

引用格式: 沈运华, 张秀荣, 刘晓煌, 等. 天空地一体化自然资源要素监测体系及其应用[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1696–1706.
[Shen Y H, Zhang X R, Liu X H, et al. An integrated space-aerial-ground monitoring system and applications for natural resources elements[J]. Resources Science, 2022, 44(8): 1696–1706.] DOI: 10.18402/resci.2022.08.12

天空地一体化自然资源要素监测体系及其应用

沈运华^{1,2}, 张秀荣¹, 刘晓煌², 熊茂秋^{3,2}, 邢莉圆²

(1. 中国地质大学(北京)马克思主义学院, 北京 100083; 2. 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

摘要: 遵循山水林田湖草是生命共同体的发展理念, 建设自然资源要素综合观测体系, 系统获取长期、连续、多尺度、多要素的自然资源观测数据, 为自然资源“两统一”管理和生态保护修复提供科学支撑, 是新时代生态文明建设的重要举措。本文在阐明自然资源监测体系现状及存在问题的基础上, 依据地球系统科学的理论基础, 针对调查、监测、观测等不同探测方法的功能和技术路径, 以系统化的视角论述了现代自然资源监测特点, 对天空地一体化监测体系技术路径进行说明, 并从宏观管理层面分析天空地一体化监测体系在自然资源统一管理中的具体应用, 以期对自然资源统一管理工作提供必要支撑。

关键词: 生态文明; 自然资源; 资源管理; 天空地协同观测; 多源数据融合; 监测体系

DOI: 10.18402/resci.2022.08.12

1 引言

自然资源是人类生产、生活的基本物质基础和空间载体, 及时、准确、系统地获取自然资源状态的基础数据, 掌握自然资源与生态环境协同演替规律, 是科学保护并合理利用自然资源的基础^[1-3]。提高中国自然资源综合探测和监管能力, 是响应新时代“山水林田湖草沙冰”生命共同体发展理念的需要, 可为解决生态环境问题、实现自然资源的合理利用和保护提供系统、全面的数据支撑, 对于自然资源“两统一”管理和支撑中国生态文明建设具有重要意义。

为研究自然资源在大尺度上的动态变化和发展趋势, 中国资源观测技术从多圈层交互、多要素耦合、多资源过程出发, 由传统地基定位观测逐渐向天空地立体化协同观测发展演变。目前, 集成了系统调查、观测试验、预测模拟、监测评价的“四位一体”技术方法是探究自然资源过去、现在、未来变

化规律和系统评价的主要手段^[4]。自然资源部成立以来, 全面实施自然资源“两统一”管理, 相继启动了全国自然资源调查监测体系和自然资源要素综合观测体系等重点项目建设^[5,6], 旨在构建统一的自然资源调查监测、要素综合观测体系。长期、持续的自然资源综合观测作为新兴技术领域, 主要研究自然资源间的相互作用、预判自然资源的变化趋势以及掌握资源的变化动因机制, 但目前观测站网及指标体系构建、数据融合及共享、机理模拟与预测等方面, 还处于起步探索阶段^[7]。

因此, 补齐中国自然资源调查监测和综合观测短板, 应用新型监测技术建立调查-观测-预测-监测“四位一体”的自然资源综合探测和研究体系, 为科学认识资源、生态、环境系统过去-现在-未来的演替规律, 提供长期、连续、高精度的数据支撑, 是中国自然资源领域现在乃至今后相当长时期内的重大科学问题。本文在阐明中国现有自然资源调

收稿日期: 2022-06-18; 修订日期: 2022-07-31

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk1400); 中国地质调查局地质调查项目(ZD20220144)。

作者简介: 沈运华, 男, 江西分宜人, 硕士研究生, 主要从事自然资源管理研究。E-mail: SYH1970@163.com

通信作者: 张秀荣, 女, 北京人, 博士, 教授, 主要从事自然资源管理政策等研究。E-mail: zhangxr@cugb.edu.cn

2022年8月

查监测体系的现状及其存在问题,分析全国自然资源综合监测体系建设重要性的基础上,依据地球系统科学理论,梳理和探讨自然资源观(监)测工作发展动态和自然资源监测特点,分析天空地一体化监测体系的构建思路及关键技术,以期为新时期中国自然资源统一管理提供支撑和服务。

2 中国自然资源监测体系的现状及存在问题

20世纪80年代以来,中国陆续展开全国土地、森林、草原、湿地等自然资源清查工作,获取了大量的调查数据,促进了国家生态文明建设和社会经济的发展^[8]。但过去资源分部门管理构建的森林、草原、耕地、地表水、地下水等各类观测站网,只着力对某一种陆表资源要素及其相关的生态系统进行研究,且在多部门交叉管理中,各部门间的标准和要求规范各不相同,很难将数据进行整合和共享,数据使用上有一定的局限性。中国自然资源监测涉及多种资源、多个作用过程、多门学科,由多部门承担,各部门需求和要求不一样,采用的指标、标准、监测方法也不统一,且数据不能共享。因此,监测数据标准化和监测结果的开放共享应是新时期自然资源调查监测和综合观测工作的重点。

目前,根据不同监测需求,国内各科研院校和行业部门以自然资源区划类型为单元,建立了各级监测站网,一般采用航天航空遥感、地面调查和定位观测等监测技术。其中,遥感监测技术普遍用于区域尺度监测,但易受传感器投影方式、外部环境(例如大气、光照)等影响;地面调查、观测利于资源属性数据获取,但存在视域局限,不适用于区域尺度监测。因此,采用天-空-地立体监测技术协同监测是开展自然资源综合监测的关键技术。

为了响应资源、生态、环境有机统一的发展理念,中国生态文明建设对自然资源监测提出了更高的要求^[9]。传统的自然资源监测对象以单资源要素为主,这种监测模式难以解释资源要素间的作用关系,不符合新时期自然资源管理需求,为此必须转变区域单资源监测为多资源监测研究,构建多资源耦合模型,为系统开展生态系统中各种资源要素演化规律和作用机制的研究提供数据基础,全面服务于资源-生态-环境的协调治理,科学支撑区域可持

