

中山大学

硕士学位论文

气象条件对衡山春季酸雨过程影响研究

姓名：李珅

申请学位级别：硕士

专业：大气物理学与大气环境

指导教师：范绍佳

20100610

气象条件对衡山春季酸雨过程影响研究

专业：大气物理学与大气环境

硕士生：李珅

指导老师：范绍佳教授

摘要

根据 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山高山气象站酸雨常规观测资料, 2009 年 3-5 月衡山酸雨加强观测资料, 以及衡山南面郴州站、衡山北面长沙站的常规探空资料, 结合地面和高空天气图、美国国家海洋和大气局 (NOAA) 后向轨迹分析等方法, 研究衡山降水特征, 探讨气象条件对衡山春季酸雨过程的影响。取得下述结论:

1. 近三年衡山降水年平均 pH 值都小于 4.50, 属于强酸雨, 酸雨频率超过 88%, 衡山酸雨较严重。衡山下半年 (7-12 月) 降水比上半年 (1-6 月) 酸度更强, 秋季 (9-11 月) 降水 pH 值最低, 酸雨频率、强酸雨频率最高, 是酸雨最严重的季节。此外, 衡山 6 月酸雨频率也较高, pH 值也很低。

衡山酸雨频率、强酸雨频率随降水量等级变化, 呈现 “U” 型分布, 不同等级的降水量对衡山 pH 值影响并不显著。降水的平均 pH 值和降水量相关性不大。降水月平均 K 值和降水量之间为显著的负相关, 降水月平均 K 值和 pH 值呈显著的正相关。

衡山降水日 pH 值分布主要有 3.50-5.00、5.10-6.20 两个范围。上半年在 3.50-5.00、5.10-6.20 两个区域均有分布, 下半年主要分布在 3.50-5.00, 在 5.10-6.20 区域分布明显减少, 约只有上半年的 1/3。

2. 衡山酸雨过程常与偏北风、偏南风相联系。降水日偏北风 (NNW、N、NNE、NE)、偏南风 (SW、SSW、S) 频率较高。近三年衡山春季降水日主导风向为偏北风或偏南风的频率远高于其他风向, 降水平均 pH 值比其他风向低。2009 年春季衡山降水日主导风向为偏南风的频率最高, 其次是偏北风、偏东风, 未出现偏西风。偏北风降水 pH 值最低, 偏东风降水 pH 值较高。

3. 衡山春季降水日不同主导风向 (偏北风、偏南风、偏东风、偏西风、静风) 的 5 个酸雨典型个例和 1 个沙尘暴过程个例的酸雨观测数据、衡山南面郴州站、衡山北面长沙站的常规探空资料, 地面和高空天气图、美国国家海洋和大气局 (NOAA) 后向轨迹分析等的剖析表明, 区域输送对衡山春季酸雨形成有重要影响, 是衡山春季酸雨的主要原因。研究衡山春季酸雨过程需重点考虑偏北风、偏南风气象条件下污染物输送的影响。此外, 沙尘暴天气中输送过来的碱性颗粒物可使衡山酸雨情况得到短暂缓解。

关键词：酸雨 气象条件 春季 衡山

Study on the influence of meteorological conditions on the acid rain during spring in Mount Heng

Major: Atmospheric Physics and Atmospheric Environment

Name: Li Shen

Supervisor: Fan Shaojia (Professor)

Abstract

Based on routine acid rain observation data from the weather station in Mount Heng during the period from July 2006 to May 2009, the enhanced observation data of the acid rain from March to May in 2009, the routine sounding data of Chenzhou and Changsha, the synoptic charts, and the backward trajectory analysis from HYSPLIT Trajectory Model of NOAA, the influence of meteorological conditions on the acid rain during spring in Mount Heng were studied. It was found that:

1. In nearly three years, the annual average pH of the precipitation of Mount Heng was below 4.50, so the rainfall was strong acid rain. The annual acid rain frequencies from July 2006 to May 2009 were all above 88%. The circumstance of acid rain in Mount Heng was serious. The acidity of the precipitation of the second half year (from July to December) was stronger than the first half year (from January to June). Autumn (from September to November) had the lowest pH and the highest acid rain frequency. Therefore, autumn was the severest season in acid rain. In addition, June also had high acid rain frequency and low pH value.

The acid rain frequency and the strong acid rain frequency increased with the precipitation level as a “U” pattern. However, the pH value didn’t change too much when the precipitation level was different. Similarly the pH of the precipitation had little correlation with the rainfall amount. The monthly average K value of the precipitation had significant negative correlation with rainfall amount but significant positive one with pH value.

The pH values of the rainy days were mainly distributed on two intervals: from 3.50 to 5.00 and from 5.10 to 6.20. The pH values of the rainy days in the first half year were both distributed on the two intervals, but those in second half year were chiefly distributed on the first interval

from 3.50 to 5.00. The frequency of second half year pH values from 5.10 to 6.20 was only about one third of that of the first half year.

2. Leaning north wind (NNW, N, NNE, NE wind) or leaning south wind (SW, SSW, S wind) always accompanied with the acid rain in Mount Heng. The frequencies of Leaning north wind and leaning south wind were very high in rainy days. In the springs of 2007 to 2009, leaning north wind and leaning south wind had higher dominant wind frequencies and lower pH than the other wind directions. During spring in 2009, leaning south wind had the highest dominant wind frequency. The second was leaning north wind and the third was leaning east wind. Leaning west wind had never been the dominant wind in this spring. The pH of leaning north wind was lowest in the three wind directions. Leaning east wind had relatively higher pH value.

3. Five cases, in which dominant wind direction was respectively leaning north wind, leaning south wind, leaning east wind, leaning west wind and calm wind in spring, were analyzed in detail. Moreover, one case involved meteorological conditions caused by sand storm, was investigated too. It was found that regional transportation not only had distinctly important influence on acid rain of spring in Mount Heng, but also was the main cause of acid rain. Thus studying the acid rain during spring in Mount Heng should be focused on the influence of the meteorological conditions, in which the pollutants are carried by leaning north wind or leaning south wind. Besides, the alkaline particulate matter transported by sand storm can improve the acid rain situation in Mount Heng for a short time.

Key words: acid rain meteorological condition spring Mount Heng

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

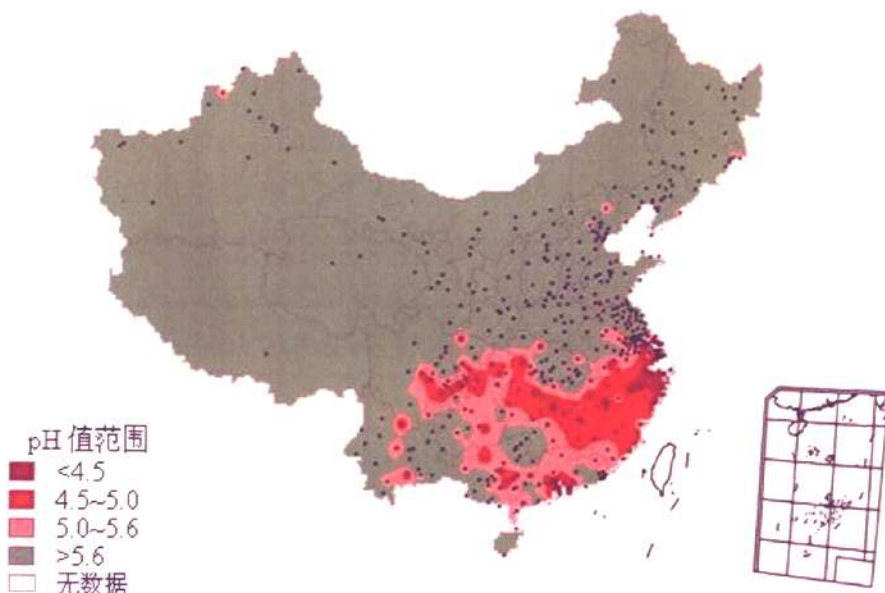
第1章 绪论

1.1 研究目的和意义

酸雨是指 pH 值 <5.6 的雨雪或者其它形式的大气降水。酸雨问题是三大全球性大气环境问题之一，我国的酸雨情况比较严重，已成为继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区。

我国酸雨主要分布在西南、华东、华中、华南四个区域。根据《2008 年中国环境状况公报》^[1]，2008 年监测的 477 个城市（县）中，52.8%的城市观测到酸雨；酸雨频率超过 75%的城市比例为 11.5%，出现强酸雨（pH 值小于 4.5）的城市比例为 8.8%。长江以南，四川、云南以东的区域为酸雨危害的主要范围，包含浙江、福建、江西、湖南、重庆大部分地区 and 长江三角洲、珠江三角洲地区。

图 1-1-1 为 2008 年我国酸雨区域分布。



全国降水pH年均值等值线

图 1-1-1 2008 年我国酸雨区域分布^[1]

湖南省是华中酸雨污染最严重的省份之一。陈旦华等^[2]早年研究已发现，湖南是我国南部严重酸雨地区，酸雨频率高，而且酸雨 pH 值较低。万小卓等^[3]对湖南 2000-2004 年酸雨研究发现，湖南省酸雨频率为 46.2%-76.4%，pH ≤ 4.5 的降水（即强酸雨）频率为 21.0%-41.6%，且有逐年上升趋势。城市降水的年均 pH 范围为 3.10-9.94，酸雨频率范围为 46.2%-76.4%，2004 年达到这几年来来的

最高值 76.4%。2004 年 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比例与前几年相比进一步下降,可能和机动车辆的增加、能源结构等有某种程度的联系。湖南省酸雨情况比较严重,主要是土壤呈酸性造成大气颗粒物为酸性,且在不利的地形、气象条件下,工业燃烧高含硫量的煤所致。随着机动车辆的增多,光靠控制 SO_2 排放量的控制措施不一定能够完全控制酸雨的恶化,氮氧化物增加可能造成湖南酸雨从早年单一的硫酸型向硫酸和硝酸混合型酸雨转变,使湖南酸雨问题更加复杂。

图 1-1-2 给出 2001-2008 年湖南省 14 个地级市年均 pH 最高值、最低值及酸雨频率的变化。

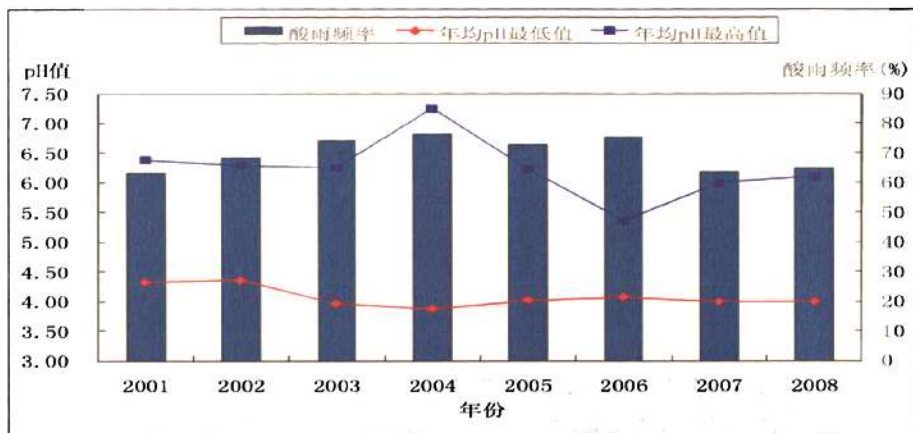


图 1-1-2 2001-2008 年湖南省 14 个地级市年均 pH 最高值、最低值及酸雨频率

由图 1-1-2 可见,湖南省 14 个市年均 pH 最低值一直维持在 3.80-4.40 的较低水平。其中年均 pH 最低值最小出现在 2004 年,达到 3.87。2001-2008 年酸雨频率全部大于 60.0%,2004 年最高达 76.4%。

2008 年湖南省环境状况公报^[4]显示,全省 14 个城市均受到不同程度的酸雨污染,酸雨污染依然严重,但重酸雨 ($\text{pH} \leq 4.5$) 频率略有减轻。降水 pH 年均值范围为 3.99-6.10,全省城市酸雨频率平均为 64.5%,较 2007 年提高了 0.8%。酸雨污染问题已成为湖南经济可持续发展进程中必须解决的重大环境问题^[5]。

图 1-1-3 为 2008 年度湖南省 14 个城市和衡山降水酸雨频率。

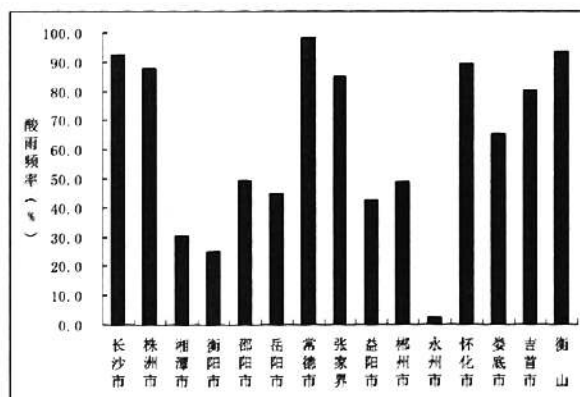


图 1-1-3 2008 年度湖南省 14 个城市和衡山降水酸雨频率

图 1-1-3 结果表明, 14 个城市中有 6 个城市的酸雨频率超过 80.0%, 其中常德酸雨频率高达 98.3%, 长沙达到 92.5%, 衡山也高达 93.5%, 仅次于常德, 衡山的酸雨污染比较严重。

衡山严重的酸雨问题可能与湖南省经济的快速发展有关。图 1-1-4 给出 2000-2009 年湖南省 GDP 总量变化。2009 年湖南 GDP 位居全国第 11 位, 2009 年 GDP 总量达到 12930.69 亿元, 将近 2000 年 3551.49 亿元的 3 倍。其中 2009 年长沙市 GDP 为 3744.8 亿元, 位居全国第 20 位, 衡山周边的长沙、岳阳、常德、衡阳、株洲 5 个城市 GDP 超过 1000 亿元。尤其是长沙、株洲、湘潭三市人口密集, 工业集中, 是湖南省经济最发达地区, 2008 年长株潭地区的 GDP 占全省的 40.9%。长株潭三市已成为湖南经济发展水平最高、最具发展潜力的经济走廊和城市群^[6]。

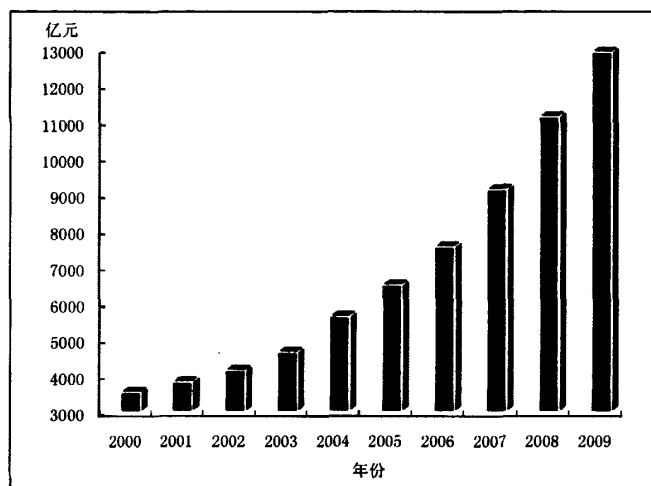


图 1-1-4 2000-2009 年湖南省 GDP 总量变化

要解决酸雨问题, 需要全面了解酸雨形成原因, 国内外科学家已进行过很多研究^[7-18]。选取高山站进行酸雨的观测研究是主要研究手段之一, 因为高山的空气比较洁净, 污染物本底浓度一般比较低, 可以避免在城市内设立站点容易受城市本身污染物浓度影响的弊端, 且高山本身很少污染排放不容易形成酸雨。研究发现在很多高山站点搜集降水的 pH 值都比较低, 甚至达到强酸雨级别, 高山酸雨与高山周边区域的城市以及远距离的污染物输送有关。通过研究高山降水过程特征, 可了解气象条件对污染物输送的影响, 分析研究酸雨的形成机理。

南岳衡山位于湖南省中部酸雨区, 是相对周边比较突出、海拔达 1200m 的一座高山。图 1-1-5 给出湖南省地理及衡山周边地形分布。

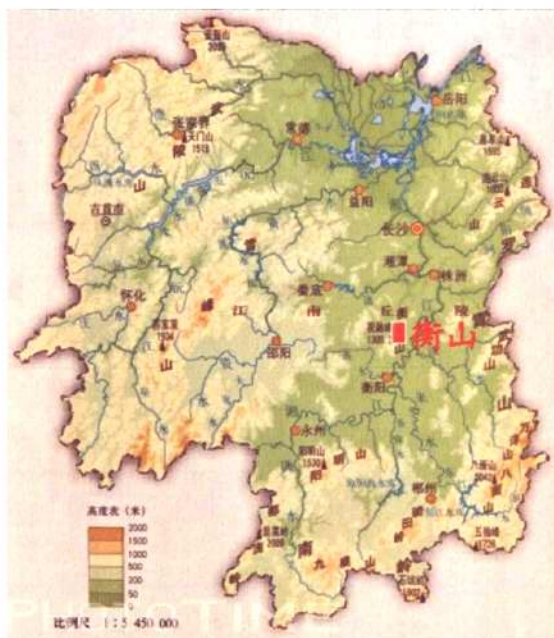


图 1-1-5 湖南省地理及衡山周边地形分布^[19]

注：红色方块为衡山位置

衡山纬度为东经 112.7° ，北纬 27.3° 。从图 1-1-5 可见，衡山东北部有湘潭、株洲、长沙等城市群，西北方向城市有娄底，西部方向城市有邵阳，南部城市主要是衡阳和郴州。湘中地区大多为丘陵、盆地和河谷冲击平原，除衡山高达 1200m 以外，其他均为海拔 500m 以下。因此，衡山是研究湖南酸雨最佳的高山观测地点。

为研究华南的酸雨特征，国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理（2005CB422200）”第三课题组于 2009 年 3-5 月在衡山进行了为期 3 个月的春季酸雨加强观测。

本文通过收集衡山南岳高山气象站的酸雨历史监测数据和 2009 年 3-5 月春季酸雨加强观测数据，研究衡山酸雨和气象条件的关系。通过对衡山春季典型强酸雨个例的剖析，分析区域输送对衡山春季酸雨形成的影响，为国家和地方有关部门制定控制酸雨污染策略提供参考依据。

1.2 国内外研究进展

在酸雨成因研究的探索过程中^[20-25]，一些科学家发现以高山作为观测站点具有很好的区域代表性，能在一定程度上反映当地大气污染的背景值和污染物的长程传输^[26-31]。通过高山站点的酸雨研究，能更有利于弄清大气污染物的输送规律，全面分析区域酸雨形成机理^[32-37]。

国外学者对高山站酸雨研究多从降水化学角度入手。如日本的 YUKIYA MINAMI, YUTAKA ISHIZAKA^[38]分析 Mt. Norikura 顶峰夏季大气气溶胶里面的无机离子种类，研究了液态水含量（LWC），发现了核化清除等一些过程的规律。C. K. DEININGER, V. K. SAXENA^[39]分析气团后向轨迹的来向，将 Mt. Mitchell 的云水

来源分成3类,并运用主分量因子的方法探讨了云水的成分和云水来源种类的关系。美国的 James B. Anderson^[40]利用自动云水采样仪收集高山站点 1994-1997 年降水样品,分析过 pH 值、电导率、离子浓度、LWC 以及相关气象要素的关系。韩国的 MAN-GOO KIM^[41]收集了 Daekwanreung 山上 2002 年 3 月-2003 年 9 月的云水、雾水样本,研究样本的 pH、电导率、主要离子浓度,并运用后向轨迹,将样本按风的来向分成 4 个组进行过研究。此外,捷克的 Miloš Zapletal 等^[42]在 Cervenohorske Sedlo 也做过类似的研究。从国外关于高山酸雨研究的文献不难发现,很多研究基于化学角度,着重分析降水中离子种类、浓度等,在降水的化学组成方面研究的较深入。

在酸雨与气象条件关系研究方面, S. R. Dorling^[43]发现,在假设污染源排放量级和分布维持在常数的前提下,预测未来酸沉降量的时候,最好是结合大气环流型的预报。I. J. Beverland^[44]分析降水组成时,得到降水的化学数据和当地风向有一定关系的结论,并利用数值预报模式进行后向轨迹的计算,最后发现降水组成和不同的输送型有关。Frederic Andre^[45]在分析雨水化学组成的过程中,研究过平均风速和盛行风向等气象要素在干季和雨季对离子浓度的影响。将气象条件和酸雨分析结合起来,可加深对酸雨的认知程度。

在我国也有学者进行过酸雨的高山站观测研究^[46-51]。柳泽文孝等^[52-53]为了查明峨眉山地区雨水污染物的来源,1998 年 4-12 月每月从 22 个采样点收集雨水样品,对峨眉山雨水化学组成的动态变化进行过深入的分析,发现峨眉山地区一年中雨水分为中和期(春夏季)、清洁期(夏秋季)和污染期(冬季),冬季 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度比春夏有明显上升,可能是冬季燃煤硫氧化物和汽车尾气排放氮氧化物增多的结果,这两种离子的影响造成降水 pH 较低。王艳等^[54-55]2004 年 8 月-2005 年 7 月对泰山降水进行了化学观测,共收集到 37 场降水,发现降水 pH 值的雨量加权均值为 4.73,酸性降水的出现频率达 60%,且泰山降水的离子组成有不同的来源。每场降水的后退气流轨迹分析发现,不同来源的降水气团 pH 值、离子浓度不同。黄海洪,董蕙青^[56]利用广西的酸雨监测和气象常规资料对广西大明山地区影响酸雨的气象因子统计分析发现,外来污染源的传输是该地区酸雨形成的重要原因,冷空气的影响路径、降水量、大气逆温等气象要素对酸雨的形成有较大影响。于涛^[57]通过对广州白云山 1994-2004 年 10 年降水监测结果分析及酸雨现状调查发现,白云山降水中的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值从 1994 年的 10.5 降到 2004 年的 2.0,认为酸雨类型由原来主要的硫酸型向次要的硝酸型转化的趋势。吴兑等^[58]分析海拔 815m 的南岭山地采集 1999 年 1 月和 2001 年 2-3 月的雨水样品资料,结果显示酸雨频率高达 88%。并从 4 次典型锋面过程中伴随降水的雨水离子浓度中推测其可能来源,发现不同过程雨水的化学特征变化差异明显,雨水中浓度最高的阴阳离子分别是 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 。

国内高山酸雨研究主要以降水化学组成分析为主。有部分科学家进行过气象条件和酸雨关系的探索,但研究地点主要集中于城市^[59-64]。张铮^[65]对两广地区一冷锋降水过程中高、低空流场的分析和 72 小时空气运动轨迹计算,得到广州地区高、低空气流的来向和范围,发现冷锋过境中低空气流由北转南后,酸雨程度有所减轻,由湖南等北部工矿区远距离输送气流含有的致酸物质比海洋气流多。黄小培等^[66]对 1992-2005 年百色市酸雨观测数据统计分析发现,百色市酸雨分布特征为夏半年酸雨频率较小,冬半年酸雨频率较高,酸雨与地面和高空风向频率、大气环流特征、大气层结稳定度等关系密切。刘京雄^[67]对 1991-2003 年闽南地区酸雨和天气图的分析发现,闽南地区春冬季酸雨出现率大。与锋面伴

随的 850 hPa 冷槽型、暖式切变型和冷式切变型, 酸雨出现率大。在倒槽型的槽后酸雨出现率明显比槽前多出 2 倍多。pH 值随降水等级的增大呈“U”型变化, 酸雨出现率在暴雨出现之前随着雨量的增大而增大, 大雨时酸雨出现率最大。闽南地区在偏西风下的酸雨出现率大, 东北风下最小。蒲维维^[68]利用 2003-2008 年北京地区三个酸雨观测站资料分析结果表明, 近 6 年来北京地区酸雨总体呈逐年加强趋势, 夏、秋两季酸雨污染严重; 1500m 高空风的风向和风速对降水酸度有明显影响; 降水量对 pH 值影响不大但对酸雨频率有明显影响; 逆温对酸雨有一定影响; 大气污染物 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对降水 pH 值有重要影响。

王玮等^[69]早年的衡山地区酸雨观测分析表明, 衡山降水酸化程度严重, 其酸性降水来自传输过程, 并不仅仅由局地的影响造成。衡山气流轨迹分析发现, 北方冷空气南下时, 衡山云水和降水酸化较显著, 气流此刻主要来自北至东的 90° 扇面内, 污染物传输其间途经污染区域, 造成下风向污染, 特别经过大城市比较多时, 云水和降水酸化情况十分严重。但综合考虑风向、风频、降水量等气象条件对高山站酸雨影响的研究文献不多。

我国在酸雨研究方面做了大量工作, 也取得了不少成果, 但酸雨污染的现状并没有得到根本改变, 仍然有加重和蔓延态势^[70-75]。原因有待于进一步研究。

为此, 本文利用国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理”第三课题组 2009 年 3-5 月衡山酸雨加强观测资料, 并收集 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山高山气象站酸雨常规观测资料, 衡山南面郴州站、衡山北面长沙站的常规探空资料, 结合地面和高空天气图、美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹分析等方法, 综合考虑风向、风频、降水量等气象条件对高山站酸雨影响, 研究衡山降水特征, 探讨气象条件对衡山春季酸雨过程的影响, 为国家和有关部门制定华南地区的酸雨调控对策提供依据。

第2章 资料、研究方法和衡山周边环境概况

2.1 研究资料

本文所使用的资料包括衡山酸雨历史资料、酸雨加强观测资料和相应的气象资料。

衡山酸雨历史资料的时间跨度为 2006 年 7 月-2009 年 5 月, 来源于湖南省衡阳市南岳区气象局的南岳高山气象站, 气象站观测场海拔 1265.9m。资料包括降水 pH 值、k 值、降水量、气温、相对湿度、风向风速、能见度、云量云状、天气现象等。

衡山酸雨加强资料的观测时间为 2009 年 3 月 14 日-6 月 2 日, 参加观测的单位有国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“中国酸雨沉降机制、输送态势及调控原理”第三课题组的中国环境科学研究院、山东大学、香港理工大学和中山大学等。加强观测数据除常规酸雨资料外, 还包括连续的 CO、SO₂、NH₃、NO_x、总 N、NO、NO₂、O₃、BC、PM10、PM2.5 的观测浓度及相对湿度 RH。

气象资料包括南岳高山站常规气象资料, 衡山南面郴州站、衡山北面长沙站的常规探空资料, 天气图, 卫星云图, 美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹图等。天气图、卫星云图、探空图、气象要素图来自于香港科技大学环境研究所网站。

有关的具体链接如下:

天气形势图——http://envf.ust.hk/dataview/hko_wc/current/.

卫星云图——http://envf.ust.hk/dataview/geo_sat_map/current/index.py?maptype__string=UST_FY2C_EAPIC,

http://envf.ust.hk/dataview/geo_sat_map/current/index.py?maptype__string=KOCHI_GEO_MAP.

探空图——<http://envf.ust.hk/dataview/profile/current/>.

气象要素图——<http://envf.ust.hk/dataview/stnplot/current/>.

衡山南面郴州站、衡山北面长沙站使用的常规探空资料来自怀俄明大学(university of Wyoming)网站, 其链接——<http://weather.uwyo.edu/uppera/ir/sounding.html>. 根据此资料绘制了长沙和郴州温度、相对湿度、比湿、风矢量图、u 分量风向、v 分量风向的探空曲线图。

后向轨迹图来源于 Air Resources Laboratory (ARL) 网站的 HYSPLIT Trajectory Model 运算结果。其链接——<http://ready.arl.noaa.gov/hysplit-bin/trajtype.pl?runtype=archive>.

此外, 部分地图来自 Google earth, 其链接——<http://earth.google.com>.

2.2 数据处理方法

本文研究主要采用数理统计、分级列表等诊断方法来研究衡山酸雨状况, 用到的主要工具有 Fortran、Matlab、Excel 等, 利用 Matlab、Excel 等软件进行分析和绘图。

所有计算中的平均为雨量加权平均。用到的主要计算公式:

1. 降水酸度的计算

降水pH平均值采用 $[H^+]$ 雨量加权法计算。

其计算公式如下：

$$pH = -\text{Log}[H^+] \quad (2-2-1)$$

$$\overline{[H^+]} = \frac{\sum [H^+]_i \cdot V_i}{\sum V_i} \quad (2-2-2)$$

$$\overline{pH} = -\text{Log}[\overline{H^+}] \quad (2-2-3)$$

式中： $[H^+]_i$ ——第*i*次（或月）氢离子浓度。

V_i ——第*i*次（或月）样品的降水量（mm）。

2. 酸雨频率的计算

$$F = n/N \times 100\% \quad (2-2-4)$$

式中： n —— pH<5.60的降水样品数（个）。

N —— 降水样品总数（个）。

3. 降水电导率（k 值）

$$[C] = \frac{\sum [C]_i \cdot V_i}{\sum V_i} \quad (2-2-5)$$

式中： $[C]_i$ ——第*i*次（或月）降水电导率（k 值）测定（ $\mu S/cm$ ）。

V_i ——第*i*次（或月）样品的降水量（mm）。

2.3 衡山及周边环境概况

衡山位于湖南省的中部。湖南属于内陆省份，全省土地以中、低山与丘陵为主。湖南土壤构成中，接近 1/3 属酸敏感土壤，酸沉降对土壤酸化已较严重。湖南省气候为具有大陆性特点的亚热带季风湿润气候，其气候特点可归纳为：

1. 气候温暖，四季分明。
2. 热量充足，雨水集中。
3. 春温多变，夏秋多旱。
4. 严寒期短，暑热期长^[76]。

衡山又称南岳，最高峰祝融峰的海拔达 1300.2m。衡山气候属亚热带季风湿

润气候,而高山的地形使其兼备山地气候特点,因此衡山气候主要特点为:垂直方向温度、降雨量、风向等气象要素变化较大,气象观测站高度处温度偏低,降水量较多,风大,云多^[77]。

衡山所处环境的大气污染状况,很大程度与湖南省内的污染物排放状况有关。表 2-3-1 给出了 2001-2008 年湖南省废气污染物排放状况变化。

表 2-3-1 2001-2008 年湖南省废气污染物排放状况变化

年份	二氧化硫(万吨)			烟尘(万吨)			工业粉尘(万吨)
	总量	工业	生活	总量	工业	生活	
2001 年	76.20	58.68	17.52	44.92	37.89	7.03	62.69
2002 年	74.32	57.59	16.73	43.43	36.72	6.71	60.83
2003 年	84.85	67.15	17.70	49.25	42.03	7.22	69.90
2004 年	87.24	71.18	16.06	53.07	45.21	7.86	72.63
2005 年	91.93	75.50	16.43	53.88	45.26	8.62	76.87
2006 年	93.36	76.60	16.76	49.14	41.64	7.50	73.35
2007 年	90.43	73.94	16.49	44.32	37.28	7.04	65.86
2008 年	84.01	67.48	16.54	37.77	30.69	7.08	55.47

从表 2-3-1 中可见,湖南 2001-2008 这近八年时间,每年二氧化硫排放总量均在 74 万吨以上,2003-2006 年连续四年保持增长,从 2007 年开始增长趋势才被遏制,但是即使这样,2008 年排放量仍然比最低的 2002 年高将近 10 万吨,其中二氧化硫的主要排放源是工业源,生活源相对稳定,基本每年都保持在 16、17 万吨水平;烟尘总量方面,2003 年至 2005 年持续增长,2006 年开始逐步下降,2008 年更是降低到近八年来最低值 37.7 万吨,八年来首次低于 40 万吨,烟尘主要排放源也是工业,工业烟尘排放量也和烟尘总量变化趋势相同,从 2006 年开始降低;工业粉尘的排放趋势和烟尘总量一致,2008 年首次降到 60 万吨以下,达到八年来最低值 55.47 万吨。由此可见,湖南省环保等政府相关部门对污染源治理的力度还是不错的,2007 年开始,这三项污染物的排放量都有一定程度的削减。

图 2-3-1 给出 2008 年湖南城市空气污染物浓度年均值示意图。

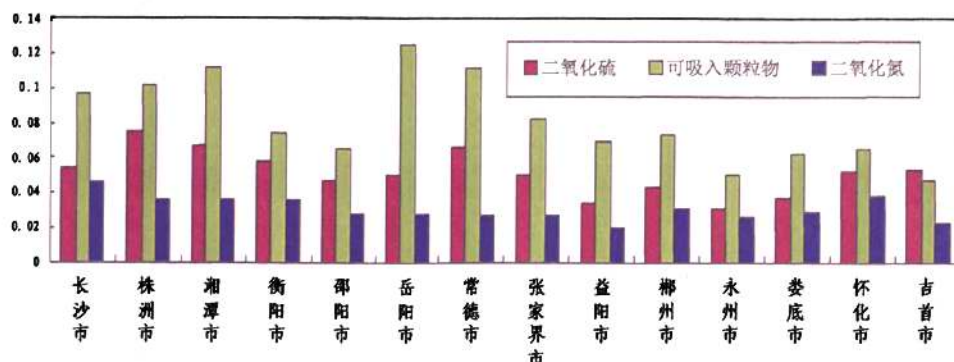


图 2-3-1 2008 年湖南城市空气污染物浓度年均值示意图^[4]

注: 空气污染物浓度年均值单位 mg/m^3

从图 2-3-1 可见，衡山周边的长沙、株洲、湘潭、衡阳等市为污染物浓度高值区。

图 2-3-2 给出 2008 年湖南城市环境空气综合污染指数示意图。

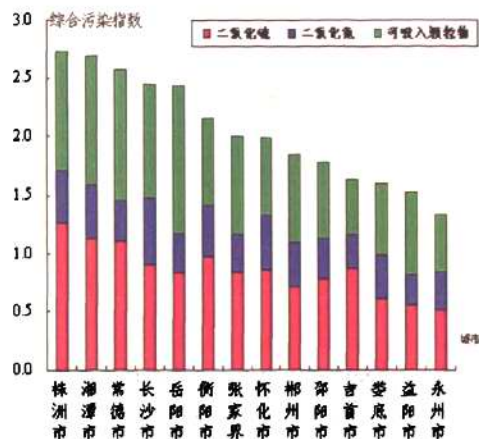


图 2-3-2 2008 年湖南城市环境空气综合污染指数示意图^[4]

从图 2-3-2 可见，衡山周边的长沙、株洲、湘潭、衡阳等市为城市环境空气综合污染指数高值区。株洲市环境空气质量为湖南省最差，湘潭、长沙、衡阳等城市综合污染指数居于前列。

综上所述，衡山周边的长沙、株洲、湘潭、衡阳等市空气污染比较严重，对衡山酸雨会有重要影响。

第3章 衡山降水一般特征

3.1 月降水量变化

根据 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山高山气象站酸雨常规观测资料, 图 3-1-1 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山各月的降水量变化。

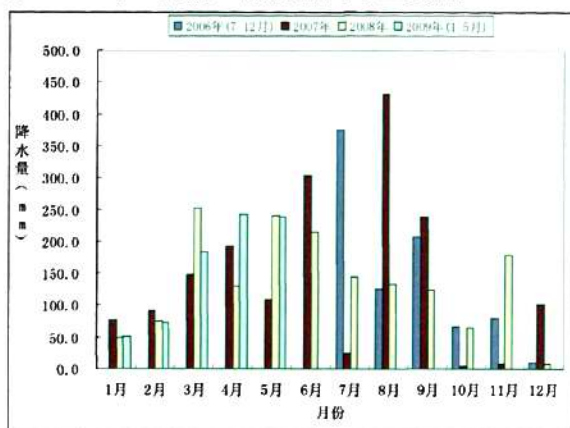


图 3-1-1 2006.7-2009.5 衡山各月的降水量变化

由图 3-1-1 可见, 衡山降水主要集中在 3-9 月, 不同年份、不同月的变化较大。2007 年 8 月降水量最大, 超过 400mm, 其次为 2006 年 7 月。

衡山降水除受季节影响外, 还受台风降水的直接影响。2006 年 7 月降水量大, 原因在于 2006 年 7 月湖南连续受到台风“碧利斯”、“格美”的影响。2007 年 8 月降水量大, 主要是因为台风“圣帕”登陆后, 在湖南逗留了 102 小时, 导致衡山降水量超过 400mm。

3.2 降水 pH 值及酸雨频率变化

表 3-2-1 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山年平均 pH 值、酸雨频率变化, 图 3-2-1 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山月平均 pH 值和酸雨频率变化。

表 3-2-1 2006.7-2009.5 衡山年平均 pH 值、酸雨频率变化

年份	pH 值	酸雨频率
2006 年下半年 (7-12 月)	4.21	90.00%
2007 年全年	4.44	88.68%
2007 年上半年 (1-6 月)	4.48	92.31%
2007 年下半年 (7-12 月)	4.40	82.93%
2008 年全年	3.88	93.50%
2008 年上半年 (1-6 月)	3.96	90.41%
2008 年下半年 (7-12 月)	3.80	98.00%
2009 年 1-5 月	4.26	95.00%

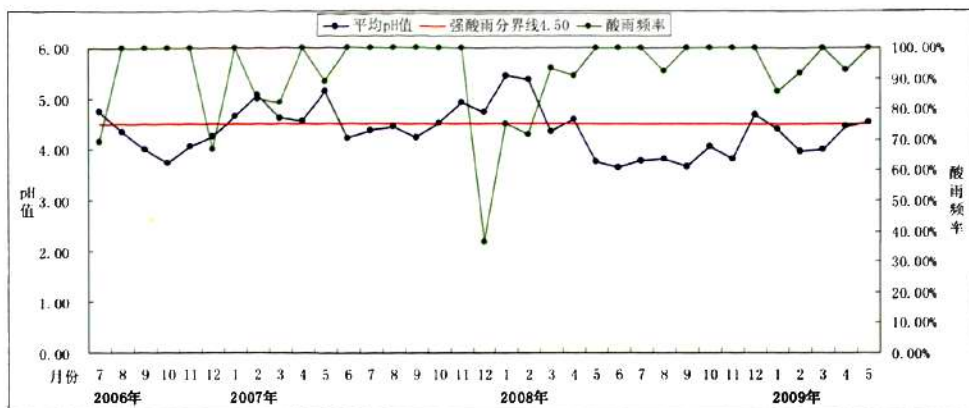


图 3-2-1 2006. 7-2009. 5 衡山月平均 pH 值和酸雨频率变化

从表 3-2-1 和图 3-2-1 可见：

(1) 衡山近三年来月平均 pH 值大部分在 4.0-5.0 之间，年平均 pH 值都小于 4.50，达到强酸雨的级别，2008 年 pH 值为 3.88，低于 4.00。三年酸雨频率都超过 90%，酸雨频率相当高。

(2) 从 pH 值变化来看，2007 年的上半年 pH 值为 4.48，下半年为 4.40，下半年的降水更酸。2008 年下半年的降水 pH 值 3.80 也略低于上半年的 3.96。2006 下半年的 pH 值和 2009 年前五个月的 pH 值相比，也要高些。总的看来，衡山降水的 pH 值下半年要比上半年低。

(3) 从酸雨频率变化来看，2007 年上半年酸雨频率为 92.31% 大于下半年的 82.93%，2008 年上半年的酸雨频率则低于下半年，酸雨频率在上、下半年的特征不如 pH 值明显。

(4) 从酸雨总体趋势来看，衡山降水年平均 pH 值在 4.0-4.5 间，酸雨频率超过 88%，酸雨比较严重。

图 3-2-2 和表 3-2-2 分别给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山各月酸雨频率和平均 pH 值变化。

