

李新,刘绍民,马明国,等.黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J].地球科学进展,2012,27(5):481-498. [Li Xin, Liu Shaomin, Ma Mingguo, et al. HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin [J]. Advances in Earth Science 2012, 27(5): 481-498.]

黑河流域生态—水文过程综合遥感 观测联合试验总体设计*

李新¹,刘绍民²,马明国¹,肖青³,柳钦火³,晋锐¹,车涛¹,王维真¹,
祁元¹,李弘毅¹,朱高峰¹,郭建文¹,冉有华¹,闻建光³,王树果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. 北京师范大学,北京 100875;
3. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室,北京 100101)

摘要:介绍了“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验”的背景、科学目标、试验组成和试验方案。试验的总体目标是显著提升对流域生态和水文过程的观测能力,建立国际领先的流域观测系统,提高遥感在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。由基础试验、专题试验、应用试验、产品与方法研究和信息系统组成。其中①基础试验:搭载微波辐射计、成像光谱仪、热像仪、激光雷达等航空遥感设备,开展一系列关键生态和水文参量的观测;发展遥感正向模型及反演和估算方法。形成覆盖全流域的水文气象综合观测网,为流域生态—水文模型研究提供更有代表性的模型参数、驱动数据及更高精度的验证数据。构建无线传感器网络,度量生态水文模型所需的若干关键的驱动、参数和模型状态的空间异质性。开展航空遥感定标和地基遥感试验。依托传感器网络,并辅之以地面同步和加密观测,开展遥感产品真实性检验。②专题试验:开展“非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测试验”,采用密集的涡动相关仪、大孔径闪烁仪与自动气象站的观测矩阵,为揭示地表蒸散发的空间异质性,实现非均匀下垫面地表蒸散发的尺度扩展,发展和验证蒸散发模型提供基础数据。③应用试验:在流域上、中、下游分别开展针对积雪和冻土水文、灌溉水平衡和作物生长、生态耗水的综合观测试验,将观测数据和遥感产品用于上游分布式水文模型、中游地表水—地下水—农作物生长耦合模型、下游生态耗水模型,通过实证研究提升遥感在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。加强试验将在2012年5月起按中游、上游、下游的顺序展开,全流域持续观测期为2013—2015年。在各类试验的支持下,开展全流域生态—水文关键参量遥感产品生产,发展尺度转换方法,建立多源遥感数据同化系统。

关键词:生态水文; 遥感试验; 流域观测系统; 黑河流域; 航空遥感; 水文气象; 无线传感器网络; 真实性检验

中图分类号: P334 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2012)05-0481-18

* 收稿日期: 2012-03-27; 修回日期: 2012-04-17.

* 基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划“黑河流域生态—水文过程集成研究”重点项目群“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测试验”(编号: 91125001, 91125002, 91125003, 91125004); 中国科学院西部行动计划三期项目“黑河流域生态—水文遥感产品生产算法研究与应用试验”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

1 背景

“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验”(以下简称“黑河生态水文遥感试验”),是围绕黑河流域生态—水文集成研究中的核心科学目标,以黑河流域已建立的观测系统以及 2007—2009 年开展的“黑河综合遥感联合试验”^[1-2]成果为基础,联合多学科、多机构、多项目的科研人员,将要在 2012—2015 年在黑河流域开展的一次卫星和航空遥感及地面观测互相配合的多尺度综合观测试验。试验的目标是显著提升对流域生态和水文过程的观测能力,建立国际领先的流域观测系统,提高遥感在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。

这次试验的科学背景主要来自于以下 2 个方面:

(1) 流域科学集成研究的需求

流域科学是地球系统科学在流域尺度上的实践^[3,4]。与国际上流域科学研究的热潮^[5-7]相契合,既着眼于地球系统科学综合研究的前沿,又同时瞄准我国西部环境建设和流域综合管理中的重大国家战略需求,国家自然科学基金委员会于 2010 年启动了“黑河流域生态—水文过程集成研究”重大研究计划(以下简称“黑河计划”)。这一研究计划,是在已经较有优势的内陆河流域集成研究的基础上,将我国流域科学研究推进到国际先进行列的重大举措,也将是一次地球系统科学研究方法的全面实践。

正如没有地球观测系统就不会有地球系统科学,发展流域观测系统、开展综合观测试验,也是发展流域科学的重要前提之一^[8]。以流域为单元建立遥感—地面一体化的观测系统是当前地球表层系统科学研究中的一个重要趋势。1980 年代开始实施的第一批陆面过程试验,主要以大陆或区域尺度作为试验区,偏重于地气相互作用研究,而没有将流域作为观测单元。水文科学虽然有试验流域的悠久传统^[5],但系统地综合观测的思路引入到流域水文与生态研究,以流域为单元建立遥感—地面一体化的观测平台,则始于近年来的一些流域信息基础设施(cyberinfrastructure)建设及生态水文观测计划。典型的流域观测计划有美国基金委发起的核心带观测平台(Critical Zone Observatory, CZO)、推进水文科学大学联盟(Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, CUAHSI)在美国自然环境迥异的不同区域设置的 11 个试验流域^[9]、水与环境研究系统网络(Water and Environment Re-

search Systems, WATERS)的流域基础建设项目^[10],以及欧洲的陆地环境观测平台(TERrestrial ENVironmental Observations, TERENO)^[11]等研究计划。在我国,“黑河计划”也提出了“建立联结观测、实验、模拟、情景分析以及决策支持等环节的以水为中心的生态—水文过程集成研究平台”的目标。

(2) “黑河综合遥感联合试验”延伸和扩展

2007—2009 年,在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”的支持下,我们联合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”,开展了“黑河综合遥感联合试验”(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)。“黑河综合遥感联合试验”获取了一套多尺度的航空—卫星遥感和地面同步观测数据集;在积雪参数提取、地表冻融微波遥感、森林结构参数的观测和遥感反演、蒸散发观测与遥感估算、土壤水分反演、生物物理参数和生物化学参数反演、水文气象观测、流域水文模拟和同化等方面取得了丰硕的成果^[1,2]。该试验的顺利完成,为在此基础上开展新一轮的试验研究做好了充分的科学储备并积累了宝贵的经验;但同时,也发现和遗留了以下问题,需要在新的试验中寻求解决方案。

缺乏能够从整体上分析流域水循环和生态过程的遥感产品。由于在流域尺度上,地表异质性更被凸现出来,加之内陆河流域景观类型多样,导致很多水循环和生态过程参量的变化剧烈,需要更高空间和时间分辨率、且时空分辨率相对一致的遥感产品,但现阶段的许多全球遥感产品还满足不了这种需求。如何利用多源卫星遥感数据,在航空遥感和地面观测的支持下,生产出可用于流域生态—水文研究的高质量、高时空分辨率遥感产品,是一个很大的科学挑战。

缺乏将遥感应用于生态—水文模型的成熟方法论。遥感在生态—水文建模中的作用主要表现为提供参数、验证模型,以及通过模型和观测的融合提高模型的模拟精度和可预报性。以上几个方面,只有利用遥感为模型提供参数的方法较为成熟,而对于利用遥感数据标定模型以及将遥感观测同化到模型中,还缺乏通行的方法。以至于对遥感究竟有多大用处,在多大程度上可以提高我们对生态—水文过程的认识,还存在着较大争议。

因此,如果说“黑河综合遥感联合试验”是一次数据获取试验,“黑河生态水文遥感试验”将是一次

方法论试验。更进一步,如果说“黑河综合遥感联合试验”是一次遥感试验加水文气象试验,“黑河生态水文遥感试验”将是一次遥感水文和遥感生态试验,是一次检验和实证遥感在流域生态—水文集成研究中应用能力的试验。

据此,我们也将这次试验的英文名称命名为HiWATER(Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research),名称中的Hi既代表了研究区黑河流域(Heihe),也表示Hello,寓意是大家的试验,是一次联合试验;同时,Hi更代表着High,寓意更高、更强。

2 科学问题与目标

2.1 科学问题

“黑河生态水文遥感试验”将以“黑河计划”的5个关键科学问题为导向建立综合观测试验平台,而其自身则重点关注流域生态—水文遥感观测和遥感应用中的方法论问题。这些问题包括:

(1) 遥感在多大程度上可以提高我们对于流域生态—水文过程的认识?哪些流域生态—水文过程可以通过遥感监测?其精度如何?如何通过观测试验发展更成熟的生态和水文遥感方法?

(2) 流域生态—水文集成研究中迫切需要的遥感产品有哪些?如何针对内陆河流域寒旱区的特点发展更高质量和更高分辨率的水循环和生态过程遥感产品?

(3) 地面观测如何更好地捕捉到观测对象在流域尺度上各自的时空变化特征?各种观测的最佳密度和尺度是怎样的?

(4) 如何设计针对遥感真实性检验的地面观测方案?如何针对异质地表,获得像元尺度“真值”以作为遥感真实性检验的标准?

(5) 生态—水文集成研究中有效利用遥感观测和遥感产品的途径有哪些?遥感产品在内陆河流域生态—水文集成研究的关键问题上可以发挥哪些作用?

(6) 如何集成遥感、地面观测和模型模拟,来更准确地估计水循环和生态过程的状态变量和通量?并提高流域水文和生态模拟与预报精度?

