

酸雨对生态系统酸化影响的研究进展

张俊平¹, 张新明², 曾纯军³, 胡月明¹

(1. 华南农业大学 信息学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学 资环学院, 广州 510642; 3. 国家林业局中南调查规划设计院, 长沙 410014)

摘要: 综述了酸雨对水生生态系统、森林生态系统和土壤生态系统的酸化影响, 讨论了生态系统酸化的系列指标, 在此基础上, 提出了果园土壤的酸化指标体系, 并在最后引出了减少酸雨对生态系统酸化影响的控制对策。

关键词: 酸雨; 酸化; 生态系统; 水体; 森林; 土壤

中图分类号: X517 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)增刊-0245-05

Studying Advances of Effects of Acid Rain on Acidifying of Ecosystem

ZHANG Jun-ping¹, ZHANG Xin-ming², ZENG Chun-jun³, HU Yue-ming¹

(1. College of Information, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Natural Resources & Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Central South Inventory and Planning Design Institute of State Forestry Administration, Changsha 410014, China)

Abstract: This paper dealt with the basic principles about the effects of acid rain on hydro-ecosystems, forest ecosystems and soil ecosystems, and a series of acidification indices of the above mentioned ecosystems was discussed. Based on the above, the tested orchard soil acidification indices system were presented, and some control measures for influence of acid rain on ecosystem acidification were deduced in the end.

Keywords: acid rain; acidification; ecosystem; water body; forest; soil

我国酸雨影响日趋严重, 在部分南方省市出现年平均 pH < 4.0 的地区, 不仅酸雨面积逐渐扩大, 酸雨出现频率也逐年上升^[1], 酸雨已成为我国严重的环境污染现象。酸雨沉降在不同生态系统及其系统组分中以不同的方式响应, 生态系统的酸敏感性表现出系统功能属性和结构性状的改变^[2]。本文就酸雨对水生生态系统、森林生态系统和土壤生态系统的酸化影响和酸化衡量的指标或方法进行了综述, 并提出若干控制酸雨对生态系统酸化影响的对策。

1 酸雨对生态系统酸化的影响研究

酸雨长期沉降会引起环境酸化, 对生态系统产生

有害影响。不同生态系统对酸输入的耐受能力和缓冲能力有很大的差别, 具有不同的临界负荷。周修萍^[2]选择岩石类型、土壤类型、植被与土地利用、水分盈余量等因子评价了我国亚热带生态系统的酸敏感性, 提出了敏感性等级划分的指标体系, 同时, 研究区域内生态系统的酸雨敏感性表现出很大的差别; 陶福祿和冯宗炜^[3]采用相同的评价因子对我国南方生态系统的酸雨临界负荷进行了研究, 研究结果显示, 我国南方生态系统硫沉降临界负荷在地域分布上由东南向西北逐渐增大, 其中临界负荷较小的极敏感地区分布在浙江南部、广东与福建交界地区、贵州西南部和广西中部。

1.1 酸雨对水生生态系统酸化的影响研究

最早被发现受酸雨影响的是水生生态系统, 一定强度的酸雨可引起水体的酸化, 致使水生生态系统的结构与功能发生紊乱。20 世纪 50 年代, 西欧、北美部分地区由于受酸雨影响, 鱼类和其他生物种类大幅度减少^[4-5], 这主要是由于酸雨导致了水生生态系统的

收稿日期: 2009-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671145); 国家科技支撑项目(2008BAB38B01); 深圳市农业综合开发基金项目(2003-96)联合资助

