

SATMOD:综合卫星云图和模式 输出参数的一种交互式方法

V.Z.Meise C.Mahringer

提要 SATMOD 是一种综合卫星云图和若干模式输出参数的交互式方法。奥地利维也纳气象与地球动力学中央研究所使用这一方法进行卫星-天气学研究、业务分析和预报服务。在本文中,集中用一种重要的天气学现象(急流)来说明 SATMOD 方法。

1. 引言

卫星云图上云的形态是大气中发生的物理过程的一种体现,但云图本身不足以描述完整的物理状况。从数值模式的网格点值可以得到的或者能够计算出的气象参数可以帮助鉴别这些物理过程。SATMOD 是一种综合了以高空间分辨率表示实际状况的卫星云图(SAT)和数值模式输出场(MOD)的交互式方法,在 SATMOD 程序中所包含的一些数值参数还形成了作为业务预报工具的基本成分。

在维也纳气象与地球动力学中央研究所(下文简称为研究所),SATMOD 方法用于研究和业务预报服务。使用 SATMOD 的研

究有几个目的:①更好地认识产生各种已观测到的云型的那些物理过程;②推导出一些天气学演变的概念模式;③得出适用于业务预报服务的研究结果。

本文旨在介绍 SATMOD 方法的业务应用,有两个目的:改进诊断分析以及为“超短期预报(即临近预报)”做贡献。业务上以一种卫星报告(SATREP)的形式向奥地利所有天气服务台站发布其结果。第5节介绍几个实例。

2. SATMOD 的基本资料

气象参数是用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数值模式的网格点值计算出来的,欧洲中期天气预报中心有一个波数为

106, 19 个垂直层次的全球谱模式。对于边界层, 使用一种包络地形及十分复杂的物理过程。ECMWF 分析和预报的网格点值可在研究所得。

在 SATMOD 方法的每日业务应用中已证明有用的参数是:

高度, 厚度, 锋面热力参数 (见 5 节 b), 温度平流, 相对涡度 (特别是在 1000, 500 和 300 百帕高度), 相对涡度分量; 相对切变涡度和相对曲率涡度, 绝对涡度平流, 水平风散度, 垂直运动, 湿度、风速 (特别是 300 百帕的风速)。

所有参数是从 ECMWF 的预报场对几个层次或规定层计算出的。高度场、湿度场、垂直运动场和风场可直接从模式中得出, 而导出参数 (如厚度、涡度、辐合度) 是从高度场和风场计算出的。

卫星图象是每半小时从 Meteosat 卫星接收的, 该卫星定位在 0° 经度对地静止轨道并拍摄每半小时的可见光 (VIS)、红外 (IR) 和水汽 (WV) 图象。

从 ECMWF 的分析得到: 非地转风场和相对风场 (相对于系统的运动)。

从无线电探空资料得到: 位温和相当位温的垂直剖面图以及等熵面上的等压线、相对流线和垂直运动。

位温 (θ) 和相当位温 (θ_e) 这类参数用于卫星云图已为人们所熟悉, 而且与只用等压面解释相比常常能更好地解释观测到的云状。因而引入这些参数并用于检验 SATMOD。用等熵面做可能产生某些问题, 例如, θ 或 θ_e 的选择, 以及在选 θ_e 情况下常见的高度非单值性, 但已

