

杨胜天, 李巍, 吕涛, 等. 2010. 酸雨对森林植被的影响及在贵州龙里的初步研究——代“酸雨胁迫影响森林植被及其生态效益的评估”专栏序言 [J]. 环境科学学报, 30(1): 1- 6

Yang S T, Li W, L T, *et al*. 2010. Pilot study of the impact of acid rain on forests in Longli, Guizhou Province— Preface to assessments of the ecological benefit of forests under acid rain stress [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(1): 1- 6

## 酸雨对森林植被的影响及在贵州龙里的初步研究 ——代“酸雨胁迫影响森林植被及其生态效益的评估”专栏序言

杨胜天<sup>1,\*</sup>, 李巍<sup>2</sup>, 吕涛<sup>3</sup>, 杜迪<sup>3</sup>, 刘瑞禄<sup>3</sup>

1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875

2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875

3. 贵州省水利厅, 贵阳 550002

收稿日期: 2009-06-05

修回日期: 2009-09-30

录用日期: 2009-12-04

**摘要:** 酸雨胁迫条件下森林生态效益评估是亟待解决的环境问题之一. 酸雨对森林生态系统的危害可分为直接危害和间接危害. 在贵州省龙里建立生态水文实验站, 自 2005 年起开展酸雨监测, 对森林植被冠层遭受酸雨直接伤害及其对酸雨的缓冲作用进行模拟实验和分析, 结果表明研究区酸雨的直接危害有限; 为此, 依据生态水文过程理论, 利用遥感和地理信息系统技术, 建立了土壤酸化、土壤酸化-植被生产力和森林生态效益评价 3 个空间信息模型; 模拟计算了研究区酸沉降对土壤化学性质、植被生产力和森林固碳、保肥方面的生态效益的影响, 构建了酸雨对森林植被的间接危害评价方法体系.

**关键词:** 酸雨; 生态水文; 直接危害; 间接危害; EcoHAT

文章编号: 0253-2468(2010) 01-01-06

中图分类号: X517

文献标识码: A

## Pilot study of the impact of acid rain on forests in Longli, Guizhou Province— Preface to assessments of the ecological benefit of forests under acid rain stress

YANG Shengtian<sup>1,\*</sup>, LIW ei<sup>2</sup>, LÜ Tao<sup>3</sup>, DU Di<sup>3</sup>, LIU Ruilu<sup>3</sup>

1. School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875

2. College of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

3. Water Resources Department of Guizhou Province, Guiyang 550002

Received 5 June 2009;

received in revised form 30 September 2009

accepted 4 December 2009

**Abstract** Ecological benefit assessment of forests under the stress of acid rain is an unresolved environmental problem. The damage of acid rain to forest ecosystems has been classified into direct damage and indirect damage. An eco-hydrological research station was established in Longli in Guizhou Province and acid rain has been monitored there since 2005. A set of simulation experiments were conducted to analyze the direct damage to the forest vegetation canopy by acid rain and the buffering of canopy to acid rain. Results show that the direct damage of acid rain is limited in the study area. Therefore, an assessment system was constructed to estimate the indirect damage of acid rain to the forest community, based on the theory of ecological and hydrological processes. In the system, three spatial information modules were formed using remote sensing and GIS technology: Soil Acidification Module, Soil Acidification Plant Productivity Module and Forest Ecological Evaluation Module. The impacts of acid deposition on soil chemistry, vegetation productivity and forest ecological values were simulated for the study area.

**Keywords** acid rain; ecohydrology; direct damage; indirect damage; ECOHAT model

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No. 2005CB422207); 国家自然科学基金项目 (No. 40671123)

Supported by the National Basic Research Program of China (973) (No. 2005CB422207) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40671123)

作者简介: 杨胜天 (1965—), 男, 教授 (博士), E-mail yangshengtian@bnu.edu.cn \* 通讯作者 (责任作者)

**Biography** YANG Shengtian (1965—), male professor (Ph.D.), E-mail yangshengtian@bnu.edu.cn \* **Corresponding author**

