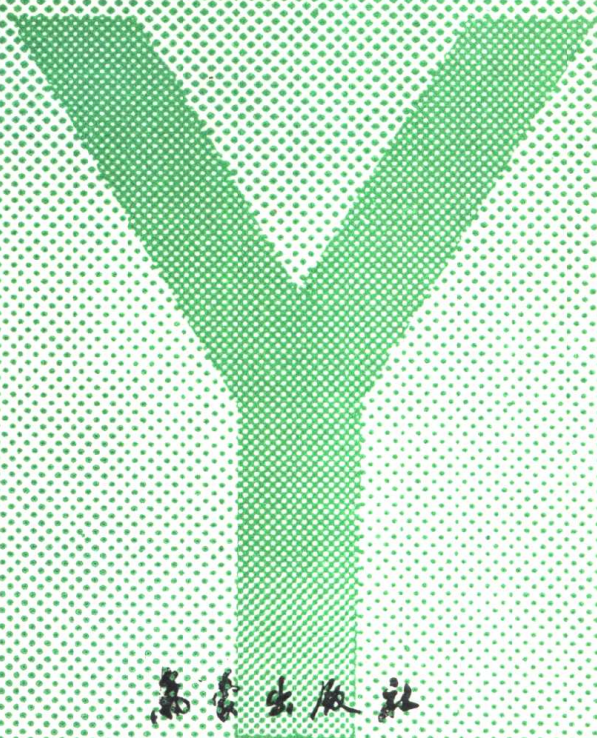


边界层气象学 导论

[美] Roland B. Stull 著



科学出版社

边界层气象学导论

〔美〕 Roland B. Stull 著

杨长新 译
赵 鸣 王彦昌 校

气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书内容广泛,概念清晰,推导严谨,对边界层气象学的有关问题作了全面系统的阐述。作为教科书,它为师生提供了基础知识,每一章都附有相当数量的习题,以加深对内容的理解;作为参考书,它为读者提供了最新的研究成果和文献评述。书中提供的大量背景材料和各种参数、外场试验方法、实用常数等,使读者有可能利用此书进行深入钻研。

本书可供高等气象院校的高年级学生、研究生、教师以及气象和环保等部门的科技人员阅读。

**An Introduction to
Boundary Layer Meteorology
Roland B. Stull**

1988 by Kluwer Academic Publishers

边界层气象学导论

[美] Roland B. Stull 著

杨长新 译

赵 鸣 王彦昌 校

责任编辑 黄丽荣

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 23.5 字数: 594千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷

印数: 1—1200 定价: 7.35元

ISBN 7-5029-0668-1/P·0360 (课)

译 者 的 话

美国威斯康星大学Roland B. Stull教授撰写的《边界层气象学导论》(An Introduction to Boundary Layer Meteorology)，内容全面，资料新颖，概念清晰，结构严谨，反映了80年代的最新成果，是一部兼有教科书和参考书双重功能的佳作。其中资料之多，评述之深，习题之广是现今边界层气象书刊中少见的，颇具指导和总结性质。此书的翻译出版对我国气象教育、科研和业务工作者很有参考价值。

在本书译校过程中，曾得到南京大学大气科学系教授、边界层气象学专家王彦昌的大力支持。即使他在生病住院期间，仍十分关心此书的译校质量和进展情况。8月16日，他不幸与世长逝，译者对他深表怀念和感激。

由于水平所限，译文若有不妥或错误，欢迎读者批评指正。

1990年8月

前 言

湍流是经典物理学至今尚未解决的问题之一。边界层气象学的部分激发因素就是由于研究和了解湍流的挑战；另一个激发因素是由丰富多彩的论题和研究方法产生的，因为这些论题和方法是在边界层气象学掩护下汇集起来的。由于我们生活在边界层中，边界层便成为接触我们的一个客体，同时，也使我们能够经常同它保持接触。在本书中，我设法抓住那些激发因素，各种挑战，以及论题和研究方法的多样性。

我在撰写本书时考虑到多种目的。首先，我将此书设计成一本教科书，阐述基本原理和数学概念优先于它们的运用，给出方程式各项的物理描述，说明样本数据，解答实例，并包括习题。第二，我将此书编成参考书，因此，书中附有各种参数化、研究方法、外场试验、实用常数等表格，以及不同条件下各种现象的图示。第三，本书最后几章是作为边界层气象学最新思想和方法的一种文献评述介绍的。

