

# 气象灾害的“遥感指纹”理论与多探测器感知本质解构

刘伟 杨淑彬 张嘉敏 刘家睿 刘亮龙\*

桂林学院 广西 桂林 541006

**【摘要】**：本文研究对气象灾害遥感观测研究的推进具有创新意义，提出“遥感指纹”概念，指出各类气象灾害在生命周期内具备独特的遥感指纹特征。利用微波雷达、红外探测器、光学相机可分别探测气象灾害指纹中的含水量、温度动态、地表几何微变化等不同信息，研究未评价各类探测方法优劣，而是从更高维度归纳不同探测手段的观测结果，提炼气象灾害信息的内核与本质，并探究各类碎片化观测信息的融合构建逻辑。

**【关键词】**：遥感指纹；气象灾害；多探测器感知；遥感监测；信息融合

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.078

## 1 引言

目前气象灾害遥感观测绝大部分的研究都集中在一个观测技术层面，比如研究不同卫星观测洪水观测精度对比，研究不同算法对比火点的观测精度，研究是好的，但只研究到观测、观测结果，但是真正的问题在于，原理完全不同的探测器观测相同的灾害，观测仪器自身设计原理对观测获取哪些类型的观测结果形成局限，忽略了灾害现象本身的复杂多样<sup>[1]</sup>。而“遥感指纹”则是基于灾害形成过程的复杂多因素物理发展过程，突破单一探测只能探测部分有限或局部的局限，对一系列片断、多维度信息的处理，完整揭示灾害的过程。

## 2 理论基础：灾害如何留下它的“指纹”

### 2.1 什么是气象灾害的“遥感指纹”？

“遥感指纹”，是灾害分别留下的环境差异性的痕迹，并不是人为的产物，而是灾害对环境的影响而留下的痕迹。例如：一场突如其来的台风经过，会带来许多环境上的变化：第一，在卫星图像上台风强大的云团会以极快的速度旋转，并快速地形形成涡流。第二，台风经过时，垂直升流和对流使得云顶温度迅速下降，红外传感器捕捉到了这种变化。第三，海面被吹得十分混乱，浪涌更高，并卷入大量白沫。以上几种现象，都可以被微波雷达记录下来。

### 2.2 探测器的工作原理决定了它“感受世界”的方式

(1) 合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术:利用稳定的无线电波发射,通过其反射信号进行不断地地形探测。对于介质和地形有着很高的灵敏度。如遇到洪涝灾害发生时,由于水体的水电值非常高,会形成强大的反射面,从而影响回波强度,成像区域将变成黑暗。同时地震或滑坡造成的地面微小移动(毫米级移动),也可用成像系统进行成像,

由于地面移动造成的相位变化,通过成像系统就可以清晰显示地形<sup>[2]</sup>。

(2) 可见光 / 多光谱传感器:类似于我们的眼睛,但是它比我们的眼睛更灵敏,可以探测到眼睛无法看到的光波。可见光 / 多光谱传感器是太阳光照在地面上反射的光波,茂盛的森林在近红外光波段有较强的反射性,但是在水中有很强的吸收性,可见光 / 多光谱传感器实质上就是一个光谱仪器,通过光谱仪可以探测各种光波、近红外光波在地表面的反射性,得到各种自然环境参数。

(3) 红外传感器:可利用红外特性获取物体本身携带的各种能量的辐射,由于物理定理上只要温度超过零度,物体本身就会产生红外线辐射,温度越高的物体其红外辐射能量越大。红外图像对热源特性反应性较强,如森林中的明火、台风中的暖气、城市热源等,红外成像后都能清晰地反映出红外图像的热能分布<sup>[4]</sup>。

(4) 微波辐射计:直接被动接收地表表面和大气自身发出的微波辐射,对大气中水汽含量、云层液态含水量、雨雪条件等微小变化有很好的“灵敏性”,这些微小变化都会直接影响到微波辐射计的测量值——“亮温”的高低,从而表征出微波环境中地表大气温度的微观状况<sup>[3]</sup>。

各种监测仪器各有其监测角度,SAR是地质构造分析及物质成分识别的主要工具,可以精确识别地表形态和物质成分;可见光传感器是色彩分析或反射分析,对物体光谱及光敏感特性记录;红外传感器是热力状态的敏感器,对地表热辐射差异敏感;微波辐射计被认为是大气含水量分析工具,对水汽的浓度梯度敏感。在灾害发生后,这些仪器通过自身特有的功能,对灾难发生时的残留“数据信息”特征进行提取。