## 1 引言 (Introduction)

工业发展造成的大气污染日益严重,酸沉降问题也随之出现,并对全球生态系统产生了重大影响,已成为影响全球环境的严重问题之一(陈静, 1999);我国已成为继欧洲和北美之后的第三大酸雨污染区.综合国内外研究状况,对酸沉降的研究主要集中在气溶胶及酸雾化学(Wu et al., 2006; 刘红杰等, 1996; 吴兑等, 2008),酸沉降成因及其对土壤、地表水、地下水、森林、农作物、水生动物、陆生动物、材料、构筑物等的影响(De Vries et al., 1994; Sverdrup et al., 1992, 1994; 李金惠等, 1998, 1999),以及自然生态系统缓冲能力、敏感性分区和临界负荷研究(郝吉明等, 1993; 1998, 1999, 2001; 何隆华等, 1998; 欧阳志云等, 2000; 杨秀虹等, 1999; 周修萍等, 1992).酸雨对森林生态系统的危害分为“自上而下”的直接危害和“自下而上”的间接危害(W·波斯哈特等, 1985).直接危害是指酸雨降落到植被冠层表面造成的危害,包括对叶片角质层的腐蚀、叶片细胞的酸化以及通过对冠层叶片的冲刷、淋洗和置换作用造成营养元素淋洗流失,影响叶片光合作用,甚至破坏叶片结构造成可见伤害,对森林植被生产力和寿命造成危害;间接危害是指酸沉降增加土壤酸度,造成盐基阳离子淋溶和有毒金属的活化,进而影响土壤肥力和植被生产力,并使植被根系减少,抵抗干旱等气象灾害能力下降,容易遭受病虫害等(廖利平等, 1992; 张治军等, 2008),导致森林退化.

针对酸雨的直接危害,国内外对农作物及森林植被等主要从以下几个方面开展了大量的监测和模拟研究.①营养元素淋洗 酸雨穿过植被冠层时,  $H^+$  被树冠吸收,树叶中  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$  被部分淋洗(Draaijers et al., 1994);②细胞功能 酸雨导致植物叶片膜透性的增加(丁一汇等, 1995);酸雨胁迫下, SOD、POD、CAT活性随酸雨 pH 值的降低先升后降呈单峰曲线型变化(严重玲等, 1999);酸雨对植物光合作用、呼吸代谢、气体交换、矿质营养代谢等的影响随酸雨 pH 值、植物种类及其发育阶段等因素的变化而变化(谢田等, 1994; 张耀民等, 1996; 丘栋梁等, 2002; 李志国等, 2007; 李万超等, 2008)等; Smith等发现模拟酸雨使杉木叶绿素含量显著增加但光合速率无变化(Smith, 1981); Reich等(1987)报道美国五叶松(*Pinus strobes L.*)单位叶干

重净光合速率和单株净光合速率均随模拟酸雨 pH 值下降而显著升高;而 Shan(1998)则报道赤松(*Pinus Densflora*)在 pH 值 2.3 的酸雨胁迫下单位叶绿素净光合速率出现显著降低,但叶绿素含量却出现显著增加;③伤害阈值 J. S. Evans等研究指出,植物叶片出现可见伤害时的最高 pH 值为 3.4 并认为最先受影响的部位是叶面和叶表皮细胞,随着受酸雨胁迫时间的延长,稍里的细胞层也可能受害(齐泽民等, 2004);冯宗炜等对 30 种树木进行综合比较表明,在 pH = 3.5 的酸雨胁迫下,木荷、水杉、桢楠、刺桐等叶片出现伤害症状,在 pH 值为 3.5 ~ 3.0 酸雨胁迫下,香椿、柳杉、喜树、苦楝、毛竹、杉木、香樟、马尾松、油桐等出现伤害症状,而火力楠、苦槠、柑橘、桂花、油茶等在 pH 值 2.5 时才出现伤害症状,并认为常绿阔叶树种比落叶阔叶和针叶树种对酸雨的抗性相对较强些(冯宗炜等, 1988, 1993).综合国内外研究成果,已发现酸雨对农作物及森林植被能量和物质代谢等生命活动的胁迫作用,并对造成可见伤害的 pH 值阈值进行了探索.但是,酸雨对森林的直接危害只有在降水酸度很高时才会出现(毛友发等, 1999),并且对于出现可见直接伤害之前的伤害缺乏定义和标量,对于不同研究区的典型植被也有进一步研究的必要.同时,气溶胶、森林冠层和土壤改变着酸雨的化学成分和酸度,体现出对酸雨的缓冲作用.徐康富和郝吉明等(1992)提出了近地层气流对降水酸度的中和作用,蒋益民等(2004)在湖南韶山,樊后保等(1996)在福建南平,就森林对酸雨的降水化学改变和缓冲问题做了大量有意义的工作.

