

杜建飞,成天涛,马剑丽.2015.上海地区酸雨气候特征及成因分析[J].大气科学学报,38(1):137-143.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130830005.
Du Jian-fei, Cheng Tian-tao, Ma Jian-li.2015.The climatic characteristics and formation of acid rain in Shanghai[J].Trans Atmos Sci,38(1):137-143.
(in Chinese)

上海地区酸雨气候特征及成因分析

杜建飞¹,成天涛²,马剑丽³

(1.上海市宝山区气象局,上海 201901;2.复旦大学 环境科学与工程系,上海 200433;3.上海市宝山区环境监测站,上海 201901)

摘要:基于宝山及浦东两个气象站的酸雨历史观测资料,分析了上海地区酸雨长期变化的气候特征及其形成原因,并对分析降水酸度的空间分布差异。宝山站降水总体上呈弱酸性,多年平均 pH 值为 5.21,酸雨率为 24%。降水 pH 值年际变化仅呈现微弱下降趋势,电导率 K 值呈明显地逐年上升变化,平均每年增加 $2.0 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,而酸雨率波动较大,由 2004 年 8% 增至 2009 年 48%。降水 pH 值在冷季较低,暖季较高,电导率 K 值正相反。浦东酸雨平均 pH 值 4.38,低于宝山的 5.08,酸雨率浦东 79.5%,远高于宝山的 33%。大气污染物 SO_2 、 NO_2 及 PM_{10} 浓度与酸雨 pH 值呈负线性相关,而与电导率 K 值呈正相关。大气颗粒物含量、污染物化学组成、降水量、风向等对降水 pH 值及酸雨率变化具有重要的影响作用。

关键词:上海;酸雨;气候特征

文章编号:1674-7097(2015)01-0137-07 中图分类号:P461.2;P435 文献标志码:A

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130830005

The climatic characteristics and formation of acid rain in Shanghai

DU Jian-fei¹, CHENG Tian-tao², MA Jian-li³

(1.Shanghai Meteorological Service, Shanghai 201901, China;

2.Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

3.Shanghai Baoshan Environment Monitoring Station, Shanghai 201901, China)

Abstract: Based on the historical observation data of acid rain at Baoshan and Pudong in Shanghai, the long-term trend and formation of regional acid rain changes and the spatial distribution of precipitation acidity were analyzed. Generally speaking, precipitation at Baoshan site shows weak acidity, the mean rainfall pH is 5.21 and the mean acid rain rate is 24%. The inter-annual variation of rainfall pH shows a slightly downward trend. The electrical conductivity K increases obviously year by year with an average annual increase at $2 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$. The acid rain rate fluctuates from 8% in 2004 to 48% in 2009. The rainfall pH is usually lower in cold season and higher in warm season. It is the opposite for the electrical conductivity K. The average pH of acid rain in Pudong is 4.38, lower than that in Baoshan at 5.08. The acid rain rate in Pudong is 79.5%, much higher than that in Baoshan at 33%. Atmospheric pollutants SO_2 , NO_2 and PM_{10} concentrations are negatively correlated with rain pH and positively related to electrical conductivity. Atmospheric particulate pollutants, chemical composition, precipitation and wind direction exert important effects on the changes of precipitation pH and acid rain rate.

Key words: Shanghai; acid rain; climatic characteristics

收稿日期:2013-08-30;改回日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41075096;21190053;21177025;21077025;40975075);上海市科委基础研究重大项目(12DJ1400100;12DZ2260200);上海市气象局区县局科技开发项目(QX200710);教育部博士点前沿领域(0110071130003);欧盟 FP7 计划(AMIS, PIRSES-GA-2011)

通信作者:成天涛,博士,教授,研究方向为大气环境,ttcheng@fudan.edu.cn.

