

# 利用 MODIS 的多通道信息估计中纬度降雨<sup>\*</sup>

延 昊 吴门新 刘桂青 李 娟

中国气象局国家气象中心,北京,100081

## 摘 要

基于同一 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 的多通道数据和被动微波辐射计 AMSR-E 的微波数据,文中研究了由 MODIS 的热红外亮温  $T_{B11\mu m}$  和可见光通道反射率  $R_{0.65\mu m}$  估计中纬度降雨的方法。首先利用 MODIS 的  $R_{0.65\mu m} > 0.8$  和  $T_{B11\mu m} < 270$  K 检测降雨云,并利用一个非线性函数估计雨强。同时,利用 AMSR-E 微波降雨产品对 MODIS 降雨估计进行了验证,发现降雨范围和雨强基本一致,在  $2^\circ$  格点上相关系数的平方达到 0.82,这启示 MODIS 降雨估计可以达到与被动微波降雨估计相近的精度。与自动雨量站观测数据的检验也取得较好的效果。

**关键词:** 降雨估计,MODIS,多通道信息,AMSR-E。

## 1 引 言

定量降水估计无论对于洪涝灾害预报,还是对于天气预报都具有十分重要的意义。由于卫星是唯一能提供大尺度降雨、云信息的手段,使得近年来卫星降水估计快速发展。卫星降雨估计主要采用热红外通道和微波技术。

早期主要应用静止卫星的热红外通道进行降雨估计。GPI 法<sup>[1]</sup>和 CST 法<sup>[2]</sup>是两种有代表性的热红外亮温估计降雨的方法,其中,降雨指数 GPI 法利用 GOES 静止卫星的冷云面积比率估计雨强,CST 法通过查找区域内最低红外亮温值估计雨强。热红外通道估计降雨的理论依据是云顶温度(不包括卷云)越低,在地面形成的降雨量越大,一些一维云模式降雨模拟的实验对此进行了验证<sup>[3]</sup>。

由于被动微波信号与降雨过程中形成的水滴和冰晶的发射和散射作用存在物理上的关系,被动微波估计降雨近年来发展很快<sup>[4-8]</sup>。从 1972 年开始,先后有多通道微波辐射扫描仪(SMMR)、特殊微波成像仪(SSM/I)、热带测雨被动微波成像仪(TMI)和位于 Aqua 卫星上的高级微波扫描辐射计(AM-

SR-E),随着微波通道的增多,空间分辨率的提高,大大提高了降雨估计的精度<sup>[4-8]</sup>。但由于被动微波传感器都位于极轨卫星上,一天只能覆盖地球两次,时间、空间采样分辨率过低,限制了其在降水预报中的作用。

为获得精度高、时空采样分辨率高的降雨估计,综合热红外通道和被动微波的降雨估计技术近年来也受到关注<sup>[9-10]</sup>。这种结合技术是将被动微波估计的降雨范围和雨强作为真值,去校正静止卫星的热红外降雨估计,使降雨估计的精度比单独的 GPI 和 CST 估计法的精度有显著提高。

王立志<sup>[11]</sup>运用动态分类方法对 GMS-5 四通道卫星云图进行分类,并根据一维云模式得到的对流云对流核心云顶温度与降水之间的关系,对层云和对流云做定量降水估算。郁凡<sup>[12]</sup>将单位特征空间归类方法应用于多光谱 GMS 卫星图像的降水强度场分析,交互式地进行多光谱卫星信息和地面实测降水的协同分析,重点对晴空、多云(无雨)、小雨、中雨、大雨和暴雨 6 种类型进行了检验。国内利用红外和微波相结合开展降雨估计和比较的工作还很少。

由于 Aqua 卫星上同时搭载了 MODIS 中分辨

\* 初稿时间:2005 年 4 月 11 日;修改稿时间:2005 年 9 月 16 日。

资助课题:国家自然科学基金项目(30370814),国家气象中心《利用卫星降水估计资料计算淮河流域的面雨量》项目,上海台风研究基金《基于多源遥感探测资料的热带气旋降水判别估计》项目。

