

能量天气学(讲义)

雷雨顺 编著

陕西气象 特刊

写在前面的话

《能量天气学(讲义)》是中年气象学家雷雨顺同志应本刊之请，在病倒的前半年，加夜班编写出来的。我们怀着尊敬和不安的心情，感谢他对我们工作的支持。这本书是他多年来在能量天气学方面研究成果系统、全面的总结，是气象科研成就中的珍品。

这本书问世了，雷雨顺同志却过早地离开了我们，未能看到，这是我们深感遗憾的事。现在奉献到读者面前，作为对雷雨顺同志永久的纪念。

中国气象编辑室

一九八三年三月十日

说 明

一九八一年和一九八二年，先后应陕西、吉林等省气象学会及业务部门之邀，介绍了能量天气学的理论和应用方法。许多同志希望把讲稿刊出，以供参考。考虑到湖北省气象科学研究所一九七八年铅印的《能量天气学概述》，印数有限，已发行完毕，另一方面，随着这几年有关研究和业务工作的进展，该书也应及时增订。

为此，我根据以往的材料和几次讲稿，整理出这个“讲义”，请“陕西气象”刊印，以应急需，并藉此得到一个听取意见的机会。

全书共分七章。第一—四章是基础知识部分，占全书的多一半，目的是为了给不易得到很多参考书、也没有条件阅读外文参考书的预报员提供一些较广泛的大气能量学和大气不稳定理论的知识。这也可以作为有兴趣的同志们进一步发展能量天气学的一个引子。第五—七章，介绍的是能量天气学的一些具体概念、方法和应用问题。这一部分主要是这几年来在国内发展起来的，也许可以为一些台站同志所喜闻乐见，但其中确实有许多地方不系统、不完善，有待进一步做工作。

全书大量使用了《能量天气学概述》的有关章节，还把北京大学和中山大学曾印过的《能量天气分析基础》中我写的某些章节（主要是第一章）加以引用，修改都不大。全书中也有约40%的内容是增写的，着重介绍了近年的有关进展。以便读者在实际工作中具体应用。这里还要指出，这个“讲义”中还有一部分和我在新疆的讲稿“降水及其天气学研究”有所重复。由于这二者作为不同课题的讲义，各有其相对完整性，故只好暂时如此。以后如有机会正式出版，再重新改写调整。

由于这个稿子仍然是讲义性的，存在问题很多，期望读者提出宝贵意见。

这里，对“陕西气象”编辑同志付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。

雷 雨 顺

一九八二年七月一日北京

能量天气学(讲义)

目 录

第一章 引论

§ 1.1 溯源

§ 1.2 大气内在能量种类

1、动能 2、位能 3、内能 4、潜热能 5、功和焓

§ 1.3 常用的几种能量组合形式

1、总比能 2、湿静力能量 3、干静力能量 4、湿焓 5、干比能
6、正压大气的比能

§ 1.4 有关单位

§ 1.5 各种尺度大气环流系统的动能

§ 1.6 大气外能源

1、太阳辐射能 2、长波辐射 3、下垫面贮存的能量 4、大气内部的异常能源

第二章 常用能量物理量

§ 2.1 物理量的保守性质

§ 2.2 总比能方程

§ 2.3 绝热过程

§ 2.4 位温和干空气比能温度

1、位温 2、干空气总比能温度 3、干静力温度 4、 T_0 和 θ 的比较

§ 2.5 湿球位温、相当位温和湿静力总温度

1、湿球位温 2、相当位温 3、湿空气的总比能温度 4、湿静力总温度 5、 T_σ 和 θ_e 的比较

§ 2.6 饱和能差

§ 2.7 两套温度系统

§ 2.8 综合物理量

1、 R_i 数 2、 R_0 数 3、弗罗德数 Fi 4、 Z 判据 5、能量位涡度

第三章 大气能量学

§ 3.1 大气的总位能

- 1、总比能 2、平均总位能高度 3、马古列斯问题
- § 3.2 **有效位能**
 - 1、基本物理模式 2、全球大气中的有效位能 3、风暴的有效位能
- § 3.3 **湿有效位能**
 - 1、湿总位能 2、全球湿有效位能 3、参考气压
- § 3.4 **能量转换**
 - 1、能量局地变化的基本方程 2、斜压不稳定能量转换机制 3、能量转换函数 4、摩擦耗散 5、有效位能的制造
- § 3.5 **大气环流系统的能量平衡**
 - 1、大气环流 2、温带扰动 3、短波 4、台风 5、风暴区的次天气尺度运动 6、潜热能的重要性 7、暴雨的动能平衡

