



•综述• 纪念30周年纪念专辑

中国生物多样性核心监测指标遥感产品体系构建与思考

任涓^{ID 1,2}, 陶胜利^{ID 2}, 胡天宇^{ID 3,4}, 杨海涛^{ID 1}, 关宏灿^{ID 1,2}, 苏艳军^{ID 3,4}, 程凯^{ID 1,2}, 陈梦玺^{ID 1}, 万华伟^{ID 5}, 郭庆华^{ID 1,2*}

1. 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息研究所, 北京 100871; 2. 北京大学城市与环境学院生态研究中心, 北京 100871; 3. 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; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要: 生物多样性的稳定维持关乎人类生存发展与地球健康。生物多样性核心监测指标(Essential Biodiversity Variables, EBVs)旨在结合地面调查与遥感技术, 为大尺度、长时间序列的生物多样性监测提供新的解决方案。然而, 目前学界仍然缺乏一套国家尺度标准化EBVs遥感监测产品数据集, 以进行生物多样性评估。本研究旨在对中国生物多样性核心监测指标遥感产品进行体系构建与思考, 首先综述了目前EBVs的遥感研究概况, 并根据EBVs研究文献的数量进行调研分析; 同时, 本文在已有遥感生物多样性产品优先标准的基础上, 添加了“可重复性”的新标准, 并据此构建了中国EBVs遥感产品体系与监测数据集的指标清单, 最终对中国EBVs遥感研究存在的问题进行思考与讨论。本研究可为中国的生物多样性遥感监测提供科学依据, 有望为中国生物多样性政策的制定提供支撑。

关键词: 生物多样性核心监测指标(Essential Biodiversity Variables, EBVs); 遥感; 生物多样性; 物种种群; 物种性状; 群落组成; 生态系统功能; 生态系统结构

任涓, 陶胜利, 胡天宇, 杨海涛, 关宏灿, 苏艳军, 程凯, 陈梦玺, 万华伟, 郭庆华 (2022) 中国生物多样性核心监测指标遥感产品体系构建与思考. 生物多样性, 30, 22530. doi: 10.17520/biods.2022530.

Ren Y, Tao SL, Hu TY, Yang HT, Guan HC, Su YJ, Cheng K, Chen MX, Wan HW, Guo QH (2022) The outlook and system construction for monitoring Essential Biodiversity Variables based on remote sensing: The case of China. Biodiversity Science, 30, 22530. doi: 10.17520/biods.2022530.

The outlook and system construction for monitoring Essential Biodiversity Variables based on remote sensing: The case of China

Yu Ren^{ID 1,2}, Shengli Tao^{ID 2}, Tianyu Hu^{ID 3,4}, Haitao Yang^{ID 1}, Hongcan Guan^{ID 1,2}, Yanjun Su^{ID 3,4}, Kai Cheng^{ID 1,2}, Mengxi Chen^{ID 1}, Huawei Wan^{ID 5}, Qinghua Guo^{ID 1,2*}

1 Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871

2 Institute of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

3 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Satellite Environmental Application Center of Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094

ABSTRACT

Background: Maintaining biodiversity is crucial to human beings. In recent years, the concept of Essential Biodiversity Variables (EBVs) has provided new insights into large-scale and long-time biodiversity monitoring. Looking at EBVs from a national monitoring perspective, some EBVs are anticipated to correspond with remote sensing-derived variables since remote sensing is the potential methodology able to offer globally qualified data with a high spatial and temporal resolution. However, the academic community still lacks consensual remote sensing variables that can correspond with

收稿日期: 2022-09-15; 接受日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(31971575)、中国科学院战略性科技先导专项(A类)(XDA19050401)和国家重点研发计划(2021YFB3901102)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: guo.qinghua@pku.edu.cn

EBVs solidly.

Aims: This study aims to (1) review the current researches on EBVs; (2) propose a new criterion called “repeatability” on the basis of the current four remote sensing biodiversity product prioritization criteria; (3) construct a list of remote sensing products for EBVs in China based on these criteria.

Problems & Prospects: First of all, there is a lack of systematic research on EBVs in China. Second, the potential of domestic satellites is not exploited enough. Third, some EBVs remote sensing products are not yet “repeatable”. In the future, there is a need to promote cooperation among scientists in the fields of ecology, remote sensing, and aerospace to further promote scientific research on the combination of EBVs and remote sensing.

Key words: Essential Biodiversity Variables (EBVs); remote sensing; biodiversity; species populations; species traits; community composition; ecosystem functioning; ecosystem structure

近年来, 人类活动与气候变化的加剧使得全球范围内的生物多样性面临前所未有的威胁(Díaz et al, 2006; Barnosky et al, 2011; Dirzo et al, 2014)。鉴于此, 全球已有196个缔约方签署了联合国《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD), 以阻止生物多样性的进一步丧失(Hoban et al, 2020)。快速、准确地评估生物多样性是支撑生物多样性保护工作的必要前提。为此, 地球观测组织生物多样性观测网络(The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network, GEO BON)提出了一套评估生物多样性的核心监测指标(Essential Biodiversity Variables, EBVs), 旨在建立全球统一、协调且有效的生物多样性监测标准。

传统的生物多样性监测主要以实地调查为主, 存在调查范围有限、耗时耗力等缺点。遥感技术可对地球系统进行大范围、长时间序列的观测, 为EBVs指标的生物多样性监测提供了可靠的数据来源。近年来, 随着遥感传感器类型的不断丰富和性能的提升, 海量可共享的卫星遥感数据得以积累; 通过遥感技术实现EBVs观测数据的获取, 在生物多样性监测研究中得到了越来越多的关注。

我国是生物多样性最为丰富的国家之一, 保护生物多样性已被纳入国家发展战略。然而, 广阔的地域以及复杂的地理空间格局为实现全国范围的生物多样性调查带来了极大的挑战。利用遥感技术进行EBVs的有效观测为上述难题提供了一种具有潜力的解决方案。采用遥感手段在整个中国范围内对生物多样性的核心监测指标进行连续监测, 能够在一定程度上填补生物多样性地面监测的时空覆盖数据空白。加强中国EBVs领域的研究, 尤其是促进EBVs指标与遥感技术研究的结合, 对于中国融入到全球生物多样性保护和评估体系将起到重要

的推动作用。目前国内相关研究主要集中在单一EBVs指标的观测上(例如: 生态系统功能中的初级生产力), 如何采用遥感技术进行更全面、更完善的EBVs监测, 仍有待深入研究。基于此, 本文系统地阐述了遥感技术在各个EBVs类别监测中的应用, 对目前遥感生物多样性产品的优先排序标准进行了更新, 构建了中国EBVs遥感监测产品体系, 并探讨了中国EBVs遥感监测中的不足与发展潜力, 为促进中国EBVs研究的进一步发展提供一定的参考支持。

1 生物多样性核心监测指标(EBVs)简介

生物多样性核心监测指标被定义为一套用于捕捉生物多样性变化的最核心的测量指标集。EBVs是进行研究、报告、管理生物多样性变化的重要测量手段, 是全球生物多样性信息基础建设的关键组成部分。它与其他环境变化监测计划相互补充, 共同构成全球监测计划的基础。EBVs指标分别从分子水平、物种水平、群落水平到生态系统水平对生物多样性进行描绘, 细分为20个子类, 可归纳为6个大类, 分别为遗传组成、物种种群、物种性状、群落组成、生态系统功能与生态系统结构(<https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>)。这些EBVs指标为评估国家和国际政策目标提供了基础, 包括联合国《生物多样性公约》制定的20项“爱知目标”(Aichi Biodiversity Targets)以及联合国2030年可持续发展议程确定的17项“可持续发展目标”(the United Nations Sustainable Development Goals, SDGs)。EBVs可以为SDGs的目标2、13、14、15提供监测数据与评判基础。相比于SDGs, EBVs针对“爱知目标”可以提供更为全面且广泛的监测数据(图1)。

2 EBVs遥感研究概况

EBVs的6大类别从不同尺度对生物多样性进行描绘, 由于它们的观测尺度、观测对象有所不同, 因此不同类别的EBVs在最佳的遥感观测方式上存在差异。由于遗传组成无法通过遥感进行直接监测, 因此本章只总结当前遥感在“物种种群”“物种性状”“群落组成”“生态系统功能”和“生态系统结构”5个类别的研究情况。

2.1 物种种群

物种种群(species populations)的动态即物种地理分布和时空丰度的变化, 代表了生物多样性及其变化的最基本的方面之一。物种种群EBVs可分为2个子类, 分别为物种分布和物种丰度。物种分布与丰度的变化是生态系统功能与服务变化的关键驱动因素。物种分布、物种丰度以及它们的空间聚集或物种属性的组合, 共同代表了物种种群EBVs类别(Jetz et al, 2019)。