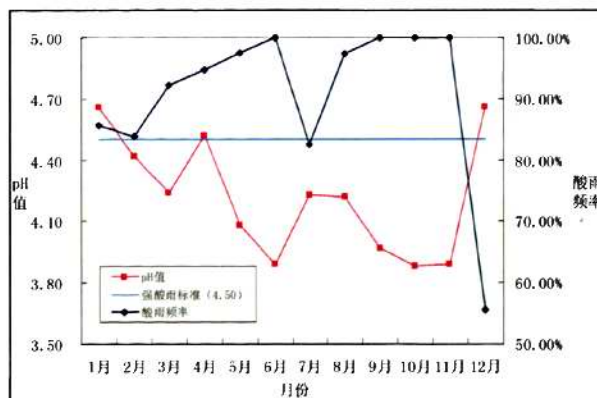


图 3-2-2 2006. 7-2009. 5 衡山各月酸雨频率和平均 pH 值变化

表 3-2-2 2006.7-2009.5 衡山各月酸雨频率和平均 pH 值变化

2006 年					2007 年			
月份	酸雨次数	降水数	酸雨频率	平均 pH 值	酸雨次数	降水数	酸雨频率	平均 pH 值
1 月	/	/	/	/	9	9	100.00%	4.65
2 月	/	/	/	/	10	12	83.33%	5.07
3 月	/	/	/	/	9	11	81.82%	4.62
4 月	/	/	/	/	13	13	100.00%	4.55
5 月	/	/	/	/	8	9	88.89%	5.14
6 月	/	/	/	/	11	11	100.00%	4.22
7 月	9	13	69.23%	4.74	2	2	100.00%	4.36
8 月	12	12	100.00%	4.34	12	12	100.00%	4.45
9 月	7	7	100.00%	4.00	10	10	100.00%	4.24
10 月	5	5	100.00%	3.74	4	4	100.00%	4.52
11 月	10	10	100.00%	4.07	2	2	100.00%	4.91
12 月	2	3	66.67%	4.26	4	11	36.36%	4.72
2008 年					2009 年			
月份	酸雨次数	降水数	酸雨频率	平均 pH 值	酸雨次数	降水数	酸雨频率	平均 pH 值
1 月	9	12	75.00%	5.45	6	7	85.71%	4.41
2 月	5	7	71.43%	5.37	11	12	91.67%	3.96
3 月	14	15	93.33%	4.34	13	13	100.00%	4.00
4 月	10	11	90.91%	4.60	13	14	92.86%	4.46
5 月	17	17	100.00%	3.76	14	14	100.00%	4.54
6 月	11	11	100.00%	3.64	/	/	/	/
7 月	8	8	100.00%	3.78	/	/	/	/
8 月	12	13	92.31%	3.82	/	/	/	/
9 月	9	9	100.00%	3.67	/	/	/	/
10 月	6	6	100.00%	4.06	/	/	/	/
11 月	10	10	100.00%	3.81	/	/	/	/
12 月	4	4	100.00%	4.69	/	/	/	/
2006.7-2009.5 各月份累计								
月份	酸雨次数	降水数	酸雨频率	平均 pH 值				
1 月	24	28	85.71%	4.66				
2 月	26	31	83.87%	4.42				
3 月	36	39	92.31%	4.24				
4 月	36	38	94.74%	4.52				
5 月	39	40	97.50%	4.08				
6 月	22	22	100.00%	3.89				
7 月	19	23	82.61%	4.23				
8 月	36	37	97.30%	4.22				
9 月	26	26	100.00%	3.97				
10 月	15	15	100.00%	3.88				
11 月	22	22	100.00%	3.89				
12 月	10	18	55.56%	4.66				

注：“/”表示没有数据

从图 3-2-2 和表 3-2-2 可看到:

(1) 衡山 12 个月有 9 个月的平均 pH 值低于 4.50, 也即是强酸雨水平, 只有 1、4、12 月降水没有这么酸, 其中 6、9-11 月四个月的平均 pH 值均小于 4.00。12 月的酸雨频率最低, 仅有 55.56%。有 8 个月的酸雨频率在 90% 之上, 6、9、10、11 月更达到 100%。

(2) 从降水平均 pH 值和酸雨频率综合来看, 衡山 6、9-11 月的酸雨是最严重的, 不仅酸雨频率最高, 而且 pH 值也很低。在所有 12 个月中, pH 值低于 4.00 的都集中在这四个月, 且月平均 pH 值均在 3.89 附近。

图 3-2-3 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山各月酸雨频率变化。

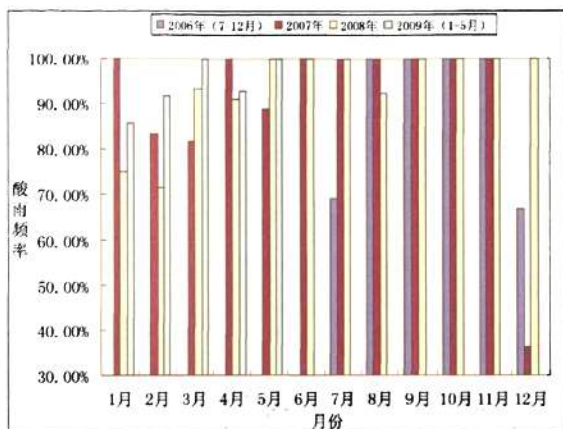


图 3-2-3 2006.7-2009.5 衡山各月酸雨频率变化

从图 3-2-3 可见, 衡山酸雨频率很高, 2007-2008 年各有 7 个月酸雨频率达 100%。由年内变化分析, 3、6、8-11 月的酸雨频率均超过了 90%。三年来 9-11 月都是最高, 5-8 月各有两年的酸雨频率为 100%。

图 3-2-4 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山各月降水 pH 值变化。

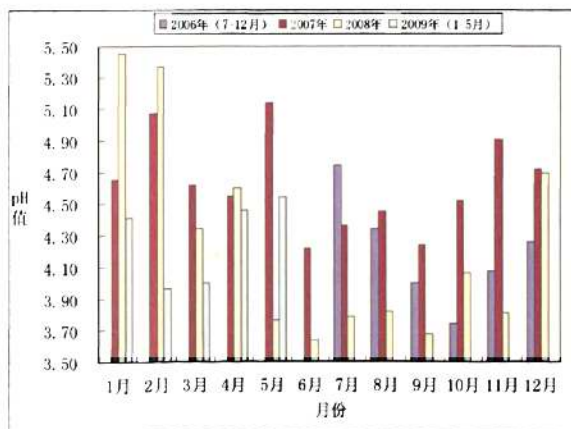


图 3-2-4 2006.7-2009.5 衡山各月降水 pH 值变化

从年际变化来分析, 2008 年有 6 个月的平均 pH 最低, 2008 年衡山酸雨是这

三年来最严重的；2009 年上半年酸雨污染也较严重。

综合图 3-2-3 及图 3-2-4 可见，6、9-11 月是衡山酸雨最严重的月份。

表 3-2-3 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山酸雨频率、强酸雨频率及降水平均 pH 值的季节变化，其中春季指 3-5 月，夏季指 6-8 月，秋季指 9-11 月，冬季指 12-2 月。

表 3-2-3 2006.7-2009.5 衡山酸雨频率、强酸雨频率及降水平均 pH 值的季节变化

季节	降水日数	酸雨日数	强酸雨日数	酸雨频率	强酸雨频率	降水平均 pH 值
春季	117	111	60	94.87%	51.28%	4.24
夏季	82	77	48	93.90%	58.54%	4.10
秋季	63	63	45	100.00%	71.43%	3.94
冬季	77	60	23	77.92%	29.87%	4.54

从表 3-2-3 可见：

(1) 秋季降水 pH 值在四季中最低，仅有 3.94，是唯一一个降水平均 pH 值小于 4.00 的季节，且秋季酸雨频率为 100%，强酸雨频率为 71.43%，秋季是衡山酸雨最严重的季节。

(2) 夏季降水 pH 值略低，春季酸雨频率略高；夏季比春季强酸雨高 7 个百分点；总体来看，夏季要比春季略严重。

(3) 冬季是四季中受酸雨污染最轻的，其降水平均 pH 值为 4.54，而其他三个季节的降水 pH 值都属于强酸雨级别（pH 值<4.50）；酸雨频率也低于 80%，强酸雨频率仅有 29.87%，三个指标同为四季中酸雨污染最轻的。

3.3 降水 K 值变化

大气降水的导电能力反映大气降水洁净程度，K 值是反映降水受环境物质污染的指标。大气中各种污染气体及颗粒物等可溶组分进入降水后，使降水的电导率 K 值增大，即导电能力增大。因此气象站常规酸雨观测中，主要借电导率（降水 K 值）来度量。K 值定义为通过电导测量池中待测溶液的电流密度与施加其上的电场强度之比。

图 3-3-1 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山各月平均 K 值变化。

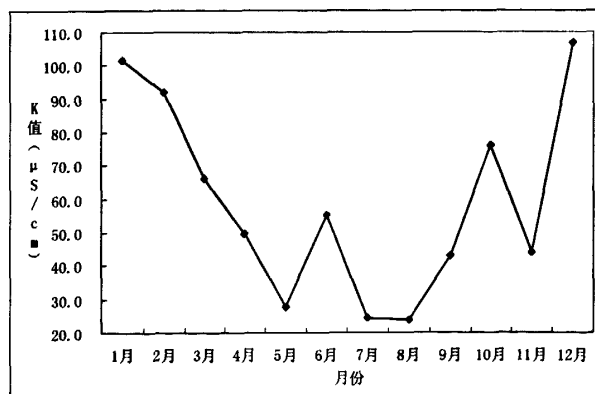


图 3-3-1 2006.7-2009.5 衡山各月平均 K 值变化

从图 3-3-1 可以看到, 5、7、8 月平均 K 值在 12 月中是最小的三个月, 其中 8 月达到最低值 $23.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。而 1、12 月则是平均 K 值最大的两个月, 每个月都超过了 $100.0 \mu\text{S}/\text{cm}$, 最高的 12 月达 $106.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。衡山夏季阶段的降水 K 值较低, 而冬季的降水 K 值较高。推测其原因, 可能是夏季衡山降水量较大, 相应离子浓度偏低, 而冬季降水量偏低, 降水中的离子浓度相应夏季来说就偏大。

图 3-3-2 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山逐月平均 K 值的变化。

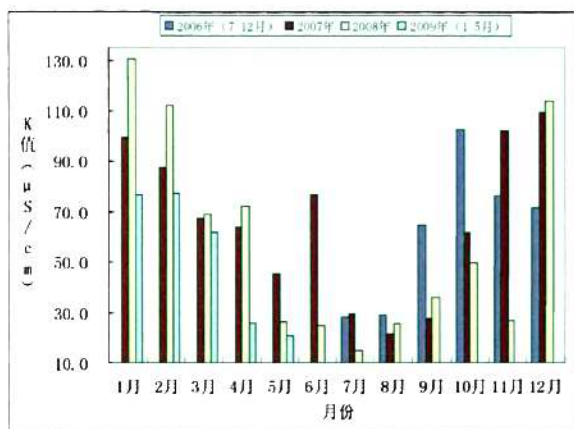


图 3-3-2 2006.7-2009.5 衡山逐月平均 K 值变化

从图 3-3-2 可见, 不同年份、不同月的平均 K 值变化较大。2009 年前 5 个月整体平均 K 值最低, 也就是电导率较低, 相对来说, 2009 年 1-5 月的空气还较清洁。

图 3-3-3 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日 K 值分布。

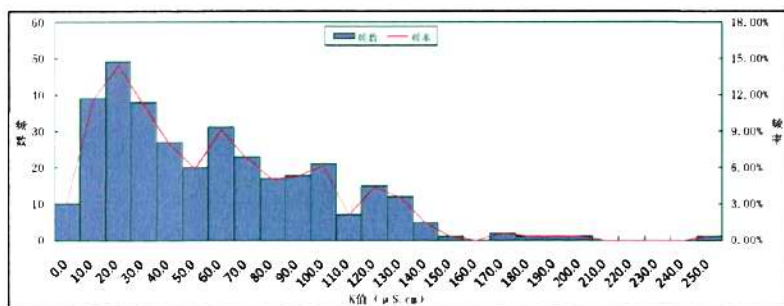


图 3-3-3 2006.7-2009.5 衡山降水日 K 值分布

从这三年的降水日分布可以看到, K 值的分布区间主要在 $10.0-110.0 \mu\text{S}/\text{cm}$, 其中最高频数的是在 $20.0-30.0$ 区间, 达到 49, 频率为 14.45%。此外 $10.0-20.0$ 、 $30.0-40.0$ 两个区间也很高, 都超过了 30 的频数, 频率分别为 11.50%、11.21%。 $60.0-70.0$ 区间降水日数的值也达到了 9.14%。 $70.0-110.0$ 区间内的四个小区间的降水日分布都接近 5.90%。之后的区间 K 值的频数总体越来越少, 值得注意的是 160.0 以上的高值也有出现, 最高甚至达到了 $253.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

图 3-3-4 给出 2009 年 1-5 月衡山降水日 K 值分布。

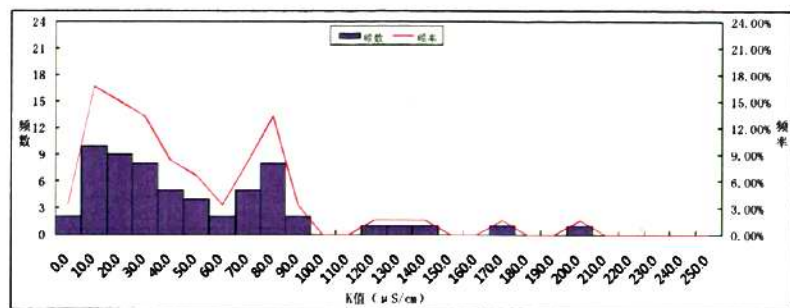


图 3-3-4 2009 年 1-5 月衡山降水日 K 值分布

2009 年 1-5 月，衡山仍然是 10.0-30.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 出现的降水日较多，其中只有 10.0-20.0 区间频数达到了 10，频率为 16.67%。80.0-90.0 区间频数和 30.0-40.0 一样，同为 13.33%。虽然只有 5 个月的数据，但是 2009 年大于 160.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的区间频数已经超过了 2007、2008 年，可见 2009 年 1-5 月衡山出现高离子浓度降水的日数较多。

3.4 pH 值、酸雨频率、K 值、降水量关系

3.4.1 月酸雨频率，平均 K 值和降水量

图 3-4-1 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山酸雨变化。

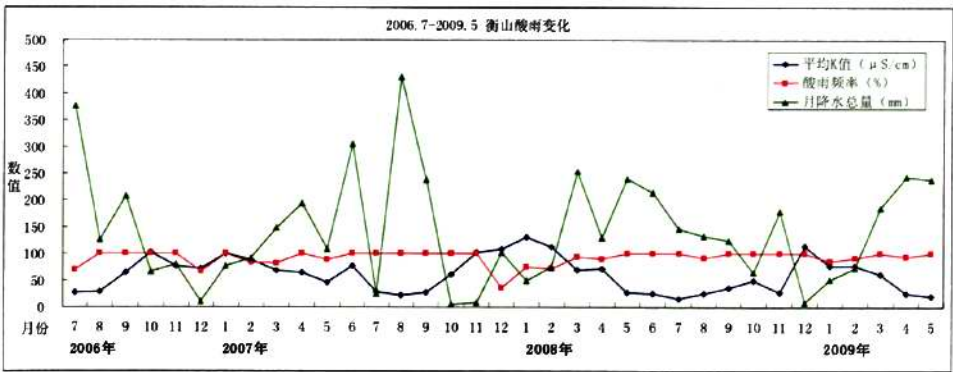


图 3-4-1 2006.7-2009.5 衡山酸雨变化

从图 3-4-1 中可看出：

- (1) 酸雨频率和平均 K 值以及月降水总量没有特别明显的关系。
- (2) 平均 K 值和月降水总量曲线则有一定的对应关系。平均 K 值和月降水总量可能存在反相关的关系。

3.4.2 pH 值和降水量

图3-4-2为2006年7月-2009年5月衡山降水 pH 值和降水量变化。

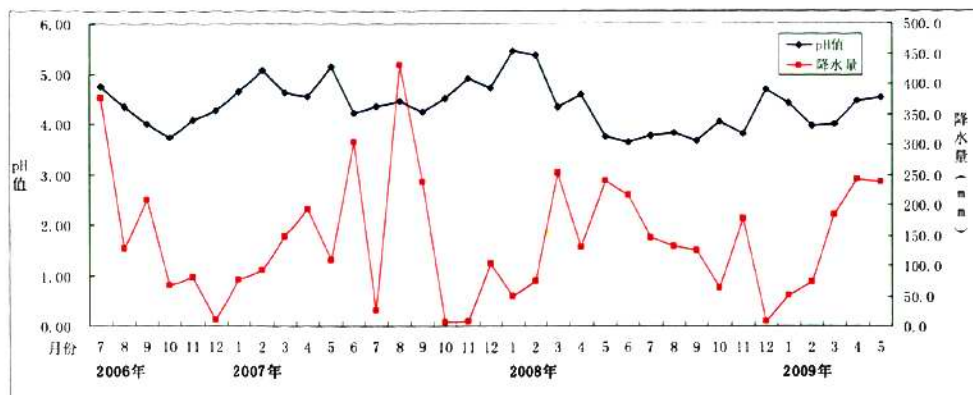


图 3-4-2 2006.7-2009.5 衡山降水 pH 值和降水量变化

从图 3-4-2 中可以看到，衡山的降水 pH 值和降水量的变化关系不是很明显。

图 3-4-3 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水月平均 pH 值和月降水量散点图。

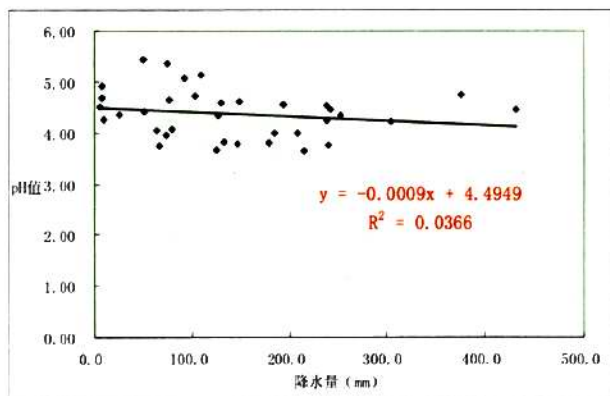


图 3-4-3 2006.7-2009.5 衡山降水月平均 pH 值和月降水量散点图

从图 3-4-3 中可见，衡山降水的月 pH 值和降水量两者的相关系数，仅有 -0.1912，属于微弱相关，所以相关性并不好。

图 3-4-4 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日平均 pH 值和日降水量散点图。

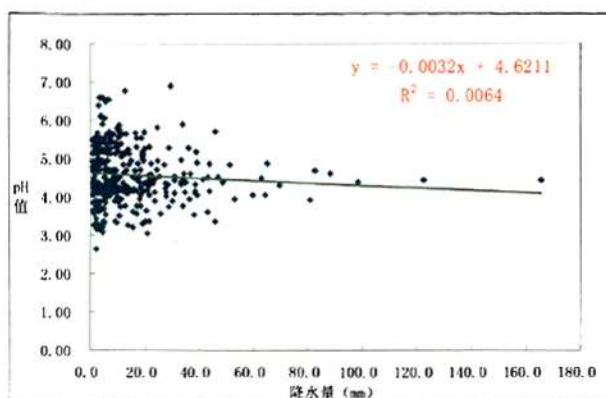


图 3-4-4 2006.7-2009.5 衡山降水日平均 pH 值和日降水量散点图

图 3-4-4 显示，两者的相关系数更小，仅有-0.0802，因此衡山降水的日平均 pH 值和降水量的关系同样不显著。

综合可见，衡山降水的平均 pH 值和降水量相关性不大。

3.4.3 降水量等级和 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率

为研究方便，将衡山每个降水日测得的 24 小时降水量分为五个等级：小雨（0.1-9.9mm）、中雨（10.0-24.9mm）、大雨（25.0-49.9mm）、暴雨（50.0-99.9mm）、大暴雨（100.0-199.9mm）。表 3-4-1 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水量等级和 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率统计。图 3-4-5 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水量等级和 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率关系图。

表 3-4-1 2006.7-2009.5 衡山降水量等级和 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率统计

降水量等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
降水日数	187	96	43	11	2
pH 值	4.10	4.06	4.12	4.27	4.44
酸雨频率	92.51%	88.54%	93.02%	100.00%	100.00%
强酸雨频率	50.27%	47.92%	62.79%	63.64%	100.00%

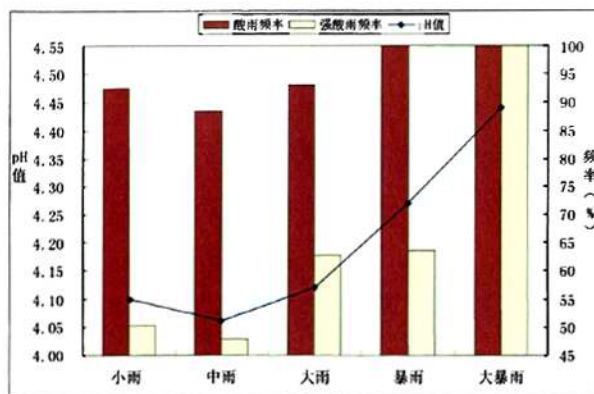


图 3-4-5 2006.7-2009.5 衡山降水量等级和 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率关系

从表 3-4-1 和图 3-4-5 可见：

(1) 中雨的 pH 值最小，仅有 4.06，其次是小雨，pH 值是 4.10，大雨、暴雨、大暴雨 pH 值为 4.12、4.27、4.44。不同等级的降水量对衡山 pH 值影响呈“U”型，但并不显著。

(2) 酸雨频率随着降水量的变化也呈“U”型变化。小雨酸雨频率为 92.51%，中雨的酸雨频率为 88.54%，大雨酸雨频率为 93.02%，暴雨、大暴雨酸雨频率为 100%。强酸雨频率和酸雨频率基本一致。

(3) 从 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率与降水量等级的关系可见，酸雨与降水量的变化呈“U”型变化。很可能是随着降水量的增大，降水对大气污染物的冲刷作用更强，有利于酸性物质在降水中的溶解，导致降水酸度的增高^[69]。

3.4.4 平均 k 值和降水量

图 3-4-6 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山月平均 K 值和月降水量散点图。

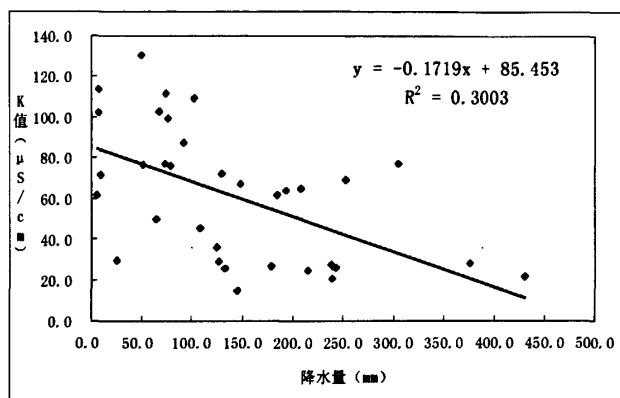


图 3-4-6 2006.7-2009.5 衡山月平均 K 值和月降水量散点图

图 3-4-6 显示，计算得到月降水量和平均 K 值的相关系数是 -0.54803，达到负的显著相关水平。究其原因，可能是由于降水量的增大，雨水中的离子浓度相对减少，电导率自然比较低，反之，降水量较小时，电导率通常相对大点。

3.4.5 平均 K 值和 pH 值

图 3-4-7 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水月平均 K 值和月平均 pH 值散点图。

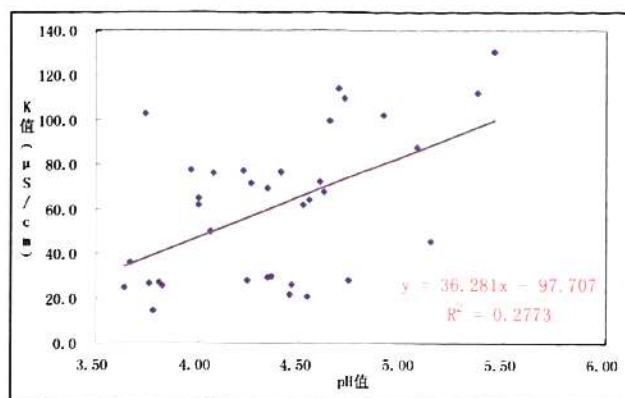


图 3-4-7 2006. 7-2009. 5 衡山降水月平均 K 值和月平均 pH 值散点图

图 3-4-7 表明, 平均 K 值和 pH 值有着正的线性关系, 相关系数 $r=0.526627$, 是显著相关的水平。即当降水的 pH 值较低时, 平均 K 值也较低, 反之, pH 值和平均 K 值都比较高。

平均 K 值反映的是大气降水的导电能力, 而导电能力又反映大气降水的洁净程度。比较令人意外的是, 衡山出现较强酸雨的时候, 导电率并不大, 其中的原因尚不清楚, 有待更深入的研究。

3.5 衡山降水日 pH 值分布特征

为研究衡山降水日 pH 值分布特征, 对衡山每次降水 pH 值的分布进行统计, 区间划分从 2.6-6.9, 以间隔 0.1 为一个区间, 即 2.60-2.70、2.70-2.80、2.80-2.90 ……然后统计每个区间的降水日数, 也即每个区间的降水日频数。

图 3-5-1 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日 pH 值分布频数图。

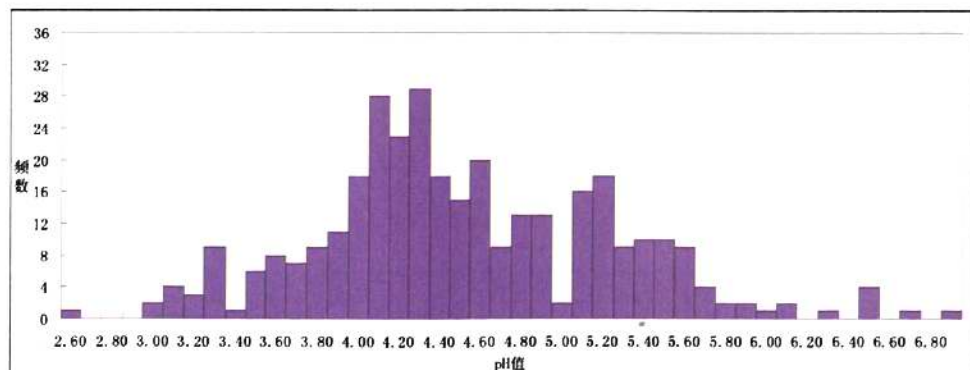


图 3-5-1 2006. 7-2009. 5 衡山降水日 pH 值分布频数图

从图 3-5-1 可见, 衡山降水日的 pH 值分布主要集中在两个范围, 分别是 3.50-5.00 范围、5.10-6.20 范围。前一范围分布的降水日总频数达到 227 日, 占总降水日频率为 66.96%。后一范围分布的降水日总数达到 83, 占 24.48%。两个区间的降水日分布频率之和超过了 90%, 其他范围分布的降水日较少。

在 3.50-5.00 这个范围中, 4.10-4.40 区间分布的降水日数形成一个高峰, 因为在 4.10-4.20、4.20-4.30、4.30-4.40 三个区间的降水日数分别有 28、23、29 日。而 4.30-4.40 是衡山降水日数分布最多的 pH 区间。另外, 4.60-4.70 区间降水日数为 20 日, 其他小区间频数都未超过 20。

在 5.10-6.20 范围, 有 5.10-5.20、5.20-5.30、5.40-5.50、5.50-5.60 四个小区间降水日数超过 10 天, 其中 5.20-5.30 在 5.10-6.20 范围中是最多降水日数的区间, 有 18 日。

图 3-5-2 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山 1-12 月降水日 pH 值分布的等值线图。

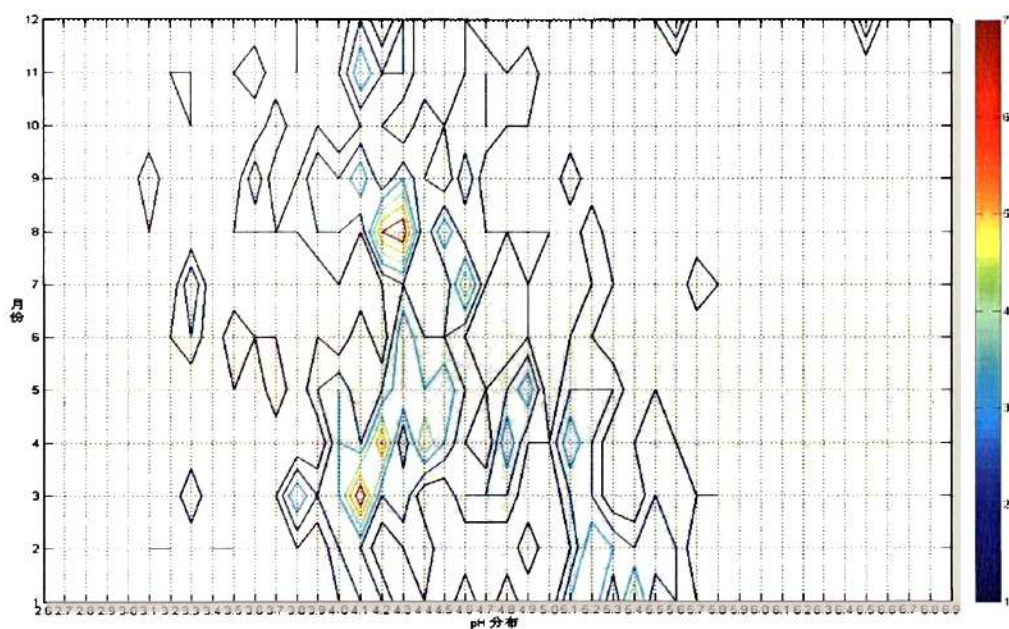


图 3-5-2 2006.7-2009.5 衡山 1-12 月降水日 pH 值分布等值线图

由图 3-5-2 发现, 3.50-5.00 范围、5.10-6.20 范围随着月份变化有一定的规律: 上半年(1-6 月)两个范围均有一定分布, 但是下半年(7-12 月)5.10-6.20 范围降水日频数明显比上半年少。在 4.10-4.20、4.30-4.40 区间可以明显看到有高值中心, 和降水日 pH 值分布频数图的特征相符。

表 3-5-1 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山 1-12 月在两个 pH 范围的降水日频率。

表 3-5-1 2006.7-2009.5 衡山 1-12 月在两个 pH 范围的降水日频率

月份	pH 3.50-5.00 范围降水日频率	pH 5.10-6.20 范围降水日频率
1 月	2.95%	5.31%
2 月	3.24%	4.72%
3 月	8.26%	2.65%
4 月	7.96%	2.65%
5 月	9.14%	2.36%
6 月	5.01%	0.59%
7 月	3.83%	1.77%
8 月	9.14%	1.18%
9 月	6.19%	0.59%
10 月	3.83%	0.29%
11 月	5.60%	0.00%
12 月	1.77%	2.36%
上半年 (1-6 月)	36.58%	18.29%
下半年 (7-12 月)	30.38%	6.19%
全年累计	66.96%	24.48%

从表 3-5-1 可见:

(1) 各月 pH 值分布规律有明显差异。3.50-5.00 范围分布的降水日中, 5 月、8 月贡献的日数最多, 其次是 3 月、4 月、9 月、11 月、6 月, 因此上、下半年的均有月份分布。5.10-6.20 范围的降水日频率前六位的月份依次是 1-5 月、12 月, 主要集中在上半年的月份。

(2) 上、下半年的分布规律和各月分布规律相对应。上半年 3.50-5.00 范围的降水日频率为 36.58%, 5.10-6.20 范围为 18.29%; 下半年在前一范围的降水日频率稍有下降, 但也超过了 30.00%, 而后一范围的降水日频率为 6.19%, 降低到上半年的 1/3 左右。所有上半年在 3.50-5.00、5.10-6.20 两个范围均有分布, 而下半年主要分布在 3.50-5.00 范围。

3.6 小结

衡山酸雨污染较严重。近 3 年衡山降水年平均 pH 值都小于 4.50, 属于强酸雨且酸雨频率超过 88%。下半年降水比上半年酸度更强, 秋季 (9-11 月) 酸雨频率、强酸雨频率最高, 是酸雨最严重的季节。此外, 衡山 6 月酸雨频率也较高, pH 值也很低。

衡山夏季降水 K 值较低, 冬季 K 值较高。K 值最高频率的区间是 20.0-30.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

衡山降水的平均 pH 值和降水量相关性不大。不同等级的降水量对衡山 pH 值影响不显著, 酸雨频率、强酸雨频率随降水量等级变化, 呈现 “U” 型分布。

降水月平均 K 值和降水量之间为显著的负相关, 且降水月平均 K 值和 pH 值呈显著的正相关。

衡山降水日 pH 值分布主要有 3.50-5.00、5.10-6.20 两个范围。上半年 (1-6 月) 在 3.50-5.00、5.10-6.20 两个范围均有分布, 下半年 (7-12 月) 主要分布在 3.50-5.00, 在 5.10-6.20 范围分布明显减少, 约只有上半年的 1/3。

第4章 衡山降水与风输送特征分析

4.1 衡山风向变化一般特征

4.1.1 衡山每日风频特征

在衡山南岳高山气象站的常规气象资料中，有每日逐时的风向记录。为更全面的了解衡山的风向特征，对衡山每日（包括降水日和非降水日）风频以及降水日的风频特点进行了比较分析。

图 4-1-1 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山每日风玫瑰图。

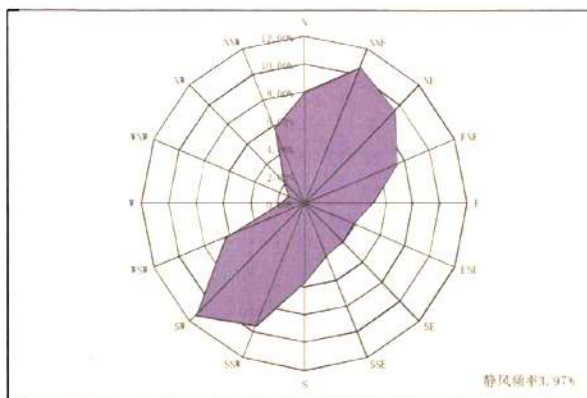


图 4-1-1 2006. 7-2009. 5 衡山每日风玫瑰图

从图 4-1-1 可见，衡山每日风向特征表现为：风向主要集中在两个方位，一个方位主要是 N、NNE、NE、ENE，其中 NNE 的风频为四个风向中最高值，其次是 NE、N 及 ENE。另一方位包括 SW、SSW、S，其中 SW 风频是所有风向中最高，SSW 出现频率也较高，仅次于 SW、NNE。由于 N、NNE、NE 靠近偏北方向，而 SW、SSW、S 靠近偏南方向，所以将这两个方位分别称为偏北和偏南。

表 4-1-1 为 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山每日（包括降水日和非降水日）风向频率统计。图 4-1-2 给出衡山 1-12 月和各风向风频的等值线图。

表 4-1-1 2006. 7-2009. 5 衡山每日风向频率统计

月份	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	C
1	5.35%	6.99%	24.73%	15.32%	10.48%	1.88%	3.49%	1.61%	3.23%	2.15%	1.88%	5.65%	8.87%	3.49%	0.54%	1.34%	2.96%
2	2.23%	5.91%	8.47%	8.14%	5.80%	4.79%	3.12%	2.12%	2.12%	2.90%	5.02%	12.49%	22.30%	8.03%	1.45%	1.00%	4.12%
3	2.15%	10.75%	11.29%	8.33%	7.26%	3.49%	2.69%	3.23%	3.23%	2.42%	6.18%	15.32%	12.63%	6.45%	1.88%	1.08%	1.61%
4	2.46%	7.22%	8.92%	6.66%	7.27%	6.00%	4.44%	3.21%	3.64%	4.63%	8.45%	11.28%	11.80%	4.49%	1.61%	1.84%	6.09%
5	2.83%	7.99%	7.68%	5.39%	4.76%	3.46%	3.37%	3.82%	2.51%	4.40%	9.16%	13.29%	16.02%	8.26%	4.35%	2.47%	0.27%
6	4.68%	5.65%	6.28%	6.49%	7.26%	2.93%	3.35%	2.23%	2.79%	5.58%	6.70%	11.72%	13.54%	14.17%	2.44%	2.51%	1.67%
7	1.70%	2.69%	1.57%	1.70%	2.20%	2.28%	1.84%	2.11%	2.33%	4.48%	10.04%	20.16%	24.78%	15.82%	3.41%	0.90%	2.02%
8	1.03%	3.14%	4.66%	5.92%	9.33%	9.69%	6.32%	4.13%	4.35%	4.26%	6.37%	12.29%	13.90%	6.23%	1.61%	1.21%	5.56%
9	1.85%	6.02%	9.96%	16.40%	16.63%	15.19%	8.06%	5.09%	3.15%	2.69%	3.01%	2.64%	1.81%	1.95%	0.88%	0.88%	3.80%
10	2.06%	6.77%	10.89%	18.06%	13.04%	11.16%	7.03%	4.61%	3.05%	2.60%	1.84%	3.23%	3.72%	2.06%	0.63%	1.21%	8.06%
11	1.71%	7.78%	10.60%	17.27%	15.32%	8.47%	4.95%	3.98%	4.35%	4.63%	2.36%	3.66%	5.56%	2.59%	0.83%	0.69%	5.23%
12	0.82%	2.45%	7.35%	24.18%	10.61%	9.08%	6.84%	7.65%	15.20%	5.82%	2.04%	2.45%	2.65%	0.82%	0.41%	0.31%	1.33%
春 (3-5)	2.61%	7.86%	8.52%	6.19%	6.08%	4.60%	3.79%	3.50%	3.07%	4.35%	8.61%	12.55%	13.86%	6.42%	2.92%	2.08%	2.99%
夏 (6-8)	2.17%	3.58%	3.88%	4.46%	6.12%	5.21%	3.90%	2.90%	3.21%	4.66%	7.84%	15.13%	17.93%	11.79%	2.49%	1.41%	3.27%
秋 (9-11)	1.86%	6.85%	10.49%	17.25%	14.97%	11.60%	6.69%	4.56%	3.51%	3.30%	2.40%	3.18%	3.69%	2.20%	0.78%	0.93%	5.72%
冬 (12-2)	2.13%	4.58%	10.67%	16.32%	8.67%	6.18%	4.80%	4.45%	8.00%	4.05%	3.20%	6.98%	11.52%	4.14%	0.84%	0.76%	2.71%
整个时段	2.17%	5.84%	8.03%	10.57%	9.40%	7.34%	4.92%	3.79%	3.83%	4.05%	5.65%	9.52%	11.39%	6.36%	1.83%	1.33%	3.97%

