

1978—1980 年湖南省高炮增雨试验区 雨水银含量的统计分析*

陈 历 舒 王 道 藩**

(湖南省气象科学研究所)

“三七”高炮施放 AgI 是否显著增加了雨水中银含量? 能否通过分析雨水银含量了解 AgI 对云催化作用的时间和空间范围? 这些都是我国当前人工增雨试验中极为关注的问题。为试图回答这两个问题, 我们于 1978—1980 年夏秋, 在湖南省中、西部高炮增雨试验区采集雨水样品, 对其银含量值进行了统计分析和个例分析, 现将所获结果报告如后。

1. 试验区概况和雨水的采样与银含量测定

1) 试验区概况

1977—1978 年夏秋, 湖南省气象科学研究所 在湘西芷江设置试验区, 在 711 雷达的支持配合下, 用三门“三七”高炮发射 AgI 降雨弹进行对流云人工增雨实验。在试验区, 1978 年设有雨量观测点 53 个(其中自记雨量计 18 台), 雨水采样点 38 处。

1979—1981 年夏秋, 我所在湘中新化—安化山区进行单块对流云随机化人工增雨实验, 试验区设有“三七”高炮两门, 711 雷达一部, 雨量观测点 60—70 个。1979, 1980 年均设雨水采样点 5 处。

1977—1980 年湖南高炮增雨试验区雨水采样点分布如图 1 所示。

2) 雨水的采样

全部雨水样品均自地面用聚丙烯塑料面盆承接雨水, 再经漏斗注入存储器而采得。存储器为硬质三角烧瓶, 也有一部分为医用盐水瓶。采样时间长短, 在炮点及雷达站等采样点, 视雨强大小, 以每个样品水量不少于 150—200 毫升, 尽量缩短, 连续采样; 在其余采样点, 则每块云降雨过程中采一至二个样品。

为了消除采样器和存储器的沾染与吸附, 这些器皿均用高纯度硝酸、蒸馏水统一操作, 严格洗净后, 用塑料薄膜包封好, 再分发给各采样点使用。取到的样水注入浓硝酸酸化再送去测定, 不采用冷冻法存储样品。

3) 银含量的测定

全部雨水样品的银含量测定工作由湖南省分析测试所承担。雨水中微量银的测定方法系该所李纲^[1]建立的, 其特点是样水和标准均用吡咯烷二硫代甲酸铵 (APDC) 直接溶于甲基异丁酮 (MIBK) 萃取, 然后用其炉体经改进过的日本岛津 AA-6105 原子吸收与火

