

文章编号:1007-9033(2008)04-0001-07

塔克拉玛干沙漠腹地近地层春季铅直湍流的小波分析

缪启龙¹, 温雅婷^{1,2}, 段春峰¹

1. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏南京 210044
2. 解放军理工大学 气象学院 军事气象系, 江苏南京 211101

摘要: 利用塔克拉玛干沙漠腹地近地层 10 m 高度处快速响应探测系统的湍流资料, 对春季晴天和沙尘暴天气下不同稳定层结的铅直湍流脉动进行小波变化及其方差分析, 以期了解铅直湍流的尺度结构特征。结果表明, 不稳定层结条件下, 春季晴天近地层的铅直湍流脉动以 12—17 s 的周期为主, 最小周期为 1—1.5 s; 春季沙尘暴时最主要的周期则为 6—10 s, 最小周期为 0.4—0.6 s。沙尘暴时不稳定层结的湍流尺度总体上小于晴天, 较小尺度波动振荡更加明显, 湍流运动比晴天更加频繁。稳定层结条件下, 春季晴天以 10—16 s 的周期振荡为主, 最小周期为 1.3—1.8 s; 春季沙尘暴则以 11—20 s 的周期振荡为主, 最小周期为 0.5—0.8 s。晴天稳定层结时的铅直脉动比沙尘暴时周期小, 小周期的湍流运动更明显一些, 但周期更小的波动在沙尘暴天气时则多一些。

关键词: 塔克拉玛干, 沙漠腹地, 近地层, 湍流, 小波分析。

中图分类号: P404 文献标识码: A

0 引言

大气边界层内的湍流运动是一种高频微尺度运动。大气湍流是由许多不同大小的湍涡相互叠加而成, 与大气稳定度层结、大气层动力、热力及地形植被扰动有着直接的关系, 对研究近地面层物质、能量的输送机制具有重要的意义, 同时也是描述大气湍流运动机理和结构的重要方法。湍流运动中包含各种不同尺度的涡旋结构, 其多种湍流的特征量在时间上和空间上是随机的、不规则的, 但统计特征还是有规律可循。因此, 对大气湍流运动的实验研究一直得到大气科学家的重视, 并且取得了一系列重要成果。1940 年周培源^[1]提出的湍流应力方程模式理论, 被认为是湍流模式理论开始的标志。1977 年周秀骥^[2]提出的湍流分子动力学理论也很有独特的见解。1981 年周明煌^[3]提出的大气边界层湍流场团块结构是对湍流结构的新认识。胡非^[4]和 Li 等^[5]区分出大气湍流中均匀各向同性小涡成分和大尺度含能涡旋成分, 区分大小涡旋提取湍流的

相干结构和湍流自相似结构, 并且识别出了湍流湿度信号中的斜坡结构, 定量给出斜坡结构对湍流通量的影响。2003 年 Zhao^[6]提出一个新的 Richardson 级串模型, 不仅显示了湍流的能量级串是分形的、间歇的和不均匀的, 而且, 由其级串图案还可以预测, 当尺度逐渐接近 Kolmogorov 耗散尺度时, 小涡将逐渐充满流体所在的物理空间, 这与观测到的实际湍流图案相符。

目前, 对沙漠地区大气边界层湍流运动的研究仍然较少, 深入流动沙漠腹地进行系统性近地层湍流运动的观测实验研究更少。快速响应探测设备的出现, 为探测研究湍流结构奠定了基础^[7]。开展流动沙漠腹地近地层湍流运动的研究, 不仅开辟了中国干旱沙漠大气研究从地表常规气象观测到快速响应探测的新途径, 而且对中国大气科学和地理科学中的沙漠环境问题、沙漠陆面过程的研究有重要作用。

1 观测仪器和数据

收稿日期: 2008-07-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40775019); 江苏省气象灾害重点实验室基金项目(编号: KLME-05004)。

