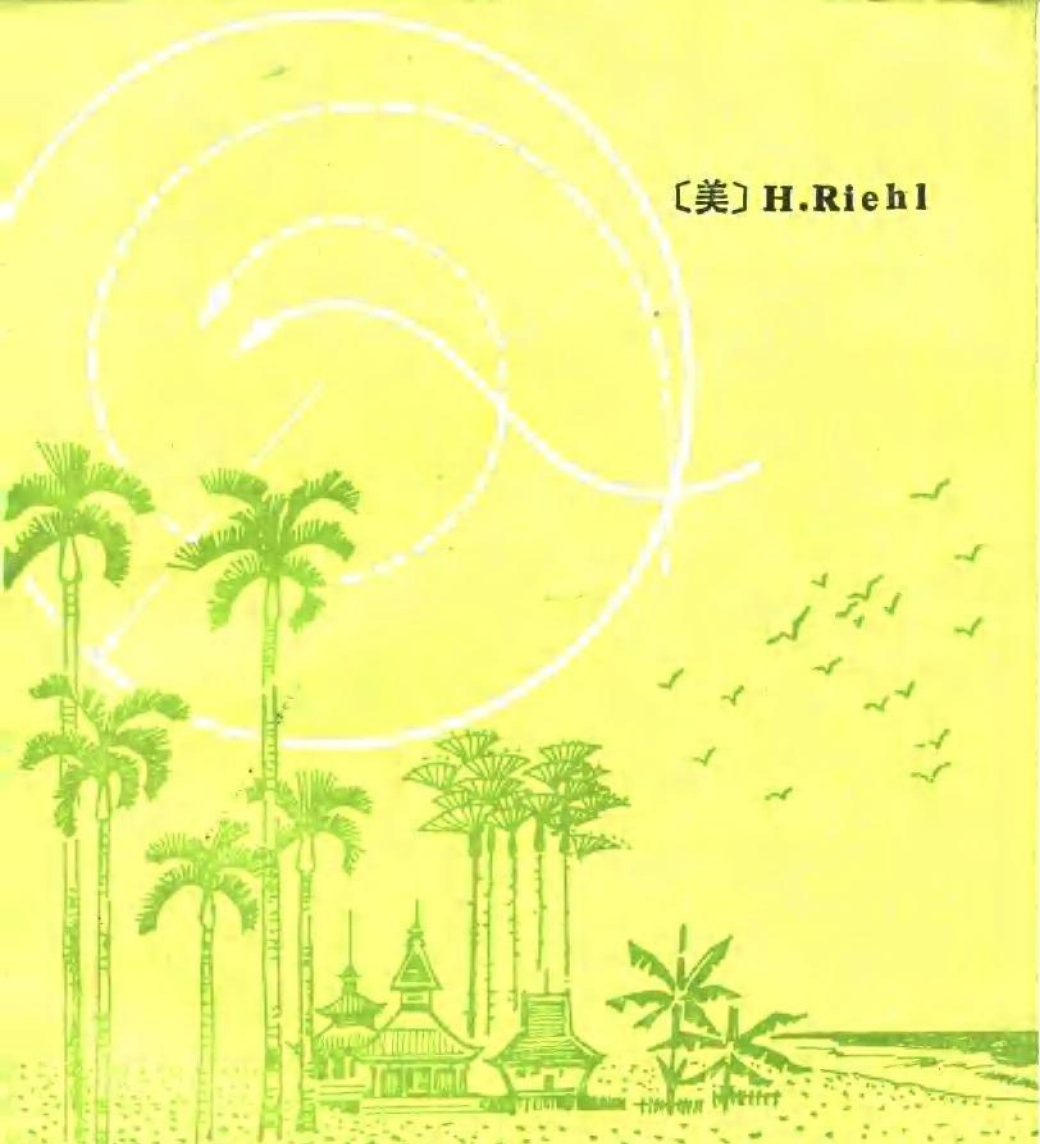


[美] H. Riehl



热带天气与气候

气象出版社

热带天气与气候

[美] H. Riehl 著

徐德林 韩 起 刘树泽 译

丁一汇 陈联寿 校

气象出版社

内 容 简 介

本书比较全面、系统地总结了热带气象学方面的研究成果。全书共分十二章，主要内容包括热带地区天气气候的基本特点、热带主要天气系统、热带气旋和热带大气环流等方面，并着重提出了热带地区的观测事实及其解释。本书讨论范围较广，资料亦较丰富。

