

文章编号: 1001-8166(2010)08-0866-11

数字黑河的思考与实践 4: 流域观测系统*

李 新¹, 程国栋¹, 马明国¹, 肖 青², 晋 锐¹, 冉有华¹,
赵文智¹, 冯 起¹, 陈仁升¹, 胡泽勇¹, 盖迎春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:数字化的流域观测系统是数字流域的重要组成部分。①首先介绍了水循环卫星遥感和地面观测的最新进展,以及航空遥感在流域观测中的重要作用。②介绍了对于流域观测系统的构想。认为流域观测系统应兼顾陆面过程、水文、生态观测的不同空间尺度和时间尺度,监测与控制试验并重,地面与遥感配合,重视采样设计,重视新兴观测手段,与信息系统和模型高度集成,科学目标导向,模型需求驱动。③黑河流域观测系统由位于流域上中下游不同景观带的野外研究站、综合观测试验以及气象水文业务化观测网络组成,在流域内先后开展了 HEIFE 实验、金塔试验和黑河综合遥感联合试验。④介绍了对于流域观测系统的进一步构想:增强遥感观测能力是关键,集成遥感、地面观测和模型模拟才能更好地定量估计水循环,流域观测系统应和信息系统、综合模型等共同构成流域科学研究的信息基础设施,更好地为流域科学服务。

关键词:数字流域;流域观测系统;遥感;无线传感器网络;黑河流域

中图分类号: P334 **文献标志码:** A

1 引 言

阔步前行的地球观测技术正在从根本上改变着水文科学的面貌,把它从传统上“数据稀缺的科学”推进到数据丰富的科学^[1]。从卫星遥感到地面观测,一系列雨后春笋般成长起来的新兴观测技术,正在重新塑造着对水循环及其相关的各种地表过程的观测方式。流域科学是地球系统科学在流域尺度上的实践,它将深深受惠于已初具雏形的地球观测系统;但另一方面,地球系统科学是尺度依赖的科学,地球观测系统如何在空间异质性被放大的流域尺度上发挥其效能,如何更好地构建一个实时、可靠、多尺度、高精度、高分辨率、遥感—地面一体化的流

域观测系统,有许多亟待我们回答的科学问题。例如,观测在流域科学、在数字流域的整体框架中起到什么作用?一个流域观测系统至少应该有哪些组成部分?如何更有效地应用卫星遥感?遥感、地面观测和模型模拟如何更好地结合?流域科学中能够有效地开展控制性的科学试验吗?流域观测系统可以成为全球观测系统的一个原型吗?

本文是数字黑河系列论文^[2]的第四篇,是对流域观测系统的思考,论文将尝试针对以上问题展开讨论。首先介绍水循环遥感和地面观测的最新进展;接下来分析了流域观测系统的跨学科和多尺度特征,并提出了如何建立流域观测系统的构想;然后回顾了黑河流域观测系统的建设;最后总结全文,并

① 收稿日期: 2010-06-20 修回日期: 2010-07-02

* 基金项目: 国家杰出青年科学基金项目“流域尺度陆面数据同化系统研究”(编号: 40925004); 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); 国家高技术研究发展计划(863计划)子课题“多频多谱段遥感数据生态环境参数综合反演技术”(编号: 2009AA12Z1463)和“多源遥感数据同化通用软件系统研制”(编号: 2009AA12Z130)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: lxin@lza.ac.cn

讨论了建立更加完善的、服务于流域科学集成研究的流域观测系统的设想。

2 地球观测技术与流域科学

2.1 卫星遥感

单就陆地水循环而言,一些水循环的重要变量和过程已经可以通过卫星观测而获取。美国国家研究委员会在《地球空间观测: 第一个 50 年的科学成就》^[3]一书中总结出,许多陆地水文变量,包括大气水汽、降水、积雪、冰川运动和物质平衡、大陆尺度的地下水储量变化,都已经能够从卫星观测可靠地获取;而另外一些陆地水文变量——包括土壤水分、蒸散发和山区雪水当量的卫星遥感技术则还不十分成熟。但后一种状况正在得到迅速的改善,新一代的遥感卫星将越来越具有针对性,越来越面向具体的科学问题和用户需求^[4],自 2009 年以来的 10 年内,针对水循环变量的遥观测计划就有^[5]。

- 全球降水观测计划 (GPM): 其核心卫星由 NASA 和 JAXA 合作研制,将搭载一个双频 (Ku 和 Ka 波段) 的降雨雷达和一个多通道的被动微波降雨辐射计。此外,通过国际合作,将发射多颗携带被动微波辐射计的非太阳同步轨道和太阳同步轨道遥感卫星,组成卫星星座。GPM 对全球降雨的观测频率将达到 3 小时^[6]。

- 土壤水分与海洋盐分卫星 (SMOS): 于 2009 年 11 月由 ESA 发射升空,搭载 L 波段微波辐射计。其主要科学目标之一是表层土壤水分的观测,分辨率为 40 km^[7]。

- 土壤水分主动和被动观测使命 (SMAP): 由 NASA 研制,搭载主被动一体的 L 波段微波辐射计和雷达,计划于 2014/2015 年发射。其科学目标与 SMOS 部分类似,也以土壤水分和地表冻结/融化为观测对象,但空间分辨率将大大提高到 3 km,重访周期为 2~3 天^[8]。

- 地表水体和海洋地形使命 (SWAT): 由 NASA 发起的卫星计划,搭载 Ka 波段雷达干涉计,计划于 2013—2016 年间发射。以河川、湖泊、水库、湿地中水体的高度为观测目标,其水平分辨率达到数十米,垂直分辨率达厘米级,重访周期为 3~6 天^[9]。

- 寒区水文高分辨率观测平台 (CoReH2O): 由 ESA 发起的卫星计划,将搭载 Ku 波段 (17.2 GHz) 和 X 波段 (9.6 GHz) 的 VV 和 VH 双极化 SAR。以积雪为主要观测对象,将大大提高山区雪水当量的观测精度,空间分辨率 100 m,重访周期为 3~15

天^[10]。

- 雪与寒区陆面过程观测计划 (SCLIP): 由 NASA 发起,搭载的雷达的配置与 CoReH2O 相同,同时,也将搭载 K 和 Ka 波段的微波辐射计。积雪也是其主要观测对象之一^[5]。

