大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法及初步评估

王金成 王丹 杨荣康 曹晓钟 郭启云

A Return Radiosonde Trajectory Forecast Method and Its Preliminary Evaluation Based on High Resolution Numerical Weather Prediction Model

WANG Jincheng WANG Dan YANG Rongkang CAO Xiaozhong GUO Qiyun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2012.20186

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析

Quality Control and Uncertainty Analysis of Return Radiosonde Data

大气科学. 2020, 44(4): 865 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19203

云海-2掩星资料在区域数值预报中的同化应用评估

Evaluation on Assimilation Application of Yunhai-2 Occultation Data in Regional Numerical Weather Prediction Model

大气科学. 2021, 45(1): 217 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20139

AMSR2辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究

The Impact of AMSR2 Radiance Data Assimilation on the Analysis and Forecast of Typhoon Son-Tinh

大气科学. 2017, 41(2): 372 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127

雷达资料同化在局地强对流预报中的应用

Application of Radar Data Assimilation in Local Severe Convective Weather Forecast

大气科学. 2017, 41(4): 673 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15288

GRAPES全球模式的误差评估和订正

Error Evaluation and Correction for GRAPES Global Forecasts

大气科学. 2017, 41(2): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16115

风廓线雷达资料在模式中的同化应用研究

A Study on Assimilation of Wind Profiling Radar Data in GRAPES-Meso Model

大气科学. 2019, 43(3): 634 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王金成, 王丹, 杨荣康, 等. 2021. 基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法及初步评估 [J]. 大气科学, 45(3): 651−663.
WANG Jincheng, WANG Dan, YANG Rongkang, et al. 2021. A Return Radiosonde Trajectory Forecast Method and Its Preliminary Evaluation Based on High Resolution Numerical Weather Prediction Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 651−663. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.20186

基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法及初步评估

王金成[1,2] 王丹[1,2] 杨荣康[3] 曹晓钟[3] 郭启云[3]

1 国家气象中心，北京 100081
2 中国气象局数值预报中心，北京 100081
3 中国气象局气象探测中心，北京 100081

摘 要 为了开展往返平飘式探空组网观测的仿真和模拟，以及评估组网观测对数值天气预报的影响，并实现往返平飘式探空在目标观测中的应用，本文提出了一种基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹模拟和预报方法。基于我国自主研发的 GRAPES 区域高分辨率模式，初步建立了往返平飘式探空的轨迹预报系统。该系统将往返平飘式探空的上升段、平漂段和下降段的轨迹方程，以及下降段降落伞的动力学方程，直接嵌入到高分辨率数值天气模式中，实现对往返平飘式探空轨迹的模拟和预报。利用轨迹预测系统对 63 个往返平飘式探空轨迹进行轨迹预报试验和评估，试验结果表明，该系统的轨迹预测结果合理可信，6 h 的轨迹预报平均误差小于 40 km。

关键词 往返平飘式探空 轨迹预测 资料同化 数值天气预报
文章编号 1006-9895(2021)03-0651-13 **中图分类号** P456 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.20186

A Return Radiosonde Trajectory Forecast Method and Its Preliminary Evaluation Based on High Resolution Numerical Weather Prediction Model

WANG Jincheng[1,2], WANG Dan[1,2], YANG Rongkang[3], CAO Xiaozhong[3], and GUO Qiyun[3]

1 *National Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
2 *Numerical Prediction Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
3 *Meteorological Observation Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract A return radiosonde trajectory forecast method based on high resolution numerical weather prediction modeling is proposed in this paper. The trajectory forecast method is intended to be used for simulating the return radiosonde network observations and supporting evaluations of the observation impacts on numerical weather predictions. Meanwhile, the trajectory forecast system will also in plan to be used for supporting the return radiosonde application in target observation experiments in the future. A return radiosonde trajectory forecast system is established by embedding

收稿日期 2020-07-31；**网络预出版日期** 2021-01-27
作者简介 王金成，男，1981 年出生，博士，主要从事资料同化研究。E-mail: wangjc@cma.gov.cn
通讯作者 杨荣康，E-mail: yrkaoc@cma.gov.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1506205、2018YFC1506202，中国气象局数值预报（GRAPES）发展专项（GRAPES-FZZX-2020）
Funded by National Key R&D Program of China (Grants 2018YFC1506205, 2018YFC1506202), China Meteorological Administration Special Numerical Weather Prediction (GRAPES) Development Fund (Grant GRAPES-FZZX-2020)

return radiosonde's trajectory equations of ascent stage, drift stage and descend stage into numerical weather prediction model GRAPES (Global/Regional Analysis and PrEdiction System), a regional model with a 3 km horizontal resolution. A dynamic equation of parachutes in descend stage is also considered in this system. By using the trajectory prediction system, the preliminary test of the return sounding trajectory prediction is carried out for 63 successful real observations of return radiosondes. The results show that the forecast trajectories using this trajectory forecast system are reasonable and reliable, with the average error of track prediction less than 40 km in 6 hours.

Keywords Return radiosonde, Trajectory forecast, Data assimilation, Numerical weather prediction

1 引言

作为地球大气观测系统的重要组成部分，探空观测能提供完整的大气三维温、压、湿、风等信息，是极其重要的大气信息来源（Faccani et al., 2009）。探空也是大气观测系统中唯一能同时提供三维大气质量场与运动场信息的观测系统，具备精度高、垂直分辨率高以及能够探测平流层等特点，已经成为大气观测网的基准观测。它广泛应用于天气预报（叶笃正, 1977a, 1977b; 王笑芳和丁一汇, 1994; 刘玉玲, 2003; 廖晓农等, 2008; 刘晓璐等, 2014; 刘超等, 2017）、数值天气预报（Radnóti et al., 2012; 郝民等, 2014; Privé et al., 2014; Ingleby et al., 2016）和卫星等遥感资料的检验评估（Kuo et al., 2005; Xu et al., 2009; Sun et al., 2010; Liao et al., 2015; 郭启云等, 2020）等领域。数值天气预报是探空资料定量应用的最重要的领域，探空资料已经成为业务数值天气预报中的重要基础资料，对减小数值模式分析场和预报场的误差起重要作用（Cardinali, 2009; Zhang et al., 2018）。对俄罗斯每天减少一个时刻探空资料的敏感性数值试验结果表明，俄罗斯上空 500 hPa 高度场 48 h 预报技巧减小 4%～10%（相当于数值天气预报半年的研发进展），并且其影响一直向东传播，直至影响到北半球的预报效果（Ingleby et al., 2016），这反映了探空资料对全球数值天气预报的重要性。另有研究表明，探空资料时间观测频次加倍，将显著提高数值天气预报的预报技巧（魏蕾和雷恒池, 2012; Privé et al., 2014; 卢萍等, 2016; 王丹等, 2019）；针对台风或飓风的飞机下投探空资料在数值天气预报中的同化应用，能够显著减小台风或飓风路径和强度的预报误差（Moteki et al., 2007; 张诚忠等, 2012; Feng and Wang, 2019）。除了对数值天气预报的重要直接影响外，探空资料对数值预报系统有间接作用和影响（Radnóti et al., 2012），探空资料是卫星辐射率和飞机报温度等资料进行偏差订正的基准资料（Cucurull et al., 2014; Eyre, 2016），被认为是数值预报分析场的锚定资料之一，用于避免数值预报分析场和预报场偏差的漂移。