假设本书适用于在气象学方面具有大学基础知识的研究生，然而，我们预计读者的基础知识是不同的，对于那些具有坚实数学基础的读者可以跳过第二章统计学部分，对于具有时间序列经验的读者可以跳过第八章。上述两个数学章节是独立的，目的是在深入钻研更多的数学知识之前，能向读者提供将统计学初步知识用于边界层的一次机会。有些学生也许学习过地球物理湍流或统计流体力学课程，这些学生可以完全跳过前五章，从边界层应用开始。舍去少数几章，教师可以很方便地将其余内容放在一学期课程中讲授。如果补充一些读物，本书也能按照大气湍流和边界层气象学的顺序用作两个学期。

符号的差异是最困难的。每个学科分支似乎都有自己的一套符号，这些符号又往往与别的学科分支的符号相冲突。使用这类已出版的符号会造成混乱。因此，我不得不选择一致的符号用于全书。在大多数情况下，我设法保留文献中最经常使用的符号，或者增加下标，或者对现有符号作些合理扩展。在其它情况下，我必须改变先前公布过的符号。这些情况读者可以参考附录 B 的符号综合表。

毫无疑问，我并不是边界层气象学所有学科分支的专家，然而，我也知道本书内容应当全面、实用。我撰写本书的兴趣和热情，促使我无数次地往返于图书馆，激起我去分析大量的研究报告，以便学习和领会边界层气象学不同领域中所使用的常用工具和基本论题。遗憾的是，受本书的篇幅限制，我需要对书中应包括的材料的数量和深度作一个困难的决定。希望我所提供的大量背景材料，能让其他教师和研究者在此基础上建立先进的概念。本书没有涉及到大气扩散和农业微气象学之类的论题，因为这些内容有其它优秀书籍。

许多同事和朋友帮助从事本书的写作，并对本书的最后形成和质量作出了重要贡献。Michelle Vandall 应该受到特别赞赏，并感谢她绘制大部分图表，设计页面和章节标题，感谢她对上述设计的全部贡献。我的同事 Steve Stage, Larry Mahrt, George Young, Jacq Schols, Chandran Kaimal, Steve Silberberg, Beth Ebert 和 Bruce Albrecht 评论了各章内容，并提出一些有价值的建议。有关外场试验的资料是 Anton Beljaars, Ad Driedonks, Jean-Claude André, Jean-Paul Goutorbe, Anne Jochum, Steve Nelson, Bob Murphy, Ruwim Berkowicz, Peter Hildebrand, Don Lenschow 和其他人提供的。Eric Nelson 校对手稿，并协助列出符号表。Sam Zhang 编制了索引。方程中有些是 Camille Riner 和 Michelle Vandall (她的名字本书中一再出现) 打印的。我的微气象学教程承

蒙威斯康星大学生忍受了4年未定稿之苦，并发现了许多错误。有耐心的Kluwer Academic出版社编辑们(以前的D. Reidel)不断给予支持，并对他们的远见和指导致以谢意。感谢美国气象学会允许我复制图10.7、图12.10和图12.19。所有上面提到的人和这里没有指名道姓的其他许多人，我都表示衷心感谢。

对于我的夫人Linda，她在我有生以来这一使人振奋又使人劳累的工作中所表现的热忱，我表示感激之情。

Roland B. Stull

威斯康星麦迪逊边界层研究组

目 录

译者的话

前言

第一章 平均边界层特征	(1)
1.1 边界层定义	(2)
1.2 风与气流	(3)
1.3 湍流输送	(5)
1.4 泰勒假说	(5)
1.5 虚位温	(7)
1.6 边界层厚度和结构	(9)
1.7 微气象学	(20)
1.8 边界层的重要性	(23)
1.9 一般参考文献	(25)
1.10 本章参考文献	(29)
1.11 习题	(29)
第二章 若干数学工具和概念工具 (一) ——统计学	(32)
2.1 湍流及湍流谱特征	(32)
2.2 谱隙	(36)
2.3 平均部分和湍流部分	(37)
2.4 若干基本统计方法	(38)
2.5 湍流动能	(48)
2.6 运动学通量	(51)
2.7 涡动通量	(54)
2.8 求和符号	(60)
2.9 应力	(66)
2.10 摩擦速度	(70)
2.11 参考文献	(72)

