

夜间近地面稳定边界层湍流间歇与增温*

钱敏伟 李 军

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 在夜间晴空条件下, 近地面大气湍流表现出很强的间歇性, 这种间歇现象导致夜间气温短时的急剧下降, 随后大幅度增温。近地面大幅度增温表明此时存在着很大的湍流热通量散度, 常通量层的概念这时不存在。从各高度层温度和风速变化的曲线上分析, 我们发现湍流大多在距离地面较高一点的高度上发生发展, 然后向下层传递, 尽管上层的湍流可能是由于下层的某一触发机制向上传递而引起的, 湍流偶尔也出现自下向上传递的过程, 但这一过程较少发生。湍流的这种上下传递说明稳定边界层大气经常处于非平衡状态, 在运用相似理论研究稳定边界层大气结构时要特别注意这一情形。

关键词 边界层 湍流 间歇 增温

1 引言

在夜间晴空强辐射冷却的天气条件下稳定边界层湍流状况较为复杂, 有时为完全湍流混合, 有时为非湍流, 表现出明显的间歇性, 湍流的这种间歇现象在近地面表现尤为突出。早在 1981 年, 赵德山和洪钟祥^[1]就已明确提出, 湍流强度的时空变化是不连续的, 动量和热量的湍流输送是间歇的。由于净辐射冷却和湍流热通量传输共同影响着夜间稳定边界层温度的变化, 湍流的间歇必然反映在温度变化的信号里。

在夜间晴空条件下, 辐射状况较为稳定, 净辐射冷却率几乎不随时间变化, 只为高度的函数, 如果某一时刻湍流活动受到抑制, 则某一高度上的温度将以同等的速率单调下降, 只有当湍流被触发时可能产生的湍流热通量散度才使大气降温率减缓或出现增温, 正因为如此, 近地面稳定边界层的湍流强弱信号实际上被调制在起伏变化的温度信号里。

稳定边界层地面的风速信号也能部分反映湍流的状况, 近地面风速增大表明湍流活动从上层获得了涡动动能, 反之, 表明湍流活动受到抑制。当近地面出现静风时, 湍流活动基本停止。

综合风速和温度随时间的变化状况, 我们就能得知某一高度上、某一时刻的湍流状况, 尤其是稳定边界层由非湍流发展成湍流时, 我们能从各高度层上的风速和温度变化曲线中跟踪到湍流出发点及湍流在各高度层上的差异及相互影响。本文的目的就是利用一次高度 32 m 范围内的五层风速和温度梯度观测来进一步说明湍流的间歇现象及湍流在垂直空间的传递过程。

1995-03-30 收到, 1995-05-12 收到修改稿

* 本工作为国家重点基金支持课题

2 观测场地及仪器设备

1994 年 8 月 15 日至 9 月 15 日, 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室在河北省香河县境内组织了一次由国家重点基金支持的大气边界层综合观测。本工作只是利用其中的一项观测项目, 即近地面风速和温度梯度观测来分析湍流的间歇现象及湍流在垂直空间的传递过程。观测场地开阔平坦, 近地面梯度观测采用移动式观测塔, 塔高 32 m, 在塔的 2、4、8、16、32 m 高度上分别安装有三风杯风速风向仪、铂电阻温度仪等, 采样频率为 1/20Hz, 通过总线传输技术将所采集的数据存入计算机。

3 资料处理方法

从一个月的连续观测中我们挑选夜间晴空时的资料作半小时的滑动平均, 给出了各高度层上温度和风速随时间变化曲线及平均理查逊数。

4 结果分析

在夜间出现晴空时, 若不考虑对流输送项, 则辐射冷却和湍流热通量传输共同影响着近地面气温的变化, 即

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -c - \frac{\partial \overline{W'\theta'}}{\partial z},$$