2.2 目标

试验的总体目标是:显著提升对流域生态和水文过程的观测能力,建立国际领先的流域观测系统,提高遥感在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。

在基础观测方面的具体目标包括:

(1) 建立支持流域科学研究和水资源综合管理的流域观测系统。

(2) 精细观测流域水循环各分量,获取水循环各分量的多尺度观测数据。

(3) 获取理解内陆河流域生态系统动态变化的多尺度观测数据。

在遥感产品和真实性检验方面的目标包括:

(4) 在综合试验基础上,制备一套支持流域—生态水文集成研究的高精度遥感产品。

(5) 开展真实性检验试验,验证遥感模型及遥感产品。

在应用方面的目标是:

(6) 将综合观测数据和遥感产品用于上游寒区分布式水文模型、中游地表水—地下水—农作物生长耦合模型、下游生态耗水模型,通过实证研究提升遥感在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。

3 试验总体方案

3.1 试验原则

“黑河生态水文遥感试验”在试验设计和试验执行中贯彻始终的原则包括:

- 科学目标导向 模型需求驱动。根据流域上、中、下游各自的集成模型的需求有的放矢地开展针对性的观测试验。

- 多尺度观测。即兼顾水文、生态、陆面过程观测的不同空间尺度和时间尺度,通过卫星—航空—地面配合,形成多尺度嵌套的观测方案。

- 尝试在观测试验中定量空间异质性。不再以均质地表为唯一观测对象,而应真正考虑异质地表,尽可能捕捉到各种变量和参数在不同空间尺度上的异质性,并度量其不确定性。

- 监测与控制试验并重。重视控制试验对理解核心的生态—水文过程的作用;短期加强观测与长期监测相结合;重点试验区加强观测和全流域监测相结合。

- 高度重视遥感传感器的定标和遥感真实性检验。针对拟开展的航空遥感的每个直接观测量,设计定标试验;针对航空和卫星遥感的反演和估计量,设计真实性检验试验。

- 密集但优化的地面观测。增加地面自动观测的空间密度和时间频率,重视采样设计,预先根据对所观测变量的空间和时间异质性的先验认识,设计

优化的观测网络。

- 全程质量控制。高度重视观测规范、人员培训、仪器比对与标定、技术巡检、数据汇交、数据处理等质量控制环节。

- 与信息系统高度集成。在正式试验开展之前,实现数据的自动采集、传输、发布等方面的数字化改造,以及对各种观测节点的远程控制。在观测试验过程中,同周期完成数据的质量控制,元数据和数据文档制备,以及大部分数据的入库。

- 联合试验。在组织方式上,实现多项目、多团队、多学科的联合试验。

3.2 试验组成

“黑河生态水文遥感试验”由基础试验、专题试验、应用试验、产品与方法研究和信息系统组成;同时,将与“黑河计划”项目及其他有关项目互相配合,开展联合观测,优势互补,共同形成流域观测系统,共同开展应用研究。

(1) 基础试验是以建设观测系统,提供基础数据,提升观测能力,发展观测方法为目标的观测试验。包括:

- 航空遥感试验
- 流域水文气象观测网
- 生态水文无线传感器网络
- 定标与真实性检验

(2) 专题试验是针对特定的水文或生态过程组织开展的综合性加强试验。目前,已设计了蒸散发专题试验,但在“黑河生态水文遥感试验”执行期间,还将根据特定的科学目标,组织开展土壤水分等其他专题试验。

- 非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测试验

(3) 应用试验的目标是针对流域上、中、下游各具特色的生态—水文过程,以综合观测试验为手段,检验和标定生态—水文模型,实证遥感产品和其他观测数据在流域生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。应用试验包括:

- 上游寒区遥感水文试验
- 中游灌区遥感支持下的灌溉优化配水试验
- 下游绿洲生态耗水尺度转换遥感试验

(4) 产品与方法研究。在基础试验、专题试验和应用试验的支持下,开展全流域生态—水文关键参量遥感产品生产,发展尺度转换方法,开展多源遥感数据同化研究。

- 水循环遥感产品
- 生态过程关键参量遥感产品

- 尺度转换方法

- 多源遥感数据同化

(5) “黑河生态水文遥感试验”信息系统。

- 卫星遥感数据收集
- 数据质量控制和自动综汇系统
- 数据发布与共享系统

在本文中,我们将在 4~6 节中分别介绍基础试验、专题试验和应用试验。产品与方法研究及信息系统,不是本文的重点,其细节可参考“黑河生态水文遥感试验”网站(<http://hiwater.westgis.ac.cn/>)。

3.3 主要观测变量和参数

从发展流域集成模型的角度,对拟观测的变量/参数划分为 3 个大类,分别是水文与生态变量(模型状态变量和通量)、驱动数据、参数(包括植被参数、土壤参数、地形参数、水文参数、空气动力参数等)。在参考现有的一些典型分布式水文模型、地下水模型、作物生长模型和动态植被模型、陆面过程模型,并对已应用在黑河流域的水文和生态模型进行分析的基础上,根据模型对数据的需求,制定了观测量表。其中,主要参考的分布式水文模型包括: DHSVM^[12], SWAT^[13] 和 GEOtop^[14]; 地下水模型以 MODFLOW 的各个版本为核心^[15]; 动态植被模型和作物生长模型以 LPJ-DGVM^[16], BIOME-BGC^[17] 和 WOFOST^[18] 为原型,其他植被模型具有和以上 2 个模型类似的结构; 陆面过程模型则主要参考 SiB2^[19], CoLM^[20] 和 CLM 3.0 及 4.0^[21]。

此外,在黑河流域已初步发展起了包含了冻土过程的分布式寒区水文模型^[22]以及中游的地表水—地下水—作物生长耦合模型^[23-25]。这些模型的数据需求也是我们制定试验方案的重要参考依据。

表 1 中列出了核心的观测量。关于模型所需的所有观测量的列表,可参考 <http://hiwater.westgis.ac.cn>。

3.4 试验区

“黑河生态水文遥感试验”以具有高寒与干旱区伴生的鲜明特征的黑河流域为试验区(图 1)。该流域位于 97.1~102.0°E 和 37.7~42.7°N 之间,是我国第二大内陆河流域,发源于祁连山中段,北至中蒙边境,东与石羊河流域接壤,西与疏勒河流域毗邻,总面积为 14.3 万 km²。

在黑河流域选择 3 个重点试验区开展加强和长期观测试验。重点试验区选择的原则是:一是要有代表性,应该具有鲜明的生态水文问题;二是具有较好的研究基础和观测设施,同时适合于开展航空遥感试验。

表 1 核心的水文和生态变量/参数的地面与遥感观测
Table 1 Key hydrological and ecological variables/parameters to be observed in HiWATER

变量/参数	目标	地面测量	航空遥感/测量 ^①	国内卫星	国外卫星或卫星计划 ^②
降水	流域水循环; 驱动变量	多普勒雷达、雨量计、雨雪量计、降水粒子滴谱仪		FY-3	TRMM, GPM
蒸散发	流域水循环; 生态耗水; 水分利用效率(生态水文耦合)	涡动相关仪、LAS、蒸渗仪、稳定同位素(分割蒸发和蒸腾)	可见光/近红外、热红外、激光雷达 ^③ 、航空 EC	FY-3 成像光谱仪、HJ-1	ASTER, MODIS, MERIS, AATSR
径流	流域水循环; 分布式水文模型	ADCP、径流场、水文断面、水文站、超声水位传感器	干涉 SAR、绿光激光雷达、多光谱		OSTM/Jason-2 Radar Altimeter, ENVISAT Radar Altimeter-2, TerraSAR-X, SWOT
地下水	流域水循环; 地表—地下水相 互作用	测井	P 波段 SAR、航空 TDEM		GOCE, GRACE, GRACE-1I
土壤水分与地表冻融	流域水循环; 冻土水文	TDR、宇宙射线土壤水分/积雪探测系统、探地雷达、烘干称重	L 波段微波辐射计、L 波段 SAR	FY-3 微波辐射计	SMAP, SMOS, ALOS PALSAR, Envisat ASAR, BIOMASS
雪深/雪水当量	流域水循环; 积雪水文	雪枕、snowfork、超声雪深传感器	K 和 Ka 波段微波辐射计、X 和 Ku 波段 SAR、激光雷达	FY-3 微波辐射计	SSM/I, CoReH ₂ O, SCLP
植被类型	分布式水文模型和生态模型所需参数	样带/样方调查	成像光谱仪、激光雷达	HJ-1, CBERS	Proba CHRIS, HYSPIRI, 其他高光谱卫星
土地利用和土地覆盖	分布式水文模型和生态模型所需参数; 人类活动影响评价	土地利用调查	多光谱、成像光谱仪、激光雷达	HJ-1, CBERS	TM, SPOT, MODIS, 其他多光谱卫星
种植结构	水文模型和生态模型所需参数; 灌溉管理	田间调查	成像光谱仪、激光雷达	HJ-1, CBERS	Proba CHRIS, HYSPIRI, 其他高光谱卫星
植被覆盖度	水文模型和生态模型所需参数	照像法、目视法	可见光/近红外	HJ-1, CBERS	TM, SPOT, MODIS, 其他多光谱卫星
叶面积指数	水文模型和生态模型所需参数; 生态系统动态	LAI-2000, TRAC, LI-3100 等	可见光/近红外 ^④ 、激光雷达、低频 SAR	HJ-1, CBERS	TM, SPOT, Proba CHRIS, MODIS, 其他多光谱卫星
植被结构参数(冠顶高度、冠幅等)	生态模型所需参数	测高仪、HemiView, 地基激光雷达	激光雷达		
生物量(NPP 和 NEP)	生态系统动态; 水分利用效率	涡动相关、地基激光雷达、收割法(生态水文耦合)	激光雷达、P 波段 SAR	HJ-1	DESDynI, BIOMASS, 其他高光谱卫星 其他激光雷达卫星
DEM	分布式水文模型和生态模型所需参数	差分 GPS	激光雷达、干涉 SAR		ALOS PRISM, ASTER 等立体像对数据

注: ①表中列举了可能的遥感观测手段, 但按目前计划 SAR、干涉 SAR 和绿光激光雷达等遥感手段将不在“黑河生态水文遥感试验”中实施。
②以近年在轨和即将实施的卫星计划为主, 其中 GPM、SWOT、GRACE-1I、SMAP、BIOMASS、CoReH₂O、SCLP、HYSPIRI、DESDynI 观测计划可望在 2012 年之后实施。
③辅助提供蒸散发估算所需参数。
④辅助提供生态系统生产力估算所需参数。

(1) 上游寒区试验区: 选择黑河主干流上游(10 009 km²) 及大野口流域(70 km²) 为重点试验区。在干流山区流域、子流域(八宝河流域)、小流域(葫芦沟和大野口) 3 个尺度上开展观测试验。

其中 核心观测区包括:

八宝河流域, 是黑河流域干流的上游子流域之一, 面积约 2 452 km²。植被覆盖以天然草地为主, 4 200 m 以上有常年积雪和永久冰川; 冻土现象相当发育。八宝河流域是结合遥感开展积雪水文和冻土水文研究的理想流域。

葫芦沟流域, 位于黑河流域上游西支。该流域

内分布有几乎所有的寒区典型下垫面类型。流域内已建立黑河上游生态水文试验研究站, 主要开展寒区水文、寒区生态和寒区生态水文研究工作。

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) 中游人工绿洲试验区: 在中游的人工绿洲—河岸生态系统—湿地—荒漠复合体内, 选择 2 个典型的区域——盈科灌区与大满灌区以及平川灌区作为核心观测区。

