

静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究

曹广真 张鹏 胡秀清 陈林

(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 为了综合应用静止气象卫星与极轨气象卫星沙尘监测的结果, 更好地进行沙尘信息的判识, 采用改进的证据理论方法, 进行静止卫星FY-2D/2E红外差值沙尘指数 (infrared difference dust index, IDDI) 产品与极轨气象卫星FY-3A沙尘强度指数 (dust strength index, DSI) 沙尘监测产品的融合处理, 划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区及可能沙尘暴发生区。融合结果与气象站点观测结果的对比分析表明, 本算法可以将静止气象卫星与极轨气象卫星遥感沙尘监测结果进行较好地融合, 更好地划分沙尘暴发生的区域, 对于沙尘暴过程的监测、评估和分析具有重要的参考价值 and 指导意义。

关键词: 静止气象卫星, 极轨气象卫星, 红外差值沙尘指数, 沙尘强度指数, 改进的证据理论, 数据融合

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.018

Study on the Fusion of Dust Products of Geostationary and Polar-Orbiting Meteorological Satellites Based on Improved Evidence Theory Algorithm

Cao Guangzhen, Zhang Peng, Hu Xiuqing, Chen Lin

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The objective of this study was to integrate the advantages of multi-source remote sensing to monitor dust storms and better discriminate between regions where dust storms occur. Firstly, The traditional evidence theory algorithm was improved by not only considering the certainty of the evidence, but also considering the average level of support for the subsets of evidence in the discrimination framework in the process of evidence combination by reducing the conflict between synthesized data. Then the algorithm is applied to the FY-2D/2E infrared difference dust index (IDDI) and the FY-3A dust strength index (DSI) to categorize the study region as either a dust storm area, non-dust storm area, or possible dust storm area. Finally, the result was validated and analyzed using the monitored data from ground stations. Both the accuracy and reliability of the dust monitoring results were considerably improved using our method.

Keywords: geostationary meteorological satellite, polar-orbit meteorological satellite, infrared difference dust index, dust strength index, improved evidence theory algorithm, data fusion

0 引言

沙尘天气是我国西北和华北北部地区经常出现的强灾害性天气。准确监测沙尘强度, 分析沙尘天气的时空分布特征, 对于区域生态环境具有十分重要的意义。

传统的沙尘监测方法主要是通过设立地面监测站点进行的, 其优点在于可以实时实地进行连续观测, 缺点在于其受到人力、物力、财力和技术的限制, 很难进行大规模布点, 无法实现大范围系统性沙尘暴发

生、移动和沉降的监测。随着遥感技术的不断发展, 不同平台、不同空间分辨率、不同时间分辨率和不同谱段特征的传感器陆续升空, 卫星遥感技术克服了传统监测方法中的缺点和不足, 已成为沙尘区域分布和沙尘强度监测的重要技术手段。

红外差值沙尘指数 (infrared difference dust index, IDDI) 是目前国内外静止卫星沙尘暴业务产品生成广泛采用的参数之一, 其数值是卫星观测到的实时目标亮温与地表背景亮温之差, 其中地表背景亮温是同时刻晴空大气的地表亮温。IDDI值越大, 代表空气中的沙尘越多, IDDI越小, 代表空气中的沙尘越少。欧洲科学家将其用于Meteosat长时间序列资料的处理, 并将结果用于沙漠气候的相关分析^[1-2]。

收稿日期: 2015年9月3日; 修回日期: 2015年12月20日
通信作者: 曹广真 (1976—), Email: caogz@cma.gov.cn
资助信息: 北京市科技新星项目 (2010B037); 国家自然科学基金 (41475031)

我国从20世纪90年代开始发展沙尘暴卫星遥感方法。郑新江等^[3-4]在90年代主要利用极轨气象卫星NOAA/AVHRR的多通道数据进行沙尘目标判识，同时还开展了卫星遥感沙尘光学厚度和载沙量初步研究。胡秀清等^[5]自2001年着手开展用静止气象卫星进行自动沙尘暴监测研究，并于2006年重点引入IDDI参数，开发了一套静止气象卫星沙尘暴自动监测业务算法，应用于GMS-5、GOES-9、我国风云二号静止气象卫星等遥感资料。张鹏等^[6-7]以米散射理论为基础，利用MODIS的8.5 μm 、11 μm 和12 μm 通道红外观测，开发了一套MODIS沙尘暴定量遥感算法，除提供沙尘检测产品外，还获取沙尘气溶胶光学厚度产品、沙尘粒子有效半径产品和沙尘总量产品。随着新一代极轨气象卫星FY-3A/3B/3C的发射，我国沙尘定量产品的开发也得到发展，如已经业务运行的VIRR沙尘强度指数（dust strength index, DSI）产品，以及探索开发的沙尘高度产品等。另外，一些新的技术和方法，也不断被探索应用到遥感沙尘信息的反演和应用上^[8-10]。