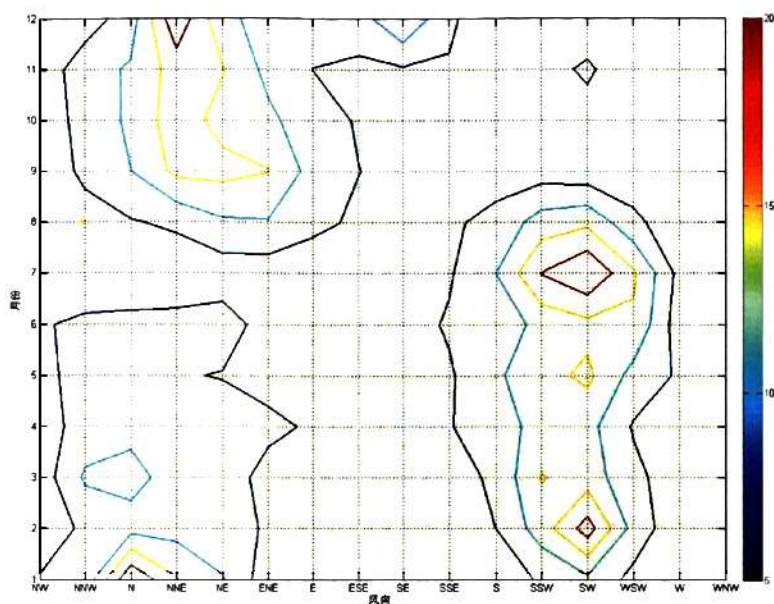


图 4-1-2 2006.7-2009.5 衡山 1-12 月和各风向风频的等值线图

从表 4-1-1 和图 4-1-2 得到：衡山春季（3-5 月）以偏南的 SW、SSW、S 为主导风向，同时偏北的 N、NNE、NE 风频都大于 7%。夏季（6-8 月）偏北风向的频率均处于较低水平，偏南的 SW、SSW、S 风频达到四季的较高水平，且 8 月 NE、ENE、E 风频明显增加，该月可看作风向转变的过渡阶段。秋季（9-11 月）偏北的 N、NNE 和 NE 风频超过 10%，偏南的 SW、SSW、S 降到较低值，此外 ENE 风频处于较高水平。冬季（12-2 月）偏北的 N、NNE、NE 风频居于前列，偏南的 SW、S 风频回升，SW 风频甚至超过 10%。

4.1.2 衡山降水日风频特征

图 4-1-3 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日风玫瑰图、表 4-1-2 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日风向频率统计。

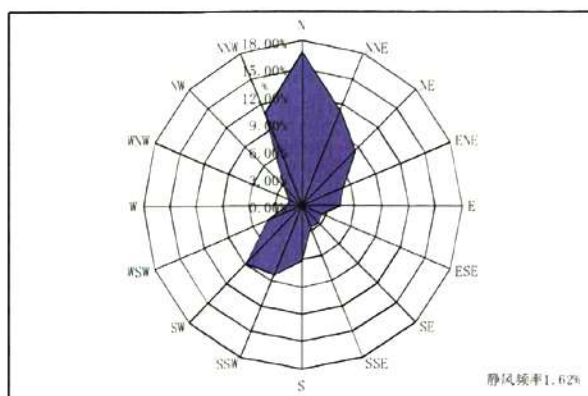


图 4-1-3 2006.7-2009.5 衡山降水日风玫瑰图

表 4-1-2 2006.7-2009.5 衡山降水日风向频率统计

月份	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	C
1	3.57%	8.93%	40.18%	17.86%	11.61%	3.57%	1.79%	0.89%	1.79%	0.89%	0.89%	2.68%	1.79%	1.79%	0.89%	0.00%	0.89%
2	2.42%	11.29%	18.55%	11.29%	7.26%	3.23%	3.23%	0.00%	3.23%	2.42%	5.65%	7.26%	16.13%	1.61%	1.61%	4.03%	0.81%
3	4.49%	21.15%	21.15%	8.33%	5.13%	1.92%	3.85%	1.92%	1.92%	1.92%	5.77%	8.97%	7.05%	4.49%	0.64%	0.64%	0.64%
4	4.61%	11.18%	17.11%	5.92%	7.89%	1.32%	3.95%	0.66%	1.97%	1.97%	11.18%	10.53%	7.89%	4.61%	0.66%	3.95%	4.61%
5	5.63%	12.50%	13.13%	4.38%	6.88%	2.50%	2.50%	5.00%	2.50%	4.38%	7.50%	13.13%	11.25%	4.38%	2.50%	1.88%	0.00%
6	2.27%	6.82%	7.95%	9.09%	6.82%	3.41%	6.82%	3.41%	2.27%	2.27%	7.95%	12.50%	11.36%	11.36%	3.41%	2.27%	0.00%
7	3.26%	5.43%	4.35%	3.26%	1.09%	2.17%	5.43%	4.35%	2.17%	6.52%	7.61%	17.39%	20.65%	11.96%	1.09%	0.00%	3.26%
8	0.00%	2.70%	7.43%	6.76%	14.19%	11.49%	5.41%	2.03%	4.73%	2.03%	9.46%	10.14%	12.84%	4.73%	3.38%	0.00%	2.70%
9	0.96%	6.73%	21.15%	18.27%	12.50%	14.42%	10.58%	1.92%	1.92%	0.96%	1.92%	2.88%	1.92%	0.96%	0.96%	0.96%	0.96%
10	0.00%	20.00%	13.33%	35.00%	5.00%	3.33%	1.67%	1.67%	3.33%	6.67%	0.00%	0.00%	3.33%	1.67%	1.67%	1.67%	1.67%
11	1.14%	18.18%	20.45%	9.09%	7.95%	5.68%	4.55%	2.27%	2.27%	1.14%	5.68%	4.55%	7.95%	2.27%	2.27%	2.27%	2.27%
12	4.17%	8.33%	15.28%	29.17%	15.28%	8.33%	1.39%	6.94%	4.17%	1.39%	1.39%	0.00%	0.00%	1.39%	1.39%	0.00%	1.39%
春 (3-5)	4.91%	14.96%	17.09%	6.20%	6.62%	1.92%	3.42%	2.56%	2.14%	2.78%	8.12%	10.90%	8.76%	4.49%	1.28%	2.14%	1.71%
夏 (6-8)	1.52%	4.57%	6.71%	6.40%	8.54%	6.71%	5.79%	3.05%	3.35%	3.35%	8.54%	12.80%	14.63%	8.54%	2.74%	0.61%	2.13%
秋 (9-11)	0.79%	13.89%	19.05%	19.05%	9.13%	8.73%	6.35%	1.98%	2.38%	2.38%	2.78%	2.78%	4.37%	1.59%	1.59%	1.59%	1.59%
冬 (12-2)	3.25%	9.74%	25.65%	17.86%	10.71%	4.55%	2.27%	1.95%	2.92%	1.62%	2.92%	3.90%	7.14%	1.62%	1.30%	1.62%	0.97%
整个时段	2.95%	11.06%	16.89%	11.28%	8.48%	4.94%	4.28%	2.43%	2.65%	2.58%	6.05%	8.26%	9.00%	4.28%	1.70%	1.55%	1.62%

从图 4-1-3 和表 4-1-2 中可见, 衡山降水日风频呈现的特征: 降水日风向同样集中在偏北和偏南两个方位。偏北的风向主要包括 N、NE, 其中 N 风风频最高, 达 16.89%, NNE、NNW 风频大于 10%。偏南的风向主要包括 SW、SSW、S, 三者的风频均高于 6%。

和每日风频特征比较, 偏北方位每日风频最高的是 NNE 风, 而降水日是 N 风, 且降水日 NNW 风频较高。偏南方位两者的特征则较类似。此外, 每日风频中 ENE 风的比例也明显高于降水日。

图 4-1-4 为衡山 1-12 月和降水日各风向风频的等值线图。

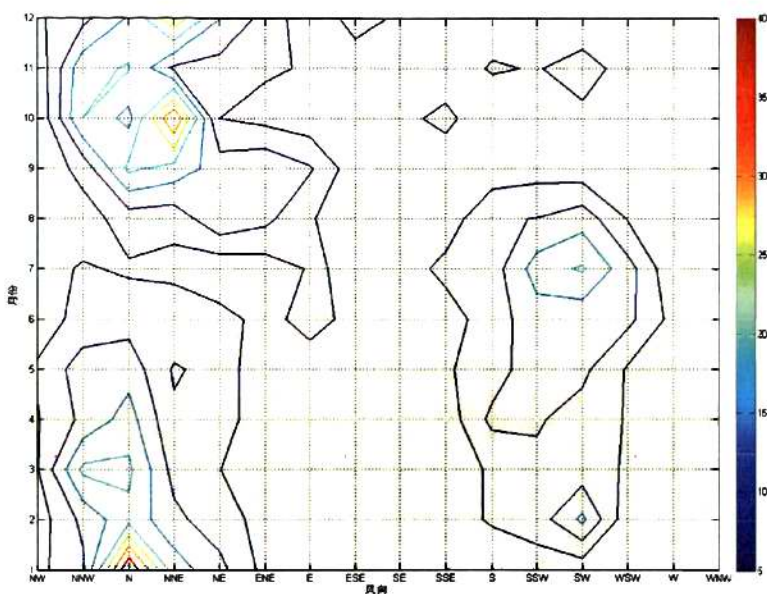


图 4-1-4 2006. 7-2009. 5 衡山 1-12 月和降水日各风向风频的等值线图

衡山降水日四季分布特征: 春季 (3-5 月) 主要是偏北的 N、NNW 风向为主, 4、5 月偏南的 SSW、SW、S 风频均较高。夏季 (6-8 月) 主导风向则为偏南方位的 SW、SSW, 两者风频都是四季中的最高值, 偏北的 NNW、N、NNE 风向全降到四季里最低值。秋季 (9-11 月) 偏北的 N、NNE、NNW、NE 再次占据主导位置, 偏南方位风向的风频则降到较低水平, 9 月 ENE、NE 风频增加, 因此 9 月是风向转化的过渡期。冬季 (12-2 月) 偏北方位的 N、NNE、NE、NNW 成为主导风向, SSW、SW 风频略有回升。

综合每日 (降水日和非降水日) 风频和降水日风频的特点, 可发现两者风频存在共同的特点——风频较高的风向主要集中在两个方位: 偏北和偏南。

(1) 每日风频和降水日风频中, 偏北方位 N、NNE、NE 都普遍较高, 不同的是每日风频 ENE 风向更多, 而降水日中偏北方位的 NNW 较多。偏南方位, 每日和降水日主要为 SW、SSW、S。

(2) 每日风频中, 春季风向主要集中在偏南方位的 SW、SSW、S, 而降水日风频, 春季风向在偏北方位的 N、NNW 和偏南方位的 SSW 风频都较高; 夏季每日和降水日的风向都集中在偏南方位; 秋季和冬季, 每日风频和降水日风频特点

同样相似，风向主要集中在偏北方位。

(3) 如偏北方位除 NNW、N、NNE、NE 外，再加上 NW，共 5 个风向。偏南方位除 SW、SSW、S，加上 SE、SSE，同样为 5 个风向。则每日风频中，偏北和偏南方位 5 个风向的风频之和接近，但降水日偏北方位的风频比偏南多一倍。

4.2 降水 pH 值与风向关系

为了探索降水 pH 值和风向之间可能的关系，将衡山每个降水日的降水 pH 进行归类，pH 值从 2.60-6.90，以间隔 0.10 为一个区间，例如 2.60-2.70、2.70-2.80、2.80-2.90 ……然后统计各 pH 区间内，该降水日降水时段出现的风向的次数。

图 4-2-1 为 2006 年 7 月-2009.5 衡山降水时段风向次数和 pH 值分布等值线图，表 4-2-1 为 2006 年 7 月-2009.5 衡山降水时段风向次数和 pH 值分布。

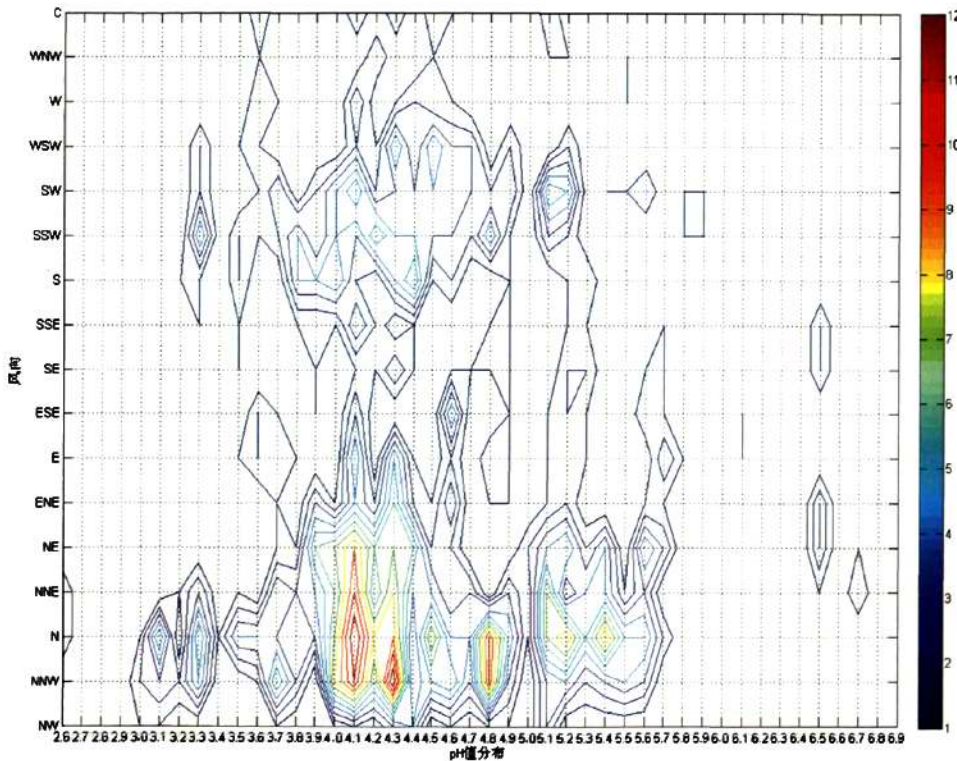


图 4-2-1 2006. 7-2009. 5 衡山降水时段风向次数和 pH 值分布等值线图

表 4-2-1 2006. 7-2009. 5 衡山降水时段风向次数和 pH 值分布

风向 pH 分布	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	C
2.60-2.70	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.70-2.80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.80-2.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.90-3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.00-3.10	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.10-3.20	1	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.20-3.30	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
3.30-3.40	0	5	6	3	0	0	0	1	0	1	1	5	2	2	0	0	0
3.40-3.50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.50-3.60	1	0	4	1	0	0	1	0	1	1	2	2	0	1	0	0	0
3.60-3.70	0	1	4	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1	1	2	1	2
3.70-3.80	1	6	3	4	1	1	1	1	0	0	0	2	3	0	1	0	0
3.80-3.90	0	3	2	3	1	0	1	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0
3.90-4.00	0	0	3	4	6	3	0	1	1	1	4	2	2	0	0	0	0
4.00-4.10	1	8	7	6	7	1	0	0	0	1	5	4	4	0	0	0	0
4.10-4.20	2	11	12	10	9	4	5	3	1	4	2	3	6	2	3	0	2
4.20-4.30	1	6	8	5	6	2	0	0	1	2	1	6	2	1	0	2	0
4.30-4.40	3	12	9	8	7	6	5	0	3	0	4	4	3	5	1	0	2
4.40-4.50	4	3	3	4	6	2	1	0	1	1	6	4	3	2	2	0	0
4.50-4.60	0	5	8	4	2	1	0	0	0	0	1	3	4	5	1	1	2
4.60-4.70	1	6	4	2	2	4	2	5	1	0	2	3	3	3	1	0	1
4.70-4.80	0	3	4	3	0	0	0	0	1	0	0	2	3	3	0	0	0

气象条件对衡山春季酸雨过程影响研究

风[向] pH分布																	C
	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	
4.80-4.90	1	10	10	0	0	1	2	0	1	1	0	5	2	0	0	0	0
4.90-5.00	1	3	5	3	0	1	1	1	1	1	1	1	3	2	0	1	0
5.00-5.10	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.10-5.20	3	3	7	7	4	1	1	1	0	0	0	3	6	0	0	1	2
5.20-5.30	0	4	9	2	5	2	1	2	2	1	1	2	5	2	0	1	0
5.30-5.40	0	2	5	4	2	0	1	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0
5.40-5.50	0	3	9	4	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5.50-5.60	0	4	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
5.60-5.70	0	3	5	3	5	1	0	2	1	0	1	0	2	0	0	0	0
5.70-5.80	0	0	2	0	3	1	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5.80-5.90	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
5.90-6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
6.00-6.10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.10-6.20	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.20-6.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.30-6.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6.40-6.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.50-6.60	0	0	0	1	3	3	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
6.60-6.70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.70-6.80	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.80-6.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.90-7.00	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
累计	21	110	147	89	77	34	29	22	21	19	38	59	58	30	14	8	12

从图 4-2-1 和表 4-2-1 可见, 在 2.60-7.00 的 pH 值范围中, N 风出现次数最多, 一共出现了 147 次; 其次是 NNW 风, 也过百, 达到 110 次; 之后是 NNE、NE, 分别为 89、77 次; SSW、SW 则相差不多, 前者是 59 次, 后者 58 次; 而 S、WSW、ENE 也超过了 30。同样可见, 降水时段的风向也是集中在偏北和偏南两个方位的风向。下面再对各区间具体分析:

在 2.60-3.50 范围, 偏北的 NNW、N 出现次数都超过 10 次, 其他风向的次数均不超过 10 次。

两个主要范围中的 3.50-5.00 范围, 偏北的 NNW、N、NNE、NE 次数居前列, 偏南的 SSW、SW、S 出现次数仅次于偏北方位, 其他风向出现次数都低于 30。

在另一个范围 5.10-6.20 之间, 偏北的 N 风次数最高, 而 NNW、NNE、NE 三个风向出现的次数均大于 20。其次是偏南 SW 的 17 次。

在 6.20-7.00 范围, NE 次数最多, 可仅有 4 次, 所以 6.20-7.00 范围分布的各个风向的次数偏少。

由此综合后得知, 衡山降水时段和之前分析的降水日风频特点类似, 风向集中在偏北和偏南两个方位。其中偏北方位出现 N、NNW、NNE、NE 风向的情况较多, 特别是 N、NNW、NE 三者的风频都超过了 10.00%。此外, 偏南的 SSW、SW 出现次数接近 60, 和 N、NNW 比较, 它们风频偏低, 不过与 NNE、NE 出现频率接近。

4.3 酸雨与主导风关系

从衡山降水 pH 值和 pH 风向的结论中可知, 衡山酸雨形成常和 N、NNW、NNE、NE 等偏北风向以及 SSW、SW、S 等偏南的风向联系密切, 为了方便讨论衡山酸雨出现时的输送特征, 本文定义偏北、偏南、偏东、偏西 4 大风向, 其中偏北风指 NW、NNW、N、NNE、NE 风; 偏东风指 ENE、E、ESE 风; 偏南风指 SE、SSE、S、SSW、SW 风; 偏西风指 WSW、W、WNW 风。衡山酸雨形成过程中大多是偏北风或偏南风主导, 偏东风、偏西风较少出现, 特别是偏西风, 出现情况很少。

图 4-3-1 给出本文定义的偏北、偏南、偏东、偏西 4 大风向的划分范围。

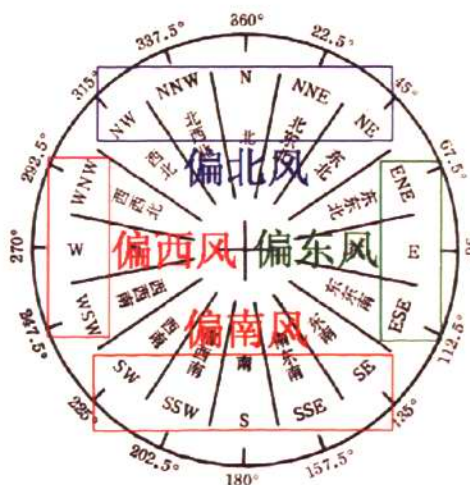


图 4-3-1 4 大风向的划分范围

把2006年9月-2009年5月衡山降水日每日主导风向按照定义分为偏东风、偏南风、偏西风、偏北风四种，并加上静风，然后统计四种风向及静风的酸雨频率和强酸雨频率，并计算它们的出现频率和相应降水 pH 值，其中主导风向定义是每个降水日 24 时次风向记录中出现次数最多的方向。

图 4-3-2 给出了 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山降水日主导风向出现频率及降水平均 pH 值。

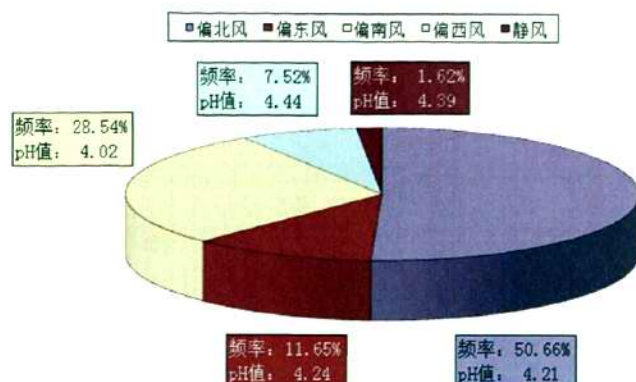


图 4-3-2 2006. 7-2009. 5 衡山降水日主导风向出现频率及降水平均 pH 值

从图 4-3-2 可见：

(1) 降水日主导风向出现频率方面，偏北风和偏南风成为主导风向出现频率最高的两个风向，偏北风主导的概率超过一半，而偏南风主导的降水日也占 28.54%。第三位是偏东风，出现频率也超过了 10.00%，而西风主导的降水日不到 8.00%。静风主导的降水日则最少，仅有 1.62%。

(2) 降水平均 pH 值方面，四种风向及静风主导的气象条件下，降水酸度都达到了强酸雨级别。偏南风主导下的降水 pH 值是最低的 4.02；偏北风的降水也较酸，仅有 4.21；和偏北风接近的是偏东风，降水 pH 值为 4.24；静风的降水 pH 值略高，达到 4.39；降水 pH 最高的是偏西风主导的降水日，其值是 4.44。

(3) 综合主导风向出现频率和降水 pH 值两方面特点发现，衡山酸雨过程常与偏北风、偏南风相联系，因为这两种风向在降水日成为主导风向的频率远高于其他风向，降水平均 pH 值还比其他风向低。所以研究衡山酸雨过程应重点考虑偏北风或偏南风的污染物输送的影响。

4.4 小结

综合每日（降水日和非降水日）风频和降水日风频的特点，可发现两者风频存在共同的特点——风频较高的风向主要集中在两个方位：偏北和偏南。

每日风频和降水日风频中，偏北方位 N、NNE、NE 都普遍较高，不同的是每日风频 ENE 风向更多，而降水日中偏北方位的 NNW 较多。偏南方位，每日和降水日主要为 SW、SSW、S。

每日风频中，春季风向主要集中在偏南方位的 SW、SSW、S，而降水日风频，春季偏北方位的 N、NNW 和偏南方位的 SSW 风频都较高；夏季每日和降水日的风

向都集中在偏南方位；秋季和冬季，每日风频和降水日风频特点同样相似，风向主要集中在偏北方位。

如偏北方位除 NNW、N、NNE、NE 外，再加上 NW，共 5 个风向。偏南方位除 SW、SSW、S，加上 SE、SSE，同样为 5 个风向。则每日风频中，偏北和偏南方位 5 个风向的风频之和接近，但降水日偏北方位的风频比偏南多一倍。

衡山降水时段和降水日风频特点类似，风向集中在偏北和偏南两个方位。其中偏北方位出现 N、NNW、NNE、NE 风向的情况较多，特别是 N、NNW、NE 三者的风频都超过了 10.00%。此外，偏南的 SSW、SW 出现次数接近 60，和 N、NNW 比较，它们风频偏低，不过与 NNE、NE 出现频率接近。

定义四种风向——偏东风、偏南风、偏西风、偏北风，统计降水日这四种风向成为主导风向的频率和降水 pH 值后发现，衡山酸雨过程常与偏北风、偏南风相联系，因为这两种风向在降水日成为主导风向的频率远高于其他风向，降水平均 pH 值还比其他风向低。所以研究衡山酸雨过程应重点考虑偏北风或偏南风污染物输送的影响。

第5章 气象条件对衡山春季酸雨过程影响典型个例剖析

5.1 衡山春季酸雨特征

表 5-1-1 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山春季各种主导风向酸雨统计, 图 5-1-1 给出 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山春季主导风向出现频率及降水平均 pH 值。

表 5-1-1 2006. 7-2009. 5 衡山春季降水日各种主导风向酸雨统计

风向	降水日数	酸雨日数	强酸雨日数	酸雨频率	强酸雨频率
静风	1	1	1	100.00%	100.00%
偏东风	6	6	3	100.00%	50.00%
偏南风	56	53	33	94.64%	58.93%
偏西风	7	5	2	71.43%	28.57%
偏北风	47	46	21	97.87%	44.68%

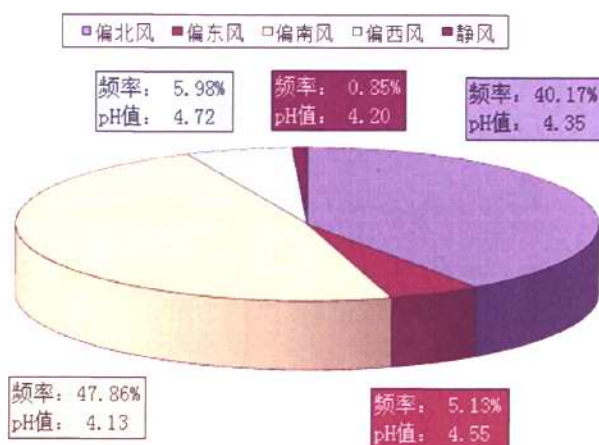


图 5-1-1 2006. 7-2009. 5 衡山春季降水日主导风向出现频率及降水平均 pH 值

从表 5-1-1 和图 5-1-1 发现：

(1) 近三年衡山春季降水偏南风出现的频率最高，高达 47.86%；其次是偏北风，频率达 40.17%；偏西风、偏东风的频率较低，分别为 5.98%，5.13%；而静风主导的日子仅 1 天，频率为 0.85%。

(2) 衡山春季偏南风主导的降水日 pH 值最低，仅有 4.13；其次是静风，降水 pH 值为 4.20；偏北风 pH 是 4.21；偏东风、偏西风降水 pH 值均高于 4.50，分别是 4.55、4.72，未达到强酸雨标准。

(3) 偏北风和偏南风酸雨频率和强酸雨频率都超过了 90%和 40%。其次是偏西风。虽然偏东风和静风的酸雨、强酸雨频率也较高，不过样本数偏少。

综上所述，2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山春季酸雨过程伴有偏南或偏北风，偏西风酸雨污染相对偏南、偏北风更轻，而偏东风、静风由于样本数不多，酸雨污染虽较重，不过代表性可能不强。

表 5-1-2 给出 2009 年春季衡山各种主导风向酸雨统计,图 5-1-2 给出 2009 年春季衡山主导风向出现频率及降水平均 pH 值。

表 5-1-2 2009 年春季衡山降水日各种主导风向酸雨统计

风向	降水日数	酸雨日数	强酸雨日数	酸雨频率	强酸雨频率
静风	0	/	/	/	/
偏东风	3	3	1	100.00%	33.33%
偏南风	22	22	15	100.00%	68.18%
偏西风	0	/	/	/	/
偏北风	16	15	11	93.75%	68.75%

注：“/”表示由于降水日数为 0，统计无意义

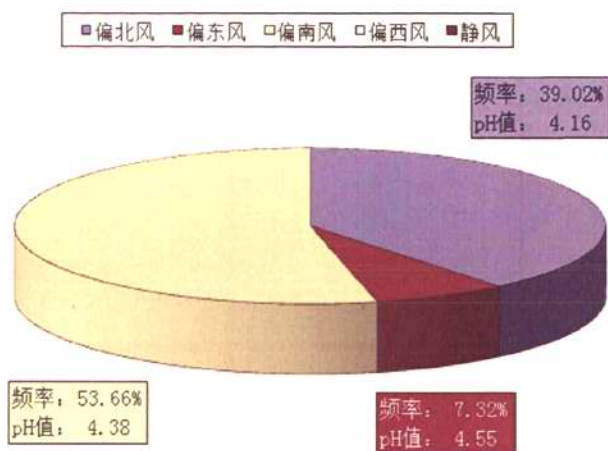


图 5-1-2 2009 年春季衡山降水日主导风向出现频率及降水平均 pH 值

在表 5-1-2 和图 5-1-2 可见：

(1) 2009 年春季衡山观测期间偏南风出现频率最高，有 53.66%；其次是偏北风，频率是 39.02%；偏东风则比较小，为 7.32%。没有出现过偏西风、静风为主导风向的降水日。

(2) 偏北风、偏南风时酸度较强，偏东风酸雨污染情况较轻。偏北风 pH 值为 4.16，偏南风为 4.38，偏东风为 4.55，未达到强酸雨级别。

(3) 偏南风、偏北风酸雨频率和强酸雨频率分别大于 90% 和 65%，偏南风酸雨频率达到 100%，而偏北风强酸雨频率和偏南风相当。

综上所述，2009 年春季衡山酸雨过程常伴有偏南风、偏北风、偏东风，尤其偏南风、偏北风对衡山酸雨影响更甚。

为便于研究不同气象条件（不同风向气流来源）对衡山春季酸雨的影响，分析气团的后向轨迹。后向轨迹图选取了三个不同高度——500m、1200m、2000m 来进行研究，它们分别代表衡山低层、衡山气象观测站（观测站高度为 1265.9m）、衡山高层的情况。气流来源方向分为偏东、偏南、偏西和偏北四个方位，它们的定义和 4.3 的风向定义一致：偏北指 NW、NNW、N、NNE、NE 方向；

偏东指 ENE、E、ESE 方向；偏南指 SE、SSE、S、SSW、SW 方向；偏西指 WSW、W、WNW 方向。因 2000m 高度无论降水与否，高层基本都是西南气流，因此统计后向轨迹来源时没有将该高度列入。

表 5-1-3 为 2009 年春季衡山降雨日后向轨迹来源方向统计。

表 5-1-3 2009 年春季衡山降水日后向轨迹来源方向统计

高度 时间	500m				1200m			
	偏东	偏南	偏西	偏北	偏东	偏南	偏西	偏北
2009 年								
3 月	1	4	0	8	0	8	2	3
4 月	5	7	0	2	2	10	0	2
5 月	7	4	0	3	3	10	0	1
合计	13	15	0	13	5	28	2	6
比例	31.71%	36.59%	0.00%	31.71%	12.20%	68.29%	4.88%	14.63%

从表 5-1-3 可以看出，500m、1200m 高度，也即衡山低层、观测站高度，来自于偏南方向的气团在春季所占的比例是最高的，分别达到 36.59% 和 68.29%。500m、1200m 偏北方向的气团分别为 31.71%、14.63%。500m 高度偏东方向气团和偏北一样多，1200m 高度略少。偏西风对 2009 年春季衡山酸雨形成的贡献最小。偏西气团在 500m 出现概率为 0，在 1200m 也仅有 4.88%。

由于 2009 年春季没有偏西风和静风主导的降水日，为使研究具有完整性，选择偏西风、静风的典型研究个例是从 2007 年、2008 年春季中选择的。

5.2 偏北风影响个例剖析

选取的衡山春季偏北风影响个例日期是 2009 年 3 月 2 日。

为全面探讨这个个例的酸雨形成过程,图 5-2-1 给出 2009 年 3 月 1-3 日衡山温度、风速风向变化,表 5-2-1 给出 2009 年 3 月 1-3 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速。

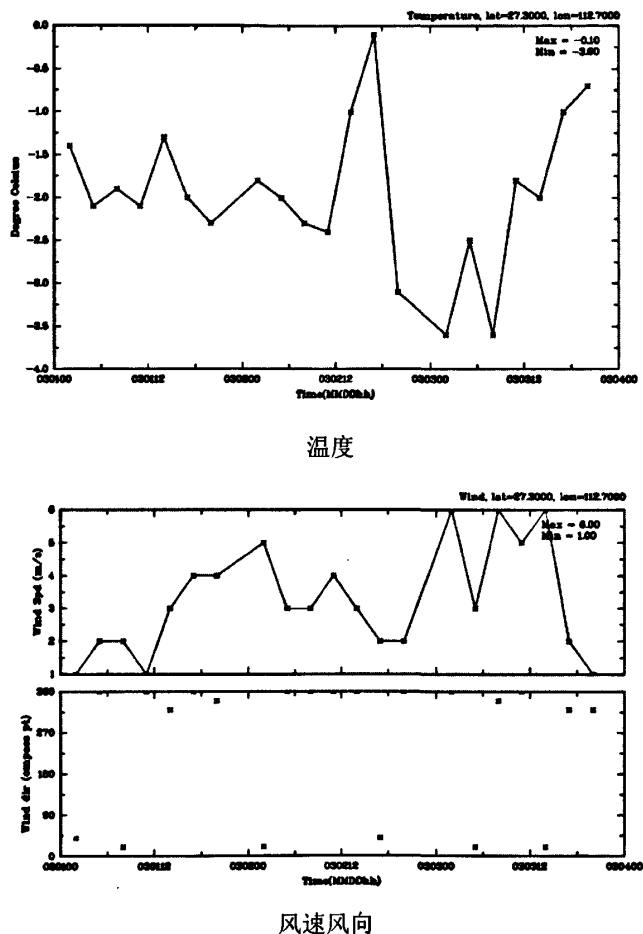


图 5-2-1 2009 年 3 月 1-3 日衡山观测站温度、风速风向变化

表 5-2-1 2009 年 3 月 1-3 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速

日期	pH 值	降水量 (mm)	日平均风速 (m/s)
3.1	4.14	27.8	2.5
3.2	3.32	4.8	3.3
3.3	4.16	43.8	4.8

从图 5-2-1 和表 5-2-1 可见, 2009 年 3 月 1-3 日衡山的日平均温度从 -1.8℃变化到 -2.2℃, 为低温阴雨天气。风向在偏北风 NW 到 NE 的五个风向变化, 1-3 日平均风速从 2.5 m/s 增加到 4.8m/s。2 日降水量不大, 1、3 日的降水都达到

了大雨的级别，3日更是超过了40.0mm。三日降水 pH 值均达到了强酸雨级别，2日仅有3.32，是2009年衡山春季降水 pH 值的日最低值。

图 5-2-2 为 2009 年 3 月 1-3 日地面天气图。

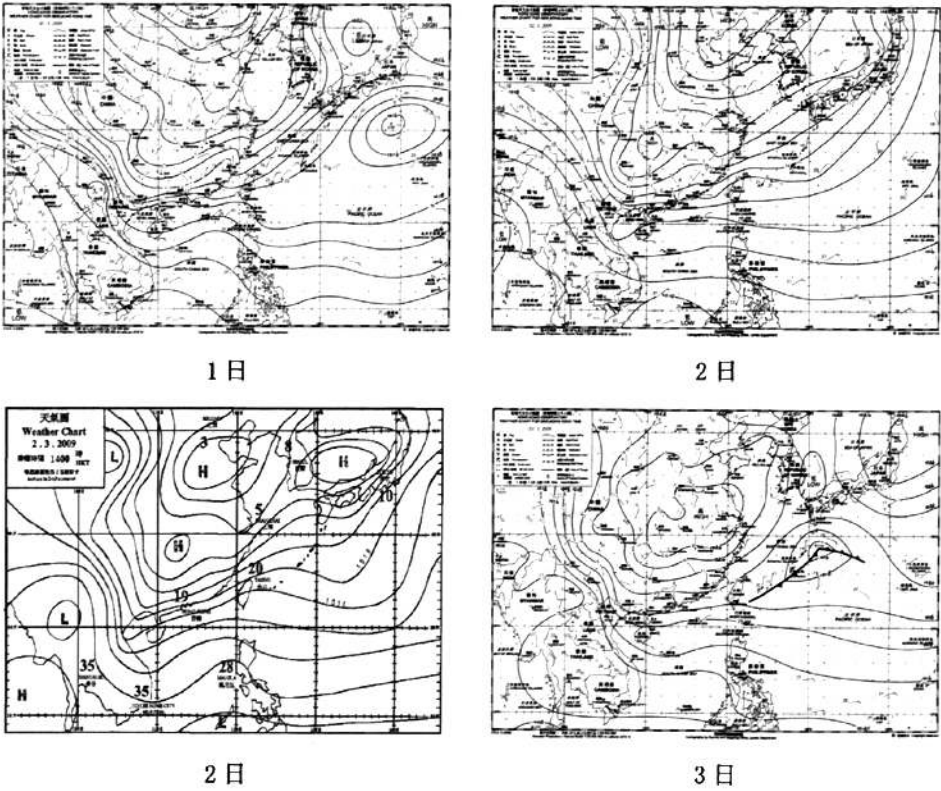
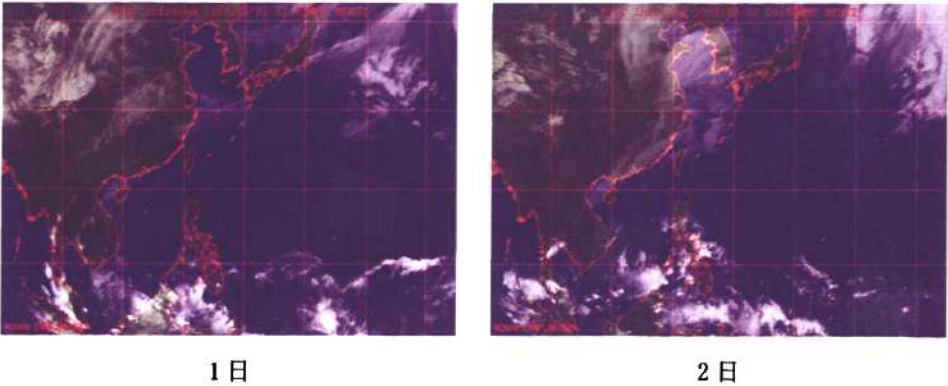
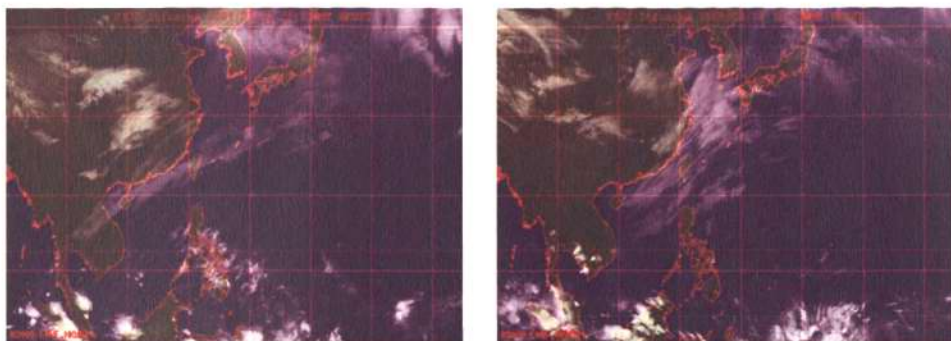


图 5-2-2 2009 年 3 月 1-3 日地面天气图

衡山 2009 年 3 月 1-3 日是持续的一段低温阴雨冰冻天气。1日衡山处于冷高压边缘，2-3 日则基本处于冷高压控制下，因此 2 日的降水并不多。

图 5-2-3 给出 2009 年 3 月 1-3 日卫星云图。





2 日

3 日

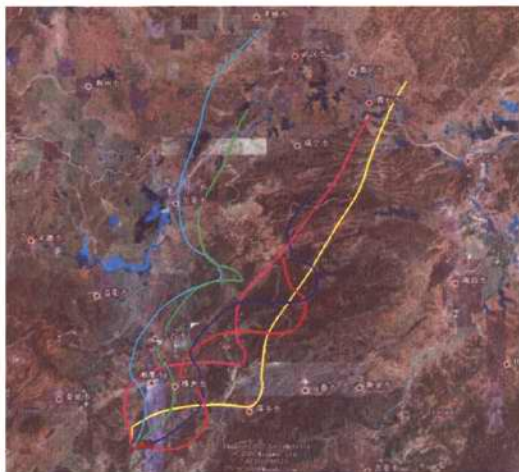
图 5-2-3 2009 年 3 月 1-3 日卫星云图

从图 5-2-3 发现，云系一般从衡山西北方向过来，1 日云较稀薄，2-3 日云带增多，主要是冷空气补充南下。2 日开始阶段云量不多，晚间的时候西北方向云量增加比较明显。

