

风暴生命史雷达特征量反演^{* 1}

张家国¹⁾²⁾³⁾ 万玉发¹⁾ 王 珏³⁾

¹⁾(中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081) ³⁾(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘 要

从风暴演变各阶段物理特征出发,基于多普勒雷达观测的三维反射率因子,定义物理量——单体重力势能。结果表明:单体重力势能是一个能够简洁、客观描述风暴单体整体强度的物理量;利用该物理量可描述单体生命史为发展和减弱两个基本过程;单体重力势能大小有助于辨别风暴类型和强度。同时,生成和分析了风暴单体演变各阶段的反射率因子垂直廓线,分析表明:在 30~150 km 的雷达观测范围内,风暴单体的反射率因子垂直廓线(降水廓线)及其随时间的变化能较好地揭示风暴的垂直结构和生命史演变特征,但没有用重力势能那样简洁。

关键词: 对流风暴;生命史;单体重力势能;反射率因子廓线

引 言

对流风暴是中小尺度的天气系统,常造成严重局地气象灾害。研究认为,对流风暴具有几个不同的物理演变阶段^[1],或称为对流风暴的生命史过程。由于对流风暴时空尺度小且演变比较复杂,多年来,临近预警预报业务一直是以雷达监测为主,以风暴物理概念模型等为基础采用经验识别和外推的方法。与此同时,不少学者也在坚持不懈地探索风暴的客观识别、追踪和外推方法及技术^[2-7],但在实际业务中往往只能起到一定的辅助性作用,还远不能根本解决对这类天气的临近预报问题,重要因素之一可能是目前大多客观预报方法缺乏对风暴整体强度的描述能力及生命史的预测能力。那么,基于天气雷达观测,从风暴整体角度出发,如何利用一个物理量对其进行定量描述,对客观识别风暴就十分必要。在描述风暴强度方面,目前国内外一般用某高度上最大反射率因子、回波顶高等物理量来表述。这样做有其优点也有较大的片面性和局限性。在利用雷达回波资料研究雷暴生命史方面,早期主要涉及的是风暴生命史与其面积大小、强度和顶高等某一回波特征之间的关系, Henry^[8]研究了普通单体和多单体风暴生命史与风暴体积参数和最大反射率因子的关系, MacKeen 等^[9]利

用雷达反射率因子导出若干参数,研究它们与雷暴剩余生命史的关系。Hand 研究了对流风暴生命史雷达反射率因子垂直廓线的演变特征,由此来预报雷暴未来生命史阶段^[10]。因雷达波束受地球曲率影响,反射率廓线不能完整地描述远离雷达风暴的生命史特征。美国 NCAR 研究开发的雷暴临近预报专家系统^[11],采用规则方法将风暴的生命史信息应用于雷暴临近预报。

我国新一代多普勒天气雷达每隔 6 min 就能获取一个体积扫描资料,为定量研究风暴三维特征和生命史演变提供了保证。本文应用多普勒雷达高频度获取的三维反射率因子资料,研究能够描述风暴单体生命过程演变特征的物理量——单体重力势能 (cell gravity potential energy, CEPE),为定量描述风暴强度和变化、建立风暴单体客观识别方法提供理论依据;同时,研究利用它及雷达反射率因子垂直廓线描述风暴单体生命过程的能力。

1 雷达资料简介

选取武汉和宜昌 CINRAD/SA 型雷达 2003 年至 2005 年 4—8 月观测资料,这些资料是在雷达 VCP21 观测模式下探测到的,资料范围为雷达探测半径 0~230 km,分辨率为 1 km × 1 km。选取雷达能够观

* 湖北省科技攻关计划课题(2004AA306B01)和中国气象局预报员专项课题(CMATG2006Y04)共同资助。

2006-12-13 收到,2007-09-12 收到再改稿。

测到完整生命过程的对流单体作为研究对象,以便研究风暴单体生命史的特征。因雷达的一个体积扫描时间约 6 min,对生命史只有几个体积扫描的小对流单体,要研究其生命史演变,雷达资料的采样密度还不够。所以,本文所选单体的生命史大都在 30 min 以上,共选取了 23 个对流单体,其中包括普通单体 13 个、多单体 4 个和超级单体 6 个。本文单体类型的定义与一般意义上单体类型相同,其类型的确定是根据雷达回波 PPI 和 RHI 上单体的结构特征来确定的。