- 重力恢复与气候试验 II (GRACE-II): 是 GRACE 的后续卫星,可通过重力观测来获取地下水动态等大尺度的水平衡,空间分辨率由 GRACE 的 450 km 左右提高到 100 km 左右^[11]。

- 重力场与稳定态海洋环流探测者 (GOCE): 于 2009 年 3 月由 ESA 发射升空,是迄今为止精度最高的重力卫星,可探测大尺度的水平衡,空间分辨率为 100 km^[11]。

其他与水循环密切相关的卫星计划还包括 JAXA 的全球变化观测使命 (GCOM) 中的水观测系列卫星^[12],中国气象局的风云卫星系列^[13]等。此外,大量的新一代星载合成孔径雷达、激光雷达、高光谱超光谱成像仪和其他遥感传感器,也在水循环观测中发挥着重要的作用^[5]。可以预见,随着新一代对地观测计划的实施,以及一系列更有针对性的遥感卫星的时间分辨率和空间分辨率的大大提高,水文科学将进入到一个全新的阶段。2020 年的水文科学,将比今天更加全面地打上太空和地球观测时代的深刻烙印,并且须臾不可分离。

2.2 航空遥感

相比卫星遥感,航空遥感一般都具有更高的空间和光谱分辨率、更精细和敏锐的观测能力、更强的机动性和可控性。它是卫星遥感的重要补充,同时也是一种非常重要的试验手段。在大尺度和流域尺度水循环及相关的陆面和生态过程研究中,航空遥感依然发挥着极为重要的作用,它的特点主要是:

- (1) 严格的可控性。依靠航空遥感可实现严格的航空—地面同步观测或者星—机—地同步观测,各种观测在时间和空间上精确匹配,辐射校正各种参数可同步获取,并且可进行更为精细的遥感传感器定标。这些特点都为过程研究、模型验证和尺度转换研究提供了不可替代的可控数据。因此,航空遥感不仅在过去 20 年来重要观测试验,如 FIFE^[14]、BOREAS^[15]、SMEX^[16] 和 CLPX^[17] 中起到了关键的作用,也将在未来的观测试验中继续扮演重要角色。

- (2) 尺度转换的桥梁。尽管卫星遥感的观测能力在不断增强,空间分辨率也大大提高,但相对航空遥感来说,像元内的异质性依然很强,开展精确和精

细的遥感验证相对较为困难。相对于卫星遥感,航空遥感的几何分辨率、光谱范围和光谱分辨率、获取时相以及重复周期等都可以根据需求灵活配置,可以获取从地面观测尺度(厘米级)到对应于甚高分辨率卫星(米级)再到对应于高分辨率卫星(数十米)的不同尺度观测,从而可以缩小星载传感器面测量与地面点测量之间遥感数据属性特征的差异。因此,航空遥感数据既可以在理想情况下做为用于遥感验证的均质像元数据,又可以作为研究尺度转换的重要数据源,在遥感时空尺度转换的过程中起到一个必要的桥梁作用。

(3) 检验卫星遥感观测能力的手段。几乎所有成熟的卫星遥感传感器,以及大多数遥感反演估算模型都是首先经过航空遥感的检验和验证。特别是在水文应用方面,由于星载微波辐射计的分辨率一般都很粗,而开展航空遥感试验更容易和地面观测值进行比对,因此,此类试验显得更为重要,如近年来开展的 SMEX 系列试验^[16]和 NAFE 试验等^[18]。针对未来的卫星计划开展仿真研究,也是航空遥感的另一个重要用武之地,2.1 节中提到的 SMAP、SWOT、CoRE20 等卫星遥感计划,无一不得益于航空遥感试验的支持。

(4) 流域观测系统的重要组成部分。虽然卫星遥感的分辨率已经大大提高,特别是卫星多光谱和 SAR 遥感,分辨率都已达到亚米到米级,但同样分辨率的高光谱、超光谱和激光雷达卫星却还远未提上日程,而后者在流域水文和生态科学研究中发挥着十分重要的作用,可以填补点测量和卫星遥感之间的诸多空白^[19,20]——例如测量森林和农作物冠层结构参数。因此,航空遥感不仅是科学试验,也是业务化的流域观测系统的重要组成部分。

2.3 新兴的水文与生态地面观测手段

在水文遥感高歌猛进的同时,对陆地水循环以及相关的生态和其他过程的地面观测能力也正在不断地增强,新的观测技术、手段和传感器不断出现,近年来受到普遍关注的新技术就有:

- 无线传感器网络:是一种将传感器技术、自动控制技术、数据网络传输、储存、处理与分析技术集成的现代信息科学技术。网络中每个节点由传感器、收发器、微处理器和能量单元(太阳能或电池)组成,并且互相通讯而构成智能化和自动化的观测网络^[21,22]。在水文应用方面,随着土壤水分、土壤温度以及其他各类传感器变得越来越精巧、越来越廉价、可靠和低功耗,大量部署这些传感器已变得完

全可能^[19]。空间密度空前提高的传感器网络,一方面使得我们能够捕捉到所观测对象在流域尺度上的空间变异性;另一方面,由于它比人工观测更加客观,在时间上可以做到与卫星遥感过境精确匹配,因此,它已成为连接传统的单点观测和遥感观测之间的一个桥梁,可以在遥感真实性检验中发挥十分重要的作用。

- 大尺度的通量观测:涡动相关是直接测量蒸散发以及其他地表通量的主要方法,其足迹可从几十米到数百米不等,与陆面模型的尺度有较大差异;另外,由于其观测范围的限制,往往缺乏捕捉较大尺度涡流的能力,通常存在能量不闭合现象^[23]。近年来受到广泛关注的大孔径闪烁仪(LAS)则能测量公里到数十公里尺度上的通量,更利于计算流域和汇水区尺度上的水平衡;同时,也使得通量观测变得更易于与卫星遥感估计得到的通量值相比较^[24]。

- 分布式水体温度观测:精确测量大气水汽含量、较大水体高度的变化的 GPS 水文观测,宇宙射线土壤水分测量方法,同位素方法,新一代天气雷达,地基激光雷达技术,声多普勒水流剖面测量(ADCP),地下水的时域瞬变电磁法(TDEM)测量,以及与水文密切相关的生态、生物化学循环、水质、土壤、生物(包括微生物)等自动传感器,在近年来都得到了快速发展^[19,25]。

