

魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 2011. 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, 16 (6): 697 - 706. Wei Dong, Sun Jisong, Lei Lei, et al. 2011. Reliability analysis of quantitative applications of sounding constructed from data detected by microwave radiometer and wind profiler [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 697 - 706.

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

魏东 孙继松 雷蕾 杨波

北京市气象台, 北京 100089

摘 要 使用 2007、2008 年 5~9 月北京南郊观象台的微波辐射计探测的温湿度数据和风廓线仪探测的水平风数据构造特种探空资料, 将其与常规探空进行统计和对比分析, 探讨了它们定性和定量应用的可靠性。结果表明, 特种探空的各要素与常规探空具有较一致的变化趋势, 定性分析使用时可有效弥补常规探空时间分辨率低的不足。但是, 在定量使用过程中, 对不同要素需区别对待: (1) 特种探空的温度和经向风、纬向风的一致性好、误差较小, 具有较好的定量使用价值; 由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大, 造成特种探空的露点温度与常规探空的一致性较差、偏大明显; 定量使用时需要订正。(2) 不同时段和不同高度各要素的表现不同, 08 时 (北京时间, 下同) 和 20 时的一致性好于 02 时和 14 时, 这可能与样本数的差异和要素的日变化特征等因素有关; 露点温度和纬向风的平均误差随高度增加明显增大, 温度和经向风的平均误差随高度增加变化不大。(3) 由特种探空得到的热力、动力稳定度参量, 除粗理查逊数外, 其他参量与常规探空计算得到的参量具有较一致的变化趋势, 在定性使用上是有价值的。在定量使用时, 需要视参量包含的温度、湿度、风等基本要素的误差程度而定。其中, 与湿度相关的参量, 如 CAPE (对流有效位能)、 $\Delta\theta_{se}$ (500 hPa 与 850 hPa 的假相当位温 θ_{se} 之差)、K 指数、湿度垂直梯度和温度露点差等参量存在不同程度的误差, 而仅与温度廓线、低空风廓线相关的参量, 如垂直温度梯度、0 °C 和 -20 °C 层高度、低空垂直风切变等参量的绝对误差很小, 具有很好的定量使用价值。

关键词 微波辐射计 风廓线 探空 稳定度参数

文章编号 1006-9585 (2011) 06-0697-10 **中图分类号** P44 **文献标识码** A

Reliability Analysis of Quantitative Applications of Sounding Constructed from Data Detected by Microwave Radiometer and Wind Profiler

WEI Dong, SUN Jisong, LEI Lei, and YANG Bo

Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

Abstract Using the conventional sounding data at Beijing meteorological station (ID: 54511) during May to September in 2007 and 2008, the reliability of quantitative applications of the sounding constructed from the temperature and humidity data detected by microwave radiometer and the wind data obtained by wind profiler (hereinafter referred to as special sounding) at the same station was analyzed. Results showed that the special and conventional

收稿日期 2010-02-23 收到, 2011-09-10 收到修定稿

资助项目 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

作者简介 魏东, 男, 1980 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事天气气候研究。E-mail: wei_dong888@163.com

sounding had a more consistent trend of any element, since the special sounding could effectively compensate for the low temporal resolution of conventional sounding in qualitative analysis. But in the quantitative use, the different performance of different elements should be paid attention to and the systematic bias should be revised. Firstly, the error of humidity of microwave radiometer was greater, which resulted in the poor consistency and the greater value of the dew-point temperature of special sounding, while the small mean error and the slightly high value of the temperatures. The error of zonal wind detected by wind profiler increases as the height increases, but the error of meridional wind is smaller. So, the temperature and wind profile had a better quantitative value relatively. Secondly, the performance differences of various elements and heights between conventional sounding and the special sounding were very different. The consistency at 0800 LST and 2000 LST was better than that at 0200 LST and 1400 LST. The average errors of dew-point temperature and zonal wind increased significantly as the altitude increased, but those of the temperature and meridional wind had a little change. Finally, for the physical parameters calculated from the two kinds of sounding, the most had a consistent trend between two kinds of sounding except the Richardson index and $\Delta\theta_{se}$, so they had a good qualitative value. However, for quantitative use, the error of the base elements must be considered. The humidity-related parameters had different degrees of error, such as CAPE (Convective Available Potential Energy), $\Delta\theta_{se}$ (difference of pseudo-equivalent potential temperature between 850 hpa and 500 hpa), K index, vertical gradient of humidity and the dew-point temperature difference. But, the parameters only related to the temperature or the low-level wind profile had high quantitative values because of the smaller absolute errors, such as the vertical temperature gradient, 0°C and -20°C layer height, low-level vertical wind shear.

Key words microwave radiometer, wind profiler, sounding, stability parameter

1 引言

探空观测是监测本地上空大气热、动力结构的重要手段。早在 1977 年, 叶笃正 (1977a, 1977b) 就研究了探空资料的应用。由于我国的常规探空观测站空间分布稀疏, 日观测次数少, 资料往往不能很好地捕捉产生暴雨、冰雹、雷暴大风等强天气的中小尺度天气系统。研究表明, 如果提高探空观测的时空分辨率, 能极大的提高强天气的监测预警能力和预报准确率。美国 NOAA 的观测研究表明, 增加非实时探空资料能够提高飓风路径预报的精度 (Har et al., 1998; Har and Forbes, 1999), 廖晓农等 (2007) 研究表明增加 14 时 (北京时间, 下同) 探空有利于提高对流性天气的短时预报准确率。近年来, 新型探测资料在研究城市短时暴雨、冰雹等强对流天气的中尺度热动力学结构等方面, 取得了一些有价值的成果 (孙继松等, 2006; 孙继松和杨波, 2008; 孙继松和王华, 2009)。但是, 由于缺乏对新型探测资料的可靠性进行系统性、长时间的科学检验, 造成它们的定量使用受到了严重制约。另一方面, 有研究表明 (郑良杰, 1989; 刘红亚等, 2005),

