

国外人工影响天气与大气 污染研究的新进展

·江西气象科技·

增 刊

1988年9月

目 录

第一部分 人工影响天气

一、云和降水物理学研究最近的某些进展	(1)
二、伊利诺斯州人工影响天气计划—PACE	(6)
三、1986年伊利诺斯州人工影响天气试验的设计	(11)
四、美国西南部合作计划1986年增雨试验的设计方案	(17)
五、保加利亚人工影响天气的科学项目	(19)
六、防雹科研工作的现状和前景	(21)
七、意大利——南斯拉夫防雹计划	(27)
八、1957年以来,几次业务消雹计划的效果分析	(29)
九、德国南方防雹试验的结果及检验	(36)
十、作物雹灾保险资料表明的北达科他州消雹工作的效果	(37)
十一、十四届冬季奥运会期间萨拉热窝机场和滑雪坡道消除过冷却雾的试验	(44)
十二、检查人工影响冬云经济效益的价值	(49)
十三、干冰的表面温度	(52)
十四、使用示踪物验证飞机穿云产生冰晶粒子的提法	(55)
十五、碘化银对冰晶成核菌的作用	(59)
十六、美国人工影响天气法四十年	(62)
附: 华北麦区人工降雨潜在产量效益的初步探讨(摘要)	(67)

第二部分 大气污染

一、大气化学和大气污染	(69)
二、一种能连续实时测定雨水化学成份的自动雨量计	(73)
三、日本列岛上空对层云中CO ₂ 的飞机测量	(81)
四、气象学在大气污染研究中的应用	(86)
第一章 大气污染气象学的作用	(86)
第二章 空气质量管理	(86)
一、本底污染	(87)
二、排放	(105)
三、空气污染的传输	(105)
四、空气质量特性	(106)
第三章 空气污染常规监测对气象情报、站网和资料处理的要求	(108)
一、引言	(108)
二、气象站网	(108)

	三、风.....	(108)
	四、大气扩散.....	(108)
	五、混和层高度.....	(109)
	六、粗糙度长度.....	(109)
	七、除去和转换过程.....	(110)
	八、污染物排放的有效高度.....	(110)
	九、排放率的变化.....	(110)
	十、长期估计.....	(110)
	十一、气象(输送)数据库.....	(111)
	十二、空气污染预报.....	(112)
第四章	方法与模式.....	(112)
	引言.....	(112)
	三、物理模拟.....	(113)
	三、气象模拟.....	(114)
	四、区域尺度模拟.....	(114)
	五、模式的应用.....	(115)
	六、模式的可靠性.....	(115)
	七、模式的管理应用.....	(115)

云和降水物理学研究最近的某些进展

关于云微物理学的知识已有相当提高，尽管在定量的细节方面很多微物理机制还没有认识。目前大气科学中很多突出问题的解决需要认识云和降水物理学的一些过程。

在过去15年，飞机观测积累了大量微物理资料，但是，对一些重要的大尺度过程的认识仍然处于早期阶段。

下面分几方面对云和降水物理研究近来的发展做些介绍。

一、云滴核化

在凝结核上云滴是多相（非均匀）核化形成的。但是，为了研究核化的物理和化学过程，需要研究均匀核化。

用膨胀气室对水汽在凝结核上核化增长的测量结果与理论计算的扩散增长结果基本一致。

云凝结核是大气气溶胶的一部份。现已研制出一种新的仪器可以鉴别云凝结核和非云凝结核。发现城市污染空气中一半以上的气溶胶粒子没有核化作用。

根据飞机测量资料，对大气气溶胶粒子的尺寸、组成和形态进行了研究，发现云凝结核谱有三种类型：海洋型、大陆型和过渡型。云凝结核浓度与气团的存在时间有关，而且受云变化的影响。云凝结核物质即有无机物，也有有机物。

二、云滴增长和降水形成

1. 凝结和混合作用

混合是云和环境空气的相互作用，对凝结有重要影响。最近的研究集中到实际云开放式环境以及在凝结增长阶段混合作用影响问题。两个最基本的研究课题是混合过程的性质和卷入空气的来源。一些研究表明云和环境空气在较大尺度上相互作用，卷夹空气和云空气在几百米的尺度上进行不完全混合。不完全混合可看做云外空气和云内空气的相互掺杂。研究还表明，云顶卷夹是主要的混合机制。

关于混合是否促进云滴增长，目前有不同看法。一种看法认为混合不能促进云滴增长，另一种看法认为干空气卷夹进入上升气流区促进大滴的产生。

混合对云的微物理特性影响的一些关键问题目前还不能做出明确的回答。随着研究工作的不断深入，对混合过程以及它对云微物理特性的影响将能做出较为明确的回答。

2. 并合作用

云滴的撞并增长是降水形成的决定性阶段。近几年已经发现在大陆和海洋气团中都存在超大粒子，它们的尺寸通常为40—160微米，浓度为1个/升—1个/米³。在并合作用中它们起并合核的作用。这种并合核在夏季降水形成中起重要作用。

关于通过并合作用大云滴的产生问题，过去用动力学方程对随机过程的处理因为没有考虑并合产生的空间不均匀性而使对大云滴的增长做出过高的估计。随机并合过程的进一步研

究可借助参数化方法。参数化使变量减少,可以把并合增长的微物理计算合并到多维云模式中去。

关于扰动的作用,通过研究发现,即使是较强的扰动对云滴间碰撞加强的影响也是较小的,因而,扰动加速大滴产生的概念已不再使用。

关于云滴被大云滴或雨滴碰撞的碰并效率,已经做了一些实验测量。有的学者指出,由于小滴和大滴间的轻触弹回,碰并效率比采用刚性球假设计算的效率低30—50%。模式计算发现撞并中有效碰并率小于65%。当云含水量是1克/米³时,云滴通过撞并增大到雨滴尺度(直径0.5毫米)大约需要20分钟。

