

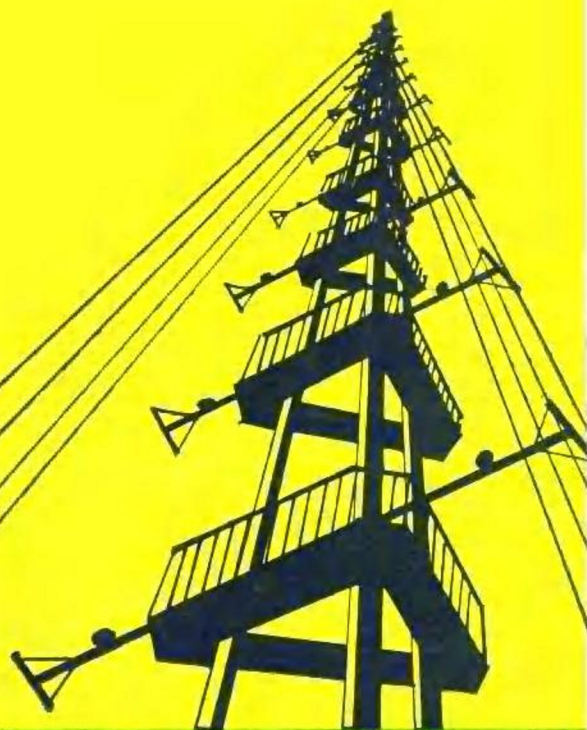


赵 鸣 编著
苗曼倩

大气边界层

现代大气科学技术丛书

气象出版社



现代大气科学技术丛书

大气边界层

赵 鸣 编著
苗曼倩

气象出版社

(京) 新登字046号

内 容 简 介

本书扼要地介绍了大气边界层研究的历史和现状, 并从边界层的动力学和数值预报、大气湍流及其在污染扩散中的应用、海气相互作用等方面, 论述了当前获得的新成果、新理论、新方法, 以及未来发展趋势和需要解决的问题。

本书可供气象部门高级业务技术组织管理人员、高等气象院校师生、研究生和业务、科研等气象科技人员阅读。

本书是现代大气科学技术丛书之一。

大 气 边 界 层

赵 鸣 苗曼倩 编著

责任编辑 杨长新

*

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市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: 787×1092 1/32 印张: 7.375 字数: 164千字

1992年9月第一版 1992年9月第一次印刷

印数: 1—1000

ISBN-7-5029-0955-9/P·0478

定价: 5.65元

序 言

随着科学技术的发展，大气科学技术的分支越来越细。为了取得某一研究问题的突破，气象科研工作者在一段时间里必须潜身于某一较窄的专业领域。但是，气象毕竟是一门多学科交叉的应用科学，为了在这个领域不断攀登新的高峰，必须掌握更多相关学科的新理论、新方法和新发现。若要博览浩如烟海的新论文和新著作，时间和精力总显得太不够，怎么办？

气象业务现代化建设要求特别注重系统设计，以便使各种适用技术巧妙地结合配套、发挥理想的整体效益。这就要求业务专家们适时掌握各种大气科学技术的最新成就，从中选取适用技术。但是，由于业务工作繁忙，常常也难于找出足够的时间一个学科一个学科去搜索。

近年来，气象部门的管理干部专业化水平有了很大提高。许多管理者本身就是专家。但是，毕竟管理学是另一门科学。他们走上管理岗位之后，在紧张的公务之余，能有时阅读几本管理科学丛书就已十分难得。事业的发展却要求他们至少要跟得上大气科学技术发展的步伐。尤其是高层次的管理者必须不断掌握大气科学技术的最新进展和发展动向。否则，就不可能再成其为称职的管理者。

感谢气象出版社想业务专家之所想，急管理者之所急，组织一批正处在大气科学技术各有关分支的前沿阵地的高级专家编著这一套“现代大气科学技术丛书”，系统地介绍大气科学技术各分支当前国内外的最新动向、最新方法和最新

理论，从战略高度对本学科的去、现在和将来做科学的概括，并指出目前发展中存在的关键问题和可能解决的途径。相信这套丛书的出版会使众多的专家和管理者花费极少的时间，获得极大的收益。

