

大气边界层物理学

〔苏〕Д. Л. 莱赫特曼 著

科学出版社

大气边界层物理学

〔苏〕Д. Л. 莱赫特曼 著

濮 培 民 译

胡志晋 裴步祥 校

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

本书论述了发生在大气行星边界层内的各种物理现象的理论。

书中推导了描述低层大气运动的方程组；讨论了一些半经验假说；研究了许多发生在大气边界层内的具体过程和若干实际问题。

本书对从事大气边界层问题的科研工作者是很有意义的，并可作为研究生和高年级大学生的教科书。书中阐述的有关海洋和大气相互作用的研究成果对于海洋工作者来说也是有益的。

Д. Л. Лайхтман

ФИЗИКА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Издание второе переработанное и дополненное

Гидрометеиздат, 1973

大气边界层物理学

[苏] Д. Л. 莱赫特曼 著

濮培民 译

胡志晋 裴步祥 校

责任编辑 侯建勤

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

*

1982 年 10 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1982 年 10 月第一次印刷 印张：12 5/8

印数：0001—3,250 字数：287,000

统一书号：13031·2003

本社书号：2731·13—15

定 价：2.00 元

译 者 的 话

人类生活在地球大气圈的底层。这里的环境条件对于人类活动的影响极大。在紧贴旋转地球表面的这个大气边界层内发生的物理过程与自由大气相比有着许多显著的特征，需要进行专题研究。

大气边界层物理学是动力气象学的一个分支，是当前环境科学研究中的一个重要内容。天气、气候和海洋-大气耦合系统的数值预报和模拟以及其他许多实际问题的探讨极大地推动了大气行星边界层理论的深入研究。计算技术的迅速发展使得求解边界层内复杂的非线性微分方程组成为可能。探测技术的进展和一系列野外综合实验为检验各种假说和建立更为完善的理论模式提供了大量观测资料。在大气边界层物理学的研究方面已取得了相当的进展。Л. Л. 莱赫特曼教授的专著《大气边界层物理学》一书是这一领域内成果的系统总结。

这本专著详细论述了发生在大气行星边界层内的各种物理现象的理论。本书第一部分推导出了低层大气中的湍流可压缩气流的动力学方程组，讨论了能用来封闭方程组的半经验假设。其余内容是把所得到的方程组应用于研究发生在大气边界层内的各种过程。如大气近地面层中大气行星边界层的结构，植被内部的湍流状况，海洋-大气相互作用，海洋上的边界层，海上湍流通量的计算、冰的风漂流，气象要素的日变化，夜间降温，辐射雾，由于作用面非均匀性引起的气象场的变化，温、湿、风的变性，平流雾的形成，灌溉后微气象状况的

变化,不同气象条件下的灌溉定额,小水域对低层大气的影响,地方性风,低云特性的变化等。最后一章讨论了一些与低层大气的特点密切相关的实际问题,诸如工厂烟囱释放烟雾造成的低层大气污染,工厂烟囱周围浓度场的计算,工业设施设计中烟囱高度的选择,过热烟抬升高度的估计,降水对低层大气污染的影响,大气近地面层中的电场等等。这些内容是从事大气边界层问题的科学工作者很感兴趣的。

该书第一版问世后,顾震潮教授曾建议我把它译成中文,后因某些原因未能出版。这个增订第二版与第一版相比,概括了许多新内容,在深度和广度上都有很大发展。无论是基本理论的阐述或者某些实际应用,书中都给出清晰的物理分析。对于从事气象学和物理海洋学的研究和教学人员以及这些专业的研究生和大学高年级学生来说,这是一本很有益的参考书。从事大气环境保护工作和其他需要了解大气边界层内物理特征的有关专业人员也能从本书中获得许多有参考价值的内容。

该书再版以来,大气边界层物理学在许多方面又有了新的进展:大气边界层中辐射过程,对流过程和水、汽潜热转换的进一步的考虑;不同温度层结下的动能耗散和湍流能谱规律的深入揭示;水-气相互作用的专题研究;各种因素和作用的参数化;各种半经验理论的检验和应用以及在更高阶相关矩闭合基础上对于非定常、水平非平均过程的综合研究等等。在这一时期内,Д. Л. 莱赫特曼教授本人也完成了许多研究工作。他在1980年4月22日给我的来信中谈到,他认为根据近年来的研究,至少可以对该书补充三个方面的内容:数值模式中边界层的参数化;基于传统闭合方法上的一些新模式;以及在更高阶闭合基础上的研究成果。

