

重庆市冬季雾的物理化学特性*

李子华

彭中贵

(南京气象学院, 南京, 210044) (重庆市环境科学研究所, 重庆, 630020)

提 要

在 1989 年 12 月 15 日至 1990 年 1 月 15 日和 1990 年 12 月 7 日至 1991 年 1 月 7 日, 对重庆市冬季雾进行了综合观测试验。从多项观测资料综合分析了雾的物理化学结构, 揭示了重庆市冬季雾许多重要的有别于外地的特征。

关键词: 重庆, 冬季雾, 物理化学特性。

1 引 言

重庆市是我国著名的“雾都”。据 1941—1990 年资料统计, 平均年雾日数为 80.1 天, 居全国各大城市之首。雾对交通运输、工农业生产影响极大, 给国民经济和人民生活带来严重的危害。因此, 有必要研究重庆市雾的物理化学结构, 以便为预报和治理提供科学依据。

重庆市地形复杂。东有铜锣山, 南有真武山, 西有中梁山, 城区本身也是山, 而且起伏大, 坡度大。长江和嘉陵江穿过市区, 而且在市中区东边汇合, 包围了市中区。这种地理条件对重庆市雾的形成与发展影响极大。重庆市是我国西南地区最大的工业基地, 空气污染严重影响雾的微物理结构和化学组成。

1989 年 12 月 15 日至 1990 年 1 月 15 日, 在重庆城区进行了含雾物理和雾水化学等内容的综合观测试验。与本文有关的观测项目、内容、仪器及布点情况如表 1 所示。表中气象观测每 3h 进行 1 次, 预报有雾的日子, 每 1.5h 观测 1 次。雾滴谱和含水量一般 20min 观测 1 次, 从雾生直至雾消。雾水采样时间一般为 1—3h, 采样量在 5—350ml 之间。气溶胶粒子数观测, 1—3h 1 次; 大流量采样器每次取样时间都在 24h 以上, 流量 $1\text{m}^3/\text{min}$ 左右。1990 年 12 月 7 日至 1991 年 1 月 7 日, 又进行了雾滴谱、雾水化学和边界层气象等部分项目的补充观测。

本文将利用观测资料, 综合分析雾的物理化学结构, 揭示重庆市冬季雾重要的有别于外地的特征。

2 雾的物理结构

观测期间, 重庆市出现 5 次浓雾过程, 即 1989 年 12 月 30 日, 1990 年 1 月 2 日, 12

* 1992 年 9 月 2 日收到原稿, 1993 年 2 月 1 日收到修改稿。

表 1 1989.12.15—1990.1.15 对重庆城区雾的理化综合观测试验项目

观测项目	仪 器	内 容	布 点
大气边界层 探测	TS-2A 型系留探测系统	1000m 以下各层温、压、湿、风 向、风速	珊瑚坝、商学院、红旗河沟
	低空探空仪和双经纬仪	低层温湿度和风向风速	黑石子
地面气象观测	常规仪器及目测	温、压、湿、风向、风速、云、能 见度、天气现象	珊瑚坝、商学院、红旗河沟、石 板坡、枇杷山、朝天门、黑石 子、高堰沟、广阳坝、沙坪坝、 陈家坪、尖山庙、大渡口
	DT 型大气能见度记录仪	能见距离	石板坡
雾的微结构	三用滴谱仪	雾滴谱、含水量	石板坡、沙坪坝、陈家坪、李子 坝
气溶胶质粒	绍尔茨计数器	爱根核	珊瑚坝
	LG-83 型多道光学粒子计数器	0.3—10.0 μm 气溶胶粒子	石板坡、沙坪坝
	安德森 PM-10 大流量分级采样器	对 10 μm 以下微粒分六级采 样	石板坡、观音桥
雾水化学	主动式和被动式雾水采集器	雾水采样, 供化学分析	李子坝、沙坪坝、珊瑚坝、广阳 坝、朝天门、铜元局、观音桥、 农机院、南岸 5km、外加 1 流 动点
大气质量监测	常规监测仪器	TSP, SO ₂ , NO _x	广阳坝、珊瑚坝、观音桥、沙坪 坝、七星岗、红旗河沟、南岸 5km
辐射和热量 平衡各分量	AT-50 直接辐射表	太阳直接辐射	珊瑚坝、广阳坝、沙坪坝
	MS-42 天空辐射表	散射辐射, 反射辐射	
	DEYS 型净辐射表	净辐射	
	地温表	0, 5, 10, 15, 20cm 地温	
	水温表	0, 20, 40, 60, 80cm 水温	

