0577-6619/2008/66(6)-1032-42 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析*

赵艳霞[1,2,3] 侯 青[1,2,3]
ZHAO Yanxia[1,2,3] HOU Qing[1,2,3]

1. 中国气象科学研究院,北京,100081
2. 中国气象局大气成分观测与服务中心,北京,100081
3. 中国气象局大气化学重点开放实验室,北京,100081
1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Centre for Atmosphere Watch and Services*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *CMA*, *Beijing* 100081, *China*
3. *Key Laboratory for Atmospheric Chemistry* (*LAC*), *CMA*, *Beijing* 100081, *China*
2007-06-20 收稿,2007-10-14 改回.

Zhao Yanxia, Hou Qing. 2008. An analysis on spatial/temporal evolution of acid rain in China (1993－2006) and its causes. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6):1032－1042

Abstract The acid rain observation network of China Meteorological Administration (CMA) was first established in 1989, with 22 stations. It maintained 85 to 88 stations from 1993 to 2005, After more sfations established in 2006 and 2007, the station number of the network has rapidly increased to 294. Considering the continuity of data, the data used in this paper is the 14-year observations of the 88 stations' network from 1993 to 2006. Based on the latest 14 years observations of the acid rain network, statistics and analysis results show that the acid rain dominated in the vast regions south of the Yangtze River, and the limited presence of acid rain zone was also observed in the northern part of the country. The 14-year acid rain data indicate that an expanding tendency of acid rain zones was obvious especially in northern China, but it remained virtually unchanged in southern China. And the most severe acid rain polluted zone gradually moved from Southwest China to Central China and the central part of South China. As far as acid intensity of rain is concerned, 1993－1998 was the period of severest acid rain, the intensity of acid rain slightly reduced in 1999－2002, increased again in 2003－2006, and reached the average acidity of the period of 1993－1998 by the end of 2006. In addition, the rain acidity in northern China increased markedly. For the causes of the rain acidity situation in China, this paper explains it in terms of the sulfur dioxide emissions and the monitoring data of rainwater chemicals.
Key words China, Acid rain, pH value, Frequency of acid rain, Sulfur dioxide emission, Rainwater chemicals

摘 要 中国气象局酸雨站网始建于1989年,最初仅有22个。1993—2005年,一直维持在85至88个,经2006和2007年两次扩建达到294个站。考虑到资料的连续性,本文是以80多个酸雨观测站有系统观测以来(即近14年)的酸雨观测资料为基础,经过客观统计分析,得出中国酸雨的时空变化特征。总的来说,中国酸雨区主体位于长江以南的广大地区,北方也存在小范围的酸雨区。从全国来看,酸雨发生范围总体上呈扩大趋势,北方酸雨发生范围扩大明显,南方基本保持不变;而且,酸雨污染重灾区由西南逐步转移至华中和华南中部。就酸雨强度而言,1993—1998年是最强阶段,1999—2002年强度有所降低,2003—2006年酸雨强度重又持续加强,到2006年已达到1993—1998年的平均水平;另一个显著特点是北方酸雨强度加强非常明显。对于中国区域降水酸度变化的成因,本文利用中国SO_2排放量的变化和大气成分本底站降水化学的监测资料进行了分析和阐述。
关键词 中国,酸雨,pH值,酸雨频率,SO_2,降水化学
中图法分类号 P402

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40575058)。
作者简介:赵艳霞,主要从事作物模式、气候变化影响、大气成分监测和评估等方面研究。E-mail:zyx@cams.cma.gov.cn

1 引 言

1.1 酸雨的概念及中国酸雨现状

酸雨是指pH值小于5.6的雨水、冻雨、雪、雹、露等大气降水,其形成最主要是SO_2和氮氧化物(NO_X)在大气或水滴中转化为硫酸和硝酸所致(Fan Houbao,2002)。早在19世纪中叶英国化学家Smith首次提出"酸雨"(acid rain)这一术语(Cowling, 1982),1972年,瑞典政府把酸雨作为一个国际性的环境问题提出并引起了各国政府的广泛关注(Ottar B,1976)。

20世纪70年代末,酸雨问题也引起了中国的重视,环保部门先后在全国布设了酸雨监测站(Liu,et al,1997),气象部门也相继建立了长期的酸雨监测网(Ding,et al,2004)。监测结果表明,80年代中期,年均降水pH值小于5.6的地区主要在西南、华南以及东南沿海一带(Dai,et al,1997)。90年代以来,酸雨出现的区域较80年代发生了比较明显的变化,酸雨区面积有所扩大,以南昌和长沙等城市为中心的华中酸雨区污染水平超过西南酸雨区;西南酸雨区酸雨强度虽然有所缓和,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东部地区,总体格局变化不大;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(Tian Hezhong,et al, 2001)。总体而言,目前中国年均降水pH值小于5.6的地区覆盖了全国约40%的面积,长江中下游以南地区至少50%以上的面积年均降水pH值低于4.5,为酸雨重污染区。

1.2 中国酸雨研究概况

"七五"到"九五"期间,中国在酸雨形成机理与传输、数值模拟、控制方法及生态影响等方面进行了广泛研究。"七五"酸雨攻关课题(1990)主要针对酸雨污染相对严重的西南和华南地区展开了酸雨形成机理、传输、控制方法以及生态影响等研究。结果表明,重庆和贵州等地的酸雨污染已达相当严重的程度,降水中硫酸盐所占的比例很高,对降水酸度贡献最大,是典型的硫酸型污染;时间分布上,西南地区冬、春季节酸雨出现频率较高。就四川和重庆而言,其特殊的气象条件和能源结构是酸雨形成的最主要原因。"八五"期间("八五"国家科技攻关项目报告),酸雨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例研究其与内陆严重酸雨区酸雨的成因、来源的异同,以及致酸物质的输入输出(Liu,et al,1997)。在"七五"和"八五"期间,评估了酸沉降对农作物和森林的影响程度和经济损失,提出了中国酸沉降控制技术评价与筛选的原则、方法和指标体系,得出了以硫沉降临界负荷为基础的控制规划和对策(Hao,et al,2001)。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,在建立了比较可靠的SO_2排放清单基础上,开发了硫化物输送模式,初步计算了省区间、跨国输送量(Wang,et al,1997)。"九五"期间("九五"国家科技攻关报告),开展了"二氧化硫污染控制区和酸雨控制区(简称两控区)划分方案"的研究,制定了控制酸雨和SO_2污染的"两控区"方案,在北方设置SO_2污染控制区,在南方设置了酸雨控制区。"十一五"期间科技部还设立"酸雨形成机理及其防治"的973项目等。

