

晋锐, 李新, 阎保平, 等. 黑河流域生态水文传感器网络设计[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 993-1005. [Jin Rui, Li Xin, Yan Baoping, et al. Introduction of eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 993-1005.]

黑河流域生态水文传感器网络设计^{*}

晋 锐¹ 李 新¹ 阎保平² 罗万明² 李秀红³,
郭建文¹ 马明国¹ 亢 健¹ 张艳林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. 中国科学院计算机
网络信息中心, 北京 100190; 3. 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要:在黑河上游八宝河流域和中游盈科灌区, 以无线传感器网络为纽带, 高效集成流域尺度内密集分布的、多源异构传感器的各种气象、水文及生态观测项目, 建立自动化、智能化、时空协同的、各观测节点远程可控的生态水文传感器综合观测网络; 通过优化地面采样方案, 精细观测和准确度量流域尺度内空间异质性较强的关键水文生态要素的时空动态过程、时空变异性和不确定性; 研究针对星载/机载遥感真实性检验的地面传感器采样方案, 精细验证遥感反演精度, 深入挖掘各种遥感手段在流域综合观测中的作用和潜力; 全面提高流域水文生态过程的综合观测能力和观测自动化水平。

关 键 词:无线传感器网络; 黑河流域; 生态水文; 遥感真实性检验

中图分类号: P334 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2012)09-0993-13

1 引 言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是指将传感器技术、自动控制技术、数据网络传输、存储、处理与分析技术集成的现代信息技术^[1], 是后 PC 时代信息科学技术发展的主要趋势, 也是信息技术及其应用的一次历史性机遇^[2]。无线传感器网络作为“地球观测系统”的一个近地组成部分, 近年得到广泛公认。在环境遥感领域, 国际上已经把无线传感器网络技术视为未来一个非常重要的发展方向。众多从事地球信息科学的著名机构, 如美国地质调查局 (United States Geological Sur-

vey, USGS)、美国国家研究委员会 (National Research Council, NRC)、美国地球空间情报局 (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA) 等都把无线传感器网络与卫星遥感并列为 2006 年之后的重点 10 年研究计划, 把 WSN 作为 EOS (Earth Observing System)、IEOS (International Earth Observing System) 和 GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) 计划的扩充, 被视为地球空间信息科学领域的重要组成部分。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》在重大专项、优先发展主题、前沿领域也均将 WSN 列为其重要方向之一。可以预见, WSN 将为地球系统科学和环境科学研究的各方面

收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-07-10.

^{*} 基金项目: 国家高技术研究发展计划重大项目“星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“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”(编号: Y002025412); 国家高技术研究发展计划项目“陆面模拟与同化系统示范研究”(编号: 2009AA122104); 国家自然科学基金项目“冻土主动微波辐射传输模拟及其辐射散射特性研究”(编号: 41071226) 资助。

作者简介: 晋锐 (1979-), 女, 山西临汾人, 博士, 副研究员, 主要从事冻土遥感、土壤水分遥感和陆面数据同化研究。

E-mail: jinrui@lzb.ac.cn

带来一场革命,并将成为其标准的观测手段^[3]。开放、标准化、具有互操作性的 WSN 组网构成传感器 Web,为进一步实现 GEOS 目标提供了基础设施和技术手段^[4]。

美国国家航空航天局喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)基于传统遥感技术对地面观测的瞬时性和不确定性,于 1997 年提出通过地面布设无线传感器网络对地表环境实时连续监测以弥补传统遥感技术不足的想法,并建立了 Web Sensor 的概念和雏形^[5]。随后,微软研究中心、加州大学、约克大学、亚利桑那大学等也都相继开展了相关研究,并成立了 Web Sensor 联盟。研发的开放式 Web Sensor 体系架构和节点在地震^[6]、海洋^[7]、洪水^[8]、积雪^[9]、冰川^[10]及动植物栖息地^[11]等方面已有不同深度和广度的应用案例^[3]。在国内,宫鹏最早将 WSN 的概念引入到环境应用领域^[1],提出 WSN 作为传统遥感技术新生长点的思想^[12],并在蔬菜大棚监测、水位监测、声像一体化及遥感验证场等方面取得初步成果。

近年来,水文研究领域的长足发展开始趋向得益于传感器技术、无线通讯和信息基础设施的最新成果,逐步开发实现了成熟的传感器网络用于更高时空分辨率的采样观测以及集成化的“传感器—科学家”应用^[13~15];并对 WSN 提出网状拓扑结构、低成本、低功耗、集成化及小型化的应用需求,期望能在较大的空间范围、以较高的时空分辨率更精确地刻画流域尺度水循环过程及其机理,提供分布式的实时观测数据。国际上诸多流域信息基础设施建设和生态水文观测计划,也将 WSN 技术引入到流域水文与生态研究,以流域为单元建立了遥感—地面一体化的观测平台。例如,核心带观测平台(Critical Zone Observatory, CZO)^[16,17];推进水文科学大学联盟(Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science, CUAHSI)^[18,19];水与环境研究系统网络(WATER and Environmental Research Systems, WATERS)^[20,21]。

在流域科学研究持续升温的国际大背景下,我国国家自然科学基金委员会也于 2010 年正式启动了“黑河流域生态—水文过程集成研究”,提出要在黑河流域建成“遥感—地面观测一体化的、高分辨率的、能够覆盖流域水、生态及其他环境要素和社会经济活动等方面的流域观测系统”。针对这一目标,计划开展“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验”(Heihe Water Allied Telemetry Exper-

imental Research, Hi-WATER)^[22]。生态水文传感器网络是 Hi-WATER 的基础试验之一。

总之,生态水文传感器网络是建立国际领先流域观测系统的重要组成部分,是重要的流域观测基础设施,更是流域科学长足发展的重要动力。本文主要介绍黑河流域生态水文传感器网络的意义和必要性、总体设计思路、节点类型以及在黑河上游八宝河流域和中游盈科/大满灌区布设 WSN 的出发点及其优化方案。

2 “黑河流域生态水文传感器网络”的意义

Hi-WATER 项目计划在黑河上游八宝河流域、中游盈科/大满灌区等试验区,以无线传感器网络为纽带,高效集成流域/灌区尺度内密集分布的、多源传感器的各种气象、水文及生态观测项目,建立自动化、智能化、时空协同的、各观测节点远程可控的生态水文传感器观测网络;全面提高流域水文生态过程的综合观测能力和观测自动化水平。黑河流域生态水文传感器网络的重要作用及其建设意义体现如下:

(1) 建立密集的生态水文传感器网络,实现分布式的地面观测,用于定量刻画流域尺度时空异质性较强的关键生态水文变量的时空动态及其不确定性

WSN 除了具有自动、实时、可控的数据获取能力,还具有小型化、集成化和高效节能的突出优势,便于野外大范围安装布设和维护。更为突出的是 WSN 是一种智能化网络,通过各种通讯技术可将各个传感器节点动态组网,形成传感器矩阵,实现传统单点观测无能为力的区域尺度关键要素的时空连续监测;各传感器节点作为一个“智能微尘”^[23],通过相互通信可实现信息共享和触发式反馈^[5]。

