

酸雨研究进展与问题探讨

汪家权¹, 吴劲兵¹, 李如忠¹, 钱家忠¹, 潘天声²

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省环境保护局, 安徽 合肥 230001)

摘要: 在综述国内外酸雨研究基础上, 提出了我国酸雨研究中存在的一些问题。我国在酸雨研究方面已经取得了重大的进展, 许多研究成果被有效地应用于酸雨的控制, 但由于酸雨的不断加重和酸雨问题的复杂性, 许多问题还需要深入研究, 如: 随着能源结构的不断变化, 研究建立适合我国特点的酸雨预测模型; 从生态系统角度研究酸沉降及其酸沉降破坏的生态系统的恢复技术; 研究燃煤二氧化硫的控制和不同行业如化工、建材、冶金等工艺废气的脱硫技术; 研究与我国的经济水平相适应的、合理的酸雨控制对策; 将新技术与酸沉降研究有机结合起来, 研究基于 GIS 的酸化模型, 规划酸沉降临界负荷。

关键词: 酸雨; 研究进展; 预测模型; 控制对策

中图分类号: P339; X143; G53.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2004)04-0526-05

酸性污染物以潮湿和干燥两种形式从大气中降落到地球表面, 一般将这个过程称为酸沉降。酸雨是指 pH 值低于 5.6 的降水(湿沉降)。酸雨主要分布在西欧、北美和东南亚。我国长江以南存在连片的酸雨区域。酸雨问题对全球的生态系统已产生了重大影响, 中外环境保护及相关学科的工作者对酸雨的形成、危害和防治等方面进行了系统研究, 取得了显著的成果。

1 国外研究进展

19 世纪 40 年代, 英国化学家罗伯特·史密斯在英格兰开始了对酸沉降现象最初的科学调查^[1], 并于 1872 年提出“酸雨”这一术语^[2]。但直到 20 世纪 40 年代, 斯堪的纳维亚半岛(瑞典和挪威)酸化问题给湖泊鱼类带来毁灭性的危害后, 酸沉降现象才引起各国学者的普遍关注。50 年代初, 酸雨已成为全球性的污染问题。50 年代中期, 美国生态学家 E 勒姆对土壤酸化、酸雨对湖泊水的影响进行研究, 并指出降水酸性是由于燃料排出的酸性物造成^[3]。但直到 1972 年, 联合国在斯德哥尔摩召开的人类环境会议上, 瑞典才第一次把酸雨作为国际性问题提出, 并阐述了酸雨及致酸物质的迁移^[4]。70 年代末美国和欧洲一些国家相继发现酸雨与森林的大面积退化有着直接关系。瑞士联邦林业研究所的 W 波斯哈特总结了前人的研究成果后指出: 酸雨对植物叶子造成直接危害, 而通过酸化土壤造成间接危害^[5]。国外许多学者从 80 年代初期开始研究酸沉降对土壤化学状况的影响, 如土壤酸化与土壤化学状态、土壤缓冲性及缓冲速率的关系^[6]。

近年来, 国外发达国家在研究酸雨来源和大气污染物迁移机理的同时, 更多地关注缔结国际性公约, 将缓解环境酸化、富营养化和地面臭氧纳入集成的统一战略。目前世界上一些国家对酸沉降采取的最新研究方法是计算机模拟技术, 如美国已成功模拟了南部氮、硫化物的沉降对当地森林土壤的影响^[5]。

收稿日期: 2003-03-20; 修订日期: 2003-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379003); 安徽省自然科学基金资助项目(03045306); 安徽省南部酸雨控制亚行贷款资助项目(AH2000-06)

作者简介: 汪家权(1957-), 男, 安徽太湖人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事环境系统仿真与污染控制的教学与研究。E-mail: jiaquan.wang@163.com

2 国内研究进展

我国酸雨中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是酸性的主要贡献者。 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 一般在 5~10 之间, 故我国的酸雨是硫酸型酸雨。而日本的酸雨中 NO_3^- 是酸性的主要贡献者, 其酸雨是硝酸型的。20 世纪 80 年代以来, 欧美酸雨也从硫化物转向氮氧化物和氨, 过去硫氮比是 2:1, 现在接近 1:1。我国降水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比最小的闽南地区(厦门、泉州和漳州等)也在 5 左右^[7]。

