

DOI: 10.20103/j.stxb.202408061856

蔡文博,王薇,朱青,张智舵,彭婉婷,蔡永立.基于谷歌地球引擎大数据支撑的自然资源生态安全应用研究进展.生态学报,2025,45(7): 3544-3554.

Cai W B, Wang W, Zhu Q, Zhang Z D, Peng W T, Cai Y L. Research progress and prospects of natural resource ecological security applications supported by GEE-based Earth big data. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3544-3554.

基于谷歌地球引擎大数据支撑的自然资源生态安全应用研究进展

蔡文博¹, 王 薇^{3,4,5}, 朱 青^{3,4}, 张智舵^{3,4}, 彭婉婷^{2,*}, 蔡永立^{3,4}

1 华东师范大学中国现代城市研究中心/城市发展研究院, 上海 200062

2 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092

3 上海交通大学设计学院, 上海 200240

4 自然资源部国土空间生态治理数字工程技术创新中心, 上海 200240

5 上海宏途卫星应用技术开发有限公司, 上海 201612

摘要:随着工业革命和城市化进程,全球资源消耗和生态环境恶化加剧,保障自然资源生态安全成为关注焦点。谷歌地球引擎(GEE)作为地球大数据云计算平台,为自然资源生态安全研究提供了新引擎,涵盖评价、预测预警及预案制定等全过程管理。系统梳理了 GEE 在自然资源生态安全评价、预测预警及预案制定等方面的应用进展,展示了其在森林资源、耕地资源、草地资源等多种自然资源管理中的广泛应用和显著成效。同时,也指出了 GEE 在数据源、研究深度及预警应用方面存在的不足和挑战。为了进一步提升自然资源生态安全研究水平,提出了基于大数据和云计算技术的自然资源生态安全研究框架,明确了大数据采集、处理、分析及决策支持等关键环节,并强调了自主研发、数据共享与开放的重要性。本研究不仅为当前自然资源生态安全研究提供了理论参考和实践指导,也为未来相关领域的深入探索 and 创新发展奠定了坚实基础。

关键词:自然资源;生态安全;谷歌地球引擎(GEE);大数据;云计算平台

Research progress and prospects of natural resource ecological security applications supported by GEE-based Earth big data

CAI Wenbo¹, WANG Wei^{3,4,5}, ZHU Qing^{3,4}, ZHANG Zhiduo^{3,4}, PENG Wanting^{2,*}, CAI Yongli^{3,4}

1 Center for Modern Chinese City Studies/Institute of Urban Development Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

3 School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4 Digital Engineering Technology Innovation Center for Territorial Spatial Ecological Governance, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200240, China

5 Shanghai Hongtu Satellite Application Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201612, China

Abstract: In the face of accelerating industrialization and urbanization, the globe has witnessed an unprecedented surge in resource consumption, leading to severe ecological degradation and posing a significant threat to the ecological security of natural resources. As such, safeguarding the ecological integrity of these resources has become a pressing concern for governments, researchers, and environmentalists worldwide. Among the various tools and platforms available for monitoring and managing natural resources, Google Earth Engine (GEE) stands out as a powerful and versatile cloud computing

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(72104232);国家自然科学基金青年科学基金项目(52208066);上海市2024年度“科技创新行动计划”软科学研究项目(24692116500);教育部哲学社科重大项目(19JZD023)

收稿日期:2024-08-06; **网络出版日期:**2024-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 22227@tongji.edu.cn

platform that facilitates the comprehensive analysis of Earth's big data. GEE has revolutionized the way we approach the ecological security of natural resources by enabling researchers to evaluate, predict, and formulate pre-plans with unprecedented accuracy and efficiency. This cutting-edge platform integrates a vast array of satellite imagery, remote sensing data, and other geospatial information, providing a holistic view of the Earth's ecosystems. By leveraging the power of big data and cloud computing, GEE allows researchers to monitor changes in natural resources over time, identify potential threats, and develop targeted intervention strategies to mitigate environmental degradation. The applications of GEE in managing natural resources are vast and varied. For instance, in the realm of forestry, GEE has been instrumental in monitoring deforestation rates, assessing forest health, and predicting future trends. In agriculture, it has aided in the precise mapping of arable lands, the monitoring of crop health, and the optimization of farming practices. Similarly, in grassland management, GEE has facilitated the assessment of grazing pressure, the monitoring of biodiversity, and the formulation of sustainable grazing strategies. Despite its many advantages, GEE is not without its limitations. One of the primary challenges lies in the quality and availability of data. While GEE provides access to a wealth of geospatial information, the accuracy and completeness of this data can vary significantly. This necessitates a thorough understanding of data sources and the application of advanced data processing techniques to ensure the reliability of analysis results. Another challenge lies in the complexity of ecological systems. Natural resources are intertwined in a delicate balance, and any change in one component can have far-reaching consequences for the entire ecosystem. As such, researchers must employ a multidisciplinary approach, integrating knowledge from fields such as ecology, geography, and environmental science, to fully comprehend the implications of their findings. To overcome these challenges and further enhance the capabilities of GEE in managing natural resources, there is a need for continued research and development. This includes refining data processing algorithms, exploring new data sources, and developing more sophisticated models to predict ecological changes. Additionally, promoting data sharing and openness among researchers and institutions can foster collaboration and accelerate the pace of innovation in this field. In conclusion, Google Earth Engine has emerged as a pivotal tool in the quest for ecological security of natural resources. By harnessing the power of big data and cloud computing, it has enabled researchers to gain deeper insights into the functioning of ecosystems and to develop more effective strategies for their protection and sustainable use. However, to fully unlock its potential, there is a need for ongoing research, collaboration, and innovation. Only through a concerted effort can we ensure the long-term ecological security of our planet's invaluable natural resources.