图 5-2-4 为 2009 年 3 月 1-3 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹。轨迹计算时间为 48h。分析中，1200m 高度风向有观测站实测，而后向轨迹模拟可能存在误差，所以 1200m 风向主要以实测数据为准，后向轨迹仅供参考。500m、2000m 没有实测数据，将后向轨迹图作为风向的主要判据。



1 日衡山 500m



1 日衡山 1200m



1 日衡山 2000m



2 日衡山 500m



2 日衡山 1200m



2 日衡山 2000m



3 日衡山 500m



3 日衡山 1200m



3 日衡山 2000m

图 5-2-4 2009 年 3 月 1-3 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹

注：后向轨迹图中，6 种不同颜色的轨迹分别代表 6 个不同时刻的气流轨迹。

红色表示 00 时的后向轨迹，
蓝色表示 20 时的后向轨迹，
绿色表示 16 时的后向轨迹，
青色表示 12 时的后向轨迹，
粉色表示 08 时的后向轨迹，
黄色表示 04 时的后向轨迹。

综合图 5-2-4 及衡山观测站的自动观测两分钟平均风向风速等气象资料，可发现：

1 日衡山 500m，N、NNE 风为主，气团轨迹经过湖南省内长沙市、岳阳市及湖北省武汉等市，最远可后推自安徽省；1200m，北风居多，另外有 NNW、NE 风，气团主要从湖北省经岳阳、长沙到衡山；2000m，主要为 SW 风，气团来自华南南部海面，经过广西的桂林市等几个城市，最后输送到衡山。

2 日衡山 500m，继续 NE 风主导，气团轨迹最远追溯至江苏无锡、南京一带；1200m，偏北风主导，主要是 N 风，还有 NE、NNE、NNW 风，气团大部分来自衡山东北部，经过了江西的南昌、九江等地；2000m，SW 风为主导，气团主要来自广西一带城市。

3 日衡山 500m，主导风向 NE 风，再转为 NW 风，气团经过湖北省黄石市、咸宁市及长沙、岳阳；1200m，偏北风主导，还有 NNE、NW 风，气团来源则比较多，东北部、南部、西部均有，气团输送过程比较复杂；2000m，有 SW、WSW、W 三个方向的气团来源，主要集中于偏西方向。

由上述分析可见，不同高度层的气流来源可能差别很大。为便于分析，我们还分析了同一时间 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹，参见图 5-2-5。后向轨迹的运行时间是 72h；图中的圆圈代表离衡山的等距离位置，单位为 km；红色、蓝色、绿色分别是 500m、1200m、2000m 的后向轨迹；在每幅图中间可以看到三个高度层的输送过程，所选取的高度是距海平面高度——AMSL。

图 5-2-5 给出 2009 年 3 月 1-3 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹。其中衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、绿色。

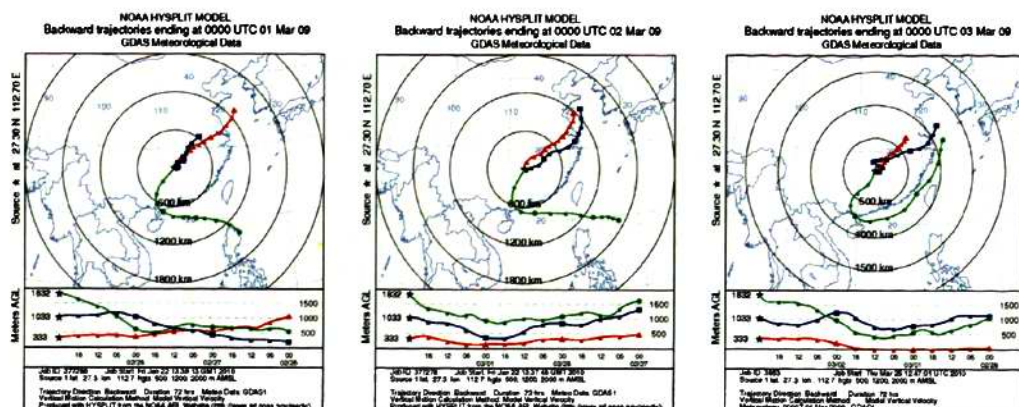


图 5-2-5 2009 年 3 月 1-3 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

图 5-2-5 说明：从这 1-3 日的三个高度层的输送图中看出，只有最酸的 2 日，500m、1200m、2000m 的输送层次比较分明，三个高度层的输送轨迹都比较分明，而其他两日，都不明显，尤其是 2000m 高度的气团经历了下沉，然后上扬的阶段。

综合上面两种后向轨迹图的分析，发现 1-3 日，500m 和 1200m 高度头三天是比较一致的偏北风控制，2000m 一般是西南气流。2 日属于比较典型的偏北风控制下的酸雨，究其为何出现春季最低 pH 值的原因，可能是偏北方向来源的气团，在低中高三个层次都持续稳定地输送污染物，且当日雨量很小，使得降水中氢离子浓度较高。

由于衡山观测站点没有探空相关数据，分析衡山周围大气气象要素的垂直结构对研究衡山酸雨时的气象条件能提供重要的参考价值。选取离衡山较近并有探空数据的长沙、郴州站点资料进行分析。

图 5-2-6 给出衡山、长沙、郴州地理位置。从中可见，衡山和郴州并不是离衡山最近的城市，但它们是距衡山最近且有探空数据的两个站点。从图 2-3-1 2008 年度城市空气污染物年均值示意图可看到，以长沙为首的长沙、株洲、湘潭区域三个城市 SO_2 年均值在全省都居于前列，郴州 SO_2 年均值不高，但是 NO_2 浓度比较高，年均值排第六，郴州市排放出的污染物更易形成硝酸等酸性物质。图 2-3-2 2008 年城市环境空气综合污染指数示意图显示，长沙、株洲、湘潭的空气综合污染指数同样高，三者都居处于前四位，郴州污染指数处于中游水平。可见如果在偏北风影响下，污染严重的长株潭城市群产生的大气污染物很可能对衡山酸雨起到显著作用；偏南风影响下，从郴州、衡阳方向输送过来的污染物，造成的酸雨污染程度可能相对更弱。因此研究长沙、郴州一北一南两个站点的探空数据，可对衡山酸雨污染物来源进行大致判断。

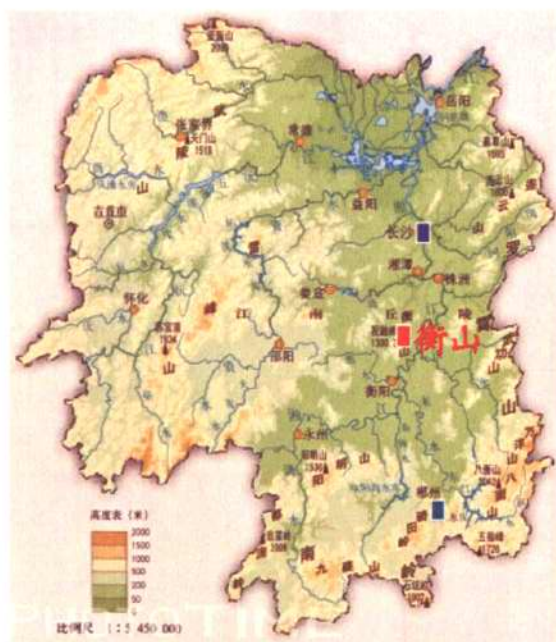


图 5-2-6 衡山、长沙、郴州地理位置^[19]

注：红色方块为衡山位置，蓝色方块为长沙位置，绿色方块为郴州位置

利用怀俄明大学 (university of Wyoming) 网站数据，绘制了长沙和郴州温度、相对湿度、比湿、风矢量图、u 分量风向、v 分量风向的探空曲线图，由于数据提供的最大高度为 14000m，所以图中选取的高度从 0-14000m。

图 5-2-7 给出长沙、郴州 2009 年 3 月温度剖面。

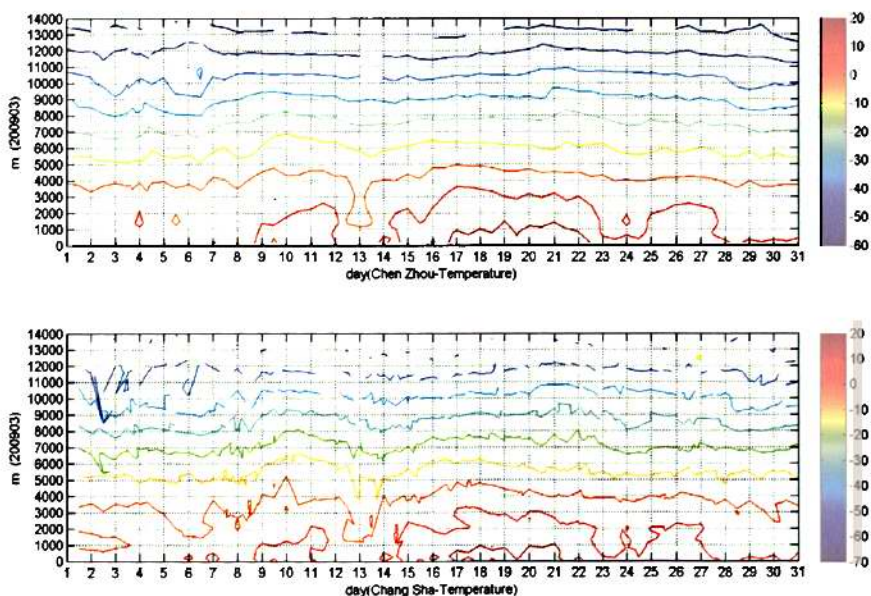


图 5-2-7 2009 年 3 月长沙、郴州温度剖面

图 5-2-7 显示, 衡山 1-3 日气温较平稳, 并未出现较大的温度变化, 和当时低温阴雨冰冻天气形势符合, 1-3 日长沙上空 1000-2000m 存在接近闭合的环状等温线, 由此推断长沙上空存在逆温层。联系衡山 1-3 日降水都是强酸雨, 且 2 日出现 pH 最低值, 分析原因可能是长沙存在的逆温, 导致污染物在城市中低层聚集, 而衡山 1-3 日污染物来源主要是东北部气团, 偏北风的输送作用, 导致长株潭地区污染物向衡山方向输送, 衡山中低层污染物浓度增多, 经过降水洗刷, 造成酸雨 pH 值偏低。

图 5-2-8 为 2009 年 3 月 1-3 日衡山相对湿度变化, 图 5-2-9 为 2009 年 3 月长沙、郴州相对湿度剖面。

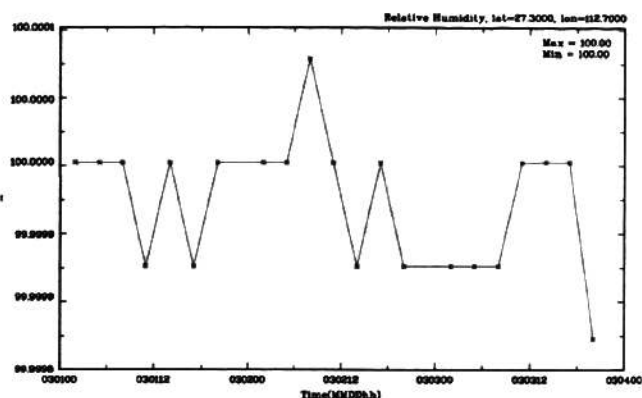


图 5-2-8 2009 年 3 月 1-3 日衡山相对湿度变化

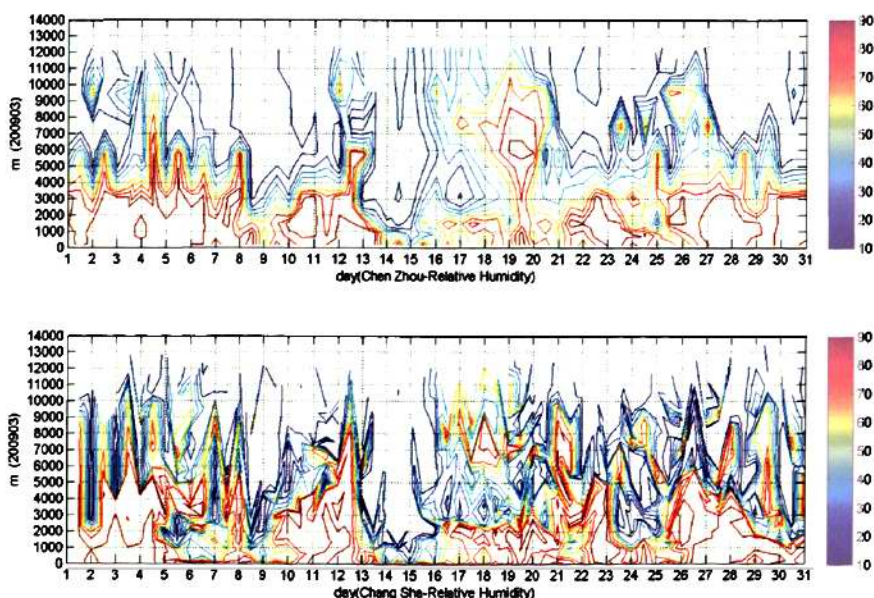


图 5-2-9 2009 年 3 月长沙、郴州相对湿度剖面

从图 5-2-8、5-2-9 可见, 衡山的相对湿度一直保持在 100.00%附近, 空气湿度呈现饱和状态。

长沙 2 日相对湿度 90%的等值线都扩展到接地, 郴州相对湿度 90%以上等

值线也较靠近地面，长沙、衡山、郴州 1-3 日均有阴雨天气，造成空气湿度都很高。

对长沙和郴州上空的水平风进行分解，分解为 u （东西）分量和 v （南北）分量。图 5-2-10 给出长沙、郴州 2009 年 3 月风的 u 分量剖面。

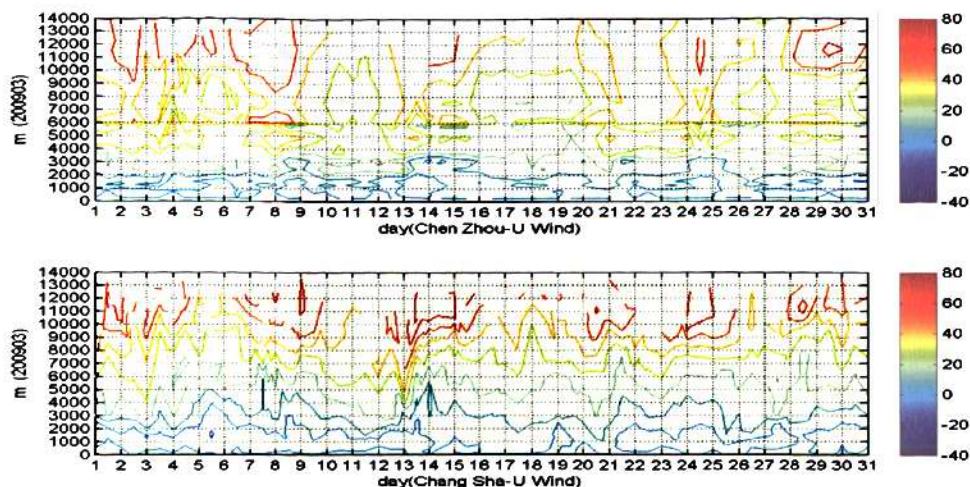


图 5-2-10 2009 年 3 月长沙、郴州风的 u 分量剖面

注：暖色调表示西风，数值为正，冷色调表示东风，数值为负。

从图 5-2-10 可见，1-3 日长沙 1200m 以下风的 u 分量一般是东风，风速一般不大于 10m/s，而在 1200-2000m 之间，随着高度增加，仍然是东风为主。郴州 1200m 以下风的 u 分量同样是东风，风速大小也和长沙类似，但在 1200-2000m 之间，随着高度增加，东风开始减少，西风增多。

图 5-2-11 给出长沙、郴州 2009 年 3 月风的 v 分量剖面。

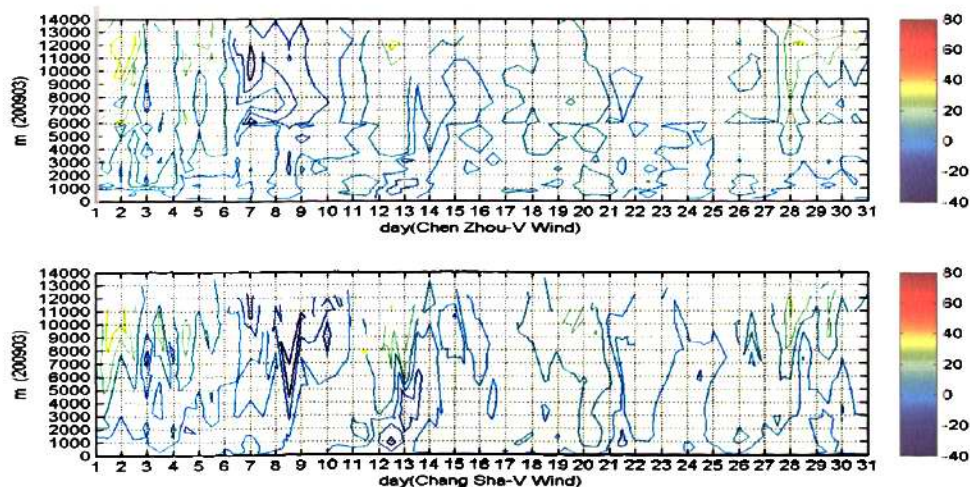


图 5-2-11 2009 年 3 月长沙、郴州风的 v 分量剖面

注：暖色调表示南风，数值为正，冷色调表示北风，数值为负。

从图 5-2-11 可见，3 月 1-3 日长沙、郴州 1200m 之下风的 v 分量是北风，

风速也不大，接近地面的风速更小，风速最大顶多达到 10m/s 左右，但随着高度增加，在 1200 到 2000m 之间，v 分量中的南风增加。

图 5-2-12 为 2009 年 3 月 1-3 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）。

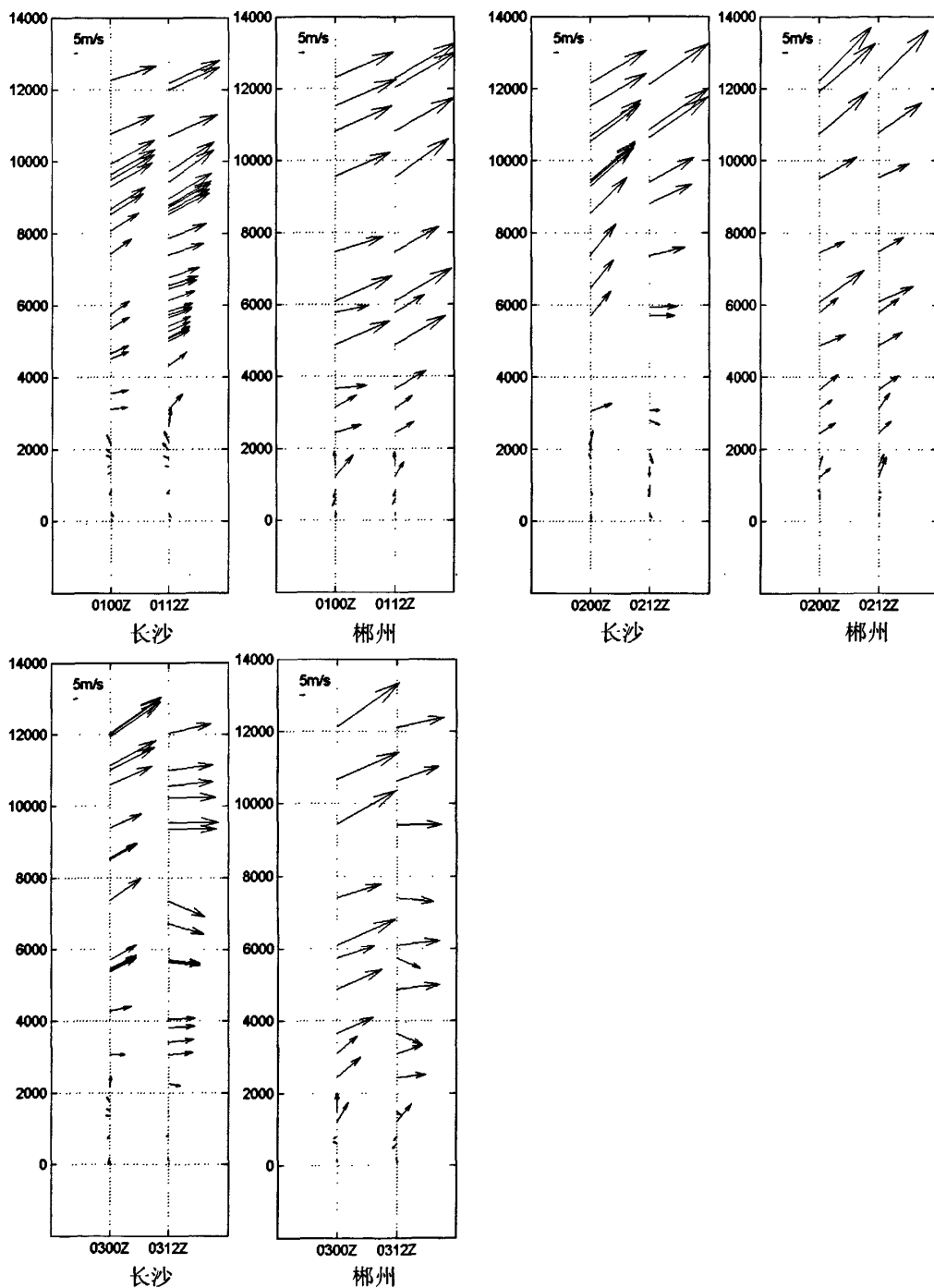


图 5-2-12 2009 年 3 月 1-3 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）

从图 5-2-12 可见，这三日水平风特征：

1 日长沙 1000m 以下存在 NE 风，低层为较弱的 NW 风；郴州 1200m 以下为较一致的 NNE、N 风，随着高度增加，在 1200-2000m，两地上空的风向开始偏南，长沙转为 SE 风，郴州则转为 S、SW 风。

2 日长沙 2000m 上空风向 12 时基本转成一致 N 风；郴州 1200m 下的风速低，相比前一日偏南风增多，1200-2000m 和 1 日风向类似，S、SW 风较多。

3 日长沙 00 时次 1200m 左右以下为 NE 风，1200-2000m SE 风增多，12 时，2000m 以下接近于静风，风速很小；郴州中低层依然为 NE 风，1200-2000m 则 SW 风主导。

上面的分析发现，长沙和衡山的风向变化一致性比较好，可能受到同一天气系统——冷锋锋后北风的影响。由于郴州与衡山的距离比长沙更远，虽说其风向变化趋势和衡山有点类似，但和长沙相比，它与衡山风向变化的一致性更差。

综合本衡山酸雨偏北风影响个例和其它偏北风个例的研究结果，可得到图 5-2-13 所示受偏北风影响时衡山的酸雨形成概念示意图。

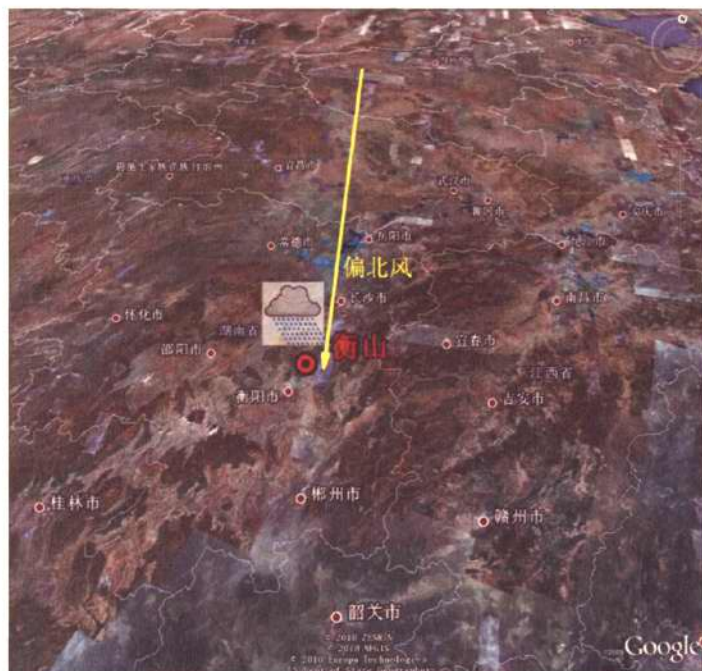


图 5-2-13 受偏北风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

图 5-2-14 的概念示意图表明：

(1) 在偏北风情况下，长沙、株洲和湘潭这一重污染区域产生的二氧化硫或者氮氧化物等污染物容易输送到衡山形成酸雨。

(2) 如果偏北风中 NE 或者 NNE 较多，则从江西或湖北过来的气团也会影响衡山，造成衡山较严重的酸雨。

(3) 在偏北风条件下，衡山酸雨的污染物来源，湖南省内主要来自长株潭地区，湖南省外可能是湖北和江西。

5.3 偏南风影响个例剖析

选取的衡山春季偏南风影响个例日期是2009年4月11-12日。

为全面探讨这个个例的酸雨形成过程,图5-3-1给出2009年4月10-13日衡山温度、风速风向变化,表5-3-1给出2009年4月10-13日衡山降水pH值、降水量、日平均风速。

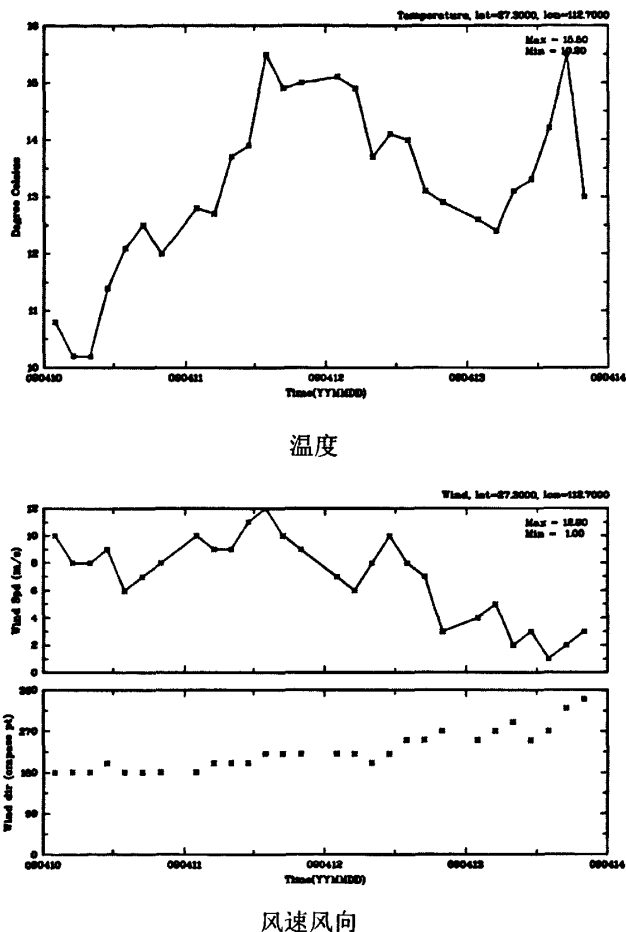


图5-3-1 2009年4月10-13日衡山温度、风速风向变化

表5-3-1 2009年4月10-13日衡山降水pH值、降水量、日平均风速

日期	pH 值	降水量 (mm)	日平均风速 (m/s)
4.10	4.43	22.7	8.3
4.11	4.41	5.9	9.5
4.12	4.43	21.3	7.8
4.13	/	0	2.8

注: “/” 表示降水量为0, 所以不存在降水pH值。

从图5-3-1和表5-3-1可见,2009年4月10-13日衡山日平均温度维持在

11~14℃，阴雨天气下平均温度变化稳定。4月10~12日，偏南风风向稳定，13日偏西风比例增多，逐渐占据主导风向。10~12日风速变化较稳定，每日平均风速都在7.5m/s以上，11日平均风速最大，达9.5m/s，13日平均风速降幅较大，降为2.8m/s。10~13日降水量变化较大，11日降水量不到7mm，10、12日大于20mm，达到中雨级别，13日没有降水。10~12日降水pH值都为强酸雨级别，维持在4.40水平。

图5-3-2为2009年4月10~13日地面天气图。

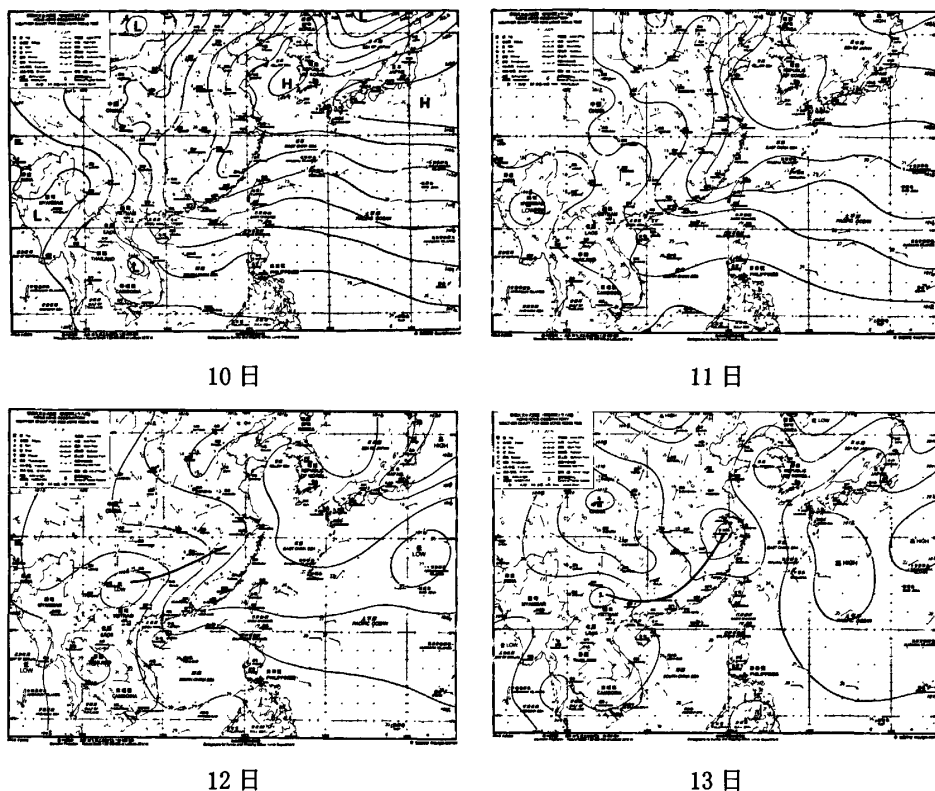


图5-3-2 2009年4月10~13日地面天气图

图5-3-2显示，2009年4月10~13日衡山处于持续的阴雨天气，衡山从10日起便处于低压槽附近，11日低压槽越来越明显，12日云南、贵州、湖南以及江西省位置横贯一条槽线，13日槽线向华南地区的沿海区域弯曲，形成弓状。

图5-3-3给出2009年4月10~13日卫星云图。

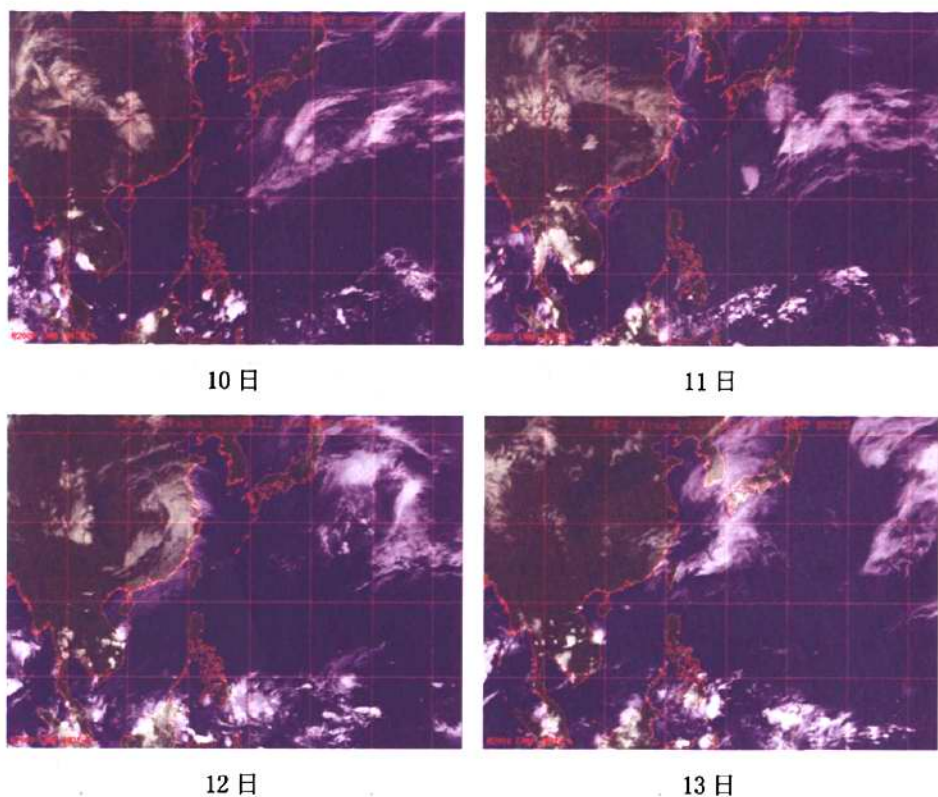


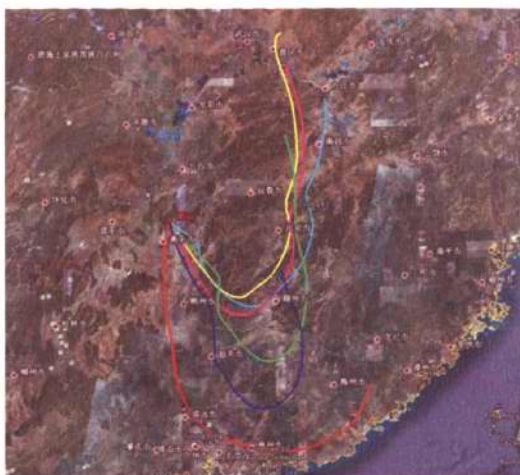
图 5-3-3 2009 年 4 月 10-13 日卫星云图

从图 5-3-3 和气象观察记录得到, 10 日云量较多, 实际观测总云量和低云量都为 10 成; 11、12 日高空存在透光层积云、透光高积云、蔽光层积云, 云量仍较多。13 日云量相比前 3 天有所减少, 尤其夜间云量减少更明显。所以 10、12 日云量多, 造成这两日降雨量较大。

图 5-3-4 为 2009 年 4 月 10-13 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹, 轨迹计算时间为 48h, 对其进行分析。后向轨迹图中, 6 种不同颜色的轨迹分别代表 6 个不同时刻的气流轨迹: 红色表示 00 时的后向轨迹, 蓝色表示 20 时的后向轨迹, 绿色表示 16 时的后向轨迹, 青色表示 12 时的后向轨迹, 粉色表示 08 时的后向轨迹, 黄色表示 04 时的后向轨迹。



10 日衡山 500m



10 日衡山 1200m



10 日衡山 2000m



11 日衡山 500m



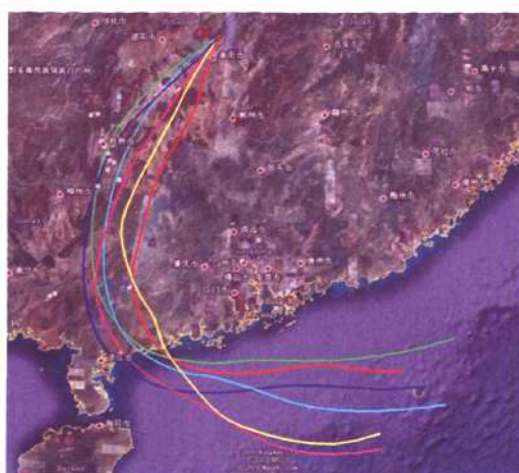
11 日衡山 1200m



11 日衡山 2000m



12 日衡山 500m



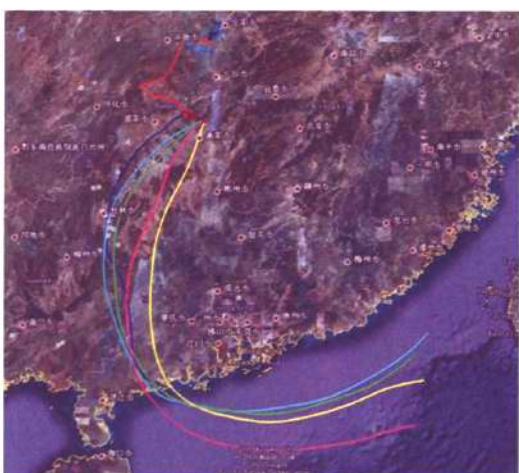
12 日衡山 1200m



12 日衡山 2000m



13 日衡山 500m



13 日衡山 1200m



13 日衡山 2000m

图 5-3-4 2009 年 4 月 10-13 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹

从图 5-3-4 以及衡山观测站的自动观测两分钟平均风向风速等气象资料可发现:

10 日衡山 500m, 主导风向为 SE 风, 气团来源主要是江西省境内赣州、抚州等市; 1200m, 主导风向是 S 风, 有部分 SE、SSE 风, 所以气流轨迹部分来自南部广东省境内, 部分来自于江西省赣州市附近; 2000m, 气团集中于衡山南部到西南部区域, 因此 SW 风比例较大。

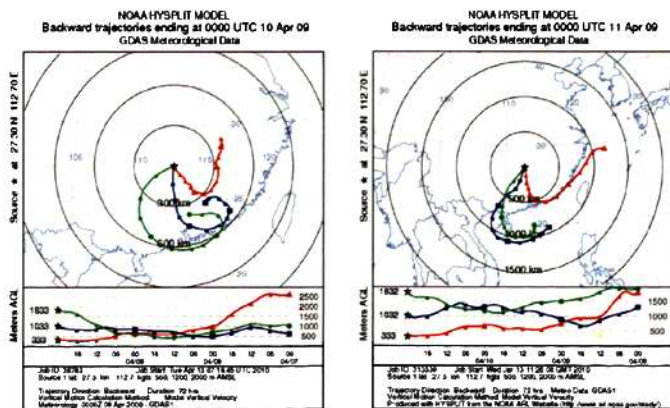
11 日衡山 500m, 气团从珠江三角洲一带输送到衡山, 路径比较集中, 途经郴州、衡阳; 1200m 处气团来源主要是 S 到 SW 中间区域, 因为当时主导风向是 SSW, SW 风向也较多; 2000m 气团来源于衡山 WSW 和 SW 区域, 途经了广西的南宁、柳州、桂林和湖南的邵阳。

12 日衡山 500m 气团主要来自衡山的 SSW 方向, 也有部分气团来自珠江三角洲地区; 1200m 高度, 风频最高的是 SW 风, 气团来源于广西东部及湖南西南部; 2000m 气团后退轨迹集中在衡山 WSW 部, 即广西省境内。

13 日衡山 500m 风向逐渐发生转变, 虽污染物主要来自衡山偏南方向, 不过已有部分源自衡山北部常德、岳阳一带; 衡山 1200m 偏西风增多, 气团主要来自广西桂林附近区域, 但出现来自 NW 部的的气团; 2000m 气团输送路径集中在衡山 WSW 至 WNW 方位。

