析了鼎湖山马尾松年轮中几种化学元素含量的历史变化, 并探讨了区域酸雨的影响。结果表明, 酸雨有可能导致马尾松年轮中 N、K 和 Al 的含量在近 30a 中的上升趋势, 和 Ca、Mg 和 Mn 明显的下降趋势。马尾松幼年期年轮部分元素含量异常地偏高, 可能是幼年期生理机制不完善、对元素的选择性吸收和排斥能力较低所致, 因此, 以马尾松幼苗为对象进行的模拟酸雨试验结果, 在推广至成熟的马尾松林地时可能会出现较大的偏差。

**关键词:** 马尾松; 年轮; 元素; 酸雨

## Tree-Ring Chemical Changes and Possible Impacts of Acid Precipitation in Dinghushan, South China

HOU Ai-Min<sup>1</sup>, PENG Shao-Lin<sup>2</sup>, ZHOU Guo-Yi<sup>2</sup> (1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011; 2. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Wushan, Guangzhou 510650). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1552~1559.

**Abstract:** The objective of this paper is to examine the relations between acid rain and element content in the rings of a native species *Pinus massoniana*, which is sensitive to acid rain pollution in Dinghushan Nature Reserve (DNR), located in one of the areas with quickest industrial growth and severest acid rain pollution in China. Substantial decline of the pH of the precipitation and an even faster increase in the frequency of acid precipitation occurred in the last two decades in the area. We expect this to be shown in the element variations in the annual rings of *Pinus massoniana*.

The samples were collected in the pine forest at an elevation of about 250m. Four *Pinus massoniana* trees were randomly sampled in the stand, each within 10m to the others to insure a homogeneous sampling condition. Discs of about 5cm in thickness were cut off at the height of about 1.3cm, and then polished to reveal annual growth rings. Ring width was measured using a WinDendro Image System (Regent Co. Canada). Cross-dating was done both visually and statistically.

For each disc, wood samples representing 2-year growth intervals were cut off with a chisel. The samples were dried and ground by means of a grinding mill. Mineralization of a 1g sample was done using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>3</sub> for total nitrogen or HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>3</sub> (8:1:1) for Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe and Al. N was determined by automated ion analyzer (Quick Chem, U.S.); Ca, Mg, K, Na, Mn and Fe by atomic absorption spectrometry (GBC932AB, Australia) and Al by digital spectrophotometer (Shimadzu UV-120-02, Japan).

The annual variations of the ring widths were generally consistent across the four trees. After removing the age-related variations, only the short term variations were still retained, so the major cause of the long term radial growth variations of these trees can be attributed to age-related factors.

For all the elements except Al, Fe and Na, the variation pattern was fairly consistent among the four

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (39899370); 广东省自然科学基金重大资助项目 (980952); 中国科学院“九五”重大资助项目 (KZ951-B1-110, KZ95T-40-02-03)

收稿日期: 2000-06-26 修稿日期: 2002-03-10

作者简介: 侯爱敏 (1975~), 女, 河南洛阳人, 博士。主要从事树木年轮学研究。E-mail: joyhou 2000@sohu.com

trees. To show the long term trend and also to eliminate the possible effects of lateral translocation of the elements from pith to bark, ten-year averages of the element concentrations were calculated.

Comparison among the trees showed that, the unusually high accumulation of most of the elements, esp. Ca, Mg, Fe, Al and Mn in the first ten years, i.e. the juvenile period could only be accounted for by the difference in the ability to absorb these elements selectively between the young and mature trees. This difference shows that it is problematic to apply the results obtained from simulation experiments using seedlings or young trees to mature trees.

The 1970s saw the lowest concentrations of Mn, Mg, N and K in all four trees, which might be accounted for by the unusually high precipitation which exacerbated leaching and nutrient loss.

After the juvenile period, most of the elements showed a more consistent and substantial trend in the near three decades, with increasing N, K and Al, and decreasing Ca, Mg and Mn concentrations.