0 引言

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的大气降水,又被称作“空中死神”,其可使湖泊水质酸化而导致水生生物的数量和种类减少,土壤营养元素流失而导致土壤贫瘠,影响植物正常发育,建筑物腐蚀而加速风化,以及刺激皮肤而危害人体健康(Gorham, 1998)。我国是继欧洲和北美之后世界上的第三大酸雨区,酸雨已成为现阶段面临的严重环境问题之一(王文兴, 1997;王文兴和丁国安, 1997;王文兴和许鹏举, 2009),每年我国因酸雨和主要致酸气体造成的直接和间接经济损失高达 1 100 亿元。大气降水化学是大气化学的重要组成,酸雨研究可上溯到 18 世纪 40 年代,英国化学家 Smith R.A. 在曼彻斯特调查酸沉降并首次提出“酸雨”(莫天麟, 1984)。此后欧洲和北美降水酸化问题引起科学家的高度重视,先后建立了大气酸沉降监测网,并连续观测大气干、湿沉降,20 世纪 90 年代东亚也组建了东亚酸沉降监测网。我国大规模酸雨监测始于 20 世纪 70 年代,酸雨发展大致经历两个阶段(丁国安等, 2004):80 到 90 年代中期急剧发展期;90 年代后期到 21 世纪初相对稳定期。酸雨研究从降水 pH 值长期变化趋势(Clow and Mast, 1999;宋玉芝等, 2005;汤洁等, 2010)、形成机理(Cariolle et al., 2008;高俊等, 2012)、无机(叶小峰等, 2005;马琳等, 2011)、有机(江伟等, 2009;Moschonas and Glavas, 2002)和重金属化学成分(Song and Gao, 2009)、酸沉降负荷一直到酸沉降模拟(李宗恺等, 2000;Davisa and Swall, 2006;王自发等, 2007)到影响因素分析(吴洪颜等, 2008;蒲维维, 2012),并逐渐开展从地面到高空的云雾水研究(鲍宝堂等, 1995;丁国安等, 2006)。

随着全球气候的持续变暖,大气污染物对气候变化的影响更为突出,人为活动与整个大气层及气候系统的相互作用关系更加紧密(丁一汇等, 2009)。在此背景下,我国主要致酸物质的排放将持续显著增加,环境酸化及酸雨形势愈加严峻,酸雨已从硫酸型转为硫酸、硝酸混合型,国家为此批准并资助 2005—2009 年的重点基础研究发展计划 973 项目“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理”,旨在深入了解我国酸雨现状、大气循环及其对生态系统影响,预测酸雨发展趋势并制定酸雨调控对策(王文兴和许鹏举, 2009;张新民等, 2010)。上海伴随着城市化推进和快速的经济增长,燃煤和汽车尾气排放逐年大幅增加,酸雨污染问题越来越突出

(江研因等, 1983;沙晨燕等, 2007)。上海地区酸雨研究始于 1979 年,江研因等(1983)全面分析了上海各区酸雨时空分布以及气象条件与酸雨的关系。邵德民等(1989)开展了酸雨综合观测,采样和分析高空云水,研究气溶胶及气象条件对酸雨的贡献。然而,到目前为止,关注该地区酸雨长期发展趋势和气候特征的研究鲜有报道。

本文通过分析降水 pH 值和电导率长期观测的历史资料,了解上海地区酸雨的年际变化趋势以及月变化特征,初步探讨酸雨与大气污染气体、颗粒物及气象因子的关系,研究结果将为上海市酸雨控制和治理提供一定的科学依据。

1 采样和分析方法

所用资料来自上海市宝山区气象台 1992—2009 年 17 a 的酸雨及气象要素观测记录,以及宝山和浦东气象站 2007—2009 年同步的酸雨观测,包括降水 pH 值、电导率 K 值,降水采样、样品测量和质量控制的技术要求与操作规范参见中国气象局《酸雨业务观测规范》(GB/T19117-2003)。与酸雨观测同期的大气环境 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 污染物浓度数据来自上海环境监测中心。基于上述数据,本文统计分析了降水 pH 值的概率分布、年际变化和月变化,以及其与大气主要污染物、气象因子相互关系。

2 结果与讨论

2.1 降水 pH 值概率分布

宝山站于 1992 年 6 月至 2009 年 12 月期间总计测量了 1 456 个降水样品,其中约有 24% 的降水 pH 值低于 5.6,降水量加权平均 pH 值是 5.21,显示降水总体上为弱酸性。pH 最低值 3.03 出现在 1998 年夏季 7 月 3 日,最高值 8.44 出现在 1995 年秋季 9 月 20 日。图 1 为降水 pH 值的概率分布,显而易见其分布基本符合正态分布, pH 在 6.0~7.0 之间出现概率最高,占到全部样品的 46%,其次是 pH 值 8.0,占总数的 15.8%,而 pH 值小于 4.0 和大于 8.0 出现的概率均极低,各占总量的 0.3% 和 0.6%。

