



马玉芬¹ 陆辉¹ 刘海涛¹

HYSPLIT 模式轨迹计算误差分析

摘要

基于 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料 GDAS 和 NCEP $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析资料 GBL, 利用美国 NOAA 空气资源实验室 ARL 研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT, 对 2010 年 3 月 12 日 12 时和田站距地 100 m 高度空气质点的 3 d 前向轨迹进行了模拟, 分析了轨迹计算中的积分误差和分辨率误差。此次轨迹模拟试验中, 积分误差对轨迹计算误差的贡献很小。随着积分时间的延长, 积分误差略有增大。积分误差并未随着驱动数据分辨率的提高而减小。分辨率误差在积分的各个时刻并不相同, 它与地形高度与天气系统有关。在轨迹模式中, 轨迹计算基于风速在时间和空间上的线性插值, 轨迹模拟的不确定性也与插值有关。使用不同分辨率的驱动数据对轨迹计算结果影响显著, 分辨率误差对轨迹计算误差的贡献远大于积分过程中截断近似等带来的积分误差。

关键词

HYSPLIT 模式; 轨迹; 积分误差; 分辨率误差

中图分类号 P426

文献标志码 A

收稿日期 2013-02-19

资助项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (IDM201004, IDM201301); 新疆气象局科学基金 (200906); 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2013211B38); 新疆维吾尔自治区科技支撑计划 (201433112)

作者简介

马玉芬, 副研究员, 主要从事中尺度数值模拟及资料同化研究. mayf@idm.cn

0 引言

混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT 是由美国 NOAA 的空气资源实验室 ARL 研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模式。它能够用于计算空气团的轨迹^[1-2], 以及模拟复杂的扩散和沉降, 包括沙尘^[3-4]、对流层臭氧、二氧化硫、苯^[5-8]、火山喷发^[9]、森林火灾^[10]和汞^[11-12]的扩散模拟。这些研究工作使用了不同的资料来源, 但均基于 HYSPLIT 模式, 模式本身的模拟误差并没有进行细致的讨论, 也没有用实例进行检验。本文基于 GDAS (Global Data Assimilation System) 和 GBL (Spherical Boundary Layer), 利用 HYSPLIT, 对 2010 年 3 月 12 日 12 时和田站距地 100 m 高度空气质点的 3 d 前向轨迹进行了模拟, 分析了轨迹计算中的积分误差和分辨率误差。文中所用时间均为世界时。

1 资料和方法

计算后向轨迹所用的 NCEP 再分析资料是从 ARL 获取的 2010 年 3 月 9—15 日每日 6 h 分辨率的 GDAS 和 GBL 资料, 空间水平分辨率分别为 $1^\circ \times 1^\circ$ 和 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 包括 1 000~10 hPa 共 17 层上的位势高度、温度、纬向风和经向风, 1 000~300 hPa 各层比湿及 1 000~100 hPa 的各层垂直速度。

与传统的计算水汽传输路径的方法^[13]不同, HYSPLIT 计算轨迹使用了拉格朗日法。假设空气中的粒子随风飘动, 那么它的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分。最终的位置由初始位置 (p) 和第一猜测位置 (p') 的平均速率计算得到:

$$p(t + \Delta t) = p(t) + 0.5[V(p, t) + V(p', t + \Delta t)]\Delta t, \quad (1)$$

$$p'(t + \Delta t) = p(t) + V(p, t)\Delta t. \quad (2)$$

积分时间步长是可变的:

$$V_{\max} \Delta t < 0.75. \quad (3)$$

与普通的空间插值法^[14]不同, 此处气象数据在水平坐标保持其原有格式, 而垂直方向被内插到地形追随坐标系统:

