

王苗,刘敏,王凯,等. 2016. 2007—2014 年湖北省酸雨变化时空特征分析. 气象, 42(7):857-864.

2007—2014 年湖北省酸雨变化时空特征分析^{*}

王 苗 刘 敏 王 凯 柳晶辉

武汉区域气候中心, 武汉 430074

提 要: 本文利用湖北省 32 个监测站 2007—2014 年及宜昌、武汉站 1990—2014 年酸雨逐日监测资料, 对湖北省酸雨变化情况进行分析, 结果表明: 湖北省年均降水 pH 值为 4.68, 属于弱酸雨等级; 自 2008 年开始全省酸雨强度不断减弱, 2007—2014 年期间持续为弱酸雨等级, pH 低值区主要位于三峡河谷地区及鄂西部分地区、鄂东南西部及南部; 年均酸雨、强酸雨频率分别为 69.5%、24.4%, 酸雨频率呈波动下降趋势, 强酸雨频率自 2009 年开始呈现明显减少趋势, 酸雨频发区主要位于南部大部地区及鄂西北东部; 年均电导率为 $50.3 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, 主要呈现中部高、东西低的分布型; 湖北省酸雨强度冬强夏弱, 发生频率冬多夏少, 电导率冬高夏低; 武汉 2005 年以后酸雨强度趋于增加, 2006—2012 年持续为强酸雨, 电导率呈增加趋势, 宜昌酸雨强度、降水污染程度均高于武汉; 另监测显示, 湖北上空 NO_2 含量分布范围呈现扩散加重趋势, 武汉地区 SO_2 呈减少趋势, NO_2 呈增加趋势, 这种变化有可能导致湖北省酸雨类型逐渐从硫酸主导型向复合型转变。

关键词: 酸雨, pH 值, 电导率, NO_x

中图分类号: P468, X517

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.009

Analysis of Variation of Acid Rain in Hubei During 2007—2014

WANG Miao LIU Min WANG Kai LIU Jinghui

Wuhan Regional Climate Centre, Wuhan 430074

Abstract: By using the daily observation data of acid rain from 32 stations from 2007 to 2014 as well as Yichang and Wuhan Stations during 1990—2014, we studied the variation of acid rain in Hubei Province. The results indicated that the precipitation of the region shows weak acidity and the mean pH is 4.68. The intensity has been in the trend of getting weak since 2008, maintaining a weak level between 2007 and 2014. The areas with pH less than 4.5 are located in the Three Gorges Valley, some areas of western part, the west of southeastern part, and the southern part of Hubei. The average annual frequency of acid rain and strong-acid rain is 69.5% and 24.4% respectively. The frequency tends to decline while the strong acid-rain shows the trend of decreasing significantly since 2009. The areas where acid rain occurs frequently are located in most southern part and the east of northwestern part of Hubei. The average annual electrical conductivity is $50.3 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, showing a pattern of high in central part and low in west and east part. The pH value is lower in winter than in summer while the frequency and electrical conductivity are higher in winter than in summer. The intensity of acid rain in Wuhan has been inclining to increase since 2005, retaining a strong during 2006—2012 while the electrical conductivity has a increasing trend. Both the intensity and pollution level are higher in Yichang than in Wuhan. In addition, the content of nitrogen oxides over Hubei Province tended to spread and increase. The sulphur dioxide content in Wuhan tends to decline while the nitrogen dioxide content tends to increase. Because of this change the acid rain components in Hubei may transform from sulfate to sulfate combined with nitric acid.

* 湖北省气象局科技发展基金(2015Y05)资助

2015 年 7 月 16 日收稿; 2016 年 5 月 20 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

