

基于珠峰区域北斗探空与 L 波段探空数据对比分析

格桑次旺¹, 达确¹, 旦增伦珠², 久美南加¹

1. 西藏自治区日喀则市定日县气象局, 西藏 定日 858200

2. 西藏自治区气象局, 西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/EAE.2026040025

摘 要 : 为掌握高空探测资料观测精度, 科学评估北斗探空系统在高空气象探测中的业务适用性, 本文选取2025年1–7月定日县高空观测站北斗探空与 L 波段探空同步观测资料, 综合运用偏差分析、Pearson 相关分析等方法, 对比分析两种探测方式下在各规定等压面的温度、风速、风向等数据差异, 结果表明: 北斗导航探空系统与 L 波段探空系统温度、风速数据一致性较高, 对应 Pearson 相关系数分别为0.999714、0.9791, 风向 Pearson 相关系数为0.8598。两套探测系统温度一致性最优, 风速次之, 而风向相关性较弱。相较于传统 L 波段探空, 北斗卫星导航探空系统抗干扰能力突出, 在复杂气候条件、复杂地形地貌之下探测稳定性与数据可靠性更优, 可满足定日县高空气象业务需求, 为定日县乃至藏西高原区高空气象观测提供强有力的数据支撑。

关 键 词 : 北斗探空; L 波段探空; 数据; 差异; 定日县

Based on the Beidou Sounding Data And L-Band Sounding Data from the Everest Region comparative Analysis

Gesang Ciwang¹, Da Que¹, Danzeng Lunzhu², Jumei Nanjia¹

1. Meteorological Bureau of Dingri County, Shigatse City, Xizang Autonomous Region, Dingri, Xizang 858200

2. Xizang Autonomous Region Meteorological Bureau, Lasa, Xizang 850000

Abstract : To understand the observation accuracy of high-altitude detection data and scientifically evaluate the operational applicability of the Beidou sounding system in high-altitude meteorological detection, this paper selects the synchronous sounding data of Beidou sounding and L-band sounding at Dingzhen County High-altitude Observation Station from January to July in 2025. By comprehensively applying deviation analysis and Pearson correlation analysis methods, the differences in temperature, wind speed, wind direction and other data on each prescribed isobaric surface under the two detection methods are compared and analyzed. The results show that the temperature and wind speed data of the Beidou navigation sounding system and the L-band sounding system are highly consistent, with corresponding Pearson correlation coefficients of 0.999714 and 0.9791, and the Pearson correlation coefficient of wind direction is 0.8598. The temperature consistency of the two detection systems is the best, followed by wind speed, while the correlation of wind direction is relatively weak. Compared with the traditional L-band sounding, the Beidou satellite navigation sounding system has outstanding anti-interference ability.

Keywords : Beidou sounding; L-band sounding; data; difference; Dingri County

引言

21 世纪以来, 随着科学技术的突飞猛进, 各种现代化技术手段在大气探测领域得以广泛应用, 助力大气探测效率与质量实现了显著提升。北斗卫星导航探空即为其中之一, 并凭借其高精度定位、高可靠性、高稳定性、全球覆盖等优势, 逐渐发展成为高空气象探测的重要技术手段。该系统由地面系统和探空仪构成, 探空仪可通过气象气球携带, 以自由升空方式获取地球表面至几万米高度空间内温度、湿度、风向、风速、气压等气象信息, 为气象预报精准性等提供强有力的数据支撑^[1]。当前, 国内外不少专家与学者针对北斗卫星导航探测开展了大量研究工作, 其中赵世军^[2]等指出北斗高空探测系统可精准测量高空风向风速, 满足气象业务所需; 祁小娟^[3]等指出北斗定位技术在提高轨迹监测精准度、达到实时追踪、增强数据传输可靠性等方面成效显著。

L 波段探空雷达作为我国气象业务当中广泛应用的常规探测设备, 通过携带无线电探空仪升空, 可直接测量不同高度层的温、压、

项目名称: L 波段雷达与北斗探空数据质量对比分析 (rkzqxj202504) 2025 年日喀则市气象局局长设科研项目资助。

作者简介: 格桑次旺 (1993.05) 男, 藏族, 西藏拉萨, 本科学历, 工程师, 研究方向: 综合气象观测。

湿、风等气象要素，其权威性与参考价值较高。沈晔^[4]等对比分析同一高度北斗测风与雷达测风数据，得出两者所测空中风的变化趋势与幅度大体一致；林彩艳^[5]等对比延安观测站北斗导航与 L 波段探空数据，发现两者温度、海拔、风向、风速的差值较小，相关性高，其中北斗卫星导航系统探测性能较好。

