

模式探空的评估分析及其在强对流 天气预报中的应用研究

陈子通¹ 闫敬华¹ 苏耀墀²

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

2 广东省江门市气象局, 江门 529000

摘要 分析华南地区强对流天气高发季节(4~5月)的模式探空与实际观测的比较结果。从模式探空的直接评估分析中发现,地面和较高层次的预报要素误差比较大,而中间层次误差比较小,在比较多个观测站和实时预报误差分析的基础上初步探讨其可能的原因。在不稳定度指数评估分析中发现,仅考虑中间层次要素的不稳定度指数性能比较稳定,而考虑地面要素的一些不稳定度指数则有可能比较敏感,在用地面观测订正后其质量有很大的提高。在强对流天气个例的应用研究中,认为逐时预报的模式探空有非常好的应用价值,以订正的对流有效位能指数为例进行了一些分析,表明站点和平面场的逐时预报对于强对流天气确实有良好的指示意义。以清远站和香港站为例,分别探讨华南地区常见的午后强对流和凌晨强对流的一种可能机制,发现逐时预报比较真实地丰富了实际观测无法得到的变化细节,而且这些细节与发生的强对流天气有很好的对应关系,而平面预报场的分析中也表明逐时预报的对流有效位能指数变率对未来2~3小时的强对流天气预报有帮助。

关键词 模式探空 评估分析 强对流

文章编号 1006-9895(2006)02-0235-13

中图分类号 P456

文献标识码 A

Research on Assessment of Model-Generated Sounding and Application in Forecasting Strong Convective Weather

CHEN Zi-Tong¹, YAN Jing-Hua¹, and SU Yao-Chi²

1 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

2 Jiangmen Meteorological Bureau, Jiangmen 529000

Abstract Because of the shortage of data density of conventional sounding data and the quality problems of some sounding data, it is so important to pay attention to the application of model-generated sounding. After analysed mode-generated sounding and observation data in detail during the high frequency convective weather season (April and May) in South China, the direct assessment of model-generated sounding data shows that the error amount of forecast element on surface and high levels is bigger than middle levels, for example, forecast element of temperature at 700-hPa level is the best, and the element forecast of surface temperature is very sensitive and difficult. Based on error analysis of multiple stations and real time forecast in long period, the possible reason is discussed. Assessment of instability indexes also shows that the performance of those instability indexes which is only considered the mid-level elements is relatively steady, but some indexes which is considered surface elements might be relatively sensitive, and their quality could be greatly improved by adding surface observation data.

Case study shows that hourly model-generated sounding data are proved to be very useful in strong convective

weather forecast, such as CAPE (Convective Available Potential Energy) index, it could be made good use of guiding to convective weather forecast. In the case study, hourly variation of four sounding stations data in South China is mainly analysed. The analysis shows that model-generated sounding data of the four stations (Lianping, Qingyuan, Yangjiang and Hong Kong) are very close to the corresponding observation value after added surface observation, and those model-generated sounding data of hourly forecast really enriches a lot of variation details which observation could not give us, which details is consistent very well with the occurring of strong convective storm. Case study also shows that the fine features of afternoon storm and morning storm could be obtained by using model-generated sounding data, and these features are very important for forecasting severe storm in a few hours later. Field distribution analysis shows that the change of CAPE index could help us forecasting convective weather that takes place two or three hours later and some indexes only considered mid-level element such as K index and SI (Showalter Index) are very useful for very short range (2–12 hours) forecasting.

There are a lot of cases that mesoscale convective systems derived from terrain-effect, which could be successfully simulated by a mesoscale numerical model, but for strong convective storms derived from large-scale weather systems, it would become very complicated, one reason might be that the initial data for mesoscale numerical model is not completely proper, another reason might be due to mesoscale numerical model, for example subgrid scale parameterization scheme is not perfect, so at present time, it might be the right way to forecast strong convective storm by combining model-generated sounding with conventional surface observation, radar echo and satellite image data.

Key words model-generated sounding, assessment, strong convective storm

1 引言

由于受人力和物力的限制,常规探空观测无论在时间密度上,还是空间密度上都远未能满足科学研究和业务预报的需求。中国探空观测站的密度相对来说是比较高的(全国约有 120 个探空站),但是如果应用于中小尺度天气系统的监测,就显得非常稀疏,比如广东省目前只有四个探空站,站距几百公里,时间跨度长达 12 个小时,这显然是不够的,而探空资料对于大气科学研究和业务预报来说又是非常重要、不可或缺的,为此,许多专家学者进行了许多有益的探索。康宁等^[1]为了获取青藏高原东侧的探空资料,研究了逐层内插的方法;王笑芳等^[2]用探空站资料研究确定有无强对流天气以及强对流天气类型的方法;王沛霖^[3]用探空资料研究台风影响期间珠江三角洲局地强风暴的大暴雨发生的环境条件等等。另一方面,为了改变探空资料不足的状况,美国 NOAA 采用下投式探空仪增加探空资料密度,认为增加非实时探空资料能够提高飓风路径预报的精度^[4]。为解决海洋和人烟稀少地区的探空观测,也为了大气科学试验的需要,美国、澳大利亚等国家又提出了微型无人探空飞机发展计划^[5]等等。

由于探空观测资料密度不足以及可能存在的质

量问题(国际上不少学者对探空资料的质量问题非常重视,例如欧洲中期数值预报中心就利用模式输出对探空观测实施质量监测),最近几年来,随着数值天气预报技术的发展,特别是数值模式的形势预报已经得到了普遍认可,数值天气预报模式输出的探空(简称模式探空)也开始受到了关注。相对于实际观测的探空,模式探空不仅可以有很高的水平分辨率和时间分辨率,而且也可以有很好的垂直分辨率。Hart 等^[6,7]的研究认为,综合运用逐时模式探空和地面观测可以缓解实测探空时空分辨的不足,他们发现逐时输出的模式探空在预报雷暴、中尺度对流复合体、对流趋势、中尺度不连续面的边界以及水汽通量辐合区域的形成和消散时,是很有用的。

本文选取华南地区强对流天气高发季节(4~5 月份)中尺度业务数值预报模式每天两次预报输出的模式探空,以及相应的实际观测资料进行一些比较分析,比较全面地分析了模式探空的误差情况及其可能的应用潜力,并通过一个强对流个例的应用研究,初步探讨了模式探空的应用方法以及可能的应用前景。

2 模式探空的一些评估分析

2.1 模式和资料说明

试验所用的数值预报模式为广州区域中心高分

辨模式(GZHM)^[8], 其基本动力框架从德国气象局引进, 模式水平分辨 0.125°(14 km), 垂直混合坐标 31 层, 静力平衡, 包含物理过程完整。初值采用德国气象局全球业务模式 GME(水平分辨约为 55 km)的四维同化场, 该模式物理过程先进(基本与欧洲中期数值天气中心 ECMWF 一致), 采用 6 小时周期的间歇性同化方案, 自 1985 年冷启动以来, 一直循环四维同化至今, 质量良好。广州区域中心高分辨模式系统自 2001 年 12 月 18 日业务运行以来, 性能非常稳定, 效果较好, 具有很好的代表性。