目前而言，间隔 12 h 时间频率的观测模式显然不能完全满足中小尺度灾害性天气的监测和预警需求，特别是在夏季汛期。为了满足数值天气预报和大气科学研究对探空资料新的应用需求，中国气象局气象探测中心研发了一种新型往返平飘式探空观测技术，该技术通过一次探空施放，实现了“上升段—平漂段—下降段”三段观测（曹晓钟等, 2019）。相比传统探空技术和模式，该技术在不显著增加成本的基础上，可以实现两次对流层垂直探测（上升段和下降段）和平流层（指定高度）持续 4 h 的连续观测。相比我国现行的业务探空采用 L 波段雷达定位技术，往返平飘式探空采用导航卫星定位技术，定位更为精准。为了验证和改进往返平飘式探空技术，2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日在安徽、湖北、湖南和江西的 6 个探空站点开展了为期一个月的小规模野外测试，试验数据的不确定性分析结果表明往返探空探测精度达到了 WMO（World Meteorological Organization）规定的突破目标，部分探测要素甚至实现了理想目标，探测资料具有良好的可用性（王丹等, 2020），具备了很好的应用前景。

往返平飘式探空尚处于早期的研发和试验阶段，要实现大规模业务应用，仍有许多科学和技术问题需深入研究和解决。其中包括往返平飘式探空组网观测对数值天气预报的影响如何？往返平飘式探空组网所需的接收站站网如何布局？往返平飘式探空能否应用于目标观测或特定时间和区域的加密观测等？这些科学技术问题的研究均依赖于往返平飘式探空的运行轨迹模拟或预测原型系统：（1）往返平飘式探空组网对数值天气预报的影响研究需要借助观测系统模拟实验（Observing System Simulation

Experiments, OSSEs），而生产模拟观测需要往返平飘式探空的模拟轨迹数据；（2）往返平飘式探空组网所需接收站站网布局需要以往返平飘式探空轨迹的气候特征为依据；（3）往返平飘式探空整个观测过程持续 6 h 左右（曹晓钟等, 2019），其下降点距离施放点的距离可达几百公里，使得其能够对偏远山区和大陆沿岸海洋上空开展垂直大气探测，具备了开展目标观测的潜力，但由于往返平飘式探空不具备动力，用其开展目标观测或特定时间和区域的加密观测需要开展往返平飘式探空轨迹预报，确定合适的施放地点、时间以及平漂高度等。因此，往返平飘式探空的轨迹模拟与预测对从科学上认识往返平飘式探空数值天气预报的影响、对往返平飘式探空未来大规模组网和更加广泛的大气观测应用具有重要意义。

往返平飘式探空是一种新型探空观测技术，对其轨迹模拟和预报的研究较少。曹晓钟等（2019）首次给出了往返平飘式探空在上升段、平漂段和下降段的运动动力模型，并利用全国 120 个探空站秋季观测的 25 km 高度风场作为往返平飘式探空平漂段风的初始值，在假定气球平漂时垂直方向保持静力平衡，水平方向仅受到风场影响的条件下，初步模拟了全国探空站气球平漂特征。除此之外，气球轨迹研究主要集中在航天用大负载的零压气球的轨迹模拟和预测方面（Musso et al., 2004; Dai et al., 2012; Jewtoukoff et al., 2016）。这些研究中假设气球是大气完美的示踪物，气球除了浮力外没有其他动力，根据轨迹运动方程，利用大气环境风场计算出气球轨迹。大气环境风场是影响气球轨迹模拟和预测精度的重要因素，以上研究中主要采用探空观测、全球再分析资料或中尺度模式预报输出的大气环境场用于气球轨迹预测。探空观测的时间间隔是 12 h，空间分辨率约为 2.5°，而再分析资料或模式预报输出的大气环境风场的时间分辨率一般为 1～6 h，空间分辨率是 0.1°～1.0°。采用这样时空分辨率的大气环境场开展气球轨迹预测隐含假设是大气在 1～12 h 内的变化是线性的，对于平流层内大尺度的大气环流系统，这样的假设和近似精度基本能够满足平漂时长达到 24 h 以上的航天用气球的轨迹预测。

然而，上述研究中提出的轨迹预测方法不能满足往返平飘式探空高精度轨迹预测的需求，有三个方面的原因：一是往返平飘式观测过程仅为 6 h，如果仍然采用 1～6 h 甚至 12 h 间隔的探空观测、再分析场或模式输出的大气环境场直接用于往返平飘式探空轨迹模拟和预测，精度肯定不能满足需求；二是往返平飘式探空的上升段和下降阶段约有 2 h，并且约有 1 h 的时间运行在对流层内，对流层内多中小尺度天气系统，大气环境风场在 6 h 内会有较大变化，采用上述较低时间分辨率的大气环境风场，会引起相对较大的轨迹误差；三是上述方法均无法考虑大气垂直速度的影响，造成上升段和下降段的计算误差较大。

为了高精度的模拟和预报往返平飘式探空的轨迹，本文提出了一种将往返平飘式探空轨迹方程和下降段降落伞的动力学方程直接嵌入高分辨率数值天气模式中的轨迹预测方法。该方法能够直接利用区域高分辨率区域数值模式积分过程中的大气环境场（水平风速、垂直速度、密度等变量），时间分辨率可以达到 30 s。基于 GRAPES（Global/Regional Analysis and PrEdiction System）高分辨率区域模式（水平分辨率为 0.03°）初步建立了往返平飘式探空轨迹模拟和预测系统，为开展往返平飘式探空观测对数值预报的影响、往返平飘式探空的优化组网布局及往返平飘式探空在目标观测中的应用等研究工作奠定了基础。

2　往返平飘式探空轨迹预测方法

往返平飘式探空运行轨迹分为上升段—平漂段—下降段三个阶段（曹晓钟等, 2019）。在上升段，依靠探空气球套球（2 个探空气球，分别称为外球、内球）的外球浮力将探空仪运送到大气高层；上升到指定高度后，外球爆破后进入平漂段，以内球作为载体携带探空气仪做近似平衡的水平运动；在平漂到达预定时间后，内球与降落伞、探空仪分离，以降落伞为载体携带探空仪进入下降段。为了实现对往返平飘式探空轨迹的模拟和预报，需要建立往返平飘式探空整个探测过程的动力和运动学方程。曹晓钟等（2019）提出了往返平飘式探空三段探测过程中的理论动力学理论模型，该动力模型中的部分物理过程复杂且部分方程参数因缺乏实验室数据支持，无法开展（如，气球内部热力学变化过程；下降段降落伞水平方向的受力与大气环境风场的关系）。为了实现往返平飘式探空轨迹的模拟和预测，需要对该动力模型进行简化。

2.1　上升段气球上升运动动力简化模型

在上升段，往返平飘式探空以内外气球作为载

体，一般情况下，气球被认为是大气的完美示踪物（Dai et al., 2012; Jewtoukoff et al., 2016），气球的水平运动速度与大气风速相同，这也是传统探空气球测风的基本条件。探空气球在垂直方向受的力包括重力、浮力和摩擦力，设上升段升速为 w_b，则其垂直方向升速的动力方程可以表达为

$$m_t\frac{\partial w_b}{\partial t}=(\rho_a V_b-m_t)g-\frac{1}{2}C_D\rho_a A_b w_b{}^2, \qquad (1)$$

其中，w_b 是探空气球在静止大气中的垂直升速，m_t 是往返平飘式探空系统总质量（单位：kg），ρ_a 是环境大气密度（单位：kg m^{-3}），V_b 是外球的体积（单位：m^3），g是重力加速度（单位：m s^{-2}），C_D 是外球的拖曳系数，A_b 是上升段外球有效横截面积，$F_f=(\rho_a V_b-m_t)g$称为净举力。