* 本文于 1982 年 4 月 26 日收到, 1982 年 10 月 15 日收到修改稿。

** 湖南省气象研究所人控室和有关单位、县气象站、哨部分同志协助采样。

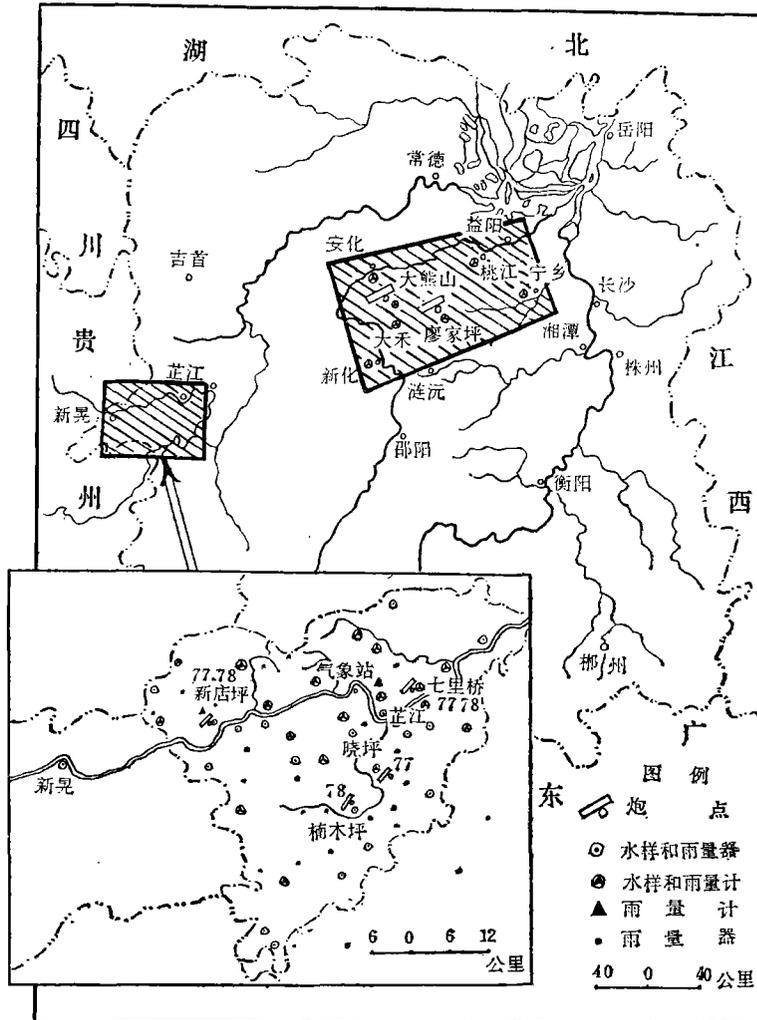


图 1 湖南高炮增雨试验区雨水采样点分布图

焰发射分光光度计测定。该方法稳定、简便、快速、检出限 1978 年以后为 5×10^{-12} 克/毫升, 在 0.2 毫微克/毫升时, 变动系数为 5%。1977 年该法尚不成熟, 检出限高达 1×10^{-10} 克/毫升, 其银含量数据在本分析中已予舍弃。

2. 雨水中银含量的统计结果

我们将雨水分为自然雨和作业雨两类。自然雨是指试验区及其相邻地区高炮作业开始前或作业结束 12 小时之后所降的雨水。作业雨是指作业后多数为 3 小时最长不超过 12 小时内所降的雨水。

1) 湖南雨水银含量

1978—1980 年湖南中、西部雨水样品银含量统计结果列于表 1。

由表 1 不难看出:

表 1 湖南1978—1980年雨水样品银含量统计结果(单位:毫克/升(即ng/l))

年 份	分 类	起止日期	样本数	平均值	标准差	标准误差	中 值	极 大	极 小
1978	自然雨	8.18—9.6	10	26	57	18	<5	180	<5
	作业雨	8.2—9.9	176	45	75	6	20	650	<5
1979	自然雨	8.22—9.1	6	35	36	15	20	90	<10
	作业雨	8.12—8.21	32	51	71	13	30	300	<10
1980	自然雨	6.6—8.3	24	23	21	4	20	70	<10
1978—1980	自然雨		40	26	35	6		180	<5
	作业雨		208	46	74	5		650	<5

(1) 各年作业雨较自然雨的雨水银含量平均值、中值、极大值均大,且无例外。

(2) 作业雨雨水银含量极大值为 650 ng l^{-1} 平均值为 46 ng l^{-1} , 仅分别为美国公共卫生局饮水管制银含量值的 $5 \times 10^4 \text{ ng l}^{-1}$ 的 $1/77$ 和 $1/1087$, 符合卫生要求。

2) 与美国佛罗里达等不同地区雨水银含量的比较

世界上不同地区地面降雨雨水银含量列于表 2。

美国佛罗里达积云实验用流动车对作业云与对比云降雨的采样^[2], 和我们一样都是采的一个积云或积云系降雨的样品, 因而是可以比较的。现把两地积云雨水银含量统计值列成表 3。要说明的是, 与表 1 不同, 表 3 所列的湖南作业雨银含量统计值, 对同一采样点来自同一块积云的两个以上的样品, 是取其银含量的算术平均值作为一个样本而加入统计的, 从而消除了瞬时高银含量值对统计结果的影响。

对表 3 的数据, 用 Welch 法^[3,4]进行统计检验, 可以得到三点结果:

(1) 湖南中、西部地区的自然雨水银含量较美国佛罗里达南部地区的自然雨水银含

表 2 不同国家、地区地面雨水的银含量¹⁾

国 家 地 区	研 究 者	分 析 方 法	检 出 限 (ng/l)	银含量平均值或范围 (ng/l)	
				自然雨水	催化雨水
澳大利亚 新南威尔斯	Warburton等 (1963,1965)	离子交换	5	5	~10
			3	3	
美国 西 部 西部五处	Bollay(1965)	中子活化	5	~5—20	~20—200
	Warburton等 (1968)	中子活化	3	~10	~20—6000
佛罗里达南部 (固定站)	Wisniewski 等 (1979)	原子吸收	2	49~51	69—81
依 利 诺 斯	Gatz(1973)	原子吸收	2	~73	
加拿大 阿尔伯塔中部	Warburton(1973)	中子活化	2	~5	~31
	Zacharuk 等 (1975,76,77)	原子吸收	3	~3	~14—16
瑞士	Lacaux 等(1980)	原子吸收	1	6	
中国 湖 南	本文作者	原子吸收	5	26	46

