

普通气象学

H·R·拜尔斯 著

$\ln P$

$\frac{b_{sl}}{\theta_{sl}}$
 ΔE

T

E

T

中国人民解放军空军气象学院

一九七九年十月

第 四 版 前 言

新的气象知识正在快速地不断扩展，它向教师、专家和教科书作者提出与之相应的挑战。自从1959年第三版发行以来，气象学已开拓了某些饶有兴趣的新领域，刷新了对某些陈旧概念的理介，较好地进行定量处理已属可能。与此同时，献身于此领域的学生相当好地掌握了它的原理，以及其它科学领域和技能。

本书的目的在于向气象专业的低年级学员在他们学习较为复杂的流体力学和气象分析以前，以及在他们分别进入不同的气象专门化以前，提供大气过程的广阔描述。

本版作了如下的重大修改：1. 关于仪器和观测的前几章（常常被列为另一门课程）列为附录，以期在全书的叙述中连贯性体现得更好些；2. 在大部分章节后面增添了习题；3. 附录中增加了单位制和某些有用的常数；4. 前面的某些章两两结合成为一章；5. 增加了一个引言，为本课程置以某种基础；6. 为了提供更紧密的前后联系，各个章节都增加了前言性质的评述。

作者再次对在本书取材及编排方面给予建议和支持以及参加审阅原稿某些部分的同事和朋友们表示衷心感谢。

H. R. 拜尔斯

选自第三版前言

本书是以某些普通物理教科书的水平来写的，供物理科技方面的高年级学生用。它设想读者已学过力学及热学方面的基本课程，并熟悉或正在学习微积分。它可以作为气象学科的基础，对于那些迫切准备从事气象工作的工程技术专业的学生，最早可在二年级学习，或者至迟在四年级学习。

本书的第三版在几个方面与前两版不同。首先，当然是它把最新的材料引进到这个迅速变化着的领域中来；其次，从本质上看本书比先前的版本是更为基本些。为了把学员引到只是最近才采用定量方法而发展出的气象学分支面前，强调基本材料是必需的。再说，由于各个方面的应用变得如此专门化，以致需要分门别类的书来处理每一分支；这种专门化的书籍看来正在增多起来。一本书（如象本书）的作者心安理得地知道：应用部分比那些基础部分更加快地过时了。

H. R. 拜尔斯

译 校 前 言

《普通气象学》是拜尔斯(H·R·Byers)教授的*General meteorology*一书1974年第四版的译本。本书是作者在1937年出版的《天气学和航空气象学》的基础上通过不断的教学实践，吸收新近的大气科学研究成果几经修改而成。

普通气象学是大气科学的主要基础之一，内容广泛，特别是近二十年来大气科学的迅速发展，使得它的内容更加丰富。这本书包括日地关系、大气热力学、大气动力学、天气学、数值天气预报、中小尺度天气学和云物理等方面的基本内容。作者在讨论这十分广阔而丰富的知识时，着重物理概念的阐述，且注意针对初学时容易产生的模糊概念加以细致讲解。所以对于具有一定数理基础的大气科学初学者来说，这是一本较好的书，对于从事气象业务或教学的同志也是可供参考的。书末有附录（关于气象观测探测方面的附录内容从略）。

本书由赵颂华（前言、第一章、第十四章、附录）、王嘉楨（第二章、第七章）、陈诗丽（第三章）、彭书铭（第四章）沈春康（第五章）、孔繁敏（第六章）、尹德昌（第八章、第十三章）、郝为锋（第九章、第十章）、包曾德（第十一章）、黄培强（第十二章、第十五章）、王正业（第十六章）同志翻译，由章振越、张丙辰同志校阅。由于我们水平有限，错误难免，欢迎读者批评指正。

译校者

1979年10月

目 录

第一章 引言	1
学习上的某些特点.....	1
气象学的命名.....	2
各章内容安排.....	2
练习.....	3
第二章 太阳、地球和辐射	4
太阳的特性.....	4
地球的运动.....	5
季节.....	7
回归线和极圈.....	8
日照长短和日照强度.....	8
季节的落后.....	11
太阳辐射.....	12
热量输送的类型.....	12
辐射能和光.....	13
黑体辐射.....	14
定义.....	14
辐射定律.....	15
散射.....	20
大气吸收.....	22
太阳辐射在大气中的减弱.....	22
透射率和削弱.....	23
反射.....	24
花房效应.....	25
练习.....	25
第三章 大气的热力平衡	27
太阳辐射和日射.....	27
地球辐射.....	28
自由大气中的辐射.....	30