Key words: acid rain, pH value, electrical conductivity, NO_x

引 言

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨水、冻雨、雪、雹和露等大气降水。早在 19 世纪中叶英国化学家 Smith 首次提出“酸雨”(acid rain), 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, 1976)。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), 酸雨面积扩大之快、降水酸化率之高世界罕见。中国的酸雨监测和研究开始于 20 世纪 70 年代末, 早期研究涉及内容主要包括酸雨形成机理与传输、酸雨影响、酸沉降控制策略、酸雨长期变化趋势等(曹洪法等, 1993; 丁国安等, 1997), 后期也不乏酸雨数据质控方法研究(汤洁等, 2008; 2010b)、酸雨成因分析(吴洪颜等, 2008; 蒲维维等, 2012; 石春娥等, 2010)。赵艳霞等(2008)、汤洁等(2010a)、侯青等(2009)、巴金(2008)等均对 20 世纪 90 年代初至 2006 年中国区域酸雨变化特征进行了较为系统的研究, 结果表明我国酸雨经历了最强期(1993—1998 年)、强度降低期(1999—2002 年)和持续加强期(2003—2006 年)三个阶段, 主要酸雨区位于长江以南广大地区; 总体看来, 我国酸雨区呈范围扩大、强度稍有减弱的趋势, 北方酸雨区范围扩大明显且酸雨强度增强趋势明显, 南方酸雨区范围基本保持不变, 但“重灾区”由西南地区逐步转移至华中和华南地区。诸多研究表明, 我国酸雨已升级为现阶段面临的严重环境问题。目前我国的酸雨区主要集中在长江以南的大部分地区以及长江、珠江三角洲地区, 酸雨区域已经占领了我国的“半壁江山”, 由此引发的酸雨污染问题也日益受到重视。

部分地区及省份也有开展酸雨方面的研究(巴金, 2008; 秦鹏等, 2006; 吴建明等, 2012; 徐梅等, 2009; 蒲维维等, 2010; 孙厚根等, 2013), 以酸雨特征研究居多, 所得结论详细给出了各地区的酸雨分布特征, 但是研究结果存在一定的区域性差异。湖北地处四川盆地以东, 长江由西向东贯穿全境, 地形西、北、东三面环山, 形成一南向敞开的不完整盆地。特殊的地理环境使得湖北省形成了华中酸雨带。有学者对湖北的酸雨状况进行了研究, 也得出了很多有意义的结论, 但因开展的较早, 大多有一定的局限性, 多数原因在于资料时间短、站点少, 如杜光智等

(2003)对湖北省的酸雨研究所用资料起止时间为 1997—2001 年, 时序长度仅 4 年; 廖洁等(2005)也开展过酸雨研究, 仅限于武汉市, 资料也只截止到 2000 年; 张霞等(2007)对湖北西部酸雨特征研究资料截止到 2002 年, 且只有宜昌、襄阳、巴东三站; 许杨等(2008; 2010)的研究仅限于 2008 年, 侧重于 2008 年初雨雪过程酸雨特征研究, 诸多学者的结论一致表明湖北地区酸雨问题不容小觑, 但是关于“重灾区”湖北省的酸雨长期发展趋势及气候特征的分析鲜有进行, 利用最新更全资料展开该区域的酸雨变化状况研究势在必行。

中国气象局于 1989 年开始建立气象部门的全国酸雨监测网(丁国安等, 2004), 湖北省气象部门自 2006 年起开始逐步加大酸雨监测力度, 至 2007 年已基本形成了由 32 个酸雨监测站组成的酸雨监测网, 部分站点如宜昌、武汉已有 1992 年至今累计近 20 多年的观测资料, 这对于开展酸雨研究都是极其宝贵的原始资料。本文将采用湖北省酸雨资料, 对全省酸雨的时空分布和形势演变特征开展了系统研究, 并对影响湖北地区酸雨污染源进行了简要分析, 以期为今后酸雨成因研究奠定基础, 也为决策者制定酸雨防治对策提供理论依据。

1 数据资料与方法

酸雨统计数据来自湖北省 32 个气象酸雨监测站逐日观测数据(站点分布见图 1)。全省酸雨观测时间为 2007—2014 年, 2007 年 1—5 月仅十堰、房县、襄阳、巴东、恩施、宜昌、天门、武汉、金沙 9 站有资料记录, 5 月以后除神农架和随州外均有记录, 但仍有站点资料缺测, 2008 年开始全省保持 32 站资料记录, 武汉、宜昌站酸雨观测时间为 1990—2014 年, 其中宜昌站 1992 年 pH 值因仪器故障致全年缺测; 剔除了明显错误数据及 $\text{pH} < 2.0$ 和 $\text{pH} > 9.0$ 的记录, 并采用了汤洁等(2010b)提出的 $\kappa\text{-pH}$ 不等式法对资料进行了质量控制, 去掉了不满足 $\kappa\text{-pH}$ 不等式的记录。