第一作者简介: 缪启龙(1944—), 男, 教授, 主要从事气候与环境研究。

塔克拉玛干沙漠位于新疆南部塔里木盆地的中央,是中国最大的沙漠,也是世界上第二大流动沙漠,在中国沙漠中具有独特性、典型性和代表性。位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中气象站(83°39'E, 38°58'N, 海拔 1 099.3 m)是流动沙漠大气近地层湍流探测实验基地,同时也是目前世界上唯一深入流动沙漠腹地 200 km 以上的大气环境观测实验站。2006 年 3 月底建成了 80 m 垂直梯度探测系统,设计为地面以上 10 层,在塔体 10 m 处设置了开路涡度协方差(OPEC)快速响应探测系统,利用三维超声风速仪实时监测 u 、 v 、 w 超声风速的变化,采样频率为 20 Hz。

在近地层湍流中有着大小不同的湍流结构,不同尺度的涡旋在物质和能量的传输过程中承担着不同的作用,对动量、热量和其他物理量的输送有重要影响。小波分析方法能够反映时间序列的局部变化特征,可以看到每一个时刻在各周期中所处的位置,能够更好地分析序列随时间的变化情况。将小波分析方法引入近地层湍流结构研究,以期对沙漠腹地近地层湍流结构进行一些分析探索,为进一步认识湍流现象和探索机制提供依据。湍流具有明显的多尺度特征,从不同稳定性度和不同的天气状况来分析,可以获得不同条件下湍流的多尺度特征及其差异。文中选取 2006 年 4 月 5 日(晴天)和 10 日(沙尘暴)不同稳定性层结条件的铅直脉动速度进行研究,样本长度为 60 s。

2 Morlet 小波及小波变换方法

关于小波分析方面的文献有很多,这里只将文中用到的 Morlet 小波作简要介绍。

Morlet 小波的形式^[8-13]为

$$\psi(t) = e^{-\frac{ict}{2}} \left(e^{-\frac{t^2}{2}} - 2^{-1/2} e^{-\frac{c^2}{4}} e^{-\frac{t^2}{4}} \right) \quad (1)$$

当 c 取较大值时,式(1)中第 2 项远小于第 1 项,因此省略第 2 项。文中取 $c=2\pi$,其子小波为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a \in \mathbb{R}; b \in \mathbb{R}; a > 0) \quad (2)$$

对于时间序列 $f(t)$ [$f(t) \in L^2(\mathbb{R})$] 的小波变换为

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}_{a,b}(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (a \neq 0) \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的共轭复数; $W_f(a, b)$ 被称为小波(变换)系数。

实际工作中,时间序列常常是离散的,如 $f(k)$ ($k=1, 2, \dots, n$), Δt 为取样时间间隔,则式(3)的离散形式为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k \Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k \Delta t - b}{a}\right) \quad (4)$$

$W_f(a, b)$ 能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特征,它是时间序列 $f(t)$ 或 $f(\Delta t)$ 通过单位脉冲响应的滤波器的输出。 a 为尺度收缩因子,反映小波的周期长度; b 为平移因子,反映相对于 t 的时间平移,在实际计算中相当于时间坐标。可证明分析检测高频分量时,时间窗口自动变窄,频率窗口高度增加;分析检测低频特性时,时间窗口自动变宽,频率窗口高度减小,从而达到时频窗口和谐变化。

文中所用 Morlet 小波函数是一个周期函数经一个 Gaussian 函数平滑而得到的,所以它的伸缩尺度 a 与傅里叶分析中的周期 T 有一一对应关系^[8],即

$$T = \left(\frac{4\pi}{c + \sqrt{2+c^2}} \right) a = 0.9876a \approx a \quad (5)$$

这使得对计算结果的解释更加简明。

将时间域上的关于 a 的所有小波系数的平方积分,即小波方差:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b)^2 db \quad (6)$$

小波方差随尺度 a 变化过程称小波方差图。它反映了波动的能量随尺度的分布,故可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,进而确定主要周期。

Morlet 小波为复数小波,其小波变换的模和实部是两个重要的变量,模的大小表示不同特征时间尺度信号的强弱,实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息。不同时间尺度下的小波系数,可以反映系统在该时间尺度下湍流的变化特征:如果湍流信号为脉动速度,正的小波系数对应于强波动振荡期,负的小波系数对应于弱波动振荡期,小波系数为零可能对应于波动振荡突变点;小波系数绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著^[9-11]。