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}). \quad (4)$$

其中: Z_{top} 为轨迹模式坐标系统的顶部; Z_{gl} 为地形高度; Z_{msl} 为坐标下边界高度。

在计算轨迹时, 轨迹误差的估计尤为重要。与真实状况相比, 拉格

¹ 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐, 830002

朗日方法计算的轨迹误差一般在 15%~30%。误差由以下 4 部分组成:由数据的时空代表性不足导致的物理偏差、由数值不准确性造成的计算误差、模式的气象场产生的仪器误差和使用气象预报场驱动时带来的预报误差。其中,物理误差与数值场描述真实流场的好坏有关,除了使用单独的验证数据,该误差无法预知。计算误差由截断近似等造成的积分误差和资料分辨率组成,本文对这 2 种计算误差展开讨论。

2 天气个例

2010 年 3 月 12 日 14 时 35 分开始,新疆和田地区自西部皮山开始至东部民丰发生了一场自 20 世纪 60 年代以来强度最强、影响范围最广的特强沙尘暴(即黑风)天气过程,人工气象观测站最低能见度普遍在 20 m 以下,和田市及其以东的洛浦、策勒、于田、民丰最低能见度均为 0 m,黑风过程期间瞬时极大风速在 13.7~22.6 m/s。黑风平均持续时间 131 min,最长的和田站达 187 min,最短的皮山站 54 min。黑风天气导致和田地区交通、电力、通信中断,地膜、塑料大棚等农业设施严重受损,全地区直接经济损失达 2 150.8 万元。

2010 年 3 月 12 日 00 时,环流形势为两脊一槽型,经向度较大,在 55~80°E 为一槽区,槽底达 40°N, 45°E、85°E 附近为 2 个脊,出现温度槽落后于高度槽的高空冷槽和强锋区,冷中心在 65°E、50°N 位置,中心强度达 -40 °C,冷槽底部在巴尔喀什湖至北疆形成一支风速大于 20 m/s,最大风速达 44 m/s 的强西风急流带,对应 700 hPa 上乌拉尔山也有一冷低压槽,锋区进一步加强,进入蒙古西部至北疆,温度槽明显落后于高度槽,槽后冷中心强度达 -28 °C,说明有较强的冷平流发展南压;12 日 14 时,强冷空气东移南下,冷中心移至巴尔喀什湖,西天山至盆地南部的和田区域处于槽底强西风急流区里,对应 700 hPa 强锋区已完全进入到和田,最大风速达 22 m/s,和田气象站的温差达 20 °C。3 月 12 日 06 时地面图(图 1)上,中亚受冷高压控制,围绕西天山冷高分布呈大张的“虎口”形状。虎口两侧、后端为冷高中心,中心强度达 1 035 hPa,与此同时贝加尔湖南部也有一中心为 1 032.5 hPa 的强冷高压,新疆处在两高之间的低压带中,南疆盆地和田犹如“虎口”之食,受热低压控制,中心值为 1 007.5 hPa。12 日 11 时冷锋由天山北侧进入盆地,尾部处在和田上空的皮山、和田之间,皮山站已出现能见度为 0 m 的黑风,此时和

田站的海平面气压降至 999.4 hPa,与皮山站气压差达 9.6 hPa,温度差达 11.0 °C,和田及其以东仍处在负变压区中,12 日 14 时正变压区覆盖和田全境,和田+ Δ P3 达 6.3 hPa,08—16 时冷锋自西向东扫过和田及其以东区域,所经之处爆发了黑风,12 日 17 时以后冷高压和冷锋减弱东移出和田区域上空,黑风天气结束。

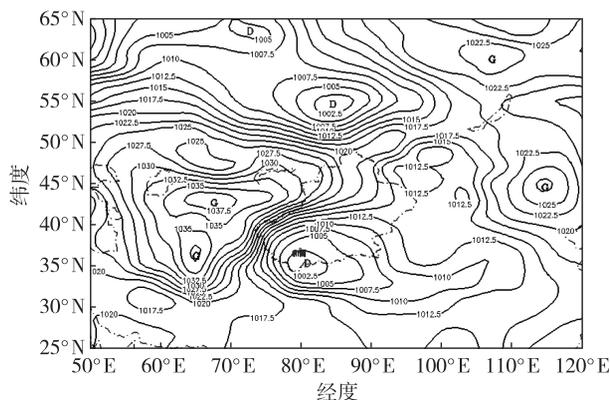


图 1 2010 年 3 月 12 日 06 时和田及其附近地区地面气压
Fig. 1 Surface pressure over Hetian and its adjacent region at 1206UTC on March 12, 2010

