

# 酸雨引起森林生态系统钙流失研究进展

吴飞华<sup>1,2</sup>, 刘廷武<sup>2</sup>, 裴真明<sup>2,\*</sup>, 郑海雷<sup>1,2,3,\*</sup>

(1. 厦门大学亚热带湿地生态系统研究教育部重点实验室, 厦门 361005; 2. 厦门大学生命科学学院, 厦门 361005;

3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005)

**摘要:** 酸雨作为一个全球性环境问题, 随着我国经济的快速发展, 其危害也日益严重。诸多长期观测研究认为酸雨导致森林生态系统营养流失, 特别是 Ca 的流失是酸雨导致森林衰退的一个重要原因。长期酸雨影响下, 土壤中的 Ca 大量流失, 在红壤等酸性土壤中表现得尤为严重; 此外酸雨也会直接淋溶出植物叶片中的 Ca, 造成林冠中 Ca 不同程度的淋溶流失, 并可能造成叶片 Ca 含量下降。且酸雨会导致叶片细胞内 Ca 稳态的失衡, 影响植物的正常生理响应。对于整个森林生态系统而言, 酸雨改变了生态系统中 Ca 生物地球化学循环的特征, 大量的 Ca 从森林生态系统中以地表径流的形式流出系统, 导致可利用 Ca 库的下降和周转速率的上升。酸雨对森林土壤、植物及生态系统各层面中的 Ca 均造成了长期广泛的影响, 深入研究其影响程度与植物的应对机制, 对我国酸雨危害区的酸雨防治和森林保育具有重大意义。

**关键词:** 酸雨; 钙; 森林生态系统

## Calcium depletion in forest ecosystem induced by acid rain: a review

WU Feihua<sup>1,2</sup>, LIU Tingwu<sup>2</sup>, PEI Zhenming<sup>2,\*</sup>, ZHENG Hailei<sup>1,2,3,\*</sup>

1 Key Laboratory for Subtropical Wetland Ecosystem Research (Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361005, China

2 School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China

3 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

**Abstract:** Acid rain is a global environmental problem that has become a very serious issue in China coupled with the rapid economic growth. The loss of nutrients in forest ecosystems, especially calcium, as shown in a lot of references done over long-term observation and research, is one of the key factors which indicate that acid rain caused the decline of forest ecosystems. Calcium has been markedly leached from the soils by acid rain, mostly in acidic soils such as red soils. Acid rain has also leached calcium from the canopy of forest resulting in a decrease of the folia calcium content sometimes, imbalance of calcium homeostasis at the cellular level, impair of physiological responses. From the ecosystem aspect, acid rain changed the characteristics of calcium biogeochemical cycle, brought calcium to be depleted from the ecosystem in the surface runoff, reduced the bioavailable calcium pool and increased the turnover rate. Because acid rain influenced calcium at different levels of the ecosystem, it is important that we focus on studying the calcium depletion and responses of plants under long-term acid rain, which can help us in the progressive prevention and treatment of acid rain and the conservation of forest ecosystems.

**Key Words:** acid rain; calcium; forest ecosystem

自工业革命以来, 人类活动的大规模增加, 特别是化石燃料的大量燃烧和土地利用方式的急剧变化, 正引起全球气候的剧烈变化。酸雨就是其中一个主要的全球性环境问题, 酸雨也称酸沉降, 包括湿沉降和干沉

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30930076, 30670317, 30770192); 厦门大学新世纪优秀人才基金资助项目 (NCETXMU07115); 长江学者和创新团队发展计划资助项目

**收稿日期:** 2008-12-09; **修订日期:** 2009-02-23

\* 通讯作者 Corresponding author E-mail: zhenghl@xmu.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

降<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 70 年代欧洲和北美发现大量的森林出现大面积的森林枯梢 (dieback) 和衰退 (decline) 现象后,人们开始注意到酸雨对生态系统的严重影响。近年来,随着我国经济的快速发展,工业源  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放同 GDP 的增长一起急剧增加,随之而来的酸雨问题也日益严重,酸雨覆盖国土面积由 1985 年的 18% 急速上升至 1993 年的 30%,我国已成为继欧洲和北美之后的第 3 大酸雨区<sup>[1]</sup>。虽然 1998 年国家实施“两控区”政策后,酸雨覆盖国土面积在 2000 至 2007 年间维持在 32.6%—38.4% 之间,但酸雨的频度和强度连年上升<sup>[2]</sup>。

对酸雨成因、危害及其防治的研究已开展近半个世纪,目前认为酸雨对森林生态系统影响主要有以下几点:土壤盐基淋失、森林病虫害、铝的活性增加、过量氮沉降间接作用及酸雨对植物的直接危害等<sup>[1]</sup>。在酸雨导致森林生态系统衰退的诸多原因中何者占据主导地位?关于这个问题,众说纷纭,从欧洲、北美森林的衰退症状、植物叶片的受损及营养分析、立地土壤环境分析等大量的长期观测研究认为酸雨导致森林生态系统营养流失,特别是 Ca 的流失是其中的重要原因之一<sup>[3-5]</sup>。事实上,除了森林生态系统,环境酸化也可以造成其他生态系统如海洋和湖泊生态系统的 Ca 流失,进而影响生态系统中动植物的生存<sup>[6-7]</sup>。

