

孙根厚, 汤洁. 2013. 1992—2010 年泰山地区酸雨变化特征及其趋势分析. 气象, 39(3): 347-354.

1992—2010 年泰山地区酸雨变化 特征及其趋势分析^{*1}

孙根厚¹ 汤洁²

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

提 要: 本文根据 1992—2010 年泰山气象站和 2007—2010 年泰安气象站的酸雨观测资料, 统计分析泰山地区的酸雨变化特征以及长期变化趋势, 并对两站的酸雨数据作对比分析。结果表明泰山站的年均 pH 值变化范围为 4.31~6.47, 除了 1999 和 2001 年外, 其余年份均低于 5.60。泰山站的降水年均 pH 值的变化分两个阶段: 1992—1999 年泰山站降水年均 pH 值年呈波动变化, 变化趋势并不显著; 2000—2010 年泰山降水 pH 值呈稳定降低的变化趋势, 年变化率为 -0.15 a^{-1} 。泰山站的多年月均 pH 值变化范围为 4.50~5.02, 3 和 7 月的月均 pH 值较高, 8 和 9 月的月均值较低, 季节变化不规则。泰安站多年月均 pH 值呈现与泰山站相似的季节变化特点。与国内高山站的酸雨观测结果比较, 泰山站的降水酸性仅次于广东大瑶山, 与西南地区高山站降水的酸性相当, 明显高于西北地区高山站。统计比较 2007—2010 年两站的酸雨数据, 结果显示泰安站降水 pH 值和 NHC 的平均值均高于泰山站。计算两站同时有降水时且降水开始时间间隔小于 2 h 降水事件的 ΔpH 和 ΔNHC , 结果表明大多数为正值, 这显示出边界层内气溶胶等污染物的云下清除对降水的贡献可能是形成这种差异的主要原因。

关键词: 泰山地区, 酸雨, 变化趋势, 云下清除

中图分类号: P402

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.03.009

Variation Characteristics and Trend of Acid Rain in Taishan Mountain Area

SUN Genhou¹ TANG Jie²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

Abstract: This paper presents an analysis of variation characteristics and long-term trend of acid rain in Taishan Mountain area, using the observed data of Taishan Mountain Weather Station from 1992 to 2010 and the data of Tai'an Weather Station from 2007 to 2010. The two stations are located within a distance of 10 km, and the latter sits at the foot of Taishan Mountain. The annual average precipitation pH values of the Taishan Mountain Station are generally below 5.60 except the two values in 1999 and 2001, with a variation ranging from 4.31 to 6.47. These pH values reveal two different periods of variation; one is a fluctuation change with no significant trend during 1992—1999, and another is a steady decrease trend from 2000 to 2010 at the annual rate of -0.15 a^{-1} . The monthly average precipitation pH values over these years at Taishan Mountain Station vary from 4.50 to 5.02 with higher values in March and July and lower values in August and September, having an irregular seasonal variation. The monthly average pH values of Tai'an Weather Station have similar features in seasonal variation with Taishan Mountain Station, except the irregular changes in a few months due to limited data. Compared with the acid rain data

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906038)资助

2011 年 12 月 8 日收稿; 2012 年 6 月 26 日收修定稿

第一作者: 孙根厚, 主要从事酸雨和气溶胶研究. Email: genhou_sun@gmail.com

通信作者: 汤洁, 主要从事大气成分观测研究. Email: tangj@cams.cma.gov.cn

from other mountain weather stations in China, the precipitation acidity of Taishan Mountain Station is much stronger than that of the mountains in the Northwest of China, similar with that of mountains in the Southwest of China, but a little weaker than that of Dayao Mountain, which is located in Guangdong Province, South China. The comparison of precipitation pH values and NHCs between Taishan Mountain Station and Tai'an Station indicates that the pH values and average NHCs of Tai'an Station are higher than those of Taishan Mountain Station. The most ΔpH values and ΔNHCs , which means the differences of pH values and of NHCs between Tai'an Station and Taishan Mountain Station when the two sites see rains at the same time and it begins to rain in less than two hours, are positive. This is probably due to the different contributions of scavenging the below clouds of atmospheric pollutants like aerosols, SO_2 and NO_x to the chemical composition of the rainwater at the two stations.

Key words: Taishan Mountain area, acid rain, variation characteristics, below-cloud scavenging

引 言

酸雨污染是我国长期面临的重大环境问题之一(丁国安等,2004;汤洁等,2007;Tang et al, 2010)。根据《2009 年中国环境状况公报》(中国环境保护部,2010),2009 年有酸雨监测的 488 个城市(县)中,出现酸雨的城市占 52.9%,酸雨污染状况不容乐观。开展长期的酸雨观测,准确把握我国酸雨污染的现状及演变趋势,是制定酸雨控制策略的基础,也可为相关科研工作提供系统的观测资料。高山降水的性质受云下冲刷的影响小,往往能更好地反映云水的化学特征。观测结果具有比较好的区域代表性,能在一定程度上反映污染物的长距离输送特征和大气污染背景状况。因此,在高山地区开展酸雨观测研究,有助于我们更好地了解污染物在云中的转化过程,以及污染物长距离输送的影响(Aleksic et al, 2009; Anderson et al, 2006)。自 20 世纪 80 年代以来,我国学者在国内一些著名高山,如峨眉山(燕子佳,1998)、庐山(Zhang et al, 1998)、玉龙雪山(刘嘉麒等,1993)、瓦里关山(汤洁等,2000)、泰山(王艳等,2006a;王艳等,2006b;刘晓环,2007;Wang et al, 2008)等,进行了降水酸度和降水化学的观测研究,获得了一些很有价值的研究成果。