探空气球的漂移也使得常规探空资料本身存在误差, 并通过资料同化过程对中尺度数值预报产生影响。因此, 如何采用新的探测仪器获取更高分辨率的探空资料成为解决上述问题的主要途径。在国外, 对新型探测技术的研究已有多, 用于垂直方向温湿探测的微波辐射计和风廓线探测的风廓线仪经过研究和试验后, 已经大批的装配, 这些新型的自动探测系统能够 24 小时不间断地工作, 提供高分辨率的探测资料。为了更好地了解新型探测资料的性能, 以便将这些资料更好地用于实际预报业务和数值预报, 很有必要分析其定量使用的可靠性。

本文使用长时间序列的北京南郊观象台常规探空资料, 对比分析与微波辐射计和风廓线构造的特种探空资料的关系, 研究特种探空数据的定性和定量应用的可靠性, 并讨论误差分布及造成明显误差的可能因素。

2 仪器、资料和方法

2.1 微波辐射计简介

北京南郊观象台的微波辐射计主要由温、压、湿探头, 测量云底高度和云底温度的红外仪等组

成。该仪器共生成 3 类数据, 分别是: (1) 电压值, (2) 各个通道的亮温值, (3) 由神经网络反演得到的从地面到 10 km 的温度、湿度、水汽和液态水廓线 (Westwater et al., 1999; 刘红燕等, 2007)。

微波辐射计提供的物理量值包括: 仪器所在点的每分钟的温度、气压、相对湿度、云底温度、总水汽、总液态水以及是否发生降水; 由地面到 10 km 高度 (47 层) 的垂直温度廓线, 水汽密度廓线, 相对湿度廓线以及液态水廓线等 4 种廓线。资料获取的时间分辨率为每分钟 1 次。

除了直接使用上述数据外, 还可以计算对流有效位能 (CAPE)、 K 指数等一些热力稳定度物理量, 能够更好地描述本地上空大气状态 (李耀东等, 2004; 刘健文等, 2005)。

2.2 风廓线仪简介

风廓线仪是上视、晴空探测脉冲多普勒雷达, 采用微波遥感技术应用多普勒原理不间断地提供可探测高度范围内的大气水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数等随高度的分布。如果与声一无线电探测系统 (RASS) 相结合, 还可以测量大气温度。其详细的探测原理可参考相关文献 (张霁琛, 2000)。

南郊观象台风廓线仪数据的时间分辨率为每 6 分钟 1 次, 最低探测高度为 120 m, 最高有效探测高度为 16 km。垂直方向共有 55 层。

高时间分辨率的高空风连续变化对中低层中小尺度系统监测提供了独特的探测手段, 预报员对风廓线资料的使用已有一定的积累 (刘淑媛等, 2003)。除直接应用探测数据外, 还可以计算风切变、相对风暴螺旋度等物理量, 3 部或更多风廓线仪的数据组网则可计算出涡度、散度和垂直速度等物理量, 可用于天气系统演变的进一步诊断分析 (章国材等, 2007)。

2.3 微波辐射计与风廓线数据构造特种探空

将微波辐射计的温湿数据与风廓线仪的水平风数据相结合可得到逐 6 分钟的实时探空。具体方法为: (1) 利用微波辐射计的温度和相对湿度计算出露点温度; (2) 利用微波辐射计的地面气压、温度和垂直廓线数据计算出各层的气压; (3) 将风廓线仪的水平风数据按高度插值到各气压层。

相对于常规放球探空, 这两者相结合构造的

探空具有时间分辨率高、资料获取及时等优势, 下文称之为特种探空。

2.4 资料与分析方法

使用 2007、2008 年 5 月 1 日至 9 月 30 日北京南郊观象台 (站号: 54511) 的 1 日 2 次或 4 次 (主汛期为 1 日 4 次, 02 时 (北京时间, 下同)、08 时、14 时、20 时; 其他月份为 1 日 2 次, 08 时和 20 时) 的常规探空数据; 与探空气球探测时间对应的特种探空数据。总样本数为 932 个, 其中 02 时和 14 时样本数各 160 个, 08 时和 20 时样本数各 306 个。

由于微波辐射计探测数据的最高层次为 10 km, 气压在 300 hPa 左右, 故文中分析要素包括: 1000、925、850、700、500、400、300 hPa 共 7 个标准等压面的温度、露点温度、风的 U 分量 (纬向风) 和 V 分量 (经向风)。

按照探测时间, 将两种探空资料分为 02 时、08 时、14 时、20 时和所有时次构造 5 个序列, 分析两种探空各要素的关系; 详细对比两种探空各要素的偏差随高度的分布情况; 分析由两种探空要素计算的物理参量的关系。

2.5 热动力物理参量

利用常规和特种探空资料分别计算了 13 种热动力物理参量: 对流有效位能 CAPE、 K 指数、 0°C 层高度 Z_0 、 -20°C 层高度 Z_{-20} 、500 hPa 与 850 hPa 的假相当位温 θ_{sc} 之差 $\Delta\theta_{sc}$ 、500 hPa 温度露点差 $(T-T_d)_{500}$ 、850 hPa 温度露点差 $(T-T_d)_{850}$ 、低层 (925 hPa 至 700 hPa) 垂直风切变 S_{low} 、中层 (700 hPa 至 500 hPa) 垂直风切变 S_{mid} 、粗理查逊数 $1B_1$ 、粗理查逊数 $2B_2$ 、500 hPa 与 850 hPa 温度差 ΔT 、500 hPa 与 850 hPa 露点温度差 ΔT_d 。