在流域生态水文应用方面,随着土壤水分、土壤温度以及其他生物化学传感器变得越来越精巧、廉价、可靠和低功耗,大量部署这些传感器已完全成为可能^[24]。空间密度空前提高的传感器网络,能够精细观测流域生态水文过程的空间变化特征和空间变异性,连续捕捉生态水文关键变量的空间场分布特征和时间演进过程。

以水为主线的黑河流域生态水文过程集成研究,离不开发展分布式的生态水文模型、流域数据同化系统以及流域综合管理决策支持系统。但是空间分布且时间连续的驱动数据、模型参数和验证数据始终是流域模型集成研究的瓶颈,也是导致模型不

确定性的重要因素之一,尤其是时空变异性较强的关键生态水文要素,例如降水、土壤水分、蒸散发等。如果能够准确度量这些关键要素在流域尺度的时空变异特征和不确定性,将促进我们对异质地表水文过程的深入理解,显著改善和提高流域水文模型和水文数据同化系统的精度。

降水在黑河上游山区径流的主要补给源,而高时空分辨率(约1 km & 1 h)的降水数据是任何生态水文模型必要且关键的驱动数据之一,直接决定着模拟的精度。但由于受到流域内局地气候条件、地形及下垫面的影响,降水具有强烈的时空异质性特征,导致土壤水分、蒸散发、径流和生态格局的时空分布差异,而这些因素的时空变异性又进而导致降水的局地特征。目前,传统方法主要依靠再分析资料的降尺度结果和水文气象观测站空间插值获得流域尺度的降水驱动;但黑河上游山区地形复杂,业务化气象水文站点分布极其稀疏,导致这两种降水驱动的空间分辨率和精度都不能满足流域水文建模的需求。多普勒雷达是监测流域尺度降水强度及其空间分布特征的有效手段,但需要密集的地面降水观测来进行细致的算法标定和验证。利用数据同化方法,在区域气候模型的多层嵌套结构中分别同化再分析资料、卫星降水产品、地面站点及降水雷达观测,实现动力降尺度是目前获取流域尺度降水驱动的崭新发展方向^[25]。通过地面具有代表性的分布式WSN观测的部署,将为以上研究提供不同海拔带、坡向和下垫面条件的降水时空分布格局及其异质性特征,进而获得准确的流域尺度降水驱动,为分布式水文模型提供更可靠的输入。

土壤水分是水循环“四水”转换的核心变量之一。虽然从水文过程的年循环角度着眼,其变化量很小,但对于一次降水过程来说,土壤水分决定着降水转化为蒸发、径流及地下水的比例,这对于精细模拟水文过程各分量的时空动态及准确估计黑河上游来水量极其重要。在蒸散发作用强烈、受人为灌溉管理和调配的黑河中游地区,土壤水分被认为是生态格局变化的主要驱动力,因此准确获得土壤水分的时空动态分布对于研究生态水文过程、植被水分胁迫、旱情监测和灌溉优化管理等方面都至关重要。但黑河中游地表景观单元破碎,加之社为单元的轮灌制度,使得几百米范围内的地表热力学和水力学特性产生显著差异,甚至不连续,导致各种作物的水分利用效率和蒸散发作用存在明显的空间差异,因此需要空间密集的观测手段来捕捉异质性

地表的土壤水分和蒸散发的空间分布,这恰好可以发挥WSN的长处。

(2) WSN是实现遥感真实性检验的全新技术手段

要实现遥感的地面真实性检验,必须同时保证时间的精确同步和地面观测的代表性。

鉴于遥感传感器的瞬时观测特性以及地表变量的快速变化,尤其是地表温度和地表冻融状态,即使依靠“人海战术”也难以做到精准的地面同步观测;而且即便采用统一的测量仪器和观测规范,人工测量也永远不可能避免主观性带来的不确定性,而这种不确定性是难以统计度量的。WSN中各观测节点都可实现远程控制,调整其观测频率或指定观测时刻,以实现与星载/机载遥感传感器的精确同步测量;而且仪器的观测误差可通过系统的比对试验进行统一标定和评估,有利于获得标准化、一致性且误差可度量的高质量观测数据。

生态水文参数的遥感定量反演需要地面观测数据的精细验证,地面观测相对于遥感观测而言更加直接,因此常被认为是遥感像元的真值。但遥感验证目前面临的共性问题之一是单点观测缺乏对遥感像元尺度的代表性,尤其是在非均一地表条件下,会造成两者之间尺度不匹配引起误差无法解释。但由于地表异质性无处不在而且千变万化,真正意义的地毯式测量相对于地表异质性是无法穷举的。为正确评估遥感产品的精度,实现遥感真实性检验,亟需考虑地表变量的时空变异特征,加密布置遥感像元尺度的地面观测场,度量其时空异质性和不确定性。通过地统计分析计算,获得像元真值(无偏最优估计)以及各关键变量/参数的空间相关性及时空稳定性,确定最佳的地面采样方案,实现以有限且具有代表性的多点观测验证遥感像元尺度的真实性^[26],获得真正与遥感像元尺度相匹配的地面观测。无线传感器网络的出现,在空间上弥补了传统点观测和遥感观测之间的尺度空白,为精确的遥感真实性检验提供了革新的技术手段。

(3) WSN具有统一的数据实时获取与管理平台

野外自然条件恶劣,太阳能供电不足、气温过低以及人为破坏等多种因素均会引起仪器故障,导致无法弥补的数据损失;而在地形复杂的黑河山区单靠人力定期巡检维护是无法及时发现和解决这些问题的。因此需要建立统一的生态水文传感器网络,远程监控各节点传感器的工作状态,实时检查观测

数据质量,实现基于数据的自动诊断和报警,最大程度避免数据缺失问题。

依靠现代观测手段,完整捕捉并精细闭合流域尺度水循环各分量,以及与之相关的生态水文过程,需要在流域范围内布设空间密集分布的各种观测设备;而且由于各种生态水文变量的时空变异性差异,观测仪器的空间分布密度和时间采样频率也均不相同。因此有必要建立一个统一的生态水文传感器网络系统,有效管理密集分布的多源传感器。

统一的生态水文传感器网络便于数据的实时标准化采集、传输、数据质量控制、可视化及仪器状态监测,实现数据及其元数据与数据平台的无缝集成,便于实现分布式观测数据与遥感数据、地图及其他专题数据库的综合分析和决策支持,有利于观测数据与流域集成模型和流域数据同化系统的有机结合,促进多学科协同观测和集成研究。

3 “黑河流域生态水文传感器网络”总体设计

“黑河流域生态水文传感器网络”的系统设计必须以“黑河流域生态—水文过程集成研究”科学目标为导向,针对黑河流域上游和中游 2 个研究区各自的关键科学问题,采用多尺度、多层嵌套、多源异构传感器的部署方式,实现对全流域关键生态水文要素自动化、智能化、时空协同的分布式综合观测。

WSN 不同于以往常规站点观测,其最大特点是可实现全流域内所有自动观测传感器的组网,形成传感器矩阵,实现联网的流域生态水文过程监测。因此,对“黑河流域生态水文传感器网络”的系统设计也提出了较高要求,包含整个观测系统框架、数据采集和管理平台、传感器选型、节点布设位置和采样频率、节点间逻辑关系和通信方式、远程控制等诸多方面的考虑。

整个观测系统的设计需要遵循的基本原则和系统基本功能如下:

(1) 服务于科学目标,以科学问题为导向是观测系统设计的基本原则。

(2) 稳定、可靠的数据在线获取能力是观测系统的基本要求。

(3) 多尺度嵌套的地面优化采样方案和采样频率,最大化利用有限 WSN 节点捕捉流域尺度关键生态水文要素的时空动态和不确定性。

(4) 可扩展性,易于根据对象的空间分布特征

增减节点,同时不影响 WSN 中其他节点的正常工作和数据传输。

(5) 系统的实时监控能力,包括网络通讯可靠性、数据传输完整性、各节点传感器、存储空间及供电状态,对异常情况能够及时诊断、定位并报告。

(6) 数据通讯的双向性,既可实现各节点观测向数据服务器定时汇交,也可由数据服务器发送指令,通过远程控制实时获取观测数据或改变节点观测行为。

(7) 所有节点观测数据组织、存储、表达形式的标准化和时钟同步。

(8) 观测数据的网络可视化显示和分析能力,不仅可实现单个节点指定观测量的可视化,还可根据各节点观测数据通过适用的地统计插值方法获得区域分布及其时空动态。

(9) 观测数据与模型的集成接口,便于后期与水文生态模型和水文数据同化系统的无缝集成。

(10) 通过数据库方式管理数量庞大的节点和传感器,包括各节点传感器配置、数据通信方式、观测位置、下垫面描述,传感器型号、采样频率、安装位置和朝向、定标系数、仪器测量误差、服役时间、更换维护日志等。

3.1 总体结构

遵循以上原则,整个“黑河流域生态水文传感器观测网络”分为三层架构(图 1),便于清晰地结构化管理:

第一层:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所数据中心和三维可视化显示终端,实现对黑河流域自动/人工观测数据的质量控制、存储入库、可视化以及与模型的无缝集成,并为数据用户提供数据查询、申请和下载服务;管理员可通过互联网操作数据服务器向各观测节点发送远程控制指令。可视化显示终端提供观测数据和 WSN 节点工作状态的实时动态显示,以及基于数据分析的错误诊断和短信/邮件报告。

第二层:区域数据汇聚中心,包括上游八宝河流域数据汇聚中心和中游张掖数据汇聚中心,并为其其他数据汇聚中心预留接口。2 个数据汇聚中心相互独立,分别负责采集和汇聚各区域内的视频数据和无法实现远程无线传输的大数据量自动观测数据,并通过专用光纤传送至中国科学院寒区旱区环境与工程研究所数据中心。此外,区域数据汇聚中心还将起到本地数据备份的作用。

第三层:各区域观测节点,包括气象、水文、生态

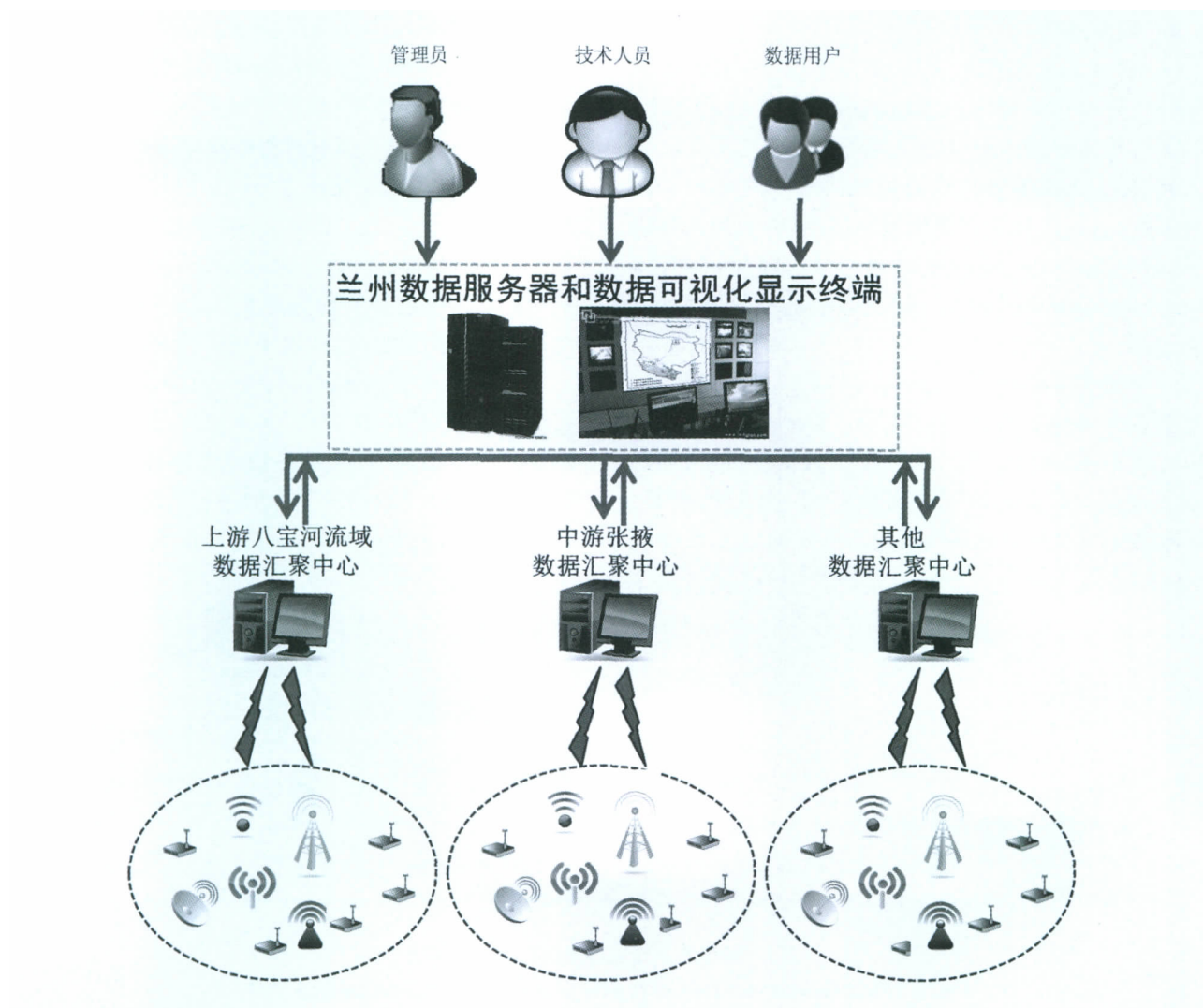


图1 黑河流域生态水文传感器网络总体结构

Fig.1 Structure of the Heihe eco-hydrological WSN

多种观测要素组合的异构传感器节点,主要负责采集数据,并通过各种无线通讯方式将数据定时发送至中国科学院寒区旱区环境与工程研究所数据中心或区域数据汇聚中心;接受下达的远程指令,实时返回观测数据或改变观测行为。

3.2 自动汇控系统

在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所数据中心、区域数据汇聚中心和观测节点间部署统一的“生态水文传感器网络”自动汇控系统,其体系如图2所示,它是野外自动数采设备与远程数据中心之间的监控与自动同步控制枢纽,其中包含“观测数据自动综汇”和“观测设备状态监控”2个子系统。