NO₂ 数据来自 SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography)(Bovensmann et al, 1999)观测的对流层 NO₂ 柱含量资料(Level 2)(<http://www.temis.nl/products/no2.html>); 武汉地区 SO₂、NO₂ 数据来自

武汉市环境状况公报(自 2000 年开始对外发布)。

所用酸雨数据按照中国气象局颁布的《酸雨观测业务规范》有关降水 pH 值和 κ 值(电导率)计算方法进行加权处理。各站酸雨平均 pH 值及发生频率按照各站降水样本量分别进行统计(中国气象局, 2005)。



图 1 湖北省酸雨监测站点分布

Fig.1 Distribution of observing stations for acid rain in Hubei Province

2 2007—2014 年湖北省酸雨变化特征

2.1 年际变化特征

由 2007—2014 年酸雨各表征值逐年变化情况

来看(图 2),湖北省降水 pH 值呈现先减小后增大的变化趋势,2007 年全省降水 pH 值为 4.56,自 2008 年开始全省降水 pH 值持续增大,表明酸雨强度不断减弱,2007—2014 年降水 pH 值持续高于 4.50;酸雨频率呈波动下降趋势,强酸雨频率自 2010 年开始呈现明显减少趋势,2007 年全省酸雨频率为 70.6%,强酸雨频率为 32.9%,2014 年分别降为 56.3%、10.0%; κ 值呈波动变化型。整体而言,自 2008 年开始,全省酸雨状况有转好的趋势,2014 年酸雨强度、酸雨发生频率、强酸雨发生频率及 κ 值分别为 5.00、56.3%、10%和 $45.8 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,均为近 8 年来最低值。

将 2014 和 2008 年全省酸雨状况对比分析可以看出(图 3),2014 年较 2008 年 pH 均值上升了 0.49

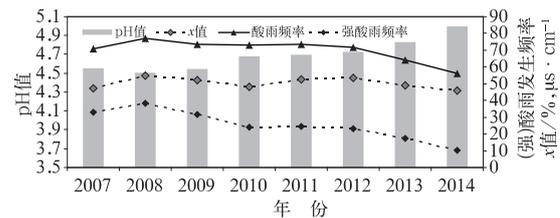


图 2 2007—2014 年湖北省酸雨逐年变化趋势

Fig.2 Changing trend of acid rain in Hubei Province during 2007—2014

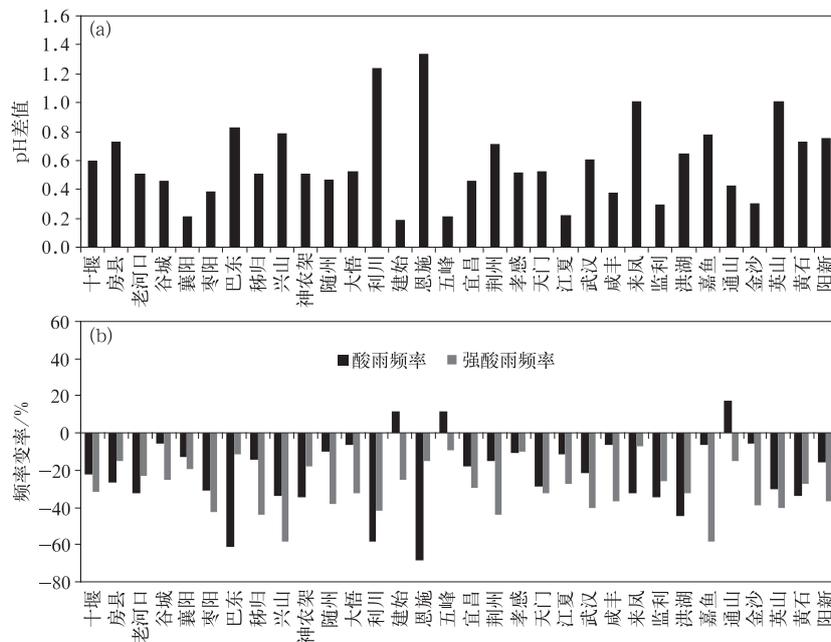


图 3 2014 年与 2008 年各站 pH 值(a)、酸雨和强酸雨频率(b)差值图

Fig.3 The differences of pH (a), frequency of acid rain and strong-acid rain (b) between 2014 and 2008

