

人工影响大气 过程的物理基础

〔俄〕 Л.Г. Качурин

胡志晋 郭恩铭 译
张纪淮 申亿铭
申亿铭 校

气象出版社

人工影响大气过程的 物理基础

〔俄〕 Л.Г.Качурян

胡志晋 郭恩铭
张纪淮 申亿铭 译
申亿铭 校

气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书专门阐述对中尺度大气过程的物理学影响,分析了大气中水的热力学可逆和不可逆的相态转换及伴随的电学现象,建立了云和云控制理论模式,研究了激发对流、人工增加降水或改变其分布、防雪以及消云雾的可能性。本书还讨论了人工影响云中的电学过程、飓风和破坏电离层与臭氧层平衡的原理,论述了主动式和被动式无线电与光学雷达探测危险大气现象、人工对它们影响的结果以及危险的冰雪场的变形等等。原苏联国家教育委员会规定该书为高等院校本科生和进修班学员的教材,同时也供研究生和大气物理学、环境保护、航空、空间、海上和河流运输以及农业等领域的专家们参考。

Основаы Искусственного Воздействия На Процессы Атмосферы

Л.Г. Качурин Ленинград Гидрометеонздат 1990

人工影响大气过程的物理基础

[俄] Л.Г. Качурин

胡志晋 郭恩铭 译

张纪淮 申亿铭

申亿铭 校

责任编辑: 吴向东 终审: 顾仁俭

封面设计: 牛 涛 责任技编: 席大光 责任校对: 王 旭

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.875 字数: 390千字

1994年3月第一版 1994年3月第一次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5029-1469-2/P·0625 (课)

定价: 8.50元

译 者 的 话

人工影响大气过程是在研究云和降水的基础上发展起来的新兴学科。从狭义观点来看，它系指人工降水、防雹、消云消雾、削弱飓风和影响大气中的电过程等；从广义角度来看，一切人类生产、生活和科学技术活动中有意识的和无意识的对天气和气候产生的有利的（如造林绿化、水库的兴建等）和不利的（如大气污染等）影响都属于这门学科的范畴。

人工影响大气过程是理论性和实践性都很强的学问，它的发展既依赖于数学、物理、化学等基础学科的有关知识和基本理论，又与室内实验和野外试验密不可分。

随着工业、农业、交通运输业、国防事业和环境科学的发展，对防止和减轻大气灾害的要求日益提高。世界各国共同关注的大气质量每况愈下和人类赖以生存的水资源的匮乏都给人工影响天气科学提出了急待解决的问题。客观的需要正是这门学科的生命力所在。

从近代人工影响大气过程的科学试验开始算起，至今已有四十多年的历史（从早期算起已有一个多世纪了）。在这期间虽然发表了众多的著作和若干专著，但在Качурин教授的《人工影响大气过程的物理基础》一书问世以前，尚未出版过大专院校的专用教材，这本书正好满足了这方面的要求。《人工影响大气过程的物理基础》主要从物理学的观点阐述了人工影响大气过程的原理、技术和方法，一定程度上反映了现代人工影响大气过程所取得的成果、发展水平和存在的问题。该书的最大特点是基础广泛，涉及的知识面广，既有一定理论深度，又有相应的实践内容。

本书可作为高等院校相应专业的教师、研究生和高年级本科生学习的参考教材，也可供有关科技人员借鉴。

全书共分八章，分别由胡志晋（第2章和第4章）、郭恩铭（第5章和第7章）、张纪淮（第1章和第6章）和申亿铭（序言、第3章、第8章和附录）翻译，最后由申亿铭统校。

限于我们的水平，翻译不当和不确切的地方在所难免，请读者指正。

译 者

1992.3.1

序 言

人工影响大气过程已成为重要的学科之一。它是由下述情况促成发展：飓风、冰雹、灾难性的暴雨、雾、不同大气层生态状况的破坏、飞行器、地面和海上设施的积冰和电击以及其它危险的自然现象给国民经济带来巨大损失。因此不仅要研究预报这些现象的可能性，而且还要研究防止产生的可能性。同时，人工影响大气过程是提高产量、改善能见度、削弱危险现象等的有效手段。