“观测数据自动综汇”子系统的目的是将野外生态水文自动传感器和人工观测获取的数据及其元数据描述信息,经无人值守的数据自动质量检查和

预处理环节后,传输到远程数据服务器上,实现自动入库;最终由流域数据共享平台向数据用户发布。对于人工观测,例如遥感地面同步观测等,系统提供手工综汇接口,可在线填写元数据并上传相应数据,实现自动入库。系统同时提供观测数据可视化支持,方便使用者管理和查看数据。

“观测设备状态监控”子系统负责与观测仪器硬件设备交流,为方便用户使用,考虑全部以基于Web的交互接口提供服务,这样用户只要有互联网接入服务的地方,就能够远程监控与管理野外观测仪器的工作状态。此部分主要包括对网络摄像头视频信号的采集与发布、对传感器工作状态的监控、以及对远程改变传感器工作状态的支持,这些功能都需要在WSN节点层次开展基于硬件接口编程的工作。

3.3 网络通信

“黑河流域生态水文传感器网络”的整体网络拓扑主要包括部署在八宝河流域和盈科/大满灌区的无线传感器网络组成的野外观测系统和部署在阿柔超级站、大满超级站和湿地观测站的网络视频监控系统、远距离骨干无线传输网络、互联网接入网络等,最后通过 IPv6 隧道技术接入 CNGI(China's Next Generation Internet)网络,从而提供用户对整个系统的访问。

覆盖典型流域/灌区的多尺度无线传感器网络,需要多种通讯技术手段的支持。WSN 的通讯方式以无线为主,辅以有线方式支持大数据量传输,均为双向通信。综合考虑节点间距离、供电情况、费用、传输数据量及所需带宽等因素,将采用以下 5 种通

讯方式(图 3):

(1) GPRS(General Packet Radio Service)适用于有手机信号覆盖地区,数据传输依赖于通信运营商的现有网络,原则上没有传输距离限制。

(2) 无线电波适用于无 GPRS 信号覆盖地区,尤其是黑河上游山区。无线电波可将数据首先传输至有手机信号的 WSN 节点,然后再通过 GPRS 传至数据中心。无线电波的传输距离最远可达 30 km,有地形或建筑物遮蔽时,传输距离有所衰减。

(3) 2.4 G 民用频段适用于短距离(~800 m)数据传输,基于 IEEE 802.15.4 协议,其最大优势是高效节能,观测节点仅需要普通电池即可持续工作半年以上,便于维护;各节点间可自动建立网络拓扑关系,寻找最优路径将数据传输至汇聚节点。

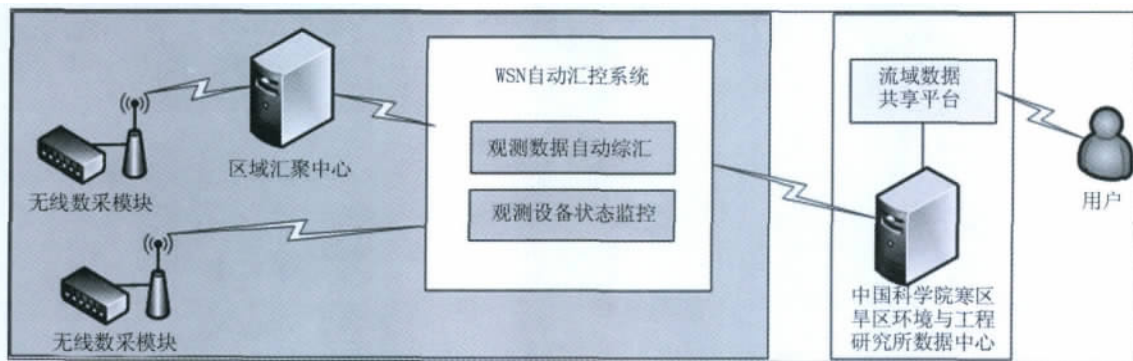


图 2 生态水文传感器网络自动汇控系统

Fig. 2 Management and control system of the Heihe eco-hydrological WSN

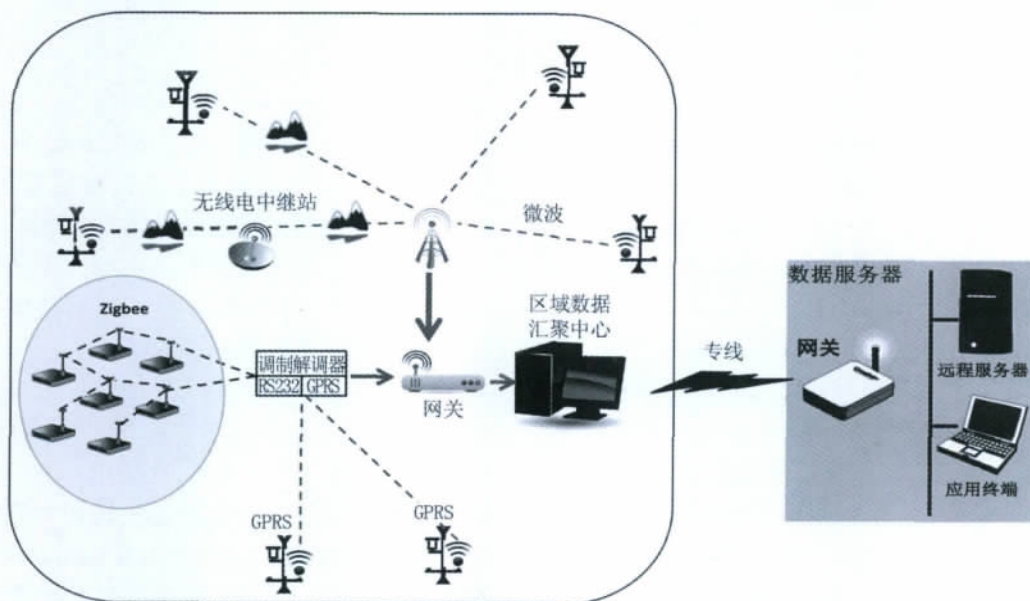


图 3 生态水文传感器网络的通信方式

Fig. 3 Communication mode of the Heihe eco-hydrological WSN

(4) 微波通讯的频段宽、传输容量大,适用于传输像片、影像等较大文件,但传送距离一般只有十几公里,且必须保证通视性。

(5) 光纤主要用于连接各区域数据中心、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所数据中心及 CNGI 网络,保障观测数据的稳定性和可靠性。

4 无线传感器网络节点类型

4.1 WATERNET

WATERNET 为定制开发的适合于高寒地区野外部署、接口灵活且支持 IPv6 协议的无线传感器网络节点。其核心目标为通过分布式地观测流域尺度降水和土壤水分/温度的时空动态,用以研究上游寒区流域积雪/冻土水文的物理过程,精细闭合水循环各分量;提供观测误差及其空间相关信息,服务于水文数据同化系统;用于水文生态模型的标定和参数化。此外 WATERNET 还将承担流域水文遥感真实性检验的核心作用。

