

国家尺度自然保护地生态系统联网监测指标体系构建与应用研究

徐梦¹ 田大栓^{1*} 王易恒¹ 何奕成¹ 崔清国² 李跃林³ 申小莉² 原作强^{4,5}
王扬²

¹中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ³中国科学院华南植物园退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; ⁴中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ⁵辽宁省陆地生态系统碳中和重点实验室, 沈阳 110016

摘要 自然保护地是维护国家生态安全, 提升生物多样性保护成效的重要载体, 对保护地生态系统进行实时、高频、多尺度的监测是认知其动态变化的有效手段, 也是实现自然保护地生态系统健康管理的基石。由于目前我国没有形成自然保护地生态系统监测网络, 缺少统一的联网监测指标体系, 导致多数自然保护地生态系统组成家底不清、动态不明, 应对生物多样性保护新问题的能力不足, 并且在国家尺度上的自然保护地生态系统健康状况及保护成效评估缺乏联网监测数据支撑。因此, 亟需构建国家尺度的自然保护地生态系统组成和动态监测网络, 以及一套科学、系统、规范的自然保护地生态系统联网监测指标体系。该文针对自然保护地生物多样性和生态系统监测的目标和内容, 参考国内外现有的生态系统监测网络的指标体系, 确定了自然保护地生态系统联网监测指标体系建立和选取的基本原则, 建立了一套适用于国家尺度的自然保护地生态系统联网监测指标体系, 并在6个国家级自然保护区进行示范。构建的指标体系针对构成生态系统的6类关键要素(生境要素、生物要素、气象要素、土壤要素、大气和水环境要素、景观要素)制定了30个监测指标, 有效应用于森林、草地、荒漠、湿地等生态系统类型的自然保护地, 能够实现对不同类型自然保护地生态系统组分和结构的现状和演变特征进行长期、动态化监测, 并可为自然保护地保护成效评估和健康管理提供规范化、标准化的基础数据。

关键词 自然保护地; 生态系统监测网络; 指标体系; 生态系统要素

徐梦, 田大栓, 王易恒, 何奕成, 崔清国, 李跃林, 申小莉, 原作强, 王扬 (2022). 国家尺度自然保护地生态系统联网监测指标体系构建与应用研究. 植物生态学报, 46, 1219-1233. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0259

Construction and application of the indicator system for ecosystem monitoring network in the protected areas on a national scale

XU Meng¹, TIAN Da-Shuan^{1*}, WANG Yi-Heng¹, HE Yi-Cheng¹, CUI Qing-Guo², LI Yue-Lin³, SHEN Xiao-Li², YUAN Zuo-Qiang^{4,5}, and WANG Yang²

¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ³Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ⁴Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; and ⁵Key Laboratory of Terrestrial Ecosystem Carbon Neutrality, Liaoning Province, Shenyang 110016, China

Abstract

The protected areas are crucial to the maintenance of national ecological security and improvement of biodiversity conservation. Application of real-time, high-frequency and multi-scale ecological monitoring in the protected areas serves an effective means for identifying the dynamics of ecosystem, which is key to the implement of ecosystem health management in the protected areas. However, due to the lack of a unified ecosystem monitoring and research network and the corresponding indicator system of the protected areas in China, the composition and dynamics of ecosystem in many protected areas remains unclear, which can diminish the ability to cope with emerging issues of biodiversity conservation. Lack of the data obtained from the ecological monitoring network can also hamper the evaluation of ecosystem health status and conservation effectiveness of the protected areas on

收稿日期Received: 2022-06-21 接受日期Accepted: 2022-10-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23080302)和中国科学院青年创新促进会会员项目(2021050)。Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA23080302) and the Youth Innovation Promotion Association CAS (2021050).

* 通信作者Corresponding author (tiands@igsnrr.ac.cn)

a national scale. As such, it is necessary to construct a national scale monitoring and research network for the composition and dynamics of ecosystem in the protected areas, as well as a scientific, systematic and normative indicator system for this monitoring network. By addressing the aims and objectives of biodiversity and ecosystem monitoring in the protected areas and with reference to the indicator systems of existing ecological monitoring networks both in China and abroad, this study summarized the basic principles of establishing the indicator system and the selection of indicators. Accordingly, an indicator system for the ecosystem monitoring network of the protected areas was established and applied to 6 national nature reserves for demonstration. The established indicator system consists of 30 indicators to comprehensively monitor changes in the 6 key elements that compose an ecosystem, which is habitat, biota, meteorology, soil, atmospheric and water environment, and landscape. The indicator system was effectively applied to monitor the long-term and dynamic changes in the status and evolution of ecosystem components and structures in different ecosystem types of protected areas including forest, grassland, wetland and desert. The normalized and standardized data achieved from the established monitoring network can further be used for the evaluation of conservation effectiveness and healthy management of the protected areas.

Key words protected area; ecosystem monitoring and research network; indicator system; ecosystem component

Xu M, Tian DS, Wang YH, He YC, Cui QG, Li YL, Shen XL, Yuan ZQ, Wang Y (2022). Construction and application of the indicator system for ecosystem monitoring network in the protected areas on a national scale. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 1219-1233. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0259

2017年,党的第十九次全国代表大会将“美丽中国”写入现代化强国建设战略目标,为中长期生态文明建设和生态环境保护指明了新的历史坐标,对“美丽中国”建设进行了明确部署,提出了2035年前“生态环境根本好转,美丽中国目标基本实现”的奋斗目标(2035目标)。“十九大”报告中明确指出,要“加大生态系统保护力度,优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性”。自然保护区作为生态系统的核心组成部分,是筑牢国家生态安全屏障、建设美丽中国的重要载体。自然保护区是指一个明确界定的地理空间,通过法律或其他有效方式获得认可、承诺和管理,以实现对自然资源及其所拥有的生态系统服务和文化价值的长期保育(Dudley, 2016)。自然保护区的核心功能是保护生态系统的原真性和完整性,也是生物多样性保护的基础。《国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》也提出,要“构建以国家公园为主体、自然保护区为基础、各类自然公园为补充的自然保护地体系,构筑生物多样性保护网络”。目前,我国建立的自然保护地主要包括国家公园体制试点、自然保护区、森林公园、风景名胜区、地质公园、湿地公园、沙漠公园等10余类,总数(不含港澳台)超过12 000处,总面积超过200万km²,约占国土面积的20% (欧阳志云等, 2020)。这些自然保护区对于保护我国自然资源和生物多样性、维持生态系统稳定性、促进国民经济可

持续发展具有重大战略意义。

近年来随着自然保护区建设和管理工作的逐步完善,我国生物多样性和生态系统保护工作取得了显著成效,然而在自然保护区的生态系统联网监测方面仍然存在不足。首先,自然保护区数目繁多、类型多样、科研监测水平和监测指标不一等因素导致了我国多数自然保护区生态系统组成的家底不清、动态不明,应对生物多样性保护的新问题的能力不足(崔国发, 2004; 王伟等, 2016; 李苗苗等, 2020)。目前我国自然保护区仍面临着众多人类活动或者全球变化引起各种环境问题,包括环境污染、外来物种入侵、酸沉降、生境破碎化、土地利用变化等(马克平, 2016; 陈善荣等, 2020)。由于多数环境问题存在滞后性、长效性、连锁性、复杂性等特点,长时间序列、大空间尺度的联网监测数据是理解其对自然保护区生物种群以及生态系统的组分和结构的影响的必要和关键基础数据。其次,自然保护区建立后,其对生物多样性及自然资源的保护成效如何,其生态系统的健康状况如何,这些方面的评估工作需要多尺度、多层次的生态系统联网监测数据的支撑(王伟等, 2016)。再次,自然保护区是一个将生态环境、社会、经济纳为整体的复杂而庞大的综合系统,这导致自然保护区的管理存在大量不确定因素,例如管理行为、自然因素(气候变化)、人为干扰等,自然保护区的适应性管理非常必要(杨荣金等, 2004; 韩俊丽等, 2012)。保护对象的现状及动态

是评估保护成效以及制定保护措施的重要依据,而自然保护地生态系统联网监测获得的数据能够为保护对象的动态变化特征及其驱动因素提供推断的依据,通过反馈使自然保护地的管理适应变化,并不断通过监测-反馈-调整的动态循环过程来提高自然保护地的管理水平和保护成效(Uychiaoco *et al.*, 2005; Moore *et al.*, 2011; 杨璐等, 2014)。综上,为了维护我国生态安全、实现生物多样性和生态系统的有效保护,亟需构建国家尺度上的自然保护地生态系统组成和动态监测网络,对生物多样性、大气、水文、生物地球化学等要素开展实时、高频和多尺度的联网监测,并在此基础上明晰我国生态系统原真性与完整性的保护现状及其变化趋势,为我国自然保护地的体系优化、保护成效提升及健康管理提供准确、科学的基础数据。