传统的物种种群调查数据存在时空覆盖不连

续等问题(Proença et al, 2017)。因此, 在没有长时间尺度和大范围生物多样性监测计划的情况下, 基于遥感的物种分布/丰度模型(species distribution models/species abundance models, SDMs/SAMs)可以提供一种替代性的、在较大时空尺度上的物种分布与丰度估算。卫星遥感平台能够获取全球覆盖范围、具有高重访周期的中高分辨率数据, 如MODIS、Landsat、Sentinel、GF等系列卫星数据。这些数据可以提供气候、地形等环境信息, 作为SDMs/SAMs的输入。与此同时, 遥感数据获取的生态系统功能属性能够较为灵敏地反映生态系统对环境变化的响应, 同样可以作为模型的预测因子, 它们提供了与碳(如植被绿色度)、水循环(如蒸散发)、能量平衡(如地表温度和反照率)有关的生态系统过程和功能的信息(Arenas-Castro et al, 2019)。将生态系统功能属性纳入SDMs/SAMs可以提高预测能力和可转移性。遥感数据的物种分布/丰度模型为入侵物种、珍稀物种的分布与丰度以及生物多样性研究提供了更为准确的参考。

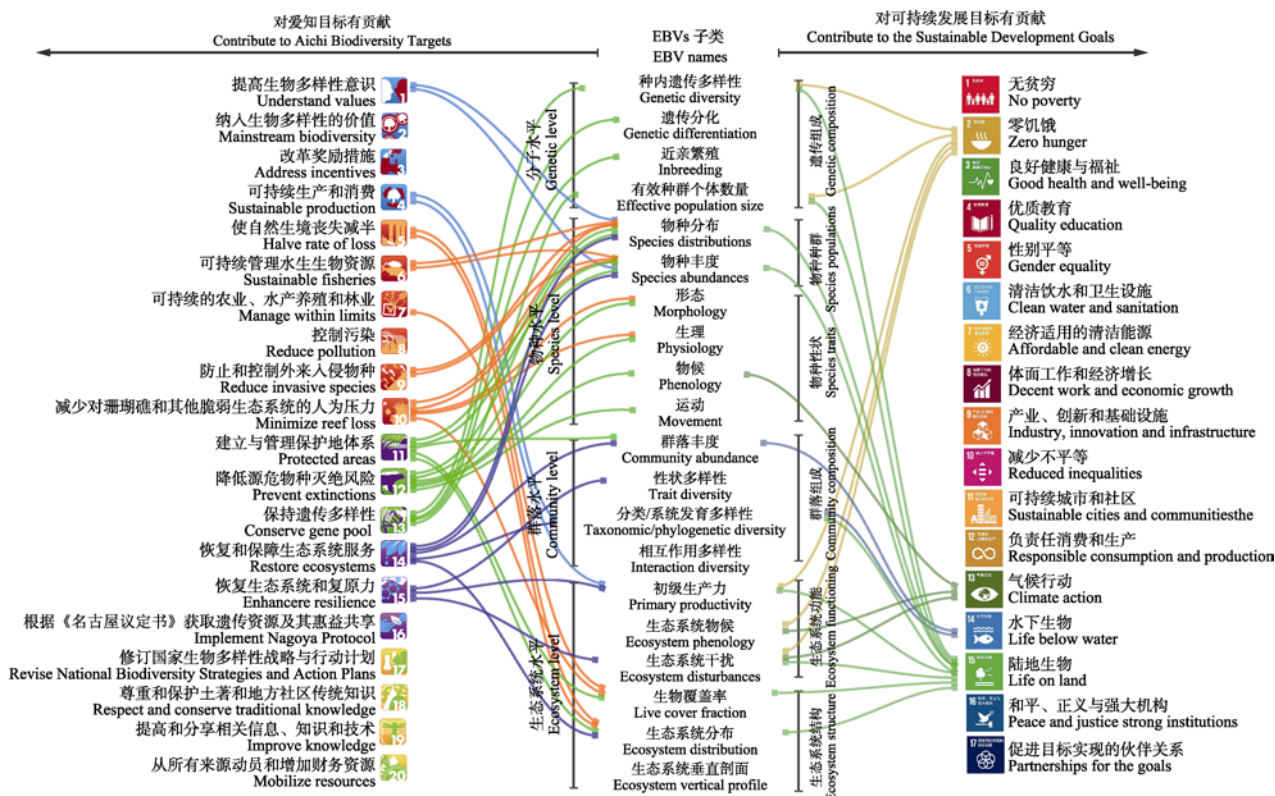


图1 EBVs子类与《生物多样性公约》爱知目标及可持续发展目标的关系

Fig. 1 The relationship of Essential Biodiversity Variables (EBVs) names to Aichi Biodiversity Targets and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs)

2.2 物种性状

物种性状(species traits)被定义为一个物种所有生物的特征,如重量、高度等。目前,物种性状EBVs被分为4个子类,分别是形态、生理、物候、运动。在物种性状的遥感监测中,可能会出现与群落组成、生态系统结构和功能EBVs子类的遥感研究相混淆的情况。因此,首先要界定物种性状的监测对象——只有对生物个体或由同种生物组成的种群的性状监测可以视为物种性状的监测,而包含多物种的性状监测则属于群落组成、生态系统结构和功能EBVs子类的研究范围。

在物种性状的遥感监测中,搭载不同传感器的近地面遥感平台可以获取较高的空间分辨率,成为“物种性状”测量中最常用的观测平台。激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)可以快速、准确地获取地物的三维点云数据,因此可以获取多种表征物种形态性状的参数(郭庆华等, 2014)。以树木为例,可以获取个体到种群的树高、冠幅、胸径、材积、枝干形状等形态学信息(Dalla Corte et al, 2020; Slavík et al, 2020; Liu et al, 2021; Pinton et al, 2021; Xu et al, 2021)。高光谱传感器具有十分丰富的光谱信息,其纳米级光谱分辨率为物种的叶绿素含量、叶面积指数、元素含量等生理生化性状的精确探测提供了可能(Ye et al, 2018; Jiao et al, 2021; Zhang JJ et al, 2021)。近地面遥感平台(无人机、高塔等)搭载物候相机,构建物候观测网络,能够探测到植物物候更加精细的变化,可以达到每日或每半日的时间分辨率(Hufkens et al, 2012; Zhao et al, 2012; Hmimina et al, 2013; Nasahara & Nagai, 2015; Liu Y et al, 2017)。无人机、飞艇等平台搭载高分辨率影像与视频传感器,能够对陆地大型动物迁徙模式进行调查(Su et al, 2018);也能够对浅海中海洋动物的捕食行为(Butcher et al, 2021)以及运动模式(Ruiz-García et al, 2020)进行监测。

机载平台搭载激光雷达与成像光谱仪,能够对区域尺度的物种形态与生理性状进行相对精细的监测。针对全球尺度的“物种性状”监测,目前Worldview、GF等系列卫星具有较高的空间分辨率,然而想要在全球尺度上进行丰富的物种性状监测,仍然需要提出新的星载成像光谱仪与LiDAR发射计划来弥补这一需求与技术之间的差距(Skidmore

et al, 2021)。

2.3 群落组成

群落组成(community composition)主要描述的是定义空间区域内(例如网格单元或生态系统类型的整个范围)生态系统的生物组成多样性,包括4个子类,分别为群落多度、分类/系统发育多样性、性状多样性以及相互作用多样性。

光谱变异假说(spectral variation hypothesis, SVH)为“群落组成”的遥感研究提供了理论支撑。SVH是将光谱异质性或变异性(遥感信号的空间变异性)与环境异质性联系起来,作为物种多样性的一种预测指标(Wang & Gamon, 2019)。Asner和Martin (2016)提出了光谱组学,将植物冠层性状和分类/系统发育与其光谱学特征联系起来,为群落组成的遥感研究提供了理论基础。

机载平台搭载成像光谱仪是“群落组成”研究中应用广泛的一种观测方式(Féret & Asner, 2014; Gholizadeh et al, 2018),主要以冠幅较大的森林作为研究对象,可对群落多度、分类/系统发育多样性、性状多样性3个“群落组成”的EBVs子类进行研究。激光雷达提供的三维点云信息能够精细地定位群落的个体信息,因此有众多研究同时结合高光谱与激光雷达,能够获取更为准确的群落组成结果(Hakkenberg et al, 2018; Zhao et al, 2018)。虽然目前已有部分研究通过机载平台进行了草地群落组成的量化(Gholizadeh et al, 2018; Rossi et al, 2022),但草地植物个体规模小,物种混杂程度高,机载平台并不是最佳的草地群落组成观测平台。而无人机由于其平台飞行高度较低,能够提供更高空间分辨率的观测数据,因此被越来越多地应用到草地群落组成的研究中(Conti et al, 2021; Zhao et al, 2021)。

结合卫星遥感数据与SVH能够估算大尺度的群落多度以及 α 、 β 多样性等指标(Rocchini et al, 2016; Madonsela et al, 2017; Rocchini et al, 2021; Sun et al, 2021),然而由于大部分卫星遥感数据的光谱分辨率有限,因此在精度上存在一定的局限性。与此同时,众多研究利用卫星遥感获取生境因子以及生态系统功能属性,并与实地测量的植被、哺乳动物、鸟类等物种多样性数据进行建模,从而推测整个研究区域内的物种多样性与分布格局。针对植被性状多样性的研究中,越来越多的学者探讨了卫星遥感