为了便于读者了解近年来国外在大气边界层物理学的研

究和探测技术方面的进展，我们在这个中译本的末尾增加了一个《补充参考文献》。书中的词汇索引由俄-汉索引和汉语拼音索引两部份组成。读者可以方便地查阅词汇的俄-汉、汉-俄对照及它们所在的页码。此外，在若干地方加了译者注，其余内容都是照译的。

我的老同学胡志晋同志和裴步祥同志分别仔细校阅了译稿的前半部和后半部分，谨对他们表示由衷的感谢。

序

这本专著是 1961 年版本的第二版。最近九年中完成了许多重要的理论和实验工作；因此，对于一系列过程有了更全面的了解。在许多情况下，已经能够在更为严密的理论模式的基础上得到一些具体的结果，而不只是作定性的估计了。因此必须对前一版本作许多重要的修订。第一、二章是重写的，其余各章都补充了新的内容。删去了一些作者认为现在已不重要的某些问题。这个版本的第三章 § 8 是 Б. А. 卡甘 (Каган) 写的，第四章 § 9 是 В. М. 拉季克维奇 (Радикевич) 写的。向他们致以最衷心的感谢。

同 А. С. 莫宁 (Монин) 教授的合作极为宝贵，这在本书涉及的许多问题中都有反映。借此机会著者谨向莫宁教授致深切谢忱。

感谢 С. С. 齐利京克维奇 (Зилитинкевич) 所作的许多有益的指点。在写书过程中，列宁格勒水文气象学院理论大气物理教研室的同事们曾给予大力帮助。В. М. 拉季克维奇在本书编辑工作中付出了巨大劳动，特此致谢。

水文气象出版社的同事们很重视本书的出版工作，谨致谢意

本书可能难免有许多不足之处，敬请指正。

目 录

译者的话

序	viii
---------	------

绪论	1
----------	---

1. 大气边界层的定义; 若干实验资料	2
---------------------------	---

2. 边界层与气象学的若干实际问题	4
-------------------------	---

第一章 边界层的流体热力动力方程组; 方程的分析 ...	6
------------------------------	---

§ 1. 平滑量方程的推导	6
---------------------	---

§ 2. 气象要素脉动量与平滑场的联系; 铅直湍流 通量	12
---------------------------------------	----

§ 3. 脉动动能平衡	21
-------------------	----

§ 4. 平均场的能量平衡; 平均场与脉动场的相互 作用	32
---------------------------------------	----

§ 5. 边界层的相似理论; 方程的简化	40
----------------------------	----

第二章 定常条件下的大气边界层	51
-----------------------	----

§ 1. 边界层内气象要素时空分布状况的若干资料 ...	51
------------------------------	----

§ 2. 决定大气边界层结构的外部因素; 气象要素的 铅直分布问题	54
--	----

§ 3. 一般方程组的定性分析	62
-----------------------	----

§ 4. 近地层的结构(模式)	71
-----------------------	----

1. 奥布霍夫-埃利松模式; 湍流尺度是高度的线性函数 ...	75
---------------------------------	----

2. 近地层的非线性模式; 层结气流中卡曼公式的推广 ...	78
--------------------------------	----

3. 近地层的幂数定律	86
-------------------	----

§ 5. 梯度观测资料的整理方法; 不同物质的湍流系	
----------------------------	--

数之比值	92
§ 6. 水汽的影响; 有雾时近地层的铅直结构	96
§ 7. 边界层; 一参数模式	107
§ 8. 边界层的闭合方程组; 解和成果分析	117
§ 9. 植被内的湍流状况	126
§ 10. 边界层内的云况	130
§ 11. 海洋上的边界层(湍流系数与高度无关)	133
§ 12. 大气-海洋边界层的非线性方程组	141
§ 13. 海洋上诸湍流通量的计算	151
§ 14. 冰的风漂流	154
1. 线性模式	154
2. 冰漂流的非线性模式	155
第三章 气象要素的日变化	163
§ 1. 温度日变化的最简模式; 湍流系数与高度无关	163
1. 陆上温度的日变化	163
2. 水上温度的日变化	169
§ 2. 温度日变化; 湍流系数随高度变化	171
§ 3. 在温度日变化理论中考虑湍流交换随时间的变化	176
§ 4. 辐射热流入量对温度日变化的影响	181
§ 5. 夜间降温; 辐射霜冻的预报	188
1. 决定夜间降温的基本因素; 问题的提法	188
2. 确定温度的第一近似值; 布伦特公式	192
3. 对于土壤初始温度分布偏离等温状态的订正	194
4. 对于湍流热流入量和蒸发的订正	196
§ 6. 湿度日变化; 辐射雾	205
§ 7. 风速日变化	212
1. 定性分析和实验资料	212
2. 风的日变化理论	215

