

現代气象学問題論丛

积云动力学

巢紀平 周晓平 著

科学出版社

國內大學中國圖書

積云动力学

王 宇 王 宇 著

中 国 科 学 出 版 社

現代气象学問題論丛

积云动力学

巢紀平 著
周曉平

科学出版社

1964

內 容 簡 介

本書較系統地總結了近年來國內外有關積雲動力學研究的新成就，其中主要是結合作者自己的研究工作詳細地敘述了我國積雲動力學的研究進展情況。

書中首先敘述了積雲宏觀特征的觀測事實，它為積雲動力學的理論研究提供了素材。接着根據積雲的特征，建立了積雲動力學的基本方程組。其次，為了研究積雲發展的动力過程，對制約積雲發展的一些因素作了定量分析和討論。然後，探討了一般熱對流的发展和結構，從而進一步研究了在水汽反饋影響下的積雲动力過程。最後，作者還指出了今後需要研究的若干問題。

本書可供氣象研究工作、業務工作者、研究生和高等院校有關專業師生參考。

現代氣象學問題論叢

積 雲 動 力 學

巢 紀 平 著
周 曉 平

*

科 學 出 版 社 出 版

北京朝陽門大街117號

北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

中國科學院印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

*

1964年10月第一版 開本：850×1168 1/32

1964年10月第一次印刷 印張：3 11/16 插頁：4

印數：0001—4,000 字數：97,000

統一書號：13031·1985

本社書號：3057·13—7

定價：[科七] 0.80 元

序

一年中寒来暑往，一昼夜間日升月沉，是最早吸引人类注意的自然現象。由于这些現象和生产实践比較密切，而这些变化又那么明显和突出，所以天文和气象学是最先为人类注意研究的对象。世界各地所流传下来的天气諺語，往往都是农民、漁人长期累积的经验总结。在我国宋代宮廷內已設置有雨量計，按时記載降雨数量；在明代永乐年間当时朝廷曾制作了雨量器頒发到全国各地，以了解全国雨情。从世界科学发展史来講，自托里賽里、伽利略制作气压表及溫度表以后，世界各地就逐渐开始进行按时的气压和溫度的长期观测，把这些序列观测和天气变化联系起来，并用之于初期的天气預报。所以，气象学从科学发展历史來說，可以算是一門古老的科学。

从現代的科学发展看来，气象学是一門边缘科学，它一面联系着当地的具体地理条件，有它的地域特点，另一方面則遵循着物理变化法則，而与数理科学有共同性。因此，进一步揭露气象現象的本質，必須广泛积累天气和气候的客观事实，利用近代新技术，更深入掌握大气物理現象的变化过程；运用近代科学的成果，进行分析研究。通过各学科之間的相交渗透，近代气象学把物理、数学、力学、控制論、天文等学科的成就运用到本学科之內，使其开花結果，这不但推进了气象学的发展，反过来也推进了其他学科。現代各国都特別注意边缘学科，认为边缘学科是学术上的新生长点，通过这些新生长点，常常可以开辟学术上的新領域，解决国民經济上的重大科学問題。二十世紀六十年代气象学的发展，充分地証实了以上的論断。

解放以来，在党的领导下，中国气象学有了长足的进展。我們一方面注意結合国家需要联系生产实践，从实践工作中提出一些

重大的气象科学基本理論問題；另一方面还注意引用現代其他学科的成就，把它运用于气象学。对这些理論問題进行系統研究，并把研究結果再用之于与生产实践有关的研究任务，从而提高气象学在实际应用中的效用，几年来我們实行的結果，是有效的。为了及时总结当前气象学的新成就，使气象工作者全面了解現代气象学最前綫的情况，我們准备刊印一套論丛，总称之为“現代气象学問題論丛”。这套論丛主要是結合我国气象学上的一些专题研究，对現代气象学中的一些重要問題进行总结，以提供有关方面参考。希望国内气象学家和其他学科的专家們随时提出批評和指教，使气象学这一門边缘学科，得到更好的发展，則这一套論丛的刊印出版，就算是尽了微薄的力量了。

