

段婧,楼小凤,汪会,等,2020.人工影响天气用碘化银催化剂对区域环境影响的研究进展[J].气象,46(2):257-268. Duan J, Lou X F, Wang H, et al, 2020. Research progress on impact of AgI in weather modification operations on environment in related areas[J]. Meteor Mon, 46(2):257-268(in Chinese).

人工影响天气用碘化银催化剂对 区域环境影响的研究进展^{*}

段婧^{1,2} 楼小凤^{1,2} 汪会^{1,2} 郭学良^{1,2} 李集明^{1,2}

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

提 要: 中国自1958年以来开展人工影响天气作业。碘化银作为主要的催化剂,是否会对环境造成影响备受关注。分析了国内外使用碘化银开展人工增雨雪和人工防雹外场试验作业后降水、土壤和湖泊等的 Ag^+ 含量,尽管催化后 Ag^+ 含量会有不同程度的增加,尤其是地面燃烧炉催化和人工防雹作业,但降水和水库中的 Ag^+ 含量远低于饮用水标准。统计了我国外场人工影响天气作业的碘化银用量,结合降水和水库中 Ag^+ 浓度观测,认为我国人工影响天气使用的碘化银不会对水资源和环境造成影响。

关键词: 人工影响天气作业,碘化银催化剂,环境影响

中图分类号: P48,X82

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.011

Research Progress on Impact of AgI in Weather Modification Operations on Environment in Related Areas

DUAN Jing^{1,2} LOU Xiaofeng^{1,2} WANG Hui^{1,2} GUO Xueliang^{1,2} LI Jiming^{1,2}

1 State Key Laboratory of Disaster Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: Weather modification operations in China has been carried out since 1958 with silver iodide as the main seeding agent. Whether silver iodide affects the environment has attracted much attention. This paper analyzed the content of silver ions in precipitation, soil and lakes after silver iodide seeding in several countries in the world. The amount of silver iodide used in China was counted, and silver ions in precipitation and in the reservoir were measured. It is found that the silver iodide used for weather modification in China do not affect water resources and the environment.

Key words: weather modification operation, silver iodide seeding agent, environment impact

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41675137、41275148)和中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2016Z006、2018Z009 和 2018KJ007)共同资助

2019年1月4日收稿; 2019年11月23日收修定稿

第一作者:段婧,主要从事气溶胶、云降水物理和人工影响天气研究. Email:duanjing@cma.gov.cn

通讯作者:楼小凤,主要从事云降水物理和人工影响天气研究. Email:louxf@cma.gov.cn

引言

人工影响天气是指在适当的天气条件下,通过人工干预,使天气过程向符合人类愿望的方向发展。1946年美国科学家 Schaefer (1946) 和 Vonnegut (1947) 相继提出,可以在冷云中通过播撒干冰或碘化银(AgI)的方法,适当增加云中的冰晶数量,促使降水的形成。该方法的提出开创了人工增雨作业的历史,并一直受到一些国家政府和公众的重视,其科学基础已被大量室内实验、数值模拟和外场试验所证实。同时,人工影响天气在试验及效果综合评估、高性能遥感探测装备的应用、催化模式及应用、作业装备研发改进等四个主要方面取得了不少进展。我国的人工影响天气工作始于1958年,目前作业规模为世界之首(毛节泰和郑国光,2006;郑国光和郭学良,2012;洪延超和雷恒池,2012;段婧等,2017)。2018年,全国30多个省(区、市)开展了人工影响天气作业,使用飞机70架次,高炮和火箭作业点18057个,人工增雨作业目标面积可达 $490 \times 10^4 \text{ km}^2$,人工防雹可影响作业面积 $53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

开展人工影响天气作业以来,曾经使用过几十种播云催化剂。有无机物质,也有有机物质,包括冰核、凝结核与致冷剂(吴兑,2005)。目前国际上人工影响天气作业催化剂主要有AgI类催化剂、致冷剂和吸湿性催化剂三大类。致冷剂主要包括干冰(固体二氧化碳)、液态二氧化碳和液氮等速效致冷剂。干冰和液态二氧化碳可使局部降温到 -78.5°C ,使得云中云滴冻结和水汽凝华产生冰晶。该类催化剂播撒后很快成为二氧化碳气体,它是空气的组成部分。液氮可使局部降温到 -196°C ,同样使得云滴冻结和水汽凝华产生冰晶。液氮播撒后成为氮气,也是空气的组成部分,不会对生态环境产生污染。吸湿性催化剂主要为氯化钠、尿素和硝酸铵等物质,这些物质具有强吸湿性,可在低于水面饱和条件下吸湿凝结增长。我国以前曾大量使用氯化钠播云,最多的年份耗用近300 t氯化钠,可能会造成土壤的盐渍化,对农作物也会有损害;而且氯化钠、氯化钙、石灰都是具有一定腐蚀性的物质,对生态环境有负面影响。尿素和硝酸铵对土壤有一定肥效。目前我国的吸湿性催化剂用量极少,对环境的影响可以不予考虑。

AgI常温下为亮黄色无臭粉末,熔点为 558°C ,

沸点为 1505°C ,汽化冷凝后形成微小的AgI晶粒,温度更高时AgI可分解成离子,遇冷再结合成AgI粒子。AgI中的银离子(Ag^+)为重金属,有一定的毒性。我国最新颁布的《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017;中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,2017),在非规范指标及限值的毒理学指标中增加了银的标准。适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水的标准是银的含量不超过 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,这与世界卫生组织规定的饮用水标准一致(World Health Organization, 2004)。AgI被认为是不溶于水的(溶解度常数为 $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$),游离的 Ag^+ 在自然环境中非常容易形成不溶于水的化合物,从而大大减小对环境的影响,因此 Ag^+ 几乎不可能通过陆地或水中的食物链积聚,达到能危害生物和动物的程度。

AgI是迄今所发现的最好的人工冰核物质,它具有成冰阈温高和成核率高的优点,同时作为化合物时毒性较低且用量少。除去它的晶格常数与冰晶十分接近外,还由于它能通过高温产生高度分散的冰核气溶胶粒子,大大提高了单位质量AgI所产生的冰核数。虽然某些无机和有机物也具有良好的核化冰晶性质,但在高温下会分解,只能用机械粉碎的方法来分散,无法产生细小的粒子,因而很难达到像AgI那样高的成核率(酆大雄,1991)。

AgI类催化剂主要由AgI及助溶剂和助燃剂组成,其播撒方式主要包括爆炸、燃烧溶液、燃烧焰剂和喷洒水溶胶等方法。机械分散的AgI粉末成核率很低,因此获得AgI冰核气溶胶的方法主要采用燃烧AgI丙酮溶液或含AgI的焰火剂。通过燃烧方法获得的AgI气溶胶粒子尺度范围为 $0.005 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。1 g AgI催化剂在 -10°C 环境下可形成 $10^{13} \sim 10^{14}$ 个冰晶核(酆大雄等,1995),可从云的上风方、云底甚至地面燃烧播撒。

