

〔比〕 G. 布拉塞 〔美〕 S. 索洛蒙 著

中层大气化学和物理学

高等教育出版社

内 容 简 介

本书详细讨论了发生在10—100公里高度范围内的中层大气的各种物理和化学过程。全书共分七章，分别介绍了中层大气及其演化；大气化学的基本知识；中层大气的结构和动力学特征；辐射在中层大气光化平衡和热平衡中的作用；大气化学成分以及重要的化学反应；中层大气的离子成分及其重要性；最后讨论了自然的和人为的扰动以及大气对这些扰动的响应。

本书在写法上考虑到中层大气是一个多学科交叉的领域，力求便于具有不同专业背景的人们阅读。本书的读者对象是大专院校大气物理和大气化学专业高年级学生和研究生，同时对于从事气象学、气候学、大气物理、大气化学、大气辐射、空间物理和环境科学的教学、研究人员，本书也有很高的参考价值。

AERONOMY OF THE MIDDLE ATMOSPHERE

Guy Brasseur and Susan Solomon
D.Reidel Publishing Company
1984

中层大气化学和物理学

[比] G·布拉塞 著
[美] S·索洛蒙

黄润恒 译 吕达仁 校

责任编辑：谷真真

* * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路68号)

燕华营印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经售

* * *

开本：850×1168 1/32 印张：15 字数：386千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷

印数：1—1300 定价：4.40元

ISBN7-5029-0091-8/P·0060

作者为中文版写的序言

近十年来，在相当大的程度上由于人们对人类活动排放的物质可能会引起将来臭氧减少的关心，平流层和中间层物理学和化学作为一门学科已越来越多地受到注意。

现在已经认识到，动力学过程、化学过程和辐射过程之间的多种耦合机制是理解大气微量成分所起作用的关键因素。此外，还必须考虑诸如从来自较低层大气的能量和质量交换以及地球和海洋生物圈的作用。

对大气中微量成分的研究是基于地面、气球和机载仪器的观测以及利用卫星所作的连续监测。对这些最新资料的解释以及对地球大气未来状态的预报，都涉及到使用光化学模式，同时在大多数情形下，还要使用动力学模式。

中层大气的变化（例如臭氧层的变化）是一种影响到地球上每一个国家的全球性现象。许多国家，包括中国在内，已积极参与各项旨在测量和解释大气过程的科学计划。这样的计划是由国家和国际科学机构执行的。

我们非常高兴地看到这本书被译成中文，并且希望它对于更好地理解大气科学是一本有用的书。我们要感谢我们的中国同行为翻译这本书所做的努力。

G·布拉塞

S·索洛蒙

1985年10月

序 言

如果读者得知“aeronomy”这个词在许多标准的英语词典（例如韦伯国际词典）里都找不到，也许会感到惊奇。但是，这个词又确实存在。本书两位作者所在机构的名称（比利时布鲁塞尔高空大气研究所和美国海洋大气局高空大气实验室）都用“aeronomy”一词就是明证。产生这种含混局面的部分原因或许是因为高空大气物理学是一个相当年轻而又正处于不断发展中的学科领域，追溯其历史不早于1940年。Chambers科技词典对它作了如下的定义：

“aeronomy（气象）是讨论地球和其他行星的化学组成、物理性质、相对运动以及与来自外层空间的辐射发生反应的一门科学分支。”

在我们看来，这似乎是一个恰当的描述，这一点将在本书通篇内容中得到反映。

在这个世纪的七十年代和八十年代，特别是由于对于人类活动对中层大气状态及其臭氧保护层扰动可能性的关注，中层大气物理和化学经历了迅速的成长和发展过程。其结果是，在对于大气的自然属性以及人类活动对大气的影晌这两方面都有了很多的了解。本书将力图介绍我们所了解的这门学科的前沿水平。我们关于高空大气物理学的观点一定反映了老师们的影响。我们的老师做了大量的工作不仅给我们对这个领域的个人理解打上烙印，而且他们自己就是跻身于这门学科发展的中心人物。我们衷心感谢那些教给我们什么是高空大气物理学这类入门见解的人们，他们是Marcel（Guy Brasseur的老师）Nicolet以及Paul Crutzen（Susan Solomon的老师）。

