

文章编号:1001-8166(2008)09-0897-18

黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案*

李新¹, 马明国¹, 王建¹, 刘强², 车涛¹, 胡泽勇¹, 肖青²,
柳钦火², 苏培玺¹, 楚荣忠¹, 晋锐¹, 王维真¹, 冉有华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)

摘要:介绍了黑河流域遥感—地面观测同步试验的科学背景、科学问题、研究目标以及观测试验方案和观测系统布置。总体目标是,开展航空—卫星遥感与地面观测同步试验,为发展流域科学积累基础数据;发展能够融合多源遥感观测的流域尺度陆面数据同化系统,为实现卫星遥感对流域的动态监测提供方法和范例。以具备鲜明的高寒与干旱区伴生为主要特征的黑河流域为试验区,以水循环为主要研究对象,利用航空遥感、卫星遥感、地面雷达、水文气象观测、通量观测、生态监测等相关设备,开展航空、卫星和地面配合的大型观测试验,精细观测干旱区内陆河流域高山冰雪和冻土带、山区水源涵养林带、中游人工绿洲及天然荒漠绿洲带的水循环和生态过程的各个分量;并且以航空遥感为桥梁,通过高精度的真实性验证,发展尺度转换方法,改善从卫星遥感资料反演和间接估计水循环各分量及与之密切联系的生态和其他地表过程分量的模型和算法。由寒区水文试验、森林水文试验和干旱区水文试验,以及一个集成研究——模拟平台和数据平台建设组成。拟观测的变量划分为5大类,分别是水文与生态变量、驱动数据、植被参数、土壤参数和空气动力参数。同步试验在流域尺度、重点试验区、加密观测区和观测小区4个尺度上展开。布置了加密的地面同步观测、通量和气象水文观测、降雨、径流及其他水文要素观测网络;使用了5类机载遥感传感器,分别是微波辐射计、激光雷达、高光谱成像仪、热红外成像仪和多光谱 CCD 相机;获取了丰富的可见光/近红外、热红外、主被动微波、激光雷达等卫星数据。

关键词:遥感试验;寒区水文;干旱区水文;森林水文;黑河流域

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A

1 背景

随着全球观测手段的出现和日趋成熟,以能量循环、水循环和生物化学循环为研究对象的地球表层系统科学已逐渐发展成为实验特征明显的科学。遥感对地观测系统的建立和应用,大大提高了地球

表层系统科学研究的效率;各种物质和能量定量测试的新技术,也为这一学科的发展带来了新的契机^[1]。科学工作者第一次可以从宏观到微观,从全球到区域,利用前所未有的先进手段观察地球表面的各种过程,并通过可重复的实验深入理解过程,进而发展定量描述这些过程的计算机模型。地球表层

收稿日期:2008-08-10;修回日期:2008-08-21.

* 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);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:2007CB714400)资助。

作者简介:李新(1969-),男,甘肃酒泉人,研究员,主要从事陆面数据同化、遥感和GIS在冰冻圈和水文水资源研究中的应用、流域集成研究。E-mail: lixin@lzb.ac.cn

系统科学已成为实验科学,在地球表层系统科学从经验科学走向实验科学的进程中,一系列针对地表过程的大型观测试验扮演了重要的角色^[2,3],正是这些观测试验对地理学、水文学、生态学、大气科学和整个地球系统科学的快速发展起到了举足轻重的作用,许多试验甚至成为一个阶段科学认识和研究方法进步的里程碑。

在各类陆面过程试验中,寒区和干旱区也受到了高度的重视。在干旱区开展的典型试验包括撒哈拉沙漠南缘地区萨赫勒水文大气引导试验(HAPEX)^[4]以及我国科学家主导的黑河试验(HEIFE)^[5,6]、内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用试验(IMGRASS)^[7,8]、西北干旱区陆—气相互作用试验(NWC-ALIEX)^[9]。这几个试验的特点都是从陆气相互作用着手,侧重于对大气边界层的观测,其目的是为大气模式中的陆面参数化服务,对于各个尺度上水文和生态过程的观测则相对较为薄弱。寒区由于观测条件困难,近年来才在气候与冰冻圈研究(CliC)等科学计划的催生下,得以有寒区陆面过程试验(CLPX)^[10]的实施。CLPX强调对雪和冻土状态的观测,但忽视了它们的水文过程。因此,寒区和干旱区的陆面过程试验——特别是以理解和模拟各种尺度的水文与生态过程为目标的综合试验还有待加强,而在其实施过程中,还应高度关注寒区和干旱区在地域上的相互交织以及在各种过程上的联系和相互作用。

中国西部地区有着鲜明的寒区和旱区相伴而生的特点,特别是内陆河流域,具有全球独特的以水为纽带的“冰雪/冻土—森林—河流—湖泊—绿洲—荒漠”多元自然景观,一般从河流的源头到尾间顺次分布着高山冰雪带、草原森林带、平原绿洲带和戈壁荒漠带等自然地理单元,是在流域尺度上开展寒区和干旱区水文和生态等陆面过程研究的理想场所。近年来,以流域为基本单元,围绕水—土—气—生—人相互作用,国内科技界开展了一系列卓有成效的研究,并且逐渐认识到必须以现代地球系统科学的思想为指导,以现代模型模拟及信息获取与处理技术为手段,开展综合集成研究,才能更好地立足于科学前沿的探索,同时也服务于未来的国家需求^[11]。显然,集成研究中机理剖析的深入和综合模型的建立,无不有赖于高分辨率、高质量和系统化的基础数据集,但无论是现有的观测数据或者是国际上其他地区的陆面过程试验数据,都无法满足流域科学集成研究的要求,数据瓶颈的问题十分突出。

因此,亟待开展一次基础性的、多尺度的、多学科联合的、精心设计的综合观测试验。这种综合观测试验是提高对寒区和干旱区水循环和生态过程的定量化认识水平的基础。如寒区水文,降水的观测和估计误差都很大,对冻土水文过程的认识甚为薄弱,对冰川和积雪的产流贡献也不清楚^[12]。干旱区水文研究中突出的问题包括:降水的高度异质性如何观测和模拟?地表水和地下水相互作用的过程是怎样的?内陆河流域尺度上的水分内循环是否存在,其量值有多大^[13]?自然和人为两种因素是如何相互作用而影响水文过程的^[14]?要解答这些问题,有赖于基础观测资料的积累,而遥感、同位素以及新一代的水文和生态观测手段,正在形成从地下到地表再到冠层、从微观到宏观的立体观测,为发展、改进和验证水文和生态等陆面过程模型提供着基础数据。开展流域综合观测试验,也是发展流域科学的重要前提。多年来,流域科学中的一些核心问题,如内陆河流域水资源的形成和转化规律以及水土资源的合理利用一直是国内科学界和决策部门关注的焦点问题之一。解决这些问题,有赖于利用现代计算机模拟技术以及广泛可获取的卫星遥感数据和其它空间数据,发展从整体上模拟流域过程和行为的流域集成模型。数据仍然是前提,为此,发达国家提出了建立流域信息基础设施的构想,美国国家自然科学基金委员会计划在美国6个流域率先建立全自动化的观测网和先进的信息系统,以期给水科学和水管理带来革命性的变革^[15,16]。观测系统和模拟平台的建立,无疑将是实现流域水资源和其他资源的精细管理,定量评估自然环境变化和人类活动对流域的影响,从而更好地为流域可持续发展服务的前提。

“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”,正是在这样的背景下,从“中国科学院西部行动计划二期”“考虑长远,引领发展”的指导思想出发,经过反复论证,于2007年年中正式启动的重点研究项目^[17]。本文将介绍项目中航空和卫星遥感与地面观测同步试验的科学背景、科学问题、研究目标以及观测试验方案和观测系统布置。

2 科学问题与目标

黑河流域遥感—地面观测同步试验将重点和优先解决以下科学问题:

(1) 遥感在多大程度上可以提高我们对于寒区水文、森林水文和干旱区水文过程的认识?

(2) 如何通过尺度转换,将多源和多尺度的遥感与地面观测资料相结合,应用于水文、生态及流域集成模型?

(3) 如何在陆面数据同化系统中有效地融合多源卫星遥感观测,实现对流域水文和生态过程的动态监测?

