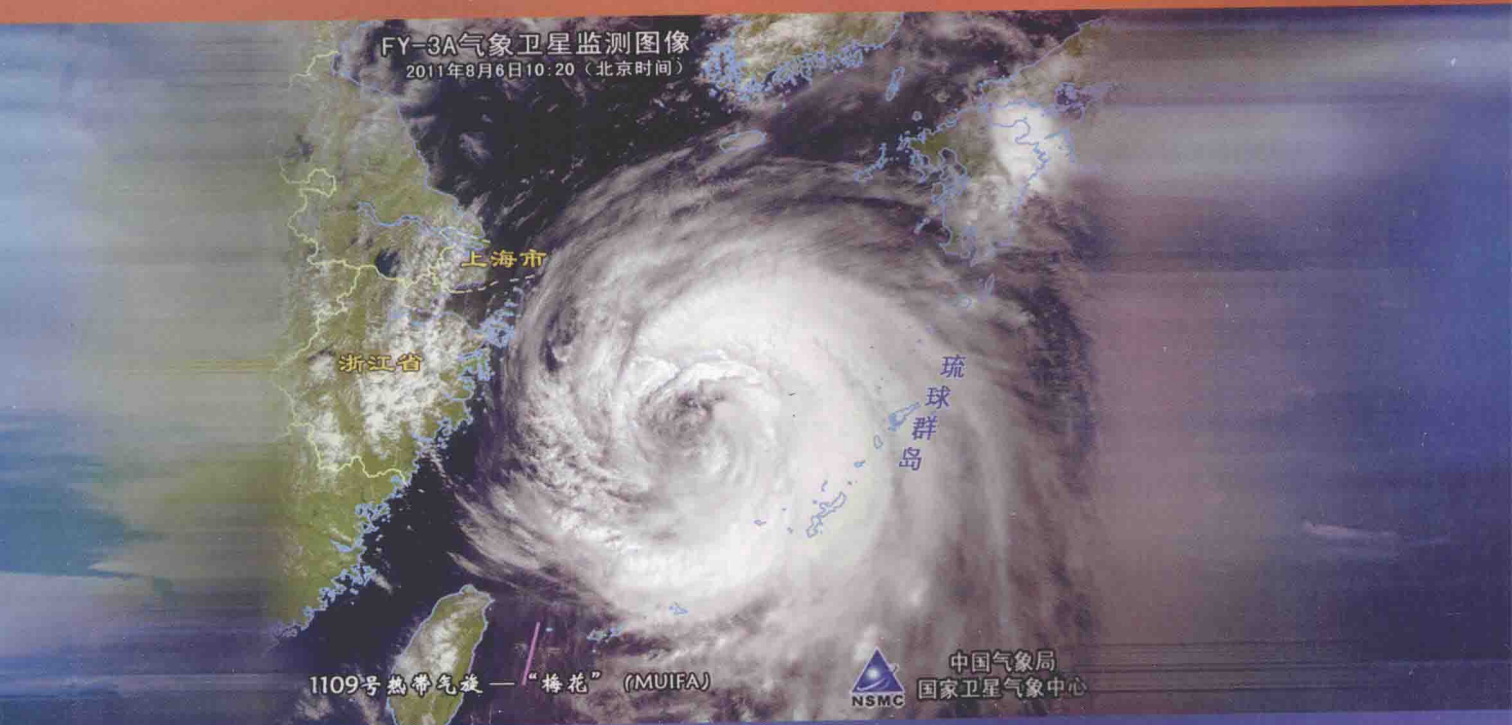


“十二五”时期国家重点图书出版规划图书
现代气象业务丛书

丛书主编：郑国光



气象卫星及其应用 (下)

杨 军 主编

“十二五”时期国家重点图书出版规划图书
现代气象业务丛书

气象卫星及其应用 (下)

主 编 杨 军
副主编 许健民 董超华 卢乃锰



 气象出版社
China Meteorological Press

第11章

云和辐射

11.1 云检测

云在地气系统水分循环中起着重要作用,同时云的形成和演变是大气中发生错综复杂的物理过程的具体表现之一。对云的了解,能更好地帮助人类了解大气的运动规律。根据卫星获得的上行辐射数据估算地表参数(地表温度、植被指数及雪盖等)或云参数(云顶温度、云顶高度和比辐射率等),首先要判识观测像元属于云还是晴空,即进行云检测。它是气象卫星观测资料定量应用工作的基础之一。

本节主要介绍利用多光谱资料,对像元进行有云与否的云检测方法。

11.1.1 基本原理

遥感图像上目标物的特征是目标物与背景的辐射差异在遥感影像上的反映。不同观测目标物在相同波段上和同一目标物在不同波段间对辐射的吸收、折射和散射存在差异,云检测正是利用云和晴空像元在不同光谱段上辐射特性的不同,采用多通道辐射信息,将卫星观测像元分为有云像元和晴空像元。与晴空下垫面相比,云具有较高的反射率和较低的温度。因此,简单的可见光和红外窗区通道的阈值,即可提供相当不错的云检测方法。然而,许多情况下如下垫面为冰雪,云为薄的卷云,夜间出现低的层云或小的积云时,云和下垫面的辐射相似,用简单的可见光和红外光谱方法难以区别云和下垫面。

11.1.2 云检测方法

11.1.2.1 光谱特性

1) 可见光光谱特性

0.64 μm 谱段处在大气窗区内,主要的吸收来自分子散射。氧、臭氧和水汽对辐射的吸收引起衰减很小。该谱段中云、雪的反射率很高,在云图上表现白亮;植被、裸地和海面的反射率较小,表现出很暗的色调。

2) 近红外和短波红外光谱段特性

0.865 μm 谱段在衰减很小的大气窗区内,加之在可见光波段的长波区域,分子的散射减小,有很高的透过率。该谱段与 0.64 μm 谱段相比较,相对于裸地而言,植被的反射率明显加大。

1.38 μm 上有水对辐射的强烈吸收,因此地面及中低层大气的辐射很难到达传感器。由于高层大气的湿度很小,高云在 1.38 μm 上的反射率很大,此波段主要用于检测卷云,特别是陆地表面的卷云。

1. $64\ \mu\text{m}$ 谱段处于大气窗区内,透过率大于 90%,水汽吸收谱线的翼区伸到该谱带,但是即使相对潮湿的大气,吸收不到 10%。该谱段可以用来区别云和积雪。

2. $13\ \mu\text{m}$ 谱带处在大气窗区,由于这一谱带冰云、水云和雪的反射率不同,因此该谱带可以用于检测冰云、水云和雪。

3) 中波红外光谱段特性

在现有卫星上搭载的中波红外光谱段主要包含 3.75 、 6.7 和 $8.6\ \mu\text{m}$ 等几个波段。

$3.7\ \mu\text{m}$ 最初被用来改进海面温度的遥感。该谱段大气对辐射的衰减相对于其他谱段要小。可用于海面温度(sea surface temperature, SST)反演中的水汽订正。利用该谱段可以改进 SST 的反演精度,识别夜间层状云、白天和夜间的薄卷云。在长波红外云图上,由于层状云和薄卷云与地表间的温度差较小,很难检测。由于 3.7 和 $11.0\ \mu\text{m}$ 两谱段的比辐射率差可引起 20% 的能量差,与 $11.0\ \mu\text{m}$ 通道相比,在 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道层云的亮度温度要低 4 K 左右,因此,可利用 3.7 和 $11\ \mu\text{m}$ 多谱段亮度温度差检测夜间层云和雾。此外, $3.7\ \mu\text{m}$ 谱段还可用来计算云的光学厚度与粒子半径。

$6.7\ \mu\text{m}$ 是水汽强吸收带,地面和大气低层发射的辐射不能到达卫星,该谱带只能检测高层大气水汽分布和大气环流。

影响 $8.6\ \mu\text{m}$ 通道特性的是有较明显的水汽吸收,为一个弱的水汽吸收区,可用于获取大气较低层水汽信息。

4) 长波红外光谱段

$11.0\ \mu\text{m}$ 谱段中云一般比地面的温度低很多,因此,可用来检测云,特别是高层云(不含薄卷云)。由于水云、裸地和植被在该谱段的比辐射率比任何其他谱带更接近于 1,因此,由此谱带可确定云顶高度。由于亮度温度与通过对光路上由水汽引起的大气衰减订正后的表面温度相关,因此,在潮湿大气中卫星接收的云辐射比在干燥大气中同样的云小。如果没有水汽订正,会高估云顶高度。大多数卷云很薄,卫星测量的不仅是卷云发出的辐射,而且有下面低云或地表发出的辐射,因此,卫星观测引起的卷云云顶高度误差可达 5 km,薄卷云更大。

$12.0\ \mu\text{m}$ 谱段与 $11.0\ \mu\text{m}$ 谱段基本相同,都是显示目标物的亮度温度,不同的是该谱带受水汽吸收的影响比 $11.0\ \mu\text{m}$ 大。对于薄卷云, 11.0 和 $12.0\ \mu\text{m}$ 谱带的辐射有较明显的差异。这个特征通常用于检测卷云。