另一个我们无论在词典里或在现实世界都难以找到一个简单定义的词是aeronomer（高空大气物理学家）。的确，因为高空大气物理学是一门多学科交叉的科学，它吸收了化学、物理学、流体力学、气象学和统计学等领域的成果，所以高空大气物理学家来自所有这些领域以及其他许多领域。本书力图对这个领域作一番全面介绍，使具有大学化学和物理学高年级学生水平的人们易于理解。同时本书还对高空大气物理学这个学科加以评介，以使本书对于那些在这个领域里已经工作过一段时间的研究者成为一本有用的参考书。为此，我们写了题为“大气中的化学概念”这一章，该章也可叫做“对非化学家谈高空大气物理学问题”。写这些章节的目的是从与高空大气物理学有关的物理化学角度来总结和复习有关的基本概念。同样，第三章题为“结构和动力学”，它是为非气象学家而写的，因为它以极其简明的观点提出与化学成分输送有关的动力学的基本要素。第四章概要介绍了辐射在中层大气化学和热收支方面的作用。第五章讨论了大气的化学成分，以及有必要加以详细考虑的所有重要的化学过程。这样做可能使那些对必须加以说明的数百个化学反应式不习惯或无兴趣的读者感到枯燥无味，而我们强调在该章中也可以找到比较基本的概念，也即对每一种成分输送过程重要性的阐述以及从现有的测量结果中能够了解到什么的讨论。在这一章里我们还分了小节，它将有助于读者比较容易地找到并辨别出每一个化学反应所起的作用。第六章对于中层大气中重要的离子成分作了类似的分析。最后，第七章考察了耦合的重要性以及自然和人为扰动两者的作用。

虽然中层大气（the middle atmosphere）可以大致地定义为从对流层顶（大约12公里）到均质层顶（大约100公里，参看第三章的定义）的区域，但是我们发现，为了解释中层大气受其相邻层大气的影响，有时有必要讨论对流层（从地面到大约12公里）以及热层（大约100公里以上的区域）的物理和化学。然而需要强调的是，我们关于这些其他的大气层次应当介绍的选择多少

是任意的，本书并不打算详尽地讨论这些相邻的大气层次。

由于本书所讨论的内容繁多，我们发现要给出关于现有文献的详尽评介是不可能的。在多数情况下我们选用参考比较近期的工作来阐述我们的观点。我们期望有兴趣的读者能够以这些文献作为出发点，对所讨论的概念追溯其详尽的历史发展。〔注〕

G·布拉塞

S·索洛蒙

1984年2月

〔注〕· 以下致谢部分从略——译注

重要符号一览表

以下的符号在通篇中被使用，它们不包括那些只在个别场合使用的符号。在有些情况下，同一种符号在不同的章节具有不同的意义，这些在下表中都加以说明。

a	地球的半径
a_e	电子-中子附着率
b	碰撞截面
c	光速；第三章中的重力波相速度
c_p	定压比热（对每克物质而言）
c_1	第一辐射常数
c_2	第二辐射常数
d	平均线间距
d_p	光分离率
e	电子电荷
e_s	饱和水汽压
f	科里奥利（Coriolis）参数
f_d	负离子碰撞分离率
f_i	物类 i 的混合比
$f(r_a)$	气溶胶尺度分布函数
f	波频率
g	重力加速度
h	普朗克（Planck）常数
$j(z, E)$	电离粒子通量
k	波尔兹曼（Boltzmann）常数
k_a	吸收系数
k_f	波传播因子

k_s	散射系数
k_v	频率 ν 上的总消光系数
$k_{act, uni, r, 1, 2, 3}$	反应速率常数
m, m_A, m_B	原子和分子A、B的质量
m_e	电子质量
n, n_i	第 i 种成分的数密度
n_e	电子密度
n^-	负离子密度
n^+	正离子密度
n	折射指数
p	气压
$p(\nu), p(\theta)$	频率 ν 和角度 θ 上的相函数
q	太阳通量
q_ν	频率 ν 上的太阳通量
r	距地球中心的距离
r_a	气溶胶半径
r_s	日-地距离
$\vec{r}$	位置向量
r	能量吸收率
s	长度
t	时间
u	纬向风速; 无量纲光学厚度 $=S_w/A_0$
$\bar{u}$	纬圈平均风速
u'	对纬圈平均风速的涡动偏离
v	经向风速
v_r	粒子的相对速度
$\vec{v}$	气块的向量速度
$\bar{v}$	欧拉(Euler)经圈平均风速
$\bar{v}^*$	欧拉经圈平均残差风速
$\vec{v}_i$	

