

陈善炳,李涛,陈叶婷.泰山酸雨特征及影响因素分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):122-127.
Chen Shanbing, Li Tao, Chen Yeting. Characteristics and influencing factors of the acid rain at Mount Tai[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 122-127. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.013. (in Chinese)

泰山酸雨特征及影响因素分析

陈善炳¹, 李涛², 陈叶婷³

(1. 山东省泰山气象站, 山东 泰安 271000; 2. 山东大学环境科学与工程学院, 山东 济南 250100; 3. 泰安市气象局, 山东 泰安 271000)

摘要: 利用2006—2015年泰山气象站的降水pH、电导率、降水量和风向风速资料, 统计分析了泰山酸雨特征和变化趋势, 探讨了降水量和风向风速对酸雨的影响。结果表明, 泰山降水年均pH变化范围为4.31~4.99, 酸雨发生频率达到69.3%; pH随降水量的增加而趋于5.60(中性); 5月至次年1月的月均pH与月平均过程降水量的变化趋势一致; 月均电导率与月平均过程降水量的变化趋势相反。泰山降水期间盛行西南风, 在南风和东北风条件下, 酸雨出现频率最高且酸性最强, 这主要是风速风向因素和人为排放源分布共同导致的。近10a泰山降水酸性程度有所减弱, 酸雨频率明显下降, 表明近年来酸雨污染情况有所改善, 有利于保护泰山生态环境。

关键词: 泰山; 酸雨; pH; 降水量; 风

中图分类号: P468, X517 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0122-06

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.013

Characteristics and influencing factors of the acid rain at Mount Tai

CHEN Shanbing¹, LI Tao², CHEN Yeting³

(1. Taishan Meteorological Station, Tai'an 271000, China; 2. School of Environmental Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100, China; 3. Tai'an Meteorological Bureau, Tai'an 271000, China)

Abstract The characteristics and variation trend of the acid rain from 2006 to 2015 at Mount Tai are statistically investigated based on the pH value, conductivity, amount of precipitation, wind direction, and wind speed, and the influence of the amount of precipitation, wind direction and wind speed on the acid rain at Mount Tai are also analyzed. The results show that the annual mean pH value of precipitation ranges from 4.31 to 4.99 and the frequency of acid rain is up to 69.3% at Mount Tai. As the amount of precipitation increases, the pH value tends to reach 5.60 (neutral). A similar variation trend is observed of the monthly mean pH value and the monthly process-averaged precipitation from May to next January, while the monthly mean conductivity presents an opposite trend with the monthly process-averaged precipitation. Southwesterly winds prevail during precipitation processes at Mount Tai. The southerly and northeasterly winds bring the highest frequency of acid rain and the highest acidity at Mount Tai, which could be attributed to the wind speed and wind direction as well as the distribution of anthropogenic emission sources. In the past decade, both the precipitation acidity and the frequency of acid rain at Mount Tai tend to decline, which indicates the improvement of acid rain pollution and is of significant importance for protecting the ecological environment of Mount Tai.

Key words Mount Tai; acid rain; pH; amount of precipitation; wind

收稿日期: 2016-11-12; 修订日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41075092)

作者简介: 陈善炳, 男, 工程师, 主要从事大气探测工作, 13583800990@139.com。

引言

酸性是降水的重要指标之一,酸雨通常是指 pH<5.60 的大气降水。造成酸雨的因素很多,主要是来源于人为排放的大量酸雨前体物如 SO₂ 和 NO_x 等酸性气体的转化,使得降水酸性增加,最终形成了酸雨^[1]。我国是世界三大酸雨区之一,目前约有 40% 的地区存在酸雨问题,具有明显的区域性和局地性特征^[2]。据中国气象局酸雨观测系统的监测数据显示,1999—2006 年我国北方酸雨区域有明显扩大趋势,并且酸雨程度明显加强^[3];汤洁等^[4]发现中国酸雨区酸雨污染程度发生了区域性变化,其中,华北地区的酸雨污染程度在 2000 年后出现连续大范围的加重现象。