总体目标是:开展航空—卫星遥感与地面观测同步试验,为发展流域科学积累基础数据;发展能够融合多源遥感观测的流域尺度陆面数据同化系统,为实现卫星遥感对流域的动态监测提供方法和范例。

具体的观测试验目标是:

(1) 以具备鲜明的高寒与干旱区伴生为主要特征的黑河流域为试验区,以水循环为主要研究对象,利用航空遥感、卫星遥感、地面雷达、水文气象观测、通量观测、生态监测等相关设备,开展航空、卫星和地面配合的大型观测试验,精细观测干旱区内陆河流域高山冰雪和冻土带、山区水源涵养林带、中游人工绿洲及天然荒漠绿洲带的水循环和生态过程的各个分量。

(2) 以航空遥感和桥梁,通过高精度的真实性验证,发展尺度转换方法,改善从卫星遥感资料反演和间接估计水循环各分量及与之密切联系的生态和其他地表过程分量的模型和算法。

(3) 发展流域尺度的陆面/水文数据同化系统,集成观测与模拟结果,生成高分辨率的、时空一致性的高质量数据集;进一步发展能够实时融合多源遥感观测的数据同化系统,实现卫星遥感对流域水文与生态过程的动态监测。

(4) 建立一个开放的试验场所和一套完全共享的多尺度综合数据集。

3 观测试验内容

黑河流域遥感—地面观测同步试验由3个试验,包括寒区水文试验、森林水文试验和干旱区水文试验,以及一个集成研究,即模拟平台和数据平台建设组成。

3.1 上游寒区水文试验

在寒区水文试验区开展微波辐射计、激光雷达、高光谱航空遥感试验。利用机载多波段微波辐射计获取雪深、地表冻融状况和土壤水分;利用机载激光雷达测量雪深和地表粗糙度;从高光谱遥感提取雪盖面积、雪反射率、雪粒径及试验区地表覆盖类型。以航空遥感和桥梁、以地面真实性检验为标准,重点

研究卫星数据反演雪水当量和土壤冻融的方法和精度。选择典型小流域同步开展双偏振多普勒雷达降水观测,地基微波辐射计观测,建立寒区水文径流场,加密观测寒区水文过程,定点测量积雪和冻土的各种物理属性和水热变化特征。获取同期的雷达、被动微波、可见光近红外和热红外卫星遥感数据,研究多尺度数据在空间和时间尺度上的转换机制。构建用于发展、改进和验证寒区陆面过程模型和分布式水文模型所需的数据集。

3.2 森林水文试验

在森林水文试验区开展高光谱、多角度热红外、激光雷达航空遥感试验。从高光谱遥感提取生物物理参数及植被类型;利用多角度热红外遥感器,获取森林、灌丛和草地的观测数据,反演地表和冠层温度;利用激光雷达测量植被的三维结构,并估算生态系统生产力。利用以上观测/反演量提高对森林水文的重要分量——蒸散发、截留、树干径流、透过流的估算精度。获取同期的可见光近红外和热红外卫星遥感数据及雷达降雨观测数据。选择重点小流域加密观测森林水文和生态过程。构建用于发展、改进和验证森林水文模型和生态模型所需的数据集。

3.3 中游干旱区水文试验

在干旱区水文试验区开展高光谱、多角度热红外、激光雷达、微波辐射计航空遥感试验。从高光谱遥感提取生物物理参数及地表覆盖类型;利用多角度热红外遥感资料反演地表和冠层温度;利用激光雷达测量植被的三维结构和粗糙度;利用微波辐射计观测土壤水分。获取同期的各类卫星遥感数据及雷达降雨观测数据。配合航空遥感试验开展地面同步观测试验。以临泽内陆河流域综合研究站和张掖国家气候观象台为依托,选择中游典型生态系统样带或样区,开展植被和土壤相关参数的地面加密观测试验。改善从航空遥感和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。

3.4 模拟平台和数据平台

以现代陆面过程模型和水文水资源模型(包括地下水动态模型)为骨架,构建“大气—水文—生态”综合模拟模型平台。发展流域尺度的陆面/水文数据同化系统,集成观测与模拟结果,生成全流域空间分辨率为1 km、时间分辨率为1小时的同化数据集。进一步发展能够实时融合多源遥感观测的数据同化系统,实现卫星遥感对流域水文与生态过程的动态监测。在“数字黑河”基础上,建立黑河遥感

试验信息系统,发布原始试验数据、各级数据产品及同化数据。

4 试验设计及观测系统布置

4.1 观测变量及其遥感与地面观测方法

从发展流域集成模型的角度,拟将观测的变量划分为 5 大类,分别是水文与生态变量、驱动数据、植被参数、土壤参数和空气动力参数,在参考现有陆面过程模型和水文模型的数据需求的基础上,制定了观测方案。对于传统上可用遥感观测或估算的水循环分量,如蒸散发、雪水当量、雪盖面积、土壤水分等,将立足于利用新型的传感器进一步提高其观测或反演精度;对于传统上被忽略的水文分量,如林冠截留、树干径流等,将尝试利用激光雷达等新兴观测手段获取更详尽的相关参数,以提高对这些水文分量的估计精度。陆面过程和分布式水文模型中的部

分参数也将利用遥感手段观测。对于遥感无法直接测量也难以间接估计的变量和参数,将直接使用地面观测手段。表 1~5 简要说明了水文变量及其它陆面过程变量、模型驱动变量、植被参数、土壤参数和空气动力参数的观测方案,及对本次试验中航空遥感、卫星遥感或地基遥感分辨率的需求以及遥感观测的精度。

4.2 试验区 and 加密观测区

选择我国第二大内陆河流域黑河流域为试验区,面积约 12.87 万 km²,位于 97°24'~102°10'E, 37°41'~42°42'N,包括高山冰雪带、森林草原带、平原绿洲带及戈壁荒漠带等不同的景观类型。黑河流域是我国内陆河流域研究的基地,具有良好的研究基础、完备的观测系统和丰富的数据积累。

航空—卫星—地面同步试验将在 4 个尺度上展开,在不同尺度上将采用不同的观测策略,分别获取

表 1 水文变量与其他陆面过程变量

Table 1 Hydrological and other land surface variables

变量	地面观测方法	遥感观测方法	遥感分辨率需求		遥观测精度
			空间	时间	
降水	雨量桶	双偏振多普勒雷达	250 m	10 min	80%
蒸散发	涡动、微气象、Lysimeter	可见光/近红外、热红外、激光雷达 ^①	5~100 m	逐日	80%
径流	径流场、水文断面	N/A			
灌溉	水文断面	N/A			
地下水	地下水位观测井	重力,如 GRACE ^②			
土壤水分	TDR、中子仪、烘干称重	微波辐射计、雷达	10~500 m	2次/天	0.06 m ³ /m ³
土壤含冰量	烘干称重、TDR	N/A			
凝结水	Lysimeter	N/A			
地表温度	红外温度计	热红外	5~100 m	2次/天	1~2 K
植被冠层温度	红外温度计	热红外	5~100 m	2次/天	2~4 K
土壤温度(廓线)	温度探头	N/A			
雪深	量雪尺	微波辐射计、雷达	10~100 m	逐日	5 cm
雪密度	体积量雪器	N/A			
雪粒径	显微镜	高光谱	5~30 m	数日	80%
雪表面温度	红外温度计	热红外	10~100 m	2次/天	1~2 K
雪层温度	温度探头	N/A			
雪湿度	介电常数法	微波辐射计、雷达	10~100 m	逐日	70%
雪面凝结	Lysimeter	N/A			
雪面升华	Lysimeter	N/A			
植被冠层截留	林冠截留场	可见光/近红外、激光雷达 ^③	5~30 m	数日	70%
枯枝落叶/苔藓层截留	烘干称重法	N/A			
透过降水	雨量桶	N/A			
树干径流	树干径流场	可见光/近红外、激光雷达 ^③	5~30 m	数日	70%
植被含水量	烘干称重法	高光谱	5~30 m	数日	70%
生物量	收割法	可见光/近红外、热红外、激光雷达 ^④	5~100 m	数日	80%
反照率	反照率表、辐射表	可见光/近红外	5~100 m	数日	90%
发射率	热红外波谱仪	热红外	5~100 m	数日	90%