本文首先对多年来国内外利用AgI开展人工增雨(雪)、人工防雹外场试验和业务作业时获得的降水、土壤及湖泊中 Ag^+ 含量的调查和研究结果进行分析总结,然后统计我国AgI用量,分析评估人工影响天气中AgI对水资源和环境可能造成的影响。碘是人类所需的食物营养成分,所以研究AgI对环境 and 人体的影响,主要研究 Ag^+ 的影响。由于人工防雹的作业播撒比较集中,且催化剂用量一般较大,防雹催化影响区域中 Ag^+ 含量或许会高于人工增雨雪的含量,所以本文分别对两种催化目的

AgI 影响研究进展进行总结分析。

1 人工增雨雪 AgI 催化影响研究

国际上早在 20 世纪 60 年代就开始了关于人工影响天气播撒 AgI 对环境的影响研究(表 1), 研究人员通过检测催化后雨雪中 Ag^+ 的含量, 及土壤、湖泊和河流中 Ag^+ 含量, 结合理论计算, 分析其对环境可能的影响 (Warburton and Maher, 1965; Kharkar et al, 1968; Warburton and Young, 1968; Parungo and Robertson, 1969; Standler and Vonnegut, 1972; Warburton, 1973; Freeman, 1979; Lacaux and Warburton, 1980; Stone, 1986; 2006; Stone et al, 1995; Potapov 和赵国庆, 1995; Warburton et al, 1995; 1996; Sánchez et al, 1999; Williams and Denholm, 2009; Korneev et al, 2017; Fisher et al, 2018)。我国也从 20 世纪 70 年代开始对催化降水中 Ag^+ 含量进行检测(表 1), 并检测水库中 Ag^+ 含量, 分析 AgI 催化对环境的可能影响(陈历舒和王道藩, 1983; 曾光平等, 1989; 吴兑, 2005; 赵习方等, 2006; 2007; 2008)。

1.1 AgI 人工增雨雪催化降水取样分析

Warburton and Maher (1965) 在澳大利亚东部飞机人工增雨雪催化的 14 个观测点收集雨雪样, 催化后 63 个样本的降水中 Ag^+ 含量在 $0.003 \sim 0.048 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 平均值为 $0.007 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而在非作业时段该区域没有检测到 Ag^+ (Warburton and Young, 1968)。在美国科罗拉多州北部人工催化降雪的 73 个雪样中 Ag^+ 浓度约为 $0.01 \sim 8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $0.95 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Parungo and Robertson, 1969; Standler and Vonnegut, 1972)。1984—1985 年在美国内华达州通过地面燃烧炉进行人工增雪, 并在降雪个例中收集 2 cm 深的雪样, 分析催化后 0.5~3 h 或更长时间的 Ag^+ 含量, 得出 85% 催化雪样的 Ag^+ 浓度高于背景浓度 ($0.002 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Warburton et al, 1995; 1996)。

2003 年以来美国爱达荷能源公司在爱达荷州, 利用布设在 Payette 的 17 个地面燃烧炉和两架飞机进行人工增雪催化作业(图 1)。在 2015、2016 年的 2 个降雪季中, 在平行于平均风速和垂直于平均风速的方向, 共布设了 35 个取样点, 获取了超过 4000 个雪样, 对 14 个增雪个例进行取样分析。催化

后雪样中 Ag^+ 含量一般在 $0.005 \sim 0.025 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1, 图 2), 最大浓度为 $0.08 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而对比区的 178 个雪样的 Ag^+ 背景浓度为 $0.001 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。对 3 个催化个例和 1 个自然降雪个例进行了实时连续取样, 发现 20%~75% 的催化时段内 Ag^+ 含量明显增加, 有时仅在短时间内可出现 Ag^+ 含量增加的现象(图 3)。 Ag^+ 的分布可以延伸到下游的 60 km, 少量可达 70 km 的范围 (Fisher et al, 2018), 在催化下游 100~200 km (图 1 红色十字) 的 Ag^+ 浓度很少超过 $0.002 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

我国在 20 世纪 70 年代开始关注催化降水中的 Ag^+ 含量, 并开展了 Ag^+ 的检测, 结果认为其对环境的影响微乎其微(吴兑, 2005)。1978—1980 年夏秋, 在湖南省中西部高炮增雨试验区设置雨水采样点 5 处, 进行 Ag^+ 含量分析(陈历舒和王道藩, 1983)。在炮点及雷达站等采样点, 根据雨强大小, 每个样品水量不少于 150~200 mL, 连续采样, 而其余采样点则对每块自然云的降雨过程取 1~2 个水

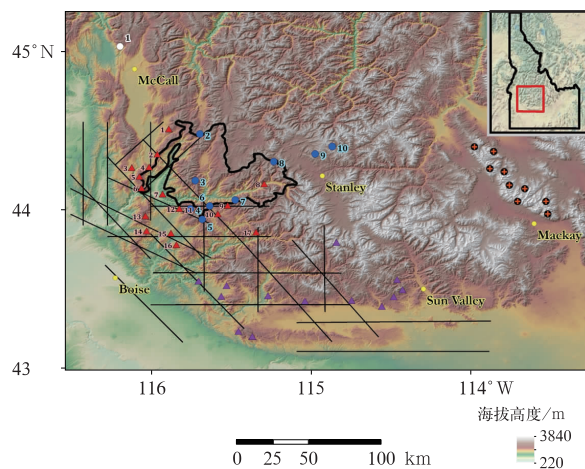


图 1 美国爱达荷州催化作业和取样点分布

(引自 Fisher et al, 2018;

红/紫三角: 地面燃烧炉, 实线: 飞机催化航线, 蓝色圆点: 降水 Ag^+ 取样点, 红色十字: 下游取样点, 黄色圆点: 主要城市, 白色圆点: 对比区取样点)

Fig. 1 Idaho of United State uses ground generators (red/purple triangles) and aircraft (lines) to deliver AgI [Fisher et al, 2018; sampling sites in and around the Payette River Basin were targeted for precipitation enhancement (blue dots); sites downwind of operations were sampled as well (red crosses); Major cities; yellow dots; site 1 (white dot) was the sole control site for this project]

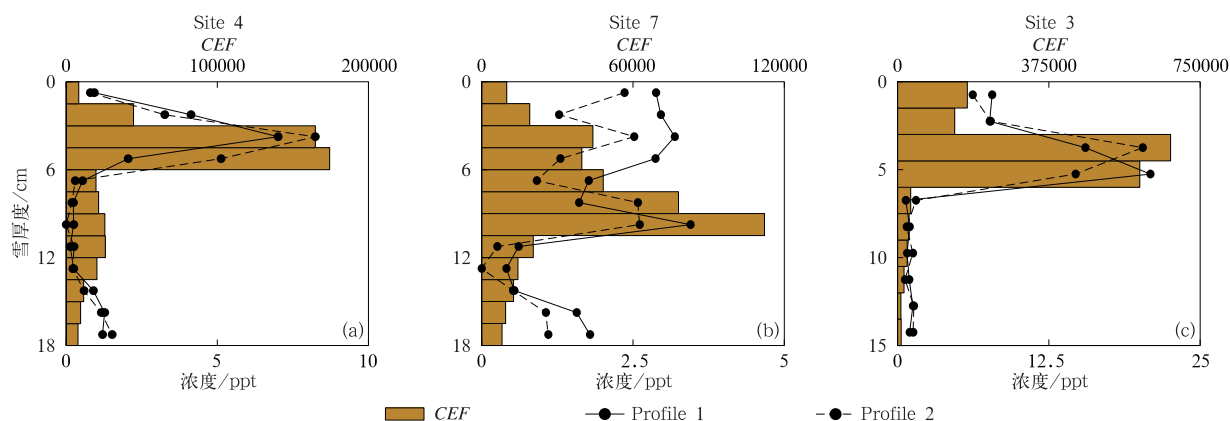


图 2 图 1 中站点 4(a)、站点 7(b)和站点 3(c) Ag^+ 浓度(单位: ppt, 1 ppt = 10^{-12})分布

(引自 Fisher et al, 2018; CEF: 地壳富集因子数)

