

王苗,吕桅桅,王凯,等,2019.武汉市酸雨变化特征及影响因子分析[J].气象,45(2):282-289. Wang M, Lü W W, Wang K, et al, 2019. Analysis of variation characteristics of acid rain in Wuhan and its impact factors[J]. Meteor Mon, 45(2):282-289 (in Chinese).

## 武汉市酸雨变化特征及影响因子分析\*

王 苗 吕桅桅 王 凯 马德粟 方思达

武汉区域气候中心,武汉 430074

**提 要:** 利用质量控制后 1990—2014 年酸雨逐日观测数据,分析武汉市酸雨变化特征,并研究酸雨与降水强度、风、气团来源及污染源的关系。结果表明:武汉站年均 pH 值为 4.86,属弱酸雨等级,酸雨强度整体呈增加趋势但 2007 年后趋于减弱;年均电导率为  $39.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,呈  $8.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的增加趋势。酸雨强度冬强夏弱,发生频率冬多夏少,电导率冬高夏低。武汉市强酸雨 pH 值和电导率呈显著负相关,非酸雨呈显著正相关。降水强度在酸雨强弱、发生频率演变过程中作用显著,但不同季节各有差异。1500 m 高度处风速增大,武汉市酸雨强度减弱、发生频率减少,西南风向下酸雨发生频率高。强酸雨主要受来自南方酸雨重污染区气团影响,外来污染源经大气输送对武汉市强酸雨贡献大。武汉市  $\text{SO}_2$  浓度趋于减少, $\text{NO}_2$  浓度趋于增加,两者浓度之和自 2000 年以来呈减少趋势。

**关键词:** 酸雨, pH 值, 电导率, 降水, 气团来源

中图分类号: P466, P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.013

## Analysis of Variation Characteristics of Acid Rain in Wuhan and Its Impact Factors

WANG Miao LÜ Weiwei WANG Kai MA Deli FANG Sida

Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

**Abstract:** Based on the daily observation data of acid rain in Wuhan during 1990—2014, we studied the variation of acid rain and its relationship with rainfall intensity, wind, air mass source and pollutant source. The results indicated that the precipitation in Wuhan shows weak acidity and the annual mean pH is 4.86. The acid rain intensity showed an increasing trend in general but has tended to weaken since 2007. The annual mean electrical conductivity is  $39.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  with a rise of  $8.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  per decade. The pH value is lower in winter than in summer while the frequency and electrical conductivity are higher in winter than in summer. The conductivity and pH value of intense acid rain have an obvious negative correlation while a significant positive correlation is for non-acid rain. The rainfall intensity is an important factor in the development of acid rain intensity and frequency, showing differences in different seasons. The intensity and the frequency of acid rain decrease when the wind speed at 1500 m height increases. Acid rain occurs more in southwest wind direction. The intense acid rain is mainly affected by acid rain from the south heavy air pollution area, and the external pollution sources by the atmospheric transmission contribute greatly to the intense acid rain in Wuhan. The sulphur dioxide content ( $\text{SO}_2$ ) in Wuhan tends to decline while the nitrogen dioxide content ( $\text{NO}_2$ ) tends to increase. The total concentrations of the two have presented a decreasing trend since 2000.

**Key words:** acid rain, pH value, electrical conductivity, precipitation, air mass source

\* 湖北省气象局科技发展基金(2015Y05)和中国气象局气候变化专项(CCSF201620)共同资助

2017 年 4 月 14 日收稿; 2018 年 11 月 7 日收修定稿

第一作者:王苗,主要从事气候变化研究. Email: maomao38278@163.com

## 引言

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨水、冻雨、雪、雹、露等大气降水。我国已经成为继欧洲、北美之后的第三大酸雨区(张新民等,2010),且我国强酸雨区( $\text{pH}<4.5$ )面积最大。目前国内很多学者对全国乃至各个区域酸雨都进行了较为系统的研究,内容涉及到酸雨数据质控(汤洁等,2008;2010a)、酸雨时空演变特征(丁国安等,2004;巴金等,2008;侯青和赵艳霞,2009;赵艳霞等,2006;汤洁等,2010b;孙根厚和汤洁,2013;徐梅等,2016)、酸雨影响要素及形成过程分析等(陈德林等,1989;黄美元等,1995;董蕙青等,2005;赵艳霞和侯青,2008;蒲维维等,2012)。诸多研究结果表明,我国北方地区的京津冀、河南和山东省部分地区存在范围不小的酸雨区且呈扩大趋势,长江中下游以南至少 50% 以上地区为酸雨重污染区,华中和华南中部已成酸雨重灾区(赵艳霞和侯青,2008)。20 世纪 80 年代至 90 年代中期为酸雨急剧发展期,90 年代中后期到 21 世纪初为相对稳定期,但是酸雨形势仍然严峻。

