

引用格式: Li Xin, Li Xiaowen, Li Zengyuan, *et al.* Progresses on the Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER)[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5): 637-649. [李新, 李小文, 李增元, 等. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 637-649.]

黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述

李 新¹, 李小文^{2,3}, 李增元⁴, 王 建¹, 马明国¹, 刘 强², 肖 青²,
胡泽勇¹, 车 涛¹, 王介民¹, 柳钦火², 陈尔学⁴, 阎广建³, 刘绍民³,
王维真¹, 张立新³, 王锦地³, 牛 铮², 晋 锐¹, 冉有华¹, 王亮绪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, 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:“黑河综合遥感联合试验”是在我国典型的内陆河流域——黑河流域开展的大型航空、卫星遥感和地面同步观测试验。28 个单位的 280 多名科研人员、研究生和工程技术人员参加了试验。介绍了 2008 年加强试验期以来的研究工作进展。“黑河综合遥感联合试验”最主要的成果是一套多尺度、高质量的综合观测数据集, 该数据集已正式对外发布, 十分有力地支持了一系列生态、水文、定量遥感模型的发展、改进和验证, 试验所期望突破“数据瓶颈”的目标已经实现。此外, 已在积雪参数提取、地表冻融微波遥感、森林结构参数的遥感反演、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、尺度推绎、流域水文模拟和同化应用等方面取得了丰富的研究成果。试验亮点包括蒸散发观测及其遥感模型改进、机载激光雷达的应用、多角度热红外传感器研制和应用; 航空遥感在获取高质量、高分辨率数据方面依然具有不可替代的作用。

关 键 词: 遥感试验; 航空遥感; 多角度热红外; 激光雷达; 水文气象; 能量平衡; 黑河流域

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2012)05-0637-13

1 引 言

“黑河综合遥感联合试验”(Watershed Allied Telemetry Experimental Research, WATER)是由中国科学院西部行动计划项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”和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”在我国第二大内陆河流域——黑河流域联合开展的大型遥感试验。总体目标是: ① 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; ② 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; ③ 发展尺度转换方法, 实现对地表生态和水文变量的主被动遥感协同反演。试验由寒区水文试验、森林水文试验、干旱区水文试验和水文气象试验组成; 分为准备期、预试验、加强试验和持续观测期 4 个阶段。

“黑河综合遥感联合试验”的科学目标、总体设计和试验方案已在论文[1]中做了详细介绍; 论文[2]则是对整个试验过程——特别是加强观测的总体概述。此外, 王建等^[3]和马明国等^[4]分别综述了上游寒区水文试验以及森林水文和中游干旱区水文

收稿日期: 2012-07-15; 修订日期: 2012-08-28

基金项目: 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”(KZCX2-XB3-15), 国家杰出青年科学基金“流域尺度陆面数据同化系统研究”(40925004)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 在冰冻圈及水文水资源研究中的应用、流域集成研究。E-mail: lixin@lzb.ac.cn。

试验。本文不再赘述试验概貌,而是重点介绍加强试验期以来在数据处理和分析、水文气象观测、水文和生态变量/参数反演与估计、水文和生态模型应用等方面的研究进展。

加强试验在 2008 年 3 月 7 日~4 月 12 日、5 月 15 日~7 月 22 日、8 月 23~9 月 5 日展开,共计 120 d,由 28 个单位的 280 多名科研人员、研究生和工程技术人员参加。航空遥感共使用了 4 类机载遥感传感器,分别是微波辐射计(L、K 和 Ka 波段)、激光雷达(同时携带多光谱 CCD 相机)、高光谱成像仪、多角度热红外成像仪;累计飞行 25 次,计 110 h。在水文气象观测方面,布置了由 12 个加强和超级自动气象站、6 个涡动相关通量站、2 个大孔径闪烁仪以及大量业务气象站和水文站组成的加密地面观测网,其中,新建的自动气象站、涡动相关通量站以及阿柔大孔径闪烁仪都连续观测至持续观测期结束(2009 年 12 月),部分观测系统连续运行至 2012 年。在地面试验方面,按流域尺度、重点试验区、加密观测区和观测小区 4 个尺度布置地面观测方案,使用了车载降雨雷达、地基微波辐射计、地基散射计、热红外光谱仪、可见光/近红外光谱仪等地面遥感设备,在 10 个加密观测区使用各种自动观测仪器和人工观测方法开展了密集的地面同步观测。观测的变量和参数包括:积雪属性(雪深、雪密度、雪粒径及雪反射率等)、冻土属性(冻融状态、水分含量、电导率等)、反射率/反照率、土壤温度和冠层温度、叶面积指数(LAI)、光合作用有效辐射比率(FPAR)、生物量、植被含水量、其他植被生物物理和生物化学参数、以及植被结构参数(树高、冠幅等)。在卫星遥感方面,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。这些数据共同构成了一套支持流域模型集成研究和流域生态水文定量遥感研究的综合数据集。

2010 年 7 月,在“黑河综合遥感联合试验”加强观测期结束两年之际,经过系统的数据处理、元数据和数据文档制备、质量控制以及信息系统开发,“黑河综合遥感联合试验”数据集正式对外发布,实现了“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”的目标^[5]。

“黑河综合遥感联合试验”已于 2010 年底正式结束持续观测期。目前,已在积雪参数提取、地表冻融微波遥感、森林结构参数的遥感反演、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、尺度推绎、流域水文模拟和同化应用等方面取得了研究成果。相关进展已分别在《冰川冻土》^[3]、《地球科学进展》^[4]、《遥感技术与应用》^[5]、《Hydrology and Earth System Sciences》^[6]、《International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation》^[7]以专刊的形式报道,并相继见诸于国内外其他学术期刊和国际国内会议。此外,还分别于 2008 年 11 月和 2009 年 8 月召开了“黑河综合遥感联合试验”第一次和第二次研讨会,两次会议各有 150 多人和 120 多人参会,从多方面讨论了试验研究进展。至 2012 年 6 月本文成稿时,直接使用“黑河综合遥感联合试验”的研究论文已逾 160 篇,其中,发表在国际期刊的研究论文超过 60 篇。

本文总结了“黑河综合遥感联合试验”自加强试验期以来的研究进展。限于篇幅,论文分为内容上各有侧重的上下两篇。其中,上篇报道了试验数据处理和信息系统的最新进展,同时重点介绍了航空遥感数据处理与应用以及水文气象观测和能量闭合方面的研究进展;下篇则重点报道了水文和生态遥感研究进展(见下篇文章)。