马鹤年

1990.8.28

前 言

大气边界层位于大气最下部靠近地球表面的部分，它的研究与大气科学的其他领域，如动力气象与数值预报，气候动力学与气候模拟，大气物理与大气污染等都有密切关系，又由于人类生活于大气底层，因此，大气边界层中发生的一切又与工农业生产，环境保护等紧密相关。正是由于这些相关领域及生产实践的推动，大气边界层的研究在近年来有了长足的发展，成为大气科学中活跃的分支之一。

本书目的是扼要介绍大气边界层这个研究领域近若干年来的发展动态，当前获得的新成果，以及新理论，新方法，详述其现状及未来发展趋势以及当前需解决的问题和应做的工作。在开始两章我们将对大气边界层的全貌，有关的基本知识，其研究的历史和现状作一个全面的介绍，然后从边界层的动力学和数值预报，大气湍流及其在污染扩散中的应用，海面大气边界层以及陆面过程及其与大气边界层的相互作用这几个方面来论述大气边界层的几个前沿领域。现代气候学研究很注重海气和陆气相互作用，而这种作用正是通过大气边界层来实现的。最后两章讲的就是海洋和不同陆地下垫面上的边界层的若干特性研究，这些研究对大气候和小气候都有密切关系。

由于本书性质所限，各方面内容不可能很全面，也不可能很深入，对有关问题有兴趣的读者，还可从书末的参考书目及主要文献中进一步扩大知识面。

本书前四章由赵鸣执笔，后三章由苗曼倩执笔，插图由

张雪林绘制。由于水平所限，错误之处在所难免，敬请批评指正。

作者 1991年夏

目 录

前言

一、大气边界层概说.....	(1)
(一) 大气边界层的基本特点	(1)
(二) 边界层大气中的物理过程及其影响	(4)
(三) 研究大气边界层的意义	(15)
(四) 大气边界层研究的方法及内容	(18)
(五) 历史简况	(28)
二、大气边界层的基本特性.....	(34)
(一) 大气湍流的一些特性	(34)
(二) 大气边界层的垂直结构和分层概况	(37)
(三) 近地层的廓线规律和相似理论	(39)
(四) 整个边界层中平均物理量的铅直分布	(47)
(五) 边界层的时间变化	(54)
三、大气边界层的动力学.....	(63)
(一) 全边界层的相似理论和阻力定律	(63)
(二) 三力平衡和四力平衡下的边界层运动	(69)
(三) 边界层与自由大气的相互作用	(77)
(四) 低纬度边界层的动力学特征	(87)
(五) 边界层内的次级环流	(91)
四、大气边界层和数值预报.....	(93)
(一) 边界层与大尺度模式	(94)
(二) 边界层数值模拟和预报 (一)	(100)
(三) 边界层的数值模拟和预报 (二)	(115)
(四) 边界层和中尺度模式	(122)

五、大气湍流特征及其在空气污染

扩散中的应用 (128)

(一) 研究大气湍流的两种方法 (130)

(二) 描写湍流结构的统计量 (131)

(三) 近地层内湍流脉动标准差的特征 (133)

(四) 近地层以上的湍流脉动标准差的日变化 (140)

(五) 近地层湍谱 (143)

(六) 湍流特征在污染扩散中的应用 (147)

六、海面大气边界层 (160)

(一) 海面大气边界层特征 (160)

(二) 海面通量 (163)

(三) 对天气系统的响应 (169)

(四) 热带海洋大气边界层 (174)

(五) 海面大气边界层的数值模式 (179)

七、陆面过程与大气边界层相互作用 (186)

(一) 一些观测和理论考虑 (186)

(二) 下垫面的影响的复杂性 (188)

(三) 土壤-植物大气层-大气之间的相互作用 (189)

(四) 城市化的影响 (201)

(五) 城市边界层 (208)

(六) 城市边界层的数值试验 (214)

结束语 (220)

主要参考文献 (222)

索引 (224)

