

安徽省酸雨分布特征和发展趋势及其影响因子

石春娥^{1,2}, 邱明燕^{1,2}, 张爱民^{1,2}, 张浩^{1,2}, 张苏^{1,2}, 王自发³

(1. 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031; 2. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031; 3. 中国科学院大气物理研究所, 竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029)

摘要: 利用气象部门 7 个酸雨观测站资料、安徽及周边部分省份煤耗量、卫星观测的对流层 NO₂ 柱含量资料, 分析了安徽酸雨的空间分布、发展趋势及酸雨发生频率上升的原因; 同时, 借助轨迹分析和聚类分析的方法分析了输送形势对各地酸雨的影响。2006~2008 年间安徽酸雨频率表现为夏季低、秋季高, 3 a 降水均值呈酸性, 其中合肥、安庆、马鞍山和蚌埠为中度酸性。在空间分布上表现为皖南到江淮之间最为严重, 向北递减。阜阳、铜陵和黄山的降水 pH 值比较集中, 各有 75% 以上位于 6.00~7.50(阜阳)、5.00~6.00(铜陵)和 5.00~6.50(黄山); 其它测站的 pH 值分布范围比较大, 峰值分别位于 4.00~4.50(合肥和安庆)、5.00~5.50(马鞍山)和 5.50~6.00(蚌埠)。与 10 a 前相比, 各地酸雨发生频率都大幅度上升。后向轨迹-聚类分析结果表明, 酸雨发生频率与污染物的外来输送密切相关, 各地都是来自偏东南到偏东北方向, 尤其是经过江苏或浙江的气团对应着最高的中度以上酸雨发生频率, 说明长江三角洲等经济发达地区的大气污染物排放对安徽酸雨有较大贡献。统计分析发现合肥酸雨变化趋势与安徽、浙江和江苏的煤耗量、对流层 NO₂ 柱含量的变化趋势都很一致(相关系数均大于 0.7), 再次说明该市酸雨增多、变强与区域污染物排放有密切联系。

关键词: 安徽省; 酸雨; 降水 pH 值; 燃煤量; 对流层 NO₂; 后向轨迹; 聚类分析

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1675-07

Spatiotemporal Trends and the Impact Factors of Acid Rain in Anhui Province

SHI Chun-e^{1,2}, QIU Ming-yan^{1,2}, ZHANG Ai-min^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, ZHANG Su^{1,2}, WANG Zi-fa³

(1. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China; 2. Key Laboratory for Atmospheric Sciences & Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031, China; 3. Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The observational data of acid rain at seven stations in Anhui province operated by China Meteorological Administration (CMA), as well as the coal consumptions in Anhui and some surrounding provinces along with satellite measured tropospheric NO₂ columns, were used to analyze the spatiotemporal trends of acid rain in Anhui and the potential reasons of the increasing occurrence frequency of acid rain. In addition, the technique of back-trajectory-cluster analysis was used to examine the impacts of transport patterns on the precipitation acidity in Anhui. The occurrence frequency shows the lowest in summer and the highest in autumn, with 3-year average pH < 5.6 during 2006-2008 at all stations, hereinto, pH values are between 5.0 and 4.5 in Hefei, Anqing, Maanshan and Bengbu. In spatial, acid rain were the most severe in southern to middle Anhui and mitigated to north. The distributions of pH were concentrative at Fuyang, Tongling and Huangshan, with more than 75% occurred between 6.00-7.50 (Fuyang), 5.00-6.00 (Tongling) and 5.00-6.50 (Huangshan); quite dispersive at other stations, with the maximum at 4.00-4.50 (Hefei and Anqing), 5.00-5.50 (Maanshan) and 5.50-6.00 (Bengbu). The occurrence frequencies of acid rain increased evidently at all stations comparing with those in the end of 1990s. The results of back-trajectories-cluster analysis show that the acid rain is closely related with the regional-range transport of acid rain precursors at each station. The air-masses from southeast and northeast, especially those passing through Jiangsu and Zhejiang, associated with the highest frequencies of acid rain with pH < 5.0, indicating that the industrial emissions in the economy developed areas of Yangtze Delta play key roles in acid rain in Anhui province. In addition, statistics shows that the occurrence frequency of acid rain in Hefei was highly correlated with the trends of the provincial coal consumptions in Anhui, Jiangsu and Zhejiang, also tropospheric NO₂ column content over Anhui province and surrounding areas with all correlation coefficients > 0.7, suggesting the close relationship between the quick increasing acid rain in Hefei and the regional pollutant emissions.