作者简介:延昊,1973 年生,男,博士,副研究员。主要从事大气参数和生态系统的遥感研究。

率成像光谱仪和 AMSR-E 被动微波辐射计,可以同步地获取云和地物的多光谱信息和被动微波数据,有效地缩小观测时间上的差异,这是以前所没有的。本文主要是利用降雨云和非降雨云在  $0.65\ \mu\text{m}$  反射率和  $11\ \mu\text{m}$  亮温的差异进行降雨检测和雨强估计,并通过与 AMSR-E 微波降雨估计和观测值的比较完成 MODIS 降雨估计方法的检验。

## 2 数据和处理

采用了 2005 年 5—7 月每天下午东亚地区的

Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 和被动微波辐射计 AMSR-E 数据。MODIS 作为一个 36 通道的中分辨率、多光谱、交叉扫描(cross-track scanning)的光谱辐射测量计,具有对大气、陆地和海洋综合观测的能力。位于同一 Aqua 卫星上的 AMSR-E 作为一个 12 通道、6 个频率(6.92, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 和 89.0 GHz)、双极化、圆锥扫描(conically scanning)的被动微波辐射计,可以提供对雨强、水汽含量、海面风速、冰雪、土壤湿度等的全球微波测量。AMSR-E 的波段特征见表 1。

表 1 AMSR-E 的波段特征  
Table 1 Band characteristics of AMSR-E

中心频率(GHz)	6.92	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0
空间分辨率 IFOV(km)	43×75	29×51	16×27	18×32	8.2×14.4	3.5×5.9

对 MODIS 数据进行处理得到经过太阳天顶角校正的 1 通道(波长  $0.620\text{—}0.670\ \mu\text{m}$ )可见光反射率  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  和 31 通道(波长  $10.78\text{—}11.28\ \mu\text{m}$ )的热红外亮温  $T_{B11\ \mu\text{m}}$ 。AMSR-E 降雨估计数据采用经过质量检验的 AMSR-E 的官方降雨估计产品<sup>[7]</sup>。所有数据都被投影成  $0.05^\circ\times 0.05^\circ$  的等经纬度数据进行计算和分析。

## 3 MODIS 多通道信息降雨估计方法

众所周知,在中纬度陆地降雨的形成过程中,水汽会被抬升,使大气柱内的云量增多,导致  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  增大;同时,在高空形成大量的冰晶,导致  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  降低,而且抬升越剧烈,高空形成的冰晶越多,云顶的热红外亮温  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  越低,此时地面的降雨越大,因此,卫星观测的  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  携带有降雨的信息。Adler<sup>[3]</sup> 应用一维云模式降雨模拟的实验对此进行了验证。而非降雨云由于高度较低,其  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  较大。对于中低云产生的弱降雨,其与云体的深厚程度有密切关系,云的光学厚度越大,地面降雨越多,  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  可以用于描述中低云的深厚程度。对于孤立的不降雨的薄卷云,其高度虽高,  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  较低,仅用热红外通道是难于识别的,但由于卷云的透光性,其可见光的  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  反射率较低,利用该特点可以将这类薄卷云与降雨云区分开来。因此,一个完整的卫星降雨估

计方法应当考虑云顶高度和云厚的信息。

在已有的热红外通道识别降雨云方法中,GPI 法<sup>[1]</sup>是采用区域内亮温  $< 235\ \text{K}$  进行降雨识别,CST 法<sup>[2]</sup>采用区域内的最低热红外亮温( $< 253\ \text{K}$ )和一个斜率进行判别,GMSRA 法<sup>[13]</sup>采用未经太阳天顶角校正  $R_{0.65\ \mu\text{m}} > 0.4$  和云顶温度  $< 230\ \text{K}$  或云粒子有效半径  $> 20\ \mu\text{m}$  识别降雨。

