

“极端生态环境调查与保护修复专题”编者按:为应对全球气候变化、生物多样性丧失等极端生态环境,我国学者从高寒、高温、高原、干旱等领域开展了相关理论和技术研究,部分成果已在工程中应用示范,取得了较好的效果。为此,编辑部组织了“极端生态环境调查与保护修复专题”,由赵远刚高级工程师担任客座主编。本专题遴选6篇论文发表,内容涵盖极端生态环境水资源调查、土壤污染调查、高原高寒地质灾害调查、岩溶区工程建设及水污染防治等,既有理论研究,也有具体的工程实践。该专题的出版,有利于促进生态环境调查与保护修复领域的技术发展。

## 极端生态环境水循环关键参量监测技术 研究现状与进展

刘勇, 周策, 赵远刚\*, 张佳佳, 周娟  
(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

**摘要:**针对高寒和干旱极端生态环境水循环变化对国家生态安全的重要性,需要开展水循环关键参量监测设备与技术研究。本文重点围绕水循环关键参量野外原位/移动/非接触式、自动、稳定监测等技术难点,开展了一系列监测生态系统水-土-气-冰-雪的关键参量的新技术设备研究。通过构建基于物联网的天地一体化生态系统监测体系,打破行业技术壁垒,促进工程技术、地质学、计算机科学等不同领域的跨学科合作,共同开展极端生态环境水循环关键参量监测技术创新,并将实现对重要生态功能区的大范围、全天候、立体化监测,对推进我国生态文明建设具有重要支撑作用,促进并实现我国生态监测技术的综合应用和发展。

**关键词:**冻土含冰量;冰川厚度;雪水当量;干旱环境蒸散发;径流量;地下水位

**中图分类号:**X83;P332 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)03-0020-07

### Research status and development of key parameters monitoring technology for water cycle in extreme ecological environments

LIU Yong, ZHOU Ce, ZHAO Yuangang\*, ZHANG Jiajia, ZHOU Juan  
(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** Given the critical importance of water cycle variations in extreme ecological environments such as high-altitude and arid regions to national ecological security, there is a pressing need to research on monitoring devices and technologies for key parameters of water cycle. This paper focuses on technical challenges associated with field in-situ/mobile/non-contact, automatic and stable monitoring of key parameters encompassing water cycle. A series of studies have been conducted to explore new technological devices for monitoring these key parameters of soil, air, ice, and snow in ecological systems. By establishing an integrated monitoring system for ecosystems based on the Internet

收稿日期:2024-03-11; 修回日期:2024-04-02 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.03.003

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(编号:2019QZKK0902);中国地质调查局地质调查项目“长江流域上游水文地质与水资源调查监测”(编号:DD20221757)、“银额盆地西部-北山盆地群油气地质调查”(编号:DD20190093)

第一作者:刘勇,男,汉族,1989年生,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事水工环调查与研究,四川省成都市郫都区港华路139号,1039786137@qq.com。

通信作者:赵远刚,男,汉族,1983年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事钻探技术研究和管理工作,四川省成都市郫都区港华路139号,171613061@qq.com。

引用格式:刘勇,周策,赵远刚,等.极端生态环境水循环关键参量监测技术研究现状与进展[J].钻探工程,2024,51(3):20-26.

LIU Yong, ZHOU Ce, ZHAO Yuangang, et al. Research status and development of key parameters monitoring technology for water cycle in extreme ecological environments[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):20-26.

of Things (IoT), the industry technological barriers are hope to be broken through, and the interdisciplinary collaboration across fields including engineering, geology, and computer science can be fostered. Through collaborative efforts in researching and innovating key parameter monitoring technologies for the water cycle in extreme ecological environments, extensive, all-weather and three-dimensional monitoring of critical ecological functional areas will be achieved. This endeavor will hold significant importance in advancing China's ecological civilization construction and promoting the comprehensive application and development of ecological monitoring technologies in the country.

