

张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 2015. 南京市降水化学特征及其来源研究 [J]. 大气科学学报, 38 (4): 473-482. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140102010.

Zhang Ze-feng, Shen Li-juan, Zhu Bin, et al. 2015. Chemical characteristics and potential sources of precipitation in Nanjing [J]. Trans Atmos Sci, 38 (4): 473-482. (in Chinese).

南京市降水化学特征及其来源研究

张泽锋¹, 沈利娟^{1,2}, 朱彬¹, 岳江³, 王红磊¹, 张秋晨¹

(1.南京信息工程大学 中国气象局气溶胶云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044;
2.嘉兴市环境保护监测站,浙江 嘉兴 314000;3.山西省气象科学研究所,山西 太原 030002)

摘要:为了解南京江北地区降水化学特征,分析了 2011 年 3—6 月共 25 个降水日的 109 个降水样品中的主要水溶性离子,并利用后向轨迹模式探讨了降水气团来源。结果表明:1)南京地区 3—6 月降水主要受南、北 2 种气团影响,北方气团降水的主要离子浓度高于南方气团降水。2)海盐示踪法和相关性分析显示,降水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来自燃煤、工业排放和汽车尾气; Ca^{2+} 主要来自地壳源; Cl^- 主要来自海洋;海洋源和陆源对 Mg^{2+} 和 K^+ 都有贡献, Mg^{2+} 的陆源贡献大于海洋源贡献, K^+ 受海洋源的影响程度要低于 Mg^{2+} 。3)南、北气团初期降水的各离子浓度高于总降水的各离子浓度,且初期降水的主要离子的富集系数高于总降水。这说明在降水初始阶段,雨水对南京大气中污染物(气态污染物和颗粒物)的云下冲刷去除作用较强,降水的离子浓度最高,局地源对降水离子的贡献较明显。

关键词:降水化学;后向轨迹;海盐示踪法;相关性分析

文章编号:1674-7097(2015)04-0473-10 中图分类号:P424 文献标志码:A

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140102010

Chemical characteristics and potential sources of precipitation in Nanjing

ZHANG Ze-feng¹, SHEN Li-juan^{1,2}, ZHU Bin¹, YUE Jiang³,
WANG Hong-lei¹, Zhang Qiu-chen¹

(1.Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044, China;
2.Jiaxing Environmental Protection and Monitoring Station, Jiaxing 314000, China;
3.Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Total 109 precipitation samples were collected in north suburb of Nanjing from March to June 2011. In order to investigate the chemistry characteristics of precipitation, the concentration of water-soluble ions were analyzed and the air mass sources of precipitation were also discussed using the back trajectory model. Results show that the precipitation is mainly controlled by southern and northern air masses, and the concentrations of major ions from precipitation of northern air masses are higher than those from southern. The sea salt tracer method and the correlation analysis indicate that NO_3^- and SO_4^{2-} are mainly from coal burning, industrial emissions and vehicle exhaust emissions. Ca^{2+} and Cl^- mainly derive from crustal and marine sources, respectively. K^+ and Mg^{2+} are both from marine and terrestrial sources, while the terrestrial contribution of Mg^{2+} is dominant, and the impact of marine on K^+ is lower

收稿日期:2014-01-02;改回日期:2015-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41005071);江苏省高校自然科学研究计划项目(10KJB610008);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

通信作者:张泽锋,博士,讲师,研究方向为大气化学,zhangzf01@vip.163.com.

than on Mg^{2+} . Due to the scavenging process, the concentrations of different ions and the enrichment factors of main ions in the early period of precipitation are higher than those in the whole period of precipitation, which are attributed to the main contribution of local pollution sources.

Key words: precipitation chemistry; back trajectory; sea salt tracer method; correlation analysis

0 引言

大气降水的化学组成受自然过程和人类活动的共同影响,是进入水滴的气态和颗粒物共同作用的结果(Panettiere et al., 2000)。各组分含量的测定成为探讨物质来源的有效途径,因此一直受到学界的广泛关注。如对兰州(张锐等, 1995)、泰山(王艳等, 2006)、广州(刘君峰等, 2006)、西安(白莉和王中良, 2008)、北京(王跃思等, 2009; 徐敬等, 2011)、上海(艾东升等, 2010)、辽宁(柴发合等, 2010)、华北本底站(徐敬等, 2011)、南京江北地区(高俊等, 2012)、青海瓦里关(张占峰等, 2014)的降水离子浓度和化学组成特征的分析结果表明,不同区域大气降水的化学组成能够反映出局地或区域的大气环境特征及其污染状况(杨复沫等, 2004; 霍铭群等, 2009)。进一步的研究表明,降水气团来源对观测点的降水化学成分会产生重要影响,如徐宏辉等(2008)的研究表明,来自泰山南方潮湿的气团是降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等离子出现高值的重要原因;艾东升等(2010)发现,来自西南方向的远距离输送对上海市夏季酸性降水化学组成产生重要影响;徐敬等(2011)对华北区域本底站降水过程的研究发现,不同气流路径降水中的电导率、离子浓度存在较大差异。

南京位于长江下游沿岸,是长江下游地区重要的产业城市和工业中心,南京地区的降水特征一直以来受到学者的关注(涂俊, 1999; Tu et al., 2005; 郑有飞等, 2007)。但是目前学界关于降水气团来源对南京降水化学的影响鲜有讨论。南京降水气团主要呈现南方气团经过地区特征和北方气团经过城市特征,南北气团的差异必定会对南京的降水化学成分产生重要影响,因此有必要对南京地区南北气团降水的化学特征进行分类讨论。基于此,本文拟对南京江北工业区 3—6 月降水中主要水溶性离子展开分析,并利用后向轨迹模式探讨降水气团的来源,讨论不同气团路径下的降水化学组成和降水离子的海陆源贡献,从而得出不同气团路径对南京降水化学成分的影响。

1 实验分析方法

1.1 样品采集

雨水采样点设在南京市江北工业区的南京信息工程大学气象楼三楼平台(距地约 6 m)。采样点东南方约 3 km 处为南京化工园区,扬子石油化工股份有限公司、南京钢铁公司、南化、华能电厂等大型、特大型企业云集于此。

2011 年 3—6 月有 25 个降水日,共采集到降水样品 109 个。采样器为直径 50 cm 的烧杯,降雨开始时将其放置在固定位置,降水结束后立刻取回样品。在降水过程中分时段采水样,采集后的水样中离子的雨量加权浓度的平均值为该日降水离子浓度。本文中的初期降水指,降水日中初始 10 min 采集到的雨水。每次采样结束后采样烧杯使用去离子水冲刷三次,100 °C 下烘干密封保存。

