

基于 MTSAT 卫星遥感监测的浙江省及周边海区大雾分布特征^{* 1}

何月¹ 张小伟¹ 蔡菊珍¹ 杜惠良² 胡波² 高大伟¹

HE Yue¹ ZHANG Xiaowei¹ CAI Juzhen¹ DU Huiliang² HU Bo² GAO Dawei¹

1. 浙江省气候中心,杭州,310017

2. 浙江省气象台,杭州,310017

1. *Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China*

2. *Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017, China*

2014-03-06 收稿,2014-08-25 改回.

何月, 张小伟, 蔡菊珍, 杜惠良, 胡波, 高大伟. 2015. 基于 MTSAT 卫星遥感监测的浙江省及周边海区大雾分布特征. 气象学报, 73(1): 200-210

He Yue, Zhang Xiaowei, Cai Juzhen, Du Huiliang, Hu Bo, Gao Dawei. 2015. Distribution characteristics of the fog derived from the MTSAT satellite data in Zhejiang Province and its adjacent sea area. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(1): 200-210

Abstract Fog is a common weather phenomenon, and is also a hazardous weather which is one of main causes of sea and air traffic accidents. So far, the climatological distribution of fog was still a lack of detailed understanding in Zhejiang and its adjacent sea regions. The spatial and temporal distribution of fog acquired from the long time series, is beneficial to monitor the fog formation, evolution and dissipation, and it is significant to the fog distribution and forecast. The fog information of Zhejiang Province and its adjacent sea regions was acquired by using the MTSAT geostationary satellite and weather stations whose data covered the period ranging from 2008 to 2012. Moreover, the fog products on hour scales with $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid resolution were worked out. The results showed that the method of fog identification which classified the threshold of solar altitude with the Normalized Fog Index (NDFI) of the MTSAT data is well suitable for the fog monitoring in the study area. The accuracy of fog identification was nearly 75% that could meet the operational using demand. In the Zhejiang land, the average annual cumulative hour of fog occurrence were about 411.7 h which accounts for 4.7% of the whole year time. The spatial distribution of fog in the Zhejiang land shows that fog occurring frequency in the south area was more than that in the north area, and the frequency in the mountainous area was higher than that in the plain. The south and west mountains, some islands of Zhoushan and Wenzhou were the high-risk areas of the Zhejiang land. In time scale, the fog of the Zhejiang land was more in autumn and winter and less in spring and summer, and the time ranging from 22:00 BT to 09:00 BT was the peak of fog occurring. The spatial distribution of fog in the sea surrounding Zhejiang indicated that sea fog mainly occurs in the coastal area, presenting the pattern in which the fog occurring frequency was decreasing from coastal to offshore. The average annual cumulative hour of fog occurrence in the East China Sea (ECS) were about 311.7 h, and fog occurring frequency was the highest in the southwest of the area. Sea fog of Zhejiang more often occurs in the Wenzhou coastal zone and the Qiantang River estuary, and it had a distinct seasonal characteristic that more fogs in spring and summer, less fogs in autumn and winter. Comparing to land fog, sea fog was not easy to dissipate and can last a longer time because it is the advection fog. Arranging the sea zones by fog occurring frequency, the descending sequence was the southeastern part of ECS, the oceans east of Taiwan, Mideastern part of ECS, southwestern part of Yellow Sea, the midwestern part of ECS, and Taiwan, northwestern part of ECS, southwestern part of

* 资助课题: 浙江省重大科技专项重点社会发展项目(2011C13044)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M22)。
作者简介: 何月, 主要从事卫星遥感监测及应用研究。E-mail: heyue0925@163.com

Yellow Sea and northeastern part of ECS.

Key words Remote sensing, Fog, MTSAT, Climatological distribution, Seasonal variation

摘要 利用日本静止气象卫星 MTSAT 逐时资料,综合地面气象观测数据,对浙江省及其周边海区陆地和海上 2008—2012 年的大雾进行了专题信息提取,并给出了浙江省陆域、周边海域 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格点的小时尺度的遥感大雾产品,结果表明:(1)基于 MTSAT 卫星观测数据,采用分级判识太阳高度角阈值和归一化大雾指数的方法,构建的浙江及其周边地区陆地和海上遥感大雾监测模型,大雾判识精度总体超过 75%,基本满足使用需求。(2)浙江省陆域近 5 年大雾年平均累计为 411.7 h,约占全年的 4.7%,基本呈南多北少,山区多平原少的格局,其中浙江南部高山区、舟山和温州部分海岛及西部山区为大雾多发区,且大雾季节分布为秋冬季较多,春夏季较少,22 时至 09 时是浙江省陆域大雾的高发时段,10 时以后大雾逐渐消散,至后半夜、凌晨前后,大雾频次逐渐增多。(3)研究区海雾主要发生在大陆近海,呈现由近海向外海减少的空间格局,东海海域年大雾累计为 311.7 h,以东海西南部地区大雾出现最多,浙江省沿海大雾的高发区位于温州海域及钱塘江口。研究区海域大雾具有明显的季节特征,主要表现为春季较多,夏季次之,秋冬季较少的分布格局,且海上主要受平流雾影响,大雾不易消散,持续时间较长。从各海区大雾发生频次从高到低依次为:东海东南部、台湾以东洋面、东海中东部、黄海西南部、东海中西部、台湾海峡、东海西北部、黄海东南部、东海西南部和东海东北部。

关键词 卫星遥感,大雾,MTSAT,气候分布,季节变化

中图法分类号 P405 P407

1 引言

雾是近地面的空气中悬浮着大量微小水滴或冰晶,使水平能见度小于 1 km 的天气现象,也是一种灾害天气。近年来,随着社会经济建设,特别是海陆空交通事业的迅猛发展,雾研究的重要性变得更加明显起来,因为雾是引发交通事故的主要原因。常规的大雾监测方法受到观测站点分布以及观测时间的限制,尤其是在浩瀚的海洋上,只有极少数甚至没有观测站。气象卫星观测资料具有覆盖范围广、客观真实性高、信息源可靠且成本低、连续性强等优点(陈林等,2006;梁益同等,2007;Li, et al, 2012),因此使用卫星观测资料识别大尺度雾区,特别是海上大雾以及历史长序列数据大雾的时空分布特征,具有其他常规监测手段所无法替代的优势。

利用卫星遥感技术开展雾的监测研究最早开始于 20 世纪 70 年代(Gurka,1974,1978; Gustafson, et al,1976),主要是利用可见光图像进行云雾识别及消散的研究。中国雾的遥感监测研究起步较晚,郑新江(1988)利用 NOAA 和 GMS-3 分析了黄海海雾特征和动态变化,之后大量的研究利用 GMS、NOAA、GOES、MODIS、FY、HJ 等不同气象卫星观测资料进行大雾的识别,如李亚春等(2001)用 GMS-5 气象卫星的可见光和长波红外通道的资料,采用多通道合成和图像增强技术对白天低层云雾进

