

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 8 期 2020 年 8 月

目 次

研究进展

海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚 (933)

综述

日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展 詹春晖, 章钊颖, 张永光 (945)

地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展
..... 林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火 (958)

博士论坛

遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展 张圆,
贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪 (975)

联合局部二值模式的 CNN 高光谱图像分类 魏祥坡, 余旭初, 张鹏强, 职露, 杨帆 (1000)

技术方法

ASTER GDEM V2 的南极冰川高程误差校正及精度分析
..... 陈昊楠, 许诗枫, 黄艳, 王淑杰, 舒松, 余柏菡, 吴健平 (1010)

风云二号多通道卫星数据对流单体检测 刘佳, 罗向阳 (1023)

遥感应用

FY-3B/MWRI 与 GCOM-W1/AMSR-2 亮温数据在北极地区的交叉定标
..... 唐晓彤, 陈海花, 管磊, 李乐乐 (1032)

泛北极地区多年冻土活动层厚度演变 蔡红艳, 韩冬锐, 杨林生, 陈慕琳, 杨小唤 (1045)

本期责任编辑: 李薇

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.8 August, 2020)

CONTENTS

Research Progress

HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea
..... *SHEN Yafeng, LIU Jianqiang, DING Jing, JIAO Junnan, SUN Shaojie, LU Yingcheng* (944)

Review

Recent advances in the radiative transfer models of sun-induced chlorophyll fluorescence
..... *ZHAN Chunhui, ZHANG Zhaoying, ZHANG Yongguang* (957)

Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries
..... *LIN Xingwen, WEN Jianguang, WU Shengbiao, HAO Dalei, XIAO Qing, LIU Qinhuo* (974)

Doctor's Voice

Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration
..... *ZHANG Yuan, JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, XU Ziwei, XU Tongren,*
YAO Yunjun, MA Yanfei, SONG Lisheng, LI Xiang, HU Xiao, WANG Zeyu, GUO Zhixia, ZHOU Ji (998)

CNN with local binary patterns for hyperspectral images classification
..... *WEI Xiangpo, YU Xuchu, ZHANG Pengqiang, ZHI Lu, YANG Fan* (1008)

Technology and Methodology

Vertical accuracy correction and analysis of ASTER GDEM V2 over Antarctic Glacier
..... *CHEN Haonan, XU Shifeng, HUANG Yan, WANG Shujie, SHU Song, YU Bailang, WU Jianping* (1022)

Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2 *LIU Jia, LUO Xiangyang* (1031)

Remote Sensing Applications

Intercalibration of FY-3B/MWRI and GCOM-W1/AMSR-2 brightness temperature over the Arctic
..... *TANG Xiaotong, CHEN Haihua, GUAN Lei, LI Lele* (1044)

Spatiotemporal change in permafrost active layer thickness in the Pan-Arctic region
..... *CAI Hongyan, HAN Dongrui, YANG Linsheng, CHEN Mulin, YANG Xiaohuan* (1057)

风云二号多通道卫星数据对流单体检测

刘佳^{1,2}, 罗向阳²

1. 商丘师范学院 信息技术学院, 商丘 476000;

2. 战略支援部队信息工程大学 数学工程与先进计算国家重点实验室, 郑州 450000

摘要: 在对流单体检测中, 相邻的对流云核很难区分。为了解决这个问题, 基于红外和水汽通道卫星数据, 提出一种新的检测对流单体方法。首先, 针对卫星数据的特点进行数据处理, 去除亮温大于241 K(对流系统的基准阈值)的像元, 并将其归一化到[0, 1]。其次, 利用H极大值变换技术提取对流核种子点, 设计一种八连通域准则使相邻种子点形成聚类并按顺序进行标记, 有效地区分了相邻的种子簇。然后, 设计一个新的准则判断相邻的种子簇是否需要合并。最后, 根据多个阈值产生的种子点设计了种子簇累加合并方法使种子点生长或者与其他相邻的种子点合并, 形成最终的对流核。选取红外和水汽通道的多通道数据开展验证实验, 并和雷达资料和其他方法进行对比实验, 结果表明该方法可以有效地区分相邻的对流单体, 在初生、成熟和消散等中尺度对流系统生命周期均准确。此外, 所提方法不仅对单个对流核有效, 而且对多个对流核也能准确地检测。

关键词: 遥感, 对流单体, 对流核, H-极大值变换, 聚类, 风云二号, 种子点

引用格式: 刘佳, 罗向阳. 2020. 风云二号多通道卫星数据对流单体检测. 遥感学报, 24(8): 1023-1031

Liu J and Luo X Y. 2020. Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(8): 1023-1031[DOI:10.11834/jrs.20209018]

1 引言

中尺度对流系统 MCS (Mesoscale Convective Systems) 是形成暴雨、冰雹等强对流天气的重要系统, 它的活动载体是对流单体 (Biggerstaff 等, 2017; Clavner 等, 2017)。通常把一个水平范围十到数十千米且垂直速度 ≥ 10 m/s, 垂直伸展几乎达整个对流层的强上升区称为对流单体 (又称对流核) (Novo 等, 2014; Gentile 等, 2014; Crosier 等, 2011)。对流核是 MCS 中对流活动活跃的部分, 对流核检测方法的主要目标是检测出对流活动中较活跃的部分。无论是快速发展对流 RDC (Rapid Developing Convection) 检测还是初生对流 CI (Convection Initiation) 检测都要以对流核检测为基础, RDC 和 CI 的检测其实也是检测对流核部分 (Cintineo 等, 2013; Böing 等, 2012; Behrendt 等, 2011)。