Key Words: natural resources; ecological security; Google Earth Engine(GEE); big data; cloud computing platform

自然资源是人类赖以生存和发展的物质基础,也是与人类社会经济发展密切耦合的能量来源和生态之本。自然资源生态安全是指一定时空范围内,通过对自然资源的合理利用和管理,自然资源生态系统的结构与功能处于一种不受或少受破坏与威胁的健康状态,并且能够持续地为人类福祉提供服务的能力^[1-2],是国家安全的重要组成部分。伴随着工业革命和城市化进程所产生的全球资源快速消耗、生态环境恶化等现象出现,保障自然资源的生态安全逐渐被国内外学者、国际组织和政策制定者重视^[3-5],呼吁提高对自然资源的合理利用和管理,从生态资源生态安全评价、预测、预警、预案开展多方位研究^[6-9],以维护自然资源生态安全。

随着地球大数据、云计算和物联网等科技的发展使自然资源数据呈现爆发增长,自然资源的管理也迎来了“大数据时代”。然而,自然资源大数据不仅具有体量大、多时相、高价值等特点^[10],同时也存在数据来源多样、交叉重叠、结构差异等特征^[11-12],这些对于自然资源生态安全的研究和管理都带来极大的挑战^[13]。以谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)为代表的地球大数据云计算平台,为大数据时代的自然资源生态安全研究提供了新引擎,为开展自然资源生态安全展评价—预测预警—预案全过程管理提供了新契机。2011年由 Google 云计算驱动的 GEE 地球大数据处理与分析云平台创建,不仅提供了海量时空大数据,同时具有高性能处理与云计算能力^[14],逐渐被运用到各个研究领域。此外,美国航空航天局 NASA 的 Earth Exchange 平

台、笛卡尔实验室亚马逊网络服务平台 (Amazon Web Services, AWS)、哥白尼数据与开发平台 (Copernicus Data and Exploitation Platform-DE) 相继建立。中国地球大数据挖掘分析系统 Earth DataMiner 和 PIE-Engine 已取得了显著进展^[12,14],但仍处于起步阶段。目前 GEE 是发展最成熟,应用最为广泛的地球大数据云计算平台,已运用在多种自然资源生态安全的研究中^[15-19],其海量大数据集合和高速云计算对自然资源生态安全研究显示出巨大潜力。

当前,中国已进入高质量发展的新阶段,这对自然资源的可持续利用与生态安全的保障提出了更高的标准。此阶段的高质量发展,新技术与大数据的支持显得尤为重要。鉴于地球大数据云计算平台在整合我国庞大且多样化的自然资源数据、以及提升我国自然资源生态安全研究水平方面的必要性和紧迫性,我们特选取应用最为广泛的地球大数据云计算平台——GEE 作为案例。在本项研究中,我们总结了 GEE 在自然资源生态安全评价、预测预警及预案研究中的应用进展,并提出了基于地球大数据的中国自然资源生态安全研究构建思路与框架。最终,针对大数据时代的特点,我们为自然资源生态安全的研究与管理提出了具体的建议。

1 应用研究

本研究以 Web of Science (WOS) 核心合集数据库和中国知网 (CNKI) 总库为数据源,将检索范围限制在运用 GEE 开展的自然资源生态安全研究,考虑国外生态安全研究涉及从生态安全、风险和健康多个角度展开,WOS 检索中将检索词设置为:摘要 = Google Earth Engine AND 主题 = ("ecological security" OR "ecological risk" OR "ecological health"),CNKI 检索词设置为:摘要 = Google Earth Engine AND 主题 = ("生态安全" OR "生态风险" OR "生态健康"),检索时间为第一篇相关论文发表(2013 年)至 2024 年,并进一步剔除与自然资源不相关文献,最终获得 450 篇文献样本,其中英文文献 388 篇,中文文献 62 篇。GEE 于 2011 年开始提供地理数据科学分析及可视化平台。2013 年开始运用于自然资源生态安全的研究,最早运用于埃塞俄比亚耕地资源和粮食安全的研究中。随后逐渐被运用在森林、水资源等自然资源的生态安全研究中,在 2017 年和 2018 年增长到 13 篇。随后,相关发文量进入快速增长期,从 2018 年的中英文发文量共 42 篇,至 2024 年增长到 100 篇以上。从发文量来看,相关研究的英文发文量远远大于中文发表量。总体来看,自 2013 年运用 GEE 开展自然资源生态安全的国内外研究,发文量呈现出前期缓慢增长到后期快速增长的特征。