1.2 样品分析

采集的降水样品经 0.45 μm 微孔的一次性水系过滤头过滤后,用 50 ml 的一次性 PET 瓶子保存,分析前样品置于 4 °C 以下的冰箱内保存,并在 1 周内测定降水中的主要化学组成。

采用瑞士万通 850IC 型色谱仪测定降水中的 10 种无机离子: NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 NO_2^- 。离子色谱仪的工作原理参见 Wang et al. (2012)。溶液配制和稀释均使用电阻率为 18.2 M Ω 的超纯水。测定的降水样品中阴、阳离子总和的相关性较好(R^2 为 0.83),研究期间降水的雨量加权阴、阳离子当量比值为 1.1,说明本研究的数据质量较好,阴、阳离子基本平衡,分析过程不存在主要离子的缺失,符合美国环保署 (USEPA) 规定的降水样品分析数据的标准 (Rastogi and Sarin, 2005)。

2 结果与讨论

2.1 降水气团来源

气流轨迹反映了大气气团在一定时间内的运动路线,据此可以分析降水气团的来源和路径。使用 HYSPLIT4.8 后向轨迹模式 (<http://www.ertcorp.com/HYSPLIT/>) 对南京 3—6 月降水发生时的气流

进行后向轨迹模拟。3—6 月为春季和夏季初,因此选取模式参数时根据春夏季相关的气象要素而定,利用 HYSPLIT4.8 模式对引起每次降水的大气气团进行后向轨迹模拟,轨迹的起始时间为每次降水过程的开始时刻,模拟时间为 48 h。由于区域尺度或中尺度天气过程的输送一般小于 1 000 km,在边界层内输送的传输时间大约为 2 d,春夏季的降水云团一般为低云,云底高度一般在 2 km 以下(寿绍文等,2003;朱乾根等,2007),大气边界层的高度大约在 1 500~2 000 m 左右,而大气污染物则主要集中在 800 m 以下的近地层和混合层内(蒋维楣等,2004),因此在模式计算时选取 500 m,1 000 m 和 1 500 m 三个高度。

南京 3—6 月降水发生时主要有 2 个气流方向(图 1):3—5 月降水发生时以北方气团为主,500 m、1 000 m 和 1 500 m 高度的气流后向轨迹均较长,气流多途径山西、河南、河北、山东、安徽等地,大部分经过海洋,说明降水主要受北方气团和海洋的共同影响;6 月降水发生时以南方气团为主,气流多起源于江西、福建、浙江等地,途径安徽,很少有气流经过海洋,降水主要受南方气团下途经地区排放源的影响。

由图 1 发现,3 月 19 日和 4 月 6 日的气流轨迹与南方气团路径相似,属于南方气团降水。6 月 25 日气流轨迹与北方气团路径相似,气流由北方而来

且经过海洋上空,属于北方气团降水。

2.2 南北气团降水中离子浓度特征对比

表 1 为 3—6 月北方气团和南方气团降水中初期降水和总降水中的水溶性无机离子雨量加权浓度。与涂俊(1999)、郑有飞等(2007)在南京的研究结果比较发现,本实验测得的 3—6 月降水离子总浓度远高于他们测得的全年降水离子总浓度,相对较短的观测时间可能导致本研究中较高的总降水离子浓度。与其他地区降水离子浓度比较发现,南京 3—6 月降水离子总浓度低于北京(杨复沫等,2004)、广州(刘君峰等,2006)和上海(艾东升等,2010)地区,高于华北区域本底站(徐敬等,2011)。

由表 1 可见,北方气团降水中主要离子浓度明显要高于南方气团降水,这与王雪梅等(2006)的研究结论一致。总降水中,北方气团降水离子总浓度是南方气团的 1.5 倍,其中 Na^+ 相差最大,北方气团降水是南方气团降水的 2.4 倍。这表明降水云团来向和路径是降水本身所含污染物差异的重要原因。本研究中北方气团主要影响 3—5 月降水,其主要离子浓度高的原因在于北方干旱少雨,风沙较多,沿途携带大量外来污染物(王艳等,2006;石春娥等,2008;柴发合等,2010)。此外,北方气团多经过海洋,导致北方气团降水中 Na^+ 浓度远高于南方气团降水。

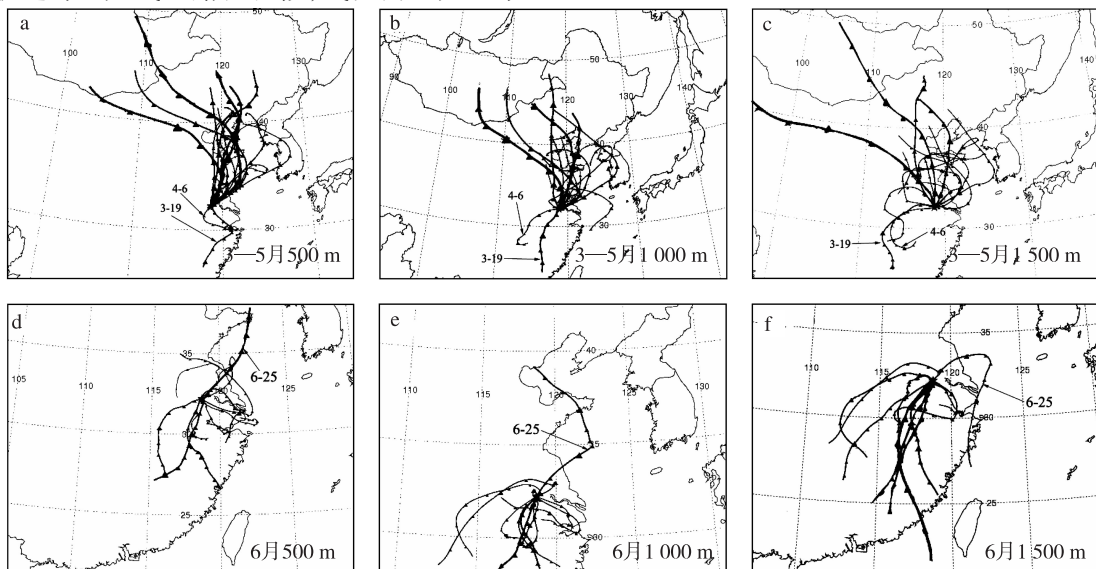


图 1 2011 年 3—6 月南京降水的 48 h 后向轨迹(a,b,c 分别为 3—5 月 500、1 000、1 500 m 高度的气团后向轨迹;d,e,f 分别为 6 月 500、1 000、1 500 m 高度的气团后向轨迹)

Fig.1 The 48 h back trajectories of precipitation from March to June 2011(a,b and c represent the trajectories at 500,1 000 and 1 500 m altitude from March to May, respectively;d,e and f represent the trajectories at 500,1 000 and 1 500 m altitude in June, respectively)