在功能多样性研究上的可行性(Jetz et al, 2016; Rocchini et al, 2018; Rossi et al, 2020; Frye et al, 2021)。目前已有Sentinel系列、GF系列、GEDI等卫星均可用于植被性状多样性的研究,随着地球观测的不断发展,植被性状多样性的研究将不断完善。

群落的种间相互关系包括竞争、捕食、互利共生等,是构成生物群落的基础(牛翠娟等, 2007)。虽然群落中物种之间的相互作用多样性通过遥感观测存在一定的难度,但仍有少量文献对该领域进行了研究。遥感与GPS结合能够对捕食者-食草动物-植物之间的相互作用进行探究(Burkepile & Parker, 2017)。激光雷达能够记录高点位密度、高精度的森林冠层数据,通过探测树冠尺寸和结构,能够判断树木个体拦截光线和遮蔽邻近树木的能力,并探测竞争导致的树冠形态的变化(Brisson, 2001; Grams & Andersen, 2007; Li et al, 2014)。

2.4 生态系统功能

生态系统功能(ecosystem functioning)指生态系统所体现的各种功效或作用,主要表现在物质生产、能量流动、物质循环和信息传递等方面(方精云和刘玲莉, 2021)。在GEOBON对该类别的描述中分为初级生产力、生态系统物候、生态系统干扰3个子类。

在2.2节“物种性状”提到的物候与初级生产力等相关性状的监测中,主要观测对象为个体和种群。而本节主要关注生态系统水平的监测,因此相较于近地面与机载平台,卫星遥感具有更大的观测范围,能够对生态系统进行宏观且全面的监测,其中星载多光谱遥感数据是生态系统功能研究中最常用的数据来源。

目前,针对初级生产力的EBVs遥感研究中,总/净初级生产力(gross/net primary production, GPP/NPP)是反映初级生产力的直接指标,而叶面积指数、叶绿素含量、光合有效辐射分量(fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FAPAR)、叶片营养指标(如氮磷钾含量、比叶面积)等一系列间接指标也能够一定程度上反映初级生产力。根据上述指标,结合卫星多光谱遥感数据与站点通量数据,采用经验模型、物理模型、机器学习模型等,现有研究已生产了一系列的全球尺度的遥感产品(Yu et al, 2018; Fang et al, 2019)。

生态系统物候是判断生态系统应对气候变化的有力指标。在过去几十年中,通过卫星采集的遥感数据,已开发了众多的地表物候产品,目前这些地表物候产品的数据源包含AVHRR、MODIS、Sentinel-2、VIIRS等卫星数据。MODIS具有较高的时间分辨率(每日),因此以MODIS为数据源的物候产品类型较多,如MODIS全球物候产品(MCD12Q2)等; AVHRR (1981年开始)与MODIS (2001年开始)相比具有更长期、多年代的数据,结合AVHRR与MODIS能够获取更长时间序列的物候产品(Reed et al, 1994; Ganguly et al, 2010)。由于Sentinel-2与VIIRS具有较高的分辨率,因此它们在生态系统物候监测中具有很大的潜力(Liu LL et al, 2017; Vrieling et al, 2018)。

生态系统干扰通常会导致生态系统的功能突然偏离其正常动态,其类型包括水、火、雪、病虫害等造成的自然灾害,也包括砍伐、放牧、土地利用结构改变等人为干扰(陈利顶和傅伯杰, 2004)。目前公开的星载遥感数据(Sentinel-1/-2、Landsat TM/ETM+/OLI、AVHRR和MODIS)能够在区域和全球尺度绘制大规模林分范围和位置,并通过探测植被绿度、叶面积以及水分的变化,从而反映如火灾、土地利用变化、砍伐等干扰的强度与范围;且自上世纪70年代起就可获取Landsat数据,可以进行长时间序列的干扰以及生态系统恢复的研究(Frolking et al, 2009; Xiao et al, 2019)。激光雷达、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等遥感数据可以对上述可见近红外数据进行补充,它们能够对生态系统扰动造成的生物量和冠层结构的变化进行更准确的评估(Frolking et al, 2009)。目前公开的生态系统干扰的数据产品有火灾(Justice et al, 2002; Hargrove et al, 2009; Jolly et al, 2015)、洪水(Tellman et al, 2021)、病虫害(Meddens & Hicke, 2014)、土地利用变化(Liu et al, 2020)等。

2.5 生态系统结构

生态系统结构(ecosystem structure)包含了形成并维持生物多样性的生态系统结构的各类参数。在GEOBON对生态系统结构EBVs类别的描述中,分为3个有代表性的子类:生物覆盖度、生态系统分布和生态系统垂直剖面。

与生态系统功能的遥感观测类似,在生态系统

结构的观测中, 卫星仍然是主要的监测平台。植被为众多生物提供栖身之处, 因此对于生物覆盖度来说, 植被覆盖度是陆地生态系统中最受关注的指标。在植被覆盖度研究中, 多光谱卫星为主要的获取来源, 基于经验方法、光谱混合分析方法以及物理方法这3种主流的大尺度植被覆盖度估算方法, 已有研究生产了多种植被覆盖度全球产品, 如GEOV1、CYCV31等(Camacho et al, 2013; Filipponi et al, 2018)。

生态系统分布主要描述生态单元的水平分布, 表述生态系统分布特征的EBVs遥感产品有土地覆盖类型分布、植被类型分布与栖息地异质性等, 能够从不同方面对生态系统的水平分布进行描绘。以多光谱为代表的被动光学卫星遥感是目前土地覆盖类型与植被类型调查的主要数据源。其他类型的遥感数据(如SAR、高光谱、LiDAR)作为辅助数据, 现有研究方法多采用机器学习算法(Su et al, 2020; Zhang X et al, 2021)。而在栖息地异质性的研究中, 主要通过遥感数据计算纹理或者空间变异信息, 从而获取全球的栖息地异质性遥感数据产品(Tuanmu & Jetz, 2015)。

生物覆盖度子类与生态系统分布子类描述的是生态系统在水平方向的特征, 而生态系统垂直剖面描述的是生态系统在垂直方向的特征。对植被面积指数(Plant Area Index Profile, PAI)剖面的研究, 已经超出了传统光学传感器的能力, LiDAR作为绝佳的数据获取手段能够计算获取植被面积指数的垂直分布(Liu J et al, 2017)。由于星载激光雷达数据的足迹覆盖有限, 不易获取生态系统的剖面信息, 因此植被高度作为重要的垂直信息备受关注。众多学者采用卫星光学影像(MODIS、Sentinel-2等)、雷达影像(PALSAR、Sentinel-1等)或二者的结合, 以星载激光雷达足迹作为输入数据, 通过参数回归或机器学习模型进行大范围的冠层高度数据产品的获取(Potapov et al, 2021); 也有研究开发新的基于神经网络的插值方法, 采用ICESat-2与GEDI激光雷达数据结合海量地面与无人机激光雷达数据, 得到了国家尺度的高精度森林冠层高度产品(Liu et al, 2022)。

3 EBVs文献数量调研分析

以“Essential Biodiversity Variables”为关键词在

Web of Science上对研究年份进行统计, 可以看出自2013年EBVs概念提出以来, 研究热度不断上升; 鉴于遥感技术是大尺度EBVs研究的有效手段, 以“remote sensing” + “Essential Biodiversity Variables”为主题词进行搜索统计, 发现相关研究数量逐年攀升, 但整体数量仍然较小, 如图2所示。

将“Essential Biodiversity Variables”作为主题词, 以国家为单位进行论文数量统计, 中国的论文数量位列世界第五, 在国际上处于较为领先的水平。然而相对于其他国家来说, 采用遥感手段进行EBVs的研究并未得到我国学者足够的重视(图2)。在中国, “remote sensing” + “Essential Biodiversity Variables”的研究文章数量, 仅占该领域研究数量的5%。

与此同时, 本文通过结合EBVs子类名称与“remote sensing”作为关键词进行文献搜索(如“species distributions” + “remote sensing” “primary product” + “remote sensing”), 并按照EBVs大类进行统计, 如图3所示。在文献检索过程中, 其中由于物种性状的子类可能与生态系统功能的子类存在一定的混淆, 因此在物种性状子类的文献调研中, 增加“species”作为关键词(例如在“morphology EBVs”子类的文献调研中, 检索关键词为“morphology” + “remote sensing” + “species”)。与物种以及群落层面的遥感研究相比, 我国在生态系统层面的遥感研究较为深入。我国针对EBVs子类的遥感研究数量占全球EBVs子类的遥感文章总数的32%。可以看出, 我国对于EBVs子类的遥感研究相对较为深入。

然而, 相较于EBVs子类与遥感相结合的研究, 以“Essential Biodiversity Variables” + “remote sensing”为主题词, 我国的研究仅占全球研究数量的5%, 可以推断目前这些研究彼此相对割裂, 并未从EBVs指标角度进行系统的考虑。

