

文章编号: 1000-2022(2003) 06-0821-08

重庆市冬季雾生消的物理特征

何友江¹, 朱 彬¹, 马 力²

(1. 南京气象学院 应用气象学系, 江苏 南京 210044; 2. 重庆市气象局, 重庆 400000)

摘 要: 2001 年 12 月份在重庆市郊及市区进行了雾的综合外场观测, 其间 12 月 4 日和 29 日各出现了一次雾过程。通过对这两次雾过程的分析, 揭示了重庆市冬季雾生消的宏微观物理过程。同时通过和 10 a 前重庆雾的比较, 得到了重庆城市发展后雾生消的一些新的特征, 并分析了其原因。和 10 a 前相比, 重庆市区冬季雾维持时间缩短, 强度减弱, 雾体爆发性发展的时间延后; 雾滴数密度可比 10 a 前增大一个数量级, 雾滴尺度约为 10 a 前的一半。重庆城市的扩大, 湿度的减小和气溶胶粒子浓度的增加是重庆雾产生这种变化的根本原因。

关键词: 重庆雾; 逆温; 微物理结构; 气溶胶

中图分类号: P426. 41; P426. 43 **文献标识码:** A

重庆是我国有名的雾都。20 世纪 80 年代末曾对重庆雾进行过大规模的观测研究, 揭示了重庆雾的成因和生消的宏微观物理过程^[1-5]。随着重庆城市的扩大和经济的迅速发展, 其环境污染日益严重, 重庆雾呈现逐年减少的趋势, 但能见度却日益变坏^[6-7]。为了解近 10 a 来重庆雾的变化情况, 2001 年 12 月 1 日至 31 日在重庆又进行了雾的综合外场探测, 获得了大量的观测资料, 同时还进行了气溶胶粒子数浓度观测。本文将利用这些观测资料来分析重庆市冬季雾生消的宏微观物理过程, 以揭示重庆城市发展后雾生消的新特征, 并在此基础上结合往年资料来分析产生这种变化的原因。

1 仪器和观测方法

本次观测采用全套美国 AIR 公司生产的 TS-2A 型系留气球探测系统, 其中探空仪可以进行风速、风向、温度、湿度、气压 5 个气象要素测量, 气艇在上升过程中一般每 10 s 完成一组测量, 测量高度一般掌握在 600 ~ 800 m, 每 3 h 观测一次, 有雾时, 加密为次/1 h。实验过程分为两个阶段, 12 月 18 日以前, 探测地点位于城市西部歌乐山山腰平顶寺附近, 其海拔高度约为 500 m; 18 日下午开始, 探测地点转移到嘉陵江边的市中心附近, 海拔高度约为 200 m。前者代表市郊, 后者代表市中心。同时, 还利用三用滴谱仪作了雾微物理结构的观测, 用粒子计数器作了气溶胶的观测。此外, 还进行了常规的气象观测(次/1 h)。

收稿日期: 2003-01-08; 改回日期: 2003-06-02

基金项目: 重庆市科委重点攻关课题(2000-6485)

作者简介: 何友江(1979-), 男, 湖北随州人, 硕士生, 研究方向: 大气物理与大气环境。

2 两次雾生消的宏观物理过程

2.1 12月29日市中心雾的生消

2.1.1 生成阶段(01—04时)

从28日17时起,300 m以下气层温度就开始持续下降(图1),到29日02时,地面温度由10 下降到6 左右。在垂直高度上,温度随高度的递减率随时间逐渐减小,28日17时400 m以下温度递减率约为 $1^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$,而到29日02时,200 m以下已近乎等温结构。此段时间内,近地层比湿逐渐上升,22时左右达最大值(图2)。与此同时,地面相对湿度也迅速增

