

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第30卷第22期

2010年11月 (半月刊)

目次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近100年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南2种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园4种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤5种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京PM _{2.5} 、NO _x 、CO的动态特征及影响因素·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统9种矿质元素生物循环特征·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便DNA的马鹿种群数量和性比·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

土壤水分遥感监测研究进展

杨涛^{1,2,3}, 宫辉力^{3,*}, 李小娟³, 赵文吉³, 孟丹³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 首都师范大学, 北京 100048)

摘要: 土壤水分是陆地表面参数化的一个关键变量。土壤水分含量随时空的转换而变化, 在地-气界面间物质、能量交换中起着重要的作用, 是农作物生长发育的基本条件和农作物产量预报的重要参数。遥感技术具有大面积同步观测, 时效性、经济性强的特点, 为大面积动态监测土壤水分提供了可能。总结了近年来国内外遥感监测土壤水分理论、方法的发展和应用, 介绍了目前几种比较成熟和广泛应用的土壤水分遥感监测方法与模型, 对比分析了各种监测方法的优缺点, 指出了土壤水分遥感监测方法存在的不足, 指明了今后发展的方向, 展望了土壤水分遥感监测方法的发展趋势。

关键词: 土壤水分; 遥感监测; 模型与方法

Progress of soil moisture monitoring by remote sensing

YANG Tao^{1,2,3}, GONG Huili^{3,*}, LI Xiaojuan³, ZHAO Wenji³, MENG Dan³

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Lab of 3-Dimensional Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Soil moisture is a key variable of land surface parameters. Soil water content variates spatially and temporally, and plays an important role in environmental elements and energy exchanges between earth and atmosphere. It is a basic indicator of crop growing and crop yield forecast, and also an important parameter in numerical weather-prediction model that lead to efficient forecasting improvement in the physics of land surface processes on regional or global scales. However, it is very difficult to obtain the soil moisture parameter by ground measurement in both temporally and spatially, especially at large spatial scales. With the development of remote sensing techniques during the last decades, it has been gradually concerned as one of the best efficient methods to retrieve soil moisture parameter. With the features of observing large area synchronously, temporally, and economically, remote sensing technique makes dynamic soil water monitoring possible at large scales. There are four objectives within this paper about soil moisture research. Firstly, it summarized systematically development and applications of remote sensing in monitoring soil moisture, mainly including Visible, Near-Infrared, Thermal infrared remote sensing and Microwave remote sensing. Secondly, it detailedly introduced present models and methodologies that extensively used for soil moisture monitoring by remote sensing, including the following Spectrum reflectivity method, Thermal inertia model, Crop water stress index, Vegetation index, Microwave remote sensing models and Hyper-spectral remote sensing model. Next, it comparatively analyzed advantages and disadvantages of all remote sensing methods in monitoring soil moisture, and pointed out shortages with very one remote sensing method. Spectrum reflectivity method is only applied in the specific area of flat terrain, single landform and a typical composition soil; Thermal inertia method is more suitable for bare soil and low vegetation coverage, and vegetation index, crop water stress index for higher coverage region; Temperature-vegetation method can effectively overcome the influence of soil background and more accurately quantitative retrieves soil moisture in no-completion coverage region; Microwave remote sensing has a solid

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA12Z111; 2009AA12Z14611); 国家自然科学基金资助项目(40771170)

收稿日期: 2010-05-01; **修订日期:** 2010-08-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gonghl@263.net

physical foundation for monitoring with high precision, though it still remains a serious challenge and some difficulties on how to eliminate impacts of the vegetation cover and surface roughness to the inversion of soil moisture. Finally, the prospect of remote sensing for soil moisture retrieval is discussed with the development of remote sensing technique, as well as some research directions in the future. It is very difficult for monitoring soil moisture, because of the complexity of plant-soil-water system. At the same time, various models and methods are only used efficiently in appropriate seasons and area. Parameters of models are heavily affected by geographical restrictions, not extended to the whole country. There, there are limitations on soil moisture retrieval by use of only one single method of microwave, visible-near infrared-thermal infrared, vegetation index. It is an effective way to get higher accuracy of data by integrated use of optical/near-infrared and microwave remote sensing, and is a trend to monitoring soil moisture quickly and efficiency at large scales in the future.

Key Words: soil moisture; remote sensing monitoring; model and method

在地球系统中,地表土壤水分是陆地和大气能量交换过程中的重要因子,对陆地表面蒸散、水的运移、碳循环有很强的控制作用,是气候、水文、生态、农业等领域衡量土壤干旱程度的重要指标。土壤含水量的时空分布与变化对陆地-大气间热量平衡、陆面大气环流和土壤温度变化产生显著的影响。大范围的土壤水分的监测是农业过程研究和环境因子评价的重要组成部分,而区域尺度甚至全球范围的土壤水环境反演又是陆地过程模式研究中必不可少的一个参量,在改善区域及全球气候、预测区域干湿情况研究中意义重大^[1]。

目前土壤含水量的获取方法可分为 3 类:田间实测法、土壤水分模型法和遥感法。田间实测法包括重量水分法、中子仪法、土壤湿度计法、伽马射线衰减法、电阻法。该方法可以准确估测土体剖面的含水量,测定的土层较多,深度较大,但只能得到单点的数据,代表范围有限,数据的实时性较差,人力财力消耗大,很难表现土壤、地形、植被覆盖上的空间变异性,宏观性得不到体现,数据得不到及时更新。土壤水分模型方法是根据物质守恒定律,建立水平平衡方程来求解土壤水分,可提供适时的土壤水分信息,具快速、可预测、可提供面信息的优势。但实验需要大量气象数据支持,参数复杂、难以确定,估测误差较大。土壤水分的遥感估测方法是通过测量土壤表面发射或反射的电磁能量,研究遥感信息与土壤湿度间的关系,建立土壤湿度与遥感数据间的信息模型,从而反演出土壤水分。遥感监测土壤水分克服了以上两种方法的缺陷,其具有时效快、动态对比性强、长时期动态大区域监测以及良好的时空分辨率等优点,因此,为区域尺度的土壤水分信息的获取提供了有效手段^[2-3]。目前,利用遥感手段已成为监测大区域范围内土壤水分时空分布和变化的主要方法。

1 土壤水分遥感监测发展与现状

1.1 可见光、近红外与热红外波段遥感

遥感监测土壤水分的可行性研究在 20 世纪 60 年代初期就已经开始,应用研究则相应地在 70 年代中期开展起来。Aston 研究发现利用冠层温度可以有效评价作物水分亏缺^[4],后来有大量的研究论证这种关系并提出了冠层温度和蒸腾速率来评价干旱的方法,如温度状态指数(temperature condition index, TCI)和作物缺水指数^[5-7]。Waston^[8-9]最早尝试利用热惯量模型,利用热红外波段获取地表温度日变化幅度和热模型相结合可以估测土壤湿度;Bijleveld 在他的工作基础上,建立了计算热惯量和每日蒸发量模型^[10];Pratt 等^[11]提出了绘制土壤水分和地理图的热惯量方法。20 世纪 80 年代,随着机载、星载遥感的迅速发展与普及,遥感监测土壤水分方法也得到了迅速发展,许多遥感数据也相继被使用,比如 TM 数据和 NOAA-AVHRR 数据。Jakson 等^[12]利用 NDVI 监测干旱发现只有水分胁迫严重阻碍作物生长时才引起植被指数的明显变化。Carlson 利用 NOAA/AVHRR 资料计算土壤有效水分和热惯量^[13]。Nemnai 利用大尺度数据研究发现 NDVI-Ts 斜率主要由植被覆盖度、表层土壤湿度状况及当地气象条件共同控制^[14]。Kogan^[15]提出植被条件指数(vegetation condition index, VCI)。Price 用植被指数、地表温度估测区域蒸散量^[16]。Moran 等^[17]认为植被指数、地表温度和空气温度的差值构成梯形,并提出了适宜部分植被覆盖的水分亏缺指数(water deficit index, WDI)。20 世纪 90 年代中后期,随着 NOAA/AVHRR 和 MODIS 数据的普遍应用,光学和热红外波段的遥感反演方法也日

