

Nengliang tianqixue

雷雨顺

能量 天气学

气象出版社

能 量 天 气 学

雷雨顺 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书共七章，分别简要地介绍了大气能量学和大气不稳定理论的基本概念及近年来的主要成果；系统地介绍了能量天气分析的基本物理量、计算方法和能量天气系统等，并总结了能量天气学应用于我国灾害性天气分析和预报所取得的结果。

本书可供气象台站预报人员阅读，也可供从事气象科研、教学的人员参考。

能 量 天 气 学

雷雨顺 编著

责任编辑：康文骥

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本：787×1092 1/16 印张：10.5 字数：255千字

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷

印数：1—1,500

统一书号：13194·0278 定价：2.50元

序

谢
义
炳

怎样充分利用观测资料，揭示大气运动规律、预测天气，尤其是危险性天气的发展，是气象学启蒙时期到现在的重要目的。

大气结构分析在气象学中被看成具有生物学和生理学中的解剖学的作用。大气结构分析如解剖学一样，是很费时间的，也要经过严格训练的。医生投药时，没有时间也不可能对病人进行解剖，只能从事间接会诊或 x 光透视。预报员从事预报时，可以对大气结构从事一定程度的直接诊断——解剖，可是时间常不允许。解决办法之一，是以高速电子计算机在中心机构把诊断结果做出来，再用传真图象发送各地，这是一个好办法。但也存在一些问题，即中心机构诊断的内容，和从事诊断的方法是否足用和完善，以及接收诊断结果的人员如何理解这些诊断结果。

另一个解决办法是把一些表达大气结构的线条填在天气图上。很早以前，就有人建议把探空曲线填在天气图上。但仅见于某些研究作品中，而不能付诸实用，因为手续太繁了，也使天气图上符号太多，使人眼花缭乱。

雷雨顺等同志的能量天气学分析方法，把天气图分析和层结稳定性分析结合起来，方法简便，图像清楚，在夏季降水天气的分析预报中具有实践价值，是在前人工作基础上的发展和创新。

任何发展和创新的工作，在其初期不会是完善的。对这类工作是指指点点、评头论足？还是满腔热情加以支持、进行改进和进一步发展完善呢？这是两种不同的态度和观点。前几年的事实，证明广大气象台站的实际工作人员是具有正确的态度和观点的。我们相信雷雨顺等同志创导的工作，将会在群众的实践中，继续向前发展。

说*

明

雷雨顺

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，该书也应及时增印。

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，并借此得到一个听取意见的机会。

讲义共分七章。第一至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，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。第五至七章，介绍这几年在国内发展起来的能量天气学的一些具体概念、方法和应用问题。它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。

讲义大量使用了《能量天气学概述》的有关章节，还引用了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），修改都不大。讲义中也有约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《降水及其天气学研究》讲稿有所重复。由于这二者作为不同课题，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

* 这是雷雨顺同志为《陕西气象》刊印能量气象学(讲义)写的说明。此书是吴正华同志根据雷雨顺同志的遗愿替他将该讲义稿整理而成。

目 录

序

说明

第一章 引论	1
§ 1.1 渊源	1
§ 1.2 大气内在能量种类	2
§ 1.3 常用的几种能量组合形式	4
§ 1.4 有关单位	5
§ 1.5 各种尺度大气环流系统的动能	6
§ 1.6 大气外能源	8
第二章 常用能量物理量	10
§ 2.1 物理量的保守性质	10
§ 2.2 总比能方程	11
§ 2.3 绝热过程	12
§ 2.4 位温和干空气总比能温度	13
§ 2.5 湿球位温、相当位温和湿静力温度	16
§ 2.6 饱和能差	19
§ 2.7 两套温度系统	20
§ 2.8 综合物理量	21
第三章 大气能量学	24
§ 3.1 大气的总位能	24
§ 3.2 有效位能	27
§ 3.3 湿有效位能	30
§ 3.4 能量转换	31
§ 3.5 大气环流系统的能量平衡	34
第四章 大气不稳定能量	39
§ 4.1 能量和不稳定理论	39
§ 4.2 铅直不稳定能量	41
§ 4.3 第二类条件不稳定	47
§ 4.4 斜压不稳定	49
§ 4.5 惯性不稳定	53
§ 4.6 运动尺度和不稳定理论	55
§ 4.7 理查孙数和大气稳定度	58
§ 4.8 不稳定理论的应用问题	63