一、大气边界层概说

大气最下部被地表所直接影响的这一层次称为大气边界层，由于边界层大气是处于旋转的地球上，与一般流体力学中处理的固体壁附近的边界层不同，有时也称为“行星边界层”。这一层很薄，典型厚度约一公里左右。虽然很薄，但它在整个大气的物理过程中却扮演了十分重要的角色。加之人类生活在大气的底层——大气边界层中，边界层中发生的一切与人类生活有密切的关系。因此对它的研究越来越引起人们的重视。本章我们将对大气边界层的基本概念作一扼要介绍，为以后各章做准备。

（一）大气边界层的基本特点

大气边界层内运动的主要特点是其湍流性，这是由大气边界层所处的地位决定的。大气边界层是大气中紧邻地表的一层，在地表面，风速显然为零，从不被地面影响的自由大气到地球表面，风速有巨大的铅直切变，这成了边界层大气中机械湍流运动的能源，加之地球表面各种不平坦的几何形状对气流产生的扰动，使边界层大气运动保持了湍流的性质。另一方面，由于边界层大气紧邻地表，地表温度的巨大变化使边界层大气温度的垂直梯度比自由大气要大得多。譬如说，中午由于强烈的日射使地表强烈增温，或当冷空气流经暖地面时，边界层内便形成了强的温度随高度的下降；夜晚地表由于长波辐射强烈冷却或当暖空气流经冷地面时，便产生相反的现象。边界层大气这种强的层结性同样对湍流运动产生

巨大的影响，例如，在温度随高度强烈递减时，具体说如果

$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$ ， θ 为位温，气块的铅直运动会受到阿基米德净浮

力的加速而加剧，使湍流发展。这可说明如下：当气块由于脉动运动上升时，根据绝热运动规律，其位温 θ 将是守恒量，由于环境位温随高度下降，因而温度比环境高，于是密度比环境低，从而出现阿基米德净浮力，使气块向上加速，即阿基米德净浮力做正功，从而使原有的湍流运动加剧。反之，

若 $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$ ，情况相反，阿基米德浮力作负功，湍流能量

将受损耗，湍流将受抑制，这便是热力湍流。湍流运动是边界层运动的特征，它决定了边界层内部发生的物理过程及气象要素的分布。由于层结对湍流的巨大影响，因而大气的层结性对边界层的巨大影响也是边界层大气运动的特点之一。

当然，湍流运动不是边界层大气所独有，自由大气中由于重力波的破碎，切变不稳定等也能形成“晴空湍流”，但那只是在时间和空间上“间歇性”的，而不象边界层中是始终存在的。

有时我们把浮力加强湍流时，即 $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$ 时称边界层

大气为不稳定的，反之，即 $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$ 时为稳定的，而浮力不

起作用即 $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$ 时为中性的。

由于层结性对边界层大气运动的巨大影响，因而造成了边界层大气的另一特点即有显著的日变化，白天，一般是不稳定层结，风、温等的垂直分布与夜晚稳定层结时有明显差别。如图1.1是Kaimal根据70年代美国著名的Minnesota野

