

基于多源数据的 云南土壤墒情监测技术研究

● 王杰 张世强 诸云强 彭建 曹言 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于多源数据的 云南土壤墒情监测技术研究

王杰 张世强 诸云强 彭建 曹言 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书根据国内外土壤墒情遥感技术监测的现状,在调查收集云南省降水、气温、蒸发、土壤水分、遥感资料的基础上,开展了基于多源卫星数据的土壤水分遥感反演算法研究和不同遥感反演结果的融合研究。主要包括土壤墒情遥感监测模型的评价与选择、土壤墒情多源遥感反演模型的构建、土壤墒情遥感反演数据预处理、云南省土壤墒情时空分布特征、基于多源数据的云南省干旱分析和云南省土壤墒情监测系统等内容。

本书可供水利工程、水文水资源等相关行业的科技人员、管理人员参考阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

基于多源数据的云南土壤墒情监测技术研究 / 王杰
等编著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5170-5083-4

I. ①基… II. ①王… III. ①土壤含水量—土壤监测
—研究—云南 IV. ①S152.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第323201号

书 名	基于多源数据的云南土壤墒情监测技术研究 JIYU DUOYUAN SHUJU DE YUNNAN TURANG SHANGQING JIANCE JISHU YANJIU
作 者 出版发行	王杰 张世强 诸云强 彭建 曹言 等 编著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京建宏印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.5印张 162千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	001—600册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

土壤水是联系地表水、地下水和生物地球循环的纽带，是物质传输和运移的载体。土壤水是山地农业所需水资源的主要来源，土壤水分的多少也是农业干旱的重要指标之一，适宜的土壤水分是获得农作物高产和水资源高效利用的最重要条件之一。如何利用先进手段及时乃至提前了解土壤墒情的现状、变化趋势和空间分布情况，是实现农业水资源的合理配置，提高用水效率，提升云南省抗旱测报能力和预测预警水平，从而持续健康发展云南省高原特色农业的基础性和战略性重大课题。

云南省现有 40 多个土壤墒情监测站点，相对云南省国土面积及复杂地形，这些监测站点远远不足，仅靠墒情站点数据难以满足水利部门和政府部门实时掌握土壤墒情和旱情空间分布情况的需要，进而导致地面墒情测站数据难以在农业抗旱决策中充分发挥其指导作用。

基于以上背景，由云南省水利水电科学研究院牵头，联合中国科学院地理科学与资源研究所和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所申请的云南省科技计划项目“基于多源数据的土壤墒情监测关键技术抗旱测报中的应用研究”于 2012 年 12 月启动了研究工作。本书是项目组成员在历经 3 年时间形成的研究成果基础上编写而成的。

本书共分 7 章，第 1 章总结了土壤墒情遥感监测国内外研究的现状，提出了土壤墒情研究的必要性，分析了云南省土壤墒情监测关键技术在抗旱测报中的应用意义。第 2 章总结了国内外对用遥感方法反演土壤墒情的研究，并对不同土壤墒情遥感监测模型进行了对比分析。第 3 章选择以 MODIS 为主要遥感数据源，以亮温-植被指数法作为主要的土壤墒情反演方法，以高分辨率遥感数据获取的土地利用数据作为补充，改进了土壤墒情和旱情的反演算法。基于

站点观测数据对比和优选国际上多种微波反演与再分析资料获取的土壤墒情产品,构建了MODIS反演产品和优选产品之间的融合算法。第4章介绍了对MODIS遥感数据、降水、土壤水分和地表反照率数据的预处理,以及生成云南省土壤墒情遥感监测产品和土壤干旱遥感监测分级指标的具体流程。第5章分析了降水、TVDI、VCTI等多源数据的云南省土壤墒情时空分布特征。第6章根据地面观测降水数据、TRMM降水数据和土壤墒情数据,分别计算了云南省极端气候指数、TRMM降水距平和土壤平均相对含水量,分析了不同时间尺度下云南省土壤墒情的时空变化特征。第7章介绍了基于地理信息系统技术、遥感技术和网络信息技术,嵌入了改进的土壤墒情反演算法的土壤墒情监测系统的架构和系统组成。

