

爆炸防雷中的云微物理机制的探讨*

段 英 许焕斌**

(河北省人工影响天气办公室, 石家庄, 050021)

摘 要

在综合实验和观测结果的基础上, 提出了能形成大雹的雹胚, 在它运行增长中常会有一个下伸到 0 层以下融化, 又再进入主上升气流区上升到 0 层以上再次冻结的过程。发生这一过程的位置是雹云的悬挂回波所在的冰雹胚胎帘区的底部, 如果在这个位置利用爆炸引起由雹胚融化而形成的液滴破碎, 会改变大雹的运行轨迹, 从而抑制大雹的形成。同时还利用数值模式模拟研究了该机制, 结果表明该机制是合理的。

关键词: 爆炸影响滴的破碎, 大雹运行增长, 爆炸防雷机制。

1 引 言

中国采用“37”高炮进行防雷作业, 自 1972 年以来已有 26 a。目前中国有超过 6000 门高炮在使用中, 年消耗炮弹数十万发, 规模巨大, 而且还有继续发展之势。这样一个庞大的工程措施, 本应有严格的工程原理和工程目的(效果评估)作依据; 但鉴于中国的防雷活动是在总结群众防雷经验中发展起来的, 形成了先有防雷作业, 再有工具发展, 继而才有效果检验和原理性研究的局面。由于原理性研究进展较慢和严格效果检验的困难, 使得工程硬设施的发展方向不明确, 防雷作业中的盲目性难以克服。例如在防雷工具的发展中, 有人认为“37”炮因射程限制控制范围偏小, 拟采用“57”高炮; 有人认为“37”炮弹所带碘化银数量不够且成核率低, 造成成冰核播撒不足, 因而拟用火箭焰弹来替代; 有人提出在高炮防雷中, 炮弹在云中既有爆炸又有成冰核播撒作用, 两个作用中哪个为主? 内蒙古等区省对比了带碘化银和不带碘化银的炮弹防雷试验, 结果没有表现出差别(夏彭年, 私人通信)。另外, 从炮击雹云后的反应来看, 在爆炸几分钟内即有效果表现^[1], 这在微物理过程发展时间上来得及吗? 这些都说明需要对爆炸作用和播撒作用作深入的研究。在此之前, 提出在防雷中拟用火箭来替代高炮是论据不足的。今后的工程措施不应再以工具来引导, 而应由工程原理和工程目的来引导。

综上所述, 为了改进和发展防雷工程系统, 应当着重进行防雷中爆炸和播撒两方面机理的深入研究。这方面的研究结果, 将使防雷工程发展的方向进一步明确。如果防雷是冰

* 初稿时间: 1998 年 11 月 27 日; 修改稿时间: 1999 年 5 月 26 日。

资助课题: 河北省“九五”重大科技攻关项目(96-95-12-3)。

** 客座研究员, 隶属北京应用气象研究所。

核播撒作用, 就应当依播撒防雷的要求来改进工程体系; 如果防雷是爆炸作用, 就应依爆炸防雷的要求来发展现有的工程体系; 当然, 经过研究也可能是二者都有作用, 这也是改进和发展工程体系的依据。

关于爆炸防雷中的动力机制, 已经作了一些工作^[1-4], 本文的目的是探讨爆炸防雷中的云微物理机制。

2 爆炸对云微物理过程的作用

爆炸对云微物理过程的作用有两个方面。一是爆炸对过冷水滴的冻结作用^[5,6]。这一作用与播撒成冰核的作用相仿, 不是爆炸专有的作用, 何况这种冻结核化作用的效力比播撒碘化银的核化效力要弱, 就谈不上其优越性, 所以本文暂不讨论; 二是爆炸引起的水滴破碎作用。水滴可以自然破碎, 即水滴的空气动力学破碎, 这要求水滴直径甚大($d > 6 \sim 8$ mm); 水滴还可有互碰破碎, 这也要求水滴的直径大于 2.0 mm 以上, 且水滴的浓度要相当大(> 几个/L)才有明显作用。但是爆炸引起的破碎作用可以不受这些限制。

