

王华荣,朱小祥,谢向明. 基于FY-2C红外资料进行夜间云检测的方法研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 105-111.

基于FY-2C红外资料进行夜间云检测的方法研究^{*1}

王华荣^{1,2} 朱小祥¹ 谢向明²

1 国家卫星气象中心, 北京 100081

2 四川省气象局, 成都 610072

提 要: 应用2007年4月30日20时至5月1日03时的FY-2C红外亮温资料、地面云观测资料以及地理海拔高度资料, 详细分析了无云条件下红外亮温与地理海拔高度之间的关系特征。通过建立夜间无云条件下红外亮温与地理海拔高度之间对应关系的标准数据库, 以此为判据实现了有云区和无云区的分离, 云检测个例结果表明正确率可达88%; 将无云区误判为有云区的百分比为4%, 同时将有云区误判为晴空区的百分比是8%。在云区的云检测正确率为82%; 在无云区的云检测正确率达到92%。在业务化应用和适用性分析中, 以5月1日00时资料建立的判据, 分别对5月2日至5日00时整个区域进行云检测试验, 分析结果表明其总体准确率与5月1日00时的基本接近但稍高, 达到92%。在云区的判识正确率提高到93%, 从而导致总体准确率稍微提高; 而在无云区的判识效果与5月1日00时的一致为92%。

关键词: 云检测, 夜间, FY-2C红外资料

A Method of Cloud Detection at Nighttime Using FY-2C Infrared Channel Data

WANG Huarong^{1,2} ZHU Xiaoxiang¹ XIE Xiangming²

1 National Meteorological Satellite Center, Beijing 100081

2 Meteorological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: Based on the surface topographic altitude data, FY-2C infrared channel data and cloud cover data from observation stations during 30 April—01 May 2007 from 2000 to 0300 (UTC), an analysis of the relation between the topographic altitude and the clear IR radiance is performed. It is found that the IR brightness temperature of surface is influenced by the change of surface topographic altitudes at nighttime in clear areas. The IR brightness temperature in some clear areas at high altitude is lower than (or equal to) that in other cloudy areas at low altitude. This results in difficulty to process cloud detection using infrared channel data. Therefore, the standard database of clear surface IR brightness temperature at different topographic altitudes is established and used to separate satellite infrared observations into “clear” and “cloudy” categories as a method at nighttime. A case selected randomly shows that 88 percent of satellite observations can be correctly separated for an infrared imagery at nighttime. There are 4 percent of “clear” observations to be incorrectly separated into “cloudy” ones. In addition, 8 percent of “cloudy” observations are incorrectly separated into “clear” category. By the method 92 percent of satellite observations in clear areas can be correctly categorized, but 82 percent in cloudy areas. In order to analyze the operational use of the method the satellite infrared observations at 0000 UTC during 2—5 May 2007 are separated into “clear” and “cloudy” categories based on the standard database from the datasets at 0000 UTC 1 May 2007. The 92 percent of total satellite observations can be correctly separated, and the accuracy is close to,

* 四川省气象局2007-6项目、《卫星预测四川中尺度对流云团发展及其降水估算》项目资助

2008年11月10日收稿; 2010年2月15日收修定稿

第一作者: 王华荣, 主要从事卫星遥感反演应用以及卫星资料同化方面研究. Email: wwghrr_ren@163.com

but better than that of cloud detection at 0000 UTC 1 May. The 93 percent of satellite observations in clear areas can be correctly categorized, which results in the better total accuracy, also 92 percent in cloudy areas.

Key words: cloud detection, nighttime, FY-2C infrared channel data

引言

卫星云图在天气监测和天气分析预报中具有重要作用,特别对云的识别与分类在业务应用上是非常有意义的。对云的识别已有大量的研究,Goodman 等^[1]总结了三种基本云检测方法即阈值法、统计法及辐射传输方法,Simpson 等^[2]应用阈值法改进了 GOES 卫星图像在海洋上的云检测方法,师春香等^[3]基于 Peak 等^[4]人提出的多阈值启发式和人工神经网络相结合的方法进行 GMS 红外云图的中尺度云系自动识别试验,王耀生等^[5]使用数学形态学方法识别卫星云图上的台风云系,马芳等^[6]探讨了多通道阈值法进行 GMS-5 卫星图像较大尺度的云检测及其方法改进,刘希等^[7]基于 Alan 等^[8]人提出的动态阈值法来实现 GMS-5 卫星图像自动云检测,朱小祥等^[9]应用红外阈值法分析了云南地区的云量等等。事实上,大量有关卫星云检测研究都基本上应用到了阈值法和卫星可见光通道或红外通道等资料。