但是，遥感技术进行沙尘监测同样具有局限性。由于成像原理不同和技术条件的限制，任何单一的遥感手段获取的数据在几何、光谱和空间分辨率等方面存在明显的局限性和差异性，不能够全面反映沙尘目标物的特征，应用范围有限。通过建立有效的多源信息融合方法，进行多源遥感沙尘信息的融合，实现遥感观测彼此之间的优势互补，全面监测并分析沙尘过程，将有助于对沙尘形成机理的科学认识，更好地科学指导沙尘天气的防治、城市生态环境建设等工作。为了从多源遥感沙尘监测结果中判断有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区以及可能沙尘暴发生区，开展彼此之间的融合处理十分必要。本文采用改进的证据理论方法，进行静止卫星FY-2D/FY-2E IDDI沙尘监测产品与极轨气象卫星FY-3A DSI产品的融合处理，划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区及可能沙尘暴发生区。

1 数据源及其特征

FY-2D IDDI产品：基于FY-2D L1级数据所开发的沙尘监测产品，时间频次1h，逢半点生成。空间分辨率5km。

FY-2E IDDI产品：基于FY-2E L1级数据所开发的沙尘监测产品，时间频次1h，逢整点生成。空间分辨率5km。

FY-3A DSI产品：基于FY-3A L1级数据所开发的沙尘强度监测产品，时间频次1次/d，生成时间视卫星过境时间而定，对于北京及周围地区一般是地方时上

午10:30左右。空间分辨率1km。

2 融合方法

2.1 证据理论

证据理论，又称Dempster-Shafer (D-S) 理论^[11]，是一种处理不确定性信息的理论。在D-S证据理论中，首先将待识别对象所有可能类型的集合所构成的空间定义为识别框架 Θ ， Θ 中所有子集组成的集合 2^Θ 中任何假设集合A的基本概率赋值函数BPAF为 $m(A)$ ，信任函数Bel(A)和似然函数Pls(A)表示问题的不确定性。

虽然D-S理论提供了相关证据的合成方法，能融合多个证据源提供的证据，但其合成公式存在不足，尤其是证据之间存在冲突时，合成结果有可能违背常理，已经有不少工作从不同角度对其进行了改进^[12-14]。本文采用综合考虑证据本身的确信度和证据对辨别框架中子集的平均支持度两个方面进行证据间的加权合成，对传统的证据理论进行了改进，降低了证据合成过程中证据之间的冲突，我们曾将该方法较好用于多时相微波遥感图像地表变化检测^[14]，主要步骤如下：

1) 通过证据 m_j 的不确定熵 $E(Am_j)$ 计算其确信度 $C(Am_j)$ ：

$$C(m_j) = \alpha \cdot e^{-E(m_j)} \quad (1)$$

其中， $E(m_j) = -\sum_i S(B_i) \ln S(B_i)$ ， $S(B_i) = \sum_{A_i \cap B_i \neq \phi} \frac{m_j(A_i)}{J(A_i)}$ ， $\{B_i, i=1,2,\dots,K\}$ 为 Θ 的基元， $J(A_i)$ 为焦元 A_i 中包含的基元的个数， α 为可选系数。