通讯作者：刘亮龙，大学生创新研究项目指导老师。



图 1 多探测器协同感知模型图

### 3 理论框架：如何解构多探测器感知的本质

#### 3.1 灾害过程与探测器响应的映射关系

气象灾害的起、消，就像一个没有接缝的电影记录，各种不同精度的探测仪器，就像不同的影评专家。每位影评专家都喜欢一个气象景观的电影，他们都很敏感。

在洪涝灾害演进阶段影响和尾声，洪水泛滥，或强力冲刷道路系统，淹没居民区，带来巨大损失。此时高精度的卫星能表现出细节化的灾情，以视觉艺术的方式表现灾情的破坏力；采用高精度的干涉 SAR，则如经验丰富的地质学家发现了土体浸润引起的微弱的地面形变，发现地表隐秘的细节变化。

洪涝灾害“遥感指纹”来自于“土壤蓄水—地表水露—灾害扩展”的物理序列，可以被不同专家识别。不同“探测器”以各个序列的时片记录关键信息的“数据+图像”序列拼接而成灾害全景图。

#### 3.2 探测器感知的“局限性”其实是“专业性”的体现

而在遥感方面，总是说 SAR 图纹理太复杂了看，却不提其有丰富的信息含量；可见光需要阳光照射，有云不能拍图，说明其是“显像”；红外只知地温高深，不知地下结构。但在遥感指纹的角度看来，这些恰好是各自的优势，是它们独有的，不应该加以批评，应该加以肯定<sup>[5]</sup>。

所有的探测器都有各自的“响应区”，对某一变量的变化反应特别灵敏，而对其他的变化几乎不敏感。如此精巧的选择机制，形成一个严密、高效的工作机构。

SAR 对任何物体都具有很好的探测能力，能够灵敏地探测几何形变中毫米级微小的差异和介电常数中的微小变化，而缺乏对温度剧变的敏感。其好比一个结构分析器，对建筑物具有毫厘级的变化有很好的灵敏度，而对室内空调机的起跳和停跳不敏感。

红外传感器虽对 0.1℃ 地温敏感，但是完全不受地纹理粗糙度及色度的影响，其原理就像快速测温仪那样，只要走的人群一看，就知道哪个是有点发热，至于你是穿什么衣，穿什

么颜色衣没有人管，没人管。

在有充足的光线环境中，可见光传感器有很好的解色解文能力，但是需要太阳的照射才可以工作，容易受到太阳云的遮挡而无法准确工作。它可以像有经验的摄影师一样可以在白天阳光下把照片的细节真实地保留，然而当环境变黑，或者出现浓云时，可见光的传感器便无法正常工作了。

对于自然灾害完整的“感知频谱”，不是由探测器单独探测就能完成的，因为每个人的数据都是片段的，只有组合在一起才能构成完整画面，才能看清事实。

探测器类型	感知原理
SAR	雷达回波/几何形变与材质/穿透云雨/无视温度
可见光	光学反射/色彩纹理/高分辨率/依赖光照
优势领域	热辐射/温度变化/全天时/仅表面温度
局限性	自然微波/大气水分/全天候/分辨率较低

图 2 不同探测器类型的特点

### 4 概念推演：从“指纹片段”到“身份识别”

#### 4.1 多探测器协同的底层逻辑

现代灾害监测为何如此热衷于多星组网和多器协同呢？从“遥感指纹”的理论角度看，答案其实很明显：单独的某个探测器的“感知频谱”太过狭窄，但是灾害“指纹”本身就是宽频谱、多维度的。

它就像解剖学上的指纹识别过程一样：如果只用普通白光照射，可能只能看到一部分纹路；换成紫外灯，或许能显现出嫌疑人留下的某些化学物质痕迹；再用侧光打一打，立体纹路又浮现出来。一份完整、可靠的指纹鉴定报告，必然综合了多种光照手段下的信息。

捕获气象灾害的“遥感指纹”同样如此，从不同探测器获得的不同探测角度来取得“证据”。要全方位地掌握一场森林火灾情况，需要可见光传感器去识别烟雾和过火迹线、热红外传感器去锁定火点温度、微波辐射计去检测火灾对大气成分的影响，还要利用 SAR 去穿透烟雾识别火点核心区的结构变化；想全面了解台风，要通过光学传感器观测到台风的云系形貌，借助红外传感器获取台风云顶温度评估台风对流的强度和发展阶段，用微波成像仪穿透云雨去了解台风内部低层环流、降水结构等细节情况，用散射计测定海面风场情况，这些“指纹片段”共同构成对台风的完整认知。