3 铅直湍流脉动的小波分析

3.1 不稳定层结晴天、沙尘暴天气比较

Morlet 小波变换系数实部时频分布形成各种尺度正负相间的振荡中心,表明湍流存在着明显的多时间尺度的周期性变化。不同时间尺度所对应的湍流结构是不同的,小尺度的多少变化表现为嵌套在较大尺度下的较为复杂的多少结构。由图 1a 可以清楚地看到,晴天时铅直湍流脉动的周期性振荡变化主要表现在 12—17 s,其中心尺度约在 14.5 s 左右,该尺度的铅直脉动经历了 4 个正负振荡循环交替的过程,突变点分别位于 6 s、12.5 s、19 s、26.5 s、33.5 s、41 s 和 56 s 左右。从第 20 s 左右开始的时间尺度为 9—12 s 的铅直脉动振荡也十分明显,尺度中心位于 10.5 s 处,总共经历了 4 个正负振荡周期,突变点分别在 24 s、30 s、35 s、40 s、45.5 s、51 s、56 s 处。此外,在前 20 s 内和最后 15 s 也有比较明显的 5—7 s 尺度的振荡周期,尺度中心位于 6 s 处。3—4 s 和 4—5 s 的较小尺度上也有微弱的振荡周期,持续了约 20 s 后

消失。图 1(b)不稳定层结条件下,沙尘暴天气的铅直脉动 6—10 s 周期性振荡变化表现十分明显,正负振荡中心尺度向低频段发展,其中心尺度约为 8 s,1 min 之内 8 s 尺度上的铅直脉动速度变化经历了 0—4 s 正 \rightarrow 4—8 s 负 \rightarrow 8—12 s 正 \rightarrow 12—16 s 负 \rightarrow 16—20 s 正 \rightarrow 20—24 s 负 \rightarrow 24—28 s 正 \rightarrow 28—32 s 负 \rightarrow 32—36 s 正 \rightarrow 36—40 s 负 \rightarrow 40—44 s 正 \rightarrow 44—48 s 负 \rightarrow 48—53 s 正 \rightarrow 53—57 s 负等 7 个正振荡期和 7 个负振荡期的循环交替过程,其中正负振荡突变点分别出现在 4 s、8 s、12 s、16 s、20 s、24 s、28 s、32 s、36 s、40 s、44 s、48 s、53 s、57 s 处。对于 3—5 s 的周期性波动振荡也比较明显,30 s 之前和之后均有更多的振荡波动周期循环,正负突变点增多。在 13—17 s 和 17—20 s 的较大时间尺度上也存在比较弱的脉动周期振荡。

为了清楚地了解时间尺度更小的铅直脉动波动变化,将小波实部图中时间尺度在 3 s 以下的波动放大(图 2)。晴天时时间尺度为 1—1.5 s 以及 1.5—2.7 s 的周期震荡比较明显,振荡中心分别位于 1.3 s

