

# 澳大利亚气象研究中心的 轨迹计算及其应用

G. A. Mills

吴宝俊

(澳大利亚气象研究中心)

(中国气象科学研究院)

## 提 要

从天气分析和预报提供的后向轨迹信息可以加强预报指导。澳大利亚气象研究中心(BMRC)开发了一个计算三维后向和前向轨迹的软件,使用的资料是澳大利亚气象局有限区域36小时3个风速分量的业务预报。它们有三种可用的输出形式:后向轨迹、前向轨迹及36小时气块垂直位移等值线场。这个软件已于分析诊断研究。

关键词: 后向轨迹 前向轨迹 垂直位移等值线

## 引 言

后向轨迹计算在天气分析中已应用了多年。Keap(1972)<sup>[1]</sup>在强天气预报中应用业务数值预报输出产品计算轨迹。Whitaker等(1988)<sup>[2]</sup>和 Mills(1989)<sup>[3]</sup>将后向轨迹计算技术应用到天气个例研究。

在计算轨迹中应用了NWP模式场,其优点是三维风场是平衡的,为准确的预报提供可用的垂直运动场。Kuo等(1985)<sup>[4]</sup>证实,尽管轨迹计算有定性直观之优点,但其弱点是在考虑气块高度变化时存在固有误差。

澳大利亚有限区域业务NWP系统最普通的输出形式是各等压面的一系列等高线场的预报图表,提供了系统随时间的变化速率。本文用区域同化预报(RASP)有限区域资料同化系统<sup>[5]</sup>的36小时预报场计算轨迹,给出了另一种形式的指导预报。有三种可用的输出产品:后向轨迹、前向轨迹及预报期内气块的气压变化场。本文还给出了轨迹计算方法,并举例说明上述三种输出产品及其可能的应用。

## 1 轨迹的计算

在初始化后,RASP预报模式输出15个

$\sigma$ 面(0.98,0.95,0.9,0.85,0.78,0.7,0.6,0.5,0.4,0.3,0.25,0.2,0.15,0.1,0.05)上的变量及 $u, v, T, q, e$ 预报场,每隔3小时一次,直至36小时,分辨率为150km,65×40个网格点。

对任一给定格点,用Adams方法(H. Idebrand 1962,<sup>[6]</sup>)求解下列方程计算后向轨迹

$$\begin{cases} dx/dt = u(x, y) \\ dy/dt = v(x, y) \\ d\sigma/dt = \sigma(x, y) \end{cases}$$

时间步长为30分钟,速度分量用双向贝塞尔函数(Bessel)插值器内插到网格点间。时间插值用线性内插到连续3小时输出时间之间。

Kuo等(1985)<sup>[4]</sup>进行了敏感性实验,研究了用NWP模式输出产品做三维轨迹计算中与使用的资料序列的时空分辨率有关的误差。把他们的结论用到本文的资料序列,由于模式输出资料分辨率为150km,时间间隔3小时而引起的24小时预报误差应不大于200km和20hPa。一般说来,这不影响根据轨迹描述所得出的定性结论。

## 2 后向轨迹输出

从预报员的观点来说,能确定到达某一给定点的气块源地是最有启发意义的产品形式。

### 2.1 个例1

一个典型的应用实例是 Mills(1989)研究上升到锋面云带中的气块的来源。1985年8月27—28日晚,一个与冷锋相联系的云带在澳大利亚东南部明显扩展,导致降雨预报及白天的温度预报失败。

Mills 详细分析了这次天气过程,分析了引起云带发展的垂直环流,并通过后向轨迹分析,确定了进入云带的气块的源地。

此诊断分析研究中,用周期性插入增量的有限区域资料同化系统分析资料。尽管使用的分辨率为250km的粗网格,但得到的诊断量是连贯的、一致的,证实了同化系统分析与动力模式联系起来是有益的。

