

酸沉降对森林生态系统影响的研究现状及展望*

刘菊秀

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要 酸沉降影响下物质循环及其不平衡研究;酸沉降对土壤理化性质的影响;森林水化学方面的研究;酸沉降下重金属的活化研究;酸沉降对植物生长的影响研究;酸沉降和气候变化对森林的影响;模拟酸雨对土壤理化性质和植物生长的影响;酸沉降下土壤风化问题的研究;运用模型对酸化问题的研究;森林土壤人为和自然的酸化;酸沉降水临界负荷的研究;酸沉降和其它污染物对植物的联合影响;酸化土壤恢复研究等方面介绍了酸沉降对森林生态系统影响的研究现状,并阐明了今后研究的方向及应该注意的问题。

关键词 酸沉降,森林生态系统,影响,现状,展望

中图分类号 X173 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2003)05-0113-05

Current and future study about effects of acid deposition on forest ecosystems. LIU Juxiu (South China Institute of Botany Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 113 ~ 117.

This paper introduced the effect of acid deposition on forest ecosystems from the following aspects: the effects of acid deposition on element cycling and nutrient imbalance; the effects of acid deposition on the soil physical and chemical properties; the study on the forest water chemistry; the study on the activation of heavy elements affected by acid deposition; the study on the plant growth affected by acid deposition; the joint effects of acid deposition and climate on forests; the effects of simulated acid rain on soil physical and chemical properties and plant growth; the study on the soil weathering; the modeling of problems brought by acid deposition; soil anthropic and natural acidification in the forests; the study on critical charge of acid deposition; the joint effects of acid deposition and other pollutants on plants; and the study on the restoration of acid soil. It also clarified the future study direction and the problems that attention must be paid to.

Key words acid deposition, forest ecosystem, effect, current study, future study.

1 引言

酸沉降包括干、湿沉降。湿沉降一般系指 pH 值低于 5.6 的天然降雨以及酸雪、酸雾等。干沉降是指硫氧化物和氮氧化物以及包含硫、氮氧化物的颗粒随风而降。而现在很多情况下把酸雪酸雾和酸性粉尘降落物都统称为“酸雨”^[3]。酸雨或酸沉降导致的环境酸化与危害是 21 世纪最大的环境问题之一。研究分析酸沉降的研究进展有助于了解研究现状,采取新的研究措施和新的酸沉降控制对策。

2 酸沉降简史

早在 18 世纪中叶,人们就已经注意到煤烟引起的腐蚀和致病。1872 年史密斯《大气和雨——化学气象学的开端》一书问世,第一次使用了“酸雨”这个术语,并指出酸雨系燃烧产生,而且可以远距离输送^[1]。20 世纪 50 ~ 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。60 年代末,酸雨导致的湖水酸化已经十分明显,酸雨的区域性危害已明朗化。70 ~ 80 年代,酸雨由北欧扩展到中欧。在地球西半球的北美,也形成了大面积酸雨区,酸雨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它地区也时有酸雨的报道,特别是作为世界燃煤大国的中国,酸雨危害面积迅速扩大。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雨。这表明酸雨已由欧美发达国家向亚非拉等发展中国家发展^[22]。