**Key words:** ice content in frozen soil; glacier thickness; snow water equivalent; evapotranspiration in arid environments; runoff volume; groundwater level

## 0 引言

随着经济社会的不断发展和人类生活水平的提高,极端生态环境的保护已成为全球范围内的紧迫任务。其中,高寒地区和干旱地区的生态环境问题尤为突出,对水资源的监测与管理显得尤为重要。水循环作为水资源的关键环节,在极端生态环境中起着至关重要的作用。准确监测和管理水循环关键参量的变化,对于保护水资源、维护生态平衡以及确保国家生态安全具有不可替代的重要性。

我国正处于生态文明建设的关键时期,高寒地区和干旱地区的生态环境问题已成为亟待解决的焦点。因此,针对高寒和干旱极端生态环境的水循环变化进行准确监测和管理具有重要的战略意义<sup>[1-2]</sup>。高寒地区的冻土含冰量、冰川厚度、雪水当量等关键参量以及干旱地区的蒸散发、径流量、地下水位等参数对于生态环境的演变和水资源的可持续利用至关重要。然而,由于极端环境的复杂性和恶劣性,传统的监测手段和技术已经无法满足对这些关键参量进行准确监测的需求。

近年来,国家生态环境监测网络建设方案提出了强化高新技术及先进装备与系统的应用,提高生态环境监测立体化、自动化、智能化水平的要求<sup>[3-5]</sup>。然而,我国目前的极端生态环境监测设备仍然存在着严重依赖进口,观测自动化、智能化、网络化程度不高等问题,制约了我国生态环境监测网络的完善和水循环关键参量监测的精度和时效性<sup>[6-8]</sup>。因此,本文将重点关注针对高寒和干旱极端生态环境水循环关键参量监测的设备与技术研究。

## 1 国内外研究现状与发展动态分析

在极端生态环境水循环关键参量监测技术的发展中,其发展阶段可划分为传统技术阶段和现代技术阶段。传统技术主要包括人工测量、传统仪器监测等,虽然具有一定的可靠性,但在监测效率、数

据准确性和时效性方面存在局限性。相比之下,现代技术利用了先进的传感器技术、遥感技术、物联网技术等,具有监测精度高、自动化程度高、实时性强等优势。通过现代技术的应用,我们能够更准确地获取关键参量的数据,实现对极端生态环境的动态监测和管理<sup>[9-12]</sup>。极端生态环境的水循环变化对于生态系统的稳定性和人类社会的可持续发展具有重要影响。例如,在高寒地区,冻土的融化和冰川的消融对水资源的供给和生态平衡造成影响;而在干旱地区,蒸发蒸腾过程以及地下水位的变化直接关系到当地的农业生产和生态环境的健康。因此,研究与监测极端生态环境的水循环关键参量,对于预防自然灾害、保护生态环境、实现可持续发展具有重要意义。

国内外极端生态环境水循环关键参量监测技术研究大体上来说,针对冻土含冰量、冰川厚度和雪水当量三个参数的监测技术研究最多,其中,对雪深测量技术的研究最为广泛,冰层厚度的测量也受到了较多的关注;而蒸散发、径流量和地下水位等三个参数的研究则相对较少,其中径流量和地下水位的研究尤其不足<sup>[13-14]</sup>。近年来,随着GPS定位、气象观测仪器、遥感影像等技术的提高和应用,冻土监测技术一定程度上也取得了进步,但仍有部分核心关键技术未能较好解决。

在冻土含冰量监测中,一般需要使用雪深测量技术来获取冰量的相关数据,同时还需要对冰层厚度进行不定期的测量;对于雪水当量的监测,现在常用的方法主要是基于热释电原理的实时水分测量仪;而蒸发量的监测,一般采用保护性植物指示、气象观测站蒸发量数据以及不定期进行的现场测量等方法;对于径流量的监测,采用雨量计等仪器和人工测量相结合的方法可以有效的获取径流量的信息;最后,对地下水位的监测,可以通过仪器或水文井深度测量等方法进行测量<sup>[15-18]</sup>。

