

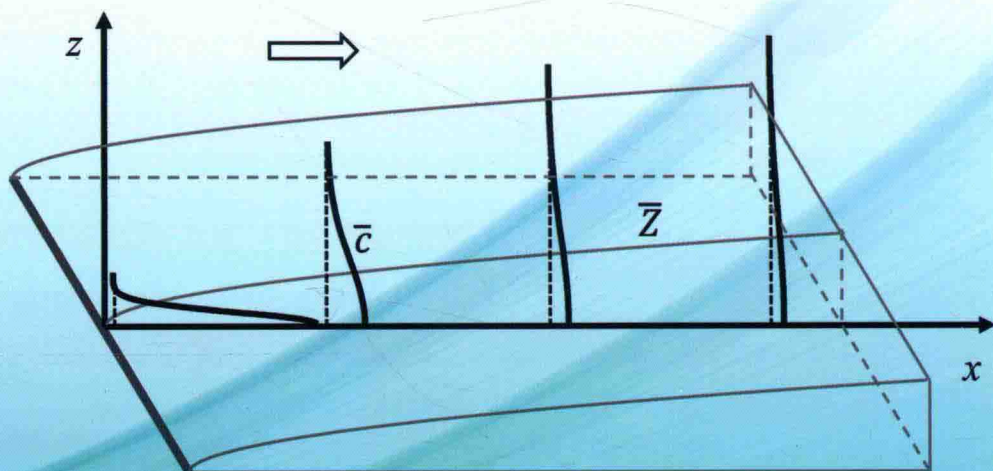


“十三五”江苏省高等学校重点教材

边界层气象学基本原理

李旭辉 著

王伟 肖薇 张弥 胡凝 王咏薇 译



科学出版社



“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号: 2017-2-051)

边界层气象学基本原理

李旭辉 著

王伟肖薇张弥胡凝王咏薇译

科学出版社

北京

内 容 简 介

边界层气象学是气象学的一门分支学科, 主要关注与地球表面直接接触的大气层的状态和其中发生的各种过程。本书以动量守恒方程, 干空气、水汽和痕量气体的质量守恒方程, 运动气块和地表的能量守恒方程以及理想气体状态方程基本控制方程组为核心来组织素材。针对不同情形, 通过方程推导, 解释大气边界层中的各种现象和结果。

本书可作为大气科学等相关专业高年级本科生或研究生的边界层气象学和微气象学课程的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

边界层气象学基本原理/李旭辉著. —北京: 科学出版社, 2018.6

“十三五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-03-057924-9

I. ①边… II. ①李… III. ①大气边界层—气象学 IV. ①P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 128345 号

责任编辑: 胡 凯 王腾飞 曾佳佳 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中国画美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 290 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



致 谢

Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology 已在 Springer 出版, 感谢以下专家提供的宝贵审稿意见: Brian Amiro (第 4 章)、Don Aylor (第 5 章)、Dennis Baldocchi (第 8 章)、Rob Clement (第 3 章)、Timothy Griffis (第 1、2、10、11 章)、Bill Massman (第 2、9 章)、HaPe Schmid (第 7 章)、Natalie Schultz (第 1、7、10 章)、Jielun Sun (第 6 章) 和 Lei Zhao (第 10 章)。

感谢耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心的博士生曹畅、胡诚、刘诚、张圳等同学, 谢谢他们试解本书中的习题。

李旭辉 王 伟 肖 薇 张 弥 胡 凝 王咏薇

南京信息工程大学

耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心

2018 年 1 月

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 边界层气象学	1
1.2 边界层气象学的应用范例	3
1.2.1 地表通量的参数化	3
1.2.2 生态系统的新陈代谢	4
1.2.3 生物颗粒的传播路径	4
1.2.4 空气污染物扩散	5
1.2.5 预测蒸散	5
1.2.6 城市热岛效应	5
1.2.7 与大尺度大气运动的联系	6
1.2.8 输送现象	6
1.3 本书框架	7
1.4 如何使用本书	7
第 2 章 基本方程	9
2.1 坐标系	9
2.2 动量守恒原理	10
2.3 质量守恒	12
2.4 能量守恒	15
2.5 理想气体定律	16
2.6 地表能量平衡	18
习题	20
参考文献	22
第 3 章 平均量的控制方程	23
3.1 雷诺分解	23
3.2 流体的不可压缩性	26
3.3 速度、混合比和位温的平均方程	28
3.4 简化的一维方程	30
3.5 闭合问题	32
3.6 量化湍流通量的方法	36
3.6.1 实验研究	36