赵 九 章

1964 年 4 月

作 者 序

积云(对流云)动力学是用流体力学和热力学的原理来研究积云的宏观发展条件和机制的科学。由于很多小范围的灾害性天气现象,如雷暴、冰雹和暴雨等都与积云的猛烈发展有关,因此积云动力学的研究将为预报这些灾害性天气提供一定的理论根据。另一方面,对流性降水的发展和雷电的形成都受积云的宏观发展过程制约,因此积云动力学是云雾物理学的一个重要组成部分。此外,积云和对流性天气经常影响航空飞行的安全,因此深入地了解积云发展过程对国防和民用航空事业也是十分重要的。

最早研究积云的宏观发展条件,是用质点动力学的方法,以后到本世纪三十年代, J. Bjerknes 又在热力学的基础上提出了薄层法。前一种方法是把积云看成是一个质点,后一种方法已初步考虑了云外下沉气流的影响。近几年来,由于观测的增加和观测方法的提高,人们逐渐清楚地认识到积云的发展是大气中水分和运动场之间矛盾发展的产物,从而用流体力学和热力学的方法,把积云的发展和四周大气看成是一个场的问题来加以统一研究。

积云动力学的研究,近几年来在国外已做了不少工作,其中如应用线性理论讨论了积云发展条件(郭晓嵐等^[34])、考虑云内外的混合过程对积云垂直结构的影响(Haltiner 等^[72])、以及进一步对积云发展过程作了数值试验(Malkus^[60], Lilly^[59], 小倉^[55], 浅井^[75]等)等。

随着云雾物理学科的发展,我国自 1958 年大跃进以来,也开始了积云动力学的研究。我们一方面利用已有的设备和条件开展了观测工作,了解了我国积云发展的实际情况,另一方面又及时地在宏观观测的基础上,开展了理论分析的研究工作。这几年来,我们对积云动力过程的基本方程组的建立,积云发生和发展条件的

綫性和非綫性分析，以及积云发展过程的数值試驗等方面均做了一些工作。

为了便于新参加这方面工作的同志，能較快地了解积云动力学目前所研究的一些問題，我們在我国研究工作的基础上編写了本书。

全书共分为五章。在第一章中，对积云的宏观特征作了概括的描述。第二章，根据积云的特征，应用尺度分析，建立了描写积云发展的基本方程組。第三章，对制約积云发展的一些因子作了定量的分析和討論。在第四章中研究了一般热对流的发展过程；在这基础上，我們在第五章中进一步考虑了在水汽凝結作用的反饋影响下，研究了积云的结构和发展过程。由于我們的水平有限，对有些問題的体会还不够全面，所以书中一定存在很多缺点，希望讀者指正。

在本书的写作过程中，承顾震潮教授給予热情的鼓励，并提出了宝贵的意見；曾佑思同志繪制了本书的插图；李兴生、章光銀两位同志协助作了不少工作，作者在此向他們表示衷心的感謝。

目 录

序.....	iii
作者序.....	v
第一章 积云宏观特征的一些观测结果.....	1
1. 积云的生命期	1
2. 积云的空间尺度	5
3. 积云中的垂直气流	6
4. 积云中的湍流	8
5. 积云中的含水量	9
6. 积云中的温度	11
第二章 积云动力学方程组.....	12
1. 流体力学和热力学的基本方程组	12
2. 对流近似理论	14
3. 非静力平衡	16
4. 气压变化对阿基米德浮力的影响	17
5. 在运动方程中滤去声波的几种方法	18
6. 凝结热通量	21
7. 水分方程	23
8. 积云动力学方程组	24
第三章 制约积云发展的一些主要因子和过程.....	25
1. 静力稳定度	25
2. 湍流扩散的影响	27
3. 大气中自由对流的发展条件	28
4. 表征局地对流的无量纲数	32
5. 云外下沉气流的影响	33
6. 挟卷过程的影响	37
7. 风速垂直切变的影响	40
8. 环境和对流活动间的相互制约	45

小結.....	48
第四章 大气中热对流的发展和結構	50
1. 中性层結大气中的热对流.....	50
2. 层結大气中的热对流.....	56
3. 下垫面加热影响下热对流的发展.....	67
4. 风速垂直切变对对流流場結構的影响.....	72
小結.....	76
第五章 积云的发展和結構	78
1. 气块模式.....	78
2. 气柱模式.....	82
3. 积云发展的流体力学模式.....	89
4. 下垫面加热影响下积云的发展.....	97
5. 积云的常定結構.....	101
6. 微观过程对积云的影响.....	106
小結.....	111
結束語	112
参考文献	114