$C(m_j)=1$ 表示证据 m_j 的确信度为100%，包含的有用信息最多，而 $C(m_j)=0$ 则表示其确信度为0，不包含任何有用信息。

2) 利用计算所得的确信度作为权值更新证据对辨别框架 Θ 及其他焦元 A_i 的基本概率赋值，并实现基本概率赋值的归一化处理，得：

$$m(\phi) = 0 \quad (2)$$

$$m'_j(A_i) = m_j(A_i) \cdot C(m_j) \quad (3)$$

$$m'_j(\Theta) = m_j(\Theta) \cdot C(m_j) + (1 - C(m_j)) \quad (4)$$

3) 利用以上更新后的基本概率赋值，修改证据组合规则：

$$m(A) = \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m'_j(A_i) + K' \cdot m''_j(A), \quad A \neq \phi, \Theta \quad (5)$$

$$K' = \sum_{\cap A_i = \phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m'_j(A_i) \quad (6)$$

$$m''_j(A) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m'_j(A) \quad (7)$$

$$m(\Theta) = 1 - \sum m(A) \quad (8)$$

其中, $m_j^*(A)$ 表示各证据加权后对A的平均支持度, K' 表示各证据加权后的总冲突概率赋值, 将该值按照加权组合后的各焦元的平均支持度进行加权分配。

2.2 BPAF 的定义

将图像的所有像元作为检测对象, 定义识别框架 Θ_s :

$$\Theta_s = \{Y, N\} \quad (9)$$

其中, Y 表示有沙尘暴发生, N 表示无沙尘暴发生, 因此, 2^{Θ_s} 的非空子集包括 $\{Y\}, \{N\}, \{Y, N\}$ 。

BPAF的定义通过FY-2D/2E IDDI产品或FY-3A DSI产品定义:

$$m(\{Y\}) = (1 - e^{-\beta d})(1 - \alpha) \quad (10)$$

$$m(\{N\}) = e^{-\beta d}(1 - \alpha) \quad (11)$$

$$m(\{Y, N\}) = \alpha \quad (12)$$

其中, d 代表FY-2D/2E IDDI产品或FY-3A DSI, a 取为最大IDDI值或DSI值的倒数, 因为IDDI值或DSI数值越大, 沙尘暴发生与否判决的不确定性越小, $\alpha = 1 / \max(d)$ 。

2.3 融合、判别及变化类型的检测

根据BPAF计算有沙尘暴发生及无沙尘暴发生的基本概率赋值、各证据的确信度和证据对有沙尘暴发生及无沙尘暴发生的平均支持度, 然后采用改进后的合成规则进行合并运算, 得到所有证据的BPAF, 作为进行判别的基础。在判别时, 使用的规则如下:

目标类别应具有最大的基本概率赋值;

目标类别的基本概率赋值与其他类别的基本概率赋值差值必须大于某阈值, 即表示每一证据对所有不同类的支持程度应保持足够大的差异;

不确定性概率必须小于某阈值, 即对目标类别的无知程度或证据的不确定性不能太大;

目标类别的基本概率分布值必须大于不确定性概率值, 即对某目标知道很少时, 不能对其分类。

3 实验

选择2012年4月27日发生在北京及其周边地区的一次沙尘过程, 选用时间相近的FY-3A DSI产品, 以及FY-2D和FY-2E IDDI产品, 采用改进证据理论进行三者之间的融合, 划分有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区和可能沙尘暴发生区。其中FY-3A DSI的获取时间是世界时3:50, FY-2D IDDI的获取时间是世界时3:30, FY-2E IDDI是世界时3:00。

图1和图2分别显示了FY-2D和FY-2E的IDDI产品, IDDI的数值变化范围分别为0~30、0~50, 其数值的大小反映了空气中沙尘的多少。IDDI大于0的区域, 被认为是有沙尘暴发生区, 否则为无沙尘暴发生区。图3显示了FY-3A DSI产品, DSI的数值变化范围为0~64, 其数值大小反映沙尘强度的强弱。DSI大于0的区域, 被认为是有沙尘暴发生区, 否则为无沙尘暴发生区。对比图1、图2和图3可以看出, 虽然时间间隔不长, 但不同卫星平台监测的有、无沙尘暴发生的区域却有较大差别。图4显示了采用改进的证据理论方法对图1—图3的沙尘信息产品进行融合处理所得的沙尘暴发生区划分结果, 除了有沙尘暴发生区和无沙尘暴发生区, 还划分了可能沙尘暴发生区。

为了检验和分析所划分的沙尘暴发生区的准确性, 根据“现在天气现象电码表”选取2012年4月27日世界时3:00的站点观测, 分别叠加在图1—图4上, 其中品红色圆点表示观测时有“尘”、“沙”的站点, 代表可能有沙尘暴发生的情况, 黑色圆点表示“观测时有沙尘暴”的站点, 代表有沙尘暴发生的情

