

中国酸雨研究现状

张新民¹, 柴发合^{1*}, 王淑兰¹, 孙新章², 韩梅¹

1. 中国环境科学研究院, 北京 100012

2. 中国21世纪议程管理中心, 北京 100038

摘要: 中国酸雨区是继欧洲和北美之后的世界三大酸雨区之一, 迫切需要科学有效的酸雨污染控制对策和措施, 而及时总结酸雨研究现状是科学控制酸雨的重要基础. 综述了近年来中国酸雨的研究发展历程、空间分布特征、成因和控制对策的研究结果. 结果表明: 中国降水化学组成仍属硫酸型, 但正在向硫酸-硝酸混合型转变; 南方酸雨区范围无明显变化, 北方酸雨区继续扩展; 强酸雨区范围为1994年以来最大, 但酸度有所减弱; 总体来看, 与过去几年相比, 2008年全国酸雨形势有所恶化. 最后对酸雨成因和控制对策进行了概述.

关键词: 研究现状; 酸雨; 中国

中图分类号: X517 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2010)05-0527-06

Research Progress of Acid Precipitation in China

ZHANG Xin-min¹, CHAI Fa-he¹, WANG Shu-lan¹, SUN Xin-zhang², HAN Mei¹

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China

Abstract: The acid rain area in China is one of the three main acid areas in the world, along with Europe and North America. Scientific controlling countermeasures for acid rain are very necessary in China, and timely summarizing of the research progress on acid rain is an important knowledge base for acid rain pollution control. This article provides an overview of most of the recent acid rain investigations in China, including the distribution pattern characteristics, reasons and control strategies concerned with precipitation in China, and the results for precipitation. The major conclusions are as follows: acid rain pollution in China is still sulfur type with a trend to sulfuric-nitrous mixed type; the acid rain area in Southern China has had no obvious change, while that in Northern China is growing; the heavy acid rain area is the largest since 1994, but the acidity is weakened to some degree; overall, in comparison with previous years, the acid rain situation in 2008 has deteriorated. In addition, the causes and control strategies are discussed.

Key words: research progress; acid rain; China

酸雨因其危害民众健康、腐蚀文物古迹、破坏生态系统, 已成为当今世界上备受关注的重大环境问题之一. 改革开放以来我国经济快速发展, 城市膨胀致使大气污染突出表现为排放连片、传输叠加和相互影响的区域污染特征, 其中酸雨污染是重要的区域大气环境问题之一^[1-4]. 我国已经成为继欧洲、北美之后的第三大酸雨区. 根据有关研究结果, 1995年我国由于酸雨和SO₂污染造成农作物、森林和人体健康等方面的经济损失超过1 100 × 10⁸元,

已接近当年国民生产总值的2%, 成为制约我国经济和社会发展的重要因素. 因此, 及时总结我国酸雨研究现状, 对治理和控制酸雨污染是非常必要和迫切的.

英国化学家SMITH R A在英格兰调查了酸沉降现象, 并在1872年出版的《Air and Rain: the Beginnings of a Chemical Climatology》一书中叙述了世界工业发展先驱城市——曼彻斯特市郊区降水中含有高浓度SO₄²⁻, 首次提出酸雨概念^[5], 但当时并未引起足够的重视. 1972年瑞典政府把酸雨作为一个国际性的环境问题向人类环境会议提交了报告^[6]. 1975年第一次国际性酸雨和森林生态系统讨论会在美国举行, 该会议讨论了酸雨对地表、土壤、森林和植被的严重危害, 自此酸雨问题受到了普遍重视. 到20世纪40年代酸雨引起了各国学者的

收稿日期: 2010-01-11 修订日期: 2010-03-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB422208)

作者简介: 张新民(1976-), 女, 河北丰宁人, 副研究员, zhangxm@craes.org.cn.