在不可见光资料可用的夜间,对云的识别主要使用红外通道资料,而且从业务实用方面来看,红外图像可能更为简便。然而,某区域的红外亮温受多种因素影响而不断变化^[10-11]。事实上,夜间的红外通道资料因为受地理海拔高度因素影响,会出现在较高海拔晴空区域的红外亮温低于或等于较低海拔区域上空的一些云的云顶亮温,这将严重影响用一阈值来实现这些区域的云地分离。特别在地势起伏较大的青藏高原—四川盆地,其影响更为明显,而四川盆地多低层云和层状云降水,所以对这些地区正确的云地分离不但对天气预报与监测具有重要作用,而且在应用卫星资料进行降水估算方面也具有重要意义。一些研究已经通过红外通道卫星资料的时空序列对比来进行有云区与无云区的识别,有效地实现了云地分离^[12-13]。这样的云检测方法在某种程度上避开了地理海拔高度的影响,但是其代价是必需多个时刻资料以及复杂的运算和处理;而且会遇到一些很难处理的问题如:(1)较长时间资料缺

失后的判识问题,(2)某区域很长时间被云覆盖且云顶红外亮温变化很大情况下的判识问题等。因此,该研究主要探讨通过建立在夜间无云条件下地理海拔高度与卫星红外亮温之间的对应关系,然后应用此关系为判据来分离同时刻整个区域的有云区和无云区。

1 资料及其处理

文中使用 FY-2C 静止卫星等经纬度红外通道 2 ($11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$) 亮温资料(IR),以及相应的灰度资料,灰度级为 $0\sim 255$,灰度值越大,其亮温越低,卫星像元的经纬度分辨率为 $0.09^\circ\times 0.09^\circ$;地理信息资料的经纬度分辨率为 $0.008^\circ\times 0.008^\circ$ 。所取资料的范围为 ($2^\circ\sim 56^\circ\text{N}$ 、 $60^\circ\sim 150^\circ\text{E}$),时段为 2007 年 4 月 30 日 20 时(世界时,本文中所有时间均为世界时)至 2007 年 5 月 1 日 03 时,5 月 2 日 00 时至 5 日 00 时。

由于卫星像元的经纬度分辨率与地理信息资料的不一致,为了统一配置资料,所以将处于某一卫星像元内的所有地理海拔高度数据进行平均,获得与卫星像元同经纬度分辨率的平均地理海拔高度资料。通过上述处理,地理海拔高度资料与卫星红外资料的经纬度分辨率均为 $0.09^\circ\times 0.09^\circ$,后文所用资料均为此数据资料。

由于地面站点是一单点的,而卫星像元的经纬度分辨率是 $0.09^\circ\times 0.09^\circ$,所以在对地面站点云观测资料与卫星像元资料进行对比配置时,卫星资料以地面站点所在经纬度上的像元为准。

2 方法设计

为了分析无云条件下红外亮温随着地理海拔高度的变化规律,文中选择了如图 1 所示样本区域。在 2007 年 4 月 30 日 20 时至 5 月 1 日 03 时这一时段内,该区域基本上为较好的无云条件,而且地理海拔高度的跨度很大,各个时刻的样本数目为 11200 对。另外,总体上来讲,海拔高度是自东向西增加

的,也就是说海拔高度的增加方向大体上隐含着自东向西这一特性,后文分析中将应用到。

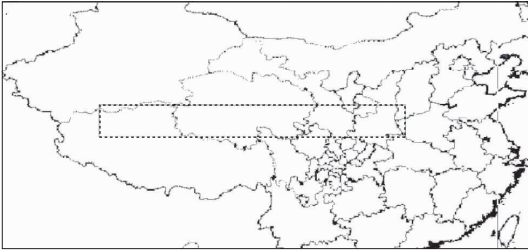


图 1 所选样本的区域(33.05°~36.2°N、82.5°~111.3°E),虚线方框所示

Fig. 1 Sample area selected to analyze the relation and establish database, labeled by dotted line