1.3 酸雨的成因

酸雨成因的研究是酸雨问题的一个重要方面。就中国酸雨中的酸性物质构成而言,区域性酸雨主要是SO_2的大量排放造成的,属"煤烟型",也称"硫酸型"(Fan Houbao, 2002)。近些年许多大中城市随着机动车数量的急剧增加导致氮氧化物排放量增加,酸雨中硝酸的比例有逐步增大的趋势(Mei,et al,2005; Liu,et al,2006; Tang,et al,2005)。在主要的致酸物质(SO_2、NO_x)的排放持续显著增加状况下,中国的酸雨将由硫酸型向硫酸硝酸混合型转变(Liu,et al, 2006; Tang,et al,2005; Zhu,et al, 2006),同时可中和酸雨的悬浮颗粒物的大量削减将使酸雨的控制更加复杂(Wang,et al, 2007)。研究表明,中国北方地区酸根离子浓度高于南方,但酸性降水却明显低于南方,这是因为不同地区大气中的SO_2含量并不与酸雨的发生及其酸度成正相关(Wang,1994; Wang, et al, 1993),也就是酸雨的形成其前体物质源SO_2是必要条件,但非充分条件,充分条件还包括其他多种自然因素的影响(Hua,et al,1998)。南北方大气中氨的含量、土壤酸碱性质及大气颗粒物中碱性物质浓度的差异等自然因素也是造成中国酸雨区域特征明显的重要原因(Feng,2004)。王文兴等(1993,1994)研究发现,与

国外相比,中国的大气颗粒物浓度高,特别是粗颗粒物多,南北地区存在着显著差异。北方土壤的碱性物质含量高,大气颗粒物中的碱性物质浓度也高于酸性物质,在降雨中这些大气颗粒物对酸性降水具有较大的中和缓冲能力;相反,南方大气颗粒物中碱性物质浓度低,其缓冲能力低于北方。土壤中碱性离子含量及 pH 值是影响酸雨形成的重要因素之一,降水中的碱性物质主要来源于土壤中,而土壤中的碱性粒子由南至北是递增的,这也导致了中国酸雨主要发生在土壤碱性物质含量低、土壤 pH 值低的南方地区。

王文兴等(1997)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,冬春季既受到西部大陆的影响,也受到日本和韩国的影响。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二甲基硫是形成酸雨的主要原因,青岛地区边界层风场和温度场的特殊规律是该地区酸雨形成的另一个重要原因(Liu,et al,1997;Feng,2004);而南部沿海城市厦门的情况则有所不同,厦门的大气污染物 SO_2、NO_X、可吸入颗粒物浓度并不高,但臭氧和过氧化氢浓度较高,大气的氧化性较强,大气中氨浓度较低,因此大气中碱性物质少是厦门酸雨的重要原因之一(Zhuang,1998)。四川、重庆的酸雨主要是当地高硫煤的使用导致的大气中高 SO_2 浓度再加上特殊的地理环境和气象条件导致的(Xu, 2005)。静风、逆温等扩散条件差的天气条件对酸雨的形成也起到一定的促进作用(Dong, et al, 2003; Wu, et al, 2004; Huang, et al, 2004; Lin, et al, 2005),降水 pH 值的分布与地面风场分布特征有相似之处,宏观上看,四川盆地、云贵高原和广西的局部等地区为全国风力最弱区,静风频率高,酸雨发生频率也较高(Tian, 2001)。另外,其他气象条件也对酸雨的形成有重要影响,如降水量等(Lin,et al,2005)。但总的来说,在南方重酸雨区,局地云下降水对酸性物质的洗脱和中长距离传输的叠加是南方大部分地区酸雨的决定性来源(Hua,et al,1998; Mao,1992; Wang,et al,1992);在污染较轻的中小城市和乡村地区,雨水酸度主要决定于云内过程(Huang,et al,1995)。

1.4 酸雨的危害及控制措施

酸雨的危害是多方面的。冯宗炜等研究发现,酸雨除了对土壤、森林、农业、水体等生态环境有诸多不利影响外,还会损毁建筑物表面,危害人体健康,影响社会经济发展,给国民经济造成巨大的损失(Feng,et al, 1993; Cao,et al,1993; Fan,2003)。酸雨会促使土壤中的营养元素钾、钠、钙、镁释放出来,并随着雨水被淋溶而流失,从而使土壤变贫瘠,影响植物正常发育(Fu, et al,2006; Xing,2002; Chen,et al,2007);还会使森林和农作物的病虫害增加、作物产量下降以及森林衰退等(Liu,2003; Li,2005)。受酸雨影响的河流和湖泊水体中碱性物质含量也会逐渐下降,严重时会引起鱼虾等水生物的死亡,同时还会引起水体中浮游生物种类的减少。酸雨还是建筑材料和文物古迹腐蚀破坏的罪魁祸首(Zhang,et al,2002)。根据"七五"和"八五"的部分研究成果估算,仅中国酸雨污染较为严重的江西、湖南、广东、广西、四川、贵州、湖北、江苏、浙江、安徽、福建等 11 个省、自治区的年生态效益经济损失约为 459 亿元(Chen,et al,1997)。

控制酸雨的有效方式是削减 SO_2 和 NO_X 的排放总量。在酸雨出现较早的工业化国家,20 世纪 70 年代后就开始了全面的环境污染治理。中国政府对 SO_2 排放造成的酸雨污染问题也十分重视,1990 年开始实施《关于控制酸雨发展的若干意见》, 1992 年在 2 省 9 市开展征收工业燃煤 SO_2 排污费和酸雨综合防治试点工作(Yang,2002)。1996 年全国人大批准的《国民经济和社会发展九五计划和 2010 远景目标纲要》以及《国务院关于环境保护的若干问题的决定》都明确提出了两控区对酸雨和 SO_2 污染重点治理(Liu Bin,2001)。随后针对酸雨和 SO_2 污染的不断加重,1998 年 1 月,国务院批准了国家环保局制定的《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》(Yang Zonghui,2002)。然而,由于"两控区"面积仅占国土面积的 11.4%,而近年来"两控区"外 SO_2 排放量的增加在一定程度上抵消了区内的控制效果,SO_2 排放的空间结构发生了明显变化。此外,随着 NO_X 的排放量上升,酸性细颗粒物浓度上升,同时大气中对酸雨具有中和作用的悬浮颗粒物在政府控制下呈逐年下降趋势,这些因素的存在使得酸雨问题与 20 年前相比更为复杂(Wang, et al, 2007)。

总之,关于酸雨的成因、危害、降水化学离子分析以及控制酸雨的对策措施等方面,近 30 年国内外都开展了大量的试验及观测研究,取得很多研究成果,也有不少学者就酸雨研究的方方面面的情况做了很全面的总结(Ding, et al, 1997; Xie, 2004;

Shannon, 1999; Menz, et al, 2004; Wu, et al, 2006),在此不多赘述。本文旨在根据中国气象局80 多个酸雨观测站最近 14 年的酸雨观测资料,经过客观统计分析,对中国区域酸雨的总体情况进行总结和评价,给出中国酸雨形势的宏观概貌,对于这种形势的成因也做了初步的分析和探讨。