其中, 盈科与大满灌区位于黑河流域中游张掖市黑河主干道以东沿岸, 是流域中游人工绿洲区域

灌溉基础设施最完备的灌区,以河灌为主、井灌为辅。灌区内密布干、支和斗渠等各级灌溉渠系。

平川灌区位于黑河流域中游临泽县境内,以井灌为主、河灌为辅,主要特点是地表与地下水交换复杂,是开展地表地下水交换研究的理想区域。

(3) 下游天然绿洲试验区:在下游沙漠戈壁—额济纳旗胡杨林—戈壁—尾间湖区,选择额济纳旗核心绿洲至西北方向的乌兰图格嘎查为试验区,其中额济纳旗核心绿洲二道桥东至七道桥典型河岸林区域为核心观测区。下游额济纳旗属于极端干旱气候区,多年平均降水量不足 45 mm,多年平均潜在蒸发量为 3 755 mm,下游额济纳绿洲是天然的绿洲生态系统,其结构简单并极度脆弱,植被稀疏,以分布于河道两岸的乔木胡杨和灌木柽柳为主。

在以上 3 个重点试验区内,按不同的试验目标嵌套布置核心观测区、观测小区和观测(采样)单元,开展多尺度观测试验。更详细的信息可参考试验网站(<http://hiwater.westgis.ac.cn>)。

3.5 试验期

考虑到人力、设备和其他资源的配置,各研究区的有关试验将顺次展开。

(1) 准备期:2010 年 1 月至 2012 年 3 月。其中:

- 2010 年 12 月前,完成试验总体设计草案。
- 2011 年 1~12 月,在多方征询意见的基础上,完善试验设计。
- 2011 年 7 月至 2012 年 3 月,仪器调研、购置和测试;航空遥感传感器调研、租用和借用;预订卫星遥感数据。

(2) 中游加强试验期:2012 年 4~10 月。

- 2012 年 4~5 月,观测仪器野外比对与标定,野外观测设施布设。
- 2012 年 5 月 15~20 日,中游加强试验各种观测正式启动。
- 2012 年 5 月中旬~7 月下旬,中游航空遥感试验。
- 2012 年 6~9 月,非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测试验。
- 2012 年 4~9 月,中游应用试验与真实性检验试验。

(3) 上游加强试验期:2012 年 9 月至 2013 年 10 月。

- 2012 年夏季,航空遥感试验及针对土壤水分的地面加强试验。
- 2012 年 9 月,阿柔超级站建设,上游自动气

象站布设,传感器网络布设。

- 2012 年 10 月,上游加强试验正式启动。
 - 2012 年 10 月至 2013 年 10 月,地面加强观测试验。
 - 2012 年 12 月至 2013 年 3 月,以无人机为主的航空遥感。
- (4) 下游加强试验期:2013 年 5~10 月。
- 2012 年夏季,航空遥感试验、植被结构参数地面测量。
 - 2012 年 10 月,四道桥超级站建设。
 - 2013 年 3~4 月,自动气象站、传感器网络及其他观测设施布设。
 - 2013 年 5~10 月,地面加强观测试验。
 - 2013 年 6~8 月,以无人机为主的航空遥感。
- (5) 全流域持续观测期:2013—2015 年。主要针对自动化的气象水文观测和生态水文传感器网络,共 3 个完整的年度。
- 在整个加强试验期内,全流域超级站持续运行。
 - 2013 年全年,全流域气象和水文观测设施连续 1 个完整年度的协同观测。
 - 期间,间或开展以无人机和飞艇为主要平台的航空遥感试验。
 - 间或开展遥感真实性检验试验。

4 基础试验

4.1 航空遥感试验

航空遥感试验是“黑河生态水文遥感试验”中最重要的基础试验之一。试验中将搭载微波辐射计、成像光谱仪、热像仪、激光雷达等遥感设备,开展一系列关键生态和水文参数的观测;发展针对主要生态水文变量/参数的遥感正向模型及反演和估算方法,提供适于流域尺度研究的高分辨率、高质量数据产品;同时,还将通过获取多空间分辨率的遥感观测,发展遥感尺度转换方法。航空遥感将为内陆河流域生态水文过程的理解,模型的发展、改进和验证,衔接地面台站观测与卫星遥感观测,以及多尺度模型集成和应用研究提供基础数据支撑和试验手段。

4.1.1 遥感传感器

航空遥感试验中搭载的遥感传感器包括激光雷达、成像光谱仪、热像仪和微波辐射计,这些仪器的具体性能指标、试验中的精度与空间分辨率要求、观测目标等信息见表 2。

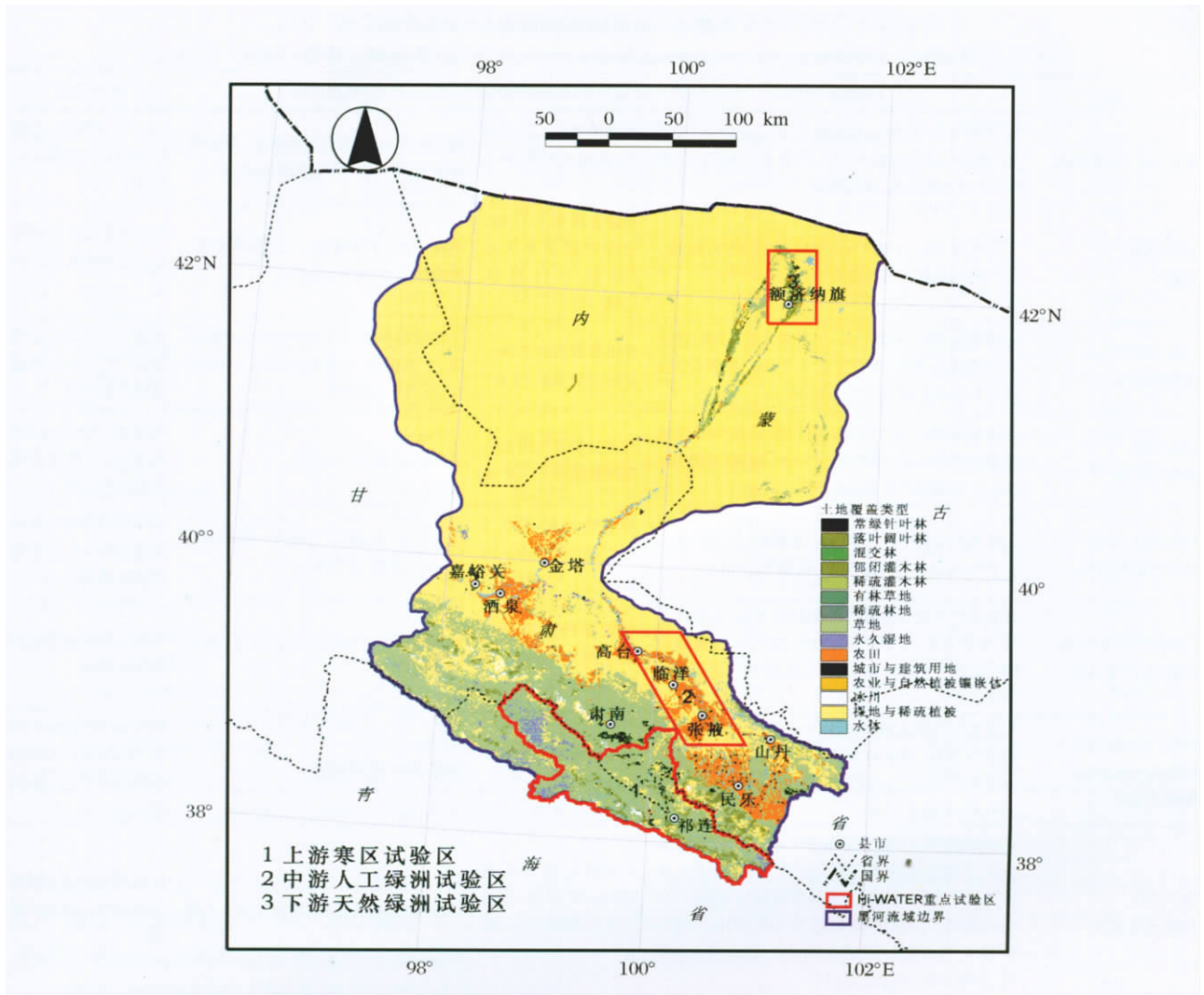


图 1 黑河生态水文遥感试验的试验区分布
 Fig.1 Experimental areas in the HiWATER

4.1.2 航空遥感飞行计划

应对上、中、下游不同特色的生态—水文问题和观测目标,主要的航空遥感任务分别在 2012 年夏季和 2012—2013 年冬季开展,具体执行计划见表 3。此外,还将利用无人机和飞艇平台开展多次航空光学遥感试验,该方面的信息未在表 3 中汇总。

4.2 水文气象观测网

长序列、高密度、多尺度水文气象要素的观测对生态—水文集成研究意义重大,并将促进对尺度问题、地表能量平衡与水循环闭合等问题的认识。“黑河生态水文遥感试验”的水文气象网建设将依托流域内现有的水文站、气象站与定位站,通过新增、改建与协同超级站和普通站,形成覆盖流域上、中、下游的水文气象综合观测网,为流域生态—水文

模型研究提供更有代表性的模型参数、驱动数据及更高精度的验证数据。

4.2.1 气象观测网

依托黑河流域内现有的气象、水文站以及长期定位站,在上、中、下游试验区新建 3 个超级站,新建 8 个、改建 4 个、协同 4 个普通站,形成由超级站—定位站—普通站—气象站—水文站组成的流域水文气象观测网。其中超级站开展连续 3 年的观测试验,普通站(16 个)进行 1 个水文年的连续观测,同时收集 3 年的黑河流域气象站、水文站和定位站(3 个)的水文气象观测数据。拟新建、改建与协同的超级站、普通站以及黑河流域已有定位站的布置信息见表 4。

普通站的观测项目与仪器配置为:辐射(向上/

表 2 机载遥感传感器
Table 2 Airborne remote sensing instruments to be used in the HiWATER

