

陈英英,熊守权,周毓荃,等,2017. 基于 FY-3/MERSI 卫星资料的霾判识方法研究[J]. 气象,43(11):1431-1438.

# 基于 FY-3/MERSI 卫星资料的 霾判识方法研究<sup>\*</sup>

陈英英<sup>1</sup> 熊守权<sup>1</sup> 周毓荃<sup>2</sup> 舒 斯<sup>1</sup> 何明琼<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 湖北省气象服务中心,武汉 430205

<sup>2</sup> 中国气象科学研究院,北京 100081

**提 要:** 选取 2015 年 12 月 25 日及 2016 年 1 月 18 日两次覆盖湖北的重污染天气过程,利用 FY-3A(B)/MERSI 卫星资料和气象、环境监测资料,应用图像色彩处理技术、可见光近红外通道反射率分析等技术,开展对湖北地区霾的遥感识别研究。研究表明:以不同波段进行红绿蓝三通道合成时,霾可以被识别,其中以全可见光模式合成时,霾以灰白色为主,比周围的云雾区略暗;以可见光、近红外、红外三通道合成时,霾以紫色、紫灰色为主,云类识别精细;以可见光、近红外两通道增强显示合成时,霾以紫灰色为主,与晴空地表及云区差异明显,但易将由小粒子组成的薄卷云误判为霾,需通过云顶黑体亮温进行剔除。通过建立红外亮温和可见光反射率识别指标,可将霾与晴空、厚云区分开来,但很难与低云/雾区进行有效区分,加入对有效粒子半径敏感的近红外通道反射率后,借助两者在粒子大小上的差异,可在一定程度上解决这一问题,并通过地面人工观测资料进行分析验证。

**关键词:** 风云三号卫星,霾,卫星资料,彩色云图,反射率,识别

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.012

## Study on Identification Index of Haze Spectrum by FY-3/MERSI Satellite Data

CHEN Yingying<sup>1</sup> XIONG Shouquan<sup>1</sup> ZHOU Yuquan<sup>2</sup> SHU Si<sup>1</sup> HE Mingqiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430205

<sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** Selecting two heavy pollution weather processes cover Hubei on 25 December 2015 and 18 January 2016, and using FY-3A (B)/MERSI satellite data and weather observation, environmental monitoring data, this paper carries out the study of haze remote sensing identification by digitizing the image color processing technology and technology of reflectance threshold of visible and near infrared channels in Hubei area. The results show that haze can be distinguished by the color composition of red, green and blue channels. With full visible bands, the color of haze is mainly gray-white, slightly darker than the surrounding cloud area; with visible, infrared and near infrared bands, the color of haze is mainly purple and purple grey, and the cloud class recognition is more fine; and with enhanced display of visible and near infrared bands, the color of haze is mainly purple grey, which can be distinguished from the clear sky surface and cloud area, but easy to be confused with the thin cirrus composed of small particles, so it needs to be eliminated through the blackbody brightness temperature. With the help of TBB of infrared channel and the visible reflectance index, haze can be identified from the clear sky and thick cloud area, but difficult to

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2016YFA0601700)和风云三号(02)批气象卫星地面应用系统工程应用示范系统项目(FY-3(02)-UDS-1.4.1)共同资助

2016 年 5 月 21 日收稿; 2017 年 9 月 11 日收修定稿

第一作者:陈英英,从事大气遥感与交通气象服务方面的研究. Email:brisk007@163.com

distinguish from mist. The problem can be solved by adding the reflectance of near infrared channel which is sensitive to the effective particle radius. Finally the results are verified through the observation of ground weather phenomena.

**Key words:** FY-3 satellite, haze, satellite data, color cloud image, reflectance, identification

## 引 言

近年来随着我国工业化和城市化的快速推进,霾现象日趋严重,给生态环境、交通运输和人体健康带来了很大威胁,已经成为一种新型城市气象灾害,受到人们的广泛关注。周宁芳等(2008)、胡亚旦和周自江(2009)、吴兑等(2010)分析了霾形成的天气、气候特征及中国大陆霾的时空分布,过宇飞等(2013)、齐冰等(2012)、魏文秀(2010)、翁之梅等(2016)在当地地形环境对霾的影响方面进行了研究。陈训来等(2007)、何心河等(2016)分别利用空气质量数值模式和 WRF-Chem 模式较好地模拟了珠三角地区和京津冀地区霾污染物的时空分布和变化规律。