续发展^[10]。

为更好服务于国家生态文明建设,需要建立综合性、整体性的自然资源一体化监测体系。自然资源一体化监测是以区域为单元,对复杂的多要素自然资源进行系统研究,从而探求自然资源发展演变规律,打破了原有部门和研究领域的壁垒,通过长期稳定的多学科交融、多部门配合,凝聚各方力量,探索以自然资源野外科学考察站网为媒介,创新持久、有效的合作体制机制^[11,12],协同研究国土空间内水-土地-植物等资源间的耦合作用、自然资源与生态环境间的互馈作用,实现国土空间的整体保护、系统修复和综合治理目标^[13]。

3 自然资源观测工作发展动态

自然资源调查、观测、预测、监测的发展,正在从服务特定学科领域向多学科交叉融合的方向转变,从单资源、生态系统向区域多资源、系统研究转变,以及从地基定位观测向天-空-地立体化协同观测转变^[14,15],对系统集成度、指标统一度、数据融合度及模拟精确度等方面的要求越来越高。

3.1 基于自然资源动态区划的综合观测站网建设

各科研院所、高校和行业部门针对各自需求建立了不同观测站网^[16,17]。但观测站网大多以单资源或生态系统为研究对象,且普遍存在观测数据部门割裂、规范不统一、数据资源共享利用滞后、现有站点分布不均等问题^[18]。因此,一体化综合观测站网的布设应以系统化整体设计为前提,依据中国自然资源地带性规律,利用自然资源综合区划与观测站布设技术,科学合理地布局综合观测站网。另外,基于中国自然环境呈现显著的地带性,各地带上自然资源的类型禀赋及其变化动因机制有着显著的差别。因此,设计建设自然资源要素综合观测站网时,需在考虑自然资源机制普遍性的同时,考虑区域地理条件的差异性,同时还应考虑组织管理上的可操作性^[19]。

基于上述观测站网建设需求,中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心作为综合观测站网建设主要单位,联合国内多家研究院校及部门机构,基于中国多年来生态环境和自然资源等研究成果,以地球系统科学理论为指导,对自然资源进行重新整合,以服务自然资源统一管理和高质量可持续发展

展为目标,将中国国土空间进行以森林、草原、水、湿地等为主导资源的综合评价和区域划分,开展了自然资源动态区划研究^[20-22]。基于不同等级的自然资源动态区划,研究中国各自然资源的空间分异特征和动态演变规律,为自然资源综合观(监)测体系构建提供依据,基于相关法规文件,满足自然治理需求,确保野外科学观测研究站布设的科学合理性和可行性(图1),实现自然资源“一张图”统筹管理。

3.2 自然资源一体化观测对象及指标体系构建

自然资源一体化体系观测对象是不同圈层内相互作用的自然资源,对自然资源科学分类并确定相应的观测指标体系是自然资源一体化探测体系构建的前提和基础^[23,24]。由于所选取的指标因研究领域和目的不同,且可供观测研究的直接观测指标是有限的,因此为了保障研究科学性和提高观测效率,对于林草、水、土地、气候等观测对象,可通过统一的站网和指标顶层设计,再根据不同的领域和拟解决的科学问题,遴选相关观测指标数据,开展相关研究,实现自然资源-生态环境系统一体化指标体系,一站多能综合观测研究。

基于上述原理及思路,自然资源一体化观测指标体系的构建应以地球系统科学理论和山水林田湖草沙冰生命共同体发展理念为出发点,以自然资源学术分类、法规界定分类和原有单资源管理分类

为借鉴,提出地表覆被资源与其相应土地资源作为统一分类依据的原则,分别按照空间属性、资源要素体系、用途和功能等3种依据,将观测对象划分为一、二、三级。在此基础上,以气候资源、地表覆盖资源和地下资源为观测对象(图2),以站点、景观、区域尺度观测研究为核心,以搭积木-模块化的思路,结合正、反演方法,确定观测要素指标,构建基于资源数量、质量和资源间相互耦合作用的“归类模块”;根据不同类型的地表覆盖资源对观测区进行分类,对“归类模块”按照气候、地表覆盖和地下资源系统进行筛选,构建“区域自然资源观测模块指标集”,观测不同资源系统的资源分布与要素属性,组合观测模块,形成相应的“赋能模块”,进而形成面向不同应用需求的一体化观测指标体系(图2)。例如,水资源要素种类、数量等配比结构与耦合作用构成不同“归类模块”,对其组合构成“观测模块”,面向水量平衡应用时构成相应“赋能模块”。

3.3 多圈层-多尺度-多过程的系统观测研究

依据地球系统科学理论,陆表圈层内的各圈层之间相互作用,主要通过自然资源各要素间耦合过程以及自然资源与生态环境间互馈作用来实现,具有多圈层、多尺度、多过程复杂系统特征和显著的时空异质性特征^[25,26],自然资源综合观测研究是认识和掌握这些过程和复杂系统的主要方式。

