

刘勇洪. 2014. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的北京地区霾识别研究. 气象, 40(5): 619-627.

基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的 北京地区霾识别研究^{*1}

刘勇洪

北京市气候中心, 北京 100089

提 要: 利用 2008—2013 年 NOAA/AVHRR1B 卫星资料和气象观测资料, 应用米氏散射理论、图像色彩处理技术、频数分布图和可见光通道表观反射率阈值技术, 开展了北京地区霾的遥感识别研究, 并在京津冀地区进行了应用。研究表明: 易于识别的霾在 NOAA/AVHRR 遥感图像上一般以 1、2、1 波段或 4、2、1 波段进行红、绿、蓝三通道假彩色合成, 图像颜色以灰色、紫色和蓝色三大系列为主; 一般仅靠遥感图像难以识别霾与轻雾, 但借助先验知识、周围环境和图像色彩, 可在一定程度上区分霾与轻雾; NOAA/AVHRR 图像的第一波段表观反射率作为光谱指标可以对霾进行较好识别, 反射率识别指标值分别为: 冬季 0.15~0.32, 春季 0.15~0.30, 夏季 0.14~0.30, 秋季 0.14~0.32; 指标对霾的有效识别准确率为 82%。利用上述建立的颜色指标和光谱指标可以较好地 2013 年 1—3 月发生在京津冀地区的雾霾进行有效监测。

关键词: 霾, 米氏散射理论, 图像色彩, 表观反射率, NOAA/AVHRR, 识别指标

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.013

Research on Haze Identification in Beijing Based on NOAA/AVHRR Satellite Data

LIU Yonghong

Beijing Municipal Climate Centre, Beijing 100089

Abstract: Using 2008—2013 NOAA/AVHRR 1B satellite data and weather observation data, preliminary research of haze identification is carried out by digitizing image color processing technology, frequency distribution figure of apparent reflectance and technology of apparent reflectance threshold of visible light channel. And the distinguish indices were applied in haze monitoring of Beijing and surrounding area. The results show that haze is easily distinguished by the color composition of red, green and blue channels with NOAA/AVHRR bands 1, 2, 1 or bands 4, 2, 1 pattern and the colors of remote sensing images are mainly grey, purple and blue. Generally, it is difficult to distinguish haze from mist only by remote sensing images, but with the help of prior knowledge, surrounding environment information and image color, haze can be identified. Apparent reflectance of the first channel of NOAA/AVHRR 1B can be used as spectral index of haze identification. The apparent reflectance values for haze identification in winter, spring, summer, autumn are 0.15—0.32, 0.15—0.30, 0.14—0.30, 0.14—0.32, respectively. And the verification analysis shows that accuracy of haze identification using these spectral indices is 82%. The color indices and reflectance indices are effectively applied in haze monitoring over Beijing and surrounding area from January to March 2013.

Key words: haze, Mie scattering theory, image color, apparent reflectance, NOAA/AVHRR, identification index

* 北京市气象局科技研发专项(2012BMBKYZX07)和北京市气象局“城市边界层观测分析与精细模式”创新团队共同资助
2013 年 1 月 18 日收稿; 2013 年 11 月 21 日收修定稿
第一作者: 刘勇洪, 主要从事生态环境遥感与农业气象. Email: lyh7414@163.com

引 言

霾是大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10.0 km 的空气普遍混浊现象,它的形成是污染因素和气象条件共同作用的结果。自 20 世纪 90 年代污染性尘霾——亚洲棕色云发现以来(Sisler et al, 1994),霾问题引起国内外广泛关注。美国保护能见度联合监测网络最早开展霾天气相关研究,建立了各种污染物成分和霾指数之间的关系,并据此制定了改善措施及法规等(Watson et al, 2002)。Chan 等(1999)也开展了澳大利亚 Brisbane 地区霾的相关成分与消光之间的关系研究。近年来在我国高速城市化的背景下,霾现象日趋严重,已经成为一种新型城市气象灾害,堪与北方沙尘暴相比(吴兑, 2006)。白志鹏等(2006)阐述了霾引起能见度下降的原因和机理,指出要把霾作为一个环境问题进行研究。过宇飞等(2013)、齐冰等(2012)、魏文秀(2010)研究指出霾不仅与天气形势和工业污染有关,而且与地形环境有直接关系。吴兑等(2006; 2007)在开展珠三角地区霾天气的成因分析中指出细粒子污染是霾形成的本质原因。陈训来等(2007)利用空气质量数值模式较好地模拟了珠三角地区霾污染物的时空分布和变化规律,古金霞等(2010)则从影响霾的主要因子构建了天津市霾评价的等级指标体系,殷永文等(2011)建立了霾天气下 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 与呼吸疾病发病率的关系。

上述对霾的研究多集中在天气成因、污染机理和人体健康等方面,对霾的监测方法研究较少。现有的霾监测方法主要采用传统的地面定点监测方法,而卫星遥感技术具有覆盖范围广、快速、动态等定点观测无法取代的优点,能够获得大尺度、长时间序列的大气污染物时空分布特征和变化趋势,将成为未来霾监测与治理的重要手段之一而发挥着不可替代的作用(黎刚, 2007; 马国欣等, 2008)。张兴赢等(2007)在我国如何利用卫星遥感技术开展大气成分研究问题上提出了研究思路和未来科研工作方向,姜杰等(2011)总结了霾遥感监测的基本原理和方法,并指出大尺度、长时间序列的遥感监测污染数据及全球性的大气环境综合遥感数据,是霾监测与综合治理的重要途径。但由于霾形成机理的复杂性和霾与雾的难以区分性,卫星遥感在霾的应用当前仍处于起步阶段,而且对霾的研究多间接体现在卫