第四章 大气不稳定能量

- § 4.1 **能量和不稳定理论**
 - 1、两个分支 2、分解有效位能的一种基本方法 3、能源和大气不稳定度分类 4、大气不稳定的类别
- § 4.2 **铅直不稳定能量**
 - 1、气块法 2、干空气静力稳定度 3、条件性稳定度 4、对流稳定度 5、潜在性稳定度 6、位势不稳定 7、饱和湿空气的静力稳定度 8、位势不稳定能量的制造机制
- § 4.3 **第二种条件不稳定**
 - 1、CISK 2、大尺度环境对积云的控制作用 3、重力波
- § 4.4 **斜压不稳定**
 - 1、天气尺度系统的起源 2、控制斜压不稳定的主要因子 3、斜压不稳定波的特性 4、斜压不稳定判据 5、水平切变的影响 6、摩擦和非绝热因子的影响
- § 4.5 **惯性不稳定**
 - 1、地转惯性不稳定 2、正压不稳定 3、对称不稳定 4、K-H不稳定
- § 4.6 **运动尺度和不稳定理论**
 - 1、长波 2、短波 3、中尺度扰动 4、中尺度带状降水区
- § 4.7 **理查逊数和大气稳定度**
 - 1、干空气铅直稳定度和切变 2、湿切变大气的静力稳定度 3、位势不稳定和 R_i 数 4、斜压性和 R_i 数
- § 4.8 **不稳定理论的应用问题**
 - 1、多能源多尺度问题 2、局限性 3、内因和外因

第五章 能量天气学分析方法和图表

§ 5.1 物理量的计算

- 1、比湿的计算
- 2、潜热项的计算
- 3、静力能量温度的计算
- 4、相当位温计算
- 5、 R_i 数的计算

§ 5.2 业务应用查算问题

- 1、单站地面查算表
- 2、地面天气图查算
- 3、等压面图的查算
- 4、探空廓线

§ 5.3 单站铅直能量廓线分析

- 1、静力稳定度图解法
- 2、能量廓线分析项目
- 3、局地大气能量结构类型
- 4、热带各种积云天气的 θ_e 廓线

§ 5.4 能量天气图分析

- 1、经向剖面
- 2、等压面能量分析
- 3、地面能量场分析

§ 5.5 大范围的稳定度分析

- 1、对流层下部干静力稳定度
- 2、对流层下部对流稳定度
- 3、对流层下部潜在稳定度
- 4、对流层下部位势稳定度
- 5、对流层下部的 R_i 数

§ 5.6 能量演变分析

- 1、地面单站能量局地变化分析
- 2、地面变能场分析
- 3、单站探空时间—铅直剖面能量分析

§ 5.7 流场和压能场分析

- 1、主要流线分析法
- 2、压能场分析

§ 5.8 等能面分析

- 1、等能面
- 2、等能面形势图的制做
- 3、等能面上相对气流分析
- 4、等能面分析的优缺点
- 5、简易等能面图

第六章 几种能量天气系统

§ 6.1 能量锋

- 1、一般情况
- 2、能量锋的客观性及其与降水的关系
- 3、能量锋的不稳定属性
- 4、能量锋和强风暴的一种关系
- 5、能量锋的普遍意义
- 6、华南暖锋

§ 6.2 Ω 能量系统

- 1、锢囚高能舌
- 2、 Ω 系统和气压系统
- 3、结构和气流特征
- 4、湿斜压调整过程

§ 6.3 能量管

- 1、能量平衡和热塔
- 2、台风等能管
- 3、等能管的铅直结构
- 4、铅直环流

§ 6.4 干暖盖

- 1、天气学意义
- 2、演变过程
- 3、干暖盖的作用
- 4、干暖盖强度指数

§ 6.5 中小尺度能量系统

1、两类系统 2、阵风锋 3、雨团能量锋 4、两种中分析方法比较

§ 6.6 气压系统的能量特征

1、能量场和压、温、湿、风场的一般关系 2、各种气压系统的能量廓线 3、锢囚低压的能量特征 4、副热带高压的能量特征 5、西南低涡的能量特征 6、东风波

第七章 在强天气分析和预报中的应用

§ 7.1 雨暴发生的能量观

1、暴雨和“雨暴” 2、形成强降水的基本条件 3、雨暴的局地能量条件和雨暴性质 4、触发条件 5、供应条件 6、增强条件 7、日变化

§ 7.2 雨暴大尺度条件的能量分析

1、聚能配置 2、不稳定能量制造系统 3、阻挡系统 4、先兆过程 5、人字形切变 6、三种雨暴

§ 7.3 几种暴雨的能量分析

1、春季暴雨 2、前汛期雨暴 3、梅雨 4、盛夏特大暴雨 5、北槽南涡类气旋大暴雨 6、影响暴雨的弱冷空气的能量分析 7、川陕大暴雨的能量特征 8、高原强降水 9、副高北侧的局地暴雨 10、沙漠附近的特大暴雨 11、稳定性降水