本书第1章由王杰、曹言、黄英撰写,张雷完成文献分析;第2章由张世强、王杰、曹言撰写,马思煜完成文献分析;第3章由彭建、张世强撰写,马思煜、种丹完成文献分析;第4章由张世强、彭建、王杰撰写,马思煜、种丹完成文献分析;第5章由张世强、彭建、王杰撰写,马思煜、种丹完成文献分析;第6章由王杰、曹言、黄英撰写,张雷、张鹏、吴灏完成文献分析。第7章由诸云强、罗侃、王东旭撰写。所有撰稿人员均参与了其他章节的交叉审稿。

本书的出版得到了云南省科学技术厅的资助;在撰写过程中云南省水利厅科技外事处张云给予了多方关注和指导,提出了许多建设性意见和建议;云南省水利水电科学研究院王树鹏、戚娜、段琪彩,云南省水文水资源局付奔也为本书的出版做出了默默的奉献,在此一并表示衷心的感谢。

由于土壤墒情的遥感反演具有复杂性,且云南省地形复杂,现有地面观测点和观测序列有限,加上参与编写人员较多,文稿难免有错误及疏漏之处,在专著即将出版时,编写人员诚惶诚恐,非常期待读者给予批评指正,以利于促进卫星遥感技术在云南省土壤墒情监测中推广应用,并发挥其效益。

作者

2016年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 土壤墒情遥感监测现状	2
1.3 云南省土壤墒情监测研究的意义	4
参考文献	6
第 2 章 土壤墒情遥感监测模型的评价与选择	8
2.1 基于热红外遥感的土壤墒情遥感监测模型	8
2.2 基于微波的土壤墒情遥感监测模型	10
2.3 基于地表温度-植被指数的土壤墒情遥感监测模型	12
2.4 小结	15
参考文献	15
第 3 章 土壤墒情多源遥感反演模型的构建	17
3.1 基于 MODIS 数据的土壤墒情反演流程	17
3.2 基于 TOA 计算 LST 的影响	18
3.3 多源遥感反演土壤墒情结果的融合	21
3.4 基于多源遥感数据的土壤墒情遥感反演算法集	27
3.5 小结	27
参考文献	28
第 4 章 土壤墒情遥感反演数据预处理	29
4.1 MODIS 数据预处理	29
4.2 降水、地面观测土壤墒情、地表反照率数据产品预处理	34
4.3 土壤墒情遥感监测产品生成	35
4.4 土壤干旱遥感监测分级指标	37
4.5 小结	38
参考文献	38
第 5 章 云南省土壤墒情时空分布特征	39

5.1	云南省降雨及蒸发的时空分布特征	39
5.2	不同时相的 TVDI 特征空间分析	46
5.3	不同时相的 VCTI 特征空间分析	47
5.4	基于多源遥感模型融合后土壤墒情的有效性检验	52
5.5	基于多源遥感数据的云南省土壤墒情时空特征分析	53
5.6	小结	61
	参考文献	61
第 6 章	基于多源数据的云南省干旱分析	63
6.1	基于极端气候指标的云南省干旱评价	63
6.2	基于 TRMM 的云南省干旱评价	74
6.3	基于土壤墒情的云南省干旱分析	84
6.4	小结	93
	参考文献	93
第 7 章	云南省土壤墒情监测系统	95
7.1	云南省土壤墒情监测系统目标与设计原则	95
7.2	云南省土壤墒情监测系统总体架构	95
7.3	云南省土壤墒情监测数据库	99
7.4	云南省土壤墒情监测系统实现	106
7.5	小结	128
	参考文献	129