观测资料主要是常规探空资料, 还有地面观测站资料、自动站资料以及 GOSE 卫星云图资料、香港 S 波段多普勒天气雷达资料等。

本文的研究主要选用 2004 年 4 月 13 至 2004 年 5 月 13 日这段时间的资料, 每天有 00 时和 12 时两次预报。这主要是考虑 4~5 月是华南地区强对流强天气发生最频繁的时段。

2.2 模式探空各要素直接评估分析

2.2.1 各层温度预报评估分析

温度是探空观测中最重要的要素之一, 层结稳

定度指数计算最主要的参考量就是温度值, 通过较长一段时间比较地面和各标准等压面层上的温度观测值与预报值, 可以在一定程度上了解温度预报能力的评估情况。主要评估的探空站选取了珠江三角洲附近的 4 个测站, 它们分别是: 连平站(59096)、清远站(59280)、阳江站(59663)和香港站(45004)。

图 1 所示 4 层(地面、850 hPa、500 hPa、200 hPa) 12 小时温度预报与实况的比较(约有 1 个月时间), 从中可以看到, 温度预报值的变化趋势与实况是基本一致的, 模式预报曲线较光滑一些, 而实际观测的温度有明显的抖动, 特别是低层。24 小时预报的比较也有类似的结果, 参考表 1。

表 1 是一个月的平均情况, 表 1 的结果很有启发意义, 总体上看中间层(700 hPa、500 hPa)的误差值最小, 而低层和高层的误差值较大, 从地面到 100 hPa 各层的分析看来, 地面温度的误差是最大的。从图 1 可以看到 500 hPa 温度曲线变化比较平缓, 变化幅度在大多情况下比较小, 模式可以比较好地预报出它的温度值和变化趋势。相对来说, 地面温度抖动比较大, 大多情况下日变化明显, 变化幅度较大, 模式虽然能预报出它的变化趋势, 但预

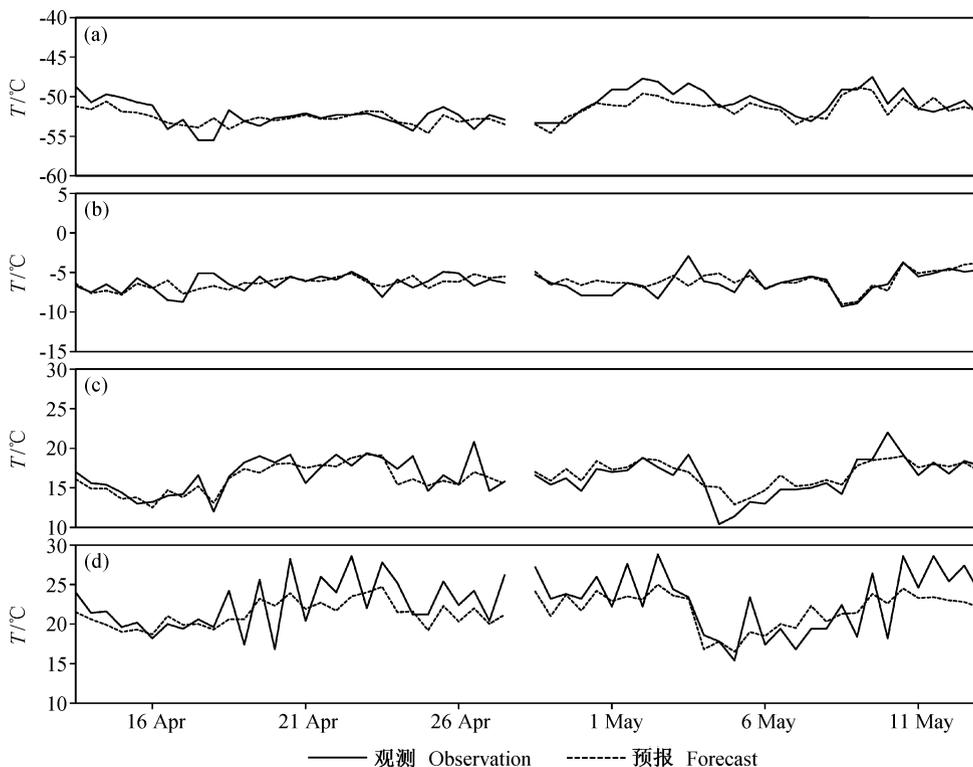


图 1 2004 年 4~5 月连平站 12 小时温度预报与实况: (a) 200 hPa; (b) 500 hPa; (c) 850 hPa; (d) 地面
Fig. 1 12-h temperature forecast and observation at Lianping station: (a) 200 hPa; (b) 500 hPa; (c) 850 hPa; (d) surface

表 1 连平站 12 小时、24 小时温度预报绝对平均误差表(单位: °C)

Table 1 Average absolute errors of 12-h and 24-h temperature forecast at Lianping station (units: °C)

| 预报 Forecast | 地面 Surface | 925 hPa | 850 hPa | 700 hPa | 500 hPa | 400 hPa | 300 hPa | 250 hPa | 200 hPa | 150 hPa | 100 hPa |
|----------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 12 h | 2.20 | 1.42 | 1.00 | 0.70 | 0.77 | 0.78 | 0.98 | 0.81 | 1.01 | 1.09 | 1.84 |
| 24 h | 2.32 | 1.57 | 1.13 | 0.81 | 0.83 | 0.87 | 1.02 | 0.86 | 1.18 | 1.19 | 1.70 |

表 2 各探空站 12 小时温度预报绝对平均误差(单位: °C)

Table 2 Average absolute errors of 12-h temperature forecast (units: °C)

| 站名 Station | 测站高度 Station altitude/m | 模式地形 Model altitude /m | 地面误差 Error on surface | 700 hPa 误差 Error at 700 hPa |
|---------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 连平 Lianping | 215 | 398 | 2.20 | 0.70 |
| 清远 Qingyuan | 19 | 89 | 1.94 | 0.81 |
| 阳江 Yangjiang | 22 | 19 | 1.21 | 0.65 |
| 香港 Hong Kong | 65 | 82 | 1.56 | 0.66 |

报曲线相对光滑些, 预报出大幅度的抖动仍然比较困难。其他各探空站的情况也类似(图略)。可以认为上述结果是比较有代表性的, 分析其他模式也有类似的情况。为什么中间层次的预报效果较好, 而地面和较高层次较差, 其机制目前还不是十分清楚, 可能是与中间层为无辐散层有关。Hart 等^[6, 7] 研究中尺度 Eta 模式的地面温度预报时发现, 模式预报的地面温度夜间有很强的偏冷趋势, 白天有由弱到强的偏暖趋势, 分析表明与地面辐射和(或)边界层参数化方案存在误差有关。另外的原因可能是探空站的高度与模式地形的不一致(如表 2)。表 2 的结果显示模式地形与测站地形高度差值越大, 预报的地面温度误差也越大, 而中高层的规律不明显。

2.2.2 其他要素预报评估分析

地面气压是一个比较综合的量, 它可以反映该站上空温度、湿度等的变化情况。地面气压还是一个非常重要的气象要素, 许多稳定度指数, 比如抬升凝结高度、对流有效位能、对流抑制能量等的计算都要涉及到它。对于地面气压来说, 模式地形与测站地形的不一致就是一个必定要考虑的问题, 这是被大家所认同的。