行遥感识别和监测;居为民等(1997)利用 GMS、NOAA 卫星资料监测沪宁高速公路上的大雾,并取得较好的效果;孙涵等(2004)重点阐述了雾在 NOAA 各通道的光谱响应特征及相关指标;马慧云等(2005)、陈林等(2006)、张春桂等(2009)、黄子革等(2010)、Bendix 等(2006)以 MODIS 为数据源,通过特征通道的选择,利用阈值法进行雾的遥感提取;梁益同等(2007)和蒋璐璐等(2011)分别利用 FY-1D 和 FY-3A 卫星观测资料,通过可见光、红外等多波段阈值对大雾进行识别,并进行个例验证;王中挺等(2010)利用 HJ-1B 卫星观测资料提出了综合利用 CCD 相机和红外相机数据进行雾监测的方法和流程,并做了个例监测试验。此外,刘健等(1999)、吴晓京等(2005)、李子华等(2011)、张舒婷等(2013)关于雾的微物理特性的研究和张苏平等(2010)、袁金南等(2011)和 Fu 等(2008)在数值模拟等方面的工作,使大雾的卫星遥感反演水平有了长足的发展。

Hunt(1973)认为雾或低云在中红外($3.7 \mu\text{m}$)通道的比辐射率要明显低于其在热红外($11.0 \mu\text{m}$)通道的比辐射率,两者的差异会产生云雾在两个通道的亮温差异,而地表则表现不明显。此特点为雾或低云的遥感识别提供了理论基础(王京丽等,2009; Wang, et al,2010)。日本的 MTSAT 静止卫星较原先的 GMS-5 卫星增加了中红外($3.7 \mu\text{m}$)通道,对大雾的识别能力有了很大的提高,刘希等

(2008)运用光谱分析法,对中国东部沿海海雾进行自动识别;Gao等(2009)利用中红外和热红外双通道差值法,开展黄海夜间海雾的自动识别,并对2006—2007年24个海雾事件进行遥感识别;Li等(2012)综合运用主成分分析、纹理分析等方法,对2006—2009年中国近海各月大雾发生频次进行统计分析。从目前关于MTSAT气象卫星大雾的遥感监测研究文献来看,多应用于海上,且主要以典型案例和事件的形式分析。针对浙江陆地及其周边海区,利用较长时间序列的卫星遥感小时尺度的监测研究迄今为止还未见报道。本研究利用MTSAT静止气象卫星观测资料,综合地面气象观测数据,通过构建遥感大雾监测模型,提取研究区陆地和海洋2008—2012年的逐时大雾信息,从而分析浙江及其周边地区陆地和海上大雾分布的时空特征,掌握该地区大雾的发生频次、高发区域、生消规律等特征,全面评估雾对该地区的影响,从而为大雾预报提供更为全面的背景资料。

2 资料来源和分析方法

2.1 研究区概况及数据源

2.1.1 研究区概况

研究区位于 22° — 32° N, 119° — 129° E,地处中纬度地区,涵盖整个浙江和邻省陆域,海域包括东海、黄海南部和台湾海峡。该区域位于中国东部沿海地区,是中国“T”字形经济带和长三角世界级城市群的核心区,是长三角地区与海峡两岸的连接纽带,在中国对外开放局面中居于举足轻重的地位,同时又是生态环境相对脆弱的地区,水汽充足,近地面大气层相对湿度高,容易发生大雾天气。研究表明,舟山群岛和福建沿海是大雾频发区(Ellrod, 1995)。据气候资料统计,浙江省多年平均雾日为31 d,沿海地区大部分在40 d及以上,部分海岛站(大陈岛)年平均雾日超过100 d。

2.1.2 数据源及预处理

本研究采用2008—2012年逐时的MTSAT静止气象卫星观测资料,同期地面大雾观测资料以及能见度自动观测资料。首先根据出现大雾天气现象时,站点能见度低,对浙江省出现大雾和能见度在1 km以下的站点序列资料进行整理,建立浙江省大雾个例资料库。

MTSAT静止气象卫星观测数据由日本高知大学提供,空间分辨率约为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,范围为 70° N— 20° S, 70° — 160° E(高玲等,2012)。数据的存储格式为PGM格式,分灰度值(GAME)和对照表(CAL)两个文件。通过IDL程序批量处理,将原始灰度图像根据对照表文件转换为具有实际物理意义的数字,其中反射通道转换为反射率,辐射通道转换为亮温值,且将数据按时次存放,同一时次存放于一个TIF文件中。

收集浙江省69个常规气象站天气现象(大雾)的观测记录,记录大雾的起止时间。2011年开始,浙江省气象局已经全面启用了自动能见度仪的观测,至2012年底,浙江省自动能见度观测站共143个,一天24次的自动观测相对于人工观测一日3次(4次)来说,时间上更连续,更能反映大雾造成的能见度演变情况。

2.2 大雾信息提取

2.2.1 大雾信息提取方法

卫星遥感大雾判识是长序列大雾时空分布特征分析的基础工作。雾的辐射特性研究表明,雾区具有特定的光谱特征:可见光、近红外波段反照率高于下垫面,低于中、高云;红外波段亮温通常低于下垫面,高于中、高云,但在天气伴有逆温层情况下(辐射雾)亮温高于下垫面邻近地区;近红外波段反照率低于可见光波段等。为了将雾与其他地物加以区分,常规的遥感监测大雾方法主要有双通道法(Underwood, et al, 2004; 刘希等, 2008; Gao, et al, 2009)、主成分分析法(李军等, 2011; Li, et al, 2012)、结合纹理处理方法(陈伟等, 2003; 周红妹等, 2011a, 2011b)等。其中较常用的双通道差值法,是将中红外波段($3.7 \mu\text{m}$)和热红外波段($11 \mu\text{m}$)作差值,但研究中发现利用中红外和热红外波段的归一化计算比双通道差值效果更佳,研究中将两者的归一化计算定义为归一化大雾指数(NDFI)。采用分级判识太阳高度角阈值和归一化大雾指数的方法,首先通过多通道阈值进行云检测,排除云的干扰,再利用海陆蒙版,对陆地和海洋加以区别,然后通过太阳高度角的分级分别构建夜间、白天和太阳初升、始落分阶段的大雾监测方法。应用IDL程序对大雾进行批量自动判识,最终生成大雾专题文件,其中,雾为1,云为-1,其他为0。判识流程详见图1。

