

新一代天气雷达谱宽资料分析晴空回波特征的探讨

耿建军^{1,2}, 顾松山¹, 陈钟荣¹, 黄兴友¹, 夏文梅³

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044;

2. 北京市气象局, 北京 100089; 3. 江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 根据广州强对流天气发生前新一代天气雷达 (CNRAD/SA) 观测的晴空回波谱宽资料, 经过数据质量控制和预处理, 估算了不同高度的湍流耗散率, 发现这次强对流天气过程发生前, 低层的湍流耗散率明显增强, 揭示了这次强对流天气过程的前兆特征。

关键词: 新一代天气雷达; 晴空回波; 谱宽; 湍流耗散率

中图分类号: P412 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)06-0814-05

Characteristics of the Spectral Width of CINRAD Clear-Air Echo before Severe Weather

GENG Jian-jun^{1,2}, GU Song-shan¹, CHEN Zhong-rong¹,

HUANG Xing-you¹, XIA Wen-mei³

(1. School of Remote Sensing NUIST, Nanjing 210044, China; 2. Beijing Meteorological Bureau Beijing 100089, China;

3. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences Nanjing 210008 China)

Abstract A series of severe convective storms affected Guangdong Province and produced disastrous heavy rain in Guangzhou especially on August 11, 2004. This paper introduces the elementary formation mechanisms for clear-air-echo before severe convection and tries to extract the dissipation rate of turbulent energy ϵ from the spectral data of CINRAD/SA in Guangzhou. The results show that the turbulence energy dissipation rate in the low atmosphere layer obviously increased before the severe convective storms occurred, which reveals the precursory character of this weather phenomena.

Key words CINRAD; clear-air echo; spectrum width; dissipation rate of turbulent energy

0 引言

强对流天气过程常伴随狂风、暴雨、强雷电甚至冰雹、龙卷等恶劣天气现象, 给当地经济和人民生命财产造成较大损失。随着我国新一代 158 部多普勒天气雷达布网工作的展开, 有许多科学工作者对强对流天气进行了深入研究。朱君鉴等^[1]利用济南 CNRAD/SA 产品分析了 2002 年发生在山东东阿的一次超级单体的典型特征, 认为风暴跟踪信息、冰雹指数、垂直积分含水量、中气旋等产品对强对流天气有较好的识别和预报能力。郑媛媛等^[2]根据合肥新一代天气雷达探测资料对 2002 年皖北地区的一次超级单体过程进行了分析, 寻找到出流边界、V 型缺口、弱回波、悬垂、中气旋等特征。于华英等^[3]对

2004 年湘南的一次飑线强对流过程进行研究, 发现此次雹云的回波强度最大达到 65 dBZ, 回波顶最高高达 14 km。他们的研究多集中于采用强度因子和径向速度这两种基数据资料生成的预报产品来对强对流天气过程进行分析预报, 其单站预报时效都较短, 大约为几十分钟。随着社会各部门和人民群众对于强对流恶劣天气的预警预报要求不断提高, 探求新的能够较早的对强对流恶劣天气现象发生进行预警的指标量是一项非常有意义的工作。宋丽莉等^[4]利用超声风速仪在对多个登陆台风实地观测的基础上, 选取出较有代表性的实验观测个例“黄蜂”、“杜鹃”和“黑格比”3 个登陆台风, 分析探讨了在登陆台风的中心、靠近中心位置的强烈影响区域近地层湍流特征。观测资料分析显示, 在登陆台风

收稿日期: 2006-04-07; 改回日期: 2007-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40475017)

作者简介: 耿建军 (1980-), 江苏徐州人, 硕士, 研究方向: 大气探测与遥感, geng_126@126.com.