Fig. 2 Concentration (unit: ppt, 1 ppt = 10^{-12}) distributions of Ag^+ at

Site 4 (a), Site 7 (b) and Site 3 (c) of Fig. 1 (Fisher et al, 2018; CEF: crustal enrichment factor)

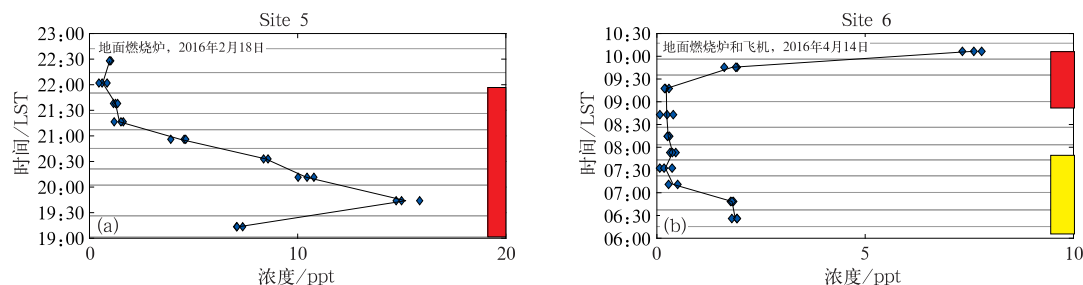


图 3 图 1 中站点 5(a)和站点 6(b) Ag^+ 浓度随时间的分布

(引自 Fisher et al, 2018; 红色: 地面燃烧炉播撒时段, 黄色: 飞机播撒时段)

Fig. 3 Two real-time sampling results from Site 5 (a) and Site 6 (b) of Fig. 1

(Fisher et al, 2018; red bar: ground generator, yellow bar: aircraft)

表 1 多个国家人工影响天气催化降水中 Ag^+ 含量检测结果

Table 1 Ag^+ concentration detection of precipitation by artificial seeding in several countries

国家	催化目的	催化方式	年份	Ag^+ 含量 / ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	参考文献
澳大利亚	人工增雨	飞机	1965	0.003~0.048	Warburton and Maher, 1965
美国西部	人工增雨	地面燃烧炉和飞机	20 世纪 60 年代	0.004~0.020	Weather Modification Association, 2009
中国湖南	人工增雨	“三七”高炮	1978—1980	0.026	陈历舒和王道藩, 1983
中国福建	人工增雨	“三七”高炮	1975—1986	0.004~0.010	曾光平等, 1989
中国北京	人工增雨	地面燃烧炉、飞机、火箭	2002—2003	0.080~0.120	赵习方等, 2007
美国爱达荷州	人工增雨	地面燃烧炉和飞机	2015—2016	0.005~0.025	Fisher et al, 2018
俄罗斯北高加索	人工防雹	苏联火箭	20 世纪 70、80 年代	2.300	Korneev et al, 2017
加拿大阿尔伯塔	人工防雹	飞机	1968	0.014~0.016	Warburton, 1973
瑞士	人工防雹	苏联火箭	1977—1978	0.006	Lacaux and Warburton, 1980
西班牙 Leon 省	人工防雹	地面燃烧炉	1993—1994	4.600	Sánchez et al, 1999

样,共分析自然降雨 40 份, Ag^+ 含量最大值为 $0.18 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 Ag^+ 为 $0.026 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。作业雨水样品 208 份, Ag^+ 含量最大值为 $0.65 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $0.046 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 年催化雨水中 Ag^+ 均大于自然雨水的含量。

1975—1986 年在福建省古田水库利用“三七”高炮携带 AgI 进行人工增雨, 试验单元取 3 h 时长, 在 1982—1985 年间共进行 96 次随机试验(其中催化 47 次)(曾光平等, 1989)。图 4 给出了催化作业点试验区及降水取样点分布, 每个水样约 10 mL,

用原子吸收法对 77 个雨水样品 Ag^+ 含量进行测定。结果得出催化后降水中 Ag^+ 含量为 $0.004 \sim 0.01 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,而在对比区的自然雨水中 Ag^+ 含量为 $0.0038 \sim 0.0042 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,催化雨水高于自然雨水的含量,但仍然远小于 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的饮用水标准(图 5)。

北京市 2002 年 12 月至 2003 年 3 月在尖子山进行地面燃烧炉人工增雨雪试验,期间在其下风方

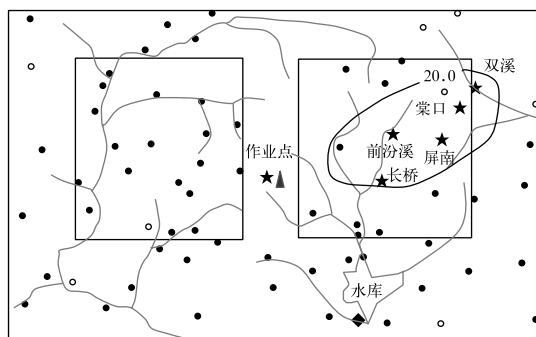


图 4 福建省古田水库地区的催化作业点和两个试验区及降水取样点分布

(引自曾光平等,1989;

●:自记雨量点,○:人工观测雨量点,
◆:雷达位置,★: Ag^+ 含量观测点)

Fig. 4 The location map of seeding sites, two experimental areas and precipitation sampling sites in Gutian Reservoir of Fujian Province

(Zeng et al, 1989; ●: automatic rain gage stations, ○: rain gage stations, ◆: radar locations, ★: Ag^+ observed sites)

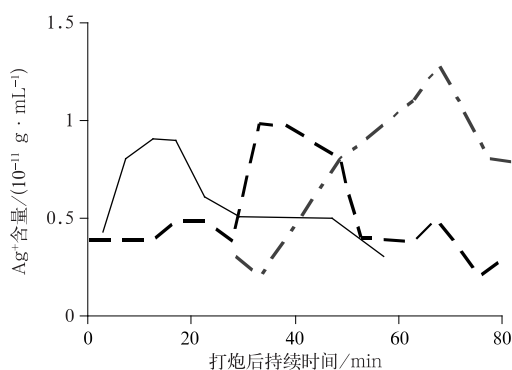


图 5 试验区石塔山(黑实线)、长桥(黑虚线)和屏南(点划线)三个取样点 Ag^+ 随时间的分布

(引自曾光平等,1989)

Fig. 5 Temporal variation of Ag^+ concentration at Shitashan (solid line), Changqiao (dashed line) and Pingnan (dot dash line) sampling sites