High N concentration is one of the important characteristics of acid precipitation. Thus, it is natural to link the observed increasing accumulation of N in the tree rings with increasing acid deposition with time. The increase in the concentration and total amount of N in the precipitation from 1989~1990 to 1998~1999 might give us some validation.

The observed profile of K variation with time seemed to be inconsistent with most other results about reduced K availability due to enhanced leaching caused by acid precipitation. However, the accelerated weathering might increase the availability of the element. Thus, other factors excluded, the variation of K should be the results of the balance between enhanced leaching and weathering, both as the result of reduced pH of precipitation.

All four trees showed a constant decrease in the concentrations of Ca, Mg and Mn throughout the time, indicating a regional controlling factor at work. Although it was reported that acid precipitation could enhance weathering which may lead to linear increase in the availability of Ca and Mg, the rate of the loss of Ca and Mg due to leaching seemed to be enhanced to a greater extent.

The acid precipitation caused a substantial increase in the concentration of Al in the annual rings of *Pinus massoniana* for the last two decades.

For Fe and Na, there was no consistent change of the concentrations both with time and among the trees, which is in accord with other reports, but few data seem to be available regarding the reason.

Interpretation of element profiles in tree rings by the environmental change would be compromised by the effects of the endogenous factors including the variations of cation binding capacity (CBC), living cells and lateral translocation of elements, etc. Analysis showed that the influence of CBC should be excluded and the influence of the variations caused by changing living cell numbers in our study is mostly local and could not cover up the long term trend of the element variation, which is also the case concerning the influence of lateral translocation. The great annual variations of Fe, Na, Al and Ca argue against the existence of lateral translocation in these elements.

*Pinus massoniana* proved to be a suitable species for the study of regional acid rain pollution history, but further elucidation is required concerning the endogenous factors affecting the radial variations of tree ring element concentration to increase the reliability of the results obtained.

**Key words:** *Pinus massoniana*; tree ring; element; acid precipitation

文章编号:1000-0933(2002)09-1552-08 中图分类号:Q948.1,S718.45 文献标识码:A

酸雨对森林的危害已引起了人们的普遍关注。研究发现,酸雨引起土壤酸化,盐基饱和度降低,一方面加速离子淋溶,造成部分养分元素缺乏;另一方面导致可溶性 Al 含量的增加,抑制一些元素的吸收,加上

过量 N 和 S 等的输入,将导致森林营养严重不平衡,从而导致森林衰亡<sup>[1~3]</sup>。许多学者通过模拟酸雨淋洗盆栽幼苗或对比分析的方法来对于酸雨引起的土壤中和植物体内元素的短期变化进行了研究<sup>[1,4,5]</sup>;而长期的野外测量资料则较为少见。由于森林具有自然的缓冲能力,土壤及凋落物中含有的有益物质具有缓冲土壤酸度,调节树木对养分的吸收的功能<sup>[6,7]</sup>;同时模拟的酸雨很难真切地反映自然界酸雨的历时长短、酸度和频率等特性,因此笔者认为将短期的对盆栽苗的模拟实验结果推广到生长于复杂的自然条件下森林物种,可能会有失偏颇。

对生长于自然条件下的树木的年轮元素尤其是 Al、Ca、Mg 和 Mn 等的含量变化的分析,为酸雨的研究提供了一条新的途径<sup>[8~10]</sup>。然而这一应用的可靠性依赖于对环境变化与年轮元素含量波动的关系的了解。以生长于我国酸雨危害较为严重的华南地区的对酸雨较为敏感的森林树种——马尾松为对象,测定了其年轮中几种主要元素含量在过去近 40a 的变化,探讨了酸雨的可能影响。物种与研究地的选择主要是基于以下两个原因。首先,马尾松是一种对酸雨较为敏感的树种,曾有不少有关酸雨导致马尾松衰亡的报道<sup>[2]</sup>,利用马尾松幼苗进行模拟酸雨的研究更是大量涌现,而将马尾松年轮化学分析应用于区域酸雨历史的研究还不多见,希望通过研究探讨马尾松在这一领域应用的前景;其次,鼎湖山所处的华南地区,是我国酸雨出现的高频区和严重地区,在不到 20a 的时间内降水酸度和频率发生了大幅度的变化,这种大幅度的变化,很可能在敏感树种马尾松的年轮中有所反映,然而在该地区尚无此类研究。