3 特种探空与常规探空各要素的相关性分析

将 02 时、08 时、14 时、20 时和所有时次的特种探空与常规探空的温度、露点温度和 U 、 V 风分量分别求相关, 相关系数分布如图 1 所示。

4 个时次各层温度的相关系数 (图 1a) 均大于 0.7, 相关性远超过 0.001 的显著性水平, 所有时次样本的相关系数都大于 0.75。相关系数低层

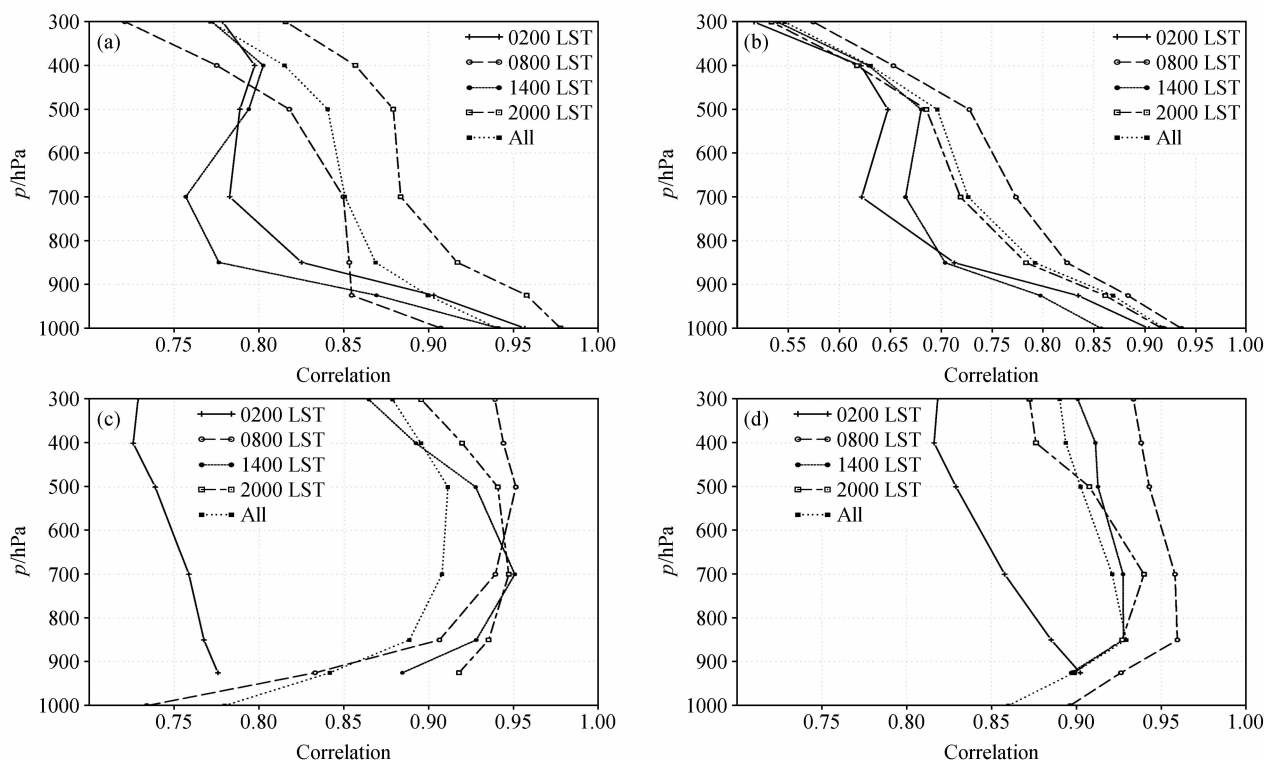


图1 特种探空与常规探空各要素不同层次的相关系数: (a) 温度; (b) 露点温度; (c) 纬向风; (d) 经向风

Fig.1 Correlations of (a) temperature, (b) dew-point temperature, (c) zonal wind, and (d) meridional wind between conventional sounding and special sounding

大, 中高层小, 基本呈随高度增大而减小的趋势, 表明特种探空的温度与常规探空的一致性较好, 低层更明显。4 个时次中, 20 时的相关系数最高, 14 时和 02 时的相对较低。

两种探空的露点温度相关系数 (图 1b) 在 0.5 至 0.95 之间, 明显低于温度的相关系数。不同时次的相关系数数值比较接近, 且随高度增加而减小。700 hPa 以下的相关系数均大于 0.6, 超过 0.001 的显著性水平。4 个时次中, 08 和 20 时的相关性较好, 02 时和 14 时的相关性略差。

两种探空的纬向风和经向风的相关系数 (图 1c 和 1d) 整体较高, 低层的相对较低, 中高层的相关系数接近, 多数大于 0.85。4 个时次中, 02 时的相关系数明显低于其他时次, 但各层相关系数仍大于 0.7。

综合来看, 两种探空的各要素相关性整体较好, 但不同要素、不同高度和不同时次的相关性存在差异。4 个要素中, 温度和风的相关性相对较好, 露点温度的相关性最差。温度、露点温度的相关性低层优于高层, 边界层内的温湿资料具

有较高的定性应用价值, 对流层中高层的风廓线资料的可靠性优于低层。4 个时次中, 各要素 08 时和 20 时的相关性较好, 02 时和 14 时的相对较差, 这可能与样本数的多寡有关, 同时也与这些要素的日变化特征有关。

4 特种探空与常规探空的偏差分析

将常规探空作为实况观测资料, 计算特种探空各要素的平均误差如图 2。

由图 2a 可见, 500 hPa 及以下各层温度的平均误差比较接近, 均为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 左右, 随高度增加变化不明显, 500 hPa 以上的平均误差逐渐加大。14 时的温度平均误差明显大于其他几个时次的。所有时次的平均误差均为正值, 且高层较大, 表明特种探空的温度平均略偏高, 且高层偏大较为明显。