(Zeng et al, 1989)

沿作业点共设 20 多个采样点作为雪水的 Ag^+ 监测点,并对 4 次人工降雪过程所采集雪水样品进行了 Ag^+ 测定及其他化学组分分析(赵习芳等,2007)。其中有 2 次收集到对比区的自然降雪样。共采集雪水样品 213 份,其中 12 份自然雪水样。取样时间从降雪开始到降雪结束,即代表作业后整个降水过程。发现雪水中 Ag^+ 浓度在不同天气过程中变化明显,浓度变化与催化剂用量间没有直接线性关系,如图 6 所示雪水中 Ag^+ 不超过 $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,虽然明显高于对比区,但仍然远低于我国生活饮用水标准。

1.2 人工增雨雪 AgI 催化湖泊和河流 Ag^+ 分析

美国开展了催化后湖泊和河流水域中 Ag^+ 含量的变化研究。Freeman(1979)利用科罗拉多高山地区的一个小流域和湖泊研究了 Ag^+ 的循环特征。流域中 Ag^+ 的来源除了考虑大气沉降和冲刷、地下水渗滤,还特别考虑了播云的影响。对雪、溪流和湖水、地下水、土壤、沉积物、沉积物间质水、水生植物、底栖生物和鱼类等的每月样本进行了两年沉积物中 Ag^+ 分析。观测表明 Ag^+ 并不局限于局地降水中,在播云后下风方几百千米处仍可检测到银残留物。 Ag^+ 浓度在所研究的所有生态系统组成中都显示出明显的季节性变化,这意味着生物积累的部分是变化的。

1980 年以来美国对内华达州 100 多个山脉湖泊和河流水体进行了研究(Stone, 1986),发现在目标区域水体的降水和湖泊沉积物样品中没有发现高于自然背景的可检测到的 Ag^+ 浓度,也没有发现在超过连续 50 年催化作业后出现 Ag^+ 积聚的证据(Stone et al, 1995; Stone, 2006)。没有证据表明 AgI 会对湖水化学组分产生影响。在内华达山脉的

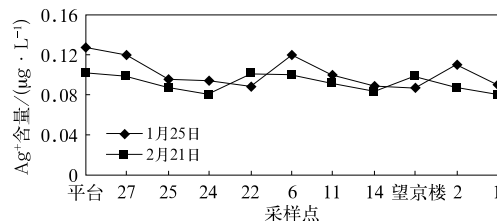


图 6 两次催化降水过程 Ag^+ 含量分布
(赵习芳等,2007)

Fig. 6 Distribution of Ag^+ concentration in two seeding processes
(Zhao et al, 2007)

莫凯勒米河流域收集的湖泊和沉积物样品中测得的 Ag^+ 与其他天然存在的痕量金属的比较表明, Ag^+ 是来自天然而非人工催化(Stone, 2006)。

从2003年开始,北京市每年夏季在密云和官厅水库区域进行蓄水型人工增雨作业,针对2004年6月至2005年7月汛期(5—9月)的飞机催化人工增雨试验,对密云水库与白河入口处2个采样点的水质进行定期连续监测,组分测定除 Ag^+ 外,还进行了pH值、电导率等共16项检测项目。其中 Ag^+ 用原子吸收光谱法测定。检测结果表明,除氨氮外,在作业期所测组分浓度值均小于非作业期; Ag^+ 及化学组分有明显的月变化,作业期为低值,而非作业期为高值,这是由于2005年和2006年的10月中旬至11月底晋冀6座水库集中向北京市输水,密云水库蓄水量增加,使输水后各时段 Ag^+ 浓度值与输水前的相应时段比有所降低。水库 Ag^+ 平均浓度最高值 $0.76 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (赵习方等, 2006; 2008), 远远低于国家 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 生活饮用水水质卫生标准。

尽管近几年北京的 AgI 用量比前几年有了一定的增长,如2011年初实施的人工增雪作业中,燃烧了1200多根 AgI 烟条,每根烟条含 AgI 约11 g, AgI 总用量为13 kg,作业区面积约为 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$, AgI 平均用量约为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$, 属于微量(安惠文, 2014)。2011年2月9—10日,山东省组织了大规模飞机人工增雨作业,燃烧1000多发 AgI 烟弹,每发烟弹含 AgI 3 g; 作业区面积约为 $7.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, AgI 用量为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$; 通过对增雨区济南卧虎山水库的检测, Ag^+ 浓度为 $0.07 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (卢培玉, 2013), 与作业前检测相比较, Ag^+ 浓度值相对降低,同样是由于作业后水库入库水量增大,稀释了 Ag^+ 的浓度。

1.3 人工增雨雪 AgI 催化对土壤和生态影响研究

河北省廊坊市在实施作业10年后,在旧州、仇庄和刘庄3个作业点,根据每个作业点的常规发射方向和发射高度,选取影响区和对比区面积各约 $50 \sim 100 \text{ km}^2$ 范围进行采样,以粉尘作为主要的采样介质,并佐以少量土壤,每个样品重量约 $5 \sim 10 \text{ g}$ (刘伯华等, 2011)。所取124件粉尘样品中平均含 Ag^+ 浓度为74.8 ppb ($1 \text{ ppb} = 10^{-9}$), 低于全国土壤平均值132 ppb。旧州和仇庄两个观测点作业影响区对比区略高,而刘庄的作业点影响区反而低于对比区平均 Ag^+ 含量。河北省平原区20029件土壤

中 Ag^+ 含量的历史背景最小值为28 ppb,最大值为83.2 ppb,平均值为73 ppb,其中旧州、仇庄、霸州地区 Ag^+ 含量为62~75 ppb,测定值略高于历史背景值。

澳大利亚的人工增雪催化试验研究项目(SPERP),2004—2009年在澳大利亚新南威尔士州覆盖 1000 km^2 范围,2018年将目标区域扩大至 2150 km^2 , 评估 AgI 催化是否会对环境产生不利影响。每年使用 AgI 17.6 kg,地面燃烧炉附近银的浓度为470 ppb,远高于目标区的90 ppb,对 SPERP 前四年收集的生态毒性监测数据的分析表明,总 Ag^+ 的平均浓度远低于任何引起关注的水平,并且认为由此项目使用 AgI 造成的不利生态毒理学影响的风险可以忽略不计(Williams and Denholm, 2009)。

已经确定的是,某些形式的银可以对低等生物有毒,而不会对高等动物产生毒性(Hampel, 1968)。自20世纪60年代以来,研究了使用 AgI 播云计划对环境的潜在影响,都得出对于植物和动物没有显著影响的结论(Cooper and Jolly, 1970; Howell, 1977; Tsiouris et al, 2002a; 2002b; Williams and Denholm, 2009)。希腊科学家还研究了 AgI 对植物及其生理、大气降水、浮游生物,动物和人类的影响,得出了类似的结论(Tsiouris et al, 2002a; 2002b)。

总的来看,从国内外人工增雨雪的降水中,及土壤、湖泊和河流中的 Ag^+ 含量分析表明, AgI 人工增雨雪催化不会对环境产生不利影响。美国人工影响天气协会2009年的报告中也认为,迄今为止的所有研究表明, AgI 人工增雨雪催化没有产生对环境和人类健康的不利影响(Dennis, 1980; Weather Modification Association, 2009)。