1 材料和方法

1.1 研究区生态环境

鼎湖山自然保护区位于广东省肇庆境内,距广州市 86km,位于 23°08'N, 112°35'E,地处南亚热带的南缘,总面积 1155hm<sup>2</sup>,为大起伏山地。气候属亚热带季风气候,年太阳总辐射约 4655MJ·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,年平均日照时数为 1433h,年平均气温 20.9℃。该区雨量充沛,年降雨量达 1900mm,但分布不均,年蒸发量 1115mm,年均相对湿度约 81.5%,每年还受到数次热带气旋或台风的影响。鼎湖山主要有砖红壤性红壤和黄壤两大类,土壤酸度较大,pH 值约 4.2~5.0。森林植物种类丰富,它们形成了 16 个植被类型。

鼎湖山所处的华南地区,是我国酸雨出现的高频区和严重地区。根据广州市环境监测中心站对 1985~1997 年降水数据分析(如表 1),自 1985 至 1990 年,广东省降水 pH 值逐年下降,1990 年达到历史最低值,同时酸雨频率逐年上升,表明广东地区的酸雨污染是急剧加重的,这种趋势到 20 世纪 90 年代以后才有所控制。鼎湖山所在的肇庆地区又是广东省酸雨污染较为严重的地区之一,1991~1997 年间降水 pH 的年均值均低于全省平均水平。

表 1 广东省降水 pH 和酸雨频率(%)年际变化

Table 1 The pH and frequency(%) of acid rain in Guangdong Province														
年份 Year	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	
pH 年均值 Annual average pH	5.18	4.82	4.78	4.53	4.46	4.43	4.96	4.61	4.93	4.85	4.89	4.84	4.81	
酸雨频率 Acid rain frequency	34.6	41.4	43.5	53.3	51.9	49.2	46.5	53.1	43.4	46.5	45.8	42.7	51.7	

马尾松采自保护区针叶林永久样地附近,海拔约 250m 左右,坡度约 25~30°,坡向南 10°西,土壤为砖红壤性红壤,土层较薄,一般厚度为 30cm,土壤酸度较大,pH 值约 4.2~5.0。冠层隐蔽度 60%左右,树高 15~25m,胸径 30~60cm。

1.2 年轮样品的采集和分析

共采 4 株树,年轮大部分从 20 世纪 60 年代开始,各株相距不超过 10m。于每株胸高处(1.3m 左右)锯取约 5cm 厚的圆盘,烘干后磨平、抛光,用加拿大 Regent 公司的 WinDendro 年轮测量系统测量年轮宽度并进行交叉定年。将年轮以两年为一段截开,磨碎后进行元素含量分析。

样品分析测定:N 用浓硫酸-高氯酸消化,自动离子分析仪(美国)测定;其它元素用三酸消化(HNO<sub>3</sub>-

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>3</sub> 按 8:1:1 混合),原子吸收光谱仪(澳大利亚, GBC932AB 型)测量 Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe;比色法(日本产 Shimadzu 数字显示分光光度计 UV-120-02 型)测 Al。

2 结果与分析

2.1 马尾松年轮宽度的变化

四棵树年轮宽度的变化如图 1。可以看到,4 棵树径向增长的变化是较为一致的,都在 20 世纪 60 年代保持了相对较高的生长率,80 年代有所下降,而在 90 年代后半期略有回升。为了排除年龄的影响,对各生长序列进行了标准化处理,结果发现年轮指数中主要只保留了短期的波动(图 2),说明主要的长期趋势是由马尾松径向生长随年龄的变化引起的。