图1给出了包含云带的矩形区域的轨迹分类,轨迹终点选在700hPa,以0.5格点单位为间隔(即近似125km)。而图2则给出了每类轨迹的路线。

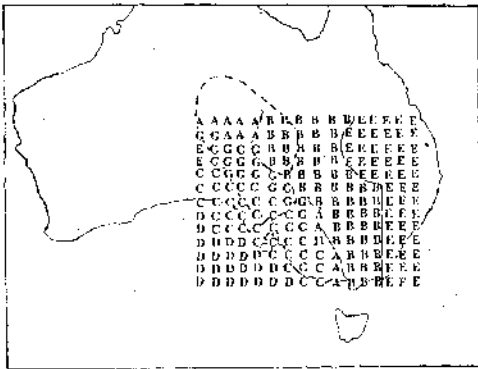


图1 1985年8月28日00时轨迹分类图  
终点在700hPa,每类轨迹路径见图2

轨迹E型与主槽前脊区相联,C型显示了锋后下沉,表示下沉气流。A、F、G型看来与“老”云带有关,维持相近的、尽管是自然的演变,贯穿云带的整个生命史。轨迹B起源于澳大利亚中部边界层,在最后18小时大部分是上升的,其终点都在主要云区的中部。轨迹B非常类似于 Harrold 所述的“暖输送带”

气流。必须注意,这些气流来源于澳大利亚北部内陆,气团已与边界层空气进行了很充分的混合。不同于A、F、G,尽管A、F、G开始时也是干的,但在上升的最后12小时显然为云的加厚提供了水汽。图1还给出了轨迹B 18小时前(27日06时)所在位置,即上升膨胀前的位置。B型轨迹前期(27日06时)为东北气流及其前期的位置,表明B轨迹先是一支上升的东北气流,它在很大程度上是等变高的,后来抬升变成西北气流。

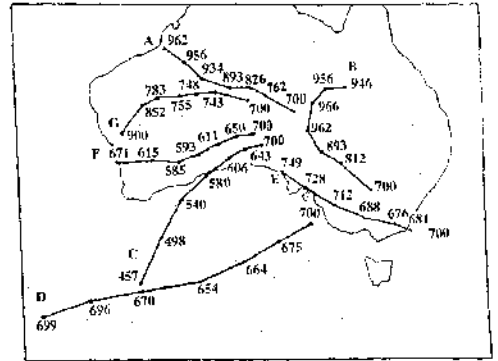


图2 1985年8月28日00时各类轨迹路径  
终点在700hPa

上升气流A、F、G较窄,接近云带尾部。前期与低层槽有关,而后在接近700hPa时有落后于低层槽的趋势。

湿度等值线最初近东西向穿越大陆的大部,加速的东北气流和槽前的西北气流使水汽向南平流。后向轨迹分析指出,大部分在大陆上发展、生成于中澳大利亚大陆边界层的云,开始随东北气流向西南加速运动,然后抬升进入槽前西北上升气流中。因此,这些上升轨迹可以认为具有源于澳大利亚中部边界层,在云带形成前12—18小时快速上升的特征(图略),是 Harrold<sup>[7]</sup>“暖输送带”。

### 2.2 个例2

1987年12月1日,有一中纬度气旋影响澳大利亚东南部大部地区。此气旋以出乎意外的发展速度爆发性发展。局地气压接近当地最低平均海平面气压纪录。伴随着大风,气温

异常低,有些地区雨量接近历史纪录。导致大范围地区受灾,其中包括大量牲畜死亡。与过去20年南澳大利亚的风暴相比,此风暴的路径出现在这个季节是相当异常的。

Velden 和 Mills<sup>[6]</sup>利用增值的有限区域资料同化系统分析的一系列资料,得出:(1)在气旋越过澳大利亚南部海岸时,一个增强的对流层高层波动影响气旋最初的发展及其路径。(2)在气旋快速加强时,与两支并列的高空急流有关的横向环流嵌入波中,中心附近上层辐散、中层上升,位于低压上空。(3)发展的低压上游,对流层高层有明显的等熵位涡(IPV)极大值,但没有在其他气旋爆发性发展个例中所发现的空气穿透挤压、加强低压环流的迹象。

为了进一步验证气旋上空平流层下沉气流是否到达对流层中部,计算了11月30日06时11×9个网格点的矩形区域的后向轨迹。中心定在低压中心(B处),终点在900、700、500和300hPa,轨迹是三维的,用6小时同化分析资料。图3给出了11月30日06时30小时后向轨迹示意图,其终点在500hPa。由图3可见,主要有4支气流。最明显的是气流C,其源地在远离大陆南边的海上,约在350—400hPa,先呈反时针方向向北下沉到700hPa附近,到达其最北端,然后转向东南,上升,最后与低压

