

中图法分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)12-1783-07

论文索引信息: 刘向培, 王毅, 石汉青, 龙智勇, 姜祝辉. 基于统计特征的中国东南沿海区域云检测 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(12): 1783-1789

基于统计特征的中国东南沿海区域云检测

刘向培, 王毅, 石汉青, 龙智勇, 姜祝辉

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

摘要: 云检测是卫星资料应用的基础, 其结果直接影响相关定量反演的精度。通过对 $21.0^{\circ}\text{N} \sim 27.0^{\circ}\text{N}$, $117.0^{\circ}\text{E} \sim 123.0^{\circ}\text{E}$ 范围的 MODIS 数据进行数字滤波, 根据遥感原理统计得到目标区域云、水体、平原、山地等不同下垫面辐射特性, 将其与多通道阈值法相结合, 依据统计结果选定通道 1、6、31、32 数据为云检测特征量并设定相应阈值。检测实验表明其对厚云的检测效果较好, 但对薄云、卷云检测能力有限。依据大气辐射传输特性, 以通道 26 数据和分裂窗通道差值为特征量检测卷云、薄云以作为补充, 得到理想的检测效果。将检测结果与 MODIS 云检测业务算法得到结果对比分析表明, 本文方法在目标区域的云检测更为精确。

关键词: MODIS; 云检测; 数字滤波; 统计特性; 东南沿海区域

Cloud detection over the southeast China basing on statistical analysis

LIU Xiangpei, WANG Yi, SHI Hanqing, LONG Zhiyong, JIANG Zhuhui

(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract: As cloud can significantly affect image qualities in the earth studies, cloud detection plays an important role in analyzing satellite images. Much work has been done on it all over the world, these methods are suitable for large area, but sometimes the precision can't meet the requirement. Based on the theory of remote sensing and digital filtering, We conduct statistical analysis on a local area ($21.0^{\circ}\text{N} \sim 27.0^{\circ}\text{N}$, $117.0^{\circ}\text{E} \sim 123.0^{\circ}\text{E}$). Through the statistic, characteristics and thresholds that are useful for the target area are found, which are Ref_1 , Ref_6 and BT_{31} . As a supplement, it selects Ref_{26Land} and $BT_{31} - BT_{32} > Th_{31-32}$ to detect cirrus and thin cloud. At the end, the result is analyzed by comparing it with the outcome of MODIS operation arithmetic, which found this method improves the precision of cloud detection.

Keywords: MODIS; cloud detection; digital filtering; statistical characteristic; the southeast China

0 引言

云是重要的气象和气候要素之一, 直接影响着天气系统的辐射平衡和热量平衡。云检测即剔除受云污染区域, 筛选出晴空区, 这是卫星资料分析应用的重要前提条件之一, 其检测结果直接影响云参数、地表参数等相关定量反演的精度, 因此提高云检测

的精度和效率将极大的促进卫星资料的实际应用^[1]。

迄今为止, 前人已经在这方面做了不少工作, 一般来说可以分为统计法和阈值法两大类。统计法包括直方图法、聚类分析、模式识别等方法, 阈值法基于云和晴空的特征差异, 根据经验设定适当的阈值进行云检测。ISCCP 法^[2]假定观测辐射只来自晴空和云两种大气状况, 以可见光 $0.6 \mu\text{m}$ 和红外窗区

收稿日期: 2009-02-04; 改回日期: 2009-04-04

第一作者简介: 刘向培 (1983—), 男, 解放军理工大学气象学院大气物理学与大气环境专业博士研究生。研究方向为气象卫星资料在区域气候研究中的应用。E-mail: xp_Liu@foxmail.com。

11 μm 波段数据为特征量,采用阈值法进行云检测。APOLLO^[3]利用了 AVHRR 5 个全分辨率探测通道资料,根据目标物特征在每个通道设定阈值进行检测,该方法是一种保守的云检测算法。CLAVR 算法^[4](Phase I)同样利用了 AVHRR 5 个通道的资料在全球范围内进行云检测,但该方法采用了 2×2 的像素进行判别,并根据下垫面性质和观测时间的不同,将算法分为白天海洋、白天陆地、夜间海洋和夜间陆地 4 类。 CO_2 薄片法^[5]利用 15 μm 附近的 CO_2 吸收波段可探测到不同层次上云的特性,把穿透性云从不透明的云和晴空中区分出来。

