DOI: 10.20103/j.stxb.202408021824

刘绍民,徐自为,黄晓东,周纪,孙义博,陈莹莹,晋锐,徐同仁.极端生态环境水循环关键参量监测设备与物联网监测系统研制和示范.生态学报,2025,45(3):1251-1260.

Liu S M, Xu Z W, Huang X D, Zhou J, Sun Y B, Chen Y Y, Jin R, Xu T R.Development and demonstration of key parameter monitoring equipment and IoT monitoring system for water cycle in extreme ecological environments.Acta Ecologica Sinica,2025,45(3):1251-1260.

极端生态环境水循环关键参量监测设备与物联网监测系统研制和示范

刘绍民[1,*],徐自为[1],黄晓东[2],周 纪[3],孙义博[4],陈莹莹[5],晋 锐[6],徐同仁[1]

1 北京师范大学 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室,北京 100875

2 兰州大学 草地农业科技学院,兰州 730000

3 电子科技大学 资源与环境学院,成都 611731

4 中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室,北京 100012

5 中国科学院青藏高原研究所 国家青藏高原科学数据中心 青藏高原地球系统与资源环境重点实验室,北京 100101

6 中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000

摘要:极端生态环境水循环关键参量监测设备基本依赖进口,部分关键参量尚无原位监测设备或缺乏大范围监测设备,且信息化、智能化水平低,亟需自主研发相关监测设备与物联网监测技术,填补国内外相关设备的空白或实现国产替代。本文主要介绍国家重点研发计划重点专项“典型脆弱生态系统保护与修复” 2023 年立项的项目“极端生态环境水循环关键参量监测设备与物联网监测系统研制和示范”(2023YFF1303500)的立项背景、主要研究内容、实施方案以及考核指标与创新点等。本项目紧密围绕国家生态监测需求,瞄准极端生态环境水循环关键参量高精度、自动、稳定监测等技术难点,研制极端生态环境(高寒、干旱)水循环关键参量监测设备 6 套,研建极端生态环境物联网监测系统 1 套,并开展基于物联网监测系统的研制设备野外测试和示范应用。项目将满足国家“三区四带”生态安全屏障建设的重大科技需求,实现极端生态环境水循环关键参量监测设备的自主创新与升级换代,大幅度提升极端生态环境野外台站监测的信息化、智能化水平,服务于我国脆弱生态系统的保护与修复。

关键词:极端生态环境;水循环;监测设备;物联网监测系统;野外测试与示范

Development and demonstration of key parameter monitoring equipment and IoT monitoring system for water cycle in extreme ecological environments

LIU Shaomin[1,*], XU Ziwei[1], HUANG Xiaodong[2], ZHOU Ji[3], SUN Yibo[4], CHEN Yingying[5], JIN Rui[6], XU Tongren[1]

1 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

2 *College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*

3 *School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*

4 *State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *China*

5 *National Tibetan Plateau Data Center, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System and Resource Environment, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

6 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF1303503)

收稿日期:2024-08-02; **网络出版日期**:2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: smliu@ bnu.edu.cn

Abstract: The monitoring of key parameters in the water cycle within extreme ecological environments is currently highly dependent on imported equipment. In many instances, critical parameters either lack in-situ monitoring devices altogether or have no large-scale monitoring solutions available. Furthermore, the existing technology in this field is often limited by low levels of informatization and intelligence, which hampers the effectiveness and efficiency of monitoring efforts. To address these challenges, there is an urgent need for independent research and development of advanced monitoring equipment and IoT (Internet of Things) technologies. These innovations would not only fill gaps in both domestic and international monitoring capabilities but also provide a pathway to replace imported systems with domestically produced alternatives, strengthening technological self-reliance. This paper introduces the project titled "Development and demonstration of key parameter monitoring equipment and IoT monitoring system for water cycle in extreme ecological environments" (2023YFF1303500), which was approved in 2023 under the national key research and development program's key project, "Protection and restoration of typical fragile ecosystems." The paper discusses various aspects of the project, including its background, primary research objectives, implementation strategies, performance evaluation criteria, and notable innovations. The project addresses the urgent national demand for enhanced ecological monitoring, particularly in extreme environments. Its core focus is on overcoming significant technical barriers to achieve high-precision, automated, and stable monitoring of key water cycle parameters in these challenging environments. The project's ultimate aim is to develop six sets of advanced monitoring equipment for key water cycle parameters, alongside an IoT-based monitoring system tailored for use in extreme ecological settings such as cold and arid regions. Field tests and demonstration applications will be carried out to validate the developed equipment, ensuring that it can function effectively and reliably in real-world conditions. Moreover, this project is closely aligned with the major scientific and technological goals of constructing the national "Three eco-zones and four shelterbelts" ecological security barrier. By fostering independent innovation and facilitating the upgrade of key monitoring technologies, the project aims to significantly enhance the levels of informatization and intelligence at field monitoring stations operating in extreme environments. These advancements will not only improve the capacity to monitor such ecosystems but also play a crucial role in protecting and restoring China's fragile ecological systems. In summary, this project represents a significant advancement in the field of ecological monitoring. With the successful implementation of this project, the nation will be better equipped to monitor, protect, and restore critical ecological environments.

