

# 广州春季锋面降水的物理化学特征<sup>\*</sup>

吴 兑 游积平 陈位超 甘春玲

(广州热带海洋气象研究所, 广州, 510080)

苏力萍 刘林勤

(中国环境科学研究院大气物理所, 北京, 100012)

## 摘 要

通过对一次典型华南春季锋面层状云降水的物理特征与化学性质的分层密集观测分析, 认识到: (1) 本次降水雨滴浓度不高, 滴径较小, 因而雨强较小; (2) 雨水 pH 值较低, 平均为 4.78; 离子成分中以  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  的含量最高, 其次是  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$ ; (3) 在贴地层内, 雨水在下落过程中离子成分是增加的, pH 值逐渐升高, 增加最多的离子成份是  $\text{NH}_4^+$ ; (4) 在降水开始后雨水 pH 值起伏上升, 而后持续下降, 雨水中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$  关系密切。

**关键词:** 雨水酸度, 雨水化学成分, 气溶胶分级水溶性成分, 雨滴谱。

## 1 引 言

降水的微物理特征与化学性质间存在着相互影响的关系, 以往的研究较多地侧重于区域酸雨的分布情况, 及其雨水酸度变化、雨水化学成分分析等方面。近年来开始见到气溶胶分级水溶性成分的报道<sup>[1]</sup>, 也曾见到利用自然地形, 在水平距离相隔数百米以至数公里范围内几个高度上对雨水酸度观测的报道<sup>[2,3,4]</sup>。但在同一地点分层密集观测采样, 并综合观测雨水酸度、化学组成、雨滴谱分布、气溶胶分级水溶性成分等随降水持续变化的报道较少。

广州地区春季是易出现酸性降水的季节, 为此我们于 1989 年 3 月 17 日至 20 日, 在广州市区越秀山电视塔组织了一次分层分段综合观测, 内容包括雨滴谱观测、雨水采样分析、气溶胶分级样品分析, 收集同时期天气背景资料、雷达回波资料, 并依据自记雨量站网分析了逐时降水场, 以期综合分析降水微物理特征与化学性质间的关系, 为研究雨水酸化过程的可能机制作参考。

## 2 观测资料

\* 初稿时间: 1993 年 6 月 2 日; 修改稿时间: 1995 年 3 月 13 日。

资助课题: 国家气象局科学基金云物理项目, 参加观测等工作的还有周智翔、陶敬华、黄智慧、黄浩辉。

越秀山电视塔位于广州市区中心北侧,电视塔基座平台作为基本观测点,距山脚环市路路面高约 32m。在基本观测点进行了雨滴谱观测,采集了雨水样品与分级气溶胶样品,另外在塔高 118m 处与山脚下采集了雨水样品。

采用滤纸色斑法观测雨滴谱<sup>[5]</sup>,使用含淀粉滤纸,采样后经熏碘蒸汽会形成深蓝色色斑,计数后处理即得到雨滴谱分布资料。雨强变化较大时每 5min 取样一次,雨强变化不大时每 10min 取样一次,为保证资料代表性,每次取二张滤纸。共取到雨滴谱资料 120 份。

分三层分别在高度 1.5m,32m,118m 处采集了雨水样品,采样间隔从 5min 至 1h,视雨强大小而定;用经去离子水冲洗三次直径为 31.5cm 的塑料盆取样,现场测定 pH 值与电导率,水样经现场过滤后装入用去离子水冲洗三次的聚乙烯塑料瓶中。共收集到雨水样品 35 份。pH 值用 PHB-29C 型酸度计测定,电导率由 DDS-11A 型电导率仪测定, $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  由离子色谱法测定, $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  由原子吸收分光光度法测定, $NH_4^+$  由化学法(纳氏试剂比色法)测定。

使用型号 20-709 的美制 Andersen 分级粒子取样器收集气溶胶样品,样品分九级,采集的大气粒子的空气动力学等效直径范围在  $0.08\mu m$  至  $10.0\mu m$  间,取样器流量为恒定的  $28.3lmin^{-1}$ 。取样器的分级捕获效率等问题由 Andersen 进行了详细介绍<sup>[7]</sup>。由于环境中气溶胶粒子密度的非均一性,以及形状的差异,空气湿度对气溶胶密度的影响,会对粒子尺度分级捕获效率造成一定的误差<sup>[8,9]</sup>。分别于降雨前、降雨中、降雨后采集了三组分级气溶胶样品,为满足化学分析收集足够的物质,每组样品采样 2-3d,采样体积保持在  $100m^3$  左右。气溶胶样品收集在玻璃纤维滤膜上,采样前后均经干燥皿恒重后称重,每级样品取半张膜用 25ml 去离子亚沸蒸馏水常温水淬 16h,淬取其中的水溶性成分,用离子色谱法测定  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ ,用耦合等离子发射光谱法(ICP)测定  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。