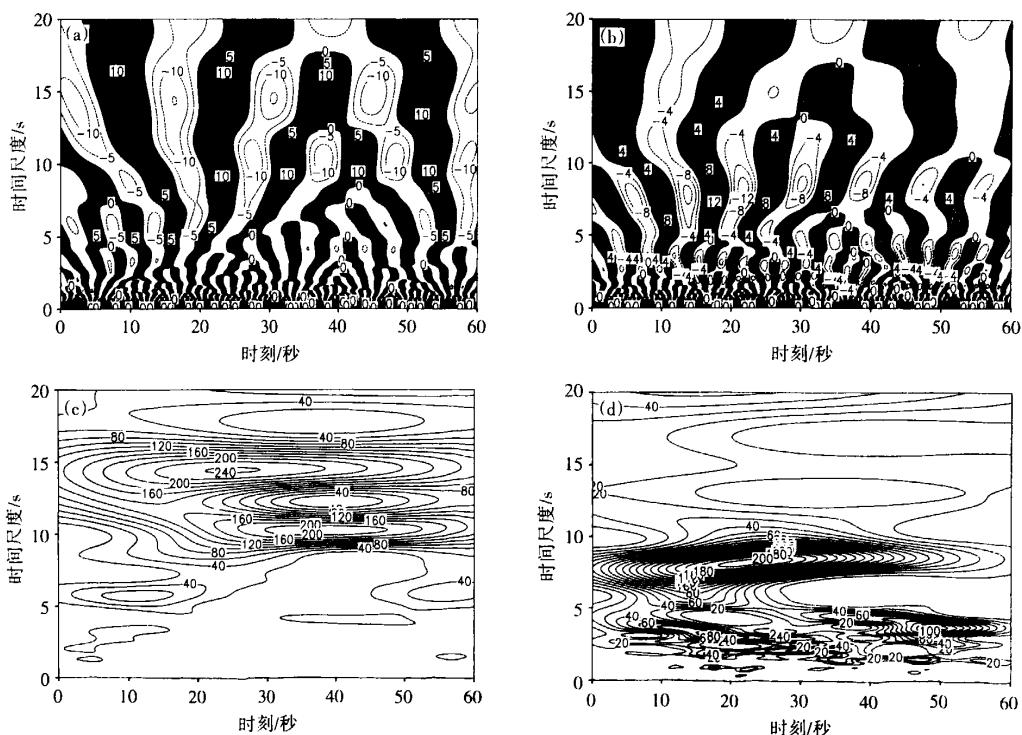


图 1 晴天和沙尘暴天气不稳定层结铅直湍流脉动不同时间尺度 Morlet 小波变换实部和模的变化

(a. 晴天-实部, b. 沙尘暴-实部, c. 晴天-模, d. 沙尘暴-模)

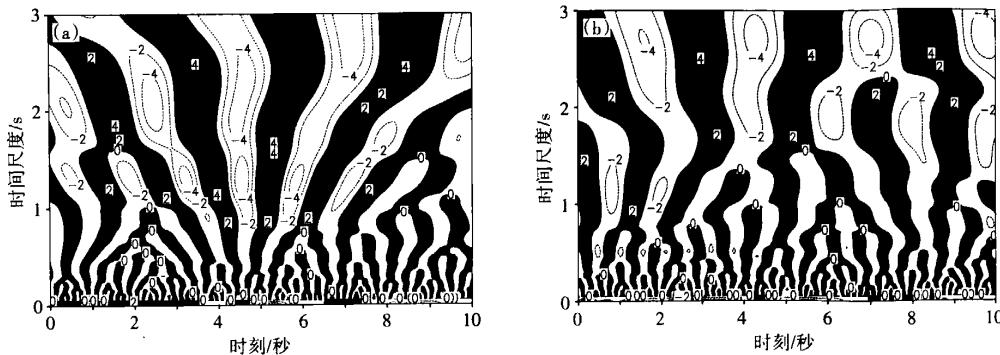


图2 晴天(a)和沙尘暴天气(b)不稳定层结时间尺度较小的 Morlet 小波变换实部的时频变化

和 2.1 s 处, 该尺度的振荡大概维持了 9 s 左右后开始衰减。沙尘暴时也存在时间尺度为 2.3—3 s 的很强的脉动周期振荡, 振荡中心位于 2.7 s 处, 在 10 s 内经历了大约 4 个该尺度的正负振荡周期; 时间尺度为 1.7—2.1 s 左右的振荡周期也比较强; 最小的时间尺度为 0.4—0.6 s, 存在于整个 10 s 的时间区间内。

Morlet 小波变换模的时频变化清楚显示不同时段各时间尺度的强弱分布。图 1c 反映了晴天时, 不同时间尺度正负振荡的周期性信号强弱差异明显, 12—17 s 时间尺度的波动周期变化最强, 分布在 60 s 整个过程中, 主要振荡中心位于 24 s 左右; 其次是波动较强的 9—12 s 周期变化, 中心在 37 s 左右; 另外, 时间尺度为 5—7 s、4—5 s 和 3—4 s 的波动振荡较弱。总体上来说, 9—20 s 时间尺度的波动振荡强于 0—9 s。图 1d 反映了沙尘暴天气时, 6—10 s 时间尺度周期变化信号最强, 主要分布在 0—50 s 过程中, 主要振荡中心在 22 s 左右; 其次是时间尺度信号较强的 3—5 s 周期变化, 主要发生在 0—30 s 和 30—60 s 两个过程中, 振荡中心分别在第 17 s 和第 50 s 左右; 其他尺度周期信号很弱。总体上看, 1—10 s 时间尺度的周期振荡信号强于 10—20 s 的周期振荡信号。