湖北省地处华中酸雨重灾区,王苗等(2016a)针对湖北 32 个酸雨监测站 2007—2014 年资料开展分析,结果表明:湖北酸雨强度整体呈现减弱趋势,2014 年酸雨强度、酸雨及强酸雨频率、电导率为近 8 年来最低值,但是仍有部分城市为强酸雨等级,其中包括武汉。武汉作为省会城市,酸雨相关历史研究却极少,廖洁等(2005)曾进行过武汉酸雨的初步分析,但研究时期早,资料序列短,结论无法展示最新特征。武汉酸雨观测起始于 1990 年,属于湖北省最早一批开展酸雨观测的站点,累计至今已有 20 多年的资料。本文将利用武汉站酸雨长期观测资料,研究酸雨 pH 值、电导率演变特征,对自身 pH 值和电导率相关性进行分析,并从降水、风、气团来源和污染源演变几方面着手分析其对武汉酸雨的影响。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

文中所用资料共四类:(1)酸雨:长期变化趋势采用武汉 1990—2014 年逐日降水量、pH 值、电导率观测数据,成因分析采用 2007—2014 年数据,一

是为了确保酸雨观测数据的准确性,二是为了揭示近期酸雨变化态势。(2)1500 m 高度风向、风速:采用武汉探空站逐日观测数据,时段为 2007—2014 年。(3)用于计算气流轨迹的格点资料:采用 2008—2014 年美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析资料。(4)污染源演变:1997—2014 年  $\text{SO}_2$  浓度、2000—2014 年  $\text{NO}_2$  浓度数据,来自武汉市环境状况公报( $\text{NO}_2$  浓度数据自 2000 年开始对外发布)。

### 1.2 方法

酸雨观测记录剔除了明显错误数据及  $\text{pH}<2.0$  和  $\text{pH}>9.0$  极不合理的数据(巴金,2008),并采用汤洁等(2010a)提出的  $\kappa$ -pH 不等式法对资料进行质量控制,最后保留 1990—2014 年期间 1903 条记录。酸雨平均 pH 值和  $\kappa$  值按照中国气象局颁布的《酸雨观测业务规范》(中国气象局,2005)计算方法进行加权处理。

气流轨迹计算使用美国海洋与大气研究中心(NOAA)空气资源实验室开发的混合单粒子拉格朗日积分传输扩散模式 HYSPLIT 4.8 版本,中心坐标为武汉( $30.62^\circ\text{N}$ 、 $114.13^\circ\text{E}$ ),模拟出强酸雨、非酸雨日 08、14、20 时及前日的 02 时(北京时)的 4 个时刻后推 72 h 气流轨迹。再利用聚类分析方法,将具有一定相似度的轨迹聚为一类,得到具有代表性的气团轨迹,模拟初始高度为 1500 m。其中强酸雨、非酸雨日定义如下:将武汉站降水 pH 值参照百分位法依次排序,挑选 pH 最小的 25 个值和最大的 25 个值所在日期,分别作为强酸雨、非酸雨日。

## 2 武汉酸雨特征分析

### 2.1 长期变化趋势

武汉 1990—2014 年年均 pH 值为 4.86,属弱酸雨等级,年际变化特征明显,整体呈每 10 年下降 0.5 的变化趋势(图 1)。酸雨变化可分为三个阶段:1990—2001 年为酸雨发展平稳期,年均 pH 值为 5.37,期间各年 pH 值均大于 4.5,1996 年为研究期间 pH 值最高年(pH 值为 5.89),其次是 1990 年(pH 值为 5.69);2001—2007 年为酸雨恶化期,年均 pH 值为 4.59,较第一阶段偏低 0.78,期间 pH 值逐年下降,2007 年为有记录以来 pH 值最低年;

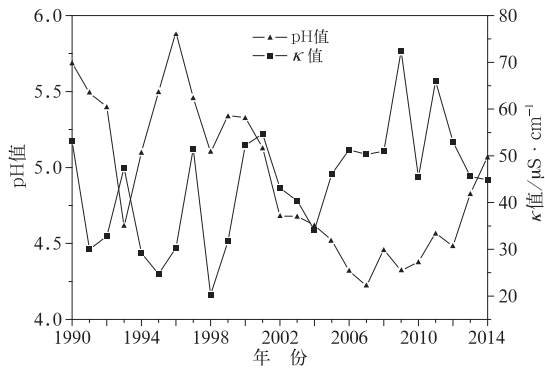


图1 武汉站 1990—2014 年降水 pH 值、 $\kappa$  值年际变化

Fig. 1 Interannual variation of pH value and conductance in Wuhan during 1990–2014

2008—2014 年为酸雨趋于改善期, 年均 pH 值为 4.55, 但整体 pH 值呈波动增加的趋势, 2014 年为 2002 年以来最高值 (pH 值为 5.07), 表明武汉酸雨近期趋于好转。

武汉 1990—2014 年年均  $\kappa$  值为  $39.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 较 2007—2014 年均值偏低  $13.6 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 近 20 多年来整体呈  $8.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  的增加趋势。年际间波动起伏较大, 最大值出现在 2009 年为  $72.4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 最小值出现在 1998 年为  $20.2 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 多数年份  $\kappa$  值维持在  $60.0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  以下, 2014 年降水  $\kappa$  值为近 10 年来最低值。

