

文章编号:1001-8166(2009)07-0681-15

黑河流域遥感—地面观测同步试验: 森林水文和中游干旱区水文试验*

马明国¹,刘 强²,阎广建³,陈尔学⁴,肖 青²,苏培玺¹,胡泽勇¹,
李 新¹,牛 铮²,王维真¹,钱金波¹,宋 怡¹,丁松爽¹,
辛晓洲²,任华忠³,黄春林¹,晋 锐¹,车 涛¹,楚荣忠¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101; 3. 北京师范大学遥感科学与国家重点实验室,地理学与遥感科学学院,北京 100875; 4. 中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091)

摘 要:主要介绍了黑河流域遥感—地面观测同步试验(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)的第二阶段,即以森林水文过程及中游干旱区生态水文过程为主要目标的中游试验。简要阐述了试验目标与研究内容,重点介绍了航空飞行试验、地面同步试验和加密观测试验的样方布置、数据获取与处理以及研究进展与展望。中游试验的核心研究内容是紧密围绕森林水文及中游干旱区水文的水循环问题开展航空遥感、地面同步观测试验和水文与生态参数加密观测试验,改善蒸散发反演模型和算法,探讨尺度转换方法。其中航空试验使用了微波辐射计、激光雷达(LiDAR)、高光谱成像仪、热红外成像仪和多光谱 CCD 相机 5 类传感器,飞行了 17 个架次和 72 个小时。

关 键 词:WATER; 遥感; 森林水文; 干旱区水文; 同步试验

中图分类号:TP79;P334 **文献标志码:**A

1 引 言

2008年3~7月,中国科学院西部行动计划二期项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验”和“973”项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”在黑河流域开展了大规模的联合观测试验(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER),在流域尺度上开展以水循环及与之密切联系的生态过程为主要研究对象的大型航空、卫星遥感与地面同步观测科学试验。WATER分为两个阶段,第一阶段是以冻土和积雪为主要研

究对象的上游寒区试验;第二阶段是以森林水文过程及中游干旱区生态水文过程为主要目标的中游试验。李新等^[1,2]详细介绍了 WATER 的科学背景、科学问题、研究目标以及观测试验方案和观测系统布置。王建等^[3]介绍了 WATER 上游寒区试验的目标与研究内容、试验区的选择、样方的布设、航空飞行试验和地面同步观测试验以及寒区水文长期观测试验等信息,并针对积雪、冻土和寒区水文过程总结了基于试验的初步研究成果。本文主要是对 WATER 的中游试验的目标与研究内容进行简要阐述,重点介绍航空飞行试验和地面同步和加密观测试验的样

收稿日期:2009-02-18;修回日期:2009-06-05.

* 基金项目:中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09-03);中国科学院“西部之光”人才培养计划项目“黑河上游毒草的遥感监测与空间分布规律研究”(编号:CACX0728501001);国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714401)资助.

作者简介:马明国(1976-),男,湖北宜昌人,研究员,主要从事中国西北生态和陆面过程遥感研究. E-mail:mimg@lzb.ac.cn

方布置、数据获取与处理以及研究进展与展望。

2 试验目标和研究内容

2.1 试验目标和关键科学问题

开展森林水文试验区与中游干旱区水文试验区航空遥感试验,利用多角度热红外遥感获取地表和冠层的组分温度及冠层结构参数;利用高光谱遥感提取植被土壤生化参数、冠层生物物理参数、地表覆盖和植被类型等信息;利用激光雷达测量地形和植被的三维结构;利用微波辐射计获取微波辐射亮温。

配合航空遥感试验开展地面同步观测试验,用于航空遥感的传感器定标和遥感反演结果的验证。加密观测森林水文和中游干旱区水文试验区典型生态系统的近地面大气要素和能、水(地表水与地下水)、生物化学循环参数,为发展和改进流域尺度的生态水文模型提供基础数据和验证资料,改善从航空遥感与卫星遥感资料反演和间接估计蒸散发的模型和算法,发展地面观测验证反演结果的尺度转换方案。

重点和优先解决以下科学问题:

- (1) 多传感器航空飞行试验设计、复杂地形条件下航空遥感数据的处理、激光雷达数据的森林结构参数提取、多尺度遥感监测数据产品的验证技术。
- (2) 如何提高中游干旱区蒸散发量的估计精度。

(3) 如何获取中游荒漠区水循环中逆湿和凝结水的定量结果。

2.2 研究内容

中游试验的核心研究内容就是紧密围绕森林水文(图1)及中游干旱区水文(图2)的水循环问题开展航空遥感、地面同步观测试验和水文与生态参数加密观测试验,改善蒸散发反演模型和算法,探讨尺度转换方法。

2.2.1 航空遥感试验

在森林水文试验区开展高光谱成像仪、多角度热红外成像仪和激光雷达航空遥感试验;在中游干旱区水文试验区开展高光谱成像仪、多角度热红外成像仪、激光雷达和微波辐射计航空遥感试验。开发机载多角度遥感数据的预处理程序,完成各种数据的预处理工作,开展参数反演综合提取方法研究。

2.2.2 航空遥感地面同步观测试验

配合航空遥感开展地面同步定标试验和加密观测试验,开展地物波谱、分光光度计、植被组分温度、土壤湿度、蒸散发量、反射率、光合生理指标等的观测。同时获取植被类型、冠层结构、森林蓄积量/生物量、叶面积指数/郁闭度、叶绿素、植被水分含量、地面粗糙度等参数,用于遥感数据定标、数据产品验证和关键参数反演和算法验证研究。

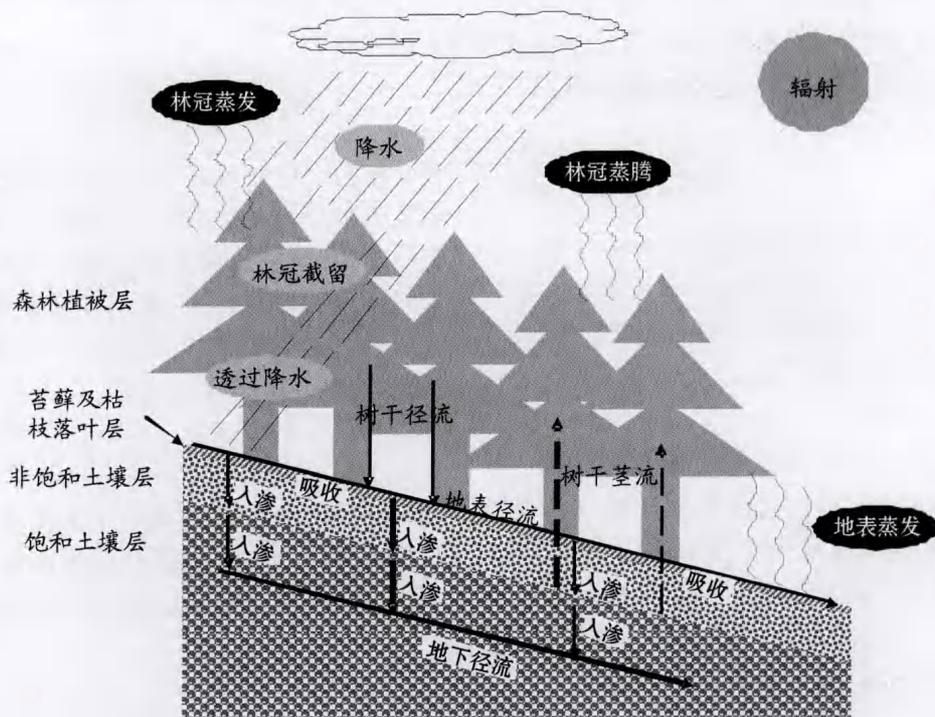


图1 森林水文循环示意图

Fig.1 General scheme of forest hydrological cycle

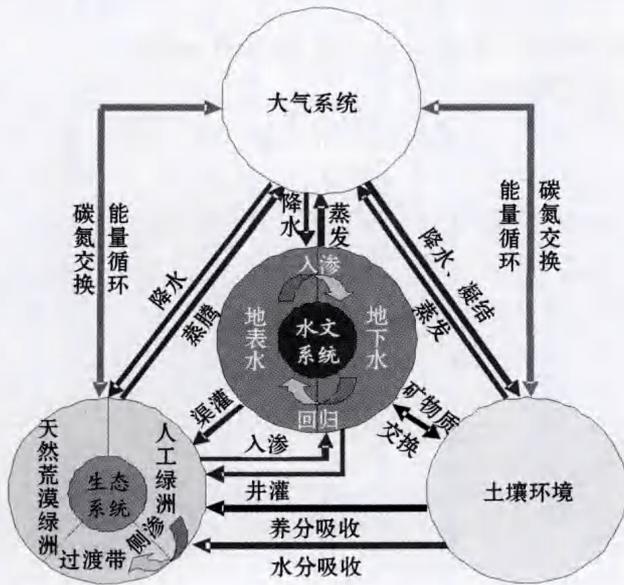


图2 中游干旱区能水循环示意图

Fig.2 General scheme of arid region hydrological cycle and energy fluxes in the middle reaches