13.9 和 $15\ \mu\text{m}$ 谱段是 CO_2 强吸收带,晴天时卫星测量的是大气发出的红外辐射,但在有云时,特别是高云出现时,卫星测量的是由高云和云上大气发出的辐射,利用它们权重函数的不同可检测不同高度上的云,如检测 500 hPa 以上的云或高云。此外,该谱段与近红外通道一起可以检测薄卷云。

11.1.2.2 判识方法

迄今为止,已发展了多种自动云检测方法,主要可分为三大类:阈值法、统计学方法及辐射传输算法。阈值法由于易于实现而成为云检测的主流算法。不同云检测算法各有利弊,在实际应用中往往并不单独使用,而是多光谱、多种方法的综合应用。在众多的云检测算法中,比较有代表性的为:ISCCP(The International Satellite Cloud Climatology Project)云检测算法,APOLLO(The AVHRR Processing scheme Over cLOUD Land and Ocean)算法,CLAVER(The NOAA Cloud Advanced Very High Resolution Radiometer)云检测方法,MODIS 云检测算法(Cloud Mask)和 SAFNWC 云掩模(CMa)算法等。

(1)ISCCP 方法主要由五部分(单一红外图像的空间对比试验、三个连续红外图像的时间对比试验、可见光和红外图像的空间/时间累计统计试验、每 5 天的可见光和红外辐射的晴空合成以及每个像元的可见光和红外辐射阈值的选取)组成。该方法检测的优点在于使用通道少,易于移植。方法的不确定性来源于测量误差和自然条件的变化。

(2)APOLLO 算法主要由 Saunders 等(1988)和 Kriebel(2003)研制开发。此方法利用了 AVHRR 五个分辨率探测通道,即通道 1($0.58\sim 0.68\ \mu\text{m}$),通道 2($0.72\sim 1.10\ \mu\text{m}$),通道 3($3.55\sim 3.93\ \mu\text{m}$),通道 4($10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$)和通道 5($11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$)资料。对于任何一个像元,如认为是云像元,必须同时满足几个条件:像元的反射率比所设定的阈值高或温度比所设定的阈值低;AVHRR 通道 2 与通道 1 的比值介于 0.7 和 1.1 之间;

通道4和通道5的亮度温度差大于所设定的阈值;若像元位于海洋上,其空间均一性还要大于所设定的阈值(Saunders等,1988)。如果像元通过了以上所有的检验,则认为像元为晴空,只要有一个检测未通过,就认为像元部分有云污染。该方法的优点在于首先能自动检测晴空、云和部分云,适用于任何季节;其次,利用其中的两个检测,设定不同的阈值,可区分完全云覆盖像元和部分云覆盖像元。

(3)CLAVR算法利用AVHRR五个通道资料在全球范围内进行云检测(Stowe等,1991),同样采用了一系列判别阈值。不同之处在于,采用了 2×2 的像元(4 km分辨率)矩阵作为判识单位。当 2×2 像元点数列中4个像元点全部没有通过有云判识时,判定像元矩阵为无云;4个像元点全部通过有云判识时,像元点矩阵为完全云盖;4个像元点中有1~3个像元通过有云判识时,认为像元矩阵是混合型。如果被判识为云或混合型的像元矩阵中的4个像元,满足另一个晴空检测条件(冰/雪,海洋镜面反射,亮的沙漠背景),像元矩阵被重新判识为完全晴空像元。根据下垫面性质和观测时间的不同,把算法分为白天海洋、白天陆地,夜间海洋和夜间陆地四类。在后来的改进方案中,CLAVR采用动态阈值法(阈值由9天的合成晴空辐射产生)(Stowe等,1998)。在随后的改进方案中,又利用不同阈值对像元逐个进行云检测,并对被云污染的像元进行分类(如低层云,薄卷云,发展旺盛的对流云,其他混合云等四类)。

CLAVR算法有10个基本步骤,按照其基本原理可以分为三类:反差信息检测、光谱信息检测以及空间信息检测。反差信息是利用地表下垫面与大气特征的光谱反射辐射的差异来识别云;由于下垫面在某些特定光谱范围内对太阳辐射的反射非常强烈或明显,所以该方法利用这一特性来进行云的识别,即光谱信息检测;太阳辐射传输过程中对各种大气或地表下垫面的空间结构变化特性也能够用于分离云相,这就是空间信息检测。

CLAVR能比较有效地识别AVHRR影像中的云像元和混合像元。在识别的像元类别中,晴空像元和云污染像元准确率较高,混合像元检测趋于保守,易将部分云像元与晴空像元也标识为混合像元,且该方法难以分辨雪和云。判识的阈值有很多是由试验或经验获得的,因此,地表的地形、地貌及下垫面对检测效果有很大的影响。另外,大气环境、季节、时间和空间等因素也会影响检测精度。

(4)SAFNWC云掩模算法是法国气象局临近预报卫星应用研究所的研究成果。其主要目标是描述卫星图像上的所有无云像元,在云区CMa计算出云形和云顶高度(温度)。当卫星图像上出现气溶胶和雪(海冰)时,CMa能检测它们。输入数据有METSAT卫星各通道(12个通道)数据、临近预报地表温度和各层大气温度,以及气候数据和植被、数字高程(DEM)等数据。算法结合辐射传输模式分为海上(考虑耀斑区)和陆地,并按白天、黎明(黄昏)、夜间进行。检测中大多数阈值来自于阈值查找表(动态获取的阈值)——由辐射传输模式(除 $3.8 \mu\text{m}$ 通道阈值用MODTRAN 3.5计算外,红外通道均由RTTOV-6(Eyre,1991)模拟计算阈值,可见光通道用6S(Tanre等,1990)模拟计算阈值和辅助数据计算得到;其他阈值则来源于统计和文献中的经验值(Derrien等,2005)。

CMa算法的优点在于阈值的设定综合考虑了各方面的因素,对于不同的大气条件、地貌、光照和视点几何位置等,阈值是不同的,总体来说,识别效果较好。缺点是薄卷云和碎云不易识别,被高云挡住了的低云也不易识别,并且夜间不能进行雪检测。

(5)目前,国际上比较流行的是MODIS云检测小组开发的MODIS Cloud Mask算法。MODIS云检测方法是借鉴了ISCCP、APOLLO、CLAVR和 CO_2 薄片法(高云检测)等方法,并结合仪器自身特点发展的算法。该算法需要输入地表类型、海拔高度等地理数据及冰雪分布数据和部分NCEP数据等。它使用了MODIS的19个通道数据,设定多个特征进行阈值判定,并使用4级可信度(0.99,0.96,0.66和小于0.66四个等级,对应检测结果为晴空、可能晴空,可能有云和云)来表示出现云的可能性。对不同的下垫面类型,MODIS方法采用自动纹理分类方法进行云检测,但MODIS的许多光谱通道不适于纹理分类的云检测方法,因此当检测结果的可信度低于95%时,改用多光谱阈值的云检测法(包含通道阈值法、直方图阈值法、统计方程法、亮温差法、空间均一性检验、反射率比值法及晴空背景场方法等)。MODIS算法认为,各检测方法之间并不相互独立。它将这些方法分为5组(Ackerman等,1997):

①简单的红外通道亮温阈值检测:主要利用三个通道的亮度温度(以下简称亮温),即 BT_{11} , $BT_{13.9}$, $BT_{6.7}$ 进行云判识。

②亮温差检测:主要利用通道光谱 11,12,8.6,6.7 和 $3.7\ \mu\text{m}$ 的不同组合,进行云判识(Ackerman 等,1990;Yamanouchi 等,1987)。

③反射率检验:主要利用通道光谱 0.66,0.87,3.7 和 $3.9\ \mu\text{m}$ 进行云判识。

④近红外薄卷云检测:主要利用通道光谱 $1.38\ \mu\text{m}$ 进行云判识。

⑤红外薄卷云检测:主要利用通道光谱 3.7 和 $12\ \mu\text{m}$ 进行云判识(Hutchison 等,1995)。

11.1.2.3 我国风云气象卫星业务云检测方法

风云静止气象卫星业务云检验算法(FY—2 CLM)

风云静止气象卫星业务云检测算法(刘健,2006)是利用长波红外通道 1($10.5\ \mu\text{m}$)、可见光通道及水汽通道的数据,以双通道动态阈值法、空间均一性检验和晴空背景法为主进行云检测。风云二号静止气象卫星(FY—2)业务云检测系统的输入数据包括:地面高程、海陆模板、下垫面类型、与待检测数据同时次的 15 d 历史亮度温度、待检测的 FY—2 各通道标称投影数据及逐像元的太阳天顶角、太阳耀斑角等数据。主要检测算法如下:

(1)用红外动态阈值判识云:按不同下垫面类型和地理高程进行动态云检测阈值提取。像元红外 1 通道亮温若低于所提取的红外亮温动态阈值,则该像元被判为云像元并输出;其余像元继续处理。动态阈值由当前时次的数据动态求得。

(2)在开阔洋面上用红外亮度温度方差方法补充判识破碎云和薄卷云:在开阔的洋面上,依据空间均一性原理,计算被检测像元周围 3×3 像元的红外亮度温度标准差。利用标准差阈值(由统计获得的静态值)判断被检测像元是否为云或晴空,并输出。