图 1 4 棵样树年轮宽度的变化

Fig. 1 Annual increase of ring width of the four trees

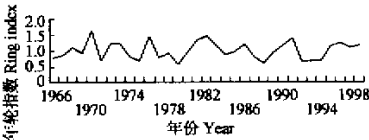


图 2 马尾松年轮指数随时间的变化

Fig. 2 Average indexed ring-width chronologies for the four series

2.2 各元素含量的变化及其与酸雨的关系分析

由图 3 可以看到,马尾松 8 种元素的含量具有或大或小的年际波动,其中 Al、Fe 和 Na 的波动较大,而其余 5 种元素年际波动较小。为了更明显地反映长期的趋势,并排除横向迁移的影响,将 10a 的均值列为表 2。

从表 2 中可以看出,除 Na 之外,树木年轮各元素含量的第 1 个 10a 均值,即幼年期含量都异常地偏高,其中 Ca、Mg、Fe、Al、Mn 表现尤为明显;由于幼年期始自 20 世纪 70 年代的 1 号样树的 Ca、Al 和 Fe 的含量明显地高于同时期其它样树的含量,可以肯定地认为:马尾松幼年期对此 3 种元素有异常高的积累,而成年以后对这些元素选择性吸收或排斥的能力才逐渐完善。这表明,酸雨造成的土壤元素含量的变化,尤其是 Al 含量的增加,对马尾松幼苗的影响要高于对成年个体的影响。因此,以马尾松幼苗为对象进行的模拟酸雨试验结果,在推广至成熟的马尾松林地时可能会出现较大的偏差。在其它几种元素中,20 世纪 70 年代处于幼年期的 1 号样树含量与同时期其它样树含量水平相当,表明可能有其它共同的控制因子在起作用。对比分析发现,该区域降雨量的均值在同时期大幅度升高(达 200mm),由于降雨量增大时对林地植被和土壤的淋溶和冲刷也增大,同时雨水中元素含量浓度降低,这便可能为 Mn、Mg、N、K 等元素在 20 世纪 70 年代的低值提供一种解释。

在除去幼年期异常值影响后,大部分元素的含量随时间表现出了更为一致的升或降的趋势,其中 N、K 和 Al 的含量在近 30a 中不断增加,而 Ca、Mg 和 Mn 则有明显的下降趋势,这里将各元素含量的变化与酸雨相联系进行分析。

2.2.1 营养元素 N 与 K 含量的变化 4 棵树之间 N 含量的差别不大,除 1 号含量稍低以外,另外 3 棵的含量处于同一水平。可以看出,在 20 世纪 60 年代,2、3、4 号样树 N 元素含量都处于较高的水平;70 年代,所有 4 棵样树都保持了较低的 N 含量;随后,N 元素的含量开始缓慢上升,90 年代,这种上升的趋势更加明显。N 是植物生长的限制因子之一,植物中 N 素主要来自大气降水输入而非矿物分解<sup>[11,12]</sup>,而 N 同时又通常是酸雨的主要成分,因此,有研究者认为酸雨中高的 N 含量在某些情况下可能给森林起了施肥的作用<sup>[13]</sup>。由于缺乏历史资料,无法确定鼎湖山近几 10a 来大气降水含氮量的变化趋势。但 1998~1999 大气降水含氮浓度为 1.01 mg · L<sup>-1</sup>,比 1989~1990 年分别高约 0.21 mg · L<sup>-1</sup>、2.83 kg · hm<sup>-2</sup><sup>[14,15]</sup>,这说明酸雨有可能增加了 N 的输入。

表 2 马尾松年轮 8 种元素含量 10a 均值的变化( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

Table 2 Variations of the eight elements in the rings of *Pinus massoniana*( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