2.2 降水 pH 值的年际变化

图 2 显示宝山站降水年均 pH 值的时间变化序列,年平均 pH 值在 4.8 与 5.95 之间起伏,最高值出现在 2004 年,最低值出现在 2009 年,总体上 pH 值并无明显的长期变化趋势,似乎存在极其微弱的下降。然而,已有研究结果表明上海市全区平均的降

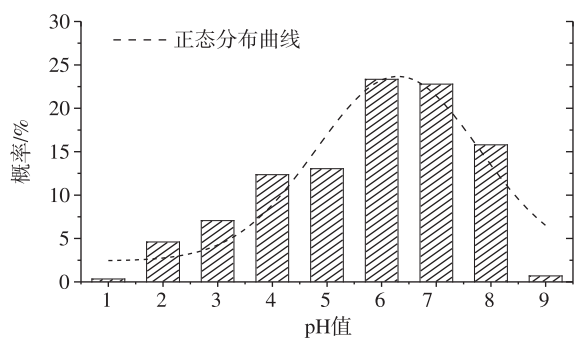


图1 宝山地区降水 pH 值概率分布

Fig.1 Probability distribution of pH in rainwater at Baoshan

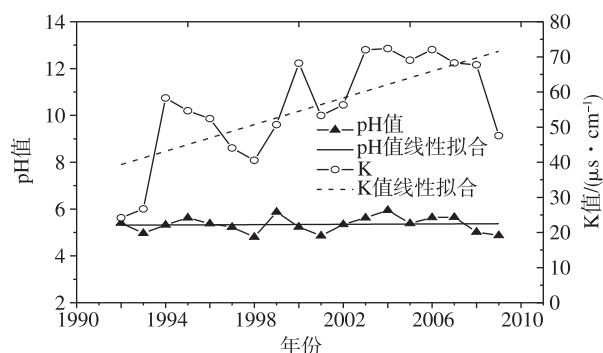


图2 宝山地区降水 pH 值和电导率 K 值年际变化

Fig.2 Inter-annual variation of pH and K in rainwater at Baoshan

水年均 pH 值呈明显下降趋势(沙晨燕等,2007),宝山单站与上海整体降水 pH 值长期变化的这种迥异,暗示该地区降水酸度存在很大的空间分布差异,近地面大气污染特别是颗粒污染物的局地差异是造成酸雨 pH 值区域不均一的最有可能原因之一(冯加良等,2010)。相比降水 pH 值的下降趋势,年均电导率 K 值总体上呈上升趋势,且平均以每年 $2.0 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率逐年增加。

图3显示了酸雨率的年际变化。降水酸雨率从2004年8%增至2009年48%,变化可大体分为四个阶段:第一阶段是1993年至1996年呈下降趋势,第二阶段1996至2001年总体上升,第三阶段是2001至2004年下降,第四阶段2004年至2009年显著上升,特别是2008—2009酸雨率达到历史最高值。酸雨率与年均降水 pH 值具有十分吻合的相反年际波动特征,尽管步调不完全一致,电导率 K 值却与年均降水 pH 值基本上具有相似的年际波动。

图4给出了低云量、年霾日百分比、年日均能见度低于10 km 百分比的年际变化。霾是大气气溶胶在较低相对湿度环境中引起的低能见度天气(小于10 km),被认为是大气细颗粒物诱发的大气污染事

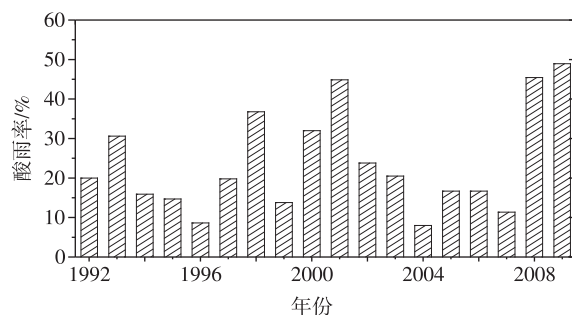


图3 酸雨率的年际变化

Fig.3 Inter-annual variation of acid rain rate at Baoshan

件,灰霾发生日数的增多意味着大气细颗粒污染日趋严重。对比图4可以看出,灰霾年日数呈增加趋势,与电导率趋势相同;而低云量及低能见度日数总体呈现下降趋势,与降水 pH 值趋势相似。这一结果表明,上海酸雨的形成机制非常复杂,影响因素较多,除局地排放颗粒污染物外,气态污染物、大气污染区域输送、大气氧化性、气象条件等也可能具有重要作用。

