

用星载先进微波探测器 (AMSU) 资料开展区域 地表洪涝分类监测*

谷松岩¹⁾²⁾ 邱 红¹⁾²⁾ 冉茂农¹⁾ 张文建¹⁾

¹⁾ (国家卫星气象中心,北京 100081) ²⁾ (北京大学物理学院,北京 100871)

摘 要

以微波辐射传输模式为基础,正演模拟分析星载先进微波探测器 (AMSU) 窗区通道微波亮温对地表洪涝信息的敏感性,结果表明中心频点分别为 31.4、50.3 和 89.0 GHz 的 AMSU 窗区通道 2、3 和 15 的微波亮温对地表洪涝特征敏感;以正演模拟计算结果为基础,选择对地表洪涝特征敏感的 AMSU 窗区通道为因子,组合形成 AMSU 洪涝指数 AFI (AMSU Flooding Index),进行地表洪涝区分类研究;地表洪涝分类结果与经机-地校验过的机载合成孔径雷达 L-SAR 资料分析结果进行对比分析,分类正确率可达 73%。短时监测试验结果表明,应用美国第 5 代极轨业务环境卫星上装载的先进微波探测器 (AMSU) 微波资料可以在准全天候条件下,实现区域地表洪涝区分类实时监测,有效弥补红外和可见波段洪涝遥感探测技术在云天条件下无法实施的缺陷。

关键词: 先进微波探测器 洪涝指数 分类监测

引 言

AMSU 是从美国第 5 代极轨业务环境卫星的第一颗星 NOAA-15 开始装载的星载先进微波探测器,由 AMSU-A 和 AMSU-B 两部分组成。其中 AMSU-A 包括频率分布从 23.8 GHz 到 89.0 GHz 的 15 个微波探测通道,可同时用于地表和大气的参数反演。当地面洪涝区上空有云层覆盖时,以往洪涝区分类监测中经常使用的可见光和近红外波段的遥感手段无法再用来获取地表信息,微波遥感成为唯一可行的遥感途径。AMSU 是我国目前唯一可以业务获取的星载被动微波探测资料,开展 AMSU 资料的洪涝监测应用研究具有业务应用前景。美国科学家 N. C. Grody 等人^[1]曾利用 AMSU 通道 1、2 和 3 的组合来分析地表环境参数的变化,取得了很好的应用效果。本文针对地表洪涝监测开展 AMSU 辐射传输正演模拟计算,根据模拟计算结果,为了在非强降水区有效克服大气的影晌,选用通道 2、3 和 15 的新的组合方式,形成对地表洪涝区分类特征比较敏感的 AMSU 洪涝指数 AFI (AMSU Flooding Index)。利用这一洪涝指数,可以有效地将地表洪涝区分类为洪涝淹没区、泥泞区、过湿区和背景干燥区。

* 本文由国家重点基础研究项目 (G1998040909) 资助。

2001-11-28 收到,2001-12-27 收到修改稿。

1 分析方法

利用遥感手段获取地表下垫面的洪涝信息,进行地表洪涝区分类研究,并进而开展洪涝灾情评估,一直是人们关注和期待的。受遥感仪器探测能力和遥感资料获取方式的制约,全天候业务洪涝监测及评估问题,始终没有得到解决。可以业务实时获取的 AMSU-A 微波资料,为云覆盖条件下地表洪涝区分类监测的业务实施提供了可能。微波遥感地表洪涝信息,以主动方式最具优势,但目前主动微波遥感资料的业务获取没有保障,使得主动微波探测资料的业务应用受到限制。利用星载微波遥感资料(SSM/I)开展被动微波遥感地表下垫面洪涝信息,能有效提取地表洪涝区分类监测信息^[2]。但 SSM/I 没有搭载在业务卫星上,无法进行实时业务应用。我们工作的目的就是将 SSM/I 及其它被动微波探测地表洪涝信息的方法尝试应用于业务卫星 NOAA-15 及其后续星上的 AMSU-A 资料中,弥补目前可见光和近红外洪涝业务监测技术在云天条件下无法探测的缺陷。

