

液氮消冷雾微结构的演变分析

黄 庚 关立友 苏正军

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要: 液氮已广泛用于外场的人工增雨和消雾, 是“十五”人工影响天气攻关研究和推荐的催化剂之一; 其优势在于价廉, 对环境无污染, 资源丰富, -8°C 以上成冰率高于 AgI。文章介绍用液氮在首都机场的消雾试验, 讨论和分析了消雾前后雾微结构的演变。对地跨北京 14 个区县, 持续 48h, 能见度最低时达 20~30m 的气团平流雾连续播撒液氮, 35min 后下风方 4.8km 的测站出现冰雪晶, 形状以柱状为主, 平均浓度为 0.35 个/ cm^3 。冰雪晶的出现破坏了雾的胶性稳定性, 能见度很快得以改善, 水平能见度增加到 300~600m。

关键词: 液氮 冷雾 微结构 人工消雾

Microstructure Characteristics of Cold Fog Before and After Artificial Seeding LN.

Huang Geng Guan Liyou Su Zhengjun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The results of field experiment in 17—18 Dec. 1997 and indoor little cloud chambers experiment conducted by Weather Modification Institute of Chinese Academy of Meteorological Sciences and Peking University in 1994—1995 are analyzed. It is shown that whether indoor or in the field, liquid nitrogen is an ideal catalyst because it obviously affects the visibility well.

The microphysical structure observed at a site shows when successively seeding liquid

资助项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA610A-06)、国家自然科学基金(40205001)及人工影响天气联合开放实验室课题

收稿日期: 2004年12月20日; 修定稿日期: 2005年12月15日

nitrogen into the natural super-cooled fog whose horizontal visibility is 50—100m and number concentration is $1206/\text{cm}^3$, ice crystal will appear at the leeward side of the observation station about 4.5—5km after 35 minutes, it is mainly columnar, and its mean concentration is $0.35/\text{cm}^3$. The appearances of ice crystal disputed the stability of fog colloid structure, and changed the visibility well. When liquid nitrogen was seeded the second circle, wind direction turns to 210° — 240° (NNW), no ice crystal appeared, concentration of fog drop decreased a little, small one decreased, and spectrum turned wide.

Key Words: liquid nitrogen (LN) artificial dissipation cold fog microstructure

引言

我国用于人工影响天气的 AgI 年消耗数吨,但其活化优势主要在 -8°C 以下, -6°C 以上不如致冷剂,且对水质和土壤还存在着污染;因此,人们一直致力于寻找其替代品。

液氮 (LN, 下同) 是一种致冷剂,是制氧过程的副产品,其资源丰富,制备、存储容易,价廉,对环境无污染,是“绿色催化剂”。其沸点 -196.8°C ,汽化潜热 $9.96 \times 10^4 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,膨胀系数 600,成冰率 $10^{12} \sim 10^{13}$ 个/g^[1,2],与干冰、液态 CO_2 相当,在 0°C 以下均可使用^[3,4]。储液器内循环造成的压差很方便使液体喷出,使用时比干冰、液态 CO_2 安全方便,被广泛用于人工增雨和消雾外场试验^[5],是“十五”人工影响天气攻关项目中研究和推荐催化剂之一。

本文通过介绍播撒 LN 前后气团平流雾的演变,分析讨论 LN 消冷雾的效果。

1 资料

1.1 仪器及观测

测站在机场气象楼顶平台,距地约 20m,离作业线路 1 线 4.5—5km。监测仪器有电动三用滴谱仪、显微镜、录像机、冷台等。取样片面积 2.0cm^2 ,暴露时间为 0.06s,采样显微录像。冰、雪晶样片置于

空旷场地自然沉降,面积 18.7cm^2 ,暴露时间约 2min,显微录像。

1.2 资料及说明

由于受录像仪的限制,采集冰雪晶资料时,停止采集滴谱。滴谱、冰雪晶资料皆为现场录像后期读出。表 1 为 LN 消雾前滴谱资料,样片 12 个,显微镜视野面积为 0.0044cm^2 ,相应采样体积为 0.635cm^3 。冰雪晶样片共 21 个,采样时连续录像,资料随机读数,即 30s 读一次,约 5min (近 10 个视野) 1 组 (表 2)。单位视野面积与雾滴谱资料相同,其相应采样体积与冰雪晶下落速度有关,下落速度与形状、尺度、密度等有关。按 C. I. Davis 的经验公式: $U = Ad^B$,得下落末速为 $2.96 \sim 59.3\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均为 $31.2\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,即采样体积为 16.5cm^3 。