综合国内外研究成果,酸雨现状对森林植被的直接伤害作用有限,只有在高酸性酸雨胁迫下才能凸显.但是生态系统经由土壤接受和缓冲酸沉降,进而影响植被生长,则是一个长期的过程,同时发现森林生态系统对酸雨的反应主要取决于土壤的酸化而不是植物本身(毛友发等, 1999).降水作为水循环过程的基本环节,深刻影响着土壤水含量、地表径流形成和地下水补给,因此,有必要从水循环角度研究酸雨危害.酸雨对森林生态系统造成的危害,既体现在影响植物生产力,也体现在影响固碳、保肥、涵养水源、水土保持等生态效益,因此,也有必要从生态学角度进行研究.国内外已开展了酸化模型和生态过程研究,建立起如 MAGIC、BEM、ILWAS、RANS(李金惠等, 1998; 夏星辉等, 1999; 李

金惠等, 1999; Cosby *et al.*, 2001; Wright *et al.*, 2006) 等许多成功的酸化模型, 以及 FORCYCLE, TREGRO, FORM-S 等 (Paul *et al.*, 1997; Zhu *et al.*, 2003) 针对森林的生态系统模型. 生态水文过程是水文过程和生物动力过程之间的功能关系, 包括生态水文物理过程、生态水文化学过程及生态效应 (黄弈龙等, 2003). 应用土壤-植被-大气系统理论, 综合考虑水文循环物理过程、物质循环地球化学过程和生态效应, 并利用遥感和地理信息系统技术, 采用新的技术手段和理论视角研究酸雨胁迫下的生态水文过程, 对于认识酸雨危害及建立空间信息模型具有积极的理论探索和应用价值.

观测资料表明, 我国西南地区依然遭受严重酸

雨危害, 其中贵阳酸雨频率超过 50% (唐信英等, 2009), 硫酸根的贡献十分突出 (张晓山等, 1990; 黄美元等, 1995). 为此, 在贵阳市龙里县选择研究区 (图 1), 建立生态水文实验站开展研究. 研究区地处贵州省中部, 位于北纬  $26^{\circ}27'$ , 东经  $107^{\circ}01'$ , 以羊鸡冲小流域为单元, 总面积  $12 \text{ km}^2$ , 地貌类型为中低山丘陵地貌, 土壤主要为黄壤, 同时集中了草地、灌丛、马尾松林和针阔混交林等植物群落. 年均降水量  $1158.5 \text{ mm}$ , 最少年为  $859.3 \text{ mm}$ ; 4~9 月是暴雨和洪水易发期, 平均降水量达  $810 \text{ mm}$ , 占年降水量的 70%; 年均气温  $14.7^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温  $35^{\circ}\text{C}$ , 极端最低气温  $-3^{\circ}\text{C}$ , 积温在  $4274 \sim 4574.6^{\circ}\text{C}$  之间.