目前的云检测方法在较大范围、平均状态上效果较好,但由于卫星上传感器接收到的目标物反射的太阳辐射及其自身发射的辐射会随着太阳高度角、纬度、季节的变化而变化,应用现有方法对某一较小区域进行精细云检测的效果还不够理想。选取具有 36 个通道的 MODIS 数据资料,基于数字滤波技术对目标区域不同下垫面辐射特性进行统计,根据统计结果确定云检测特征量及相应阈值,对目标区域进行精细的云检测,达到了较好效果。

1 资料说明及样本分析

1.1 资料说明

选取的样本为 2008 年 11 月 17 日 2 时 30 分 (UTC) TERRA 卫星上搭载的 MODIS 传感器接收的数据,覆盖范围为 ($21.0^\circ\text{N} \sim 27.0^\circ\text{N}$, $117.0^\circ\text{E} \sim 123.0^\circ\text{E}$)。该区域为位于我国东南沿海的台湾岛及其周边海域,下垫面有水体、平原、山地等多种类型,地形分布如图 1 所示。在预处理步骤采用自相关插值法去除条带噪声^[6],在 ENVI 环境下使用 modistool 工具去除双眼皮效应,并对目标区域数据以 (24.0°N , 120.0°E) 为中心进行等经纬度投影处理。目标区域数据经数字滤波后进行统计分析,最终选取通道 1、通道 6、通道 26、通道 31、通道 32 数据作为云检测特征量,这些通道的技术指标和主要用途见表 1。考虑到分辨率的统一,这里选取各个通道的 1 km 分辨率数据进行云检测。

1.2 样本分析

观察图 2 所示通道 6 反照率图像及图 3 所示通道 31 亮温图像,目标区域中 A、B、C、D 4 个子区域有较显著云存在。其中 A、C、D 区域主要为厚云,在各个区域边缘处有少量薄云,B 区域主要为薄卷云。

另外在 C 区域东南部也有少量卷云存在。

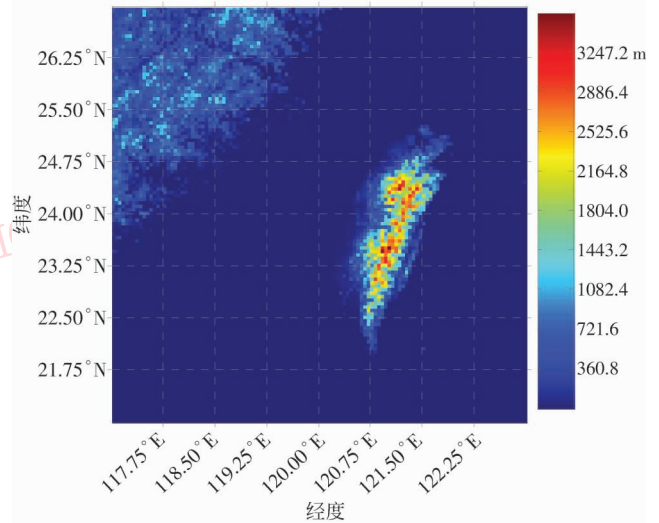


图 1 DEM 数据图像

Fig. 1 DEM data image

表 1 MODIS 云检测特征波段参数

Tab. 1 Some Bands of MODIS Image for Cloud Detection

通道	光谱范畴/ μm	信噪比	主要用途	分辨率/m
1	0.620 ~ 0.670	128	陆地、云边界	250
6	1.628 ~ 1.652	275	陆地、云特征	500
26	1.360 ~ 1.390	1 504	卷云、水汽	1 000
31	10.780 ~ 11.280	0.05	地球表面	1 000
32	11.770 ~ 12.270	0.05	和云顶温度	1 000