* 责任作者, 柴发合(1955-), 男, 陕西大荔人, 研究员, 硕士, 博士, 主要从事大气环境管理与技术研究, chaifh@craes.org.cn

普遍关注并开展了研究^[7-8],我国则自20世纪70年代起开始研究酸雨污染。

1 中国酸雨研究发展历程

20世纪70年末在我国长江以南部分地区出现了酸雨^[9-10],自此大规模酸雨监测和研究在我国展开。为了查明我国酸雨污染的状况,国家环境保护部门于1982年建立了全国酸雨监测网^[1,11-13],中国气象局也于1989年建立了气象部门的全国酸雨监测网^[14-15]。这两大酸雨监测网为我国降雨化学研究积累了大量数据,对我国酸雨控制和研究起了重要作用^[16]。

20世纪70年末我国在北京、南京、上海、重庆和贵阳等城市开展了酸雨污染的局部研究,发现这些地区也不同程度地存在着酸雨问题,西南地区则很严重^[17-19]。在这种情况下,国家科学技术部设立了一系列酸雨科研课题,着重对我国酸雨的形成机理与传输、数值模拟、控制方法及生态影响等方面进行研究。“七五”酸雨攻关课题主要针对酸雨污染相对严重的西南和华南地区开展了酸雨形成机理与传输、控制方法以及生态影响等方面的研究。“八五”期间酸雨的研究区域扩展到东部沿海及华中地区,并以青岛和厦门等地为典型案例,研究其与内陆重酸雨区酸雨的成因、来源,以及致酸物质的输入和输出的关系^[13]。“九五”期间开展了“SO₂污染控制区和酸雨控制区(简称两控区)划分方案”的研究。制定了“两控区”方案,在北方设置SO₂污染控制区,在南方设置酸雨控制区。此外,为了控制我国大气SO₂污染和酸雨不断恶化的趋势,1998年1月国务院正式批准了“两控区”方案。“两控区”涉及27个省、自治区、直辖市,面积达 $109 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土面积的11.4%,其中酸雨控制区为 $80 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土面积的8.4%,SO₂污染控制区为 $29 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土面积的3.0%。该方案的实施对抑制我国酸雨污染起到了重要作用。“十一五”期间科学技术部还设立“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理”的“973”项目,重点研究酸性物质在中国复杂排放条件和大气环境下的形成机制及输送沉降规律,典型生态系统对酸沉降的响应机制、过程及特征,以及酸沉降控制的综合指标体系及调控原理等问题。通过上述研究建立了我国酸雨沉降控制技术评价与筛选的原则、方法和指标体系,以及基于硫沉降临界负荷的控制规划和对策^[20];在大气污染物输送过程的研究方面也积累了一定经验和理论基础,开发了硫化物

输送模式,初步计算了省区间和跨国的输送量^[21]。

2 酸雨空间分布特征

目前我国酸雨区主要分布在东北地区东南部、华北大部、西南和华南沿海地区及新疆北部地区,大体呈东北—西南走向。在欧、美、亚世界三大酸雨区中,我国的强酸雨区($\text{pH} < 4.5$)面积最大,长江以南地区是全球强酸雨中心。我国降水化学组成仍属硫酸型,但正在向硫酸—硝酸混合型转变,SO₄²⁻和NO₃⁻以及NH₄⁺和Ca²⁺分别是降水中主要阴、阳离子,并且浓度远高于欧洲和北美^[16]。与过去几年相比,2008年全国区域酸雨特点:①南方酸雨区范围无明显变化^[22],酸度则增减不一。如武汉和黄山等南方地区的部分站点均出现了有酸雨系统观测以来的最低pH(年均值),即酸雨强度达近十年来的最高值^[23],而总体来看湖南省南部、贵州省中部、四川省东北部、广西壮族自治区西北部等地区酸雨污染又有所减轻^[24]。②北方酸雨区继续扩展。1994年后在北方出现的几个小块酸雨区呈现连片趋势,2003—2005年,北京市、天津市及河南省部分地区的酸雨频率增加到20%,甚至高达50%以上,泰山和青岛站酸雨频率均在60%以上^[25],部分省市站点的酸雨频率和强酸雨频率达近15a来的最高值^[23]。③强酸雨区范围为1994年以来最大,但酸度有所减弱。2008年,我国强酸雨区范围为1994年以来最大,并明显向北扩展;强酸雨区降水酸度整体有所减弱,但局部地区降水酸度出现增强,如2007年北京、山西、河南、安徽和山东等部分省、直辖市站点的酸雨和强酸雨频率达近15a来的最高值^[23]。2004—2007年,全国年均酸雨日数、酸雨量/总降水量的值逐年上升,增幅较为明显^[23]。④总体来看,与过去几年相比,2008年全国酸雨形势有所恶化。