Key Words: Extreme ecological environments; Water cycle; Monitoring equipment; IoT monitoring system; Field testing and demonstration

极端生态环境涉及高寒环境(年平均气温≤5 ℃)和干旱环境(年降水量≤400 mm)。在我国,高寒和干旱环境区域分别占整个国土面积的46%和43%,合计约62%[1—2],极端生态环境(高寒、干旱)分布较为广泛。在气候变暖与人类活动双重影响下,极端生态环境水循环发生了显著变化。其中在高寒环境区域,冻土退化、冰川消融、积雪减少,影响水资源供给[3];在干旱环境区域,河流频繁断流、地下水位下降、蒸散发增加,威胁生态系统安全[4]。极端生态环境既是生态脆弱区,又是监测盲区,因此迫切需要极端生态环境水循环关键参量及变化的监测。

目前,极端生态环境监测设备研制比较困难,基本依赖进口,存在卡脖子风险[5—9]。部分参量尚无原位监测设备或快捷、高效、大范围监测设备[10—15](表1),无法满足高精度、自动、稳定监测需求,极端生态环境水循环监测设备与关键技术亟需自主研发。其中,冻土含冰量多为室内测量,主要测量方法包括核磁共振法、膨胀法、传统热脉冲法和介电谱法[16—17]等,尚无原位监测设备。传统探地雷达为提高冰川探测厚度,通常采用数百千瓦超大功率发射,为防止发射信号烧坏接收机,收发天线需要保证一定的距离,难以实现小型化;在野外操作时,采用点测模式才能实现较佳的性能,因而采集效率低[18]。雪水当量可以使用伽马射线仪和雪枕等设备以及人工方法进行自动测量[19—20],但是上述方法仅能获取点尺度的雪水当量,存在空间代表性差的问题,

难以反映大范围雪水当量的空间分布特征。传统测量径流量主要采用水文断面结合流速仪进行测量,但存在布设困难、测点稀疏、灵活性低等问题;无人机具备快捷灵活和观测密度大等优势,为径流测量带来了新的契机,但当前主要集中于视觉流速测量方法等方面,尚无专用的无人机载径流量测量设备[21—22]。地下水位通常采用定点打井结合水位计测量,存在效率低、时效性差等问题;利用探地雷达技术进行地下水位探测是一个新兴的研究领域,国内外的研究主要集中在探测原理和方法方面[23],设备则主要采用已有的成熟探地雷达产品,探测精度不高、效率较低,尚未研发出针对地下水位探测的专用设备。地表蒸散发常用涡动相关仪、闪烁仪等进行地面观测,空间覆盖范围有限,难以直接捕获蒸散发在区域上的复杂性和异质性;机载涡动相关方法可实现大范围地表蒸散发的直接观测[24—25],但目前我国机载蒸散发观测设备严重依赖进口[26—27],难以广泛推广应用。除了监测设备外,由于极端生态环境区域条件恶劣,无通讯信号区域较多,极端生态环境水循环监测的信息化、智能化水平偏低,主要表现为[28—33]:(1)在设备端,欠缺边缘计算与智能分析能力,无法实现监测数据快速处理和动态智能监测;(2)在传输端,无通讯信号区域依靠单一通讯卫星系统带宽有限,不能实现高频、图像数据的远程实时传输;(3)在信息系统端,尚处于起步阶段,监测设备无法远程调控。因此,极端生态环境物联网监测的技术瓶颈也亟待突破。

表 1　极端生态环境水循环监测设备现状与问题

Table 1　Current status and issues of water cycle monitoring equipment in extreme ecological environments

序号 Number	关键参量 Key parameters	现有观测手段 Existing observation methods	存在问题 Issues
1	冻土含冰量	核磁共振仪(室内测量)等	尚无野外原位
2	冰川厚度	传统探地雷达、透底冰芯等	功率大、耗时、分辨率低、难以车载
3	雪水当量	伽马射线仪、雪枕、人工观测等	单点、空间代表性差
4	径流量	水文断面+流速仪等	布设困难、测点稀疏、灵活性低
5	地下水位	定点打井+水位计等	效率低、时效性差
6	蒸散发	涡动相关仪、闪烁仪等	观测空间范围小

本项目将重点突破极端生态环境水循环关键参量高精度、自动、稳定监测等技术难点,研制适合高寒环境冻土含冰量、冰川厚度、雪水当量和适合干旱环境径流量、地下水位、蒸散发等关键参量的野外原位/移动式/非接触式/机载监测设备;研建物联网监测系统,实现监测数据全域传输与智能化管理;在不少于 2 个典型高寒环境和 2 个典型干旱环境野外台站开展基于物联网监测系统的研制设备野外测试与示范应用,揭示水循环关键参量的变化规律,服务典型脆弱生态系统保护与修复。

1　研究内容和关键科学与技术问题

1.1　研究内容

(1)高寒环境水循环关键参量—冻土、冰川和积雪监测设备研制

研发原位冻土含冰量自动观测仪,突破高精度光电联合感测和人工智能误差补偿等关键技术;研发无人车载冰川厚度探测仪,突破数字型伪随机编码雷达信号发射和冰内杂波抑制等关键技术;研发车载雪水当量观测仪,突破大范围高灵敏度快中子捕获和环境噪声消除等关键技术,并开展研制设备的性能测试与示范应用。

(2)干旱环境水循环关键参量—径流和地下水监测设备研制

研发无人机载径流量测量系统,突破径流表面流速场重建和河道地形点云构建等关键技术;研发车载多频地下水位探测仪,突破高压脉冲波形捷变和超宽带脉冲天线频率重构等关键技术,并开展研制设备的性能测试与示范应用。

(3)干旱环境水循环关键参量—蒸散发监测设备研制

研发机载五孔压力矢量风速测量模块,突破变马赫数相对三维风速插值等关键技术;研发高频开路水汽

分析模块,突破射频白噪声主动抑制光腔输出光谱噪声等关键技术;研发纯电动无人机平台,突破无人机机翼展弦比加大等关键技术;集成无人机载蒸散发观测系统并研制数据实时监控、处理与分析软件,突破高频观测数据监控、处理与分析等关键技术,开展研制设备的性能测试与示范应用。

(4)极端生态环境物联网监测系统研建和示范

研发全域通讯与智能终端设备,突破海量异步串行数据高速解构、边缘计算与优化和异构网络切换等关键技术;研建物联网监测信息系统,突破云端接口反向控制与编译,集成大数据流水线、三维实景建模和分布式计算等关键技术;构建物联网监测系统,在不少于 2 个典型高寒环境和 2 个典型干旱环境野外台站开展基于物联网监测系统的研制设备野外测试和示范应用。

1.2 关键科学与技术问题

(1)在监测设备研发中,如何针对待测参量与极端生态环境的特点,实现高寒环境水循环固态参量和干旱环境水循环液态、气态参量的高精度、自动、稳定监测?