应用图 1 所示区域内的 FY-2C 卫星红外亮温资料和与之对应的地理海拔高度资料,可以得到图 2。图 2 给出了 2007 年 4 月 30 日 20 时至 5 月 1 日 03 时样本的红外亮温随地理海拔高度的分布情况,图 2 中 a 为 4 月 30 日 20 时的分布情况,b 为 21 时的,c 为 22 时的,d 为 23 时的;e 为 5 月 1 日 00 时的,f 为 01 时的,g 为 02 时的,h 为 03 时的。由图 2a,图 2b,图 2c 可以看出,在夜间,亮温随着海拔高度的升高不断减小,近似直线增减;随着太阳的由东向西顺序照射地面,这种同增减关系被逐渐破坏,如图 2d、图 2e、图 2f、图 2g 所示;到最后这种因为海拔高度的不同而造成红外亮温不同关系基本上消失,

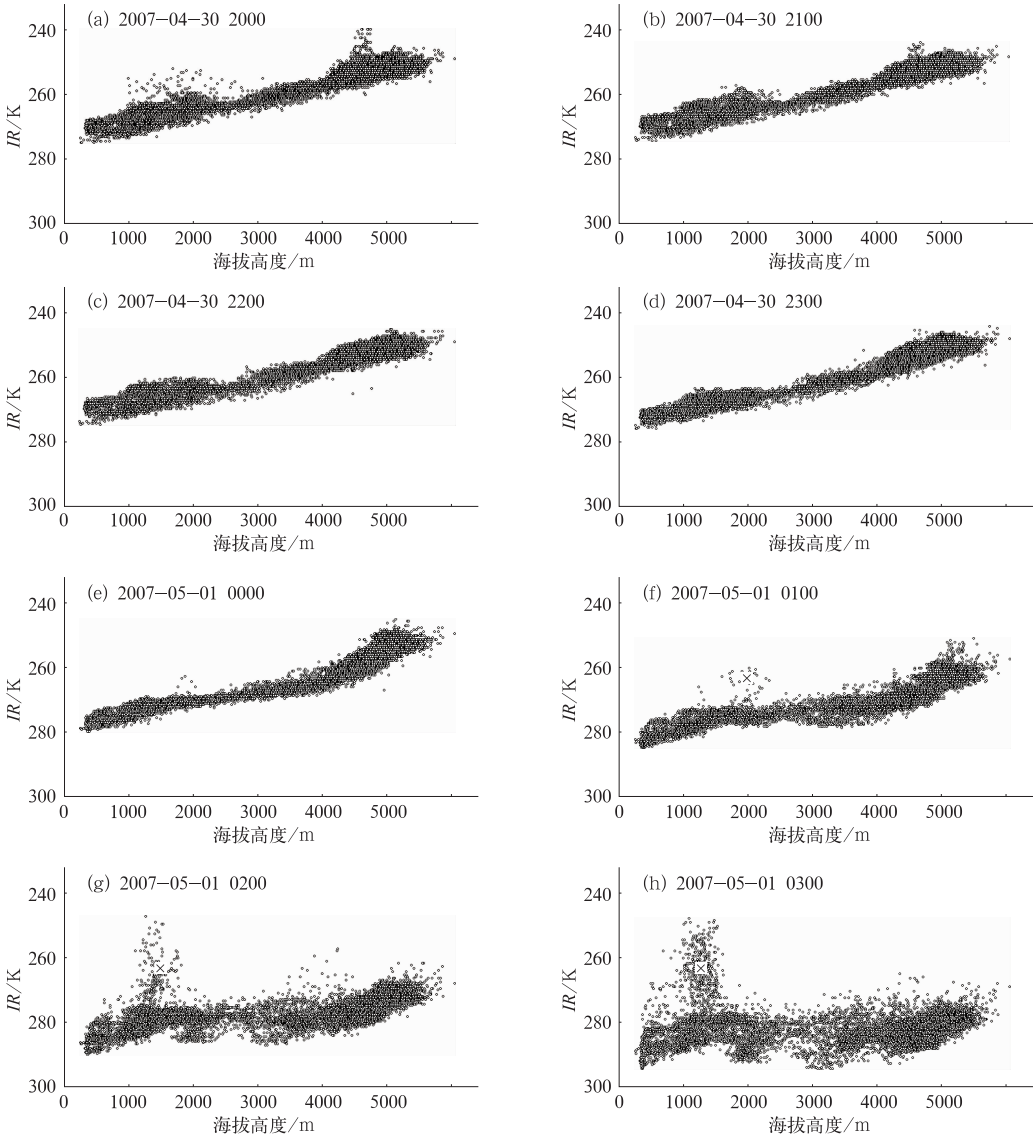


图 2 2007 年 4 月 30 日 2000 UTC(a)至 5 月 1 日 0300 UTC(h)所选区域样本的红外亮温随地理海拔高度的每小时分布情况

Fig. 2 The hourly distribution of sample pairs of IR brightness temperature and surface topographic altitude data during 30 April to 1 May 2007 from 2000 UTC (a) to 0300 UTC (h)

如图 2h 所示。另外,在图 2f、图 2g、图 2h 可以看出,在标识“×”附近为云像元,此三个时段有少量云侵入,从某种意义上讲这些有云像元是可以被识别出来的,因为这些云像元的亮温值与同海拔高度的晴空地表像元的亮温值是有很大差异的。同时,从图 2f 也可以明显看出,“×”所示的云像元的云顶亮温值大于一些海拔较高的无云地表像元的亮温值,若用一固定阈值是不能将两者准确判识的。

为了更好地分析无云条件下红外亮温与地理海拔高度之间的关系,对每相隔 30 m 海拔高度范围内的卫星像元亮温进行平均运算,其计算公式:

$$\overline{IR}_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M IR_{mj} \quad (1)$$

其中 IR_{mj} 表示第 m 个地理海拔高度为 j 的卫星像元红外亮温值,并且其必须满足的前提条件是 $30k < j \leq 30(k+1)$;其中 $k=0,1,2,3,\dots,200$; M 表示满足 $30k < j \leq 30(k+1)$ 条件下的所有卫星像元总数。