1.1 AMSU-A 微波窗区通道对地表洪涝信息的敏感性分析

AMSU-A 通道 1 为水汽吸收通道,对近地层水汽比较敏感。通道 2、3 和 15 为窗区通道,可以有效探测地表下垫面特征。其中通道 15 对大气中的强降水有散射效应。AMSU-A 微波通道的亮温受地表和大气的双重影响,对于权重函数比较低的窗区通道而言,大气的影响相对较弱,而来自地表的影响主要取决于地表的微波比辐射率,进而与地表下垫面的介电常数直接相关。在微波波段影响介质介电常数的主要因素是下垫面介质中的含水量。当介质从纯水变化为理想的干物质时,介电常数虚部会由 80 变化到 5,而地表微波比辐射率的变化范围会从 0.5 到 0.95。不同的微波通道对地表洪涝特征的响应不尽相同,地表洪涝特征在微波波段引起的下垫面的频散性成为扫频法微波地表探测的基础。利用扫频法从 AMSU-A 窗区通道数据中提取地表信息常用的方法有物理反演法和指数分析法。受 AMSU-A 空间分辨率的限制,在地表洪涝信息提取时,物理反演法很难克服亚像元组分不确定带来的影响。而利用多通道组合有效克服大气影响的指数分析法成为大范围地表洪涝信息提取,地表洪涝监测的有效方法。N. C. Grody 在他的地表水文产品中用 AMSU-A 通道 1、2 和 3 的组合来构成湿度指数,取得了较好的应用效果^[1]。但通道 1 位于水汽吸收线上,水汽影响强烈,给指数法的应用效果带来影响。重新选因子,用新的通道组合方式来构成地表洪涝指数,是我们开展 AMSU-A 洪涝监测应用研究的出发点。

AMSU-A 的基本光谱特征如表 1 所示。

表 1 AMSU-A 微波通道的光谱特性

通道序号	中心频率(GHz)	主要吸收气体	主要探测目的
1	23.8	水汽	可降水/地表特征
2	31.4	窗区	可降水/地表特征
3	50.3	窗区	表面发射率
4~14	52.8~57.29	氧气	大气温度廓线
15	89.0	窗区	地表特征

利用 AMSU-A 窗区通道来分析地表洪涝区分类特性时,如何描述地表下垫面的湿润状况,是模拟分析的关键一步。对于 45 km 分辨率的 AMSU-A 像元来说,很难保证像元中亚像元组分的唯一性,更难保证各组分洪涝特征的一致性。AMSU-A 一个像元的微波亮温,反映了整个像元的综合遥感特性。将组分复杂、45 km 分辨率的 AMSU-A 像元的地表遥感特征抽象为由绝对干燥的等效干地表和充分饱和的、积水覆盖的等效水体表面按等效水体面积百分比 f 的混合^[2],可以使问题大为简化。 f 值的大小并不等同于真实像元中实际水体所占的面积百分比,而只是当真实像元与理想的由干土壤和水体组成的混合像元具有相同微波辐射特性时,所应该具有的等效的水体面积百分比。极端情况下完全由干燥土壤组成的像元, f 值为 0;完全由水体覆盖的像元, f 值为 1。这样描述后,AMSU 混合像元的地表微波比辐射率可简化表示为^[2]:

$$\varepsilon_{ws} = (1 - f) \varepsilon_{ds} + \varepsilon_w f = \varepsilon_{ds} - f(\varepsilon_{ds} - \varepsilon_w) \quad (1)$$

其中 ε_{ws} , ε_{ds} 和 ε_w 分别是像元等效微波比辐射率以及等效干地表和等效水体的微波比辐射率; f 为等效水体面积百分比,其含义为与组分不确定的、真实的 AMSU-A 像元的微波比辐射率相等的理想的由干土壤和湿土壤组成混合像元中,等效水体所占的面积百分比。 f 值的引入为微波辐射传输的模拟计算带来方便,但同时又引出如何在 f 值的概念下建立 AMSU-A 像元各组分真实微波比辐射率与像元等效微波比辐射率之间关系的新的问题。