	N	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Al
1 #								
1970	0.614	0.371	0.689	0.165	0.184	0.085	0.04	1.206
1980	0.581	0.317	0.517	0.141	0.164	0.066	0.04	0.639
1990	0.695	0.521	0.422	0.139	0.148	0.053	0.038	0.641
2 #								
1960	0.765	0.33	0.772	0.235	0.107	0.081	0.068	0.932
1970	0.733	0.314	0.521	0.172	0.107	0.054	0.048	0.505
1980	0.727	0.379	0.424	0.135	0.196	0.037	0.037	0.637
1990	0.9	0.537	0.408	0.107	0.14	0.03	0.031	0.689
3 #								
1960	0.781	0.453	0.608	0.164	0.157	0.062	0.065	1.914
1970	0.702	0.361	0.528	0.12	0.117	0.055	0.043	0.866
1980	0.8	0.445	0.536	0.111	0.128	0.052	0.037	1.248
1990	1.052	0.663	0.397	0.104	0.223	0.058	0.034	1.418
4 #								
1960	0.803	0.341	0.641	0.258	0.11	0.093	0.076	1.143
1970	0.677	0.363	0.532	0.215	0.14	0.042	0.045	0.33
1980	0.734	0.431	0.454	0.197	0.137	0.06	0.045	0.503
1990	0.955	0.518	0.428	0.184	0.122	0.049	0.028	0.523

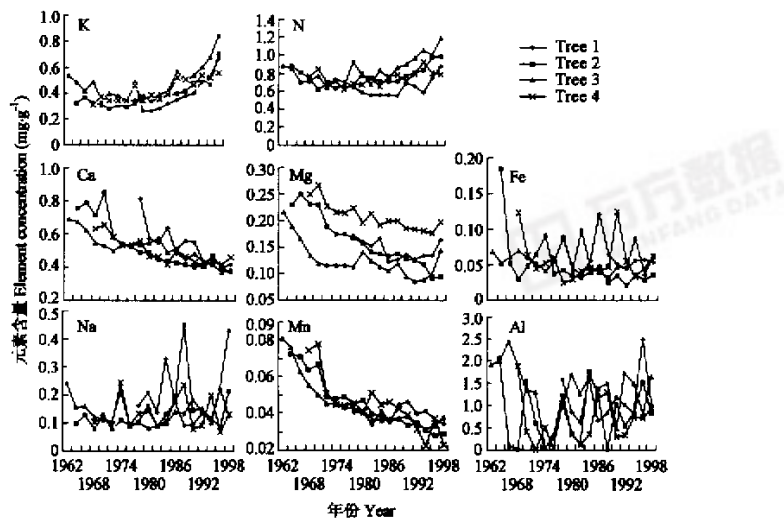


图 3 马尾松年轮 8 种元素含量随时间的变化

Fig. 3 Variations of eight elements in the annual rings of *Pinus massoniana*

许多有关酸雨的研究中,都得出酸雨造成树木叶和茎以及土壤中 K 元素大量流失的结论<sup>[6,7,16]</sup>,这与本结果中木质部 K 元素含量随时间的上升趋势相矛盾(图 3)。然而如果考虑到酸雨对土壤风化的影响,可以为这种现象提供数据解释。酸雨中的氢离子是重要的风化反应物,它与成土母质矿物中的阳离子起反应,将它从矿物的晶格中取代出来,而土壤酸是参与风化的氢离子的重要来源<sup>[17]</sup>。Wood 和 Bormann<sup>[18]</sup>在

他们的盆栽试验中,用不同 pH 值的人工酸雨处理美国五针松的幼苗,观察到人工酸雨处理能增加砂壤土的风化速率,当 pH 由 5.6 降至 2.3 时,K 的输入增加了 3~4 倍,而 K 的淋失一直到 pH 低至 3.0 或 2.3 时才增加,由于自然界中的酸雨 pH 值低于 3.0 的频率是很小的,因此酸雨造成的风化与淋失平衡的结果,有可能是土壤和植物体内 K 离子含量的增加。如果这一结果能够推广到自然条件下和本研究区的砖红壤性红壤中,便可解释本试验中 K 随时间增加的结果,当然这需要进一步的研究。

