

酸沉降下铝毒对森林的影响(综述)

刘菊秀

(中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650)

摘要:回顾了酸沉降的研究历史,总结了酸沉降对森林生态系统的影响。在此基础上综述了近二十年来酸沉降下铝毒与森林衰亡关系方面的一些研究成果,阐明铝毒是引起森林衰亡的一个重要的因素,并提出了酸沉降影响下铝毒与森林衰亡研究中存在的一些问题。

关键词:酸沉降; 铝毒; 森林

中图分类号: Q948.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2000)03-0269-06

EFFECT OF ALUMINUM TOXICITY ON FORESTS UNDER ACID DEPOSITION

LIU Ju-xiu

(*South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China*)

Abstract: This paper reviews the research history of acid deposition, and summarizes the effects of acid deposition on forest ecosystems. Studies on the relationships between aluminum toxicity and forest decline under acid deposition in the last two decades are also reviewed, which is shown that aluminum toxicity is an important factor led to forest decline. Certain questions associated with the study methods and approaches to the study on aluminum toxicity to forest decline are proposed.

Key words: Acid deposition; Aluminum toxicity; Forest

酸沉降包括干、湿沉降。湿沉降一般是指 pH 值低于 5.6 的天然降雨(简称酸雨)和酸雪、酸雾等。干沉降是指硫氧化物和氮氧化物以及包含硫、氮氧化物的粉粒随风而降。酸沉降导致的环境酸化与危害是本世纪最大的环境问题之一。许多研究表明,酸沉降特别是由酸沉降引起的土壤酸化和铝毒可能是全球森林衰退的重要原因。欧洲“森林墓地”的出现是由酸沉降引起的^[1]。在 80 年代,以 Ulrich 为代表就已提出了铝毒假说^[2-4],引起了科学家们的极大兴趣,并就铝毒与森林衰亡之间的关系作了大量的研究工作。本文综述近 20 年来酸沉降下铝毒对森林的影响方面的一些研究成果,阐明了铝毒是引起森林衰亡的一个重要的因素。

1 酸沉降历史回顾与现状

早在 17 世纪,在英国的大城市和工业区人们就意识到煤烟和硫氧化物危害的存在。在 18 世纪中叶,人们注意到由煤烟和硫氧化物引起的腐蚀和导致的疾病等。1872 年史密斯所著的

收稿日期: 2000-01-04

基金项目: 广东省环境保护局, 国家自然科学基金(39700112, 3992800), 中日美合作项目(990283)资助

《大气和雨—化学气象学的开端》中首先使用了“酸雨”这个词，并指出酸雨是燃烧产生，而且可以远距离运输，50年代至60年代，北欧的瑞典和挪威南部地区开始受到来自欧洲中部工业区酸性大气污染物的影响，到60年代末，酸沉降导致的湖水酸化已经十分明显，棕色鳟鱼濒于灭绝。70年代到80年代，酸沉降由北欧扩展到中欧。在北美，也形成了大面积酸沉降区，酸沉降的世界性危害趋势已露端倪。80年代以来，在北美和欧洲以外的其他地区也时有酸雨的报道，特别是世界燃煤大国的中国，酸沉降危害面积迅速扩大。日本、韩国、马来西亚、泰国等亚洲国家，巴西、委内瑞拉等南美洲国家，尼日利亚和象牙海岸等非洲国家都报告发生了酸沉降，这表明酸沉降已由欧美发达国家向亚非拉等发展中国家发展了。

世界酸沉降区主要集中于欧洲、北美和中国西南及华南。就我国来说，酸沉降分布具有明显的区域性，主要分布在长江以南，以城市污染为主，大中城市比小城市严重，市区比郊区严重，并以主要工业城市为中心，形成几个酸沉降区：以重庆、贵阳为代表的西南酸沉降区（是酸沉降出现的高频区和严重地区）；以柳州、广州为代表的华南酸沉降区；以长沙、南昌为代表的华中酸沉降区；以福州、厦门为代表的沿海酸沉降区；以杭州、温州为代表的沪杭酸沉降区；以青岛为中心的胶东半岛酸沉降区。据1991年“中国环境状况公报”称，降水pH平均值范围在3.8—7.6之间，监测的51个城市中pH平均值低于5.6的占59%。酸雨出现频率超过75%的有长沙、南充、宜宾、赣州、重庆和衡阳等。在80年代，我国的酸雨主要属于硫酸型，90年代后，酸雨中的氮氧化物含量越来越大。