本书可供有关大专院校师生，大气科学、地理学、海洋学、航空学和工程学等研究人员，以及广大气象科技工作者参考。

Herbert Riehl

Climate and Weather in the Tropics

Academic Press, Inc. (London) Ltd.

1978

热带天气与气候

[美] H. 锐尔 著

徐德林 韩 起 刘树泽 译

丁一汇 陈联寿 校

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

广益印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本：850×1168 1/32 印张：18.25 字数：503 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数：1—1,500 统一书号：13194·0279

定价：4.45元

译 序

本书作者 Herbert Riehl 教授从事热带气象学教研工作几十年,对于热带天气气候有相当丰富的实践经验和理论知识。

作者 1954 年著的《热带气象学》比较全面地归纳了当时热带气象学方面的研究成果,是本世纪五十、六十年代热带气象学方面的一部知名著作。本书是此后二十五年来热带气象学迅速发展的产物。作者从天气气候学的角度出发,归纳分析了热带气象方面的大量观测事实和研究成果,提出了目前对热带大气的综合认识,并就热带天气气候的研究方向提出自己的看法。全书资料丰富、内容全面,比较系统地叙述了热带天气气候的基本特点、主要天气系统、热带气旋和热带大气环流等。但对一些具体问题的讨论尚不够深入,且未包括一些更新的观测事实和理论解释。本书可供有关大专院校师生,大气科学、地理学、海洋学、航空学和工程学等研究人员,以及广大气象科技工作者参考。

全书译校分工:第一章,韩起、徐德林;第二至四章,刘树泽;第五、十一、十二章,韩起;第六至十章,徐德林。中国科学院大气物理研究所的丁一汇同志对全书作了校订,国家气象局中央气象台的陈联寿同志参加了部分章节的校对工作。

由于我们水平有限,译文中肯定会有不少缺点和错误,欢迎读者批评指正。

译 者

1982 年 10 月

原 序

1950年以来,由于无线电通讯和空间观测使地球上的距离大大缩短,因而使人们对世界气候和天气的整体认识日益加深。越来越清楚的是:热带大气系统及其内部的相互作用,不仅影响整个热带地区,而且最终会影响到全球。所以热带气象学知识的不断发展,是作者撰写本书的主要原因。此外,作者早先的著作《热带气象学》(1954年)亦需要修改补充;更确切地说,它需要由新著取而代之。

现在,人们对大气科学家的要求是:制止沙漠的蔓延,使干旱地区获得更多水,使飓风不严重影响人口稠密的海滨地区等等。总之,要使每个人的生活更舒适些。在作者前一本书出版以后二十五年来所取得的进展表明,其中一些目标现在能够实现了。本书汇集了各种新、旧资料,提出了我们目前对热带大气一致的认识,并明确或含蓄地提出一些进一步发展的方向,以便使天气学能够完成赋予它的崇高使命。本书对大气科学方面的学生(如果他们已具备了本专题的基础知识及基本理论)特别有用;也可作为大气科学和诸如物理学及工程学等有关专业人员的参考书;还可供社会科学方面的人士阅读,这对于提高和更新他们在热带气象方面的知识是很必要的。

同其它领域一样,本领域知识的迅速发展,迫切需要就这一课题写出内容全面的新著。事实证明,在过去二十五年内,即使通常很宁静的热带地区,在这一领域的研究也不是停步不前的。在天气分析技术和对流过程分析等方面已取得了最为明显的进展,现在大部分地区都应用客观分析技术。本书的重点是提出观测事实及其解释,而大量与事实有关的资料是构成全书的基础。不过,本书也决不掩盖有争议的解释以及观测资料的不确定性。某些专题处于迅速的过渡状态,例如通过播云实施的人工影响天气。象这类课题应通过专门的著作和文章继续进行研究,因为,企图通过一本书研究目前有