经试验了解决这些问题的几种可能方法。

为了确定某一天气系统内的气流, 有必要计算相对于系统运动的风矢量。系统运动由卫星云图推导, 尽管有一定的主观性, 这一方法却得到了令人满意的结果。

由于附加的基本资料在预报部门无法从业务上获得, 所以到目前为止这些研究只能在研究部门进行。因此卫星-天气学研究的目的在于推导出能在日常服务中使用的概念模式。

3. 业务用 SATMOD 方法的卫星-天气学分类

尽管每一天气个例研究显示的是其各自的特性, 但还是可以进行某种分类 (Weldon, 1978 年)。使用 SATMOD 方法, 把一些典

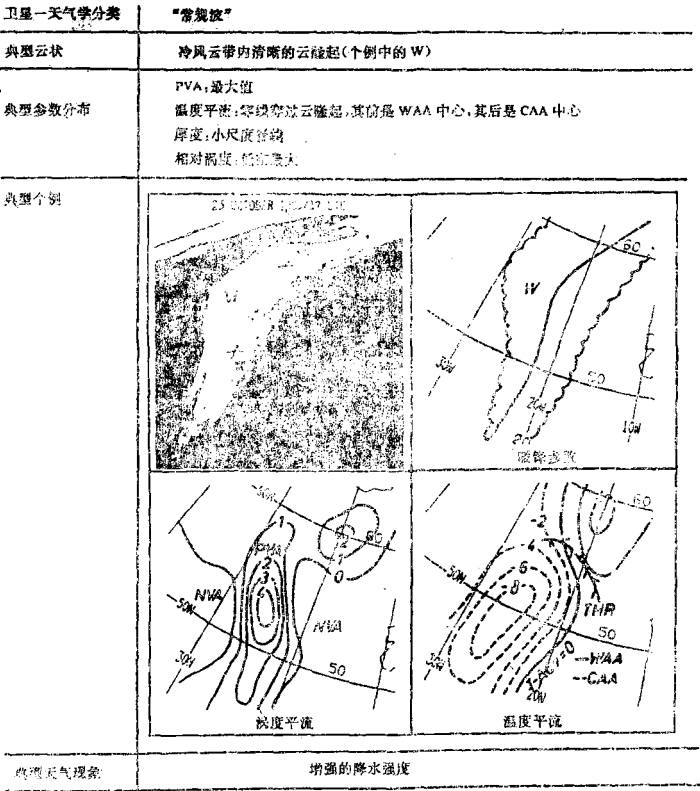


图 1 卫星-天气学分类“常规波”W 的描述。
TFP 是暖锋参数 (解释见 5 节 b); PVA
(NVA): 正 (负) 涡度平流; CAA(WAA);
冷 (暖) 空气平流; THR: 稠密脊线
(Zwatz-Meise, 1985)

型的云状与若干数值参数进行了比较。根据理论上的一些考虑和经验,已经选择出最重要的参数分布并对卫星-天气学分类作出定义,每一类代表卫星云图上的一种典型云状和相应气象参数的一种典型分布。本文将用冷锋波动的实例加以说明。

图 1 是奥地利所有天气服务台站都能得到的天气过程记录的相应剖面图的一个个例。图中对典型云状、典型参数分布和典型个例做了描述。对于业务应用,卫星-天气学分类在以下三方面给出提示:①大气中正在进行的物理过程(图 1 个例中为次生气旋生成);②进行某些定量估算的相应参数分布(图 1 个例中,一些锋面参数、涡度平流和温度平流);③与云状相关的典型天气事件(图 1 中为增强的降水强度)。表 1 总结出对日常天气预报有用的主要种类,所有这些现象都是在日常业务中诊断出来的,并且每一种都是经常出现的——在所用的卫星云图中每年至少出现 50 天。

表 1 业务用 SATMOD 方法的卫星-天气学分类

锋面云量	非锋面云量	非带状云量
不同分型的冷锋 不同分型的暖锋	辐合带 与急流相关的切变带	逗点云 强积云
锢囚锋	与急流相关的纤维状云	急流带产生的云量*
波的演变	厚度脊带	暖空气平流云量
稳定斜压气团界面	变形带	

* 急流带是急流内最大风速区

在第 4 节,将用急流带引起的云量的实例来说明 SATMOD 方法的业务应用。

4. 与气流和急流带有关的典型云状

图 2 表示一急流带概念模式的某些特征。图的上部包括急流高度的参数分布。由于风切变的增大,气旋涡度的最大值出现在急流带的气旋一侧,当急流带向急流下游移动时,正涡度平流(PVA)最大值出现在