1.1 评价研究

自然资源生态安全评价是实现风险预测预警、制定科学预案对策的基础。GEE 平台在评价各类自然资源生态安全方面发挥了重要作用^[19-21]。从研究主题来看,评价相关的研究论文发文量最大,表明该领域是当前的研究热点。具体来看,耕地资源生态安全的评价发文量最多,占总评价相关研究的 43.6%,这反映了耕地资源在全球粮食安全中的核心地位及面临的挑战。相比之下,对草地、地下水、动物等资源的研究相对较少,总占比不足 15%,表明这些资源的生态安全评价尚未得到充分的学术关注。

目前,GEE 已被运用于评估森林^[22-25]、耕地^[16,26-29]、草地^[30]、土地资源的长时间序列变化^[31-32],水环境和洪水风险^[21,33-36],以及外来植物入侵风险(表 1)。例如,耕地资源和粮食安全相关的研究从耕地覆盖变化^[37]、作物产量评估^[38]等多个方面开展:(1)初期应用阶段(2010—2015 年),Lemoine 等^[39]率先提出了可以利用 GEE 平台对全球作物面积和状态进行监测的设想。(2)扩展与应用深化阶段(2016—2019 年),GEE 主要集中在农作物类型识别、农业面积估算和农作物健康状况监测上。通过分析多时相的卫星影像,研究者能够快速估算作物种植面积和产量,为农业生产规划和粮食安全政策提供支持。如 Dong 等^[40]基于物候学的算法和 GEE 平台,评估了 Landsat 8 影像在东北亚地区(包括日本、朝鲜、韩国和中国东北地区)年度水稻制图方面的潜力。(3)深度发展与创新应用阶段(2019—至今),GEE 的应用开始进一步融入精准农业管理、农情监测和预测、移动端智能农业决策支持系统开发以及生态系统管理等农业管理领域的应用等新兴领域^[41],例如

利用 GEE 进行精准作物分类识别、作物物候调查等^[26—28],为农业管理提供了重要依据。

表 1 在自然资源生态安全领域应用 GEE 研究分类

Table 1 Applying Google Earth Engine for classification research in the field of natural resource ecological security

自然资源类型 Natural resource types	运用类型 Utilization types	主要数据 Main data	方法 Methods	主题(评价) Themes (evaluations)	代表性文献 Representative literature
耕地资源 Cultivated land resources	作物识别	Sentinel-1 & 2、Landsat	基于植被物候、光谱特征等特征的分类方法	作物(水稻、油菜等)种植区域的识别、种植面积的统计	[37—38]
森林资源 Forest resources	资源变化	MODIS、Landsat	随机森林等分类方法	森林(针叶林、阔叶林)分布的时空格局分析	[42—44]
	生物量	Sentinel-2	随机森林等分类方法	草地分类及生物量估算	[45]
	资源变化	MODIS、Landsat	植被指数阈值分类方法	评价湿地资源(红树林、潮滩)的时空格局变化	[46—49]
湿地资源 Wetland resources	水体面积变化	Landsat	基于光谱指数的水体提取方法	评估人口增长和气候变化中的地表水资源时空变化	[30,50—52]
地表水资源 Surface water resources	水温变化	Landsat、MODIS	地表水文反演	评估全球变暖和人类活动影响下河湖不同部分的水温空间变化	[53—55]
	水环境	Sentinel-2、Landsat	相关分析/深度学习	藻华、绿潮的时空动态监测	[33—36]
	洪水风险	MODIS	变化检测/机器学习	破裂时间、持续时间对水位影响的评估	[56—58]
	水体质量	Landsat	遥感指数计算	评估水体透明度、叶绿素 a、悬浮固体和浊度的时空变化	[59—61]
	干旱风险	MODIS、Landsat	遥感指数反演	评估干旱的发生和分布	[62—63]
	耦合互馈	多种数据源	综合分析	研究不同资源要素间的耦合作用(如水土耦合等)	[64]
	不同自然资源要素	多种数据源	比较分析	分析不同资源利用方式间的权衡关系	[65]
resources	演变机制	多种数据源	时间序列	监测和分析多种资源要素的演变趋势	[66]

森林资源生态安全的研究不仅关注于森林覆盖面积变化^[42—44],也关注于森林火灾等威胁森林安全的灾害^[22—25]。(1)初期应用阶段(2010—2014年),GEE 平台的推出以来,研究人员利用其处理大规模遥感数据(如 Landsat 和 MODIS)能力,进行全球和区域尺度的森林覆盖变化监测。Hansen 等^[67]研究利用 GEE 实现了从 1984 年至今的全球森林覆盖变化分析,成为森林监测的标志性应用。(2)扩展与应用深化阶段(2014—2018年),GEE 的应用涵盖了森林健康状况的评估、森林火灾的监测,以及森林碳储量的评估等方面。研究者利用 GEE 强大的数据处理能力,分析了森林病虫害、干旱等对森林健康的影响,并构建了基于遥感数据的森林碳储量估算模型,为碳排放管理和气候变化研究提供了支持。如 Gray 等^[68]使用 GEE 高分辨遥感数据集,通过持续训练,整合燃料、气候和景观的长期动态,形成了一套持续更新的每周美国西部森林和林地发生大规模野火概率评估。(3)深度发展与创新应用阶段(2018—至今),GEE 的应用开始进一步与机器学习算法相结合^[42—44],进行更精确的森林类型分类和健康状况评估,重点关注森林生态系统服务功能的综合评估和管理^[17]、森林生态恢复^[69]及其对气候变化的适应性^[70]等。