地处山东省中部的泰山,是我国北方著名的山峰。1992 年起,位于泰山日观峰的泰山气象站开始对降水 pH 值和电导率进行长期连续观测,2007 年起,距日观峰约 10 km 处的泰安市气象站开始同样的酸雨监测。本文利用两站截至 2010 年底的酸雨观测资料,应用统计方法,分析泰山地区酸雨的长期变化趋势;通过比较泰山站和泰安站降水性质的差异,讨论泰山地区低层大气内的云下冲刷过程对降

水酸性的影响。

1 观测站点和观测方法

泰山雄峙于华北大平原的东侧,地势差异显著,其主峰(玉皇顶,海拔 1545 m)与山前平原相对高差达 1400 m。泰山的西部和北部为华北平原,是我国重要的农产区;东部和南部为平原和丘陵,在 200 km 范围内分布着济南、潍坊、莱芜和兖州等工业城市和煤矿产区。泰山地区属暖温带大陆性季风气候,具有明显的垂直变化规律:山顶年均气温 5.3℃,比山脚下的泰安市低 7.5℃;山顶年均降雨量 1124.6 mm,相当于山下的 1.5 倍。山下四季分明,山上春秋相连。山顶冬季较长,结冰期达 150 d,最低气温为 -27.5℃。

泰山酸雨观测站点位于日观峰(36°15'N、117°06'E,海拔 1534 m),泰安酸雨观测站点位于泰山脚下的泰安市郊(36°10'N、117°09'E,海拔 128.6 m),两站水平距离约 10 km,垂直高差约 1400 m。

降水的 pH 值和电导率是研究降水化学性质的重要指标。pH 值指示降水的酸碱性质;电导率则表示降水的导电性能,电导率越大则降水的导电能力越强。在酸雨研究中,一般使用 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 表示降水的电导率(电导率是电阻率的倒数。电阻率的单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$,因此电导率的单位为 $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$,而其中的 S 为 Siemens,表示 Ω^{-1})。由降水的导电能力与降水中的离子种类和离子含量有关,因此降水电导率的大小可以反映降水中离子含量的高低。降水采样、pH 值和电导率(以下记为 k 值)的观测按照中国气象局发布的技术要求(中国气象局,1992;中国气象局,2005)进行。由于观测规范的变化,2005 年底以前,按照降水事件采集降水样品;之

后,采集 08:00 至次日 08:00 的 24 h 降水样品。以人工安放和收回聚乙烯桶的方式采集降水样品,在样品收集后 12 h 内,使用上海雷磁仪器厂生产的 PHS-3B 型 pH 计和 DDS-307 型电导率仪分别测量降水的 pH 值和 k 值(中国气象局,1992;中国气象局,2005)。根据中国气象局的业务规范进行酸雨观测的质量控制,同时对未知水样进行年度考核。

2 观测资料和计算方法

1992—2010 年期间,泰山观测站共获得 1215 组降水 pH 值和 k 值的数据,数据完整率(累计降水量与同期气象观测总降水量之比)为 97.0%;2007—2010 年,泰安市气象站共获得 200 组降水 pH 值和 k 值的数据,数据完整率为 97.4%。两站的酸雨观测数据的完整性和连续性较好。造成数据完整率低于 100% 的原因是,日(或过程)降水量低于 1 mm 时,降水样品量不足,导致技术性缺失。

酸雨资料采用中国气象局颁布的酸雨划分标准进行统计:pH<5.60 的大气降水为酸雨,其中 4.50 ≤ pH<5.60 的降水为弱酸雨,pH<4.50 为强酸雨。为确保数据资料的质量,应用 k -pH 不等式方法(汤洁等,2008)对两站的降水 pH 值和电导率数据进行了校验。该方法的计算公式如下:

$$k_m > k_{H^+} + k_{OH^-} = A_{H^+} \times 10^{-pH} + A_{OH^-} \times 10^{14-pH} \quad (1)$$