Key words: Anhui Province; acid rain; precipitation pH; coal consumption; tropospheric NO₂; back-trajectory analysis; cluster analysis

随着我国城市化和工业化的发展,酸雨日益成为一个严重的环境问题,也成为政府和科学家们关注的重要课题。过去 20 年,中国南方酸雨经历了一个以 1999 年为转折年由强到弱并再次增强的过程,强酸雨区由西向东扩展,继西南强酸雨区之后,长江

三角洲也成为一个重要的强酸雨区^[1,2]。2005 年,上

收稿日期:2009-08-14;修订日期:2009-11-12

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422205);安徽省气象局业务技术开发专项(KG200703)

作者简介:石春娥(1970~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为大气物理化学,E-mail:chun.e.shi@gmail.com

海市的降水年均 pH 值为 4.49, 最低值为 2.95, 酸雨发生频率为 71%, 与 1998 年相比, 平均 pH 值下降了 1.22 个 pH 单位, 意味着酸度上升了 15 倍^[3]. 1992~2005 年江苏出现酸雨的程度由北向南快速加重^[4]. 浙江酸雨发生频率在经历了 1995~2000 的小幅度下降之后迅速上升, 2005 年已经达到 90%, 全省几乎都被酸雨覆盖^[5].

安徽省处于南北过渡带上, 东部与亚洲经济最为发达、人口最为稠密的长江三角洲接壤, 北边与我国酸雨前体物 SO₂、NO₂ 排放量都比较大的华北地区相邻^[1]. 近 20 年来, 安徽省酸雨也引起不少学者的关注^[6-9]. 研究认为 2000 年之前, 安徽酸雨主要发生在皖南山区到沿江部分城市, 淮北平原基本上没有观测到酸雨, 20 世纪 90 年代, 多数城市酸雨发生频率都有下降趋势. 最近, 唐先干等^[10] 分析了皖南山区 2007 年 4~11 月降水的酸性特征, 发现皖南地区的酸雨、强酸雨频率都较高, 分别为 92% 和 44%. 邱明燕等^[11] 分析了合肥市 1992~2007 年酸雨年、季变化特征, 发现合肥酸雨也经历了减弱再加强的过程, 转折年为 1998 年.

虽然以上研究加深了人们对安徽及长江下游地区酸性降水分布、发展趋势和影响因子的了解, 但是研究的年限大都在 2005 年之前, 在讨论人为污染物排放对酸雨的影响时普遍是从概念上进行定性阐述, 很少使用具体资料进行论证, 即使使用污染物排放资料, 也仅仅使用局地排放源数据或局地污染物浓度数据; 在讨论气象条件的影响时大多考虑的是局地气象因子, 而酸雨前体物是可以随着气流远距离输送的^[12], 即一个地方排放的污染物可导致其他地方产生酸雨. 而且, 随着我国城市化进程加快、汽车拥有量升高, 我国东部地区的大气污染已经由过去的点状分布发展到面上分布, 如用卫星观测到对流层 NO₂ 含量、气溶胶光学厚度等在安徽北边的华

北、东边的长江三角洲都存在大范围的大值区^[13,14]. 因此, 在分析安徽酸雨成因时仅仅考虑局地因素是不够的.

笔者在研究中发现, 最近 3 a 安徽省酸雨和强酸雨的发生频率都显著增加, 而且南北各地都观测到 pH 值低于 4.5 的强酸雨. 为进一步了解安徽酸雨变化趋势及影响因子, 本研究综合利用中国气象局布设在安徽境内 7 个酸雨观测站的资料以及已有的结果分析了安徽酸雨时、空分布和发展趋势; 借助后向轨迹和聚类分析的方法探讨了大尺度输送条件对安徽省降水酸度、酸雨出现频率的影响; 使用安徽及周边部分省份的逐年煤耗量, 及 GOME (global ozone monitoring experiment)^[15] 和 SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography)^[16] 观测的对流层 NO₂ 柱含量资料 (Level 2) (<http://www.temis.nl/products/no2.html>) 分析了安徽酸雨发生频率迅速上升的原因. GOME 和 SCIAMACHY 的仪器都是装载在与太阳同步的卫星上, SCIAMACHY 是 GOME 的继续, 其观测的 NO₂ 柱含量资料已得到广泛应用^[13,17-19], 其中包括估计全球或区域 NO_x 排放^[18,19].

1 酸雨观测站网及研究方法

1.1 酸雨观测站网

气象系统布设于安徽省境内的酸雨观测站由南向北分别位于黄山、安庆、铜陵、马鞍山、合肥、阜阳及蚌埠 (表 1), 常规观测降水 pH 值和电导率 *K* 值. 各站都位于气象观测场内, 除黄山外基本上位于城郊结合部, 黄山站位于光明顶, 海拔 1 840 m, 其余观测站海拔都在 50 m 以下. 合肥的酸雨观测有效资料始于 1992 年 1 月, 马鞍山始于 2007 年 1 月, 蚌埠始于 2006 年 6 月, 其余测站始于 2006 年 1 月.