2 资料情况

中国气象局酸雨监测站网是一个布设在全国气象台站基本反映区域背景大气酸沉降的业务站网,覆盖了除香港、台湾、澳门以外的全部省、市、自治区,所获得的资料基本能反映区域大气酸沉降的时空分布特征(Ding,et al,2004)。中国气象局酸雨业务观测始于 1989 年,当时只有 22 个站。90 年代初,中国气象局在全国范围内布设酸雨监测站网。1993—2000 年,全国酸雨站为 85 个,2001—2002 年为 87 个,2003—2005 年,扩展到 88 个,2006 年又新建了 69 个国家级站,全国达到 157 个。另外,各省气象局自建的酸雨站在 2006 年底也全部纳入国家级站网,统一进行业务管理。因此,从 2007 年开始,中国气象局的酸雨监测网中共有 294 个站。为了数据前后有连续性和可比性,本文使用的是 1993 年开始观测的 80 多个站 14 年的观测资料进行统计分析的,站点分布情况见图 1。

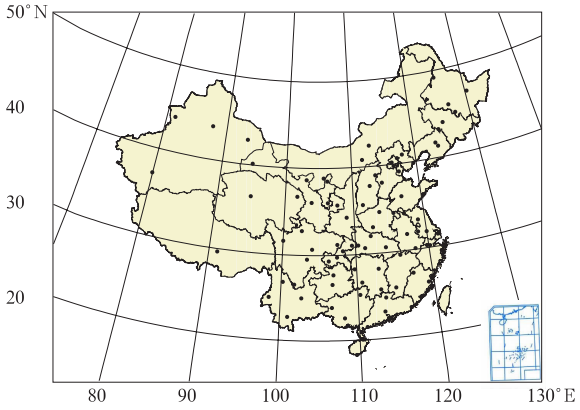


图 1 中国气象局酸雨站网分布

(截至到 2006 年上半年)

Fig. 1 Acid rain observation network of China Meteorological Administration in the first half of 2006

2.1 年平均 pH 值和酸雨频率

本文使用的 80 多个站 14 年的逐日酸雨监测资料中,年平均 pH 值和年平均酸雨频率(F)按照中国气象局《酸雨观测业务规范》(2005)中的方法计算得出。

2.1.1 年平均 pH 值

采用氢离子浓度[H^+]-降水量加权法,即将每日降水 pH 值换算成氢离子浓度后,乘上相应的日降水量,求和,再除以年内总降水量,得平均氢离子浓度,再取负对数,即为年平均 pH 值。计算公式如下:

$$[H^+]_i = 10^{-\mathrm{pH}_i} \tag{1}$$

$$\overline{[H^+]_i} = \frac{\sum [H^+]_i \times V_i}{\sum V_i} \tag{2}$$

$$\overline{\mathrm{pH}} = -\overline{\lg[H^+]} \tag{3}$$

式(1)中,pH_i 为每日降水的 pH 值,$\overline{\mathrm{pH}}$为降水量加权平均 pH 值;$[H^+]_i$ 为由日降水的 pH 值计算得到的氢离子浓度,单位为 mol/L;V_i 为日降水量,$\sum V_i$为年降水量,单位均为 mm。

2.1.2 酸雨频率(F)

取降水 pH 值低于 5.60(不含 5.60)的次数,按照下式计算其出现频率,即

$$F_{[<5.6]} = \frac{N_{[<5.6]}}{N_{总}} \times 100\% \tag{4}$$

式(4)中,$F_{[<5.6]}$为 pH 值<5.6 的频率;$N_{[<5.6]}$为 pH 值低于 5.6 的次数;$N_{总}$为当年进行降水 pH 值观测的次数。

pH 值低于 4.5 的强酸雨频率采用类似的方法计算得出。

2.2 降水化学资料

目前,中国气象局站网中只有 4 个站有降水化学分析资料,1 个是全球大气本底站即青海的瓦里关本底台(代表洁净地区大气本底),3 个区域大气本底站分别是黑龙江的龙凤山(代表东北地区)、北京的上甸子(代表京津冀及周边地区)和浙江的临安(代表长三角地区),台站简况见表 1。由于这些台站属于世界气象组织全球大气基准网,其业务采用的是国际统一标准,因此数据具有很高的准确性和可靠性。考虑到瓦里关地区无酸雨问题,本文只收集了 3 个区域本底站的降水化学分析资料,资料年代为 1999—2006 年。年均离子浓度为年内每次降水量与离子浓度的加权平均值。

表 1 大气本底站简要情况

Table 1 Information of 4 atmosphere watch baseline observatories in China

	上甸子	临安	龙凤山	瓦里关
经度	117.07°E	119.04°E	127.36°E	100.54°E
纬度	40.39°N	30.18°N	44.44°N	36.17°N
高度(m)	287	139	331	3810

2.3 SO_2 和 NO_x 排放数据

SO_2 排放量的数据主要来自《中国环境统计公报》以及各省的《环境公报》,全国的资料年代为1997—2005 年。省级的为 2000—2005 年。氮氧化物目前还没有统计数字,但能源和环境部门给出过估算的数据,虽然数值有一定差别,但变化趋势是一致的。

3 全国降水酸度(pH 值)变化特征

中国酸雨区主体位于长江以南的广大地区,长江以北也存在范围不小的酸雨区。从年均降水 pH 值来看,近 14 年全国酸雨区范围总体上呈扩大趋势,北方酸雨范围有所扩大,南方酸雨范围基本保持不变;就酸雨强度而言,大体分 3 个阶段:1993—1998 年是最强阶段,1999—2002 年强度有所降低,2003—2006 年酸雨强度重又持续加强,到 2006 年已基本达到 1993—1998 年的平均水平,虽然个别地区比 1998 年以前有所减轻,但有些地区比 1998 年以前更加严重。

从图 2 可以看出,2003—2006 年,以四川、贵州为主体的强酸雨区(年均降水 pH 值<4.5)范围明显缩小,极强酸雨区(年均降水 pH 值小于 4.0)逐渐消失;而华中和华南中部如湖南、广东和江西等地区酸雨强度并未减弱,而且进一步加强,甚至在湖南东部、江西西部等部分地区又重新出现年均降水 pH 值小于 3.5 的情形,即酸雨污染重灾区由西南转移至华中和华南中部。另外,华北的部分地区酸雨强度加强明显,从图 2d 中可以看出,2006 年强酸雨区明显向北延展。