上述对霾的研究多集中在天气背景、污染机理等方面,而针对污染的监测方面,主要有地基和卫星两大类,传统的地面定点监测方法观测精度较高但站点稀疏且不均,新型的卫星遥感技术具有覆盖范围广、标准统一和快速更新动态等定点观测无法取代的优点,在污染事件的确定、污染物源解析、污染物区域分布、污染物区域输送等方面优势明显(刘璇等,2015),是未来霾监测与综合治理的重要途径(黎刚,2007;马国欣等,2008,姜杰等,2011,卢乃锰等,2017)。

由于霾形成机理的复杂性和霾与雾的难以区分性,利用卫星遥感在霾的应用研究多体现在卫星遥感反演的气溶胶光学厚度(Wang et al,2008;王中挺等,2012;亢红霞等,2016;邓玉娇等,2016)或大气能见度(孙娟等,2006;李旭文等,2011)以及 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感反演(孙立娥等,2016;薛文博等,2015;武卫玲等,2014;李同文等,2015)等方面,也有学者利用气溶胶指数来研究紫外吸收性气溶胶的时空变化特征(宿兴涛等,2015)。但由于气溶胶光学厚度存在遥感反演复杂性和不确定性,而且不是霾判定的核心指标和标准,尚不能满足霾监测预警的业务需求。

刘勇洪(2014)利用 NOAA/AVHRR 卫星资料

采用图像色彩处理技术开展对北京地区霾的识别研究,而湖北地形复杂、河流湖泊众多,常规地面监测站空间分布更为不足,急需利用我国的风云系列卫星资料开展霾的动态监测业务,这对于湖北各城市的空气质量监测、控制、预警和治理均具有重要意义,同时可满足湖北作为中部地区交通枢纽对气象服务能力提出的要求。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

选取 2015 年 12 月 25 日和 2016 年 1 月 18 日覆盖湖北大部地区的两次较严重的污染天气过程,由国家卫星气象中心网站下载空间分辨率为 1 km 的 FY-3A(B)/MERSI 资料进行分析,每日两次,共 4 景。选取中分辨率光谱成像仪 MERSI 20 个波段中的 3 个波段进行霾的识别,分别是可见光、近红外和红外波段。由地面气象台站资料获取人工观测的地面天气现象产品,主要用于“霾”和“轻雾”的区分。

### 1.2 霾遥感识别方法

通过遥感图像处理技术,对 3 个观测波段分别赋予 RGB 三原色进行彩色合成,生成一幅彩色合成图像,通过目视解译进行霾的识别。由于图像色彩处理技术相对于复杂的光谱特征分析原理和方法更为简单,且结果直观、明显,对业务人员快速识别霾更具有实际意义(刘勇洪,2014)。

通常,霾是水平能见度 < 10 km 且空气普遍有浑浊的天气现象;而轻雾是水平能见度 1~10 km 的稀薄雾幕天气现象(吴兑,2004)。在粒子尺度上,霾与可见光波长相近,根据米氏散射理论,霾在可见光波段有较强的散射特性,因此卫星观测到的该波段的反射率要明显高于晴空反射率。而云雾的粒子尺度一般大于可见光波长,在可见光波段有很强的散射特性,使云雾较之晴空和霾,在该通道有更高的反射率。因此,根据霾的这一特性,可利用 FY-3/MERSI 卫星的可见光通道反射率来进行霾的识别。

需要注意的是,雾和霾的形成机理虽然差异很大,但有时两者在目视时难以区分,尤其是浓的雾和淡的霾,卫星观测到的可见光通道反射率十分接近。这时,第一种解决方法可以根据观测的空气湿度来辅助区别,第二种方法可以用其他通道的卫星资料来区分,由于雾粒子明显大于霾粒子,可以用对粒子尺度较为敏感的近红外通道进行判别。考虑到数据时空分辨率的一致性,本文采用第二种方法进行研究。

## 2 多光谱识别

针对 4 景 FY-3A(B)/MERSI 遥感图像,利用

图像色彩处理技术,在不同颜色通道组合与增强模式下,霾与晴空地表及云雾区的颜色存在一定的差异,可进行有效识别,采用的图像色彩处理模式有三种:MODIS 全可见光模式,可见光、红外、近红外通道组合模式,以及可见光、近红外两通道增强显示模式。

### 2.1 MODIS 全可见光模式(假彩色云图)

波段 0.65、0.55 和 0.47  $\mu\text{m}$  分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,并进行图像拉伸或增强,效果与从高空直接目视地面类似,较为直观,霾以灰色、灰白色为主,冬季晴空地表呈棕灰色,云雾区成白色,如图 1 所示。