3. 降水滴的相互作用

降水滴谱的变化不仅受并合作用的影响,也受降水滴相互作用的影响。这些相互作用导致部份水滴并合和分裂。通常认为滴谱宽度由小降水滴间的“自我碰撞”随机过程决定。对降水滴自碰撞的测量发现云中电荷促进并合作用,而且伴有水滴分裂和巨滴(直径160微米)的产生。巨滴可做为并合核,因而可增强撞并过程。

大雨滴(直径不小于2毫米)和小雨滴(直径在0.4毫米以上)间的碰撞可导致雨滴的碰撞分裂。对碰撞分裂已进行了一些模拟研究。大多数学者认为雨滴的碰撞分裂使暖云并合的雨滴尺寸受到限制(雨滴直径小于2.5毫米)。但也有些观测表明暖云降水的雨滴可大到5—8毫米。雨滴碰撞的另一影响是引起雨滴颤动,从而影响其正常形状。关于雨滴颤动进行了风洞测量和模式研究,结果比较一致。

4. 滴谱

指数型滴谱是根据水汽凝聚和沉积等稳定过程得出的。然而,实际滴谱通常是不稳定过程造成的。因而需要把传统的指数型滴谱扩大为包括更多参数的滴谱。有的学者根据降雨率的观测提出三类滴谱。对小于2毫米/小时的降水用马歇尔—帕尔默指数型谱,对大于25毫米/小时的降水使用斜率相对不变的指数型谱,对中等降水率使用做过并合和碰撞分裂修正的滴谱。

三、冰粒子核化

冷云降水通常由贝吉龙过程启动。在过冷云滴占优势的水汽环境中,冰晶通过扩散迅速增长。贝吉龙过程对冰粒子浓度反应很敏感。冰粒子浓度随冰核的本底(背景)浓度而变化,也随控制次级冰粒子产生的一些因子而变化。冰粒子核化对冷云降水是很重要的,也是增加冷云降水的关键因子。

关于原生核化,近年来进行了一些实验研究和理论研究。例如用蒙特卡洛方法研究冰粒子的粘接、融化和核化。通过过冷蒸馏水的重复核化实验研究冻结时间的变化。在垂直风洞中用生物冰核研究悬挂水滴的冻结,研究接触核化和浸入核化的差别。

冰核测量是冰粒子核化研究的重要方面。用连续流扩散云室,静态扩散云室,混合云室测量大气中和云中的冰核浓度。关于冰核来源,认为粘土是主要源,生物源的证据还不充分。因而还没有被承认。

关于原生核化问题,目前只是进行了一些探索性工作,还不能得出明确的结论。

次生冰核化的研究工作主要集中在对哈利特—莫索普(Hallett—Mossop)机制产生的次生冰核化产物方面。一些实验研究表明次级生成物与结霜表面温度有关而不是与空气温度

有关。霰间碰撞不产生结凇碎片，霰与冰晶碰撞可形成碎片。通过实验还发现存在产生次级生成物的其他机制。

次级生成物中有一类是飞机产生的结冰粒子。形成机制可能与飞机结凇或绝热冷却有关，但未必是由飞机排气中的成核物质引起。

四、冰粒子增长和降水

关于冰粒子增长的研究，主要是研究通过云粒子碰撞，冰晶的增长。冰胚可通过捕获别的冰晶（聚集）或通过与过冷云滴碰撞（结凇）而转化成大的降水粒子。

1. 冰晶和雪片

关于冰晶增长和雪片形成，进行了一些理论和实验研究。现已从理论上计算了柱状冰晶增长的静电场、热力场和水汽场，对平面六角形冰晶也从理论上进行了计算。现已研制出新的风洞用于研究雪片的生长机制，它可以模拟研究各种形状和大小冰晶的增长。可以模拟出2毫米的枝状冰晶和超过4毫米的雪花。卷云观测资料分析表明冰晶的性状和谱型随温度而变化。降雪粒子的观测表明在云中除-15℃层附近外，冰晶的结凇增长超过扩散增长。水饱和状态下的一些测量证明雪花的形成是由于冻滴的撞并。

降雪和冰晶增长过程是很复杂的。这方面的研究工作刚刚开始。我们现在只是对个别物理机制有了一些定量的认识，更全面的认识有待进一步研究。

2. 霰和雹

关于霰的理论和实验研究，主要是研究结凇的启动机制，毛毛雨滴与柱状冰晶和平板冰晶的碰撞。飞机结冰也是霰研究中的一个方面。风洞实验和高山自然云中的实验表明在干增长条件下冰粒子可以撞冻结凇。

关于霰的形成，有的学者认为来自冻滴（直径不小于300微米）。但是，云中这样大的滴出现在冻结高度以上用现有的凝结一并合理理论是不能解释的，需要进一步观测研究。研究还表明低密度的霰可能是有效的撞冻增长中心，进入湿度大的环境会经受突发的增长跃迁。

对冰雹的研究主要是对雹块结构和物理特性的研究，还有对雹谱的研究。现在已可用水平风洞模拟雹块的干湿增长。再现自然雹块的特征。风洞冰化实验表明结晶方向与冻结方式有关，而不是与表面粗糙度有关。用显微镜对结凇冰的晶体结构进行分析发现结晶与环境温度和沉积、霰有关，而且受加热后的缓冷作用（“退火”）影响。同位素分析方法也用于雹块分析中。

对雹块的质量、密度、下落速度和结构进行了测量，也通过模式计算研究雹块增长轨迹和雹块终端速度的关系。从加拿大阿尔伯特塔风暴的观测得出一些雹谱，它们都是指数型。

五、雾、层状云、地形云

为研究纽约州的辐射雾进行了雾—82计划。所研究的问题包括雾的发展阶段，垂直混合和平流作用，液态含水量和雾滴谱的变化。科德角海湾区平流雾的研究表明空气和海水间的较大温差是风驱动的上涌流的表现结果。在海洋上容易形成雾，因为对流能激发水汽的生成。

