魏东,孙继松,雷蕾,等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J]. 气象,2011,37(4):412-422.

三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析*

魏 东 孙继松 雷 蕾 杨 波 时少英

北京市气象台,北京 100089

提 要:使用 2007 和 2008 年 5—9 月常规探空资料、微波辐射计和风廓线数据构建的特种探空资料以及 BJ-RUC 模式探空资料计算的常用热动力物理参量,比较了在冰雹、雷暴大风和短时暴雨等强天气中特种探空和常规探空的各参量之间的差异,探讨了特种探空在强对流天气判别中定量应用的可靠性,最后选取不同强对流天气个例,详细对比分析了三种探空的物理参量在不同强对流天气发生前后的演变趋势。结果表明:(1)特种探空与常规探空的热动力物理参量在三种不同强天气中的表现基本一致。与常规探空相比,特种探空数据的时间分辨率高,各物理参量的变化特征表现更明显,能更详细地描述强天气发生前后大气状态的变化。(2)由特种探空计算的多种物理参量在不同强天气的酝酿、发展过程中差别明显,在强天气发生前 3~6 小时的变化趋势尤其明显,对于 3 类强天气的判别具有明确的短时临近预报意义。(3)与特种探空相比,模式探空的多数物理参量在强天气发生前后的变化趋势一致,低空垂直风切变最接近,而少数表征大气热力性质的物理参数的数值和转折时间仍有一定差别,尤其是模式对潜热释放过程的描述能力明显不足,几乎不能描述强对流云团发展过程中对流层中上层强烈的增温过程。因此,在使用模式探空参量制作强对流天气的潜势预报时,须辅以特种探空的实时探测数据计算的物理参量,对模式预报结果进行订正。

关键词:特种探空,微波辐射计,风廓线,强对流天气,BJ-RUC(快速更新循环同化预报系统)

Comparative Analysis of Three Kinds of Sounding Data in the Application of the Severe Convective Weather

WEI Dong SUN Jisong LEI Lei YANG Bo SHI Shaoying

Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

Abstract: Using the physical parameters calculated from data of conventional sounding, model forecast sounding of Beijing rapid update cycle forecast system (BJ-RUC) and the special sounding constructed from the data detected by microwave radiometer and wind profiler during May to September 2007 and 2008, the difference of the physical parameters between the conventional sounding and the special sounding in the various severe convective weather processes was compared in detail. The availability of the special sounding to discriminate the various convective weather processes was discussed. Finally, the evolution trend of the physical parameters of three kinds of soundings in the hail, thunderstorm, heavy rainfall weather process was analyzed. Through the detailed analysis, some meaningful conclusions have been drawn. Firstly, the physical parameters from special sounding has a same evolution trend as the conventional sounding in different convective weather processes. Moreover, the characteristics of parameters of special sounding are more significant than that of conventional sounding. Therefore it could give a more detailed description of the atmospheric stratification in the convective weather process. Secondly, there has an obvious difference of the parameters of special sounding in the process of various severe weather brewing and development,

* 本文得到国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706004)、国家科技支撑计划项目"京津冀城市群高影响天气的特征和成因分析"(2008BAC37B01)和全国强对流预报专家团队的共同资助

2010 年 4 月 20 日收稿; 2010 年 7 月 5 日收修定稿

第一作者:魏东,主要从事天气预报与分析研究工作. Email:wei_dong888@163.com

and it is significant especially during three to six hours before weather occurs. Thus the special sounding has a clear sense to the short-term nowcasting of various severe weather. Thirdly, in most cases, special sounding could show the evolution of the parameters before and after the severe weather occurs. Model forecast sounding has a better performance, but the evolution of the parameters has a time difference with the observations. The parameters of convectional sounding could not well capture the characteristics evolution during the process of severe weather because of the low temporal resolution. Fourthly, to the thermal parameters, in most cases, there have similar values and the same trends between the model forecast sounding and the special sounding. Therefore, it is needed to revise the quantitative thresholds of the various parameters and then to summarize the screening criteria for severe weather discrimination, which can be used in BJ-RUC forecast system to give the convective weather classification forecast.

Key words: special sounding, microwave radiometer, wind profiler, severe convective weather, BJ-RUC (Beijing rapid update cycle forecast system)

引　言

探空资料在很早前就被人们所重视,其对天气系统的监测和预报有重要作用[1-2],现在已经成为强对流天气预报中必不可少的参考资料之一。但是,常规探空由于气球漂移存在误差[3],而且观测站稀疏、日观测次数少,不能很好地描述形成暴雨、冰雹、雷暴大风等强对流天气的中小尺度天气系统的发生发展过程。通过其他方式获取高分辨率的高空温压湿风资料成为解决矛盾的主要途径。在国外,对新型遥感探测技术的研究已有多年,微波辐射计采用神经网络反演能够得到从地面到 10 km 的温度、相对湿度、水汽和液态水廓线[4-5],风廓线雷达采用微波遥感技术应用多普勒原理能给出大气水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数等随高度的分布[6],这些新型的自动探测设备能够 24 小时不间断工作,提供高时间分辨率的高空探测资料。近几年来,北京陆续建成了风廓线雷达和微波辐射计,目前这些新型探测资料已被用于日常预报业务,而且在研究城市短历时暴雨、冰雹等强对流天气的中尺度热动力学结构等方面已经取得了一些有价值的成果[7-9]。

当前,在短期时段内,对冰雹、雷暴大风和短时暴雨天气的分类预报仍是一个难题[10],预报员常利用天气学概念模型结合探空物理参量制作潜势预报[11-13],如刘玉玲用探空计算 *CAPE*、粗理查森数、螺旋度等几个对流参数并应用到强对流天气的潜势预测[14],廖晓农等利用 *CAPE*、抬升指数和风切变等一些物理量分析了一次严重的大雹事件[15],雷蕾等分析了多种物理参量在冰雹、雷暴大风和短时暴雨天气下的差异,认为这些参量的时间变化比物理量本身更能体现各种天气的发生潜势[16]。长时间序列的常规探空与同时刻的特种探空(使用微波辐射计的温湿度数据和风廓线仪的水平风数据构建)的对比分析[17]表明,两者的温压湿风等要素具有较好的一致性变化趋势,由其计算的多数物理参量的数值比较接近。但是,由特种探空资料计算得到的各种物理参量是否能用于强天气的判别还需要深入分析。

另一方面,如果能将各种物理参量对应的强天气判别标准应用于高分辨率的中尺度数值模式,制作强天气分类潜势预报,能有效地提高模式的应用价值,为强对流天气的业务预报提供有益的参考。北京市气象局引进开发的快速更新循环同化预报系统(BJ-RUC)已日趋成熟。对 BJ-RUC 模式探空的检验分析表明,各要素和计算的物理参量在 12 小时时效内的预报误差较小[18],但是模式探空计算的各物理参数能否用于强天气的分类预报还需要详细地分析研究。