所有这些新的观测手段,一方面大大地增强了对从微观到流域再到大规模水循环的观测能力,另一方面使得“分布式”的地面观测成为可能。同时,各类传感器之间互相组网,优势互补,构成传感器 Web,正在将传统上的地面点观测变成面观测。

3 流域观测系统构想

3.1 流域观测系统的跨学科特征

流域科学具有鲜明的多学科、交叉学科和跨学科特征,需要地球表层系统科学中各个部门学科的参与。由于这些学科所研究对象的尺度不同,其思路往往也有很大差异。接下来,我们从与流域科学密切相关的 3 个学科——陆面过程、水文学和生态学的角度分别分析它们对流域观测的空间和时间尺度以及可控性的认识。

陆面过程研究传统上以理解地气相互作用为目标。在众多的陆面过程试验中,尽管观测往往是以气象站或通量站为核心,但由于其目标是应用于 GCM 的次网格过程参数化,它所关心的空间尺度还是大陆或区域尺度,以大网格内异质性的观测为其

出发点: 在时间尺度上则强调快过程, 以加强期为特征的观测时段。在观测手段上一般借助于微气象和通量观测设备。从可控性来讲, 陆面过程试验一般不可控, 只能依靠大自然形成的不同气候和景观特征, 进行守候式的监测试验。

水文观测一般以流域、集水区或坡面为基本的观测单元, 强调不仅要测量垂直方向的水平衡, 也要测量所观测对象 (如不同水文响应单元) 之间在水平方向上的相互作用。因此, 它对观测的空间密度的要求远高于陆面过程试验; 其时间尺度则以小时、日为基本单元, 一般要持续到一个水文年以上——特别是考虑到冻融、积雪等寒区水文过程。观测的核心变量是降雨、蒸发、径流、入渗、积雪、土壤水分

及其冻融循环、地下水位等。水文试验也以监测为主, 但部分试验可控, 如一些坡面径流试验。

生态试验在空间尺度上则更小, 以器官一个体一样地为基本观测单元; 在时间尺度上除了短期过程的观测外, 也重视多年甚至百年或更长时间的长期监测。在观测手段上, 野外试验和实验室分析并重。生态试验的可控性较强, 可以人为控制光、热、水、肥等条件, 而观测相应的生态响应。

在流域科学的视野内, 显然需要以跨学科的思路, 兼顾以上 3 种不同的空间和时间尺度, 但同时又要以流域为基本单元, 以水为主线, 监测与控制试验并重, 才能全面理解流域尺度上的水文与生态过程。图 1 概述了流域观测系统的跨学科特征。

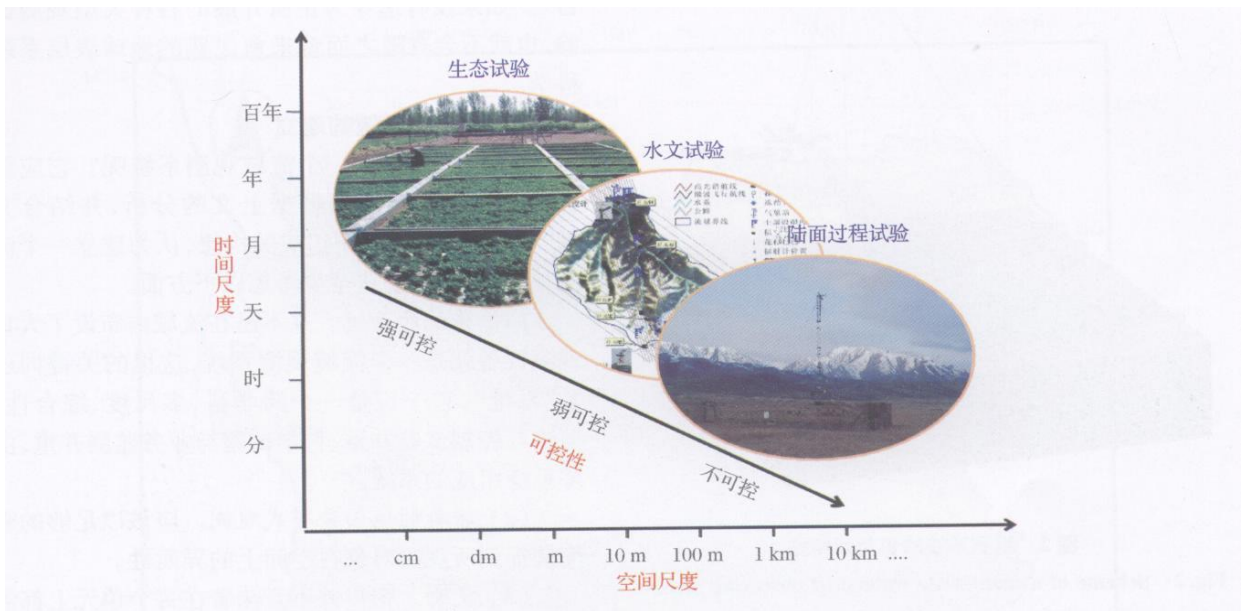


图 1 流域观测系统的跨学科特征

Fig 1 Watershed observing strategy from a transdisciplinary viewpoint

3.2 流域观测系统的多尺度特征

地面点观测传统上往往选择均质地表, 这主要是因为对均质地表的测量、分析和建模都较为容易。但异质性是地表自然过程的基本特征, 从严格意义上说, 地球表面不存在绝对均质的地表。在流域科学中, 显然不能再以均质地表为基本的观测对象, 而必须捕捉所测量对象的空间和时间异质性^[26]。然而, 异质性观测十分复杂, 又和尺度问题深深地联系在一起。如何才能通过多尺度观测, 真正捕捉到所观测对象在空间和时间上的异质性呢?