由公式(1)可以得到图 3,图 3 给出了 2007 年 4 月 30 日 20 时至 5 月 1 日 03 时(UTC)红外亮温随地理海拔高度的变化曲线,由于 2007 年 4 月 30 日 20 时、21 时、22 时基本重合一致,图中没有单独标识这三个时刻的变化曲线。从图 3 可以明显看出,在夜间没有阳光照射影响下,20 时、21 时、22 时三个时刻的红外亮温随地理海拔高度的变化趋势一致。从 4 月 30 日的 23 时开始,在海拔高度为 4 km 以下的区域,亮温值开始出现整体上升,因为此时太阳还没有照射到海拔较高的区域。5 月 1 日 00 时,随着太阳开始对整个区域的照射,海拔较高的地方的亮温值也开始上升,但是上升幅度没有低海拔的地方大,这是因为所选区域东西跨度 20 多个经度,有一个多小时的时差,造成东区先受到阳光加热。随着太阳照射时间加长,地表亮温是逐渐上升的。从 5 月 1 日 00 时到 03 时这几个时刻的变化曲线来看,在低海拔特别是 1000 m 以下地区,亮温值的上升趋势逐渐减少而且最后趋于一致;在较高海拔区域也同样出现了亮温值大幅度上升且上升幅度逐渐变小;这样发展到最后其结果是很低海拔地表红外亮温值与很高海拔地表红外亮温值差异很小,这个从 02 时和 03 时变化曲线可以明显看出,也就是说此时已经可以不用考虑因高海拔地形而产生较低红外亮温值现象。对于 02、03 时变化曲线,在海拔为 1200 m 附近的区域出现了明显的突变,实际上这是

前文所提及的由于有少量云侵入造成的(图 2g、图 2h);而且其亮温值小于高海拔地表的亮温值,从而也可以说明此时应用一般阈值方法即可分离这些有云和无云区域。

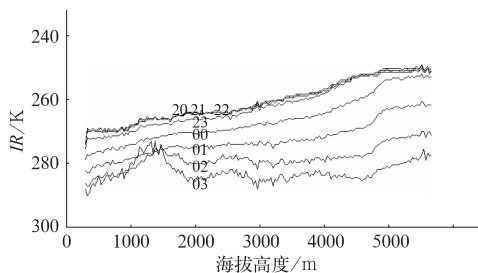


图 3 2007 年 4 月 30 日 20 时至 5 月 1 日 03 时(UTC)红外亮温随地理海拔高度的变化

趋势,其中 4 月 30 日 20 时、21 时、22 时基本重合一致,没有单独标注

Fig. 3 The hourly relation between IR brightness temperature and surface topographic altitude data during 30 April to 1 May 2007 from 2000 UTC to 0300 UTC