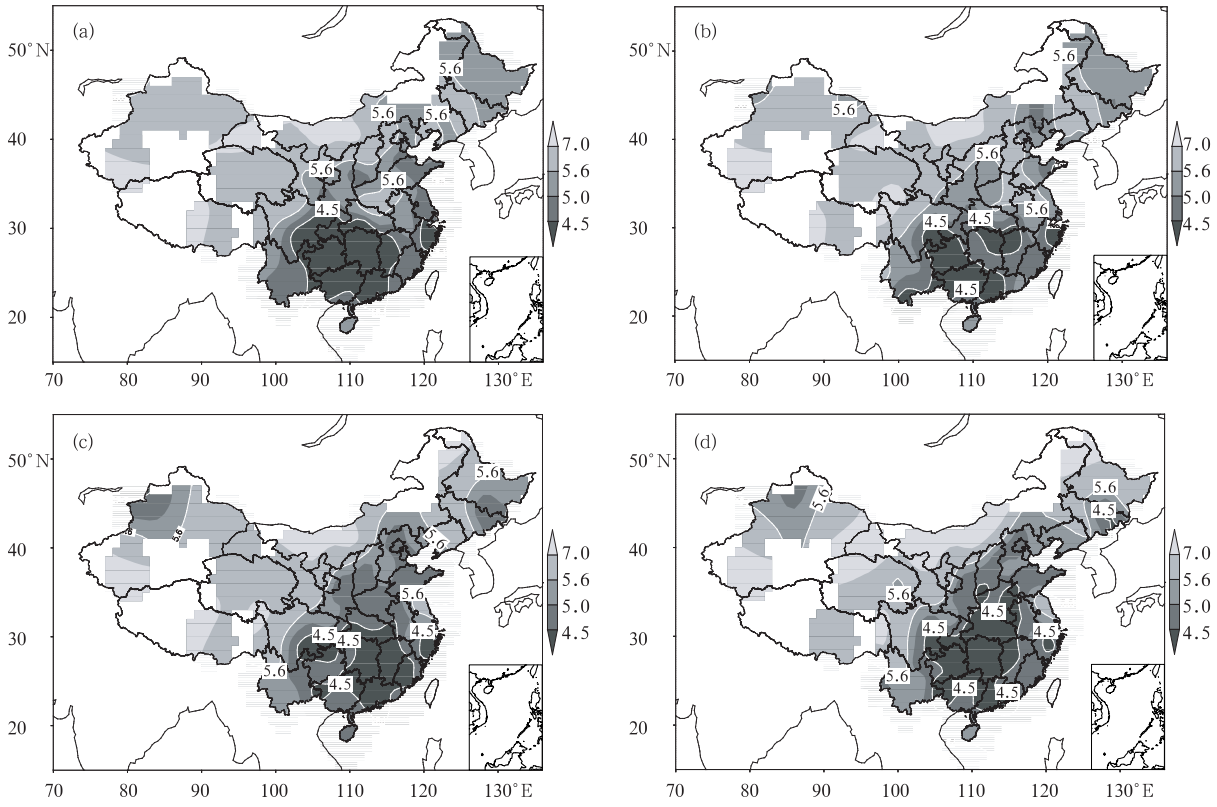


图 2 1993—1998(a)、1999—2002(b)、2003—2006(c)年不同时段平均降水 pH 值和 2006 年(d)年均降水 pH 值分布

Fig. 2 Average pH values of precipitation over 1993－1998(a), 1999－2002(b), 2003－2006(c) and the annual average pH values of 2006(d)

事实上，20 世纪 90 年代末实施双控区政策之后，情况有了一定改进。1999 年底，列入双控区的 175 个城市中已有 98 座城市实现了 SO_2 浓度达标(摘自中国能源网：www.china5e.com)。中国气象局酸雨站网也监测到，1999—2002 年是近 14 年来酸雨污染最轻的阶段。后来，由于排放量反弹(见本文第 5 部分)，酸雨污染又趋于加重。因此，从全国来看，当前的酸雨强度只是比最严重期间稍有减弱。

4 全国酸雨频率变化特征

就酸雨频率而言，南方酸雨区和北方酸雨区有不同的变化特点。

南方酸雨区 14 年来总的变化趋势是西南地区东部(云、贵、川)酸雨发生频率降低，华中和华南中部(主要是湖南、江西和广东)增加，华东南部(主要是浙江和福建)稳定。从图 3 可以看出，1993—1998 年南方酸雨发生频率大于 80%的酸雨高发地区主要在贵州、重庆、湖南东北部、江西西部、广东中南部和浙江部分地区。1999—2002 年除江西省西部外，上述地区的酸雨高发区范围减小、强度减弱。2003 年之后，贵州酸雨频率降低明显，湖南东北部、江西和广东合并为较大的酸雨高发区，而且频率有所增大，长沙和赣州都在 90%以上，广州 2004—2006 年均在 97%以上；另外，重庆一直是一个酸雨高发区，酸雨频率也是在 97%以上；浙江和福建的酸雨频率基本稳定在 80%左右，个别地区如浙江临安达到 90%。2006 年酸雨频率在 80%以上的区域为历史最大。

就北方而言，华北地区除 1993 年以外，1994—2002 年酸雨发生频率一直维持在较低的水平，自 2003 年开始，京津冀地区及河南部分地区的酸雨发生频率增加到 20%甚至超过 50%，山东省酸雨发生频率大于 50%的区域面积也逐渐扩大；2004 和 2005 年，新疆西北部、黑龙江南部个别地区的酸雨发生频率也超过了 50%。