表 1 南京市江北工业区不同气团降水中主要离子的雨量加权平均浓度

Table 1 The average volume-weighted concentrations of main ions in precipitation of different air masses in the industrial estate located on north bank of the Yangtze River, Nanjing

时间	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
2011-03-20	1.73/1.59	29.44/25.03	1.35/1.15	40.13/26.04	5.21/3.65	1.92/1.80	5.55/4.05	0.75/0.86	12.17/8.24	55.11/42.88
2011-03-21	4.12/2.93	34.12/20.58	1.58/1.17	14.18/16.31	2.74/4.69	4.82/5.13	5.84/5.10	2.10/1.62	5.73/7.74	51.86/37.42
2011-03-22	0.26/0.26	0.98/0.98	0.14/0.14	1.22/1.22	0.37/0.37	0.21/0.21	0.37/0.37	0.01/0.02	0.91/0.91	1.47/1.47
2011-04-02	1.25/1.25	2.28/2.28	0.72/0.72	26.66/26.66	3.30/3.30	1.08/1.08	2.61/2.61	0.29/0.42	5.33/5.33	18.79/18.79
2011-04-03	0.91/0.91	2.34/2.34	0.57/0.57	21.12/21.12	2.54/2.54	1.10/1.10	1.36/1.36	0.17/0.24	2.77/2.77	8.37/8.37
2011-04-15	3.53/3.68	10.64/13.13	2.46/2.43	34.95/37.12	4.56/4.53	1.74/2.42	3.88/4.03	2.8/4.22	8.74/9.65	37.49/36.61
2011-04-22	0.74/0.74	2.48/2.48	0.51/0.51	10.64/10.64	1.31/1.31	0.52/0.52	0.96/0.96	0.12/0.18	2.33/2.33	10.22/10.22
2011-04-27	1.10/1.10	1.03/1.03	0.41/0.41	4.80/4.80	0.93/0.93	0.23/0.23	1.02/1.02	0.15/0.21	1.69/1.69	4.63/4.63
2011-05-02	6.32/2.24	12.50/7.70	2.63/1.30	65.48/28.06	8.87/3.49	2.81/1.53	8.42/2.91	5.36/1.37	20.16/5.8	54.14/19.18
2011-05-03	2.32/2.32	6.29/6.29	1.09/1.09	4.94/4.94	0.99/0.99	1.36/1.36	2.14/2.14	0.82/1.19	1.37/1.37	10.88/10.88
2011-05-10	44.56/10.07	17.90/17.96	16.38/4.53	532.79/108.93	55.07/12.72	24.97/7.65	58.03/11.74	235.45/21.52	93.29/17.22	1140.87/173.34
2011-05-22	19.40/11.73	43.96/26.59	13.95/8.53	373.81/227.19	41.67/25.06	19.26/12.66	47.16/27.74	87.30/47.20	145.39/82.36	605.58/276.04
2011-05-23	0.25/0.25	1.67/1.67	0.13/0.13	6.53/6.53	0.45/0.45	0.42/0.42	0.41/0.41	0.01/0.02	0.82/0.82	4.00/4.00
2011-06-25	3.05/9.54	21.19/15.15	1.52/6.98	5.07/20.64	1.36/1.67	5.06/4.73	3.82/5.32	1.50/31.41	3.03/6.96	31.81/25.75
北方气团 降水平均	6.40/3.47	13.34/10.23	3.10/2.12	81.59/38.59	9.24/4.69	4.68/2.92	10.11/4.98	24.06/7.89	21.7/10.94	145.37/47.83
时间	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
2011-03-19	0.92/0.92	3.97/3.97	0.63/0.63	16.37/16.37	1.85/1.85	0.71/0.71	2.02/2.02	0.24/0.28	3.77/3.77	17.66/17.66
2011-04-06	0.89/0.57	5.85/4.66	0.39/0.29	8.21/6.45	1.13/1.00	0.66/0.59	1.25/0.98	0.15/0.08	1.97/1.83	12.67/9.32
2011-06-04	0.54/0.54	1.34/1.34	0.61/0.61	21.06/21.06	0.83/0.83	0.89/0.89	3.49/3.49	0.14/0.16	5.24/5.24	18.14/18.14
2011-06-09	3.08/2.90	24.45/18.30	9.09/5.43	147.22/74.27	16.58/5.74	7.84/4.56	29.24/15.8	11.81/7.61	26.45/17.94	112.74/63.19
2011-06-10	0.83/1.16	4.57/16.70	0.90/3.99	5.25/8.07	0.60/1.53	1.06/1.35	2.06/8.43	0.32/2.24	1.5/5.04	8.47/17.32
2011-06-14	0.47/0.39	2.74/3.03	0.63/0.65	16.31/13.85	2.52/2.27	1.29/1.44	2.78/2.26	0.12/0.12	4.47/3.24	13.21/14.58
2011-06-17	8.96/1.77	65.08/29.17	10.94/1.81	271.03/33.79	46.58/7.10	24.70/5.81	33.02/6.71	41.36/1.55	52.58/10.09	398.67/74.08
2011-06-18	0.72/4.98	18.49/33.33	0/6.49	3.45/36.19	1.11/4.85	5.11/6.21	3.34/7.54	0/15.61	2.57/11.09	27.31/71.69
2011-06-21	0.64/1.44	6.67/3.95	0.62/1.90	12.97/20.05	1.92/2.70	1.67/1.21	2.66/2.75	0.17/1.32	3.23/2.43	22.91/24.42
2011-06-23	0.08/0.08	0.49/0.49	0.10/0.10	3.30/3.30	0.36/0.36	0.18/0.18	0.28/0.28	0/0	0.48/0.48	2.52/2.52
2011-06-24	2.92/1.47	10.56/8.54	2.16/0.83	142.96/25.99	15.82/2.74	6.72/3.86	6.86/2.98	2.66/0.59	12.28/2.46	53.04/15.76
南方气团 降水平均	1.82/1.47	13.11/11.23	2.37/2.07	58.92/23.58	8.12/2.82	4.62/2.44	7.91/4.84	5.18/2.69	10.41/5.78	62.48/29.88
3—6月降 水平均	1.12	5.23	1.01	14.50	1.75	1.28	2.37	0.33	3.86	18.15