### 3 天气背景

1989 年 3 月 17 日至 20 日广州经历一次较典型的华南准静止锋南压入海的降水过程。过程前期,珠江三角洲地区已一个半月无大于 5mm 明显降水。这次过程属久晴无雨转雨的转折性天气过程,有利于研究降水对气溶胶的清除规律及雨水酸化机制。

表 1 1989 年 3 月 17-20 日广州降雨情况

日期	起止时间	持续时间	与上次大于 0.1 mm 降水间隔	雨量 (mm)	性质	最大回波 顶高 km	回波强度 dBz
3.17	0 <sup>27</sup> -16 <sup>50</sup>	983min	13d	16.3	连续性中雨	7	50
3.17	19 <sup>30</sup> -0 <sup>50</sup>	329min	2h40min	4.0	连续性中雨	5	35
3.18	2 <sup>10</sup> -5 <sup>30</sup>	200min	1h20min	0.8	连续性小雨	5	30
3.18	19 <sup>05</sup> -21 <sup>30</sup>	145min	13h35min	5.9	连续性中雨	7	50
3.20	18 <sup>40</sup> -20 <sup>08</sup>	88min	45h10min	4.4	阵雨	7	60

500hPa 高空图上印支槽从 16 日开始加强,槽前盛行西南气流,北方有冷空气扩散南压,17 日 08 时西风槽底部影响华南地区。对应 850hPa 高空,自 16 日开始在南岭山地北

侧有切变线维持,南海及太平洋西部盛行反气旋环流,17日08时南海南部出现气旋性环流,西太平洋反气旋加强,南海北部偏南风风速加大,在此期间,南岭山地横切变线略有摆动,一直维持到19日08时。在地面图上,从17日开始原在南岭北坡稳定少动的华南准静止锋向南摆动,并在武夷山区形成锢囚,此形势一直维持到19日20时,而后,锋面南压入海,过程结束。

这次降水过程自3月17日开始断续维持到3月20日,其间共有五次主要降水,如表1所示。本次降水过程为层状云降雨,但在层状云中嵌有对流单体,自3月17日至20日全天始终布满层状云,地面云状Sc,降水持续时间长,但雨强不大,过程总降水量为31.4mm,回波顶高在5—7km间,强度中等,一般均稳定少动或缓慢向东偏北移动。逐时地面降水场分析表明,降雨带一直维持在南岭与海岸之间,雨带中有多个较明显的雨团,雨带稳定少动但有强弱振荡。过程后期3月20日傍晚的降水属于层状云嵌套的对流云降水(见图1)。

## 4 降水的物理化学特征

### 4.1 降水的微物理特征

表2 广州春季锋面降雨的微物理特征\*

时间	样品数	$\bar{N}$ (m <sup>-3</sup> )	$\bar{K}_{d>1mm}$ (m <sup>-3</sup> )	$\bar{D}$ (mm)	$\sqrt[3]{\bar{D}^3}$ (mm)	$I$ (mm/hr)	$Z$ (mm6/m <sup>3</sup> )	$LWC$ (g/m <sup>3</sup> )	$D_{max}$ (mm)
3.17	77	220.4	18.5	0.59	0.69	1.05	486	0.06	3.5
3.18	23	347.8	29.4	0.61	0.72	1.52	554	0.09	2.9
3.20	20	229.7	52.5	0.78	0.91	2.50	1212	0.13	3.1
平均	120	246.4	26.3	0.63	0.73	1.38	620	0.08	3.50

(\* 括号内为各量的单位)

表2为用观测雨滴谱资料计算的各微物理特征量结果,由于3月17日至18日清晨的三次降水间隔不超过3h,故而合并作为一次降雨统计。从表中看到这次降雨的微物理特征大致表现为层状云降水的特点,即雨滴浓度比广州同季节雷阵雨高出60%<sup>[6]</sup>,尺度较小,最大滴直径仅3.5mm,含水量也较低,因而雨强、雷达反射因子均比较小。将这次降水过程微物理特征量随时间变化绘于图2,可以看到含水量主要与雨滴浓度,尤其是大于1mm的雨滴浓度有关,而与平均直径变化关系不密切。在降水中后期8h中,可以分析出各微物理特征量有起伏变化,反映了云中降水的不均匀性,即雨团中雨核的存在。而3月20日的降水,从雨滴浓度、平均直径到含水量均表现出两个明显的峰值,第一峰出现在降

