

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.12.011

国内外自然资源监测与观测网络建设现状及经验启示

彭令^{1,2}, 殷志强^{1,2*}, 金爱芳^{1,2}, 杨贵才³, 李展辉⁴

PENG Ling^{1,2}, YIN Zhiqiang^{1,2*}, JIN Aifang^{1,2}, YANG Guicai³, LI Zhanhui⁴

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;
2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000;
4. 中国地质调查局, 北京 100037

1. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China;
2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;
3. Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China;
4. China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要:自然资源是人类生存、社会发展和经济建设的物质基础,监测与观测地球系统各圈层及山水林田湖草沙冰等要素对自然资源管理决策和地球系统科学研究具有十分重要的科学和现实意义。梳理了美国、英国、德国、法国、澳大利亚等国家自然资源相关网络的建设思路及站点部署、监测与观测内容指标、技术方法、新型装备等,总结国际经验与启示,即注重地球系统科学框架下的系统监测与综合观测,提升标准化长期连续监测与观测能力,加强天-空-地立体化协同式监测与观测。分析中国自然资源相关监测网络的发展现状和存在不足,提出建设国家自然资源监测网络的初步构想,以期为中国自然资源监测体系建设提供参考与借鉴。

关键词:自然资源;监测网络;观测网络;经验启示;地球系统科学

中图分类号:P5;P96 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)12-2156-09

Peng L, Yin Z Q, Jin A F, Yang G C, Li Z H. Status and enlightenment of natural resources monitoring and observation network construction in China and abroad. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(12): 2156-2164

Abstract: Natural resources are the material basis of human survival, social development and economic construction. Monitoring and observing the various spheres of the earth system and its components such as mountains, rivers, forests, fields, lakes, grass, sand and ice are of great scientific and practical significance for natural resource management decision-making and earth system scientific research. This paper summarizes the construction ideas, site deployment, monitoring and observation content indicators, technical methods and new equipment of natural resource related networks in the United States, England, Germany, France, Australia and other countries, and summarizes international experience and enlightenment, that is, pay attention to comprehensive monitoring and observation under the framework of earth system science, improve standardized long-term continuous monitoring and observation capabilities, and strengthen based on space-sky-ground collaborative monitoring and observation. This paper analyzes the development status and existing deficiencies of China's natural resource related monitoring network, and puts forward the preliminary idea of building a national natural resources

收稿日期:2022-05-20;修订日期:2022-07-11

资助项目:中国地质调查局项目《全国自然资源监测评价与智慧服务》(编号:DD20221761)、《承德资源环境承载力综合地质调查与评价》(编号:DD20230489)

作者简介:彭令(1984-),男,博士,正高级工程师,从事遥感地质与自然资源综合研究。E-mail:jcypengling@mail.cgs.gov.cn

*通信作者:殷志强(1980-),男,博士,正高级工程师,从事第四纪环境演变与自然资源综合研究。E-mail:yinzhizhiqiang@mail.cgs.gov.cn

monitoring network, in order to provide reference for the development of China's natural resource monitoring and observations.

Key words: natural resources; monitoring network; observations network; experience and enlightenment; earth system science

自然资源是人类生存、社会发展和经济建设的物质基础,人类社会的可持续发展离不开对自然资源的科学合理开发利用与保护,人类目前所面临的各种生态环境问题实质上是对自然资源过度开发、粗放利用所导致的地球系统失衡的结果(傅伯杰等,2007)。因此,综合监测和观测地球系统陆地与海洋、地上与地下各类自然资源对管理决策和地球系统科学研究都具有十分重要的科学和现实意义。

自 20 世纪 80 年代以来,一些国家、地区、国际组织等开始建立国家、区域甚至全球尺度的资源环境生态综合监测或观测网络(傅伯杰等,2014;刘海江等,2014;Guo et al.,2016),开展了水、土地、气候、生物等各类自然资源及生态系统监测,有效服务了资源环境可持续发展。同时,通过对大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、冰冻圈的长期连续观测,获得地球系统组成要素和各圈层的物理、化学、生物等长序列观测数据,有力地推动了地球系统科学研究、监测和观测技术发展(NEON,2011;Bogena,2016;Sier et al.,2016;Gaillardet et al.,2018;James et al.,2019)。其中,监测网主要用于监视资源环境生态等目标对象以掌握其变化情况,而观测网侧重于对地球系统等事物现象的综合观察以理解其变化过程与原因(付宇佳等,2022),二者的共同目标都是动态采集数据和获取信息。