假设 AMSU-A 像元由干土壤(ε_{ds})、水体(ε_w)和比辐射率未知部分(ε_x)组成。其中比辐射率未知部分有可能是潮湿土壤、植被覆盖区等复杂下垫面。3 部分占像元的面积百分比分别为 a 、 b 和 c , $a + b + c = 1$ 。按照等效水体面积百分比的概念和上面的式(1),我们有:

$$\varepsilon_{ws} = a\varepsilon_{ds} + b\varepsilon_w + c\varepsilon_x = \varepsilon_{ds} - f(\varepsilon_{ds} - \varepsilon_w) \quad (2)$$

总存在一个等效的水体面积百分比 f 满足上式,但同时也有同一等效水体面积百分比对应着不同的 AMSU-A 组分分布特征的情况,后面一种情况会给洪涝分析结果带来误判。对 AMSU-A 进行亚像元分析,可以提高洪涝监测分析结果的正确率。引入 f 值,可以使微波正演和反演分析绕过像元组分未知、不确定这一难题。同时,在后面确定分类阈值时,也要用到 f 值来建立 L-SAR 不同分辨率资料间分类结果的相互关系。AMSU-A 的优势在于它对一般的气溶胶、云和轻微降水等大气中悬浮物的穿透性上。当云雨的遮蔽使红外和可见通道的探测结果无法应用时,AMSU-A 资料的应用可以有效弥补这些不足。

AMSU-A 各微波通道的微波亮温对 f 值变化的响应各不相同,图 1 是 AMSU-A 正演模式模拟计算的结果。正演辐射传输模式选用气压层光学厚度模式(PLOD),从 0.1 到 1050 hPa 间,等压面分为 42 层。大气廓线选用 1976 年版美国标准大气廓线^[3]。

AMSU-A 窗区通道 2 和 3 受大气的影 响很小,权重函数峰值高度比较低,通道的主要信息来自地面。从图 1 中可以看到,当像元水体面积百分比 f 值从 0.1 变化到 0.9 时,窗区通道微波亮温的变化量可高达 100 K。而对于以氧气为主要吸收气体的非窗区通道(AMSU-A 通道 4~14),通道微波亮温的变化量很小,尤其是对于部分大气温度探测通道(AMSU-A 通道 7~14),当反映地表洪涝状况的像元等效水体面积百分比 f 值从 0.1 变化到 0.9 时,通道微波亮温几乎不变。非窗区通道对地表特征变化不敏感的根本原因是

这些通道的权重函数峰值位置比较高,通道的主要信息来自地表以上大气的不同层次。上述的模拟分析都是在晴空大气条件下进行的,此时对强降水敏感的 AMSU-A 通道 15 具有与通道 2 和 3 相同的特性。当反映像元地表洪涝特征的 f 值从小逐渐变大时,AMSU-A 通道 2、3 和 15 的亮温值正相关,单调递增。这一分析结果为 AMSU-A 洪涝指数的因子选取,提供了依据。