层状云的研究包括层云、层积云、高层云、卷层云的研究，也包括北极层云的研究。研究它们的形态和结构，研究它们的形成、发展和消散。

海洋层云的飞机观测表明云底和云顶的滴谱参数有很大不同，这表明有垂直混合存在。

云顶辐射冷却引起的对流可维持层云中的湍流混合。用湿对流模式对海洋上空层云形成的模拟研究表明对流驱动的水汽可在几小时之内使海洋表面低层饱和，表面层顶部水汽凝结冷却，使表面层上部的较暖干空气饱和，从而产生对流，产生逆温层。因此，层云云顶逆温不一定是层云形成的先决条件。

飞机观测和雷达测量也用来确定融化层的特征。研究表明，在 -5°C 附近，冰粒子浓度最高，约在 2°C 雪花被融化。

系留气球用于研究夜间层积云中空气的小尺度运动，温度脉动和微物理特征，发现向下的对流空气中存在较大的滴，认为可能是由云顶辐射冷却造成的。

卷层云和高层云的模拟研究表明，对卷云维持、辐射效应起重要作用，冰晶的下落速度决定卷云的演变，冰晶的性质和谱决定云中的水份收支。

关于地形云，主要研究了卷夹、辐射和一些微物理变化对地形云的影响。对未受卷夹显著影响的云，模式预报和观测结果比较符合。模拟研究还发现山地上部云通过扩散和结凝起“播撒”作用，使下部云（可以看做馈给云）降雪增强。这种增强依赖于山的高度，馈给云的厚度和风速。

六、对流云

关于对流云，进行了广泛的观测和模拟研究。

1. 观测研究

热带云团中冰粒子形状和谐的观测表明，积云中 -16°C 附近区域结淞是占优势的增長机制。在微物理学性质方面云团的层状云区不同于积云区。形状不定的冰粒子的存在说明有聚合作用发生。飓风中的冰粒子观测发现在 -2°C 层以上的所有上升气流中都有霰的存在。

一些学者根据多普勒雷达对雹暴的测量提出一些气流模式来说明霰和雹的发展。他们指出冰胚由聚合产生，聚合发生在上升气流核心外围的辐散区域。馈给云摄取冰胚并把它们带给新的单体，粒子下落速度和上升气流速度间的某种匹配使其增长到合适尺寸。

装用飞机对雹云的探测发现弱回波区没有降水粒子，在这里上升气流最大值可达 50米/秒 。在弱回波区边缘发现 4厘米 左右的霰。

关于云和降水粒子的发展，发现水滴主要在温度高于 -8°C 的强上升气流区，冰晶和冰聚物在液态含水量低上升气流弱的区域，在弱到中等上升气流区有中等浓度的霰。观测和计算表明小滴（直径小于 0.5毫米 ）来自合并增长，大滴来自霰和雹的下落。雹块的取样资料分析表明大多数雹块是在冻滴上形成的，而且在 -11°C 到 -19°C 之间有两个增长层。

根据对流云的观测和模式研究，现已鉴别出四种下沉气流：来自云顶不饱和空气的贯透下沉气流，由蒸发冷却和质量通量补偿引起的云边缘下沉气流，由对流过冲引起的过冲下沉气流，由降水粒子下泄、蒸发冷却、融化等降水下沉气流。

2 模式

关于云和风暴的模式研究，根据不同的研究目的提出了不同的模式，涉及的研究领域很广。其中包括关于深对流云形成和低空大气关系的研究，关于下沉气流机制的研究，关于在雪盖地面上对流和云形成的研究，关于深对流引起扰动气流的研究，关于对流云相互作用的研究，关于爬线雷暴特征的研究，关于龙卷发展阶段的研究，关于超单体旋转和传播的研究，关于雷暴外流相互作用的研究，关于风垂直切变作用的研究等。这些模式研究，加深了

对一些现象和过程的认识。现已认识到观测的大多数微下击暴流是由蒸发激励的,而且起源于云底附近。关于龙卷的模拟虽然还不够理想,还不能模拟出龙卷,但确实揭示了龙卷阶段的某些特征,低层气旋涡度明显增强,其附近有小尺度下沉气流,引起阵风锋的迅速卷入,垂直涡度来源于环境风切变的水平涡度,也可由低空入流产生。超单体雷暴的模拟加深了对雷暴动力过程的认识,中空旋转是由于与环境风切变有关的涡度,低空旋转与冷空气边界有关。风暴旋转产生的气压梯度使风暴向右传播。

七、锋面云

锋面云是产生大范围降水的云。对锋面云进行了观测研究和模式研究。

通过飞机观测锋面云中冰粒子向降水的演变发现云中水汽凝结体有五个不同的发展区。接近云顶是核化和扩散增长区, -20°C — -10°C 之间是聚合区, -10°C — -4°C 是冰晶增殖区, -4°C — 0°C 又是聚合区,高于 0°C 是融化和碰撞并合区。

关于冰粒子谱,尽管都可用指数谱,但观测发现锋面云的层状云区和对流云区的粒子谱是不同的。

关于云中的过冷水,微波辐射计和雷达测量表明锋前锋后云中过冷水分布不同。锋前云中过冷水分布与地形有关,锋后过冷水分布广且与对流有关。

云顶温度和云厚是重要的降水参数,它们可从天气分析上确定。锋前云的发展大多是由于低温产生的轻度结冻的冰晶。在锋后云中,冰晶是在有较多液态水存在时在较高温度形成的。

用多普勒雷达,飞机、无线电探空仪和地面台站网对冷锋的波状雨带进行研究,发现雨带垂直冷锋,认为波状雨带可能是切变不稳定引起的。锢囚锋的波状雨带几乎平行于云顶附近的风。认为被潜热释放加强的水平转动涡旋不能产生这种雨带。