第 一 章

积云宏观特征的一些观测结果

近年来,由于观测方法、观测工具的改进和发展,特别是雷达的广泛使用,对于积云的宏观特征已有了一定的了解。本章将对到目前为止的一些观测结果进行概括的总结。首先需要指出的是,各个地区的积云宏观特征差别很大,各个个体积云间的差别也很大,因此在应用这些观测结果时,必须要考虑到这一特点。

1. 积云的生命期

积云是大气中的一种局地对流现象。在大气中,局地对流的尺度谱是很宽的,可以从几十米的热力对流泡或云泡,到一、二十公里的雷雨云。不同尺度的对流,生命期是不一样的。有时在同一时间里,不同地区的同一尺度的积云维持的时间也会有很大的差异。

一般来说,积云的发展和演变是很迅速的。根据我国一些地方的观测,积云生命期平均只有十几分钟。图1是一块积云发展的一个例子。这块积云从上午11时49分开始发展,到12时05分消散,共经历了16分钟。

一块积云常常是由很多个云泡堆积而成。这些云泡可以相继地发展,它们的生命期更短,一般只有几分钟。图2是一块积云中,两个云泡相继发展的例子。

如果积云发展成阵雨云或雷雨云,它们的生命期就要长些,有时可以长到1—2小时。一块发展完整的雷雨云,生命史可以分成三个阶段^[2],这三个阶段是:

(1) 形成阶段。这个阶段的特征是云中皆为上升气流,从外



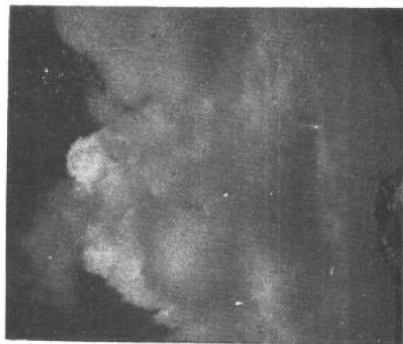
(1) 11 时 49 分



(2) 11 时 53.5 分

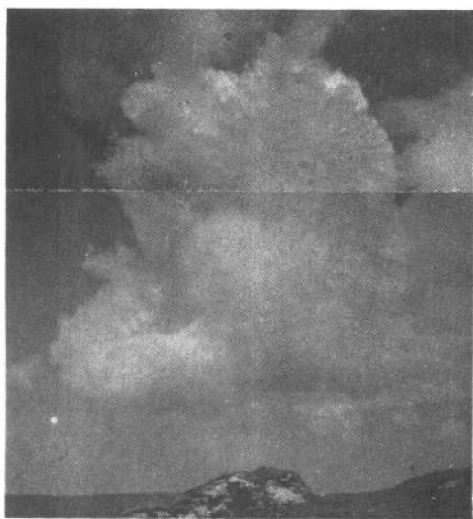


(3) 11 时 58 分



(4) 12 时 00 分

图 1. 一块积云的发展过程



(5) 12 时 01 分

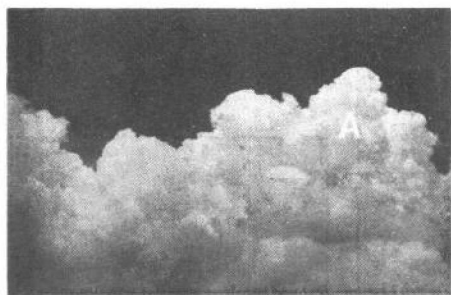


(6) 12 时 03 分

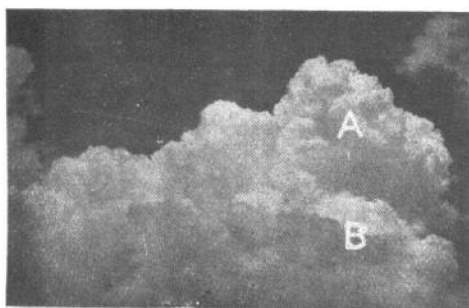


(7) 12 时 05 分

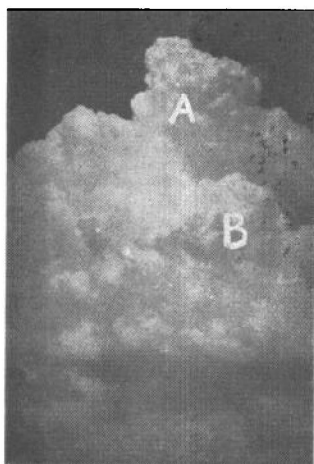
图 1 . (續) 一块积云的发展过程^[1]