基于上述分析,由于夜间受地理海拔高度影响,很容易干扰云地分离,所以为了消除这种影响,文中应用选取区域(图 1 中所示)的样本来建立标准的无云条件下海拔高度与红外亮温之间的关系,后以此标准来分离同时刻整个区域的有云区和无云区。以 TB_k 表示无云条件下海拔高度在 k 层上的标准红外通道 2 亮温值, T_j 表示海拔高度为 j 的某一卫星像元的红外亮温值,有云与无云判识方法为:如果 T_j 小于 TB_k ,则 T_j 这一像元为有云区;否则 T_j 这一像元为无云区。其中 $k=0,1,2,3,\dots,200$,并且其必须满足 $30k < j \leq 30(k+1)$ 。

对于无云条件的选择,主要根据地面云观测资料,同时结合应用红外亮温随地理海拔高度的分布图来进行分析。对于晴空可以直接获取判识标准 TB_k ;如果遇到区域内有少量云这种情况,如图 2f、图 2g、图 2h 中的“×”所示情况,则需剔除区域内的少量云样本。并且这些云样本如前文所述是可以被剔除的,基本上不影响判识标准 TB_k 的获取。

3 结果与分析

3.1 任选个例结果分析

考虑到篇幅限制及其具有的共性,文中仅任选了 2007 年 5 月 1 日 00 时刻的 FY-2C 卫星红外通

道 2 资料以及地面站点的云观测资料,应用前文所述方法,进行云检测试验。表 1 给出了 5 月 1 日 00 时云检测结果与整个区域内所有地面云观测资料(共 3063 对样本)进行“严格对比”下的误差统计,进行所谓“严格对比”则意味着观测到的云量等于或超过 1 成时被视为地面观测有云。由表 1 可以看出,在与地面云观测资料“严格对比”情况下,云检测结果的总体正确率为 72%。在地面观测为晴空时,卫星云检测结果的误判率为 3%,这说明对无云区域的判识效果非常好。在地面观测为有云时,算法判识为无云的百分比达到 25%,这直接导致了整个结果的准确率相对不高。造成上述 25%的高误判率原因之一可能是云量的不足使得站点所对应的像元卫星本身无法分辨,这种原因造成的误判情况是无法明确地分析界定的。

表 1 2007 年 5 月 1 日 00 时在“严格对比”下的云检测结果误差

Table 1 Accuracies of cloud detection at 0000 UTC 1 May 2007 based on all samples				
地面观测	像元有云		像元无云	
	样本个数	百分比	样本个数	百分比
有云(云量 1 成)	1177	38%	776	25%
无云(云量为 0)	84	3%	1026	34%
样本总数:3063	总正确率:72%			

为了更为合理地分析云检测结果的准确度,必须排除因为云量不足而造成卫星本身无法分辨这种情况的干扰,所以对于地面观测云量在 1 成到 6 成的样本全部剔除,然后进行所谓的“选择性对比”误差统计。表 2 给出了 5 月 1 日 00 时在“选择性对比”下(处理后共 2100 对样本)的云检测结果误差,表 3 给出了 5 月 1 日 00 时在云区与晴空区的云检测结果误差。从表 2 中可以看出,云检测结果的总体正确率达到 88%。结合表 3 来看,在地面观测为云区时(990 对样本),算法判识的正确率为 82%;被误判的比例为 18%,占总样本的 8%,误判原因可能

表 2 2007 年 5 月 1 日 00 时在“选择性对比”下的云检测结果误差

Table 2 Accuracies of cloud detection at 0000 UTC 1 May 2007 based on “selected” samples				
地面观测	像元有云		像元无云	
	样本数	百分比	样本数	百分比
有云(云量 7 成)	812	39%	178	8%
无云(云量为 0)	84	4%	1026	49%
样本总数:2100	总正确率:88%			