2 数据信息系统和数据共享

获取一套高质量的、多尺度、并经过严格的质量控制和标准化整理、最终发布共享的流域综合数据集,一直是“黑河综合遥感联合试验”的重要目标之一和科学责任。从试验之始,我们即制定了“建立数据共享与发布平台,力争成为开放联合、学科交叉以及数据共享的典范”的方针^[8]。试验结束后,经过历时近两年的数据处理、元数据和数据文档制备以及严格的质量控制^[5,9-10]，“黑河综合遥感联合试验”数据集于 2010 年 7 月开始对外发布共享,并很快得到了国内外同行的广泛关注。自正式共享以来,截至 2012 年 6 月,共为 248 位科研人员提供了 701 个数据集,数据总量达 6 987 Gb,提供的数据涉及航空遥感、卫星遥感、气象水文观测及地面观测的各个方面。其中,在来自于基金委重大研究计划“黑河流域生态—水文过程集成研究”有关项目的数据申请中,“黑河综合遥感联合试验”数据集占了主体部分。广泛的数据申请和数据应用,充分说明了一次综合试验在支持生态水文集成研究以及水文、生态和定量遥感模型的发展、改进和验证方面的重要作用(图 1)。

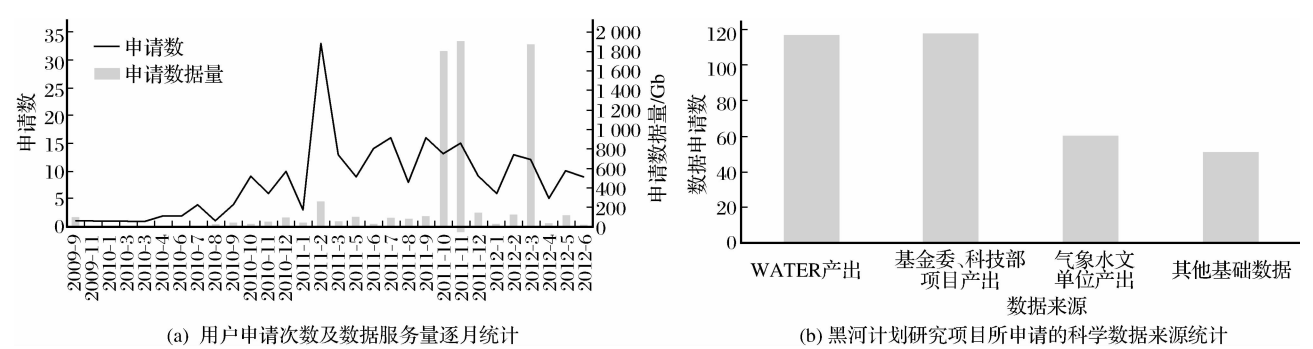


图 1 “黑河综合遥感联合试验”数据服务统计

Fig. 1 Statistics on the data service of the WATER

目前,“黑河综合遥感联合试验”共发布数据集 258 个^①,包括了预试验、加强试验和持续观测试验的所有数据集。其中航空遥感共 26 个数据集,含微波辐射计数据集 9 个,WiDAS 数据集 8 个,成像光谱仪数据集 5 个,激光雷达数据集 4 个;卫星遥感数据集 15 个;在地面观测数据集中,寒区水文试验数据集 69 个,森林水文试验数据集 21 个,干旱区水文试验数据集 96 个;气象水文试验数据集 31 个。经过预处理和质量控制后的 Level 2 数据,总数据量约 2.6Tb。详细的数据编目、各个数据集的元数据及相关文档,都可从“黑河综合遥感联合试验”数据信息系统网站在线获取(中文网站:<http://westdc.westgis.ac.cn/>和 <http://rsdc.bnu.edu.cn/>;英文网站:<http://wdscar.westgis.ac.cn/>)。

3 航空遥感

航空遥感共使用了 4 类机载遥感传感器,分别是微波辐射计(L、K 和 Ka 波段)、激光雷达(同时携带多光谱 CCD 相机)、高光谱成像仪、热红外成像仪;累计飞行 25 次,共 110 h^[2]。其中,热红外和激光雷达数据的预处理较为复杂,其应用也更具有基础性,因此我们在本节中详细介绍。对于高光谱成像仪和微波辐射计的应用,则分别在水文和生态遥感应用部分作相应的介绍。

3.1 多角度热红外

地表热辐射的方向性是热红外遥感的热点和难点问题^[11],热辐射方向特性反映了地表组分温度信息,对于地表能量平衡和水热通量研究具有重要意义。目前,唯一具有多角度热红外观测能力的 AT-SR(或 AATSR)传感器分辨率较粗,难以满足对于

异质地表热辐射方向性特性的研究。在“黑河综合遥感联合试验”中,我们将研制和应用机载多角度热红外遥感传感器作为一个重要研究课题。

“黑河综合遥感联合试验”中自主研制了机载红外广角双模式成像仪(Wide-angle Infrared Dual-mode line/area Array Scanner—WiDAS)。它由 4 个 CCD 相机、1 个中红外热像仪和 1 个热红外热像仪组成,成功实现了 6 个波段 7 个角度的观测能力,最大观测角度为 30°(CCD 波段)和 40°(中红外和热红外)^[12]。数据可用于提取地表反照率、植被覆盖度、叶面积指数、地表温度、组分温度等参数,对于地表能量平衡研究——特别是提高蒸散发的估计精度有着重要意义。

刘强等^[13]详细介绍了 WiDAS 数据的预处理过程,这些处理过程是使用 WiDAS 数据产品开展定量遥感研究和应用的基础。WiDAS 传感器的可见近红外与中红外、热红外波段在探测器性能、空间分辨率和目标辐射特性方面都具有显著差异,因此它们的预处理具有不同的算法。可见近红外波段的 CCD 相机用积分球定标,用简单的多项式形变函数进行波段间配准,用 6S 模型和实测气溶胶光学厚度进行大气校正。中红外、热红外波段的红外相机则用面元黑体定标,波段配准中采用了复合的形变函数和金字塔匹配算法,大气校正采用 MORTAN 模型和实测大气廓线。目前,WATER 信息系统中提供了 4 次飞行的 1A~3B 级 WiDAS 数据产品(图 2)。WiDAS 获取的高分辨率红外多角度数据集,尤其是机载中红外多角度数据集,为国内首次获取,在国际上也是一份非常难得的数据。