个单位,且全省各站 pH 值均不同程度上升,恩施、利川、英山、来凤 4 站上升超过 1 个 pH 值单位,建始仅上升 0.19 个单位。由 2008 和 2014 年酸雨分布图(图略)可以看出,湖北省 2008 年全省基本为弱酸雨控制区,鄂西部分地区、江汉平原大部及鄂东南部分地区为强酸雨区,而 2014 年全省以弱酸雨为主,局部地区甚至出现非酸雨区;湖北省 2014 和 2008 年 pH 差值图显示(图略),大部地区 pH 值上升了 0.2~1.0 个单位,鄂西南西部 pH 值增加最明显,其次是鄂西北西部及鄂东东部小范围地区。

2014 年酸雨频率与 2008 年相比,共 29 站降低,恩施、巴东、利川 3 站降低超过 50%,通山、五峰、建始等发生频率分别上升了 17.8%、11.8% 和 11.7%,其中建始站自 2010 年开始酸雨频率保持为 100%,即该站“逢雨必酸”,也是湖北省唯一一个酸雨频率保持为 100% 的站点;强酸雨频率全省站点无一例外均有所降低,兴山、嘉鱼 2 站强酸雨频率下降接近 60%。酸雨频率降低主要体现在鄂西地区,尤其是三峡河谷、鄂西南及江汉平原地区,但鄂东局部地区酸雨频率却有所上升。

2.2 年均酸雨空间变化特征

2.2.1 降水 pH 值

2007—2014 年湖北省全省降水 pH 值平均为 4.68,属于弱酸雨等级,32 个酸雨监测站显示年均降水 pH 值在 4.42(嘉鱼)至 5.20(房县)之间,其中嘉鱼、秭归、江夏、宜昌、金沙、襄阳、武汉共 7 站 pH 值低于 5.6,为强酸雨等级,其余 25 站属弱酸雨等级,强酸雨区域主要位于鄂西北北部及东部、鄂西南西部、三峡河谷地区、鄂东南西部及南部。整体而言,湖北省酸雨强度中部高于东、西部,具体分布情况见图 4。

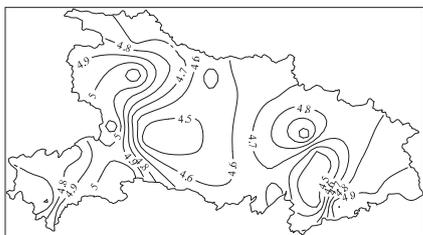


图 4 2007—2014 年湖北省酸雨平均 pH 值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average pH values of acid rain of Hubei Province during 2007—2014

2.2.2 酸雨及强酸雨发生频率

2007—2014 年湖北省酸雨平均发生频率为 69.5%,强酸雨发生频率为 24.4%。酸雨频发区主要位于南部大部地区及鄂西北东部(图 5),低发区主要位于鄂西局部及鄂东北局部,建始站酸雨发生频率居于全省首位为 94.2%,另有金沙站酸雨发生频率超过 90%,其他站点除房县、来凤外均超过 50%;强酸雨发生频率和酸雨发生频率分布型较为类似,同样呈现中部高东西低南部高北部低的分布型,金沙站强酸雨频率超过 50% 为全省强酸雨发生频率最高地,江夏、嘉鱼、秭归、宜昌等 24 站超过 10%,建始、通山等 6 站不足 10%。值得注意的是建始站,该站酸雨发生频率自 2010 年开始连续保持为 100%,但是强酸雨发生频率较低,表明该地为酸雨高发区,但以弱酸雨为主。

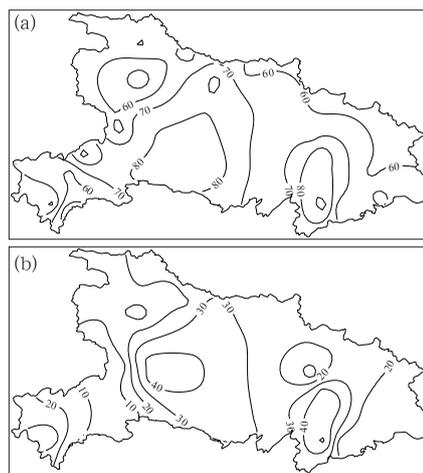


图 5 2007—2014 年湖北省酸雨(a)及强酸雨(b)发生频率空间分布

Fig. 5 Frequency spatial distribution of acid rain (a) and severe acid rain (b) in Hubei Province during 2007—2014