图 2 以对应于多个中分辨率遥感像元 (500 m ~ 2 km) 的异质地表为例, 概述了我们对于多尺

度观测的思考。传统上, 从卫星遥感到航空遥感再到地面观测, 是一个从较粗分辨率到精细分辨率再到点的嵌套式尺度。但是, 随着卫星遥感分辨率的大大提高, 地面大尺度观测手段和传感器网络的出现, 卫星—航空—地面已经不再是一个嵌套的观测, 而是相互交织在一起的多尺度观测系统。在这个系统中, 异质性能够被传感器网络、大尺度观测和成像方式 (遥感) 等多种观测手段所捕捉到, 但由于不同观测的有效感应范围都不一致, 尺度转换问题变得空前复杂。从定量度量异质性、度量观测误差, 以及各种观测相互比较的角度, 在布置多尺度观测系统时应考虑:

• 各种观测——包括遥感的像元、滑动相关和 LAS 的足迹,其代表性范围或空间足迹应尽可能重合。

• 观测的空间代表性误差在统计上是无偏的,方差尽可能小,观测的空间统计分布特征(概率分布函数)应该已知,并可根据源权重函数或采样点的空间布置方案来定量估计。

• 可以预先根据研究区异质性的特点设计采样方案,同时也必须考虑交通可达性、安全性等实际因素的限制。

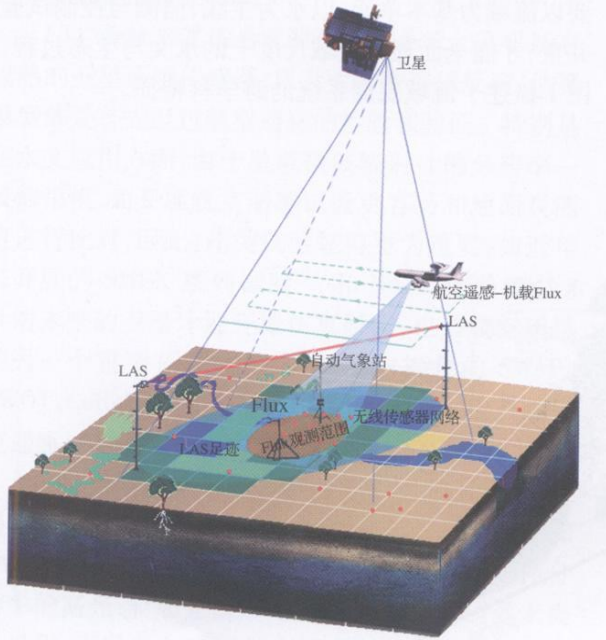


图 2 观测系统的多尺度特征

Fig 2 Scheme of a multi scale watershed observing system

3.3 监测试验、控制试验和综合观测试验

传统上认为,“地球科学始于观察,而非控制试验”^[27]。但是,随着地球科学成为实验科学,以验证科学假说为目标的控制试验越来越被倡导和推介^[26]。科学问题和技术进步双重驱动,监测与控制试验并重的综合观测试验应成为流域观测系统的另一个重要特征。其中,

(1) 监测试验的目标是观察自然过程,或者是为已有模型的验证和运行提供驱动数据、参数和验证数据^[28],并采集高分辨率的数据以将其同化到流域水文和生态模型。监测试验必须捕捉到所观测现象在其模拟、观测尺度上的异质性。异质性的尺度针对不同变量/参数而不同,因此,应针对每个观测量设计具体的观测方案和空间及时间采样方案。

(2) 控制试验是有目的地对自然过程的观测,是验证科学假说的试验,而科学假说往往表现为正在发展中的模型和新理论。由于地球科学的试验对象是大自然,传统上开展控制试验十分困难。但随着观测能力的提高,控制或半控制试验逐渐变得可能,最典型的例子是生物圈 2 号的尝试。另外,根据自然形成的气候、景观等梯度,设计对比观测试验,也可被理解为部分可控的试验。

在目前,开展以监测试验为主,辅之以部分可控试验的综合观测试验,是发展成熟的流域观测系统的重要途径之一。正如美国国家研究委员会的《水文科学的机遇》一书中所指出^[29]，“大型试验,为不同的研究者提供了开展他们研究工作的基本平台”。如果没有迄今为止所开展的各种大型观测试验,也就不会有随之而愈来愈成熟的地球表层系统科学。

3.4 流域观测系统的建立

那么,如何建立一个流域观测系统呢?它应该有哪些特点呢?我们根据上文的分析,并结合文献^[30]对流域观测系统组成的构想,认为建立一个流域观测系统时,应该至少考虑以下方面。

(1) 系统的系统。并不是在流域内布设了大量观测设备就是一个流域观测系统,这里的关键词还是“系统”,它一定是一个跨学科、多尺度、综合性、监测与控制试验并重、科学试验与业务监测并重,由多系统组成的系统。

(2) 密集的地面分布式观测。应该以足够的密度捕捉到所观测对象在空间上的异质性。

(3) 优化。密集并不意味着在每个单元上都需要观测,这不经济、不可能也无必要,应根据我们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。

(4) 遥感和地面的互相协同。遥感能直接观测以及间接反演和估计的水文及相关变量/参数在逐渐增多,在地下水和径流等非遥感观测的传统领域也正在扮演越来越重要的角色。但遥感并不能观测到流域水文和生态研究所需的所有变量/参数,或者其空间和时间分辨率还不能满足很多水文和生态研究需求。因此,地面观测依然不可缺少。只有遥感和地面互相协同,才能既保证遥感的精度,又将观测系统真正扩展到整个流域尺度。

(5) 与信息系统的集成。实现数据的自动采集、传输、发布等方面的数字化改造,以及对各观测节点的远程控制。

- (6) 与模型高度集成。以模型需求为导向开展观测, 重视通过观测验证科学假说和新理论。
- (7) 迎接新的观测技术的挑战。

4 黑河流域观测系统

黑河流域作为我国流域科学研究的重要试验流域, 其观测系统的建设, 积 20 多年之功, 已初具规模, 形成了以野外研究站和大规模综合观测试验为核心, 并与气象、水文、水文地质、水资源管理、农业、林业等部门的业务观测站网密切配合的流域观测系统。在本节中, 我们将重点介绍黑河流域的野外研究站和综合观测试验。关于业务观测系统, 文献 [31] 做过较详细介绍, 更具体的观测编目可参考

“数字黑河”网站 ([http //he he westgis ac cn](http://hehe.westgis.ac.cn))。图 3 展示了黑河流域观测系统。

4.1 野外研究站

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在黑河流域上游高山冰雪带、草原森林带、中游平原绿洲带、下游戈壁荒漠带, 先后建设有 4 个野外研究站, 它们针对流域上、中、下游不同的自然景观和特色鲜明的水文与生态过程, 开展长期观测研究, 形成了黑河流域观测系统的主干。这 4 个站分别是:

- (1) 临泽内陆河流域综合研究站, 始建于 1975 年, 2003 年加入中国生态系统研究网络, 位于黑河流域中游临泽县平川镇, 站区周边主要景观类型为绿洲、绿洲—荒漠过渡带、沙漠和戈壁。主要开展荒

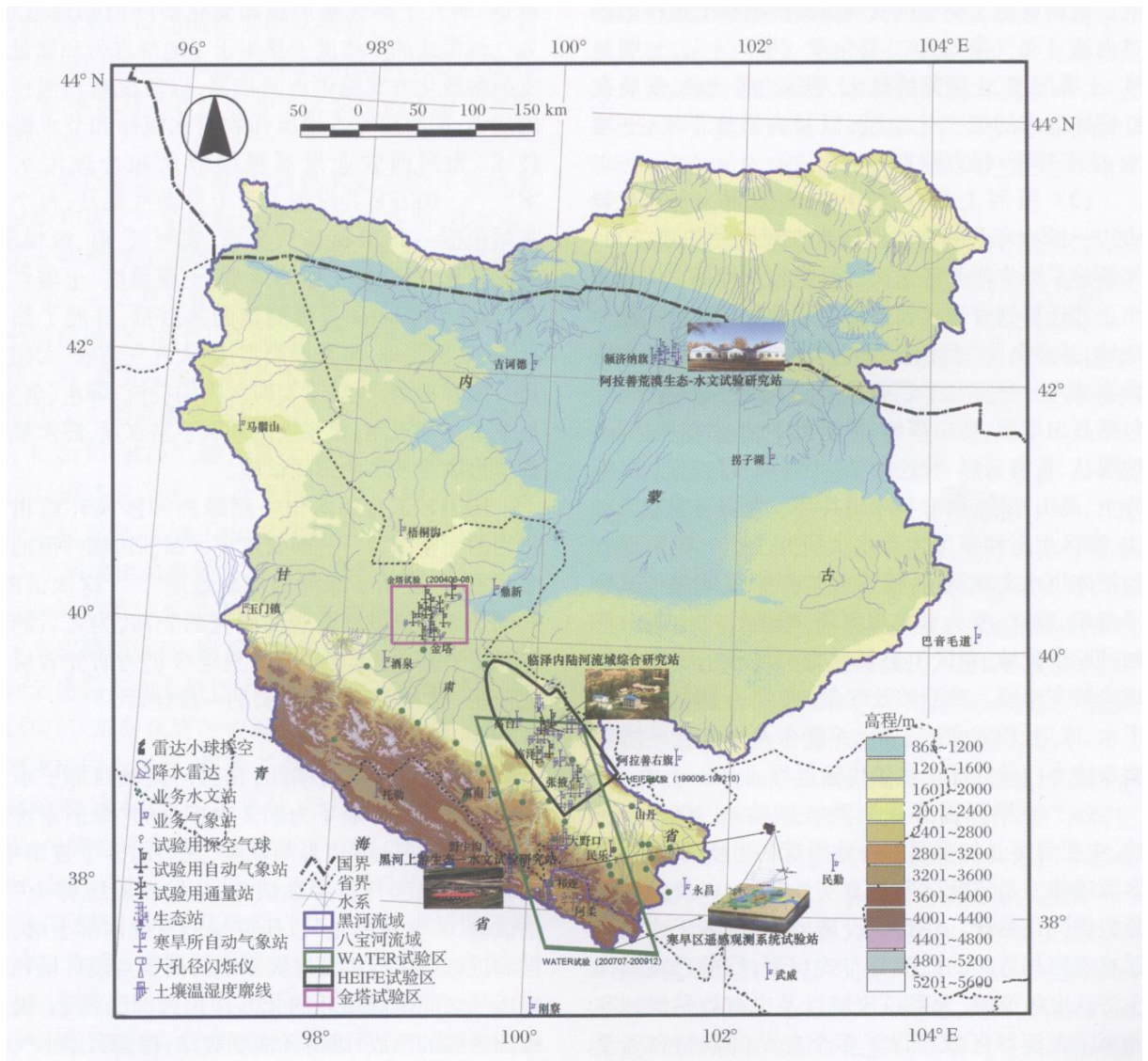


图 3 黑河流域观测系统

Fig 3 The watershed observing system of the Heihe River Basin

漠及荒漠绿洲农田生态系统演变长期定位研究,以及内陆河流域水—生态—经济系统综合观测研究。观测设施主要包括分布在黑河全流域不同景观带的 4 套环境观测系统,位于站区的涡动相关、波文比、自动气象站和一系列生态水文观测设备,站区周边地区的水分、土壤、植被、地下水等长期观测样地/点,并配备有农业试验地、水肥试验场、土壤与水化学分析实验室。

(2) 阿拉善荒漠生态水文试验研究站,始建于 1982 年,位于黑河流域下游阿拉善高原额济纳旗,站区周边主要景观类型为河岸林(乔木胡杨、灌木红柳和柽柳)和戈壁荒漠。主要开展极端干旱荒漠生态系统中绿洲生态水文、恢复生态、荒漠生态研究。观测设施主要包括安装在额济纳旗七道桥胡杨林内的自动气象站和二氧化碳、树干茎流、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量、土壤张力等观测,安装在红柳样地内的波文比系统,以及大量地下水、土壤水、生态样带 样方调查。

(3) 黑河上游生态水文试验研究站,承袭 1950—1990 年代祁连山寒区水文观测站积累,2004 年新建了野牛沟寒区水文过程定位观测站^[32],2008 年正式迁移到青海省祁连县扎马什乡马粪沟试验小流域,并命名为“黑河上游生态水文试验研究站”。该流域内分布有几乎所有的寒区典型下垫面类型,包括高山草原、高山草甸、沼泽化草甸、河谷灌丛、山坡灌丛、青海云杉、祁连圆柏,并且季节性冻土、多年冻土、高山寒漠、积雪和冰川共存。主要开展寒区水文、寒区生态和寒区生态水文研究工作。观测设施包括冰川水文观测场,积雪水文观测场,寒漠带试验子流域,森林、灌丛水文观测场,季节性冻土高山草甸试验子流域,寒区生态长期观测场和土壤水热物理参数实验室。观测涉及气象、水文、土壤、生态、地下水、冰川、积雪和冻土等,并配备 4 套综合环境观测系统专门研究冻土水热传输过程。