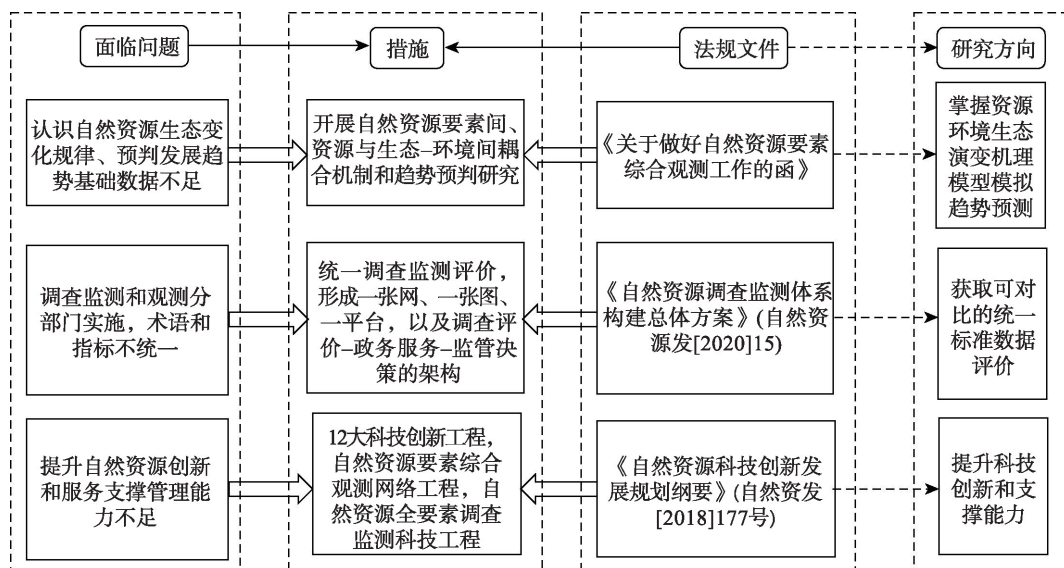


图1 自然治理能力挑战与需求

Figure 1 Natural resources governance capacity challenges and needs

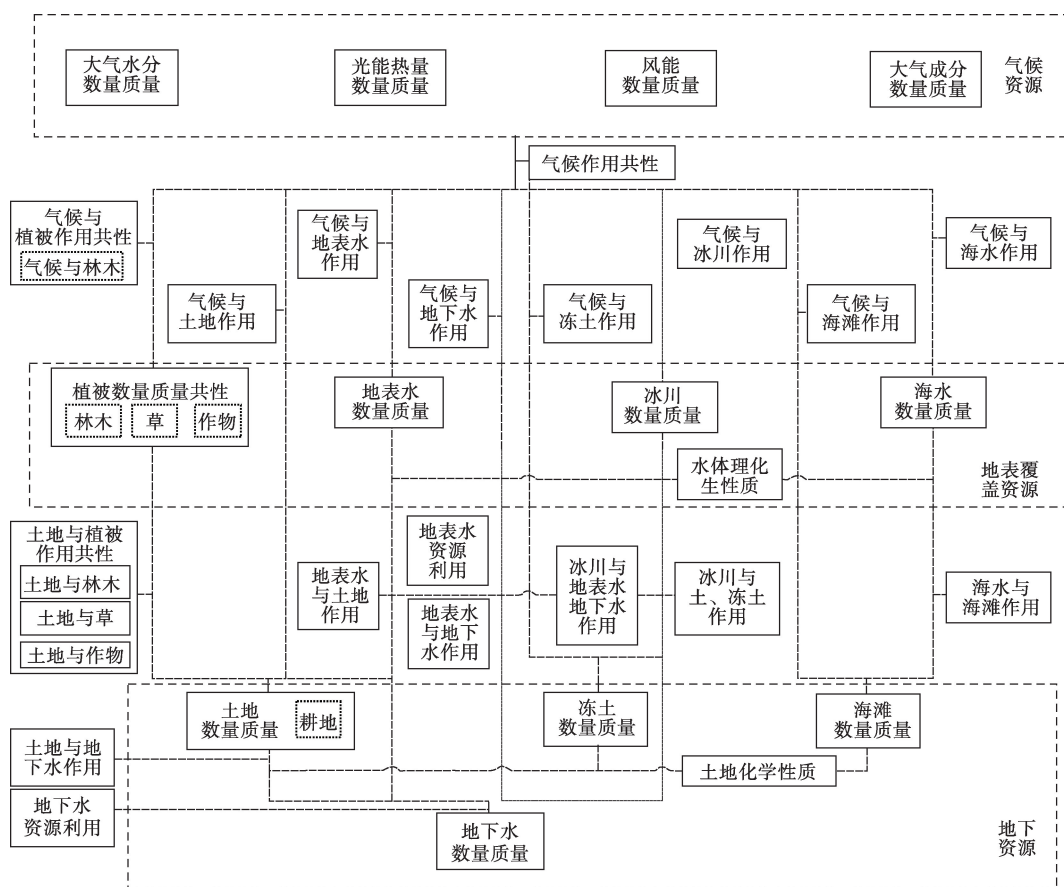


图2 全国自然资源要素综合观测体系指标模块

Figure 2 National natural resource elements comprehensive observation system indicator module

卫星遥感观测是当前自然资源主要观测手段,但存在可用分辨率低的问题^[27,28]。为了解决此问题、实现对多尺度自然资源演替的精确刻画,需要对卫星遥感观测、航空遥感观测和地面定点观测相结合,加强卫星遥感观测与地面观测站的顶层统筹部署,推进观测站遥感校验场、试验场和航空遥感观测建设。利用不同时空分辨率的遥感数据和地面观测站所观测的数据,结合不同时间尺度的定点观测和实地调查数据,实现不同空间尺度上的协同观测和时间上的全天候观测,最终得出区域内资源与环境的时空变化规律。

另外,各类资源-环境综合模型对资源要素循环过程和相关作用机理都有不同程度的模拟刻画^[29,30],但模拟目的及重点都有所不同,且缺乏“多要素集聚-多层次重叠-多过程耦合-多时空演变”的资源-环境模拟系统的研究。因此,运用统计分析、遥感解译、空间分析和尺度转换等技术,遴选不同尺度

下资源要素耦合过程的关键影响因子,构建植被-土地-水资源过程耦合模型指标体系,研究区域不同资源配比与产水量、植被净生产力、碳储量等关键变量的关系,建立多要素、多尺度、多过程耦合效应模型,是一体化综合观测体系未来需要突破的技术难题。