辐射通量和大气中的冷却	31
辐射图	33
地球的热量平衡	36
练习	39
第四章 温度分布	40
温度的垂直分布	40
平流层	41
对流层	42
对流层的详细分层	46
温度的水平分布	47
练习	49
第五章 热力学和静力学	51
气体定律	51
热力学第一定律	55
位温和干空气的稳定度	68
练习	76
第六章 水汽及其热力学效应	78
水汽压和饱和	78
绝对湿度	80
比湿	80
混合比	82
相对湿度	83
露点温度	83
等熵凝结温度	84
湿度参量的可变性	84
空气柱中的水汽含量	85
相变	87
饱和绝热过程	88
可逆绝热过程和假绝热凝结过程	90
相当位温	90
湿球温度	91
条件性不稳定	93
卷夹过程	93
绝热图和热力学图解	95
在热力图解上进行图解计算	99

适用追踪气块的特性量	99
能量图解	100
气层的稳定度, 对流性不稳定	104
练习	106
第七章 空气的水平运动——风	108
角速度	108
角速度矢量	108
地球上某点的旋转分量	109
佛科摆实验	110
向心力	110
角动量守恒	111
视重力和真重力	112
加速坐标系中的运动	113
惯性力和非惯性力	115
旋转平面上的定量测定	115
球形地球上的科氏加速度	118
气压梯度	119
力的平衡	121
地转平衡	122
气旋和反气旋	124
摩擦效应	125
弯曲路径中的运动	126
运动的小结	129
在等压面上的表示方法	130
等压面上的其他性质	132
地转风随高度的变化	134
小结	138
练习	138
第八章 大气流动特性	140
涡度	140
流线、流函数和速度势	143
环流和涡度	145
环流和力管	148
正压和斜压大气	152
欧拉展开式	152
连续性和散度	154

连续性、角动量和涡度	160
倾向方程	161
说明	162
练习	162
第九章 大气环流	164
移动性气旋和反气旋	169
角动量的输送	170
能量交换	172
急流	172
季风环流	175
大洋的反气旋	176
练习	176
第十章 气旋和反气旋的垂直结构	177
用热成风表示的垂直结构	178
关于压力和温度分布的配置	180
动力学效应	181
锋的特征	182
移动性锋	185
气旋和高空波动	186
锋和气旋的生命史	186
气旋的波动理论	187
气旋生成	189
简化的垂直结构	190
伯杰龙的锢囚锋模式	196
浅薄冷气堆上的气流	197
气旋的能量	197
锋生	198
练习	200
第十一章 气团及其结构和变性	202
气团的源地	202
气团的属性	203
决定气团特性的过程	205
海洋的热交换和蒸发	205
垂直通量的性质	207
气团变性的概述	207

逆温.....	208
雾.....	210
烟雾.....	211
练习.....	212
第十二章 天气图分析概述.....	213
剖面分析.....	214
D 系统.....	216
等压面.....	217
等熵分析.....	219
运动学分析.....	222
散度分析.....	224
涡度分析.....	227
中尺度气象学.....	228
练习.....	230
第十三章 热带气象学.....	231
辐合带.....	231
风的垂直结构.....	233
信风和季风气流的特性.....	233
横波.....	234
热带气旋.....	236
练习.....	245
第十四章 天气预报的定量方法.....	247
地面图运动学.....	247
高空波动的移动.....	248
数值预报.....	251
有限差分法.....	255
根据涡度平流作预报.....	257
练习.....	259
第十五章 凝结、降水和大气电.....	260
气溶胶粒子的尺度谱.....	261
凝结物理学.....	263
溶液效应.....	265
水滴的增长和蒸发.....	268
水滴总体的增长.....	271

冰晶在水汽中的增长和升华.....	272
混合云中增长.....	274
冰的成核作用.....	276
并合增长.....	278
大气电.....	281
练习.....	285
第十六章 雷暴及其有关现象.....	286
雷暴的定义及其与对流的关系.....	286
雷暴单体的结构和生命史.....	287
卷夹和下降气流的热力学.....	289
近地面的雷暴天气.....	290
干雷暴.....	293
夜雷暴.....	293
新单体发展.....	293
雷暴电.....	297
雹.....	299
龙卷.....	300
水龙卷.....	304
附录.....	305