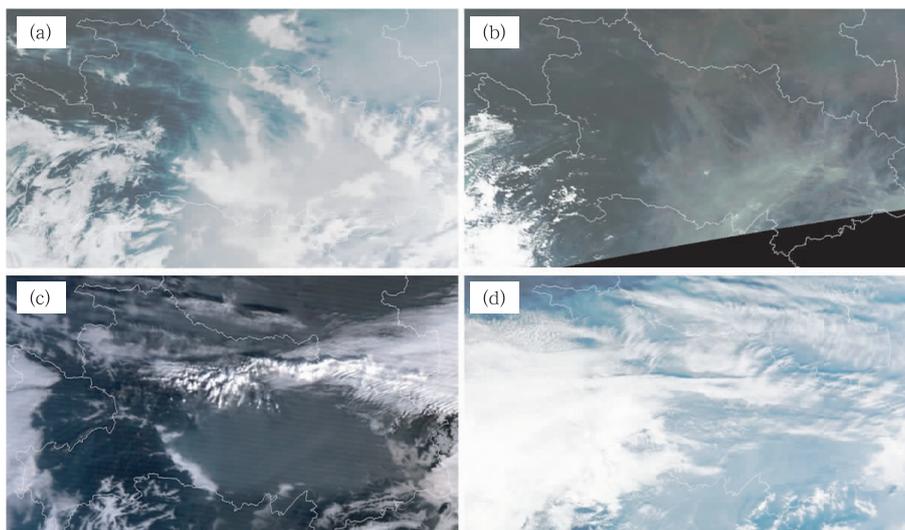


图 1 2015 年 12 月 25 日 01:50(a)和 06:30(b),2016 年 1 月 18 日 01:00(c)和 07:10(d)MODIS 全可见光模式下的 FY-3A/(B)遥感图像上霾的颜色

Fig. 1 Haze color on the FY-3A/(B) remote sensing images with full visible mode of MODIS

(a) 01:50 UTC 25 December 2015, (b) 06:30 UTC 25 December 2015, (c) 01:00 UTC 18 January 2016, (d) 07:10 UTC 18 January 2016

### 2.2 可见光、红外、近红外通道组合模式

以可见光 0.65  $\mu\text{m}$ 、近红外 1.64  $\mu\text{m}$ 、红外 11.25  $\mu\text{m}$  三个通道分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,并进行图像拉伸或增强,可综合反映消光程度、粒子大小和黑体亮度温度 3 个方面的信息。Rosenfeld and Lensky(1998)针对典型地表及各类云型的合成颜色进行定义(图 2),但由于 20 世纪 90 年代霾现象还未如此频繁,图谱中没有单独列出霾的颜色。但从理论判断,由于霾在可见光波段的散射具有比云雾低、霾顶温度较高、霾粒子较小的特性,这些特征与较薄的无降水发生

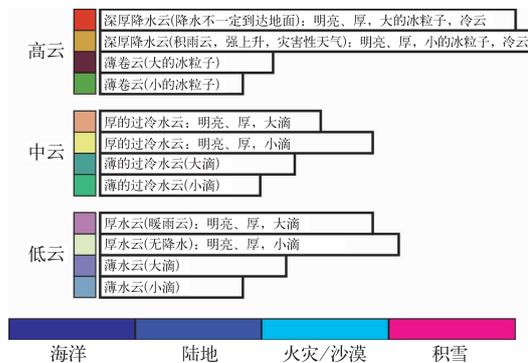


图 2 三通道组合模式下典型云类与地表的颜色图谱  
Fig. 2 Color spectrum of typical cloud and surface with three channel combination mode

粒子较小的暖云类似,合成颜色应该以紫色、紫灰色为主,这也在图 3 中得到证实。

对比图 1 和图 3 发现,图 3 中对于云区的分类识别更为精细,图 1 中均为白色的云区在图 3 中呈现乳白色、淡黄色和红棕色,分别对应为较厚的水云、较厚的过冷水云和薄卷云。

### 2.3 可见光、近红外两通道增强显示

利用波段 0.65、1.64 和 0.65  $\mu\text{m}$  分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,并进行

图像拉伸或增强,霾以紫灰色为主,如图 4 所示。可以看出,这种显示方式对霾的识别较为清晰,与云区、地表差异明显,但仅利用颜色时易将薄卷云误认为是霾,如图 4a 和 4b,这种情况可以通过先验知识来判别,霾通常是在近地面层,表面均一、质感轻薄、边界模糊,而薄卷云通常是覆盖在中低云之上,具有云的纹理特征,边界清晰。另一方面,当地面有积雪/结冰现象或在大江大河的入海口处,这种合成方式在霾的识别方面存在困难,需利用其他波段进行辅助判断。