Goyer^[6]利用爆炸索的爆炸来模拟闪电, 并观测爆炸对喷泉喷出的水滴群尺度分布谱的影响。爆炸索用系留气球固定在离地面 91.44 m 上空, 装药离喷泉约 33.5 ~ 45.7 m, 相应的超压值为 7.4 g/cm^2 , 与“37”弹爆炸点外 50 ~ 60 m 的超压值相当。在所有的实验中, 都观测到在有爆炸时水滴尺度分布谱的大水滴部份(尾巴) 向小的尺度方向移动, 未有爆炸时的水滴谱取样, 最大水滴尺度达到 1700 μm ; 而在有爆炸时, 最大水滴尺度为 800 μm 。图 1 是 Goyer 给出的观测水滴谱分布, 可见爆炸破碎作用使 $d > 0.8 \text{ mm}$ 的水滴都消失了, 使较小的水滴增加近 100 倍。经过计算, 这些增加的小水滴质量, 等于消失的大水滴质量, 说明这些较小水滴是由大水滴破碎而来的。这种水滴破碎是爆炸作用引起的, 本文将就这一作用在防雷中可能存在的微观物理机理进行探讨(爆炸对小的水滴群($d < 40$

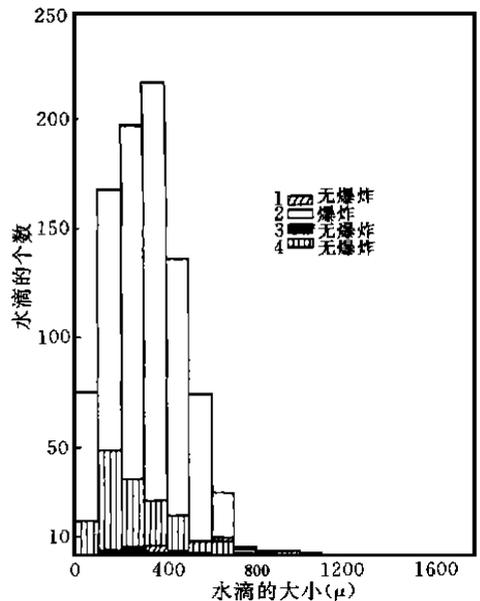


图 1 在“忠实老喷泉”下方方 137.16 m 处收集到的水滴尺度分布

有促进碰合的作用, 可以使较大水滴浓度增加, 加速降水过程的发展^[7], 由于这种作用属于水滴粒子的并合过程, 对防雷的直接影响较小, 本文也暂不讨论)。

3 大雹形成个例模型的分析

冰雹云一般可分为单体、多单体和超级单体(强单体), 也有些雹云不属于上述之类。强单体或超级单体雹云形成的雹灾要占总冰雹灾害的 80%, 因而分析研究超级单体模型的大雹形成对防雷有重要意义。

本文给出了 2 个具有超级单体回波特征垂直剖面图(RHI)。其中一个国外著名的雹暴, 经过多名学者的细致研究, 提出了超级单体雹暴结构和成雹机制, 对雹云物理学发

展起了重大推动作用。另一个所选的是国内雷暴个例,看来国内外的超级单体雷暴具有相似的结构,有相当广的代表性。

图 2a, b 分别是 Wokingham 雷暴^[8], 甘肃平凉雷暴^[9]。由图可见,它们都具有有界弱回波区和前悬回波,且前悬回波的底部在环境温度 0 层以下附近。正如文献[10]所述,在这种回波结构中,意味着大雹生长路径是雹胚由前悬回波区的雹胚帘出发,经有界弱回波区上沿进入云体的主上升气流区,边增长边运行,直到弱回波顶部(V),当冰雹落速大于上升气流时,沿弱回波区后沿的回波墙下落。这些认识得到了 Doppler 雷达气流观测结果的支持^[11]。