传感器	主要性能指标	精度与空间分辨率要求	观测目标	研制单位
激光雷达 + CCD 相机	型号为 Leica ALS70, 系统最大飞行高度为 5 000 m(AGL), 最大扫描角 75°, 内置数码相机, 记录 1, 2, 3 次回波强度, 高程精度 5 ~ 30 cm	高程精度 2 cm, 全波形, 波型采样间隔 1 ns	森林结构参数、农田结构参数、核心观测区 DEM、葫芦沟流域冰川 DEM	Leica 公司制造, 中国科学院对地观测中心引进
AISA 成像光谱仪	光谱范围 400 ~ 1 000 nm, 244 通道, FOV 40 度, 线阵推扫成像, 1 600 像素	光谱分辨率 3.3 nm, 空间分辨率 0.4 m (相对飞行高度 1 000 m)	植被分类、土地覆盖/土地利用类型、种植结构、反射率、反照率	芬兰 SPECIM 公司制造, 北京师范大学引进
CASI 1500 成像光谱仪	光谱范围 380 ~ 1 050 nm, 每行像元数 1 500, 连续光谱通道数 288, 光谱带宽 2.3 nm, 帧频(全波段) 14, 垂直航线方向视场角 40°	光谱分辨率 ≤ 5 nm, 空间分辨率 1 ~ 5 m	生物物理参数、生物化学参数、植被分类、土地覆盖/土地利用类型、种植结构、反射率、反照率	加拿大 ITRES 公司制造, 核工业北京地质研究院引进
SASI 600 成像光谱仪	光谱范围 950 ~ 2 450 nm, 每行像元数 600, 连续光谱通道数 101, 光谱带宽 15 nm, 帧频(全波段) 100, 垂直航线方向视场角 40°	光谱分辨率 ≤ 10 nm, 空间分辨率 1 ~ 30 m	雪粒径、反射率、反照率	加拿大 ITRES 公司制造, 核工业北京地质研究院引进
TASI 600/32 热红外成像光谱仪	光谱范围 8 000 ~ 11 500 nm, 通道数 32, 空间像元数 600, 光谱采样间隔 110 nm, 总视场 40°	等效噪声温度 0.2 K, 空间分辨率 5 ~ 10 m	地表温度、植被冠层温度、雪表面温度、河水温度、发射率	加拿大 ITRES 公司制造, 核工业北京地质研究院引进
机载红外广角双模式成像仪(WiDAS)	覆盖 5 个可见光波段, 1 个热红外波段; 热红外相机: 波长 800 ~ 1 200 nm, 320 × 240 像元; 视场角 80°, 记录 7 个角度; CCD 相机视场 50°, 记录 7 个角度	等效噪声温度 0.2 K, 空间分辨率 5 ~ 10 m	地表 BRDF、反照率、地表温度、植被冠层温度	中国科学院遥感应用研究所研制
PLMR (Polarimetric L-band Multibeam Radiometer)	双极化 L 波段微波辐射计: 中心频率 1.413 GHz, 带宽 24 MHz, 垂直与水平极化, 分辨率 1 km (相对航高 3 km), 入射角可调, 为 ± 7°, ± 21.5°, ± 38.5°, 灵敏度 < 1 K	空间分辨率 100 m ~ 1 km	土壤水分、地表冻融	澳大利亚 Monash 大学、Melbourne 大学和 Newcastle 大学, 拟引进
被动微波遥感集成系统	L 波段微波辐射计: 中心频率 1.413 GHz, 带宽 20 MHz, 灵敏度 0.08 K, 波束角 15°, 入射角 45°, 垂直与水平极化; K 和 Ka 波段成像微波辐射计: 中心频率 18.7 和 37 GHz, 带宽 400 MHz, 灵敏度 0.15 K, 波束角 2.5°, 入射角 45°, 垂直与水平极化, 扫描成像, 扫描范围 ± 12°	L 波段空间分辨率 100 m; K 和 Ka 波段空间分辨率 10 ~ 100 m	土壤水分、地表冻融、雪深和雪水当量	中国科学院东北地理与农业生态研究所研制

表 3 航空遥感飞行计划
Table 3 Airborne remote sensing missions

传感器	测区	飞行架次及时间	平台	目标
CASI + SASI	盈科与大满灌区、平川灌区	2012 年夏季分 2 个时相各执行 1 架次; 样带 1 架次	无人机	土壤参数、FPAR、LAI、叶绿素、反射率
WiDAS	盈科与大满灌区、平川灌区、阿柔	2012 年夏季分 2 个时相各执行 1 架次, 阿柔 2012 年夏季 1 个架次	无人机、无人飞艇	反射率、反照率、地表温度、组分温度
TASI	盈科与大满灌区	2012 年夏季分 2 个时相各执行 1 架次	无人机	发射率、地表温度
激光雷达 + CCD 相机	盈科与大满灌区、葫芦沟流域、天老池流域、额济纳旗	上游: 2012 年夏季 1 ~ 2 架次; 中游: 2012 年夏季 1 个架次; 下游: 2012 年夏季 2 个架次	无人机	DEM、植被结构参数、种植结构
PLMR	盈科与大满灌区、阿柔、扎马什克(黑河主干流西支)	2012 年夏季 6 ~ 8 架次	无人机	土壤水分
被动微波遥感集成系统	阿柔、葫芦沟、冰沟、盈科与大满灌区	2012 年夏季至 2013 年春季分 10 个架次	无人机	土壤水分与冻融、积雪

表 4 黑河流域拟新建、改建与协同的超级站、普通站以及已有定位站

Table 4 Automatic meteorological stations and flux towers to be established in the HiWATER and existing research stations in the Heihe River Basin

序号	站点名称	经度 / °E	纬度 / °N	高程 / m	位置	站点类型	开始观测期 (持续时间)	景观类型
1	阿柔站	100.45	38.05	3 033	上游	超级站	2013 (长期)	高寒草地
2	大满站	100.372	38.855	1 519	中游	超级站	2013 (长期)	农田
3	四道桥站	101.124	41.988	935	下游	超级站	2013 (3年)	胡杨 柽柳
4	景阳岭站	101.11	37.852	3 700	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草甸
5	峨堡站	100.935	37.958	3 407	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草地
6	白石崖站	100.646	38.02	3 131	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草地
7	阿柔阴坡站	100.417	37.986	3 538	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草地
8	阿柔阳坡站	100.519	38.091	3 559	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草地
9	黑河西支多年冻土区气象站	98.946	38.833	3 775	上游	普通站	2013 (1年)	沼泽草甸
10	莺落峡站	100.17	38.809	1 740	上游	普通站	2013 (1年)	高寒草地
11	寺大隆站	99.930	38.423	3 052	上游	普通站	2012 (长期)	高寒草地
12	排露沟林前气象站	100.38	38.555	2 731	上游	普通站	2009 (长期)	草地
13	水源涵养林研究院观测站	100.455	38.563	2 600	上游	普通站	2011 (长期)	草地
14	戈壁站	100.303	38.894	1 571	中游	普通站	2012.05—2013	戈壁
15	神沙窝站	100.49	38.79	1 582	中游	普通站	2012.05—2013	沙漠
16	张掖湿地站	100.448	38.974	1 460	中游	普通站	2010—2013	湿地
17	花寨子荒漠站	100.317	38.767	1 726	中游	普通站	2008—2013	山前荒漠
18	五里墩气象站	100.133	39.333	1 378	中游	普通站	2008 (长期)	农田
19	七道桥胡杨林站	101.238	42.02	878	下游	普通站	2013 (1年)	胡杨
20	黑河上游生态—水文试验研究站	99.883	38.269	2 980	上游	定位站	2009 (长期)	高寒草地
21	临泽内陆河流域研究站	100.13	39.35	1 382	中游	定位站	2006 (长期)	农田
22	阿拉善荒漠生态—水文实验研究站	101.053	42.033	920	下游	定位站	2009 (长期)	胡杨林 柽柳

注: 阿柔超级站将在原阿柔站的基础上扩建, 原阿柔站从 2008 年持续观测至今。

下短波辐射、向上/下长波辐射、净辐射)、降水量、风温湿压、多层土壤温湿度(8层)、地表温度(2个)、土壤热通量(3块 6 cm)与平均土壤温度(2 4 cm)。

超级站将在遥感真实性检验、模型发展和验证、尺度转换研究中发挥重要作用,其观测项目与仪器配置为:

(1) 多尺度蒸散发的观测(蒸渗仪、涡动相关仪、波文比系统、大孔径闪烁仪)。

(2) 综合水文气象要素的观测: 在基本配置的基础上(同普通站)增设风温湿梯度(6层)和光合有效辐射。

图 2 是一个超级站布设示意图,其中,蒸渗仪、波文比系统、涡动相关仪、气象塔放置在观测场中间,大孔径闪烁仪的发射与接收器架设在两端,大孔径闪烁仪的光径路线长度大于 1.5 个 MODIS 像元,即 1.5 km 以上,并且垂直于当地主风方向。大孔径闪烁仪的源区内设置无线传感器网络,观测影响蒸散发的关键地表参数传感器,如土壤温湿度、地表温度与叶面积指数等。

在以上仪器配置的基础上,还将根据不同站的特点,增设观测仪器。如上游阿柔站以土壤冻融为

主要观测目标,将布设密集的土壤湿度、温度和水势探头,以细致了解冻融锋面迁移等土壤冻结—融化过程。

4.2.2 降水和径流观测

为了提高降水量的测量精度,在中游大满超级站、上游阿柔超级站附近分别选取开阔平坦的位置以及阴坡和阳坡的位置,建立降水对比观测场,对当前黑河流域使用的主要降水观测仪器进行对比,得到各种雨量计的降水校正系数。通过以上对比观测,评估降水的类型、雨雪量计的口径与型号、地形等对降水测量精度的影响;探索风环境对降水测量——特别是对降雪测量的影响。利用降水量对比观测结果对雨量计和雨雪量计观测结果进行校正。同时,依托无线传感器网络,获取多点的降水量观测值,实现高精度的区域降水量估计。

黑河中游地表水和地下水多次转化是内陆河流域独特的水文现象。因此,在出山口冲积扇区段、灌溉渠系和供水系统,以及相应的水文地质单元区段设置径流观测。具体在中游草滩庄与黑河大桥之间、黑河大桥、平川桥、高台桥、罗城桥布设水文观测断面,加密观测黑河中游干流的河川径流。测量方