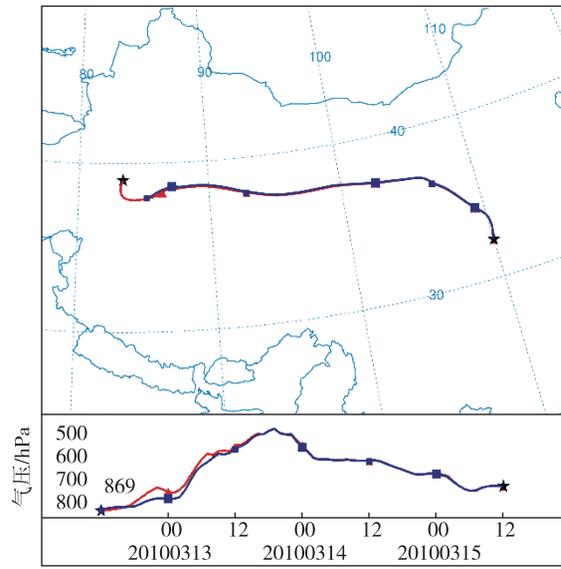
本文以此次黑风天气为例,对 2010 年 3 月 12 日 12 时和田站距地 100 m 高度空气质点的 3 d 前向轨迹进行了模拟,分析了轨迹计算中的积分误差和分辨率误差。

3 误差分析

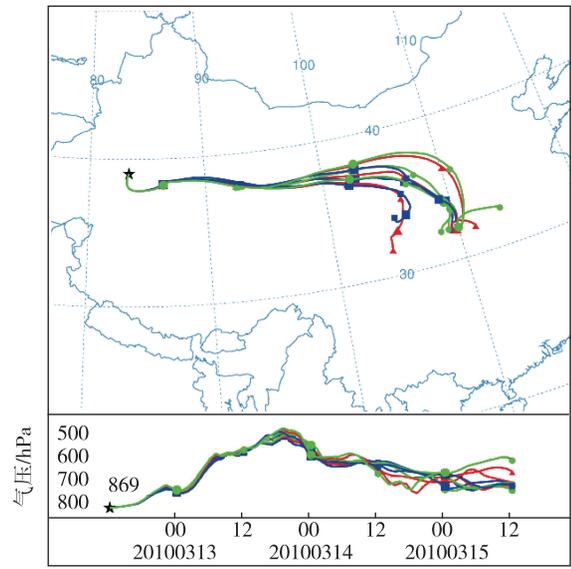
3.1 积分误差

轨迹计算误差中的积分误差部分可以通过从前向轨迹的终点做后向轨迹模拟并比较条轨迹的差异来估计。向前积分的起点设为 (83.4°E, 39.0°N, 100 m AGL), 向前积分 72 h, 再将此时到达的点作为起点,此刻作为初始时刻,向后模拟 72 h。

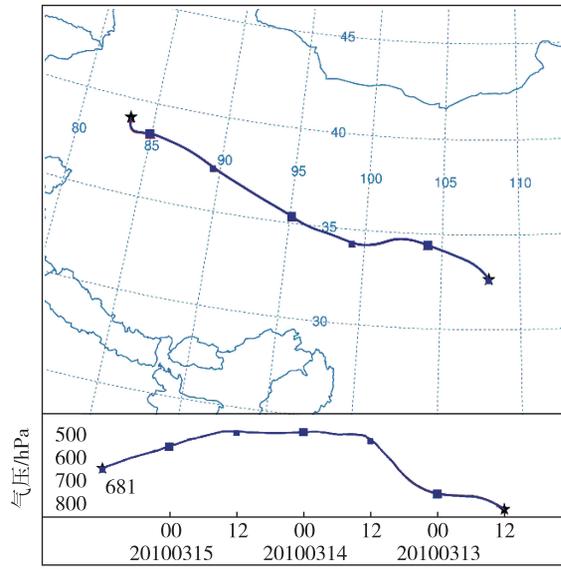
GDAS 资料模拟的前后向轨迹仅在 12 日 18 时到 13 日 12 时期间前、后向轨迹在高度和传输距离上有些许差别,最大高度差约达 40 m。水平方向的最大位移达 26 km 左右,出现在 12 日 12 时。在 13 日 12 时以后,前后向轨迹完全重合(图 2a)。GBL 数据模拟的前后向轨迹非常吻合(图 2b)。此次轨迹模拟试验中,积分误差对轨迹计算误差的贡献很小。随着积分时间的延长,积分误差略有增大。积分误差并未随着驱动数据分辨率的提高而减小。