1.2 研究方法

表 1 各测站资料及 2006~2008 年酸雨状况

Table 1 Basic situations and statistic results of acid rain during 2006-2008 at each station

测站名	各级酸雨出现频率/%			平均 pH	平均电导率/ μS·cm ⁻¹	样本数	酸雨观测降 水量/mm	土壤 pH
	强	中度	弱					
阜阳	5.6	5.6	6.6	5.26	52.7	198	2 971.4	7.9
蚌埠	9.8	13.0	25.4	4.99	44.8	193	3 308.4	6.0
合肥	33.9	20.1	13.8	4.52	46.4	239	2 586.0	6.5
马鞍山	10.8	25.3	36.1	4.86	53.6	166	2 013.1	6.13
铜陵	1.1	7.7	39.2	5.31	89.2	273	3 749.2	5.5
安庆	30.9	18.3	22.5	4.55	53.1	262	3 333.2	6.23
黄山	6.0	7.5	25.8	5.29	22.4	415	5 853.3	7.05

首先,应用汤洁等^[20]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 K -pH 不等式的记录. 根据中国气象局酸雨观测业务规范^[21],采用降水体积加权平均计算年、季降水 pH 值和电导率均值. 为了描述不同酸度降水的年/季变化特征,对降水酸度进行分级统计处理,具体分级标准为:强酸性($\text{pH} < 4.5$)、中度酸性($4.5 \leq \text{pH} < 5.0$)、弱酸性($5.0 \leq \text{pH} < 5.6$)以及非酸雨($\text{pH} \geq 5.6$)^[22]. 由于 pH 值低于 5.0 的中度以上酸雨能对生态系统产生明显负面影响^[22],本研究将重点讨论中度以上酸雨发生频率的变化趋势及其影响因子.

后向轨迹能较好地表示污染气团到达接收地之前所经过地区^[23]. 邱明燕等^[11]利用合肥酸雨观测站建站以来的资料分析了各级酸雨出现频率与不同高度气团来向的关系,发现 1 500 m 高度不同来向气团对应的酸雨发生频率差别最大. 为研究输送条件对安徽酸雨的影响,首先应用美国 NOAA 研制的轨迹模式 HYSPLIT4 (hybrid single particle lagrangian integrated)^[24] 和 GDAS1 (global data assimilation system,分辨率:水平方向 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向从地面到 2 kPa 分为 23 层,时间:3 h 一次)资料计算各测站 2006~2008 年所有降水日降水过程中间时刻,距地面 1 500 m 高度(黄山为 500 m)的 48 h 后向轨迹. 然后,采用 Dorling 等^[25]提出的聚类分析的方法对所有降水日后向轨迹进行客观分类. 该方法根据气团水平移动速度和方向对大量轨迹进行分组,分组的原则是:达到组间差异极大,组内差异极小. 在分组的基础上进一步统计每一组内轨迹所对应的各级酸雨出现的频率和平均电导率等.

2 安徽酸雨分布现状

2.1 2006~2008 年安徽酸雨空间分布和各站 pH 值分布

鉴于大部分观测站的有效观测始于 2006 年,计算了 2006~2008 年各测站各级酸度降水发生情况(表 1). 表 1 同时还给出了各地土壤 pH 值,来自各测站按照中国气象局酸雨观测业务规范^[21]制作的环境报告书. 各站都有酸性降水出现,降水 3 a 平均 pH 值均低于 5.6,即降水平均呈酸性,其中合肥与安庆接近强酸性;马鞍山与蚌埠为中度酸性. 合肥、安庆和马鞍山酸雨频率较高,均在 70% 上下,阜阳酸雨频率较低(17.8%). 中度以上酸雨出现频率居前 3 位的分别为合肥(54.0%)、安庆(49.2%)和马鞍山(36.1%),铜陵出现中度以上强度酸雨频率最

低($< 10\%$).

虽然黄山 3 a 降水平均也呈弱酸性,但由于黄山测站位于海拔 1 840 m 的光明顶,这里酸雨受局地污染的影响较小,主要反映外来污染物输送的影响,不反映皖南地区的普遍情况. 根据文献[10],2007 年 4~11 月,皖南地区的酸雨、强酸雨频率分别为 92% 和 44%. 另外,根据本研究对安徽各站酸雨季节分布的统计结果,铜陵以外的各站都是夏季酸雨发生频率最低,可以推测皖南的酸雨和强酸雨年均出现频率应该在 92% 和 44% 附近或更高. 沿江 3 个测站中,安庆和马鞍山的酸雨发生频率均较高,但铜陵酸雨发生频率较低,中度以上强度酸雨频率居全省之末,这可能与当地的有色金属工业排放污染物中碱性离子浓度比较高有关,这一点可以从该站降水电导率一直居全省之首得到证明. 汤洁等^[2]最近的研究也指出,我国很多地方近地层的大气气溶胶粒子对酸雨有中和作用. 可见,铜陵酸雨发生频率较低可能属于局地现象. 因此,安徽酸雨空间分布表现为皖南到江淮之间最为突出,向北递减.