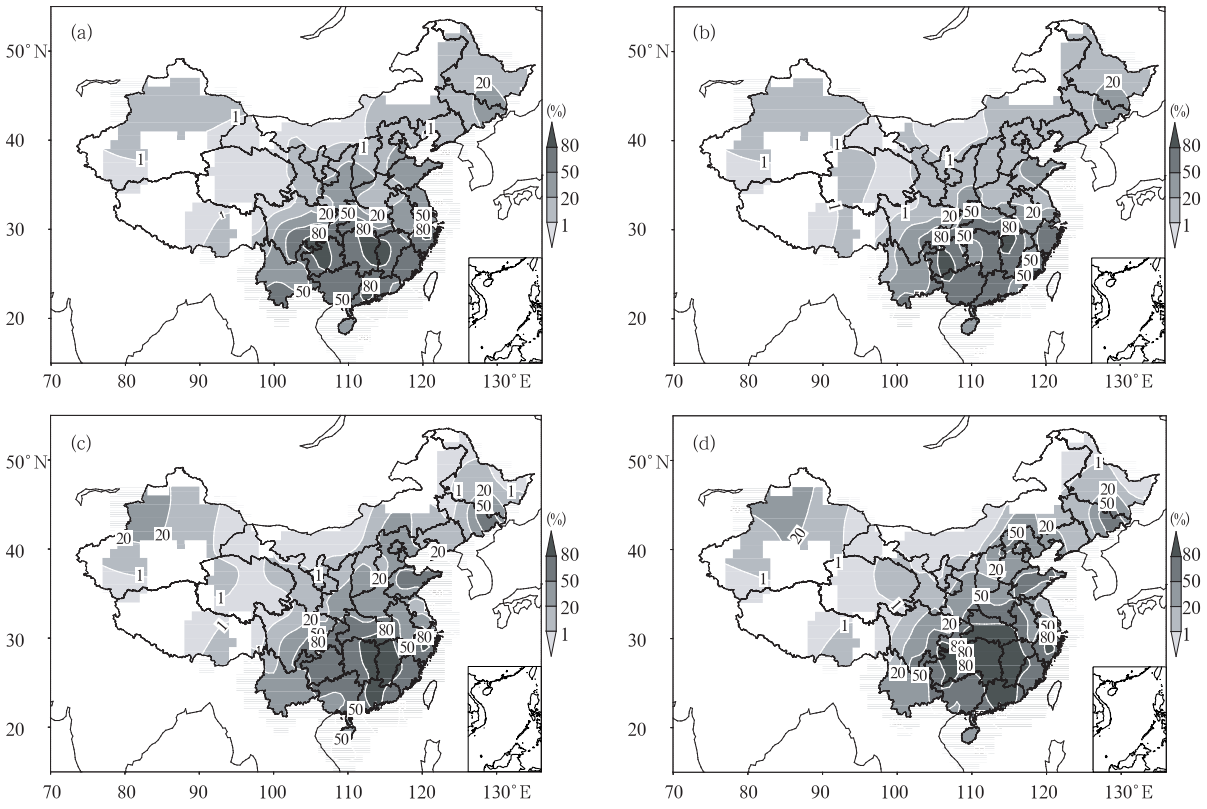


图 3 1993—1998(a)、1999—2002(b)、2003—2006(c)年不同时段和 2006 年(d)酸雨发生频率分布

Fig. 3 Duration average acid rain frequency over 1993－1998(a), 1999－2002(b), 2003－2006(c) and the annual acid rain frequency of 2006(d)

对于 pH 值小于 4.5 的强酸雨发生频率的变化趋势来说,南方的变化与上述酸雨频率的变化特点基本一致,只是强酸雨的频率在 20%—50%,贵州、湖南、江西和广东个别地区个别年份出现超过 80% 的情况;而北方酸雨区的强酸雨发生频率变化不大,稳定在 20%以下。

5 中国区域酸雨形势成因分析

虽然酸雨的成因很多,尤其对于局地小范围的酸雨,不仅与当地的排放量大小有关,还与土壤性质、以及气象条件如风向风速、逆温情况等很多因素有关。但是,从整个中国区域来说,酸雨的主要成因就是人类活动排放到大气中的 SO_2 和 NO_X 等酸性气体造成的,这可以从中国区域 SO_2 排放量的变化与酸雨形势的变化的一致性得到验证。另外,大气成分本底站的降水化学资料也能较好地说明这一点。氮氧化物排放量目前国家还没有定量的统计数字,但国家发改委能源所和环保局的估计数字表明,氮氧化物近年也是呈明显上升的趋势(取自报告材料)。

5.1 中国区域 SO_2 排放量

从 1997—2005 年的全国 SO_2 排放总量可以看出(图 4),1999—2002 年,排放总量相对较少,酸雨站网监测显示该时段酸雨污染也是相对最轻的阶段;2003 年之后,排放量持续增加,而酸雨站监测的降水 pH 值则持续减小,酸度增强,酸雨频率提高。可见,酸雨污染的轻重与区域 SO_2 排放量的多少密切相关。从图 4 还可以看出,这些年生活排放的 SO_2 基本没有变化,总量变化趋势与工业排放量变化完全一致。因此,控制酸雨污染应从行业入手,加大推广使用脱硫新技术,对于大的排放源设定合理

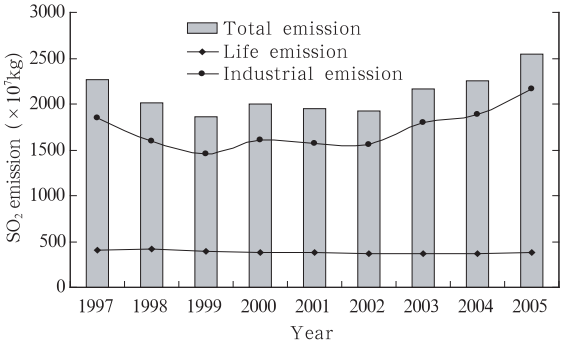


图 4 中国 1997—2005 年 SO_2 排放总量变化

Fig. 4 Total SO_2 emission in China during 1997−2005

的排放标准和指标,以期在不影响经济发展的同时,又能控制大气污染,包括酸雨污染。

5.2 降水化学特征分析

大气降水的化学离子成分中浓度比较高的是氨根(NH_4^+)、硫酸根(SO_4^{2-})、钙离子(Ca^{2+})和硝酸根(NO_3^-),还有浓度相对较低的镁离子(Mg^{2+})、钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)、氯离子(Cl^-)、氢离子(H^+)和氟离子(F^-)等。这些成分中,硫酸和硝酸是中国区域酸雨中最主要的酸性成分。从图 5 可以看出,3 个区域本底站的降水离子成分硫酸根和硝酸根浓度呈持续上升的趋势,图 6 表明 3 站的降水 pH 值总体趋势是下降(图 5 和 6 中上甸子站 2002 年由于局地建设原因,数据可靠性差,仅供参考),这些与中国区域降水酸度变化是一致的。但是,由于降水化学资料较少,仅有的 3 个区域本底站还不能完全代表中国区域的情况,尤其是西南和华南地区是酸雨的主要污染区,中国气象局酸雨监测网目前在这些地区还没有降水化学分析的酸雨站。但从环保或其他一些科研项目所做的降水化学监测分析表明,近年来,西南东部和华南地区硫酸根和硝酸根浓度总体

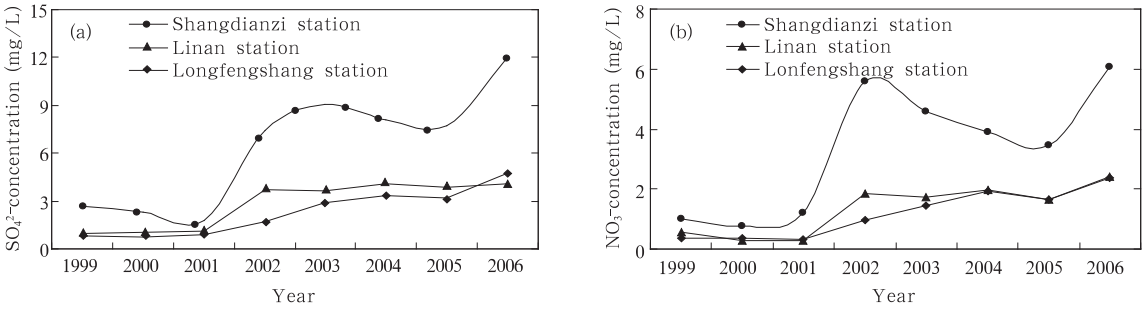


图 5 3 个本底站 1999—2006 年的降水中硫酸根(a)和硝酸根(b)浓度变化

Fig. 5 SO_4^{2-} (a) and NO_3^- (b) concentration changes in rain water 3 regional atmosphere watch baseline observatories during 1999−2006