如何估算雨强的方法也不同,GPI 法<sup>[1]</sup>采用区域内冷云面积比率乘以 3 估计雨强,CST 法<sup>[2]</sup>采用线性函数估计雨强,Vicente<sup>[14]</sup>采用指数函数估计雨强,GMSRA<sup>[13]</sup>法采用二次曲线估计雨强。

本文提出的 MODIS 多通道降雨估计方法,首先利用  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  和  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  区分降雨云、非降雨云和陆地,具体指标是  $T_{B11\ \mu\text{m}} < 270\ \text{K}$  和  $R_{0.65\ \mu\text{m}} > 0.8$ 。对精心选择的我国东部地区的  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  和  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  与 AMSR-E 微波雨强作统计分析,发现降雨云的  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  和  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  与 AMSR-E 微波雨强存在非线性的统计关系:相同温度下,反射率越大,微波雨强越大;相同反射率下,温度越低,微波雨强越大;反射率越大,温度越低,微波雨强越大。这与郁凡<sup>[12]</sup>对地面雨强在 GMS 红外和可见光二维光谱特征空间的等级分布分析结果基本一致,即红外和可见光通道信息应结合用于反演地面降雨。针对不同  $T_{B11\ \mu\text{m}}$  的降雨云,本文采用不同的二次曲线由反射率  $R_{0.65\ \mu\text{m}}$  反演雨强(图 1)。

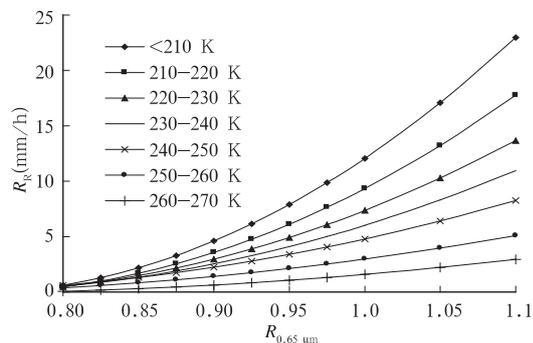


图 1 不同温度  $T_{B11\mu m}$  (K) 下 MODIS 反射率  $R_{0.65\mu m}$  与雨强 (mm/h) 的反演关系

Fig. 1 Rain rate  $R_R$  (mm/h) as a function of MODIS  $R_{0.65\mu m}$  under different  $T_{B11\mu m}$  (K)

## 4 结果与检验

### 4.1 2005 年 6 月 21 日降雨案例分析

2005 年 6 月 21 日雨带主要分布在广西、广东、

江西和福建一带(彩图 2a), 广西一站的 1 h 降雨量超过了 25 mm, 广东一站的 1 h 降雨量超过了 19 mm。本文应用 2005 年 6 月 21 日下午的 MODIS 和 AMSR-E 数据对这次降雨云团进行降雨估计。

在这次天气过程中, 典型强降雨云、弱降雨云、非降雨云和晴空陆地的辐射特征见表 2, 强降雨云的低温特征很明显,  $T_{B11\mu m}$  仅 213.1 K, 而且 89 GHz 极化的微波亮温也最低。弱降雨云的  $T_{B11\mu m}$  较高, 为 266.1 K, 但云光学厚度依然很大,  $R_{0.65\mu m}$  为 0.85。降雨云的一个共同特征是云光学厚度较大,  $R_{0.65\mu m}$  较大。

非降雨云的  $T_{B11\mu m}$  较高, 与弱降雨云相近, 但其  $R_{0.65\mu m}$  较小, 云光学厚度较小, 89 GHz 微波亮温较大。可以采用简单的  $R_{0.65\mu m}$  和  $T_{B11\mu m}$  阈值将其剔除。薄卷云的  $T_{B11\mu m}$  尽管很低, 但由于光学厚度较小,  $R_{0.65\mu m}$  只有 0.58, 容易识别。晴空陆地的  $T_{B11\mu m}$  最高, 同时  $R_{0.65\mu m}$  最小, 也容易识别。