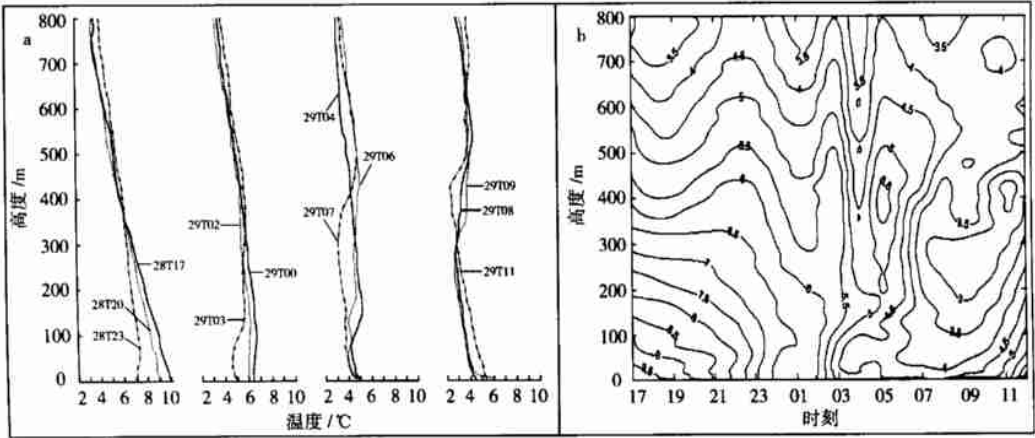


图 1 12月28日17时至29日11时重庆市中心温度廓线(a)、温度剖面(b)
Fig. 1 The temperature profiles (a) and time-height cross-section (b) of temperature at the center of Chongqing city from 1700 BST on 28th to 1100 BST on 29th in Dec.

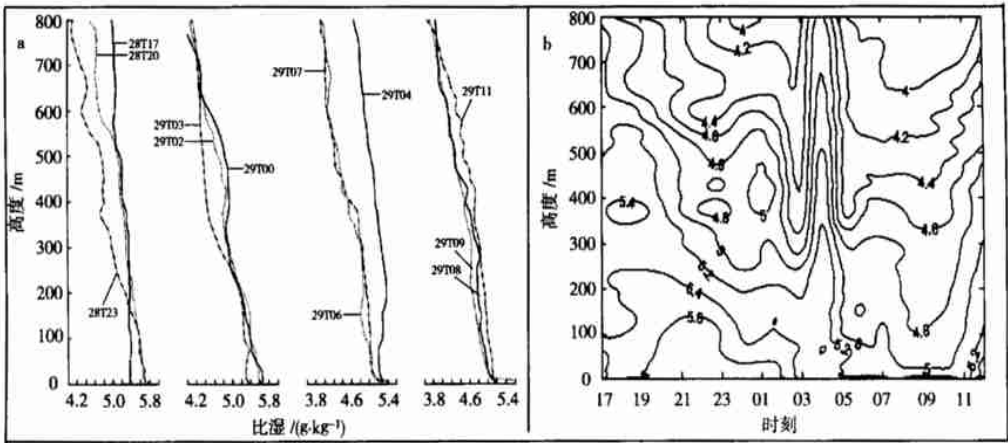


图 2 12月28日17时至29日11时重庆市中心比湿廓线(a)、比湿剖面(b)
Fig. 2 The humidity profiles (a) and time-height cross-section (b) of humidity at the center of Chongqing city from 1700 BST on 28th to 1100 BST on 29th in Dec.

加,平均增大率约为 $3\%/h$,到29日02时,地面相对湿度已达到97%(图3)。02—03时,50 m气层温度下降最快,并在50~100 m形成强度约 $2^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 的逆温层,逆温层底有水汽堆积,从图3a看,在50 m左右高度层,相对湿度达到100%,首先成雾(或称之为低云),而后雾迅速上下伸展,04时雾底接地,雾顶达到100 m左右高度。可见这次雾在形成之前,并未

出现贴地逆温, 这与以往先有贴地逆温后成雾的特征有所不同。

2. 1. 2 酝酿发展阶段(04—06 时)