1 国内外相关生态监测网络及其指标体系研究现状

自然保护地的有效管理是全球生物多样性保护的焦点问题,为此全球多个国家都针对自然保护地的生物多样性和生态系统监测制定了监测计划和技术方法。但自然保护地的保护范围和保护成效以及生态系统健康管理不仅依赖于对生物和环境要素的单点定位监测,更需要在国家和区域尺度上的集成和综合性监测(Myers *et al.*, 2000; Watson *et al.*, 2014)。随着观测手段、数据处理能力的提升,以大数据为基础的联网观测成为新时代生物多样性保育和生态系统健康管理的关键(Vihervaara *et al.*, 2013; Isbell *et al.*, 2015; Kulmala, 2018; 于贵瑞等, 2018, 2021; Niu *et al.*, 2020)。20世纪80年代以来,国内外陆续建立了多个区域、国家和全球尺度上的生态系统研究和监测网络平台,开展生物多样性以及生态系统的动态监测和研究工作(Scholes *et al.*, 2008; Kao *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2015; Mirtl *et al.*, 2018)。例如联合国《生物多样性公约》缔约方大会发起成立的地球观测组织-生物多样性监测网络(Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network, GEO BON),旨在建立现有生物多样性监测网络之间的联系,建立和完善生物多样性核心监测指标,推动生物多样性数据收集、监测方法标准化及监测信息的共享(Scholes *et al.*, 2008; Schmeller *et al.*, 2015)。GEO BON鼓励国家和地区成立不同水平的

子网络。2014年中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)建立,目标是结合多种监测方法从整体上对中国生物多样性的变化开展长期的监测与研究(马克平, 2015)。Sino BON采用传统监测方法和最新技术(例如红外触发拍摄技术、卫星追踪技术、宏基因组学技术等)相结合的模式,对我国兽类、鸟类、两栖爬行类、鱼类、昆虫、土壤动物、土壤微生物、森林、草原/荒漠植物和林冠生物多样性进行监测研究(冯晓娟等, 2019)。美国国家生态观测站网络(National Ecological Observatory Network, NEON)由美国国家科学基金出资建立,重点关注气候变化、土地利用变化和入侵物种对生物多样性和自然资源的影响,促进对环境变化的深入了解和预测,并提出应对环境变化的对策,为生物多样性保护和生态安全提供保障(赵士洞, 2005; Kao *et al.*, 2012)。NEON根据美国生态气候区(根据地貌、植被、气候和生态系统划分)建立野外站,监测对象包括陆地植物和动物、土壤、大气、水生生物、沉积物、水文和水化学等。英国环境变化研究监测网络(UK Environmental Change Network, ECN)也是国际上重要的生态系统研究和监测网络之一,其目的是监测影响生态系统的主要因子(例如气候、大气污染、土地利用方式等)以及这些因子的变化所引起的生态系统反应,包括生物多样性变化、土壤和水资源的质量改变等。ECN在生物方面的监测涵盖了陆地植物、陆地无脊椎动物、陆地脊椎动物、浮游植物、大型水生植物、浮游甲壳以及大型底栖无脊椎动物等(Sykes & Lane, 1996; Sykes *et al.*, 1999)。中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)是由中国科学院发起和建立的长期监测和网络工作平台,其目标是以地面联网观测实验为主,结合遥感、地理信息系统和数学模型等现代生态学研究手段,实现对我国各类生态系统和环境状况的长期、全面的监测和研究。CERN制定了统一的生物、气候、水文、土壤要素等指标的监测体系,全面深入研究我国主要类型生态系统(农田、草地、森林、湿地、荒漠等)的结构、功能、动态和持续利用的途径和方法,在国家层面的生态系统变化机理研究以及生态系统优化管理示范等方面做出了卓越贡献(牛栋等, 2006; Li *et al.*, 2015)。

我国自然保护地的生物多样性和生态系统监测工作起步较晚,目前正处于积极发展的阶段。20世

纪末至21世纪初,国家林业局组织了大规模的全国森林资源清查、湿地资源调查、野生动物资源调查、野生植物资源调查等调查和监测工作,自然保护区是这些工作的重要区域。近20年来,国家林业局、国家环保部、国家海洋局等相关部门针对生物多样性保护和生态环境监测制定了多个技术规范和标准。例如,为规范生物多样性观测工作,2015年国家环境保护部颁布实施了环境保护标准《生物多样性观测技术导则》,对植物、哺乳动物、鸟类、土壤动物、大型真菌等多类生物多样性的观测内容和技术方法进行了规定。针对不同类型的生态系统观测,国家林业局发布了《森林生态系统长期定位观测指标体系(GB/T 35377—2017)》、《湿地生态系统定位观测指标体系(LY/T 2090—2013)》、《荒漠生态系统定位观测指标体系(LY/T 1698—2007)》等一系列标准和规范。针对自然保护区生物多样性及生态监测,国家林业局及地方环保部门也发布了行业或地方标准,例如《自然保护区生物多样性调查规范(LY/T 1814—2009)》、云南省《自然保护区与国家公园生物多样性监测技术规程(DB 53/T 391—2012)》、广东省《自然保护区主要生态因子监测技术规范(DB44/T 1791—2015)》等。国内外学者也对自然保护区监测的规划和指标体系构建等进行了探讨(Parrish *et al.*, 2003; Fancy *et al.*, 2009; Théau *et al.*, 2018; 姚帅臣等, 2019)。基于上述标准和规范,许多自然保护区管理部门针对其保护对象的特征和区域特点开展了监测工作,监测内容主要是生物多样性(鸟类、兽类、两栖爬行类、鱼类、无脊椎动物、植物以及不同生态系统中的生物群落)、生态环境(气象、大气环境、水文和水质、地质与土壤等)、人类活动(例如土地利用、旅游、人文景观等)、生态安全(例如外来入侵种、自然灾害、疫病虫害等)等方面。目前在我国自然保护区监测工作中,生物多样性和生态环境是最为关注的内容(李苗苗等, 2020)。生物多样性监测中,鸟类和兽类监测工作开展较多,这主要是由于鸟类和兽类易于识别,并且社会关注度高;其次是植物,监测内容包括物种组成、种群结构、功能性状、植被类型及覆盖面积等;两栖爬行类、鱼类、无脊椎动物等的监测工作重视程度不高,这主要是由于监测技术受限并且个体活动隐蔽不易识别。生态环境方面的监测目前主要偏重于自然保护区的环境质量或健康,水文与水质、气象因

子、大气质量、土壤养分、地质结构等指标的监测占比较高。此外,自然保护区的生物多样性和生态系统监测以及科研工作获得了更高且持久的关注和重视程度,而其他类型的自然保护区监测力量投入不足(李苗苗等, 2020)。总体来说,目前我国自然保护区的生物多样性和生态系统监测工作尚未形成国家尺度的监测网络,并且缺乏统一、规范化、标准化的监测指标体系和技术方法,这严重制约了我国自然保护区健康管理和保护成效评估。

2 自然保护区生态系统联网监测指标体系构建

2.1 自然保护区生态系统联网监测的目标与内容

自然保护区生态系统监测网络的构建以服务美丽中国建设,支撑自然保护区健康管理与保护成效评估,探索生态系统组分的变化动因机制、演化趋势和相互间耦合作用,解决我国生物多样性保护重大科学问题为目标,通过制定统一、标准化和规范化的观测指标和方法技术,对自然保护区中反映生物多样性、生态系统组成和功能的关键要素进行长期观测,获取质量可靠、规范和具有可比性的生物群落及生态系统组分的动态信息,揭示自然保护区各类生态系统中生物群落及其多样性的动态变化规律;同时与生态系统环境要素观测数据相结合,利用遥感、地理信息系统和数学模型等研究手段,掌握生物多样性的现状与演变机制,识别主要威胁因素,为深入研究并揭示我国自然保护区生态系统原真性和完整性的现状评估和健康提供数据服务。基于以上目标,自然保护区生态系统联网监测的内容应涵盖生态系统的基本组分,即生物组分(生产者、消费者、分解者)和非生物组分(环境系统),具体可以分解为以下6类要素:

(1)生境要素。反映自然保护区生态系统环境的基本特征,如群落类型、水分状况、土壤类型、人类活动情况等,为解释生物生长环境提供必要信息。

(2)生物要素。自然保护区生态系统联网监测的核心内容与研究主体,也是自然保护区成效评估和健康管理的核心指标。生物要素联网监测的重点内容包括物种组成与种群数量、群落结构特征、物质生产与养分循环等。

(3)气象要素。反映自然保护区气候条件和大气现象实时、动态变化特征,如气压、空气温度、降水

等,是研究生态系统组分长期动态变化的重要资料。

(4)土壤要素。陆地生态系统物质和能量流动的核心界面,也是生态系统重要组分之一。土壤要素的联网监测能够反映自然保护区土壤生态系统功能及其提供的生态系统服务的动态特征及长期变化趋势。

(5)大气和水环境要素。反映自然保护区大气环境和水体环境的现状与变化趋势,包括大气干湿沉降、温室气体排放、水循环和水化学要素等的观测。

(6)景观要素。反映自然保护区生态系统景观格局的动态变化特征,用于全面、客观地揭示生态环境变化及人类活动干扰对自然保护区生态系统和景观变化的综合影响。

2.2 自然保护区生态系统联网监测指标体系的构建原则

针对自然保护区特点,生态系统联网监测指标的确定应依据以下原则:

(1)体现联网监测目标。紧扣不同类型自然保护区生态系统特点,选择能够体现自然保护区生物多样性、自然环境动态变化的监测指标。监测指标的选择需要以保护区生态监测的目标为依据,能够反应自然保护区生态系统组成和结构的重要参数(如动植物种类组成、种群数量及群落组成特征等)以及关键生境因子(包括气候、土壤、水环境等)。

(2)体现长期动态变化。长期、大尺度的联网监测对揭示自然保护区生物多样性及生态系统组成结构特征及演变趋势十分重要,因此应选择具有长期监测意义、对自然保护区生态系统动态变化有关键指示作用的指标。有些指标虽然重要,但是在长期时间尺度上意义不大,则不宜选择。

(3)监测项目易实施、可操作性强。我国自然保护区类型多样,不同类型或区域的自然保护区所具备的科研监测条件不一,执行生态监测工作相关人员的科研素质也可能参差不齐。为确保自然保护区生态系统联网监测的时间延续性,应当尽可能选择简单可靠、容易实施、可操作性强的指标和方法,避免因经费、人为因素等导致自然保护区生态系统联网监测工作中断。

(4)标准性原则。自然保护区生态系统演变特征需要长时间序列、大空间尺度的联网监测数据为支撑,因而联网监测数据的可比性至关重要。因此针对各个监测项目,应尽可能地选择国家标准以及国

内外普遍采用的监测方法和技术,不成熟的、处于实验阶段的方法不宜采用。

(5)样地保护原则。自然保护区设置的核心目标是保护典型的、特有的、重要的生态系统或生物类型,因此联网监测选择的指标应尽可能地减少对样地及样线上野生动植物的干扰和破坏。一些具有破坏性的监测指标尽管具有重要意义,也应尽量避免选择或限制其监测强度。

(6)兼顾科学性和应用性。联网监测获得的数据是自然保护区生物多样性和生态系统保护成效评估及健康管理的基础信息,因此在选择监测指标时应兼顾科学性和应用性,既能满足生态学研究,也能服务于自然保护区保护成效评估和健康管理。

2.3 自然保护区生态系统联网监测指标体系

通过分析国内外已有的生态系统监测网络的指标体系研究现状,结合自然保护区生物多样性和生态系统联网观测的特点,以及自然保护区保护成效评估、健康管理的目标要求,构建了自然保护区生态系统联网监测指标体系(表1)。该指标体系针对构成生态系统的6类要素(生境要素、生物要素、气象要素、土壤要素、大气和水环境要素、景观要素)制定了30个监测指标,能够实现对自然保护区生态系统组分和结构的现状及其动态变化进行准确可靠的评价分析,并为自然保护区保护成效评估和健康管理提供统一、标准化的基础数据。

生境要素是对自然保护区物种栖息环境的描述,能够反映该自然保护区生态系统的基本组成和特征,是联网监测不可缺少的基础资料。生境要素监测的指标大多数可以通过直观的观察进行定性描述,例如植被类型、植物群落名称、地形地貌、人类活动等,少数项目则需要通过测量进行定量描述。生境要素指标的监测频率一般为每5年1次,如在短时间内有剧烈变动则需及时记录。

生物是生态系统的核心部分,是生态系统结构和状态的直接体现者,是生态系统功能的真正实现者,因此生物要素监测是自然保护区生态系统联网监测的核心内容与研究主体。作为生态系统的生产者,植物群落的监测是自然保护区生物要素联网监测的重点关注内容,包括植物多样性与群落结构、生物量与养分循环等,需要在每年的固定时间(通常是植物生长季)通过野外调查采样和室内分析进行监测(吴冬秀等, 2019)。野生动物种群(鸟类、大型

野生动物等)可根据生态监测条件进行定期或动态(季节动态或实时动态)监测(李晟等, 2014; 朱淑怡等, 2017; 冯晓娟等, 2019)。例如对迁徙鸟类的监测, 可根据自然保护区在其迁徙路线中的地位(繁殖地、越冬地、停歇地), 在其活动时间进行监测(《生物多样性观测技术导则 鸟类(HJ 710.4—2014)》)。此外, 土壤微生物群落也是生态系统的重要组成部分, 需要每年在植物生长季(或不同季节)通过土壤样品采集进行测定和分析。

自然保护区气候条件和大气现象的实时、动态变化特征是研究生态系统长期动态变化的重要资料。目前生态监测或科研条件较好的自然保护区(例如自然保护区), 可以利用气象辐射自动观测系统(即自动气象站)对关键气象要素, 包括气压、风、降水、气温等进行实时、连续在线监测。对于部分科研条件欠缺的自然保护区, 则需要人工对气象要素进行定时观测。

土壤是地球关键带的核心界面, 具有保障生产力、碳固存、养分循环、气候调节、维持动植物健康等重要生态系统功能, 是维系地球生命的关键组分。土壤包含了非生物组分和生物组分, 自然保护区联网监测中的土壤要素主要针对土壤非生物组分, 监测内容包括土壤的物理性质(例如土壤密度、土壤机械组成), 化学性质(如酸碱性、养分含量)以及主要污染物等。土壤要素的联网监测通常针对表层土壤(0–20 cm), 因为表层土壤是陆地生态系统物质交换、能量流动、生物相互作用最为活跃的层次。对于具备一定条件的自然保护区, 也可对土壤剖面(0–10、10–20、20–40、40–60、60–100 cm)上各指标的变化进行监测。

自然保护区的建立有助于生态系统环境质量的维持和改善, 然而大气污染、全球变化、水体污染等多种全球性、广域性环境问题也同时在影响自然保护区生态系统的健康状况。因此, 全面的生态系统监测网络, 除了监测生态系统各组分之外, 还应监测可能引起生态系统组分变化的大气和水环境指标, 包括大气干湿沉降、温室气体排放、水质情况等, 不仅有助于理解自然保护区生态系统演变的环境驱动因子, 也能助力环保部门协同制定碳减排、大气和水污染治理等重大环境问题。由于表征大气和水环境的指标多需要动态监测, 且对分析仪器和技术有一定要求, 因此不作为自然保护区联网监测

的核心内容, 鼓励具有一定科研能力的自然保护区进行监测。

由于自然保护区原真生态系统的演变通常具有动态性、长期性、广域性等特点, 样方水平上的传统地面调查获取的是有限的“点”数据, 许多关键观测数据(例如净初级生产力、植被覆盖等)在拓展到区域和国家尺度进行动态分析和评估时存在诸多困难(何兴元等, 2018)。随着无人机、光谱、激光雷达等技术的快速发展, 生态系统动态数据的时空分辨率不断提高, 依靠上述先进的通讯信息、遥感探测和图像解析处理等技术, 能够获取高频度的、统一标准的大尺度生态系统动态变化参数(Skidmore *et al.*, 2015; Paganini *et al.*, 2016; 郭庆华等, 2020)。因此, 以高分辨遥感数据为基础, 通过图像解析和数据处理, 分析表征植被信息的重要参数, 并结合景观格局的时空变异分析, 能够实现以统一的尺度标准追踪和明晰自然保护区植被和景观格局的动态演变特征, 并解析造成区域尺度变化的机理过程。自然保护区景观要素联网监测的内容包括表征植被覆盖率、植物生物物理特征及生产过程的重要参数如植被指数、净初级生产力等, 以及景观格局指数例如景观多样性指数、景观破碎化指数等(陈利顶等, 2008)。考虑到景观要素监测指标的获取和分析对遥感数据解析、地理信息系统等技术有一定的要求, 自然保护区管理部门可通过与相关高校或者科研院所合作, 对景观要素开展长期动态监测, 从而形成对自然保护区整体状态与变化特征的观测。

3 自然保护区生态系统联网监测应用示范

为推动自然保护区生态系统监测网络的构建与示范, 本文依托中国科学院战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设工程”, 选择森林、草地、荒漠和湿地不同类型的代表性自然保护区, 基于自然保护区生态系统联网监测指标体系(表1), 在各保护区开展从个体、群落到生态系统尺度的生物要素监测, 并结合大气、土壤、水文等环境要素监测, 以及区域尺度的植被覆盖与景观动态监测, 构建自然保护区生态系统组成与动态的标准化和多尺度动态数据库, 并推进数据集建设与共享。