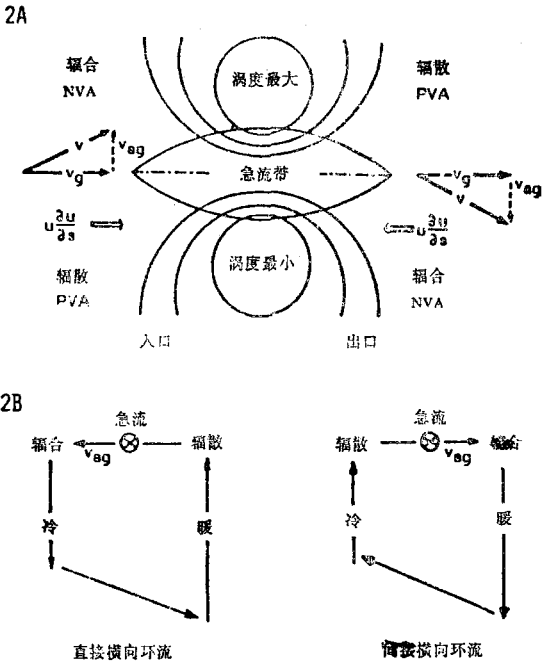


图 2 Uccellini 提出的急流带模式的简化示意图。上部:急流高度,急流带的示意表示(实线是等风速线,点划线是急流轴),涡度最大值和最小值,正负涡度平流(PVA、NVA),辐散,风矢量: u_g 是地转风, v_{ag} 是非地转风; $u = u_g + v_{ag}$, $u(\frac{\partial u_g}{\partial s})$ = 加速度(s-坐标);下部:经过入口区(左)和出口区(右)的垂直剖面图

左出口区,负涡度平流(NVA)最大值出现在左入口区。在反气旋一侧情况相反,PVA 最大值在右入口区。

由于入口区气块的加速和出口区气块的减速,在入口区非地转风分量由反气旋一侧指向气旋一侧,出口区由气旋一侧指向反气旋一侧。辐合和辐散的分布是涡度平流场及非地转风场的结果。

图 2 的下部是经过入口区和出口区的垂直剖面图。PVA 最大值与中层的辐合和上升运动及高层辐散有关,因而在入口区和出口区有垂直环流单体发展。急流带内的两个区:左出口区和右入口区,似乎有利于云量的发展。因此急流带现象是有意义的天气学现象之一,它们可以用 SATMOD 方法进行诊断。

图 3 (略)是选择出的与急流和急流带

有关的典型云状，云图包括各种狭窄的纤维状云例：有的是单个的、相当长且沿急流轴排列成行；有的相当短、垂直于急流轴排列，在反气旋切变涡度区，可以形成称为切变带的上层云带，在急流带的左出口区，可观测到逗点状云或增强的积状云。

在左出口区气旋一侧可以发现具有对流特征的锋面云量的增强，同时在反气旋一侧具有层状云特点。波状云的隆起出现在急流带内锋面云带的尾部边缘。

5. SATMOD 方法在急流带的应用

在研究所，用 0600 UTC 卫星云图制作 SATMOD 的诊断。为了这一目的，把 18 小时预报场与云图相结合。选择预报场代替数值分析场有以下三个原因：① 对预报员来说预报已经得到，而对于 0600 UTC 的诊断时间，分析场到得太晚；② 预报场与实际卫星云图的比较可以检验预报质量；③ 在 500 百帕高度场的初值化分析和短期预报之间存在约为 0.95 的高值平均距平相关系数。

卫星报告 (SATREP) 是在 0730 UTC (当地时间为 0830) 之前向奥地利所有天气台站发布的。卫星报告包括：① SATMOD 诊断结果，② 诊断时间 (0600 UTC) 相关系数的量值和由 ECMWF 诊断场做出的同一天 1200 和 1800 UTC 相关参数的移动和变化，③ 有关短期预报和 18 小时预报质量的评论要点。如果与卫星云图的比较清楚地表明预报是错的，那么在 SATREP 中也要简单介绍。在以下 a、b 部分，将用两个实例说明 SATREP 程序。

a. 1986 年 8 月 20 日的个例：左出口区逗点状云

图 4 是 1986 年 8 月 20 日 0600 UTC 的 SATMOD 诊断的基本材料。卫星云图 (图 4 a) 表示一种逗点状云 (C) 和一种短纤维状高云 (F)。C 区的天气观测报告指出存在伴有分散零星降水的多层次的云。