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

干旱是指水分的收支或供求不平衡而造成水分短缺现象,当供水不能满足需水时,就表现为干旱(成福云,2001)。随着全球气候变暖,我国干旱灾害爆发得越来越频繁,且呈现出干旱强度大、影响范围广、持续时间长的特点(叶笃正等,1996)。因此,干旱所带来的危害越来越大,也越来越受到人类的关注。2010年春季,西南5省(自治区、直辖市)发生严重干旱,有些地区甚至出现了特旱(国家防汛抗旱总指挥部,2010;陈云芬,2010)。2014年,全国12省(自治区)遭遇严重干旱,居民生活用水遇到困难,农田一季几乎颗粒无收。加之人口的不断增长,水资源供需矛盾越发突出,监测和预防干旱已然成为一个研究热点和难点,同时也是一项亟待解决的问题。在此背景下,2011年全国抗旱规划会议明确提出加强抗旱减灾基础研究,充分利用新技术,不断提高我国抗旱减灾科技水平。2016年1月,国家防汛抗旱总指挥部(以下简称“国家防总”)召开全国防汛抗旱工作视频会议,在传达贯彻落实李克强总理和汪洋副总理的重要批示指示精神的同时,国家防总副总指挥、水利部部长陈雷强调“十三五”期间加强新技术、新材料、新设备的推广应用,不断提高抵御灾害的能力,全力做好防汛抗旱等各项工作。

云南省地处我国西南边陲地带,处于低纬度高原季风气候区,加之境内特殊的地理、地质地貌环境,全省气象灾害呈现种类多、频率高、分布广、区域性突出等特点,其中旱灾影响范围最广(解明恩,2004)。2000年前后,云南省降水出现较大转折以及温度异常,干旱有进一步加剧的趋势。尤其在2009年秋季至2010年春季期间,云南省遭遇了100年一遇的特大干旱,表现为持续时间长、干旱程度深、覆盖范围广、影响及损失大的特点,产生了自20世纪50年代有气象资料记载以来的干旱纪录(国家防汛抗旱总指挥部,2010)。2011年入夏以来,云南省大部分地区降水量又连续偏少,造成了较为罕见的全省性大范围夏旱。连续的干旱不但使河流断流,而且导致土壤失墒严重。加之温度的异常升高,农作物需水也增加,在云南省水利工程蓄水不足的条件下,对云南省农业增产及粮食安全造成了非常严重的影响。越来越频发的干

旱,使人们认识到如何利用先进手段及时乃至提前了解旱情的发生和发展过程,并且提早做好防范措施是非常有必要的。因此,加强全省范围内干旱监测预警具有非常重要的现实意义。

传统的干旱监测方法往往是通过设置地面实测站点进行人工监测,如气象站点或土壤墒情监测站点,其对局地干旱监测具有较高的精确性,然而,由于受土质、地形、坡度、土地覆盖/土地利用等因素影响,土壤墒情的空间异质性极强,单纯站点监测对于大范围的旱情监测和评估缺乏时效性和代表性。另外,全省气象站/土壤墒情监测站点数量有限,对于利用监控站点监测全省的旱情具有很大的限制作用,因此迫切需要利用卫星遥感等高新技术手段来反演土壤墒情在空间上的分布状况以及动态变化情况。

1.2 土壤墒情遥感监测现状

遥感获取土壤墒情是通过测量土壤表面反射或发射的电磁能量,分析卫星上传感器获取的电磁波信号与土壤湿度之间的关系,从而定量反演地表土壤墒情。遥感监测反演可以得到土壤湿度在空间上的分布状况和在时间上的变化情况,因具有监测范围广、速度快、成本低,可以进行长期动态监测的优势,被认为是可以提供区域和全球实际土壤墒情的有效方法之一。

目前,国内运用比较成熟的监测模型主要有土壤热惯量模型和植被指数模型。土壤热惯量模型适用于裸地或植被覆盖率很低的区域;植被指数模型适用于植被覆盖状况下土壤墒情的监测。考虑到云南省的具体情况,本书拟采用植被指数模型。该模型不直接涉及地表能量平衡中感热通量的计算,而是通过建立土壤墒情与地表温度、植被指数等气象或下垫面特征的关系来估算土壤墒情。

植被指数模型适于地面作物覆盖状况下土壤墒情的遥感监测。当植被供水正常时,卫星遥感的植被指数和植被冠层的温度在一定的生长期内保持在一定范围内,如果遇到土壤墒情不足、植被供水不足生长受到影响时,卫星遥感的植被指数降低,而植被因水分供给不足关闭一部分气孔,导致植被冠层的温度升高。如国家卫星气象中心提出的植被供水指数的定义为

$$VSWI = T_s / NDVI$$

式中: T_s 为植被的冠层温度, K; NDVI 为归一化植被指数; VSWI 为植被供水指数,表示植被缺水程度的相对大小, VSWI 值越大表明植被冠层温度越高,植被指数越低,受旱程度越重,土壤含水量越小。

