



较好的应用前景,并采用美国静止业务气象卫星(Geostationary Operational Environmental Satellite, GOES, 位置 75°W)的双通道红外资料对近海岸夜间海雾和低云开展试验研究;而 Ahn 等<sup>[3]</sup>提出基于 GMS-5 红外通道,采用一种晴空辐射合成图与红外辐射图相比较的新算法来检测海雾和层云。国内的鲍献文等<sup>[4]</sup>利用 GMS-5 静止卫星和 NOAA 极轨卫星资料,综合运用光谱分析法、结构分析法等技术分析海雾在卫星资料中所反映的光谱特征和辐射特征的差异,进行云雾自动检测和分离技术的定量应用研究。随着新一代极轨卫星遥感资料的广泛应用,张纪伟等<sup>[5-7]</sup>基于 MODIS 卫星数据开展雾的监测研究,在海雾与晴空海面、海雾与低云等分离检测算法方面,以及雾的光学厚度、雾顶高度和能见度等特征量的定量研究方面取得了比较理想的效果;吴晓京等<sup>[8]</sup>利用 1989—2008 年长序列的 NOAA/AVHRR 数据,生成黄渤海 20 a 海雾的分布状况,并在此基础上得到黄渤海海雾的季节特征;在静止气象卫星资料应用方面,何月等<sup>[9]</sup>利用日本多功能交通卫星(Multi-functional Transport Satellite, MTSAT, 位置 140°E)静止气象卫星资料,采用分级判识太阳高度角阈值和大雾指数的方法,反演了近 5 a 浙江海雾的逐时分布,取得了较好的监测结果。

尽管目前 NOAA 和 MODIS 极轨卫星资料的光谱信息丰富,但是其过境时间不多,特别对海雾的消长动态监测能力较差,实践证明仅利用这些极轨卫星资料进行海雾监测尚不能很好地满足日常业务化的需求。静止卫星可得到 1 次/h 的影像资料,能有效地弥补极轨卫星在监测时间上的不足,因此近年来才逐步采用静止卫星资料建立海雾监测模型,并以采用 GOES, GMS, MTSAT 等卫星的数据居多。针对台湾海峡利用风云静止气象卫星开展逐时海雾遥感监测的研究文献迄今为止尚未见报道。本研究将利用我国自主研发的风云系列 FY-2E 静止卫星资料,在分析 FY-2E 卫星探测通道的光谱和辐射特征的基础上构建海雾监测模型,并利用地面能见度观测资料对海雾的监测精度进行验证。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

台湾海峡地处中国东南沿海,是中外船只的重要航道,船只繁多。台湾海峡天气复杂,处于华南沿海水汽丰沛之处,春季冷空气与海上暖湿气流形成对峙形势,再加上海洋的作用,常形成大雾天气,且大多由于暖湿气流平流造成,所以海雾强大而且一

次会持续几天,给海上交通带来很大危害。其中海峡西部是我国近海 6 个多海雾区域之一。

台湾海峡海雾有明显季节变化和日变化特征,在季节上主要集中在冬春季,夏秋季较少。在这一时期又恰好是阴雨季节,所以常有雾与阵雨、雷雨同时出现。海雾在日变化上主要表现为下半夜至次日午前段明显,尤其清晨最多,中午至傍晚前后出雾的机会最少;雾的持续时间以 1~2 d 为主。总之,台湾海峡的雾季为每年的 3—5 月,各月多年平均雾日为 3~8 d。

### 1.2 数据及其预处理

本研究用到的数据包括 FY-2E 静止气象卫星数据、台湾海峡西部地面气象站逐时能见度观测数据。

FY-2E 卫星定位于 E105°的赤道上空,星上搭载一台可见光红外自旋扫描辐射仪,星下点空间分辨率约为 5 km,卫星数据的时间分辨率为 60 min, VISSR 有 5 个通道,各通道参数特征见表 1。

表 1 FY-2E 卫星探测通道参数  
Tab. 1 The observation channels parameter of FY-2E satellite

通道	波长范围/ $\mu\text{m}$	波段性质
IR1	10.29 ~ 11.45	热红外
IR2	11.59 ~ 12.79	热红外
IR3	6.32 ~ 7.55	中红外
IR4	3.59 ~ 4.09	中红外
VIS	0.510 ~ 0.905	可见光