2 人工防雹 AgI 催化影响研究

国际上一些国家对人工防雹作业后的降水、湖泊、土壤及空气的 Ag^+ 进行检测,分析 AgI 催化对环境的影响。到目前为止我国没有开展针对防雹作业的 Ag^+ 检测。

2.1 人工防雹 AgI 催化的降水 Ag^+ 分析

1968年加拿大阿尔伯塔的人工防雹试验,在冰雹云底上升区利用飞机燃烧 AgI 焰剂释放 AgI 约

240 g,在预报的降水路径上布点取样分析 Ag^+ 浓度(图 7),28 个降水样品中有 15 个检测到了高于背景浓度($0.005 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)4 倍以上的 Ag^+ ($0.02 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) (Warburton, 1973)。1977—1978 年夏季,瑞士利用俄罗斯火箭对冰雹云进行 AgI 动力催化人工防雹作业,一颗火箭弹携带 84 g AgI ,每个对流单体催化 3~5 颗火箭弹,一个冰雹云单体 3.1~3.7 km 高度内催化 AgI 剂量可以达到 250 g (Lacaux et al, 1985)。1977 年 118 个非催化区雨水取样的 Ag^+ 浓度为 $0.009 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,1978 年的 414 个催化雨水 Ag^+ 浓度与背景浓度之比为 1.1~40 (Lacaux and Warburton, 1980)。

1993—1994 年期间西班牙在 Leon 省利用 10 个自动地面燃烧炉组成的催化网开展了人工防雹随机催化作业(图 8),每小时释放 200 g AgI ,每个催化日大约播撒 1.5 kg。在 34 个观测点共获取了 88 个催化样本,59 个自然降水样本,催化个例中平均 Ag^+ 浓度为 $14.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,远高于人工增雨雪的 Ag^+ 浓度,尽管催化后 Ag^+ 含量比非催化的高 3 倍,但仍然被认为 Ag^+ 污染的值($50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)低很多(表 2;Sánchez et al,1999)。

2.2 人工防雹 AgI 催化湖泊和河流 Ag^+ 分析

1986—1991 年在摩尔多瓦利用 AgI 开展人工防雹作业,以保护 200 万 hm^2 的庄稼免受雹灾影响。14 年间分别在作业季节之前和之后,每年两次在防雹区内外的 100 个水库抽取水样,连续 9 年人工防雹作业区域水体的 Ag^+ 浓度为 $1.7 \sim 7.4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,而对比区浓度则为 $0.9 \sim 4.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (Korneev et al,

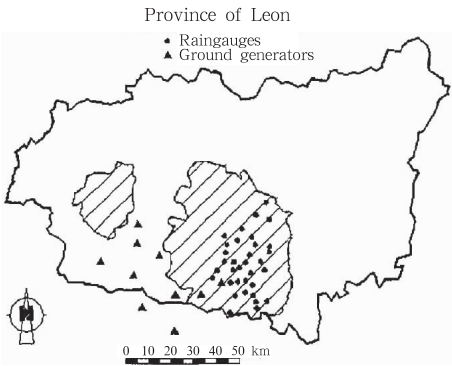


图 8 西班牙 Leon 省人工防雹试验区
(Sánchez et al,1999;条形区域为保护区,
黑色三角为地面燃烧炉,
黑色圆点为降水取样点)

Fig. 8 The hail suppression regions in Leon of Spain
(Sánchez et al,1999; Triangles represent the location of each generator, striped zone represents the protected area, black dots circles represent the location of the rain gage stations used to collect the samples)

表 2 西班牙人工防雹试验催化和非催化区的 Ag^+ 浓度分布(Sánchez et al,1999)

Table 2 Statistical values for thunderstorms seeded and unseeded in Spain
(Sánchez et al, 1999)

变量	催化区	非催化区
Ag^+ 浓度平均值($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	14.8	4.6
Ag^+ 浓度标准差($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	26.22	5.1
Ag^+ 浓度最大值($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	157.7	18.4
Ag^+ 浓度中位数($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	4.2	3.4
探测不到次数/次	9	6
有效样本/个	88	59

2017),贯穿整个测量时段,防雹区的 Ag^+ 浓度超过了未防雹区浓度。即便如此,考虑到 AgI 浓度与播撒入大气中的催化总量之间没有相关性,所以防雹区的高 Ag^+ 浓度并不能认为是由 AgI 催化引起的。

2.3 人工防雹 AgI 催化对土壤和生态影响研究

在希腊北部 1982—1994 年开展了 12 年人工防雹作业,设立了 2 个目标区和 3 个控制区(Tsiouris et al,2002a;2002b)。通常认为大部分 Ag^+ 累积在地面 2 cm 厚的土壤内,因此防雹作业后对试验中对最上层 3 cm 内的土壤取样 10 kg,24 h 烘干后,取 50 g 土壤进行 Ag^+ 含量分析。共获取 2507 个土壤样本,同时在 3 个控制区域获取 85 个对比样本。两

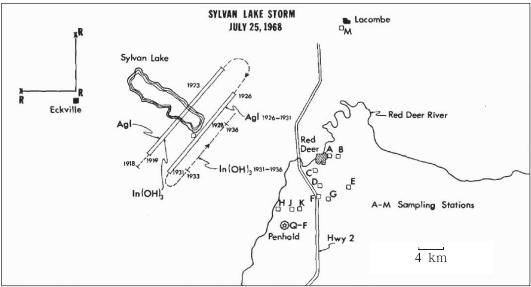


图 7 加拿大阿尔伯塔西尔万湖地区
飞机播撒轨迹和地面采样点分布示意图
(Warburton, 1973)

Fig. 7 Aircraft seeding tracks and surface sampling sites for Sylvan Lake storm in Canada
(Warburton, 1973)

个区域的 AgI 用量很少,在 20 万、10 万 hm^2 面积上播撒量分别为 469、361 kg,土壤中 Ag^+ 含量分别为

44.5 和 37.2 ppb,与控制区没有被催化影响的区域水平相当(表 3)。观测表明 12

表 3 希腊人工防雹试验区目标区及和控制区的土壤 Ag^+ 浓度分析的统计结果(Tsiouris et al, 2002a)

Table 3 Descriptive statistics of silver concentration acquired after soil sample analysis from the target and control areas (Tsiouris et al, 2002a)

		平均值/ppb	标准误差/ppb	标准差/ppb	变异系数	0.05 显著性检验水平	样本数/个
目标区	Hemathia-Pella	44.5	0.9	32.6	73.2	42.9~46.2	1438
	Serres	37.2	0.5	15.6	41.9	36.3~38.1	1063
	Tymavos	42.7	2.1	10.6	28.8	38.5~46.8	25
控制区	Ormylia	56.7	2.0	10.9	19.1	52.8~60.6	30
	Sithonia	30.4	1.7	9.0	29.8	27.1~32.6	30