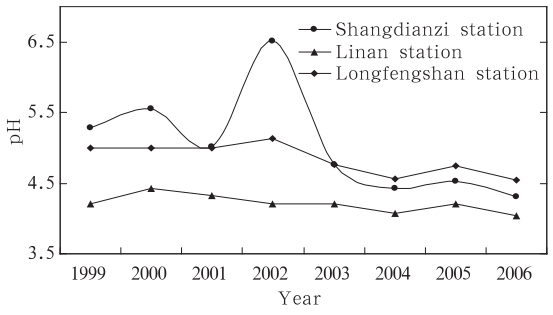


图 6 3 个本底站 1999—2006 年的年均降水 pH 变化情况

Fig. 6 Annual average pH of rain water at 3 regional atmosphere watch baseline observatories during 1999－2006

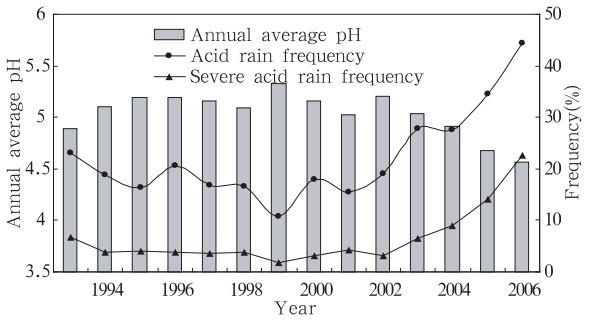


图 7 1993—2006 年北方 7 省市降水的酸化趋势

Fig. 7 Trend of precipitation acidification in 7 provinces/cities (Beijing, Tianjin, Hebei, Henan, Shandong, Shaanxi, Shanxi) in northern China in 1993－2006

也是呈上升趋势的,但不同地区硫酸根和硝酸根浓度上升的幅度有所不同,虽然雨水酸度的主要控制离子还是 SO_4^{2-},但 NO_3^- 对雨水酸度的贡献越来越大(Mei,et al,2005;Liu,et al,2006;Zhang,2007)。

6 典型事例分析:北方酸雨变化情况

前面的分析提到,北方酸雨污染最近几年呈明显加重的趋势。为了更加客观地反映这一事实,本文选取以前有酸雨发生但并不严重的华北及黄淮海地区,包括北京、天津、河北、河南、山东、陕西、山西等,进行统计分析(图 7)。

从图 7 看出,即使在 1993—1998 年南方酸雨严重期间,华北及黄淮海地区的酸雨污染无论从酸度还是频率上都还比较轻。但 2003—2006 年,降水 pH 值迅速变小,即酸雨强度明显增强;酸雨频率和强酸雨频率显著提高。尤其 2006 年,该区域总体上更是出现了 14 年以来最严重的酸雨污染,7 省市 16 个监测点的年均降水 pH 值为 4.57,酸雨频率为 45%,强酸雨频率为 23%。以大气成分区域本底站上甸子(代表京津冀地区)为例,2003—2006 年的年均降水 pH 值分别为 4.76、4.43、4.52 和 4.31,酸雨频率为 40%、47%、51%和 67%。

华北及黄淮海地区出现这种情况的根本原因是随着经济的发展,SO_2 和 NO_x 的排放量迅速增加所致。以河南和山东为例(图 8),SO_2 的排放量不断增加,河南省 2005 年的排放量是 2000 年的近 2 倍。山东排放量一直较高,近年还在上升。

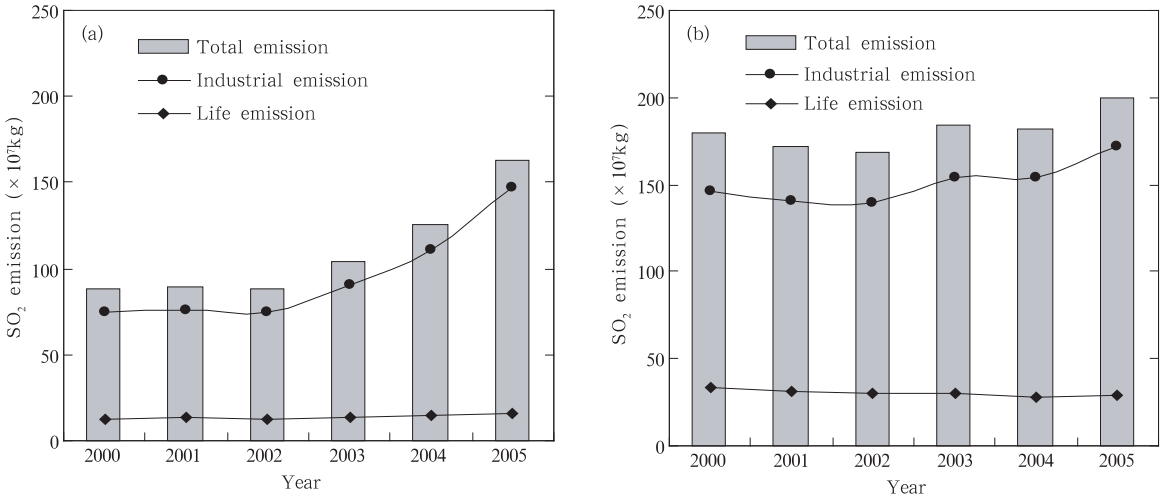


图 8 河南省(a)和山东省(b)2000—2005 年 SO_2 排放量变化情况

Fig. 8 SO_2 emissions of Henan(a) and Shandong(b) provinces during 2000－2005

事实上,北方的其他省份包括黑龙江、吉林、辽宁等也都不同程度地存在酸雨污染逐步加重的趋势。应该说,在南方酸雨没有明显改善的情况下北方酸雨污染又趋于加重,是近14年中国酸雨变化的最大特点之一,应引起有关部门的关注。

7 结论和讨论

总的来说,中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、广东酸雨污染最为严重。另外,北方也存在范围不小的酸雨区,主要在华北的京津冀及河南和山东的部分地区。近14年从全国范围来看,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,南方酸雨范围基本保持不变,而且北方酸雨强度增强趋势明显。在认清酸雨污染的严峻形势下,应采取有效措施,控制酸雨污染。

从成因来看,中国区域酸雨主要是人类活动排放到大气中的SO_2和NO_x等酸性物质造成的,而且绝大多数排放来自于工业排放。这点从中国区域SO_2排放量的变化与酸雨形势变化的一致性以及大气成分区域本底站的降水中硫酸根和硝酸根离子浓度上升的事实得到印证。

由于本研究主要是针对中国区域范围的酸雨变化情况,对于小的区域如大中城市近几年机动车的快速增加和能源结构的调整给城市酸雨带来的影响和变化等问题,应结合降水化学分析在今后开展研究和探讨。另外,目前降水化学方面的监测资料仍然较少,中国气象局站网中只有全球本底站和3个区域本底站有降水化学的资料。因此,对局地或小范围的酸雨原因难以做出具体、细致的分析,影响对策措施的合理制定,今后应在降水化学方面加大监测力度。