FY-2E 卫星数据必须经过预处理后才能进一步应用,主要包括:①辐射定标,将原始灰度图像根据对照表转换为具有实际物理意义的数据,将反射通道转换为反射率,辐射通道转换为亮温值;②研究区域提取,卫星原始覆盖范围较大,对台湾海峡区域(E114°~123°、N20°~29°)内的云图数据进行了子区提取。

考虑到 FY-2E 通道 IR3 是水汽强吸收带,其最大辐射贡献大致在 400 hPa 高度处,水汽通道信息对云雾识别的作用不大,另外通道 IR2 特性与 IR1 类似,因此本研究选择 FY-2E 的通道 IR1、通道 IR4 和通道 VIS 作为海雾监测的主要探测通道。

至 2015 年底,福建省能见度自动观测站约为 150 个,其中海峡西部能见度观测站共有 67 个(包括 17 个含有人工雾观测的常规气象站)。一天 24 次的自动观测相对于一天 4 次的人工观测来说,能更客观反映海雾造成的能见度演变情况。

## 2 原理与方法

要从卫星上监测海雾,涉及到的研究对象包括

海岸带、海洋以及海洋上空的云,其中人们更关注的是水体和云的特性。图 1 是台湾海峡上空典型云雾

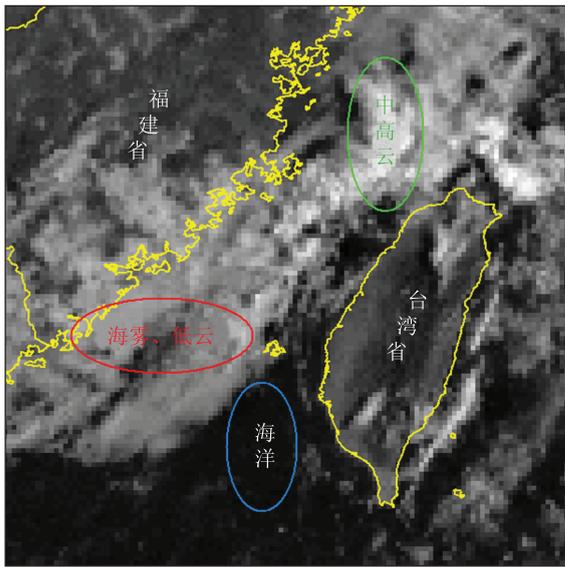


图 1 典型云雾的 FY-2E 卫星可见光影像

Fig.1 The FY-2E satellite visible light image of typical clouds and sea fog

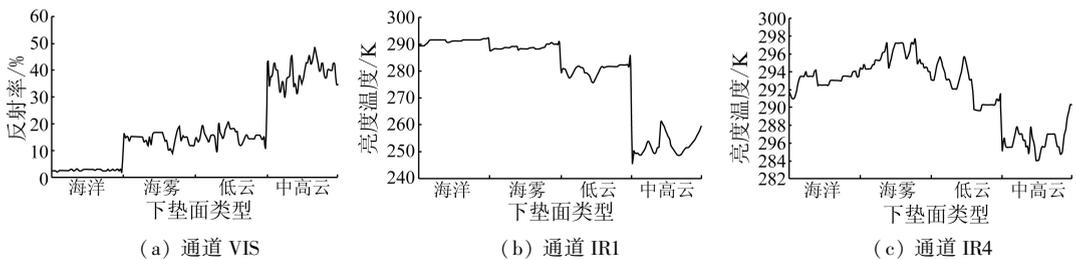


图 2 台湾海峡海洋及云雾等下垫面 FY-2E 卫星资料波谱特征曲线

Fig.2 FY-2E satellite spectrum characteristic curve of ocean, clouds and sea fog in Taiwan Strait

1) 可见光通道的反射特征。在可见光波段, FY-2E 卫星接收的能量主要来自下垫面反射的太阳辐射。从图 2(a) 可以看出, 晴空海表反射率在 5% 以下, 并且变化不大, 云雾反射率明显大于晴空海表, 据此可较好地地区分云雾区与海表区; 低层云和海雾的反射率都在 30% 以下, 明显低于中高云的反射率。理论上雾滴比云中水滴小得多且其滴谱更均匀, 相比于同等厚度的低云, 海雾来自地面或其他方向上的漫反射和透射少, 海雾反射率应该低于相同厚度的低云, 但是在 FY-2E 的可见光通道上海雾与低云的反射特性却表现为十分相似, 因此据此难以对海雾与低云进行区分。