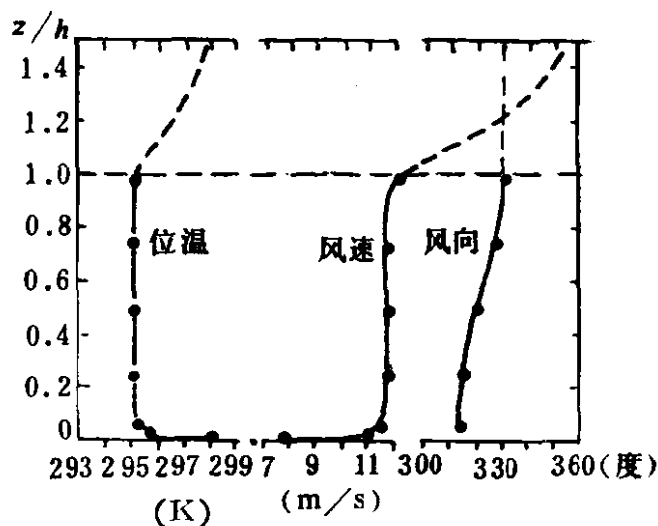


图1.1 对流边界层中风速、风向和位温的垂直分布

外试验获得的当层结很不稳定达自由对流状态时大气边界层中风速、风向、位温的典型的垂直分布。而图1.2是利用著名的澳大利亚 Wangara 观测资料求出的稳定边界层中若干次平均的各要素量的典型分布。我们看到一个明显特点是对流边界层中一个大高度范围内各要素的变化甚小，但在靠近地面的“近地层”中风速随高度剧增，位温随高度剧减。而在边界层顶部到自由大气间有一狭窄的逆温过渡层，其间要素产生剧变。而在稳定边界层中位温随高度增加，风速先随高度增大，在达到最大值后又随高度下降。上述这些结果虽然是从某些观测总结出的，但却是普遍性的。

由于边界层大气紧邻地面，于是地表的不同性质将影响边界层内的运动，这是边界层大气的又一特点。起伏不平的地表和光滑的地表对气流的扰动程度不同，造成不同的湍流状态，不同土壤的热力学特性会造成不同的地表温度、湿度状态，因而影响层结，从而影响边界层结构和大气运动。下垫面是水面，陆面，植物面，还是裸地都会造成不同的边界层状态。起伏的下垫面不仅对气流起动力扰动作用，也会因

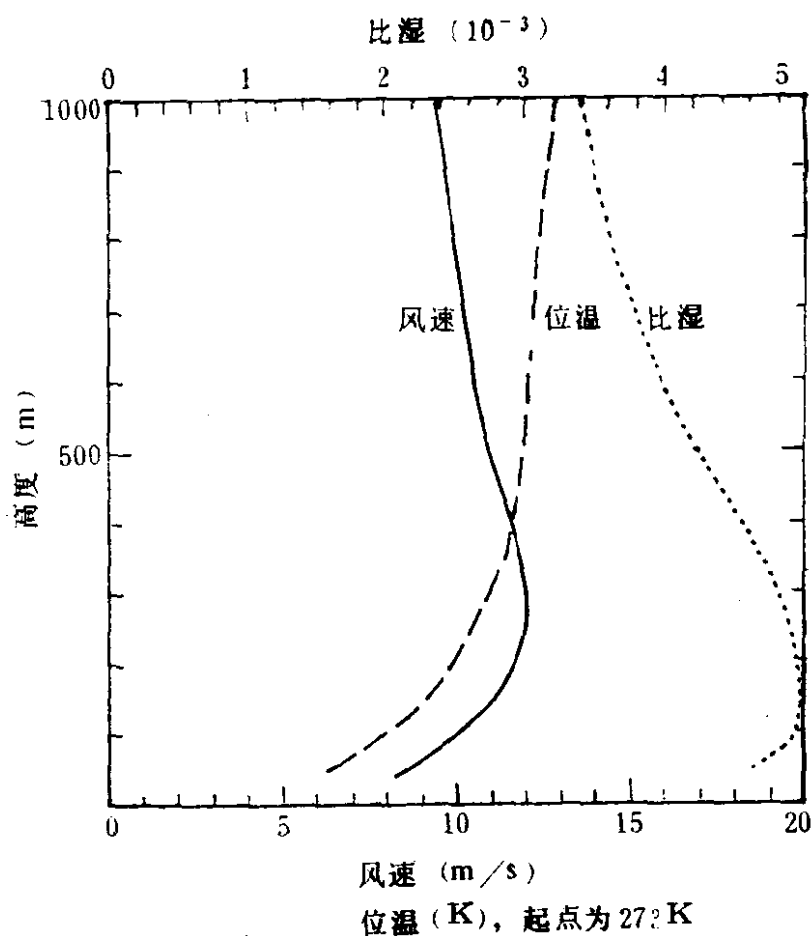


图1.2 稳定边界层中风、位温和比湿的垂直分布

热力状况的差异产生局地环流。因此研究大气边界层必须充分考虑下垫面的影响，这是大气边界层的又一特点。

大气边界层的这些特点与自由大气有很大不同，这就决定了边界层大气中发生的物理过程及其在大气运动中所起的作用与自由大气有很大不同，研究方法也有很大不同，这些我们将在以后逐步看到。