的中心及其强烈影响的区域, 风速和湍流强度均有强烈的变化, 越靠近中心位置, 增大越明显。Davies 等^[5] 在英国的索尔福德市使用激光雷达对城市边界层进行了测量, 根据测量数据计算了径向速度变化、湍流耗散率, 得出湍流耗散率在一天中是逐步增加的, 同时指出测量的精度依赖于当时雷达仰角的高度, 仰角越低, 精度越高。随着基于多谱勒效应遥测遥感技术的发展和相关设备的研发使用, 相干多普勒雷达可以获得晴空条件下高时空分辨率的特征数据。Smalikho 等^[6] 认为利用脉冲多普勒激光雷达获取的速度和谱宽数据可以计算湍流耗散率, 并指出用谱宽数据计算方法得到的湍流耗散率的数值精度大约是利用速度数据计算方法得到的湍流耗散率数值精度的两倍。

2004年 8月 11日下午, 广东地区出现了一系列强对流天气过程, 其中 1个超级风暴单体严重影响了广州。此次过程伴随有大风、强降水、强雷电, 部分地区出现了龙卷、冰雹, 致使农作物大面积受损, 住房、工棚、厂房倒塌和损坏 2 227 间, 7人受伤, 一人遭雷击死亡, 直接经济损失超过 5 000 万元。

本文根据工作于降水体扫模式 VCP21 下广州新一代天气雷达 (CNRAD/SA) 在当日下午强对流天气现象发生前观测到的晴空回波谱宽资料, 估算不同高度的湍流耗散率 ε , 探寻其与强对流天气现象的关系。

1 晴空回波

1.1 定义

本文研究的晴空回波为高灵敏度脉冲多普勒天气雷达观测到的边界层大气中非降水、非鸟类、非昆虫等原因产生的雷达回波, 强度大约在十几分贝以下。

1.2 晴空回波成因分析

晴空回波的成因大致为: 大气中悬浮了一定量的湿性气溶胶微粒; 大气折射指数不均匀。无论是折射率的不均匀性还是悬浮气溶胶微粒在空间的分布, 均与各种尺度的大气运动有关, 湍流运动导致其速度谱展宽。关于大气折射指数不均匀性引起的雷达反射, 早先就有人提出了折射指数的高梯度层造成的反射机制, 并导出了计算微波功率反射系数的公式。在他们的推演中, 假定反射是镜面的, 电磁波从两层不同介质的分界面上反射。但进一步的研究表明^[4], 将此理论应用于微波雷达观测对流层的情

况是有困难的, 由上述公式, 对应所观测到的晴空回波强度所要求的折射指数梯度太高。

湍流, 其主要特征是脉动的三维分布, 而且难以测量其瞬时时空变化分布值, 然而湍流的统计特征量可以被识别且可以进行分析, 湍流展示了在一个广阔时空尺度流体特性的有效混合。分析表明动能从大的空间尺度到越来越小的空间尺度直至最后转化为分子粘性消散, 因此要保持湍流, 就必须使动能不断获得补充。湍流是有结构的多尺度不规则运动。首先提出流体湍流运动中多尺度输送特性的科学家 Richardson 描述湍动能的多尺度传输过程为“大涡包含小涡, 并喂予速度; 小涡包含更小的涡, 如此继续直到黏性耗散”^[7]。

对于湍流在强对流天气形成过程中的作用, 蒋瑞宾等^[8] 利用超声风温仪和风速仪对 1990年 8月 7日在北京通县地区所发生的一次强对流天气过程中的湍流场变化进行了分析, 得出在中尺度天气发展过程中, 近地层的湍流参数有明显的变化, 在过程发生前本地区湍流明显加强, 证明了局地的输送对强对流天气的发生有促进作用。

2 多普勒天气雷达谱宽数据特征量和计算湍流特征量的方法

对于用雷达研究湍流特征量的可行性, 国内外的科学工作者也作了一定的研究。美国国家海洋大气局波传播实验室和环境研究院的 Frisch 等^[9] 于 1974 年用多普勒雷达和声探空仪的实验数据对湍流耗散率进行了计算, 经过比较, 发现二者吻合度较好。此外, Doviak 等^[10]、葛润生^[11] 曾对多普勒天气雷达探测能力进行过估算, 在暖湿气团控制的夏季, 雷达探测晴空回波的距离可以达到 50~100 km, 实际的观测也表明了这一点。在散射体为气象目标情况下, 回波信号包含的多普勒频偏常常不是单值的, 这是因为脉冲体积内的粒子具有各种大小的径向速度, 从而造成回波频谱的增宽。对频谱增宽起作用的因素主要有 4 项, 即垂直方向上的风切变、因波束宽度而产生的横向风效应、粒子下落速度不均匀分布、大气的湍流运动。由于以上 4 个因素对谱宽的影响可近似看作相互独立, 则多普勒速度谱方差 σ_v^2 可以表示成各因素造成的方差之和, 即

$$\sigma_v^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 \quad (1)$$

式中, 等号右边 4 项方差分别表示由垂直方向上的风切变、因波束宽度而存在的横向风效应、粒子下落速度不均匀分布、大气的湍流运动造成的谱方差。

下面分项讨论:

(1) 垂直方向上的风切变

Sloss 和 Atlas 发现, 多数情况下风切变对谱的展宽总计小于 0.224 m/s 其与由湍流引起的谱的展宽相比几乎可以忽略^[11]。

(2) 因波束宽度而存在的横向风效应

由于波束存在一定的水平宽度, 与波束轴垂直的横向风在偏离轴线方向上就有径向分量。当雷达天线方向性图为高斯分布时, 可以导出由波束宽度产生的谱宽 σ_2 为^[12]: $\sigma_2 = 0.42V\theta\sin\phi$, 其中 V 是风速, θ 为波束宽度, ϕ 为波束轴线方向与风向之间的夹角。当风速为 30 m/s 波束宽度为 1° 时, 由此产生的谱宽 σ_2 最大也只有 0.22 m/s 因此这一项对于总的谱宽贡献不大。

(3) 粒子下落速度不均匀分布

当雷达水平探测时, 天线仰角 γ 为 0° , 粒子的落速在波束轴线上的径向速度为零。由此产生的谱宽相当于上述的横向风效应产生的谱宽。而当雷达天线垂直指向时, 粒子下落速度即为径向速度, 所以由此产生的谱宽最大。因此在一定程度上, 谱宽 σ_3 与 $\sin\gamma$ 成正比。当 γ 角在 10° 以内, 这种谱宽与湍流产生的谱宽比较起来是很小的。而晴空回波出现时, 多普勒雷达仅在几个较低的仰角 (0.5° , 1.5° , 2.4° , 3.4°) 可能探测到, 同时在晴空条件下或者在强对流发生前的对流上升运动时, 降水粒子不存在或尚未大量形成, 因此该因素也可以忽略。

(4) 大气的湍流运动

正如上述提到的, 当雷达作低仰角观测时, 粒子下落速度的不同对多普勒谱增宽的贡献是微不足道的, 这时多普勒谱宽主要对应于湍流运动。将天线的辐射模式 P 假定为三维高斯分布, 有^[13]

$$P(x, y, z) = \frac{\exp\{-[(y^2 + z^2)/(2\alpha^2) + x^2/(2\beta^2)]\}}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\beta\alpha^2} \quad (2)$$

其中: x 是波束轴的方向, y 和 z 是与波束轴垂直的坐标轴方向。 α 和 β 分别是波束宽度和脉冲长度 ($\alpha = R\theta$, $\beta = c\tau R$ 为目标物到天线的距离, θ 为波束宽度, c 为光速, τ 为脉冲宽度, 其量纲为 L)。令 $F_P(k)$ 表示天线辐射模式 P 的傅立叶变换, P 是空间波数 k 的函数。滤波函数 (筛选函数) $|F_P(k)|^2$ 由下式得出

$$|F_P(k)|^2 = (2\pi)^{-6} \cdot \exp\{-[(k^2 - k_x^2)\alpha^2 + k_x^2\beta^2]\} \quad (3)$$

其中: $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ 。

湍流波动的速度是空间位置 r 的随机函数, 其相关函数仅依赖于 $r = (r_1 - r_2)$, 表示为

$$B_{ij}(r_1, r_2) = \langle V_i(r_1) V_j(r_2) \rangle。$$

其中: V_i 和 V_j 分别代表 V 的第 i 个和第 j 个分量。定义 $B_{ij}(r)$ 的傅立叶变换为谱宽密度张量 $\Phi_{ij}(k)$, 其中 k 为波数。