仍以连平站为例, 因为测站实际地形(215 m)比模式地形(398 m)要低, 模式预报的地面气压比实测值偏低(大约偏低 20 hPa), 所以必须进行地形订正。模式预报的地面气压经过地形订正后比较接近实际观测, 不仅变化趋势, 而且数值也是比较接

近的(图略), 这也说明模式预报能力是比较好的。经过真实地形订正后, 12 小时预报绝对平均误差为 1.01 hPa, 24 小时预报误差为 1.06 hPa, 而未经地形订正的误差分别是 21.25 hPa 和 21.31 hPa。

另外一个重要要素是风。从图 2 可以看出, 风的 u 分量预报也是中间层次(500 hPa 及邻近层)效果要好一些, 而地面风的预报仍是比较差的, 如 500 hPa 曲线, 模式预报非常好地拟合了观测值, 相关性比较好, 而地面风的预报值与观测值的相关性就比较差; v 分量也有类似的情况(图略)。因为地面风速值较小, 中高层风速值较大, 所以平均绝对误差并不能说明问题, 如果考虑到各层的平均风速值大小不同, 标准化后也可以明显看出中间层次的预报比较好, 地面预报比较差。

最后, 还有一个比较重要的要素——露点温度, 它与水汽的状况有关, 水汽量的预报比较困难, 一般来说低层的水汽量比较大, 中高层比较小, 并且变化幅度会比较大, 特别是华南地区。因为较低层次的水汽相对要重要些, 与上述类似, 同样分析了地面、925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 各层的露点温度预报与观测值(图略), 从平均绝对误差来看, 总体上, 925 hPa 和 850 hPa 预报效果最好, 地面和 700 hPa 以上层要差一些。这与其他要素略有不同, 因为高层(300 hPa 及以上)水汽稀薄, 如果把 850 hPa(或邻近层)看作水汽的中间层, 也可以有同样的结论。从实测露点温度

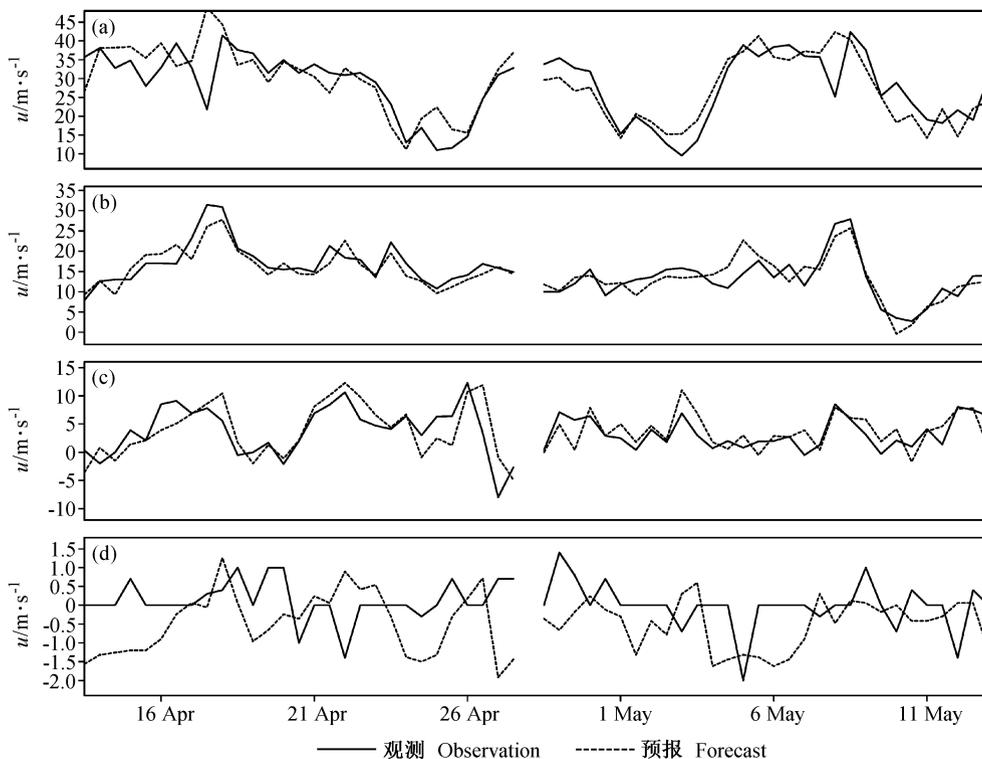


图 2 2004 年 4~5 月连平站 12 小时风(u 分量)预报与实况, 其他同图 1

Fig. 2 12-h u component forecast and observation at Lianping station, the others are the same as Fig. 1

的时间曲线图上, 确实可以看到 850 hPa 露点温度的变化是比较平缓的, 而地面和 500 hPa 要剧烈得多, 特别是 500 hPa。

2.3 稳定度指数的评估分析

上述主要是探空观测各要素的直接评估分析, 考虑到模式探空在强对流天气预报中的应用问题, 不稳定度预报能力的评估也是非常重要的。选取大气稳定度分析中常用的几个指数, 主要包括: 对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、 K 指数(KI)、沙瓦特指数(SI)、抬升凝结高度(LCL)、相对螺旋度(SRH)和强天气威胁指数(SWEAT)^[9]等。

这些指数分为两类分别进行评估: (1) 考虑中间层次要素的指数, 如 K 指数、沙瓦特指数和 SWEAT 指数。它们计算所用的变量主要是 850 hPa 到 500 hPa 的基本要素(u 、 v 、 T 和 Q)。 (2) 考虑了地面要素的指数, 如对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、抬升凝结高度(LCL)和相对螺旋度(SRH)。它们的计算需要有地面要素的参与。

2.3.1 考虑中间层次要素的指数

强对流天气预报业务中常用的 K 指数, 它主

要是考虑 850 hPa 与 500 hPa 的温度差值、850 hPa 露点温度以及 700 hPa 温度露点差。根据前文分析得知, 模式对这些量的预报能力是比较好的。图 3 所示为清远站 24 小时预报与相应实况的相关分布情况, 可以看出模式预报 K 指数是比较好的。其他指数(SI、SWEAT 等)情况类似, 说明模式对这些不稳定度指数确实有一定的预报能力。

2.3.2 考虑地面要素的指数

在许多情况下, 考虑地面要素的指数可以更加精确地反映大气的不稳定度状况, 比如 CAPE 指数, 许多研究表明 CAPE 指数在估计上升气流等方面较其他指数更加可靠, 因为它是包括地面层整气柱不稳定能量的积分效应, 而不仅是某一层次(如 K 指数)。

考虑了地要素的一些不稳定指数情况比较复杂。有的指数(如 SRH)对于地面要素的预报误差并不是十分敏感, 而有的指数(如 CAPE、CIN 和 LCL)则可能因地面要素的预报误差导致很大的偏差, 比如 CAPE 指数, 它对地面要素(温度、露点和地面气压)的预报误差非常敏感, 因为地面温度、