3 酸沉降对森林生态系统影响的研究概况

3.1 物质循环及其不平衡研究

*广东省环境保护局资助项目(2000-09)。

收稿日期:2002-08-29 改回日期:2002-11-07

酸沉降一方面导致土壤营养离子的流失,另一方面 N 沉降量的增加,植物可吸收 N 增加,相应导致对营养离子的需要量增加,这两方面相互作用的结果导致了森林营养不平衡问题的出现。而重金属的活化,导致植物体受到毒害。在欧洲和北美对森林生态系统营养平衡问题进行了 20 多年的研究。Makarovh 等^[24]认为俄罗斯西北部森林高 N 沉降,导致了 K、Ca 和 Mg 流失加快,营养不平衡。Huntington 等^[14]对美国东南部森林生态系统 Ca 元素的生物地化循环总的平衡问题进行了研究,发现酸沉降影响下,相对于植物生长的需要,土壤交换性 Ca 的贮量很少。在根际区,通过土壤风化产生的交换性 Ca 不足以补充土壤淋失和植物吸收的交换性 Ca。在这些地方 Ca 的流失将威胁森林生产力的维持。Janzen 等^[16]认为很多植物的营养问题比如 Ca 的缺乏与土壤溶液营养的内部比例问题有关,而不是绝对的浓度。Curtin 等^[7]认为一个简单的方法预测盐基离子的比例问题可以作为植物是否健康的诊断。Zysset 等^[44]在研究欧洲栗子树 (*Castanea sativa* Mill) 对变化的 Ca/Al 比例时发现当栗子树生长的营养溶液里 Al 含量增加时,栗子树根和叶里的 Al 浓度增加,而 Ca 和 Mg 含量降低。Pichtel 等^[34]、Das 等^[9]、John 等^[19]和 Michopoulos 等^[27]的研究则发现在酸沉降影响下重金属活化严重,限制了森林生态系统的发展。森林物质元素的平衡问题关系到森林的存亡问题。研究森林物质迁移分布规律对森林可持续发展具有重要意义。

3.2 对土壤理化性质的影响

酸沉降对土壤理化性质的影响表现在土壤 pH 值的降低,盐基离子的流失和重金属的活化等。Koptsik 等^[21]的研究表明,在酸沉降影响下 pH 值、BS(盐基饱和度)和盐基离子含量下降,而交换性酸和 Al 含量则增加,尤其在 O 和 E 层表现明显。Matzner 等^[26]认为,目前大气沉降量的改变对森林土壤的影响是:土壤 Al 的释放,原先吸附的 SO_4^{2-} 的释放,N 在土壤有机质的积累,根可吸收 N 的增加和 Ca^{2+} 在土壤溶液中的减少。Carnol 等^[6]则认为对酸沉降敏感的土壤为低 BS,Ca 和 Al 对 pH 缓冲能力不强的土壤。

3.3 土壤 Al 化学与 Al 毒研究

在酸沉降影响下,Al 被活化,对植物根生长产生严重影响。各国科学家对 Al 化学和 Al 毒研究进行了详细的研究。Noble^[31]的研究认为,当考虑 Ca-

Al 平衡对根生长的影响时,不应只考虑自由 Ca^{2+} 和 Al^{3+} , 还要考虑其他形态的铝离子,例如:其他单体铝: AlOH^{2+} 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 和 AlSO_4^+ , 因为他们同样具有毒性。Parker 等^[32]则证明聚合 $\text{Al}_{13}:\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$ 为最毒的 Al 的种类。Maaike^[23]认为 Al 对 Al 敏感的植物树种影响很大,表现在增加溶液 Al 的含量,根生长减慢,叶变枯黄,植物体 Mg 和 P 含量降少。Hirano 等^[12]认为土壤里高含量的 Al 对根结构和形态产生不利影响。

3.4 森林水化学方面的研究

一般来说,大气降水反应了当地酸沉降湿沉降情况,受空气污染的严重情况。而穿透雨和树干径流则反应了森林林冠和树干对湿沉降缓冲能力(表现在降水中 pH 值的升高与降低),与大气降水的反应情况(离子的释放与吸收),凋落物和表层土壤对酸沉降都有一定的缓冲作用,地表水 pH 值升高,但也会导致营养离子的流失和重金属的活化。Skirvan 等^[39]对森林水化学的研究发现,相对于大气降水,在穿透雨中重金属元素累积,Mn,Zn,Cu 和 Cd 的累积倍数分别为 45,5,2 和 2 倍。通过对森林水化学的研究也可以揭示大气污染情况的变化,森林生态系统的健康状况。Niklinska 等^[30]对森林水化学的研究表明,由于 H^+ 和重金属的积累,将会对森林生态系统产生严重影响。