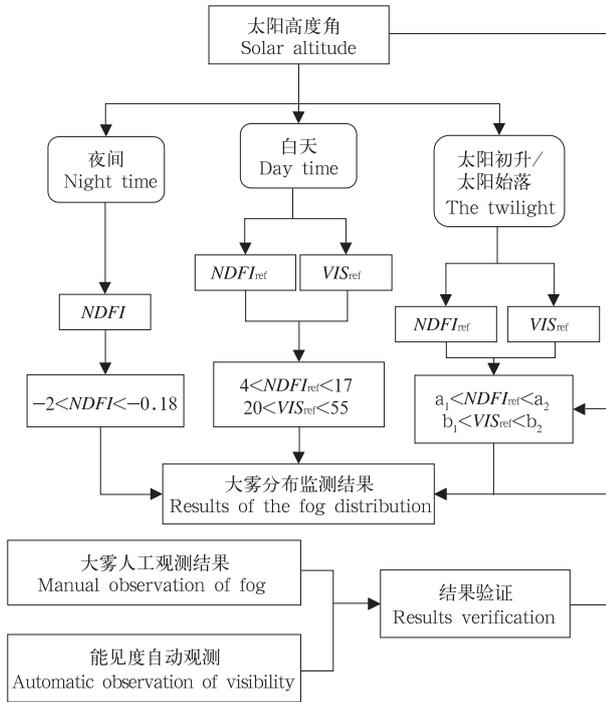


图 1 卫星遥感雾监测流程

Fig. 1 Flowchart for the fog monitoring of remote sensing

图 1 中, $NDFI = \frac{BT_{3.7} - BT_{11}}{BT_{3.7} + BT_{11}} = \frac{B_4 - B_1}{B_4 + B_1}$,
 $NDFI_{ref} = \frac{BT_{3.7}/\sinh - BT_{11}}{BT_{3.7}/\sinh + BT_{11}} = \frac{B_4/\sinh - B_1}{B_4/\sinh + B_1}$,
 $VIS_{ref} = VIS/\sinh$, $BT_{3.7}$ 、 BT_{11} 分别为 $3.7 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 的辐射值, 对应 MTSAT 卫星为 B_4 、 B_1 , 即第 4 波段和第 1 波段的亮温值, VIS 是可见光通道反射率值, h 是太阳高度角。 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 是根据太阳

高度角的不同设置对应不同的阈值。

2.2.2 大雾信息提取精度验证

针对有雾日每天逐时大雾提取的结果与气象站人工观测天气现象中的大雾结果进行比较。首先对站点进行筛选, 去除代表性较差的站点, 再对站点进行分类, 将海岸线 10 km 范围内的沿海站及海岛站共 8 个站的大雾人工观测结果作为沿海及海上大雾精度验证的参考站, 将陆地站共 50 个站的大雾观测结果作为陆地大雾精度验证的参考站。若所在像元或周边 3×3 像元内有 3 个及以上像元出现雾时认为该点有雾, 否则为无雾, 去除有云站点, 其余站点分别与气象站所在位置进行比对。观测有雾, 且遥感识别有雾, 为正确; 观测无雾, 而遥感识别有雾, 为误判; 观测有雾, 遥感识别无雾, 为漏判。

统计 2008—2012 年沿海及海岛共 8 个站和陆地站共 50 个站各年各项精度指标(表 1)发现, 该方法在海上和陆地大雾监测过程中总体正确率分别达 76.8% 和 78.6%, 漏判率为 16.4% 和 16.5%, 误判率为 23.1% 和 21.3%。其中正确率最低的年份为 2009 年, 沿海及海岛站、陆地站的正确率分别达 74.7% 和 74.8%, 误判率为 25.2% 和 25.1%; 正确率最高的年份为 2010 年, 沿海及海岛站、陆地站的正确率分别达 81.4% 和 83.3%, 误判率为 18.5% 和 16.6%。从各年份精度分析来看, 精度指标相对稳定, 正确率均在 74% 以上, 漏判率在 30% 上下, 这表明该方法在海上及陆地大雾监测中均能达到较高的提取精度, 基本能满足日常大雾监测的需要。

表 1 大雾遥感判识精度分析(与大雾人工观测对比)

Table 1 The accuracy of the fog identification of remote sensing (compared to manual observation)

年份	沿海及海岛站点(8 站)				陆地站点(50 站)			
	样本点	误判率(%)	漏判率(%)	正确率(%)	样本点	误判率(%)	漏判率(%)	正确率(%)
2008	34108	23.5	13.7	76.4	266925	21.4	18.1	78.5
2009	35156	25.2	10.3	74.7	261169	25.1	10.0	74.8
2010	20451	18.5	28.3	81.4	169440	16.6	26.2	83.3
2011	33599	24.3	17.4	75.6	252929	23.1	14.9	76.8
2012	27487	23.8	12.2	76.1	171374	20.4	13.2	79.5
总计	150802	23.1	16.4	76.8	1121837	21.3	16.5	78.6

将遥感大雾提取结果与大雾人工观测结果进行逐时对比验证, 统计各精度指标, 图 2 和 3 为 2008—2012 年逐月及逐时遥感大雾判识准确率统计结果, 从各月判识结果来看, 沿海各站(图 2a)春季正确率相对较高, 平均达 78.5%, 冬季次之, 夏季

较低, 正确率不到 60%, 其中最高为 2 月, 达 92.3%, 最低为 7 月, 仅为 59.3%; 陆地各站(图 2b)冬季正确率较高, 为 80.6%, 其中, 1—3 月均超过 85%, 最低为 10 月, 仅为 55.6%。总体来说, 6—10 月漏判率比较高, 主要原因是由于该时段内雾较少,

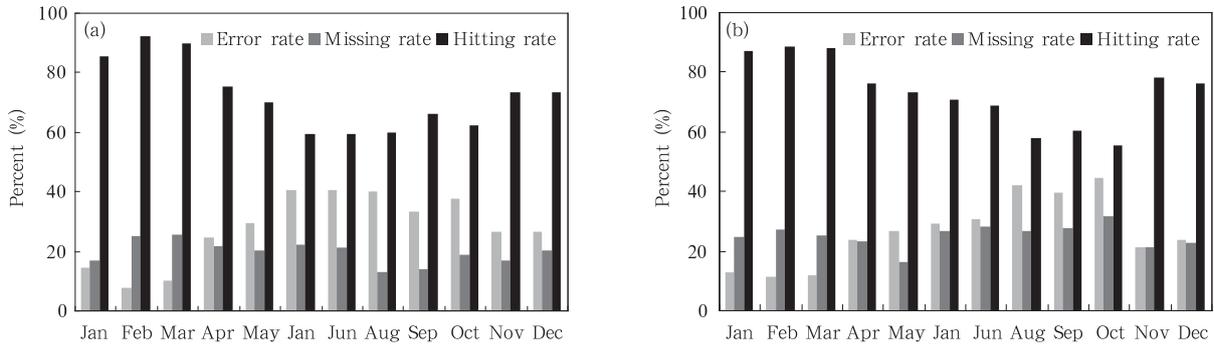


图2 2008—2012年各月大雾遥感判识与人工观测对比(a. 沿海站, b. 陆地站)

Fig. 2 Comparative analysis of the monthly fog frequency (%) between the remote sensing identification and manual observation during the period ranging from 2008 to 2012 (a. coastal stations, b. land stations)