§ 8. 相互联系的气象要素日变化理论	220
第四章 由活动面非均匀性引起的气象场的变化	232
§ 1. 变性过程的定性分析	232
§ 2. 温湿场变化的计算	237
§ 3. 平流雾的形成	244
1. 冷却雾	245
2. 蒸发雾	247
§ 4. 灌溉时微气象状况的变化;不同气象条件下的 灌溉定额	250
§ 5. 小水域对低层大气结构的影响	259
1. 水域对气象要素年平均值的影响	260
2. 小于一年时段内的水域表面温度及水域上的气温	263
§ 6. 非均匀下垫面上的非定常过程	264
1. 热平流随时间变化时低层大气温度场的破坏	265
2. 水平非均匀表面上的周期性温度变化	271
§ 7. 地方性风	275
1. 纯粹的山谷风	279
2. 斜坡上的海陆风	280
§ 8. 气团在非均匀下垫面上运移时低云特征的变化	284
§ 9. 在下垫面粗糙度变化影响下的风场变性	288
第五章 若干专题	306
§ 1. 工厂烟囱排放烟尘造成的低层大气污染	306
§ 2. 工厂烟囱周围浓度场(高空点源)的计算	306
1. 湍流系数的幂数逼近	306
2. 用相似概念逼近 $k(z)$	313
3. 混合物浓度场定常性的判据	317
§ 3. 平均浓度的计算;设计工业设施时烟囱高度的 选择	318

§ 4. 过热烟抬升高度的估算	321
§ 5. 降水对低层大气污染的影响	327
§ 6. 大气近地层内的电场	329
摘要	336
附录	338
符号说明	353
补充参考文献	356
词汇索引	381
1. 俄-汉词汇对照(索引)	381
2. 索引	388

绪 论

这本专著的目的是试图阐明当代关于低层大气（大气行星边界层）中一些主要物理现象的论述，并利用它们来解决某些实际问题。

大气边界层中的气流实质上是固体壁附近的可压缩湍流气流。第一章阐述了这种气流的一般动力学方程组。

第二章讨论了最简单的边界层结构模式，其中认为过程是水平均匀和定常的。这种似乎是理想化的状态能够很好地逼近实际条件，这是因为在边界层内经常观测到很大的铅直梯度，铅直非均匀性对于这里发生的过程起着决定性的作用。

非定常问题，包括其中最重要的气象要素的日变化理论和夜间降温等问题是在第三章中讨论的。

第四章论述了运动气团在下垫面影响下变性的理论。气团与下垫面相互作用的结果极大地破坏了气流的结构，并产生了诸如平流雾和平流霜冻等一系列重要现象。灌溉绿洲的气象状况和不同气象条件下的灌溉定额的变化都与从沙漠地区移到湿润下垫面上来的气团的变性过程有关。

第五章讨论了某些需要考虑边界层特点才能解决的特殊性质的实际问题。

这本专著是为从事边界层问题的科学工作者编写的。它也可用作研究生和高年级大学生的教科书。相邻学科的专家们也可以在书中找到一些关于边界层的结构及发生在边界层内的各种过程等方面的有益资料。遗憾的是由于时间和篇幅的限制，许多重要的研究没有能在本书中反映出来。

1. 大气边界层的定义；若干实验资料

由于粘性附着作用，在地面附近形成了很大的风速铅直梯度。在一般大气的气流中，这些梯度都超过了导致气流由层流状态向湍流状态转换的临界值。因此，低层大气中的运动始终具有湍流的特点。

在下垫面影响下湍流化了的大气层称谓大气行星边界层。其厚度与外层气流(在远离地面的自由大气中的气流)的速度有关，也与铅直层结和下垫面不平坦性的尺度及形状有关。在定常状态下，当浮力效应不大时，在整个湍流层中基本运动动能转换成湍流能量引起的动能损失等于水平气压梯度所作的功。