2.2.3 森林水文地面加密观测试验

以大野口观测试验基地为依托,选择森林水文试验区重点小流域,获取多源、多尺度的机—星—地同步/准同步观测数据集,获取同期雷达降雨和台站观测气象数据,开展样方调查和森林水文要素加密观测。发展、验证森林三维结构参数的主被动遥感机理模型、定量反演模型和方法,改进、发展遥感反演和间接估计森林水文过程分量的模型和算法。

2.2.4 中游干旱区水文地面加密观测试验

以黑河流域已有观测系统为基本站点,选择人工绿洲和荒漠典型生态系统样带或者样区,加密观测水文和生态过程。获取同期雷达降雨资料和站点降水观测数据,加密观测水文、土壤和植被各个子系统主要参数,观测地下水动态和灌溉用水量,观测凝结水和逆湿等影响荒漠地区稀疏植物生长的重要分量。

2.2.5 重要分量估算与尺度上推研究

收集试验期间多时段卫星遥感数据及其产品,并完成预处理工作。利用航空和卫星资料反演冠层结构、组分温度、粗糙度等变量,改善从卫星遥感资料反演和间接估计蒸散发的模型和算法,提高中游干旱区水文参数特别是蒸散发估算精度。验证不同尺度航空遥感与卫星遥感反演结果的地面测量和尺度上推方案,和蒸散发和与之相关变量的反演精度。

3 各试验区数据获取情况

中游试验分预试验期(2007年7月21日至9

月23日)和加强试验期(也叫航空飞行试验期,2008年5月8日至7月24日)2个试验期。预试验期间主要开展了排露沟流域样方调查、盈科绿洲的Hyperion卫星同步和临泽内陆河流域综合研究站(以下简称临泽站)及兰州大学临泽草地生态试验站(以下简称草地站)的ASAR及TM卫星同步观测试验,重点进行样方选址、测试观测设备,优化试验方案以及培训试验人员。加强试验期航空—卫星—地面同步试验,按照试验方案全面获取观测资料,涉及大野口流域、关滩流域、花寨子荒漠、盈科绿洲、临泽草地、临泽站、张掖市、阿柔乡和扁都口加密观测区(图3),其中阿柔乡和扁都口没有固定的观测人员,只是在同步期间从其他观测区临时安排人员前去观测。

3.1 航空飞行试验数据获取、预处理及应用前景

3.1.1 数据获取情况

在森林水文和中游干旱区水文试验期间,中国科学院遥感应用研究所负责航空飞行试验,共计飞行了17个架次和72小时,其中6月22日为激光雷达在大野口针对初步飞行方案进行试飞,其余16次飞行的相关信息在表1中列出,飞行区域见图3。

3.1.2 数据预处理及应用前景

L波段机载微波辐射计采用独特的平板天线设计,避免了大口径喇叭天线难以在飞机上安装的问题,可同时测量2个极化方向,是非常难得的L波段微波数据。配合3次微波辐射计的飞行,都在临泽站—草地站测区开展了土壤水分、盐分和温度的地面调查,形成机—地同步数据,而且7月8日飞行还与星载ASAR传感器同步。为了解决机载微波辐射计的定标问题,在7月4日和7月8日的飞行中专门设计了定标航线,并开展了同步地面测量。机载微波辐射计为非成像设备,依靠机上全球定位系统(Global Positioning System, GPS)数据确定观测的大致位置。发布数据包括原始数据和预处理后包含地理坐标和定标的辐射亮温数据。

机载红外广角双模式成像仪(Wide-angle Infrared Dual-mode Line/area Array Scanner, WiDAS)获取的多角度红外数据主要用于研究地表二向反射和热辐射方向特性。获取中红外波段的多角度数据尚属国内首次,对于研究中红外地表辐射特性是非常有用的数据积累。前期的数据在可见近红外波段有较多问题,而且天气状态不理想,不能够有效支持二向性反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)信息的提取,不过热红外波

表1 森林水文和中游干旱区水文试验航空飞行一览表
Table 1 List of airborne remote sensing in the experiment of forest hydrology and arid region hydrology in the middle reaches

传感器类型	日期	卫星数据获取	飞行区域	天气
18 GHz L 波段双极化微波辐射计	5月25日		临泽站—草地站/扁都口	阴
	7月4日	SPOT5*, AATSR, MERIS	临泽站—草地站/扁都口/水库和沙漠定标航线	云**
	7月8日	ASAR	临泽站—草地站/沙漠定标航线	云
4个 CCD 相机 (550 nm、650 nm、700 nm、750 nm)、中红外热像仪 (AGEMA 550, 3 ~ 5 μm) 和热红外热像仪 (S60, 8 ~ 11 μm) 组成的机载红外广角双模式成像仪	5月30日	Hyperion, AASTR, MERIS	临泽站—草地站/张掖—盈科—花寨子	晴
	5月31日		大野口/阿柔	云
	6月1日		张掖—盈科—花寨子	云
	6月29日	MISR	临泽站—草地站/张掖—盈科—花寨子/观象台	云
	7月7日	TM, AATSR, MERIS	张掖—盈科/阿柔/扁都口	晴/云/云
	7月11日	MERIS	临泽—草地站/张掖—盈科—花寨子/观象台	晴
成像光谱仪 OMIS II (0.46 ~ 1.1 μm 60个通道; 1.55 ~ 1.75 mm; 2.08 ~ 2.35 mm; 3.0 ~ 5.0 mm; 8.0 ~ 12.5 mm) 和 SWPHI (1.0 ~ 2.5 mm, 256个通道)	6月4日	Hyperion	张掖—盈科—花寨子/大野口	晴/云
	6月6日	MISR, MERIS	临泽站—草地站	晴
	6月15日	AATSR, MERIS	临泽站—草地站	晴
	6月16日		张掖—盈科—花寨子	云
LiteMapper 5600 机载激光雷达 + 高分辨率彩色 CCD 相机	6月20日	MISR	张掖市—盈科/NE 条带和 NW 条带/大野口 7 条航线	阴
	6月23日		大野口 (200 m 间距的 18 条航线, 50 m 间距的 6 条航线, 图 4)	晴
	6月24日	MERIS	SW 条带/SE 条带	晴

注: * 文中大量传感器的中英文全称参考李新等^[1,2]的论文; ** 部分数据受云影响, 一般试验区没有云的覆盖, 尽量保证试验区数据的质量。微波辐射计受云的影响较小, 飞行时没有考虑试验区是否无云

段的多角度信息是完整的。7月7日和7月11日的数据在各波段的质量都比较稳定, 天气状态也不错, 在地面开展了大量同步观测, 是相关研究的首选。对于 WiDAS 数据, 已经形成了辐射定标和几何处理等预处理的流程, 构建了数据产品的体系结构, 并提取了黑河试验区 6 种典型地物的辐射方向性^[4]。除了原始数据外, 主要发布上述 2 个测区的 Level 2C 数据, 即对每一景图像做辐射定标、波段间配准、几何校正到地理坐标并进行大气校正。

机载高光谱数据由 OMIS-II 和 SWPHI 两个传感器同时获取。两传感器结合形成全波段的高光谱数据, 但是 SWPHI 视场幅宽小于 OMIS-II。机载高光谱数据可用于研究区地表覆被的精细分类、植被生化参量反演、C₃ 和 C₄ 作物的区分、土壤类型分类、土壤水分含量和成分反演等。其中 6 月 4 日的高光谱飞行与星载的 Hyperion、CHRIS、ASTER 传感器同步, 并开展了地面调查和光谱测量, 形成星—机—地同步的理想数据集。高光谱数据在辐射定标方面普遍存在较多难题, 黑河试验的机载高光谱数据也未能形成和发布标准的辐射定标产品, 用户需要基于地面测量光谱或者光谱先验知识进行相对辐射校正和绝对定标处理, 或者使用基于灰度 (Digital

