

# 中国人工增雨研究进展

张良<sup>1,2</sup>, 王式功<sup>1,2</sup>, 尚可政<sup>1,2</sup>, 杨德保<sup>2</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000 2. 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要** 随着全球气候变暖的加剧, 水资源短缺问题表现得越来越突出, 如何有效地开发利用空中水资源已成为人们关注的热点问题之一。本文回顾了人工增雨的发展历史, 概述了当今国内外人工增雨的发展状况, 归纳了各地区云状、积云特征、液态含水量、冰晶浓度等云物理特征, 并在此基础上对我国各地区尤其是西北地区的增雨潜力进行了分析, 最后归纳总结了人工增雨的常用手段、经验和检验人工增雨效果的方法。

**关键词** 人工增雨, 云物理特征, 效果检验

中图分类号: P481

文献标识码: A

## 引言

没有水, 就没有生命。然而与人类生活紧密相关的淡水却越来越匮乏, 淡水资源的短缺已成为世界性的危机。根据世界资源研究所(World Resources Institute, WRI) 2000年10月21日公布的一份报告, 到2025年, 全球至少有35亿人口, 将居住在缺乏农业、工业及生活用水的地区。在中国, 由于经济规模扩大和环境的恶化, 一些原来降水充沛的地区也面临着淡水短缺的威胁。目前, 中国有200多个城市缺水。北京市每年缺水10多亿 $m^3$ , 地下水位有的地方已降到30多m。深圳每天至少缺水10万 $m^3$ , 曾经出现过“水荒”。江河也缺水, 黄河连年出现断流。楼兰古城因为缺水, 只剩下几处断垣残壁; 罗布泊因为干涸, 成为生命禁区。那么, 如何解决淡水资源缺乏的问题呢? 一方面, 要节约用水, 提高水资源的利用率。另一方面, 增加可供人们使用的淡水总量, 即开发空中水资源。开发空中淡水资源是解决淡水短缺的有效途径, 不但可以加大地表径流量、增加库容、改善土壤墒情, 而且可以补充地下水资源, 使地下水资源不致枯竭。事实证明, 人工增雨能有效地开发利用大气中的淡水资源, 经济效益显著, 可以常年有计划地进行, 并可以与已有的

农田水利设施结合起来发挥更大的效益。为此, 对中国近年开展的人工增雨工作进行回顾, 为进一步开展人工影响天气工作提供有益的借鉴。

## 1 国内外人工增雨历程回顾

历史上人工影响天气可能是从与强雷暴等灾害作斗争开始的(Pausanias指出大约在小亚细亚就曾用弓箭进行过这种斗争)<sup>[1]</sup>。此后, 人们用迫击炮或火炮轰击雹云以便驱散它。直到1946年<sup>[2]</sup>, Schaefer在纽约州的Schenectady用播撒干冰的办法消雹增雨, 从此, 人工影响天气有了一个重大突破。一年后, 美国通用公司的Vonnegut发现了碘化银。

1965至1981年期间, 前苏联进行了约几十次人工影响天气试验, 从20世纪50年代开始, 在乌克兰进行了近30a的外场试验<sup>[3]</sup>, 试验面积达 $50\text{ km} \times 75\text{ km}$ , 试验结果表明: 对层状云催化, 可增加降水量30%~40%。美国从1972至1981年期间进行了约46次人工影响天气试验<sup>[4]</sup>, 其中一些比较大的试验<sup>[5]</sup>有农垦局的罗拉多河流域试验计划(CRB-PP)、南达科他州的突击计划、云捕捉者计划以及北达科他州的辅助计划。南达科他州的计划<sup>[6]</sup>有助于该州业务上的计划实施, 而北达科他州计划<sup>[7]</sup>则为该州的人工影响云计划(NDCMP)奠定了基础;

收稿日期: 2006-02-27 改回日期: 2006-04-26

基金项目: 科技部西部开发科技行动重大项目“祁连山空中水资源开发利用研究”(2004BA901A16)和国家自然科学基金项目(40375015)及博士学科点专项科研基金资助课题(200307300019)共同资助

作者简介: 张良(1980-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事干旱气候及水资源开发利用研究。

NOAA 的积云试验 (FACE) 地点在佛罗里达州南和加勒比海,其目的是研究热带云和进行人工增雨;NCAR 在科罗拉多州东北部进行的国家冰雹研究试验 (NHRE) 源自前苏联 20 世纪 60 年代早期高加索山区防雹试验的成功,目的是为研究暴雹和检验前苏联防雹假说,为美国的抑雹工作提供经验依据。除此之外,比较大的试验还有都市气象学试验 (METROMEX) 以及后来的塞拉合作试验 (SCPP) 和农作物人工增雨试验 (PACE) 等。1975 年<sup>[8]</sup>在日内瓦召开的第 7 次 WMO 会议上,决定实施增水计划 (PEP)<sup>[9]</sup>。

在人工影响天气的历史上, Climax 计划和 Israel I 系列计划有着重要的意义,尽管有科学家对这 2 个计划<sup>[10-15]</sup>产生过争论甚或异议,但是 Climax 计划仍然是少数在统计上具有显著性并获得物理解释的播云增雨成功试验之一,而且它标志着广泛进行播云增雨作业的开端。Israel I 计划是唯一被认可的人工增雨随机化交叉试验,1982 年 Science 发表了题为“35 年中唯一成功的播云”的文章,以该计划作为成功的例子,引导公众支持人工影响天气活动,促进当时一些国家增加经费,支持人工影响天气作业。

