

峨眉山酸雨的垂直观测

张 铮

(北京大学地球物理系)

提 要

本文为了解降水酸度在垂直方向上的变化规律,自峨眉山金顶(3077 m)至山脚的西南交大(约500 m)在高差约2500 m的垂直方向,设立了五个酸雨观测站。1985年10月5—20日联合观测期间共测了三次降水过程,结果得出:(1)天气形势对降水酸度起决定性作用,不同天气形势所引起的降水酸度变化,大大超过降水酸度的垂直变化梯度;(2)同一天气形势下,降水酸度随海拔高度的降低无明显的线性相关,但在三次降水过程中,降水酸度在垂直方向上的变化趋势是较为一致的。作为影响峨眉山降水酸度垂直变化的因子,云水酸度和山顶至山脚大气中硫化物等污染物的垂直分布,也与天气过程密切相关。

关键词: 降水酸度; 垂直观测; 天气形势。

一、问题的提出

为了解酸雨的成因,以便制定合适的对策,防治酸雨的危害,中国环境科学研究院等十多个单位组成联合观测组,于1985年10月5—20日,在四川省峨眉山进行联合观测,其中包括常规气象观测,雾、降水、气溶胶和污染气体等的宏微观物理和化学特征的观测,本文通过对部分观测资料的整理和分析,试图了解峨眉山降水酸度的垂直变化和原因。

酸雨的成因,一方面是具有酸性核心的小云滴在云中凝结和碰并长大,并发生相应的化学变化^[1,2],形成具有一定酸度的雨滴落到云下;另一方面雨滴由云下落到地面的过程,一路淋溶气溶胶和污染气体,也产生一系列的化学反应^[3,4],因此距地面不同高度,雨滴的酸度和化学成分是不断变化的。为了解雨滴在云内外发生的化学变化,常常用飞机进行观测,但本文是使用垂直梯度观测站的方法,和飞机这个可运动的观测站相比较,梯度站的缺点是不能随云层高度的变化而改变观测高度,一般只能观测云的中下部情况,此外测站之间还会有水平位置和处在山的不同侧面的差别,以及由于受地形影响,观测站的雨样与空中的雨水总会有些区别等;而优点是花费小,能同时进行几个高度、长时间的降水连续观测。

峨眉山地处四川盆地的西南边缘,其最高点金顶(3077 m)选作第一测站,第二、三、四和五测站分别为华严顶(1914m,风景区)、龙洞(1300 m,山背面的山区为农

1988年11月12日收到,1989年9月17日收到修改稿。

业区)、万年寺(1020 m, 风景区)和西南交大(约 500 m, 山下居民区)。峨眉山不仅山高, 而且设点间距较合适, 加上云底高度常在 2000 m 左右, 金顶测站经常处在云中, 因此峨眉山是设置梯度观测站的理想场所。

二、天气形势分析

根据历史天气图和自己绘制的 500hPa、700hPa (1985 年 10 月 7—23 日) 和 850hPa (仅绘制 1985 年 10 月 10—13 日) 等压面每日 8:00 的流线图, 可知这一时期的天气形势共分三个降水过程^[9]:

1. 第一次降水过程(1985 年 10 月 7—9 日)

由 500 hPa 天气图可知, 10 月 8 日—9 日峨眉山地处高压西部边缘, 新疆地区弱冷空气开始沿着青藏高原的北部向东南方向移动, 由四川北部流入盆地, 伴随冷空气的到来, 四川盆地 700hPa 中低层为辐合流场, 有一弱的涡旋系统生成(见图 1), 10 月 7 日—9 日峨眉山的中低空一直受低涡或切变线控制, 从而引起 8 日前后的阵性降水, 水汽来源于局地辐合。

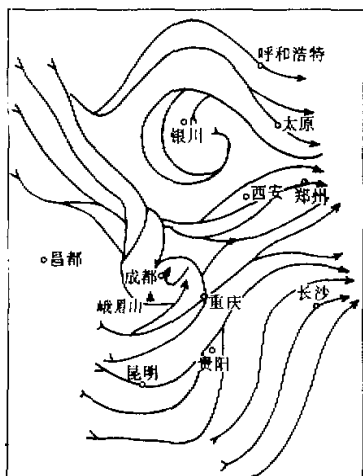


图1 1985 年 10 月 7 日 8:00, 700hPa 的流线图

2. 第二次降水过程(1985 年 10 月 11—13 日)

500hPa 天气图上, 四川盆地始终由槽后的西北气流控制, 700hPa 流线上, 10 月 10—11 日从缅甸到四川盆地是一个西南气流场, 且风速由南向北依次减小呈辐合状态, 850hPa 流线上, 10 月 11 日在四川盆地及其附近上空形成气旋型涡旋(见图 2), 这有利于低层污染物的聚集抬升。当低层西南暖湿气流爬升到 5000m 高空和西北方向的冷空气相遇时, 致使成云降雨, 各观测站主要在 12 日白天观测到降水, 降水量不大。