① 自“黑河综合遥感联合试验”数据集发布以来,我们对部分数据做了进一步的质量控制和数据更新。本文统计信息截至到 2012 年 6 月 30 日。

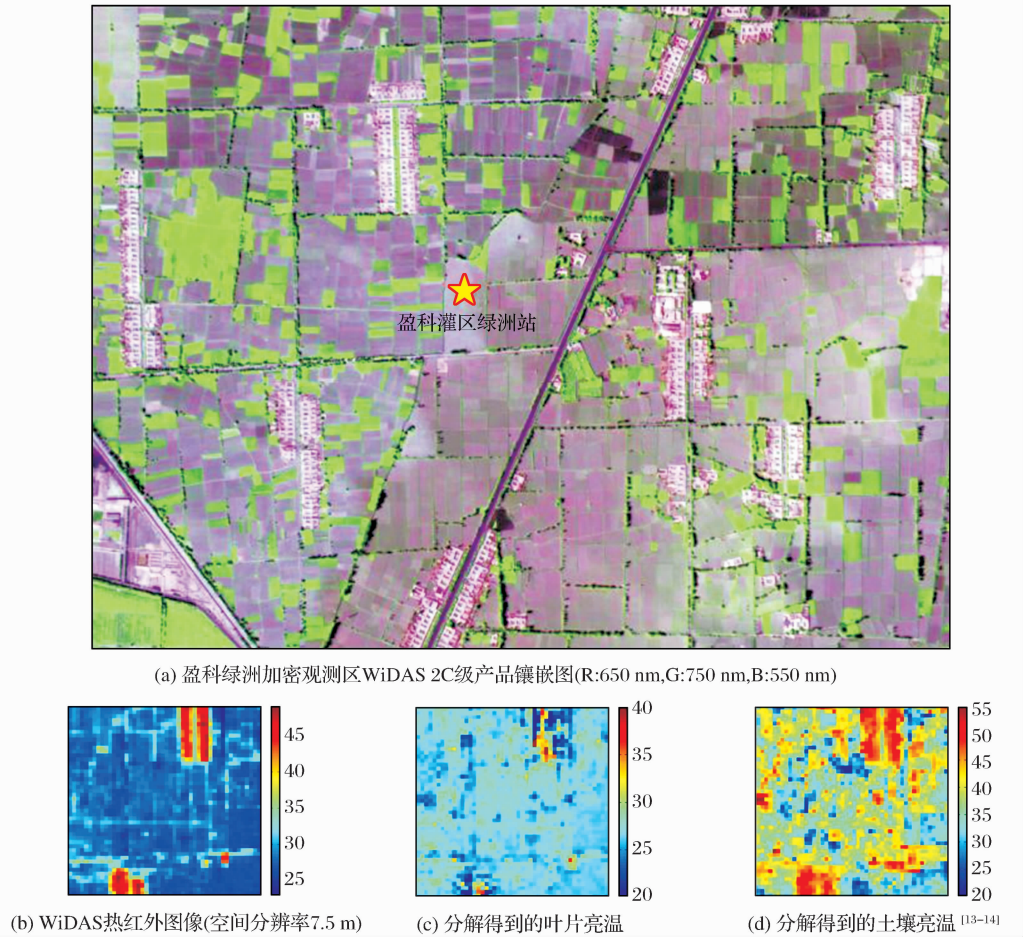


图 2 WiDAS 航空图像及组分温度分解结果

Fig. 2 WiDAS airborne images and the leaf and soil brightness temperature separation results

在组分温度反演方面,Liu 等^[14]根据可见近红外和热红外波段的局地化相关特性,发展了一个新算法,成功地实现了冠层温度和冠层下土壤背景温度的分离。无论从遥感数据提取的组分温度,还是大量地面观测的结果都表明植被和土壤的平均温度差异经常可以达到 20 K 以上,这种显著的差异是干旱区地表的一个显著特征;因此,用多角度热红外分离冠层和土壤温度在干旱区具有比其他地区更加重要的意义。Huang 等^[15-16]发展了基于辐射度的热红外辐射方向特性计算机模拟模型(TRGM),并与农田小气候模型(Cupid)耦合,实现了农作物冠层热红外辐射方向特性的动态模拟,发现土壤水分、短波辐射、风速等农田小气候参数,以及冠层结构、组分温度和组分发射率等因素是决定热红外辐射特性的主要影响因子。模型模拟发现在太阳观测主平面,农作物冠层热红外辐射表现有明显的“热点效应”,呈现为碗边、圆顶和铃型三种典型的形态特征。据此,推算了热点强度和热点半宽度描述热红外“热点效应”的大小和形态,利用 WATER 试验观测数据

验证表明,其相关系数大于 0.9,均方根误差 0.2 K;叶片和土壤组分温度差估计精度优于 1.0 K。

此外,彭菁菁等^[17]发展了多角度热红外干旱指数(MTDI),利用 WiDAS 数据实证了 MTDI 在土壤水分监测中的应用能力。作者选择代表地表热辐射方向性特征的核函数组合因子与地表温度(LST)构成特征空间并提取出 MTDI,与温度植被干旱指数(TVDI)比较,MTDI 中包含的方向性辐射信息对于地表植被的分布较敏感,能更好地反映高植被覆盖区域的土壤水分变化。

3.2 激光雷达

星载激光雷达(LiDAR)分辨率较粗,无法满足高分辨率数字高程模型(DEM)提取,以及异质性极强的内陆河流域山区森林结构参数和干旱区绿洲农田结构参数提取的需求。WATER 试验获取的 LiDAR 数据,在数字高程模型(DEM)信息提取,森林结构参数、森林生物量、作物结构参数、地物分类和空气动力学粗糙度估计方面得到了广泛应用,充分证明了航空遥感所不可替代的观测能力。图 3 展示了在黑河中游

盈科绿洲加密观测区,利用机载 LiDAR 获取的数字表面模型(DSM)与 CCD 影像(20 cm 分辨率)叠加的三维视图。

LiDAR 数据完成了初级预处理和应用预处理,初级预处理包括 LiDAR 波形数据的精确位置解算和点云化处理,应用预处理包括生成 DSM、DEM 和冠层高度模型。同时,基于原始数据发展了 LiDAR 波形的分析方法,如刘清旺等^[18]从基本的雷达方程出发,对森林冠层结构进化简化,建立了 LiDAR 立体散射体模型。并通过分析随时间变化的入射脉冲能量对返回波形的影响,得到时长变化量与森林冠层空间特征之间的对应关系;对不同散射体波形特征进行分析,提出了单峰导数法和多峰导数法两个新的波形特征量提取方法。覃驭楚等^[19]针对全波形数据分解中广泛应用的高斯混合模型的参数估计

问题,提出了一个逐级递进高斯分解流程,解决了激光雷达波形分解中高斯函数的阶数确定问题。同时,综合考虑发射脉冲与大气衰减对回波的影响,实现了回波数据的相对辐射校正,使得同样地物之间波形数据的相似性提高。Qin 等^[20]针对激光雷达波形分解中广泛应用最大似然估计方法只关注高的 R^2 指标,而对可能出现的局部最优甚至可能出现负的峰值问题关注不够,提出了一种新的 LiDAR 波形分解方法,该方法采用 RDP (Ramer-Douglas-Peucker)方法对波形进行曲线拟合,发展了利用新的波形峰值的选择方法和波形参数确定方法。通过对小脚印 LiDAR 和大脚印 LiDAR 单波形的分解实验,表明新方法可提供全局最优的波形分解结果,可避免噪声对分解的影响,具有可接收的 R^2 和更快的速度。

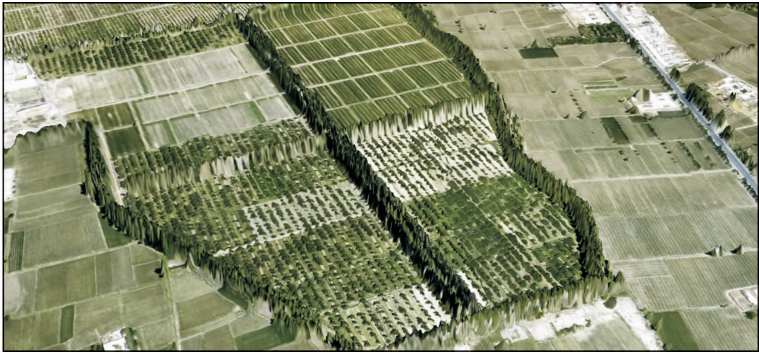


图 3 机载航空激光雷达获取的数字表面模型与 CCD 影像(20 cm 分辨率)叠加的三维视图(黑河中游盈科绿洲加密观测区)