注:① 辅助提供蒸散发估算所需参数;② 目前只适用于大尺度,在本项目中不开展这一方面研究;③ 提供相关参数;④ 辅助提供生态系统生产力估算所需参数

表2 模型驱动变量
Table 2 Forcing variables

变量	地面观测方法	遥感观测方法	遥感分辨率需求		遥感观测精度
			空间	时间	
降水	雨量桶	双偏振多普勒雷达	250 m	10 min	80%
气温	自动气象站	N/A			
大气压	自动气象站	N/A			
比湿	自动气象站	N/A			
风速	自动气象站	N/A			
风向	自动气象站	N/A			
太阳辐射可见光部分直射分量 ^①	辐射表	可见光/近红外	10~100 m	2次/天	90%
太阳辐射可见光部分漫射分量	辐射表	可见光/近红外	10~100 m	2次/天	90%
太阳辐射近红外部分直射分量	辐射表	可见光/近红外	10~100 m	2次/天	90%
太阳辐射近红外部分漫射分量	辐射表	可见光/近红外	10~100 m	2次/天	90%
长波向下辐射	辐射表	热红外	10~100 m	2次/天	90%

注:① 观测试验加强期中利用所有可用遥感资料和地面资料计算数日辐射驱动量

表3 植被参数
Table 3 Vegetation parameters

参数	地面观测方法	遥感观测方法	遥感分辨率需求		遥感观测精度
			空间	时间	
植被类型	实地调查	可见光/近红外	5~100 m		85%
冠顶高度	测高仪、Hemi View 林地冠层数字分析系统	激光雷达	1~5 m	逐旬至月	20 cm
主干高度	测高仪、Hemi View 林地冠层数字分析系统	激光雷达	1~5 m	逐旬至月	20 cm
植被覆盖度	照像法、目视法	可见光/近红外	5~30 m	逐旬	85%
叶倾角分布	鱼眼照相法、LAI-2000	可见光/近红外	5~30 m	逐旬	80%
叶宽	量尺	N/A			
叶长	量尺	N/A			
根深	壕沟法、全根法	N/A			
根密度	方块取根法、切根器取样	N/A			
冠层反射率(可见光)	光谱仪	可见光	5~100 m	逐旬	90%
冠层反射率(近红外)	光谱仪	近红外	5~100 m	逐旬	90%
冠层透过率(可见光)	光谱仪	可见光	5~100 m	逐旬	90%
冠层透过率(近红外)	光谱仪	近红外	5~100 m	逐旬	90%
光合作用有效能量比例	光合有效辐射表	可见光	5~100 m	逐旬	80%
叶面积指数	LAI-2000、TRAC 和 LI-3100	可见光/近红外、激光雷达	5~100 m	逐旬	80%
茎面积指数	LAI-2000、TRAC 和 LI-3100	激光雷达	5~100 m	逐旬	80%
叶绿素含量	SPAD-502 叶绿素含量测量仪	可见光/近红外	5~100 m	逐旬	80%
光合作用参数	LI-6400 光合仪	N/A			

表4 土壤参数
Table 4 Soil parameters

参数	地面观测方法	遥感观测方法	遥感分辨率需求		遥感观测精度
			空间	时间	
土壤质地	沉降法、比重法、粒度分析仪	高光谱(探索性)	5~30 m	1次	65%
土壤深度	剖面	N/A			
土壤反射率(可见光)	光谱仪	可见光	5~100 m	逐旬	85%
土壤反射率(近红外)	光谱仪	近红外	5~100 m	逐旬	85%
有机质含量	干烧法、比色法	高光谱(探索性)	5~30 m	1次	80%
体密度	环刀法	N/A			
土壤比重	比重计	N/A			
饱和土壤水势	土柱法、压力排水法	N/A			
饱和土壤导水率	入渗仪	N/A			
土壤孔隙率	环刀法	N/A			
导热系数	热流计法	N/A			
热容	量热法、热脉冲法	N/A			
土壤介电常数	网络分析仪	微波辐射计、雷达	10~100 m	逐日	80%
几何粗糙度	粗糙度板	N/A			

表 5 空气动力参数
Table 5 Aerodynamic parameters

参数	地面观测方法	遥感观测方法	遥感分辨率需求		遥感观测精度
			空间	时间	
动力粗糙度	梯度 + 涡动组合法	激光雷达、可见光/近红外	5 ~ 30 m	1 次/季	10 cm
热力粗糙度	梯度 + 涡动组合法	N/A			
零位移高度	梯度 + 涡动组合法	激光雷达、可见光/近红外	5 ~ 30 m	1 次/季	10 cm

卫星遥感,航空遥感和地面观测资料。

• 流域尺度:覆盖全流域,以卫星遥感为主要的观测手段。

• 重点试验区:综合考虑内陆河流域的主要水文过程,选择 3 个具有代表性的重点试验区开展开展航空—卫星—地面同步观测,分别是上游寒区水文试验区、森林水文试验区和中游干旱区水文试验区(图 1)。

• 加密观测区:为重点试验区内的一些代表性小流域或灌区,除航空—卫星—地面同步观测外,将对无法从遥感获取的其他水文、生态和大气状态变量也开展系统的加密观测。

• 观测小区:开展地面同步试验和加密观测,在部分观测小区内,将设立长期运行的通量站、气象站或水文站。

4.2.1 重点试验区

上游寒区水文试验区。选定为黑河上游东支的八宝河子流域,面积约 2 452 km²;这里冬季积雪稳定,冻土发育,适合于寒区水文学研究。

森林水文试验区。包括大野口、海潮坝等一系列山前子流域,在景观类型上涵盖了冰川、积雪、多年冻土、高寒草原和森林。该试验区的主要观测对象为森林水文过程。

中游干旱区水文试验区。该区主要包括张掖、临泽、高台绿洲,在这一试验区内,以黑河干流莺落峡和正义峡两个水文站为地表水输入和输出控制点,形成一个完整的水循环系统。该试验区的主要观测对象为干旱区水文和生态水文过程。

4.2.2 加密观测区

上游寒区水文试验区内的加密观测区包括(图 2):

(1) 冰沟流域:流域面积 30.28 km²,海拔 3 450 ~ 4 400 m,平均为 3 920 m,平均宽度 3.59 km,季节性积雪厚度约为 0.5 m,最深达 0.8 ~ 1.0 m,多年冻土下界可能在 3 400 m 左右。主要开展积雪遥感同步观测,长期观测目标为积雪水文和冻土水文。

(2) 阿柔乡:位于八宝河流域中部河谷地带,海

拔约 3 000 m,地势开阔平坦。主要开展积雪和地表冻融状态的遥感—地面同步观测,并长期观测季节冻土的水热变化特征。

(3) 扁都口:民乐县扁都口以北的平坦开阔地,平均海拔 2 800 m,观测瞬时积雪及地表冻融状态,验证被动微波地表冻融分类算法。

森林水文试验的加密观测区选择大野口流域和排露沟小流域(图 3)。

(1) 大野口流域是一个独立水系,大野口水库以上汇水面积为 70 km²,主要树种为青海云杉。

(2) 排露沟流域海拔 2 600 ~ 3 800 m,面积 2.73 km²,年平均气温 0.7℃ 年平均降水量 435.5 mm,观测基础较好,祁连山水源涵养林研究院在该流域内布设了森林水文观测系统及大量水文和植被观测样地。

这 2 个加密观测区的遥感—地面同步观测及长期观测目标都围绕蒸散发、截留、树干径流、透过流等森林水文的核心过程展开。

中游干旱区水文试验区是由人工绿洲、绿洲—荒漠过渡带、荒漠草原、荒漠和水域共同组成的荒漠—绿洲景观系统。共包括 6 个加密观测区(图 4),由南向北分别为:

(1) 花寨子:位于张掖绿洲南缘,景观为荒漠草原。主要开展蒸散发和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。

(2) 盈科绿洲:位于张掖市以南 8 km,是典型的农田生态系统,主要作物为种植玉米、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) 张掖市^①:开展城市周边土地利用状况调查和大气光学特性观测。

(4) 观象台:位于张掖国家气候观象台周边,景

① 为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”与国家重点基础研究发展计划(973 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”联合开展的黑河综合遥感联合试验新增加密观测区。