式中, k_m 为实测电导率, k_{H^+} 和 k_{OH^-} 分别为氢离子(H^+)电导率和氢氧根离子(OH^-)电导率,由实测的降水 pH 值和两种离子的摩尔电导率 A_{H^+} 和 A_{OH^-} 计算。将实测的降水 pH 值和 k 值代入式(1),若不等式成立,则通过校验,否则不通过。泰山站和泰安站均各有 1 条数据未通过该方法的校验,未通过校验的数据在下文的统计分析中不采用。经过上述校验过的数据,采用 H^+ 雨量加权方法计算年(月)平均 pH 值,采用雨量加权方法计算年(月)平均 k 值。本文还参考 Tang 等(2010)人的方法,用下式计算非氢电导率(non-hydrogen conductivity, NHC),以分析泰山地区降水中污染物的变化特征:

$$NHC = k_m - k_{H^+} - k_{OH^-} \quad (2)$$

3 结果分析

3.1 降水 pH 值和电导率的变化范围

图 1a 和 1b 分别显示 1992—2010 年泰山站降

水 pH 值和 k 值的降水频次比例及降水量比例分布状况。泰山站降水 pH 值分布范围为 3.5~9.0,但是主要集中分布在 4.0~6.8。此范围内的累积降水频次比例和累积降水量比例分别为 84.7% 和 89.4%。降水 pH 值在 <4.5、4.5~5.6 及 >7.0 范围内的降水量比例为 19.1%、36.3% 和 4.2%,降水频次比例为 20.4%、30.6% 和 5.8%。一个值得注意的现象是,降水 pH 值的降水频次和降水量比例分布并不一致:pH 值在 4.2~5.8 范围(尤其在 4.2~4.8 范围)内,降水量比例高于降水频次比例,即降水量较大时,其降水 pH 值多分布在此范围内;而当 pH 值 <4.2 和 >5.8 范围时,则相反。

泰山站降水 k 值的变化范围是为 3.2~401 $\mu S \cdot cm^{-1}$,其降水频次及降水量比例分布都近似于对数正态分布。当 $k < 50 \mu S \cdot cm^{-1}$ 时,降水量比例高于对应的降水频次比例;而当 $k > 50 \mu S \cdot cm^{-1}$ 时,则相反。由于降水的稀释作用, k 值的降水频次比例与降水量比例分布存在一定差异。较丰沛的降水事件中,降水 k 值较低,反之,降水 k 值较高。

图 1c 和 1d 为泰安站 2007—2010 年降水 pH 值和 k 值的降水频次及降水量比例分布状况。泰安站的降水 pH 值变化范围为 3.79~7.21。降水 pH 值在 <4.5、4.5~5.6 和 >7.0 范围内的降水频次比例分别为 6.0%、22.0% 和 5.5%,降水量比例分别为 7.0%、28.4% 和 4.8%。泰安站的降水 pH 值呈现出有趣的双峰分布,两峰值范围为 4.4~5.0 和 6.0~7.0。双峰范围内的合计降水频次比例和降水量比例分别达到 77% 和 75.8%。数据的统计分析表明,2007 年降水 pH 值低于 5.0 降水事件占较大比例,而 2008—2010 年的降水 pH 值多高于 5.8,因此泰安站观测资料序列较短以及降水 pH 值存在较明显的年际波动变化,是形成降水 pH 值双峰分布的主要原因。与泰山站相比,泰安站的降水 pH 值分布整体偏高,但是,泰山站的降水 pH 极大值却高于泰安站,这是因为泰山站在 2000—2001 年间出现了一些 pH 较高的降水事件,而在 2007—2010 年期间两站的降水 pH 极值相近。

泰安站降水 k 值主要集中在 30~100 $\mu S \cdot cm^{-1}$ 范围内, $k \leq 100 \mu S \cdot cm^{-1}$ 的降水频次比例和降水量比例为 57% 和 79.7%。与泰山站的 k 值分布相似,当 $k < 90 \mu S \cdot cm^{-1}$ 时,降水量比例高于降水频次比例;而当 $k > 90 \mu S \cdot cm^{-1}$ 时则相反。与泰山站的降水 k 值分布相比,泰安站的 k 值在高值区的比例偏高。在 $k > 60 \mu S \cdot cm^{-1}$ 的范围内,除个别

