

阵风的分形与混沌特征研究

程雪玲 全利红 胡 非 王丙兰

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 首先分析了北京 2002 年 3 月一次强沙尘天气过程的阵风结构, 对其进行了分形特征的分析, 比较不同高度层上分数维的变化, 不同时间尺度阵风概率分布的标度关系, 以及无阵风时间尺度概率分布的标度与分数维存在的联系。更进一步, 分析了 2002 年全年的阵风分形特性、3 月的分形特征以及其他天气现象 (如降雨) 的分形特征比较后, 发现: 1) 小尺度阵风结构的分数维要高于大尺度阵风分数维, 这是因为小尺度阵风包含了更多短时局部的天气信息; 2) 不同高度、不同时间尺度阵风的分数维存在较大差异, 而不是象湍流脉动时间序列的分数维那样随时间基本不变; 3) 因受天气形势的影响大, 中尺度阵风的分数维虽基本相同, 但由于大尺度阵风较少, 其概率分布不存在标度关系, 这同样也在其他天气现象 (如降雨) 中存在; 4) 无阵风时间尺度概率分布的标度与分数维之间的联系, 一方面反映在其标度指数上, 另一方面反映在其标度区间上。

关键词 阵风 湍流脉动 分形 标度律 大气边界层 沙尘天气

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0256-11 **中图分类号** X169 **文献标识码** A

The Fractal and Chaotic Characteristic of Gustwind

CHENG Xue-Ling, QUAN Li-Hong, HU Fei, and WANG Bing-Zan

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract We first investigate a typical case of serious gustwind (March, 2003 in Beijing) by the use of wind speed series recorded by the Beijing 325 m Meteorological Tower. The structure, especially the fractal characteristic of the gustwind can be very well and very clear represented by the fractal theory, which leads to some essential information about such phenomenon. Then we also investigate all cases of gustwind as well as turbulence, raining weather and weak wind (in such case there is no gustwind) in the whole year 2002. The comparisons reveal: 1) The wind gustness appears when the basic flow (e. g., ten minutes averaged velocity) and the perturbations (fluctuations) both are strong. It perhaps can be explained by the non-linear interactions between large-scale structure (ten minutes average velocity) and the perturbations (original data). 2) As the fractal dimensions of the wind gustness on different heights are calculated, there is often a turning point in the fractal dimensions at the time scale of 16.7 hours. It means the wind gustness is multi-fractal. 3) The fractal dimensions of different gustwind are different, unlike the turbulence whose fractal dimension is almost in 1.6—1.7. It means the wind gustness is anisotropy but not isotropy as turbulence. 4) By analyzing no gustness of wind and comparing with gustwind time scales, we also find that there are two relationships between the probabilities with fractal dimensions.

Key words gustwind, turbulence fluctuation, fractal, scaling law, atmospheric boundary layer, sand weather

收稿日期 2007-04-05 收到, 2007-04-23 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405004、40233030 和 40605006 以及国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目 (Y0101) 和北京市城市气象科学基金 UMR200509

作者简介 程雪玲, 女, 1971 年出生, 副研究员, 主要从事大气边界层湍流理论以及湍流扩散的数值模拟等方面的研究。

E-mail: chengxl@mail.iap.ac.cn

1 引言

在自然界中, 实际的风速和风方都是随时随地变化的, 通常所说的风速是指在离地面(或海平面)某一高度某一段时间的平均值。为了更有效地研究风的作用, 常将风速分为持续风速和阵风风速。持续风速是指较长一段时间内的平均值, 多数国家规定用 1 h 平均风速作为代表, 阵风风速是指数秒钟内的平均, 时间长短不同, 所得平均风速也不同^[1]。一般 6 级以下的风不会引起大的危害。6 级或 6 级以上的风多为阵风, 才有一定的危害。

强风过程对国民经济生产生活各个方面都会造成巨大的影响^[2], 而强风过程中的阵风特性^[3]也是防灾减灾研究中的一个重要问题。在港口码头有专门关于大型港机设备如何应对突发性强阵风的措施^[4~6]、针对飞机在飞行过程中受到阵风所产生的附加过载也有大量的阵风载荷减缓技术的研究^[7~10]以及飞机操纵系统抗阵风破坏和干扰的研究^[11,12]。

除以上在工程中对阵风造成的破坏进行研究外, 更多是对阵风特性及其伴随的灾害性天气的研究: 早在 20 世纪 80 年代开始, 研究人员就利用北京 325 m 气象塔对冷锋过境时的边界层阵风结构进行了系统的分析^[2,13,14]; 在雷暴前沿通常有一定强度的出流辐合, 形成阵风锋, 近年来研究阵风锋的雷达回波进行短时临近预报日益受到重视^[15~18]; 另一种突然的强阵风称为飑, 持续时间短促, 出现时瞬时风速突增, 风向突变, 气象要素随之剧烈地变化, 往往是气压骤升, 温度陡降, 湿度增大, 并常伴有雷雨出现^[19], 在飑线强回波带的前沿可探测到阵风锋窄带回波; 此外, 研究表明, 沙尘暴的爆发与强冷锋前干飑线的发展密切相关。由于强冷锋过境时冷锋前干飑线移至被强烈太阳辐射加热的地表以及条件不稳定大气层结地区, 干飑线进一步发展致使沙尘暴爆发。沙尘暴的沙墙是类似于飑线阵风锋面的干飑线沙尘暴锋面, 是阵风锋面前沿反向上升气流卷起干燥地表尘沙而形成的^[20]。

曾庆存等^[21]对沙尘天气过程近地面大气边界层的特征进行了专门的研究。他认为, 除高空飘

尘外, 沙尘天气(尤其是沙尘暴)的侵袭都具有爆发性, 近地面大气边界层的气象要素和湍流特性在此之前和之后有非常急剧和强烈的变化。在侵袭期间大气边界层的扰动异常剧烈: 风的阵性很强, 湍流也很强, 有其鲜明的特征。认识这些特征对认识沙尘暴过程, 尤其是其中的起沙机制和近地面大气边界层湍流通量的参数化过程, 是十分重要的。曾庆存等^[21]从理论上推导了计入阵风作用而进行订正的起沙公式。