近年来, 有很多使用卫星数据检测对流核的

方法 (汪柏阳 等, 2015; 吕巧谊, 2017; Protat 等, 2014)。此外, 还有一些使用气象图像序列的方法, 如数据同化方法。为了控制对流云的高度形变状态, 数据同化方法使用一个数据同化工具检测对流核, 但是该方法的时间复杂度比较高 (Thomas 等, 2010)。红外和水汽通道的亮温差可以用来识别对流云团 (赵文化和单海滨, 2018)。源分配方法 SA (Source Apportionment) 研究了对流核的生命周期演化, 并使用卫星图像序列跟踪和预测 MCS (Shukla 和 Pal, 2012)。TOOCAN (Tracking of Organized Convection Algorithm Through a 3D Segmentation) 方法对红外图像进行对流系统体积的 3 维分割迭代处理 (Fiolleau 和 Roca, 2013)。不过这个方法在处理实时问题方面还存在一些缺陷。风云卫星资料结合天气雷达等资料可以为对流云团识别和跟踪方法的研究提供可靠的数据支撑 (张春桂 等, 2017)。Chasteen 等 (2019) 利用常规观测、分析仿真等对维持 MCS 生

收稿日期: 2019-01-29; 预印本: 2019-08-05

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(编号:E0310/1112/02-1); 河南省科技攻关项目(编号:202102210158); 河南省高等学校重点科研项目(编号:18B520032, 20B520028)

第一作者简介: 刘佳, 1985年生, 男, 博士, 研究方向为遥感数据处理和模式识别。E-mail: sqsyj@126.com

通信作者简介: 罗向阳, 1978年生, 男, 教授, 研究方向为网络与信息安全。E-mail: luox_y_ieu@sina.com

命周期和持久性的过程进行了深入研究。多阈值的对流云识别技术可以对FY-2E卫星云图进行识别、统计和分类(黄勇等, 2014)。

改进的雷暴识别、跟踪和预报 ETITAN (Enhanced Thunderstorm Identification, Tracking And Nowcasting) 方法使用两个阈值识别对流核, 准确率比原始的TITAN方法更高(Han等, 2009)。但是由于对流核的形状变化非常快, 因此经常会产生不准确的识别结果。为保持雷暴内部结构的完整性, 当区分一个雷暴簇中的相邻雷暴时, 基于数学形态学的ETITAN雷暴识别方法可以有效地缓解相邻雷暴的错误合并问题, 该方法的识别步骤主要为:

(1) 使用单个最低阈值进行识别, 以此为基础使用腐蚀操作, 使合并的雷暴分裂成两个独立的雷暴。通过这个步骤消除了错误合并, 有效地区分了相邻的雷暴单体。

(2) 使用第2个较高的阈值提取第2个更强的雷暴。

(3) 对每一个雷暴执行腐蚀和膨胀操作, 从而有效地区分相邻的雷暴。最终在雷暴簇中得到两个独立的雷暴, 并且内部结构也保持的比较完整。

快速发展雷暴 RDT (Rapid Developing Thunderstorm) 方法使用统计决策和经验准则识别强对流系统(Météo F, 2013)。RDT方法是目前较为先进的对流核判识方法, 该方法利用欧洲地区15 min时间间隔的对流监测数据进行临近预报。RDT方法红外通道阈值的选取在参考对流体垂直方向上的高度变化基础上, 采用了自适应阈值方法。该方法利用以下5个判识条件检测对流核:

(1) T_{cold} 代表最冷亮温阈值, 一般取值为 -55°C ;

(2) T_{warm} 代表对流体最暖温度阈值, 一般取值为 -10°C — 5°C ;

(3) ΔT 为对流体在垂直方向上的温度等值线间隔, 取值为 1°C ;

(4) ΔT_{tower} 为对流体极值检测必须达到的最小温度差, 取值为 3°C ;

(5) A_{min} 为对流体判识最小面积阈值, 在红外卫星云图上一般取一个像元大小。

ETITAN方法利用了数学形态学中的腐蚀和膨胀等操作, 有效地区分了相邻的雷暴。RDT方法

使用自适应阈值的方法识别对流系统, 方法简单高效。本文提出的对流核检测方法也参考了这两种方法, 使用了数学形态学技术和阈值方法, 有效地区分了相邻的对流核。

综上所述, 对流单体检测是指从大面积对流云中提取对流核部分并剔除卷云部分。一般方法是采用亮温值和面积两个指标, 使用简单的阈值法进行分割。阈值方法对阈值非常敏感, 提取的核轮廓通常不可靠。该方法存在以下不足: (1) 相邻的对流核很难区分, 容易被错误识别为同一个对流核; (2) 成片云区内的对流核很难被单独识别, 造成大部分云会连同周边亮温较低的云被包含在内。当亮温阈值设置太高时, 检测到的对流核区域会跟周围的冷云连接在一起; 当亮温阈值太低时, 容易造成检测到的对流核区域不完整。由于每个对流核的平均亮温值存在差异, 所以使用单个阈值进行对流核检测的方法不能准确地区分相邻的对流核。

针对以上问题, 本文提出一种基于H极大值变换和聚类的对流核检测方法 HTC (H-maxima Transform and Clustering)。该方法首先利用H极大值变换方法提取对流核种子点。接着使用连通域邻域准则对相邻的种子点进行聚类并按顺序进行标记, 有效地区分了相邻的种子簇。然后利用区域增长方法提取对流核部分, 采用合并准则使种子点生长或者与其他相邻的种子点合并, 形成最终的对流核。