3.4 自然资源“四位一体”技术方法体系构建

系统调查、观测试验、预测模拟、监测评价(预警)4种技术方法是一个有机整体、缺一不可,在自然资源系统研究领域占据主要地位^[7,10,31,32]。在自然资源一体化监测体系中,系统调查、观测试验为生态修复提供数据支撑^[7,32],预测模拟、监测评价揭示自然现象及动态规律,为生态修复提供决策依据,实现生态问题及时发现、及时处理与监管^[33,34]。

通过系统调查-观测试验-预测模拟-监测评价方法,加强野外科学站网融合,实现由单自然资源要素观测研究向区域多自然资源要素综合观测研

究的转变,掌握区域内各类自然资源过去、现在、未来3种状态,建立由调查-观测-预测-监测构成的全链条“四位一体”方法技术体系(图3),系统化地获取自然资源要素相互作用过程及发展规律,为中国自然资源综合观测体系建设提供有力支撑。

4 天空地一体化自然资源监测体系构建与应用

山水林田湖草沙冰是一个生命共同体,构建自然资源综合观测体系的基础是获取一套全面、完善、权威的自然资源管理基础数据。自然资源监测体系是为摸清中国各类自然资源家底和变化情况,以遥感监测为主要技术手段,重点构建以自然资源分类为核心的调查监测标准体系,为经济社会发展和生态文明建设奠定基础。但由于中国自然资源管理分属不同部门管理的历史原因,造成自然资源数据标准不统一、融合难,连续长期的自然资源间相互作用、变化动因机制、发展趋势等关键数据缺失等问题。因此需要对观测数据进行标准化,以便融合分析。同时,需要探索通过物联网、大数据、云计算和人工智能等高科技,搭建集数据采集、传输存储、质量控制和融合分析为一体的全链条数据平台,进而实现数据的开放共享,这就需要建立天空地一体化监测体系来实现。天空地一体化自然资源监测体系是基于卫星遥感技术、无人机监测和地面巡查监测的立体化监测体系,用以扩大监测范

围,满足自然资源宏观管理调控,实现各类资源数据共享、处理、应用、分析等管理的集成,在自然资源统一管理中发挥重要作用^[35-37],是实现自然资源“一张图”统筹管理和高质量可持续发展的关键。

4.1 监测体系构建思路

为揭示自然资源复杂系统在陆地表层综合分异特点,探索资源各要素间的耦合关系、变化趋势和动因机制和演化趋势,需要从不同时空尺度对自然资源要素进行观测。目前,对于区域尺度的观测,一般采用卫星(航空)遥感观测,具有高效、快速、高分辨率、低成本、覆盖范围大、视域大等优势,但受大气、地物电磁波谱吸收-反射等影响,对自然资源存在同物异影、同影异物、甚至难以识别等问题^[27];对于个体尺度的观测,主要采用定点地面观测手段,具有长时序、连续、精细刻画自然资源演替过程和精准预判未来发展趋势等优势,但视域范围有限,难以精确反映面上自然资源演替。为实现不同空间尺度上的协同观测和时间尺度上的连续观测,需结合卫星、航空、地面等多种观测技术,构建天空地一体化监测体系。

天空地一体化监测体系综合利用不同观测技术各自优势,取长补短,获取不同时空分辨率的观测数据与实地调查数据。“天”即卫星遥感监测,利用卫星遥感技术对资源要素进行大范围、连续的高精度观测,实现对自然资源的宏观调控管理,例如

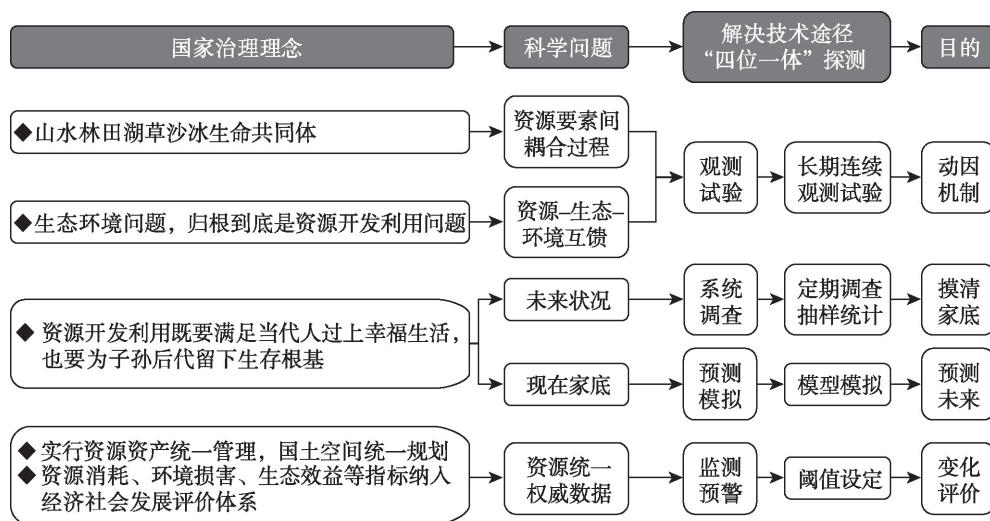


图3 国家需求及“四位一体”探测技术

Figure 3 National demand and “four-in-one” detection technology

2022年8月

在区域植被覆盖度估算等方面发挥作用^[28];“空”即无人机监测,基于高分辨率的无人机遥感监测可获取自然资源精细化结构信息,实现对自然资源分层分类提取、评价,例如对植被冠层提取等方面;“地”即地面监测,可定点监测掌握资源要素环境和属性数据,是获取基础数据的必要技术。将“天”“空”“地”3种监测技术结合,以模块化的思路,按自然资源数量、质量和作用过程的基本特征遴选出观测指标,并根据资源数量、质量和资源间相互耦合作用构建“归类模块”,对大气、地表和地下3种资源分布空间和不同资源系统涉及资源要素进行观测,可从宏观角度摸清大气-地表-地下资源的分布空间和不同资源系统涉及的资源家底,且从微观角度掌握资源间作用机理、耦合配比等机制过程。另外,在此基础上,空间点面结合建立自然资源演变、评价模型,为不同时空尺度自然资源的合理利用和环境保护提供决策依据。