2.3 降水 pH 值的月季变化

图5给出宝山站多年的月均降水 pH 值和电导率 K 值,可以看出,月均降水 pH 值为 5.11~5.48,各月并没有表现出较大的差异。相比之下,冬春季降水酸性较强,这可能是由于冬季燃煤量增加和机动车冷启动而造成 SO_2 和 NO_2 的排放量明显上升,这些致酸污染气体在大气中发生气-粒转化、颗粒表面非均相化学反应及云内外液相化学,从而导致大气中含硫酸和硝酸盐颗粒增多,最终致使降水偏酸。夏秋季降水酸性相对较弱,较大降水量会导致雨水的氢离子稀释,从而减轻降水的酸度。另一个方面,夏秋季对流层较高和大气对流活跃,有利于大气中污染物的稀释扩散,势必对降水酸性减弱起到一定的贡献作用。酸雨发生概率季节变化也较为明显,冷季酸雨发生率明显高于暖季,其形成原因类似降水酸性月变化。

2.4 酸雨局地差异分析

2.4.1 宝山及浦东酸雨特征

表1给出2007—2009年宝山与浦东两站的酸雨统计特征,可以看出,浦东的酸雨程度明显要比宝山严重,宝山站3a的雨量加权平均 pH 值为 5.08,酸雨率 33%,而浦东雨量加权平均 pH 值为 4.38,酸雨率 79.5%。宝山的 K 值明显比浦东要大,宝山站3a雨量加权平均电导率(K值)为 $60.4 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,而浦东站雨量加权平均电导率(K值)为 $43.2 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。电导率 K 值反映降水中的离子浓

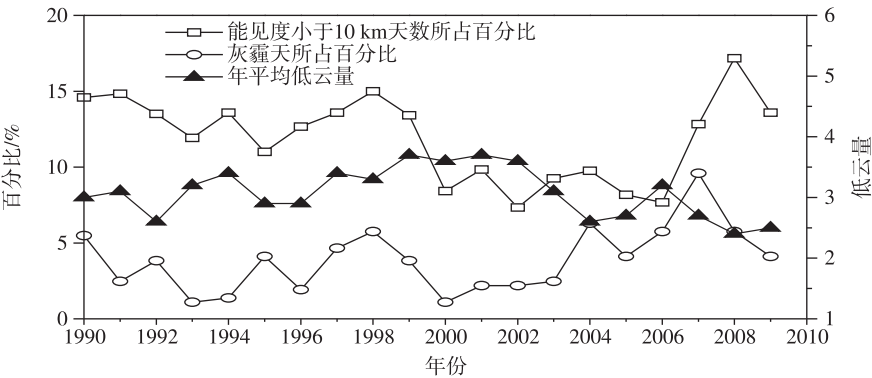


图 4 年灰霾日百分比、日均能见度小于 10 km 百分比及低云量的年际变化

Fig.4 Inter-annual variations of hazy-day percentage, vis-less-10 km day percentage and low cloud amount