3.1 监测网络构成

目前初步选择6个国家级自然保护区构建自然保护区生态系统监测网络(图1; 表2), 包括了森林、

表1 自然保护区生态系统联网监测指标体系

要素 Element	指标 Indicator	监测内容 Monitoring item	监测频率 Monitoring frequency
生境 Habitat	植被 Vegetation	植被类型与分布面积、主要植物群落名称、演替阶段、林龄(人工林)	每5年1次 Once per 5 years
	地貌地形 Topography	Vegetation type and distribution area, major plant community, succession stage, age of plantation	
	土壤类型 Soil type	地貌、坡位、坡向、坡度 Landform, slope position, aspect and gradient	
	气候条件 Climate	土壤分类 Soil classification	
生物 Biota	人类干扰类型与程度 Type and impact of human disturbance	气候带类型 Climate type	每年1次, 在植物生长季进行, 分乔木层、灌木层、草本层进行调查观测 Once per year during plant growing season. The survey and sampling shall be carried out in the tree, shrub and herb layers, separately
	植物物种组成与种群数量 Plant species and population	人类活动类型与影响强度 Type and impact of human activity and land use	
	植物群落特征 Plant community characteristic	植物种、株数或丛数、胸径(乔木)、高度、盖度(草本)、生活型(灌木及草本)	
	植物生物量与凋落物量 Plant biomass and litter fall	Plant species, number of plants or clusters, diameter at breast height (tree), height, coverage (herb), life type (shrub and herb)	
	植物器官元素含量 Element content of plant apparatus	植物种数或丰富度、密度、群落郁闭度(乔木层)、群落盖度(灌木层及草本层)	
	保护种群更新与物候 Regeneration and phenology of protected plant species	Number or richness of plant species, density, community canopy density (tree layer), community coverage (shrub and herb layers)	
	动物物种组成与种群数量 Animal species and population	草本层地上部分干质量、草本层根总干质量、凋落物总干质量	
		Dry mass of the aboveground and root of herbs, dry mass of total litters	
		植物叶片及根系碳、氮、磷含量	
		Contents of carbon, nitrogen and phosphorus in plant leaf and root	
气象 Meteorology	土壤微生物群落特征 Soil microbial community characteristics	幼树或树苗株数、平均高度、平均直径, 荒漠短命植物种群密度、冠层高度、种群盖度、生长节律	每年1次 Once per year
	入侵种及疫病虫害 Invasive species, infestations and diseases	Number, average height and base diameter of young trees and seedlings, and the density, height, coverage and growth rhythm of ephemeral plants in desert	
	气压 Pressure	鸟类、大型野生动物、迁徙鸟类(湿地生态系统)、啮齿动物(草地生态系统)、家畜(草地及荒漠生态系统)物种与种群数量	
	风 Wind	Species and population of birds, large wild animals, migratory birds (for wetland ecosystem), rodents (for grassland ecosystem) and livestock (for grassland and desert ecosystem)	
	空气温度 Air temperature	土壤微生物生物量碳、氮含量, 土壤微生物群落组成, 土壤微生物多样性	
	空气湿度 Air humidity	Soil microbial biomass carbon and nitrogen content, community composition and biodiversity of soil microbes	
	大气降水 Precipitation	外来/入侵植物、外来/入侵动物、有害昆虫、植物疫病、动物疫病	
	土壤温度 Soil temperature	大气压 Atmospheric pressure	
	土壤物理性质 Soil physical property	风速、风向 Wind speed and direction	
	土壤化学性质 Soil chemical property	空气温度 Air temperature	
土壤 Soil	土壤水分 Soil moisture	相对湿度 Relative humidity	自动观测: 1次·min ⁻¹ ; 人工观测: 3次·d ⁻¹ (8:00、14:00、20:00) Once per minute for automatic observation, and 3 times per day (at 8:00, 14:00 and 20:00) for manual observation
	土壤污染物 Soil pollutants	降水总量、降水强度 Total amount and intensity of precipitation	
		地表温度、地表以下10 cm处土壤温度 Temperature at soil surface and 10 cm below the surface	
		土壤颗粒组成、土壤密度 Soil particle composition, soil density	
		pH、有机碳、全氮、全磷、速效氮、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾含量	
		pH, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus, available potassium content	
		土壤含水量 Soil water content	
		重金属元素(铬、铅、镉、镍、铜、钼、砷、汞等)、多环芳烃(PAHs)、抗生素抗性基因(ARGs)	
		Heavy metal (Cr, Pb, Ni, Cd, Se, As, Hg, etc.), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), antibiotics resistance genes (ARGs)	
		土壤含氧量 Soil oxygen content	

表 1 (续) Table 1 (Continued)

要素 Element	指标 Indicator	监测内容 Monitoring item	监测频率 Monitoring frequency
大气和水环境 Atmospheric and aquatic environment	大气干湿沉降 Atmospheric dry and wet deposition	沉降总量、pH、化学成分(SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 、Cl ⁻ 等)含量 Total amount, pH and chemical composition (concentration of SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , etc.) of the deposition	每月1次和有降水时 Once per month and when precipitation occurs
	温室气体排放 Greenhouse gas emission	温室气体(CO ₂ 、N ₂ O、CH ₄)排放通量 Emission fluxes of greenhouse gases (CO ₂ , N ₂ O, CH ₄)	每月1-3次 1-3 times per month
	地表和地下水水质 Quality of surface water and groundwater	pH、电导率、溶解性有机碳、总氮、总磷含量、化学需氧量(COD)、重金属元素(镉、铅、铬、汞等)、有机农药、抗生素抗性基因(ARGs) pH, conductivity, dissolved organic carbon, total nitrogen, total phosphorus content, chemical oxygen demand (COD), heavy metal (Cd, Pb, Cr, As, Hg, etc.), organic pesticide, antibiotic resistance genes (ARGs)	每年4-6次 4-6 times per year
	植被指数 Vegetation index	归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI) Normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI)	每月1次 Once per month
景观 Landscape	能量流动 Energy flow	净初级生产力(NPP)、光合有效辐射吸收比率(PAR) Net primary productivity (NPP), fraction of absorbed photosynthetically active radiation (PAR)	
	景观异质性 Landscape heterogeneity	景观丰度(PR)、香农多样性指数(SHDI)、Simpson多样性指数(SIEI)、香农-威纳均匀度指数(SHEI)、Simpson均匀度指数(SIEI) Patch richness (PR), Shannon-Wiener diversity index (SHDI), Simpson diversity index (SIEI), Shannon evenness index (SHEI), Simpson evenness index (SIEI)	每年1次 Once per year
	景观破碎化 Landscape fragmentation	边缘密度(ED)、斑块平均大小(MPS)、核心斑块占景观面积比(CPLAND) Edge density (ED), mean patch size (MPS), core area percentage of landscape (CPLAND)	

表 2 6个国家级自然保护区的地理位置、分布面积、生态系统类型以及气候条件和植被类型特征

保护区 Protected area	经度 Longitude	面积 Area (km ²)	海拔 Altitude (m)	年平均气温 MAT (°C)	年降水量 MAP (mm)	气候类型 Climate type	生态系统类型 Ecosystem type	主要植被类型 Major vegetation type
长白山自然保护区 Changbai Mountain Nature Reserve	127.63°-128.27° E 41.70°-42.42° N	1 964.65	720-2 691	3-7	700-1 400	温带大陆性山地气候 Temperate continental mountain climate	森林 Forest	红松阔叶混交林、云冷杉林、亚高山岳桦林、高山苔原带 Korean pine and broad-leaved mixed forest, spruce-fir forest, subalpine <i>Betula ermanii</i> forest, alpine tundra
古田山自然保护区 Gutian Mountain Nature Reserve	118.06°-118.18° E 29.18°-29.30° N	81.07	200-1 258	15.3	1 963	中亚热带季风气候 Mid-subtropical monsoon climate	森林 Forest	中亚热带常绿阔叶林 Mid-subtropical evergreen broad-leaved forest
鼎湖山自然保护区 Dinghu Mountain Nature Reserve	112.51°-112.56° E 23.15°-23.19° N	11.33	14-1 000	21	1 927	南亚热带季风气候 Southern subtropical monsoon climate	森林 Forest	南亚热带季风常绿阔叶林 Southern subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest
锡林郭勒草原自然保护区 Xilin Gol Grassland Nature Reserve	115.53°-117.20° E 43.43°-44.65° N	5 800	1 000-1 200	-1-2	300-450	温带大陆性气候 Temperate continental climate	草地 Grassland	温带半干旱草地 Temperate semi-arid grassland
西鄂尔多斯自然保护区 West Ordos Nature Reserve	106.74°-107.74° E 39.25°-40.15° N	4 361.16	1 150	9.8	160	暖温带大陆性气候 Warm temperate continental climate	荒漠 Desert	荒漠 Desert
若尔盖湿地自然保护区 Zoigé Wetland Nature Reserve	102.48°-102.98° E 33.42°-34.00° N	1 665.7	3 422-3 704	0.7	656	高原寒温带季风气候 Plateau cold temperate monsoon climate	高寒湿地 Alpine wetland	高寒草甸、沼泽草甸 Alpine meadow, swamp meadow

MAT, mean annual air temperature; MAP, mean annual precipitation.