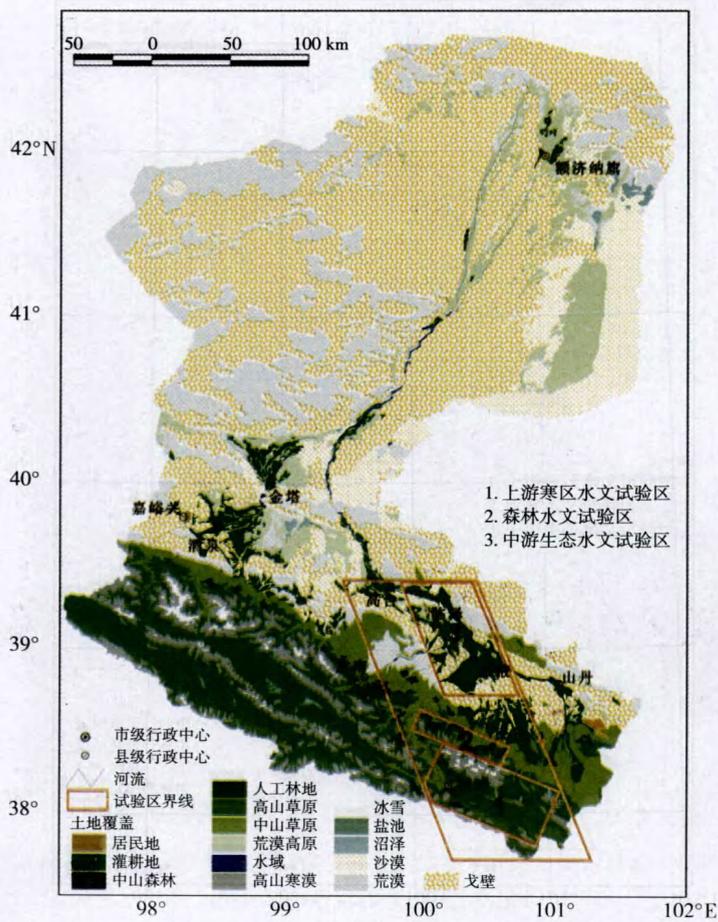


图1 黑河流域遥感—地面观测同步试验重点试验区布置图(背景为黑河流域景观图)

Fig.1 Heihe River Basin and the location of three key experiment areas

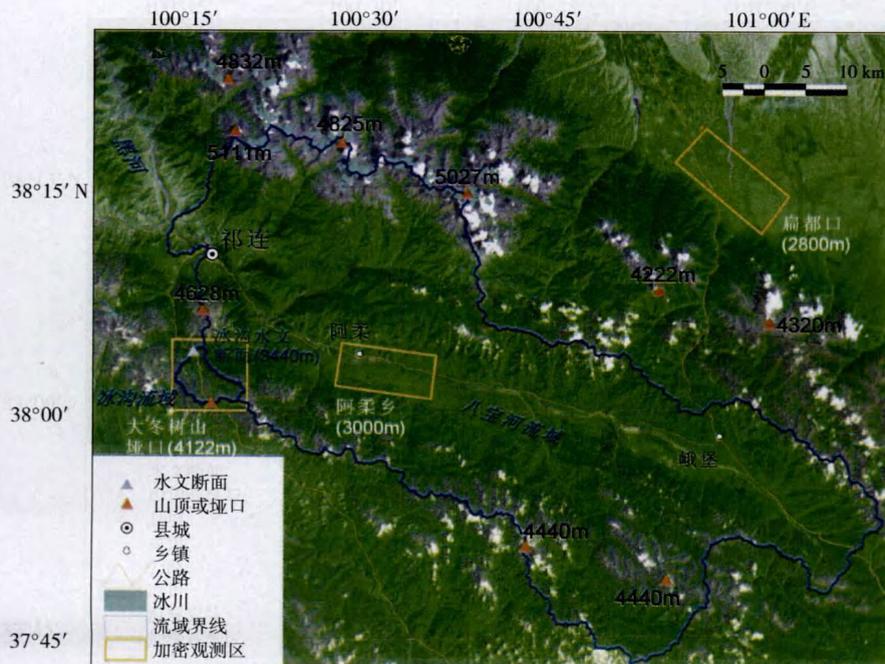


图2 上游寒区水文试验区(背景为 TM 影像)

Fig.2 Cold region experiment area

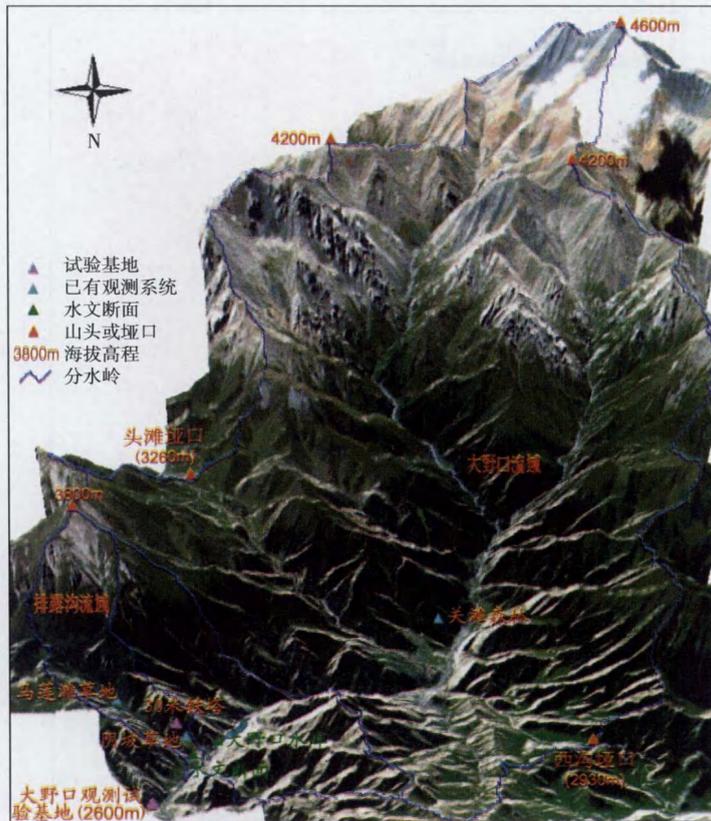


图 3 森林水文试验区(背景为叠加在 DEM 上的 QuickBird 影像)

Fig. 3 Forest experiment area

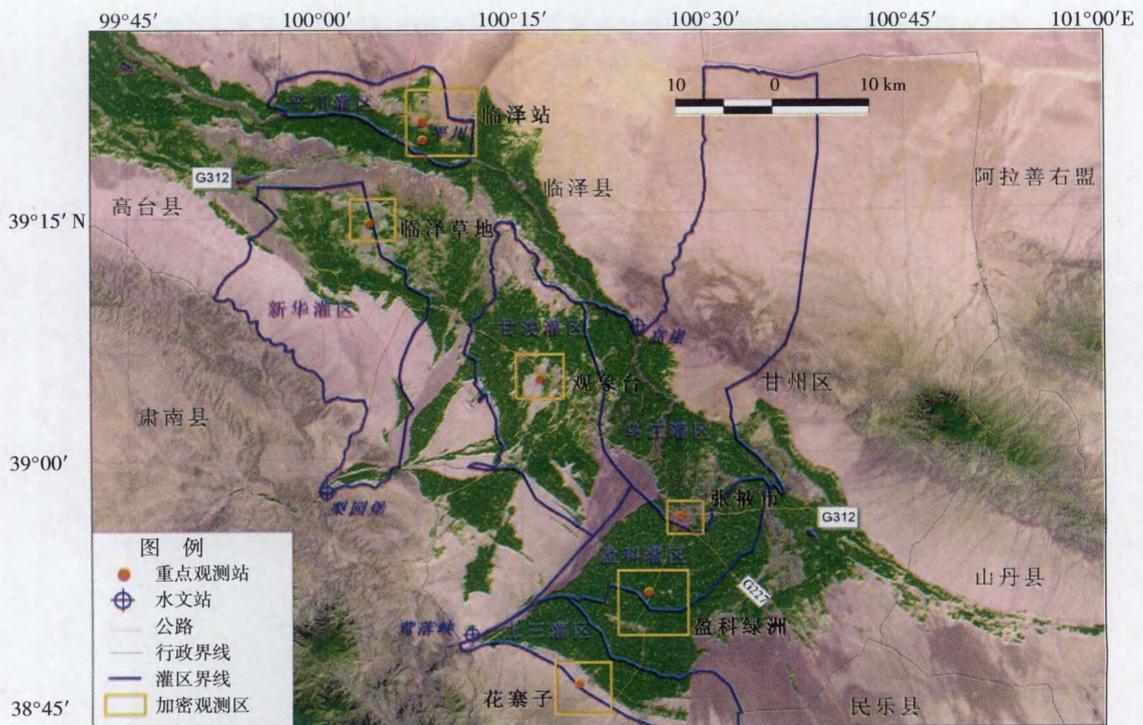


图 4 中游干旱区水文试验区(背景为 TM 影像)