v'	对经圈平均风速的涡动偏离
w	垂直风速; 光程
$\overline{w}$	欧拉平均垂直风速
$\overline{w}^*$	欧拉平均残差垂直风速
w'	对平均垂直风速的涡动偏离
z	高度
A	反照率
A_D	对Doppler谱线而言的吸收率
A_L	对洛伦兹 (Lorentz) 谱线而言的吸收率
A_0	有效带宽
$A_{\delta\tau}$	吸收率
B	转动常数
B_v, B_l	普朗克函数
$\vec{B}$	电感
c_p	热容量 (对每克分子物质而言)
$\vec{D}$	位移向量
D	退偏振因子
E	能量
$\vec{E}$	电场向量
E_{act}	活化能量
$\vec{F}, F_\lambda, F_\phi, F_z$	摩擦力及在 λ, ϕ, z 方向上的摩擦力 (第三章)
$F, F(z), F(\vec{r}, \vec{\omega}), F_\uparrow, F_\downarrow$	辐射通量密度 (第四章)
F_{ij}	CO_2 从库 i 向库 j 输送的速率
$F_{10.7}$	10.7厘米射电波的通量
ΔG	形成的吉布斯 (Gibbs) 自由能
H	中性大气的标高
H_i	第 i 种成分的标高
$\vec{H}$	磁场向量

ΔH	形成的焓
H	时角
I	离化频率
$I(\lambda)$	波长 λ 上的辐射强度
J	电流密度
$J_i, J(x)$	物类 i 的光离解频率
J_v	源函数
k	吸收系数
k_r	瑞利 (Rayleigh) 摩擦系数
k_z	一维湍涡扩散系数
$k_{zz}, k_{yz}, k_{yy}, k_{zy}$	二维湍涡扩散系数
$L, L_v, L^{\uparrow}, L^{\downarrow}$	辐射率
L_i	成分 i 的光化学损失率
M	第三体 (可以是任何的大气成分)
M_E	发射的能量通量 (发射强度)
M_n, M_v	单位体积的粒子数
N	Brunt-Vaisala频率 (第三章); 总的氧气柱 (第四章)
$N(i), N(i, z, \chi)$	成分 i 的气柱丰度, $i = O_2, O_3, N_2, O$
P, P_i	成分 i 的光化学产生率
P_H	总辐射加热率
Q	净辐射加热率
Q	离化率
R	气体常数
Ro	气流的罗斯贝 (Rossby) 数
R_s	太阳半径
RH	相对湿度
S	静力稳定度参数 (第三章); 谱线的积分强度 (第四章)

$S_{\odot}$	太阳常数
ΔS	形成的熵
S	对辐射通量而言的单位表面
T	温度；有效透过率（只用在第四章）
$T(\lambda), T_{\nu}$	波长 λ 和频率 ν 上的透过率
$\bar{V}$	电子速度
W	每个离子对产生的能量
α	辐射张弛速率
α_m	米（Mie）散射参数
α_d	电子-离子复合率
α_{eff}	有效复合率
α_i	离子-离子复合率
β	平均线宽参数
$\beta_{\odot}$	太阳辐射稀释因子
γ_D	1/e最大强度处的谱线半宽度
γ_L	1/2最大强度处发射线的半宽度
δ	倾角
ε	量子效率
ε_0	自由空间的介电常数
ε_p	势能
θ	相对于法线S的角度
κ	R/c_p
λ	经度（第三章）；波长（第二、四章）；负离子与电子之比（第六章）
μ	辐射通量的入射角
μ_0	导磁率
ν	频率
ν_e	碰撞频率
$\bar{\nu}$	波数

ρ	密度
σ	斯忒藩-波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数
$\sigma_a, \sigma_v, \sigma_v^-$	截面
τ_a	吸收的光学厚度
τ_i	成分 <i>i</i> 的化学时间常数
τ_s	散射的光学厚度
$\tau_v, \tau(\lambda)$	总光学厚度
τ_{chem}, τ_{dyn}	化学或动力时间常数
ϕ	纬度; 辐射的天顶方向 (第四章)
$\phi(i)$	化学成分 <i>i</i> 的通量
$\phi(r_s, n)$	半径为 <i>r_s</i> 粒子的消光效率因子
χ	太阳天顶角
ω	辐射通量的立体角
ω_r	电磁波频率
Γ	温度递减率
Γ_d	干绝热递减率
θ	位温
Φ	位势 (第三章); 辐照度 (第四章)
$\Omega, \vec{\Omega}$	地球自转角速度
Ω_v	单次散射反照率