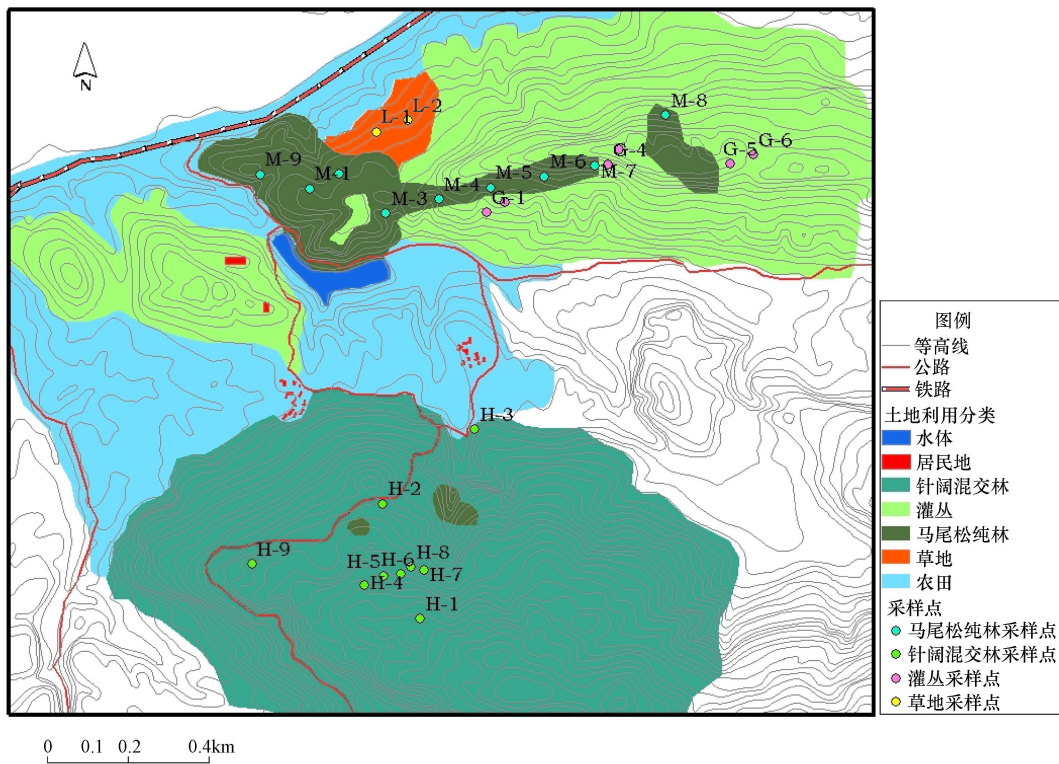


图 1 研究区示意图

Fig 1 The study area

在研究区设置气象站, 获取气象数据, 并对降水进行了连续监测, 采集降雨样品, 掌握研究区酸雨现状. 开展实地生态调查, 采集代表植物样品, 分析生物量及其分配参数, 以及营养元素含量; 并采集了土壤样品, 化验获取土壤主要物理及化学参数, 以确定研究区主要植被覆盖和土壤情况. 开展了酸雨模拟实验, 测定遭受酸雨胁迫叶片的净光合作用速率; 采集了典型覆盖植被冠层穿透雨和树干

茎流样品, 测量营养物质和 pH 值变化, 研究酸雨对森林植被的直接伤害作用及森林植被冠层对酸雨的缓冲作用. 基于野外观测和实验数据, 将遥感数据驱动的土壤水平衡模型、植被生产力光能利用率模型与基于过程的土壤酸化模型、营养元素循环模型相耦合, 建立了土壤酸化和森林土壤酸化-植被生产力空间信息模型, 解决了土壤化学性质从点尺度到空间尺度的扩展, 定量表达了土壤和土壤水离子

浓度、植被生产力、营养元素循环空间分异。将模型模块化,耦合于自主开发的 EcHAT 系统 (LU *et al.*, 2009),并以贵州龙里研究区为研究对象,运用模型对土壤化学性质、植被生产力和营养元素生物循环等关键过程的时空演变模式进行了模拟和研究。运用情景设定的方式,定量模拟了研究区酸雨强度变化导致的土壤中植被可吸收盐基离子的变化,以及对森林植被 NPP 的影响。其中,“贵州典型森林群落植物冠层叶片遭受酸雨直接伤害的模拟实验与效应分析”一文对酸雨造成的直接伤害进行了分类,通过模拟实验分析了贵州典型森林植被冠层叶片净光合作用速率遭受酸雨胁迫影响的情况,根据实验站监测到的酸雨数据评估了酸雨现状对研究区典型森林植被冠层的直接伤害作用。“贵州典型森林群落植被冠层的酸雨淋溶特征及缓冲作用”一文通过模拟实验和监测数据分析,研究了贵州研究区典型森林植被冠层的酸雨淋溶特征以及对不同酸度降雨的缓冲作用。“土壤酸化空间信息模型构建及其在贵州龙里试验区的应用”一文具体介绍了土壤酸化模型的结构和模拟结果。“土壤酸化-植被生产力空间信息模型的构建及贵州典型森林对酸沉降的生态效应响应”一文介绍了土壤酸化-植被生产力空间信息模型的构建及酸沉降生态效应研究。“酸沉降对森林生长固碳和土壤盐基保持功能的影响”一文主要介绍森林的水土保持、涵养水源生态效益评价以及酸雨对其影响。

