

气象学和气候学中的 辐射过程

G. W. 帕尔特里奇 著
C. M. R. 普拉特

科学出版社

气象学和气候学中的辐射过程

G. W. 帕尔特里奇 C. M. R. 普拉特 著

吕达仁 黄润恒 林海 译

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了地球大气中辐射传输过程的概貌、基本规律和当前最新研究状况。全书共分十章,包括太阳辐射、地表辐射和大气(包括云和气溶胶)辐射,并详细分析了各种辐射(短波和长波辐射)和大气成分之间复杂的相互作用。书中引用了最新观测资料和研究成果,着重于物理机制的研究,避免复杂的数学推导,并有专门一章介绍大气辐射传输和气候学、大气动力学、大气物理学各分支之间的关系。因此,本书是当前国际上大气辐射领域中较新和较全面的书,被列为 Elsevier 科学出版公司所选“大气科学进展”专著丛书之五。

本书适合于大气物理、气象和气候专业的研究人员、实际工作人员和大学教师、研究生参考阅读。对于与大气环境有关的其他领域,例如环境科学、地理科学、环境遥感等方面的研究技术人员也有相当参考价值。

G. W. Paltridge and C.M.R.Platt

Developments in Atmospheric Science, 5

RADIATIVE PROCESSES IN METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Elsevier Scientific Publishing Company

Amsterdam-Oxford-New York 1976

气象学和气候学中的辐射过程

G. W. 帕尔特里奇 C. M. R. 普拉特 著

吕达仁 黄润恒 林 海 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1981 年 2 月第一次印刷 印张: 14

印数: 0001—2,750 字数: 307,000

统一书号: 13031·1432

本社书号: 2041·13—15

定 价: 2.20 元

译 者 的 话

“气象学和气候学中的辐射过程”一书是由两位澳大利亚大气物理学家 C. W. 帕尔特里奇和 C. M. R. 普拉特合著的一本关于大气辐射方面的专著。该书被列为 Elsevier 科学出版公司所出版的大气科学进展丛书之五。

大气辐射学是一门较为古老的大气科学学科分支,它历来被认为是气候研究的基础。近年来,由于气象卫星以及其他探测手段的迅速发展和广泛应用,人们对于大气中的辐射情况得到了全球范围内的全面认识,获得了大量的在各种天气气候情况下大气辐射状态的测量资料。另一方面,对各种时间和空间尺度的大气动力学和各类大气物理过程的深入研究越来越多地涉及这些过程和大气辐射过程之间复杂的相互作用和反馈关系。这类关系越来越多地被提到定量的基础上进行理论讨论。例如,在气候变迁方面的研究就涉及到海洋、极冰以及大陆地表的辐射和热状态,以及大气中的云、气溶胶通过对辐射过程的重要作用来影响气候这类复杂的气候动力学问题。因此,大气辐射研究的重要性显著增加,世界各国都做了大量的理论和实验工作。

从理论上讲,大气辐射就是辐射传输方程在实际地球大气环境下的求解问题。这个问题由于实际环境的复杂性,以及由于传输所涉及的分子吸收光谱和粒子散射等问题,使得方程的解析解只是在极特殊的理想假定下才能得到。这方面的研究继续是大气辐射研究的重要方面。另一方面大气辐射又大量地和许多实际天气气候过程一起综合研究。因此,要用篇幅不大的一本书来全面介绍大气辐射的各个研究领域的主要内容成果和前沿性的研究方向是不容易的。本书比较成功地做到了这一点。

如作者在前言中所说,本书的对象是大气物理学家,而不是数学家。对于大气辐射传输的纯数学问题感兴趣的读者显然需要找另外的专著。本书介绍了大气辐射的总体图象(第一章)、辐射传输的基本规律(第二、四章)、太阳辐射能及其在大气中和地表的传输(第三、五、六章)、大气的长波辐射及其传输(第七章)。在此之后,又各用一章分别介绍了云和大气气溶胶在大气辐射过程中的作用,这在当前是一个极其重要而又活跃的领域。