各层露点温度的平均误差 (图 2b) 均为正值, 随高度增加而明显增大, 850 hPa 以上的平均误差大于 4°C , 这表明特种探空的露点温度比常

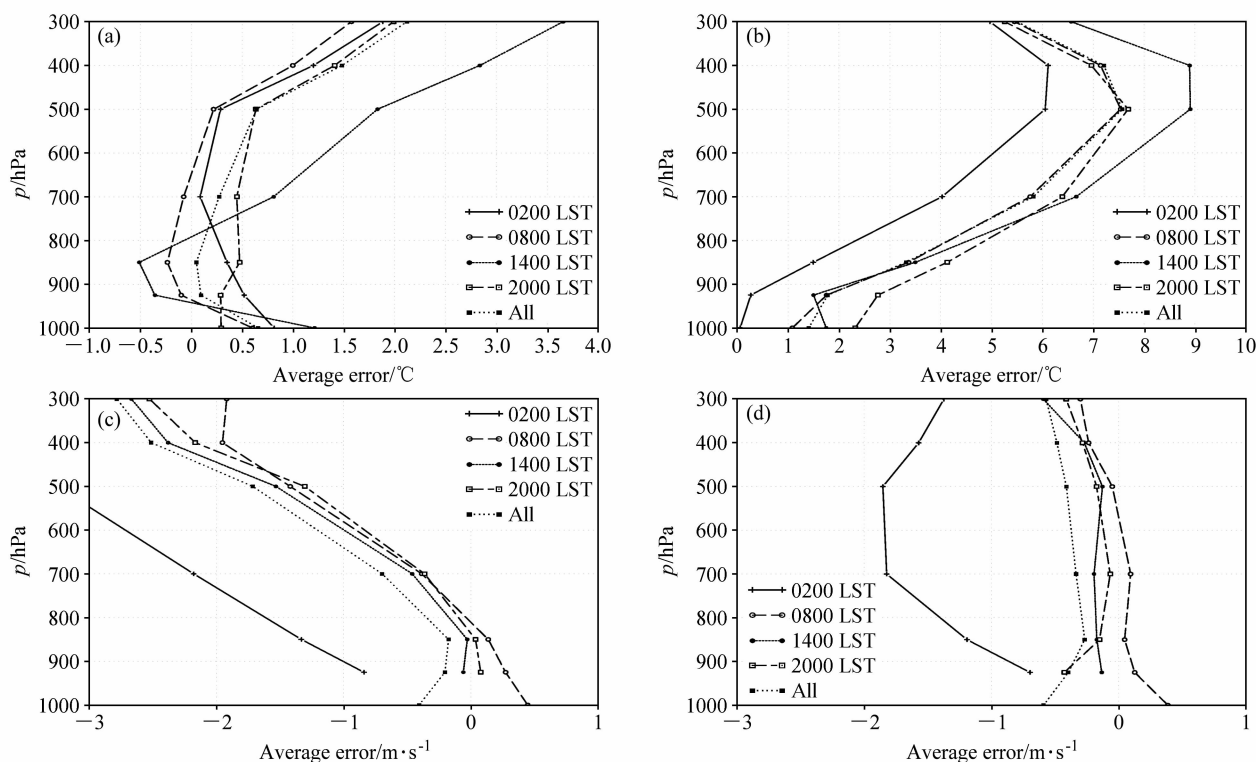


图2 特种探空与常规探空各要素不同层次的平均误差: (a) 温度; (b) 露点温度; (c) 纬向风; (d) 经向风

Fig. 2 Average errors of (a) temperature, (b) dew-point temperature, (c) zonal wind, and (d) meridional wind between special sounding and conventional sounding

规探空的平均偏大, 且高层偏大更明显。结合温度的平均误差分布说明, 特种探空的温度露点差平均偏小, 高层偏小更明显, 即微波辐射计探测的相对湿度平均偏大, 且高层偏大更明显。02 时的平均误差明显小于其他时次。

特种探空的纬向风平均误差 (图 2c) 为负值, 平均误差的绝对值高层大、低层小, 随高度增加呈线性增大趋势, 这可能与纬向风本身随高度明显增大有关。与纬向风速的量级相比而言, 一般情况下, 并不影响它的定量应用价值。02 时的平均误差明显大于其他时次。

由风廓线仪探测的经向风的平均误差 (图 2d) 整体较小, 平均误差多为负值, 即特种探空的经向风平均偏小, 其中 02 时的偏小更明显。平均误差随高度增加变化不大。

综上, 特种探空的温度和经向风的平均误差较小, 随高度增加变化不大; 露点温度与常规探空的偏差较大, 随高度增加偏差更明显。温度和露点温度平均偏高, 露点温度偏高明显; 经向风和纬向风平均偏小, 纬向风偏小更明显。这表明,

特种探空的西风分量略偏小或东风分量略偏大, 经向风与常规探空相当。

5 特种探空与常规探空数据的对比分析

前文给出的统计结果在一定程度上说明了两种探空各要素的关系, 但造成两者差别的因素还需使用实际值直接对比分析。

图 3 和图 4 分别给出了 140 天 02 时的特种探空与常规探空的温度、露点温度、纬向风和经向风及其差随高度的分布。

由图可看出, 两种探空的温度 (图 3a) 随高度同时增大或减小, 分布趋势一致, 多数情况下温度等值线几乎重合。温度偏差随高度的分布 (图 4a) 表现为, 绝大多数样本在各层次偏差接近 0°C , 部分样本在部分层次的正、负偏差较明显, 最大正偏差为 7°C 左右、最大负偏差为 -4°C 左右。正偏差多数在 450 hPa 以上, 而负偏差多在 450 hPa 至 600 hPa 之间。这表明特种探空的高层