2 单体重力势能的定义及表达式

一般认为,对流风暴具有 3 个不同的演变阶段,即积云阶段、成熟阶段和消亡阶段。对流风暴的强弱、结构在雷达三维反射率因子场上有特定的表现^[12]。在积云阶段,云中盛行上升气流,雷达观测到对流单体先是在中空形成,然后同时向高、低空发展,直到降水着地;在成熟阶段,上升气流和下沉气流并存,雷达观测到的强回波不再向上发展,并向下触地;减弱消亡阶段,云中盛行下沉气流,强回波高度开始下降,直到单体消亡。从上述风暴演变的基本物理过程和雷达观测事实来看,风暴单体生命过程存在重力势能的变化。为了从整体上描述单体的状态,这里定义一个物理量——单体重力势能,即在某一时刻雷达观测到的一个对流单体中所有降水粒子相对于与地面平行的某参考平面所具有的重力势能之总和。

对雷达观测的一个对流风暴,在风暴体内有一体积元 δV ,设 δV 内单位体积的含水量为 M ,则对流风暴 δV 相对于距离地面高为 h_0 的参考面所具有的重力势能为:

$$dP = Mg(h - h_0)\delta V \quad (1)$$

$$dP = Mg(h - h_0)dhdS \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $\delta V = dh dS$, g 为重力加速度, h 是体积元距离地面的高度, S 为风暴单体在 h 高度的面积, P 为风暴的单体重力势能。 h_0 为重力势能的参考高度,目的是消除地球曲率对重力势能计算的影响。用式(2)对整个风暴单体积分,则单体具有的重力势能为:

$$P = \int_s \int_{h_0}^H Mg(h - h_0)dhdS \quad (3)$$

假设云内滴谱分布为 Marshall-Palmer (M-P) 分

布,则单位体积液态水含量 M 与反射因子 z 之关系式^[12]

$$M = 3.44 \times 10^{-3} z^{4/7} \quad (4)$$

代入式(3)得:

$$P = g \int_s \int_{h_0}^H 3.44 \times 10^{-3} z^{4/7} (h - h_0) dh dS \quad (5)$$

3 风暴生命过程特征量的演变规律

3.1 用风暴单体重力势能描述

对 23 个对流回波单体,滤掉小于 20 dBz 的弱回波,用式(5)计算其重力势能的生命史时间(北京时,下同)序列。图 1 是一个超级单体重力势能的生命史的变化。从图中可看到:单体生命史有发展和减弱两个最基本的过程:在发展过程中,开始单体重力势能很小,随着单体的发展,重力势能逐渐上升到最大值;在减弱过程,重力势能又从最大值开始逐渐减小到趋于零。因此,在风暴单体整个生命史演变过程中,重力势能表现为单峰型分布。单体最大重力势能出现的时间与 3.2 节中廓线法描述的单体成熟阶段出现时间基本一致,说明最大重力势的出现表示单体已经发展到成熟期。对同一单体而言,相对地面 1 km, 2 km 和 3 km 不同参考高度所计算的时间序列重力势能只有大小的差异,分布型式没有差异,各相对高度上重力势能的分布均能描述风暴发展和减弱两个过程。重力势能在以单峰分布为主趋势的情况下,有时也可能出现小的脉动,特别是在发展过程,各类单体均存在这种情况,特别是多单体风暴(如图 2 所示)。