方程（1）中气球上升速度由气球浮力、探空系统重力和垂直方向的摩擦力决定。精确模拟方程（1）是非常复杂的。一方面，气球热力学的模拟相对比较复杂，气球所受到的浮力是由气球的体积 V_b 和环境大气密度ρ_a决定。根据热力学方程，气球的体积由气球内所充气气压和温度分布决定，但气球在大气环境中的热力变化是非常复杂的，受到环境大气的热传导、气球内部气体的热对流、太阳短波辐射、地球和大气的长波辐射等诸多因素的影响（Gallice et al., 2011; Dai et al., 2012）；另一方面，气球在垂直运动过程中的拖曳系数和流体的雷诺数有关，不同材质的气球，拖曳系数与雷诺数的关系也不相同，精确的确定拖曳系数与雷诺数的关系需要实验室试验测定，仅仅依靠探空放球试验只能近似估计（Gallice et al., 2011）。一般情况下，净举力与摩擦力在一定时间尺度上（60 s 以上）近似平衡，垂直升速可以认为是匀速（Gallice et al., 2011）。为了简化起见，假设往返平飘式探空气球在上升阶段匀速上升，则上升段的动力模型简化为如下形式：

$$w_b=c, \qquad (2)$$

其中，c 表示气球匀速上升的速度。

2.2 平漂段气球平漂运动动力简化模型

往返平飘式探空的平漂阶段，内球的浮力与探空系统的重力平衡，其垂直运动速度接近零，探空系统在指定高度做近似平衡的水平运动：

$$w_b=0. \qquad (3)$$

动态平衡的高度主要由充气量以及地面与平漂高度上的大气温度、压强和气球内氢气的温度、压强决定。

2.3 下降段降落伞下降运动动力简化模型

往返平飘式探空下降段由降落伞作为载体，下降过程中受到空气阻力的影响，加之大气密度的增加，下降速度随高度减小。由于降落伞理论上不同于气球，因此下降段的动力方程需要考虑 3 个方向的受力，曹晓钟等（2019）给出了往返平飘式探空下降段降落伞的理论动力模型。该理论模型中抬升系数和排开空气的质量等参数和变量无法确定，难于实现数值模拟。为此，假设降落伞也是大气完美的示踪物，下降过程中水平运动速度与环境大气风场速度相等，该假设条件是利用降落伞位置计算大气风场的基本条件。实际观测试验中，在降落伞是大气完美示踪物的假设条件下，利用降落伞位置直接计算了大气风场，下降段的东西风和南北风分量的均方根误差和偏差均与上升段均方根误差相当（王丹等, 2020），由于上升段气球是大气运动场的完美示踪物的假设是合理的，这就从侧面验证了降落伞是大气的完美示踪物的假设条件是合理的。在这个假设条件下，降落伞在下降过程的动力模型简化为

$$m_t\frac{\partial w_p}{\partial t}=m_t g-\frac{1}{2}C_p\rho_a A_p w_p{}^2, \qquad (4)$$

其中，w_p 是降落伞在静止大气中的垂直降落速度，C_p 是降落伞的拖曳系数，A_p 是下降段降落伞的有效横截面积。

实际上，降落伞从接收到指令到完全打开需要一定时间，为了更精确的模拟往返平飘式探空下降段的垂直速度变化，需要精确模拟降落伞的打开过程。设降落伞在打开过程中和完全打开后有效横截面积（$A_{p,t}$）为

$$\begin{cases} A_{p,t}=A_p\sin\left(\dfrac{2t_d}{T_{open}}\right), t_d<T_{open}, \\ A_{p,t}=A_p, \quad t_d\geqslant T_{open}, \end{cases} \qquad (5)$$

其中，T_{open} 是降落伞从开始打开到完全打开需要的时间，t_d 是从切断平漂气球以后下降段所经历的时间。根据实际观测数据，这里设降落伞完全打开所需的时间是 3 s。

2.4 往返平飘式探空轨迹方程

综上所述，往返平飘式探空在整个探测过程中

均可以被认为是大气的完美示踪物，其水平运动速度与环境大气风速完全相同，气球的水平运动仅由大气环境风场决定。往返平飘式探空的轨迹方程表达如下：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial x}{\partial t} = u_{\mathrm{a}}, \\ \dfrac{\partial y}{\partial t} = v_{\mathrm{a}}, \\ \dfrac{\partial z}{\partial t} = w_{\mathrm{a}} + w_{\mathrm{s}}, \end{cases} \tag{6}$$

其中，(x, y, z) 表示往返平飘式探空的空间位置坐标（单位：m），u_{a}、v_{a} 分别是位置 (x, y, z) 的环境大气场南北、东西方向风速（单位：m s^{-1}），w_{a} 是位置 (x, y, z) 环境大气的垂直速度（单位：m s^{-1}），w_{s} 是上升段或平漂段气球或下降段降落伞在静止大气中的垂直速度（单位：m s^{-1}）。根据公式（2～4），在上升段，$w_{\mathrm{s}}=w_{\mathrm{b}}=c$；在平漂段，$w_{\mathrm{s}}=0$；在下降段，$w_{\mathrm{s}}=w_{\mathrm{p}}$，降落速度可通过积分偏微分方程（4）获得。

2.5　往返平飘式探空轨迹的数值模拟实现方法

公式（2～5）是经过简化的往返平飘式探空轨迹方程组。采用四阶龙格库塔时间差分方案求解方程（5），并将其直接嵌入到区域高分辨率数值模式积分过程，直接应用区域高分辨率数值模式每步积分（一般为 10～30 s）的环境大气参数，实现对往返平飘式探空轨迹进行精细化刻画，达到往返平飘式探空轨迹模拟的时间分辨率和精度的要求。往返平飘式探空轨迹积分过程中，利用插值算法计算探空系统所经过位置的大气环境参数，具体实施中采用的插值方案如下：

（1）水平方向：采用经纬度为坐标的双线性插值方案。

（2）垂直方向：对水平风速和温度采用高度坐标系下的线性插值方案，气压变量先进行自然对数计算，然后采用高度坐标系下的线性插值，并将插值结果转化为气压。

（3）时间维度：假设在数值模式每一步积分过程中，所有变量均是线性变化的，所有变量采用线性插值方案。

3　往返平飘式探空轨迹预测初步结果

基于 GRAPES_MESO V5.0 中尺度预报系统，采用上述往返平飘式探空轨迹预测方程，建立了往返平飘式探空轨迹预测系统，利用往返平飘式探空观测试验数据对往返平飘式探空轨迹预测能力进行了初步评估。

3.1　GRAPES 预报系统简介

GRAPES 是我国自主研发的具有完全知识产权的数值天气预报系统（薛纪善和陈德辉, 2008），基于 GRAPES 已经建立了完备的数值预报业务体系（沈学顺等, 2020）。本文采用 GRAPES 区域高分辨率模式系统（GRAPES_MESO）的最新版本（V5.0），该版本模式于 2020 年 6 月实现了业务化。

GRAPES_MESO V5.0 水平分辨率是 0.03°，垂直层数 49 层，模式层顶高 35000 m，模式覆盖区域范围是（10°～60°N, 70°～145°E）。积分时间步长 30 s，轨迹模拟采用的初始场是 NCEP GFS（National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System）提供的 6 h 预报场。

GRAPES_MESO V5.0 对风场具有较好的分析和预报效果。其风场的分析和预报的均方根误差随高度呈现“S”型（庄照荣等, 2020）变化规律。风场的分析和预报均方根误差在 200 hPa 附近达到最大值，纬向风 U 的分析均方根误差约为 2.6 m s^{-1} 左右，3 h 预报均方根误差约为 3.4 m s^{-1}，经向风 V 的分析均方根误差约为 2.7 m s^{-1}，3 h 预报的均方根误差约为 3.6 m s^{-1}；风场的分析和预报的均方根误差在 50 hPa 附近最小，纬向风 U 的分析和预报的均方根误差约为 1.6 m s^{-1}，经向风的分析和预报的均方根误差约为 1.75 m s^{-1}。详细的风场的分析和预报的均方根误差详见庄照荣等（2020）中的图 7。