本文旨在比较特种探空与常规探空和模式探空物理量在不同强天气中的表现,探讨使用探空物理量制作强对流天气分类预报的可行性。

1　资料及研究方法

1.1　资料

2007 和 2008 年 5 月 1 日至 9 月 30 日北京南郊观象台的每日两次或四次的常规探空数据。由位于

该站的微波辐射计探测的温度、湿度数据和风廓线仪探测的水平风数据构建的逐 6 分钟特种探空数据；BJ-RUC 预报系统每日 05 时为初始场、时效 24 小时的模式预报探空数据。

利用常规探空、特种探空和 BJ-RUC 模式探空资料分别计算常用的热动力物理参量：(1)表征热力稳定度的参量：对流有效位能 $CAPE$、K 指数、500 hPa与 850 hPa 的假相当位温 θ_{se}之差 $\Delta\theta_{se}$；(2)表征雹胚生长环境的参量：0 ℃层高度 Z_0、−20 ℃层高度 Z_{-20}；(3)表征大气湿度的参量：500 hPa 温度露点差 $(T-T_d)_{500}$、850 hPa 温度露点差 $(T-T_d)_{850}$、大气可降水量 PW；(4)表征动力稳定度的参量：低层(700～925 hPa)垂直风切变 S_{low}、中层(500～700 hPa)垂直风切变 S_{mid}、粗理查森数 1：$(B_1=CAPE/0.5S_{low}^2)$、粗理查森数 2：$(B_2=CAPE/0.5S_{mid}^2)$；(5)表征温度、湿度垂直分布特征的参量：500 hPa 与 850 hPa 温度差 (ΔT)、500 hPa 与 850 hPa露点温度差 (ΔT_d)。

1.2 BJ-RUC 系统介绍

北京快速更新循环数值预报系统(简称 BJ-RUC)[18-19]包括主模式(WRFV2.2)、前处理模块 WPSV2.2 和 WRFVARV2.1。系统采用 NCEP 的全球分析和预报资料(AVN)制作系统冷启动背景场及边界条件，每天运行 8 次。

1.3 研究个例筛选

首先进行天气分类，将 2007 和 2008 年 5—9 月逐日天气按由弱到强依次分为：无降水日、无雷暴出现的稳定性降水日、短时暴雨日(雨强≥50 mm/3 h、雨强≥20 mm/h)、雷暴大风日和冰雹日。

在个例筛选过程中，将北京 20 个人工观测站资料与自动站资料结合，把同时出现一种以上强天气的个例按照天气现象就重的原则归类(如出现雷暴大风伴有冰雹的天气归为冰雹日等)。最终确定冰雹个例 20 个、雷暴大风个例 32 个、短时暴雨个例 13 个。

2 特种探空和常规探空物理量在不同强天气中的比较分析

根据雷蕾等[16]的分析，挑选方差 σ 相对较小，且在冰雹、雷暴大风和短时暴雨 3 类强天气下有较明显差别的 10 个参量[$CAPE$、K、Z_0、Z_{-20}、$\Delta\theta_{se}$、$(T-T_d)_{500}$、$(T-T_d)_{850}$、S_{low}、PW 和 ΔT]。

特种探空的定量应用可靠性分析结果[17]表明，与常规探空相比，特种探空的温度和经向风、纬向风的一致性好、误差较小，相应的物理量参数的误差也较小；由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大，与湿度相关的物理参量的误差较大。由表 1 也可以看出，特种探空与常规探空的 10 个参数的相关系数普遍大于 0.6，相关性超过了 0.01 的显著性水平，即两种探空的各参数具有较一致的变化趋势。从各参数的平均误差看，与湿度有关的参量[如 K 指数、$\Delta\theta_{se}$、$(T-T_d)_{500}$等]的平均误差略大，其他参数的平均误差较小。

计算常规探空和特种探空的各参量在 3 类强天气个例发生日的最大(最小)值的平均值如表 2 所示。

表 1 特种探空与常规探空物理量的平均误差及相关系数

Table 1 Mean errors and correlation of physical parameters between special sounding and conventional sounding

	02 时		08 时		14 时		20 时		所有	
	平均误差	相关系数	平均误差	相关系数	平均误差	相关系数	平均误差	相关系数	平均误差	相关系数
$CAPE$/J·kg^{-1}	82.1	0.76	26.1	0.75	20.3	0.36	−112.2	0.71	−10.8	0.66
K/℃	7.5	0.71	9.5	0.88	7.1	0.77	10.9	0.76	9.2	0.81
$(T-T_d)_{500}$/℃	−5.2	0.72	−6.3	0.68	−6.3	0.66	−5.0	0.73	−5.7	0.70
$(T-T_d)_{850}$/℃	0.1	0.76	−3.6	0.84	−3.8	0.72	−2.0	0.79	−2.5	0.80
ΔT/℃	−1.3	0.61	−0.2	0.71	1.8	0.56	−0.6	0.80	−0.2	0.70
$\Delta\theta_{se}$/K	−2.7	0.64	−2.7	0.74	−1.4	0.55	−3.1	0.70	−2.6	0.70
Z_0/m	−189.7	0.74	−47.6	0.79	−34.9	0.69	−65.3	0.87	−76.1	0.82
Z_{-20}/m	60.2	0.87	52.6	0.88	297.0	0.86	132.1	0.91	120.4	0.90
S_{low}/10^{-3} s^{-1}	1.0	0.65	0.2	0.82	0.2	0.84	−0.1	0.88	0.2	0.80
PW/cm	0.5	0.89	0.6	0.95	1.0	0.90	0.8	0.91	0.7	0.92

表 2　3 类强对流天气个例发生日两种探空的物理量最大/最小值的平均值*

Table 2　Average maximum or minimum values of physical parameters for special and conventional sounding in the day of hail, thunderstorm and short-term heavy rainfall occurring

物理量	冰雹		雷暴大风		短时暴雨	
	常规探空	特种探空	常规探空	特种探空	常规探空	特种探空
$CAPE$/J·kg^{-1}	1012	1346	1307	1437	964	1513
K/℃	31	42	29	43	34	46
Z_0/m	4174	5303	4207	5489	4751	5833
Z_{-20}/m	7414	8764	7501	8812	8093	9200
$(T-T_d)_{500}$/℃	28.38	20	26.60	21	26.56	18
S_{low}/10^{-3} s^{-1}	5.26	9.02	5.06	8.25	3.32	8.19
PW/cm	7.35	11.40	7.65	12.18	10.0	14.70
$\Delta\theta_{se}$/K	−9.86	−25.39	−8.93	−27.09	−11.52	−30.87
$(T-T_d)_{850}$/℃	5	2	7	2	3	1
ΔT/℃	−28	−32	−29	−32	−25	−31