3.5 重金属的活化研究

在酸沉降影响下土壤一方面流失大量营养离子,另一方面重金属元素 Hg,Pb,Cd,Cr,Mn,Zn 和 Cu 被活化,在土壤溶液的含量大大增加,对植物根系产生很大影响。Pichtel 等^[34]的研究发现,在波兰表面土壤上,重金属含量比 1976 年增加。Mats 等^[25]对 Hg,Pb,Cd,Zn 和 Cu 的积累迁移分布情况进行了监测,发现各元素的流动性都有一定程度增加。John 等^[19]的研究则表明,重金属污染对大量元素的植物可利用性和森林土壤酸化参数有一定影响。Das 等^[9]和 Michopoulos^[27]分别对 Cd 生理、生态和生物化学方面的植物影响研究和 Pb 在森林土壤的迁移活化进行了研究。

3.6 对植物生长的影响研究

酸沉降对植物生长的危害有直接和间接两个方面。直接危害表现在使树叶的腊被、角质层和气孔受到伤害,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。间接危害表现在通过酸沉降对土壤和与其他污染物的联合作用而影响植

物的生长。Svein 等^[40]研究表明,除林冠颜色受酸沉降的轻微影响外,冠层密度等其它参数与酸沉降影响没有明显相关关系。Raben^[36]的研究则发现,在德国某些森林生态系统正受酸沉降严重影响。

3.7 酸沉降和气候变化对森林的影响

随着温室气体排放量增加,全球温度有上升的趋势,气候随之产生一定量变化。气候变化导致植物对 N 的需要量增加,而相反酸沉降对植物的影响则导致植物对 C 的需要量增加。研究酸沉降和气候变化对森林的联合影响越来越受到科学家的关注。Robert 等^[37]认为气候变化和酸沉降对森林的联合影响是复杂的,受地理分布不同的影响,高纬度和中纬度比低纬度更易受环境压力影响。Alcamo 等^[4]研究认为,在 2100 年,欧洲受气候变化影响的面积(58%)将与欧洲 1990 年受酸沉降影响的面积差不多(54%)。在 21 世纪初期欧洲受酸沉降和气候变化影响的总面积为最小,以后将慢慢增加,这表明尽管控制硫氧化物的排放量,但在欧洲,森林生态系统仍受环境压力的影响。到 21 世纪中叶,欧洲有 14% 的面积既受酸沉降影响又受气候变化影响。

3.8 模拟酸雨对土壤理化性质和植物体生长的影响

由于受野外实验条件的限制,为了清楚简明地研究酸沉降对森林生态系统的影响,科学家们往往采取模拟的研究方法。Mitchell 等^[28]研究发现,不同量的硫酸和硝酸的运用使土壤产生不同的反应。加高量的硫酸,土壤剖面埋埋包里土壤 Ca 含量增加,而加高量的硝酸,埋埋包里 Ca 含量降低。解释为:硫酸根离子被土壤高吸附,而硝酸根离子具高流动性,导致阳离子的流失或被生物的快速吸收。Neil 等^[29]认为在模拟酸雨影响下,10 龄松苗比之 6 龄松苗来说有更大的生物量,然而在高度、茎粗上没有什么差别。建议对树苗进行长期的研究是有必要的。Rustad 等^[38]研究运用模拟酸雨淋洗土壤及淋洗后土壤的恢复状况。研究表明,经过 4 年酸雨的应用,土壤溶液中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 迅速增加,在随后 2 年的恢复实验中,土壤和土壤溶液化学回到了酸雨淋洗前的状况。表明在次生地的阔叶树生态系统酸化后是可以迅速得以恢复的。此研究还表明不同硫酸和硝酸量及比例的应用导致土壤化学产生不同的反应。

3.9 酸沉降影响下土壤风化问题的研究

在自然生态系统,土壤的化学风化是缓冲酸沉

降压力的主要机制。越来越多的科学家进行土壤化学风化的研究。Bain 等^[5]对土壤的风化研究发现,在风化过程中, Mg 的释放最快,其次是 K,最慢是 Ca。

3.10 运用模型对酸化问题的研究

模型的应用加速了酸沉降研究的进程。Ulrich 等^[43]用模型证实了阳离子对 Al 毒有缓解作用。Eriksson^[10]运用模型研究酸沉降对针叶林土壤的影响,认为随着酸沉降的控制,土壤 pH 值会升高,但上层土壤原先吸附的硫酸盐的释放将会延缓酸化土壤的恢复。