大气边界层的特点不仅表现在风速从零连续增长到与自由大气气流相应的大小，而且也表现在风向很有规律的变化方面。风向的这种变化是由于柯氏力的影响引起的。它对于大气过程的演变特别重要。因为风向与等压线的交角决定了气流要穿过等压线，并因此影响到气团有规则铅直位移和气压场的均匀化。

图 1 描绘了速度模量的铅直廓线和 100 米高度以上风向的平均偏转。这是 T. H. 克拉多 (Кладо) 根据帕弗洛夫斯克 (Павловск) 高空观象台*二个夏半年的资料得到的。风向由下而上单调地向右偏转，直到大约 2 公里的高度。在这个高度上偏转角达到 24° 。随后风向的变化已不大并失去了单调的特点。看来这个高度以上的风向、风速变化主要和气压水平梯度随高度的变化有关。

图 2 上描绘了一种典型情况。它帮助我们理解风向右旋

* 帕弗洛夫斯克位于北纬 $59^{\circ}41'$ ，东经 $30^{\circ}26'$ 。——译者注

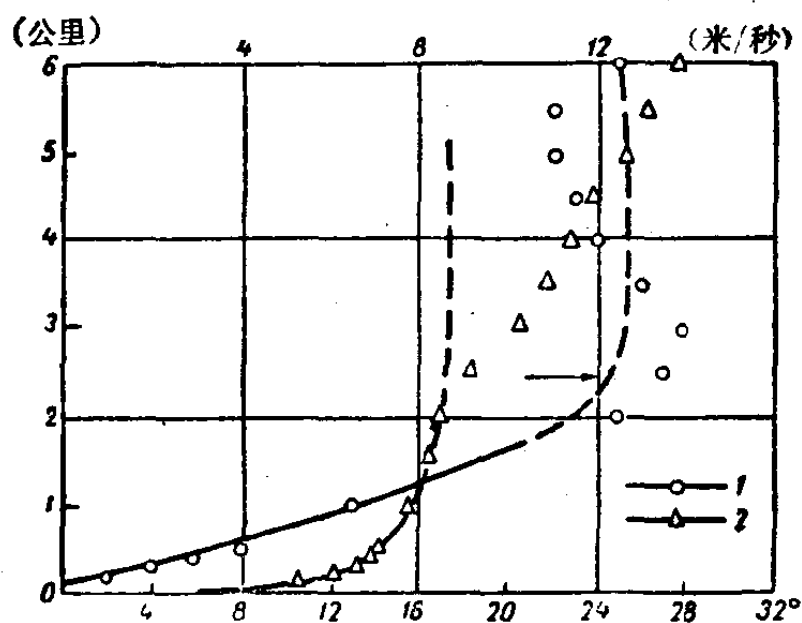


图 1 风向 (1) 和风速模量 (2) 随高度的变化

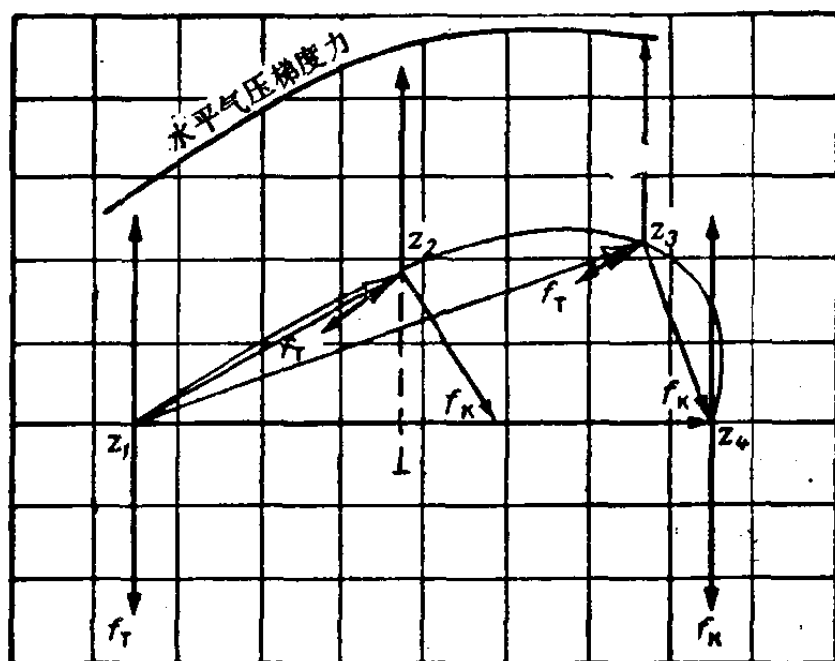


图 2 不同高度上的风向和各种作用力

的机制。在定常运动中水平气压梯度力*在边界层范围内几乎不变,并与柯氏力 f_K 和摩擦力 f_T 相平衡。图上给出了 $z_1 < z_2 < z_3 < z_4$ 四个高度上的风速和力的矢量。

