

基于热红外和微波数据的 地表温度和土壤水分反演算法研究

THE STUDY OF ALGORITHM FOR RETRIEVING LAND SURFACE TEMPERATURE AND
SOIL MOISTURE FROM THERMAL AND MICROWAVE DATA

● 毛克彪 著



中国农业科学技术出版社

基于热红外和微波数据的 地表温度和土壤水分反演算法研究

THE STUDY OF ALGORITHM FOR RETRIEVING LAND SURFACE TEMPERATURE AND
SOIL MOISTURE FROM THERMAL AND MICROWAVE DATA

● 毛克彪 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究/
毛克彪著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. 12
ISBN 978 - 7 - 80233 - 468 - 7

I. 基… II. 毛… III. ①地表 - 温度 - 演算法②土壤水 -
演算法 IV. P227.9 S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 189560 号

责任编辑 梅 红

责任校对 贾晓红 康苗苗

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)62150862 (编辑室) (010)68919704 (发行部)

(010)68919703 (读者服务部)

传 真 (010)62189012

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 新华书店北京发行所

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 850 mm × 1 168 mm 1/32

印 张 8.75

字 数 200 千字

版 次 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

—— 版权所有 · 翻印必究 ——

前 言

地面温度和土壤水分是反映土壤—植被—大气系统能量流动与物质交换以及土地资源和环境管理的重要参数，也是地球表面能量平衡和温室效应的两个重要指标，是区域和全球尺度地表物理过程的一个关键因子。因此，地面温度和土壤水分在气候、水文、生态学和生地化学等许多领域中是非常重要的。但是依靠地面观测站的观测来大面积地获取地表温度和土壤水分参数是不现实的。然而借助于热红外遥感、微波遥感影像，可以方便快捷地获得大面积，甚至全球的地温和土壤水分资料，且数据更新快，成本低廉。

地表温度和土壤水分是陆地植物、土壤生物赖以生存的重要物质源泉。陆地植物赖以生存的水分、各种矿物质等主要来源于土壤水和溶解在土壤水中的各种营养物质。土壤中的水分可以直接被植物的根系吸收。土壤水是植物所需的各种营养物的主要载体，土壤水分的适量增加有利于各种营养物质的溶解和移动，有利于磷酸盐的水解和有机磷的矿化，这些都能改善植物的营养状况，促进营养物的循环。地表温度和土壤水分可以作为干旱预报、农作物估产等的一个重要指标。在干旱半干旱地区，监测地表土壤水分和地表温度的时空变化特性对理解土壤—植被相互作用过程，提高土壤和植被的有效利用率尤为必要。在干旱半干旱地区土壤水分蒸发一般是一种极其不利的过程，可使土壤干旱缺水，导致土壤盐渍化等，从而引起土壤沙化、水土流失、植被退化等生态环境恶化现象。在绿洲和沙漠的交错地带由于干旱少雨，土壤水分低，荒漠化的现象比较严重。同时，土壤水分和地

表温度是农作物长势监测和估产的主要参数,准确、快速、大范围的土壤水分测量是作物生长状态监测和估产模型所必需的。

本书汇集了作者近六年多的研究工作,其中大部分内容已经在国际权威遥感刊物(International Journal of Remote Sensing)、地球物理研究(Journal of Geophysical Research-atmosphere)、IEEE(IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing)等国际刊物和国际会议,以及《中国科学》和其他国内核心刊物上发表。特别是在地表温度上,作者从高分辨率的 ASTER 数据、中分辨率的 MODIS 数据,到低分辨率的被动微波 AMSR-E 都提出了自己算法(至少有 7 个算法)。这也是我的博士论文主要内容,算法的反演精度和实用性得到了国内外热红外及相关领域的专家认可。博士论文答辩委员会委员:李增元研究员(中国林业科学研究院)、田国良研究员(中国科学院遥感应应用研究所)、李召良研究员(中国科学院地理所)、张仁华研究员(中国科学院地理所)、阎广建教授(北京师范大学)、柳钦火研究员(中国科学院遥感应应用研究所)、李震研究员(中国科学院遥感应应用研究所)、陈良富研究员(中国科学院遥感应应用研究所)对我做的工作给予了非常好的评价和充分的肯定。

