

北京地区一次强沙尘天气过程的中尺度通量特征

刘照明^{1,2} 全利红² 姜金华² 王丙兰²

1 江西省气象局, 南昌 330046

2 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 应用大气所 325 m 铁塔的湍流资料和梯度资料, 对 2003 年 3 月 20~23 日影响北京的一次强沙尘天气过程的中尺度通量和湍流通量进行了分析, 结果表明: 冷空气的影响是从上层开始的。沙尘爆发前, 边界层有强逆温存在, 动量以中尺度输送为主, 湍流很弱。沙尘爆发时, 向下的湍流动量通量明显加大。湍流动量通量是沙尘沉降的主要原因, 但沙尘爆发前的中尺度过程不能忽略。沙尘爆发前后, 感热通量均以小尺度的湍流输送为主, 中尺度输送不明显。

关键词 沙尘暴 中尺度通量 湍流通量 城市边界层

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0296-06 **中图分类号** P404; P445+.4 **文献标识码** A

Characteristics of the Mesoscale Fluxes During a Strong Dust Storm Weather Process in Beijing

LIU Xi-Ming^{1,2}, QUAN Li-Hong², and JIANG Jin-Hua², WANG Bing-Lan²

1 Jiangxi Meteorological Bureau, Nanchang 330046

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

Abstract Based on the mean field data of wind, temperature and the turbulent field data from Beijing 325 m Meteorological Tower, the characteristics of mesoscale and turbulent fluxes during the strong dust storm weather from 18 to 22 March 2002 are discussed. The results show that the influence of cold front is from the upside to the downside of the Atmospheric Boundary Layer (ABL). Before the dust storm broke out, there is a strong temperature inversion in ABL, and the mesoscale momentum flux is obviously larger than the turbulent momentum flux. While the dust storm broke out, the minus turbulent momentum flux increased rapidly. The minus turbulent momentum flux is the main factor that results in the dropping of the dust, but the mesoscale process can not be ignored before the dust storm breaking out. Before and while the dust storm breaking out, the turbulent sensible flux is much larger than the mesoscale sensible flux.

Key words dust storm, mesoscale flux, turbulent flux, urban boundary layer

1 引言

大气边界层中的通量输送过程是地气间的物

质、动量、水热交换的必要条件之一。目前大气环流模式 (GCM) 的水平分辨率一般在 100 km 左右, 对小于 100 km 水平尺度的次网格通量的估

收稿日期 2007-03-16 收到, 2007-04-15 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030、40405004 和 40605006 和城市气象科学基金 UMR200509

作者简介 刘照明, 男, 1963 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事大气边界层物理和湍流、城市气候与环境研究。

E-mail: xmliu@mail.lapc.ac.cn

算主要是进行参数化,这种参数化基于水平均一下垫面假设,并根据均匀下垫面条件下的观测试验结果以及有关的湍流理论来设计^[1]。也就是说,地表面网格平均的次网格通量的参数化依赖于 Monin-Obukhov 相似理论,边界层大气次网格通量的参数化则根据梯度输送的 K 理论^[2]。然而,无论是 Monin-Obukhov 相似理论还是 K 理论,描述的都是均一下垫面条件下的湍流运动,对于尺度比湍流运动大但又不足以被气候模式网格分辨的中尺度运动,这些理论还不能进行有效的描述。近年来,由下垫面不均匀性产生的中尺度环流对通量的贡献越来越受到重视^[3~5]。一些研究表明,在许多大气背景条件下,这种中尺度通量强于湍流通量,因而在气候模式中应考虑中尺度通量的参数化问题^[6~8]。

由于客观条件的限制,很难进行中尺度通量的试验观测^[9]。Moore 等^[10]曾利用 ABLE (Arctic Boundary Layer Expedition) 试验资料讨论过由小尺度通量线性组合导出区域通量的有效性,而 Mahrt 等^[11]则利用 CODE (California Ozone Deposition Experiment) 试验资料计算了地面以上 30 m 的湍流通量和中尺度通量。然而,这些都是基于对飞机试验的资料研究。