基于地表温度与植被指数构成的三角形/梯形特征空间被广泛用于估算区域土壤墒情。Goward 等(1985)首次指出植被指数与地表温度构成了特征空

间。Lambin 和 Ehrlich (1996) 研究表明, 在不同区域、不同土地覆被类型的地表温度与植被指数之间具有较好的线性关系, 其线性函数的线段长度、三角面积斜率和倾角与土壤湿度等有密切联系, 因此将地表湿度与植被指数之间的空间集合特征称为土壤墒情指数 (LSI)。Price (1990)、Gillies (1995) 和 Carlson 等 (1995) 发现在研究区植被覆盖度和土壤水分变化范围较大时, NDVI 和地表温度构成的散点图呈三角形, 并用土壤-植被-大气传输模型 (SVAT) 进行了验证。Moran (1994) 通过对灌溉农田和草地的研究发现, 地表与大气的温差和植被指数构成的散点图接近梯形, 可以用水分亏缺指数 (WDI) 定义梯形内任一点的缺水状况。

在对多源遥感反演土壤墒情结果进行融合时存在不同时空尺度的转换问题。时间尺度上的转换是指遥感反演的瞬时值如何扩展到小时、日、月乃至更长的时间尺度, 国内外对区域蒸散的时空尺度转换研究为土壤墒情的时空转换提供了有益的思路。如 Jackson 等 (1983) 提出了瞬时蒸散发拓展到日蒸散发的正弦函数。Sugita 和 Brutsaert (1991) 假定蒸散比在一天之内恒定来估算蒸散发。Allen 等 (2007) 认为假定蒸散比不变的方法会导致日蒸散值过低。空间尺度转换则是指如何将不同空间分辨率的遥感反演结果进行对比, 这就涉及不同尺度、不同模型条件下参数的适用性和转换问题。Lhomme 等 (1992) 应用尺度转换方法对不同分辨率的蒸散进行比较。Hu 等 (1999) 通过地表参数 (如 T_s 、 α 、 ϵ 、 r_a 等) 的尺度转换来处理空间异质性的影响。

我国在土壤墒情监测和建立监测系统方面也开展了大量尝试。杨丽萍等 (2009) 选用植被供水指数法和 MODIS 数据对山东省春季地表墒情分布进行了研究, 建立了土壤墒情监测模型。杨达等 (2011) 利用 NOAA/AVHRR 卫星资料构建了吉林省旱情监测系统, 尝试了利用归一化植被指数法来直接监测干旱程度, 同时也指出该方法受到不同作物种类、不同生长阶段的影响较大, 需要长时间数据的积累来进一步完善。刘勇洪等 (2011) 引入遥感 (RS) 和地理信息系统 (GIS) 技术, 以图像栅格信息方式分别考虑土壤、植被和大气空间区域分布的非均匀性, 以中期天气预报要素、实测土壤墒情及当前 MODIS 卫星遥感资料为基础, 研究开发了基于 IDL 语言的 250m 空间分辨率网格信息的北京市土壤墒情预报服务系统, 并在北京地区进行了气象业务服务和效果评估。蔡衡和王郡 (2011 年) 利用 76 个站点的气象数据和土壤墒情观测数据, 建立了贵阳市土壤墒情与农作物旱情监测评估系统, 利用该系统将土壤墒情、土壤有效水分、土壤墒情指数与农作物灌溉量联系起来, 为利用土壤墒情监测干旱提供了支撑平台。

综上所述, 国内外对于土壤墒情的遥感反演技术已经有较好的积累, 而在利用多源数据来提高反演的精度方面还探讨不多。由于近年来我国干旱灾害强

度和频度的增加,如何利用土壤墒情对干旱灾害进行监测和测报已经引起了多个省市的重视。国内已有省份利用“3S”技术采用土壤墒情监测数据和遥感反演数据建立了土壤墒情监测系统,监测干旱的工作已经开始或正在开展。然而,目前的工作大多还局限于单一传感器或站点数据,对于综合多站点数据与不同来源的遥感数据,以及融合不同数据的土壤墒情监测开展较少,基于 WebGIS 等最新技术方面在国内各研究中尚未开展,从而与建立实用、先进的土壤墒情监测系统,并在抗旱测报中确实发挥作用还有较大的差距。