定日县（86°20′~87°70′E，27°80′~29°10′N）地处青藏高原西南部，境内地形地貌复杂且气候多变^[6]，高空气象条件受高原地形、季风环流等因素影响，垂直空间气象要素变化显著，对高空探测数据的稳定性与精准度提出了高标准要求。当前，定日县高空气象探测以北斗探空、L 波段探空为常用技术手段。为掌握以上两种方式的差异，本文选取 2025 年 1-7 月定日县北斗探空与同址 L 波段雷达探测资料，对比分析两者在规定等压面之上温度、风向、风速等差异，旨在为本地高空气象观测数据质量控制、高原气象服务业务发展等提供有力参考。

一、资料与方法

（一）资料来源

选取 2025 年 1 月至 7 月定日国家高空气象站北斗导航探空观测数据与 L 波段高空观测数据，对比每日 08 时与 20 时以上两种观测方式的观测数据。一旦北斗探测与 L 波段高空探测当中任意一种探测高度低于 20hPa，则剔除该时次探测数据。借助 L 波段高空气象探测系统数据处理软件对所有探空数据进行处理，获得各时次规定等压面，分别为 100hPa、150hPa、200hPa、250hPa、300hPa、400hPa、500hPa、600hPa，记录各等压面气温、海拔、风向风速等探测资料。其中 L 波段探空资料在各班次后人工进行质量控制，以防“飞点”与异常记录，而北斗导航探空则由中心站与观测站共同完成自动质量控制。

（二）数据处理

为精准对比两套探测系统数据，需按流程开展以下数据处理。

时间匹配。为使两种方式探测时间窗口对应，选用 08 时与 20 时的温度、风向、风速数据进行配对，以消除观测时间不同步带来的偏差；（2）质量控制。剔除资料缺失、信噪比过低及明显异常的样本，保留有效数据；（4）偏差计算。在相同高度与时间条件下，计算北斗导航探测与 L 波段探空的温度差、风速差与风向差，形成用于后续分析的风场偏差数据集^[7]。

（三）分析方法

本研究重点选用偏差分析、Pearson 相关分析法开展数据对比分析，具体如下。

1. 偏差分析

计算北斗导航系统高空探测值与 L 波段高空气象探测值之间的差值，公式如下：

$$\Delta X = X_{\text{北斗}} - X_{\text{L波段}}$$

按照以上公式统计并计算两种观测方式在各等压面层的平均偏差，据此评估两个系统的差异性。

2. Pearson 相关分析法

通常情况下，选用 Pearson 相关系数 r 衡量两组数据线性相关程度^[8]，其计算公式如下。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

上述公式当中，X、Y 对应北斗、L 波段对应要素序列，r 取值在 -1 到 1 之间，该数值越接近 1，代表数据变化趋势一致性越强。分层计算温度、风速、风向在各规定等压面相关系数，定量区分两个系统在以上三种气象要素数据观测上的一致性。

二、探空观测原理对比

L 波段探空观测系统以 GFE（L）型二次测风雷达与 GTS 系列探空仪为核心探测单元。观测时，探空仪由充入氢气或氦气的气象气球搭载升空，可完成地面至 36 km 高空范围内大气温度、湿度、气压要素的直接探测^[9]；同时雷达还可持续追踪探空仪位置，获取斜距、仰角、方位角等定位参数，经时序运算解算探空仪移动速率与方位，反演不同高度层的风向、风速信息，实现气象要素垂直剖面观测^[10]。

而北斗导航探空系统依托搭载基带射频 SoC 一体化定位模块的专用探空仪开展观测，同样可完成地面至 36 km 高空温、湿、压、风的一体化探测。该系统通过北斗卫星导航定位获取高精度三维位置信息，直接解算高空风场参数，规避传统雷达定位的空间偏差；观测数据经 GFSK 无线调频调制，通过 P 波段实时传输至地面接收处理终端，兼具高空间分辨率与数据传输实时性，可同步输出定位信息与设备工况状态^[11]。

三、观测结果对比分析

（一）规定等压面上的温度对比

由图 1a 可知，2025 年 1-7 月定日县北斗导航探空与 L 波段探空温度数据均符合正态分布^[12]，两者之间的 Pearson 相关系数为 0.999714，可见两种探测方式温度观测数据存在极显著的正相关关系，即两种探测方式结果具有较强一致性。由图 1b 可见，在各规定等压面之下，气温平均差介于 -1.49 ~ 0.72 之间，08 时与 20 时两种探测方式的气温平均差也存在一定差异。其中 08 时

150hPa以下高度差值为负值，即L波段探空测得的温度高于北斗导航探空温度，150hPa以上则为正；而20时所有高度差值均为负，即各等压面北斗导航探空温度均低于L波段探空获取的温度数据。对比可见，20时300hPa高度温度平均差绝对值最大，差值为-1.49℃；而20时100hPa高度温度平均差绝对值最小，差值为-0.09℃。