根据待测参量、极端生态环境的特点,通过原始与集成创新,突破高精度光电联合感测、数字型伪随机编码雷达信号发射、大范围高灵敏度快中子捕获、径流表面流速场重建、高压脉冲波形捷变、变马赫数相对三维风速插值与射频白噪声主动抑制光腔输出光谱噪声等关键技术,研制出适合高寒环境水循环固态参量(冻土含冰量、冰川厚度、雪水当量)和干旱环境液态、气态参量(径流量、地下水位、蒸散发)高精度、自动、稳定监测的设备,填补国内外相关设备的空白或达到国际同类设备水平。通过多措并举开创国产监测设备研发的新局面,把极端生态环境水循环固、液、气态参量监测关键核心技术牢牢掌握在我们自己手中。

(2)如何实现监测数据的自动采集、全域传输与智能化管理?

突破海量异步串行数据高速解构和动态记录、边缘计算与优化、高频大数据流实时分割、异构网络切换和卫星通讯传输容错以及云端接口反向控制与编译等关键技术,并集成大数据流水线、三维实景建模和分布式计算等技术,研制出全域通讯与智能终端设备、物联网监测信息系统,构建极端生态环境物联网监测系统,从而实现监测数据的自动采集与存储、全域(涵盖无通讯信号区)实时传输、在线质控、智能分析、可视化展示与设备远程调控等。

(3)如何开展物联网监测系统支撑下的研制设备野外测试与示范应用?

将研制的高寒环境冻土含冰量、冰川厚度、雪水当量和干旱环境径流量、地下水位、蒸散发监测的新设备与已有观测系统有机结合,借助研发的全域通讯与智能终端设备与研建的物联网监测信息系统,集成构建极端生态环境物联网监测系统,实现监测数据的自动采集、全域传输与智能化管理;根据物联网监测系统支撑功能分不同应用场景,在不少于 2 个典型高寒环境和 2 个典型干旱环境野外台站开展物联网监测系统支撑下的研制设备野外测试与示范应用,揭示水循环关键参量的变化规律,服务典型脆弱生态系统保护与修复。

2 实施方案

本研究将通过原始与集成创新,以突破监测设备核心关键技术为重点,物联网监测系统为集成方式,野外测试与示范应用为检验手段,开展极端生态环境水循环关键参量监测设备研制工作;研建极端生态环境物联网监测系统,实现监测数据的自动采集、全域传输与智能化管理,开展基于物联网监测系统的研制设备野外测试与示范应用,揭示极端生态环境水循环关键参量的变化规律,总体技术路线如图 1 所示。

2.1 高寒环境水循环关键参量—冻土、冰川和积雪监测设备研制

研制原位冻土含冰量自动观测仪、无人车载冰川厚度探测仪和车载雪水当量观测仪,重点研发主动加热光电测管与天线、发射前端、接收前端以及宇宙射线快中子监测等模块,结合人工智能误差补偿技术、冰内杂波抑制技术及环境噪声消除技术,实现冻土含冰量、冰川厚度和雪水当量的原位/精细/大范围的自动监测;开展室内单机测试和野外比对测试,采用核磁共振+冻土温湿廓线、EKKO 传统探地雷达、GMON(Gamma monitor)伽马射线仪+人工采样方法分别测试原位冻土含冰量自动观测仪、无人车载冰川厚度探测仪、车载雪