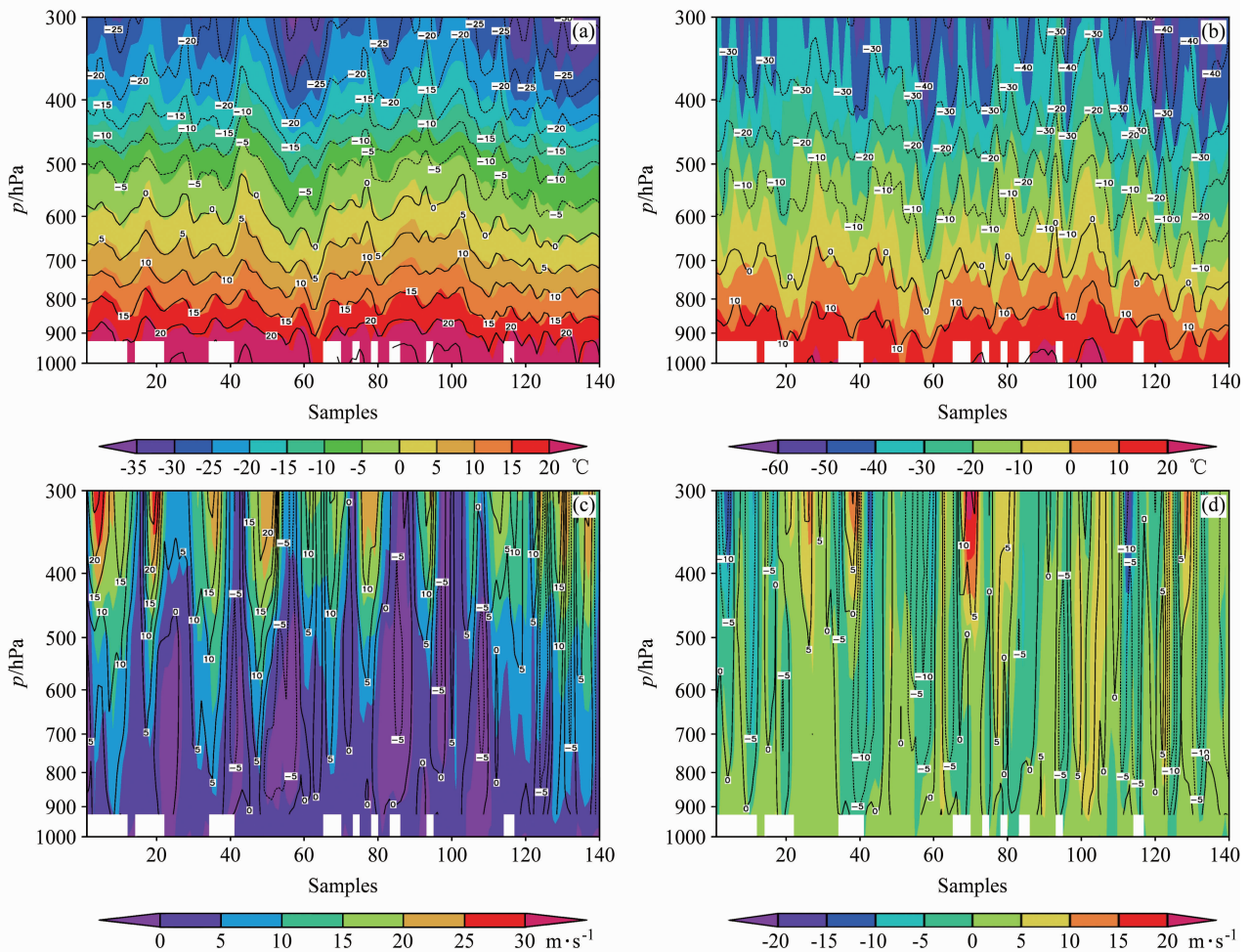


图3 140天02时特种探空(等值线)与常规探空(阴影)的各要素值随气压的分布:(a)温度,单位:°C;(b)露点温度,单位:°C;(c)纬向风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;(d)经向风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 (a) The temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) dew-point temperature ($^{\circ}\text{C}$), (c) zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and (d) meridional wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of special sounding (contour) and conventional sounding (shaded) at 0200 LST of 140 days

温度有时偏高,中层温度有时偏低。查阅对应时间的天气或天空状况发现,大部分明显偏高时都有雷阵雨发生,而温度偏低时多有轻雾或低云出现。

从两种探空的露点温度随气压的分布(图3b)看,两者几乎同时增大或减小,有较一致的变化趋势。从两种探空露点温度偏差的分布(图4b)可看出,两者偏差明显,正偏差多、负偏差极少,这表明特种探空露点温度常明显大于常规探空的露点温度,其中,明显偏差主要集中于中高层,750 hPa以下的偏差相对较小。与当时的天气对照发现,特种探空露点温度明显偏大时,一般伴有降水、中低云或轻雾,但也有个别时候是晴空。

从两种探空的纬向风(图3c)及偏差(图4c)的分布可看出,两者具有一致的变化趋势,大部分样本的偏差为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,部分时次的偏差明显、为负值,且多位于500 hPa以上。查看具体数值发现,形成明显负偏差多是由于特种探空为东风,而常规探测为西风,即纬向风风向相反的缘故。明显偏差出现时为轻雾或晴天,并无强对流或降水发生,造成这种风向相反的原因有待进一步研究。

两种探空经向风的变化趋势(图3d)非常一致,绝大多数样本的偏差(图4d)接近零,少数偏差明显,正负偏差都有出现,负偏差的次数更多且偏差值更大,明显偏差主要出现在500 hPa以上。造成负偏差的多数情况为特种探空是北风、