由此可见, 4 月 10-12 日衡山 500m、1200m 主要受偏南风影响, 而 13 日风向开始转变, 偏南风减少, 偏西风增多, 最后逐渐转为 NW 等偏北风; 高层 2000m 气流主要集中在 WSW 和 SW 方向, 变化不大。所以选取的个例日期——4 月 11-12 日, 衡山 1200m 及以下高度受偏南风影响。

图 5-3-5 给出了 2009 年 4 月 10-13 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹, 其中后向轨迹的运行时间是 72h, 在每幅图中间方框内可看到三个高度层的输送过程。其中衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、绿色。



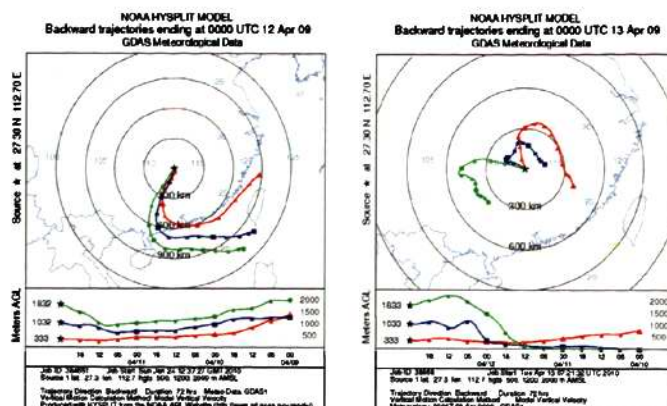


图 5-3-5 2009 年 4 月 10-13 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

图 5-3-5 说明：10 日，500m 的气团曾在气流输送下，经历了从高处向低处沉降的过程；1200m 气流输送过程平稳，输送高度维持在 1000 多 m；2000m 高度的气团有抬升过程。11 日，500m 气团输送特征和 10 日类似，初始阶段沉降后，然后比较平稳；1200m 气团则先上升，随后沉降；2000m 高度，先沉降再上升。12 日，500m 污染物输送过程与前两日类似；1200m、2000m 气团输送均较平稳，稍稍沉降一段时间，又被气流卷夹上扬。三个高度层次比较分明。13 日，500m 气团输送继续保持前几日的情形，可初始高度有一定降低，从 1500m 降低到 1000m；1200m、2000m 过程类似，前半段时间气团被低层气流输送，然后经历较大幅度抬升，最后稳定在 1500m 相应高度。

研究衡山酸雨时的气象条件必然要探讨衡山周围大气气象要素的垂直结构，由于衡山的资料缺乏，再次通过对长沙、郴州的探空数据分析来弥补以上缺陷。图 5-3-6 给出 2009 年 4 月长沙、郴州温度剖面。

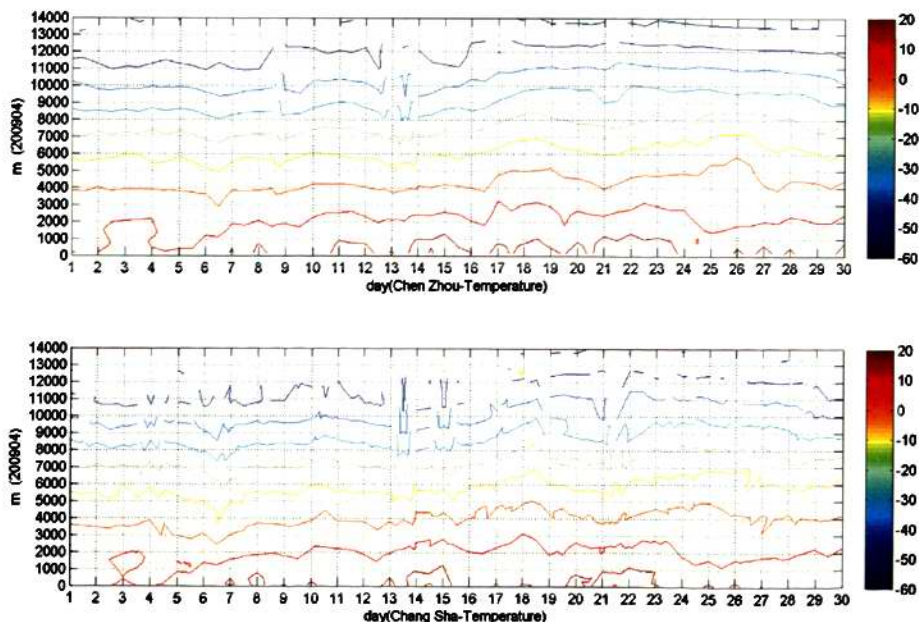


图 5-3-6 2009 年 4 月长沙、郴州温度剖面

图 5-3-6 显示, 4 月 10-13 日长沙、郴州上空空气并没有出现逆温等情况, 整体气温变化平稳。此前气象资料表明该段时期衡山日平均温度维持在 11-14℃, 各时刻温度变化波动不大, 所以衡山和长沙、郴州的垂直温度剖面特点类似。

图 5-3-7 为 2009 年 4 月 10-13 日衡山相对湿度变化, 图 5-3-8 为 2009 年 4 月长沙、郴州相对湿度剖面。

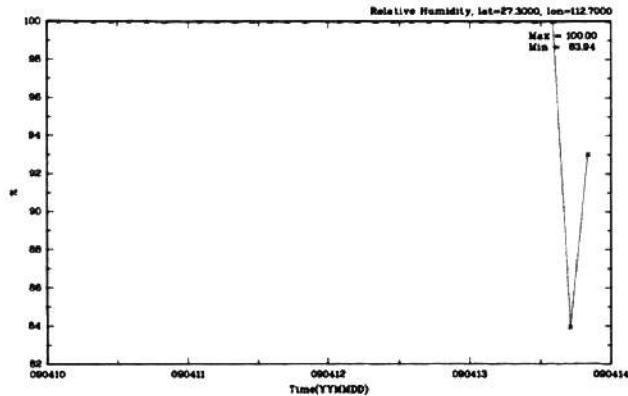


图 5-3-7 2009 年 4 月 10-13 日衡山相对湿度变化

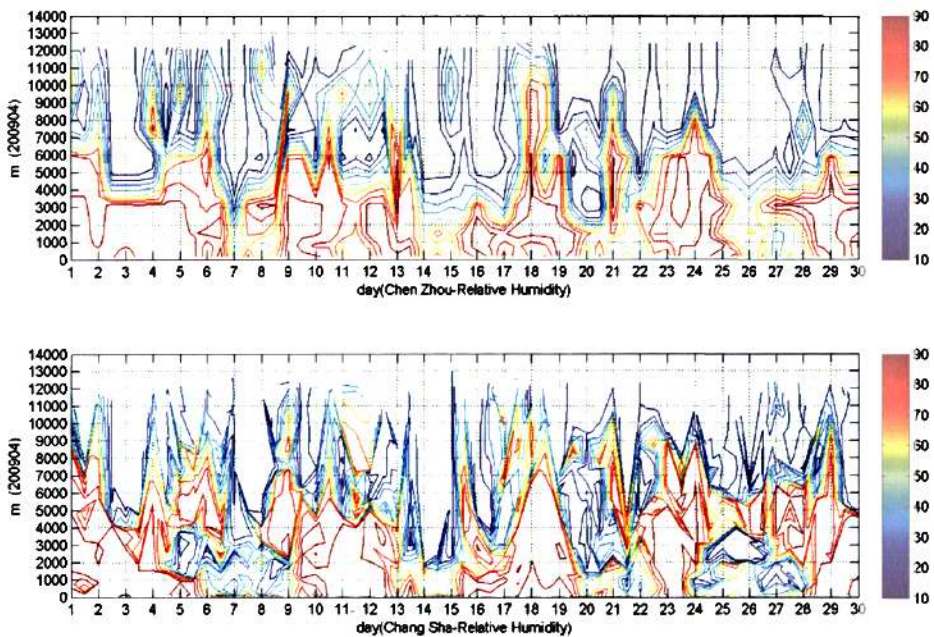
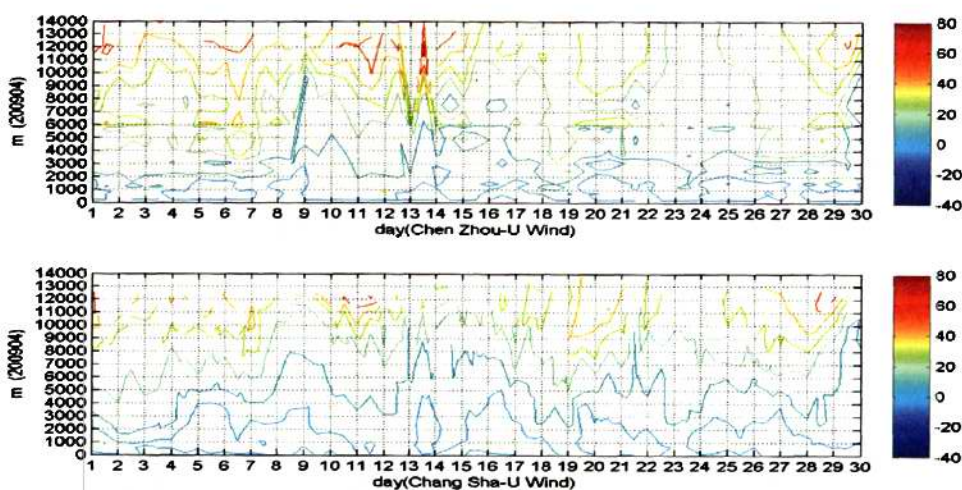


图 5-3-8 2009 年 4 月长沙、郴州相对湿度剖面

从图 5-3-7、5-3-8 可见, 衡山 4 月 10、12 日降水量较大, 11 日降水量较小, 相对湿度曲线在 10-12 日为 100%, 13 日 12 时后开始下降。

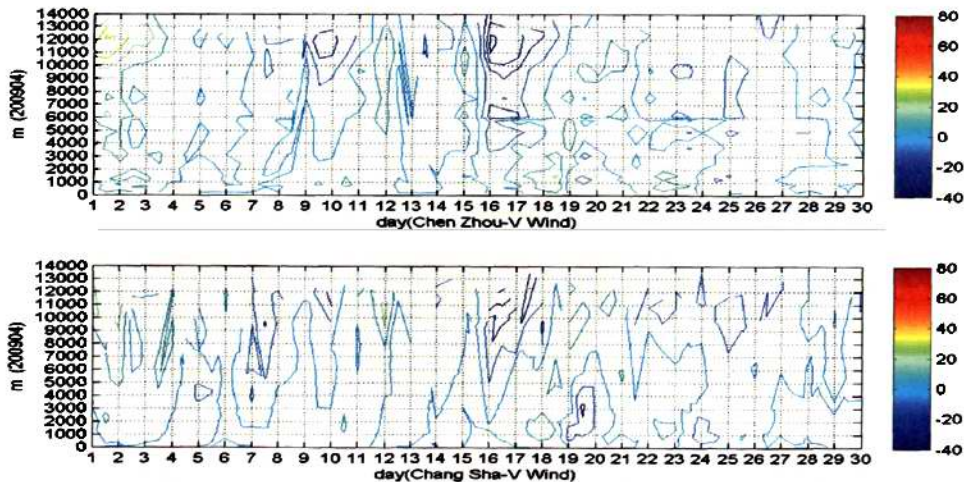
4 月 10-12 日长沙上空相对湿度在 90% 以上, 13 日湿度明显下降; 郴州 10 日相对湿度较高, 11、12 日的相对湿度略有降低, 13 日相对湿度先增高再降低。

所以衡山相对湿度变化和长沙较相似, 和郴州存在一定差异。

图 5-3-9 为 2009 年 4 月长沙、郴州风的 u 分量剖面。图 5-3-9 2009 年 4 月长沙、郴州风的 u 分量剖面

注：暖色调表示西风，数值为正，冷色调表示东风，数值为负。

从图 5-3-9 可见，10-11 日，长沙 1000m 以下主要是东风，不过从 11 日末期至 13 日，东风分量很少，高层基本以西风为主。郴州 10-13 日 1000m 以下风的 u 分量为稳定的西风，风速变化不大。

图 5-3-10 为 2009 年 4 月长沙、郴州风的 v 分量剖面。图 5-3-10 2009 年 4 月长沙、郴州风的 v 分量剖面

注：暖色调表示南风，数值为正，冷色调表示北风，数值为负。

从图 5-3-10 可见，10-12 日，长沙风的 v 分量的等值线稀疏，1000-2000m 存在南风，13 日，弱的北风出现。郴州情况和长沙相同，10-12 日主要为南风，13 日北风增加。

图 5-3-11 为 2009 年 4 月 10-13 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和

12 两个时次)。

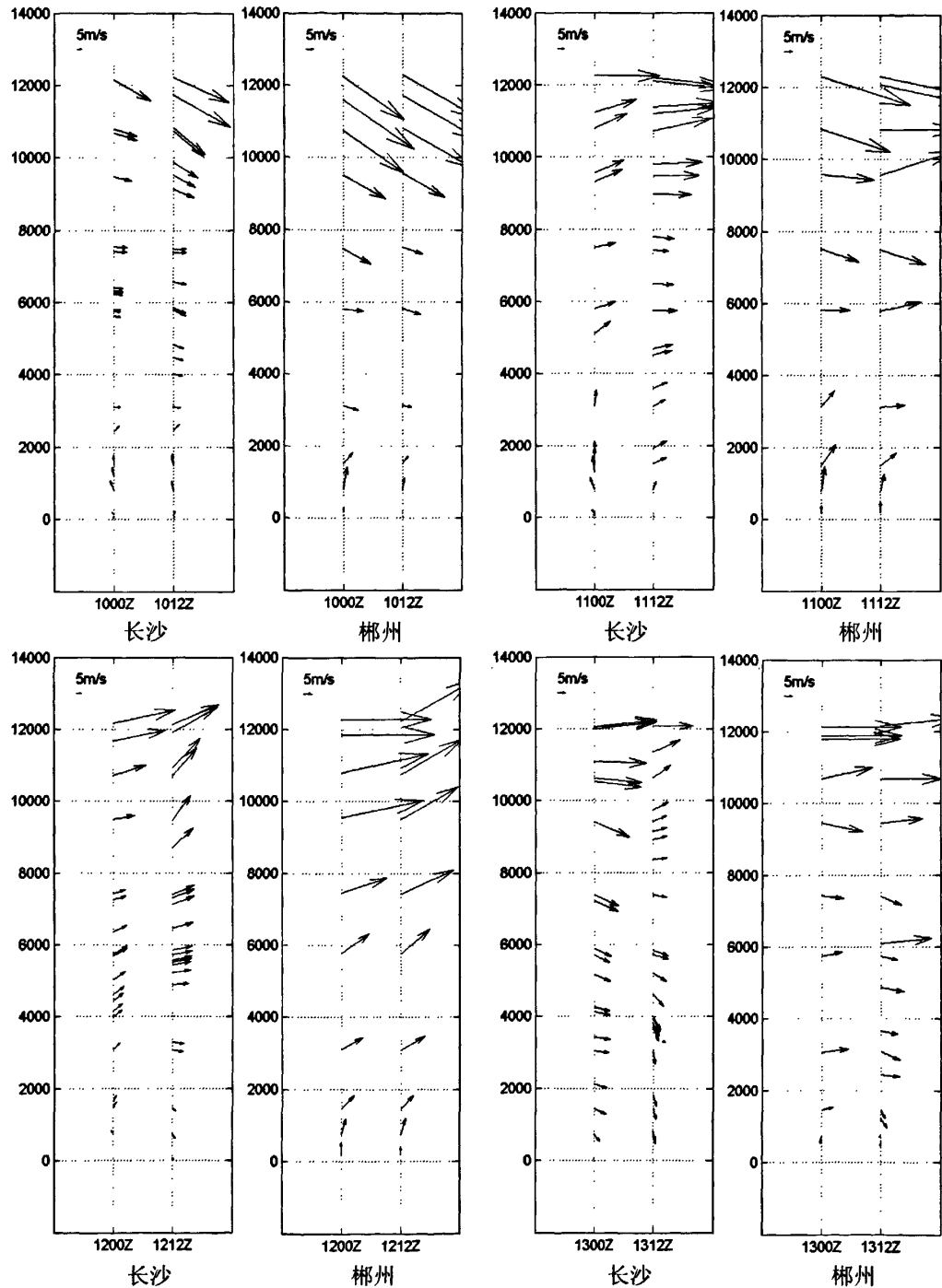


图 5-3-11 2009 年 4 月 10-13 日长沙、郴州风矢量剖面(每日包含 00 和 12 两个时次)

从图 5-3-11 可见，这四日两地的水平风特征：
10 日长沙高空，从 0 到 2000m 随高度增加，风向从低层的 SE 转为 SSE 风，

最后转为 S 风；11 日 00 时次和 10 日特征类似，11 日末期 SW 出现，风速较大，接近 10m/s；12 日 SW 风速相比 11 日有减少，12 时次出现 NW 风向；13 日 NW 风频和风速都有增加。这几日风速中 11 日最高，衡山正是 11 日达到最高日平均风速 9.5m/s，风速变化长沙和衡山有相似之处。

10-12 日郴州风矢量的风向存在相同特点，从 0 到 2000m 高度，低层是南风，随高度增加，风向转为 SW 风；13 日 12 时次出现了 NW 风。风速方面同样是 11 日最大。

因此，水平风特征衡山和长沙共同点更多，衡山与郴州的差异性更大。

综合上面的分析，4 月 10-13 日，衡山和长沙在气象要素垂直结构的气象条件方面具有较好的一致性，由于郴州与衡山的距离比长沙远，气象条件趋势虽和衡山类似，但和长沙相比，与衡山气象条件的一致性更差。偏南风个例日期——4 月 11-12 日，长沙、郴州两地和衡山一致，2000m 以下以偏南风为主导风向。在这种长沙、衡山、郴州一致偏南风的气象条件下，衡山出现强酸雨。

综合本衡山酸雨偏南风影响个例和其它偏南风个例的研究结果，可得到图 5-3-12 所示受偏南风影响时衡山的酸雨形成概念示意图。

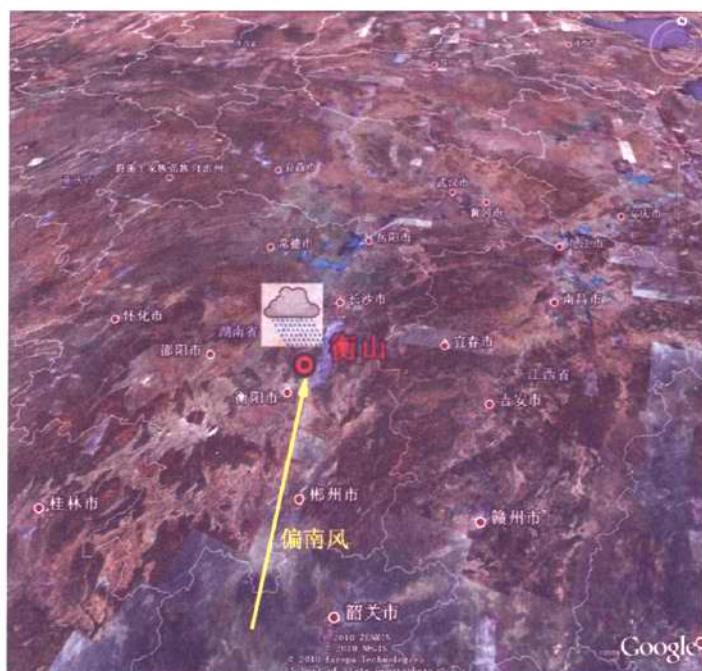


图 5-3-12 受偏南风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

图 5-3-12 的概念示意图表明：

- (1) 在偏南风情况下，从珠江三角洲产生的气象污染物可能被气团携带，经过省内的郴州、衡阳市，再输送到衡山地区。
- (2) 如偏南风中 SW 风为主导风向，经过广西省内桂林、柳州等城市的气团同样会带来比较多的污染物。
- (3) 在偏南风条件下，衡山酸雨的污染物来源，湖南省内主要是衡阳、郴州，湖南省外可能多为广东、广西的远距离输送。

5.4 偏东风影响个例剖析

选取的衡山春季偏东风影响个例日期是 2009 年 5 月 6 日。

为全面探讨这个个例的酸雨形成过程,图 5-4-1 给出 2009 年 5 月 5-7 日衡山温度、风速风向变化,表 5-4-1 给出 2009 年 5 月 5-7 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速。

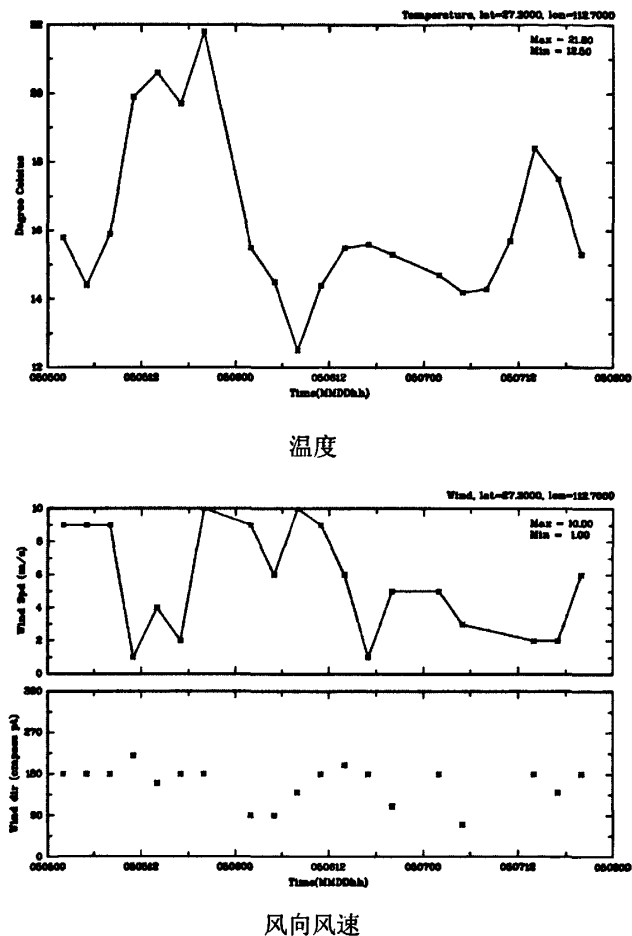


图 5-4-1 2009 年 5 月 5-7 日衡山温度、风速风向变化

表 5-4-1 2009 年 5 月 5-7 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速

日期	pH 值	降水量 (mm)	日平均风速 (m/s)
5.5	4.81	3.0	6.3
5.6	4.93	1.8	7.3
5.7	/	0	4.4

注: “/” 表示降水量为 0, 所以不存在降水 pH 值。

从图 5-4-1 和表 5-4-1 可见, 2009 年 5 月 5-7 日衡山日平均温度在 15-17

℃间，日平均温度变化较小。5日主导风向为偏南风，6日衡山南岳高山气象观测站风向资料显示主导风向转为偏东风，某几个时次存在偏南风，图 5-4-1 中衡山风向变化却看到偏南风出现时次多于偏东风，和观测站风向资料有出入，这里以观测站数据为准。7日偏南风风频最高。5日的日平均风速超过 5.0m/s，6日日平均风速最大，达到 7.3m/s，7日风速则为 4.4m/s。5日降水量仅为 3.0mm，6日降水量更少，7日没有降水。5日的降水 pH 为 4.81，6日达到 4.93，未形成强酸雨。

图 5-4-2 给出 2009 年 5 月 5-7 日地面天气图。

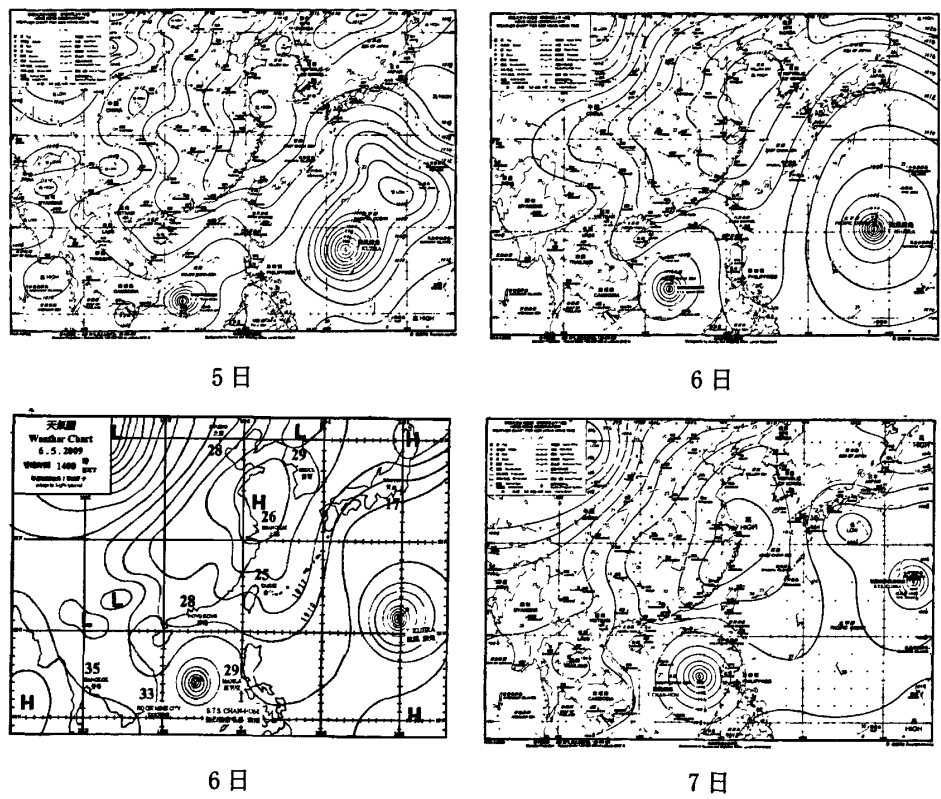


图 5-4-2 2009 年 5 月 5-7 日地面天气图

图 5-4-2 显示，5 日衡山西部——贵阳、昆明一带存在低压中心，同时衡山西北部、东北部有高压中心，衡山处于低压槽线附近，但对流天气不强烈。6 日，低压中心北移，5 日上海附近的高压中心范围继续扩大。7 日高压中心范围伸展到衡山东部，对衡山影响愈加明显。

图 5-4-3 为 2009 年 5 月 5-7 日卫星云图。

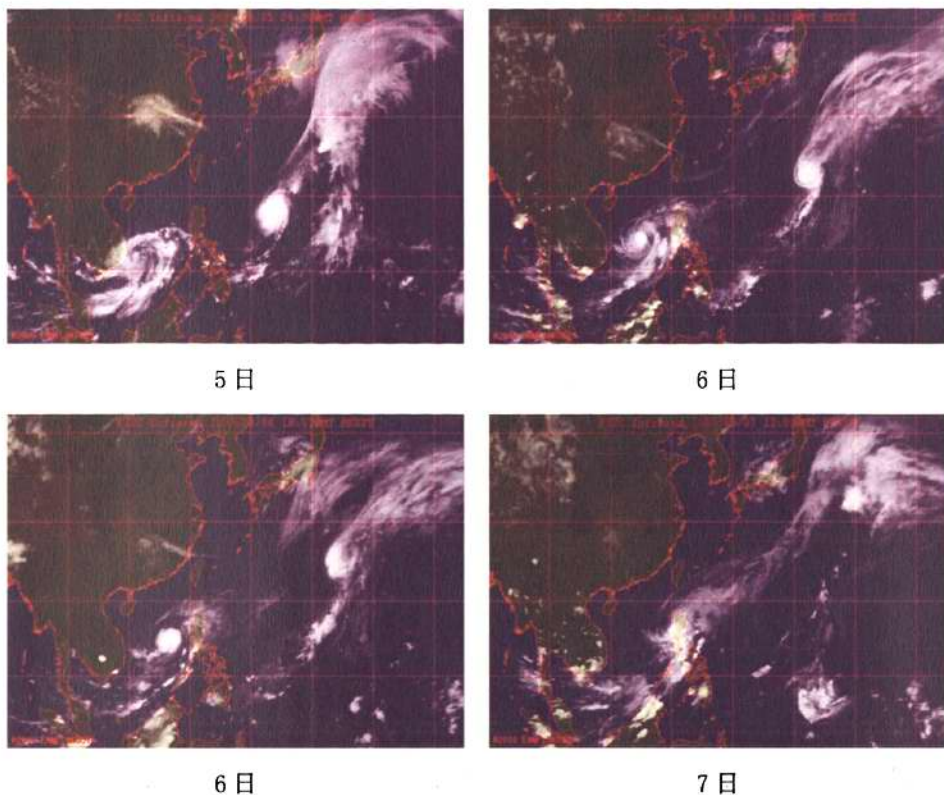
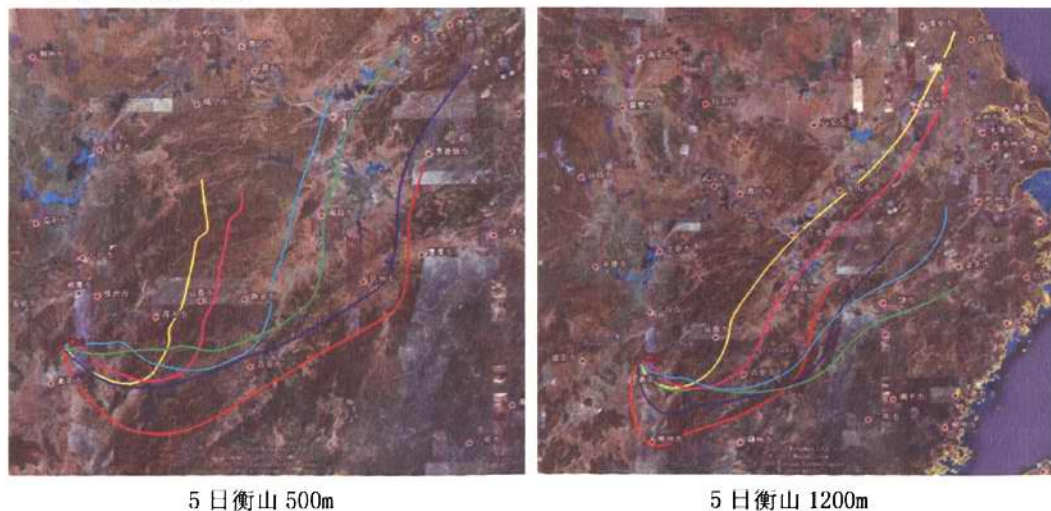


图 5-4-3 2009 年 5 月 5-7 日卫星云图

从图 5-4-3 和气象观测记录得到, 5 日衡山上空有密卷云、透光高层云、淡积云、蔽光层积云, 总云量在 6 成左右, 白天无低云, 晚上低云增多。6 日高空主要为蔽光层积云、碎雨云、透光层积云, 总云量和低云量均为 10 成, 布满衡山上空。7 日云量减少, 尤其是低云量减少比较明显。

图 5-4-4 为 2009 年 5 月 5-7 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹, 轨迹计算时间为 48h。





5日衡山 2000m



6日衡山 500m



6日衡山 1200m



6日衡山 2000m



7日衡山 500m



7日衡山 1200m



7 日衡山 2000m

图 5-4-4 2009 年 5 月 5-7 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹

注：后向轨迹图中，6 种不同颜色的轨迹分别代表 6 个不同时刻的气流轨迹。

红色表示 00 时的后向轨迹，
蓝色表示 20 时的后向轨迹，
绿色表示 16 时的后向轨迹，
青色表示 12 时的后向轨迹，
粉色表示 08 时的后向轨迹，
黄色表示 04 时的后向轨迹。

从图 5-4-4 以及衡山观测站的自动观测两分钟平均风向风速等气象资料可见：

5 日衡山 500m，主导风向偏东风，大部分气团来自江西境内，途径吉安等市；衡山 1200m 偏南风风频最高，偏东风占有部分比例，特别是 5 日末期，因此气团既有来自南部郴州市方向，又有来自东部的吉安、南昌等市方向；2000m，输送气团的风向，经历偏北风到偏南风的转变过程，湖北省境内输送过来的气团，绕过宜春、吉安高空，再由郴州、衡阳到达衡山。

6 日衡山 500m，早些时刻有来自南部的部分气团，后来逐渐转为来自偏东方向的气团，主要经过鹰潭、抚州、新余等地；1200m，风向多变，主导风向为偏东风，较近时刻的后退轨迹来源于衡山偏东部；2000m，气团主要从韶关一带输送过来。

7 日衡山 500m，仍是一致的偏东风，来自江西境内的鹰潭、抚州等地；1200m，在偏南风输送下，衡山东南部的赣州市及南部的韶关、清远等地气团均能到达衡山；2000m 高度，和 1200m 的特征类似，气团来自衡山东南部和南部区域。

可见，5 月 5-7 日，衡山 500m、1200m 高度均明显受偏东风输送影响，2000m 高度气团来向 5 日从偏北方向转为偏南方向后，6-7 日未有改变。

图 5-4-5 为 2009 年 5 月 5-7 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹，后向轨迹运行时间是 72h；在每幅图中间方框内可看到三个高度层的输送过程。其中衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、绿色。

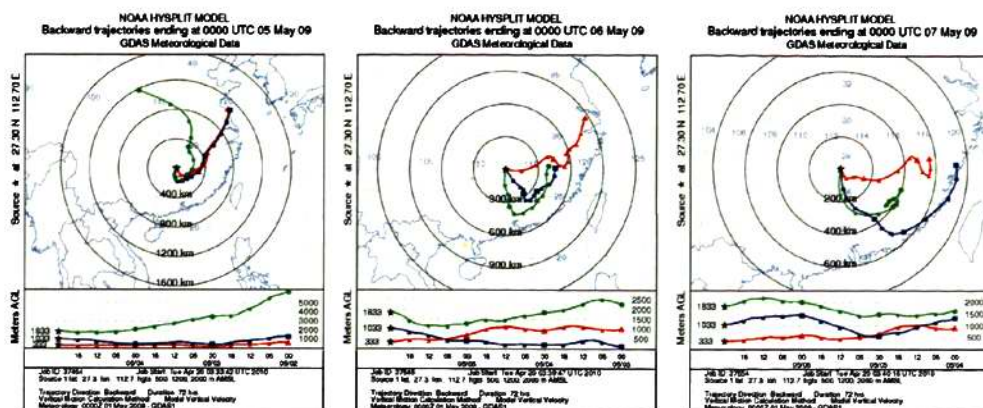


图 5-4-5 2009 年 5 月 5-7 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

图 5-4-5 说明：5 日 500m、1200m 高度的气团输送平稳，2000m 高度气团明显有沉降过程。6 日衡山 500m 的气团输送经历沉降的过程，1200m 气团逐渐上升到相应高度，2000m 气团沉降后迅速上升。7 日 500m 高度气流输送平稳，1200m 高度气团经历沉降、上升过程，2000m 高度气团远距离输送过程中缓缓上升。

图 5-4-6 给出 2009 年 5 月长沙、郴州温度剖面。

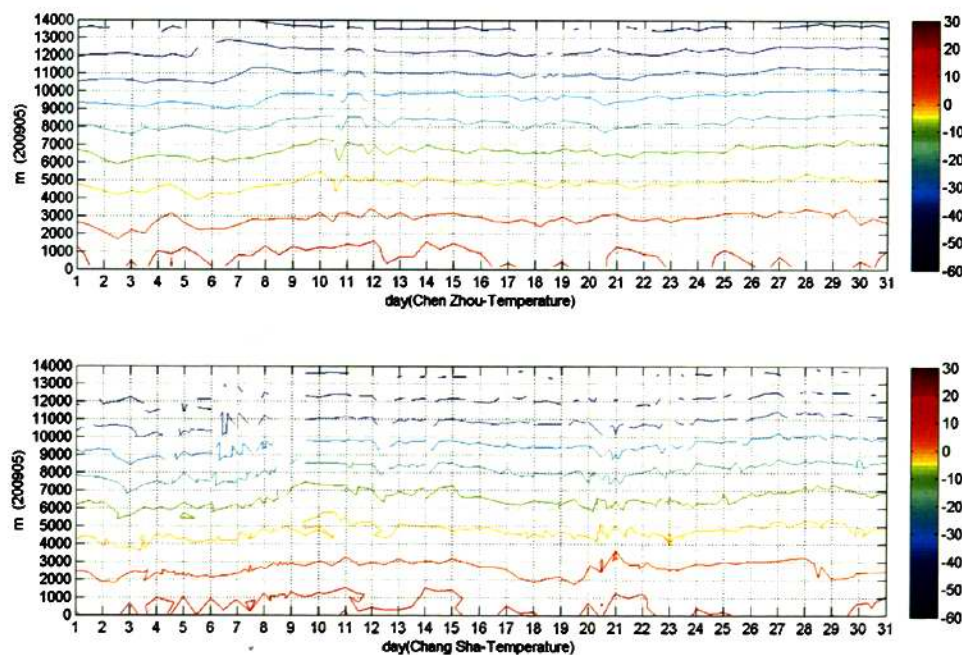


图 5-4-6 2009 年 5 月长沙、郴州温度剖面

图 5-4-6 显示，5-7 日长沙、郴州上空 2000m 以内温度等值线有小的波动，但整体没有出现逆温或较大幅度的变化。

图 5-4-7 为 2009 年 5 月 5-7 日衡山相对湿度变化，图 5-4-8 为 2009 年 5 月长沙、郴州相对湿度剖面。

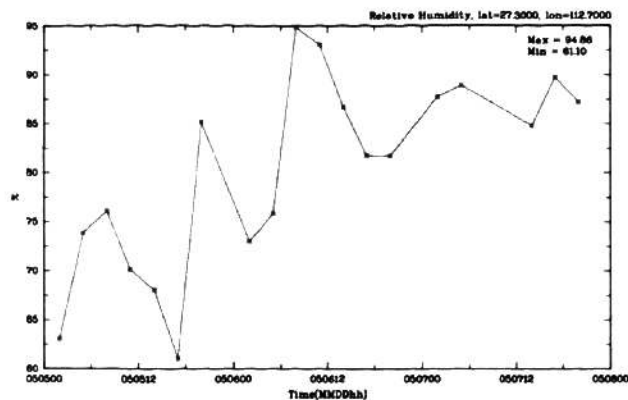


图 5-4-7 2009 年 5 月 5-7 日衡山相对湿度变化

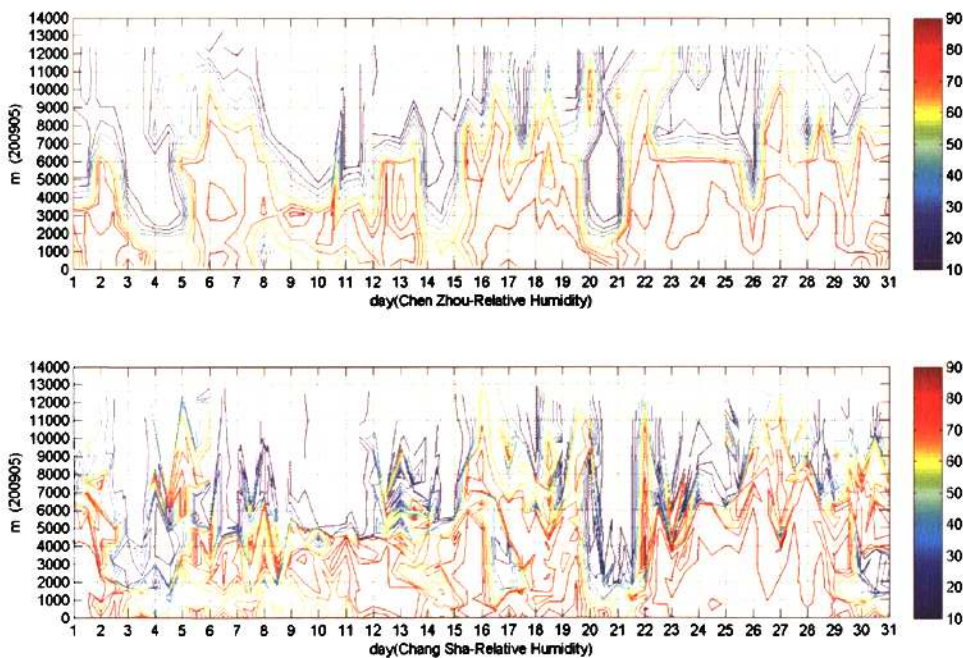


图 5-4-8 2009 年 5 月长沙、郴州相对湿度剖面

从图 5-4-7、5-4-8 和观测站气象记录得到：

因衡山 5 日天气现象出现露，相对湿度存在增加过程，随后相对湿度减少，降水又使湿度增加，由于雨量少，5 日末段时间空气相对湿度下降；6 日有降水，湿度增加，同样因为降水量较少，相对湿度维持一段时间后下降；7 日即使无降水，但再次出现露，可见这日相对湿度不小，比 6 日略小，低于 90.0%。