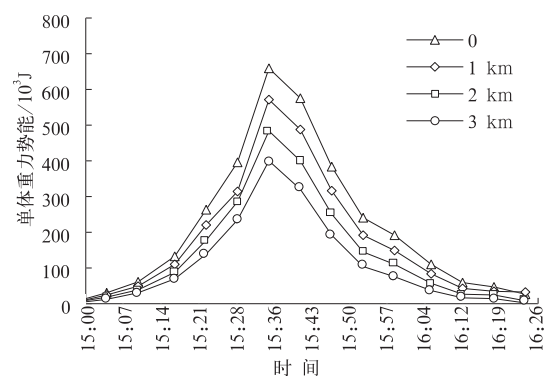


图 1 2004 年 7 月 8 日一个超级单体的重力势能随时间演变

Fig. 1 CEPE evolution of a super cell on July 8, 2004

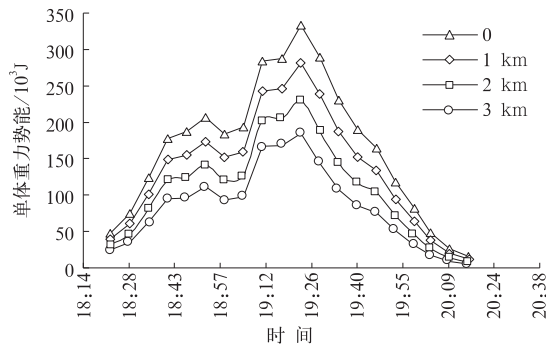


图2 2004年7月9日一个多单体的重力势能随时间演变

Fig. 2 CEPE evolution of a multi-cell on July 9, 2004

由计算 23 个风暴单体每 6 min 的变化趋势,结果表明,发展过程和减弱过程出现脉动的频率分别为 9.4%、4.7%,说明大多数情况下单峰分布是比较理想的。出现脉动有两个方面的原因:一是风暴发展过程确实存在这种脉动;二是雷达扫描锥面之间存在缝隙,或因单体快速移入雷达探测盲区,时间上的不连续性导致重力势能值的脉动。因此应用重力势能描述风暴演变趋势时应当注意。

由表 1 看出,不同的风暴单体其重力势能大小有显著差异,超级单体的重力势能在 3 类单体中最大,多单体次之,普通单体最小。因此,风暴单体重力势能对风暴类型有一定的辨别能力。

表 1 3 类单体重力势能大小

Table 1 The CEPE value of three cell types

单体类型	普通单体雷暴	多单体雷暴	超级单体雷暴
样本数	11	6	6
单体重力势能/ 10^3 J	20 ~ 100	40 ~ 400	40 ~ 800

3.2 用雷达反射率因子垂直廓线描述

雷达反射率因子垂直分布及其变化能够反映风暴单体垂直的物理结构及其生命史各阶段的特征^[12-15]。计算 23 个风暴单体的平均降水率的垂直廓线及其时间序列,分析发现:在 30 ~ 150 km 范围内,平均降水率廓线时间序列较好地反映出风暴单体的生命史演变特征。因在远距离受地球曲率、在近距离受雷达探测盲区影响,廓线不能完整地描述反射率因子的垂直分布。图 3 是 2004 年 7 月 8 日一个超级单体(距离雷达站约有 70 km)的平均降水率在风暴生命史各阶段的垂直分布,其演变的基本特征是,从发展到成熟阶段平均最大降水率随高度

升高逐渐抬升,而从成熟到消亡阶段最大平均降水率随高度升高逐渐降低。各阶段的具体特征是:初始阶段(14:58),对流回波中心出现在中层,强度较弱,降水率很小;发展至成熟阶段(15:17,15:35),对流回波在中层发展加强,最大平均降水率相应增强,并向上向下减小,强度梯度较大;减弱阶段(15:47,16:06,16:18),回波强度减弱,最强回波高度下降,最大平均降水率逐渐减小,高度不断下降。