草地资源生态安全的研究不仅评估草地覆盖面积变化,也利用 GEE 精准监测草地退化程度和生物量。(1)初期应用阶段(2010—2015年),GEE 的应用主要集中于草地覆盖变化的监测和草地退化评估^[30]。研究者基于 GEE 提供的 Landsat 和 MODIS 等多时相卫星数据,对不同区域的草地覆盖变化进行了时空动态监测。此阶段的研究重点在于识别草地退化的区域和速率,为草地保护政策的制定提供基础数据支持。如研究人员能够识别出草地退化的热点区域,特别是在气候变化和人类活动密集的地区。这些早期的研究证明了 GEE

平台在处理大规模遥感数据和快速分析草地资源变化方面的高效性,奠定了其在草地研究中的应用基础。(2)深化应用与扩展阶段(2016—2018年),草地资源研究的应用开始深化,研究者不仅关注草地覆盖变化,还开始探索草地生态系统健康与环境因子之间的关系。随着 GEE 平台上机器学习工具和更多遥感数据集的引入,草地资源的研究范围扩大到包括草地生态系统生产力的评估^[45]。(3)创新应用与综合评估阶段(2019—至今),草地资源研究进入了创新应用和综合评估阶段。这一阶段的研究不仅局限于草地的覆盖变化和生产力,而且综合考虑草地的多种生态系统服务功能,如碳储量、土壤保持和水源涵养等。此外,GEE 平台的机器学习和深度学习工具在这一阶段得到了更广泛的应用,研究者能够通过更复杂的模型更精准地预测草地资源的变化和评估其生态效益^[71]。

湿地和滨海带生态安全评估方面,针对海平面上升、海岸栖息地消失、土地下陷、蓝藻和赤潮等^[72-73],利用 GEE 长时间序列遥感影像识别和评价海岸带湿地变化,对于维护滨海湿地生态安全提供数据和技术支撑:(1)基础监测与初步应用阶段(2010—2014年),滨海和湿地资源研究主要集中在资源的基础监测和覆盖变化评估。GEE 平台的出现极大地促进了大规模、长时间序列湿地数据的处理和分析能力,使研究者能够进行更为系统的资源监测^[46-49]。(2)应用深化与功能拓展阶段(2015—2018年),研究者开始关注湿地的生态功能评估和健康状况监测,特别是湿地在碳汇、栖息地提供和生物多样性保护方面的作用^[74]。(3)创新技术应用与跨学科综合研究阶段(2019年—至今),滨海和湿地资源研究进入了创新技术应用和跨学科综合研究阶段。这一阶段,研究者进一步利用 GEE 平台的计算能力,结合先进的机器学习和深度学习技术,探索更加精细化和动态化的湿地监测与评估方法^[71]。

除了耕地、森林、湿地和滨海带自然资源,GEE 也被运用于矿产、水资源以及生物资源生态安全的评价中^[75]。如 Pekel 等^[67]利用 GEE 进行全球水体监测的代表性研究,借助 GEE 处理了超过 300 万张 Landsat 影像,生成了全球水体变化的 30 米分辨率时间序列地图,覆盖了 1984—2015 年的数据。这项研究首次提供了一个全球水体变化的高分辨率地图,为水资源管理提供了重要参考。Dinerstein 等^[76]基于生态区域的保护策略,使用 GEE 平台对全球陆地生态区域进行了详细的分类和评估,应用高分辨率遥感数据分析了生物多样性保护热点,为保护政策的制定提供了科学支持。此外,GEE 还被初步应用于不同自然资源要素之间的耦合互馈、权衡胁迫和演变机制的研究中。如甘聪聪等^[64]通过 GEE 平台的 Sentinel-1/2 数据构建动态窗口提取移栽期光学/雷达特征,利用水土耦合关系实现水稻种植模式制图。不过,GEE 在类似研究中的应用仍在探索阶段,并不多见。

总体来看,GEE 已经被广泛运用于多种自然资源生态安全评价中,集中在森林资源变化和水灾风险,耕地变化、作物识别和灾害评估,湿地和滨海带土地变化评价,水环境和洪水风险的评估中;评价方法根据自然资源特征和评价对象而异,随机森林分类法、时间序列分析法、植被指数阈值、作物生长模型和遥感数据耦合法等多种方法被采用,但以时间序列分析法为主的资源变化研究较多;数据源均集中在 Landsat 5—8、Sentinel 1—2、MODIS 产品上,其他数据源运用有限且质量不齐,这也可能限制了自然资源生态安全评价多以自然资源时空分布格局变为主,多采取以自然资源分类、时间序列分析、变化检测的评价范式,综合评价在自然资源生态安全的研究运用有限。

1.2 预测与预警研究

随着研究的深入,预测与预警成为自然资源生态安全研究的重要方向。从研究发文量来看,预测的论文数量仅次于评价研究,但整体而言仍偏少,特别是在各类自然资源类型的预测预警领域。