趋成熟。Goetz^[18]研究了不同分辨率(AVHRR、TM、SPOT等)下Ts、NDVI斜率与土壤湿度的关系。Gillies等应用土壤-植被-大气传输模型湿度进行模拟,并用遥感获取的Ts和NDVI作图,发现能得到一系列土壤湿度的等值线^[19]。目前,国外有学者结合可见光、近红外与热红外的信息,使用归一化植被指数(NDVI)和陆地表面温度(LST),构建NDVI-LST空间来反演土壤水分。Sandholt等^[20]植被指数和地表温度的关系,提出了温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)估测土壤表层湿度状况,该指数只表示土壤湿度的相对状态。

我国土壤水分遥感监测的研究大体从20世纪80年代中期开始。早期研究主要集中于土壤参数的遥感测定,如黄杨研究了土壤含水量及其微波反射特性的关系^[21],唐登银^[22]提出了一种以能量平衡为基础的干旱指数法。20世纪90年代至今,我国学者在土壤含水量遥感模型及其应用研究方面取得了一系列进展。例如,肖乾广等^[23]引入了“遥感土壤水分最大信息层”的概念,并以此理论建立了多时相的综合土壤湿度统计模型;徐兴奎^[24]等人通过简化能量平衡方程,直接推算表观热惯量(ATI),并建立了ATI与土壤含水量的关系式;余涛^[25]发展了地表能量平衡方程的一种简化方法,经过简化处理可从遥感图像数据直接得到真实热惯量值,进而得到土壤水分含量分布;齐述华^[26]等利用综合了植被覆盖信息和陆地表面温度信息的TVDI旱情指标能较好地反映表层土壤水分变化趋势,以陆地表面温度为基础的旱情指标比植被指数为基础的旱情指标更合理;冯强等利用NOAA/AVHRR数据建立了植被状态指数(VCI)与土壤湿度之间的统计模型,应用此模型在作物生长期应用于大范围旱情遥感监测有效且简便易行^[27];刘安麟等利用简化的或者成熟的作物缺水指数法WDI进行土壤水分和旱情监测,研究发现该指数不仅适用于裸地条件,还能够有效地应用于完全植被或部分植被覆盖条件下的干旱监测^[28-30];梁芸等^[31]通过建立植被供水指数(VSWI)与土壤湿度的关系式,研究发现利用MODIS植被供水指数监测庆阳地区的土壤湿度是可行的;辛景峰等^[32]利用NOAA-AVHRR数据,研究了土壤湿度与地表温度/植被指数的斜率的定量关系;魏国栓^[33]等构建Ts/NDVI特征空间,依据该特征空间计算温度植被干旱指数,进而反演了仪征地区不同季节的40cm土壤相对湿度。

1.2 微波遥感

微波遥感土壤湿度法分主动微波遥感监测法和被动微波遥感监测法两种。此方法物理基础坚实,即土壤的介电特性和土壤含水量密切相关,水分的介电常数大约为80,干土仅为3—5,存在较大的反差。土壤的介电常数随土壤湿度的变化而变化,表现于卫星遥感图像上是灰度值G亮度温度的变化。

1.2.1 被动微波监测土壤水分

被动微波反演土壤水分已有30多年的历史。20世纪70年代初,美国国家航空航天局(NASA)在亚历山大农田进行了航空微波辐射计飞行试验,同步观测了0—15cm的土壤湿度,对试验数据进行了分析,发现亮度温度与土壤湿度(质量百分比)具有较好的线性相关^[34]。Njoku等^[35]基于辐射传输方程,建立亮度温度与土壤湿度等参数的非线性方程,然后用迭代法和最小二乘法解非线性方程求出土壤湿度。Jackson^[36]和Koike^[37]利用被动微波遥感对较大尺度的土壤水分进行了制图研究和试验。植被对土壤水分反演的影响是不可忽视的因素,为了消除植被的影响,必须注重植被的遥感监测,建立相关的计算模型。Teng^[38]等研究了植被对土壤水分监测的影响,结果表明在浓密植被覆盖区土壤湿度监测中应避免使用19GHz波段,尽量选择较长波段微波辐射,以消除植被对土壤湿度反演的影响。Frate^[39]等利用由微波遥感获得的比辐射率经过两个隐藏层的BP神经网络模型的训练得到土壤含量。Bindlish^[40]利用改进的IEM模型,得到了与实际土壤湿度相关性高达0.95的反演结果。乔平林^[41]基于BSM模型与人工神经网络(ANN)进行了土壤湿度的反演,即使在先验知识具有不确定时仍能保证一定的准确度。王磊等^[42]引入微波极化差异指数(MPDI)概念,提出了一种自动区分地面植被覆盖情况的方法,改进了Richard提出的计算植被消光系数的方程,提高了反演的效率。

1.2.2 主动微波监测土壤水分

主动微波土壤湿度反演已有30多年的历史,最早研究始于Ulaby等人^[43]的实验。其中,裸土土壤湿度反

演研究开展较多,Dobson、Oh、Shi 等结合物理模型和多频、多极化或全极化数据建立了土壤水分反演的半经验模型,实现了裸土土壤水分反演^[44-46]。但是当用于植被覆盖地表时,未能有效地实现土壤湿度的反演^[47]。目前,植被覆盖区土壤湿度微波遥感反演研究主要基于现有的植被模型(如水-云模型和 MIMICS 模型),在获得试验区植被层信息后,将以上模型参数进行校正,去除植被层对地表土壤湿度反演的影响。例如,Roger 等^[48]基于模拟数据建立了农作物覆盖地表土壤湿度反演的经验回归模型;Baghdadi^[49-51]等对 IEM 模型进行了半经验性的标定,改进了像元尺度上相关长度的表达,提高了土壤水分反演的精度;Rahman^[52-53]等探讨了粗糙度对观测信号的贡献,从而求得粗糙度的分布信息,进而获得土壤水分反演结果;施建成^[54]等利用目标分解方法分离出植被散射部分,在一定程度上克服了植被层和表面粗糙度的变化对雷达后向散射对土壤水分的影响;杨虎等^[55]利用多时相 Radarsat ScanSAR 雷达后向散射系数图像繁衍得到了地表土壤水分变化模式信息;鲍艳松^[56]等利用 TM 遥感数据削弱植被散射和衰减的影响,基于 ASAR 和 TM 数据建立冬小麦覆盖下的土壤湿度反演模型,实现了冬小麦覆盖下土壤湿度的反演。