表 3 2007 年 5 月 1 日 00 时在云区与晴空区的云检测结果误差

Table 3 Accuracies of cloud detection respectively in clear and cloudy areas at 0000 UTC 1 May 2007			
在云区(样本数:990)		在无云区(样本数:1110)	
正确率	误判率	正确率	误判率
82%	18%	92%	8%

是一些云非常低,其云顶亮温与云下的地表亮温非常接近,算法无法判识,这种情况是非常难以处理的。另外,在实际观测为晴空区时(1110 对样本),云检测结果的正确率达到 92%;被误判的比例为 8%,占总样本的 4%;这说明对无云区的判识效果要好于对有云区的判识效果。

为了更直观形象地分析云检测结果,图 4 给出了 2007 年 5 月 1 日 00 时的原始红外 2 图像与云检测结果图像,对比图 4a、图 4b 可以看出,云检测效果不错,方法是可行的。如在四川盆地内(30°N、105°E)附近区域和(28°N、105°E)附近区域,这些区域的云被准确地分离出来;实际上这些区域的红外亮温值都大于或等于地势较高的青藏高原上的一些如(33°N、90°E)附近区域的亮温值。

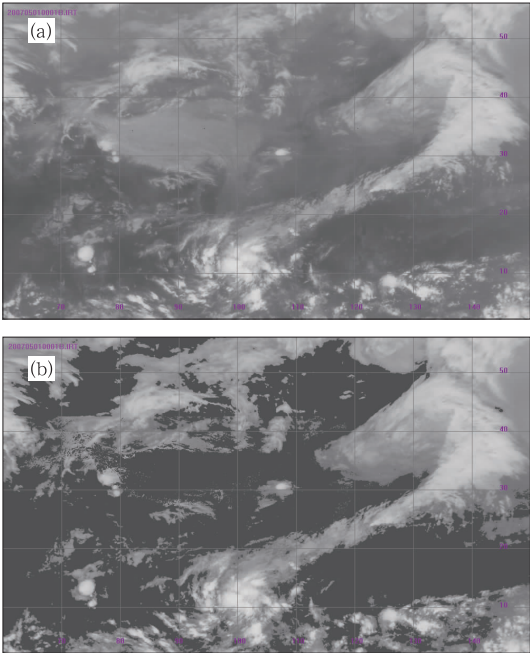


图 4 2007 年 5 月 1 日 00 时 FY-2C 红外通道 2 图像(a)及其云检测结果图(b)(经纬度单位:°)
Fig. 4 The satellite infrared imagery (a) and the picture from cloud detection (b) at 0000 UTC 01 May 2007

3.2 扩展试验结果分析

事实上,对于无云条件下每一固定地表区域,其亮温虽然一日内变化较大;但在连续的一段时间内,每天同时刻的晴空地表亮温变化差异不大。基于这一特性,应用 2007 年 5 月 1 日 00 时资料建立的标准无云条件下海拔高度与红外亮温之间的关系,以此为判据,应用前文描述的方法,分别对 5 月 2 日 00 时、3 日 00 时、4 日 00 时、5 日 00 时资料进行云地分离试验。这对该方法的更大适用性和业务化非常重要,而且其结果也能分析说明云检测方法的效果。

表 4 给出了 5 月 2 日(3055 对样本)、3 日(3045 对样本)、4 日(3054 对样本)、5 日(3047 对样本)00 时在“严格对比”下的云检测结果误差。由表 4 可以看出,这一时段内的云检测结果总体正确率为 74%,将云区误判为晴空区的比例是 24%,将无云区误判为云区的百分比为 2%,总体效果与 5 月 1 日 00 时的基本一致。表 5 给出了 5 月 2—5 日 00 时共 4 个时次在“选择性对比”下的云检测结果误差,以及表 6 给出了所有这 4 个时次在云区与晴空区的云检测结果误差。从表 5 可看出,在排除云量不足这个干扰因素后,云检测结果的总体正确率达到 92%,稍高于 5 月 1 日 00 时的 88%。结合表 6 综合来看,由于在云区的判识准确度提高到 93%,从而使得总体准确率稍微提高;而在无云区的判识效果与 5 月 1 日 00 时的一致。所有这 4 个时次在云

表 4 2007 年 5 月 2—5 日 00 时在“严格对比”下的云检测结果误差

Table 4 Accuracies of cloud detection at 0000 UTC during 2—5 May 2007 based on all samples