表 2 2005 年 6 月 21 日云和陆地的典型辐射特征

Table 2 Radiative properties of cloud and land on June 21, 2005

辐射特征	强降雨云	弱降雨云	非降雨云	薄卷云	晴空陆地
$R_{0.65\mu m}$	1.03	0.85	0.71	0.55	0.06
$T_{B11\mu m}$ (K)	194.9	266.1	266.3	232.9	293.1
89 GHz 微波亮温(K)	217.6	271.1	288.8	289.8	291.8

依据 MODIS 方法检测降雨并估计雨强(彩图 2b), 并与 AMSR-E 微波雨强(彩图 2c)相比较, 发现两种方法估计的降雨范围比较一致, 雨强分布也比较一致。近一步的相关分析(表 3)表明, 随着空间尺度的增加, MODIS 和 AMSR-E 降雨估计结果的相关性有显著提高, 在 2.5° 格点尺度上, 相关系数的平方达到 0.9, 这与已有研究结果相一致<sup>[13-15]</sup>。Tapiador<sup>[15]</sup> 指出 0.1° 格点的 SSM/I 微波和 GOSE 红外 1 h 降雨估计值的相关系数为 0.6。

表 3 不同空间尺度上的 2005 年 6 月 21 日 MODIS 和 AMSR-E 雨强的相关统计

Table 3 Correlation statistics of AMSR-E and MODIS rainrate at a range of spatial scales on June 21, 2005

空间尺度	0.05°	0.25°	1°	2.5°
样本数	110203	4148	288	42
相关系数的平方	0.48	0.62	0.85	0.90

2005 年 6 月 21 日 14 时的 1 h 实况雨量显示出, 在广西省存在两个降雨中心, 广东省存在一个降

雨中心。MODIS 和 AMSR-E 微波降雨估计法都检测出了这两个降雨中心。

### 4.2 方法检验

选择四川(31°—29°N, 103°—105°E)、湖南(30°—28°N, 110°—112°E)和福建(27°—25°N, 116°—118°E)3 个代表性区域(空间范围为 2° 格点)对 MODIS 多通道降雨估计方法进行检验。初始数据为 2005 年 5 月 20 日—7 月 31 日下午的 0.05° 格点 MODIS、AMSR-E 卫星降雨估计值和自动站的 1 h 雨量观测值。将 2° 格点范围内的 1600 个卫星降雨估计值求平均得到区域的卫星估计值, 同时将 2° 格点范围内的自动雨量站 1 h 观测值求平均得到区域的观测值, 这样得到的样本数为 160。由于本文收集的 MODIS 数据有缺失现象, 而且 AMSR-E 的扫描宽度比 MODIS 窄, 导致了用于检验的样本数比实际天数少。

随着空间尺度的增加和时间尺度上的累加, 卫星降雨估计与观测值的相关系数会有显著增加<sup>[13-16]</sup>。但本文使用的 MODIS 作为极轨卫星, 每

天白天仅过境一次,无法在时间尺度上进行累加以形成日、月降雨量数据,即无法在日、月时间尺度上开展方法检验,因此 MODIS 方法检验主要围绕  $2^\circ$  格点的时间序列而开展。

MODIS 和 AMSR-E 估计雨强的散点分布显示(图 3)两者存在良好的相关关系,相关系数的平方达到 0.817,在 0.01 水平上显著。MODIS 估计雨强的均值为 1.03 mm/h,AMSR-E 的均值为 0.96 mm/h,偏差为 0.05 mm/h,均方根误差为 0.04 mm/h。