作者简介: 张俊平(1976—), 男, 博士, 主要从事土地资源管理与 GIS 应用研究。E-mail: zjp01210@163.com

通讯作者: 胡月明

破坏,进而威胁到水生生物的生存。长期的酸雨沉降可以致使降雨区水体 pH 值的降低以及土壤和水体底泥中的金属(主要是铝)溶解进入水体中而毒害鱼类,其中活性铝含量的增加是生物受水体酸化危害的最主要的原因^[6-7],一般认为水体 pH < 6.5,水体酸化对生物影响就已经开始显示出来^[8],当水体的 pH 值降到 5.0 以下时,鱼的繁殖和发育会受到严重影响,还会导致水生物的组织结构发生变化^[9]。Haines T A^[10]认为,水体在酸中和容量(ANC)小于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地表水碱度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCO}_3$ 以下时对酸雨特别敏感。目前,评价水体酸化敏感性的方法主要有 4 种:可滴定碱度(ANC)法、钙饱和指数(CSI)法、抗酸化容量(ΔA)法、水体酸化敏感指数(SI)法。郝吉明等^[11]认为,天然水体 pH 值一般在 6.5~8.5 之间,同时水体中 HCO_3^- 占碳酸溶解量的 60%~95%, HCO_3^- 是水体的主要缓冲因素,因此提出用 ΔA 法来评价天然水体酸化的敏感性比较适宜;廖柏寒等^[12-13]采用 SI 法研究我国西南地区水体酸化敏感性,认为 $\Delta \text{pH} = \Delta \text{pH}_{\text{目前}} - 6.50$,同时满足 $\text{ANC} = 0 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$ 的天然水可以看作是水体酸化的指标。

然而,水体的酸化不仅只与酸雨有关,在很大程度上取决于集水区基岩、土壤、土地利用方式、地表径流、底质和湖水水质等多种因素^[14],其中土壤的抗酸化能力是关键因素^[15]。近年来,随着国内工业的快速发展所产生的大量硫和氮的排放引起了严重的酸雨,在我国大部分地区,尤其是长江中上游地区地表水酸化的趋势日渐明显^[16-17]。但是,不同地区水体的酸化和水体对酸雨的敏感性或是缓冲性及其区划可能不同,Nragh 等系统地比较了加拿大湖泊对酸雨的缓冲性和相对敏感性,Hendy 等提出了美国东部地区淡水湖泊的敏感度^[18]。江静蓉等^[19]借鉴 Galloway 和 Kramer 提出的水体酸化敏感性指标,探讨了广东与广西二省的地表水对酸雨的敏感性,地表水的酸敏感性表现出与区域基岩、土壤类型分布的密切相关。叶雪梅等^[15]根据土壤、基岩和土地利用方式等信息评估了我国酸性地表水的地区分布和在酸雨影响下,地表水对进一步酸化的敏感性,结果表明我国大部分地表水对酸化并不敏感:极易酸化和较易酸化的地表水主要分布在东北的北部地区;对酸化敏感性为中级和低级(即不易酸化)的地表水主要分布在东北暗棕壤地区和南方富铝土区域;其余地区的地表水对酸化不敏感(即完全不可能发生酸化),其中南方重酸雨区由于土壤对酸化不很敏感,因此在短期内不会出现大

面积水体酸化。

目前,研究水体酸化模型应用最为广泛的是 MAGIC 模型,该模型适用于评估陆地和地表水体系对酸沉降的长期反应能力,在我国主要用于土壤和地表水酸化的酸沉降临界负荷的确定^[20];ILWAS 模型即全湖泊流域酸化研究模型,可预测森林覆盖地区生态系统中地表水酸度随酸沉降变化而变化,该模型主要应用于大尺度的地表水体的 pH 值和 Al^{3+} 的浓度的预测^[21];RAINS-Asia 模型特别适合于亚洲国家在不同的能源结构和排放控制对策条件下评价 SO_2 、硫沉降和生态系统的保护水平来估算 SO_2 浓度和酸雨 pH 值,汪家权等^[22]采用此模型较好地预测了安徽省酸雨控制区各市的 SO_2 浓度和酸雨 pH 值。