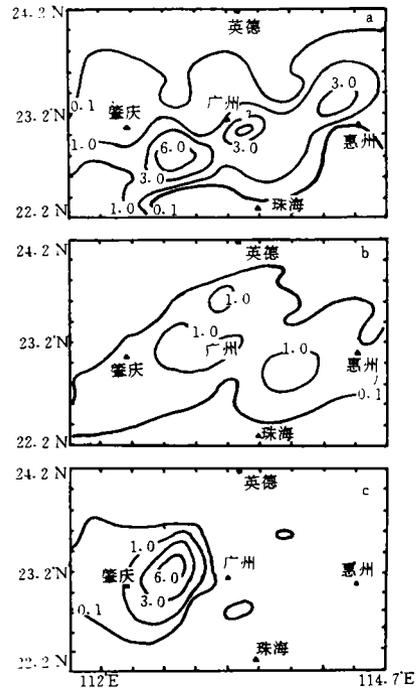


图1 珠江三角洲逐时雨量场

(a, 1989年3月17日10—11时雨量场;  
b, 1989年3月17日23时至24时雨量场;  
c, 1989年3月20日16—17时雨量场;  
等值线单位 mmh<sup>-1</sup>)

水前期,第二峰在中后期,分别对应雨团中的两个次级降水元—雨核,在这个过程中应是层状云中嵌有对流云。雨滴直径峰值先于雨滴浓度峰值出现,而含水量峰值居于两者之间。从这两个个例来看,降水开始时雨滴尺度大而浓度并不太大,随后浓度加大,尺度减小,这种变化在一个个例中可重复出现多次。将这 3d 降水的雨滴浓度与最大滴直径出现几率列于表 3,可看到这个过程雨滴浓度较之中国中纬度地区要小,91%的样品中雨滴浓度小于 500 个  $m^{-3}$ ,雨滴尺度明显较小;94%的样品最大滴小于 3mm,既表现出典型层状云降水的雨滴分布特点,又与中国中纬度地区以  $N_s, A_s$  为主的层状云降水雨滴谱以高浓度小滴为特点有所不同。这是由于岭南地区水热条件较好,层状云云状以  $Sc$  为主(本次过程地面气象记录均报  $Sc$ ),故而云层较之中纬度地区更趋于不稳定。

我们统计了雨滴谱谱型出现频率,这次过程以多峰谱(Ⅲ型谱)居多数,达 62.5%;单峰谱(Ⅱ型谱)次之占 33.3%;无峰谱(Ⅰ型谱)最少占 4.2%。但低于广州地区对流性降水多峰谱出现频率<sup>[15]</sup>。把该过程中三次降水的平均谱绘于图 3,我们看到其主要特点仍为层状云降水雨滴谱,谱型连续无间断谱,为单峰型,峰值直径 0.4mm,谱比较光滑,大于 0.4mm 的谱为单调下降幂函数谱。与本地区雷雨云降水的雨滴谱多峰、多间断谱、谱宽可达 7mm 以上有较大不同<sup>[5]</sup>。同时将 3 月 17 日 15 时 20 分降水最活跃的瞬

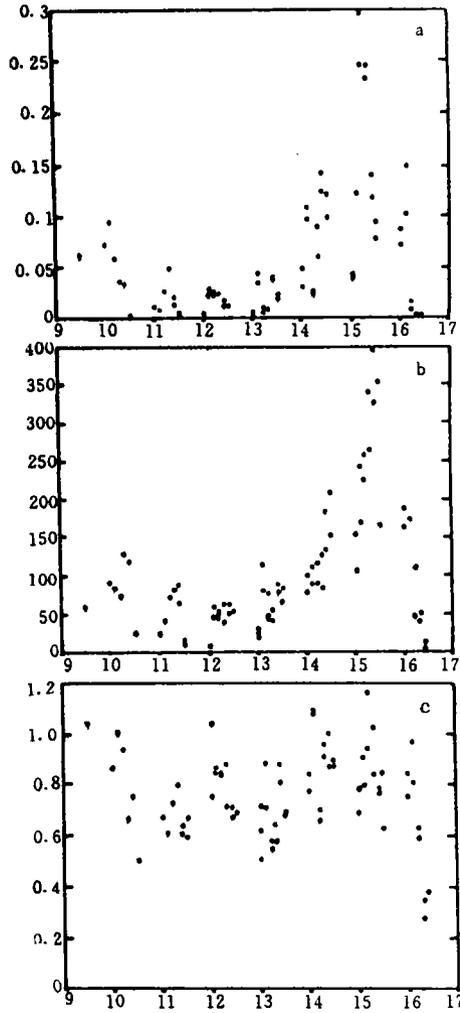


图 2 1989 年 3 月 17 日雨滴微结构变化  
(a. 含水量 LWC 单位:  $gm^{-3}$ ; b. 总浓度  $N$ , 单位:  $个 m^{-3}$ ;  
c. 平均直径  $D$ , 单位:  $mm$ ; 横坐标为 3 月 17 日 9—17 时)

表 3 雨滴浓度与最大滴直径出现百分率(%)

日期	样本数	雨滴浓度(个 $m^{-3}$ )				最大滴直径(mm)			
		0-100	100-300	300-500	>500	0.1-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	>3.0
3.17	77	60	30	5	5	44	43	8	
3.18	23	13	43	26	17	5	65	—	
3.20	20	30	40	15	15	20	50	10	
平均	120	46	34	11	9	8	49	6	