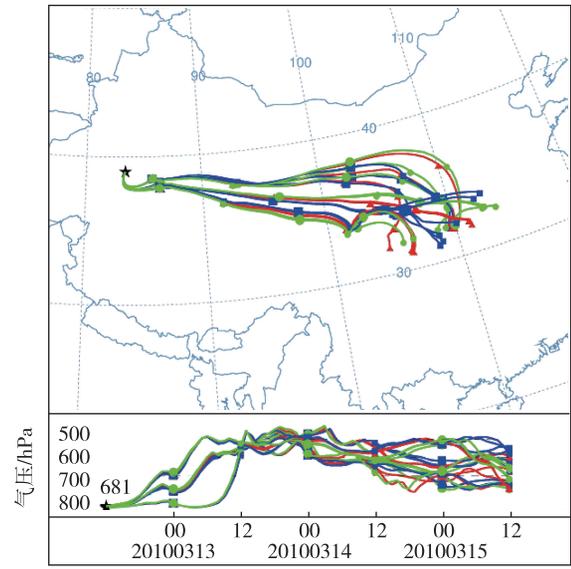
a.GDAS



a.GDAS



b.GBL



b.GBL

图2 积分误差估计时的轨迹水平和垂直分布
(红线为前向轨迹,蓝线为后向轨迹)

Fig. 2 Horizontal and vertical distribution of trajectories for integration error estimation (red lines for forward trajectory while blue for backward)

图3 集合预报方法估计分辨率误差时不同分辨率资料驱动法的轨迹水平和垂直分布

Fig. 3 Horizontal and vertical distribution of trajectories for resolution error estimation by ensemble prediction forced by datasets with different resolution

3.2 分辨率误差

轨迹计算误差中的分辨率误差部分估计方法之一是类似集合的方法.在模拟的初始位置的平面上的东南西北4个方向上各取100 m偏移,在垂直方向上分别向上和向下取25 m的位移,获得 $3 \times 3 \times 3$ 的空间点阵,共计27个初始点.所取得偏移量与积分误差的计算结果相接近,通过这些轨迹的扩散来估计流场辐散的不确定性(图3).

使用GDAS资料模拟的轨迹集合(图3a)中,27

条轨迹的空间走向非常一致,在积分48 h之后才略有扩散.使用GBL资料模拟的轨迹集合(图3b)中,27条轨迹在水平方向上的走向一致,随着积分时间的增加而逐渐分散.在垂直方向上,轨迹在13日00时按高度大致分为3类,此3类轨迹在13日12时重新合并并且到达550 hPa附近的高空,其后,轨迹高度均缓慢下降.

分辨率误差在积分的各个时刻并不相同,它与地形高度及天气系统有关.一方面,在模式积分到不

同的时刻,驱动数据对空气质点所在位置地形高度的描述能力不尽相同.比如 GDAS 和 GBL 数据中和田站的海拔高度就不同,较高分辨率的 GDAS 数据中和田站的海拔高度为 1 109 m,GBL 中为 1 284 m,和田气象站的实际海拔高度约为 1 104 m,可见, GDAS 数据对该站地形高度的描述能力更强,说明分辨率误差与地形高度有关.另一方面,分辨率较低时,次网格尺度的天气过程可能被忽略.当某一天气过程的空间尺度大于 110 km 而小于 250 km 时, GDAS 数据能够捕捉到该天气过程的风场变化,从而较为准确地模拟出相应空气质点的轨迹,而 GBL 则不能,所以,分辨率误差也与地天气系统相关.