在过去 10 年中,随着网络和计算机技术的发展,GIS(特别是 WebGIS)等相关技术和方法取得了很大进步,分布式地理空间计算、地理时空数据库等关键技术日益完备,并着重表现在:①以上技术为实现集成大数据量的对地观测影像和基础地理数据,进而开展资源环境计算以及结果交互式可视化提供了基础;②数据、标准、软件等方面均表现出较强的开放化发展趋势,开放地理空间软件和技术已经能够覆盖地理空间数据的存储、转换、表达和分析等各个环节,目前发展形成了 GeoTools、GeoServer、OpenLayers、OpenGIS 等开源软件包和功能库,打破了以前 GIS 领域被个别公司和组织垄断的局面,避免了传统商业软件的封闭性,有利于实现拥有自主知识产权的数据库和分析系统。因此,本书充分利用 WebGIS 构建了基于多源遥感数据的土壤墒情监测系统,自动下载部分遥感影像,依据构架的土壤墒情遥感反演算法,在线计算分析研究区的土壤墒情,进而依据标准可视化显示旱情空间分布,并供授权用户查询打印,有效弥补当前单纯依靠某一种遥感数据的单机版土壤墒情监测系统的缺陷,也是未来构建土壤墒情监测系统的趋势。

1.3 云南省土壤墒情监测研究的意义

干旱是与其他灾害不同的一种自然灾害,它发生的过程缓慢,历时数月或数年,影响范围大,它不仅对工农业生产造成较大的影响,而且还会产生一些次生影响(肖瑶,2010;孙雪萍,2013),如干旱引起高原湖泊水位降低,从而减弱湖泊水循环,导致湖泊水质恶化,干旱还容易导致森林火灾等。农作物对水的敏感性较强,因此干旱对农作物的影响重大,会造成农作物长势不良及产量减少。目前,云南省在农业灌溉及抗旱等农事生产活动中仍以经验为基础。因而及时全面了解土壤墒情的空间动态分布状况,不仅可以为相关决策部门制订防御干旱灾害的措施提供科学依据,而且对发生干旱时指导农业进行科学灌溉具有重要的现实意义。随着经济社会的不断发展,用水需求迅猛增加,在干旱不断加剧的情况下,全社会对增加抗旱主动性,实现水资源可持续发展

提出了迫切的需求。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》《云南省中长期科学和技术发展规划纲要》和《云南省“十二五”科学和技术发展规划》都在公共安全领域将自然灾害的发生规律、预测预报技术及动态监测技术的研究和应用列入优先主题。提高抗旱决策的准确性、时效性和权威性，对云南省的抗旱减灾工作有重要的实践意义。

土壤墒情对于旱发生早期和旱情发生过程具有非常重要的指示作用（黄丽，2010）。因此，大力开展土壤墒情监测与研究对预警和监测干旱的发生发展非常必要。土壤墒情监测也是发展节水农业的基础，它可以为农业节水生产和主管部门提供必需的土壤墒情定量信息和空间分布状况，从而提高节水农业宏观管理决策的科学化水平。

目前，土壤墒情监测的手段有常规地面监测和卫星遥感监测。近些年来，云南省土壤墒情监测站点的监测资料已经在云南省抗旱测报中发挥了一定作用。然而，基于地面实测站点进行土壤墒情监测还存在不足：①由于监测站点受所处地形地貌、下垫面、局地气象要素等影响，各站点间的观测资料难以直接对比，从而限制了其对旱情提前指示作用的发挥；②相对云南省国土面积和复杂的地形，现有40多个土壤墒情监测站点比较稀少，土壤墒情监测站点仅反映的是局部的土壤湿度情况，受土质、地形、坡度、土地利用等因素影响，土壤墒情具有很强的空间异质性，单纯依靠传统的土壤墒情监测站点观测数据难以全面反映云南省各地的土壤墒情动态。