本文主要综述了酸雨对土壤、植物和整个森林生态系统中 Ca 流失的研究,探讨了酸雨导致 Ca 失衡的最新进展,并讨论了在中国南方地区开展生态系统水平 Ca 动态研究的必要性。

## 1 酸雨对土壤中 Ca 的影响

### 1.1 土壤中 Ca 的存在形态

森林生态系统中 Ca 有 4 种形态,即有机体中的 Ca、矿物态 Ca、交换态 Ca 和水溶性 Ca。有机物中的 Ca 主要存在于动植物体中;矿物态 Ca 占全 Ca 量 40%—90%,是主要 Ca 形态和主要 Ca 来源,通过风化并以  $\text{Ca}^{2+}$  形态进入溶液;交换 Ca 占全 Ca 量的 20%—30%,是土壤盐基总量的主体,对植物有效性好;而水溶性 Ca 则指存在于土壤溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$ 。森林生态系统中的 Ca 循环使土壤与植物间的 Ca 库维持一个动态的平衡。

### 1.2 酸雨对土壤中 Ca 的淋溶

酸雨长期作用的后果之一就是造成土壤酸化,阳离子特别是  $\text{Ca}^{2+}$  的流失,进而改变整个土壤的离子平衡<sup>[9]</sup>。酸雨中的  $\text{H}^+$  与土壤胶体表面上吸附的盐基离子进行交换反应而被吸附在土粒表面,被交换下来的盐基离子则随渗漏水而淋失。土壤中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  盐基离子比  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  对酸雨更为敏感<sup>[9-10]</sup>。而且在酸雨的作用下土壤元素的迁移具有阶段性,在土壤 pH 下降到 4 之前,主要是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等交换性阳离子发挥缓冲作用,而当 pH 降到 4 左右时, $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子就已基本消耗殆尽,次级缓冲体系如铝硅酸盐等开始起主要作用<sup>[3, 11]</sup>。

此外盐基离子的淋失还与土壤类型关系密切,由沉积岩形成的土壤缓冲能力很强,尤其是含碳酸盐高的土壤;而由水晶花岗岩、石英等形成的土壤,如红壤、灰化土等酸性土壤类型,其缓冲能力很弱,更多表现为 Ca 的缺乏<sup>[9]</sup>。中国的酸雨主要出现在长江以南,该地区大多为酸性的红壤类土壤。这类土壤的基本特点是其粘粒矿物以高岭石为主,但所带的负电荷量很小,总 Ca 贮量一般小于 0.5%,阳离子交换量较低<sup>[12]</sup>,因此这类土壤对酸的缓冲性能较弱,当有酸雨进入时,更容易导致 Ca 的缺失。模拟酸雨淋溶实验表明,在红壤、黄壤、山地草甸土及紫色土中,离子淋失量大小均为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ <sup>[11]</sup>。

### 1.3 国内外对酸雨导致 Ca 流失的长期野外观测

野外样地的长期定位观测也证实酸雨导致森林土壤中 Ca 的大量流失。在欧洲挪威的研究发现,由于土壤为灰化土,缓冲能力差,从 20 世纪 70 年代至 90 年代 3 个地区的可交换 Ca 同时呈现出不同程度的流失,且与酸沉降量成正比<sup>[13]</sup>。在加拿大安大略的 Plastic 湖地区,土壤中的可交换性 Ca 也出现近 40% 的下降,与此同时地表径流中 Ca 也下降了 20% 左右<sup>[14]</sup>。而在美国 Hubbard Brook Experimental Forest (HBEF) 观测站开展的长达 50a 的观测中,发现土壤中的可利用 Ca 库下降了近 50%<sup>[15]</sup>。

另外,在中国酸雨严重的南方地区,长期监测的数据同样说明土壤的持续酸化和 Ca 的流失。鼎湖山自然保护区是 1955 年我国最早建立的自然保护区,其后在 1978 年成立中科院鼎湖山森林生态系统定位观测站,研究历史资料丰富,且地处工业发达的珠江三角洲区域,酸雨危害严重,50 年间土壤 pH 下降了 0.3—0.5 个

单位,土壤中的交换性Ca也持续下降,其含量仅仅只有20世纪50年代的60%左右<sup>[16-19]</sup>。而酸雨影响下近20a来衡山土壤也酸化严重,从1983年和2001年的样品研究表明交换性盐基离子降低明显,尤其是山体上部的常湿淋溶土层中的交换性盐基离子下降了 $5.96\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,下降幅度达58.36%<sup>[20]</sup>。庐山地区也表现出土壤pH下降,可交换性Ca、Mg更是消耗殆尽,35a间下降了30%—60%<sup>[21]</sup>。