针对流域生态水文研究需求,以及黑河流域气候严寒和地势陡峭的地域特征,WATERNET 以自主研发的嵌入式操作系统 ZKOS 为基础平台进行定制

开发^[27],其突出特点在于:①接口方式灵活,可连接多个串口、模拟和数字类型传感器;②支持双向通信,可远程访问各节点,获取其工作状态和观测数据,并改变其观测频率;③利用 GPS 卫星授时来自动校准系统内部时钟,保证所有节点的时间同步性,这点在遥感真实性检验中尤为重要;④在 ZKOS 系统中嵌入 TCP/IP 协议栈实现了支持 IPv6 的无线传感器网络,具有地址资源丰富、地址自动配置、安全性高、移动性好等优点;⑤考虑到野外安装位置的通达性及维护成本,通过系统远程升级功能实现系统内核更新和维护,针对山区 GPRS 网络不稳定情况,还开发了断点续传功能;⑥嵌入式电源智能管理系统,避免过充过放。

开发的 55 个 WATERNET 节点可搭载多种探头(表 1),其中雨量筒、雪深探头和土壤温湿盐传感器主要针对水循环中的降水、土壤水分及其冻融状态进行观测。雪深探头、土壤温湿盐传感器和红外表面温度探头还可用于雪水当量、土壤水分及其冻融状态和地表温度的遥感真实性检验。WATERNET 的无线传输方式包括 GPRS、无线电及 2.4 G,可满足黑河不同地域的观测和研究需求。

表 1 WATERNET 传感器
Table 1 Sensor of WATERNET

传感器	型号	接口数量
土壤温湿盐传感器	Hydra Probe II (SDI-42) -93640-025-3	5
红外表面温度探头	Apogee 20 Infrared Radiometer (standard FOV) -SI-411	1
雨量筒	Texas Electronics 24.5 cm Tipping Bucket Rain Gage (0.1 mm tip) -TE525MM	1
雪深探头	CSC Ultrasonic Distance Sensor for snow depth or water level-SR50A	1
空气温湿度传感器	Vaisala Temperature and RH Probe-HMP45C	1
风速风向传感器(高山型)	RM Yong 05103-45-L Alpine Wind Monitors	1

4.2 SoilNET

SoilNET 的核心目标是异质性地表的土壤水分遥感真实性检验和蒸散发估算,尤其是在地表种植结构复杂、田块破碎、防风林和灌溉渠系密布其间的黑河中游绿洲区域。SoilNET 包含 50 个 End Device 节点,每个节点可连接 4 个 SISOMOP(Simple SOil MOisture Probe)土壤水分/温度探头;9 个中继节点(Router)用于汇聚≤13 个 End Device 节点的观测数据,并将其传输至汇聚节点;1 个汇聚节点(Coordinator)将采用 GPRS 将全部观测数据远程传输至数据中心(图 4)。SoilNET 系统基于 JenNet 网络协议栈开发,采用星型网络拓扑结构,节点之间无遮挡时传输距离<800 m;End Device 采用休眠机制,只需

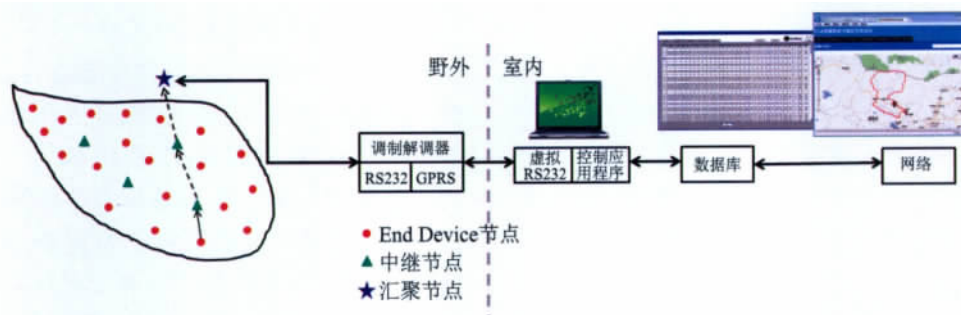
采用 3.6V 1 号电池即可持续工作半年以上;数据传输采用握手机制,保证传输完整性和可靠性^[28]。

4.3 BNU 土壤水分温度观测系统

BNU(Beijing Normal University)土壤水分温度观测系统包含 100 个节点,每个节点连接 3 个土壤温度和 1 个土壤水分观测;各节点自带存储设备,无数据传输功能,采用 8 节 5 号电池供电。

5 黑河上游八宝河流域的 WSN 观测布置方案

八宝河是黑河干流的东支子流域,发源于峨堡以东的景阳岭,流域面积 2 452 km²,海拔介于 2 640 ~5 000 m 之间;属大陆性高寒山区气候,年平均气

图 4 SoilNET 网络结构^[28]Fig. 4 SoilNET Network Communication^[28]

温 1℃, 年降水量 270 ~ 600 mm; 植被覆盖以天然草地为主, 包括高山和高寒草甸/草原等类型, 流域西部山区分布有少量灌木林和青海云杉林; 4 200 m 以上有常年积雪和永久冰川, 冻土现象比较发育, 多年冻土分布下限约在 3 600 m。

八宝河流域是 Hi-WATER 上游寒区遥感水文试验的核心观测区, 是结合多源遥感开展寒区水文过程研究的理想流域。分布式 WSN 观测系统的建设, 对于深入理解寒区积雪/冻土水文过程, 促进将遥感应用于生态水文模型及数据同化系统的方法论研究具有重要意义, 例如为寒区水文模拟和数据同化提供分布式的时空连续观测数据, 通过分布式 WSN 观测给出模型误差和观测误差的空间相关性, 为水文模型的标定和参数化提供参考数据, 同时为中一粗分辨率遥感验证提供地面同步观测数据。

为利用有限数量的节点实现寒区水文过程的时空分布式观测, 拟在整个八宝河流域布设 40 个 WATERNET 节点构成流域尺度降水/土壤水分观测网络, 并与超级站和普通站协同观测, 其核心目标是捕捉 5 ~ 10 km 尺度流域内降水和土壤水分的时空动态及其空间变异特征, 小于 5 km 尺度的空间变异性采用中高分辨率水文遥感产品或者嵌套式的 SoilNET 自动观测和人工测量来提供。

为保证 40 个 WATERNET 节点的观测更具流域代表性, 考虑已有超级站和普通站的位置, 采用多目标优化布样方案确定各节点位置^[29, 30]: 以 30 m 分辨率数字高程模型、坡度、坡向作为基础地理信息数据, 采用多年 MODIS 年平均地表温度、地形湿度指数及 GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) 降水数据表征流域地表温度、土壤水分和降水的空间分布及变异结构, 进行土壤水分、地表温度和降水的多目标优化, 优化目标为观测点位的 3 个变

量的回归克里格方差 (Mean Regression Kriging Variance, MRKV) 之和最小, 由于 3 类变量的量纲不同, 因此在公式 (1) 中进行了归一化处理, 即优化目标为使得归一化之后的方差 (WA) 最小, 公式如下:

$$WA = \frac{C_1 \alpha_i}{S_1} + \frac{C_2 \alpha_i}{S_2} + \frac{C_3 \alpha_i}{S_3} \quad (1)$$

其中 C_i 代表 3 个优化变量的 MRKV 值, S_i 代表对应变差图的基台值, α_i 表示 3 个优化变量所占权重, 本研究设为 0.333。采用模拟退火算法进行全局搜索, 得到最优的观测点位置布方案^[29, 30]。