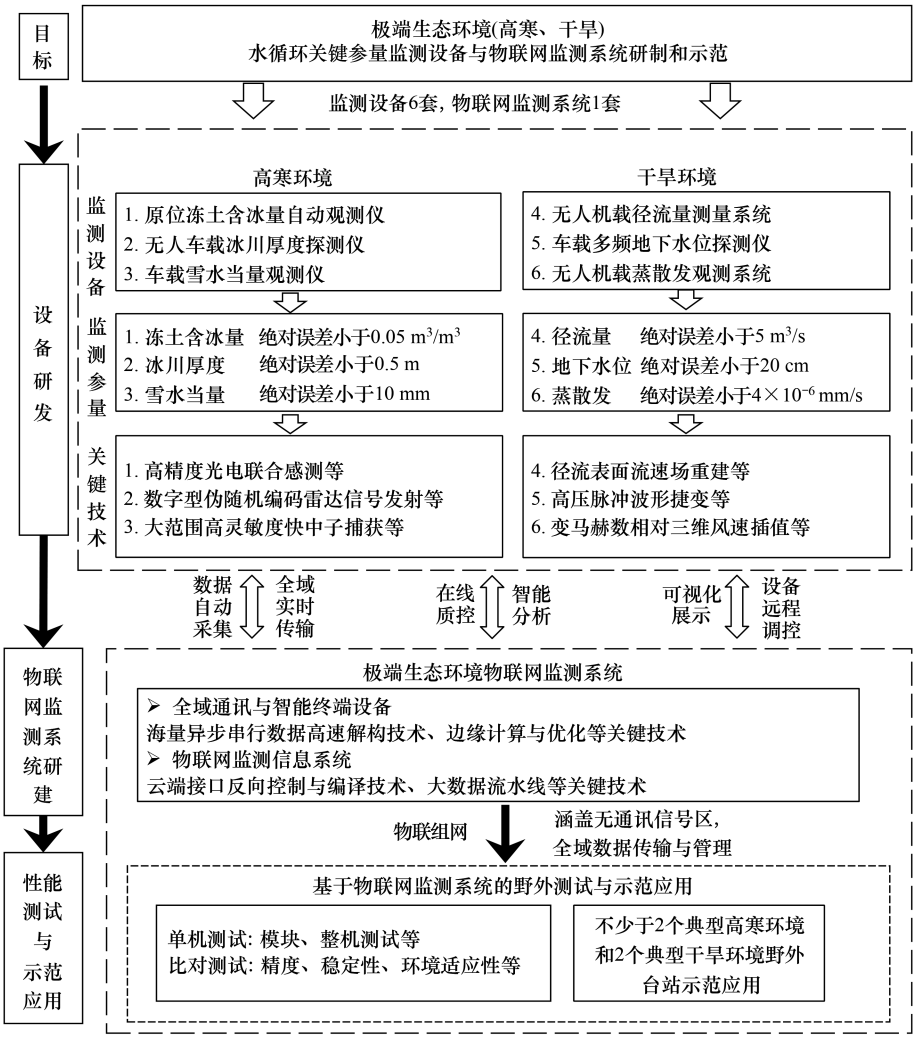


图 1　项目总体技术路线图

Fig.1　Overall technique route for the project

水当量观测仪测量结果的准确性、设备的稳定性、数据的完整性和环境的适应性等,并在高寒环境的黑河上游垭口站和青藏高原格尔木站或新疆阿勒泰站、黑河上游八一冰川和青藏高原廓琼岗日冰川等区域开展基于物联网监测系统的研制设备示范应用。

2.2　干旱环境水循环关键参量—径流和地下水监测设备研制

研制无人机载径流量测量系统和车载多频地下水位探测仪,重点研发摆动式全幅实景数据采集处理、悬挂式声呐水深透视探测、超宽带高峰值冲激脉冲发射与小型化时域冲激脉冲收发天线等模块;结合高流速复杂断面数据分析方法和高速实时雷达信号处理及成像算法等,测量径流量和地下水位;开展室内单机测试和野外比对测试,采用声学多普勒流速剖面仪、定点打井法+高精度水位计和常规探地雷达分别测试无人机载径流量测量系统、车载多频地下水位探测仪测量结果的准确性、设备的稳定性、数据的完整性和环境的适应性等,并在黑河中游河道及周边人工绿洲荒漠区域、黑河下游河道及周边天然绿洲荒漠区域开展基于物联网监测系统的研制设备示范应用。

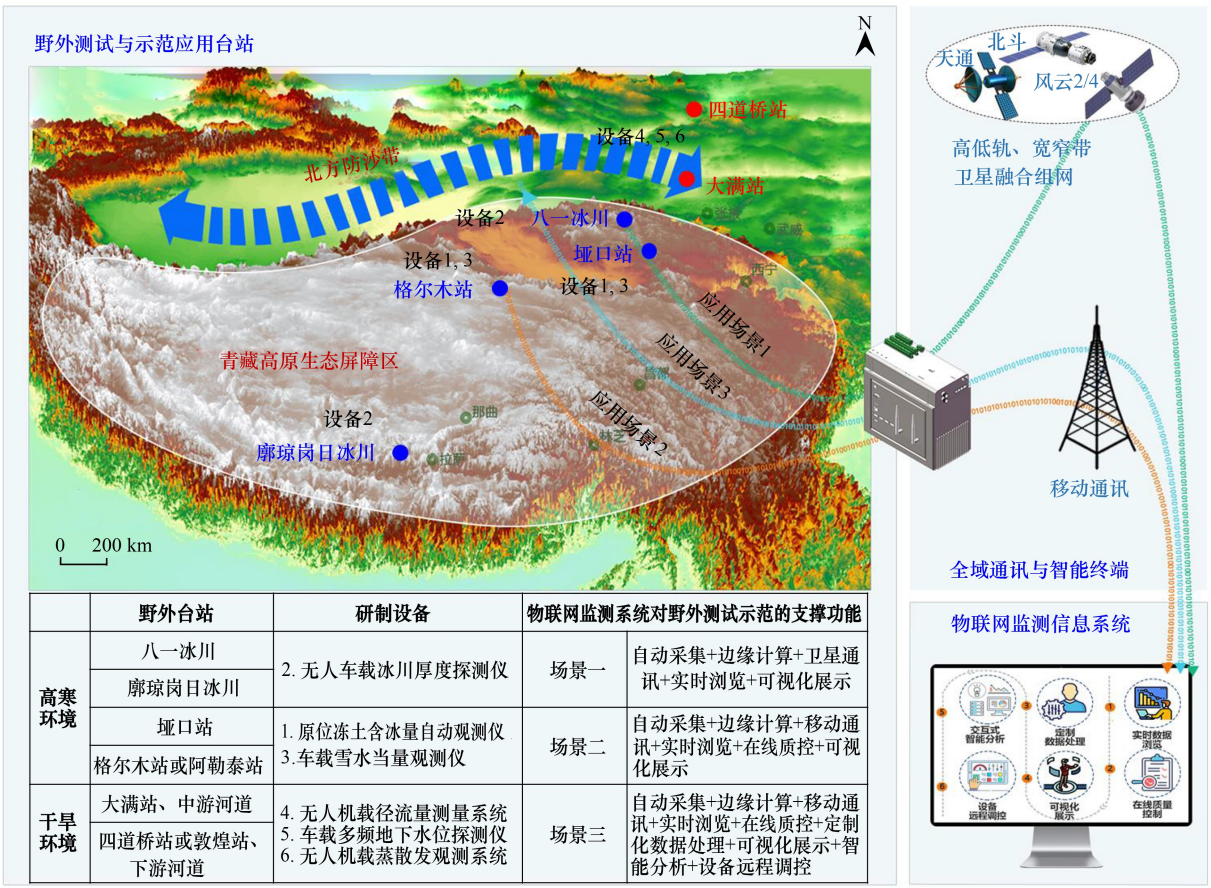
2.3　干旱环境水循环关键参量—蒸散发监测设备研制

研发机载五孔压力矢量风速测量模块、轻小型高频开路水汽分析模块,并研制垂直起降纯电动无人机平台,结合高精度组合导航系统等其他关键模块,集成研制无人机载蒸散发观测系统;研发无人机载蒸散发观测