土壤酸化,可利用Ca库的下降必然会导致植物体内Ca含量的变化,生长受抑制,这也为研究者提供了另一个研究手段。在有些缺少长期历史数据的地区,研究者可利用植物年轮中记录的信号来推测土壤中Ca的变化。在受酸雨影响的地区,不仅树木年轮的轮宽等结构特征会发生变化,年轮中Ca的含量也会随之下降<sup>[22-23]</sup>。另外,由于锶(Sr)和Ca在自然界常伴生出现,它们同属碱土金属,化学性质和地球化学行为相近,相对Ca而言,在植物体内Sr不仅更难以移动而且其稳定同位素信号也更灵敏,因此可用Sr的稳定同位素示踪土壤中Ca的动态<sup>[24]</sup>。对欧洲和北美多个地区及不同树种的年轮研究结果表明,这些样品均在1880—1920时间段存在明显的Sr同位素变化,这说明在全球酸雨危害的初期,大量的 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 进入土壤后,急剧的改变土壤中Ca的地球化学行为,从而影响了树木对Ca的吸收<sup>[25]</sup>。

## 2 酸雨对植物中Ca的影响

### 2.1 植物体内Ca的存在形态

Ca在植物中的含量占干重的0.1%至5.0%,且表现出系统发育特异性,在裸子植物和鸭跖草目的单子叶植物中含量较低<sup>[26]</sup>。在植物体内,绝大部分的Ca以果胶结合态及难溶性有机、无机钙盐(草酸钙为主)存在于细胞壁和液泡中,细胞质中的Ca主要与蛋白质等大分子结合,游离 $\text{Ca}^{2+}$ 一般仅 $200\text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[27]</sup>。

在维管植物中,Ca被植物根系吸收后进入管胞或导管,随着蒸腾流运输到叶片等器官。由于维管系统和叶片细胞的细胞壁中的果胶会大量结合Ca,从而在植物体内形成了一个从根至顶芽,Ca从高到低的浓度梯度<sup>[3]</sup>。此外由于Ca不像K、Mg等其他营养元素,它在植物体内不易移动,在衰老过程或缺Ca时不能够通过再分配或韧皮部回流来缓解植物对Ca的需求。因此酸雨对植物淋洗后,最先在顶端的枝叶出现症状<sup>[27]</sup>。

### 2.2 酸雨对植物叶片中Ca的直接淋溶

自然降雨过程会导致叶片中营养元素的淋溶,这是森林生态系统营养循环的一个重要组成部分<sup>[15]</sup>。而Fairfax和Lepp<sup>[28]</sup>最先发现酸雨加剧了烟草叶片阳离子(特别是 $\text{Ca}^{2+}$ )的淋失。而利用不同酸度的模拟酸雨(雾)处理日本冷杉(*Abies firma*)<sup>[29]</sup>和红云杉(*Picea rubens*)<sup>[10]</sup>的实验中也发现, $\text{Ca}^{2+}$ 是模拟酸雨处理中淋失量最大的阳离子,且析出量与酸雨中 $\text{H}^+$ 和 $\text{NO}_3^-$ 浓度相关,随酸雨pH值的降低而增加,相应的 $\text{K}^+$ 则没有表现出这种关系。

在对野外森林冠层穿透水(throughfall)和树干茎流(stem flow)的研究中,也发现植物冠层叶片中大量的阳离子被淋洗出来。王玮等<sup>[30]</sup>对四川峨眉山的针叶林(峨眉冷杉,*Abies fabri*)和阔叶林(金顶杜鹃,*Rhododendron fabri*)冠层对酸雨反应的调查表明,冠层穿透水富集大量的盐离子,显示出酸雨促进树木叶片中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{K}^+$ 等营养离子的淋溶,且 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 阳离子的析出量随降雨酸度增加而增加。Zeng等<sup>[31]</sup>在韶山地区对中国酸雨区典型的亚热带针阔叶混交林进行了一年四个季度的研究,结果表明受酸雨影响,冠层淋溶出的离子由 $\text{Ca}^{2+}$ 占据主要地位(50%—80%),而不是更易移动的 $\text{K}^+$ 或 $\text{Mg}^{2+}$ ,且在冬季表现出明显的淋溶高峰,来自植物叶片组织内部的 $\text{Ca}^{2+}$ 占总穿透水的87%。

### 2.3 酸雨对不同森林类型的林冠淋溶影响

酸雨中 $\text{H}^+$ 的浓度在通过林冠后会发生了很大的变化,这与不同类型森林冠层对酸雨的缓冲作用有关。与总沉降相比,阔叶林穿透水 $\text{H}^+$ 浓度降低,pH值升高,而针叶林穿透水 $\text{H}^+$ 浓度却增加,pH值降低,表明了阔叶林林冠对酸雨的缓冲作用,针叶林林冠却加剧酸雨酸化<sup>[32]</sup>。Cronan和Reiners<sup>[33]</sup>对新英格兰中部高海拔针叶冷杉和低海拔北方阔叶林的比较研究发现,在酸雨的作用下,叶片中 $\text{Ca}^{2+}$ 等离子被大量淋溶,且阔叶林的淋溶量大于针叶林,析出的 $\text{Ca}^{2+}$ 发挥了对酸雨的缓冲作用,这一结果与峨眉山的研究<sup>[30]</sup>类似。