表 1 表明沿江到淮北大城市(合肥、蚌埠、安庆、马鞍山和阜阳)的平均电导率差别不大,都约为 $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,黄山最低($22 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),说明黄山降水中离子浓度比较低,也说明该地降水受污染程度低. 中度以上酸雨出现频率最低的铜陵,平均电导率几乎是沿江其他城市的 2 倍,说明该市降水虽然酸度不高,但受污染程度很高.

各站 pH 值分布显示,阜阳、铜陵和黄山的降水 pH 值比较集中. 阜阳 75% 以上位于 6.00~7.50(偏碱性),铜陵 75% 左右介于 5.00~6.00(弱酸到中性),黄山以 5.50~6.00 出现的频率最高,约 77% 介于 5.00~6.50(弱酸到中性)(图 1). 其他测站的

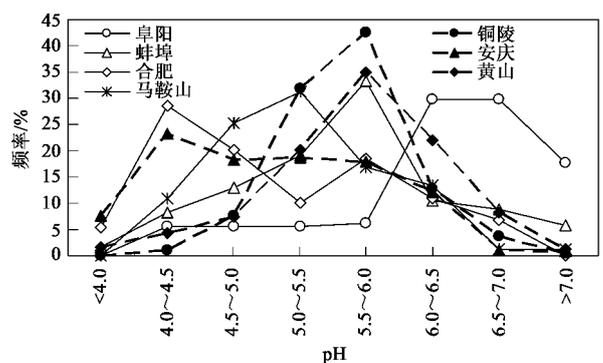


图 1 2006~2008 年各站 pH 值分布

Fig. 1 Distributions of rainwater pH value at each station during 2006-2008

pH 值分布范围比较宽,但合肥和安庆峰值出现在 4.00~4.50(强酸性),马鞍山的 pH 值峰值在 5.00~5.50(弱酸性),其次是 4.50~5.00(中度酸性). 蚌埠的 pH 值峰值在 5.50~6.00,其次是 5.00~5.50. 另外,合肥以外的测站都出现过 pH 值 >7.0 的偏碱性降水,尤其是阜阳(17.7%)和蚌埠(5.7%),出现碱性降水的频率向南递减.

2.2 2006~2008 年安徽酸雨的季节变化

图 2 给出了各站中度以上酸雨发生频率的季节变化. 可见,各站酸雨都呈明显的季节变化,其中,夏季发生频率低,秋冬季发生频率高. 只有安庆表现出冬季最高,其他测站都是秋季最高. 电导率的季节分布与中度以上酸雨的季节分布一致. 酸雨、电导率的这种季节分布与季风气候条件密切相关. 夏季雨水充沛,且降水频繁,大气中酸性前体物清除较快,不容易形成酸雨;春季北方沙尘暴发生频繁^[26],本地盛行西北风^[27],北方沙尘气溶胶的输入对酸雨有一定的中和作用^[10]. 另外,对安庆多年 08:00 探空资料的统计分析发现,安庆冬季近地层逆温频率达 60%,逆温频率、逆温强度和逆温厚度都远远超过秋季,而阜阳的秋冬季节逆温差别不如安庆大. 这可能是安庆冬季酸雨发生频率超过秋季的原因,具体原因有待于进一步研究.

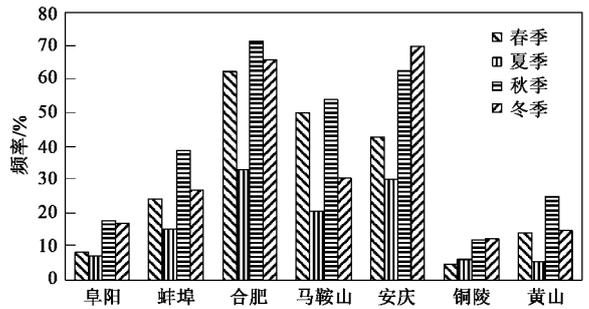


图 2 2006~2008 年安徽各测站中度以上酸雨发生频率的季节分布
Fig. 2 Seasonal distributions of occurrence frequency of precipitation with pH < 5.0 at each station during 2006-2008

3 安徽酸雨变化趋势及其可能原因

3.1 变化趋势

2000 年之前,合肥的年均降水 pH 值总体呈上升趋势,酸雨发生频率在 1996 年为一峰值,之后下降,1998 年最低(图 3),与中国其它地方的酸雨变化趋势一致^[1,2];但 2000 年之后即呈明显上升态势,尤其中度以上酸雨的出现频率在 2005 年之后显著增加,2008 年超过 60%. 另外,表 2 给出了不同年代安徽各地酸雨发生频率,包括文献报道和本研究的统计结果. 可见近 10 年来安徽各地酸雨发生频率普遍上升.