1.2.3 主被动微波结合土壤水分研究

目前,主被动联合反演土壤水分的研究方法可大致分为两种:一种是将主动微波与被动微波数据融合在一起,共同对地表参数进行反演。第二种是首先采用被动微波数据获取低分辨率的地表土壤水分结果,在此基础上再利用主动微波数据进行处理,获取分辨率更高的土壤水分结果。Lee^[57]分别针对主被动微波遥感数据建立了亮度温度、后向散射系数与地表土壤水分、植被参数(LAI)的关系,利用几何光学模型模拟主动微波散射,用水云模型计算植被影响。随后建立了表征前向模型模拟结果与卫星观测数值的差异函数,利用不同通道对前向模型中各参数进行确定。Narayan^[58]基于特定假设,首先用被动微波传感器数据反演得到对应时相土壤水分,然后用两个相邻时相被动微波土壤水分结果及同期被动微波像元内部的主动微波数据计算两次观测之间该被动微波像元内部的后向散射-土壤水分变化系数。进而推算后续时相主动微波像元尺度土壤水分值。Chauhan^[59]利用机载合成孔径雷达 AIRSAR 和辐射计 PBM,采用主被动结合的方法,对美 Mahantango 流域土壤水分进行了研究,结果与观测值吻合良好。李震等^[60]研究建立了一个半经验公式模型,用来计算体散射项,综合时间序列的主动和被动微波数据,消除植被覆盖的影响,估算地表土壤水分变化状况。

2 主要方法原理及模型

2.1 土壤水分光谱法

土壤水分光谱法是应用遥感估算光学植被度,利用分解象元排除法来提取土壤水分光谱信息。土壤水分含量约大于 5% 时,随土壤水分含量的增加反射率有呈指数下降趋势^[61],这一规律为遥感方法监测土壤水分提供了可能。两者关系常用下式表示:

$$R = ae^{bP} \quad (1)$$

式中, R 表示光谱反射率, P 是土壤水分百分数, a 、 b 是待定系数。在此基础上,刘培君^[62]等引入“光学植被盖度”的概念,把混合像元的光谱信息纯化为裸土的光谱信息,并进行了 TM 资料与 NOAA/AVHRR 资料之间的转换得到 NOAA/AVHRR 土壤水分回归模型,以实现大面积干旱监测。塔西甫拉提·特依拜等^[63]使用 Landsat7/ETM+ 资料,推算土壤水分,并提出评价地下水位分布的遥感模型-GLDRS 模型。但是,土壤水分-反射率的正相关关系受土壤水分含量的限制,一般在土壤水分含量不超过 25% 的时候较明显,超过 25% 以后反射率将出现反弹,模型将不再适用,而且根据不同的土壤质地需要对模型中的参数 a 、 b 进行调整,需要丰富的先验知识和资料。

2.2 热惯量模型

土壤热惯量是土壤的一种热特性,是引起土壤表层温度变化的内在因素。水分有较大的热容量和热传导率,使较湿的土壤具有较大的热惯量,而这一热惯量可由光学遥感监测地表温度的变化得到,这使得热惯量法在遥感监测土壤水分中具有可行性。

随着具有较高分辨率的 TIROSS、NOAA 系列气象卫星相继投入使用,推动了土壤水分遥感监测方法的研

究。Price 通过系统的研究,阐述了热惯量的遥感成像原理,提出了表观热惯量的概念,从而使采用卫星提供的可见光-近红外反射率和热红外辐射温度差计算热惯量并估算出土壤水分成为可能^[64-65]。Enland 等提出了辐射亮度热惯量(RTI)的概念,且认为 RTI 对土壤水分的敏感性好于 ATI^[66]。研究表明,对于同一类型的土壤,其含水量越高,则热惯量越大,二者间存在正相关。土壤热惯量法是土壤热特性的综合性参数,定义为:

$$P = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (2)$$

式中, P 为热惯量, λ 为热传导率, ρ 为土壤密度, c 为比热。Price 在简化了潜热蒸发形式后给出了 P 的一个近似解如下:

$$P = 2SV(1 - \alpha)C_1/\sqrt{\omega}(T_1 - T_2) - 0.9\beta\sqrt{\omega} \quad (3)$$

式中, S 为太阳常数; V 为大气透明度; α 为地表反照率; C_1 为太阳赤纬和经纬度的函数; ω 为地球自转频率; β 为地表综合参数,是土壤辐射率和比湿等参数的函数; T_1 、 T_2 分别为地表最高、最低温度。

在实际应用时,不考虑地理纬度的影响,可以用表观热惯量 ATI 来近似代替真实热惯量 P ,直接建立表观热惯量 ATI 与土壤含水量间的遥感统计模式,该模式表达为:

$$ATI = (1 - \alpha)/(T_d - T_n) \quad (4)$$

式中, ATI 为土壤表观热惯量; α 为全波段反射率; T_d 、 T_n 为昼夜的最高、最低温度,可分别用 NOAA/AVHRR 卫星通道 4 的昼夜亮温 CH4 和 NCH4 求得。在利用表观热惯量(ATI)反演土壤含水量(W)时,常用线性经验模型: $W = a + b \times ATI$ 。其中, W 为土壤湿度, a 、 b 为系数。除了线性经验公式模型外,还可以采用幂函数、指数函数等非线性经验公式。

热惯量遥感反演需要研究区上空昼夜两幅图像进行严格配准以得出昼夜温差。在实际应用中,由于受到云的影响,同一研究地区昼夜无云的图像较难获得,昼夜图像象元的精确配准精度也很难得到保证;热惯量计算假设土壤在水平尺度和垂直方向性质一致,这在现实中并不存在;在作物稠密的农田中,植被信息掩盖了背景的土壤信息,因此热惯量农业旱灾监测只适合于裸露地或者植被非常稀疏的地区。

2.3 作物缺水指数

在植被覆盖的地区,土壤水分的盈亏直接影响植被蒸腾作用,进而导致植被冠层温度发生变化。Idso^[5]认为作物在潜在蒸发条件下的冠层温度与空气温度的差与空气的饱和水汽压差具有线性关系,提出了作物水分胁迫指数(crop water stress index, $CWSI$)的概念:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{II}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{II}} \quad (5)$$

式中, T_c 指作物冠层温度($^{\circ}\text{C}$); T_a 指空气温度($^{\circ}\text{C}$); $(T_c - T_a)_{II}$ 为作物在潜在蒸发状态下的冠层温度与空气温度的差,是温差的下限; $(T_c - T_a)_{ul}$ 为作物无蒸腾条件下的冠层温度与空气温度的差,是温差的上限。Jackson 等^[6]用冠层能量平衡的单层模型对 Idso 的冠层空气温差上下限方程进行了理论解释,在能量平衡的阻抗模式基础之上提出了作物水分胁迫指数的理论模式:

$$CWSI = 1 - ET/ET_0 \quad (6)$$

式中, ET 为实际蒸散; ET_0 为潜在蒸散。根据彭曼蒸散公式进一步可以得到:

$$CWSI = \frac{\gamma(1 + r_c/r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (7)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + rC_p/r_a) \quad (8)$$