月 9 日、24 日和 28 日。表 2 列出了这 5 次雾的主要宏观特征。由表可见, 重庆浓雾多形成于 0—4h 之间, 除个别情况外, 多消散于中午前后, 持续时间一般 8h 以上, 最长的可达 12h。表中雾顶高度是由温、湿廓线确定的, 根据观测, 雾中相对湿度 $f \geq 95\%$, 雾顶之上常有逆温层存在。重庆雾顶很高, 多在 300—400m 之间, 最高的可达 500m。这样厚的雾层, 在国内外城市雾中极少见到。雾生时地面气温在 4—6 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 雾中最高气温为 10 $^{\circ}\text{C}$, 属于暖雾。

重庆雾的宏观结构与局地环流密切相连。研究发现, 重庆市区在山脉、江河、城市等因子影响下, 冬季晴天夜晚出现山风环流。东西两侧山区下泄冷空气, 在长江和市中区汇合, 在其上空形成上升气流。此时出现两支明显的环流结构, 一支在长江至真武山之间, 为顺时针环流; 一支在嘉陵江及其北岸, 为逆时针环流。环流的垂直厚度在 300—550m 之间。白天随着太阳辐射的增强, 山风环流逐渐减弱, 午后转为谷风环流。5 次浓雾过程有 2 次

表2 重庆市冬季雾的宏观特征

日期 (年、月、日)	起雾时间	持续时间 (h)	雾顶高度 (m)	雾层厚度 (m)	气温(°C)	
					范围	平均
1989.12.30	4:10	8	320	320	3.8—6.5	5.3
1990.01.02	4:04	10	400	400	3.8—8.0	6.0
1990.12.09	23:52	12	500	400	5.8—10.0	6.8
1990.12.24	0:50	6	400	400	5.4—7.3	6.3
1990.12.28	2:20	9	200	200	5.1—8.6	6.6

就是在山风作用下形成和发展的,即下坡风在市区和长江辐合,暖湿空气抬升,先在低空形成云,然后在重力沉降、乱流扩散等作用下,及地成雾^[1]。由于山风环流垂直范围大,持续时间长,因而重庆雾层厚,时间长,直到流场发生变化,形成谷风环流时,雾顶才开始下降,地面雾逐渐消散。即使其中有3次雾是由辐射冷却作用产生的,山风对其发展仍有重要影响。因为辐合上升气流不断将长江和嘉陵江水面水汽带到雾体之上,可使雾顶抬升,雾层加厚,持续时间长。