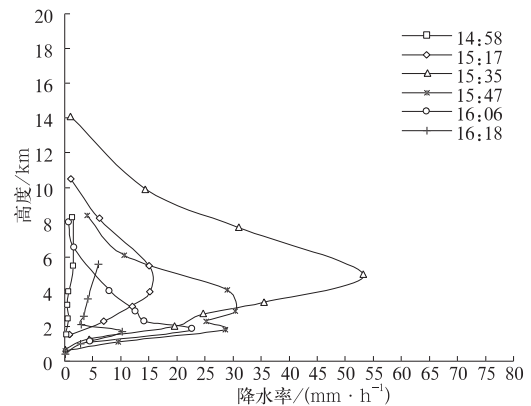


图3 2004年7月8日一个超级单体平均降水率廓线随时间演变

Fig. 3 Evolution of average rainfall profile of a super cell on July 8, 2004

对比两种描述风暴单体生命史的方法,可以说,用反射率因子垂直廓线时间序列描述风暴单体生命史是将四维问题转化为三维问题来处理,而用时间序列的重力势能描述风暴单体生命史则是把四维问题转化成二维问题来处理了。后者将单体生命史特征问题简化了,其最大优点是只用了一个物理量就简洁、客观地描述了风暴复杂生命史演变过程;同时,对单体生命史特征的描述和识别时可有效地用于 150 km 以外的雷达探测范围。

3.3 风暴单体水平面积生命史变化

以 3 km 和 6 km 两个高度上大于 20 dBz 反射率因子回波面积表示单体的水平面积,计算每个单体生命史期间每 6 min 一次的回波面积。单体回波面积有两种稍不同的演变过程:一种是在单体发展过程和减弱过程前期回波面积均随时间增大,而在减弱过程后期回波面积随时间减少;另一种回波面积演变特点是,在发展过程回波面积随时间变大,在减弱过程回波面积随时间减小。图 4 是 2004 年 7 月 8 日一个超级单体的计算结果,其演变属于前一种情况。回波发展阶段面积增长这种变化很好理解,在

减弱阶段面积增长可以这样理解:虽然单体减弱,强反射率因子回波面积减小,但大于 20 dBz 反射率因子回波面积可能仍然在扩大,直到消亡阶段回波面积才逐步减小。

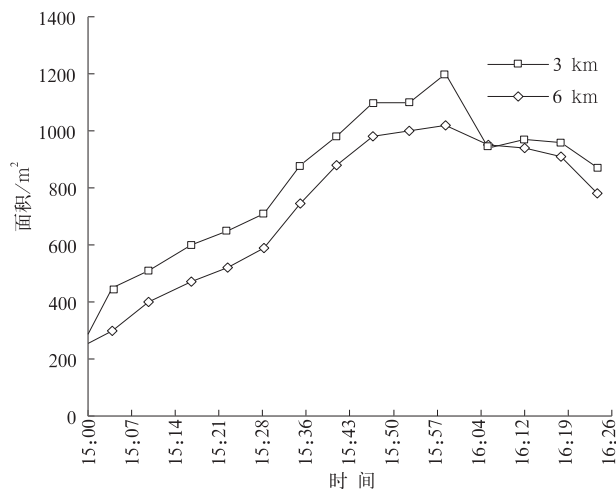


图4 2004年7月8日一个超级单体面积随时间演变

Fig. 4 Evolution of the area of a super cell on July 8, 2004

4 结论

1) 对流风暴是具有三维结构的中小尺度对流系统,利用单体重力势能这个物理量可以简洁、客观地描述风暴单体整体强度,其变化反映了风暴单体演变趋势。

2) 用单体重力势能描述一个风暴的演变过程,其生命表现为发展和减弱两个最基本的过程。尽管单体重力势能分布特征表现为单峰型,但是有时也存在小的脉动,故用其短时间的变化推断未来较长时间趋势存在不确定性。

3) 不同的单体类型,在成熟阶段,其重力势能大小有显著差异。超级单体的重力势能在三类单体中最大,多单体次之,普通单体最小。因此,风暴单体重力势能对风暴类型有一定的辨别能力。

4) 在雷达 30 ~ 150 km 的探测范围内,风暴单体

演变各阶段垂直反射率因子廓线特征表现不同,有一定的差异,对识别风暴的发展变化有帮助。因在远距离受地球曲率、在近距离受雷达探测盲区影响,廓线不能完整地描述反射率因子的垂直分布。无论近距离还是远距离在描述风暴生命过程上单体重力势能均比较简洁。