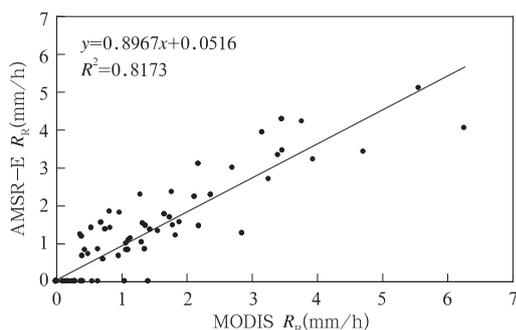


图 3 MODIS 和 AMSR-E 雨强(mm/h)的散点分布  
Fig. 3 Scatterplots of MODIS and AMSR-E rain rate  $R_R$  (mm/h)

MODIS 估计雨强和观测值的散点分布显示(图 4)两者存在一定的关系,相关系数的平方为 0.317,在 0.01 水平上显著。MODIS 估计雨强的均值为 1.03 mm/h,观测值的均值为 0.53 mm/h,偏差为 0.5 mm/h,均方根误差为 1.14 mm/h。

GMSRA 卫星估计值与观测值的日雨量相关统计表<sup>[13]</sup>显示,在  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  区域内相关系数约为 0.75,使用的样本数约为 80。Kidd 的研究<sup>[16]</sup>指出在  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  区域内卫星估计值与观测值的日雨量相关系数一般为 0.3—0.4,随季节有一定变化。Tapiador<sup>[15]</sup>指出空间范围小于  $1^\circ$  格点的 1 h 卫星降雨估计值与观测值的相关系数非常低,如  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  SSM/I 微波、红外降雨估计与雨量站 1 h 观测值的相关系数平方小于 0.16。

图 4 也显示出 MODIS 识别的降雨格点数比观测到的降雨格点数多,这与地面观测降雨比卫星估计降雨存在滞后现象<sup>[15]</sup>有一定关系,也与本文用于检测降雨的红外阈值  $T_{B11\mu m} (< 270 \text{ K})$  偏大有关。经常使用  $F_{AR}$  (False alarm ratio) 分析卫星识别降雨云的错误情况, $F_{AR}$  的定义如下

$$F_{AR} = \frac{\text{与观测相比卫星识别错误的降雨格点数}}{\text{卫星识别的降雨格点总数}} \quad (1)$$

$F_{AR}$  会随空间尺度的增加而减小,即卫星识别降雨的错误情况在减小。Kidd<sup>[16]</sup> 在  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  区域内针对日雨量计算的  $F_{AR}$  为 0.6, Tapiador<sup>[15]</sup> 在  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  区域内针对 1 h 降雨估计计算的  $F_{AR}$  大于 0.6, 本文在  $2^\circ \times 2^\circ$  区域内计算的  $F_{AR}$  为 0.38, 处于合理范围。

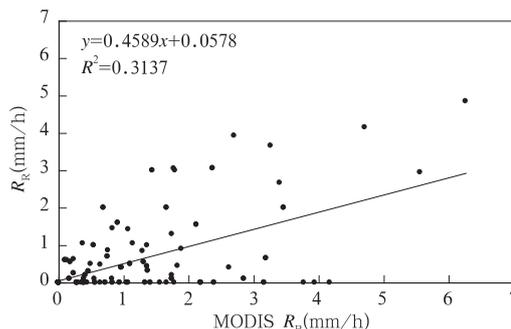


图 4 MODIS 和自动站观测雨强(mm/h)的散点分布

Fig. 4 Scatterplots of MODIS and gauge rain rate  $R_R$  (mm/h)

## 5 结论与讨论

(1) 本文提出的 MODIS 降雨估计方法主要利用 MODIS 的可见光通道反射率  $R_{0.65\mu m} > 0.8$  和  $T_{B11\mu m} < 270 \text{ K}$  检测降雨云,并利用一个非线性函数关系由  $R_{0.65\mu m}$  和  $T_{B11\mu m}$  估计雨强。