草地、湿地和荒漠4类生态系统, 对我国自然保护地主要类型具有较强代表性。长白山国家级自然保护区位于吉林省东南部, 是我国成立最早的自然保护区之一, 主要保护对象是温带森林生态系统、典型火山地貌景观以及珍稀动植物资源。长白山自然保护区是我国温带面积最大的原始林保护区, 属于欧亚大陆东北部典型植被类型, 具有明显的植被垂直带谱, 随海拔升高依次分布着红松(*Pinus koraiensis*)阔叶林带、云冷杉林带、亚高山岳桦(*Betula ermanii*)林带、高山苔原带等。古田山国家级自然保护区位于浙江省开化县西北部, 地处浙赣两省交界处, 主要保护对象为国家I级重点保护野生动物白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)、黑麂(*Muntiacus crinifrons*)及其栖息的森林生态系统。古田山自然保护区内分布着以甜槠(*Castanopsis eyrei*)、木荷(*Schima superba*)和青冈(*Quercus glauca*)为优势种的中亚热带常绿阔叶林原生植被, 是中国生物多样性监测网络(Sino BON)和中国森林生物多样性监测网络(CForBio)的核心区域。鼎湖山国家级自然保护区位于广东省肇庆市东北部, 主要保护对象是地带性亚热带季风常绿阔叶林。鼎湖山自然保护区蕴藏丰富的生物多样性, 被生物学家称为“物种宝库”和“基因储存库”。保护区内具有400多年记录历史的地带性森林植被——亚热带季风常绿阔叶林和其他多种保存完好的森林类型, 被誉为“北回归沙漠带上的绿色明珠”。锡林郭勒草原

国家级自然保护区位于内蒙古自治区锡林浩特市境内, 主要保护对象为草甸草原、典型草原、沙地疏林草原和河谷湿地生态系统等。锡林郭勒草原自然保护区是我国在温带草原建立的第一个自然保护区, 其分布的温带典型草原对于欧亚大陆草原具有广泛的代表性。西鄂尔多斯国家级自然保护区地跨内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克前旗和乌海市两个行政区, 位于鄂尔多斯高原向黄河谷地过渡的区域, 主要保护对象为四合木(*Tetraena mongolica*)、半日花(*Helianthemum songaricum*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、绵刺(*Potaninia mongolica*)等多种古老的第三纪孑遗濒危植物和荒漠生态系统。西鄂尔多斯自然保护区属于典型的暖温带大陆性气候, 其独特的地形地貌及古地理环境是许多珍稀动植物, 特别是古老残遗植物的“避难所”, 是国际公认的亚洲干旱区生物多样性和地质历史变化研究的关键性地带。若尔盖湿地国家级自然保护区地处青藏高原东缘, 位于四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县境内, 主要保护对象是黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、白鹳(*Ciconia ciconia*)、玉带海雕(*Haliaeetus leucoryphus*)、胡兀鹫(*Gypaetus barbatus*)等多种国家重点保护珍稀野生动物以及高原沼泽湿地生态系统。若尔盖湿地是中国第一大高原沼泽湿地, 也是世界上面积最大、保存最完好的高原泥炭沼泽, 同时也是青藏高原高寒湿地生态系统的典型代表。

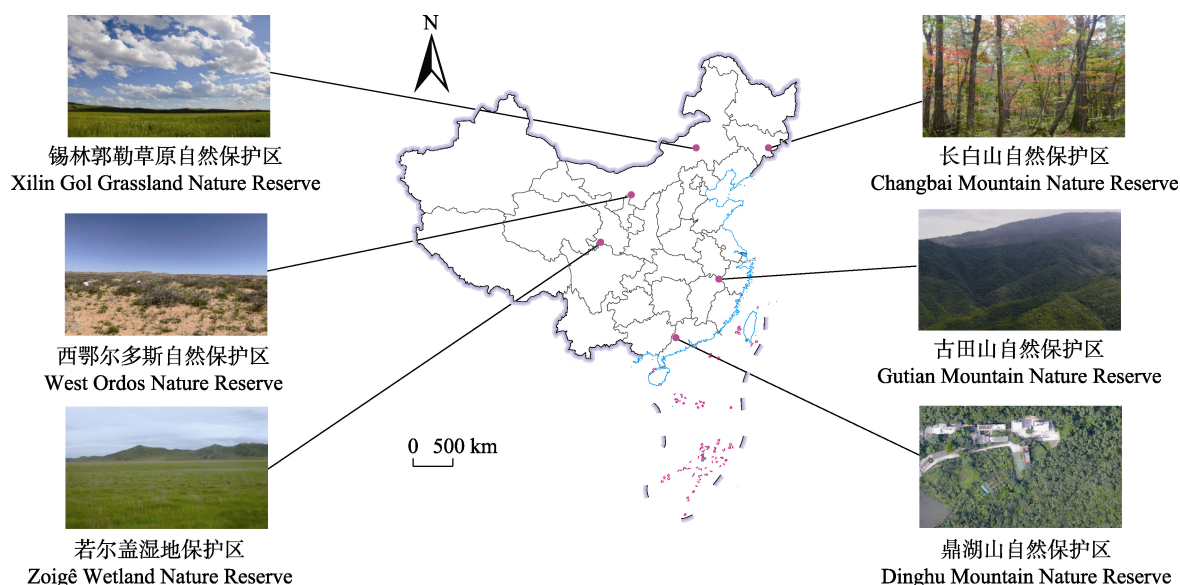


图1 中国自然保护地生态系统监测网络。

Fig. 1 Ecosystem monitoring and research network of nature reserves in China.

1956年以来,我国先后在上述6个国家级自然保护区内建立了生态系统长期定位监测研究站,对保护区内代表性的生态系统类型开展了动植物多样性、初级生产力、凋落物分解、旗舰动物的种群动态、微生物群落组成与多样性以及关键生态环境因子等方面的监测,建设了较为完善的生态监测基础设施,具备良好的科学研究能力,陆续被纳入CERN台站及国家野外科学观测研究站,为开展自然保护区生态系统联网监测与示范奠定了坚实的基础。

3.2 联网监测与数据集成

2019年起在上述6个代表性国家自然保护区基于统一、标准化的指标体系和方法规范,通过野外调查、室内分析、遥感等技术手段,对自然保护区生境、生物、气象、土壤、大气和水环境以及景观6类生态系统要素进行多动态监测。为实现联网监测数据的有效集成和共享,各保护区的监测数据需要使用统一的数据汇交模板进行提交。联网监测数据汇交模板使用Microsoft Excel制作,不同生态系统(森林、草地、荒漠、湿地)各形成1个Excel文件。Excel文件中的每个数据表(Sheet)为生态系统要素及其包含指标的数据集,根据不同生态系统进行编号(森林为F,草地为G,荒漠为D,湿地为W),并规定了联网监测指标的数据集清单和数据提交格式范本。以森林生态系统为例,联网监测数据提交模板包含8个数据表,分别是F01(生境描述)、F02(森林植物群落物种组成)、F03(森林植物群落特征)、F04(森林优势植物元素含量)、F05(森林动物种类及数量)、F06(森林土壤理化性质及微生物)、F07(森林气象要素)、F08(森林大气和水环境要素)。遥感数据使用专用储存设备进行提交和上传。联网监测数据每年汇交一次。汇交的联网监测数据经过审核后,分别集成为自然保护区生物要素联网监测数据库(包括动植物群落物种组成与群落特征、生物多样性、生物量、土壤微生物等指标或监测项目)、自然保护区环境要素联网监测数据库(包含气象、土壤、大气和水环境相关监测指标和项目)以及自然保护区景观要素联网监测数据库(包括植被指数、净初级生产力,以及景观多样性和破碎度等相关景观指数)。

3.3 初步成果

(1)通过在6个国家级自然保护区生态系统联网

监测的固定样地开展群落调查、植物及土壤样品采集、实验室测定等工作,分析不同类型自然保护区生物多样性、群落组成和土壤环境的基本特征,并初步阐明植物多样性、土壤碳氮含量等核心监测指标的生物地理分布格局特征(图2)。生物多样性保护是自然保护区建设的核心目标之一。植物作为生产者,其生物多样性对维持生态系统功能及其稳定性至关重要(Tilman *et al.*, 2006; Isbell *et al.*, 2015),是