以上优化计算中可获得多种实现, 在统计意义上均满足方差最小且全局最优。在优化的基础上, 综合考虑道路通达性、通视性、GPRS 信号覆盖范围等因素, 并经过实地考察和无线传输信号测试后, 最终确定八宝河流域 WSN 布点方案 (图 5)。各节点之间的无线传输方式如图 6 所示, 其中由于 20 和 25 号节点无 GPRS 信号, 通过通视分析增设中继节点。

6 黑河中游盈科/大满灌区的 WSN 观测方案

水文遥感和遥感水文在水文研究领域均是目前非常活跃的研究方向。前者侧重于利用遥感手段监测水循环各分量的空间分布及其时间演进; 后者则侧重于通过遥感观测为生态水文模型提供模型参数、参数标定和验证数据集, 还可将遥感观测同化到物理模型之中, 最终目标是改进生态水文模拟的精度和可靠性; 两者均离不开依靠地面观测而不断改进遥感反演算法, 并对遥感反演结果进行细致验证和客观评价。

黑河中游是以农田为主的绿洲景观, 但由于田块破碎, 且有防风林、灌溉渠系、道路及居民地密布

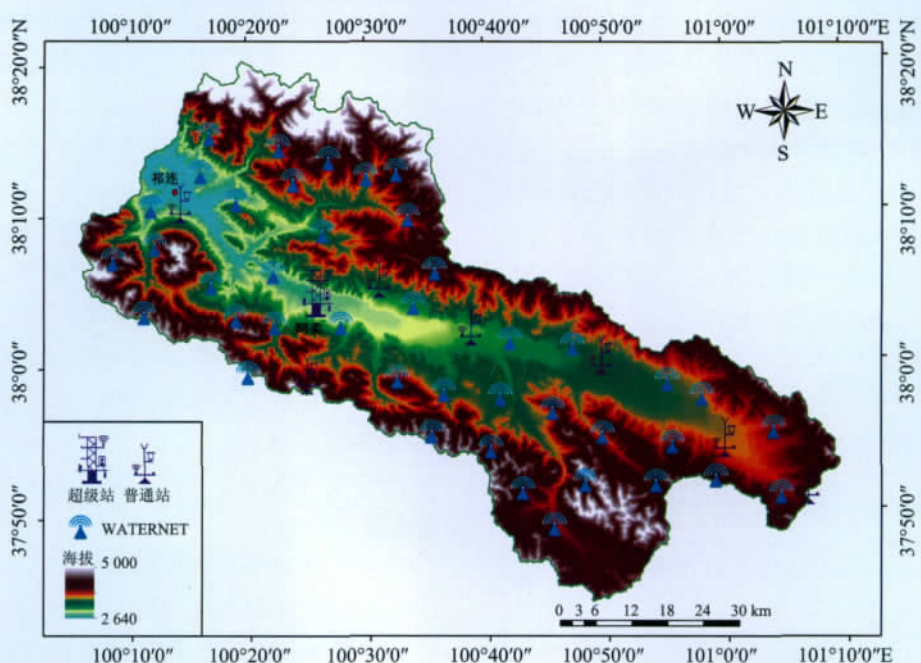


图 5 八宝河流域生态水文传感器网络分布图

Fig.5 Distribution of eco-hydrological WSN in the Babaohe River Basin

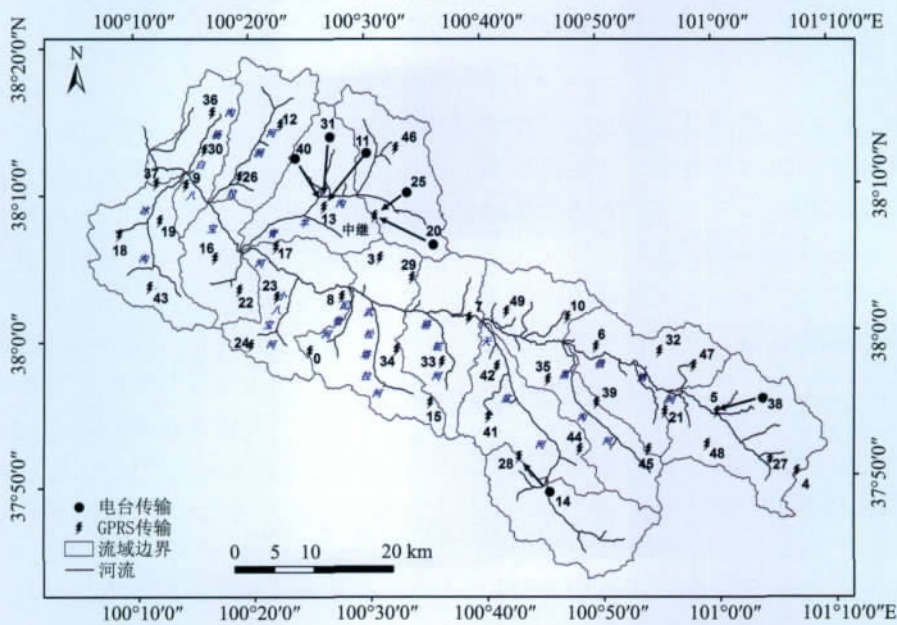


图 6 流域尺度降水/土壤水观测网络节点分布及其无线传输方案

Fig.6 Distribution and wireless communication of WATERNET nodes

其间,造成地表热力学和水力学特性的非均一性,使得地表土壤水分、地表温度、蒸散发等变量的空间分布特征存在显著分异性。

异质地表的遥感反演及其验证是遥感真正能够在流域尺度得以实际应用,不可回避的关键问题之一,因此黑河中游绿洲可作为利用无线传感器网络实践非均质地表遥感真实性检验的天然试验场。

遥感产品的真实性检验是评价遥感产品质量、可靠性和适用性的唯一手段,也是提高遥感产品精度、改善遥感产品质量的主要依据。此外,WSN 还将为非均匀下垫面地表蒸散发研究和灌溉水平衡及灌溉优化配水提供实时动态数据。

WSN 将在黑河中游异质地表遥感产品真实性检验中发挥其核心作用,主要体现在空间抽样和

统计推断两方面。“地毯式测量”虽然是遥感产品真实性检验的理想方式,但受限于现实条件,难以实现;通过采用空间采样理论对有限的 WSN 节点(n)进行优化布置,使公式(2)中区域均值方差最小化,即可采用较少样本代表总体。之后再根据无线传感器网络获得的观测数据,经尺度上推策略(公式(3)),获得航空遥感和中高分辨率卫星遥感像元尺度的估计“真值”,即无偏最优估计。

$$\sigma_n^2 = E \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_i} y_i - \frac{1}{A} \int_A y_i di \right] \quad (2)$$

式中 E 为数学期望,为第 i 个样本的属性值; n 为样本数,即 WSN 节点数量; $\frac{1}{A} \int_A$ 为遥感像元尺度(A)的总体均值,它可由 n 个样本单元的数学平均值来估计。

$$\sigma^2 = E \left(\sum_{i \neq j}^n \omega_i y_i - y_j \right)^2 \quad (3)$$

式中,未采样点 y_i 的属性值可利用周边 WSN 节点观测值经加权平均 $\sum_{i \neq j}^n \omega_i y_i$ 来估计,使得空间插值误差 σ^2 最小化。