八、一些建议

机载探测设备的进步使得能够测量云中粒子的大小和形状,使人们对云和风暴的微物理结构的认识有了很大提高。多普勒雷达、飞机对气流的观测和通过模式进行的研究使得对云和降水粒子演变的研究获得一些重要的成果。高速电子计算机促进模式研究的发展。但是,目前,基础实验仪器设备仍感薄弱。云物理和云化学的实验研究是很重要的,它是外场观测和模式研究的必要补充,而且是大气科学中的基础研究。需要改进现有的实验设备,研制新的实验设备。

通过对雷达、飞机和中尺度观测网观测资料的分析,结合云的模式研究,使得对云的认识取得很大进步,再加上实验研究,能更好地理解云的微物理特征。

云物理学与大气科学中的很多重要问题密切相关。例如对酸雨和核“冬天”的认识依赖于对云过程的认识。人工增加降水更是这样,确定播撒效果,选择最佳播撒方案都有待于对云过程的进一步认识。研究气候变化需要有关云辐射的认识。改进降水和强风暴的预报固然要依据中尺度动力学,但也需要云物理学知识。

关于云和降水物理学的研究方向认为有如下几方面。

1. 关于观测设备,要充分运用好现有的云和风暴的观测设备,并不断研制就地测量和遥感的新仪器新设备。

2. 使实验仪器设备现代化,从而改善复杂的微尺度相互作用的模拟和测量。

(下转第28页)

伊利诺斯州人工影响天气计划—PACE

S·A·Chanyon, Jr

一、前言

伊利诺斯州人工影响天气计划是联邦政府和州人工影响天气合作研究计划的一个组成部分,是在该合作研究计划的成果基础上进行。计划的组成人员包括中西部几所大学以及国家海洋大气局的科学家,计划是由中西部四所州立大学(伊利诺斯、印第安那、密执根和俄亥俄)以及伊利诺斯州水源勘测局(ISWS)和国家海洋大气局(NOAA)的科学家共同制定。

PACE计划的主要目的是确定能否使用某种方法使中西部夏季降水增加,以利于农业生产,特别是增加玉米和大豆的产量。把重点放在解决增加夏季对流降水有以下几个原因。

首先,农业研究结果表明,降水变化对谷物有很大影响,水文学研究表明,增加对流降水对水源也有重要影响。对这些“效应”类型的研究表明,在中西部对降水进行人工影响,效益最明显的是增加7、8月份的降水。尽管增雨对水源和其它方面有利,但增加夏季降水主要是对农业有利(Changnon和Huff, 1979)。

其次,过去十年来中西部各州一直在进行人工影响天气方面的努力,其中包括希望增加产量的农场主、农业综合企业和农业金融部门所做的工作。因而,州和大学的领导面临一个问题:人工影响天气是否可行?结果,中西部各大学的农业试验也都陆续参与了各种试验的设计与实施。许多农业方面人士认为,不管通过什么途径,若想使玉米和大豆的产量大幅度增加,要有更多的水源才行(Changnon, 1980)。

再一点,中西部科学家根据人工影响天气方面的成果认为,中西部人工增雨的科学依据虽未确立,但佛罗里达和南、北达科他进行的对流云人工增雨的结果却十分令人鼓舞,促进了在中西部进行人工增雨的信心,截止到1975年的一系列有意识和无意识人工影响天气的研究进一步支持了认为可以取得有效成果的乐观看法。例如,在圣路易斯进行的都市气象试验(METROMEX)表明,其中有一部分是由于对流风暴各部分的合并增强造成的在夏季降水由于城市而增加(Changnon等, 1981),这有助于建立增雨的假说。

最后,尽管近年来全国谷物产量很高,但仍然在努力设法使产量进一步增加以及逐年稳定,很明显,这是由于这些谷物有明显的经济效益,最终将使生产者和消费者获益。因此,对于中西部来说,研究任何一项具体方法的任何试验其最终目的都是要回答这样一个问题:能否使人工影响天气取得预期的有效成果?

二、背景情况

三十多年来,水源勘测局一直参与云物理学和降水的研究,这项工作其中就包括对人工影响天气问题做出明确回答。1970年水源勘测局与开垦局实施一项计划作为PACE计划的前奏(Changnon, 1973)。这一为期三年的计划对以下两个基本问题作了回答:1)在中西部

能否以适用的方式进行人工影响天气？2)人工影响天气能否使各行各业都满意？大气研究的有关问题包括试验设计、评价、降水测定、目标区外效应、云的研究(飞机测定和模式研究)以及气候学研究。在四个方面进行了效应研究：环境效应(例如水体中碘化银的数量和增雨对野生动物的影响)；法律方面(将产生控制和监督人工影响天气活动的州法律的雏型)；公众对人工影响天气的态度(对人工影响天气计划如何管理)以及经济效应。

PACE计划于1977年确立，如前所述，1976—1978年期间各类科学家评定了该项研究的必要性，并制定了有关PACE的计划。从州政府和联邦政府只获得了有限的资源，1978年海洋大气局开始协助进行有关气象学和天气效应的研究。在计划前期即1978—1980年海洋大气局提供了支持，以后(1981—1983)由州政府继续给予有限的支持。1984年4月匡会通过，由海洋大气局重又开始拨给资金直至今，迄今为止，国家海洋大气局为PACE计划提供资金总计约为180万美元，各州提供约100万美元。