## 2.2 逐月变化特征

酸雨逐月变化图显示 (图 2), 武汉 5—9 月为持续弱酸雨阶段, 其他月份除 11 月外均为强酸雨, pH 最低值出现在 12 月为 4.19, 最高值出现在 6 月为 4.83。  $\kappa$  值呈波动变化, 12 月最高为  $69.7 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 7 月最低为  $41.0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。酸雨频率冬季

各月均超过 90%, 其中 2 月达 100%, 且 2 月强酸雨频率达 66.7%, 居于各月之首; 夏季酸雨频率保持在 80% 以下, 强酸雨频率均不超过 26%。可以看出, 武汉和湖北省酸雨季节变化趋势较为一致 (王苗等, 2016b), 即酸雨强度冬强夏弱, 电导率冬高夏低, 发生频率冬多夏少。

## 2.3 降水 pH 值和电导率关系

武汉 2007—2014 年降水共 588 次, 强酸雨、弱酸雨、非酸雨发生频率分别为 42.0%、44.6%、13.4%。强酸雨中降水 pH 值在 4~4.5 范围内的占 32.1%, 居各等级之首, 另外 9.9% 处于 3.4~4.0 范围内; 弱酸雨在 4.5~5.0、5.0~5.6 区域内的分布频率均在 21% 左右; 非酸雨中 9.0% 分布在 5.6~6.0, 另有 1% 位于  $\text{pH} > 6.5$  范围内。  $\kappa$  值在  $8.4 \sim 156 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 大部分低于  $70 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 36.6% 分布在  $40 \sim 70 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 20.6% 分布在  $20 \sim 40 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $\kappa$  值为  $8.0 \sim 20 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  的降水出现频率为 3.7%, 相比之下, 超过  $100 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  的降水出现频率更高, 为 14.3%。

图 3 是武汉酸雨各等级降水 pH 值和  $\kappa$  值的相关性。强酸雨 pH 值和  $\kappa$  呈显著负相关 (通过  $\alpha = 0.01$  的显著性水平检验),  $\kappa$  增大 pH 值减小, 弱酸雨呈弱正相关但不显著, 而非酸雨则呈显著正相关 (通过  $\alpha = 0.01$  的显著性水平检验),  $\kappa$  值增大 pH 值增大。对 1990—2014 年武汉降水 pH 值、 $\kappa$  值作了类似相关分析, 结论基本一致。早在 20 世纪 90 年代, 洪盛茂 (1997) 对临安地区强酸雨分析发现类似的特点。究其原因, 可认为强酸雨中酸性物质多,  $\kappa$  值增加时, 降水中酸性物质主导作用越来越明显, pH 值降低; 而非酸雨中, 碱性物质主导作用更强,  $\kappa$  值增加, 降水中碱物质的主导作用更明显, pH 值也

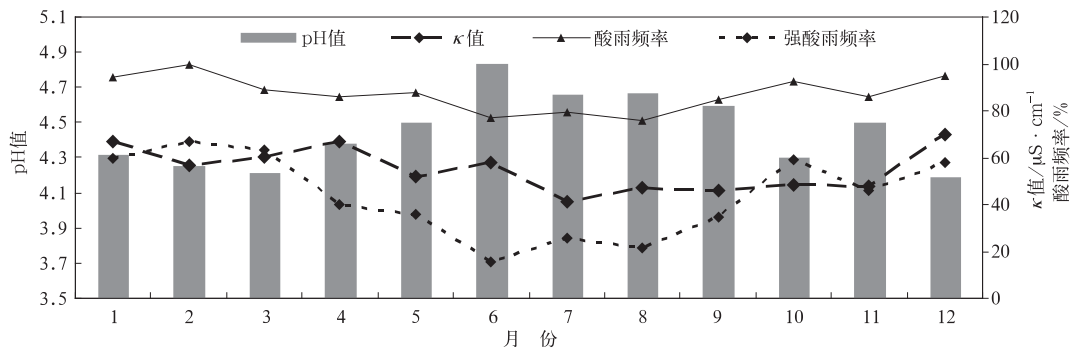


图 2 2007—2014 年武汉站酸雨逐月变化图

Fig. 2 Monthly variation of acid rain in Wuhan during 2007–2014

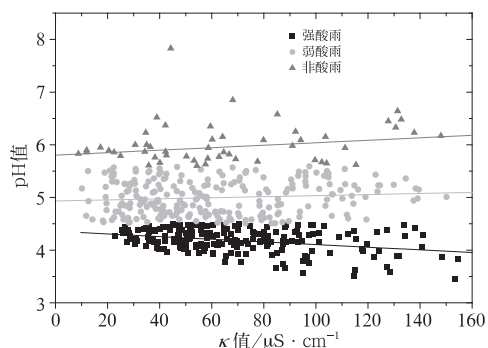


图 3 不同酸性等级降水 pH 值和电导率  $\kappa$  值相关分布图

Fig. 3 Correlation distribution between pH and conductance for each grade

随之增加。

### 3 酸雨与气象要素相关分析

#### 3.1 不同降水强度下酸雨变化特征

武汉年均降水 pH 值随降水强度增加呈增加趋势(图 4),当降水强度由大雨转为强降水时,降水酸度由强转变为弱,但具体到不同季节各有差异。降水由小雨演变成大雨时,春季降水 pH 值逐渐减小,夏季和秋季是先减再增,冬季先增后减,这应该和各季节降水特点及污染程度相关。当各季节降水从大雨转为强降水等级时,pH 值均出现明显增大,这表明强降水发生时冲刷对污染物稀释作用明显,使得降水酸度降低,这和陈德林等(1989)研究结论一致。春、冬季不同等级降水下 pH 值均低于 4.5,且冬季