本文利用中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔观测的风温湍流资料和梯度资料,对 2002 年 3 月影响北京的一次沙尘天气过程的中尺度通量和湍流通量进行分析,尝试揭示中尺度通量和湍流通量在沙尘爆发前后的特征。

2002 年 3 月 18~22 日,我国北方地区 $1.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ 遭受了强烈的沙尘暴天气过程。这次强沙尘暴天气影响我国甘肃、内蒙古、宁夏、山西、陕西、河北、天津和北京等地的 $2.85 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 耕地和 $2.30 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 草地,影响人口达 1.3 亿。这次过程从 20 日凌晨 03:00 (北京时间,下同)进入北京上空一直到 22 日 20:00 左右过程基本结束,20 日上午 11:15 颗粒物浓度达到峰值,能见度不足 200 m,总悬浮物浓度为 $1.1 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,是国家空气质量二级标准的 40 倍。

对于这次沙尘天气过程及其边界层特征,彭珍等^[12]进行过描述和研究,然而却没有研究其中尺度通量特征的情况。陈陟等^[9]曾对冷锋天气过

程的中尺度通量特征进行过研究,认为在强背景风场条件下,湍流动量输送占绝对优势;当背景风较弱时,中尺度动量通量不容忽视。

2 观测资料与尺度分析

本文所用资料为位于北京市中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔的常规气象观测资料和湍流观测资料。该铁塔共设有 15 层风、温、湿梯度观测平台,分别位于 8、15、32、47、65、80、102、120、140、160、180、200、240、280、320 m。在 47、120 和 280 m 高度上分别架设有 10 Hz 的风、温超声观测仪。梯度观测的采样频率为 0.05 s^{-1} ,超声观测的采样频率为 10 Hz。

图 1 分别为 2002 年 3 月 20 日 00:00~23 日 00:00 铁塔记录的 15 和 320 m 高度上的 1 h 平均风速、气温的时间序列(缺 21 日 03:00~08:00 的资料)。从图中可看到,冷空气的影响是从风速开始的,20 日 08:00 之前,两层的风速都很小,但 08:00~12:00,风速增加。15 m 高度上由 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 320 m 高度上则由 $3.0 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 骤然增大到近 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速的垂直切变也增大,说明冷空气带来边界层中强烈的动力不稳定。另外,320 m 高度上的风速开始增大的时间较 15 m 高度要早近 1 h,意味着冷空气的影响是从上层开始的。在冷空气影响之前 320 m 高度的气温一直在上升,15 m 处的气温则从 06:00 时开始上升。06:00~10:00 期间 2 层之间形成了很强的逆温结构,逆温最强时达到将近 $1.0 \text{ }^\circ\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$,这种逆温层抑制了沙尘的向下输送。10:00 以后,逆温结构被破坏,此时,强的风速垂直切变(动力不稳定)和温度垂直切变(热力不稳定)导致沙尘迅速向下输送(监测显示,此时的沙尘达到最强),沙尘开始爆发。

图 2 为根据超声风速仪测到的 2003 年 3 月 20 日沙尘爆发当天 24 h 的风、温湍流资料得到的 u 、 v 、 w 、 T 的谱分布情况。由图可见,湍流运动的惯性区(图中斜率为 $-2/3$ 的部分)都在频率大于 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的高频段上,对应的时间尺度为 100 s,这对于平均风速大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风场意味着湍流能量主要集中在尺度 1 000 m 以下的涡流中。另外,