§ 7.4 台风的能量分析和预报

1、台风的能量特征 2、能量场和台风移动路径 3、台风暴雨落区和能量场 4、台风暴雨强度和能量场

§ 7.5 雷暴、冰雪和飑线的能量特征

1、一般特征 2、雷暴大风 3、南方春季飑线 4、飑线和能量锋 5、雹暴能量的局地积累 6、雹暴和暴雨能量条件的差异 7、冬雷暴和高空雷暴

§ 7.6 寒潮和大雪的能量分析

1、大雪的水平能量特征 2、暴雪区和中层高能中心 3、寒潮前后地面单站能量变化 4、单站时空剖面上的寒潮能量特征

§ 7.7 在天气预报上的应用

1、雨暴预报思路 2、先兆过程 3、暴雨落区预报 4、消空问题 5、时效问题

总温度查算表见《能量天气学(讲义)》附刊

参 考 文 献

- [1] 谢义炳, 气象学报, 27 (1956), 1—24.
- [2] 顾震潮、陈雄山、许有丰, 气象学报, 29 (1958), 44—56.
- [3] 陶诗言等, 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究, 科学出版社, 1963.
- [4] 仇永炎, 气象学报, 28 (1957), 13—26.
- [5] Riehl, H. et al., *Geophysica*, 1958, 503—535.
- [6] Palmén E. et al., 大气环流系统 (程纯枢等译), 科学出版社, 1978.
- [7] ВОРИСЕНОВ, Е.Л., ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ АТМОСФЕРНЫХ. ПРОЦЕССОВ, ГИДРОМЕТ, Изд, 1960.
- [8] Darkow, G.L., *J. Appl. Met.*, 7 (1968), 199—205.
- [9] Kreitzberg, C. W. et al., *J. Appl. Met.*, 9 (1970), 417—432.
- [10] 谢义炳, 气象科技资料, 1978, No. 2, 5—9.
- [11] 中央气象局气象科学研究所, 能量天气学研究, 1975, 油印本.
- [12] 中央气象局气象科学研究所, 能量天气学研究(二); 能量天气学若干问题; 皆油印本, 1977.
- [13] 雷雨顺、吴宝俊、吴正华, 大气科学, 2 (1978), 297—306.
- [14] 雷雨顺、吴正华, 静力稳定度的能量分析, 气象学报, 38 (1980), 380—386.
- [15] 雷雨顺, 吴正华, 气象, 1980, No. 5, 9—11.
- 又, 暴雨文集 (1978), 162—171, 吉林人民出版社, 1980.
- [16] 叶笃正, 大气科学, 3 (1979), 195—202.
- [17] 陶诗言、丁一汇、周晓平, 同上, 227—237.
- [18] 曾庆存, 同上, 256—269.
- [19] Kieffer P.J., 参见 *Handbook of Met.*, 1943, P. 401.
- [20] Newton, C.W., et al., *Tellus*, 17 (1965), 449—462.
- [21] 叶笃正、李麦村, 大气运动中的适应问题, 科学出版社, 1965.
- [22] Iribarne, J.V. and W.J. Godson, *Atmospheric thermodynamics* 1973.
- [23] Koppány Gr., *met. Mag.*, 104 (1975), 302—306.
- [24] 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 科学出版社, 1979.
- [25] 杨大升、刘余滨、刘式适, 动力气象学, 气象出版社, 1981.
- [26] Saucier W.T., *Principles of Meteorological Analysis*, The University of Chicago Press., 1955.
- [27] Green, J.S.A., et al., *Q.J.R. Met. Soc.*, 92 (1966), 210—219.

- [28] E.N.洛伦茨, 大气环流的性质和理论, 科学出版社, 1976。
- [29] 正野重方, 动力气象学, 科学出版社, 1960。
- [30] 北京大学地球物理系气象教研室, 天气分析和预报, 科学出版社, 1976。
- [31] 朱乾根、林锦瑞、寿绍文, 天气学原理和方法, 气象出版社, 1981。
- [32] 巢纪平、周晓平, 积云动力学, 科学出版社, 1964。
- [33] Holton, J.R., An Introduction to dynamic Meteorology, Academic Press, 1972.
- [34] Johnson, D.R., J.Atmo.Sci., 27(1970), 727—741。
- [35] Dutton, J.A., The Ceaseless Wind, an introduction to the theory of atmospheric motion, 1976.
- [36] 谢义炳, 暴雨文集, 1—15, 吉林人民出版社, 1980。
- [37] Lorentz E.N., Tellus, 30(1978), 15—31, 31(1979), 230—235。
- [38] 吴宝俊, 蒋凤英, 湿有效位能的一种近似表示式及其计算, 气象科技, 1981, 附(二), 1—4。
- [39] Saltzman, B., Rev.Geophysic and SPace, 8(1970), 269—289。
- [40] Smith, P.J., Tellus, 25(1973), 411—423。
- [41] Ward, J.H., et al., Mon.Wea.Rev., 104(1976), 836—848。
- [42] Palmen, E., et al., Tellus, 7(1965), 186—188。
- [43] 孔震村(E.C.Kung), et al., J.Atmos.Sci., 32(1975), 729—740。
- [44] Krishnamarti T.N., J.Appl.met., 9(1970), 442—450。
- [45] 雷雨顺, 降水及其天气学研究, 新疆气象, 1982。
- [46] 雷雨顺, 吴正华, 张兰香, 北方天气文集(1), 12—23, 北京大学出版社, 1981。
- [47] Fritsch, J.M., 见Cloud Dynamics, 1970, 850—867。
- [48] 李麦村, 中国科学, 1976, 592—601。
- [49] Orlanski, I., J.Atmos.Sci., 30(1973), 1007—1016。
- [50] 叶笃正、朱抱真, 大气环流的若干基本问题, 科学出版社, 1958。
- [51] A.厄里阿生, 见S.佩特森, 天气分析与预报, 第十五章, 科学出版社, 1958。
- [52] J.J.哈延纳, 数值天气预报, 北京大学地球物理系气象专业译, 科学出版社, 1975。
- [53] Fleagle, R.G., Q.J.R.Met.Soc., 83(1957), 1—20。
- [54] Parker, A.E., Met.Mag., 97(1968), 340—349。
- [55] 陈秋士, 中纬度中尺度系统发生发展的物理过程, 见“数值预报和数理统计预报会议文集”, 科学出版社, 1974。
- [56] 郭晓岚, Tellus, 3(1951), 234—243。
- [57] Hoskin, R.T., Q.T.R.Met.Soc., 100(1974), 480—481。
- [58] Roach, W.T., et al., Q.J.R.Met.Soc., 101(1975), 437—462。