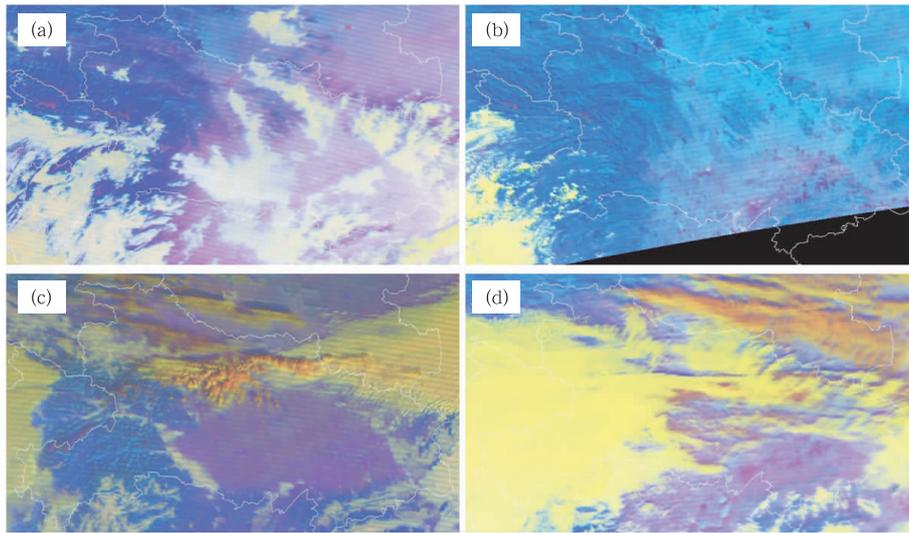


图 3 同图 1,但为三通道模式

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for three channel combination mode

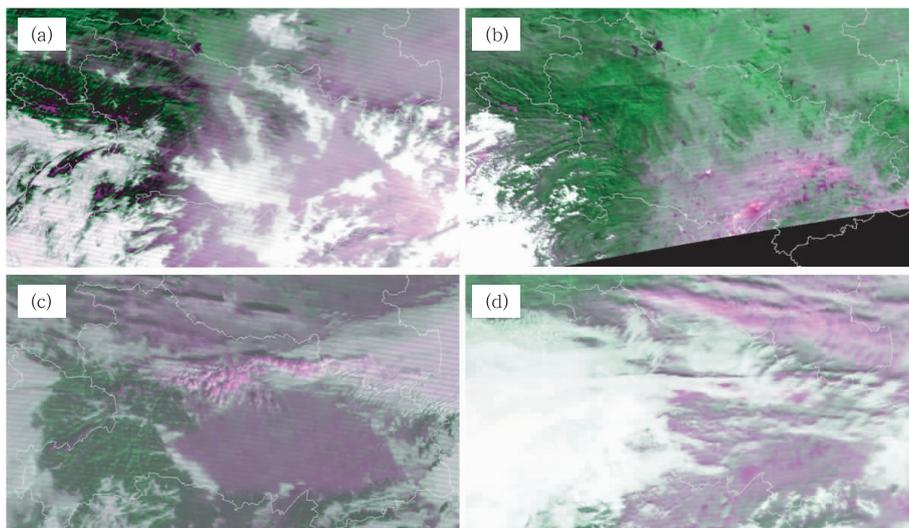


图 4 同图 1,但为两通道增强模式

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for two channel enhancement mode

### 3 定量分析

#### 3.1 霾的可见光反射率识别指标

霾在绝大多数情况下是介于晴空与低云/雾之间的一种天气现象,因此霾的光谱识别主要是区分霾与晴空和低云/雾的光谱反射率。选取 4 景遥感图像在  $28^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$  范围内所有像元的可见光通道数据,绘制其出现频数的分布图。

由于遥感图像上晴空、霾、低云/雾、中高云各自的反射率值均在一定范围内,遵循自然界大部分地物特征变化呈近似正态分布的原则,频次分布的极大值中心可认为是晴空、霾、低云/雾、中高云的通道典型值,其交界处可认为是其区分的阈值,即为识别霾的光谱指标。可以看出,图 5 对晴空、霾和低云/雾、云进行了初步的区分,图 5a 中霾和低云/雾的可见光通道反射率在  $0.12\sim 0.29$ ,图 5b 在  $0.13\sim 0.29$ ,图 5c 在  $0.12\sim 0.26$ ,图 5d 在  $0.16\sim 0.34$ 。

#### 3.2 近红外通道对霾的辅助判别

虽然可见光波段反射率可以有效地将霾与晴空地表和云水含量较多的云区分开来,但由于可见光波段对水汽变化不是很敏感,导致低云/雾和霾在可见光波段经常呈现较为一致的现象,无法被识别,需用其他波段进行辅助判别,如利用雾、霾粒子在尺度上的差异进行区分,通常低云/雾的有效粒子半径大于霾,在近红外通道表现为更小的反射率,可利用这一特点进行霾和低云/雾的划分。