为了定性分析驱动数据分辨率对轨迹模拟误差产生影响的机制,绘制了 12 日 12 时塔克拉玛干沙漠一个高压系统中的地表风场(图 4).图 4a 为 GDAS 驱动轨迹模式模拟的结果,而图 4b 为用 GBL 资料模拟的结果.从图中可以看到,由于驱动数据分辨率的不同,所描述风场在风向、风速上均有差别,对天山南麓的风场切变的描述也有所不同.在轨迹模式中,轨迹计算基于风速在时间和空间上的线性插值,因此,轨迹模拟的不确定性也与插值有关,而气象驱动资料的水平和垂直分辨率与模拟空间的实际风场和积分时间有关.

另一种估算分辨率误差的方法是在同一初始时刻的同一初始点上使用不同分辨率的资料进行轨迹模拟.如图 5 所示,尽管轨迹模拟的起点源自同一位势高度,但其海拔高度和气压值均互不相同,这是由这 2 种资料中海拔高度场的不同造成的.

2010 年 3 月 12 日 12 时, GDAS 的模拟结果中,和田站地面以上 100 m 处气团在向东传输过程中随着地形高度的升高而上升,在 13 日 20 时左右,轨迹途经地形高度为海拔 4 000 m 的地区,气团高度也随之达到最大,位于 6 000 m 高空,其后开始缓慢下降. GBL 的模拟结果中,气团高度随着东移过程中地形高度的升高而升高,在 13 日 12 时左右上升至海拔 5 000 m 附近,在其后的 24 h 内,高度无明显变化,其后开始缓慢下降,在 15 日 12 时下降至海拔 3 000 m 高度.无论用哪种分辨率的气象场做轨迹模拟的驱动数据,所模拟气团的高度均随其下方地形高度的升高而升高,上升速度大于地形高度的上升,这是地形抬升作用的表征.而后气团随着地形高度的降低开始下降.使用 2 种资料驱动轨迹模式 HY-SPLIT 模拟的轨迹在各个时刻空间距离随时间的变