3.2　模拟样本选取

2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日，中国气象局大气探测中心在长江流域中下游地区的湖南、湖北、安徽、江西 4 省选取 6 个探空站作为气球施放点。往返探空气球一日施放 2 次，为了避免对业务探空影响，往返探空施放时间比业务探空时间滞后约 30 min。为了准确评估往返平飘式探空轨迹预测系统给的预测效果，在上述试验样本中选取上升段—平漂段—下降段相对完整，并且整个观测过程达到一定时长的试验样本作为模拟对象。选取的试验样本满足三个条件：一是平漂高度大于 20 km；二是整个观测过程持续时间大于 5 h；三是下降的结束高度低于 2 km。经过筛选共有 63 个样本满足上述

条件。分析发现，经过平漂后，往返平飘式探空降落点与施放点的距离均大于 100 km，由于试验网络目前没有设置更多的接收机，在下降阶段信号接收不完整，这是造成下降段结束高度小于 2 km，很多观测试验不完整的主要原因。

表 1 给出了满足条件的 63 个试验样本的上升段平均上升速度，平漂段平均高度，平漂段的平均时长，下降结束的高度等信息。从表中可以看出，上升段平均上升速度在 4.2～6.2 m s^{-1} 之间，平均升速 5.39 m s^{-1}。平漂阶段平均持续时长 17481 s（4.85 h），平均高度为 27693.2 m，两项指标均达到了往返平飘式探空的设计指标，这表明往返平飘式探空相比现有业务探空系统，不仅能够增加对平流层持续约 5 h 的稳定观测，还能够实现在 06 时（协调世界时，下同）和 18 时对大气对流层进行间接加密垂直观测。

3.3 上升段气球上升速度

在往返平飘式探空轨迹的模拟过程中，上升段探空气球的上升速度采用表 1 中的每次试验上升段的平均升速。平漂高度采用每次试验的平均平漂高度。

3.4 下降段拖曳系数估计

从公式（4）可以发现，在降落伞下降达到平衡状态时，利用降落伞横截面积，探空系统的总质量以及平衡状态下的下降速度，可计算降落伞的拖曳系数。设往返平飘式探空降落到一定高度时达到平衡状态，即垂直加速度为零：

$$\frac{\partial w_{\mathrm{p}}}{\partial t}=0. \tag{7}$$

表 1 用于验证往返平飘式探空轨迹预测系统的观测试验样本基本信息

Table 1 Information of selected successful returned radiosonde observations for evaluating returned radiosonde trajectory forecast system evaluation

编号	站名	放球时间	上升段平均升速/m s^{-1}	平漂的平均高度/m	平漂持续时长/s	结束观测高度/m
1	安庆	2018年6月11日11:16	6.02	30118.7	19576	834.7
2	安庆	2018年6月12日11:16	5.35	30179.2	18972	1011.1
3	安庆	2018年6月14日11:16	5.97	29081.1	19516	892.6
4	安庆	2018年6月15日11:18	5.51	29994.6	19208	418.2
5	安庆	2018年6月16日11:29	5.27	30570.7	18150	644.5
6	安庆	2018年6月18日11:20	5.66	26865.7	19136	912.5
7	安庆	2018年6月20日11:17	5.53	31371.2	18926	1021.6
8	安庆	2018年6月21日11:16	5.65	29306.0	33902	305.1
9	安庆	2018年6月22日11:18	5.1	28202.6	19392	1177.0
10	安庆	2018年6月23日11:16	5.43	30850.2	18992	490.2
11	安庆	2018年6月24日11:16	5.55	27701.9	18954	1405.5
12	安庆	2018年6月24日23:16	4.4	27556.5	17696	311.4
13	安庆	2018年6月26日11:18	5.61	30465.0	18928	1888.9
14	安庆	2018年6月26日23:16	4.52	28411.9	12420	645.9
15	安庆	2018年6月27日23:20	4.64	25180.7	22234	1519.9
16	安庆	2018年6月28日23:19	4.24	27786.9	17158	1830.4
17	安庆	2018年6月29日11:16	5.45	29755.9	18888	1719.3
18	安庆	2018年7月3日11:17	5.36	29275.6	11298	281.4
19	安庆	2018年7月4日23:16	4.57	23368.3	18094	343.1
20	安庆	2018年7月6日11:17	5.47	29047.2	19284	946.8
21	安庆	2018年7月7日11:21	5.15	28400.5	20590	102.7
22	安庆	2018年7月8日11:16	5.31	30274.4	20532	1465.7
23	安庆	2018年7月9日23:19	4.52	28146.0	17490	1541.7
24	安庆	2018年7月10日11:17	5.48	29866.3	11066	725.7
25	长沙	2018年6月14日23:25	5.67	23743.3	19070	1663.2
26	长沙	2018年6月28日23:20	5.19	22580.0	18724	1699.6

表 1 （续）

编号	站名	放球时间	上升段平均升速/m s^{-1}	平漂的平均高度/m	平漂持续时长/s	结束观测高度/m
27	赣州	2018年6月10日11:23	5.8	25667.9	18854	1057.8
28	赣州	2018年6月19日23:24	5.13	24282.7	19160	1053.3
29	赣州	2018年6月21日12:07	5.51	28330.0	15940	1729.8
30	赣州	2018年6月22日23:52	5.15	22207.7	16512	1965.1
31	赣州	2018年6月26日23:42	5.19	27923.8	6634	393.1
32	赣州	2018年6月29日00:00	5.03	28332.3	10304	1797.9
33	南昌	2018年6月10日11:34	5.25	29969.9	13424	476.1
34	南昌	2018年6月11日23:26	5.47	22955.6	18912	322.7
35	南昌	2018年6月13日11:23	5.51	28954.7	16842	1267.0
36	南昌	2018年6月14日23:17	6.02	25339.4	19970	643.6
37	南昌	2018年6月15日11:14	5.82	27247.9	19510	606.6
38	南昌	2018年6月24日11:23	6.18	29927.2	19298	1863.6
39	南昌	2018年6月29日11:18	6.04	28845.3	15660	260.0
40	南昌	2018年6月30日23:54	5.86	26778.2	12190	660.7
41	南昌	2018年7月5日11:16	5.92	27388.5	12650	410.9
42	武汉	2018年6月9日23:48	5.42	25367.8	13446	757.8
43	武汉	2018年6月10日11:39	5.28	29394.4	17866	1242.4
44	武汉	2018年6月11日11:34	5.75	28057.0	18072	48.5
45	武汉	2018年6月12日23:47	5.0	27175.0	11462	1474.6
46	武汉	2018年6月14日23:26	4.93	25345.1	18474	292.4
47	武汉	2018年6月16日11:18	4.98	31547.3	18006	364.3
48	武汉	2018年6月17日11:26	5.61	30091.7	19352	1181.3
49	武汉	2018年6月19日11:37	5.76	22980.8	18008	1507.3
50	武汉	2018年6月19日23:42	5.48	22872.1	24980	88.1
51	武汉	2018年6月20日11:16	5.18	30033.7	18532	979.9
52	武汉	2018年6月21日11:20	5.26	30236.0	18398	849.0
53	武汉	2018年6月24日23:28	5.42	27809.2	18242	1043.8
54	武汉	2018年7月1日11:17	5.47	30633.1	19800	1272.6
55	武汉	2018年7月3日23:36	5.47	25358.3	18286	359.7
56	武汉	2018年7月5日23:25	5.24	24751.3	13314	147.5
57	武汉	2018年7月8日11:37	6.11	30270.1	18198	1826.3
58	武汉	2018年7月9日23:37	5.59	25993.8	11694	168.6
59	宜昌	2018年6月9日11:27	6.12	29254.1	18898	946.9
60	宜昌	2018年6月10日23:42	5.51	23014.8	18074	481.2
61	宜昌	2018年6月11日11:36	4.91	26514.1	15902	71.6
62	宜昌	2018年6月21日11:22	5.58	28418.9	18782	1140.5
63	宜昌	2018年6月26日23:45	5.18	27300.0	9438	1245.4
平均值			5.39	27693.2	17481	917.4