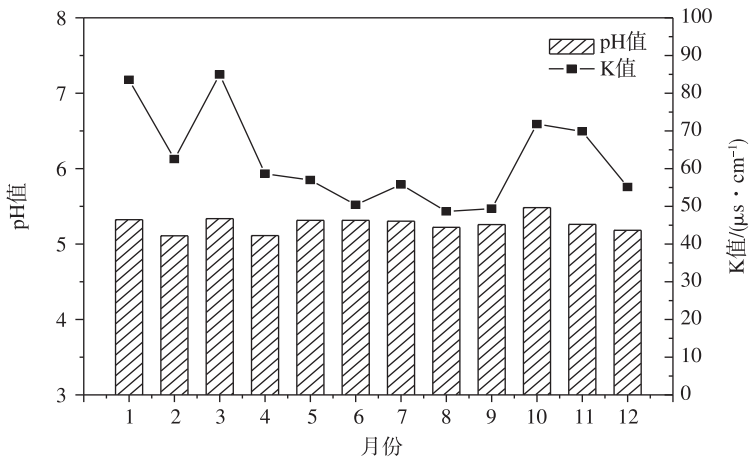


图 5 宝山多年的月平均酸雨 pH 值和电导率 K 值

Fig.5 Variation of monthly average pH and K in rainwater at Baoshan

度,宝山 K 值高于浦东,从侧面印证了宝山大气中可溶性气溶胶浓度要高于浦东,空气质量浦东相对较好。

2007 年,宝山站平均 pH 值为 5.76,未呈现酸雨特征,浦东站显酸性 pH 值平均 4.59,而且浦东站酸雨发生概率 73.0% 远高于宝山站的 9.5%。宝山站平均电导率 K 值为 67.7 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,而浦东站同期平均 K 值为 46.3 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,宝山站的 K 值明显高于浦东站。2008 年,宝山站平均 pH 值为 5.02,达到酸雨标准,酸雨发生概率为 46.5%,平均电导

表 1 2007—2009 年宝山与浦东站的酸雨特征

Table 1 Characteristics of acid rain during 2007—2009 at Baoshan and Pudong

	2007 年			2008 年			2009 年		
	pH 值	酸雨发生概率/%	K 值	pH 值	酸雨发生概率/%	K 值	pH 值	酸雨发生概率/%	K 值
宝山	5.76	9.5	67.7	5.02	46.5	67.7	4.87	49.0	47.5
浦东	4.59	73.0	46.3	4.27	79.6	45.1	4.36	87.4	37.9

率 K 值为 67.7 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,而浦东站平均 pH 值为 4.27,属较强酸雨,酸雨发生概率为 79.6%,平均 K 值为 45.1 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。2009 年,宝山站平均 pH 值为 4.87,呈现酸雨特征,酸雨发生概率为 49.0%,平均 K 值为 47.5 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,而浦东站平均 pH 值为 4.36,达到强酸雨标准,酸雨发生概率为 87.4%,平均 K 值为 37.9 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。宝山站 pH 值的年际变化较大,而浦东站则相对较小,K 值亦然。总之,浦东站的酸雨危害程度要高于宝山站。

2.4.2 酸雨 pH 值与大气污染物关系

宝山、浦东两站 2007—2009 年酸雨月均 pH 值、K 值与本地月均 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的相关性分析如表 2 所示。由表 2 可知,宝山 pH 值与 SO₂、NO₂ 以及 PM₁₀均呈现负相关,PM₁₀的相关系数较高为-0.358,而宝山导电率 K 值与 SO₂、NO₂ 及 PM₁₀均是正相关,SO₂ 的相关系数最高 0.53,其次是 NO₂ 的相关系数 0.422,与 PM₁₀ 相关系数仅为 0.144。浦东 pH 值与 SO₂、NO₂ 以及 PM₁₀也呈负相关,SO₂ 的相关系数最高-0.532,而 K 值与 SO₂、NO₂ 以及 PM₁₀呈正相关,相关系数为 0.556~0.66。不难发现,SO₂ 和 NO₂ 对局地颗粒物中可溶组分形成甚至 PM₁₀有相当的贡献,特别在浦东站表现更为明显,但它们并不一定导致酸雨发生,PM₁₀中还存在其他成分不利降水酸化,例如碱性成分。

表 2 宝山、浦东两站酸雨月均 pH 值、K 值与月均 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的相关系数

Table 2 Correlation between monthly pH, K and PM₁₀, SO₂, NO₂

大气污 染物	宝山		浦东	
	pH 值	K 值	pH 值	K 值
PM ₁₀	-0.358 ¹⁾	0.144	-0.332	0.556 ³⁾
SO ₂	-0.142	0.530 ³⁾	-0.532 ³⁾	0.660 ³⁾
NO ₂	-0.161	0.422 ²⁾	-0.334	0.583 ³⁾