目前,中国已经建立大量有关水、土地、森林等自然资源相关监测或观测站网(王兵等,2004;王左等,2006;何惠,2010;范宏喜,2015;马克平,2015;严宇红等,2017;冯晓娟等,2019;廖小罕等,2020;卢琦等,2020;吴季友等,2021),在保障资源开发利用和生态环境保护中发挥了积极作用。但是,这些已建站网多数分散在不同部门,相互之间缺乏统一的规划,建设标准、数据格式不统一,共享利用难度大,关注生态属性的生态观测研究网多,关注资源数量、质量属性的资源监测网少(钱建利等,2021),无法有效解决山水林田湖草沙冰等流域性、系统性、综合性问题,难以支撑服务国家自然资源统一管理。近年来,中国自然资源部门开始积极探索自然资源监测与观测网站,初步构建了全国自然资源要素综合观测网络与典型地区河北

坝上高原野外观测研究站(刘晓煌等,2020;殷志强等,2020;王梁等,2021;裴小龙等,2022;沈运华等,2023)。

本文通过梳理欧美国家自然资源相关监测与观测网络的建设目标与思路、技术方法体系等,总结国际经验与启示,分析中国自然资源相关监测与观测网络的发展现状及存在不足,提出建设中国自然资源监测网络的初步构想,为中国自然资源监测体系建设提供参考与借鉴。

1 国外自然资源监测与观测网络

近年来,欧美等发达国家先后倡导建立了国家及全球尺度的自然资源和生态环境综合监测或观测网络系统。譬如比较有代表性和影响力的美国国家生态观测网络(National Ecological Observatory Network, NEON)、英国环境变化监测网络(Environmental Change Network, ECN)、德国陆地环境观测网络(Terrestrial Environmental Observatories, TERENO)、法国地球关键带观测网络(Critical Zone Observatories: Research and Application, OZCAR)、澳大利亚陆地生态系统研究网络(Terrestrial Ecosystem Research Network, TERN)等国家尺度网络,以及全球陆地观测系统(Global Terrestrial Observing System, GTOS)、全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, GOOS)、全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)、全球综合地球观测系统(Global Earth Observation System of Systems, GEOSS)等全球尺度网络。其中 GEOSS 是 2003 年由联合国、欧盟等组织,100 多个国家参与搭建的全球性观测网络,它把与地球系统有关的陆地、海洋、大气、人类活动等系统联系起来,形成一个前所未有的全球性综合观测体系(冯筠等,2005;Stefano et al.,2015)。

1.1 建设目标与思路

自然资源监测与观测网络建设目标是建成国家尺度或区域性统一规范的监测或观测网络系统,获取地球多圈层组成要素不同时空尺度的长期、连续监测与观测数据信息,分析和理解资源、环境、生

态的变化过程及其原因,预测地球系统的未来变化趋势,从而解决全球变化等重大科学问题,服务社会经济可持续发展,为管理者提供及时有效的决策信息。

比如 NEON 的目标是形成大陆尺度的自然生态系统观测研究平台,掌握和预测整个美国的自然生态系统变化,为国家自然资源管理决策提供信息支撑 (NEON, 2011)。ECN 的目标是获得具有可比性的长期监测数据,识别自然和人为因素影响的环境变化,并理解其变化原因,从而预测未来变化趋势 (Sier et al., 2016)。TERENO 的目标是观测全球变化对陆地生态系统及社会经济的影响,为分析预测未来陆地生态系统过程提供高时空分辨率的长期观测数据信息 (Bogena, 2016)。TERN 旨在解答未来复杂的自然生态系统变化问题,为维护生态系统健康和促进自然资源可持续发展提供科学基础 (James et al., 2019)。

监测与观测网络的建设思路通常是围绕社会经济发展需求和重大科学问题,开展统一规划设计、基础设施建设、网络运行管理。在建设过程中,最重要的是站点部署和指标选取确定(即在哪里监测和监测什么内容),其中监测站点通常根据不同地质地貌类型、气候条件、土地利用或植被类型和生态过程的自然生态系统区划进行部署(如 NEON、OZCAR) (NEON, 2011; Gaillardet et al., 2018),或以自然流域单元进行部署(如 TERENO) (Bogena, 2016),或围绕需要解决的科学问题部署。比如 TERN 围绕如下科学问题部署观测网络:①自然生态系统如何应对环境压力?②如何加强自然生态系统的积极趋势和管理其消极后果?③未来自然生态系统如何变化?例如对不同气候变化条件的响应。④土壤、碳储量、水、植被和生物多样性等重要自然资源资产如何应对这些变化及其科学管理。⑤自然生态系统的服务功能韧性如何?例如土壤健康、养分循环、提供清洁水、作物授粉、碳封存,以及对疾病传播影响等 (James et al., 2019)。