3. 第三次降水过程(1985 年 10 月 15—17 日)

在 500hPa 的天气图上, 10 月 14 日印度半岛建立印缅大槽, 槽前的西南气流从印度半岛伸向四川盆地, 这是绕道南下的冷空气。在 700 hPa 的天气图上, 四川盆地处于副热带高压的西部边缘, 南支气流携带暖湿空气从孟加拉湾越过横断山脉进入盆地, 这是降水云系的水汽来源。在降水期间, 四川盆地上一向的切变线, 峨眉山地区中低层有一较强的辐合区, 有利于冷暖空气交汇(见图 3), 这次降水的时间长, 最早的测站 14 日开始, 最晚的测站持续到 19 日以后结束。

4. 三次降水的天气形势特点

(1) 高空 500hPa 等压面均有冷空气入侵, 但入侵四川盆地的路径不同, 第一次由北部流入, 第二次随槽后的西北气流进入, 第三次冷空气绕过青藏高原, 从西南方向伸进。

(2) 由 850—700hPa 等压面高度来看, 第一、二次降水过程的水汽来源, 主要来自

自四川盆地附近地区，由局地辐合抬升冷却而成云；第三次降水过程的水汽来源于四川盆地西南方向的海上，主要由副热带高压西部边缘的南支气流，源源不断地输入暖湿空气取得。

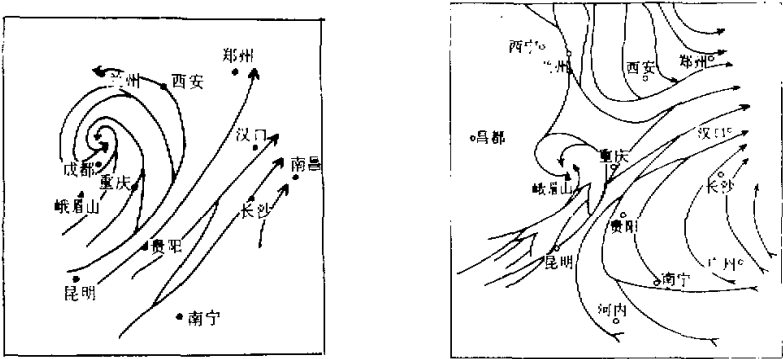


图2 1985年10月11日 8:00, 850hPa的流线图 图3 1985年10月16日 8:00, 700hPa的流线图

三、降水酸度和化学成分的梯度观测

1985年10月5—20日联合观测期间，五个测站逢雨必测，共得31份降水样品。采雨筒直径20cm，安放在距地1.5m高的支架上，降水pH值在现场及时观测，现将31份降水样品的pH值，分站对三次降水过程分组进行雨量加权平均，列成表1，并绘制成图4。

表1 三次降水过程各站降水的平均pH值

站名		金顶	华严顶	龙洞	万年寺	西南交大
过程	pH值					
第一	样品个数	2		2		
	pH平均值	4.31		3.81		
第二	样品个数		2	3	3	4
	pH平均值		3.78	3.57	3.95	3.78
第三	样品个数	1	4	4	4	2
	pH平均值	5.50	*	4.51	5.14	4.77

注：空白格为未下雨；* 表示样品受污染

31份降水样品在现场过滤，并低温贮存带至实验室内进行化学分析，共分析10种阴阳离子，其中F⁻，Cl⁻，NO₃⁻，SO₄²⁻，Na⁺，NH₄⁺，K⁺和HPO₄²⁻等8种离子用美国Dionex-2010型离子色谱仪分析，Ca²⁺和Mg²⁺用日立180—80型原子吸收仪火焰法分析。现将降水中两种主要致酸离子SO₄²⁻和NO₃⁻浓度^[6]，分站按三次降水过程进行雨量加权平均，见表2和图5，由表1、2和图4、5可知：