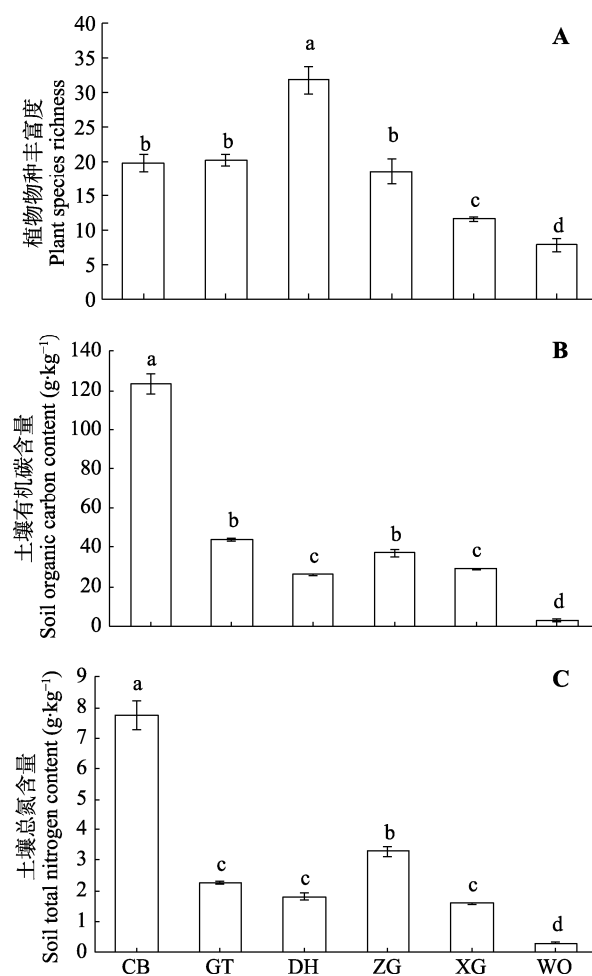


图2 6个国家级自然保护区监测样地植物物种丰富度和土壤碳氮含量特征(平均值±标准误)。CB, 长白山自然保护区; DH, 鼎湖山自然保护区; GT, 古田山自然保护区; WO, 西鄂尔多斯自然保护区; XG, 锡林郭勒草原自然保护区; ZG, 若尔盖湿地自然保护区。不同小写字母表示各自然保护区之间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Plant species richness, soil carbon and nitrogen contents in monitoring plots of six national nature reserves in China (mean \pm SE). CB, Changbai Mountain Nature Reserve; DH, Dinghu Mountain Nature Reserve; GT, Gutian Mountain Nature Reserve; WO, West Ordos Nature Reserve; XG, Xilin Gol Grassland Nature Reserve; ZG, Zoigê Wetland Nature Reserve. Different lowercase letters indicate significant difference among six nature reserves ($p < 0.05$).

自然保护区生物多样性监测的核心指标。联网观测数据显示, 植物物种丰富度在森林生态系统类型的自然保护区明显高于其余类型保护地, 其中位于亚热带季风区的鼎湖山保护区植物物种丰富度最高, 其次是长白山、古田山和若尔盖湿地保护区, 而草地生态系统类型(锡林郭勒)和荒漠生态系统类型(西鄂尔多斯)保护区的植物多样性最低(图2A)。土壤是碳氮等元素生物地球化学循环的核心界面之一, 土壤碳氮含量的变化可能对植物多样性、生产力、气候变化、碳固持等生态系统性状或过程产生重要影响(Galloway *et al.*, 2008; Jackson *et al.*, 2017)。联网监测数据显示, 保护区监测样地的土壤有机碳(图2B)及总氮(图2C)含量在森林类型自然保护区表现出从北向南降低的趋势, 其中长白山自然保护区样地土壤有机碳和总氮含量最高, 平均值分别为123.25和7.75 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而在其他3类生态系统中, 表现出随气候湿润程度增加而升高的分布格局, 即土壤有机碳和总氮含量在湿地类型保护区高于草地类型保护区, 荒漠类型保护区最低(3.24和0.31 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(2) 基于近20年(2001–2021年)遥感影像数据的解译和分析, 初步揭示不同类型自然保护区植被指数、净初级生产力(NPP)等表征生态过程或状态的核心参数的分布格局及其多年变化趋势(图3, 图4)。6个国家级自然保护区生态系统NPP多年平均值特征与植物多样性分布格局类似, 森林类型保护区NPP显著高于其余类型保护区, 鼎湖山自然保护区NPP最高, 西鄂尔多斯自然保护区NPP最低(图3A)。NPP的时间稳定性表征在某个时间序列下的NPP相对其均值的恒定程度(即NPP在某时间段内的平均值与其时间变异标准差的比值)(Tilman, 1999), 能够反映出长时间序列下生态系统对气温、降水及其他影响因子变化的响应程度, 可用于量化生态系统稳定性(Tilman *et al.*, 2006)。在2001–2021年, 古田山自然保护区生态系统NPP的稳定性显著高于其他5个自然保护区(图3B), 表明古田山自然保护区生态系统在应对气候变化等风险因素时具有更高的稳定性。此外, 6个自然保护区的归一化植被指数(NDVI)时空分布图(图4)显示, 3个森林生态系统类型的自然保护区(长白山、古田山、鼎湖山)的植被绿度在2001–2021年明显增加, 其中古田山和鼎湖山2个保

护区的NDVI在整体上增加程度最大。位于内蒙古的2个自然保护区中, 锡林郭勒草原自然保护区和西鄂尔多斯自然保护区(荒漠生态系统)的NDVI在整体上均明显增加, 尤其是西鄂尔多斯保护区东部区域植被绿度增加程度最高。若尔盖湿地自然保护区的NDVI在整体上轻微增加, 其核心区和缓冲区植被绿度的增加程度最大。总体来说, 近20年来上述6个国家级自然保护区在植被保护方面成效良好。

4 结论和建议

本文基于国内外已有的生物多样性和生态系统观测网络的指标体系的研究基础, 针对自然保护区生物多样性和生态系统观测的目标、内容和特点, 结合自然保护区保护成效评估和健康管理等研究需求, 初步构建了自然保护区生态系统联网监测指

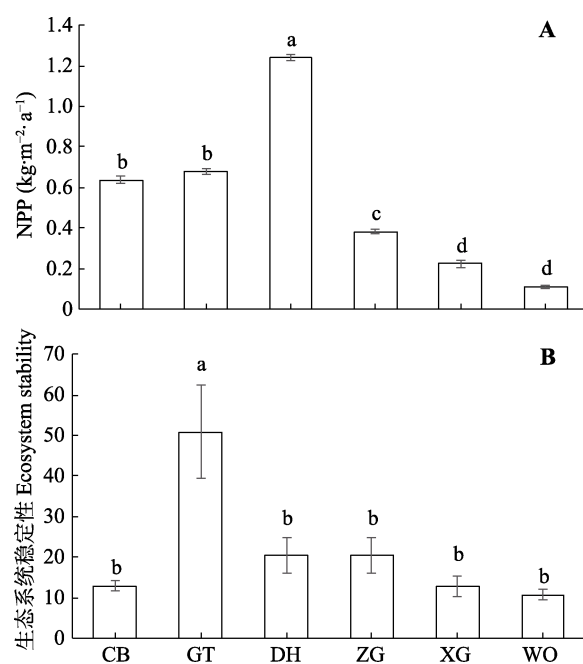


图3 2001–2021年6个国家级自然保护区净初级生产力(NPP)及其时间稳定性(即生态系统稳定性)(平均值 \pm 标准误)。CB, 长白山自然保护区; DH, 鼎湖山自然保护区; GT, 古田山自然保护区; WO, 西鄂尔多斯自然保护区; XG, 锡林郭勒草原自然保护区; ZG, 若尔盖湿地自然保护区。不同小写字母表示各自然保护区之间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Net primary productivity (NPP) and its temporal stability (ecosystem stability) of six national nature reserves in China from 2001 to 2021 (mean \pm SE). CB, Changbai Mountain Nature Reserve; DH, Dinghu Mountain Nature Reserve; GT, Gutian Mountain Nature Reserve; WO, West Ordos Nature Reserve; XG, Xilin Gol Grassland Nature Reserve; ZG, Zaigê Wetland Nature Reserve. Different lowercase letters indicate significant difference among six nature reserves ($p < 0.05$).