(3)利用红外窗区通道与水汽通道的亮温差判识云:当亮温差较小时,说明有云存在。

(4)多天合成次高温作为背景数据判识云:比较待检测图像和该地的地表红外 1 通道亮温背景数据(或地表反射率),像元亮温若高于背景,则该像元被判为晴空像元并输出。否则进入第 2 步云判识过程。背景阈值由历史资料统计给出。

图 11.1 为 2009 年 7 月 21 日 00:15(UTC,下同)FY—2D 云检测的一个示例。

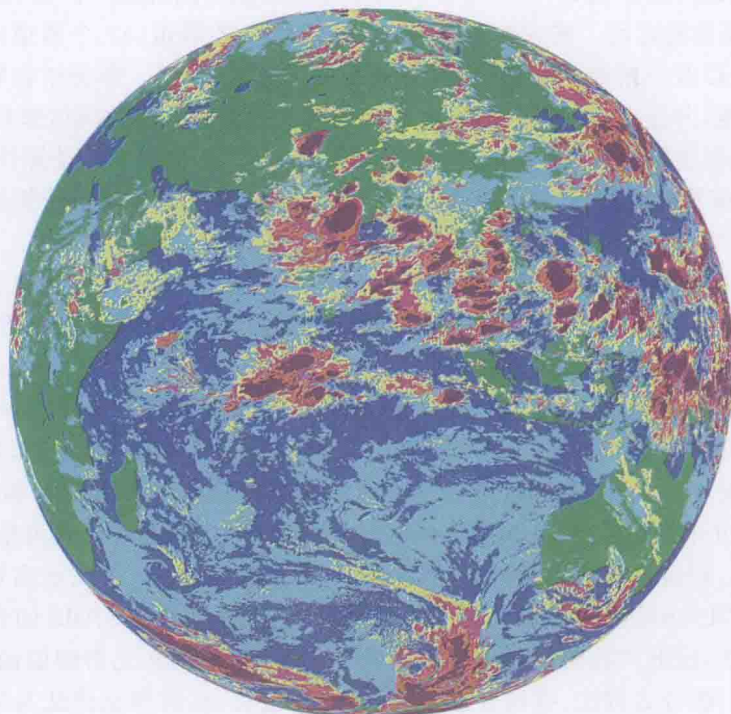


图 11.1 FY—2D 云检测示例

(2009 年 7 月 21 日 00:15(UTC)时 FY—2D 星的云检测产品图。

图中绿色为陆地,蓝色为海洋,其他为检测出的云)

FY—2 CLM 算法系统运行稳定,云检测产品动画连贯,从全局来看,得到了较好的云检测结果。但当实时数据无法获取动态云检测阈值或获取的动态云检测阈值不合理,均会导致云检测精度下降;同时,背景数据的引入,可能会使云检测结果受到区域气候异变的影响。

风云极轨气象卫星业务云检测算法(FY—3 CLM)

风云极轨气象卫星业务云检测算法含 FY—3/VIRR 全球云检测算法和 FY—3/MERSI 云检测算法。

(1)FY—3/VIRR 云检测算法:采用多特征(单通道或通道组合)阈值方法。其中,通道组合特征包括通道差特征和通道比值特征等。各个特征阈值采用两种方法:直方图动态阈值方法和通过正演模拟确定的阈值表方法。在单个特征云检测的基础上,通过综合云检测方案确定最终的像是“云”或“晴”的属性;最后,是各个像元点的云检测判识结果,以及云和晴空判识的可信度。

VIRR 云检测算法中,选择了 450×2048 像元块(5 min 观测时间),进行直方图统计和阈值选择。在这个块中不仅考虑地表类型不同带来的差异,而且需要考虑地理高程的影响。对 DEM 小于等于 1000 m 和大于 1000 m 两种情况分别进行直方图统计,再考虑陆地地表分类,因此对于红外通道,共有 13 种类型。由于整条轨道内有近 20 个 450×2048 像元块,容易造成块之间云检测结果不连续,在动态计算阈值时,进行了块之间的滑动平均处理。

理论上,在单峰直方图(全部为晴空或者全部为云)的情况下,找不到阈值。实际上,当云和晴空像元点数相差悬殊时,也找不到阈值,在这种情况下则设计使用相邻块的阈值作为本块的阈值,进行云检测处理。此外,通过阈值后处理来解决阈值的合理性问题。阈值后处理包括以下处理:①当在本块中没有找到阈值时,可见光通道用本块最大阈值代替,红外通道用本块最小亮温阈值代替;②对不同块阈值进行相互比较,用统计方法排除不合理的阈值,用前后相邻阈值平均值代替。在 5 min 段内每块动态阈值处理之后,首先进行阈值后处理,再进行单特征通道云检测。

VIRR 云检测算法中获取阈值的第二种方法是利用大气廓线库进行正演计算,建立离线的云检测查找表。利用全球 12 245 条晴空大气廓线库,通过 RTTOV 快速辐射传输模式,针对 FY—3/VIRR 红外通道光谱响应函数,正演得到不同下垫面类型、不同卫星观测视角($0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 和 60°)下的晴空亮温数据集,选取的波段主要为中波红外波段 $3.7 \mu\text{m}$ 和长波红外大气分裂窗波段 11 和 $12 \mu\text{m}$ 。

针对每种类型和每个卫星天顶角,分别绘制亮温差($BT_{3.7} - BT_{11}$, $BT_{3.7} - BT_{12}$ 和 $BT_{11} - BT_{12}$)与通道 4 亮温散点图,并拟合其上包络线。经过插值计算,得到每种分析类别所对应的通道 4 亮温和卫星观测视角条件下红外亮温差云检测查找表。

综合云检测是在单通道云检测的基础上,针对不同的地理区域、下垫面类型、季节、高程、太阳耀斑和积雪等,给出综合云检测方案。

图 11.2 为 FY—3/VIRR 2009 年 3 月 3 日 00:30 云检测一个示例。图 11.2(a)为三通道(6,2 和 1)合成图,图 11.2(b)为红外窗区通道云图,图 11.2(c)为综合云检测产品快视图。其中,白色和灰色为云,白色像元可信度较灰色高;深蓝和浅蓝色代表晴空水体,深蓝比浅蓝色可信度高;深绿和浅绿色代表

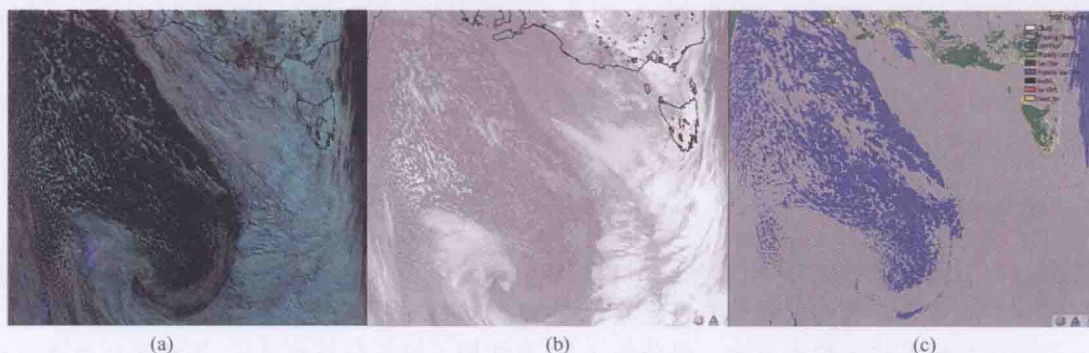


图 11.2 FY—3/VIRR 云检测个例
(FY—3/VIRR 2009 年 3 月 3 日 00:30)

晴空陆地,深绿比浅绿色可信度高;红色代表晴空太阳耀斑像元;黑色为未处理像元。

(2)FY—3/MERSI 云检测:源于 MODIS 算法,是以白天单一像元为检测对象,基于该仪器 L1 数据,考虑太阳耀斑的影响,根据多光谱云检测原理和可信度等级计算方法,生成基于像元的云检测算法。算法针对不同的下垫面类型,采用自动的纹理(此处为 $11\ \mu\text{m}$ 通道的像元与相邻像元间的亮温差)分类方法进行云检测。当检测结果的可信度低于 95% 时,采用多光谱的云检测方法。MERSI 云检测的关键是阈值的确定,需要通过大量的光谱通道测值和计算分析试验。

① $11\ \mu\text{m}$ 红外窗区通道检测:利用 MERSI 红外窗区通道的亮温 BT_{11} (通道 5) 阈值检测洋面上的云,尤其对夜间洋面上冷云的检测效果最好。对于其他地面类型,因陆面比辐射率在 $11\ \mu\text{m}$ 变化很大,可建立简单的云检测阈值。该阈值随生态环境、季节和观测时间的变化而变化。