由此可见, 阵风这一天气现象的研究对保障国民经济生产、生活具有重要的意义。但是, 目前对阵风的研究多从应用出发, 人们关心的是阵风对周围环境的影响, 对于其发展演化的动力学机制的分析还不多见, 曾庆存比较深入地分析了沙尘暴发生前后, 阵风结构的水平传播与上升、下沉气流的关系, 阵风结构在垂直方向传播的特点, 以及由此特点造成当地起沙和扬沙的过程^[21]。而由于阵风的随机性, 研究阵风的演化规律, 特别是模拟阵风的发展过程是非常困难的。一般认为阵风风速的脉动是随机的, 并服从高斯分布, 且是由无限多正弦风叠加而成的, 有人通过对阵风谱的模拟, 分析阵风的变化及对周围的影响^[1]。还有人在风洞中模拟阵风^[22,23], 设计研制出一套在环境风洞中模拟产生阵风的发生系统, 从而在大气环境风洞中再现真实大气运动的阵风特性。

如果从阵风的动力学本质来看, 其与湍流有相似之处, 都是在外界环境或边界不稳定激励下产生的、包含多尺度相互作用貌似随机实属复杂的运动状态^[24]。但二者有一个根本区别, 即阵风的尺度远远大于湍流尺度, 因此阵风是作为一种天气现象进行研究的。由于阵风的复杂性本质, 本文将通过研究复杂系统的分形理论对其动力学机制进行分析。目前, 应用分形理论研究降雨的动力学演化规律已经取得了相当的成果^[25~33], 但对于阵风的研究却不多, 其中的一个重要原因是按照阵风定义得到的时间序列无法与湍流区分, 需要给出一个既反映阵风的气象特点, 又类似降雨那样离散的时间序列。这一工作通过分析对比不同的阵风定义方法, 基本已经得到了满足上述要求的阵风定义。对湍流的分形特性研究结果^[34,35]表明, 湍流曲线的分数维在 1.6~1.7 之

间,那么阵风是否也遵循这样的规律呢?我们将在下面的研究中看到不同的结论。

2 阵风定义

据文献 [36] 中介绍,世界气象组织(WMO)指出:阵风(Gust)是在规定时间间隔内,风速对其平均值持续时间不大于 2 min 的正或负的偏离。负的阵风又称为息静。其参数有:阵风峰值风速(p)为与正的阵风振幅联系在一起的风速;阵风持续时间(t_g)为从阵风开始到结束的时间间隔;阵风值(m)为阵风峰值风速与邻近的息静风速之间的标量差;阵风频率(n)为单位时间出现的正阵风数;阵风振幅(g_s)为偏离平均风速的最大阵风的标量值;阵风息静风速(l)为与负的阵风振幅联系在一起的风速;阵风形成时间(t_f)为从阵风开始到阵风振幅值的时间间隔;阵风衰减时间(t_d)为从达到阵风振幅值到阵风结束的时间间隔(图 1)。

文献 [36] 认为这种定义过于理想,的确,真实的风速序列更多的是如图 2 所示的情况,这时,用上述定义统计阵风显然困难得多。因此,作者根据“军用设备气候极值”的国家标准提出风的作用必须达到一定的持续时间(t),它等于风吹过设备顺风尺寸的 8 倍所经历的时间。因此, t 也是作用于设备上的阵风的平均时距。由于风速的脉动,平均时距不同时,相应的阵风,特别是阵风极值是不同的。因此定义:阵风平均时距 t 为测风时仪器感应空气运动的时段长度;阵风 V_t 为平均时距 t 内的风极值;稳定风速 V 为平均 10 min 的风速。

赵德山等^[13]和刘小红等^[14]通过研究也发现:

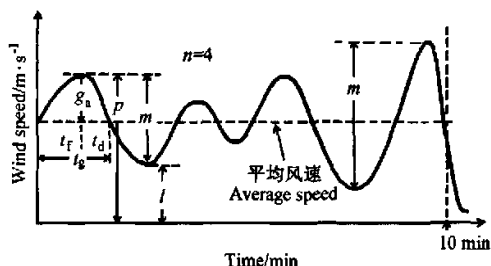


图 1 阵风参数示意图

Fig. 1 The sketch of wind gust

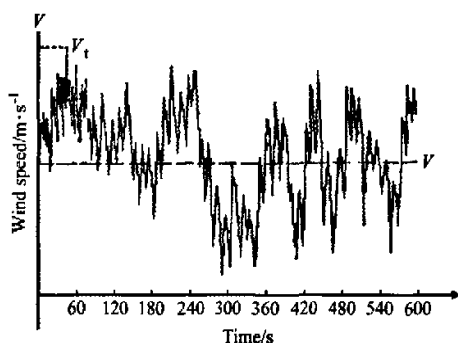


图 2 真实的风速序列

Fig. 2 The nature wind speed series

在一定时距内取最大风速和最小风速之差为阵风平均值,不同时距内阵风平均值均随时距加大而增大,当时距大于 10 min 后变得缓慢,这表明 10 min 这个时距可以近似地视为是得到最大阵风平均值的最小值,也就是说取 10 min 作为研究阵风时距所得到的阵风平均值是具有代表性的。

因此,我们也采用 10 min 作为阵风时距,在原始时间序列中,顺序读取 10 min 数据,取其最大值和平均值,若二者的差大于某一个阈值,则认为该段数据是阵风。用这种方法,我们分析了 2002 年 3 月沙尘天气期间北京 325 m 气象塔监测到的大气边界层风速时间序列。

而在分析 2002 全年的阵风时,对阵风定义做了些改动:顺序读取数据,取其最大值和平均值,比较二者的差是否大于阈值,其中阈值不是固定的,而是与顺序读取数据的长度成正比,即: $N \times \Delta u$, N 为读取的数据的长度, Δu 为一个固定的值。这样随着风速增加,阈值增大;风速减小时,阈值仍增大,直到最大值和平均值的差不再大于阈值,风速完成了一个从递增到递减的过程,则认为该段数据是阵风。这样做能够获得更多尺度的阵风(包括大气旋等),从而能够比较不同尺度结构的分形特征。

3 强天气过程下大气边界层阵风

首先分析 2002 年 3 月北京 325 m 气象塔 15 层风速平均场中第 1 层(8 m)、第 5 层(65 m)、第 10 层(160 m)和 15 层(320 m)的资料(所取的风速是西北臂上的)。