时谱绘于图 3, 我们看到其峰值直径向大滴一侧拓宽到 1mm 位置, 这反映了云中成雨过程较为活跃。但谱型仍维持准单调下降的幂函数谱, 说明其降水过程虽活跃但仍是较稳定的过程, 构成层状云中的雨核与对流旺盛的积云降水谱仍有本质的不同。而 3 月 20 日 18 时 57 分的瞬时谱谱型多峰, 小滴明显不足, 显示出较明显的小阵雨的谱型特征<sup>[5]</sup>, 这是对云嵌于层状云内作为雨核的一个例子。

用雨滴谱配置  $Z-I$  关系对于雷达定量测量降水的标定很有帮助, 此外, 由于  $W-I$  关系远比  $Z-I$  关系地区变异小<sup>[5]</sup>, 故而我们利用这个过程 120 份雨滴谱配置了  $Z-I$  关系与  $W-I$  关系, 可表示为:

$$Z = AI^b \quad (1)$$

$$W = AI^b \quad (2)$$

为便于比较, 将其与广州地区其它例子的结果同时列于表 4, 可以看到这次锋面降水的雨滴谱配置的  $Z-I$  关系与另三类阵性降水不同, 而与中国长江流域以北各地的层状云降水更为接近<sup>[10]</sup>。

一般认为中纬度地区连续性降水的雨滴谱序列的平均谱可以表示为较规则的指数谱, 而低纬地区连续性降水是否遵从这一分布呢? 我们将这个过程的三次降水按如下关系进行拟合:

$$N_r = N_0 e^{-\lambda D} \quad (3)$$

其中  $\lambda = AI^b \quad (4)$

结果见表 5, 从表中可看到无论个例与平均, 该过程

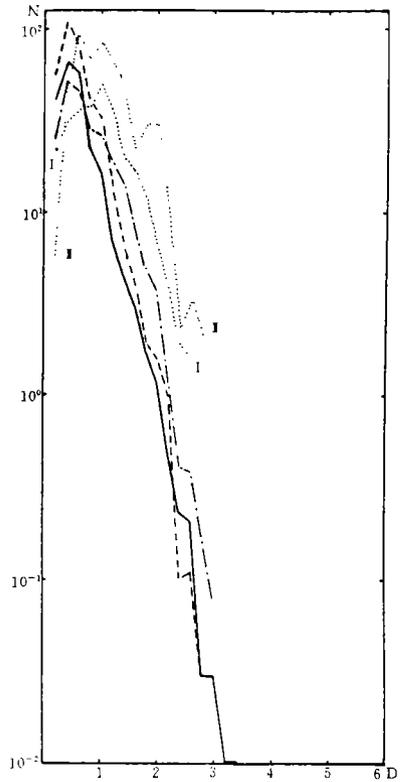


图 3 本次过程雨滴平均谱  
(其中实线为 3 月 17 日平均谱, 长虚线为 3 月 18 日平均谱, 点划线为 3 月 20 日平均谱, 点线 I、II 分别为 3 月 17 日 15:20 及 3 月 20 日 18:57 瞬时谱。横轴为雨滴直径  $D$ , 单位 mm, 纵轴为雨滴浓度  $N$ , 单位个  $m^{-3}$  (0.2mm)

表 4 广州地区各类降水的  $Z-I$  与  $W-I$  关系

	$Z-I$ 关系				$W-I$ 关系			
	$A$	$b$	$r$	$S$	$A$	$b$	$r$	$S$
春季锋面降水	270	1.36	0.9677	0.2816	0.0633	0.86	0.9882	0.1055
静止锋暖区降水 <sup>[6]</sup>	370	1.42	0.9690	0.3333	0.0583	0.86	0.9922	0.0992
夏季小阵雨 <sup>[5]</sup>	345	1.39	0.9543	0.2925	0.0569	0.88	0.9904	0.0822
夏季阵雨 <sup>[5]</sup>	264	1.53	0.9503	0.3198	0.0639	0.83	0.9842	0.0955

表 5 广州春季锋面降水的谱分布函数

日期	$N_0$	$A$	$b$	$r$	$S$
3.17	239.6	2.49	-0.2631	-0.8307	0.0973
3.18	355.1	2.59	-0.2851	-0.8557	0.1244
3.20	202.0	2.12	-0.2280	-0.7436	0.1567
平均	210.6	2.73	-0.2237	-0.8616	0.0801

的雨滴谱序列的  $\text{Log}N$  与  $D$  的相关系数均在 0.74 以上,显著性水平优于 0.001, 剩余标准差不大于 0.16, 说明  $N$  与  $D$  间存在指数关系。可见用式(3)、(4) 来拟合是合理的, 但与中纬度的形式有较大差别, 突出的是  $N_0$ 。偏低一个量级左右, 总的看来此低纬个例雨滴平均谱型较平缓, 谱宽较宽而浓度较低。