② 可见光和近红外反射率检测:根据不同下垫面条件、生态环境,运用不同通道的反射率进行检测。单通道反射率检测法,在检测黑背景下亮云时有很好的效果;反之,检测效果很差。例如,利用 MERSI 通道 3 ($0.65\ \mu\text{m}$) 检测陆地上的云,通道 4 ($0.86\ \mu\text{m}$) 进行海洋云检测,通道 6 ($1.64\ \mu\text{m}$) 进行海洋和雪(冰)下垫面情况下的云检测,通道 7 ($2.13\ \mu\text{m}$) 进行雪(冰)上的云检测。其中,冰雪信息由冰雪归一化指数等阈值判识得到。

③ 反射率比值检测:利用可见光或近红外 2 通道间目标反射率(R)的比值(如: $R_{0.86}/R_{0.65}$) 进行检测。因为云在这两个光谱的反射率相近,而水体或植被在这两个光谱通道上的反射率有较大差异。反射率比值检验法用于白天水上云检测。在太阳耀斑区需要考虑太阳耀斑角对阈值的影响。如 $R_{0.86}/R_{0.65}$ 用于海洋和陆地云检测, $R_{0.905}/R_{0.940}$ 用于陆地云检测。

④ 长波红外(LWIR)空间均一性检验:在很多情况下,与晴空地表相比,在长波红外云具有明显的空间变化特征,可用以像元为中心的 3×3 像元标准差作为检测指标来实现云检测。可主要用于海洋及冰(雪)下垫面上。但在海岸或温度梯度较大(如湾流)的区域,红外辐射云检测的可信度较差。

⑤ 可信度估计:MERSI 用 $[0, 1]$ 区间上任意一值代表检测结果的可信度水平,值越大说明晴空像元的检测结果越可信,值小到一定程度或等于 0 时,表明晴空不可信。云检测可信度分为 4 类:0.99, 0.95, 0.66 和小于 0.66,在实际应用中,分别表示像元的检测结果是晴空、可能晴空、可能云和云。以上的云检测结果均以可信度为返回值,把单一的可信度水平 F_i 加以综合,形成最终的晴空或云判别的可信度 Q 。在这些检测中,检测方法之间并不是相互独立的。先将检测方法分为 N 组,每一组检测的最小可信度表示为:

$$G_i = \min[F_i] \quad (11.1)$$

最终的云检测结果可信度为:

$$Q = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N G_i} \quad (11.2)$$

⑥ 晴空修复(CSR)检测:MERSI 云检测方法是一种保守的晴空检测方法。因此,需要对误判为云的晴空点进行修正,并直接给出可信度,如阴影区、太阳耀斑区和海岸线附近晴空的误判。该检测包括:利用植被指数对海岸线和阴影区进行检测、海洋 $11\ \mu\text{m}$ 亮温均一性检测、太阳耀斑区 $0.905/0.940\ \mu\text{m}$ 反射率比值检测和 $0.86\ \mu\text{m}$ 空间均一性检测。

图 11.3 为沙漠地区 MERSI 云检测个例。图 11.3(a)是 3 通道(6, 2 和 1)合成图,图 11.3(b)是云检测结果,对比说明云检测的效果较好。

11.1.3 误差分析

云检测方法以阈值法为主,阈值往往受到地域和时间的限制。薄云、低云和雾一直是云检测工作的难点。同时,黎明、黄昏及夜间云检测效果较差,这也是影响检测精度的主要因素之一。

对云检测结果的准确率检验方法一般分为 3 类:直接用人眼进行观察分析;用地面站点资料对比统计分析;用公认较准确的卫星云检测数据进行对比分析,但需要准确的时空匹配数据。人眼检测法难以实现定量检验,其他方法则由于视角不同而难以实现绝对精度检测。以地面站资料为例,业务中检测精

度随季节时间波动,波动范围一般在 75%~95%左右。

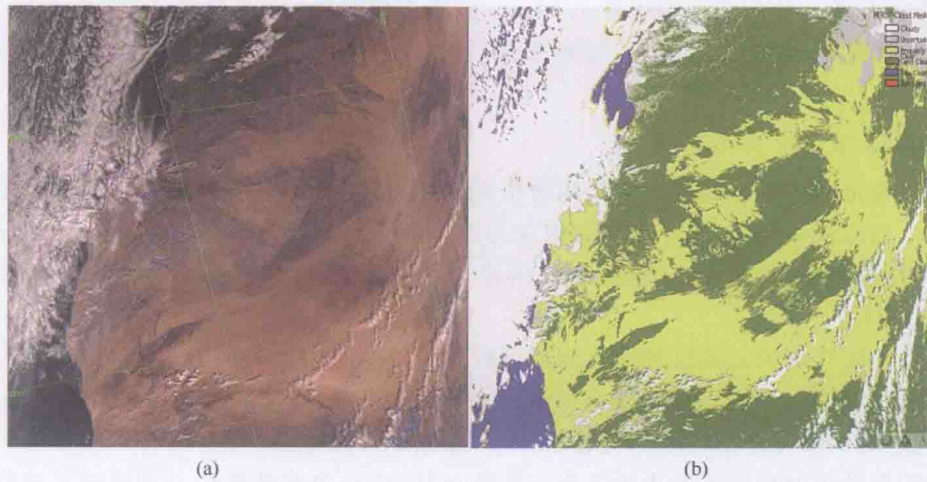


图 11.3 云检测产品示例(2008 年 12 月 11 日 11:00(GMT))

白色表示完全云;灰色表示可能云;黄色表示可能晴空;蓝色表示晴空海洋;绿色表示晴空陆地

11.2 云分类

云对地气系统的辐射收支平衡有重大影响,低云反射大部分太阳辐射、高云阻止长波辐射射向太空。对不同云类的正确检测、识别和应用,可以在气候研究中更合理地使用云的信息。云与天气也存在密切关系,不同的云类反映了不同的大气状况,如对流云的存在预示着可能发生降水或强对流天气,反映了大气的不稳定性;层积云的存在预示着大气中存在着干空气逆温层,这通常是由于天气尺度的环流下沉造成的。因而对云进行正确的分类有助于改善天气预报精度。

卫星观测云是从遥远的太空对地球系统进行观测,因为可见光和红外观测到的主要是云顶特征,与地面观测到的云是有差别的,因而分类体系也有差别。由于卫星在遥远的太空观测地球上的云,因此能识别出的云类也比地面可识别云类少。利用可见光和红外通道观测数据,从宏观角度对云进行分类一般可分为:积雨云、厚卷云、薄卷云、雨层云、中云、低云和层云(雾)。根据云顶特性,可分为冰云、水云和混合相态云。利用红外和可见光探测器,只能探测最高层云顶特性,从而判断最高层云的类别,当像元点存在多层云系时,对下层云无法进行探测和识别,一些微波通道可以部分穿透云,而探测到云中信息,利用 CLOUDSAT 和 CALIPSO 卫星上装载的主动探测器可以清楚地探测到云的垂直结构。

已有的云分类方法可以概括为波段交叉法、阈值法、直方图法、统计分类法、结构分析法和神经网络法等。

11.2.1 云分类的主要原理

云的物理性质决定了云的光学性质,云的光学性质不同,直接影响到云对辐射的发射、反射和吸收。不同云的光学性质差异明显,目前对云的分类主要利用可见光的反射特性和红外的辐射特性。

11.2.1.1 可见光云分类的原理

不同云类的厚度和形状等因素是区分云类的重要依据。云体厚度与卫星所测的云层反射率有直接关系。在可见光窗区,卫星所测到的可见光辐射可表示为: $I_{\lambda}(\theta_s) = (\gamma_{s\lambda} \cos\theta/\pi) E_{\lambda}(T_B)$ 。因太阳辐照度 $E_{\lambda}(T_B)$ 可认为是常数,所以卫星观测到的辐射 I_{λ} 只与物体反照率 $\gamma_{s\lambda}$ 、太阳高度角 θ 有关。在太阳高度角订正以后,卫星所测的可见光辐射就仅为反照率的函数,反照率与可见光云图的计数值成正比,反照率越大,可见光通道计数值越大,一般而言,云体也越厚。一些红外光谱特性相似的云类,如薄卷云、厚卷云、多层云系和积雨云,通常具有明显不同的厚度或反照率。

不同相态的云在太阳短波段的辐射性质不同,近红外和短波红外通道探测信息也可以提供一定的云的结构、相态特征等。如由于冰与水在 $1.64\ \mu\text{m}$ 波段有较明显的吸收性质差异,即冰粒子在 $1.64\ \mu\text{m}$ 吸收大,反射率明显小,水粒子吸收小,反射率高,故 $1.64\ \mu\text{m}$ 反射率对云顶粒子的热力学相态比较敏感。

11.2.1.2 红外通道云分类的原理

卫星红外图像是通过接收地气系统的辐射得到的,卫星在红外窗区测量云顶的红外辐射可表示为 $L = \epsilon_{s\lambda} B_{\lambda}(T_s)$,当波长一定时,卫星所测辐射仅与温度和云的比辐射率有关,红外窗区通道亮温测值近似等于大气有效辐射层处的温度。因此,红外图像可以表征云的高度,如云顶越高,亮温越低,色调越白,灰度值也就越大。