1) 本表国外资料取自 Wisniewski 等(1979)和 Lacaux 等(1980)的论文

表 3 中国湖南与美国佛罗里达夏秋雨水银含量比较(单位: ngl^{-1})

地 区 年 份	自 然 雨					作 业 雨				
	样本数	平均值	标准差	标准误差	极大值	样本数	平均值	标准差	标准误差	极大值
中 国 湖 南 (1978—1980)	40	26	35	6	180	151	38	50	4	260
美 国 佛 罗 里 达 (1973—1975)	59	46	62	8	320	42	71	141	21	780

量低得多,其平均值差异的显著性水平为 $\alpha < 0.025$ 。参阅表 2 可见, 湖南较美国佛罗里达以及依利诺斯有利于用追踪 AgI 的办法来研究 AgI 的扩散问题, 但又不及加拿大的阿尔伯塔、瑞士和美国西部优越。

(2) 湖南作业雨与自然雨银含量平均值差异显著, 美国佛罗里达作业雨与自然雨银含量平均值差异不明显。显著性水平,前者为 $\alpha < 0.05$, 后者为 $\alpha > 0.10$ 。

(3) 美国佛罗里达较中国湖南作业雨银含量大,其差异在统计上是有意义的,显著性

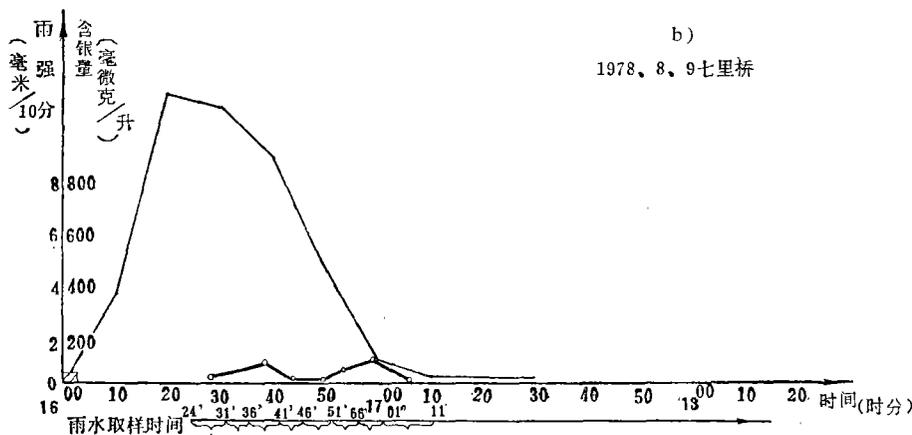
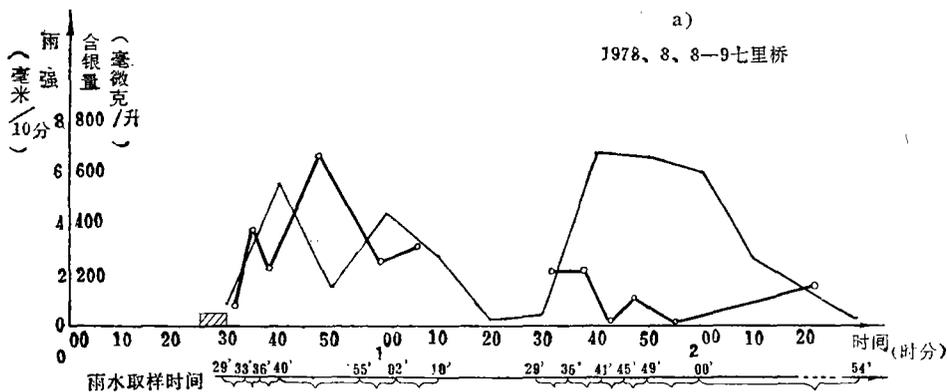


图 2 两例作业云雨水银含量和雨强随时间的变化

—雨强线 ◯—银含量线 ▨炮击时段

水平 $0.05 < \alpha < 0.10$ 。

3. 作业云雨水银含量的个例分析

1) 作业云雨水银含量随时间的变化

1978年8月8,9两日,芷江县七里桥炮点对作业云降雨采样资料较全,现将此二例作业云雨水银含量和雨强随时间变化点绘成图2a,b。

1978年8月8日,芷江受地面切变线影响,500 mb 高空风为SSW,作业前云的回波水平尺度为 50×80 公里²,顶高缺测。00时25分至02时04分七里桥炮点向东南方炮击19发后,回波顶高为9.06公里,水平尺度为 50×90 公里²,回波强中心位置下降,强度减弱,以30公里/小时的速率向350°方向移动。炮点总降雨量为41.7毫米。显然作业云是积云群,采样点位于云的左侧。