3.6.2 模型研究	39
习题	41
参考文献	45
第 4 章 大气湍流的产生与维持	47
4.1 能量库与能量传输	47
4.2 平均流的动能收支	50
4.3 湍流的动能收支	53
4.4 大气稳定度	56
习题	62
参考文献	66
第 5 章 植被冠层内的流场	67
5.1 冠层形态	67
5.2 冠层体积平均	67
5.3 平均动量方程	70
5.4 冠层内风廓线的解析解	72
5.5 平均流和湍流的动能收支	74
5.6 剪切不稳定和湍流的诞生	75
习题	80
参考文献	83
第 6 章 大气边界层中的受力平衡	84
6.1 大气分层	84
6.1.1 对流边界层	84
6.1.2 稳定边界层	86
6.1.3 大气边界层的昼夜演变	87
6.2 中性和对流边界层内的受力平衡	88
6.3 大气稳定条件下的受力平衡	92
习题	97
参考文献	100
第 7 章 近地边界层痕量物质扩散	101
7.1 基本约束条件	101
7.2 均匀湍流中的点源扩散	103
7.2.1 瞬时点源	103
7.2.2 连续点源	107
7.3 高架源的高斯烟羽模型	108
7.4 地面源的扩散过程	110

7.4.1 地面线源	110
7.4.2 地面点源	113
7.5 植被冠层中的扩散	114
7.6 通量贡献区理论	115
7.6.1 通量贡献区的概念	115
7.6.2 确定通量贡献区函数的方法	117
7.6.3 通量贡献区模型	119
习题	121
参考文献	124
第 8 章 涡度相关原理	126
8.1 引言	126
8.2 冠层源项	126
8.3 净生态系统交换的概念	129
8.4 箱式法	130
8.5 涡度相关法的控制体积	132
8.6 无平流条件下的涡度相关法	136
8.7 垂直平流	137
8.8 水平平流	141
8.9 实际应用中需关注的问题	143
习题	144
参考文献	147
第 9 章 通量观测中的密度效应	148
9.1 密度效应	148
9.2 涡度相关观测中的密度效应	149
9.3 通量梯度关系中的密度效应	153
9.4 箱式法测定通量的密度效应	156
习题	157
参考文献	160
第 10 章 能量平衡、蒸发和表面温度	162
10.1 叶片尺度通量的阻力表达式	162
10.2 冠层能量平衡和大叶模型	165
10.3 应用于遥感的单源模型	168
10.4 双源蒸发模型	170
10.5 地气交换模型的改进	172
10.6 表面温度的单源模型	173

习题	177
参考文献	180
第 11 章 大气边界层的热量、水汽和痕量气体收支	182
11.1 引言	182
11.2 对流边界层的平板近似理论	183
11.3 边界层增厚和夹卷过程	186
11.3.1 边界层增厚	186
11.3.2 夹卷过程	188
11.3.3 边界层云的作用: 积云	189
11.3.4 边界层云的作用: 层积云	190
11.4 对流边界层的热量收支	192
11.5 对流边界层的 CO_2 收支	194
11.6 对流边界层的水汽收支	197
11.7 夜间稳定边界层中的痕量气体	198
11.8 平衡边界层	199
11.8.1 海洋上的平衡边界层	199
11.8.2 陆地上的平衡边界层	200
习题	201
参考文献	205
符号与常数	207
索引	214

第1章 引 论

1.1 边界层气象学

边界层气象学是气象学的分支学科，主要关注与地球表面直接接触的大气层的状态和其中发生的各种过程。大气边界层是自由大气与地表（如陆地、湖泊、冰盖和海洋）之间的界面，其厚度约为 1 km（图 1.1）。从大气圈角度来看，大气边界层是大尺度大气运动的下边界；从生物圈角度来看，大气边界层自上而下地影响着生态系统的各种功能。