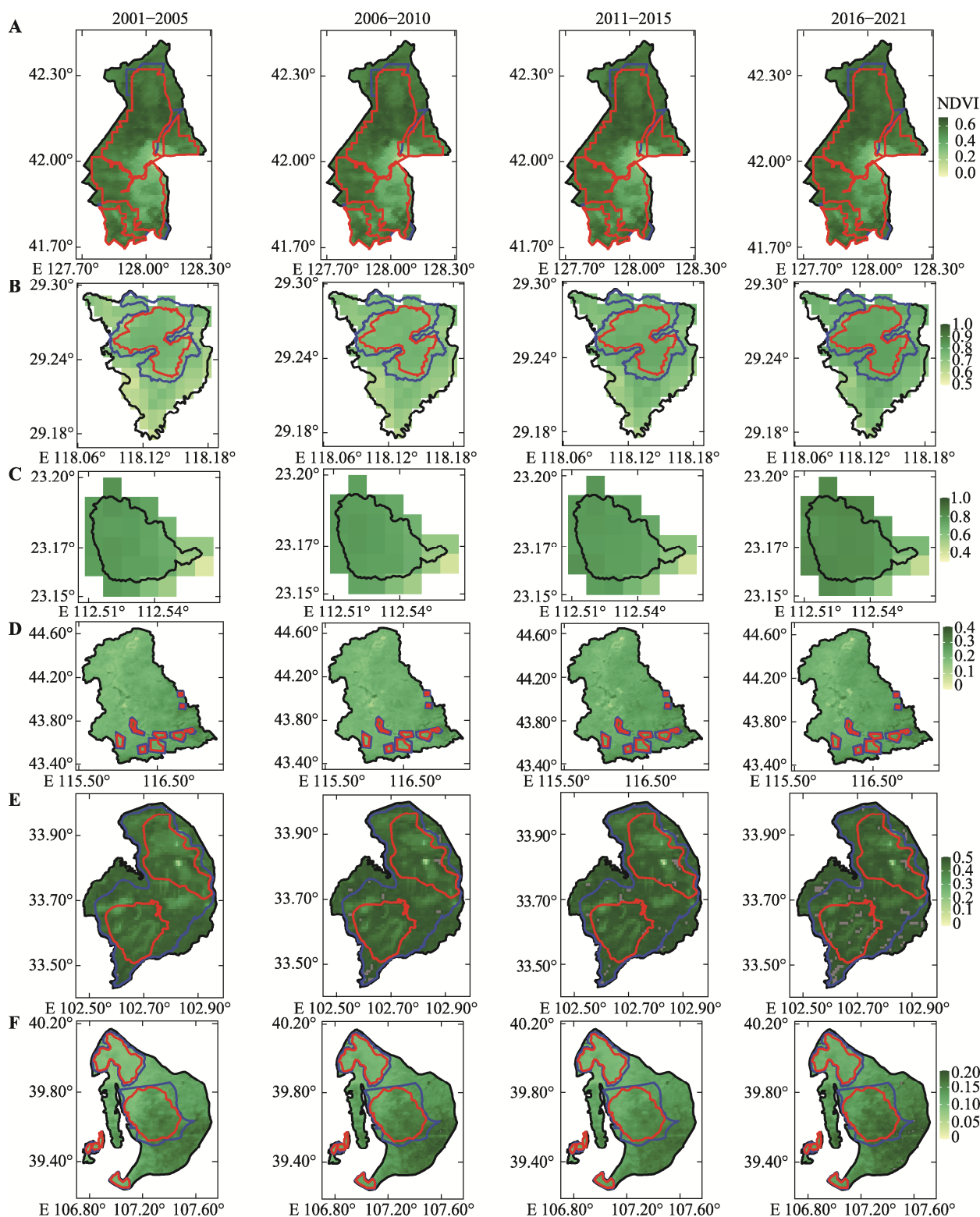


图4 2001–2021年6个国家级自然保护区归一化植被指数(NDVI)的时空变化特征。**A**, 长白山自然保护区。**B**, 古田山自然保护区。**C**, 鼎湖山自然保护区。**D**, 锡林郭勒草原自然保护区。**E**, 若尔盖湿地自然保护区。**F**, 西鄂尔多斯自然保护区。每个保护区的4幅图中的NDVI分别为2001–2005、2006–2010、2011–2015、2016–2021年的平均值。红线和蓝线圈内的区域分别表示自然保护区的核心区和缓冲区。

Fig. 4 Spatial and temporal variations in the normalized difference vegetation index (NDVI) of the six national nature reserves from 2001 to 2021. **A**, Changbai Mountain Nature Reserve. **B**, Gutian Mountain Nature Reserve. **C**, Dinghu Mountain Nature Reserve. **D**, Xilin Gol Grassland Nature Reserve. **E**, Zoigê Wetland Nature Reserve. **F**, West Ordos Nature Reserve. NDVI data used in the four plots of each nature reserve were the averages from 2001 to 2005, 2006 to 2010, 2011 to 2015, and 2016 to 2021, respectively. Areas circled by red and blue lines indicate the core zone and buffer zone of a nature reserve, respectively.

标体系,并在6个国家级保护区开展了3年的生态系统联网监测示范工作。构建的指标体系根据构成生态系统的6个关键要素(生境要素、生物要素、气象要素、土壤要素、大气和水环境要素、景观要素)设置了30个监测指标及其下涵盖的监测内容,针对不同类型自然保护区(森林、草地、荒漠、湿地)生态系统组分和结构的现状和演变特征进行长期、动态化监测,并可为自然保护区保护成效评估和健康管理提供统一、标准化的基础数据。此外,根据不同自然保护区生态监测能力的差异和区域监测特点,可有针对性地选择和组合监测指标及项目,建设符合区域特点的自然保护区生态系统监测网络。同时,指标体系构建过程中,监测指标和观测方法参考了国家标准以及CERN观测规范,有助于实现自然保护区生态系统联网监测数据与国家生态系统研究等其他相关观测网络数据的共享。

目前我国拥有自然保护区12 000余处,自然保护区类型多样,保护对象既包括野生动植物、代表性生态系统,也包括人文景观和风景区。需要指出的是,本文构建的指标体系侧重于生物多样性、生态系统结构、生态系统功能等方面的监测,以体现生态系统的原真性和完整性特征,因此更加适合应用于针对野生动植物栖息地、自然生态系统、自然资源与自然景观设立的自然保护区(例如国家公园、自然保护区、自然公园等)开展生态系统联网监测。对于其他类型的自然保护区,则要根据其特点对某些指标进行删减或者加强观测。此外,指标体系中除景观要素外的大部分指标的监测多基于样地尺度,能够有效观测小尺度生态系统的变化。但是自然保护区的分布面积从数十至数千 km^2 不等,在研究上多属于景观或区域尺度,传统样地调查获得的离散数据是否或者从多大程度上能够代表整个自然保护区生态系统状况的时空演变特征,需进行科学验证。建议在下一步工作中:(1)在指标体系建设方面,还需根据不同类型自然保护区在管理目标和功能定位上的差异,加强凸显自然保护区特色的要素模块及其指标集的构建。(2)在应用示范方面,需要细化联网监测落地实施方案,特别是如何设置调查样地使其能够代表自然保护区在整个景观或区域尺度的变化特征,这也是影响联网监测数据能否有效应用于自然保护区保护成效评估与健康管理的重要问题。(3)在观测方法上,需要在传统地面调查的基础

上更多地结合遥感观测技术,包括卫星遥感、航空遥感、近地面遥感,配合搭载不同的传感器例如相机、高光谱、激光雷达等,能够在生态系统尺度、景观尺度、区域尺度对多种反映生态系统结构与功能的指标(生物多样性、生态系统生产力、生物量、植物群落垂直结构、生化组分等)开展高时空分辨率的监测,从而有效弥补传统地面调查方法空间观测尺度有限的缺点(郭庆华等, 2020)。并且,生态学研究本身也在向着更大的尺度发展(如宏观生态学、全球生态学等),亟需融入新的研究技术手段,而这些新技术未来也可应用于自然保护区的观测,实现空地一体化全方位对自然保护区生态系统进行实时、高频和多尺度的联网监测。

参考文献

- Chen LD, Liu Y, Lv YH, Feng XM, Fu BJ (2008). Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5521-5531. [陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰 (2008). 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 28, 5521-5531.]
- Chen SR, Dong GH, Yu Y, Liu HJ, Wen QQ, Lu SJ, Luo HJ (2020). The framework of ecological quality monitoring network for ecological supervision. *Environmental Monitoring in China*, 36, 1-7. [陈善荣, 董贵华, 于洋, 刘海江, 温倩倩, 陆泗进, 罗海江 (2020). 面向生态监管的国家生态质量监测网络构建框架. *中国环境监测*, 36, 1-7.]
- Cui GF (2004). Special research fields and hot spots in science of nature reserves. *Journal of Beijing Forestry University*, 26(6), 102-105. [崔国发 (2004). 自然保护区学当前应该解决的几个科学问题. *北京林业大学学报*, 26(6), 102-105.]
- Dudley N (Translated by Zhu CQ, Ouyang ZY) (2016). *Guidelines for Applying Protected Area Management Categories* (in Chinese). China Forestry Publishing House, Beijing. [朱春全, 欧阳志云 (译) (2016). IUCN自然保护区管理分类应用指南. 中国林业出版社, 北京.]
- Fancy SG, Gross JE, Carter SL (2009). Monitoring the condition of natural resources in US national parks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151, 161-174.
- Feng XJ, Mi XC, Xiao ZS, Cao L, Wu H, Ma KP (2019). Overview of Chinese Biodiversity Observation Network (Sino BON). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34, 1389-1398. [冯晓娟, 米湘成, 肖治术, 曹垒, 吴慧, 马克平 (2019). 中国生物多样性监测与研究网络建设及进展. *中国科学院院刊*, 34, 1389-1398.]
- Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai Z, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions,