2 HTC方法

2.1 研究数据

实验数据由中国气象局提供, 来源于FY-2F气象卫星。FY-2F气象卫星定位于 112°E 赤道上空, 2012-01-13在西昌卫星发射中心发射成功。表1为FY-2F气象卫星成像仪辐射通道的波长和空间分辨率, 可以看出FY-2F包含5个不同波长范围的通道, 4个红外通道的空间分辨率均为 5 km , 可见光通道的分辨率有两种, 分别为 1 km 和 5 km , 该通道的数据用于白天的气象观测。中国的暴风雨等自然灾害经常发生在夏季, 因此, 选择夏季的卫星数据作为实验数据, 该数据时间间隔为 6 min 。

表1 FY-2F 卫星成像仪辐射通道的波长和空间分辨率
Table 1 Wavelength and spatial resolution of FY-2F satellite imager radiometric channels

| 通道号 | 通道名称 | 波长/ μm | 空间分辨率/km |
|-----|--------|-------------------|----------|
| IR1 | 红外窗口通道 | 10.3—11.3 | 5 |
| IR2 | 红外窗口通道 | 11.5—12.5 | 5 |
| IR3 | 水汽通道 | 6.3—7.6 | 5 |
| IR4 | 短波红外通道 | 3.5—4.0 | 5 |
| VIS | 可见光通道 | 0.55—0.90 | 1和5 |

2.2 研究方法

HTC方法主要基于H极大值变换计算成对种子点的合并和分裂次数,并判断成对的种子簇是否需要合并,从而区分相邻的对流核。所提方法的流程图如图1所示。

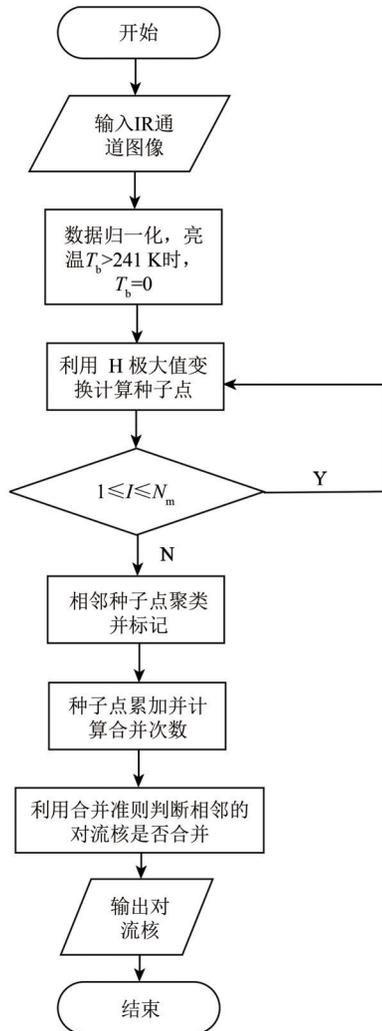


图1 HTC方法流程图

Fig.1 Flow chart of HTC method

2.2.1 数据预处理

假定卫星红外图像 I 大小为 $m \times n$, 为方便处

理, 首先将所有亮温值 T_b 归一化到值域 $[0, 1]$ 。使用阈值 241 K (对流系统的基准阈值) 确定对流区域, 去除大于 241 K 的像素。计算公式为

$$I_g(m,n) = \frac{241 - I(m,n)}{241 - I_{\min}} \quad (1)$$

式中, $I_g(m,n)$ 表示归一化后的图像, $I(m,n)$ 表示原始红外灰度图像, I_{\min} 表示原始图像的最小值。

假定卫星红外图像 I 定义为

$$I = cc + bg \quad (2)$$

式中, cc 表示对流核, bg 表示背景或非对流核区域。对流核检测的目的是提取对流核区域并去除背景。因此, 对流核区域可以表示为

$$cc = \begin{cases} I - bg, & I > bg \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 阈值选择和H极大值变换

通过H极大值变换技术计算种子点首先需要确定阈值 h , 该阈值的选择是经过多次试验后选择的最佳经验阈值, 实验选择了FY-2卫星全部5个通道的图像进行了多次重复试验对比, 实验结果表明通过该阈值计算可以得到最准确的对流核种子点。实验得出 0.03 可以形成效果最好的初始种子点, 因此把 0.03 作为初始种子点的最佳阈值。接着利用H极大值变换技术计算对流核的种子点。

H极大值变换是数学形态学 (Najman 和 Talbot, 2013; Serra 和 Soille, 2012) 的一种技术, 该方法能够去除不相干的结构, 并保持图像基本的形状特性, 具有处理速度快等优点, 广泛应用于图像分割、特征抽取等领域。该方法可以抑制灰度图像中所有小于等于给定阈值 h 的极大值 (这个值在红外图像中指亮温)。H极大值变换定义为

$$HMAX_h(X) = R_f^{\circ}(X - h) \quad (4)$$

式中, X 表示原始红外图像, h 表示阈值, R_f° 表示膨胀重构。H极大值变换可以避免在同一个对流核内极大值点的分离。因此, 将H极大值变换技术应用到对流单体检测中可以避免极值点的分离并有效地区分相邻的极值点。

2.2.3 邻域标记方法

使用八连通域邻域准则对相邻的种子点进行聚类并按顺序标记, 标记后的种子点称为种子簇。同一个连通域内的像素标记相同, 这样就区分了不同的种子簇。假定标记图像用矩阵 LA 表示, 每