注:1)通过 0.05 信度的显著性检验;2)通过 0.01 信度的显著性检验;3)通过 0.001 信度的显著性检验。

酸雨形成原因主要是大气中 SO₂、NO₂ 经均相、非均相化学反应生产硫酸盐和硝酸盐,导致降水成酸性,SO₂ 与 NO₂ 含量增加必然致使降水酸性增强,pH 值与 SO₂、NO₂ 呈现负相关(段婧和毛节泰,2008)。然而,若大气颗粒物中同时含有大量的碱基离子,可以中和大气降水中的酸性成分,因此大气颗粒物进入降水,颗粒物的化学性质可缓冲或者加强降水酸化(王文兴和许鹏举,2009)。冯加良等(2010)等报道了宝山 PM_{2.5}除了秋季外均呈碱性,可见宝山颗粒物矿物质含量高且呈碱性,极大地缓冲了降水酸性,而浦东细颗粒物含量高,加强了降水的酸性。K 值与污染气体的正相关也反映了降水中的离子含量与这些污染气体和大气颗粒物有直接关系。大气降水对颗粒物的冲刷作用是空气自洁方式,大气中污染气体及颗粒物增加,降水离子浓度随之而增大,电导率因而加大。由此可见,宝山和浦东气溶胶性质不同,可能是造成两地降水 pH 值不同

状况的重要原因。

2.4.3 酸雨 pH 值、K 值与降水量关系

将日降水量划分为 5 个等级,并对宝山、浦东两站不同降水级别下的降水 pH 值、K 值以及酸雨率进行了分析,结果见表 3。由表 3 可见,宝山站各级降水的平均 pH 值均大于 5.0,降水量小于 5 mm 级的 pH 值最高 5.23,然后随着雨量增加,pH 值先降后升再降,最低值为 5.04,总体上呈波动下降趋势;降水 K 值随着雨量增加而明显降低,最高值 101.35 μs·cm⁻¹出现在小于 5 mm 级降水,最低值 51.87 μs·cm⁻¹出现在大于 50 mm 级别,可见雨量对降水中污染物的稀释作用显著;酸雨率在雨量较小时偏小,然后随着雨量增加先升后降,最高值 50.9%对应 5~10 mm 降水档,这可能与碱性颗粒物逐渐被冲刷,大气中中和物质减少,导致降水酸性增加。浦东各级降水 pH 平均值全部小于 5.0,最高值出现在小于 5 mm 降水等级 4.66,最低值 4.33 出现在 10~20 mm 降水等级,酸雨情况比宝山严重;K 值出现与宝山站情况类似,随着降水量增加,K 值减小,各级降水 K 值均小于宝山,最高值 87.42 μs·cm⁻¹出现在小于 5 mm 降水等级,说明大气中颗粒物可溶含量较宝山少,雨水较为清洁,降水中酸性物质比例高于宝山;浦东各级降水酸雨率均高于宝山,而且随着雨量增加酸雨率明显增大。需要提醒相关性只是定性分析,仅仅表明除大气污染物外,降水量对降雨酸度也有一定程度的影响,特别是在较低雨量的增长阶段(0~10 mm),降水酸度、离子浓度及酸雨日数量均有大幅变化。

表 3 不同降水等级宝山和浦东的降水酸度、酸雨率比较

Table 3 The rainwater acidity and acid rain rate of different daily rainfall amount at Baoshan and Pudong

降水级 别/mm	宝山			浦东		
	pH 值	K 值/ (μs·cm ⁻¹)	酸雨 率/%	pH 值	K 值/ (μs·cm ⁻¹)	酸雨 率/%
<5	5.23	101.35	21	4.66	87.42	69.2
5~10	5.05	64.36	50.9	4.64	47.43	88.2
10~20	5.12	65.14	36.4	4.33	45.41	85
20~50	5.04	52.32	46.5	4.35	39.2	83.6
>50	5.08	51.87	45.5	4.35	32.61	88.9

2.4.4 酸雨 pH 值、K 值与主导风向的关系

图 6 给出酸雨日的风向玫瑰分布。由于 2007—2009 年期间,有效酸雨采样日中没有出现主导风向为偏西风的样本,故偏西风数据缺失。从图

6 可知,在宝山站主导风向为北到西北风的情况下,降水 pH 值最大 6.10,酸雨程度最轻,而主导风向为东到东北风时,pH 值最小仅为 4.83,酸雨程度最重。总体上,主导风向为东北风、东到东北风、东南风和西到西北风的情况下,酸雨较严重,而当主导风向为北到西北风、南到西南风和西南风的情况下,酸雨较轻。在浦东站,在主导风向为北到西北风的情况下,降水 pH 值最大 5.07,而在主导风向为偏南风的情况下,降水 pH 值最小仅为 4.14,总体来说主导风向为东到东北风、偏东风和偏南风时,酸雨较严重,而当主导风向为北到西北风、南到西南风和东到东南风时,酸雨程度较轻。宝山、浦东两站在主导风向为北到西北风时,酸雨程度都有所缓解,这与北方输送的颗粒物有关,北方输送的颗粒物主要呈碱性,对缓解酸雨有一定作用(Wang et al., 2006)。而在主导风向为东到东北风和东南风时,酸雨较严重,与细颗粒物浓度含量较高有关。