急流带从 54°N, 10°W 扩展到 47°N,



图 4 1986 年 8 月 20 日 0600 UTC 左出口区的逗点状云，ECMWF 的 18 小时预报：(a) 气象卫星 IR 云图，文字解释见正文；(b) 500 百帕等高线图，单位：10 位势米；(c) 实践：300 百帕的等风速线，单位：米/秒；点划线：300 百帕切变涡度零线；(d) 300 百帕绝对涡度平流，单位： $10^{-5}/秒^2$ ；(e) 300 百帕相对涡度，单位： $10^{-5}/秒$ ；(f) 500 百帕的垂直运动(ω)，单位：百帕/小时；(g) 700 百帕的辐散，单位： $10^{-5}/秒$ ；(h) 300 百帕的辐散，单位： $10^{-5}/秒$

12°E (爱尔兰-英格兰-荷兰-西奥地利) (图 4 c), 在 52°N, 04°E (荷兰) 的 PVA 最大值影响下, 急流带左出口区出现逗点状云。模式预报与云状的良好相关性表明 18 小时预报基本正确, PVA 最大值位于涡度最大值 (图 4 e) 的东边, 近 53°N, 0° (东英格兰) 处, 涡度最大值沿急流带中心的气旋一侧, 且主要由切变涡度组成。辐合的垂直分布 (图 4 g, h) 和垂直运动 (图 4 f) 与概念模式一致 (图 2), 尽管这些值很小。正如在急流带中经常观测到的那样, 在急流带下风方纤维状云位于急流轴 (300 百帕切变涡度的零线) 上 (图 4 c)。

在急流带下游部分的急流轴附近或急流轴上可经常观测到纤维状云, 可以引用两个物理过程解释它们的形成: SATMOD 研究表明在较高的一些层次有一个上升的暖输送带, 如果这里没有足够的湿度就无法产生天气尺度的云量。此外, 在 1978 年 Weldon 的文献中提到在急流轴的正下方有一个小尺度环流单体, 在反气旋一侧形成辐合和上升运动, 在气旋一侧形成下沉运动, 由于其尺度很小, 这一过程用 SATMOD 无法显示出来。两个过程的综合影响可能导致在急流轴上出现典型的窄长的纤维状云。

关于预报, 从天气图上可以看出代表云系统的位置、强度和云状的所有参数的位移。图 5 是同一天 1200 和 1800 UTC 的天气图, 急流带向东扩展 (图 5 a, b), 具有 PVA 最大值的急流带左出口区随着 PVA 值的加大从 0600 UTC 的 52°N, 04°E 移到 1800 UTC 的 50°N, 16°E (图 4 d, 5 c, d)。

表 2 表示向所有区域预报中心发布 SATMOD 结果的方式。

图 6 是为检验而准备的 3 小时卫星云图, 在左出口区, 逗点云的位置与 PVA 最大值的一致性很好, 轴上的纤维状云延长, 维持到急流带的下游部分。1200、1500 和 1800 UTC 的天气观测 (这里无图显示) 表明被增强的逗点状云的天气活动性, C 区有许

表 2 1986 年 8 月 20 日的卫星报告

第一部分	
1. 逗点状云: 53°N, 03°E—51°N, 10°E, 急流带的左出口区	
2. 急流: 51°N, 05°E—51°N, 10°E, 急流带出口区急流轴上的纤维状云	
第二部分	
1. 300 百帕 PVA 最大值:	
0600 UTC: 52°N, 04°E, 3 个单位	
1200 UTC: 51°N, 09°E, 5 个单位	
1800 UTC: 50°N, 15°E, 6 个单位	
维持在急流带的左出口区	
2. 出口区的急流轴:	
0600 UTC: 51°N, 05°E—48°N, 11°E	
1200 UTC: 51°N, 05°E—48°N, 16°E	
1800 UTC: 50°N, 10°E—48°N, 22°E	
第三部分	
云状和 18 小时预报的良好一致性	
1. 逗点状云: 按照 PVA 最大值扩展, 天气活动按 PVA 最大值的增大和周日环流而增强	
2. 纤维状云: 按照出口区的急流轴扩展, 无明显天气事件的高层云量	