### 4.2 雨水的化学性质

将本次降水过程在基本观测点所取雨水样品的化学特征列于表 6, 可以看出, 本过程的平均 pH 值比较低为 4.78, 最低 pH 值是 3.50, 最高为 6.20, 样品中酸雨出现频率为 88.5%,  $\text{pH} < 5.0$  的占 76.9%,  $\text{pH} < 4.0$  的强酸雨占 15.4%, 雨水酸化很严重。电导率平均为 45.2, 离子成份中以  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  最多, 其次是  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ ; 而  $\text{F}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  浓度较低,  $\text{Mg}^{2+}$  的含量极低, 反映了沿海城市雨水成分的特点, 与原报道的广州地区雨水化学成分的特点相似<sup>[11]</sup>。而与南海海域降水中以  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  占绝对优势, 亦存在高浓度  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的情形很不一样<sup>[12]</sup>。

表 6 基本观测点的雨水化学特征(离子浓度单位:  $\mu\text{eq/l}$ )

时间	样品数	雨量 mm	平均 pH 值	电导率 $\mu\text{s/cm}$	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
3.17	19	21.1	4.86	40.1	15.4	17.7	27.6	42.2	116.0	16.5	19.8	7.2	1.4
3.18	4	5.9	4.35	55.8	13.3	26.1	47.9	56.9	168.0	19.8	29.7	7.2	1.3
3.20	3	4.4	4.96	55.1	14.5	36.9	50.4	50.4	115.8	20.5	30.4	10.8	1.7
平均	26	31.4	4.78	45.2	14.9	22.0	34.6	46.1	125.8	17.7	23.2	7.7	1.4

表 7 不同高度处雨水的化学性质(离子浓度单位  $\mu\text{eq/l}$ )

取样点	平均 pH 值	电导率 $\mu\text{s/cm}$	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$\sum -$	$\sum +$
1.5m	4.9	38.3	14.1	32.9	26.5	49.7	238.2	28.8	41.3	33.8	3.3	123.2	345.4
32m	4.6	34.2	27.0	17.14	30.9	35.3	79.0	22.8	15.8	7.6	1.2	110.6	126.4
118m	4.6	35.0	10.6	25.0	22.9	30.8	78.2	14.3	25.8	8.1	1.8	89.3	128.2

在降水过程中, 选取几个时段增加了在电视塔上层取样与在山脚下环市路取样, 其中 3 月 17 日 15 时至 17 时的资料三层比较齐全, 结果列于表 7, 可见降水 pH 值是随雨水自高层落下而增加的, 电导率亦加大, 表明雨水在下落过程中增加了离子成份, 而且其总和效应是偏碱性的。具体来看, 离子成份中  $\text{SO}_4^{2-}$  在各层均占阴离子浓度首位, 而阳离子中主要是  $\text{NH}_4^+$ , 而且  $\text{NH}_4^+$  的增加比  $\text{SO}_4^{2-}$  的增多要显著, 导致低层 pH 值升高。此外, 从这三层雨水样品的离子成份来看, 离子的增加主要在 32m 至地面间完成, 而 32m 与 118m 处雨水的 pH、电导率及离子浓度无大差别。

将 3 月 17 日凌晨至 18 日凌晨的完整降水个例雨水化学性质与雨强随时间的变化绘于图 4。看到在整个降水持续的 26h 中, 雨强共有三个较显著的峰值, 分别出现在开始降水的第 6 小时, 第 14 小时与第 20 小时, 其它时段雨强都维持在低水平上, 三个雨强峰值以第一次最强, 而后一次比一次弱, 可能是对应着锋面降水的三个雨带活动。对应 pH 的