本文特别重视的是产生大冰雹的雷暴前悬回波底部伸到 0 层以下这一特征,这意味着进入主上升气流的雹胚可以是融化了的液滴。雹胚在这里能够融化为液滴吗?这要看雹胚在这里滞留的时间。悬挂回波底部的粒子运动特征是,在垂直方向落速接近于气流升速,故而悬挂;在水平方向上由离开云转而进入云,即这里有一个水平风速为零的地方,稍高处风吹离云,稍低处吹向云,故而雹胚在这里的相对水平移速较小。考虑到悬挂回波的底部宽可达几公里,所以雹胚在这里可能滞留 1~10 min。再从层状云降水融化(亮)带的观测结果来分析毫米大小的冰相粒子的融化时间。一般亮带厚度为 50~300 m^[12],这里垂直运动弱,毫米级大小的固态降水粒子的相对落速如为 1~2 m/s,则表明它们可以在 1~5 min 内融化。在模拟中,雹胚在 0 以上滞留时间也可达 5 min 以上。看来雹胚在悬挂回波伸到 0 层以下处,是可以融化为液滴的。文献[13]也曾指出,许多雹胚实际上是融化了的霰雪粒子,再经强上升气流挟带上升后再冻结成冻雨胚的。另外,冰雹切片研究表明,冰雹的体密度由表面到中心有径向变化,但它们都在 0.8~0.98 g/cm³ 之间,只观测到低达 0.70 g/cm³ 密度值^[14],没有低于此值的报导。但实际的雪团、霰粒子体密度可以低于 0.5 g/cm³,这些都说明,有利于大雹形成的胚粒子的体密度可能有一个由低到高的演变过程,当雹胚在胚胎帘中下伸到 0 层以下,一方面可因融化而使体密度加密,也可由湿生长过程吸收多余捕获的过冷水而加密,这样一来,就可以理解为什么大雹的胚雹皆具有大于 0.7 g/cm³ 的体密度。既然由大液滴冻结的冻滴胚,与霰胚的密度差异不大,它们在胚胎帘中所具有的落速差别也就不会太大,因而在进入主上升气流的过程中被上升气流分选吹入或吹出的概率就接近了。当然对液滴来说,在未严重变形和破碎之前,由于其密度大,阻力系数偏小,更

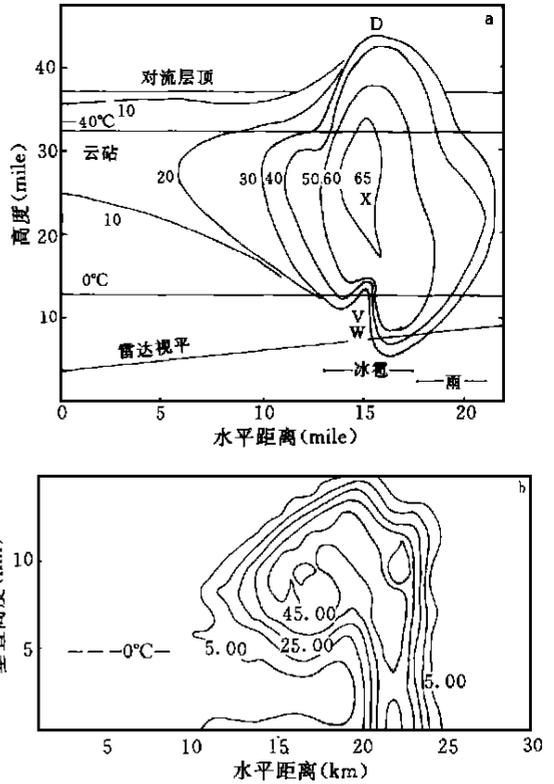


图 2 a. 英国 Wokingham 雷暴强盛时期的雷达回波 (引自文献[8]原图, X:最强回波处, D:最高回波顶, W:回波墙, O:前悬回波, V:弱回波区);
b. 中国甘肃平凉 19900809 雷暴 (引自文献[9], 0 层高度在 4834 m)

易于进入主上升气流区, 提高了霰胚再入主上升气流增长成大雹的概率, 对大雹形成是有利的; 这也说明了构成大雹的霰胚有相当比例(20%)是冻滴胚的原因^[12]。

从另一方面来看, 不论是霰胚还是冻滴胚, 皆可存在在悬挂回波高于 0 的区内液化后再进入主上升气流区再行冻结的过程, 如果在胚胎帘区进行爆炸, 使直径大于 0.8 mm 的液滴破碎到该直径以下, 导致原有的运行增长轨迹的变化, 就有可能来抑制大雹的形成。

4 数值模拟试验

为了更进一步讨论上述爆炸防雷的云微物理机制, 即爆炸引起的伸到 0 以下悬挂回波中融化霰胚(大雨滴)破碎作用在防雷中的作用, 利用二维雹云模式^[15]和大雹运行增长模式^[16], 对超级单体雹云^[17]进行了数值模拟试验。模式的计算区, 水平 50 点, 垂直 30 点, 水平格距 $\Delta x = 1.0$ km, 垂直格距 $\Delta z = 0.5$ km。图 3 给出了用来进行模拟试验的超级单体的流场(a)和水凝结物场(b), 其中非闭合曲线是 0 层的位置。与图 2 相比可见二者的结构是十分相似的。