- [59] 新田尚, 天气, 18(1871), No.6.
- [60] Nitta, T., (新田尚) et al., J. Atmos. Sci., 29(1972), 1011—1024.
- [61] Lin Y.J., et al., J. Atmos. Sci., 31(1974), 1392—1401.
- [62] Haman K.E., Mon. Wea. Rev., 104(1976), 49—56.
- [63] 杉山清春, 天气, 19(1972), No.7, 13—19.
- [64] Paine, D.A., et al., The Linking of multi-Scaled energy Sources leading to atmospheric development, 1974.
- [65] Marray, F.W., J. Appl. Met., 6(1967), 203—204.
- [66] Lasheem A.M., Intern. Trop. Met, Part 2, 1—4, 1974.
- [67] Harris, B.E., WMO, No.321(1972), 287—307.
- [68] Aspliden, C.I., J. Appl. Met., 15(1976), 692—697.
- [69] Betts, A.K., Mon. Wea. Rev., 102(1974), 760—764.
- [70] 湖北省气象局科研所, 能量天气学研究文集, 1980.
- [71] 陶诗言等, 中国之暴雨, 科学出版社, 1980.
- [72] 杨国祥, 中小尺度天气学, 气象出版社即将出版.
- [73] 吴正华等, 气象科学技术集刊, 1, 18—26, 气象出版社, 1981.
- [74] 包澄澜等, 大气科学, 1977年, 153—155.
- [75] 赵煜佳、张清芬, 见中央气象局气象科学研究所的“论文汇集”, 1965.
- [76] 三宫洸三, 天气, 23(1976), 288—296.
- [77] 雷雨顺、吴正华, 北方灾害性天气文集, 16—21, 气象出版社, 1981.
- [78] 吴宝俊、王翠娣, 同(73), 32—40.
- [79] 马鹤年, 同(36), 171—176.
- [80] 马鹤年, 北方天气文集(1), 1—11, 1981.
- [81] 雷雨顺, 气象学报, 39(1981), 168—181.
- [82] Lockwood, J.G., Met. Mag., 97(1968), 145—155, 381—383.
- [83] Calson, T.N., et al., Tellus, 20(1968), 203—226.
- [84] Calson, T.N., et al., Bull. Amer. Met. Soc., 61(1980), No.9, 1018—1032.
- [85] 章淹等, 中尺度天气分析, 农业出版社, 1965.
- [86] 李吉顺, 丁一汇、蔡则怡, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第九号, 39—46, 1980.
- [87] Darkow, G.L., et al., Mon. Wea. Rev., 103(1975), 817—822.
- [88] 雷雨顺, 气象, 1981, No.4, 2—4.
- [89] Reed, R.T. et al., J. Atmos. Sci., 28(1971), 1117—1133.
- [90] 时冈达志, 气象研究 1—1, 120(1974), 517—528.
- [91] Merkin L., Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics, 9(1977), 129—157.

- [92] Gray, W.M., Mon Wea.Rew., 105(1977), 1171—1178.
- [93] Bosart, L.F., et al., Mon.Wea.Rev., 106(1978), 348—362.
- [94] 顾逸华, 气象, 1982, No. 2, 16—17.
- [95] 符长锋, 气象, 1981, No. 6, 10—12.
- [96] 雷雨顺, 气象, 1980, No. 8, 4—6.
- [97] 田盛培, 气象, 1980, No. 11, 10—12.
- [98] 杨红梅、雷雨顺, 北方天气文集(二), 北京大学出版社 1982年出版。
- [99] 游景炎、赵亚民、马桂英, 见京、津、冀暴雨中尺度试验1979年研究报告, 1980.
- [100] 陆一强, 北方天气文集(四), 约1983年出版。
- [101] 朱金元, 强对流天气文集, 气象出版社将出版。
- [102] 张婉佩, 发展台风与不发展台风的对比分析, 1978年全国台风会议文集, 即将出版。
- [103] 齐向华, 气象, 1977, No. 3, 14—15.
- [104] 卢保祥, 军事气象, 1977, No. 1, 36—48.
- [105] 张学敏, 教学研究(一), 18—24, 1980.
- [106] 张学敏, 气象, 1981, No. 9, 2—3.
- [107] 雷雨顺, 见[101], 又, 气象, 1981, No. 4, 2—4.
- [108] 汤键坤, 一次冰雹天气的分析, 贵州气象, 1980, No. 2, 1—14.
- [109] 吴哲明, 气象, 1980, No. 10, 14—16.
- [110] 华北六省市冰雪科研协作组, 华北地区大范围雪暴的天气学研究, 气象出版社将出版。
- [111] 雷雨顺, 大范围雪暴的发生条件, 高原气象将刊登。
- [112] 李玉书, 气象, 1982, No. 4, 7—8.
- [113] 内蒙锡盟气象台, 81.5锡盟东北部风雪寒潮过程分析, 1982油印本。
- [114] 王继志, 大气科学, 2(1978), 307—313.
- [115] 符长锋、陈世银, 气象, 1980, No. 2, 1—2.
- [116] 雷雨顺、吴宝骏、吴正华, 冰雹概论, 科学出版社, 1978.
- [117] 吴正华, 北方灾害性天气文集, 90—95, 气象出版社, 1981.
- [118] 吴正华, 华北区域性暴雨落区预报的探讨, 同[99], 53—59.
- [119] 李开秀、李新国、河南气象, 1982, No. 1, 8—10.
- [120] 王秀玲、彭彬如, 新疆气象, 1982, No. 2, 19—22.