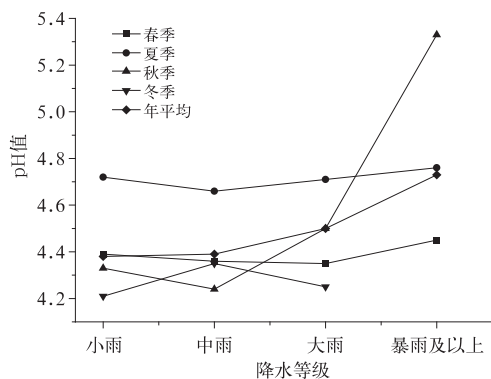


图 4 武汉四季 pH 值和降水量关系

Fig. 4 Relationship between pH and precipitation in different seasons in Wuhan

较春季更低,秋季强降水条件下为弱酸雨,小雨、中雨及大雨条件下均为强酸雨,而夏季各雨量等级下均为弱酸雨等级,这一方面反映出酸雨强度的季节变化,即冬季最强、春、秋季次之,夏季最弱,另一方面也表明降水强度在酸雨强弱演变过程中的重要作用。

图 5 分别给出了武汉四季酸雨、强酸雨频率随雨量的变化图。春季酸雨频率随雨量增大而增大,均超过 80%,强降水时酸雨频率为 100%。夏季先减后增,强降水较其他等级降水发生时酸雨出现频率更高。秋季酸雨频率也是先减后增,只是强降水发生时酸雨频率明显减少。冬季酸雨较其他各季节相比发生更为频繁,小雨时为 96.3%,到中雨、大雨均为 100%,即冬季只要降水强度大于小雨量级就会出现“逢雨必酸”的局面。年平均显示,武汉随着降水等级小雨—中雨—大雨—暴雨的转变,酸雨发生频率呈现增—减—减—减的变化。

强酸雨频率随季节的变化明显异于酸雨频率。春、秋季的变化趋势和年平均一致,只是秋季在强降雨下无强酸雨发生;夏季降水强度为小雨、中雨、大雨时强酸雨出现频率不断增加,当降水演变为强降水时,强酸雨频率减少;冬季与其他季节相反,强酸雨频率在中雨时最低。但是从年均演变来看,强酸雨频率随着降水等级的不断增大与酸雨发生频率类似,即为增—减—减—减的变化,只是当降水增加到强降水时,强酸雨频率减少幅度更大,但是整体来看,降水小于暴雨量级时,各等级降水条件下酸雨(强酸雨)频率相差不大,当发生强降水时,频率明显增大。

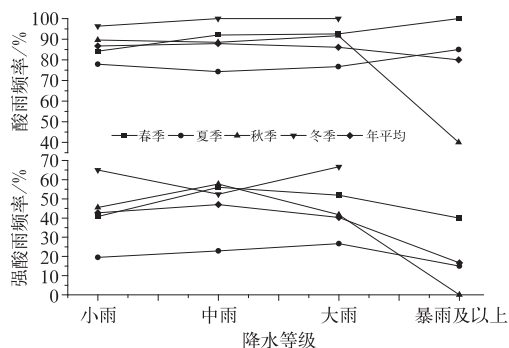


图 5 武汉四季酸雨发生频率和降水量关系

Fig. 5 Relationship between acid rain frequency and precipitation in different seasons in Wuhan

### 3.2 不同风向风速条件下酸雨特征

当大气污染物保持相对恒定的情况下,风对局部大气污染物源的扩散方向及速度有明显的影响(林长城等,2005)。燃煤排放的大量  $\text{SO}_2$  等是酸性降水的主要致酸物质,化石燃料的高温燃烧产生的  $\text{NO}_x$  是降水酸化的另一原因,通常认为大气中  $\text{SO}_2$  及其衍生物平流的平均高度为 1200~1500 m(胡焯,1984),其中 1500 m 高度是大气污染物的主要运输高度(张铮和孟广礼,1992)。本文利用武汉探空站资料,分析其 1500 m 高度处风速和风向资料,以期研究风对酸雨的影响。武汉 1500 m 高度处年平均风速为  $6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,参照风速等级表将风速分为 3 个等级:0~2 级风为一级风( $\leq 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),3~5 级风为二级风( $3.4 \sim 10.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),大于 5 级以上的风为三级风( $> 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),武汉站 3 个等级风速出现概率分别为 22.7%、63.2%、14.1%,表 1 给出了 1500 m 高度上风速对降水酸度、酸雨频率的影响情况。武汉随着 1500 m 高度处风速不断增大,pH 值也不断增大,降水酸度趋于减弱,酸雨及强酸雨频率均趋于减少。不过相比于风速由一级增加为二级,由二级增为三级时 pH 值的增幅、酸雨及强酸雨频率减幅更大(各等级间差异通过 0.05 的  $F$  检验)。