第一章 引言

当宇航人员描述他们进行空间旅行的经验和感觉时，不可避免地要讲到行星地球的壮丽隽秀。他们看到的最突出的景像是标志着大风暴区的巨大云团，以洁雅的幔幛或稠密的条带覆盖着大部分的大陆和海洋。这些云镶嵌在昏暗的蓝色大气中，围绕在行星边缘处的大气色彩变深，因为在那里光的切线穿过较长的大气路径。

如果得到地球的连续照片，应注意云型是在连续变化中。高纬度地区有旋转的云团，它们可以看成是空气沿锋面运动和围绕低压扰动作螺旋转动的踪迹。稠密洁白的云团由赤道地区向中纬度送出显著的云河。

显然，地球有一个永不停息的大气。这就是为什么我们不仅必须考虑大气性质的空间分布，而且还必须考虑它们随时间变化的特性。大气包括其中的波动和涡旋，仍然是跟随着地球一起旋转的系统的不可缺的部分。其内在的运动用来平衡地球不同地区的不等的增热和冷却。

在本书中，我们将考察来自太阳的热量如何分布、如何聚集于低纬地区、对大气运动如何提供热力驱动、地球旋转如何影响这些运动、以及风暴如何成为该图象的主角。

学习上的某些特点

我们将注意力放在高达35公里的大气，这是天气活动大都发生在其中的那个部分。这个球体外壳，相对于地球体积而言有如苹果皮那样，是人们可以观测到的最活跃的自然现象的基地。大气可以看成是在赤道热源和极地热汇之间运转着的巨大热机。由于地球自转所产生的特殊效应和各种局部驱动的反作用，大气的环流运动是复杂的。

出现在电视上或报刊上的天气图，是一种随时间演变的复杂、互相联系、三维结构大为简化了的描述；我们将要讨论付平流层急流、自由大气中的波状扰动、组成大气环流的气团交换、以及由于水的相变、摩擦效应和局地热源热汇所引起的影响的种种细节。所有这些现象都可以用确切的数学——物理术语来描述。气象学家们得到各式各样自动化和先进数值计算机的帮助，正朝着——门可能完整地确切预报的科学前进。

随便浏览本书各章节，可以发现各种各样的数学——物理关系、图表、以及习惯用于表示性质和过程的图示法。如果学员被弄混乱，是不足为奇的，因为他可能习惯于与其通过不加控制的开放系统，不如通过予以控制的实验来学习科学。如果他发现了动人心弦的大气戏剧和向人们挑战的气象问题，那么他就感受到此课程的一些魅力了。

气象学的命名

希腊人已经有**气象学** (*meteorologio*) 一词, 由 *meteoros* (意指上面的东西) 加 *logos* (翻译为论述) 组成; 然而今天对大气的研究已经分成各个专门学科, 以致承袭自古希腊的那种**色罗万象的气象学** (*meteorology*) 已不再能满足每一个人。于是我们将**高层大气** (*aeronomy*) 一词用于研究主要是电离和游离的那部分大气, 它通常在35公里以上的高空; 而**大气科学** (*atmospheric science(s)*) 则被某些人偏爱地作为笼统的名称。以前国际气象协会曾在其名称上加以**大气物理** (*Atmospheric Physics*), 并且有些大学的气象系将气象学这个泛指术语解释为类似的、但又略有不同的含义。

采用随便承认别人建议的那些新名称的部分动机, 是摆脱掉被一般群众甚至某些科学家误介了的名称。一个气象学家, 有如政府天气机构中的预报工作者一样, 被过多的群众看成充其量是在电视上展示粗略的草图和给出天气预报的人。他的成果被认为是非科学的, 或者在某种程度上是纯属消遣性的。老于世故的公众习惯于把气象学看成是大量描述性的、与地理学学习有关的课程。还有一些人认为, 气象学家是由那些研究流星的天文学家派生出来的。