第一章 引 论

§ 1.1 渊 源

1826年出现了世界上第一张天气图，约100年后天气学才真正形成，并得到蓬勃的发展。本世纪四十年代，籍助于高空天气图，气象学变成了三维科学。随着现代大气科学的发展，六十年代后建立在大气动力学基础上的“数值天气预报”逐渐在各国得到了广泛的应用。

但在今后相当长的时间，天气学方法，即以天气图为主要工具的方法，仍是研究天气发展规律和制作各种时效的天气预报的主要方法。不过，随着科学技术的发展，天气学的研究指导思想和分析内容会不断地有所发展，也日益客观化、量化。

例如，现行天气图分析的一个重要前提是，假定风场和气压场已经存在，考察在各种作用力下的大气运动的变化过程。可是，由于大气环流系统中各种力之间的关系错综复杂，只用这种动力学方法不容易研究大气运动发生和维持的许多问题。

因此，人们早就认识到：也可以从另一种观点——能量学观点来研究大气运动规律。大气可以看做是包含各种形式能量的一个闭合系统，根据物理上熟知的能量守恒原理，一个孤立系统的能量不会自生自灭，而只能从一种形式转换成另一种形式。据此，如知道了大气起始时刻的总能量，又根据某些物理考虑还可以知道终止时刻的能量状态，从而就可以确定终止状态下的大气运动状况。正是根据这种观点，人们把大气中能量的制造、转换和消

耗问题，与大气热力学和动力学问题分别开来，单独进行了研究，在对大气运动规律的认识上已取得了一定成果。

风雨雷电，是由各种尺度的大气涡旋系统造成的。一般公认，这种涡旋系统是大气层结的热力不稳定和基本气流的动力不稳定的必然结果。用能量学的语言说，就是由于大气中出现了不稳定能量。当累积了大量的一触即发的这种不稳定能量时，在适当的扰动条件下，各种涡旋就发生发展起来，造成这种那种的天气现象。不稳定能量消耗殆尽，这个扰动系统也就逐渐消失了。同时又开始积累新的不稳定能量。整个大气的能量循环就是这样不停地进行着。

所谓能量天气学，就是按照能量守恒和转换的物理规律，用天气图方法研究天气分析和预报问题。重点是想弥补常规天气图方法之不足，着重对天气现象发生的能源和水汽问题提出一些切实可行的分析方法，以做为常规天气学方法的辅助手段。这也就是此种方法引起国内气象工作者一定兴趣的原因。

现在所说的能量天气学，本来内含在已经发展了几十年的天气动力学中的。但是，它和常规天气学中单项地分析压、温、湿、风场确实是有原则不同的：它既关心分别代表位能、显热能、潜热能和动能的压、温、湿、风场，更关心综合压、温、湿、风的总比能场，着重研究大气中的总能量（尤其不稳定能量）的变化；对于造成各种灾害的强天气，又特别关心其水汽变化造成的能量变化。这就是能量天

气学的基本出发点。

我国气象台站广大气象人员在业务实践中认识到：雷雨、冰雹和暴雨这类对流天气发生发展中最活跃的因子是水汽，和水汽垂直分布有关的对流不稳定能量是主要能源。在寻找预报这类天气的指标时都注意综合考虑温压湿各种要素及其时空变化。这种实践经验是提出能量天气学并使它迅速发展的基本动力。

在大气科学理论上，大气能量学是熟知的，多年来一直有许多人从事研究。大气环流系统的理论研究和诊断分析中，能量平衡是一个基本课题。在数值天气预报的模式设计中，也要考虑动力学方程组在能量上的一致性。这些工作从不同角度上为进行能量天气学研究提供了理论基础。现行日常天气预报业务上，要分析等高线、等风速线、等温线和等比湿线等，也可以看作在进行位能、动能、内能和潜热能的单项分析。这种分析方法为能量分析方法提供了基本的分析经验。

五十年代初，谢义炳等在研究夏季降水天气时就注意使用包含了水汽的假相当位温 θ_{se} 〔¹〕，在顾震潮、陶诗言、仇永炎及其他人的研究中也都注意分析水汽和应用 θ_{se} 〔²⁻⁴〕。我们在后面会看到 θ_{se} 是很接近总能量的相当温度的一个量，因此，以往分析 θ_{se} 所得到的结果，照样可以用到能量天气分析中。国外，在大尺度大气运动中使用总能量，是五十年代末和六十年代初相继出现的〔⁵⁻⁷〕。六十年代末期，在英美气象刊物上发表了用总能量这个概念研究中纬度天气学问题的一些材料〔⁸⁻⁹〕。这些工作都可以看作能量天气学研究的开端性工作。