图 3 是 8 m 高度（最底层）风速的原始数据、每 10 min 平均和根据阵风定义得到的阵风。从图中可以看到，阵风主要集中在 5~6 日、15~17 日和 20~22 日这 3 段时间内，阵风期间风力等级在 7 级（最大风速约 $14\sim 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），而其他时候的风力等级要小得多，一般为 4 级（ $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右）。

从图 3 可以看到几次阵风出现比较集中的情况，经过统计可以发现：3 月 5 日有 10 次阵风，3 月 14 日有 10 次阵风，3 月 16 日 24 次阵风，3 月 17 日有 8 次阵风；3 月 20 日 11 次阵风，3 月 21

日 22 次阵风，3 月 22 日有 9 次阵风。

北京 2002 年 3 月的一次沙尘暴天气，时间从 3 月 18 日傍晚（在西北地区形成）到 3 月 22 日^[37]。沙尘 20 日凌晨 3 时（北京时间，下同）进入北京上空，20 日 10 时左右从高空输送到地面，沙尘暴全面爆发，22 日 20 时左右过境，沙尘暴结束。沙尘暴过境前后，地面气象要素变化明显，图 4 给出了气象塔 4 层高度上的风速变化（10 min 平均）。可以看到：3 月 19 日地面（8 m）平均风速仅为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，3 月 20 日 10 时起风速开始增大，至 12 时已急增至 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，此后风速一

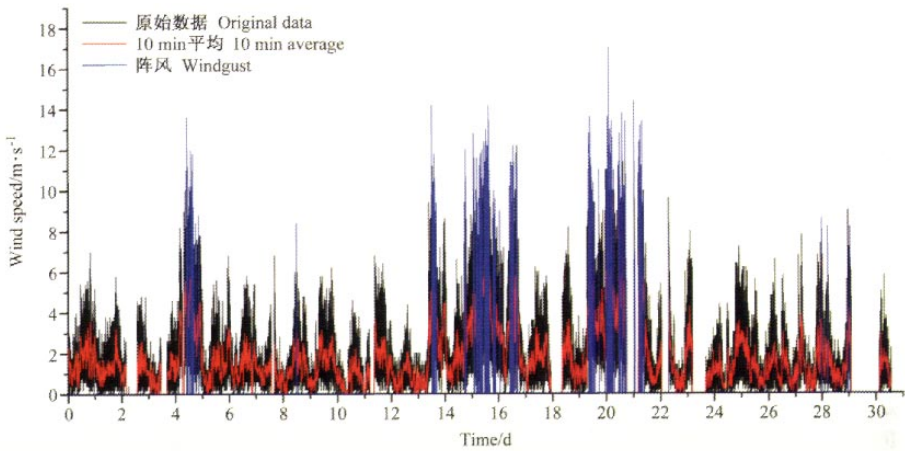


图 3 3 月份的阵风（8 m 高度）
Fig. 3 Wind gust in March (at 8 m)

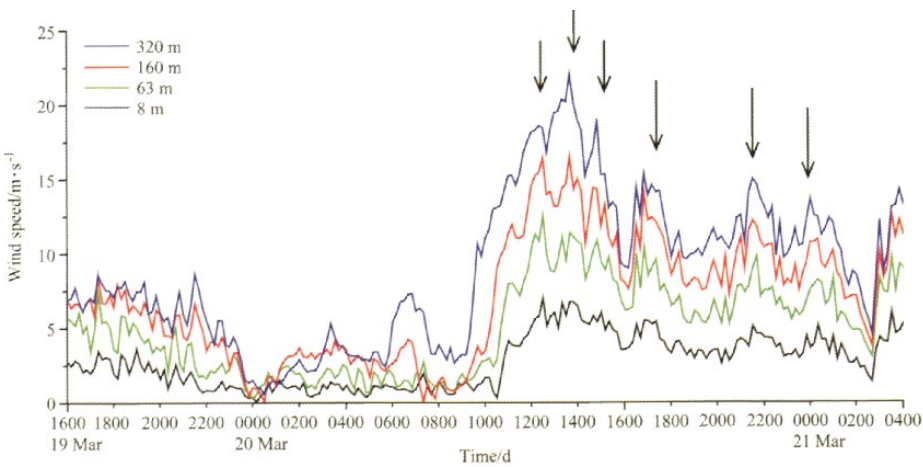


图 4 沙尘暴期间的平均风速
Fig. 4 Average wind speed during sand storm period

直维持很大值,并清楚可见几个大的阵风(图中箭头所指)。可见沙尘暴期间风速明显增大。

通过阵风图我们看到:原始数据是湍流脉动,10 min 平均是大尺度低频结构,而阵风则是某些很强的大尺度低频结构与很强的湍流脉动的叠加。

湍流参数化方案中通常认为湍流不受大尺度等外界作用,因而只对湍流进行参数化;而这里我们看到当某些大尺度结构较强时,会与其激发出来的强脉动湍流产生非线性作用,产生阵风,因此有必要在湍流参数化的过程中对阵风进行参数化。

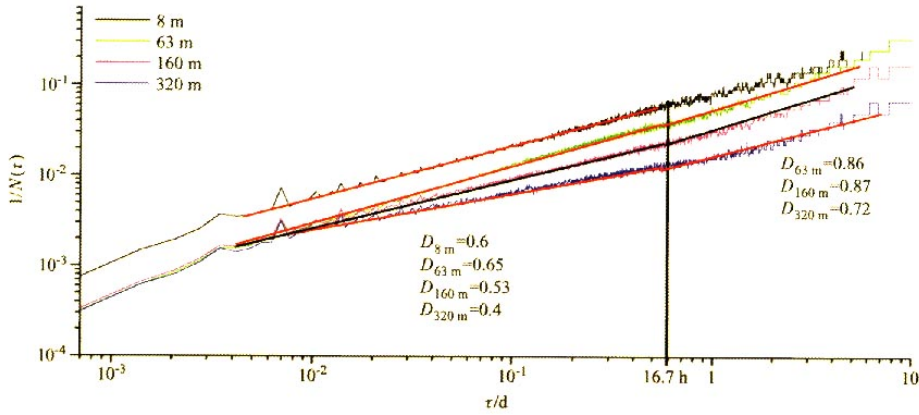


图 5 3月阵风的分数维 (D_s)

Fig. 5 Fractal dimension of wind gust in Mar (D_s)