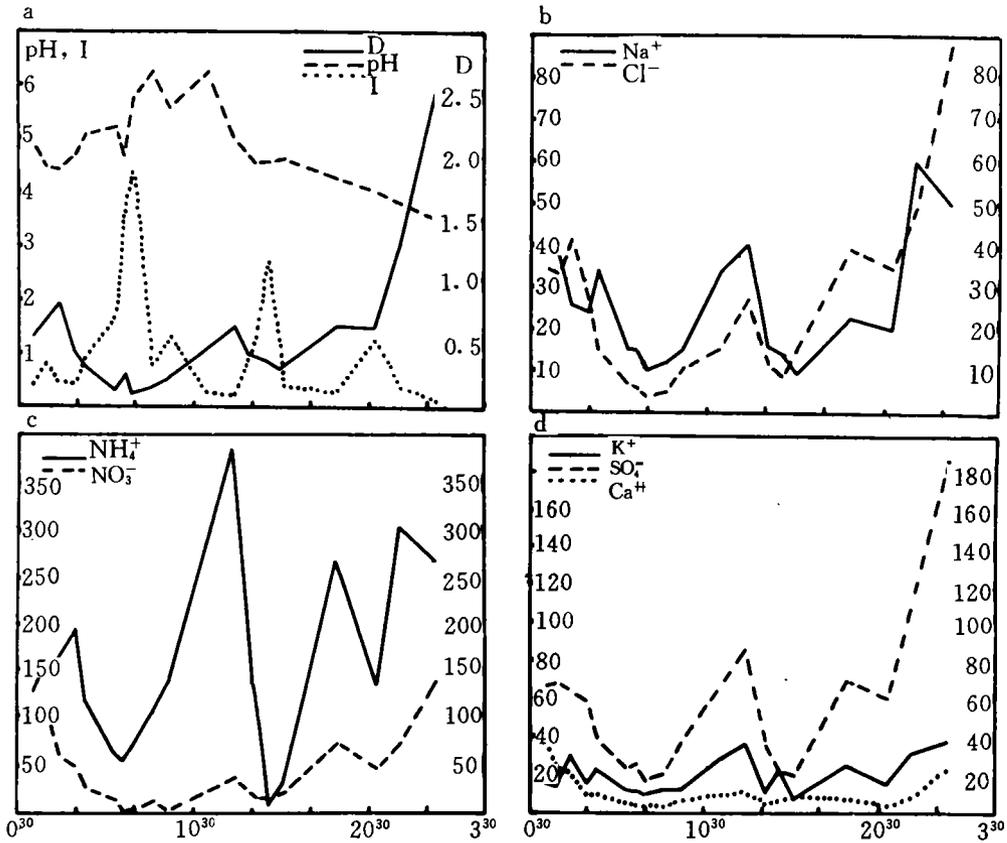


图4 1989年3月17日—18日雨水化学性质及雨强随时间变化

(a, 雨强  $I$  ( $\text{mmh}^{-1}$ ), pH 值及电导率  $D$  ( $\mu\text{scm}^{-1}$ ); b,  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$ ;

c,  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$ ; d,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ , b, c, d 纵坐标皆为离子浓度,

单位:  $\mu\text{eq/l}$ ; 横坐标为 3 月 17 日 0:30—3 月 18 日 3:30)

变化,降水开始后前 11h 内 pH 有起伏,但总的趋势是上升的,降水中、后期, pH 值变化无大起伏而呈持续下降趋势,直至降水停止前最后一个样品达本次降水的最低值 3.5。电导率的变化在降水前、中期起伏不大,与雨强也有对应得较好的反相关关系,这里主要反映了雨量的稀释效应。最后两个样品电导率异乎寻常的增高,是值得注意的。具体到各离子成分,均与电导率的变化有很相似的图像,最后两个样品中阴离子浓度均增加很多,尤其是  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Cl}^-$ ,这两种离子增多是造成 pH 下降的主要因素。值得一提的是,在各离子成份中,  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$  的关系比较密切,而  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  间均有一定关系。

表8 以气溶胶为参考的雨水离子的富集度

$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$
1.97	2.84	2.32	0.15	1	1.35	0.047	0.023	1.84

表 9 雨水中的非海盐成份

	浓度(total) ( $\mu\text{eq/l}$ )	非海盐浓度(nss) ( $\mu\text{eq/l}$ )	nss/total(%)
$\text{SO}_4^-$	46.1	44.2	95.8
$\text{NO}_3^-$	34.6	34.6	100.0

为讨论雨水中离子成份的可能来源,我们定义富集度因子<sup>[13]</sup>,以气溶胶中水溶性离子成分为参考离子成分,将这次降水的结果列于表 8,相对于当时当地的气溶胶组分而言,雨水中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{NO}_3^-$  有富集现象,而  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{F}^-$  与气溶胶关系密切。

由于广州地区近海,雨水化学成份会受到海盐气溶胶的影响,因而也按照以前的方法<sup>[13]</sup>计算了雨水中的非海盐成分,从表 9 中看到,  $\text{SO}_4^-$  与  $\text{NO}_3^-$  的非海盐成分比较多,分别占其总量的 95.8% 与 100%,因而可以认为广州地区此次降雨过程中雨水中的  $\text{SO}_4^-$  与  $\text{NO}_3^-$  主要来源于大陆源与人类活动的影响。