### 1.1 冻土含冰量监测技术

在国内,冻土含冰量的监测技术主要应用于北方低温冻土区,以提高低温工程安全性。近年来,发展趋势主要集中于无线传输系统的应用、多参数组合型监测仪器的开发和智能化的数据采集和处理系统。例如,哈尔滨工业大学设计开发了基于RFID技术的低功耗无线传输系统,提高了传输效率,并大大降低了监测成本。

国外冻土含冰量监测技术研究更加广泛。其中,可燃气体含量监测技术的应用较为成熟。这类技术通过监测冻土内部空气中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 等成分的含量及其变化规律,间接反映出冻土含冰量的变化情况。

### 1.2 冰川厚度监测技术

冰川厚度监测技术主要应用于高山冰川区和极地冰川区,以了解冰川变化趋势,预测未来变化<sup>[19]</sup>。目前,卫星遥感技术和激光雷达技术是比较常用的技术手段。

国内目前主要依赖于遥感技术,对冰川厚度、冰面变化等指标进行监测。而国外则更多使用激光雷达技术进行高精度的三维地形测量和构建,提高了冰川厚度监测的精度和可靠性。

### 1.3 雪水当量监测技术

雪水当量监测技术主要应用于雪区水文、山地水文等领域。在国内,该技术研究较少,但也有一些功能较为完备的监测仪进行了研制。例如,中国科学院沈阳应用生态研究所研制的小型自动雪水器,对雪水含量进行了较好的监测和预测<sup>[20-21]</sup>。

国外雪水当量监测技术研究相对较为成熟。其中,遥感技术被广泛应用,例如激光雷达技术、卫星遥感技术等。同时,还采用了多种监测手段,如压雪积算法、气象监测法、地球重力监测法等。

### 1.4 蒸散发监测技术

蒸散发监测技术主要应用于水资源监测、农业水利等领域<sup>[22-23]</sup>。近年来,国内相关研究中心加大了研究力度,提高监测手段的精度和自动化程度。例如,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所利用微波辐射技术和土壤水分模型,对黄土高原地区蒸散发进行了监测和模拟。

国外蒸散发监测技术也受到广泛关注。对于蒸发量的监测,主要应用气象学、水利学、生态学、植物生理学等多个学科的综合技术手段。常用的

监测手段有重量法、蒸发盘法、比重法、蒸发计法、氘同位素技术等。

### 1.5 径流量监测技术

径流量监测技术主要应用于水资源管理、防洪减灾等领域。在国内,径流量监测技术研究还处于比较初级的阶段<sup>[24-26]</sup>。目前主要依赖于人工测量和水位计自动记录技术,缺乏高强度的测试数据和高效的实时监测手段。因此,未来需要注重提高测试方法的自动化、实时化、智能化水平。国外径流量监测技术应用更为广泛,监测手段包括工程监测法、气象学监测法、水文学监测法等。常见的监测手段有定值法、流量积算法、水位流速关系法等。

### 1.6 地下水位监测技术

地下水位监测技术主要应用于水资源管理、地下水资源开发等领域。在国内,监测手段主要包括测井技术、地下水位计记录技术等。同时,近年来,无人机技术和遥感技术也被应用到地下水位监测中。例如,哈尔滨工业大学设计开发的水资源环境智能监测无人机,利用红外遥感技术、多光谱遥感技术等指标对地下水位进行了高精度的监测。

国外地下水位监测技术主要应用于水文学领域,目前采用的监测手段有:井内监测、常规测量、在线监测等。此外,地下水位监测技术在应用领域也越来越广泛,可以用于农业水利、城市水资源管理等多个领域。