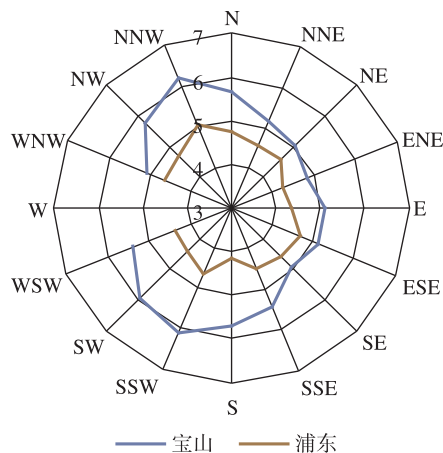


图 6 宝山、浦东两站 2007—2009 年主导风向条件下的酸雨 pH 值

Fig. 6 pH in different dominant wind directions during 2007—2009 at Baoshan and Pudong

由图 7 可知,宝山站在主导风为西北风时 K 值最大,达到 $110.8 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,在南到西南风的情况下 K 值最小 $32.4 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。总体来说,主导风向为东北风、北到东北风、西北风、西到西北风、西到西南风、西南风等时 K 值较大,而主导风向为东到东北风、偏东风、东到东南风、东南风、南到东南风、偏南风 and 南到西南风等时 K 值较小。浦东主导风向为北到西北风时 K 值最大 $87.0 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,主导风向为偏北风时 K 值最小 $30.8 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,总之,K 值较大出现在北到西北风和南到东南风的情况,其他主导风向 K 值均较小。近地面风向和风速对局地污染物扩散影响极大,气团经过分布在不同风向方位

的不同排放源,导致处于下风位置站点大气颗粒污染化学组成的差异,将势必在一定程度上造成降水酸度的波动。

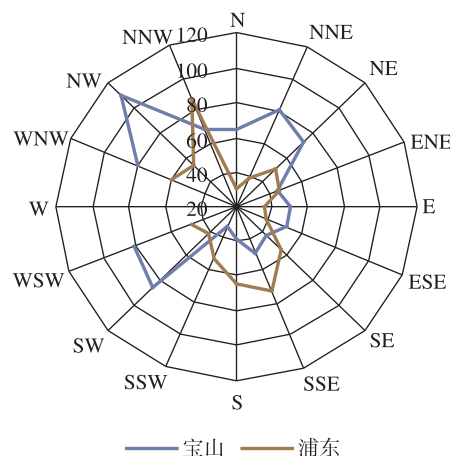


图 7 宝山、浦东两站 2007—2009 年主导风向条件下的酸雨 K 值

Fig. 7 K in different dominant wind directions during 2007—2009 at Baoshan and Pudong

3 结论

1) 宝山站降水多年呈弱酸性,平均 pH 值为 5.21,酸雨率达 24%。降水 pH 值年际变化趋势不明显,与上海市平均 pH 值变化趋势相差较大。pH 值在冷季较低,暖季较高,电导率 K 值相反。这一势态说明酸雨在上海本地区内部存在较大的时空与空间分布不均一性。

2) 浦东酸雨状况远比宝山严重,而降水中可溶粒子含量宝山远大于浦东。降水酸度与大气污染物关系密切,降水 pH 值与 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 呈负线性相关,而电导率 K 值与它们呈正相关。

3) 酸雨成因非常复杂,既有大气成分、颗粒物作用,又有气象因素的影响。大气降水 pH 值是离子平衡结果,其变化与颗粒物浓度、可溶离子含量、降水量、风向等关系密切。

未来酸雨的调查还需对降水、大气颗粒化学成分、大气氧化性进行同步采样研究。

参考文献:

- 鲍宝堂,束家鑫,朱炳权.1995.上海城市雾理化特性的研究[J].南京气象学院学报,18(1):114-118.
- 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[J].应用气象学报,15(S1):85-94.
- 丁国安,郑向东,马建中,等.2006.近 30 年大气化学和大气环境研究回顾——纪念中国气象科学研究院成立 50 周年[J].应用气象