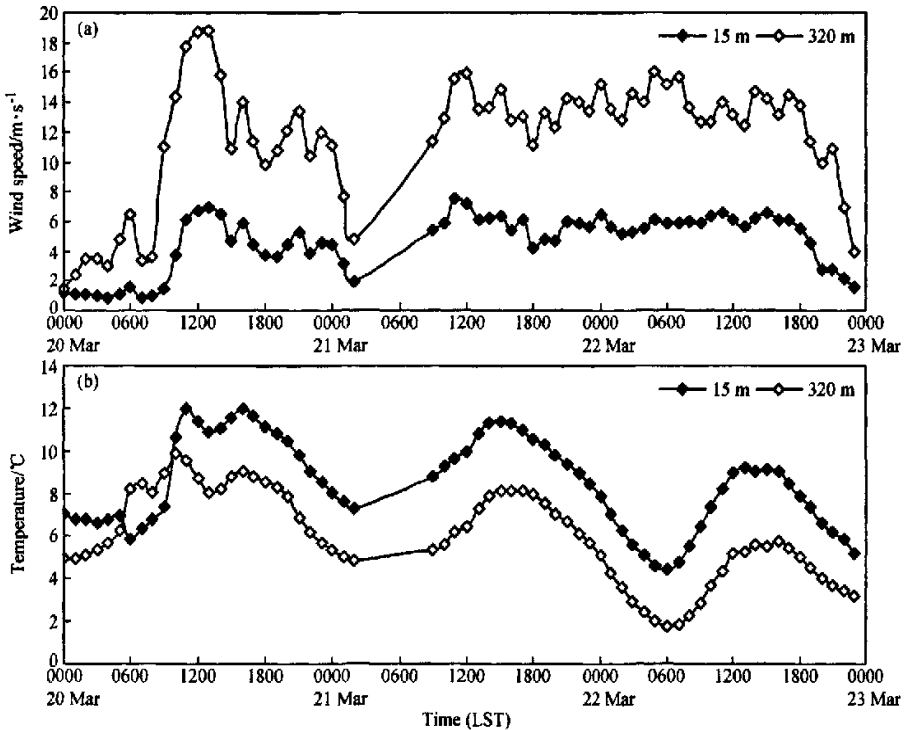


图1 2002年3月20日00:00~23日00:00铁塔不同高度上记录的1 h (a) 平均风速和 (b) 气温

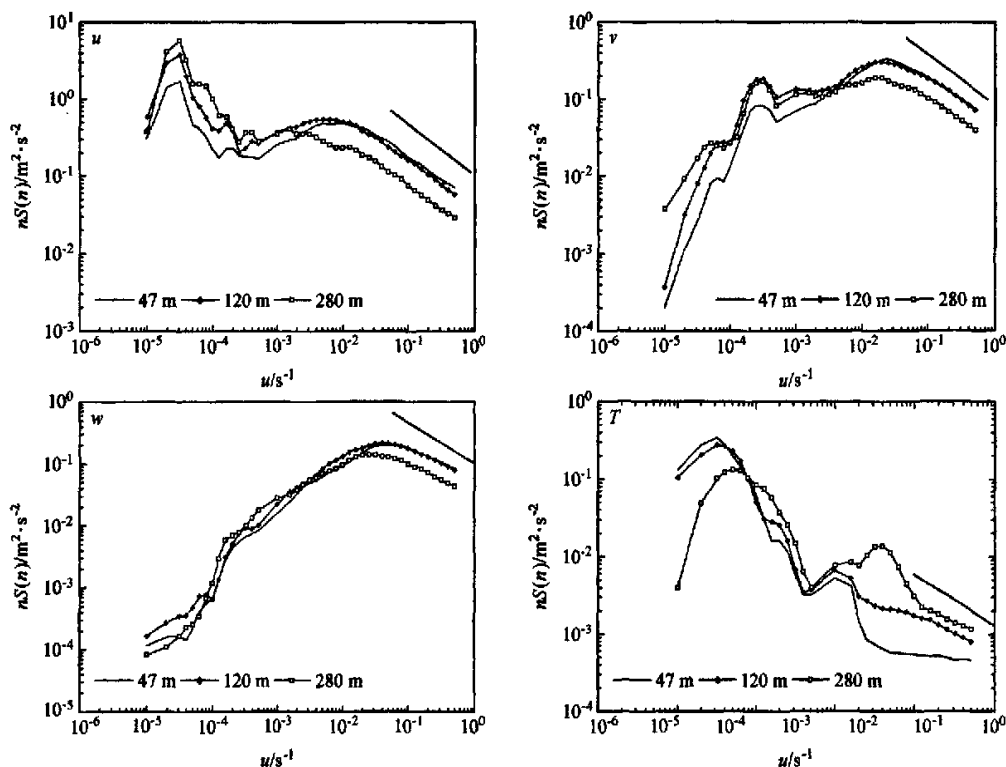
Fig. 1 Time series of (a) mean wind speed and (b) temperature at different heights of the tower during the period of 20–23 Mar 2002