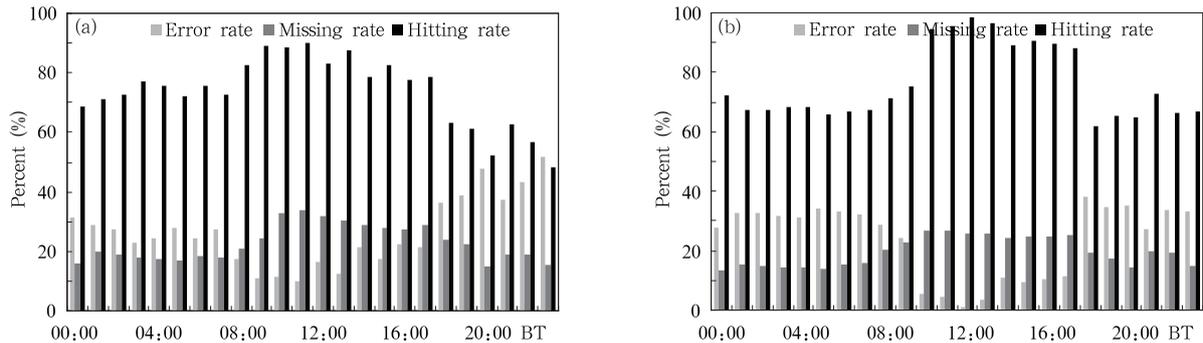


图3 2008—2012年逐时大雾遥感判识结果与人工观测对比(a. 沿海站, b. 陆地站)

Fig. 3 Comparative analysis of the hourly fog frequency (%) between the remote sensing identification and manual observation during the period ranging from 2008 to 2012 (a. coastal stations, b. land stations)

且干扰较大,无法有效分离低云和雾,特别是低云和雾高低层叠加的时候,往往被遥感识别成云,而观测则认为雾。

从逐时判识结果来看,沿海各站(图3a)和陆地各站(图3b)表现为较一致的特征,08—16时(北京时间,下同)遥感大雾提取的精度相对较高,正确率普遍超过80%,另外,在大雾最容易生成的夜间(20—02时),判识正确率约为65%。日落时段准确率偏低,仅为61.2%和61.7%,由此可以说明,该方法对白天大雾监测精度更高,因为根据可见光图像特征,可有效分离大雾,夜间由于仅根据短波红外及亮温差的判识,提取精度相对较低。由于海上多为平流雾,大雾的持续时间较长,如大陈岛站大雾最长持续

时间近120 h,而遥感监测对于夜间的判识精度低于白天,这也导致了遥感海上大雾的整体判识精度不如陆地。

综上精度验证结果表明,该模型对于长时间序列大雾的判识精度近80%,基本满足使用需求。该方法更适用于冬春季白天大雾的识别。

2.3 统计方法

研究采用5年总累计小时数、各年份季节累计小时数及逐时大雾发生频次3种方式进行统计。5年总累计小时数是将5年内所有有雾的逐时判识结果进行处理分析,最终生成5年总累计小时数分析结果,用以反映5年来浙江及其周边地区大雾发生的总体分布特点。分季节累计小时数统计是对5年中

春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—次年2月)每个季节所有有雾的逐时判识结果进行处理分析,最终生成4个季节的大雾分析结果,用以反映大雾在季节上的频次分布特点。逐时大雾发生频次是统计年平均逐时大雾发生频次,用以反映大雾的生消特征、高发时段等信息。

3 卫星遥感陆地大雾时空分布特征

3.1 卫星遥感陆地大雾空间特征分析

从2008—2012年浙江省陆地大雾 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格点的大雾年平均累计时数分布(图4)可以看出,浙江省近5年大雾年平均累计时数为411.7h,约占全年的4.7%,基本呈南多北少,山区多平原少的格局,其中,大雾多发(年平均大雾累计小时 ≥ 300 h)地区主要有:(1)浙江南部高山区,以泰顺、景宁、文成为主,年平均大雾累计时数超过600h;(2)舟山及温州部分海岛零星分布,年平均大雾累计时数超过400h;(3)浙江省西部山区(临安、开化等地),以及中南部山区(遂昌、青田、永嘉和温州等地),年平均大雾累计时数在400—600h。该空间分布趋势总体与滕卫平等(2009)的研究结果吻合。从浙江省及各市大雾年平均累计时数的分布情况(表2)可以看出,各市大雾发生频次从高到低依次为:温州市、舟山市、丽水市、台州市、衢州市、杭州市、金华市、宁波市、绍兴市、湖州市和嘉兴市。

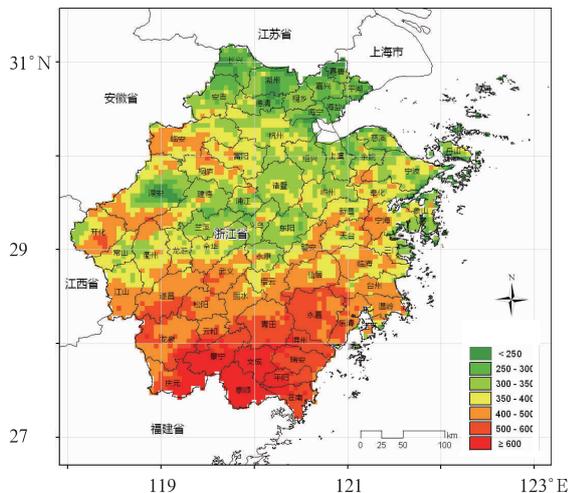


图4 2008—2012年浙江省陆地大雾年平均累计时数
Fig. 4 Average annual cumulative hours of fog occurrence in the Zhejiang land from 2008 to 2012

表2 2008—2012年浙江省及各市
大雾年平均累计时数

Table 2 Average annual cumulative hours of fog occurrence in Zhejiang Province and its cities covered from 2008 to 2012

地点	年均累计时数(h)	地点	年均累计时数(h)
杭州	353.7	金华	350.4
宁波	343.2	衢州	382.3
温州	572.7	舟山	566.3
嘉兴	368.2	台州	400.6
湖州	332.6	丽水	515.2
绍兴	342.9	浙江省	411.7

3.2 卫星遥感陆地大雾季节分布特征

为说明浙江陆地大雾的季节分布特征,分别对近5年春、夏、秋、冬四季的大雾累计时数进行统计分析,获得各季大雾空间分布情况(图5),可以看出,浙江省陆地大雾季节特征明显,春季浙江省陆地雾区主要分布于南部山区,北部和东北部偏少,全省平均大雾累计时数为106h,总大雾累计时数在38—212h,部分地区超过150h,浙中大雾累计时数在70—110h;夏季浙江陆地大雾发生相对较少,全省平均大雾累计时数为60h,总大雾累计时数在12—130h;秋季浙江陆地雾区主要分布于东南部及浙西北山区,嘉兴和衢州等地相对偏少,全省平均大雾累计时数为140h,总大雾累计时数在70—412h,浙南部分山区超过400h;冬季是浙江大雾最为频发的季节,主要分布于南部及西南部山区,北部和东北部偏少,全省平均大雾累计时数为200h,总大雾累计时数在86—340h。总体来看,陆地雾主要为辐射雾,季节特征表现为冬、秋季较多,春、夏季较少的分布格局,从秋、冬季的大雾分布来看,浙江南部高山区,景宁、泰顺、文成、庆元等地为大雾高发区。