由于云顶高度较接近的云的红外通道测值近似。仅以单通道的红外计数值难以区分,如云顶高度均较高的薄卷云、厚卷云、多层云系和积雨云团。为了克服此难题,采取多通道信息进行云分类,如利用 12 和 $11\ \mu\text{m}$ 通道对水汽和冰晶辐射的吸收差异,来探测半透明卷云。

红外通道的有效辐射层主要取决于吸收气体的含量、分布和温度廓线。不同波长的红外通道探测性质略有差异,如图 11.4 所示, FY-2C 红外通道(IR1 和 IR2)、水汽通道(WV)的光谱段不同,不同通道探测的有效辐射层位置各有差异。利用这种差异有助于我们进行云分类。如水汽通道正处于水汽的振动强吸收带中,而水汽的分布高度一般低于云顶的高度。假如有云存在,则水汽通道看到的是云而不是水汽,此时红外窗区通道和水汽通道观测到的亮度温度差别不大;反之,云很少或晴空时,水汽通道看到的是水汽而窗区通道看到的是地表或海表,二者的亮度温度差别就比较大。因此,红外窗区与水汽通道亮温差能够显示出大气中云的分布状况,尤其能够从数值上反映出云发展的强弱,此特征对于夜间的云分类分析十分有用,即云发展得越旺盛,亮度温度差值越小,在强对流云区,差值接近或小于零,为云的分类提供了很好的依据。

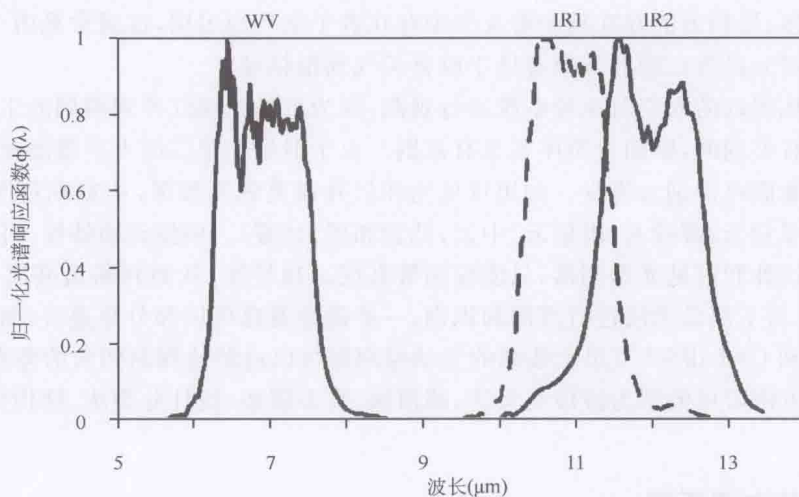


图 11.4 FY-2C 红外分裂窗两个通道(IR1 和 IR2)、水汽通道(WV)的归一化光谱响应函数

11.2.1.3 卫星云图云分类的判据

卫星云图最大的长处就是能获取大面积的云信息,从而得到较传统云观测方式更为直观、宏观的云类型特征判据如下:

(1) 结构形式:是指不同明暗程度物像点的分布式样。如高层高积云常表现为带状、涡旋状等,开口细胞状云系是由积云、浓积云等组成。

(2) 范围大小:是指云系的分布尺度,由云系尺度可以推断形成云的物理过程,尺度小的云系常与中小尺度天气系统相关;尺度大的则与大尺度的天气系统联系。

(3)边界形状:不同类型的云,边界不尽相同,如积云、浓积云边界不整齐,层云(雾)边界较整齐。

(4)色调:是指物象的亮暗程度。可见光云图上云的色调与云厚和云的成分有关,红外云图则与云顶温度相关。

(5)暗影:是指在一定太阳高度角下,高的云在低的目标物上的投影。

(6)纹理:用来表示云顶表面粗糙程度。如层云(雾)云顶表面均匀、光滑;积云、浓积云表面多起伏、不均匀。

运用计算机进行自动云分类时,一般仅采用光谱(主要是亮温)及其结构特点。其他判据利用较少,特别是因为阴影等分析相当困难,故在实际应用时很难利用。因此,气象学家目视判别的像元样本一般可视为“真值”。

11.2.2 云分类算法

云分类的过程是根据云的光学性质进行特征提取,获得了一系列描述各种云/表面类型的光谱和纹理等特征,利用分类器进行分类。具体步骤包括数据预处理、云特征参数化、云分类模型建立和测试。

11.2.2.1 云分类的主要方法

(1)波段交叉法:波段交叉法是从辐射传输方程出发,利用各通道光谱段之间相互组合,将云高和云量参数化,经过求解辐射传输方程来确定云类型。Derrien 等(2007)使用 AVHRR 和 GOES 红外、可见光云图,对云进行分类研究。研究发现,主要云型的分类效果很好,但在中、低云的分类上有较大误差。

(2)阈值法:阈值法是简单有效且使用广泛的方法。最早 Koffler 等(1973)采用阈值法来区别云和地表。杨澄等(2002)利用 GMS-5 的 11,12 和 $6.7\ \mu\text{m}$ 通道间的亮温差作为阈值来判断云型。结果表明,在有无云的判断和高、低云的判别较好。直方图法是对阈值法的改进。

(3)统计方法:云分类统计法是从统计理论出发,依据某一统计变量,将图像进行分类。常用的统计云分类法包括阈值法、直方图法和聚类分类。

①国外关于云分类的研究较早,已有多种技术方法,并已基本实现业务化。如阈值法,其原理简单,使用方便,很多业务化产品采用了此类技术,但需考虑阈值随时空变化的复杂性,如欧盟根据 MSG(第二代 Meteosat 卫星)的可见光反射率和红外亮温分别设计了不同的阈值对照表,提供高、中、低 3 大类 7 个子类的云类型产品。

②直方图法是首先对历史或全局做二维,甚至三维直方图统计,找出各种类型云的灰度分布,借此来确定最佳的阈值,把各类型云很好的分开。对于不同卫星的观测谱段,云的特性不同,可以利用不同卫星的不同波段的组合,或者同一卫星的不同通道来定量的区别不同类型的云。

③聚类分类依据一定的相似度量(距离、角度或概率),对未知样本进行划分,直到满足给定的准则函数值。聚类分类不需要任何预知知识,运算量小,实施简单,易于自动分类,在云类的客观识别中得到广泛应用。聚类分类包括最大最小距离法、K—均值法、动态聚类及分层聚类等。目前,国家卫星气象中心就采用了 K—均值法技术实现了 FY—2C 的 8 种云类的业务化识别。尽管聚类分析法在近几年里不断地完善并做了许多的改进,但是此方法受所选分析区域图像的限制,分析的效果太过于依赖卫星观测视角内观测对象的特征,使得云分类难以得到较为一致的判据。

(4)神经网络法:神经网络是一种能适应新环境的系统,它针对过去经验(信息)的重复学习,而具有分析、预测、推理和分类等能力,是当今能够仿效人类大脑去解决复杂问题的系统。相对常规的系统(使用统计方法、模式识别、分类、线性或非线性方法)而言,神经网络法可以看做是介于统计法和结构分析法之间的方法,它不需要对样本空间做概率模型正态分布的假定。神经网络为基础的系统,具有更强大的功能和分析问题技巧。

最早把人工神经网络法应用于云分类问题中的是美国科罗拉多大学的 Key 等(1989),Lee 等(1990)应用美国陆地卫星 LANDSAT 的云分类。此后,师春香等(2002)利用多通道遥感信息,在 FY—2C 上实现比较了多种神经网络方法,如误差反向传播网络(BP)、Modular 回馈神经网络(MNN)、Jordan-Elman 型递归神经网络、概率神经网络(PNN)、自组织映射网络(SOM)和互动型神经模糊推理系

统(CANFIS)的分类效果,发现各种神经网络模型均可得到较好的分类效果,分类正确率达到 90%以上,且首次尝试了将 FY—2C 云图分为四个区域,并按季节分别建立 16 个云分类模型。研究表明,分类结果有较好的区域连续性及合理性,较不分区域和季节的模型,其精度可提高 3%~7%。

(5)云参数法:云参数法是一种云分类最直接的方法,它的主要原理就是通过卫星遥感数据,从大气辐射传输方程出发,将红外窗区通道与可见光通道或者二氧化碳吸收通道,甚至微波通道相结合,最终计算出云的各项特性,如云顶高度、云顶粒子相态、云的散射系数、吸收系数、云滴有效半径、云光学厚度和云量等进行云分类。如国家卫星气象中心刘健等(2000)利用 FY—1D、NOAA 仪器的多光谱探测通道数据,采用 $1.6\ \mu\text{m}$ 反射率和 $11\ \mu\text{m}$ 亮度温度双通道散点图及 $3.75\ \mu\text{m}$ 与 $11\ \mu\text{m}$ 亮度温度差分析方法,对密实卷云、卷云覆盖在水云上、密实水云等几种云覆盖情况的典型多层云系进行识别。