2.2.2 Ca, Mg 和 Mn 的含量变化 从图 3 中可以看出,这 3 种元素在木质部的含量从 20 世纪 60 年代末开始随时间有明显的下降趋势,年际间的波动很小,而且除 Mg 元素之外,Mn 和 Ca 在 4 棵树的含量差别甚微;Mg 元素的含量虽然在 3 号样树和 4 号样树之间有较大的差别,但却有相同的下降趋势。这种共同的趋势表明,区域性的控制因子起到了主导作用。大量有关人工模拟酸雨和森林水化学的研究表明,此 3 种元素的淋失随雨水酸度的增加而稳定增加<sup>[4,16,19,20]</sup>;然而 Wood 和 Bormann<sup>[18]</sup>的试验也证明,由风化造成的 Ca 和 Mg 的输入随酸雨酸度的对数增加而成直线增加。因此对于本试验的结果可能有两种解释,一是本试验样地土壤母质中 Ca, Mg 和 Mn 含量较低,二是风化所造成的增加的速率远远低于淋失的速率。

2.2.3 Al, Fe 和 Na 含量的变化 在所测 8 种元素中,这 3 种元素的含量年际变化幅度最大,且 4 棵树之间表现出较大的差别(图 3)。当取 10a 均值相比较时,4 棵树 Al 的含量随时间表现出相似的变化趋势(表 2),其中 70 年代均值较 60 年代有急剧的下降,随后 20a 中一直保持上升的趋势。活性 Al 是酸性土壤中限制植物生长的一个重要因素,被认为是一种新的毒性元素,酸雨引起了活性 Al 含量在本地区 Al 本底值偏高的赤红壤中的增加,进而造成了马尾松体内 Al 含量的增高。由于缺乏类似报道,目前对马尾松 Al 毒的阈值还不确定,但可以肯定,Al 含量的持续增加,迟早会对马尾松造成急性或慢性的伤害。

Fe 除在幼年期普遍偏高外,4 棵树有较大的变异。Na 的含量年际变异最大,10a 的均值在 4 棵树中也毫无规律,Na 含量的较大的变异系数在许多研究中都有报道<sup>[21,22]</sup>,原因尚需进一步研究。

3 讨论

一些内源因子对年轮中元素分布的影响可能会掩盖或加强外界环境因子的影响,从而影响到利用年轮元素含量来解释环境变化的可信性。从以下几个方面进行讨论:

(1)木质部阳离子束缚力(wood cation binding capacity, CBC) CBC 随年龄的增长由髓部向外的系统性下降在其它物种中曾有报道<sup>[24,25]</sup>,但未见对马尾松的有关报道。如果马尾松年轮中 Mn、Ca 和 Mg 的下降是 CBC 随年龄的增长而下降的结果,那么年龄较小的 1 号样树年轮中 Ca、Mg 和 Mn 的含量应该比同时期 2、3 号样树的含量高,这种情况只出现在 Ca 元素中,且并未维持多久(图 3),因此 CBC 变化的影响基本可以排除。

(2)生活细胞数量及各种木质部组织数量的径向变化 由于部分元素如 Mg 通常是与生活细胞结合在一起的<sup>[23]</sup>,生活细胞数量的径向变化便会导致此类元素径向分布的变化。生活细胞通常在韧皮部含量较多,这就可以解释部分元素在此部位积累的现象。本研究的 Mg 和 Ca 两个元素含量在最外层两个轮中出现了明显的增长,可能与生活细胞数量增多有关。但这种因素的影响只是局部性的,不能掩盖整体的明显下降趋势。

(3)元素横向迁移的可能性探讨 影响年轮中元素分布的一个重要因素是元素的横向迁移,它可能会掩盖或加强环境变化造成的影响,降低应用年轮元素来研究环境变化的可信度,因此年轮元素横向迁移存在与否及其机制是年轮化学领域必须解决的一个基础性问题,然而也是存在争论较多的一个问题。