系统数据监控、处理与分析软件,重点突破高频观测数据监控、处理与分析技术;开展研制设备的室内单机测试与野外比对测试,在典型干旱环境且风速大于 2 m/s 的条件下,与塔基涡动相关仪、闪烁仪或国外无人机载涡动相关系统比较,测试无人机蒸散发测量结果的精度、有效数据率、设备的稳定性和环境的适应性等,并在黑河中游大满站、下游四道桥站或敦煌站等区域开展基于物联网监测系统的研制设备示范应用。

2.4 极端生态环境物联网监测系统研建和示范

研制全域通讯与智能终端设备和研建物联网监测信息系统,构建极端生态环境物联网监测系统,并在不少于 2 个高寒环境的冻土、冰川与积雪等野外观测站和 2 个干旱环境的径流、地下水和蒸散发等野外观测站,分三个不同应用场景,开展以研建的物联网监测系统为支撑,研制设备的野外测试和示范应用(图 2)。其中场景一为无通讯信号的黑河上游八一冰川和青藏高原廓琼岗日冰川测试无人车载冰川厚度探测仪,通过卫星通讯对数据进行实时浏览和可视化展示等;场景二是有通讯信号的黑河上游垭口站和青藏高原格尔木站测试原位冻土含冰量自动观测仪和车载雪水当量观测仪,通过移动通讯实时传输核心数据和原始数据,并对数据进行实时浏览、在线质控和可视化展示等;场景三为有通讯信号干旱环境的黑河中游大满站、下游四道桥站或敦煌站及中游河道、下游河道,测试无人机载径流量测量系统、车载多频地下水位探测仪和无人机载蒸散发观测系统,通过移动通讯实时传回核心数据和原始数据,并进行数据实时浏览、在线质控、定制化数据处理和可视化展示。在此基础上利用智能分析和远程调控功能,动态规划无人机载径流量测量系统和车载多频地下水位探测仪的观测路径。



	野外台站	研制设备	物联网监测系统对野外测试示范的支撑功能	
高寒环境	八一冰川	2. 无人车载冰川厚度探测仪	场景一	自动采集+边缘计算+卫星通讯+实时浏览+可视化展示
	廓琼岗日冰川			
	垭口站	1. 原位冻土含冰量自动观测仪 3.车载雪水当量观测仪	场景二	自动采集+边缘计算+移动通讯+实时浏览+在线质控+可视化展示
	格尔木站或阿勒泰站			
干旱环境	大满站、中游河道	4. 无人机载径流量测量系统 5. 车载多频地下水位探测仪 6. 无人机载蒸散发观测系统	场景三	自动采集+边缘计算+移动通讯+实时浏览+在线质控+定制化数据处理+可视化展示+智能分析+设备远程调控
	四道桥站或敦煌站、下游河道			

图 2 基于物联网监测系统的野外测试与示范应用

Fig.2 Field Testing and Demonstration Application Based on the IoT Monitoring System

3　项目考核指标与创新点

3.1　项目考核指标

(1)研制极端生态环境(高寒、干旱)水循环关键参量监测设备 6 套(图 3),每套设备样机 2 台。包括:原位冻土含冰量自动观测仪(绝对误差小于 0.05 m^3/m^3),无人车载冰川厚度探测仪(绝对误差小于 0.5 m)、车载雪水当量观测仪(绝对误差小于 10 mm)、无人机载径流量测量系统(绝对误差小于 5 m^3/s)、车载多频地下水位探测仪(绝对误差小于 20 cm)和无人机载蒸散发观测系统(绝对误差小于 4×10^{-6} mm/s),其中用于高寒和干旱环境地面监测设备的无故障运行时间>720 h,机载监测设备的无故障运行时间>120 h。