如图 6 所示,将风向分为 16 个等级,武汉 1500 m 高度处主导风向是偏西南风,其次是偏东北风,这和武汉所处地理位置受季风环流影响密不可分,而这

两个主导风向下降水及酸雨出现频次较其他方向更高,偏西北风向下出现频次最低。武汉降水发生时各风向酸雨频率超过 70%,强酸雨频率超过 25%,西南西风向下酸雨出现频次最高,该风向下酸雨发生频率为 92.6%,强酸雨频率为 53.7%,另外偏东南风条件下酸雨发生也较为频繁。虽然偏西北风发生次数较少,但是该风向下酸雨也是高频出现,相比之下,偏东北风条件下酸雨发生频率较其他几个方向偏少。总体而言,武汉在偏西南风情况下酸雨更为频发。

表 1 1500 m 高度处不同风速条件下武汉酸雨变化情况

Table 1 Variation of acid rain in Wuhan under different wind speeds at 1500 m height

	一级风	二级风	三级风
pH 值	4.35	4.38	4.47
酸雨发生频率/%	89.7	89.6	85.0
强酸雨发生频率/%	54.6	53.3	40

## 4 气团来源对酸雨影响

酸雨的形成主要分为云中致酸和云下致酸,杜光智等(2003)指出湖北省部分地区受云中成酸和大气输送影响比较大。考虑到 1500 m 高度是大气污染物的主要运输高度(张铮和孟广礼,1992),且该层环流特征对降水有指征意义,前人也有研究指出 1500 m 高度不同来向气团对应酸雨差别最大(邱明燕

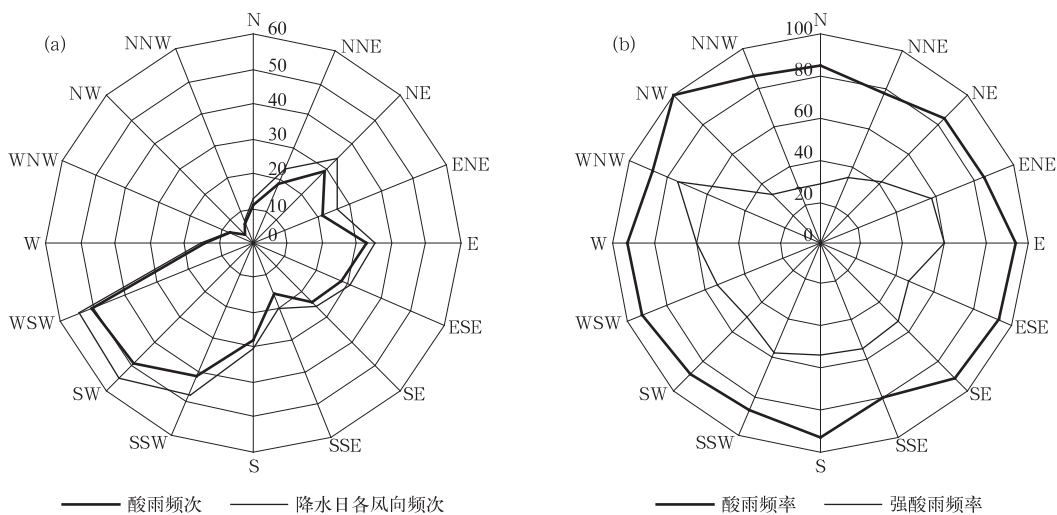


图 6 1500 m 高度处不同风向上酸雨发生频率

Fig. 6 Frequency of acid rain in different wind directions at 1500 m height

等,2009;石春娥等,2010;石敏等,2011),所以本研究将利用 HYSPLIT 后向轨迹模型对武汉强酸雨、非酸雨日 1500 m 高度处后向气流轨迹进行聚类分析,得到强酸雨期间 3 条聚类轨迹和非酸雨期间 6 条聚类轨迹(图 7)。

影响武汉市强酸雨的气团轨迹共计 3 类,主要来自偏南方向。第一类轨迹来自西南偏南方向,占比 74%,以 1000 m 左右高度处水平输送为主且运行较慢,72 h 轨迹主要来自酸雨污染最严重区域之一湖南;第二类轨迹来自华北方向,占比 20%,平均高度在 1500 m 左右且下沉运动平缓,主要经河北、江苏、安徽等地由偏东方向进入武汉,河北所在的京津冀也是北方酸雨主要分布区;第三类轨迹来自西北方向,仅占 6%,平均高度在 3500 m 左右,下沉运动明显,传输距离数千千米,水平运动快,72 h 轨迹主要经西北等地由偏北方向进入武汉。

影响武汉市非酸雨的气团轨迹共计 6 类,主要来自偏北方向。第一类轨迹主要经鄂西北由偏北方向进入武汉,占比 46%;第二类轨迹主要由来自东北部洋面然后经江苏、安徽等地进入武汉,占比 16%,一、二类轨迹垂直运动平均高度均在 1500 m 左右,下沉运动偏弱,水平运动较慢;第三、五、六类轨迹主要经西北或偏北方向进入武汉,占比 18%,垂直运动平均高度在 2000~4000 m 左右,下沉运动明显,水平运动较快;第四类轨迹主要经广西、湖南等地由西南偏南方向进入武汉,占比 20%,这类轨迹垂直运动平均高度在 1000 m 左右,上升运动平缓,传输距离数千千米,水平运动快。