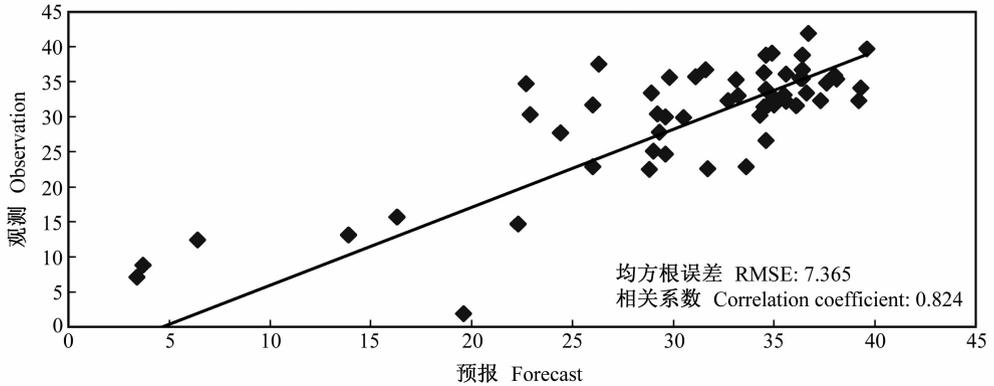


图3 清远站 24 小时 K 指数预报与实测值散布图

Fig. 3 The correlation between 24-h K index forecast and observation at Qingyuan station

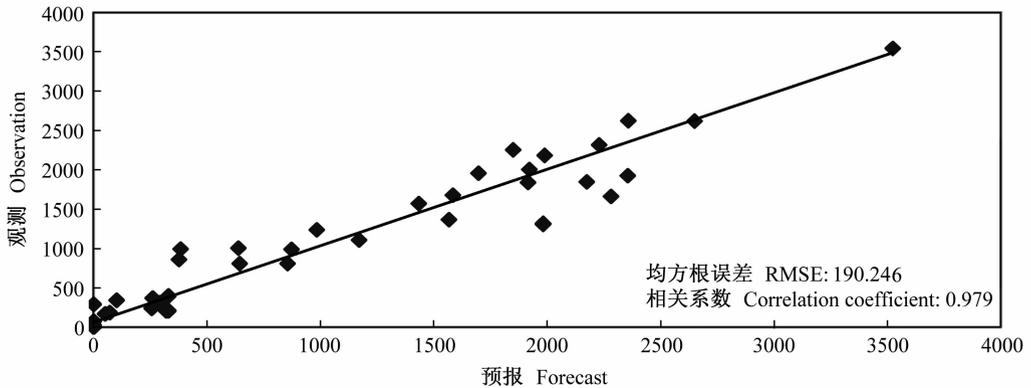


图4 清远站 24 小时 CAPE 指数预报与实测值散布图

Fig. 4 The correlation between 24-h CAPE (Convective Available Potential Energy) forecast and observation at Qingyuan station

露点和地面气压值直接决定抬升凝结高度和状态曲线, 所以这些指数一般需要用地面观测值(地面站或自动气象站的观测)进行订正。图4是经过地面要素订正后 CAPE 指数 24 小时预报值与观测值的相关分布图, 可见经过订正后的 CAPE 指数的预报效果是比较好的, 而未经订正的 CAPE 指数误差则比较大(图略)。

Hart 等^[6]的研究也发现了模式直接预报的 SRH 指数比 CAPE、CIN 指数更有效果, 并建议用地面观测订正 CAPE、CIN 指数。本文也评估了其他时段(如 5~6 月)的个例, 情况类似。上述的分析还是很初步的, 在个例应用中将进一步探讨。

3 模式探空应用研究

为了进一步检验模式探空的性能, 探讨模式探空在强对流天气预报中的应用前景, 选取中间时段的一个例子, 即 2004 年 4 月 26 日 00 时(国际协调

时, 下同)至 2004 年 4 月 27 日 00 时发生在珠江三角洲及其周边地区的一次强对流天气过程, 它是由弱冷空气与热带暖湿空气的适当配置引发的。

这一次强对流天气过程是带状中尺度对流系统向南移动过程中造成的。从云图(如图 5)分析得知: 整体云带南移过程中分为东、西(以珠江口作参考)两段。西段云带逐渐消散, 仅在 26 日 12 时左右在珠江口附近发展出强对流云团, 维持 3 小时左右后消失。这个过程以东段的云带为主, 南移过程中东段云带保持一定的强度, 并伴随有强对流云团发展。雷达回波(如图 6)、自动气象站观测及灾害性天气报告(图略)等资料也比较一致地表现出这一次强对流天气过程, 强降水主要在珠江口附近及其东侧地区。

模式总体上预报了雨带的南移, 逐时雨带的南移过程也是以东段为主, 而且形势预报也基本上正确(图略), 但是, 预报强对流天气的落区和强度与

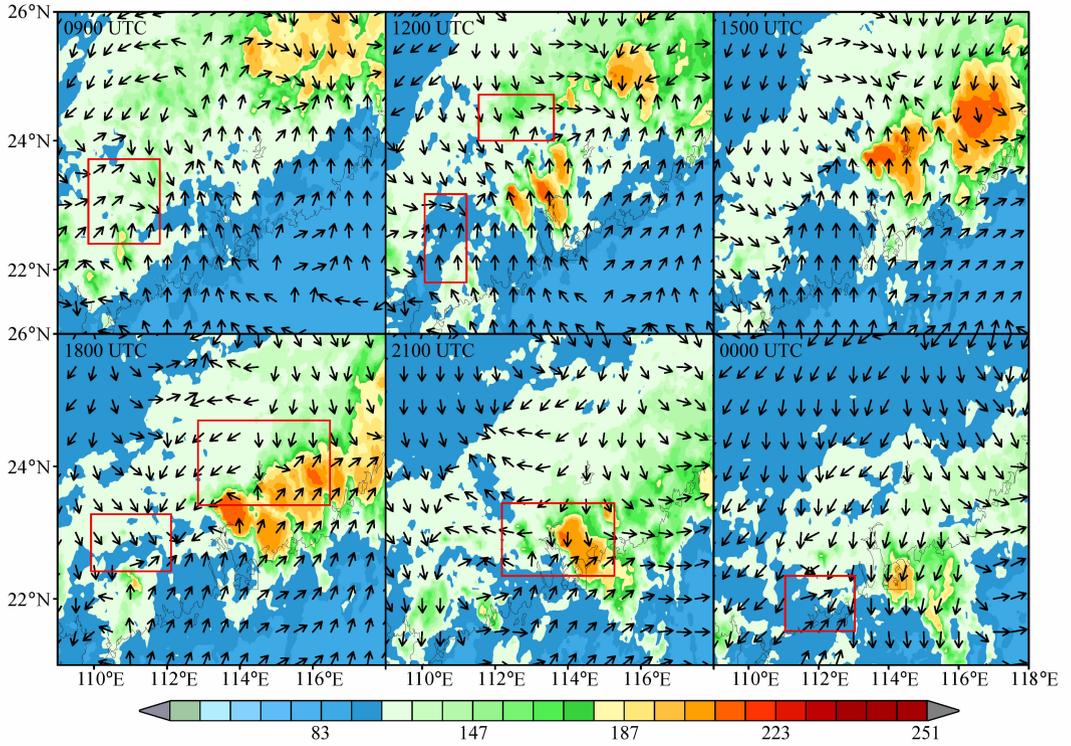


图5 静止红外云图(255级)与地面风(26日09时至27日00时),方框为切变扰动
Fig. 5 Geostationary operational environmental satellite infrared images (255 level) and surface wind (0900 UTC 26 Apr to 0000 UTC 27 Apr), shear is shown in boxes