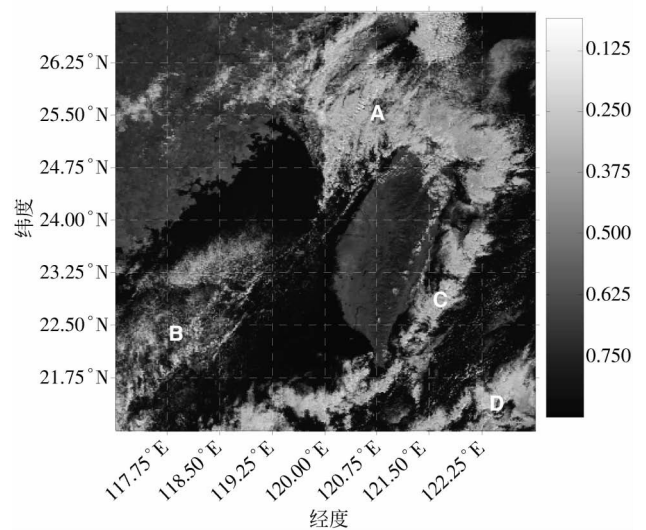


图 2 通道 6 反照率图像

Fig. 2 Channel 6 albedo image

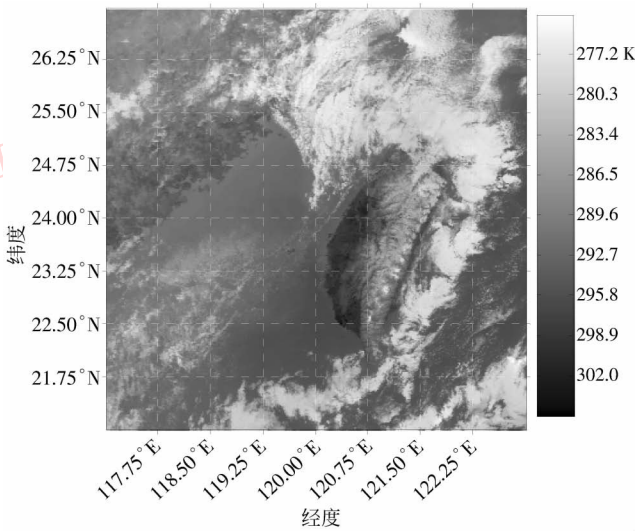


图 3 通道 31 亮温图像

Fig. 3 Channel 31 brightness temperature image

2 下垫面特征统计分析

参考并根据本文研究需要改进 Kitamoto^[7]采用的方法对目标区域云图进行数字滤波处理。在大气窗区,物体的辐射很少被大气吸收,因此红外窗区通道观测值能描述目标物表面温度。等经纬度投影后的每一行数据处于相同纬度,如果该行数据温度值均匀且较高或较低,则判定该行目标物为地表(水表)或云表(对于较大区域的数据,发生这种情况的可能性较小);否则认为其至少有 $L\%$ 的数据没有被云覆盖,即这些数据直接来自于未经衰减地表(水表)辐射,能够反应其温度情况,然后利用标准大气模型计算阈值,并根据该阈值进行数字滤波,具体步骤如下:

1) 读取一行数据(相同纬度);

2) 计算该行数据平均值 $Mean$ 和标准差 Std 。如果 $Mean > C_1$ 且 $Std/Mean < C_2$, 判定该行全部为地表(水表);如果 $Mean < D_1$ 且 $Std/Mean < D_2$, 则判定该行全部为云,转步骤 1);如果不满足上述两种条件,转步骤 3);

3) 对该行亮温数据排序,取 $L\%$ 最大值并计算平均值 t_0 ,用于表示地表(水表)亮温;

4) 云的最低高度为 H/km ,按照温度随高度递减率 $6.5 K/km$ (美国标准大气模型,高度 $0 \sim 11 km$),则高度 H 处的温度为 $t_H = t_0 - 6.5H$;

5) 以 t_H 为阈值对该行数据进行数字滤波处理,即完成粗略的云检测,转 1)。

根据普朗克定律,采用不同波长辐亮度数据计算将得到不同亮温。维恩位移定律反映了波长与温度之间的关系^[8]

$$\lambda_{max} T = b, b = 2897.8 \mu m \cdot K \quad (1)$$

通常目标物温度在 $300K$ 左右,根据维恩位移定律可得此时 $\lambda_{max} = 9.66 \mu m$,计算亮温通常选择 $8 \sim 13 \mu m$ 光谱通道;另外,考虑大气吸收的影响, $10.2 \sim 12.4 \mu m$ 光谱范围为大气窗区;而在 $9.7 \mu m$ 附近黑体辐射值对温度导数值最大,说明在此范围内光谱辐射对温度敏感性好。综合以上因素,选取波长为 $11 \mu m$ 的 MODIS 通道 31 数据计算目标物亮温,并按照上述步骤通过数字滤波的方法进行粗略云检测;对非云区域,依据 DEM 数据将目标物划分为山地、平原和水体。这样,可以对云、山地、平原、水体等分布情况进行统计,得到对应的概率分布情况,根据云检测需要,下面列出了几个对云下垫面区分性较好的几个通道的统计结果如图 4—图 7。

云的反照率受到高度、厚度、含水量等多种因素的影响,在统计图中表现为具有较宽的反照率分布范围。在通道 1 统计图中,云反照率分布在 $0.225 \sim 0.975$ 范围内,反照率处于 $0.4 \sim 0.8$ 的概率较大,平原、水体和山地反照率概率最大值均出现在 0.075 。在通道 6,云的反照率为 0.525 的概率最大,平原和山地反照率概率最大值出现在 0.175 ,水体的反照率最低,分布在 $0.025 \sim 0.3$,最大概率出现在 0.025 处。