#### 4.3 气溶胶的物理化学特征

将 Andersen 分级采样器采集的 9 级气溶胶样品进行了分析,发现就总质量谱而言(图 5),本次降水前后均为三峰型,降水前主峰在  $9-10\mu\text{m}$  处,第二峰在  $4.7-5.8\mu\text{m}$  处,第三峰出现在  $1.1-2.1\mu\text{m}$  处;在降水持续过程中,这种谱型仍维持,但整个谱段浓度均下降,主要是大粒子浓度的下降;降水后谱型虽然仍是三峰型谱,但配置发生很大变化,整个谱向小粒子一侧偏移,主峰出现在  $0.43-0.65\mu\text{m}$  处,次峰在  $9-10\mu\text{m}$  处,第三峰很不明显在  $4.7-5.8\mu\text{m}$  处,  $>1.1\mu\text{m}$  的粒子较降水前与降水中均有明显下降,而  $<0.65\mu\text{m}$  的粒子又有明显增多。具体到各种离子成份,在降水前我们看到(图 6)  $\text{SO}_4^-$  与  $\text{Ca}^{++}$  含量最高,此外,还有一定数量的  $\text{NH}_4^+$ ;而  $\text{F}^-$  在大粒子段有微弱的峰;降水过程中  $\text{SO}_4^-$  与  $\text{Ca}^{++}$  的含量略有增加,大粒子段的  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{F}^-$  基本消失,而开始出现微弱的  $\text{Cl}^-$  峰;降水后  $\text{SO}_4^-$  与  $\text{Ca}^{++}$  的巨粒子峰被削减了许多,而在小粒子段又有增加,而  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  在整个谱段均有显著增高。这里反映了降水对气溶胶中水溶性物质的清除是明显的,尤

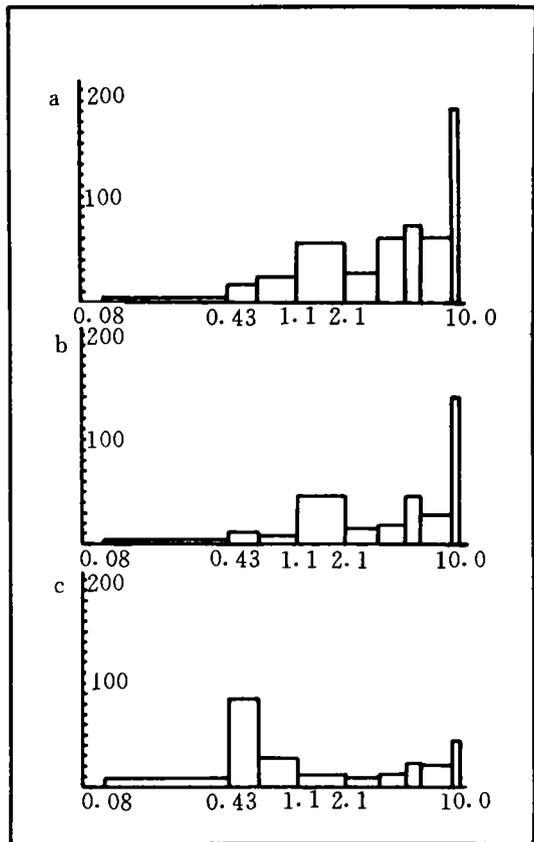


图 5 降水前 a, 中 b, 后 c 气溶胶总质量谱变化  
(横坐标为  $\Delta D$ , 单位  $\mu\text{m}$ ;  
纵坐标为  $\Delta m/\Delta \ln(\Delta D)$ , 单位  $\mu\text{g m}^{-3}$ )

其是  $D \geq 1.1 \mu\text{m}$  粒子段。而小粒子中一些成分的增多是与降水后期小雨滴蒸发后析出的气溶胶再悬浮机制有关,还是与不同属性气团的物质输送有关,有待于今后深入研究。

## 5 小 结

通过对这次典型的华南春季锋面层状云系降水的物理特征与化学性质的分析,得到如下认识:

(1) 这次锋面层状云系降水过程由三个雨峰组成,对应着三条雨带;层状云中嵌有对流云;降雨的雨滴浓度比本地区积云降水高 60%, 平均  $246.4 \text{ 个 m}^{-3}$ , 雨滴比较小, 平均直径  $0.63 \text{ mm}$ , 最大雨滴仅观测到  $3.5 \text{ mm}$  的滴;雨强不大。雨滴谱型为准单调下降幂函数谱, 配置的 Z-I, W-I 关系与中国中纬度各地的较为接近。

(2) 雨水 pH 值较低, 平均为 4.78, 样品中酸雨出现频率可达 88.5%, 离子成份中以  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  的含量最高, 其次是  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$ 。

(3) 在近地面层内, 雨水在下落过程中离子成份是增加的, pH 值逐渐升高, 增加最多的离子成份是  $\text{NH}_4^+$ 。

(4) 降水开始后 pH 值是起伏上升的, 而后持续下降, 降水终止时的最后一个样品 pH 值低至 3.5。雨水中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$  的关系密切。