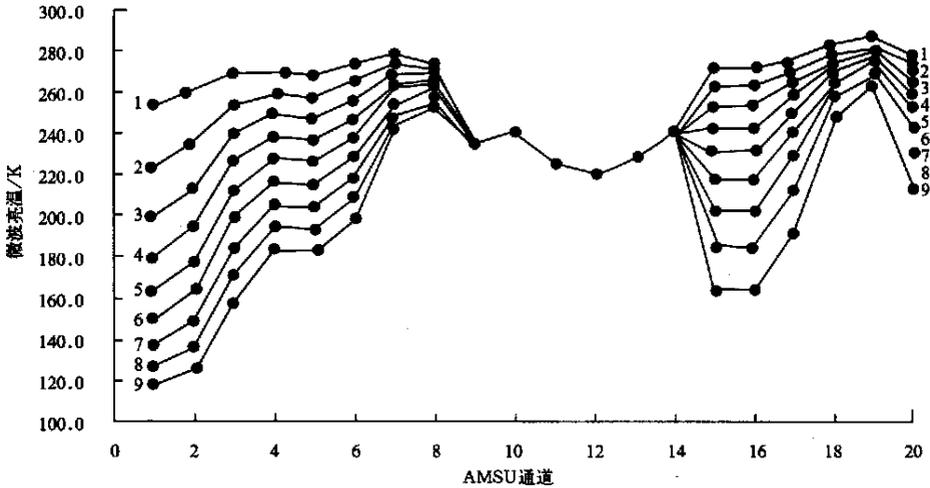


图1 AMSU-A 通道亮温对等效水体面积百分比的响应分析
(曲线1、2、3、……、9 分别对应着水体面积百分比 f 值 0.1、0.2、0.3、……、0.9)

1.2 AMSU-A 洪涝指数及其特性的模拟分析

上面单通道地表特征敏感性分析表明,AMSU-A 通道 2、3 和 15(中心频率分别为 31.4 GHz、50.3 GHz 和 89.0 GHz)的通道亮温都与地表洪涝特征正相关。定义通道 2、3 和 15 通道亮温的线性组合为 AMSU-A 洪涝指数(AFI),以 I_{AFI} 记之。表达式如下:

$$I_{AFI} = (T_{ch3} - T_{ch2}) + \beta \times (T_{ch15} - T_{ch3}) = \beta \times T_{ch15} + (1 - \beta) \times T_{ch3} - T_{ch2} \quad (3)$$

其中系数 β 可以利用 AMSU-A 正演模拟分析得到,计算结果 β 为 2.3182。正演模拟分析时,利用已知的大气廓线库(包含 1000 多条陆地区域大气廓线)资料计算 AMSU-A 各通道亮温,进一步可得到通道 3 与通道 2 以及通道 15 与通道 3 之间的通道亮温差。利用最小二乘法得到两组通道亮温差之间的线性拟合曲线。此时,两组通道亮温差之间的相关系数约为 0.8913。得到 AMSU-A 洪涝指数(AFI)与 AMSU-A 通道亮温差之间的关系后,继续通过正演模拟分析的方法,从水体面积百分比 f 出发,计算得到陆表微波比辐射率^[4],经大气辐射传输计算,得到 AMSU-A 各通道亮温。利用前面得到的洪涝指数(AFI)与通道亮温差之间的关系,计算得到洪涝指数(AFI)值。进而可得到等效水体面积百分比 f 与 AFI 的相互关系。从图 2 中可以看到等效水体面积百分比 f 与 AMSU-A 洪涝指数(AFI)在整个 f 变化域中并不单调对应。与 AMSU-A 通道 2 亮温组合,当通道 2 亮温小于某一阈值(例如小于 140 K)时,AFI 与等效水体面积百分比 f 的对应关系为单调递减;通道 2 亮温高于这一阈值时,对应关系为单调递增。水体面积百分比 f 在一定程

度上反映了地表的干湿状况,上面的模拟分析结果表明,当地表比较干, f 值小于 0.6 时(相应的通道 2 亮温大于 140 K),随着像元水体面积百分比的增加,洪涝指数(AFI)增加。当地表比较湿, f 值大于 0.6 时(相应的通道 2 亮温小于 140 K),随着像元水体面积百分比的增加,洪涝指数(AFI)反而减小。实际应用中,结合通道 2 亮温值,可以合理确定洪涝指数(AFI)随水体面积百分比(f)变化的拐点,以便更好地分析地表的洪涝状况。