- 学报,17(6):796-814.
- 丁一汇,李巧萍,刘艳菊,等.2009.空气污染与气候变化[J].气象,35(3):3-14.
- 段婧,毛节奏.2008.气溶胶与云相互作用的研究进展[J].地球科学进展,23(3):252-261.
- 冯加良,胡小玲,管晶晶.2010.上海市大气细颗粒物的酸度及其与组成的关系[J].上海大学学报:自然科学版,16(5):431-436.
- 高俊,郑有飞,陈书涛.2012.2007—2008年南京江北工业区大气降水化学特征[J].大气科学学报,35(6):697-701.
- 江伟,李心清,曾勇,等.2009.贵州省遵义市降水中低分子有机酸对自由酸度的贡献[J].地球化学,38(4):354-360.
- 江研因,王素芸,杨春林,等.1983.1981年上海地区雨水酸度和化学组分的研究[J].上海环境科学,3:9-12.
- 李宗恺,王体健,金龙山.2000.中国的酸雨模拟及控制对策研究[J].气象科学,20(3):339-347.
- 马琳,杜建飞,闫丽丽,等.2011.崇明东滩湿地降水化学特征及来源解析[J].中国环境科学,31(11):1768-1775.
- 莫天麟.1984.酸雨研究进展[J].南京气象学院学报,7(1):121-128.
- 蒲维维,于波,赵秀娟,等.2012.北京地区酸雨的天气影响因素及降水化学特征分析[J].气象科学,32(5):565-572.
- 沙晨燕,何文珊,童春富,等.2007.上海近期酸雨变化特征及其化学组分分析[J].环境科学研究,20(5):31-34.
- 邵德民,张维,沈爱华,等.1989.上海市酸雨观测实验[J].气象,15(3):39-44.
- 宋玉芝,秦伯强,杨龙元,等.2005.太湖沿岸湿沉降的化学特性及水体酸化的趋势[J].南京气象学院学报,28(5):593-600.
- 汤洁,徐晓斌,巴金,等.2010.1992—2006年中国降水酸度的变化趋势[J].科学通报,55(8):705-712.
- 王文兴.1997.中国环境酸化问题[J].环境科学学报,17:1-11.
- 王文兴,丁国安.1997.中国降水酸度和离子浓度的时空分布[J].环境科学研究,10(2):1-7.
- 王文兴,许鹏举.2009.中国大气降水化学研究[J].化学进展,21(2):266-281.
- 王自发,高超,谢付莹.2007.中国酸雨模式研究回顾与所面临的挑战[J].自然杂志,29(2):78-82.
- 吴洪颜,濮梅娟,商兆堂,等.2008.江苏省2006年酸雨分布特征及其与气象条件的关系分析[J].气象科学,28(5):563-567.
- 叶小峰,松田秀,王自发,等.2005.东亚地区降水离子成分时空分布及其特征分析[J].气候与环境研究,10(1):115-123.
- 张新民,柴发合,王淑兰,等.2010.中国酸雨研究现状[J].环境科学研究,23(5):527-532.
- Cariolle D, Evans M J, Chipperfield M P, et al.2008. Impact of the new HNO_3 —Forming channel of the $\text{HO}_2 + \text{NO}$ reaction on tropospheric HNO_3 , NO_x , HO_x and ozone[J]. Atmos Chem Phys, 8: 4061-4068.
- Clow D W, Master M A.1999. Long-term trends in stream water and precipitation chemistry at five headwater basins in the northeastern United States[J]. Water Res Res, 35(2):541-554.
- Davisa J M, Swall J L.2006. An examination of the CMAQ simulations of the wet deposition of ammonium from a Bayesian perspective[J]. Atmos Environ, 40:4562-4573.
- Gorham E.1998. Acid deposition and its ecological effects: A brief history of research[J]. Environ Sci & Policy, 1:153-166.
- Moschonas N, Glavas S.2002. Weak organic acidity in a wet-only precipitation study at a Mediterranean coastal site, Patras, Greece[J]. Atmos Res, 63(1/2):147-157.
- Song Fei, Gao Yuan.2009. Chemical characteristics of precipitation at metropolitan newark in the US East Coast [J]. Atmos Environ, 43(32):4903-4913.
- Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, et al.2006. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP aerosol in Shanghai [J]. Atmos Environ, 40(16):2935-2952.

(责任编辑:张福颖)