星遥感反演的气溶胶光学厚度或大气能见度方面。孙娟等(2006)利用 MODIS 卫星反演的气溶胶产品开展了与霾直接相关的大气能见度的研究; Wang 等(2008)对珠三角地区霾的研究显示可以利用 MODIS 数据反演的光学厚度对霾进行有效监测; 李旭文等(2011)利用 Landsat-ETM 影像反演的大气能见度来反映地面空气质量,以便为霾的监测预警提供依据; 王中挺等(2012 年)研究指出利用环境一号卫星反演的气溶胶光学厚度可以有效监测霾污染强度。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。由于国内气象部门有 20 年以上的长时间序列 NOAA/AVHRR 卫星资料,且至今仍是国内重要的日常业务卫星数据源,因此发展基于 NOAA/AVHRR 卫星的霾遥感识别指标对城市空气质量监测与气候变化研究业务均具有重要意义。北京是一个近 2000 万人口的特大城市,是我国的政治文化中心和交通枢纽,雾霾已经成为影响北京城市生活质量及国际形象的重大自然威胁,也急需利用卫星资料开展北京及周边地区的霾动态监测业务,这对于北京城市的空气质量监测、控制、预警和治理均具有积极意义。

1 资料和方法

1.1 资料

由北京市气象局气候中心提供的北京地区 2008—2013 年北京地区晴空下 1 km 分辨率 NOAA/AVHRR 1B 白天卫星资料和相应的 20 个常规气象台站天气现象观测资料。其中卫星资料 60 景,其中冬季(12—2 月)24 景,春季(3—5 月)12 景,夏季(6—8 月)12 景,秋季(9—11 月)12 景。每一景 1B 数据包括 5 个波段,经过了辐射定标和太阳天顶角校正,其中第 1、2 波段分别是可见光、近红外波段表观反射率值,第 3 波段是中红外波段辐射亮温值,第 4、5 波段是热红外波段辐射亮温值。

地面气象台站观测资料主要用于“霾”和“轻雾”天气现象的确认,由此,本文利用的 60 景卫星观测资料中 52 景为至少有 1 站为“霾”记录,另外 8 景为 20 站均无“霾”且无“轻雾”记录的晴空资料,在此基础上,利用卫星观测资料开展霾的识别研究。

1.2 霾遥感识别方法

根据米氏散射(Mie Scattering)理论,霾的粒子尺度与可见光波段波长相近,因此霾在可见光波段有较强散射特性,卫星传感器接收到的该波段反射率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,使云雾在该通道上较晴空和霾有更高的亮度,即在该通道上云雾有更高反射率,而且霾对光的散射有随波长增加迅速减小的趋势(王中挺,2012)。因此根据霾的这种特性,可利用 NOAA/AVHRR 卫星的可见光通道第 1 波段表观反射率(简称 $Ref1$, $0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$)来进行霾的识别。

由于 NOAA/AVHRR 1B 数据包含大气与地面信息,霾的米散射特性包含了大气与地物散射综合信息,且霾反射率又明显高于晴空反射率,低于云雾,因此无需进行大气校正,直接利用辐射定标后的霾、晴空及云雾不同的表观反射率 $Ref1$ 就可区分出霾。为准确地进行区分,在这里采用遥感图像 $Ref1$ 频数分布图与阈值技术来确定霾的 $Ref1$ 指标。其中 $Ref1$ 频数分布图的横坐标是从小到大变化的表观反射率值,纵坐标是该反射率值出现的次数,通过折线图连接就可生成 $Ref1$ 频数变化曲线图。由于遥感图像上晴空、霾、云雾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,晴空、霾、云雾反射率变化的交界处(相当于分布曲线的两尾)就是反射率出现次数低的位置,即 $Ref1$ 频数变化曲线的波谷所在地,而波谷所在位置的 $Ref1$ 就是晴空、霾、云雾区分的阈值,即为识别霾的光谱指标。当 $Ref1$ 频数变化曲线有多个波谷时,需要结合晴空、霾、云雾在统计区域的面积比例大小和 $Ref1$ 值大小综合考虑。

另外,由于霾在可见光的米散射特性,使得在许多情况下光能穿透霾层到达地表,而不同地表特征反射差异较大,影响着传感器接收的霾散射信息,而北京地表反射特征随季节变化较大,因此需要开展北京不同季节的霾识别研究。

遥感影像的色调或颜色是地物类型解译的基本要素。对霾来说,由于霾和云雾粒子尺度差异造成对光的不同散射原理,使霾在遥感图像上的颜色和晴空及云雾有较大差异。近年来对霾的图像特征研究多集中于利用图像变换技术如何去除雾霾的研究(吴寿江等,2012;王志杰等,2008),表明霾与其他类

别在图像上是可以区别的。霾与晴空和云雾在图像上颜色的差异,本质上是不同浓度的气溶胶粒子(可用气溶胶光学厚度来反映)对光的消光差异,即霾的气溶胶光学厚度一般大于晴空而小于云雾,且霾在不同的波段上具有不同气溶胶光学厚度,反映在图像上对应不同的颜色通道,就能根据颜色合成原理形成不同的颜色,从而通过图像色彩区分出霾。一般通过遥感图像处理技术,采用不同观测波段,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。