一些中学课程和大学低年级课程的处理, 对这种误介是有影响的。气象学常常和其它叙述性教材放在一起作为一个教学单元, 称为“地球科学”。事实上, 由于地理学家们把天气和气候作为解释自然与人文景观的因子, 他们常常被要求来讲授气象学。

学员, 或许还有教员, 可能由于发现气象学是近代物理的一个特殊分支, 利用先进的数学工具和高度依赖于所有的物理科学而感到惊讶。它主要包括电磁辐射理论、热力学、经典力学、流体物理、物理化学、以及边界层理论。如果包括高层大气, 那么还必须了介: 太阳物理、光谱学、等离子物理、电离、粒子物理、 x 线现象、光学、宇宙线物理、激励现象、电动力学、磁性流体力学、无线电传播、以及其它有关的课程。

各章内容安排

本书各章是按照由基本力到大气的复杂的相互作用这样的顺序来安排的。首先, 我们在第二章考虑驱动大气的能源: 太阳, 以及它的能量是如何被大气接受的。为了了解它的效应以及地球在不均匀增热中的表现, 学员应学习辐射物理学的某些基本概念, 然后再把它们应用于计算地球及其大气的热量收支 (第三章)。在这个背景上, 进而对全球大气的温度分布进行稍加详细的考察, 见第四章。

在增热和冷却、膨胀和压缩的情况下, 空气表现得同任何普通气体一样; 所以在第五章中我们探讨气体热力学, 弄清楚气压为什么随高度变化和怎样变化, 以及在何种条件下大气将变为热力不稳定 (有如雷暴中的那样), 或者强烈稳定 (有如雾和污染事件中的那样)。水是被空气携带的一种最重要的物质, 它经常表现为不可见的水汽, 然而通过云中的凝结和

不时发生的下雨下雪，水不只是湿润了大地，而且还在大气中产生了不容轻视的热力变化（第六章）。

在了解了驱动大气的热机或热力机以后，接着将讨论所造成的空气运动（第七章）。这里我们遇到对于大多数物理专业学生全然是新颖的某些东西——一种非惯性力或视示力。由于地球的自转和需要在这种旋转参考系中表示运动，于是出现了一种视示偏向力。我们将说明这种力与其它力有什么关系，以及当这些运动（风）反映在天气图上看来像什么，这促使我们把更复杂的流体运动概念，用于预报天气和了解全球大气环流（第八章）。

具备了大气热力学和大气动力学的知识之后，将进而注视和解释大气环流，它保持着地球上不同地区在长时期里的温度平衡（第九章）。人们发现，在赤道与极地间相互交换着的气团中的扰动（风暴）极为重要。与这些扰动相伴的冷、暖气团的爆发，构成了赤道以外各个纬度上观测到的天气发生变化的机理（第十章）。

现在，我们注视逐日的天气、热带气团和极地气团、以及它们交绥的特性（第十一章）。按照对天气的这种看法，介绍有关分析不同高度天气图及垂直剖面图的某些知识（第十二章）。为了对天气有个完整的图象，我们将注意力转向热带。在那里人们看到一系列不同的天气问题 and 最令人神怡的现象：飓风或台风（第十三章）。

然后紧接着讨论整个前面章节曾引导出的天气预报问题（第十四章）。虽然在前面曾提出过各种要素预报定量化的暗示，现在将集中注意几个近代的数值方法，如美国国家天气服务中心采用的模式。

末了两章（第十五、六章）考查了重要的中小尺度现象，讨论云和降水物理（人工影响天气是在这个基础上进行的）。最后总结有关雷暴以及其它剧烈天气现象。

如果具有天气观测、测量、分析和预报的实际工作经验的话，那么，书中给出的描述性和定量分析的某些细节就更有意义。如果读者未能由其它课程获得这些实际知识，则他应注意使用手边的天气图和其它资料。附录A及B给出日常仪器及观测的基本内容，它们可列为一门单独的课程；但对那些缺乏这方面知识的学生，则应很好地查阅这些附录以期理解气象记录是如何得来的。附录C在提供定量讨论和求介问题所必需的知识方面，是有益的。