很大争议的全部问题将会一事无成。对诸如高层大气和海气相互作用等其它课题，请读者参阅专题教课书。

卫星、雷达和计算机等新技术，已经大大促进了大气科学的发展。作者有幸得到 Ferdinand Baer 教授的协作，他为本书写了第十一章，这是一份详细的数值天气预报讲稿。他的专题是热带飓风，但是，他所介绍的方法与把先进的数值方法应用于热带及热带同其它纬带的关系等问题都是有联系的。本书多处编进了卫星和雷达资料，这就大大增加了图片说明。

在选用参考文献时，曾经不得不作一番斟酌。虽说作者备有参考文献近千篇，但是，若把全部文献都列入，那就可能影响本书的主要目的。读者将会看到，这里所用的绝大部分参考文献是世界大部分地区都能得到的杂志。很多有用的材料是包含在专题论著和文章中的，本书作者也难于注明它的具体所在。虽说由于历史的原因对少数这样的文献难以弃之不用，但它们对于一般学生来讲实际上是无用的。带有区域性和局地性的研究绝大部分也被删去了，只有第六章除外，这一章是专门讨论局地问题的。在此，作者对一些朋友和同事表示歉意，他们的一些著作没有列入本书的参考文献，其中有一些无疑是由于疏忽而遗漏的。

波恩的 Hermann Flohn 教授大力支持作者撰写本书，并促成由伦敦科学出版社出版。作者感谢几家出版社同意翻印其具有版权的插图，同样也要感谢朋友们和同行们为本书提供了大量的插图。在本书的编辑和脱稿过程中，作者得到了 J. M. Van Valin 的大力协助。

Herbert Riehl

1979年3月30日

符号说明

全书中所有数学符号在其首次出现时都作了说明。这里只列出常用符号，而不常用的符号已在文中都有定义。

A	面积	L	1) 汽化潜热 2) 波长
a	地球半径	M	质量
C	摄氏温标单位	M_r, M_s	水平质量流
C	1) 传播速度(或矢量) 2) 围绕闭合曲线的环流	M_z	垂直质量流
C_d	曳力系数	m_d	干空气分子量
c_p	定压比热	m_w	水汽分子量
D	等压面间的厚度	P	1) 降水量 2) 位能
E	蒸发	p	压力
e	水汽压	Q	空气热力学热容量
F	1) 融化潜热 2) 摩擦力	Q_g	地-气潜热交换
F_l	潜热通量	Q_s	地-气感热交换
F_s	感热通量	q	比湿
F_z	垂直通量	q_{00}	地面空气的比湿
f	科氏参数	q_s	饱和比湿
g	克	q_w	水面上的比湿
g	重力加速度	R	空气的气体常数
h_p	等压面高度	R_a	大气辐射
h_s	单位质量感热容量	r	1) 柱坐标中的半径 2) 与地轴的距离
J	焦耳, kJ 千焦耳	s, n	水平自然坐标; s 方向与风向一致
K	绝对温标单位	T	温度
K	1) 动能($V^2/2$) 2) 交换系数	T_{00}	地面气温
K_h	涡动的热量输送系数	T_v	虚温
K_m	涡动的动量输送系数	T_w	水温
K_s	涡动的水汽输送系数		