在 u 、 v 谱的低频段频率为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (对应时间尺度约 1.4 h, 空间尺度约 50 km) 附近还有一较窄的谱峰, 这反映了锋面次级环流等中尺度过程。 w 谱的中尺度峰值不很明显。 T 谱分布中则在 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (对应的时间尺度约为 10 min, 空间尺度为 10 km) 附近有一窄峰, 意味着在这次沙尘天气过程中, 热量基本上是以高频的湍流输送为主, 中尺度过程不明显。

根据上述对中尺度和湍流运动谱的尺度分析, 将湍流和中尺度过程在时间尺度上进行分离, 将时间尺度小于 5 min 的运动看作湍流运动, 5 min ~ 6 h 的运动看作中尺度运动。在数学处理上, 按照 Mahrt^[11] 提出的方法, 即定义一个物理量 Φ 的湍流平均 (5 min 平均) 为 $[\Phi]$, 在更长的尺度上得到的中尺度平均 (6 h 平均) 为 $\langle \Phi \rangle$, 定义 Φ^* 为 $[\Phi]$ 至 $\langle \Phi \rangle$ 的距平 (中尺度扰动)。具体尺度分离方案可参阅文献 [9]。

3 通量计算结果

对沙尘爆发前后的当天 (2002 年 3 月 20 日 00:00~23:00) 47、120 和 280 m 高度上的中尺度动量通量和湍流动量通量进行了计算, 图 3 为各高度层每 3 h 一次的平均结果。从图中可以看到: 在沙尘爆发前的 06:00~09:00 中尺度动量通量以负的动量通量为主, 量级上明显比湍流通量大, 但各层的中尺度动量通量有所不同。03:00 47 m 有弱的向下湍流动量通量, 中尺度动量通量不明显, 120 m 的向下的湍流动量通量与中尺度动量通量基本相当, 280 m 处则以弱的向下中尺度动量通量为主, 湍流动量通量不明显。06:00 120 和 280 m 处的向下中尺度动量通量的量级明显增大, 而 47 m 处的中尺度动量通量以及其他各层的湍流动量通量都非常小。09:00 120 和 280 m 处的

图2 2002年3月20日00:00~24:00时湍流数据得到的 u 、 v 、 w 、 T 谱分布(直线的斜率为 $-2/3$)Fig. 2 Spectral distribution of u , v , w , T on 20 Mar 2002 (The slopes of the line are $-2/3$)

中尺度动量通量继续增大,且280 m处的中尺度动量通量已转为向上的正值。这主要是因为,在冷空气到来之前,夜间的稳定边界层结导致湍流动量通量非常弱,近地面层的中上层存在弱的中尺度环流。随着冷锋的逼近,由于逆温层结的形成和加强,抑制了湍流通量的输送,而中尺度动量通量则由于冷锋的到来明显增大,且在280 m处出现了正的中尺度动量通量,这些都明显的抑制了沙尘的向下输送。所以,虽然从08:00开始,北京即受到这次冷空气的影响,但一直到10:00冷空气带来的沙尘才开始沉降。到12:00向下的湍流动量通量急剧增大,比同高度上的中尺度通量大许多。280 m高度上的中尺度动量通量则在逐渐减小,并在15:00后也转为负值。