2.2.3 电导率

降水电导率 κ 值能反映降水的洁净程度,即 κ 值越小降水杂质越少,湖北省 2007—2014 年年平均电导率为 $50.3 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,电导率呈现中部高东西低的分布型(图 6),高值区主要位于鄂西北东北部及鄂东北西部,孝感、谷城 2 站电导率高于 $90 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,建始站为 $67.0 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 位于第三,另有洪湖、十堰等 23 站介于 $40 \sim 70 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,大悟、金沙等 6 站低于 $40 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,其中神农架最低为 $27.3 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,这与该地海拔高、绿地覆盖广、空气污染少等环境因素是密不可分的。

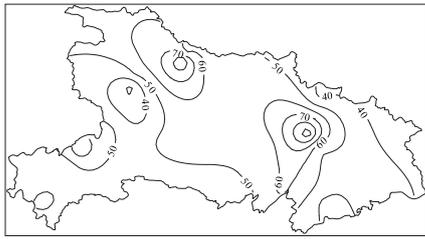


图 6 2007—2014 年湖北省降水电导率空间分布
Fig. 6 The precipitation conductance distribution of Hubei Province during 2007—2014

2.3 酸雨的逐月变化情况

由酸雨表征要素的逐月变化情况来看(图 7),湖北省酸雨强度 1—7 月逐渐加强,1 月 pH 值为 4.25,之后逐渐增大,至 7 月 pH 值达到最高为 4.90,年内 4—11 月 pH 值保持在 4.5 以上,表明该阶段全省为弱酸雨等级,其余月份为强酸雨等级,降水 pH 值季节分布可以看出(图略),冬季强酸雨区域分布最广,除东西部小范围外全省大部地区 pH 值 < 4.5,夏季大部分 pH 值大于 4.5;降水电导率逐月变化基本呈“U 型”分布,1 月出现最高值,7 月出现最低值,且 6—9 月维持在 $50 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下;酸雨发生频率各月均高于 50%,和降水电导率变化趋势较为一致,最高、最低值分别出现在 1 月(83.7%)、7 月(54.9%),响应于酸雨频率的变化,强酸雨发生频率最高、最低值同样分别出现在 1 月(44.6%)、7 月(11.0%),且 4—9 月强酸雨频率均低于 30%,夏季均低于 15%。由酸雨逐月变化情况可以看出,湖北省酸雨强度夏弱冬强,发生频率夏少冬多,电导率夏低冬高。

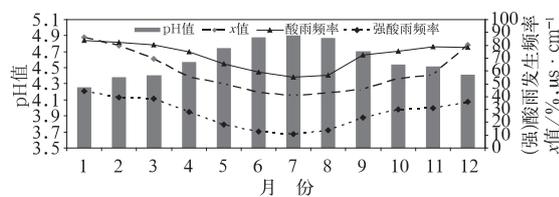


图 7 2007—2014 年湖北省酸雨逐月变化图
Fig. 7 Monthly variation of acid rain in Hubei Province during 2007—2014

3 典型台站酸雨变化趋势

选取酸雨观测资料较长的武汉站和宜昌站作为

湖北省东部和西部的代表站,从酸雨强度和酸雨 κ 值进行历史比较,反映湖北省酸雨变化状况。

3.1 酸雨强度变化

武汉站年均 $\text{pH}=4.86$,为弱酸雨等级,年际变化阶段性特征明显(图 8)。2005 年以前酸雨强度整体较弱, pH 值均 >4.5 ,1990 年($\text{pH}=5.69$)、1996 年($\text{pH}=5.89$)为非酸雨,1996 年为近 24 年来武汉降水酸性强度最弱年;2005 年之后武汉酸雨强度趋于增加,2006—2012 年 7 年间武汉站酸雨持续强酸雨等级,其中 2007 年($\text{pH}=4.22$)为武汉降水酸性强度最强年,之后出现逐渐减弱的趋势。

宜昌站年均 $\text{pH}=4.40$,为强酸雨等级,酸雨强度整体呈减弱的趋势,年际变化相对较为平稳。2011 年以前宜昌站多数年份维持强酸雨水平,其中 20 世纪 90 年代 1990—1998 年期间 pH 值持续低于 4.5,2011 年开始酸雨等级保持为弱酸雨。与武汉站相比,除 2005、2007、2009、2010、2012 年强度略低于武汉站外,其余年份均高于武汉站。