2.12 习题	(73)
第三章 控制方程对湍流的应用	(78)
3.1 方法学	(78)
3.2 基本控制方程	(79)
3.3 简化、近似和尺度理论	(83)
3.4 湍流中平均变量方程	(90)
3.5 方程概要和简化	(95)
3.6 个例分析	(99)
3.7 参考文献	(112)
3.8 习题	(113)
第四章 湍流通量和方差的预报方程	(119)
4.1 湍流偏差预报方程	(119)
4.2 自由对流尺度变量	(121)
4.3 方差预报方程	(124)
4.4 湍流通量的预报方程	(138)
4.5 参考文献	(152)
4.6 习题	(154)
第五章 湍流动能、稳定性和尺度	(156)
5.1 TKE收支方程的推导	(156)
5.2 对TKE收支的贡献	(157)
5.3 TKE收支贡献为湍涡大小的函数	(173)
5.4 平均动能及其与湍流的相互作用	(174)
5.5 稳定度的概念	(176)
5.6 理查孙数	(182)
5.7 奥布霍夫长度	(187)
5.8 无量纲梯度	(191)
5.9 其他尺度参数	(192)
5.10 综合稳定度表	(193)
5.11 参考文献	(194)
5.12 习题	(198)
第六章 湍流闭合技术	(207)

6.1	闭合问题	(207)
6.2	参数化规则	(210)
6.3	局部闭合——0 阶和1/2阶	(212)
6.4	局部闭合——1 阶	(213)
6.5	局部闭合—— $1\frac{1}{2}$ 阶	(223)
6.6	局部闭合——2 阶	(229)
6.7	局部闭合——3 阶	(234)
6.8	非局部闭合——过渡湍流理论	(235)
6.9	非局部闭合——谱扩散理论	(251)
6.10	参考文献	(253)
6.11	习题	(259)
第七章	边界层条件和地表强迫	(267)
7.1	有效地面湍流通量	(267)
7.2	地面热量收支	(269)
7.3	辐射收支	(272)
7.4	界面上的通量	(278)
7.5	通量分配为感热和潜热两部分	(289)
7.6	往来于地面的通量	(300)
7.7	参考文献	(309)
7.8	习题	(313)
第八章	若干数学工具和概念工具(二)——时间序列	(317)
8.1	时间序列和空间序列	(317)
8.2	自相关	(318)
8.3	结构函数	(322)
8.4	离散傅立叶变换	(325)
8.5	快速傅立叶变换	(334)
8.6	能谱	(336)
8.7	谱的特征	(342)
8.8	两个变量的谱	(354)
8.9	周期图	(360)
8.10	非局部谱	(361)

8.11 TKE方程的谱分解	(365)
8.12 参考文献	(368)
8.13 习题	(370)
第九章 相似理论	(373)
9.1 概述	(373)
9.2 白汉金 π 量纲分析方法	(377)
9.3 尺度变量	(380)
9.4 稳定边界层相似关系一览	(386)
9.5 中性边界层相似关系一览	(390)
9.6 对流边界层相似关系一览	(393)
9.7 对数风速廓线	(400)
9.8 罗斯贝数相似和廓线匹配	(410)
9.9 谱相似	(413)
9.10 相似尺度范围	(418)
9.11 参考文献	(420)
9.12 习题	(427)
第十章 测量方法和模拟技术	(433)
10.1 传感器和测量类型	(433)
10.2 传感器一览	(435)
10.3 形态学的主动远距传感器观测	(439)
10.4 仪器观测平台	(443)
10.5 外场试验	(447)
10.6 模拟方法	(451)
10.7 分析方法	(459)
10.8 参考文献	(466)
10.9 习题	(474)
第十一章 对流混合层	(478)
11.1 不稳定近地层	(479)
11.2 混合层	(487)
11.3 夹卷层	(514)
11.4 夹卷速度及其参数化	(519)