为更准确的定量考察大气沉降和不同类型森林冠层的相互作用,很多研究者进行了长期的定位观察。在

美国 Hubbard Brook Experimental Forest (HBEF) 试验站, 经过对不同类型的森林冠层穿透水和树干茎流的长期研究表明, 总穿透水中 65%—89% 的  $\text{Ca}^{2+}$  来自于冠层的叶片淋溶, 按照文中森林冠层叶片 Ca 含量  $618 \text{ mol} \cdot \text{hm}^{-2}$  估算, 冠层年均  $\text{Ca}^{2+}$  淋溶量占叶片总 Ca 的 13%, 且较低海拔的阔叶林冠层溶出的  $\text{Ca}^{2+}$  比高海拔的针叶林中多<sup>[15]</sup>。在对北加利福尼亚演替早期的森林研究表明, 其淋溶量只有叶片总 Ca 的 4%—13%<sup>[34]</sup>, 而在美国田纳西州的监测数据则表明, 相对于叶片总 Ca 而言, 不同类型阔叶林冠层淋溶出的  $\text{Ca}^{2+}$  占 12%—20%<sup>[27]</sup>。

也有研究<sup>[35]</sup>观测到针叶林的淋溶量大于阔叶林, 如在广东鹤山对马尾松 (*Pinus massoniana*) 林和马占相思 (*Acacia mangium*) 及木荷 (*Schinus superba*) 林的林内降水研究表明, 针叶林内降水比阔叶林降水离子富集程度较为显著, 对酸雨抗性较强的木荷冠层淋溶出的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  最少, 研究者认为可能是由于鹤山地区海拔较低, 干沉降量较大, 而马尾松分泌的树脂更易富集酸性污染物所造成的<sup>[35]</sup>。

#### 2.4 酸雨导致植物叶片总 Ca 含量变化

野外试验表明, 酸雨危害严重的地区与相对清洁的地区相比, 由于土壤中可利用 Ca 的匮乏, 且植物淋溶量增大后对 Ca 的需求上升, 造成叶片严重缺钙<sup>[36]</sup>。衰退的森林物种大多表现为叶片总 Ca 含量下降, 如峨嵋冷杉在受害严重的金顶附近地区其针叶 Ca 含量只有正常 Ca 含量的 68% 左右<sup>[30]</sup>。Liu 等<sup>[37]</sup>对美国佛蒙特州的两个糖枫 (*Acer saccharum*) 种群的研究也发现, 在遭受酸雨危害严重的地区, 糖枫叶片中的 Ca 和 Mg 远低于对照区, 并认为这可能是叶片  $\text{CO}_2$  同化能力下降的原因之一。

但在有些室内短期模拟酸雨试验中, 供试植物叶片中总 Ca 含量并没有明显下降<sup>[10, 38]</sup>, 这可能是由于在短期酸雨处理下, 虽然植物叶片 Ca 的淋溶加剧, 但这也促进了根部对 Ca 的吸收和迁移, 在土壤可利用 Ca 不匮乏的情况下, 叶片中 Ca 的下降并不显著。

#### 2.5 酸雨导致植物叶片细胞水平 Ca 失衡

虽然酸雨并不一定会造成植物叶片中 Ca 含量的下降, 但也会对植物细胞内 Ca 的动态平衡造成严重的影响。如红云杉叶片在酸雨处理下, 虽然叶片中总 Ca 并没有明显差异, 但细胞质膜结合的 Ca (membrane-associated calcium, mCa) 含量明显下降, 同时, 可观测到气孔运动响应明显滞后<sup>[39]</sup>。虽然从数量上看, 酸雨作用下叶片淋洗出的 Ca 只占叶片总 Ca 中的 10%—20%, 但由于叶片中的 Ca 大多是以难溶的果胶钙和草酸钙等形式存在于细胞壁, 而叶片淋洗出的 Ca 则来源于叶片细胞质外体<sup>[40]</sup>, 当胞外 Ca 由于酸雨影响产生  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  级浓度变化时, 很可能导致胞内 Ca 信号失衡, 扰动细胞正常的生理响应。在其他裸子植物香脂冷杉 (*Abies balsamea*)、加拿大铁杉 (*Tsuga canadensis*) 和美国白松 (*Pinus strobus*) 中均发现模拟酸雨处理后的类似现象, mCa 含量下降的同时伴随着细胞膜稳定性及其抗冻能力的下降<sup>[4, 41]</sup>。这说明酸雨导致细胞 Ca 失衡从而导致了抗逆能力下降是个普遍现象。

酸雨导致 Ca 流失的另一个症状是土壤中可利用 Ca 的匮乏。在利用低 Ca 基质培养来模拟酸雨导致的极端缺 Ca 环境实验时, 红云杉叶片也出现 mCa 含量的下降, 从而影响了植物对逆境的抵抗<sup>[4]</sup>。在野外长期控制实验中也发现, 不仅观测到红云杉针叶中总 Ca 下降、呼吸速率上升, 还会导致叶片的 mCa 水平和抗冻能力的降低<sup>[42]</sup>。温室培养和大田实验均说明, 酸雨所导致的土壤可利用 Ca 匮乏与酸雨直接淋溶一样, 会导致植物细胞 Ca 平衡的破坏。