t	时间	θ	位温
U	纬向基本气流	θ_0	相当位温
u, v	笛卡儿坐标中的水平速度分量	λ	经度
	量	μ	涡动粘滞系数
V	风速	ρ	空气密度
\mathbf{V}	风矢	ρ_0	水汽密度
u_0, v_0	柱坐标中的水平速度分量	τ	水平切应力
W	瓦, kW 千瓦	τ_0	表面应力
W	机械功	ϕ	纬度
w	垂直运动	ω	1) 地球自转角速度 2) 个别气压变化 dp/dt
x, y	笛卡儿水平坐标, x 指向东、 y 向北	Ω	角动量
z	垂直坐标	Ω_r, Ω_ϕ	侧向动量输送
β	科氏参数随纬度的变化	Ω_z	垂直动量输送
δ	一般差分符号	$\text{div}(\)$	某要素的散度
Δ	有限差分	$\nabla \cdot \mathbf{V}$ 或 $\text{div}_2 \mathbf{V}$	水平速度散度
γ	温度递减率	—	时间或线平均; 加 ' 表示偏差
ξ	垂直轴的相对涡度		差
ξ_0	绝对涡度	\sim	面积平均; 加 * 表示偏差
η	水平轴的涡度	\wedge	垂直平均(脱字符)
θ	柱坐标中的角度		

关于已做试验的说明

本书多次提及以往所做的几次重大热带试验。图 5.2 所示为三次考察所用考察船队的阵式排列情况。下面为几次主要试验所用缩写词的全称、实验时间与地理位置:

LIE 莱恩岛试验, 北中赤道太平洋, 1967 年 3~4 月;

ATEX 大西洋热带试验, 中赤道大西洋, 1969 年 2 月;

BOMEX 巴巴多斯海洋和气象试验, 小安的列斯群岛以东西热带大西洋, 1969 年 5~7 月;

VIMHEX 委内瑞拉国际气象水文试验, 委内瑞拉北部, 1969 年 6~10 月与 1972 年 5~9 月;

GATE 全球大气研究计划大西洋热带试验, 非洲西部沿海, 1974 年 6~9 月。

目 录

译序

原序

符号说明

第一章 热带风系	(1)
1.1 低层大气环流综述	(1)
1.2 地面环流的季节变化	(7)
1.3 地面风和气压的全球分布	(10)
1.4 赤道槽的地面参数	(14)
1.5 对流层平均风	(19)
1.6 平流层环流	(27)
参考文献	(33)
第二章 辐射、温度和湿度	(37)
2.1 辐射	(38)
2.2 地面气候	(46)
2.3 高空气候	(58)
参考文献	(75)
附录	(77)
第三章 降水和蒸发	(78)
3.1 热带年雨量	(79)
3.2 年降水和蒸发	(80)
3.3 雨量的季节变化	(87)
3.4 极端降水	(97)
3.5 雨量分析	(97)

参考文献.....	(116)
第四章 能量垂直输送	(119)
4.1 云下气层	(120)
4.2 云层	(138)
4.3 云层中的湍流交换	(161)
参考文献.....	(189)
第五章 信风逆温	(195)
5.1 垂直结构	(197)
5.2 信风逆温结构的变化	(203)
5.3 信风逆温的消散	(210)
5.4 太平洋的东北信风	(217)
5.5 信风能量收支	(225)
参考文献.....	(238)
第六章 昼夜和局地调节作用.....	(240)
6.1 加热造成的地-气相互作用.....	(241)
6.2 风的日变化	(252)
6.3 雨量的日变化	(260)
6.4 地形对气候的影响	(264)
6.5 建造水库可能引起的降水增加	(269)
6.6 大气污染	(272)
6.7 雾	(273)
6.8 地面气压的半日变化	(274)
参考文献.....	(275)
第七章 天气观测和分析	(278)
7.1 观测	(278)
7.2 分析方法	(290)

参考文献	(299)
第八章 天气尺度系统	(301)
8.1 引言	(301)
8.2 湍流尺度	(302)
8.3 对流层内的上下层不耦合	(303)
8.4 辐射的影响	(305)
8.5 热带暴雨天气系统	(307)
8.6 天气系统	(325)
参考文献	(371)
第九章 热带气旋的结构和机制	(377)
9.1 生命史概述	(379)
9.2 地面结构	(381)
9.3 高空结构	(400)
9.4 动量和能量收支	(422)
参考文献	(432)
附录：局地热源的讨论	(436)
第十章 热带气旋的形成和移动	(440)
10.1 飓风形成期间的一些观测资料	(441)
10.2 飓风的强度变化	(444)
10.3 飓风的形成	(445)
10.4 飓风后期阶段	(462)
10.5 飓风的移动	(465)
参考文献	(472)
第十一章 飓风数值预报	(477)
11.1 引言	(477)
11.2 动力学方法	(479)