### 1.7 物联网智能监控技术

物联网智能监控技术在国内外都备受关注和研究。在国内,随着政府支持和产业融合的推动,该技术在工业生产、智能交通、环境监测等领域取得了显著进展,技术不断创新,应用场景不断拓展。例如,在环境监测领域,通过部署传感器网络实现对空气质量、水质监测的智能化管理。

在国外,物联网智能监控技术也得到了广泛研究和应用。一些发达国家如美国、德国、日本等在该领域处于领先地位,其跨学科研究和标准化建设促进了技术的进步和规范化。

综上所述,国内外在极端生态环境水循环关键参量监测技术的研究和应用方面均取得了重要进展,为未来该技术的发展提供了坚实基础和广阔前景。在未来的研究中,我们需要进一步深入探讨各种监测技术的优化与创新,加强国际合作与交流,共同应对极端生态环境变化带来的挑战,促进生态

环境的可持续发展和保护。

## 2 拟解决的关键科学问题

针对极端生态环境水循环关键参量的监测,目前国内间接测量方法较多,能直接测量的技术应用较少,直接测量方法主要面临以下难点:

(1)环境条件恶劣:极端生态环境常常伴随着恶劣的气候和地理条件,例如极寒、高海拔、高纬度等,这给直接测量带来了巨大的挑战。

(2)监测设备稳定性要求高:监测设备在极端环境中需要长期稳定运行,对设备的可靠性和稳定性提出了更高的要求。

(3)数据准确性与一致性:直接测量方法要求监测数据准确性高且一致性好,然而在极端环境下,由于环境因素的复杂性,数据采集可能受到干扰或误差,导致数据的准确性和一致性受到影响。

针对上述直接测量方法的难点,结合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几个核心环节,拟解决以下关键科学问题:

(1)研发耐极端环境监测设备:针对极端环境条件,需要研发具有高度耐用性和稳定性的监测设备,以确保在恶劣环境下的长期可靠运行。

(2)提高监测数据精度和一致性:通过技术手段和算法优化等方式,提高监测数据的精度和一致性,减少环境因素对监测数据的干扰。

(3)开展实地测试与验证:在实际极端环境中开展实地测试与验证,验证监测设备和方法的实用性和有效性,不断优化和改进技术方案。

## 3 主要监测设备特点及功能

围绕解决水循环关键参量野外原位/移动/非接触式、自动、稳定监测等技术难点,需要研制的水循环关键参量监测设备主要包括:土壤冻土含冰量监测站、冰川厚度在线监测站、雨雪量计监测站、自动蒸发站、径流自动监测记录仪、地下水位在线监测仪。系统整体建设完成后,还需具备以下目标特点及能力。

### 3.1 智能采集

对极端生态环境现场各类环境数据进行智能化远程采集,并通过互联网、移动网络(GPRS、4G、北斗短报文、无线电台等)传输到平台软件中进行存储,为后续的处理、分析做好基础。降低工作人

员的工作强度,提高工作效率。

### 3.2 自动处理

可自动对现场数据进行采集,也可以定时采集,并且对部分关键数据进行自动处理和分析,对极端生态环境数据自动采集、存储,同时进行分类并自动计数。提高工作人员工作效率,降低工作人员的工作强度。

### 3.3 在线查看

通过在线视频技术,实现现场情况的在线查看,实现现场情况拍照保存,方便后续进行历史数据分析。提供远程指挥调度能力,提高整体管理应对水平。

### 3.4 智能统计

对不同来源的数据进行统一处理,通过数据合并的手段实现综合分析,提高工作效率。

### 3.5 移动应用

提供移动应用功能,使用手机就可以完成监测、分析及管理工作。提供多样的移动工作方式。

总之在高寒和干旱环境下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技术的实现可以更好地保护生态环境,促进经济社会的发展,对于推动科技进步和经济社会的可持续发展具有重要的意义。