随着自然资源生态安全研究的深化,研究者逐渐认识到,仅依赖历史和现状评价已难以满足应对复杂自然资源问题的需求,特别是在全球气候变化和人类活动加剧的背景下^[71-72]。GEE 平台以其高分辨率、时空连续的全局数据资源^[11],为自然资源生态安全的预测与预警提供了强有力的支持,并逐步在耕地与粮食安全^[41,77-78]、森林火灾与病虫害防控^[79]、水质及蓝藻水华预警^[80]、生物资源保护^[81]等领域展现应用潜力。

初期探索阶段(2010—2015年):在这一时期,GEE 平台开始被引入自然资源生态安全的预测预警领域,

但应用尚显零散。例如,在耕地与粮食安全方面,虽然尚未形成系统的预测预警系统,但研究者已开始探索利用遥感数据监测作物生长状况,为产量预测奠定基础。森林火灾与病虫害的预测预警研究也处于起步阶段,主要集中于火灾后影响评估与趋势分析。

应用拓展阶段(2016—2019年):随着 GEE 平台的不断成熟与遥感数据资源的丰富,自然资源生态安全的预测预警研究进入快速拓展期。在耕地与粮食安全领域,GEE 被广泛应用于欧洲委员会 ASAP 系统等大型项目中,实现对全球多个粮食不安全区域的实时监测与预警^[82]。森林资源方面,森林病虫害与火灾的预警模型开始构建,如基于 GEE 数据驱动的澳大利亚火灾概率模拟研究^[83],标志着该领域预测预警技术的实质性进展。

深化与创新阶段(2020年至今):近年来,随着机器学习、深度学习等先进技术的融入,GEE 在自然资源生态安全预测预警中的应用进一步深化与创新。水质监测与蓝藻水华预警方面,如 Tao 等^[84]利用 GEE 平台对松花江流域湖泊水质透明度的长时间序列分析,为水质管理提供了科学依据。生物资源保护领域,则出现了利用 GEE 与机器学习技术预测的新方法^[81]。然而,尽管预测预警研究取得显著进展,但在影响机制、驱动力分析及动态预测模型构建等方面仍存在挑战,需进一步加强研究。

1.3 预案研究

预案研究旨在基于科学预测预警结果制定有效应对措施,但当前该领域的研究相对匮乏。从研究主题来看,预案研究主要集中在生态系统服务评估与生态风险等领域,且研究对象逐步拓展至城市耕地、生态岛等区域:(1)起步阶段(2010—2015年):预案研究在这一时期处于萌芽状态,尚未形成系统的研究方法框架。尽管有少数研究开始探索基于遥感数据的自然资源变化情景模拟,但预案的制定多依赖于定性分析与专家经验判断,缺乏科学系统的支持^[74]。(2)初步应用阶段(2016—2019年):随着 GEE 平台及相关技术的逐步成熟,预案研究开始进入初步应用阶段。例如,Clinton 等利用 GEE 平台估算了全球都市耕地面积,并设定了都市农业发展的预案情景^[85],标志着预案研究开始与遥感技术深度融合。(3)深化与多元化阶段(2020年至今):近年来,预案研究在深度与广度上均取得进展。研究者开始关注多因素影响下的预案制定,利用 GEE 平台整合多元异构数据,构建更加精细化的预案模型^[72]。同时,预案研究也向多领域拓展,如生物资源保护、气候变化适应等,为自然资源生态安全的全方位管理提供了有力支持^[71]。然而,当前预案研究仍面临诸多挑战,如风险胁迫变化下的预案制定、国际平台的对接与协同等,需进一步加强研究与探索。

2 理论框架设计

在大数据和高质量发展时代的背景下,以及国家对自然资源生态安全保障日益增长的需求,如何有效利用大数据和云计算技术来支撑自然资源生态安全,已经成为一个至关重要的研究方向。当前,自然资源管理领域正面临着复杂多变的挑战,包括生态风险的监测与评估、生态系统健康的维护与提升、以及生态服务功能的优化和保障。要解决这些问题,必须从技术创新和理论发展两个方面进行系统深入的研究。

在技术层面上,研究需要集中于大数据和云计算技术的应用,包括大数据的采集、清洗、整合、存储和分析,云计算的高效处理与数据安全保障。这些技术的应用可以实现对自然资源数据的全方位、多尺度、多层次的整合和分析,为科学决策提供坚实的数据基础。其次,在学理层面上,研究应立足于自然资源生态安全的理论基础,明确生态安全评价、预测预警和预案决策的内在逻辑关系。具体而言,需要构建一套科学的评价指标体系,用于量化评估自然资源的生态安全状态;同时,需要发展预测模型,结合历史数据和实时监测数据,对未来生态安全状况进行预测和预警;最后,还需建立科学的决策支持体系,帮助制定有效的预案和管理策略,以应对潜在的生态风险和挑战。

本研究提出了一个“五位四体”的大数据云计算支撑的自然资源生态安全研究基本框架(图1)。这一框架从自然资源生态安全的评价、预测预警到预案决策全过程的需求出发,明确了五个关键环节和四个主要研究体系:(1)大数据采集和云计算体系:通过多源数据采集技术,从遥感数据、地理信息系统(GIS)数据、传感