对比图 1 和图 2 发现, 不稳定层结条件下, 沙尘暴以 6—10 s 时间尺度的振荡周期为主, 3—5 s 时间尺度的振荡次之, 最小的时间尺度为 0.4—0.6 s; 晴天则以 12—17 s 时间尺度的波动信号最强, 9—12 s 尺度波动较强, 1—1.5 s 的时间尺度波动也比较明显。晴天的最强铅直脉动时间尺度上比沙尘暴时长 6 s 左右, 最小的时间尺度也比沙尘暴时长 0.6—0.9 s, 同时也说明了沙尘暴时的湍流尺度总

体上小于晴天, 较小尺度波动振荡更加明显, 湍流运动比晴天更加频繁、复杂。

3.2 稳定层结晴天、沙尘暴天气比较

稳定层结条件下, 晴天时的湍流运动也具有多尺度特征, 由图 3a 可以明显地看到, 时间尺度为 10—16 s 的振荡周期最强, 主要振荡中心位于 12.5 s 处, 该时间尺度的波动经历了 5 个正负振荡周期, 突变点分别位于 6 s、12.5 s、18.5 s、25 s、31.5 s、37.5 s、44 s、50 s、56 s 处; 其次, 振荡周期较强的波动时间尺度表现为 4—6 s, 振荡中心位于 5.5 s 左右, 出现在整个过程中的 20—60 s; 其他尺度周期信号较弱。10—20 s 时间尺度的振荡明显强于 0—10 s 的时间尺度。沙尘暴天气时, 铅直脉动振荡最强的波动表现为 0—60 s 整个过程中的 11—20 s 时间尺度震荡, 振荡中心位于 16 s 处, 该波动共经历了 4 个正负振荡周期, 其中 0—7 s 正 → 7—15 s 负 → 15—23 s 正 → 23—31 s 负 → 31—39 s 正 → 39—47 s 负 → 47—55 s 正 → 55—60 s 负, 正负振荡突变点在 7 s、15 s、23 s、31 s、39 s、47 s、55 s 处; 时间尺度比较小的脉动也有一些周期性变化, 但振荡信号比较弱。同样, 10—20 s 的时间尺度上振荡的强度最大。

同样对稳定层结条件下的小波实部图进行了时间尺度在 3 s 以下的局部放大(图 4), 观察较小尺度的小波实部可以发现, 稳定条件下, 晴天时尺度为 2—2.5 s 的周期振荡很强烈, 中心振荡位于 2.3 s 处, 10 s 内大约经历了 4.5 个很明显的正负振荡周期; 时间尺度为 1.3—1.8 s 的周期振荡是晴天比较明显的最小范围。沙尘暴时 2—3 s 时间尺度上也存在着比较明显的振荡周期, 中心位于 2.5 s 处, 经历了约 3 个正负振荡周期后, 正负振荡中心尺度有