目前,全世界有几十个国家特别是干旱和半干旱地区的国家都在实施着 100 多个人工影响天气的计划<sup>[16]</sup>,其中美国有 40 多项,影响面积约 26 万 km<sup>2</sup>,居世界之首。不仅如此,从 20 世纪 60 年代初期以来很多国家如前苏联<sup>[17]</sup>、澳大利亚、阿根廷<sup>[18]</sup>、保加利亚、肯尼亚、瑞士、法国等都进行了大规模的防雹减灾作业。如瑞士的“Crossver such III”计划,肯尼亚的强劲作业都取得了很大成绩。

中国的人工影响天气工作始于 1958 年<sup>[19]</sup>,为了帮助农业解决“水”的问题,在当年干旱最严重的吉林省首先进行了人工增雨试验,取得了实效。从 1980 年<sup>[20]</sup>起,中国先后在吉林、内蒙古、陕西、宁夏、新疆 5 个省区进行了 2 个外场计划,完成了对这些地区云、降水微结构资料的观测、收集和整理工作。在台湾省,为了增加日月潭湖区的降水,以解决水力供电问题,进行了人工增雨试验<sup>[21]</sup>。近些年来,我国在华北京津冀地区、西北黄河上游河曲地区及“三江源”地区、黑河上游祁连山地区、新疆天山地区、东北辽河和第二松花江流域、华中“南水北调”丹江口水库区、长江中上游地区及国家生态建设重点地区实施以人工增雨(雪)为主的人工影响天气工程,建设现代化的人工影响天气作业基地。

从 1995 ~ 2003 年,全国人工增雨影响面积超过 300 万 km<sup>2</sup>,约占我国国土面积的 1/3,23 个省(区、市)开展了高炮火箭防雹作业,保护面积超过 41 万 km<sup>2</sup>,累计减免雹灾损失超过 340 亿元。全国 30 个省(区、市)的人工影响天气作业人员超过 3.5 万人。目前,我国的人工影响作业规模已居世界首位。

虽然中国人工影响天气的工作开展至今已有 40 多年<sup>[22]</sup>,但是对于灾害性天气复杂的变化规律,目前还知之甚少,人工影响天气工作也仅是刚刚入门,要真正达到更有效地影响天气,使它趋利避害,还需要经过长期的努力。

## 2 中国各地区的云物理特征和人工增雨潜力

经过多年的努力,人们终于认识到,人工增雨的基本原理就是将催化剂引入自然云<sup>[23]</sup>,促使其核化、繁生,逐步增大形成降水从而达到能够降水或增大降水的目的。而且,任何一种目的均在于增雨的播云对策<sup>[24]</sup>,即都要首先判别和研究自然云的特点,所以研究自然云云物理特征是人工增雨工作的基础。云物理特征包括宏观特征和微观特征。宏观特征包括云的外形、水平伸展、垂直伸展、生命史、云中温度场、气流场、含水量场等特征;云中粒子的大小分布和相态结构特征称为微观特征,如云滴谱、云滴浓度或数密度、云的含水量、云滴谱宽度、平均半径、立方平均半径、峰值半径等参数,以及云滴大小与云滴间距的比值表示云滴的自由路径。

表 1 是中国各地区春季和夏季的云状况以及中国部分地区和国外积云特征的比较。

表 1 中国各地区春夏季主要云状  
Tab. 1 The main cloud shapes in different areas of China in spring and summer

地 名	时 间	主 要 云 状
吉 林	4 ~ 5 月	As Sc
湖 南	7 ~ 8 月	Cu cong
江 西	夏季	Cu cong Cb Cu hum
北 京	夏季	Cu cong Cb
上 海	夏季	Cu cong Cb

由表 1 可以看出,吉林<sup>[25]</sup>地区 4、5 月份的主要降水来自层状云,其主要降水过程是凝华、淞附、碰并增长。湖南<sup>[26]</sup>7 ~ 8 月和江西<sup>[27]</sup>、北京<sup>[28]</sup>、上海<sup>[29]</sup>夏季主要以局部对流性降水为主,但是对于某

地点来说,浓积云的降水量比积雨云小得多,次数也少,平原比山区更显著,其原因是浓积云的降水强度弱、时间短、范围小,所以浓积云的含水量小,人工催化增加的雨量是有限的。

积云生命史是决定降水过程的主要因素之一,云顶温度是区分暖云、冷云的重要参数。而且,在不同的地理气候条件下,积云的宏观特征具有显著的差异。表 2 为中国的观测值同世界其他地区<sup>[30~35]</sup>情况的比较。

从表 2 可以看出,云底高度随纬度的变化不明显,但同各地气候的大陆性和海洋性有关。从海洋到内陆再到半沙漠地区,云底高度逐渐增大。由于云底高度的不同,加上地面温度随纬度的变化,形成了高纬度地区和干燥地区云底温度都较低的特点。大陆上的积云云顶高度随纬度增加而减小,浓积云的云顶温度随纬度变化差异很小,积雨云的云顶温度随纬度

增加而升高,又由于对流层顶向高纬度减低,其温度增高,不同纬度的积雨云云顶高度和温度的差异与其有密切关系。在表 2 中,为了解各地积云降水的宏观特点,选择了降水几率为 50% 的积云进行比较,以了解各地积云的差异。可以看出,升速减小、生命史延长,含水量减小,降水云厚也减小。按照碰并理论,升速减小,含水量增大,则降水云厚度减小。由于各地升速的差异在一个量级以上,而含水量差异不到 3 倍。因此,各地降水云的厚度主要决定于上升速度,上升速度越大,雨滴轨迹越高,降水云厚度也就越大。各地积云的外形相似,即浓积云狭厚(云厚大于云宽),淡积云、积雨云宽厚相当,且积云升速越大,生命史越短,各地积云的宽度相差不大,积雨云的宽度在高纬度地区比中纬度小,各地冰晶化产生时的云顶温度相差不大,约为  $-21^{\circ}\text{C}$  左右。