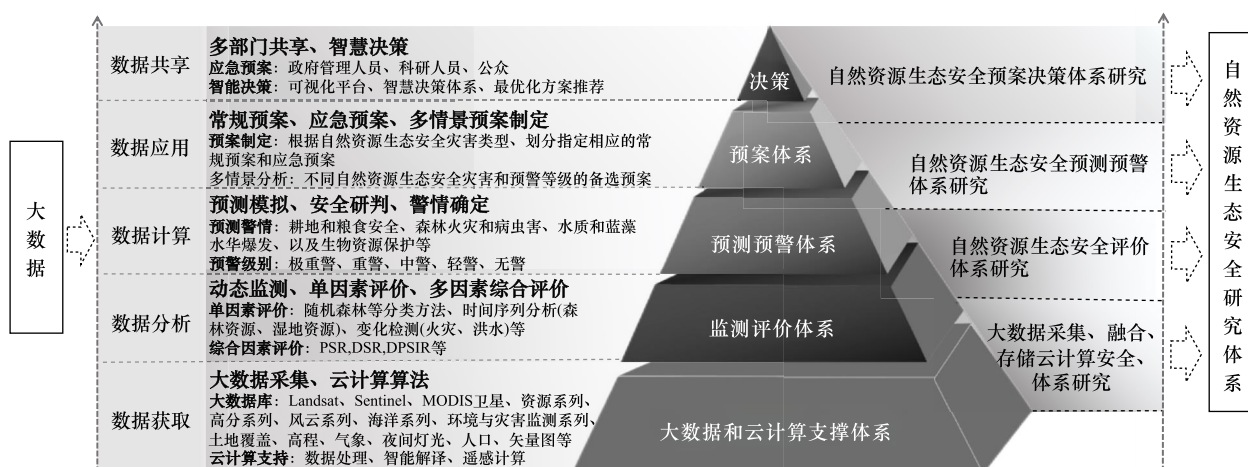


图1 基于地理大数据和云计算平台的自然资源生态安全研究框架

Fig.1 The framework of natural resource ecological security research based on geographic big data and cloud computing platform

器网络数据、以及社会经济数据等多种渠道获取大规模、多维度的自然资源相关数据。通过数据融合与清洗,确保数据的准确性、一致性和时效性,为后续研究提供高质量的数据基础。基于云计算技术,构建高效、安全的数据存储与计算环境。该体系旨在处理海量数据,确保数据在存储、传输和使用过程中的安全性,同时提供高性能的计算能力,以支持复杂的生态安全分析与模拟。(2)自然资源生态安全评价体系:利用大数据分析和机器学习技术,构建生态安全评价模型,评估当前自然资源的生态安全状态。该体系包含指标体系的构建、权重确定、模型选择等环节,旨在为自然资源生态安全状况的科学评价提供有力支撑。(3)自然资源生态安全预测预警体系:基于评价结果和趋势分析,构建生态安全预测模型,对未来可能的生态安全风险进行预警。该体系综合运用统计模型、机器学习模型和地理信息系统,预测未来不同情景下的生态安全变化,为提前防范和应对潜在的风险提供科学依据。(4)自然资源生态安全预案决策体系:结合评价、预测和预警结果,制定科学合理的预案和决策策略,以提高应对突发生态事件和长期生态管理的能力。该体系强调多方参与和协同决策,旨在制定多层次、多尺度的应对措施,确保自然资源的可持续利用和生态安全。

3 总结与展望

随着地球大数据与云平台技术的发展,自然资源生态安全研究迈入新阶段,面临新机遇与挑战。遥感云计算平台 GEE,展现出强大应用潜力,包括提供海量数据、强大云计算能力及多源数据融合优势。然而,GEE 在数据源、研究深度及预警应用方面存在局限。综上所述,大数据成为驱动自然资源生态安全研究的关键。GEE 云平台在数据提供、处理、运算及预警可视化方面优势明显,尽管其应用尚处发展期,但对推动研究现代化、精准化、智慧化管理具有巨大潜力。因此,本文提出以下展望:

在全面加强自主产权研发能力的战略背景下,GEE 作为一个集成了海量遥感数据、强大计算能力和先进分析工具的全球性地理空间分析平台,其技术架构和应用实践对我国在相关产品、装备、平台的研发中具有重要的借鉴意义和指导价值。

1) GEE 技术架构的启示:构建高效的云计算生态数据平台

GEE 通过其云计算架构提供了一个高效、灵活的生态监测和分析平台,其核心优势在于对全球生态数据的无缝集成和实时处理能力。GEE 的技术架构依托于 Google 的云计算基础设施,能够处理来自多个传感器和多时相的大规模遥感数据集,这种集成性和实时性为快速响应生态环境变化提供了可能。在我国的自主研发过程中,可以借鉴 GEE 的云计算架构,构建具有自主知识产权的云端生态监测平台。特别是在当前“新基建”的大背景下,发展基于云计算的生态数据中心,推动遥感数据的高效存储、管理和实时处理,将极大提高

我国在生态监测领域的技术自主性和国际竞争力。具体而言,我国应着重开发具备以下功能的生态监测平台:一是高性能数据处理模块,用于快速解析和处理多源异构数据;二是智能化数据融合模块,实现遥感数据与其他生态数据(如气象、水文、土地利用等)的深度融合;三是开放式数据共享接口,推动数据的跨部门、跨区域共享与应用,从而形成数据驱动的生态保护和管理决策支持体系。