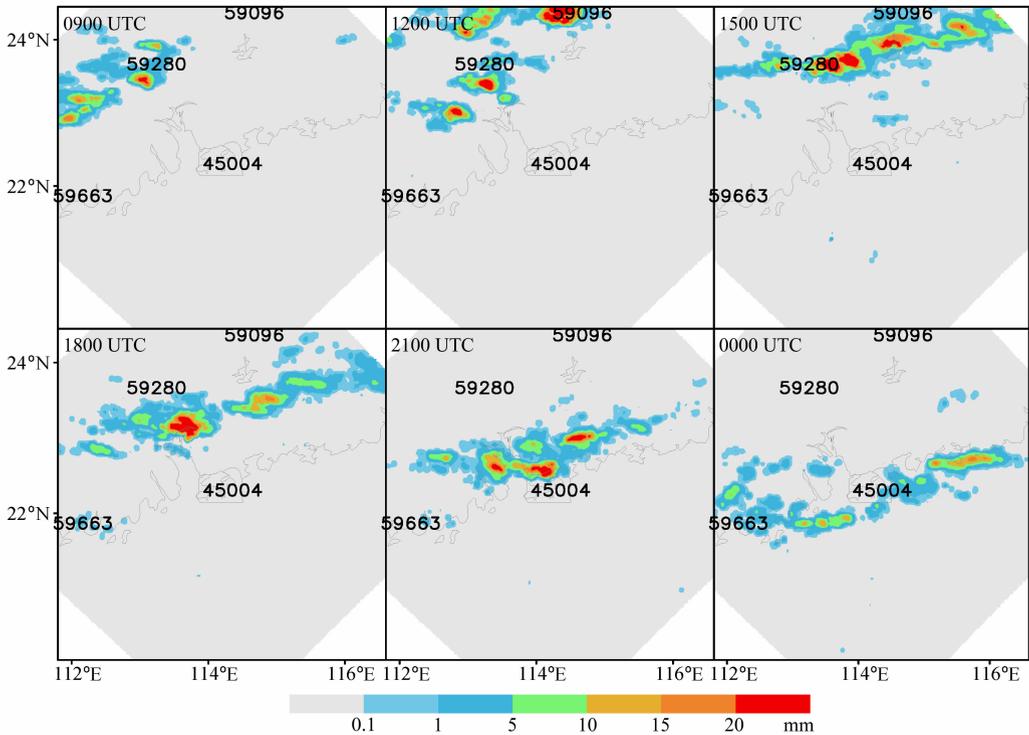


图6 26日09时至27日00时香港多普勒雷达1小时平均雨强图
Fig. 6 Hourly average rain rates from Hong Kong Doppler radar (0900 UTC 26 Apr to 0000 UTC 27 Apr)

实际观测还是有很大的差距,这是可以预计到的,从目前的技术水平看,数值模式直接预报强对流天气还是非常困难的,特别是由天气系统衍生的强对流,国内外许多研究均有类似的结论^[6, 10, 11],一方面是获得真实反映中小尺天气系统的精细初始场非常困难,另一方面则是因为模式技术,主要是物理过程还相当不完善,所以研究模式探空的预报能力和应用方法就非常有意义,在模式与观测的交互分析中加深对强对流天气系统变化机理的认识。下面以 CAPE 指数为例进行一些初步分析。

从图 7 可以看出,逐时 CAPE 指数预报与观测吻合得比较好,不仅是变化趋势很一致,就是数值大小也可以说基本一致。仔细分析也可以发现,逐时预报的 CAPE 指数,与这一次强对流天气过程,不仅落区,而且发生时间的指示意义都是非常好的。

(1) 清远站(图 7b)00 时至 08 时,CAPE 指数持续上升,08 时至 09 时维持在 2500 J/kg 的高值,

09 时至 14 时数值逐渐下降,而后迅速下降到零值。图 7b 可以看到 CAPE 逐时预报值与 12 小时间隔的观测值非常一致,逐时预报极大地丰富了实际观测不可能得到的变化细节,而这些细节正是强对流天气预报的关键。考察清远站及附近的自动站观测(图略)、卫星云图(图 5)和雷达回波(图 6)的演变情况,与 CAPE 指数指示的情况非常一致。由图 8 所示,由于从早晨、中午一直到傍晚前(08 时,北京时间 16 时),地面温度持续上升,虽然 850 hPa、500 hPa 等各高空层温度也有一定的升高,但总体上仍表现不稳定能量的急速增加,在局部南北风切变(如图 5 0900 UTC 分图方框所示,虽然总体南北风切变辐合带仍未到达,但自动站和地面站观测同时表明此时此地有局部切变,是可信的)的触发下发生强对流。09 时开始有明显的雷达回波,10 时自动站记录有降水,之后强对流云团向东南移动,11~12 时最为强盛(参考图 5 和图 6 的 1200 UTC),13