对比两类气团轨迹可以发现,非酸雨气团轨迹

来自西北路径的占比较大,这类气团输送距离远且上升下沉运动比较剧烈,污染物扩散条件好,还有部分路径来自洋面,空气水汽含量丰富,所经过区域酸雨污染也相对较轻,另有部分路径来自湖北西北部及广西南部,均为酸雨污染较弱区域;而强酸雨气团轨迹主要来自南方酸雨污染最为严重的区域,其次是华北酸雨污染严重区域,两种路径气流无明显上升下沉运动,不利于污染物扩散,且输送距离近,均以低层水平运动为主,速度缓慢,易于污染物积聚,而来自西北远距离输送路径比例仅 6%。由此分析初步推断,武汉市强酸雨发生主要受外来污染源影响,但是这需要进一步验证。

## 5 酸雨污染源演变趋势

作为酸雨主要污染源,对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  的浓度变化分析尤为重要。武汉市 1997—2014 年  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  浓度演变图显示(图 8),研究时段内多以  $\text{NO}_2$  高于  $\text{SO}_2$  浓度为主。2008 年以前两者浓度相当,2008 年开始  $\text{NO}_2$  浓度明显高于  $\text{SO}_2$ ,且两者浓度差趋于增大。2008 年武汉市  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  年均浓度值分别为  $0.030$  和  $0.054 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,2014 年分别为  $0.021$  和  $0.055 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。整体而言, $\text{SO}_2$  呈现减少趋势, $\text{NO}_2$  呈现增加趋势。另外值得注意的是, $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  浓度之和自 2000 年以来整体呈弱的不显著减少趋势,2000—2007 年趋于增加,2008 年开始减少尤为明显,2014 年为历年来最低值,这也能从一定程度上解释武汉市酸雨第二阶段恶化和第三阶段趋于好转的原因。

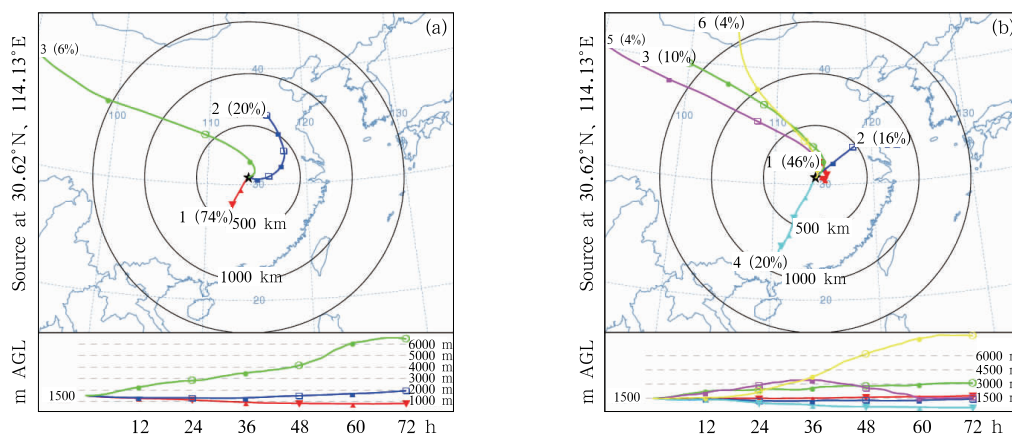


图 7 2007—2014 年武汉强酸雨日(a)和非酸雨日(b)1500 m 高度处大气聚类轨迹

Fig. 7 Trajectories clustering outputted from HYSPLIT model at 1500 m during acid rain days (a) and no-acid rain days (b) in Wuhan from 2007—2014

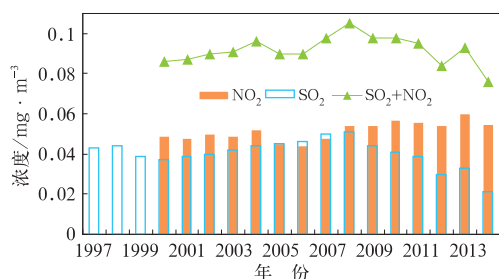


图 8 1997—2014 年武汉市污染物浓度逐年变化

Fig. 8 Annual variation of pollutant concentration in Wuhan during 1997—2014

## 6 结论与讨论

本文通过对武汉酸雨系统研究,得出以下主要结论:

(1) 武汉市 1990—2014 年年均 pH 为 4.86, 呈每 10 年减少 0.5 个 pH 值单位的变化趋势, 年均  $\kappa$  值为  $39.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$  且呈  $8.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  增加的趋势, 酸雨变化分为酸雨发展平稳期、恶化期和趋于改善期三个阶段。

(2) 2007—2014 年期间武汉市多以弱酸雨为主, 但强酸雨频率超非酸雨 3 倍, pH 值在 4~4.5 内分布最高 (32.1%), 电导率  $\kappa$  值大部分低于  $70 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。强酸雨的 pH 值和降水电导率  $\kappa$  呈现显著负相关, 而非酸雨则呈现显著正相关。