监测与观测内容指标通常涉及地球系统的大气圈、水圈、生物圈、土壤圈、冰冻圈等多圈层,涵盖水、土壤、大气、生物等各类要素的物理、化学、生物等性质,指标数量十几项至上百项不等(表 1)。

1.2 技术方法及装备

目前国际上整合应用“天-空-地”等多种技术

手段,集成构建基于地球系统科学概念的大跨度多学科交叉融合-多技术系统集成-多领域综合应用的监测和观测网络,从而实现不同时空尺度的自然资源和生态系统的立体化、综合性、协同化监测与观测。技术装备向一体化、自动化、智能化方向发展,传感器向小型化、低功耗、低成本方向发展。本文选取代表性网络,对其采用的技术方法及装备进行介绍。

2019年,美国地质调查局(USGS)启动开发下一代水资源观测系统(Next Generation Water Observing System, NGWOS),整合水域、地面和空中网络摄像头、遥感雷达、水质传感器等监测设施,计划在全美选择具有代表性的10个典型流域实施下一代水资源观测系统。该观测系统将实时采集有关河流流量、流速、蒸散量、积雪、土壤湿度、水质、地表水与地下水转换量等数据信息,以支撑21世纪美国水资源管理,同时也作为新仪器和创新水资源监测方法的孵化器 (Eberts et al., 2019)。

NEON 通过采用激光雷达、成像光谱仪、高分辨率数码相机等机载遥感平台,气象、土壤、物候、地表水和地下水自动化监测仪器,以及野外定期观测、采样等多种技术手段,获取有关气候、地表水、地下水、土壤、植物、动物、微生物等观测数据信息,涵盖大气学、生态水文学、生物地球化学、生物学等数据产品 182 项。其中自动监测产品 75 项,突出特点是可以获取高质量、标准化、可对比的数据资源。

TERENO 每个观测站综合集成多种技术手段和观测设施,包括:①多时空尺度的区域降水场观测系统(如气象雷达、雨量站等);②测量水气、能量和痕量气体通量的微气象涡旋协方差系统和闪烁仪;③高时空分辨率的环境参数监测系统(如土壤温度、湿度传感器);④地表水、地下水和溶质迁移量化观测系统(如水位计、蒸渗仪、浊度仪等);⑤地基、空基遥感观测平台(如塔架、无人机);⑥地球物理和光谱传感器系统(如高光谱和红外相机、微波辐射计、合成孔径雷达、激光雷达、空气化学仪器等)。

OZCAR 所有观测站都配备多种监测仪器,特别是对于冰川和雪地观测站而言,除常规气象观测外,还采用超声波雪深传感器、摄影测量、激光雷达、微波雷达、无人机、卫星遥感等测量冰雪面的厚度和面积范围,以及宇宙射线计数测量雪水当量、

雪粒子计数器测量飘雪通量、高时空分辨率光谱仪监测地表反照率等。地表水流量除采用常规水位传感器测量外,还开发了地面雷达、基于摄像机图像或视频的大尺度粒子图像测速(LS-PIV)等非接触式监测方法。此外,为了实现流域尺度物质和能量平衡的长期高分辨率监测,及时有效地运用新兴技术,2011年启动了地球关键带时空监测设备创新研究计划(CRITEX),用于研发新仪器装备,并将其分为实践状态、研发状态和研究状态3类。其中,实践状态类仪器是利用成熟的技术,可广泛应用于实际;研发状态类是已开发出设备原型,但尚未商业化;研究状态类属于新兴技术和探索创新,如使用分布式光纤温度传感器连续测量钻孔中地下水垂直流速(Read et al., 2014),基于MIMS技术的连续流膜进样质谱仪(CF-MIMS)原位高频监测地下水体中的 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 H_2 、He、Ne、Ar、Kr、Xe等溶解气体浓度(Chatton et al., 2017),以及研制便携式超导重力仪监测局地包气带、地下水的储量变化(精度相当于2 mm等效水柱高)(Chaffaut et al., 2021)等。