本书最后一章介绍了大气辐射和大气动力与物理过程相互反馈作用这一方面的研究现状和初步结果。显然,这方面的研究远未成熟,但是极为重要。当然,限于本书的目的和篇幅,一些问题不能充分展开,这将是大气动力学和大气物理学深入研究的课题。

本书不但对大气物理工作者很有价值,对于从事地球环境研究和应用的科学工作者,例如海洋学、地理学、农林业和能源利用等方面的工作者也是很有价值的参考书。此外值得一提的是,本书对于从事大气和地球环境遥感研究和应用的工作者也是重要的。因为可见光和红外波段各类遥感无不是利用大气中实际存在的这类辐射和相应的传输规律。只有对大气(和地表)辐射有全面深入的了解才能恰当地利用波段和正确地处理和解释资料。虽然本书的着重点并不在此,但它所提供的基本资料和物理图象仍然是很有价值的。

本书是由吕达仁、黄润恒、林海三同志分别译出并共同校订的。译文分工是黄润恒(前言、一、二、三、四、五章),吕达仁(六、七、八、十章),林海(九章和附录)。周秀骥同志给予了帮助。限于水平,错误在所难免,敬希读者给予指正。

一九七九年五月

前 言

大气辐射是一门相当古老的学科,它已成为对气候作一般研究的基础,同时它也与研究个别天气过程有关。但是当代关于这门学科的文献已经变得多少有些高深莫测,不易为非专门家所理解。除了 Kondratyev 杰出的著作以外,在一些普通气象学教科书上关于辐射的个别章节与 Goody 和 Chandrasekhar 对于辐射传输问题所作的严格的理论处理之间,总有一定的差距。当实验大气物理学家或气象学家试图在他们的模式里考虑辐射过程的影响时,就会感到这种差距的存在。本书正是为了弥补这个差距而写的。本书的对象是物理学家,而不是数学家。

各种单位换算和常数

- 1 瓦特 (W) = 1 焦耳 · 秒⁻¹ (J sec⁻¹)
 1 卡 (cal) = 4.1868 焦耳 (J)
 = 2.390 × 10⁻⁸ 尔格 (erg)
 = 1.163 毫瓦特 · 小时 (mW hr)
 1 卡 · 分⁻¹ (cal min⁻¹) = 69.8 毫瓦特 (mW)
 1 卡 · 秒⁻¹ (cal sec⁻¹) = 4.18 × 10³ 毫瓦特 (mW)
 1 卡 · 厘米⁻² (cal cm⁻²) = 1 兰 (ly)
 1 兰分⁻¹ (ly min⁻¹) = 69.8 毫瓦特/厘米² (mW cm⁻²)
 1 焦耳 · 秒⁻¹ (J sec⁻¹) = 1 瓦特 (W)
 = 10³ 毫瓦特 (mW)
 1 兆焦耳 (MJ) = 2.777 × 10⁵ 毫瓦特 · 小时 (mW hr)
 1 卡 · 厘米⁻² · 秒⁻¹ (cal cm⁻² sec⁻¹) = 4180 毫瓦特 · 厘米⁻² (mW cm⁻²)
 1 毫米小时⁻¹ (蒸发) (mm hr⁻¹) ≈ 68.6 毫瓦特 · 厘米⁻² (mW cm⁻²)
 1 毫米 · 日⁻¹ (蒸发) (mm day⁻¹) ≈ 2.86 毫瓦特 · 厘米⁻² (mW cm⁻²)
 1 流明 (对 0.556 微米而言) = 1.47 毫瓦特 (mW)
 1 尔格 · 秒⁻¹ (erg sec⁻¹) = 10⁻⁴ 毫瓦特 (mW)
 1 瓦特 · 米⁻² (Wm⁻²) = 0.1 毫瓦特 · 厘米⁻² (mW cm⁻²)
 1 毫巴 (mb) = 10⁻³ 达因 · 厘米⁻² (dyn cm⁻²)
 = 10² 瓦特 · 秒 · 米⁻³ (W sec m⁻³)
 1 达因 (dyn) = 10⁻⁵ 牛顿 (N; 1 牛顿 = 1 焦耳 · 米⁻¹)
 $\hbar$ (Planck 常数) = (6.62517 ± 0.00023) × 10⁻³⁴ 焦耳 · 秒
 c (光速) = (2.997930 ± 0.000003) × 10¹⁰ 厘米 · 秒⁻¹
 k (Boltzmann 常数) = (1.38044 ± 0.00007) × 10⁻²³ 焦耳 · K⁻¹
 δ (Stefan-Boltzmann 常数) = (5.6696 ± 0.0025) × 10⁻¹² 瓦特 · 厘米⁻² · K⁻⁴
 $\tilde{L}$ (蒸发潜热) ≈ 590 卡 · 克⁻¹ (对水而言)