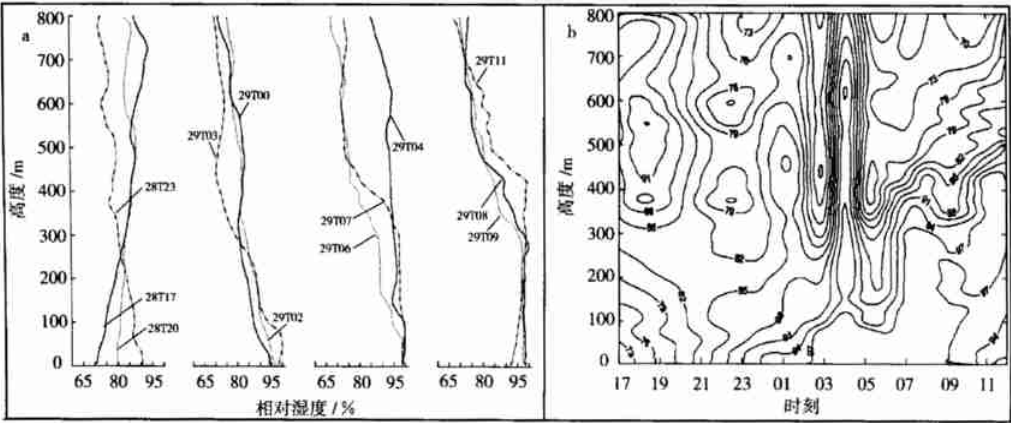


图 3 12 月 28 日 17 时至 29 日 11 时重庆市中心相对湿度廓线(a)、相对湿度剖面(b)
Fig. 3 The relative humidity profiles (a) and time-height cross-section (b) of relative humidity at the center of Chongqing city from 1700 BST on 28th to 1100 BST on 29th in Dec.

04 时以后, 雾层并未迅速发展。由相对湿度廓线图(图 3a)及相对湿度剖面图(图 3b)上看, 04 时以后雾顶稍有降低, 从温度廓线图(图 1a)上看, 逆温层略有抬升。由于水汽凝结, 雾区内比湿明显减小, 并随高度有减小的趋势, 但在雾顶之上, 有较弱的逆湿现象。04 时以后的 2 h 内, 雾体相对稳定, 这与以往辐射雾在形成后很快出现爆发性发展的特征有所不同。

2. 1. 3 爆发性发展阶段(06—07 时)

06 时以后, 雾顶爆发性发展, 1 h 之内, 雾顶上升了约 200 m, 雾体厚度达到 300 m 左右。雾区内比湿和温度则随高度逐渐递减, 比湿递减率约为 $0.16 (g \cdot kg^{-1}) / (100 m)$, 温度递减率约为 $0.6 / (100 m)$ 。雾顶之上为较强的逆温层, 强度约为 $1.1 / (100 m)$, 但比湿递增现象已不明显。爆发性发展的原因是 300 m 上下气层急速降温。在图 1b 中可以看到, 地面雾形成以后, 200 ~ 400 m 之间气层降温最快, 04—07 时, 约下降 2 , 在图 1a 中可以看到, 由于急速降温, 在雾顶之上, 300 ~ 400 m 高度层, 又出现了明显的逆温层。在比湿廓线图(图 2a)上, 可以看到在这个逆温层内, 比湿偏大, 说明有水汽集聚, 这为爆发性发展准备了条件。在相对湿度时空剖面图(图 3b)上可以看到, 地面雾形成以后, 雾顶之上气层相对湿度急剧增加, 06—07 时, 当地面雾最浓时, 雾顶跃升到 300 m。

2. 1. 4 成熟阶段(07—09 时)

07 时以后, 雾体进入成熟阶段, 相对稳定, 雾顶略有降低, 雾体内温度随高度按湿绝热递减率递减, 平均递减率约为 $0.4 / (100 m)$, 雾顶之上, 逆温层厚度逐渐增大。08 时以后, 太阳出山, 地面温度开始逐渐上升。雾体内比湿随时间有所减小, 随高度依然维持 $0.1 (k \cdot kg^{-1}) / (100 m)$ 左右的递减率, 雾顶之上, 比湿递减率增大。