Number, DN) 值的分析方法。在几何校正方面, 因为飞机平台的扰动, 高光谱传感器的扫描图像必须根据 POS 测量的姿态参数进行几何校正才能恢复视觉效果好的图像。因此我们发布的是根据室内定标数据初步辐射定标和根据高精度定位定向系统 (Position & Orientation System, POS) 测量的姿态参数初步几何校正的数据, 用户需要做进一步处理。虽然几何精校正不存在技术问题, 但因为高光谱数据量大, 如果对航带数据投影和重采样不仅占用大量磁盘空间, 而且不利于数据的分析, 所以我们不提供几何校正结果, 而是提供几何校正需要的控制点, 用户可根据自己的需要可利用几何控制点进行几何精纠正。

LiteMapper 5600 机载激光雷达不但获取常规的点云数据, 还获得具有完整波形的多次回波, 对多次激光回波的分析可以提取植被高度、森林的生物量垂直分布等信息。与激光数据同步还拍摄了高分辨真彩色照片, 用于制作测区正射影像图。相邻照片的重叠率大于 60%, 因此存在通过传统的立体匹配方法提取地面三维信息的可能, 可以与激光雷达提取的三维信息互为补充和验证。黑河试验中机载激光雷达的重点飞行区是大野口林区, 全区平均点云

密度4个/m²以上,对超级样地和样带还进行了加密飞行。除了大野口测区外,6月20日在张掖市—盈科绿洲测区获取的激光雷达数据可用于市区的三维结构提取以及农业区林网结构的提取。并可以配合7月7日获取的多角度数据,开展激光雷达主动遥感与多角度被动遥感的协同研究。另外还有SE、SW、NE、NW 4个航带数据,是沿ICESat卫星上的大脚印激光雷达的星下点轨迹设计的,旨在用高分辨航空激光雷达数据支持星载大脚印激光雷达数据的分析。激光雷达数据的标准处理包括点云生成、点云分类、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字表面模型(Digital Surface Mode, DSM)生成和正射影像生成几个步骤,发布的原始数据包括波形数据、点云数据、航拍图像,处理产品包括DEM、DSM和正射影像。因为波形数据的分析尚无标准化的处理方法,所以全波形信息的充分挖掘还需要用户自己开展工作。目前已经完成了所有机载LiDAR数据和高分辨率彩色CCD数据的处理,生成了DEM、DSM、冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM)和高分辨率彩色CCD镶嵌影像图。

3.2 大野口森林水文试验区

大野口森林水文试验区包括大野口流域和排露沟小流域2个加密观测区,同步观测及长期观测目标都围绕森林冠层结构和生物物理参数以及蒸散发、截留、树干径流、透过流等森林水文的核心过程展开。

3.2.1 数据获取情况

甘肃省水源涵养林研究院2003年曾在排露沟流域设置了15个20m×20m的森林固定观测样地,2007年7月21日至8月16日,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和甘肃省水源涵养林研究院开展了这些森林样地的调查工作,调查了16个森林样地(15个固定样方和1个幼林样方)。另外还调查了10个灌木样方和8个草地样方,这些样方与甘肃省水源涵养林研究院2003年7~8月在该流域开展的样方调查的位置基本一致,可以形成对照。

2008年6月1~15日,中国林业科学研究院资源信息研究所、中国科学院遥感应应用研究所、北京师范大学和甘肃省水源涵养林研究院等单位在大野口流域开展了森林结构参数和生物物理参数的加密观测试验。这些试验包括固定样地观测、临时样地观测、超级样地观测和样带观测4部分内容(图4)。

固定样地观测集中在排露沟流域,对具有多年观测历史资料积累的15块森林固定样地进行了冠层结构参数(叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和

郁闭度等)的观测,利用的仪器包括LAI 2000、TRAC、HemiView以及北京师范大学自制的冠层结构观测设备。

临时样地观测是为了提高森林观测样地在空间分布上的均匀性,在大野口流域选择了43块25m×25m的临时样地,测量了样地每株树的胸径、冠幅和枝下高,按径阶抽取优势木测量了树高,并测量了样地林分的株数密度、郁闭度、LAI和立地因子。

超级样地观测是指在大野口关滩森林观测塔周围设置了一个100m×100m的超级样地,利用各种仪器设备对该样地进行了详细的观测(图5)。具体观测内容包括:

(1)利用全站仪对样地内的每株树木的平面空间分布位置进行了精确定位。

(2)对样地内每株树进行了树高、胸径、枝下高和冠幅的测量。

(3)利用LAI 2000、TRAC和HemiView测量了林分的LAI。

(4)利用地基LiDAR对林分结构进行了三维扫描。

(5)分幼龄林、中龄林和成熟林3级,各抽取10株树,采集不同部位的枝叶样品进行了湿重和干重测量。

(6)测量了样地的地表粗糙度和土壤湿度。

(7)利用ASD光谱仪测量了典型林木的树冠光谱和BRDF。

样带观测是指在大野口关滩森林站设置了一个通过超级样地,与航带平行,跨越不同结构林分和地形的样带,宽20m,长1km。在样带上每隔50m设1块20m×20m的森林样地,分别观测林木的树高、胸径、枝下高和冠幅,并测量林分的LAI。

在排露沟阴坡固定样方和关滩阳坡超级样方里分别设置了一个青海云杉林水文参数观测场,根据不同的郁闭度布设雨量桶、截留槽、苔藓截留桶、树干径流收集器和自制蒸散桶等设备,以获取不同郁闭度的森林水文特征数据。

3.2.2 研究进展和展望

以上地面观测是和航空、卫星遥感数据的获取配合完成的。目前已经获取的航空遥感数据包括高密度点云LiDAR及同步获取的高分辨率彩色CCD影像、多角度观测数据;中高空间分辨率星载遥感数据包括多景ENVISAT ASAR双极化数据、3景ALOS PALSAR双极化数据、2景Radarsat-2全极化数据、1景EO-1高光谱数据和1景SPOT5全色与多光谱数

据。相关研究围绕这些遥感和地面观测数据开展。

目前正在开展如下几个方面的研究工作:

(1) 高密度机载 LiDAR 点云数据用于林分参数提取的方法研究。将获取的高密度 LiDAR 波形数据转换为多次回波点云数据,研究基于点云数据的林冠覆盖下的地形、林分树高、LAI、植被覆盖率等参数的提取方法。

(2) 高密度机载 LiDAR 点云数据用于单木信息提取的方法研究。从点云数据出发,综合利用 LiDAR 强度信息和同步获取的 CCD 影像信息,发展高精度的单木参数提取算法,如单木树高和冠幅信息的提取算法。

(3) 地基 LiDAR 数据处理和森林结构参数信息提取模型和方法研究。研究地基 LiDAR 多次扫描数据之间的配准技术,基于 LiDAR 数据确定每株树的位置及其胸径、树高信息的方法,高精度提取森林 LAI 的方法等。

(4) 多时相 PALSAR 用于山地森林生物量提取的方法研究。研究 PALSAR 数据的地形辐射校正方法和森林生物量提取模型,利用样地实测数据验证和改进模型,利用激光雷达提取的森林生物量评价 L-波段 SAR 在山地提取森林生物量的能力。

(5) 基于 Radarsat-2 数据的山地森林 LAI 估测方法研究。利用地面实测的样地 LAI 数据,研究基于全极化 C-波段 SAR 数据提取森林 LAI 的模型和方法,分析地形对 LAI 提取效果的影响并发展地形改正方法。

(6) 基于近真实三维森林场景的主被动遥感机理模型研究。利用超级样地的各种地面观测数据建立起真实的森林三维场景,利用该场景开展光学、微波和激光雷达影像模拟研究,分析主被动散、辐射机理,为发展主被动协同反演模型提供理论支持。

(7) 森林冠层 LAI 的地面观测方法实验研究。

(8) 青海云杉林林冠截留特征分析。利用地面实测的青海云杉林内穿透降雨、树干径流,结合降雨特征和通过数码相机观测的雨量筒上方的冠层郁闭度,来发展一个半经验半物理的林冠截留模型^[5]。

(9) 从林冠层、枯落物层和土壤层 3 个生态作用层次对祁连山林草复合流域 5 种主要灌木林生态系统的水文生态效应进行了研究^[6]。

未来可开展的研究工作如下:

(1) 开展 LiDAR 与 SAR 协同反演森林参数的方法研究。

(2) 开展 SAR 和光学遥感数据协同反演森林

参数的模型研究,基于 ENVISAT ASAR、ALOS PALSAR 和 Radarsat-2 SAR 数据,综合应用 EO-1 高光谱和 SPOT5 多光谱数据,发展 SAR 和光学遥感数据协同用于森林参数反演的方法,并将 LiDAR 提取的树高、LAI 用于协同反演模型的验证。