三、PACE计划和现状

PACE有关的计划中(伊利诺斯州水源勘测局，1978)规定了PACE的目标：

- 1)确定各生长季天气条件下可能出现的降水变化；
- 2)确定可能出现的降水变化对农业各方面的影响；
- 3)确定社会经济和环境对天气变化的最终要求。

1978年公布的PACE的具体目标是：1)慎重实施有关对美国中部农业区的云进行人工影响的现场试验；2)详细记录人工影响后云动力学的变化及其物理学响应；3)建立理论的和数值的模式指导试验的进行和有关技术的转让；4)确定由暖季降水人工影响引起的目标区内降水的变化；5)确定人工影响天气引起的目标区外的效应。

图1(略)给出了中西部PACE计划试验区和有关地区。该计划包括三个核心部分：气象、农业和其它社会经济的及环境的影响。PACE计划分为三个阶段：1)试验前阶段；2)试验现场阶段；3)最后的评价阶段。图2给出了这些阶段及关键研究项目。第二阶段也即试验现场阶段又分为两个小阶段：A阶段是进行一系列的探索性现场试验，从中引出用于后一小阶段即B阶段(基本上为目标区确定性试验)的决策(和设计)。PACE计划中有两个关键的点，以决定是继续进行还是中止计划实施(参见图2)。

目前，PACE计划的试验前阶段已基本完成(见图2)，包括各种可行性研究，还包括回波—雨量气候学分析、各种假说的建立、社会—经济评价。从1978年至1985年间积累的结果可以得出以下结论：有必要也有可能在第二阶段的A阶段进行单个云人工影响及多个云试验。因此，1986年夏季将开始进行包括对单个云试验性播撒的首次现场试验。应该强调的是，由于资金有限，还只能是初步的试验，同时，人员和设施也很有限。但试验前阶段取得的结果十分令人鼓舞，部分地以佛罗里达某些云条件下成功播撒为基础建立的假说(Gagin等，1986)对做出继续进行第二阶段试验的决定起了推动作用。下文介绍了对试验前阶段某些关键研究及其主要结果的评述。水源勘测局在人工影响天气方面取得的一系列研究结果(1948—1978)中也起了作用(Changnon, 1979)。关于试验前阶段的详细计划可参见Changnon等(1980)。

四、基本气象学研究

试验前阶段的主要研究范围包括6个方面：1)天气条件；2)云的研究；3)降水的研究；

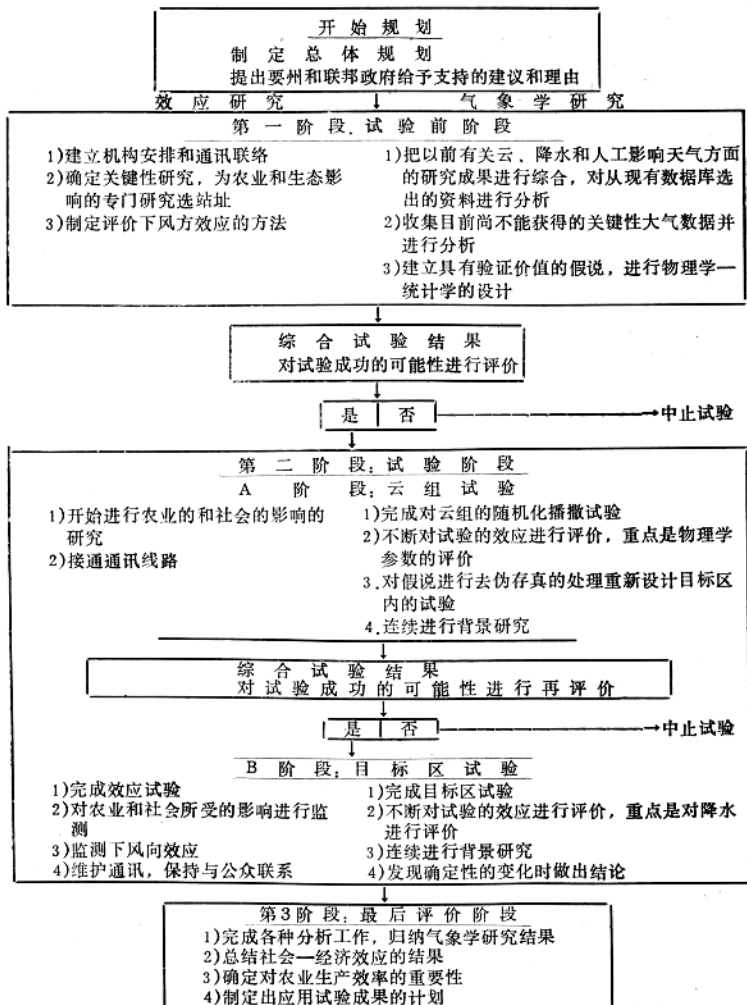


图2 PA CE计划进行过程示意图

4)计划的设计和评价;5)建立假说;6)制定PACE现场试验实施计划。在PACE计划的气象学研究开始前,回顾并总结了过去有关伊利诺斯夏季云和降水的全部研究结果(Changnon和Huff,1986)。

1. 天气分析以及预报因子变量和共变量

PACE计划的一个重要假说是,在不同的强迫功能或者说不同的“天气类型”下,引起7、8月份降水的“盛行云”变化很大。因此,大多数的有关雷达回波、降水系统和云特性的分析都包括对资料进行分类。METROMEX试验的结果支持了这种作法,它表明比较活跃的对流条件要比孤立对流更易进行增雨,Purdue的科学家和水源勘测局进行了与产生夏季降水的天气条件分型有关的一些研究。对使用地面和高空资料做现场试验作业的预报和试验结果的评价的情况进行了研究(Achtemeier,1980,1983a,1983b)。例如,当时确定了十一个关键的地面天气变量,可以解释目标区内降水 $\geq 2\text{mm}$ 降水时段中雨量方差的40%。