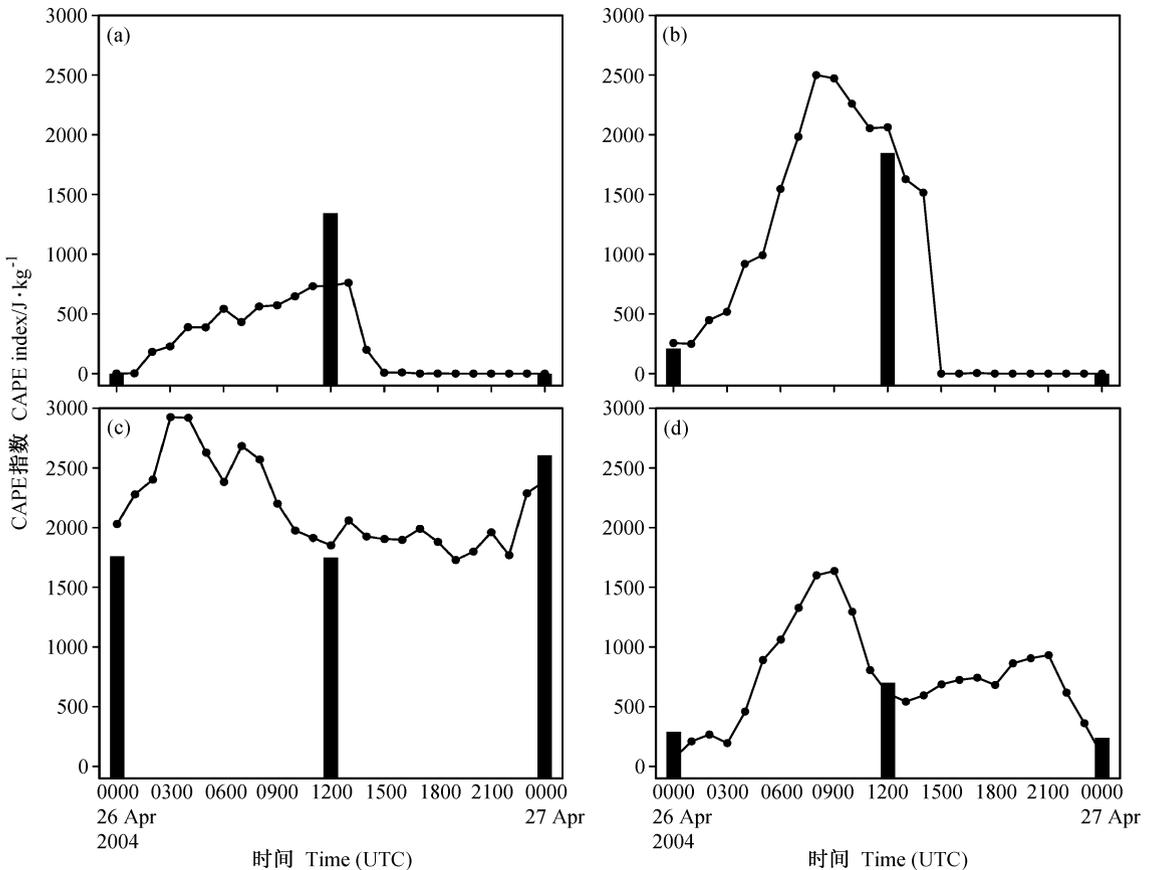


图 7 4 个探空站模式逐时预报(实线)与观测(条柱)的订正 CAPE 指数:(a)连平;(b)清远;(c)阳江;(d)香港

Fig. 7 Corrected CAPE index from hourly model forecast (line) and observation (bar) at four stations: (a) Lianping; (b) Qingyuan; (c) Yangjiang; (d) Hong Kong

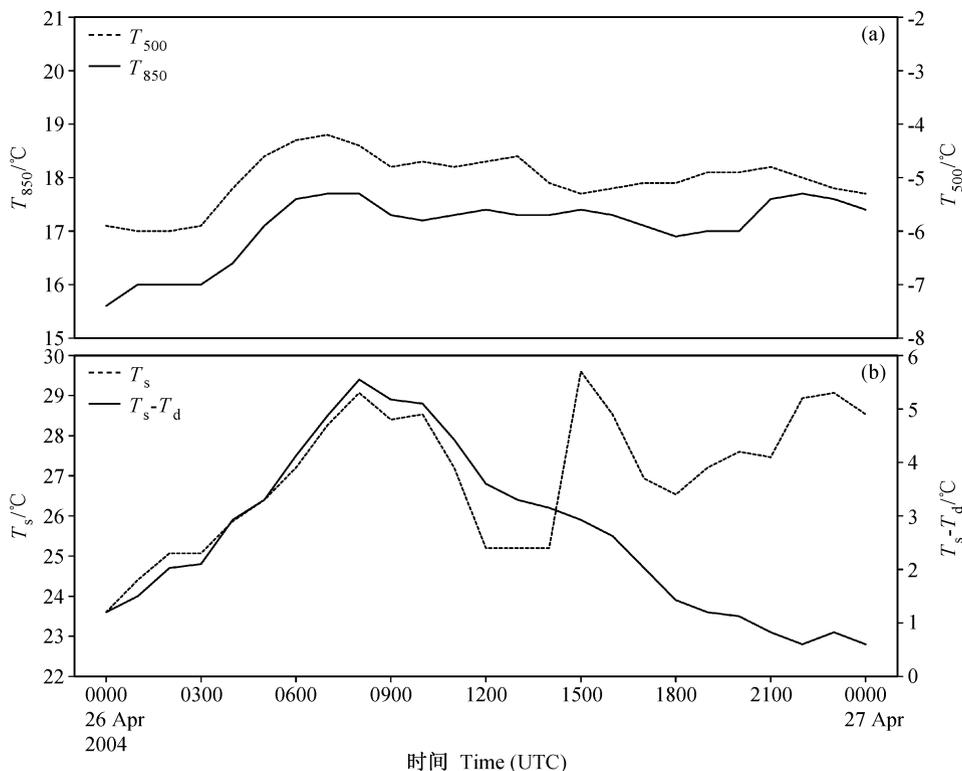


图 8 清远站逐时温度与温度露点差: (a)850 hPa 温度(T_{850})和 500 hPa 温度(T_{500}); (b)地面温度(T_s)和温度露点差($T_s - T_d$)

Fig. 8 Hourly temperature and dew-point deficit at Qingyuan station: (a) 850-hPa temperature (T_{850}) and 500-hPa temperature (T_{500}); (b) surface temperature (T_s) and dew-point deficit ($T_s - T_d$)

时迅速减弱消失。这可能是华南地区常见的午后强对流天气的机制之一。

(2) 连平站的 CAPE 指数 11 时左右才达到最高值(图 7a), 比清远站要晚; 13 时后 CAPE 迅速下降至零值, 与该地区的强对流天气也有很好的对应, 与清远站类似, 这里不再详细说明。

(3) 香港站的情况有些不同(图 7d)。图 7d 所示的 CAPE 指数有两个峰值, 08~09 时的峰值与清远站相类似, 这主要是因为白天加热使得地面温度升高所致, 但是这个时段香港及周边地区没有发生强对流天气, 因为南北切变辐合带远未到达, 没有触发机制。另一个峰值是 20~21 时, 它的主要原因并非地面温度的升高, 而是因为地面湿度的增加, 地面温度维持和高层温度下降所致(如图 9), 这时南北切变带已接近周边地区(如图 5 2100 UTC 分图的方框所示)。22~23 时, 香港地区发生强对流天气, 周边自动站普遍记录有强降水, 27 日 00 时后迅速减弱(如图 6, 限于篇幅只给出每 3 小时的情况, 若用逐时可以更清楚)。这可能是华南地区

常见的凌晨强对流天气的一种机制。

(4) 阳江站情况要复杂一些, 但总体上与香港站类似, CAPE 指数总体上也是以两个峰值为主——26 日午后的峰值和 27 日早晨的峰值(图 7c, 图没完整画出, 实际上 27 日 00 时后 CAPE 值是迅速下降)。与香港站类似, 阳江站在第二个峰值时, 即 27 日早晨峰值才有强对流天气与之对应, 出现峰值比香港站晚, 地面风切变 27 日 00 时左右到达(如图 5 中 0000 UTC 分图的方框所示)。而后, 27 日 01~02 时有强对流天气与之对应。

上述 4 个测站逐时 CAPE 指数的分析给了我们很大的启示。虽然, 目前数值模式直接预报强对流是困难的, 但是逐时预报提供的细节还是非常有意义的。12 小时间隔的探空观测是远远不足的, 如强对流天气系统, 一般只有几个小时的生命史, 探空观测的 CAPE 指数基本无法反映这一次强对流过程, 而订正后模式逐时预报的 CAPE 指数综合了地面温度、水汽、地面气压和高空各层温度, 较真实地反映不稳定能量的变化。2.3 节中长时间的