TERN采用大尺度景观环境、中尺度生态系统和小尺度生态系统过程3种不同时空尺度开展系统综合监测(Sparrow et al., 2020)。其中,大尺度景观环境监测主要基于航天、航空遥感技术,通过空中遥感数据采集和地面实地校准与验证,生成大范围空间数据,以表征和监测资源环境的数量、质量等空间分布格局,主要解决与自然生态系统发生变化的地点和时间有关的问题。中尺度生态系统监测使用标准化的实地调查和抽样方法,通过对样地、样带调查取样,获取有关植被结构与组成、土壤特征和土地覆盖的数据和样本,跟踪自然生态系统变化,以及这些变化的方向和幅度。小尺度生态系统过程监测通过超级站点连续运行的密集原位监测传感器和定期现场测量,对自然生态系统的物质(碳、水等)、能量交换,以及动物、植物、微生物等生物群落和土壤、地表水、地下水等生态环境进行监测和观测,并结合实地调查和遥感技术,分析研究碳-水平衡、能量平衡及生物多样性,理解自然生态系统的变化过程,提供自然生态系统不利变化的减缓对策措施。

TreeNet通过点测树仪(natkon.ch)自动实时测量树木胸径的微米级变化。树木胸径变化一方面

体现了不可逆的季节性生长过程,另一方面可由树木水分关系,驱动树皮可逆的昼夜收缩和膨胀,通常白天叶子蒸腾作用强烈,导致树木失水树干收缩,而夜间却相反。基于此,将胸径波动转化为树木的水分亏缺和生长情况,从而实现森林实际生长量和树木水分亏缺状况的实时监测(Zweifel et al., 2021)。

2 国内自然资源监测与观测网络

2.1 发展现状

长期以来,中国水、土地、森林、草原等自然资源分属不同部门管理,各个部门先后建立了大量相关监测或观测站网(表2)(王兵等,2004;王左等,2006;何惠,2010;范宏喜,2015;马克平,2015;严宇红等,2017;冯晓娟等,2019;廖小罕等,2020;卢琦等,2020;吴季友等,2021),并取得长足发展和显著成效,在支撑服务资源生态环境管理,推动地球科学、生态学、农学等相关学科发展,促进监测与观测技术方法进步等方面发挥了重要作用。由于建设背景不同,这些网络具有不同的功能定位和服务目标,可以分为2类:业务网和科研网。其中,业务网主要由业务管理部门牵头建设,部署监测站点数量较多,用于掌握相应资源的数量、质量等整体状况,但自动实时监测指标较少,主要监测关键核心指标,以满足业务需求和管理需要;而科研网通常由科研部门牵头建设,观测站点数量较少,通常在全国自然地理、植被类型、生态功能等区划基础上,选择具有代表性的典型地区部署观测站点,但观测指标非常多,涉及数量、质量、生态等状态参量及其变化过程通量,以获取丰富的数据用于科学研究。

2.2 存在问题

(1)缺乏网络顶层统一规划设计。已建站网主要分散在行业部门、科研院所和高等院校,分块设计、多头建设、技术标准不统一,在国家层面缺乏统一规划设计,导致设备资源分散、站网重复建设、数据可比性差,站网的空间布局和学科体系不够完善(高春东等,2019;杨萍等,2020;杨萍,2021),难以精准、高效地支撑服务自然资源开发利用与科学保护。

(2)缺乏以地球系统科学为理论指导的综合性、长期性监测。地球各圈层的自然资源之间相互联

表 1 国外自然资源相关监测与观测网络介绍
Table 1 Overview of natural resources monitoring and observation network construction in foreign countries