年的防雹作业,没有对土壤造成银污染。

2.4 AgI 催化空气取样分析

AgI 播撒到空中后,除了一部分 AgI 粒子被浸没到液态水滴中,大部分 AgI 粒子在核化前会以气溶胶的形式存在。假如设定 AgI 气溶胶粒子的大小为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,要达到 $5\times 10^4\text{ m}^{-3}$ 的冰核浓度以使过冷云中产生巨大变化,则 Ag^+ 在空中的浓度为 $0.1\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,比最大允许浓度低 10 万倍,可以不予以考虑。当然在 AgI 发生器附近,AgI 气溶胶浓度会大很多。若在 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下以 $1\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率燃烧,在燃烧炉下风方至少 50 m 外位置的 Ag^+ 浓度才能被认为稀释到低于最大允许浓度(Standler and Vonnegut, 1972)。

在苏联的北高加索地区和摩尔多瓦开展人工防雹的季节里,为了确定空气中 Ag^+ 的浓度,每日 4 次用相同的分析过滤器抽取空气,每次总取样体积为 5 m^3 ,取样高度离地 12 m,分析了催化季节观测站周围 30 km 范围内大气中 Ag^+ 浓度,得出 AgI 的浓度的变化与催化剂的用量不相关,表明催化对空气中 AgI 气溶胶浓度产生的影响不明显。在北高加索地区为 $6.4\times 10^{-5}\sim 8.3\times 10^{-5}\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在摩尔多瓦则为 $0.001\sim 0.043\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这个值比空气中最大允许浓度($10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)小几个量级。

所以,基于过量催化的原理,一般来说人工防雹

的 AgI 用量会多于人工增雨雪的用量,但从上面的分析得出,人工防雹催化后降水、湖泊河流(表 1)和土壤及空气中 Ag^+ 含量仍然在安全的范围,不会对环境造成污染。

3 我国 AgI 播撒量统计和影响估算

3.1 我国 AgI 播撒量统计

基于 2016 年和 2017 年全国飞机和地面作业情况,计算了不同催化设备的 AgI 用量。地面催化设备的 AgI 含量分别按照每根烟条 20 g、每发火箭弹 20 g 和每发高炮炮弹 1 g 进行计算。2016 年我国 AgI 年使用总量为 4773 kg,2017 年为 4229 kg,美国在 1996 年 AgI 总量为 3000 kg(Eisler, 1996)。表 4 给出了 2016 年和 2017 年全国不同催化设备和不同催化目的 AgI 催化用量。从地面和空中作业来看(图 9),地面作业占 AgI 播撒总量的 80% 左右,其余为飞机作业播撒量。地面作业中火箭播撒的 AgI 贡献了总量的 50% 以上,炮弹释放量占 20% 左右,而地面 AgI 烟条占比低于 10%。从催化目的来看,2016 年地面作业中以防雹为主,占总播撒量的 57%,而在 2017 年人工增雨催化用量有所增加,略微超过人工防雹的催化剂用量,同时火箭播撒的 AgI 用量占总播撒量的 50% 以上。

表 4 2016 年和 2017 年不同设备的 AgI 催化量(单位:kg)

Table 4 AgI seeding mass by different devices in 2016 and 2017 (unit: kg)

年份	增雨作业				防雹作业		总计 AgI
	飞机	地面			炮弹	火箭	
		炮弹	火箭	AgI 烟条			
2016	643	87	962	364	1018	1699	4773
2017	846	37	900	358	734	1354	4229

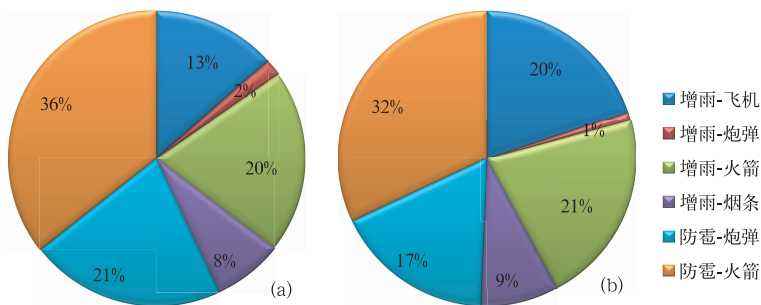


图 9 2016 年(a)和 2017 年(b)全国 AgI 催化量占比

Fig. 9 AgI seeding ratios by different devices and aims in 2016 (a) and 2017 (b)

3.2 AgI 浓度及影响估算

由于地面作业是 AgI 的主要播撒源,按照地面作业影响区域和播撒量,结合地区年降水量计算了我国作业省份每平方千米和体积降水内 AgI 的量,评

估 AgI 对环境的影响。各省作业影响面积按照地面作业点数量和作业影响面积进行估算,地面作业点(火箭和高炮)按照 10 km 的半径计算影响面积。

统计了 2016 年我国 30 个省(区、市)的 AgI 用量(表 5)。从播撒量来看,新疆、云南和陕西是我国

表 5 我国作业省(区、市)的 AgI 用量
Table 5 AgI consumption of seeding provinces in China

省级	影响面积 /(10 ⁴ km ²)	年降水量/mm	AgI 播撒量/kg	单位影响面积 AgI 含量 /(g · km ⁻²)	单位降水 Ag ⁺ 浓度 /(μg · L ⁻¹)
云南	39	1000	541	1.39	0.00064
四川	49	800	165	0.33	0.00019
黑龙江	46	400	96	0.20	0.00023
贵州	18	1100	103	0.57	0.00024
湖北	18.6	750	68	0.37	0.00022
陕西	21	500	357	1.13	0.00104
青海	14.1	50	79	0.55	0.00508
新疆	94	50	1441	1.47	0.01354
北京	1.7	500	88	4.59	0.00422
福建	12	1000	133	1.11	0.00051
天津	1.2	550	22	1.83	0.00153
河北	15.7	400	122	0.73	0.00084
山西	6	400	115	0.42	0.00048
内蒙古	23.5	50	247	0.77	0.00708
辽宁	12.9	500	109	0.67	0.00061
吉林	17.2	400	60	0.26	0.00029
江苏	5.7	800	1	0.02	0.00001
浙江	8.2	1200	16	0.20	0.00007
安徽	11.9	750	22	0.18	0.00011
江西	17	1400	2	0.01	0.000002
山东	16	550	148	0.70	0.00058
河南	17	700	84	0.49	0.00032
湖南	21	1200	16	0.08	0.00003
广东	8.4	1400	0.5	0.06	0.000002
广西	20.5	1000	22	0.11	0.00005
海南	3.4	1500	12	0.35	0.00011
重庆	8.2	1000	108	1.05	0.00048
西藏	10.2	50	16	0.16	0.00144
甘肃	14.7	30	194	1.00	0.01532
宁夏	5.3	200	48	0.91	0.00208