11.5 下沉和平流	(525)
11.6 参考文献	(530)
11.7 习题	(543)
第十二章 稳定边界层	(548)
12.1 平均特征	(548)
12.2 过程	(556)
12.3 演变	(567)
12.4 其他厚度模式	(570)
12.5 低空(夜间)急流	(571)
12.6 浮力(重力)波	(579)
12.7 地形坡度和流泄风	(587)
12.8 参考文献	(591)
12.9 习题	(599)
第十三章 边界层云	(602)
13.1 热力学	(602)
13.2 辐射	(612)
13.3 云的夹卷机制	(615)
13.4 晴天积云	(619)
13.5 层积云	(628)
13.6 雾	(636)
13.7 参考文献	(638)
13.8 习题	(648)
第十四章 地形的影响	(653)
14.1 地形产生的地方性风	(653)
14.2 受地形影响的气流	(662)
14.3 城市热岛和城市烟羽	(678)
14.4 参考文献	(681)
14.5 习题	(690)
附录	(694)
A 尺度变量和无量纲组	(694)
B 符号	(698)

C 实用常数、参数和换算系数	(717)
D 虚位温推导	(720)
索引	(723)

第一章 平均边界层特征

从我们开始呼吸起，一生中大部分时间是在地面度过的。人们感到白天阳光温暖，夜间寒气袭人，这就是长庄稼、建房舍和进行频繁贸易往来的场所。我们对本地的风和小气候变化比较熟悉，一旦去外地旅行，就会发现各地气候大不一样。

但是这种地面气候特征并不能代表我们在其余大气层中所观测到的特征。产生这种差别的原因之一，就是地球对最低层大气的影影响太大。

地面是大气的一个边界。这个边界上的输送过程，影响了最低的100至3000m的大气，产生所谓的边界层（图1.1），对流层其余部分则不精确地称之为自由大气层。因此，为多数人所感受到的大气特征，或多或少是以较浅层空气中发现的特有特征为基础的。

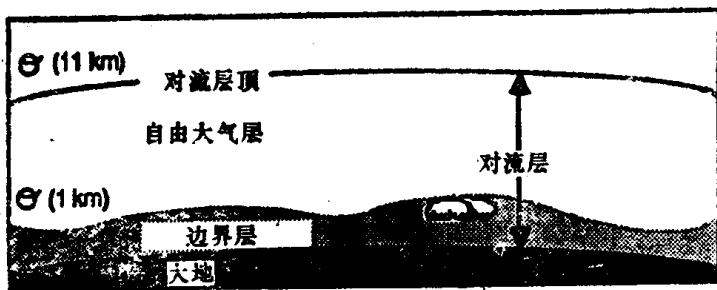


图1.1 对流层可以划分为近地面的边界层（阴影区）和边界层以上的自由大气层两部分

本章打算提供边界层描述性评述。重点放在中纬度陆地边界层，因为世界大多数人口居住在这里，而且这里已经进行了大量边界层测量，况且周日循环和气旋过境又是这一地区的主要强迫机制。此外，对热带和海洋边界层也要做简要评述。尽管有关章

节中会谈到这里所介绍的边界层描述性特征，但后几章全面介绍边界层理论和方程仍然是很有意义的。

1.1 边界层定义

对流层从地面向上一直可以延伸到平均高度 11km，但通常只有最低层几公里才直接受下垫面影响。因此，我们可以把边界层定义为直接受地面影响的那部分对流层，它响应地面作用的时间尺度为 1 小时或更短。这些作用包括摩擦阻力、蒸发和蒸腾、热量输送、污染物排放，以及影响气流变化的地形等。边界层厚度是完全随时间和空间变化的，变化幅度从几百米到几千米。

图1.2表示对流层最低层温度变化的例子。图上的温度随时间变化的曲线是根据俄克拉何马州劳顿附近每隔几小时进行的无线电探空测风记录绘制的。曲线表示近地面温度日变化，它在高空很不明显。这个日变化是陆地边界层的关键特征之一。

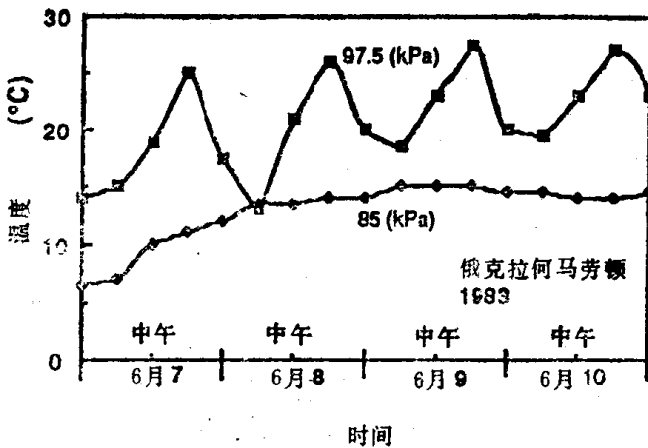


图1.2 近地面 (97.5kPa) 和地面以上约 1100m (85kPa) 测得的温度变化曲线

这个日变化不是由于边界层上太阳辐射直接引起的。边

界层只吸收少量的太阳辐射，而大部分被输送到地面。地面典型吸收率约90%，结果使大部分太阳能被地面吸收。正是地面为响应太阳辐射而变暖和变冷，它依次迫使边界层通过输送过程而变化。湍流是一个重要的输送过程，有时它也可用来定义边界层。