2014 年武汉站 pH 值为 5.07,酸雨强度为 2002 年以来最低值;宜昌站 pH 值为 4.71,酸雨强度为有记录以来最低值。整体而言,宜昌酸雨强度强于武汉。这是因为酸雨受地理环境、气象条件影响明显,宜昌处于山地丘陵地区,静风、逆温出现频率高,大气混合层高度低,造成扩散条件差,酸性气体不易扩散,张震等(2007)就指出宜昌的大气环境和丰沛的云水资源不利于污染物的扩散和远距离输送,却有利于污染物与空气中水分子的充分结合,且酸雨观测点位于猓亭等重工业区的下风方向,而武汉地处鄂东沿江地区,地形开阔,风速大,逆温出现频率相对较小,故宜昌较武汉相比更容易出现酸雨污染。

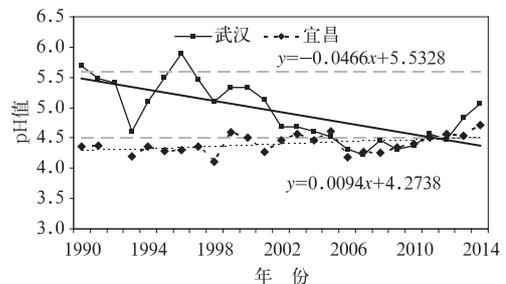


图 8 1990—2014 年武汉站和宜昌站降水 pH 值强度年际变化

Fig. 8 Interannual variation of pH values of precipitation in Wuhan and Yichang during 1990—2014

3.2 降水 κ 值变化

图 9 为武汉和宜昌站降水 κ 值年际变化情况。武汉站年均 κ 值为 $39.1 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, 近 20 多年来整体呈增加的趋势。2008 年以前呈波动变化, κ 值维持在 $60.00 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下, 最高值出现在 2009 年为 $72.4 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$; 宜昌站年均 κ 值为 $59.80 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$, 变化相对较为平稳, 最高值出现在 2005 年为 $83.2 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。除 2008、2009、2011 年宜昌 κ 值略低于武汉外, 其余年份均高于武汉, 且在 2007 年之前两站 κ 值差异较大; 其中武汉站 2014 年降水 κ 值为近 10 年来最低值, 整体而言, 宜昌降水污染程度重于武汉。

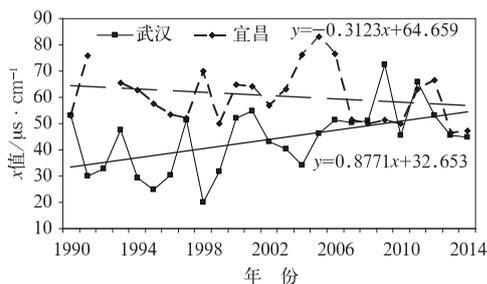


图 9 1990—2014 年武汉站和宜昌站降水 κ 值年际变化

Fig. 9 Interannual variation of precipitation conductance in Wuhan and Yichang during 1990—2014

4 酸雨污染源变化情况

酸雨的形成是一个极其复杂的理化过程, 与酸性前体物 SO_2 、 NO_x 等的排放有密切关系(王明星, 1999)。依据环境卫星遥感监测反演对流层 NO_2 垂直柱浓度分布结果显示(图 10), 2003—2011 年, 中部三省 NO_x 浓度显著增加, 尤其是河南中北部、湖北中东部、湖南中北部等人口密集, 工农业活动水平较高的地区。湖北上空的年均 NO_x 含量分布范围呈现扩散加重趋势, 从 2003 年仅武汉市周边范围扩散到整个湖北中东部, 鄂西北地区也大幅度上升。 NO_2 柱浓度年平均均值成倍增加, 江汉平原、宜昌东部地区以及鄂东北地区平均含量与 2003 年相比增加 2 倍以上。除鄂西南地区含量变化不大外, 其他地区增长在 1~3 倍。

通过武汉城区 2000 年以来 NO_2 、 SO_2 浓度演变图可以看出(图 11), 武汉市城区 2000—2014 年 NO_2 浓度多高于 SO_2 。整体而言, SO_2 呈减少趋势、 NO_2 呈增加趋势。相关研究给出关于酸雨已开始由单纯的硫酸型向硫酸和硝酸混合型转变的结论(Tang et al, 2005; Liu et al, 2006), 武汉地区 SO_2 减少、 NO_2 增加趋势也有可能致酸雨类型逐渐从硫酸主导型向复合型转变。另外 2008 年以来 NO_2

