

广州地区 1994 年 6 月洪涝期间 降水的物理化学特征*

吴 兑 邓雪娇 黄浩辉

(广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘 要 受 9403 号强热带风暴登陆和锋面暴雨的影响, 致使珠江下游出现百年一遇特大洪涝灾害, 本文在此期间分析了在从化气象站密集观测的雨水成分与雨滴谱资料, 结果表明: (1) 雨滴谱型以多峰谱为主, 极少出现无峰谱; (2) 雨水的 pH 值均比较低; (3) 在雨水离子中以 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的浓度最高, 雨水中被富集的主要是 NO_3^- ; (4) 气溶胶水溶性离子成分中, SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 的浓度最高。

关键词 雨水酸度 雨滴谱 雨水离子成分

1 引言

近年来, 随着环境问题日益引人注目及大气化学学科的进展, 有关雨水酸度及化学组分的研究日趋普遍, 但大量的研究较多地侧重于区域酸雨的分布情况, 及其雨水酸度与化学组分的关联方面, 一般均指整场雨的平均情况而言, 对于典型降水类型的密集取样观测研究相对较少^[1], 我们曾研究了广州地区两次典型降水过程中雨水酸度及化学组分的时空变化^[2,3], 但均仅限于春季, 即一般认为华南的酸雨季节。对其他季节, 尤其是汛期强降水的酸度变化及化学成分的变化一无所知, 而降水的微物理特征与化学成分随降水持续的变化, 反映了降水云中的重要物理化学过程, 可以提供大量有关降水发生发展信息, 因而我们于 1994 年 6 月在广州市从化气象站进行了一次降水的综合密集观测, 正值台风云系与副高西侧锋区内低值系统造成的西、北江流域持续暴雨洪涝灾害期间, 内容包括雨滴谱观测、雨水样品分析、气溶胶样品分析, 并研究了它们的物理特征与化学性质, 为研究雨水增长过程与酸化机制, 以及云与降水的物理化学模式研究提供了难得的资料实例。

2 天气背景与观测的基本情况

1994 年 6 月华南地区大范围暴雨天气是由于西太平洋副热带高压西北侧高空锋区内, 频繁的高空槽活动、低空西南风急流、对流层下部低涡和地面气旋的共同影响所造成的, 其间还有 9403 号强热带风暴在粤西登陆的影响, 因而频繁交替的持续性强

1996-07-12 收到, 1997-01-12 收到修改稿

* 中国气象局气象科学基金资助

降水造成了华南西、北江流域近百年一遇的洪涝灾害。

从化气象站位于 23°33'N、113°34'E，靠近北回归线，雨滴谱观测与雨水的密集取样均是在观测场北侧值班室二楼平台上进行的，周围地形开阔，处于城市近郊。从化以旅游、农业为其主要经济来源，又是广州市区的重要水源地，工业污染较少，因而可以代表较为清洁区的自然背景情况。

采用滤纸色斑法观测雨滴谱^[4]，使用含淀粉滤纸，取样后即时熏碘蒸汽而形成深蓝色色斑，计数后处理即得到雨滴谱分布资料。取样间隔 5 min，取样暴露时间为 5~60 s，每张滤纸收集 300 个以上的雨滴，共取到雨滴谱资料 425 份。使用经去离子水冲洗三次直径 31.5 cm 的塑料盆取样，采样间隔 5 min，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 222 份。使用 PHB-29C 型酸度计测定 pH 值，由 DDS-11A 型电导率仪测定电导率；F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻由离子色谱法测定；K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺由原子吸收分光光度法测定，NH₄⁺由化学法（纳氏试剂比色法）测定。使用 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 μm 至 10.0 μm 间，取样器流量为恒定的 28.3 L/min。取样器的分级捕获效率等问题由 Andersen 进行了详细介绍。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^[5]。共采集了两组分级气溶胶样品，为满足化学分析收集足够的物质，每组样品采样 2~3 天，采样体积保持在 100 m³ 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 25 ml 去离子亚沸蒸馏水常温水淬 16 h，淬取其中的水溶性成分，用离子色谱法测定 F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺，用耦合等离子发射光谱法（ICP）测定 Ca²⁺、Mg²⁺。