2. 云的研究

1973、1977、1978和1980年进行一系列飞机观测,收集了计划规定的云内(云底至 12°C)资料。对200多个对流云进行观测,对每个云观测中至少一次穿过 0°C 层和云底,对云内上升气流、液态水含量和各种水凝物进行了分析。大多数情况下,伊利诺斯的云具有很高的液水含量,并合过程相当活跃,并含有大量的活跃冰核(Ackerman和Westcott,1986)。研究工作还包括根据探测资料进行模式模拟(Semonin,1976;Ackerman和Sun,1985),并把伊利诺斯的播撒性与成功进行过云人工影响试验的佛罗里达和大平原的条件做了对比。对所有与PACE计划有关的夏季对流云研究的结果进行了全面回顾,以便于考虑这些结果与云内观测资料的一致程度(Westcott和Ackeiman,1985)。PACE计划1985年度报告中包括了对中西部对流云有关知识的详尽的总结。Hebrew大学的科学家对雷达测定的单体进行了分析,这样可以按雨量对各种云特性(增长率和高度)进行分析(Gagin等,1986)。

3. 降水的研究

为了向PACE计划的设计、作业和评价提供信息,对降水单元和降水系统进行两项重要研究。第一,分析了三个夏季的10—cm雷达资料,确定回波线、回波组(或云团)及单个回波(单体)的特性和统计值进行气候类型描述。第二,评述了各种卫星测定降水的方案,在试验期间卫星资料可作为目标区外降水资料使用。这项研究还包括在现场作业时使用卫星资料和短时预报的雷达资料(Kidder,1985)。对使用高级雷达测定云内播撒效应也进行了研究(Tameson,1985)。

4. 设计和评价

PACE计划的物理学和统计学的设计和评价方面包括对其他人工影响天气试验的关键因子的评价研究(Hsu和Huff,1985)。另一个研究的重点是统计学设计和物理学设计中的取样单位和试验单位(Changnon和Hsu,1980)。由于取样单位在第一阶段是关键问题,所以研究重点是针对单个回波和地面降水单体的特性(Changnon,1981)。单个回波单体按“成对”的回波进行分析(Hsu,1985b)。这些研究为所需要的测定系统及规定的若干年内试验工作采用的样本大小提供了各种指标。通过随机化方法对云回波和降水单体的变化进行了模拟分析,这将有助于确定出测定可能播撒效应的变化程度所需的样本大

小。

5、人工影响云的假说

试验前阶段各项基本研究工作之一就是应用过去的研究成果和本计划的成果建立人工影响云的假说。开始时考虑了几种假说(伊利诺斯水利勘测局, 1978)。这项研究已产生了一个具有十个步骤的动力播撒方法的假说(Ackevman, 1986)。这一假说中的某些步骤将是1986年开始进行的播撒效应试验中最先进行验证的部分。

6、实施计划的制定

基本气象学研究的第六个方面是制定PA CE的总体计划和各项实施计划, 制定了一个关于PA CE试验前阶段的详尽计划(Changnon等, 1980)。还制定了目标区内天气类型试验的初步计划(Changnon, 1983)。试验阶段(即第二阶段)的A阶段的设计工作正在进行当中。

五、人工影响天气的初步效果

PA CE计划中关于降水变化影响的研究是以1967—1976阶段的研究成果的评定为基础的(Changnon和Huff, 1979)。所需要的有关公众态度和环境评定的大多数结果可以得到, 但仍需要一个公众对PA CE本身种种反映的文件(Changnon和Ivens, 1979)。伊利诺斯州有案可查的关于人工影响天气的法律出现于1974年, 但1979年人工影响天气法律活动的低潮导致了1981年为寻求更新的修改法并使之生效而进行的频繁法律活动。需要以下四个方面的以现有研究成果评价结果为基础的研究工作: 建立大尺度农业经济模式; 新的谷物产量—天气之间的关系; 建立更为复杂的水收支模式以及将农业、水文和气象因子结合在一起以了解试验性的或业务性的人工增雨中存在的全部限制条件。

1. 农业研究

以前的农业研究已明确表明7、8月份雨量增加对伊利诺斯州主要谷物玉米和大豆产量增长(1950—1975年资料)的价值(Changnon和Huff, 1979)。但是, 不断变化的农业实践(技术)使人们对根据以前资料确定的天气—产量关系是否适用于80年代产生疑问。因此, 应用近年来的资料对产量—雨量关系进行了研究, 以确定最新的农业技术与天气之间是如何相互影响的(Holliinger, 1985)。结果表明, 70年末和80年代的产量要比这阶段以前的年份更易受天气变化的影响, 更进一步表明了增雨的价值, 甚至在6月份增雨也有很大价值。另一个研究是关于中西部谷物产量的增加对更大范围甚至全国的经济影响。为了模拟产量变化对农业生产、包括对外出口在内的需求量以及价格的影响, 研制了一个复杂的用于评定玉米和大豆生产效应的玉米带经济学模式。它适用于模拟不同范围和不同程度的天气变化以达到模拟经济影响的目的(Garcia等, 1985)。

2. 水源评价

对有关夏季增雨对水源(地上和地下水)的影响进行了研究(Changnon等, 1985)。确定了水文系统逐日监测夏季增雨量的重要性。正在研制一个水平衡模式, 其精细程度足以监测到5—25%的日雨量增加。同时, 对于暴雨过程对水的数量和质量的进行了研究, 还研究了一些特强的暴雨过程对PA CE计划评价工作的影响。

3. 试验结果的综合

(下转第16页)

1986年伊利诺斯州人工影响天气试验的设计

摘 要

本文描述了1986年农作物试验人工增水(PACE)现场计划情况的综述,并回顾了该试验的背景情况,总体目标、1986年具体目标以及1986年现场工作和设计的评价。总的说来虽然还需要进行一些适当的调整以克服一些料想不到的取样问题,但该设计还是令人满意的。

1、背景情况:

在被称为农作物试验人工增水(PACE)的伊利诺斯州人工影响天气计划之下,1986年7—8月在伊利诺斯州中部进行了初步的现场试验,根据以下几个方面进行了初步的设计,即:在农作物试验人工增水的指导下,1978—1985年进行了试验前的大量研究:计划以前由伊利诺斯州水源勘测局对中西部云的物理学和动力学进行的研究;伊利诺斯州对流降水的分布特点;以及其他研究人员在人工影响天气研究方面的研究结果,比如国家海洋大气局在佛罗里达的研究计划(FACE)和开垦局主持的对大平原进行的各种研究。

水源勘测人员(Changnon等人,1983,1985,1986)进行了一些更适合试验之前的研究,包括:

- 1)对中西部云特点的回顾和评价为在1986年试验提供了一些假设理论;
- 2)对试验区可用的雷达回波资料进行了广泛研究,获得了未播撒天气系统中对流降雨实体的时、空分布的有关知识和定量化信息(参着Huff,1987);
- 3)评价了云播撒试验的云污染问题;
- 4)就存在问题、失败与成功原因对过去云播撒计划进行了评定;
- 5)进行了一些与下述重要因子有关的天气气候学研究,比如:天气尺度风暴类型的分布、按风暴类型和一天中出现时间,7—8月份降雨天数的频率分布以及恶劣天气(暴雨、冰雹、陆龙卷、破坏性的风等等)的出现概率;
- 6)对飞机、雷达、天气预报设施、计算机和资料转换等项目的业务要求;
- 7)用于人工影响天气效益最终评定的农业模拟及水域研究;

1.1 农作物试验人工增水计划的目的:

1986年现场工作的实施说明了在1978年PACE计划文件中第二阶段的开始,这一文件规定了PACE计划的总体任务和目标,包括:

- 1)确定各生长季节不同天气条件下出现的降水变化;
- 2)确定降水变化对农业各个方面的影响;
- 3)努力了解社会经济和环境对天气变化的最终期望程度;

1978年文件规定的具体任务如下:

- 1)精心设计关于美国中部农业区人工影响云和增雨的现场试验;

2)提供有关人工影响天气引起云动力学及其它物理学反应的变化;

3)研制概念模式和数值模式来指导开发技术的最终转让;

4)确定暖季降水实体人工影响后引起的区域内降水的变化;

5)确定任何播撒造成的区域外影响的效应;

1985年和1986年初试验前阶段即第一阶段基本上完成,总的来说,这一阶段工作包括以前提到的与下述问题有关的一些研究,对根据伊利诺斯州和中西部人工影响云的成功经验确立的各种假说十分重要的全部可用背景信息的评价;适用于评价这些假设的设计标准的研制;以及一系列业务方法(设备要求、资料收集、转换和随机化技术等)的研制开发。

第二阶段主要是进行探索性的,如果取得成功,第三阶段就进行正式的试验,第一阶段过渡到第二阶段要求第一阶段的试验结果足以使人们相信此项研究工作应继续下去。

1.2 1986年的任务:

第二阶段现场试验的初步设计如下:

1)考察-10℃条件下播撒碘化银产生的云中反应以验证PACE动力播撒的各种假设,

2)收集资料以增加对中西部云的物理学和动力学的了解,收集水源勘测局实施的其它协作项目中使用的资料。

3)促进工作人员的兴趣以及积累进行人工影响天气试验的经验;

4)检验和进一步开发现场设施;

5)培养能指导和进行未来PACE现场试验的独立分队;

2、1986年试验的设计:

正如前文指出的,1986年试验的设计基本上以试验之前(第一阶段)的大量研究结果为依据,这些研究结果加上资金的限制决定了初步试验的方法及局限性,下文中简要概述了该设计的各方面情况。

由于PACE的最终目的是确定是否能对云和夏季降水进行人工影响以及如何和什么时间进行这一根本性问题,可以肯定除云物理研究外,1986年的试验应该包括对美国中西部典型的天气条件下云的实际播撒。然而据认为,不管样品大小如何,期望任何单个年份的试验就能引出决定性答案,反而需要有秩序有步骤地开发研制更密切适合于第二阶段A部分试验的基本原理、假设、定义以及分类方法,第一年主要提供学习的经验。

2.1 试验的详细介绍:

1986年整个的现场工作可以归结为“天气类型试验”(WTE),根据一系列天气气候学研究,1986年试验包括对4种天气型四处理(Changnon等人,1986),这里考虑了两种基本分区方法:按天气尺度天气条件和按弱对流,中等对流和强对流分类。虽然按对流分类最好,但是在1986年的业务预报需要可靠度的情况下用来规定对流等级所必需的信息不存在。由于这种不确切性,用下列4种天气尺度天气分类进行分区,因为这些天气类型可以预报得非常准确,并能为中西部暖季产生降水的系统提供理论上的分类(一个重要的科学研究任务)。这些系统包括:

1)冷锋云系——在地面冷锋150法定哩内出现的云;

2)静止锋云系——在地面静止锋位置的150法定哩内出现的云。

3)暖锋云系——在地面锋以南(暖区)的75法定哩内以及以北的150哩内出现的云;

4)气团云系——暖区中基本云系(暖气团系统)加上锋后150法定哩内的云系(冷气团云),冷气团云似乎没有什么用途。

天气类型试验定于7、8月份进行,因为这时中西部农业最需要增加雨量,试验在1200—2100 CDT(中白白天光照时间),这一时段进行正是对流的云最易出现时,天气类型试验包括两组子试验,这些子试验为“回波子试验”(ESX)和“云物理学子试验”(CPS)回波子试验包括业务型播撒试验,在雷达和香潘机场现场指挥部半径100英里内增长积云中-10℃高度播撒下投式碘化银烟火(安装在播撒飞机上)。