这里 c 为净辐射冷却率, 在夜间晴空条件下近地面一般为 $1 \sim 3 \text{ K/h}$, 随高度迅速减小。一般来说, 晴空条件下净辐射冷却率随时间变化不大。显然, 若湍流受到抑制, 湍流热通量为零, 热通量散度也因为零, 则由(1)式可知, 此刻气温将进入单调线性急速下降阶段, 如果从某一时刻开始某一高度上气温下降趋缓或出现增温, 在排除凝结核释放潜热这一因素后, 一般可认为此刻该高度层的湍流活动被触发。因为此时只有湍流活动能改变温度变化的趋势。

图 1 是 9 月 9 日傍晚到 9 月 10 日凌晨的温度和风速随时间变化曲线, 最上方的曲线分别为 32 m 高度层上的温度和风速。2 m 高度上的温度和风速曲线在最下方, 粗线为平均理查逊数。

从图上我们可以看到, 温度变化总体上呈下降趋势, 但却起伏变化, 在湍流活动受抑制的时间段里, 即理查逊数 Ri 大于临界理查逊数 $Ri_c = 0.25$ 时, 温度急剧下降, 如 21:00 和 00:30 前后, 2 m 高度上温度下降率约为 3 K/h , 32 m 高度上为 2.0 K/h , 基本上代表净辐射冷却率, 而在随后湍流得到发展的时间段上, 即 $Ri < Ri_c$, 温度又急剧上升, 尤其是湍流发展前期, 如从 01:00 到 02:30 约一个半小时的时间内, 增温幅度高达 3 度多。从 22:00 至次日 00:00 这段时间的温度变化曲线上看, 湍流活动大大削减了辐射冷却的作用, 使温度下降率减缓。以上分析表明, 湍流的间歇现象是引起近地面增

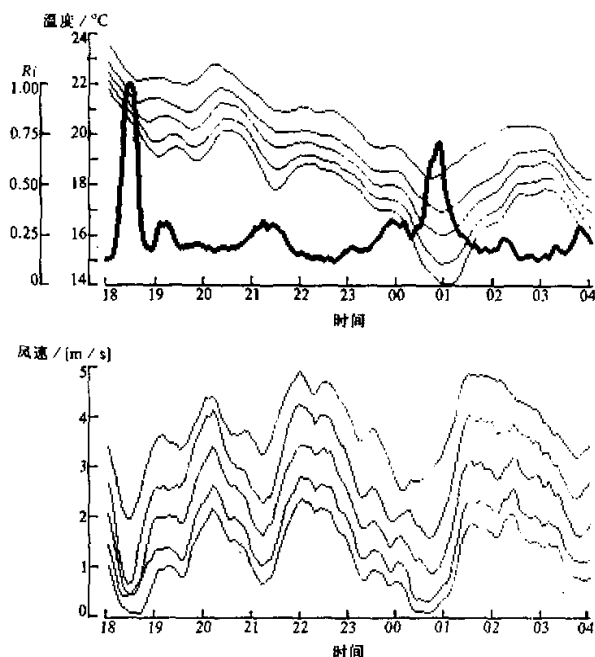


图 1 9月9日至10日的温度和风速曲线

温的主要原因。与温度变化曲线相对应, 风速的起伏变化与温度完全一致, 只是温度变化稍稍滞后, 这主要是因为温度感应探头响应较慢的缘故。

近地面大幅度增温表明此时存在着很大的湍流热通量散度, 常通量层的概念这时不存在。

图 2 是 9 月 7 日的温度和速度变化曲线, 情形与图 1 基本一样, 注意 03:30 前后的温度变化, 各高度层上的降温率和增温率有很大差异, 在 2 m 高度上, 降温率和增温率都约为 2.5 K/h, 而在 32 m 高度上, 降温率约为 0.8 K/h, 增温率很小, 这说明此时 32

m 高度上湍流间歇度要比 2 m 高度上的湍流间歇度弱, 也说明在 32 m 的范围内湍流状况有显著差异。

既然在 32 m 的高度范围内湍流活动有显著差异, 它们就一定有相互影响, 注意图 3 中 04:00 至 05:30 间的增温点和降温点, 2 m 高度上的温度变化较 32 m 高度上滞后约 30 min, 这说明此时近地面湍流的发展和衰减都受上层影响, 近地面的湍流由上层湍流向下传递而来。这时的风速变化曲线也反映出一定的相位差。