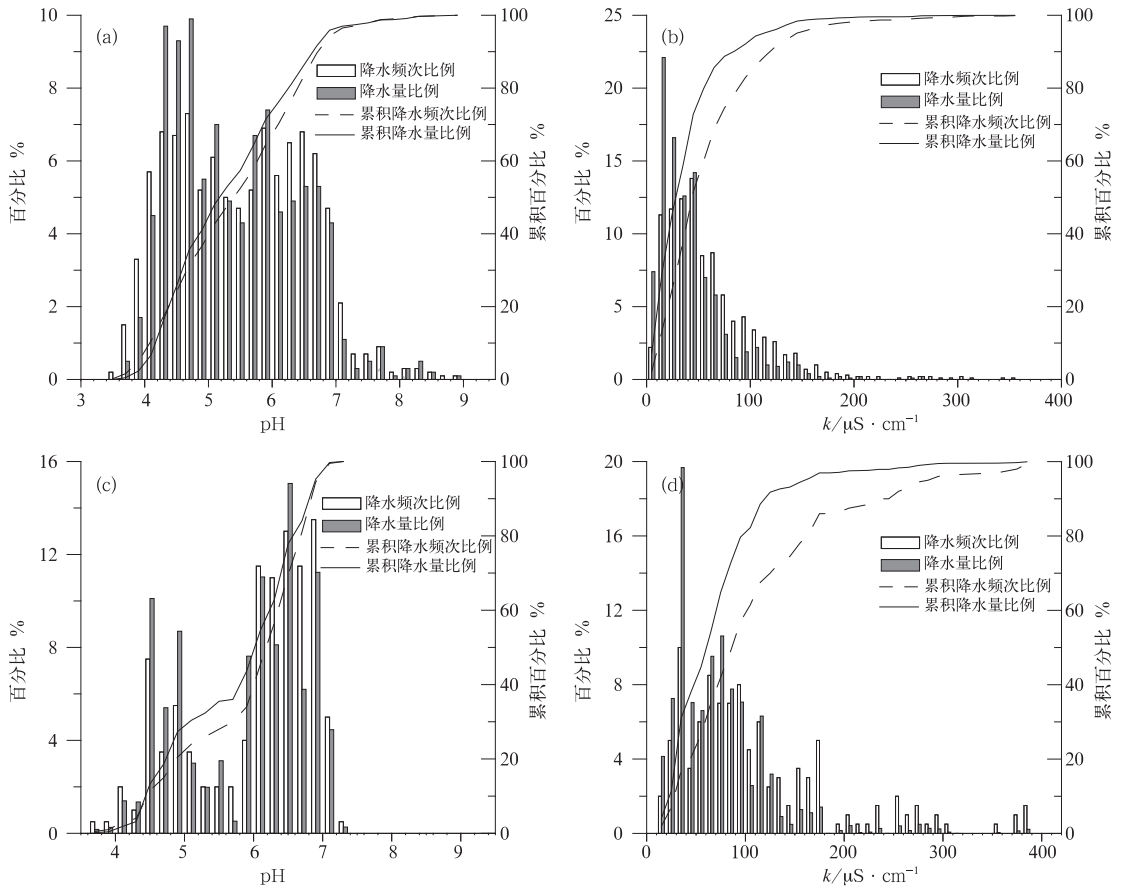


图 1 泰山站(a,b)和泰安站(c,d)的降水 pH 值和 k 值的统计分布

Fig. 1 The statistical distribution of pH value and k value (electrical conductivity) of Tai'an Weather Station (a,b) and Taishan Mountain Station (c,d)

外,泰安站的 k 值降水频次比例和降水量比例均高于泰山站。

3.2 季节变化特征

如图 2 所示,泰山站降水的多年月均 pH 值的变化范围是 4.50~5.02,均低于 5.6, 8 和 9 月的多年月均 pH 值较低,分别为 4.50 和 4.59,而 3 和 7 月的 pH 值较高,分别为 5.02 和 4.97。总体而言,泰山降水 pH 值的季节起伏变化不规则,变化幅度也不大,显示出全年各季节的酸雨污染均较为严重。泰山站降水的多年月均 k 值的变化范围为 33.9~94.3 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,具有较明显的季节变化:冬季最高,春、秋季次之,夏季最低, k 值与月平均降水量呈现反相关的变化关系。

泰安站降水的多年月均 pH 值变化范围为 4.65~6.45,多年月平均 k 值变化范围为 53.7~205.7 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。忽略在冬、春季由于降水较少而导致的一些明显不规则起伏变化外,可以从图 2 中看出,泰安站多年月均 pH 值的低值也是出现在夏、秋两季,

月均 k 值的低值也出现在夏季。与泰山相比,泰安站降水 pH 值和 k 值均较高。导致这种差异的原因有:泰安站和泰山站的降水量差异,以及云下清除对两站降水化学性质贡献的差异等。后一种原因在 3.5 节再做详细探讨。

3.3 长期变化特征

图 3 显示 1992—2010 年泰山降水的年均 pH 值和 k 值、降水 pH 值等级的分布以及年总降水量。

1992—2010 年泰山站降水年均 pH 值的变化范围为 4.31~6.49,多年年平均值为 4.72。1999 年的年均 pH 值最大,以 1999 年为界,之前和之后的年均 pH 值变化趋势明显不同:1992—1999 年的年均 pH 值起伏变化明显;1999—2010 年表现为较稳定的下降趋势。2007、2008 和 2010 年的年均 pH 值分别为 4.31、4.36 和 4.40,显示泰山已经属于重酸雨污染地区。利用 Mann-Kendall 方法计算两个阶段年均 pH 值的趋势值,并做显著性水平检验,结果见表 1。总体而言,1992—1999 年间泰山降水