个元素 $LA(p)$ 代表像素 p 的标号, 图像前景像素集合用 F 表示, $LA(p)$ 要满足两个条件: (1) 如果 $p \in F^c$, $LA(p) = 0$; 如果 $p \in F$, $LA(p) = \infty$ 。(2) 当且仅当 $p \in F$ 和 $q \in F$ 在同一个连通域中, 有 $LA(p) = LA(q)$; 否则, $LA(p) \neq LA(q)$ 。

标记过程如下, 首先初始化矩阵为

$$LA^0(p) = \begin{cases} \infty, & \forall p \in F \\ 0, & \forall p \in F^c \end{cases} \quad (5)$$

然后, 在迭代时刻 $t > 0$, 矩阵的迭代表达式为

$$LA^{(t)}(p) = \min\{LA^{(t-1)}(p); \lambda; L_{\min}(p)\} \quad (6)$$

式中,

$$L_{\min}(p) = \min_{kl} \{LA^{(t-1)}(q) \mid q = (x_p + k, y_p + l) \in F\} \quad (7)$$

式中, λ 是连通域计数器, 整数 k 和 l 定义在连通域的邻域中。

上述邻域标记方法可以保证提取的种子点不仅连续而且能区分不同的对流核。

2.2.4 合并准则

将 H 极大值变换阈值为 0.03 时提取的种子点作为初始的种子簇。以初始的种子簇为基准, 并累加通过其他阈值计算的种子簇。最大累加次数定义为 N_m , 同时计算成对种子簇的合并次数, 并使用合并准则判断成对的种子簇是否需要合并。合并准则定义为

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & merge \geq v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中, 1 表示合并, 0 表示不合并, $merge$ 表示合并次数, v 表示合并次数的阈值。

3 实验结果与分析

3.1 在 IR 图像序列上的实验

图 2 为对流核检测在序列图像上的实验。选取的数据来源于 FY-2F IR1 通道, 时间段为 2014-08-27 0500—0800 UTC (Coordinated Universal Time, 协调世界时) 共 3 个小时, 因为 FY-2F 数据每 6 min 产生一次, 所以 3 个小时共有 30 幅图像。由于云在短时间内的形态特征变化较小, 不易观测, 因此, 选择其中 6 幅时间间隔半小时的 IR 灰度图像说明 HTC 方法在序列图像上的有效性。

从图 2 可以看出, 每一幅图像均包含多个对流核 (红色部分为检测到的对流核), 包括初生、成

熟和消散等 MCS 的各个生命周期, 形状大小各不相同, 随着时间的推移, 每一幅图中对流核的形状和大小等特征都发生着不同程度的变化, 有的发生分裂, 有的和其他相邻的对流核合并, 有的在某一时刻消散, 还存在部分初生对流, 说明 HTC 方法在 MCS 的不同生命周期阶段均能准确地检测对流核。图 2 (a) 是 6 幅图像中包含对流核数量最多的一个, 大部分处于初生和发展阶段, 图 2 (f) 对流核的数量最少, 并且大部分处于成熟阶段。部分相邻的对流核在某个时刻可能没有合并, 但是随着时间的推移, 亮温等发生变化后可能会发生合并现象。同样, 分裂现象也是如此, 单个对流核可能分裂成两个或多个。

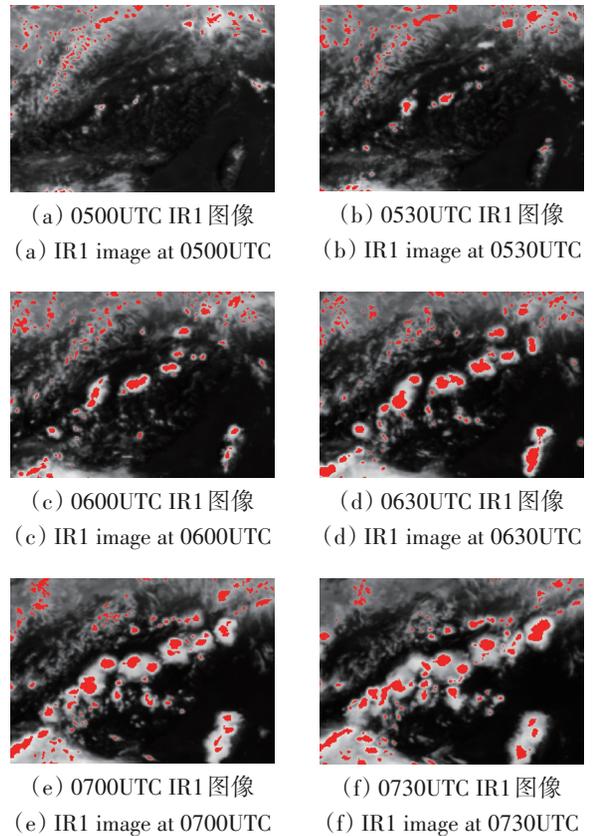


图 2 在红外图像序列上的实验

Fig.2 Experiments on IR image sequences

3.2 与雷达资料实验对比

对多部多普勒天气雷达数据进行预处理、多雷达拼图、坐标系转换等处理后进行实验验证, 验证时间为 2014-08-27—28, 实验区域为 112°E—120°E, 27°N—35°N, 验证数据为 FY-2F 卫星数据和多普勒天气雷达资料 (雷达基数据, 6 min 时间