但正如谢义炳在第一次能量天气分析会议总结中所指出的〔¹⁰〕，做为一种天气分析和预报方法，在我国是由中央气象

局气象科学研究所首先研究并推广的〔¹¹⁻¹⁵〕。叶笃正、陶诗言、曾庆存等在总结我国气象科学三十年进展时，都指出〔¹⁶⁻¹⁸〕，我国用能量方法在暴雨和强对流天气的分析和预报中揭示出许多重要现象，得到广泛的应用和发展，取得了一些可喜的成果。

当然，这仅仅是开始，要用它和其它方法结合弄清楚强天气的发生发展过程并制定预报方案，还要从理论上和实践上做许多工作。为此，我们在本书中既介绍国内能量天气学研究中取得的一些成果，也对大气能量学的许多基础知识做些介绍，以便读者（尤其广大业务工作者）参考。

§ 1.2 大气内在能量种类

在物理上，能量是指物体所具有的与其状态相联系的一种内在能力；一个系统的能量的变化，和作用于这系统上的外力所作的功成正比。因此，能量是系统的状态的单值函数。凡一个系统的力学的、电学的、化学的状态的变化，都可以说是这系统有力学、电学、化学的能量变化。

对于大气，例如单位质量空气团，具有各种性质的状态，因而也具有与这种状态相联系的内在能量。在这些能量中，我们主要考虑运动学和热力学的几种能量。

（1）动能 大风（空气的高速运动）能刮倒树木房屋，运动着的物体所具有的这种内在能力叫做动能，其大小决定于物体的质量和运动速度，单位质量空气的动能：

$$E_k = \frac{1}{2} V^2 \quad (1.1)$$

其中 V 是风速，且 $V^2 = u^2 + v^2 + w^2$ ；这里的 u 、 v 、 w 是风在 x 、 y 、 z 三个坐标上的分量。

（2）位能 离地面一定距离的物体

落下时，能把地面压实，能砸伤动物；这是由于地球对物体的引力使物体具有的一种内在能力，叫做位能。按照万有引力定律，地面上空的一切物体，不论其质量如何，都以相同的重力加速度 g 落下，重力位能的大小则由物体质量及物体在重力场中的位置而定。在数值上说，某高度 Z 处单位质量空气的位能 E_p ，等于克服重力把该空气块抬升到 Z 高度所花费的功，即等于重力位势 Φ ：

$$E_p = gz = \Phi \quad (1.2)$$

这里的 z 一般都取该气块距海平面的高度。由此式可见，现在业务上绘制的等压面形势图也就是位能形势图，可以用来考察规定等压面上位能的贮存情况。

上述的动能和位能，是对整个物体（这里指单位质量气块）而言的，与物体的客观运动和状态有关，因而被统称为机械能，是普通力学的研究对象。下面再介绍和热力学状态有关的两种大气内在能量，即内能和潜热能。

（3）内能 对于理想气体来说，其分子之间相互作用的能量比热力运动能量小得多，故其内能只由分子热运动平均动能决定，而且只是温度的函数。大气的特征和理想气体接近，故单位质量内能的表达式为：

$$E_i = C_v T \quad (1.3)$$

其中 T 为温度（绝对温标， K ）， C_v 为定容比热。

泛言之，凡和物体内部微观运动、状态及结构有关的能量，都统称为内能。而上边所定义的内能实际是热能，（并没有考虑辐射能、电磁能、化学能和原子能）。这几种能量或对天气变化的影响甚小，或其作用还不为人们了解，或在外能源中讨论（如辐射能）。

（4）潜热能 大气中水汽量虽然不

大，但和水汽变化有关的能量转换过程在大气宏观和微观运动中经常起着重大而微妙的作用。当空气中的水汽凝结成雨滴时，放出凝结潜热、单位质量湿空气中所含有的潜热能 E_e （也叫潜焓）

$$E_e = Lq \quad (1.4)$$

其中 q 为空气比湿（经常用混合比代替）， L 为凝结潜热、是温度的函数，

$$L = 597.3 - 0.566t \text{ 卡/克} \approx 600 \text{ 卡/克} \cdot \text{度} \quad (1.5)$$

其中 t 为温度（ $^{\circ}C$ ）。一般情况下，都把 L 取为常数。忽略了 L 随温度的变化，自然会引起误差，但与观测误差相比，这误差是很小的。另外，上式只考虑了汽化热，发生固体降水时还应包括融化热；但这种过程复杂，而且发生区域也小（尤其夏半年），故一般也不考虑。

顺便指出，如果液体雨滴经过干空气下降，则雨滴的蒸发会消耗大气内能，其表达式和（1.4）式相同而取负号。这样情况对强对流天气中强大的下沉气流的形成起很大作用。

（5）功和焓 上述的动能、位能、内能和潜热能是大气所具有的四种最基本的能量形式。但以后会看到，在总能量的计算中不用内能 $C_v T$ ，而用热焓代替之。为了了解此种代替的重要含义，需要说明做功和能量变化的关系。

由牛顿第二定律知道，在外力作用下，物体发生位移，称为外力对物体做了功，这时物体受力而有了加速度，即速度发生了变化，也就是动能发生了变化。同样，做功也可以使位能发生变化，还可以使动能和位能互相转化，等等。总之，能量的变化或转化和做功密切联系在一起，功是使物体能量发生变化或使一种形式的能量转换为另一种形式能量的方式，功是被传递的能量的量度。