(3) LiDAR 波形数据用于森林参数提取的模型和方法研究,直接基于 LiDAR 波形数据提取森林参数的模型和方法,而不是将波形数据转换为点云数据后再用于森林参数信息的提取。

(4) 森林水文过程模拟分析研究,基于 LiDAR 数据提取的高精度 DEM 和单木信息实现流域林木 3D 空间分布建模,用于森林水分过程分析。

(5) 基于遥感获取的森林参数估算森林水文参数的模型与算法研究。

3.3 花寨子和盈科绿洲加密观测区

花寨子加密观测区主要开展蒸散发、土壤水分以及荒漠植被生物物理和生物化学参数的同步观测。盈科绿洲加密观测区是典型的农田生态系统,主要作物为植种玉米、大田玉米和小麦。该区主要开展农田蒸散发、相关生态参数及作物结构参数的同步观测,地表地下水相互作用监测,农田灌溉用水监测。

3.3.1 数据获取情况

2007 年 9 月 5~10 日预试验期间,在张掖—盈科—花寨子一线开展了与 Hyperion 卫星同步的地面观测试验。西部行动计划项目组主要选择了典型地物的 26 个样方测量地物光谱、红外温度和热像仪温度、LAI、土壤剖面取样、叶绿素 (SPAD 数值)、光合作用和样方调查,同时用 CE318 太阳光度计测大气气溶胶光学厚度。“973”项目组共对 42 个植被采样点的冠层光谱、LAI、叶绿素浓度 (包括化学分析方法和 SPAD 数值),28 个样本的光能利用率和反射率数值,41 个采样点的土壤反射数据及其对应的土样采集。同期获得 9 月 10 日 Hyperion 卫星数据 1 景。

航空飞行同步观测期间,北京师范大学地理学与遥感科学学院、中国科学院遥感与应用研究所、北京大学遥感与地理信息系统研究所、寒区旱区环境与工程研究所等单位在张掖—盈科—花寨子一线布设了 5 个加密观测小区 (图 6),图中的盈科气象站玉米样地与盈科小麦样地位于绿洲区域,花寨子绿洲玉米样地位于荒漠与绿洲防护林交接地带,另外 2 个样地位于荒漠区,其中荒漠 01 样地植被 (红砂) 覆盖度高于荒漠 02 样地。在这些样地开展了大量

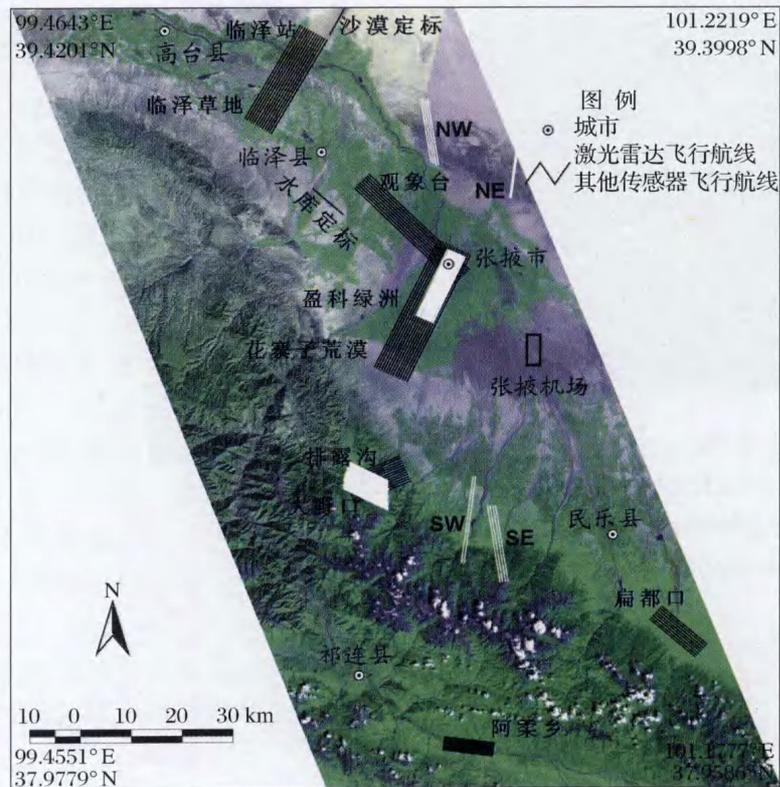


图3 航空遥感区布置图(底图为2000年LandSat TM数字镶嵌图)

Fig.3 Flight regions of the airborne missions

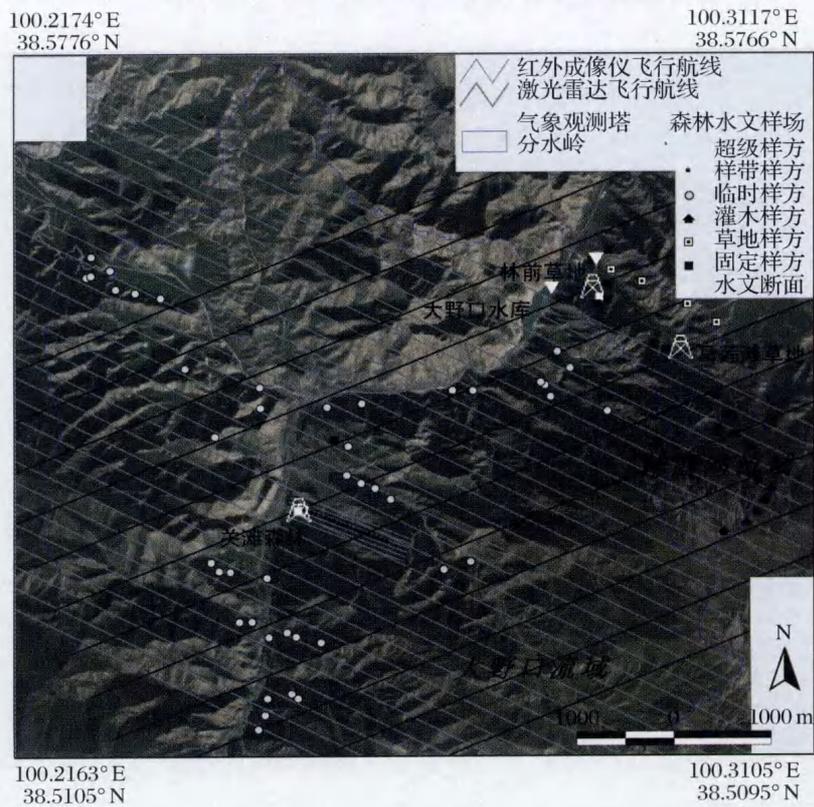


图4 森林水文试验区观测场地示意图(底图为2004年8月8日Quick Bird影像)

Fig.4 General scheme of observation sites in forest hydrology experiment area



图 5 关滩森林站观测场地示意图
(底图为 2008 年 6 月 23 日 CCD 航片)

Fig. 5 General ground true collection scheme for the site around Guantan forest station

参数的地面同步和加密观测,其中盈科气象站玉米地、花寨子绿洲玉米样地与荒漠 02 样地为主要观测对象,多数观测内容以 3~5 天为一个周期重复开展观测。同时城市调查组在张掖市周边以及张掖—盈科—花寨子一线针对人工林、玉米和小麦等典型地物开展了大量样方调查。土地利用组分为 2 个小

组,一个在中游干旱试验区各个加密观测区开展针对 TM 影像的土地利用调查,另一个小组则在盈科绿洲气象站周边开展针对航空飞行 CCD 相机数据的土地利用调查,其精度可达到田块尺度。

在航空飞行同步观测期间,该加密观测区完成了对冠层光谱、组分光谱、BRDF、反照率、光合速率、光合有效辐射分量(Fraction of Photosynthetically Active Radiation, FPAR)、结构参数、植被覆盖度、辐射温度与地表比辐射率、大气参数、蒸散发和土壤水分等要素的连续观测,形成了一套多时相、多波段与多类型的遥感地面数据集,能够为开展遥感模型及反演验证、尺度转换、模型同化、通量研究以及水文及生态过程等工作提供数据支撑。该观测区的具体观测项目、仪器和观测日期如表 2 所示。

3.3.2 研究进展和展望

基于该试验区获取的卫星遥感、航空遥感、地面加密观测和气象水文观测数据,目前正在开展以下研究:

(1) 基于 LPJ 动态全球植被模型(Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model, LPJ-DGVM)的盈科绿洲单点蒸散发估算与植被动态模拟^[7]。