假设窄波束内, 目标物充满波束条件下, 径向速度可以被认为在任何地方均是平行于波束轴线 r 方向的。因此有^[9]

$$\Phi_r(k) \approx \Phi_{11}(k) \quad (4)$$

对于湍流谱宽各向同性张量的假设表明^[13]

$$\Phi_{11}(k) = \frac{E(k)}{4\pi k^2} \left[\frac{k_x^2}{k^2} - 1 \right] \quad (5)$$

同时, 在湍流惯性区中有^[14]

$$E(k) = A \varepsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (6)$$

其中: A 是普适常数 ($A \approx 0.47$)^[11]; ε 是湍流耗散率。

在体扫中测量到的径向速度变化, 以其谱宽的形式来表示则为^[9]

$$\sigma_{11}^2 = \int k \Phi_{11}(k) [1 - (2\pi)^6 |F_P(k)|^2] \quad (7)$$

其中: d 是雷达到目标物的距离, 将式 (3)、(5) 代入式 (7), 可以得到

$$\sigma_{11}^2 = \frac{A \varepsilon^{\frac{2}{3}}}{4\pi} \int k k^{\frac{-11}{3}} \left[1 - \left(\frac{k_x}{k} \right)^2 \right] \cdot \{1 - \exp[-(k^2 - k_x^2)\alpha^2 - k_x^2\beta^2]\} \quad (8)$$

将上式转换到以 (k, θ, ϕ) 为坐标的球形坐标系中, 其中, $k_x = k \cos\theta$ 将上述方程积分化简得

$$\sigma_{11}^2 = \frac{3}{2} \Gamma \left[\frac{5}{3} \right] A (\varepsilon\alpha)^{\frac{2}{3}} \left[1 - \frac{S^2}{15} - \frac{S^4}{105} \right] \quad (9)$$

其中: $S^2 = 1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2$, $\left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \leq 1$ 保留方程 (9) 中 S^2 项, 转化为

$$\varepsilon \approx \alpha^{-1} \left[\frac{\sigma_{11}^2}{1.35A \left(1 - \frac{S^2}{15} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

3 数据处理

采用工作于降水模式 VCP21 下广州新一代多普勒天气雷达在 2004 年 8 月 11 日强天气过程发生前获得的谱宽基数据进行计算。

3.1 数据预处理及质量控制

数据预处理是对雷达数据进行所读取资料的数

据填补、滤波等处理, 剔除一些不可靠数据, 对数据进行修正, 以便后续的处理。数据读取过程是将原始雷达数据中的各个径向数据重新计算插值排序到 360 个整数角度上去。径向滤波是取单一条径向上的 A—I 共 9 个点, 排序后用中间那个值代替 E 处的值 (图 1)。

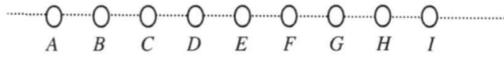


图 1 9 点径向中值滤波示意

Fig. 1 Sketch map for nine-point radial median filter

为去除谱宽数据中的一些特大谱宽奇异点, 本次处理中采用美国下一代天气雷达系统中的规定, 当谱宽数据大于 10 m/s 时, 不予考虑, 将其值赋为该径向所有谱宽值的平均值。

3.2 数据处理及分析

计算所用数据距离雷达站径向距离是 $30 \sim 60 \text{ km}$, 在该区域内满足条件 $(\beta/\alpha) \leq 1$, 从而本次数据处理利用 (10) 式来计算湍流耗散率 ε 。

本次强对流天气过程于 8 月 11 日 14 时影响广州并导致 15—16 时发生强降水。根据广州自动气象站资料, 8 月 10 日 12 时—11 日 10 时为晴空 (云量至多一成)。因此选取本次过程发生前约 20 h 和 5 h 的 8 月 10 日 12 时 44 分—17 时 27 分和 8 月 11 日 3 时 28 分—8 时 23 分各 50 个雷达体扫时次 (每个体扫时次间隔 6 min) 数据进行处理, 数据分辨率为 $0.25 \text{ km} \times 1^\circ$ 。

不同仰角两个时间序列的湍流耗散率 ε 及其拟合值结果见图 2 结果表明: 将发生强对流天气现象时的 ε 值明显高于其后没有强对流天气现象时的 ε 值, 前者所处时段中造成晴空回波的湍流运动较剧