酸沉降对森林的危害分为直接危害和间接危害，直接危害表现在它直接伤害树木，使树叶的皮质或蜡质和气孔受到伤害，营养元素淋失，光合作用及正常代谢受到干扰及破坏，引发植被死亡^[5]。

酸沉降对森林的间接危害表现在以下方面：1) 酸沉降与森林病虫害：由于酸沉降，受害树木N营养水平增加会导致食叶昆虫数量增加，也可能因树木生长衰落使抗病虫害能力下降而易受到病虫侵染；2) 酸沉降与其它污染物的复合影响；3) 土壤盐基淋溶：研究者普遍认为酸沉降会加速盐基离子的淋溶，这种长期的离子淋溶肯定导致土壤的养分缺乏^[6]；4) 铝毒：土壤溶液中Al浓度受进入土壤中的酸和酸性阴离子及土壤中和酸能力所控制，随着pH值及盐基饱和度的下降，可溶性Al的含量会增加^[7]，导致植物生长受到抑制；5) 过量氮沉降：从长期来看，过量的N或者被微生物种群利用，或者增加盐基离子的淋溶，造成森林营养不平衡，从而导致森林衰亡^[8]；6) 酸沉降对土壤重金属的影响：由于酸沉降引起土壤离子的淋溶及酸化，因此，必然会对土壤中的重金属含量、形态、组成及生物有效性等产生影响；7) 酸雨对土壤微生物的影响：土壤酸化对微生物产生严重的影响，导致细菌活性降低，数量减少而真菌数量增加。酸雨抑制放线菌中拮抗作用菌群的发育，还会影响根瘤菌和自身固氮菌的存活，从而影响植物生态系统的养分循环。

由上可知，在酸沉降下会出现各种各样的危害森林的因素，然而，在诸多因素中，铝毒是非常重要的一个影响因素。酸沉降下铝毒与森林衰亡的关系一直是科学家们研究的重要课题。

2 酸沉降的铝毒对森林的危害

在世界很多地区，土壤酸度都限制着植物的生长。一般来说植物生长受抑制是很多因素综

合作用的结果, 这些因素包括铝(Al)、锰(Mn)和氢(H^+)的毒害及必需元素特别是钙(Ca)、镁(Mg)、磷(P)及钼(Mo)等的缺乏。在 $pH \leq 5$ 时, 通常认为可溶性 Al 是重要的生长限制因素。

铝占地壳重量的 7.1%。原生含铝矿物(长石和云母)分化后释放出 Al, 这种 Al 又重新沉淀为次生铝硅酸盐矿物。矿物分化后又转变成氧化铝和氢氧化铝。酸性土壤($pH < 5.0$)中上述原生和次生矿物的溶解, 使得可溶性铝得以进入土壤水(土壤溶液)。土壤溶液中铝的含量取决于土壤 pH 值、原生和次生含铝矿物的数量和类型、铝和无机矿物表面的交换平衡以及与有机组分的络合反应。

在自然界中, 铝在土壤中是以固定状态存在的, 但当土壤发生酸化时, 部分固定态的矿物铝被活化成为可溶态的铝, 如 Al^{3+} 、 $Al(OH)^{2+}$ 、 $Al(OH)_2^+$ 和聚合羟基铝等, 统称为活性铝。活性铝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^[9-11]。Ulrich^[12]研究报告指出, 土壤中 Ca/Al 摩尔比是衡量铝对植物危害的一个有用的指标, 当 $Ca/Al < 1$ 时, 铝能对植物吸收水分和养分的根毛产生损害, 进而引起植物枯萎和死亡。Cronan 等则认为, 当叶片 $Ca/Al < 12.5$ 时, 植物有 50% 的可能受到 Al 的毒害^[5]。