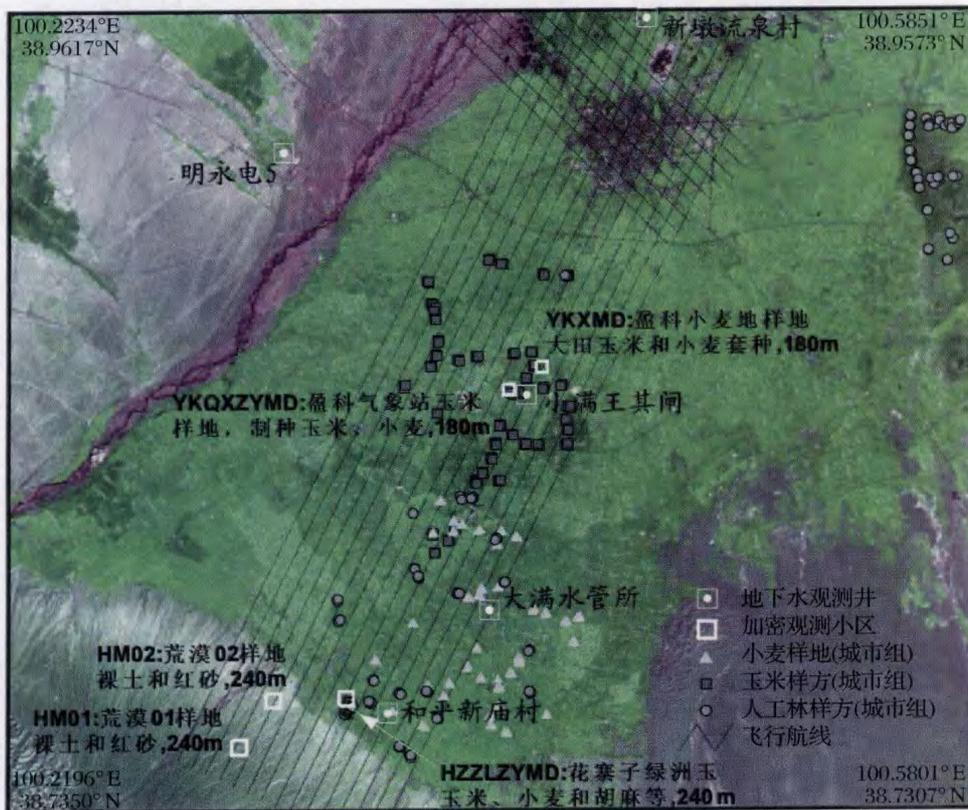


图 6 花寨子、盈科绿洲和张掖市加密观测区样方布置图(底图为 2007 年 9 月 23 日 LandSat TM 影像)

Fig. 6 Experiment site distribution of foci experimental areas of Huazhaizi and Yingke oasis and Zhangye city

表2 花寨子和盈科绿洲加密观测区观测项目
Table 2 Observation items for foci experimental areas of Huazhaizi and Yingke oasis

测量参数	测量仪器	测量日期
冠层光谱	FieldSpec ASD 350 ~2 500 nm	IRSA-524, 528, 530, 603, 604, 616, 623, 629, 705, 706, 707, 709, 711 PKU-520, 525, 528, 601, 604, 610, 616, 623, 624, 626, 629, 701
BRDF	FieldSpec ASD + 多角 度观测架	PKU & BNU-530, 609, 614, 620, 622, 626, 630 IRSA-621, 709
反照率	CMP3 短波表	IRSA-520, 524, 525, 527, 528, 529, 530, 601, 603, 604, 606, 609, 614, 615, 616, 620, 622, 623, 624, 627, 629, 630, 707, 711, 714
光合作用	LI-6400	IRSA-520, 524, 528, 530, 604, 616, 629, 705, 707, 709, 711
叶绿素	SPAD 叶绿素仪	IRSA-520, 524, 528, 530, 616, 629, 707, 711
FPAR	Sunscan	CAAS-530, 531, 601, 603, 604, 608, 610, 611, 629, 701, 707, 709, 711, 714
植被荧光作用	调制荧光仪	CEODE-707
冠层结构(LAI, LAD,株高等)	LAI 3000 和直尺等 LAI 2000	IRSA-520, 524, 525, 528, 531, 606, 611, 612, 614, 616, 621, 627, 702, 709 UESTC-712
植被覆盖度	照相法	BNU-520, 525, 528, 530, 611, 614, 615, 621, 623, 627, 630, 702, 709, 710
组分温度	SC2000 热像仪 S60 热像仪	BNU-520, 524, 528, 601, 604, 616, 629, 707, 711 IRSA-601, 616
连续辐射温度	自计辐射计	BNU-520, 524, 528, 530, 601, 603, 604, 616, 629, 630, 701, 707, 709, 711
辐射温度	手持辐射计	BNU & IRSA-520, 524, 528, 601, 604, 616, 629, 707, 711
红外比辐射率 (8~14 um)	D & P Model 102F BOMEN MR304	BNU-527, 529, 603, 622, 623, 629, 630 IRSA-630(荒漠)
大气参数(消光 系数, AOD 等)	CIMEL CE318	BNU-520, 523, 525, 527, 528, 616, 620, 622, 623, 627, 629, 701, 707, 711 IRSA-527, 528, 529, 531, 601, 602, 603, 604, 606
土壤水分	TDR/烘干法	IRSA/ CAREERI-520, 528, 530, 604, 616, 629, 707, 711
蒸散发	自制 lysimeter	CAREERIV614~713
田间管理数据	人工调查	CAREERI-1029, 1030(作物已经收割)
地下水	HOBO 水位温度自动 记录仪	和平新庙村(164.2 m)、大满水管所(67 m)、明永电5(74.3 m)、小满王其闸(43 m)、乌江 小湾村(8 m)、新墩流泉村(2.5 m),括号内为绳长

注: BNU = 北京师范大学; IRSA = 中国科学院遥感与应用研究所; UESTC = 成都电子科技大学; CEODE = 中国科学院对地观测与数字地球科学中心; CAAS = 北京农林科学院; CAREERI = 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所; LAD, Leaf Angle Distribution, 叶倾角分布; AOD, Aerosol Optical Depth, 大气气溶胶光学厚度; TDR, Time Delay Reflectometry, 时域反射计

- (2) 春小麦干旱与水分利用效率遥感估算。
 - (3) 玉米全生长期的叶面积指数测量方法。
 - (4) 行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析^[8]。
 - (5) 田块尺度作物辐射温度获取方法对比。
 - (6) 叶片偏振。
 - (7) 基于 LiDAR 数据反演 LAI。
 - (8) 基于 FRT 模型的高光谱多角度植被指数。
 - (9) 基于高光谱多角度遥感数据的叶面积指数反演。
 - (10) 多角度多波段 BRDF 模型反演反照率。
 - (11) 植被日光诱导荧光探测光能利用率及植被功能类型。
 - (12) 非均温表面发射率提取算法 AISSTES 的实验验证。
 - (13) 盈科灌区气象站周边玉米地的热像仪和手持式红外辐射计温度测量数据比对研究^[8]。
 - (14) 多源遥感数据协同定量反演陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反射率。
 - (15) 大田玉米全生长期光合作用日变化。
 - (16) 基于 TM 和 MODIS 数据的区域蒸散发估算研究。
- 在后期的研究中还将开展:
- (1) 区域蒸散发估算与植被动态模拟。
 - (2) 区域土壤湿度遥感估算。
 - (3) 离散植被 LAI 在不同空间尺度上的转换规律。
 - (4) 不同时间多空间尺度数据的联合反演、信息提取与验证方法。
 - (5) 空间尺度转换的通用公式和模型。
 - (6) 地表时空变化特征参数的尺度转化方法。
 - (7) 遥感瞬时观测值的时间尺度扩展研究。
 - (8) 基于叶面积指数、地表温度等关键参数研究过程模型与机理模型耦合过程中的时空尺度效应。
 - (9) 基于多源、多尺度遥感数据开展多尺度地

物场景重建与遥感模拟。

(10) 研究 FPAR 的空间尺度效应和尺度转换方法并试验验证。

(11) 进行城市模型空间尺度上升或下降时的尺度转换问题研究。

(12) 开展地理信息系统、虚拟地理环境与遥感的集成创新研究。

3.4 临泽草地加密观测区

临泽草地加密观测区位于兰州大学临泽草地生态试验站周边,土地覆盖类型为湿地、草地、盐碱地和农田。该区主要开展蒸散发、土壤水分、地表和冠层温度、生物物理参数的同步观测,并重点研究尺度转换方法、蒸散发遥感估算模型和蒸散发的数据同化方法。