Fig. 3 Three-dimensional view of the Yingke oasis foci experimental area, the middle reaches of the Heihe River Basin

This picture is generated by overlaying high resolution CCD images (20 cm resolution) on the digital surface model obtained from Airborne LiDAR

森林结构是研究森林水文和生态过程的重要参数,WATER 中发展了多种利用机载 LiDAR 数据估算山区森林结构参数的方法。何祺胜等^[21]基于大野口试验区的高密度 LiDAR 小脚印点云数据和地面实测数据,建立了单株和样地尺度青海云杉林结构参数的估算方程。其中,林分平均高、林分算术平均高的估测方程的 R^2 大于 0.7,平均冠幅、平均胸径、林分密度的估测方程 R^2 均大于 0.5。刘清旺等^[22]采用优化的单株木树冠特征识别算法估算相关的结构参数,最后通过回归分析建立估算参数(树高、冠幅)与实测参数(树高、冠幅、胸径)之间的最优回归方程,并与现有的单株木生物量实测相关生长方程联立,得到单株木生物量估算相关生长方程。验证结果表明树高、冠幅及生物量的估算均有较高的精度。Cao 等^[23]发展了结合机载 LiDAR 数据和

SPOT 5 影像,利用线性光谱分解模型和 Li-Strahler 几何光学模型的有效植被面积指数反演算法,并利用地面 LAI-2000 和 TRAC 测量结果验证了该方法的有效性($R^2=0.75$)。He 等^[24]以 LiDAR 估计的青海云杉林地上生物量为参考值,评价了 ALOS PALSAR L 波段数据估算山区森林地上生物量的性能。结果表明:在样地水平上,HH 和 HV 极化的后向散射系数与生物量没有明显关系。在林分水平上,后向散射系数随着森林生物量的增加而增加,并可用一个对数函数来描述,对 SAR 的地形校正有助于森林地上生物量反演的有效性。Tian 等^[25]分别采用参数与非参数方法,基于多源遥感数据进行了森林地上生物量估算。结果表明:采用参数方法(逐步回归法),LiDAR 数据即可获得高精度估算结果;针对非参数方法(k 最邻近法),增加输入特征向

量不一定能提高估计精度;利用 SPOT 5 数据的前两个主成分和 DEM,结合 k 最邻近法即可达到开展业务化制图的目的,并可替代 LiDAR 估算区域森林地上生物量。

利用 LiDAR 开展农田等低矮植被的结构参数反演十分具有挑战性。周梦维等^[26]以全波形 LiDAR 发射与回波波形的 Gaussian 性为理论基础,通过对波形的拟合,实现作物与土壤波形的剥离,然后确定回波波形上各关键点,再结合作物冠层结构的特征获得盈科试验区农作物冠层高度。验证结果表明:反演作物冠层高度的绝对误差在 0.04 m 以内,相对误差小于 5.2%。进一步,结合从 LiDAR 全波形数据获取的 DEM、DSM、回波强度信息和光学信息——如植被指数,利用决策树方法开展试验区典型地物的分类;发现 LiDAR 信息对于区分垂直方向特征明显的地物独具优势,因此两者结合可以显著提高目标分类精度,总体分类误差为 7%^[27]。

此外,WATER 试验中获取的机载 LiDAR 数据,还被应用于森林和农田 LAI 反演^[28-30],并被创

新性地应用于空气动力学粗糙度估计^[31-32]。我们将在本文相应章节中介绍这些研究进展。

4 水文气象观测

4.1 观测数据处理及能水循环特征分析

内陆河流域中,山区冰冻圈和干旱区并存,各种地域单元都有着其鲜明的能量平衡和水循环特征。20 多年来,研究者在流域不同地带先后设置了水文气象和通量观测设备^[33-34],分析其能量平衡和水循环特征。“黑河综合遥感联合试验”则建立了地域覆盖类型更全面的加密水文气象观测网^[1-2],为分析和研究流域能水循环特征提供了更完备的数据基础。

WATER 共新建了 7 个自动气象站,4 套涡动相关观测(EC)^①,2 套大孔径闪烁仪(LAS),并与流域内其他 5 个自动气象站和 2 个通量站开展了协同观测。在持续观测期结束后,7 个自建站中的 3 个结束了观测任务,另外 2 个延续观测至 2012 年 3 月,阿柔站和花寨子站则观测至今。表 1 汇总了自动气象站和通量站的最新状况。

表 1 WATER 建立的自动气象和通量站的观测起至时间(具体观测项目参考文献[1],[2],[40])

Table 1 Automatic meteorological stations and FLUX tower of WATER					
序号	站名	位置	海拔/m	观测起至时间	景观类型
1	阿柔冻融观测站*	100°27'E, 38°03'N	3 033	2007-07-25 起至今,中间于 2010-05-27 气象站迁移至 100°27'25.8''E, 38°03'01.7''N	高山草原
2	冰沟寒区水文气象观测站	100°13'E, 38°04'N	3 407	2007-09-25 至 2010-01-14	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	2007-10-29 至 2009-10-01	高山寒漠
4	大野口关滩森林站*	100°15'E, 38°32'N	2 835	2007-10-01 至 2012-03-30	森林
5	大野口马莲滩草地站	100°18'E, 38°33'N	2 817	2007-11-02 至 2010-05-16	草地(以马莲为主)
6	花寨子荒漠站	100°19'E, 38 46 N	1 726	2008-06-01 至 2012-03-29 2009-03-06 至今(重新更换观测仪器)	荒漠草原
7	盈科灌区绿洲站*	100°25'E, 38°51'N	1 519	2007-11-05 至今 2012-03-29	农田(玉米地)

注:有*站点包括 EC 观测,阿柔站包括 EC 和 LAS 观测系统

这些观测系统的数据都经过严格的质量控制^[35]。自动气象站的观测数据质量控制分计算机自动控制和人机交互判断两个阶段。其中,计算机自动控制包括气候学界线值、台站极值、基本气象公式、内部一致性、时间一致性等检查步骤,并对检查结果进行综合决策;人机交互包括对前一步骤中判断为可疑和错误的数据进行人工判断、分析错误原因、订正逻辑性错误。经过严格质量控制的 WATER 试验自动气象站观测数据总体质量较高^[36]。

原始涡动数据的预处理和质量控制使用了改进的 EdiRe 软件^[37]。通过异常值及野点剔除、倾斜修正、超声虚温订正、时间滞后校正、频率响应修正和空气密度效应修正,生成 Level-1 数据产品;再通过大气状态平稳性检验、总体湍流特征检验以及湍流通量统计特征分析等质量控制步骤,生成 Level-2 数据产品。王介民^[38]改进了以上方法,并编撰了《涡动相关通量观测指导手册》。各站土壤水分的测量结果,结合 Delta 和 Stevens 两种手持式 TDR 以