目 录

作者为中文版写的序言	1
序言	11
重要符号一览表	v
第一章 中层大气及其演化	1
1.1 引言	1
1.2 地球大气的演化	2
1.3 可能的扰动	4
参考文献	8
第二章 大气中的化学概念	10
2.1 引言	10
2.2 热力学的原则	10
2.3 基本的化学动力学	15
2.3.1 双分子反应的碰撞理论	18
2.3.2 单分子反应	21
2.3.3 三分子反应	22
2.4 能级符号及其用法	23
2.4.1 普遍规则	25
2.4.2 电子辐射过程的选择定则	27
2.5 光离解过程	27
2.6 中层大气中的受激成分	30
参考文献	33
第三章 结构和动力学	35
3.1 引言	35
3.2 垂直结构以及某些观测到的动力学特征	36

106428

3.3	大气动力学的基本描述	43
3.3.1	初始方程	43
3.3.2	准地转位涡度方程	52
3.4	动力学对化学成分的影响	55
3.5	大气环流模式	59
3.6	平流层二维动力学: 概念性的介绍	63
3.6.1	纬圈平均和涡旋	63
3.6.2	平流层平均经圈环流的描述	65
3.7	波瞬态和波耗散的重要性	76
3.8	大气的一维表示法	86
	参考文献	89
第四章	辐射	96
4.1	引言	96
4.2	大气顶部的太阳辐射	100
4.2.1	作为黑体的太阳	102
4.2.2	实测的太阳光谱	104
4.3	太阳辐射在大气中的衰减	110
4.3.1	吸收	110
4.3.2	分子和气溶胶粒子的散射	116
4.4	辐射传输	118
4.4.1	普遍方程	118
4.4.2	波长小于4微米辐射传输方程的解: 多次散射	122
4.4.3	波长大于4微米辐射传输方程的解: 红外辐射的吸收和 发射	129
4.5	辐射的热效应	145
4.5.1	吸收辐射引起的加热	148
4.5.2	发射辐射引起的冷却	151
4.6	辐射的光化学效应	155
4.6.1	概述	155

4.6.2 主要大气分子的吸收截面	156
4.6.3 光离解系数的数值计算	189
参考文献	193
第五章 组成和化学	210
5.1 引言	210
5.2 氧化合物	212
5.2.1 纯氧化学	212
5.2.2 奇氧族以及某些观测结果	214
5.3 碳化合物	229
5.3.1 甲烷	229
5.3.2 甲烷氧化化学	234
5.3.3 甲烷氧化的某些最终产物: 一氧化碳和二氧化碳	238
5.4 氢化合物	243
5.4.1 概述	243
5.4.2 氢基化学	252
5.4.3 奇氢族以及某些观测结果	256
5.5 氮化合物	262
5.5.1 平流层中氧化氮的源	262
5.5.2 平流层中奇氮和硝酸的化学	267
5.5.3 奇氮族, 寿命和观测结果	270
5.5.4 热层下部和中间层的奇氮化学	282
5.5.5 热层下部和中间层的奇氮族	283
5.6 氯化合物	286
5.6.1 概述	286
5.6.2 氯化学	288
5.6.3 奇氯族, 寿命和观测结果	292
5.7 其他的卤化物	298
5.8 硫化化合物和气溶胶的形成	301
5.9 臭氧的总体平衡	308

参考文献	317
第六章 离子	334
6.1 引言	334
6.2 中层大气离子的形成	341
6.2.1 太阳辐射的作用	341
6.2.2 高能粒子的作用	345
6.2.3 不同电离过程的比较	352
6.3 正离子化学	353
6.3.1 E区的正离子	353
6.3.2 D区的正离子	358
6.3.3 平流层的正离子	362
6.4 负离子化学	366
6.4.1 D区的负离子	366
6.4.2 平流层的负离子	371
6.5 电离过程对中性成分的影响	373
6.6 电离层下部的无线电波	379
参考文献	384
第七章 可能的扰动及大气响应	391
7.1 引言	391
7.2 扰动研究中耦合的重要性	396
7.3 太阳辐照变化的影响	400
7.4 粒子沉降	407
7.5 火山喷发	412
7.6 人为活动的排放	416
7.6.1 二氧化碳	416
7.6.2 甲烷	422
7.6.3 一氧化二氮	424
7.6.4 对流层和平流层下部中的飞机影响	427
7.6.5 氟氯碳 (CFC)	428

7.6.6 同时扰动	435
参考文献.....	437
附录A 物理常数和其他数据.....	447
附录B 气压-高度转换图	448
名词索引.....	449