2. 1. 5 消亡阶段(09 时以后)

09 时以后, 地面吸收太阳辐射增温加快, 平均增温率约为 $0.4 / h$, 雾滴开始蒸发, 对流作用加强, 近地层相对湿度迅速减小, 地面雾消, 雾体则迅速抬升。到 11 时, 地面相对湿度已减小至 92 % 以下, 雾底已抬升至 150 m 左右, 转化为低云, 而后雾消亡。在时空剖面图(图 1b),

3b) 上可以看到,地面雾消时,在 200~300 m 的高度层,气温出现一个低中心,相对湿度存在一个大于 97 % 的低云区。在温度和相对湿度廓线图(图 1a, 3a) 上可以看到,11 时逆温底和大于 97 % 的相对湿度区已超过 400 m,说明地面雾消后,转化的低云实际已抬升到 400 m 高度。

由以上分析可知,这次雾发展的过程是,逆温首先在低空形成后,雾开始形成于逆温层底,而后雾底及地,雾顶抬升。雾形成后,逆温迅速抬升,并始终位于雾顶之上。但由于贴地辐射降温不强,加之湿度小,水汽不足,雾层未能迅速发展。由于雾顶之上的强降温作用,地面雾在维持了 2 h 之后,才得以爆发性发展。日出之后,地面增温,地面雾很快消失,雾体演变为低云。与 10 a 前的重庆雾相比,这次雾形成前没有出现贴地逆温,这可能与城市热岛增强有关;雾形成后,并未很快垂直发展,而是待雾顶之上强降温后才爆发性发展,而且地面雾维持时间相对缩短,这与重庆地面湿度减小有关。

2.2 12月4日歌乐山雾的生消

3 日入夜后,地面温度减小相当缓慢(图 4a), 03 时以前,大约 0.05 /h, 03 时以后温度基本上不再随时间递减,至 07 时左右开始上升;而在垂直高度上,温度随高度的变化十分明显,200 m 以下大约 0.8 /(100 m),再往上温度递减率减小。地面比湿和相对湿度在 3 日入