2) 热红外通道的辐射特征。在热红外波段, FY-2E 卫星接收到的能量主要来自下垫面自身发射的长波辐射, 如果将海表和云雾近似看做黑体, 则热红外波段的辐射量仅与云雾顶部或海表的亮度温度有关, 卫星接收到的辐射量越多, 下垫面的亮温越高。从图 2(b) 可以看出, 中高云区的亮温最低, 一般都

的 FY-2E 卫星可见光通道灰度图, 图中红色框区域为海雾及低云, 绿色框区域为中高云, 蓝色框区域为晴空海表。

## 2.1 白天海雾遥感监测原理

在可见光通道的影像上, 暗黑色的晴空海表与云雾的区别最为明显; 而中高云呈现为较亮的白色调, 其白亮程度与太阳高度角和云体的密实程度相关。由于台湾海峡海雾大多为平流雾, 因此海雾雾顶高度相对一致, 雾顶亮度变化也比较平缓, 纹理均匀, 海雾的边界非常光滑清晰, 尤其是海雾的东南边界呈明显的弧状弯曲, 这种边界形状与偏南风的范围有密切关系; 海雾的西北边界由于受陆地和云的影响, 形状不规则, 但雾界仍然分明。

以 2015 年台湾海峡西岸 5 次典型海雾过程 (2 月 22—26 日、3 月 15—19 日、4 月 2—5 日、5 月 15—16 日、5 月 28—29 日) 为样本, 采用目视解译并结合地面观测资料来区分海雾区、低云区、中高云区以及晴空海洋区, 然后根据遥感理论分析选区样本的可见光、远红外以及中红外通道的光谱特征和辐射特征, 最后得到白天的波谱特征曲线见图 2。

在 270 K 以下, 与海雾区、低云区和海表区的亮温有着明显的区别, 可以据此有效区别中高云和其他下垫面。而海雾的亮温介于海表和低云之间, 由于海雾比低云更接近于海表, 与海表的亮温也更为接近, 雾顶高度不及低云顶高, 海雾亮温也比低云温度高。

3) 中红外通道的反射和辐射特征。中红外波段位于太阳短波辐射和地球长波辐射的重叠区域, 白天卫星在这一波段获得的能量既有下垫面反射的太阳辐射又有其自身发射的红外辐射, 并且二者都不能忽略, 如果将中红外波段的能量全部转化为亮温值, 则从图 2(c) 可以看出, 除了中高云外, 海表、海雾和低云在这一波段没有特别明显的波谱特征, 但可以通过各下垫面在热红外与中红外通道亮温差的不同建立辅助判别指标, 比如海表在热红外和中波红外通道的亮温差相对较小, 而云的亮温差起伏变化很大, 海雾的亮温差介于海表和云之间。

## 2.2 夜间海雾遥感监测原理

卫星在夜间仅可获得红外探测资料, 因此夜间

海雾遥感识别比白天更加困难。在夜间,中红外通道同其他热红外通道一样,主要反映下垫面本身的热辐射,但是不同特性的下垫面也存在着一定的差异,中红外通道对于海洋发射辐射仍相当于黑体,因此海洋中红外和热红外通道的有效温度大致相同,然而海雾和低云在中红外通道不是黑体辐射,其比辐射率明显小于 1,因此海雾和低云在中红外和热红外通道的有效温度存在较为明显的差异。本研究实验发现,夜间台湾海峡海雾中红外和热红外的亮温差在 0 ~ -3 K,海表的亮温差在 0 ~ 1 K,而中高云的亮温差变化较大并且大都在 10 K 以上,因此夜间海雾判识主要采用中红外和热红外的双通道差值法进行。何月等<sup>[9]</sup>研究发现,利用中红外和热红外通道的归一化指标比单纯的双通道差值法效果更好,故本研究采用归一化指标计算方法。

在太阳初升(凌晨)和始落(傍晚)阶段,由于可见光通道探测值随太阳高度角的变化较为复杂,中红外通道内包含的反射太阳辐射和自身辐射信息也十分繁杂,两通道数据难以得到真正利用,因此本研究对于凌晨和傍晚时段的海雾识别目前仍采用经验阈值加以判别。