① 其中设立在临泽草地加密观测区的 1 套涡动相关仪为短期观测。

及现场取土样也做了系统的标定^[39]。

基于这些资料,我们对黑河流域的能水循环特征有了进一步的认识。例如,王维真等^[40]选取高寒草地、森林及农田3种下垫面的观测资料,分析了它们的水、热和二氧化碳通量特征。结果发现:黑河流域内不同地表覆被类型下,能量收支各分量(净辐射、感热、潜热和土壤热通量等)有明显的日变化特征;各通量站观测结果如季节变化趋势等差异明显,反映了不同地表覆被类型地气交换特征的不同。其中,盈科绿洲站的观测结果进一步证实了绿洲效应。即:①潜热通量大,日蒸散量超过5 mm;②由于周围干热沙漠的影响,绿洲内的感热通量小,且在白天中午至下午这一较长时段变为负值,即热量由上向下传输,近地层出现逆温。

WATER建立的多尺度观测系统中,还包括可以观测从几百米到数公里尺度上区域湍流通量的LAS,以获取较大尺度的水热循环特征。同时,依据相关模型,分析EC和LAS两个系统的不同通量贡献源区,以便进行尺度转换、遥感验证等研究^[41]。Liu等^[42]针对黑河流域内的灌溉农田、高山草原等几种不同地表覆被类型的通量观测,分析了蒸散发的日变化和季节变化规律、地表异质性的影响以及EC和LAS不同源区的贡献等。发现由于LAS的贡献源区远大于EC,其观测到的感热也大于EC,而目前一般认为,EC系统普遍存在对蒸散发(潜热)和感热都低估的现象。这意味着利用较大尺度的观测系统开展蒸散发和通量观测对理解尺度问题、能量闭合和水收支是非常重要的。

4.2 能量闭合问题

EC通过测量风速脉动与标量(温度、水汽和CO₂浓度等)脉动,计算协方差得到湍流通量。这是边界层气象学的基本原理与应用之一。EC方法不仅精度高,且对生态系统环境干扰最小,可在野外条件下长时间连续可靠的工作,是当前地气交换研究中最先进和首选的通量观测方法。然而,分析有关通量时出现的能量平衡闭合问题,即测量到的感热和潜热通量之和一般总小于近地层可利用能量(净辐射与土壤热通量之差),使得对EC方法的精度和代表性带来诸多怀疑。普遍超过10%的能量闭合观测误差,对于模型验证、能量平衡分析、CO₂源汇分析、及遥感真实性检验等,都是难以接受的。

王介民等^[35]对国内外有关近地层通量闭合问

题的研究现状做了综述,并结合WATER试验数据开展了个例研究。结果表明:①近地面能量平衡闭合问题是1990年代中后期EC通量观测方法大量推广应用后突显出来的,但并非主要由EC的通量观测误差引起。如果对原始湍流数据进行科学的后处理(包括频率损失修正等),在平坦均匀下垫面和大气湍流平稳发展等简单情况下,EC的观测误差不应当对能量平衡闭合产生重要影响。②对参与近地面能量收支的其他机制即能量“非湍流输送”各组分的更详细分析,如近地面可利用能量各项中土壤和植被热量储存项,以及植被光合作用耗能等的合理估算,常会使能量闭合率提高10%~15%。③“涡动相关方法”应用在复杂的大气湍流通量观测中的局限,特别是对低频较大尺度湍流通量的低估,仍是关键所在。在理论分析的基础上,以阿柔冻融观测站6 d连续资料为例,仔细计算土壤浅层热储存,在EC资料再处理中加上高低频损失修正等,再参考该站LAS观测对感热通量的提高,能量闭合率可达到99%。但在许多复杂情况下,较大尺度的涡旋或湍流有组织结构会有更明显影响。近地层能量闭合问题的根本解决必须考虑后者的贡献。④地面观测网或飞机、LAS等观测的“面积平均”通量常常可以实现较好的能量闭合率。提高通量观测的时空代表性是解决能量闭合问题的关键。以单点观测代表复杂空间分布,仍然是当前EC方法难以逾越的局限。这些,都为EC观测矩阵的设计(初步设计可参考文献^[43])做了必要的理论准备。

Liu和王维真等对黑河地区不同站点的能量闭合问题做了较细致的分析。Liu等^[42]利用30 min的EC通量观测数据分别分析了2008~2009年盈科绿洲站和关滩森林站、2008年6~12月以及2009年1~12月的阿柔冻融站能量闭合问题,在对土壤热储存订正至地表的基础上,得出3个站点的能量闭合率在79%~89%之间。在平坦均匀下垫面和大气湍流平稳发展等简单情况,EC的观测误差不应当对能量平衡闭合产生重要影响,由于盈科绿洲、阿柔冻融和关滩森林3个站点的植被高度分别为1.8 m、0.2~0.3 m和20 m,其冠层热储存项对能量闭合率的贡献不可忽略。在能量平衡各项中,光合作用以及存储在植被一大气系统的能量通常被忽略,这也是造成能量不闭合现象的原因之一,张智慧等^[44]对盈科绿洲站的冠层热存储项(光合作用耗能

项、冠层热存储项、空气热存储项、冠层露水焓变项及空气湿度变化项)的贡献进行了分析,使能量闭合率提高到 96.4%,其中光合作用耗能的贡献为 3.8%,空气热存储及冠层热存储的贡献分别为 0.2%和 0.3%,而冠层露水焓变项和空气湿度变化项贡献很小。

5 结 语

5.1 数据成果

“黑河综合遥感联合试验”的最主要成果是一套多尺度、高质量的综合观测数据集。缺乏系统的观测数据,以用于集成研究和各类模型的标定和验证一直是黑河流域集成研究工作的一个重要瓶颈。“黑河综合遥感联合试验”从根本上改变了这种状况,本文上下篇所概述的航空遥感、水文气象、地表通量、生态水文参数等基础数据获取,以及流域能水循环分析、生态和水文遥感方法等方面的进展都体现了 WATER 综合数据集的作用。此外,WATER 的各种观测数据还在水文、生态和定量遥感模型的发展、改进、标定和验证中发挥了重要作用。所涉及的模型包括:

(1) 寒区水文模型。主要是分布式水文模型和冻土水文过程^[45-46]及积雪水文过程的耦合^[47-48]。所有这些建模工作,都需要细致和高分辨率的 DEM、地表覆被类型、近地表气象要素、能量和水量平衡、以及积雪和冻土水文过程观测资料的支持。WATER 寒区水文试验所获得的观测资料,在这些新模型的发展和验证中发挥了关键的作用。

(2) 地下水模型。对蒸散发过程和河道水文过程的简化都是目前地下水模型的不足之处。在 WATER 数据的支持下,地下水模型中河道模块的改进及与陆面过程模型的耦合都取得了新进展^[49-50]。

(3) 生态系统生产力模型。黑河流域的生态系统模拟之前鲜有开展,且缺乏系统的验证资料。利用 WATER 中 EC 观测的碳通量,Wang 等^[51-52]系统地估算了黑河流域不同生态系统的生产力,并验证了模型结果。多种观测资料,也在作物生长模型的标定及碳数据同化研究中发挥了重要作用^[53]。