间隔)和地面区域自动站资料(气象要素包括:风、温、降水)。图3(b)和图3(d)时次分别为2014-08-28 0530UTC和2014-08-28 0954UTC,图中蓝色表示没有闪电的对流,红色表示含有闪电的对流,白色表示有闪电的小尺度对流(雷达回波判别为回波的面积不到卫星像元的1/4)。图3(a)和图3(c)为对应时次的IR1通道红外图像的对流核检测结果。经统计并和雷达资料对比,图3(a)检测对流单体的准确率约为86.2%,图3(c)检测到对流单体的准确率约为87.1%。通过人工观测和检测结果进行比较可以看出,HTC方法检测到的对流核与雷达图像的检测结果基本匹配,准确率较高,从而验证了所提方法的有效性。

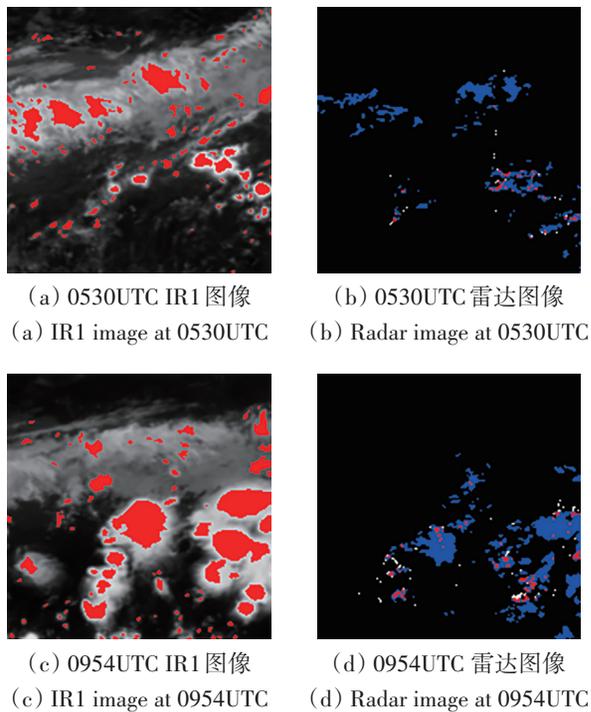


图3 与雷达资料对比
Fig.3 Comparison with radar data

3.3 水汽通道与IR1通道实验对比

以下实验为比较HTC方法在不同通道的有效性,本节数据来源于FY-2F气象卫星IR1通道和水汽通道。FY-2F水汽通道为中高层通道,而其余3个通道(IR1、IR2、IR4)为近地层通道。

图4(a)为2015-05-19 0000UTC IR1通道灰度图像,可以看出存在多个对流核。图4(b)为同一时刻的水汽通道灰度图像,可以看出两幅灰度图像存在明显差异。图4(c)和图4(d)为相应通道的对流核检测结果(红色部分)。

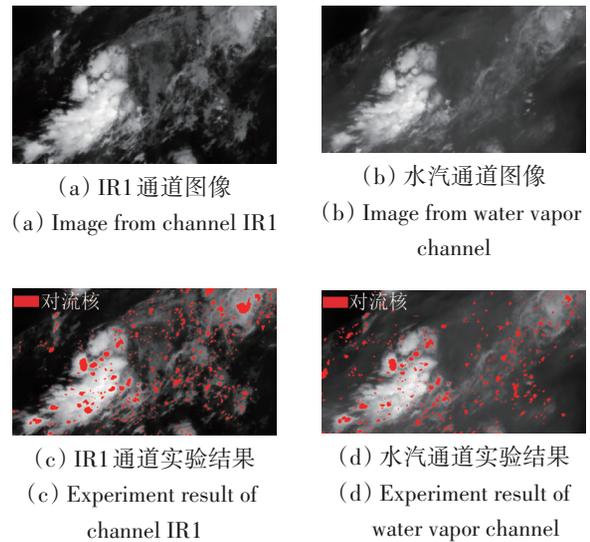


图4 IR1通道和水汽通道实验对比
Fig.4 Comparison between channel IR1 and water vapor channel

据图4所示,IR1通道检测出的对流核数量明显多于水汽通道,这是由水汽通道的特点决定的。水汽通道对中高层水汽比较敏感,底层的水汽在水汽通道往往不能有效地检测到。而IR1通道通过微波辐射反应对流云的特征,两个通道的物理特性的差异造成了检测结果的不同。正确的检测结果应是水汽通道检测出的对流核数量更少,因此,图4的对比实验结果符合两个通道的物理特性,说明HTC方法对于水汽通道也是有效的。

3.4 HTC方法与其他方法的比较

针对方法验证,从上述实验中的与亮温图像的比较,以及IR1通道和水汽通道的对比实验反映了HTC方法的有效性。另外,为了更充分的验证,本节首先和阈值方法以及目前主流的RDT、ETITAN和SA方法进行比较,然后再利用列联表方法验证所提方法的有效性。由于存在多个对流核,并且云的形状不固定并且不断快速变化,因此,阈值方法这种简单的依靠阈值进行识别的方法误差较大,往往会得到不准确的检测结果。RDT方法是基于统计决策和经验准则的一种方法。ETITAN方法结合两个阈值以及形态学操作检测对流核。SA方法使用邻域搜索准则选择连续的冷云区域。