* $CAPE$、K、Z_0、Z_{-20}、$(T-T_d)_{500}$、S_{low}、PW 为日最大值，$\Delta\theta_{se}$、$(T-T_d)_{850}$、ΔT 为日最小值

$CAPE$、K、Z_0、Z_{-20}、$(T-T_d)_{500}$、S_{low} and PW represent maximum values in the day respectively; $\Delta\theta_{se}$, $(T-T_d)_{850}$, ΔT represent minimum values in the day

表征热力不稳定的四个参量 $CAPE$、K 指数、ΔT 和 $\Delta\theta_{se}$ 中，特种探空的最大值（$CAPE$ 和 K 指数）或最小值（ΔT 和 $\Delta\theta_{se}$）的绝对值比常规探空的大，其表现的热力不稳定性更强，这是由于特种探空计算的不稳定参量的最大值或最小值——即最不稳定时刻是在一个连续的时间序列中挑选的。根据多数研究结果，对流发生前的临近时刻热力不稳定最强，而常规探空由于日观测次数少很难捕捉到这一时刻。从特种探空的 $CAPE$ 和 K 指数在五种不同天气下的散点分布图（图 1a、b）可看出，两个参数在

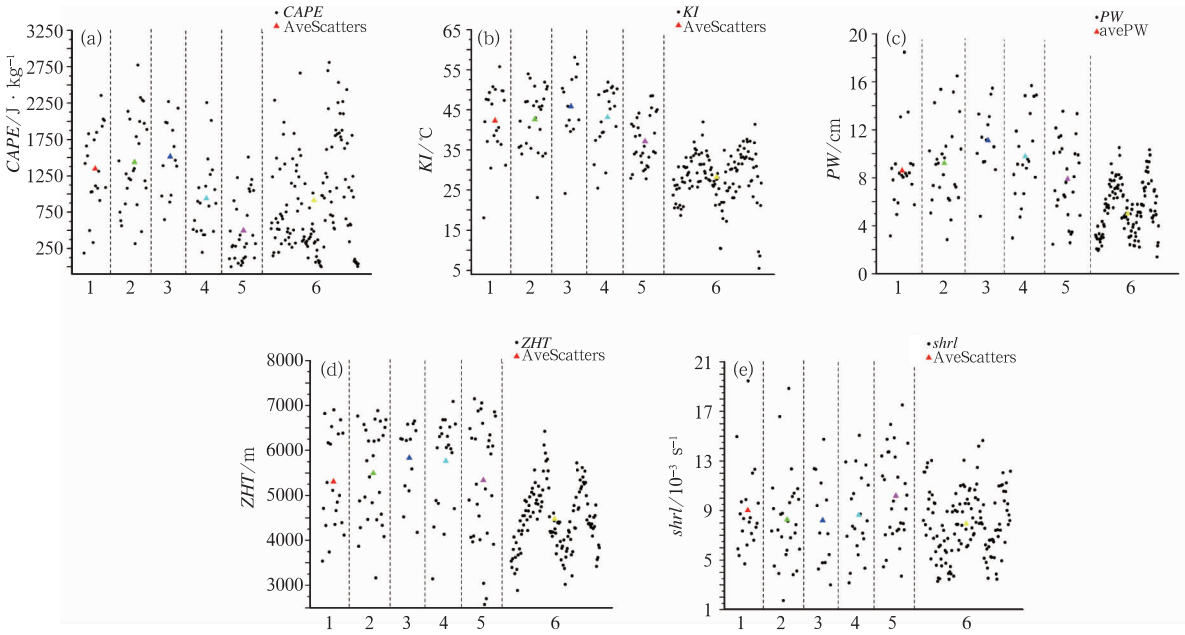


图 1　冰雹、雷暴大风、短时暴雨、一般性降水和无降水日的特种探空物理量散点及其均值分布

（a）$CAPE$；（b）K 指数；（c）大气可降水量；（d）0 ℃层高度；（e）低空垂直风切变

散点：单个个例参数值；▲：多个个例平均值；横坐标数字：1. 冰雹，2. 雷暴大风，3. 和 4. 短时暴雨，5. 稳定性降水，6. 无降水日；

Fig. 1　Distributions of scattered point and the mean value of the physical parameters for special sounding in different weather

(a) $CAPE$, (b) K index, (c) height of 0 degree layer, (d) low-level vertical wind shear, (e) precipitable water

dots: parameter value of individual case; solid triangle: mean value of all cases; abscissa numbers 1: hail, 2: thunderstorm, 3 and 4: short-term heavy rainfall, 5: non-convective precipitation, 6: no rain

3 类强对流天气个例日的散点分布范围比较接近，但与其在一般天气日的分布有明显不同，这说明 *CAPE* 和 *K* 指数虽然无法区分 3 类强对流天气，但可区分出强对流天气与一般性降水和普通天气。

对于表征等压面湿度分布的 500 hPa、850 hPa 的温度露点差，特种探空更好地捕捉到了其在 3 类强天气中的不同表现。冰雹和雷暴大风的 500 hPa 温度露点差更大，而短时暴雨的 850 hPa 温度露点差更小，这也证实了冰雹和雷暴大风发生时的层结是上干下湿，而暴雨发生时则为深厚的湿层。*PW* 表征大气柱垂直含水量的多少，从表 2 和图 1c 可看出，短时暴雨的 *PW* 明显较大，冰雹和雷暴大风的 *PW* 接近，明显小于短时暴雨的，两种探空计算结果一致，这说明该参数能够用于区分短时暴雨和冰雹与雷暴大风。

0 ℃和－20 ℃层高度是判别冰雹发生潜势的重要特征参数[20]，常规探空和特种探空的统计得到的趋势一致（表 2），这两个特性层的高度在三种天气中均表现为：冰雹＜雷暴大风＜短时暴雨，冰雹的两个特性层高度比短时暴雨低 500 m 左右。从 5 类天气多个个例的 0 ℃（图 1d）和－20 ℃层高度（图略）的散点分布图也可以看出，短时暴雨的特性层高度相对更高，冰雹的较低，这符合两类天气发生时的特征。