目前, 我国酸雨区主要位于长江以南, 南方大多数城市和地区普遍出现酸雨, 以西南、华南地区较为突出, 同时酸雨面积近年来大幅度扩大, 长江以南酸雨区域已连成一片, 并向长江以北蔓延, 甚至在东北地区的图们、丹东和东海海域也发现较强的酸性降水, 同时降水的酸性不断升高。降水中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 浓度相当于欧洲、北美和日本的 3~5 倍^[8]。

国内对酸雨的研究最早可追溯到 20 世纪二三十年代。当时, 我国西南地区的贵阳、重庆等地就出现了 pH 值 < 4.5 的严重酸雨, 东南部的一些大中城市周围也陆续出现了高频率的酸雨。虽然酸雨已使当地的土壤化学性质发生变化, 但并未引起人们的重视, 直到五六十年代, 随着人们逐渐认识到铝离子对土壤酸性的重要性后, 才开始在理论上研究酸沉降^[9]。

1974 年, 我国在北京开始对酸雨进行监测。70 年代末, 在北京、上海、南京、重庆和贵阳等城市开展了研究, 发现这些地区不同程度存在酸雨问题^[10]。尤其在 1982 年夏季, 重庆市连降酸雨, 降水 pH 值大多小于 4.0, 导致了大面积农作物受害及建筑物的严重腐蚀^[11]。为了掌握酸雨分布, 国家环保部门于 1982 年建立了 189 个观测站、523 个降水采样点的酸雨监测网。通过多年的观测记录发现酸雨集中分布在西南酸雨区(重庆、贵阳、柳州等)、福厦酸雨区(福建东南工业区)、南昌酸雨区(南昌、九江、黄石等)、青岛酸雨区和长江以南酸性富铁铝土壤地区等, 而东北、京津唐工业区尚未发现酸雨^[12]。

20 世纪 80 年代以来, 我国开始研究酸雨对树木的影响, 并认识到酸雨已威胁了我国某些地区的森林生态系统^[13]。降水 pH 值 4.5 以下的林区, 树林叶子普遍受害, 树高降低、林业产量下降, 林木生长过早衰退^[14~16]。酸雨的长期影响会降低土壤中微生物的活性, 影响枯枝落叶的分解。当酸雨量大于土壤缓冲能力时, 土壤就会酸化。另一方面, 酸雨中的氢离子与土壤胶体表面吸附的盐基离子进行交换反应后吸附于土壤颗粒表面, 导致交换下来的盐基离子淋失, 同时氢离子也促进了活性铝的溶出^[17~20]。

20 世纪 90 年代以来, 王文兴等较系统地研究了中国酸雨的形成机制。黄美元研究了中国西南地区酸雨的形成过程, 认为在重庆和贵阳等重污染城市, 云下过程对雨水的酸化起主要作用, 在污染较轻的中小城镇和乡村地区, 雨水酸度主要取决于云内过程^[21]。俞绍才等对厦门地区进行多年的降水研究后, 认为该地区的酸雨以外来源为主^[22]。王文兴等从我国大陆人为源 SO_2 和 NO_x 的排放强度和地理分布、年降水量、平均气温、大气扩散能力、大气颗粒物酸化缓冲能力、土壤的碱金属及碱土金属含量、土壤的酸碱性质、酸雨前体物排放强度和酸性物雨洗能力等因素分析了中国长江以南出现酸雨的原因。并指出, 由于自然因素的重要作用, 占酸雨前体物 SO_2 和 NO_x 的排放量 40% 的排放强度很大的渤海和黄海地区未出现区域性酸雨, 排放强度不大的长江以南地区却出现了很强的区域型酸雨^[23], 其他一些敏感地区, 如云南东部、东北东部和北部、山东半岛东部等地区可能出现酸性降水^[12], 南方重污染城市的酸性降水主要来源于城市高浓度大气污染物的局地冲刷, 广阔区域和清洁地区的酸性降水则主要来源于大气污染物的中、长距离传输^[24]。