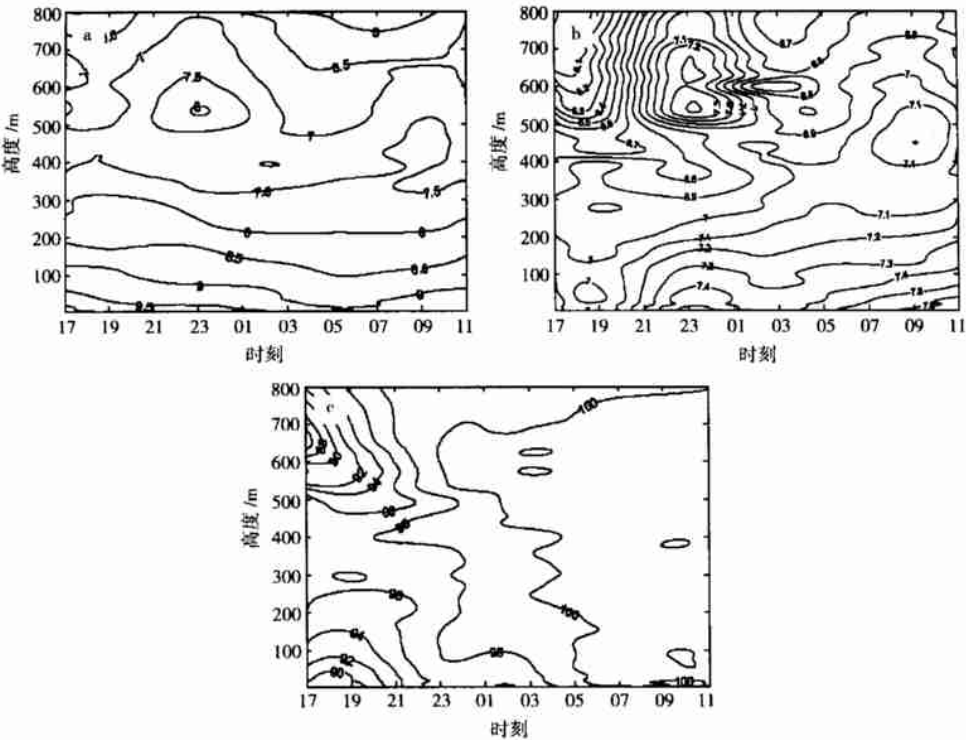


图 4 12月3日17时至4日11时歌乐山温度(a)、比湿(b)、相对湿度(c)剖面

Fig. 4 The time-height cross-section of temperature (a), humidity (b) and relative humidity(c) at Geyueshan of Chongqing from 1700 BST on 03th to 1400 BST on 04th in Dec.

夜后即迅速增加(图 4b、c), 到 23 时左右,地面比湿已达 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地面相对湿度已达 96 % 以上。3 日入夜后,在 500 m 左右的高空,温度逐渐增加,出现了一个逆温层(图 4a);比湿和相对湿度增加也十分迅速,比湿平均增大率约 $0.25 (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})/\text{h}$,相对湿度平均增大率约

2 % / h, 到 23 时, 比湿场上出现了一个极大值中心(图 4b), 达到 $7.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相对湿度则达到 100 %, 云开始形成(图 4c)。云形成后, 云顶缓慢上升发展, 而云底则迅速下沉, 到 06 时左右, 云底接地成雾。云形成后逆温层即减弱消失; 比湿极大值中心下降到 400 m 高度。雾体内相对湿度始终高达 100 %。到 11 时, 雾体厚度已达 800 m。可见, 这次过程是在边界层上层出现逆温之后, 由于水汽在逆温层底部堆积形成云, 而后接地成雾的。和 29 日的雾过程相比, 其成雾机制大致相同, 都是在逆温层下成云, 而后云底下降接地成雾。所不同的是, 4 日云形成的初始高度 500 m 要远大于 29 日的成云高度 50 m。另外, 4 日雾体内相对湿度始终高达 100 %, 雾体厚度达到 800 m, 其维持时间也比 29 日的雾长的多。

3 重庆冬季雾的微物理结构

从微观结构上看, 在 29 日雾发展的整个过程中, 沙坪坝雾滴数密度一直相当大, 最大时达到 $3\,072.2 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 平均也有 $1\,746.3 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 雾滴尺度相当小, 平均峰值直径约 $3.1 \text{ }\mu\text{m}$, 平均直径约 $3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 。平均含水量约为 $0.21 \text{ g}/\text{m}^3$, 能见度一直维持在 100 m 左右, 在雾体成熟阶段, 能见度曾一度降低到 80 m 左右。而在 4 日的雾过程中, 歌乐山(郊区) 平均雾滴数密度为 $983 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 最大数密度约 $2\,138 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 雾滴平均峰值直径 $3.7 \text{ }\mu\text{m}$, 平均直径 $4.5 \text{ }\mu\text{m}$, 平均含水量为 $0.097 \text{ g}/\text{m}^3$ 。可见, 重庆市郊的雾滴数密度比市中心要小, 而雾滴尺度比市中心大。如表 1 所示, 和 10 a 前相比, 重庆雾滴数密度明显增大, 雾滴尺度减小。从沙坪坝看, 10 a 后, 平均雾滴数密度约增大了 一个数量级, 而平均雾滴尺度减小到不足原来的一半。可见, 重庆城市的扩大, 对雾微物理结构的影响十分显著, 使雾滴数密度剧增, 雾滴尺度锐减。另外, 还可以看出, 从市中心区向市郊, 雾滴数密度减少, 而雾滴尺度增大, 这是市中区比市郊污染严重所致。

表 1 重庆冬季雾微物理结构的比较

Table 1 The comparision of the microphysical structure of Chongqing fog in winter