随着“3S”技术的发展，尤其是遥感技术的发展，为高分辨率遥感数据反演土壤墒情的空间分布带来了机遇。利用高新卫星遥感技术反演土壤墒情的研究近年来取得了一些进展，其中以NOAA/AVHRR数据和中分辨率成像仪（MODIS）数据应用最为广泛。随着我国多颗小卫星的发射，如HJ-1A/1B卫星（空间分辨率为30m，单星重访周期为4d，双星组网重访周期为2d）为提高土壤墒情遥感反演的空间分辨率提供了重要的数据源。但是小卫星的观测波段较少（如HJ-CCD只有4个波段），而且存在定标等问题，单纯依赖小卫星数据反演的土壤墒情准确度难以保证。

因此，本书充分利用云南省地面土壤墒情监测站点数据，综合多源卫星遥感数据，研究多源遥感数据的土壤墒情反演算法和融合反演算法，并与土壤墒情监测数据进一步融合，形成时空分辨率均较高的土壤墒情监测成果。此外，本书结合先进的GIS技术和网络技术，将土壤墒情数据的管理和与遥感数据的流程化处理相结合，构建土壤墒情监测系统，并利用网络快速发布监测成果，让水利防汛抗旱部门和政府相关部门实时掌握云南省土壤墒情的空间分布状况及变化情况、旱情空间分布状况及变化情况，提高云南省抗旱测报水平，这对云南省主动抗旱、积极合理抗旱具有重要指导意义。同时，本书将为云南

省利用高新卫星遥感技术在其他行业方面应用提供经验借鉴。

参 考 文 献

- [1] 成福云. 旱灾及抗旱减灾对策探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2001, 10: 9-10.
- [2] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究 [M]. 济南: 山东科技出版社, 1996.
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2010 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 陈云芬. 全省干旱等级达 80 年以上一遇 [N]. 云南日报, 2010-3-17 (1).
- [5] 全国 12 省区遭遇严重干旱 [Z]. 新闻 1+1, 2014, 1 (8).
- [6] 解明恩, 程建刚. 云南气象灾害特征及成因分析 [J]. 地理科学, 2004, 24 (6): 721-726.
- [7] S Goward, C Tucker, D Dye. North American Vegetation Patterns Observed with the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer [J]. Vegetatio, 1985, 64 (1): 3-14.
- [8] E F Lambin, D Ehrlich. The Surface Temperature-Vegetation Index Space for Land Cover and Land-Cover Change Analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 (3): 463-487.
- [9] J C Price. Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration [J]. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28 (5): 940-948.
- [10] R R Gillies, T N Carlson. Thermal Remote Sensing of Surface Soil Water Content with Partial Vegetation Cover for Incorporation into Climate Models [J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34 (4): 745-756.
- [11] T N Carlson, R R Gillies, T J Schmugge. An Interpretation of Methodologies for Indirect Measurement of Soil Water Content [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77 (3-4): 191-205.
- [12] M S Moran, T R Clarke, Y Inoue. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface Air Temperature and Spectral Vegetation Index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 30 (5): 246-263.
- [13] R D Jackson, J L Hatfield, R J Reginato. Estimation of Daily Evapotranspiration from One Time-of-day Measurements [J]. Agricultural Water Management, 1983, 7 (1-3): 351-362.
- [14] M Sugita, W Brutsaert. Daily Evaporation Over a Region from Lower Boundary Layer Profiles Measured with Radiosondes [J]. Water Resources Research, 2007, 27 (5): 747-752.
- [15] R G Allen, M Tasumi. Satellite-based ET Mapping to Assess Variation in ET with Timing of Crop Development [J]. Agricultural Water Management, 2007, 88 (1-3): 54-62.
- [16] J P Lhomme, E Elguero. Examination of Evaporative Fraction Diurnal Behaviour