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\gamma r_a R_n / (\rho C_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma[(T_c - T_a) - r_a R_n / (\rho C_p)]} \quad (9)$$

式中, γ 为干湿表常数($\text{Pa}/^{\circ}\text{C}$), r_c 为作物冠层对水汽传输的阻抗(s/m), r_a 为空气动力学阻力(s/m), Δ 为饱和水汽压和温度关系曲线的斜率($\text{Pa}/^{\circ}\text{C}$), rC_p 为潜在蒸散时的冠层阻抗(s/m), R_n 为净辐射(W/m^2), ρ 为空气密度(kg/m^3), C_p 为空气比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), e_a^* 和 e_a 分别为空气在 T_a 时的饱和水汽压(kPa)和实际水

汽压(kPa)。CWSI 模式的提出使作物缺水指标的研究从单纯研究冠层温度发展到考虑冠层与大气的微气象条件,其理论依据得到加强而被广泛地应用于农业旱灾监测中^[67-68]。

作物缺水指数法主要利用热红外遥感温度和气象资料来间接反演作物覆盖条件的土壤水分。该方法以热量平衡原理为基础,物理意义明确,其使用区域优势明显,精度较高,在植被覆盖地区的土壤水分反演精度优于热惯量法。但是 CWSI 模式是以冠层能量平衡单层模型为理论基础的,在作物生长的早期冠层稀疏时效果较差;作物缺水指数法所需的资料较多、计算复杂;地表气象数据主要来自地面气象站,实时性不强;地表气象数据确定外推的范围和方法也对作物缺水指数法的精度产生影响。

2.4 植被指数

植被光谱的红和近红外波段包含了绝大部分的植被信息,两波段的不同组合称为植被指数。*NDVI*(归一化差值植被指数)是应用最广泛的植被指数之一,表示为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (10)$$

式中,*NIR*和*R*分别为遥感图像中近红外和红波段的反射率。植被的生长中土壤水分不足将影响作物正常生长并进而表现出植被指数的变化。因此,通过植被指数可以间接反演土壤水分状况、判断作物的受旱程度。

2.4.1 距平植被指数

距平植被指数(anomaly vegetation index, *AVI*)作为监测农业干旱的一种量度,以研究区的多年的每旬、每月 *NDVI* 的平均值为背景值,利用当年的每旬、每月的 *NDVI* 值减去背景值得到植被指数的距平。采用 *NDVI* 计算的距平植被指数(*AVI*)表示为:

$$AVI = NDVI_i - \overline{NDVI} \quad (11)$$

式中,*NDVI_i*是研究区某一特定时段(旬、月等)的植被指数值; $\overline{NDVI}$ 为研究区多年该时段植被指数平均值。正距平表示植被生长较一般年份好,负距平表示植被生长较一般年份差。一般而言,距平植被指数为-0.1—-0.2表示旱情出现,-0.3—0.6表示旱情严重。陈维英等^[69]引入距平植被指数监测了我国1992年特大干旱取得了较好效果,认为采用距平植被指数监测

农作物干旱比只用 *NDVI* 的瞬时值优越。

2.4.2 植被条件指数

在分析多年 NOAA/AVHRR 数据的基础上,Kogan^[70]提出植被条件指数(vegetation condition index, *VCI*)的概念,表示为:

$$VCI = 100 \times \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (12)$$

式中,*NDVI_i*为经平滑处理的特定年归一化植被指数,*NDVI_{min}*和 *NDVI_{max}*分别为经平滑处理的多年*i*时期最小、最大归一化植被指数。*VCI*适用于估算区域级的干旱程度,在时空方面,应用 *VCI* 动态监测干旱的范围比其它方法(如 *NDVI* 和降水量)监测更为有效和实^[71]。

距平植被指数和植被条件指数对农业旱情监测具有操作简单特点,但是需要长期的、能代表正常年份的历史遥感数据,由于天气状况对遥感数据的影响以及遥感资料的存档问题使之在实施上往往较为困难。

2.4.3 温度植被指数及温度植被干旱指数

作物供水正常时,生长期内作物的植被指数和冠层温度 *T_s* 将稳定在一定的范围;干旱状态下作物根部缺水使蒸腾作用受到抑制,叶面气孔关闭使作物的冠层温度升高,同时作物的生长将受到影响而使植被指数降低。因此,*T_s*和 *NDVI* 的结合能够提供地表植被和水分条件信息^[72],可采用温度植被指数(temperature vegetation index, *TVI*)和植被供水指数(vegetation supply water index, *VSWI*)^[73-74]来监测土壤水分的变化,表示为:

$$TVI = T_s / NDVI \quad (13)$$

$$VSWI = NDVI/T_s \quad (14)$$

式中, T_s 为植被的冠层温度; $NDVI$ 为归一化植被指数。在分析已有的 T_s - $NDVI$ 特征空间的基础上, Sandholt 等^[20] 对 TVI 进行了改进, 提出了温度植被干旱指数 (temperature vegetation drought index, $TVDI$) 概念, 表示为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (15)$$

$$T_{smax} = a + bNDVI \quad (16)$$

式中, T_s 为给定像元的地表温度; T_{smin} 为 $NDVI$ 对应的最低表面温度 (°C), 对应着 T_s - $NDVI$ 特征空间的湿边; T_{smax} 为 $NDVI$ 对应的最高表面温度 (°C), 对应着 T_s - $NDVI$ 特征空间的干边; $NDVI$ 为给定像元的归一化差值植被指数; a 、 b 为待定系数, 可以从 T_s / $NDVI$ 特征空间的干边拟合得到。

$TVDI$ 简化了 T_s - $NDVI$ 三角形、梯形特征空间, 仅使用遥感数据就可以进行大范围农田水分监测。但是, 在干旱季节利用 $TVDI$ 进行农业旱灾监测存在着技术参数精确估计困难、对云的反应灵敏和对于地表类型反应不灵敏的缺点。

2.4.4 水分亏缺指数

为了克服 $CWSI$ 只能应用于植被郁闭冠层的条件, Moran 等将植被指数和土壤-植被混合温度结合起来, 将 $CWSI$ 扩展到部分植被覆盖状况下, 在能量平衡双层模型的基础上建立了一个新指标水分亏缺指数 (WDI)。 WDI 是基于以地面温度与空气温度差作为横坐标, 以植被指数作为纵坐标, 构筑的散点图, 具梯形特征空间, 以此来估算土壤相对含水量。对于一定的植被覆盖度下, 其 WDI 定义为:

$$WDI = [(T_s - T_a)_{max} - (T_s - T_a)_r] / [(T_s - T_a)_{max} - (T_s - T_a)_{min}] \quad (17)$$

式中, T_s 为陆地表面温度, T_a 为气温。

WDI 以作物缺水指数为理论基础, 假设陆地表面温度是冠层温度与土壤表面温度的线性加权及土壤与植被冠层之间不存在感热交换, 结合陆地气温差与植被指数得到区域干旱评价指标^[17]。齐述华^[29] 等使用 MODIS 陆地表面温度, 计算水分亏缺指数, 对我国 2000 年 4 月上旬和 5 月中旬发生的干旱进行了监测, 将水分亏缺指数法的应用范围拓展到了裸地、完全植被和部分植被覆盖条件下土地的旱情监测。