4 构建中国EBVs遥感监测产品体系

4.1 遥感生物多样性产品的优先排序标准更新

随着人类活动与气候变化的加剧, 生物多样性正经历着前所未有的快速变化, 因此实现宏观、周期性调查与观测对于了解中国生物多样性现状以及变化具有十分重要的意义。然而目前我国十分缺乏系统性的EBVs遥感研究, 尤其缺乏一套能够覆盖全国的EBVs遥感监测数据集指标。

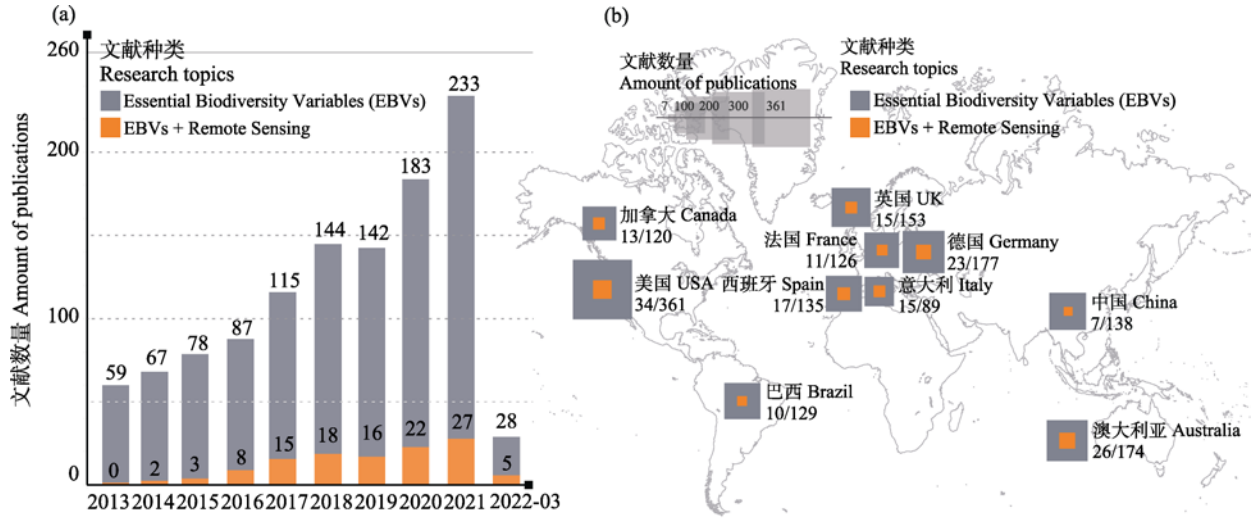


图2 基于文献汇总的生物多样性核心监测指标(EBVs)遥感研究发展情况

Fig. 2 The overview of the publications on Essential Biodiversity Variables (EBVs) field and remote sensing research within EBVs

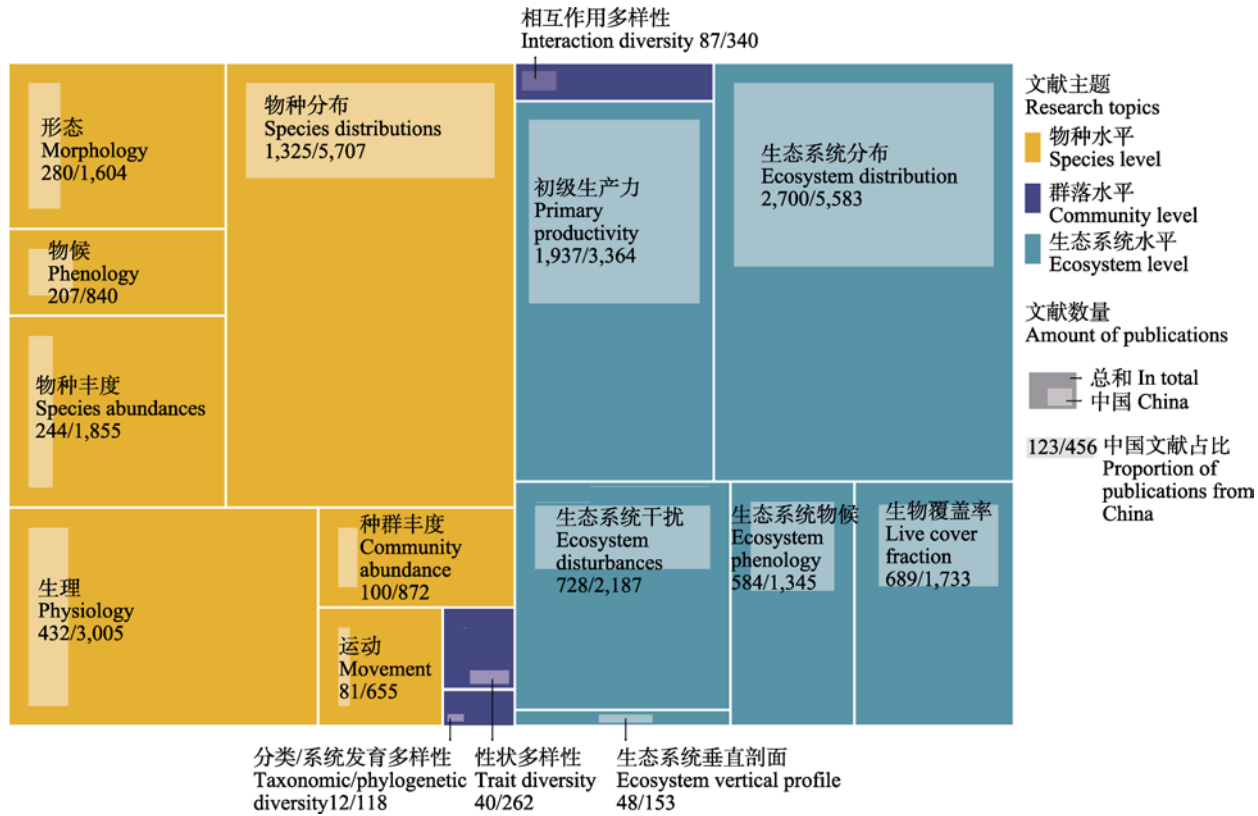


图3 中国生物多样性核心监测指标(EBVs)子类遥感研究文章数量占比情况

Fig. 3 The proportion of the publications from China in the field of Essential Biodiversity Variables (EBVs) names

Skidmore 等(2021)提出了四项原则(表1原则1-4),帮助对EBVs遥感产品进行选择,但这四项原则多聚焦于遥感数据在生物多样性监测中的有效性,未直接考虑可重复性这一指标。对生物多样性

的监测而言,单一时期的本底调查固然重要,但是周期性的生物多样性监测对生物多样性变化探测及保护具有非常重要的意义。遥感产品可按照预期进行规律性的获取也是EBVs遥感监测数据集的重

要筛选原则, 因此本文将数据的“可重复性”放到与上述四项原则并列的位置(表1原则5)。“可重复性”主要描述的是遥感生物多样性产品在未来预期能够按照一定时间分辨率获取的能力。本文根据Skidmore等(2021)所提出的四项原则对目前覆盖中国的EBVs遥感产品进行了筛选, 并对它们的“可重复性”进行打分(表2)。“可重复性”的评分范围在1–3分。1分表示“可重复性”好, 该项遥感生物多样性产品具有成熟的遥感卫星基础, 完善的数据处理能力, 目前已存在权威机构采用统一的标准并以一定的时间间隔进行较高质量的生产, 且在未来数年内能够保持该频率进行生物多样性遥感产品的生产。3分表示“可重复性”较差, 目前完全缺乏相关的遥感卫星基础设施, 尚不具备该数据产品的生产能力, 还需要大量的研究和开发工作。

4.2 中国生物多样性核心遥感监测产品指标集

本文提出一套可参考的中国生物多样性核心监测遥感产品指标集(表2)。该指标集能够从多个方面进行生物多样性要素状态和趋势的监测。经过Skidmore等(2021)提出的四项优先原则的筛选, 大

多数生物多样性遥感产品的“可重复性”评分较高, 然而也存在一些“可重复性”较低的产品, 如森林冠层高度、植被类型、叶片性状仅获得了2.5分的评分。

相对于其他EBVs遥感产品, 获取可重复的国家尺度森林冠层高度与植被类型产品对于生物多样性的动态描述具有重要作用, 然而难度较大。森林冠层高度是了解森林生物多样性的起源和维持机制的重要遥感产品, 然而在目前的森林冠层高度生产中存在遥感产品的饱和问题以及星载激光雷达脚点数据的离散分布问题, Liu等(2022)提出了一种深度学习指导的空间内插(Neural Network Guided Interpolation) NNGI模型, 借助140 km²无人激光雷达数据进行NNGI的训练, 最终绘制了中国30 m分辨率的森林冠层高度产品。

传统的植被图绘制依赖大量的植被实地调查数据, 通过专家经验, 结合文献史料记载与地形图, 最终综合地图制图学与生态学知识实现植被图的绘制。我国第一代1:100万植被图从20世纪80年代启动, 通过三代人200多位研究人员的努力, 耗

表1 遥感生物多样性产品的优先排序标准更新(修改自Skidmore等(2021))

Table 1 Updated remote sensing biodiversity product prioritization criteria (revised from Skidmore et al (2021))