3.3 卫星遥感陆地大雾逐时分布特征

浙江省大雾逐时分布频次(图6)结果显示,浙江省陆域范围22时至次日09时是大雾的高发时段,特别是00时至08时,占大雾总频次的40%,各时次年均超过20次,10时以后随着太阳辐射的增强,大雾逐渐消散,至后半夜、凌晨前后,大雾频次逐渐增多。各市大雾逐时分布结果显示,除舟山以外,其余各市基本与全省呈现较为一致的时间变化特征,主要是由于舟山多海岛,水汽较重,受海雾影响较为严重,在下午仍表现出比其他各市较高的大雾频次。

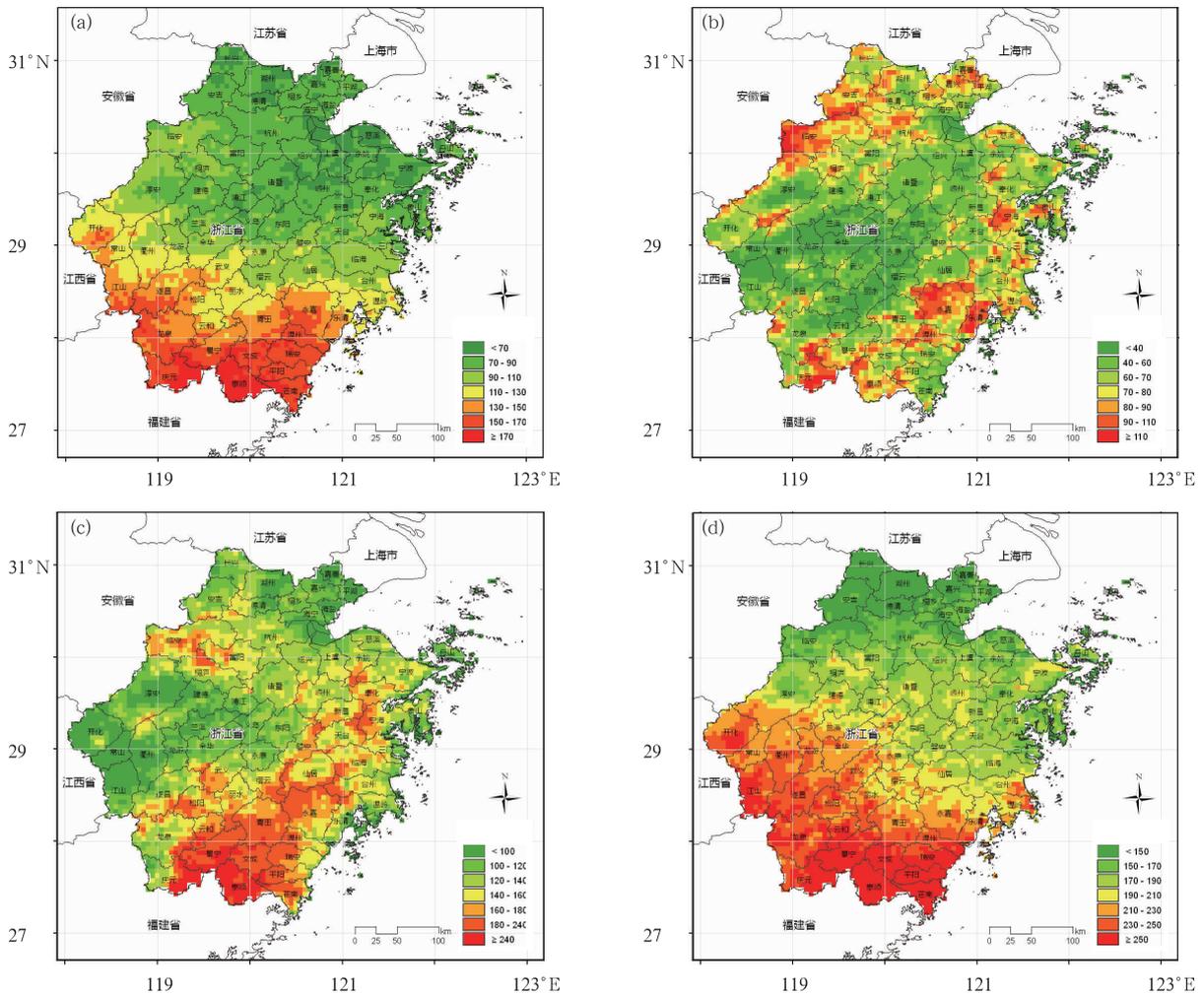


图5 2008—2012年浙江省陆地大雾各季平均累计时数(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)
 Fig. 5 Average seasonal cumulative hours of fog occurrence in the Zhejiang land from 2008 to 2012
 (a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

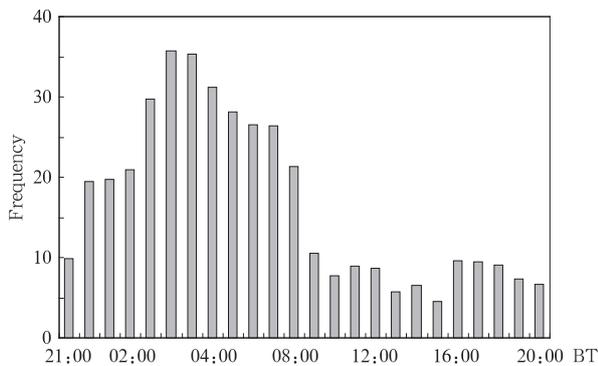


图6 2008—2012年浙江省大雾逐时分布频次
 Fig. 6 Hourly frequency of fog in Zhejiang Province from 2008 to 2012

4 卫星遥感海上大雾时空分布特征

4.1 卫星遥感海上大雾时间特征分析

从2008—2012年浙江及其周边海域 $0.05^\circ \times$

0.05° 网格点的大雾年平均累计时数分布(图7)可以看出,研究区海雾主要发生在大陆近海,呈现由近海向外海减少的空间格局;其中福建省沿岸大雾最为频繁,年平均累计时数在400—500 h;东海海域年大雾累计时数为311.7 h,以东海西南部地区大雾出现最多,其次为东海中西部、东海西北部和东海东南部地区,东海东北部和中东部地区大雾出现频次相对较少,浙江省沿海大雾的高发区位于温州海域及钱塘江口。从各海区大雾发生频次(表3)从高到低依次为:东海东南部、台湾以东洋面、东海中东部、黄海西南部、东海中西部、台湾海峡、东海西北部、黄海东南部、东海西南部和东海东北部。