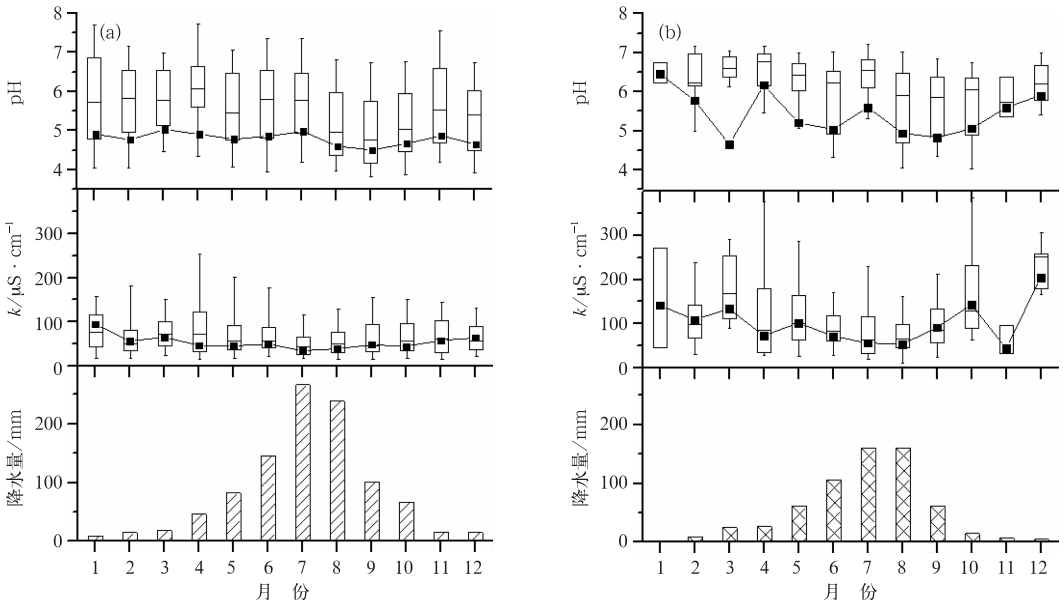


图 2 泰山站(a)和泰安站(b)pH 值、 k 值的多年月均值变化特征及多年月降水量的变化
(矩形框内为 25%~75% 的分布, 直线表示 5%~95% 的数据, 矩形框内的横线代表中值, 实心方框代表雨量加权的月平均值)

Fig. 2 Multi-year monthly average variations of precipitation, pH value and k value of Tai'an Weather Station (b) and Taishan Mountain Station (a)

(Solid boxes (■) stand for weighted monthly averages, transverse lines (—) for the medians, rectangles for the distribution of 25%—75%, and straight lines for the data of 5%—95%)

表 1 1992—2010 年泰山站年均 pH 值、 k 值变化趋势

Table1 Variation trend of annual average pH values and k values from 1992 to 2010

	年份	趋势值	显著性水平检验 ($\alpha=0.05$)
pH	1992—1999	$0.13 a^{-1}$	不显著
	1999—2010	$-0.15 a^{-1}$	显著
	1992—2010	$-0.05 a^{-1}$	显著
k 值	1992—2010	$0.80 a^{-1}$	不显著

pH 变化趋势不明显,而在 1999—2010 年间泰山站的酸雨污染呈现显著增强的趋势。王艳等(2006b)、刘晓环(2007)于 2006 年前后在泰山对降水酸度和降水离子组成进行了观测研究,其报道的年均 pH 值结果(见表 2)与本文结果一致。

1992—2010 年间泰山站降水年均 k 值变化范围为 $26.1 \sim 85.9 \mu S \cdot cm^{-1}$,多年平均值为 $43.3 \mu S \cdot cm^{-1}$ 。除 1999—2001 年期间降水年均 k 值显著偏高外,泰山站降水 k 值的年际变化相对平稳。虽然 1992—2010 年间泰山站降水 k 值呈现一定的增长趋势,但是统计上不显著(表 1)。

泰安站在 2007—2010 年的年平均 pH 值分别为 4.73、5.25、5.54 和 5.38, k 值分别为 91.5、

67.6、58.5 和 $73.5 \mu S \cdot cm^{-1}$ 。表 2 的比较可以看出,本文获得的泰安市地区降水年均 pH 值明显低于甄文栋(2005)报道的 1987—2001 年间泰安市降水酸度观测结果(6.06~7.04);本文给出的 2007 年平均降水 pH 值与刘晓环(2007)观测的 2006 年的年均降水 pH 值(4.42)最为接近,2008—2010 年的年均降水 pH 值却明显高于刘晓环的观测结果。同样,本文给出的泰安市地区各年酸雨频率(6.5%~58.3%)较甄文栋(2005)观测 1987—2001 年研究的酸雨频率(0~11%)明显偏高,但低于刘晓环(2007)报道的 72%。纵观其他研究与本文的观测结果,可以大体看出,进入 21 世纪以来,泰安市地区降水酸度较 20 世纪 90 年代明显增强,这种变化趋势与泰山站经历的长期变化趋势相似。

3.4 与其他高山站观测结果的比较

表 3 汇总了一些的国内高山站酸雨的研究成果。泰山的降水酸性强于青海瓦里关山、新疆天山的降水酸性;与江西庐山、贵州雷公山、四川峨眉山、云南玉龙雪山的降水酸性相当,但弱于广东大瑶山的降水酸性。从全国酸雨分布态势看,长江以南的