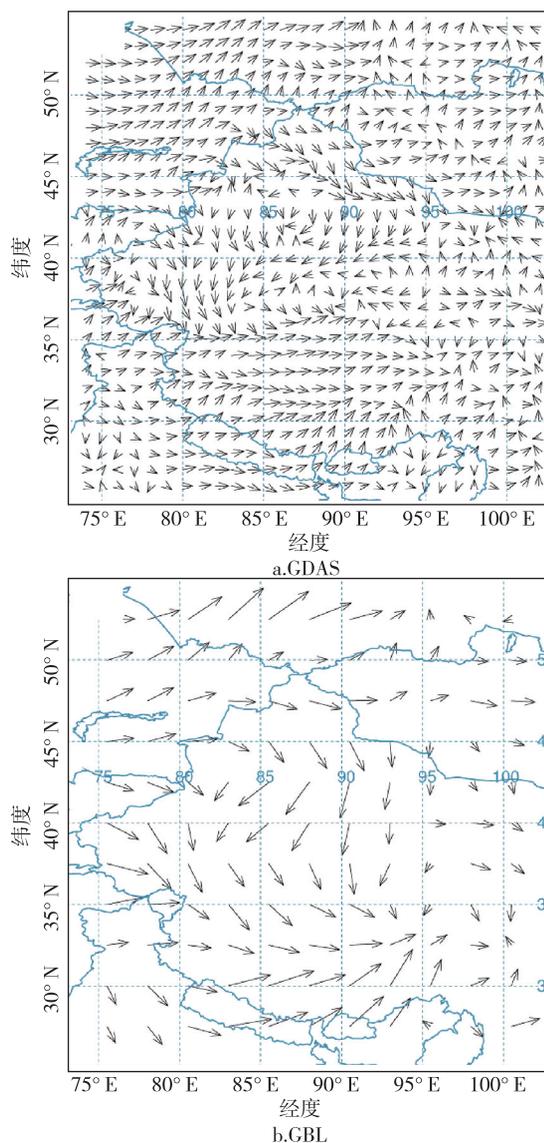


图 4 12 日 12 时地表风场

Fig. 4 Land-surface wind vector at 1212UTC on March 12, 2010

化如图 5c 所示,轨迹走向趋势一致,在水平方向上和垂直方向上模拟的轨迹偏差距离随着积分时间的延长先增后减,在 14 日 12 时彼此偏离 732.463 km,此刻在垂直方向上也偏离了 1 239.6 m.可见,使用不同分辨率的驱动数据对轨迹计算结果影响显著,分辨率误差对轨迹计算误差的贡献远大于积分过程中截断近似等带来的积分误差.

4 结论与讨论

采用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料 GDAS 和 NCEP2. $5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析资料 GBL,利用美国 NOAA 空气资源实验室(ARL)研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的混合单粒子拉格朗日

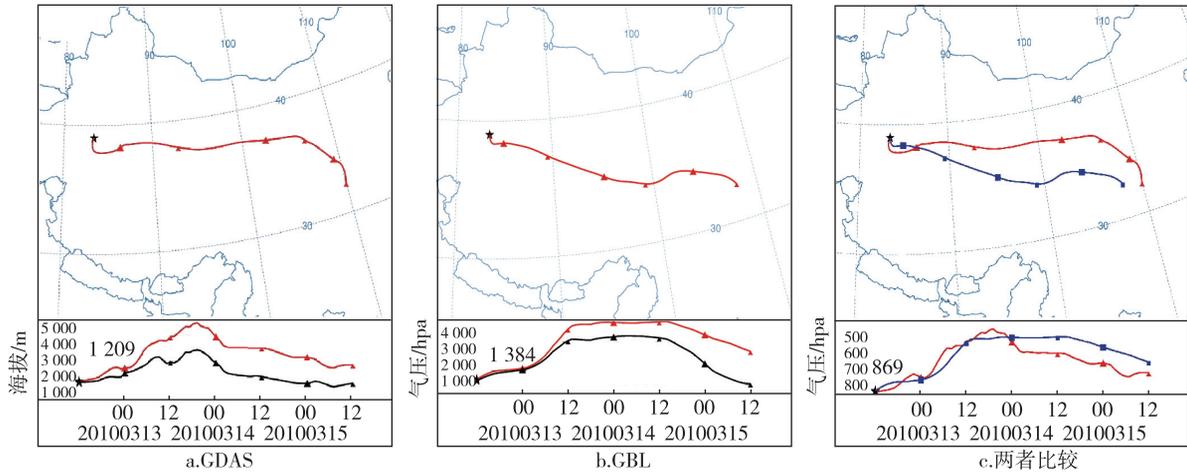


图5 不同分辨率资料驱动法的轨迹水平和垂直分布

(a, b 中红线为轨迹, 黑线为地形高度; c 中红线为用 GDAS 模拟的结果, 蓝线为 GBL 资料模拟的结果)

Fig. 5 Horizontal and vertical distribution of trajectories forced by datasets with different resolution (red lines indicate trajectories while black for altitude in figure a and b; red line for the trajectory from GDAS while the blue for that from GBL in figure c)

综合轨迹模式 HYSPLIT, 对 2010 年 3 月 12 日发生在新疆和田地区的典型区域性黑风沙尘传输轨迹进行了模拟, 分析了 2 种轨迹计算误差, 即积分误差和分辨率误差. 研究表明:

1) 此次轨迹模拟试验中, 积分误差对轨迹计算误差的贡献很小. 随着积分时间的延长, 积分误差略有增大. 积分误差并未随着驱动数据分辨率的提高而减小.

2) 分辨率误差在积分的各个时刻并不相同, 它与地形高度与天气系统有关.