3.11 森林土壤人为和自然的酸化

土壤酸化大部分是一个自然的酸化过程,例如生物量的积累,根和微生物的呼吸,土壤有机质,大气酸沉降加速了土壤酸化的过程。Daniel 等^[8]通过 30 年在永久样地采样分析后对 pH 值预测发现 38% 的土壤酸化归因于酸沉降,62% 归因于土壤的自然酸化。

3.12 酸沉降临界负荷的研究

临界负荷是指一种或多种污染物曝露的定量估计值,根据目前的认识,低于这个负荷时,对环境的特定敏感部分不会造成显著的影响。我国在酸沉降临界负荷研究方面的工作进行比较多。陶福祿等^[2]对中国南方生态系统酸沉降临界负荷进行了研究。谢绍东等^[3]对整个中国酸沉降临界负荷进行研究。我国对酸沉降最敏感的区域是漂灰土带,其次是砖红壤地区和暗棕壤带和黑土带。

3.13 酸沉降和其他污染物对植物的联合影响

酸沉降和其他污染物对植物体生长的联合影响比酸沉降对植物体生长的单独影响更严重。Kainulainen 等^[20]研究了酸沉降与臭氧对植物的联合影响,发现他们对植物生长产生严重影响。

3.14 酸化土壤的恢复研究

酸沉降导致的酸化土壤严重限制植物的生长,因而寻求有效的途径对其进行改善是一件刻不容缓的事情。一直以来对酸化土壤的恢复大多采用传统的方法,即施用石灰^[7,11,33,35]。Joann 等^[18]的研究发现,当酸性土壤施用牛粪后也可以短时间内提高土壤的 pH 值,且土壤中的植物可吸收性 P 和 K 的含量也提高。Torleif 等^[42]和 Jeffrey 等^[17]则发现草木灰可以改善酸化土壤的理化性质,可以降低土壤的酸度和 Al 的含量。Jackson 等^[15]和 Tait 等^[41]则利用造纸厂废弃纸浆对酸化土壤进行改善。Hue

等^[13]通过实验发现有机肥料可以有效提高土壤盐基离子含量,降低土壤溶液 Al 的含量。

4 酸沉降对森林生态系统影响的研究展望

近年来,由于对硫氧化物排放的限制,降雨的 pH 值有上升的趋势。然而欧洲和北美的研究表明,酸沉降对森林生态系统的影响的趋势却依然越来越严重。酸沉降对生态系统的影响仍然是环境问题研究的重点。研究酸沉降对森林生态系统的影响机理和森林生态系统对酸沉降的反馈机制,以及酸沉降影响后酸化问题的恢复仍是研究的核心问题。

在发展中国家随着交通运输业的发展,氮氧化物对酸雨的贡献将越来越大,我们应该多研究酸沉降下 N 的物质循环化学转化问题,研究其对森林危害的真正机理。

建议同位素跟踪运用于酸沉降导致的物质不平衡研究上,揭示物质循环分布途径,物质在整个生态系统的输入输出量。

以后的研究应该不多局限于单个过程或单个因子的研究。而是对整个生态系统进行操纵性研究,进行多因子分析,达到对生态系统各个组成成分总的研究,对生态系统物质循环和能量流动的全方面的研究。

在土壤恢复方面,建议实施以下措施:

继续直接施用石灰、草木灰、牲畜粪便等改善土壤。在中国有广大的农村,建议多使用猪粪、牛粪等农家肥料,在牲畜少的地方,建议使用绿肥,例如:一年蓬 (*Erigeron annuus* (L.) Pers)、小飞蓬 (*Comniza canadensis* (L.) Cronq)、豆科植物叶等有机肥料; 尽量少从森林运走木材及含 Ca 等营养元素丰富的枝、茎和叶; 种植对酸沉降不敏感的树种; 研究开发能分泌碱性次生代谢产物,而自身又对酸沉降不敏感的植物树种,达到对土壤直接的改善; 尽量控制大气酸沉降的输入。