4.2 卫星遥感海上大雾季节分布特征

从浙江及其周边海域大雾的季节分布(图8)可以看出,浙江及其周边海域大雾具有明显的季节特

征,主要表现为春季较多,夏季次之,秋、冬季较少的分布格局,除夏季外,其余各季空间分布特征较为一致,从春季东海的海雾分布来看,东海西南部、中西部地区为海雾高发区。

表 3 2008—2012 年浙江及其周边海区
大雾年均累计时数分区统计

Table 3 The statistics of the average annual cumulative hours of fog occurrence in the sea surrounding Zhejiang Province from 2008 to 2012

地区	年均累计时数(h)	地区	年均累计时数(h)
黄海西南部	389.5	黄海东南部	274.9
东海西北部	265.2	东海东北部	198.7
东海中西部	335.5	东海中东部	389.4
东海西南部	240.7	东海东南部	557.6
台湾海峡	302.2	台湾以东洋面	488.3
东海海域	311.2		

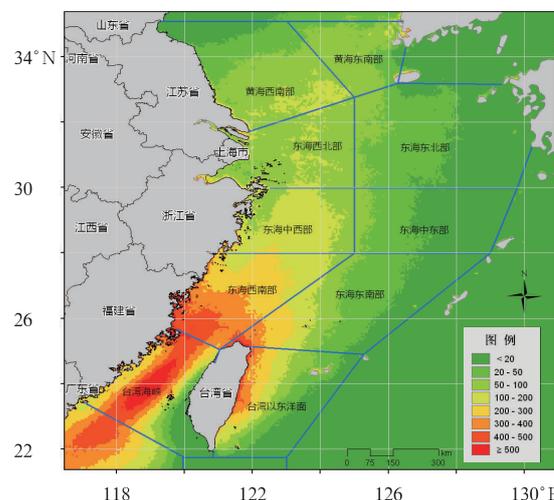


图 7 2008—2012 年浙江及其周边海域大雾年平均累计时数
Fig. 7 Average annual cumulative hours of fog occurrence in the sea surrounding Zhejiang Province from 2008 to 2012

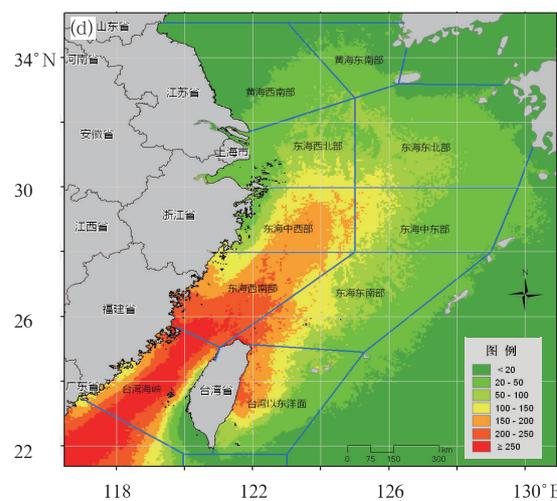
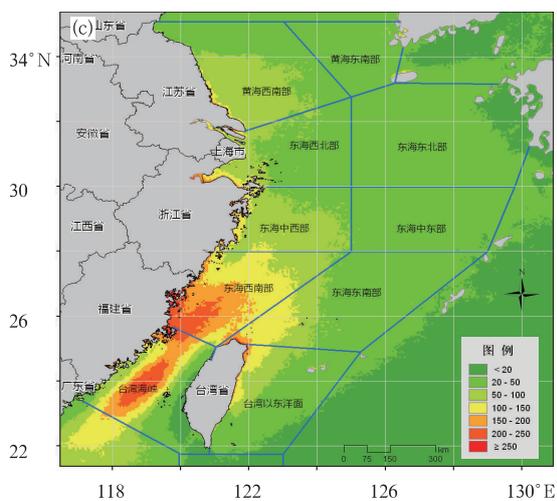
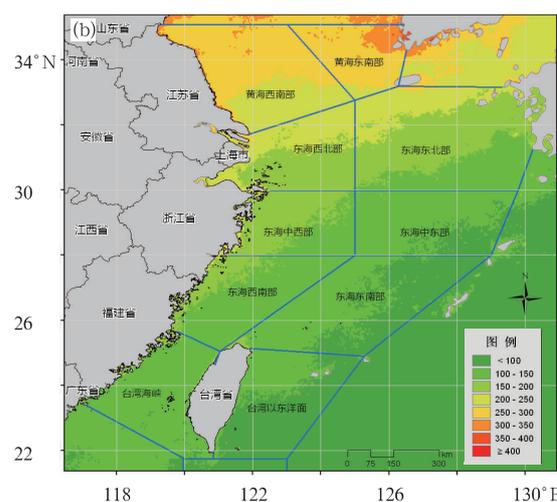
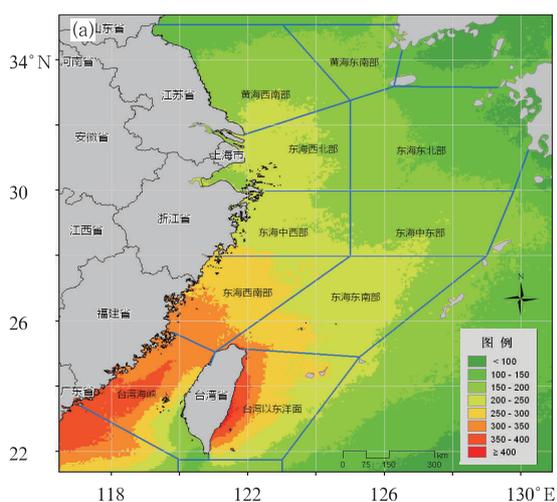


图 8 2008—2012 年浙江及其周边海域大雾各季平均累计时数(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)
Fig. 8 Average seasonal cumulative hour of fog occurrence in the sea surrounding Zhejiang Province from 2008 to 2012 (a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

4.3 卫星遥感海上大雾逐时分布特征

东海海域大雾逐时分布频次(图9)结果显示,东海海域01—08时是大雾的高发时段,各时次年均累计超过20次,11时以后大雾频次减少明显,至16时开始,大雾频次有所增多。总体来看,海上大雾各时次大雾频次差比陆地大雾小,这表明,海上主要受平流雾影响,大雾不易消散,持续时间较长。各海区逐时大雾分布频次,基本与东海海域呈现较为一致的时间变化特征。