由于 Al 的毒害, 植物根的生长受到严重限制, 根尖和侧根变粗, 细侧根和根毛大为减少, 因而不能充分吸收养分和水分, 过量的土壤铝会影响植物对必要养分(Ca、Mg、K、P 和 Fe)的吸收、运转和利用, 并可抑制为植物提供养分的微生物过程。从细胞水平上看, 铝毒影响细胞膜的结构和功能、DNA 合成和有丝分裂、细胞的伸长、矿质营养及代谢过程, 根据目前部分研究结果, 铝的毒理可归纳为:

1) 铝对细胞分裂和伸长的抑制作用: 主要表现在铝与膜脂中的磷结合, 从而破坏细胞膜功能。Wagatsuma 等的研究表明铝可以影响生物膜的结构和功能^[13]。一些研究者认为铝的原初作用位点可能在生物膜上, 铝与生物膜中的磷脂结合, 影响膜的结构稳定性, 从而破坏生物膜功能, 导致细胞的分裂和伸长受到抑制。

2) 铝与钙的拮抗: 普遍认为铝诱导植物降低对钙的吸收和转运, 原因是铝和钙在很多生理功能方面都有相反的作用。如 Ca^{2+} 使生物膜流动性减小, 并增加其选择透性, 而 Al^{3+} 正好相反^[14]。铝和钙在影响离子吸收、钙调蛋白的结构和功能方面都有相反的作用^[15], 而钙对铝毒有明显的缓冲作用。

3) 铝对有机化合物的作用: 在有机体内, 铝能与许多有机化合物结合, 并影响正常代谢。铝能与蛋白质结合, 使之变性; 铝与 DNA 的结合, 增加了 DNA 双螺旋的稳定性, 从而阻止 DNA 复制^[13]。

4) 铝对钙调素的作用: 钙调素是一种存在于所有真核细胞内的多功能代谢调节蛋白质。钙调素与钙结合成为 Ca^{2+} -CaM 复合物后才具生物活性, 它对代谢调节是通过对靶酶激活而实现的^[9]。铝可以改变钙调素结构并对其功能产生影响。

5) 铝对营养元素吸收的抑制作用: 一些学者认为铝除了与钙有拮抗作用外, 铝还对 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 P^{3+} 等的吸收有一定的抑制作用, 因为这些离子间存在竞争性。在溶液中, 当铝与钙、磷等离子相互络合时就阻碍植物对这些离子的吸收。相反, 当溶液中元素离子

的浓度增高时,能缓冲铝的毒性。高吉喜等的研究表明,当溶液中离子强度增加时,铝的毒性降低,而稀营养液下铝的毒害性增大^[14]。

总之,铝与森林衰亡有着密切的关系。铝是森林衰亡的一个重要的影响因素^[16-28],朱晓帆等的研究表明铝中毒是峨嵋山冷杉衰亡的重要原因之一^[29]。奉节县山区9万亩华山松中90%已枯死,也与酸沉降有关^[30]。刘厚田等认为铝中毒是南山酸雨对马尾松的主要危害^[24,31]。高吉喜等认为铝对马尾松生长状况起着重要的影响^[11]。铝对森林危害还有待进一步研究。

3 存在问题及研究的主要趋势

酸沉降为目前最引人注目的世界环境问题之一,科学家们对酸雨中铝毒问题尤为关注。迄今为止,各国科学家对铝毒害进行了大量的研究,发表了大量的研究报告。由于条件的限制,研究方法的不同,导致研究结果相差很大,甚至出现矛盾的结果,给不同地理区域的研究结果的比较带来很大困难。目前常规研究方法分为野外调查法和模拟酸雨实验法(或直接喷洒铝离子)两大类。野外调查法的优点是不改变植物生长的背景条件,不足之处是植物同时受酸雨和其他污染物的综合作用,由于环境监测资料(例如:污染物种类、浓度,污染历史等)的不完整,判断酸沉降下铝毒在植物危害中单独所起的作用存在困难。模拟酸雨实验法的优点是能定性和定量地研究模拟酸雨下铝毒对植物的危害程度和机理,不足之处是模拟酸雨在雨水化学成分、降雨频度、雨滴大小、降雨历期、模拟降雨时的温度、光照、湿度条件与自然降雨有较大差别^[32],使模拟的实验结果与自然界的真实状况产生偏离。