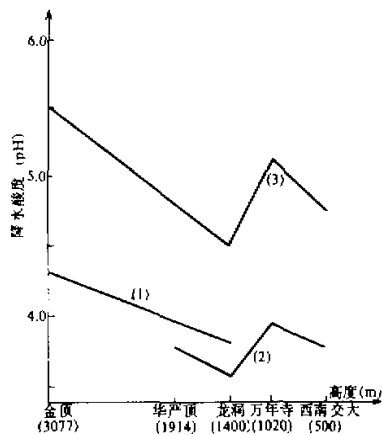


图4 降水酸度的垂直分布

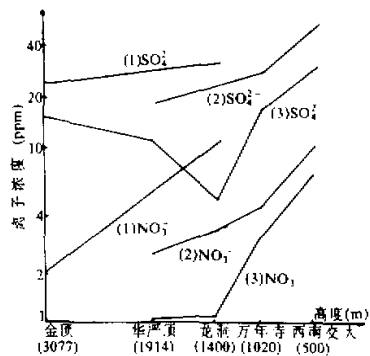


图5 降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子浓度的垂直分布

曲线(1),(2),(3),依次代表第一、二、三次降水过程 曲线中的标号(1),(2),(3),依次代表第一、二、三次降水过程

表2 降水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子浓度

站名		金顶	华严顶	龙洞	万年寺	西南交大
过程	离子浓度(ppm)					
	SO_4^{2-}	24.02		31.44		
第一	NO_3^-	1.93		11.07		
第二	SO_4^{2-}		18.07	23.19	28.29	53.05
	NO_3^-		2.47	3.33	4.50	10.20
第三	SO_4^{2-}	15.35	11.49	5.05	16.94	30.50
	NO_3^-	缺	1.07	1.09	3.03	7.36

注：空白格为未下雨

1. 天气形势对降水酸度和 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 离子浓度的影响比它们的垂直梯度变化大得多，同一测站，降水酸度和 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 离子浓度，依第一、二和三次降水过程次序，逐次降低，从数值来看，前两次接近，第三次相差较大，第一、二次降水过程的降水酸度比第三次大10倍(或以上)。
2. 金顶站只在两个降水过程中出现降水，其降水酸度均高于下面测站。同一天气形势下，金顶站下面测站的降水酸度随海拔高度的降低没有明显的线性相关，但在三次降水过程中，随海拔高度的降低降水酸度的变化趋势很相一致。降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子浓度(除个别记录外)随海拔高度降低而升高，山脚下的西南交大测站降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子浓度比上面测站约高1—2倍和1—6倍。
3. 降水中 SO_4^{2-} 离子浓度比 NO_3^- 高几倍至十几倍，充分显示 SO_4^{2-} 离子是峨眉山降水中的更为主要的致酸物质。

四、云雾水和云下硫化物观测

为寻求造成峨眉山降水酸度垂直分布的原因，观测了云雾水的酸度和化学成分，即了解云内的情况。另外，为了解云下湿清除过程，观测了云下硫化物。

1. 金顶云雾水的观测

由于雾是云接地所致，因此金顶云雾水在一定程度上代表 3000 m 高空的云水情况，对联合观测期间的总计 47 个雾水样品分组，10 月 15 日以前为第一组，之后为第二组，并按雾水量进行加权平均，求出雾水酸度和 8 种阴阳离子浓度的组平均值（见表 3）。由表 3 可知，第一组比第二组的雾水酸度和全部 8 种离子浓度都高，雾水酸度约高 6 倍，主要致酸离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度约高 2—3 倍，由此可见，天气形势对云（雾）水酸度和离子浓度的影响非常显著，第二组即第三降水过程，由西南方向污染较少的海洋上空不断输送水汽形成的云水，与第一组（包括第一、二降水过程）辐合四川盆地污染物，由局地抬升冷却形成的云水相比，其酸度要小，所含的离子杂质少，云水要清洁得多。

表 3 金顶云雾水的酸度和离子浓度平均值（ppm）

类别 组别	pH	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
第一组	4.48	13.23	4.14	8.76	2.73	5.29	1.00	2.94	0.55
第二组	5.13	5.48	1.42	2.04	0.78	2.26	0.34	1.04	0.21

2. 云下硫化物的观测

气溶胶中的可溶性离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 以及大气中的 SO_2 气体，都是雨滴淋溶后的主要致酸物质，表 4 和图 6 列出金顶和万年寺测站气溶胶中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子浓度的逐日平均值的变化，表 5 列出各测站大气中的 SO_2 ， SO_4^{2-} 和生态硫的总量，以 SO_2 含量计算（简称 SO_2 ）。由表 4、5 和图 6 可知，峨眉山大气气溶胶中的可溶性离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度及大气中 SO_2 含量，随天气形势的变化而改变，14—15 日以前的数值高，各梯度站相继在 15—16 日出现最低值， SO_2 含量甚至为 0（检测不出），以后缓慢回升，但数值水平明显低于 14—15 日以前（ NO_3^- 离子不明显），由此可看出，峨眉山大气在 15 日前后，分别受两类不同的天气系统控制。由表 4、5 和图 6 的同一日数据可知，气溶胶中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子