(3) 降水从大雨增为强降水时, 武汉市 pH 值均出现明显增大, 强降水的冲刷作用明显; 随着降水由小雨—中雨—大雨—暴雨的转变, 年均酸雨频率呈现增—减—减的变化, 强酸雨频率也有类似变化; 1500 m 高度处风速增大, 武汉市 pH 值增大, 酸雨及强酸雨频率均趋于减少, 西南风向下酸雨频发, 其次是偏东南风向。

(4) 武汉市强酸雨气团轨迹主要来自南方酸雨污染最为严重的区域, 其次是华北酸雨污染严重区域, 非酸雨发生前来自西北冷空气路径的占比较大, 武汉市强酸雨发生受外来污染源影响可能性较大。

(5) 武汉市  $\text{SO}_2$  趋于减少、 $\text{NO}_2$  趋于增加, 两者浓度和 2000—2007 年趋于增加, 2008 年开始趋于减少。武汉酸雨变化和全国其他区域已有研究相比, 既有相似之处, 也有其独特特征。酸雨形成是一个复杂的过程, 影响因素众多, 气象条件是重要因素

之一, 后期仍需深入研究。酸雨中离子浓度受云内过程、云下气体化学反应和云下气溶胶共同影响, 所以加强对降水中离子种类和浓度的监测, 关注酸雨形成机理研究, 是后期研究工作的重点。

## 参考文献

- 巴金, 2008. 中国地区酸雨的长期演变及时空分布特征分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Ba J, 2008. Study on the long-term trend and spatio-temporal distribution characteristics of acid rain over China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 巴金, 汤洁, 王淑凤, 等, 2008. 重庆地区近 10 年酸雨时空分布和季节变化特征分析[J]. 气象, 34(9): 81-88. Ba J, Tang J, Wang S F, et al, 2008. Analysis of spatio-temporal distribution and seasonality of acid rain in Chongqing from 1997 to 2006 [J]. Meteor Mon, 34(9): 81-88 (in Chinese).
- 陈德林, 谷淑芳, 李洪珍, 1989. 降水酸度与降水物理量关系的分析[J]. 气象科学研究院院刊, 4(1): 82-87. Chen D L, Gu S F, Li H Z, 1989. Analysis of the relationship between the acidity and physical character of precipitation [J]. J Aca Meteor Sci, 4(1): 82-87 (in Chinese).
- 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(增刊): 85-94. Ding G A, Xu X B, Wang S F, et al, 2004. Database from the acid rain network of China Meteorological Administration and its preliminary analyses [J]. J Appl Meteor Sci, 15(S): 85-94 (in Chinese).
- 董蕙青, 黄海洪, 高安宁, 等, 2005. 影响广西酸雨的大气环流特征分析[J]. 气象, 31(10): 51-55. Dong H Q, Huang H H, Gao A N, et al, 2005. Analysis of effect of atmosphere circulation on acid rain in Guangxi [J]. Meteor Mon, 31(10): 51-55 (in Chinese).
- 杜光智, 黄晓华, 黄霞, 等, 2003. 湖北省酸雨的时空分布规律及成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 12(4): 377-381. Du G Z, Huang X H, Huang X, et al, 2003. Temporal and spatial distribution of acid rain in Hubei Province with a discussion on the cause [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 12(4): 377-381 (in Chinese).
- 洪盛茂, 1997. 临安地区强酸雨的特点[J]. 大气科学, 21(1): 31-38. Hong S M, 1997. The characteristic of the strong acid rain in Lin'an [J]. Sci Atmos Sinica, 21(1): 31-38 (in Chinese).
- 侯青, 赵艳霞, 2009. 2007 年中国区域性酸雨的若干特征[J]. 气候变化研究进展, 5(1): 7-11. Hou Q, Zhao Y X, 2009. An analysis on characteristics of regional acid rain over China in 2007 [J]. Adv Climate Change Res, 5(1): 7-11 (in Chinese).
- 胡倬, 1984. 酸雨的气象解释及可测性探讨[J]. 环境科学, 5(1): 73-76. Hu Z, 1984. Discussion on meteorological interpretation and measurability of acid rain [J]. Environ Sci, 5(1): 73-76 (in Chinese).
- 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[J]. 大气科学, 19(3): 359-366. Huang M Y, Shen Z L, Liu S R, et al, 1995. A study on the formation processes of acid rain in some areas of Southwest China [J]. Sci Atmos Sinica, 19(3):