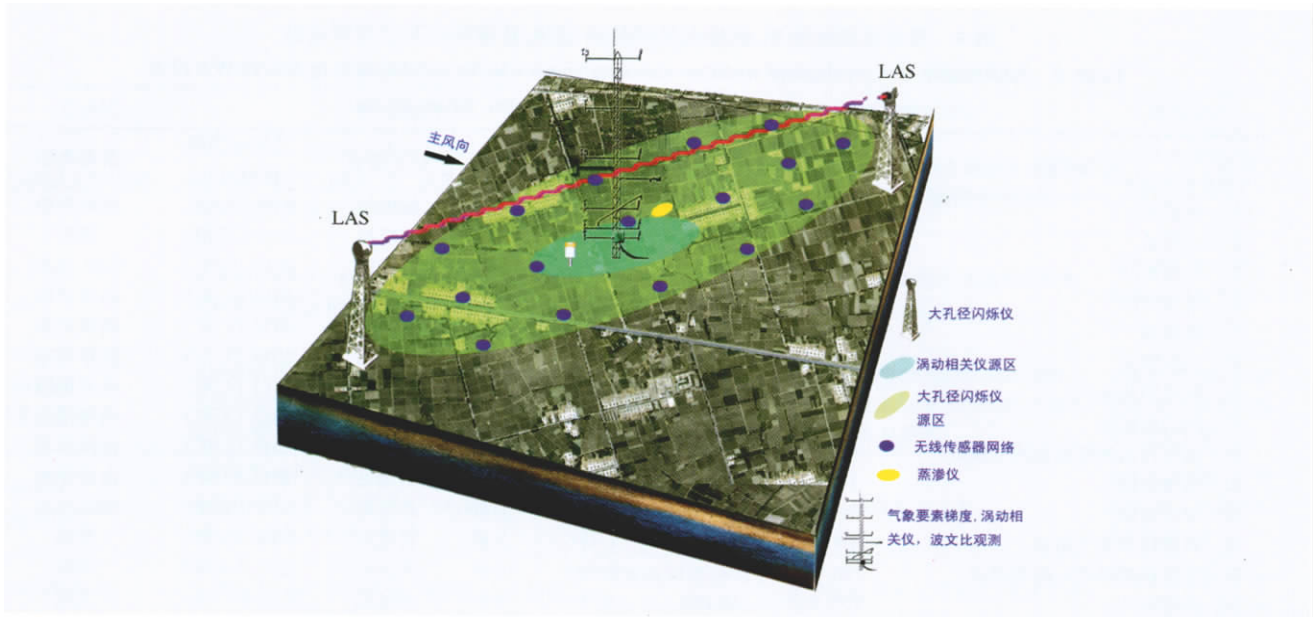


图 2 超级站的布设示意图

Fig. 2 Instrumentation plan for a super station

案是利用水位计(压力式或超声波)测量连续水位变化;利用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)获得精确流量,建立水位—流量关系,最终利用水位估算出流量。

4.3 生态水文无线传感器网络

无线传感器网络作为“地球观测系统”的一个近地组成部分,近来得到广泛关注。它弥补了传统点观测和遥感观测之间的尺度空白,可为遥感反演和模型模拟结果的验证提供更有代表性的像元或网格尺度“真值”。

在“黑河生态水文遥感试验”中,生态水文无线传感器网络的目标是:构建现代化的无线传感器网络,度量生态水文模型所需的若干关键的驱动、参数和模型状态的空间异质性;形成自动化的遥感真实性检验系统。将在黑河上游八宝河流域、中游盈科与大满灌区、下游额济纳旗 3 个试验区,以无线传感器网络为纽带,高效集成试验区内密集分布的、异构传感器的各种气象、水文及生态观测项目,建立自动化的、智能化的、时空协同的、各观测节点可远程控制的多尺度、多层嵌套的生态水文传感器综合观测网络,全面提高流域水文和生态过程的综合观测能力和观测自动化水平。

4.3.1 无线传感器网络设计和节点研制

黑河流域生态水文无线传感器网络的组成包括:野外观测系统、网络视频监控系統、远距离骨干无线传输网络、互联网接入网络等。其中,野外观测

网络依靠无线网桥、微波、GPRS 等多种方式实现混合组网。最后通过 IPv6 隧道技术接入 CNGI 网络(中国下一代互联网示范工程),从而提供 IPv6 用户对整个系统的访问。

针对无线传感器网络技术在黑河流域生态水文过程监测领域的应用特征,研制了适用于低温环境、低功耗、接口灵活、数据传输稳定可靠、具有双向通信功能、且支持 IPv6 的无线传感器网络节点(图 3 中 WATERNET)。能够接入该节点的观测变量包含 5、10 和 40 cm 3 层土壤温湿度及盐分、地表温度、降雨、雪深、空气温湿度及风速风向。

4.3.2 布设方案

以将要在上游八宝河流域内布设的生态水文无线传感器网络为例,说明其布设原则和方案。这一网络共包含 4 个层次的观测系统,分别为超级站、分布式自动气象站网、流域尺度土壤温湿度分布式观测网络及遥感真实性检验观测场(图 3)。其中:

(1) 阿柔超级站节点。在超级站标配基础之上,按照传感器网络的统一设计,进行观测系统的集成和无线传输改造,并增设网络摄像头以及具有无线传输功能的超声雪深探头和 LAI 自动观测仪。

(2) 分布式自动气象站网。在八宝河流域内,将在普通站(表 4)标配基础之上,增加超声雪深探头,并进行观测系统集成和无线传输改造,形成分布式自动气象站网(图 3)。

(3) 流域尺度土壤温湿度分布式观测网络。观

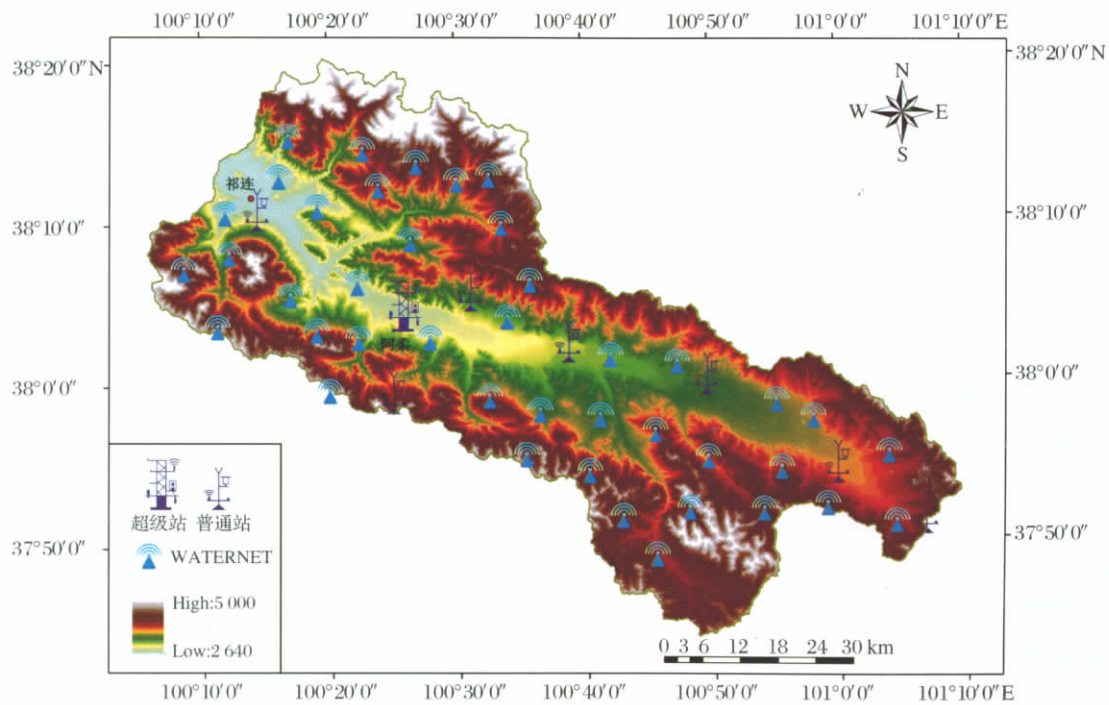


图 3 八宝河流域生态水文传感器网络

Fig. 3 Eco-hydrological wireless sensor network in the Babao River Basin , upper streams of the Heihe River Basin

测流域尺度上降水、土壤水分和土壤温度的时空异质性和不确定性,为流域水文模拟和流域尺度水文同化提供基础资料和误差信息;同时起到中—粗分辨率遥感验证(单点验证)的作用。传感器之间的分布间隔为 5 ~ 10 km。

(4) 遥感真实性检验观测场。主要布设在阿柔超级站 LAS 源区内,一方面要兼顾考虑星载—机载多种遥感传感器的地面分辨率,通过固定节点辅之以移动节点的空间嵌套方案,度量像元尺度地表变量的空间异质性和不确定性,为航空遥感和高分辨率卫星遥感反演结果的真实性检验提供像元尺度“真值”;另一方面还要和蒸散发多尺度观测中各种仪器的足迹相互配合,支持尺度转换研究。

4.4 定标与真实性检验

定标和真实性检验是实现定量遥感的重要前提。该基础试验的主要目标是:获取用于航空和卫星遥感数据辐射定标、大气校正和几何校正所需的地面观测数据,支持遥感数据预处理。开展地基遥感试验,系统地获取黑河流域不同地表覆被类型的热红外波段发射率及积雪和冻土的微波辐射特征。针对关键生态—水文过程的航空和卫星遥感产品,依托传感器网络(4.3 节),并辅之以必要的地面同

步和加密观测,获取用于遥感产品真实性检验的地面观测数据集。

4.4.1 定标

辐射定标。在航空飞行区域内选择若干个较为均质的下垫面作为可见光/近红外、热红外、微波辐射计定标场,同步测量定标场内均质地表的辐射特征,包括反射率和微波亮温(分别选择水体、沙地/戈壁作为冷端和热端)。

大气校正。在试验区内通过探空和分光光度计观测,获取大气校正所需的水汽廓线、温度廓线、气溶胶分布等信息,支持大气辐射传输模型完成航空或卫星遥感数据的大气校正。在张掖观象台常规探空观测基础上,中游加强观测期每日加密 1 次常规探空观测;同时,在有人机航空飞行前后各开展 1 次 GPS 探空观测。用全自动太阳分光光度计进行气溶胶光学厚度的观测。

几何校正。在飞行区内设置多个高精度地面控制点,进行航空遥感图像的精校正。利用已有的 SPOT 5、QuickBird 等高分辨影像,提前制作用于几何精校正的背景参考影像图。针对 DEM 测绘,在测区加密布设一定密度的控制点和验证点,利用差分 GPS 进行测量,以提高 DEM 测量精度,同时验证和评价 DEM 产品精度。