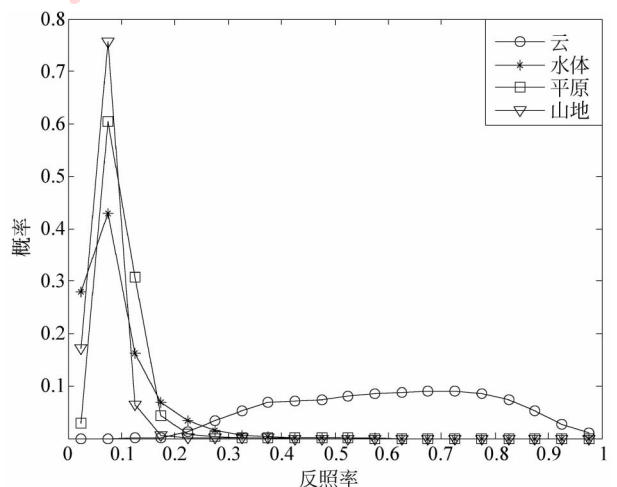


图 4 通道 1 不同下垫面反照率分布图

Fig. 4 Distribution of albedo of samples in channel 1

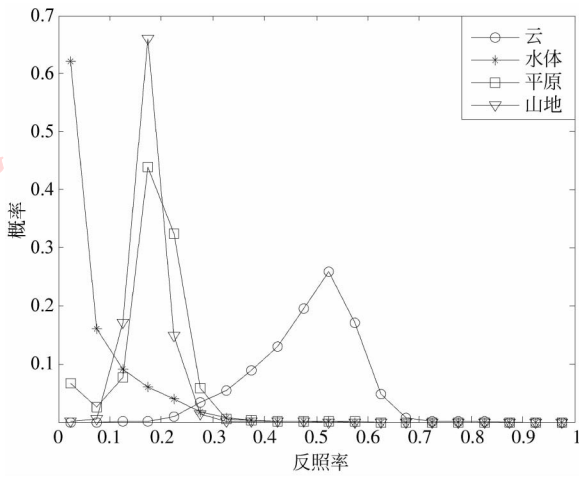


图 5 通道 6 不同下垫面反照率分布图

Fig. 5 Distribution of albedo of samples in channel 6

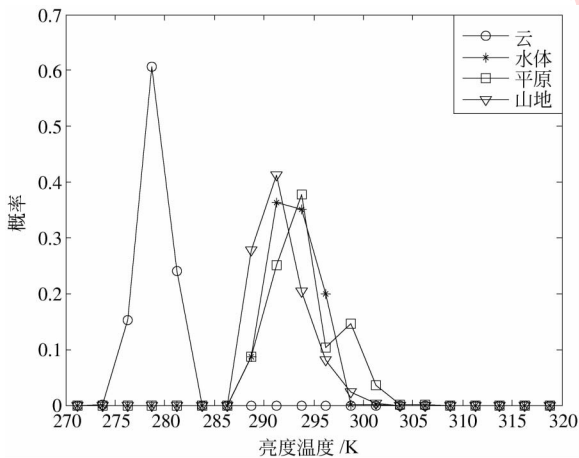


图 6 通道 31 不同下垫面反照率分布图

Fig. 6 Distribution of brightness temperature of samples in channel 31

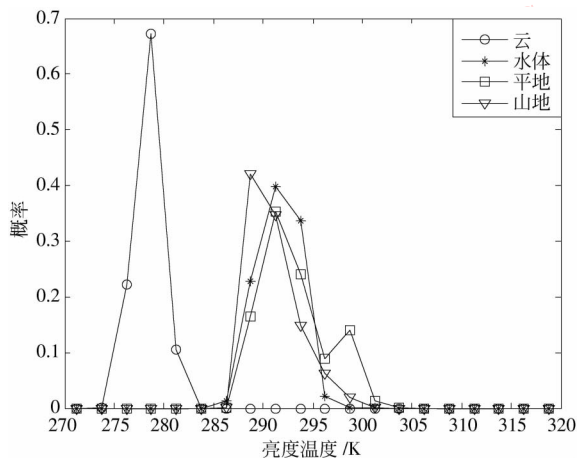


图 7 通道 32 不同下垫面反照率分布图

Fig. 7 Distribution of brightness temperature of samples in channel 32

在通道 31、32,云和其他下垫面区分性较好,在通道 31,云亮温概率最大值出现在 278.75 K,山地和水体亮温概率最大值出现在 291.25 K,平原亮温概率最大值出现在 295 K。云的亮温观测值在通道 31 与 32 有很好的相关性,相关系数达 0.999 0,这也就是在统计图中这两个通道的光谱分布较为相似的原因。由统计图可以判定在红外通道设定阈值进行云检测可以检测出大部分云。