序号 Number	优先原则 Prioritization criteria	描述 Description
1	关联性 Relevance	遥感生物多样性产品的使用目的与方法决定了关联性的强弱。主要关注以下方面与遥感生物多样性产品的相关性: (1)管理问题; (2)为CBD目标提供信息; (3)为SDGs提供信息; (4)为生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)的风险评估过程提供数据。It is known who wants the remote sensing biodiversity product, what they will do with it and how it will be used. The remote sensing biodiversity product is relevant: (1) for management questions; (2) to inform the CBD targets; (3) to inform the SDGs; and (4) to provide data for the IPBES risk assessment processes.
2	可行性 Feasibility	可行性这一标准考虑了遥感数据的可用性、获取数据的便利性、遥感在时空尺度的完整性以及数据整合与分析的便利性和经济性。This criterion considers the availability of remote sensing data, the ease of access to such data, the completeness of remote sensing in space and time and the ease and affordability of data integration and analysis.
3	准确性(遥感状态) Accuracy (remote sensing status)	准确性是指衡量某一遥感生物多样性产品观测准确性的标准, 该标准考虑了遥感数据以及获取精准遥感生物多样性产品技术的有效性。A measure of the current activity for the accurate observation of a given remote sensing biodiversity product. This criterion considers the effectiveness of remote sensing data and techniques to achieve an accurate and precise value of the remote sensing-enabled biodiversity product.
4	成熟度(遥感状态) Maturity (remote sensing status)	成熟度这项标准指的是目前遥感生物多样性产品是否成熟且其程度如何, 即有能力生产遥感生物多样性产品的组织/机构是否可以向资助机构提出产品生产建议, 以及该项任务完成的难度如何。Maturity refers to the maturity and status of the current remote sensing biodiversity products. Institutions/organizations with hopes to generate remote sensing biodiversity products can be identified and/or proposed to a funding body.
5	可重复性(新添加) Repeatability (new addition)	可重复性主要描述某一遥感生物多样性产品在未来预期能够按照一定时间分辨率获取的能力, 即评判能否按照预期规律性获取遥感生物多样性产品及该需求的难度。Repeatability mainly describes the ability of a certain remotely sensed biodiversity product to be expected to be accessible at a certain temporal resolution in the future, i.e., it judges whether the remotely sensed biodiversity product can be accessed with the expected regularity and the difficulty of that demand.

表2 能够免费获取的覆盖中国的生物多样性核心监测指标(EBVs)遥感产品指标集

Table 2 Open access remote sensing product indicators for Essential Biodiversity Variables (EBVs) monitoring in China

遥感产品 Remote sensing product	数据名称 Data name	卫星平台 Satellite platform	获取时间 Acquire time	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率/ 比例尺 Spatial resolution /Scale	可重复性 Repeatability	下载链接 Download link
生态系统功能 Ecosystem functioning							
叶面积指数 LAI	MCD15A3H v006	MODIS	2000–present	4 d	500 m	1	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd15a3hv006/
	CGLS-LAI300	Sentinel-3/PROBA-V	2014–present	10 d	300 m		https://land.copernicus.eu/global/products/lai
	GLASS-LAI	AVHRR	1981–2018	8 d	0.05°	1	http://www.glass.umd.edu/
光合有效辐射分量 FAPAR	MCD15A3H v061	MODIS	2002–present	8 d	500 m		https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd15a2hv061/
	CGLS-FAPAR 300	Sentinel-3/PROBA-V	2014–present	10 d	300 m		https://land.copernicus.eu/global/products/fapar
	GLASS-FAPAR	AVHRR	1981–2018	8 d	0.05°		http://www.glass.umd.edu/
蒸散 ET	MOD16A2 v006	MODIS	2001–present	8 d	500 m	1	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/
	GLASS-ET	MODIS	2000–2018	8 d	1 km, 0.05°	1	http://www.glass.umd.edu/Download.html
净初级生产力 NPP	MOD17A3Hv006	MODIS	2001–present	Yearly	500 m		https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hv006/
总初级生产力 GPP	MOD17A2HG F v061	MODIS	2000–present	8 d	1 km	1	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hgfv061/
	NIRv-GPP	AVHRR	1982–2018	Monthly	0.05°		https://doi.org/10.12199/nescd.ecodb.2016YFA0600200.02.002
	GLASS-GPP	MODIS	2000–2020 2000–2020	8 d	500 m, 0.05°		http://www.glass.umd.edu/
叶绿素荧光 SIF	OCO2_L2_Lite_SIF 10r	OCO-2	2014–2022	16 d	2.25 km	1	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=OCO2%20SIF&page=1
	OCO2_L2_Lite_SIF 11r	OCO-2	2019–2022	16 d	2.25 km		https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=OCO2%20SIF&page=1
	OCO3_L2_Lite_SIF 10r	OCO-3	2019–2022	16 d	2.25 km		https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=OCO2%20SIF&page=1
	Tansat-SIF	TanSat	2017–2019	Daily	2 km		http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=3695497&docId=10126
	Chl _{leaf}	ENVISAT-MERIS	2011	7 d	300 m	2	https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111479
物候 Phenology	MCD12Q2 v006	MODIS	2001–2019	Yearly	500 m	1.5	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q2v006/
叶片性状 Leaf traits	叶片磷含量 LPC 比叶面积 LA 叶片干物质含量 LDMC	Global maps	trait2015	–	–	1 km, 3 km	2.5 https://www.try-db.org/TryWeb/Data.php#59
生物量 Biomass	China forest Aboveground Biomass (AGB) map	ICESat/GLAS, MODIS	2004	–	1 km	2	http://www.3decology.org/dataset-software/
	Global Aboveground Biomass (AGB) Map (version: V02)	MODIS/GLAS	2005	–	1 km		http://www.glass.umd.edu/

表2 (续) Table 2 (continued)

遥感产品 Remote sensing product	数据名称 Data name	卫星平台 Satellite platform	获取时间 Acquire time	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率/ 比例尺 Spatial resolution /Scale	可重复性 Repeatability	下载链接 Download link
生态系统结构 Ecosystem structure							
植被连续覆盖/全球森林覆盖变化 VCF/GFCC	Global 2010 Tree Cover (30 m)	Landsat	2010	—	30 m	2	https://glad.umd.edu/dataset/global-2010-tree-cover-30-m
土地覆盖 LC	MCD12Q1 v006	MODIS	2001–2020	Yearly	500 m	1.5	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/
	GlobeLand30	Landsat	2000, 2010, 2020	—	30 m		http://www.globallandcover.com/
	FROM_GLC30	Landsat	2010, 2015, 2017	—	30 m		http://data.ess.tsinghua.edu.cn/
	GLC_FCS30	Landsat	1985–2020	Every 5 years	30 m		https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30?lang=zh_CN
火烧迹地 BA	MCD64A1 v006	MODIS	2000–present	Monthly	500 m	1.5	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd64a1v006/
	Burnt Area 300m	Sentinel-3/OLCI, SLSTR, PROBA-V	2014–2020	10 d/monthly	300 m		https://land.copernicus.eu/global/products/ba
植被覆盖度 FCover	FCover	Sentinel-3/OLCI, PROBA-V	2014–present	10 d	300m	1.5	https://land.copernicus.eu/global/products/fcover
	Fractional Vegetation Coverage (FCover) (version: V40)	MODIS	2000–2018	8 d	500 m		http://www.glass.umd.edu/
冰面范围 IE	MODIS/Terra Sea Ice Extent 5-Min L2 Swath 1km, Version 6	MODIS	2000–present	5 mins	1 km	1	https://nsidc.org/data/mod29/versions/6#anchor-1
	SMOS L3 Sea Ice Thickness	SMOS	2010–present	Daily	12.5 km		https://earth.esa.int/eogateway/catalog/smos-l3-sea-ice-thickness
栖息地异质性 Habitat heterogeneity	Global Habitat Heterogeneity	MODIS	2005	—	1 km, 5 km, 25 km	2	http://www.earthenv.org/texture
森林冠层高度 Forest canopy height	Forest tree height map of China	GEDI, ICESAT2	2019	—	30 m	2.5	http://www.3decology.org/dataset-software/
植被类型 Vegetation type	An updated Vegetation Map of China (1 : 1000,000)	Landsat	2018	—	1 : 1,000,000	2.5	http://www.3decology.org/dataset-software/

LAI, Leaf area index; FAPAR, Fraction of photosynthetically active radiation; ET, Evapotranspiration; NPP: Net primary production; GPP: Gross primary productivity; SIF, Solar-induced chlorophyll fluorescence; LPC, Leaf phosphorus content per leaf dry mass; SLA, specific leaf area; LDMC, Leaf dry mass per leaf fresh mass; VCF/GFCC, Vegetation continuous fields/global forest cover change; LC, Land cover; BA, Burnt area; FCover, Fractional vegetation cover; IE, Ice extent.