在大气中，一般只涉及一种形式的功，空气膨胀做的功 A 。它就是空气体积元 dV 克服环境的气压 P 做的功 δA ，

$$\delta A = PdV \quad (1.6)$$

利用这个关系，常定义一个和内能不同的状态函数焓 h ，对单位质量空气说（注意 $dm = \rho dV$ ，其中 dm 为质量元， ρ 为空气密度）。

$$h = C_v T + \frac{1}{\rho} P = C_v T + RT = C_p T \quad (1.7)$$

其中 $C_p = C_v + R$ ，是空气的定压比热， R 为气体常数。由此可见，焓就是内能与空气等压膨胀做功之和。由于焓的表达式只与温度有关，因此，习惯把焓称做显热能，以与潜热能区分。

§ 1.3 常用的几种能量组合形式

上面所述的显热能、位能、潜热能和动能，是大气热力学和动力学中的四种基本能量形式。在实用上，由于所考虑的问题的特点不同，或使用总比能（四种之和），或使用其二、三种之和，简述如下。

1、总比能 单位质量空气的总能量（简称比能）是显热能、位能、潜热能和动能之和，

$$E_t = C_p T + gz + Lq + \frac{1}{2} V^2 \quad (1.8)$$

显然，总比能是表达大气中重要的各能量的较完整的式子。但研究具体问题时，上述各项或可忽略，或可看作常数，因此，可用以下几种简化形式。

2、湿静力能量 E_t 中的动能项（ $\frac{1}{2} V^2$ ），除了高空急流附近极少数情形之外，比其它几项小二、三个数量级，因此，一般可不考虑，故（1.8）式简化

为

$$E_\sigma = C_p T + gz + Lq \quad (1.9)$$

E_σ 叫做湿（空气）静力能量，“静力”一词表示未考虑动能， E_σ 又叫 σ 函数，是在本世纪四十年代初，人们为鉴别气团而提出来的〔10〕。近些年， E_σ 在热带对流参数化研究中受到了广泛的使用。它也是目前在能量天气分析中最经常使用的一个量。

3、干静力能量 如果空气中湿度很小，则（1.9）式还可简化为：

$$E_D = C_p T + gz \quad (1.10)$$

E 是干空气的静力能量，在气象上应用十分广泛，并且有种种异名。最著名的称呼叫做蒙哥马利函数（或叫等熵面流函数），又叫实在能量或位势热量。有人认为， E 和位温关系密切，以叫位热比较合适；因而也可以把 E_σ 叫做湿位热。

4、湿焓 天气分析中，在固定等压面上讨论问题比较方便。这时，如果所考虑的水平范围不大，则 E_σ 中的 gz 项可看做常数 Φ_c ，故只要计算

$$E_h = C_p T + Lq \quad (1.11)$$

E_h 是湿空气的焓。我国气象工作者在研究台风路径和500mb能量场的关系时，就是计算和 E_h 相当的温度，突出了温湿项的作用（见§7.4）。

5、干比能 如果讨论高空急流附近的能量问题，水汽项的贡献可略，而动能项的贡献必须考虑。这时有：

$$E_{\sigma,t} = C_p T + gz + \frac{1}{2} V^2 \quad (1.12)$$

$E_{\sigma,t}$ 就是干空气的比能。C. W. 牛顿等用此讨论了急流附近的能量分布，并发现在最大风速高度，急流轴必然显出超过流线振幅的系统性蜿蜒，才能满足移动性波系中的能量学和运动学要求〔20〕。

6、正压大气的比能 对于正压大气，等压面上没有温度变化，空气中也不

包含水汽, 则 能量 E_t , 退化为更简单的形式:

$$E_p = gz + \frac{1}{2}V^2 \quad (1.13)$$

这就是正压大气比能。

通常, 在等压面上计算 E_t , 小范围内位能项近于常数, 动能项也可以忽略, 二者的重要性完全被掩盖了。但是在许多问题上, 如正压不稳定问题, 如低层急流问题, 这二项有其特殊贡献, 因此, 应有特殊的分析方法。

叶笃正、李麦村等在研究大气运动中的适应问题时曾强调^[21]在中小尺度无摩擦运动中, 准地转关系不能成立, 但正压大气的单位质量的能量:

$$E_F = gz + \frac{1}{2}V^2 \quad (\text{单位为米}^2/\text{秒}^2)$$

守恒、即
$$\frac{dE_F}{dt} = 0$$

也就是说, 等 E_F 线和流线是平行的, 故建议分析 E_F 场。

§ 1.4 有关单位

现行的物理量单位系统中, 先选定长度(L), 质量(M)和时间(T)作为基本量, 而其它的任何导出量Q都按下式表示出来,

$$[Q] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (1.14)$$

此式称为物理量Q的量纲式; 指数 α 、 β 、 γ 称为量纲, 是任意有理数。

气象上和物理上一样, 一般选用CgS系统, 即厘米(Cm)、克(g)、秒(S)制; 有时也用到MKS系统, 即米(M)、千克(Kg)、秒(S)制。表1.4给出常用的一些导出量的单位名称和量纲。