在酸沉降对我国生态系统的影响方面, 我国学者从经济学角度进行了研究。其中, 对农业影响的研究最多^[25]。酸雨和 SO_2 对蔬菜生长和产量的影响较大, 其复合污染使西红柿、胡萝卜和棉花等农作物生长受阻, 产量降低, 复合作用明显高于单一因素的作用, 但其交互作用并不明显^[26]。张林波等通过野外开顶式熏气装置对水稻、小麦等 9 种农作物进行模拟酸雨与 SO_2 的单独处理和复合处理, 建立了酸雨 pH 值和 SO_2 浓度对农

作物产量的单一影响和复合影响模型,推算出苏、浙等7省(市)农作物受酸沉降危害的减产量,并利用市场价值法估算并分析了酸沉降造成的7省(市)农业经济损失,更加直接地为正确评价酸沉降对农业的危害提供科学依据^[27]。

对于酸性排放物的跨国输送问题,我国近几年才开始研究。刘宝章等通过青岛地区酸雨的成因研究指出,青岛市排放的污染物质不可能向东南方向的周边国家输送,而海上的污染物会对青岛市有一定的影响^[28]。王文兴等研究认为北方沿海地区的图们和丹东凤凰山的酸雨主要来源于朝鲜半岛和日本,东南沿海地区则比较复杂,冬春季可能受到朝鲜半岛和日本的影响^[29]。

近年来,我国在酸化模型的应用方面得到了一定的发展^[30]。应用最为广泛的为MAGIC模型即集水区地下水酸化模型(Model of Acidification of Groundwater in Catchment),是酸沉降对土壤和地表水酸化长期影响的理论型动态数据模型,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^[31~33]。LWAS模型即全湖泊流域酸化研究模型(Integrate Lake-Watershed Acidification Study),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^[34]。设在奥地利的Laxenburg的国际应用研究所(IIASA)开发的RAINS模式(地区酸化信息与模拟),把公共政策选择与影响结合起来,同时提供关于控制代价、排放、大气输送与生态影响的总的信息。该模式现正被许多国家用于控制酸化的政策^[35]。笔者于2000年12月参加安徽省环保局关于利用亚行贷款治理长江流域酸雨项目中,亚行提供了适用于亚洲地区的RAINS-Asia模型,该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。该项目中,美国E&E公司的专家们运用该模型预测了安徽省酸雨控制区各市的 SO_2 浓度和酸雨pH值。

3 问题与展望

我国在酸雨研究方面已经取得了重大的进展,许多研究成果被有效地应用于酸雨的控制,但由于酸雨的不断加重和酸雨问题的复杂性,许多问题还需要深入研究。

3.1 酸雨的预测与预报研究

随着各种酸化模型的应用和发展,为酸雨的预测和预报提供了一定的工具,但是,这些模型一般只适合大尺度评价和区划,或者只是运用了国外的模型(如RAINS-Asia模型)。对于各种典型地区的酸雨状况,酸雨pH值在降雨过程中的变化规律,要进行准确的预测,还需要深入研究。同时,虽然最近几十年中国的主要能源仍然是煤,但随着能源结构的不断变化和汽车用量的不断增多,导致酸雨前体物(NO_x 和 SO_2)比例的不断变化以及排放量的不断增长,可能出现新的酸雨状况和酸雨区^[36]。由于以前的研究更多的是关注硫酸型酸雨,对硝酸型酸雨的研究不多,所以对酸雨的预测提出了新的课题和任务,应该尽快建立适合我国特点的酸雨预测模型。

3.2 从生态系统角度研究酸沉降及其酸沉降破坏的生态系统的恢复技术研究

酸沉降对整个陆地生态系统产生了严重影响,加速了土壤和水体的酸化,现在的学者大多关注于酸沉降对各陆地生态系统的影响^[37],以及研究酸沉降临界负荷来确定污染物排放量控制对策等。由于其他大的生态问题如水体的富营养化等,得到了更多的关注,所以对受到酸沉降破坏的生态系统的恢复技术研究的投入不够。而且,同水体富营养化一样,这些大的生态系统的恢复,不是一朝一夕之功,需要长时间的研究。研究生态系统的恢复技术,需要国家集中一定的人才和资金,从整个生态系统全局出发来研究酸沉降^[16]。