(2) 检验分析表明,MODIS 和 AMSR-E 微波降雨估计的降雨范围和雨强基本一致,在  $2^\circ$  格点上相关系数的平方达到 0.82,这启示 MODIS 降雨估计可以达到与被动微波降雨估计相近的精度。并利用观测数据对 MODIS 降雨估计进行了检验,相关系数的平方为 0.317,与国外的类似研究结果一致。

(3) Aqua 卫星同时提供了热红外和 89 GHz 微波通道的同步信息,用于降雨的方法研究效果很好。该方法主要应用于中国的东部地区,在西部干旱和青藏高原地区需要修正。由于采用了可见光通道信息,因此仅在白天使用。

(4) 卫星降雨反演是一个非线性的问题,仅根据单一通道信息直接由单一线性/曲线函数估计降雨会引入较大误差。近年的研究都采用不同的非线性方法反演降雨,Vicente<sup>[14]</sup> 和 GMSRA<sup>[13]</sup> 法采用

指数函数和二次曲线由红外亮温估计雨强,并采用湿度校正因子和云增长速率校正因子校正初始估计结果才取得较好的估计结果。郁凡<sup>[12]</sup>采用模糊数学中的降水强度类属矩阵由 GMS 红外和可见光通道估计降雨取得较好结果。Tapiador<sup>[15]</sup>采用神经网络融合红外和被动微波信息进行降雨估计。本文采用的是一种类似查找表的非线性反演方法,针对不同温度  $T_{B11,\mu m}$  的降雨云,采用不同的二次曲线由反射率  $R_{0.65,\mu m}$  反演雨强(图 1)。

## 参考文献

- [1] Arkin P A, Meisner B N. The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982—1984. *Mon Wea Rev*, 1987, 115:51-74
- [2] Adler R F, Negri A J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J Appl Meteor*, 1988, 27:31-51
- [3] Adler R F, Mack R A. Thunderstorm cloud height-rainfall rate relations for use with satellite rainfall estimation techniques. *J Climat Appl Meteor*, 1984, 23:280-296
- [4] Ferraro R R, Marks G F. The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements. *J Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12:755-770
- [5] Ferraro R R. SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications. *J Geophys Res*, 1997, 102:16715-16735
- [6] Kummerow C D, Hong Y, Olson W S, et al. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. *J Appl Meteor*, 2001, 40:1801-1817
- [7] McCollum J, Ferraro R R. Next generation of NOAA/NESDIS TMI, SSM/I, and AMSR-E microwave land rainfall algorithms. *J Geophys Res*, 2003, 108(D8): 8382, doi:10.1029/2001JD001512
- [8] 李万彪,陈勇,朱元竞等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水. *气象学报*, 2001, 59(5):591-601  
Li Wanbiao, Chen Yong, Zhu Yuanjing, et al. Retrieval of rain over land by using TRMM/TMI measurements. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 2001, 59(5):591-601
- [9] Adler R F, Negri A J, Keehn P R, et al. Estimation of monthly rainfall over Japan and surrounding waters from a combination of low-orbit microwave and geosynchronous IR data. *J Appl Meteor*, 1993, 32:335-356
- [10] Miller S W, Arkin P A, Joyce R. A combined microwave/infrared rain rate algorithm. *Int J Remote Sensing*, 2001, 22:3285-3307
- [11] 王立志,李俊,周凤仙. GMS-5 四通道云图的自动分类及其在定量降水估算中的应用. *大气科学*, 1998, 22(3):371-378  
Wang Lizhi, Li Jun, Zhou Fengxian. Cloud classification of GMS-5 data and its application in rainfall estimation. *Scientia Atmos Sinica*(in Chinese), 1998, 22(3):371-378
- [12] 郁凡. 多光谱卫星图像降水强度场的分析. *气象学报*, 2003, 61(3):334-345  
Yu Fan. Analysis of rainfall intensity field by using multispectral GMS imagery. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 2003, 61(3):334-345
- [13] Ba M, Gruber A. The GOES multispectral rainfall algorithm (GMSRA). *J Appl Meteor*, 2001, 40:1500-1514
- [14] Vicente G A, Scofield R A, Menzel W P. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79:1883-1898
- [15] Tapiador F J, Kidd C, Levizzani V, et al. A neural networks-based fusion technique to estimate half hourly rainfall estimates at 0.1° resolution from satellite passive microwave and infrared data. *J Appl Meteor*, 2003, 43:98-116
- [16] Kidd C, Kniveton D R, Todd M C, et al. Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J Hydrometeor*, 2003, 4:1088-1104