练 习

1 复习附录C中给出的单位制，并

a) 拟制一个由 -60°C 到 40°C 的摄氏温度与华氏温度的对照表；

b) 将 600卡/克 （水在 0°C 附近的汽化热）转换为焦耳/公斤，以及将 $2\text{克}\cdot\text{卡/厘米}^2\text{分}$ （大气外界的近似的太阳增热值）转换为瓦特/米²；

c) 将 $8.5 \times 10^5\text{达因/厘米}^2$ 转换为牛顿/米²、毫巴、等价的毫米水银柱高、等价的吋水银柱高；

d) 将克/厘米³转换为仟克/米³；

e) 将哩/小时转换为米/秒；

f) 试比较半径为5微米的平均云滴与直径为2毫米的雨滴以及直径为1厘米的弹子大小的冰雹的体积，于是再考虑，为了形成一个雨滴或水雹究竟需要多少个云滴聚积起来。

第二章 太阳、地球和辐射

作为巨大的热核反应堆的太阳，是大气能量的根本源泉。当在家里和工厂里烧煤的时候，我们用的是储存着的太阳能。煤就是几千年前的森林化石*，象今天的森林一样，它们的生长都需要阳光。其他形式的热能和机械能也是间接地由太阳赋予的，石油及其提炼品，天然气和很多化学物都是太阳对曾经有生命的有机物作用过而形成的。瀑布的能量，是源于太阳的大气能量推动了蒸发——降水循环，提高了水位而得到的。事实上，甚至连我们的生命都是依靠着太阳，如果没有太阳，就没有可作食品的植物，海里就没有鱼，地球上就没有动物和其他生物。

除了人类在很小规模上，仿制了类似太阳的热核反应外，地球上一切形式的有用能量基本上都是来自太阳。由其他星体供给我们的能量，与从地球内部发出来的能量一样，都是微不足道的。只有太阴潮才是地球上一种重要的不是由太阳所赋予的能源，然而，它与太阳辐射能相比却要小几个量级。

对于气象学来说，太阳是十分重要的，追根求源，一切自然现象都是由于地球各部分接收和利用了太阳能所致。

对我们来说，大部分太阳能，由于向各个方向射入无限的宇宙空间而浪费掉了。地球截取得的只是其中极微小的一部分。然而，极微小的这一部分对于我们，却是一个巨大的宝库。

由于太阳如此重要，每一个学习气象的人都应该熟悉它，尤其要了解太阳和地球的关系。本书只讨论一些重要的问题，在天文基础教科书中，一般都有相当完整的章节讨论太阳，可供读者参考。

太阳的特性

太阳的质量是地球的330,000倍，太阳的半径约为地球的110倍。大约在 1.5×10^8 公里（93百万哩）的平均距离上有地球和其他行星围绕着太阳旋转。人们能够观察到的只是占太阳质量和体积极小部分的太阳大气。太阳大气是分层的：**光球层**，其厚度约为0.0005太阳半径，它复盖着通常可见的日盘，而且实际上是所有观察到的太阳辐射的直接泉源。**色球层**，处在光球层的外围，其厚度约为0.02太阳半径，它是由相对透明的多少是均匀的气体组成，从这一层中显露出钉柱状或针状物。它的存在是1870年日食时首先注意到的。再外面，向没有确定的边界伸展的**日冕**，是炽热的珍珠色的幕幔，处于高度的离子化和原子形态，而且只有在

* 原文是如此 (译者注)

日食时或用一种不借助于日食而显示日冕的特殊仪器——日冕仪才能看见。

太阳中心的温度估计有 1 千 5 百万 K 左右。从色球层放射出来的大部分可以测得到的辐射推知，色球层的底部温度约为 $7300 K$ ，顶部为 $4500 K$ 。有效黑体温度，即理想辐射体所具有的温度约为 $5800 K$ 。

太阳放射 X 射线、宇宙线、无线电波直到波长为 15 米或波长更长的整个电磁谱。无线电波源于巨大的太阳黑子区，且在喷焰时是特别激烈的。人眼被构造得能最大程度地利用阳光，我们能看见太阳光谱中具有最大能量的这一部份。它的红外射线为我们提供热量。

图 2—1 展示的是在对数标尺上的电磁谱配置图。频率 ν 通过 $C = \nu\lambda$ 的关系与波长 λ 相联系。此处 C 是波传播的速度，即光速，约每秒 3×10^8 米。有时也用波数，即在单位距离上波的数目，或 $1/\lambda$ 。频率 $\left(\frac{1}{\text{秒}}\right)$ 的单位用赫兹 (hertz) 表示，简写为 Hz 。