将式（7）代入公式（4）中得

$$C_{\mathrm{p}} = \frac{m_{\mathrm{t}} g}{\rho_{\mathrm{a}} A_{\mathrm{p}} w_{\mathrm{p}}^2}. \tag{8}$$

以安庆 2018 年 06 月 11 日 11 时施放的往返平飘式探空作为参考，其在降落阶段的末端（28000 s 后），其降落的加速度近似为零，满足降落伞完全打开所需的时间是 3 s，其运动可以认为达到了平衡状态，降落伞最终的降落速度为 3.5 m s^{-1}（如图 1 所示）。并已知往返平飘式探空采用的降落伞横截面积 A=0.554 m^2，下降阶段探空系统总质量 m_{t}=0.266 kg，结合降落最后阶段观测到的大气环境参数（温度 T_{a}=257.9 K，气压 P_{a}=916.24 hPa），

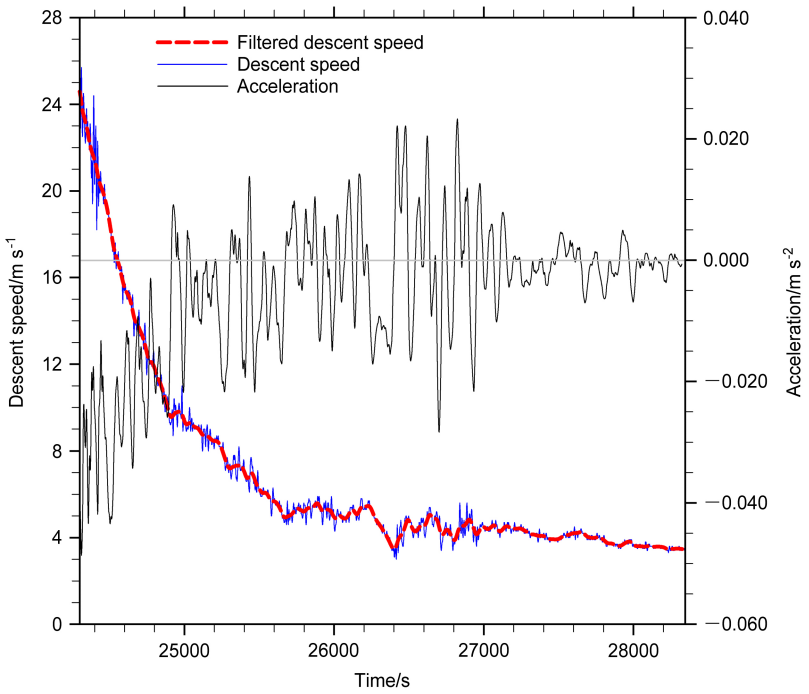

图 1 安庆站 2018 年 6 月 11 日 11 时 16 分（协调世界时，下同）开始的往返平飘式探空下降段观测的下降速度（蓝线）、采用 Lanczos 滤波器滤波后的下降速度（红线）和下降段的加速度（黑线）

Fig. 1 Observed (blue line), filtered (red line, using Lanczos method) descent speed of returned radiosonde, and the acceleration (black line) during descent stage released at Anqing station at 1116 UTC on 11 June 2018

利用公式（6）可以计算降落伞的拖曳系数：

$$C_{\mathrm{p}}=\frac{m_{\mathrm{t}}g}{\rho_{\mathrm{a}}A_{\mathrm{p}}w_{\mathrm{p}}^{2}}=0.312. \qquad (9)$$

一般情况下，降落伞或者气球的拖曳系数是雷诺数的函数，而雷诺数由密度、障碍物的尺度以及速度决定（Gallice et al., 2011）。雷诺数的表达式为

$$Re=\frac{\rho_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{p}}w_{\mathrm{p}}}{\mu}, \qquad (10)$$

其中，Re 是雷诺数，R_{p} 是降落伞的半径，μ 是大气的动力粘性系数。但在现有试验数据条件下，无法精确计算拖曳系数与雷诺数的关系，故假设拖曳系数在降落伞打开过程和完全打开后的下降过程中近似保持不变，在整个下降速度模拟过程中采用公式（8）计算的拖曳系数。

3.5 典型模拟个例结果分析

选取安庆站 2018 年 6 月 20 日 11 时 17 分施放的往返平飘式探空作为典型模拟个例，分析和评估轨迹模拟的效果。图 2 是观测和模拟的往返平飘式探空整个观测过程的垂直速度和位势高度。观测到的往返平飘式探空上升速度在对流层内的变化相对较小，集中在 4～6 m s^{-1} 范围内，这与大气垂直运动和气球的热力变化密切相关；上升速度在平流层低层（10～16 km）附近波动较大，最大值可达 10 m s^{-1}，最小值是 4.2 m s^{-1}，这是非常有意思的现象，几乎所有观测试验均有相似的现象（图略），原因需进一步研究；上升速度在高度达到 16 km 以上后趋于稳定。从上述分析中可以发现，往返平飘式探空气球上升速度在上升段，特别是在对流层顶附近剧烈变动，目前原因仍然不明确。因此，采用上升速度的零级近似作为往返平飘式探空轨迹模拟和预测中气球上升速度对往返平飘式探空上升速度具有一定的代表性。在平漂段，往返平飘式探空的垂直速度仍然不严格等于零，也有一定的波动，平漂阶段中后期垂直速度在−2～2 m s^{-1} 波动，但其平均值几乎为零，说明假设平漂阶段垂直速度为零是合理的。下降段开始，往返平飘式探空剧烈下降，最大下降速度可到−26 m s^{-1}，这是由于往返平飘式探空的气球爆破后，降落伞的打开需要一个过程，使得下降速度迅速增大；随后降落伞的完全打开后，下降速度逐渐减小。从图 2 中可以发现，模拟的下降段下降速度与观测到的下降速度具有较好的一致性，说明往返平飘式探空轨迹预测方法中采用的降

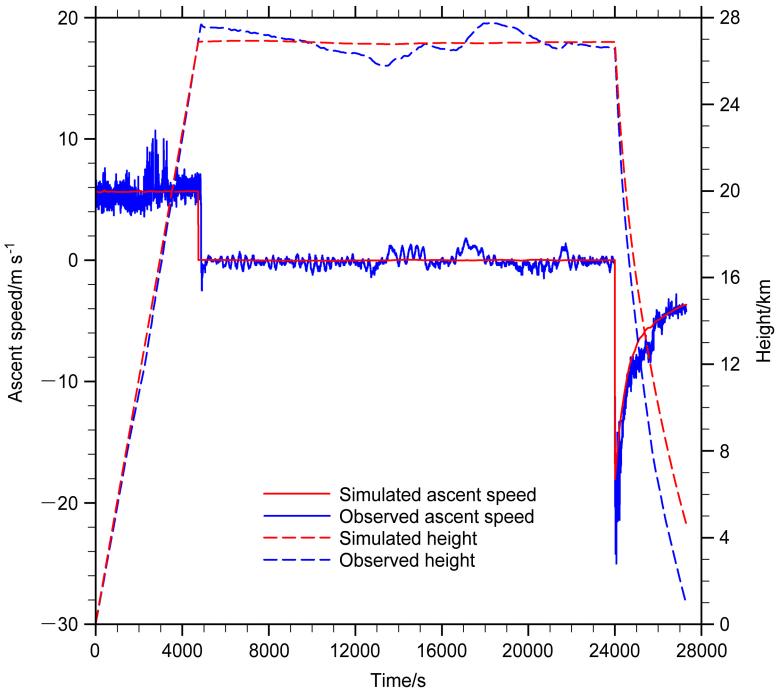

图 2　安庆站 2018 年 6 月 20 日 11 时 17 分施放的往返平飘式探空的垂直速度和高度。蓝（红）色实线是观测（模拟）垂直速度，蓝（红）色虚线是观测（模拟）的高度，速度方向向上为正值