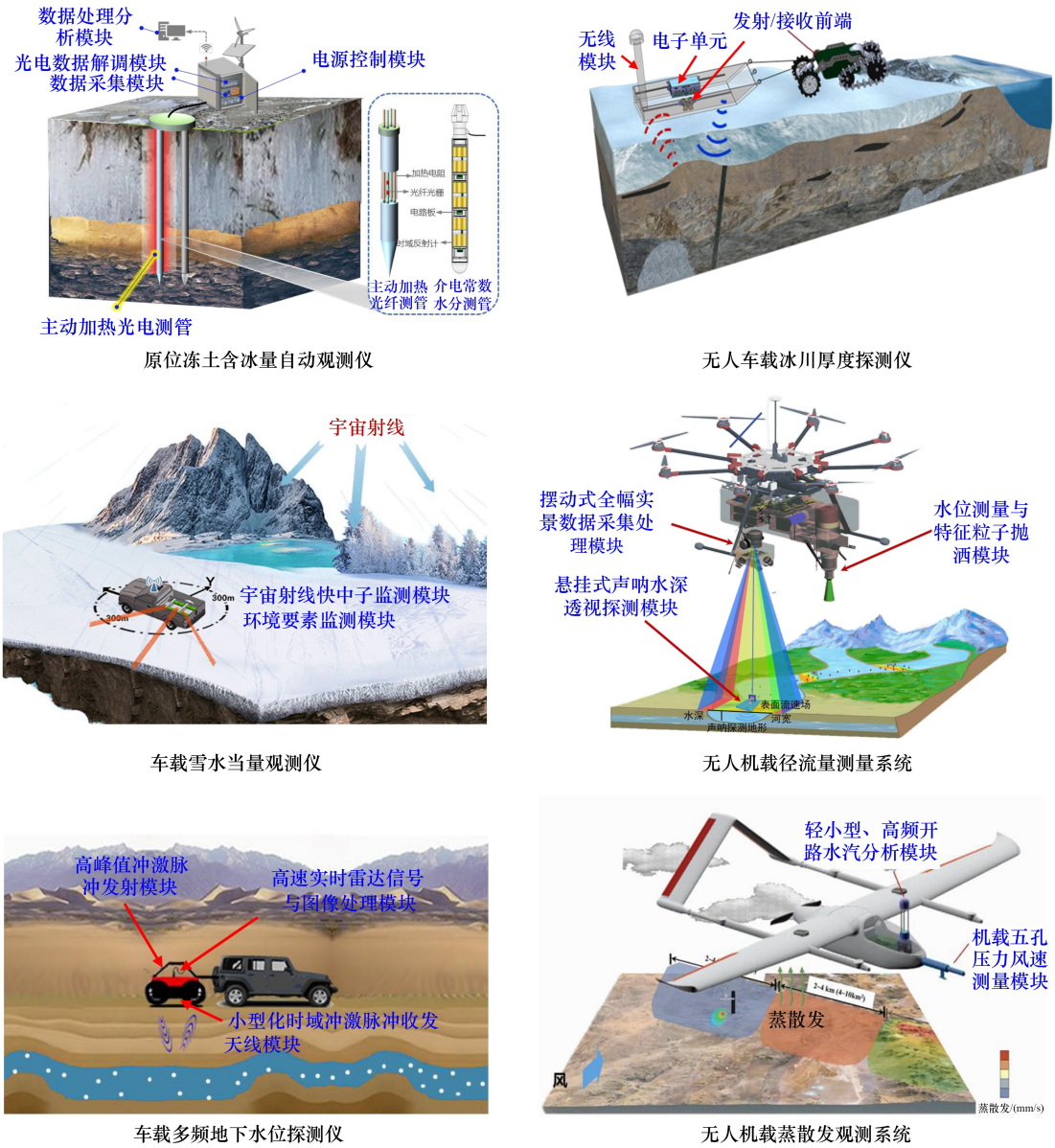


图 3　项目研制 6 套设备示意图

Fig.3　Project Development Diagram of 6 Equipment Sets

(2)研发极端生态环境物联网监测系统 1 套(图 4),包括:全域通讯与智能终端设备 12 台,实现监测数据自动采集与存储、全域(包括无通讯信号区)实时稳定传输;物联网监测信息系统 1 套,实现监测数据的在线质控、实时浏览与处理、智能分析、可视化展示与设备远程调控。