观测期间,取到雾滴谱资料119份,含水量样本172个。雾滴谱是用三用滴谱仪观测的,利用惯性使雾滴沉降在涂有油层的玻璃片上,然后放在显微镜下读取雾滴大小和个数,或经显微照相后再进行读数。本文选用了雾滴数多于300个的样本73份,并作了捕获系数订正,计算结果如表3所示。表中实测含水量是用滤纸斑痕法观测的,计算含水量是由滴谱资料求得的。所列4个站中,石板坡位于市区,沙坪坝位于城西边缘、中梁山,陈家坪和李子坝介乎其中。由表可以看到,重庆雾微物理结构的特点是,雾滴数密度很大,而含水量和雾滴尺度很小。特别是位于城市中心部位的石板坡,平均数密度超过500个/cm³,而平均直径仅有4.4μm,含水量一般不超过0.1g/m³。与上海、成都的都市雾,云南、安徽、福建等省的山区雾^[2]比较,数密度要大几倍至1个量级,平均直径要小几倍。与舟山海雾^[3]以及其它各地的雾^[2]比较,含水量要小甚至小1个量级。由雾滴谱资料计算的含水量和能见度与实测值比较接近。利用样品较多的沙坪坝和陈家坪资料,作出了雾滴谱平均分布图(图1)。可见滴谱较窄,而且峰值明显偏向小滴一端。就两站比较,陈家坪小滴更多,滴谱更窄。影响重庆雾微物理结构的因素主要是严重的空气污染和城市热岛效应。据绍尔茨凝结核计数器测量(能测最小尺度为0.01μm的质粒),气溶胶粒子数密度平均值为37147个/cm³,极大值达到96057个/cm³。光学粒子计数器测量(最小检测直径为0.3μm),平均数密度达到1024个/cm³。由于污染重,空气中凝结核多,因而雾滴数密度大。一般地说,数密度大的,尺度就要小,而数密度小的,尺度就可能大。关于重庆城市热岛效应,文献[4]已有详细论述。平均情况,晴天夜晚市区气温要比郊区高2°C。而且由于城市上空有高浓度的气溶胶粒子覆盖层,夜晚会削弱地面长波辐射,增大逆辐射,从而减小辐射冷却率。即使是晴夜(20h—08h),降温也仅3°C左右。由于空气冷却程度不强,成雾时空气饱和程度不高,雾滴不能充分凝结增长,因而雾滴尺度小,液水含量少。

城区各地雾的微物理参数并不相同(表3,图1)。位于城边的沙坪坝站数密度不及市中心的1/2,而平均直径和含水量则要大1倍和5倍。陈家坪站的参数值则介乎两站之间。这与各站的气温和气溶胶质粒分布有关。如图2所示,从雾生到雾消,沙坪坝站气温

表3 重庆市各测站冬季雾的微物理结构

参数		石板坡	陈家坪	沙坪坝	李子坝
数密度(个/cm ³)	范围	35.0—2026.0	31.1—1635.7	38.0—1436.6	
	平均	529.0	453.8	188.0	
平均直径(μm)	范围	3.5—7.5	3.9—5.9	4.0—16.4	
	平均	4.4	4.8	9.4	
峰值直径(μm)	范围	3.5	3.3	3.5—9.8	
	平均	3.5	3.3	6.1	
最大直径(μm)	范围	7.0—35.0	23.1—66.0	22.4—103.6	
	平均	21.9	40.4	42.9	
有效平均半径(μm)	平均	2.03	6.82	8.82	
实测含水量(g/m ³)	范围	0.001—0.163	0.002—0.370	0.003—0.483	0.001—0.183
	平均	0.029	0.129	0.175	0.061
计算含水量(g/m ³)	范围	0.00—0.12	0.01—0.30	0.02—0.67	
	平均	0.02	0.10	0.19	
实测能见距离(m)	范围	30—900	10—800	10—800	40—1000
	平均	215	208	113	246
计算能见距离(m)	平均	265	178	121	
样本数	雾滴谱	12	16	45	
	含水量	20	39	60	45

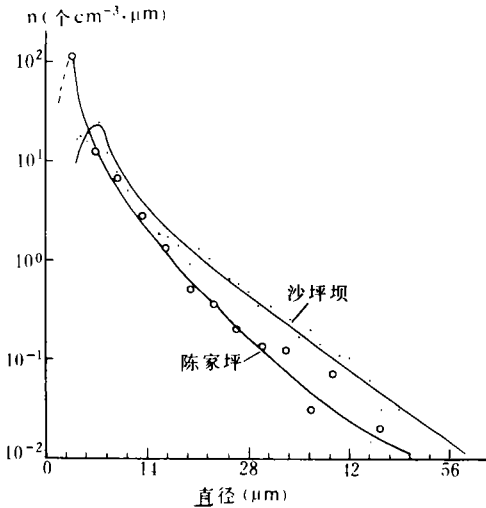


图1 陈家坪和沙坪坝雾滴谱分布
(点和圆圈分别是沙坪坝和陈家坪的观测值)