多伴有强降水的雷暴, 稍后的预报场与分析场的比较表明模式预报无明显的误差。

b. 1988 年 9 月 2 日的个例: 锋面增强

图 7 包括 1988 年 9 月 2 日 0600 UTC 的 SATMOD 诊断的基本材料, 卫星云图显示出一个清楚的锋面云带 (F-F) (图 7 a), 在 50°N, 10°E 附近地区 (I) 有一个很强的云隆起, 具有一个伴有强阵雨型降水及雷暴天气的环流结构 (这里未列出天气报告)。从云图上看到的现象可能有两种解释: 在急流带的左出口区有某一常规波在发展或者某一锋面在增强。如果急流带穿越一个锋面, 那么众所周知的效应是增强左出口区低空的斜压性, 正如图 2 中可以看到的那样, 出口区的环流单体在热力上间接导致温度对比的增大, 此外, 左出口区 PVA 的迭加影响上升运动。

为了确定锋的位置, SATMOD 方法使用锋面热力参数 (TFP), TFP 帮助确定锋的位置, 在那里温度梯度的变化率是最大的, 它可以从所谓的“等效厚度场” (500—850 百帕) 计算出来, 等效厚度场除包括常用的厚



图 5 8月20日1200 UTC ECMWF 的24小时和30小时预报(左边a, c, e)及18小时预报(右边b, d, f): (a)(b)实线: 300百帕的等风速线, 单位: 米/秒; 点划线: 300百帕切变流度的零线; (c)(d)300百帕绝对湿度平流, 单位 $10^{-6}/\text{秒}^2$; (e)(f), 300百帕的相对湿度, 单位: $10^{-5}/\text{秒}$

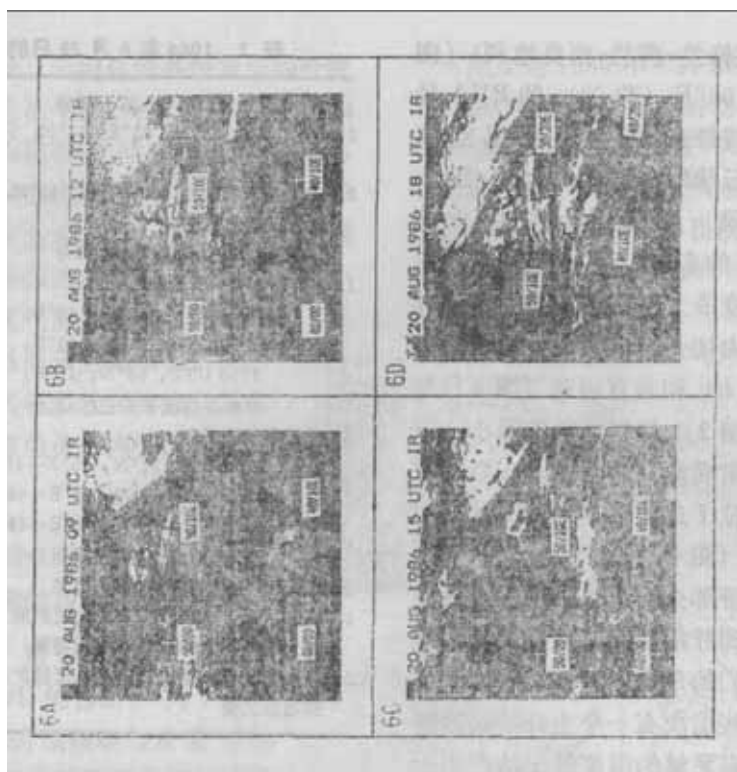


图 6 1986年8月20日的气象卫星 IR 云图:
(a)0900 UTC, (b)1200 UTC, (c)1500 UTC,
(d)1800 UTC



图 7 1988 年 9 月 2 日 0600 UTC 的锋面增强和 18 小时预报。
(a) 气象卫星 IR 云图, 文字解释见正文; (b) 按照 TFP 确定的冷锋位置, 500—850 百帕的温度平流, 单位: 度/12 小时, 实线; 暖空气平流, 虚线; 冷空气平流; (c) 实线: 300 百帕等风速线, 单位: 米/秒; 点划线: 300 百帕相对切变涡度零线; (d) 300 百帕绝对涡度平流, 单位: $10^{-6}/\text{秒}^2$; (e) 300 百帕相对湿度, 单位: $10^{-2}/\text{秒}$; (f) 700 百帕垂直运动(w), 单位: 百帕/小时; (g) 850 百帕的辐散, 单位 $10^{-6}/\text{秒}$; (h) 300 百帕的辐散, 单位 $10^{-5}/\text{秒}$