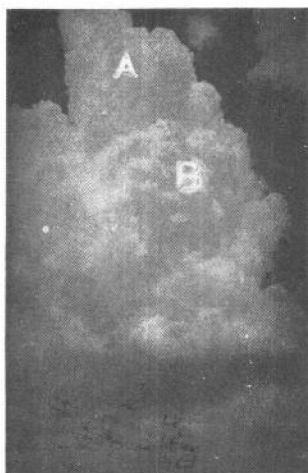
(1) 14 时 18 分



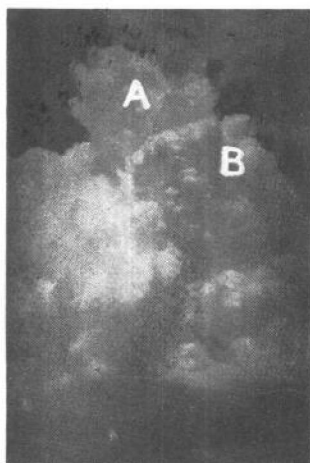
(2) 14 时 19 分 30 秒



(3) 14 时 20 分 30 秒



(4) 14 时 21 分 30 秒



(5) 14 时 23 分

图 2. 两个云泡(A, B)的相继发展^[1]

形上看,云頂呈圓弧狀,云體聳立成塔狀。這個階段的持續時間約為15分鐘左右。它基本上是從淡積雲向濃積雲發展的階段。

(2) 成熟階段。這是濃積雲向積雨雲發展的階段。這時雲中除了有系統的上升氣流外,也出現了有系統的下沉氣流。到這個階段的後期,有時從外形上看,雲頂向兩側延展成砧狀。這個階段的持續時期約為15—30分鐘。自然降水一般就在這個階段開始。

(3) 消散階段。這一個階段的特徵是,雲中皆為有系統的下沉氣流,或者至少在雲的低層是如此。消散階段的持續時期可以長到30分鐘。

當然,雲的生命期是因時、因地而不同的。例如在蘇聯,雷雨雲從開始發展,到降水出現,平均需時1.7小時,慢的要長達2.7小時^[3]。Davis等^[4]分析了美國860個對流回波的持續時間,它們平均是27.8分鐘,最短的是15.5分鐘,最長的可以到達150分鐘,而小於40分鐘的占總數的79.3%。

2. 積雲的空間尺度

實際觀測所得積雲的垂直尺度,一般與濕絕熱不穩定層的厚度有關。但并不與不穩定層的厚度相等,雲頂可以比不穩定層頂低,也可以高出很多。這是因為制約積雲發展的因素很多,層結只是其中的一個。

根據 Вульфсон 的觀測^[5],熱力對流泡和雲泡的平均尺度只有100米,大的也只有700—800米。雷雨雲的厚度一般都有幾公里,但是,雲頂穿入平流層的例子也不少^[6]。熱帶有的積雨雲甚至可以超過20公里。在我國西北地區的積雨雲,常常只有3—4公里厚;但在華南地區,由於水汽充沛,濃積雲的厚度也可以到達10公里以上。

一般來說,積雲的水平尺度與垂直尺度在量級上是很接近的。這和大氣中別的一些對流現象,如海陸風、山谷風等是很不一樣的。

3. 积云中的垂直气流

积云中气流垂直速度的大小和分布, 随积云的发展阶段而不同。在发展阶段, 上升气流平均约为每秒几米。在发展成熟的雷雨云中可以达到 20—30 米/秒^[7], 目前观测到最大的上升速度为 60 米/秒^[8]。