(二) 边界层大气中的物理过程及其影响

1. 湍流交换过程

我们讲了大气边界层运动的主要特点是湍流性，这就决定了大气边界层中主要的物理过程是各种物理量包括热量，动量，水汽及各种标量物质的湍流输送，包括垂直及水平的输送，显然这种输送随大气边界层中湍流的强弱而变。这种输送本身通过边界层大气的运动规律决定了边界层内气象要素的时间和空间分布；决定了地气系统中地气之间各种物理量的交换。这种湍流交换不仅对边界层内的物理过程有很大影响，也对整个大气的运动有重要的作用。除了动量、热量等大气本身固有的物理属性外，污染物浓度作为一个物理量也在边界层中发生着湍流输送过程。这种湍流输送过程造成了污染物浓度的不同的时空分布。

在详述湍流输送过程前，先讲湍流如何定量描述，设观测出的 x 方向瞬时风速 u 的时间变化如图1.3。取某一时段内的 u 值平均，得到其平均值 $\bar{u}$ ，某一瞬间瞬时值与平均值之差即是脉动值 u' ，于是 $u = \bar{u} + u'$ ， $\bar{u}$ 的存在只能引起平流输送，而 u' 才引起湍流输送。在湍流运动中，平均量与脉动量各自起着自己的作用。

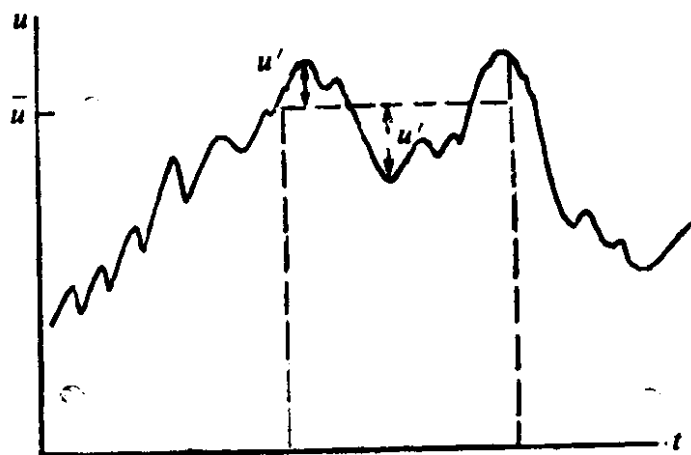


图1.3 瞬时风速 u 的时间变化

常用某物理量的湍流通量来表示湍流输送的大小。所谓通量就是单位时间内因湍流运动通过单位截面的物理量。例如，若污染物浓度为 C ，则因湍流运动通过水平截面由下向上的污染物通量是 $\overline{w' C'}$ ， w' 为垂直湍流脉动速度， C' 为浓度脉动值。这可如下理解： w' 可视为单位时间由下向上通过单位截面的空气体积，于是 $w' C'$ 即是单位时间由下向上通过单位截面的污染物质， $\overline{w' C'}$ 是某一时段内的平均值，因为湍流量是随机量，所以某一时段内的平均才有实际意义。 $\overline{w' C'} > 0$ ，说明 w' 与 C' 间存在正相关，如图1.4，图中说