选取 4 景图像中雾-霾相对集中的  $29^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$  区域作为典型区域进行雾和霾的近红外通道辅助判别,由图 6 对应时次的地面人工观测资料可以看出,图 6a 和 6c 地面天气现象基本为雾,图 6b 主要为霾,而图 6d 则为雾、霾和云区的混合。

提取 4 景图像中所有像元的可见光通道和近红外通道反射率,做双通道频次二维分布图,如图 7 所示,可以看出,地面天气主要为雾的图 7a 和 7c 图中对应频次分布最大的红色区域,其近红外通道反射

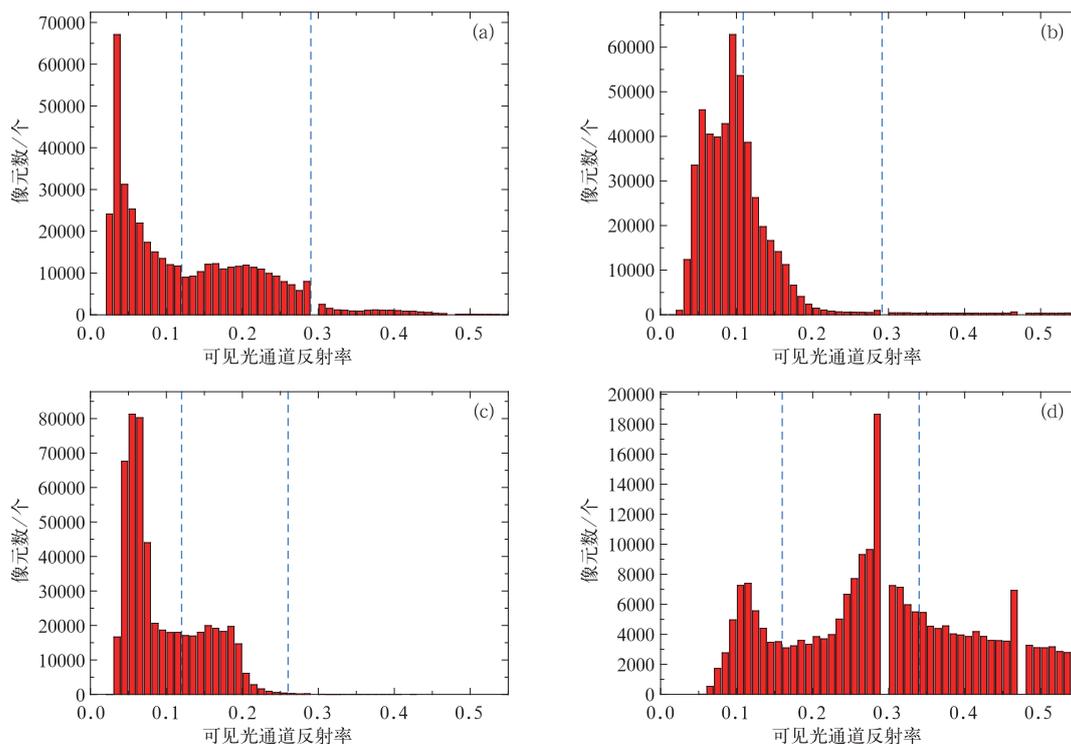


图 5 2015 年 12 月 25 日 01:50(a)和 06:30(b),2016 年 1 月 18 日 01:00(c)和 07:10(d)可见光通道反射率的频次分布

Fig. 5 Frequency distribution of reflectance of visible channel

(a) 01:50 UTC 25 December 2015, (b) 06:30 UTC 25 December 2015, (c) 01:00 UTC 18 January 2016, (d) 07:10 UTC 18 January 2016