(4) 寒旱区遥感观测系统试验站,2009 年新建,主要目标是加强遥感—地面观测同步试验,开展多源遥感卫星定标试验与真实性检验,以及发展遥感数据同化系统。在观测设施方面,致力于建设与遥感观测相适应的地面分布式观测,目前已在黑河上游八宝河流域、大野口流域以及中游盈科绿洲和花寨子荒漠等区域布设了多个自动气象站和通量站。下一步将以这些站为中心,在黑河上游八宝河流域、中游甘州和盈科灌区,以无线传感器网络为纽带,扩展而形成流域和灌区尺度内密集分布的各种

气象、水文及生态观测项目,建立自动化的、时空协同的、逐个观测结点可控的综合观测网络。

4.2 综合观测试验

自 1980 年代以来,黑河流域共开展过 3 次大规模的综合观测试验。

4.2.1 黑河地区地气相互作用野外观测实验

1990 年 6 月至 1992 年 10 月,在黑河流域中游开展了“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE),简称“黑河实验”。HEIFE 是国际上最早在复杂地表干旱区开展的大型陆面过程观测研究,一开始就受到国际科学界的关注,被列为 WCRP 和 IGBP 的组成部分^[33,34]。实验区位于黑河流域中游地区一个 70~90 km 的范围内(图 3)。实验的目标是“研究干旱气候形成和变化的陆面物理过程;为气候模式的中纬度干旱半干旱地带水份和能量收支的参数化方案提供观测依据,以便提高气候预报的能力;同时研究本地区作物需水规律和节水灌溉技术,为河西农业发展提供节水和合理用水方案”^[33]。HEIFE 共设置了 5 个自动气象站,每个基本站包括一个 20 m 微气象塔,观测风、温、湿梯度,短波与长波辐射,土壤热通量,土壤温度,土壤含水量,以及 Lysimeter 直接测定的蒸散量;开展了湍流脉动、系留气球、多普勒声雷达、大气气溶胶、太阳光谱等加强观测;收集了实验区内的径流、降水、蒸发、地下水位等观测;在张掖站开展了需水量、需水规律和节水灌溉技术的田间试验。

HEIFE 试验揭示出一副绿洲和沙漠环境相互作用的完整图像——即新发现了绿洲边缘沙漠的逆湿现象,并证明了绿洲的冷岛效应^[35]。这次试验,开创了黑河流域综合观测研究的先河,为之后的观测奠定了基础,其共享数据集至今仍为研究者所广泛使用,成为我国地学试验的一段佳话。

4.2.2 金塔试验

2004 年 6~8 月期间,在黑河流域西部子水系中游金塔绿洲开展了为期 2 个多月的“绿洲系统能量与水分循环过程”观测试验,之后的多个夏季中,又在这一地区开展后续试验,这些试验统称为“金塔试验”。其目标是“以研究绿洲系统内部土壤、植被和近地层大气以及绿洲系统与周围荒漠环境和上层大气之间水热循环的相互作用过程为核心,揭示绿洲系统的形成、维持和演变规律;探讨利用小气候资源开发绿洲和发展绿洲的科学途径”。试验期间,在金塔流域内部和围绕绿洲边缘的沙漠上共布置了 7 个观测站,运用涡动相关、自动气象站、雷达

小球探空、系留气球探空等观测手段, 获取了金塔绿洲及其外围荒漠戈壁的地面和低空气象资料、土壤温湿和热通量资料、地面辐射和能量水分交换资料等; 同时, 收集了观测期间卫星遥感数据和地表参数, 以期获得绿洲系统能量与水分循环全貌^[36, 37]。

4.2.3 黑河综合遥感联合试验

2007—2009年, 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”共同发起了“黑河综合遥感联合试验”。其总体目标是: 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; 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。其中, 预试验在 2007 年 7~12 月展开。加强试验在 2008 年 3~9 月间分阶段展开, 共计 120 天, 由 28 个单位 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、高光谱成像仪、红外广角双模式成像仪; 累计飞行 26 次, 110 小时。在地面试验方面, 布置了由 12 个加强和超级自动气象站、5 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, 使用了车载降雨雷达、地基微波辐射计、地基散射计等地面遥感设备和大量自动观测仪器, 在流域尺度、重点试验区、加密观测区和观测小区 4 个尺度上展开了密集的同步观测, 测量了大量的积雪、地表冻融、森林结构、蒸散发、土壤水分、反照率/反射率、地表温度、生物物理参数和生物化学参数。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^[31, 38]。持续观测期延续至 2009 年底, 主要以通量站和自动气象站观测为主。随着观测期的结束, 黑河综合遥感联合试验已初步实现了建立一个开放的试验平台和发展多尺度、多分辨率、高质量并最终完全共享的综合数据集的目标, 全部数据将通过黑河综合遥感联合试验信息系统发布 (<http://westdc.westgis.ac.cn/water>)。

5 结论与讨论

地球科学的一个重要特征是地球观测系统。实际上, 流域科学这一多学科交叉特点明显的科学, 一刻也离不开先进的观测系统的支持。只有现代化的流域观测系统, 才能源源不断地将新的观测信息补充到数字流域中, 才可能催生出更加成熟的流域科学。

遥感水文正在快速发展, 随着一系列新的遥感卫星的发射, 对降水、土壤水分、水体高度、雪水当量、地下水等水文变量的观测精度以及空间和时间分辨率, 在未来 10 年内都会有量级上的提高。航空遥感将继续在流域科学试验中引领新的观测风骚。地面上, 无线传感器网络、大尺度通量观测和其他分布式观测, 改变着传统的单点测量方式, 将地面点观测真正变成了面观测。各种新兴的观测技术, 组成了天地一体化的流域自动观测网络, 使得我们能以前所未有的精度观测到在空间和时间上快速变化着的流域水文和生态过程。

设计流域观测系统时, 需要以跨学科的思路, 以流域为基本单元, 以水为主线, 兼顾陆面过程、水文学和生态学的 3 种不同的空间和时间尺度, 监测与控制试验并重, 设计多尺度的观测系统, 捕捉到所测量对象的空间和时间异质性, 同时定量度量异质性所带来的不确定性。

黑河流域可作为建立流域观测系统的一个原型。其观测系统的主干是分别位于流域上、中、下游的黑河上游生态水文试验研究站、临泽内陆河流域综合研究站、阿拉善荒漠生态水文试验研究站以及以流域尺度遥感观测为目标的寒旱区遥感观测系统试验站。在黑河流域先后开展了 HEIFE 实验、金塔试验、黑河综合遥感联合试验, 这些综合性的大规模科学试验, 极大地丰富了流域科学观测实践。