综上所述,通过模拟实验和观测数据,研究了酸雨对森林生态系统的直接伤害作用,结果表明研究区酸雨的直接伤害作用有限,为此,依据生态水文过程理论,利用遥感和地理信息系统技术,建立了土壤酸化、土壤酸化-植被生产力和森林生态效益评价 3 个空间信息模型,模拟计算了研究区酸沉降对土壤化学性质、植被生产力和生态效益的影响,构建了酸雨对森林植被间接危害评价方法体系。

对酸雨危害的科学研究,深化了对酸雨这一环境问题的认识,但酸雨对森林植被的危害,受到气候气象、酸雨组成、植被类型、土壤类型等多方面的影响。增加植物物种,进行多年连续观测,对于深化酸雨直接伤害的认识具有重要价值;上述 3 个空间模型对研究区进行了模拟,取得了良好的效果,有必要扩大研究区域,进一步率定模型参数,完善模型结构,实现模型在大尺度上的扩展。酸雨和旱涝、火灾等环境问题共同作用影响生态系统,结合其他

环境问题对酸雨进行研究将作为酸雨研究的重要拓展。

责任作者简介:杨胜天

(1965—),男,博士,教授,博士生导师。北京师范大学地理学与遥感科学学院院长,北京市环境遥感与数字城市重点实验室主任,中国地理学会环境遥感学分会常务理事,水土保持监测学会常务理事。主要研究方向为水资源与水环境遥感,在流域生态水文过程模拟,非点源污染负荷估算与生态防治,土壤侵蚀遥感监测以及生态效益评估模型等方面开展了大量研究工作,将生态水文模型与 RS/GIS 技术紧密集成,研发了生态水文评价系统 EcHAT (Ecohydrological Assessment Tool) 软件著作 2008SR06938, <http://Ecohat.bnu.edu.cn>),完善了生态水文过程的空间模拟,在黄河流域、东北三江平原、新疆伊犁河流域、贵州酸沉降地区、海南省以及北京密云水库、官厅水库等地区进行了实际应用,为流域水资源综合管理、国土资源整治和环境污染防治提供技术支撑。近年来主持国家“十一五”支撑计划项目“黄河生态保护目标及生态需水量研究”、公益性项目“基于遥感信息的泾渭下游土壤水分时空模拟研究”、“863”计划“饮用水安全评价与预警中的低空艇载高分辨遥感技术”、“973”项目“酸沉降对森林植被和农作物的影响及其评价”、国家自然科学基金项目“岸边缓冲带对非点源污染控制效应的遥感解析”、“喀斯特环境中土壤退化机理及恢复重建途径研究”、“喀斯特地区土壤退化过程中土壤水动力机制研究”等近 20 项,发表论文 80 余篇,专著 5 部,获国家及省部委以上科研奖励 4 项。



#### 参考文献 (References):

- Aheme J, Larssen T, Cosby B J, *et al.* 2006. Climate variability and forecasting surface water recovery from acidification: Modelling drought-induced sulphate release from wetlands [J]. *The Science of the Total Environment* 365(1-3): 186-199
- Cosby B J, Wright R F, Homberger G M, *et al.* 1985. Modelling the effects of acid deposition: A assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry [J]. *Water Resources Research*, 21(1): 51-63
- Cosby B J, Wright R F, Homberger G M, *et al.* 1985. Modelling the effects of acid deposition: Estimation of long-term water quality responses in a small forest catchment [J]. *Water Resources Research*, 21(11): 1591-1601
- Cosby B J, Ferrier R C, Jenkins A, *et al.* 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model [J]. *Hydrology and Earth System*