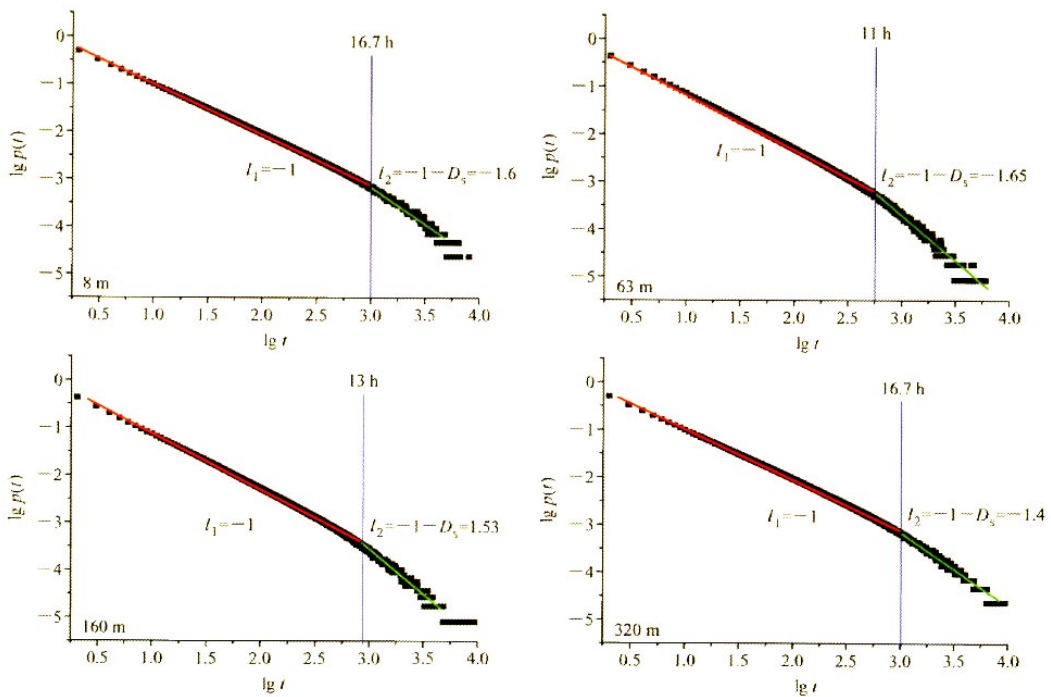


图 6 3月无阵风时间尺度概率分布的标度关系

Fig. 6 The scale law on the probability of no-wind and time scale in Mar

4 阵风的分形特性

对阵风进行参数化,首先要弄清阵风这一复杂现象的动力学本质,而分形理论的出现,为解释复杂系统动力学行为机制提供了有力工具^[38],利用这一理论,人们对诸如降水^[26~33]、湍流^[34,35]、水文资源^[39]、海岸线^[40]等复杂性问题进行了定量化研究,通过分析刻画其动力学特征的参数,如分数维、Lyapunov 指数、相关维等,揭示其内在规律,为参数化、数值预报等提供理论基础。

分形是 20 世纪 70 年代初由 Mandelbrot^[38]引入的关于自相似性的一般概念,是描述具有相似结构的几何形状的工具,后来发展成对各种复杂系统的自相似性进行研究的工具。系统的自相似性,是指某种结构或过程的特征从不同的空间尺度或时间尺度来看都是相似的,这种自相似现象不仅限于形体方面,而且还表现在功能、信息等诸多方面,反映了系统所包含的全面信息特征。

分形概念的本质在于几何特征:分形中几乎

每一邻域里点的分布都疏密不一,几乎处处不存在切线,具有自相似性结构,一个典型的例子是著名的 Cantor 集,另有如 Von Koch 曲线、Sierpinski 海绵等。分形的定量描述是分数维,如果用长度为 λ 的尺子去度量一个分形曲线的长度,会发现不同的 λ 将得到不同的长度 $L(\lambda)$,两者之间满足幂函数关系:

$$L(\lambda) \propto \lambda^D, \quad (1)$$

式中 D 即为分数维,也称为标度指数。式 (1) 实际上表示了不管 λ 如何改变, $L(\lambda)$ 的形状不变,这正是自相似的数学表现。而当一个分形体是由具有不同分数维的分形单元构成的时候, $L(\lambda)$ 与 λ 的函数关系会在某些地方发生转变,具有两个或多个分数维,称为多重分形。

Schmitt 等^[25]的研究表明:降雨的发生是具有标度的,也就是说用某一时间尺度 τ 度量降雨时间序列,统计发生降雨的次数 $N(\tau)$,遵循如下规律:

$$N(\tau) = N(\tau_1) \left(\frac{\tau}{\tau_1} \right)^{-D_s}, \quad (2)$$

其中, τ_1 是最大的时间尺度, D_s 为分数维。

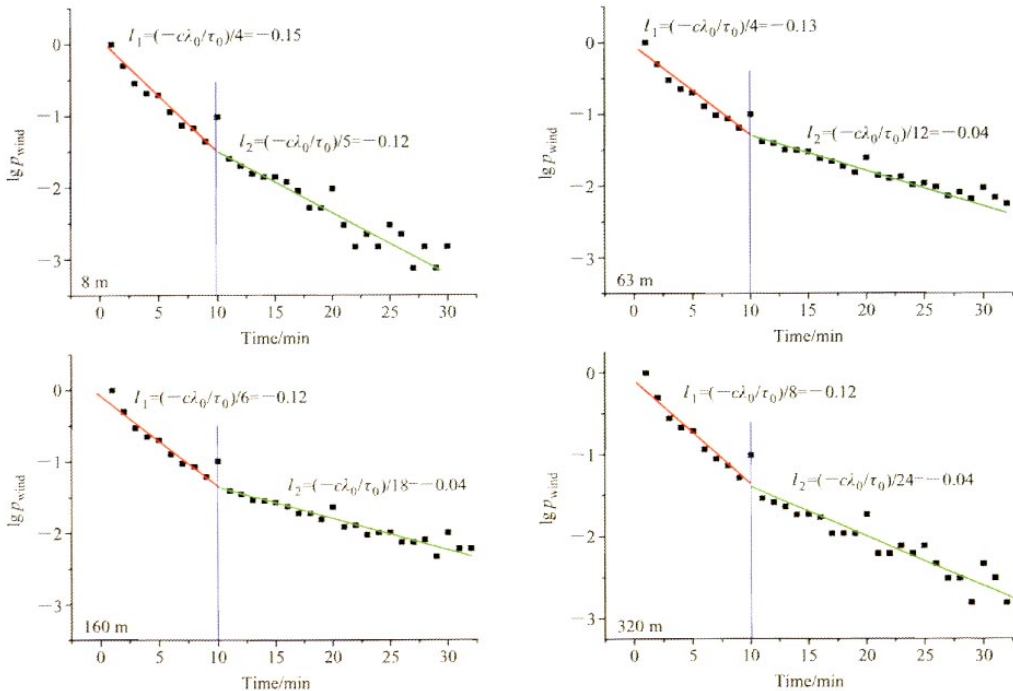


图 7 3 月不同时间尺度阵风概率分布的标度关系

Fig. 7 The scale law on the probability of wind and time scale in Mar

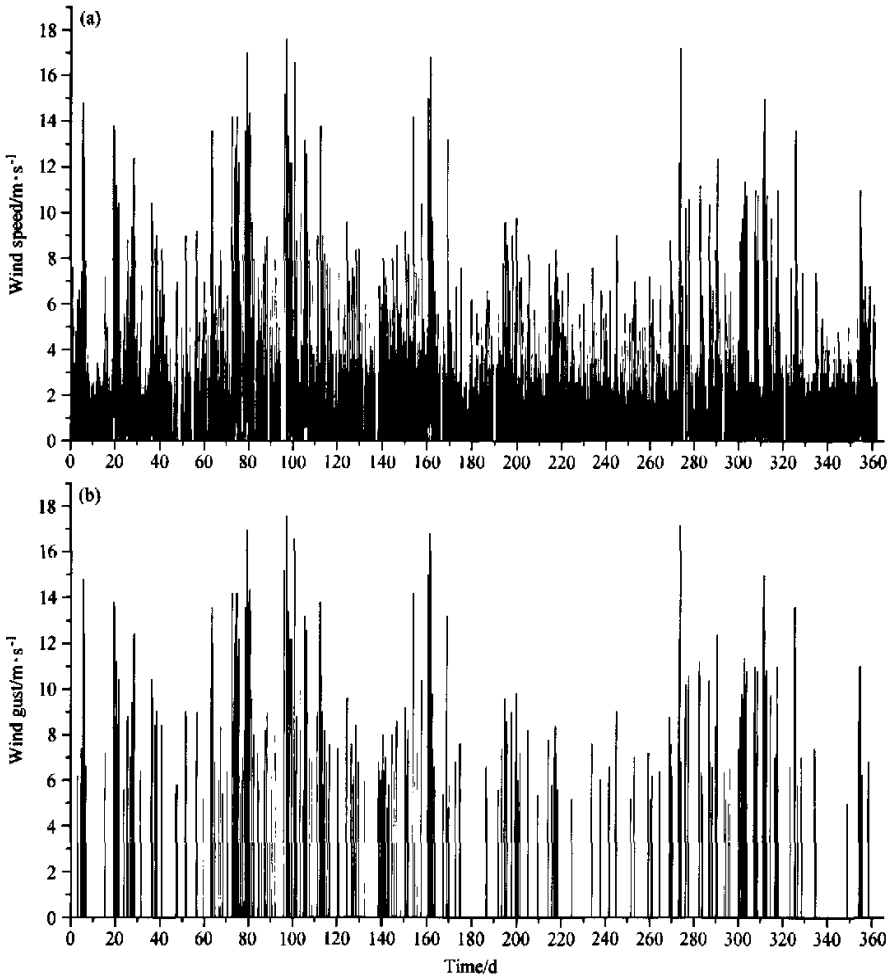


图 8 2002 年全年在 8 m 高度上的 (a) 风速和 (b) 阵风

Fig. 8 (a) Wind and (b) gust of 2002 at the height of 8 m

根据此定义,我们统计了在 4 层高度上 3 月出现的阵风的分数维,如图 5 所示。发现除了近地的 8 m 处,其他高度在 16.7 h 时斜率都会发生变化,出现多重分形。

进一步, Schmitt 等^[25]研究了持续没有降雨的概率与分数维的关系,也就是说,用某一个时间尺度 τ 度量降雨时间序列,如果在一个 τ 时间内没有降雨则记数一次,统计出总数 $p(\tau)$ 与 τ 的关系:

$$p(\tau) \propto \tau^{-D_s-1}. \quad (3)$$

根据此式,我们统计了 3 月无阵风的概率与时间尺度的关系(图 6),发现在 11~16 h 这段范围斜率 l 会出现转折,在小的尺度 τ 上的标度是平庸的

($=-1$),而在大的尺度上则符合式(3),说明的确存在一个多分形现象,在大的时间尺度上,无阵风的标度关系成立。

结合 β 模型^[41],并根据 Schmitt 等推导的不同时间尺度降雨概率分布的标度关系过程,我们推导出不同时间尺度阵风概率分布的标度关系:

$$p(\tau) \propto e^{-c\lambda_0\tau/\tau_0}, \quad (4)$$

其中, $c=1-D_s$ 为余维数, $\lambda_0=\tau_j/\tau_{j-1}$ 为相邻两个时间尺度之比, τ_0 为最小时间尺度。

我们假设一段阵风的时间尺度为 τ , 包含 $k=\tau/\tau_0$ 个连续的最小阵风尺度,根据 β 模型理论,要出现这样 k 个连续的阵风,其概率为

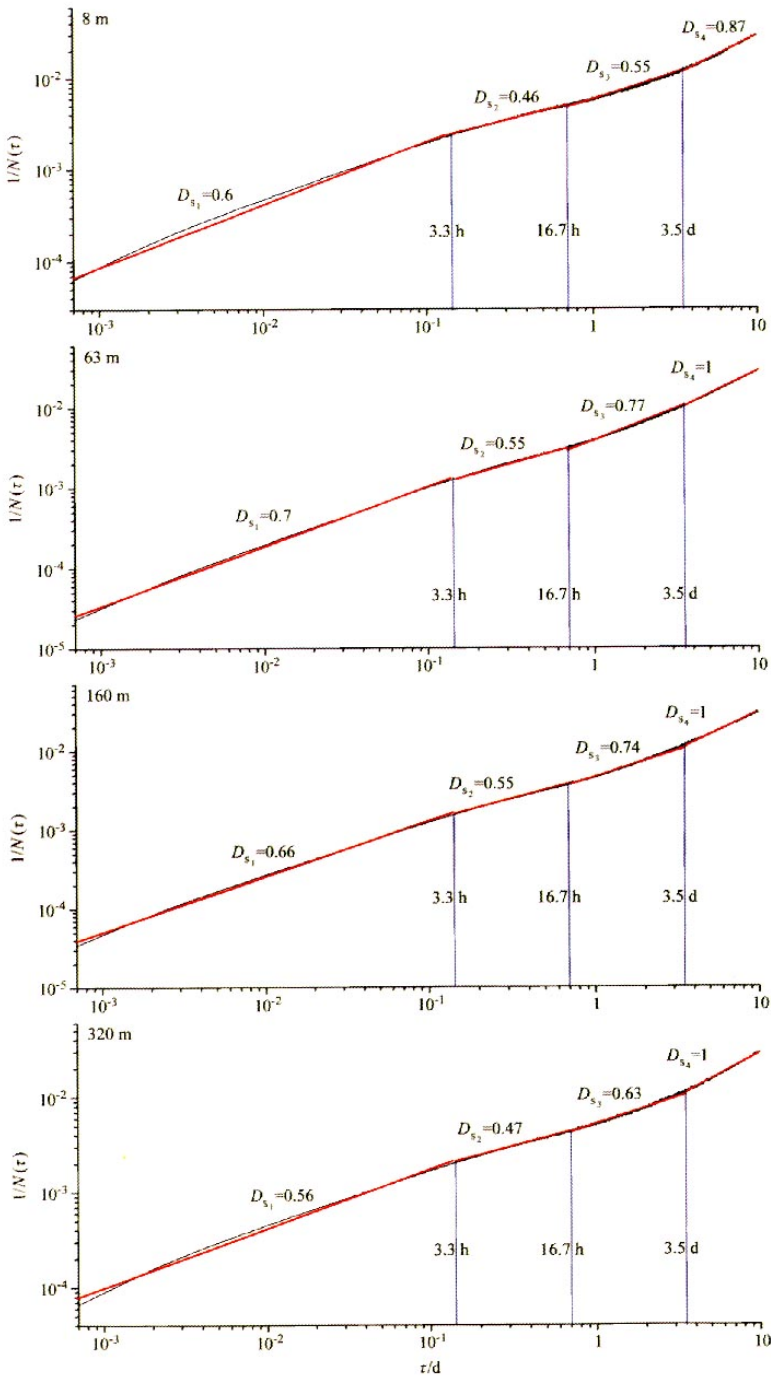


图 9 2002 年全年在不同高度上阵风的分数维
Fig. 9 Fractal dimension of wind gust at various heights in 2002

$$p(\tau) = (1 - \beta_0^2) \beta_0^{m(\tau)}, \quad (5)$$

其中, β_0 是 β 模型中的参数, 表示每步级串余下部分的百分比 ($0 < \beta_0 < 1$), $\beta_0 = \lambda_0^{-1/n}$; n 为级串的步数; 由于在尺度为 τ 的阵风前后是无阵风, 而这两部分的概率为 $(1 - \beta_0^2)^2$; $m(\tau)$ 表示的是 k 个连续尺度为 τ_0 的阵风出现的概率, 且 $\lambda_0 = \lambda^{1/n}$, 则

$$m(\tau) = \sum_{i=0}^n \lambda_0^i = \frac{\lambda_0 k - 1}{\lambda_0 - 1} \approx n \frac{\lambda_0 k - 1}{\lg \lambda}, \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 且因 $\lambda_0^n = k$, 则

$$p(\tau) = (1 - \beta_0^2)^2 \beta_0^{m(\tau)} \approx \lambda^{-\frac{\lambda_0 k - 1}{\lg \lambda}} \approx e^{-\tau \lambda_0 / \tau_0}, \quad (7)$$

即不同时间尺度的阵风概率分布所遵从的标度关系。

图 7 为 3 月不同时间尺度的阵风概率分布的标度关系。可以看到: 阵风具有明显的多分形, 其斜率是分段的, 以 10 min 为界, 这与我们定义阵风时限定阵风的长度为 10 min 有关。在时间尺度小于 10 min 时, 其标度指数与式 (7) 基本一致, 其中 $\lambda_0 = \tau_j / \tau_{j-1} = 1.5$, $\tau_0 = 1$ min。而随着尺度增大, 逐渐趋于平庸标度, 也就是说在大尺度上不具有分形, 尤其随着尺度的增大, 符合定义的阵风很少, 标度关系也就不成立了。

下面分析 2002 年全年的阵风, 而阵风的定义与第 2 节介绍和分析的 3 月阵风稍有不同, 这样定义得到的阵风将会有一些远大于 10 min, 特别是在高空, 由此可以了解到大尺度结构风的阵性变化的一些分形特点, 并与前面分析的小尺度阵风进行比较。图 8 是 2002 年全年在 8 m 高度上的风速和阵风。

图 9 是 2002 年全年在不同高度上阵风的分数维。对比图 5 和图 9 可以看到, 当阵风的尺度增大到 16.7 h 之后, 趋于平庸标度, 当尺度为 3.5 天以上时, 分数维基本是 1, 这也在降雨的分数维中发现类似现象^[25]。在小尺度范围内的阵风分数维 (< 3.3 h 的尺度) 要比大尺度的阵风 (< 16.7 h 的尺度) 的分数维大。不同高度、不同时间尺度阵风的分数维存在较大差异, 而不是象湍流曲线的分数维在 1.6~1.7 这样一个很小的范围内变化, 这说明了阵风的各向异性和非均匀性。对于尺度在 3.3~16.7 h 的阵风, 其分数维与高度之间存在一定的关系: 靠近地面和最上层高空的阵风

的分数维要小于中间两层, 说明在中间两层的阵风较多, 上层更多的是平流, 近地面更多的是湍流; 而以阵风为主的两层高度上, 其分数维是一致的, 与降水等天气现象的分数维也是一致的 (0.55)^[25], 这可能是由于影响其的天气形势相同。