长沙 5 日到 6 日，湿度先增加，然后减少，从 6 日到 7 日的过程中又出现先增后减过程；郴州 5 日-7 日，湿度变化只经历一个先增大后减少的过程，比长沙相对湿度曲线的变化波动小。

衡山相对湿度变化趋势复杂，和长沙较相近，而和郴州相对湿度变化不一

致。

图 5-4-9 给出 2009 年 5 月长沙、郴州风的 u 分量剖面。

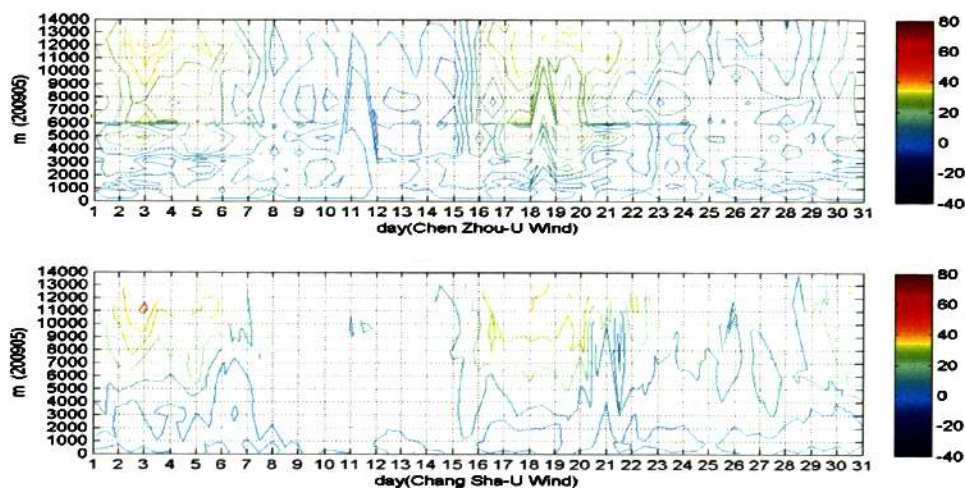


图 5-4-9 2009 年 5 月长沙、郴州风的 u 分量剖面

注：暖色调表示西风，数值为正，冷色调表示东风，数值为负。

从图 5-4-9 可见，5-7 日，长沙和郴州 2000m 以下均为东风，郴州等值线更平，长沙的等值线波动更大。

图 5-4-10 给出 2009 年 5 月长沙、郴州风的 v 分量剖面。

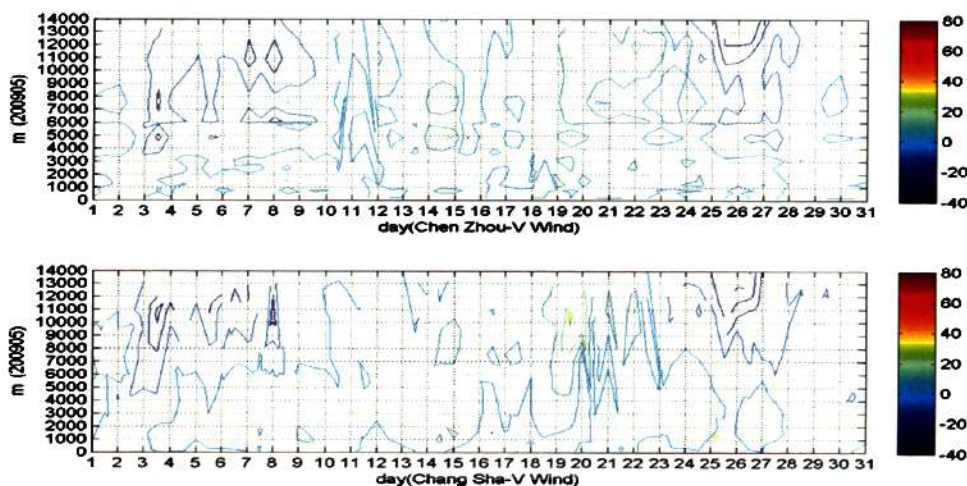


图 5-4-10 2009 年 5 月长沙、郴州风的 v 分量剖面

注：暖色调表示南风，数值为正，冷色调表示北风，数值为负。

从图 5-4-10 可见，5-7 日，长沙 2000m 以下主要以南风为主，而郴州仅仅 6 日出现南风，其他两日南、北风都较少。

图 5-4-11 为 2009 年 5 月 5-7 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和

12 两个时次)。

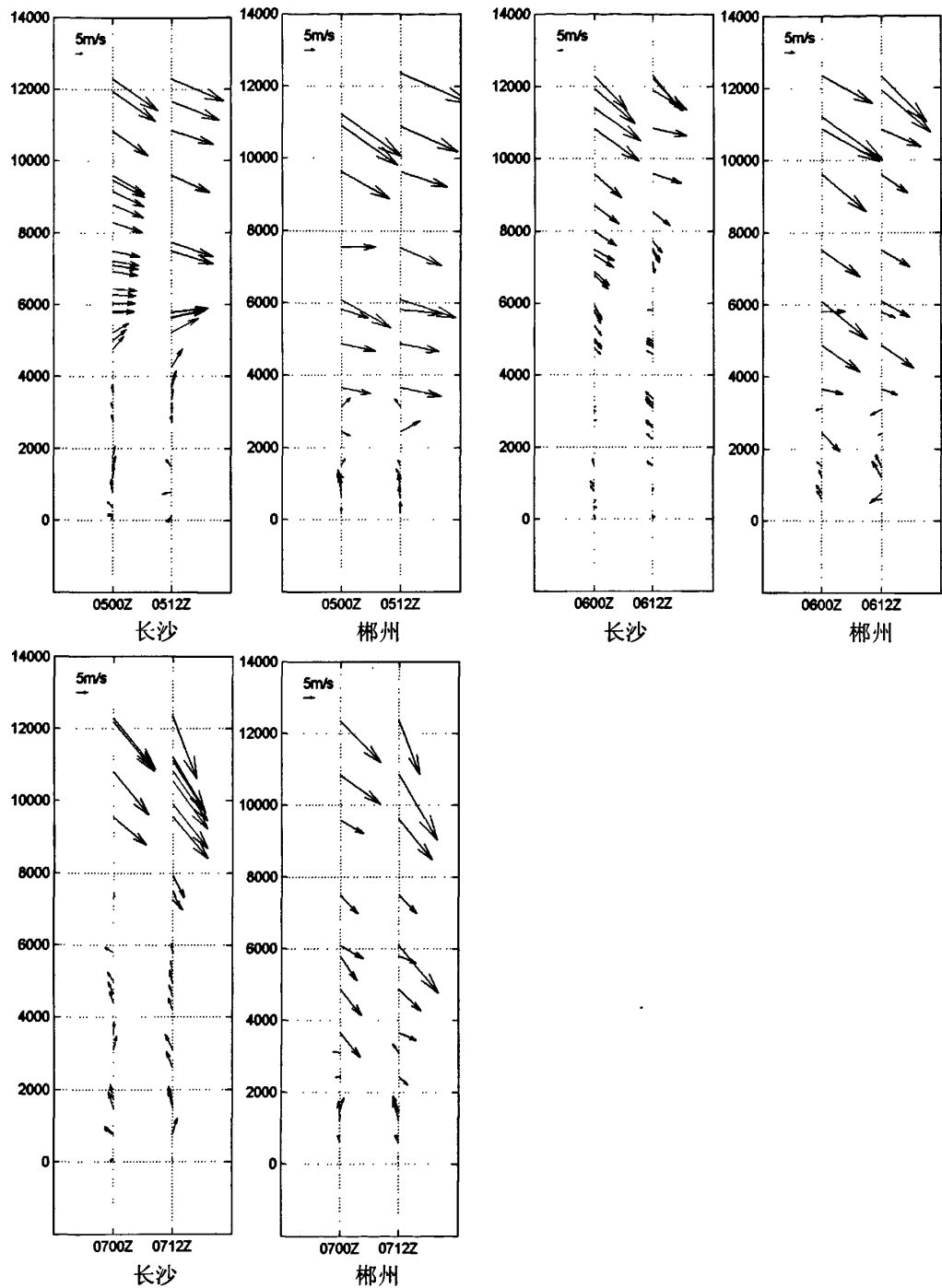


图 5-4-11 2009 年 5 月 5-7 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）

从图 5-4-11 可见，5 月 5-7 日的水平风特征：
5 日 00 时次长沙上空从 0 到 2000m，随高度增加，风向顺时针旋转，从底

层的 E 风转为 SE 风，再转为 S 风，12 时次 1000m 以下以偏东风为主，1000-2000m 以 SE 风为主；6 日低层存在偏东风，随着高度增加，SE、S 风增多；7 日和 6 日类似，风速有一定程度增加。

5 日郴州 2000m 下为比较一致的偏南风；6 日 1000m 偶尔出现偏东风，主要以偏南风主导；7 日偏南风继续占据主导地位。

综合上面的分析，5 月 5-7 日，衡山和长沙在有关气象要素垂直结构的气象条件方面具有较好的一致性，由于郴州与衡山气象条件的一致性较差。

偏东风个例日期——5 月 6 日的降水过程中，衡山 1200m 及以下高度主要受偏东风输送的污染物影响，降水虽是酸雨，但并没达到强酸雨级别。

综合本衡山酸雨偏东风影响个例和其它偏东风个例的研究结果，可得到图 5-4-12 所示受偏东风影响时衡山的酸雨形成概念示意图。

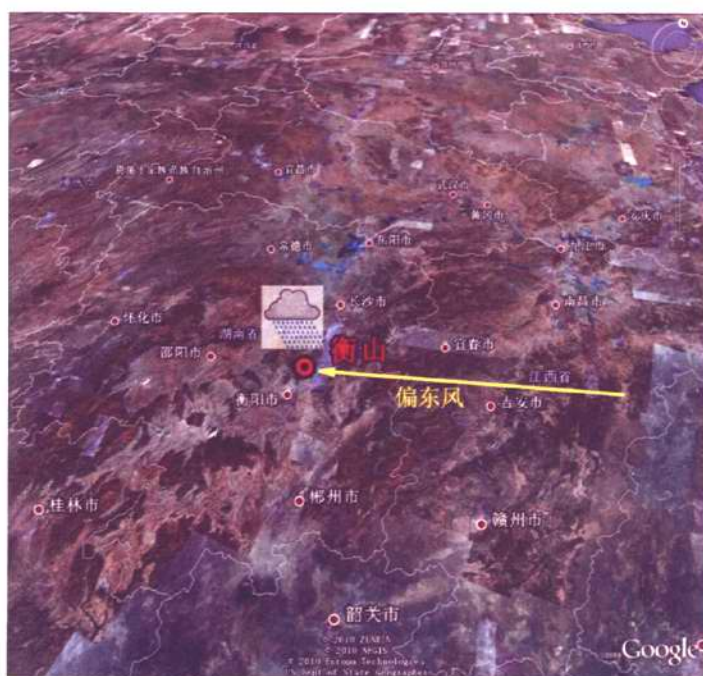


图 5-4-12 受偏东风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

图 5-4-12 的概念示意图表明：

(1) 当衡山受偏东风影响下，从江西的吉安、宜春等市输送过来的污染物，形成了致酸物质。所以污染物来源为湖南省外的江西境内部分城市。

(2) 偏东风为主导风向的情形在衡山春季较少，且在偏东风情况下，降水不如偏南、偏北风主导时降水那样酸，酸雨污染相对较轻。

5.5 偏西风影响个例剖析

2009 年春季衡山没有偏西风为主导风向的个例, 从 2007、2008 年春季挑选偏西风个例, 选取的偏西风影响个例日期是 2007 年 4 月 14 日。

图 5-5-1 给出 2007 年 4 月 13-15 日衡山温度、风速风向变化, 表 5-5-1 给出 2007 年 4 月 13-15 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速。

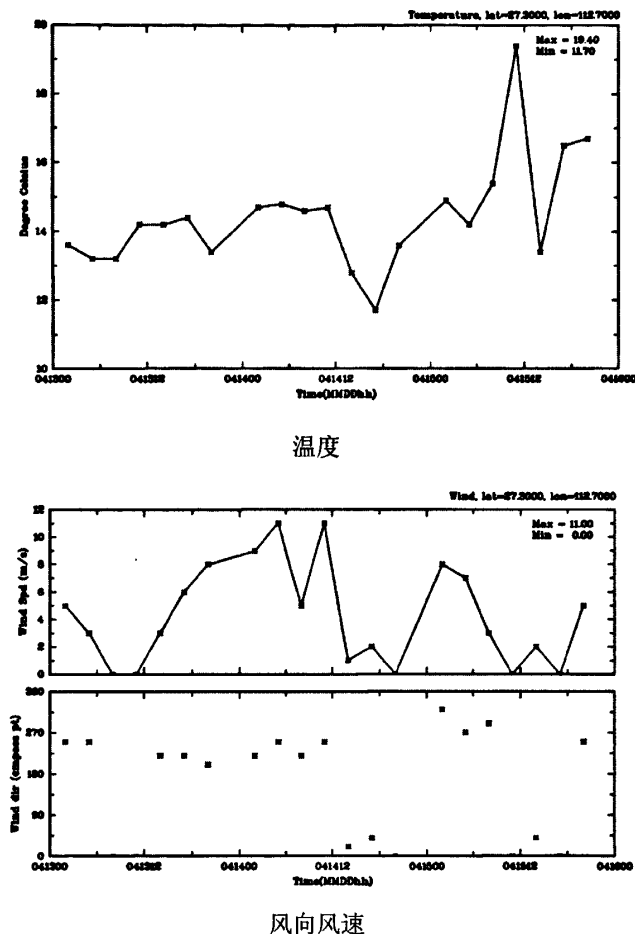


图 5-5-1 2007 年 4 月 13-15 日衡山温度、风速风向变化

表 5-5-1 2007 年 4 月 13-15 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速

日期	pH 值	降水量 (mm)	日平均风速 (m/s)
4.13	/	0	4.3
4.14	4.23	14.1	6.2
4.15	/	0	2.5

注: “/” 表示降水量为 0, 所以不存在降水 pH 值

从图 5-5-1 和表 5-5-1 可见, 2007 年 4 月 13-15 日的日平均温度处于 14℃-15℃ 区间, 温度变化较平稳, 和历年 4 月中旬气温比偏高。13 日主导风向为偏西风, 同时 SW、静风出现频率也较高; 14 日, WSW 风频最高, SW 风出现时

次也较多；15日偏西风占有最高比例，偏北风比例同样较高。13-15日的日平均风速中14日最高，达到6.2m/s，13日为4.3 m/s，15日降到3.0 m/s之下。三日来只有14日有降水，降水量达14.1mm，为中雨级别。pH值方面，14日4.23的降水pH值在衡山春季偏西风主导的降水日中比较罕见，因近三年春季偏西风主导的降水日只有7次，出现强酸雨的仅有2日。

图5-5-2给出2007年4月13-15日地面天气图。

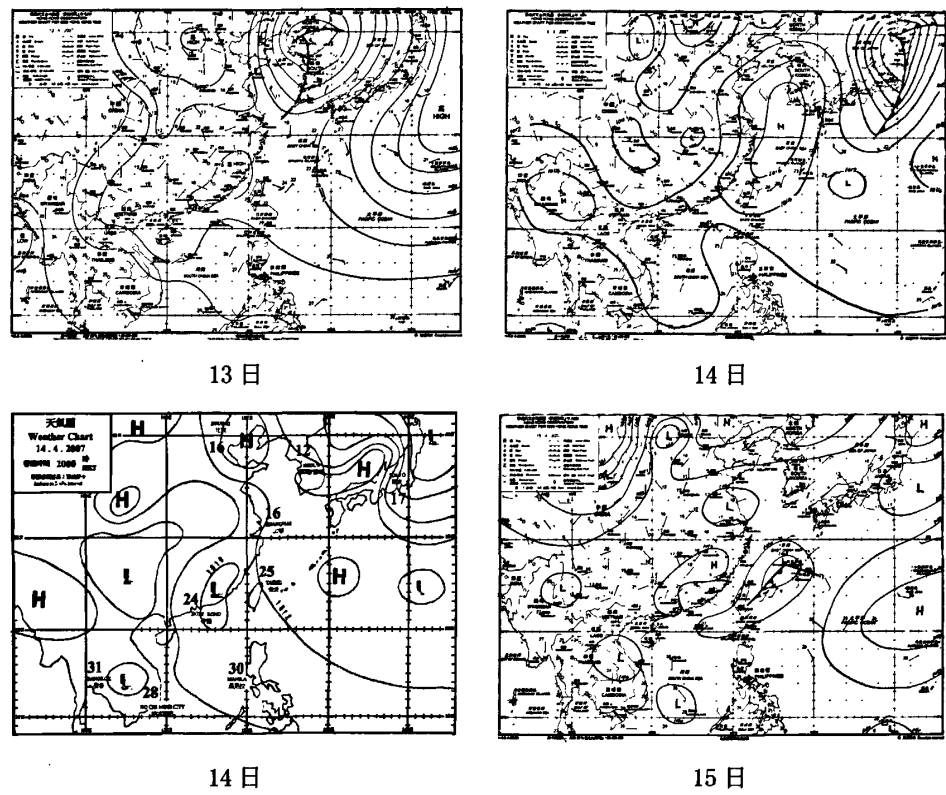


图5-5-2 2007年4月13-15日地面天气图

图5-5-2显示，4月13日，衡山东南部存在较大范围的高压中心；14日高压迅速东移入海，衡山北部存在低压中心，重庆、成都上空也存在范围较大的低压中心；15日高压中心控制衡山南部和东部，相比13日的高压中心，对衡山的影响更加明显。

图5-5-3为2007年4月13-15日卫星云图。

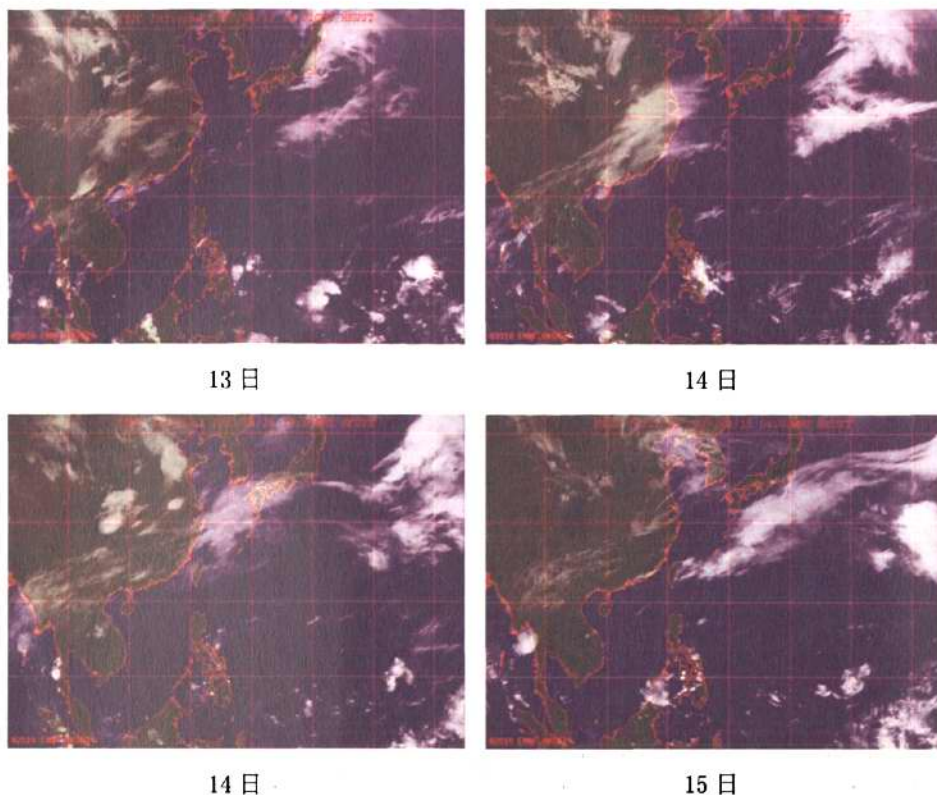
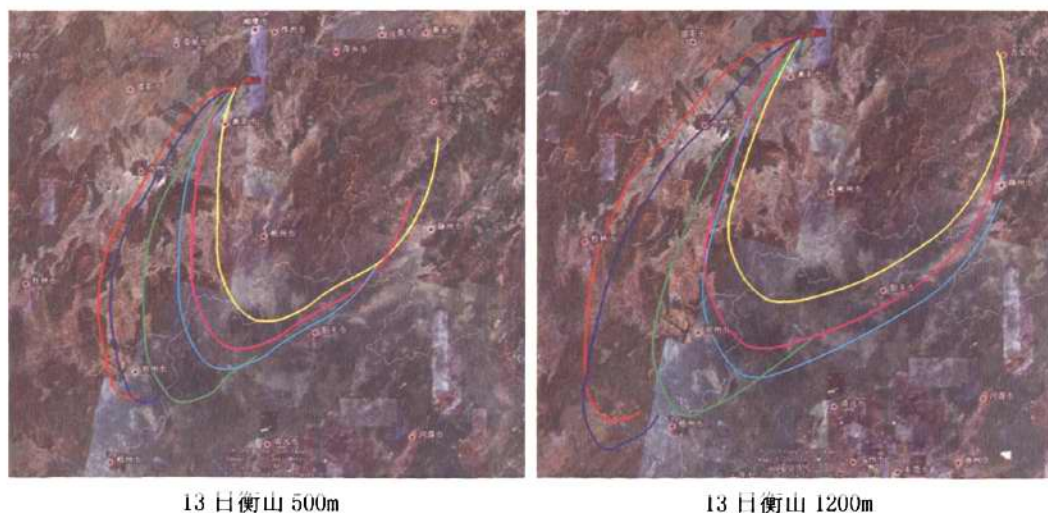


图 5-5-3 2007 年 4 月 13-15 日卫星云图

从图 5-5-3 和气象观测记录得到, 13 日衡山上空的云量较多, 有透光层积云、蔽光层积云; 14 日空中存在淡积云、碎积云、透光高积云, 实际观测云量早晚时次较少, 白天则达到 10 成; 15 日由于受到高压中心影响, 云量减少显著。

图 5-5-4 为 2007 年 4 月 13-15 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹。





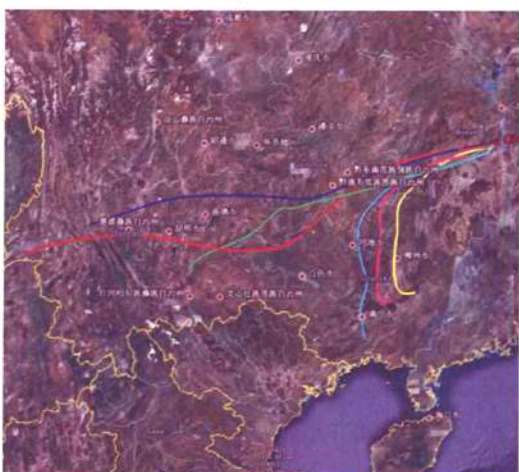
13 日衡山 2000m



14 日衡山 500m



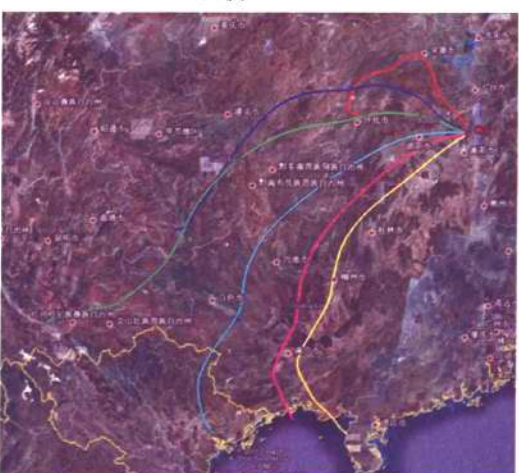
14 日衡山 1200m



14 日衡山 2000m



15 日衡山 500m



15 日衡山 1200m



15 日衡山 2000m

图 5-5-4 2007 年 4 月 13-15 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹

注：后向轨迹图中，6 种不同颜色的轨迹分别代表 6 个不同时刻的气流轨迹。

红色表示 00 时的后向轨迹，
蓝色表示 20 时的后向轨迹，
绿色表示 16 时的后向轨迹，
青色表示 12 时的后向轨迹，
粉色表示 08 时的后向轨迹，
黄色表示 04 时的后向轨迹。

从图 5-5-4 及衡山观测站的自动观测两分钟平均风向风速等气象资料可见：13 日衡山 500m 高度，最近时刻的气团主要来衡山 WSW 方向，该日早些时刻，从衡山南部到西南部区间也有不少气团输送；1200m，和 500m 特征比较类似，气团来源于衡山 WSW 方向，经过广西桂林及湖南省的永州，早些时刻 SW 方向也有部分气团；衡山 2000m，除了一直较稳定的 SW 气流外，还存在 WSW 方向气流，气团最远来自广西柳州一带。

14 日衡山 500m，主导风向主要为 SW 风，广西东部的贺州、梧州等市的气团输送对衡山该高度空气有一定影响；1200m，主要集中于 WSW 方向，偏西风主导的特征明显，广西中部一些城市输送的气团能到达衡山；2000m，气团的轨迹都比前一日更加偏西，不仅有来自广西、南宁等地的，还有来自云南昆明，途经贵州南部抵达衡山的。

15 日衡山 500m，气团继续集中在 SW 至 WSW 区域间；1200m，广西中西部城市和云南南部、贵州中南部输送的气团到达衡山，和 14 日 2000m 的气象条件相似；2000m，除偏西方向的气团，来自衡山 NW 方位的气团增多，其中主要源自贵州北部、重庆及四川东部。

由此可见，4 月 13-15 日衡山 500m、1200m 高度 WSW 风风频较高，2000m 层次偏西方向的气团占据很大比例，因此偏西风成为输送污染物的一个重要气象条件。而 14 日的降水正是这种偏西风主导形成强酸雨的典型情况。偏西风主导下形成强酸雨的个例不多见，通常情况，降水多为大于 4.50 的酸雨，有时形成的降水都不是酸雨。

图 5-5-5 为 2007 年 4 月 13-15 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹，后向轨迹运行时间是 72h；在每幅图中间方框内可看到三个高度层的输送过程。其中衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、绿色。

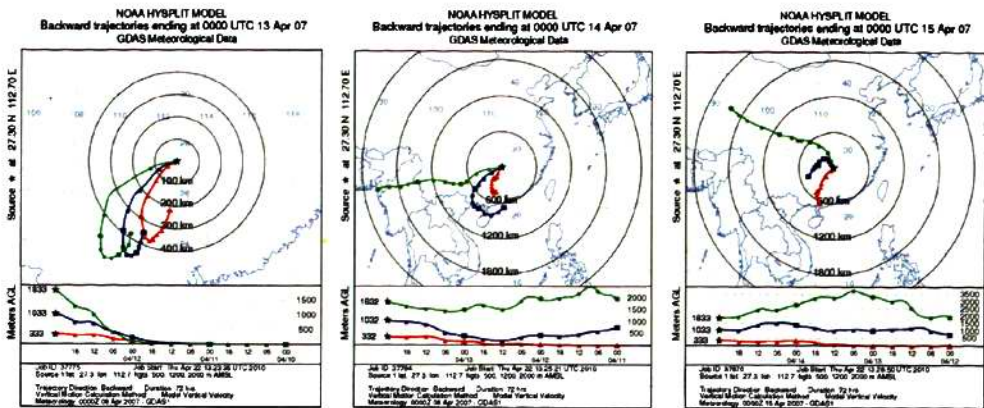


图 5-5-5 2007 年 4 月 13-15 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

图 5-5-5 说明：13 日，三个高度层的气团开始阶段处于大气低层，随着气流的输送，气团上升到各自相应高度。14 日，500m 高度输送气流的高度初始阶段较低，低于 500m；1200m 高度的气流先下沉一段高度，然后向上输送；2000m 气团的输送高度则是缓缓下降。15 日，三个高度层的输送高度分明，500m 的输送气流高度较低；1200m 输送高度保持稳定；2000m 的气流开始时刻有一定的抬升，随后逐渐沉降。

图 5-5-6 给出 2007 年 4 月长沙、郴州温度剖面。

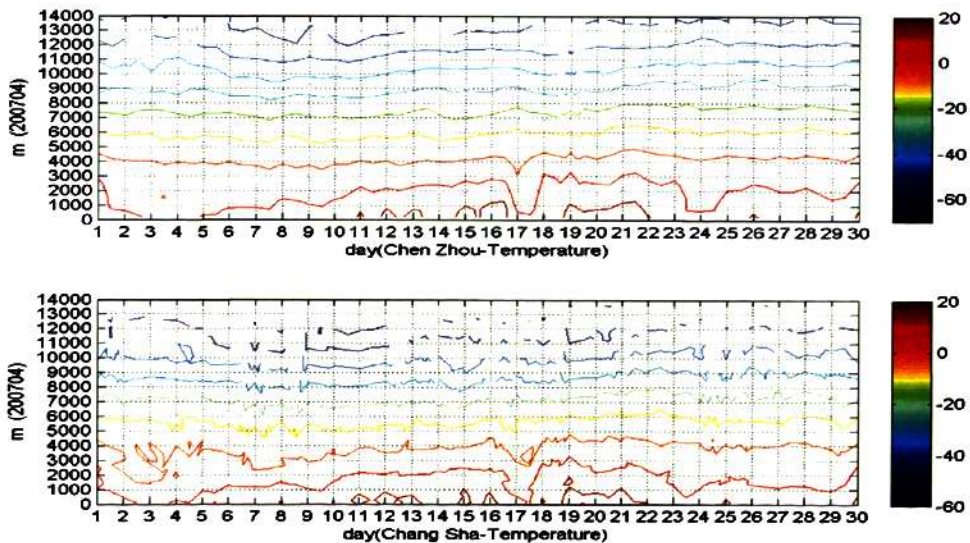


图 5-5-6 2007 年 4 月长沙、郴州温度剖面

图 5-5-6 显示，4 月 13-15 日，长沙、郴州两地 1000m 以下的温度较高，未出现逆温或较大幅度的变化，总体温度变化稳定。

图 5-5-7 为 2007 年 4 月 13-15 日衡山相对湿度变化，图 5-5-8 为 2007 年 4 月长沙、郴州相对湿度剖面。

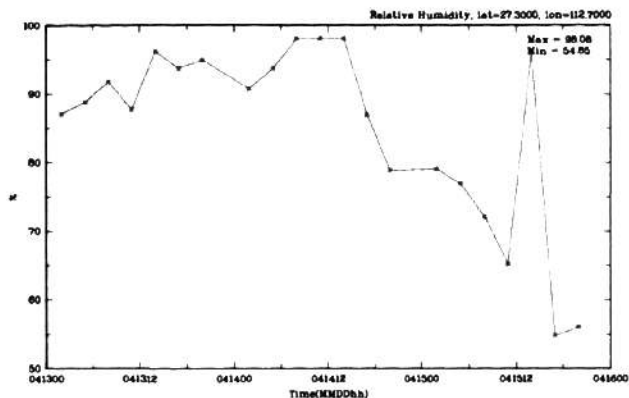


图 5-5-7 2007 年 4 月 13-15 日衡山相对湿度变化

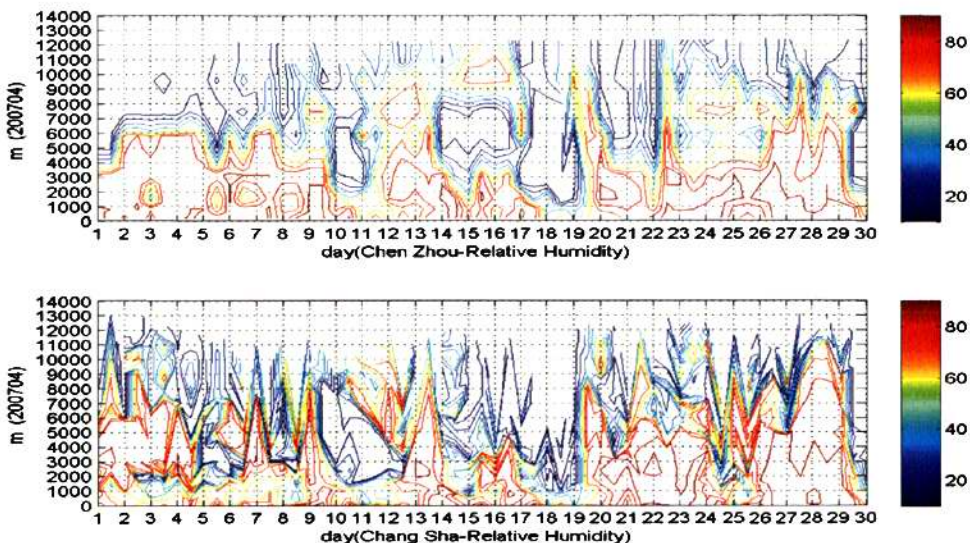


图 5-5-8 2007 年 4 月长沙、郴州相对湿度剖面

从图 5-5-7、5-5-8 和观测站气象记录得到：

13 日衡山相对湿度维持在 90% 附近；14 日随着降水增多，相对湿度升高，维持在 98%，下午 16 时降水结束，相对湿度开始下降；15 日没有降水，相对湿度继续下降，下午 13 时出现雾、露等天气现象，相对湿度骤升，14 时雾、露消失，相对湿度立刻跌到 60% 以下。

13-15 日长沙、郴州两地相对湿度都经过先增再减的过程，不同之处在于，长沙 14 日出现相对湿度高值的时间比郴州要早些，而 14 日早晨衡山相对湿度增加较快，所以长沙和衡山相对湿度的变化情况类似，郴州大体趋势和衡山相同。

图 5-5-9 给出 2007 年 4 月长沙、郴州风的 u 分量剖面。

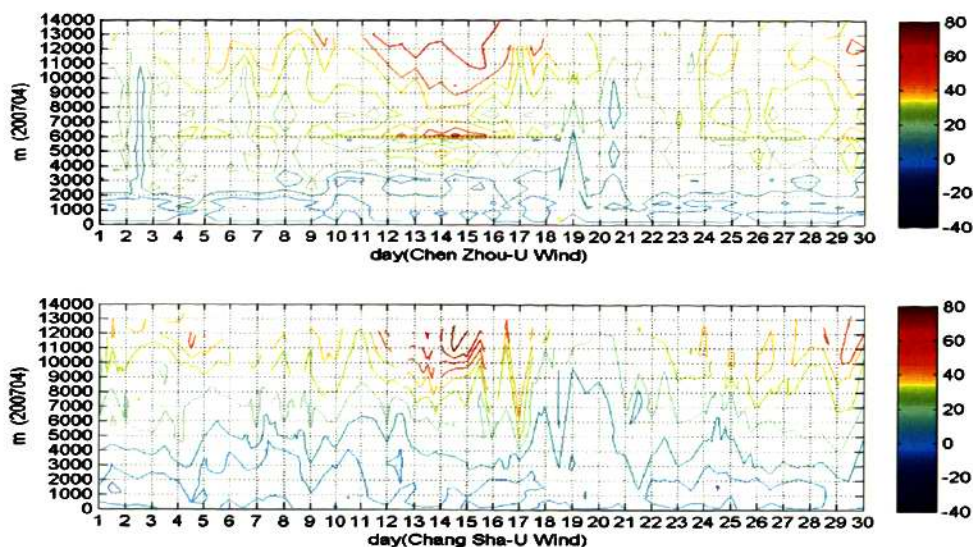


图 5-5-9 2007 年 4 月长沙、郴州风的 u 分量剖面

注：暖色调表示西风，数值为正，冷色调表示东风，数值为负。

从图 5-5-9 可见，13-15 日，长沙 2000m 以下风的 u 分量以西风为主，风速比较稳定，14 日 1000m-2000m 存在西风；郴州这几日西风占据控制地位，但风速不如长沙稳定，且 1000-2000m 之间很少出现西风。

图 5-5-10 给出 2007 年 4 月长沙、郴州风的 v 分量剖面。

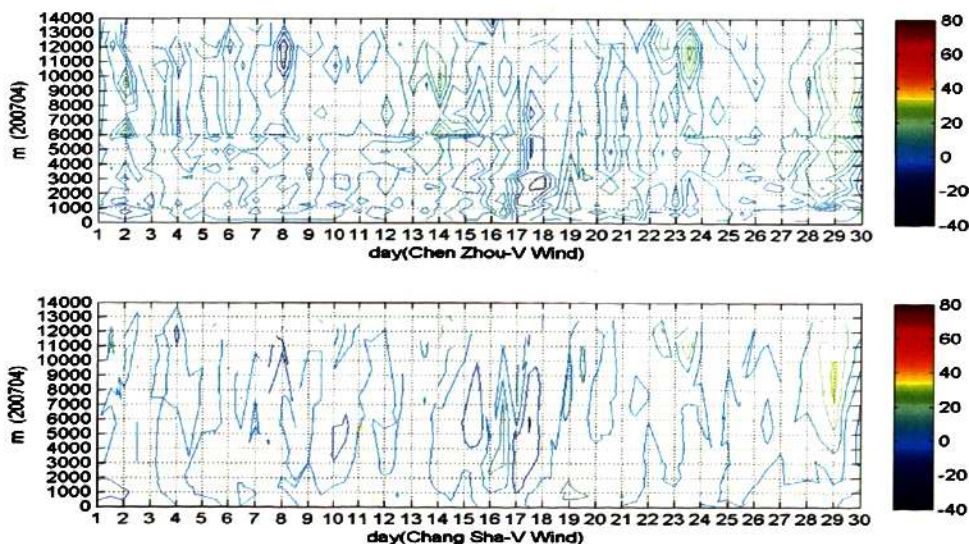


图 5-5-10 2007 年 4 月长沙、郴州风的 v 分量剖面

注：暖色调表示南风，数值为正，冷色调表示北风，数值为负。

从图 5-5-10 可见，13 日长沙 2000m 以下南、北风较少；14 日南风增多；

15 日以南风为主。13 日郴州 1000-2000m 存在南风；14、15 日 v 分量同样是南风居多。和长沙相比，郴州的南风等值线更密集。

图 5-5-11 给出 2007 年 4 月 13-15 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）。