如果存在元素在木质部的由过去形成的年轮向新近形成的年轮中的横向迁移活动,那么在一棵比较老的树木的木质部中,新轮中元素的含量肯定比相对年轻的树木木质部新轮的元素含量高,这种情况在 N 和 K 两种具有上升趋势的元素中存在,从图 3 中可以看出,年代较短的 1 号样树的 N 和 K 含量明显低于其它样树,但树龄短于 3 号树的 4 号样树 N 和 K 的含量却明显高于 3 号树,因此仅凭这种现象还不足以证明横向迁移的存在;在其它元素中未出现上述情况,在含量呈下降趋势的 Ca、Mg 和 Mn 中甚至出现相反的情况;运用多元统计方法分析检验的方法,并未在 8 个元素序列中发现任何统计上显著迁移迹象。

仔细观察图 3 可以看到,K、N、Mg 和 Mn 等 4 个元素的变化曲线较为平滑,并且出现一定时段的平台



期,说明横向迁移的可能性是存在的;但同时此组元素也保留有明显的年际波动,元素的横向迁移在整年中并非匀速进行,且并不能掩盖其它因素所引起的长期变化趋势。Fe、Na、Al 和 Ca 等元素较大的年际波动说明这 4 个元素不大可能存在横向迁移。

对于木质部元素横向迁移的存在与否和影响大小尽管众说纷纭,但大多数研究者均倾向于 Al、Ca 和 Fe 等元素不存在横向迁移,这就为这些元素在环境污染研究中的应用提供了依据。当然,对年轮元素的横向迁移需要进一步的深入研究,以便增加研究结果的可信度。

#### 4 结论

对 4 棵样树 8 种元素的含量变化分析表明,区域酸雨有可能导致 N、K 和 Al 元素含量的升高和 Ca、Mg、Mn 含量的大幅度下降,马尾松幼年期年轮中对部分元素如 Al、Ca 和 Fe 等有异常高的积累,而成年后似乎具备了一定的排斥与选择性吸收能力,因此,以幼苗为对象研究酸雨对马尾松造成的 Al 毒害等结果外推至成年个体时可能有一定的偏差。同时对盆栽幼苗的短期淋洗试验很难揭示出在自然条件下森林土壤系统中长期而复杂的风化、淋溶等机制的相互制衡作用。

马尾松是研究区域环境污染尤其是酸雨污染历史的一个较有潜力的物种,但需要进一步加强其年轮中元素横向迁移和随年龄的变化对元素的吸收和积累能力及 CBC 的变化等的研究,并进行对照研究,以增加研究结果的可信度。

#### 参考文献

- [1] Cao H F (曹洪法), Gao J X (高吉喜), Shu J M (舒俭民). A Study on the effect of Aluminum on the Seedlings of *Pinus massoniana*. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1992, **12**(3): 239~246.
- [2] Liu H T (刘厚田), Zhang W P (张维平), Shen Y W (沈英娃), *et al.* On the Declining Symptom of *Pinus massoniana* in Nanshan, Chongqing. *Acta Botanica Sinica* (in Chinese) (植物学报), 1988, **30**(3): 318~324.
- [3] Ulrich B, Mayer R, Khanna P K. Chemical changes due to precipitation in a Loess-derived soil in central Europe. *Soil Science*, 1980, **130**(4): 193~199.
- [4] Zhou G Y (周国逸), Xiao C J X (小仓纪雄). The Influence of Acid Precipitation on the Element Release in Different Soil Types in Chongqing. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1996, **16**(3): 251~257.
- [5] Wang Y G, Sheng P L, Yuan D W. Simulating the Effect of Acid Precipitation on the Leaching and Availability of Soil Metal Ions. *Environmental Science* (in Chinese) (环境科学), 1988, **9**(2): 22~26.
- [6] Cao H F (曹洪法), Wang W (王玮), Gao Y X (高映新), *et al.* Reaction of Forest Canopy to Acid Rain and the Corresponding Impact. *China Environmental Science* (in Chinese) (中国环境科学), 1989, **9**(2): 81~85.
- [7] Deng S J (邓仕坚), Chen C Y (陈楚莹), Zhang J W (张家武), *et al.* A Preliminary Study on the Capacity of Forest Canopy and Litter to Buffer Simulated Acid Precipitation. *Environmental Science* (in Chinese) (环境科学), 1992, **13**(3): 10~17.
- [8] Schweingruber F H. *Tree Rings and Environment: Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf. Paul Haupt Verlag, Berne, 1996.
- [9] Momoshima N, Takashima Y, Koike M, *et al.* Distribution and extraction behavior of elements in annual rings of *Cryptomeria* and *Abies firma*. *Journal of Japanese Society for Analytical Chemistry*, 1994, **43**(11): 891~895.
- [10] Yanoksy T M, Kppel W M. Effects of solution mining of salt on wetland hydrology as inferred from tree rings. *Water Resources Research*, 1997, **33**(3): 457~470.
- [11] Ma X H (马雪华). The Nutrient Elution Effect of Precipitation in Chinese Fir and *Pinus massoniana* Woods. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 1989, **9**(1): 15~20.
- [12] Liu K F (刘克锋), Han J (韩劲). *Soil Fertilizer*. Beijing: Chinese Architecture Industry P, 1995, 124.
- [13] H Kamith. *Rule of Balance—Forestry and Environmental Problems*. Beijing: Chinese Environmental Press, 1996, 226~228.
- [14] Huang 万方数据, Ding M M (丁明懋), Zhang Z P (张祝平), *et al.* The Hydraulic Characteristics and Nitrogen Dynamics in the Evergreen Broad-leaved Forest in Dinhusan. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese)