1978年8月9日,芷江受锋面影响,500 mb 高空风风向为ESE,作业前七里桥炮点西北方有一块处于发展阶段的积云回波,其顶高3.4公里,水平尺度为 4×4 公里²,炮点东南方还有一块回波,前者向东南伸展,后者向西北移动,有向炮点上空合并的趋势。15时59分至16时09分七里桥炮点先向西北方向回波处炮击18发,后向东南方向回波炮击26发,位于七里桥炮点西南方的楠木坪炮点,16时30分至32分也向东方炮击19发。16时25分,积云在炮点上空合并,雷电交加,回波顶高达12.8公里,水平尺度为 10×12 公里²。16时29分后,降雨加大,持续40分钟。七里桥炮点总降雨量为46.9毫米,采样点位于此积雨云的左侧。

由图2a可以清楚地看到:第一,作业后雨水银含量有一个极大值650 ng/l,出现在作业结束后26分钟;作业后60—110分钟,银含量还有100—200 ng/l。第二,与雨强变化曲线相比较,银含量出现极大值的时间较雨强出现极大的时间晚7分钟。第三,降雨强度的双峰或三峰似与银含量无明显关系。图2b降雨强度呈单峰,雨强极大;雨水银含量第二峰值出现在炮击后39分钟,还有第二峰,但含量都很低,情况与图2a的降雨强度曲线在01时40分至02时10分对应情况极相似。

2) 作业云雨水银含量的空间变化

作业云整个降水过程中,雨水银含量的区域分布,以1978年8月7,9两日为例来说明。这两次作业云雨水银含量与雨量分布如图3a,b。

1978年8月7日,芷江处于副高边缘,大气层结不稳定,作业前云的回波顶高8.5公里,水平尺度 3×4 公里²,位于新店坪炮点以东。17时08分,新店坪炮点向正东方向炮击38发,作业后云的回波顶高增高为10.8公里,水平尺度为 4×6 公里²,强中心下降。由图3a可见,降雨最大中心和银含量最大中心都在炮点西南,两者仅相距3—4公里。1978年8月9日天气和作业情况前已述及,银含量和雨量分布与图3a相似。

关于高炮作业时,AgI的影响范围,我们考虑是介于自然雨水银含量中位数值 20 ng l^{-1} 和平均值 26 ng l^{-1} 的等值线所围的面积。在图3a,b上,雨水银含量 20 ng l^{-1} 线所围面积分别为300.6和299.7公里², 26 ng l^{-1} 线所围面积分别为228.6和225.7公里²。