重要符号一览表

说明: (1) 除非特别指明, 下标“g”表示地面值或表面值, 下标“s”表示标准气压和标准温度条件。

(2) 符号上的一横表示平均值, 例如 $\bar{A}$ 。

(3) $\uparrow$ 或 $\downarrow$ 表示某参数的垂直分量。

A	面积
A_e	湍流交换系数
A_m	热功当量的倒数
A_{ij}	二维矩阵
B	Planck 黑体函数, 例如 $B(T)$
$\tilde{B}$	以通量密度单位表示的 Planck 黑体函数
C	浓度
CC	云量, 云量的百分比
CR	冷却率
D	太阳漫射通量密度
D_R, D_D	由 Rayleigh 散射 (R) 或尘埃散射 (D) 引起的太阳漫射通量密度
E	熵产生或熵交换的全球率
E_0	某一特定纬度带的熵交换率
$\tilde{E}$	水汽的向上垂直通量密度, 即蒸发率
E_q	时间方程
F	辐射通量密度
F_0	进入大气顶的太阳辐射通量密度
F_N	净辐射通量密度
F_S, F_L	短波(太阳)或长波(地球)通量密度
F_{NS}, F_{NL}	净短波(太阳)或净长波(地球)通量密度
$\tilde{G}$	地面(垂直)热通量
$\hat{G}$	大气向空间的长波发射与表面黑体发射的比例常数
G'	倾斜平面上的全球通量密度
H	辐照度
$\tilde{H}$	垂直感热通量密度
$\hat{H}$	大气标高
I_0	太阳常数(比强度或辐射率)
J	辐射强度
$J(r)$	半径为 r 的单粒子散射系数

JJ	Bessel 函数
$\tilde{J}$	源函数
$\tilde{J}_{sc}$	散射源函数
J_R	分子的 Rayleigh 散射截面
$K(r)$	半径为 r 的单粒子消光系数
L	长度量纲(也表示第五章的自由程)
$\tilde{L}$	水的蒸发潜热
M	质量量纲
$\tilde{M}$	放大因子
$\hat{N}$	分子数密度
N	辐射率
N^+, N^-	向上或向下辐射率
$N \uparrow, N \downarrow$	垂直流辐射率
P	辐射通量
$\tilde{P}$	相函数
P^0	与方位无关的相函数
P'_n	连带的 Legendre 多项式
Q_a, Q_{sc}, Q_e	指由于吸收、散射和消光的消光效率
Q_m	每个分子的能量
Q	单位质量的能量
$\tilde{Q}$	加权后的透过率
$\hat{Q}$	辐照度的时间积分
$\tilde{R}$	加权后的吸收率
R	平均地球半径
R^*	日-地距离
Re	反射率
S	线强
$\tilde{S}$	$= (\gamma_e + \gamma_r)/2$
T_d	露点温度
T	温度
T_P, T_0	行星温度
T_e	有效辐射温度
T_{st}	平流层低层的温度
Tr	透过率(也写作 $Tr_R, Tr_{oz}, Tr_{wv}, Tr_D$ ——见 τ)
$\tilde{Tr}$	通量透过率
U	能量输送的量
V	体积量纲;也指气溶胶谱分布中的 Junge 指数
W	单位截面垂直气柱内的液态水总含量(也是表 2.1 中的辐射的比辐射率)
$\tilde{W}$	光子权重