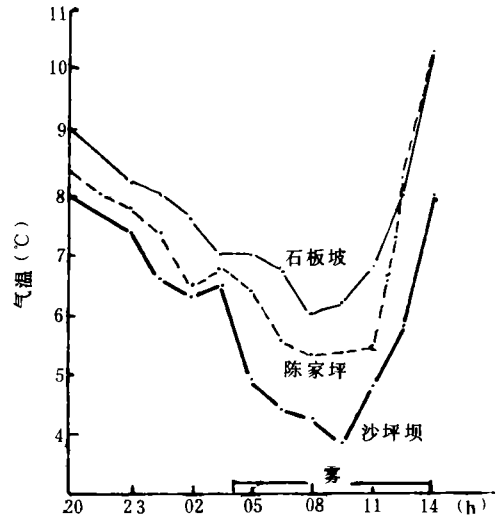


图2 1990年1月2日雾三个站气温比较

比市中区石板坡要低1—2℃,因而雾层凝结出的液水多。据观测,沙坪坝站气溶胶粒子数密度比市中区小2—4倍,因而雾滴数密度小。

虽然含水量很小,雾中能见度仍很差。以1990年1月2日雾为例,石板坡站在7:30—11:02的连续取样期间,含水量不到0.05g/m³,雾滴平均直径仅4.0μm,但平均能见度只有100m,而且多为30—50m(图3)。导致能见度差的主要原因是雾中存在着数密

度很大的小雾滴,这些小雾滴对含水量贡献很小,但却影响到有效平均半径的大小,致使能见度变差。由这段时间的雾滴谱资料,计算得有效平均半径 $r_e = 2.02 \mu\text{m}$, 根据能见距离 R 与 r_e 及含水量 W_L 的关系式

$$R = 2.62r_e/W_L$$

可以求得 $R = 105\text{m}$, 与实测值接近。从物理意义来说,当雾滴小而数密度很大时,雾滴总几何截面就会大,这将导致消光系数加大,从而使能见距离变小。

3 雾水的化学特性

综合观测期间,采集到的雾水仅

有两场,统计上无意义。本文将对 1984—1990 年 7 年期间获得的 182 个完整样本进行统计分析。除对雾水进行电导、pH 值测定外,还用岛津 LC-6A 液相色谱仪测定醛和有机酸,用美国 Dionex2120i 离子色谱仪测定 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、甲酸、乙酸等,用日立 180/70 原子吸收分光光度计测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Pb^{2+} 等。

雾水离子浓度高,是重庆雾水化学的特性。仅就水溶物含无机组分而言,平均浓度为 $3.3 \times 10^4 \mu\text{mol/L}$, 浓度最高时,约占雾水重量的 1%。就同组分(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+)相比,比美国洛杉矶高出 0.4 倍,较日本赤城山高出 4.9 倍。与上海相比, $[\text{H}^+]$ 离子浓度高出 7.5 倍。电导率平均为 $815 \mu\text{s/cm}$, 最高达 $1600 \mu\text{s/cm}$, 最低 $50 \mu\text{s/cm}$ 。比日本关东地区 1987 年 11 月的测值^[5]要高出 7 倍。

如果把城区与郊区分开来统计,如表 4 所示,城区雾水离子浓度要比郊区高出 20%。城区内不同测点雾水离子浓度差异也很大。图 4 给出了 6 个测点的雾水离子平均浓度。市中区测点设在体育馆,红旗河沟位于城北,沙坪坝气象站位于城西,铜元局、李子坝和朝天门测点分别位于长江、嘉陵江和两江汇合处的趸船上。由图可见,位于街区 3 个测点的雾水离子浓度比江面上 3 个测点要高得多,这反映出街区污染重。江面上河谷风相对大,污染物稀释快,也是离子浓度小的一个原因。就街区而言,市中区的雾水离子浓度又要高于城西和城北。

雾水离子浓度随季节而异。如果将 4—9 月定为暖季,10—3 月定为冷季,则由表 4 可以看出,冷季的各种离子浓度都比暖季高,为暖季的 1—2 倍多。这是由于暖季扩散条件好于冷季。