2 雾的微结构演变分析

2.1 播撒前的自然雾

消雾前 (17 日 20 时) 层结: 54m ~ 293m ~ 461m,相应温度为 $-3.5^\circ\text{C} \sim -5.0^\circ\text{C} \sim +7.0^\circ\text{C}$ 。逆温层顶高 464.6m,逆温强度为 $5.8^\circ\text{C}/\text{hm}$;雾厚平均 254.6m,最大超过 350m。能见度 50m (高速公路: 20~30m);地面风向 NNE;风速 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;机场、高速公路关闭。

表1 播撒LN前 (1997.12.18.05: 50~07: 13) 的雾滴谱 (数浓度: (个/cm³))

时间	d (μm)																Σ (个/cm ³)			
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34		36	40	46
5: 50	387	496	298	131	47	19	9													1387
5: 59	315	395	277	114	46	42	13	11		4	3		7							1227
6: 04	243	343	294	192	148	87	55	39	39	38	19	4	4	3	3	3				1514
6: 07	255	375	283	187	117	76	38	16	6	6		2	2	2		2	5			1372
6: 11	230	339	285	197	126	71	39	19	16	8	2	2								1334
6: 15	266	351	268	109	77	55	44	24	8	4	4			7	7	3				1227
6: 22	217	375	254	88	46	30	9	6	13	12										1050
6: 45	243	351	260	69	57	33	16	11	8			2	2	1		1	1			1055
6: 50	302	259	268	99	46	25	24	16						3	3	7		7		1159
6: 55	243	250	257	107	90	52	36	31	22	19	11	8	8	3					3	1137
7: 09	206	214	274	118	54	43	28	19	11	4				3						974
7: 13	230	330	213	131	115	63	35	16	6	2				2	2				2	1047
平均	261	340	269	128	81	50	29	17	11	8	3.4	1.5	1.9	2.0	1.3	1.3	0.5	0.6	0.4	1206

表2 播撒LN后 (1997.12.18.08: 08~09: 13) 的冰雪晶谱 (数浓度: (个/cm³))

时间	柱状	针状	六角片状	帽柱状	Σ (个/cm ³)
08: 08	0.091	0.036	0.012		0.139
08: 14	0.097	0.018	0.018		0.133
08: 18	0.212		0.012		0.224
08: 25	0.103	0.024	0.006		0.133
08: 30	0.267	0.018	0.012		0.297
08: 36	0.303	0.012	0.018		0.333
08: 43	0.468	0.017	0.017	0.017	0.519
08: 50	0.400	0.001	0.030		0.436
09: 00	0.521		0.024		0.545
09: 07	0.566	0.013	0.054		0.633
09: 13	0.473		0.061		0.534
平均	0.312	0.013	0.024	0.001	0.350
各形状最小尺度	40μm×27μm	330μm×51μm	37μm	46μm×29μm	
各形状最大尺度	586μm×55μm	989μm×62μm	147μm	77μm×44μm	

作业前, 测站温度-4.5~-4.7℃, 无冰雪晶出现, 东北转东南风, 风力1~2m·s⁻¹, 能见度50~100m, 雾滴平均浓度1.7×10⁵/cm³, 谱宽4~46μm, 数密度975~1515个/cm³, 平均1206个/cm³, 平均含水量0.691g·m⁻³. 滴谱观测期间, 浓度随时间变小, 滴变大, 峰值由5~7μm变为7~9μm, 无冰晶。表1是5: 50~7: 13作业前的雾滴谱, 图1是其平均谱。

2.2 播撒后雾的微物理结构演变

消雾试验精心设计, 拟定了作业时间、

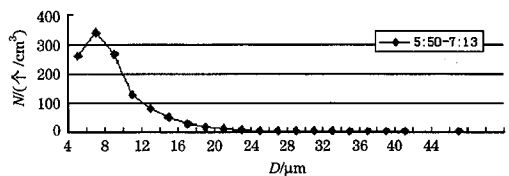


图1 消雾前 (5: 50~7: 13) 雾的平均谱

区域、路线、流程, 多种催化装置和运载工具、多仪器的宏微观特征观测。高、低空3道作业线: 1线在上风方跑道东侧的顺义东环岛向南7.5km的路段, 采用35枚30号系留气球携带液氮, 球间距130~150m, 形