- Using a Soil - Vegetation Model Coupled with a Mixed - layer Model [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1999, 3 (2): 259 - 270.
- [17] Z Hu, S Islam, L Jiang. Approaches for Aggregating Heterogeneous Surface Parameters and Fluxes for Mesoscale and Climate Models [J]. Boundary - Layer Meteorology, 1999, 93 (2): 313 - 336.
- [18] 杨丽萍, 隋学艳, 杨洁, 等. 山东省春季土壤墒情遥感监测模型构建 [J]. 山东农业科学, 2009, 5: 17 - 20.
- [19] 杨达. 基于 GIS 的土壤墒情监测及抗旱管理决策系统 [J]. 科技资讯, 2011, 24: 54 - 55.
- [20] 刘勇洪, 吴春艳, 叶彩华, 等. 基于网格化信息的北京地区土壤墒情预报服务系统 [J]. 中国农业气象, 2011, 2: 267 - 272.
- [21] 蔡衡, 王郡. 贵阳市土壤墒情与农作物旱情监测评估系统建设与利用 [J]. 农技服务, 2011, 4: 471 - 472.
- [22] 肖瑶. 湘西岩溶地区干旱特征及治理措施 [J]. 湖南水利水电, 2010, 2: 71 - 73.
- [23] 孙雪萍, 房艺, 苏筠. 基于旱情演变的社会应灾过程分析——以 2009—2010 年云南旱灾为例 [J]. 灾害学, 2013, 28 (2): 90 - 95.
- [24] 黄丽, 顾磊. 遥感墒情监测方法综述 [J]. 首都师范大学学报, 2010, 31 (3): 59 - 63.

第 2 章 土壤墒情遥感监测模型的评价与选择

国内外对利用遥感方法反演土壤墒情的研究已有 30 多年的历史，利用可见光、近红外、热红外、微波波段开展了大量的反演试验，建立了诸多反演模型，发布了很多区域或全球尺度的土壤湿度产品。反演模型可以分为 3 类：基于热红外遥感的监测模型、基于微波的监测模型和基于地表温度-植被指数的监测模型。

2.1 基于热红外遥感的土壤墒情遥感监测模型

土壤的温度分布取决于土壤的热性质，即土壤的热容量。用热红外方法监测土壤墒情主要是从遥感图像获取地表温度（Land Surface Temperature, LST），进而利用地表温度和土壤湿度的关系来计算土壤墒情。基于热红外遥感的土壤墒情监测模型通常有热惯量模型和表观热惯量植被干旱指数模型等。

2.1.1 热惯量模型

利用热惯量模型监测一定深度的土壤含水量，关键是要建立土壤含水量与土壤热惯量之间的关系模型。土壤热惯量反映的是土壤热容量、土壤温度变化幅度和速度的一种性质。热惯量大的土壤含水量高，其地表温度日较差小；热惯量小的土壤含水量低，其地表温度日较差大。基于 MODIS 传感器计算热惯量只需计算地表反射率和昼夜温差，可以利用可见光-近红外通道得到地表反射率，利用热红外通道得到昼夜温差。计算昼夜温差是热惯量模型反演土壤水分的关键。昼夜温差首先利用卫星热红外通道资料进行定标计算，然后将得到的辐射亮度带入普朗克方程量和土壤的导热率。土壤的热容量（C）指单位体积土壤增温 1℃所需的热量，它由组成土壤的水、空气和固体颗粒的热容量按所占的体积加权平均求得，即

$$C = (C_s V_s + C_w V_w + C_a V_a) / V \tag{2.1}$$

其中

$$V = V_s + V_w + V_a$$

式中： C_s 、 C_w 、 C_a 分别为固体颗粒、水、空气的容积热容量； V_s 、 V_w 、 V_a 分别为固体颗粒、水、空气所占的体积； V 为土壤的总体积。

由于土壤中空气的热容量非常小,而水的热容量约为固体颗粒热容量的 2 倍,因而土壤的热容量主要随土壤的体积含水量 (θ) 而变化,即

$$C = C_s V_s / V + C_w \theta \quad (2.2)$$

土壤中热量从温度高的部分传导到温度低的部分的过程称为土壤热传导,热传导的通量由热流通量(热通量)表达。由傅里叶定律,有

$$Q_s = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.3)$$

式中: Q_s 为热流通量; λ 为土壤热导率。

矿物质的导热率一般较大,水次之,空气最小,因而土壤导热率的大小取决于固体颗粒的组合形态和含水量。当土壤含水量增加时,土壤的导热率增大。根据热传导的傅里叶定律和能量守恒定律,可导出土壤热传导方程为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.4)$$