2 结果与分析

2.1 霾的颜色识别

针对约 60 景 NOAA/AVHRR 遥感图像,利用图像色彩处理技术,易于识别的霾以灰色、紫色、蓝色三大系列为主,在不同颜色通道组合与增强模式下,霾与其他地物类型的颜色有明显差异,图 1 为北京地区不同时间 NOAA/AVHRR 遥感图像应用色彩处理技术监测的霾的不同颜色,其中针对霾识别常用的图像色彩处理模式有:

(1)NOAA/AVHRR 普通模式:波段 1、2、1 分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,并进行图像线性拉伸($0 \sim 255$)或 2%线性增强,霾以灰色、暗灰和紫红色为主。图 1a 为利用 2011 年 5 月 28 日 NOAA18 卫星监测到的霾以灰色显示,图 1b 为利用 2011 年 1 月 4 日 NOAA18 卫星监测到的霾以暗灰色显示,图 1c 为利用 2011 年 3 月 12 日 NOAA18 卫星监测到的霾以紫红色显示。

(2)NOAA/AVHRR 云增强模式:波段 4、2、1 分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,图像线性拉伸($0 \sim 255$),且通道 4 反相显示,霾以灰紫色为主,图 1d 为利用 2009 年 9 月 14 日 NOAA17 卫星监测到的局部霾以灰紫色显示。

(3)NOAA/AVHRR 植被增强模式:波段 4、2、1 分别对应红(R)、绿(G)、蓝(B)三通道进行假彩色合成,图像线性拉伸($0 \sim 255$),霾以蓝灰和浅蓝色为主,图 1e 为利用 2011 年 2 月 25 日 NOAA18 卫星监测到的霾以蓝灰色显示,图 1f 为利用 2011 年 12 月 11 日 NOAA18 卫星监测到的局部霾以浅蓝色显示。

2.2 霾与轻雾的识别

2.2.1 轻雾和霾难以区分

由于霾是水平能见度 <10 km 且空气普遍有混浊的天气现象,而轻雾是水平能见度 ≥ 1.0 km 至 <10.0 km的稀薄雾幕天气现象,两者形成机理虽然差异很大,但两者在目视时经常难以区分,主要根据观测的空气相对湿度来区别。北京地区遥感能监测到 52 个霾日天气事件的天气现象观测发现:有 49 个霾日出现轻雾天气现象,另外 3 个例外均是站点 ≤ 2 个的局部霾天气事件,霾与轻雾的重合率达 94%。该结果表明:对北京地区来说,有区域性霾发生的当天,几乎必定有轻雾现象发生,而霾与轻雾主要是依据空气湿度来区别,因此可以认为北京的霾一般是由城市上空的轻雾由于空气湿度降低而转化过来。这是由于一般晴朗无云的上午,随着温度升高,雾滴不断蒸发,相对湿度减小,轻雾就演变成霾。但由于空气湿度分布存在空间差异性,在城市与农村地区也存在较大差别,在许多情况下的广阔范围内,轻雾和霾现象并存的可能性很高。在 2008—2013 年的北京气象台站对霾日的观测记录中发现北京区域轻雾和霾并存的现象较多,而且可见光波段对水汽变化不是很敏感,导致轻雾和霾在可见光波段的颜色经常呈现较为一致的现象。例如 2009 年 5 月 25 日北京气象台站观测记录显示:平原北部出现霾,南部出现轻雾;而当日过境的 NOAA18 卫星遥感图像上轻雾和霾的颜色基本一致,致使遥感图像难以区分轻雾和霾。因此在现阶段遥感不能有效监测空气相对湿度的情况下,仅靠遥感图像在一般情况下是难以区分轻雾和霾的。

2.2.2 借助先验知识和周围环境区分轻雾和霾

尽管在一般情况下遥感图像难以区分轻雾和霾,但借助先验知识和周围环境也有可能有效区分轻雾和霾。这是由于空气相对湿度的日变化与温度日变化相反,其最高值基本上出现在清晨温度最低时,最低值出现在午后温度最高时(周淑贞等,1997),由此可借助空气湿度的变化规律和卫星过境时间辅助区分轻雾和霾。此外,如果有雾出现,由于空气的流动性和空气湿度很大的特性,周边常伴有轻雾发生。

对北京城市来说,由于形成霾的基础(大气气溶胶粒子)充分,根据空气湿度的日变化规律,只要不是雨后空气湿度大造成的轻雾,一般在晴朗天气下出现的轻雾于正午 12 时之后极易发展成霾,再借助

色彩图像处理技术,有可能区分轻雾和霾。在色彩上,轻雾和雾由于粒子半径较大,对光偏向于漫散射,因此轻雾和雾在太阳光下颜色一般较霾偏白偏亮,在遥感图像上表现出颜色的差异。图 2 为分别利用 MODIS/Terra 卫星及 NOAA18 卫星监测的 2013 年 1 月 13 日北京及周边地区雾霾区域:11:52 (北京时)(图 2a),华北平原地区出现的雾呈亮白色,北京城区和部分平原地区的轻雾呈浅灰白色,到 14:53(图 2b),雾仍显示偏亮白色,北京平原大部地区的轻雾和雾已演变为紫色的霾,这与观测实况相符。对京津冀平原地区来说,由于 20 世纪 90 年代以来城镇化、经济发展带来的污染排放增加造成的京津冀平原地区的霾天气从局地性演变为区域性,河北平原城市霾日数明显大于北京(王喜全等,2013),京津冀区域影响霾天气形成的气溶胶污染在非城区范围逐渐加重,并且和城区逐渐趋于一致(赵普生等,2012)。因此当北京出现区域性霾时,周边河北、天津广大平原地区与北京霾图像颜色相似的区域均可识别成霾,图 1b 和 1c 在借助图像色彩识别的基础上结合了 12 时之后轻雾易演变成霾这一先验知识,可以判定京津冀平原地区有区域性霾出现。