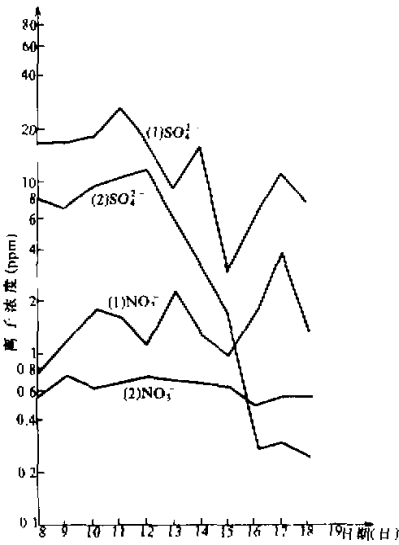


图6 气溶胶中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度
(1) 金顶站、(2) 万年寺站

浓度是山顶比山底低,而大气中SO₂含量随海拔高度的不同其差别不大、变化无规律。

表 4 金顶、万年寺站气溶胶中的 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 浓度

站名	离子 (ppm)	1985 年 10 月										
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
金顶	SO ₄ ²⁻	7.79	6.89	9.39		11.71			1.71	0.27	0.30	0.24
	NO ₃ ⁻	0.54	0.72	0.62		0.72			0.62	0.47	0.53	0.52
万年寺	SO ₄ ²⁻	17.41	16.98	17.72	26.84	17.05	8.75	15.28	2.69	5.85	10.79	7.34
	NO ₃ ⁻	0.76	1.14	1.73	1.58	1.10	2.14	1.24	0.93	1.61	3.74	1.23

注：空白格为缺测

表 5 峨眉山大气中SO₂ 的垂直分布

站名	浓度 (mg/m ³)	1985 年 10 月								
		10	11	12	13	14	15	16	17	18
金 顶		0.037	0.037	0.177	0.105	0.097	0	0.068	0.033	0.040
华严顶		0.059	0.110	0.096	0.056	0.087	0	0.032	0.048	0.046
龙 洞		0.047	0.243	0	0.120	0.230	0	0	0.051	0.020
万年寺		0.077	0.220	0.093	0.091	0.048	0.157	0.029	0.054	0.029
西南交大		0.145	0.076	0.112	0.105	0.040	0.127	0	0.018	0.025

致谢：中国环境科学研究院大气研究所宁洁同志参加了天气形势分析工作，本文资料取自联合观测组交流资料，其中降水酸度和离子组分以及气溶胶成分的数据，由中国环科院大气所提供；金顶云雾水成分数据，由北京大学技术物理系环境化学教研室提供；大气中的硫化物数据，由四川省环保科研所提供，在此一并表示谢意。

参 考 文 献

[1] Hegg D. A., et al, 1984, A Numerical Model For Sulfur Chemistry in Warm-Frontal Rainbands, *J. Geophys. Res.*, **89**(D5), 7133— 7147.

[2] Rutledge S. A., et al, 1986, A Numerical Model For Sulfur and Nitrogen Scavenging in Narrow Cold-Frontal Rainbands 1. Model Description and Discussion of Microphysical Fields, *J. Geophys. Res.*, **91**(D13), 14385— 14402.

[3] 熊际钊等, 1987, 云下 SO₂ 洗脱与贵阳市降水中酸的来源, *中国环境科学*, **7**(3), 36— 42.

[4] S. 图梅等, 1984, 大气气溶胶, 科学出版社, 92— 95.

[5] 北京大学地球物理系气象教研室编, 1978, 天气分析和预报, 科学出版社, 157— 160.

[6] Heicklen J., 1981, 大气化学, 湖南科学技术出版社, 319— 350.

VERTICAL OBSERVATION OF ACID RAIN IN EMEI MOUNTAIN

Zhang Zheng

(*Department of Geophysics, Peking University*)

Abstract

In order to know variations of rain's acidity in a vertical direction, five observation posts of acid rain from the Gold Top (3077m) of Emei Mountain to Southwest Communications University (about 500m) located near the foot of Emei Mountain were built. The longest distance between two posts is about 2500m in the vertical direction. During the joint period from 5 to 20 October 1985, three weather processes of precipitation were observed. The results show: (1) weather situation is a decisive factor effecting precipitation's acidity. The variations of precipitation's acidity caused by different weather situations are much more than the gradient changes of precipitation's acidity in the vertical direction; (2) in the same weather situation, precipitation's acidities do not obviously show linear change with decrease of sea level elevation, but in the three weather situations, precipitation's acidities are of the same changing trend in the vertical direction. The acidity of cloud water and the vertical distribution (from the top to the foot of the mountain) of some pollution gases, such as SO_2 , are considered as the factors to effect the vertical change of precipitation's acidities in Emei Mountain, and also have direct bearing on the weather processes.

Key words: Precipitation's acidity; Vertical observation; weather situation.