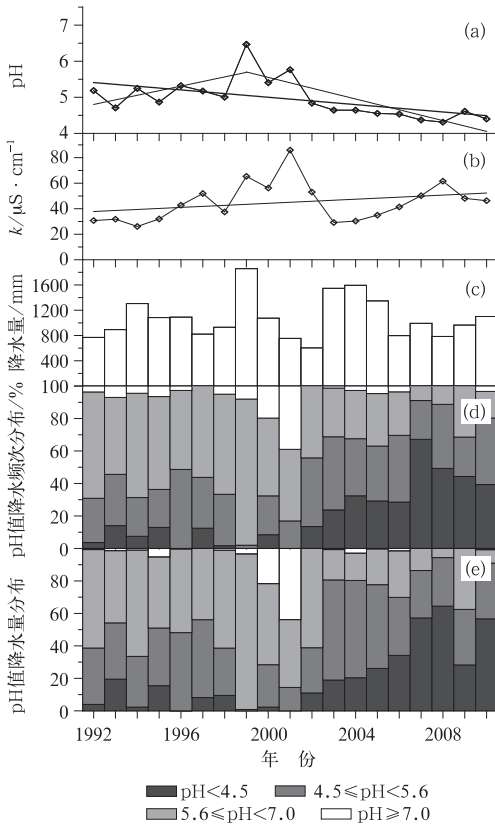


图 3 1992—2010 年泰山站年平均 pH 值(a)、 k 值(b)年总降水量(c)以及酸雨比例分布(d,e)
Fig. 3 The annual precipitation pH value (a), k value (b) annual precipitation (c) and the distribution of acid rain percentages (d, e) during 1992—2010

大部地区历来是重酸雨区,而我国北方地区的酸雨污染严重程度相对轻微(Tang et al, 2007)。泰山的酸雨污染之严重,比肩于我国南方重酸雨区的高山站,恰好给出了解释我国北方地区普遍存在的降水中致酸物质的高含量与降水酸度较低之悖论的一个例证。包括山东省在内的华北地区,火力发电在总电力供应中占据主要地位,也是 SO_2 排放的重要来源,因此华北地区是我国最大的 SO_2 高排放强度地区(Streets et al, 2003),但是华北地区却不是我国酸雨最严重的地区。这是因为,我国北方土壤偏碱性,来自于土壤的气溶胶对降水有较显著的中和作用(Wang et al, 2002)。土壤颗粒的巨核性使得这种土壤颗粒物的中和作用更多地发生在边界层内,泰山与周边平原的相对高度差接近 1500 m,使得泰山顶的降水观测较少地受边界层内颗粒物冲刷——中和作用的影响。因而,泰山酸雨污染严重的现象就不难理解。下文 3.5 中我们还将进一步从泰山站和泰安站的降水酸度差别分析边界层内颗粒物冲刷——中和作用的影响。

3.5 边界层内冲刷对降水化学性质的影响

泰安站与泰山站的水平距离约 10 km,垂直距离达 1400 m。两站的地理位置较为接近,对比分析两者的降水性质差异,有助于分析理解酸雨前体物和气溶胶的云下清除对降水化学的贡献。表 4 列出

表 2 泰山站和泰安站的酸雨观测统计结果与较早统计结果的比较
Table 2 Comparison of the statistical results of acid rain observations from Taishan Mountain Station and Taian Station

地区	年份	年均 pH 值	酸雨频率/%	来源
泰安	1987—2001	6.06~7.04	0~11	甄文栋,2005
泰安	2006	4.42	72	刘晓环,2007
泰山	2005—2006	4.56,4.53	62.8	刘晓环,2007
泰安	2007—2010	4.73~5.54	6.5~58.3	本研究
泰山	1992—2010	4.31~6.49	2~91	本研究

表 3 与其他高山站观测结果的比较

Table 3 Comparison of precipitation pH values from Taishan Mountain Station and other mountain stations in China

山名	海拔/m	年份	年平均 pH 值	来源
新疆天山	2119	2003—2004	7.27	Zhao et al, 2008
青海瓦里关山	3816	1997	6.38	汤洁等,2000
江西庐山	1300	1993	4.26	Zhang et al, 1998
贵州雷公山	1630	2003	4.5~5.0	肖劲松等,2007
贵州雷公山	1630	2004	4~4.5	肖劲松等,2007
云南玉龙雪山	3240	1993	4.89	刘嘉麒等,1993
四川峨眉山	3070	1986—1995	4.01~4.59	燕子佳,1998
重庆缙云山	350~652	1998—1999	5.23	魏虹等,2005
广东大瑶山	815	1999—2002	4.23~6.20	吴兑等,2005
山东泰山	1534	1992—2010	4.31~6.49	本研究

表 4 2007—2010 年泰安和泰山酸雨 pH 值、k 值和 NHC 的统计比较

Table 4 Comparison of precipitation pH value, k value, and NHC from Tai'an

Station and Taishan mountain Station from 2007 to 2010

		pH				$k/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$			NHC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$				
		< 4.5	4.5~5.6	5.6~7.0	≥ 7.0	≤ 50	50~100	100~150	≥ 150	≤ 50	50~100	100~150	≥ 150
泰山	频次比例/%	50	32	17	1	36	41	17	7	49	35	11	4
	降水量比例/%	52	32	16	0	60	32	6	2	75	20	3	2
	平均值	4.42				51.9			38.5				
泰安	频次比例/%	7	22	67	6	23	37	16	26	25	36	15	25
	降水量比例/%	7	28	60	5	38	42	13	7	40	41	13	7
	平均值	5.08				73.8			70.8				