影响大气的过程，同时也是认识自然规律的过程。在伴有理论分析的严格的控制试验中，大气对人工影响的反应是可以确定的，即在多大程度上人们建立的大气物理过程的概念是正确的，以及是否可能预报。此外还可以评价监测大气状态的信息测量仪器的可靠性和在人工影响的作用下大气的变化。大气是能够在其中成功地进行观测球状和枝状闪电、极光、自然界物体和飞行器的非热无线电辐射等许多独特现象的唯一实验室。

存在着一种随着科学技术的发展，自然现象支配人类的能力逐渐降低的观点，但是这种看法并不完全正确。当然，飞机的坚固性和发动机的功率是经常增加的，而对正在飞行的飞机起破坏作用的大气湍流和闪电的能量仍然和以前一样。骤然看来，人类在同自然界的相互作用中愈来愈具有优势。但是随着高速飞机和功率强大的火箭的出现，在云中人工起爆雷电的情况愈来愈经常，而在飞机接近它们之前却不出现电的活动。

在早期达不到的高度上完成飞行，现代飞机已开始进入具有高速度和强湍流的激流之中，在一定意义上对偏离标准的飞行条件变得愈发敏感了。即使由于结冰或雷暴作用引起空气动力学性

质大大变坏或无线电导航设备发生故障的时候，在轻引擎飞机可接受的气象条件下飞机仍可以继续飞行和完成降落，现代高速大型飞机装备了同结冰和静电化斗争的设备。但是飞机在云中荷电的几率要比自然的或飞机本身激发的闪电打击飞机的几率大得多。飞机结冰的速度减小了，但对空气动力学性质的灵敏度却增大了。按照过去的标准，高速飞机机翼支撑面和升降舵上不大的结冰都会引起它的可操作性急剧变坏，轮机结冰是一种新的、不常见的，但却是非常危险的现象。

同时注意到，现代飞机全天候飞行被认为是它的优点之一。无论控制飞行的仪器如何完善，在飞机着陆的时刻飞行员应当看见地面，并且飞行速度愈大，看到的距离也应愈远。在复杂的条件下完全自动化的“盲”着陆，目前在世界的任何一个航空站上尚无保障。1988年11月15日在Байконур宇航场上无宇航员的Буран号宇宙飞船的自动化着陆仅仅展示了实现这种着陆的原则可能性。

雾和起降带的结冰常常是飞机起飞和降落时的附加困难，飞机体积和速度的进一步增大使得引起惨祸的危险大大增加。1977年在加内群岛机场上的雾曾是两架飞机相撞的原因，其结果死亡了811人。

寻找有益的矿藏和利用定向爆破建造大型建筑，都同在比较弱、肉眼看不到的雷电放电的影响下雷管过早作用而发生的危险有关。

当先进的生产方法愈来愈依靠大气过程的时候，做为例证之一，现已产生了研制主动和被动的保护大气电影响方法的新思路。

预料不到的不断增长的人类对大气过程的有害干预，也成了激发人们寻求控制大气过程各种途径的必要情况。

由于人类生产和生活活动的结果，使着非大气本身所固有的混合物进入大气，它们使大气具有了新的性质。例如在大城市日

出时这些混合物不仅可使雾消散，也能通过光化学作用使其中某些成分转变为对人类和周围动植物有害的化合物。

根据联合国的资料，最近十年间人类活动产生的混合物已对地球平流层臭氧保护带造成了破坏，这种混合物的浓度已明显地超过了允许的界限。

人工改变大气性质的速度不断增大，这就迫使人们既考虑不可避免的后果，也关心对策。因为人类及动植物对已经变坏了的生存条件的适应性是有限的。与周围自然环境污染相联系的具有本世纪特征的疾病发病率的增加，正是上述情况的证明。现在我们已经被迫开始有计划地节制人类对大气的影响，以便防止大气性质的自发变坏。