亮温图像可以显示不同云之间的亮温差异。从亮温图像中可看出对流核的大致轮廓(红色和

黄色部分)。检测结果和亮温图像进行比较可以验证 HTC 方法在整个 MCS 生命周期的有效性。

图 5 为 HTC 方法与其他方法的比较结果, 图 5 (a) 是包含多个相邻对流核的 IR1 通道灰度图像, 图 5 (b) 为相应的亮温图像, 由于本文设计了合并准则判断相邻的对流核是否需要合并, 因此, HTC 方法能够更加有效地区分相邻核。与之相反, 传统的阈值方法仅仅依靠阈值, 而 RDT 方法相比阈值方法加入了梯度信息, 比阈值方法有所改进, 但是仍然不能准确区分相邻核。同时, 和图 5 (b) 亮温图像黄色部分进行比较可以看出, 其他方法检测出来的对流核不完整或者有误报情况, 不能准确地区分相邻对流核。检测结果中与所提方法最接近的是 SA 方法, 如图 5 (f) 所示, 左上角区域检测到两块对流核区域, 而根据亮温进行验证应只有下方区域为对流核, 上方区域为误报。相比之下, HTC 方法 (图 5 (g)) 检测到唯一的一块对流核区域, 检测结果更准确。

最冷的云顶区域和红外图像中的最小亮温值密切相关, 这些最小的亮温值和 HTC 方法计算出的种子点是相似的。种子点通过八连通域进行聚类形成不同的种子簇。同时, 使用合并准则判断成对的种子簇是否需要合并。通过与亮温图像中的最冷云顶区域进行比较发现, HTC 方法检测到的对流核区域和最冷云顶区域基本一致, 因此也验证了该方法能够准确地检测对流核。

3.5 列联表方法验证

另外一种验证方法是列联表方法。本节采用检测概率 POD (Probability Of Detection)、虚警概率 FAR (False Alarm Ratio) 和临界成功指数 CSI (Critical Success Index) 3 个指标量化评估这些方法。评价指标公式如下

$$POD = \frac{h}{h + m} \quad (9)$$

$$FAR = \frac{f}{h + f} \quad (10)$$

$$CSI = \frac{h}{h + m + f} \quad (11)$$

式中, h 表示检测正确的对流核个数, f 表示不是对流核但被检测出是对流核的个数, m 表示本应是对流核但未被检测到的个数。POD、FAR 和 CSI 的数值均处于 0—1, POD 和 CSI 的数值越大越接近正

确预报, FAR 数值越小越接近正确预报。检测结果的理想状况是获得高的检测概率和低的虚警概率。

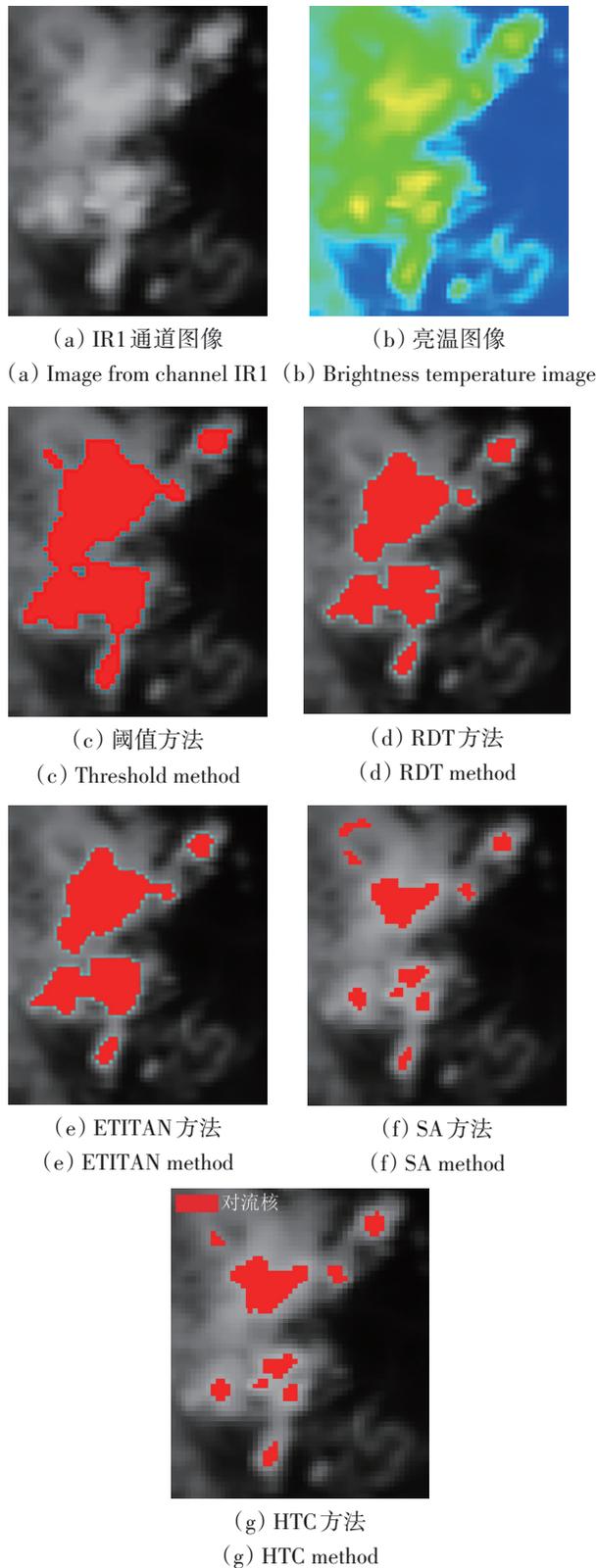


图 5 HTC 方法与其他方法的比较

Fig.5 Comparison between HTC and other methods

使用2013-08-01—31、时间间隔为6 min、空间分辨率为5 km的数据评估这些方法。选取的样本总数为7440个。表2是不同方法的评价结果。HTC方法结合了形态学中的H极大值变换技术，并设计了合并准则区分相邻的对流核，而阈值法、RDT、ETITAN和SA方法没有设计合并准则来提高检测准确率。因此，HTC方法相对于其他方法能够达到更好的性能。该方法的POD约为0.87，FAR约为0.21，CSI约为0.74。和其他方法比较，HTC方法的检测概率更高并且虚警概率更低。