表 2 世界不同地区积云特征值比较<sup>[27]</sup>

Tab. 2 The cumulus characteristic values contrast in different areas of the world

地 名		列宁格勒	乌克兰	美国中部	新墨西哥	九江	波多黎各	夏威夷	
								海洋积云	地形云
纬度/ $^{\circ}\text{N}$		60	50	40	35	30	20	20	20
云底高度/km		0.9	1.7	1.6	3.6	1.3	0.5	0.6	0.6
云底温度/ $^{\circ}\text{C}$		8.8	8.5	14	7	21	21	20	20
云顶高度/km	浓积云	3.1	4.3			4.8	2.5		2.2
	积雨云	6~10	26	11		14			
云顶温度/ $^{\circ}\text{C}$	浓积云	-2	-5			-2	10		9
	积雨云	-48				-58			
浓积云降水	高度/km	4.5	6.0	7.5	8.7	7.0	3.0	2.4	2.1
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	-10	-17	-18	-24	-8	8	7	9
(降水几率为 50%)	厚度/km	3.6	4.3	5.9	5.1	5.7	2.5	1.8	1.5
	平均绝热含水量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	2.7		3.5	3.0	4.6	2.4		1.6
	升速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.0	1.5	3.8	4.0	4.5	1.8	1.0	0.25
	生命时间/min	90			25	20		30	>60
	冰晶化温度/ $^{\circ}\text{C}$	-22			-30	-22			

在我国北方地区,特别是西北地区,水资源缺乏是制约工农业生产的主要因素。然而,这些地区却有着丰富的空中水资源。表 3 是甘肃省临夏地区人工增雨气候背景的分析。根据天气学原理,云系的形成取决于充分的水汽输送和一定的热力、动力条件。而阴天的气候概率可在一定程度上反映该地区的成云条件,阴天气候概率大的地区,说明该地区天气过程频繁,成云条件好,水汽充沛。但这些云不产生降水的概率又有多大呢?为此,在统计各地阴天频率的基

础上,又计算了各地阴天非雨日频率,从另一方面它能大致反映云的自然降水概率。通过对阴天频率的统计分析,可以初步掌握各地的成云条件和多云天气的自然降水能力,从未产生降水的阴天非雨日资料估算人工增雨的可能性,例如,阴天频率大,阴天非雨日频率也大的地方,说明该地区成云条件好,但其自然降水概率小,就可以认为由云致雨条件差,潜在人工增雨可能性大。

表3 甘肃临夏各地不同天气出现频率<sup>[36]</sup>

Tab.3 The frequency of different weather occurred in Linxia of Gansu province

地名	阴天				阴天非雨日频率/%				小雨日频率/%			
	春	春-夏	夏	年	春	春-夏	夏	年	春	春-夏	夏	年
永靖	41.3	43.0	40.3	32.0	21.0	8.5	-2.7	9.4	19.1	31.3	35.9	20.5
东乡	43.3	46.0	42.0	36.0	11.5	4.1	-6.3	3.9	28.8	35.1	36.5	27.2
积石山	46.7	46.9	42.0	36.1	13.8	6.9	-7.1	4.1	28.2	33.6	34.1	25.8
临夏市	39.0	41.0	37.0	32.0	7.7	0.7	-9.3	1.3	27.8	34.1	36.6	26.0
临夏县	48.0	48.0	45.0	38.0	13.8	3.6	-7.8	3.7	29.0	36.0	40.0	28.6
和政	41.7	44.5	42.3	35.0	7.6	1.1	-6.1	1.9	30.1	35.7	37.3	27.9
广河	41.7	43.0	39.7	35.0	11.2	1.0	-7.3	4.0	27.8	36.4	37.2	26.7
康乐	41.7	44.0	40.7	34.0	9.7	0.5	-7.3	2.2	28.0	36.2	37.3	26.8

从表3可以看出,由春到夏,阴天非雨日频率大幅度减小,春季大多数地方都在10%以上,最大21%,春末夏初都<10%,夏季小雨日频率都大于阴天,这表明该地区夏季多以积云或局地对流性降水为主。因此,从人工增雨的可能性考虑,用高炮人工增雨为好,而且,从不同时期的小雨日频率分布看,由春到夏,小雨日频率不断增大,尤其从春季到春末夏初增加幅度最大,说明春末夏初是人工增雨潜力较大的时期。

陕西省也是水资源比较短缺的省份之一,目前现有的水资源<sup>[37]</sup>主要包括地表水(420亿 $m^3/a$ )、地下水(总量为155亿 $m^3/a$ ,可开采量为55亿 $m^3/a$ )、空中水资源量约为6700亿 $m^3/a$ 。若能达到世界公认的以色列人工增雨外场试验得出的增雨20%以上的结果,那么对陕西省的工农业发展将会起到重要的促进作用。

根据对青海省东北部地区3~5月的5a平均水汽输送量的计算<sup>[38]</sup>,在3~5月内其年平均水汽输入量为 $2312.7 \times 10^8 t$ ,水汽总输出量为 $2108.4 \times 10^8 t$ ,水汽净输入量为 $204.3 \times 10^8 t$ ,占总输入量的8.8%。说明在输入的水汽中只有 $204.3 \times 10^8 t$ 变成降水或