1.2 酸雨对森林生态系统酸化的影响研究

森林是陆地生态系统中最重要的重要组成部分,超过森林生态系统负荷能力的酸雨必然会危害森林健康。人们普遍认为,酸雨对树木影响大小、危害轻重主要取决于树木本身特征(如物种与品种、生物学特征、生长发育阶段等),也取决于酸雨的特点,如酸雨的化学组成、酸度、频次、作用时间及雨量等因子,以及酸雨与其他污染物的复合作用。然而,Binkley D 等经过近 25 年的实地研究表明:土壤 pH、土壤缓冲能力、土壤阳离子交换量、土壤盐基饱和度、土壤碳酸盐矿物以及人为对土壤的利用和管理水平等因素决定了酸雨对森林生态系统的影响程度^[18]。笔者认为出现分歧的主要原因在于科研人员研究的方法或手段不同所致,显然采用室内模拟酸雨淋洗树木的方法与天然降雨对树木的影响是截然不同的,首先,树木对酸雨的短期和长期作用效果是不同的,大多数树木对酸雨胁迫都具有不同程度的拮抗性,在一定的酸雨强度环境中仍能健康生长,甚至生长得更好;其次,人工模拟酸雨淋洗与天然降雨的雨水化学组分与酸雨强度是完全不同的,天然降雨不可能每次具有相同的化学物质组分,以及相同的降雨酸度、频率和降雨时间间隔等;重要的是在自然条件下,树木的生长环境是开放的系统,森林土壤、植被、大气环境、森林小气候、地形地貌、人类活动等因素制约了酸雨对森林生态系统的影响程度,有研究报道,酸雨对植物影响最敏感的部位是根部,其次是叶面^[11]。

欧洲和北美在 1970—1990 年间出现了大面积森林衰退现象,酸雨被认为是造成森林退化的最主要、最直接的原因^[23],但 Rehfuess 等^[24]认为酸雨在森林生态系统的退化和破坏过程中所起的作用仍不清楚,

因为森林生态系统对酸雨的反应主要取决于土壤而不是植物本身的作用,同时森林土壤本身通常是酸性反应,酸雨效应很难估量,并且大多数树木在 pH 3 ~ 9 的溶液中生长良好。因此,确定森林土壤对酸雨的临界负荷显得十分必要,早期人们使用土壤溶液的钙铝摩尔比,近期使用 R 值 $((Ca + Mg + K)/Al)$ 表示,但应用最为广泛地是盐基离子同铝的摩尔比(简称 BC/Al 比率),欧洲进行临界负荷区划时采用了 BC/Al 比率,并将其临界值设置为 1,然而目前对此颇具争议,尚无定论。同时,酸雨对森林树木的伤害分为直接和间接两个方面的作用,不同的树种、不同的个体大小对酸雨反应差别很大,邱栋梁和刘星辉^[25]的研究表明,长期的酸雨沉降对果树(荔枝、龙眼)危害的直接原因是酸雨破坏了果树的微结构,降低叶绿素含量和光合效率,间接原因是酸雨引起了土壤理化性质的变化^[11];大量资料表明,pH > 4.5 的酸雨对树木生长不会产生明显的影响,反而可能会对树木生长产生促进作用^[11,16],只有在酸雨 pH 值 < 3.7 时,森林生态系统才遭受其破坏^[18,26],而对树木的直接危害仅在降水酸度很高(pH ≤ 3.0)时才会出现^[18]。我国西南地区酸雨对森林的危害十分严重^[15,26-27],此外在柳州市郊、广州市郊、杭州市郊等地也出现了酸雨对森林的严重危害。

目前,国内外把筛选抗逆性树种作为防治酸雨的一种重要生物措施,并取得了很大进展。冯宗炜^[26]就西南地区 77 种乔灌木对酸雨敏感性进行了研究,认为其中对酸雨极敏感的有 12 种、敏感性和中等敏感的有 41 种、抗性较强和抗性强的有 24 种,同时筛选出适应当地环境种植的乔灌木树种;单运峰^[27]根据模拟酸雨污染和酸雨区实地调查结果,应用相对比较排序法综合评价了西南酸雨区 150 种树木对酸雨的相对敏感性,并在此基础上筛选出适于当地可供城镇绿化和用材林、经济林建设的抗性强的植物。因此,人们可以应用植物对酸雨的敏感性或拮抗性,利用敏感植物监测或指示酸雨的危害,也可以作为酸雨综合防治对策的依据之一。