时30年于2007年完成。2020年,通过“众源数据采集-变化检测分类-专家知识”的植被测绘策略进行了中国1:100万植被图的现实性更新。在2022年末,中国新一代1:50万植被图有望完成。

上述最新研究成果的数据更新能够对EBVs遥感监测数据集进行有力补充。

5 中国EBVs研究存在问题与展望

5.1 存在问题

(1)我国缺乏对EBVs的系统性研究。EBVs为记录 and 量化全球生物多样性变化提供了一种具有潜力的解决方案,中国科学家在全球EBVs研究中起

到了积极的作用。遥感作为EBVs的重要的观测手段,国内学者结合遥感针对如初级生产力、生态系统物候等EBVs子类进行了较为深入的研究,然而,目前这些研究之间存在割裂,缺乏从宏观的EBVs视角进行系统性的归纳和有效的整合。而相比于生态系统层次的研究,我国在物种层面和群落层面的EBVs子类研究有所不足,需要更多的专家学者投入来推动我国相应领域的EBVs研究。

(2)国产卫星的潜力有待深入挖掘。在上述展示的覆盖中国的EBVs遥感产品中,数据源大多来自于国外的卫星遥感产品,而国产卫星进行EBVs遥感产品生产以及研究相对较少。近年来,随着我国卫星遥感技术的不断发展,与国外的遥感技术水平逐渐缩小,发射了一系列的陆地资源观测卫星。目前国产系列卫星覆盖了从全色、多光谱到高光谱,从光学到雷达等不同传感器类型(表3)。近20年来,国产卫星积累了大量的遥感数据,在中国EBVs遥

感产品的生产中存在巨大潜力。国产卫星中的亚米级高空间分辨率卫星(如高分二号)能够满足获取“物种性状”EBVs遥感产品的空间分辨率要求。高光谱卫星(如高分五号、HJ-1A)具备描绘“群落组成”与“生态系统功能”的能力。SAR卫星(如高分三号)能够为“生态系统功能”与“生态系统结构”提供可靠的数据支持。具有高时间分辨率、中/高空间分辨率的全色多光谱卫星在目前的国产卫星中数量最多,能够对“群落组成”与“生态系统功能”EBVs子类进行全国范围内的持续监测。

(3)部分EBVs遥感产品目前尚未具备“可重复性”,尤其是描述生态系统结构EBVs子类的部分数据产品。NASA、ESA凭借其丰富的卫星数据,生产了众多可周期性获取的EBVs遥感数据产品,如NPP、ET等。然而在生态系统结构EBVs类别,尤其是生态系统垂直结构方面,遥感产品数量稀少。如表2所示,目前国内生产了森林树高产品以及植被

表3 有潜力进行生物多样性核心监测指标(EBVs)遥感数据获取的国产卫星及其主要参数介绍
Table 3 The specification of China's satellites that has the potential to acquire EBVs-related remote sensing products

卫星名称 Satellite name	发射日期 Launch time	轨道高度 Orbit height (km)	重访周期 Revisit capacity	幅宽 Swath width (km)	传感器类型 Sensor type	波段 Number of bands	空间分辨率 Spatial resolution (m)
高分系列 GF series							
高分一号 GF-1	2013/4/26	645	4 d	60	全色/多光谱 PAN/MS	5	2/8
			2 d	800	宽视场多光谱 WV-MS	4	16
高分二号 GF-2	2014/8/19	631	5 d	45	全色/多光谱 PAN/MS	5	0.8/3.2
高分三号 GF-3	2016/8/10	755	2 d	5-650	合成孔径雷达 SAR	1	1-500
高分四号 GF-4	2015/12/29	36,000	20 s	400	多光谱 MS	5	50
				400	中红外 MWIR	1	400
高分五号 GF-5	2018/5/9	705	5 d	60	高光谱 HS	330	30
				60	多光谱 MS	12	20/40
高分六号 GF-6	2018/6/2	645	4 d	90	全色/多光谱 PAN/MS	5	2/8
				800	宽视场多光谱 WV-MS	8	16
高分七号 GF-7	2019/11/3	505	2 d				
			5 d	20	双线阵相机 DLC	1	0.8/0.65
				20	多光谱 MS	4	3.2
				1.6	激光测高仪 LA	1	0.1
高分一号 02/03/04星 GF-1-02\03\04	2018/3/31	645	2 d	66	全色/多光谱 PAN/MS	5	2/8

表3 (续) Table 3 (continued)

卫星名称 Satellite name	发射日期 Launch time	轨道高度 Orbit height (km)	重访周期 Revisit capacity	幅宽 Swath width (km)	传感器类型 Sensor type	波段 Number of bands	空间分辨率 Spatial resolution (m)
资源系列 ZY series							
资源一号01/02星 ZY-1-01/02	1999/10/14	778	3 d	113	CCD相机	5	20
			3 d	890	CCD 宽视场多光谱 WFV-MS	2	258
			26 d	119.5	红外多光谱 MS-IR	4	78/156
资源一号02B星 ZY-1-02B	2007/12/19	778	3 d	27	高分辨率相机 HD	1	2.36
				113	CCD相机	5	20
				890	CCD 宽视场多光谱 WFV-MS	2	258
资源一号02C星 ZY-1-02C	2011/12/22	780	3 d	54	高分辨率相机 HD	1	2.36
				60	全色/多光谱 PAN/MS	4	5/10
资源一号04星 ZY-1-04	2014/12/7	778	3 d	60	全色/多光谱 PAN/MS	4	5/10
			26 d	120	红外多光谱 MS-IR	4	40/80
			26 d	120	多光谱 MS	4	20
			3 d	866	宽视场多光谱 WFV MS	4	73
					全色/多光谱 PAN/MS	9	2.5/10
资源一号02D星 ZY-1-02D	2019/12/12	778	3 d	115	全色/多光谱 PAN/MS	9	2.5/10
				60	高光谱相机 HS	166	30
资源三号01星 ZY-3-01	2012/1/9	506	5 d	52	双线阵相机 DLC	1	3.5
				52	全色/多光谱 PAN/MS	5	2.1/5.8
资源三号02星 ZY-3-02	2016/5/3	505	3-5 d	51	双线阵相机 DLC	1	2.5
			3 d	51	全色/多光谱 PAN/MS	4	2.1/5.8
资源三号03星 ZY-3-03	2020/7/25	505	3-5 d	51	双线阵相机 DLC	1	2.5
			3 d	51	全色/多光谱 PAN/MS	4	2.1/5.8
			5 d	0.07	激光测高仪 LA	1	1
环境一号 HS-1							
环境一号 A星 HS-1A	2008/9/6	649	4 d	360	CCD相机	4	30
				50	CCD 高光谱 HS	115	100
环境一号 B星 HS-1B	2008/9/6	649	4 d	360	CCD相机	4	30
				720	CCD 红外多光谱 MS-IR	4	150/300
环境一号 C星 HS-1C	2012/12/9	499	4 d	40/100	合成孔径雷达 SAR	1	5/25
实践九号 SJ-9							
实践九号 A星 SJ-9A	2012/10/14	645	4 d	30	全色/多光谱 PAN/MS	5	2.5/10
实践九号 B星 SJ-9B	2012/10/14	645	8 d	18	红外相机 IR	1	73

PAN, Panchromatic; MS, Multispectral; WFV, Wide-field of view; SAR, Synthetic aperture radar; MWIR, Medium wave infrared; HS, Hyperspectral; DLC, Dual-line array camera; LA, Laser altimetry; CCD, Charge-coupled device; IR, Infrared.











类型分布产品等重要的生态系统结构产品, 然而目前尚未实现可重复获取。

5.2 展望

EBVs的提出为全球生物多样性标准化监测提供了可能性, 中国科学家在全球EBVs的研究中起到了积极的作用。然而目前我国仍存在EBVs研究缺乏系统性、国产卫星潜力挖掘不足、部分EBVs遥感产品尚未具备“可重复性”等问题。在未来, 需要促进生态学、遥感科学、航空航天科学等领域的科学家合作, 进一步推动EBVs与遥感结合的科学研究, 加强EBVs各个类别研究的整合, 以及EBVs遥感监测指标体系的顶层设计; 更好地利用国产卫星数据形成我国EBVs遥感数据集, 并弥补目前EBVs遥感数据集的“可重复性”不足的问题, 尤其是生态系统垂直结构的相关数据产品。在此基础上, 结合我国的地理空间格局与生态系统特点, 根据中国的EBVs遥感监测指标体系, 为我国的生物多样性监测提供一套统一的、标准化的大尺度调查标准, 为全球生物多样性监测提供可靠的数据支撑与合作基础。

致谢: 感谢审稿专家和责任编委提出的宝贵意见, 感谢迈阿密大学马倩对于文章图片编辑给予的帮助与建议。

ORCID

任涓  <https://orcid.org/0000-0001-6042-396X>
陶胜利  <https://orcid.org/0000-0002-2145-4736>
胡天宇  <https://orcid.org/0000-0002-9133-7738>
杨海涛  <https://orcid.org/0000-0002-6053-9505>
关宏灿  <https://orcid.org/0000-0003-0457-7395>
苏艳军  <https://orcid.org/0000-0001-7931-339X>
程凯  <https://orcid.org/0000-0003-4006-8854>
陈梦玺  <https://orcid.org/0000-0002-8723-3530>
万华伟  <https://orcid.org/0000-0002-5355-5179>
郭庆华  <https://orcid.org/0000-0002-1065-0838>