城区雾水离子浓度年际变化如图 5 所示。由图可见,从 1984 年到 1988 年,随着工业的发展,雾水离子浓度直线上升,4 年时间增加了将近 2 倍。1988 年以后,动力消耗减少及烟尘治理取得成效,使得空气污染物减少,雾水离子浓度略有下降。

由表 4 可以看出,重庆雾水主要污染物是硫酸(盐)及钙、铵,其次是硝酸(盐)、氯及氟

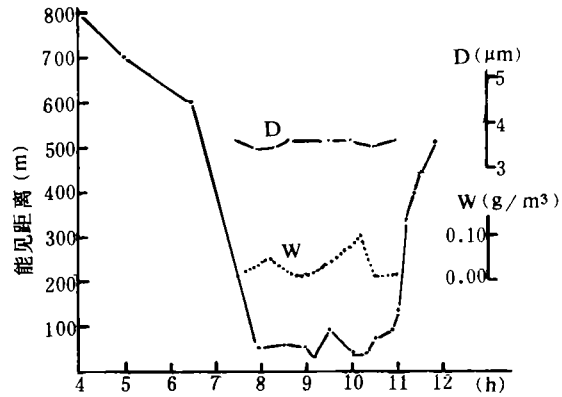


图 3 1990 年 1 月 2 日石板坡
雾中能见度和含水量
(W 为含水量, D 为雾滴直径)

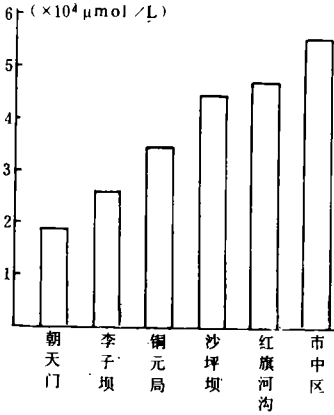


图4 各测点雾水离子浓度

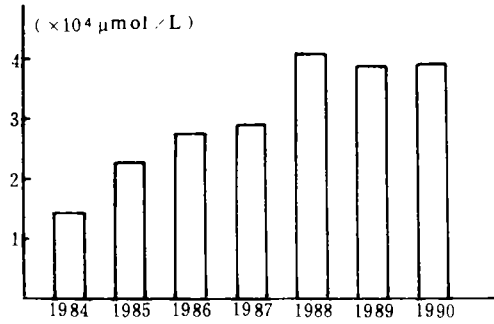


图5 城区雾水离子浓度年际变化

表4 重庆市雾水化学成分平均浓度(单位:μmol/L)

季节	地点	H ⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	样本数
全年	城乡	40.93	1019.86	1486.38	3307.48	3685.37	1482.72	1063.87	2062.28	991.57	6450.04	4.39	182
暖季	城区	20.00	559.34	955.93	1466.11	2264.34	870.27	452.00	844.64	587.37	3805.43	4.70	22
冷季	城区	53.90	1102.96	1580.98	3731.73	3992.14	1692.23	1165.39	2272.55	1086.19	6912.58	4.27	151
冷季	郊乡	10.14	751.64	954.34	2023.55	1883.53	395.71	669.52	1062.79	502.62	7662.04	4.99	9

的化合物。

重庆市雾水呈酸性。如表4所示,pH值在2.96—8.00之间,平均为4.39。其中城区雾水pH值在2.96—7.52之间,平均值4.30;郊区pH值在4.45—8.00之间,平均为4.99。暖季pH值平均为4.70,冷季则为4.27。

为了寻求酸度的来源,采用多元回归线性模型

$$[H^+] = \text{const} + AF^- + BCl^- + CNO_3^- + DSO_4^{2-} + EK^+ + FNa^+ \\ + GNH_4^+ + HCa^{2+} + IMg^{2+}$$