特种探空的低空风垂直切变（图 1e，表 2）更大。对于 3 类强对流天气，两种探空都表现为：冰雹最大，雷暴大风的次之，暴雨的最小。这表明，冰雹形成的环境中，较强的低空风垂直切变是必要条件，而暴雨形成时垂直风切变相对较弱。这与以往的研究结果一致，较大的垂直风切变能维持或加强风暴的垂直结构，有利于冰雹的形成[21]。

总之，对于各参数在 3 类不同强天气中的表现，特种探空与常规探空具有一致性变化趋势。而且，对于参数的日最大值，特种探空的更大；对于参数的日最小值，特种探空的更小。这表明，相对于一日只有两次或四次的常规探空，逐 6 分钟的特种探空能够更详细地描述强天气发生前后大气层结的变化，更有利于强天气的判别。

3 特种探空物理量对不同强天气的判别

选取发生在北京探空站附近且过程相对较强的三种强对流天气个例各 4 个，计算强天气发生前 12 小时内逐 6 分钟特种探空物理量的 4 个个例的平均值（图 2）。

三种强对流天气发生前，*CAPE* 存在一定差异（图 2a）。雷暴大风的 *CAPE* 值增长幅度更大，在天气发生前 4～8 小时内维持在高值区，而冰雹和短时暴雨的 *CAPE* 值的大小和变化幅度非常接近，不易区分。天气发生前 1～2 小时 *CAPE* 值迅速减小，表现出能量的快速释放过程。

短时暴雨的 *K* 指数最大，雷暴大风和冰雹的次之（图 2b），在天气发生前 6 小时左右，雷暴大风和冰雹的 *K* 指数由下降趋势转为上升趋势，其中，冰雹天气过程中 *K* 指数的增幅更大。

高低层温差（ΔT）分布（图 2c）显示，三者的变化趋势一致，但冰雹和雷暴大风的高低层温差明显大于短时暴雨，环境大气的垂直温度梯度存在明显差异。

对于 500 hPa 的温度露点差（图 2d），雷暴大风最大，冰雹次之，暴雨最小。3 类强天气发生前 4 小时内，500 hPa 温度露点差均开始减小，雷暴大风减小幅度最大，其值与冰雹相当，而短时暴雨快速接近饱和。850 hPa 的温度露点差（图 2e）变化趋势与 500 hPa 的一致，但雷暴大风在低层变化幅度较小。这表明，短时暴雨发生时湿层较厚、整层大气趋于饱和，而冰雹需要低层有一定的湿度，雷暴大风则表现为整层相对较干的气层。

大气可降水量（图 2f）在 3 类天气临近发生前 4 小时出现明显增大，不同的是，雷暴大风的 *PW* 在迅速增大后又明显下降。临近发生时刻，短时暴雨的 *PW* 最大，冰雹次之，雷暴大风最小。*PW* 的演变趋势与等压面的温度露点差的演变趋势相一致。

3 类天气的 0 ℃（图 2g）和－20 ℃（图 2h）层高度差异明显，短时暴雨两个层次的高度明显高于冰雹和雷暴大风，天气发生前等温层高度都有所抬高。其中，暴雨发生前 2 小时内，等温层高度抬升速度最快，这可能与深厚湿对流过程所释放的大量凝结潜热有关。

对低空垂直风切变（图 2i），冰雹和雷暴大风的明显大于短时暴雨，且在天气发生前 3 小时内冰雹和雷暴大风的呈明显增强趋势，而短时暴雨在较弱的风切变下即可发生。

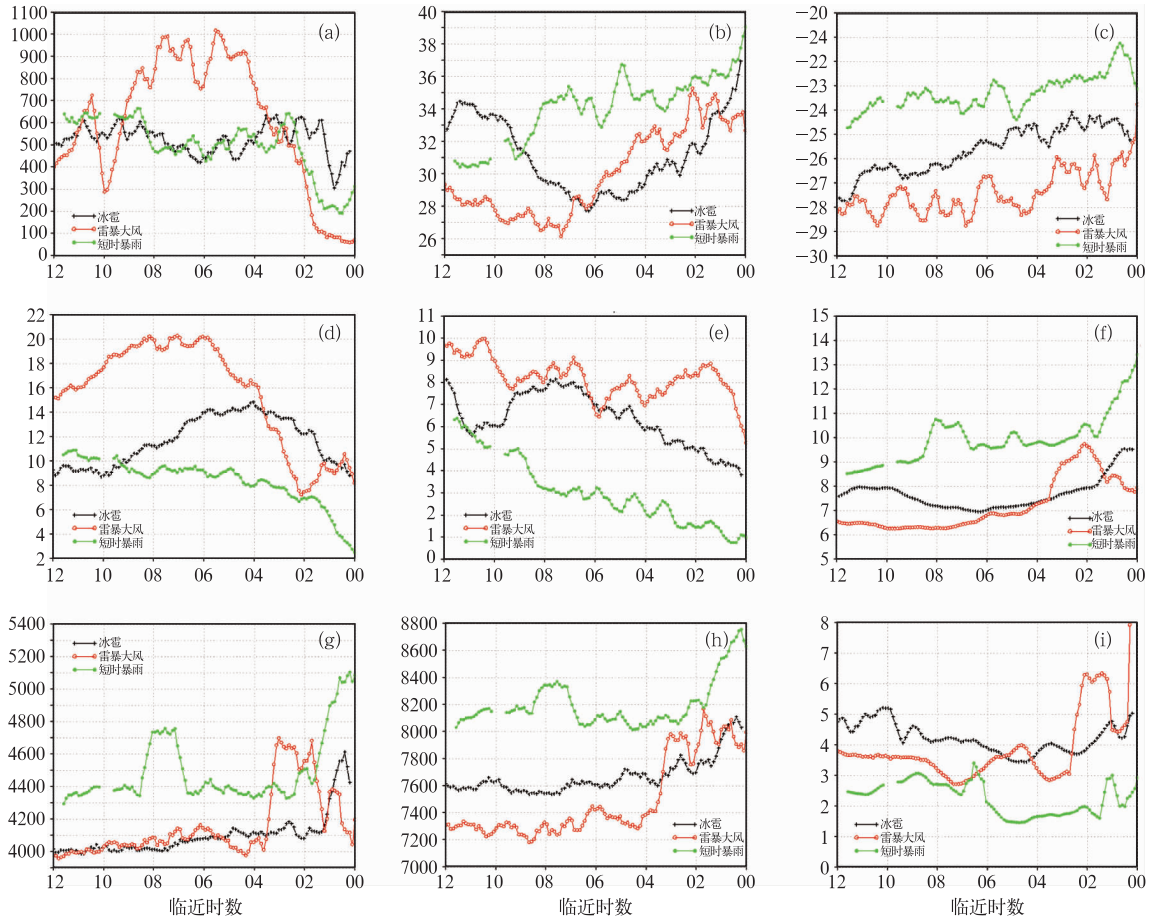


图 2　三类强天气发生前 12 小时特种探空物理参量随时间的演变

(a) $CAPE$(J·kg^{-1}); (b) K 指数(℃); (c) ΔT(℃); (d) $(T-T_d)_{500}$(℃); (e) $(T-T_d)_{850}$(℃); (f) 可降水量(cm); (g) 0 ℃层高度(m); (h) −20 ℃层高度(m); (i) 低空垂直风切变(10^{-3} s^{-1})