(5) 降水前、中、后的气溶胶均为三峰谱型, 但配置不同, 总的来看, 降水对气溶胶大粒子中水溶性成分的清除是显著的。

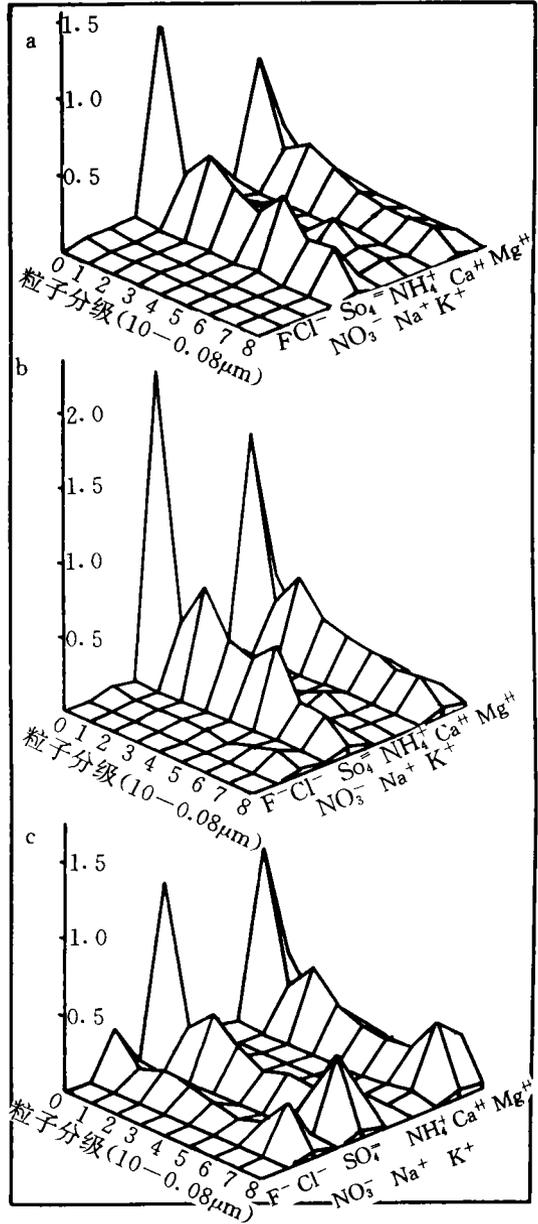


图 6 气溶胶水溶性离子谱分布

(a, 降水前; b, 降水中; c, 降水后;

纵坐标为  $\Delta m / \Delta \ln \Delta D$ , 单位:  $\mu\text{eqm}^{-3}$ )

## 参考文献

- [1] 吴兑等. 广州大气气溶胶质量谱与水溶性成分谱分布的年变化特征. 气象学报, 1994, 52 (4): 499—505.
- [2] 张铮. 峨眉山酸雨的垂直观测. 大气科学, 1991, 15 (3): 31—37.
- [3] 纪仲仿. 降水酸度和化学组分垂直监测的初步分析. 大气科学, 1989, 13 (3): 378—382.
- [4] 丁国安等. 庐山降水化学垂直分布的初步研究. 应用气象学报, 1990, 1 (4): 360—368.
- [5] 吴兑. 广州地区 1984 年 6 月小阵雨的微物理结构. 气象, 1989, 15 (5): 16—22.
- [6] 吴兑等. 华南准静止锋暖区内降水的物理化学特征. 气象, 1994, 20 (2): 18—24.
- [7] Andersen A A. A sampler for respiratory health hazard assessment. Am Ind Hyg Ass J, 1966, 27: 160—165.
- [8] Butler J D. Air pollution chemistry. New York. Academic Press, 1979, 152—164.
- [9] Jana B. Milford and Cliff I. Davidson. The sizes of particulate trace elements in the atmosphere—A: Review. JAPCA, 1985, 35 (12): 1249—1260.
- [10] 吴兑等. 宁夏平原不同雨型的 Z-I 关系研究. 气象, 1989, 15 (2): 22—26.
- [11] 全文哲等. 广州地区酸雨现状的研究. 中国环境科学, 1989, 9 (2): 123—128.
- [12] 吴兑等. 西沙永兴岛降水的酸度及其化学组成. 气象学报, 1989, 47 (3): 381—384.
- [13] 吴兑. 西沙群岛旱季小阵雨的酸度及化学成分. 气象, 1990, 16 (9): 18—22.

## THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A SPRING FRONTAL RAINFALL IN GUANGZHOU

Wu Dui You Jiping Chen Weichao Gan Chunlin

(Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangzhou, 510080)

Su Liping Liu Linqin

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012)

### Abstract

Through layer-by-layer observational analysis to a typical case of frontal sheet-cloud rainfall, some of its physical and chemical characteristics are obtained, which show that: (1) modest raindrops concentration and small drop diameter account for a light raininess; (2) the pH value (4.78 in average) is low and  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^-$ , and  $\text{NO}_3^-$  are the dominant composition of ions with  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  next to them; (3) with the fall of raindrops at the near-surface layers, ion levels and pH values increase; (4) the pH value rises in fluctuation at the onset of the rainfall coupled with a consistent descent afterwards.  $\text{Cl}^-$  well relates with  $\text{Na}^+$

**Key words:** Rainwater acidity, Rainwater chemical composition, Aerosol, Watersoluble ionic compositions.