3.3 废气脱硫技术研究

自20世纪70年代初,日本和美国率先实施控制二氧化硫排放战略以来,许多国家开始制定了二氧化硫排放标准和中长期控制战略,1984年3月,欧洲各国与加拿大在渥太华召开了环境保护负责人会议,缔结了到1993年尽量将二氧化硫产生量控制在30%的条约。我国对于燃煤二氧化硫的控制洗选、煤气化、型煤加工等技术和工业固硫型煤控制燃煤工业锅炉对大气的污染等方面,取得了一定成绩^[38,39],但是对于我国不同行

业如化工、建材、冶金等的工艺废气的脱硫技术，缺乏足够的研究，或研究进展缓慢。

3.4 与经济水平相适应的酸雨控制对策研究

国家环境保护局 1995 年开始组织在全国范围内划分酸雨控制区和二氧化硫控制区(简称“两控区”)，1997 年 1 月，国务院批准了关于“两控区”的划分。确定了我国“两控区”的酸雨控制目标：到 2000 年，酸雨控制区酸雨恶化的趋势得到缓解，到 2010 年，酸雨控制区降水 pH 值小于 4.5 的面积比 2000 年有明显减少^[40]。这个划分方案定性的给出了酸雨的控制目标，一定程度上是适合我国经济水平的，但是，对于如何调整、具体这个目标使之与我国的经济水平相适应，同时制定更合理的酸雨控制对策，有待进一步研究^[41]。

3.5 新技术的应用研究

将地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)等新技术与酸沉降研究有机结合起来，研究基于 GIS 的酸化模型，规划酸沉降临界负荷。目前开始有一些研究^[42]，但应用并不广泛。

根据预测，到 2020 年我国现有酸雨区将继续扩大，降水的酸性继续升高，可见我国的酸雨研究任重道远。但是，对于酸雨的控制我们是有信心的，我国政府已将环境保护作为一项基本国策，并制定了大气污染控制等法规。随着公民环保意识的逐步加强，环境保护技术的不断创新，经济支持力度不断加大，相信我国的酸雨问题将得到有效的控制。

参考文献：

- [1] D 宾克利. 酸性沉降与森林土壤-美国东南部的沉降环境及研究实例[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [2] 瑞典农业部环境委员会. 环境酸化的现状与展望[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [3] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究[J]. 中国环境监测, 1996, 12(5):5-9.
- [4] 李文华, 杨修. 环境与发展[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1984. 80-83.
- [5] 陈静. 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, 1999, 20(1):79-85.
- [6] 潘根兴. 西德对土壤酸化问题的研究进展[J]. 土壤学进展, 1991, 13(3):32-36.
- [7] 汤大钢, 王玮, 庞燕波, 等. 氮氧化物在闽南地区酸雨中的贡献[J]. 环境科学研究, 1996, 9(5):38-40.
- [8] 王文兴. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2):1-7.
- [9] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题[J]. 土壤通报, 1988, 19(2):49-51.
- [10] 唐孝炎. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
- [11] 高粱, 高佳. 环境保护与农业丰收[M]. 天津:天津科技翻译出版社, 1994.
- [12] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5):323-329.
- [13] 杨金宽, 姬南柱. 酸雨地区马尾松害虫发生量的初步调查[J]. 生态学杂志, 1988, 7(2):54-55.
- [14] 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.
- [15] 吴刚, 章景阳, 王星. 酸沉降对重庆南岸马尾松针叶林年生物生产量的影响及其经济损失的估算[J]. 环境科学学报, 1994, 14(4):460-465.
- [16] 樊后保. 酸雨与森林衰退关系研究综述[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(1):88-92.
- [17] 杨景辉. 酸性沉降物对土壤的影响[J]. 土壤学进展, 1984, 6(5):11-19.
- [18] 李庆康. 茶园土壤酸化的现状及展望[J]. 土壤通报, 1987, 18(2):69-71.
- [19] 王敬华, 张效年, 于天仁, 等. 华南红壤对酸雨敏感性的研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(4):348-354.
- [20] 赵忠. 森林土壤酸化及其林木生长的影响[J]. 土壤学进展, 1988, 10(2):1-5.
- [21] 黄美元, 沈志来, 刘帅仁, 等. 中国西南典型地区酸雨形成过程研究[J]. 大气科学, 1995, 19(3):359-366.
- [22] 俞绍才. 中国酸雨发展趋势及控制对策文集[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1992.
- [23] 王文兴. 影响我国降水酸性因素的研究[J]. 中国环境科学, 1993, 13(6):401-406.
- [24] 王玮, 王文兴, 全浩. 我国酸性降水来源探讨[J]. 中国环境科学, 1995, 15(2):89-94.
- [25] 吴劲兵, 汪家权, 孙世群. 酸沉降农业经济损失估算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(1):100-104.
- [26] 刘连贵. 酸雨和 SO₂ 复合污染对几种农作物的影响[J]. 环境科学, 1996, 17(2):16-20.