留在作业区上空,其余变成过路水移出青海省。

从上述分析结果可以看出,在西北的部分省份或者部分地区空中水资源比较丰富,人工增雨潜力较大,若能在加强农业基础设施建设的同时,积极开展人工影响天气工作,对进一步增加农业抗御自然灾害的能力、缓解水资源短缺及加快农业发展具有重要意义。

此外,除了上述云的外形等宏观特征之外,云中的液态含水量、云滴浓度和云滴半径等微观特征也能够反映云物理特征。华北地区在春秋季节,既受江淮气旋、黄淮气旋东移的影响,又受到频繁出现的冷锋、蒙古气旋、黄河气旋等降水系统的影响。对上述不同天气系统云中液态含水量(LWC)分布特征的分析结果表明<sup>[39]</sup>,冷锋、蒙古气旋等天气系统云中LWC一般为 $0.03 \sim 0.36 g \cdot m^{-3}$ ;江淮气旋、黄淮气旋天气系统中LWC一般为 $0.03 \sim 0.25 g \cdot m^{-3}$ 。对所取资料的统计分析得出,液态含水量最大值为 $0.36 g \cdot m^{-3}$ ,平均值为 $0.057 g \cdot m^{-3}$ 。与国内外一些地区观测情况进行比较可看出(表4),云滴分布特征为大陆性和海洋性共同影响,但主要表现为大陆性层状云特征。

表4 国内外云物理特征参量

Tab.4 The parameters of cloud physics characteristics in different areas

	$C_{LW \max}/g \cdot m^{-3}$	$C_{LW}/g \cdot m^{-3}$	$T/^\circ C$	$H/km$	$N_c/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D/\mu m$
新疆	0.11		< -16	2.0	182	7
吉林	0.17		-5 ~ -9	3 ~ 6	207	4 ~ 9
陕西	0.24		> -12		65	
哈尔滨		0.031	6.7 ~ -42.7	1.0 ~ 8.0		
山东	0.36	0.057	-3 ~ -15	4.0 ~ 5.5	58	9.8
英国	0.40		-2 ~ 2	1.2	300	6 ~ 7
加拿大	0.15		-5	2.5	200	17
纽约	0.21		2.9	1.5	350	9.9

注  $C_{LW \max}$  液态含水量最大值;  $T$  温度;  $H$  海拔高度;  $N_c$  云滴浓度;  $D$  云滴直径



在华中地区,浓积云顶高度最高可达 8 000 m 以上,最低约为 2 700 m,最大频率出现在 5 000 m 左右,占 23%;云顶温度的变化范围较大,在 +10 ~ -20 °C, +5 ~ -1 °C 之间占 22.3%, < -10 °C 出现的次数较少。由此表明,华中地区的浓积云滴谱很宽,大滴谱很宽,大滴浓度相当大,在发展并不旺盛的 Cu cong 中,顶部直径在 50 μm 以上的滴浓度可达 1 ~ 10 个/cm<sup>3</sup>;且含水量大,厚度不大的云中,顶部含水量可 > 1 g · m<sup>-3</sup>,也曾多次观测到 2 g · m<sup>-3</sup> 以上的平均含水量,一般情况下,对含水量贡献最大的多为直径 40 ~ 80 μm 的云滴。

在华北地区,根据 2D - C 探头取得的冰晶资料统计表明,河北地区上空层状云中冰晶浓度较山东省高,山东省最大浓度值较低,仅为 52.6 个/L,与国内部分地区的观测结果比较(表 5),可以看出华北地区云水自然转化效率地区差异大,河北省较高,山东省冰晶浓度偏低,云水的自然转化效率较低,应适量播撒冷云催化剂,增加冷云中的冰晶浓度,使更多的云水转化为雨水。

表 5 国内部分地区冰晶简况

Tab. 5 The ice crystal situation over some areas of China

	吉林	河北	山东	西宁	北京	兰州
平均浓度/(个/L)	26.2	15.6	13.9	3.6	75.9	11.1
最大浓度/(个/L)	222	562	52.6			
平均直径/μm	130	59.3				

在华南地区,春季与夏季之间的时期是降水的主要季节,受西太平洋副热带高压的控制,夏季也是阶段性干旱的多发季节;夏季之后的冬半年往往降水较少,形成秋冬的干旱性气候<sup>[40~41]</sup>。在夏旱期间,高云和中云不出现降水,无人工增雨条件,Sc、Cb、Cu 云都有一定的人工增雨条件,其中降水时间在 1 ~ 5 h 之间,过程雨量为 1.0 ~ 5.0 mm 的云具有充分作业时间,自然雨量又较大,作业机会和作业时间易掌握,是旱季作业比较适合的作业云。在华南地区的各种天气型中,较有利于人工增雨作业的是西风槽前型和台风型,其次是副热带辐合带型和南海高压型。

由上述分析可以看出,我国大部分地区都具有一定的增雨潜力,西北地区和东北地区春季降水主要以层状云降水为主,南方地区夏季降水多以浓积云和积雨云为主,华南地区夏季由于受西太平洋副热带高压的影响,常会形成干旱天气,可以充分

利用有利的天气形势,掌握当地的云物理特点,把握时机进行人工增雨作业以缓解旱情。

从上面的分析还可以看出,全国许多地区对云物理条件的观测还比较缺乏,资料不够系统和全面,但是随着科学技术的迅速发展,雷达<sup>[42~54]</sup>、卫星<sup>[55]</sup>和微波辐射计<sup>[56]</sup>等先进的观测手段和仪器的使用,会使人们对云物理状况的认识更加全面和深入,为更有效地实施人工作业奠定基础。