序号	名称	已建站点数量	监测与观测内容和指标	建设运行情况
1	美国国家生态观测网络 (NEON)	81 个观测站, 其中 47 个陆地观测站和 34 个淡水水域观测站; 部署 1.7 万余个传感器, 2000 个样地	气候、地表水、地下水、土壤、植物、动物、微生物等 气象、大气质量、土壤结构与理化性质、地表水和地下水的理化及生物性质、土地利用/土地覆盖、植物结构与特征、动物种类与数量、微生物多样性等方面的 153 项指标, 其中仪器自动监测指标 63 项	美国国家科学基金会 2000 年提出建立, 历经 20 a 规划建设, 耗资 4.6 亿美元, 于 2019 年 8 月建成运行
2	美国水资源监测站网	大约 190 万个站点, 其中 1.35 万余个实时或近实时监测站点	河流、运河、沟渠等水流流量, 河流、湖泊、水库、湿地等地表水水位, 地下水水位, 泉水位, 水温、电导率、pH 值、溶解氧、浊度、叶绿素、有机物、主要无机物、悬浮泥沙等水质参数, 以及降水量、蒸发量、气温、气压、湿度、风速、风向、太阳辐射量等 太阳辐射量、净辐射量、湿度、气温、风速、风向、降雨量、天空和地面反射率、地表湿度等 二氧化氮、氨气 气象条件 大气成分 降水化学 地表水 土壤水 土壤特性 植物	美国地质调查局运营与维护, 其中一些实时站点运行超过 100 a
3	英国环境变化监测网络 (ECN)	57 个监测站, 其中 12 个陆地站、29 个河流站和 16 个湖泊站	pH 值、电导率、碱度、钠、钾、钙、镁、铁、铝、总磷、总氮、硝酸盐、氯化物、硫酸盐、溶解有机碳 流量、水温、pH 值、电导率、浊度、总磷等 37 项水质指标 pH 值、电导率、碱度、钠、钾、钙、镁、铁、铝、总磷、总氮、磷酸盐、氨氮、硝酸盐、氯化物、硫酸盐、溶解有机碳 土壤湿度、容重、pH 值、钾、钙、镁、锰、铝、总氮、总磷、锌、镉、铜、汞、钴、钼、锶、镍、有机碳、无机碳酸盐等 植物的种类、森林的胸径、高度和优势度、草地生物量 浮游植物和大型水生植物的种类、丰度, 以及大型水生植物的分布 食草动物鹿、羊、兔, 以及蝙蝠、青蛙、鸟类的种类、数量、丰度 无脊椎动物飞蛾、蝴蝶、甲虫、蜘蛛的种类、数量、丰度 浮游动物和大型底栖无脊椎动物的种类、丰度	英国环境食品与农村事务部、自然环境保护委员会、林业委员会等 14 个政府部门和机构共同资助, 自然环境研究委员会生态与水文中心负责运行管理, 通过整合已建野外观测站 (如洛桑试验站) 组网运行, 网络监测数据时同序列长达 25 a 以上
4	德国陆地环境观测网络 (TERENO)	4 个观测站, 分别代表德国东北部低平原区、中部哈尔茨低平原区、西部埃菲尔/下莱茵河谷、南部前阿尔卑斯山区	降水量、气温、湿度、风速、风向、辐射、CO ₂ 和 H ₂ O 通量等 土壤湿度、土壤温度和氮、土壤密度、土壤养分等 地表水位和流量、地下水水位、水质、细菌毒素、异种生物等污染物 植被初级生产力、树木生长量、软体和两栖动物的种类、数量等 大气层 土壤 水 生物	2008 年启动建设, 由德国亥姆霍兹国家研究中心联合会运行管理
5	法国地球关键带观测网络 (OZCAR)	21 个观测站, 其中包含 60 多个仪器站点 (尺度从地块到整个河流集水区)	降雨量、气温、风速、风向、空气压力、空气湿度、辐射、雨的化学成分、雨水氧和氢同位素组成 流量、水温、电导率、浊度、悬浮泥沙浓度、水化学成分、地表水氧和氢同位素组成 土壤含水量、地下水水位、地下水温度、地下水电导率、地下水化学成分、地下水氧和氢同位素组成 土地利用/土地覆盖、农业投入的化学成分 大气层 地表水 地下水 地表层	2015 年启动运行, 主要通过整合已建站点, 由法国高等教育、研究和创新部资助

续表 1

序号	名称	已建站点数量	监测与观测内容和指标	建设运行情况
6	澳大利亚陆地生态系统研究网络 (TERN)	13 个实地观测与遥感校验场地, 16 个生态系统过程监测超级站, 800 余个生态系统样地样带观测点	景观环境 生态系统 生态系统过程	2009 年启动建设, 由国家合作研究基础设施战略、昆士兰州政府、西澳大利亚州政府和南澳大利亚州政府共同支持
7	瑞士树网 (TreeNet)	61 个监测站点, 包括 13 个种类约 450 棵树木	森林资源	2011 年建成运行, 瑞士联邦森林雪地和景观研究所、苏黎世联邦理工学院、应用植物生物学研究所等单位联合实施

系、相互作用, 一种资源的不合理开发利用会影响另一种资源的存在状态。全球变化背景下, 地球系统各要素耦合作用引发的系统性风险越来越大。然而, 以往所建的业务网通常以部门管理的相应资源生态环境为单一监测对象, 而科研网大部分依靠科研项目经费建设, 难以保障长期稳定运行, 整体缺乏以地球系统科学视角开展综合系统、长期稳定的监测与观测, 导致各类自然资源的相互关系、演替规律、内在作用机理等认识不清, 难以破解自然资源间相互制约关系、自然生态系统平衡等关键问题。