3 云检测实验

基于可见光、红外通道的遥感原理,结合前文统计得到的目标区域不同目标物反照率和亮温的概率分布情况,可以确定云检测特征量及相应阈值并进行云检测,通过对比分析可见光图像和检测结果,找出检测方法存在的不足并加以改进,最终得到较为理想的云检测结果。

3.1 阈值法云检测

观察各波段样本反照率和亮温概率分布图可知:在通道 1 和通道 6,云和下垫面反照率分布有一定重叠区域,在红外分裂窗通道(31、32 通道)中,云和其他下垫面亮温差异较大,设定通道 31、32 阈值 Th_{31} 和 Th_{32} 可以检测出大部分云。由于两通道亮温统计分布状况类似,因此仅选用一个通道,这里选取通道 31 数据作为云检测特征量。将可见光通道和红外通道相结合,建立云检测关系式如下:

$$Ref_1 > Th_1 \& Ref_6 > Th_6 \& BT_{31} < Th_{31} \quad (2)$$

这里取 $Th_1 = 0.25, Th_6 = 0.3, Th_{31} = 285$ K,云检测结果如图 8 所示。

对比云检测结果和通道 6 图像可以见,简单地采用红外通道和可见光通道的组合进行云检测在总体上能够达到较好的效果,准确检测出了目标区域中绝大部分云,但存在的不足之处是 B、D 区域边缘、C 区域右侧、A 区域左侧及厚云边缘部分的薄云、卷云没有检测出来。然而由于卷云覆盖区域大、持续时间长以及其特有的辐射特性,它在天气系统中起着重要的作用,Wylie 指出,北美地区全年都有 20%~30% 区域覆盖有卷云。在遥感资料应用中,卷云的存在会对后继定量反演的精度带来较大影响,直接影响卫星资料的应用效果。

3.2 卷云、薄云的检测

3.2.1 1.38 μm 通道(通道 26)用于卷云检测

MODIS 1.38 μm 通道专门用于薄卷云的检测。

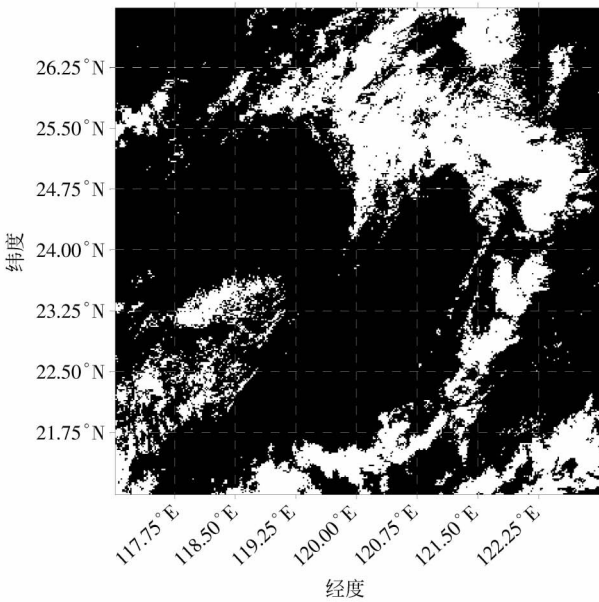


图 8 式(2)云检测结果

Fig. 8 Cloud detection result from algorithm (2)

在该通道,水汽对辐射具有强的吸收,如果波束传播路径上水汽含量累计达到 1 cm 可降水量,则地面的反射辐射几乎全被吸收,不能到达卫星传感器。由于对流层顶水汽含量很少,高云反射的辐射能够到达卫星传感器,而中低云及地面反射辐射由于水汽吸收削弱而不能到达,因此在 1.38 μm 通道云图上高云表现为白亮如图 9。