在雷雨云的消散阶段, 云中的下沉气流, 也可以达到与上升气流相近的强度。

从云中气流垂直速度随高度的分布看来, 最大值一般发生在云的中上部, 个别的云块中最大值也可以发生在顶部附近。图 3 给出了浓积云中垂直速度随高度的平均分布, 图 4 给出了阵雨云的平均分布。

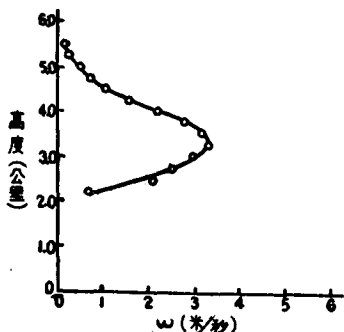


图 3. 浓积云中垂直速度随高度的平均分布^[7]

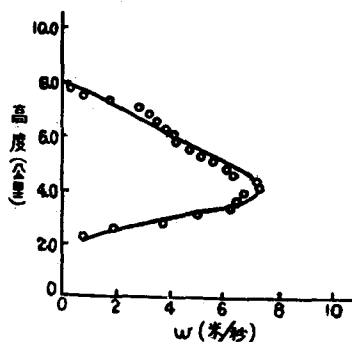


图 4. 阵雨云中垂直速度随高度的平均分布^[7]

Malkus^[9] 曾观测过信风积云中的垂直气流。图 5 是一块处在发展阶段中的积云中的气流垂直速度分布。由此图可以看到, 上升气流在云的中轴附近最强, 在云的边界附近逐渐变小, 在云的顶部和云的四周有下沉气流。

最近, Probest-Jones 和 Harper^[10] 应用都卜勒雷达, 测出了阵雨云中气流垂直速度的分布情况。图 6 是其中的一个例子。这块云的厚度约 6 公里, 上升速度最大的区域在云的顶部稍下面的地

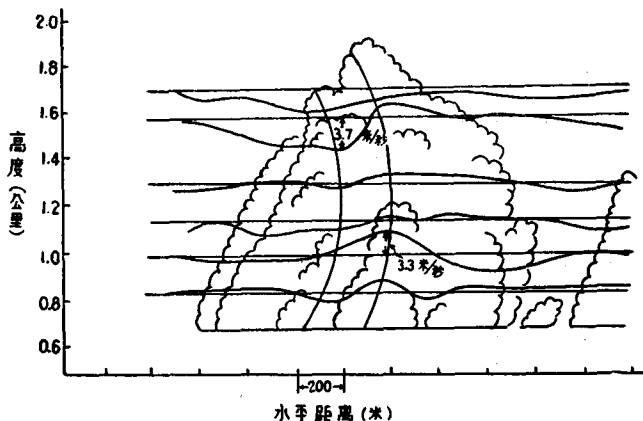


图 5. 一块信风积云中气流垂直速度的分布^[9]

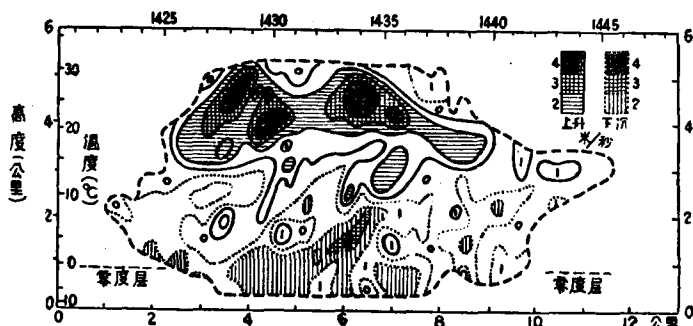


图 6. 一块阵雨云中气流的垂直速度分布^[10]

方。云中除有系统的上升运动外,也有系统的下沉运动。下沉气流在云的底部显著,强度比上升气流稍小。图 7 是按图 6 的观测结果,所给出的一个气流模型。从图 7 可以看到,云中上升气流位在云移动方向的前部,下沉气流主要在云的后部。Browning 和 Ludlam^[11] 也给出过雷雨云中气流分布的一个相类似的模型。

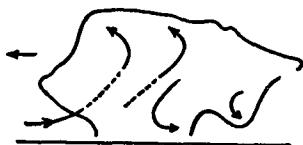


图 7. 阵雨云中的气流模型^[10]