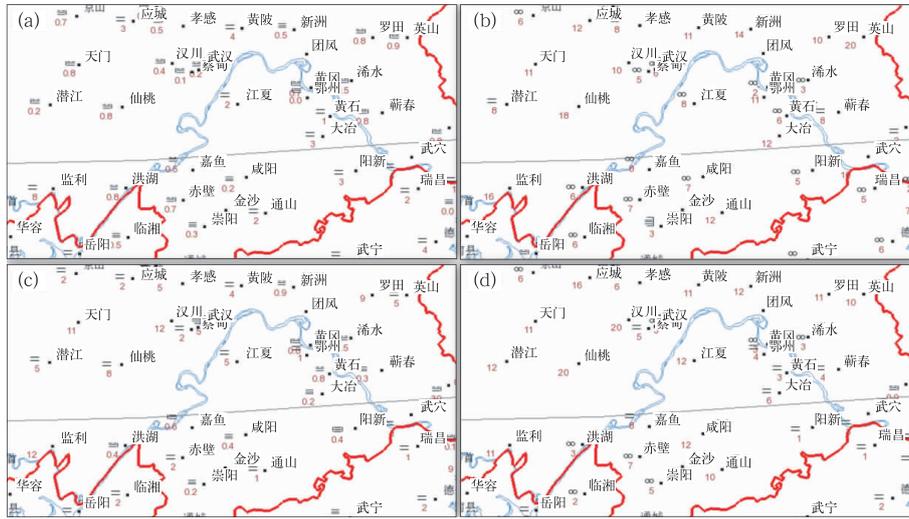


图 6 2015 年 12 月 25 日 08 时(a)和 14 时(b),2016 年 1 月 18 日 08 时(c)和 14 时(d)地面天气现象观测

Fig. 6 Observation of ground weather phenomena

(a) 08:00 BT 25 December 2015, (b) 14:00 BT 25 December 2015,  
(c) 08:00 BT 18 January 2016, (d) 14:00 BT 18 January 2016

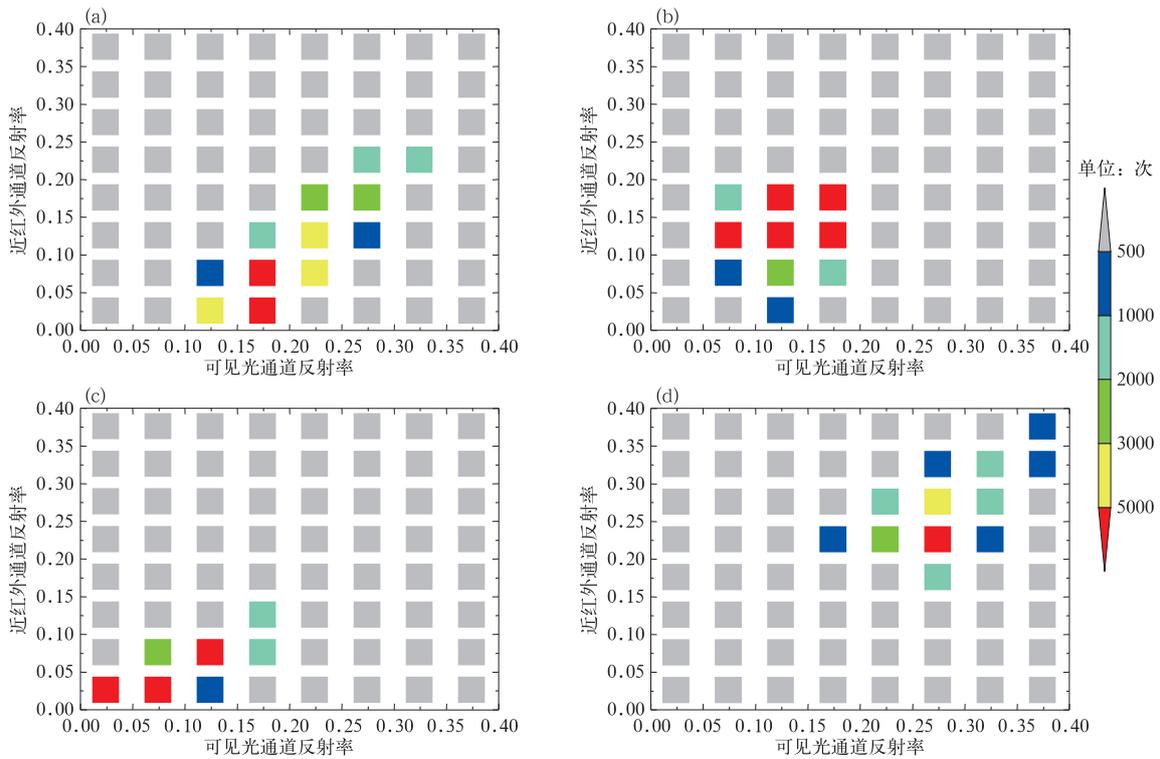


图 7 2015 年 12 月 25 日 01:50(a)和 06:30(b),2016 年 1 月 18 日 01:00(c)和 07:10(d)双通道反射率的频次分布

Fig. 7 Frequency distribution of reflectance of visible and near infrared channel

(a) 01:50 UTC 25 December 2015, (b) 06:30 UTC 25 December 2015,  
(c) 01:00 UTC 18 January 2016, (d) 07:10 UTC 18 January 2016