到 2020 前,中国计划发射 100 颗卫星,作者希望得到国内有关部门的支持,将我们的算法应用到我们国家的卫星上去。衷心希望进一步得到科技部、农业部、教育部、国家自然科学基金委、国防科工委、中国农业科学院、中国气象局等相关单位的支持,使得我们的研究能够更好地进行和推广到实际应用中去,为农业生产和灾害监测提供准确的数据。

本研究工作得到了国家自然科学基金重点项目(编号:90302008 & 40571101),“863”专题(编号:2006AA10Z241)以及中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金的支持。作者在这里感谢博士生导师施建成、硕士生导师覃志豪提供了一个非常

好的学术环境，感谢万正明先生、李召良老师、孙国清老师，以及陈锟山老师给予了很多无私的帮助和指导。我做的工作与他们的指导是分不开的。特别感谢中国农业科学院农业资源与农业区划研究所所长唐华俊老师给了我工作后最大的支持，最后感谢实验室主任周清波老师以及其他老师的支持。本书在中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金（所长基金）资助下得以出版。由于写作匆忙，请各位同行批评指正。

作 者

2007-11

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 研究目的和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.3 主要研究内容和技术路线	(15)
1.4 本章小结	(20)
第二章 热红外和被动微波地表温度和土壤水分反演 的基本理论与方法	(31)
2.1 电磁波谱	(31)
2.2 热辐射的基本定律及基本概念	(33)
2.3 大气窗口与热红外遥感	(37)
2.4 热红外地表温度和发射率反演的常用方法	(39)
2.5 微波模型	(41)
2.6 被动微波地表温度反演算法	(43)
2.7 被动微波土壤水分反演算法	(44)
2.8 本章小结	(44)
第三章 实验数据选择与分析	(54)
3.1 ASTER	(54)
3.2 MODIS	(56)
3.3 AMSR-E	(60)
3.4 本章小结	(63)
第四章 针对 ASTER 数据的地表温度和发射率反 演算法研究	(67)
4.1 劈窗算法	(68)
4.2 多波段算法	(83)

2 III 基于热红外和微波数据的地表温度和土壤水分反演算法研究

4.3	本章小结	(102)
第五章	针对 MODIS 数据的地表温度和发射率 反演算法研究	(107)
5.1	劈窗算法	(109)
5.2	从 MODIS 数据中同时反演地表温度和 发射率的 RM-NN 算法	(136)
5.3	本章小结	(165)
第六章	针对被动微波数据 AMSR-E 的地表 温度反演研究	(175)
6.1	被动微波地表温度反演的理论基础	(178)
6.2	地表温度反演传统经验方法	(180)
6.3	针对被动微波 AMSR-E 数据反演地表 温度物理统计算法	(183)
6.4	利用神经网络从被动微波数据 AMSR- E 中反演地表温度	(195)
6.5	本章小结	(211)
第七章	针对被动微波数据 AMSR-E 的土壤水分 反演研究	(219)
7.1	被动微波土壤水分反演的理论基础	(220)
7.2	针对 AMSR-E 数据的 AIEM 模拟分析	(223)
7.3	土壤水分反演算法及敏感性分析	(227)
7.4	算法验证及应用	(235)
7.5	本章小结	(239)
第八章	结语与展望	(244)
致谢		(257)
附录		(259)

第一章 绪 论

1.1 研究目的和意义

地表能量交换信息的获取是监测区域资源环境变化的一个重要环节。地表温度和土壤水分是地表能量平衡的决定因素之一。由于土壤水分含量对土壤发射率的变化影响很大,而且土壤水分的蒸发对能量交换影响很大,因此土壤水分含量变化是影响地表温度变化和地表能量交换的一个最主要的因素之一。获取区域地表温度和土壤水分时空差异,并进而分析其对区域资源环境变化的影响,是区域资源环境动态监测的重要内容。传统的做法是通过地面有限观测点的观测数据来分析区域地表温度和土壤水分的时空差异。这种地面观测方法不仅艰难而且付出代价非常昂贵。近 20 年来,遥感技术的飞速发展快速地获取区域地表温度和土壤水分的时空差异信息提供了新的途径。地表温度和土壤水分在区域资源环境研究中的重要性已经使热红外和被动微波遥感成为遥感研究的一个重要领域,目前已经开发了很多针对热红外数据的实用地表温度遥感反演方法,如热辐射传输方程法、劈窗算法、单窗算法和多通道算法。但热红外遥感受大气和云的影响特别严重,因此在有云的情况,被动微波在地表温度反演中具有独特的优势。由于地球表面的复杂性,使得陆地表面温度的反演精度受到限制,特别是在土壤水分含量变化比较大的地区。因此,为了更准确地分析区域热量空间差异,很有必要考虑地表温度的过程中考虑土壤水分含量变化。经过大量的研究证明微波在监测