这种协同，不是单一的叠加式，而是一种像“多学科专家会诊”一样，各位专家（探测器）在自己专业的领域提出证据和判断，每种专业证据之间相互印证、补充，最后才能形成这

么一份关于灾害的、坚实且牢固的一个“身份鉴定书”。

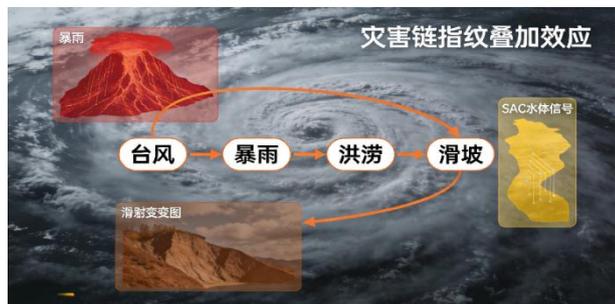


图3 灾害链指纹叠加效应虚拟图

#### 4.2 “指纹”的唯一性与混合型灾害的挑战

如果我们希望准确识别出不同的灾害，那应该是有不同“指纹”的，比如干旱有“高烧”（地表温度）、“萎靡”（植被指数）、“干渴”（土壤湿度）的“指纹”，而寒潮有“跳水”（大面积降温）、相态变化（大量降水转成雪）的“指纹”，沙尘暴有特殊的气溶胶光学“签名”和地表反射率突变的“指纹”，森林火灾有高温火点、浓烟弥漫、地表植被被烧毁后所留下的光谱等“指纹”，这些独特的“指纹”特征为灾害类型精准识别提供了基础。

一般情况下，灾害并不是独自发生的，而是以灾害链或者灾害复合的方式发生，在灾害识别方面会给“遥感指纹”造成一定难度。一场台风可能会带来暴雨，引起洪涝，而洪涝之后会出现滑坡，如果有好的条件，可能还会发生一些传染病流行等次生灾害。“灾害链”或者是“灾害复合体”会使得遥感指纹变得更杂，它可能是多个单一指纹的叠加、交织甚至变异。

#### 参考文献：

[1] 中国气象局.中国气象灾害年鉴(2024)[M].北京:气象出版社,2024.  
 [2] 李娜,赵国康,韩进生,张舒凌,肖壮.一种基于遥感技术的农业气象灾害监测预警方法及系统:中国,CN202510921776.5[P].2025-10-17.  
 [3] 孙晖,姬军红,林智韬,等.农业洪涝灾害多源遥感监测研究进展与展望[J].农业灾害研究,2025,15(S2):123-130.  
 [4] 何瑞瑞,赵凤君,曾玉婷,等.多源遥感影像在森林火灾监测中的应用[J].世界林业研究,2022,35(2):59-63.  
 [5] NASA.EOSDIS Handbook[R].Washington,D.C.:National Aeronautics and Space Administration,2018.

一个侦破案件的侦探判断案发现场留下的蛛丝马迹是何种危害的隐藏信号：SAR发现的形变，究竟是山体滑坡的征兆，还是有其他因素如地面沉降引起的变化？红外捕捉到的高温区，到底是林火的火点，还是钢铁厂的烟囱？可见光看到的植被颜色变黄，是干旱导致的枯萎，还是秋天正常的换装？

我们需要理解灾害整个过程的发生机理，必须要做到把物理学、灾害学以及信息学相关的知识融会贯通，在分析各个“指纹”相关性的过程中予以剥离。

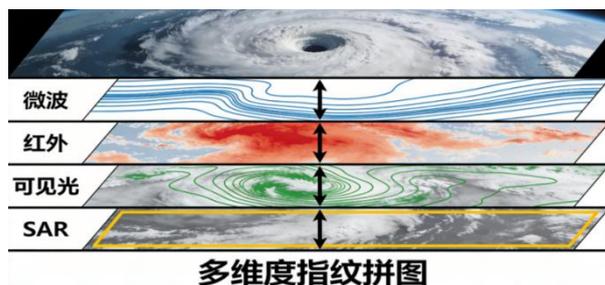


图4 多维度指纹拼图

#### 5 思考与启示

“遥感指纹”的首要启示在于，在今后的灾害监测系统中，不能只是“看得更频、更清”，还要在一定程度上转向“看得更全、更懂”，即应该以“如何系统性获取灾害的完整指纹”作为顶层设计理念，而不仅仅是组装更多的高性能探测器。未来的卫星星座可以由多种类型的“异构”卫星所组成，每颗上携带不同功能的探测器优势互补，共同构建能够观察到灾害多个方面表象的感知网络。