除此，还存在战争影响大气过程的科学观点。

关于在多大程度上人类可以控制大气过程的概念是随时间周期地变化的。如果想象一种图表，其横坐标为时间，纵坐标为控制的可能性（向上是有希望的，向下是失望的），则图表将具有缓慢衰减的周期曲线形式，它带有很高的极大值和很深的极小值，但其平均值毕竟是逐渐升高的，现在我们来考察一下本世纪内这种曲线的变化。

1899—1902年举行了几次国际科学会议，专门讨论冰雹的问题。此后法国、意大利、澳大利亚政府预见到可能成功，便拨出大量经费，用大炮对雹云进行射击试验。在著名学者的领导下这种试验进行了许多年，证明是不成功的。

但是控制天气思想本身并没有被抛弃。1910年9月在不列颠应用知识协会上曾有人作过用电影响天气的报告。在讨论这个报告时，著名学者汤姆森曾宣称：按照他的计算，大面积改变大气，只需中等电量就足够了。然而在这条道路上的困难与其说是科学性的，倒不如说更具有政治色彩，遗憾的是汤姆森的计算结果并未被人们所知道，而汤姆森本人也未再提起他的计算。但是本世纪20年代人们研究人工引起降水的可能性时，曾经把带电的沙

粒做为主要催化剂之一。

1931年在荷兰从飞机上把磨碎的固态 CO_2 抛撒到过冷云中，首次引起了人工降雨。但是在当时这些试验并未按其意义给予评价。诚然，受影响的云的垂直厚度与其中的降水强度相比是不大的。

在30年代人工影响大气的理论有很大进展。苏联奥巴林斯基，保加利亚克力斯塔诺夫和他的助手们做了许多工作，初次完成了大气中凝结过程的计算，并在实验室和自然条件下进行了大量试验。在战前的紧张时期，苏联政府就拿出大量经费，用于建立实验气象研究所，它研究的主要问题就是人工获得降雨。人工降雨被认为是同干旱做斗争的潜在最重要的手段。

应该指出，在那个时候远非所有的人都对控制天气的可能性持类似态度。我们引用当时美国天气局局长马尔维纳的看法，他说：“……干旱不能被制止，也就是说，丰富的或可观的降水量既不能通过空中爆炸的途径，也不能通过向云中引入数量不大的某种物质的办法来得到。人类掌握的所有手段和力量，仅构成了引起和支持有限空间个别降雨所需要的和被自然界所消耗的取之不尽的能量储备中非常小的一部分。”

今天可以肯定地说，类似的批评是站不住脚的。但是在科学技术发展的那个阶段，还没有人认为人工降雨是同干旱做斗争的实际手段的基础。

在第二次世界大战期间所有的国家都把注意力主要集中在保障军事行动的天气预报上。大家知道，第二次世界大战及以后的战争的许多战役的结果都取决于天气预报，为了战争目的，人们可以控制局地的天气条件，例如：大型登陆行动中的人工造雾，机场消雾，控制大型水库等地区的水文气象状况等。

第二次世界大战结束以后，影响大气过程的问题就成了许多大气物理学研究者的注意中心。美国陵格莫尔和他的同事们完成了一系列引起人工降雨的有效试验。为了把催化剂抛撒入云，使

用了当时最高升限的飞机，它可以升到浓积云顶部的高度，同时还找到了人工晶化云的新的有效方法。有关试验的论文刊登在世界许多杂志上。开始出现了“统治天气”的术语。人们认为，控制天气和在所有情况下控制降水已经为人类所掌握。

事实上，在这个时期并没有获得意想不到的结果，亦即没有从根本上发现影响云的新的可能性。但是这些试验伴有准确的计算，并被那个时候有名望的学者完成的试验所证明。看来，这一点对促进影响云和降水实践达到新阶段的宣传，不比获得的结果本身意义小。这不仅仅是宣传，而且在40年代末和50年代初的前苏联、澳大利亚和其它一些国家中都进行了试验，这些试验都证明了人工影响过冷云降水的可能性。但是这些试验的重复率是不高的。