Fig. 2　Evolutions of physical parameters of special sounding within 12 hours prior to the occurrence of three kinds of severe weather

(a) $CAPE$(J·kg^{-1}), (b) K index(℃), (c) temperature difference between 500 hPa and 850 hPa(℃), (d) difference of temperature and the dew-point temperature at 500 hPa(℃), (e) difference of temperature and the dew-point temperature at 850 hPa(℃), (f) precipitable water(cm), (g) height of 0 ℃ layer(m), (h) height of −20 ℃ layer(m), and (i) low-level vertical wind shear(10^{-3} s^{-1})

综上,对强天气发生前 12 小时内特种探空物理参量多个个例的平均值的连续演变分析表明,各参量在 3 类强天气酝酿、发展过程中存在明显差别,对于强天气类型的判别具有明确的短时临近预报意义。

4　三种探空资料在各类强天气中的应用对比

上文的分析表明,特种探空计算的热力和动力物理参量对于判别 3 类强天气是有价值的,但是否能直接定量用于模式输出探空实现强天气的预报还需进一步分析。

选取 2008 年发生在北京测站或其附近的冰雹、雷暴大风和短时暴雨天气个例各 2 个:(1)冰雹:2008 年 6 月 13 日 16:00—17:00、2008 年 6 月 23 日 14:00—15:00;(2)雷暴大风:2008 年 5 月 26 日 21:00—22:00、2008 年 8 月 24 日 00:00—01:00;(3)短时暴雨:2008 年 7 月 29 日 00:00—01:00、2008 年 7 月 30 日 21:00—22:00。对比分析常规探空和特种探空物理参量对 BJ-RUC 模式探空物理量的订正能力。

图 3 给出了 3 类强天气的个例中三种探空的 *CAPE* 随时间的演变。对冰雹的第一个个例(图 3a),天气发生前特种探空的 *CAPE* 有明显增大,天气发生时 *CAPE* 急剧下降,准确刻画了冰雹发生前后不稳定能量积聚与迅速释放的过程。模式预报的 *CAPE* 有一定反映,但其变化幅度明显偏小,这可能与模式不能很好地描述这类中小尺度天气系统的发生发展过程中热力过程的快速变化有关。对冰雹天气第二个个例(图 3b),特种探空的 *CAPE* 在 12 时前后有骤然增减过程,但未表现出天气发生前的累计过程,这与冰雹发生前(6 月 22 日夜间至 23 日早晨)本地出现了明显雷阵雨天气,天空云量多,使得微波辐射计的探测误差较大有关(见文献[17])。模式探空的 *CAPE* 有明显的增大和骤

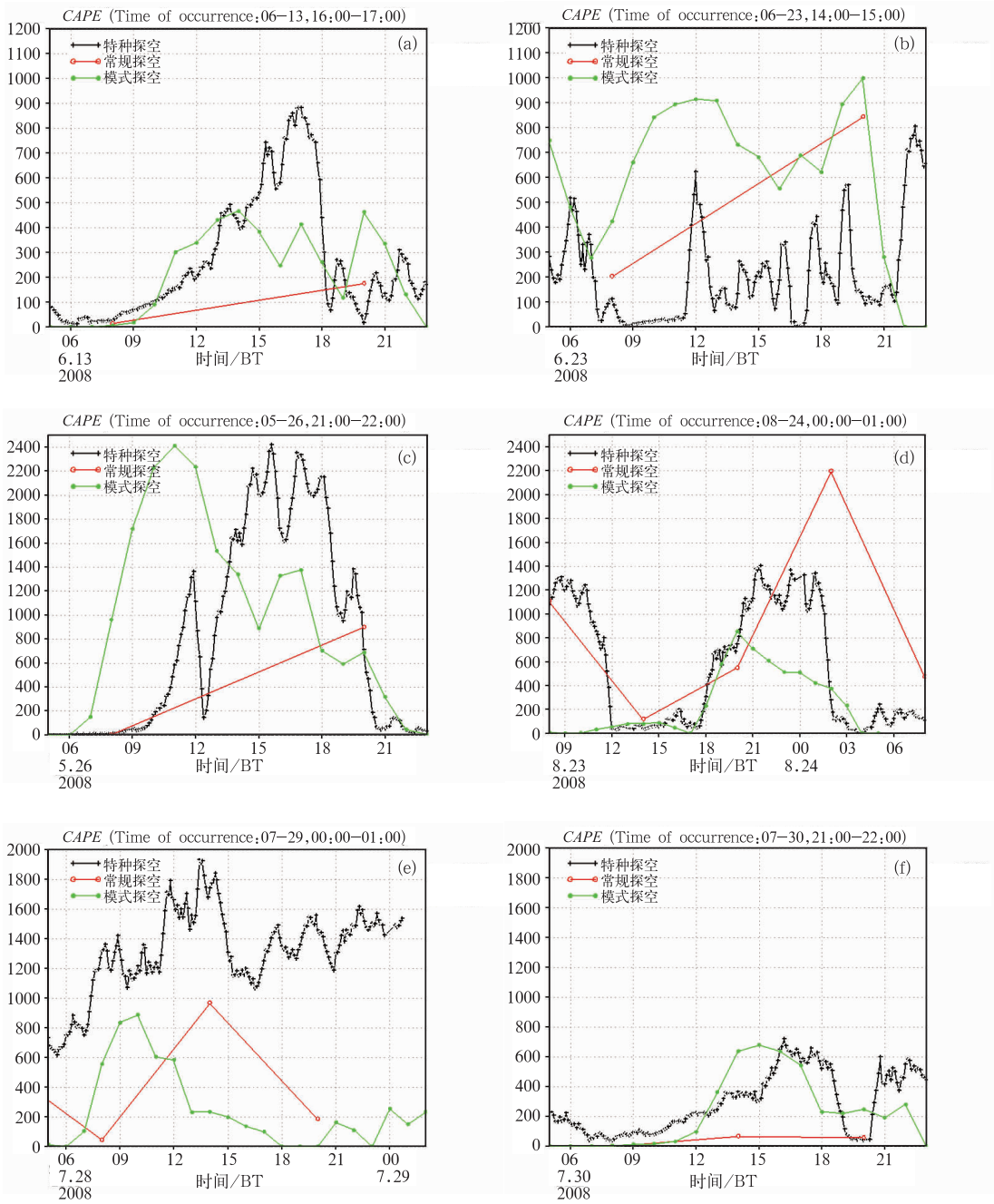


图 3 三类强天气(a,b:冰雹;c,d:雷暴大风;e,f:短时暴雨)各 2 个个例中 *CAPE*(单位:J·kg^{-1})随时间的演变

Fig. 3 Evolutions of *CAPE* of three kinds of soundings in the different convective weather cases: (a) and (b) hail, (c) and (d) thunderstorm, (e) and (f) short-term heavy rainfall (unit: J·kg^{-1})