致谢:感谢王亚强副研究员协助绘制了图1,感谢丁国安研究员对本研究的指导。

References

Cao Hongfa, Shu Jianmin, et al. 1993. Effect of acidic deposition on crops and forest and economic loss in Guangdong and Guangxi province // State Environmental Protection Administration of China. Air Pollution Prevention and Control Technologies (in Chinese). Beijing: Science Press,844-851

Chen Fu, Chai Fahe. 1997. Control strategy of acid deposition in China. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 10(1): 27-31

Chen Xiaoling, He Dongjin, et al. 2007. Research advance in acid rain injury mechanism to garden plants. Subtropical Agriculture Research (in Chinese), 2(2):99-103

China Meteorological Administration. 2005. Specifications for Monitoring of Acid Rain (in Chinese). Beijing:China Meteorological Press,24-25

Cowling E B. 1982. Acid precipitation in historical perspective. Environ Sci Tec, 16(2):110-123

Dai Shugui, Yue Guichun, Wang Xiaorong. 1997. Environmental Chemistry (in Chinese). Beijing:Higher Education Press, 60-63

Ding Guoan, Xu Xiaobin,et al. 1997. The actuality and trend of acid rain in China. Chinese Sci Bull (in Chinese), 42:169-173

Ding Guoan, Xu Xiaobin, Wang Shufeng, et al. 2004. Database from the acid rain network of China meteorological administration and its preliminary analyses. J Appl Meteor (in Chinese), 15(suppl):85-94

Dong Huiqing, Huang Haihong, et al. 2003. Analysis of frequency characters of acid rain in Naning city. Meteor Sci Techn (in Chinese), 31(2):101-108

Fan Houbao. 2002. On worldwide acid rain research. J Fujian College Forestry (in Chinese), 22(4):371-375

Fan Houbao. 2003. A review of research on interactions between acid rain and forest decline. J Fujian College Forestry (in Chinese), 23(1):88-92

Feng Xianqing. 2004. Summary of acid rain's status, causes of natural formation and counter measures research in China. Yunnan Geographic Environ Res (in Chinese), 16(1):25-28

Feng Zongwei, Cao Hongfa, Zhou Xiuping. 1999. Effects of Acid Deposition on Ecoenvironment and Its Control Strategies (in Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 125-130

Feng Zongwei. 1993. The Impacts of Acid Rain on Ecoenvironment (in Chinese). Beijing: Chinese Science & Technic Press,177pp

Fu Xiaoping, Tian Dalun. 2006. Research progress of the effect of acid rain on plant. J Northwest Forestry University (in Chinese), 21(4): 23-27

Hao J M, Duang L, Zhou X L, et al. 2001. Application of a LRT model to acid rain control in China. Environ Sci Techn, 35(17): 3407-3415

Hua Rimao,et al. 1998, Advance of research of acid rain in China. J Anhui Agriculture University (in Chinese), 25 (2):206-210

Huang Haihong, Dong Huiqing,et al. 2004. Characteristics and origin of acid rain in Nanning city. J Nanjing Institute of Meteor (in Chinese), 27(6):784-790

Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Liu Shuairen, et al. 1995. A study on the formation process of acid rain in some areas of Southwest China. Scientia Atmospheric Sinic (in Chinese), 19(3):359-366

Li Ji, Liu Zhengtao, Shu Jianmin, et al. 2005. Analysis on the forest soil acidification status quo in typical acid rain areas of central and south China. China Environ Sci (in Chinese), 25:77-80

Lin Changcheng, Lin Xiangming, Zhou Yan, et al. 2005. Study on the relationship between meteorological conditions and acid rain in Fuzhou, Fujian province. J Tropical Meteor (in Chinese), 21(3): 330-336

Liu Baozhang, Li Jinlong, Wang Jingyun and Tang Xiaoyan. 1997. China Environ Sci (in Chinese), 17(2): 103-107

Liu Bin. 2001. Formation harm and prevention of acid rain. Environ Sci Techn (in Chinese), 4(96): 21-23

Liu Junfeng, Song Zhiguang, Xu Tao. 2006. Study on ionic composition of rainwater at Guangzhou and the primary factors of rainwater acidity. Chinese J Environ Sci (in Chinese), 27(1): 1998-2002

Liu Juxiu. 2003. Current and future study about effects of acid deposition on forest ecosystems. Chinese J Ecology (in Chinese), 22(5): 113-117

Mao Jietai. 1992. A statistic model on the range of acid deposition in Guangdong and Guangxi province. J Environ Sci (in Chinese), 12 (1): 28-35

Mei Ziliang, Liu Zhongqiu, Liu Li, et al. 2005. Analysis on the variation of acidity and chemical compositions of rainwater in Chengdu urban area. Sichuan Environment (in Chinese), 24(3): 52-55

Menz F C, Seip H M. 2004. Acid rain in Europe and the United States: An update. Environmental Sci Policy, 7: 253-265

Ottar B. 1976. Organization of long range transport of air pollution monitoring in Europe// Dochinger L S, Seliga T A. lst. Internat. Symp. Acid Precipitation and the Forest Eco System. Pennsylvania, 105-117

Project Report of the 7th Five-year Plan for Science and Technology. 1990. Causes and Effects of Acid Rain in the Southwest China and its Control Strategies

Project Report of the 8th Five-year Plan for Science and Technology (85-912-01). 1996. Acid Deposition and Its Ecosystem Effect

Project Report of the 9th Five-year Plan for Science and Technology (962911205203). 2001. Basic Research and National Project On the Controlling of Acid Rain in China.

Shannon J D. 1999. Regional trends in wet deposition of sulfate in the United States and SO_2 emissions from 1980 through 1995. Atmospheric Environment, 33: 807-816

Tang A H, Zhuang G S, Wang Y, et al. 2005. The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing. Atmospheric Environment, 39: 3397-3406

Tian Hezhong, Lu Yongqi, Hao Jiming. 2001. Control courses and progress of acid rain and SO_2 pollution in China. Electric Power (in Chinese), 34(3): 51-57

Wang Wenxing. 1993. Research on the contributing factors of acid rain in China . China Environ Sci (in Chinese), 13(6): 401-407

Wang Wenxing. 1994. Research on the cause of acid rain in China. China Environ Sci (in Chinese), 14(5): 323-329

Wang Wenxing, et al. 1992. Regional sources of acid deposition in South China. J Environ Sci (in Chinese), 12(1): 1-5

Wang Wenxing, Liu Hongjie, et al. 1997. The origins of acid rain in the eastern coastal areas in China. China Environ Sci (in Chinese), 17(5): 387-392

Wang Zifa, Gao Chao. 2007. Modeling studies of acid rain in China: Progress and challenge. Chinese J Natur (in Chinese), 29(2): 78-82

Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, et al. 1997. Studies on transport of acid substance in China and East Asia Part I: 3-D Eulerian ransport model for pollutants. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 21: 366-378

Wu Dan, Wang Shigong, Shang Kezheng. 2006. Progress in research of acid rain in China. Arid Meteor (in Chinese), 24(2): 70-77