11.2.2.2 风云气象卫星业务云分类方法

下面介绍我国风云气象卫星业务云分类方法。

(1)风云静止气象卫星业务云分类方法:国家卫星气象中心 FY—2 卫星业务云分类产品包括地面、中低云、高层云、卷层云、密卷云及积雨云等类别。以标称图和云检测结果为主要输入数据,以段(32×32 的块)为基本处理单位,使用直方图分析方法将像元分为几个不同类别,然后主要使用红外和水汽两个通道进行散点图分析,并用两个标准来进行聚类:第一个标准,是在散点图上类中心与属于类的像元之间的欧几里得距离。如果这个距离非常小,它们就属于同一类了。这些红外、水汽通道入瞳辐射值极其一致的像元群往往就属于同一种陆地表面、海面,或者不透明的密实的层状云。如果这个距离不是非常小,那么,还要检查第二个标准,即斜率。斜率可以用来区分高云中的各种类别,斜率的分布可以分成三种情况:

①第一种情况是斜率几乎等于零,水汽通道入瞳辐射基本上是常数。这种情况景观的高度一定低于水汽通道的权重函数的高度。在这种情况下,下一步要检查红外通道的动态范围。如果红外通道的动态也很小,那么,这个景观就属于像元红外和水汽两个通道的欧几里得距离非常小的情况。它们一般是同一种陆地表面、海面,或者不透明的密实的层状云。如果红外通道的动态相当大,那么,这个段数据里很可能既有地面,又有云,二者交织在一起,并且这其中往往还有许多部分像元有云的情况。

②第二种情况是斜率大于 0.3,且小于 0.5 的情况。这种情况段内的云是以卷云为主。卷云这种景观,其通道辐射值的分布不是呈正态的,这是因为卷云里各个部分之间厚薄相差非常大。

③第三种情况是斜率大于 0.5 的情况。这种景观红外测值的动态范围很小,水汽通道的动态反而很大。景观主要体现为密卷云、积雨云等。

通过上述步骤,最终将云分为高层云、卷层云、密卷云和积雨云(罗敬宁,2006)。表 11.1 给出国家卫星气象中心业务云分类产品包含的类别。图 11.5 为国家卫星气象中心业务云分类产品一个示意图。

表 11.1 国家卫星气象中心业务云分类产品代码及内容说明

数据内容	类别	英文
0	晴空海面	Clear Oceans
1	晴空陆地	Clear Lands
11	混合像元	Mixed Pixels
12	高层云或雨层云	Altostratus or Nimbostratus
13	卷层云	Cirrostratus
14	密卷云	Cirrus dens
15	积雨云	Cumulonimbus
21	层积云或高积云	Stratocumulus or Altocumulus

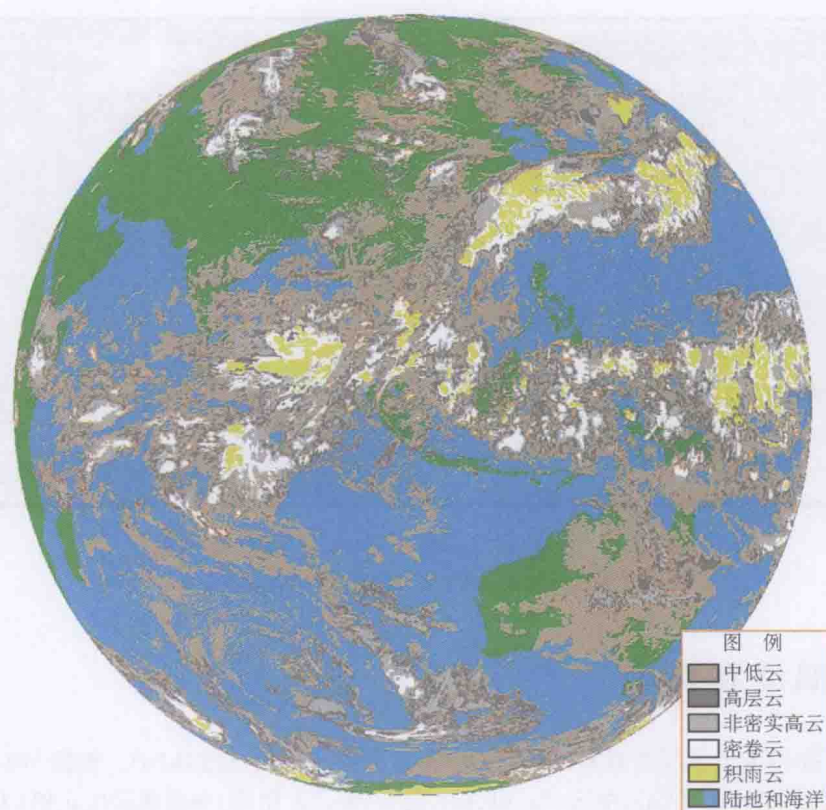


图 11.5 国家卫星气象中心业务云分类产品示意图

(2) 风云极轨气象卫星业务云分类方法: 基于经过辐射定标和地理定位的 FY—3/VIRR L1 数据和云检测数据, 结合地表类型数据, 利用可见光、红外、近红外通道的光谱和纹理特性, 采用阈值方法对有云像元进行高、中、低云识别, 得到云分类产品。主要算法包括: 薄卷云识别、破碎云识别、云类型识别及破碎云滤除(刘瑞霞, 2008)。

① 薄卷云识别: 利用 VIRR L1 数据、云检测产品、地表分类数据, 采用快速辐射传输模式模拟与经验阈值相结合的方法, 确定不同季节、不同下垫面薄卷云判识阈值, 建立查算表, 将薄卷云识别出来, 定义为冰云。

② 破碎云识别: 利用 VIRR L1 数据, 采用经验阈值的方法, 确定破碎云阈值, 同时计算方差识别云边缘纹理, 判识得到破碎云。

③ 近红外通道冰水相态识别: 利用 VIRR 近红外通道数据, 采用快速辐射传输模式模拟和统计阈值相结合的方法, 确定不同季节、不同下垫面冰云和水云识别阈值, 从而判识云相态。

④ 破碎云滤除: 将破碎云合并入周围最占优势的云类型。

⑤ 高、中、低云识别: 利用 VIRR 红外通道数据, 采用统计阈值方法, 确定不同季节、不同下垫面高、中、低云阈值, 判识得到云类型。图 11.6 为 2009 年 3 月 11 日云分类产品。

11.2.3 云分类的误差分析

一般从两个角度检验云分类结果的正确性: 一是目视; 二是相对比较。其中, 目视是利用气象专家的经验进行目视检验; 相对比较是用地面观测资料进行对比统计, 也可用公认的较准确的卫星云分类产品进行对比分析。在陆地上检验可以二者结合来验证, 但在海面上或缺乏常规观测的地方, 只能用同类卫星产品进行对比, 如利用 MODIS 云分类结果进行比较。检验的标准是采用均方误差(MSE)、归一化均方误差(NMSE)、%Error、样本正确率、相关系数等指标进行评定。

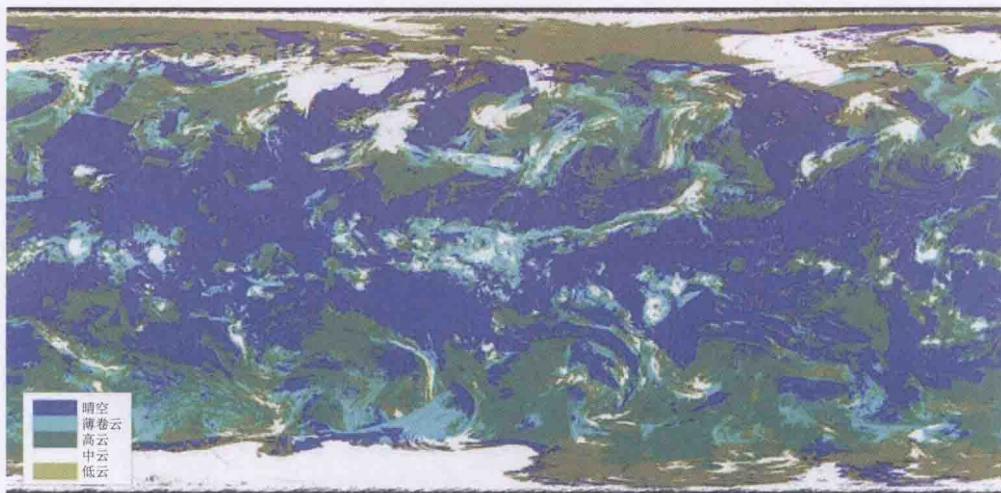


图 11.6 2009 年 3 月 11 日 VIRR 云分类产品示例
(白色为高云, 浅蓝色为薄卷云, 棕黄色为中云, 绿色为低云)

11.3 云顶温度和高度

云顶温度和高度是指云顶层所具有的温度(K)和云顶层所处的高度(hPa)。根据 WMO 的规定, 云层依高度不同, 可分为高云(Ci, Cc 和 Cs)、中云(Ac 和 As)、低云(Sc, Ns 和 St)和直展云(Cu 和 Cb)4 族共 10 属。