地面观测	像元有云		像元无云	
	样本个数	百分比	样本个数	百分比
有云(云量 1 成)	6009	49%	2899	24%
无云(云量为 0)	263	2%	3030	25%
样本总数:12201	总正确率:74%			

表 5 2007 年 5 月 2—5 日 00 时在“选择性对比”下的云检测结果误差

Table 5 Accuracies of cloud detection at 0000 UTC during 2—5 May 2007 based on “selected” samples

地面观测	像元有云		像元无云	
	样本个数	百分比	样本个数	百分比
有云(云量 7 成)	4356	54%	352	5%
无云(云量为 0)	263	3%	3030	38%
样本总数:8001	总正确率:92%			

表 6 2007 年 5 月 2—5 日 00 时在云区与晴空区的云检测结果误差

Table 6 Accuracies of cloud detection respectively in clear and cloudy area at 0000 UTC during 2—5 May 2007

在云区(样本数:4708)		在晴空区(样本数:3293)	
正确率	误判率	正确率	误判率
93%	7%	92%	8%

区的判识总体效果较好,可能原因是云顶亮温与地表红外亮温接近的云相对较少。

同样为了形象直观给出结果以及篇幅限制,文中仅选取了 2007 年 5 月 4 日 00 时的云检测结果图像与 FY-2C 静止卫星原始红外图像,如图 5 所示。从图 5 可以看出,其效果与图 4 效果一样不错。

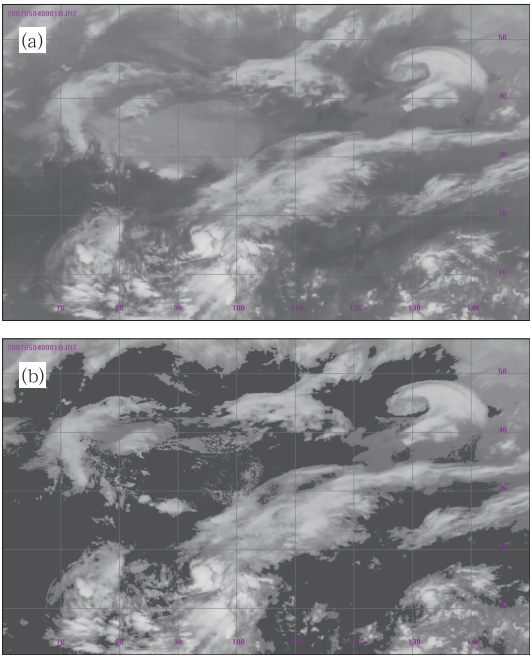


图 5 2007 年 5 月 4 日 00 时 FY-2C 红外通道 2 图像(a)及其云检测结果图(b)(经纬度单位:°)

Fig. 5 The satellite infrared imagery (a) and the picture from cloud detection (b) at 0000 UTC 4 May 2007

4 结论与讨论

由于夜间的红外通道资料受地理海拔高度因素影响,这将严重影响云地分离。为此,本文应用 2007 年 4 月 30 日 20 时至 5 月 1 日 03 时的 FY-2C 静止卫星红外通道 2 亮温资料以及地理海拔高度资料,详细分析了晴空红外亮温与地理海拔高度之间的关系。分析发现:在夜间没有阳光照射的一定时间段内,红外亮温随着海拔高度的升高不断减小,近似直线增减且变化趋势基本一致;随着太阳的由东

向西顺序照射地面以及照射时间的持续,这种同增减关系被逐渐破坏,到最后低海拔无云区的红外亮温值与高海拔无云区的亮温值差异很小,这种因为地势高度的不同而造成的晴空区红外亮温不同现象基本消失。

文中任意选择了2007年5月1日00时的资料来进行云地分离试验,并以同时刻区域内所有地面云观测资料为基础来分析评价云检测效果。结果表明:云检测结果的总体正确率达到88%,将无云区误判为有云区的百分比是4%,同时将有云区误判为晴空区的百分比是8%。结合实际云地分离图像也能体现云检测效果不错,方法是可行的。在云区,云地分离的正确率为82%,有18%被误判。在无云区,云检测的正确率高达92%。