土壤水分含量的变化过程中具有非常大的优势,而被动微波遥感是大尺度土壤水分含量变化监测的一个非常理想的工具。光学遥感和微波利用各自的优势联合反演地表参数是遥感中一个重要的研究主题。

随着现代遥感技术的发展,获取的遥感数据越来越多。高分辨率的热红外遥感数据如 Landsat TM 等,其周期长且价格昂贵,只适合对小范围的精确研究。1999 年搭载 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 遥感器的对地观测卫星 (TERRA) 发射成功,为全球和区域资源环境动态监测开辟了又一新的途径。ASTER 由日本通产省 (METI) 提供,主要用于解决土地利用与覆盖、自然灾害、短期天气变动、水文等几个方面的问题。轨高 705km,为太阳同步近极地轨道,地面重复访问周期 16 天,设计运行时间为 6 年。ASTER 是一个拥有 15 个波段的高分辨率传感器,在 ASTER 的 15 个波段中有 5 个是高分辨率的热红外波段,因而非常适合于城市和小区域的地表热量空间差异分析。按照 ASTER 项目的计划,其数据应用于全球变化研究中,如提升自然灾害的监测和预报能力,短期气候变化和水循环等。

中分辨率的遥感数据如 MODIS、NOVAA/AVHRR,其中 NOVAA/AVHRR 主要是应用于气象。MODIS 是为全球资源、环境、气候变化等综合服务。MODIS 传感器可以同时接收来自大气、海洋、陆地表面的信息。每 1~2 天获得一次全球观测数据,比较适合于中大区域尺度的动态监测。MODIS 是一个拥有 36 个波段的具有中等地面分辨率的地球观测卫星,其 1~2 波段的星下像元为 250m,3~6 波段为 500m,7~36 波段为 1km。在 36 个波段中,有 20 个可见光-近红外波段,有 16 个热红外波段。MODIS 卫星的飞行与太阳同步,每天同一区域至少可获得昼夜两景的图像,并且可以免费接收,因此非常适合中大尺度的地表

动态监测。对全球地温监测而言, MODIS 数据是一个非常合适的选择。研究开发利用 MODIS 的热红外波段来进行全球地表温动态变化监测, 具有很高的现实应用意义^{[1][2]}。

热红外地表温度反演算法受天气的影响非常大, 在实际应用中精度有时难以得到保证。而且, 热红外遥感受云的影响很大, 从 NASA 提供的温度产品分析可知大部分的温度产品, 60% 以上的地区受到云的影响, 这对实际应用产生了很大的局限性。由于被动微波能穿透云层, 并且受大气的影响非常的小, 可以克服热红外遥感的缺点。因此, 研究如何利用被动微波数据来反演地表温度就显得非常的迫切。

AMSR 是改进型多频率、双极化的被动微波辐射计。2001 年 AMSR 搭载在日本的对地观测卫星 ADEOS-II 上腾空。AMSR-E 微波辐射计是在 AMSR 传感器的基础上改进设计的, 它搭载在 NASA 对地观测卫星 Aqua 于 2002 年发射腾空。AMSR 和 AMSR-E 这两个传感器的仪器参数基本一致。最大区别在于 AMSR 是在 10:30 左右穿过赤道, 而 AMSR-E 则是在 13:30 左右。这两个传感器的传输基本相同, 因此本节主要介绍 AMSR-E。AMSR-E 辐射计在 6.9~89GHz 范围内的 6 个频率, 以双极化方式 12 个通道的微波辐射计。AMSR-E 通过测量来自地球表面的微波辐射来研究全球范围的水循环变化。在水文应用研究中, 为了取得两个降雨事件前后的土壤水分含量变化, 频繁地获得研究区的数据是非常重要的。卫星的时间分辨率主要取决于刈宽度、卫星高度和倾角。对于 AMSR-E 而言, 除了极地地区外, 在不到两天的时间内, 在升轨和降轨都可以将全球覆盖一次。

目前, 针对 AMSR-E 被动微波遥感数据的地表温度和土壤湿度反演算法的研究还很少, 其主要原因是对于微波的地表辐射机理研究还不是很成熟, 而且由于空间分辨率的影响, 使得地面实测资料的获得非常困难, 因此研究如何综合利用对地观测卫星多