## 4 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中心站点建设方案

### 4.1 总体技术方案

开展现场监测网络的建设主要是将各类专业采集设备、传输及控制设备部署在工作现场、采集所需现场环境,实现各因子信息数据自动采集、上传,与物联网平台结合使用可自动分析相关数据,并可与气象、地质灾害、地震物联网设备结合使用。根据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的监测类型、监测特点以及处理、统计、分析的要求,建设极端环境大数据监测预警系统会将监测设备安装在现场,通过设备的专业采集能力将数据采集传输到软件系统中,然后对数据进行分析处理,从而完成高寒环境冻土含冰量、冰川厚度、雪水当量、干旱环境蒸散发、径流量、地下水位的实时监测管理的相关工作。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见图1。

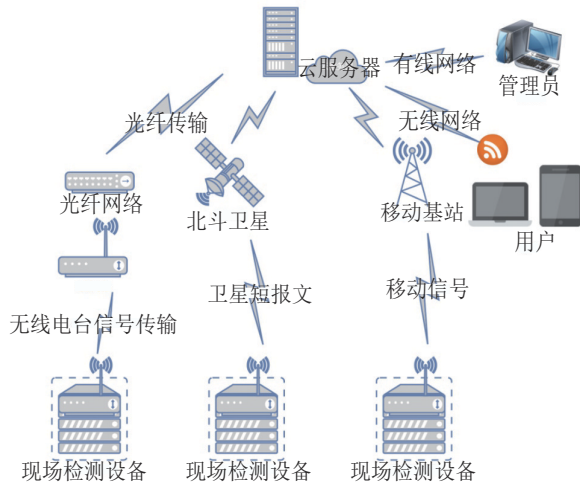


图1 极端生态环境水循环关键参量监测设备与物联网监测系统拓扑图

Fig.1 Topological diagram of monitoring devices for key parameters of water cycle in extreme ecological environments and IoT monitoring system

## 4.2 中心站点建设方案

### 4.2.1 在线监测仪站点建设

平台利用“互联网+物联网+GIS+大数据”，开展极端生态环境土壤冻土含冰量监测站、冰川厚度在线监测站、雨雪量计监测站、自动蒸发站、径流自动监测记录仪、地下水水位在线监测仪站点建设，实现监测范围内主要极端生态环境监测的规范化、数字化、智能化、可视化、科学化及实时采集图像、文字、视频及生态环境等材料，经过软件系统的数据格式化、挖掘、分析、统计，及时准确地发布各中心监测点的主要极端生态环境情况，为主管部门提供实时数据、分析结果。

### 4.2.2 关键参量监测设备与物联网监测系统

在各个极端生态环境中心站点安装部署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客户端和服务端，将极端生态环境土壤冻土含冰量监测站、冰川厚度在线监测站、雨雪量计监测站、自动蒸发站、径流自动监测记录仪、地下水水位在线监测仪等仪器设备智能集成、无缝对接，数字化极端生态环境水循环生态服务平台作为平台的核心，经过数据的智能化采集，将数据进行分析处理，能够将数据通过网络上传到省级或国家主管部门，实现采集有图像、文字、视频及生态环境监测，帮助有关人员快速、准确的掌握极端生态环境情况。

### 4.2.3 安装部署

安装部署土壤冻土含冰量监测站、冰川厚度在线监测站、雨雪量计监测站、自动蒸发站、径流自动监测记录仪、地下水水位在线监测仪设备能够实现设备的物联、远程控制及数据传输，设备实现清洁能源太阳能供电。设备可将数据通过无线网络传输到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智能及人工辅助识别分类，并将结果数据进行入库存储。

### 4.2.4 远程监控

中国西南部高原区域幅员辽阔，地形复杂多变，个别区域无公网覆盖或人类难以到达。如何从西南部高原区域等极端区域及时获取监测数据是生态系统监测的一个重要挑战。无人机物联网能够通过无人机搭载中继设备，与地面监测设备建立数据传输链路，实现监测数据的远程中继传输。然而，基于无人机的物联网应用研究大多集中在数据量少的环境，并不适用于图像、视频等大体量监测数据的无人机远程中继传输，见图2。