成一条空中作业线，高度 30m，距机场跑道 4km，与跑道平行。2 线以 10m³ 液氮播撒车（采用 SD-5 型超声波撒喷头，喷高 22m），在机场东南构成。3 线以 2m³ 液氮播撒车，从收费站至三元桥。

07:30 开始作业，播后现场立即出现冰晶，35min (08:05) 后下风方 4~5km 的测站出现冰雪晶（图略），8:21 见太阳，8:50 出现冰晶粘连成的小雪花（图略），9:00 出现大雪花。冰晶出现能见度开始增加，随着雪花尤其是大雪花的出现、沉降，能见度从 100m 增加到 300m，迅速得以改善（见图 3 的 V₁）。冰雪晶平均 0.13~0.63 个/cm³，平面密度为 1.3×10³ 个/cm²，以柱状为主（89%），其尺寸：40μm×27μm~586μm×55μm，还有六角（6.9%）、针状（3.8%）、柱帽（0.3%）及不规则等形状。粘连成雪花的主要是柱状，此外还有针状；粘连的冰晶大小接近、形状相同，表明生长的温湿条件相同。依 T. Kobayachi 的实验结果，推断其形成的环境温度为 -3.0~-10.0℃，主要在 -5.0~-8.0℃^[6]。在此温度范围内空心柱的出现，其水汽的冰面过饱和度在 6%~8%，针状的过饱和度更大，达到 10% 以上，与庐山的试验结果一致^[7]。冰雪晶采样期间（08:08~09:13），测站温度回升（见图 3），-4.6~-3.1℃，除太阳辐射外，相变潜热释放是温升的另一因素。风向顺时针转，由 170°~190°，以东南风为主，风速 1~2m·s⁻¹，冰雪晶浓度随时间增大（如图 2），伴有过冷滴。作业共播撒液氮 9m³，地面积雪 0.5~1cm。

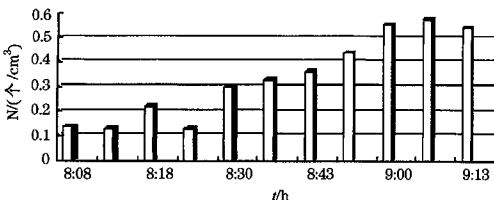


图 2 冰雪晶浓度随时间的变化

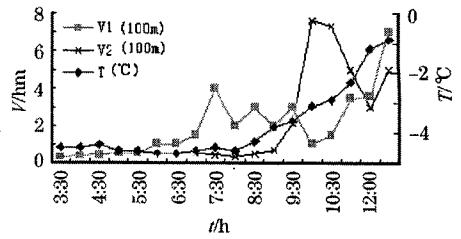


图 3 风场对能见度 V 的影响 (V₁: 播撒时风向变化, V₂: 播撒时为静风)

多次试验表明，风场是影响催化剂 (LN) 扩散的主要因素。风速小于 1m·s⁻¹，LN 约扩散 4km；1~2m·s⁻¹时，扩散 4~8km；3m·s⁻¹时，扩散约 10km。催化影响区与风向一致，与风速成正比。如图 3 的 V₂ 是静风时的 LN 消雾，播后 1h，能见度由播前 30m 增加到 700m，最好时达 1500m。作业仅几秒钟，作业点出现冰晶，见飘扬的冰晶烟羽，能见度变坏；5min 后能见度好转，20min 后见雪花，能见度迅速好转，9:30 见太阳。作业后约 10km² 的区域，维持了 87min，然后阳光模糊，11:40 时能见度回落到 200m，降雪 0.2mm。象首都机场这样特定空间欲不受雾的困扰，必须四周设防，风向转变时能适时调整，应有多种催化剂和作业方法。

2.3 冰晶源的扩散

冰晶的点源扩散方程^[8]：

$$q = \frac{Q}{8 \sqrt{(\pi k t)^3}} e^{-\frac{\omega^2 t}{4k}} e^{-\frac{\omega(x-h)}{2k}} e^{-\frac{(x-y)^2}{4k}} e^{-\frac{y^2}{4k}} \cdot (e^{-\frac{(x-h)^2}{4k}} - e^{-\frac{(x+h)^2}{4k}}) e^{-\alpha N_c}$$