与 $CWSI$ 指数相比, WDI 可以通过航空、航天数据获取的表面温度借助气象数据就可以估测土壤水分, 而且对于各种植被覆盖状态的土壤均适用。其不足之处就是必须有地面气象数据的配合 (如气温, 还需要饱和水汽压差、风速、动力学阻抗等参数来定义梯形特征空间的边界), 利用纯粹遥感数据无法实现土壤水的估测, 而气象数据受站点限制和地表状态的差异性影响, 通过内插能获取逐像元气温值误差明显。

2.4.5 条件植被温度指数

干旱的发生存在着时空变异, 导致在像素水平上的距平植被指数、条件植被指数和条件温度指数所使用的指标 (如研究年限内 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI$) 可能不同, 使某一特定时期内不同像素间监测结果的可比性较差。王鹏新等^[75] 在这 3 种指数的基础上, 提出了条件植被温度指数 (vegetation temperature condition index, $VTCl$) 的概念, 表示为:

$$VTCl = \frac{LST_{NDVI, max} - LST_{NDVI}}{LST_{NDVI, max} - LST_{NDVI, min}} \quad (18)$$

$$LST_{NDVI, max} = a + bNDVI \quad (19)$$

$$LST_{NDVI, min} = a' + b'NDVI \quad (20)$$

式中, $LST_{NDVI, max}$ 、 $LST_{NDVI, min}$ 分别表示在研究区域内, 当 $NDVI$ 值等于某一特定值时的地表面温度的最大值和最小值; a 、 b 、 a' 、 b' 为待定系数, 可通过绘制研究区域的 $NDVI$ 和 LST 特征空间的干湿边散点图拟合得到。

条件植被温度指数既考虑了某一区域内归一化植被指数的变化, 又考虑了在归一化植被指数值相同条件下地表温度的变化, 能较好地监测该区域的相对干旱程度, 并可用于研究干旱程度的空间变化特征。但是, 一个地区的 $NDVI$ 受到当地的气候状况、土壤性质、植被类型、地形等影响, 对于低密度植被覆盖地区, $NDVI$ 对

于观测和照明几何非常敏感,在农作物生长的初始、结束季节,会分别产生对于植被覆盖率的过高、过低估计;进行某地区多年植被指数计算时,还必须结合当地的土地利用图,确认研究区某时段植被类型;*NDVI* 对于土壤中的水分反应具有一定的滞后性等,在实际应用时必须综合考虑这些因子的影响。

2.5 微波遥感模型

土壤水分微波遥感的理论基于液态水(约 80)和干土(2—5)之间介电常数的强烈反差,随着土壤水分增加,土壤介电常数将相应增大。国外学者对于土壤的介电常数进行了大量的研究, Hallikainen 等^[76]测量了不同含水量的土壤介电常数,认为介电常数和土壤含水量之间为正相关,同时与土壤温度、粒度有关; Wang 等^[77]提出土壤复杂介电常数与含水量的经验模型,这些为土壤水分微波遥感打下了一定的基础。微波遥感以其全天时、全天候的工作特征以及对于植被、土壤具有一定的穿透能力而被广泛应用于土壤水分反演,被认为是当前土壤水分反演中最有效的方法之一。微波遥感按传感器工作性质可以分为主动微波遥感和被动微波遥感。

2.5.1 主动雷达遥感

土壤表面后向散射的信号与土壤水分、土壤表面的粗糙度、介电特性、土壤的物理特性等有关^[78],土壤湿度信息面临的一个问题就是要将土壤含水量的影响与其他因子的影响区分开。20 世纪 90 年代早期,研究后向散射系数和土壤水分含量的关系,大多数是依据统计方法,通过实验数据的相关分析建立土壤湿度与后向散射系数之间的经验函数关系,而以线性关系应用最普遍。在建立的 $\delta^\circ - m_v$ 线性关系中,即 $\delta^\circ = A + Bm_v$,对于给定的雷达参数(频率、极化方式、入射角等), A 主要受表面粗糙度控制, B 受纹理结构影响^[44]。

Ulaby^[79]等研究了土壤水分和雷达参数的线性关系,发现土壤湿度在田间持水量的 50%—150% 范围时,对植被的影响较大,必须建立线性关系排除植被在监测中的干扰成分。Dobson^[80]等认为干的或饱和的土壤,不适用线性关系,而是非线性的关系。Anderson 等^[81]在线性关系的基础上,提出了适用于更大范围湿度值估测的 σ° 与 m_v 非线性算法,表示如下:

$$\sigma^\circ = A + B \exp(-m_v/m_{v0}) + C \exp(-\sigma/\sigma_0) + D \exp(-m/m_0) \quad (21)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 、 m_{v0} 、 σ_0 、 m_0 是关于频率、极化方式和入射角的常数。Tansey^[82]和 Moeremans^[83]的研究表明,在裸地和稀疏植被地区,近地表土壤湿度与后向散射系数之间有很高的相关性。李震^[60]等依据统计方法建立土壤湿度与后向散射系数之间的经验函数关系,表示为:

$$I^0 = -0.2312m^{0.6874} \quad (22)$$

式中, m 为土壤水分。主动微波遥感土壤水分精度较高,且可以全天候使用,成为监测水分最灵活、最适用、最有效的方法。随着一系列携带主动微波传感器的卫星(ERS 系列、EOS、SAR、Radar sat、ADEOS、TRMM 等)的发射升空,大量的雷达图像及数据的应用,将使微波遥感的成本不断下降,逐渐被应用于实践。

2.5.2 被动微波遥感

土壤湿度是影响被动微波辐射测量的关键因子,也是被动遥感监测土壤水分的理论基础。为此,国内外专家围绕土壤水分与亮度温度的关系进行了大量理论研究和航空遥感实验,得出许多有实用性的模型算法。Schmugge 等^[84]对试验数据进行了分析,发现亮温 Tb 与土壤水分(重量百分比)具有较好的线性关系,引入田间持水力 FC (field capacity),建立亮温与 FC 之间的线性关系。Njoku 等^[35]基于辐射传输方程,建立了 Tb 与土壤水分等参数的非线性方程。植被对土壤水分反演的影响是不可忽视的因素,很多算法在植被密集处无法使用,为了消除植被的影响,必须注重植被的遥感监测,建立相关的计算模型。Wang 等研究了植被对土壤水分监测的影响,结果表明在浓密植被覆盖区土壤湿度监测中应避免使用 19GHZ 波段,尽量选择较长波段微波辐射,以消除植被对土壤湿度反演的影响^[38]。此外,利用正向模型和神经网络等算法也是当前土壤水分遥感反演算法的主要发展方向^[85-86]。被动微波遥感重返周期高,受粗糙度和地形影响相对要小,但图像的空间分辨率相对较低。