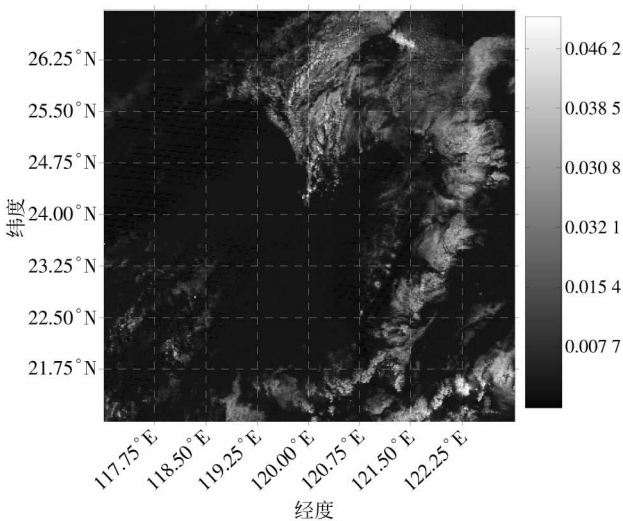


图 9 通道 26 反照率图像

Fig. 9 Channel 26 albedo image

Ben-Dor 通过分析 AVIRIS 数据指出,在高海拔、低含水量大气及下垫面高反照率条件下应用该

通道检测卷云有一定的局限性。分析目标区域云图可以发现,在台湾岛中部山脉区域天气晴好,但在 26 通道图像上仍然表现为较高反照率(图 10)。结合该通道反照率统计图分析可得,该通道各种目标物的反照率普遍较低,山地、平原反照率概率最大值出现在 0.001 25,水体反照率概率最大值出现在 0.005,云的概率分布谱非常宽,覆盖 0.001 25 ~ 0.048 75。出现这种概率分布的原因在于中低云在该通道反照率图像中反照率和其他下垫面同样非常低,只有较高的卷云才具有较高的反照率。根据该通道目标区域特性,在不同下垫面采用不同阈值进行卷云的检测,建立如下云检测关系式:

$$Ref_{26Land} > Th_{26Land} \quad H > 0 \quad (3)$$

$$Ref_{26Water} > Th_{26Water} \quad H < 0 \quad (4)$$

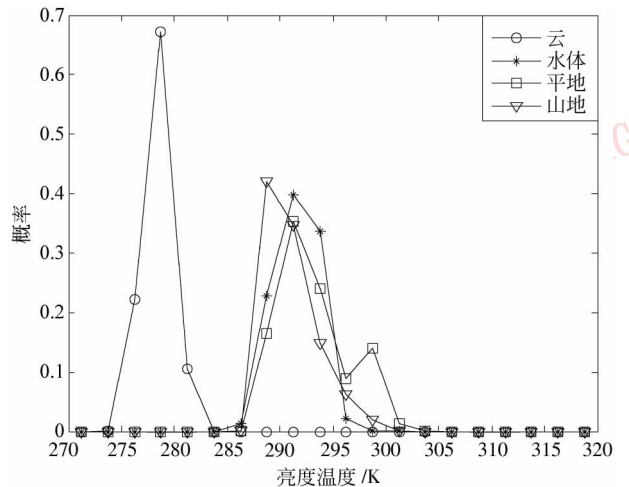


图 10 通道 26 不同下垫面反照率分布图

Fig. 10 Distribution of albedo of samples in channel 26

3.2.2 分裂窗通道差值 $BT_{31} - BT_{32}$ 用于薄云检测

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,在红外窗区,地表的红外辐射能量由地表温度和地表比辐射率两个因素决定,由于同一地物的温度恒定,而其比辐射率随波长而发生的改变很小,因此同一下垫面在不同光谱波段的发射率相差较小,但大气水汽对不同红外光谱波段的吸收谱线不同,在 12 μm 处它的光谱吸收较强,辐射能主要反映大气水汽信息,而在 11 μm 处的吸收较弱,辐射能主要反应下垫面信息。因此,在晴空和厚云区域 12 μm、11 μm 辐射值之差必定较小,而在薄云区域差值则较为显著。由于亮温由辐射能计算而来,因此大气对不同光谱波段的吸收差异将导致不同红外谱段的亮温差异。为了在将地物比辐射率随波长变化减小的同时尽可能反应出不