- Science, 5(3): 499—517
- 陈静. 1999. 大气酸沉降及其环境效应的研究进展 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 20(1): 79—85
- Chen J. 1999. Researching process on acid deposition and its environmental effects [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 20(1): 79—85 (in Chinese)
- 丁一汇, 高素华. 1995. 痕量气体对我国农业和生态系统影响研究 [M]. 北京: 中国科学出版社. 242—243
- Ding Y H, Gao S H. 1995. Effect of Trace Gases on Agriculture and Ecosystem of China [M]. Beijing: China Science Press. 242—243 (in Chinese)
- de Vries Reinds G J. 1994. Assessment of critical loads and their exceedance on European forest using a one-layer steady-state model [J]. Water, Air and Soil Pollution, 72: 357—394
- Draaijers G P, Rissan J E, Leeuwen J W. 1994. Canopy change processes at the Speulder forest [R]. Report No. 722108004. Netherlands National Institute of Public Health and Environmental Protection Bilthoven. 172—235
- 樊后保, 马壮, 梁一池. 1996. 福建南平杉木人工林截留降水化学性质的变化 [J]. 福建林学院学报, 16(2): 101—104
- Fan H B, Ma Z, Liang Y C. 1996. Chemical properties of open and intercepted precipitation in Chinese fir plantation in Nanping, China [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 16(2): 101—104 (in Chinese)
- 冯宗炜, 张家斌, 陈楚莹, 等. 1988. 模拟酸雨对树木叶片的伤害和树木抗性的研究 [J]. 环境科学, 9(5): 30—33
- Feng Z W, Zhang J B, Chen C Y, et al. 1988. Injuries to tree leaves by simulated acid rain: resistant nature of the trees [J]. Environmental Science, 9(5): 30—33 (in Chinese)
- 冯宗炜, 单运峰. 1993. 大气污染防治技术研究 [M]. 北京: 科学出版社. 821—826
- Feng Z W, Shan Y F. 1993. Air Pollution Prevention and Control Technologies [M]. Beijing: Science Press. 821—826 (in Chinese)
- Hao J M, Xie S D, Duan L, et al. 1998. Acid deposition and ecosystem sensitivity in China. In Bashkin V, Park S (eds). Acid Deposition and Ecosystem Sensitivity in East Asia [M]. New York: Nova Science Publishers. 267—311
- 郝吉明, 谢绍东, 段雷, 等. 2001. 酸沉降临界负荷及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社. 1
- Hao J M, Xie S D, Duan L, et al. 2001. Critical Loads of Acid Deposition and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 1 (in Chinese)
- 郝吉明, 谢绍东, 贺克斌. 1996. 生态系统对酸沉降相对敏感性评价原理与方法 [J]. 环境科学, 17(3): 77—80
- Hao J M, Xie S D, He K B. 1996. Principles and methods to assess the relative sensitivity of ecosystems to acidic deposition [J]. Environmental Science, 17(3): 77—80 (in Chinese)
- 郝吉明, 段雷, 谢绍东. 1999. 中国土壤对酸沉降的相对敏感性区划 [J]. 环境科学, 20(4): 1—5
- Hao J M, Duan L, Xie S D. 1999. Mapping the relative sensitivity of soils to acid deposition in China [J]. Environmental Science, 20(4): 1—5 (in Chinese)
- 何隆华, 杨宏伟, 周修萍. 1998. 地理信息系统与生态系统对酸沉降相对敏感性评价 [J]. 环境科学学报, 18(2): 177—180