1.3 酸雨对土壤生态系统酸化的影响研究

土壤是生态系统中酸雨的最大接受者及相对稳定的一个组成部分。酸雨对水生生态系统和陆地生态系统的影响主要是通过土壤的理化性质的变化体现出来:土壤矿物风化加速、养分元素淋失和毒性元素活化(主要是 Al)、盐基离子的迁移和释放、土壤酸化、土壤微生物种群变化以及酶的活性受到影

响^[11,28-29]。其中土壤矿物风化在一定酸度强度的降水下变化不明显,只有当酸度足够时,土壤矿物风化速率表现明显增大,对于不同土壤类型的矿物风化速率主要取决于土壤发育程度和易风化矿物的质量分数^[11,30]。

目前,国内外学者普遍采用人工模拟酸雨淋洗土壤的方法分析土壤理化性质的变化,评价酸雨对土壤酸化的影响程度,以及土壤的酸敏感性。土壤酸化是指土壤交换性酸的增加或交换性盐基的减少,通过模拟酸雨淋洗的试验结果表明,我国南方酸性土壤酸化影响表现出与原土壤 pH 值密切相关的特点,土壤 pH 值愈高,土壤酸化受酸雨的影响愈小,同时酸雨的 pH 值愈低,酸雨对土壤酸化的影响愈大^[31]。张新明等^[32]、张俊平等^[33-35]采用室内模拟酸雨淋洗的方法,较为系统地研究了深圳市酸雨形成机制以及当地赤红壤发育的果园土壤酸、氮、盐基离子对土壤酸化的影响,并以土壤酸、氮、盐基离子为土壤酸化指标对土壤酸化进行了评价。笔者尝试着建立了果园(荔枝)土壤酸化的评价指标体系,并将该指标体系分为三类:第一类是土壤交换性酸强度指标(pH(KCl))、交换性酸度(EA)、交换性铝(EAl)、可滴定酸度(BNC)、实际酸化速率、阳离子交换量(CEC)或电导率(EC)等指标;第二类是土壤交换性 Ca^{2+} 、盐基总量(BS)或盐基饱和度(BSP)等指标;第三类是土壤活性酸强度指标(pH(H_2O))。同时,笔者采用这一指标体系评价了供试土壤的酸化情况,并指出土壤酸化指标体系在实际应用中,应根据研究的具体需要选择适当的酸化指标,否则得出的结论不够严谨,最好的方法是综合考虑多酸化指标对土壤酸化的影响。

然而,较理想的土壤酸化研究应该有足够长的时间让酸雨的影响充分表现出来。事实上,酸雨对土壤酸化的贡献率远小于自然过程以及人为土地利用过程的影响^[36],在农业利用条件下,土壤的酸化主要由经营活动决定^[37]。Blinkley 等通过对酸雨区火炬松林立地土壤 5 ~ 25 年间土壤 pH、阳离子交换量、可滴定碱度和可滴定酸度(BNC)变化的跟踪研究,结果显示土壤 pH 下降了 0.3 ~ 0.8 个单位,可滴定碱度变化很小,而可滴定酸度显著增加,交换性盐基离子减少了 20% ~ 80%^[18]。目前,土壤酸度指标普遍采用 pH 值,土壤 pH 值反映的是活性酸的酸度,而潜在性酸通常用交换性酸度或是水解性酸度表示,在 pH < 4.8 的酸性土壤中,交换性氢一般只占总酸度的 3% ~ 5%,而交换性铝占总酸度的 95% 以上^[38]。土壤铝形态受