4.4.2 地基遥感试验

发射率既是地表能量平衡的重要参数,也是提高地表温度反演精度的关键参数。但无论是在黑河流域,还是其他干旱区,都缺乏对热红外波段发射率的系统测量。在“黑河生态水文遥感试验”中,将采用红外波谱仪 102F 来观测黑河流域内不同地表覆被类型的发射率的时空变化特征。同时,该项观测试验还将与热红外高光谱航空遥感密切配合,完成中游主要地表覆被类型的发射率制图。

冻土和积雪在黑河上游寒区水文扮演着重要角色,而微波遥感是监测冻土和积雪的主要技术手段。我们将利用车载地基微波辐射计,选取流域内不同类型土壤,在冻—融交替过程中连续观测土壤微波辐射的变化特征;也将观测不同厚度、不同下垫面、不同粒径积雪的微波辐射特征。

4.4.3 真实性检验试验

真实性检验的关键是获取待检验变量的像元“真值”及其空间和时间变化特征。在“黑河生态水文遥感试验”中,真实性检验将采用以下观测方案。

(1) 传感器网络。在空间采样理论的指导下,考虑不同遥感产品的特点,设计多目标(同时针对多个遥感产品)、多尺度的地面采样方案。在此方案的指导下,布设传感器网络,以多点代面的方式开展高空间密度、高时间分辨率的自动测量,并采用异质地表尺度上推技术得到像元真值,同时估计其不确定性。

(2) 基于足迹/斑块的地面观测技术。具体包括:采用涡动相关仪或涡动矩阵(详见本文第 5 节)测量蒸散发、感热通量和生态系统生产力;采用 LAS 测量感热通量、采用宇宙射线土壤水分/积雪观测仪测量斑块尺度土壤水分(直径约 600 m);采用伽马射线测雪仪观测雪水当量。利用足迹模型和空间采样理论,将以上观测值转换为像元真值,开展遥感产品的真实性检验。

(3) 成像方式观测。采用热像仪观测地表和冠层温度;采用探地雷达观测土壤水分。以上观测数据经过尺度上推后,将用于真实性检验。

(4) 用甚高分辨率航空遥感获取异质性像元采样方案设计和尺度上推所需的先验信息,包括土地覆盖、植被类型和作物种植结构。

(5) 加密的人工观测。采用人工方式,加密观测地表温度、土壤水分、雪深和雪水当量、叶面积、植被结构、生态生理参数等其他参量,和传感器网络及其他观测方式配合,获取待检验参量的像元真值及

空间和时间变化特征。

5 专题试验:非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测试验

“黑河生态水文遥感试验”将要启动的第一个专题试验是“非均匀下垫面多尺度地表蒸散发观测试验”。从 HEFEI 试验到“黑河综合遥感联合试验”地表蒸散发一直是观测研究的重点。蒸散发观测极具挑战性,和能量平衡闭合、通量尺度上推等复杂问题均有密切联系。在“黑河生态水文遥感试验”中,我们设计了密集的涡动相关仪、大孔径闪烁仪与自动气象站的矩阵方式观测试验,力求捕捉地表—大气水热交换的三维动态特征。为理解蒸散发过程,揭示地表蒸散发的空间异质性及其影响因子,实现非均匀下垫面地表蒸散发的尺度扩展提供基础观测数据;也为蒸散发遥感估算模型的发展与验证等提供像元尺度的地面真值。

在黑河流域中游张掖地区设立 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ 、 $5.5\text{ km} \times 5.5\text{ km}$ 2 个嵌套试验区。在大试验区内,地表覆被类型主要是绿洲农田、居民地、湿地、戈壁、荒漠、沙漠等,能代表黑河流域中游主要土地覆被类型。在此区域内,将构建“一横一纵”的观测系统,包括 1 个超级站、4 个普通站,每个普通站也各配置 1 台涡动相关仪。普通站建立在东部沙漠、南部荒漠、西部戈壁以及北部湿地,超级站设置在中部绿洲农田上。这个观测系统的目标是监测荒漠—绿洲系统的地表蒸散发变化特征以及影响因子。另外,在主风方向上(西北、东南风),利用 5 个站点(包括戈壁、大满、神沙窝站)开展风温湿的 2 层梯度观测($5, 10\text{ m}$),用于监测平流的影响。

小试验区的观测方案如图 4 所示。在盈科灌区与大满灌区设置 $5.5\text{ km} \times 5.5\text{ km}$ 的试验区,下垫面主要为玉米、果园、蔬菜、村庄、道路等,能代表中游灌区的作物结构与耕作方式。其中, $5.5\text{ km} \times 5.5\text{ km}$ 是航空飞行区域, $4.4\text{ km} \times 4.8\text{ km}$ 是观测矩阵区域。在观测矩阵区内,根据作物结构、防护林朝向、村庄与道路分布、土壤水分与灌溉状况等将该区域划分成 17(包括 1 个村庄下垫面)个小区,每个小区内架设 1 台涡动相关仪和自动气象站。3 台大孔径闪烁仪贯穿矩阵区域中间 3×3 个 MODIS 像元,每个大孔径闪烁仪北端的塔上架设 2 层气温与 1 层风速/风向。在大满超级站,架设 1 台大孔径闪烁仪横跨 2 个 MODIS 像元。光径路线中间设置 1 个 40 m 气象塔,7 层风温湿与 CO_2 梯度的观测,以及四分

量辐射、直接与散射辐射、日照时数的观测; 气象塔上还有 3 层涡动相关仪的观测、1 个换位式波文比—能量平衡测量装置。气象塔附近安装 1 台蒸渗仪。同时, 在此区域内密集布设土壤温湿度、地表温度与叶面积指数的探头, 准确地测量整个矩阵区域以及每个小区内影响地表蒸散发的关键地表参数。

利用稳定同位素技术开展单点连续、多点同步(与航空飞行、机载涡动相关仪等)的土壤蒸发与植被蒸腾的分割观测, 获取单点、卫星像元尺度土壤蒸发和植被蒸腾的时空变化特征。在观测矩阵区域内 3 × 3 个 MODIS 像元中间, 选择沿盈科干渠两边的防护林(3 个点), 利用热扩散液流测量系统(TDP)观测树木蒸腾量。

在观测期间, 将开展多次多种遥感传感器的航空飞行试验(可见光、红外、微波、激光雷达等), 结合卫星遥感信息, 反演试验区的作物结构、反照率、地表温度、组分温度、土壤水分、地表粗糙度等, 估算

试验区的多时空分辨率蒸散发; 开展无人机/飞艇的观测试验, 加强航空遥感观测的密度。

6 应用试验

6.1 上游寒区遥感水文试验

上游寒区遥感水文试验的目标是: 开展针对性的综合观测试验, 验证和标定包含了冻土过程的寒区分布式水文模型; 通过航空—地面遥感试验验证复杂地形条件下的亚像元积雪面积比例产品算法, 发展积雪面积和雪水当量之间的动态函数关系; 以降水同化产品作为主要驱动之一, 将积雪面积和土壤水分遥感产品同化到寒区水文模型中, 改进山区径流——特别是春季径流的预报精度。

为增进对寒区水文过程的理解, 评估遥感数据在提高寒区径流模拟能力中的作用, 选择 CRHM^[26]与 SHAWDHM^[22]2 个寒区水文模型作为研究的主要工具。

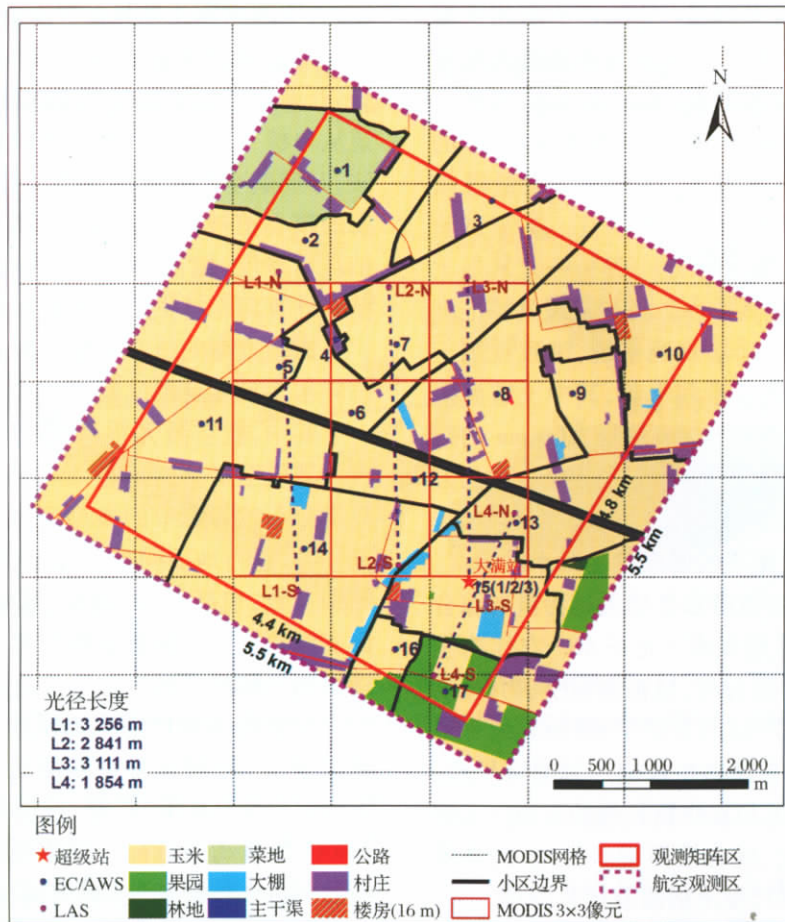


图 4 4.4 km × 4.8 km 试验区内仪器的布设示意图

Fig. 4 Instrumentation plan for the evapotranspiration observing experiment over heterogeneous surface

针对这 2 个模型的需求,在不同尺度上开展模型驱动数据、参数和状态变量的观测(图 5)。其中流域—子流域—小流域尺度的试验分别在黑河上游、八宝河流域以及葫芦沟小流域开展。雪水当量、积雪面积、雪面反照率、表层土壤水分以及土壤冻融状态是观测的重点。同时,将通过高分辨率的机载光学遥感获取 MODIS 亚像元尺度上的积雪面积“真值”,高分辨率的机载微波遥感获取 MODIS 亚像元尺度上的雪水当量数据,在此基础上构建网格尺度积雪面积比例与雪水当量之间的动态函数关系。