其中 Q: 点源单位时间的冰晶生成率，q: 冰晶浓度，h: 源高，N_c: 雾滴浓度，ω: 冰晶下落速度，x、y、z: 三轴向风速，k: 湍流系数，t: 时间。

常压下 30 号系留气球装 LN 约 900g (点源)，LN 喷出迅速蒸发膨胀，膨胀系数 600，距喷口 1cm 处温度随时间递增，从开始的 -132℃ 上升到 -40℃ 约 56min，汽化率从开始的 31g·min⁻¹ 减少到 6g·min⁻¹，

56min内可保持同质自发核化的低温区域^[9]。在上风方,强低温凝华核化的冰晶源(线源,高30m),随风向下游扩散,测站(高20m)35min后见到冰晶,与风的水平输送($3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)距离相若,45min后见到从天而降的小雪花。冰晶源(线源)在随气流水平扩散的同时,随相变潜热附加的浮力缓慢向上运动长大并趋向夹卷扩展,到达稳定层(逆温层)底时水平扩散,大冰晶下落引起了下面增长,导致加热和接续的空气上升,携带的冰晶长到克服上升气流的尺度而下降,并合沿途的液滴或粘连其它的冰晶继续长大,落至地面。这个上升气流在过冷雾或云的广大地区有效地水平扩展的冰晶羽,帮助剩余冰晶下落增长,以反馈方式影响整个云雾体,扩散到整个空间,机场能见度得以改善。

2.4 播撒率

LN的用量: $M_j = W \& / nm_j$ 。 M_j 为催化剂用量(g), W 、 $\&$ 为催化对象的含水量和体积, n 为冰晶生成率($10^{12} \sim 10^{13}/\text{g}$), m_j 为冰晶质量(10^{-5}g), 雾含水量 $0.7\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 体积 $10 \times 0.3\text{km}^3$ 时, 一次消雾LN的用量约 $10\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

几年来,首都机场、高速公路消冷雾的试验中,播撒LN都会立即出现冰雪晶,随后出现雪花,能见度很快得到改善,作业时间与消雾效果的维持时间约1:1~2,即播撒1h,能见度的改善可维持1~2h。

3 小结

(1) 标准大气压下LN的沸点为 -196.8°C ,喷出汽化,造成局部水汽同质自发核化、气溶胶核化,产生大量冰晶。且

其资源丰富、价格低廉、使用安全方便、对环境无污染,是“绿色催化剂”,在 0°C 以下均可使用,成冰率达 $10^{12} \sim 10^{13}/\text{g}$,与干冰、液态 CO_2 相当,只要条件适宜,是催化剂的首选。

(2) LN是有效的冷雾、冷云催化剂,播后的明显物理效果是冰晶效应,产生雪花,能见度很快得到改善。风场对冰雪晶扩散的影响较大,播撒影响区与风向一致,且与风速成正比。作业时间与效果持续时间为1:1~2。

参考文献

- Morrison B. J. et al. A Laboratory Characterization of Dry Ice as A Glaciogenic Seeding Agent. Pre-prints Ninth Conf. On Weather Modification. Park City, Amer. Meteor. Soc. 8—9.
- 曹学成,王伟民. 液氮成冰作用和特征,液氮人工增雨技术,北京:气象出版社,1997:14~19.
- Fukuta. N., Project Mountain Valley Sunshine-Progress in Science and Technology. J. Appl. Meteor., 1996; 1483—1493.
- Vlasiuk, M. P. et al. Progress in development and the use of Nitrogen technology for artificial dispersal of supercooled fogs at airport, Proc. Sixth WMO Sci. Conf. on Weather Modification. Italy, WMO/TD 596, 1994; 665—668.
- 李大山,章澄昌,许焕斌等. 人工影响天气现状与展望,北京:气象出版社,2002:228.
- Mason B. J., 1971, 云物理学. 中国科学院大气物理研究所译,北京:科学出版社,1978; 264~267.
- 江祖藩,印文建. 自然雾中液氮成冰扩散的研究,液氮人工增雨技术,北京:气象出版社,1997:42~46.
- 北京市环保科研所. 大气污染防治手册,上海:上海科学技术出版社,1987.
- 秦长学,王伟民等. 系留气球携带液氮消雾技术的探讨,液氮人工增雨技术,北京:气象出版社,1997:125~129.