为利用有限数量节点,同时满足多尺度遥感真实性检验、异质性地表蒸散发及灌溉优化配水等多种研究需求,在黑河中游盈科/大满灌区的 $5.5 \text{ km} \times 5.5 \text{ km}$ 核心观测区采用嵌套方案进行空间优化采样。为获取核心观测区内 WSN 观测变量的空间分布特征,利用 TM 计算得到的 120 m 分辨率地表温度和 30 m 分辨率 TVDI(Temperature Vegetation Dryness Index)作为先验信息,以综合反映土壤水分、地表温度和 LAI 的空间分布特征,计算得到的地表温度和 TVDI 的变异距离分别为 $500 \sim 800 \text{ m}$ 和 $250 \sim 500 \text{ m}$ 。WSN 的空间布设从如何利用给定数量的 WSN 节点获取较优的变异函数出发,以反映各种尺度上的空间结构;一般要求在变异距离内每个距离间隔内的点对数目不应小于 20 对^①。

为实现嵌套式布设,将 $5.5 \text{ km} \times 5.5 \text{ km}$ 核心观测区共分为 4 个区域(图 7a),详细布置方案见图 7b,各区域核心目标和布设方案如下:

(1) 区域 1(50 个 SoilNET):位于大满超级站所在的 $962 \text{ m} \times 962 \text{ m}$ 像元,其核心目标为小—中尺度的土壤水分/温度遥感真实性检验的加密观测;辅以实时观测大满超级站周围异质地表的土壤水分/温度空间分布;采用空间优化采样方案布点。

(2) 区域 2(65 个 BNUNET、39 个 WATER-

NET): 4×4 个 $962 \text{ m} \times 962 \text{ m}$ 像元的遥感真实性检验观测区,位于 $5.5 \text{ km} \times 5.5 \text{ km}$ 核心观测区的中央,除区域 1,实际包含 15 个像元,其核心目标是多变量的中等尺度遥感真实性检验,包括土壤水分/温度、地表温度和 LAI;并配合非均一地表的蒸散发观测矩阵试验;采用空间优化采样方案布点。

(3) 区域 3(15 个 BNUNET,1 个 WATER-NET):区域 1 和区域 2 之外的区域,其主要目标是配合开展非均匀下垫面地表蒸散发观测研究和灌溉水平衡及灌溉优化配水试验。该区域内布点方式为考虑 EC 和 LAS 位置,人工确定位置,保证每个社至少有一个 WSN 节点,以捕捉以社为单元的灌溉信息。

(4) 区域 4(10 个 WATERNET):大满超级站 LAS 光径路线观测区,其主要目标是配合大满超级站异质性地表蒸散发观测,为揭示地表蒸散发的空间异质性及其影响因子提供基础观测数据。该区域内 WSN 节点位置根据 LAS 贡献源区范围人为确定。

7 结 语

“黑河流域生态水文传感器网络”是在流域自动观测系统方面的一次有益尝试,在流域尺度内布置数量如此之大、种类之多且相互协同的观测网络是国内首次,对于将黑河作为一个示范性研究型流域,并将其打造成流域生态水文研究的天然实验室具有重要的建设意义。

“黑河流域生态水文传感器网络”的实时数据获取能力,使得模型与观测数据的无缝集成成为可能,对径流的实时模拟和预报,具有重要意义;WSN 从点到面观测方式的转变,能够获取流域/灌区尺度关键水文生态要素的时空动态及其变异性规律,对于分布式生态水文模型的参数标定、参数化方案改进、水文同化系统的观测数据及其观测误差均提供了前所未有的分布式观测数据,从而能够更加精确地闭合水循环;地面密集分布的 WSN 也为遥感真实性检验提供了崭新的技术手段,尤其是在异质地表条件下,将极大促进遥感水文和水文遥感领域的方法论发展。可以预见,“黑河流域生态水文传感器网络”将在流域水循环、生态水文、遥感等方面发挥日益重要的作用。

① Kang Jian, Li Xin, Jin Rui, et al. Geostatistical-based optimal design of eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012(In Preparation).

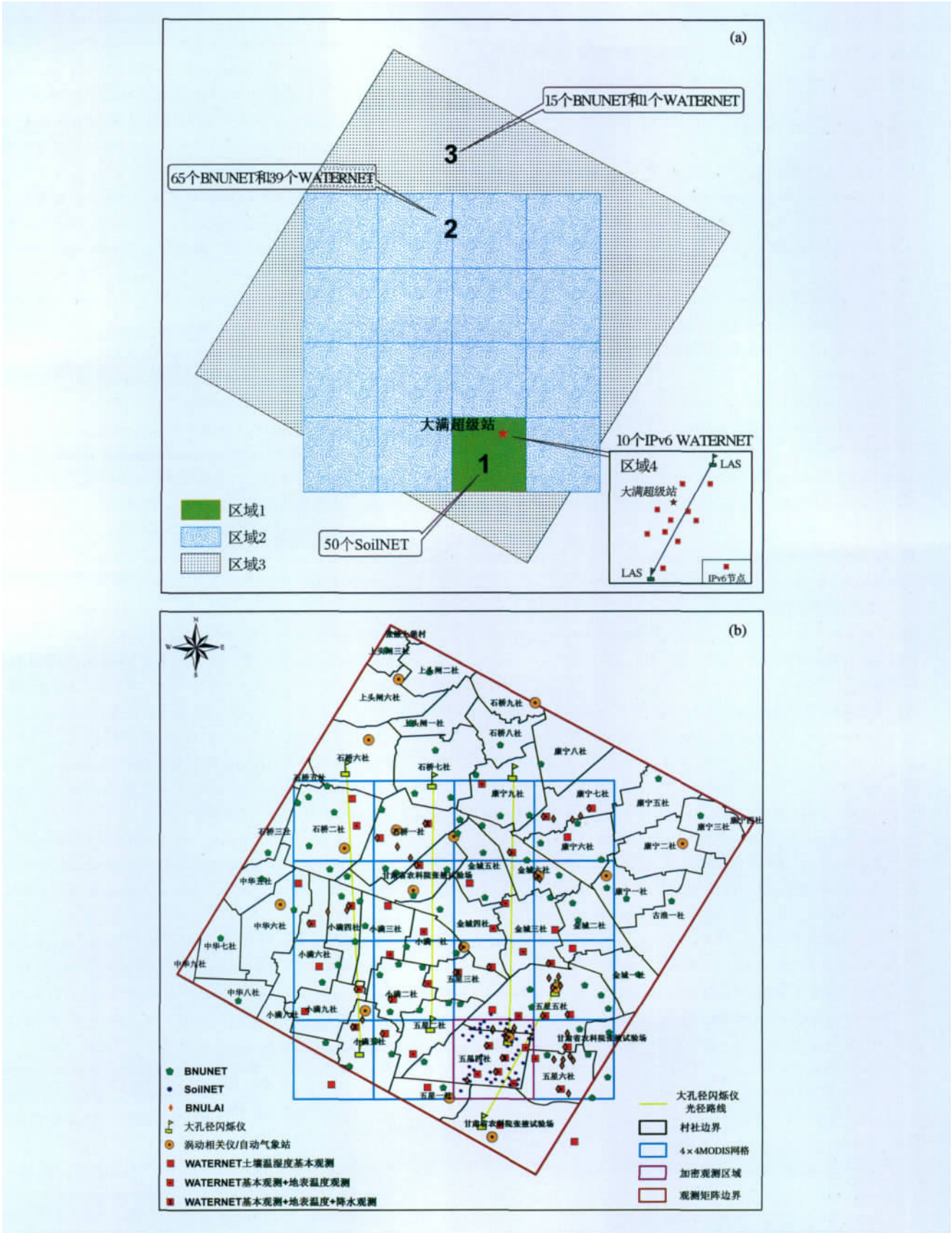


图 7 黑河中游 WSN 节点布置方案

Fig. 7 Distribution of WSN nodes in Yingke/Daman irrigation district

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰研究员、葛咏研究员和王江浩博士在 WSN 优化布点方案中提供的理论支持和具体指导。