(3) 技术手段有待融合拓展, 新兴技术应用不足。以往针对各类资源生态环境监测采用的技术手段较单一、零散, 真正实现融合“天-空-地”等多维立体监测技术手段较少, 整合跨学科多类型协同监测应用程度较低, 集成应用物联网、云计算、人工智能等新技术不足, 难以实现高精度、高分辨率监测数据的实时、多维产出和智能智慧服务。

3 经验启示与建议

3.1 经验启示

中国基本实现了自然资源统一管理, 自然资源相关监测和观测网络建设取得长足发展和重要成效。面对当前生态文明建设、保障资源安全、统一管理自然资源等方面的国家需求, 创新发展地球系统科学理论、推进监测技术进步等方面的科技需求, 以及弥补当前自然资源监测体系存在的不足, 亟需规划建设国家统一的自然资源监测网络。因此, 相关国家的站网建设思路、运行模式、技术手段等, 值得学习借鉴。

(1) 注重地球系统科学框架下的系统监测与综合观测。在全球变化背景下, 亟需对地球系统的大气圈、水圈、岩石圈、生物圈、冰冻圈等圈层及山水林田湖草沙冰等要素进行系统监测与综合观测, 同时加强地球科学、生物学、农学、林学等多学科数据信息融合集成, 进而理解地球系统的变化过程并预测未来变化趋势(于贵瑞等, 2021)。

(2) 提升标准化长期连续监测与观测能力。借鉴 ECN 等相关网络经验, 加强监测与观测网络的标准化、规范化建设, 特别是新建网络, 要从站点建设、指标设置、数据采集、质量管理等方面制定详细的技术标准规范(杨帅等, 2020), 确保获得具有可比性的高质量数据。

表2 中国自然资源相关监测与观测网络
Table 2 Overview of natural resources monitoring and observation network construction in China

序号	名称	已建站点数量	监测/观测		建设部门及时间
			内容	指标	
1	国家地下水监测网	监测井 20317 个、 测流站 152 个	地下水资源	水位、水温、水量(自动监测),水质指标(采样测试)	自然资源部、水利部,2015年
2	全国水文监测网	水文站 7309 个、 水位站 15429 个、 雨量站 55413 个	地表水资源	河流流量、水位、含沙量,湖泊水库水位、蓄变量等	水利部,1956年
3	国家地表水水质 自动监测网	3646 个	地表水水质	水温、pH 值、溶解氧、电导率、浊度、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、叶绿素 α 、藻密度等	生态环境部,1999年
4	中国气象监测网	国家站 2421 个、 区域站 65164 个	气象、气候资源	降水量、气温、气压、湿度、水汽压、风速、风向等	中国气象局,1959年
5	国家土壤环境监测网	79941 个	土地资源	pH 值、阳离子交换量、镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌、六六六、滴滴涕等	生态环境部、农业农村部、自然资源部,2017年
6	国家生态系统观测 研究网络(CNERN)	53 个	农田、森林、草地、 湿地、湖泊、荒漠、 海洋等生态系统	气象要素、土壤要素、底质要素、水环境要素、生物要素等 280 余项 指标	科技部,2005年
7	中国生态系统研究 网络(CERN)	44 个	森林资源	森林水文要素、森林土壤要素、森林气象要素、森林小气候梯度要素、森林调控环境空气质量功能、森林群落学特征、森林动物资源 等 300 余项指标	中国科学院,1988年
8	中国荒漠-草地生态系统 观测研究野外站联盟	201 个	荒漠、草地等自然 生态系统	水分要素、土壤要素、气象要素、生物要素等 102 项指标	中国科学院、国家林草局、教育部和农业农村部,2013年
9	中国生物多样性监测 与研究网络	90 个	生物资源	动物、植物、微生物等物种种群、物种性状、群落组成、遗传组成、 生态系统结构和生态功能	中国科学院,2013年

(3)加强天-空-地立体化协同式监测与观测。综合应用航天航空遥感、智能传感器、远程通信、物联网等新技术,建立天基、空基和地基立体化协同式监测与观测技术体系,提升仪器设备自动化、智能化水平,提高数据采集频率和监测精度,逐步实现多要素-多过程-多尺度-多方法立体协同监测与观测。