		数密度/(个·cm ⁻³)		平均直径/μm		峰值直径/μm		最大直径/μm		含水量/(g·m ⁻³)	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
1989-12— 1990-01 ^[2,7]	石板坡 (市中区)	35.0~ 2 026.0	529.0	3.5~ 7.5	4.4	3.5	3.5	7.0~ 35.0	21.9	0.000~ 0.163	0.029
	沙坪坝 (市郊)	38.0~ 1 436.6	188.0	4.0~ 16.4	9.4	3.5~ 9.8	6.1	22.4~ 103.6	42.9	0.000~ 0.483	0.175
2001-12	沙坪坝 (市中区)	55.9~ 3 072.2	1 746.3	3.1~ 5.2	3.8	3.1	3.1	6.2~ 34.1	24.8	0.030~ 0.500	0.210
	歌乐山 (市郊)	287.0~ 2 138.0	983.0	4.0~ 5.3	4.5	3.7	3.7	11.1~ 51.8	24.3	0.030~ 0.240	0.097

4 重庆城市发展对雾的影响

据往年的观测结果^[1,3], 重庆辐射雾绝大多数发生在晴朗、微风(无风)的夜晚, 但在本次观测期间内, 许多晴朗的夜晚并无雾生成, 这在重庆是少有的。如 23 日晴朗无雾, 02、05 时 100 m 以下的平均风速分别为 $1.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 29 日 02、05 时 100 m 以下平均风速分别为 $2.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如风速过大则可能难以成雾, 显然, 23 日无雾并不是因为风速过大。从其温度、相对湿度廓线图(图 5)上可以看出, 02 时贴地层出现厚度达 120 m

的逆温层, 02—05 时, 逆温层几乎没有变化。而在有雾的夜晚, 贴地逆温形成后, 通常强度很快加大, 逆温层上抬^[1, 7]。地面湿度从太阳落山后虽迅速增大, 但到 02 时, 地面相对湿度还不到 80 %, 由于逆温的存在, 水汽虽在地面堆积, 到 08 时地面相对湿度虽然达到 95 %, 但还不足以成雾。可以看出, 晴朗的夜晚无雾生成, 主要是因为湿度太小, 空气难以达到饱和。这一点也可以从图 6 看出, 和 10 a 前相比, 重庆边界层内比湿明显减小, 平均约减小 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而重庆

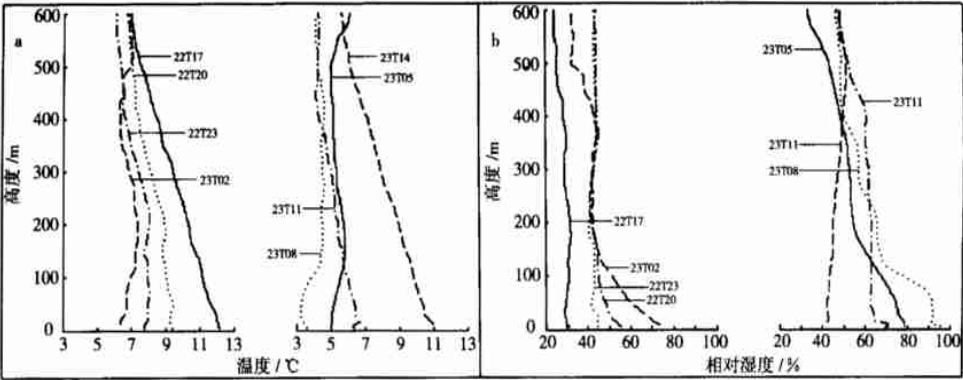


图 5 12 月 22 日 17 时至 23 日 14 时时中心温度 (a)、相对湿度 (b) 廓线
Fig. 5 The profiles of temperature (a) and relative humidity (b) of Chongqing city from 1700 BST on 22th to 1400 BST on 23th in Dec.