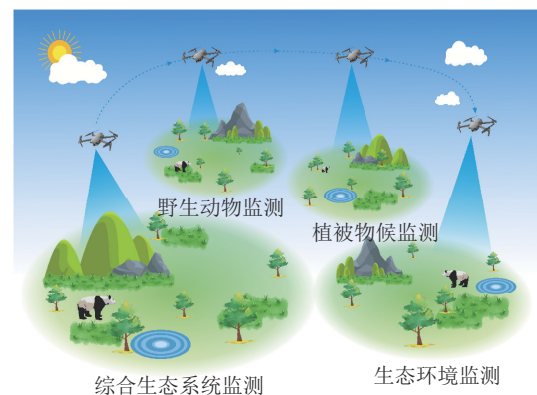


图2 无人机物联网中继应用示范框架

Fig.2 Demonstration framework of unmanned aerial vehicle (UAV) IoT relay application

选择重点区域安装部署远程监控设备，实现视频的远距离监测数据的无线回传，并在平台中实时查看各监测点的数据及图像信息。

通过开展以上水循环关键参量的野外原位/移动/非接触式、自动、稳定监测等技术方案研发，最终实现以上水循环关键参量的野外原位/移动/非接触式、自动、稳定监测等技术要求。

## 5 结论与未来展望

### 5.1 结论

《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》中,围绕青藏高原生态屏障区、黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)、长江重点生态区(含川滇生态屏障)、东北森林带、北方防沙带、南方丘陵山地带、海岸带等“三区四带”进行了重大工程布局。极端生态环境水循环关键参量监测技术研究紧密围绕“三区四带”生态安全屏障建设科技需求,通过基础理论研究、关键技术与装备研发、典型区域集成示范,支撑生态监测预警、荒漠化防治、水土流失治理、石漠化治理、退化生态系统(森林、草地、湿地等)修复、生物多样性保护、城市人居环境改善和重大工程生态安全保障,促进生态与生产功能协同提升,形成整体和系统治理技术体系,并进行推广应用。

目前,我国的生态环境保护工作已进入了全方位、多层次、高水平的新阶段。为了满足这一阶段的发展需求,需要采用先进的科学技术手段对极端生态环境进行监测,并对监测数据进行有效分析和处理。因此,研制一种高效、准确、可靠的满足极端生态环境下的水循环关键参量监测设备与物联网监测系统显得非常重要。

### 5.2 未来展望

随着持续的技术创新和应用拓展,针对极端生态环境水循环关键参量监测技术的研究将取得巨大进展,主要表现在以下几方面:

(1)技术改进的方向:未来的发展方向将主要集中在技术改进上,包括但不限于传感器技术、数据处理算法、通信技术和耐久材料的研发。随着人工智能、大数据和物联网技术的发展,我们有望看到更智能化、高效化和可靠化的监测设备出现。

(2)应用领域的拓展:除了极端生态环境水循环监测,这些技术也有望在其他领域得到应用,如气候变化监测、水资源管理、自然灾害预警等。未来,我们可以将这些技术扩展应用到更广泛的领域,以解决全球面临的环境挑战。

(3)可持续发展和生态保护:随着社会对环境保护和可持续发展的关注度不断提高,监测技术的发展将在保护生态环境、维护生态平衡方面发挥更加重要的作用。未来,这些技术将成为实现可持续发展目标的重要工具之一。