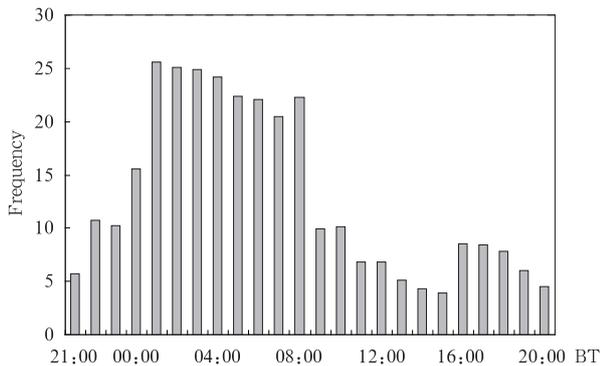


图9 2008—2012年平均东海海域大雾逐时分布频次

Fig. 9 Hourly frequency of fog in the East China Sea from 2008 to 2012

5 结论和讨论

利用静止气象卫星MTSAT观测资料,综合地面气象观测数据,通过构建遥感大雾监测模型,提取研究区陆地和海洋共5年(2008—2012年)的大雾专题信息,从而分析浙江省及其周边海区陆地和海上大雾分布的气候特征,得到以下主要结论:

(1)基于MTSAT静止气象卫星观测数据,采用分级判识太阳高度角阈值和归一化大雾指数的方法,构建了浙江省及其周边海区陆地和海上遥感大雾监测模型,精度验证表明,逐时的遥感大雾反演结果对于长时间序列大雾的判识精度超过75%,基本满足使用需求。且该方法更适用于冬、春季白天大雾的识别。

(2)分析给出了浙江省陆域 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格点的遥感大雾产品。结果表明浙江省近5年大雾年平均累计时数为411.7 h,约占全年的4.7%,基本呈南多北少,山区多平原少的格局,其中浙江南部高山区、舟山和温州部分海岛及西部山区为大雾多发区(年平均大雾累计时数超过300 h);季节空间特

征分析表明,浙江省陆域大雾表现为秋冬季较多,春夏季较少的分布格局,各季年平均大雾累计时数为60(夏季)—200 h(冬季);逐时大雾分布频次结果显示,22时至次日09时是浙江省陆域大雾的高发时段,占大雾总频次的40%,10时以后大雾逐渐消散,至后半夜、凌晨前后,大雾频次逐渐增多。

(3)分析给出了浙江省及其周边海区 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格点的遥感大雾产品。结果表明,研究区海雾主要发生在大陆近海,呈现由近海向外海减少的空间格局,东海海域年大雾累计时数为311.7 h,以东海西南部地区大雾出现最多,浙江省沿海大雾的高发区位于温州海域及钱塘江口,研究区海域大雾具有明显的季节特征,主要表现为春季较多,夏季次之,秋冬季较少的分布格局,且海上主要受平流雾影响,大雾不易消散,持续时间较长。从各海区大雾发生频次从高到低依次为:东海东南部、台湾以东洋面、东海中东部、黄海西南部、东海中西部、台湾海峡、东海西北部、黄海东南部、东海西南部和东海东北部。

基于卫星资料的小时尺度的长时间序列大雾时空分布特征有利于全面掌握研究区的大雾分布、生消特征、高发区域等信息,对大雾时空分布特征、大雾预报具有重要意义。在研究中仍存在以下问题:(1)低云以及多层云的客观存在是影响遥感大雾监测准确率的重要因素,若在遥感大雾自动监测模型中加入能见度、相对湿度等实时的地面观测数据以及云分类、云顶亮温等卫星产品将有助于进一步提高遥感大雾判识的准确率;(2)一天24小时的能见度自动观测与静止气象卫星观测资料时间上较为匹配,因此结合自动站能见度观测的遥感大雾监测,具有良好的业务应用前景,可实时校验遥感结果的准确率。

致谢:感谢浙江省气候中心李正泉博士对本文英文的修改润色及写作的帮助。

参考文献

- 陈林,牛生杰,仲凌志. 2006. MODIS监测雾的方法及分析. 南京气象学院学报, 29(4):448-454. Chen L, Niu S J, Zhong L Z. 2006. Detection and analysis of fog based on MODIS data. J Nanjing Inst Meteor, 29(4): 448-454 (in Chinese)
- 陈伟,周红妹,袁志康等. 2003. 基于气象卫星分形纹理的云雾分离研究. 自然灾害学报, 12(2): 133-139. Chen W, Zhou H M, Yuan Z K, et al. 2003. Recognition of fog and cloud in meteor-