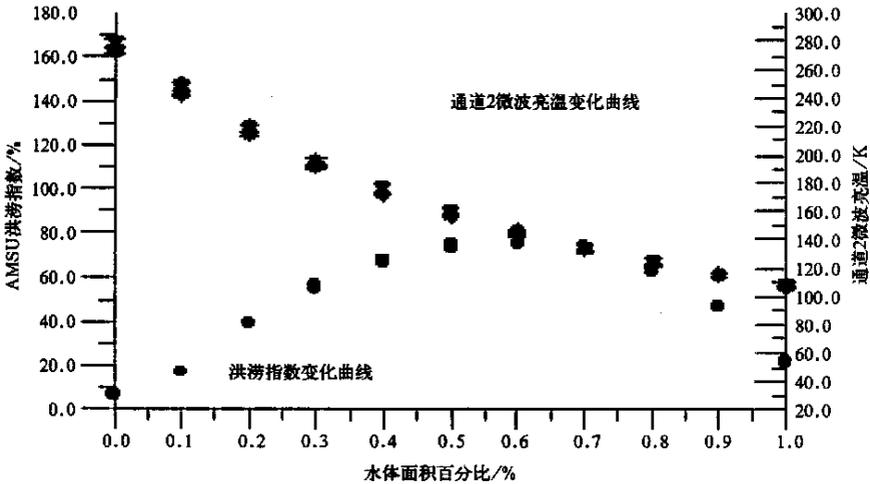


图 2 洪涝指数和通道 2 亮温随水体面积百分比的变化曲线

2 AMSU-A 地表洪涝区分类试验

2.1 资料说明

AMSU-A 资料 AMSU 微波通道具有成像和探测双重功能,主要用来反演大气温度和湿度的垂直分布廓线。其中 AMSU-A 窗区通道的地表遥感应用正逐步为人们所认知。1998 年长江流域发生了特大洪灾,地表洪涝区分类特征研究从 AMSU-A 预处理后生成的业务数据集 LIC 数据做起。AMSU-A 的 LIC 数据已经经过定标转换及格式变换,成为亮温数据。分析数据选取 7 月底到 8 月底期间鄱阳湖和洞庭湖流域有降水过程时的资料。7 月底和 8 月初两次强降水过程之后,收集 NOAA-15 过境时的 AMSU-A 观测资料,得到 7 月 31 日和 8 月 3 日、4 日及 8 月 23 日和 8 月 24 日的轨道资料,用于地表洪涝区分类特征研究。

L-SAR 资料 L-SAR 为国产机载合成孔径雷达。1998 年 8 月 2 日至 3 日长江第 3 次洪峰过境时,搭载在中国科学院遥感应应用研究所“奖状”飞机上的 L-SAR 雷达系统从空中获取到鄱阳湖和洞庭湖流域的 SAR 图像资料,图像原始分辨率为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。在本文的应用研究中,使用根据 L-SAR 资料制作的、经机-地校验过的洪涝淹没分布图^[5],用来做地表洪涝区分类结果的精度检验。使用时,对 L-SAR 资料进行了图像重投影和资料重采样等处理,将 L-SAR 资料匹配到 AMSU-A 资料像元网格上。共收集到 7 月 31 日、8 月

2 日、8 月 3 日和 8 月 25 日等时段的 L-SAR 雷达地表洪涝区分类结果资料。

NOAA-15 AVHRR 资料 文中用到的 AVHRR 资料为 1998 年洪水期间经星-地校验过的 AVHRR 水情监测图^[5]。共收集到可用资料 8 景。其中鄱阳湖 4 景、洞庭湖 4 景,时间为 1998 年 7 月 31 日、8 月 3 日、8 月 4 日和 8 月 23 日。