Z	Rayleigh 散射函数(见第五章)
a	吸收率(又写作 a_{oz} , a_{wv} ——见 τ)
b_f	后向散射与前向散射之比
c	光速
c_p	定压比热
d_n	从 1 月 1 日起算的天数
d	太阳的标准化半径
$\bar{d}$	云的平均行星反照率
e	水汽压
$\bar{f}$	辐射频率
$\hat{f}$	云的黑体发射与地表黑体发射之比
f'	通过倾斜平面所看到的天空部分
f_1, f_2, f_3	表示某种函数
g	重力加速度
$\hat{g}$	晴空的行星反照率
h	距地面的高度
h_c	平均云底高度
$\hat{h}$	Planck 常数
i, j	标号
j	质量比辐射系数
$\hat{j}$	体积比辐射系数
k	每个分子的气体常数
$\hat{k}$	Boltzmann 常数
l	广义吸收系数
m	分子质量
$\hat{m}$	晴空大气对太阳辐射的总吸收率
m_a	绝对空气质量
m_r	相对空气质量
n	数密度
n_c, n	折射指数 ($n_c = n_r - in_i$)
n_T	总数密度或总数
p	气压
p_h	相应于真实厚度 h 的气压厚度
p_g	地面气压
q	比湿
r	粒子半径
r_e	在一种分布中粒子的平均有效半径
s	程长
s_v	比容

t	时间
t_h	时角
$\hat{u}$	辐射能量密度
u	垂直光程长
u^*	有效光程长(也即有效吸收量)
w	单位体积内的液态水含量(在第十章第四节中定义为单位质量中的液态水含量)
x, y, z	坐标
u, v, w	在 x, y, z 方向上的速度分量
x, y	一般的变量
x	臭氧的光程
y	水汽的光程
z	垂直距离
$\hat{z}$	标高
$\bar{\alpha}$	浑浊度对波长的 Ångström 关系
α	反照率,也是第七章中的线宽以及第十章中的空气的比容
α_R	由 Rayleigh 散射产生的大气反照率
$\bar{\alpha}_R$	由 Rayleigh 散射产生的漫射通量的大气反照率
α_R^*	由 Rayleigh 散射产生的向上漫射通量的大气反照率
α_0	行星反照率
$\beta_a, \beta_{sc}, \beta_e$	指吸收 a 、散射 sc 、消光 e 的体消光系数(还有 $\beta_R, \beta_{O_2}, \beta_{WV}$ 和 β_D ——见 τ)
Γ	扩散系数
γ_{sc}	体散射函数
γ_r, γ_e	Rayleigh 散射系数(见第四章)
γ_{ob}	观测的太阳高度
γ	太阳高度
δ	太阳偏角,也是第七章中的谱线间距
ϵ	比辐射率
ϵ_1	从地面看大气的通量比辐射率
ϵ_2	平均云高以上大气的通量比辐射率
$\epsilon_{\text{天顶}}$	天顶方向的比辐射率
ζ	某一平面对水平面的倾角
θ'	太阳方向与平面法线的夹角
$\hat{\theta}$	以分数表示的云量
θ	天顶角
θ_0	$= 2\pi dn/365$
θ_{ob}	观测的太阳天顶角
$\kappa_a, \kappa_{sc}, \kappa_e$	指吸收 a 、散射 sc 、消光 e 的质量消光系数
η	$\sec \theta$