土壤的酸度影响明显,在弱酸性土壤中,土壤中铝以羟基铝离子形态存在,而当酸性土壤 $\text{pH} < 4.0 \sim 4.2$ 时,其铝以游离态形式溶出,对水生生态系统和陆地生态系统产生严重毒害,因而酸雨区土壤铝的研究显得十分重要。邵宗臣、王维君等^[39-42]对南方酸性土壤中铝的形态以及模拟酸雨淋溶对土壤铝形态的转化进行了深入的研究,他们采用改进的连续分级提取方法对可提取的非晶态铝连续提取,表现出非晶态铝硅酸盐(NcAl) > 层间铝(LnAl) > 氧化铁结合态铝(DCBAI) > 有机配合态铝(OrAl) > 吸附态无机羟基铝(HyAl) > 交换态铝(ExAl)的趋势,在酸雨淋洗下土壤中交换态铝(ExAl)增加,吸附态无机羟基铝(HyAl)有所降低,而其他几种铝形态的变化并不明显,同时土壤中铝的溶出量随酸雨溶液 pH 和土壤 pH 的降低而增加。

不同的土壤类型对酸雨具有不同的缓冲能力,Ulrich^[23]将土壤的缓冲作用分为碳酸盐($\text{pH} 6.2 \sim 8.2$)、硅酸盐($\text{pH} > 5$)、阳离子交换($\text{pH} 4.2 \sim 5$)、铝($\text{pH} < 4.2$)、铁($\text{pH} < 3.5$)等5个缓冲区域,但土壤的缓冲能力是有一定限度的。因此如何评价土壤对酸雨的敏感性就显得十分必要,Mcfee等采用阳离子交换量、盐基饱和度、土壤管理、碳酸盐存在状况等四种参数,建立了美国森林土壤对酸雨敏感性分区评价体系^[11]。国内科研工作者在这方面也做了大量的工作,郝吉明等^[11]根据阳离子交换量(CEC),将敏感性分为四级,概略绘制了全国土壤对酸雨敏感性区域分布图,区划的结果表明,我国对酸沉降最敏感的地区主要分布在东北的大兴安岭地区、云南的南部和华南沿海地区,其次是东北地区、长江以南和青藏高原西部的广大地区,而我国的绝大多数地区,包括西北和华北地区,对酸沉降较不敏感;周修萍等^[43-44]应用Mcfee的方法,先后评价了南方部分省(区)和西南地区土壤对酸雨的敏感性;王敬华等^[45]基于酸缓冲曲线提出了土壤酸害容量和酸敏感值(ΔpH 敏感值)二个具体指标,并对指标分别进行了初步分级,同时对广东、广西、海南三省的土壤进行了酸敏感性分区。有研究表明,将可滴定碱度(ANC)和可滴定酸度(BNC)的概念应用于土壤酸化的预测,所得结果只能代表理论上的结果;将石灰位($\text{pH} - 0.5\text{pCa}$)、铝离子的变化用作土壤酸化的指标,比用 pH 值单一指标更能反映土壤的酸化状况,但 pH 值能够直接反应出土壤酸度的强弱。

2 酸雨对生态系统酸化影响的控制对策

(1)控制 SO_x 、 NO_x 等酸性物质的排放是防止酸雨发展的根本对策,也是减小酸雨对生态系统影响的最好选择。主要措施有:加强环境法制管理,严格实行大气污染物排放量控制;加强对汽车尾气的控制;使用清洁能源,减少污染;开发和应用各种脱硫脱氮新技术和设备,优化能源质量,提高能源利用率等。

(2)加强地区间的合作,减少酸性物质跨地区污染。酸雨污染已经是国际性、区域间的共同关心的环境问题,需要各国各地区的通力合作,切实制定并严格执行国际、区域间的环境保护法,改善人类生存环境。