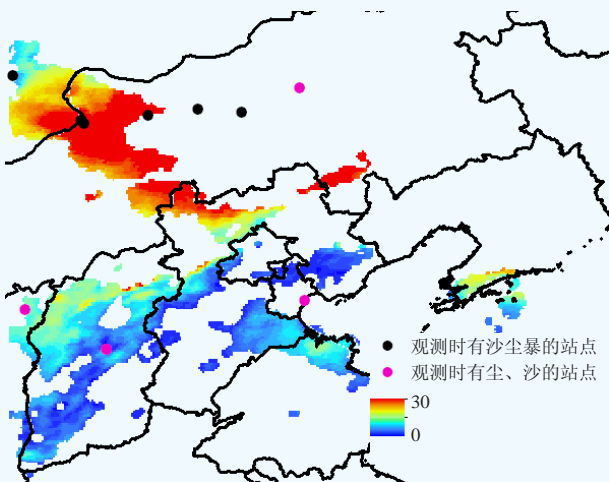


图1 FY-2D IDDI产品 (世界时3:30)
Fig. 1 FY-2D IDDI (UTC3:30)

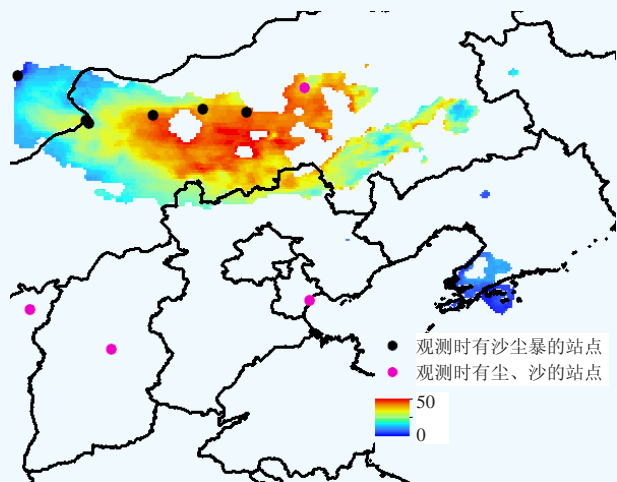


图2 FY-2E IDDI产品 (世界时3:00)
Fig. 2 FY-2E IDDI (UTC 3:00)

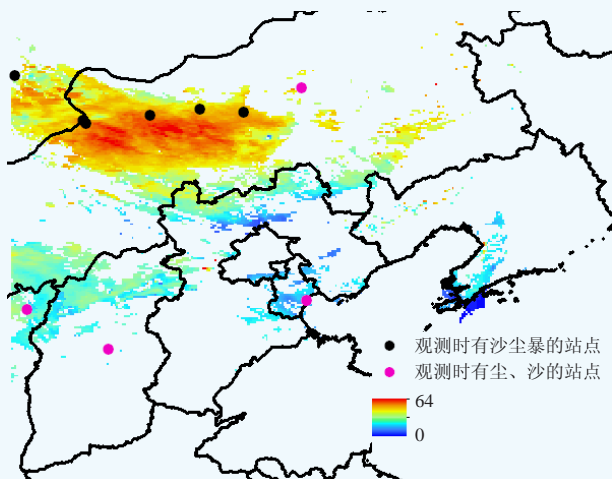


图3 FY-3A DSI产品 (世界时3:50)
Fig. 3 FY-3A DSI (UTC 3:50)