### 2.3 海雾遥感自动监测业务系统

在海雾监测中,由于日出前后的监测方法存在

一定的差别,为此根据时间初步划分白天、夜间、凌晨及傍晚 4 个时段,不同时段采用卫星的不同探测通道以及通道的不同阈值。海雾特征通道阈值的选取是关键步骤,本研究从台湾海峡监测站点中分别选取具有代表性的晴空站点、有雾站点和有云站点,然后分时段进行统计分析并求取阈值。

在上述研究分析的基础上,利用 FY-2E 静止卫星的可见光、热红外和中红外 3 个通道数据,运用可见光反射率阈值法实现云雾与下垫面背景的自动分离;运用热红外亮温阈值实现海雾和低云与中高云的自动分离;同时运用中红外和热红外通道差值的归一化指标实现夜间海雾的监测;最后采用 Delphi 计算机语言建立了一个台湾海峡海雾自动判识监测的业务系统。该系统具有阈值调整、业务时间表安排、自动运行和手动运行转换等功能,同时在业务产品中叠加了自动站能见度观测数据,便于用户直接快速对系统生成的海雾产品的准确度进行初步评估。

## 3 结果与分析

### 3.1 遥感监测结果

图 3 为 2015 年 4 月 4 日发生在台湾海峡西部

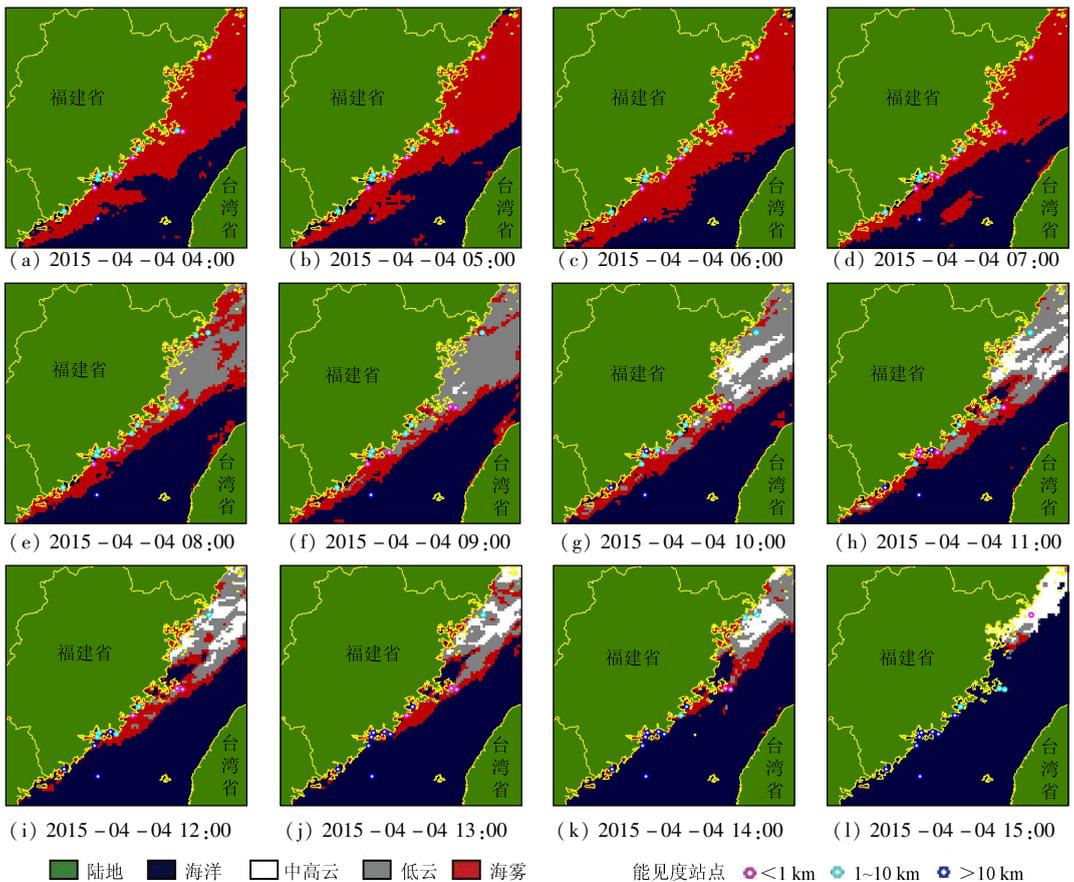


图 3 台湾海峡一次海雾过程的 FY-2E 卫星动态监测结果

万方数据 Fig. 3 One sea fog dynamic monitoring by using FY-2E satellite in Taiwan Strait