### 3 酸雨对森林生态系统中 Ca 的影响

#### 3.1 森林生态系统中 Ca 的生物地球化学循环

Ca 的生物地球化学循环通过沉降输入、土壤风化、地表径流输出、植物吸收存留、冠层淋溶、凋落物分解等各个环节来实现。目前对 Ca 的营养吸收循环的研究表明, 植物地上部分中的 Ca 主要集中在乔木层, 林下层植物中的 Ca 贮量一般在 2%—5%<sup>[43]</sup>, 此外 Ca 在树木中的积累和分配上, 在针叶林和阔叶林中表现出较大的差异。在针叶林中, Ca 主要积累在树干, 占乔木层地上部分总贮量的 45% 左右, 针叶的贮量和年积累量均不足 20%<sup>[43-44]</sup>, 而在阔叶林中, Ca 贮量和年积累量均相对较高, 且近 30% 的 Ca 存在于植物叶片中<sup>[43, 45]</sup>。

例如在鼎湖山,黄果厚壳桂-鼎湖钓樟群落(40年生)总贮量是马尾松群落(66年生)的11.7倍,而400年生的成熟林其Ca贮量更达到了 $2648 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[45]</sup>。因此阔叶林相比针叶林,其植物对Ca的吸收和凋落归还均高出1倍左右<sup>[43-45]</sup>。

为确认酸雨对整个森林生态系统物质循环全方位长期变化趋势的影响,需要将植物与森林水文学研究相结合,开展长期定位观测。而正是这一类对大尺度生态系统生态学研究的需求,促成了20世纪长期生态学研究的发展。例如美国Hubbard Brook Experimental Forest(HBEF)试验站,自20世纪60年代开始,就在集水区尺度上开展了生物地球化学循环等方面的长期生态系统生态学研究<sup>[46]</sup>,酸雨影响下生态系统中Ca生物地球化学循环的变化正是其主要内容之一。Likens等<sup>[15]</sup>监测了1962至1993年,生态系统中Ca的输入、输出、植物吸收、归还等各环节中的变化,利用这些数据模拟计算生态系统的Ca平衡,发现在酸雨对Ca生物地球化学循环的大多数环节产生了重大影响,主要表现为对Ca的可利用量和周转速率的影响。

### 3.2 酸雨影响下森林生态系统Ca的可利用量变化

整个森林生态系统中,植物可利用Ca主要包括土壤中的可交换态Ca和土壤表面腐殖层有机物络合的Ca。在生物地球化学循环的各环节中,大气干、湿沉降输入和土壤矿物母质的风化输入是其主要来源;而在输出方面,则主要为降水淋溶后Ca进入地表径流的流失,以及植物吸收固定在木质部中的Ca。因此可利用Ca含量的净变化量可简单的表示为:可利用Ca含量的净变化量=沉降输入+土壤风化-淋溶流失-植物固定。

在HBEF试验站近50a的长期定位研究数据中可以发现,该地区的森林生态系统Ca输入出现下降。这是由于随着美国《空气清洁法案》的实施,大气酸沉降中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 明显减少,但与此同时 $\text{Ca}^{2+}$ 沉降输入也明显下降<sup>[15, 47]</sup>,而土壤风化速率则基本保持恒定<sup>[15, 48]</sup>。

而在输出方面,地表径流中Ca的流失占据了整个变化量的较大部分,地表径流中Ca含量与酸沉降的严重程度呈正相关,在1970年左右出现最高峰,后期虽然随酸雨危害的好转而下降<sup>[15]</sup>,但表现出十年左右的滞后,从而造成大量的Ca从生态系统中流失。此外植物吸收固定的Ca自20世纪80年代开始逐年下降<sup>[15]</sup>,这是因为在酸雨影响的早期,由于氮素的输入和土壤阳离子的大量溶出,森林一般表现为促进生长,不过晚期则出现衰退<sup>[3]</sup>。

这些长期监测数据表明,HBEF试验站森林生态系统中可利用Ca储量已流失近半,且至今仍呈净流失状态,从而导致生态系统初级生产力下降了75%<sup>[15, 15]</sup>。而Bailey等<sup>[48]</sup>利用Na在各环节中的循环量稳定的特点,把Ca/Na作为Ca在生态系统中循环的示踪信号,其研究也得出了类似的结果。

### 3.3 酸雨影响下森林生态系统Ca周转速率的变化

Ca的生物地球化学循环中另外两个主要环节是冠层淋溶及凋落物归还。冠层中Ca的淋溶已在前面加以论述,在HBEF试验站表现出冠层淋溶的Ca与酸雨强度密切相关,约占植物总归还Ca量的10%—20%<sup>[15]</sup>。森林凋落物归还的年均Ca量在HBEF试验站并没有表现出明显的变化<sup>[15]</sup>。不过我国鼎湖山的研究发现,近20a来南亚热带常绿阔叶林中的年凋落物量总体呈下降趋势<sup>[49]</sup>。且由于随着土壤酸化,土壤中微生物活性大幅下降,且Ca的流失造成微生物种群结构变化<sup>[27]</sup>,如细菌和放线菌的数量减少,嗜酸真菌的比率上升,从而影响了凋落物的分解,长期酸雨影响下凋落物分解大多表现为受抑制<sup>[50]</sup>。因此,虽然凋落物中Ca含量没有长期监测的数据,但预计其生态系统中植物凋落物归还的Ca量也还是下降的。