2.1 时间演变

我国酸雨大致经历了2个阶段:①20世纪80年代至90年代中期为第一阶段,是酸雨的急剧发展期;②20世纪90年代中后期到21世纪初为第二阶段,降水年均pH在不同地区有升有降,总体进入相对稳定期,但酸雨形式仍不乐观^[14,26]。20世纪80年代我国降水年均pH小于5.6的地区主要在西南、华南以及东南沿海一带^[27]。20世纪90年代以来,酸雨区面积有所扩大,其中以南昌和长沙等城市为中心的华中酸雨区污染水平超过了西南酸雨区;西南酸雨区虽然酸雨强度有所缓和,但仍维持较严

重的水平;华南酸雨区主要分布在珠江三角洲及广西自治区的东部地区,污染格局总体变化不大;华东酸雨区包括长江中下游地区以南至厦门的沿海地区,小尺度上的污染格局有所波动^[28]。总体而言,目前中国降水年均 pH 小于 5.6 的面积约占国土面积的 40%,长江中下游以南地区至少 50% 以上的面积降水年均 pH 小于 4.5,为酸雨重污染区。

就全国酸雨强度而言,1993—1998 年为最强。1998 年全国实行“两控区”政策以后,1999—2002 年酸雨强度有所降低,而 2003—2007 年重又加强,全国年均酸雨日数、酸雨量/总降水量值逐年上升,且增幅较为明显,在 2006 年达到了 1993—1998 年的平均水平^[25,29],2007 年全国平均酸雨日数为 1993 年有系统观测数据以来的最高值^[23]。与 2007 年相比,2008 年发生较重酸雨(pH < 5.0)的城市减少了 1.1%,发生重酸雨的城市所占比例基本持平^[22]。

2.2 区域变化

赵艳霞等^[29]对中国气象局全国酸雨监测网 80 多个酸雨观测站的 1993—2006 年观测数据进行了研究,认为我国主要酸雨区分布在长江以南的广大地区,其中以重庆、湖南、江西和广东等省、直辖市酸雨污染最为严重;另外,北方地区也存在范围不小的酸雨区,主要分布在京津冀、河南省和山东省的部分地区。从全国范围来看,近 14 a 我国酸雨区总体上呈范围扩大、强度稍有减弱的趋势。其中,北方酸雨区范围扩大明显,且酸雨强度增强趋势明显;南方酸雨区范围基本保持不变,但酸雨污染重灾区由西南地区逐步转移至华中和华南中部地区。

2.2.1 南方地区

唐信英等^[30]对四川省 10 个酸雨观测站点 2007 年的数据研究发现,该省酸雨污染较重,月均 pH 为 4.58 ~ 5.33,川中、东、南部酸雨污染重于川西北地区。2008 年四川省酸雨频率平均值为 39.6%,比 2005 年(28.3%)增加近 11.3%。2008 年四川省降水中离子组成、离子浓度排序与 2005 年相比变化不大,但降水离子总量呈上升趋势。降水 SO_4^{2-} 浓度占离子总量的比重最大, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^- > 3$,酸雨仍为硫酸型污染^[31]。以重庆市为例,其主城区 1993—2007 年酸雨的年均 pH 介于 3.8 ~ 4.5 之间,各季的酸雨频率基本在 80% 以上,并有增大趋势^[32]。