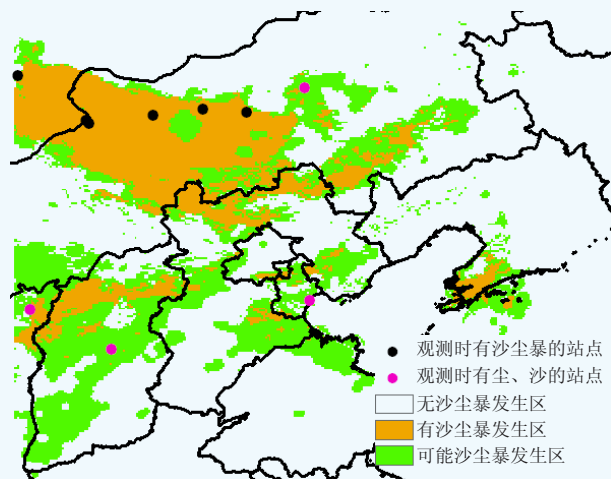


图4 FY-2D/2E/3A 融合沙尘监测产品
Fig. 4 Fusion result of FY-2D/2E/3A dust products

况。从图1 FY-2D IDDI产品与站点观测的叠加可以看出, FY-2D IDDI与品红色圆点的观测一致性较好, 但与黑色圆点的观测一致性不理想, 说明FY-2D对于可能沙尘暴发生的监测准确性较高, 但对有沙尘暴发生的监测准确性不够。而从图2 FY-2E IDDI产品与站点观测的叠加可以看出, FY-2E的IDDI与黑色圆点的观测一致性较好, 但与品红色圆点的观测一致性却不理想, 说明FY-2E对于有沙尘暴发生的监测准确性较高, 但对可能沙尘暴发生的监测准确性不高, 图3是FY-3A DSI产品与站点观测的叠加, 总体显示了与图2相似的一致性特征, 但FY-3A DSI与黑色和品红色圆点的观测一致性较高一些, 说明其不论对有沙尘暴发生, 还是对可能沙尘暴发生的监测准确性都较FY-2E高。而图4 FY-2D/2E/3A融合沙尘监测结果与站点观测的叠加则显示了很好的一致性, 说明融合结果对于有沙尘暴发生与可能沙尘暴发生监测的准确性与可靠性。

4 结论

采用综合考虑证据的确信度和证据对辨别框架中子集的平均支持度的改进的证据理论方法, 进行静止卫星FY-2D/FY-2E IDDI沙尘监测产品与极轨气象卫星FY-3A DSI沙尘产品的融合处理, 划分沙尘发生过程中的有沙尘暴发生区、无沙尘暴发生区和可能沙尘暴发生区。通过各监测结果与站点观测的叠加显示, 说明了融合结果对有沙尘暴发生与可能有沙尘暴发生监测的准备性与可靠性。

随着我国新一代极轨气象卫星风云三号业务化经验的积累以及新一代静止气象卫星试验星2016年按计划即将发射, 我国的沙尘暴遥感监测能力将大大提高, 监测水平将大大增强, 不仅可以提供高时间分辨

率、高空间分辨率和高光谱分辨率的真彩色或假彩色沙尘暴监测图像, 还可以通过逐渐完善的业务系统及提供定量的沙尘暴监测产品, 也将为本文方法的进一步发展、改进以及更好的应用提供丰富、科学的数据源, 以更准确地进行沙尘过程的监测。

参考文献

- [1] Legrand M, Plana-Fattori A, N'Doumé, C. Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat. 1. Infrared difference dust index. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D16):18251-18274.
- [2] Brooks N. Dust-climate interactions in the Sahel-Saharan zone of Northern Africa, with particular reference to late twentieth century Sahelian drought. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich U K, 2000.
- [3] 郑新江, 罗敬宁, 陆文杰, 等. 2000年3—4月卫星监测沙尘天气分析. *遥感信息*, 2000(2): 26-27.
- [4] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究. *遥感学报*, 2001, 5(4): 300-306.
- [5] 胡秀清, 卢乃猛, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 266-275.
- [6] Zhang P, Lu N, Hu X, et al. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels. *Global and Planetary Change*, 2006, 52: 197-206.
- [7] 张鹏, 张兴赢, 胡秀清, 等. 2006年一次沙尘活动的卫星定量遥感和分析研究. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 302-308.
- [8] 徐辉, 余涛, 顾行发, 等. 利用分裂窗通道比辐射率遥感判识沙尘气溶胶研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1189-1193.
- [9] 王玲, 李正强, 李东辉, 等. 基于遥感观测的折射指数光谱特性反演大气气溶胶中沙尘组分含量. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1644-1649.
- [10] 曹广真, 张鹏, 陈林, 等. 地面能见度观测在卫星遥感IDDI指数中的融合应用. *遥感技术与应用*, 2013, 28(4): 588-593.
- [11] Klein L A. Sensor and data fusion concepts and application (second edition). Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999.
- [12] Yager R. On the dempster shafer framework and new combination rules. *Information Sciences*, 1987, 41: 93-137.
- [13] 孙全, 叶臭清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式. *电子学报*, 2000, 8: 117-119.
- [14] Cao G Z, Hou P, Jin Y Q, et al. Fusion of features in multi-temporal SAR imagery to detect changes in urban areas. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30: 5989-6001.