同红外谱段的亮温差,就要选定光谱段相近,而光谱特征差异较大的波段^[9-10]。

这里选取 MODIS 通道 31、32 数据,以图 11 所示通道 31 和 32 亮温差值 $BT_{31} - BT_{32}$ 作为特征量进行薄云检测,弥补可见光、红外通道云检测存在的不足,建立云检测关系式如下

$$BT_{31} - BT_{32} > Th_{31-32} \quad (5)$$

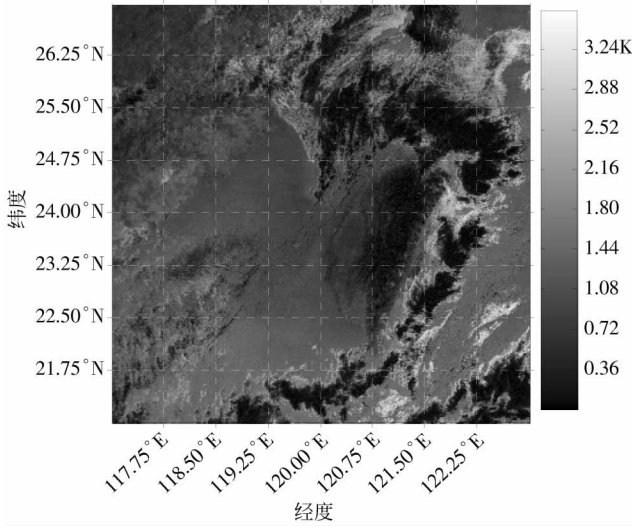


图 11 通道 31、32 亮温差值图
Fig. 11 Earth emitted spectra

3.3 薄云、卷云检测

根据目标区域遥感图像及不同下垫面统计概率分布图,经过多次试验,取 $Th_{31-32} = 1.6 \text{ K}$, $Th_{26_{Land}} = 0.018$, $Th_{26_{Water}} = 0.0055$,结合可见光、红外通道检测方法,综合式(2)–(5),记为式(6),进行云检测,得到检测结果如图 12 所示。

对比增加分裂窗和 26 通道数据进行云检测前后的检测效果(图 13),可以发现薄云、卷云的检测得到很大改善,在云边缘区域、云块间的缝隙区域都存在有大量的薄云,这些云反射率低,在可见光通道特征并不明显,用单独的红外通道也不易发现,而用 26 通道与分裂窗通道特征相结合,根据薄云、卷云与厚云、及其他下垫面具有不同特征,能够实现薄云的有效检测。

MODIS 云检测业务算法利用了 36 个通道中的 14 个,后增加为 19 个,对每个像素给出 4 个层次的判断:无云、可能无云、可能有云和有云。该算法针对全球范围进行综合云检测,总体上能够达到较好效果,但并没有针对某一特定区域特性进行研究。对比本文方法和 MODIS 云检测业务算法在目标区

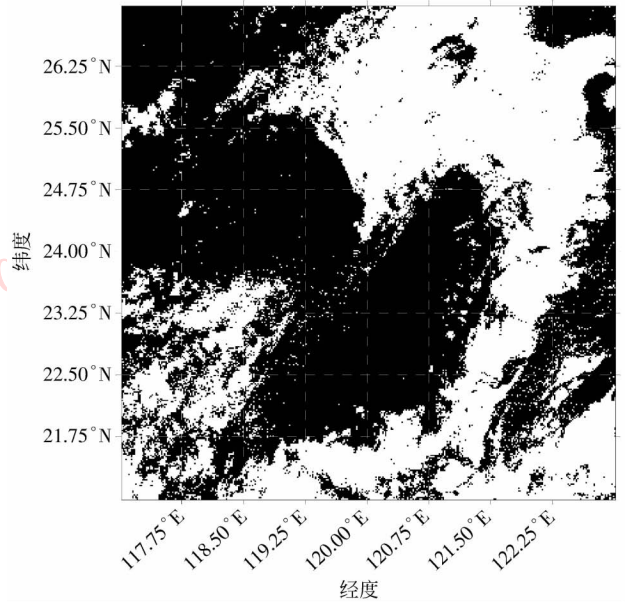


图 12 式(6)云检测结果
Fig. 12 Cloud detection result from algorithm (6)

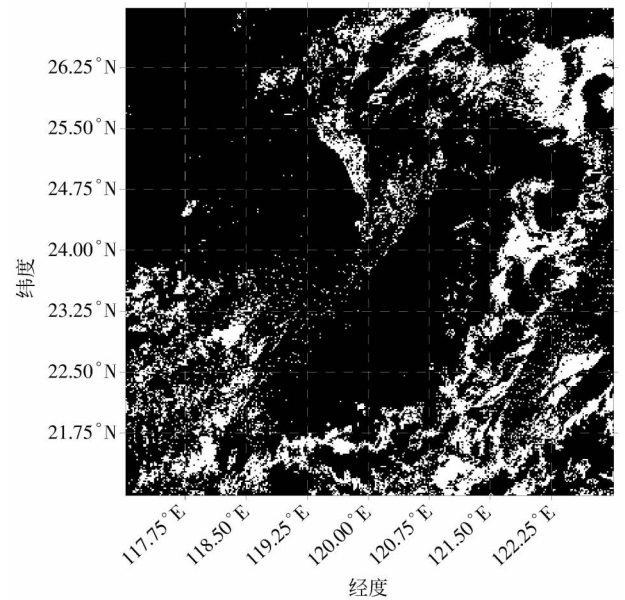


图 13 式(2)和式(6)云检测差异
Fig. 13 Cloud detection difference between algorithm (2) and algorithm (6)