3.4.1 数据获取情况

2007年9月12~23日预试验期间,在临泽加密观测区和临泽站加密观测区开展了与 ASAR 卫星同步的土壤水分观测试验(同时测量地表粗糙度)和与 TM 卫星同步的地表温度同步观测试验。同期获得9月19日 ASAR 卫星数据和9月23日的 TM 卫星数据各1景。

航空飞行同步观测期间,以中国科学院寒区旱区环境与工程研究所为主,“973”相关课题参与开展地面同步观测和加密观测试验。在兰州大学临泽草地生态试验站的实验场上,设计了加密观测区一观测小区一采样单元3级嵌套式采样方案(图7),

对应于从高分辨率的航空遥感到中等分辨率卫星遥感的多种尺度,详细介绍参考李新等^[1]对该方案的详细介绍。其中红外温度同步采样路线为东西向共计8条,相邻2条间距250m,每条采样路线上每隔250m布设一个采样点。微波飞行同步采样路线与飞行航线垂直,共计6条,相邻2条间距200m,每条采样路线上每隔100m布设一个采样点。该加密观测区完成了辐射温度、土壤水分、地物光谱、反照率、FPAR、大气参数与地表粗糙度等要素的连续观测,具体观测项目、仪器和观测日期如表3所示。

3.4.2 研究进展和展望

已开展的相关研究:

(1) 针对 ALOS/PALSAR 数据,使用 AIEM 理论模型计算地表的同极化后向散射系数,Oh 半经验模型描述交叉极化散射特征,通过对大量后向散射模拟数据的分析,建立地表粗糙度计算模型;利用模拟数据分析地表辐射亮温随土壤水分和粗糙度的变化规律,在此基础上构建 NN 模型并结合粗糙度计算结果和辐射计飞行数据反演研究区域的土壤水分^[10]。

(2) 利用“水—云”模型分析芦苇和玉米地的后向散射特性,由于植被形态的不同,导致 HH 和 VV 极化的衰减不一致,同时发现了植被露珠的存在对其后向散射的影响作用,因此通过极化之间的差异性可以识别不同植被^[11]。

(3) 通过测量配制的不同土水比的土壤溶液样

表3 临泽草地加密观测区观测项目

Table 3 Observation items for foci experimental areas of Linze grassland

测量项目	仪器	测量日期和样方或样带
地物光谱	ASD 光谱仪	530(ABDE*), 603(B), 606和615(黑白布和水泥地), 616(E)
反照率	CMP3 短波表	525(E), 526(D), 527(D), 528(E), 530(E), 601(AB), 603(A), 604(F), 606(E), 620(A), 622(AD), 624(E), 711(E)
红外波谱	红外波谱仪 102F	626
FPAR	3415 光量子计	606(E), 611(D), 611(E), 615(E), 616(E), 620(A), 622(B), 623(DE), 624(B), 629(AE)
大气参数(消光系数, AOD 等)	CE318	530, 602, 602, 603, 606, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 701, 702, 704, 706, 707, 708, 709, 711
土壤水分	烘干法和 TDR	524(BDE), 525(S1~6), 528(BDE), 530(A~E), 602(T1~4**), 603(T5~8), 610(A~E), 627(A~E), 704(新样带1~12), 708(S1~6), 711(A~E)
组分温度	SC2000 热像仪	708
	S60 热像仪	708
连续辐射温度	自计辐射计	610(A~E, 农田), 611(A~E, 农田), 711(E)
辐射温度	手持辐射计	528(BDE), 530(A~E), 602(T1~8), 606(A~E), 610(T1~8), 611(T1~8), 615(A~D), 622(T1~8), 629(BCE), 711(B~E)
地表粗糙度	粗糙度板	ABC

* ABCDE 为样方名称; ** T 代表红外温度同步样带, 1~4 表示第 1~4 条样带, S 代表土壤水分同步样带

品电导率,推算出土壤饱和和溶液电导率,从而可以精确得到土壤盐分含量,这些工作可以为以后的微波遥感反演土壤盐分的模型参数确定提供可靠的地面测量数据,同时可以为遥感反演提供验证数据。

(4) 利用临泽草地站大麦地、苜蓿地、芦苇地和盐碱地所观测的地表温度数据,初步分析了不同下垫面地表温度的空间异质性,开展了基于公共陆面模式(Common Land Model, CoLM)及地表通量的数值模型模拟研究,初步建立了基于 CoLM 模型和集合卡尔曼滤波算法的蒸散发数据同化方案。

(5) 在基于 16 个土壤水分剖面的逐日 Delta T PR2 持续观测数据,利用平均相对偏差及相关系数方法,对网格尺度上多层土壤水分的时间稳定性进行了分析,由于环境的复杂性及观测的误差,这种特殊类型土壤水分的时间稳定特征还需要进一步研究^[12]。

目前正在开展或拟开展的研究:①基于微波辐射计反演植被含水量和土壤水分;②基于主动 SAR 反演植被含水量和土壤水分;③地表温度反演;④遥感蒸散发反演;⑤Fpar 遥感估算;⑥土壤盐分对微波信号的影响研究;⑦含盐土壤介电常数测量及建模;⑧利用主动微波遥感数据同步反演土壤水分和盐分;⑨发展和改进植被盖度、冠层高度的遥感反演算法;⑩发展和改进地表温度的遥感反演算法;⑪发展和改进地表反照率的遥感反演算法;⑫地表温度时空插值方法的研究;⑬基于大孔径闪烁仪(Large Ap-

erture Scintillometer, LAS) 和涡动相关法(Eddy Covariance, EC)的蒸散发验证遥感反演蒸散发算法;⑭发展可同化多源遥感数据的蒸散发数据同化方法。

3.5 临泽站加密观测区

临泽站加密观测区位于临泽内陆河流域综合研究站周边,包括过渡带及绿洲。该区主要开展生态水文变量的同步观测和长期监测,重点观测对象是过渡带的蒸散发和凝结水。

3.5.1 数据获取情况

航空飞行试验期间中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和“973”相关课题联合在临泽站加密观测区开展地面同步观测和加密观测试验,在临泽站内玉米等试验田、五里墩农田、樟子松林地、白杨树林地和过渡带荒漠分别针对不同下垫面布设观测样方(图 8)。荒漠地区设置了 800 m 长的南北样带,每隔 100 m 布设一个 40 m × 40 m 样方,570 m 长的东西样带,每 30 m 布设一个样点,同时针对微波飞行同步垂直与飞行航线布设了 6 条同步采样路线(P1 ~ P6),针对红外和高光谱飞行在第 6、7、8 航线(LY6、LY7 和 LY8)上布设观测点。在平川水库开展红外定标试验,在板桥乡壕洼村西边的沙漠开展微波定标试验(图 7)。该加密观测区完成了叶面积、地下水、BRDF、反照率、FPAR、地物光谱、辐射温度、积分球、凝结水、土壤水分、样方调查、比辐射率与蒸散发等要素的连续观测,具体观测项目、仪器和观测日期如表 4 所示。

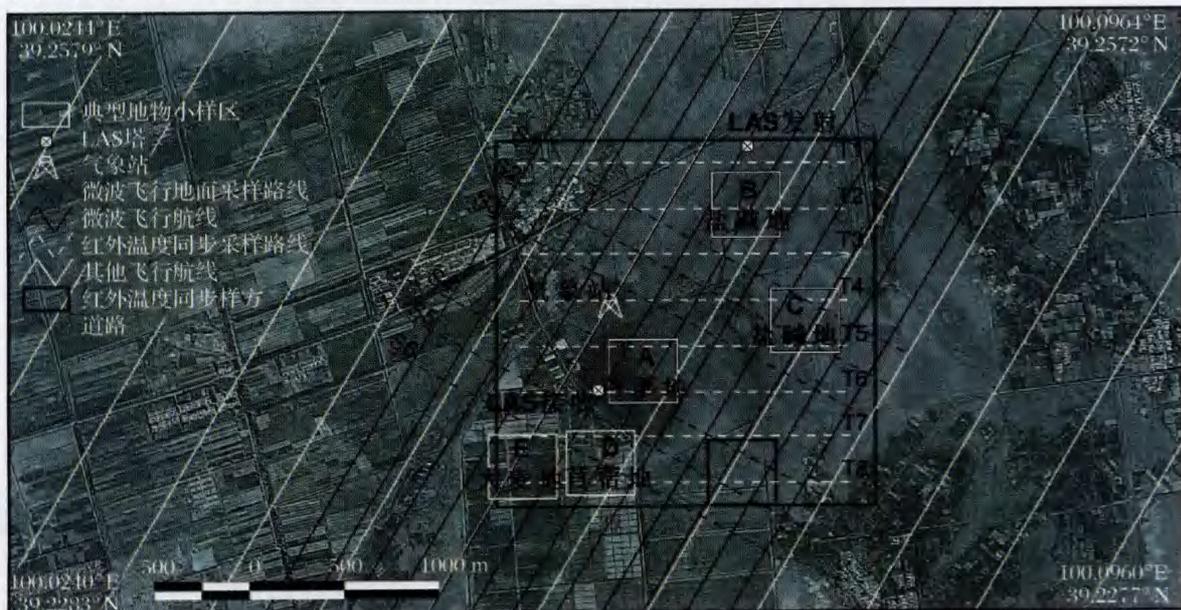


图7 临泽草地加密观测区样方布置图(底图为2008年7月4日SPOT5影像)