但在晴天 12 时以前出现的轻雾和霾在遥感图像上很多情况下是难以区分的,需要依靠地面观测的空气相对湿度来进行区分,少部分情况可以根据先验知识及周围环境特征辅助识别,图 1d 中 2009 年 9 月 14 日 NOAA17 卫星(北京时 10:47 过境)霾(分布于城市区域)的识别不但利用了霾与周边具有明显差异的灰紫色颜色特性,也利用了北京城市区域(北京平原中部位置)更容易出现霾的先验知识;而图 2a 中 2013 年 1 月 13 日 MODIS/Terra 卫星(北京时 11:52 过境)则不但利用了轻雾呈灰白色的特性,更重要的是考虑了周边有大范围的雾(呈亮白色)这一周边环境特征来确定是轻雾而非霾。

2.3 霾的光谱识别指标

2.3.1 霾的季节识别指标

由于霾的能见度一般在 10 km 以下,而 1 km 以下在有霾和雾存在的情形下一般观测记录为“雾”,因此霾在绝大多数情况下是介于晴空与雾之间的一种天气现象,即霾的光谱识别主要是区分霾与晴空和雾的光谱反射率。在这里选择北京地区冬、春、夏、秋季节里 4 景典型霾日的 NOAA/AVHRR 遥感图像,并利用图像的 $Ref1$ 在北京地区

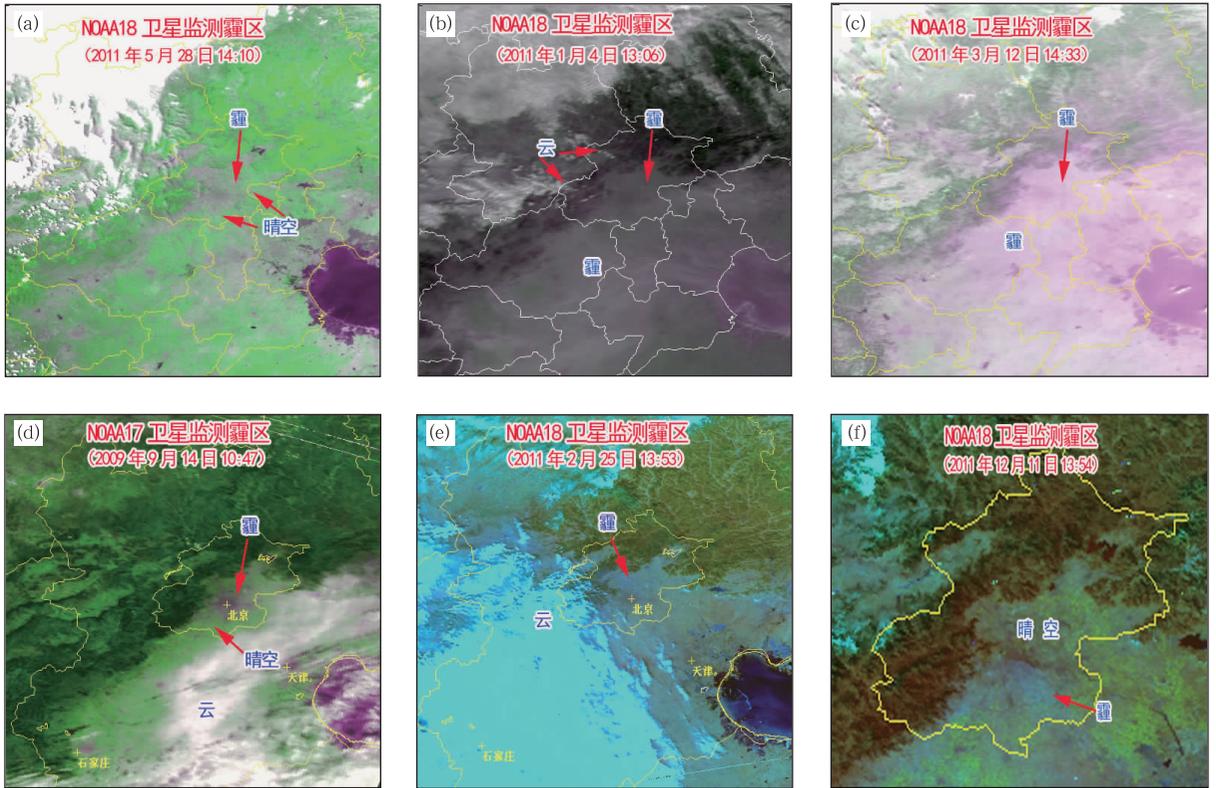


图 1 北京不同时间 NOAA/AVHRR 遥感图像上霾的不同颜色

(a) 2011 年 5 月 28 日, (b) 2011 年 1 月 4 日, (c) 2011 年 3 月 12 日, (d) 2009 年 9 月 14 日, (e) 2008 年 7 月 4 日, (f) 2011 年 12 月 11 日

Fig. 1 Different colors of haze on NOAA/AVHRR images at different times in Beijing

(a) 28 May 2011, (b) 4 January 2011, (c) 12 March 2011, (d) 14 September 2009, (e) 4 July 2008, (f) 11 December 2011