5 结论

本文分析了 2002 年 3 月一次强沙尘天气过程的阵风结构, 通过分析发现: 阵风是某些大尺度低频结构与其上强湍流脉动叠加形成的。湍流参数化方案中通常认为湍流不受大尺度等外界作用, 因而只对湍流进行参数化; 而这里我们看到当某些大尺度结构较强时, 会与其激发出来的强脉动湍流产生非线性作用, 产生阵风, 因此有必要在湍流参数化的过程中对阵风进行参数化。

要对阵风进行参数化, 首先要弄清阵风这一复杂现象的动力学本质, 因此, 我们对其进行了分形特征的分析。分析了无阵风时间尺度概率分布的标度与分数维的关系, 一方面其标度指数与分数维是线性关系, 另一方面其标度区间与分数维的范围是一致的。此外, 我们推导出不同时间尺度阵风概率分布的标度关系, 在小尺度范围内成立, 而由于大尺度阵风较少, 其概率分布不存在标度关系, 这同样也在其他天气现象 (比如降雨) 中存在。进一步分析了 2002 年全年的阵风的分形特性, 在与 3 月的分形特征以及其他天气现象 (比如降雨) 的分形特征比较之后, 发现: 在大尺度上分数维趋于平庸; 小尺度阵风结构的分数维要高于大尺度阵风分数维, 这也是因为小尺度阵风包含了更多短时局部的天气信息; 不同高度、不同时间尺度阵风的分数维存在较大差异, 而不是象湍流曲线的分数维那样基本相同; 大尺度阵风的分数维因受同样的天气形势的影响, 故基本相同。

参考文献 (References)

- [1] 张云彩, 姚美旺, 王敏声, 等. 阵风及其谱模拟. 海洋工程, 1996, 14 (2): 20~27
Zhang Yuncai, Yao Meiwang, Wang Minsheng, et al. Gust simulation. The Ocean Engineering (in Chinese),

- 1996, 14 (2): 20~27
- [2] 李倩, 刘辉志, 胡非, 等. 大风天气下北京城市边界层阵风结构特征. 中国科学院研究生院学报, 2004, 20 (1): 40~44
Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. Characteristic of the urban boundary layer under strong wind condition in Beijing City. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2004, 20 (1): 40~44
- [3] 陈凯, 余永生, 贾丛贤. 傍山地区的强风场特性实测研究. 流体力学实验与测量, 2003, 17 (3): 18~22
Chen Kai, Yu Yongsheng, Jia Congxian. Full scale measurement of a strong wind near mountains. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2003, 17 (3): 18~22
- [4] 梁国峰. 大型港机设备如何应对突发性强阵风. 集装箱化, 2004, 12: 10~11
Liang Guofeng. How to prevent the damage of strong wind gust to large mechanical equipments in the harbor. *Containerization* (in Chinese), 2004, 12: 10~11
- [5] 孙斌辉, 余国芳, 徐新辉. 大型港机遇突发阵风时的应对措施. 港口装卸, 2005, 2: 39~40
Sun Binhui, Yu Guofang, Xu Xinhui. The measurement to deal with the damage of wind gust to large mechanical equipment in harbor. *Port Operation* (in Chinese), 2005, 2: 39~40
- [6] 港口大型机械防阵风防台风管理规定. 国务院公报, 2003, 28
The rules for preventing the damage of typhoon to large mechanical equipment in harbor. *Communique of State Department*, 2003, 28
- [7] 费玉华. 阵风减缓直接升力控制方案的仿真研究. 飞行力学, 2000, 18 (1): 69~72
Fei Yuhua. Direct lift force control plan about gust load alleviation modeling and simulation. *Flight Dynamics* (in Chinese), 2000, 18 (1): 69~72
- [8] 费玉华. 阵风载荷减缓技术的研究. 航空与航天, 2000, 6: 22~26
Fei Yuhua. The study on reducing wind gust load. *Aviation and Spaceflight* (in Chinese), 2000, 6: 22~26
- [9] 赵元峰, 唐永哲, 赵宝庆. 飞机迎角在垂直阵风干扰中的卡尔曼滤波估计. 飞行力学, 2006, 24 (3): 53~55
Zhao Yuanfeng, Tang Yongzhe, Zhao Baoqing. Angle of attack's Kalman filter estimation in vertical gust. *Flight Dynamics* (in Chinese), 2006, 24 (3): 53~55
- [10] 吴志刚, 杨超. 主动气动弹性机翼的颤振主动抑制与阵风减缓研究. 机械强度, 2003, 25 (1): 32~35
Wu Zhigang Yang Chao. Investigation on active flutter suppression and gust alleviation for an active aeroelastic wing. *Journal of Mechanical Strength* (in Chinese), 2003, 25 (1): 32~35
- [11] 沈景丽. 地面阵风荷载下的飞机操纵系统受力分析. 黑龙江科技信息, 2002, 6: 127
Shen Jingli. Mechanical analysis of ground wind gust load to the control system of plane. *Heilongjiang Information of Science and Technology* (in Chinese), 2002, 6: 127
- [12] 杨超, 邹丛青. 多输入气动伺服弹性系统抗阵风不灵敏性研究. 航空学报, 2000, 21 (6): 496~499
Yang Chao, Zou Congqing. Analysis of insensitivity to gust for multi-input aeroservoelastic system. *ACAT Aeronautica et Astronautica Sinica* (in Chinese), 2000, 21 (6): 496~499
- [13] 赵德山, 王立治, 洪钟祥. 冷锋过境时的边界层阵风结构分析. 大气科学, 1982, 6 (3): 324~332
Zhao Deshan, Wang Lizhi, Hong Zhongxiang. Analysis on the structure of gust in boundary layer when a cold front passing. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1982, 6 (3): 324~332
- [14] 刘小红, 洪钟祥. 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究. 大气科学, 1996, 20 (2): 223~228
Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang. A study of the structure of a strong wind event in the atmospheric boundary layer in Beijing area. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, 20 (2): 223~228
- [15] 王树芬. 一次阵风锋过程的边界层下部风场变化分析. 气象科学院院刊, 1989, 4 (1): 96
Wang Shufen. Analysis of wind field at the bottom boundary layer during a wind gust front process. *Journal of Academy of Meteorological Science* (in Chinese), 1989, 4 (1): 96
- [16] 葛润生. 阵风锋的雷达探测和研究. 气象科学院院刊, 1986, 1 (2): 113~122
Ge Runsheng. Gust from observation and study by Radar. *Journal of Academy of Meteorological Science* (in Chinese), 1986, 1 (2): 113~122
- [17] 李国翠, 郭卫红, 王丽荣, 等. 阵风锋在短时大风预报中的应用. 气象, 2006, 32 (8): 36~41
Li Guocui, Guo Weihong Wang Lirong, et al. Application of gust front to damage wind forecasting. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, 32 (8): 36~41
- [18] 匡晓燕, 席世平, 汤志亚. 2001 年河南两次强对流天气过程对比分析. 河南气象, 2002, 4: 11~13
Kuang Xiaoyan, Xi Shiping, Tang Zhiya. Contrasting analysis of the two severe convective weather processes in 2001. *Henan Meteorological Quarterly* (in Chinese), 2002, 4: 11~13
- [19] 宋世平, 周晋红, 刘春霞. 关于天气现象“雹”的实践认识. 山西气象, 2003, 64 (3): 34~34
Song Shiping, Zhou Jinhong, Liu Chunxia. Practice knowledge on squall. *Shanxi Meteorological Quarterly* (in Chinese), 2003, 64 (3): 34~34
- [20] 胡隐槐, 光田宇. 强沙尘暴发展与干电线——黑风暴形成的一个机理分析. 高原气象, 1996, 15 (2): 178~185