天空地一体化监测体系基于天、空、地3个角度,以地球系统科学理论为指导,掌握区域自然资源系统现状及演替规律,解析自然资源要素耦合作用机理、资源-生态-环境互馈作用机理,实现了人工与自动、站点与区域、地面与天空、宏观与微观、试验与模拟、科研与管理六位一体的探测方式,提高了自然资源综合观测网络建设效率。

4.2 监测体系的多源数据融合

多源数据融合是通过不同的模型算法,将不同来源的数据信息进行融合,对多源数据的时空分辨率、完整性、精度等方面进行综合互补,从而弥补单一资源数据的不足,提高资源数据的准确性和有效性,为自然资源统一管理提供数据支撑^[38,39]。目前,多源数据融合模式可根据数据获取方式分为遥感数据融合、非遥感数据融合以及遥感与非遥感数据的融合。

由于不同遥感探测器的成像机理和成像方式不同,其适用范围和局限性也各不相同,单一数据源难以全面反映自然资源的时空演变特征和过程机制,因此需要对卫星(航空)遥感、无人机遥感获取的多种区域尺度的遥感数据集进行多源遥感数据融合,利用多种数据的协同和互补,综合优化资源数据的时空分辨率,提高数据精度。非遥感数据

包括历史统计数据、地面观测数据和土地利用现状调查数据等,有效对自然资源识别、分类,但相较于遥感数据,非遥感多源数据缺乏足够分辨率的空间属性信息^[40]。基于多源遥感与非遥感数据融合,可有效避免数据分辨率不同、一致性差等问题,从而可获得高分辨率的空间数据与更精细的属性数据。

基于天空地一体化监测体系获得的数据具有多来源、数据量大和种类丰富的特点,在应用数据进行自然资源统一管理时,为提高数据提取、分类效率和保障数据精确性、完整性,需要对海量数据进行多源数据融合。

4.3 天空地一体化监测体系在自然资源统一管理中的应用

自然资源是天然存在、有使用价值、可提高人类当前和未来福利的自然环境因素和条件的总和,自然资源要素则为一定范围内有密切联系的各类自然资源,与自然资源系统相对应,是构成系统的基本单元,一个要素可以是一个系统的子系统,且可用属性表示。目前天空地一体化监测体系广泛应用于多种生态系统的要素监测,分析资源间、资源与环境的配置关系与协调作用,在自然资源统一管理中应用广泛^[8,10],主要涉及以下3个方面:

(1)应用于资源的资产管理。中国自然资源种类丰富、资源属性各不相同,资源资产管理受市场环境、资源类型和区域生态等多因素影响,而自然资源以分割管理体制为主,部门间资源资产管理权责界限模糊,很大程度影响资源配置效率,不利于统一管理,因此资产管理工作不仅需要统一的标准规范,还需要开放共享的数据平台。天空地一体化自然资源监测体系在整理、解读数据资料的基础上,选取合适的评价方法从资源要素的资产数量与质量两方面对所选要素进行价值评估,明确资源要素的经济效益和生态效益,从而实现科学有效的资源资产管理,构建资源资产管理体系。例如,王景升等^[41]选取涵养水源、水土保持、固碳释氧、育土保肥等功能服务指标对西藏森林生态系统服务价值评估,利于当地森林系统的管理。另外,监测体系通过统一要素概念、指标、方法,形成不同圈层间自然资源的数量、质量、相互作用的观测研究技术标准体系,实现自然资源确权登记和资源资产价值

评估。

(2)应用于国土空间规划。天空地一体化资源监测体系在国土规划编制、实施与监管过程中,通过一体化数据管理平台,实现长期、连续多源数据的共享,为评价指标、阈值等选取不科学的问题提供解决方案^[42],提高了对国土要素动态的感知能力。基于资源要素空间分异特征和动态演变规律,运用资源环境承载力评价和国土开发空间适宜性评价方法进行国土空间规划。例如,赵增玉等^[43]学者基于城市要素综合调查和观测数据,选取土地利用、水文地质、土壤污染等指标对城市国土开发空间适宜性进行评价,为城市可持续发展提供决策依据。通过监测体系、信息网络以及空间探测技术等手段,建成空天地一体化自然资源数据库,构建覆盖全国典型区域的自然资源“一张图”,将国土空间进行综合评价和区域划分,为国土空间规划各要素配置提供决策依据,从而实现国土空间资源配置的优化。

(3)应用于生态环境修复。通过对区域资源要素的观测,掌握生态环境现状、确定生态修复目标是生态修复的前提。揭示生态环境中不同修复目标的相关性以及生态环境与区域经济的协调性,是当前生态修复工作的重点内容。但目前生态修复缺乏系统性和整体性的数据指标、评价方法和监管体制,因此,区域生态系统服务功能未能有明显的

改善成效。为解决当前生态修复存在的问题,需通过建立天空地一体化资源监测体系,实现多源数据的融合,对自然资源进行全要素、全过程、全覆盖的立体探测,结合生态功能评价、生态环境状况评价方法,观测、提取生物多样性、水源涵养、生境质量指数等评价指标对生态环境进行了综合评价,量化判定生态修复阈值,从宏观和微观层面确定生态系统自身修复能力,引导生态修复合理进行,逐步实现山水林田湖草的整体保护、系统修复和综合治理,保障国家生态安全。

4.4 天空地一体化监测体系实例分析

天空地一体化自然资源监测体系集成多种观测技术,面向森林、草原、湿地、水域和海域等不同生态环境^[41,44-46],对区域资源要素进行长期、连续的高精度监测,掌握自然资源现状并对资源发展状态进行预测(图4)。现以草原生态系统和湿地生态系统作为例,分析天空地一体化自然资源监测的具体内容。