模型网格/遥感像元尺度的遥感水文试验针对 2 个典型的寒区水文过程:积雪水文和冻土水文,分别在葫芦沟流域和阿柔试验场开展。其中积雪观测场中,以积雪积累与消融中的质量和能量平衡过程观测为重点,重点考虑积雪覆盖面积和雪水当量的空间变化。利用 Gamma 射线雪水当量传感器测量积雪场范围内的总雪水当量,雪层分析仪(SPA)测量 2~3 个典型点的雪水当量(包括雪密度和雪湿度),FlowCapt(一个整体式的声学原理测量风吹雪设备)测量仪测量风吹雪通量,涡动相关仪测量雪面以及风吹雪层的蒸发/升华量,配置 3 m×3 m 的雪枕记录雪水当量和融雪水,Lysimeter 测量融雪量,与雨雪量计观测结果相互比对验证。冻土试验场选择阿柔超级站,以土壤水热过程——尤其是土壤的冻融循环过程为观测重点。将在超级站标准配置的基础上布设冻土活动层观测系统,细致观测土壤温度、液态含水量、热通量和水势,其中土壤温湿度探头,表层 30 cm 内按照 5 cm 分层,100 cm 内按照 10 cm 分层布设,从而为冻土冻融过程参数化方案提供高分辨率、高精度的基础数据。

6.2 中游灌区遥感支持下的灌溉优化配水试验

目标是开展针对水资源和作物关键参量的综合观测试验,验证和标定地表水—地下水—农作物生长耦合模型;在植被类型分布、植被覆盖度、物候期、NPP、土壤水分等遥感产品的支持下,将地表水—地下水—农作物生长耦合模型扩展应用到灌区尺度;根据对水资源供需状况和农作物长势的监测和短期预测,结合最优化方法,优化灌溉配水计划,提高灌溉效率,初步实现灌区尺度上的灌溉优化管理。

观测试验方案将针对地表水—地下水—农作物生长耦合模型的需求,在不同尺度上开展模型驱动、参数和状态变量的观测。

灌区水平衡是核心的观测目标。方案是:以灌

区为空间单元,以农业年为时间单元,观测灌区水量平衡的各分项,包括灌区范围内的降水量、进入灌区的地表水灌溉水量、进入灌区的地下水侧向流量、灌区内的蒸散发量、灌区向外的地表排水量和流出灌区的地下水侧向流量、渠道蒸发量(图 6)。此外,还将系统地开展灌溉方式调查,主要包括灌溉的轮期、亩均灌溉量、田块的灌水深度、田块的沟垄高度、田块的下渗时间、灌溉水温等。同时,利用航空遥感获得高分辨率的渠系结构分布和作物种植结构遥感产品,为实现地表水—地下水—农作物生长耦合模型的尺度扩展提供基础数据。

作物生长模型采用荷兰瓦赫宁根大学开发的 WOFOST,该模型可模拟作物生长发育过程,包括生育期、光合作用、呼吸作用、干物质分配、生长和衰老、蒸腾作用、根生长等。观测试验主要针对模型的标定和验证展开,观测项目包括物候、生长发育特征、生理生态特征、土壤理化特征、碳循环特征和生物化学参数。

6.3 下游绿洲生态耗水尺度转换遥感试验

下游绿洲生态耗水尺度转换遥感试验的目标是:开展生态耗水的多尺度综合观测试验,验证和标定从单株→冠层→群落→区域的蒸散发尺度转换方法;开展航空激光雷达遥感试验,获取尺度转换所需要的核心植被结构参数(树高、胸径、叶面积指数、植被覆盖度、植被类型等);在遥感数据的支持下,精确计算河岸林生态系统耗水量。

试验方案的核心是航空激光雷达遥感试验及生态耗水多尺度观测试验。

其中,航空激光雷达试验的方案如图 7 所示。在开展航空遥感的同时,将在核心观测区选择胡杨、柽柳分布较为集中的典型区域,布设多个胡杨和柽柳样方,进行地面同步观测,获取单株胡杨和柽柳的结构参数,包括树高、胸径、冠幅、生物量等,利用地面实测数据标定和验证航空激光雷达反演结果,最终得到下游河岸林生态系统植被结构参数。

生态耗水多尺度观测试验的方案是:在核心观测区建立生态耗水加密观测场,观测破碎景观背景下的多尺度(单株、群落、冠层和区域)冠顶蒸散发和 CO₂ 通量动态特征。具体观测包括:①单株尺度植物蒸散发特征观测:利用树干液流技术动态监测植被蒸腾速率日变化特征;②冠层尺度碳、水通量观测:在典型植被样方和裸土样方上架设多套涡度相关系统和自动气象站,观测典型植物冠层及裸土蒸散发和 CO₂ 通量及微气候特征;③区域尺度:架设

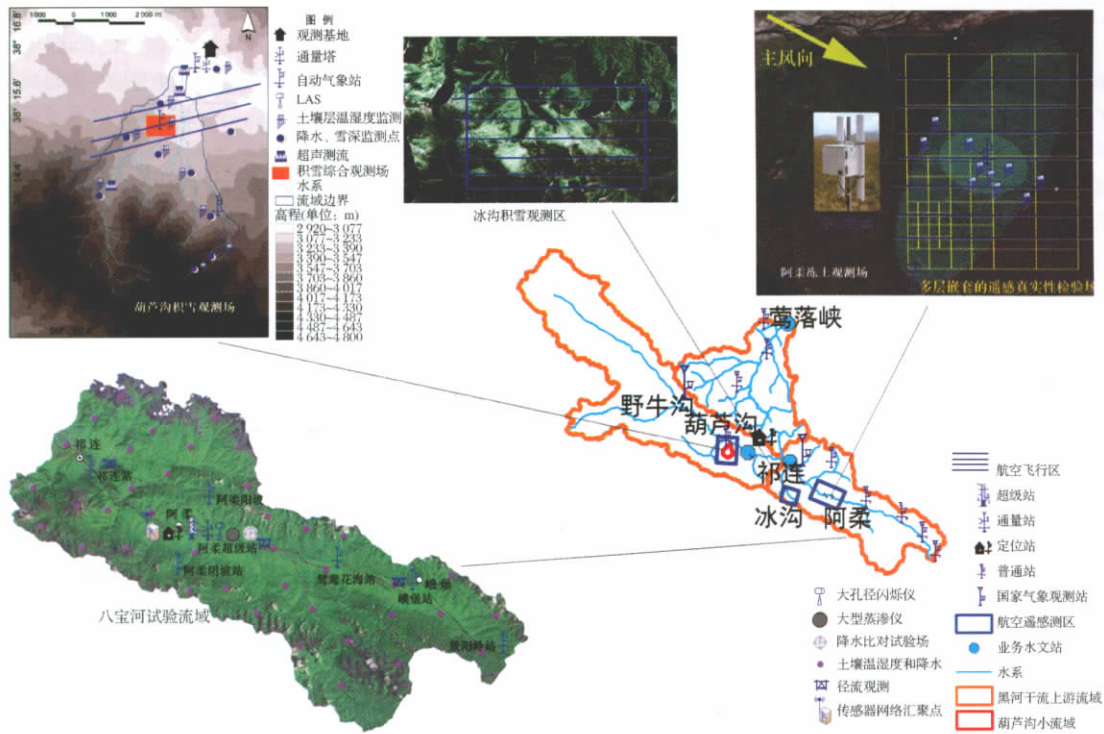


图 5 上游寒区遥感水文试验多尺度观测方案示意

Fig. 5 Multi-scale observing scheme in the cold region remote sensing hydrology experiment

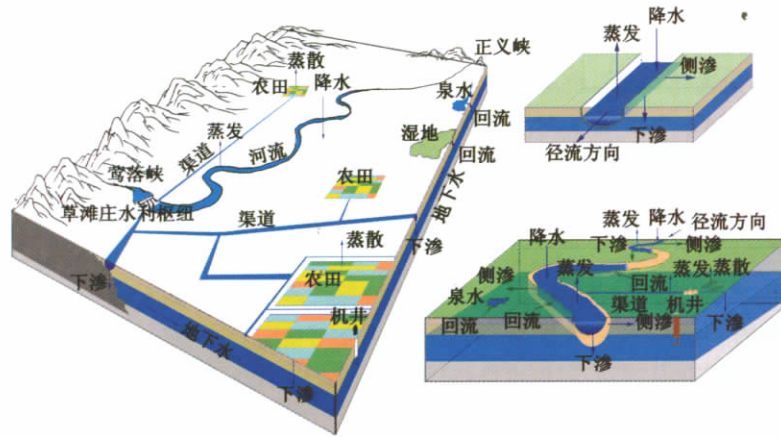


图 6 中游灌区水平衡观测方案示意

Fig. 6 Observing scheme for the water balance at irrigation district scale

LAS 观测系统, 观测胡杨、柽柳、裸土斑块异质下垫面条件下的平均蒸散量。同时, 在 LAS 和涡动相关仪器区内, 利用无线传感器网络加密观测土壤水分和土壤温度。由此, 形成从单株到冠层、群落、区域的立体观测场, 为利用遥感估算蒸散发模型、陆面过程模型或生态耗水经验模型实现生态耗水的尺度转换, 提供多尺度的标定和验证数据。

7 结 语

本文介绍了“黑河生态水文遥感试验”的背景、科学目标和试验方案。建立先进的流域观测系统, 开展综合观测试验, 是“黑河计划”在流域尺度上实践地球系统科学研究方法的一个重要步骤。我们相信, “黑河生态水文遥感试验”的开展, 将是回答“黑