(4) 陆面和水文数据同化。已发展了能够同化多源遥感和其他观测数据的黑河流域水文数据同化系统^[54],随着这一系统的成熟,WATER 综合观测

数据将和流域集成模型深度结合,勾勒出流域水文和生态过程的清晰框架。

从总体上看,丰富的数据分析和应用证明,WATER 观测数据已经十分有力地支持了一系列的生态、水文、遥感模型的建模工作。可以认为,这次试验所期望突破“数据瓶颈”的目标已经实现,“黑河综合遥感联合试验”成功地起到了一次大型综合试验积累基础观测数据的作用,WATER 综合数据集的成效已经显现出来。

5.2 试验亮点

“黑河综合遥感联合试验”在多个方面开展了创新性的观测。

(1) 遥感蒸散发模型的发展和改进。蒸散发是耦合生态与水文过程的关键环节,也是干旱区内陆河流域水循环的最主要支出项,其观测和模拟的不确定性也最大。自 HEIFE 试验^[55]以来,蒸散发的观测与建模一直是黑河流域水文与生态研究的一个重点。“黑河综合遥感联合试验”中,基于多源观测数据,研究人员发展和改进了多种蒸散发估算方法,特别是在自动化的地表温度—植被指数(Ts-VI)三角空间提取、利用计算流体力学模型反演动力粗糙度、多角度热红外数据的应用、蒸散发参数化方案的改进等方面都取得创新性的研究成果(将在本文下篇做详细综述)。同时,对能量闭合问题也有了新认识。经过细致的数据处理、土壤热存储项订正、光合作用耗能项等其他项贡献的分析,能量闭合有了很大的提高。然而,能量不闭合是一个与尺度相关、与空间异质性相关的复杂问题,WATER 在蒸散发观测与分析方面的研究进展,为从理论上和试验上进一步推动对能量闭合问题的解决打下了更好的基础。

(2) LiDAR 数据在 DEM 获取、森林和农田结构参数提取、粗糙度估计等方面的创新工作。以上参数是高分辨率的生态水文建模与过程理解的基础数据,由于星载 LiDAR 在短期内还难以具备高分辨率地获取这些参数的能力,航空 LiDAR 遥感就成为必不可少的手段,将在流域水文和生态研究中发挥重要作用。

(3) WATER 试验中设计了新的多角度热红外传感器并且成功获取数据。WiDAS 数据的初步应用说明,它在理解地表能量平衡——特别是在蒸散发模型发展中具有独特优势,尤其是它获取组分温

度的能力是其他遥感数据源所不可取代的。这一创新性的遥感仪器设计,提供了新的遥感潜力,为开展多角度热红外试验遥感打下了更好的基础。

需要强调的是这些观测亮点能充分说明航空遥感在获取高质量、高分辨率数据方面依然具有不可替代的作用。例如,WATER 试验中,机载多角度热红外的分辨率达到 8 m,可相应的卫星数据(AATSR)的分辨率则为 1 km;机载 LiDAR 的分辨率 <1 m,而星载 LiDAR(如 GLAS)的分辨率则为 ~ 150 m。高分辨率的航空遥感数据,无论是在获取其他遥感手段所无法企及的数据产品,如山区森林结构参数,还是检验新的遥感方法方面,都具有不可替代的作用。

5.3 组织方式创新

WATER 也践行了大型试验——特别是跨学科试验的组织方式。可以认为,没有多项目、多学科的联合,取得 WATER 的综合观测成果是不可能的。试验团结了几十家单位,汇聚了多学科的智慧,以跨项目的方式开展,这在国内近 10 多年是很少或者几乎没有的。WATER 的实施,倡导了科学界自身联合开展大规模科学试验的途径,相信她在组织方式、资源共享、公共开放平台建设、数据共享等方面的经验,将为地表系统科学研究团队工作方式留下有益的探索。

5.4 不足之处

WATER 总体上是一次以数据积累为核心目标的试验,同时也开展了内容丰富的水文和生态参数的反演与估算研究。然而,在遥感的水文和生态应用方面,还没有开展系统的方法论探索,还没有形成从数据到水文和生态应用再到水资源管理决策的系统方法论。特别是困扰于以下两点:

(1) 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;缺乏将遥感受用于生态—水文模型的成熟方法论。

(2) 尺度问题的理论和实践挑战依然艰巨。WATER 试验虽然获取了大量星—机—地同步的多尺度观测数据,但在尺度转换、异质性像元的真实性检验、多尺度数据的联合应用等方面的研究尚显薄弱。

因此,从总体上说,“黑河综合遥感联合试验”还是一次数据获取试验,我们还亟需开展一次方法论试验,来系统地发展遥感在流域生态—水文集成研

究中的应用能力。

5.5 展望

总之,“黑河综合遥感联合试验”,作为一次多学科联合的大型航空—卫星遥感与地面同步观测试验,开展了建立流域观测系统的成功探索,建立了一个开放的试验平台,更重要的是获取了一套多尺度、高质量的综合数据集。这些数据,作为试验的最主要资产,已经并会继续在水文、生态、以及定量遥感模型的发展、改进和验证研究中起到重要的支持作用。随着时间的推移,相信“黑河综合遥感联合试验”的基础支撑作用将会进一步发酵。

挑战来自于如何将这些多源多尺度观测统一、有效地应用于流域科学中,如何应对复杂的尺度问题,如何实现遥感和水文与生态科学的深度结合……。然而,我们深信,试验是发展定量遥感,也是让遥感在水文和生态科学中真正发挥作用的重要手段,依然有许多的水文和生态过程,需要通过观测试验去发现、去探索;遥感水文和遥感生态的方法,需要观测试验去实证;尺度转换的规律,也有待于真正多尺度的观测试验去揭示。

WATER 所积累的经验,所存在的不足,都将转化为新一轮试验的指导原则。我们期望在 WATER 的基础上,经过精心准备,开展一次更成熟的遥感水文与遥感生态试验。

致谢:“黑河综合遥感联合试验”有 28 家单位的 281 位人员亲临现场指导或参加试验,衷心感谢“黑河综合遥感联合试验”所有参加人员! 试验数据处理工作自 2008 年加强试验结束后开始,前后历时两年,期间得到了参试单位众多科研人员和研究生的帮助。该试验由中科院西部行动计划项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”和国家 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”联合组织实施,两个项目分别得到中国科学院和科技部的资助,在此谨致谢忱! 在试验执行以数据处理过程中,程国栋院士、吕达仁院士、姜景山院士、符淙斌院士、金亚秋院士、王介民研究员、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、李传荣研究员、Toshio Koike、Massimo Menenti、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,我们在此表示衷心的感谢! 大量卫星遥感数据从 EAS、JAXA 等机构免费获取,Envisat 数据通过中

欧龙计划 2 期项目获得;JAXA ALOS 数据通过 Takeo Tadono 博士、叶庆华博士和施建成研究员获取(中科院青藏所与 JAXA 合作项目);ASTER 数据由梁顺林教授通过 NASA 项目获取。试验的后勤保障得到钟兰鸿女士和汤瀚高级试验师的大力支持。同时,试验的圆满完成也离不开张掖气象局、甘肃祁连山水源涵养林研究院、张掖水务局、甘肃省张掖市政府、青海省祁连县政府及当地群众的热情支持,在此一并致谢!