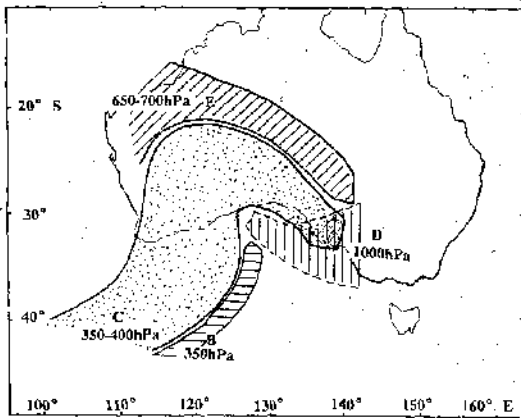


图3 11月30日06时30小时后向轨迹示意图  
终点在500hPa

B 叠置。这支气流的下沉部分并不与高空槽附近的 IPV 中心相接,但起源于与高空槽有关的宽广的高 IPV 槽区。气流 B 在到达风暴环流以前平行于气流 C。另外两支主要气流,一支是西北上升气流(E),起源于700hPa附近;一支是辐合明显的偏东气流 D。大部来源于大陆边界层,在气旋南部的东南气流中迅速上升。这几支气流与云的特征关系密切;东北上升气流汇入低压 B 东部和东北部发展的对流云团,低压西北部晴空区与下沉气流 C 相联,上升的东南气流 D 流入发展的逗点状云系。

后向轨迹也用于分析研究12月1日06时维多利亚州发生重大天气时气流的起源,并检验了在快速发展时的差异。另外,还与 Carlson(1980)<sup>[9]</sup>提出的概念模型和 Whitaker 等(1988)<sup>[10]</sup>诊断分析总统日风暴中提出的轨迹进行了比较。

图4给出了对终点在700hPa的气块的分析结果。由图4可见,有两支下沉气流(A,B),流入低压北部的干舌。气流 A 是北支,与其相联的气块在槽顶(风速最大区)附近运动,一般从300—400hPa 向下沉。气流 A 的上部(终点在400hPa),11月29日18时位于西澳大利亚上空,波状线后,起源于发展的 IPV 突出部分。下沉气流 B 西南部源地较低(550hPa),在其转向向前呈反气旋型弯曲,来自主槽轴(参见图3)。气流 C 与气流 B 路径

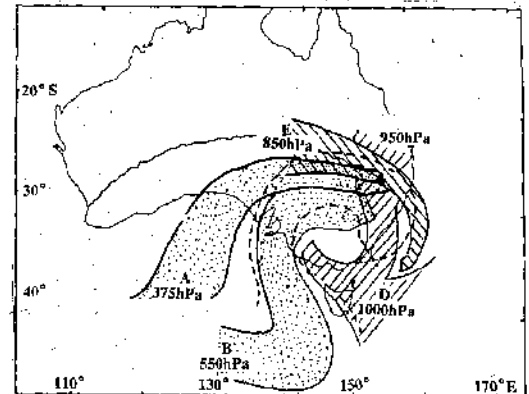


图4 12月1日06时36小时后向轨迹示意图

相同,但前者起点更靠北,在450hPa左右,终点刚好在低压B的东北方,并开始到达发展低压D的位置(图略)。这支气流先下沉到850hPa,到达其最北端,然后在低压前部变为上升气流。这支气流与图3中上升/下沉气流C非常相似。有趣的是,这支气流(气流C)在低压B快速发展时与其叠置,而有着相同起源的气流,当低压D在近海再度发展时刚好到达那一区域。

分析指出,有两支主要的上升气流。第一支(图4中E)起源于约850hPa 低压中心西北侧,呈气旋性曲线上升,最后到达新南威尔士近海,另一支气流(D)卷挟着气旋东部大范围的空气进入东南气流。值得注意的是,这支气流源于较暖的塔斯曼海边界层,意味着海表的通量会大大提高当日维多利亚地区上空在上升的东南气流中的雨量。24小时以前(见图3),这支气流源于大陆边界层,有少量的水汽提供给发展的低压B,如前所述,此低压在较干燥的空气中加强。

图4显出了 Carlson<sup>[9]</sup>(1980)概念模式的特征。Carlson 概念模式给出的气流是相对于运动系统的,而本文的轨迹相对于地球。与 Carlson 模式相比,与低压B有关的干舌(图4中气流A)稍宽了些。暖输送带(E)形状相似,但冷输送带(D)宽得多了,可以理解为较活跃。图4中气流A的形状及相应的较高层的特征,与 Whitaker 等(1988)<sup>[10]</sup>分析的总统日风暴表面上相似。然而不同的是,在 Whitaker 分析中,直到风暴发生爆发性发展时,这些气流才进入风暴中心附近。当然,这是由于受诊断分析所使用的资料精度的限制,这一点 Mills(1989)<sup>[3]</sup>作了详细的讨论。