注:表中“/”前后的数据分别为初期降水和总降水中离子的雨量加权浓度。

南方气团主要影响 6 月降水,降水离子受途经地区人为排放源(如交通运输、燃煤排放等)的影响,这与邵德民等(1992)、王艳等(2008a)的研究结果一致。长江三角洲低层大气的输送气流受夏季西南季风的影响,西南方向是大气污染物重要的输送路径(王艳等,2008b),南京夏季有 35%的气团来自中国大陆南部地区(沈毅等,2009)。一些研究表明,我国南方城市空气质量普遍优于西北内陆的城市(董继元等,2009),且夏秋季可吸入颗粒物浓度要低于秋冬季取暖期的浓度(杨书申等,2005)。据

此可知,途径地区较少的排放源可能导致南方气团降水中的离子浓度低于北方气团,而南京地区 6 月降水受大气污染物浓度相对较低的西南气团的影响(艾东升等,2011),故使得南方气团降水中主要离子浓度明显低于北方气团降水。此外,南方气团降水量(2 097 mm)是北方气团降水量(1 217 mm)的 1.7 倍,南方气团总降水离子的沉降量(6 007 mg·m⁻²)要大于北方气团降水离子(5 368.6 mg·m⁻²),这表明南方气团较大的降水量和降水频率对降水离子也有一定的影响。

2.3 降水中化学组成的来源解析

2.3.1 海盐示踪法

南京江北地区 3—6 月降水受不同来源的气团影响,3—5 月降水主要受途径海洋上空的北方气团影响,6 月主要受南方气团影响。为了解海盐及非海盐气溶胶对南京江北地区降水组成的贡献,计算 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 NO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子占海盐的比值。

通常认为海洋是 Na^+ 的唯一来源, Na^+ 被作为参照元素来估计降水中不同组分来自海盐部分 (Sea Salt Factor, SSF) 和非海盐部分 (No-Sea Salt Factor, NSSF) 的贡献 (Kulshrestha et al., 1996)。表 2 是南京江北地区降水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 相对于 Na^+ 的比例及其富集因子 (E_x),同时也给出了这些组分在降水中海盐和非海盐部分的比例。富集因

子的计算公式如下 (Kulshrestha et al., 1996):

$$E_x = \frac{\left(\frac{P_x}{P_{\text{Na}^+}}\right)}{\left(\frac{S_x}{S_{\text{Na}^+}}\right)} \quad (1)$$

其中: X 是计算富集因子的离子; P_x 指降水中离子的浓度, P_{Na^+} 指降水中 Na^+ 的浓度; S_x 指海水中离子的浓度, S_{Na^+} 指海水中 Na^+ 的浓度。降水中各离子的海盐部分 (X_{SSF}) 和非海盐部分 (X_{NSSF}) 分别由下面的公式 (Das et al., 2005) 计算得到:

$$X_{\text{SSF}} = \frac{P_{\text{Na}^+} \times \left(\frac{S_x}{S_{\text{Na}^+}}\right)}{P_x}, \quad (2)$$

$$X_{\text{NSSF}} = 100 - X_{\text{SSF}} \quad (3)$$

表 2 2011 年 3—6 月总降水和初期降水中不同离子海盐和非海盐部分的比较

Table 2 Comparisons between marine and non-marine contributions of different ions in the whole and initial precipitation from May to June 2011 %

比例	Cl^-/Na^+	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$	$\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$	K^+/Na^+	$\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$	
海水比例	1.167	0.125	0.00002	0.022	0.227	0.044	
雨水比例(北方气团)	1.435	13.775	3.151	0.610	1.351	11.113	
E_x	1.200	110.200	157573.200	27.700	6.000	252.600	
X_{SSF}	81.300	0.900	0.001	3.600	16.800	0.400	
总降水	X_{NSSF}	18.700	99.100	99.999	96.400	83.200	99.600
雨水比例(南方气团)	3.281	20.259	3.921	1.402	1.909	15.988	
E_x	2.800	162.100	196051.200	63.700	8.400	363.400	
X_{SSF}	35.600	0.600	0.0005	1.600	11.900	0.300	
X_{NSSF}	64.400	99.400	99.9995	98.400	88.100	99.700	
海水比例	1.167	0.125	0.00002	0.022	0.227	0.044	
雨水比例(北方气团)	1.581	22.730	3.392	0.485	1.445	12.758	
E_x	1.400	181.800	169615.800	22.100	6.400	290.000	
X_{SSF}	73.800	0.500	0.001	4.500	15.700	0.300	
初期降水	X_{NSSF}	26.200	99.500	99.999	95.500	84.300	99.700
雨水比例(南方气团)	4.340	34.285	5.713	1.301	4.455	32.330	
E_x	3.700	274.300	285640.500	59.100	19.600	734.800	
X_{SSF}	26.900	0.400	0.0004	1.700	5.100	0.100	
X_{NSSF}	73.100	99.600	99.9996	98.300	94.900	99.900	

通过计算海盐和非海盐部分的比例发现,无论是北方气团还是南方气团降水,降水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 非海盐部分的比例都接近 100%,其富集系数都在 100 以上,说明 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 几乎没有海洋贡献,主要来自燃煤、工业排放和汽车尾气排放。

Ca^{2+} 非海盐部分的比例在 99% 以上,其富集系数也在 100 以上,说明 Ca^{2+} 主要来自地壳源,包括土壤尘、道路扬尘以及建筑施工等活动。 K^+ 和 Mg^{2+} 非海盐部分的比例均高于海盐部分,而它们的富集系数都在 65 以下,说明海陆源对这两种离子均有贡献。

Cl^- 非海盐部分的比例在南、北气团降水中分别为 64.4% (总降水), 73.1% (初期降水) 和 18.7% (总降水), 26.2% (初期降水), 其富集系数都在 5 以下, 说明海洋是 Cl^- 的最主要来源, 而降水中 Cl^-/Na^+ 的比值范围在 1.435 到 4.340 之间, 略高于海水中两者的比例, 说明南京降水中 Cl^- 尚有一定的陆源 (工业排放和土壤沙尘)。降水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 非海盐贡献率都达 83% 以上 (表 2), 与 Fujita et al. (2000) 的研究结果较一致。

北方气团降水中, Cl^- 海盐部分的比例为 73.8% (初期降水) 和 81.3% (总降水), 远高于南方气团降水中海盐部分的比例, 因为北方气团沿途输送时经过海洋, 降水中 Cl^- 受海洋的影响, 这也导致了北方气团降水中 Cl^- 非海盐部分的比例远低于西安的约 84% (白莉和王中良, 2008; 田晶等, 2011)。此外, 本研究中北方气团降水基本在 3—5 月发生, 为春季降水, 春季风速较高, 被风激起的海水转化成为大气中的海盐气溶胶的量较多, 对降水中相关离子的贡献较大。南方气团降水中, Cl^- 非海盐部分的比例分别为 73.1% (初期降水) 和 64.4% (总降水), 远高于北方气团降水中非海盐部分的比例, 表明南方气团降水中 Cl^- 受人为排放源的影响较大。南方气团降水中 Cl^- 非海盐部分的比例比深圳 (牛彧文等, 2008) 降水 (约 33%) 要高, 深圳作为沿海城市, 其降水受海洋影响, 导致了降水中较低的非海盐 Cl^- 。