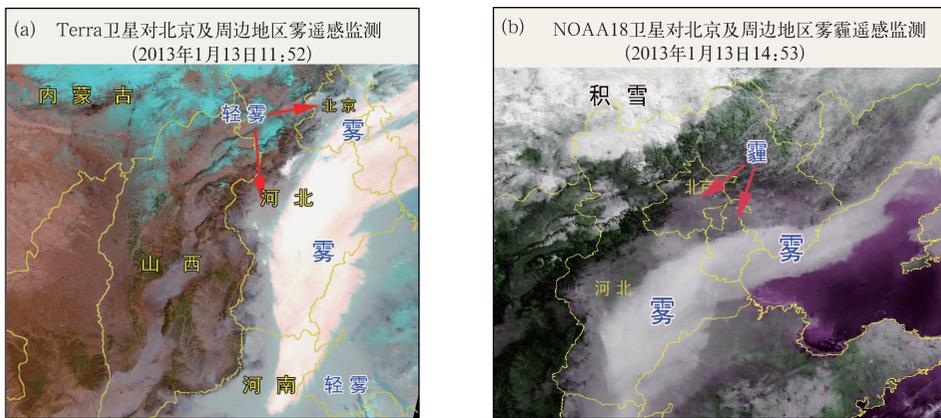


图 2 2013 年 1 月 13 日卫星对北京及周边地区雾霾遥感监测

(a) 11:52, (b) 14:53

Fig. 2 Fog and haze monitoring in Beijing and the surrounding area by satellite on 3 January 2012

(a) 3:52 BT, (b) 6:53 BT

范围频数分布图和阈值技术开展霾的识别,结果如图 3 所示。

由冬季 2011 年 1 月 12 日的霾图像(图 3a₁)及

相应 $Ref1$ 的频数分布图(图 3a₂)可知,北京平原地区南部出现霾,而城区和北部则为晴空,这与气象台站观测实况相符。其中频数分布图中 $Ref1=0.15$ 处

有一波谷(图 3a₂ 中红线所示),可确定为霾和晴空的分界线,即 $Ref1 < 0.15$ 为晴空, $Ref1 \geq 0.15$ 为霾。

另外在 $Ref1 = 0.11$ 处有个小的波谷,这是山区晴空 ($Ref1 < 0.11$) 与平原晴空 ($Ref1 \geq 0.11$) 的分界线。

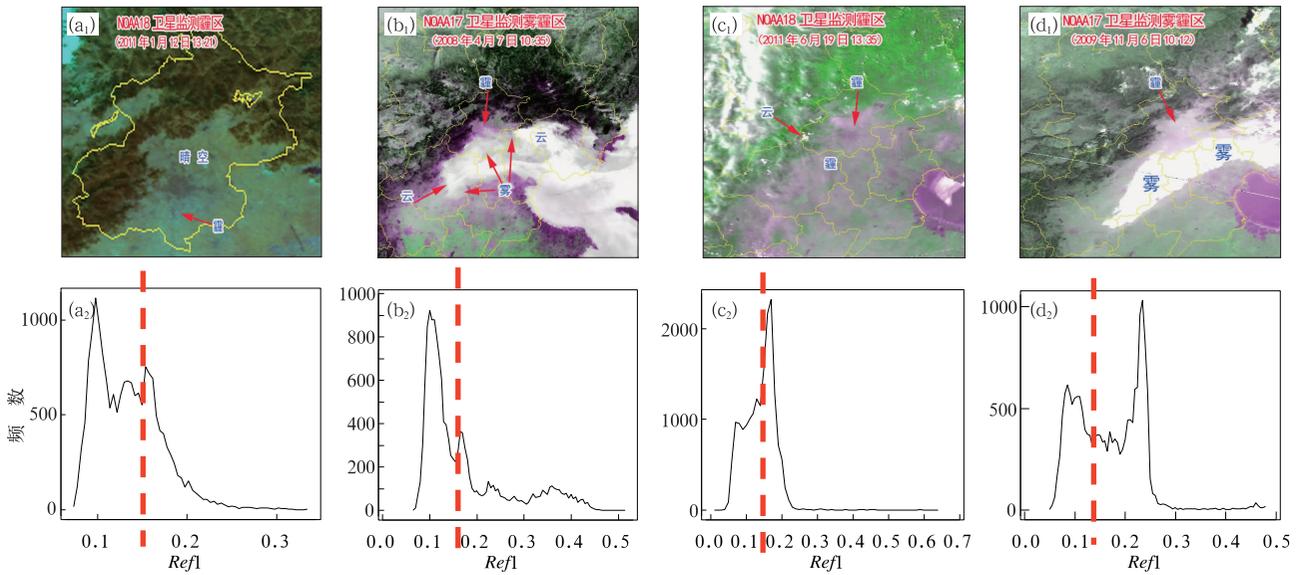


图3 北京冬季、春季、夏季、秋季典型霾日的 NOAA 卫星图像(a₁, b₁, c₁, d₁) 及相应 Ref1 频数分布图(a₂, b₂, c₂, d₂)

(a) 2011 年 1 月 12 日, (b) 2008 年 4 月 7 日, (c) 2011 年 6 月 19 日, (d) 2009 年 11 月 6 日

Fig. 3 NOAA satellite image of typical haze day of winter, spring, summer, autumn (a₁, b₁, c₁, d₁) and frequency distribution of Ref1 of corresponding image (a₂, b₂, c₂, d₂) in Beijing Area