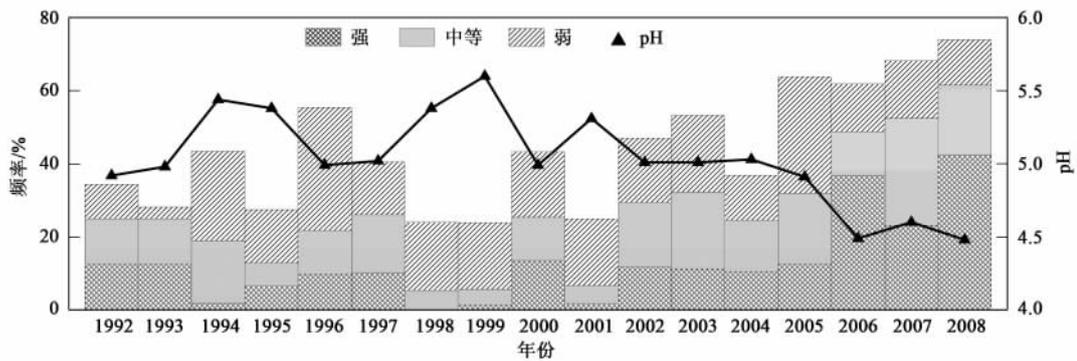


图 3 合肥市各级酸雨发生频率及年均降水 pH 值演变趋势

Fig. 3 Trends of annual frequency of acid rain of each grade and annual average pH in Hefei

表 2 1997~1998 至 2006~2008 年安徽各地酸雨发生频率变化情况

Table 2 Changes in frequencies of acid rain in Anhui from 1997-1998 to 2006-2008

城市	2000 年之前		2000 年之后	
	酸雨频率/%	年份	酸雨频率/%	年份
阜阳	0.0 ^[7]	1998	17.7	2006~2008
蚌埠	17.5 ^[7]	1998	41.8	2006~2008
合肥	26.3 ^[7]	1998	68.8	2006~2008
马鞍山	11.6 ^[7]	1998	72.3	2006~2008
安庆	8.1 ^[7]	1998	72.3	2006~2008
铜陵	38.6 ^[7]	1998	48.2	2006~2008
黄山市	5.9 ^[7]	1998	39.3 (光明顶)	2006~2008
泾县	44.0 ^[5]	1997	92.0 ^[9]	2007

3.2 大尺度输送条件对安徽酸雨的影响

图 4 给出了各测站降水日 48 h 后向轨迹分组结果,即各组的平均水平轨迹分布,在每根平均后向轨迹终点给出了分组序号(图 4 括号外数字),相应输送条件下的酸雨观测次数(括号内左边的数字)和中度以上酸雨发生频率(括号内右边的数字). 轨迹的长短反映气团移动的速度,轨迹的方向反映气团的来向. 图 4 表明,造成各地降水的气团主要来自西南方向、东南偏东和东北偏东,其他来向的气团不