本次综合观测期间，共观测到台风后部涡旋云带强降水、低槽切变强降水、热对流强雷雨等降水个例 12 个。

3 降水的微物理特征

现将观测到的雨滴谱资料按不同降水类型计算的微物理特征量列于表 1，可以看到，稳定型降水的雨滴浓度最高，但其直径大于 1 mm 的雨滴浓度并不高，而雷阵雨与台风降水的雨滴浓度与大滴浓度均较高，且雨滴的平均直径也比其他类型降水大，因而这两种类型降水的雨强、含水量及雷达反射率因子也比较大。小阵雨的浓度最低，因而其雨强及雷达反射率因子最小。最大曾观测到直径 6.5 mm 的雨滴。

表 1 各种降水类型雨滴谱的特征量

降水类型	观测次数	N	N	D	D^3	I	Z	W	D_{\max}	I_{\max}
		(个/m ³)	$d > 1.0 \text{ mm}$	(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm ⁶ /m ³)	(g/m ³)	(mm)	(mm/h)
稳定型降水	24	393.3	127.4	0.95	1.14	7.2	4770	0.35	3.9	38.32
小阵雨	95	178.7	66.6	1.03	1.19	4.3	9724	0.20	6.5	64.69
雷阵雨	100	339.9	169.5	1.25	1.54	18.6	30566	0.75	6.1	155.06
混合型降水	135	297.7	107.0	1.02	1.18	7.7	7774	0.35	5.5	63.71
台风降水	53	372.4	178.9	1.05	1.29	15.1	21294	0.65	5.9	146.33

表 2 各种降水类型雨滴谱的谱型出现频率(%)

降水类型	观测次数	谱型		
		I	II	III
稳定型降水	24	0.0	30.4	69.6
小阵雨	95	0.0	18.1	81.9
雷阵雨	100	0.0	6.0	94.0
混合型降水	135	0.7	3.0	96.3
台风降水	53	0.0	17.0	83.0
春季锋面 ^[3]	120	4.2	33.3	62.5
春季锋前 ^[2]	118	2.6	29.8	67.5

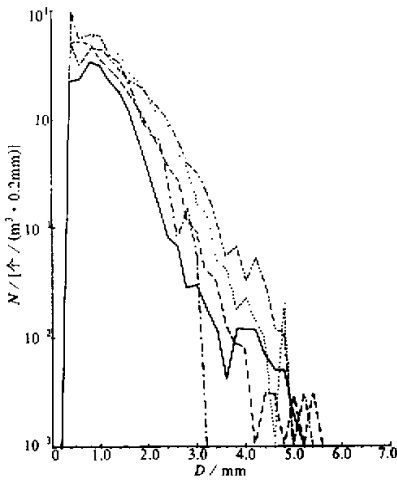


图 1 各种降水类型雨滴谱的实测平均谱
——小阵雨, ---混合型, - · - · 稳定型,
····雷阵雨,台风

各种降水类型雨滴谱的谱型出现频率见表 2,总的印象是 III 型谱(多峰谱)出现机会甚高,极少出现 I 型谱(无峰谱),即使是稳定型降水也是如此,与以往分析的广州春季降水和夏季小阵雨的情况相类似^[2~4]。雷阵雨与混合型降水中以 III 型谱的出现机会最高,均达 90%以上,台风降水与小阵雨中 III 型谱的出现频率也可达 80%以上,稳定型降水 II 型谱(单峰谱)出现机会最多,有 30%左右。与春季相比,III 型谱的出现机会明显增多而几乎不出现 I 型谱。这些现象与不同降水类型的云中降水粒子增长的活跃程度是相对应的。

将各种降水类型雨滴谱的实测平均谱列于图 1,从中看到稳定型降水的小滴浓度高,而连续谱宽最窄,此种类型的降水在我们的例子中是雨强较弱的;雷阵雨和台风降水在整个谱段的浓度都比较高,且连续谱宽也比较宽,因而雨强较强;混合型降水的情况介于稳定型降水与雷阵雨之间;虽然小阵雨的连续谱宽也比较宽,但其主要谱段的浓度明显低于其他类型的降水,故而雨强最弱。五种类型降水有一个共同的显著特点,即谱型均呈多峰谱型,与长江流域及以北地区的情况不同^[6],表明云中降水粒子的增长过程较为活跃。