率均在 0~0.1,可见光通道反射率由于受太阳天顶角大小的影响,图 7a 在 0.15~0.2,而图 7c 在 0~0.15。而地面天气主要为霾的 7b 图中,近红外通道反射率在 0.1~0.2,明显高于图 7a 和 7c 雾区,初步证实由于霾/雾粒子大小的差异,可通过对粒子大小比较敏感的近红外通道反射率进行识别。图 7d 由于在霾区中混合了雾和云,使得双通道反射率都明显增大。

### 3.3 霾的卫星识别指标及初步检验

根据上述分析,可初步设定卫星多通道观测阈值用于霾区的识别,考虑到四季植被覆盖的不同,地表反射率有明显差异,在此仅提出冬季湖北省霾的卫星遥感识别指标,如表 1 所示。

表 1 冬季湖北省利用 FY-3/MERSI 卫星监测的霾光谱识别指标

Table 1 Identification index of haze spectrum by FY-3/MERSI satellite data in the winter of Hubei

	红外通道	可见光通道	近红外通道
冬季	>263.15 K	0.2~0.8	0.16~0.6

红外通道大于 263.15 K 用于区分中、高云,可见光通道的下限值 0.2 用于区分晴空,其上限值 0.8 用于区分较厚的低云,近红外通道则用于区分较薄的低云和雾。考虑到不同时刻太阳天顶角对反射率的影响,这里的可见光和近红外通道反射率指标均取经太阳天顶角订正后的反射率。为检验上述三个通道的组合对于识别霾区的有效性,利用卫星过境时次的地面人工观测资料进行对比分析。

取湖北 13 市(州)12 月 25 日及 1 月 18 日 08 和 14 时的地面人工观测资料检验卫星对霾的辨识结果,在 52 次观测中记录为雾的有 26 次、霾 13 次,其余 13 次没有监测到云的发展或没有观测。经检验,在 13 次记录为霾的过程中,除了 4 次有云覆盖外,其余 7 次通过上述指标识别。

为进一步检验上述指标的有效性和代表性,选取 2016 年 1—2 月、11—12 月(认为是冬季)华北出现较大范围重度污染的 19 天为例,提取北京及河北 25 个国家站的地面人工观测资料为样本进行分析,考虑到华北地区与湖北在地表植被特性方面的差异,经数据分析,将表 1 霾光谱识别的可见光通道反射率阈值范围调整为 0.15~0.8,另外两通道不变。结果显示,在近千余次观测记录中,天气现象为霾的记录有 343 次,除去有云覆盖的 96 次外,其余 247

次中有 210 次通过上述指标识别,识别率在 85%左右。

但同时也看到,上述卫星判别指标会将部分雾区或晴空区误识别为霾。分析可能的原因,一方面由于轻雾和霾经常同时出现,当两者同时存在时,雾滴略重处于下层,相对较轻的霾处于上层,而对粒子大小的近红外通道反射率反映的是云顶附近的信息,因此多判定为霾;另一方面,受地表反射率等因素的影响,可能造成阈值附近像元的误判,造成与晴空区有所交叉。还有一个可能的因素是,卫星过境时间与地面整点观测时间不完全吻合,最多存在 30 min 的偏差,当地面雾、霾、晴空小面积交错分布时,由于时间偏差带来位置上的偏移,从而造成误判,这在早晨 FY-3A 卫星资料与地面观测的对比中较为明显,使得 FY-3A 霾光谱识别指标检验相符率为 80%左右,而中午前后雾大多已消散,霾区均一面稳定、覆盖范围较广,因此上述样本中利用 FY-3B 资料对霾的光谱识别率可达到近 90%。

总之,在对晴空、厚云区已经剔除的基础上,近红外通道可在一定程度上区分霾和低云/雾。但在霾区上层有云覆盖,或地表有积雪覆盖等情况下,则无法通过上述方法识别霾区。

## 4 结论与讨论

本文通过对发生在湖北的两次重污染天气过程的 FY-3A(B)/MERSI 遥感图像和地面观测资料的对比分析,利用图像色彩处理技术和三通道识别指标,对湖北霾的遥感识别进行了初步研究,主要结论如下:

(1) 以可见光、近红外、红外三通道合成时,霾以紫色、紫灰色为主,并且在云类的识别上更为精细;以可见光、近红外两通道增强显示合成时,霾以紫灰色为主,晴空地表呈绿色、云区呈白色,色彩差异明显,但易将由小粒子组成的薄卷云误判为霾,需通过云顶黑体亮温进行剔除。

(2) 通过建立红外亮温和可见光通道反射率识别指标,可将霾与晴空、厚云区分开来,但很难与低云/雾区进行有效区分,加入对有效粒子半径敏感的近红外通道反射率阈值后,借助两者在粒子大小上的差异,可在一定程度上解决这一问题,并通过地面人工观测资料进行对比验证。