Fig. 4 Arid region experiment area

观为砾质戈壁。重点依赖于观象台的各种先进设备开展地表能量平衡观测。

(5) 临泽草地:位于兰州大学草地农业科技学院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。

(6) 临泽站: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,重点观测对象是蒸散发和凝结水。

4.3 试验期

黑河流域遥感—地面观测同步试验共分为4个主要阶段。

(1) 试验准备期:2007年7月1日~10月31日,完成遥感和地面观测方案的详细设计,建设观测基地,设置地面观测场,建立通量和气象水文观测网络,标定观测仪器,集成已有观测资源,预订卫星遥感数据,落实航空遥感仪器和搭载平台。

(2) 预试验期:2007年夏季(7~10月)在森林水文试验区和中游干旱区水文试验区,冬季(10~12月)在上游寒区水文试验区开展预试验。按照地面试验方案开展卫星遥感同步试验,模拟航空遥感同步试验,开展其他观测项目的测量工作,测试各种观测设备,特别是遥感传感器,培训观测人员。在以上基础上,改进和细化地面同步测量的设计方案和测量方法,完善航空遥感试验方案。

(3) 加强试验期:2008年冬季(3~4月)在上游寒区水文试验区开展航空—卫星—地面同步试验,夏季(5~7月)在森林水文试验区和中游干旱区水文试验区开展航空—卫星—地面同步试验,按照试验方案全面获取观测资料。

(4) 持续观测期:2008年7月~2009年12月31日,在加强试验期之后,主要依靠地面气象水文观测网等自动台站持续获取2个完整年度的资料,期间根据分析结果开展补充测量和若干次卫星同步试验。

数据整理、分析和数据库建设贯穿于整个试验期,重点是在加强试验期之后。

4.4 地面观测系统

4.4.1 地面同步观测及真实性检验方案

表1~5所列的各种变量和参数都在各个加密观测区开展密集的同步观测,观测方法已在表中做

概要说明,这里介绍针对遥感反演变量和参数的空间采样、时间采样、真实性检验及尺度转换方案。

在参考多种空间采样方案^[18-21]的基础上,设计了加密观测区—观测小区—采样单元3级嵌套式采样方案,对应于从甚高分辨率的航空遥感到中等分辨率卫星遥感的多种尺度。

(1) 加密观测区:详细见4.2.2节,每个区内至少有一个自动气象站或通量站,同时在加强试验期布设多种地基遥感设备,开展数小时至多天的连续观测,获取高时间分辨率的连续数据。这些连续观测不仅是重要的验证资料,也是实现时间尺度扩展的重要依据。

(2) 观测小区:在每个加密观测区,根据观测目标及植被、土壤和地形的分异,选择多个样区。每个样区尽可能均值。小样区大小为 $3 \times 3 \sim 12 \times 12$ 个30 m左右分辨率的像元,对应于多数高分辨率卫星传感器,如TM和EnviSat ASAR等,同时,在小样区内可嵌套多个5 m左右分辨率的像元,对应于航空遥感和甚高分辨率卫星传感器;大样区布置在相对更为均值的加密观测区,如临泽草地,大小为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$,对应于中等分辨率遥感传感器,如MODIS等,同时,其内嵌套若干个小样区(图5)。对于非成像且分辨率较粗的微波辐射计航空遥感观测,难以布置规则的网格状样方,因此采取样带采样方式,方案是沿垂直航线方向,设置多个长约1~2.5 km的样带,样带间格约等于微波辐射计的分辨率,在每条样带上每隔50~100 m进行地面同步测量。

(3) 采样单元:是具体采样的位置,对应于一个像元,在采样单元内根据测量目标采用单点测量、地毯式测量或随机密集采样。试验中拟使用的可见光/近红外和热红外波段的机载传感器空间分辨率在1~8 m,经过处理后的数据产品空间分辨率在5 m以内,因此地面试验获取的验证数据应该代表5 m左右的像元观测值。在地面同步实验中,测量反射率/反照率、植被结构参数、生物物理参数和生物化学参数时应尽量选用均质的地表,随机测量多组数据;在测量地表温度和组分温度时,最好采用热像仪进行成像测量,如果用非成像的辐射计或接触式温度计,应该在5 m的像元内测量尽可能多的点,并采用巡回检测方法^[22];在土壤水分的测量中,应该进行密集采样,然后利用统计方法获取像元尺度内的平均值,这样才能使地面观测的尺度与航空遥感观测尺度匹配。

点测量经尺度上推后,用于验证像元尺度上的

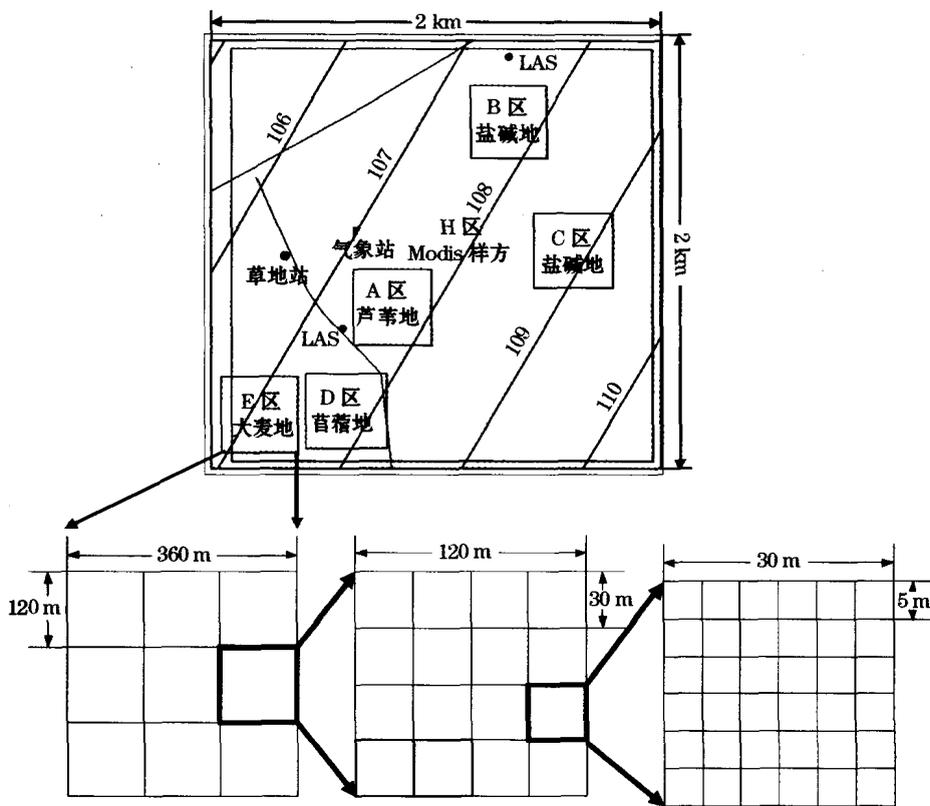


图 5 采样方案示意图

Fig. 5 General scheme of the sampling strategy

遥感观测。尺度上推方案根据地的异质性和结构特征来设计,对于非常均值的地表,采用多个点观测的简单算术平均来验证像元观测值^[23];对于异质性强但空间结构较为规则的地表,如荒漠,则将植被覆盖度作为尺度上推的一个核心因子,按不同类型(如植被和裸露地表)的面积比例加权平均获得像元尺度上对应的估计值^[21];对于空间异质性强,且没有明显结构特征的地表,则采用地统计方法将点观测优化插值为可与遥感观测相互比较的格网化数据^[24]。无论是哪种尺度上推方案,航空遥感的甚高分辨率都可作为一个中间桥梁^[22],即首先用点观测标定/验证甚高分辨率的航空像元,再将其上推到较粗的卫星遥感像元。

时间采样的策略是:对于时间异质性很强的参数,如蒸散发、光合作用、土壤温度、植被冠层温度、地物波谱等,尽量安排在飞机过境时刻同步观测或采用自动仪器连续观测。对于数小时内相对稳定的参数,如土壤湿度,可以考虑接近飞机过境前后时测量。对于数天内相对稳定的参数,如叶绿素、覆盖度、叶面积指数、植被含水量、森林蓄积量/生物量、

树高、粗糙度等,可以考虑在飞行期间及飞行间歇期内观测。对于时间异质性很强的变量,由于一方面要保证空间上足够的采样密度;另一方面又受限于有限的仪器和人力,不可能做到所有测量都完全同步,因此,需要利用自动气象站和通量塔以及加密的自动设备开展连续观测,发展时间尺度推绎方法。