3) 在轨迹模式中, 轨迹计算基于风速在时间和空间上的线性插值, 轨迹模拟的不确定性也与插值有关. 气象驱动资料的水平和垂直分辨率与模拟空间的实际风场和积分时间有关.

4) 使用不同分辨率的驱动数据对轨迹计算结果影响显著, 分辨率误差对轨迹计算误差的贡献远大于积分过程中截断近似等带来的积分误差.

5) 空气质点的实际传输轨迹并不可知, 缺乏真实的观测资料进行验证, 本文仅对比分析了 2 种不同分辨率的资料驱动轨迹模式模拟的结果, 以分析其积分误差和分辨率误差, 所有结论仅基于本次天气过程, 并不一定具有普适性.

参考文献

References

- [1] Draxler R R. Boundary layer isentropic and kinematic trajectories during the August 1993 North Atlantic regional experiment intensive [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101 (D22): 29255-29268

- [2] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT 4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47: 295-308
- [3] Escudero M, Stein A, Draxler R R, et al. Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model [J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2006, 111 (D6), doi: 10.1029/2005JD006395
- [4] Draxler R R, Gillette D A, Kirkpatrick J S, et al. Estimating PM10 air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait, and Saudi Arabia [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35 (25): 4315-4330
- [5] Rolph G D, Draxler R R, de Pena R G. Modeling sulfur concentrations and depositions in the United States during ANATEX [J]. Atmospheric Environment, 1992, 26 (1): 73-93
- [6] Stein A F, Lamb D, Draxler R R. Incorporation of detailed chemistry into a three-dimensional Lagrangian-Eulerian hybrid model: Application to regional tropospheric ozone [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34 (25): 4361-4372
- [7] Draxler R R. Meteorological factors of ozone predictability at Houston, Texas [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, 50 (2): 259-271
- [8] Stein A F, Isakov V, Godowitch J, et al. A hybrid modeling approach to resolve pollutant concentrations in an urban area [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41 (40): 9410-9426
- [9] Stunder B J B, Heffter J L, Draxler R R. Airborne volcanic ash forecast area reliability [J]. Weather and

- Forecasting, 2007, 22(5): 1132-1139
- [10] Rolph G D, Draxler R R, Stein A F, et al. Description and verification of the NOAA smoke forecasting system: The 2007 fire season [J]. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(2): 361-378
- [11] Cohen M, Fine S, Hathaway P G, et al. NOAA report to congress: Mercury contamination in the Great Lakes [R]. Submitted to Congress on May 14, 2007; 162
- [12] Cohen M, Artz R, Draxler R, et al. Modeling the atmospheric transport and deposition of mercury to the Great Lakes [J]. *Environmental Research*, 2004, 95(3): 247-265
- [13] 何跃, 管兆勇, 林永辉. 强弱南海夏季风年水汽输送路径特征分析 [J]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2009, 1(1): 32-37
- [14] HE Yue, GUAN Zhaoyong, LIN Yonghui. Characteristics of the water vapor transporting path in strong and weak SCS summer monsoon years [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 1(1): 32-37
- [14] 秦伟良, 刘悦. 空间插值法在降水分布中的应用 [J]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 2(2): 162-165
- QIN Weiliang, LIU Yue. Application of spatial interpolation in rainfall distribution analysis [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 2(2): 162-165

Trajectory calculation error assessment for HYSPLIT

MA Yufen¹ LU Hui¹ LIU Haitao¹

¹ Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

Abstract Based upon GDAS and GBL NCEP reanalysis data with resolution $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ and $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ respectively, the trajectory of the air mass at 100 m altitude over Hetian meteorological station is simulated by HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), which is developed by Air Source Laboratory of NOAA, to estimate the effect of integration error and resolution error on the trajectory calculation error. The contribution of the integration error is found to be very small, which increases slightly with the integration time length and has no relation to the resolution of the meteorological data. The resolution error varies at different time point, and is found to be related to the topography, the weather system and the interpolation. The simulated trajectories using datasets with different resolution differed with each other significantly, indicating that the resolution error contributes more to the trajectory calculation error than calculation error.

Key words HYSPLIT model; trajectory; integration error; resolution error