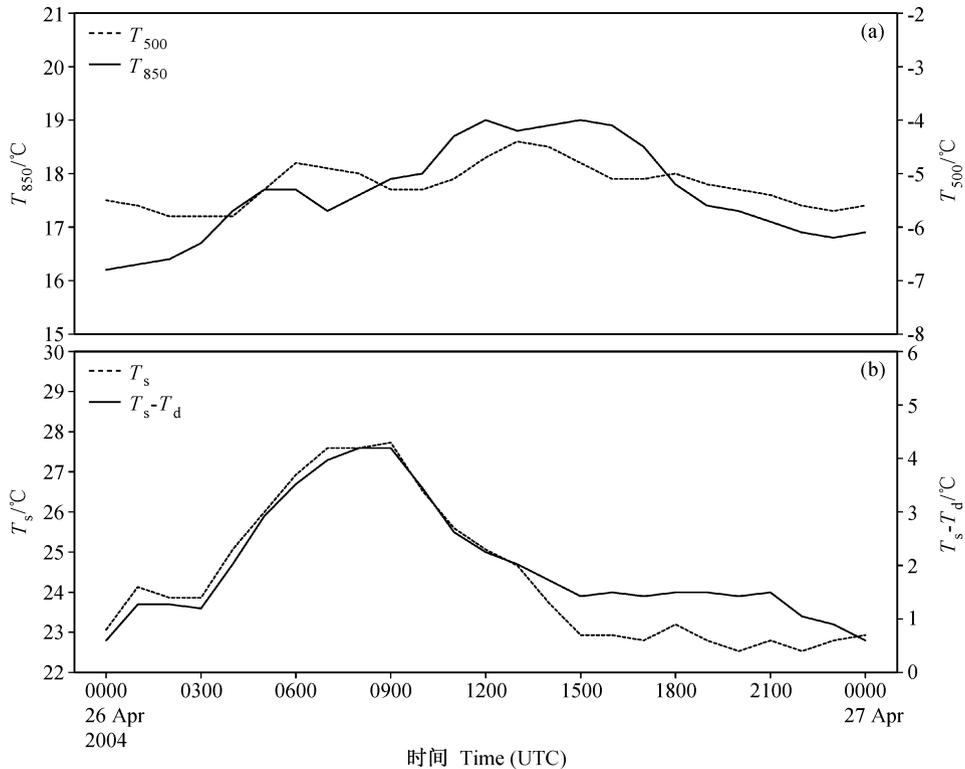


图9 同图8, 但为香港站

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for Hong Kong station

评估分析已表明其预报效果是比较好的, 这一次过程的分析进一步证实了这一点。比如上述4个测站逐时预报的CAPE指数, 应该说是基本可信的, CAPE值急速上升配合切变的触发作用, 开始发生强对流天气, 损耗不稳定能量, 而后CAPE迅速下降, 与雷达和卫星观测的情况非常一致。另外, 逐时模式探空还可以帮助我们揭示强对流天气的一些发生、发展机理, 如华南地区常见的午后强对流(这里以清远站为代表)和凌晨强对流(以香港站为代表)。上述分析可知, 午后强对流的一种可能机制是白天加热使得地面温度急速升高, 积累不稳定能量, 在一定的触发机制作用下发生强对流; 而凌晨强对流, 主要是低层增湿, 地面温度并没有升高, 高空温度一定程度下降而导致不稳定能量增加, 在有利的触发机制作用下发生的强对流。

上面的分析主要是CAPE指数单站的变化, 下面看CAPE指数的平面分布情况(这是模式探空的一优势, 可以比实际观测的水平分辨率高得多)(图10)。

限于篇幅, 这里重点论述26日18时至27日

00时珠江口附近的强对流天气演变情况。

(1) 26日18时, 广州市及其东侧附近有一强对流系统正在发展(如图6的1800 UTC分图), 而这时的CAPE差值场(如图10a)则指示出这一区域已为CAPE值减小区, 在其南面珠江口两侧各有一CAPE增值区, 预示未来强对流系统可能在这些地方发展, 与接下来2~3小时雷达和自动站观测到的演变情况非常一致(参考图6的2100 UTC分图)。

(2) 26日21时, 珠江口东西两侧有正在发展的强对流雨团(如图6的2100 UTC分图), 同样, 这时的CAPE差值场(如图10b)指示这些区域为CAPE值减小区, 而在其南面香港岛附近和其西南面阳江东北侧附近各有一CAPE增值区, 预示未来强对流系统可能在这些地方发展, 与接下来2~3小时雷达和自动站观测到的演变情况非常一致(参考图6的0000 UTC分图)。