云在地气系统的长短波辐射通量和全球能量平衡中起着十分重要的作用, 然而不同高度的云所起的作用则存在不同。半透明高云由于对太阳通量的透射和云体红外通量的发射, 而在对流层和平流层低层产生增暖效应, 中云和低云由于云体较强的反射而在大气中和地表面产生冷却作用。因此, 云顶高度在研究全球气候变化和温室增暖效应中占有重要的位置。此外, 利用卫星反演的云顶温度和云高产品, 可以定量分析天气系统演变、地面降水量等与云顶温度和云高之间的关系, 为提高短期天气预报水平提供一定的参考。

11.3.1 基本原理

11.3.1.1 CO₂ 通道薄片法

在单一云层的大气中, 通过采用 CO₂ 薄片算法进行辐射传输计算。在一给定的视场中, 有云像元在波段 ν 上的观测辐射 $I(\nu)$ 为:

$$I(\nu) = (1 - N\epsilon)I_{\text{clr}}(\nu) + N\epsilon I_{\text{bcd}}(\nu, P_c) \quad (11.1)$$

式中 $I_{\text{clr}}(\nu)$ 表示晴空辐射, $I_{\text{bcd}}(\nu, P_c)$ 表示气压为 P_c 的大气层上视场中全部为不透明云时的辐射, N 为视场中的云量, ϵ 为云的比辐射率。从式(11.1)中可以看出, 对于一个给定的辐射值, 过高地估计比辐射率, 会导致过高地估计云顶气压(即云顶过低)。

不透明云的辐射可表示为:

$$I_{\text{bcd}}(\nu, p_c) = I_{\text{clr}}(\nu) - \int_{p_c}^{p_s} \tau(\nu, p) \frac{dB[\nu, T(p)]}{dp} dp \quad (11.2)$$

式中 p_s 为地面气压, p_c 为云顶气压, $\tau(\nu, p)$ 是气压为 p 的大气层到大气层顶的透射辐射, $B[\nu, T(p)]$ 是 $T(p)$ 的 Planck 函数。右边第 2 项表示不透明云造成晴空辐射的减少。

根据 Chahine(1974)和 Smith 等(1978)的研究工作, 对于频率为 ν_1 和 ν_2 的两个光谱通道, 同一视场的观测辐射与晴空辐射差值之比为:

$$\frac{I(\nu_1) - I_{\text{clr}}(\nu_1)}{I(\nu_2) - I_{\text{clr}}(\nu_2)} = \frac{N\epsilon_1 \int_{p_c}^{p_s} \tau(\nu_1, p) \frac{dB[\nu_1, T(p)]}{dp} dp}{N\epsilon_2 \int_{p_c}^{p_s} \tau(\nu_2, p) \frac{dB[\nu_2, T(p)]}{dp} dp} \quad (11.3)$$

若两个频率很接近,则 $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$ 。在已知两个频率通道的观测值及大气温度和透射率廓线的基础上,即可求得云顶气压。

如果晴空辐射是未知的,可对式(11.3)进行变换,云顶气压一般根据 5×5 像元区域上两个 CO_2 通道的辐射梯度求得,即:

$$\frac{I_{\min}(\nu_1) - I_{\max}(\nu_1)}{I_{\min}(\nu_2) - I_{\max}(\nu_2)} = \frac{(N\epsilon_{\min} - N\epsilon_{\max}) \int_{p_s}^{p_c} \tau(\nu_1, p) \frac{dB[\nu_1, T(p)]}{dp} dp}{(N\epsilon_{\min} - N\epsilon_{\max}) \int_{p_s}^{p_c} \tau(\nu_2, p) \frac{dB[\nu_2, T(p)]}{dp} dp} \quad (11.4)$$

式中 $I_{\min}$ ($I_{\max}$) 是云最多(最晴空)的像元辐射值, $N\epsilon_{\min}$ ($N\epsilon_{\max}$) 是相应的有效比辐射率。如前所述,假设两个相近通道上的云最多和最晴空像元的有效比辐射率梯度相同,则可根据有效比辐射率的梯度求得云顶气压。该算法假设辐射梯度的变化,是由有效比辐射率而不是云顶气压的变化所引起的。

云顶高度确定后,有效云量(或有效比辐射率)就可通过红外窗区通道数据求得,表达式为:

$$N\epsilon = \frac{I(\nu) - I_{\text{clr}}(\nu)}{B[\nu, T(p_c)] - I_{\text{clr}}(\nu)} \quad (11.5)$$

式中 N 表示视场中云量大小, $N\epsilon$ 为有效云量, ν 是窗区通道频率, $B[\nu, T(p_c)]$ 是不透明云的辐射。没有窗区通道晴空辐射时,不能计算有效比辐射率。

对于每一个 5×5 像元区域,有效比辐射率与云量 N 和比辐射率 ϵ 有关。当 $N\epsilon < 1$ 时,卫星观测到的或是破碎云($N < 1, \epsilon = 1$)或整个是透明云($N = 1, \epsilon < 1$)或是破碎的透明云($N < 1, \epsilon < 1$)。对于分辨率为 5 km 的观测像元,视场中的半透明云多数是由云的比辐射率小于 1 所致,而不是视场部分被云覆盖所致。Wylie 等(1994)指出,在热带和亚热带地区,对于大多数天气系统来说,这种说法是正确的。

11.3.1.2 红外窗区通道辐射传输计算

通过对 11 μm 大气窗区的辐射传输计算,同时考虑地表温度及云光学厚度的影响,建立一个较为丰富的云顶温度查算表数据库,据此来反演云顶温度。云顶高度的反演是把云顶温度和云顶高度联系起来,利用卫星过境前后全球尺度数值模式预报的大气温度廓线,经过对其进行时间、空间插值处理,得到卫星扫描时刻像元位置处的大气温度廓线,进而根据反演得到的像元点处云顶温度求得对应的云顶高度值。

我们将计算分子吸收的 κ 分布方法和计算散射大气辐射传输的离散纵标法结合起来,计算在散射、分子吸收和热辐射过程同时存在条件下的云辐射率大小。设太阳天顶角余弦、卫星天顶角余弦和相对方位角分别为 0.64, 0.94 和 45° , 当地表温度为 293.5 K 时,计算不同云光学厚度和云滴有效半径对应的 11 μm 通道辐射率随云顶温度的变化。结果显示,对于光学厚度和云滴有效半径都比较小的情况(如 $r_e = 5 \mu\text{m}$, $\tau_c = 6$),由于云光学厚度和云滴有效半径的不确定性引起的云顶温度的反演误差最大可达 6.5 K。除此之外,云光学厚度和有效半径的不确定性引起的云顶温度估计误差一般小于 2 K。

此方法在辐射传输计算时考虑了地表温度及云光学厚度的影响,即考虑了地面热辐射和各种云状的作用,对视场中部分为云或为半透明云的情况有一定的代表性,因此反演准确度有一定程度的提高。

11.3.2 计算方法

11.3.2.1 CO_2 通道薄片法

CO_2 通道薄片法最早用于红外大气探测仪器(HIRS/2)资料的云参数计算(Smith 等, 1985; Eyre 等, 1989)。该方法利用权重函数峰值高度分别为 600 和 900 hPa 的 14.0 和 13.4 μm 通道对计算云顶高度。事实上云顶高度范围变化很大,显然用两个光谱通道不能完全反映真实情况。国家卫星气象中心利用接收的区域 NOAA-10 HIRS/2 资料计算云顶高度时,在改进的同步物理反演方法基础上(黎光清等, 1993)又增加一个 13.7 μm 通道,分别计算三个通道的云顶高度,再从中确定最佳云顶高度(董超华等, 1992),改进了云参数计算精度。

MODIS 仪器有 4 个 CO_2 吸收通道(通道 33~13.34, 34~13.64, 35~13.94 和 36~14.24 μm)用于反演云顶高度,远红外通道(通道 31 的中心波长为 11.03 μm)用于计算云的有效比辐射率。

在 5×5 像元的视场中, 方程(11.3)表示云的平均性质。方程左边的观测云辐射通过云检测结果为云(或可能为云)的像元平均求得, 晴空辐射通过一个快速大气辐射传输模式(PFAAST)(Hannon 等, 1996)计算求得。该模式将大气分为 101 层, 计算中考虑了卫星天顶角和各种气体及水汽的吸收, 模式中温度和湿度廓线采用 NCEP 的全球温度和湿度分析场资料。方程(11.3)的右边根据温度廓线、透射率廓线(与云顶气压有关)计算。通过辐射偏差调整来保证方程两边的平衡。

假设云在两个相近波段上的比辐射率相同, 反演的云顶高度为与测量值和模式计算值之比最佳匹配时的气压值。 p_c 的取值范围在地面气压(或逆温层顶)到对流层顶气压之间。利用 4 个 CO_2 通道和 1 个红外窗区通道辐射的比值可以计算 5 个云顶气压值。从理论上讲, 在靠近 CO_2 吸收波长的通道上, 冰云的比辐射率会有 5% 左右的差异(如冰云在 $14.24 \mu\text{m}$ 上的比辐射率比 $13.9 \mu\text{m}$ 上的比辐射率小 5%), Zhang 等(2002)对与此有关的调整进行了测试。