4 雨水的化学特性

将收集的雨水现场测定了 pH 值与电导率,并分析了主要的离子成分,各类降水的平均情况见表 3,可以看到这些雨水的 pH 值均比较低,尤其是小阵雨与雷阵雨平均为 4.4,台风降水与混合型降水稍高平均为 5.0,但仍低于目前的酸雨标准($\text{pH} > 5.6$),最小值为 3.5,最大值为 6.5,在 222 个样品中, $\text{pH} < 5.6$ 的样品占 89%, $\text{pH} < 5.0$ 的也占到 73%,而 $\text{pH} < 4.5$ 的强酸雨还占 44%,可见广州地区不仅春季降水造成酸雨危害,就是在汛期降水的酸雨危害也十分严重。电导率平均在 $15.4 \sim 41.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,表明雨水中离子浓度总水平并不太高。各类降水间离子浓度的分布趋势比较相近,在阴离子中 SO_4^{2-} 的浓度较高,在阳离子中 NH_4^+ 的浓度最高,其次是 Ca^{2+} ,而 K^+ 、 Mg^{2+} 的浓度很低。明显的不同之处是台风降水的雨水中 Cl^- 、 Na^+ 显著多于其他类型的降

表 3 各种降水类型雨水的 pH 值、电导率与离子浓度 (mol/L)

	样品数	pH	电导率 / (μS/cm)	F	Cl	NO ₃	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
稳定型降水	13	4.9	15.4	6.0	11.8	13.6	15.6	5.9	18.4	3.9	9.1	1.4
小阵雨	46	4.4	41.0	12.1	17.7	25.9	51.1	7.9	42.0	6.5	16.2	2.4
雷阵雨	63	4.4	36.2	9.2	19.2	19.9	39.9	10.6	23.9	4.8	10.0	2.8
混合型降水	47	5.0	16.6	11.7	15.1	11.1	27.5	7.6	27.7	3.5	10.8	3.7
台风降水	53	5.0	26.6	29.3	37.1	17.5	33.7	22.4	43.2	5.8	15.0	4.1
春季锋面 ^[3]	26	4.8	45.2	14.9	22.0	34.6	23.1	23.2	125.8	17.7	3.9	0.7
春季锋前 ^[2]	58	4.4	57.7	12.1	42.1	48.9	20.3	34.5	128.6	24.6	11.0	1.7

水,说明其受到了海洋环境的影响。上述情况与南海海域西沙群岛降水中以 Cl^- 、 Na^+ 占明显优势, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度亦很高的情况有很大不同^[7], 与我国大陆 SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 占优势的情况有相似之处^[8], 反映了我国低纬沿海地区降水化学性质的特点, 与受到较严重污染的广州市区雨水化学成分中 NO_3^- 离子浓度甚高, 占阴离子含量第一位的情况有明显不同^[2]。

5 气溶胶的物理化学特征

将 Andersen 分级采样器采集的九级气溶胶样品进行了分析,发现所取两组样品的平均总质量介于广州与华南海岸之间,气溶胶水溶性离子成分中, SO_4^{2-} 是浓度最高的阴离子成分,而 Ca^{2+} 是浓度最高的阳离子成分, SO_4^{2-} 、 F^- 的浓度高于广州及其华南海岸地带, NO_3^- 、 K^+ 的含量明显偏低, Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 的浓度与广州同季的结果相近。

表 4 气溶胶质量浓度 (μg/m³) 与水溶性离子成分浓度 (mol/m³)

采样地点	总质量	F	Cl	NO ₃	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
从化	90.3	0.182	0.103	0.004	0.398	0.118	0.095	0.014	0.272	0.070
广州雨季 ^[9]	114.4	0.057	0.102	0.025	0.343	0.157	0.118	0.058	0.244	0.073
南海北岸 ^[5]	73.8	0.067	0.265	0.042	0.148	0.241	0.068	0.051	0.327	0.115

气溶胶质量浓度谱呈三峰分布,主峰位于 9~10 μm 处,第二峰在 4.7~5.8 μm 处,第三峰出现在 0.43~0.65 μm 处;与广州市区的结果相似但第三峰向小粒子一侧偏移^[10]。从图 2 来看,气溶胶水溶性离子成分谱分布也有三峰分布的倾向,其中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 的分布更具典型性,三个峰的位置也与总质量谱基本一致。较为特殊的是 F^- ,在这里的浓度较高,与以往在华南其他地方的观测结果不同,而且表现为双峰分布,第二峰位于 2.1~3.3 μm 处,有别于总质量浓度谱,估计其不会是自然