数值模拟方案设计如下, 在全场除边界带外(水平 10~40, 垂直 3~28)在每个格点播

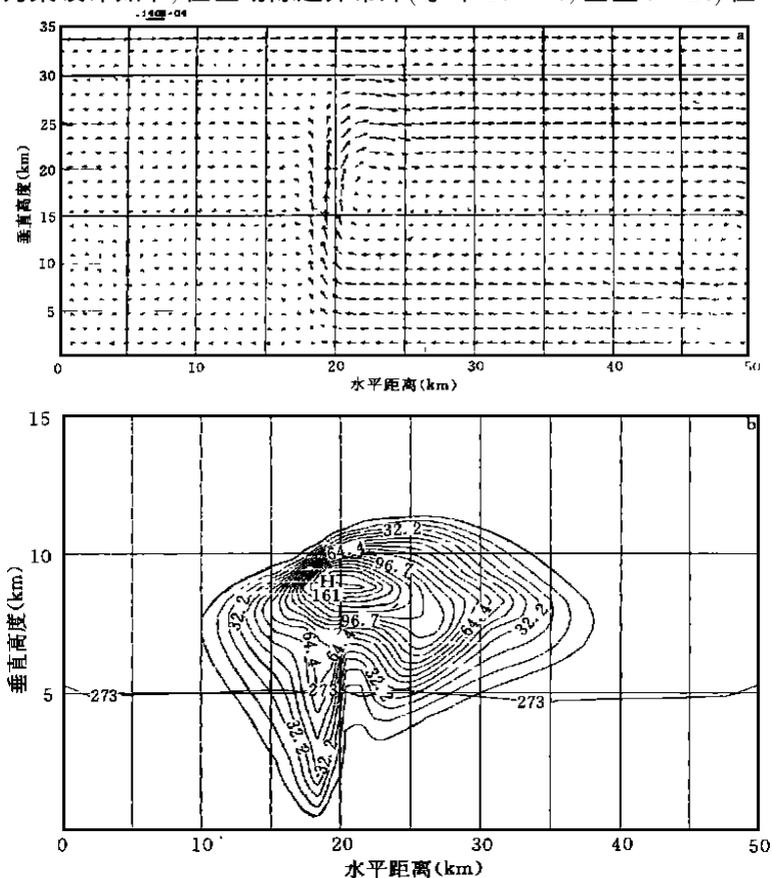


图 3 超级单体的流场(a)和水凝结物场(b)

(非闭合曲线是 0 高度线)

撒雹胚, 初始大小为 0.2 cm , 初始密度 0.9 g/cm^3 , 对每个格点的雹胚皆编了号, 以便于追踪其轨迹。自然算例不加任何人工影响; 爆炸算例则在 0 层以下附近的悬挂回波区内, 使由雹胚融化而成的液滴在爆炸作用下破碎为 $d = 0.08 \text{ cm}$ 的滴, 并对它继续进行运行增长的计算。

图 4 给出的计算结果, 是冰雹最终直径和雹胚最初出发地的分布图, 它显示了冰雹最终尺度与雹胚出发地的关系。其中标有“0”值的线是水平速度为零的线, a 是自然算例, 最大冰雹直径为 2.35 cm ; b 是爆炸算例, 相应最大冰雹直径只有 0.315 cm 。对比图 4a 和图 3b, 清楚地看到可形成大雹的雹胚出发地是从悬挂回波区内靠近水平速度零线又接近主上升气流的区域内出发的, 这也应该是爆炸影响冰雹形成的作业区。从图 4a 和 4b 的对比可见, 爆炸引起的融化雹胚的破碎作用明显地抑制了大雹的生长。