表2 不同方法的评价结果

| 方法 | <i>h</i> | <i>m</i> | <i>f</i> | POD | FAR | CSI |
|--------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| 阈值法 | 15045 | 9221 | 7750 | 0.62 | 0.34 | 0.47 |
| RDT | 20137 | 8225 | 7448 | 0.71 | 0.27 | 0.56 |
| ETITAN | 24973 | 8264 | 8774 | 0.75 | 0.26 | 0.59 |
| SA | 32861 | 5799 | 9268 | 0.85 | 0.22 | 0.69 |
| HTC | 34782 | 5197 | 9246 | 0.87 | 0.21 | 0.71 |

注：黑色加粗数字表示最佳结果。

就方法的时效性而言，HTC方法对整个检测区域（区域大小为2288×2288像素）图像进行一次对流核检测的平均时间在3 s以内（表3），与其他方法相比速度更快。FY-2F高时间分辨率静止气象卫星每隔6 min可以返回一幅图像，因此，HTC方法在时效性方面具有一定的优势。同时，该方法能够为对流初生检测和快速发展对流检测提供技术基础，并为对流核的跟踪和临近预报方法的实现打下良好的基础。

表3 不同方法计算速度的对比

Table 3 Comparison of different methods for computing speeds

| 方法 | 计算时间/s |
|--------|-------------|
| 阈值法 | 3.02 |
| RDT | 4.06 |
| ETITAN | 4.95 |
| SA | 5.78 |
| HTC | 2.91 |

注：黑色加粗数字表示最佳结果。

4 结论

本文提出一种利用红外通道和水汽通道检测对流单体的方法HTC，有效地区分了相邻云核，解决了对流单体检测中相邻云核难以区分这一难

题。HTC方法首先利用H极大值变换技术提取对流核种子点。接着使用连通域邻域准则对相邻的种子点进行聚类并按顺序进行标记，有效地区分了相邻的种子簇。然后利用区域增长的方法提取对流核部分，根据多个阈值产生的种子点设计了合并准则使种子点生长或者与其他相邻的种子点合并，形成最终的对流核。在卫星红外图像的实验结果以及与其他方法的对比证明了HTC方法可以有效地区分相邻的对流核。

所提方法有以下优势：（1）准确地区分了相邻的对流云核；（2）该方法适用于中尺度对流系统的各个生命周期，无论是初生、成熟还是消散阶段都可以达到较好的效果；（3）该方法不仅对单个对流核有效，而且对多个对流核也能准确地检测。另外，本方法计算速度快，平均时间在3秒钟以内，能够满足气象领域的实时性要求。

志 谢 此次实验的数据获取得到了中国气象局国家卫星气象中心的大力支持，在此表示衷心的感谢！

参考文献(References)

- Behrendt A, Pal S, Aoshima F, Bender M, Blyth A, Corsmeier U, Cuesta J, Dick G, Dorninger M, Flamant C, Di Girolamo P, Gorgas T, Huang Y, Kalthoff N, Khodayar S, Mannstein H, Träumner K, Wieser A and Wulfmeyer V. 2011. Observation of convection initiation processes with a suite of state-of-the-art research instruments during COPS IOP 8b. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(S1): 81 - 100[DOI: 10.1002/qj.758].
- Biggerstaff M I, Zounes Z, Addison Alford A, Carrie G D, Pilkey J T, Uman M A and Jordan D M. 2017. Flash propagation and inferred charge structure relative to radar-observed ice alignment signatures in a small Florida mesoscale convective system. *Geophysical Research Letters*, 44(15): 8027-8036 [DOI: 10.1002/2017GL074610]
- Böing S J, Jonker H J, Siebesma A P, and Grabowski W W. 2012. Influence of the subcloud layer on the development of a deep convective ensemble. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(9): 2682 - 2698[DOI: 10.1175/JAS-D-11-0317.1].
- Chasteen M B, Koch S E and Parsons D B. 2019. Multiscale Processes Enabling the Longevity and Daytime Persistence of a Nocturnal Mesoscale Convective System. *Monthly Weather Review*, 147(2): 733-761 [DOI: 10.1175/MWR-D-18-0233.1]
- Cintineo J L, Pavolonis M J, Sieglaff J M and Heidinger A K. 2013.