11.3	内应力	(483)
11.4	加热	(486)
11.5	边界条件	(488)
11.6	数值计算	(492)
11.7	初始条件	(497)
11.8	稳态模式	(498)
11.9	统计学方法	(507)
11.10	结果和潜力	(509)
	参考文献	(515)

第十二章 大气环流 (520)

12.1	经典模式	(521)
12.2	经典模式的评述：辐射	(522)
12.3	经典模式的评述：运动	(524)
12.4	数值模拟	(530)
12.5	大气环流的收支	(531)
12.6	大气环流的变化	(555)
	参考文献	(567)

附录：教科书、专题论著、包含大量资料的论文或文献

	综合评述	(572)
--	------	-------

第一章 热带风系

热带跨越整个地球赤道，但在两个半球上何处是它们与中纬度的界线呢？按照来自希腊语“热带”（即过渡）一词的意思，百科全书将南、北回归线严格地确定在南、北纬 23.5 度的纬线上。这是太阳的天顶位置在其年变程中最高位置，以后则开始反向运动。其另一个定义是确定在南、北纬 30 度纬线上，把地球表面分成两部分：热带和温带。这样，热带就成了大气全部动量和大部分热量的源地。

从大气科学的角度看，可以将热带确定为世界上大气过程与较高纬度的大气过程完全不同的一部分地区，这样，人们便可以单独写一本只涉及热带天气和气候的书（地理学家的观点见文献[28a]）。如果这种观点被接受，对流层中部（700 毫巴）东风带和西风带之间的分界线可作为划分这种边界的标准。这一分界线是变动的，它考虑了季节的变化和同一季节中地球上各部分地区的差异。

本书将主要讨论按这种方式划分的“热带”。当然，众所周知，天气不会停滞在任何人造的边界上（国家之间或想象的源和汇之间的边界），也不会停滞在主要的物理机制发生变化的地区。事实上，我们对热带和温带之间的联系非常感兴趣。没有任何一部分大气能够单独存在，不研究更广泛的区域也不能对其了解。所以，全书将经常讨论到狭义的热带与较高纬度大气之间的联系。

1.1 低层大气环流综述

(1) 平均纬向风

概略地观察一下地球表面的平均风系，就可发现一个明显的特征。一般说来，南、北纬 30 度之间盛行东风（来自东方），中、高纬度盛行西风（来自西方）。为什么会出现这种热带和温带风系的明显分

界呢？其根源要从古代谈起。

早在公元前五百年，古代人就能够从尼罗河流域的测量证明地球是圆的，他们推测地球是围绕着太阳转动的。自公元十六和十七世纪以来，当这些概念得到普遍承认时，动力理论很快发展起来。早期的研究者认为，观测和理论同时进行是最重要的。所得到的最有价值的概念之一就是角动量守恒的理论。

考虑半径为 r 的圆盘以角速度 ω 绕中心转动。那末，边缘速度是 $r\omega$ (图 1.1)，再乘以半径 r ，圆盘单位质量的角动量 Ω 为 ωr^2 。