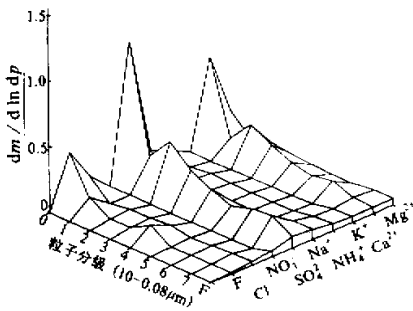


图 2 气溶胶水溶性离子成分谱分布

来源,可能与当地的局地人类活动影响有关。

6 讨论

从表 5 看到,当 pH 值较低,雨滴总浓度、大滴浓度、雨滴平均直径均比较低,导致雨强、含水量、雷达反射率因子都比较小;随着 pH 值的增大,雨滴总浓度、大滴浓度、雨滴平均直径均在增加,故而雨强、含水量、雷达反射率因子也都增大。这种现象在以往的研究中也有所发现^[2,11],应与小滴的比截面积(表面积与体积之比)较大,更易于吸收大气中的气态酸性物质有关。

表 5 不同酸度降水的雨滴谱特征量

pH 值	雨滴谱 观测次数	N (个/ m^3)	N $d > 1.0\text{ mm}$	D (mm)	D^3 (mm)	I (mm/h)	Z (mm^6/m^3)	W (g/ m^3)
3.5~4.5	233	256.4	97.4	1.05	1.20	6.5	6190	0.35
4.5~5.5	165	355.4	150.5	1.11	1.31	15.0	26909	0.62
5.5~6.5	18	465.1	182.1	1.23	1.46	18.4	26832	0.76

为研究雨水中离子成分的可能来源,我们计算了以当地同时取到的气溶胶水溶性离子成分为参考系的富集度因子以及非海盐成分^[9],结果列于表 6 和表 7,对于气溶胶而言,主要被富集的是 NO_3^- ,尤其在稳定型降水、小阵雨、雷阵雨中富集明显。在稳定型降水、小阵雨、雷阵雨中, Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 有微弱富集现象,而 SO_4^{2-} 、 Na^+ 与气溶胶的关系较为密切。台风降水的情况较为特殊,雨水中 Cl^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 的富集较其他类型弱外, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均与气溶胶关联较少。

由于广州地区近海,雨水化学成分会受到海盐气溶胶的影响,因而按照原来的方法^[12]计算了雨水中的非海盐成分,从表 7 看到,各类降水中几乎全部的 F^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 均为非海盐成分,而 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 的非海盐成分也比较多,因而可以认为雨水中这些离子成分主要来源于大陆源与人类活动的影响。

表 6 不同类型降水的富集度因子(相对于气溶胶)

降水类型	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
稳定型降水	3.4	110.3	1.2	1.5	5.8	8.7	1.0	0.6
小阵雨	2.6	105.4	1.9	1.0	6.6	7.2	0.9	0.5
雷阵雨	3.7	105.4	2.0	1.8	5.0	7.1	0.7	0.8
混合型降水	2.3	46.5	1.1	1.0	4.5	4.0	0.6	0.8
台风降水	2.2	29.3	0.5	1.2	2.8	2.7	0.3	0.4

表 7 不同类型降水的诸离子成分中非海盐成分所占比重(%)

降水类型	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
稳定型降水	99.9	41.4	100	99.2	100	96.8	98.6	52.7
小阵雨	99.9	47.9	100	99.7	100	97.4	98.9	62.5
雷阵雨	99.9	35.6	100	99.5	100	95.4	97.7	56.4
混合型降水	99.9	41.2	100	99.4	100	95.4	98.5	76.3
台风降水	99.9	29.5	100	98.7	100	91.8	96.7	37.1

7 小结

(1) 稳定型降水的雨滴浓度最高, 但其直径大于 1 mm 的雨滴浓度并不高, 而雷阵雨与台风降水的雨滴浓度与大滴浓度均较高, 且雨滴的平均直径也比其他类型降水大, 因而这两种类型降水的雨强、含水量及雷达反射率因子也比较大。小降雨的浓度最低, 因而其雨强及雷达反射率因子最小。最大曾观测到直径 6.5 mm 的雨滴。雨滴谱型以多峰谱为主, 极少出现无峰谱。

(2) 雨水的 pH 值均比较低, 尤其是小阵雨与雷阵雨平均为 4.4, 台风降水与混合型降水稍高平均为 5.0, 但仍低于目前的酸雨标准 ($\text{pH} \leq 5.6$), 最小值为 3.5, 最大值为 6.5, 在 222 个样品中, $\text{pH} < 5.6$ 的样品占 89%, $\text{pH} < 5.0$ 的也占到 73%, 而 $\text{pH} < 4.5$ 的强酸雨还占 44%, 可见广州地区不仅春季降水造成酸雨危害, 就是在汛期降水的酸雨危害也十分严重。