随着植物Ca归还量的下降和凋落物分解的放缓,从而导致Ca在生态系统中的周转速率加快。早期针对温带森林生态系统的研究认为Ca在生态系统中的平均周转周期为5.9a<sup>[27]</sup>,但HBEF试验站的数据显示,长期酸雨作用下Ca平均周转周期已缩短为3a左右<sup>[15]</sup>。可利用Ca库的下降和周转时间的缩短意味着森林生态系统对酸雨更加敏感,植物将更快更直接的面对缺Ca的损害。

## 4 展望

在美国HBEF试验站的长期研究表明,酸雨明显导致了整个森林生态系统Ca的流失。在国内的研究中,

虽然土壤的监测数据显示土壤酸化和可利用 Ca 含量下降的趋势, 但还缺少结合森林水文学的生态系统整体研究和长期监测, 特别是在重庆、四川峨眉山等属于酸雨敏感土壤且危害严重的地区, 以及近年来酸雨危害日益严重的中南和华东地区, 这对深入认识和控制酸雨所引起的森林生态衰退具有重要作用。

而且欧美针对酸雨进行的长期生态定位研究多开展在温带针叶林、落叶阔叶林等森林生态系统, 而中国南方受酸雨危害地区大多为亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林及暖性针叶林等, 其气候因子、物质循环和能量平衡均有较大的不同, 酸雨对我国森林生态系统的危害特点还有待进一步研究。此外针对我国酸雨沉降的特点, 确定更恰当的危害阈值, 对预测森林生态系统健康状态和生态恢复等研究有较大的应用价值。此外在对酸雨危害的监测中, 如何选择监测项目以使更准确的记录和预测生态系统的变化也值得考虑, 例如采用 Sr 同位素信号<sup>[24-25]</sup>或 Ca Na<sup>[48]</sup>来作为 Ca 的示踪信号, 其研究结果相对传统方法而言更灵敏快捷。

由于我国经济发展的需要和现状, 酸雨问题在短期内很难得以根治。深入研究植物对酸雨抗性的机理, 寻找和筛选具有良好经济、生态效益的耐酸雨污染的物种具有非常重要的意义和紧迫性。冯宗炜等<sup>[1]</sup>在 20 世纪 80 年代对不同植物的酸雨抗性曾做了大量的工作, 这些植物所表现出的抗性差异是否与其对缺 Ca 的响应有关, 有待深入研究。

#### References:

- [ 1 ] Feng ZW, Cao H F, Zhou X P. Effect of acidic deposition on ecosystems and ecological rehabilitation. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1999.
- [ 2 ] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China environmental state bulletin(1989-2007). 2008, Available from: <http://www.mep.gov.cn/plan/zkgb/>.
- [ 3 ] Tomlinson G H. Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 51-81.
- [ 4 ] Schaberg P G, DeHayes D H, Hawley G J. Anthropogenic calcium depletion: A unique threat to forest ecosystem health? *Ecosystem Health*, 2001, 7(4): 214-228.
- [ 5 ] Likens G E, Driscoll C T, Buso D C. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, 1996, 272(5259): 244-246.
- [ 6 ] Orr J C, Fabry V J, Aumont O, Bopp L, Doney S C, Feely R A, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key R M, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matar R, Monfray P, Mouchet A, Najjar R G, Plattner G K, Rodgers K B, Sabine C L, Sarmiento J L, Schlitzer R, Slater R D, Totterdell I J, Weirig M F, Yamanaka Y, Yool A. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 2005, 437(7059): 681-686.
- [ 7 ] Jezziński A, Yan N D, Paterson A M, DeSellas A M, Turner M A, Jeffries D S, Keller B, Weeber R C, Mc Nicol D K, Palmer M E, McIver K, Arseneau K, Ginn B K, Cumming B F, Smol J P. The widespread threat of Calcium decline in fresh waters. *Science*, 2008, 322(5906): 1374-1377.
- [ 8 ] Zhou W, Ling B. Research progress in chemistry behavior and bio-availability of calcium in soil. *Soils and fertilizers*, 1996, (5): 19-22.
- [ 9 ] Ling D J, Zhang J E, Ouyang Y. Advancements in research on impact of acid rain on soil ecosystem: a review. *Soils*, 2007, 39(4): 514-521.
- [ 10 ] Sherman R E, Fahey T J. The effects of acid deposition on the biogeochemical cycles of major nutrients in miniature red spruce ecosystems. *Biogeochemistry*, 1994, 24(2): 85-114.
- [ 11 ] Fan H B, Lin D X. Leaching and weathering effects of simulated acid rain on four types of mountain soils in Fujian, China. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 570-577.
- [ 12 ] Yu T R. The acidity characters and acidification of soil in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 1988, 19(2): 49-51.
- [ 13 ] Kirchner J W and Lydersen E. Base cation depletion and potential long-term acidification of Norwegian catchments. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(8): 1953-1960.
- [ 14 ] Watmough S A, Dillon P J. Major element fluxes from a coniferous catchment in central Ontario, 1983-1999. *Biogeochemistry*, 2004, 67(3): 369-398.
- [ 15 ] Likens G E, Driscoll C T, Buso D C, Siccama T G, Johnson C E, Lovett G M, Fahey T J, Reiners W A, Ryan D F, Martin C W, Bailey S W. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*, 1998, 41(2): 89-173.
- [ 16 ] He Y G. Soils of Dinghushan nature reserve in Guangdong province. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 1983(1): 87-96.
- [ 17 ] Li J X. Soils of Dinghushan in Daoyao region Guangdong province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 1959(1): 30-43.
- [ 18 ] Xia H P, Yu Q F, Zhang D Q. The soil acidity and nutrient contents, and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests

- of Dinghushan nature reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 645-653.
- [19] Liu J X, Zhou G Y, Chu G W, Zhang Q M. Effects of soil acidity on the soil nutrients under Dinghushan monsoon evergreen broad leaved forest. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 763-767.
- [20] Wu P C, Peng S L, Wang X Y, Chen Y S. Soil acidification caused by acid precipitation in Mt. Hengshan over last 20 years. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 219-224.
- [21] Pan G X, Fallavier P, Lu Y W, Yang Y. Soil acidification in Mt. Lushan and changes in its physico-chemical properties in the past 35 years. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, 24(4): 145-147.
- [22] Hou A M, Peng S L, Zhou G Y. Tree-ring chemical changes and possible impacts of acid precipitation in Dinghushan, South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1552-1559.
- [23] Penninckx V, Meerts P, Herbauts J, Gruber W. Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management*, 1999, 113(1): 23-33.
- [24] Ma Y J and Liu C Q. Using Strontium isotopes to trace nutrient element circulation and hydrochemical evolution within an ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(4): 377-383.
- [25] Drouet T, Herbauts J, Demaiffe D. Long-term records of strontium isotopic composition in tree rings suggest changes in forest calcium sources in the early 20th century. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1926-1940.
- [26] Broadley M R, Bowen H C, Cotterill H L, Hammond J P, Meacham M C, Mead A, White P J. Variation in the shoot calcium content of angiosperms. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(386): 1431-1446.
- [27] McLaughlin S B and Wimmer R. Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytologist*, 1999, 142(3): 373-417.
- [28] Fairfax J A W and Lepp N W. Effect of simulated acid rain on cation loss from leaves. *Nature*, 1975, 255(5506): 324-325.
- [29] Igawa M, Kase T, Satake K, Okochi H. Severe leaching of calcium ions from fir needles caused by acid fog. *Environmental Pollution*, 2002, 119(3): 375-382.
- [30] Wang W, Cao H F, Ying J, Chen Y Z, Ye Q, Sun W S. Interaction of acidic cloud droplet with and its effects on forest canopy in the Jingding zone of the Mount Emei. *Research of Environmental Sciences*, 1988, 1(6): 25-31.
- [31] Zeng G M, Zhang G, Huang G H, Jiang Y M, Liu H L. Exchange of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{K}^+$  and uptake of  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  for the subtropical forest canopies influenced by acid rain in Shaoshan forest located in Central South China. *Plant Science*, 2005, 168(1): 259-266.
- [32] Tao F L, Feng Z W. Review on the elimination and buffering functions of plant to acid deposition. *Rural Eco-Environment*, 1999, 15(2): 46-49.
- [33] Cronan C S, Reiners W A. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia*, 1983, 59(2): 216-223.
- [34] Potter C S, Ragsdale H L, Swank W T. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian forest canopy. *Journal of Ecology*, 1991, 79: 97-115.
- [35] Liu J X, Wen D Z, Zhou G Y. Chemical properties of the rainfall in the coniferous and broad-leaved forests in acid rain area of Heshan, Guangdong. *China Environmental Science*, 2000, 20(3): 198-202.
- [36] Driscoll C T, Lawrence G B, Bulger A J, Butler T J, Cronan C S, Eagar C, Lambert K F, Likens G E, Stoddard J L, Weathers K C. Acidic deposition in the northeastern United States: sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies. *Bioscience*, 2001, 51(3): 180-198.
- [37] Liu X, Ellsworth D S, Tyree M T. Leaf nutrition and photosynthetic performance of sugar maple (*Acer saccharum*) in stands with contrasting health conditions. *Tree Physiology*, 1997, 17(3): 169-178.
- [38] Tian D L, Huang Z Y, Fu X P. Effects of simulated acid rain on mineral elements content in leaves of *Cinnamomum camphora* seedling in artificial potted environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1099-1105.
- [39] Borer C H, Schaberg P G, DeHayes D H. Acidic mist reduces foliar membrane-associated calcium and impairs stomatal responsiveness in red spruce. *Tree Physiology*, 2005, 25(6): 673-680.
- [40] Fink S. Unusual patterns in the distribution of calcium oxalate in spruce needles and their possible relationships to the impact of pollutants. *New Phytologist*, 1991, 119(1): 41-51.
- [41] DeHayes D H, Schaberg P G, Hawley G J, Strimbeck G R. Acid rain impacts on Calcium nutrition and forest health—Alteration of membrane-associated calcium leads to membrane destabilization and foliar injury in red spruce. *Bioscience*, 1999, 49(10): 789-800.
- [42] Schaberg P G, DeHayes D H, Hawley G J, Murakami P F, Strimbeck G R, McNulty S G. Effects of chronic N fertilization on foliar membranes, cold tolerance, and carbon storage in montane red spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(8): 1351-1359.
- [43] Chen C Y, Wang K P, Zhang J W, Zheng S Y, Zhao J L, Deng S J, Gao H, Ma J X, Li S M, Xie W C, Xiong Z P. Nutrient accumulation, distribution and cycling in Chinese Fir-Homana mixed forest ecosystem. *Journal of Ecology*, 1988, 7(4): 7-13.
- [44] Mo J M, Brown S, Kong G H, Zhang Y C, Lenart M. Nutrient distribution and cycling of a Masson's pine planted forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 635-640.
- [45] Mo J M, Zhou G Y, Peng S L, Zhang D Q, Yu Q F. Distribution and Biological Cycle of Nutrients in *Cryptocarya concinna* / *Lindera chunii*