2.2 AMSU A 地表洪涝区分类阈值方案

分类阈值是通过与 L-SAR 观测分类结果的对比分析得到的。对比分析时,首先将 L-SAR 分类结果粗化到与 AMSU-A 相当的空间分辨率。在 L-SAR 地表洪涝区分类结果资料中,地表洪涝区被分类为正常水域,被淹农田,被淹居民区,被淹林地、草地,及未淹地表。实际上,我们得到的 L-SAR 地表洪涝区分类结果资料中只含有两类像元:水体(被淹像元)和非水体(未被淹像元)。在将 L-SAR 地表洪涝区分类结果资料粗化到 AMSU-A 分辨率的过程中,像元中水体和非水体的比例发生很大变化。粗化的第一步是将 L-SAR 的分类结果粗化到 NOAA-15 的 AVHRR 资料的分辨率(以 L-SAR* 标记),并与同时刻星-地校验过的 AVHRR 资料的分类结果进行对比分析。此时,1 个 L-SAR* 像元相当于 33×33 个原始 L-SAR 像元。当一个 L-SAR* 像元中原始资料中水体像元个数占到像元总个数(33×33)的 70% 时,L-SAR* 标识出的水体覆盖区域与 AVHRR 的监测分类结果吻合得最好,相关系数达到 98.4%。所以规定 L-SAR* 资料中水体判识的阈值为 70%。根据 L-SAR* 像元中原始水体像元个数比进一步可划分出过湿区、泥泞区,与之相对应的水体像元个数比分别为 60% 和 40%。当 L-SAR* 像元的原始水体像元所占个数低于 20% 时,定义为干区。在此基础上继续粗化 L-SAR* 资料,得到与 AMSU-A 分辨率相当的地表洪涝区分类结果资料,以 L-SAR** 记之。此时,L-SAR** 资料被分为 4 层:水体淹没区、泥泞区、湿区和干区。

以 1998 年 8 月 4 日的 AMSU-A、AVHRR 资料和 1998 年 8 月 3 日的 L-SAR 资料为分析样本,经相关分析得到 AMSU-A 洪涝指数 AFI 的分类阈值。此时,AMSU-A 洪涝指数 AFI 的分类结果与 L-SAR** 的分类结果相关系数最大。双参数组合的分类阈值如表 2 所示。

2.3 地表洪涝区分类结果分析

根据上面的分类阈值,对 1998 年 7 月 31 日、8 月 4 日和 8 月 24 日的 AMSU-A 资料进行地表洪涝区分类,结果如图 3 所示。从图 3 的分类结果可以看出,尽管 AMSU-A 的空间分辨率在地表洪涝监测中不占有优势,但微波通道的准全天候特性,尤其是对非强降水的云区而言,其可探测性独具优势。有效弥补了可见光和红外探测技术对云区覆盖地表探测的盲区。AMSU-A 窗区通道多通道组合,清晰分类出洪涝淹没区、泥泞区、湿区和背景干燥区。

经与独立样本 7 月 31 日、8 月 2 日和 8 月 25 日机载合成孔径雷达 L-SAR** 资料的对比分析,正确率可达 73%。正确率按如下算式计算:

$$\text{正确率} = X / S_s$$

$$X = F_f + M_m + W_w + B_b \quad (4)$$

表 2 双参数分类阈值表

	I_{AFI}	T_{ch2}	f
水体	$I_{AFI} < 50$	$T_{ch2} < 150 \text{ K}$	$f \geq 0.8$
泥泞区	$80 \geq I_{AFI} \geq 50$	$T_{ch2} < 150 \text{ K}$	$0.8 > f \geq 0.6$
过湿区	$80 > I_{AFI} \geq 60$	$T_{ch2} \geq 150 \text{ K}$	$0.6 \geq f \geq 0.4$
干区	$I_{AFI} < 60$	$T_{ch2} > 150 \text{ K}$	$0.4 > f$