## OVERLAND RAINFALL ESTIMATES IN MIDLATITUDE BY USING MODIS MULTI-CHANNELS

Yan Hao Wu Menxin Liu Guiqing Li Juan

*National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

### Abstract

This paper describes a method of rainfall estimates in midlatitude based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 11  $\mu\text{m}$  infrared temperature  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$  and 0.65  $\mu\text{m}$  visible reflectance  $R_{0.65\mu\text{m}}$ . Generally, rain cloud is higher than non rain cloud in altitude and its temperature is lower than that of non rain cloud. It means 11  $\mu\text{m}$  infrared channel carries information of rain cloud and non rain cloud, which can be used to detect rain and estimate rainfall. Moreover, rain cloud has a big cloud optic thickness related with a big  $R_{0.65\mu\text{m}}$ . Thus,  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$  and  $R_{0.65\mu\text{m}}$  should be combined to estimate rainfall.

The method, denoted MODIS multi-channel technique, detects rain cloud according to thresholds of MODIS  $R_{0.65\mu\text{m}} > 0.8$  and  $T_{\text{B11}\mu\text{m}} < 270$  K, in which high visible threshold of  $R_{0.65\mu\text{m}}$  is able to screen out cirrus due to its transparent feature in visible channel. Then a nonlinear function of  $R_{0.65\mu\text{m}}$  and  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$  completes the rain rate estimation. More specifically, different function of  $R_{0.65\mu\text{m}}$  for different  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$  is further used for rainfall estimation upon calibration with AMSR-E rain rate products.

The technique was tested for one Asia case and validated with AMSR-E passive microwave rainfall estimates and rain gauge data from May to July 2005. The result shows that rain estimates of MODIS agrees well with AMSR-E microwave estimates with a correlation coefficient  $R^2$  of 0.8 at a spatial scale of  $2^\circ$ . The correlation coefficient  $R^2$  of MODIS estimates and rain gauge data is 0.32 at a spatial scale of  $2^\circ$ , which coincides with other researches' result.

Physically, AMSR-E passive microwave estimates overland rainfall according to the scattering effect of ice particle in the column of air and thus it is a more direct method of rainfall estimation. The validation of MODIS method indicates that clouds with a big rain intensity observed by AMSR-E often have a high  $R_{0.65\mu\text{m}}$  and low  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$ . In other words, clouds with a high  $R_{0.65\mu\text{m}}$  and low  $T_{\text{B11}\mu\text{m}}$  often comprise a lot of ice particle in the air.

Aqua satellite first simultaneously supplies passive microwave and infrared/visible radiative information of rain, which exposes a promising direction for rainfall research.