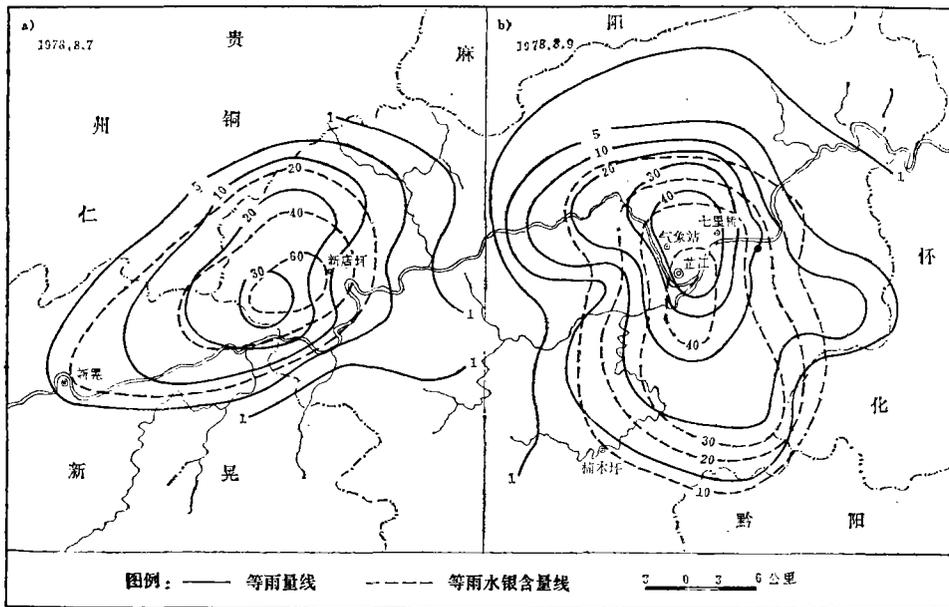


图 3 两例作业云雨水银含量与雨量分布

4. 讨 论

高炮作业后雨水中银含量的增加,在统计上是显著的。下面就增加的可能机制及与催化效果的关系作些讨论。

1) 降雨弹气溶胶的粒子谱与雨水银含量

据张瑞莲等^[5]的观测研究,我国现用降雨弹气溶胶粒子最大直径为 1.7 微米,最小直径为 0.02 微米,中值直径为 0.079 微米,直径大于 0.1 微米的粒子浓度比为 5%,重量比为 92.6%,直径大于 0.5 微米的粒子重量比为 87.9%。

显然,对于降雨弹 AgI 气溶胶,高炮作业后雨水中银含量的增加主要是直径大于 0.1 微米的 AgI 粒子造成的。在增大雨水中银含量的各种可能机制中,重力沉降效应是微不足道的,应予以重视的是 AgI 粒子在云中和云下的冲刷。

2) 关于 AgI 被冲刷的问题

(1) B. J. Mason^[6] 综述过大气微粒受雨水冲刷总机制的各个过程,指出过纯 AgI 粒子是疏水性固体,自然界云内水汽过饱和度不超过 1%,对于半径 $r > 0.1$ 微米的不可溶性粒子,至少要水汽过饱和度达 3% 时才能发生凝结。所以除非降雨弹 AgI 气溶胶粒子不纯,含有可溶性成份,否则它被云体吸收和吸附或作为凝结核而转移到云水、雨水中,起溶化或凝结核化冲刷作用可能是极小的。

(2) H. M. Davenport 等^[7] 对三例云下连续性降雨前后大气气溶胶粒子谱作了测量,并与考虑了惯性碰并、截获、布朗扩散、热致迁移、扩散输送、静电效应等机制的理论加以比较。结果表明对 0.4—1 微米的粒子冲刷系数实测值为 $2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$ /秒,较理论值高一至二个数量级。若用上述冲刷系数可以算出半小时可冲刷 3.5—16.5%, 三小

时可冲刷 19.4—66.0%，似可以解释雨水中银含量的增加。然而 L. F. Radke 等^[8]据五例对流云和一例层状云降水前后云底附近大气气溶胶浓度测量结果认为，冲并系数存在一个所谓冲刷间隙(Scavenging gap)，其左、右缘分别为直径 0.5 和 2.0 微米，干气溶胶粒子直径位于此间隙，则被雨水冲并的效率极低，直径在此间隙外的粒子才能有效地受到冲刷。考虑到我国降雨弹的粒子谱，就不能断然肯定 AgI 的绝大部分是被雨水冲刷下来的。冲刷系数或冲并效率的理论值与实测值的差异，表明还有其他的机制在起作用。我们讨论混合性对流云的时候，AgI 成冰核化冲刷作用便是不能不着重考虑的机制了。

(3) 由于我国降雨弹 AgI 气溶胶不是单分散相的，较粗的粒子浓度比虽小而重量却极大。所以，关于雨水中银含量的分析只适合于定性考察 AgI 的扩散和其催化作用，不大可能作为定量分析催化效果的直接证据。

参 考 文 献

- [1] 李纲，雨水中微量银的无火焰原子吸收光谱测定，分析测试通讯，第一期，1982年。
- [2] Wiesniewski Joe & Robert I. Sax, Silver concentration in rainwater from seeded and nonseeded florida cumuli: 1973—1975 results, *Journal of Appl. Met.*; 18, No. 8, 1979.
- [3] 斯蒂尔 R. G. D. 和 J. H. 托里，数理统计的原理和方法，科学出版社，北京，1979。
- [4] 叶家东、范蓓芬，方差不相等的双样本回归分析，大气科学，第五卷第二期，1979。
- [5] 张瑞莲等，降雨弹爆炸产生的 AgI 气溶胶微粒的大小分布，南京大学学报（自然科学版），第一期，1981。
- [6] 梅森，B. J.，云物理学（中国科学院大气物理研究所译），科学出版社，1978。
- [7] Davenport, H. M. & L. K. Peters, Field studies of atmospheric particulate concentration changes during precipitation, *Atm. Env.*, 12, No. 5, 997—1008, 1978.
- [8] Radke Lawrence F., Peter V. Hobbs and Mark W. Eltgroth, Scavenging of aerosol particles by precipitation, *Journal of Appl. Met.* 19, No. 6, 1980.