2007 年浙江省酸雨频率在 33% ~ 99% 之间,平均值为 76%,强酸雨频率在 6% ~ 95% 之间,平均值

为 44%。浙江省酸雨污染冬季最严重,夏季最轻。浙江的临安、杭州、绍兴,浙东南的舟山、台州、温州等经济发达地区是该省酸雨污染较重的地区,浙西南的衢州、丽水、云和等经济相对落后的地区酸雨污染较轻^[33]。宋晓东等^[34]基于浙江省 1992 和 2002 年的酸雨监测数据,并利用 RAINS-ASIA 模型模拟了 1990—2030 年浙江省酸雨变化情况。结果表明:浙江省的酸雨分布范围不断扩大、危害程度不断加重;未来一个时期内, SO_2 排放量都会维持在较高的水平上;酸沉降超临界负荷面积所占比例在经历了较快的增长阶段之后,将维持在较为恒定的水平上,并呈现出明显的时滞性。

江苏省南部的东山—无锡和吕泗为 2 个重酸雨区中心,其酸雨频率均在 90% 以上,降水年均 pH < 4.44,符合强酸雨的标准。南部地区的酸雨一年四季都有发生,秋、冬、春季酸雨频率达 75% 以上,夏季略低,为 65%,年均酸雨频率为 72.3%。南部地区的区域性酸雨过程主要发生在冬、春两季,占全年区域性酸雨过程的 73%^[35]。

安徽省马鞍山市 2007 年降水年均 pH 为 4.90,酸雨频率为 65.5%;降水酸度和酸雨频率有明显的季节性,夏季降水酸度弱,冬、春季降水酸度强,且酸雨频率较高^[36]。此外,安徽省铜陵市酸雨污染也较为严重,2000—2005 年降水年均 pH 为 4.46 ~ 4.92,均在酸雨临界值(pH 为 5.6)以下;酸雨频率在 44.4% ~ 61.5% 之间,基本上一半的降水属于酸雨^[37]。

湖北省 2007 年降水年均 pH 为 4.47,酸雨频率为 71.5%^[38]。1992—2005 年闽西北邵武市的降水年均 pH 为 4.07 ~ 5.11,全部呈酸性;酸雨频率介于 25% ~ 100% 之间,其中 1992—2000 年邵武市的酸雨频率总体呈下降趋势,自 2001 年起酸雨频率逐渐增加,2005 年达到 100%;冬、春两季酸雨污染较重^[39]。

2.2.2 北方地区

2003—2007 年北京地区降水 pH 为 3.48 ~ 7.90,年均 pH 逐年下降,酸雨污染从南到北呈加重趋势。酸雨频率为 45.3%,强酸雨频率为 20.2%。酸雨、强酸雨主要集中在夏、秋季^[40]。

2007 年吉林省酸雨有加重趋势,近九成的酸雨出现在东部地区,且强酸雨也都出现在东部地区,其中蛟河和六道两站酸雨频率较高,分别为 60.6% 和 63.6%;6—8 月是吉林省中、西部地区酸雨的主要

发生时段,东部地区各月差别不明显^[41]。

2008年辽宁省降水pH为3.55~10.27,全年共出现强酸雨27次,占监测次数的2.1%。大部分地区降水呈中性,酸雨主要分布在大连、丹东和阜新3个地区,其中大连酸雨最严重,酸雨频率为30.2%。从时间上看,6—9月出现酸雨频率最高,达10%以上,而强酸雨没有明显的时间分布阶段^[42]。柴发合等^[43]于2007年2月—2008年1月在辽宁省辽中县水文监测站进行了降水化学特征观测,观测期间降水pH为3.4~8.1,降水量加权均值为4.79,整体呈酸性。

1991—2008年新疆城市降水年均pH逐年平缓降低,其中乌鲁木齐和伊宁市变化起伏较大,哈密与和田两市变化较小。北疆城市降水年均pH大部分在6.0附近波动,明显低于南疆城市;南疆城市降水年均pH大部分在7.0附近波动,变幅小于北疆城市^[44]。