组织单位:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院遥感应用研究所、北京师范大学、中国林业科学研究院。

参与单位:成都电子科技大学、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、甘肃省祁连山水源涵养林研究院、中国科学院研究生院、中国科学院新疆生态与地理研究所、北京大学、兰州大学、南京大学、中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国气象局兰州气象干旱研究所、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、中国科学院空间科学与应用研究中心、德国海德堡大学、中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所、中国农科院、国家农业信息化工程技术研究中心、华南农业大学、武汉大学、首都师范大学、四川师范大学。

支撑单位:中国飞行试验研究院中飞通用航空公司、广西桂能信息工程有限公司、北京天诺基业科技有限公司。

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] Wang Jian, Che Tao, Zhang Lixin, *et al.* The Cold Regions Hydrological Remote Sensing and Ground based Synchronous Observation Experiment in the Upper Reaches of Heihe River[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[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 189-197.]
- [4] Ma Mingguo, Liu Qiang, Yan Guangjian, *et al.* Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Heihe River Basin: Experiment of Forest Hydrology and Arid Region Hydrology in the Middle Reaches[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 681-695. [马明国, 刘强, 阎广建, 等. 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[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 681-695.]
- [5] Li Xin, Li Xiaowen, Li Zengyuan. Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER) Datasets are Available for Open Access[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 761-765. [李新, 李小文, 李增元. 黑河综合遥感联合试验数据发布[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 761-765.]
- [6] Li X, Li X W, Roth K, *et al.* Preface “Observing and Modeling the Catchment Scale Water Cycle”[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 597-60.
- [7] Li X, Su Z B, Wu B F. Retrieval of Key Eco-hydrological Parameters for Cold and Arid Regions[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 1-2.
- [8] Li Xiaowen, Li Zengyuan, Li Xin, *et al.* Watershed Allied Telemetry Experimental Research Album[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2010: 133. [李小文, 李增元, 李新, 等. 黑河综合遥感联合试验图册[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2010: 133.]
- [9] Ma Mingguo. Quality Control and Evaluation for the Ground Observation Data of the Watershed Allied Telemetry Experimental Research[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 766-771. [马明国. WATER 试验地面观测数据质量控制与评价[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 766-771.]
- [10] Wu Lizong, Qu Yonghua, Wang Liangxu, *et al.* Data Management and Its Sharing Application of Watershed Allied Telemetry Experimental Research[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 772-781. [吴立宗, 屈永华, 王亮绪, 等. 黑河综合遥感联合试验的数据管理与共享[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 772-781.]
- [11] Li Xiaowen, Wang Junfa, Wang Jindi, *et al.* Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2001. [李小文, 汪骏发, 王锦地, 等. 多角度与热红外对地遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [12] 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.]
- [13] Liu Qiang, Xiao Qing, Liu Zhigang, *et al.* Image Processing Method of Airborne WiDAS Sensor in WATER Campaign[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 797-804. [刘强, 肖青, 刘志刚, 等. 黑河综合遥感联合试验中机载 WIDAS 数据的预处理方法[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 797-804.]
- [14] Liu Q, Yan C Y, Xiao Q, *et al.* Separating Vegetation and Soil

- Temperature Using Airborne Multiangular Remote Sensing Image Data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 66-75.
- [15] Huang H G, Liu Q H, Qin W H. Thermal Emission Hot-spot Effect of Crop Canopies—Part I: Simulation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(3): 313-322.
- [16] Huang H G, Liu Q, Liu Q H, *et al.* Validating Theoretical Simulations of Thermal Emission Hot Spot Effects on Maize Canopies[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(3): 746-761.
- [17] Peng J J, Liu Q, Liu Q H, *et al.* Kernel-driven Model Fitting of Multi-angle Thermal Infrared Brightness Temperature and Its Application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(4): 361-365, 371.
- [18] Liu Qingwang, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Feature Analysis of LiDAR Waveforms from Forest Canopies[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54(8): 1206-1214. [刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 森林冠层探测激光雷达的波形特征分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1670-1678.]
- [19] Qin Yuchu, Li Bin, Niu Zheng, *et al.* Stepwise Decomposition and Relative Radiometric Normalization for Small Footprint LiDAR Waveform[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2011, 54(4): 625-630. [覃驭楚, 李斌, 牛铮, 等. 小光斑激光雷达全波形数据递进分解与相对辐射校正[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 103-109.]
- [20] Qin Y C, Thuy Vu T, Ban Y F. Toward an Optimal Algorithm for LiDAR Waveform Decomposition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(3): 482-486.
- [21] He Qisheng, Chen Erxue, Cao Chunxiang, *et al.* A Study of Forest Parameters Mapping Technique Using Airborne LiDAR Data[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(7): 748-755. [何祺胜, 陈尔学, 曹春香, 等. 基于 LIDAR 数据的森林参数反演方法研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 748-755.]
- [22] Liu Qingwang, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Estimating Biomass of Individual Trees Using Point Cloud Data of Airborne LiDAR[J]. High Technology Letters, 2010, 20(7): 765-770. [刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 机载 LiDAR 点云数据估测单株木生物量[J]. 高技术通讯, 2010, 20(7): 765-770.]
- [23] Cao C, Bao Y, Xu M, *et al.* Retrieval of Forest Canopy Attributes based on a Geometric-optical Model Using Airborne LiDAR and Optical Remote-sensing Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(3): 692-709.
- [24] He Q S, Cao C X, Chen E X, *et al.* Forest Stand Biomass Estimation Using ALOS PALSAR Data based on LiDAR-derived Prior Knowledge in the Qilian Mountain, Western China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(3): 710-729.
- [25] Tian X, Su B, Chen E X, *et al.* Estimation of Forest Above-ground Biomass Using Multi-parameter Remote Sensing Data Over a Cold and Arid Area[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17: 102-110.
- [26] Zhou Mengwei, Liu Qinhua, Liu Qiang, *et al.* Inversion of Crop Height by Small-footprint-waveform Airborne LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 183-188. [周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 基于机载小光斑全波形 LIDAR 的作物高度反演[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 183-188.]
- [27] Zhou Mengwei, Liu Qinhua, Liu Qiang, *et al.* A Method for Classification by Fusing Full-waveform Airborne Laser Scanning Data and Aerial Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(6): 821-827. [周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 全波形激光雷达和航空影像联合的地物分类[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 821-827.]
- [28] Fu Z, Wang J D, Song J L, *et al.* Estimation of Forest Canopy Leaf Area Index Using MODIS, MISR, and LiDAR Observations[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2011, 5(1): 053530-053530-21. doi:10.1117/1.3594171.
- [29] Zhou Mengwei, Liu Qinhua, Liu Qiang *et al.* Inversion of Leaf Area Index based on Small-footprint Waveform Airborne LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 207-213. [周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 机载激光雷达的作物叶面积指数定量反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 207-213.]
- [30] Cui Yaokui, Zhao Kaiguang, Fan Wenjie, *et al.* Retrieving Crop Fractional Cover and LAI based on Airborne LiDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(6): 1276-1281. [崔要奎, 赵开广, 范闻捷, 等. 机载 LiDAR 数据的农作物覆盖度及 LAI 反演[J]. 遥感学报, 2011, 15(6): 1282-1288.]
- [31] Colin J, Faivre R. Aerodynamic Roughness Length Estimation from Very High-resolution Imaging LiDAR Observations over the Heihe Basin in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(12): 2661-2669.
- [32] Tian X, Li Z Y, Vander Tol C, *et al.* Estimating Zero-plane Displacement Height and Aerodynamic Roughness Length Using Synthesis of LiDAR and SPOT-5 Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(9): 2330-2341.
- [33] 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.]
- [34] Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, *et al.* Simulation of Energy and Water Balance in Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer System in the Mountain Area of Heihe River Basin at Hexi Corridor of Northwest China[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2005, 48(4): 538-548. [康尔泗, 程国栋, 宋克超, 等. 河西走廊黑河山区土壤—植被—大气系统能水平衡模拟研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(6): 544-551.]
- [35] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Liu Shaomin, *et al.* The Problems of