(3)对已经酸化的生态系统可以添加一定的改良剂,如氢氧化钠、碳酸钠、消石灰、石灰石、磷矿粉、沸石等化学药品中和部分的酸,以达到改良生态系统的目的。同时,也可以采用生物恢复技术和物理恢复的方法恢复生态系统。

(4)加速生态环境建设和恢复生物群落,尽量筛选出适宜本地的耐酸性的动植物,提高生态系统缓冲酸度的能力。

(5)合理利用土地,切实保护农地,防治土地(壤)的退化,减少土壤酸性物质进入大气或水生生态系统。主要措施有:通过调控土壤水分与能量的合理循环,减少土壤的侵蚀、沙化、盐化、酸化以及土壤的板结等;科学耕作土壤,增施有机肥,进行作物—绿肥轮作,重视用养结合;限制施用农药的种类和数量,保证土壤中有较大的土壤生物群体^[46]。

(6)重视学科间的交叉研究,引进3S技术动态监控和管理我国酸雨分布、发展以及酸雨对生态系统的危害,较为便捷地实现对酸雨在生态系统中的临界负荷区划。同时,因地制宜地开发适合我国的酸化模型,为生态系统酸化的预测和预报提供切实的帮助。

3 结束语

随着酸雨危害的日趋严重,人们在酸雨对生态系统酸化的影响研究方面取得了较大的进展和一些重要的研究成果,但还有许多问题仍需要进一步的深入研究。例如:酸雨临界值的确定、酸雨在生态系统中的临界负荷、生态系统中酸化指标体系的建立、大气中酸性物质的传输机理、酸雨对生态系统的影响(主要是基于不同的研究对象,酸雨的影响程度不同)、酸雨研究与3S技术的集成,以及酸化模型的开发

等等。

参考文献:

- [1] 丁国安, 徐晓斌, 房秀梅, 等. 中国酸雨现状及发展趋势[J]. 科学通报, 1997, 42(2): 169-173.
- [2] 周修萍. 我国东部七省生态系统对酸沉降的相对敏感性[J]. 农村生态环境, 1996, 12(1): 1-5.
- [3] 陶福禄, 冯宗炜. 中国南方生态系统的酸沉降临界负荷[J]. 中国环境科学, 1999, 19(1): 14-17.
- [4] 孙崇基. 酸雨[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 2-16.
- [5] Sandoy S, Langaker R M. Atlantic salmon and acidification in southern Norway a disaster in the 20th Century but a hope for the future[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, 130: 343.
- [6] 吴丹, 王式功, 尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 70-77.
- [7] Myllynen K. River water with high ion concentration and low pH causes mortality of lampreyroe and newly hatched larvae[J]. *Ecotox Environ Saf*, 1997(36): 43-48.
- [8] 彭金良, 严国安, 沈国兴, 等. 酸雨对水生生态系统的影响[J]. 水生生物学报, 2001, 25(3): 282-288.
- [9] Ikuta K, Suzuki Y, Kitamura S. Effects of low pH on the reproductive behavior of salmonid fishes[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2003, 28: 407-410.
- [10] Haines T A. Acidic precipitation and its consequence for aquatic ecosystems: A review[J]. *Trans Amer Fish Belgiaue Soc*, 1987, 110: 669-707.
- [11] 郝吉明, 谢绍东, 段雷, 等. 酸沉降临界负荷及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 1-26, 82-145.
- [12] 廖柏寒, 李长生. 土壤对酸沉降的缓冲机制探讨[J]. 环境科学, 1989, 10(1): 30-34.
- [13] 廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[J]. 环境科学学报, 1991, 11(4): 425-430.
- [14] 王德铭, 夏宜净, 刘保元, 等. 水质酸化对水生生物影响的研究[J]. 环境科学学报, 1992, 12(1): 91-96.
- [15] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 中国地表水酸化敏感性的区划[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 16-21.
- [16] 冯宗炜, 汤洪霄, 李辛夫, 等. 酸雨对土壤生态系统的影响[M]. 北京: 中国科技出版社, 1993: 53-60.
- [17] 陈静生, 关文荣, 夏星辉, 等. 长江中下游水质变化趋势与环境酸化关系初探[J]. 环境科学学报, 1998, 18(3): 265-270.
- [18] Binkley D, Driscoll C T, Allen P, 等. 酸性沉降与森林土壤—美国东南部的酸沉降及研究实例[M]. 张月娥, 曹俊忠, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 14-45.
- [19] 江静蓉, 周修萍, 秦文娟. 两广地区水域对酸雨的敏感性及其分区图[J]. 环境科学学报, 1992, 12(1): 119-123.
- [20] 谢绍东, 郝吉明, 周中平. 柳州地区各种红壤土种的酸沉降临界负荷研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6): 657-661.
- [21] 陈利秋. 世界环境科技发展及实力分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 1-25.
- [22] 汪家权, 吴劲兵, 李如忠, 等. 酸雨研究进展与问题探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 526-530.
- [23] Ulrich B. International conference on silver fir dieback. Kelheim. West Germany, 1980. 228-236.
- [24] Rehfuess K E. Acidic deposition: Extent and impact on forest soils, nutrition, growth and disease phenomena in central Europe[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1989, 48: 1-20.
- [25] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 α 荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2000, 27(3): 177-181.
- [26] 冯宗炜. 酸雨对生态系统的影响—西南地区酸雨研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 45-80.
- [27] 单运峰. 酸雨、大气污染与植物[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 52-159.
- [28] 许信玲, 肖祥希, 谢一青, 等. 果园土壤酸化及铝毒矫治的研究[J]. 土壤, 2005, 37(5): 541-544.
- [29] 凌大炯, 章家恩, 黄倩春, 等. 模拟酸雨对砖红壤盐基离子迁移和释放的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 444-450.
- [30] 仇荣亮, 杨平. 南方土壤酸沉降敏感性研究 V. 模拟酸雨条件下土壤矿物风化特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(4): 89-93.
- [31] 俞元春, 丁爱芳, 胡筋, 等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响[J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(2): 39-42.
- [32] 张新明, 张俊平, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 18-21.
- [33] 张俊平, 胡月明, 王长委, 等. 深圳市酸雨时空分布特征及其成因分析[J]. 水土保持学报, 2007a, 20(2): 166-169.
- [34] 张俊平, 张新明, 王长委, 等. 模拟酸雨对果园土壤交换性阳离子迁移及其对土壤酸化的影响[J]. 水土保持学报, 2007b, 21(1): 14-17.
- [35] 张俊平, 张新明, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝果园土壤主要形态酸变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 15-19.
- [36] Devries W, Breeuwsma A. The relation between soil acidification and elements cycling[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1987, 35: 293-310.
- [37] Mcfee W W. Sensitivity ratings of soil to acid deposition[J]. *Environmental Experimental Botany*, 1983, 25(3): 203-210.
- [38] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 171-179.
- [39] 王维君, 陈家坊. 土壤铝形态及其溶液化学的研究[J]. 土壤学进展, 1992, 20(3): 10-18.
- [40] 王维君. 我国南方一些酸性土壤铝存在形态的初步研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(1): 1-8.
- [41] 邵宗臣, 何群, 王维君. 模拟酸雨对红壤铝形态的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 187-193.
- [42] 邵宗臣, 何群, 王维君. 红壤中铝形态[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 38-48.
- [43] 周修萍, 江静蓉, 秦文娟. 我国南方四省土壤对酸雨的敏感性探讨[J]. 大气环境, 1987(3): 42-48.
- [44] 周修萍, 秦文娟. 华南三省(区)土壤对酸雨的敏感性及其分布图[J]. 环境科学学报, 1992, 12(1): 78-83.
- [45] 王敬华, 张效年, 于天仁. 华南红壤对酸雨敏感性的研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(4): 348-355.
- [46] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 104-111.