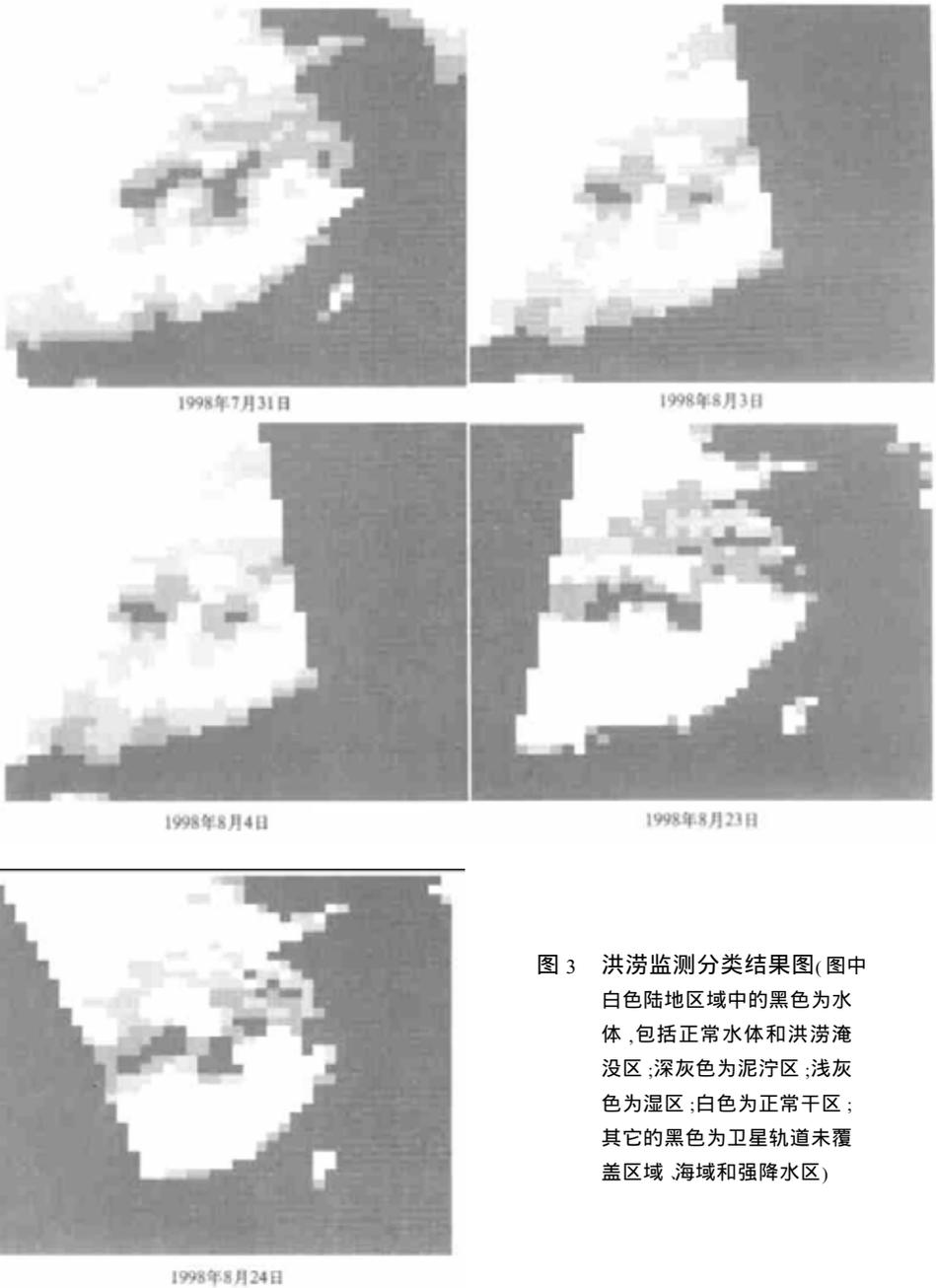


图3 洪涝监测分类结果图(图中白色陆地区域中的黑色为水体,包括正常水体和洪涝淹没区;深灰色为泥泞区;浅灰色为湿区;白色为正常干区;其它的黑色为卫星轨道未覆盖区域、海域和强降水区)

其中 F_f 为 L-SAR^{**} 和 AMSU-A 的分类结果均为洪涝区的像元数; M_m 为 L-SAR^{**} 和 AMSU-A 的分类结果均为泥泞区的像元数; W_w 为 L-SAR^{**} 和 AMSU-A 的分类结果均为过湿区的像元数; B_b 为 L-SAR^{**} 和 AMSU-A 的分类结果均为背景干燥区的像元数; S_s 为分析样本总个数; X 为所有两种资料分类结果一致的像元总数。正确率 = (23 + 6 +