- He L H, Yang H W, Zhou X P. 1998. Geographic information system and the estimation of ecosystem's relative sensitivity to acid deposition [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 18(2): 177—180 (in Chinese)
- 黄弈龙, 傅伯杰, 陈利顶. 2003. 生态水文过程研究进展 [J]. 生态学报, 23(3): 580—587
- Huang Y L, Fu B J, Chen L D. 2003. Advances in ecohydrological process research [J]. Acta Ecologica Sinica, 23(3): 580—587 (in Chinese)
- 蒋益民, 曾光明, 张龚, 等. 2004. 酸雨作用下的森林冠层盐基离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ) 淋洗 [J]. 热带亚热带植物学报, 12(5): 425—430
- Jiang Y M, Zeng G M, Zhang G, et al. 2004. Leaching of base cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ) from forest canopy during acid rain [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 12(5): 425—430 (in Chinese)
- 李金惠, 汤鸿霄. 1998. 酸化模型及其发展趋势评述 [J]. 环境科学进展, 6(4): 31—43
- Li J H, Tang H X. 1998. Acidification models and their development [J]. Advances in Environmental Science, 6(4): 31—43 (in Chinese)
- 李金惠, 汤鸿霄. 1999. 酸化模型在国内的发展与应用进展 [J]. 环境科学进展, 7(2): 1—6
- Li J H, Tang H X. 1999. Acidification models and their development [J]. Advances in Environmental Science, 7(2): 1—6 (in Chinese)
- 李万超, 江洪, 曾波, 等. 2008. 模拟酸雨对青冈和木荷幼苗光合响应特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 30(7): 98—103
- Li W C, Jiang H, Zeng B, et al. 2008. Effects of simulated acid rain on photosynthesis in schima superba and quercus glauca [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 30(7): 98—103 (in Chinese)
- 李志国, 翁忙玲, 姜武, 等. 2007. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响 [J]. 生态学杂志, 26(1): 31—34
- Li Z G, Weng M L, Jiang W, et al. 2007. Effects of simulated acid rain on some physiological indices of *paralmeria lotungensis* seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 26(1): 31—34 (in Chinese)
- 廖利平, 陈楚莹. 1992. 模拟酸雨—土壤酸化—杉木、木荷根系生长关系的研究 [J]. 生态学杂志, 11(1): 23—28
- Liao L P, Chen C Y. 1992. Relationships between simulated acid rain, soil acidification and root growth of Chinese fir and schima superba [J]. Chinese Journal of Ecology, 11(1): 23—28 (in Chinese)
- Liu C M, Yang S T, Wen Z Q, et al. 2009. Development of ecohydrological assessment tool and its application [J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 52(7): 1947—1957
- 刘红杰, 王玮, 高金和, 等. 1996. 闽南地区酸性雾水特征初探 [J]. 环境科学研究, 9(5): 30—32
- Liu H J, Wang W, Gao J H, et al. 1996. Preliminary study on the characteristics of acid fog in Minnan Area [J]. Research of Environmental Sciences, 9(5): 30—32 (in Chinese)
- 毛友发, 仇荣亮, 温志良. 1999. 陆地生态系统酸沉降缓冲能力影响因素 [J]. 土壤与环境, 8(2): 141—143