泰山位于山东省中部,海拔高度 1 545 m,是山东省最敏感的酸雨区之一。泰山顶四季划分不明显,具有明显的高山气候特征。泰山上树木经过长期的精心保护和培育,森林生态系统得到不断完善,其在涵养水源、保护野生动植物、维持环境稳定等方面具有不可替代的作用。泰山相对海拔高,局地重污染排放较少,大部分污染物源于外来输送,其酸雨发生频率仍相对较高,目前酸沉降已经造成了泰山不同海拔高度土壤的酸化趋势^[5]。2004 年 7—12 月泰山站观测到降水的雨量加权平均 pH 为 4.74,酸雨频率占到 78.3%^[6],2004—2006 年间泰山降水最低 pH 更是达到 3.60,并且以硫酸型酸雨污染为主^[7],说明人为污染物的排放等因素导致泰山降水酸化问题突出。因此,研究泰山的降水酸性等特征的变化情况对于控制区域酸雨污染问题、保护自然生态环境具有重要的意义,同时也为改进我国酸雨数值模拟研究^[8]和为相关部门制定综合污染防治措施提供参考依据。

1 资料与统计方法

本文所用资料为泰山气象站 2006—2015 年的降水 pH、电导率、降水量及风向风速。经统计,10 a 间泰山有效降水为 659 次。酸雨资料采用中国气象局颁布的酸雨划分标准进行统计:降水 pH < 5.60 时为酸雨, pH 在 4.50 ~ 5.60 之间时为弱酸雨, pH < 4.50 时为强酸雨。

应用汤洁等^[9]提出的 K-pH 不等式方法对所有资料进行质量控制,去掉不满足条件的记录。根据中国气象局酸雨观测业务规范^[10],使用 H⁺ 的降水量加权均值方法计算降水的年均 pH,使用电导率

的降水量加权平均方法来计算降水的年均电导率。此外,本文采用算数平均方法计算月均 pH 和月均电导率以讨论降水量的影响。

酸雨频率:取降水 pH < 5.60 (不含 5.60) 的次数,按照下式计算其出现频率,即:

$$F_{[<5.60]} = \frac{N_{[<5.60]}}{N_{\text{总}}} \times 100\%$$

式中, $F_{[<5.60]}$ 为 pH < 5.60 的频率; $N_{[<5.60]}$ 为 pH < 5.60 的次数; $N_{\text{总}}$ 为进行 pH 观测的总次数。

2 酸雨特征

通过对泰山气象站酸雨监测数据进行统计分析显示,2006—2015 年泰山单次降水的 pH 变化范围为 3.40 ~ 8.23,659 次有效降水中有 457 次降水 pH < 5.60,酸雨频率为 69.3%,其中,发生强酸性降水的频率最高,为 37.5%;其次是弱酸性降水,占总降水的 31.8%;碱性降水发生频率最低,频率为 2.4%,表明泰山地区的酸雨问题较为突出。

由表 1 可知,泰山 2006—2015 年降水的 10 a 平均 pH 为 4.50,其中,2008 年降水年均 pH 最低,为 4.31;2015 年年均 pH 最高,为 4.99。从酸雨频率来看,2007 年最高,酸雨频率为 91.0%,2015 年最低,为 23.4%。本文的观测结果与孙厚根和汤洁^[11]研究的 2007、2008、2010 年泰山站降水年均 pH 基本一致。整体上,2006—2015 年的年均 pH 均小于 5.60,而酸雨出现频率也明显偏高,说明泰山地区酸雨频发且酸性较强,但近几年降水年均 pH 的升高和酸雨频率的降低表明泰山酸雨情况开始有所改善。表 1 中显示 2010—2015 年,泰山酸雨频率由 80.3% 下降到 23.4%,这主要是由于随着我国大气污染减排政策的实施和脱硫技术措施的提高,使得 SO₂ 污染控制区内酸性污染气体排放减少所引起,比如山东省 SO₂ 排放量 2011—2015 年下降了 16.5%,有效降低了酸雨发生几率;另一方面,中国东部地区 SO₂ 以及 NO_x 排放量减少的同时,氨气排放量 2011—2014 年增加了约 20%^[12],对降水酸性起到了更重要的中和作用。