的一次海雾过程个例。从中可以看出,本次海雾过程福建沿海海雾从 4:00—11:00(北京时,下同)都一直稳定存在,只是分布范围渐渐变小,11:00 以后海雾从南向北逐步退缩,直至 15:00 福建沿海才基本无雾。该海雾变化过程,符合台湾海峡海雾自身的生成、维持、消亡的一般特点。

将海雾遥感监测结果与沿海能见度自动观测结果进行叠加显示,可以看出,在空间分布上遥感监测结果与能见度自动观测结果基本吻合。由此可见, FY-2E 静止卫星资料一小时一次的高时间分辨率数据可以较好地实现对台湾海峡海雾的动态监测,这一优势是极轨卫星资料所不可比拟的。

### 3.2 监测精度分析

根据 2015 年台湾海峡海雾遥感自动监测业务系统的逐小时 FY-2E 海雾监测产品,收集相应时间点台湾海峡西部常规及自动气象站的能见度观测资料形成样本对。由于地面实测数据与遥感监测数据在时间上完全一致,因此作为对遥感监测结果进行精度评定的数据源是合理的。本研究共收集白天有效样本 6 088 对,夜间样本 7 027 对,然后采用 Bendix 等<sup>[10]</sup>提出的精度分析指标对监测结果进行精度检验,相关指标公式为

$$POD = \frac{yy}{ny + yy} \times 100\% \quad (1)$$

$$FAR = \frac{yn}{yn + yy} \times 100\% \quad (2)$$

$$MDR = \frac{ny}{ny + yy} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $POD$  为命中率 (probability of detection,  $POD$ );  $FAR$  为误警率 (false alarm ratio,  $FAR$ );  $MDR$  为漏检率 (missed detection ratio,  $MDR$ );  $yy$  为遥感监测结果有海雾和地面实测结果一致的站点个数;  $yn$  为遥感监测结果有海雾而地面实测结果没有海雾的站点个数;  $ny$  为遥感监测结果没有海雾而地面实测结果有海雾的站点个数。

从 2015 年白天的监测情况来看,遥感监测结果有海雾和地面实测结果一致的站点有 2 912 个,遥感监测结果有海雾而地面实测结果没有海雾的站点有 579 个,遥感监测结果没有海雾而地面实测结果有海雾的站点有 1 185 个(表 2)。按 Bendix 的指标

表 2 2015 年台湾海峡白天海雾遥感监测站点

Tab.2 Precision analysis of daytime sea fog remote sensing monitoring in Taiwan Strait in 2015 (个)

监测站点	卫星监测有雾	卫星监测无雾	合计
地面观测有雾	2 912	1 185	4 097
地面观测无雾	579	1 412	1 991
合计	3 491	2 597	6 088

法可得到  $POD = 71\%$ ,  $FAR = 16.5\%$ ,  $MDR = 29\%$ 。本研究用同样的方法也对夜间海雾监测结果的精度进行了评价,得出  $POD$  仅为 58%。这是因为在夜间、凌晨和傍晚时段缺少可见光通道,而仅依据红外亮温尚不能较好地地区分低云和海雾,故而造成监测精度低于白天。

本研究建立的台湾海峡海雾卫星遥感监测模型,其云雾及海表的识别分离阈值是基于对 2015 年 5 次典型海雾过程进行科学分析与统计得到的。为了进一步证明该模型阈值的稳定性,对 2016 年上半年海雾监测模型的业务运行情况进行效果分析,经过普查最后共收集白天有效样本 3 975 个,其中遥感监测结果有海雾和地面实测结果一致的站点共有 2 209 个,遥感监测结果有海雾而地面实测结果没有海雾的站点有 277 个,遥感监测结果没有海雾而地面实测结果有海雾的站点有 769 个,由此得到 2016 年上半年该模型业务监测  $POD = 74\%$ ,  $FAR = 11\%$ ,  $MDR = 26\%$ , 3 个指标均与 2015 年的监测结果非常接近,说明模型对云雾及海表的识别分离阈值具有较好的稳定性。