(植物生态学报),1994,**18**(2):194~199.

[15] Zhou G Y (周国逸), Yan J H (闫俊华). The Characteristics of Regional Precipitation and the Impact of its Nutrient Concentration on the Development of Forest Ecosystem in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* (in Chiense) (生态学报).

[16] Liu J X (刘菊秀), Wen D Z (温达志), Zhou G Y (周国逸). Chemical Characteristics of Precipitation in Coniferous and Broad-leaved Forests in Acid Rain Area of Heshan, Guangdong. *China Environmental Science* (in Chinese)(中国环境科学), 2000,**20**(3):198~202.

[17] Trudgill S T. *Soil and Vegetation Systems*. Oxford: Clarendon Press, 1977.

[18] Wood T and Bormann F H. Short-term effects of a simulated acid rain upon the growth and nutrient relations of *Pinus strobus* L. *Water, Air, Soil Pollution*,1977,**7**:479~488.

[19] Abrahamsen G, Horntveldt R, and Tveite B. Impacts of acid precipitation on coniferous forest ecosystems. In:L. S. Dochinger and T. A. Seliga Eds. *Proc. 1st International Symp. Acid Precipitation and the forest Ecosystem*. U. S. D. A. Forest Service, Gen. Tech. Rep. No. NE-23, Upper Darby, Pennsylvania, 1976. 991~1009.

[20] Cronan C S, Reiners W A, Reynolds R C, *et al.* Forest floor leaching: Contributions from mineral, organic and carbonic acids in New Hampshire subalpine forests. *Science*, 1978, **200**:309~311.

[21] Li Z A. Studies on the Nutrient Ecology of Artificial Forests in Subtropical China. Doctorate Dissertation, Zhongshan University, 1999.

[22] Kong L S (孔令韶), Li B S (李渤生), Guo K (郭柯), *et al.* Features of Element Concentration in the Plants in Karakunlun and Kunlun Mountain Area. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese) (植物生态学报),1995,**19**(1): 13~22.

[23] De Visser P H B. The relations between chemical composition of oak tree rings, leaf, bark, and soil solution in a partly mixed stand. *Can. J. For. Res.* , 1991,**22**:1824~1831.

[24] Momoshima N and Bondietti E A. Cation binding in wood: applications to understanding historical changes in divalent cation availability to red spruce. *Can. J. For. Res.* , 1990, **20**: 1840~1849.

[25] Momoshima N, Eto I, Kofuji H, Takashima Y, *et al.* Distribution and chemical characteristics of cations in annual rings of Japanese cedar. *J. Env. Qual.* , 1995,**24**:1141~1149.