### 3 人工影响天气的一些作业方法和手段

人工影响天气的作业方法和手段是多样的,目前人工影响天气的主要方法,是使用恰当的工具将催化剂引入云体影响其微物理过程。对于冷云通常是播撒人工冰核,暖云通常是播撒吸湿核。冷云催化剂主要有 3 类:(1)致冷剂:干冰、液氮、丙烷等;(2)无机成冰物质:碘化银、硫化铜、碘化铅等;(3)有机成冰物质:介乙醛、间苯三酚、乙酰丙酮铜等。在暖云作业中常用的吸湿性物质有盐粉、氯化钠、尿素、硝酸铵等。催化剂的选择和使用比较复杂,需要根据当地的云物理状况和作业目的而定,同一地区不同的天气情况下作业方法也不尽相同,因此,现就常用的一些作业手段和注意问题作总结。

#### 3.1 盐粉作为凝结核进行人工增雨

盐粉多用来作为人工增雨和消雹的药剂,中国长江以南地区多用此方法。盐粉进入云里,一方面吸收水汽,一方面与云滴碰并,不久就可形成水滴。

对于播撒盐粉<sup>[57]</sup>来说,首先要考虑的是剂量和播撒部位问题。剂量是由许多因素决定的,如云的厚度、含水量、垂直气流、云的整个结构以及药剂所起作用的性质等等。由于很细的盐粉撒在云的下方可以由气流带上去,因此撒在云的下部就可以了。

#### 3.2 用干冰、液氮和碘化银进行人工增雨作业

(1)干冰的作用是直接促使云中形成冰晶。正如盐粉作业时一样,云的厚度、气流强弱、起伏的大小等一系列云中参数的变化,完全可以造成干冰剂量上好几个数量级的差别。撒干冰一般用飞机,或者是用火箭将其带入云中。

(2)碘化银<sup>[58~60]</sup>由于成核率高,总体性能好,是目前我国实施人工增雨使用的主要催化剂。碘化银的成冰能力(即在什么温度下可以起到冰核作用)与颗粒的大小有关。碘化银的使用剂量远比干冰和盐粉要小,应当注意碘化银旧配方只有当过冷

云水温度  $< -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时才有效,我国研制的新配方能在  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  时有效<sup>[61]</sup>,而且作业时,需要用飞机、高炮或气球将药剂带入云中发烟。

(3) 液氮作为冷云催化剂,具有冷冻成冰效率高,催化阈温高,使用保管方便,无污染,经济实用等优点。然而由于其沸点太低( $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),蒸发太快,所以实际对云(雾)催化作业时,在播撒层蒸发很快,因而影响距离短,对比较深厚的云(雾)层不能充分有效地催化。针对这一问题,国内的人工影响工作者通过研究寻找高效适用的载体<sup>[62~63]</sup>和引进先进的播撒设备<sup>[64~65]</sup>等方法使这一问题得到解决。

### 3.3 用高炮进行人工增雨作业

用高炮进行人工增雨方面,根据西南地区  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度分布特征的分析结果可提供以下参考:

(1) 作业点高度与炮弹型号的选择,作业点海拔高,则可选择中期爆炸型号的炮弹;反之则需要选用长效爆炸型的( $13\sim 17\text{ s}$ )炮弹。

(2) 不同季节应有不同的炮弹种类。

(3) 夏、秋高炮作业要采用合理的射角,以便炮弹能进入  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度,若达不到此高度,也要选择积状云上升气流强烈的云区作业。

此外,还有用飞机播撒四聚乙醛<sup>[66]</sup>催化增雨、地面燃炉等作业方法和手段,在此不一一详述。

## 4 人工增雨的效果检验

各国对增雨效果的统计检验普遍采用随机试验和非随机试验2大类试验设计。Changnon<sup>[67~69]</sup>认为人工影响天气的效果评估经历了一个从依赖统计检验,强调随机化试验到重新注重经验证据,学会如何正确设计作业方案,探索物理因子同统计检验结合为一体的试验研究和业务性作业的大轮回过程。从统计学观点看,随机试验的结果更加客观可靠,但由于周期长,投入大,尤其要求放弃一半左右的增雨机会,因而不适合以抗旱蓄水为目的的人工增雨作业。所以目前我国的人工增雨作业基本上属于非随机试验设计,常用的人工增雨效果检验的方法有3种:统计检验、物理检验和数值模式检验。

### 4.1 统计检验

统计检验是以降水量为统计变量,对实施增雨作业后的实测雨量与统计推断出的如未实施作业雨量之间的差值进行统计检验,找出由于降水的自然变差和估计值的随机误差引起的差异可能性的大

小。若这种可能性很大,认为人工催化效果不显著;若这种可能性很小,例如  $< 5\%$ ,则认为人工催化效果显著。这种可能性的大小通常称为显著性水平。

### 4.2 物理检验

20世纪80年代以来科学界对效果检验,要求获取实施作业后的物理证据,即要检验催化所引起的云系的微物理变化,如冰晶和降水粒子增多,云中温度和上升速度的变化等,被称为物理检验。随着对云降水的复杂性和多尺度性认识的深化以及探测技术的发展,物理学检验在人工影响天气作业效果检验中的权重将逐步加大。