泰山降水 10 a 的电导率平均值为 48.6 μS · cm⁻¹,变化范围为 5.1 ~ 440 μS · cm⁻¹,是降水较为洁净的瓦里关山降水平均电导率 (14.8 μS · cm⁻¹)^[13] 的 3 倍多,很可能与华北地区大气的人为污染(如 SO₂、颗粒物等)较为严重有关。表 1 并没有表现出明确的年均 pH 与年均电导率变化关系,主要是因为电导率反映的是水溶性组分的总含量,

而 pH 是由水溶性酸、碱成分相对含量共同作用的结果。华北地区属于富氨区,氨气以及碱性颗粒物对泰山酸雨起到重要的中和缓冲作用,导致泰山降水中常含有大量铵根离子和碱金属钙离子^[14],因此,高电导率也并不一定意味着酸雨程度较为严重。

表 1 2006—2015 年泰山降水年均 pH、酸雨频率及年均电导率统计表

Table 1 Annual mean pH value, frequency of acid rain (%), and annual mean conductivity ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) for the precipitation at Mount Tai from 2006 to 2015

年份	年均 pH	酸雨频率/%	年均电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$
2006	4.49	70.9	42.9
2007	4.36	91.0	52.5
2008	4.31	88.7	60.8
2009	4.53	69.0	48.4
2010	4.40	80.3	46.0
2011	4.43	76.3	44.7
2012	4.68	72.6	43.1
2013	4.76	55.6	45.8
2014	4.61	38.8	53.9
2015	4.99	23.4	46.1
平均	4.50	69.3	48.6

3 降水量对酸雨的影响

降水量是影响降水酸性的一个重要因素,大气中的酸性污染物会被冲刷并溶解到雨水中,并随雨水沉降到地表和水体。图 1 描述了降水量与 pH 和电导率的整体相关关系,可以看到, pH 和电导率与降水量的线性相关程度均不高。但按照酸雨 pH 的界定来划分,随着降水量增加,酸性降水 ($\text{pH} <$

5.60) 的 pH 有增加趋势,而中性和碱性降水 ($\text{pH} >$ 5.60) 的 pH 呈较明显的减小趋势,即无论酸性降水还是碱性降水的 pH 均随着降水量的增加而向 $\text{pH} = 5.60$ 趋近(图 1a)。同时,电导率随降水量的增加呈明显的非线性减小趋势(图 1b),推测是由于水溶性离子受降水量稀释所致。

如图 2 所示,泰山降水量具有明显的季节性变化,每个月的过程降水量相差较大,7、8 月平均过程降水量最大,超过了 20 mm,而 1、2 月平均过程降水量最小,在 5 mm 左右。降水的月均 pH 总体呈先下降后上升的趋势,2 月的降水 pH 最高,平均为 5.84;从 2 月到 5 月,月均 pH 与月平均过程降水量呈相反变化趋势(图 2a),即随着降水量的增加, pH 减小了 0.67 个单位;从 5 月以后, pH 与降水量的月变化趋势较为相似,10 月的月均 pH 降到最低的 4.43。同时可以发现,电导率与降水量总体呈相反的月变化趋势(图 2b),当降水量增加时,电导率相应减小,例如 7 月的平均过程降水量达到最大时,电导率降到最低;当降水量减小时,电导率随之增加,例如 7—10 月的月平均过程降水量降低了大约 4 倍,而电导率相应增高了约 2 倍。7 月的降水酸性和电导率均明显较低,除了降水量的稀释作用外,可能与该月份的大气污染程度较轻有关。而秋收期间的秸秆焚烧和较低的降水量共同导致了 10 月降水的强酸性和高电导率。冬春季较高的降水电导率,主要是由北方冬季燃煤供暖排放的大量空气污染物如 SO_2 所致,但由于北方沙尘和扬尘天气频繁,泰山冬春季节大风多发^[15],可将北方地区大气中丰富的碱性物质携带至泰山站点,其中和缓冲作用使得冬春季降水的 pH 较高,减少了酸雨的发生。