北方气团降水中 Mg^{2+} 海盐部分的比例为 15.7% (初期降水) 和 16.8% (总降水), 南方气团降水中为 5.1% (初期降水) 和 11.9% (总降水)。对比发现, 北方气团降水中 Mg^{2+} 受海洋的影响相对较大, 南方气团降水中 Mg^{2+} 主要来自陆源贡献。分析表明, 海陆源对降水中 Mg^{2+} 都有贡献, 且陆源贡献大于海洋源贡献, 这与艾东升等 (2010) 的研究结果一致。海陆源对降水中 K^+ 都有贡献, 但其所占的海盐源部分的比例比 Mg^{2+} 要低, 且只有在受北方气团影响下才会有较低的富集系数和相对较高的海盐比例, 因此 K^+ 受海洋源的影响要低于 Mg^{2+} 。

由表 2 可见, 初期降水中各离子的富集系数 (K^+ 除外) 高于总降水, 表明初期降水对大气中污染物的清除效率较高。其中, 初期降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 的富集系数远高于总降水中相应离子的富集系数, 表明大气中 SO_2 、 NO_x 和扬尘污染较为严

重。由于降水中 K^+ 相对其他几种离子浓度而言较低, 降水对其清除作用不明显, 因此初期降水中的富集系数并没有高于总降水。

2.3.2 降水离子相关性分析

表 3、4 分别给出了南京市江北工业区 3—6 月南、北气团降水离子间的相关系数。由表 3 可见, 北方气团降水离子中 Na^+ 和 Cl^- , K^+ 和 Cl^- , Mg^{2+} 和 Cl^- 的相关性均通过了置信度为 99% 的显著性检验, 且相关系数明显高于南方气团相应离子间的相关系数 (表 4), 这说明北方气团降水中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- 具有相似的来源, 降水明显受海洋的影响, 这与海盐示踪法中所得结论一致。北方气团降水中 K^+ 和 Ca^{2+} ($r=0.790$), Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ($r=0.993$) 的相关性高于南方气团降水中 K^+ 和 Ca^{2+} ($r=0.655$), Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ($r=0.778$) 的相关性, 而 Ca^{2+} 是主要的地壳元素, 表明北方气团降水中 K^+ 和 Mg^{2+} 受地壳源的影响要高于南方气团降水。

降水中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} , Ca^{2+} 与 K^+ 具有较好的相关性, 表明这 3 种离子主要来自降水对土壤扬尘的清除。 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的相关性也较好, 表明这两种离子具有相似的来源且在降水中具有相似的性质或它们的前提物质 SO_2 和 NO_x 具有共同的排放源。 Ca^{2+} 分别与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- , Mg^{2+} 分别与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- , K^+ 分别与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 之间有较高的相关性, 可能是由于大气中的酸性化学组分 H_2SO_4 、 HNO_3 和 HCl 吸附在含 Ca 、 Mg 、 K 等碱性化学组分的颗粒物表面并发生反应, 再由云下雨滴洗脱进入降水而造成 (Pandis et al., 1992; Chandra et al., 2005)。Safai et al. (2004) 在研究降水化学组成时也认为, 大气中的 SO_2 能吸附在颗粒物表面进而与来自土壤中的组分如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 或与海洋中的组分如 Na^+ 反应。土壤中的碱性组分可通过随风飘起的扬尘进入大气, 表明风携带土壤扬尘对降水化学有重要作用 (Khemani et al., 1985; Casado et al., 1992), 可使降水中的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 大多以中和形态存在。 F^- 和 SO_4^{2-} , F^- 和 NO_3^- , Cl^- 和 NO_3^- , Cl^- 和 SO_4^{2-} 的相关性较好, 说明降水中 F^- 和 Cl^- 主要来自工厂燃煤和汽车尾气排放等人为源的影响。 NH_4^+ 与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的相关性也较好, 两者可能以盐的形式存在。

表3 北方气团总降水离子间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among different ions in precipitation of northern air masses

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	1.000	0.689 ¹⁾	0.966 ¹⁾	0.794 ¹⁾	0.781 ¹⁾	0.910 ¹⁾	0.835 ¹⁾	0.721 ¹⁾	0.829 ¹⁾
NH ₄ ⁺		1.000	0.672 ¹⁾	0.634 ²⁾	0.678 ¹⁾	0.782 ¹⁾	0.715 ¹⁾	0.630 ²⁾	0.693 ¹⁾
K ⁺			1.000	0.790 ¹⁾	0.763 ¹⁾	0.881 ¹⁾	0.843 ¹⁾	0.774 ¹⁾	0.789 ¹⁾
Ca ²⁺				1.000	0.993 ¹⁾	0.916 ¹⁾	0.982 ¹⁾	0.963 ¹⁾	0.983 ¹⁾
Mg ²⁺					1.000	0.933 ¹⁾	0.983 ¹⁾	0.956 ¹⁾	0.986 ¹⁾
F ⁻						1.000	0.959 ¹⁾	0.884 ¹⁾	0.942 ¹⁾
Cl ⁻							1.000	0.975 ¹⁾	0.975 ¹⁾
NO ₃ ⁻								1.000	0.922 ¹⁾
SO ₄ ²⁻									1.000

注:1)表示通过置信度为99%的显著性检验;2)表示通过置信度为95%的显著性检验.

表4 南方气团总降水离子间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among different ions in precipitation of southern air masses

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Na ⁺	1.000	0.833 ¹⁾	0.889 ¹⁾	0.665 ²⁾	0.691 ²⁾	0.830 ¹⁾	0.634 ²⁾	0.724 ²⁾	0.822 ¹⁾
NH ₄ ⁺		1.000	0.786 ¹⁾	0.543	0.823 ¹⁾	0.897 ¹⁾	0.654 ²⁾	0.722 ²⁾	0.900 ¹⁾
K ⁺			1.000	0.655 ²⁾	0.590	0.670 ²⁾	0.831 ¹⁾	0.787 ¹⁾	0.731 ²⁾
Ca ²⁺				1.000	0.778 ¹⁾	0.717 ²⁾	0.851 ¹⁾	0.925 ¹⁾	0.771 ¹⁾
Mg ²⁺					1.000	0.907 ¹⁾	0.676 ²⁾	0.803 ¹⁾	0.943 ¹⁾
F ⁻						1.000	0.623 ²⁾	0.746 ¹⁾	0.909 ¹⁾
Cl ⁻							1.000	0.929 ¹⁾	0.715 ²⁾
NO ₃ ⁻								1.000	0.868 ¹⁾
SO ₄ ²⁻									1.000

注:1)表示通过置信度为99%的显著性检验;2)表示通过置信度为95%的显著性检验.