图 1 和图 2 中也存在着这种相位差, 如图 1 中 19:40 至 20:30 附近的增温点和降温点 2 m 高度上的温度变化较 32 m 高度上滞后约 15 min, 而在与之对应的风速曲线上却没有发现有相位差。这一现象可能的解释是同一原因引起的扰动并未在近地面各层上都触发湍流, 湍流先在近地面上层得到发展, 因为一般来讲那里的静力稳定度相对于其下各层可能要弱一些, 湍流在上层发展后才向下传递, 引发下层空气的湍流。此时湍流的衰减也自上向下, 在上层湍流衰减后, 下层湍流失去能量来源, 才慢慢地衰减。再分析图 1 中 23:50 左右的风速小扰动, 其扰动向上传递, 因为下层扰动先于上层, 在 2、4、8、16 m 层上, 扰动很快被抑制, 而传递到 32 m 时, 该扰动没受到抑制, 触发了该层的湍流, 使该层气温首先得到增高, 然后湍流再向下传递, 造成下层气温增高, 风速加大。这又是一个典型的湍流自上而下传递的例子, 但触发上层湍流的机制却在下层。在这个例子中触发机制可能是向上传递的重力波。

湍流偶尔也有自下向上传递的时候, 图 4 是 9 月 13 日至 9 月 14 日的温度和风速变

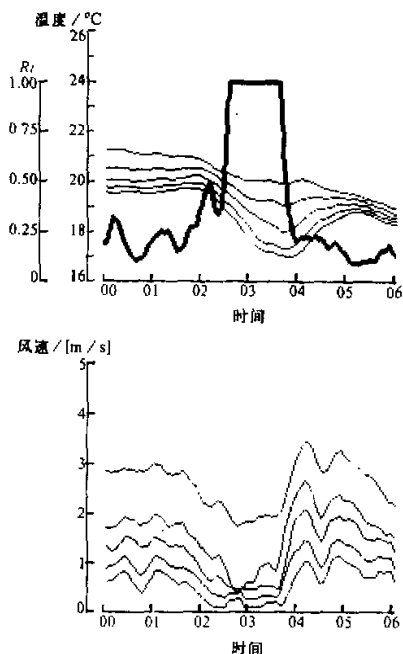


图2 9月7日的温度和风速曲线

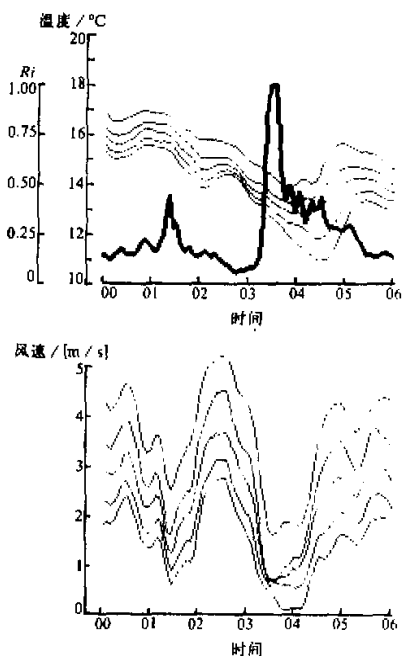


图3 9月11日的温度和风速曲线

化曲线, 注意 01:00 至 02:30 间的温度变化, 当 16 m 及以下各层都停止降温并开始出现增温时, 32 m 高度上仍在急速降温, 表明此时 32 m 高度层上湍流仍未开始, 而 16 m 及以下各层上湍流活动已得到发展, 32 m 高度上开始出现增温较下层滞后 20 min。这时的风速变化曲线也反映了这一状况, 16 m 及以下各层的风速增加早于 32 m。这一现象表明湍流也可在下层首先得到发展, 然后影响上层, 引发上层空气发生湍流。但这一情形较少出现。