度等高线外, 还包括凝结过程释放的潜热。
使用 TFP 这种锋参数有以下几个优点; ① TFP 是按照普通的锋面定义来规定的, 与地

面天气图分析锋面的主观方法相比, 它是一个客观参数; ② 它可用数值预报场计算出来, 因而是进行锋面预报的有用参数; ③ 它可从厚度场计算出来, 而这种厚度场考虑到锋面的三维特点。

在所讨论的个例中, TFP 场非常显著的最大值出现在冷锋云带的前沿(图 7 中用冷锋符号标明), 冷锋前的云带(R-R)与厚度脊有关, 本文不讨论。厚度平流(500—850 百帕, 图 7 b)表明冷锋云带已经在冷平流区, 而能够显示常规波发展的暖平流中心不明显。云状与模式参数完全吻合, 因而在模式预报中天气图方法是值得信赖的。300 百帕的等风速线表明中心位于 43°N , 4°E (法国南部) 的急流带与锋面交叉, 伴有增强的 PVA 最大值的左出口区(图 7 d)位于 46°N , 8°E 附近(阿尔卑斯西部地区上空)正如云图(图 7 a)所显示的那样, 这种格局是引起锋面云量增强的一种典型形势。辐散的分布(见图 7 g, h)符合这种急流带模式, 即低空和中层(500—1000 百帕)左出口区辐合最大而高空(300 百帕)辐散最大, 这种辐散分布与 850—500 百帕的上升运动有关(图 7 f)。

综上所述, 卫星-天气学分类的“冷锋”和“急流带左出口区的锋面增强”都可以进行诊断分析, 为了预报目的, 必须在同一天 1200 和 1800 UTC 得到与云系统的形成和方位有关的参数。