2) GEE 在人工智能与大数据分析中的应用:提升智能化生态评估与预测能力

GEE 广泛应用人工智能和机器学习技术,开发了多种适用于生态监测和分析的算法模型,如随机森林、支持向量机等。这些技术在生态安全评估中能够有效处理高维度和复杂数据,提高了生态系统变化检测的精度和可靠性。我国在自主研发过程中,应借鉴 GEE 的技术思路,加大在生态监测和数据分析领域的人工智能技术应用,开发具有自主知识产权的智能化遥感监测和分析平台。重点可以围绕以下几个方向开展研发:(1)智能遥感数据解译与分类。利用深度学习技术,如卷积神经网络(CNN)、生成对抗网络(GAN)等,提高遥感影像解译的精度和效率,特别是针对植被类型分类、土地利用变化监测等复杂场景,开发专用算法和模型。(2)生态系统变化的智能预测。基于大数据分析和机器学习模型,构建生态系统变化的时空预测模型,实现对未来生态风险的早期预警。通过集成多种数据源(遥感影像、气象数据、地面观测等),建立更加精准的生态安全风险评估体系,为决策者提供科学依据。(3)自动化数据处理流程。研发自动化的数据处理和分析工具,降低人工干预,提高数据处理的效率和准确性,特别是针对大规模数据的快速处理和智能分析,提升平台的整体运行效率。

3) 数据开放与共享模式的借鉴:构建国家级生态数据共享平台

GEE 通过构建一个开放的数据共享平台,促进了全球范围内的生态数据共享与合作,形成了跨学科、跨地域的生态研究协作网络。我国可以借鉴这一模式,推动国家级生态数据共享平台的建设,促进数据资源的高效利用和多元化应用。在建设过程中,应重点关注以下几个方面:(1)数据标准化和规范化。建立统一的数据标准和规范,确保不同来源、不同格式的数据能够在同一平台上无缝对接和整合,提升数据的兼容性和互操作性。(2)数据安全性与隐私保护。在推动数据开放共享的同时,注重数据安全和隐私保护,特别是涉及国家安全和敏感生态信息的数据,需要建立严格的数据访问权限管理和安全审查机制。(3)数据共享激励机制。建立数据共享激励机制,鼓励科研机构、政府部门和企业开放共享其生态数据资源,形成数据共享的良性循环。

4) 结合国家战略推进自主研发:打造面向未来的生态监测与管理技术体系

结合我国当前的科技创新和生态文明建设战略,GEE 的成功经验为我国指明了未来生态监测与管理技术体系的研发方向。在“十四五”规划和“双碳”战略背景下,我国应进一步明确生态监测与管理技术的研发重点和方向,尤其是在以下几个领域加强研发力度:(1)生态大数据中心建设。建设国家级生态大数据中心,集成多源生态数据,实现数据的高效存储、管理和应用,推动大数据在生态监测与管理中的应用。(2)自主生态监测卫星和传感器研发。加快自主生态监测卫星和传感器的研发,提升我国遥感数据获取的自主性和精度,为生态安全监测和评估提供数据支持。(3)生态保护与修复技术研发。基于 GEE 的生态系统服务评估经验,研发适用于我国不同生态类型的生态保护和修复技术,推动生态系统的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰. 土地资源系统认知与国土生态安全格局. 中国土地, 2019(12): 9-11.
- [2] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [3] Li B, Zhang W J, Long J, Chen M Y, Nie J L, Liu P. Regional water resources security assessment and optimization path analysis in Karst areas based on emergy ecological footprint. *Applied Water Science*, 2023, 13(6): 142.
- [4] Wang C, Lin A Y, Liu C H. Marine ecological security assessment from the perspective of emergy ecological footprint. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 9: 1090965.