另一存在的问题是所进行的研究都比较片面,不系统。对森林铝毒的研究仅仅从单个的因子或某几个因子出发是不够的。目前对铝毒的研究都从铝的迁移和转化及不同存在形式的铝的毒性来进行^[33-36]。陆地森林生态系统的危害并不一定表现在直接受害方面,而主要通过打破陆地生态系统内的物质元素平衡而间接地、长期地起作用,特别是土壤中物质元素的浓度平衡和植物体内主要是活性强的部分元素平衡。这样至少将造成4个方面的后果:土壤营养库中的物质元素浓度平衡紊流,直接造成生态系统养分循环过程紊流;土壤营养库中的营养元素大量流失;有害离子的活化;Ca/Al比发生改变。众所周知,生态系统的基本功能是物质循环和能量流动,这个基本功能的实现是生态系统健康的基础,也是系统长期适应环境条件的一种反应。当酸沉降到达生态系统内部时,其物质元素的长期平衡受到破坏,有害离子的增加危及系统的结构,最终导致生态系统的基本功能崩溃,因此,酸沉降的危害仅仅从某个离子的浓度差或者个别症状来判断是不准确的,而应以生态系统为基本对象,研究其对物质循环和能量流动的影响。实际上,酸沉降对生态系统的影响是综合的,对于个别的损害,生态系统本身有其修复功能,不会伤及整个系统,但是如果导致了系统功能的紊流,则将会使得整个系统崩溃。当前,有关临界负荷的研究和标准的制定,在我国环保战线上处于非常重要的位置,但临界负荷的制定应该基于酸沉降对整个生态系统的影响上,而不是单个成分。

因而,对于森林的铝毒研究,应该从整个生态系统的角度出发,不能单从活性铝含量的增加或其它的几个因子出发来评价其对森林的危害。一般资料表明,铝对森林的危害主要是在酸沉降下活性铝增加而导致的,而笔者认为,更正确的表达应为酸沉降下出现的元素之间的不平衡导致了铝毒危害森林。在酸沉降下,土壤的风化,电荷的不平衡导致活性铝相对增加,但此

时还不足以对森林产生危害。由于盐基离子大量流失, 活性铝的拮抗元素的大量减少才使铝毒强烈表现出来, 当然这得进一步研究论证。

就铝毒研究具体的发展趋势, 笔者认为以后的研究应着重于从系统的角度出发, 综合各影响因素来研究铝毒对森林的影响途径及机理, 并进行客观的评价。富铝化土壤的修复机制也将是一个重要的研究内容。

参考文献:

- [1] 石弘之, 张坤民. 周北海译. 酸雨 [M]. 北京: 中国环境出版社, 1997.
- [2] Matzmer E, Marach D, Fortmann H. Soil acidity and its relationship to root growth in declining forest stands in Germany [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1986, 31:273-282.
- [3] McLaughlin S B. Effects of air pollution on forests [J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1985, (5): 512-534.
- [4] Ulrich B, Mayer R, Khanna P K. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe [J]. *Soil Science*, 1980, 130(4):193-199.
- [5] Cronan C S, Grigal D F. Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forests ecosystem [J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:209-226.
- [6] 周国逸, 小仓纪雄. 酸雨对重庆几种土壤中元素释放的影响 [J]. *生态学报*, 1996, 16(3):251-257.
- [7] 王维君, 陈家坊, 何群. 模拟酸雨对主要酸性土壤中铝的溶出及形态的影响 [J]. *应用生态学报*, 1992, 3(2):184-189.
- [8] 仇荣亮, 吴箐. 陆地生态环境酸沉降敏感性研究 [J]. *环境科学进展*, 1997, 5(4):8-19.
- [9] 田仁生, 刘厚田. 酸化土壤中铝及其植物毒性 [J]. *环境科学*, 1990, 11(6):41-46.
- [10] 高吉喜. 铝毒与森林衰退间关系 [J]. *环境科技*, 1990, (10):19-21.
- [11] 高吉喜, 曹洪法, 孙德玲, 等. 铝对马尾松生长状况影响的研究 [J]. *中国环境科学*, 1992, 12(2):118-121.
- [12] Ulrich B, Panbrath J. Effects of Accumulation Air Pollutants in Forest Ecosystems [M]. D Reided Publishing Company, 1983, 331-342.
- [13] Wagatsuma T, Kaneko M, Hayasaka Y, et al. Destruction process of plant root cell by aluminum [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1987, 33(2):161-175.
- [14] Kinraide T B, Parher D R. Cation amelioration of aluminum toxicity in wheat [J]. *Plant Physiol*, 1987, 83: 546-551.
- [15] 高吉喜, 曹洪法. 离子强度、pH值和 Ca^{2+}/Al^{3+} 对马尾松幼苗的铝毒影响 [J]. *环境科学学报*, 1991, 11(2):194-198.
- [16] Kong G H, Liang C, Wu H M, et al. Dinghushan Biosphere Reserve: Research History and Perspective [M]. Science Press, Beijing, 1993.
- [17] Hirano Y, Hijii N. Effects of low pH and aluminum on root morphology of Japanese red cedar saplings [J]. *Environmental Pollution*, 1998, 101:339-347.
- [18] Tanaka A, Tadano T, Yamamo K, et al. Comparison of toxicity to plants among Al^{3+} , $AlSO_4^+$ and Al-F complex ions [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1987, 33(1):43-55.
- [19] Tadao Wagatsuma, Minoru Kaneko. High toxicity of hydroxy-aluminum polymer ions to plant roots [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1987, 33(1):57-67.