- Community in Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(2): 99-103.
- [46] Likens G E. Some perspectives on long-term biogeochemical research from the Hubbard Brook ecosystem study. *Ecology*, 2004, 85(9): 2355-2362.
- [47] Hedin L O, Granat L, Likens G E, Adri Buishand T, Galloway J N, Butler T J, Rodhe H. Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature*, 1994, 367(6461): 351-354.
- [48] Bailey S W, Buso D C, Likens G E. Implications of sodium mass balance for interpreting the calcium cycle of a forested ecosystem. *Ecology*, 2003, 84(2): 471-484.
- [49] Guan L L, Zhou G Y, Zhang D Q, Liu J X, Zhang Q M. Twenty years of litter fall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan forest ecosystem research station. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 449-456.
- [50] Fang H and Mo J M. Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3127-3136.

#### 参考文献:

- [1] 冯宗炜, 曹洪法, 周修萍. 酸沉降对生态环境的影响及其生态恢复. 社会经济自然复合生态系统可持续发展研究丛书. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报 (1989—2007). 2008, Available from: <http://www.mep.gov.cn/plan/zkgb/>.
- [8] 周卫, 林葆. 土壤中钙的化学行为与生物有效性研究进展. *土壤肥料*, 1996, (5): 19-22.
- [9] 凌大炯, 章家恩, 欧阳颖. 酸雨对土壤生态系统影响的研究进展. *土壤*, 2007, 39(4): 514-521.
- [11] 樊后保, 林德喜. 模拟酸雨对福建四种山地土壤的淋溶与风化作用. *山地学报*, 2002, 20(5): 570-577.
- [12] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题. *土壤通报*, 1988, 19(2): 49-51.
- [16] 何宜庚. 广东省鼎湖山自然保护区的土壤. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 1983(1): 87-96.
- [17] 黎积祥. 广东高要鼎湖山附近的土壤. *中山大学学报(自然科学版)*, 1959(1): 30-43.
- [18] 夏汉平, 余清发, 张德强. 鼎湖山3种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性. *生态学报*, 1997, 17(6): 645-653.
- [19] 刘菊秀, 周国逸, 褚国伟, 张倩媚. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响. *土壤学报*, 2003, 40(5): 763-767.
- [20] 吴甫成, 彭世良, 王晓燕, 陈咏淑. 酸沉降影响下近20年来衡山土壤酸化研究. *土壤学报*, 2005, 42(2): 219-224.
- [21] 潘根兴, Fallavier P, 卢玉文, 杨焱. 近35年来庐山土壤酸化及其物理化学性质变化. *土壤通报*, 1993, 24(4): 145-147.
- [22] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系. *生态学报*, 2002, 22(9): 1552-1559.
- [24] 马英军, 刘丛强. 生态系统营养离子循环及水化学演化的锶同位素示踪. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 377-383.
- [30] 王玮, 曹洪法, 宁洁, 陈延智, 叶芹, 孙文舜. 峨嵋山金顶地区酸性云雾水对植物冠层的作用和影响. *环境科学研究*, 1988, 1(6): 25-31.
- [32] 陶福祿 and 冯宗炜. 植物对酸沉降的净化缓冲作用研究综述. *农村生态环境*, 1999, 15(2): 46-49.
- [35] 刘菊秀, 温达志, 周国逸. 广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征. *中国环境科学*, 2000, 20(3): 198-202.
- [38] 田大伦, 黄智勇, 付晓萍. 模拟酸雨对盆栽樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗叶矿质元素含量的影响. *生态学报*, 2007, 27(3): 1099-1105.
- [43] 陈楚莹, 王开平, 张家武, 曾士余, 赵吉录, 邓仕坚, 高洪, 马家禧, 李顺明, 谢文彩, 熊左平. 杉木火力楠混交林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究. *生态学杂志*, 1988, 7(4): 7-13.
- [44] 莫江明, Sandra Brown, 孔国辉, 张佑昌, Melanie Lenart. 鼎湖山马尾松林营养元素的分布和生物循环特征. *生态学报*, 1999, 19(5): 635-640.
- [45] 莫江明, 周国逸, 彭少麟, 张德强, 余清发. 鼎湖山黄果厚壳桂、鼎湖钓樟群落主要营养元素的分配和生物循环. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11(2): 99-103.
- [49] 官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量20年动态研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 449-456.
- [50] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3127-3136.