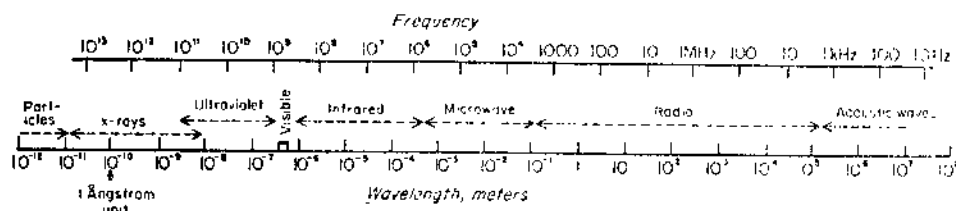


图 2—1 电磁谱

Frequency——频率	X-rays——射 X 线
Ultraviolet——紫外线	Visible——可见光
Infrared——红外线	Microwave——微波
Radio——无线电波	Acoustic waves——声波

某些辐射处在所谓可见波段范围之内，即它能被人眼所发现。波长太短，使得人眼不能观察到的辐射为紫外线，长波类型的辐射为红外辐射。一切辐射能都象光辐射一样，它们以光速在空间直线地传播着。太阳辐射和地球辐射波长的量级是 10^{-8} 米，这 10^{-8} 米称为微米，简写为 μm ，有时用 10^{-9} 米(毫微米 nm)作为辐射单位，或者用特殊的辐射单位 10^{-10} 米，称为埃 ($\text{\AA}$)。可见光波段处在约为 $0.4-0.7 \mu m$ ($400-700 nm$, $4000-7000 \text{\AA}$) 之间。在大气的主要部分，在 $0.1-30 \mu m$ 波长范围内的辐射是有特殊重要的意义，紫外线，X 射线中的光子和微粒辐射产生重要的反应。

地球的运动

我们最熟悉的地球运动就是绕着地轴的自转和沿着轨道绕着太阳的公转。如果从北极上空往下看，这两种运动都是反时针方向的，即自转和公转都是从西到东的。一天 24 小时和我们的钟表计时，都是以地球对太阳自转一周的时间作为基础的。这种时间单位称为太阳日。我们用地球绕着太阳公转一周的时间——365.242 太阳日作为一年来制作日历。

地球自转的实际速度并不是用太阳做参考系来确定的，因为当地球在它的轨道上行进时，在太阳上“回头看”地球的话，地球的转动要比自转一周稍多一点。一年后，地球在其整个轨道上运行了一次，附加的转动总共多了一次自转。图 2—2 表示了这种效应。该图是

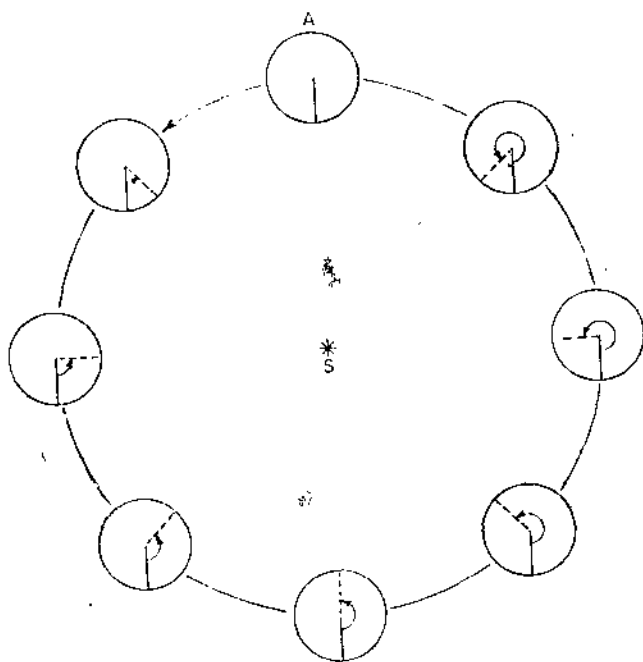


图 2—2 恒星日与地球运动的关系

从北极上空看地球的。当地球在其轨道上以箭头所指示的方向运动时，选用一根用实线半径代表的子午线，在A点这根子午线是向着本页书的底部，也是向着太阳的。地球在其轨道上再一次运动到A点，那根子午线又朝向太阳时，即相对于本页书的底部（固定参考点），地球的旋转已经超过 360° 。小箭头表示的角度是使子午线和太阳排成一线时的附加角。由图可见，当地球在轨道上运行到A点的对面位置上，则自转附加部分累积达 180° ，经过一年，地球又回到A点时，附加角总计达 360° 。如果认为一年为365.242太阳日，则在每一个太阳日，地球转动了一周又 $1/365.242$ 。实际自转一周的时间叫一个**恒星日**，如果用S表示恒星日的时、分、秒，则