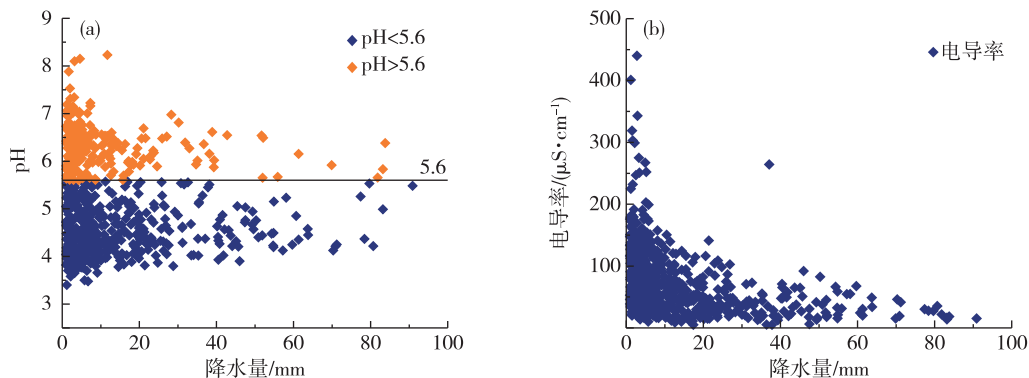


图 1 泰山降水 pH(a) 和电导率(b) 与降水量的关系

Fig.1 Relations between the pH value (a)/conductivity (b) and the amount of precipitation at Mount Tai

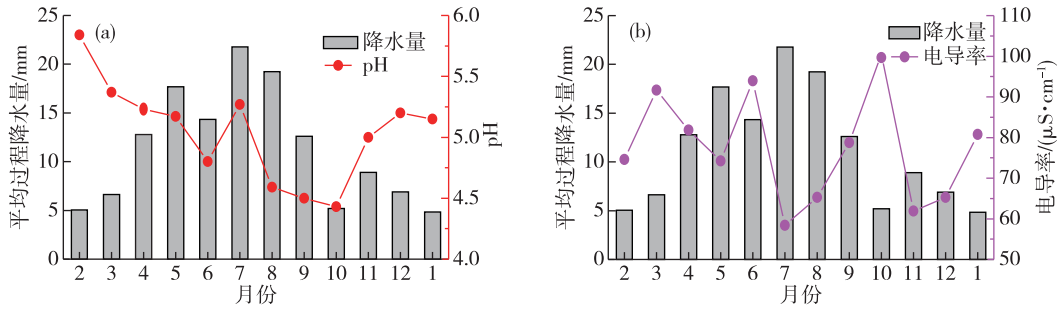


图 2 月均 pH(a)和月均电导率(b)的变化特征以及与月平均过程降水量变化的关系(横坐标从 2 月开始,以便更直观地描述月变化关系)

Fig.2 Variations of the monthly mean pH value (a) and monthly mean conductivity (b) and their relations with the variations of the monthly process-averaged precipitation (the x-axis begins from February to visually describe monthly variations)

4 风对酸雨的影响

风对酸雨前体物的迁移扩散十分重要,风向和风速不仅决定着当地污染源排放的大气污染物稀释和对外扩散输送速度,更会对排放源下风向地区造成严重的大气污染。泰山是华北平原海拔最高点并且常年风速较大,因此,风携带的高空大气污染物对于泰山酸雨的形成具有十分重要的影响。

图 3 显示了 2006—2015 年泰山降水期间的风向和风速。可以看出,泰山降水期间盛行西南风(图 3a),从南方(SW—SE)来的风的频率达到了 50%,其次为途经东部海域的东北风(NE—ENE,频率为 13%),而西北 NW 来向的风的频率最低,仅为 2%;与风向频率相反,南方来向的风速最低,平均约 $5.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而西北来向的平均风速高达 $8.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3b)。说明泰山降水气团主要来自湿润的南方和海洋,而内陆北方气团通常较为干燥,形成降水的情况较少。