(3) 在利用可见光通道做为霾的识别指标时,

要考虑不同季节、不同时刻、不同地域所带来的太阳天顶角和晴空地表反射率对可见光通道反射率的影响。

(4) 本文中的一些初步结论仅利用 4 景图像分析获取, 还需要更多图像的参与检验。但这些初步研究确认了我国的风云三号气象卫星资料在霾大面积、全天候监测的可行性, 对推动气象业务中霾的实时监测及服务具有重要作用。

## 参考文献

- 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等, 2007. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 46(4): 103-107.
- 邓玉娇, 胡猛, 林楚勇, 等, 2016. 基于 FY3A/MERSI 资料分析广东省气溶胶光学厚度分布[J]. 气象, 42(1): 61-66.
- 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等, 2013. 无锡市霾天气特征及影响因素研究[J]. 气象, 39(10): 1314-1324.
- 何心河, 马建中, 徐敬, 等, 2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 PM<sub>2.5</sub> 污染过程的数值模拟[J]. 气象, 42(7): 827-837.
- 胡亚旦, 周自江, 2009. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 35(7): 73-78.
- 姜杰, 查勇, 袁杰, 等, 2011. 遥感技术在灰霾监测中的应用综述[J]. 环境监测管理与技术, 23(2): 15-18.
- 亢红霞, 那晓东, 臧淑英, 2016. 基于卫星遥感数据(AOD)估算 PM<sub>2.5</sub> 的研究进展[J]. 环境科学与管理, 41(2): 30-34.
- 黎刚, 2007. 环境遥感监测技术进展[J]. 环境监测管理与技术, 19(1): 8-11.
- 李同文, 孙越乔, 杨晨雪, 等, 2015. 融合卫星遥感与地面测站的区域 PM<sub>2.5</sub> 反演[J]. 测绘地理信息, 40(3): 6-9.
- 李旭文, 牛志春, 王经顺, 等, 2011. 遥感影像反演区域能见度及其与地面空气质量监测数据一致性研究[J]. 环境监测管理与技术, 23(1): 20-27.
- 刘勇洪, 2014. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的北京地区霾识别研究[J]. 气象, 40(5): 619-627.
- 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等, 2015. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析——以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例[J]. 中国环境科学, 35(3): 641-651.
- 卢乃锰, 方翔, 刘健, 等, 2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象, 43(3): 257-267.
- 马国欣, 薛永祺, 李高丰, 2008. 珠江三角洲地区的灰霾监控与卫星遥感[J]. 科技导报, 26(16): 72-76.
- 齐冰, 刘寿东, 杜荣光, 等, 2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象, 38(10): 1225-1231.
- 宿兴涛, 许丽人, 张志标, 等, 2015. 基于卫星观测的我国北方地区紫外吸收性气溶胶的时空分布研究[J]. 气候与环境研究, 20(1): 11-20.
- 孙娟, 束炯, 鲁小琴, 等, 2006. MODIS 遥感气溶胶光学厚度产品在地面能见距中的应用[J]. 环境科学与管理, 31(5): 97-101.
- 孙立娥, 崔文连, 王艳玲, 等, 2016. 基于环境一号卫星的 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感反演研究[J]. 中国环境监测, 32(3): 129-134.
- 王中挺, 厉青, 李莘莘, 等, 2012. 基于环境一号卫星的霾监测应用[J]. 光谱学与光谱分析, 32(3): 775-780.
- 魏文秀, 2010. 河北省霾时空分布特征分析[J]. 气象, 36(3): 77-82.
- 翁之梅, 李丽平, 杨万裕, 等, 2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征[J]. 气象, 42(2): 183-191.
- 吴兑, 2004. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议[J]. 广东气象, (4): 1-4.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等, 2010. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 68(5): 680-688.
- 武卫玲, 薛文博, 付飞, 等, 2014. 近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度卫星反演研究进展[J]. 环境与可持续发展, 39(5): 94-96.
- 薛文博, 武卫玲, 付飞, 等, 2015. 中国 2013 年 1 月 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程卫星反演研究[J]. 环境科学, 36(3): 794-800.
- 周宁芳, 李峰, 饶晓琴, 等, 2008. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象, 34(6): 81-88.
- Rosenfeld D, Lensky IM, 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds[J]. Bull Am Meteor Soc, 79(11): 2457-2476.
- Wang Dehui, Xia Lihua, Kuang Yaoqiu, 2008. A case study on monitoring haze in Pearl River Delta by MODIS[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai: IEEE: 3949-3951.