综合上述分析, 在晴空条件下, 稳定边界层湍流在

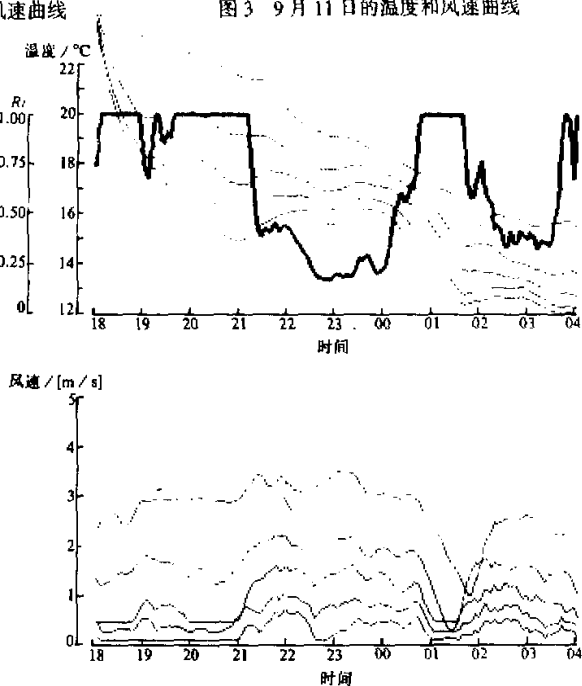


图4 9月13日至14日的温度和风速曲线

32 m 范围内的响应时间可长达 15 至 30 min。

湍流的这种上下传递说明稳定边界层大气经常处于非平衡状态, 在运用相似理论研究稳定边界层大气结构时要特别注意这一情形。

5 结语

在夜间晴空条件下, 近地面大气湍流表现出很强的间歇性, 这种间歇现象导致夜间气温急剧降温, 随后大幅度增温。近地面大幅度增温表明此时存在着很大的湍流热通量散度, 常通量层的概念这时不存在。从各高度层温度和风速变化的曲线上分析, 稳定边界层大气中存在着湍流自上而下和自下而上的传递, 在 32 m 范围内湍流响应时间可长达 15 至 30 min, 边界层处于湍流非平衡状态。

参 考 文 献

- 1 赵德山、洪钟祥, 1981, 典型辐射逆温生消过程中的爆发特征, *大气科学*, 5(4), 407~415.
- 2 Garratt, J.R. and R.A. Brost, 1981, Radiative cooling effects within and above the nocturnal boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2730~2746.
- 3 Carlson, M.A. and R.B. Stull, 1986, Subsidence in the nocturnal boundary layer. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25, 1088~1099.

Intermittent Turbulence and Temperature Burst in the Nocturnal Surface Layer

Qian Minwei and Li Jun

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry Beijing 100029)

Abstract During clear nights, the turbulence in the surface layer shows the characteristics of intermittence. The intermittent turbulence results in sharp temperature decreases and subsequent increases. The quick increase of temperature represents that there is large divergence of the turbulent heat flux in the near surface layer and heat flux should not be considered as a constant in this situation. After analysing the variances of temperature and velocity at different levels, it is found that the turbulence is usually stimulated at higher levels and then transported to the atmosphere below even though the trigger factor might come from lower levels. Sometimes it is stimulated at lower levels and then transported to the upper atmosphere. The characteristics presents that the atmosphere is usually not in an equilibrium and care should be taken when we study the nocturnal boundary layer with the similarity theory.

Key words boundary layer turbulence intermittence temperature burst