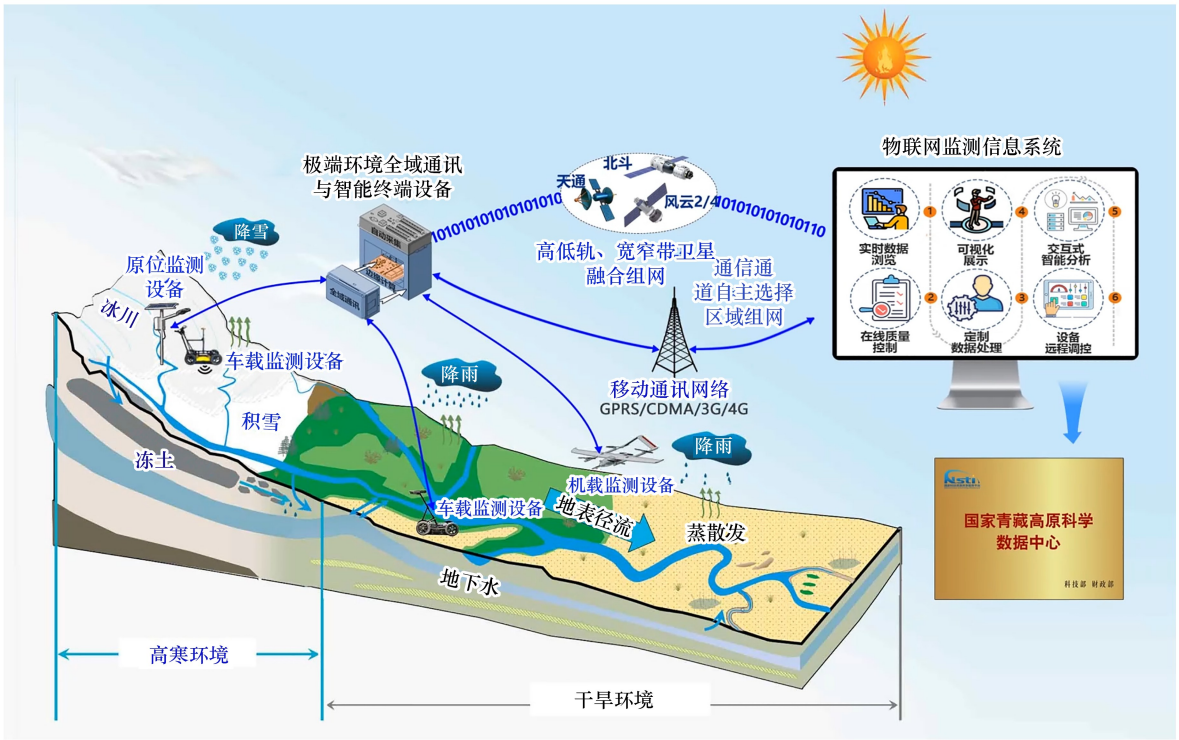


图 4 极端生态环境物联网监测系统示意图

Fig.4 Diagram of IoT Monitoring System for Extreme Ecological Environments

(3)在不少于 2 个典型高寒环境野外台站和 2 个典型干旱环境野外台站开展基于物联网监测系统的研制设备野外测试和示范应用,揭示水循环关键参量的变化规律。

(4)申请国家发明专利 8—10 项(其中授权≥2 项),授权软著 8—10 项,发表 JCR 1、2 区或 CSCD 期刊论文 8—10 篇;培养研究生 20—25 人。

3.2 创新点

(1)自主研发极端生态环境水循环监测设备,产生一系列原始与集成技术创新

原位冻土含冰量自动观测仪实现冻土含冰量的野外原位测量,填补国内外相关监测设备的空白;无人车载冰川厚度探测仪、无人机载径流量测量系统、无人机载蒸散发观测系统,实现冰川精细化、径流量快捷、蒸散发大范围的监测,达到国际同类设备水平。

(2)突破极端生态环境物联网监测的技术瓶颈,取得技术集成创新

全域通讯与智能终端设备集成监测数据的自动采集、存储和全域实时、稳定传输以及边缘计算等功能,填补国内外相关设备的空白;物联网监测信息系统解决极端生态环境监测信息化、智能化水平低问题。

(3)新的监测模式的应用

开展物联网监测系统支撑下的研制设备野外测试与示范应用,开创新的监测模式,实现观测数据实时汇聚、在线质控、智能分析与即时服务,监测设备的远程调控以及运行维护的及时响应。

4 结语

本项目将满足国家“三区四带”生态安全屏障建设的重大科技需求,实现极端生态环境水循环关键参量监测设备的自主创新与升级换代,大幅度提升极端生态环境野外台站监测的信息化、智能化水平,服务于我国脆弱生态系统的保护与修复。

高寒、干旱环境是我国现有生态环境监测中的薄弱环节。本项目研制的设备与物联网技术具有很好的应

用前景,可推广到中国生态系统研究网络、高寒区地表过程与环境观测研究网络、黑河流域地表过程综合观测网以及其他类似的野外台站开展科学研究,也是我国相关部门开展脆弱生态环境监督管理的重要数据获取手段,将提升我国全域生态环境的监测水平。

参考文献(References):

[1] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. 遥感学报, 2008, 12(3): 499-505.

[2] 韩丹, 李玉霖, 杨红玲, 宁志英, 张子谦. 模拟增温和改变降雨频率对干旱半干旱区土壤呼吸的影响. 中国沙漠, 2021, 41(2): 100-108.

[3] 丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 张世强, 王生霞, 苌亚平, 李向应, 上官冬辉, 韩海东, 秦甲, 韩添丁. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.

[4] Segal D C, Moran J E, Visser A, Singleton M J, Esser B K. Seasonal variation of high elevation groundwater recharge as indicator of climate response. Journal of Hydrology, 2014, 519: 3129-3141.

[5] Arnold E, Leuschen C, Rodriguez-Morales F, Li J L, Paden J, Hale R, Keshmiri S. CReSIS airborne radars and platforms for ice and snow sounding. Annals of Glaciology, 2020, 61(81): 58-67.

[6] Nakashima Y, Zhou H, Sato M. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47(3/4): 241-249.

[7] Peña-Haro S, Carrel M, Lüthi B, Hansen I, Lukes R. Robust image-based streamflow measurements for real-time continuous monitoring. Frontiers in Water, 2021, 3: 766918.

[8] Thomas R M, Lehmann K, Nguyen H, Jackson D L, Wolfe D, Ramanathan V. Measurement of turbulent water vapor fluxes using a lightweight unmanned aerial vehicle system. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(29): 243-257.

[9] Nagy R C, Balch J K, Bissell E K, Cattau M E, Glenn N F, Halpern B S, Ilangakoon N, Johnson B, Joseph M B, Marconi S, O'Riordan C, Sanovia J, Swetnam T L, Travis W R, Wasser L A, Woolner E, Zarnetske P, Abdulrahim M, Adler J, Barnes G, Bartowitz K J, Blake R E, Bombaci S P, Brun J, Buchanan J D, Chadwick K D, Chapman M S, Chong S S, Chung Y A, Corman J R, Couret J, Crispo E, Doak T G, Donnelly A, Duffy K A, Dunning K H, Duran S M, Edmonds J W, Fairbanks D E, Felton A J, Florian C R, Gann D, Gebhardt M, Gill N S, Gram W K, Guo J S, Harvey B J, Hayes K R, Helmus M R, Hensley R T, Hondula K L, Huang T, Hundertmark W J, Iglesias V, Jacinthe P A, Jansen L S, Jarzyna M A, Johnson T M, Jones K D, Jones M A, Just M G, Kaddoura Y O, Kagawa-Vivani A K, Kaushik A, Keller A B, King K B S, Kitzes J, Koontz M J, Kouba P V, Kwan W Y, LaMontagne J M, LaRue E A, Li D J, Li B N, Lin Y, Liptzin D, Long W A, Mahood A L, Malloy S S, Malone S L, McGlinchy J M, Meier C L, Melbourne B A, Mietkiewicz N, Morisette J T, Moustapha M, Muscarella C, Musinsky J, Muthukrishnan R, Naithani K, Neely M, Norman K, Parker S M, Rocha M P, Petri L, Ramey C A, Record S, Rossi M W, SanClements M, Scholl V M, Schweiger A K, Seyednasrollah B, Sihi D, Smith K R, Sokol E R, Spaulding S A, Spiers A I, St Denis L A, Staccone A P, Whitney K S, Stanitski D M, Stricker E, Surasinghe T D, Thomsen S K, Vasek P M, Li X L, Yang D, Yu R, Yule K M, Zhu K. Harnessing the NEON data revolution to advance open environmental science with a diverse and data-capable community. Ecosphere, 2021, 12(12): e03833.