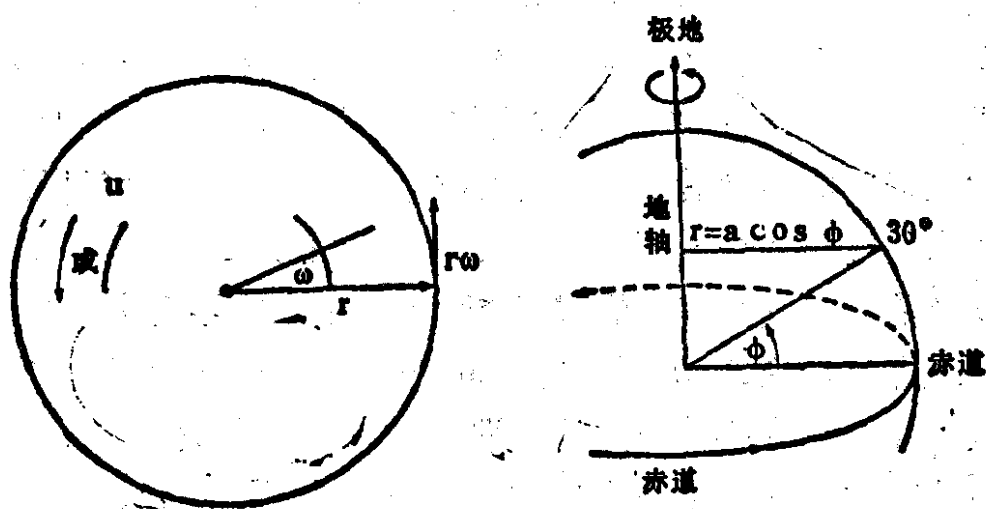


图 1.1 转动圆盘(左)和地球(右)的角动量示意图

如果诸如水之类的流体以不同的速度 u (大气中的风) 绕圆盘运动，那末水的附加或相对角动量是 ur ，单位质量水的总角动量或绝对角动量 $\Omega = ur + \omega r^2$ 。越靠近圆盘中心， ωr^2 越小，它随半径的减小而减小。

现在我们来考察地球及其大气。绕地轴旋转的地球表面的角动量也由 ωr^2 表示，这里 $\omega = 2\pi/86400$ 弧度/秒或 7.29×10^{-5} 秒⁻¹。臂长 $r = a \cos \phi$ (图 1.1 右边)¹⁾，按惯例，用符号 a 表示地球半径， ϕ 表示纬度。当然， ω 的值各处为常数，但 r 是变化的。在赤道， $r = a$ ，到极点， $r = 0$ 。因而，地球的角动量从赤道向极地方向随 $\cos^2 \phi$ 减小。相对角动量由风的东西或纬向分量给出，也用 ur 表示，均对单

1) 原书误为 $r = \cos \phi$ ——译校注。

位质量而言。

地球加大气的总角动量或绝对角动量必须考虑质量。地球质量约为 6×10^{21} 吨，大气的质量约为 5×10^{15} 吨（约为地球质量的百万分之一）。在没有外力作用的情况下，地球和大气系统总质量的角动量 $\Omega = ur + \omega r^2$ 将守恒，这是无需考虑的。

如果没有任何外力的作用，守恒原理不仅可用于地球和大气的总质量，而且可用于单个的空气柱或空气块。那末，沿轨迹有

$$\frac{d}{dt}(ur + \omega r^2) = 0 \quad (1.1)$$

式中 d/dt 是个别质量的时间变化。当空气向较高纬度运动时，随着 ωr^2 减小，应获得相对西风速度；向赤道移动的空气，应转变为东风。从地面风的分布图上可以看出，赤道区为东风，较高纬度带为西风。因而，在热带，空气动量小于地表面动量，而越过 30 度纬线，比地面的动量大。这说明热带的空气已向赤道运动，而中、高纬度的空气向极地运动。