作为一个典型的试验流域, 如何使流域观测系统在黑河流域集成研究中发挥更大的作用? 如何完成其数字化改造, 使它和黑河流域的其他信息基础设施更好地结合起来? 是我们面临的重大挑战……

(1) 增强观测能力, 发展更加成熟的卫星遥感方法是流域观测系统的关键, 水文变量的遥感观测、估计和反演精度, 还需要大大提高, 例如, 蒸散发、土壤水分的遥感依然面临很多的不确定性, 径流的遥感测量、水质遥感、地下水的高分辨率遥感都是需要开拓的新领域, 异质性对遥感真实性检验以及遥感估计和反演算法的影响从理论认识和观测实践上都

需要进一步提高^[19]。无疑,精细设计的观测试验,是检验和提升遥感观测能力的必由之路。

(2) 如何集成遥感、地面观测和模型模拟,来更好地估计水循环状态变量和通量,是真正的挑战^[5]。对它们的综合应用,不仅有助于理解流域整体过程,也有益于推进与流域科学有关的各个学科的发展^[19]。观测和模拟的结合依赖于数据同化方法,它不仅仅是模型领域的热点,更是观测领域的焦点。许多研究甚至认为,对于异质地表的水文过程——特别是蒸散发之类的复杂水文过程,结合模型和观测的数据同化技术是提高其估计精度的真正有前景的途径^[25]。

(3) 观测系统也必须和信息系统更好地结合起来,才能更加迅速、更加方便地将经过质量控制的观测数据和各级产品推送到用户。信息基础设施要有和观测系统交互的能力,如对传感器的远程控制 and 远程定标等,这样才能更方便地对观测数据进行质量检查和可视化,并将它们更迅速地应用和同化于模型。对于“数字黑河”,“进一步构想是在 eScience 的框架下将数据系统、观测系统、模型系统、信息发布系统、高性能计算及科学计算可视化集成为一个整体”^[2]。

总之,流域科学,必将受惠于更加先进、可靠的观测系统,但如果观测不和模型结合,并成为数字流域的一个有机组成部分,就会是盲目的观测。因此,当设计流域观测系统时,当开展每一项观测时,我们始终应该问自己的一个问题是,我们为什么而观测?我们深信,流域是自然界的天然实验室^[39],在这个实验室里,精细设计的观测试验、先进的流域观测系统将大有可为,它和流域其他信息基础设施将共同协力,为流域科学——为地球表层系统科学做出应有的贡献。流域观测系统完全可以成为全球观测系统的一个很好的原型!

英文缩略词

ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler 声多普勒水流剖面仪

BOREAS: Boreal Ecosystem-A tmosphere Study, 北方生态系统-大气研究

CLPX: Cold Land Processes Field Experiment 寒区陆面过程野外试验

CoRH2O: Cold Regions Hydrology High-Resolution Observatory, 寒区水文高分辨率观测平台

FIFE: First ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) Field Experiment 第一

次国际卫星陆面气候项目野外试验

GCM: General Circulation Model 一般环流模型

GCOM: Global Change Observation Mission 全球变化观测使命

GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer 重力场与稳定态海洋环流探测器

GPM: Global Precipitation Measurement 全球降水观测计划

GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment 重力恢复与气候试验

GRACE-II: Gravity Recovery and Climate Experiment II 重力恢复与气候试验 II

HEIFE: Atmosphere-land surface processes experiment at the Heihe River Basin, 黑河地区地气相互作用野外观测实验研究

JAXA: the Japan Aerospace Exploration Agency 日本宇宙航空开发机构

LAS: Large Aperture Scintillometer, 大孔径闪烁仪

NAFE: National Airborne Field Experiment (澳大利亚)国家航空野外试验

NASA: National Aeronautics and Space Administration 美国国家宇航局

SAR: Synthetic Aperture Radar 合成孔径雷达

SCLP: Snow and Cold Land Processes 雪与寒区陆面过程观测计划

SMAP: The Soil Moisture Active Passive Mission 土壤水分主动和被动观测使命

SMEX: Soil Moisture Experiment 土壤水分实验

SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity 土壤水分与海洋盐分卫星

SWAT: The Surface Water and Ocean Topography Mission 地表水体和海洋地形使命

TDEM: Time Domain transient Electromagnetic surveys 时域瞬变电磁法

致谢:在“数字黑河”系列论文脱稿之际,再次感谢 10 年来所有参加“数字黑河”研究工作的同事的大力支持!在此致谢!

参考文献 (References):

- [1] McLaughlin D. An integrated approach to hydrologic data assimilation: Interpolation, smoothing and filtering [J]. *Advances in Water Resources* 2002, 25: 1275-1286
- [2] Li Xin, Cheng Guodong, Wu Lizong. Digital Heihe River Basin I: An information infrastructure for the watershed science [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 297-305. [李新, 程国栋, 吴立宗. 数字黑河的思考与实践 I: 为流域科学服务的数字流域 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 297-305]