1992—1995年河南省酸雨污染呈减弱趋势,1998—2006年酸雨污染则呈加强趋势。从酸雨面积上看,1992—2006年河南省酸雨区域由南到北逐渐由大变小,2000年出现pH低值,尔后由南到北、由西到东酸雨区域再度迅速变大,2006年酸雨明显加重^[45]。

3 成因研究

从中国酸雨与区域SO₂排放量的变化一致性,以及大气成分区域本底站降水中SO₄²⁻和NO₃⁻浓度上升的事实来看,酸雨污染主要是来源于工业SO₂和NO_x等酸性物质的排放^[29,46]。近些年许多大中城市随着机动车保有量的急剧增加,其排放的NO_x使酸雨中NO₃⁻浓度逐步增大^[47-48];然而就SO₂而言,大气中的SO₂含量与酸雨的发生及其酸度并不完全呈正相关^[17,49-50]。另外,由于大气中碱性悬浮颗粒物的大量削减将使酸雨的成因研究变得更加复杂^[51]。从现有研究的成果来看,我国酸雨主要有以下成因:

首先,本地排放的酸性气体如SO₂和NO_x是造成酸雨污染的重要原因。如对于沿海酸雨较重的青岛市而言,近代工业发展排放大量的致酸物质以及海洋上天然排放的(CH₃)₂S是形成酸雨的主要原因^[52];2007年浙江省酸雨监测结果同样反映了本地污染源排放对降水酸化的贡献不容忽视。浙北(如临安、杭州、绍兴等)和浙东南(舟山、台州、温州等)等经济发达地区酸雨污染较重;而浙西南经济

相对落后地区(如衢州、丽水、云和等)的酸雨污染较轻^[33]。此外,湖南^[38]、广州^[53]、重庆^[32]和安徽^[37]等省、直辖市也有相应报道。

其次,区域输送是造成区域酸雨加重的主要原因^[54-55]。王文兴等^[50]的研究发现,中国东部和东南部沿海地区的酸雨来源比较复杂。冬、春季不仅受西部大陆的影响,也受日本和韩国的影响。在南方重酸雨区,中长距离污染物传输的叠加是南方大部分地区酸雨的决定性来源。海南岛北部地区酸雨形成的致酸物多属远距离输送所致,主要来源于华南地区,部分来源于越南;其酸雨污染不仅与气象条件有关,而且与海南岛的地形地貌有关^[56]。此外在华北地区^[54]、四川地区^[57]的许多研究均表明,污染物区域传输对酸雨的重要影响。

此外,由于酸雨的形成是复杂的大气化学过程,受影响因素较多。局地云下降水对酸性物质的洗脱^[58]、酸性TSP^[59]、特殊的地形特征、经济布局^[30]以及气象条件^[35,39,52,56]等对酸雨的形成均有重要影响。

4 控制对策

酸雨污染控制是一个复杂的控制过程,不能单纯地依靠控制本地的SO₂排放量。如北京市湿沉降中的硫组分来自本地污染源排放的SO₂和远距离输送,但削减本地SO₂排放量,湿沉降污染并未减轻^[60];长沙市控制SO₂排放后,发现酸雨中SO₄²⁻浓度下降,而NO₃⁻浓度上升。该现象表明NO_x控制有待进一步加强^[61]。鉴于近年来NO_x的排放量和酸性细颗粒物浓度上升,大气中对酸雨具有中和作用的碱性颗粒物浓度逐年下降,且“两控区”以外区域酸雨增加迅速等现象,我国应实行SO₂和NO_x多物种协同控制;鉴于本地排放及区域传输对酸雨的重要影响,应设立本地和区域双重酸雨控制标准和机制,在控制本地源的基础上,进一步实行区域联动控制酸雨污染的发生、发展;鉴于经济布局和气象因素对酸雨污染的影响,我国酸雨控制应在做好工业布局调整的基础上,加快酸雨预报、预警等模型的开发^[62]。

参考文献(References):

- [1] 何纪力,陈宏文,胡小华,等. 江西省严重酸雨地带形成的影响因素[J]. 中国环境科学,2000,20(5):477-480.
- [2] 蒋大和. 关于我国酸雨的污染物输送问题[J]. 中国环境科学,1996,16(4):246-253.
- [3] ZHANG J E, OUYANG Y, LING D J. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China[J].