1954年世界气象组织专家组在总结这个时期的试验后指出，从过冷云中人工引起降水的可能性是无条件的，并建议“不要吝惜力量”，首先是从“评价发展着的方法使用范围和它们的经济价值”出发继续工作。为了响应这个呼吁，在许多国家中展开了气象场的建设，装备了飞机试验室，加工制作了专门雷达等等，

影响大气过程取得的成绩吸引了人们的注意，在冷战的武器库中又出现了新的术语“气象战”。

不过把云用做武器的思想不是新的。远在1750年澳大利亚皇后玛丽雅·切列兹亚被迫颁布了禁止射击或使用钟鼓声驱赶雹云的法律，其目的是为了禁止“恶意地把雹云引向邻省的可耕地”。

在50年代末和60年代初，“气象战”的术语暂时消失了，但和平利用云的前途已不象十年以前那样辉煌了。在这方面，1964年美国大气研究委员会控制天气和气候研究小组的报告是有代表性的，在这个报告中指出：“为了验证播云假说能否给予降水形成明显的影响，过去利用实验资料进行了许多统计研究，几乎所有这些研究结果都是否定的，它们不能证明用催化剂播云肯定会影响降水的假说。不但如此，研究的越仔细，在肯定结果方面给

出的可靠性越小。

复杂的和代价相当大的暂时只给出无足轻重的研究结果，很快地被控制天气的企图所占据。十五年前任何一个学者都不能期望这样的结论。”

看来完全失望了——“控制天气可能性的曲线”急剧下降。但控制天气的科学已进入成熟阶段，发现了该领域中老问题的一些新观点以及一些新问题，出现了新的、更加完善的影响云发展的工具。更重要的是出现了检验影响结果的新手段和新方法。

前苏联已把火箭和雷达用于大面积的防雹。虽然在许多异常的气象条件下，当执行影响作业时，在火箭的空隙间冰雹可能漏过去，有时达不到前面所说的影响程度，但基本上是成功的。

在欧洲和美国用人工消雾和低云的方法打开了一些机场和其它重要设施。在云和雾中激光打通了飞行器与地面光学通讯的通道。人工制造积云，强化降水，清除局地空气区的混合物，在处理云与保护目标物的途径方面可以预先引起雷电放电和降水。

消除切尔诺贝核电站事故后果的试验证明，在增加大气的辐射危险期间实施人工降水再分配，可以使云中的放射性质点避免或减少落到水域中，所以它是制止辐射损坏向周围环境蔓延的有效方法。

所有这些都使人工影响大气过程成为具有牢固基础的现实可能。

对大气过程自然变化个别阶段以及对它们的影响的理论和实验模拟方法得到了很大的发展。把它们同自然界的试验对比，有很高的可信度。

这本书正是为此出版的，在书中讨论了影响大气过程的基本原理，既有今天使用的，也有根据现代的科学概念在可预见的将来具有前途的原理。

如象历史证明的那样，科学发展的长期预见往往是不可靠的，甚至是错误的。例如在30年代美国包括有著名学者组成的委员会

提出了三十年间科学发展的预报，在这份预报中没有提到电子计算机、核动力技术、雷达甚至火箭。

现在已经系统地制作科学技术发展的预报。比照过去预报更完善、更客观，但是目前在科学技术新的分支里的预报，在很大程度上还基于学者直观或被称为专家评估上。

地球物理学中的宇宙系统目前只用于获取各种尺度的有危害的自然过程的信息手段。早在60年代克拉寥夫就讨论了把它们当做同自然势力做斗争的积极方法的前途，并且在某种程度上重新评价了改善气候和近地层大气的可能性。在地球物理学中扩展使用火箭和宇宙仪器的思想显示出了生命力。

应当指出，在我们这个时代科学技术预报的意义从根本上是增大了。在国家政治和国际关系许多重要问题中已经显示出它们的作用。

控制大气过程的科学主要是瞄准预见到的可能具有较大的经济和社会效应结果的新成就。然而它的远景计划却出现了困难，首先我们拟议中控制的和现在在某种程度上已经控制的许多大气过程的机制尚未足够认识，还允许对过程本身和对它们作用的结果有各式各样的解释。同时人类控制天气（更何况对自然界整体的控制）的期望上升和下降的历史证明，不保证可靠的科学技术基础和不认识到自己匆忙决定的责任就对周围环境强行进攻是不允许的。