减过程,有一定的预报指示意义。由于两次冰雹天气发生在 08 和 20 时之间,在天气发生前后常规探空不能很好地揭示这种 *CAPE* 随时间的演变特征。

雷暴大风的第一个个例(图 3c),特种探空的 *CAPE* 演变较好地反映了强天气发生前后的不稳定能量变化,模式探空也很好地模拟了能量的积累和释放过程,但是对系统发生发展的预报时间比实际天气发生时间偏早;在天气发生前只有一次观测的常规探空没有明确的预报意义。第二个个例(图 3d)的雷暴大风天气发生在 8 月 24 日凌晨,三种探空的 *CAPE* 变化都较好地反映了强雷暴发生前不稳定能量的迅速增长、强对流开始后的迅速减小这一变化过程。但模式探空的 *CAPE* 减小过程较缓慢,且 *CAPE* 的最大值小。此次过程中,常规探空 1 日有 4 次观测,能够较明显地反映出 *CAPE* 的演变特征。

在两个短时暴雨个例中,强天气的酝酿、发生、发展过程中,特种探空计算的 *CAPE* 比常规探空要大得多(图 3e、3f)。尽管模式对 *CAPE* 发生明显转折的时间(即天气发生发展的时间)预报有时可能存在明显误差。模式探空和特种探空的 *CAPE* 在暴雨发生前的增长和发生后的减小过程是比较一致的。两个个例中,常规探空的 *CAPE* 都有一定程度的表现。

对于 500 hPa 和 850 hPa 的温度差(图略),模式探空能够较好地描述降水过程中高低空温差逐渐增大的过程。但是,与特种探空相比,在降水云团发展过程中,由于对流层中上层潜热释放形成的中高层增温,造成垂直温度梯度减小过程,模式对这种潜热释放过程的模拟能力明显不足。特种探空表现为,降雹发生前,高低空温差有一个迅速减小的脉冲过程,而在降雹发生过程中,高低空温差达到最大。这是由于冰雹增长过程中潜热的剧烈释放造成对流层中高层迅速增温,以及降雹过程相伴随的拖曳作用造成更高层冷气团"下传",使对流层中层气温迅速下降造成。而中尺度模式在大多数情况下难以描述这种积云尺度的剧烈变化特征,因此,利用特种探空对是否降雹进行临近预警可能是一种有效的判别手段。

850 hPa 的温度露点差(图略)在不同个例中的连续演变表明,在不同强天气发生前后低层均有不同程度的增湿,其中冰雹和短时暴雨过程表现尤其明显,而且短时暴雨的低层湿度一般比其他两类天气的大。模式对暴雨过程中低层湿度的变化趋势描述较好,而在冰雹和雷暴大风天气发生前后的变化描述明显弱于特种探空。这可能与模式对与冰雹等相关的积云尺度对流系统的模拟能力有限有关。

三种探空的大气可降水量在不同天气个例中的分布有明显不同(图 4)。在第一个冰雹个例中(图 4a),特种探空和 BJ-RUC 预报的 *PW* 都呈一致的增长趋势,且特种探空的 *PW* 大于模式的预报结果,每日两次的常规探空不能描述 *PW* 的增长过程。在冰雹的第二个个例中(图 4b),特种探空和常规探空的 *PW* 有增大过程,而 RUC 预报的 *PW* 在冰雹发生前无明显增长过程,但冰雹发生后有增大过程。从 2 个个例看出,冰雹个例发生前 *PW* 呈增长趋势,在冰雹发生后的某个时刻达到最大值。

雷暴大风的第一个个例(图 4c)发生前,特种探空和 RUC 预报的 *PW* 呈缓慢增长趋势,常规探空的 *PW* 变化不大。雷暴大风的第二个个例(图 4d)发生前 *PW* 的变化很明显,三种探空的 *PW* 都表现出明显的增大过程,特种探空和 RUC 预报的 *PW* 在发生前有减小过程。

短时暴雨的第一个个例(图 4e)发生前,特种探空和 RUC 预报的 *PW* 呈增长趋势,特种探空的增长最明显,常规探空的 *PW* 变化不明显。第二个个例(图 4f)发生前后,三种探空的 *PW* 表现非常一致,发生前明显增大,而发生后开始减小。

3 类天气的不同个例中,强天气发生前后 *PW* 的表现与前文的统计分析结果一致,强天气发生前 *PW* 都有增大过程,但短时暴雨最明显,雷暴大风发生前 *PW* 存在减小过程。

3 类强天气的低空垂直风切变在天气发生前后有明显不同(图 5)。冰雹过程的低空切变呈现脉动式变化(图 5a、5b),雷暴大风(图 5c、5d)在天气发生前风切变逐渐加强,3～6 小时内,低空垂直风切变增幅达到 5 $m \cdot s^{-1}$ 左右,而短时暴雨(图 5e、5f)发生前风切变在多数情况下数值小于冰雹和雷雨大风天气,就低空切变随时间变化而言,变化幅度较小,有时甚至有减小的趋势。三类天气的 6 个个例中,除了在雷暴大风的第二个个例中表现较差外,模式的中低层垂直风切变与特种观测或常规探空的变化趋势一致。