大气校正是标定和验证遥感反演产品,实现真实性检验的重要步骤,因此大气光学特性的观测十分关键。在黑河流域遥感—地面观测同步试验中,在各加密观测区都将开展探空及分光光度计观测,同步获得水汽廓线、温度廓线、气溶胶分布等大气辐射传输模型所需参数,用于航空和卫星遥感资料的大气校正。

地基遥感观测也是真实性检验的重要组成部分,在各加密观测区布置了多种地基遥感设备,包括地基微波辐射计、光谱仪、热红外波谱仪、热成像仪和手持式红外辐射计。地基遥感观测一方面可直接用于标定航空和卫星遥感观测,另一方面也可应用于遥感模型的验证。

表6 黑河流域遥感—地面观测同步试验气象水文重点站和重点加强站

Table 6 Super stations and super stations with flux tower

序号	站名	位置	观测项目	景观类型
1	阿柔冻融观测站	100°27'E 38°03'N 3 033 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、降水; 四分量辐射; 土壤剖面: 温度、水分、水势(10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm, 120 cm 和 160 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm); 涡动相关; 大孔径闪 烁仪	高山草原
2	冰沟寒区水文气象观 测站	100°13'E 38°04'N 3 407 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、降水; 四分量辐射; 土壤剖面: 温度和水分(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm 和 120 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm)	高山草甸(河滩 地)
3	大冬树山垭口积雪观 测站	100°14'E 38°01'N 4 101 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、雨雪量计; 雪深; 四 分量辐射; 土壤剖面: 温度和水分(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm 和 120 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm)	高山寒漠
4	野牛沟寒区水文站	99°33'E 38°28'N 3 320 m	大气: 温湿梯度观测(1.5 m & 2.5 m)、风速风向、气压、降水、地 表温度; 净辐射和总辐射; 二氧化碳(3.5 m); 土壤剖面: 温度和 水分(20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm) 及土壤热通 量(5 cm)	高山草原
5	大野口关滩森林站	100°15'E 38°32'N 2 835 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m & 24 m)、气压、雨雪量计; 雪深; 光合有效辐射; 四分量辐射(19.75 m & 1.68 m); 冠顶热 红外温度; 土壤剖面: 温度和水分(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm 和 120 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm); 涡动相关; 树干液 流(3 个); 透过滤; 树干径流; 冻结管	森林
6	大野口马莲滩草地站	100°18'E 38°33'N 2 817 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、降水; 四分量辐射; 土壤剖面: 温度和水分(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm 和 120 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm)	草地(以马莲为 主)
7	大野口排露沟林前草 地站	100°17'E 38°34'N 2 731 m	大气: 温湿梯度观测(1.5 m & 3 m)、风速(2.2 m & 3.7 m)、风 向、气压、降水; 净辐射和总辐射; 二氧化碳(2.8 m & 3.5 m); 土 壤剖面: 温度(20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm)、水 分(10 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, 120 cm, 160 cm)、土壤张力、土 壤热通量(5 cm, 3 个); 树干液流(4 个)	草地
8	花寨子荒漠站 ^①	100°19'E 38°46'N 1 726 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、降水; 四分量辐射; 地表热红外温度; 土壤剖面: 温度和水分(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm 和 160 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 10 cm)	荒漠草原
9	盈科灌区绿洲站	100°25'E 38°51'N 1 519 m	大气: 风温湿梯度观测(3 m & 10 m)、气压、降水、四分量辐射; 地表热红外温度; 土壤剖面: 温度和水分(10 cm, 20 cm, 40 cm、 80 cm, 120 cm 和 160 cm) 及土壤热通量(5 cm 和 15 cm); 涡动 相关	农田(玉米地)
10	张掖国家气候观象台	100°17'E 39°05'N 1 456 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m, 4 m, 10 m, 20 m, 30 m)、降水; 光合 有效辐; 四分量辐射; 地表热红外温度; 土壤剖面: 温度(5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 40 cm)、水分(10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm、 180 cm)、土壤热通量(3 层); 涡动相关	戈壁
11	临泽草地站	100°04'E 39°15'N 1 394 m	大气: 风温湿梯度观测(2 m & 10 m)、气压、降水; 四分量辐射; 地 表热红外温度; 土壤剖面: 温度(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm)、湿 度(10 cm)、土壤热通量(5 cm); 涡动相关; 大孔径闪烁仪	湿地、盐碱地
12	临泽内陆河流域综合 研究站	100°08'E 39°21'N 1 382 m	大气: 温湿梯度观测(1.5 m & 3 m)、风速(2.2 m & 3.7 m)、风 向、气压、降水; 净辐射和总辐射; 二氧化碳(2.8 m & 3.5 m); 土 壤剖面: 温度(20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm)、水 分(10 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, 120 cm, 160 cm)、土壤张力、土 壤热通量(5 cm, 3 个); 涡动相关 ^②	农田

注: ①为国家重点基础研究发展计划(973 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”援建; ②涡动相关通量塔位于临泽内陆河流域综合研究站附近五里墩(100°08'E, 39°20'N, 1 378 m)

并重点在花寨子到高崖水文站之间沿不同地下水埋深梯度,在 6 个地下水观测孔布设了水位自记仪器,同时利用当地的平原区观测孔,形成山前大埋深区、倾斜平原小埋深区、平原地下水渗出区、引灌地表水地下水循环区的连贯观测序列,观测频率达到每日一次。

4.5 航空遥感方案

4.5.1 传感器

针对寒区水文、森林水文和干旱区水文的试验目标,使用了 5 类机载遥感传感器,分别是微波辐射计、激光雷达、高光谱成像仪、热红外成像仪和多光谱 CCD 相机(表 7)。

表 7 机载遥感传感器
Table 7 Air borne remote sensing instruments

传感器	主要性能指标	分辨率(飞行高度 1500 m)	观测目标	研制单位
L 波段微波辐射计	中心频率 1.413 GHz;带宽 25 MHz;波束角 15°;入射角 35°;垂直与水平极化	120 ~ 600 m ^①	土壤水分、地表冻融、雪湿度	中国科学院东北地理与农业生态研究所
K 波段微波辐射计	中心频率 18.7 GHz;带宽 400 MHz;波束角 12°;垂直极化	100 ~ 400 m ^①	土壤水分、地表冻融、积雪深度、雪湿度	中国科学院东北地理与农业生态研究所
Ka 波段成像微波辐射计	中心频率 36.0 GHz;带宽 400 MHz;波束角 1.5°;垂直极化;扫描成像,扫描范围 ± 12°	39 m	积雪深度	中国科学院东北地理与农业生态研究所
激光雷达	型号:LiteMapper5600;频率:最大 100 KHz;高程精度:0.02 m;波型采样间隔:1 ns;激光束离散角:0.5 mrad;扫描角:± 22.5°;飞行高度:200 ~ 6 000 m	点云密度: > 4 点/m ^{2②}	冠层结构、生物量、DEM、积雪深度	德国 IGI 公司
可见光推帚式成像光谱仪 PHI-II	光谱范围:400 ~ 850 nm;通道数:124;空间像元数:652;光谱采样间隔:1.8 nm;光谱分辨率:≤ 5 nm;瞬时视场:0.7 mrad (穿轨),1.2 mrad (沿轨);总视场:> 24°	1.05 m	生物物理参数、生物化学参数、植被分类、反射率、反照率	中国科学院上海技术物理研究所
成像光谱仪 OMIS-II	光谱范围及通道数:0.46 ~ 1.1 mm 共 60 个通道,1.55 ~ 1.75 mm,2.08 ~ 2.35 mm,3.0 ~ 5.0 mm,8.0 ~ 12.5 mm;各 1 个通道;空间像元数:512;瞬时视场:3 mrad;总视场:73°	4.5 m	生物物理参数、生物化学参数、植被分类、反射率、反照率、地表温度	中国科学院上海技术物理研究所
短波推帚式成像光谱仪 SWPHI	光谱范围:1000 ~ 2500 nm;通道数:256/128;空间像元数:320;光谱采样间隔:6.25 nm;光谱分辨率:≤ 10 nm;瞬时视场:1.3 mrad (穿轨),1.0 mrad (沿轨);总视场:24°	1.95 m	雪粒径、反射率、反照率、植被含水量	中国科学院上海技术物理研究所
CCD 相机	4 个波段分别是 550、650 和 700 nm (带宽均为 40 nm) 及全色波段;1300 × 1038 像元;视场角 60°;记录 5 个角度,分别是前向 29°、20°、0°,后向 20°、29°	1.2 m	生物物理参数、生物化学参数、反射率、反照率	中科院遥感应用研究所、北京师范大学联合改装并研制软件
多角度热像仪	波长 8 ~ 12 mm;320 × 240 像元;视场角 80°;记录 7 个角度,分别是前向 40°、30°、20°、0°,后向 20°、30°、40°	7.86 m	地表温度、冠层温度、雪面温度、发射率、土壤水分	中科院遥感应用研究所改装并研制软件