### 2.3 个例3

1989年3月12-15日,一个季风低压西北-东南向穿过澳大利亚,在内陆产生了创纪录的雨量,导致澳大利亚大部内陆地区洪涝。Mills 和 Zhao<sup>[1]</sup>对其形势作了一系列可预报性数值试验。

季风低压穿越沿岸前,与其对应的大范围的对流运动,对于对流层高层斜压区的发展有一定影响,值得进一步研究。图5给出了3月13日00时终点在300hPa的36小时后向轨迹,是用同化分析资料计算的(见 Mills, 1989)<sup>[3]</sup>。计算时间间隔为6小时。由于季风低压对流区被平流到斜压带暖区一边(即进入澳大利亚东南部增强的高层脊),而A槽正南的空气平流到冷区一边(图略),轨迹的终点横在急流上,成为一支支流。

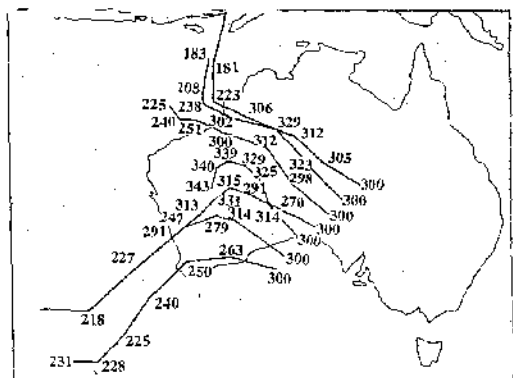


图5 1989年3月13日00时36小时后向轨迹图  
终点在300hPa

### 3 前向轨迹输出

除了指定起始点,而不是指定终点及在时间上向前而不是向后追踪路径外,这种输出资料与后向轨迹的计算方法完全一样。对天气气候分析来说,可能前向轨迹不如后向轨迹有用,但前向轨迹资料对严重污染事件,如核污染事故的研究很有用。图6给出了佩斯

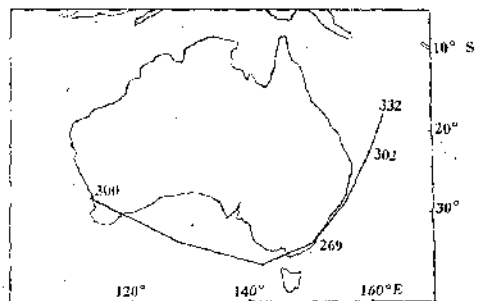


图6 1989年10月28日11时佩斯上空气块36小时前向轨迹

上空300hPa 一气块在时间上被向前追踪的例子。应当注意该计算不含扩散机制,因为不是大气污染模式。

#### 4 气块上升场

NWP 模式提供给预报员的基本垂直运动特征是在特殊层的瞬时垂直运动场。然而,从 Lagrangian 意义上来说,气块瞬时上升或下沉区不能显示气块上升(下沉)的量。后向轨迹给出了个别气块经历的上升(下沉)路径,但没有提供一个场。

一个替代产品(如 Phillips, 1989)<sup>[12]</sup>是显示在一个特殊的垂直坐标面中的气块24小时或36小时位移场。Phillips 把这种计算作为模式积分的一部分,使用后向轨迹软件包可得到相似的产品。在感兴趣的地理区域计算每个网格点的后向轨迹,求出每个轨迹起始点和终点的垂直坐标差,把得出的气块垂直位移量标在轨迹的终点,并在得出的气块位移场上画出等值线即可得到这种场。图7给出了此产品的例子。此例中格点阵选用的是150km 格点网预报模式子集。

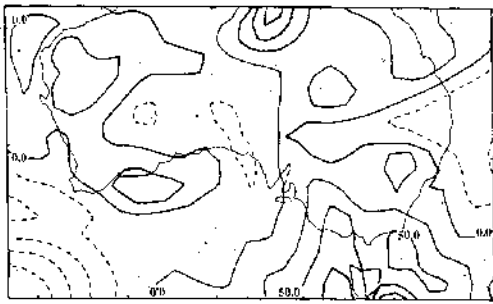


图7 1990年2月20日11时700hPa 气块垂直位移场  
等值线间隔为25hPa,正值区为上升区

此例可能并不特别,但其预报确实给预报员带来一些困难。36小时700hPa 垂直运动场上,看不出维多利亚上空有特别的、有组织的、大的上升运动,尽管预报有相对湿度极大值,但量值小于70%。后向轨迹得出的36小时上升运动场显示维多利亚和新南威尔士南部为一般区,而维多利亚西部的较大上升运动