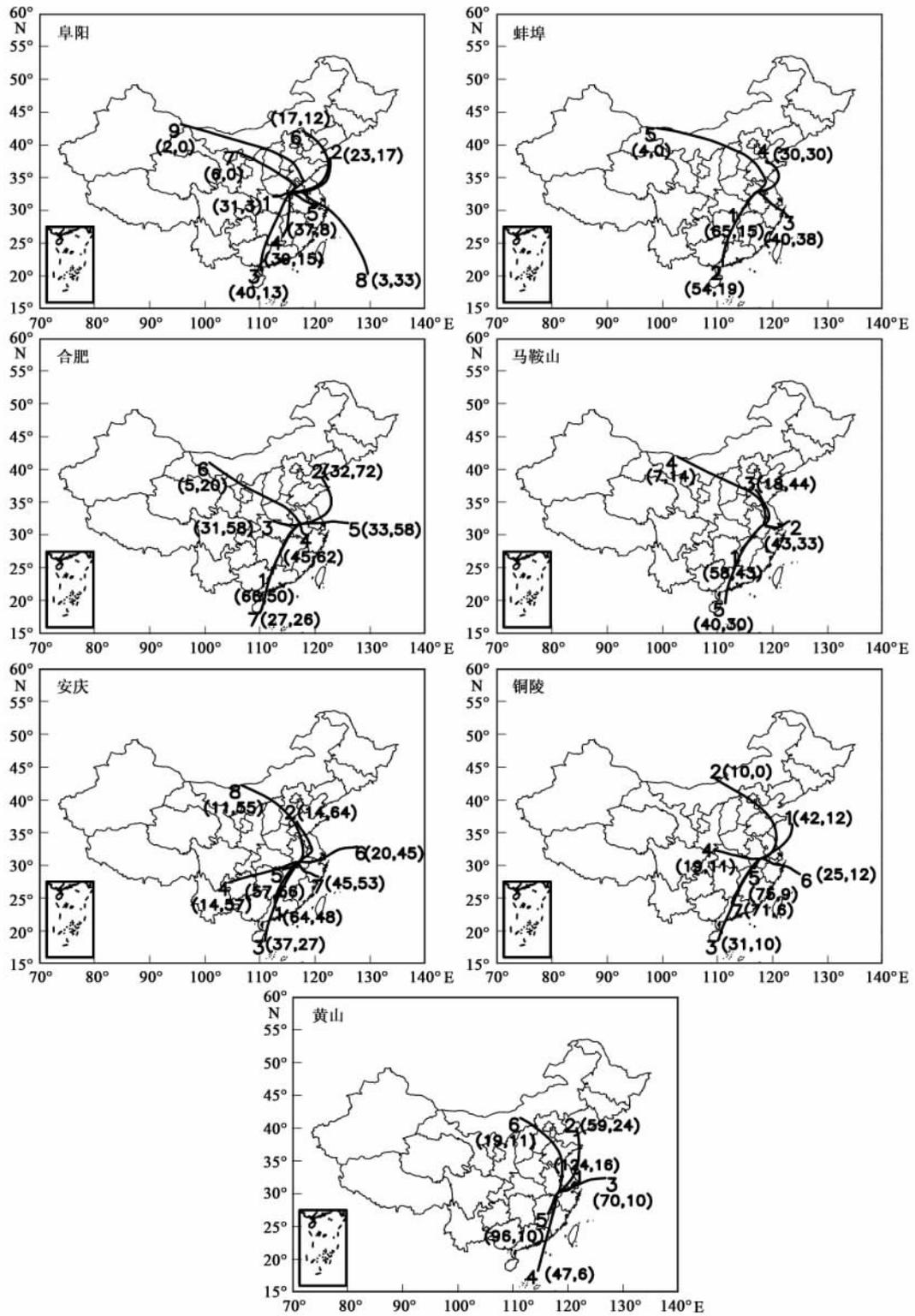


图 4 各观测站 2006 ~ 2008 年降水日 48 h 后向轨迹各组内平均轨迹分布及酸雨观测次数 (括号内左边数字) 和 中度以上酸雨频率 (%) (括号内右边数字)

Fig. 4 Distributions of cluster-mean 48 h back-trajectory on rainy days at each station with the precipitation times and corresponding frequencies of acid rain with pH < 5.0 in the parentheses

多,这与安徽省的季风气候是一致的;不同来向向后轨迹所对应的中度以上酸雨的频率差别显著,如果

不考虑发生次数较少(少于 5 次)的轨迹组,发生频率最高的都是经过江苏或浙江的偏东方向的轨迹;

发生频率次高的轨迹组仍然有一部分测站对应着偏东轨迹,如蚌埠、铜陵和黄山.合肥和安庆的酸雨发生频率居全省各测站之首,且这2市本地轨迹对应的中度以上酸雨发生频率居各组中第二或第三,这与其他测站不同,说明这2个城市本地排放源对酸雨的贡献较其他城市大.每一个测站,来自西南方向的轨迹都有2组,一长一短,短轨迹对应的中度以上酸雨发生频率远高于长的轨迹组,这说明移动缓慢的气团有利于酸雨前体物的累积.中度以上酸雨发生频率的这种分布形势与文献[17]的图4中对流层NO₂柱含量的分布形势一致,即经过NO₂柱含量高值区的气团往往对应酸度较高的降水;这也说明,外地污染物排放对安徽省酸雨的贡献有重要作用,酸雨治理必须考虑区域或大范围内的减排措施.

从图4中还可以看出,各测站都有一组来自西北、能到达蒙古边界、发生次数不多的后向轨迹.其对应的中度以上酸雨发生频率在淮河以北的2个测站(阜阳和蚌埠)为0,在合肥、马鞍山和铜陵分别为20.0%、14.3%和0.0%,居各组之末,但在安庆和黄山分别为54.5%和10.5%,在各组中偏低,但非末尾,这一方面说明北方沙尘气溶胶的中和作用向南减弱,另一方面也反映了本省污染物排放对酸雨的贡献.

3.3 安徽酸雨与区域大气污染的关系

3.3.1 安徽酸雨发生频率与安徽及周边省份燃煤量的关系

如3.2所述,各地都是经过江苏、浙江的气团轨迹对应着最高的中度以上酸雨发生频率,为分析安徽酸雨发生频率上升的原因,笔者从各省统计年鉴中搜集了安徽、江苏和浙江1990年之后逐年煤耗量(见图5),因为燃煤量直接反映大气污染物(如SO₂)的工业排放量.由图5可见,2003年之前,各省煤耗量缓慢上升,之后迅速上升,尤其是江苏.统计表明合肥各级酸雨发生频率与安徽、江苏和浙江的煤耗量之间均存在非常显著的正相关(表3),相关系数都超过0.7,通过信度 $\alpha = 0.01$ 检验.与此对应,降水的年均pH值与煤耗量的变化趋势明显相反.值得注意的是,合肥中度以上酸雨及年均pH值与浙江、江苏的煤耗量之间的相关程度超过了与安徽煤耗量之间的相关程度.这表明近年来合肥日益严峻的酸雨形势与安徽省及周边省份工业污染物排放量增加有密切联系.