(3) 27日00时, 与上述类似, 分析CAPE差值场(如图10c)可看到, 阳江附近区域为CAPE主要增值区, 预示未来强对流系统可能在这些地方发

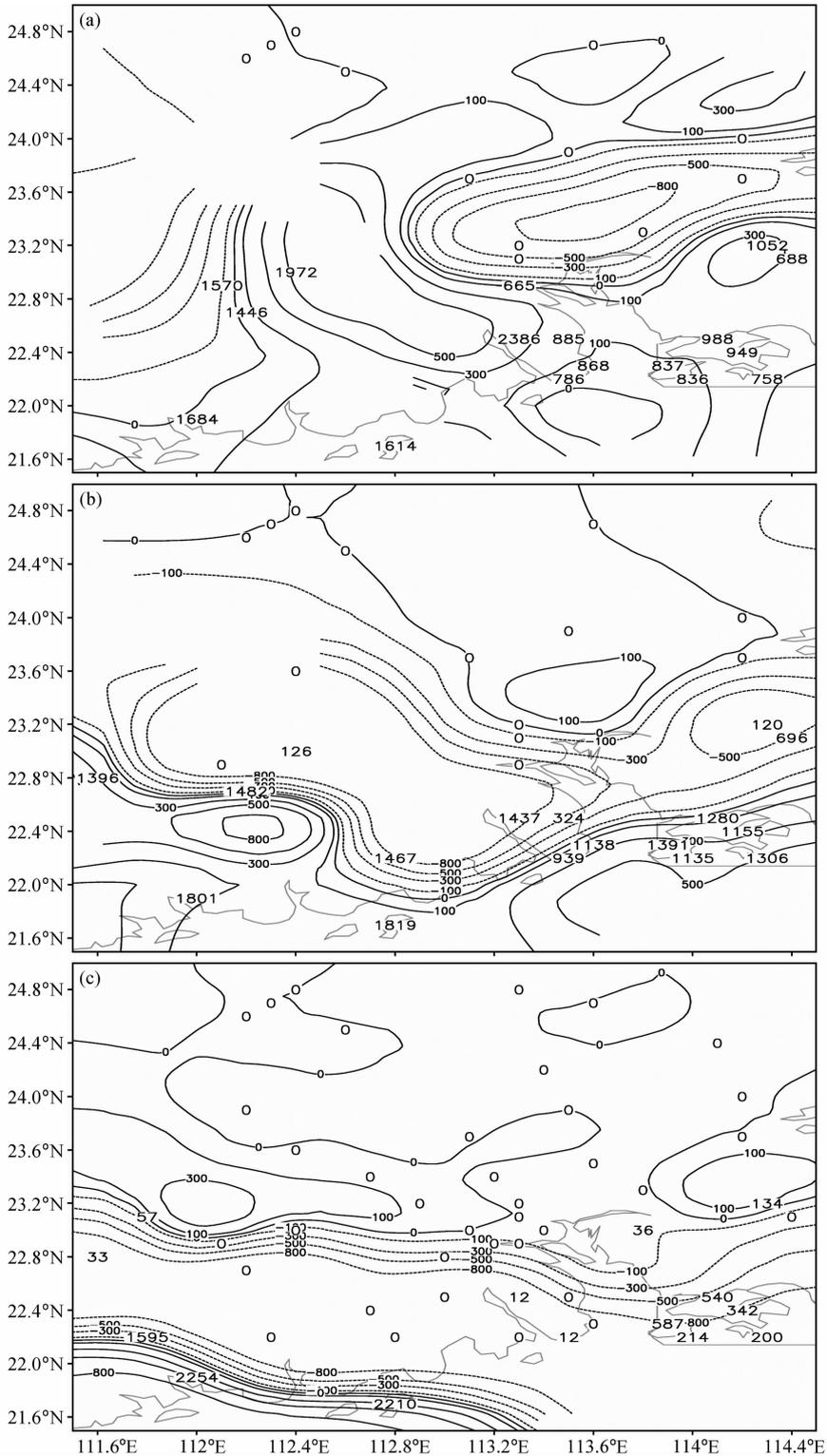


图 10 订正的 CAPE 指数预报差值场(单位: J/kg)。(a)等值线: 18 时减 15 时; 数字: 18 时 CAPE 值。(b)等值线: 21 时减 18 时; 数字: 21 时 CAPE 值。(c)等值线: 24 时减 21 时; 数字: 24 时 CAPE 值
Fig. 10 Deviation of corrected CAPE index from model (units: J/kg). (a) Contour line: 1800 UTC—1500 UTC; digital number: value of CAPE at 1800 UTC. (b) Contour line: 2100 UTC—1800 UTC; digital number: value of CAPE at 2100 UTC. (c) Contour line: 2400 UTC—2100 UTC; digital number: value of CAPE at 2400 UTC

展,与接下来的雷达观测非常一致(图略)。

上述主要是 CAPE 指数的一些初步分析,其他指数也有指示意义,不过只考虑中间层次(一般 850 hPa 至 500 hPa)要素的一些不稳定指数(如 K 指数等)对于强对流天气的落区和发生时间指示比较笼统,精确程度还不够高(图略)。

4 结论与讨论

由于探空观测资料时间、空间密度的不足,以及可能存在的质量问题,关注模式探空的评估分析及其应用方法的研究是非常重要的。本文在广州区域中心业务中尺度模式的基础上,选取华南地区强对流天气高发季节(4~5月)的资料,进行了一些初步的评估分析,在具体的强对流天气个例上研究其可能的应用方法,讨论其应用前景。

从模式探空的直接评估分析中发现,地面和较高层次的预报要素误差比较大,而中间层次比较小,比如温度预报,700 hPa 的效果是最好的,而地面温度的预报最差。从不稳定度指数评估分析可以发现,仅考虑中间层次的不稳定度指数性能比较稳定,而考虑地面要素的一些不稳定指数对预报误差比较敏感,用地面观测订正后其质量有很大提高。

临近预报和甚短时预报是强对流天气最主要的两种预报方法,临近预报一般是在时效内(0~2小时)采用线性外推的方法。因为没有考虑物理原因,所以对于那些新生、消亡和生命周期较短的系统,往往不能成功,而高时间、高空间分辨率的模式探空有可能从动力、热力的机理上改进预报,甚至有可能在一定程度上延长它们的预报时效。如以清远站和香港站为例,探讨华南地区常见的午后强对流和凌晨强对流的一种可能机制时,发现逐时预报的 CAPE 指数变率对未来 2~3 个小时发生的强对流天气确实有良好的指示意义。甚短时预报(0~12小时预报)一般要在事件发生前作出,难度就更大,考虑动力、热力的变化机理就更为重要了,评估分析表明仅考虑中间层次的不稳定指数有较好的预报能力,并且可以有较长的预报时效(因不需要地面要素订正,所以预报时效可以较长),这一点对甚短时预报来说可能是比较重要的。

另外就是关于中尺度数值模式在强对流天气预报中的应用问题。对于地形衍生的强对流天气已经

有比较多的成功例子^[12],也积累了一些比较有效的办法,但是对于天气系统衍生的强对流天气则比较复杂,这不仅是精细的初值问题,还涉及到次网格参数化等问题。张大林^[11]认为“即使我们有完善的初值,中尺度天气系统的可预报性仍是有限的。这是因我们所使用的数值微分方程是一套含有若干近似和假设的平均方程,许多次网格现象都是由经验参数化”。所以在目前情况下,应用模式探空和地面观测,并结合使用雷达回波、卫星云图可能是一种比较有效的办法。

参考文献 (References)

- [1] 康宁,李德友.非探空站点资料的获取及应用.气象,1996,22(9):53~55
Kang Ning, Li Deyou. Data application and acquiring at none sounding station. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1996, 22(9): 53~55
- [2] 王笑芳,丁一汇.北京地区强对流天气短时预报方法的研究.大气科学,1994,18(2):173~183
Wang Xiaofang, Ding Yihui. Study on method of short-range forecast of severe convective weather in Beijing area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, 18(2): 173~183
- [3] 王沛霖.台风影响期间珠江三角洲局地强风暴的大暴雨发生的环境条件.热带气象学报,1995,11(4):375~378
Wang Peilin. Environmental conditions of geneses of severe local storm and heavy rain in the Pearl river delta during periods of typhoon influences. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, 11(4): 375~378
- [4] Qu Xiaobo, Julian Heming. The impact of dropsonde data on forecasts of hurricane Debby by the meteorological office unified model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(6): 1029~1044
- [5] Holland G J, McGeer T, Youngren H. Autonomous aerossondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(12): 1987~1998
- [6] Hart R E, Forbes G S, Grumm R H. The use of hourly model-generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part I: Initial assessment in forecasting warm-season phenomena. *Wea. Forecasting*, 1998, 13: 1165~1185
- [7] Hart R E, Forbes G S. The use of hourly model-generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part II: Initial assessment in forecasting nonconvective strong wind gusts. *Wea. Forecasting*, 1999, 14: 461~469
- [8] 闫敬华.广州中尺度模式局地要素预报性能分析.应用气象学报,2001,12:21~29
Yan Jinghua. Analysis on the element prediction performance

- of the Guangzhou mesoscale NWP model. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12**: 21~29
- [9] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 2003. 291~301
Shou Shaowen, Li Shenshen, Yao Xiuping. *Mesoscale Meteorology* (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 2003. 291~301
- [10] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. 大气科学, 1998, **22**(4): 548~561
Zhang Dalin. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**(4): 548~561
- [11] Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. NCAR auto-nowcast system. *Wea. Forecasting*, 2003, **18**(4): 545~561
- [12] K A 布朗宁. 现时预报. 周凤仙, 马振骅, 李泽椿, 译. 北京: 气象出版社, 1986. 230~255
Browning K A. *Nowcasting* (in Chinese). Zhou Fengxian, Ma Zhenhua, Li Zechun, Translate. Beijing: China Meteorological Press, 1986. 230~255