式中: $C \frac{\partial T}{\partial t}$ 为单位体积土壤热量的时间变化率; $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$ 为单位体积土壤能量的净输入量。

对于各向同性的均质土壤,如果土壤含水率不随深度变化或其变化对热特性参数的影响可以忽略,则 C 和 λ 可当作常数。假定只有垂直方向的能量交换,则可进一步简化为一般固体的热传导方程:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

其中

$$\alpha = \lambda / C$$

式中: α 为热扩散率。

在一定的边界条件下,通过分离变量法解方程,则可得到热惯量方程:

$$p = \frac{k(1-A)}{\Delta T_0} \quad (2.6)$$

式中: p 为热惯量; ΔT_0 为日最高地表温度与最低地表温度之差; A 为全波段反照率; k 为常数。

土壤的温度分布与土壤的热特性有直接关系,热特性又与土壤的含水量有关。利用可见光和热红外通道可以计算土壤的反射率和亮度温度,可以得到地面的 A 和 ΔT_0 ,进而间接获得热惯量 p 。

以 MODIS 为例,计算全波段反射率 A 的公式为

$$\begin{aligned} A = & 0.137CH_1 + 0.071CH_2 + 0.142CH_3 + 0.128CH_4 \\ & + 0.099CH_8 + 0.081CH_9 + 0.082CH_{10} + 0.080CH_{11} \\ & + 0.037CH_{14} + 0.043CH_{15} + 0.039CH_{17} + 0.059CH_{19} \end{aligned} \quad (2.7)$$

式中: CH_1 、 CH_2 、 CH_3 、 CH_4 、 CH_8 、 CH_9 、 CH_{10} 、 CH_{11} 、 CH_{14} 、 CH_{15} 、

CH₁₇、CH₁₉分别为 MODIS 传感器在 1、2、3、4、8、9、10、11、14、15、17、19 各通道的反照率。

通过地表温度直接求取昼夜温差的方式比较复杂,因此常采用昼夜辐射温度差代替地表温差。

热惯量模型在遥感监测区域干旱中得到了广泛的应用。但是热惯量模型主要适用于裸土或稀疏植被覆盖条件。

2.1.2 表观热惯量植被干旱指数模型

如果假设研究范围内气象条件一致,表观热惯量(Apparent Thermal Inertia, ATI)与真实热惯量(Real Thermal Inertia, RTI)呈线性关系,就可以利用 ATI 和 NDVI 建立 NDVI-ATI 空间。在 NDVI-ATI 空间中,干边在下,湿边在上。计算干边和湿边的方程式为

$$ATI_{\min} = a + b \cdot NDVI \quad (2.8)$$

$$ATI_{\max} = a' + b' \cdot NDVI \quad (2.9)$$

式中:ATI_{min}为在相应 NDVI 下的最小表观热惯量;ATI_{max}为在相应 NDVI 下的最大热惯量;a、a'、b、b'为回归系数,分别为 NDVI-ATI 空间中湿边和干边方程的截距与斜率。

由 NDVI-ATI 空间计算表观热惯量植被干旱指数(AVDI)的公式为

$$AVDI = \frac{a + b \cdot NDVI - ATI}{(a' + b' \cdot NDVI) - (a + b \cdot NDVI)} \quad (2.10)$$

2.2 基于微波的土壤墒情遥感监测模型

用微波遥感估算土壤水分的原理是基于土壤水分和介电常数之间的密切关系,不同介电常数的土壤所表现出的散射和辐射特征不同。根据传感器工作方式的差异,基于微波的土壤墒情遥感监测模型可以分为主动和被动微波遥感模型两大类。

2.2.1 主动微波遥感模型

主动微波遥感是指利用搭载在遥感平台上的雷达向地物目标发射出经过调制的电磁波束,再通过天线接收地物目标反射的回波信号,并进行处理后得到地物目标的后向散射信息(一般称为后向散射系数),然后根据这些信息来提取和分析地物目标的相关参数的技术。雷达观测的空间分辨率同天线长度有关,通常越长的天线获得的分辨率就越高,在实际应用中常使用合成孔径雷达来实现用较小的天线长度合成等效天线来获取高分辨率数据的目的。