λ	波长
μ	$\cos \theta$
μ_0, φ_0	用 $\cos \theta$ 和方位角表示的太阳方向
ν	波数
ν_0	吸收线中心的波数
ξ	粒子尺度参数 $2\pi r/\lambda$
π	3.1416
Π	半日长度
ρ	密度
σ	Stefan-Boltzmann 常数
τ	光学厚度
$\tau_a, \tau_{sc}, \tau_e$	指吸收 a、散射 sc、消光 e 的光学厚度
$\tau_R, \tau_{O_3}, \tau_{WV}, \tau_D$	指 Rayleigh 散射、臭氧吸收、水汽吸收以及尘埃吸收的光学厚度
τ^*	从大气顶到大气底的光学厚度
ϕ	方位角;也是第七章中的经验函数
Φ	纬度
ϕ	入射线与出射线间的散射角
ω	立体角
Ω_0	单位立体角
$\bar{\omega}_0$	单次散射反照率
$\langle \cos \phi \rangle$	散射的不对称因子

目 录

译者的话

前言

各种单位换算和常数

重要符号一览表

第一章 全球概貌	1
1. 引言	1
2. 基本模式	4
3. 温度、云量和太阳常数	7
4. 时间常数	9
5. 平均经圈截面	10
6. 云和辐射损失	11
7. 辐射冷却率与全球动力学	13
8. 卫星观测结果及经向不对称性	17
9. 作为被动变量的全球动力学	21
第二章 术语、基本定律及标准	23
1. 辐射场物理量	23
1.1 单色辐射术语	24
2. 吸收、反射和透射	25
3. 散射	26
4. 热发射	27
5. 气象学上的辐射量	31
6. 辐射标准	32
第三章 太阳	34
1. 辐射输出	34
2. 长期变化	37
3. 位置术语及公式	39
4. 天顶角与空气质量	41
5. 24 小时辐射输入总量	43
第四章 辐射传输	45
1. 引言	45
2. 传输方程	45
2.1 普遍情形	46
2.2 业务模式的近似解	47
3. Mie 散射	50
4. 数值解	54
4.1 Monte Carlo 方法	54

4.2 累加法	55
第五章 大气中的太阳辐射	58
1. 引言	58
2. 臭氧的吸收	59
3. 晴空水汽的吸收	62
4. 云的影响	64
4.1 液态水的吸收	68
5. Rayleigh 散射	69
第六章 地表辐射	73
1. 引言	73
2. 太阳直接光束	76
2.1 Rayleigh 散射	77
2.2 臭氧和水汽的吸收	79
2.3 大气尘埃的作用	79
3. 晴空漫射辐射	81
4. 倾斜表面的辐射	82
5. 地表的辐射性质	83
5.1 地表反照率	84
5.2 地表比辐射率	87
6. 地面净辐射的参数化分量	88
7. 海洋的辐射	91
第七章 晴空大气中的长波辐射传输	93
1. 引言	93
2. 大气吸收的分布和性质	93
3. 辐射传输方程	96
4. 垂直通量密度方程	97
5. 透过率模式的建立	99
5.1 单线吸收	99
5.2 带吸收	100
5.3 经验透过率模式与广义吸收系数	103
5.4 直接积分透过率模式	104
5.5 水汽连续吸收	105
6. 对流层及平流层低层的辐射冷却模式	107
6.1 多谱两参数模式	108
6.2 比辐射率近似	113
6.3 各种模式计算的比较	118
6.4 冷却率与局地温度之间的经验关系	123
7. 中层大气(30—100 公里)的辐射冷却	123
第八章 云和长波传输	126
1. 引言	126
2. 水滴和冰晶的红外参数	128
3. 吸收近似	130