Fig. 2　Observed and simulated ascent speed and height of returned radiosonde as released at Anqing station at 1117 UTC on 20 June 2018. The blue (red) solid line represent observed (simulated) ascent speed, the blue (red) dashed line represent observed (simulated) height. Positive values of ascent speed represent ascending stage

落伞下降速度模拟方案是合理可行的，但对于该个例，垂直速度模拟值偏小。

图 3 是观测和模拟的往返平飘式探空的轨迹图。从图中可以发现：上升段模拟的轨迹与观测的轨迹十分接近，这是由于模式在对流层内的风场模拟误差相对较小；在平漂段，随着预报时长的增加，模拟轨迹与观测轨迹之间的距离逐渐增大，这与模式风场在平流层误差较大有关；在下降段，模拟轨迹与观测轨迹之间的距离变化较小。从图 3 中还可以发现，模拟的平漂段轨迹相对观测轨迹非常平滑，这是由于模拟轨迹采用了完全固定的高度，没有考虑探空气球在平漂过程中的热力过程和大气的密度变化。其他时刻的模拟轨迹也具有相似的特点（图略）。

为了评估往返平飘式探空轨迹预报系统的性能，采用模拟轨迹与观测轨迹之间的距离（轨迹误差）作为衡量往返平飘式探空轨迹预测的精度。图 4 是该个例模拟的轨迹误差随时间的变化。从图 4 中可以发现：上升段轨迹误差随时间增长相对较慢，轨迹最大误差 4.2 km；平漂段轨迹误差随预报时间线性增大，轨迹误差最大可达 48 km。

3.6　平均轨迹预测误差

图 5 给出所有 63 个往返平飘式探空试验样本（表 1）的预报轨迹误差。从图 5 中可以发现，大部分试验样本轨迹误差随预报时间增长，最大轨迹误差达 142 km，最小轨迹误差小于 10 km。从图 5 中还可以看到，往返平飘式探空轨迹的平均预报误差（蓝线）随着预报时间线性增大，上升段（时间小于 5000 s）和下降段（时间大于 24000 s）轨迹误差增长率明显小于平漂段，这可能是因为数值天气模式在对流层风场的模拟误差小于平流层风场的模拟误差。预报时长为 6 h（21600 s）时，往返平飘式探空轨迹的平均模拟误差仅为 39.99 km。

3.7　轨迹预测误差原因初步分析

从图 5 中可以发现，不同的往返平飘式探空样本的轨迹预报误差具有明显差别，6 h 预报的最小误差为 2.8 km，而最大的预报误差可以达 114.8 km。为了深入理解较大轨迹预报误差产生的原因，选取轨迹预报误差较大的武汉站在 2018 年 7 月 8 日 11 时施放的往返平飘式探空预报结果（图 5 中红线）进行分析。从图 6 中可以看出，对流层中模式预报

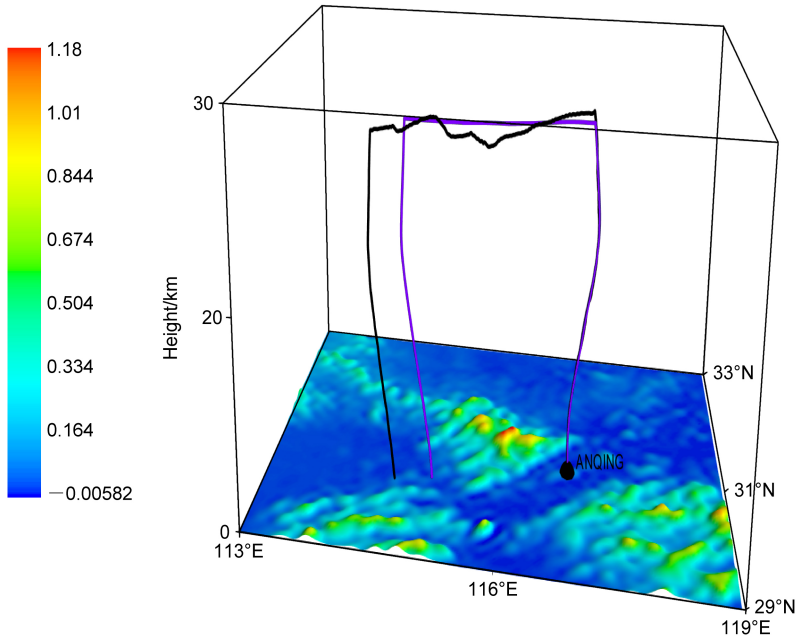

图 3 安庆站 2018 年 6 月 20 日 11 时 17 分施放的往返平飘式探空的轨迹。黑色线代表观测轨迹，紫色线代表模拟的轨迹，彩色阴影代表地形高度（单位：km）

Fig. 3 Observed (black line) and simulated (purple line) trajectories as released at Anqing station at 1117 UTC on 20 June 2018. The shadings represent the terrain height (units: km)

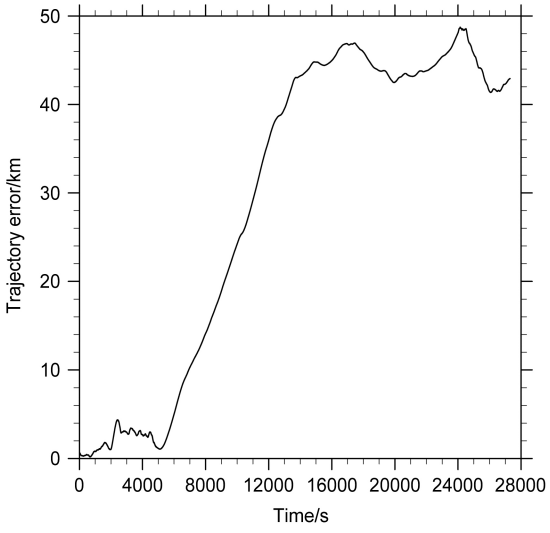

图 4 安庆站 2018 年 6 月 20 日 11 时 17 分施放的往返平飘式探空预报轨迹误差

Fig. 4 The forecast trajectory errors of returned radiosonde as released at Anqing station at 1117 UTC on 20 June 2018

的风场与观测的风场非常接近，误差相对很小；在平流层中，模式预报的风场与观测的风场相差很大，模式预报的东风偏强达 12 m s^{-1}，模式预报的纬向风风速误差最大约±10 m s^{-1}。从这些结果可以得出，模式预报的平流层风场误差较大是造成轨迹预报误差较大的主要原因。

4 总结和讨论

本文提出了一种基于高分辨率数值天气模式的往返平飘式探空轨迹预测方法，该方法的主要特点是将往返平飘式探空轨迹方程与下降段降落伞的动力学方程嵌入到数值天气模式中，直接利用高分辨率数值天气模式预报高时空分辨率的大气环境场，实现了对往返平飘式探空轨迹的高精度预报。为了较精确的模拟往返平飘式探空下降段的垂直速度和轨迹，本文首先详细推导了往返平飘式探空下降段降落伞的动力学过程，并利用观测数据分析确定了下降段的开伞过程所需时间和减速下降过程中的拖曳系数。进而，利用 GRAPES_MESO 高分辨率数值模式建立了往返平飘式探空轨迹预测系统。利用该轨迹预测系统对 63 次往返平飘式探空观测轨迹进行模拟和评估，结果表明该轨迹预测系统能够较好地模拟往返平飘式探空下降段垂直速度，并具备了往返平飘式探空轨迹模拟和预报能力，能够较精确的预报往返平飘式探空的运行轨迹，预报 6 h 的平均轨迹误差小于 40 km。本文发展的往返平飘式探空轨迹预报系统为开展往返平飘式探空组网观测模拟仿真和开展往返平飘式探空模拟观测同化影响