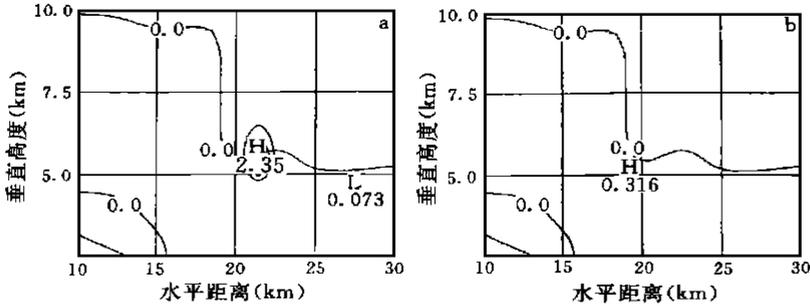


图 4 a. 自然算例的雹最终大小与播撒初始位置的分布;

b. 爆炸影响算例的雹最终大小与播撒初始位置的分布

为了进一步考察爆炸引发的融滴破碎对大雹形成的机理, 把终极直径达 2.35 cm 编号为 292 的雹胚增长运行轨迹给在图 5 中 (a 是自然算例, b 是爆炸算例)。从 5a 看出, 它的增长运行轨迹是从出发点开始, 边生长边沿着水平速度零线旋转进入主上升气流, 达到最大尺度后, 越过主上升气流区而下落。5b 则看到 292 号雹胚, 在开始也是边增长边向主上升气流区旋进, 但由于爆炸的破碎作用, 使雹胚长大后落到 0 层以下融化—爆炸破碎—尺度变小—运行轨迹改变, 就出现了运行轨迹向右转移, 离开主上升气流在弱上升气流区旋转的现象, 这里是不利于大雹形成的, 所以雹直径只有 0.315 cm , 是小雹。看来爆炸引发的滴破碎作用, 在与大雹形成的物理过程相配合, 是可以抑制大雹形成的。

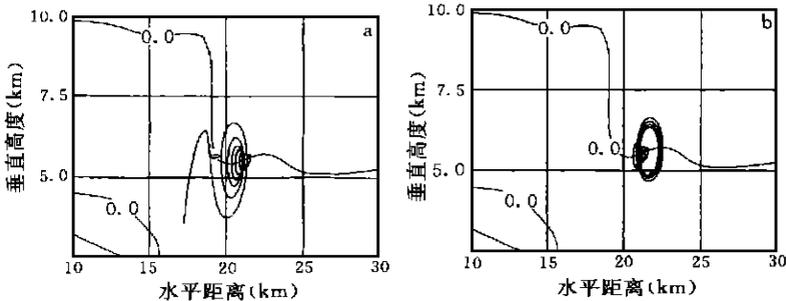


图 5 a. 自然算例中, 编号 292 雹胚 (初始位置: $x = 22, z = 6$; 初始大小 $d_0 = 0.2 \text{ cm}$, 初始密度 $\rho_0 = 0.98 \text{ g/cm}^3$) 的运行增长轨迹; b. 爆炸

影响算例的 292 号雹胚的增长运行轨迹

5 结 语

文中在综合分析了一些降大雹的个例雹云结构观测结果和爆炸引起液滴破碎的实验结果后指出:

(1) 爆炸可以使未达到空气动力学破碎尺度的滴和不满足互碰破碎的滴, 破碎成小于 0.08 cm 的滴群;

(2) 能形成大雹的胚胎常在悬挂回波区的胚胎帘的底部下伸到 0 层以下融化, 这种融化除使雹胚的体密度加大, 表面粗糙度降低和阻力系数减少, 从而使末速加大, 更易于进入主上升气流, 从而更有利于大雹形成外, 液滴的易破碎性, 为用爆炸促使这些融滴的破碎准备了条件;

(3) 爆炸对滴的破碎作用, 特别是对进入 0 层以下雹胚融化成水滴的破碎, 在与大雹形成的物理过程相配合, 是抑制大雹形成的一种可能机制;