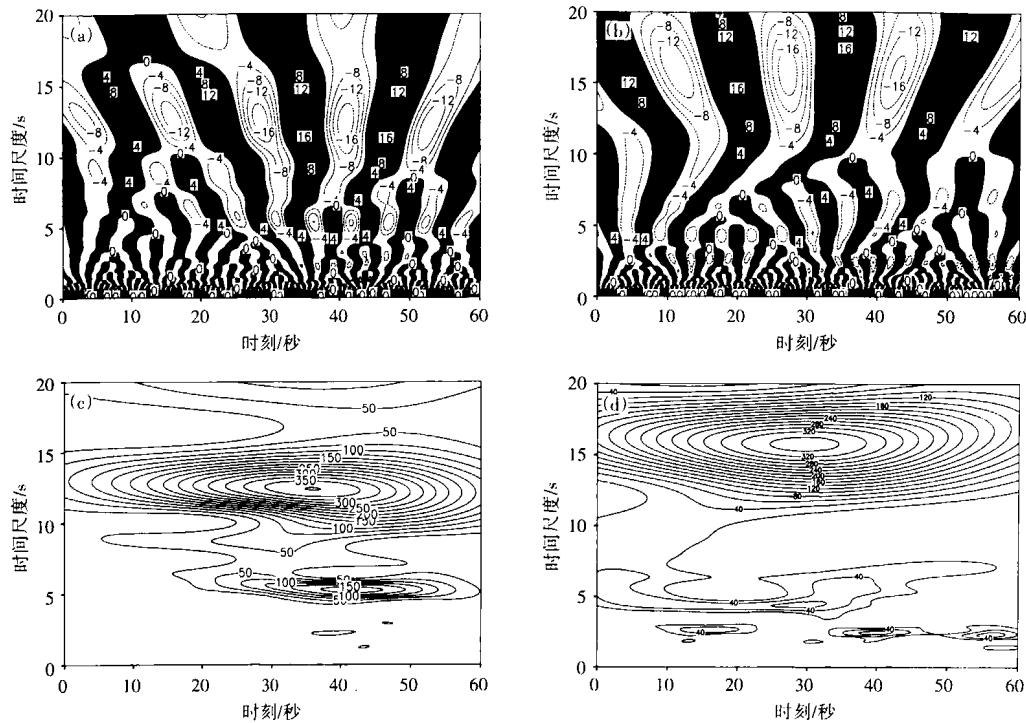


图3 晴天和沙尘暴天气稳定层结铅直湍流脉动不同时间尺度 Morlet 小波实部和模的变化
(a. 晴天-实部, b. 沙尘暴-实部, c. 晴天-模, d. 沙尘暴-模)

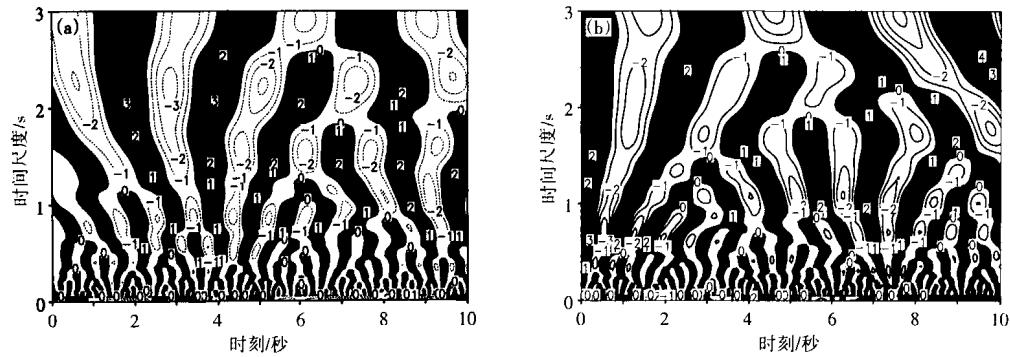


图4 晴天(a)和沙尘暴天气(b)稳定层结时间尺度较小的 Morlet 小波变换实部的时频变化

向低频段发展的趋势;此外,时间尺度为0.5—0.8 s和0.9—1.2 s的周期振荡也较强,维持时间在3秒左右。

对比图3和图4发现,稳定层结条件下,晴天近地层铅直脉动湍流以10—16 s时间尺度的振荡为主,4—6 s尺度的振荡也比较强,最小尺度则表现在1.3—1.8 s处。沙尘暴天气时间尺度为11—20 s的波动振荡最强,除此以外仅有一些小尺度的弱振荡,最小振荡的时间尺度为0.5—0.8 s;沙尘

暴天气的主要脉动时间尺度比晴天时大3—4 s,最小的振荡过程则比晴天短0.8—1 s,反映了晴天稳定层结时的铅直脉动比沙尘暴尺度小,小尺度的湍流运动更明显一些,但尺度更小的波动在沙尘暴天气时则多一些。