- 359-366(in Chinese).
- 廖洁,朱志超,侯祺棕,2005.武汉市酸雨分布规律及其成因分析[J].工业安全与环保,31(3):39-40. Liao J, Zhu Z C, Hou Q Z, 2005. The distribution regulation and cause analysis on acid rain in Wuhan city[J]. Industrial safety and environmental protection, 31(3):39-40(in Chinese).
- 林长城,林祥明,邹燕,等,2005.福州气象条件与酸雨的关系研究[J].热带气象学报,21(3):330-336. Lin C C, Lin X M, Zou Y, et al. 2005. Study on the relationship between meteorological conditions and acid rain in fuzhou[J]. J Trop Meteor, 21(3):330-336 (in Chinese).
- 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. Pu W W, Yu B, Zhao X J, et al, 2012. The analysis of synoptic factors and chemical characteristics of acid rain in Beijing[J]. Scientia Meteor Sinica, 32(5):565-572(in Chinese).
- 邱明燕,石春娥,张浩,等,2009.合肥市酸雨变化特征及其影响因子[J].环境科学学报,29(6):1329-1338. Qiu M Y, Shi C E, Zhang H, et al, 2009. Marked changes of acid rain in Hefei and their causes[J]. Acta Sci Circum, 29(6):1329-1338(in Chinese).
- 石春娥,邱明燕,张爱民,等,2010.安徽省酸雨分布特征和发展趋势及其影响因子[J].环境科学,31(6):1675-1681. Shi C E, Qiu M Y, Zhang A M, et al, 2010. Spatiotemporal trends and the impact factors of acid rain in Anhui Province[J]. Environ Sci, 31(6):1675-1681(in Chinese).
- 石敏,张青新,于宁,等,2011.基于气流轨迹大气输送对大连市酸雨形成分析[J].环境科学与技术,34(12H):236-241. Shi M, Zhang Q X, Yu N, et al, 2011. Analysis on the form of acid rain in Dalian based on air trajectory clustering [J]. Environ Sci Tech, 34(12H):236-241(in Chinese).
- 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[J].气象,39(3):347-354. Sun G H, Tang J, 2013. Variation characteristics and trend of acid rain in Taishan Mountain Area[J]. Meteor Mon, 39(3):347-354(in Chinese).
- 汤洁,徐晓斌,杨志彪,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[J].应用气象学报,19(4):385-392. Tang J, Xu X B, Yang Z B, et al, 2008. The conductivity additivity of ionic components in precipitation and its application to the data evaluation of acid rain monitoring[J]. J Appl Meteor Sci, 19(4):385-392(in Chinese).
- 汤洁,俞向明,程红兵,等,2010a.酸雨观测中pH测量负偏差来源[J].应用气象学报,21(4):458-463. Tang J, Yu X M, Cheng H B, et al, 2010a. The cause of pH measurement negative bias in acid rain monitoring[J]. J Appl Meteor, 21(4):458-463(in Chinese).
- 汤洁,徐晓斌,巴金,等,2010b.1992~2006年中国降水酸度的变化趋势[J].科学通报,55(8):705-712. Tang J, Xu X B, Ba J, et al, 2010b. Trends of the precipitation acidity over China during 1992—2006[J]. Chin Sci Bull, 55(8):705-712(in Chinese).
- 王苗,刘敏,王凯,等,2016a.2007—2014年湖北省酸雨变化时空特征分析[J].气象,42(7):857-864. Wang M, Liu M, Wang K, et al, 2016a. Analysis of variation acid rain in Hubei during 2007—2014[J]. Meteor Mon, 42(7):857-864(in Chinese).
- 王苗,王凯,刘敏,2016b.2014年湖北省酸雨若干特征及其与霾关系分析[J].环境科学与技术,39(4):149-153. Wang M, Wang K, Liu M, 2016b. Characteristics of acid rain of Hubei Province in 2014 and relationship between acid rain and smog[J]. Environ Sci Tech, 39(4):149-153(in Chinese).
- 徐梅,祝青林,朱玉强,等,2016.近20年天津市酸雨变化特征及趋势分析[J].气象,42(4):436-442. Xu M, Zhu Q L, Zhu Y Q, et al, 2016. Characteristics and variation trend of acid rain in Tianjin during the last 20 years[J]. Meteor Mon, 42(4):436-442 (in Chinese).
- 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. Zhang X M, Chai F H, Wang S L, et al, 2010. Research progress of acid precipitation in China[J]. Res Environ Sci, 23(5):527-532(in Chinese).
- 张铮,孟广礼,1992.1988年两广地区春季酸雨观测和天气形势分析[J].北京大学学报(自然科学版),28(1):86-95. Zhang Z, Meng G L, 1992. An observation of spring's acid rain and an analysis of weather situation at the Liangguang's Area of China in 1988. Universitatis Pekinensis(Acta Scinentiarum Naturalium), 28(1):86-95(in Chinese).
- 赵艳霞,侯青,2008.1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J].气象学报,66(6):1032-1042. Zhao Y X, Hou Q, 2008. Ananalysis on spatial/temporal evolution of acid rain in China (1993—2006) and its causes[J]. Acta Meteor Sinica, 66(6):1032-1042(in Chinese).
- 赵艳霞,侯青,徐晓斌,等,2006.2005年中国酸雨时空分布特征[J].气候变化研究进展,2(5):242-245. Zhao Y X, Hou Q, Xu X B, et al. 2006. Spatial-temporal distribution of acid rain in China during 2005. Adv Climate Change Res, 2(5):242-245 (in Chinese).
- 中国气象局,2005.酸雨观测业务规范[M].北京:气象出版社:24-25. China Meteorological Administration, 2005. Operational Specifications for Acid Rain Observation [M]. Beijing: China Meteorological Press:24-25(in Chinese).