(a) 12 January 2011, (b) 7 April 2008, (c) 19 June 2011, (d) 6 November 2009

由春季 2008 年 4 月 7 日的霾图像(图 3b₁)及相应 Ref1 的频数分布图(图 3b₂)可知,北京城区及平原地区北部出现霾,而平原南部出现雾,部分雾上空有云,这与气象台站观测实况相符。其中频数分布图中 $Ref1 = 0.15$ 处有一波谷(图 3b₂ 中红线所示),可确定为霾和晴空的分界线。即 $Ref1 < 0.15$ 为晴空, $Ref1 \geq 0.15$ 为霾。另外在 $Ref1 = 0.30$ 附近有个波谷,确定为霾 ($Ref1 < 0.30$) 和雾 ($Ref1 \geq 0.30$) 的分界线。

由夏季 2011 年 6 月 19 日的霾图像(图 3c₁)及相应 Ref1 的频数分布图(图 3c₂)可知,北京平原地区大部出现霾,而山区及延庆盆地为晴空,这与气象台站观测实况相符。其中频数分布图中 $Ref1 = 0.14$ 处有一波谷(图 3c₂ 中红线所示),可确定为晴空和霾的分界线,即 $Ref1 < 0.14$ 为晴空, $Ref1 \geq 0.14$ 为霾。

由秋季 2009 年 11 月 6 日的霾图像(图 3d₁)及相应 Ref1 的频数分布图(图 3d₂)可知,北京平原地区出现霾,这与气象台站观测实况相符。其中频数分布图中 $Ref1 = 0.14$ 处有一波谷(图 3d₂ 中红线

所示),可确定为霾和晴空的分界线,即 $Ref1 < 0.14$ 为晴空, $Ref1 \geq 0.14$ 为霾。

利用上述技术和方法,对北京地区近 5 年约 60 景各月 NOAA/AVHRR 卫星能监测到的霾遥感图像特征进行统计分析,最终得到的 NOAA/AVHRR 卫星北京霾识别指标如表 1 所示。

表 1 北京地区利用 NOAA/AVHRR 卫星监测的霾光谱 Ref1 识别指标

Table 1 Ref1 identification index of haze spectrum by NOAA/AVHRR satellite data in Beijing

	冬季 (12—2月)	春季 (3—5月)	夏季 (6—8月)	秋季 (9—11月)
Ref1	0.15~0.32	0.15~0.30	0.14~0.30	0.14~0.32

如表 1 所示,四季的指标有所差异,冬、春季节的 Ref1 下限值(0.15)略大于夏、秋季(0.14),这是由于冬、春季节由于植被覆盖较少,其地表反射率大于夏、秋季影响的缘故。而霾的上限值主要是通过区分霾与雾来识别,春、夏季雾的浓度一般明显低于秋、冬季,春、夏季雾识别的下限值(0.30)也略低于

秋、冬季,因此霾识别的下限值在春、夏季定为0.30,而在秋、冬季定为0.32。

2.3.2 霾的识别指标限制条件

前面确定的北京四季霾光谱识别指标,在应用于高反射率地区时并不适用,这主要发生在当年11月到第二年4月期间北京的大兴永定河谷、密云潮白河谷和首都机场等地区,由于这几个地区植被覆盖低,土壤质地与其他地物差异大,反射率明显高于其他地区,在晴空下 $Ref1$ 可达 0.18~0.20,而一般晴空地表 $Ref1$ 都小于 0.15,这是在识别霾时需要注意的问题。

此外,在地面有积雪(或冰)时,霾难以识别。这

是由于光能透过霾层到达积雪(或冰)地面,而积雪(或冰)地面具有高反射率特性,掩盖了霾对光的米散射特性。图4为利用NOAA18卫星监测的2011年2月15日北京地面有积雪时出现的霾(图4a)及相应北京地区 $Ref1$ 的频数分布图(图4b)。由图4a可知,密云水库已结冰,在北京平原地区西南及北部出现积雪,而在东部与南部地区无积雪的上空出现霾,频数分布图中 $Ref1=0.15$ 处有一波谷(图4b中红线所示),可以判定为霾和晴空的分界线,另外一个波谷 $Ref1=0.18$ 处可以判定为是霾和积雪的分界线。根据这些特征,可以较为容易地判断出平原东部与南部地区为霾,判定出平原地区西南及

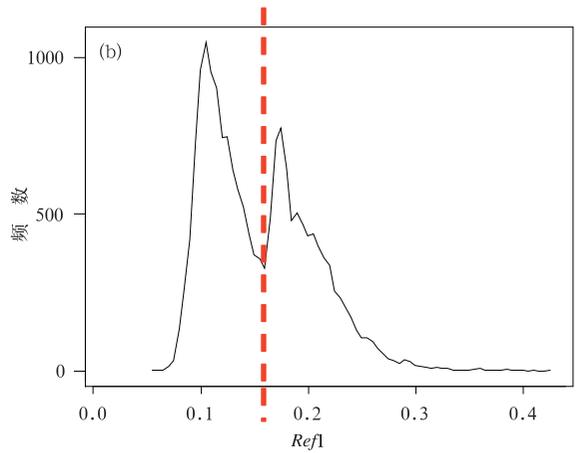
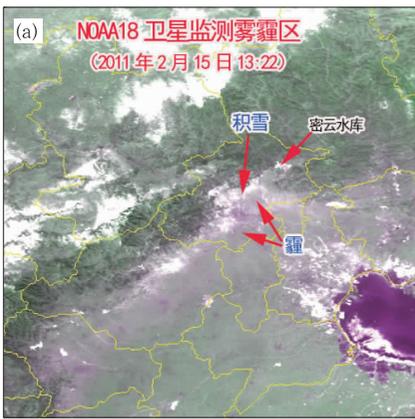