### 4.3 数值模式检验

数值模式检验建立在云和降水宏观动力过程、微物理学过程及人工影响天气原理基础上,针对不同问题,建立一套描述云和降水过程的方程组,采用适当的差分方案,利用计算机来求解。该方法能用计算方法预测催化的效果,指导作业和效果检验的方案设计。随着人们对云和降水自然规律以及人工影响天气机理认识的逐渐加深,数值模式检验会得到进一步的完善。

经过多年的努力,国内有的地方建立了自己的效果检验系统<sup>[70~73]</sup>,在具体问题的解决方面,我国的人影工作者近年来做了一些有益的尝试<sup>[74~76]</sup>,并且注意到了依靠雷达回波、PMS资料<sup>[77]</sup>等物理证据支持统计结果。然而目前还没有一种检验方法能够使人们完全信服,科学界倾向于将这几种方法结合起来,因地制宜研究和采用科学的、客观的、可行的物理学—数值模式—统计学相结合的作业效果检验方法,并使之得到广泛应用。

## 5 结 语

我国的人工影响天气工作开展已近50 a,在人工增雨、云和降水的数值模拟、微观物理观测、云微物理学、云动力学等各方面取得了一系列研究成果,积累了中国各地区的人工增雨工作资料和经验,一些地区总结出了较为适合该地区人工增雨的途径和方法。然而,总体看来,人工影响天气的发展还不够完善,还有许多有待进一步研究的地方。为了能够更加科学、合理、有效地开发空中水资源,使人工增雨和人工影响天气工作得到更进一步的发展,需要在以下几个方面继续加强试验和研究:

(1) 加强对云物理基础的研究。我国的人影工作比较偏重于能有效防止和减少气象灾害的技术研

究,其中也包含一些服务于技术研究的应用基础研究,而对于作为人工影响天气基础的云降水物理学研究,如云与降水粒子的辐射特性、冰晶核化增生过程、云凝结核和凝结增长过程等云微物理过程的研究则比较缺乏,今后应当加强;

(2) 加强先进观测仪器的使用。卫星、雷达、微波辐射计等先进仪器的使用可以增加对云微物理状况资料的获取,从而进一步加深人们对云物理学的认识和研究,同时还对选择作业时机和效果检验提供依据;

(3) 加强数值模式的发展和研究。目前的数值模拟仍然有许多不足之处,需要在动力学、微物理学以及多尺度相互作用方面继续改进,通过试验和模拟,进一步了解认识各类云的多尺度特征及其分布,了解云降水物理过程,为实施作业提供判断依据;

(4) 加强对催化剂使用的研究。目前碘化银在人工增雨等作业方面的作用还无法取代,但是其对有限的银资源的使用和由于多年增雨而积累的对人们的潜在危害令人们非常关注。所以,一方面要加强新型高效催化剂的试验和研究,一方面对其他催化剂的使用方法进行改进,使其在某些天气状况下可以替代碘化银;

(5) 研究适合各自区域特点的、客观实用的、统计学方法与物理学方法相结合的效果检验方法。

#### 参考文献:

- [1] Roland List. 云物理学和人工影响天气[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.5-8.
- [2] Braham R R Jr. 为改善物理认识而设计播云试验[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.29-34.
- [3] 蔡庆梅. 苏联人工影响天气简介[J]. 内蒙古气象,1996(6):24-30.
- [4] 1981年各国人工影响天气计划登记表. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.310-317.
- [5] Lewis O, Grant William R cotton. 1975~1978年期间人工影响天气的评述[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.9-17.
- [6] Smith P L, Harold D, Orville Bruce A, et al. 杨建忠译. 达科他州人工影响天气研究现状报告[J]. 山西气象,1990(增刊):83-95.
- [7] Mielka P M. 人工影响天气试验的设计与评价[A]. 史国宁等译. 大气科学中的概率统计和决策[M]. 北京:气象出版社,1991.212-221.
- [8] Roland List. 增水计划的意义和目的[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.39-41.
- [9] Dennis A S. Changing perceptions of the Israeli weather modification program[J]. J Wea Mod, 1996(28):83-85.
- [10] Hobbs P V, Rangno A L. Comments on the Climax and Wolf Creek Pass Cloud Seeding experiments[J]. J Appl Met, 1979, 18(9):1233-1237.
- [11] Rangno A L, Hobbs P V. Further analyses of the Climax Cloud seeding experiments using NOAA published data[J]. J Climate Appl Met, 1987, 26(7):757-762.
- [12] Rangno A L, Hobbs P V. Further analyses of the Climax Cloud seeding experiments[J]. J Appl Met, 1993, 32(12):1837-1847.
- [13] Rangno A L, Hobbs P V. A new look at the Israeli cloud seeding experiments[J]. J Appl Met, 1995(34):1169-1193.
- [14] Nirel R, Rosenfeld. Estimation of the effect of operational seeding on rain amounts in Israel[J]. J Appl Met, 1995(34):2220-2229.
- [15] Levin Z. Numerical simulation of dispersal of next seeding material in Israeli using a three-dimensional mesoscale model[J]. J Appl Met, 1997(36):474-484.
- [16] 郑国光. 21世纪人工影响天气科学技术展望[J]. 国际地震动态, 1997(7):14-19.
- [17] M. T. 阿伯沙耶夫. 1981-1990年苏联防雹作业的效果[J]. 新疆气象, 1997, 20(4):60-62.
- [18] Sanc J L. 岳鹏译. 前苏联防雹技术在阿根廷的应用[J]. 新疆气象, 2000, 23(3):42-43.
- [19] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [20] 游来光, 马培民. 北方人工降水水资源研究进展[A]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[C]. 北京:气象出版社,1989.1-2.
- [21] 粟庆飞. 1951~1978年台湾省人工影响天气活动[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1985.305-309.
- [22] 王致君, 刘黎平, 龚乃虎. 人工影响天气的回顾与展望[J]. 高原气象, 1999, 18(3):361-366.
- [23] 申亿铭. 过冷层状云中飞机播撒催化剂的扩散问题[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.17-19.
- [24] Gagin A. 播云技术[A]. 人工影响天气新进展[C]. 北京:气象出版社,1982.49-51.
- [25] 游来光. 吉林春季层状云中降水元增长条件的研究[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.1-3.
- [26] 郭恩铭, 马培民, 孙奕敏. 1962年8月在湖南省用盐粉催化浓积云降水的试验[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.30-33.
- [27] 胡志晋. 江西九江地区夏季积云的宏观特征[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.97-107.
- [28] 郭恩铭, 陈雪琴. 北京地区夏季雷雨云活动的雷达探测[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.52-62.
- [29] 许焕斌. 上海地区雷雨云下气象要素的变化与雷雨云发展状态的关系[A]. 气象科学技术集刊[C]. 北京:气象出版社,1982.64-69.
- [30] Mason B J. The physics of clouds[M]. Oxford University Press, 1971, § 6.3, § 8.9.
- [31] Battan L J, Braham R R. A study of convective precipitation based on cloud and radar observations[J]. J Met, 1956(13):587.
- [32] Squires P. The microstructure and colloidal stability of warm clouds[J]. Tellus, 1958(10):256-262.
- [33] Squires P, Warner J. Some measurements in the orographic cloud of the island of Hawaii and in the trade wind cumulus[J]. Tellus, 1957(9):475.
- [34] Battan L J. Radar Meteorology[M]. Chicago:University of Chicago Press, 1959, § 10