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0259

- and potential solutions. *Science*, 320, 889-892.
- Guo QH, Hu TY, Ma Q, Xu KX, Yang QL, Sun QH, Li YM, Su YJ (2020). Advances for the new remote sensing technology in ecosystem ecology research. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 418-435. [郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军 (2020). 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究. 植物生态学报, 44, 418-435.]
- Han JL, Wu SH, Luan XF, Zhao GL (2012). Research on adaptive management of natural reserves. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 40, 284-287. [韩俊丽, 武曙红, 栾晓峰, 赵光亮 (2012). 自然保护区适应性管理研究. 山西农业科学, 40, 284-287.]
- He XY, Ren CY, Chen L, Wang ZM, Zheng HF (2018). The progress of forest ecosystems monitoring with remote sensing techniques. *Scientia Geographica Sinica*, 38, 997-1011. [何兴元, 任春颖, 陈琳, 王宗明, 郑海峰 (2018). 森林生态系统遥感监测技术研究进展. 地理科学, 38, 997-1011.]
- Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer TM, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin JN, Guo Q, Hautier Y, Hector A, *et al.* (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526, 574-577.
- Jackson RB, Lajtha K, Crow SE, Hugelius G, Kramer MG, Piñeiro G (2017). The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419-445.
- Kao RH, Gibson CM, Gallery RE, Meier CL, Barnett DT, Docherty KM, Blevins KK, Travers PD, Azuaje E, Springer YP, Thibault KM, McKenzie VJ, Keller M, Alves LF, Hinckley ELS, *et al.* (2012). NEON terrestrial field observations: designing continental-scale, standardized sampling. *Ecosphere*, 3, art115. DOI: 10.1890/es12-00196.1.
- Kulmala M (2018). Build a global earth observatory. *Nature*, 553, 21-23.
- Li MM, Xia WC, Wang M, Luan XF (2020). A bibliometric review of natural protected areas monitoring in China. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 2158-2165. [李苗苗, 夏万才, 王猛, 栾晓峰 (2020). 基于文献计量的中国自然保护区监测研究. 生态学报, 40, 2158-2165.]
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014). Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685-695. [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014). 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 22, 685-695.]
- Li SG, Yu GR, Yu XB, He HL, Guo XB (2015). A brief introduction to Chinese Ecosystem Research Network (CERN). *Journal of Resources and Ecology*, 6, 192-196.
- Ma KP (2015). Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1-2. [马克平 (2015). 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1-2.]
- Ma KP (2016). On key issues and possible solutions related to nature reserve management in China. *Biodiversity Science*, 24, 249-251. [马克平 (2016). 当前我国自然保护区管理中存在的问题与对策思考. 生物多样性, 24, 249-251.]
- Mirtl M, Borer ET, Djukic I, Forsius M, Haubold H, Hugo W, Jourdan J, Lindenmayer D, McDowell WH, Muraoka H, Orenstein DE, Pauw JC, Peterseil J, Shibata H, Wohner C, *et al.* (2018). Genesis, goals and achievements of Long-Term Ecological Research at the global scale: a critical review of ILTER and future directions. *Science of the Total Environment*, 626, 1439-1462.
- Moore CT, Lonsdorf EV, Knutson MG, Laskowski HP, Lor SK (2011). Adaptive management in the U.S. National Wildlife Refuge System: science-management partnerships for conservation delivery. *Journal of Environmental Management*, 92, 1395-1402.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.
- Niu D, Huang TQ, Yang P, Yu GR (2006). Chinese Ecosystem Research Network (CERN): construction experiences, future challenge and development strategy. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 6, 466-471. [牛栋, 黄铁青, 杨萍, 于贵瑞 (2006). 中国生态系统研究网络(CERN)的建设与思考. 中国科学院院刊, 6, 466-471.]
- Niu SL, Wang S, Wang JS, Xia JY, Yu GR (2020). Integrative ecology in the era of big data—From observation to prediction. *Science China Earth Sciences*, 63, 1429-1442.
- Ouyang ZY, Du A, Xu WH (2020). Research on China's protected area system classification. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 7207-7215. [欧阳志云, 杜傲, 徐卫华 (2020). 中国自然保护地体系分类研究. 生态学报, 40, 7207-7215.]
- Paganini M, Leidner AK, Geller G, Turner W, Wegmann M (2016). The role of space agencies in remotely sensed essential biodiversity variables. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2, 132-140.
- Parrish JD, Braun DP, Unnasch RS (2003). Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience*, 53, 851-860.
- Schmeller DS, Julliard R, Bellingham PJ, Böhm M, Brummitt N, Chiarucci A, Couvet D, Elmendorf S, Forsyth DM, Moreno JG, Gregory RD, Magnusson WE, Martin LJ, McGeoch MA, Mihoub JB, *et al.* (2015). Towards a global terrestrial species monitoring program. *Journal for Nature Conservation*, 25, 51-57.
- Scholes RJ, Mace GM, Turner W, Geller GN, Jürgens N, Larigauderie A, Muchoney D, Walther BA, Mooney HA (2008). Toward a global biodiversity observing system. *Science*, 321, 1044-1045.

- Skidmore AK, Pettorelli N, Coops NC, Geller GN, Hansen M, Lucas R, Mùcher CA, O'Connor B, Paganini M, Pereira HM, Schaepman ME, Turner W, Wang TJ, Wegmann M (2015). Environmental science: agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature*, 523, 403-405.
- Sykes JM, Lane AMJ (1996). *The United Kingdom Environmental Change Network: Protocols for Standard Measurements at Terrestrial Sites*. Stationery Office, London. 5-32.
- Sykes JM, Lane AMJ, George DG (1999). *The United Kingdom Environmental Change Network: Protocols for Standard Measurements at Freshwater Sites*. Centre for Ecology & Hydrology, London. 7-42.
- Théau J, Trottier S, Graillon P (2018). Optimization of an ecological integrity monitoring program for protected areas: case study for a network of national parks. *PLOS ONE*, 13, e0202902. DOI: 10.1371/journal.pone.0202902.
- Tilman D (1999). The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, 80, 1455-1474.
- Tilman D, Reich PB, Knops JMH (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 441, 629-632.
- Uychieo AJ, Arceo HO, Green SJ, De La Cruz MT, Gaite PA, Aliño PM (2005). Monitoring and evaluation of reef protected areas by local fishers in the Philippines: tightening the adaptive management cycle. *Biodiversity & Conservation*, 14, 2775-2794.
- Vihervaara P, D'Amato D, Forsius M, Angelstam P, Baessler C, Balvanera P, Boldgiv B, Bourgeron P, Dick J, Kanka R, Klotz S, Maass M, Melecis V, Petřík P, Shibata H, *et al.* (2013). Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: insights from the global ILTER sites network. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 53-66.
- Wang W, Xin LJ, Du JH, Chen B, Liu FZ, Zhang LB, Li JS (2016). Evaluating conservation effectiveness of protected areas: advances and new perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 1177-1188. [王伟, 辛利娟, 杜金鸿, 陈冰, 刘方正, 张立博, 李俊生 (2016). 自然保护区保护成效评估: 进展与展望. 生物多样性, 24, 1177-1188.]
- Watson JEM, Dudley N, Segan DB, Hockings M (2014). The performance and potential of protected areas. *Nature*, 515, 67-73.
- Wu DX, Zhang L, Song CY, Zhang SM (2019). *Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems*. China Environment Publishing Group, Beijing. [吴冬秀, 张琳, 宋创业, 张淑敏 (2019). 陆地生态系统生物观测指标与规范. 中国环境出版集团, 北京.]
- Yang L, Chen MR, Yang SY, Hu WJ, Cheng JX, Ye GQ, Ji YN, Bao SS (2014). Adaptive management of aquatic germplasm reserves. *Marine Environmental Science*, 33, 122-129. [杨璐, 陈明茹, 杨圣云, 胡文佳, 程建新, 叶观琼, 纪雅宁, 鲍姗姗 (2014). 水产种质资源保护区适应性管理研究. 海洋环境科学, 33, 122-129.]
- Yang RJ, Fu BJ, Liu GH, Ma KM (2004). Principles and methods of sustainable management of ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 23, 103-108. [杨荣金, 傅伯杰, 刘国华, 马克明 (2004). 生态系统可持续管理的原理和方法. 生态学杂志, 23, 103-108.]
- Yao SC, Min QW, Jiao WJ, He SY, Liu MC, Liu XY, Zhang BT, Li WH (2019). Establishment and application of an ecological monitoring indicator system in national parks oriented to management objectives. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8221-8231. [姚帅臣, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 刘显洋, 张碧天, 李文华 (2019). 面向管理目标的国家公园生态监测指标体系构建与应用. 生态学报, 39, 8221-8231.]
- Yu GR, He HL, Zhou YK (2018). Ecosystem observation and research under background of big data. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33, 832-837. [于贵瑞, 何洪林, 周玉科 (2018). 大数据背景下的生态系统观测与研究. 中国科学院院刊, 33, 832-837.]
- Yu GR, Zhang LM, Zhang YJ, Yang M (2021). A coordinated three-dimensional network for observing large-scale terrestrial ecosystem status changes and the consequences on resources and environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 1903-1918. [于贵瑞, 张雷明, 张扬建, 杨萌 (2021). 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. 应用生态学报, 32, 1903-1918.]
- Zhao SD (2005). United States National Ecological Observatory Network—With special references to its concepts, design and progress. *Advances in Earth Sciences*, 20, 578-583. [赵士洞 (2005). 美国国家生态观测站网络(NEON)——概念、设计和进展. 地球科学进展, 20, 578-583.]
- Zhu SY, Duan F, Li S (2017). Promoting diversity inventory and monitoring of birds through the camera-trapping network in China: status, challenges and future outlook. *Biodiversity Science*, 25, 1114-1122. [朱淑怡, 段菲, 李晟 (2017). 基于红外相机网络促进我国鸟类多样性监测: 现状、问题与前景. 生物多样性, 25, 1114-1122.]

特邀编委: 严正兵 编辑: 赵航