- [3] Comm ittee on Scientific Accomplishm ents of Earth Observations from Space, NRC. Earth Observations from Space The First 50 Years of Scientific Achievements[M]. National Academies Press, 2008: 142.
- [4] Wagner W, Verhoest N, Ludwig R, *et al*. Editorial: 'remote sensing in hydrological sciences' [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(6): 813-817.
- [5] Comm ittee on Earth Science and Applications from Space: A Community Assessment and Strategy for the Future, NRC. Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond[M]. National Academies Press, 2007: 456.
- [6] Smith E A, Asrar G, Funahana Y, *et al*. International Global Precipitation Measurement (GPM) Program and Mission: An Overview [C] // Measuring Precipitation from Space. Netherlands: Springer, 2007: 611-653.
- [7] Kerr Y H, Waktouf P, Wigneron J P, *et al*. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 666-687.
- [8] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, *et al*. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [9] Durand M, Fu L L, Lettermanier D P, *et al*. The surface water and ocean topography mission: Observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 766-779.
- [10] Rott H, Yueh S H, Cline D W, *et al*. Cold regions hydrology high resolution observatory for snow and cold land processes [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 752-765.
- [11] Drinkwater M R, Floberghagen R, Hagmanns R, *et al*. GOCE: ESA's first earth explorer core mission [J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1/2): 419-432.
- [12] Inaoka K, Kachi M, Fujii H, *et al*. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles and climate change [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 717-734.
- [13] Jin Y Q, Lu N M, Lin M S. Advancement of Chinese meteorological Feng Yun (FY) and Oceanic HaiYang (HY) satellite remote sensing [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 844-861.
- [14] 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.
- [15] 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): 1549-1577.
- [16] Jackson T. Soil Moisture Experiments in 2002 (SMEX02) Summary of Experiment Plan [R]. USDA, 2002.
- [17] Cline D, Yueh S, Chapman B, *et al*. NASA Cold Land Processes Experiment (CLPX 2002/03): An airborne remote sensing [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(1): 338-346.
- [18] Walker J P, Panciera R. National Airborne Field Experiment 2005 Experiment Plan [R]. Melbourne: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne, 2005.
- [19] Comm ittee on Integrated Observations for Hydrologic and Related Sciences, NRC. Integrating Multiscale Observations of U. S. Waters [M]. National Academies Press, 2008: 210.
- [20] Kampe T U, Johnson B R, Kuester M, *et al*. NEON: The first continental scale ecological observatory with airborne remote sensing of vegetation canopy biochemistry and structure [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4(043510), doi: 10.1117/1.336-375.
- [21] Gong Peng. Progress in recent environmental applications of wireless sensor network [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(2): 387-395. [宫鹏. 无线传感器网络技术环境应用进展 [J]. 遥感学报, 2010, 14(2): 387-395.]
- [22] Delin K A, Jackson S P, Johnson D W, *et al*. Environmental studies with the sensor web: Principles and practice [J]. *Sensors*, 2005, 5(1/2): 103-117.
- [23] Wang Jim in, 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.]
- [24] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, *et al*. Large aperture scintillometer intercomparison study [J]. *Boundary-layer Meteorology*, 2008, 128(1): 133-150.
- [25] Jacobs J, Krajewski W, Loescher H, *et al*. Enhanced Water Cycle Measurements for Watershed Hydrologic Sciences Research [R]. Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Sciences, Inc., 2006: 65.
- [26] McDonnell J J, Sivapalan M, Vache K, *et al*. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(W07301), doi: 10.1029/2006WR005467.
- [27] 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.
- [28] Li X in, Wu Lizong, Ma Mingguo, *et al*. Digital Heihe River Basin 2: Data integration [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 306-316. [李新, 吴立宗, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 2: 数据集成 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(3): 306-316.]
- [29] National Research Council. Opportunities in the Hydrologic Sciences [M]. Washington DC: National Academy Press, 1991: 368.
- [30] Li X in, Cheng Guodong. On the watershed observing and modeling system [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.]
- [31] Li X in, 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.]
- [32] Chen Rensheng, Kang Ersi, Ji Xubin, *et al*. Preliminary study of the hydrological processes in the alpine meadow and permafrost regions at the headwaters of the Heihe river [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 387-396. [陈仁升, 康尔泗, 吉喜斌, 等. 黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 387-396.]
- [33] Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jim in, *et al*. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. *Plataeu Meteor-*

- ology, 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.]
- [34] Wang Jim in Land surface process experiments and interaction study in China from HEIFE to MGRASS 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 MGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280-294.]
- [35] Hu Y inqiao, Gao Youxi Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 285-296. [胡隐樵, 高由禧. 黑河实验 (HEIFE) —— 对于干旱地区陆面过程的一些新认识 [J]. 气象学报, 1994, 52(3): 285-296.]
- [36] Hu Zeyong, Lv Shihua, Gao Hongchun, *et al* Comparative analyses on ground wind field and air temperature humidity characteristics inside and outside Jinta oasis [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(4): 522-526. [胡泽勇, 吕世华, 高洪春, 等. 夏季金塔绿洲及邻近沙漠地面风场、气温和湿度场特性的对比分析 [J]. 高原气象, 2005, 24(4): 522-526.]
- [37] Lu SH, An XQ, Chen Y C. Simulation of oasis breeze circulation in the arid region of the northwestern China [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(suppl): 101-107.
- [38] LiX, LiXW, LiZY, *et al* Watershed allied telemetry experimental research [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D22103), doi 10.1029/2008JD011590.
- [39] 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.

Digital Heihe River Basin. 4: Watershed Observing System

LI X in¹, CHENG Guodong¹, MA Mingguo¹, XIAO Qing², JIN Rui¹, RAN Youhua¹, ZHAO W enzh i¹, FENG Q i¹, CHEN Rensheng¹, HU Zeyong¹, GE Y ingchun¹

(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 Novel technologies in remote sensing and ground observations have made it possible to capture the spatial and temporal variations of hydrological variables. In the next decades, their spatial and temporal resolution will increase significantly. This paper provides our thoughts on the watershed observing system in the Digital Heihe River Basin research initiative. First, the latest advances in observing the water cycle using satellite remote sensing, airborne remote sensing and ground-based observation are reviewed. The next part of the paper presents our prospects on how to build a watershed observing system. The system should take into account various spatiotemporal scales of the land surface, hydrological and ecological processes. It should make it a priority aim to serve the development, validation and modification of integrated watershed models. It should act as an integrated remote sensing and ground based observing system, and should integrate well with information systems and watershed models. The premiums on sampling strategy and new observation methods, and the equal importance of monitoring and control experiments are also discussed in this section. We then introduce the current watershed observing system of the Heihe River Basin as a prototype study. It is composed of well instrumented field stations located along its upper, middle, and lower reaches with different landscapes, and operational meteorological and hydrological networks. Some comprehensive observation experiments have so far been carried out in the Heihe River Basin. They include the HEIFE (Atmosphere-land surface processes experiment at the Heihe River Basin), the Jinta experiment and the WATER (Watershed Allied Telemetry Experimental Research). The last part of the paper introduces our further thinking of watershed observing system. It is of key importance to enhance the remote sensing observation ability of water cycle and related ecological processes in a river basin scale. It is only possible to better quantify the water cycle through the integration of remote sensing and in situ observations and model simulations. In summary, the water observing system, in good cooperation with watershed information system and integrated watershed models, constitutes a cyberinfrastructure and lays the foundation for the emerging watershed science.

Key words Digital river basin; Watershed observing system; Remote sensing; Wireless sensor network; Heihe River Basin