研究结果表明,本监测模型对于台湾海峡长时间序列的海雾事件,平均判识精度超过 70%,监测效果较为理想,基本能满足日常海雾监测的需要,静止卫星比极轨卫星具有更高的时间分辨率,可在海雾动态监测中发挥较大作用。但是监测过程出现的漏报率和误警率还比较高,究其原因可能除了 FY-2E 卫星的空间分辨率相对较低,以及在定标计算中存在一定误差外,最主要的还是所建模型尚无法有效地分离低云和海雾。这种临近地面为雾,抬升到一定高度就是低云的现象,特别是低云和海雾高低层叠加在一起的时候,往往被高空遥感识别成云,而在地面则观测为海雾,是目前利用卫星遥感技术监测海雾还暂时难以解决的棘手问题。

## 4 结论与讨论

1) 为了适应实时监测海雾的业务需求,本文利用国产 FY-2E 静止卫星数据建立了台湾海峡海雾监测模型,得到每小时一次的海雾监测产品,有效地克服了极轨卫星监测产品时间分辨率低的缺陷,较好地实现对海雾变化过程的动态监测,通过 2015 年和 2016 年海雾的卫星监测精度分析,表明遥感监测结果平均判识精度超过 70%,且空间分布上与地面观测相吻合,对于海雾的实时监测有较好的业务应用价值。

2) 由于低云的物理特性与海雾十分接近,特别

是当海雾区上空存在有其他类型的中高云系覆盖时,卫星遥感技术存在局限性。今后可考虑利用不同时间的观测图像序列,结合海雾与层云在运动规律、消散规律等方面存在的差异对海雾和低云加以有效区分,以提高海雾的监测精度。

3)本研究虽然对夜间、凌晨和傍晚不同时间进行了分段识别,但由于订正后的阈值仍无法完全统一,判识准确率均低于白天,因此,对某一特定时间段的卫星通道选择和量化判识指标等还有待进一步研究,同时在实际应用中,也需注意判断阈值的动态性。

4)由于风云静止卫星的空间分辨率只有 5 km,对于一些范围较小的海雾,监测效果不够理想,今后应该融合极轨卫星资料高空间分辨率的优势,同时结合地面自动或人工观测资料,采用卫星和地面实时监测的点面结合方式以使海雾的监测精度得到进一步提高。

## 参考文献 (References):

- [1] 郑新江. 黄海海雾的卫星云图特征分析[J]. 气象, 1988, 14(6): 7-9.  
Zheng X J. On satellite imagery features of sea fogs over the Yellow Sea[J]. Meteorological Monthly, 1988, 14(6): 7-9.
- [2] Ellrod G P. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery[J]. Weather and Forecasting, 1995, 10(3): 606-619.
- [3] Ahn M H, Sohn E H, Hwang B J. A new algorithm for sea fog/stratus detection using GMS-5 IR data[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(6): 899-913.
- [4] 鲍献文, 王鑫, 孙立潭, 等. 卫星遥感全天候监测海雾技术与应用[J]. 高技术通讯, 2005, 15(1): 101-106.  
Bao X W, Wang X, Sun L T, et al. The weatherproof detection system of sea fog by remote sensing and its applications[J]. High Technology Letters, 2005, 15(1): 101-106.
- [5] 张纪伟, 张苏平, 吴晓京, 等. 基于 MODIS 的黄海海雾研究——海雾特征量反演[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(S1): 311-318.  
Zhang J W, Zhang S P, Wu X J, et al. The research on Yellow Sea sea fog based on MODIS data: Sea fog properties retrieval and spatial-temporal distribution[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(S1): 311-318.
- [6] 马慧云, 范冲, 赵向东. 基于云雾与晴空地表混合像元的云雾检测算法[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(1): 55-59. doi: 10.6046/gtzyyg/2010.01.09.  
Ma H Y, Fan C, Zhao X D. An algorithm for separating cloud-fog from surface features based on mixed pixels[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(1): 55-59. doi: 10.6046/gtzyyg/2010.01.09.
- [7] 张伟康, 马慧云, 邹峥嵘, 等. 基于 SBDART 辐射传输模型的夜间辐射雾自动检测及时间序列分析[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 80-86. doi: 10.6046/gtzyyg/2014.02.14.  
Zhang W K, Ma H Y, Zou Z R, et al. Automatic detection of night time radiation fog based on SBDART radiative transfer model and the analysis of time series[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(2): 80-86. doi: 10.6046/gtzyyg/2014.02.14.
- [8] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于 20 年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 63-72.  
Wu X J, Li S M, Liao M, et al. Analyses of seasonal feature of sea fog over the Yellow Sea and Bohai Sea based on the recent 20 years of satellite remote sensing data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(1): 63-72.
- [9] 何月, 张小伟, 杜惠良, 等. 利用静止气象卫星监测浙江海上大雾[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 599-606.  
He Y, Zhang X W, Du H L, et al. Monitoring sea fog of Zhejiang from geostationary meteorological satellite data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(3): 599-606.
- [10] Bendix J, Thies B, Cermak J, et al. Ground fog detection from space based on MODIS daytime data - a feasibility study[J]. Weather and Forecasting, 2005, 20(6): 989-1005.