参考文献

- [1] Kessler E. 雷暴形态学和动力学. 包澄澜, 党人庆, 朱锁凤, 等译. 北京:气象出版社, 1991:45.
- [2] Dixon M, Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a Radar-based methodology. *J Atmos Ocean Technol*, 1993, 10(6): 785-797.
- [3] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 263-276.
- [4] 汤达章, 傅德胜, 张亚平. 暴雨回波跟踪与临近预报初探. 南京气象学院学报, 1992, 15(1): 66-72.
- [5] 万玉发, 张家国, 杨洪平, 等. 联合雷达网与卫星定量监测与预报长江流域大范围降水. 应用气象学报, 1998, 9(1): 94-103.
- [6] 王改利, 刘黎平. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用. 气象, 2005, 31(10): 12-15.
- [7] 张家国, 吴翠红, 王珏, 等. 一次冷锋大暴雨过程的多普勒雷达观测分析. 应用气象学报, 2006, 17(2): 225-231.
- [8] Henry S G. Analysis of Thunderstorm Lifetime as a Function of Size and Intensity. Preprints, 26th Radar Meteor Conf, Amer Meteor Soc, 1993: 138-140.
- [9] MacKeen P L, Brooks H E, Elmore K L. Radar reflectivity-derived thunderstorm parameters applied to storm longevity forecasting. *Wea Forecasting*, 1999, 14: 289-295.
- [10] Hand W H. An object-oriented technique for nowcasting heavy shower and thunderstorms. *J Meteor Appl*, 1996, 3:31-41.
- [11] Mueller C, Saxon T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 545-561.
- [12] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社, 2005:91.
- [13] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京:气象出版社, 2001: 356-362.
- [14] 史锐, 程明虎, 崔哲虎, 等. 用雷达反射率因子垂直廓线联合雨量计估测夏季区域强降水. 应用气象学报, 2005, 16(6): 473-477.
- [15] 吴翠红, 万玉发, 吴涛, 等. 雷达回波垂直廓线及其生成方法. 应用气象学报, 2006, 17(2): 232-239.

Convective Storm Life Cycle Parameters Derived from Radar Reflectivity Data

Zhang Jianguo¹⁾²⁾³⁾ Wan Yufa¹⁾ Wang Jue³⁾

¹⁾ (*Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074*)

²⁾ (*State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*Wuhan Central Weather Office, Wuhan 430074*)

Abstract

Weather radar is one of the important tools of severe storm warning. It is important to depict the density and evolution of whole storm using weather radar reflectivity data for storm identification and tracking. Therefore, based on 3-dimension CHINRAD/SA radar reflectivity, cell gravity potential energy (CEPE), a new physical parameter, is defined, which is relevant to storm life cycle. Its expression is derived and characteristic is studied. In addition, the vertical reflectivity profile of the cell is built and analyzed. The results show that the density of whole storm cell can be compactly and objectively described by the CEPE, and the cell evolvement trend is reflected by its change. If using CEPE to describe cell life cycle, there are two basic processes during the entire life cycle of the cell, namely developing process and weakening process. In spite of the overview single-peak distribution pattern, sometimes there is a little pulse in the pattern which occurs mostly at developing phase. At mature phase, the value of the CEPE is marked different among different cell types. The largest is for super cell, the second is for multi cell, and the least is for ordinary cell. Accordingly, cell type can be distinguished by CEPE to some extent. The characteristics of vertical reflectivity profile (VPR) of the storm cell are different from initiative to dissipated phases, which help to identify the evolution of the storm cell. But these differences can not be opened out to 150 km and in 30 km, as the effects of the earth curvature and radar blind area respectively. Comparing these two methods, it is obvious that the VPR is not as concise and objective as the CEPE.

Key words: convective storm; cell life cycle; gravity potential energy; radar reflectivity profile