参考文献 (References):

- [1] Gong Peng. Wireless sensor network as a new ground remote sensing technology for environmental monitoring[J]. *Journal of Remote Sensing* 2007, 11(4): 545-551. [宫鹏. 环境监测中无线传感器网络地面遥感新技术[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 545-551.]
- [2] Tu GuoFang, Zhang Can, Heinrich Nimann, et al. Scalable video object coding and QoS control for next generation network. Communications and Computer Networks[J]. *Multimedia Communications* 2005, 11(3): 113-116.
- [3] Hart J K, Martinez K. Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78, 177-191.
- [4] Van Zyl T L, Simonis I, McFerren G. The sensor web: Systems of sensor systems[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2009, 2(1): 16-30.
- [5] Delin K A, Jackson S P, Johnson D W, et al. Environmental studies with the SensorWeb: Principles and practice[J]. *Sensors*, 2005, 5: 103-117.
- [6] Butler R, Lay T, Creager K, et al. The global seismographic network surpasses its design goal [J]. *EOS*, 2004, 85(23): 225-229.
- [7] McPhaden M J. Evolution of the 2002-03 El Niño [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2004, 85: 677-695.
- [8] De Roure D. Floodnet: A new flood warning system[J]. *Royal Academy of Engineering Quarterly*, 2005, 23: 48-51.
- [9] Rice R, Bales R C. Embedded-sensor network design for snow cover measurements around snow pillow and snow course sites in the Sierra Nevada of California [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46, W03537. doi: 10.1029/2008WR007318.
- [10] Martinez K, Hart J K, Ong R. Environmental sensor networks [J]. *Computer*, 2004, 37(8): 50-56.
- [11] Szewczyk R, Osterweil E, Polastre J, et al. Habitat monitoring with sensor networks [J]. *Communications of the Association for Computing Machinery* 2004, 47(6): 34-40.
- [12] Gong Peng. Progress in recent environmental applications of wireless sensor networks [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.]
- [13] Barrenetxea G, Couach O, Krichane M, et al. SensorScope: An environmental monitoring network [J]. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, 2006, 87(52): Fall Meet. Suppl., Abstract H51D-0513.
- [14] Cayan D, VanScoy M, Dettinger M, et al. The wireless watershed in Santa Margarita Ecological Reserve [J]. *Southwest Hydrology* 2003, 2: 18-19.
- [15] Harmon T, Ambrose R, Gilbert R, et al. High-resolution river hydraulic and water quality characteristics using rapidly deployable networked infomechanical systems (NIMS RD) [J]. *Environmental Engineering Science* 2007, 24(2): 151-159.
- [16] Andersen S A, Bales R C, Duffy C J. Critical zone observatories: Building a network to advance interdisciplinary study of Earth surface processes [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72(1): 7-10.
- [17] Brantley S L, White T S, White A F, et al. Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF) [R]. Newark, DE: 2006.
- [18] 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.
- [19] Loescher H W, Jacobs J M, Wendroth O, et al. Enhancing water cycle measurements for future hydrologic research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(5): 669-676.
- [20] 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.
- [21] Bonner J, Harmon T. Sensors and Sensor Networks: WATERS Network Project Office Sensors Committee Report [R]. WATERS Network Project Office Sensors Committee, 2007.
- [22] 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.]
- [23] Kahn J M, Katz R H, Pister K S J. Emerging challenges: Mobile networking for "Smart Dust" [J]. *Journal of Communications and Networks* 2000, 2(3): 188-196.
- [24] NRC: Committee on Integrated Observations for Hydrologic and Related Sciences, Integrating Multiscale Observations of U. S. Waters [M]. Washington DC: National Academies Press, 2008: 210.
- [25] Pan Xiaoduo, Tian Xiangjun, Li Xin, et al. Assimilating doppler radar velocity and reflectivity observations in the WRF model by four-dimensional variational data assimilation based on proper orthogonal decomposition [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117, DXXXXX, doi: 10.1029/2012JD017684 2012.
- [26] Zhang Renhua. Quantitative Thermal Infrared Remote Sensing Model and Ground Experimental Basis [M]. Beijing: Science Press, 2009. [张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [27] Li Xiuhong, Cheng Xiao, Yan Ke, et al. A monitoring system for vegetable greenhouses based on a wireless sensor network [J]. *Sensors*, 2010, 10: 8963-8980.
- [28] Bogena H R, Herbst M, Huisman J A, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9: 1-12.
- [29] Ge Yong, Wang Jianghao, Gerard Heuvelink, et al. Sampling

- optimization design of a wireless sensor network for monitoring ecohydrological process in the Babaohe River Basin , China [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2012(Subwitted) .
- [30] Ge Yong , Wang Jianghao , Wang Jinfeng , *et al.* Regression kriging model-based sampling optimization design for the eco-hydrology wireless sensor network [J]. *Advances in Earth Science* 2012 , 27(9) : 1 006-1 013. [葛咏, 王江浩, 王劲峰, 等. 基于回归克里格的生态水文无线传感器网络布局优化 [J]. 地球科学进展, 2012 , 27(9) : 1 006-1 013.]

Introduction of Eco-hydrological Wireless Sensor Network in the Heihe River Basin

Jin Rui¹ , Li Xin¹ , Yan Baoping² , Luo Wanming² , Li Xiuhong³ ,
Guo Jianwen¹ , Ma Mingguo¹ , Kang Jian¹ , Zhang Yanlin¹

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China*; 2. *Computer Network Information Center , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China*; 3. *Beijing Normal University , Beijing 100875 , China*)

Abstract: This paper gives an introduction about the eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin , including its background , observation objective , node type definition , data transfer mode , and the optimal spatial sampling strategy. All kinds of meteorological , hydrological and ecological observation sites distributed in both the Babaohe River Basin in the upstream and the Daman/Yingke irrigation districts in the middle stream of the Heihe River basin are integrated and communicated to the data center through the wireless transferring technique. An automatic , intelligent , and remote-controllable eco-hydrological wireless sensor network is established. Meanwhile , relevant researches about optimal spatial sampling strategy of the wireless sensor network nodes have been carried out to capture the spatial-temporal dynamics and spatial variations of the key eco-hydrological parameters in the heterogeneity land or at remote sensing pixel scale. As a result , it is anticipated to improve the integrated , standardized and automated observation capability for the hydrological and ecological processes research at the basin scale.

Key words: Wireless sensor network; Heihe River Basin; Eco-hydrology process; Validation of remote sensing retrievals.