## Application of FY-2E data to remote sensing monitoring of sea fog in Fujian coastal region

ZHANG Chungui, LIN Bingqing

(Fujian Provincial Meteorological Science Institute, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In this paper, the authors analyzed the variation law of visible light, thermal infrared band and mid-infrared band of FY geostationary satellite for sea fog, clouds and sea surface (clear sky) in Taiwan Strait, which was based on a lot of experimental analyses by using different phases of satellite data, combined with the visibility data of automatic meteorological stations. On such a basis, reflectivity threshold was used to separate sea fog and cloud from sea surface, and brightness temperature threshold was used to separate sea fog and low cloud from middle and high cloud. In addition, night sea fog was automatically identified by the normalized difference index of mid-infrared and thermal infrared band. Finally, the automatic monitoring software system of Taiwan Strait sea fog was established, and surface observation data were used to examine the precision of remote sensing monitoring. The

research results show that FY geostationary satellite could make up for the deficiency of Polar Orbit Satellite in time resolution, and it has a good performance on the dynamic monitoring service of Taiwan Strait. A comparison shows that the remote sensing monitoring results of sea fog are in accordance with observation results, and the monitoring accuracy is more than 70% in daytime. Night time accuracy is lower than that of the day time, and there exists limitation in the separation of sea fog and low cloud.

**Keywords:** FY-2E satellite; sea fog; remote sensing monitoring; Fujian coastal region

(责任编辑: 李 瑜)

=====

## 下期要目

- 任 燕 基于综合干旱指数的淮河流域土壤含水量反演
- 王瑞军 甘肃红山地区重要控矿地质单元的高分一号卫星数据遥感解译与应用
- 侯学会 基于物候信息的山东省冬小麦长势遥感监测
- 束秋妍 基于 GRACE 的华北平原地下水储量时空变化分析
- 朱欣然 一种改进 CVAPS 的 LUCC 分类自动更新方法
- 王光辉 基于多特征融合的遥感影像变化检测算法
- 潘竟虎 兰西城市群热环境格局的多尺度研究
- 孙 旋 基于 SST 的珊瑚礁白化监测技术综述
- 尹 峰 一种国产高分卫星遥感影像的变分融合方法
- 董文全 遥感数据时空融合研究进展及展望
- 张晓东 基于像元二分法的盐池县植被覆盖度与地质灾害点时空格局分析
- 侯小刚 近 15a 新疆逐日无云积雪覆盖产品生成及精度验证
- 李 军 基于最优插值的土壤含水量遥感反演缺失数据插补
- 杨 亮 基于观测角信息的 HJ 1A/1B 卫星光学影像几何精校正
- 李艳艳 基于轨道参数修正的 PALSAR-2 影像正射校正技术
- 郑鸿瑞 合成孔径雷达遥感地质应用综述
- 任丽艳 基于北斗技术的无人机飞行监管系统开发与应用
- 崔 静 基于光谱磁化率模型的黄土剖面地层划分
- 刘 刚 利用遥感技术对青藏高原西部湖泊与构造背景关系研究