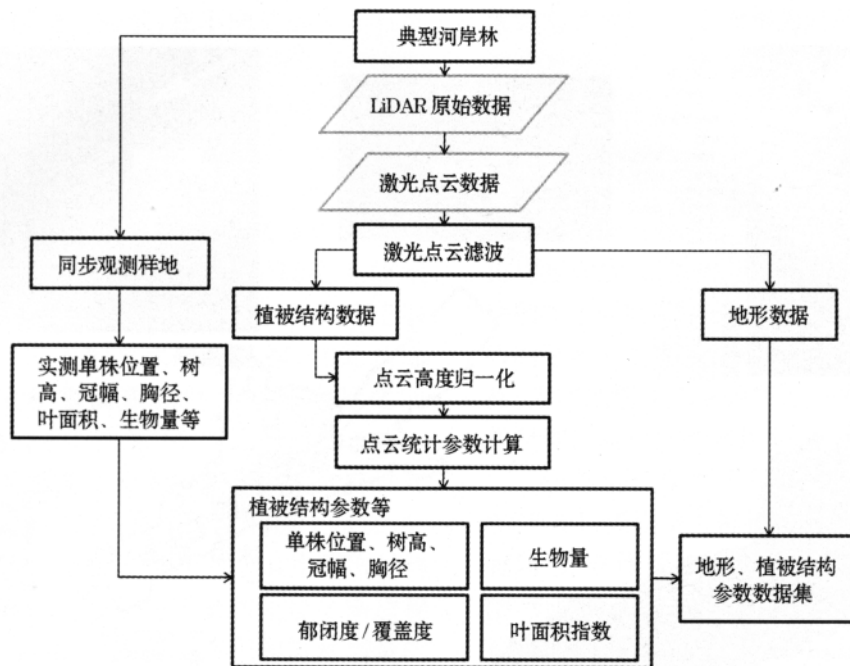


图 7 航空激光雷达测量下游河岸林试验方案

Fig. 7 Experiment plan for retrieving canopy structure of riparian ecosystem using airborne LiDAR

河计划”核心科学问题,完成其科学目标,保障其顺利实施的重要环节;也是支撑计划内其他一系列研究项目,促进学科协同,开展多学科交叉研究的理想平台。

同时,“黑河生态水文遥感试验”也是前期已开展的“黑河综合遥感联合试验”以及黑河流域的一系列观测工作的延伸和扩展,我们也相信,在这些基础上,“黑河生态水文遥感试验”将会成为一次更加精心准备、科学问题更明确、更强调多学科联合的流域科学试验。这次新的试验必须面对更加清晰的科学问题,和流域科学中的生态—水文集成研究有更密切的结合,并且回答遥感应应用方法论上的急迫问题,唯有这样,才能使遥感更可信、更有用,才能为遥感在流域生态—水文集成研究中的应用开辟一个成熟的研究范例,才能使地球观测技术真正成为生态—水文研究的利器。

总之,遥感观测和生态—水文模型及生态—水文集成研究的深度结合,是本项目最根本的着眼点。“黑河生态水文遥感试验”将不仅仅是一次综合观测,也是一次系统的遥感方法论研究。我们期望,在完成本文所述及的一系列观测任务的同时,也着力推进遥感算法发展、遥感产品生产、遥感数据同化、遥感在生态—水文模型中的应用等研究工作;并且通过方法论研究的深入,实质性地提高遥感在流域

生态—水文集成研究和水资源管理中的应用能力。

致谢: 试验所依托的无线传感器网络建设得到了“基于下一代互联网的科研信息基础设施建设和应用示范工程”课题“黑河流域生态水文遥感—地面观测试验与综合模拟应用示范”和国家高技术研究发展计划重大项目“星机地综合定量遥感系统与应用示范(一期)”课题“遥感产品真实性检验关键技术及其试验验证”(编号: 2012AA12A305)和国家高技术研究发展计划“全球陆表特征量产品生成与应用研究”课题“陆面模拟与同化系统示范研究”(编号: 2009AA122104)的资助。中欧龙计划 3 期项目“Close water cycle at the river basin scale using remote sensing data”(ID 10649)将为试验提供卫星遥感数据支持。在 2010 年初开始 HiWATER 试验设计以来,程国栋院士、李小文院士、傅伯杰院士、宋长青研究员、冯仁国研究员、王介民研究员、康尔泗研究员、张仁华研究员、阎保平研究员、李增元研究员、黄铁青研究员、冷疏影研究员、杨坤研究员、赵涛博士及“黑河计划”专家组成员多次提出过宝贵建议。在此谨致谢忱。

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 X, Li X W, Li Z Y, et al. Watershed allied telemetry experimental research [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: (D22103), doi: 10.1029/2008JD011590.
- [3] Cheng Guodong. Integrated Management of the Water-Ecology-Economy System in the Heihe River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2009: 581. [程国栋. 黑河流域水—生态—经济系统综合管理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 581.]
- [4] Li Xin, Cheng Guodong. On the watershed observing and modeling systems [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 756-764. [李新, 程国栋. 流域科学研究中的观测和模型系统建设 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 756-764.]
- [5] Committee on U. S. Geological Survey, National Research Council. Watershed Research in the U. S. Geological Survey [M]. Washington, DC: National Academies Press, 1997: 96.
- [6] Committee on Watershed Management, National Research Council. New Strategies for America's Watersheds [M]. Washington DC: National Academies Press, 1999: 328.
- [7] Committee on River Science at the U. S. Geological Survey, National Research Council. River Science at the U. S. Geological Survey [M]. Washington, DC: National Academies Press, 2007: 206.
- [8] Li Xin, Cheng Guodong, Ma Mingguo, et al. Digital Heihe River Basin. 4: Watershed observing system [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8): 866-876. [李新, 程国栋, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 4: 流域观测系统 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 866-876.]
- [9] Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science. Hydrology of a Dynamic Earth [R]. Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, Inc., 2007.
- [10] NRC: Committee on the Review of Water and Environmental Research Systems (WATERS) Network, National Research Council. Review of the WATERS Network Science Plan [M]. Washington DC: National Academies Press, 2010: 88.
- [11] Bogena H, Schulz K, Vereecken H. Towards a network of observatories in terrestrial environmental research [J]. *Advances in Geosciences*, 2006, 9: 109-114.
- [12] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1665-1679.
- [13] Arnold J G, Fohrer N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 563-572.
- [14] Rigon R, Bertoldi G, Over T M. GEOTop: A distributed hydrological model with coupled water and energy budgets [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(3): 371-388.
- [15] Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C, et al. MODFlow-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process [R]. CO: U. S. Geological Survey, Denver, 2000.
- [16] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [17] Thornton P E, Running S W. User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.2 [Z]. USA, 2002.
- [18] Vandiepen C A, Wolf J, Vankeulen H, et al. WOFOST—A simulation-model of crop production [J]. *Soil Use and Management*, 1989, 5(1): 16-24.
- [19] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [20] Dai Y, Zeng X, Dickinson R E, et al. The common land model [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013-1023.
- [21] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical Description of Version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR/TN-478 + STR, Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research, 2010: 257.
- [22] Zhang Y L, Cheng G D, Li X, et al. Coupling the Simultaneous Heat and Water model (SHAW) with a distributed hydrological model and its evaluation of the combined model in a cold region watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2012 (submitted).
- [23] Zhou J, Hu B X, Cheng G D, et al. Development of a three-dimensional watershed modelling system for water cycle in the middle part of the Heihe rivershed, in the west of China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(12): 1964-1978.
- [24] Zhou J, Cheng G D, Li X, et al. Numerical modeling of wheat irrigation using coupled HYDRUS and WOFOST models [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(2): 648-662, doi: 10.2136/sssaj2010.0467.
- [25] Tian W, Li X, Wang X S, et al. Coupling a groundwater model with a land surface model to improve the water and energy cycle simulation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012 (submitted).
- [26] Pomeroy J W, Gray D M, Brown T, et al. The cold regions hydrological process representation and model: A platform for basing model structure on physical evidence [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(19): 2650-2667.

HiWATER: An Integrated Remote Sensing Experiment on Hydrological and Ecological Processes in the Heihe River Basin

Li Xin¹, Liu Shaomin², Ma Mingguo¹, Xiao Qing³, Liu Qinhuo³, Jin Rui¹,
Che Tao¹, Wang Weizhen¹, Qi Yuan¹, Li Hongyi¹, Zhu Gaofeng¹, Guo Jianwen¹,
Ran Youhua¹, Wen Jianguang³, Wang Shuguo¹

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *Beijing Normal University, Beijing 100875, China*;
3. *The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: This paper introduces the background, scientific objectives, experiment components and implementation plan of the Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER). The overall objective of HiWATER is to improve the observability of hydrological and ecological processes, to build a world-class river basin observing system, and to increase the applicability of remote sensing and other new generation observation techniques in eco-hydrological studies and water resource management at basin scale. HiWATER encompasses fundamental experiments, thematic experiments, application experiments, remote sensing methods development and products generation, and an integrated information system.

(1) Fundamental experiments: ① Microwave radiometer, imaging spectrometer, thermal imaging camera, Light Detection and Ranging (LiDAR) and other sensors will be used in the airborne missions to observe key eco-hydrological parameters and at the meantime to develop and improve the remote sensing models and methods for the retrieval of those variables. ② To establish a comprehensive hydrometeorological observation network that will cover the entire Heihe River Basin, in order to provide more representative model parameters and forcing data, and more accurate ground truths. ③ An eco-hydrological Wireless Sensor Network (WSN) will be established to capture the spatial-temporal dynamics and variations of key forcing data, eco-hydrological parameters, and model state variables over heterogeneous land surfaces. ④ Airborne sensors calibration and ground-based remote sensing experiments will be conducted. Remote sensing products will be validated rest upon the WSN, in association with simultaneous in situ measurements and other intensive observations.

(2) Thematic experiments: A multi-scale observation experiment on evapotranspiration will be performed over heterogeneous land surfaces. Eddy Covariance (EC) systems, Large Aperture Scintillometer (LAS), and Automatic Weather Stations (AWSs) will be intensively deployed to constitute an observing matrix to reveal the spatial heterogeneities of ET, to identify the scale effects and achieve scale transformation of ET over heterogeneous landscapes, and to provide elementary data sets for the development and validation of ET estimation models.

(3) Application experiments: Purposeful observation experiments will be performed in the upstream, middle stream, and downstream of the Heihe River Basin, aiming at snow and frozen soil hydrology, water balance in irrigation management, and quantifying plant water consumption. Observed data sets and remote sensing products will be used in distributed hydrological model, coupled surface water-groundwater-crop growth model, and ecological water consumption model towards the areas of upstream, middle stream, and downstream. It is anticipated the applicability of remote sensing in integrated eco-hydrological studies and water resource management can be enhanced by means of these empirical researches.

The intensive observations and field campaigns will be orderly undertaken in the middle stream, upstream, and downstream of the Heihe River Basin from May, 2012 to 2015. Dependent on various experiments, remote sensing products at basin scale for the key eco-hydrological variables will be created, scale transformation approaches will be explored, and a multi-source remote sensing data assimilation system will be eventually built.

Key words: Eco-hydrology; Remote sensing experiment; Watershed observing system; Heihe River Basin; Airborne remote sensing; Hydrometeorology; Wireless sensor network; Validation of remote sensing products.