整个对流层都能间接地随地面特征而变化，但是边界层以上这种响应过程是非常缓慢的。所以，我们定义的边界层包括了约1小时时间尺度的论点。这并不意味着在那个时间内边界层要达到平衡，但至少这种变化已经开始。

在边界层研究中往往包括有两种云，一种是晴天积云，它与边界层热力关系非常密切，如果不集中研究边界层的激发机制，便很难了解它的动力学。另一种是层积云，它布满了混合湿边界层的上部，那里的低温可以使水汽凝结。雾是接近地面的层积云，它也是一种边界层现象。

没有地面作用的雷暴，通过把边界层空气吸入云中，或者通过建立冷下曳气流层，在几分钟之内就能改变边界层状况。虽然雷暴很少被看作是边界层现象，但它们与边界层的相互作用，本书还要进行详细评述。

1.2 风与气流

气流或风可以分为平均风速、湍流和波动三大类(图1.3)。每一类可以独立存在，也可以与其它两类同时存在。这三类都可以存在于边界层之中。边界层中诸如湿度、热量、动量和污染物等各种量的输送，在水平方向上受平均风速支配，在垂直方向上受湍流支配。

平均风速是造成快速水平输送或平流的主要原因。边界层中2—10 m/s的水平风速是常见的。摩擦力使平均风速在近地面达到最慢速。垂直平均风速极小，通常只有每秒几毫米到几厘米。

在夜间边界层中经常观测到的波动，虽然它们只能输送少量的热量、湿度和污染物之类的标量，但在输送动量和能量方面却

有着显著的作用。这类波动可以由平均风切变和越过障碍物的平均气流就地产生，也可以由很远的雷暴等天气系统传播而来。

地面附近出现湍流的频次非常高，这是边界层不同于其它大气层的一个显著特征。在边界层之外，湍流主要发生在急流附近，因为那里的强风切变可以产生晴空湍流 (CAT)。

大气波动有时能加强局地风切变，形成湍流。因此，波动现象与热量和污染物的湍流输送有关。不过，没有湍流的波动就不那么真正有效了。

研究湍流或波动的一般方法，是把温度和风等变量分解为平均和扰动两部分。平均部分表示平均温度和平均风速的影响，扰动部分则表示波的影响或叠加在平均风速上的湍流影响。

正如本书后几章将要谈到的，把这种分解方法应用于运动方程后，便产生若干新项。其中有几项是由扰动变量的乘积组成的，它描述了与湍流有关的变量之间的非线性相互作用。当我们主要考虑波动时，通常就可以略去这些项。只含有一个扰动变量的其它项，描述了与波动有关的线性运动。当突出湍流时，这些项便可以忽略不计。

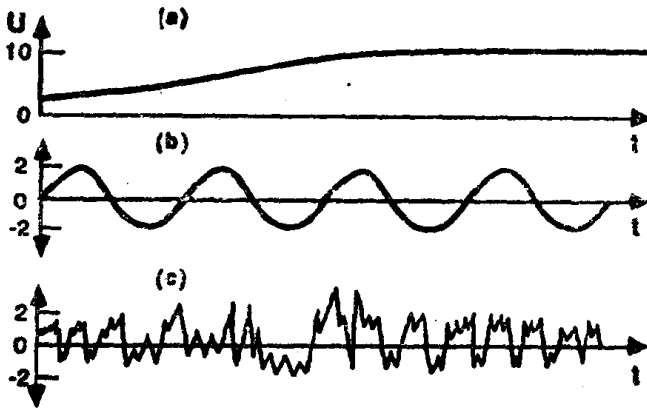


图1.3 (a) 平均风速；(b) 波动；(c) 湍流的理想状况。实际上，波和湍流经常是叠加在平均风速上的。U表示风在x方向上的分量