- Chemosphere, 2007, 67(11): 2131-2137.
- [4] OUYANG X J, ZHOU G Y, HUANG Z L, *et al.* Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 503-514.
- [5] SMITH A R. Air and rain; the beginnings of a chemical climatology[M]. London: Longmans, Green, and Co., 1872: 17-24.
- [6] OTTAR B. Organization of long range transport of air pollution monitoring in Europe[C]//DOCHINGER L S, SELIGA T A. Ist. Internat symp on acid precipitation and the forest ecosystem. Pennsylvania; Springer Netherlands, 1976: 105-117.
- [7] 汪家权, 关劲兵, 李如忠, 等. 酸雨研究进展与问题探讨[J]. *水科学进展*, 2004, 115(14): 526-530.
- [8] MENZ F C, SEIP H M. Acid rain in europe and the united states: an update[J]. *Environmental Science Policy*, 2004, 7(4): 253-265.
- [9] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 67.
- [10] ZHAO D W, XIONG J L, XU Y, *et al.* Acid rain in southwestern China[J]. *Atmos Environ*, 1988, 22(2): 349-358.
- [11] WANG W X, WANG T. Short communication on acid rain formation in China [J]. *Atmos Environ*, 1996, 30(23): 4091-4093.
- [12] 陈复, 柴发合. 我国酸沉降控制策略[J]. *环境科学研究*, 1997, 10(1): 27-31.
- [13] 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.
- [14] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(S1): 85-94.
- [15] 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.
- [16] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. *化学进展*, 2009, 21(2/3): 266-280.
- [17] 王文兴, 张婉华, 石泉, 等. 影响我国降水酸性因素的研究[J]. *中国环境科学*, 1993, 13(6): 401-407.
- [18] 李祚泳. 我国部分城市降水中离子浓度与 pH 值的关系研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(3): 303-306.
- [19] 蒋益民. 湖南省城市与森林的大气湿沉降化学及其作用机理[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [20] HAO J M, DUANG L, ZHOU X L, *et al.* Application of a LR model to acid rain control in China [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(17): 3407-3415.
- [21] 王自发, 黄美元, 何东阳. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究: I. 三维欧拉污染物输送实用模式[J]. *大气科学*, 1997, 21(3): 366-378
- [22] 中华人民共和国环境保护部. 2008 中国环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2009[2009-09-26]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2008zkgb/200906/t20090609_152536.htm.
- [23] 侯青, 赵艳霞. 2007 年中国区域性酸雨的若干特征[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(1): 7-11.
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 2007 中国环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2008[2009-09-26]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2007zkgb/200811/t20081117_131309.htm.
- [25] 赵艳霞, 侯青, 徐晓斌, 等. 2005 年中国酸雨时空分布特征[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(5): 242-245.
- [26] 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: 169-173.
- [27] 戴树桂, 岳贵春, 王晓蓉. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 60-63.
- [28] 田贺忠, 陆永棋, 郝吉明, 等. 中国酸雨和二氧化硫污染控制历程及进展[J]. *中国电力*, 2001, 34(3): 51-57.
- [29] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. *气象学报*, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [30] 唐信英, 罗磊, 陈碧辉. 2007 年四川省酸雨时空分布特征研究[J]. *高原山地气象研究*, 2008, 28(1): 62-65.
- [31] 钱骏, 赵磊, 终洪金, 等. 四川省实施《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十一五”规划》中期评估[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 43-48.
- [32] 何泽能, 高阳华, 谭炳全, 等. 重庆市主城区 15 年来酸雨变化趋势分析[J]. *高原山地气象研究*, 2009, 29(1): 59-62.
- [33] 牛彧文, 顾骏强, 康丽莉. 浙江省酸雨污染特征研究[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 572-575.
- [34] 宋晓东, 江洪, 余树全, 等. 浙江省酸雨的空间分布格局及其未来变化趋势预测[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(1): 13-16.
- [35] 缪国华, 施丹平. 2007—2008 年江苏南部酸雨分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 313-317.
- [36] 付敏. 马鞍山市酸雨特征及其影响因素的统计分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 9-14.
- [37] 甘昊, 孙世群, 王朝飞, 等. 铜陵市酸雨变化趋势分析[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(5): 752-754, 767.
- [38] 许杨, 杨宏青. 湖北省 2007 年酸雨特征及其与气象污染条件的关系[J]. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 351-354.
- [39] 吴德辉, 李白良, 林长城, 等. 闽西北邵武市酸雨分布特征及其与气象条件的关系[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, 22(4): 33-36, 40.
- [40] 张爱群, 徐晓峰, 徐文静, 等. 北京地区酸雨概况及特征分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会大气环境监测、预报与污染物控制分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 160-163.
- [41] 冯喜媛, 药明, 王亚君. 2007 年酸雨形势简析[J]. *吉林气象*, 2009(3): 28-29.
- [42] 宗英飞, 张国林, 苏常新, 等. 2008 年辽宁省酸雨时空分布特点分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(16): 7536-7537.
- [43] 柴发合, 高健, 王淑兰, 等. 辽宁省背景地区降水化学与大气