参考文献

Arenas-Castro S, Regos A, Gonçalves JF, Alcaraz-Segura D, Honrado J (2019) Remotely sensed variables of ecosystem functioning support robust predictions of abundance patterns for rare species. *Remote Sensing*, 11, 2086.
Asner GP, Martin RE (2016) Spectranomics: Emerging science and conservation opportunities at the interface of biodiversity and remote sensing. *Global Ecology and*

Conservation, 8, 212–219.
Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, Wogan GOU, Swartz B, Quental TB, Marshall C, McGuire JL, Lindsey EL, Maguire KC, Mersey B, Ferrer EA (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51–57.
Brisson J (2001) Neighborhood competition and crown asymmetry in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 2151–2159.
Burkepile DE, Parker JD (2017) Recent advances in plant-herbivore interactions. *F1000Research*, 6, 119.
Butcher P, Colefax A, Gorkin R, Kajiura S, López N, Mourier J, Purcell C, Skomal G, Tucker J, Walsh A, Williamson J, Raoult V (2021) The drone revolution of shark science: A review. *Drones*, 5, 8.
Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, Baret F, Weiss M (2013) GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 137, 310–329.
Chen LD, Fu BJ (2004) Ecological significance, characteristics and types of disturbance. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 581–586. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 傅伯杰 (2004) 干扰的类型、特征及其生态学意义. *生态学报*, 20, 581–586.]
Conti L, Malavasi M, Galland T, Komárek J, Lagner O, Carmona CP, Bello F, Rocchini D, Šímová P (2021) The relationship between species and spectral diversity in grassland communities is mediated by their vertical complexity. *Applied Vegetation Science*, 24, e12600.
Dalla Corte APD, Souza DV, Rex FE, Sanquetta CR, Mohan M, Silva CA, Zambrano AMA, Prata G, Alves de Almeida DR, Trautenmüller JW, Klauberg C, de Moraes A, Sanquetta MN, Wilkinson B, Broadbent EN (2020) Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105815.
Díaz S, Fargione J, Chapin FS, Tilman D (2006) Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, 4, e277.
Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B (2014) Defaunation in the anthropocene. *Science*, 345, 401–406.
Fang HL, Baret F, Plummer S, Schaepman-Strub G (2019) An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57, 739–799.
Fang JY, Liu LL (2021) *Ecosystem Ecology: Reviews and Perspectives*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [方精云, 刘玲莉 (2021) 生态系统生态学回顾与展望. 高等教育出版社, 北京]
Féret JB, Asner GP (2014) Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy. *Ecological Applications*, 24, 1289–1296.

- Filipponi F, Valentini E, Nguyen Xuan A, Guerra C, Wolf F, Andrzejak M, Taramelli A (2018) Global MODIS fraction of green vegetation cover for monitoring abrupt and gradual vegetation changes. *Remote Sensing*, 10, 653.
- Frolking S, Palace MW, Clark DB, Chambers JQ, Shugart HH, Hurr GC (2009) Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114, G00E02.
- Frye HA, Aiello-Lammens ME, Euston-Brown D, Jones CS, Kilroy Mollmann H, Merow C, Slingsby JA, van der Merwe H, Wilson AM, Silander JA Jr (2021) Plant spectral diversity as a surrogate for species, functional and phylogenetic diversity across a hyper-diverse biogeographic region. *Global Ecology and Biogeography*, 30, 1403–1417.
- Ganguly S, Friedl MA, Tan B, Zhang XY, Verma M (2010) Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1805–1816.
- Gholizadeh H, Gamon JA, Zygierbaum AI, Wang R, Schweiger AK, Cavender-Bares J (2018) Remote sensing of biodiversity: Soil correction and data dimension reduction methods improve assessment of α -diversity (species richness) in prairie ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 206, 240–253.
- Grams TEE, Andersen CP (2007) Competition for resources in trees: Physiological versus morphological plasticity. *Progress in Botany*. In: *Progress in Botany* (eds Esser K, Löttge U, Beyschlag W, Murata J). Springer Heidelberg, Berlin.
- Guo QH, Liu J, Tao SL, Xue BL, Li L, Xu GC, Li WK, Wu FF, Li YM, Chen LH, Pang SX (2014) Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling. *Chinese Science Bulletin*, (6), 459–478. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 薛宝林, 李乐, 徐光彩, 李文楷, 吴芳芳, 李玉美, 陈琳海, 庞树鑫 (2014) 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望. *科学通报*, (6), 459–478.]
- Hakkenberg CR, Zhu K, Peet RK, Song C (2018) Mapping multi-scale vascular plant richness in a forest landscape with integrated LiDAR and hyperspectral remote-sensing. *Ecology*, 99, 474–487.
- Hargrove W, Spruce J, Gasser G, Hoffman F (2009) Toward a national early warning system for forest disturbances using remotely sensed canopy phenology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75, 1150–1156.
- Hmimina G, Dufrêne E, Pontailier JY, Delpierre N, Aubinet M, Caquet B, de Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Granier A, Gross P, Heinesch B, Longdoz B, Moureaux C, Ourcival JM, Rambal S, André LS, Soudani K (2013) Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132, 145–158.
- Hoban S, Bruford M, Jackson JD, Lopes-Fernandes M, Heuertz M, Hohenlohe PA, Paz-Vinas I, Sjögren-Gulve P, Segelbacher G, Vernesi C, Aitken S, Bertola LD, Bloomer P, Breed M, Rodríguez-Correa H, Funk WC, Grueber CE, Hunter ME, Laikre L (2020) Genetic diversity targets and indicators in the CBD post-2020 Global Biodiversity Framework must be improved. *Biological Conservation*, 248, 108654.
- Hufkens K, Friedl M, Sonnentag O, Braswell BH, Milliman T, Richardson AD (2012) Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117, 307–321.
- Jetz W, Cavender-Bares J, Pavlick R, Schimel D, Davis FW, Asner GP, Guralnick R, Kattge J, Latimer AM, Moorcroft P, Schaepman ME, Schilldhauser MP, Schneider FD, Schrödt F, Stahl U, Ustin SL (2016) Monitoring plant functional diversity from space. *Nature Plants*, 2, 16024.
- Jetz W, McGeoch MA, Guralnick R, Ferrier S, Beck J, Costello MJ, Fernandez M, Geller GN, Keil P, Merow C, Meyer C, Muller-Karger FE, Pereira HM, Regan EC, Schmeller DS, Turak E (2019) Essential biodiversity variables for mapping and monitoring species populations. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 539–551.
- Jiao QJ, Sun Q, Zhang B, Huang WJ, Ye HC, Zhang ZM, Zhang X, Qian BX (2021) A random forest algorithm for retrieving canopy chlorophyll content of wheat and soybean trained with PROSAIL simulations using adjusted average leaf angle. *Remote Sensing*, 14, 98.
- Jolly WM, Cochrane MA, Freeborn PH, Holden ZA, Brown TJ, Williamson GJ, Bowman DMJS (2015) Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6, 7537.
- Justice CO, Giglio L, Korontzi S, Owens J, Morisette JT, Roy D, Descloitres J, Alleaume S, Petitcolin F, Kaufman Y (2002) The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 244–262.
- Kissling WD, Walls R, Bowser A, Jones MO, Kattge J, Agosti D, Amengual J, Basset A, van Bodegom PM, Cornelissen JHC, Denny EG, Deudero S, Egloff W, Elmendorf SC, Alonso García E, Jones KD, Jones OR, Lavorel S, Lear D, Navarro LM, Pawar S, Pirzl R, Rüger N, Sal S, Salguero-Gómez R, Schigel D, Schulz KS, Skidmore A, Guralnick RP (2018) Towards global data products of Essential Biodiversity Variables on species traits. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1531–1540.
- Lausch A, Bannehr L, Beckmann M, Boehm C, Feilhauer H, Hacker JM, Heurich M, Jung A, Klenke R, Neumann C, Pause M, Rocchini D, Schaepman ME, Schmidtlein S, Schulz K, Selsam P, Settele J, Skidmore AK, Cord AF (2016) Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives. *Ecological Indicators*, 70, 317–339.