参考文献

- [1] 石弘之(日本). 1997. 酸雨[M]. 北京:中国环境出版社.
- [2] 陶福祿,冯宗炜. 1999. 中国南方生态系统的酸沉降临界负荷[J]. 中国环境科学, **19**(1): 14~17.
- [3] 谢绍东,郝吉明,周中平,等. 1998. 中国酸沉降临界负荷区划[J]. 环境科学, **19**(1): 13~17.
- [4] Alcamo J, Krol M, Posch M. 1995. An integrated analysis of sulfur emissions, acid deposition and climate change [J]. *Water Air Soil Poll.*, **3**:1539~1548.
- [5] Bain DC, Duthie DML, Thomson CM. 1995. Rates and processes of mineral weathering in soils developed on greywackes and shales in the southern uplands of Scotland [J]. *Water Air Soil Poll.*, **3**:1069~1074.
- [6] Carnol M, Ineson P, Dickinson A. 1997. Soil solution nitrogen and cations influenced by (NH₄)₂SO₄ deposition in a coniferous forest [J]. *Environ. Poll.*, **97**(1~2): 1~10.
- [7] Curtin D, Smillie G. 1995. Effects of incubation and pH on soil solution and exchangeable cation ratios [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **59**:1006~1011.
- [8] Daniel M, Daniel DR, Lee HA, et al. 1998. DIVISION S-7 FOREST & RANGE SOILS. Three decades of observed soil Acidification in the Calhoun experimental forest: Has acid rain made a difference [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **62**:1428~1439.
- [9] Das P, Samantaray S, Rout GR. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review [J]. *Environ. Poll.*, **98**(1): 29~36.
- [10] Eriksson Erik. 1998. Modeling acidification effects on coniferous forest soils [J]. *Water Air Soil Poll.*, **104**:353~388.
- [11] Farina WMP, Channon P, Thibaud GR. 2000. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: Long-term soil effects [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**:652~658.
- [12] Hirano Y, Hijii N. 1998. Effects of low pH and aluminum on root morphology of Japanese red cedar saplings [J]. *Environ. Poll.*, **101**:339~347.
- [13] Hue NV, Licudine DL. 1999. Amelioration of subsoil acidity through surface application of organic manures [J]. *J. Environ. Qual.*, **28**:623~632.
- [14] Huntington TG, Hooper RP, Johnson CE, et al. 2000. Calcium depletion in a southeastern United States forest ecosystem [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**:1845~1858.
- [15] Jackson MJ, Line MA, Wilson S, et al. 2000. Application of composed pulp and paper mill sludge to a young pine plantation [J]. *J. Environ. Qual.*, **29**:407~414.
- [16] Janzen HH, Chang C. 1987. Cation nutrition of barley as influenced by soil solution composition in a saline soil [J]. *Can. J. Soil Sci.*, **67**:619~629.
- [17] Jeffrey SK, Ivan JF, Lindsey ER, et al. 1996. Soil processes and chemical transport. Threshold application rates of wood ash to an acidic forest soil [J]. *J. Environ. Qual.*, **25**:220~227.
- [18] Joann KW, Chi C, George W, et al. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**:962~966.
- [19] John D, Antti-Jussi L. 1998. Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter, SW Finland [J]. *Environ. Poll.*, **99**:225~232.
- [20] Kainulainen P, Holopainen JK, Holopainen T. 2000. Plant and environment interactions combined effects of ozone and nitrogen on secondary compounds, amino acids, and aphid performance in Scots pine [J]. *J. Environ. Qual.*, **29**:334~342.
- [21] Koptsik G, Mukhina I. 1995. Effects of acid deposition on acidity and exchangeable cations in podzols of the kola peninsula [J]. *Water Air Soil Poll.*, **85**:1209~1214.
- [22] Likens GE. 1989. Some aspects of air pollution on terrestrial ecosystems and prospects for the future [J]. *Ambio*, **18**:172~178.
- [23] Maaik CCD, Roland B, Peter JM, et al. 1997. Aluminium toxicity and tolerance in three health land species [J]. *Water Air Soil Poll.*, **98**:229~239.