3.3.2 安徽酸雨与对流层NO₂柱含量关系

图6给出了1997、2003和2008年安徽及周边

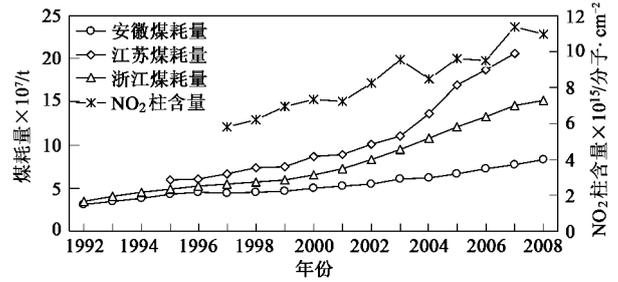


图5 安徽、浙江和江苏煤耗量与安徽及周边地区上空年均对流层NO₂柱含量演变趋势

Fig. 5 Trends of provincial coal consumption in Anhui, Zhejiang and Jiangsu, along with annual area mean tropospheric NO₂ columns over Anhui and surrounding areas

表3 合肥各级酸雨发生频率及年均pH值与图5中各省煤耗量和对流层NO₂柱含量的Pearson相关系数

Table 3 Correlation coefficients between pH, frequencies of acid rain in Hefei and provincial coal consumptions, tropospheric NO₂ columns

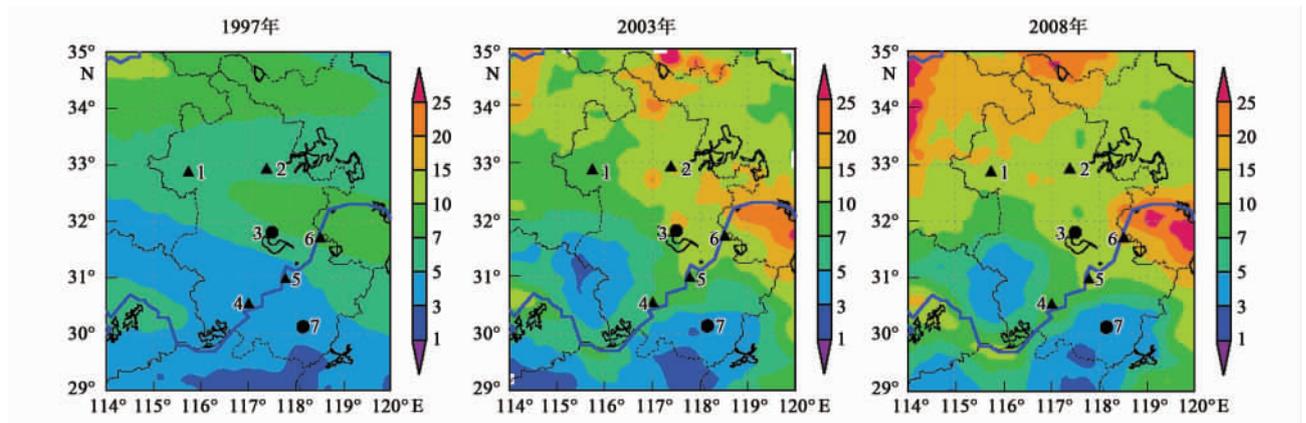
影响因子	酸雨	中度以上酸雨	强酸雨	年均pH值
	pH < 5.6	pH < 5.0	pH < 4.5	
安徽煤耗量	0.77	0.76	0.73	-0.68
江苏煤耗量	0.73	0.81	0.76	-0.77
浙江煤耗量	0.78	0.79	0.75	-0.71
对流层NO ₂ 柱含量	0.88	0.85	0.74	-0.77

地区年均对流层NO₂分布,其中,图6范围内的逐年平均已在图5中给出.由图6可见,安徽及周边地区上空NO₂柱含量呈东北及沿江高,西南、皖南低的分布形势,且最近几年上升迅速.统计表明NO₂柱含量与合肥市各级酸雨的发生频率呈非常显著的正相关,与pH值呈明显的负相关(表3).这表明近年来合肥日益增多的酸雨与安徽及周边地区对流层NO₂含量的升高有密切联系.

4 结论

(1) 2006~2008年,安徽省7个测站均出现不同程度的酸雨,酸雨发生频率夏低、秋高,3a平均的降水pH值均为酸性,其中合肥、安庆、马鞍山和蚌埠为中度酸雨.空间分布表现为皖南到江淮之间最为突出,向北递减.