2.4 局地源对降水离子的影响

比较初期降水和总降水中离子浓度可发现,北方气团降水中,初期降水离子浓度是总降水的1.2~3.0倍,南方气团降水中,初期降水离子浓度是总降水的1.1~2.9倍,初期降水中离子浓度明显高于总降水中的浓度。前人研究指出,降水对大气气溶胶具有明显的清除作用(康汉青等,2009;罗大成等,2011),并且降水的清洗作用是大气中颗粒物浓度下降的主要原因之一(Chate et al., 2003; Chaloulakou et al., 2005)。初期降水中较高的离子浓度表明,降水初始阶段,雨水对南京大气中污染物云下冲刷去除作用较强,降水中离子浓度最高。随着降水过程的进行,大气中污染物浓度降低,云下冲刷作用对降水中离子浓度的影响减弱,降水中离子浓度降低,导致总降水中离子浓度低于初期降水。海陆源分析表明,南北气团初期降水中主要离子的

富集系数要高于总降水中的离子,这也说明初期降水对大气中污染物的清除作用较强。

图2为降水离子浓度随时间的变化趋势。其中,5月2日的Air Pollution Index(API)指数飙升至307,空气质量级别为V级,为沙尘天气,可较好的反映南京降水对局地污染物的清除过程。由5月2日降水变化趋势可以看出,初期降水中各离子浓度均较高,雨水对南京大气中污染物(气态污染物和颗粒物)云下冲刷去除作用较强,随着降水过程的进行,降水离子浓度逐渐降低。6月25日降水中各离子浓度偏低,大部分维持在100 μeq·L⁻¹以内。由中国环保部空气质量报告可知,该日南京空气质量为优,局地污染源较少,降水对污染物的清除效率较低,导致降水中离子浓度偏低。

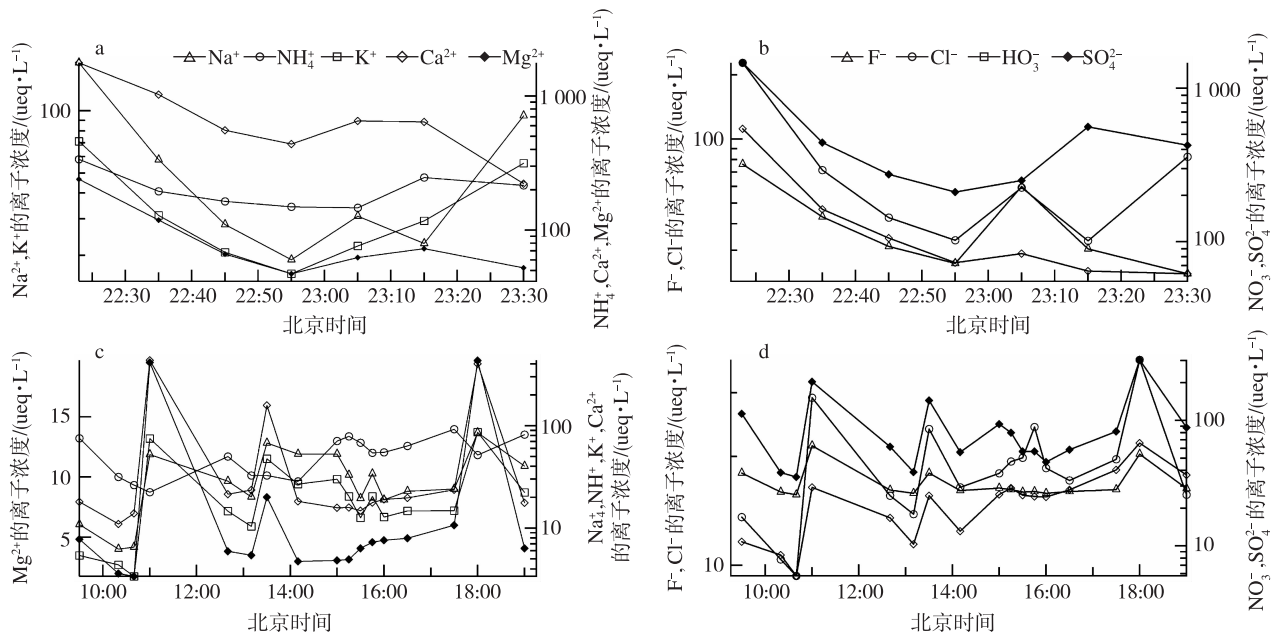


图 2 2011 年 5 月 2 日 (a,b) 和 6 月 25 日 (c,d) 降水中主要离子浓度的时间变化

Fig.2 Temporal variations of concentrations of main ions in precipitation on (a,b) 2 May and (c,d) 25 June 2011

3 结论

1) 南京江北地区 3—6 月降水主要受南北气团的影响, 3—5 月降水主要受北方气团影响, 气流后向轨迹较长且途径海洋, 降水主要受海洋和北方气团的共同影响。6 月降水主要受南方气团影响, 降水主要受南方气团下途径地区和南京本地排放源的影响。

2) 总降水中, 北方气团降水离子总浓度是南方气团的 1.5 倍, 表明降水云团来向和路径是降水本身所含污染物差异的根本原因。降水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 几乎没有海洋源贡献, 主要来自燃煤、工业排放和汽车尾气排放, Ca^{2+} 主要来自地壳源, Cl^- 主要来自海洋, 海洋源和陆源对 K^+ 和 Mg^{2+} 都有贡献, 其中, Mg^{2+} 的陆源贡献大于海洋源贡献, K^+ 受海洋源的影响程度要低于 Mg^{2+} 。

3) 南北气团初期降水中各离子浓度均高于总降水中的浓度, 且初期降水中主要离子的富集系数要高于总降水中的离子, 说明降水初始阶段, 雨水对南京大气中污染物 (气态污染物和颗粒物) 云下冲刷去除作用较强, 降水中离子浓度最高, 局地源对降水离子的贡献较为明显。

参考文献 (References):

艾东升, 郑祥民, 周立旻, 等. 2010. 近 2 年上海市夏季降水地球化学特征研究 [J]. 环境科学, 31 (9): 2002-2009. Ai Dongsheng, Zheng

Xiangmin, Zhou Liwen, et al. 2010. Geochemical character of precipitation in summer of Shanghai 2008—2009 [J]. Environmental Science, 31 (9): 2002-2009. (in Chinese).