大气的能量是巨大的，不管人工释放原子能是怎样的，自然界的能量将永远大于人类所能开发享用的能量。但大气过程在原则上还是屈从于合理的控制。存在着一些目前尚未达到终点的认识渠道和控制亚稳态阶段的大气过程的方法，学会使用它们，就可以用不大的能量消耗在需要的方向上，从而推动“大气机器”。这里同原子力能学相类似。如果谈到量级，则能量盈益在两种情况下大致相同。

在其它方面也存在着类似。控制天气需要精确地分析大气状

况和它们可能的发展变化，同时还要求选择较好的方法。在许多情况下，计算上很小的失误就可能使影响本身化为乌有，或者引起不希望出现的效应。

随着建立新的原子技术武器和电磁辐射发生器，出现了新的影响大气过程的可能性，其目的是为了毁灭敌人，但这种影响是以平流层和宇宙为舞台的。鉴于使用气象战的思想引起了人们的心理作用，特别是加重了太阳系现代发展周期所表征的毁灭性的天气异常，这就使人们产生了严重惊惶。

禁止使用影响周围环境为战争目的服务已成为国际生活所必需。

1973年塔什干会议奠定了举行国际人工影响大气过程问题代表会议的基础，从那个时候起已定期地举行这样的会议。第五次代表会议1989年5月在中国北京举行，世界气象组织主持了这次会议，在它的协调下同时完成了影响大气过程的国际计划。

80年代在西班牙进行了有前苏联、美国、加拿大、保加利亚和法国等国的学者与工程师参加的带有严格检验的大面积增加降水的试验。在瑞士试用了前苏联抑制雹灾的技术和方法，世界气象组织专家委员会完成了对所获得的资料的分析。在联邦德国利用同样的资料对不同国家有代表性的积雨云数值模式进行了对比。

1987年世界大多数国家签订的《蒙特利尔议定书》中有控制、停止发展和在以后逐步削减臭氧破坏物的生产等内容。

在1988年联合国第43次会议上前苏联建议组织国际生态援助中心和建立监测地-气中生态状况的宇宙实验室。

近年来苏美关于核战争引起的地球物理后果的讨论令人信服地证明，毁坏不可能是局部的，它不可避免地在整个地球上引起生态上的不可逆过程。

为了和平目的，科学上有根据地控制大气过程，可以也应该成为发展人类社会生产力最重要在手段之一。在这方面应该团结地球上的全体人民，而不能散布消灭生活的威胁。

目 录

译者的话

序言

第一章 大气中水的相态变化和伴随而生的现象	(1)
1.1 相变热力学的基本原理.....	(1)
1.2 相态的不稳定平衡.....	(7)
1.3 热力学不可逆(自发的)相态转变.....	(11)
1.4 均质凝结时冷凝水的相态.....	(16)
1.5 晶化气溶胶.....	(22)
1.6 作为晶化催化剂的包接化合物.....	(31)
1.7 作为凝结和蒸发过程调节器的吸湿性和表面活性物质.....	(35)
1.8 影响物体的介电性质.....	(39)
第二章 云内结构的改变	(44)
2.1 粒子的凝结增长.....	(44)
2.2 云中粒子的增长.....	(62)
2.3 云的自然晶化.....	(76)
2.4 云中潜在的能够转化为自然和人工降水的水分产生.....	(85)
2.5 致冷催化剂的晶化作用.....	(86)
第三章 大气中的人工束流	(93)
3.1 吹流中自由束流活动区理论.....	(93)
3.2 人工激发大气对流.....	(108)
3.3 排放到大气中的混合物,用人工束流消除局部空气中的混合物.....	(114)