图4 利用NOAA18卫星对北京积雪下霾的识别(a)及 $Ref1$ 相应频数分布图(b)
Fig. 4 Identification of haze by NOAA18 satellite over land surface with snow (a) and corresponding frequency distribution of $Ref1$ in Beijing Area (b)

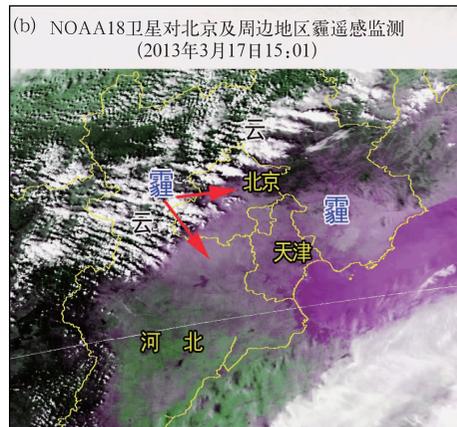


图5 NOAA18 卫星对北京及周边地区雾霾遥感监测
(a) 2013 年 1 月 10 日, (b) 2013 年 3 月 17 日

Fig. 5 Fog and haze monitoring by NOAA18 satellite in Beijing and surrounding area
(a) 10 January 2013, (b) 17 March 2013

北部为积雪。而事实上根据观测记录,整个平原地区上空均有霾出现,因此平原地区西南及北部地面为积雪以及结冰的密云水库上空的霾在遥感图像上不能识别。

3 结果验证与应用

3.1 结果验证

北京南郊观象台(站号 54511, 39.79°N、116.47°E,海拔 32.5 m)是北京地区气象观测站中唯一参加全球常规气象资料交换的台站,故一般用观象台的观测资料来代表北京的气象资料和天气状况,且北京地区的霾日数统计也常以该站观测数据为准,因此在本文以南郊观象台的天气现象观测记录“霾”作为真实值,根据观象台在遥感图像上相应的位置,对 NOAA/AVHRR 图像“霾”识别的结果进行验证。

对 2008—2013 年 52 景“霾”卫星资料中剔除了观象台上空有云的数据后,剩下 51 景“霾”卫星数据,利用前面建立的分季节光谱指标进行霾的识别和验证。验证结果如表 2 所示。

表 2 北京观象台的霾日光谱识别结果
Table 2 Identification result of haze spectrum for Beijing Observatory

	非霾日数/d	霾日数/d
观测记录	11	40
图像识别正确	7	35
$Ref1$	0.104~0.206	0.140~0.285
总体准确率/%	82	

如表 2 所示,观象台 51 d 记录里,其中的 40 d 霾日按照前面建立的分季节光谱指能标识别出其中的 36 d,对其中的非霾日 11 d 能正确判识 6 d,总体准确率为 $42/51=82\%$ 。分析误差产生的原因:(1)对“霾”的判定标准不一造成的误差,这是由于 2013 年 1 月 31 日以前北京地区各台站对“霾”的重要判定指标——相对湿度标准偏低,大部分按相对湿度小于 70%来识别霾。如表 2 所示非霾日的 $Ref1$ 为 0.104~0.206,表明某些图像的 $Ref1$ 已远大于霾的光谱阈值(0.15)。例如 2008 年 4 月 7 日观象台的 $Ref1$ 为 0.206,观测记录里只有“轻雾”,而同一天周边的石景山、丰台、海淀、朝阳、房山、门头沟站 $Ref1$ 值均在 0.15 以上,且卫星过境时相对湿度在

70%以下,相应地观测记录为“霾”,而观象台的相对湿度为 72%,按照当地判定标准(小于 70%)则记录为“轻雾”而非“霾”,从而造成遥感图像的判别与记录判定的不一致。而从 2013 年 1 月 31 日开始,北京地区各气象观测站按照中国人民共和国气象行业标准《霾的观测和预报等级》(QX/T113-2010)及中国气象局综合观测司《关于霾天气现象观测补充规定的函》(气测函[2013]17)号来执行霾的观测,把“霾”的空气相对湿度提高到小于 80%或更高值的观测,这将有效减少霾的判别误差;(2)阈值的不确定性,如 2011 年 6 月 13 日观象台的 $Ref1$ 为 0.154,略大于春季阈值(0.15)图像判为“霾”,但观测记录里没有“霾”,从而造成误判。(3)遥感图像 $Ref1$ 估算的不确定性,遥感图像受卫星姿态、观测天顶角及辐射定标影响, $Ref1$ 估算具有一定误差,可能造成在阈值附近的像元误判。

3.2 在京津冀地区的应用

2013 年 1—3 月,京津冀地区多次出现大范围雾、霾天气,主要特点表现为:发生频次高、持续时间长、污染强度大、影响范围广。北京市气候中心利用前面初步确定的霾颜色指标与光谱指标,针对京津冀地区分别制作了 2013 年 1 月 10—14 日、1 月 18 日、1 月 23 日、1 月 28 日、1 月 29 日、3 月 15 日和 3 月 17 日约 10 期雾霾遥感业务监测产品。图 5 为利用 NOAA18 卫星制作的北京及周边地区霾遥感监测产品。其中图 5a 为 2013 年 1 月 10 日 NOAA18 卫星监测霾图,通道 1、2、1 假彩色合成显示霾的颜色为暗紫红色,且霾的 $Ref1$ 在 0.25~0.32 之间,雾的 $Ref1$ 在 0.32~0.44 之间;图 5b 为 2013 年 3 月 17 日 NOAA18 卫星监测霾图,通道 1、2、1 假彩色合成显示霾的颜色为紫红色,且霾的 $Ref1$ 在 0.16~0.21 之间,这些均符合本文建立的霾的颜色指标和光谱指标,显示了初步研究成果的有效性。