对规定等压面上两种探测方式温度均方差偏差进行计算得出，08时与20时两种探测方式均方差偏差分别为0.47℃、0.79℃，可见20时两种探测方式温度偏差高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，除300hPa等压面之外，其余等压面温度均方差偏差均小于1℃，且低层差异明显小于高层。两套系统观测温度差异性较小。

表1 各规定等压面北斗与L波段探空系统温度均方差偏差

等压面/hPa	100	150	200	250	300	400	500	600
温度均方差偏差/℃	0.43	0.17	0.50	0.91	1.14	0.63	0.34	0.51

(二) 风数据对比

(1) 风速数据对比

如图2a给出了2025年1-7月定日县北斗导航探空与L波段探空风速散点图，计算两套探测系统下风速数据相关性得出，两者之间的Pearson相关系数为0.9791，可见两套探测系统风速观测数据相关性良好，即两套探测系统风速整体一致性较高，由图2b可见，在各规定等压面之下，风速平均差介于-1.33~3.89m/s之间，08时与20时两套探测系统的风速平均差也存在一定差异。其中08时仅600hPa高度风速差值为正，即L波段探空测得的风速低于北斗导航探空风速，其余等压面风速差值均为正；而20时所有等压面风速差值均为正，即北斗导航探空风速均高于L波段探空风速。对比可见，20时200hPa高度风速平均差绝对值最大，差值为3.89m/s；而20时600hPa高度风速平均差绝对值最小，差值为0.07m/s。

对规定等压面上两套探测系统风速均方差偏差进行计算得出，08时与20时两套探测系统均方差偏差分别为0.76m/s、2.63m/s，可见20时两套探测系统风速偏差明显高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，100~300hPa等压面两套探测系统风速偏差较大，而400~600hPa等压面两套探测系统风速偏差较小，其中500hPa两套探测系统风速偏差最小，均方差偏差为0.14m/s，可见对流层中层两套探测系统一致性良好。

表2 各规定等压面北斗与L波段探空系统风速均方差偏差

等压面/hPa	100	150	200	250	300	400	500	600
风速均方差偏差/(m/s)	2.58	2.77	2.91	2.04	1.54	0.61	0.14	0.57

(2) 风向数据对比

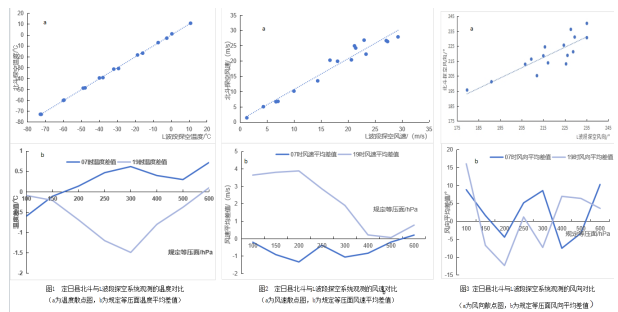
如图3a给出了2025年1-7月定日县北斗导航探空与L波段探空风向散点图，计算两套探测系统下风向数据相关性得出，两者之间的Pearson相关系数为0.8598，可见两套探测系统风向观测数据也存在一定的正相关关系。由图3b可见，在各规定等压面之下，风向平均差值介于-12.32~16.03°之间，08时与20时两套探测系统的风向平均差也存在显著差异，20时100hPa高度风速

平均差绝对值最大，差值为16.03°；而20时250hPa高度风向平均差绝对值最小，差值为1.22°。

对规定等压面上两套探测系统风向均方差偏差进行计算得出，08时与20时两套探测系统均方差偏差分别为6.82°、8.74°，可见20时两套探测系统风速偏差明显高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，各规定等压面风向均方差偏差均较大，表明两套探测系统一致性偏差。

表3 各规定等压面北斗与L波段探空系统风向均方差偏差

等压面/hPa	100	150	200	250	300	400	500	600
风向均方差偏差/°	12.93	4.88	9.25	3.74	7.95	7.24	5.08	7.71



(3) 定日县一次降水过程大气层结特征及两类探空资料对比分析

结合2025年7月13日定日县降水天气过程的两组探空观测数据可知，降水发生前后区域大气层结特征出现明显演变。过程前期对流有效位能CAPE仅为0.46 J/kg，对流抑制能量CIN为-88.78 J/kg，低层稳定层结显著，大气对流发展受到强烈抑制，暂不具备降水发生的热力条件；随着天气系统移动与局地热力作用影响，后期CAPE升至83.2 J/kg，CIN减小至34.7 J/kg，对流抑制作用大幅减弱，不稳定能量逐步释放，抬升凝结高度、自由对流高度及平衡高度的垂直配置更加利于空气块抬升，大气不稳定性明显增强，为本次降水过程提供了有利的热力基础。本次观测分别采用L波段与北斗两套探空系统，对比来看，北斗探空依托卫星定位技术，规避了传统L波段雷达观测受地形、电磁干扰及大气折射带来的误差，在风速、位势高度等要素上观测精度更高，数据连续性更好，结合定日县高海拔区域特点，北斗探空数据能够更精准地反映降水过程中大气温、湿、风及层结结构的动态变化，观测结果可靠性优于L波段探空。