传感器的优势是今后的一个重要研究方向。Aqua 对地观测卫星同时拥有 MODIS 和 AMSR-E 传感器。相对而言,用 MODIS 的热红外波段反演地表温度的算法已经比较成熟。我们可以通过 MODIS 的地表温度产品来代替 AMSR-E 所需要的地表数据,通过建立 AMSR-E 各通道亮温和 MODIS 地表温度产品的关系,从而可以分析不同地表地物类型在微波波段的辐射机制,最后建立微波地表温度的反演算法。从而克服需要测试 AMSR-E 过境的同步地表温度数据的困难。并为多传感的参数反演相互校正和传感器的综合利用提供理论依据。在用被动微波数据反演得到地表温度的同时,我们可以通过利用微波波段的发射率和土壤水分的关系,进一步反演土壤水分和雪水当量等其他参数。

1.2 国内外研究现状

从第一台热红外仪器算起,已经有 50 多年的历史^{[1][2]}。这里介绍几个主要的热红外传感器。Landsat 是美国的陆地卫星。NASA 的陆地卫星 (Landsat) 计划 (1975 年前称“地球资源技术卫星——ERTS”),从 1972 年 7 月 23 日以来,已发射 7 颗 (第 6 颗发射失败)。目前 Landsat1~4 均相继失效,Landsat5 仍在超期运行 (从 1984 年 3 月 1 日发射至今) (http://edc.usgs.gov/guides/landsat_tm.html)。NOAA 卫星是美国发射的极轨气象卫星,1970 年 12 月发射了第一颗,近 30 年来连续发射了 16 颗。NOAA 气象卫星系列采用的是双星系统,与太阳同步近极地圆形轨道,以确保同一地点、同一地方时的上午、下午成像。轨道平均高度分别为 833km 和 870km,轨道倾角为 98.7° 和 98.9°。从 1958 起,NASA 就开始致力于地球及环境演变的观察和研究 (<http://www.noaa.gov/wx.html>)。1991 开始实施 ESE (Earth Science Enterprise),在 1999 年 12 月开始的 ESE 二

期任务中,发射了首颗地球观测系统(Earth Observing System)卫星 Terra(原 AM-1)(<http://eosps0.gsfc.nasa.gov/>)。它是第一个能提供整体观察地球变化信息的观测系统。主要用于地表、生物圈、固体地球、大气和海洋的长期全球范围的观测。Terra 是 EOS 系列的第一颗承载多传感器卫星,星载传感器一共有五个:中分辨率成像光谱仪(MODIS),多角度成像光谱辐射计(MISR),云与地球辐射能系统(CERES),对流层污染测量仪(MOPITT)和高级星载热发射反照辐射计(ASTER)。MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,中分辨率成像光谱辐射计)是搭载于美国 EOS 系列卫星之上的一个重要遥感传感器(<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)。MODIS 具有 36 个可见光-红外的光谱波段,空间分辨率为 250~1 000m。MODIS 遥感数据是新一代的卫星遥感信息源,在生态学研究、环境监测、全球气候变化以及农业资源调查等诸多研究中具有广泛的应用前景。ASTER 是第一台用于制图和温度精确测量的星载高空间分辨率多通道热红外成像仪(<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>)。它由三个光学子系统组成:可见光近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)和热红外(TIR)。ASTER 数据具有高空间、波谱和辐射分辨率,每景幅宽 60km×60km。VNIR 在近红外波段(0.78~0.86 μm)提供能生成立体像对的后视影像数据。

我国发射了风云系列(<http://www.cma.gov.cn/qxxdh/qxwx/>)。风云 1 号(FY-1)气象卫星是我国首次自行设计和发射的实验型极轨气象卫星。FY-1A、1B 分别于 1988 年 9 月 7 日和 1990 年 9 月 3 日在太原卫星发射中心先后发射升空。FY-1C、FY-1D 分别于 1999 年 5 月 10 日、2002 年 5 月 15 日成功发射。FY-1D 是我国第一代与太阳同步轨道业务应用气象卫星。风云 2 号(FY-2)是我国自行研制的第一颗静止气象卫星。于 1997 年 6 月 10 日从我国西昌卫星发射中心,由长征三号运载火箭成功