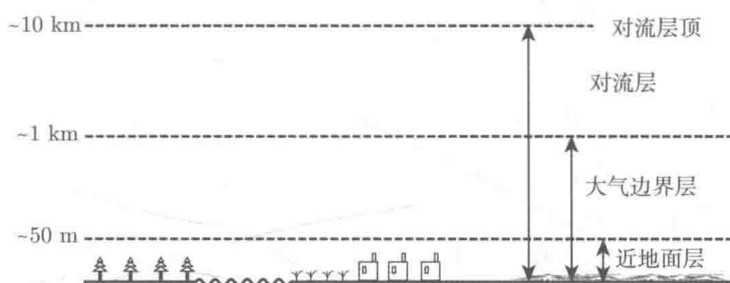


图 1.1 低层大气的分层示意图

图中垂直高度并未按比例绘制

大气边界层的物理状态可以用温度、湿度、气压和风等变量来描述，其化学状态可以用痕量气体（如 CO_2 和空气污染物）的浓度高低来描述。描述边界层物理状态的变量与大气动力过程（如边界层中的湍流发展水平、物质扩散效率和大气稳定度等）紧密相关，会对大气动力过程产生重要影响。除气溶胶外，描述大气边界层化学状态的变量多为被动变量，并不直接影响大气动力过程。边界层状态变化主要受以下两个过程控制：边界层内部的动量、能量和物质的传输以及边界层与地表或自由大气之间的动量、能量和物质的交换，通常用通量来量化上述传输过程的速率。因此，边界层气象学的主要研究目标之一就是分析边界层状态变量与过程变量之间的关系。

地表与大气之间的辐射能量交换是调控大气边界层物理和化学状态的关键过程。晴朗无云时，大气边界层对于太阳短波辐射几乎是透明的，此时，辐射能量的吸收、反射和发射仅发生在地表。白天，地表吸收太阳短波辐射，加热大气边界层；夜晚，地表净损失长波辐射，冷却大气边界层。太阳辐射为地表蒸散提供了能量来

源,在此过程中液态水吸收能量汽化变成水汽进入大气。在陆地生态系统中,蒸散主要发生在白天,会增加大气湿度;夜晚蒸散较弱甚至消失。植物光合作用和呼吸作用受昼夜变化的调控,导致大气中的 CO_2 和其他生物活性气体浓度也发生昼夜变化。综上可知,大气边界层物理和化学状态具有显著的昼夜变化特征,相反,自由大气中并不存在这样的日变化动态。

边界层的另一个重要特征是大气运动以湍流为主。在对流边界层内(图 1.2),风切变(即风速随高度的变化)和地表加热引起的浮力会激发湍流,部分大尺度湍流可以进入自由大气,产生对流云。在夜晚,风切变是产生湍流的唯一机制。风切变通常发生在地表,当存在低空急流时,风切变也偶见于夜间边界层顶(图 1.3)。

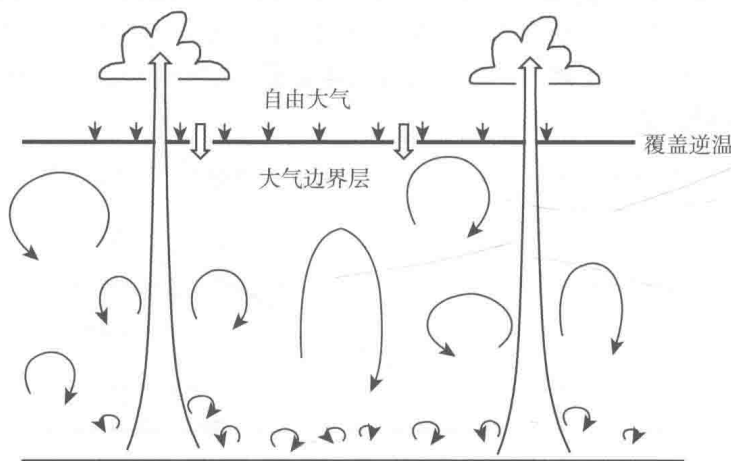
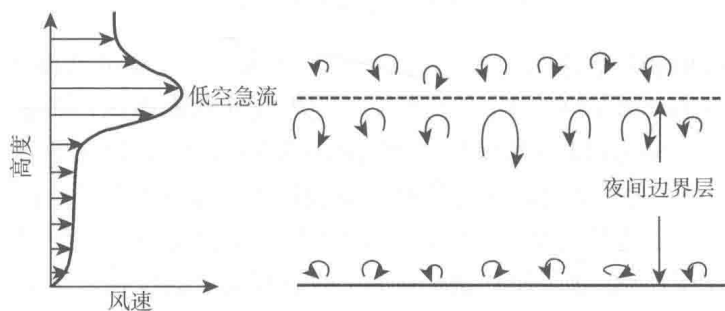