白莉, 王中良. 2008. 西安地区大气降水化学组成特征与物源分析 [J]. 地球与环境, 36 (4): 289-297. Bai Li, Wang Zhongliang. 2008. Chemical composition and potential sources of major ions in precipitation in the Xian district, Shanxi Province [J]. Earth and Environment, 36 (4): 289-297. (in Chinese).

Casado H, Encinas D, Lacaux J P. 1992. The moderating effect of the Ca^{2+} ion in the acidity in precipitation [J]. Atmos Environ, 26 (6): 1175.

柴发合, 高健, 王淑兰, 等. 2010. 辽宁省背景地区降水化学特征及其与大气传输的关系 [J]. 环境科学研究, 23 (4): 387-393. Chai Fahe, Gao Jian, Wang Shulan, et al. 2010. The characteristics of precipitation chemistry and its relationship with atmospheric transport at a background site in Liaoning Province [J]. Environ Sciences Res, 23 (4): 387-393. (in Chinese).

Chaloulakou A, Kassomenos P, Grivas G, et al. 2005. Particulate matter and black smoke concentration levels in central Athens, Greece [J]. Environ Intern, 31 (5): 651-659.

Chandra M P, Venkata M S, Reddy S J. 2005. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: Influence of terrestrial sources on ionic composition [J]. Atmos Environ, 39 (6): 999-1008.

Chate D M, Rao P S P, Naik M S, et al. 2003. Scavenging of aerosols and their chemical species by rain [J]. Atmos Environ, 37 (18): 2477-2484.

Das R, Das S N, Misra V N. 2005. Chemical composition of rainwater and dustfall at Bhubaneswar in the east coast of India [J]. Atmos Environ, 39 (32): 5908-5916.

董继元, 王式功, 尚可政. 2009. 降水对中国部分城市空气质量的影响分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2 (12): 43-48. Dong Jiyuan, Wang Shigong, Shang Kezheng. 2009. Influence of precipitation on air

- quality in several cities, China [J]. *J Arid Land & Resources Environ*, 2(12): 43-48. (in Chinese).
- Fujita S, Takahashi A, Weng J H, et al. 2000. Precipitation chemistry in East Asia [J]. *Atmos Environ*, 34(4): 525-537.
- 高俊, 郑有飞, 陈书涛. 2012. 2007—2008年南京江北工业区大气降水化学特征 [J]. *大气科学学报*, 35(6): 697-701. Gao Jun, Zheng Youfei, Chen Shutao. 2012. Chemical characteristics of precipitation in the industrial area to the North of the Yangtze River in Nanjing in 2007—2008 [J]. *Trans Atmos Sci*, 35(6): 697-701. (in Chinese).
- 霍铭群, 孙倩, 谢鹏, 等. 2009. 大气颗粒物和降水化学特征的相互关系 [J]. *环境科学*, 30(11): 3159-3166. Huo Minqun, Sun Qian, Xie Peng, et al. 2009. Relationship between atmospheric particles and rain water chemistry character [J]. *Environmental Science*, 30(11): 3159-3166. (in Chinese).
- 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 2004. 空气污染气象学教程 [M]. 北京: 气象出版社. Jiang Weimei, Sun Jianing, Cao Wenjun, et al. 2004. *Air pollution meteorology tutorial* [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 2009. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 14(5): 523-530. Kang Hanqing, Zhu Bin, Fan Shuxian. 2009. Size distributions and wet scavenging properties of winter aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. *Climatic Environ Res*, 14(5): 523-530. (in Chinese).
- Khemani L T, Momin G A, Naik M S, et al. 1985. Impact of Alkaline particulates on PH of rainwater in India [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 25(4): 365-376.
- Kulshrestha U C, Sarkar A K, Srivastava S S, et al. 1996. Investigation into atmospheric deposition through precipitation studies at New Delhi, India [J]. *Atmos Environ*, 30(24): 4149-4154.
- 罗大成, 卢新卫, 陈景辉, 等. 2011. 西安市南郊春季降水化学成分特征 [J]. *城市环境与城市生态*, 24(3): 15-22. Luo Dacheng, Lu Xinwei, Chen Jinghui, et al. 2011. Chemical composition of spring precipitation in southern suburb of Xian city [J]. *Urban Environ & Urban Ecology*, 24(3): 15-22. (in Chinese).
- 刘君峰, 宋之光, 许涛. 2006. 广州地区雨水化学组成与雨水酸度主控因子研究 [J]. *环境科学*, 27(10): 1998-2002. Liu Junfeng, Song Zhiguang, Xu Tao. 2006. Study on ionic composition of rainwater at Guangzhou and the primary factors of rainwater acidity [J]. *Environmental Science*, 27(10): 1998-2002. (in Chinese).
- 牛彧文, 何凌燕, 胡敏. 2008. 深圳大气降水的化学组成特征 [J]. *环境科学*, 29(4): 1014-1019. Niu Yuwen, He Lingyan, Hu Min. 2008. Chemical characteristics of atmospheric precipitation in Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 29(4): 1014-1019. (in Chinese).
- Pandis S N, Seinfeld J H, Pilinis C. 1992. Heterogeneous sulphate production in an urban fog [J]. *Atmos Environ*, 26(14): 2509-2522.
- Panettiere P, Cortecchi G, Dinelli E, et al. 2000. Chemistry and sulfur isotopic composition of precipitation at Bologna, Italy [J]. *Appl Geochem*, 15(10): 1455-1467.
- Rastogi N, Sarin M M. 2005. Chemical characteristics of individual rain events from a semi-arid region in India: Three-year study [J]. *Atmos Environ*, 39(18): 3313-3323.
- Safai P D, Rao P S P, Momin G A, et al. 2004. Chemical composition of precipitation during 1984—2002 at Pune, India [J]. *Atmos Environ*, 38: 1705-1717.
- 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 2003. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社. Shou Shaowen, Li Shenshen, Yao Xiuping. 2003. *Mesometeorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 石春娥, 翟武全, 杨军, 等. 2008. 长江三角洲地区四省会城市 PM₁₀ 污染特征 [J]. *高原气象*, 27(2): 408-414. Shi Chun'e, Zhai Wuquan, Yang Jun, et al. 2008. Characteristics of PM₁₀ pollution at four provincial cities in Yangtze River delta district [J]. *Plateau Meteorol*, 27(2): 408-414. (in Chinese).
- 沈毅, 王体健, 韩永, 等. 2009. 南京近郊主要大气污染物的观测分析研究 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 45(6): 746-756. Shen Yi, Wang Tijian, Han Yong, et al. 2009. Observation of main air pollutants at a suburban site in Nanjing [J]. *J Nanjing University (Natural Science)*, 45(6): 746-756. (in Chinese).
- 邵德民, 张维, 沈爱华. 1992. 上海地区高空气流长距离输送轨迹及其与酸雨的关系 [J]. *上海环境科学*, 11(1): 6-9. Shao Demin, Zhang Wei, Shen Aihua. 1992. An analysis of relationship between the upper air parcel trajectories of long-range transport and acid rain in Shanghai [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 11(1): 6-9. (in Chinese).
- 涂俊. 1999. 南京市降水化学成分特征及变化趋势 [J]. *上海环境科学*, 18(10): 451-453. Tu Jun. 1999. Characteristics and trend of chemical composition of precipitation in Nanjing [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 18(10): 451-453. (in Chinese).
- Tu J, Wang H S, Zhang Z F, et al. 2005. Trends in chemical composition of precipitation in Nanjing, China, during 1992—2003 [J]. *Atmos Res*, 73: 283-298.
- 田晶, 沈振兴, 张琨, 等. 2011. 西安市春、夏季大气降水的化学组成和来源分析 [J]. *西安交通大学学报*, 45(5): 108-113. Tian Jing, Shen Zhenxing, Zhang Kun, et al. 2009. Chemical composition and potential sources of water-soluble compounds in atmospheric precipitation in Xi'an in spring and summer [J]. *J Xi'an Jiaotong University*, 45(5): 108-113. (in Chinese).
- Wang H, Zhu B, Shen L, et al. 2012. Size distributions of aerosol and water-soluble ions in Nanjing during a crop residual burning event [J]. *J Environ Sci*, 24(8): 1457-1465.
- 王雪梅, 杨龙元, 秦伯强, 等. 2006. 太湖流域春季降水化学组成及其来源研究 [J]. *海洋与湖沼*, 37(3): 249-255. Wang Xuemei, Yang Longyuan, Qin Boqiang, et al. 2006. Chemical composition and origin of spring rainwater in Taihu Lake [J]. *Oceanologia & Limnologia Sinica*, 37(3): 249-255. (in Chinese).
- 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等. 2006. 泰山降水化学及大气传输的研究 [J]. *环境科学学报*, 26(7): 1187-1194. Wang Yan, Ge Fuling, Liu Xiaohuan, et al. 2006. Study on the precipitation chemistry and atmospheric transport at the mount Taishan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(7): 1187-1194. (in Chinese).
- 王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等. 2008a. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析 [J]. *环境科学研究*, 21(1): 22-29. Wang Yan, Chai Fahe, Liu Houfeng, et al. 2008. Analysis on the characteristics of horizontal transport of the atmospheric pollutant over the Yangtze Delta [J]. *Environmental Sciences Res*, 21(1): 22-29. (in Chinese).