- Mao Y F, Qiu R L, Wen Z L. 1999 Factors influencing buffering ability of land-ecosystem [J]. *Soil and Environmental Science*, 8(2): 141—143 (in Chinese)
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 2000. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究 [J]. *生态学报*, 20(2): 9—12
- Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. 2000 China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity [J]. *Acta Ecologica Sinica* 20(2): 9—12 (in Chinese)
- Paul A A, Tónu O. 1997 A forest soil vegetation atmosphere model (FoSVA), I: Concepts [J]. *Ecological Modelling* 95: 211—224
- 齐泽民, 王玄德, 宋光煜. 2004 酸雨对植物影响的研究进展 [J]. *世界科技研究与发展*, 26(2): 36—41
- Qi Z M, Wang X D, Song G Y. 2004. The research progress of the effect of acid rain on plant [J]. *World Sci-Tech Research and Development* 26(2): 36—41 (in Chinese)
- 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 2002 模拟酸雨对龙眼叶片气体交换和叶绿素a荧光参数的影响 [J]. *植物生态学报*, 26(4): 441—446
- Qiu L D, Liu X H, Guo S Z. 2002 Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longyan [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 26(4): 441—446 (in Chinese)
- Reich P B, Schoettle A W. 1987 Effects of ozone and acid rain on white pine (*Pinus strobes*) seedlings grown in five soils. Net Photosynthesis and Growth [J]. *Can J Bot* 65: 977—987
- Shan Y. 1998. Effects of simulated acid rain on pinus densiflora inhibition of net photosynthesis by the pheophytization of chlorophyll [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 103: 121—127
- Smith W H. 1981. *Air Pollution and Forests* [M]. New York: Springer-Verlag
- Sverdrup H, DeVries W. 1994 Calculating critical loads for acidity with the simple mass balance method [J]. *Water Air and Soil Pollution* 72: 143—162
- Sverdrup H, Warfvinge P, Røgner T, et al. 1992 Critical loads for forest soil in the Nordic countries [J]. *Ambio* 21(5): 348—355
- 唐信英, 罗磊, 张虹娇. 2009. 西南地区酸雨时空分布特征研究 [J]. *高原山地气象研究*, 29(2): 33—36
- Tang X Y, Luo L, Zhang H J. 2009 The study on the space—time distribution characteristics of acid rain in southwest [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* 29(2): 33—36 (in Chinese)
- W·波斯哈特. 1985. 瑞士森林面临衰亡的危害 [J]. *生态学杂志*, (5): 42—45
- W. Boshat. 1985 Switzerland forest facing harm of contabescence [J]. *Chinese Journal of Ecology* (5): 42—45 (in Chinese)
- Wright R F, Aheime J Bishop K, et al. 2006 Modelling the effect of climate change on recovery of acidified freshwaters. Relative sensitivity of individual processes in the MAGIC model [J]. *Science of the Total Environment* 154—166
- Wu D, Tie X X, Deng X J. 2006 Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China [J]. *Chemosphere* 64(5): 749—757
- 吴兑, 李菲, 邓雪娇, 等. 2008 广州地区春季污染雾的化学特征分析 [J]. *热带气象学报*, 24(6): 569—575
- Wu D, Li F, Deng X J et al. 2008 Study on the chemical characteristics of polluting fog in Guangzhou area in spring [J]. *Journal of Tropical Meteorology* 24(6): 569—575 (in Chinese)
- 谢田, 李庆新. 1994 酸雨致使菠菜光合作用下降机理初探 [J]. *环保科技*, 16(1): 9—11
- Xie T, Li Q X. 1994. The research of photosynthesis decline mechanism of spinach exposed to acid rain [J]. *Environment Protection and Technology*, 16(1): 9—11 (in Chinese)
- 徐康富, 郝吉明. 1992. 中国酸雨发展区势及控制对策 [M]. 北京: 中国科学技术出版社. 1—4
- Xu K F, Hao J M. 1992 Expanding Trend and Control Countermeasure of Acid Rain in China [M]. Beijing: China Science and Technology Press. 1—4 (in Chinese)
- 严重玲, 洪业汤, 王世杰, 等. 1999. 稀土元素对酸雨胁迫小麦活性氧清除系统响应的作用 [J]. *作物学报*, 25(4): 504—507
- Yan C L, Hong Y T, Wang S J et al. 1999. Effect of rare earth elements on the response of the activated oxygen scavenging system in leaves of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica* 25(4): 504—507 (in Chinese)
- 杨秀虹, 仇荣亮, 岑慧贤. 1999 陆地生态系统对酸沉降的敏感性及其影响因素 [J]. *农业环境保护*, 18(2): 92—95
- Yang X H, Qiu R L, Cen H X. 1999. Study on sensitivity of terrestrial ecosystem to acid deposition and influencing factor [J]. *Agro-environmental Protection* 18(2): 92—95 (in Chinese)
- 张晓山, 张宝珠, 沈济, 等. 1990 大气颗粒物缓冲能力参数化 [J]. *环境化学*, 9(2): 19—25
- Zhang X S, Zhang B J, Shen J et al. 1990 Parameterization of atmospheric particle buffering to acid [J]. *Environmental Chemistry*, 9(2): 19—25 (in Chinese)
- 张耀民, 吴丽英, 王晓霞, 等. 1996. 酸雨对农作物的叶片伤害及生理特性的影响 [J]. 15(5): 197—208; 227
- Zhang Y M, Wu L Y, Wang X X, et al. Effects of acid rain on leaf injury and physiological characteristics of crops [J]. 15(5): 197—208; 227 (in Chinese)
- 张治军, 王彦辉, 于澎涛, 等. 2008 不同优势度马尾松生物量及根系分布特征 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 32(4): 71—75
- Zhang Z J, Wang Y H, Yu P T. 2008 Characteristics of biomass and root distribution of *Pinus massoniana* with different dominance [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 32(4): 71—75 (in Chinese)
- 周修萍, 秦文娟. 1992 华南三省(区)土壤对酸雨的敏感性及其分区图 [J]. *环境科学学报*, 12(1): 78—83
- Zhou X P, Qin W J. 1992 Sensitivity of the soil in South China to acid deposition [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 12(1): 78—83 (in Chinese)
- Zhu Z X, Paul A A, Meng F R, et al. 2003 A Forest Nutrient Cycling and Biomass Model (FoNB M) based on year-round monthly weather conditions Part II Calibration, verification, and application [J]. *Ecological Modelling* 170: 13—27