图 1.2 对流边界层中的湍流运动示意图



(a) 夜间低空急流示意图 (b) 急流高度和地表附近风切变产生湍流的示意图

图 1.3 夜间低空急流的示意图及急流高度和地表附近风切变产生湍流的示意图

正是由于气流的湍流特性,能量和物质才能够在边界层内扩散并输送至上层大气,这种湍流输送效率远高于分子扩散。此外,湍流可对大尺度的气团运动产生摩擦力,摩擦力的减速作用使得边界层内的风速要比自由大气中小。如果没有地表摩擦力,大气边界层内的风速将非常大,以至于地球上的人类和其他生物都无法忍

受。而边界层以上的大气因为不受地表摩擦力的作用，故可以自由流动。

湍流运动是杂乱无章的。读者自然会问，从大气边界层如此杂乱无序的运动中，是否能够找出任何规律？答案是肯定的。只要遵循能量、质量和动量守恒原理，就能从那些表面上看似随机的运动结构中得到有序的形式。而且大气湍流运动越强烈，则越易于量化大气边界层的平均状态。如何合理地应用能量、质量和动量守恒原理就成为边界层气象学研究的根本任务。

大尺度的大气状态对边界层过程的影响可以用一系列已知参数来描述。比如，气压梯度通常被认为是已知参数，它与天气形势密切相关，边界层气象学家的任务就是基于已知的气压梯度来确定边界层中的地表摩擦力、湍流强度和风向切变等。另一个已知参数是边界层以上的太阳辐射。受天空云的影响，晴天时预测太阳辐射强度的变化要比阴天时更为容易。边界层内的对流和辐射冷却可以形成云，除此之外，云的预报已超出边界层气象学的研究范畴。在实际研究中，一般用地面气象观测和天气预报模式来确定天空的阴晴变化，基于以上给定的天空条件，就可以计算地表各种能量分量之间的平衡关系。

大气边界层内包含了近地面层，其高度为地面以上几米至几十米（图 1.1），该层中地表对大气的的影响最为强烈，并且微气象学现象多见于此层。近地面层的下部有时是植被或者城市冠层，有时没有植被和其他粗糙元。大气边界层中最受关注的是风、温度、湿度和气体浓度的垂直廓线，这些廓线决定了大气与地表之间的动量、能量、水汽和痕量气体的交换效率。在大气边界层中，有一些痕量气体（如 SO_2 、 O_3 和可挥发性有机物等）是空气污染物，其他痕量气体多为平均寿命长并且与生物活动有关的温室气体（如 CO_2 和 CH_4 ）。微气象学家创立了多种方法来量化这些痕量气体的通量，这些方法都得到了广泛的运用，本书将详细阐述这些方法的理论基础。

1.2 边界层气象学的应用范例

边界层气象学是一门应用性科学，下面将举例阐述该学科的应用特性及其与相关学科（动力气象学、陆地生态学、水文学和空气污染气象学等）之间的联系。虽然本书讨论这些问题的深浅不同、详略各异，但所提供的素材可为读者今后的文献调研提供充足的知识储备。多学科的交叉需要我们更好地理解大气边界层中的各种现象，这也为边界层气象学家提供了新的科学问题。

1.2.1 地表通量的参数化

通量是指单位时间内通过单位参考平面净的物质的量或能量，如 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射通量表示 1 s 内通过 1 m^2 表面积辐射能是 200 J； $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽

通量表示 1 s 内通过 1 m² 表面积的水汽质量为 0.1 g。若参考平面水平且位于地表正上方, 则通量就等同于地表与大气之间的交换速率。地表辐射能量、感热、动量和水汽通量为天气预报模式和气候预测模型提供了下边界条件。在模型中, 一般用一系列的数学公式来表征这些通量, 即所谓的参数化, 并用一系列的已知参数来描述通量与地表形态、光学性质和植被生态属性之间的关系。对于在线模式而言, 其参数化方案通常与大气模式耦合在一起, 此时需要大气模式在最低的格点高度上进行逐时预报, 为实际的通量计算提供驱动变量, 这些驱动变量包括入射太阳辐射、入射长波辐射、气温、湿度、风速和降水量。在离线模式中, 通量的参数化方案则由这些变量的观测值来驱动, 可见, 离线计算也是试验者分析野外观测数据的一种方式。一个可靠的参数化方案必须建立在完备的大气传输原理之上, 而边界层气象学研究对于此工作必不可少。

1.2.2 生态系统的新陈代谢

生态系统的新陈代谢过程涉及系统与环境之间的能量和物质交换。白天, 植物从大气中吸收 CO₂ 用于光合作用, 与此同时, 植物通过蒸腾消耗水分, 这不仅可以防止植物过热, 还有助于植物根系从土壤中吸收营养物质; 夜晚, 植物通过呼吸作用向大气中释放 CO₂。上述植物生理过程是高度动态变化的, 会随着天气条件的波动而逐时改变。CO₂ 和水汽交换发生在近地面层, 使得该层成为观测物质交换过程的理想大气层, 而在近地面层以上的大气中通过观测来获取生态系统功能信息是根本不可行的。生态系统在近地层中留下了诸多印记, 这使得通过大气观测来获取生态系统的 CO₂ 和水汽交换成为可能。这类微气象学方法不需要进行破坏性的植被取样, 也不会破坏植被的生长环境, 在实际观测中得到了广泛应用。尽管微气象学方法具有诸多优势, 但仍存在一些方法论上的挑战。从本质上而言, 微气象学方法的理论基础是质量守恒原理, 而试验只能观测到质量守恒方程中的部分项, 这就迫使研究者不得不利用有限的观测项去估计真实的生态系统净交换。而在某些气象状况和站点条件下, 这种估算方法可能会失败, 因此充分理解该估算方法成功和失败的条件, 对于野外试验设计和后续数据分析都至关重要。

1.2.3 生物颗粒的传播路径

大气中的生物颗粒根据尺寸大小可以归为以下两类。靠风媒传播的植物种子尺寸较大, 介于几毫米和几厘米之间; 花粉和孢子属于小尺寸类别 (0.5~100 μm)。这些生物颗粒的生命周期包括生成、释放、扩散和沉降, 每个阶段都会受到大气边界层条件的影响, 对风场和湍流结构尤为敏感。植物种子的沉降速率较大, 故很难逃离近地层。绝大部分种子的扩散距离都在距离母本数十米的范围内, 其确切的传

播路径受植被高度处的风速、风向和植被冠层内的风向切变所控制。尺寸较小的生物颗粒(花粉和孢子)的传播距离较远,大部分沉降在离源区数千米的范围内。一旦被卷入大尺度对流湍涡中,其中一小部分颗粒物还能够逃离近地层,进入边界层上部甚至自由大气,进行长距离传输。孢子的长距离传输是引发植物病害大范围传播的主要机制。与此类似,花粉的长距离传输可导致基因污染,这也是植物育种专家非常关注的问题。基于颗粒物的形态特征、生成时间和大气边界层的湍流结构,可以确定逃离近地层的颗粒物的比例大小。

1.2.4 空气污染物扩散

污染源下风向的空气污染程度受污染物排放速率、污染源配置和局地气象条件共同控制。惰性污染物浓度与排放速率呈线性相关,即排放速率翻倍会使得污染物浓度倍增。相比而言,污染物浓度随气象条件的变化特征就更为复杂。比如,同样的源排放强度,在当天可能符合空气质量标准,但随着大气条件改变,次日就可能不符合空气质量标准。大气对污染物的扩散能力会随着风速增大、湍流增强、静力不稳定度增加和边界层高度增加而增强。空气质量预报模型基于质量守恒原理,并考虑了大气扩散条件,可以预测排放源附近污染物浓度的高低,这样就可以基于已知污染源进行空气质量预报,告知当地居民附近的空气质量如何。对于监管部门而言,空气质量预报模型可以用来判断新建污染源是否会引起空气质量不达标。一般而言,空气污染物沉降速率与近地层污染物的浓度成正比,故预测近地层污染物浓度有助于评估空气污染对生态系统健康的影响。