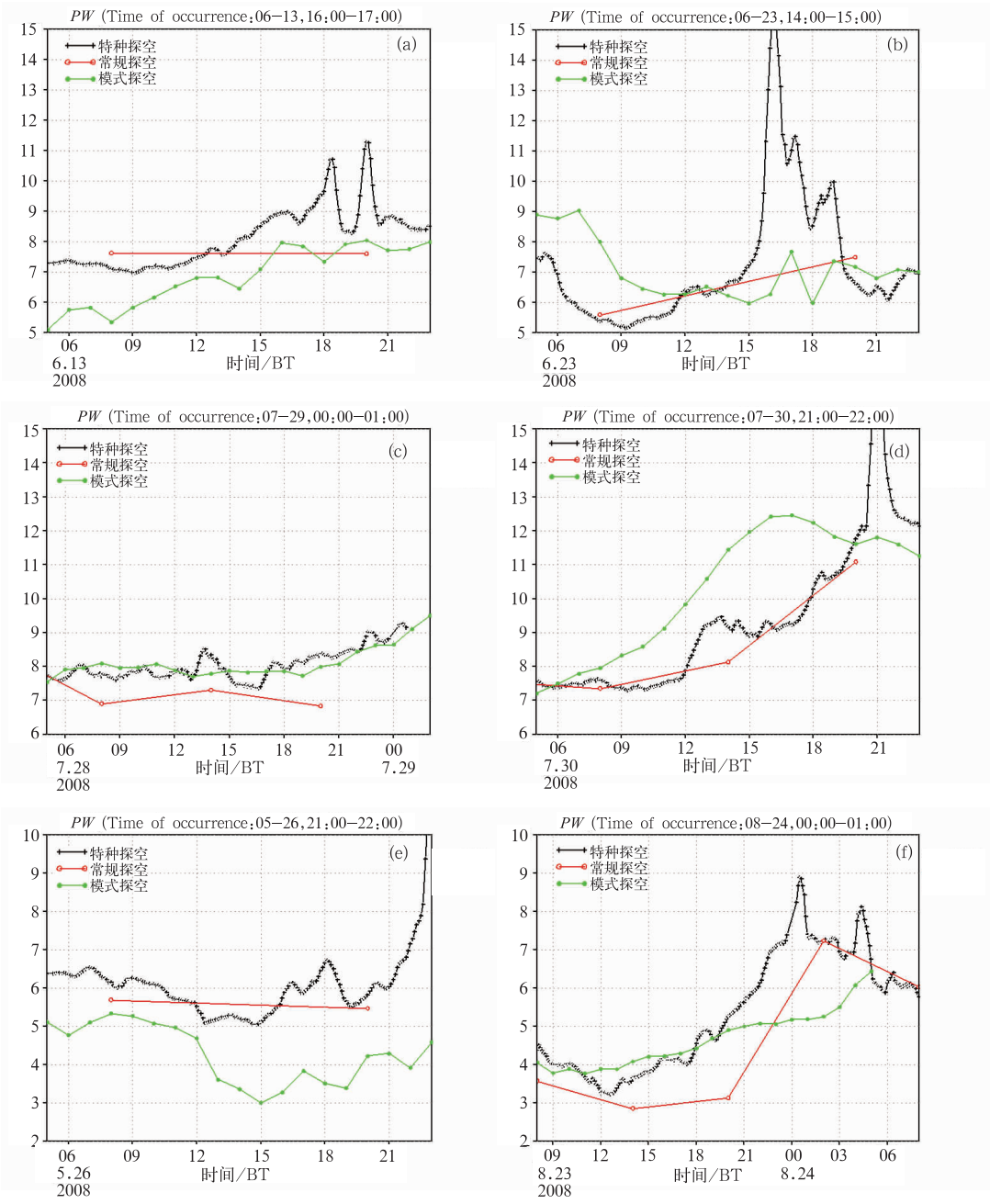


图 4 三类强天气(a,b:冰雹;c,d:雷暴大风;e,f:短时暴雨)个例中大气可降水量 *PW*(单位:cm)随时间的演变

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the precipitable water (unit:cm)

综上,多数情况下,常规探空的观测次数少,不能很好地描述强天气发生过程中各物理参量的变化特征,无明显的预报指示意义。特种探空能准确表现天气发生前后的参量的变化规律;模式探空也有一定程度的反映,但很多时候模式预报的物理量的演变特征与实况存在一定时间差,可能与模式不能准确描述中小尺度天气系统的发生发展过程有关。与特种探空相比,在强天气发生前后,模式探空表征大气动力特征的中低层垂直风切变和大部分表征大气热力性质的物理参量有一致的变化趋势,但模式对潜热释放过程的描述能力明显不足,几乎不能描述强对流云团发展过程中对流层中上层强烈的增温过程。虽然由于微波辐射计的探测误差造成的特种探空与热力相关的物理参量存在不同程度的误差,但其随时间的演变仍然具有很好的指示意义,是模式预报探空的有益补充。