- Evolution of severe and nonsevere convection inferred from GOES-derived cloud properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9): 2009 – 2023 [DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0330.1]
- Clavner M, Cotton W R, van den Heever S C, Saleeby S M and Pierce J R. 2018. The response of a simulated mesoscale convective system to increased aerosol pollution: Part I: Precipitation intensity, distribution, and efficiency. *Atmospheric Research*, 199: 193-208 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.08.010]
- Crosier J, Bower K, Choulaton T, Westbrook C D, Connolly P J, Cui Z Q, Crawford I P, Capes G L, Coe H, Dorsey J R, Williams P I, Illingworth A J, Gallagher M W and Blyth A M. 2011. Observations of ice multiplication in a weakly convective cell embedded in supercooled mid-level stratus. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(1): 257 – 273 [DOI: 10.5194/acp-11-257-2011]
- Fiolleau T and Roca R. 2013. An algorithm for the detection and tracking of tropical mesoscale convective systems using infrared images from geostationary satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(7): 4302 – 4315 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2227762]
- Gentile S, Ferretti R and Marzano F S. 2014. Investigating Hector Convective Development and Microphysical Structure Using High-Resolution Model Simulations, Ground-Based Radar Data, and TRMM Satellite Data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(4): 1353 – 1370 [DOI: 10.1175/JAS-D-13-0107.1]
- Han L, Fu S, Zhao L, Zheng Y G, Wang H Q and Lin Y J. 2009. 3D convective storm identification, tracking, and forecasting—An enhanced TITAN algorithm. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 26(4): 719 – 732 [DOI: 10.1175/2008JTECHA1084.1]
- Huang Y, Liu H J, Zhai J and Feng Y. 2014. FY-2E Convective cloud detection method based on multi-thresholds. *Remote Sensing Technology and Application*, 29(06):915-922 (黄勇, 刘慧娟, 翟菁, 冯妍. 2014. 基于多阈值的FY2E对流云识别方法. 遥感技术与应用, 29(06): 915-922) [DOI: 10.11873/j.issn. 1004-0323. 2014.6.0915]
- Lv Q Y. 2017. Satellite detection of multi-layered clouds and associated radiative effects. Lanzhou: Lanzhou University (吕巧谊. 2017. 多层云的卫星检测及其辐射效应. 兰州: 兰州大学)
- Météo F. 2013. Algorithm Theoretical Basis Document for “Rapid Development Thunderstorms” (RDT-PGE11 v3.0). SAF/NWC/CDOP2/MFT/SCI/ATBD/11; Nowcasting Satellite Application Facility: Madrid, Spain.
- Najman L and Talbot H. 2013. *Mathematical Morphology: From Theory to Applications*. New York: John Wiley & Sons.
- Novo S, Martinez D and Puentes O. 2014. Tracking, analysis, and nowcasting of Cuban convective cells as seen by radar. *Meteorological Applications*, 21(3): 585 – 595 [DOI: 10.1002/met.1380]
- Protat A, Rauniyar S, Kumar V and Strapp J W. 2014. Optimizing the probability of flying in high ice water content conditions in the tropics using a regional-scale climatology of convective cell properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(11): 2438 – 2456 [DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0002.1]
- Serra J and Soille P. 1994. *Mathematical morphology and its applications to image processing*. New York: Springer.
- Shukla B P and Pal P K. 2012. A source apportionment approach to study the evolution of convective cells: An application to the nowcasting of convective weather systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(1): 242 – 247 [DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2170661]
- Thomas C, Corpetti T and Mémin E. 2010. Data assimilation for convective-cell tracking on meteorological image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(8): 3162 – 3177 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2045504]
- Wang B Y, Qin D Y and Liu C C. 2015. Detection of rapidly developing convection using FY-2F satellite data. *Journal of Remote Sensing*, 19(5):836-843 (汪柏阳, 覃丹宇, 刘传才. 2015. 利用FY-2F数据检测快速发展对流. 遥感学报, 19(05):836-843) [DOI: 10.11834/jrs.20154218]
- Zhang C G, Zhou L Z and Lin B Q. 2017. Identification and tracking of convective cloud clusters based on satellite and radar data. *Meteorological science and technology*, 45(3):485-491.(张春桂, 周乐照, 林炳青. 2017. 基于卫星和雷达资料的对流云团识别跟踪. 气象科技, 45(03): 485-491) [DOI: 10.19517/j. 1671-6345. 20160313]
- Zhao W H and Shan H B. 2018. Study of convective cloud identification based on H₂O/IRW observation. *Meteorological Monthly*, 44(06): 814-824(赵文化, 单海滨. 2018. 基于红外窗区与水汽通道对流云团识别方法研究. 气象, 44(06):814-824) [DOI: 10. 7519/j.issn.1000-0526.2018.06.009]

Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2

LIU Jia^{1,2}, LUO Xiangyang²

1. School of Information Technology, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China;

2. Zhengzhou Information Science and Technology Institute, State Key Laboratory of Mathematical Engineering and Advanced Computing, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Mesoscale Convective System (MCS) is the main reason of formation strong convective weather. Therefore, it is quite necessary for us to study the evolution and characteristic of MCS. Adjacent convective cells cannot be well distinguished is the main problem in convective cell detection. To address this issue, a new method is proposed based on H-maxima transform using infrared and water vapor channel data from FY-2F meteorological satellite.

Firstly, Pixels with bright temperature greater than 241K (Baseline threshold of convection system) were removed and normalized to [0, 1]. Secondly, H-maxima transform technology was used to extract seed points of convective cells, and a new criterion for connected domain was designed to cluster adjacent seed points and mark them in order. Finally, a new merging method was developed to make the seed points grow or merge with adjacent seed points.

Experimental results on satellite images from infrared channel and water vapor channel show that the proposed HTC method efficient and accurate, including initial, mature and dissipation stages of Mesoscale Convective Systems lifecycle. This study showed that the proposed method has a considerable application prospect for detecting convective cells in the field of meteorology. In addition, the proposed method is not only suitable for detecting single convective cells, but also capable of multiple convective cells detection.

Key words: remote sensing, convective cell, convective core, H-maxima transform, clustering, FY-2, seed point

Supported by Project of Ministry of Industry and Information Technology of China (No. E0310/1112/02-1); Science and Technology Department of Henan Province (No. 202102210158); Key Scientific Research Project of Colleges and Universities of Henan Province(No. 18B520032, 20B520028)