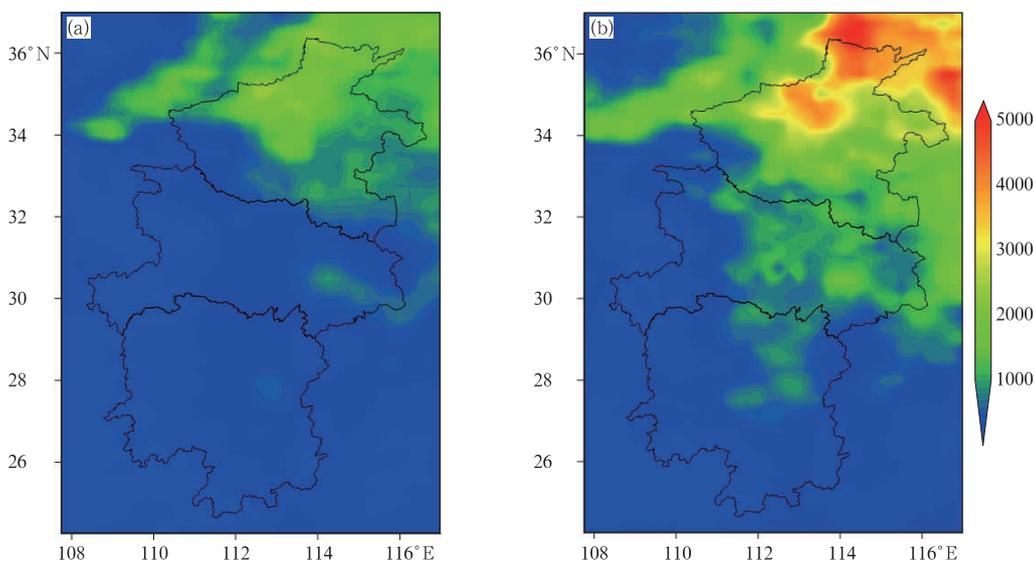


图 10 2003 年(a)和 2011 年(b)华中区域对流层 NO_2 柱浓度分布(单位: 10^{13} 分子 $\cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 10 Tropospheric NO_2 vertical column density of 2003 (a) and 2011 (b) over Central China (unit: 10^{13} molec $\cdot \text{cm}^{-2}$)

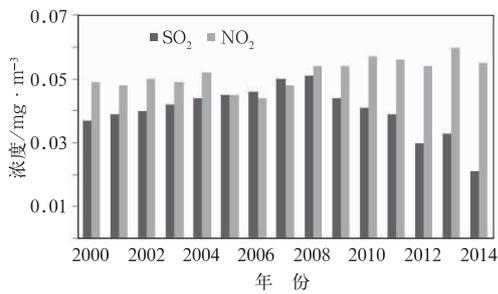


图 11 2000—2014 年武汉市
污染物浓度逐年变化

Fig. 11 Variation of pollutant concentration
in Wuhan during 2000—2014

与 SO₂ 间浓度差值明显加大,但是总浓度值趋于减小,这也许是武汉地区近年来酸雨强度趋于减弱的原因之一。

另外值得注意的是,根据探空资料分析发现宜昌站 1500 m 高度处风速小于武汉站,这个高度通常被认为是大气中 SO₂ 及其衍生物平流所在高度(胡焯,1984),风速偏小不利于局地污染物扩散;且武汉站 1500 m 高度处风速呈略减少趋势(图略),而宜昌站则呈略增加趋势,这也可以从一定程度上解释武汉站酸雨强度、 κ 值增加而宜昌减小的原因。

5 结 论

(1) 湖北省降水酸性属于弱酸雨等级,酸雨强度呈现先增强后减弱的变化趋势,强酸雨区域主要位于三峡河谷地区于三峡河谷地区及鄂西部分地区、鄂东南西部及南部;酸雨频率呈波动下降趋势,强酸雨频率自 2009 年开始呈现明显减少趋势,酸雨频发区主要位于南部大部地区及鄂西北东部;年均电导率主要呈现中部高东西低的分布型;整体而言,湖北省酸雨 2007 年以来有趋于好转的态势,2014 年酸雨强度、发生频率和电导率均为近 8 年来最低值。