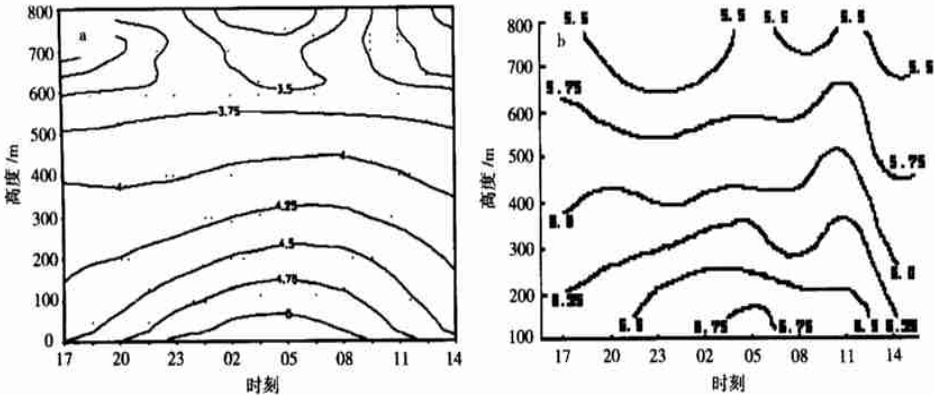


图 6 2001 年冬季重庆平均比湿 (a)、1989 年冬季重庆平均比湿 (b) 剖面
Fig. 6 Average humidity of Chongqing city in winter in 2001 (a) and 1989 (b)

湿度之所以减小, 主要是因为城市扩大, 森林植被面积减小, 使有效水汽源面积减小, 从而使水面的蒸发、叶面的蒸腾减小^[8-9], 造成边界层中水汽不足, 从而难以成雾。此外, 植被覆盖度的减少, 可使起雾时间推迟, 雾消时间提前, 雾水含量减小, 这一点黄建平等^[10]已有论述。如 29 日的辐射雾, 在凌晨 03 时左右雾才形成, 比往年稍有推迟, 雾在 09 时就开始消亡, 比往年约提前两三个小时^[1, 7], 整个雾过程持续时间缩短很多, 雾的强度也有所减小。近 20 a 来重庆市工业发展迅速, 排放到空气中的污染物日益增多, 再加上重庆独特的地理环境, 使污染物不能及时扩散, 从而导致重庆上空污染物浓度的迅速增加, 气溶胶粒子的数浓度比八九十年代增加了几倍(表 2)。气溶胶粒子浓度的增加, 对雾的宏微观物理结构有十分重要的影响。高浓度的气溶胶粒子, 在白天吸收太阳的直接辐射^[11], 在夜晚又削弱了地面的长波辐射^[12], 致使白天近地层温度减小, 边界层中上层温度升高, 使得白天大气边界层层结有趋于稳定的趋势, 对流减弱, 水

汽和气溶胶粒子向近地层堆积;而在夜晚可使近地层温度升高,使中上层降温,导致夜晚的大气边界层层结稳定度减小,水汽难以在地面堆积,因而近地层相对湿度有减小的趋势。其结果就是使重庆地面温度日较差逐渐减小,昼夜边界层结构均趋向中性,逆温层强度减弱,进而使夜间近地层辐射降温作用减弱,湿度减小,起雾时间推迟,雾体强度减弱,雾消时间提前。另外,污染程度的加重,气溶胶粒子浓度的增加,可使空气中的雾凝结核增多,导致雾滴数密度增大,雾滴尺度减小^[7],且随着重庆有效水汽源面积的减小,这种作用就更加显著。

表 2 重庆气溶胶粒子数浓度($r \geq 0.3 \mu\text{m}$)比较

Table 2 The comparison of the aerosol particle ($r \geq 0.3 \mu\text{m}$) concentration in Chongqing

时间段(年-月-日)	平均浓度/(个· cm^{-3})	最大浓度/(个· cm^{-3})	最小浓度/(个· cm^{-3})
1990-12-13—1991-01-04 ^[13]	252.7	452.9	84.9
2001-12-10—2001-12-31	676.5	1 053.4	355.5