3.4	催化剂质点在云和雾中的扩散	(132)
3.5	水平束流中的凝结云	(141)
第四章	云中热力过程的控制	(151)
4.1	把催化剂送入云中的手段	(151)
4.2	在云系不同发展阶段的雷达探测	(157)
4.3	人工影响非对流云的发展	(175)
4.4	人工控制对流云中的过程	(188)
4.5	防雹	(202)
4.6	动力消云(雾)方法	(235)
4.7	加速雪崩的动力方法	(244)
第五章	人工消雾和造雾	(247)
5.1	雾中能见度	(247)
5.2	人工加热法消雾	(249)
5.3	动力消雾法	(264)
5.4	改变雾的吸收特性的消雾法	(266)
5.5	用强化凝结过程的催化剂消雾	(269)
5.6	声学消雾法	(276)
5.7	电学消雾法	(281)
5.8	作为消雾工具的光量子发生器	(288)
5.9	控制蒸发的防雾方法	(298)
5.10	钝化凝结核的防雾方法	(301)
5.11	光化学烟雾	(303)
第六章	影响云中的电过程	(309)
6.1	基本状况	(309)
6.2	不同发展阶段的云中电过程的监测	(312)
6.3	利用火箭人工引起雷暴云对地放电	(324)
6.4	利用激光在大气中建造电离通道的可能性	(328)
6.5	利用相对论电子和质子的强电流束影响 云的可能性	(341)

6.6 激发局地云内放电以降低云中总电 场强度·····	(353)
6.7 用晶化催化剂播云改变云中电状况·····	(358)
6.8 用改变云水晶化潜能的方法控制危险雷 暴云的可能性·····	(362)
6.9 控制云的体电荷·····	(375)
6.10 海船和飞机的结冰与起电 ·····	(381)
第七章 影响飓风和反气旋的可能性·····	(385)
7.1 飓风发展过程中实现的能量·····	(385)
7.2 控制飓风的可能性·····	(389)
7.3 播撒晶化催化剂减弱飓风·····	(395)
7.4 大气涡旋的磁流体力学模式·····	(401)
7.5 以减轻干旱为目的的削弱反气旋的可能性·····	(405)
第八章 影响高层大气·····	(408)
8.1 基本状况·····	(408)
8.2 影响电离层·····	(413)
8.3 高层大气中(近宇宙等离子区)强化的人工电 子束和其它基本粒子束·····	(434)
8.4 做为生物保护层的平流层臭氧, 人类活 动对臭氧的影响·····	(438)
8.5 核爆炸对大气的可能影响·····	(446)
附录: 第一类边界条件下热传导和扩散方程的解·····	(449)

第一章 大气中水的相态变化和伴随而生的现象

1.1 相变热力学的基本原理

许多大气现象和水的相变有关。水由气态转变为液态或固态，由液态转变成固态等。相变有同质和异质之分。在第一种情况下不同相态的同一种物质参加变化过程，在第二种情况下异类物质参加相变过程，如起着凝结核或晶化核作用的混合物。

现在按本书所要求的程度来讨论相变的理论。

我们将把物理系统的平衡（稳定）态理解为在一定的外部条件下，亦即当系统是封闭的时候迟早要发生的状态。相似的热力学系统稳定度可用熵在时间上定常的条件来决定。以后如果不作专门说明，均不是系统的热力学参数（其中包括熵）的瞬时值，而是按某一时段所求的平均值。这一时段同所研究的过程发展起来的时间相当。

如果在改变外力或外部热交换的条件下，在变换过程中系统将产生一系列的连续平衡态，则这样的过程是可逆的。这就是说当按相反的顺序改变系统的外部参数时，系统将沿着同一路径在相反的方向上进行，即由最终状态转向初始状态。按其本身性质相态变化是不可逆过程，与初始或最终状态的平衡与否无关。封闭系统不可逆性的形式特征是在变化过程中系统熵的增加并接近其相应于平衡状态的极大值。

封闭系统达到稳定态（平衡态）的时间叫做稳定（平衡）态的张弛时间。

一般说来，相态变化的不可逆性需要用不平衡（热力学不可