- Surface Energy Balance Closure—An Overview and Case Study [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 705-713. [王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个案分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 705-713.]
- [36] Huang Guanghui, Ma Mingguo, Tan Junlei, *et al.* Data Quality Control and Products of Automatic Weather Stations for Watershed Allied Telemetry Experimental Research [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 814-820. [黄广辉, 马明国, 谭俊磊, 等. WATER 试验自动气象站数据质量控制与产品生成[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 814-820.]
- [37] Zhang Zhihui, Wang Weizhen, Ma Mingguo, *et al.* Data Processing and Product Analysis of Eddy Covariance Flux Data for WATER [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(6): 788-796. [张智慧, 王维真, 马明国, 等. WATER 试验涡动相关通量数据处理方法及产品生成[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(6): 788-796.]
- [38] Wang Jiemin. Guideline for the Flux Measurement Using Eddy Covariance Technique (Ver. 20120212) [S/OL]. <http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd>, 2012. [王介民. 涡动相关通量观测指导手册 (Ver. 20120212) [S/OL]. <http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd>, 2012.]
- [39] Wu Yueru, Wang Weizhen, Jin Rui, *et al.* The Calibration of Measurement of Soil Water Content Using Time Domain Reflectometry (TDR) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 262-267. [吴月茹, 王维真, 晋锐, 等. TDR 测定土壤含水量的标定研究[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 262-267.]
- [40] 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.]
- [41] 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.]
- [42] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, *et al.* A Comparison of Eddy-covariance and Large Aperture Scintillometer Measurements with Respect to the Energy Balance Closure Problem [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291-1306.
- [43] 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. [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.]
- [44] Zhang Zhihui. Study on the Flux Observation using Eddy Covariance Method in the Heihe River Basin [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011. [张智慧. 涡动相关法在黑河流域的通量观测与研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.]
- [45] Wang L, Koike T, Yang K, *et al.* Frozen Soil Parameterization in a Distributed Biosphere Hydrological Model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(3): 557-571.
- [46] 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, DOI: 10.1002/hyp.9514.
- [47] Li H Y, Wang J. Simulation of Snow Distribution and Melt Under Cloudy Conditions in an Alpine Watershed [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2195-2203.
- [48] Liu Yu, Jiang Lingmei, Shi Jiangcheng, *et al.* Validation and Sensitivity Analysis of the Snow Thermal Model (SNTherm) at Binggou Basin, Gansu [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4): 792-800. [刘誉, 蒋玲梅, 施建成, 等. 雪热力模型 (SNTherm) 在冰沟流域的模拟和敏感性试验[J]. *遥感学报*, 2011, 15(4): 801-810.]
- [49] Wang X S, Ma M G, Li X, *et al.* Groundwater Response to Leakage of Surface Water Through a Thick Vadose Zone in the Middle Reaches Area of Heihe River Basin, in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(4): 639-650.
- [50] 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, (in Revision).
- [51] Wang X F, Ma M G, Huang G H, *et al.* Vegetation Primary Production Estimation at Maize and Alpine Meadow Over the Heihe River Basin, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 94-101.
- [52] Wang X F, Ma M G, Li X, *et al.* Validation of MODIS-GPP Product at 10 Flux Sites in Northern China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(2): 587-599.
- [53] Wang J, Li X, Lu L. Regional Corn Yield Estimation by the Integration of Multi-source Observations with a Crop Growth Model [J]. *Agricultural Systems*, 2012 (in Revision).
- [54] Han X J, Li X, Franssen H H, *et al.* Spatial Horizontal Correlation Characteristics in the Land Data Assimilation of Soil Moisture [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(5): 1349-1363.
- [55] Hu Yingqiao, 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.]

Progresses on the Watershed Allied Telemetry
Experimental Research (WATER)

Li Xin¹, Li Xiaowen^{2,3}, Li Zengyuan⁴, Wang Jian¹, Ma Mingguo¹, Liu Qiang²,
Xiao Qing², Hu Zeyong¹, Che Tao¹, Wang Jiemin¹, Liu Qinhuo², Chen Erxue⁴,
Yan Guangjian³, Liu Shaomin³, Wang Weizhen¹, Zhang Lixin³, Wang Jindi³,
Niu Zheng², Jin Rui¹, Ran Youhua¹, Wang Liangxu¹

(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; 3. Beijing Normal University, Beijing 100875, China
4. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: WATER experiment is a simultaneous airborne, satellite-borne and ground-based remote sensing experiment taken place in the Heihe river Basin, a typical inland river basin in northwest China. Many teams contributed to the WATER through their participation. In total, 28 institutions and more than 280 scientists, students, engineers and aircrews participated in the field campaigns of WATER. This paper introduces the research progresses since the intensive observation period of WATER, which was completed in 2008. The most important outcome of the WATER is its multi-scale, high-quality, and integrated observational data sets, which was officially released and opened to public from July 2010. It offers supports for the development, improvement and validation of a series of ecological, hydrological, and quantitative remote sensing models. The designed objective to break through the data bottleneck in integrated watershed study has been accomplished. In addition, the WATER has achieved abundant research results in ① retrieving snow parameters, surface soil freeze/thaw state, forest structure parameters, evapotranspiration, soil water content and biogeophysical parameters from remote sensing; ② hydrometeorology observation; ③ and development of scaling methods, hydrological models and data assimilation system. The highlights of WATER include improvement of remote sensing models on estimating evapotranspiration, application of airborne LiDAR, and development and application of a multi-angle thermal infrared remote sensing sensor. It is also illustrated that the airborne remote sensing is still playing an irreplaceable role in obtaining high-quality and high-resolution data.

Key words: Remote sensing experiment; Airborne remote sensing; Multi-angle thermal infrared; LiDAR; Hydrometeorology; Energy balance; Heihe River Basin