播撒量最大的三个省(区)(图 10),新疆年播撒量近 1.4 t,约占全国播撒量的 30%,但因其区域面积最大,单位影响面积的 AgI 含量为 $1.47 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$ 。对比来看,北京虽然不是播撒量较大的地区,但由于其影响面积仅为 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,所以单位影响面积 AgI 用量远高于其他各省(区、市),达到 $4.59 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$ 。进一步结合各省(区、市)年降水量,计算单位降水 Ag^+ 浓度后结果又有不同(图 11)。总的来看,新疆虽然播撒量最大,但由于其较大的区域面积和很低的年降水量,使得其单位降水 Ag^+ 浓度为 $0.01354 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;虽然北京单位影响面积 AgI 用量最高,但因其较大的年降水量,单位降水 Ag^+ 浓度仅为 $0.00422 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,这比前面提到的 2002 年和 2003 年以来在北京采样水库或降水测得的浓度值低 1~2 个数量级(赵习方等,2006;2007;2008);湖南和福建的估算值也低于观测值 1~2 个量级(陈历舒和王道藩,1983;曾光平等,1989),主要是因为不同于单点采样,这里的计算是平均了影响区域面积和考虑年降水量的综合结果,估算值低于观测值一方面可能是催化剂的影响范围并没有达到预估影响范围的结果,另一方面可能是计算中使用了全年总降水量,而有些区域催化时段并不覆盖整年,导致计算值偏低;甘肃因最低的年降水量,单位降水 Ag^+ 浓度为 $0.01532 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,是所有计算各省(区、市)的最大值。各省(区、市)综合结果的最大值

远小于饮用水的安全标准,因此并不会对环境产生不利影响。

4 结论和讨论

国际上人工影响天气催化剂主要有致冷剂、吸湿性催化剂和 AgI 类催化剂三大类。AgI 广泛应用于人工影响天气作业。

国内外相关科学研究表明,人工防雹作业中 Ag^+ 浓度虽然远高于人工增雨雪产生的 Ag^+ 浓度,但总的来说人工影响天气作业产生的 Ag^+ 浓度低,对环境的影响远低于世界卫生组织饮用水中 Ag^+ 浓度($50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的安全标准,土壤及空气中 Ag^+ 含量也在安全的范围。

近几年我国人工影响天气外场作业的 AgI 播撒量超过 4000 kg,其来源以地面催化作业为主。利用年降水量和地面作业影响面积,估算地面催化的单位降水中 Ag^+ 浓度,认为当前我国降水中 Ag^+ 浓度远低于国际和国内水环境质量标准,不会对环境产生不利影响,也没有证据表明人工影响天气作业会对生态环境产生长期的累积不利影响。

为了更好地评估催化引起的环境影响,在以后的人工影响外场作业中,应该继续开展催化降水和湖泊河流等的 Ag^+ 浓度检测和土壤 Ag^+ 浓度检测,并进一步关注 AgI 在大气中扩散的情景,从而更好地评估催化对水资源和环境的影响。

参考文献

- 安惠文,2014. 人工增雨(雪)所用催化剂对环境 and 人体健康的影响[J]. 天津农业科学,20(4):112-114. An H W,2014. Impact on the environment and human health on the using of catalyst artificial precipitation(snow)[J]. Tianjin Agric Sci,20(4):112-114 (in Chinese).
- 陈历舒,王道藩,1983. 1978—1980 年湖南省高炮增雨试验区雨水银含量的统计分析[J]. 气象学报,41(4):499-505. Chen L S, Wang D F,1983. Silver concentration statistical analysis of rain during rain enhancement experiment by antiaircraft guns in Hunan Province from 1978 to 1980[J]. Acta Meteor Sin,41(4):499-505(in Chinese).
- 段娟,楼小凤,卢广献,等,2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象,43(12):1562-1571. Duan J,Lou X F,Lu G X,et al,2017. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteor Mon,43(12):1562-1571(in Chinese).
- 鄯大雄,1991. 燃烧 AgI 丙酮溶液产生冰核气溶胶[J]. 气象,17(3):3-8. Feng D X,1991. The generation of ice nucleus aerosols by burning AgI-acetone solution[J]. Meteor Mon,17(3):3-8 (in Chinese).

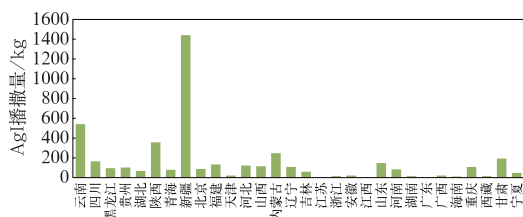


图 10 2016 年我国开展地面催化的 AgI 播撒量
Fig. 10 AgI consumption of ground seeding for several provinces in China in 2016

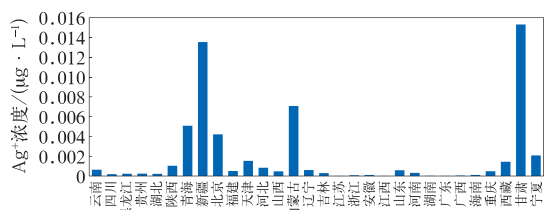


图 11 同图 10, 但为单位降水中 Ag^+ 浓度
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for Ag^+ concentration