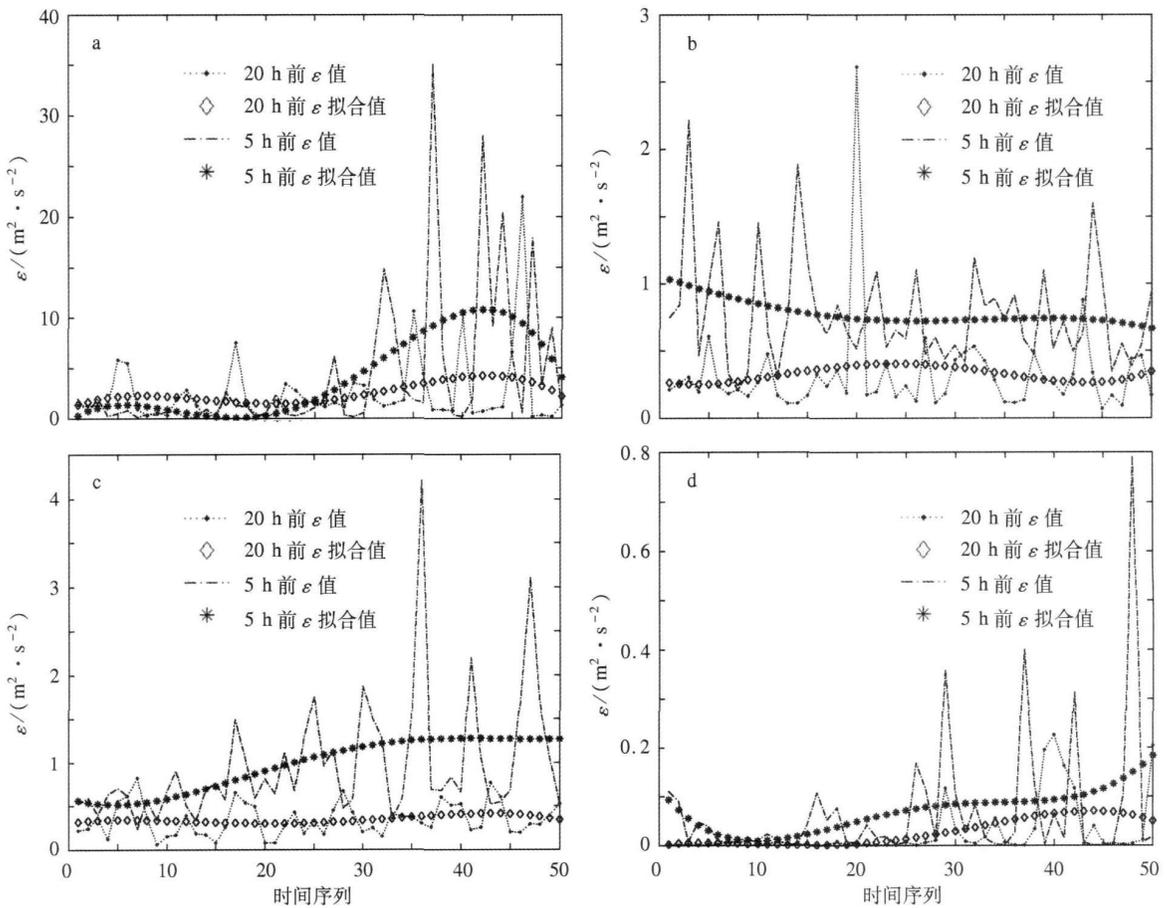


图 2 不同仰角两个时间序列的湍流耗散率 ε 及其 4 次拟合值

a 0.5° ; b 1.5° ; c 2.4° ; d 3.4°

Fig. 2 Turbulent energy dissipation rates and their fourth order fit curves

for two time series of 50-scan at (a) 0.5° , (b) 1.5° , (c) 2.4° and (d) 3.4° elevation before the strong convective weather process in Guangzhou at 1400 BST 11st August 2004