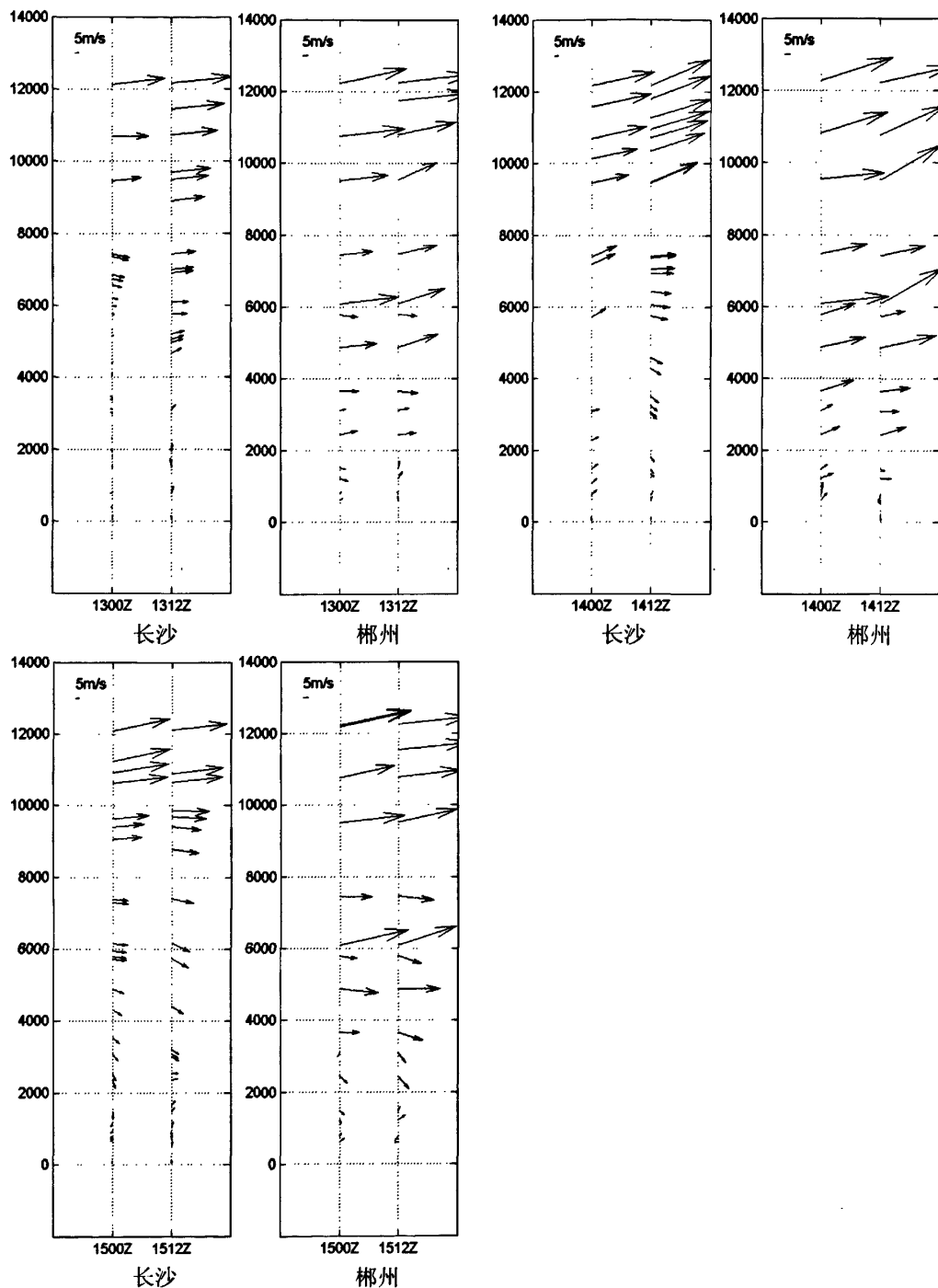


图 5-5-11 2007 年 4 月 13-15 日长沙、郴州风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）

从图 5-5-11 可见, 4 月 13-15 日的水平风特征:

13 日 00 时次长沙 2000m 以下风速不大, 12 时次从底层到 2000m, 风向从 SW 转为 S 风; 14 日一致的 WSW 风, 12 时次 1200m-2000m 高度 NW 风比例增加; 15 日 00 时次 NW 等偏北风比例较大, 12 时次转为偏南风为主。

13 日 00 时次郴州偏西风比例较大, 12 时次 SW 等偏南风比例增多; 14 日偏西风在 1200m 到 2000m 之间占据绝对的主导地位, 1200m 以下, 存在 SW 风; 15 日除 WSW、SW 等风向, 出现 NW 等偏北风。

综合上面分析, 偏西风个例日期——2007 年 4 月 14 日长沙、衡山、郴州 2000m 以下一致偏西风输送的气象条件下, 衡山出现了强酸雨。

综合本衡山酸雨偏西风影响个例和其它偏西风个例的研究结果, 可得到图 5-5-12 所示受偏西风影响时衡山的酸雨形成概念示意图。

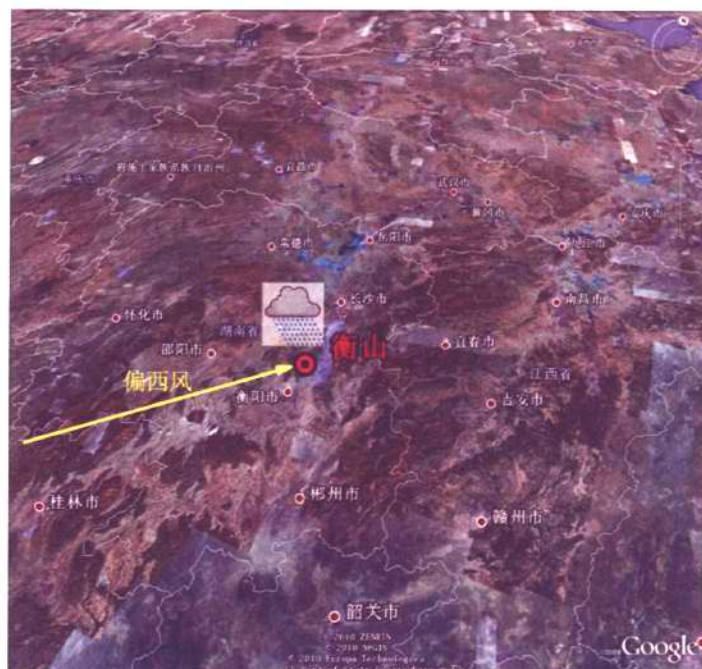


图 5-5-12 受偏西风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

图 5-5-12 的概念示意图表明:

(1) 在偏西风影响下, 从贵州省、广西中部城市排放的污染物可能被气团携带, 途径怀化、邵阳, 最后到达衡山。所以污染物来源湖南省内为怀化、邵阳等西部城市, 省外为广西中部和贵州省地区。

(2) 衡山春季偏西风主导的降水日较少, 该种气象条件下降水酸性较弱, 有时甚至不是酸雨, 酸雨污染在四种风向中最弱。

5.6 静风影响个例剖析

前面分别讨论了偏北风等四种风向输送特征对衡山春季酸雨过程影响的典型个例，它们的共同点便是区域输送对衡山酸雨过程有着重要影响。但忽略了静风条件下，衡山本地附近源的输送对衡山酸雨污染物的贡献，所以选取静风的个例进行分析。

静风个例选取的是日期是2007年4月27日。图5-6-1为2007年4月26-28日衡山温度、风速风向变化，表5-6-1为2007年4月26-28日衡山降水pH值、降水量、日平均风速。

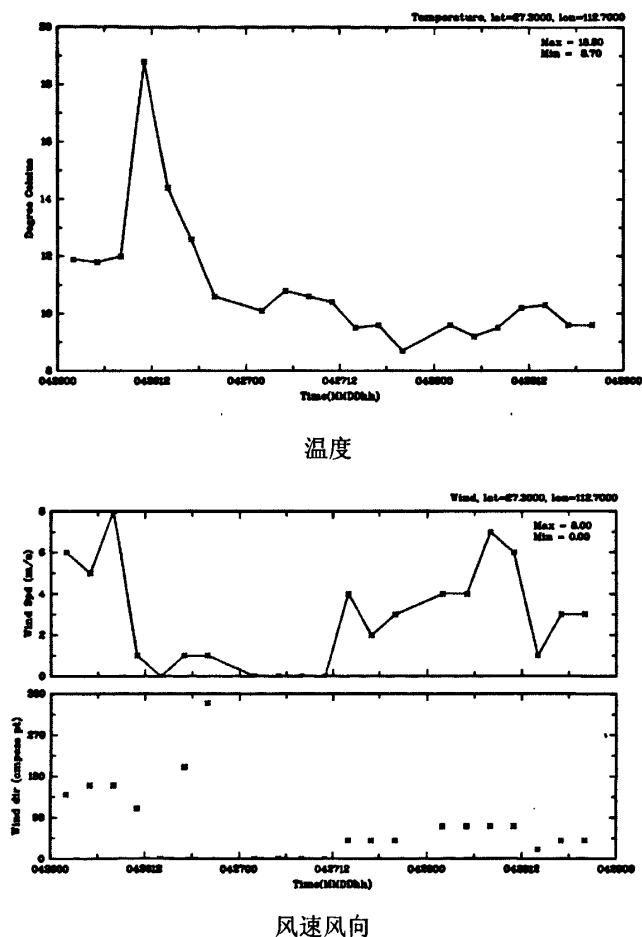


图 5-6-1 2007 年 4 月 26-28 日衡山温度、风速风向变化

表 5-6-1 2007 年 4 月 26-28 日衡山降水 pH 值、降水量、日平均风速

日期	pH 值	降水量 (mm)	日平均风速 (m/s)
4.26	5.12	14.2	3.4
4.27	4.20	15.8	1.2
4.28	4.52	31.2	3.9

从图 5-6-1 和表 5-6-1 可见,2007 年 4 月 26-28 日的日平均温度分别为 12.8℃、10.0℃和 9.6℃,三日的温度逐日下降。26 日以偏南风为主,其中 SSE、SE 和 S 风向较多,末端时间静风增多;27 日以静风为主导,同时存在一定比例的 NE、NNE 等偏北风,所以在图 5-6-1 风速风向变化图中,27 日出现偏北风;28 日 ENE 和 NE 风向占据主导风向。27 日静风主导的日子风速最小,日平均风速仅 1.2m/s,其他两日则为 3.0 m/s 以上。26、27 日降水量级别均达到中雨,28 日降水量更是超过 30.0mm 的大雨。26 日的降水 pH 值为 5.12,酸性不强;27 日 pH 值低于 4.50,属强酸雨;28 日降水酸度略微好转,不再为强酸雨。

图 5-6-2 给出 2007 年 4 月 26-28 日地面天气图。

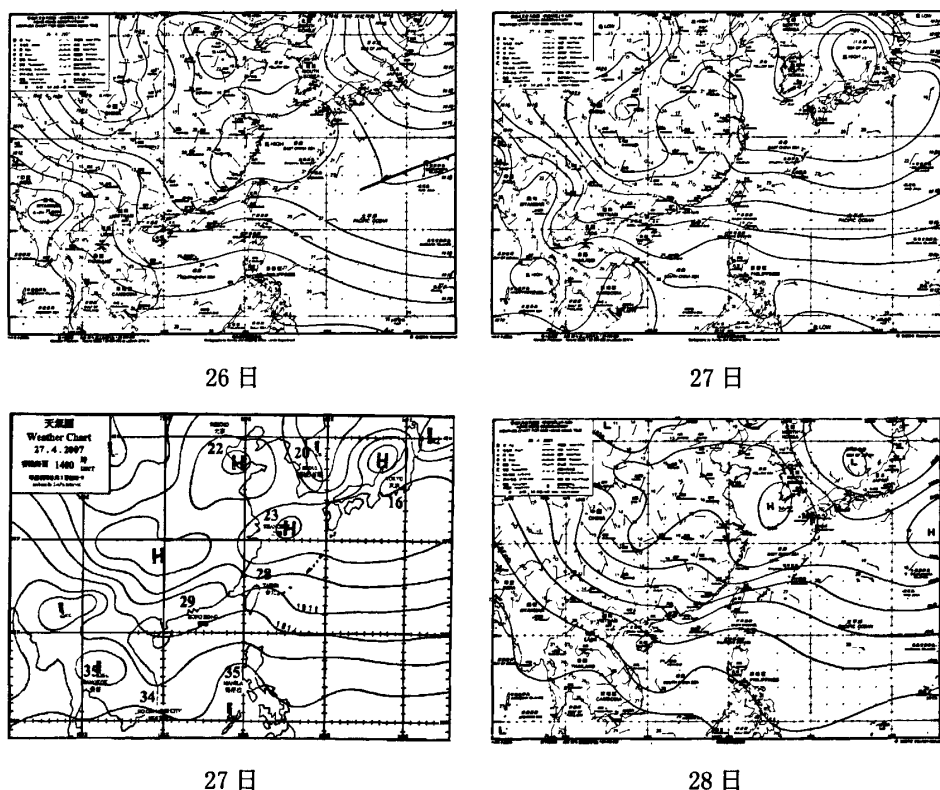


图 5-6-2 2007 年 4 月 26-28 日地面天气图

图 5-6-2 显示,4 月 26 日,衡山东部,江西、福建、江苏一带存在范围较大的高压中心。27 日,26 日的高压中心东移,衡山西北部则存在另一高压中心,晚些时刻,高压中心南移,大致位于衡山西部。28 日衡山高空受低槽影响,中低层由于切变线影响,出现大的降水过程。

图 5-6-3 为 2007 年 4 月 26-28 日卫星云图。

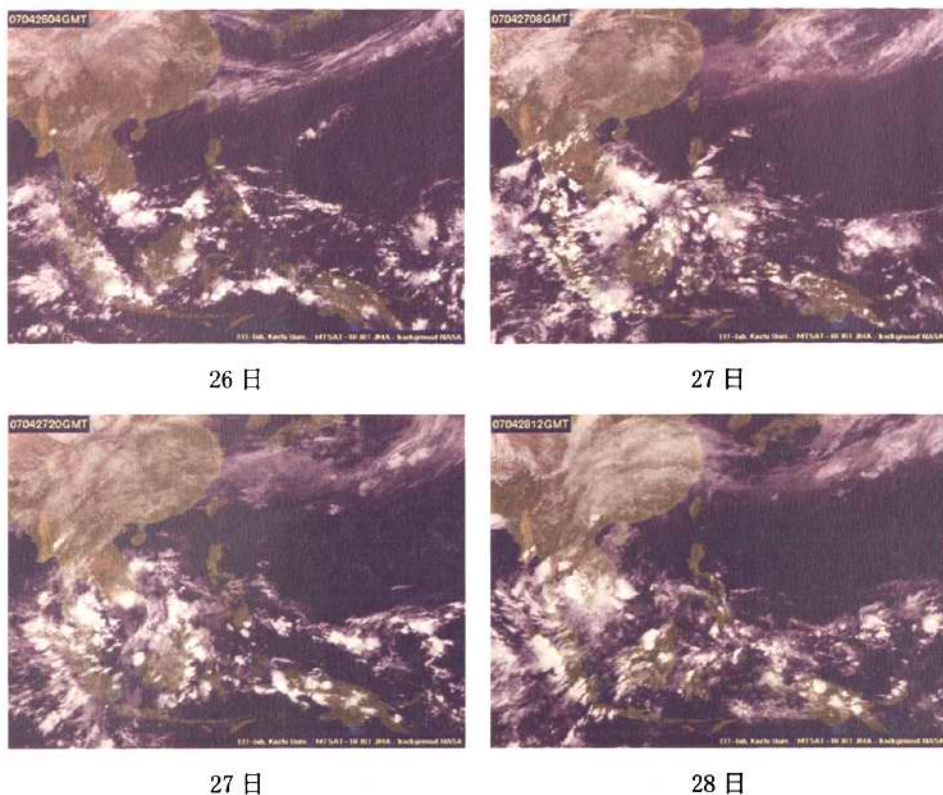


图 5-6-3 2007 年 4 月 26-28 日卫星云图

从图 5-6-3 和气象观测记录得到, 26 日衡山受到东部高压中心影响, 空中总云量白天初始阶段云量不多, 随后渐渐增多, 可观测到透光高积云、淡积云、碎积云和蔽光层积云。27 日衡山上空云量增加明显, 尤其是夜间时刻, 全天观测的总云量和低云量一直为 10 成。28 日衡山和 27 日类似, 云量很多。

图 5-6-4 为 2007 年 4 月 26-28 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹。



26 日衡山 500m

26 日衡山 1200m



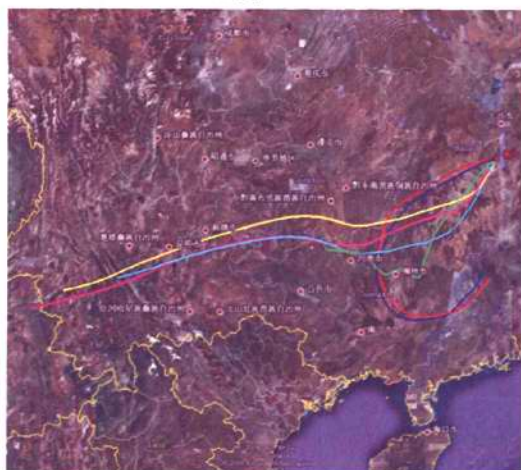
26 日衡山 2000m



27 日衡山 500m



27 日衡山 1200m



27 日衡山 2000m



28 日衡山 500m



28 日衡山 1200m



注：后向轨迹图中，6 种不同颜色的轨迹分别代表 6 个不同时刻的气流轨迹。

红色表示 00 时的后向轨迹，
蓝色表示 20 时的后向轨迹，
绿色表示 16 时的后向轨迹，
青色表示 12 时的后向轨迹，
粉色表示 08 时的后向轨迹，
黄色表示 04 时的后向轨迹。

28 日衡山 2000m

图 5-6-4 2007 年 4 月 26-28 日衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹

从图 5-6-4 以及衡山观测站风向等气象资料可见

26 日，衡山 500m 气团来自于衡山偏北方向，经过长株潭区域；1200m 高度，气团多来自衡山东部，经过江西宜春等市；衡山 2000m 高度，既有来自南方的气团，又有来自东北部的的气团。

27 日，衡山 500m 的后向轨迹较曲折，较近时刻的气团多来自衡山北部，而早些时刻，部分来源于 SE 方向；1200m，由于静风的影响，红色的后退轨迹几乎绕衡山一圈，其他轨迹则来自南部和东部；2000m 高度，气团主要来自 WSW 和 SW 方向。

28 日，衡山 500m，经过长株潭上空的偏北方向的气团占据主导地位，另外有 NE 方向的气团；1200m 高度，ENE 方向集中了大部分污染物的输送路径；2000m 位置，稳定的 SW 气流输送到衡山高空。

图 5-6-5 为 2007 年 4 月 26-28 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹，后向轨迹运行时间是 72h；在每幅图中间方框内可看到三个高度层的输送过程。其中衡山 500m、1200m、2000m 后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、绿色。

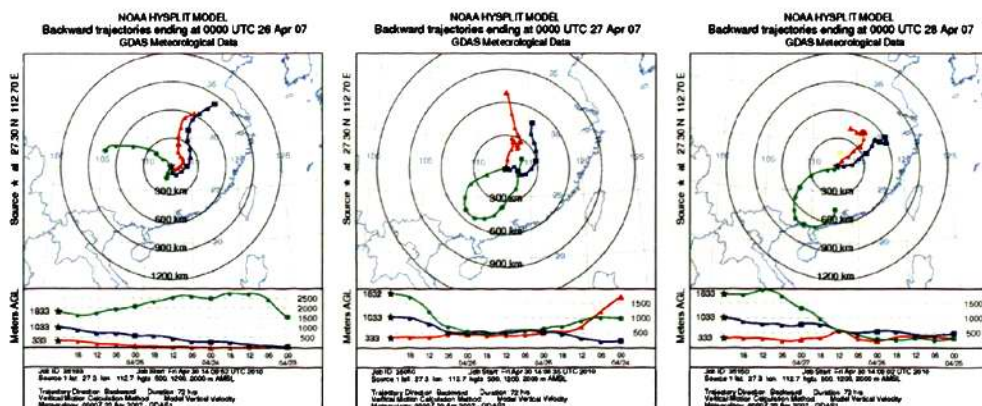


图 5-6-5 2007 年 4 月 26-28 日衡山 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

图 5-6-5 说明：26 日 500m 的气团输送高度平稳，1200m 高度的气团经历过逐渐上升阶段，2000m 的气团则先上升，再渐渐下沉；27 日三个高度层的气团输送了一段距离后，气流所处的高度都几乎相同，随后再分别输送到各自高度。

之前的多个个例通过对长沙、郴州的探空数据分析，研究衡山酸雨形成时，其周围大气气象要素的垂直结构，结果发现长沙探空数据所显示的气象要素的变化趋势和衡山较接近，所以此次分析过程不再对郴州进行研究。

图 5-6-6 给出了 2007 年 4 月长沙温度剖面。

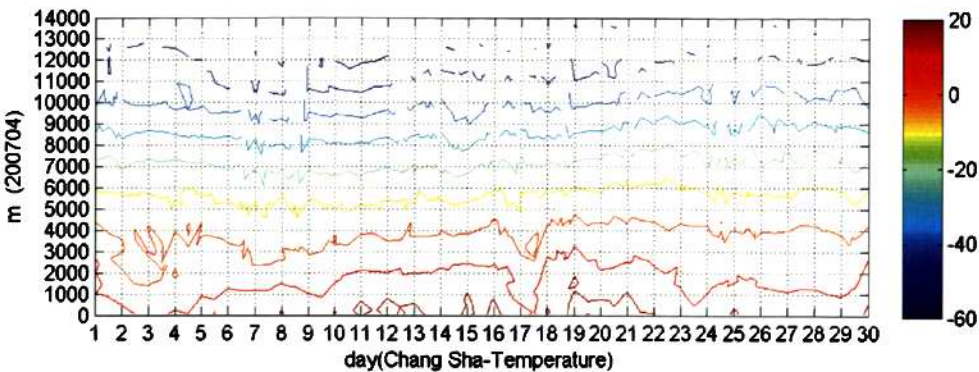


图 5-6-6 2007 年 4 月长沙温度剖面

图 5-6-6 显示，长沙 26-28 日，2000m 以下的等温线平直，没有逆温或者大的幅度变化，说明该段时间长沙上空空气温度变化平稳。

图 5-6-7 为 2007 年 4 月 26-28 日衡山相对湿度变化，图 5-6-8 为 2007 年 4 月长沙相对湿度剖面。

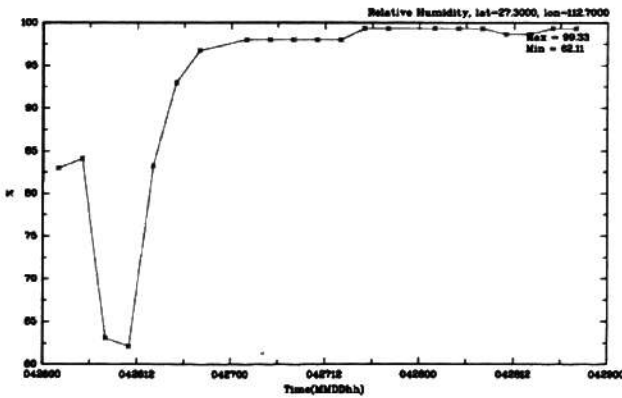


图 5-6-7 2007 年 4 月 26-28 日衡山相对湿度变化

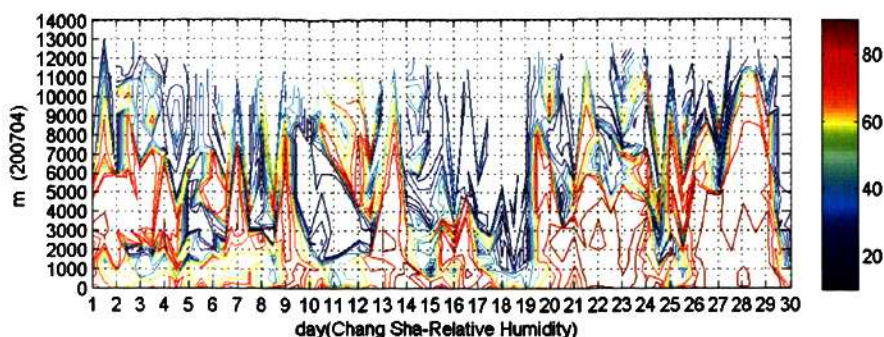


图 5-6-8 2007 年 4 月长沙相对湿度剖面

从图 5-6-7、5-6-8 和观测站气象资料得到：

26 日衡山相对湿度降到 65% 以下，随着午后的降水，相对湿度逐渐上升。27-28 日衡山均有降水降水，使得相对湿度维持在 97%-100% 的较高水平，28 日大雨使得相对湿度比 27 日略高。

26-28 日长沙相对湿度的等值线显示的均为高值，28 日出现接近闭合的高值中心，所以 28 日相对湿度是三日中最大。这些和衡山 26-28 日相对湿度的趋势类似。

图 5-6-9 给出了 2007 年 4 月长沙风的 u 分量、v 分量剖面剖面。

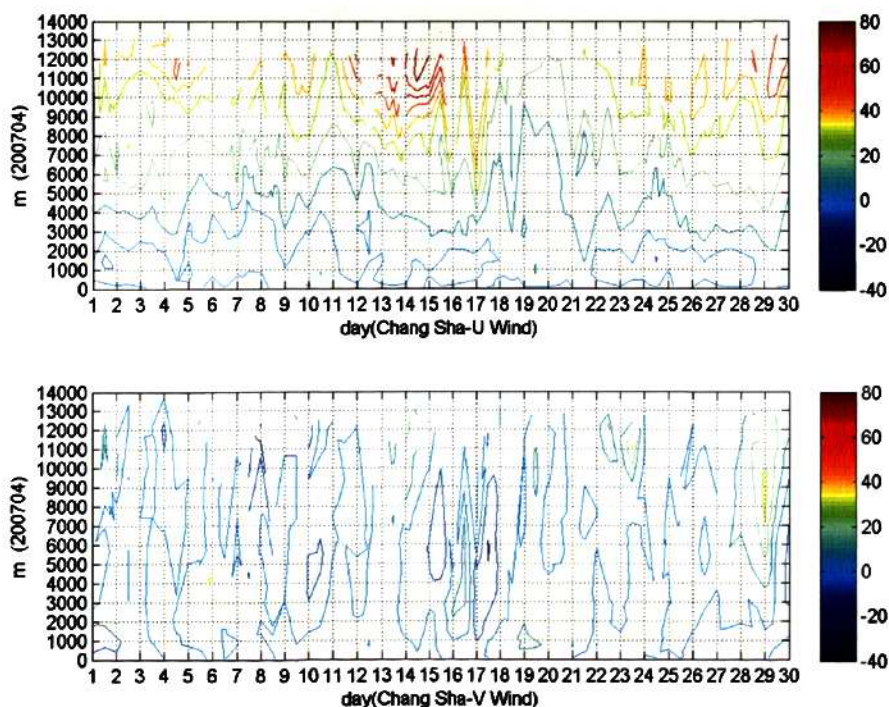


图 5-6-9 2007 年 4 月长沙风的 u 分量、v 分量剖面

注：u 分量剖面中，暖色调表示西风，数值为正，冷色调表示东风，数值为负。

v 分量剖面中，暖色调表示南风，数值为正，冷色调表示北风，数值为负。

从图 5-6-9 可见：26-28 日，长沙 2000m 以下 u 分量以东风为主。2000m 高度 v 分量为南风，低层没有等值线，因此长沙高层南风居多，和衡山高层风向特点相似。

图 5-6-10 给出 2009 年 4 月 26-28 日长沙风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）。

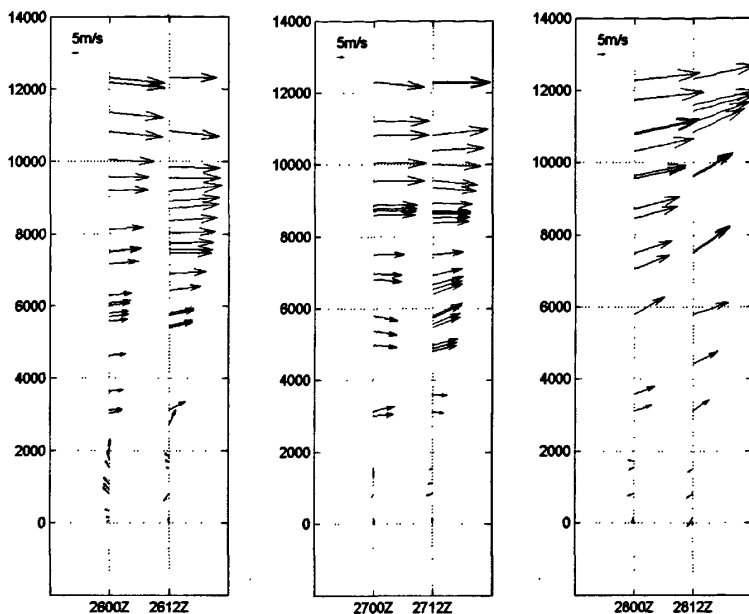


图 5-6-10 2009 年 4 月 26-28 日长沙风矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）

从图 5-6-10 可见，4 月 26-28 日水平风特征：

26 日 00 时次长沙从低层到 2000m 高度，风向从偏东风转为 SE 风，然后转为 S 风；12 时次，1000m 以下 NE 等偏北风增多，1000m-2000m SE 风向较多。因此衡山 500m 高度气团主要来源于偏北方向，1200m 高度来自东部，2000m 高度来自南部和东北部。

27 日，风速相比 26 日低很多，00 时次 2000m 以下以弱的偏北风为主；12 时次 1000-2000m 有较弱偏东风。27 日长沙风矢量特点和衡山 27 日 500m 气团来自偏北方向，1200m 有东部气团输送的情形相符。

28 日，风速比 27 日明显增大，00 时次 1000m 以下偏北风较多，1000m-2000m 风向转为偏东风；12 时次，2000m 下 ENE 或者 NE 风频较高。28 日长沙风矢量特点和衡山 500m 偏北方向气团居多，1200m 主要为 ENE 风输送气团的情形相似。

综合上述的分析可见：

（1）衡山主导风向为静风时，也存在 NE、NNE 等风向。在这种情况下，偏北和偏东风向输送的污染物逐渐积累，造成了衡山的强酸雨，所以污染物除部分属于本地输送，多数属于区域输送。

（2）静风为主导风向时，衡山酸雨与静风前主导风向的输送特征有关。

（3）静风主导的降水日在近三年衡山春季只出现过这一次，可能还需要更多个例来进行验证。

5.7 沙尘暴影响个例剖析

2009年3-5月酸雨加强观测期间,在衡山碰到一次沙尘暴过程,据报道^[78]:4月23日凌晨至24日,我国出现2009年以来第六次沙尘天气过程,也是2009年1-4月以来最强沙尘暴天气。23日凌晨至24日早晨,内蒙古中西部、甘肃中西部、宁夏、陕西北部、山西中北部、新疆南疆盆地等地出现扬沙或沙尘暴。24日白天,沙尘继续东移南下,河北中南部、山东北部、河南东北部及渤海湾等地上空都出现了浮尘或扬沙天气。从4月22日早晨开始,中央气象台多次发布沙尘天气预报信息,23日还发布了沙尘暴橙色警报。本次沙尘天气波及新疆、内蒙古等十二省(自治区、直辖市),是2009年1-4月我国出现的影响范围最大的一次沙尘天气过程;局地出现强沙尘暴和特强沙尘暴;本次区域性沙尘暴天气从23日凌晨持续至24日白天,历时约40个小时。可见本次沙尘天气影响范围广、强度大、持续时间长。

图5-7-1给出2009年4月25日FY-3A卫星监测图像。

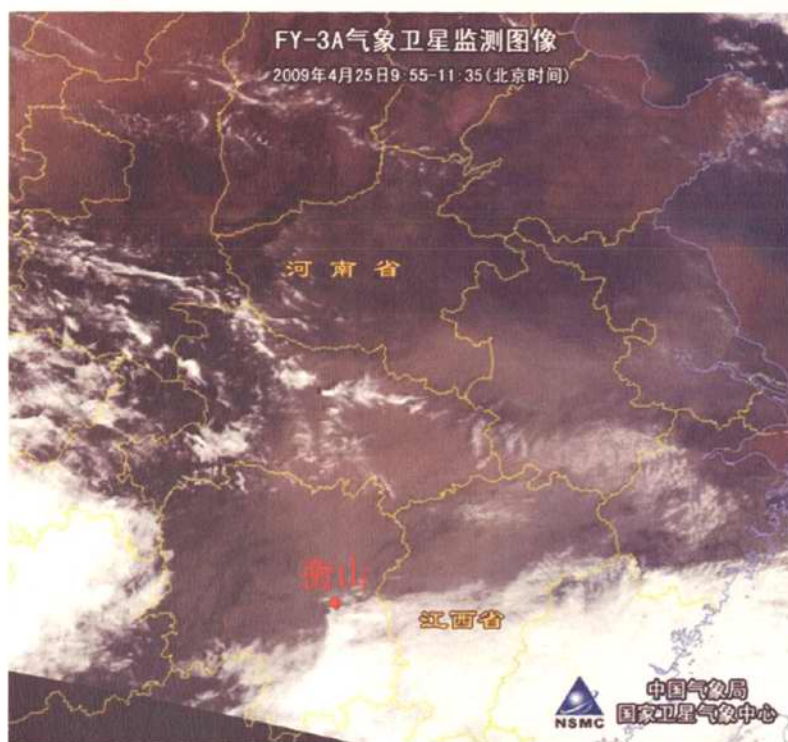


图5-7-1 2009年4月25日FY-3A卫星监测图像^[79]

在这次沙尘暴过程,湖南省同样受到浮尘影响。图5-7-1可见,25日浮尘到达了湖南、江西省。一直以来衡山酸雨污染较严重,但遭遇沙尘暴过程中,降水pH值明显上升,降水虽不是酸雨,可分析沙尘暴个例对探讨衡山酸雨pH值变化原因有帮助,所以对此次衡山遭遇的沙尘暴个例进行分析。

图5-7-2给出衡山2009年4月23-28日500m、1200m、2000m三个高度层的后向轨迹,后向轨迹运行时间是72h;在每幅图中间方框内可看到三个高度层的输送过程。其中衡山500m、1200m、2000m后向轨迹颜色分别为红色、蓝色、

绿色。

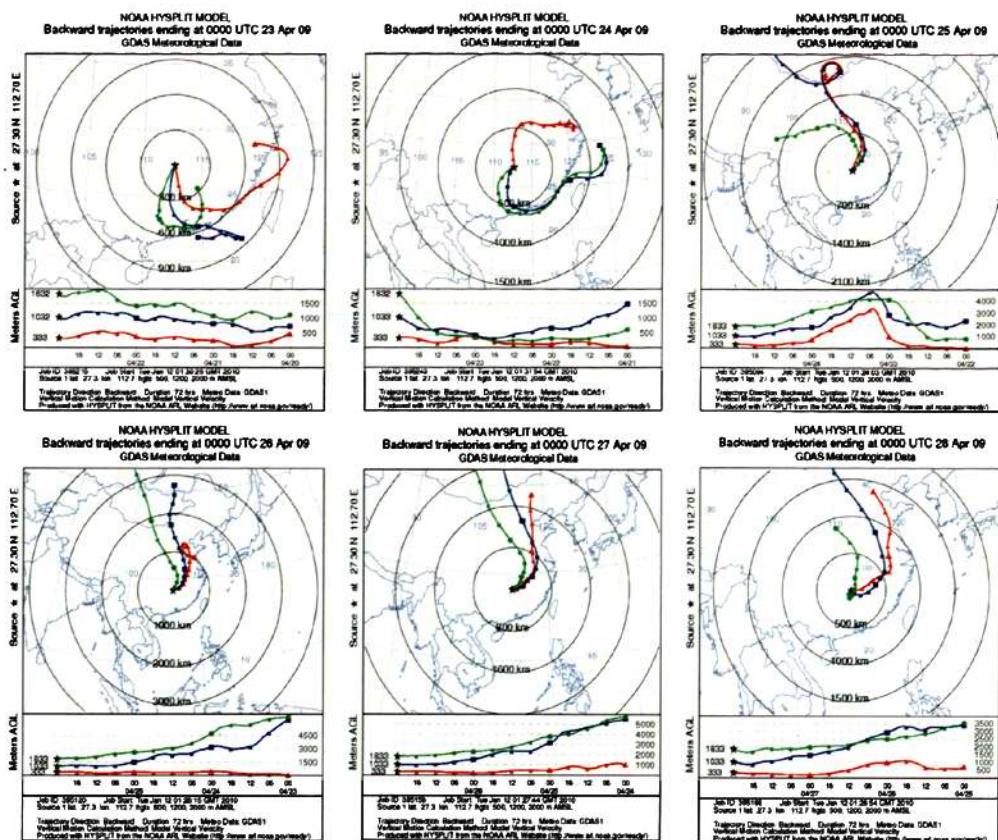


图 5-7-2 衡山 2009 年 4 月 23-28 日 500m、1200m、2000m 三个高度层的后向轨迹

从图 5-7-2 可见：

(1) 23 日，气团主要来自衡山南部；24 日 500m 高度处的气团来源转向，从南部转为北部；25 日气团全部转向，均来自北部；27-29 日，随着沙尘暴的影响逐渐减弱，气团来向未发生变化，三个高度的气团仍来自衡山偏北方向。

(2) 三个高度层的输送过程显示，23 日三个高度层气团输送较分明；24 日，1200m 处气团经历明显下沉阶段，2000m 的气团输送高度末期上升显著；25 日三个高度的气团全经过一定的抬升，随后沉降到中低层，沉降特征突出；26 日 500m 输送平稳，1200m、2000m 的气团呈现下沉趋势；27-28 日输送特征和 26 日类似。可见沙尘暴过后，天气系统均一，气团远距离输送后下沉，因此其携带的污染物很难上卷。

图 5-7-3 为 2009 年春季衡山观测期间空气污染物浓度变化曲线。

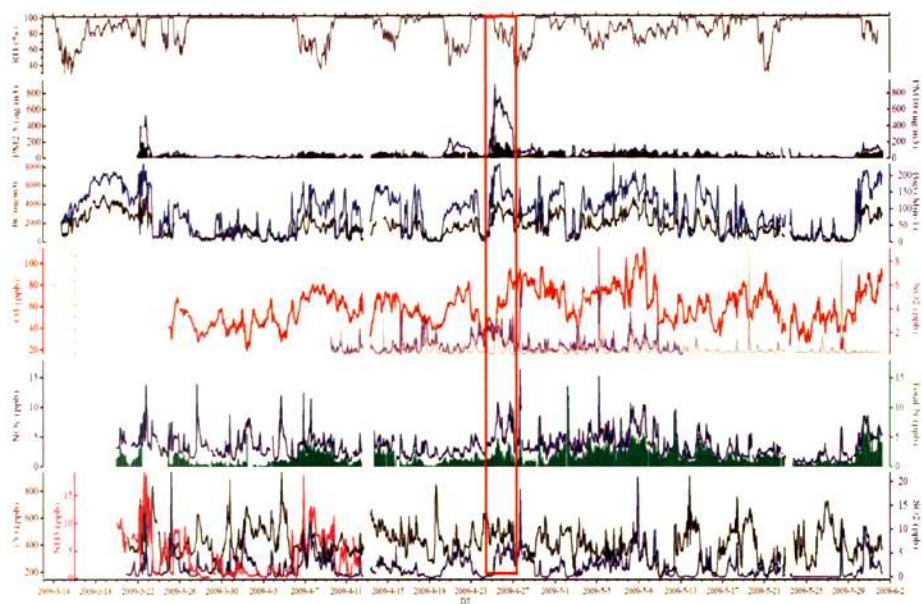
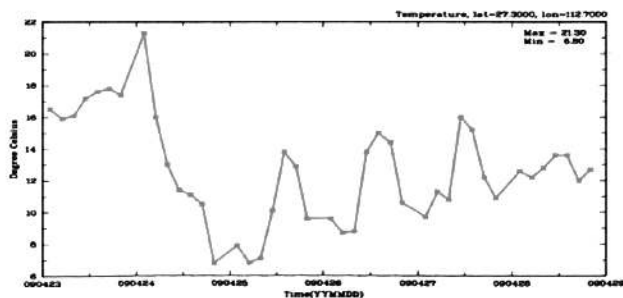