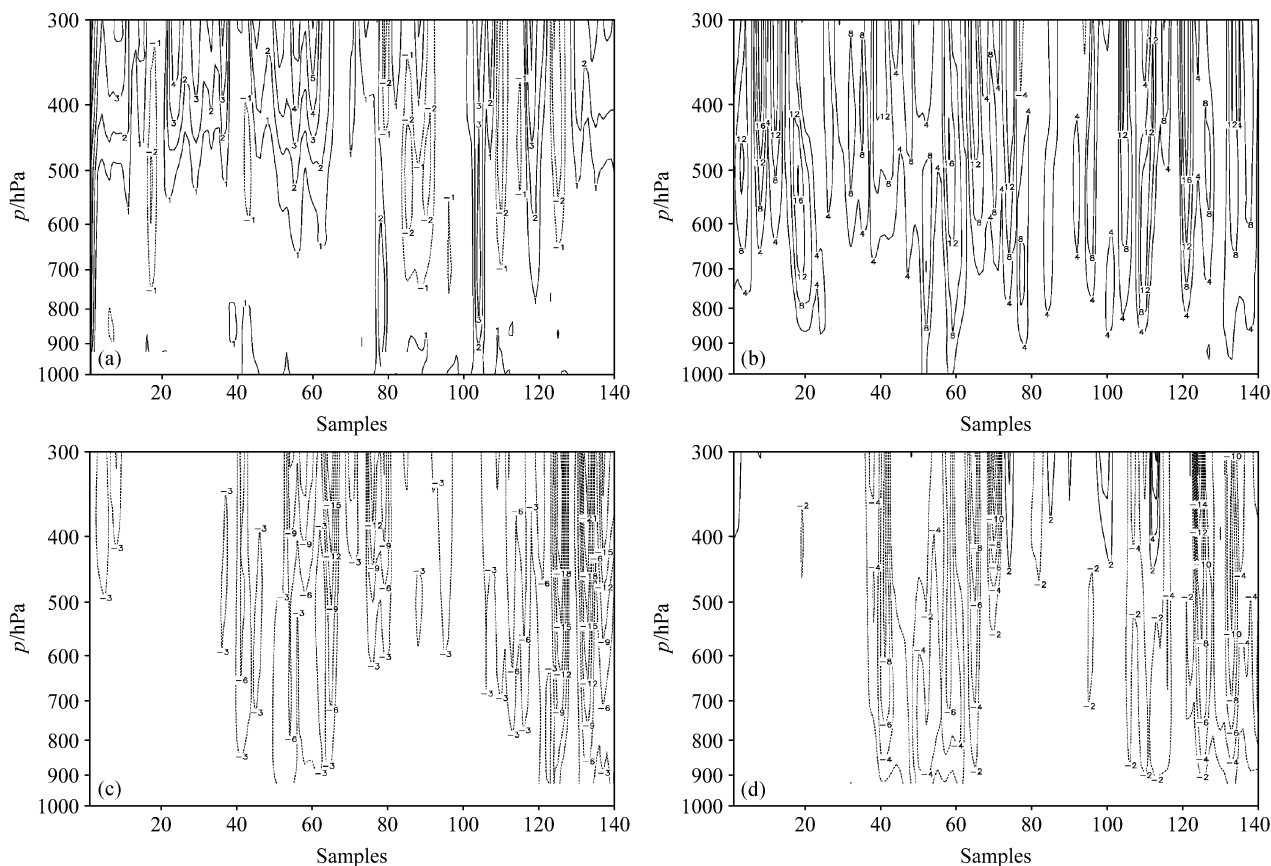


图4 140天02时特种探空与常规探空各要素值的差随气压的分布 (a) 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; (b) 露点温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; (c) 纬向风, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) 经向风, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4 The difference of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) dew-point temperature ($^{\circ}\text{C}$), (c) zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), and meridional wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) between special sounding and conventional sounding at 0200 LST of 140 days

常规探空为南风。正偏差出现次数少, 也多是由于两种探空的经向风风向相反造成。出现明显偏差时并无强天气出现。

08时、14时和20时两种探空各要素的对比结果与02时的类似, 这表明一般情况下特种探空的大多数要素和常规探空接近, 且变化趋势非常一致, 这与上文的相关性分析结果相符, 即特种探空可定性使用。从定量应用方面来看, 各要素的偏差特点不同, 温度偏差有正有负, 露点温度的偏差绝大多数为正, 明显偏差都集中于中高层, 低层(尤其700 hPa及以下层次)的湿度偏差较小。在温湿度出现较大偏差时多有降水、轻雾或低云出现。风的多数偏差出现在风廓线仪探测与常规探测的风向相反时, 风廓线仪探测有偏东、偏北的倾向。这与平均误差的统计分析结果一致。在定量使用时对不同要素和不同层次需区别对待,

中高层的露点温度或相对湿度几乎没有定量使用价值。

6 特种探空物理量参数的定量分析

利用探空资料计算得到的各种热力、动力稳定度参数是判断对流环境、对流性质的重要手段(雷蕾等, 2011), 下面分析由不同时次的特种探空和常规探空数据计算的13个物理量的关系。

6.1 相关性分析

从两种探空各物理量的相关系数(表1)可看出, 除两个粗理查逊数和02时的中层垂直风切变外, 其他11个物理量的相关系数较大, 相关性超过了0.01的显著性水平。其中, 0°C 层和 -20°C 层高度的相关系数最大, 其他表征大气层结热力性质的 K 指数、 $\Delta\theta_{\text{se}}$ 等的相关性也较高, 但14时

的 CAPE 相关性低于其他 3 个时次。对于表征大气动力特性的参数,除 02 时的中层垂直风切变外,其他时次的高低空垂直风切变的相关性很好。这表明,两种探空计算的温湿参量的演变趋势非常一致,风廓线仪探测的水平风与常规探空的有较好的一致性。由 CAPE 和风切变组合得到的粗理查逊数的相关系数较小,一致性差。

6.2 平均误差分析

表 2 给出了特种探空的 13 个物理量参数的平均误差和误差百分比。特种探空的 CAPE 比常规探空平均偏小约 2.5%,其中,20 时的明显偏小(偏小约 21.5%),02 时、08 时和 14 时平均偏大,02 时偏大最明显(比常规探空的 CAPE 偏大约 16%)。这表明,从凌晨(02 时)至傍晚(20 时),特种探空的 CAPE 由明显偏大逐步转为明显

偏小,这可能与大气热力条件的日变化有关:当太阳辐射加热较弱时,层结的热力不稳定性也相对较弱,而特种探空的 CAPE 偏大;午后到傍晚的热力不稳定增强时,特种探空的 CAPE 反而偏小。

一天 4 个时次中,特种探空的 K 指数均明显偏大,其中 08 时和 20 时偏大最明显、偏大近 70%;02 和 14 时偏大相对较小、平均偏大 35%左右,由特种探空计算的 K 指数基本无法用于日常业务中的定量分析。

与常规探空的 500 hPa 温度露点差相比,特种探空平均偏小近 30%,4 个时次的平均偏差接近。850 hPa 温度露点差也整体偏小,14 时偏小最明显,08 和 20 时的次之。这表明,在大多数情况下,特种探空整层湿度比常规探空明显偏大。

表 1 特种探空与常规探空计算的 13 个物理量的相关系数

Table 1 Correlations of the 13 physical parameters between special sounding and the conventional sounding