第五章 能量天气学分析方法和图表	65
§ 5.1 物理量的计算	65
§ 5.2 业务应用查算问题	67
§ 5.3 单站铅直能量廓线分析	69
§ 5.4 能量天气图分析	73
§ 5.5 大范围的稳定度分析	78
§ 5.6 能量演变分析	79
§ 5.7 流场和正压大气比能场分析	84
§ 5.8 等能面分析	85
第六章 几种能量天气系统	88
§ 6.1 能量锋	88
§ 6.2 Ω 能量系统	92
§ 6.3 能量管	95
§ 6.4 干暖盖	99
§ 6.5 中小尺度能量系统	101
§ 6.6 气压系统的能量特征	104
第七章 能量天气学在强天气分析和预报中的应用	108
§ 7.1 雨暴发生的能量观	108
§ 7.2 雨暴大尺度条件的能量分析	113
§ 7.3 几种暴雨的能量分析	115
§ 7.4 台风的能量分析和预报	121
§ 7.5 雷暴、冰雹和飑线的能量特征	123
§ 7.6 大雪和寒潮的能量分析	125
§ 7.7 能量天气学在天气预报上的应用	126
附表 1: Lq/c_p 查算表	129
附表 2: $Lq/c_p = 1555 e/P$ 查算表	132
附表 3: 1000 毫巴 ¹⁾ (设 $\phi_0 = 0$ 位势米 ²⁾) $T_{\sigma\phi_0}$	134
附表 4: 950 毫巴 (设 $\phi_0 = 500$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	136
附表 5: 900 毫巴 (设 $\phi_0 = 1000$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	138
附表 6: 850 毫巴 (设 $\phi_0 = 1400$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	140
附表 7: 800 毫巴 (设 $\phi_0 = 2000$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	142
附表 8: 700 毫巴 (设 $\phi_0 = 3000$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	144
附表 9: 600 毫巴 (设 $\phi_0 = 4200$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	146

1) 1 毫巴=100 帕, 下同 2) 1 位势米=1 米²/秒, 下同

附表10: 500毫巴(设 $\phi_0=5600$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	148
附表11: 400毫巴(设 $\phi_0=7500$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	150
附表12: 300毫巴(设 $\phi_0=9500$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	152
附表13: 200毫巴(设 $\phi_0=12000$ 位势米) $T_{\sigma\phi_0}$	154
参考文献	156
后记	159

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,借助于高空天气图,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,天气学研究的指导思想和分析内容会不断地有所发展,也会日益客观化、定量化。

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。

人们早就认识到:还可以从另一种观点——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,就可以确定终止状态下大气运动状况。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区分,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,造成种种天气现象。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,作为常规天气学方法的辅助手段。此种方法引起了国内气象工作者一定兴趣。

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。但是,它和常规天气学中单项地分析压、温、湿、风场确实是有原则的不同: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(尤其是不稳定能量)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:在雷雨、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,与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, 大气能量学是人们熟知的, 多年来一直有许多人研究它。在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], 作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], 能量方法在我国用于暴雨和强对流天气的分析和预报中揭示出许多重要现象, 并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所取得的一些成果, 也对大气能量学的许多基础知识作些介绍, 以便读者(尤其是广大业务工作者)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, 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。

上述的功能和位能, 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, 故单位质量气块内能的表达式为

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

其中 T 为绝对温度, c_v 为定容比热。

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 (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,

$$L = (597.3 - 0.566t) \text{卡}^1/\text{克} \approx 600 \text{卡/克} \quad (1.5)$$

其中 t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。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, 这个误差是很小的。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 (尤其是夏半年), 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。这样的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能量转换为另一种能量的方式, 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, 即空气膨胀所做的功 A 。它就是空气体积元 dV 克服环境的气压 P 做的功

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

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 $dm =$

1) 1 卡 = 4.1868 焦耳, 下同

ρdV , 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。现简述如后。

1. 总比能 单位质量空气的总能量(简称总比能)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 $\left(\frac{1}{2} V^2\right)$, 除了高空急流附近等极少数情形之外, 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^[19]。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_D 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。最著名的称呼为蒙哥马利函数(或叫等熵面流函数), 又叫实在能量或位势热量。有人认为, E_D 和位温关系密切, 以叫位热比较合适; 因而也可把 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 500 毫巴等压面能量场的关系时, 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

$$E_{Dt} = c_p T + gZ + \frac{1}{2} V^2 \quad (1.12)$$

E_{Dt} 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

$$E_{bt} = gZ + \frac{1}{2}V^2 \quad (1.13)$$

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,如正压不稳定问题和低层急流问题,这两项有其特殊贡献,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

$$E_{bt} = gZ + \frac{1}{2}V^2 \text{ (单位为米}^2\text{/秒}^2\text{) 守恒,}$$

即

$$\frac{dE_{bt}}{dt} = 0$$

也就是说,等 E_{bt} 线和流线是平行的,故建议分析 E_{bt} 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1.1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 $0.5 \times 10^6 \text{ 尔格} = 0.05 \text{ 焦耳}$ (见表1.1)。