3.2 工作建议

在整合优化已有监测站网的基础上,采取改建升级、融合共建和空白新建的建设模式,构建国家统一的自然资源监测网络。坚持顶层统一、多维集约、分级分步、标准规范、智能运维、智慧服务等原则,以地球系统科学和自然资源科学为理论指导,重点围绕监测站点部署、指标体系构建、监测技术研发、标准规范研制等开展监测站网建设的关键技术研究。研究自然资源时空分布特征与规律,开展全国自然资源综合区划,科学合理部署监测站点;研究筛选山水林田湖草生命共同体相互联系与作用的关键指标,构建功能需求与学科分类相结合的指标体系,建立功能完善的监测网络;创新发展“天-空-地-井-海”立体协同监测技术手段,研发低功耗、小型化、智能化的传感器与套装设备,致力于高精度、高分辨率、人工智能等综合集成(陈军等,2022);研制贯穿站点建设、数据采集、质量管理各环节的标准规范,构建系统完整、先进实用的标准体系,保障监测网络的规范有序运行。

根据国家自然资源管理需求,按照功能规划分步建设统一的自然资源监测网络,实现水、土地、森林、草原、湿地、矿产、海洋、地下空间等自然资源监测,动态掌握自然资源数量、质量、生态等方面的变化情况和发展趋势,全面提升中国自然资源监管能力。同时,通过逐步建设完善的国家自然资源监测网络,获取山水林田湖草沙冰等自然资源的时空序列数据信息,按照国家学科分类标准进行数据管理,集成地球系统各圈层及其组成要素的地质、物理、化学、生物等学科观测数据集,推动国家资源环境生态监测大数据中心建设,开展跨学科的数据密集型地球系统科学研究,揭示多圈层自然资源相互关系与演替规律,实现对地球系统变化过程的理解和预测,从而促进地球系统科学的发展。

4 结论

(1)欧美等发达国家非常重视国家尺度的监测

与观测网络建设,注重地球系统科学框架下的系统监测与综合观测,强调标准化、规范化的长期连续监测与观测,加强天-空-地立体化协同监测与观测。通过长期连续、规范稳定运行管理,获得长序列、高质量的数据信息,有力保障跨学科综合研究,极大促进理论科技创新,有效服务资源环境可持续发展。

(2)面对国家自然资源统一管理需求,当前中国自然资源监测与观测网络主要存在三方面不足:一是缺乏网络顶层统一规划设计,难以精准、高效支撑服务国家自然资源统一管理;二是缺乏以地球系统科学为理论指导的综合性长期性监测,难以有效解决自然资源领域的重大科学问题;三是技术手段有待融合拓展、新兴技术应用不足,高精度、高分辨率监测网络亟待完善。

(3)目前,中国自然资源统一管理制度基本形成,亟需围绕国家重大需求和世界科技前沿,规划建设国家统一的自然资源监测网络,全面提升中国自然资源监测和地球观测能力,科学认知自然资源禀赋与演替,促进地球系统科学发展,保障国家资源安全,服务生态文明建设,助力提升国家治理体系和治理能力现代化水平。

致谢:成文过程中得到中国地质调查局吴爱民教授级高级工程师,中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心郝爱兵教授级高级工程师、任金卫研究员、刘晓煌正高级工程师,中国地质环境监测院周平正高级工程师等专家的宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- Bogena H R. TERENO: German Network of Terrestrial Environmental Observatories[J]. Journal of Large-Scale Research Facilities, 2016, 2: 52-59.
- Chaffaut Q, Hinderer J, Masson F, et al. New insights on water storage dynamics in a mountainous catchment from superconducting gravimetry[J]. Geophysical Journal International, 2021, 228(1): 432-446.
- Chatton E, Labasque T, de La Bernardie J, et al. Field continuous measurement of dissolved gases with a CF-MIMS: applications to the physics and biogeochemistry of groundwater flow [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(2): 846-854.
- Eberts S M, Wagner C R, Woodside M D. Water priorities for the nation—The U.S. Geological Survey next generation water observing system [R]. Reston, VA, 2019.
- Gaillardet J, Braud I, Hankard F, et al. OZCAR: the French network of