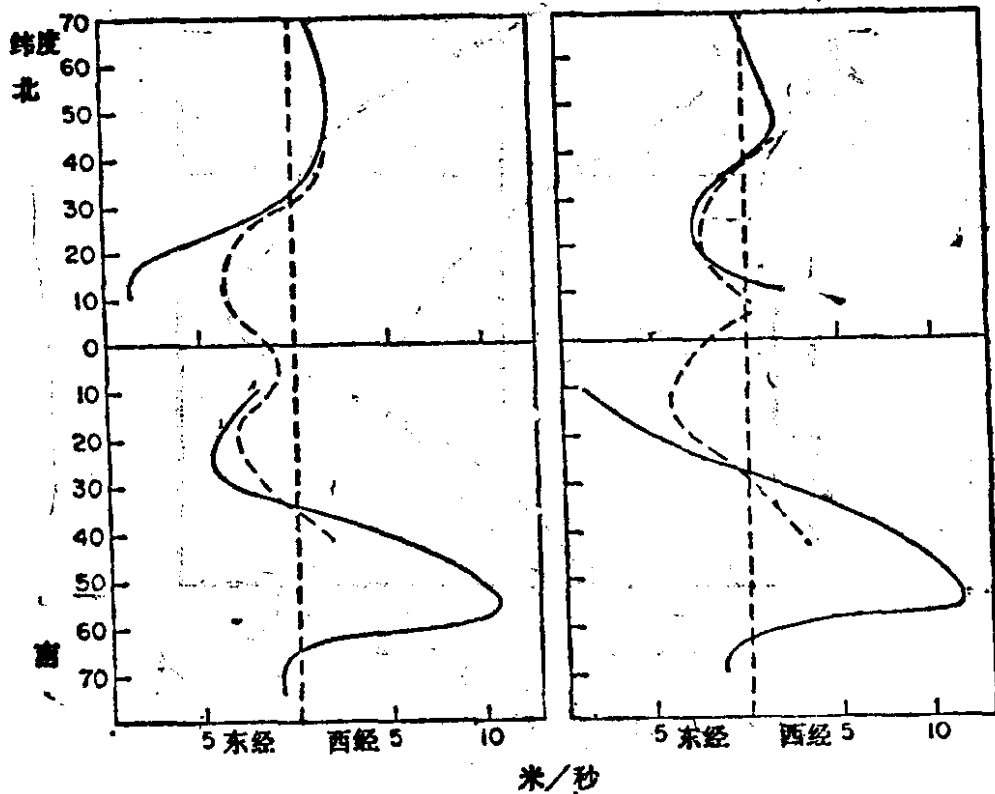


图 1.2 一月(左图)和七月(右图)海洋上平均纬向风(米/秒,虚线)和地转风(实线)^[23]

读者可用 (1.1) 式计算。平均季节廓线给出的平均纬向风分布 (图 1.2) 表明, 东风向赤道方向的增加并不象动量守恒要求的那样大。与整个地气系统不同的是, 空气要受到作用于其上的力的影响。空气向低纬运动过程中, 由于地面摩擦而速度减慢, 结果, 将不会出现环球的强东风带; 同样, 空气向较高纬度运动也受到阻滞。因此, 西风向极地方向的增加也不会如 (1.1) 式要求的那样快。然而, 仍可看到动量守恒的基本趋势, 这种趋势是明显的, 且支配着全球地面平均风场。