在冷空气影响之前,近地面边界层以中尺度动量通量为主,湍流动量通量非常小。在沙尘爆发前,近地面层上层(280 m)的中尺度动量通量转为向上的正值,抑制了沙尘的向下输送。但沙尘爆发后,小尺度的向下湍流动量通量明显增大,

从而导致沙尘的沉降。随后,边界层中主要是以负的湍流动量通量为主,其中也包含有量级相对较小的中尺度动量通量。说明这次沙尘暴影响过程中,湍流输送是导致沙尘下降的主要机制,但同时也包含冷锋所带来的中尺度环流的影响。对比图3与图1a还发现,背景风速较小时,中尺度动量通量比湍流动量通量强;而背景风速较大时,湍流动量通量比中尺度动量通量强。

图4为47、120和280 m高度上每3 h一次的中尺度感热通量和湍流感热通量的平均结果。从图4可见,无论是沙尘爆发前还是爆发后,3层中都是以小尺度的湍流感热通量为主。这与图2得到的 T 谱显示的结果是一致的。但在沙尘爆发前的06:00和09:00,120和47 m的湍流感热通量明显减小,且以向下的负值为主,而从280 m高度的湍流感热通量的变化可以看到,03:00~06:00向上的湍流感热通量逐渐变小,到09:00已转为负值,说明06:00 120 m以下已经开始形成了逆温层结,但280 m处的逆温还没有形成,到

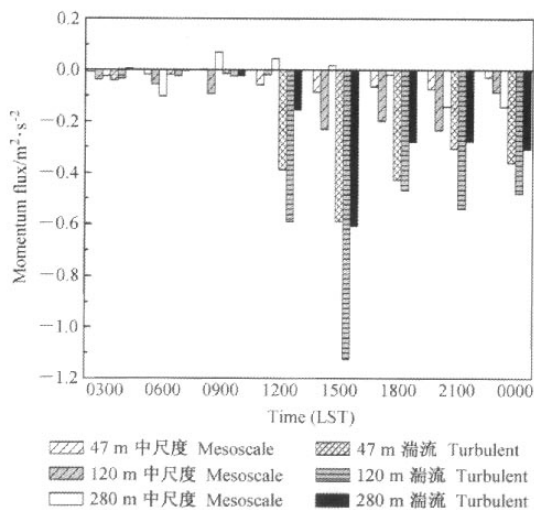


图3 2002年3月20日中尺度动量通量和湍流动量通量

Fig. 3 The mesoscale and turbulent momentum fluxes on 20 Mar 2002

09:00 280 m 以下均形成逆温结构。冷空气的影响是从上层开始的,这与图1的结果是一致的。

4 结论与讨论

中尺度通量的参数化一直是气候模式中值得关注的问题。陈昶等^[9]通过分析一次冷空气过程的中尺度通量指出,在较长的时间尺度湍流通量参数化时,有必要考虑因中尺度扰动而产生的修正。Zeng 等^[8]曾提出不均匀下垫面上大气中尺度热通量加湍流热通量的参数化方案,但该方案给出的函数形式很复杂,实验参数多,实际应用较困难。

地表的非均匀性可能产生中尺度环流^[13],而大尺度的天气系统,如冷锋系统,也可能激发中尺度的环流。在以往许多通量计算中,都不将通量进行湍流尺度和中尺度的区分,主要原因就是我们难以找到合适的方法将中尺度通量从整个通量中分离出来。

本文尝试用 Mahrt 等^[11]提出的区分中尺度通量与湍流通量的方法,对一次强沙尘天气过程的中尺度通量和湍流通量进行了计算,发现:沙尘爆发前,近地面边界层以中尺度动量通量为主,湍流动量通量非常小。在沙尘爆发前际,近地面层