当 $(I - I_{\text{clr}})$ 或 $(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$ 的值落在仪器噪声范围内时(约 $0.5 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$), 反演的 p_c 无意义。根据方程(13.4)及 5 个反演的云顶气压, 可计算出 5 个有效云量。Menzel 等(1983)指出, 在 5 个反演值中, 最有代表性的云高和云量, 是在 4 个 CO_2 吸收通道和 1 个红外通道均符合辐射传输方程的那个反演值。

如果 $(I - I_{\text{clr}})$ 或 $(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$ 的值落在仪器噪音范围内使辐射比无法使用, 则可直接利用红外窗区通道的亮温计算云顶气压, 通过卫星观测的 $11.03 \mu\text{m}$ 通道亮温与温度廓线的比较来确定云顶气压, 此时云量和云比辐射率假设为固定值。因此, 对于各种类型的云, 无论使用 CO_2 方法, 还是红外窗区通道方法, 均可反演得到云顶气压。Wylie 等(1989)指出, 当 $N_c < 10\%$, 将有一半以上非常薄的云可能被误判。

将经过定标和天顶角订正的 MODIS 数据分成 5×5 像元的小单元, 利用 MODIS 的云检测方法对像元进行判识, 当 21~25 个像元为晴空时, 不再计算云参数。

11.3.2.2 云顶高度的计算

由于 FY-3A VIRR 仪器没有 CO_2 吸收通道, 因此采用 $11 \mu\text{m}$ 红外通道辐射传输计算的方法来计算云顶温度/云高。

求解如下辐射传输方程:

$$\frac{dI_i(\mu, \Phi)}{d\tau_k} = -I_i(\mu, \Phi) + \frac{\bar{\omega}_k}{4\pi} \int P(\mu, \Phi, \mu', \Phi') I_i(\mu', \Phi') d\Omega + \frac{\bar{\omega}_k}{4\pi} P(\mu, \Phi, \mu_0, \Phi_0) \pi F e^{-\tau_k/\mu_0} + (1 - \bar{\omega}_k) B(\tau_k) \quad (11.6)$$

式中 μ_0 和 Φ_0 表示太阳天顶角的余弦和方位角, $B(\tau_k)$ 是普朗克函数, F 是太阳入射在大气层顶的辐射强度; τ_k 是大气光学厚度, 表示为云光学厚度 τ_c 、气溶胶光学厚度 τ_p 、分子散射光学厚度 τ_m 和分子吸收光学厚度 τ_{ak} 之和; 单次散射反照率表达为 $\omega_k = (\tau_c \omega_c + \tau_p \omega_p + \tau_m) / \tau_k$, 式中 ω_c 和 ω_p 分别是云和气溶胶的单次散射反照率; 散射相函数 $p(\mu, \Phi, \mu', \Phi')$ 由云散射相函数 $p_c(\mu, \Phi, \mu', \Phi')$ 、气溶胶散射相函数 $p_p(\mu, \Phi, \mu', \Phi')$ 和分子散射相函数 $p_m(\mu, \Phi, \mu', \Phi')$ 加权平均得到:

$$p(\mu, \Phi, \mu', \Phi') = [p_p(\mu, \Phi, \mu', \Phi')] \tau_p \bar{\omega}_p + p_c(\mu, \Phi, \mu', \Phi') \tau_c \bar{\omega}_c + p_m(\mu, \Phi, \mu', \Phi') \tau_m] / (\tau_p \bar{\omega}_p + \tau_c \bar{\omega}_c + \tau_m)$$

求解辐射传输方程的方法为离散纵座标法, 计算中将大气分为 17 层, 大气廓线参考美国标准大气。云滴谱设为单模对数正态分布:

$$n(r) = \frac{C}{(2\pi)^{1/2} r I n \sigma} \exp\left[-\frac{(I n r - I n r_0)^2}{2 I n^2 \sigma}\right] \quad (11.7)$$

式中 r 是云滴半径, $n(r)$ 是半径在 r 和 $r + dr$ 之间的云滴数密度, C 是云滴总数密度, r_0 是模式半径, σ (1.48) 是几何标准偏差。在通常情况下, 水云的散射相函数、单次散射反照率和消光截面主要取决于如下定义的云滴有效半径:

$$r_e = \frac{\int \pi r^2 m(r) dr}{\int \pi r^2 n(r) dr} \quad (11.8)$$

由此可以得到云滴有效半径与模式半径几何标准偏差的关系:

$$r_e = r_0 \exp\left(\frac{5}{2} \ln^2 \sigma\right) \quad (11.9)$$

利用上述的辐射传输模式,计算不同云状(云光学厚度和云滴有效半径)、不同地表温度、不同卫星天顶角($0^\circ \sim 56^\circ$, 间隔为 4°)及 5 个云顶温度(282, 270, 260, 240 和 220 K)条件下的 $11 \mu\text{m}$ 通道辐射率变化情况,构建反演所需的查找表数据库。计算表明,当 $r_e = 10 \sim 15 \mu\text{m}$ 时,云顶温度变化 2 K 时引起的辐射率变化小于 2%;当 r_e 从 $20 \mu\text{m}$ 增加到 $30 \mu\text{m}$ 时,云顶温度变化 2 K 时引起的辐射率变化从 3% 增大到 5%。

这种方法的创新性在于辐射传输计算时考虑了地表温度及云光学厚度的影响,即考虑了地面热辐射和各种云状的作用,对视场中部分为云或半透明云的情况有一定的代表性,反演准确度也有一定程度的提高。

云高的计算流程:

(1) 从公共数据集中读取卫星过境时刻前后两个时次(时间间隔 6 h)数值模式预报的大气温度廓线。

(2) 进行时间插值,得到卫星过境时的大气温度廓线。

(3) 进行空间水平插值,得到像元点处的大气温度廓线。

(4) 读入该像元点处计算的云顶温度值,进行空间垂直二次线性插值,求得像元点处云顶温度对应的云顶高度(hPa)。

11.3.3 误差分析

对于光学厚度薄的云,云顶高度计算值代表的是云中心部分的气压,对于光学厚度厚的云,代表的是云层顶部的气压。 CO_2 薄片算法的精度一般在 50 hPa,其中对中、高云的反演效果较好,低云误差较大。当不透明云的上部有透明云存在时,一般会低估透明云的高度,平均的误差可达 100 hPa 左右;当下层的不透明云处于对流层中部($400 \sim 700$ hPa)时,上层透明云的云高估计误差最大;当下层的不透明云接近地面或者上层透明云时,透明云高的估计误差可以忽略。Chang 等(2005)发展了一个针对水云上部覆盖半透明卷云的双层云条件下卫星反演云高的新方法。

国家卫星气象中心提供全球分布的 5 km 分辨率云顶温度和云高的日、旬和月产品。图 11.7 和图 11.8 分别为 2009 年 8 月 28 日 FY—3A 卫星反演的云顶温度和云顶高度日产品示意图。图中显示,地球表面覆盖着大范围的云系;中、低纬度云层的云顶温度较高,但赤道附近存在着一些云顶温度很低的云层;由于此时太阳直射北半球,北半球云层的云顶温度较南半球普遍偏高。对应赤道附近的云顶温度低值区,存在着一些发展较为强盛的热带对流云团(热带辐合带 ITCZ),此处云顶很高。

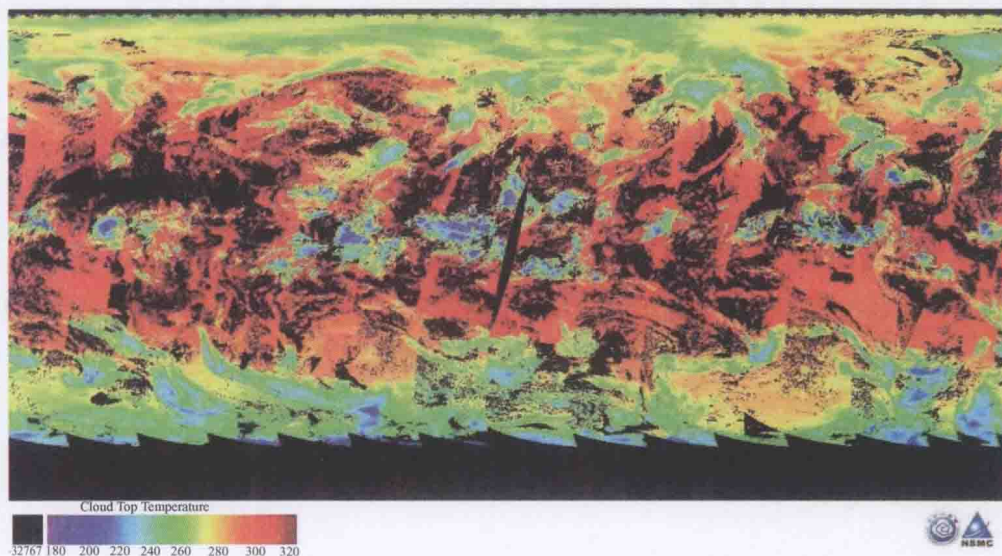


图 11.7 FY—3 2009 年 8 月 28 日计算的全球云顶温度(单位:K)