	CAPE	K	$(T-T_d)_{500}$	$(T-T_d)_{850}$	ΔT	ΔT_d	$\Delta \theta_{se}$	Z_0	Z_{-20}	S_{low}	S_{mid}	B_1	B_2
02 时	0.76	0.71	0.72	0.76	0.61	0.67	0.64	0.74	0.87	0.65	0.11	0.74	0.07
08 时	0.75	0.88	0.68	0.84	0.71	0.58	0.74	0.79	0.88	0.82	0.84	0.34	0.12
14 时	0.36	0.77	0.66	0.72	0.56	0.61	0.55	0.69	0.86	0.84	0.72	0.33	0.06
20 时	0.71	0.76	0.73	0.79	0.80	0.71	0.70	0.87	0.91	0.88	0.73	0.15	0.43
所有	0.66	0.81	0.70	0.80	0.70	0.66	0.70	0.82	0.90	0.80	0.72	0.20	0.19

表 2 特种探空物理量的平均误差及误差百分比

Table 2 Average errors and error percentage of physical parameters calculated from special sounding

	02 时		08 时		14 时		20 时		所有	
	平均误差	误差百分比	平均误差	误差百分比	平均误差	误差百分比	平均误差	误差百分比	平均误差	误差百分比
CAPE	82.1	16.1%	26.1	10.6%	20.3	3.5%	-112.2	-21.5%	-10.8	-2.5%
K	7.5	32.6%	9.5	68.5%	7.1	37.9%	10.9	71.2%	9.2	55.1%
$(T-T_d)_{500}$	-5.2	-27.9%	-6.3	-31.3%	-6.3	-25.9%	-5.0	-26.2%	-5.7	-28.1%
$(T-T_d)_{850}$	0.1	0.7%	-3.6	-27.1%	-3.8	-36.0%	-2.0	-15.8%	-2.5	-21.0%
ΔT	-1.3	5.1%	-0.2	1.0%	1.8	-7.1%	-0.6	2.4%	-0.2	0.9%
ΔT_d	-4.0	-10.9%	-2.4	-7.5%	-4.3	-11.0%	-2.3	-7.1%	-3.0	-8.6%
$\Delta \theta_{se}$	-2.7	56.2%	-2.7	-219.5%	-1.4	60.4%	-3.1	873.0%	-2.6	283.6%
Z_0	-189.7	-4.3%	-47.6	-1.2%	-34.9	-0.8%	-65.3	-1.6%	-76.1	-1.8%
Z_{-20}	60.2	0.8%	52.6	0.7%	297.0	3.9%	132.1	1.8%	120.4	1.6%
S_{low}	1.0	31.4%	0.2	6.0%	0.2	5.3%	-0.1	-1.6%	0.2	7.0%
S_{mid}	-0.3	-13.4%	-0.9	-29.0%	-0.7	-25.0%	-0.9	-27.1%	-0.8	-25.6%
B_1	73.8	16.2%	57.9	30.8%	-46.9	-10.7%	-388.2	-63.9%	-103.5	-25.0%
B_2	1683.9	472.8%	873.4	411.7%	1088.3	179.6%	989.1	197.6%	1088.5	274.7%

注:CAPE 平均误差单位为 $J \cdot kg^{-1}$, K 、 $(T-T_d)_{500}$ 、 $(T-T_d)_{850}$ 、 ΔT 、 ΔT_d 平均误差单位为 $^{\circ}C$, $\Delta \theta_{se}$ 平均误差单位为 K , Z_0 、 Z_{-20} 平均误差单位为 m , S_{low} 、 S_{mid} 平均误差单位为 $10^{-3}s^{-1}$, B_1 、 B_2 平均误差单位为 $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ 。

高低层的温差 (ΔT) 表征了垂直温度梯度, 负值越大表明热力不稳定性越强。从数值上看, 所有时次的平均误差较小, 为 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 14 时偏小, 02 时、08 时和 20 时的偏大, 02 时偏大最多、偏大近 5%。这种表现与 CAPE 相似, 白天热力条件较好时, 特种探空表现的不稳定性偏弱, 而入夜后热力条件变差, 特种探空表现的不稳定性偏强。

特种探空 4 个时次的高低空露点温度差 (ΔT_d) 代表了湿度的垂直梯度, 与常规探空相比, 特种探空的湿度垂直梯度平均偏小 7%~10%。

$\Delta\theta_{se}$ 常用来判断大气层结的位势稳定度大小。特种探空的 $\Delta\theta_{se}$ 明显大于常规探空, 20 时偏大 8 倍多, 08 时的偏大 2 倍多。

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层的高度是判断冰雹形成环境的重要参量。特种探空与常规探空的两个特性层高度较为接近, 特种探空的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度平均略偏低, 而 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度平均略偏高。

对于低层垂直风切变, 特种探空整体平均偏大约 7%。其中, 02 时偏大较明显, 比常规探空偏大 30% 左右, 08 和 14 时偏大 5% 左右, 20 时与常规探空的最接近。

对于中层垂直风切变, 特种探空平均偏小 25% 左右, 4 个时次中, 02 时偏小 13.4%, 明显小于其他 3 个时次; 对流层中层的垂直风切变比低空的偏差更大, 是由于风廓线误差随高度增加造成的。

由 CAPE 和低空垂直风切变计算的粗理查逊数 (B_1), 特种探空明显比常规探空平均偏小, 但 4 个时次表现明显不同, 20 时偏小最明显, 偏小近 64%, 14 时偏小 10.7%; 而 02 和 08 时偏大, 08 时偏大 30% 左右, 02 时偏大 16%。对于对流层中层的粗理查逊数 (B_2), 特种探空显著偏大, 比常规探空平均偏大近 3 倍。其中, 02 和 08 时偏大最多, 偏差量是常规探空的 4 倍多; 14 时和 20 时偏大近 2 倍。

综上分析, 特种探空与常规探空相比, 综合表征大气层结热动力特征的两个粗理查逊数的差别最大, 其次是 $\Delta\theta_{se}$, 其平均误差达到了常规探空的数倍, 不具定量使用价值; 与湿度有关的物理参量如 K 指数、各等压面上的温度露点差等的