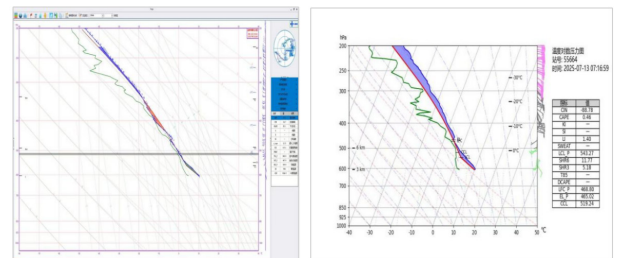


图4 定日县一次降水过程大气层结特征及两类探空资料图

(左为L波段探空t-lnp图，右为北斗探空t-lnp图)

四、结论与讨论

（一）主要结论

本文通过对定日县 2025 年 1–7 月北斗导航探空与 L 波段探空观测数据进行对比，得出以下结论：

北斗导航探空与 L 波段探空温度、风速数据一致性较高，其 Pearson 相关系数分别为 0.999714、0.9791，风向 Pearson 相关系数为 0.8598。可见，两套探测系统温度一致性最优，风速次之，而风向相关性较弱；

两种探测系统在时次与垂直分层上存在明显差异。温度偏差 08 时整体优于 20 时，300 hPa 偏差最大；风速偏差 20 时显著大于 08 时，中高层偏差突出；风向偏差整体偏大，100 hPa 偏差最为显著，且 20 时偏差普遍高于 08 时。

（二）讨论

两套探测系统的偏差主要源于定位体制与探测环境差异^[13]。

其中 L 波段探空依赖雷达二次应答定位，易受地面电磁干扰、雷达测角误差影响，在高层易出现空间定位偏差；北斗探空采用卫星导航定位，定位精度更高，但受电离层延迟影响，中高层风场反演易引入系统性误差，导致 20 时偏差显著增大。综合来看，北斗导航探空在定位精度、时空分辨率上更具优势，整体精准度优于传统 L 波段探空，尤其在对流层低层表现稳定，仅中高层风场数据需进一步优化。

在今后的探测工作中，可从以下三方面提升探测质量。其一，构建北斗探空数据的分层误差校正模型，针对不同时次、高度层的偏差特征进行订正，重点优化中高层风场数据^[14]；其二，优化风场反演算法，引入电离层延迟修正参数，降低中高层风向风速偏差；其三，开展多站点、多天气背景下的对比观测，完善不同区域的误差评估方案。此外，在实际的业务应用当中，可以 L 波段探空为基准，对北斗探空数据进行动态质量控制，实现两套系统的优势互补，提升高空气象观测的整体可靠性与稳定性^[15]。

参考文献

[1] 覃晓玲, 胡程峻, 覃月凤等.北斗探空与 L 波段探空湿度对比分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2026,43 (01): 23–25.
[2] 赵世军, 高太长, 马英等.利用北斗导航系统探测高空风的研究 [J].测绘科学, 2013,38 (05): 13–15+45.
[3] 祁小娟.北斗定位技术在高空探测气球轨迹监测中的应用研究 [J].农业灾害研究, 2026,16 (02): 181–183.
[4] 沈晔, 陶莉.北斗探测系统与 L 波段雷达高空风对比分析 [J].气象水文海洋仪器, 2024,41 (02): 58–62.
[5] 林彩艳, 曹梅, 白燕荣等.北斗导航与 L 波段探空数据对比分析 [J].气象水文海洋仪器, 2026,43 (02): 26–28+32.
[6] 久美南加, 达确, 巴桑等.定日县气温与降水变化特征 [J].西藏科技, 2025,47 (07): 48–53.
[7] 郑燕, 刘立群, 董方有等.北斗与 L 波段探空系统探测对比分析 [J].气象水文海洋仪器, 2025,42 (01): 26–29.
[8] 郭磊, 高梅.北斗与 L 波段探空系统在荣成高空站某时段观测数据对比分析 [J].数字农业与智能农机, 2026 (03): 60–64.
[9] 郝文强.对比分析 L 波段测风雷达与北斗探空系统性能 [J].内蒙古科技与经济, 2025 (10): 134–136+148.
[10] 张明, 杜裕, 汤森.北斗测风与 L 波段雷达测风的差异性分析 [J].气象研究与应用, 2023,44 (02): 63–68.