- [20] Tadao Wagatsuma, Minoru Kaneko, Yasuhiro Hayasaka. Destruction process of plant root cells by aluminum [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1987, 33(2):161-175.
- [21] 吾杰. 酸雨对土壤—植物系统环境效应研究 [A]. 陈志远. 中国酸雨研究 [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [22] 许宁, 庞叔薇. 酸雨对茶树中铝的形态分布及生态化学影响 [J]. *环境科学学报*, 1990, 10(4):424-433.
- [23] 庞叔薇, 林铁. 黔北地区土壤中活性铝的分布调查 [J]. *环境科学学报*, 1987, 7(1):42-48.
- [24] 刘厚田, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系 [J]. *环境科学学报*, 1992, 12(3):297-304.
- [25] 王维君, 陈家坊, 何群. 模拟酸雨对主要酸性土壤中铝的溶出及形态的影响 [J]. *应用生态学报*, 1992, 3(2):184-189.
- [26] Wright R J, Wright S F. Effects of aluminum and calcium on the growth of subterranean clover in Appalachian soils [J]. *Soil Science*, 1987, 143(5):341-348.
- [27] Shin-Ichiro Wada. A critical evaluation of 1 mol/L KCl-extraction method for determining exchangeable Al ions in variable charge soils [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1987, 33(2):153-160.
- [28] Blamey F P C, Edwards D G, Asher C J. Effects of aluminum, OH:Al and P:Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture [J]. *Soil Science*, 1983, 136(4):197-207.
- [29] 朱晓帆, 卢红, 金燕. 峨嵋山冷杉衰亡与土壤铝活化的关系研究 [J]. *环境科学*, 1997, 18(4):25-28.
- [30] 中国林学会. 酸雨与农业 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [31] 刘厚田, 张维平, 沈英娃, 等. 重庆南山酸雨与马尾松衰亡的关系 [J]. *环境科学学报*, 1988, 8(3):331-338.
- [32] 单运峰. 酸雨, 大气污染与植物 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [33] 傅柳松, 吴杰民, 杨影, 等. 模拟酸雨对土壤活性铝释出影响研究 [J]. *环境科学*, 1993, 14(1):20-24.
- [34] 黄衍初, 曲长菱. 土壤中铝的溶出及形态研究 [J]. *环境科学*, 1996, 17(1):57-59.
- [35] 徐仁扣, 季国亮. 土壤与酸的反应时间对土壤酸度及土壤溶液中铝离子形态分布的影响 [J]. *热带亚热带土壤科学*, 1998, 7(4):296-298.
- [36] 邵宗臣, 何群, 王维君. 红壤中铝的形态 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(1):38-47.