该设计还包括在恶劣天气条件下中止播撒业务的规定,同伊利诺斯州控制该州人工影响天气业务的法律所要求的那样,下列规定可以满足法律的要求和避免对公众和作业实施人员安全造成的危殆,这些规定包括:

——在恶劣天气警报区(由国家天气服务局发布的)或警报中包括的强对流系统100海里内不能进行播撒,甚至播撒目标再远一些也不能播撒。

——具有超过50,000英尺的雷达回波顶或者穿过对流层顶高度的云50海里范围内不能播撒。

——在回波速度超过35海里/小时和最大反射率大于45 dbz的云层50海里内不能进行播撒。

——在雷达气象学家根据回波增长过快确定的可能强对流区有冰雹征兆和(或)大风和陆龙卷特征时不能进行播撒。

在恶劣天气监视网所覆盖的区域允许进行播撒,然而,所有的成员均被告之,当出现这些天气形势时,要特别注意恶劣天气的发展可能性。

优先考虑云物理学子试验是因为非常需要获得更多的云物理资料来检验和调整最初的假设(如果必要),这些试验基本上是在7月份进行的,此时,装有进行云物理测量和云播撒仪器和设备的飞机才能使用。回波子试验工作主要是在8月份进行,尽管在7月份也进行回波试验飞行,但都是在不与云物理学子试验冲突情况下进行,根据中西部云播撒的基本原理并且使用有关的最佳情报,回波子试验包括增加雨量为目标的云播撒试验,因为1986年试验时没有雨量器站网资料可用,所以验证工作完全依赖于雷达回波分析。本文再一次强调,仅仅2个月的试验不可能获得统计显著的结果,但是积累可用资料的工作起步了,对未来ESX和CPS现场试验的进一步提高具有价值的情报开始收集了。

2.2 随机化过程

在天气类型内进行不同的随机化处理,用一个天气单元的Ag1进行播撒,另一个单元用空白对照剂进行播撒。当一个下午或下午中的一个时段出现了上文列出的四种天气类型之一时,那么这个下午或下午中某时段就称为一个天气单元(由实施计划的气象工作人员确定)除非实施计划的气象工作人员决定提前终止,一个天气单元一般应到2100 CDT终止。因此,如果1986年第一次试验中出现的天气类型为冷锋,第一个随机化处理的两个对比天气单元就能确定对这两个月试验期间的第一次冷锋和第二次冷锋的处理方法,如果第二次试验出现的是一个暖锋,那么第二个随机化处理的两个对比天气单元就能确定该暖锋和下一个暖锋的处理办法。

根据天气单元(几天或几天中的某一时段)而不是根据云或其它的对流实体进行随机化

处理的，以满足对适用试验方法必不可少的一些标准。这些标准如下：

1. 天气单元在物理学上是有意义的并且可以用天气类型进行分类。

2. 天气单元可实时地加以确定并且在播撒开始之前进行随机化处理。

3. 天气单元之间明显不同，所以没有理由怀疑对任何一个单元的播撒会影响对另外一部单元的观测；

由于个别的云或其它对流实体不能满足以上第二条和第三条标准，所以作出了不能用其作为ESX试验天气单元的决定，由于缺乏足够的关于播撒造成云与云之间的化学污染和邻近云动力发展引起的增效作用的资料，因此可以认为根据必须满足第3条标准的规定云不能用作为经验的天气单元。

当然以上天气单元（一天或者一天中某一时段）这种规定带来的问题是这样做使样本大大小于用单个云或对流实体作为天气单元（处理单元），再根据这种对比云对进行了随机化处理。后来在夏季计划中，对这一规定稍加修改，即根据计划指挥人员和当班气象工作人员的判断，如果天气单元之间在时、空上相距甚远而彼此之间相互污染的可能性极小的情况下，也可以在一天之内有一个以上的天气单元。

这样天气单元内的单个云单元也可作为CPS试验单元，业务研究表明，在某一天气单元（冷锋、暖锋等），中可以作为CPS试验单元处理的云体最多不超过6个。因此，在每一种天气单元中总共有6种可能的云处理，对播撒和未播撒的对比对的方式进行了随机化处理，为了把CPS试验期间所有可能出现的情况都考虑到，要对足够多的天气单元进行这样的处理。

为使2个月试验期间每种天气单元和整个样本的AgI和空白对照剂处理在数目上保持平衡，在ESX和CPS试验中用对比对方式进行随机化处理，所有的随机化处理都是在试验期开始之前进行的，随机化处理日程安排只有负责随机化处理的官员（Huff）和统计学顾问（Gabriel）知道，每天飞机播撒烟火剂的安排由一个临时协助工作的学生负责，由他帮助装配烟火箱并且把这些装好的烟火箱安装在播撒飞机上。只有在试验资料的最后统计分析后才公开随机化处理情况。

2.3 预报系统：

这次试验以及任何其它人工影响天气的试验的关键之一是要有一个组织良好、人员充足的预报单位，它能及时获得各种有用的天气资料 and 情报在安排的播撒作业之前就能提供最长为12小时的各种短期预报，在飞机起飞之前及时作出订正预报，并且在作业进行时对可能发生的天气情况进行监测。

因此，在设计1986年农作物试验人工增水（PACE）计划中，为了满足上述需要，具体规定了各种类的天气产品，这些包括：1)在Alden18传真机收到的国家气象中心（NMC）气象云图集选出需要的部分；2)从FAS604线路和NOAA/NWS公共产品线路上获得了基本数字和文字资料；3)接收实时GOES卫星云图并在图形显示系统上显示；4)NCAR提供了先进的自动化大气探测性能（CLASS）资料；5)水源勘测局雷达及辅助计算机系统的资料再上从附近NWS台站获得的专用RAOB观测资料就构成了1986年现场计划中用于预报：短时预报（订正）和监视天气条件的资料 and 情报。

2.4 CPS取样方法：