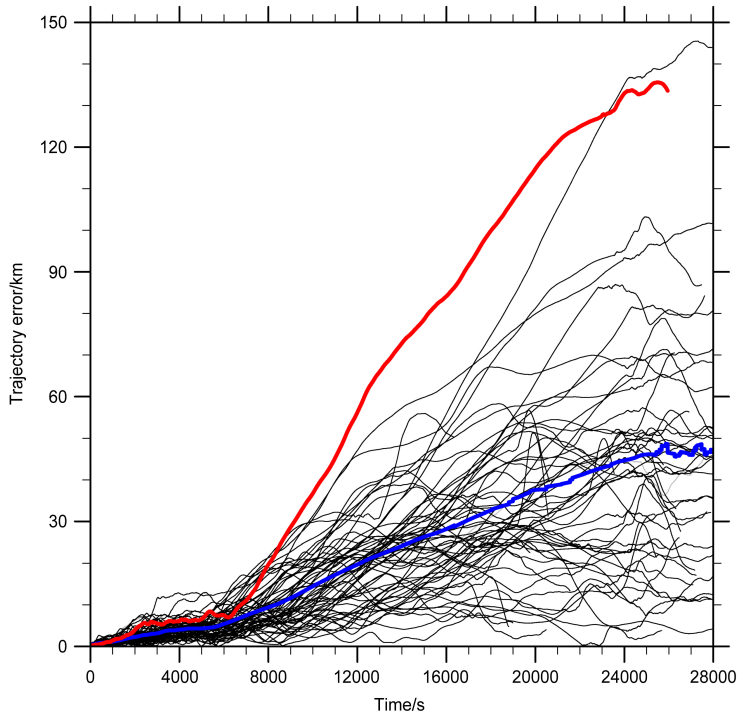

图 5　63 个往返平飘式探空模拟轨迹误差（黑色线）和平均轨迹误差（蓝色线）。红线代表 2018 年 7 月 8 日 11 时武汉站个例的轨迹预报误差，是 63 个样本中预报误差最大的

Fig. 5　The simulated trajectories errors for each sample (black line) and the mean errors (blue line) for 63 samples of returned radiosonde. The red line is the trajectory error at Wuhan station (forecast error is the largest) at 1100 UTC on 8 July 2018

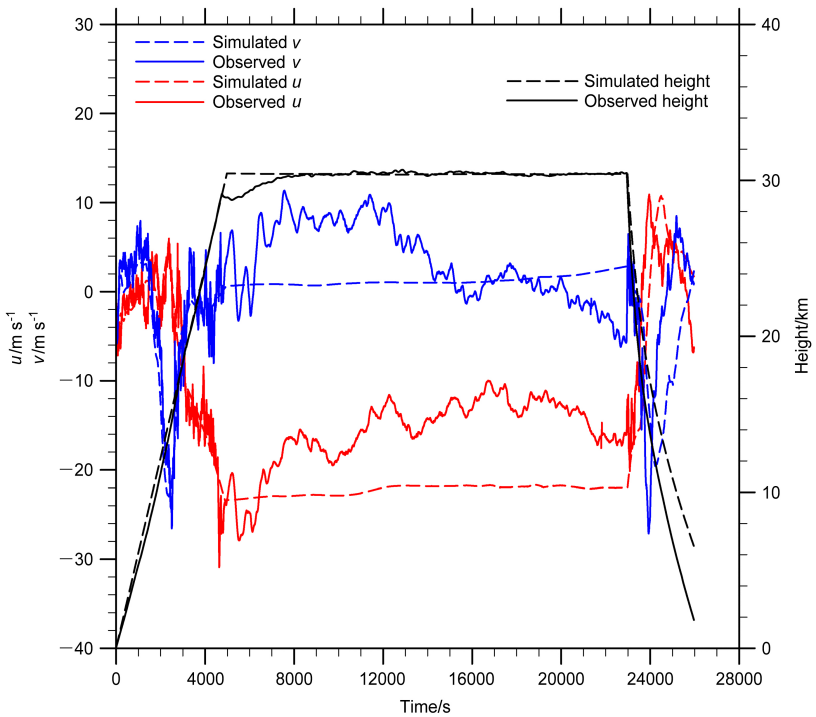

图 6　2018 年 7 月 8 日 11 时武汉站往返平飘式探空个例的观测和模拟的高度（黑色）、纬向风速 u（红色）、经向风 v（蓝色）。实（虚）线表示观测（模拟）值

Fig. 6　Observed and simulated height (black lines), zonal wind u (red lines), and meridional wind v (blue lines) of returned radiosonde case at Wuhan station at 1100 UTC on 8 July 2018. The solid (dashed) lines represent observed (simulated) values

试验奠定了基础，为往返平飘式探空在目标观测中的应用提供技术支撑平台，为未来探空仪器的回收再利用奠定了基础。

往返平飘式探空轨迹预测误差主要源自三个方面，一是数值模式预报的大气环境场存在不确定性，特别是平流层风场的不确定性较大；二是模式初始场的误差；三是往返平飘式探空上升阶段和平漂段探空气球热动力学模拟的不确定性造成的垂直速度模拟误差和下降段降落伞降落速度的模拟误差。随着模式改进，特别是模式对平流层风场预报误差的减小，未来往返平飘式探空轨迹预测系统的预报误差也会显著减小。本文建立的往返平飘式探空轨迹预测系统中，假设在静止大气中，往返平飘式探空气球在上升段保持匀速上升，在平漂段垂直速度为零，这样的假设精度相对较低（图 2）。对上升段和平漂段气球的热力学、动力学精确模拟可以进一步提高往返平飘式探空轨迹模拟和预报的精度，为此未来将对往返平飘式探空探空气球在上升段和平漂段的热力学、动力学过程开展深入研究。

参考文献（References）

曹晓钟, 郭启云, 杨荣康. 2019. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究 [J]. 仪器仪表学报, 40(2): 198−204. Cao Xiaozhong, Guo Qiyun, Yang Rongkang. 2019. Research of rising and falling twice sounding based on long-time interval of flat-floating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument (in Chinese), 40(2): 198−204. doi:10.19650/j.cnki.cjsi.J1803748

Cardinali C. 2009. Monitoring the observation impact on the short-range forecast [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135(638): 239−250. doi:10.1002/qj.366

Cucurull L, Anthes R A, Tsao L L. 2014. Radio occultation observations as anchor observations in numerical weather prediction models and associated reduction of bias corrections in microwave and infrared satellite observations [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(1): 20−32. doi:10.1175/JTECH-D-13-00059.1

Dai Q, Fang X D, Li X J, et al. 2012. Performance simulation of high altitude scientific balloons [J]. Advances in Space Research, 49(6): 1045−1052. doi:10.1016/j.asr.2011.12.026

Eyre J R. 2016. Observation bias correction schemes in data assimilation systems: A theoretical study of some of their properties [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 142(699): 2284−2291. doi:10.1002/qj.2819

Faccani C, Rabier F, Fourrié N, et al. 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system[J]. Wea. Forecasting, 24(5): 1268−1286. doi:10.1175/2009WAF2222237.1