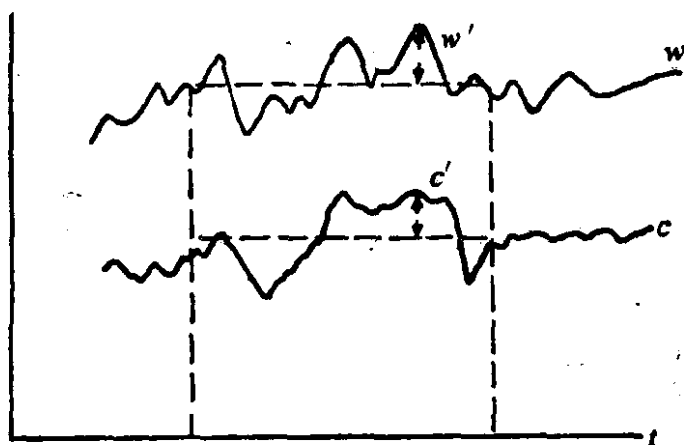


图1.4 通量说明图，横坐标为时间，图中给出的铅直脉动速度 w' 与浓度脉动 C' 的同时变化

明 $w' > 0$ 时一般同时 $C' > 0$ ， $w' < 0$ 时 C' 也小于0，于是造成 $\overline{w' C'} > 0$ ，这说明气块将高浓度带向上，而将低浓度带向下，结果就是有净污染物通量由下向上； $\overline{w' C'} < 0$ ，则通量向下。类似地， $H = c_p \rho \overline{w' \theta'}$ 是由下向上的湍流热通量¹⁾。 $T = \rho \overline{u' w'}$ 是由下向上的 x 方向的动量通量。此处

1) 若计入水汽的影响，则有时用 $\theta'_v w'$ 代替 $\theta' w'$ ， θ_v 为虚位温。

ρ 为空气密度, u' 是 x 方向脉动速度, q' 为比湿。类似我们也可定义水平方向的通量, 由于大气边界层一般气象要素在铅直方向变化远大于水平方向, 因此通常铅直方向通量是主要的。

湍流通量由脉动量定义, 很难测量, 湍流半经验理论中的通量梯度关系则基于混合长概念, 把通量与平均量的梯度联系起来, 即如

$$\begin{aligned} H &= -K_h c_p \rho \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}, \quad E = -K_q \rho \frac{\partial \bar{q}}{\partial z}, \\ T &= -K_m \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.1)$$

等等。(1.1)中的各 K 表示比例系数, 它反映了湍流交换的强弱, 称湍流交换系数, 对动量为 K_m , 水汽为 K_q , 热量为 K_h , 由于三者传输机制不尽相同, 它们有差别, 但其差别目前研究得还不充分, 因而粗略地亦可认为其相同。其他标量亦可有类似关系, 称 K 理论。这些关系一直是处理湍流交换的基本方法。近来认为, 当层结很不稳定趋于自由对流时, (1.1)式不再成立, 这时改用其他方法来处理。由于平均量的梯度较易测量, 因此实用上(1.1)式应用很广。它说明通量总是由平均量的高值区域指向低值区域, 这在物理上也是完全合理的。

大气边界层中, 一般白天地面因辐射加热而增温, 使下层位温偏高, 于是由(1.1), 热通量向上, 夜间地面冷却, 情况相反, 热通量向下。由于边界层大部分范围内一般 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} > 0$, 故动量通量一般向下。实际上, 因 $\bar{u}$ 随高度增而增, 因此当 $w' > 0$ 时, 把下部小风速带上来, 因此同时的 $u' < 0$, 故

$\overline{u'w'} < 0$ 。在地面为蒸发源时, $E > 0$, 即有水汽通量向上。对作为标量的污染物讲, 其湍流通量也是由高浓度区指向低浓度区, 从而造成污染物的扩散。总而言之, 湍流交换是大气边界层内主要的物理过程, 它决定了边界层内各种物理现象的发生。除了湍流交换外, 辐射传输, 水汽相变等也是层内的物理过程, 但起主导作用的是湍流。

2. 湍流交换在大气边界层中起的作用

由于大气边界层中的运动是湍流运动, 由此产生物理量的湍流交换, 这一过程便控制了边界层内各气象要素的时空变化。试以温度变化为例, 在绝热运动中, 有:

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

此处 θ 是位温瞬时量, 在湍流运动中, 瞬时量瞬息万变, 实际上有代表意义的是其在某一时段内的平均值。它又服从什么方程呢? 湍流力学中通过求平均可以证明平均量 $\bar{\theta}$ 服从下列方程

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u'\theta'}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v'\theta'}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w'\theta'}}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

按以前所讲, $\bar{w'\theta'}$ 为铅直方向湍流热通量(相差因子 $c_p \rho$), 相应地, $\bar{u'\theta'}$, $\bar{v'\theta'}$ 分别为 x 以及 y 方向湍流热通量。如果考虑大气边界层中主要变化发生在铅直方向, 则(1.3)可简化为:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{w'\theta'}}{\partial z} \quad (1.4)$$

这说明铅直向热通量的垂直变化能引起平均温度的变化, 其