在地面附近气压梯度力与摩擦力相平衡。随着高度的增

* 原文及图 2 上为“水平气压梯度”，按意义写成“水平气压梯度力”更合理。——译者注

加和地面阻尼作用的减小,摩擦力要减小,风速要增加,而正比于风速的柯氏力也同时增加,风向则逐渐趋近于等压线.实验资料表明,地面的动力影响可达到1.5—2公里.应该指出,尽管行星边界层是纯粹由动力因素引起的,但其厚度和结构是与温度分布密切相关的,因为浮力对于涡动(脉动)运动的动能有很大影响.湍流交换本身要影响温度的铅直分布,所以湍流将反过来影响温度状况.由此可知,大气边界层内的温度廓线不仅与热源的分布及强度有关,而且也与湍流强度有关.湍流交换对于边界层内的任何其他物理特征的铅直分布也都有实质性的影响.

因此,边界层物理特征的时空结构状况是与各种作用力和热源等综合的外部条件密切相关并由这些综合的外部条件所决定的.大气边界层物理学的对象就是研究这个范畴的问题.

2. 边界层与气象学的若干实际问题

数学的发展和高效能计算工具的出现,使数值天气预报方法能应用于实际.开展自由大气数值预报近十年来取得了和具有一百年历史的传统天气学预报相同的甚至更高的准确度.数值预报方法的进一步发展有赖于更完整、更准确地考虑影响气象场演变的各种因素.在短期数值预报的近代模式中通常假定过程是绝热的,并忽略湍流的效应.这会引入很大误差,以致单纯靠改进数学方法已不能显著地改善所得的结果.在编制数值预报时迫切需要正确地反映边界层内的各种过程.这首先是因为边界层控制了输送给大气的主要热流量和大尺度运动动能的耗散.

为了提高预报的实际效果,同样重要的是需要估算在相对均匀的自由大气的过程中,实际下垫面上形成的低层天气

的复杂状况。为了解决这个问题，需要研究非均匀下垫面与运动气团低层大气间的相互作用。

除了数值预报问题以外，定向影响一些个别的局地现象在当前也很有实际意义；例如消雾、同霜冻和干旱作斗争、改变蒸发状况以及在水域上形成冰盖等等。遗憾的是这些重要措施的制订至今还带有纯经验的性质，最好的也只是基于十分粗略的估价，并由此产生各种困难和缺点。要使情况从根本上得到改善，只有认真地研究理论和进行相应的数值试验。

工业排放物所引起的大气污染带来的各种问题目前已很尖锐，这些问题的合理解决也和考虑低层大气的湍流状况密切相关。

最后可指出，尽管航空的技术水平很高，但飞机的安全起飞和降落仍然需要关于低层大气中的风切变和湍流等方面的足够准确的情报。

我们指出了若干最典型的例子。从中可以看到在解决许多实际气象问题时，正确考虑低层大气内的物理过程是很重要的。

第一章 边界层的流体热力动力方程组; 方程的分析

§ 1. 平滑量方程的推导

力学第二定律、空气和水汽的质量守恒定律、能量守恒和转化定律及状态方程共同组成了决定风速三个分量、空气的温度、压力、密度及水汽密度的闭合方程组。这时，供给空气的热流入量应是坐标及时间的已知函数。

这一组方程具有以下形式：

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{\rho} \sum F_x; \quad (1.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\rho} \sum F_y; \quad (1.2)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{\rho} \sum F_z; \quad (1.3)$$

$$\frac{d(1/\rho)}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right); \quad (1.4)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = \left[a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial r}{\partial z} \right] \frac{\Theta}{T}; \quad (1.5)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right); \quad (1.6)$$

$$p = \rho R T. \quad (1.7)$$

式中 u, v, w 是速度的三个分量； F_x, F_y, F_z 是各种力在直角坐标轴上的投影，它们都是用已经在方程组内引入的变量