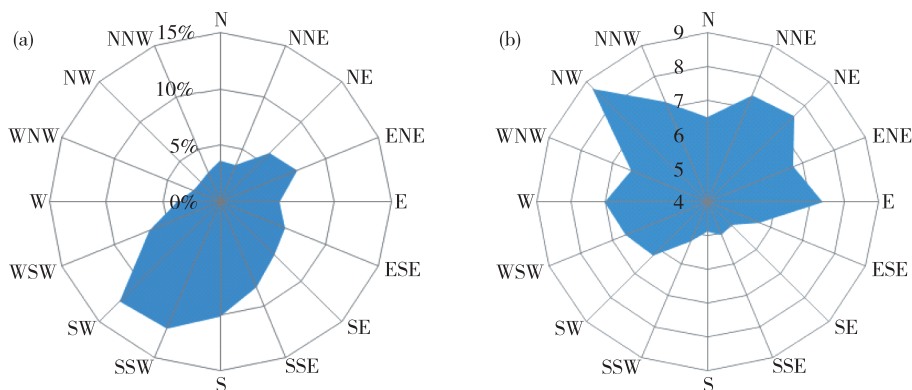


图 3 泰山降水期间的风向(a)和风速(b;单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)玫瑰图

Fig.3 Wind roses showing the direction (a) and the speed (b) during precipitation processes at Mount Tai

图 4 描述了不同来向的泰山降水 pH 和酸雨频率分布。可以看出,由西南至东北来向(WSW—S—NE)的降水 pH 明显较低(图 4a),其中 S、ENE 和 WSW 来向的降水 pH 最低,平均 4.90 左右,而西北 NW 来向的降水 pH 则显著高于南方,平均达到了 5.76。同时,西南至东北来向降水出现的酸雨频率(70%~80%)明显高于西北来向(30%)(图 4b)。该结果与 2004 年气流轨迹分析表明的来自我国南部和华东地区的气团带来的泰山降水酸性最强^[6]这一结论吻合。

对比图 3 和图 4 可以发现,带来降水最多而风速最低的南方来向气团所贡献的酸雨频率最高、酸性最强;带来降水最少而风速最高的西北来向气团所贡献的酸雨频率最低,酸性最弱。此外,带来降水较少但风速较高的东北气团所贡献的酸雨频率也很高,达到了 80%,酸性较强。王艳等^[6]、Wang et al.^[7]对泰山降水化学组成的研究表明,由于我国北方土壤偏碱性,起源于我国西北或蒙古国的气团,其降水中含有大量的钙离子并且降水酸性最

弱,而华东、华中和华南地区污染物排放量大并且土壤偏酸性,导致南方来向降水中硫酸根浓度高而钙离子浓度低,酸性较强。因此,本研究中泰山降水 pH 和酸雨频率的风向风速分布特征主要由气团来向和周边污染源共同导致。一方面,北方气团常伴随大风,可将大量土壤碱性物质携带至泰山上

空,使泰山降水酸性缓冲能力强,整体 pH 较高,而南方气团和东部气团带来较多的工业污染物和较少的土壤碱性物质,因而该来向的泰山降水酸性较强;另一方面,泰山受周边地市许多大型污染源排放的影响,SO₂等酸雨前体物会被抬升扩散至泰山上空,从而形成酸雨沉降下来。