- critical zone observatories [J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-24.
- Guo L, Lin H. Critical zone research and observatories: current status and future perspectives [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(9): 1-14.
- James C, Derek E, Will E, et al. TERN, Australia's land observatory: addressing the global challenge of forecasting ecosystem responses to climate variability and change [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(9): 095004.
- NEON. 2011 Science strategy: enabling continental-scale ecological forecasting [EB/OL]. [2023-12-08]. https://www.neonscience.org/sites/default/files/NEON_Strategy_2011u2_0.pdf.
- Read T, Bour O, Selker J S, et al. Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 3706-3719.
- Sier A, Monteith D. The UK Environmental Change Network after twenty years of integrated ecosystem assessment: Key findings and future perspectives [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 68: 1-12.
- Sparrow B D, Edwards W, Munroe S E M, et al. Effective ecosystem monitoring requires a multi-scaled approach [J]. *Biological Reviews*, 2020, 95(6): 1706-1719.
- Stefano N, Paolo M, Mattia S, et al. Big data challenges in building the global earth observation system of systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 68: 1-26.
- Zweifel R, Eitzold S, Basler D, et al. Tree Net-The biological drought and growth indicator network [J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 4: 776905.
- 陈军, 武昊, 张继贤, 等. 自然资源调查监测技术体系构建的方向与任务 [J]. *地理学报*, 2022, 77(5): 1041-1055.
- 范宏喜. 开启地下水监测新纪元——聚焦国家地下水监测工程建设 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(2): 161-162.
- 冯晓娟, 米湘成, 肖治术, 等. 中国生物多样性监测与研究网络建设及进展 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(12): 1389-1398.
- 冯筠, 高峰, 黄新宇. 构建天地一体化的全球对地观测系统: 三次国际地球观测峰会与 GEOSS [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(12): 1327-1333.
- 付宇佳, 潭昌海, 刘晓煌, 等. 自然资源定义、分类、观测监测及其在国土规划治理中的应用 [J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1048-1063.
- 傅伯杰, 刘宇. 国际生态系统观测研究计划及启示 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 893-902.
- 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用 [J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 1-16.
- 高春东, 何洪林. 野外科学观测研究站发展潜力大应予高度重视 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 344-348.
- 何惠. 中国水文站网 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 460-465.
- 廖小罕, 封志明, 高星, 等. 野外科学观测研究台站(网络)和科学数据中心建设发展 [J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2669-2683.
- 刘海江, 孙聪, 齐杨, 等. 国内外生态环境观测研究台站网络发展概况 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(5): 125-131.
- 刘晓煌, 刘晓洁, 程书波, 等. 中国自然资源要素综合观测网络构建与关键技术 [J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1849-1859.
- 卢琦, 李永华, 崔向慧, 等. 中国荒漠生态系统定位研究网络的建设与发展 [J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 779-792.
- 马克平. 中国生物多样性监测网络建设: 从 CFoBio 到 Sino BON [J]. *生物多样性*, 2015, 23(1): 1-2.
- 裴小龙, 高天胜, 祝晓松, 等. 基于空天地一体化的黑河流域自然资源要素综合观测网络构建 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(5): 1450-1459.
- 钱建利, 倪舒博, 徐多勋, 等. 浅析构建自然资源要素综合观测网络重要意义 [J]. *中国国土资源经济*, 2021, 8: 28-36.
- 沈运华, 张秀荣, 刘晓煌, 等. 陆表自然资源综合观测体系构建的思考 [J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(2): 72-80.
- 王兵, 崔向慧, 杨锋伟. 中国森林生态系统定位研究网络的建设与发展 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 84-91.
- 王梁, 刘晓煌, 刘玖芬, 等. 全国自然资源要素综合观测标准体系构建 [J]. *中国标准化*, 2021, 12: 11-20.
- 王左, 何惠, 魏新平. 我国水文站网建设与发展 [J]. *水文*, 2006, 26(3): 42-44.
- 吴季友, 陈传忠, 蒋睿晓, 等. 我国生态环境监测网络建设成效与展望 [J]. *中国环境监测*, 2021, 37(2): 1-7.
- 严宇红, 周政辉. 国家地下水监测工程站网布设成果综述 [J]. *水文*, 2017, 37(5): 74-78.
- 杨萍, 白永飞, 宋长春, 等. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望 [J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 125-134.
- 杨萍. 中国科学院野外科学观测研究网络未来发展的思考 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 104-112.
- 杨帅, 周国民, 庄严. 国际农业科学观测工作网络化发展的经验与启示 [J]. *农业大数据学报*, 2020, 2(4): 5-13.
- 殷志强, 卫晓锋, 刘文波, 等. 承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果 [J]. *中国地质调查*, 2020, 7(3): 1-12.
- 于贵瑞, 张雷明, 张扬建, 等. 大尺度陆地生态系统状态变化及其资源环境效应的立体化协同联网观测 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 1903-1918.