草地作为自然生态系统的重要组成部分,具有调节气候、水源涵养、防风固沙、水土保持等生态服务功能,草地资源监测可识别区域草地动态变化,利于草地精确评估和科学管理。基于天空地一体化监测技术的草地资源监测,面向对象的监测一般通过野外调查样地、遥感解译和定位观测对草地生态系统的要素种类、数量、质量等指标进行监测^[44,45],

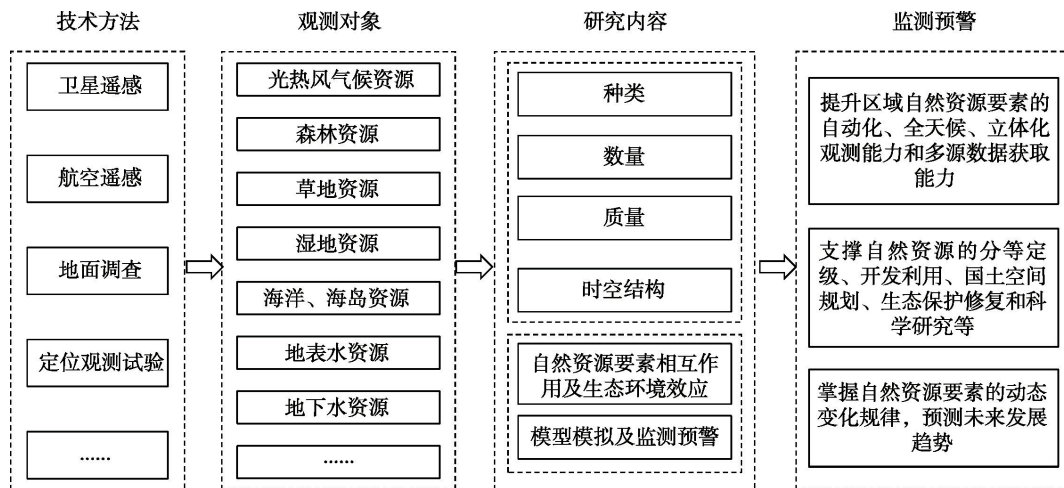


图4 天空地一体化监测体系应用

Figure 4 Application of an integrated space-aerial-ground monitoring system

2022年8月

掌握草地资源的现状、动态变化以及资源各要素间耦合过程,着重监测资源本身;面向区域的监测侧重于监测草地资源与与生态环境间相互影响和互馈作用,通过野外采样、实验室样品分析计算生物量,结合气象站网对气候指标进行观测,研究气候和人为活动对草地的影响^[46]。

湿地生态系统作为水陆相互作用形成的特殊自然综合体,在生态环境保护、生物多样性维持以及社会经济发展中具有重要作用^[47]。湿地资源监测不仅要考虑环境要素,还要考虑生态要素,采用天-空-地立体监测方法,从多尺度掌握湿地资源过去与现在的分布与变化,例如动态监测湿地生物、地表水深和地表水水质等要素指标以及湿地生态景观,摸清资源要素种类、数量和质量等,结合预测模型,还可模拟湿地资源变化状态与动因机制,从而掌握湿地多维度、多要素的演化规律与作用机制,为湿地合理利用、生态保护、科学管理提供决策依据。

5 结语与展望

构建自然资源综合观测体系是落实自然资源部“两统一”管理和“一张网、一张图、一个平台”计划的迫切需求。本文围绕自然资源综合观测体系构建的关键技术问题,以系统化视角提出了对观测站网建设、观测对象及指标体系、多尺度多手段综合观测研究及“四位一体”方法体系构建等自然监测工作的认识和思考,依托于对综合观测体系的认识,落实天空地一体化监测体系的构建;并基于对天空地一体化自然资源监测体系构成和多源数据融合的理论基础提出建议,从宏观管理层面分析明确了天空地一体化监测体系在自然资源统一管理中的重要作用,结合实例明确天空地立体监测是研究资源间以及资源与环境间作用的技术支撑。期望以本文为基础,吸引各方科学家共同探讨,不断探索与创新,以期为新时代中国自然资源一体化综合观测体系建设提供支撑和完善,为国家生态文明建设提供决策服务。

在当今地球系统科学各领域研究广度和深度持续推进的趋势下,自然资源综合观测体系如何通过尺度转换、标准规范及质量控制等技术和措施,

实现获取数据的准确性、一致性和空间连续性,进而整合不同学科领域的数据和过程模型,形成宏观、综合、动态的数据模型同化体系,是未来体系构建中面临的重要挑战。另外,针对中国自然资源调查-观测-预测-监测一体化体系的建设,还应加强国家层面的顶层设计,进一步完善自然资源系统研究理论及方法基础,重点解决观测站网及指标体系优化、多方法功能协调匹配、多手段观测数据协同转化、多尺度观测效应转换及多过程要素耦合模拟等关键技术瓶颈。由于自然资源综合观测体系建设是一项长期、复杂的系统工程,为解决具体实施过程面临的诸多技术性、操作性难题和瓶颈,需要在实践中不断总结不足和经验,持续完善技术和方法体系,健全运营及保障机制,为实现对地球系统了解过去、掌控现在和预测未来的体系目标而求索不止。

参考文献(References):

- [1] 周成虎. 自然资源要素综合观测体系专辑序言[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1837-1838. [Zhou C H. Introduction to the special issue on "Comprehensive Observation System of Natural Resource Elements"[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1837-1838.]
- [2] Carranza M L, Drius M, Malavasi M, et al. Assessing land take and its effects on dune carbon pools: An insight into the Mediterranean coastline[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 951-955.
- [3] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1905-1917. [Cui L F, Wang L C, Qu S, et al. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1905-1917.]
- [4] 王远超, 彭毅, 刘晓煌, 等. 全国自然资源要素综合观测体系建设需求及发展动态[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 47-54. [Wang Y C, Peng Y, Liu X H, et al. Establishment needs and development trends of the comprehensive observation system for national natural resource elements[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 47-54.]
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 关于印发自然资源科技创新发展规划纲要的通知[EB/OL]. (2018-10-16) [2022-08-01]. http://gi.mnr.gov.cn/201811/t20181113_2358751.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Notice on Printing and Distributing the Outline of Natural Resources Science and Technology Innovation Development Plan[EB/OL]. (2018-10-16) [2022-08-01]. http://gi.mnr.gov.cn/201811/t20181113_2358751.