借助于 TFP 进行分析并在图 8 所有图中选加约定符号, 表明到

1800 UTC 以前冷锋向东移动, 北部地区向东位移约 3° , 而在 50°N 以南地区位移约 5° 。再进一步, 急流带非常清晰(图 8 a、

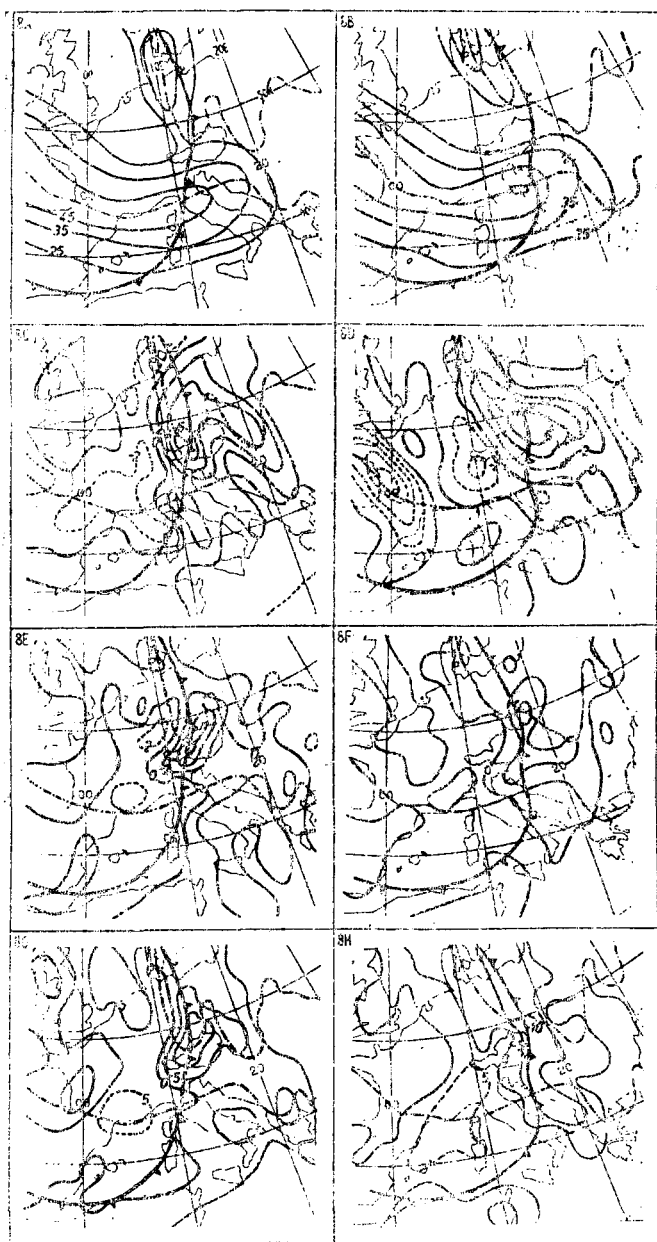


图 8 1988 年 9 月 2 日 1200 UTC (左边 a, c, e, g) 和 1800 UTC (右边 b, d, f, h) ECMWF 的 24 小时和 30 小时预报; (a) (b) 实线: 300 百帕等风速线, 单位: 米/秒, 点划线: 300 百帕相对切变涡度的零线; (c) (d) 300 百帕绝对涡度平流, 单位 $10^{-9}/\text{秒}^2$; (e) (f) 850 百帕的辐散, 单位 $10^{-5}/\text{秒}$; (g) (h) 700 百帕垂直运动(w), 单位: 百帕/小时

b), 其左出口区伴有 PVA 最大, PVA 最大区 0600 UTC (图 7 b) 大约在 48°N , 09°E , 1200 UTC 通过巴伐利亚和奥地利 (图 8 c) 1800 UTC 移到 49°N , 18°E , 在很大区域内扩展, 稍后左出口区及 PVA 最大值区在冷

锋上叠加。

在这天的 SATREP 中, 所讨论的这一现象以表 3 所述形式向各区域预报中心发布。图 9 (略) 是用于检验目的而在预报期间接收到的卫星云图。TFP 和急流带参数的预报与锋面云带和叠加增强云量完全一致, 叠加增强云量伴随着象雷暴这样的强烈天气事件。同样, 过后分析场和预报场的比较表明模式没有明显的预报误差。

c. SATMOD 识别模式误差的实例

卫星云图中的云系统 (代表卫星-天气学分类) 与 18 小时预报模式参数的比较可以识别预报误差。这一点可用图 10 表示的锋面增强的实例来说明。在卫星云图中 (图 10 a), 一锋面云带 (F-F) 表明在 I 区附近有一个云量增强区, TFP、急流轴 (300 百帕切变涡度的零线) 和等风速线 (图 10 b) 等参数也表明急流带的左出口区有锋面增强。然而, 在云量增强区没有 PVA 最大值, 但在西边约 10° 左右有一个 PVA 最大值区 (图 10 c, 10a 中的 P), 因此可以辨别出 PVA 场有误差, 在锋面增强的短期预报中不能使用, 稍后预报与 PVA 分析场 (图 10 c, d) 的比较证实了预报误差; 分析的 PVA 最大值与图 10 a 的 I 区一致。