## 参考文献(References):

- [1] 齐杨,于洋,刘海江,等.中国生态监测存在问题及发展趋势[J].中国环境监测,2015(6):9-14.  
QI Yang, YU Yang, LIU Haijiang, et al. Research on existing problems and developmental tendency of ecological monitoring in China[J]. Environmental Monitoring in China, 2015(6):9-14.
- [2] 杨颖,洪沁.浅论生态环境监测的现状与发展趋势[J].资源节约与环保,2015(10):84-84.  
YANG Ying, HONG Qin. Brief discussion on present condition and development trend of ecosystem environment monitoring [J]. Resources Economization & Environmental, 2015(10):84-84.
- [3] 杨丽平.生态环境监测及其在我国的发展[J].科技创新与应用,2016,36:155.  
YANG Liping. Ecosystem environment monitoring and it's development in our country[J]. Technology Innovation and Application, 2016,36:155.
- [4] 陈良富,顾坚斌,王甜甜,等.近地面NO<sub>2</sub>浓度卫星遥感估算问题[J].环境监控与预警,2016,8(3):1-5.  
CHEN Liangfu, GU Jianbin, WANG Tiantian, et al. Scientific problems for ground NO<sub>2</sub> concentration estimation using DOAS method from satellite observation[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2016,8(3):1-5.
- [5] 陈可欣.基于高分辨率遥感影像的建成区扩张与驱动力研究:以嘉兴市为例[D].杭州:浙江大学,2016.  
CHEN Kexin. Research on urban built-up area expansion and driving forces based on high-resolution remote sensing image: A case study of Jiaxing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [6] 哈米达·再尼尔.浅谈我国生态环境监测现状和发展[J].科技视界,2015(4):323,397.  
Hamida·Zainier. Brief discussion on present condition and development of ecological environment monitoring in our country [J]. Science & Technology Vision, 2015(4):323,397.
- [7] 刘丛.生态环境监测及其在中国的发展[J].能源与节能,2015(8):93-94.  
LIU Cong. On the ecological environment monitoring and its development in China[J]. Energy and Energy Conservation, 2015(8):93-94.
- [8] 王生廷,盛煜,曹伟,等.基于地貌分类的黄河源区多年冻土层地下冰储量估算[J].水科学进展,2017,28(6):801-810.  
WANG Shengting, SHENG Yu, CAO Wei, et al. Estimation of permafrost ice reserves in the source area of the Yellow River using landform classification [J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):801-810.
- [9] 吴吉春,盛煜,吴青柏,等.气候变暖背景下青藏高原多年冻土层中地下冰作为水“源”的可能性探讨[J].冰川冻土,2009,31(2):350-356.  
WU Jichun, SHENG Yu, WU Qingbo, et al. Discussion on the possibility of taking ground ice in permafrost regions as water sources under climate warming [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009,31(2):350-356.
- [10] 王生廷,盛煜,吴吉春,等.基于地貌分类对祁连山大通河源区多年冻土地下冰储量估算[J].冰川冻土,2020,42(4):1186-1194.