3.3 铅直湍流脉动变化的小波方差分析

为了判断铅直脉动的主要振荡周期,及对脉动变化起主要作用的周期,进行了小波方差检验。由小波方差图(图5)可以看出,晴天时不稳定层结条

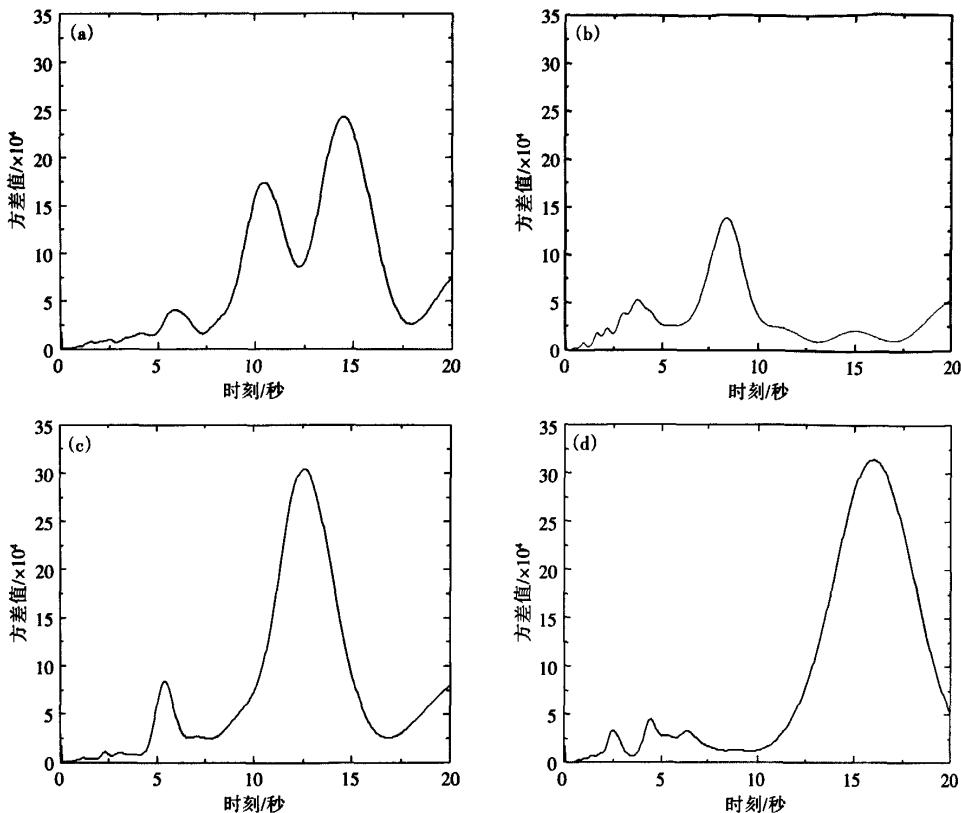


图5 晴天和沙尘暴天气不同层结铅直湍流脉动变化的 Morlet 小波方差变化
(a. 晴天-不稳定, b. 沙尘暴-不稳定, c. 晴天-稳定, d. 沙尘暴-稳定)

件下小波方差有2个峰值,分别对应于10.5 s和14.5 s两个时间尺度。峰值14.5 s尺度的脉动振荡最强,10.5 s尺度的振荡次之。稳定层结条件下小波方差也有2个峰值,准12.5 s时间尺度的振荡在整个周期中表现最强,准5.5 s的振荡表现也比较明显,但强度比准12.5 s尺度小很多。沙尘暴天气下,大气处于不稳定层结时铅直湍流脉动变化具有准8 s、准3.5 s的主周期,其中准8 s小波方差最大,准3.5 s相对很小,说明准8 s在整个湍流变化中周期震荡强。大气处于稳定层结时,脉动变化具有准16 s的周期,小波方差最大,其余时间尺度的小波方差相对较小,表现不明显,说明准16 s左右的时间尺度周期震荡在湍流变化中表现显著。

4 结论

利用塔克拉玛干沙漠腹地近地层10 m高度处的湍流资料,对春季的晴天和沙尘暴天气下,不同层结条件的铅直湍流脉动速度进行了小波变化及

方差分析,得出了以下主要结论:

(1)在不稳定层结条件下,晴天近地层铅直湍流脉动以12—17 s的振荡周期为主,9—12 s的振荡周期次之,最小的振荡周期为1—1.5 s;沙尘暴时以6—10 s周期的波动信号最强,3—5 s周期的波动较强,最小的波动周期仅为0.4—0.6 s;晴天的最强铅直脉动周期上比沙尘暴长6 s左右,最小周期也比沙尘暴时长0.6—0.9 s,同时也说明了沙尘暴时不稳定层结的湍流尺度总体上小于晴天,较小尺度波动振荡更加明显,湍流运动比晴天更加频繁。

(2)稳定层结条件下,晴天近地层铅直方向湍流脉动的周期以10—16 s的波动振荡最强,4—6 s周期的振荡也比较强,最小周期则表现在1.3—1.8 s处。沙尘暴天气时以11—20 s周期的波动振荡为主,除此以外仅有一些小周期的弱振荡,最小振荡的周期为0.5—0.8 s;晴天的主要脉动周期比沙尘暴天气时小3—4 s,最小的振荡过程则比沙尘

暴时多0.8—1 s,反映了晴天稳定层结时的铅直脉动比沙尘暴时周期小,小周期的湍流运动更明显一些,但周期更小的波动在沙尘暴天气时则多一些。

参考文献

- [1] 周培源. 关于 Reynolds 求似应力方法的推广和湍流的性质[J]. 中国物理学报, 1940,(4):1-33.
- [2] 周秀骥. 湍流分子动力学理论 [J]. 大气科学, 1977, (4):300-305.
- [3] 周明煌. 大气边界中湍流场的团块结构[J]. 中国科学, 1981,(5):614-622.
- [4] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解[J]. 气候与环境研究, 1998,3(2):97-105.
- [5] Li Xin, Hu Fei, Liu Gang, et al. Multi-scal fractal characteristics of atmospheric boundary-layer turbulence[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 787-792.
- [6] Zhao Songnian. Synchro-cascade pattern in the atmospheric turbulence[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D8): 1-8.
- [7] Hogstrom U, Hunt J C R, Smedman A S. Theory and measurements for turbulence spectra and variances in the atmospheric neutral surface layer [J]. *Bound-Layer Meteorol*, 2002, 103: 101-124.
- [8] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列的信号处理[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 278-283.
- [9] 王勇, 丁园圆, 刘峰贵. 西宁近48 a来气温变化的多时间尺度分析[J]. 国土与自然资源研究, 2006,(1):46-48.
- [10] 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近50年来气候变化多时间尺度分析[J]. 高原气象, 1997, 16(1):81-93.
- [11] 吴洪宝. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 210-235.
- [12] 林振山. 气候建模、诊断和预测的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1996: 176-186.
- [13] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1998, 79(1):61-78.

Wavelet Analysis on Vertical Turbulence of Surface Layer over Hinterland of Taklimakan Desert in Spring

MIAO Qi-long¹, WEN Ya-ting^{1,2}, DUAN Chun-feng¹

1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing, 210044, China

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 211101, China

Abstract: The turbulence data at 10 m height in the hinterland of Taklimakan Desert are employed to analyze the wavelet and variance changes of the vertical turbulence to understand the turbulent structure characteristics under sunshine and sand storm conditions in spring. The results are as follows: under the unstable condition, the vertical pulsation peculiarity is primarily at the 12—17 s time scale, with the smallest time scale 1—1.5 s, while under the sand storm condition the main time scale is about 6—10 s, and the smallest is 0.4—0.6 s. In the sand storm day, the time scale of turbulence is smaller than that in the fine day as a whole, the smaller scale fluctuation vibration is more obvious, and the turbulent motion is more frequent. Under the stable condition, in the fine day the time scale is around 10—16 s primarily, the smallest time scale is 1.3—1.8 s, while during the sand storm, the turbulence presents the 11—20 s time scale vibration, with the smallest time scale 0.5—0.8 s. In the fine day, the time scale of vertical turbulence is smaller than that in the stand storm day, and the smaller time scale turbulent motion is more frequent.

Key words: Taklimakan, Desert hinterland, Surface layer, Turbulence, Wavelet analysis.