- html.]
- [6] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源调查监测体系构建总体方案[EB/OL]. (2020-02-17) [2022-08-01]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200117_2498071.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Overall Plan for Building Natural Resource Survey and Monitoring System[EB/OL]. (2020-02-17) [2022-08-01]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200117_2498071.html.]
- [7] 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. [Liu X H, Liu X J, Cheng S B, et al. Construction of a national natural resources comprehensive observation system and key technologies [J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1849-1859.]
- [8] 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, 34(8): 28-36. [Qian J L, Ni S B, Xu D X, et al. An analysis of the importance of constructing a comprehensive observation network of natural resources elements[J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(8): 28-36.]
- [9] 刘晓煌, 付宇佳. 方寸之中 尽览万象: 探究全国自然资源要素综合观测体系[J]. 自然资源科普与文化, 2022, (1): 4-13. [Liu X H, Fu Y J. To study the national comprehensive observation system of natural resources[J]. Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources, 2022, (1): 4-13.]
- [10] 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. [Fu B J, Niu D, Yu G R. The roles of ecosystem observation and research network in earth system science[J]. Progress in Geography, 2007, 26(1): 1-16.]
- [11] 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. [Chen J, Wu H, Zhang J X, et al. Building natural resources surveying and monitoring technological system: Direction and research agenda[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1041-1055.]
- [12] 赫银峰, 罗奇, 高阳, 等. 自然资源要素综合观测一体化平台建设探索与实践[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 55-61. [He Y F, Luo Q, Gao Y, et al. Exploration and practice on the construction of the comprehensive observation integration platform for natural resource elements[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 55-61.]
- [13] 王远超, 彭毅, 刘晓煌, 等. 全国自然资源要素综合观测体系建设需求及发展动态[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 47-54. [Wang Y C, Peng Y, Liu X H, et al. Establishment needs and development trends of the comprehensive observation system for national natural resource elements[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 47-54.]
- [14] 于贵瑞, 张黎, 何洪林, 等. 大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2653-2665. [Yu G R, Zhang L, He H L, et al. A process-based model and simulation system of dynamic change and spatial variation in large-scale terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2653-2665.]
- [15] 高吉喜, 赵少华, 侯鹏. 中国生态环境遥感四十年[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 705-719. [Gao J X, Zhao S H, Hou P. Advances of remote sensing on ecology and environment in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(4): 705-719.]
- [16] 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. [Liao X H, Feng Z M, Gao X, et al. The development of field scientific observation and research stations (networks) and scientific data centers[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2669-2683.]
- [17] 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. [Yang P. Thoughts on future development of field observation and research network of Chinese Academy of Sciences[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(1): 104-112.]
- [18] 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): 125-135. [Yang P, Bai Y F, Song C C, et al. Construction of long-term ecological research sites in field station: Status, progress and prospect[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 125-135.]
- [19] 吴国雄, 郑度, 尹伟伦, 等. 专家笔谈: 多学科融合视角下的自然资源要素综合观测体系构建[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1839-1848. [Wu G X, Zheng D, Yin W L, et al. Insights: Building a national comprehensive observation system of natural resource elements from the perspective of multidisciplinary integration[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1839-1848.]
- [20] 张海燕, 樊江文, 黄麟, 等. 中国自然资源综合区划理论研究与技术方案[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1870-1882. [Zhang H Y, Fan J W, Huang L, et al. Theories and technical methods for the comprehensive regionalization of natural resources in China[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1870-1882.]
- [21] 张子凡, 张海燕, 刘晓煌, 等. 华北地区自然资源综合区划的动态变化特征[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 92-99. [Zhang Z F, Zhang H Y, Liu X H, et al. Dynamic change characteristics of comprehensive regionalization of natural resources in North China[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 92-99.]
- [22] 郑艺文, 张海燕, 刘晓洁, 等. 1990-2018年东北地区综合区划下自然资源动态变化特征分析[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 100-108. [Zheng Y W, Zhang H Y, Liu X J, et al. Analysis of natural resources dynamic change characteristics under comprehensive regionalization in Northeast China from 1990 to 2018[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 100-108.]
- [23] 白中科. 国土空间生态修复若干重大问题研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 1-13. [Bai Z K. The major issues in ecological restoration of China's territorial space[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 1-13.]