了泰山站和泰安站在 2007—2010 年间降水的 pH 值、k 值和 NHC 的平均值,以及降水频次及降水量比例的分布。由表 4 可见,两站 pH 值和 k 值分布的区别。泰山站超过 80% 的降水 pH 值分布在 5.6 以下,其中 pH 值低于 4.5 的比例分别为 50% (降水频次比例) 和 52% (降水量比例)。相比较而言,泰安站近 90% 的降水 pH 值集中在 4.5~7.0 之间,其中 67% (降水频次比例) 和 60% (降水量比例) 的 pH 值在 5.6~7.0 之间。在 k 值高于 50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 分布中,泰安站的比例高于泰山站的比例。产生这种差异主要有两个原因:一是泰山降水频率和降水量高于泰安站,降水稀释作用明显;二是海拔 128 m 的泰安站相比于海拔 1534 m 泰山站,气溶胶等污染物的云下清除对降水 pH 值和电导率的贡献更加显著。

为进一步分析云下清除对两站降水 pH 值和 k 值的影响,统计了 2007—2010 年间两站同时有降水且两站降水的开始时间相差小于 2 h 的降水事件,共有 80 次。计算两站的降水 pH 值和 NHC 的差 (ΔpH 和 ΔNHC , $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{泰安}} - \text{pH}_{\text{泰山}}$, $\Delta\text{NHC} = \text{NHC}_{\text{泰安}} - \text{NHC}_{\text{泰山}}$) 并点绘在图 4 中。

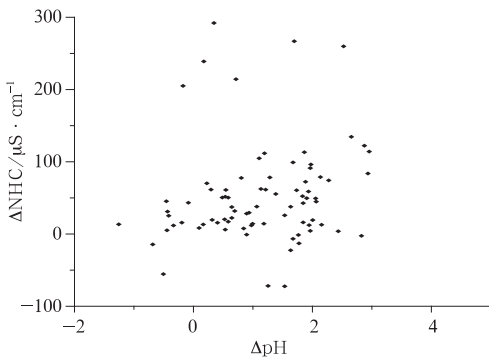


图 4 泰安站和泰山站同时有降水时, ΔpH 和 ΔNHC 的分布

Fig. 4 Distribution of ΔpH and ΔNHC when both Tai'an Station and Taishan mountain Station have rains

由图 4 可以看出,占总数 76% 降水事件的 ΔpH 和 ΔNHC 均大于 0,即位于第一象限。这种分布显示,泰山与位于山脚下的泰安市同时出现降水时,由于边界层内的冲刷作用,泰安市的降水中含有更多的可溶性污染物,这些污染物对降水酸性具有中和作用,使得泰安市的降水 pH 值升高。但是,也有部分降水事件的 ΔpH 和 ΔNHC 不是同时大于 0,或者都小于 0。有 9 次降水事件,占总数的 11.3%,分布在图 4 的第二象限,即 $\Delta\text{NHC} > 0, \Delta\text{pH} < 0$,这种情形下,边界层冲刷作用同样导致泰安站降水所含污染物多于泰山站降水,但污染物偏酸性,使得泰安站降水较酸。有另外 10 次降水事件出现在图 4 的第三和第四象限,说明泰安站降水的 NHC 低于泰山降水的 NHC,产生这种情况的原因可能是由于降水的局地性较强,使得两站云团化学性质存在较大差异。如果将第三和第四象限局地性特征明显的降水事件排除,我们可以假定,泰山、泰安地区的降水云系的化学性质基本一致均匀,泰山、泰安的高度差使得更多边界层内气溶胶及气体污染物通过云下冲刷进入泰安站降水,导致 NHC 增加,大多数情况下会导致 pH 值增加,少数情况下导致 pH 值降低。边界层内的云下清除是造成两站降水酸度和化学性质显著差异的重要原因之一。

4 结 论

本文使用泰山和泰安气象站的观测资料,统计分析泰山地区酸雨变化趋势,并通过对比泰山和泰安站的酸雨资料分析,气溶胶的云下清除过程对降水 pH 值和电导率的影响。主要结果如下:

(1)1992—2010 年泰山降水的年均 pH 值变化范围为 4.31~6.49,酸雨污染比较严重。与国内其他高山站的观测结果相比,泰山站的降水酸性与西南高山站的降水酸性相当,但明显强于西北地区高