相对误差较大, 定量使用时需要进行大幅订正; 仅与温度、低空风廓线相关的参量, 如温度垂直梯度、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度、低空风切变等具有很好的定量使用价值。

7 结论

本文使用 2007 年和 2008 年 5~9 月北京南郊观象台的微波辐射计探测的温湿度和风廓线仪探测的水平风数据构造特种探空, 与该站的常规探空资料共计 932 个样本进行统计和对比分析, 探讨特种探空资料定性和定量应用的可靠性。得到以下结论:

(1) 微波辐射计探测的温湿度和风廓线仪探测的水平风与常规探空具有较一致的变化趋势, 在定性分析使用时, 可以有效弥补常规探空时空分辨率低的不足。但是, 在定量使用过程中, 需要对各种要素区别对待。

(2) 特种探空的温度廓线和风廓线具有较好的定量使用价值。各要素中, 温度和风的偏差相对较小; 由于微波辐射计探测的相对湿度误差较大, 造成特种探空的露点温度与常规探空的一致性相对较差, 偏大明显。

(3) 不同时次、不同高度各要素的表现不同, 08 时和 20 时的一致性好于 02 时和 14 时, 其中, 02 时风的一致性最差, 这一现象可能与样本数的差异、要素日变化特征等因素有关。露点温度和纬向风的平均误差随高度增加明显增大; 温度和经向风的平均误差随高度增加变化不大。

(4) 由特种探空得到的热力、动力稳定度参量, 除粗理查逊数外, 其他参量与常规探空计算得到的参量具有较好的一致性变化趋势, 在定性使用上是有价值的。在定量使用时, 需要视这些参量包含的温度、湿度、风等基本要素的误差程度而定。其中, 与湿度相关的参量, 如 CAPE、 $\Delta\theta_{se}$ 、K 指数、湿度垂直梯度、等压面上的温度露点差等参量的绝对值存在不同程度的误差, 而仅与温度廓线、低空风廓线相关的参量, 如垂直温度梯度、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度、低空垂直风切变等参量的绝对误差很小, 具有很好的定量使用价值。

参考文献 (References)

- Hart R E, Forbes G S, Grumm R H. 1998. The use of hourly model generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part I: Initial assessment in forecasting warm season phenomena [J]. *Weather and Forecasting*, 13: 1165–1185.
- Hart R E, Forbes G S. 1999. The use of hourly model generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part II: Initial assessment in forecasting nonconvective strong wind gusts [J]. *Weather and Forecasting*, 14: 461–469.
- 雷蕾, 孙继松, 魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别 [J]. *气象*, 37 (2): 136–141. Lei Lei, Sun Jisong, Wei Dong. Discriminant of convective weather types in summer using sounding data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37 (2): 136–141.
- 李耀东, 刘健文, 高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究 [J]. *气象学报*, 62 (4): 401–406. Li Yaodong, Liu Jianwen, Gao Shouting. 2004. On the progress of application for dynamic and energetic convective parameters associated with severe convective weather forecasting [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 401–406.
- 廖晓农, 俞小鼎, 谭一洲. 2007. 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*, 33 (3): 28–32. Liao Xiaonong, Yu Xiaoding, Tan Yizhou. 2007. Improvement of convective weather forecasting with enhanced 1400 BST sounding data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (3): 28–32.
- 刘红亚, 薛纪善, 沈桐立, 等. 2005. 探空气球漂移及其对数值预报影响的研究 [J]. *应用气象学报*, 16 (4): 518–526. Liu Hongya, Xue Jishan, Shen Tongli, et al. 2005. Study on sounding balloon drifting and its impact on numerical predictions [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16 (4): 518–526.
- 刘红燕, 李炬, 曹晓彦, 等. 2007. 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*, 22 (2): 222–229. Liu Hongyan, Li Ju, Cao Xiaoyan, et al. 2007. Characteristics of the atmosphere remote sensed by the ground-based 12-channel radiometer [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 22 (2): 222–229.
- 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础 [M]. 北京: 气象出版社, 75pp. Liu Jianwen, Guo Hu, Li Yaodong, et al. 2005. The Basis of Calculation of Physical Parameters Used in the Weather Forecast and Analysis [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 75pp.
- 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 2003. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系 [J]. *热带气象学报*, 19 (3): 285–290. Liu Shuyuan, Zheng Yongguang, Tao Zuyu. 2003. The analysis of the relationship between pulse of LLJ and heavy rain using wind profiler data [J]. *Journal of tropical meteorology (in Chinese)*, 19 (3): 285–290.
- 孙继松, 王华. 2009. 重力波对一次雹暴天气过程的影响 [J]. *高原气象*, 28 (1): 165–172. Sun Jisong, Wang Hua. 2009. The impact of gravity wave on a hailstorm weather process evolution [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (1): 165–172.
- 孙继松, 王华, 王令等. 2006. 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*, 30 (2): 221–234. Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 221–234.
- 孙继松, 杨波. 2008. 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*, 32 (6): 1352–1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1352–1364.
- Westwater E R, Han Y, Irisov V G, et al. 1999. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16: 805–818.
- 叶笃正. 1977a. 探空资料的应用 (一) [J]. *气象*, 3 (11): 5–7. Ye Duzheng. 1977a. Application of sounding data I [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 3 (11): 5–7.
- 叶笃正. 1977b. 探空资料的应用 (二) [J]. *气象*, 3 (11): 21–23. Ye Duzheng. 1977b. Application of sounding data II [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 3 (11): 21–23.
- 张霭琛. 2000. 现代气象探测 [M]. 北京: 北京大学出版社, 289–298. Zhang Aichen. 2000. The Detection of Modern Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: Press of Peking University, 289–298.
- 章国材, 矫梅燕, 李延香, 等. 2007. 现代天气预报技术和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 89–95. Zhang Guocai, Jiao Meiyun, Li Yanxiang, et al. 2007. The Technology and Methods of Modern Weather Forecast [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 89–95.
- 郑良杰. 1989. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟 [M]. 北京: 气象出版社, 5–12. Zheng Liangjie. 1989. Diagnosis and Simulation of Meso-Scale Weather System [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 5–12.