烈;正常情况下,湍流运动较平稳(表 1)。表 1 中 ε_{20} 表示强对流天气过程发生前 20 h 的 50 个雷达探测时次谱宽数据的 ε 平均值, ε_5 表示强对流天气过程发生前 5 h 的 50 个雷达探测时次谱宽数据的 ε 平均值。仰角为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 和 3.4° 时, $\varepsilon_5/\varepsilon_{20}$ 分别为 1 640 9、2 835 5、2 401 1 和 2 600 0 相差较大。随雷达探测仰角升高,湍流耗散率 ε 逐渐减小。

表 1 本次广州强对流天气过程发生前
两个时间序列不同仰角的 ε 平均值

Table 1 Mean values of turbulent energy dissipation rates for the two time series of different elevations before the Guangzhou severe convection storm event

仰角	$\varepsilon_{20}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	$\varepsilon_5/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	$\varepsilon_5/\varepsilon_{20}$
0.5°	2.494 3	0.344 4	1.640 9
1.5°	4.092 9	0.976 5	2.835 5
2.4°	0.324 6	0.779 3	2.401 1
3.4°	0.027 0	0.070 2	2.600 0

4 小结

(1) 强对流天气过程发生前产生的晴空回波是由于局地大气不稳定的湍流运动造成的大气折射指数分布不均引起的。

(2) 通过对位于广州的新一代多普勒天气雷达探测到的 2004 年 8 月 11 日发生的一次强对流天气过程发生前所出现晴空回波谱宽基数据的分析,得出初步结论,在临近发生强对流天气现象前湍流运动较正常情况下要剧烈,这表现为其特征量湍流耗散率 ε 值要明显高于正常情况下的 ε 值,该明显偏大的现象出现在对流性强天气过程之前几个小时。这就有可能利用此特征量,提高对前期有晴空回波出现的强对流天气过程临近预报时效。

(3) 流耗散率 ε 随着探测高度的升高而减小。

本文得出的仅是对广州的强对流天气过程的个例计算的初步结论,能否真正应用于实际业务中去,

还需要进行更多不同季节、不同地区个例的验证。

致谢: 本文使用的数据由广州中心气象台的胡胜同志和广东省气候与农业气象中心的秦鹏同志提供,特此感谢。

参考文献:

- [1] 朱君鉴, 刁秀广, 黄秀韶. 一次冰雹风暴的 C/NRAD/SA 产品分析 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 579-589
- [2] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析 [J]. 气象学报, 2005, 62(3): 317-328.
- [3] 于华英, 顾松山, 刘鹏, 等. 一次强对流的三维数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 305-313
- [4] 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉. 登陆台风近地层湍流特征观测分析 [J]. 气象学报, 2005, 63(6): 915-921
- [5] Davies F, Collier C G, Pearson G N, et al Doppler lidar measurements of turbulent structure function over an urban area [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2004, 21(5): 753-761.
- [6] Snelkko J K, Lipp F, Rahn S M. Measurement of atmospheric turbulence by 24m Doppler lidar [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2005, 22(11): 1733-1747
- [7] 张兆顺, 崔桂香. 走进湍流 [J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8
- [8] 蒋瑞宾, 朱平. 一次中尺度天气过程中湍流特征分析 [J]. 气象, 1995, 21(4): 11-15.
- [9] Frisch A S, Clifton S E. A study of convection capped by a stable layer using Doppler radar and acoustic echo sounders [J]. J Atmos Sci, 1974, 31(2): 1623-1628.
- [10] Doviak R J, Dusan S Z. Doppler radar and weather observations [M]. Orlando: FL: Academy Press, 1984: 150-152
- [11] 葛润生. CAMS 多普勒天气雷达探测能力的估算 [J]. 气象科学研究院院刊, 1989, 4(2): 133-140
- [12] 马振骅. 气象雷达回波信息原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 139
- [13] Platt V G, Cunningham R M, Campon C F, Jr. The refractive index structure of a cumulus boundary and implications concerning radio wave reflections [C]. // Sixth Weather Radar Conference Boston: Amer Meteor Soc, 1957: 273-280.
- [14] Lumley J L, Panofsky H A. The structure of atmospheric turbulence [M]. London: Wiley, 1964: 239