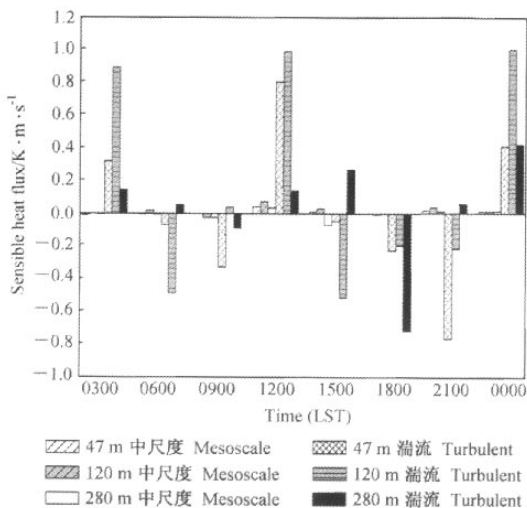


图4 2002年3月20日中尺度感热通量和湍流感热通量

Fig. 4 The mesoscale and turbulent sensible heat fluxes on 20 Mar 2002

上层的中尺度动量通量转为向上的正值,抑制了沙尘的向下输送。但沙尘爆发后,小尺度的向下湍流动量通量明显增大。并且,随着冷空气的不断影响,边界层中是以负的湍流动量通量为主,其中也包含有量级相对较小的中尺度动量通量。说明这次沙尘暴影响过程中,湍流动量输送是导致沙尘下降的主要机制,但同时也包含冷锋所带来的中尺度环流的影响。但是,无论是在沙尘爆发前还是爆发后,感热输送主要是以湍流输送为主,中尺度感热通量非常小。

参考文献 (References)

- [1] Mahrt L. Grid-averaged surface flux. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, 115 (8): 1550~1560
- [2] 张强,曹晓彦,胡隐樵. 论中尺度运动对大尺度模式网格平均的次网格通量的影响. *高原气象*, 2001, 20 (4): 453~460
Zhang Qiang, Cao Xiaoyan, Hu Yinqiao. On influence of mesoscale motion on grid-averaged subgrid-scale fluxes of large-scale model. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2001, 20 (4): 453~460
- [3] Noppel H, Fiedler F. Mesoscale heat transport over complex terrain by slope winds—a conceptual model and numerical simulations. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, 104: 73~97
- [4] Dalu G A, Pielke R A. Vertical heat fluxes generated by

- mesoscale atmospheric flow induced by thermal inhomogeneities in the PBL. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50** (6):919~926
- [5] Strunin M A, Hiyama T. Spectral structure of small-scale turbulent and mesoscale fluxes in the atmospheric boundary layer over a thermally inhomogeneous land surface. *Bound.-Layer Meteor.*, 2005, **117**:479~510
- [6] Avissar R, Pielke R A. A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117** (10):2113~2136.
- [7] Dalu G A, Pielke R A, Avissar R, et al. Linear impact of thermal inhomogeneities on mesoscale atmospheric flow with zero synoptic wind. *Ann. Geophys.*, 1991, **9**:641~647
- [8] Zeng X, Pielke R A. Landscape-induced atmospheric flow and its parameterization in large-scale numerical models. *J. Climate*, 1995, **8** (5):1156~1177
- [9] 陈昝, 李诗明, 钱粉兰, 等. 一次冷锋过境过程的中尺度通量观测. *地球物理学报*, 2000, **43** (6):754~761
- Chen Zhi, Li Shiming, Qian Fenlan, et al. Observation of mesoscale flux of a cold front passage. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2002, **43** (6): 754~761
- [10] Moore K E, Fizesjarrald R, Ritter J A. How well can regional fluxes be derived from smaller-scale estimates. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98** (D4):7187~7198
- [11] Mahrt L, Macpherson J I, Desjardins R. Observations of fluxes over heterogeneous surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, 1994, **67** (4):345~367
- [12] 彭珍, 刘照明, 洪钟祥. 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. *气候与环境研究*, 2007, **12** (3): 267~276
- Peng Zhen, Liu Ximing, Hong Zhongxiang. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (3): 267~276
- [13] Segal, M and Arritt, R W. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradient. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**:1593~1604