- [24] Makarov MI, Kiseleva VV. 1995. Acidification and nutrient imbalance in forest soils subjected to nitrogen deposition [J]. *Water Air Soil Poll.*, **85**:1137 ~ 1142.
- [25] Mats A, Ake L, Lage B, et al. 1995. Monitoring of heavy metals in protected forest catchments in Sweden [J]. *Water Air Soil Poll.*, **2**:755 ~ 760.
- [26] Matzner E, Murach D. 1995. Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in central Europe [J]. *Water Air Soil Poll.*, **1**:63 ~ 76.
- [27] Michopoulos P. 1999. Lead migration in some acid forest soils under Beech in Greece [J]. *J. Environ. Qual.*, **27**:1705 ~ 1708.
- [28] Mitchell MJ, David MB, Fernandez II, et al. 1994. Response of buried mineral soil bags to experiments acidification of forest ecosystem[J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **58**:556 ~ 563.
- [29] Neil WM, Brandon JD. 1997. Growth and survival of Jack pine exposed to simulated acid rain as seedlings [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **61**:295 ~ 297.
- [30] Niklinska M, Maryanski M, Szarek G, et al. 1995. Chemical input/output balance for a moderately polluted forest catchment in southern Poland [J]. *Water Air Soil Poll.*, **3**:1771 ~ 1776.
- [31] Noble AD, Fey MV, Sumner ME. 1988. Division S-4 Soil fertility and plant nutrition. Calcium-aluminum balance and the growth of soybean roots in nutrient solutions [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **52**:1651 ~ 1656.
- [32] Parker DK, Kinraide TB, Zelazny LW. 1989. On the phytotoxicity of polynuclear hydroxy- aluminum complexes [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **53**:789 ~ 796.
- [33] Peter JS, Donald JL. 1997. Effects of watershed liming on *Picea rubens* seedling biomass and nutrient element concentration [J]. *Water Air Soil Poll.*, **95**:193 ~ 204.
- [34] Pichtel J, Sawyerr HT, Krystyna C. 1997. Spatial and temporal distribution of metals in soils in warsaw, Poland [J]. *Environ. Poll.*, **98**(2):169 ~ 174.
- [35] Pierce FJ, Warncke DD. 2000. Soil and crop response to variable-rate liming for two Michigan fields [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**:774 ~ 780.
- [36] Raben G, Andreae, Meyer-Heisig M. 2000. Long-term acid load and its consequences in forest ecosystems of saxony (Germany) [J]. *Water Air Soil Poll.*, **122**:93 ~ 103.
- [37] Robert KD, Joe W. 1995. Global forest systems: an uncertain response to atmospheric pollutants and global climate change [J]? *Water Air Soil Poll.*, **1**:101 ~ 110.
- [38] Rustad LE, Fernandez II, David MB, et al. 1996. Experimental soil acidification and recovery at the Bear Brook watershed in Maine [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **60**:1933 ~ 1943.
- [39] Skrivan P, Rusek J, Fottova D, et al. 1995. Factors affecting the content of heavy metals in bulk atmospheric precipitation, throughfall and stemflow in central bohemia, Czech republic [J]. *Water Air Soil Poll.*, **85**:841 ~ 846.
- [40] Svein S, Kjetil T. 1997. Crown condition of Norway spruce in relation to sulphur and nitrogen deposition and soil properties in southeast Norway [J]. *Environ. Poll.*, **96**(1):19 ~ 27.
- [41] Tait C, Lena QM. 2000. Heavy metals in the environment. Effects of acidification on metal mobility in a papermill-ash amended soil [J]. *J. Environ. Qual.*, **28**:760 ~ 766.
- [42] Torleif B, Bo F. 1995. Silvicultural use of wood ashes-effects on the nutrient and heavy metal balance in a pine (*Pinus sylvestris*, L.) forest soil [J]. *Water Air Soil Poll.*, **2**:1039 ~ 1044.
- [43] Ulrich EG, Walter JH. 1992. Modeling cation amelioration of aluminum phytotoxicity [J]. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **56**:166 ~ 172.
- [44] Zysset M, Brunner I, Frey B, et al. 1996. Response of European chestnut to varying calcium/aluminum ratios [J]. *Environ. Qual.*, **25**:702 ~ 708.

作者简介 刘菊秀,女,1975年生,湖南嘉禾人,在读博士研究生。主要从事植物环境生态学研究,发表论文10篇。
E-mail:ljxiu@scib.ac.cn
责任编辑 王伟