[10] Zhu H H, Wu B, Cao D F, Li B, Wen Z, Liu X F, Shi B. Characterizing thermo-hydraulic behaviors of seasonally frozen loess via a combined opto-electronic sensing system: Field monitoring and assessment. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129647.

[11] Luo X J, Wang Q X, Qin K M, Tian H, Fu Z Q, Zhao Y W, Shen Z T, Liu H, Fu Y Y, Liu G R, Yao K Q, Qian X P, Rong J, Zhang W X, Luo X G, Liu C X, Tian X S, Yu M H, Wu F, Chen J J, Liu J T, Liu Z Y. Development and commissioning of a compact Cosmic Ray Muon imaging prototype. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1033: 166720.

[12] Sun J X, Yang H C, Li Y, Cui H J. Unified mobility model for diffusion-limited current in organic diodes based on fermi-dirac statistics. Physical review applied, 2021, 16: 034037.

[13] Sun Y B, Sude B, Lin X W, Geng B, Liu B, Ji S N, Jing J P, Zhu Z P, Xu Z W, Liu S M, Duan Z J. Quality evaluation for measurements of wind field and turbulent fluxes from a UAV-based eddy covariance system. Atmospheric Measurement Techniques, 2023, 16: 5659-5679.

[14] Ran Q H, Li W, Liao Q, Tang H L, Wang M Y. Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. Hydrological Processes, 2016, 30(17): 3014-3029.

[15] Cao Q, Song X D, Wu H Y, Gao L, Liu F, Yang S H, Zhang G L. Mapping the response of volumetric soil water content to an intense rainfall event at the field scale using GPR. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124605.

[16] Patterson D E. The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry results from laboratory tests. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(1): 131-144.

[17] Liu G, Si B C. Soil ice content measurement using a heat pulse probe method. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 235-246.

[18] 张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 陈吉阳, 沈颖. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚. 冰川冻土, 1985, 7(2): 153-162.

[19] Goodison B E. Accuracy of Canadian Snow Gage Measurements. Journal of Applied Meteorology, 1978, 17(10):1542-1548.

[20] Grasty R L. Direct snow-water equivalent measurement by air-borne gamma-ray spectrometry. Journal of Hydrology, 1982, 55(1): 213-235.

[21] Eltner A, Sardemann H, Grundmann J. Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and unmanned-aerial-vehicle imagery. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(3): 1429-1445.

[22] Peña-Haro S, Carrel M, Lüthi B, Hansen I, Lukes R. Robust image-based streamflow measurements for real-time continuous monitoring. Frontiers in Water, 2021, 3: 766918.

[23] Nakashima Y, Zhou H, Sato M. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47: 241-249.

[24] Gioli B, Miglietta F, Martino B D, Hutjes R W A, Dolman H A J, Lindroth A, Schumacher M, Sanz M J, Manca G, Peressotti A, Dumas E J. Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions. Agricultural and Forest Meteorology, 2004,127(1-2): 1-16.

[25] Desjardins R L, Worth D E, MacPherson J I, Bastian M, Srinivasan R. Flux measurements by the NRC Twin Otter atmospheric research aircraft: 1987—2011. Advances in Science and Research, 2016(13): 43-49.

[26] Sun Y B, Ma J Y, Sude B, Lin X W, Shang H L, Geng B, Diao Z Y, Du J Q, Quan Z J. A UAV-Based Eddy Covariance System for Measurement of Mass and Energy Exchange of the Ecosystem: Preliminary Results. Sensors, 2021, 21(2): 403.

[27] Sun Y B, Sude B, Geng B, Ma J Y, Lin X W, Hao Z Z, Jing W J, Chen Q T, Quan Z J. Observation of the winter regional evaporative fraction using a UAV-based eddy covariance system over wetland area. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 310: 108619.

[28] 李新, 刘绍民, 孙晓敏, 吴冬秀, 周燕, 郭建文, 温学发, 陈世苹, 马明国, 晋锐, 赵宁. 生态系统关键参量监测设备研制与生态物联网示范. 生态学报, 2016, 36(22): 7023-7027.

[29] Li X, Zhao N, Jin R, Liu S M, Sun X M, Wen X F, Wu D X, Zhou Y, Guo J W, Chen S P, Xu Z W, Ma M G, Wang T M, Qu Y H, Wang X W, Wu F M, Zhou Y K. Internet of Things to network smart devices for ecosystem monitoring. Science Bulletin, 2019, 64(17): 1234-1245.

[30] Chen Y Y, Zhang M H, Li X, Che T, Jin R, Guo J W, Yang W, An B S, Nie X W. Satellite-enabled Internet of remote things network transmits field data from the most remote areas of the Tibetan Plateau. Sensors: Basel, Switzerland, 2022, 22(10): 3713.

[31] Zhang M H, Li X. Drone-enabled Internet-of-things relay for environmental monitoring in remote areas without public networks. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7648-7662.

[32] Zhang M H, Zhang L X, Zhao C M, Jin R, Guo J W, Li X. Fetching ecosystem monitoring data in extreme areas via a drone-enabled Internet of remote things. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(24): 25052-25067.

[33] Liu S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y, Ren Z G. The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 180072.