计算了[H⁺]与各变量之间的相关程度。各测点计算结果表明,李子坝趸船[H⁺]与Cl⁻、NO₃⁻、F⁻等相关性很好,Cl⁻、F⁻来源于对岸100m处的天原氯碱化工厂和搪瓷厂;影响沙坪坝气象站和铜元局趸船[H⁺]离子浓度的第一因子是SO₄²⁻,其次是Ca²⁺和NO₃⁻;长航趸船雾水酸度的主要影响因子是SO₄²⁻、NO₃⁻和Cl⁻。由此可见,重庆市雾水酸度的主要来源是硫酸、硝酸和盐酸,它们的存在形式是各种盐。根据各测点逐年平均的SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻作3元相图(图略),可以看到3种酸根在酸化中的相对作用,硫酸根占70—90%,硝酸根占15—20%,氯根占5—20%。

燃烧化石燃料排放到大气中的SO₂和NO_x是公认的大气降水物中自由酸度的主要来源。重庆市能源以高硫(4%)高灰(25%)的原煤为主,其次是燃油。全市年耗煤量1335×10⁴t,耗油量47.5×10⁴t,其中城区耗煤534×10⁴t,耗油18×10⁴t。年耗煤密度为9716t/km²。全市每年向大气排放SO₂约80×10⁴t,烟尘41×10⁴t,其中城区分别为32×10⁴t和

$14 \times 10^4 \text{t}$ 。严重的大气污染使城区大气环境质量各项指标(NO_x 除外)近 10 年平均值都超过国家三级标准,其中 SO_2 为 $0.39 \text{mg}/\text{m}^3$, TSP 为 $0.59 \text{mg}/\text{m}^3$, 降尘为 $18.22 \text{t}/\text{mon} \cdot \text{km}^2$ 。与全国各大城市相比,重庆市大气中 SO_2 含量最高。

重庆市雾水中 SO_4^{2-} 主要是 SO_2 转化而来的。以 SO_4^{2-} 作为因变量, SO_2 , TSP, Ca^{2+} , NH_4^+ , Mg^{2+} 为自变量, 建立多元回归方程, 计算结果得出, SO_2 对 SO_4^{2-} 贡献率占 80%, TSP 占 18%。大气气溶胶水质水溶物离子组分分析表明, IP(粒径 $< 10 \mu\text{m}$) 水溶物中 SO_4^{2-} 占 60%, NO_3^- 占 8%; TSP 中 SO_4^{2-} 仅占水溶物的 20%, NO_3^- 占 1.4%。这说明硫酸(盐)和硝酸(盐)主要在小粒子中, 而在大颗粒中则以碱性物质 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主。

4 结 论

由以上分析可以得出, 重庆市冬季雾的主要物理化学特性是: 雾顶高, 雾层厚; 雾滴小, 含水量少, 能见度低; 雾水化学成分浓度高, 呈酸性。这与重庆市特殊的地理条件及城市热岛效应有关, 也与城市发展及严重的大气污染密切相连。

参考文献

- [1] 李子华, 张利民. 论山风对重庆雾形成和发展的作用. 重庆环境科学, 1992, 14(3): 7—11.
- [2] 李子华等. 西南地区和长江下游雾的时空分布和物理结构. 地理学报, 1992, 47(3): 242—251.
- [3] 杨中秋等. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构. 海洋学报, 1989, 11(4): 431—438.
- [4] 李子华等. 重庆市区冬季热岛和湿岛效应的研究. 地理学报, 1993, 48(4): 358—366.
- [5] Daniec F. Fogwater collector design characterization Environ. Sci Tech, 1984, 18: 827—833.

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE CHONGQING WINTER FOG

Li Zihua

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044)

Peng Zhonggui

(Chongqing Reseach institute of Environmental Science, Chongqing, 620020)

Abstract

Comprehensive observation of fog was conducted in Chongqing from Dec. 15 1989 to Jan. 15 1990 and from Dec. 7 1990 to Jan. 7 1991. In this paper, the physical and chemical characteristics of winter fog are analysed comprehensively. Some important characteristics of winter fog in Chongqing, which are different from fog of other areas in the country, are revealed.

Key words: Chongqing, Winter fog, Physical chemical characteristic.