Wu Xiandu, Shi Songwei, et al. 2004. Analysis of acid rain survey and meteorological condition in Wenzhou. J Zhejiang Meteor (in Chinese), 25(4): 20-24

Xie Haiwei, Zhang Yan, Yin Lianqing. 2004. Present situation of research of acid rain. Environ Sci Techn (in Chinese), 27: 179-181

Xing Yanxian. 2002. Effects of acid deposition on agricultural production and its control strategies. Soil and Environment (in Chinese), 11(1): 98-100

Xu Longjun, Lan Jintao. 2005. Analysis on acid rain regularity in Chongqing and its control. Mining Safety & Environmental Protection (in Chinese), 32(5): 16-19

Yang Zonghui. 2002. Acid rain in China and its countermeasures. Environmental Science Survey (in Chinese), 21(1): 25-26

Zhang Xueyuan, An Baigang, et al. 2002. Runoff and corrosion of material due to acid rain. Corrosion Sci Protection Techn (in Chinese), 14(3): 157-160

Zhang Yong. 2007. The characteristics of acid rain pollution and the causes for its formation during the tenth five-year plan in Chongqing. J Southwest University (Natural Science) (in Chinese), 129(14): 164-168

Zhu Shu, Qiu Shiping, Qin Jun. 2006. Analysis of variation tendence of acid rain in Liuzhou. J Guangxi Academy of Sci (in Chinese), 22 (3): 228-230

Zhuang Mazhan. 1998. Atmosphere pollution and acid rain present situation and tendency in Xiamen. Fujian Environment (in Chinese), 15(1): 21-22

附中文参考文献

“八五”国家科技攻关项目报告(85-912-01). 1996. 我国酸沉降及其生态环境影响研究.

曹洪法,舒俭民,刘燕平等. 1993. 酸沉降对两广地区农作物、森林影响的经济损失//国家环境保护局. 大气污染防治技术研究. 北京:科学出版社, 844-851

陈复, 柴发合. 1997. 我国酸沉降控制策略. 环境科学研究, 10(1): 27-31

陈笑玲,何东进,洪伟等. 2007.酸雨胁迫对园林植物伤害机理的研究进展.亚热带农业研究,2(2):99-103

戴树桂,岳贵春,王晓蓉. 1997.环境化学.北京:高等教育出版社,60-63

丁国安,徐晓斌,房秀梅等. 1997.中国酸雨现状及发展趋势.科学通报,42:169-173

丁国安,徐晓斌,王淑凤等. 2004.中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析.应用气象学报,15(增刊):85-94

董蕙青,黄海洪等. 2003.南宁市酸雨频率特征分析.气象科技,31(2):101-108

樊后保. 2002.世界酸雨研究概况.福建林学院学报,22(4):371-375

樊后保. 2003.酸雨与森林衰退关系研究综述.福建林学院学报,23(1):88-92

冯砚青. 2004,中国酸雨状况和自然成因综述及防治对策探究.云南地理环境研究,16(1):25-28

冯宗炜,曹洪法,周修萍. 1999.酸沉降对生态环境的影响及其恢复技术.北京:中国环境科学出版社,125-130

冯宗炜. 1993.酸雨对生态系统的影响.北京:中国科学技术出版社,177pp

付晓萍,田大伦. 2006.酸雨对植物的影响研究进展.西北林学院学报,21(4): 23-27

花日茂等. 1998.我国酸雨的研究进展.安徽农业大学学报,25(2):206-210

黄海洪,董蕙青等. 2004.南宁市酸雨特征及来源分析.南京气象学院学报,27(6):784-790

黄美元,沈志来,刘帅仁等. 1995.中国西南典型地区酸雨形成过程研究.大气科学,19(3):359-366

"九五"国家科技攻关项目报告(962911205203) .2001.我国酸雨控制国家方案基础研究

李霁,刘征涛,舒俭民等. 2005.中国中南部典型酸雨区森林土壤酸化现状分析.中国环境科学,25(增刊):77-80

林长城,林祥明,邹燕等. 2005.福州气象条件与酸雨的关系研究.热带气象学报,21(3): 330-336

刘宝章,李金龙等. 1997.青岛酸雨天气边界层气象特征.中国环境科学,17(2):103-107

刘彬. 2001.酸雨的形成、危害及防治对策.环境科学与技术,4(96):21-23

刘菊秀. 2003.酸沉降对森林生态系统影响的研究现状及展望.生态学杂志,22(5):113-117

刘君峰,宋之光,许涛. 2006.广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究.环境科学,27(1):1998-2002

毛节泰. 1992.广东、广西地区酸沉降统计模式的研究.环境科学学报,12(1):28-35

梅自良,刘仲秋,刘丽等. 2005.成都市区酸雨变化及降雨化学组成分析.四川环境,24(3):52-55

"七五"国家科技攻关项目报告. 1990.西南地区酸雨来源、影响和控制对策研究

田贺忠,陆永棋,郝吉明等. 2001.中国酸雨和二氧化硫污染控制历程及进展.中国电力,34(3):51-57

王文兴,刘红杰等. 1997.我国东部沿海地区酸雨来源研究.中国环境科学,17(5):387-392

王文兴. 1994.中国酸雨成因研究.中国环境科学,14(5):323-329

王文兴等. 1992.华南地区春季酸沉降区域源解析.环境科学学报,12(1):1-5

王文兴等. 1993. 影响我国降水酸性因素的研究,中国环境科学,13(6):401-407

王自发,高超等. 2007.中国酸雨模式研究回顾与所面临的挑战.自然杂志,29(2):78-82

王自发等. 1997. 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.大气科学,21: 366-378

吴丹,王式功,尚可政. 2006.中国酸雨研究综述.干旱气象,24(2):70-77

吴贤笃,施松微等. 2004.温州市酸雨特征及气象条件分析.浙江气象,25(4):20-24

解海卫,张艳,尹连庆. 2004.酸雨研究的现状.环境科学与技术,27(增刊):179-181

邢廷铣. 2002.酸雨对农业生产的影响及其对策.土壤与环境,11(1):98-100

徐龙君,兰劲涛. 2005.重庆市酸雨规律分析及防治对策.矿业安全与环保,32(5):16-19

杨宗惠. 2002.我国酸雨状况和对策.云南环境科学,21(1):25-26

张学元,安百刚,韩恩厚等. 2002.酸雨对材料的腐蚀冲刷研究现状.腐蚀科学与防护技术,14(3):157-160

张勇. 2007.重庆市十五期间酸雨污染特征及成因分析.西南大学学报,129(14):164-168

中国气象局. 2005. 酸雨观测规范.北京:气象出版社,24-25

朱姝,仇士萍,秦军. 2006.柳州市酸雨变化趋势分析.广西科学院学报,22 (3):228-230

庄马展. 1998.厦门大气污染物及酸雨现状与发展趋势.福建环境,15(1):21-22