2022年8月

- [24] 孙兴丽, 刘晓煌, 刘晓洁, 等. 面向统一管理的自然资源分类体系研究[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1860–1869. [Sun X L, Liu X H, Liu X J, et al. Classification system of natural resources for integrated management[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1860–1869.]
- [25] Ticona Gutierrez J C, Adamatti D S, Bravo J M. A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: Application in the calibration of a hydrologic model[J]. Computational Geosciences, 2019, 23(6): 1219–1235.
- [26] Xiao L M, Zhang W, Hu P L, et al. The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical karst area[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 1–12.
- [27] 官鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 13–23. [Gong P. Some frontier problems in remote sensing science and technology[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2009, 13(1): 13–23.]
- [28] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774–782. [Jia K, Yao Y J, Wei X Q, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 774–782.]
- [29] 戴永久. 陆面过程模式研发中的问题[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 33–38. [Dai Y J. Issues in research and development of land surface process model[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 33–38.]
- [30] Fang G, Yang J, Chen Y, et al. How hydrologic processes differ spatially in a large Basin: Multisite and multiobjective modeling in the Tarim River basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(14): 7098–7113.
- [31] 吴英迪, 蒙古军. 中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 17–33. [Wu Y D, Meng J J. Quantifying the spatial pattern for the importance of natural resource ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 17–33.]
- [32] 孙鸿烈, 成升魁, 封志明. 60年来的资源科学: 从自然资源综合考察到资源科学综合研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1414–1423. [Sun H L, Cheng S K, Feng Z M. From integrated surveys of natural resources to comprehensive research of resources science over 60 years[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 1414–1423.]
- [33] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 41–54. [Xie X Y, Li A N, Qin H A. The simulation models of the forest carbon cycle on a large scale: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 41–54.]
- [34] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731–2739. [Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2731–2739.]
- [35] 陈慧玲, 张毅. 自然资源所信息化建设标准化探索[J]. 自然资源信息化, 2022, (4): 10–15. [Chen H L, Zhang Y. Exploration on standardization for information construction of natural resources institute[J]. Natural Resources Informatization, 2022, (4): 10–15.]
- [36] 廖小罕, 师春香, 王兵. 从无人机遥感、数据融合、生态价值谈自然资源要素综合观测体系构建[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 4–7. [Liao X H, Shi C X, Wang B. Construction of comprehensive observation system of natural resource elements based on UAV remote sensing, data fusion and ecological value[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 4–7.]
- [37] 裴小龙, 高天胜, 祝晓松, 等. 基于天空地一体化的黑河流域自然资源要素综合观测网络构建[J/OL]. 干旱区地理, (2022–05–23) [2022–06–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20220523.1008.001.html>. [Pei X L, Gao T S, Zhu X S, et al. Construction of comprehensive observation network for natural resource elements in Heihe River Basin based on the integration of space-air-ground[J]. Arid Land Geography, (2022–05–23) [2022–06–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20220523.1008.001.html>.]
- [38] 陈迪, 吴文斌, 陆苗, 等. 基于多源数据融合的地表覆盖数据重建研究进展综述[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9): 62–70. [Chen D, Wu W B, Lu M, et al. Progresses in land cover data reconstruction method based on multi-source data fusion[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(9): 62–70.]
- [39] 汤宇磊, 吴杨杨, 蒋兴征, 等. 面向自然资源信息提取的多源异构数据融合技术: 以汉江流域NDVI数据为例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 74–82. [Tang Y L, Wu Y Y, Jiang X Z, et al. Multi-source heterogeneous data fusion technology for natural resource information extraction: A case study of NDVI data in Hanjiang Basin[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 74–82.]
- [40] 朱枫, 崔雪锋, 缪丽娟. 中国历史时期土地利用数据集的重建方法述评[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1563–1573. [Zhu F, Cui X F, Miao L J. China's spatially-explicit historical land-use data and its reconstruction methodology[J]. Progress in Geography, 2012, 31(12): 1563–1573.]
- [41] 王景升, 李文华, 任青山, 等. 西藏森林生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 831–841. [Wang J S, Li W H, Ren Q S, et al. The value of Tibet's forest ecosystem services[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 831–841.]
- [42] 郝庆, 邓玲, 封志明. 面向国土空间规划的“双评价”: 抗解问题与有限理性[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 541–551. [Hao Q, Deng L, Feng Z M. The “Double Evaluation” under the context of spatial planning: Wicked problems and restricted rationality[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 541–551.]

- [43] 赵增玉, 王伟, 李向前, 等. 基于城市地质调查成果的泰州国土空间开发适宜性评价[J]. 中国地质调查, 2021, 8(3): 90–97. [Zhao Z Y, Wang W, Li X Q, et al. Suitability evaluation of land space development in Taizhou based on urban geological survey results[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(3): 90–97.]
- [44] 肖继东, 石玉, 李聪, 等. 基于CBERS和MODIS数据的草地资源监测评价研究[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 24–33. [Xiao J D, Shi Y, Li C, et al. CBERS and MODIS data based grassland resources monitoring and evaluation[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(8): 24–33.]
- [45] 付晶莹, 彭婷, 江东, 等. 草地资源立体观测研究进展与理论框架[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1932–1943. [Fu J Y, Peng T, Jiang D, et al. Research progress and theoretical framework of multi-dimensional observation of grassland resources[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1932–1943.]
- [46] 欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 等. 气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6912–6924. [Ouyang L, Ma H Y, Wang Z M, et al. Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grassland in the eastern Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6912–6924.]
- [47] 钱建利, 杨斌, 张贺, 等. 基于立体综合观测的湿地资源观测指标体系构建[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1921–1931. [Qian J L, Yang B, Zhang H, et al. Development of an indicator system of wetland resources based on mutidimensional comprehensive observation[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1921–1931.]

An integrated space–aerial–ground monitoring system and applications for natural resources elements

SHEN Yunhua^{1,2}, ZHANG Xiurong¹, LIU Xiaohuang², XIONG Maoqiu^{3,2}, XING Liyuan²

(1. School of Marxism, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Coupling Processes and Effects of Natural Resource Elements, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China; 3. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Following the development concept that mountains, rivers, forests, fields, lakes, and grasslands form a community of life, building a comprehensive observation system for natural resources elements, and systematically obtaining long-term, continuous, multi-scale, and multi-element observation data of natural resources to provide scientific support for the “two unified” management of natural resources and ecological protection and restoration are an important measure for ecological progress in the new era. On the basis of clarifying the current situation and existing problems of the monitoring system of natural resources, from the theoretical perspective of the Earth science system, and in view of the functions and technical routes of different detection methods such as field investigation, monitoring, and observation, this article discussed the characteristics of modern natural resources monitoring from a system perspective, and explained the technical routes of the integrated space-aerial-ground monitoring system. It also analyzed the specific applications of the integrated space-aerial-ground monitoring system in the unified management of natural resources from the macro management level, in order to provide necessary support for the unified management of natural resources.

Key words: ecological civilization; natural resources; resource management; space-aerial-ground collaborative observation; multi-source data fusion; monitoring system