对一个超级单体型雹云, 利用数值模拟研究方法, 对上述机制进行的模拟试验表明: 这种机制是合理的, 模拟结果给出了这种机制抑制大雹生长的具体图像。

参考文献

- 1 许焕斌, 王思微. 关于爆炸防雹中的若干问题. 见: 石安英等编. 防雹及雹云物理文集. 北京: 气象出版社, 1989. 214 ~ 236
- 2 许焕斌. 关于爆炸影响气流的力学原理. 气象, 1979, 5(10): 26 ~ 29
- 3 许焕斌. 爆炸防雹中可能动力机制的探讨. 气象学报, 2001, 59(1): 66 ~ 67
- 4 许焕斌. 爆炸影响云雾实验结果的分析 and 数值模拟再现. 气象科技, 2001, 29(2): 40 ~ 44
- 5 Goyer G G. Effects of lightning on hydrometeors. Nature, 1965, 206(19): 1203 ~ 1209
- 6 Goyer G G. Mechanical effects of a simulated lightning discharge on the water droplets of 'old Faithful' Geyser. Nature, 1965, 206(26): 1302 ~ 1304
- 7 陈汝珍等. 爆炸对云滴碰并增长的实验研究. 应用气象学报, 1992, 3(4): 401 ~ 417
- 8 Browning K A, Ludlam F H. Airflow in convective storm. Quart J Roy Meteor Soc, 1962, 88: 117 ~ 135
- 9 张鸿发, 郝秀书, 王致君等. 偏振雷达观测强对流雹暴云. 大气科学, 2001, 25(1): 38 ~ 48
- 10 Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart J Roy Meteor Soc, 1976, 102: 499 ~ 533
- 11 Kropfli R A, Miller I J. Thunderstorm flow patterns in three dimensions. Mon Wea Rev, 1975, 103: 70 ~ 71
- 12 黄美元, 洪延超, 吴玉霞. 梅雨锋云系的若干雷达回波特征. 见: 《中国南方云物理学和人工降水论文集》编辑组编. 中国南方云物理学和人工降水论文集. 北京: 气象出版社, 1986, 46 ~ 54
- 13 Cotton W R, Anthes R A. 风暴和云动力学. (中释本), 北京: 气象出版社, 1993. 588pp
- 14 Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of clouds and precipitation. Reidel, Boston, Massachusetts, 1978, 54
- 15 许焕斌, 王思微. 二维冰雹云模式. 气象学报, 1988, 46(2): 227 ~ 236
- 16 王思微, 许焕斌. 利用流型雹云中大雹增长运行轨迹的数值模拟. 气象科学研究院院刊, 1989, 2: 171 ~ 177
- 17 段英, 刘静波. 超级单体、单体和多单体雹云及其成雹特点的数值模拟研究. 气象学报, 1998, 56(5): 529 ~ 539

THE POSSIBLE CLOUD-MICRO PHYSICAL MECHANISM OF EXPLOSION IN HAIL SUPPRESSION

Duan Ying Xu Huanbin

(Hebei Province Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021)

Abstract

After the syntheses of results which are the structure of hailstorm obtained from field observation and effects of explosion on the breakup of drops, this paper suggested that the explosion may cause the breakup of drops which is melted hail-embryo in embryo curtain located in overhang echo below the 0 level, this break effect makes the growth+travel trajectory of hailstone change, there by avoid the formation of large hailstone. The numerical experiments tested and verified this suggestion.

Key words: Breakup of drop by explosion, Growth+travel trajectory, Mechanism of hail-suppression.

书 讯

吴国雄院士和丑纪范院士等人合著的《副热带高压形成和变异的动力学问题》即将由科学出版社正式出版。这是第一部关于副热带高压动力学的专著。作者利用最新的观测和再分析资料揭示了副高活动和变异的许多新事实,并根据多年的研究成果,阐述了若干创新性的动力理论,如热力适应理论,大气中的过流,全型垂直涡度方程,涡度变化的内部强迫——倾斜涡度发展,涡度变化的外部强迫——非均匀空间加热效应,以及东、西风交界面的时间变化方程及该界面在保持气候系统角动量守恒中的重要性等等。并应用这些最新理论揭示了副高的形成和变异机制,阐述了夏季陆面感热加热及亚洲季风降水对副高形成的重要作用,进行了成功的数值模拟。这些关于副高形成和变异的新观点和新理论为深入开展副高的天气和动力学研究提供了理论基础,对改善天气预报和气候预测也有重要的应用价值。

叶笃正院士称该专著“结构严谨,既有很强的理论性,又与资料分析和数值模拟相结合,是一部理论联系实际的具有创新意义的学术专著。其所阐述的若干基本理论不仅适合于副高的研究,而且对揭示气候系统多圈层的相互作用机制也具有广泛的应用前景。”

陶诗言院士认为“书中所阐明的基础理论和取得的成果深化了对副高的性质和特征的认识,对揭示副高的形成和变异的动力机制具有重要意义,为副高的气候预测和天气预报提供了重要的理论基础。预期本书的出版将进一步推动我国天气气候研究的深入发展。”

该专著为 16 开本,全书深入浅出,理论联系实际,对气象业务工作者、院校师生和大气科学研究者均具有参考价值。

科学出版社

秦国英