4. “标准”云	131
5. 云的比辐射率	133
6. 云对大气冷却的作用	136
7. 晴空大气冷却和有云大气冷却的对比	140
第九章 大气气溶胶	142
1. 引言	142
2. 太阳短波辐射的消光	142
3. 短波辐射的吸收	146
4. 大气浑浊度	148
5. 红外长波辐射的消光	149
5.1 消光系数的计算	149
5.2 特定分布消光系数的例子	152
5.3 大气气溶胶引起的红外冷却	153
6. 大气气溶胶的增加对气候的影响	154
第十章 辐射和大气动力学	159
1. 大气的平均温度廓线	159
1.1 引言	159
1.2 辐射平衡和平流层	160
1.3 辐射-对流平衡和对流层	162
2. 对流层中的辐射	164
2.1 辐射冷却与廓线曲率	164
2.2 薄层通量散度的计算	166
2.3 辐射和大气逆温	167
3. 边界层内的辐射	169
3.1 夜间冷却和地面雾	171
4. 辐射和云的气象学	173
4.1 引言	173
4.2 静能损失、潜热和位移率	177
4.3 层积云	178
4.4 卷云	180
附录	182
1. 气溶胶谱	182
2. 粒子随湿度的增长	186
3. 气溶胶折射指数	187
3.1 短波(太阳辐射)区	187
3.2 红外区	188
4. 云滴谱	193
参考文献	197

第一章 全球概貌

1. 引言

首先我们把地球及其大气看成一个整体,它受到来自太阳的平均辐照度为 $\bar{F}_0$ 的辐射能量的作用。它将一部分(所谓行星反照率 α_0) 太阳辐射反射到宇宙空间,其余的份额 $\bar{F}_0(1 - \alpha_0)$ 被吸收,用于增加平均行星温度 $\bar{T}_0$ 。进而,假若我们把行星设想为一个理想的黑体,在我们所关心的红外热发射情形,平均温度最终达到的数值,将使热发射的辐射能量 $\sigma \bar{T}_0^4$ 完全与被吸收的太阳能保持平衡。故有,

$$\bar{T}_0 = [\bar{F}_0(1 - \alpha_0)/\sigma]^{1/4} \quad (1.1)$$

这样一个简单的行星的“气候”由它的温度所表示,而且直接就是太阳能输出的函数。倘若 $\bar{F}_0$ 增加,平均温度也相应地增加。

实验上业已证明,地-气系统确实处于辐射能量平衡状态,或者十分接近这种状态。因此,对于初学者来说,多少会感到奇怪,为什么即使对千变万化的世界的平均量下定义在数学上的各种困难作了考虑,仍然还是不可能事先预报平均全球温度。除非我们事先知道了答案,情况果真如此。其结果是,我们确实无法预言气候的变化,而由于诸如太阳的能量输出这种系统的外部参数的某种变化,气候的变化是可能发生的。然而,常常还是用方程(1.1)的各种变形去验证对全球性异常的预报。根本的问题是,以总体的或全球平均的形式出现的 α_0 是 $\bar{T}_0$ 的未知函数,也即是以方程(1.1)方式定义的“气候”的未知函数。完全有可能面临这样一个地球,当太阳能输出增加时,全球平均温度反而会减小,它完全取决于这一函数的性质。这种情形在直观上是不太好想象的,然而根据我们目前的认识却是有可能的。

投射到大气顶部的太阳辐照度具有经向分布,以年平均来说,从赤道的极大向两极减小。由于地球轨道的倾斜,在极区的辐照度并不按纬度 Φ 的余弦那样快地减小,事实上,平均极地辐照度大约是赤道的 0.4 (见第三章)。然而,由于在高纬度区反射率的增加,实际上几乎被地球表面吸收的量大致与 $\cos \Phi$ 成正比,所以输给系统的能量主要由赤道区控制着。射向空间的长波热发射以及相应的全球温度也是向着两极递减的,但却不为零。(这是观测事实,而不是理论性的结论。)辐射能量平衡表明,向外的总的热通量等于所吸收的太阳能通量。系统的平衡表明,在赤道区被吸收的能量必须通过大气和海洋向两极输出,从而能够向空间再辐射。天气和气候的各种现象——大气和海洋的动力学和热力学——在某种意义上是实现所需的经向流动过程的简单表演。它们的特征由这个链条两端的辐射能量的输入和输出所决定。此外,困难在于辐射的各种源和汇的性质不是事先可以预告的,因为太阳能的输入以及热能的输出所驱动的过程以一种未知方式决定着这种能量输入和输出。除了描述大气和海洋各种重要运动的极其复杂性而外,还有两个基本的问题尚待解决。一是确定控制全球范围内的云量及其分布的因子,因为云对太阳辐射的反射以及对热发射都具有决定性的影响;其二是确定控制大气和海洋间的经向能