- Li Y, Hess C, Wehrden H, Härdtle W, Oheimb G (2014) Assessing tree dendrometrics in young regenerating plantations using terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Science*, 71, 453–462.
- Liu H, Gong P, Wang J, Clinton N, Bai YQ, Liang SL (2020) Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015. *Earth System Science Data*, 12, 1217–1243.
- Liu J, Skidmore AK, Heurich M, Wang TJ (2017) Significant effect of topographic normalization of airborne LiDAR data on the retrieval of plant area index profile in mountainous forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 77–87.
- Liu LL, Zhang XY, Yu YY, Guo W (2017) Real-time and short-term predictions of spring phenology in North America from VIIRS data. *Remote Sensing of Environment*, 194, 89–99.
- Liu X, Hao YS, Widagdo FRA, Xie LF, Dong LH, Li FR (2021) Predicting height to crown base of *Larix olgensis* in northeast China using UAV-LiDAR data and nonlinear mixed effects models. *Remote Sensing*, 13, 1834.
- Liu XQ, Su YJ, Hu TY, Yang QL, Liu BB, Deng YF, Tang H, Tang ZY, Fang JY, Guo QH (2022) Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112844.
- Liu Y, Hill MJ, Zhang XY, Wang ZS, Richardson AD, Hufkens K, Filippa G, Baldocchi DD, Ma SY, Verfaillie J, Schaaf CB (2017c) Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and PhenoCams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237/238, 311–325.
- Ma XL, Mahecha MD, Migliavacca M, van der Plas F, Benavides R, Ratcliffe S, Kattge J, Richter R, Musavi T, Baeten L, Barnoiaea I, Bohn FJ, Bouriaud O, Bussotti F, Coppi A, Domisch T, Huth A, Jaroszewicz B, Wirth C (2019) Inferring plant functional diversity from space: The potential of Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111368.
- Ma XL, Migliavacca M, Wirth C, Bohn FJ, Huth A, Richter R, Mahecha MD (2020) Monitoring plant functional diversity using the reflectance and echo from space. *Remote Sensing*, 12, 1248.
- Madonsela S, Cho MA, Ramoelo A, Mutanga O (2017) Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 133, 116–127.
- Meddens AJH, Hicke JA (2014) Spatial and temporal patterns of Landsat-based detection of tree mortality caused by a mountain pine beetle outbreak in Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 322, 78–88.
- Nasahara KN, Nagai S (2015) Development of an in situ observation network for terrestrial ecological remote sensing: The Phenological Eyes Network (PEN). *Ecological Research*, 30, 211–223.
- Niu CJ, Lou AR, Sun RY, Li QF (2007) *Foundations in Ecology*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 李庆芬 (2007) 基础生态学. 高等教育出版社, 北京.]
- Pinton D, Canestrelli A, Wilkinson B, Ifju P, Ortega A (2021) Estimating ground elevation and vegetation characteristics in coastal salt marshes using UAV-based LiDAR and digital aerial photogrammetry. *Remote Sensing*, 13, 4506.
- Potapov P, Li XY, Hernandez-Serna A, Tyukavina A, Hansen MC, Kommareddy A, Pickens A, Turubanova S, Tang H, Silva CE, Armston J, Dubayah R, Blair JB, Hofton M (2021) Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165.
- Proença V, Martin LJ, Pereira HM, Fernandez M, McRae L, Belnap J, Böhm M, Brummitt N, García-Moreno J, Gregory RD, Honrado JP, Jürgens N, Opige M, Schmeller DS, Tiago P, van Swaay CAM (2017) Global biodiversity monitoring: From data sources to Essential Biodiversity Variables. *Biological Conservation*, 213, 256–263.
- Reed BC, Brown JF, VanderZee D, Loveland TR, Merchant JW, Ohlen DO (1994) Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5, 703–714.
- Rocchini D, Bacaro G, Chirici G, da Re D, Feilhauer H, Foody GM, Galluzzi M, Garzon-Lopez CX, Gillespie TW, He KS, Lenoir J, Marcantonio M, Nagendra H, Ricotta C, Rommel E, Schmidtlein S, Skidmore AK, van de Kerchove R, Rugani B (2018) Remotely sensed spatial heterogeneity as an exploratory tool for taxonomic and functional diversity study. *Ecological Indicators*, 85, 983–990.
- Rocchini D, Boyd DS, Féret JB, Foody GM, He KS, Lausch A, Nagendra H, Wegmann M, Pettorelli N (2016) Satellite remote sensing to monitor species diversity: Potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2, 25–36.
- Rocchini D, Salvatori N, Beierkuhnlein C, Chiarucci A, de Boissieu F, Förster M, Garzon-Lopez CX, Gillespie TW, Hauffe HC, He KS, Kleinschmit B, Lenoir J, Malavasi M, Moudry V, Nagendra H, Payne D, Šímová P, Torresani M, Féret JB (2021) From local spectral species to global spectral communities: A benchmark for ecosystem diversity estimate by remote sensing. *Ecological Informatics*, 61, 101195.
- Rossi C, Kneubühler M, Schütz M, Schaepman ME, Haller RM, Risch AC (2020) From local to regional: Functional diversity in differently managed alpine grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111415.
- Rossi C, Kneubühler M, Schütz M, Schaepman ME, Haller RM, Risch AC (2022) Spatial resolution, spectral metrics

- and biomass are key aspects in estimating plant species richness from spectral diversity in species-rich grasslands. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8, 297–314.
- Ruiz-García D, Adams K, Brown H, Davis AR (2020) Determining stingray movement patterns in a wave-swept coastal zone using a blimp for continuous aerial video surveillance. *Fishes*, 5, 31.
- Skidmore AK, Coops NC, Neinavaz E, Ali A, Schaepman ME, Paganini M, Kissling WD, Vihervaara P, Darvishzadeh R, Feilhauer H, Fernandez M, Fernández N, Gorelick N, Geijzendorffer I, Heiden U, Heurich M, Hobern D, Holzwarth S, Muller-Karger FE, van de Kerchove R, Lausch A, Leitão PJ, Lock MC, Múcher CA, O'Connor B, Rocchini D, Roquesli C, Turner W, Vis JK, Wang TJ, Wegmann M, Wingate V (2021) Priority list of biodiversity metrics to observe from space. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 896–906.
- Slavík M, Kuželka K, Modlinger R, Tomášková I, Surový P (2020) UAV laser scans allow detection of morphological changes in tree canopy. *Remote Sensing*, 12, 3829.
- Su XK, Dong SK, Liu SL, Cracknell AP, Zhang Y, Wang XX, Liu GH (2018) Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to study wild yak in the highest desert in the world. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 5490–5503.
- Su YJ, Guo QH, Hu TY, Guan HC, Jin SC, An SZ, Chen XL, Guo K, Hao ZQ, Hu YM, Huang YM, Jiang MX, Li JX, Li ZJ, Li XK, Li XW, Liang CZ, Liu RL, Ma KP (2020) An updated vegetation map of China (1 : 1000000). *Science Bulletin*, 65, 1125–1136.
- Su YJ, Guo QH, Xue BL, Hu TY, Alvarez O, Tao SL, Fang JY (2016) Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: Estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 173, 187–199.
- Sun H, Hu JQ, Wang JX, Zhou JH, Lv L, Nie JY (2021) RSPD: A novel remote sensing index of plant biodiversity combining spectral variation hypothesis and productivity hypothesis. *Remote Sensing*, 13, 3007.
- Tellman B, Sullivan JA, Kuhn C, Kettner AJ, Doyle CS, Brakenridge GR, Erickson TA, Slayback DA (2021) Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596, 80–86.
- Tuanmu MN, Jetz W (2015) A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1329–1339.
- Vrieling A, Meroni M, Darvishzadeh R, Skidmore AK, Wang TJ, Zurita-Milla R, Oosterbeek K, O'Connor B, Paganini M (2018) Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215, 517–529.
- Wang R, Gamon JA (2019) Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111218.
- Xiao JF, Chevallier F, Gomez C, Guanter L, Hicke JA, Huete AR, Ichii K, Ni WJ, Pang Y, Rahman AF, Sun GQ, Yuan WP, Zhang L, Zhang XY (2019) Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111383.
- Xu WB, Deng SS, Liang D, Cheng XJ (2021) A crown morphology-based approach to individual tree detection in subtropical mixed broadleaf urban forests using UAV LiDAR data. *Remote Sensing*, 13, 1278.
- Ye HC, Huang WJ, Huang SY, Wu B, Dong YY, Cui B (2018) Remote estimation of nitrogen vertical distribution by consideration of maize geometry characteristics. *Remote Sensing*, 10, 1995.
- Yu T, Sun R, Xiao ZQ, Zhang Q, Liu G, Cui TX, Wang JM (2018) Estimation of global vegetation productivity from Global LAnd Surface Satellite data. *Remote Sensing*, 10, 327.
- Zhang JJ, Cheng T, Guo W, Xu X, Qiao HB, Xie YM, Ma XM (2021) Leaf area index estimation model for UAV image hyperspectral data based on wavelength variable selection and machine learning methods. *Plant Methods*, 17, 49.
- Zhang X, Liu LY, Chen XD, Gao Y, Xie S, Mi J (2021) GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 13, 2753–2776.
- Zhao JB, Zhang YP, Tan ZH, Song QH, Liang NS, Yu L, Zhao JF (2012) Using digital cameras for comparative phenological monitoring in an evergreen broad-leaved forest and a seasonal rain forest. *Ecological Informatics*, 10, 65–72.
- Zhao YJ, Sun YH, Chen WH, Zhao YP, Liu XL, Bai YF (2021) The potential of mapping grassland plant diversity with the links among spectral diversity, functional trait diversity, and species diversity. *Remote Sensing*, 13, 3034.
- Zhao YJ, Zeng Y, Zheng ZJ, Dong WX, Zhao D, Wu BF, Zhao QJ (2018) Forest species diversity mapping using airborne LiDAR and hyperspectral data in a subtropical forest in China. *Remote Sensing of Environment*, 213, 104–114.

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 李会丽)