在物理上, 能量的单位和功的单位相同, 其量纲为 L^2MT^{-2} 。能量单位尔格和焦耳之间的关系为

$$1 \text{ 焦耳} = 10^7 \text{ 尔格}$$

例如, 对10米/秒的风速, 每克空气的动能为 0.5×10^6 尔格 $=0.05$ 焦耳。见表1.4

热量只是能量的一种特殊形式, 因此, 国际上规定热量单位使用能量单位。可是由于历史原因, 目前在有关文献中还经常使用卡(又叫克卡)和千卡作为热量单位。因此, 热量有焦耳和卡两种通用单位。卡就是一克纯水由14.5℃升高到15.5℃过程中所需能量。焦耳和卡的变换关系是:

$$\begin{aligned} \text{热力学上, } 1 \text{ 卡} &= 4.1840 \text{ 焦耳} \\ &= 4.1840 \times 10^7 \text{ 尔格} \end{aligned}$$

气象上常用国际卡, $1 \text{ 卡} = 4.1868 \text{ 焦耳}$

因此

$$1 \text{ 焦耳} = 0.2389 \text{ 卡}$$

$$1 \text{ 尔格} = 2.389 \times 10^{-8} \text{ 卡}$$

有些动力气象书上, 考虑到方程中有些项惯用卡为单位, 而另一些项都用焦耳做单位, 因此常在有关项上乘以热功当量J或功热当量A; 也有的书上不标出A或J, 但读者应心中有数。J就是1卡热量可以变换成的功。

$$J = 4.1863 \times 10^7 \text{ 尔格/卡}$$

$$\text{而 } \frac{1}{J} = A \text{ 就是功热当量}$$

$$A = 2.389 \times 10^{-8} \text{ 卡/尔格}$$

在进行能量天气学研究时, 按理说, 以使用上述的能量单位为合适。但我们考虑到总比能各组成项中, 和空气温度联系的显热项是主要项, 又考虑到计算的简便和一般气象工作者对温度单位感到直观, 乃用能量所相当的温度大小表示能量大小。这对于表示比能来说, 是很合理的, 以后可以看到, 物理上严格推导能证明, 人们熟悉的相当位温就是湿空气比能所相应的温度的准确表达式。而且, 能量单位

表1.4

常用物理量的单位和量纲〔²²〕

物理量 单位 和 量纲	CgS 系 统		MKS 系 统	
	单 位	量 纲	单 位	量 纲
加 速 度		厘米、秒 ⁻²		米、秒 ⁻²
密 度		克、厘米 ⁻³		千克、米 ⁻³
力	达 因	克、厘米、秒 ⁻²	牛 顿	千克、米、秒 ⁻²
压 强	毫 巴	达因、厘米 ⁻² 克、厘米 ⁻¹ 秒 ⁻²	牛顿/米 ²	千克、米 ⁻¹ 秒 ⁻²
能 量	尔 格	达因、厘米 克、厘米 ² 秒 ⁻²	焦 尔	牛顿、米 千克、米 ² 秒 ⁻²
比 能	尔格/克	厘米 ² 秒 ⁻²	焦尔/千克	米 ² 、秒 ⁻²

和温度单位之间的换算关系也很简单，由（1.8）式可见，能量单位除以 C_D 就是温度单位，即：

$$C_D \approx 1.00 \text{ 焦尔/克} \cdot \text{度}$$

$$= 0.24 \text{ 卡/克} \cdot \text{度} \quad (1.15)$$

故当能量用〔焦尔/克〕表示时，相当于温度用〔度〕表示。

此外，能量变化率的单位和功率单位一样应当用：

$$\text{瓦特} = 1 \text{ 焦尔/秒}$$

有时还要用到单位面积上的能量，用1卡/米²或1卡/厘米²，后一单位有的书上特别称作〔⁶〕

$$\text{兰利} = 1 \text{ 卡/厘米}^2$$

§1.5 各种尺度大气环流系统的动能

一切天气学问题总是首先和有关的大气环流系统的时间和空间尺度相联系，天气现象的可预报性也和尺度有关，环流系统的生命期则是随系统的大小而变化。

例如近地面的小旋风寿命不大于一分钟，局地雷暴延续几小时，大的气旋则可维持7—15天。而大型环流的生命期可达

一月或更长的时间。

各种尺度大气环流系统的铅直和水平尺度都可以较准确地估计出来，从而也可估算出各系统中的空气质量。另外，几乎各种系统的风速都可大致取做10米/秒。据此就可计算出运动系统的总动能，表1.5给出了七种环流系统的动能和生命期〔²³〕。由表及相应的图1.5可见，小尺度系统的生命期随动能的增加而缓慢增加，但在大尺度系统中迅速增加，其增长上限就是全球大气环流所具有的动能，约为 10^{21} 焦尔。

表1.5中还给出了环流系统的机械功

率，即动能 K 与生命期 T 之比 $\frac{K}{T}$ ，它表示

了动能的生产率、转换率或耗散率，其单位这里用瓦或焦尔/秒。此外表中还给了单位面积的功率，瓦/米²。我们知道整个地球得到的太阳能量级约为 10^{17} 瓦，或 10^3 瓦/米²。而动能转换和太阳能之比（即地球大气系统的净效率）为 10^{-3} ，也就是说只有千分之一的太阳能转换为地球大气动能。太阳能和大气净效率决定了大气系统机械功率上限， 10^{14} 瓦。