4 结论与讨论

本文通过对大量 NOAA/AVHRR 遥感图像和气象观测资料的对比分析,利用图像色彩处理技术、频数分布图和反射率阈值技术对北京霾的遥感识别进行了初步研究,并在京津冀地区进行了应用,主要有以下结论:

(1) 易于识别的霾在 NOAA/AVHRR 遥感图

像上一般用波段 1、2、1 或 4、2、1 进行红、绿、蓝三通道假彩色合成,图像增强方式为 0~255 线型拉伸或 2%线性增强,颜色以灰色、紫色和蓝色三大系列为主;

(2) 仅靠遥感图像一般难以区别霾和轻雾,在大的范围内常存在轻雾与霾并存现象,但借助先验知识、周围环境和图像颜色,可一定程度上区分霾和轻雾;

(3) 霾在 NOAA/AVHRR 图像上可以通过第一波段表观反射率 Ref_1 进行识别,表观反射率识别指标为:冬季 0.15~0.32,春季 0.15~0.30,夏季 0.14~0.30,秋季 0.14~0.32,但此光谱指标在具有高反射率特征的某些地区并不适用,并且在地面有积雪或水面结冰时上空的霾也不能识别。

(4) 建立的光谱指标对霾的有效识别准确率达 82%,对 2013 年 1—3 月京津冀地区大范围霾的应用监测表明本文初步建立的霾颜色指标和光谱指标具有业务操作性和实际意义。

本文对北京地区霾遥感识别进行了初步研究,其研究结论是否适用于其他地区尤其是南方地区还需进一步研究,而且利用 NOAA/AVHRR 资料得出的光谱指标仅用了约 60 景图像,还需要更多的图像参与检验;而且该光谱指标是否在其他卫星如 MODIS 卫星和国内 FY-3 卫星类似通道上适用,也需进一步研究确定。而且本文没有对霾的等级指标(如轻度、中度和重度)开展研究,利用光谱特征开展霾的等级划分进而开展空气质量等级的监测是未来遥感研究霾的重点内容之一。但这些初步研究确认了遥感监测手段在霾大面积、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,而且随着遥感基础研究的不断发展,对霾的光学特征会有更深入的认识,遥感技术在霾监测预警等方面也将发挥重要作用。

参考文献

白志鹏,董海燕,蔡斌彬,等. 2006. 灰霾与能见度研究进展. 过程工程学报,6(增刊2):36-41.

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. 中山大学学报(自然科学版),46(4):103-107.

古金霞,白志鹏,刘爱霞,等. 2010. 天津市灰霾评价等级指标体系研究. 环境污染与防治,32(8):1-4.

过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究.

气象,39(10):1314-1324.

姜杰,查勇,袁杰,等. 2011. 遥感技术在灰霾监测中的应用综述. 环境监测管理与技术,23(2):15-18.

黎刚. 2007. 环境遥感监测技术进展. 环境监测管理与技术,19(1):8-11.

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. 环境监测管理与技术,23(1):20-27.

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. 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. 气象,38(10):1225-1231.

孙娟,束炯,鲁小琴,等. 2006. MODIS 遥感气溶胶光学厚度产品在能见度中的应用. 环境科学与管理,31(5):97-101.

王喜全,孙明生,杨婷,等. 2013. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化. 气候与环境研究,18(2):165-170.

王志杰,谭伟,罗扬,等. 2008. 两种遥感图像增强方法对图像分类的适宜性分析. 山地农业生物学报,27(4):295-300.

王中挺,厉青,李莘莘,等. 2012. 基于环境一号卫星的霾监测应用. 光谱学与光谱分,32(3):775-780.

魏文秀. 2010. 河北省霾时空分布特征分析. 气象,36(3):77-82.

吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别. 气象,32(4):9-15.

吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报,64(4):510-517.

吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等. 2007. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降. 热带气象学报,23(1):1-6.

吴寿江,李亮,宫本旭,等. 2012. GeoEye-1 遥感图像去雾霾方法比较. 国土资源遥感,3:50-53.

殷永文,程金平,段玉森,等. 2011. 上海市霾期间 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析. 环境科学,32(7):1894-1898.

张兴赢,张鹏,方宗义,等. 2007. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展. 气象,33(7):3-14.

赵普生,徐晓峰,孟伟,等. 2012. 京津冀区域霾天气特征. 中国环境科学,32(1):31-36.

周淑贞,张如一,张超. 1997. 气象与气候学. 北京:高等教育出版社,64-65.

Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. 1999. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques. Atmospheric Environment, 33(19):3237-3250.

Sisler J F, Malm W C. 1994. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. Atmospheric Environment, 28(5):851-862.

Wang D H, Xia L H. 2008. A case study on monitoring haze in Pearl River Delta by MODIS. Proceedings of the Bioinformatics and Biomedical Engineering. 3949-3951.

Watson J G. 2002. Critical review of visibility: Science and regulation. J Air & Waste Manage Assoc,52(6):628-713.