2.6 高光谱遥感

农业旱灾遥感监测中,利用高光谱遥感技术进行土壤水分研究对于发现土壤水分和光谱间的规律和寻找水分敏感波段具有十分重要的意义。20 世纪 60 年代,国外学者就开始了土壤水分和光谱反射率的研究。Bowers 等^[87-88]研究发现土壤光谱反射率在整个波长范围内随土壤水分的增加而降低,土壤含水量与水分在吸收波段的吸收强度之间具有较好的线性相关;Liu 等^[89]研究发现,在低于一定的土壤水分临界值时,土壤光谱反射率随土壤湿度的增加而降低,高于临界值后反射率随土壤水分的增加而增加,二者之间存在非线性关系;Lobell 等^[90]认为土壤的体积含水量或相对含水量跟土壤光谱之间的指数相关关系比土壤重量含水量要好;刘伟东等^[91]通过对土壤的光谱反射率与土壤的表面湿度进行分析,比较 5 种方法在反演土壤表面湿度的能力,并对我国小汤山精准农业试验区的土壤表面湿度进行高光谱填图。

当前国内外对于土壤光谱做了大量的研究,但在大面积土壤水分遥感反演应用上仍处于探索阶段。随着高光谱遥感理论技术的不断成熟、高光谱卫星系列计划的实现和应用的推广普及,高光谱土壤水分遥感技术的巨大应用潜力将会得到进一步的体现。

3 方法分析及比较

近年来,土壤水分定量遥感反演研究取得了较大进展,但也存在明显的不足:

(1) 反射率法操作简便快捷,但其易受周围环境及自身成分性质等的影响,从而使得其与土壤水分之间的关系并不能简单地用线性方程来表示,给定量反演带来困难,因而反射率法只适用于地形平坦,地貌单一且土壤组成比较典型的地区。

(2) 热惯量法和表观热惯量法主要适用于裸地或植被生长早期。热惯量法具有较好的重复性、准确性和同一性,可以通过土壤水分含量与热惯量之间的良好的线性关系直接反演土壤水分。但是热惯量法易受天气云层的干扰,对高植被覆盖地区或农作物田块土壤水分反演的效果较差,因此,考虑植被对热惯量法的影响,今后应加强不同植被覆盖状况下热惯量法的适用性研究。

(3) 作物植被指数法适用于植被覆盖情况,能在一定程度上弥补热惯量法的不足。*CWSI* 和 *VSWI* 的计算过程中出现许多自然因子数据(如干湿球常数、修正空气阻力、剩余阻力、作物冠层阻力、饱和水气压和温度关系的斜率等),使其计算复杂,各要素仍依赖于地面气象台站,实时性得不到保证。距平植被法仅仅是从植被角度来监测干旱,其他因素考虑较少,而且需要多年累积数据,目前存档的卫星资料难以满足对数据的要求。条件植被温度指数模型的缺点是对研究区域选择的要求较高,对研究区域环境背景(如气象条件、地表覆盖类型、土壤属性、水系分布和灌溉状况以及作物栽培等)的了解程度要求也较高。

(4) 微波遥感监测土壤水分具有坚实的物理基础,监测精度较高,不受光照条件限制能够全天候工作,对植被、土壤具有一定的穿透能力,但是如何消除植被覆盖以及地表粗糙度对反演土壤水分的影响依然是当前的一个研究热点和难点。同时由于卫星反演算法实用化的难度,发展实用的基于全球尺度的土壤水分反演算法目前还很困难。

综上所述,反射率法只适用于地形平坦、地貌单一且土壤组成比较典型的地区;热惯量法较适宜于裸土和低植被覆盖区域;植被指数法、作物缺水指数法适合于植被覆盖度较高的区域;温度-植被法可以有效地克服土壤背景的影响,在不完全覆盖地区可以更准确地定量反演土壤水分状况;高光谱方法具有明确的物理意义,也是比较新的方法,有待进一步的发展。因此,利用微波、可见光-近红外-热红外、植被指数等单一方法反演土壤水分均具有一定的局限性,在实际应用中综合运用光学/近红外与微波遥感进行土壤水分的协同反演是获得较高精度土壤水分反演数据的一种有效途径和土壤水分监测的发展趋势。

4 结论与展望

相对于传统的定点监测方法,遥感在监测土壤水分方面具有相当多的优势,随着遥感技术的不断发展,以及相应的遥感模型不断的完善,遥感监测土壤水分在实际应用中具有广阔的前景。但是,由于植物-土壤-水分系统自身的复杂性,造成了土壤水分遥感监测的难度。各种方法各有其适用的季节和地区,模型参数的确

定具有地域限制,无法推广到全国范围。鉴于目前在土壤水分方面的研究状况,应重点深入开展以下方向的研究:

(1) 高光谱数据由于能够以很高的光谱分辨率在光谱区域内连续地取样,故其能够提供几乎整个波段的辐射信息。由于土壤和植被在不同的波段具有不同的光谱特征,不同波段可以提供不同影响因素的信息,因此利用高光谱波段信息,多种数据融合,各波段获得的信息互补,可以提高土壤水分的监测精度,这是今后土壤水分遥感反演研究的趋势。

(2) 用遥感监测土壤水分的过程通常是先反演出地表物理参数,再建立参数与水分的关系式。因此,定量遥感推算地表参数成为这一过程的关键,其精度直接关系到监测的效果。由空间分辨率引出的混合像元分解技术,各种热通量的计算、地表温度的反演等在监测中都应受到充分重视。

(3) 目前的研究大多建立回归模型来计算土壤水分,这种方法需要积累大量的观测数据,工作量大,模型也不稳定,影响了监测的时效性。而且,地面实测资料多为点状的,如何外推到面上与遥感资料相匹配也是影响模型精度的一大问题。因此,今后仍要加强对土壤水分变化的动力学模型的研究,力求建立稳定的,较少依赖于非遥感数据的模型。

(4) 目前对于裸露土壤一般采用热惯量法,部分植被覆盖采用经植被指数修正的方法,完全植被覆盖下常用单层模型。但是,对裸露土壤、部分植被覆盖和完全植被覆盖没有明确的界定,这就造成了操作的不确定性。因此,今后的研究应向将热惯量模型推广到植被覆盖情况,成为广义的热惯量。将基于植被指数修正的模型扩展到裸露土壤情况,向广义的植被指数模型方向发展,建立适合于植物生长各个时期的适用模型。

(5) 目前,无论国内还是国外,所有的方法都是通过一些指标,例如植被指数、亮度温度等,来间接评价土壤水分,因此最终都要通过实测的土壤水分数据进行回归和反演。如何摆脱实测数据的支持,将光谱反射率、红外温度或亮度值等遥感数据通过一定的模型与土壤水分建立起关系,从而达到仅仅依靠遥感数据来获得真实土壤水分百分比含量也是今后土壤水分遥感反演研究的一个重点和难点内容。

References:

- [1] Han N L, Chen S B, Wang Z J, Bao S X, Song J H. Review of the bare field soil moisture retrieval from passive microwave. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(Sup): 155-159.
- [2] Urso G D, Minacapilli M. A semi-empirical approach for surface soil water content estimation from radar data without a-priori information on surface roughness. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1/4):297-310.
- [3] Cashion J, Lakshmi V, Bosch D, Jackson T J. Microwave remote sensing of soil moisture: evaluation of the TRMM microwave imager(TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1/4): 242-253.
- [4] Aston A R, Van Bavel C H M. Soil surface water depletion and leaf temperature. *Agronomy Journal*, 1972, 64: 21-27.
- [5] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J J, Reginato R J, Hatfield J L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24: 45-55.
- [6] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [7] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9(4): 309-317.
- [8] Waston K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images. *Remote Sensing of Environment*, 1971, 3: 2017-2041.
- [9] Waston K, Pohn H A. Thermal inertia mapping from satellite discrimination of geology unit in Oman. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 1974, 2(2): 147-158.
- [10] Bijleveld R A. 'Tell Us' a combined surface temperature, soil moisture and evaporation mapping approach. Paper Presented at 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Manila, Philippines, 1978, 20-25.
- [11] Pratt A, Ellyett C D. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 151-168.
- [12] Jackson R D, Slaler P N, Pinter P J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various Vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(3): 187-208.
- [13] Carlson T N. Regional scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements. *Remote Sensing*

- Reviews, 1986, 1(2): 197-247.
- [14] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 276-284.
- [15] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous area. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405-1420.
- [16] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1990, 5(28): 940-948.
- [17] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y. Estimating Crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing Environ*, 1994, 49(3): 246-263.
- [18] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71-94.
- [19] Gillies R R, Carlson T N, Gui J, Kustas W P, Humes K S. Averification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [20] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [21] Huang Y, Yang X R, Geng H B. The relationship of the microwave reflective characteristic to soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 1(2): 101-106.
- [22] Tang D Y. An aridity index based on energy balance. *Geographical Research*, 1987, 6(2): 21-31.
- [23] Xiao Q G, Chen W Y, Sheng Y W. A study on soil moisture monitoring using NOAA satellite. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(3): 312-317.
- [24] Xu X K, Sui H Z, Tian G L. Application and research of complementary relationship theory in remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(1): 54-59.
- [25] Yu T, Tian G L. The application of thermal inertia method the monitoring of soil moisture of north China plain based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 24-31.
- [26] Qi S H, Wang C Y, Niu Z. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index(TVDI). *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 420-426.
- [27] Feng Q, Tian G L, Wang A S, McVicar T R, Jupp D L B. Remote sensing monitoring of soil humidity using vegetation condition index. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(3): 81-88.
- [28] Liu A L, Li X M, He Y B, Deng F D. Simplification of crop shortage water index and its application in drought remote sensing monitoring. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 210-214.
- [29] Qi S H, Zhang Y P, Niu Z, Wang C Y, Zheng L. Application of water deficit index in drought monitoring in China with remote sensing. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 367-372.
- [30] Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y. Estimation of soil moisture of winter wheat field based on CWSI and soil water correction coefficient. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 373-378.
- [31] Liang Y, Zhang F, Han T. Monitoring soil humidity by using EOS/MODIS VSWI product in Qingyang. *Arid Meteorology*, 2007, 25(1): 44-47.
- [32] Xin J F, Yu Z R, Driessen P M. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(6): 443-447.
- [33] Wei G S, Shen R P, Ding G X. Primary studies on estimating soil moisture in deep layer of farmland by remote sensing in Yizheng. *Remote Sensing of Technology and Application*, 2008, 23(1): 141-145.
- [34] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(2): 317-323.
- [35] Njoku E G, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6—18GHz. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*, 1999, 37(1): 79-93.
- [36] Jackson T J, Le Vine D M, Hsu A Y, Oldak A, Starks P J, Swift C T, Isham J D, Haken M. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: The southern great plains hydrology experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2136-2151.
- [37] Koike T. Study on spatial and temporal variability of surface soil wetness on tibetan plateau by using the satellite-based microwave radiometers. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 1997 (41): 915-919.

- [38] Teng W L, Wang J R, Doraiswamy P C. Relationship between satellite microwave radiometric data, antecedent precipitation index, and regional soil moisture. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(13): 2483-2500.
- [39] Frate D, Schiavon G. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(2): 174-183.
- [40] Bindlish R, Jackson T J, Gasiewski A J, Klein M, Njoku E G. Soil moisture mapping and AMSR-E validation using the PSR in SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(2): 127-139.
- [41] Qiao P L, Zhang J X, Wang C H. Soil moisture retrieving by passive microwave remote sensing data. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 25(3): 342-344.
- [42] Wang L, Li Z, Chen Q. Soil moisture retrieval with AMSR-E in the region with vegetation coverage. *High Technology Letters*, 2006, 16(2): 204-209.
- [43] Ulaby F T, Bativala P P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1976, CE-14(2): 81-93.
- [44] Dobson M, Ulaby F T. Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing Remote Sensing of Environment*, 1986, GE-24(1): 23-36.
- [45] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 370-381.
- [46] Shi J C, Wang J, Hsu A Y, O'Neill P E, Engman E T. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254-1266.
- [47] Bindlish R, Barros A P. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(1): 130-137.
- [48] Roger D, De R, Yang D. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy with soil moisture inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872.
- [49] Baghdadi N, King C, Chanzy A, Wigneron J P. An empirical calibration of the integral equation model based on SAR data, soil moisture and surface roughness measurement over bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4325-4340.
- [50] Baghdadi N, Gherboudj I, Zribi M, Sahebi M, King C, Bonn F. Semi-empirical calibration of the IEM backscattering model using radar images and moisture and roughness field measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(18): 3593-3623.
- [51] Baghdadi N, Holah N, Zribi M. Calibration of the integral equation model for SAR data in C-band and HH and VV polarizations. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4): 805-816.
- [52] Rahman M M, Moran M S, Thoma D P, Bryant R, Sano E E, Collins C D H, Skirvin S, Kershner C, Orr B J. A derivation of roughness correlation length for parameterizing radar backscatter models. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(18): 3995-4012.
- [53] Rahman M M, Moran M S, Thoma D P, Bryant R, Collins C D H, Jackson T, Orr B J, Tischler M. Mapping surface roughness and soil moisture using multi-angle radar imagery without ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 391-402.
- [54] Shi J C, Li Z, Li X W. Evaluate usage of decomposition technique in estimation of soil moisture with vegetated surface by multi-temporal measurements data. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 412-416.
- [55] Yang H, Guo H D, Li X W, Yue H Y. Optimum radar parameters for mapping soil moisture. *High Technology Letters*, 2003, 13(9): 21-24.
- [56] Bao Y S, Liu L Y, Wang J H. Soil moisture estimation based on optical and microwave remote sensing data. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(3): 228-233.
- [57] Lee K H, Anagnostou E N. A combined passive/active microwave remote sensing approach for surface variable retrieval using Tropical Rainfall Measuring Mission observations. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(1): 112-125.
- [58] Narayan U, Lakshmi V, Jackson T J. High-resolution change estimation of soil moisture using L-band radiometer and radar observations made during the SMEX02 experiments. *IEEE Transactions on Geosci and Remote Sensing*, 2006, 44(6): 1545-1554.
- [59] Chauhan N S. Soil moisture estimation under a vegetation cover: combined active passive microwave remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing*, 1997(18): 110-115.
- [60] Li Z, Guo H D. Measuring the change of soil moisture with vegetation cover integration passive and active microwave data. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 481-484.
- [61] Liu P J, Zhang L, Alishir Kurban, Chang P, Li L X, Zhao B K. An estimate method of optical vegetation Coverage Using TM data. *Remote Sensing of Technology and Application*, 1995, 10(4): 9-14.
- [62] Liu P J, Zhang L, Alishir Kurban, Chang P, Li L P, Pu L T, Zhao B K. A method for monitoring soil water contents using satellite remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 135-139.