为了能够实现业务化需要,以及分析云检测方法适用性和效果,以5月1日00时资料建立的标准无云条件下红外亮温与地理海拔高度之间的关系为判据,分别对5月2日到5日00时整个区域进行云地分离。这4个时次的云检测结果总体准确率与5月1日00时的接近但稍高,达到92%。在云区的判识效果提高,达到93%,从而使这4个时次的云检测结果总体准确率稍微提高;而在无云区的判识效果与5月1日00时的一致为92%。实际上确定了一个时刻的无云条件,就可获得对随后一段时间同时刻都能适用的判识标准;再用此时段内的云检测结果并结合地面观测资料来确定下一个基本无云或者云量相对很小的无云条件时刻,以此类推可以建立各个时段的 TB_k 判识标准数据库。

此云地分离方法并没有改变有云区域的红外亮温,这对后续的云分类工作也不造成影响。从某种意义上讲,可以认为这也是对卫星红外通道资料的海拔高度修正,以避免其干扰某些云分类算法,此类云分类算法^[14-16]并没有预先的云检测过程,而是直接把地表作为一种云类来统一分类,这样可能会提高分类的准确度。

文中的云检测方法仅用到了红外通道资料,如果有其他光谱特征信息的加入或者结合其他方法,可能会进一步提高云地分离的准确度。同时,由于地表红外亮温随地理纬度的变化而有所改变,文中在建立标准的无云条件下海拔高度与红外亮温之间的关系时,选择了图1所示的狭长区域,将此判据应用到整个区域可能会降低云检测的准确度(特别是

离图1所示区域较远的一些地方),所以这方面的改进也可能会进一步提高整个区域云地分离的准确度,这将在下一步工作中进行探讨。

参考文献

- [1] Goodman A H, Henderson Sellers A. Cloud detection and analysis: A review of recent progress[J]. Atmospheric Research, 1988, 21: 203-228.
- [2] Simpson J J, Gobata J I. Improved cloud detection in GOES scenes over the seas[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 52(2): 79-94.
- [3] 师春香, 吴蓉璋, 项续康. 多阈值和神经网络卫星自动分隔试验[J]. 应用气象学报, 2001, 12(1): 70-78.
- [4] Peak J E, Tag P M. Segmentation of satellite imagery using hierarchical thresholding and neural networks[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 605-616.
- [5] 王耀生, 王燕, 冯晓娟. 利用卫星多通道遥感资料进行云的识别试验[J]. 气象, 1994, 20(6): 24-32.
- [6] 马芳, 张强, 郭锐, 等. 多通道卫星云图云检测方法的探讨[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 119-128.
- [7] 刘希, 许建民, 杜秉玉. 用双通道动态阈值对GMS-5图像进行自动云检测[J]. 应用气象学报, 2005, 16(4): 434-444.
- [8] Alan V D, William J E. Senior member, An automated dynamic threshold cloud-masking algorithm for daytime AVHRR imageries over land[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1682-1694.
- [9] 朱小祥, 孟旭, 方宗义, 等. 利用卫星资料计算云南地区云量及云特征分析[J]. 气象, 1995, 21(1): 32-36.
- [10] Séze G and Rossow W B. Time-cumulated visible and infrared radiance histograms used as description of surface and cloud variations[J]. Int J Remote Sens, 1991, 12: 877-920.
- [11] Séze G and Rossow W B. Effects of satellite data resolution on measuring the space-time variations of surface and cloud[J]. Int J Remote Sens, 1991, 12: 921-952.
- [12] Rossow W B and R A. Schiffer, validation of ISCCP cloud products[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 6: 2370-2393.
- [13] Rossow W B and L C Garder. Cloud detection using satellite measurement of infrared and visible radiances for ISCCP[J]. J Climate, 1993, 6: 2341-2368.
- [14] Yu Fan, Liu Changsheng and Chen Weimin. Man-computer interactive method on cloud classification based on bispectral satellite imagery[J]. Adv Atmos Sci, 1997, 14: 389-398.
- [15] Yu Fan and Liu Changsheng. Improved man-computer interactive method on clouds classification based on bispectral satellite imagery[J]. Acta Meteorological Sinica, 1998, 12: 361-375.
- [16] 王华荣. 应用一维变分方法同化GMS-5卫星反演湿度场及其应用[D]. 南京大学硕士学位论文, 2005: 32-34.