1.2.5 预测蒸散

水分是植物生长不可或缺的资源。植物体本身所含水分总量可以忽略不计,植物所吸收的水分绝大部分以蒸散的形式进入大气。蒸散速率主要受可利用能量和土壤湿度所控制,近地层气温、大气湿度和风速对其也有一定的影响。利用以上状态变量可以预测蒸散,这对于指导农民确定田间灌溉时间和灌溉量大有裨益。此外,量化蒸散还有助于在生态系统模型中确定植物长势。地表水汽通量(蒸散速率)与能量和质量守恒紧密相关,这种关联分别通过地表能量平衡方程和水量平衡方程得以体现。而对于 CO_2 通量而言,并不存在类似的约束方程。水分利用效率是指 CO_2 通量与水汽通量的比值,拥有相同光合作用机制(如 C_3 或 C_4)的植物的水分利用效率变化幅度较小,建模者可以利用水分利用效率保守性来计算生态系统生产力。

1.2.6 城市热岛效应

城市热岛效应是指城市区域地表温度和气温高于周边郊区温度的现象。全球超过一半的人口生活在城市中,尽管城市热岛在地表景观中属于局地热点,但其对

于城市居民的生命健康有着深远的影响。城市热岛不仅会增加空调能耗,而且会加剧人类健康的热胁迫。人们为了缓解城市热岛效应推行了不少对策,这些对策所基于的科学依据就是地表能量守恒原理。从能量平衡角度而言,以人造结构替代自然景观会在多方面扰乱地表能量平衡。其中,蒸发冷却作用减弱就是导致城市变暖的一个重要因子。人为热释放作为额外的能量叠加在地表能量平衡中,会增加地表温度。土地利用变化引起的反照率降低也会增加太阳短波辐射的能量输入。与自然植被和土壤相比,建筑物在白天可以储存更多的辐射能,这些存储的热量在夜间释放,进而引起夜间增暖。地表与边界层大气之间的对流所引起的能量再分配可增强亦可削弱城市热岛效应,其效果取决于城市对流效率是被抑制还是被增强。这些有关城市热岛的概念早已被人们所熟知。为了缓解城市热岛效应,需要量化城市热岛影响因子的日变化和季节变化特征,并研究其在城市街区间及不同气候区的空间变化特征。

1.2.7 与大尺度大气运动的联系

埃克曼抽吸是边界层气流与大尺度大气运动相互作用的物理机制之一。因气压梯度力和科里奥利力二力平衡,在北半球低压系统中,边界层以上的大气呈逆时针旋转,而在高压系统中呈顺时针旋转,这些天气系统在水平方向上所跨越的尺度可达几百千米。在大气边界层中,地表摩擦使得气流在低压系统中流进,呈气流辐合;而在高压系统中流出,呈气流辐散。埃克曼抽吸是指低压系统中气流辐合所诱发的大气边界层顶的垂直上升运动,该运动可抽吸近地层水汽,垂直输送到上层大气,以维持云的存在。埃克曼抽吸中的上升气流通过邻近高压系统的辐散得以补偿,从而形成了叠加在逆时针和顺时针旋转流场上的二级环流。可见,要成功预报云和降水,就需要精确地描述埃克曼抽吸机制。

1.2.8 输送现象

除上述所讨论的应用范例之外,研究低层大气扩散还有助于科学家优化湍流输送理论。由于在控制环境中无法再现大气边界层各种条件,这就导致已建立的湍流输送理论会在超出常规参数范围的情况下使用。比如,用于描述管道和风洞边界层流体湍流扩散的普朗特理论在近地层大气中适用性较好,但在大气边界层上部和植物冠层内部应用效果不佳,这是因为这两类扩散过程主要由大尺度湍涡所控制,而这些湍涡的特征尺度远大于普朗特混合长度。另一个例证是大气边界层与自由大气之间的能量和物质交换,此时可以用扩散介质本身的物质运动来更准确地描述热量和水汽的输送,而并非用与温度和气体浓度梯度相关的扩散过程来描述这一过程。