- [ 35 ]Changnon S A ,Bigler S G. On the observation of convective clouds and the radar - precipitation echoes within them[ J ]. Bull Amer Meteor Soc ,1957 38( 5 ) 279.
- [ 36 ]贾效忠. 甘肃临夏地区人工降雨气候背景分析[ J ]. 灾害学, 2000 21( 83 ) 34 - 36.
- [ 37 ]樊鹏. 人工影响天气工作在西部大开发中大有作为[ J ]. 陕西气象 2000( 4 ) :42 - 43.
- [ 38 ]德力格尔, 黄彦彬. 青海省东北部地区春季空中水资源潜力分析[ J ]. 高原气象 2002 21( 6 ) 623.
- [ 39 ]张连云, 冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[ J ]. 气象, 1997 23( 5 ) 3 - 7.
- [ 40 ]夏丽花, 冯玲, 曾光平. 福建省干旱概况及夏旱期间人工增雨条件分析[ J ]. 应用气象学报 2003 14( 3 ) :143 - 150.
- [ 41 ]吴兑. 广东人工影响天气的回顾与展望[ J ]. 广东气象 2003 ( 4 ) 43 - 46.
- [ 42 ]王昂生, 杨蕴玉, 朱文琴, 等. 雨滴谱雷达联合观测结果初析[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 50 - 51.
- [ 43 ]薛震刚. 数字化雷达定量测量降水及其结果的订正[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 132 - 138.
- [ 44 ]毛伟康. 广州地区夏季对流云的雷达回波参数与降水强度的关系[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 154 - 157.
- [ 45 ]王鹏云, 孟繁喜, 郝日钟, 等. 从雷达资料看气旋冷锋降水的一些特征[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 167 - 171.
- [ 46 ]洪延超, 徐乃璋, 王昂生. 北京地区中尺度系统的雷达观测研究[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 172 - 178.
- [ 47 ]迟竹萍, 张苏平, 冯桂利, 等. 数字化天气雷达回波资料在人工影响天气工作中的处理应用[ J ]. 成都信息工程学院学报, 2001 16( 2 ) :119 - 122.
- [ 48 ]Vonder Haar T H. 气象卫星资料在人工影响天气试验的设计、作业和评价中的应用[ A ]. 人工影响天气新进展[ C ]. 北京: 气象出版社, 1985. 90 - 96.
- [ 49 ]孙海燕, 肖辉, 王振会, 等. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估[ J ]. 南京气象学院学报 2005 28( 2 ) :172 - 179.
- [ 50 ]冯桂利, 迟竹萍, 王以琳. 多普勒雷达图象资料在人工增雨决策指挥中应用研究[ J ]. 山东气象 2005 25( 1 ) :1 - 4.
- [ 51 ]白卡娃, 杨昌年, 宋娟, 等. 南京周边地区夏季对流云降水的雷达回波特征与人工增雨[ J ]. 气象科学 2005 25( 2 ) 206 - 211.
- [ 52 ]朱龙彪, 何彩芬, 黄思源. 宁波新一代天气雷达在人工增雨中的应用[ J ]. 气象 2005 31( 7 ) 59 - 61.
- [ 53 ]李金辉, 陈保国, 罗俊颖. 陕西省中北部人工增雨适宜时段及层状云特征[ J ]. 气象科技 2005 33( 1 ) 87 - 90.
- [ 54 ]李云川, 张文宗, 王建峰, 等. 数字化雷达人工影响天气作业指挥系统[ J ]. 气象科技 2005 33( 3 ) 264 - 266.
- [ 55 ]李大山, 石定朴, 郝新江, 等. 静止气象卫星水汽图像的分析和应用( 一 ) [ J ]. 应用气象学报, 1998 9( 2 ) :186 - 195.
- [ 56 ]朱元竟, 胡成达, 甄进明, 等. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[ J ]. 北京大学学报( 自然科学版 ), 1994 30( 5 ) :597 - 606.
- [ 57 ]胡志晋, 潘在桃. 催化层状云降水的盐粉粒度问题[ A ]. 气象科学技术集刊[ C ]. 北京: 气象出版社, 1982. 118 - 122.
- [ 58 ]Geoffrey E Hill. 冬季地形云中使用飞机释放碘化银的扩散试验[ A ]. 人工影响天气新进展[ M ]. 北京: 气象出版社, 1985. 101 - 107.
- [ 59 ]申亿铭. 碘化银炮弹在过冷层状云中爆炸后催化剂的扩散问题[ A ]. 气象科学技术集刊[ C ]. 北京: 气象出版社, 1982. 27 - 29.
- [ 60 ]张国庆, 德力格尔, 张加昆, 等. 黄河上游地区边界层特征与地面碘化银催化条件及时机的研究分析[ A ]. 青海省黄河上游人工增雨文集[ C ]. 1999. 141 - 146.
- [ 61 ]胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[ J ]. 应用气象学报 2001 12( 增刊 ) :10 - 13.
- [ 62 ]齐颖, 汪学林, 郑娇恒, 等. 人工影响天气液氮载体的筛选[ J ]. 吉林气象 2004( 1 ) 32 - 37.
- [ 63 ]齐颖, 汪学林, 郑娇恒. 新型液氮载体外场催化试验[ J ]. 吉林气象 2004( 3 ) :12 - 15.
- [ 64 ]陈保国, 陈争旗, 樊鹏, 等. LC 播撒设备研制与播撒试验[ J ]. 陕西气象 2004( 6 ) :17 - 19.
- [ 65 ]樊鹏, 余兴, 雷恒池, 等. 液态二氧化碳( LC )播撒装置应用研究[ J ]. 应用气象学报 2005 16( 5 ) 685 - 691.
- [ 66 ]汪祖凡, 黄永隆, 蒋根旺, 等. 飞机播撒四聚乙醛催化降雨试验分析[ A ]. 气象科学技术集刊[ C ]. 北京: 气象出版社, 1982. 39 - 45.
- [ 67 ]章澄昌. 当前国外人工增雨防雹作业的效果评估[ J ]. 气象, 1998 24( 10 ) 3 - 8.
- [ 68 ]Changnon S A. A perspective on weather modification evaluation[ J ]. J Wea Mod, 1986( 18 ) :1 - 5.
- [ 69 ]Changnon S A ,Cambright W H. Experimentation involving controversial scientific and technological issues ; weather modification as a case illustration[ J ]. Bull Amer Met Soc , 1990 71( 3 ) 334 - 344.
- [ 70 ]德力格尔. 青海省人工影响天气综合指挥系统[ J ]. 气象, 1997 , 23( 2 ) 32 - 35.
- [ 71 ]叶田, 田秀芬. 淄博市人工影响天气效果检验系统[ J ]. 山东气象 2001 21( 1 ) 34 - 36.
- [ 72 ]何国富, 张若汉, 廖如育, 等. 南宁地区人工增雨效果分析[ J ]. 广西气象, 1991 12( 2 ) 52 - 54.
- [ 73 ]李大山, 李延红, 林松. 人工降水作业时机选择的专家系统[ A ]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[ C ]. 北京: 气象出版社, 1989. 92 - 95.
- [ 74 ]高树俊. 一种人工增雨效果评估简便设计方法[ J ]. 山东气象, 2003 23( 4 ) 39 - 40.
- [ 75 ]房彬, 肖辉, 王振会, 等. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用[ J ]. 南京气象学院学报 2005 28( 6 ) :739 - 744.
- [ 76 ]王吉宏, 班显秀, 袁健, 等. 人工增雨效果检验方法概述[ J ]. 辽宁气象 2003 19( 1 ) 31 - 34.
- [ 77 ]周德平. 国内外人工影响天气科研业务动态[ J ]. 辽宁气象, 2003 19( 3 ) 20 - 23.