- 传输特征和研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(4): 387-393.
- [44] 刘新春, 何清, 钟玉婷. 新疆城市酸雨分布特征及变化趋势分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 115-120.
- [45] 杜子璇, 刘荣花, 熊杰伟, 等. 1992—2006年河南省酸雨分布特征分析[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 55-58.
- [46] 樊后保. 世界酸雨研究概况[J]. 福建林学院学报, 2002, 22(4): 371-375.
- [47] 梅自良, 刘仲秋, 刘丽, 等. 成都市区酸雨变化及降雨化学组成分析[J]. 四川环境, 2005, 24(3): 52-55.
- [48] 刘君峰, 宋之光, 许涛. 广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 1998-2002.
- [49] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5): 323-329.
- [50] 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.
- [51] 王自发, 高超, 谢付莹. 中国酸雨模式研究回顾与所面临的挑战[J]. 自然杂志, 2007, 29(2): 78-82.
- [52] 冯砚青. 中国酸雨状况和自然成因综述及防治对策探究[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(1): 25-28.
- [53] 樊琦, 范绍佳, 钟流举, 等. 华南地区典型酸雨过程气象条件的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2008, 28(3): 279-283.
- [54] 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 14-20.
- [55] NAGASE Y, SILVA E C D. Acid rain in China and Japan: a game-theoretic analysis [J]. Regional Science and Urban Economics, 2007, 37(1): 100-120.
- [56] 冯文, 李天富, 吴春娃, 等. 海南岛北部地区酸雨的天气影响因素及污染源分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 643-649.
- [57] 马丽雅, 王斌, 杨俊国. 四川省酸雨时空分布特征[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4): 26-29.
- [58] 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.
- [59] 林长城, 肖辉, 赵卫红, 等. 福建高山、重点城市春季TSP对降水酸度的影响[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 405-410.
- [60] 金蕾, 徐谦, 林国安, 等. 北京市近二十年(1987—2004)湿沉降特征变化趋势分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1195-1202.
- [61] 杨宇红. 长沙市市区近5年酸雨变化趋势及相关因素分析[J]. 湖南有色金属, 2005, 21(6): 28-30.
- [62] WANG T J, JIN L S, LI Z K, *et al.* A modeling study on acid rain and recommended emission control strategies in China[J]. Atmos Environ, 2000, 34(26): 4467-4477.

(责任编辑: 孙彩萍)