- Hu Yinqiao, Yasushi Mitsuta. Development of the strong dust storm and dry squall line—a mechanism analysis on generating black storm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15** (2): 178~185
- [21] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 千里黄云——东亚典型沙尘暴. 北京: 科学出版社, 2006
- Zeng Qingcun, Dong Chaohua, Peng Gongbing, et al. *Gigantic Yellow Cloud—the Dust Storm in Eastern Asia* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006
- [22] 金秋萍. 环境风洞中的阵风模拟技术. 环境科学研究, 1995, **8** (4): 43~47
- Jin Qiuping. Gust simulating technique in environmental wind tunnel. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 1995, **8** (4): 43~47
- [23] 张鸿雁, 李凤蔚, 王元. 环境风洞中动态风速的控制系统. 环境工程, 2005, **23** (3): 86~87
- Zhang Hongyan, Li Fengwei, Wang Yuan. Active control of dynamic wind speed in environmental wind tunnel. *Environmental Engineering* (in Chinese), 2005, **23** (3): 86~87
- [24] 余振苏, 程雪玲. 湍流的复杂系统论. 新世纪力学研讨会——钱学森技术科学思想的回顾与展望研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 2001
- She Zhensu, Cheng Xueling. The complex systematization of turbulence. *New Century Mechanics Meeting—The Review of Qian Xueseng's Science Thinking* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001
- [25] Schmitt F, Vannitsem S, Barbosa A. Modeling of rainfall time series using two-state renewal processes and multifractals. *Journal of Geophysical Research* (in Chinese), 1998, **103** (D18): 23181~23193
- [26] Ferraris L, Gabeliani S, Parodi U, et al. Revisiting multifractality in rainfall fields. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, **4**: 544~551
- [27] Ignacio Rodriguez-Iturbe. Exploring complexity in the structure of rainfall. *Advances in Water Resources*, 1991, **14** (4): 162~167
- [28] Breslin M C, Belward J A. Fractal dimensions for rainfall time series. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1999, **48**: 437~446
- [29] Svensson C, Olsson J, Berndtsson R. Multifractal properties of daily rainfall in two different climates. *Water Resources Research*, 1996, **32** (8): 2463~2472
- [30] 魏一鸣, 孙国栋, 胡平昭. 九江年降水时间序列的混沌特性. 江西科学, 1998, **16** (3): 141~145
- Wei Yiming, Sun Guodong, Hu Pingzhao. The chaotic characteristics of annual precipitation series in Jiujiang. *Jiangxi Science* (in Chinese), 1998, **16** (3): 141~145
- [31] Deidda R, Benzi R, Siccaldi F. Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall. *Water Resources Research*, 1990, **35** (6): 1853~1867
- [32] Jin Long, Luo Ying, Lin Zhenshan. Comparison of long-term forecasting of June-August rainfall over Changjiang-Huaihe valley. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14** (1): 87~92
- [33] Olsson J, Niemczynowicz J, Berndtsson R. Fractal analysis of high-resolution rainfall time series. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**: 23265~23274
- [34] 刘星, 李昕, 胡非. 大气边界层风速脉动的分形模拟. 气候与环境研究, 1998, **3** (3): 260~265
- Liu Gang, Li Xin, Hu Fei. Fractal representation of wind speed fluctuation in atmospheric boundary layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (3): 260~265
- [35] 高志球, 苏中波, 王介民, 等. 不同下垫面大气边界层湍流的混沌特性研究. 南京气象学院学报, 1999, **22** (4): 680~684
- Gao Zhiqiu, Su Zhongbo, Wang Jiemin, et al. Study on chaotic characteristics of atmospheric turbulence over different underlying terrains. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (4): 680~684
- [36] 董双林. 中国的阵风极值及其统计研究. 气象学报, 2001, **59** (3): 327~333
- Dong Shuanglin. Gust extremes in China and its statistical study. *Acat Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (3): 327~333
- [37] 李亚秋. 北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 2002
- Li Yaqiu. Some characteristics of atmospheric boundary layer (ABL) structure and turbulence transfer during the strong sandstorm weather in Beijing. Master Thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002
- [38] 曼德布洛特 B. 分形对象. 北京: 世界图书出版公司, 1999
- Mandelbrot B. *Les Objects Fractals* (in Chinese). Beijing: World Publishing Corporation, 1999
- [39] 张少文, 王文圣, 丁晶, 等. 分形理论在水文水资源中的应用. 水科学进展, 2005, **16** (1): 141~146
- Zhang Shaowen, Wang Wensheng, Ding Jing, et al. Application of fractal theory to hydrology and water resources. *Advances in Water Science*, 2005, **16** (1): 141~146
- [40] Zhu Xiaohua, Cai Yunlong, Yang Xiuchun. On fractal dimensions of China's coastlines. *Mathematical Geology*, 2004, **36** (4): 447~461
- [41] Frisch U. 湍流. 北京: 世界图书出版公司, 1995
- Frisch U. *Turbulence*. Beijing: World Publishing Corporation, 1995