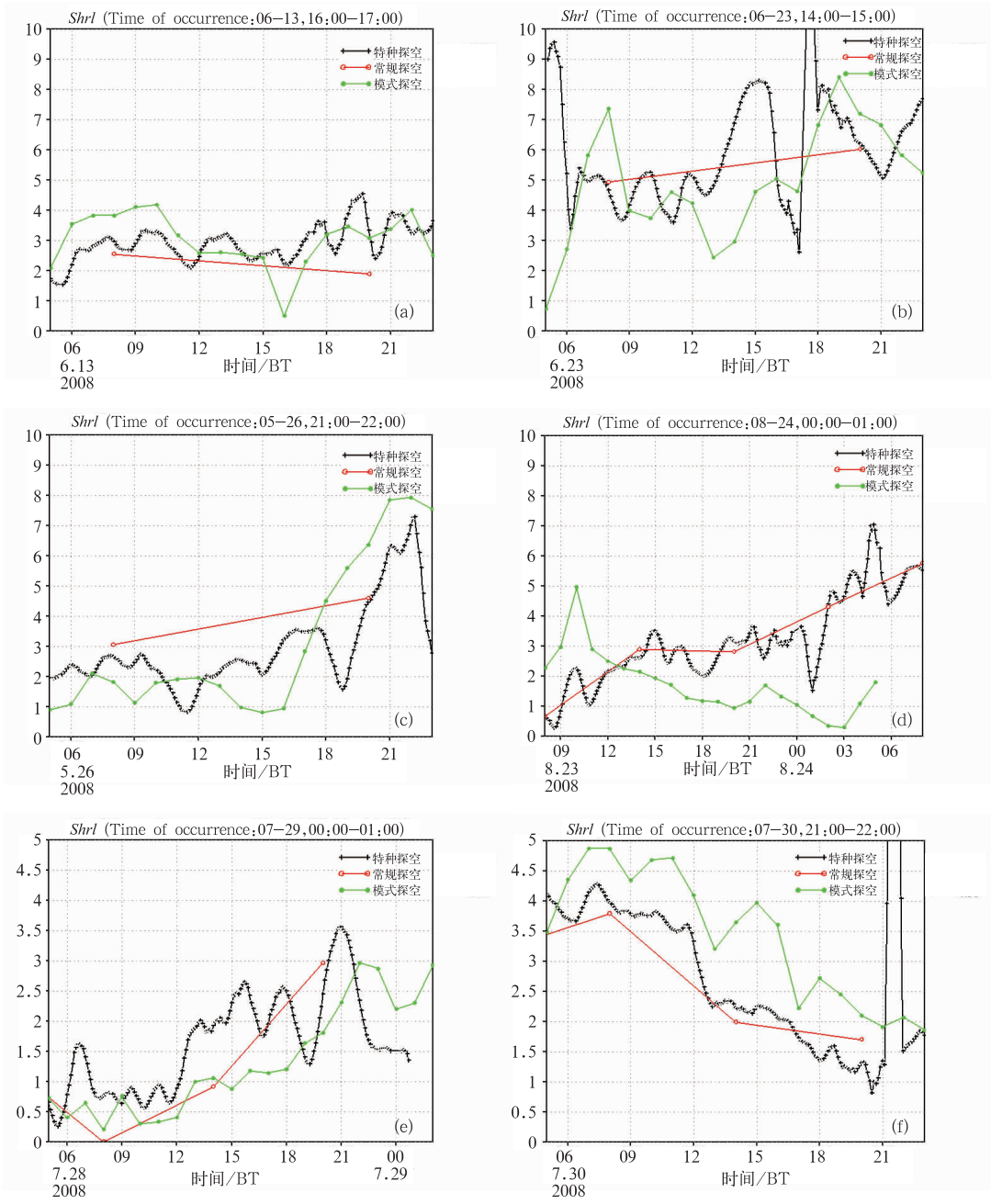


图 5　3 类强天气(a,b:冰雹;c,d:雷暴大风;e,f:短时暴雨)个例中低空垂直风切变(单位:10^{-3} s^{-1})随时间的演变

Fig. 5　As in Fig. 3, but for low-level vertical wind shear(unit:10^{-3} s^{-1})

5　结　语

本文比较了特种探空和常规探空物理量在 3 类强天气中的区别,探讨了特种探空对强天气判别的可能性。选取不同强天气个例,详细分析了常规探空、特种探空和中尺度模式探空的多种物理参量在不同强天气发生前后的演变趋势,得到以下结论。

(1) 在冰雹、雷暴大风和短时暴雨 3 类强天气中发生前后,特种探空与常规探空的热动力物理参量具有一致性变化趋势。与常规探空相比,特种探空的参数日最大值更大,日最小值更小。这表明,相对于 1 日只有 2 次或 4 次的常规探空,逐 6 分钟的特种探空能够更详细地描述强天气发生前后大气状态的变化。

(2) 对个例发生前 12 小时内多个个例物理量

平均值的变化趋势分析表明，由特种探空计算的物理参量在 3 类强天气酝酿、发展过程中存在明显差别，对于 3 类强天气判别具有明确的短时临近预报意义。

（3）三种探空的物理参量在 3 类强天气个例中的表现不同。多数情况下，特种探空能准确表现天气发生前后的参量的变化规律；模式探空也有一定程度的反映，但很多时候模式预报的物理量的演变特征与实况存在一定时间差，可能与模式不能准确描述中小尺度天气系统的发生发展过程有关；由于常规探空的观测次数少，往往不能很好捕捉强天气发生过程中各参量的变化特征。

（4）对于表征大气动力特征的中低层垂直风切变，三种探空的变化趋势基本一致，能不同程度地表现出不同强天气发生前后低空垂直风切变的演变。对于表征大气热力性质的参数，尤其在短时暴雨过程中，由于微波辐射计的探测误差使得特种探空的参量存在不同程度的误差，但其随时间的演变仍然具有很好的指示意义，如特种探空能够准确描述冰雹发生前后温度垂直梯度的明显变化，对是否降雹进行临近预警可能是一种有效的判别手段。模式对潜热释放过程的模拟能力明显不足，几乎不能描述强对流云团发展过程中对流层中上层强烈的增温过程。

以本文的工作为基础，将对不同强对流天气具有判别意义的探空物理参量的判别阈值修订后，引入 BJ-RUC 系统，利用叠套法制作格点强对流天气分类预报试验，同时，须用高密度的特种探空资料计算的物理参量对模式预报结果进行订正。

参考文献

[1] 叶笃正. 探空资料的应用(一)[J]. 气象，1977，3(11)：5-7.

[2] 叶笃正. 探空资料的应用(二)[J]. 气象，1977，3(11)：21-23.

[3] 陈哲. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. 气象，2010，36(2)：22-27.

[4] 刘红燕，李炬，曹晓彦，等. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J]. 遥感技术与应用，2007，22(2)：222-229.

[5] Westwater E R，Han Y，Irisov V G，et al. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS：Comparison experiments [J]. J Atmos Oceanic Technol，1999b，16：805-818.

[6] 张霭深. 现代气象探测[M]. 北京：北京大学出版社，2000：289-298.

[7] 孙继松，王华，王令，等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学，2006，30(2)：221-234.

[8] 孙继松，杨波. 地形与城市环流共同作用形成的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学，2008，32(6)：1352-1364.

[9] 孙继松，王华. 重力波对一次雹暴天气过程的影响[J]. 高原气象，2009，28(1)：165-172.

[10] 郑永光，张小玲，周庆亮，等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象，2010，36(7)：33-42.

[11] 廖晓农，于波，卢丽华. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象，2009，35(9)：18-28.

[12] 廖晓农，俞小鼎，谭一洲. 14 时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用[J]. 气象，2007，33(3)：28-32.

[13] 吴蓁，俞小鼎，席世平，等. 基于配料法的“08.6.3”河南强对流天气分析和短时预报[J]. 气象，2011，37(1)：48-58.

[14] 刘玉玲. 对流参数在强对流天气潜势预测中的作用[J]. 气象科技，2003，31(3)：147-151.

[15] 廖晓农，俞小鼎，于波. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析[J]. 气象，2008，34(2)：10-17.

[16] 雷蕾，孙继松，魏东. 利用探空资料判别夏季强对流的天气类别[J]. 气象，2011，37(2)：136-141.

[17] 魏东，孙继松，雷蕾，等. 用微波辐射计和风廓线资料构建探空资料的定量应用可靠性分析[J]. 气候与环境研究(待刊).

[18] 魏东，尤凤春，范水勇，等. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)探空预报质量评估分析[J]. 气象，2010，36(8)：72-80.

[19] 范水勇，陈敏，仲跻芹，等. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估[J]. 暴雨灾害，2009，28(2)：119-125.

[20] 雷雨顺，吴宝俊，吴正华. 冰雹概论[M]. 北京：科学出版社，1978.

[21] 俞小鼎，姚秀萍，熊廷南，等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京：气象出版社，2006.