注:① 高分辨率对应于飞行高度 350 m;② 对应于航高约 800 m

4.5.2 航空遥感区及观测目标

寒区水文、森林水文和干旱区水文试验区将各飞行 6 ~ 8 架次,根据试验目标,在 3 个试验区共选择了 7 个航空遥感飞行区(图 8),各区域的观测目标和搭载的遥感传感器见表 8。

4.6 卫星遥感

卫星遥感是黑河流域遥感—地面观测同步试验的重要组成部分,将在试验期通过免费获取、共享计划和商业购买等多种渠道,获取可见光/近红外、热红

外、主被动微波、激光雷达等丰富的卫星数据(表 9)。

5 小结

黑河流域遥感—地面观测同步试验,是一次在流域尺度上开展的,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。本文介绍了试验的科学背景、科学问题、研究目标以及观测试验方案和观测系统布置。

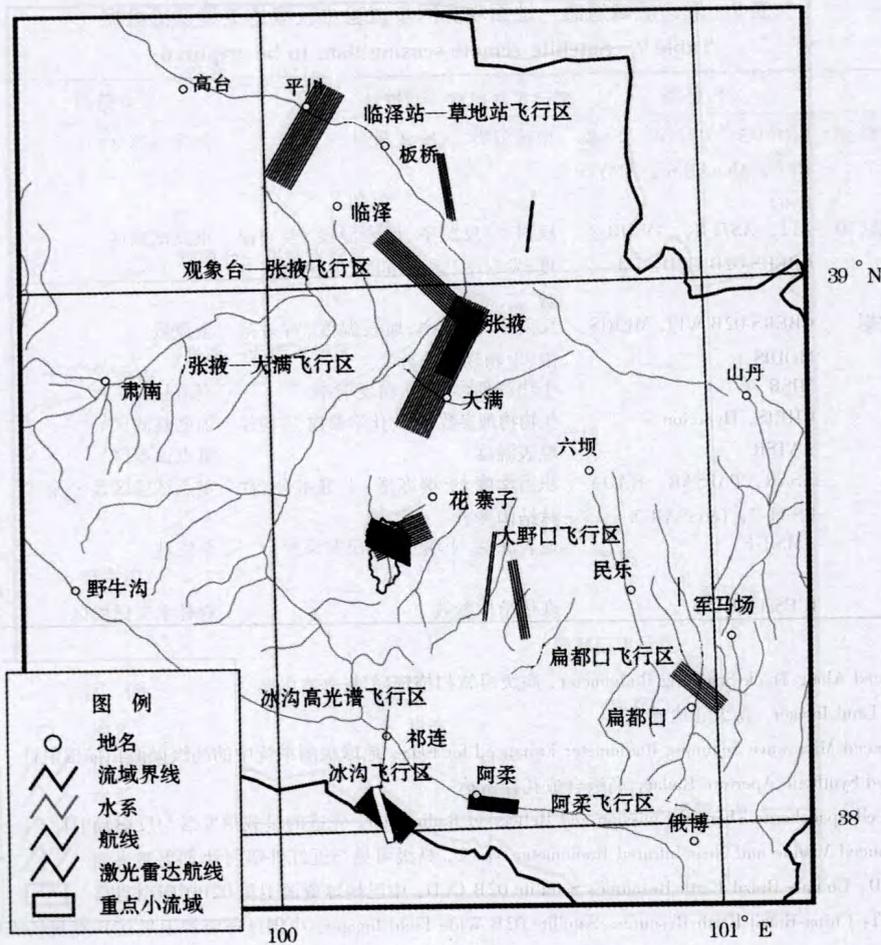


图8 航空遥感区布置图(白框内表示加密的航带)

Fig.8 Flight regions for airborne remote sensing

表8 航空遥感区布置及主要观测目标

Table 8 Flight regions and main observation items of airborne missions

编号	名称	所在试验区	航带	观测目标	搭载传感器
测区1	临泽站—草地站飞行区	干旱区水文	13 × 22 km	地表和冠层温度、土壤水分、蒸散发、反射率/反照率、生物物理参数	高光谱成像仪、多角度热红外成像仪、微波辐射计、CCD相机
测区2	观象台—张掖飞行区	干旱区水文	9 × 28 km	地表温度、反射率/反照率	高光谱成像仪、多角度热红外成像仪
测区3	张掖—大满—花寨子飞行区	干旱区水文	15 × 29 km	地表和冠层温度、土壤水分、蒸散发、反射率/反照率、作物结构参数、生物物理参数、生化参数、城市目标	高光谱成像仪、多角度热红外成像仪、激光雷达、微波辐射计、CCD相机
测区4	大野口飞行区	森林水文	13 × 12 km	森林结构参数、生物量、DEM、地表和冠层温度、反射率/反照率、生物物理参数	激光雷达、高光谱成像仪、多角度热红外成像仪
测区5	冰沟飞行区	寒区水文	18 × 12 km	积雪深度、雪湿度、雪粒径、反射率/反照率	微波辐射计、高光谱成像仪
测区6	阿柔飞行区	寒区水文	10 × 10 km	地表冻融、土壤水分、地表温度、蒸散发、反射率/反照率、生物物理参数	微波辐射计、多角度热红外成像仪、CCD相机
测区7	扁都口飞行区	寒区水文	8 × 12 km	地表冻融、土壤水分、反射率/反照率、生物物理参数	微波辐射计、多角度热红外成像仪、CCD相机

表 9 黑河流域遥感—地面观测同步试验中获取的卫星遥感数据

Table 9 Satellite remote sensing data to be acquired

类型	传感器	主要目标	获取范围	主要获取时间
极高分辨率多光谱数据 (1~5 m)	IKONOS, PRISM, Proba HRC, QuickBird, SPOT5 HRG	植被分类、试验区制图	加密观测区	试验准备期、加强试验期
高分辨率多光谱数据(10 ~120 m)	ALI, ASTER, AVNIR-2, CBERS-02B CCD, TM	反射率/反照率、地表温度、雪面温 度、发射率、雪盖范围、生物物理参 数	重点试验区	加强试验期
中等分辨率多光谱数据	CBERS-02B WFI, MERIS, MODIS	反射率/反照率、地表温度、雪盖范 围、生物物理参数	全流域	加强试验期、持续观 测期
多角度	MISR	生物物理参数、二向反射率	全流域	加强试验期
高光谱	CHRIS, Hyperion	生物物理参数、生物化学参数、雪粒径	加密观测区	预试验期、加强试验期
热红外	AATSR	地表温度	重点试验区	加强试验期
雷达	ASAR, PALSAR, RADA- RSAT-2, TerraSAR-X	积雪深度、土壤冻融、土壤水分、森 林结构参数	重点试验区及全流域	预试验期、加强试验 期
被动微波	AMSR-E	地表冻融、土壤水分、积雪深度	全流域	加强试验期、持续观 测期
激光雷达	ICESat GLASS	森林结构参数	森林水文试验区	加强试验期

注:传感器全称

AATSR: Advanced Along-Track Scanning Radiometer, 高级沿轨扫描辐射计

ALI: Advanced Land Imager, 高级陆地成像仪

AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer Enhanced for EOS, 地球观测系统中的高级微波扫描辐射计

ASAR: Advanced Synthetic Aperture Radar, 高级合成孔径雷达

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 先进的星载热发射与反射辐射计

AVNIR-2: Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2, 高级可见与近红外辐射计 2 型

CBERS-02B CCD: China - Brazil Earth Resources Satellite 02B CCD, 中巴地球资源卫星 02B CCD 相机

CBERS-02B WFI: China-Brazil Earth Resources Satellite 02B Wide Field Imager, 中巴地球资源卫星 02B 宽视场成像仪