6. 结 论

SATMOD 方法将卫星云图及模式输出参数一起使用。奥地利气象与地球动力学中央研究所使用这种方法进行研究和天气预报

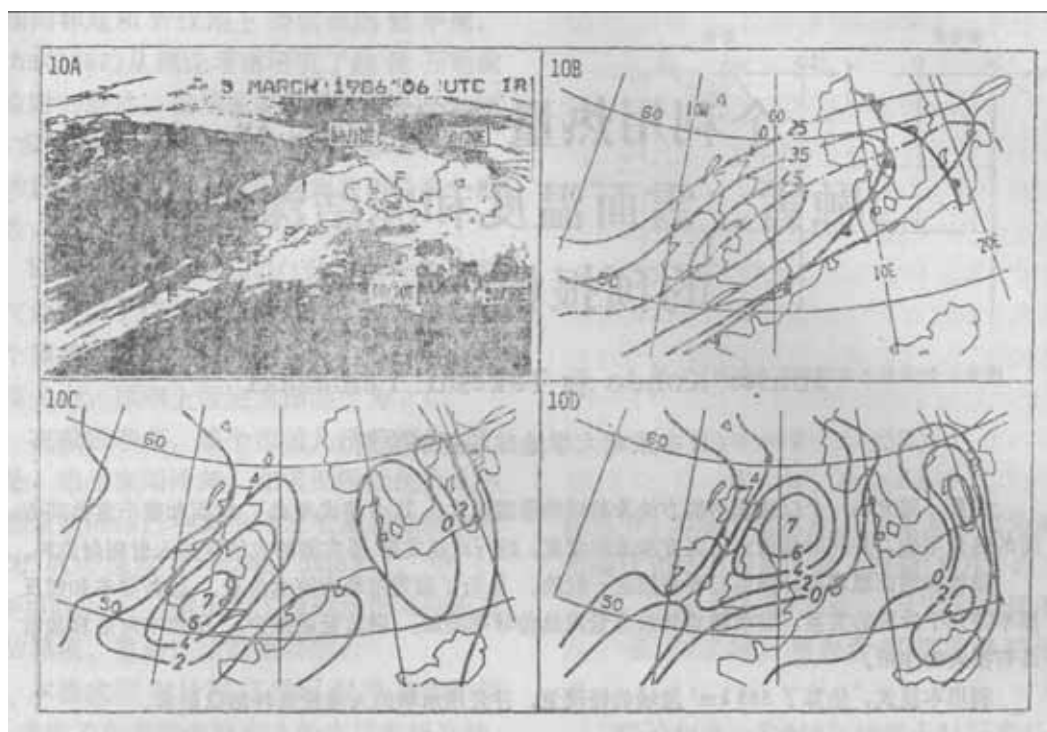


图 10 1986 年 5 月 5 日 0600 UTC 模式误差的识别。(a)气象卫星 IR 云图, 文字解释见正文; (b)ECMWF 的 18 小时预报, 按 TFP 的冷锋位置(见 5 节 b); 实线, 300 百帕等风速线, 单位: 米/秒; 点划线, 300 百帕相对切变涡度零线; (c)ECMWF 的 18 小时预报, 300 百帕绝对涡度正平流, 单位: $10^{-2}/\text{秒}^2$; (d)ECMWF 的分析, 300 百帕绝对涡度的正平流, 单位: $10^{-2}/\text{秒}^2$

表 3 1988 年 9 月 2 日的卫星报告

第一部分

1. 厚度脊带:
55°N, 16°E—48°N, 16°E—49°N, 20°E; 暖平流
 2. 冷锋:
58°N, 11°E—46°N, 10°E—40°N, 03°E; 冷平流云
PVA 最大值在 48°N, 09°E(与第 3 相比)
 3. 急流带云量: 锋面增强 48°N, 09°E
- 第二部分
2. TFP:
0600 UTC: 56°N, 11°E—46°N, 10°E—40°N, 03°E
1200 UTC: 56°N, 13°E—50°N, 13°E—45°N, 11°E—
40°N, 08°E
1800 UTC: 55°N, 16°E—48°N, 17°E—40°N, 14°E
 3. 300 百帕 PVA 最大值:
0600 UTC: 48°N, 09°E, 12 个单位
1200 UTC: 48°N, 13°E, 7 个单位
1800 UTC: 48°N, 18°E, 7 个单位

第三部分

- 云状和 18 小时预报的良好一致性
1. 冷锋: 按照 TFP 移动
 2. 锋面增强: 按照 PVA 最大值移动, 持续雷暴和降雨活动

业务服务。关于欧洲上空急流带特点的科学调研已经完成, 其结果之一是可以利用 SATMOD 方法在业务上诊断急流带现象。对伴有强烈天气现象的两类急流带云量的分析证明了这一点。

在第一个个例中, 位于急流带左出口区的逗点状云伴有 PVA 最大值。在其后 12 小时的等风速线最大值、涡度最大值, 特别是 PVA 最大值的轨迹为预报员提供了逗点状云运动的较好估算。在第二个个例中, 锋面增强出现在急流带左出口区 PVA 最大值与冷锋相交处, 在该个例中还证明 SATMOD 对诊断和跟踪锋面增强很有用。

数值参数与卫星云图的交互使用开辟了识别数值模式失效的可能性。如果清晰的云状和 18 小时预报的相应参数不一致或者云型的移动不符合参数移动轨迹, 则模式必定失效。第三个个例(即锋面增强的例子)表示的就是这种形势, 以后有必要试用其它方法, 如直接外推云的运动, 并注视下一步的模式预报以确保新的预报做出正确的订正。

赵秀英译自《Weather and Forecasting》Vol. 5, 1990

周景林校