**Key words:** Rainfall estimates, MODIS, Infrared/visible channels, AMSE-E.

## 延 昊等：利用MODIS的多通道信息估计中纬度降雨

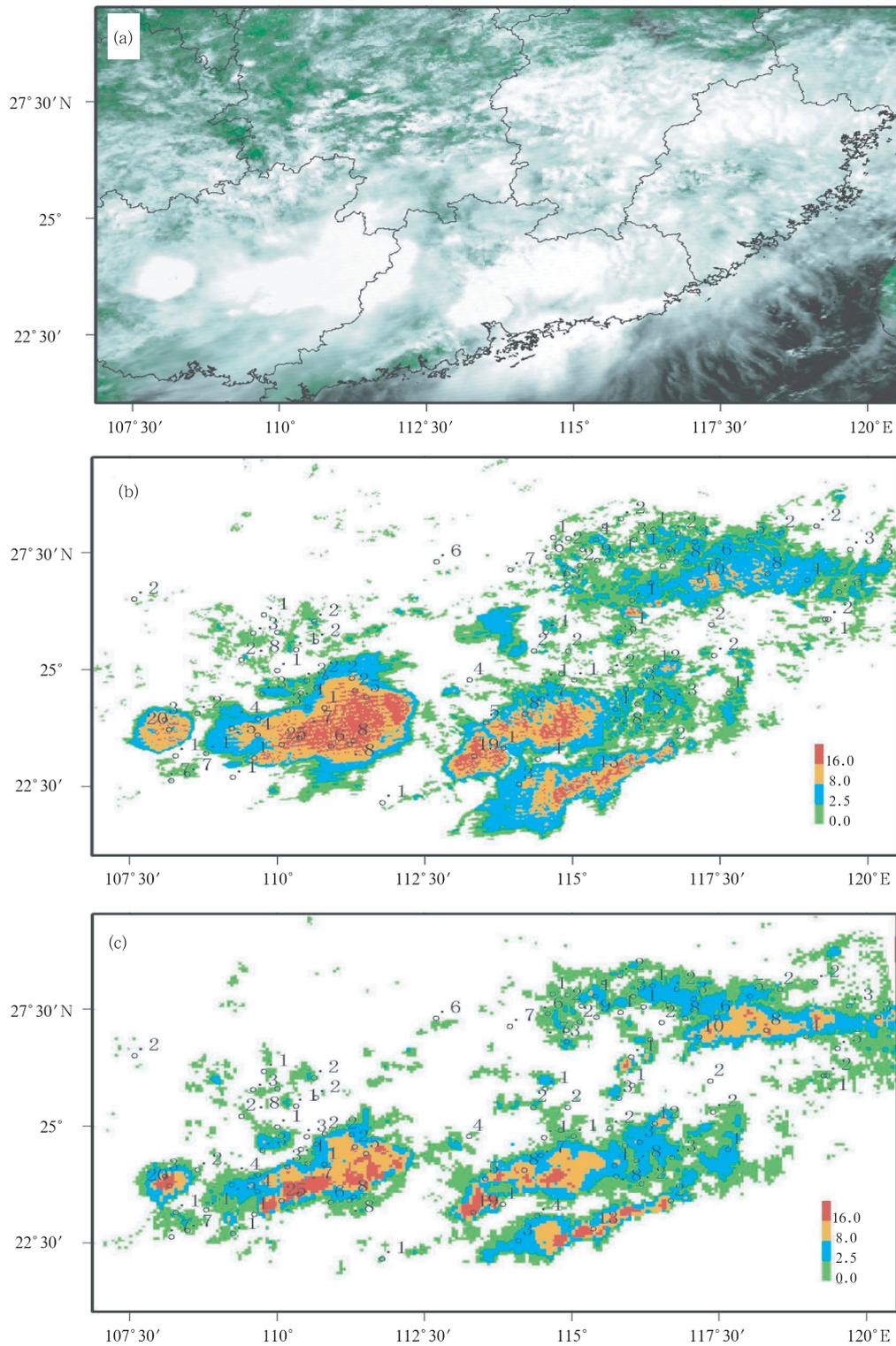


图2 2005年6月21日降雨估计

(a. MODIS假彩色云图; b. MODIS热红外反演降雨分布和实况, 单位 mm/h; c. AMSR-E微波反演降雨分布和实况, 单位:mm/h)

Fig.2 Rainfall estimates on June 21,2005

(a.cloud map in RGB false color; b.MODIS IR retrieved rainfall and observation, unit:mm/h; c.AMSR-E retrieved rainfall and observation, unit:mm/h)