域的检测结果,二者在总体上一致,但在总云量方面,MODIS 云检测业务算法检测的云量总体偏多,而本文检测结果更为准确;在细节方面,业务算法尽管将检测结果划分为 4 个等级,但在 B 区域检测结果不够精细,将薄云间的部分晴空误检为云;中国大陆东南沿海无云区域被误检为有云(如图 14 所示)。

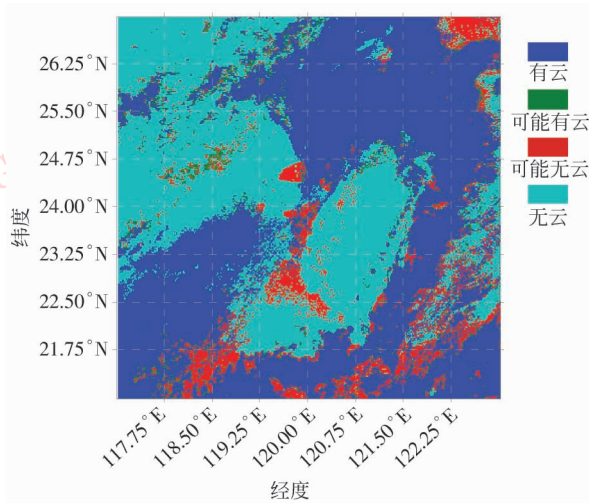


图 14 MODIS 云检测业务算法检测结果

Fig. 14 Cloud detection result of MODIS operation arithmetic

4 结 论

通过实验验证、对比分析发现,可见光反照率和红外亮温阈值相结合能够有效检测出厚云,但对透明薄云、卷云的检测能力有限,而 26 通道及红外分裂窗通道能准确检测出薄云、卷云,是前面一种检测方法的有效补充。将两种方法相结合,可以用较少通道得到理想的检测效果。对比目标区域本文研究方法和 MODIS 云检测业务算法检测结果,本文方法检测结果优于业务算法检测结果。

参考文献 (References)

[1] Wang Yi. New Generation of Earth Observation System and its Application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 185-190. [王毅. 新一代对地观测系统及其主要应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 185-190.]

[2] Rossow W B, Garder L C. Validation of ISCCP cloud detection [J]. J Climate, 1993, 6(12):2370-2393.

[3] Saunders R W, Kriebel K T. An improved method of detecting clear sky and cloudy radiance from AVHRR data [J]. Int J Remote Sens, 1988, 9(1):123-150.

[4] Stowe L L, Davis P A, McClain P E. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for advanced very high resolution radiometer [J]. J. Atmos Ocean Technol, 1999, 16(6):656-681.

[5] Wylie D P, Menzel W P, Woolf H M, et al. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS [J]. J Climate, 1994, 7(12): 1972-1986.

[6] Wu Jun, Zhang Wanchang. Striping MODIS images with Self-correlation Interpolation Algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(3): 253-258. [吴军, 张万昌. MODIS 影像条带噪声去除的自相关插值法 [J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 253-258.]

[7] Kitamoto A. The development of typhoon image database with content-based search [EB/OL], [2010-08-30]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.145.7789&rep=rep1&type=pdf>.

[8] Yang Qingsheng, Liu Chuang. Retrieving land surface temperature from MODIS data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(2):90-94. [杨青生, 刘闯. MODIS 数据陆面温度反演研究 [J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(2):90-94.]

[9] Song Xiaoning, Zhao Yingshi. Cloud detection and analysis of MODIS image [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8A(9): 1079-1083. [宋小宁, 赵英时. MODIS 图象的云检测及分析 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(9):1079-1083.]

[10] Zhang Zhaoming, He Guojin, Xiao Rongbo, et al. Land surface temperature retrieval based on MODIS and TM data [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(2):366-370. [张兆明, 何国金, 肖荣波, 等. 基于 MODIS 和 TM 数据的陆面温度反演 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 366-370.]