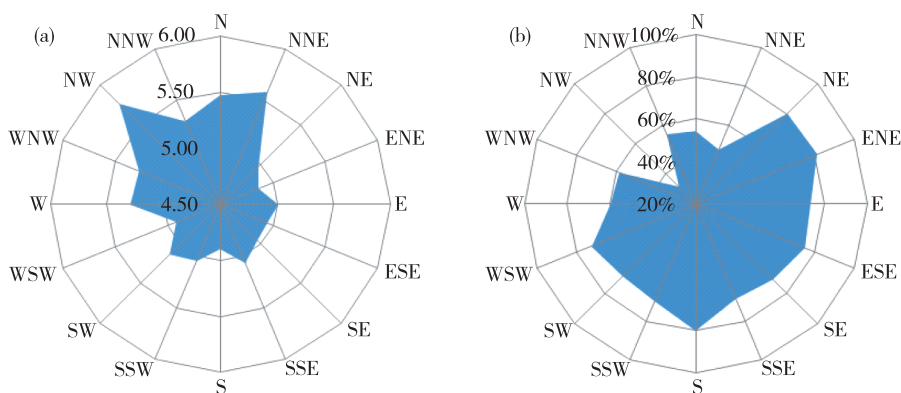


图4 泰山降水 pH(a)和酸雨频率(b)玫瑰图

Fig.4 Rose diagrams of the pH value (a) and the frequency of acid rain (b) for the precipitation at Mount Tai

5 小结

通过用 2006—2015 年泰山气象站的降水 pH、电导率、降水量和风向风速资料,统计分析了泰山酸雨特征和变化趋势,探讨了降水量和风向风速对酸雨的影响。

1) 泰山 2006—2015 年总有效降水 659 次,酸雨发生频率较高,达到了 69.3%。10 a 平均 pH 为 4.50,变化范围为 3.40~8.23;年均 pH 呈现先下降后上升的趋势,酸雨频率也不断下降,表明近几年泰山酸雨污染情况有所改善。

2) 随降水量的增加,pH 趋于中性(5.60),电导率呈明显的非线性减小趋势。月均 pH 与月平均过程降水量的变化趋势从 2 月到 5 月相反,5 月以后较为一致;月均电导率与月平均过程降水量总体呈相反的变化趋势。

3) 泰山降水期间盛行风速相对较小的西南风,而风速较大的西北风给泰山带来的降水最少。风向风速对酸雨的酸性和出现频率有显著影响,南风 and 东北风条件下,酸雨出现频率最高、酸性最强,西北风条件下,酸雨频率最低、酸性最弱。风向风速和排放源共同导致了这一分布特征。

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2006:365.
- [2] 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):266-281.
- [3] 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.
- [4] 汤洁,徐晓斌,巴金,等.1992~2006 年中国降水酸度的变化趋势[J].科学通报,2010,55(8):705-712.
- [5] 张明,李小明.酸沉降对泰山土壤酸化的影响[J].山东大学学报(理学版),2010,45(1):36-40.
- [6] 王艳,葛福玲,刘晓环,等.泰山降水化学及大气传输的研究[J].环境科学学报,2006,26(7):1187-1194.
- [7] Wang Y, Wai K M, Gao J, et al. The impacts of anthropogenic emissions on the precipitation chemistry at an elevated site in North-eastern China [J]. Atmos Environ,2008,42(13):2959-2970.
- [8] 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.
- [9] 汤洁,徐晓斌,杨志彪,等.电导率加和性质及其在酸雨观测数据质量评估中的应用[J].应用气象学报,2008,19(4):385-392.
- [10] 中国气象局.酸雨观测业务规范[M].北京:气象出版社,2005:30-31.
- [11] 孙厚根,汤洁.1992—2010 年泰山地区酸雨变化特征

- 及其趋势分析[J].气象,2013,39(3):347-354.
- [12] Fu X, Wang S, Xing J, et al. Increasing ammonia concentrations reduce the effectiveness of particle pollution control achieved via SO₂ and NO_x emissions reduction in East China[J]. Environ Sci Technol Lett, 2017,4(6):221-227.
- [13] 汤洁,薛虎圣,于晓岚,等.瓦里关山降水化学特征的初步分析[J].环境科学学报,2000,20(4):420-425.
- [14] 王艳,葛福玲,刘晓环,等.泰山降水的离子组成特征分析[J].中国环境科学,2006,26(4):422-426.
- [15] 王德众,丁善文,刘恒德,等.泰山大风气候特征统计分析[J].山东气象,2011,31(3):15-17.