- [63] Tiyyip T, Ghulam A. Research on model of groundwater level distribution in the oasis and desert ecotone using remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(4):299-307.
- [64] Price J C. Thermal inertia mapping: a new view of the earth. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(C18): 2582
- [65] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(1):59-73.
- [66] Enland A W, Galantowicz J F, Schretter. The radio brightness thermal inertia measure of soil moisture. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30(1): 132-139.
- [67] Ben-Asher J, Phene C J, Kinarti A. Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 1992, 22(4): 379-390.
- [68] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(1): 69-75.
- [69] Chen W Y, Xiao Q G, Sheng Y W. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 9(2): 106-112.
- [70] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8): 1405-1419.
- [71] Liu W, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(14): 2761-2782.
- [72] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71-94.
- [73] Carlson T N, Perry E M, Schmugge T J. Remote sensing estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 52(1/2): 45-69.
- [74] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurement to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Environment*, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [75] Wang P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412-418.
- [76] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, Mohamed E R, Wu L K. Microwave dielectric behavior of wet soil Part I: Empirical model and experimental observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(1): 25-34.
- [77] Wang J R, Schmugge T J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, CD-18: 288-295.
- [78] Weimann A, Von Schonermark M, Schumann A, Jörn P, Gunther R. Soil moisture estimation with ERS-1 SAR data in the East-German loess soil area. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(2): 237-243.
- [79] Ulaby F T, A slam A, Dobson M C. Effect of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture. *IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing*, 1982, GE-20(4): 476-481.
- [80] Dobson M C, Ulaby F T. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part II -soil tension. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1981, GE-19(1):51-61.
- [81] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, Kustas W P, Mecikalski J R. A two source time integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(2): 195-216.
- [82] Tansey K J, Millington A C, Battikhi A M, White K H. Monitoring soil moisture dynamics using satellite imaging radar in northeastern Jordan. *Applied Geography*, 1999, 19(4): 325-344.
- [83] Moeremans B, Daut rebande S. Soil moisture evaluation by means of multi2temporal ERS SAR PRI images and interferometric coherence. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(3/4): 162-169.
- [84] Schmugge T J. Remote sensing of surface soil moisture. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17: 1549-1557.
- [85] Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, De Griend A A, Berger M; Ferrazzoli P. Retrieving near surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 489-506.
- [86] Liou Y A, Tzeng Y C, Chen K S. A neural-network approach to radiometric sensing of land surface parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(6): 2718-2724.
- [87] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soil. *Soil Science*, 1965, 100(2): 130-138.
- [88] Bowers S A, Smith S J. Spectrophotometric determination of soil water content. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1972, 36(6): 978-980.

- [89] Liu W D, Baret F, Gu X F, Tong Q X, Zheng L F, Zhang B. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81 (2/3): 238-246.
- [90] Lobell D B, Asner G P. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 722-727.
- [91] Liu W D, Bare F, Zhang B, Zheng L F, Tong Q X. Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 700-706.

参考文献:

- [1] 韩念龙, 陈圣波, 汪自军, 包书新, 宋金红. 被动微波反演裸露区土壤水分综述. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(增刊), 155-159.
- [21] 黄杨, 杨习荣, 耿淮滨. 土壤含水量与其微波反射特性关系的研究. *环境遥感*, 1986, 1(2): 101-106.
- [22] 唐登银. 一种以能量平衡为基础的干旱指数. *地理研究*, 1987, 6(2): 21-31.
- [23] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟. 用气象卫星监测土壤水分的实验研究. *应用气象学报*, 1994, 5(3): 312-317.
- [24] 徐兴奎, 隋洪智, 田国良. 互补相关理论在卫星遥感领域的应用研究. *遥感学报*, 1999, 3(1): 54-59.
- [25] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. *遥感学报*, 1997, 1(1): 24-31.
- [26] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究. *遥感学报*, 2003, 7(5): 420-426.
- [27] 冯强, 田国良, 王昂生, Tim R. Mevicar, David L B J. 基于植被状态指数的土壤湿度遥感方法研究. *自然灾害学报*, 2004, 13(3): 81-88.
- [28] 刘安麟, 李星敏, 何延波, 邓凤东. 作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 210-214.
- [29] 齐述华, 张源沛, 牛铮, 王长耀, 郑林. 水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究. *土壤学报*, 2005, 42(3): 367-372.
- [30] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 基于 CWSI 和土壤水分修正系数的冬小麦田土壤水分含量估算. *土壤学报*, 2005, 42(3): 373-378.
- [31] 梁芸, 张峰, 韩涛. 利用 EOS/MODIS 植被供水指数监测庆阳地区的土壤湿度. *干旱气象*, 2007, 25(1): 44-47.
- [32] 辛景峰, 宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA/NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究. *遥感学报*, 2001, 5(6): 443-447.
- [33] 魏国栓, 沈润平, 丁国香. 仪征地区农田深层土壤湿度遥感反演初探. *遥感技术与应用*, 2008, 23(1): 141-145.
- [41] 乔平林, 张继贤, 王翠华. 基于星载被动微波遥感的地表土壤湿度反演. *辽宁工程技术大学学报*, 2005, 25(3): 342-344.
- [42] 王磊, 李震, 陈权. 植被覆盖地区 AMSR-E 反演土壤水分算法研究. *高技术通讯*, 2006, 16(2): 204-209.
- [54] 施建成, 李震, 李新武. 目标分解技术在植被覆盖条件下土壤水分计算中的应用. *遥感学报*, 2002, 6(6): 412-416.
- [55] 杨虎, 郭华东, 李新武, 岳焕印. 主动微波遥感土壤水分观测中的最优雷达参数选择. *高技术通讯*, 2003, 13(9): 21-24.
- [56] 鲍艳松, 刘良云, 王纪华. 综合利用光学、微波遥感数据反演土壤湿度研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(3): 228-233.
- [60] 李震, 郭华东. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化. *遥感学报*, 2002, 6(6): 481-484.
- [61] 刘培君, 张琳, 库尔班, 常萍, 李良序, 赵兵科. 用 TM 数据估测光学植被盖度的方法. *遥感技术与应用*, 1995, 10(4): 9-14.
- [62] 刘培君, 张琳, 艾里西尔·库尔班, 常萍, 李良序, 赵兵科. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法. *遥感学报*, 1997, 1(2): 135-139.
- [63] 塔西甫拉提·特依拜, 阿布都瓦斯提·吾拉木. 绿洲-荒漠交错带地下水位分布的遥感模型研究. *遥感学报*, 2002, 6(4): 299-307.
- [69] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用. *环境遥感*, 1994, 9(2): 106-112.
- [75] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件温度植被指数及其在干旱监测中应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 412-418.
- [91] 刘伟东, Frédéric Baret, 张兵, 郑兰芬, 童庆禧. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. *土壤学报*, 2004, 41(5): 700-706.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元