Fig.7 Experiment site distribution of foci experimental areas of Linze grassland

表 4 临泽站加密观测区观测项目

Table 4 Observation items for foci experimental areas of Linze Station

测量项目	仪器	测量日期和样方或样带
叶面积	LAI 2000	临泽站(619, 625, 630, 703, 709, 710)、五里墩(624, 629, 710)
叶面积	手工卷尺	临泽站(524, 711)、五里墩(528, 530)
叶面积	鱼眼相机	五里墩(528, 530, 603, 604, 629, 711)、荒漠(528, 530,)、杨树林(530,)、临泽站(527, 619, 625, 630, 703, 710)、白杨树样方(530)
地下水	人工	523, 604, 606, 616, 621, 626, 701, 711, 716, 721
BRDF	ASD 光谱仪	五里墩(525, 528, 530, 629, 711)、荒漠(528, 530)、临泽站(625, 630, 709)
反照率	CMP3 短波表	荒漠(528, 605, 606, 615, 622)、临泽站内(625, 630, 704)
FPAR	3415 光量子计	临泽站(616)、五里墩(701)
地物光谱	ASD 光谱仪	五里墩(528, 530, 616, 629, 711)、荒漠(528, 530, 616)、临泽站(709)、临泽站土壤样品(624, 630)
辐射温度	手持辐射计	东西样带(524, 525, 528)、南北样带(524, 525, 528)、五里墩(525, 629, 711)、LY6(606, 615, 629, 711)、LY7(530, 606, 615, 629, 711)、LY8(530)、P16(704, 708)、沙漠定标(525)、平川水库水体定标(530)
积分球	积分球	五里墩(624, 629, 711)、临泽站(528, 530, 619, 630, 709)
降水量	雨量桶	619, 621, 709, 713
凝结水	盘、铝盒	盘(526~627, 7.5~7.8)、铝盒(624~630, 7.5~7.8, 717~729)
土壤水分	烘干法	东西样带(524, 525, 528, 627, 711)、南北样带(524, 525, 528, 627, 711)、五里墩(524, 525, 528, 629, 711)、LY6(606, 615, 629, 711)、P1-6(704, 708)、LY7(530, 606, 610, 615, 629, 711)、LY8(530, 606, 610)
样方调查	人工	白杨树、樟子松、荒漠过渡带
比辐射率		缺省信息和数据
蒸散发	水平衡法	观测时间段

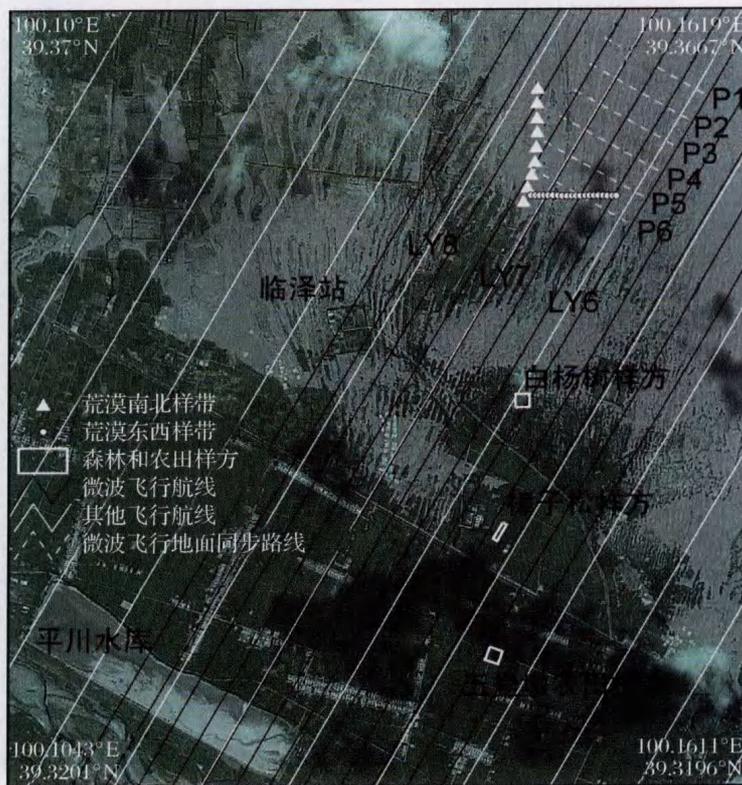


图 8 临泽站加密观测区样方布置图

Fig. 8 Experiment site distribution of foci experimental areas of Linze Station

表5 扁都口和阿柔乡加密观测区观测项目

Table 5 Observation items for foci experimental areas of Biandukou and Arou township

测量项目	仪器	扁都口测量日期	阿柔测量日期
覆盖度和叶面积	照相机	524,622,624,718	623,710~712,722
红外波谱	红外波谱仪 102F	624,706	714
辐射温度	自计辐射计	531	531
辐射温度	手持辐射计	524~525,704	705,707,714
反照率	CMP3 短波表	624,706	
粗糙度	粗糙度板	523~526	623
土壤水分	TDR 和烘干法	523~526,531,704	531,705,714
地物光谱	ASD 光谱仪	524,622,624	705~707
BRDF	ASD 光谱仪	622	623,705~707
积分球	积分球	622	
样方调查	人工	622,704,718	623,705,722
光合作用	LI-6400		705~707
探地雷达与 TDR		523~525,603	531,620

3.5.2 研究进展和展望

由于临泽站与盈科绿洲2个加密观测区的观测项目有大量相似的地方,因此相关研究可以在2个区同时开展。重点介绍凝结水和过渡带荒漠相关的研究进展和展望。观测的结果表明临泽站附近的沙地上每晚有平均0.1 mm的凝结水,其量随着坡度、坡向和在坡面上所处的位置变化幅度较大。拟利用自动气象站的梯度风温湿观测,估算水汽通量,反演凝结水的量,并用地面观测结果验证。

3.6 扁都口和阿柔乡加密观测区

扁都口加密观测区在夏季以大面积均质的油菜和大麦等山前农田生态系统为主,主要开展土壤水分和生物物理参数的同步观测,布设了观测的样方与样带。阿柔乡加密观测区夏季是典型的高寒草甸生态系统,该区主要开展土壤水分、相关生态参数及展狼毒盖度的观测与调查,调查主要在3个样方开展,样方分布图参考王建^[3]的论文。

这2个加密观测区目前开展的研究主要集中在土壤水分的反演和狼毒盖度的估算上。利用探地雷达,在长度样带(30~100 m)上进行观测,反演获得土壤含水、含冰量定量信息,针对ASAR和微波辐射计观测,对连续分布的多条样带观测结果进行地统计分析和空间内插,获得区域尺度及像元(如30 m×60 m)内的土壤水分空间分布,并用TDR观测的结果进行验证^[13]。利用多角度、多极化的ASAR数据开展地表土壤水分反演研究,重点是消除地表粗糙度和植被的影响,结合改进的积分方程模型(Advanced Integral Equation Model, AIEM)模拟分析,获得了研究区地表粗糙度的分布,提供了反演的先验信息;植被的作用利用水—云模型加以计算,反演结

果精度得到了提高,TDR单点观测结果和探地雷达像元尺度观测的结果被用来进行反演结果的验证。采用数码相机拍照法对狼毒盖度进行了研究,选择过绿特征区分绿色植被和非绿色植被,结合亮度特征和面积阈值从非绿色植被中自动提取出狼毒花,并提出一种基于行程标记的孔洞填充算法对狼毒花中的孔洞进行了填充,然后利用狼毒花的面积对茎叶面积进行回归分析,发现二者表现出了很好的线性关系,为了得到更准确的狼毒花和狼毒茎叶面积,获取照片时最好处于狼毒的盛花期^[14]。进一步的工作将利用TM卫星数据获取波段信息和地面测量的狼毒花的光谱特征反演狼毒盖度,并用照相机测量的密度进行算法的验证与改进。