(2) 湖北省 4—11 月酸雨强度为弱酸雨等级,酸雨频率低于 80%,强酸雨频率低于 32%, κ 值维持在 $60 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下,酸雨强度冬强夏弱,发生频率冬多夏少,电导率冬高夏低。

(3) 武汉为弱酸雨等级,2005 年以后酸雨强度趋于增加,2006—2012 年持续为强酸雨,电导率呈增加趋势;宜昌为强酸雨等级,但酸雨强度整体呈减弱趋势;宜昌酸雨强度、降水污染程度均高于武汉。

(4) 湖北上空 NO_x 含量分布范围呈现扩散加重趋势,武汉地区 SO₂ 呈减少趋势、NO₂ 呈增加趋势,这种变化有可能导致酸雨类型逐渐从硫酸主导型向复合型转变。

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. 北京: 中国气象科学研究院, 8-22.
- 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.
- 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(2): 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.
- 杜光智, 黄晓华, 黄霞. 2003. 湖北省酸雨的时空分布规律及成因分析. 长江流域资源与环境, 12(4): 378-381.
- 侯青, 赵艳霞. 2009. 2007 年中国区域性酸雨的若干特征. 气候变化研究进展, 5(1): 7-11.
- 胡焯. 1984. 酸雨的气象解释及可测性探讨. 环境科学, 5(1): 73-76.
- 廖洁, 朱志超, 侯祺棕. 2005. 武汉市酸雨分布规律及其成因分析. 工业安全与环保, 31(3): 39-40.
- 蒲维维, 于波, 赵秀娟, 等. 2012. 北京地区酸雨的天气影响要素及降水化学特征分析. 气象科学, 32(5): 565-572.
- 蒲维维, 张小玲, 徐敬, 等. 2010. 北京地区酸雨特征及影响因素. 应用气象学报, 21(4): 464-472.
- 秦鹏, 杜尧东, 刘锦奎, 等. 2006. 广东省酸雨分布特征及其影响因素. 热带气象学报, 22(3): 298-300.
- 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影响因素. 环境科学, 31(6): 1675-1681.
- 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.
- 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 等. 2010a. 1992—2006 年中国降水酸度的变化趋势. 科学通报, 55(8): 705-712.
- 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. 应用气象学报, 19(4): 385-392.
- 汤洁, 俞向明, 程红兵, 等. 2010b. 酸雨观测中 pH 测量负偏差来源. 应用气象学报, 21(4): 458-463.
- 王明星. 1999. 大气化学. 北京: 气象出版社, 161-162.
- 吴洪润, 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. 气象科学, 28(5): 563-567.
- 吴建明, 邹海波, 贺志明. 2012. 江西省酸雨变化特征及其与气象条件的关系. 气象与减灾研究, 35(2): 45-50.
- 徐梅, 祝青林, 王丽娜, 等. 2009. 京津地区酸雨变化特征及趋势分析. 气象, 35(11): 78-83.
- 许杨, 杨宏青. 2008. 年初湖北省酸雨过程酸雨特征及成因. 长江流域资源与环境, 17(1): 128-131.
- 许杨, 杨宏青. 2010. 湖北省 2008 年酸雨特征及成因分析. 环境科学与技术, 33(11): 97-101.
- 张霞, 李兰, 魏静. 2007. 湖北西部城市酸雨特征及其与气象条件的关

- 系. 暴雨灾害, 26(2):175-178.
- 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 2010. 中国酸雨研究现状. 环境科学研究, 23(5):527-532.
- 赵艳霞, 侯青. 2008. 1993—2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析. 气象学报, 66(6):1032-1042.
- 中国气象局. 2005. 中国气象局酸雨观测业务规范. 北京: 气象出版社, 4-24.
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. 1999. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. J Atmos Sci, 56(2):127-150.
- 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.
- Ottar B. 1976. Organization of long range transport of air pollution monitoring in Europe//Dochinger L S, Seliga T A. Pennsylvania, 1st Internat Symp Acid Precipitation and the Forest Eco System, 105-117.
- Tang A H, Zhuang G S, Wang Y, et al. 2005. The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing. Atmos Environ, 39(19):3397-3406.