(2) 平均经向环流

平均纬向风廓线意味着有南北或经向运动。这些运动确实存在 (图 1.3), 它们在南、北纬 30 度范围内主要向赤道方向运动^[7,43,49]。

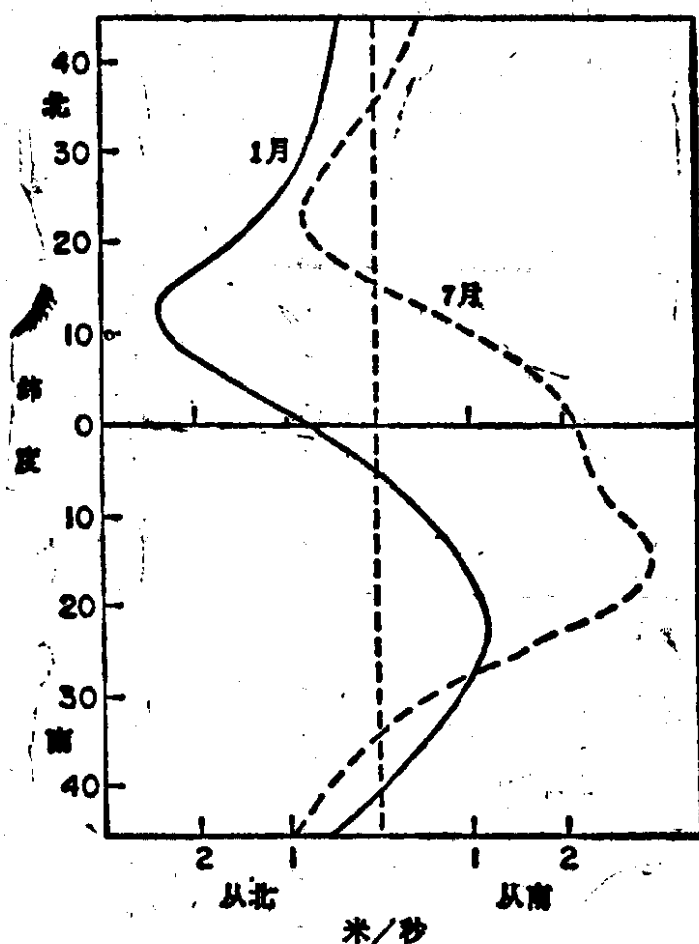


图 1.3 一月和七月洋面平均经向风^[49]

只有某种力在这个方向上使空气加速的条件下, 这种运动才能存在, 而大气中已知的使大尺度风场产生加速的唯一的力是气压力。因

此,人们应该预料,在副热带会发现高压存在,在有空气向赤道方向运动的赤道带会发现低压存在。这种气压分布确实是存在的(图 1.4)。一个宽阔的高压带位于副热带地区;而另一个气压带,往往被称为低压赤道槽(约低 5—10 毫巴)位于热带中心地区。在气象学的历史上,曾将低压槽与赤道带中地球的最大太阳加热区联系起来,因为它随太阳发生季节性位移。

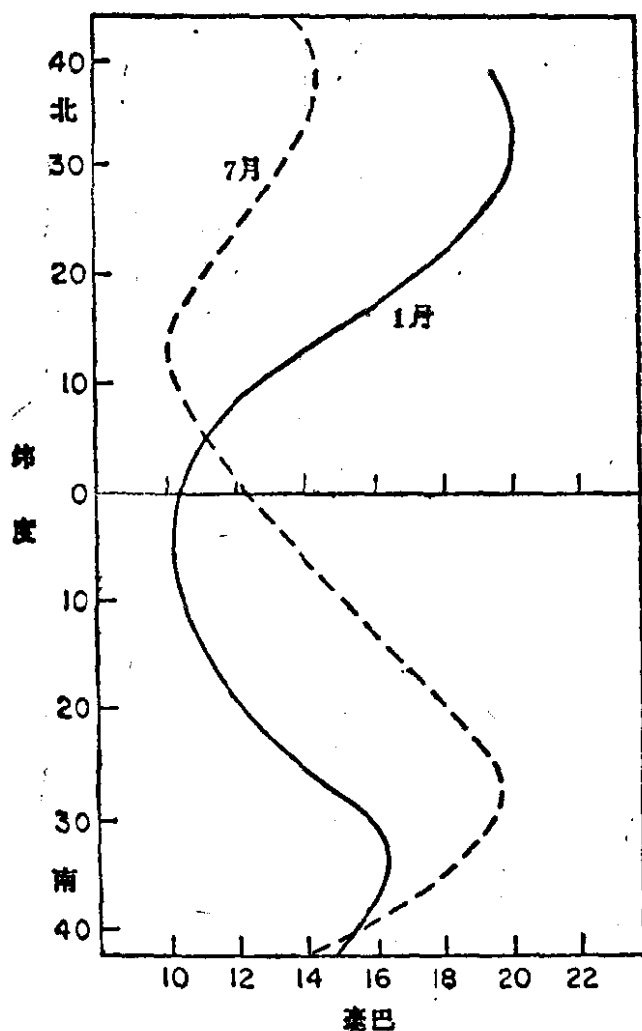


图 1.4 平均海平面气压廓线(毫巴)

(3) 垂直运动和雨带

下面将概括地说明经向环流和热带天气分布的关系。用图 1.3 可以计算各纬度带的水平散度 $\nabla \cdot \mathbf{V}$ (\mathbf{V} 为风矢量)

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v} r}{\partial \phi} = \frac{\partial \bar{v}}{a \partial \phi} - \frac{\bar{v} \tan \phi}{a} \quad (1.2)$$