- [27] 张林波, 曹洪法, 沈英娃, 等. 苏、浙、皖、闽、湘、鄂、赣 7 省酸沉降对农业危害-农业损失估算[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6):489 - 491.
- [28] 刘宝章, 李金龙, 王敬云, 等. 青岛酸雨天气边界层气象特征[J]. 中国环境科学, 1997, 17(2):103 - 107.
- [29] 王文兴, 刘红杰, 张婉华, 等. 我国东部沿海地区酸雨来源研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5):387 - 392.
- [30] 谢绍东, 郝吉明, 周中平, 等. 酸化模型及其在确定酸沉降临界负荷中的应用[J]. 环境科学, 1996, 16(2):80 - 84.
- [31] 徐仁和, 季国亮. 预测土壤和地表水酸化趋势的 MAGIC 模型[J]. 土壤学进展, 1994, 16(5):36 - 39.
- [32] 陶福祿, 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.
- [33] 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.
- [34] 陈利秋. 世界环境科技发展与实力分析[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998.
- [35] 李金惠, 汤鸿霄. 酸化模型在国内的发展与应用进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2):1 - 6.
- [36] 韩国钢. 中国 2020 年环境保护战略目标与预测[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1993.
- [37] 王代长, 蒋 新, 卞永荣. 模拟酸雨对不同土层酸度和 K^+ 淋失规律的影响[M]. 环境科学, 2003, 24(2):30 - 34.
- [38] 郝吉明. 中国燃煤二氧化硫污染的控制战略[J]. 中国环境科学, 1996, 16(3):208 - 212.
- [39] 张慧明. 燃煤工业锅炉排放二氧化硫对大气的污染及工业固硫型煤的应用[J]. 环境科学进展, 1999, 7(1):54 - 61.
- [40] 国家环保局. 酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案[J]. 环境保护, 1998, 3:7 - 10.
- [41] 孙 欣, 汪家权, 席天功, 等. 安徽省芜湖市酸雨污染及防治对策. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(2):259 - 264.
- [42] 郝吉明, 谢绍东. 酸沉降临界负荷及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.

Research development and some problems discuss on acid rain in China^{*}

WANG Jia-quan¹, WU Jin-bing¹, LI Ru-zhong¹, QIAN Jia-zhong¹, PAN Tian-sheng²

(1. College of Resources & Environmental Sciences, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Environmental Protection Agency, Hefei 230001, China)

Abstract : By describing briefly the acid rain research history in China and abroad, the paper analyzes acid rain study in China, and put forward some further research problems. In the past years, great progress in acid rain researches have been made in China. But due to the development of acid rain form and the complexity of acid rain movement, many problems still need to be further researched in China. For instance, (1) Set up models to prognosticate acid rain with the change of energy structure; (2) Study the ecology remediation technique damaged by acid rain from the point of ecology system; (3) Find the way to control waster SO_2 and desulfurizing technic in different industry; (4) Constitute countermeasure to control acid rain which is suitable the development of our economy; (5) Combine new technique such as GIS with acid deposition approach, acid deposition model and programming critical charge of acid deposition.

Key words : acid rain; research development; forecasting model; countermeasure

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50379003) and the Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 03045306).