舌表明,在维多利亚附近上升运动区比700hPa 垂直运动预报的上升运动区要大。这可以在数值指导预报中为预报员提供更有力的工具。

位于澳大利亚西海岸南部上空的上升运动区看来与云区关系明显。

应当注意,气块上升场并未给出气块在36小时预报时效中是否改变其垂直运动方向。模式的瞬时垂直运动场(3小时间隔)提供了这种情报。

#### 5 小结

本文给出了 RASP 有限区资料同化系统后向和前向轨迹产品的个例,指出了这种 Lagrangian 特征的输出产品能够补充正规 Eulerian 形式的 NWP 模式输出产品,帮助预报员解释模式产品。本文的重点在于介绍这些技术的预报指导应用,但对其诊断应用也有启发意义,象 Mills(1989),Velden 及 Mills(1990),Zhao 及 Mills(1990)的工作所表明的。

以什么形式向预报员提供轨迹产品最好,是个值得探讨的问题。一种是在一张图上画许多轨迹。另一种是给出预报员所在地区的气流轨迹。后一种较简单,但不一定能提供“最大量”的信息。上升运动场至少可给出大的上升区,但不能给出上升或下沉气块的源地。可能最好的选择是两者结合起来。输出产品可将上升或下沉气流编上不同的颜色码,叠加在其他场或卫星云图上。为了得到更理想的形式,最后还要与用户(地方预报中心)共同研究解决。

#### 参考文献

- 1 Keap, R. An operational three-dimensional trajectory model. *J. Appl. Meteor.* 1972, (11): 1193-1223.
- 2 Whitaker, J. S. et al., A model-based diagnostic study of the rapid development phase of the President's Day cyclone. *Mon. Wea. Rev.* 1988, 116: 2337-2365.
- 3 Mills, U. A. Dynamics of a rapid cloud development over southeastern Australia. *Mon. Wea. Rev.* 1989, 117: 1402-1422.
- 4 Kuo, Y-H. M. Skurmanich, P. L. Heagenson, J. S. Chang.

- The accuracy of trajectory models as revealed by observing system sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.* 1985, 118:1852-1857.
- 5 Mills, G. A. , R. S. Seaman, 1990, The BMRC Limited area data assimilation system, Accepted by *Mon. Wea. Rev.*
  - 6 Hildebrand, B. B. *Advanced calculus for Applications.* Prentice Hall, 1962, 846.
  - 7 Harrold, T. W. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbance. *Quart. Roy. Meteor. Soc.* ,1973, 99:232-251.
  - 8 Velden, C. S. , G. A. Mills. Diagnosis of upper-level processes influencing an unusually intense extra-tropical cyclone over southeast Australia. *Wea. and forecasting.* 1990, 5: 449-482.
  - 9 Carlson T. N. , Airflow trough midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Mon. Wea. Rev.* 1980, 108: 1498-1509.
  - 10 Whitaker, J. S. , L. W. Uccellini, K. F. Brill A model-based diagnostic study of the rapid development phase of the President's Day cyclone. *Mon. Wea. Rev.* , 1988, 116, 2337-2365.
  - 11 Zhao, S-X, G. A. Mills. A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II ; Synoptic-diagnostic description. *Mon. Wea. Rev.* 1991, 119: 2074-2094.
  - 12 Phillips, S. A. Routine forecast of trajectories, *Mon. Wea. Rev.* 1989, 117:1351-1354.

## The Computation and the Use of the Trajectories in Bureau of Meteorology Research Centre (BMRC) of Australia

G. A. Mills

Wu Baojun

(BMRC)

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

The presentation of back trajectory information from synoptic analyses and forecasts can provide additional forecast guidance. A package has been developed to compute backward and forward trajectories in three dimensions, with three velocity components, from the Australia Bureau of Meteorology operational limited area 36-hour forecasts. Three forms of output are available, backward trajectories, forward trajectories, and a contoured field of 36-hour air parcel displacement to a chosen vertical coordinate surface. The package has also been applied to diagnostic studies.

**Key Words:** backward trajectory forward trajectory air parcel vertical displacement contour