- Chinese).
- 鄯大雄,陈汝珍,蒋耿旺,等,1995. 高效碘化银焰火剂及其成冰性能的研究[J]. 气象学报, 53(1):82-90. Feng D X, Chen R Z, Jiang G W, et al, 1995. The high efficient AgI pyrotechnics and their ice nucleating properties[J]. Acta Meteor Sin, 53(1):82-90(in Chinese).
- 洪延超,雷恒池,2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 17(6):951-967. Hong Y C, Lei H C, 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification[J]. Climatic Environ Res, 17(6):951-967(in Chinese).
- 刘伯华,宫进忠,陈宝江,等,2011. 廊坊市人工增雨作业区粉尘银环境影响分析[J]. 安徽农业科学, 39(11):6582, 6593. Liu B H, Gong J Z, Chen B J, et al, 2011. Environmental impact analysis of the dust silver of precipitation enhancement affected areas in Langfang City[J]. J Anhui Agric Sci, 39(11):6582, 6593(in Chinese).
- 卢培玉,2013. 人工增雨影响因子性能探讨[J]. 安徽农业科学, 41(35):13623-13625. Lu P Y, 2013. On the performances of artificial precipitation impact factors[J]. J Anhui Agric Sci, 41(35):13623-13625(in Chinese).
- 毛节泰,郑国光,2006. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报, 17(5):643-646. Mao J T, Zheng G G, 2006. Discussions on some weather modification issues[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5):643-646(in Chinese).
- Potapov Y I,赵国庆,1995. 防雹地区环境污染的研究[J]. 山西气象, (2):12-13, 35. Potapov Y I, Zhao G Q, 1995. Study on environmental pollution in hail suppression region[J]. Shanxi Meteor Quart, (2):12-13, 35(in Chinese).
- 吴兑,2005. 人工增雨催化剂对环境的影响甚微[J]. 广东气象, (3):16. Wu D, 2005. Rain enhancement seeding agent have little impact on environment[J]. Guangdong Meteor, (3):16(in Chinese).
- 曾光平,郑淑真,胡敬雍,等,1989. 福建省古田水库地区人工降雨试验雨水中 Ag^+ 分布的研究[J]. 热带气象学报, 5(1):63-71. Zeng G P, Zheng S Z, Hu J Y, et al, 1989. A study of the distribution of the Ag^+ content in rain-water during artificial rainfall experiment Gutian Area of Fujian Province[J]. J Trop Meteor, 5(1):63-71(in Chinese).
- 赵习方,张蔷,秦长学,等,2006. 实施飞机人工增雨对密云水库水质中 Ag^+ 影响研究[J]. 气象, 32(5):46-51. Zhao X F, Zhang Q, Qin C X, et al, 2006. Effect of aircraft precipitation enhancement on Ag^+ concentration in Miyun Reservoir[J]. Meteor Mon, 32(5):46-51(in Chinese).
- 赵习方,张蔷,赵淑艳,2008. 人工增雨对密云水库 Ag 等化学组分影响研究[J]. 气象科技, 36(4):468-473. Zhao X F, Zhang Q, Zhao S Y, 2008. Influence of precipitation enhancement on Ag and chemical composition characteristics in Miyun Reservoir[J]. Meteor Sci Technol, 36(4):468-473(in Chinese).
- 赵习方,郑国光,张蔷,等,2007. 碘化银地面发生器增雪水中 Ag^+ 与化学组分研究[J]. 气象科技, 35(1):111-114. Zhao X F, Zheng G G, Zhang Q, et al, 2007. Analysis of Ag^+ and chemistry components in snow water catalyzed by ground AgI generator[J]. Meteor Sci Technol, 35(1):111-114(in Chinese).
- 郑国光,郭学良,2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势[J]. 中国工程科学, 14(9):20-27. Zheng G G, Guo X L, 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification[J]. Eng Sci, 14(9):20-27(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2017. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- Cooper C F, Jolly W C, 1970. Ecological effects of silver iodide and other weather modification agents: a review[J]. Water Resour Res, 6(1):88-98.
- Dennis A S, 1980. Weather Modification by Cloud Seeding[M]. New York, NY: Academic Press: 21-22.
- Eisler R, 1996. Silver hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review[R]. Laurel, MD: Patuxent Wildlife Research Center, U. S. National Biological Service: 20708.
- Fisher J M, Lytle M L, Kunkel M L, et al, 2018. Assessment of ground-based and aerial cloud seeding using trace chemistry[J]. Adv Meteor, 2018: 7293987.
- Freeman R A, 1979. Ecological Kinetics of Silver in an Alpine Lake Ecosystem[M]//Marking L L, Kimerle R A. Aquatic Toxicology, Proceedings of the Second Annual Symposium on Aquatic Toxicology. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials: 342-358.
- Hampel C A, 1968. The Encyclopedia of the Chemical Elements[M]. New York: Reinhold Book Corporation.
- Howell W E, 1977. Environmental impacts of precipitation management: results and inferences from Project Skywater[J]. Bull Amer Meteor Soc, 58(6):488-501.
- Kharkar D P, Turekian K K, Bertine K K, 1968. Stream supply of dissolved silver, molybdenum, antimony, selenium, chromium, cobalt, rubidium and cesium to the oceans[J]. Geochim Cosmochim Acta, 32(3):285-298.
- Korneev V P, Potapov E I, Shchukin G G, 2017. Environmental aspects of cloud seeding[J]. Russ Meteor Hydrol, 42(7):477-483.
- Lacaux J P, Warburton J A, 1980. The disposition of silver released from soviet OBLAKO rockets in precipitation during the hail suppression experiment grossversuch IV. Part I: measurements of background and a preliminary seeding test[J]. J Appl Meteor, 19(7):771-778.
- Lacaux J P, Warburton J A, Fournet-Fayard J, et al, 1985. The disposition of silver released from soviet OBLAKO rockets in precipitation during the hail suppression experiment grossversuch IV. Part II: case studies of seeded cells[J]. J Climate Appl Meteor, 24(9):977-992.

- Parungo F P, Robertson C E, 1969. Silver analysis of seeded snow by atomic absorption spectrophotometry[J]. *J Appl Meteor*, 8(3): 315-321.
- Sánchez J L, Dessens J, Marcos J L, et al, 1999. Comparison of rain-water silver concentrations from seeded and non-seeded days in Leon (Spain)[J]. *J Wea Modif*, 31(1): 87-90.
- Schaefer V I, 1946. The production of ice crystals in a cloud of super-cooled water droplets[J]. *Science*, 104(2707): 457-459.
- Standler R B, Vonnegut B, 1972. Estimated possible effects of AgI cloud seeding on human health[J]. *J Appl Meteor*, 11(8): 1388-1391.
- Stone R H, 1986. Sierra lakes chemistry study[R]. Final Report to Southern California Edison Co., Contract No. C2755903.
- Stone R H, 2006. 2006 Mokelumne watershed lake water and sediment survey[R]. Final Report to the Pacific Gas and Electric Company, Tech Ecol Services, San Ramon, Ca.
- Stone R H, Smith-Miller K, Neeley P, 1995. Mokelumne watershed lake water and sediment silver survey[R]. Final Report to the Pacific Gas and Electric Company. San Ramon; Technical and Ecological Services.
- Tsiouris S E, Aravanopoulos F A, Papadoyannis I N, et al, 2002a. Soil silver content of agricultural areas subjected to cloud seeding with silver iodide[J]. *Fresenius Environ Bull*, 11(9): 697-701.
- Tsiouris S E, Aravanopoulos F A, Papadoyannis I N, et al, 2002b. Soil silver mobility in areas subjected to cloud seeding with AgI [J]. *Fresenius Environ Bull*, 12(9): 1059-1063.
- Vonnegut B, 1947. The nucleation of ice formation by silver iodide [J]. *J Appl Phys*, 18(7): 593-595.
- Warburton J A, 1973. The distribution of silver in precipitation from two seeded Alberta hailstorms[J]. *J Appl Meteor*, 12(4): 677-682.
- Warburton J A, Chai S K, Stone R H, et al, 1996. The assessment of snowpack enhancement by silver iodide cloud-seeding using the physics and chemistry of the snowfall[J]. *J Wea Modif*, 28(1): 19-28.
- Warburton J A, Maher C T, 1965. The detection of silver in rainwater; analysis of precipitation collected from cloud-seeding experiments[J]. *J Appl Meteor*, 4(5): 560-564.
- Warburton J A, Young L G, 1968. Neutron activation measurements of silver in precipitation from locations in western North America[J]. *J Appl Meteor*, 7(3): 444-448.
- Warburton J A, Young L G, Stone R H, 1995. Assessment of seeding effects in snowpack augmentation programs; ice nucleation and scavenging of seeding aerosols[J]. *J Appl Meteor*, 34(1): 121-130.
- Weather Modification Association, 2009. Weather Modification Association (WMA) position statement on the environmental impact of using silver iodide as a cloud seeding agent[EB/OL]. WMA; [http:// countyofsb. org/uploadedFiles/pwd/Content/Water/WaterAgency/WMA%20AGI_toxicity. pdf](http://countyofsb.org/uploadedFiles/pwd/Content/Water/WaterAgency/WMA%20AGI_toxicity.pdf)
- Williams B D, Denholm J A, 2009. An assessment of the environmental toxicity of silver iodide-with reference to a cloud seeding trial in the snowy mountains of Australia[J]. *J Wea Modif*, 41(1): 75-96.
- World Health Organization, 2004. Guidelines for Drinking-Water Quality; Recommendations[M]. 3rd ed. Geneva; World Health Organization; 434.