Feng J, Wang X G. 2019. Impact of assimilating upper-level dropsonde observations collected during the TCI field campaign on the prediction of intensity and structure of hurricane Patricia (2015) [J]. Mon. Wea. Rev., 147(8): 3069−3089. doi:10.1175/MWR-D-18-0305.1

Gallice A, Wienhold F G, Hoyle C R, et al. 2011. Modeling the ascent of sounding balloons: Derivation of the vertical air motion [J]. Atmos. Meas. Tech., 4(10): 2235−2253. doi:10.5194/amt-4-2235-2011

郭启云, 杨荣康, 程凯琪, 等. 2020. 基于探空观测的多源掩星折射率质量控制及对比 [J]. 应用气象学报, 31(1): 13−26. Guo Qiyun, Yang Rongkang, Cheng Kaiqi, et al. 2020. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on sounding observation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 31(1): 13−26. doi:10.11898/1001-7313.20200102

郝民, 田伟红, 龚建东. 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究 [J]. 气象, 40(2): 158−165. Hao Min, Tian Weihong, Gong Jiandong. 2014. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(2): 158−165. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.003

Ingleby B, Rodwell M, Isaksen L. 2016. Global radiosonde network under pressure [R]. ECMWF Newslett., 149: 25–30. https://www.ecmwf.int/en/newsletter/149/meteorology/global-radiosonde-network-under-pressure [2021-02-21]

Jewtoukoff V, Plougonven R, Hertzog A, et al. 2016. On the prediction of stratospheric balloon trajectories: Improving winds with mesoscale simulations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33(8): 1629−1647. doi:10.1175/JTECH-D-15-0110.1

Kuo Y H, Schreiner W S, Wang J, et al. 2005. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes [J]. Geophys. Res. Lett., 32(5): L05817. doi:10.1029/2004GL021443

廖晓农, 俞小鼎, 于波. 2008. 北京盛夏一次罕见的大雹事件分析 [J]. 气象, 34(2): 10−17. Liao Xiaonong, Yu Xiaoding, Yu Bo. 2008. Analysis on infrequent big hail event in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(2): 10−17. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.02.002

Liao M, Zhang P, Yang G L, et al. 2015. Preliminary validation of refractivity from a new radio occultation sounder GNOS/FY-3C [J]. Atmos. Meas. Tech. Discuss., 8(9): 9009−9044. doi:10.5194/amtd-8-9009-2015

刘玉玲. 2003. 对流参数在强对流天气潜势预测中的作用 [J]. 气象科技, 31(3): 147−151. Liu Yuling. 2003. A study of severe convective parameters and their potential predictability to severe convective storms [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31(3): 147−151. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2003.03.004

刘晓璐, 刘建西, 张世林, 等. 2014. 基于探空资料因子组合分析方法的冰雹预报 [J]. 应用气象学报, 25(2): 168−175. Liu Xiaolu, Liu Jianxi, Zhang Shilin, et al. 2014. Hail forecast based on factor combination analysis method and sounding data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 25(2): 168−175. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2014.02.006

刘超, 花丛, 张恒德, 等. 2017. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用 [J]. 气象, 43(5): 591−597. Liu Chao, Hua Cong, Zhang Hengde, et al. 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(5): 591−597. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.008

卢萍, 李旭, 李英, 等. 2016. 空间加密探空观测资料对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响 [J]. 大气科学, 40(4): 730−742. Lu Ping, Li Xu, Li Ying, et al. 2016. The influence of spatially intensive sounding observation data on the numerical modeling of southwest vortex rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 730−742. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15170

Moteki Q, Shirooka R, Yoneyama K, et al. 2007. The impact of the assimilation of dropsonde observations during PALAU2005 in ALERA [J]. SOLA, 3: 97−100. doi:10.2151/sola.2007-025

Musso I, Cardillo A, Cosentino O, et al. 2004. A balloon trajectory prediction system [J]. Adv. Space Res., 33(10): 1722−1726. doi:10.1016/j.asr.2003.07.044

Privé N C, Errico R M, Tai K S. 2014. The impact of increased frequency of rawinsonde observations on forecast skill investigated with an observing system simulation experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 142(5): 1823−1834. doi:10.1175/MWR-D-13-00237.1

Radnóti G, Bauer P, McNally A, et al. 2012. ECMWF study to quantify the interaction between terrestrial and space-based observing systems on numerical weather prediction skill [R]. ECMWF Technical Memorandum No. 679. doi: 10.21957/yvf1ceq7i

沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展 [J]. 气象学报, 78(3): 451−476. Shen Xueshun, Wang Jianjie, Li Zechun, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(3): 451−476. doi:10.11676/qxxb2020.030

Sun B M, Reale A, Seidel D J, et al. 2010. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics [J]. J. Geophys. Res. Atoms., 115(D23): D23104. doi:10.1029/2010JD014457

王笑芳, 丁一汇. 1994. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究 [J]. 大气科学, 18(2): 173−183. Wang Xiaofang, Ding Yihui. 1994. Study on method of short-range forecast of severe convective weather in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18(2): 173−183. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.05

王丹, 徐枝芳, 王瑞文, 等. 2019. 14:00 加密探空对区域数值预报系统的影响研究 [J]. 高原气象, 38(4): 872−886. Wang Dan, Xu Zhifang, Wang Ruiwen, et al. 2019. Intensive radiosonde observations at 14:00 in China mainland and their impact study on mesoscale numerical weather prediction [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 38(4): 872−886. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00121

王丹, 王金成, 田伟红, 等. 2020. 往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析 [J]. 大气科学, 44(4): 865−884. Wang Dan, Wang Jincheng, Tian Weihong, et al. 2020. Quality control and uncertainty analysis of return radiosonde data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 865−884. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19203

魏蕾, 雷恒池. 2012. 加密探空资料同化对一次降水预报能力改进研究 [J]. 气候与环境研究, 17(6): 809−820. Wei Lei, Lei Hengchi. 2012. Improvement of precipitation forecasts by the assimilation of encrypted sounding data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(6): 809−820. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.18

Xu X H, Luo J, Shi C. 2009. Comparison of COSMIC radio occultation refractivity profiles with radiosonde measurements [J]. Adv. Atmos. Sci., 26(6): 1137−1145. doi:10.1007/s00376-009-8066-y

薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 206–342. Xue Jishan, Chen Dehui. 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction System GRAPES (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 206–342.

叶笃正. 1977a. 探空资料的应用 (一) [J]. 气象, 3(11): 5−7. Ye Duzheng. 1977a. Applications of radiosonde observations I [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 3(11): 5−7. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1977.11.005

叶笃正. 1977b. 探空资料的应用 (二) [J]. 气象, 3(12): 21−23. Ye Duzheng. 1977b. Applications of radiosonde observations Ⅱ [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 3(12): 21−23. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1977.12.016

张诚忠, 万齐林, 丁伟钰, 等. 2012. 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验 [J]. 气象学报, 70(1): 30−38. Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Ding Weiyu, et al. 2012. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of typhoon Morakot [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(1): 30−38. doi:10.11676/qxxb2012.003

Zhang L H, Gong J D, Wang R C. 2018. Diagnostic analysis of various observation impacts in the 3DVAR assimilation system of global GRAPES [J]. Mon. Wea. Rev., 146(10): 3125−3142. doi:10.1175/MWR-D-17-0182.1

庄照荣, 王瑞春, 李兴良. 2020. 全球大尺度信息在 3 km GRAPES-RAFS 系统中的应用 [J]. 气象学报, 78(1): 33−47. Zhuang Zhaorong, Wang Ruichun, Li Xingliang. 2020. Application of global large scale information to GRAEPS RAFS system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(1): 33−47. doi:10.11676/qxxb2020.002