发射,送入地球准同步轨道。卫星从西向绕地球公转角速度与地球自转角速度相等,故对地相对静止,定位于东经 105° 的赤道上空。FY-2 采用自旋稳定方式(卫星每分钟自旋约 105 圈)通过卫星的姿态控制系统使卫星的自旋扫描保持与地轴平行。星上携带各种仪器,既有对地观测功能,又有广播、通信功能。其主要遥感器为 3 通道扫描辐射计——可见光、红外和水汽自旋扫描辐射计(VIWSSR),可获得白天的可见光云图、昼夜红外云图和水汽分布图像,可见光—近红外通道为 $0.55 \sim 1.05\mu\text{m}$,星下点分辨率为 1.25km ;水汽通道为 $6.2 \sim 7.6\mu\text{m}$,用于获得对流层中上部水汽分布图像;红外通道为 $10.5 \sim 12.5\mu\text{m}$,用于获得昼夜云和下垫面辐射信息。水汽和红外通道图像的星下点分辨率为 5km ,每半小时可以获得一幅全景原始云图。星上还带有 3 个卫星云图转发器,可转发高、低分辨率云图,并进行天气图传播等;数据收集系统可提供 133 个通道的数据传输(其中 100 个国内通道、33 个国际通道),用于收集地球表面监测台站的气象、水文、海洋等数据;空间环境监测器用于监测太阳活动和空间环境。风云 3 系列相继将要发射。

中巴资源 1 号(CBERS-1)卫星已于 1999 年 10 月 14 日发射成功,这标志着我国有了自己的地球资源卫星(<http://www.cresda.com/cn/default.asp>)。中巴资源 1 号卫星(CBERS-1)是中国与巴西合作研制的数据传输型遥感卫星。轨道高度 778km (与太阳同步轨道),重复覆盖周期 26 天,设计工作寿命 2 年。中巴资源 1 号卫星主要应用于地球资源和环境监测。其携带的高分辨率 CCD 相机接收的数据,地面分辨率可达 20m 。中巴资源 1 号卫星上搭载了 3 台成像传感器,即:广角成像仪(WFI)、高分辨率 CCD 相机、红外多光谱扫描仪(IR-MSS)。中巴资源 1 号卫星集 4 种功能于一体:高分辨率 CCD 相机具有几个与 Landsat 卫星的 TM 类似的波段,且空间分辨率高于 TM;

CCD 相机具有侧视立体观测功能,这与 SPOT 的侧视立体功能类似;以不同的空间分辨率覆盖观测区域的能力,WFI 的空间分辨率为 256m,IR-MSS 可达 80m 和 160m,CCD 为 20m;3 种成像传感器组成从可见光、近红外到热红外整个波谱域覆盖观测地区的组合能力。2003 年中巴资源卫星 2 号相继发射,3 号和 4 号正在研究中。

我国的热红外遥感研究比较多。刘玉洁、杨忠东等在[3]中介绍了 MODIS 遥感影像在大气、陆地、海洋反演的参数的各种算法和 MODIS 数据的应用。李小文、汪骏发等在[4]主要介绍了二向性反射的几何光学模型和定量遥感的“病态”反演理论,并对非同温混合像元热辐射尺度效应模型进行了分析和验证,而且对多阶段目标决策反演策略的参数不确定性和敏感性进行了分析。李小文对热红外的遥感机理做了比较深入的研究,他在[4][5]中讨论了地表非同温像元的发射率的定义问题及对分离真实温度和发射率的影响,同时强调了先验知识在反演中的作用。苏理宏在[6]中对非同温的混合像元和发射率的方向性进行了研究。徐希孺等^{[7]~[9]}探讨了热红外多角度遥感问题,认为只有当扫描方向与作物茎向相垂直时才最有利于作物叶冠和土壤温度的反演,并提出了混合像元组分温度的反演方法。陈良富等^{[10]~[11]}研究了热红外遥感中大气下行辐射的近似计算及通道间信息相差性对陆面温度反演的影响。孙毅义等^[12]分析了地面发射率随观测角度而变化,认为热红外辐射具有方向性特征。陈良富等^[13]提出了非同温混合像元热辐射组分有效发射率的概念,并验证该发射率与组分温度无关。李召良等^[14]利用白天和晚上中红外和热红外的数值差异提出了一种用于提取方向发射率的物理方法。覃志豪也对热红外遥感原理,特别是地表温度的反演方法做了大量的研究^{[15]~[19]}。毛克彪等^{[1]~[32]}同时也针对对地观测卫星(TERRA)多传感器的特点提出了适合于 MODIS 和