5 结 论

(1) 12 月 29 日的雾和 12 月 4 日的雾其成雾机制大致相同,都是在逆温层下首先成云,而后云接地成雾。在 29 日雾的整个过程中,雾顶一直有逆温存在,雾体最大厚度达 300 m,其持续时间达 6 h 以上。在 4 日雾的过程中,逆温在成云后即减弱消亡,雾体垂直厚度超过 800 m,雾体内相对湿度达到 100 %。

(2) 和 10 a 前相比,重庆市区冬季雾在起雾之前无贴地逆温出现,雾体维持时间缩短,强度减弱,爆发性发展的时间延后。雾滴数密度显著增大,可比 10 a 前增大一个数量级,雾滴尺度显著减小,约为 10 a 前的一半。

(3) 随着重庆市城市面积的扩大,有效水汽源面积减小,湿度减小,这是重庆冬季雾减少,雾体持续时间缩短、强度减弱的主要原因。

(4) 气溶胶粒子数浓度的增加,使重庆温度日较差逐渐减小,昼夜边界层结构趋向中性,逆温层强度减弱,这也是导致重庆冬季雾维持时间缩短,强度减弱,雾滴数密度增大、尺度减小的重要原因之一。

参考文献:

[1] 李子华,张利民,楼小凤. 重庆市区冬季雾的宏微观结构及其物理成因[J]. 南京气象学院学报,1993,16(1): 48-54.

[2] 李子华,吴 君. 重庆市区冬季雾滴谱特征[J]. 南京气象学院学报,1995,18(1): 46-51.

[3] 李子华,张利民. 论山风对重庆雾形成和发展的作用[J]. 重庆环境科学,1992,14(3): 7-11.

[4] 石春娥,杨 军,孙学金,等. 重庆雾的三维数值模拟[J]. 南京气象学院学报,1997,20(3): 308-317.

[5] 李子华,涂晓萍. 重庆市区冬季边界层气象要素的时空分布及与成雾的关系[J]. 南京气象学院学报,1993,16(3): 329-333.

[6] 李子华. 重庆市区气象能见度低劣的成因[J]. 南京气象学院学报,1992,15(4): 550-557.

[7] 李子华,彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性[J]. 气象学报,1994,52(4): 477-483.

[8] 周淑贞. 城市气象学[M]. 北京: 气象出版社,1994: 600-615.

[9] 黄玉仁,黄玉生,李子华,等. 生态环境变化对雾的影响[J]. 气象科学,2000,20(2): 129-135.

[10] 黄建平,李子华,黄玉仁,等. 西双版纳地区雾的数值模拟研究[J]. 大气科学,2000,24(6) 821-834.

[11] 李子华,杨 军,黄世鸿. 考虑湿度影响的城市气溶胶粒子白天温度效应[J]. 大气科学,2000,24(1): 87-94.

[12] 李子华,涂晓萍. 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应[J]. 大气科学,1996,20(3): 359-366.

[13] 陈金荣,周文贤. 重庆市区大气气溶胶的时空分布和物理特性[J]. 气象科学,1992,12(4): 436-443.

The Physical Process of Chongqing Fog's Genesis and Dissipation in Winter

HE You-jiang¹, ZHU Bin¹, MA Li²

(1. Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044, China;

2. Chongqing Weather Bureau, Chongqing 400000, China)

Abstract: A comprehensive field observation of fog in both the center and suburb of Chongqing is carried on in December 2001, there were two processes of fog in 4th and 29th during that period. By analyzing the two processes of fog, the macro- and micro-physical characters of Chongqing fog in winter are revealed, and the new characters of Chongqing fog after the development of the city are obtained by comparing with the Chongqing fog ten years ago. At last the reason for such change of Chongqing fog is also analyzed. In comparison with the Chongqing fog ten years ago, the duration of fog is shortened, the intensity weakened, and the erupting development postponed; the density of fogdrops is about ten times and the size of fogdrops is one half. The expansion of the city, the reduction of humidity, and the increase of aerosol particle concentration are responsible for such changes of Chongqing fog.

Key words: Chongqing fog; inversion; microphysical structure; aerosol