山的观测结果,因此泰山的酸雨污染较为严重。

(2)泰山的酸雨变化分两个阶段:1992—1999年的年均 pH 值呈波动变化,1999—2010年的年均 pH 值呈显著下降的趋势,总体上,泰山的降水 pH 值呈降低趋势。泰山站的年均 k 值在 1992—2010年波动较大,但总体变化趋势并不明显。2007—2010年泰安站的降水年均 pH 值低于 1987—2001年泰安站的年平均值,但高于 2006年的年均 pH 值,表明自 2006年来泰安站的酸雨污染表现为减弱的趋势。与泰山站相比,泰安站的月均 pH 值和 k 值偏高。

(3)泰山降水 pH 值季节变化不明显,其多年月平均 pH 值变化范围为 4.50~5.02,最小月均 pH 值出现在 9 月份,最大月均值出现在 3 月份。泰山降水 k 值呈现较明显的季节变化,多年月均 k 值的变化范围为 33.9~94.3 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,冬季最高,春秋季次之,夏季最低。

(4)泰山站和泰安站的酸雨资料的统计对比结果表明 2007—2010年泰安站的平均 pH 值、 k 值和 NHC 值均高于泰山站相应的值。对比两站同时有降水时的 pH 值和 NHC 值发现,大多数泰安站降水 pH 值和 NHC 值高于泰山站,这表明边界层内的气溶胶等污染物的云下清除对降水化学性质的贡献可能是导致这种差异的主要原因。

致谢:感谢泰山气象站和泰安气象站的工作人员的长期辛勤工作,提供了宝贵的酸雨观测资料。

参考文献

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): 85-94.

刘嘉麒, Keen W C. 1993. 中国丽江内陆背景降水值研究. 中国环境科学, 13(4): 246-251.

刘晓环. 2007. 泰山降水的化学性质研究—山上山下对比分析. 山东大学硕士学位论文: 30.

汤洁,程红兵,于晓岚,等. 2007. 全国酸雨观测网位置水样考核结果的统计分析. 气象, 33(12): 77-84.

汤洁,徐晓斌,巴金,等. 2008. 电导率加和性质及其在酸雨观测数据质量评估中的应用. 应用气象学报, 19(4): 1-8.

汤洁,薛虎圣,于晓岚,等. 2000. 瓦里关山降水化学特征的初步分析. 环境科学学报, 20(4): 420-425.

王艳,葛福玲,刘晓环,等. 2006a. 泰山降水的离子组成特征分析. 中国环境科学, 2(4): 422-426.

王艳,葛福玲,刘晓环,等. 2006b. 泰山降水化学季大气传输的研究.

环境科学学报, 26(7): 1187-1194.

魏虹,王建力,李建龙. 2005. 重庆缙云山降水 pH 值和化学组成特征分析. 农业环境科学学报, 24(2): 344-348.

吴兑,邓雪娇,范绍佳,等. 2005. 南岭大瑶山雾区封面降水的雨水化学成分研究. 中山大学学报(自然科学版), 44(6): 105-109.

肖劲松,彭晓渝,杨红,等. 2007. 雷公山国家级自然保护区森林降水化学特征的初步分析, 环境污染及防治, 25(增): 502-509.

燕于佳. 1998. 峨眉山降水电导率变化规律初探, 四川环境, 17(3): 74-77.

甄文栋. 2005. 山东省城市酸沉降状况及成因研究. 济南: 山东大学环境科学与工程学报, 12-13.

中国环境保护部. 2010. 2009年中国环境公报. 北京: 中国环境出版社.

中国气象局. 1992. 《酸雨观测方法(试行2版)》. 北京: 气象出版社.

中国气象局. 2005. 《酸雨观测业务规范》. 北京: 气象出版社, 19-24, 40.

Aleksic N, Roy K, Sistla G, et al. 2009. Analysis of cloud and precipitation chemistry at Whiteface Mountain, NY. Atmospheric Environment, 43(17): 2709-2716.

Anderson J B, Jr Baumgardner R E, Grenville S E, et al. 2006. Trends in cloud water sulfate and nitrate as measured at two mountain sites in the Eastern United States: Regional contributions and temporal changes compared with regional changes in emissions, 1986 - 1999. Atmospheric Environment, 40(23): 4423-4437.

Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2010. An Inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. J Geophys Res, 2003, 108 (D21), doi: 10. 1029/2002JD003093.

Tang J, Xu X B, Ba J, et al. 2010. Trends of the precipitation acidity over China during 1992 - 2006. Chinese Science Bulletin, 55(17): 1800-1807.

Wang Z F, Hajime A. 2002. Itstushi U. Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over East Asia: Observations and model results. J Geophys Res, 107 (D19): 4389-4400.

Wang Y, Wai K M, Gao J, et al. 2008. The impacts of anthropogenic emissions on the precipitation chemistry at an elevated site in North-Eastern China. Atmospheric Environment, 42(13): 2959-2970.

Zhang Y, Qin Y. 1998. The chemical characteristics of springtime precipitation in Lushan Mountains, East China. Journal of Applied Meteorology, 37(10): 1143-1152.

Zhao Z P, Tian L D, Fischer A, et al. 2008. Study of chemical composition of precipitation at an alpine site and a rural site in the Urumqi River Valley, Eastern Tien Shan, China. Atmospheric Environment, 42(39): 8934-8942.