$$S + \frac{1}{365.242} S = 24$$

$$S = \frac{24}{1 + \frac{1}{365.242}} = 23.93447 \text{ 小时}$$

或者23小时56分4.09秒。因此，每一个恒星日的地球实际自转率要稍大于钟表所示的速率。

当我们来考虑地球上空气的运动——风时，发现地球的自转对它有深刻的影响，且必须使用每一个恒星日转动 2π 弧度这样真实的速率。顺便指出，当我们精确地说一年，是说它有365.242平均太阳日，因为轨道并不是如图 2—2 所示的那样的圆，而是呈椭圆形的。

地球有两种对气象来说影响极为微小的运动。一种是进动，就是26000年绕地轴作一次缓慢的锥形转动。另一种是太阳运动，就是整个太阳系，包括地球在内，在宇宙空间以每秒19公里的速度向Vega星方向*飞行的这种运动。

对气象来说，地球的自转和公转最为重要。自转间接地引起天气的日变化，例如白天增温，夜间降温。此外，自转对地球和大气都附加一个加速度，即向心加速度，其重要性仅次于引力加速度。

季 节

季节变化与地球的公转有关。若地球的轨道平面和赤道平面相重合，季节变化则将很小。地球在空间沿椭圆轨道到达椭圆长轴最近太阳一端的近日点时，地球接收到的太阳能最强，地球到达椭圆长轴离太阳最远一端的远日点时，太阳的加热最小。作为一个整体来说，一年中地球上接收到的太阳辐射量的差异与我们现在正要研究的引起季节变化的热量差异相比是非常小的。

图2—3揭示了季节形成的真正原因。赤道平面相对地球轨道平面成 $23\frac{1}{2}^{\circ}$ 的倾角。这意味着地轴对轨道平面的垂线成 $23\frac{1}{2}^{\circ}$ 的倾角。地轴倾斜的方向是很接近于椭圆的长轴方向的。因此，二至点即地轴向着太阳倾斜的位置就很接近于远日点和近日点。南半球日照时间

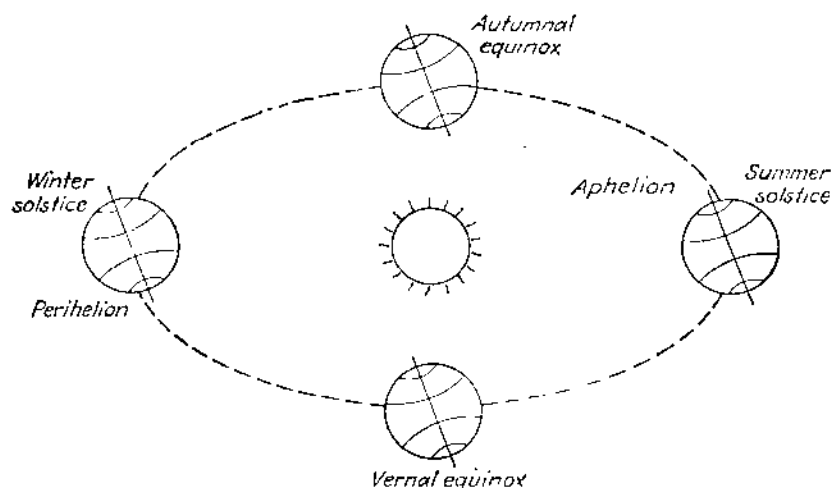


图2—3 地球运动和季节

Vernal equinox——春分	Summer solstice——夏至
Autumnal equinox——秋分	Winter Solstice——冬至
Perihelion——近日点	Aphelion——远日点

* 准确地说，是向着天琴座★星与武仙座★星之间某一个方向

(译者注)