量流分配的因子。

然而，在研究气候和气候分布的时候所自然遵循的路线是把注意力集中在辐射过程上，而把其他的因素作为补充。（然而在本章第七节也有许多例子支持相反的提法）。这个结论由下述事实得到进一步肯定，即辐射体状态的变化同时表现为自身的变化。例如，由于冷空气平流所造成的大气表面层辐射的减小将立即传播开来。平流层将立即感到来

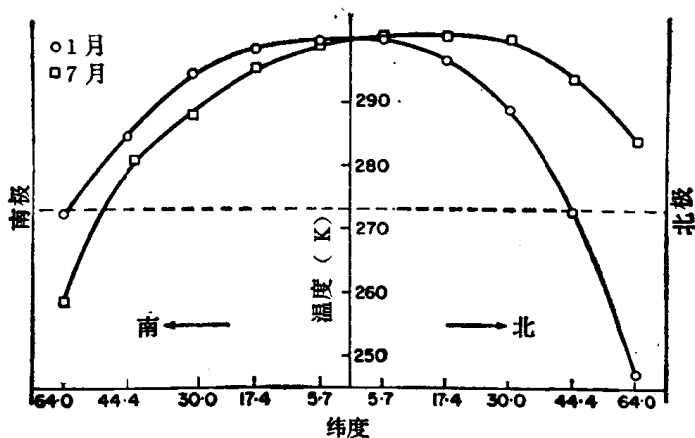


图 1.1 1 月和 7 月的地表温度的经圈分布

北半球取自 Crutcher 和 Meserve (1970)，南半球取自 Taljaard 等人 (1969)。纬度以 $\cos \Phi$ 划分。

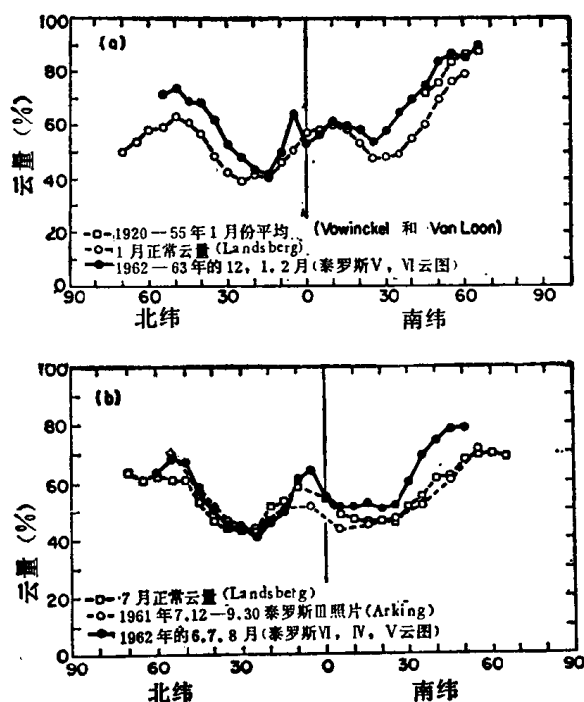


图 1.2 带平均云量的纬度分布

(a) 1 月, (b) 7 月。

其中 Landsberg, Vowinckel 和 Van Loon 的结果是在地面观测的; 其余的曲线是在卫星上观测的。(取自 Clapp, 1964)