ASTER 数据的地表温度和发射率反演算法。

国外热红外遥感研究比国内要早。真正的地表温度算法是从 20 世纪 80 年代开始的^{[1][2][33]}。按照使用热红外通道来划分,可以分为:单窗算法、劈窗算法和多波段算法。比较典型的单窗算法是覃志豪等针对只有一个热红外波段的 Landsat TM/ETM 数据提出来的地表温度反演方法^{[15][17][18]}。Jiménez-Muñoz and Sobrino 在 [34] 提出了一个普适性单通道算法。相对而言,劈窗算法比较成熟,到目前为止,已经提出了至少有 18 个劈窗算法^{[1][16][19][28][29][35]~[51]}。这些算法的主要区别在于对各参数的计算方法不同,因此可以把这些算法归纳为五大类^[14]:发射率模型、两基本参数模型、复杂模型、热辐射量模型和简单模型。同时反演地表温度和发射率的算法相对而言不是非常的成熟^{[25][29][52]~[60]}。其中具有代表性的多波段算法是李召良等提出来的独立指数法 (TISI)^[57] 和 Wan and Li 针对 MODIS 在 [60] 中提出来的同时利用白天/黑夜数据的多波段算法。其特点是对地表温度和地表发射率的同时反演,但需要昼夜两景图像才能进行反演。针对 MODIS 数据的多波段算法需要 14 个方程,计算过程比较复杂,并且是在利用大气模型来确定若干参数的情况下才能进行求解。由于白天和晚上同一地区的天气变化较大,很多时候白天晴朗的地区晚上则有云,况且由于卫星轨道的变化,只有进行几何校正才能使白天和晚上两景图幅形成匹配,但几何校正的像元数值重采样又使像元数值发生变化,从而带来计算误差。

虽然热红外遥感技术的飞速发展快速地获取区域地表温度空间差异信息提供了新的途径^{[1][2]}。但热红外地表温度反演算法受天气的影响非常的大,特别是基于热惯量的土壤水分反演算法在实际应用中精度有时难以得到保证。而且,热红外遥感受云和大气水汽的影响很大,从 NASA 提供的温度产品分析可知大部

分的温度产品, 60% 以上的地区受到云的影响, 这对实际应用产生了很大的局限性。由于被动微波能穿透云层, 并且受大气的影响非常的小, 可以克服热红外遥感的缺点。因此, 研究如何利用被动微波数据来反演地表温度就显得非常的迫切^{[61][62]}。在微波波段, 土壤水分和介电常数密切相关, 土壤的介电特性明显地依赖于土壤水分的变化, 而地表的辐射信号又由土壤的介电特性所决定。更重要的是微波传感器具有全天候、全天时监测潜力, 因为在微波的低频波段, 它可以穿透云雾、雨雪, 对地物也具有一定的穿透能力, 它不依赖于太阳辐射, 不论白天黑夜都可以工作。各种研究分析表明被动微波遥感是土壤水分反演的最好方法之一^{[63][64][65]}。

微波遥感的发展可以追溯到第二次世界大战, 但微波遥感在地质中的应用起始于 20 世纪 60 年代, 开始的研究是以地面和航空为主。随着微波遥感技术的迅猛发展, 微波遥感已经成为获取遥感信息的重要手段 (本研究主要是针对被动微波, 因此在这里以介绍被动微波的发展历程为主)。最早发射的星载微波辐射计是 1962 年美国发射的近距离观测金星的水手 2 号 (Marina 2) 飞船搭载的双频道微波辐射计, 其工作频率为 15.8GHz、22.2GHz, 主要目的是为了测量金星大气深处的温度。从卫星上用被动式微波观测的有效记录是从 1978 发射的“雨云 7 号”卫星 (Nimbus-7) 上的 SMMR (扫描式多通微波扫描辐射仪) 开始的, 自 1979 运行到 1987 年, 它每 6 天对全球进行一次观测。美国国防气象卫星计划 DMSP 系列卫星上的微波辐射计 SMM/I 在 1987 年取代了 SMMR, SMM/I 每 3 天对全球进行一次观测。这些微波辐射测量包括了 4 个频率微波的水平极化与垂直极化观测。对湿地研究来说, 其较高频率的 37GHz (SMMR 和 SMM/I) 与 85.5 GHz (仅 SMM/I) 提供的高空间分辨率数据 (37GHz 分别为 30km 和 85.5GHz 为 15km)。被动微波观测的主要优点在于