(2) 阜阳、铜陵和黄山的降水pH值比较集中,阜阳75%以上位于6.00~7.50,铜陵75%左右位于5.00~6.00,黄山以5.50~6.00出现的频率最高,约77%位于5.00~6.50;其他测站的pH值分布比较宽,合肥和安庆峰值出现在4.00~4.50,马鞍山的pH值峰值在5.00~5.50,蚌埠的pH值峰值在5.50~6.00.



1. 阜阳, 2. 蚌埠, 3. 合肥, 4. 安庆, 5. 铜陵, 6. 马鞍山, 7. 黄山; 单位: 10^{15} 分子 \cdot cm^{-2} ; GOME:1997; SCIAMACHY:2003, 2008

图6 安徽上空对流层 NO_2 柱含量分布

Fig. 6 Distributions of annual-mean tropospheric NO_2 column over Anhui province

(3) 边界层上部输送条件对各地酸雨都有重要影响. 各测站都是来自偏东南到偏东北方向、尤其是经过江苏或浙江的气团对应着最高的中度以上酸雨发生频率, 这与东亚 NO_2 分布形势非常吻合. 说明长江三角洲、华北等经济发达地区的酸雨前体物排放对安徽酸雨有不可忽视的贡献.

(4) 与 10 a 前相比, 各地酸雨发生频率普遍上升. 合肥中度以上酸雨发生频率在 2005 年之后显著增加. 合肥酸雨发生频率与安徽及周边省份燃煤量和对流层 NO_2 柱含量之间都存在显著正相关, 相关系数均大于 0.7, 意味着该市酸雨频率增加、强度加强与区域污染物排放有密切联系.

参考文献:

[1] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 降水时空变化对中国南方强酸雨分布的影响[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 913-923.

[2] 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 等. 1992~2006 年我国降水酸度的变化趋势[J]. 科学通报, 2010, 55(8): 705-712.

[3] Huang K, Zhuang G S, Xu C, *et al.* The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China [J]. Atmospheric Research, 2008, 89(1-2): 149-160.

[4] 商兆堂. 江苏降水 pH 值的特征分析[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(3): 99-102.

[5] 宋晓东, 江洪, 余树全, 等. 浙江省酸雨的空间分布格局及其未来变化趋势预测[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(1): 13-16.

[6] 刘立进, 张燕. 安徽省宣城地区酸雨污染初步研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 1999, 22(2): 176-177.

[7] 王小月, 张书贵. 芜湖市降水化学成分特征及变化趋势初步研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 276-279.

[8] 檀满枝, 阎伍玖. 安徽省酸雨污染特征分析[J]. 环境科学研究, 2001, 14(5): 13-16.

[9] 王虹. 马鞍山市降水酸度的时空变化特征及其成因初探[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(2): 356-361.

[10] 唐先干, 杨金玲, 张甘霖. 皖南山区降水酸性特征与元素沉降通量[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 356-361.

[11] 邱明燕, 石春娥, 张浩, 等. 合肥市酸雨变化特征及其影响因子[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1329-1338.

[12] 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 161-162.

[13] Richter A, Burrows J P, Nuss H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. Nature, 2005, 437(7055): 129-132.

[14] 柳晶. 中国地区气溶胶光学特性及辐射强迫的卫星遥感观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. 59-74.

[15] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, *et al.* The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2): 151-175.

[16] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, *et al.* SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2): 127-150.

[17] Shi C, Fernando H J S, Wang Z, *et al.* Tropospheric NO_2 Columns over East Central China: Comparisons between SCIAMACHY measurements and nested CMAQ Simulations [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(30): 7165-7173.

[18] Leue C, Wenig M, Wagner T, *et al.* Quantitative analysis of NO_x emissions from Global Ozone Monitoring Experiment satellite image sequences [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106(D6): 5493-5506.

[19] Zhang Q, Streets D G, He K, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112 D22306, 2007, doi: 10.1029/2007JD008684.

[20] 汤洁, 徐晓斌, 杨志彪, 等. 电导率法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.

[21] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 30-31.

[22] 程新金, 黄美元. 降水化学特性的一种分类分析方法[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(1): 82-88.

[23] Beverland I J, Crowther J M, Srinivas M S N, *et al.* The Influence of Meteorology and Atmospheric Transport Pattern on the Chemical Composition of Rainfall in south-east England [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(6): 1039-1048.

[24] Draxler R R. Evaluation of an ensemble dispersion calculation [J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42: 308-317.

[25] Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. Cluster analysis a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry — method and applications [J]. Atmospheric Environment, 1992, 26A(14): 2575-2581.

[26] 刘蔚, 王涛. 我国沙尘暴变化及降尘特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(增刊): 26-32.

[27] 石春娥, 姚叶青, 张平, 等. 合肥市 PM_{10} 输送轨迹分类研究[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1383-1391.