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

$$\begin{aligned} 1 \text{ 焦耳} &= 0.2389 \text{ 卡} \\ 1 \text{ 尔格} &= 2.389 \times 10^{-6} \text{ 卡} \end{aligned}$$

有些动力气象书上，考虑到方程中有些项惯用卡为单位，而另一些项却用焦耳做单位，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。

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

而
$$\frac{1}{J} = A = 2.389 \times 10^{-8} \text{ 卡/尔格}$$

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，仍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_p 就是温度单位，

即
$$c_p = 0.23996 \text{ 卡/克} \cdot \text{度}$$

$$\approx 1.00 \text{ 焦耳/克} \cdot \text{度} \quad (1.15)$$

故当能量用[焦耳/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

$$\text{瓦特} = 1 \text{ 焦耳/秒}$$

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兰利^[6]。

表 1.1 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 ¹⁾ · 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 耳	牛顿 · 米 千克 · 米 ² · 秒 ⁻²
比 能	尔格/克	厘米 ² · 秒 ⁻²	焦耳/千克	米 ² · 秒 ⁻²

1) 1 达因 = 10⁻⁵ 牛，下同

§ 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1.2给出了七种环流系统的动能和生命期^[23]。由表及相应的图1.1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} 焦耳。

表1.2中还给出了环流系统的机械功率，即动能 E_k 与生命期 T 之比，它表示了动能的生产率、转换率或耗散率，其单位用瓦或焦耳/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为 10^{14} 瓦。

表 1.2 几种环流系统的动能

环流系统名称	动能 E_k (焦耳)	生命期 T (秒)	机械功率 (E_k/T)(瓦)	面积 S (米 ²)	单位面积和功率 (E_k/TS)(瓦/米 ²)
A 小旋风	$10^4 \sim 10^5$	10^1	10^3	10^2	10
B 积云单体 (无降水局地单个积云)	$10^{10} \sim 10^{11}$	$10^2 \sim 10^3$	10^8	10^6	10^2
C 局地雷暴	10^{14}	$10^3 \sim 10^4$	10^{10}	10^8	10^2
D 冷锋	10^{17}	10^5	10^{12}	10^{11}	10
E 温带气旋	$10^{17} \sim 10^{19}$	10^6	10^{13}	10^{13}	1
F 锋区 (高空为长波，地面为气旋簇)	10^{20}	10^7	10^{13}	10^{13}	1
G 大气总环流	10^{21}	$10^7 (?)$	10^{14}	10^{14}	1

用大气机械功率除全球大气总动能，得到的大气环流生命期为 10^7 秒(故在表中用问号标志)。可以这样看待这个结果，由所给的太阳辐射造成的地球大气环流系统的持续期约为 10^7 秒，即大致为四个月。

较小尺度环流系统的能量转换效应集中在相对小的地区并在较短的时间内进行。把它和人造能量比一比是很有意思的。现在最大的人造能量是水力发电站获得的，机械功率约 10^9 瓦，和局地雷暴接近，但局地雷暴仅工作两小时。公共汽车的功率一般约 $10^4 \sim 10^5$ 瓦，相当于大的旋风的功率；而民航班机的机械功率为 10^7 瓦，可与局地对流单体相比，即一个局地对流单体的总功率可以使一架飞机在空中呆10到20分钟。

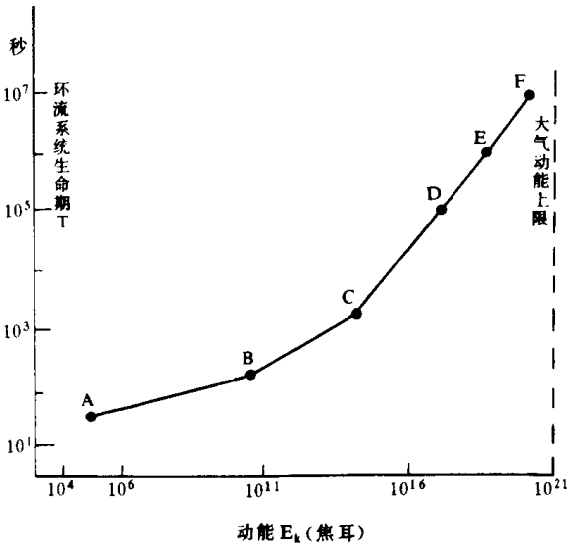


图 1.1 动能和运动生命期关系图

§ 1.6 大气外能源

§ 1.2所讨论的几种能量,是大气内在能量,是从大气热力学、运动学和动力学角度得到的。对于大气中许多运动规律,从大气热力学、运动学和动力学定律出发,得到几个基本能量学原理,并在绝热无粘情况下研究,可以阐明天气分析和预报中碰到的许多问题。但要更好地解决天气学问题,还要研究大气和其环境的能量交换,要研究大气的外部能源和能汇。