CHRIS: Compact High Resolution Imaging Spectrometer, 紧密型高分辨率成像光谱仪

GLAS: the Geoscience Laser Altimeter System, 地球科学激光高度计系统

Hyperion: 地球观测卫星-1 上携带的高光谱成像仪

ICESat: Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite, 冰、云和陆地高程卫星

IKONOS: IKONOS 卫星, 一颗商业化极高分辨率地球观测卫星

MERIS: MEidium Resolution Imaging Spectrometer, 中分辨率光谱仪

MISR: Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, 多角度成像光谱仪

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪

PALSAR: Phased Array type L - band Synthetic Aperture Radar, 相控阵 L 波段合成孔径雷达

PRISM: Panchromatic Remote - sensing Instrument for Stereo Mapping, 立体制图全色遥感器

PROBA HRC: PROBA High Resolution Camera, PROBA 卫星高分辨率相机

QuickBird: QuickBird 卫星, 一颗商业化极高分辨率地球观测卫星

RADARSAT-2: 加拿大雷达卫星 2 号

SPOT5 HRG: SPOT5 High Resolution Geometry, SPOT5 卫星高分辨率几何装置

TerraSAR-X: 德国 X 波段合成孔径雷达卫星

TM: Thematic Mapper, 专题制图仪

这次试验将以精细观测水循环及与之密切联系的生态过程和其他陆面过程为主要对象,以加深对这些过程的观测、理解和模拟为目标。通过这次试验,将积累一套高分辨率的、时空一致性的高质量数据集,发展从卫星遥感资料反演和间接估计水循环各分量及其他地表过程分量的模型和算法,同时发

展流域尺度的陆面数据同化系统。这次试验,将可望加深我们对于流域尺度和更大尺度上的水循环机理和水资源转化规律的认识,同时,也将对管好水,用好水,实现流域水资源、土地资源与其他自然资源的可持续利用发挥潜在的重要价值。

致谢:感谢“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(简称黑河遥感)项目组所有成员对本文工作的支持。在项目论证及试验过程中,程国栋院士、吕达仁院士、李小文院士、王介民研究员、金亚秋教授、康尔泗研究员、张仁华研究员、丁永建研究员、施建成教授、梁顺林教授、冯仁国研究员、宋长青研究员、黄铁青研究员、赵涛博士等提出过宝贵建议,作者谨致谢忱。国家重点基础研究发展计划(973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”自2007年10月起,与“黑河遥感”项目联合开展“黑河综合遥感联合试验”,在航空遥感飞行架次、地基遥感仪器及卫星数据获取方面大力扩充了“黑河遥感”项目。

参考文献(References):

- [1] Zheng Du, Chen Shupeng. Progress and disciplinary frontiers of geographical research [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(5): 599-606. [郑度, 陈述彭. 地理学研究进展与前沿领域 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 599-606.]
- [2] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, et al. The First ISLSCP Field Experiment (FIFE) [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1988, 69(1): 22-27.
- [3] Sellers P, Hall F, Margolis H, et al. The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(9): 1 549-1 577.
- [4] Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, et al. HAPEX-SAHEL—A large-scale study of land-atmosphere interactions in the semiarid tropics [J]. *Annales Geophysicae*, 1994, 12(1): 53-64.
- [5] Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. *Plateau Meteorology*, 1994, 13(3): 225-236. [胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果 [J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 225-236.]
- [6] Wang Jiemin. Land surface process experiments and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 280-294. [王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/ TIPEX [J]. *高原气象*, 1999, 18(3): 280-294.]
- [7] Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1997, 2(3): 199-209. [吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用——科学问题与实验计划概述 [J]. *气候与环境研究*, 1997, 2(3): 199-209.]
- [8] Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Study on soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner-Mongolia semi-arid grassland [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 571-593. [吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用综合研究 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 571-593.]
- [9] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. NWC-ALIEX and its research advances [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 427-441. [张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆—气相互作用试验 NWC-ALIEX 及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 427-441.]
- [10] Cline D, Davis R E, Edelman W, et al. Cold Land Processed Field Experiment Plan [R]. 1999.
- [11] Cheng Guodong, Li Xin, Kang Ersi, et al. Integrated Model Development and Modeling Environment Building for Interdisciplinary Studies in the Heihe River Basin [R]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2008. [程国栋, 李新, 康尔泗, 等. 黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设 [R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008.]
- [12] Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan. Glacier-Snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 304. [康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 304.]
- [13] Wheaton H S, Sorooshian S, Sharma K D. Hydrological Modeling for Arid and Semi-Arid Areas [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 206.
- [14] Wang Hao, Ruan Benqing, Shen Dajun. Water Price Theories and Practices for Sustainable Development [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 278. [王浩, 阮本清, 沈大军. 面向可持续发展的水价理论与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 278.]
- [15] Atkins D E, Droegemeier K K, Feldman S I, et al. Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure: Report of the National Science Foundation [R]. NSF, 2003.
- [16] Neuse Prototype Hydrologic Observatory Design Team. Designing Hydrologic Observatories: A Paper Prototype of the Neuse Watershed [R]. Draft Version 4.0, 2004.
- [17] Huang Tieqing, Zhao Tao, Feng Renguo, et al. Project arrangement and primal progress in the second phase of the CAS Action Plan for West Development [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 888-895. [黄铁青, 赵涛, 冯仁国, 等. 中国科学院西部行动计划(二期)项目布局与初步进展 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 888-895.]
- [18] Liang S. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. Inc., 2004.
- [19] Justice C, Belward A, Morissette J, et al. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(17): 3 383-3 390.
- [20] Tian Y, Woodcock C E, Wang Y, et al. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: II. Sampling strategy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 431-441.
- [21] Hufkens K, Bogaert J, Dong Q H, et al. Impacts and uncertainties of upscaling of remote-sensing data validation for a semi-arid

- woodland [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72 (8): 1 490-1 505.
- [22] Zhang Renhua. *Experimental Remote Sensing Models and Its Field Foundation* [M]. Beijing: Science Press, 1996. [张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [23] Liang S, Fang H, Chen M, *et al.* Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83 (1): 149-162.
- [24] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resource Evaluation* [M]. New York: Oxford University Press, 1997:483.

Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Heihe River Basin: Scientific Objectives and Experiment Design

LI Xin¹, MA Mingguo¹, WANG Jian¹, LIU Qiang², CHE Tao¹,
HU Zeyong¹, XIAO Qing², LIU Qinhuo², SU Peixi¹, CHU Rongzhong¹,
JIN Rui¹, WANG Weizhen¹, RAN Youhua¹

(1. *Cold and Arid Regions 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*)

Abstract: This paper introduces the background, scientific questions, objectives, experiment design and configuration of a simultaneous airborne, satellite-borne and ground-based remote sensing experiment taking place in the Heihe River Basin, northwest China. The overall objective is to improve the observability, understanding, and predictability of hydrological and related ecological processes on catchment scale, to accumulate a comprehensive, interdisciplinary and multi-scale dataset for the development of watershed science and to promote the applicability of quantitative remote sensing in watershed science studies. The catchment scale water cycle and related ecological processes are observed by airborne remote sensing, satellite remote sensing, ground-based radar, network of hydrometeorological stations and flux towers, and ecological monitoring equipment in typical landscapes of a inland river basin, which varies from the alpine glacier-snow-permafrost zone, forest-steppe zone in high mountain area to the desert-oasis zone in middle reaches. Based on the observations, and particularly by using high-resolution airborne remote sensing to bridge the gap between satellite remote sensing and ground measurements, many models and algorithms for retrieving and estimating hydrological and ecological variables will be validated and potentially improved. Additionally, the development of scaling methods is put in high priority. The project is composed of three experiments, *i. e.*, cold region hydrology experiment, forest hydrology experiment and arid region hydrology experiment as well as an integrated study—development of an experiment information system and a catchment scale land data assimilation system to merge multi-source and multi-scale remote sensing data into land model. Five types of data are defined to be observed, including hydrological-ecological variables, atmospheric forcing variables, vegetation parameters, soil parameters and aerodynamic parameters.

Up to now, a very dense ground observation network has been established, which consists of automatic meteorological stations, flux towers, hydrological stations, rain gauges, rainfall radar, ground-based remote sensing instruments, other instruments and numerous experiment sites to collect ground data. Five types of the airborne remote sensor including microwave radiometer, lidar, hyperspectral imager, thermal imager and CCD camera are used to obtain plentiful airborne remote sensing data. Satellite remote sensing data covering the visible/near-infrared, thermal infrared, active and passive microwave bands are acquired.

Key words: Remote sensing experiment; Watershed science; Cold region hydrology; Arid region hydrology; Forest hydrology.