- WANG Shengting, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Based on geomorphic classification to estimate the permafrost ground ice reserves in the source area of the Datong River, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1186-1194.
- [11] 王绍令,王平,张廷军.环境同位素<sup>3</sup>H在青藏高原多年冻土区地下冰研究中的应用[J].*冰川冻土*,1989(1):53-59,99-100.  
WANG Shaoling, WANG Ping, ZHANG Tingjun. Applications of environmental isotope tritium to research into ground ice in permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989(1):53-59,99-100.
- [12] 孔森,温智,吴青柏,等.热管在青藏高原多年冻土区高速公路应用中的适用性评价[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2019,50(6):1384-1391.  
KONG Sen, WEN Zhi, WU Qingbai, et al. Applicability evaluation on application of thermosyphon in embankment engineering of expressway in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019,50(6):1384-1391.
- [13] 程国栋.大比例尺多年冻土含冰量图的编制原则[J].*冰川冻土*,1981(3):53-57.  
CHENG Guodong. Principle of compiling ice content maps at large scales[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981(3):53-57.
- [14] 吴紫汪.多年冻土的工程分类[J].*冰川冻土*,1979(2):52-60.  
WU Ziwan. The engineering classification of several years jely soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1979(2): 52-60.
- [15] 龚诚,黄海,陈龙,等.藏东地区冻错曲流域崩塌发育特征与链式成灾模式研究[J].*钻探工程*,2023,50(5):1-10.  
GONG Cheng, HUANG Hai, CHEN Long, et al. Characteristics of collapse development and geohazard chain model in the Dongcuoqu Basin, eastern Tibet [J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(5):1-10.
- [16] 李民,刘志辉,房世峰.基于MODIS数据的雪水当量监测模型研究[J].*水土保持研究*,2007(4):74-76,81.  
LI Min, LIU Zhihui, FANG Shifeng. Study of snow water equivalent monitoring model based on MODIS data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007(4):74-76,81.
- [17] 陈龙,王军朝,李元灵,等.藏东南艰险地区灾害地质调查思路与方法论述[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2018,45(8):58-64.  
CHEN Long, WANG Junchao, LI Yuanling, et al. Research ideas and methods for geological hazards survey in southeast Tibet [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018,45(8):58-64.
- [18] 崔华丽,杨东旭,杨栋,等.狭陡型泥石流成灾特征与防治对策研究——以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例[J].*钻探工程*,2022,49(6):122-129.  
CUI Huali, YANG Dongxu, YANG Dong, et al. Disaster characteristics and prevention measures of narrow-steep debris flow: A case study of Liujia gully in Jinchuan county, Aba prefecture, Sichuan province [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(6):122-129.
- [19] 赵林,丁永建,刘广岳,等.青藏高原多年冻土层中地下冰储量估算及评价[J].*冰川冻土*,2010,32(1):1-9.  
ZHAO Lin, DING Yongjian, LIU Guangyue, et al. Estimates of the reserves of ground ice in permafrost regions on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1):1-9.
- [20] 车涛,李新,高峰.青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演[J].*冰川冻土*,2004,26(3):363-368.  
CHE Tao, LI Xin, GAO Feng. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/D) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004,26(3):363-368.
- [21] 黄晓东,李旭冰,刘畅宇,等.青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战[J].*冰川冻土*,2019,41(5):1138-1149.  
HUANG Xiaodong, LI Xubing, LIU Changyu. Remote sensing inversion of snow cover extent and snow depth/snow water equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: Advance and challenge [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5):1138-1149.
- [22] 龙胤慧,徐晓民,郭中小,等.干旱区牧草蒸散发量变化趋势及其影响因素[J].*人民黄河*,2015,37(3):142-144,148.  
LONG Yinhui, XU Xiaomin, GUO Zhongxiao, et al. The trend of evapotranspiration changes of forage grass and its influencing factors in arid area [J]. *Yellow River*, 2015,37(3):142-144,148.
- [23] 贾伍慧,尹立河,王晓勇,等.利用改进的Loheide方法计算地下水的蒸散发量[J].*水文地质工程地质*,2017,44(2):48-51.  
JIA Wuhui, YIN Lihe, WANG Xiaoyong, et al. Quantifying groundwater evapotranspiration by the modified Loheide method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 48-51.
- [24] 田志仁,李名升,夏新,等.我国地下水环境监测现状和工作建议[J].*环境监测与预警*,2020,12(6):1-6.  
TIAN Zhiren, LI Mingsheng, XIA Xin, et al. Current situation and suggestions of groundwater monitoring work in China [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2020, 12(6):1-6.
- [25] 周政辉,刘庆涛,张淑娜.国家地下水监测工程(水利部分)系统集成设计[J].*水利信息化*,2016(6):50-54,72.  
ZHOU Zhenghui, LIU Qingtao, ZHANG Shuna. Design on system intergration of national groundwater monitoring project (water resource part) [J]. *Water Resources Informatization*, 2016(6):50-54,72.
- [26] 冯建月,解伟,吴海东,等.地下水监测工程承压-自流监测井密封技术[J].*钻探工程*,2021,48(3):146-151.  
FENG Jianyue, XIE Wei, WU Haidong, et al. Sealing technology for confined-artesian monitoring wells in groundwater monitoring engineering [J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(3): 146-151.

(编辑 王文)