1. 太阳辐射能 大气在不停地运动着,运动的根本能源是太阳辐射能——日射。但地球大气对太阳辐射(所谓短波辐射)几乎能全部透过;也就是说,直接由大气吸收太阳辐射能而变成的内能和位能是较小的。太阳辐射能主要是首先加热下垫面(陆面或水面),下垫面通过长波辐射、湍流等作用,再把热量传递给大气,增加大气的总位能。

这说明,下垫面在使日射转变成大气的总位能过程中起着桥梁作用。在大气总能量短期变化中,水汽潜热能是个最活跃的因子,它时大时小,变化多端,和强烈天气(尤其降水天气)有着最密切的关系。而水汽的最初源地也在下垫面,下垫面的水(水域中的水或土壤中的水分)蒸发成水汽时,消耗了下垫面得到的辐射能。水汽到了空中,凝结时释放潜热,供给了大气热能。所以下垫面通过水分蒸发过程,也间接地把太阳辐射能转变为总位能。

下垫面接受的日射很不均匀。其原因有些是系统性的自然因子造成的,如地球公转和自转造成的地面日射的季节变化和日变化。有些是下垫面性质差异所造成的,大者如海陆差异,小者如局地土壤性质和覆被的差异。另外,和大气运动系统的演变、移动相联系的空中水汽、天空云况的变化,也大大影响了下垫面对日射的吸收,使问题更为错综复杂。

2. 长波辐射 空气也具有一般黑体的特性,因而,按其本身温度发出长波辐射,使大气内能转换成辐射能。内能减少,气温降低,气柱在垂直方向必然收缩,位能也减少,即大气总位能减少。

空气并不是绝对黑体,具有选择吸收性,水汽、二氧化碳和臭氧是空气中吸收地面辐射的主要物质。下垫面长波辐射通过空气时,有很大一部分为大气吸收,使大气的温度升高。

大气顶部与底部之间的长波辐射通量之差,就是红外辐射通量的净损失,也就是大气冷却率。这种冷却率达到每日 1°C 以上,是大气能量平衡中的能汇。大气通过净辐射损失的能量在700—500毫巴的对流层中部最大。所损失的能量补给来源有二:一是依靠地面向大气最低层的显热垂直向上输送;二是靠对流层低层(主要发生在地面以上1500~3000米范围内)的潜热加热。

3. 下垫面贮存的能量 在考虑大气外能源时还必须注意下垫面贮存的能量。例如,对北半球地-气系统来说,春夏的日射大于射出的长波辐射,即存在多余的热量。大气所能贮存的能量只是剩余热量的 $1/10$ 。因此,绝大部分剩余能量必然贮存在海洋内,而且是贮存在平均深度约200米的海水上层。春夏暂时剩余而贮存下来的热量,大约能使200米深度的海水温度升高 1.2°C 。

固体地面贮存热量的本领比海洋相对地要小,但在土壤中肯定也会贮存一定热量。

地球内部的能量对大气的影晌,一般都认为可以忽略不计。但是,在局部火山活动区域,地热对大气的局部加热,可能对局地天气有所影响。另外,贮存在深海的能量,经过长久的缓慢翻动过程,达到海洋表面,也可能影响气候变化。

4. 大气内部的异常能源 在各种天气系统制约下,大气中也会形成一些异常能源。例如,

大气中无云和多云就可造成异常能源。云可以把大量射入日射反射回宇宙空间，无云时反射率为0.14，多云时达0.5，从而使有效太阳能减少或增多，使日射在空间和时间上发生异常分布。而且，云对下垫面来的红外辐射是不透明的，云量的增加和云顶高度的增加都减少了从地-气系统向宇宙空间的红外辐射。例如夏半年低云量增加，使地面温度减少；云顶高度增加，地面温度增加。

对于上述四种大气外能源，也都要用统计分析或数值处理等方法反映在天气预报的研究中；可惜目前在短期预报中还很少研究。