$2 + 13) / 60 = 73\%$ 。分类结果正确率如表 3 所示。

表 3 分析结果正确率检验

		L-SAR ⁺ 分类结果				总和(S)
		洪涝区(F)	泥泞区(M)	过湿区(W)	背景干燥区(B)	
AFI 分类 结果	洪涝区(F)	23	7	3	0	33
	泥泞区(M)	2	6	2	1	11
	过湿区(W)	0	0	2	0	2
	背景干燥区(B)	0	1	0	13	14
	总和(S)	25	14	7	14	60

3 结 论

通过 AMSU-A 的正演模拟分析及地表洪涝状况的实际分类监测,得到如下几点主要结论:

(1) AMSU-A 窗区通道对地表洪涝特征敏感;

(2) 多通道组合可以有效减小大气对 AMSU-A 窗区通道的影响,提高 AMSU-A 窗区通道对地表洪涝特征的探测能力;

(3) 利用 AMSU-A 多通道组合分类监测方法,可以将地表洪涝区有效分类为洪涝淹没区、泥泞区、过湿区和背景干燥区;

(4) AMSU-A 微波资料对地表洪涝区的分类监测可以有效弥补洪涝区上空有云层覆盖,可见光和红外等遥感手段无法使用时,现有监测手段的不足;

(5) 强降水对 AMSU-A 通道有很强的影响,使得 AMSU-A 资料的地表洪涝区分类监测应用受到限制。

本项应用研究试验为利用 AMSU-A 窗区通道多通道组合技术开展准全天候区域地表洪涝分类监测提供了示范。

参 考 文 献

- 1 Grody N C, Weng F, Ferraro F. Application of AMSU for obtaining hydrological parameters. 6th Microwave Specialists Meeting, Florence, Italy, March, 1999.
- 2 Basist A, Grody N C, Peterson C N. Using the special sensor microwave sensor microwave/image to monitor land surface temperature, and snow cover. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**: 889 ~ 911.
- 3 Jun Li, Wolf W W, Menzel P. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 1248 ~ 1268.
- 4 Jones A S, Vonder Harr T H. Retrieval of microwave surface emittance over land using coincident microwave and infrared satellite measurement. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, D12: 13609 ~ 13626.
- 5 国家遥感中心编. 中国特大洪灾遥感图集. 北京: 北京大学出版社, 1999. 14 ~ 20, 48 ~ 56.

FLOOD DETECTION AND MONITORING BY USE OF AMSU-A MICROWAVE DATA

Gu Songyan¹⁾²⁾ Qiu Hong¹⁾²⁾ Ran Maonong¹⁾ Zhang Wenjian¹⁾

¹⁾ (*National Satellite Meteorological Center, CMA Beijing 100081*)

²⁾ (*Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

The Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) is a new advanced generation microwave-sounding unit , and has great potential in land characteristic analysis , especially on flood detection and monitoring . The wetness index analysis method of flood detection and monitoring by using AMSU-A microwave data was tested over Boyang and Tongting lake areas in China during the 1998 summer . To accomplish this , the characteristics of microwave radiance transfer about AMSU-A channels are analyzed first and the result indicates that the window channels of AMSU-A can give more information about the surface flooding . Then a set of wetness indexes by combining three channels out of four AMSU-A window channels (ch1 , ch2 , ch3 , & ch15) is developed . Thereafter the best wetness index which is sensitive to the land surface wetness changes is chosen to conduct the detection and monitoring , and the flooding area is classified into four situations : flooding , mudding , over wet , and background dry area . In the Cal/ Val Test , the data from China L-SAR aboard on the plane and Canadian Radar-SAR aboard on the Radarsat are used , and the Cal/ Val results is up to 73 % . The future work will focus on the possible improvements in the algorithm and extend testing of the algorithm to other regions .

Key words : New-type of microwave sounding data Surface wetness index Flood area classification