1.3 本书框架

本书以基本控制方程组为核心来组织素材。这些方程组包括动量守恒方程,干空气、水汽和痕量气体的质量守恒方程,运动气块和地表的能量守恒方程以及理想气体状态方程,针对不同情形,本书通过方程的逻辑推演来解释大气边界层中的各种现象和结果。

本书第2章将介绍基本方程组,在第3章中将雷诺分解应用于这些方程组,得到一系列描述时间平均状态变量与通量之间关系的控制方程组。

第4~6章是动量守恒原理的应用。在第4章中,通过对平均动量方程的推导来研究大气边界层中湍流的产生与维持。第5章将动量守恒原理应用于植物冠层内的空气层,此处需要利用体积平均来研究植物要素与流动气块之间的交互作用。在第6章中,大气边界层将被划分为多个子层,略去动量方程中的小项,再通过受力平衡分析就可以得到平均速度的简易解析解。

第7章和第8章将介绍质量守恒原理的应用。第7章主要关注大气边界层中痕量物质的扩散过程。在第8章中,对雷诺平均质量守恒方程使用体积平均,从而建立植物 CO_2 、水汽和热量与大气中过程变量之间的关系,该关系是利用涡度相关技术观测地表通量的基础。

第9章主要研究干空气密度波动给大气边界层中温室气体通量观测带来的干扰。本章将反复使用理想气体状态方程来分析温度、湿度、痕量气体浓度和气压之间的相互依赖关系。

第10章建立了模拟蒸发和表面温度的数学模型,这些模型的理论基础就是地表能量平衡,也就是能量守恒定律在叶表、冠层和地表的具体应用。

在第11章中,将基于能量和质量守恒原理来量化能量、水汽和痕量气体在整个大气边界层、地表和自由大气之间的传输过程。

1.4 如何使用本书

本书可以作为高年级本科生或研究生的边界层气象学和微气象学课程的教材。在耶鲁大学,该课程为3个学分,课程持续12周,每周3小时,共计36课时,本书内容比3个学分课程需要讲解的内容要多。如果课程侧重于观测方法,则可以跳过介绍模型模拟的章节(第10章)和第7章的大部分内容,但建议保留有关通量贡献源区的内容。如果课程侧重于大气边界层现象的模拟,则可以略去与观测方法相关的章节(第8、9章)。

通常,研究型参考书会依据时间先后顺序来组织素材,这样可以体现概念和理

论随时间的发展进程,而本书并未采取这种写作策略。不论素材发表时间早晚,作者主要依据逻辑结构来编写本书。每章末尾都列出了部分参考文献,读者可以就感兴趣的专题自己重建其历史顺序或做更深入的探索研究。

本书的读者应该具备多元微积分的知识,流体力学和热力学的知识储备对于本课程的学习有益但非必需。大气科学专业的学生会发现,第 2 章所介绍的内容与其他大气类专业课会有部分重复,但复习这些基本原理对于学习后面的边界层专业知识是大有裨益的。虽然本书会在适当之处进行公式推导,但理解公式的物理含义及其简化的前提条件远比纯粹的公式数学推导更为重要。

本书将重点介绍边界层气象学的基本理论和基本概念,但这并不会削弱观测研究的价值和重要性。为此,作者将本人和其他科学家发表的一些实验结果设计融入每章的课后习题中。即使不想做这些习题,也应该花些时间来研读这些习题的题干,并建议去探索本书所介绍的基本原理与其他教材所提供的实验数据之间的关系。从这个角度来看,本书可以作为几本优秀的边界层气象学教材的有机补充,这些经典教材包括 Oke 编写的 *Boundary Layer Climates* (《边界层气候学》), Stull 所著的 *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* (《边界层气象学导论》), Garratt 编写的 *The Atmospheric Boundary Layer* (《大气边界层》), Wyngaard 撰写的 *Turbulence in the Atmosphere* (《大气湍流》), Foken 编写的 *Micrometeorology* (《微气象学》) 以及 Vilá-Guerau de Arellano、van Heerwaarden、van Stratum 和 van den Dries 共著的 *Atmospheric Boundary Layer: Integrating Air Chemistry and Land Interactions* (《大气边界层: 大气化学与地表交换的整合》)。