3.7 通量和气象水文观测

试验区内通量和气象水文观测网络分布及重点站和重点加强站的基本信息已经在李新等^[1]文章中被详细介绍,此处重点介绍一下相关研究的进展。利用雨滴谱资料分析不同类型降雨雨滴直径 D 和对应的下落速度 v 之间的关系,同时还得到了对应层状云和对流云雷达定量测量降雨的Z-R关系和雷达定量测量大气垂直含水量的M-R关系^[15]。选取草地、森林及农田3种下垫面的自动气象站和涡动相关仪及大孔径闪烁仪通量观测站观测资料,分析了水、热和CO₂通量特征,表明黑河上游阿柔站和中原临泽站两套LAS的观测与涡动相关仪有关结果有较好的对应关系^[16]。使用EC和LAS通量解析足迹模型分别分析了临泽草地生态试验站、阿柔观测站的EC、LAS观测通量的源区,结合风向变化规律,对二者通量观测差异进行分析解释^[17]。

4 结 语

以森林水文过程及中游干旱区生态水文过程为主要目标的中游航空飞行和地面同步观测试验已经顺利完成,部分补充观测一直在开展。目前的主要工作是元数据的编写、数据的规范化与预处理。相关的数据分析和研究工作也已经广泛地开展,并取得了一些阶段性成果,部分成果以本期专辑或者投稿到其他刊物的形式发表。在今后很长的时间内,我们的工作重点是利用这一套高分辨率的、时空一致性的高质量数据集,发展从航空和卫星遥感资料反演和间接估计水循环各分量(如水热通量、蒸散发、土壤水分等)及其他地表过程分量(如地表温度、生物物理参数等)的模型和算法,利用地面观测资料进行结果验证和算法的改进。展望未来,再开展一次星—机—地大型遥感地面同步观测试验已经提上上议事日程,加紧数据分析和研究,发现问题与不足,凝练有限的科学目标,改进试验和观测方案,将是在新的试验中取得进展和成功的关键。

致谢:感谢中国科学院的寒区旱区环境与工程研究所、遥感应用研究所、上海技术物理研究所、地理科学与资源研究所、东北地理与农业生态研究所,教育部北京师范大学、成都电子科技大学、北京大学,甘肃省祁连山水源涵养林研究院、甘肃省气象局和张掖市气象局等单位的科研人员和学生共同参与试验;感谢临泽内陆河流域综合研究站和兰州大学临泽草地生态试验站提供的后勤保障;感谢中飞通用航空公司和广西桂能信息工程有限公司为试验的顺利完成所做的工作;感谢其他参与和关心本次试验的单位和个人。

参考文献(References):

- [1] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: Scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9):897-914. [李新,马明国,王建,等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验:科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9):897-914.]
- [2] Li Xin, Li Xiaowen, Li Zengyuan, *et al.* Watershed allied telemetry experimental research[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2009 (in press).
- [3] Wang Jian, Che Tao, Zhang Lixin, *et al.* Introduction on the experiment of cold region hydrological remote sensing and ground-based synchronous observation in the upstream of Heihe basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 189-197. [王建,车涛,张立新,等. 黑河流域上游寒区水文遥感—地面同步观测试验介绍[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2):189-197.]
- [4] Fang Li, Liu Qiang, Xiao Qing, *et al.* Design and implementation of airborne wide-angle infrared dual-mode line/area array scanner in Heihe experiment[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):696-704. [方莉,刘强,肖青,等. 黑河试验中机载红外广角双模式成像仪的设计及实现[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):696-704.]
- [5] Tan Junlei, Ma Mingguo, Che Tao, *et al.* A Study of interception of *Picea Crassifolia* based on different canopy closure[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):825-833. [谭俊磊,马明国,车涛,等. 基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):825-833.]
- [6] Jin Ming, Li Xiaoxiong, Liu Xiande, *et al.* Ecohydrology of the shrublands in the Xishui experimental station on the northern slope of the Qilian Mountains, Gansu, China[J]. *Hydrological Processes*, 2009 (in press).
- [7] Wang Xufeng, Ma Mingguo. Carbon and water fluxes of cornfield simulated with LPJ model[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):734-740. [王旭峰,马明国. 基于LPJ模型的制种玉米碳水通量模拟研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):734-740.]
- [8] Chen Ling, Yan Guangjian, Li Jing, *et al.* Footprint Uncertainty analysis for ground-based multiangular measurement of row crops[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):793-802. [陈玲,阎广建,李静,等. 行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):793-802.]
- [9] Kang Guoting, Yan Guangjian, Ren Huazhong, *et al.* A comparison of different ground-based radiative temperature measurement methods on the field patch scale[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):784-792. [康国婷,阎广建,任华忠,等. 田块尺度作物辐射温度获取方法对比研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):784-792.]
- [10] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, *et al.* Joint inversion of soil moisture using active and passive microwave data[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):769-776. [赵天杰,张立新,蒋玲梅,等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):769-776.]
- [11] Xu Chunliang, Chen Yan, Jia Mingquan, *et al.* Measurement and analysis of backscattering properties on typical surface features[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):810-816. [徐春亮,陈彦,贾明权,等. 典型地物后向散射特性的测量与分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):810-816.]
- [12] Ran Youhua, Li Xin, Wang Weizhen, *et al.* Grid scale temporal stability of multi-layer soil moisture in a grassland ecosystem in western China[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):817-824. [冉有华,李新,王维真,等. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7):817-824.]
- [13] Patrick Thomas Philipp Klenk. Determining Spatial Structures of Soil Water Content Obtained From Multichannel Ground-penetrating Radar Measurements[D]. Heidelberg: Heidelberg University.

- ty,81-102.
- [14] Qian Jinbo, Ma Mingguo. Coverage estimation on *Stellera chamaejasme* L based on digital photos[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):776-783. [钱金波,马明国.基于数码照片的狼毒盖度估算[J].地球科学进展,2009,24(7):776-783.]
- [15] Guo Zhao, Rongzhong Chu, Tong Zhang, et al. Improving the rainfall rate estimation in the midstream of the Heihe River Basin using raindrop size distribution[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009 (in press).
- [16] Wang Weizhen, Xu Ziwei, Liu Shaomin, et al. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):714-723. [王维真,徐自为,刘绍民,等.黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J].地球科学进展,2009,24(7):714-723.]
- [17] Shuang Xi, Liu Shaomin, Xu Ziwei, et al. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements in the Heihe river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7):724-733. [双喜,刘绍民,徐自为,等.黑河流域观测通量的空间代表性研究[J].地球科学进展,2009,24(7):724-733.]

Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Heihe River Basin: Experiment of Forest Hydrology and Arid Region Hydrology in the Middle Reaches

MA Mingguo¹, LIU Qiang², YAN Guangjian³, CHEN Erxue⁴, XIAO Qing²,
SU Peixi¹, HU Zeyong¹, LI Xin¹, NIU Zheng², WANG Weizhen¹,
QIAN Jinbo¹, SONG Yi¹, DING Songshuang¹, XIN Xiaozhou², REN Huazhong³,
HUANG Chunlin¹, JIN Rui¹, CHE Tao¹, CHU Rongzhong¹

(1. Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Institute of Forest Resources Information Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER) is a simultaneous airborne, satellite-borne and ground based remote sensing experiment in the Heihe river basin, which is the second largest inland river basin in the arid region of northwest China. WATER consists of the cold region, forest, and arid region hydrological experiments and its field campaigns include two phases. The first phase is an intensive observation period lasting from March 7 to April 12, 2008 for the cold region and the second phase is that from May 15 to July 22 for the forest and arid regions, 2008. The second step is introduced in this paper. The scientific objectives and research tasks are briefly reviewed. The airborne sensors include microwave radiometers at L, K and Ka bands, imaging spectrometer, thermal imager, CCD and LIDAR. Seventeen missions were performed with 72-hour flying time. Simultaneous observations were performed in the foci experimental areas which include Dayekou watershed, Pailugou watershed, Huazhaizi desert, Yingke oasis, Zhangye city, Linze grassland, Linze station transitional zone. The sampling protocol, data acquirement and preprocessing, research advance and prospects are introduced in detail for these airborne and ground simultaneous experiments.

Key words: WATER; Remote sensing; Forest hydrology; Arid region hydrology; Simultaneous experiment.