## Review of Researches on Rainfall Enhancement in China

ZHANG Liang<sup>1 2</sup>, WANG Shi - gong<sup>1 2</sup>, SHANG Ke - zheng<sup>1 2</sup>, YANG De - bao<sup>1 2</sup>

( 1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China ;  
2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China )

**Abstract** : Under the background of global warming, the water resources shortage has become more and more prominent, and how to develop water resource in the atmosphere has been a focus for many people. The history of weather modification was reviewed and its present development home and abroad was summarized in this paper. The cloud physics characteristics of different areas was summed up, including the shape of cloud, the characteristics of cumulus, liquid water content, ice crystal concentration, etc., and based on it, the potential of rainfall enhancement in Northwest China was analyzed. In the end, the means of artificial rain making and its effect evaluation was introduced also.

**Key words** rainfall enhancement ; cloud physical characteristic ; effect evaluation

( 上接第 72 页 )

## Advances in Detecting Aerosols with Mie Lidar

XIA Jun - rong ZHANG Lei

( College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University ; Key Laboratory of Western China's  
Environmental Systems ( Ministry of Education ), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China )

**Abstract** : The advantages of lidar on detecting aerosols and the methods for solution to Mie lidar equation were summarily introduced in this paper. The major studies and the remaining problems on detecting aerosols with Mie lidar in recent two decades were also discussed.

**Key words** lidar ; detecting aerosols ; Collis slope method ; Fernald method ; Klett method

万方数据  
WANFANG DATA