对边界层气象学发展历史感兴趣的读者可以参考以上教材,也可以阅读由 Davidson、Kaneda、Moffatt 和 Sreenivasan 编写的 *A Voyage Through Turbulence* (《穿行在湍流的世界》),这本书对湍流的发展史进行了全面回顾。

为了加强读者对各章概念的理解,每章都设置了 20 道左右难易程度不同的习题。星号标注的习题是依据已发表的论文所构思的小型研究性课题,难度最大,读者可以从每章所列出的参考文献中获得解答这些难题的思路。在回答问题时,需要特别注意一些细节,努力建立良好的“数感”,如物理量的单位和有效数字的位数等。这些细节常被用来判断学生对某一知识的掌握程度。比如,自然地表的净辐射变化范围为 $-100 \sim 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,如果计算的答案是 $-150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,那就得想想是不是哪儿出错了。

读者可以从作者个人网页上 (<https://xleelab.sites.yale.edu/publications>) 获取本书所有的插图,这些图片可以用于学术报告和课堂讨论。与本教材配套的在线课程正在建设中,一旦完成就会通过作者个人网页向公众开放。授课教师可以从作者个人网页上下载课后习题的参考答案。英文 PPT 和课后习题答案已在作者个人网页上共享。

第2章 基本方程

2.1 坐标系

通常利用右手笛卡儿坐标系来研究矢量 (如通量、速度和标量浓度梯度)。在讨论动量、质量和能量守恒时, 该坐标系的原点是固定的, 三条坐标轴的方向也相应固定。在水平面上, x 轴指向北方, y 轴指向西方, z 轴指向重力的反方向。此时, 瞬时速度矢量表示为 $\mathbf{v} = \{u, v, w\}$, 标量 a 的梯度表示为 $\nabla a = \{\partial a / \partial x, \partial a / \partial y, \partial a / \partial z\}$ 。

微气象学坐标系是一种特殊的笛卡儿坐标系, 它通常根据近地层内观测到的风矢量来确定水平坐标轴的方向 (图 2.1)。同样利用右手法则, 微气象学坐标系的 x 轴方向与平均水平风矢量一致, y 轴为侧风方向或者横风方向, z 轴垂直于地面。在地形平坦地区, z 轴与重力方向相反。平均速度矢量 $\bar{\mathbf{v}} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}$, 上划线表示时间平均, 通常采用 30 min 平均。如果风向每隔 30 min 会发生改变, 则坐标系的 x 轴和 y 轴也要相应地变化。根据定义可知, 近地层中侧风速度的平均值 $\bar{v}$ 始终为零。尽管长期平均的 $\bar{w}$ 应该非常接近于零, 但在个别情况下仍然能观测到平均垂直速度 $\bar{w}$ 不为零。在近地层以上, 由于风向随高度而变化, $\bar{v}$ 可能不等于零。

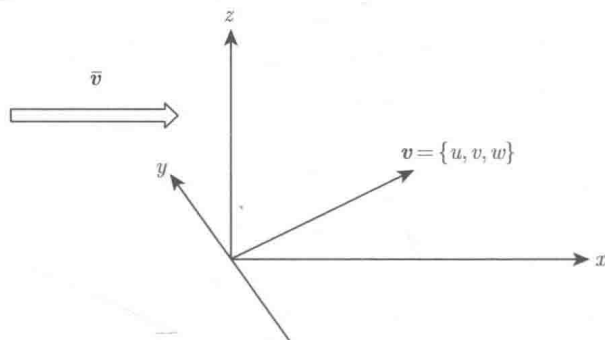


图 2.1 微气象学坐标系

风矢量是在仪器坐标系内观测得到的, 为了合理地解释观测数据, 就需要利用坐标旋转将仪器坐标系转换为微气象学坐标系, 得到微气象学坐标系内的风速统计量和通量数值。旋转 x - y 坐标平面使其与局地地形保持一致, 强迫 $\bar{v}$ 为零, 则计算表面动量通量时仅需要考虑 u 和 w 两个速度分量。更重要的是, 坐标旋转消除了由于仪器倾斜所造成的误差。在所有观测量中, 垂直速度对于倾斜误差最为敏感。如果风速传感器倾斜角度为 α , 则仪器测量的平均垂直速度 $\bar{w}_1$ 由两部分