(3) 电导率平均在 $15.4 \sim 41.0 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, 表明雨水中离子浓度总水平并不太高。各类降水间离子浓度的分布趋势比较相近, 在阴离子中以 SO_4^{2-} 的浓度较高, 在阳离子中以 NH_4^+ 的浓度最高, 其次是 Ca^{2+} , 而 K^+ 、 Mg^{2+} 的浓度很低。

(4) 气溶胶水溶性离子成分中, SO_4^{2-} 是浓度最高的阴离子成分, 而 Ca^{2+} 是浓度最高的阳离子成分, SO_4^{2-} 、 F^- 的浓度高于广州及其华南海岸地带, NO_3^- 、 K^+ 的含量明显偏低, Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 的浓度与广州同季的结果相近。气溶胶质量浓度谱呈三峰分布, 气溶胶水溶性离子成分谱分布也有三峰分布的倾向。

(5) 当 pH 值较低时, 雨滴总浓度、大滴浓度、雨滴平均直径均比较低, 导致雨强、含水量、雷达反射率因子都较小; 随着 pH 值的增大, 雨滴总浓度、大滴浓度、雨滴平均直径均在增加, 故而雨强、含水量、雷达反射率因子也都增大。应与小滴的比截面积 (表面积与体积之比) 较大, 更易于吸收大气中的气态酸性物质有关。

(6) 雨水中被富集的主要是 NO_3^- , 尤其在稳定型降水、小阵雨、雷阵雨中富集明显, 其次 Cl^- 、 NH_4^+ 也有微弱的富集现象。

致谢: 谨向广州中心气象台及从化气象站对本工作提供的便利与帮助和中国科学院地球化学研究所梁凤娴副研究员、于赤灵工程师精心分析样品表示由衷的谢意。

参 考 文 献

- 1 苏力萍、刘林勳、任阵海等, 1993, 广州地区降水物理化学变化及其相互间的关系, 中国环境科学, 13(6), 414~419.
- 2 吴兑、甘春玲、陈位超等, 1994, 华南准静止锋暖区内降水的物理化学特征, 气象, 20(2), 18~24.
- 3 吴兑、游积平、陈位超等, 1996, 广州春季锋面降水的物理化学特征, 气象学报, 54(2), 175~184.
- 4 吴兑, 1989, 广州地区 1984 年 6 月小阵雨的微物理结构, 气象, 15(5), 16~22.
- 5 吴兑, 1995, 南海北部大气气溶胶粒子的分布特征, 大气科学, 19(5), 615~622.
- 6 吴兑、黄浩辉, 1994, 广东云与降水的宏微观物理特征, 气象科技, (1), 14~24.
- 7 吴兑、项培英、常业楠等, 1989, 西沙永兴岛降水的酸度及其化学组成, 气象学报, 47(3), 381~384.
- 8 王润庞、王木林、纪湘明等, 1988, 本底污染区域监测站降水化学的一些监测结果, 气象, 14(11), 9~12.

- 9 吴兑、常业谛、毛节泰等, 1994, 华南地区大气气溶胶质量谱与水溶性成分谱分布的初步分析, 热带气象学报, 10(1), 85~96.
- 10 吴兑、陈位超, 1994, 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, 52(4), 499~505.
- 11 何珍珍、金安简、黄美元等, 1985, 雨水酸度与降水物理特性的关系, 大气科学, 9(4), 442~446.

The Physical and Chemical Features of Heavy Rain over Guangzhou Area in June 1994

Wu Dui, Deng Xuejiao and Huang Haohui

(Guangzhou Institute of Tropical Marine Meteorology, Guangzhou 510080)

Abstract Because of No. 9403 severe tropical storm and a frontal storm, very heavy rainfall lead to the severest flood damage in the Pearl River downstream area once a hundred years. This paper analyses the rain compositions and raindrop spectrum data collected densely at Conghua station during this period. The main results are: (1) the raindrop spectrum type is mainly multimodal seldom occurring non-peak spectrum, (2) the pH-values of rain are quite low, (3) in rain negative ions, the SO_4^{2-} density is the highest, while NH_4^+ is the largest in positive ions, and what is mainly concentrated is NO_3^- , (4) in aerosol water dissoluble ions, the SO_4^{2-} density is the highest in all of negative ions, and Ca^{2+} is the highest in positive ions.

Key words rain acidity size-distribution of raindrops rainwater chemical composition