- ological satellite image based on fractal texture structure analysis. *J Natural Disasters*, 12(2): 133-139(in Chinese)
- 高玲, 任通, 李成才等. 2012. 利用静止卫星 MTSAT 反演大气溶胶光学厚度. *气象学报*, 70(3): 598-608. Gao L, Ren T, Li C C, et al. 2012. A retrieval of the atmospheric aerosol optical depth from MTSAT. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 598-608(in Chinese)
- 黄子革, 潘长明, 王贵钢等. 2010. MODIS 卫星海雾检测技术研究. *海洋测绘*, 30(2): 70-73. Huang Z G, Pan C M, Wang G G, et al. 2010. Study on the technique of sea fog detection using MODIS data. *Hydrographic Surveying and Charting*, 30(2):70-73(in Chinese)
- 蒋璐璐, 魏鸣. 2011. FY-3A 卫星资料在雾监测中的应用研究. *遥感技术与应用*, 26(4): 489-495. Jiang L L, Wei M. 2011. Application of fog monitoring with FY-3A data. *Remote Sensing Technol Appl*, 26(4): 489-495(in Chinese)
- 居为民, 孙涵, 张忠义等. 1997. 卫星遥感资料在沪宁高速公路大雾监测中的初步应用. *遥感信息*, (3): 25-27. Ju W M, Sun H, Zhang Z Y, et al. 1997. The preliminary application on the fog monitoring in Huning expressway based on remote sensing satellite data. *Remote Sensing Information*, (3):25-27(in Chinese)
- 李军, 韩志刚, 陈洪滨等. 2011. 静止气象卫星遥感探测华北平原秋季大雾研究. *遥感技术与应用*, 26(2): 186-195. Li J, Han Z G, Chen H B, et al. 2011. Detection of heavy fog events over North China Plain by using the geostationary satellite data. *Remote Sensing Technol Appl*, 26(2): 186-195(in Chinese)
- 李亚春, 孙涵, 李湘阁等. 2001. 用GMS-5气象卫星资料遥感监测白天雾的研究. *南京气象学院学报*, 24(3): 343-349. Li Y C, Sun H, Li X G, et al. 2001. Study on detection of daytime fog using GMS-5 weather satellite data. *J Nanjing Inst Meteor*, 24(3):343-349(in Chinese)
- 梁益同, 张家国, 刘可群等. 2007. 应用FY-1D气象卫星监测雾. *气象*, 33(10): 68-72. Liang Y T, Zhang J G, Liu K J, et al. Application of FY-1D meteorological satellite to monitoring of fog. *Meteor Mon*, 33(10): 68-72(in Chinese)
- 刘健, 许健民, 方宗义. 1999. 利用NOAA卫星的AVHRR资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征. *应用气象学报*, 10(1): 29-33. Li J, Xu J M, Fang Z Y. 1999. Analysis of scale characteristics at the top of cloud and fog using NOAA AVHRR satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 10(1): 29-33(in Chinese)
- 李子华, 刘端阳, 杨军. 2011. 辐射雾雾滴谱拓宽的微观物理过程和宏观条件. *大气科学*, 35(1): 41-54. Li Z H, Liu D Y, Yang J. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening. *Chinese J Atmos Sci*, 35(1): 41-54(in Chinese)
- 刘希, 胡秀清. 2008. 基于MTSAT卫星的我国东部沿海雾区的自动识别. *台湾海峡*, 27(1): 112-117. Li X, Hu X Q. 2008. Sea fog automatic detection over the East China Sea using MTSAT data. *J Oceanography in Taiwan Strait*, 27(1):112-117(in Chinese)
- nese)
- 马慧云, 李德仁, 刘良明. 2005. 基于MODIS卫星数据的平流雾检测研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 30(2): 143-145. Ma H Y, Li D R, Liu L M. 2005. Fog detection based on EOS MODIS data. *Geomatics Infor Sci Wuhan University*, 30(2): 143-145(in Chinese)
- 孙涵, 孙照渤, 李亚春等. 2004. 雾的气象卫星遥感光谱特征. *南京气象学院学报*, 27(3): 289-301. Sun H, Sun Z B, Li Y C, et al. 2004. Meteorological satellite remote-sensing spectral characteristics of fog. *J Nanjing Inst Meteor*, 27(3): 289-301(in Chinese)
- 滕卫平, 杜惠良, 项云法等. 2009. 浙江省大雾的气候特征及其与气象要素的关系. *浙江大学学报(理学版)*, 36(5): 594-602. Teng W P, Du H L, Xiang Y F, et al. Fog's climate characteristics and relations with meteorological elements in Zhejiang Province. *J Zhejiang University(Science edition)*, 36(5): 594-602
- 王京丽, 李三妹, 吴晓京等. 2009. 卫星遥感北京大雾气候分布特征及成因分析初探. *干旱区地理*, 32(1): 23-31. Wang J L, Li S M, Wu X J, et al. 2009. Climate distributing characteristics of fog in Beijing by using remote sensing in recent five years. *Arid Land Geography*, 32(1): 23-31(in Chinese)
- 王中挺, 厉青, 王桥等. 2010. 利用环境一号卫星数据监测雾分布. *遥感技术与应用*, 25(3): 318-322. Wang Z T, Li Q, Wang Q, et al. 2010. Detection of fog using HJ-1 data. *Remote Sensing Technol Appl*, 25(3): 318-322(in Chinese)
- 吴晓京, 陈云浩, 李三妹. 2005. 应用MODIS数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演. *遥感学报*, 9(6): 688-695. Wu X J, Chen Y H, Li S M. 2005. Utilizing MODIS data to retrieve the visibility and microphysical properties of fog happens in Northwest China. *J Remote Sensing*, 9(6): 688-695(in Chinese)
- 袁金南, 黄健. 2011. 珠江口附近春季一次海雾的观测分析及三维数值模拟. *气象学报*, 69(5): 847-859. Yuan J N, Huang J. 2011. An observational analysis and 3-dimensional numerical simulation of a sea fog event near the Pearl River Mouth in boreal spring. *Acta Meteor Sinica*, 69(5): 847-859(in Chinese)
- 张春桂, 蔡义勇, 张加春. 2009. MODIS遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用. *应用气象学报*, 20(1): 8-16. Zhang C G, Cai Y Y, Zhang J C. The application of monitoring sea fog in Taiwan Strait using MODIS remote sensing data. *J Appl Meteor Sci*, 20(1): 8-16(in Chinese)
- 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析. *大气科学*, 37(3): 552-562. Zhang S T, Niu S J, Zhao L J. 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China sea. *Chines J Atmos Sci*, 37(3): 552-562(in Chinese)
- 张苏平, 任兆鹏. 2010. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验. *气象学报*, 68(4): 439-449. Zhang S P, Ren Z P. 2010. The influence of the thermal effect of under-

- laying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: Observations and numerical simulations. *Acta Meteor Sinica*, 68(4): 439-449(in Chinese)
- 郑新江. 1988. 黄海海雾的卫星云图特征分析. *气象*, 14(6): 7-9.
- Zheng X J. 1998. On satellite imagery features of sea fogs over the Yellow Sea. *Meteor Mon*, 14(6): 7-9(in Chinese)
- 周红妹, 葛伟强, 柏桦等. 2011a. 气象卫星大雾遥感自动识别技术研究. *热带气象学报*, 27(2): 152-160. Zhou H M, Ge W Q, Bai H, et al. 2011a. Research on automatic fog identification technology by meteorological satellite remote sensing. *J Trop Meteor*, 27(2): 152-160(in Chinese)
- 周红妹, 汤绪, 葛伟强等. 2011b. 城市和沿海大雾遥感自动检测和云、雾分离技术研究. *高原气象*, 30(3): 675-682. Zhou H M, Tang X, Ge W Q, et al. 2011b. Automatic detection of heavy fog and cloud-fog separation technology in city and coastal area of Eastern China based on meteorological satellite remote sensing image. *Plateau Meteor*, 30(3): 675-682(in Chinese)
- Bendix J, Thies B, Nauss T, et al. 2006. A feasibility study of daytime fog and low stratus detection with TERRA/AQUA over land. *Meteor Appl*, 13(2): 111-125
- Ellrod G P. 1995. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Wea Forecasting*, 10(3): 606-619
- Fu G, Guo J T, Pendergrass A, et al. 2008. An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas. *Oce Co Sea Res*, 7(1): 27-34
- Gao S H, Wu W, Zhu L L, et al. 2009. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea using MTSAT-1R data. *Acta Oceanol Sinica*, 28(2): 23-35
- Gurka J J. 1974. Using satellite data for forecasting fog and stratus dissipation//5th Conference on Weather Forecasting and Analysis, 54-57
- Gurka J J. 1978. The role of inward mixing in the dissipation of fog and stratus. *Mon Wea Rev*, 106(11): 1633-1635
- Gustafson A V, Wasserman S E. 1976. Use of satellite information in observing and forecasting fog dissipation and cloud formation. *Mon Wea Rev*, 104(3): 323-324
- Hunt G E. 1973. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal wavelengths. *J Roy Meteor Soc*, 99: 346-369
- Li J, Han Z G, Chen H B, et al. 2012. Fog detection over China's adjacent sea area by using the MTSAT geostationary satellite data. *Atmos Oce Sci Lett*, 5(2): 128-133
- Underwood S J, Ellrod G P, Kuhnert A L. 2004. A multiple-case analysis of nocturnal radiation-fog development in the central valley of California utilizing the GEOS nighttime fog product. *Meteor Appl*, 43(2): 297-311
- Wang J L, Li S M, Liu X L, et al. 2010. An analysis of the fog distribution in Beijing for the 2001 - 2005 period using NOAA and FY data. *Atmos Res*, 96(4): 575-589