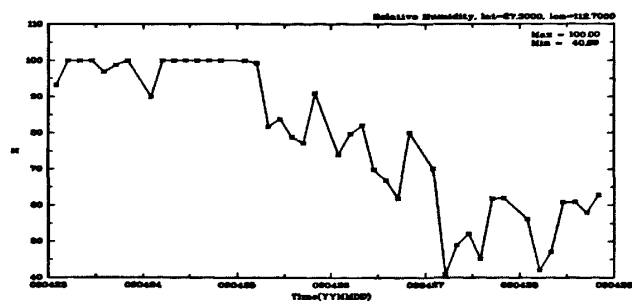
图 5-7-3 2009 年春季衡山观测期间空气污染物浓度变化曲线
注：红框所框中的沙尘暴时段多种污染物浓度出现高值。

图 5-7-3 显示，在 4 月 25 日，PM_{2.5}、PM₁₀ 以及其他大气污染物浓度骤增。从之前对后向轨迹的分析，了解到 25 日气流沉降特征显著，所以沙尘暴中浮尘颗粒物沉降，使得衡山空气里面的 PM_{2.5}、PM₁₀ 短时浓度突然增高，出现峰值。

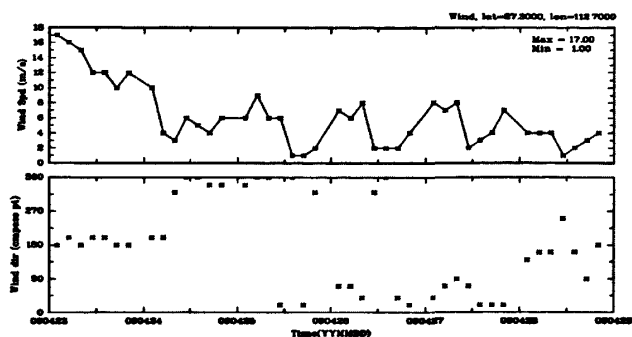
图 5-7-4 给出 2009 年 4 月 23-28 日衡山温度、相对湿度、风向风速、能见度、气压曲线。



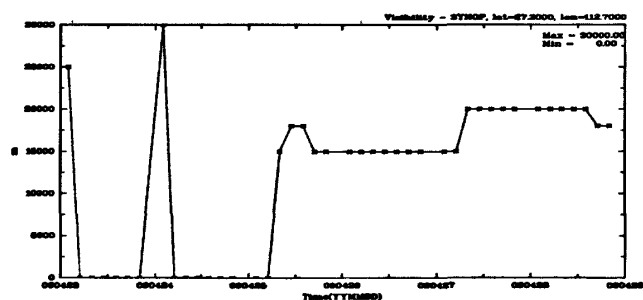
温度



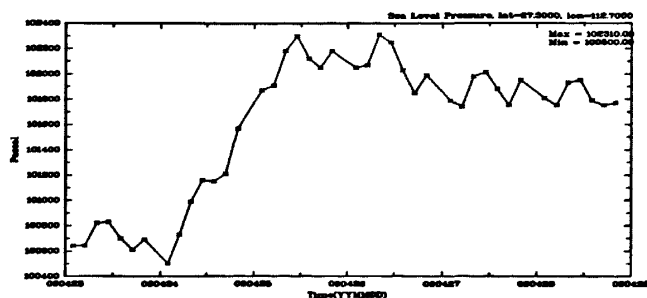
相对湿度



风向风速



能见度



气压

图 5-7-4 2009 年 4 月 23-28 日衡山温度、相对湿度、风向风速、能见度、气压曲线

从图 5-7-4 可见：随着沙尘暴的到来，24 日衡山温度突降到 7℃ 以下，和

23 日最高温度相比,降幅多达 14℃ 以上。24 日风向从偏南风转为偏北风,风速初始阶段增大;25 日当冷空气完全控制时,盛行北风,风速相对稳定。23 日衡山的降水使空气相对湿度达 100%,且降水导致 23 日能见度降为 0;24 日相对湿度下降,很可能沙尘暴部分颗粒物已到达衡山,随后由于降水,相对湿度回升,能见度大部分时间为 0;25 日沙尘暴使衡山相对湿度继续降低,此时能见度虽未降为 0,但 15km 的能见度和 23 日的 25km 相比有一定降低。当沙尘暴过境,气压经过短暂的降低过程,随后随着冷空气的控制,气压升高,并维持在较高水平。

表 5-7-1 给出 2009 年 4 月 23-28 日衡山降水 pH 值、降水量。

表 5-7-1 2009 年 4 月 23-28 日衡山降水 pH 值、降水量

日期	降水量 (mm)	pH 值
4 月 23 日	34.1	4.47
4 月 24 日	29.4	6.91
4 月 25 日	0	/
4 月 26 日	0	/
4 月 27 日	0	/
4 月 28 日	6.9	4.02

注:“/”表示降水量为 0,则不存在 pH 值

表 5-7-1 显示,23 日衡山降水量较大,降水级别为大雨且是强酸雨,酸雨污染严重。24 日,pH 骤升到 6.91,这一值是衡山春季的最高值,也是 2006 年 7 月-2009 年 5 月衡山所有降水日的最高值。推测这个近三年来的 pH 最高值很可能与沙尘暴有关。因沙尘暴过境,带来大量碱性的沙尘颗粒和气溶胶,衡山高空云受其影响,降水中的酸性物质被中和,导致 pH 值升高。

由于衡山没有空气污染指数 (API) 数据,所以选取长沙市 4 月 API 指数资料进行参考。图 5-7-5 为 2009 年 4 月长沙市 API 指数变化曲线。

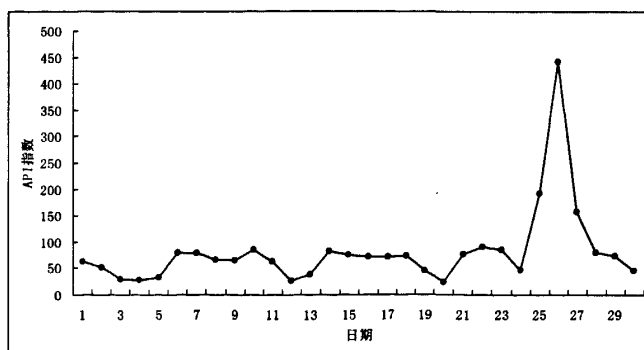


图 5-7-5 2009 年 4 月长沙市 API 指数变化曲线

从图 5-7-5 中可见,24 日沙尘暴来临,长沙市 API 指数为 48;25 日长沙市可吸入颗粒物浓度骤升,污染指数增至 194,翻了 4 倍多;26 日,更是达到最高峰,指数飙升至 443,空气质量出现重度污染;27 日,污染指数下降;28 日,API 降到长沙市的正常水平 80 左右,空气质量状况恢复良好。

在图 5-7-5 和图 5-7-3 中存在一个问题：衡山和长沙市的颗粒物浓度都是 25 日开始，但衡山降水 24 日达到 6.91，降水 pH 值变化相对颗粒物浓度变化要提前 1 日。具体原因可能是因为在沙尘暴过程中，23-24 日沙尘暴部分沙尘颗粒物在高空气流的推动下，先行到达衡山高空，碱性物质对衡山高空成云降雨过程造成影响。24 日衡山降水部分来自于中高云，导致降水呈碱性。25 日沙尘暴过境再加上之前到达颗粒物的沉降，使 25 日衡山及长沙空气中颗粒物含量剧增。因此，衡山 24 日降水 pH 值增大，和 25 日空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度升高，两者并不矛盾。

图 5-7-6 给出了 2009 年 4 月长沙相对湿度、比湿剖面。

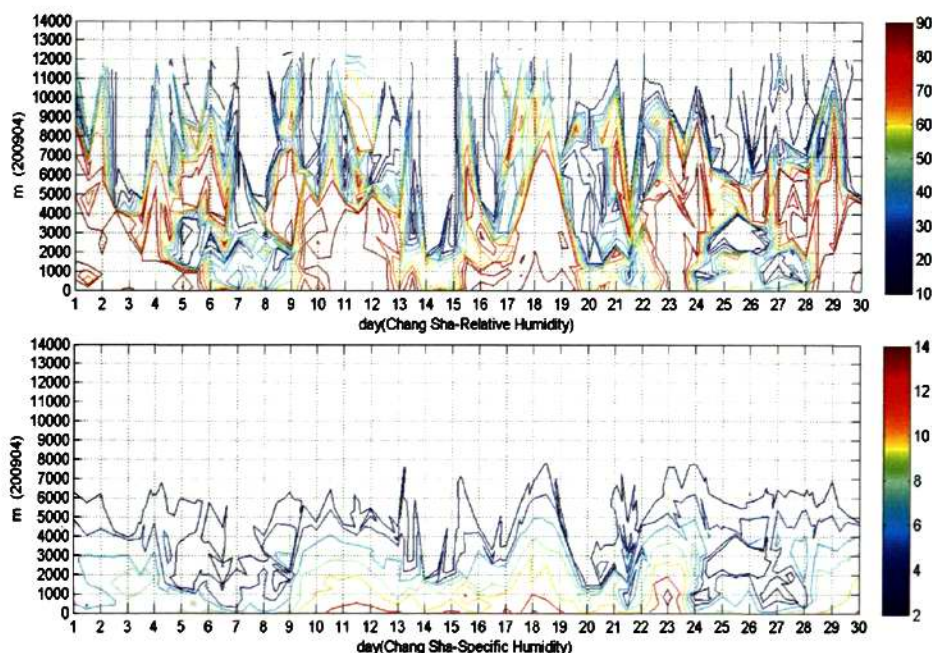


图 5-7-6 2009 年 4 月长沙相对湿度、比湿剖面

图 5-7-6 显示，无论相对湿度还是比湿剖面，24 日长沙上空 1000m 处已经出现深蓝色的低值区，即相对湿度和比湿在 24 日处于较低水平。所以，长沙市 24 日中高空已受沙尘暴影响，而长沙和衡山距离不过 100 多 km，推测衡山中高空 24 日同样受到沙尘暴的影响。

图 5-7-7 给出了 2009 年 4 月 23-28 日长沙风向矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）。

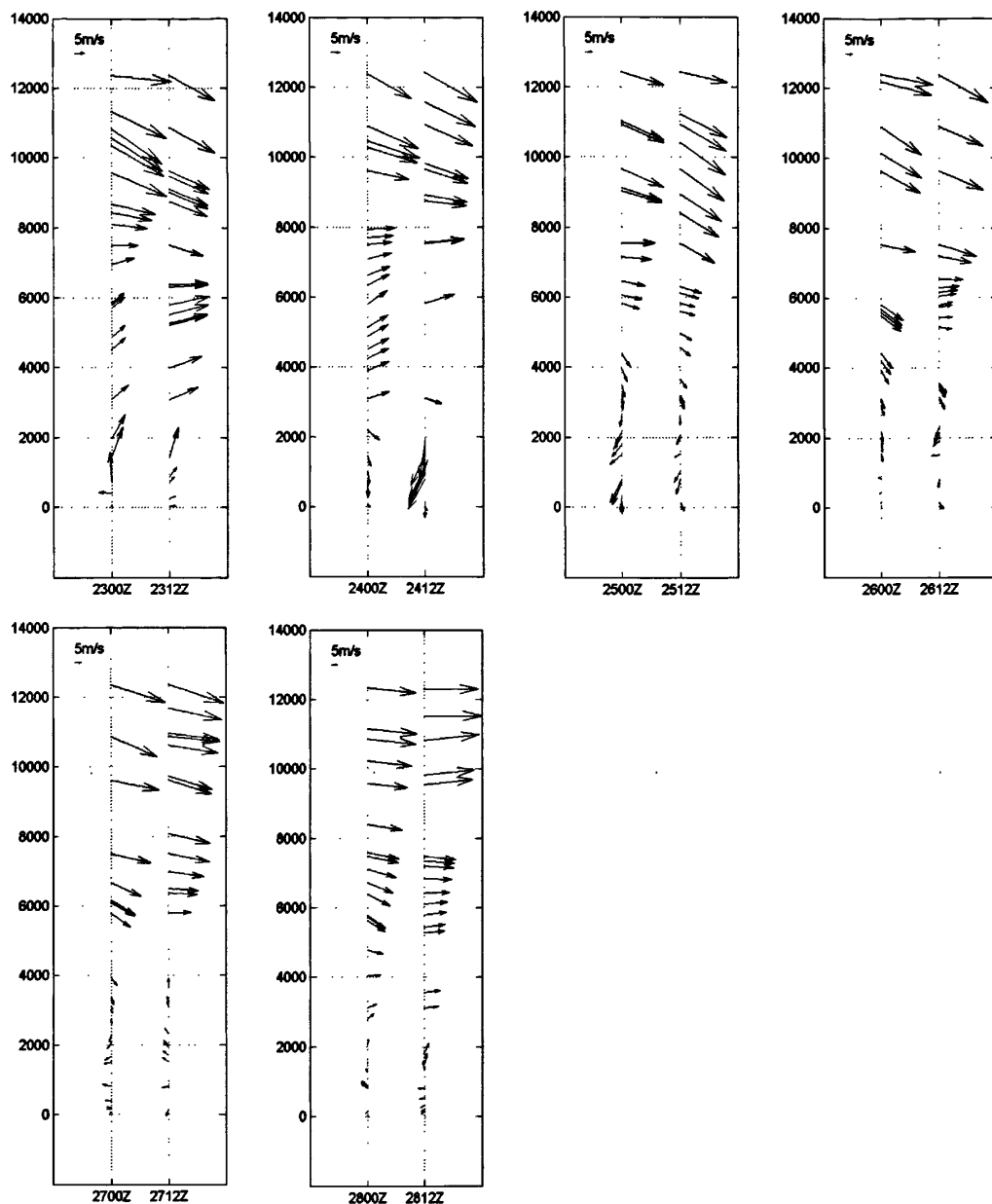


图 5-7-7 2009 年 4 月 23-28 日长沙风向矢量剖面（每日包含 00 和 12 两个时次）

从图 5-7-7 可见，长沙市 23 日 2000m 以下为一致的偏南风，不过风速 12 时次相对 00 时次已开始变小。24 日 00 时次，2000m 高度以内风向从偏南风转为偏北风，12 时偏北风风速很大，平均风速将近 20m/s，说明吹扬起沙尘的偏北气流已抵达长沙，并成为长沙 2000m 高度内的主导风向。25 日沙尘暴过境，偏北风风速减小，偏北风输送来的沙尘开始大量沉降，该日长沙市 API 指数增到 194。26 日偏北风速达到 23-26 日的最小值，沙尘颗粒物的沉降特征相当明显，加上 25 日沙尘的沉降积累，26 日长沙市 API 升至最高值 443。27 日，沙尘暴过去，1000m 下的风向转变，偏南风比例增加。28 日偏南风特征和 27 日类

似。由此可见, 24 日沙尘暴的偏北气流开始影响长沙, 25、26 日沙尘颗粒物大量沉降, 27、28 日沙尘暴离去。

由于衡山和长沙地理位置较近, 且之前多个个例的分析了解到, 衡山和长沙的气象条件变化趋势类似。所以将长沙市当时某些气象条件的特征类推到衡山, 就能很好解释衡山降水 pH 值在 24 日达到 6.91 高值的原因。

综合上述分析, 沙尘暴过程中, 气象条件发生明显变化, 导致衡山温度、相对湿度、风向风速等气象要素随之改变, 其中偏北风输送过来的碱性颗粒物沉降, 使得衡山降水酸度得到短暂缓解。但当沙尘暴天气结束后, 衡山的降水 pH 值又恢复到以往的强酸雨级别。

5.8 小结

近三年衡山春季降水日主导风向出现的频率及降水日 pH 值数据显示, 衡山春季酸雨过程常伴有偏南或偏北风, 且偏南风、偏北风时的酸雨较严重。偏西风酸雨污染相对偏南、偏北风更轻, 而偏东风、静风由于样本数不多, 酸雨污染虽较重, 代表性可能不强。

2009 年春季衡山降水日偏南风为主导风向的频率最高, 其次是偏北风、偏东风, 而偏西风未出现。降水平均 pH 值方面, 偏北风降水 pH 值最低, 偏南风其次, 然后是偏东风。因此偏北风、偏南风的污染物输送对衡山春季酸雨形成有重要影响。

衡山春季酸雨过程典型个例分析表明:

(1) 偏北风条件下, 长沙、株洲和湘潭这一重污染区域产生的二氧化硫或者氮氧化物等致酸物质容易输送到衡山。偏北风中 NE、NNE 也可导致从江西或湖北过来的气团也影响衡山, 形成较严重的酸雨。偏北风条件下, 衡山酸雨污染物来源省内主要是长株潭地区, 省外可能是湖北和江西。

(2) 偏南风条件下, 从珠江三角洲产生的致酸物可能被气团携带, 经过郴州、衡阳市, 再输送到衡山地区。偏南风中 SW 风可能将广西桂林、柳州等城市的污染气团输送到衡山。偏南风条件下, 衡山酸雨的污染物不仅来自衡阳、郴州, 也可能来自广东、广西的远距离输送。

(3) 偏东风条件下, 从江西的吉安、宜春等市输送过来的污染物, 形成了致酸物质, 衡山降水不像偏南、偏北风主导时的降水那样酸, 因此衡山的酸雨污染相对较轻。偏东风条件下, 污染物来源为湖南省外的江西境内部分城市。

(4) 偏西风条件下, 从贵州省、广西中部城市排放的污染物可能被气团携带, 途径怀化、邵阳, 到达衡山。衡山春季偏西风主导的降水日较少, 该种气象条件下降水酸性较弱, 有时甚至不是酸雨, 酸雨污染在四种风向中最弱。偏西风条件下, 污染物来源湖南省内为怀化、邵阳等西部城市, 省外为广西中部和贵州省地区。

(5) 静风条件下, 污染物除部分属于本地排放, 更多是与静风前主导风向的输送特征有关。静风主导的降水日在近三年衡山春季只出现过这一次, 可能还需更多个例进行验证。

(6) 源自我国西北的强沙尘暴天气也有可能影响衡山地区, 伴随偏北风输送过来的碱性颗粒物可使衡山酸雨情况得到短暂缓解。沙尘暴天气影响结束, 衡山降水 pH 值又恢复到以往的强酸雨级别。

第6章 结论和讨论

6.1 结论

根据2006年7月-2009年5月衡山南岳高山气象站酸雨常规观测资料,2009年3-5月衡山酸雨加强观测资料,以及衡山南面郴州站、衡山北面长沙站的常规探空资料,结合地面和高空天气图、美国国家海洋和大气局(NOAA)后向轨迹分析等方法,研究衡山降水特征,探讨气象条件对衡山春季酸雨过程的影响,可得到下述结论:

1、衡山酸雨污染较严重。近3年衡山降水年平均pH值都小于4.50,属于强酸雨,且酸雨频率超过88%。下半年降水比上半年酸度更强,秋季(9-11月)酸雨频率、强酸雨频率最高,是酸雨最严重的季节。此外,衡山6月酸雨频率也较高,pH值也很低。衡山降水的平均pH值和降水量相关性不大。不同等级的降水量对衡山pH值影响不显著,酸雨频率、强酸雨频率随降水量等级变化,呈现“U”型分布。

2、衡山降水日pH值分布主要有3.50-5.00、5.10-6.20两个范围。上半年(1-6月)在3.50-5.00、5.10-6.20两个区域均有分布,下半年(7-12月)主要分布在3.50-5.00,在5.10-6.20区域分布明显减少,约只有上半年的1/3。

3、衡山酸雨过程常与偏北风、偏南风相联系。降水日偏北风(NNW、N、NNE、NE)、偏南风(SW、SSW、S)频率较高。近三年衡山春季降水日主导风向为偏北风或偏南风的频率远高于其他风向,降水平均pH值比其他风向低。2009年春季衡山降水日主导风向为偏南风的频率最高,其次是偏北风、偏东风,未出现偏西风。偏北风降水pH值最低,其次是偏南风,偏东风降水pH值较高。偏北风、偏南风的污染物输送对衡山春季酸雨形成有重要影响。

4、衡山春季酸雨过程典型个例分析表明:

(1) 偏北风条件下,长沙、株洲和湘潭重污染区域产生的污染物容易输送到衡山。偏北风中NE或者NNE可导致从江西或湖北过来的气团也影响衡山,形成较严重的酸雨。因此偏北风影响下,酸雨污染物来源,湖南省内主要是长株潭地区,省外可能是湖北和江西,此时酸雨污染较重。

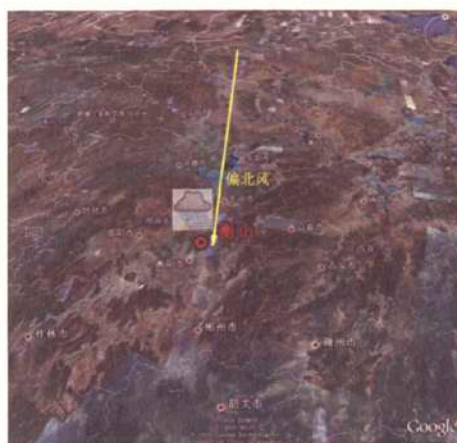


图 6-1-1 受偏北风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

(2) 偏南风条件下, 从珠江三角洲产生的致酸物可能被气团携带, 经过郴州、衡阳市, 再输送到衡山地区。偏南风中 SW 风也可能将广西桂林、柳州等城市的污染气团输送到衡山。因此偏南风影响下, 衡山污染物来源, 湖南省内主要是衡阳、郴州, 省外可能多为广东、广西的远距离输送, 此时酸雨污染较重。

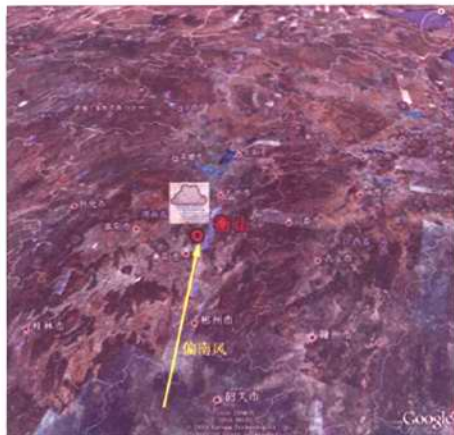


图 6-1-2 受偏南风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

(3) 偏东风条件下, 从江西的吉安、宜春等市输送过来的污染物, 形成了致酸物质。所以污染物来源, 主要为江西境内部分城市。偏东风为主导风向的情形在衡山春季较少, 且降水不如偏南、偏北风主导时降水那样酸, 酸雨污染相对较轻。

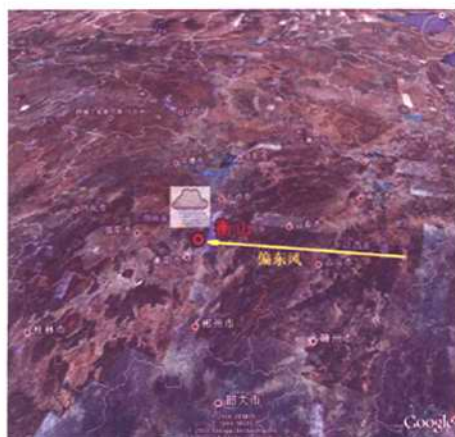


图 6-1-3 受偏东风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

(4) 偏西风条件下, 从贵州省、广西中部城市排放的污染物可能被气团携带, 途径怀化、邵阳, 最后到达衡山。因此污染物来源, 湖南省内为怀化、邵阳等西部城市, 省外为广西中部和贵州省地区。衡山春季偏西风主导的降水日较少, 该种气象条件下降水酸性较弱, 酸雨污染在四种风向中最弱。



图 6-1-4 受偏西风影响时衡山的酸雨形成概念示意图

(5) 静风条件下, 酸雨的形成除与本地的污染物排放有关外, 也与静风前主导风向的污染输送有关。

(6) 源自我国西北的强沙尘暴天气也有可能影响衡山地区, 伴随偏北风输送过来的碱性颗粒物可使衡山酸雨情况得到短暂缓解。沙尘暴天气影响结束, 衡山降水 pH 值又恢复到以往的强酸雨级别。

6.2 讨论

1、资料所限, 尤其是缺乏衡山的探空资料, 本文未能对衡山上空垂直方向的气象要素分布对酸雨的影响进行全面分析。

2、由于缺少衡山周边城市(特别是北部的长沙、株洲、湘潭, 南部的衡阳、郴州)污染源数据, 污染浓度监测数据, 本文未能定量分析污染物长距离输送情况的具体贡献率。

3、衡山酸雨成因十分复杂, 涉及到大气物理、大气化学、生态学等很多交叉学科。如何进行定量分析, 还需要更深入的研究。

参考文献

- [1] 2008 年中国环境状况公报. 中华人民共和国环境保护部, 2009 年 6 月 4 日.
- [2] 陈旦华, 孙庆瑞, 王美蓉等. 湖南省酸性降水的研究. 环境科学研究, 1998, 11(2): 8-12.
- [3] 万小卓, 许晶. 湖南省酸雨变化趋势预测分析及其防治对策. 环境科学与技术. 2005, 28(S2): 91-91.
- [4] 2008 年湖南省环境状况公报. 湖南省环境保护厅. <http://www.hbj.hunan.gov.cn/InfoDisp.aspx?menuID=246&GID=285>.
- [5] 蒋益民. 湖南省酸雨的成因、危害和防治措施的初步研究. 硕士论文. 湖南大学环境工程专业, 2001.
- [6] 张德会, 李传新, 鲁军. 湖南 GDP 增速领跑中部 长株潭城市群贡献超四成. 湖南在线. <http://news.qq.com/a/20100118/000985.htm>.
- [7] Nenad Aleksic, K. Roy, G. Sistla, et al. Analysis of cloud and precipitation chemistry at Whiteface Mountain, NY. Atmospheric Environment. 2009, 43:2709-2716.
- [8] Gary M. Lovett, Andrew W. Thompson, James B. Anderson, et al. Elevational patterns of sulfur deposition at a site in the Catskill Mountains, New York. Atmospheric Environment. 1999, 33:617-624.
- [9] Masahide Aikawa, Takatoshi Hiraki, Mitsuru Shoga, et al. Fog and precipitation chemistry at Mt. Rokko in Kobe, April 1997-March 1998. Water, Air, and Soil Pollution. 2001, 130:1517-1522.
- [10] Koichi Watanabe, Yusaku Takebe, Nobuhiro Sode, et al. Fog and rain water chemistry at Mt. Fuji: A case study during the September 2002 campaign. Atmospheric Research. 2006, 82:652-662.
- [11] L. Bruce Railsback. Lower pH of acid rain associated with lightning: evidence from sampling within 14 showers and storms in the Georgia Piedmont in summer 1996. The Science of the Total Environment. 1997, 198:233-241.
- [12] T. Larssena, G. R. Carmichael. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition. Environmental Pollution. 2000, 110: 89-102.
- [13] R. J. Charlson. H. Rodhe. Factors controlling the acidity of natural rainwater. Nature. 1982, 295:683-685.
- [14] Thorjorn Larssen, Svein Solberg, Espen Lydersen, et al. ACID RAIN in China: Rapid industrialization has put citizens and ecosystems at risk. Environmental Science & Technology. 2006, 40(2): 418-425.
- [15] Yu Ren, Aijun Ding, Tao Wang, et al. Measurement of gas-phase total peroxides at the summit of Mount Tai in China. Atmospheric Environment. 2009, 43:1702 - 1711.
- [16] V. Elias, M. Tesar, J. Buchtele. Occult precipitation: sampling, chemical analysis and process modeling in the Sumava Mts. (Czech Republic) and in the Taunus Mts. (Germany). Journal of Hydrology. 1995, 166:409-420.
- [17] 张行军, 张远航, 李金龙. 层状云酸化过程的数值模拟. 环境科学研究. 1996, 9(5):1-4.
- [18] 戴志军. 湖南省酸雨成因及对策. 生态与自然保护. 1999, (4):36-39.
- [19] 时代图片·图客. <http://pt.tuke.com>.
- [20] Tetsuya Adzuhata, Tomoko Okamura, Junko Inotsume, et al. Chemical

characterization of acid fog and rain in northern Japan using back trajectory and Qblique rotational factor analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2001, 130: 337 - 342.

[21] Jeffrey L. Collett Jr., Aaron Bator, D. Eli Sherman, et al. The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmospheric Research*. 2002, 64:29 - 40.

[22] Joseph E. Sickles II, Jeffrey W. Grimm. Wet deposition from clouds and precipitation in three high-elevation regions of the Eastern United States. *Atmospheric Environment*. 2003, 37:277 - 288.

[23] James B. Anderson, Ralph E. Baumgardner, Jr., Sandra E. Grenville. Trends in cloud water sulfate and nitrate as measured at two mountain sites in the Eastern United States: Regional contributions and temporal changes compared with regional changes in emissions, 1986 - 1999. *Atmospheric Environment*. 2006, 40:4423 - 4437.

[24] Fredric C. Menz, Hans M. Seip. Acid rain in Europe and the United States: an update. *Environmental Science & Policy*. 2004, 7:253-265.

[25] Yoko Nagase, Emilson C. D. Sliva. Acid rain in China and Japan : a game-theoretic analysis. *Regional Science and Urban Economics*. 2007, 37:100-120.

[26] De-Yin Huang, Yi-Gang Xu, Ping' an Peng, et al. Chemical composition and seasonal variation of acid deposition in Guangzhou, South China: Comparison with precipitation in other major Chinese cities. *Environmental Pollution*. 2009, 157:35-41.

[27] Lauraine G. Chestnut, David M. Mills. A fresh look at the benefits and cost s of the US acid rain program. *Journal of Environmental Management*. 2005, 77: 252 - 266.

[28] Detlev Mißler, Karin Acker, Wolfgang Wieprecht. A relationship between liquid water content and chemical composition in clouds. *Atmospheric Research*. 1996, 41:321-335.

[29] I. S. A. Isaksen, C. Granier, G. Myhre, et al. Atmospheric composition change: Climate - Chemistry interactions. *Atmospheric Environment*. 2009:1-54.

[30] Hugh Ellis, Paul L. Ringold, George R. Holdren Jr. Emission Reductions and Ecological Response: Management Models for Acid Rain Control. *Socio-Econ. Plann. Sci.* 30(1):15-26.

[31] K. Heinke Schlünzen, Elke M. I. Meyer. Impacts of meteorological situations and chemical reactions on daily dry deposition of nitrogen into the southern North Sea. *Atmospheric Environment*. 2007, 41:289 - 302.

[32] M. Normana, S. N. Das, A. G. Pillai, et al. Influence of air mass trajectories on the chemical composition of precipitation in India. *Atmospheric Environment*. 2001, 35:4223 - 4235.

[33] Ming Chee Yeung, Sze Chung Lee, Bit Hon Lun, et al. Summer rain events in south-east Asia: Spatial and temporal variations. *Atmospheric Research*. 2007, 86:241 - 248.

[34] Sam Napolitano, Jeremy Schreifels, Gabrielle Stevens, et al. The U.S. Acid Rain Program: Key Insights from the Design, Operation, and Assessment of a Cap-and-Trade Program. *The Electricity Journal*. 20(7):47-58.

- [35] 王文兴, 徐鹏举. 中国大气降水化学研究进展. 化学进展. 2009, 21(2/3):266-281.
- [36] 黄美元, 沈志来, 刘帅仁等. 中国西南典型地区酸雨形成过程研究. 大气科学. 1995, 19(3):359-366.
- [37] 黄美元, 沈志来, 洪延超. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展. 大气科学. 2003, 27(4):536-551.
- [38] Yukiya Minami, Yutaka Ishizaka. Evaluation of chemical composition in fog water near the summit of a high mountain in Japan. Atmospheric Environment. 1996, 30(19): 3363-3376.
- [39] C. K. Deininger, V. K. Saxena. A validation of back trajectories of air masses by principal component analysis of ion concentrations in cloud water. Atmospheric Environment. 1997, 31(2): 295-300.
- [40] James B. Anderson, Ralph E. Baumgardner, Volker A. Mohnen. Cloud chemistry in the eastern United States, as sampled from three high-elevation sites along the Appalachian Mountains. Atmospheric Environment. 1999, 33: 5105-5114.
- [41] Man-Goo Kim, Bo-Kyoung Lee, Hyun-Jin Kim. Cloud/Fog water chemistry at a high elevation site in South Korea. Atmospheric Chemistry. 2006, 55: 13-29.
- [42] Miloš Zapleta, David Kuňák, Petr Chroust. Chemical characterization of rain and fog water in the Cervenohorske Sedlo (Hruby Jeseník Mountains, Czech Republic). Air Soil Pollut. 2007, 186: 85-96.
- [43] S. R. Dorling, T. D. Davies. Extending cluster analysis-synoptic meteorology links to characterise chemical climates at six northwest European monitoring stations. Atmospheric Environment. 1995, 29(2): 145-167.
- [44] I. J. Beverland, J. M. Crowther, M. S. N. Srinivas, et al. The influence of meteorology and atmospheric transport patterns on the chemical composition of rainfall in south-east England. Atmospheric Environment. 1998, 32(6): 1039-1048.
- [45] Frederic Andre, Mathieu Jonard, Quentin Ponette. Influence of meteorological factors and polluting environment on rain chemistry and wet deposition in a rural area near Chimay, Belgium. Atmospheric Environment. 2007, 41:1426-1439.
- [46] 王美蓉. 华南地区高山酸沉降化学研究. 环境科学学报. 1992, 12(1): 37-47.
- [47] 齐立文, 王文兴. 我国低纬度亚热带地区的降水化学及其雨水酸化趋势分析. 环境科学研究. 1995, 8(1):12-20.
- [48] 齐立文. 两广大陆地区酸雨的时空分布规律和化学特点. 气象. 1993, 19(11):8-12.
- [49] 许晶. 湖南省酸性降水现状、成因及对策研究. 环境污染治理技术与设备. 2001, 2(4):25-29.
- [50] 蒋益民, 曾光明, 张现宝等. 湖南省酸雨的主要特点与酸雨污染防治对策. 湖南大学学报(自然科学版). 2001, 28(3):78-96.
- [51] 黄江波. 2000-2004 年酸雨特征分析. 硕士论文. 中山大学大气物理学和大气环境专业, 2006.
- [52] 柳泽文孝, 贾疏源, 益田晴惠等. 峨眉山 1998 年 8 月和 12 月采集雨水化学组成的对比研究. 地质灾害与环境保护. 2001, 12(4): 17-20.
- [53] 柳泽文孝, 贾疏源, 益田晴惠等. 峨眉山 1998 年雨水化学组成的动态变化. 四川环境. 2004, 23(1): 59-61.
- [54] 王艳, 葛福玲, 刘晓环等. 泰山降水的离子组成特征分析. 中国环境科学. 2006, 26(4): 422-426.

- [55] 王艳, 葛福玲, 刘晓环等. 泰山降水化学及大气传输的研究. 环境科学学报. 2006, 26(7): 1187-1194.
- [56] 黄海洪, 董惠青, 陈竑. 大明山保护区的酸雨特征分析及气象影响机理. 福建林学院学报. 2003, 23(4): 331-334.
- [57] 于涛. 浅议白云山酸雨现状与发展趋势. 云南环境科学. 2006, 25(S1): 134-135.
- [58] 吴兑, 邓雪娇, 范绍佳. 南岭大瑶山雾区锋面降水的雨水化学成分研究. 中山大学学报. 2005, 44(6): 105-109.
- [59] 盛裴轩, 毛节泰, 王建民等. 华南地区冷锋云系中污染物的输送. 环境科学学报. 1992, 12(1): 16-27.
- [60] 张新玲, 安俊岭, 程新金等. 污染源、气象条件变化对我国 SO_2 浓度及硫沉降量分布的影响. 大气科学. 2003, 27(5): 939-948.
- [61] 张铮, 盛裴轩. 高低空流场形势影响降水酸度的实例分析. 气象. 1990, 16(4): 3-9.
- [62] 郑凤琴, 孙崇智, 谢宏斌. 1991~2004 年不同环流背景下南宁市降水化学成分变化特征的研究. 热带气象学报. 2007, 23(6): 664-668.
- [63] 雷恒池, 吴玉霞, 肖辉等. 不同天气系统下我国云雨水化学特征的研究. 高原气象. 2001, 20(2): 127-131.
- [64] 陈静. 珠江三角洲酸雨与气象条件关系研究. 硕士论文. 中山大学大气物理学和大气环境专业, 2007.
- [65] 张铮, 孟广礼. 1988 年两广地区春季酸雨观测和天气形势分析. 北京大学学报(自然科学版). 1992, 28(1): 86-95.
- [66] 黄小培, 覃峥嵘, 韦革宁. 桂西酸雨的季节分布及风向频率统计特征分析. 气象研究与应用. 2008, 29(4): 10-13.
- [67] 刘京雄, 林长城, 蔡义勇等. 闽南地区酸雨特征与其影响天气系统的统计分析. 热带气象学报. 2007, 23(7): 53-58.
- [68] 蒲维维, 张小玲, 徐敬等. 北京地区酸雨特征及影响因素分析. 第 26 届中国气象年会大气成分与大气气候及环境变化论文集.
- [69] 王玮, 张孟衡, 庞燕波. 衡山地区酸性降水来源和成因的研究. 环境科学学报. 1992, 12(1): 48-57.
- [70] 吴甫成, 吴君维, 王晓燕等. 湖南酸雨污染特征. 环境科学学报. 2000, 20(6): 807-809.
- [71] 赵艳霞, 侯青. 1993—2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析. 气象学报. 2008, 66(6): 1032-1042.
- [72] 张龚, 曾光明, 蒋益民等. 湖南省酸雨变化特征、现状及成因分析. 环境科学研究. 2003, 16(5): 14-17.
- [73] 王文兴. 中国酸雨成因研究. 中国环境科学. 1994, 14(5): 323-329.
- [74] 赵艳霞, 侯青. 近 13 年(1993-2005)中国区域酸雨变化特征. 中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集.
- [75] 王文兴, 梁金友, 陈延智. 华南地区春季酸沉降区域源解析. 环境科学学报. 1992, 12(1): 1-6.
- [76] 湖南省政府. 网上湖南. 湖南省政府门户网站: <http://www.hunan.gov.cn/wshn/>.
- [77] 吴桂生, 彭蝶飞. 南岳衡山气候与旅游研究. 湖南林业科技. 2002, 29(1): 81-83.
- [78] 今年最强沙尘暴: 范围广强度强影响大. 中国天气网: <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20090425/30429.shtml>.
- [79] 中国气象局国家卫星气象中心. <http://nsmc.cma.gov.cn/index.html>.

致谢

范绍佳老师循循善诱的讲课方式，平易近人的性格，幽默风趣的谈吐，在这两年的研究生阶段，都给我留下了难以磨灭的印象。本论文是在范老师悉心指导下完成的，多次和范老师进行的关于论文修改的讨论中，我一次次体会到范老师身上治学严谨和诲人不倦的态度。

除了范老师，也很感谢研究生阶段给我授课的其他老师，如林文实、樊琦等老师，他们认真负责的授课态度让我难以忘怀。

此外，吴兑老师，邱军、陈静师兄及邱晓暖等同学都曾给我论文方面的帮助，在此我向他们表示衷心的感谢！