- 王艳,柴发合,王永红,等.2008b.长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J].环境科学,29(5):1430-1435. Wang Yan, Chai Fahe, Wang Yonghong, et al. 2008. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. Environmental Science, 29(5):1430-1435. (in Chinese).
- 王跃思,李雪,姚利,等.2009.2007年北京夏季降水分段采样酸度和化学成分分析[J].环境科学,30(9):2715-2721. Wang Yuesi, Li Xue, Yao Li, et al. 2009. Variation of PH and chemical composition of precipitation by multi-step sampling in summer of Beijing 2007 [J]. Environmental Science, 30(9):2715-2721. (in Chinese).
- 徐虹,毕晓辉,林丰妹,等.2010.杭州市大气降雨化学组成特征及来源分析[J].环境污染与防治,32(7):75-81. Xu Hong, Bi Xiaohui, Lin Fengmei, et al. 2010. Analysis on the sources and characteristics of chemical composition of precipitation in Hangzhou [J]. Environ Pollut Control, 32(7):75-81. (in Chinese).
- 徐宏辉,王跃思,杨勇杰,等.2008.泰山顶夏季大气气溶胶中水溶性离子的浓度及其粒径分布研究[J].环境科学,29(2):306-309. Xu Honghui, Wang Yuesi, Yang Yongjie, et al. 2008. Concentrations and size distributions of water soluble ions of atmospheric aerosol at the summit of Mount Tai [J]. Environmental Science, 29(2):306-309. (in Chinese).
- 徐敬,张小玲,徐小斌,等.2011.大气传输对华北区域本底地区降水化学成分的影响[J].气候与环境研究,16(1):105-112. Xu Jing, Zhang Xiaoling, Xu Xiaobin, et al. 2011. Influence of atmospheric transportation on chemical compositions of precipitation in north China regional background area [J]. Climatic Environ Res, 16(1):105-112. (in Chinese).
- 杨复沫,贺克斌,雷宇,等.2004.2001—2003年间北京大气降水的化学特征[J].中国环境科学,24(5):538-541. Yang Fumo, He Kebin, Lei Yu, et al. 2004. Chemical characters of atmospheric precipitation in Beijing in years of 2001—2003 [J]. China Environ Sci, 24(5):538-541. (in Chinese).
- 杨书申,邵龙义,肖正辉,等.2005.中国典型城市2004年大气质量及颗粒物浓度与气象条件关系分析[J].中原工学院学报,16(5):5-9. Yang Shushen, Shao Longyi, Xiao Zhenghui, et al. 2005. The analysis of air quality and the relationship between particulate mass concentrations and meteorology condition of the typical cities in China, 2004 [J]. J Zhongyuan Institute Technol, 16(5):5-9. (in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理和方法[M].4版,北京:气象出版社. Zhu Qianguan, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. The principles and methods of synoptic meteorology [M]. 4th rd Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 张锐,晁开,张宁.1995.兰州大气颗粒物和可溶性离子及其降水中元素组成的关系[J].中国沙漠,15(4):357-361. Zhang Rui, Chao Kai, Zhang Ning. 2005. Atmospheric particles in relation to water-soluble ions and elementary composition of rainfall in Lanzhou city [J]. J Desert Res, 15(4):357-361. (in Chinese).
- 张占峰,王红磊,德力格尔,等.2014.瓦里关大气降水的化学特征[J].大气科学学报,37(4):502-508. Zhang Zhanfeng, Wang Honglei, Deli Geer, et al. 2014. Chemistry characteristics of atmospheric precipitation in Waliguan [J]. Trans Atmos Sci, 37(4):502-508. (in Chinese).
- 郑有飞,唐信英,徐建强,等.2007.南京市江北工业区降水酸性及化学成分分析[J].环境科学研究,20(4):45-51. Zhen Youfei, Tang Xinying, Xu Jianqiang, et al. 2007. The analysis of precipitation acidity and chemical composition in the industrial estate located on north bank of the Yangtze River, Nanjing [J]. Environ Sciences Res, 20(4):45-51. (in Chinese).

(责任编辑:孙宁)