- [5] 姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2022, 42(5): 1981-1992.
- [6] Fartout Enayat F, Ahmad Ghanbari S, Asgharipour M R, Seyedabadi E. Emergy ecological footprint analysis of Yaghooti grape production in the Sistan region of Iran. *Ecological Modelling*, 2023, 481: 110332.
- [7] Zhang M N, Ao Y, Liu M, Zhao Y H, Lin K L, Cheng T. Ecological security assessment based on ecosystem service value and ecological footprint in the Pearl River Delta urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109528.
- [8] Zhang R Q, Li P H, Xu L P. Evaluation and analysis of ecological security based on the improved three-dimensional ecological footprint in Shaanxi Province, China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109483.
- [9] Yao X C, Chen W W, Song C C, Gao S Q. Sustainability and efficiency of water-land-energy-food nexus based on emergy-ecological footprint and data envelopment analysis: Case of an important agriculture and ecological region in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134854.
- [10] 杨俊艳, 樊迪, 黄国平. 自然资源管理背景下的时空大数据平台建设. 测绘通报, 2020(1): 124-127.
- [11] 程立海, 崔荣国, 董瑾, 张迎新, 宋文婷, 刘聚海. 自然资源 and 国土空间大数据技术应用框架. 地球信息科学学报, 2024, 26(4): 881-897.
- [12] 沈镭, 郑新奇, 陶建格. 自然资源大数据应用技术框架与学科前沿进展. 地球信息科学学报, 2021, 23(8): 1351-1361.
- [13] 左学刚, 邹滨, 胡晨霞, 李沈鑫, 贺晨骋. 自然资源大数据助力的城市可持续发展评估. 测绘科学, 2023, 48(1): 189-200, 213.
- [14] 程伟, 钱晓明, 李世卫, 马海波, 刘东升, 刘富乾, 梁军龙, 胡举. 时空遥感云计算平台 PIE-Engine Studio 的研究与应用. 遥感学报, 2022, 26(2): 335-347.
- [15] 陈媛媛, 郭莹莹, 魏翀, 向云飞, 朱梦瑶, 张昕. 基于多源时序遥感影像和 GEE 的滨海湿地分类与比较. 长江流域资源与环境, 2024, 33(8): 1691-1701.
- [16] 舒斯红, 刘强. 基于 GEE 与多源 Sentinel 数据的县域水稻种植面积提取. 北京测绘, 2024, 38(7): 1034-1040.
- [17] 栾诗萌, 马书明. 基于 GEE 的土地利用变化对生态服务价值影响研究——以大连市为例. 环境科学学报, 2024, 44(8): 446-458.
- [18] 顾容, 张东, 钱林峰, 吕林, 陈艳艳, 于凌程. GEE 平台下考虑潮位变化及植被物候特征的盐城滨海湿地精细化遥感分类. 海洋学报, 2024, 46(5): 103-115.
- [19] 刘修钰, 朱青, 王薇, 蔡永立. 基于 GEE 平台的鄱阳湖区水体面积变化时空格局分析. 测绘地理信息, 2024, 49(4): 57-62.
- [20] 胡昊, 邓莹, 赵章红, 邵振峰, 庄庆威. 基于 GEE 平台的开封市地表水体遥感监测与分析. 测绘地理信息, 2024: 1-4. doi:10.14188/j.2095-6045.20240001
- [21] 刘小燕, 崔耀平, 史志方, 付一鸣, 闰亚迪, 李梦迪, 李楠, 刘素洁. GEE 平台下多源遥感影像对洪灾的监测. 遥感学报, 2023, 27(9): 2179-2190.
- [22] Chew Y J, Ooi S Y, Pang Y H, Lim Z Y. Framework to create inventory dataset for disaster behavior analysis using google earth engine: A case study in peninsular Malaysia for historical forest fire behavior analysis. *Forests*, 2024, 15(6): 923.
- [23] Costa-Saura J M, Bacciu V, Ribotta C, Spano D, Massaiu A, Sirca C. Predicting and mapping potential fire severity for risk analysis at regional level using google earth engine. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4812.
- [24] Dahan K S, Kasei R A, Hussein R, Said M Y, Rahman M M. Towards understanding the environmental and climatic changes and its contribution to the spread of wildfires in Ghana using remote sensing tools and machine learning (Google Earth Engine). *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(1): 1300-1331.
- [25] Jodhani K H, Patel H, Soni U, Patel R, Valodara B, Gupta N, Patel A, Omar P J. Assessment of forest fire severity and land surface temperature using google earth engine: A case study of Gujarat State, India. *Fire Ecology*, 2024, 20(1): 23.
- [26] Eisfelder C, Boemke B, Gessner U, Sogno P, Alemu G, Hailu R, Mesmer C, Huth J. Cropland and crop type classification with Sentinel-1 and Sentinel-2 time series using google earth engine for agricultural monitoring in Ethiopia. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 866.
- [27] Liu Z J, Su Y Y, Xiao X M, Qin Y W, Li J, Liu L. Identification and mapping of yellow-flowering rapeseed fields by combining social media data, Sentinel-2 imagery, deep learning algorithm, and google earth engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 132: 104047.
- [28] Sahoo R N, Kondraju T, Rejith R G, Verrelst J, Ranjan R, Gakhar S, Bhandari A, Chinnusamy V. Monitoring cropland LAI using Gaussian Process Regression and Sentinel-2 surface reflectance data in google earth engine. *International Journal of Remote Sensing*, 2024, 45(15): 5008-5027.
- [29] 王振兴, 刘东, 王敏. 基于 GEE 平台和多维特征优选的粮食作物提取——以西辽河流域为例. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 200-208.
- [30] Lin X C, Chen J J, Wu T H, Yi S H, Chen J, Han X W. Time-series simulation of alpine grassland cover using transferable stacking deep learning and multisource remote sensing data in the google earth engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103964.
- [31] 梁锦涛, 陈超, 孙伟伟, 杨刚, 刘志松, 张自力. 长时序 Landsat 和 GEE 云平台的杭州湾土地利用/覆被变化时空格局演变. 遥感学报, 2023, 27(6): 1480-1495.
- [32] 袁乃全, 熊丽军. 基于 GEE 与集成学习的土地覆盖信息提取方法. 地理空间信息, 2023, 21(5): 76-79.
- [33] Cheng J, Jia N, Chen R S, Guo X N, Ge J Z, Zhou F C. High-resolution mapping of seaweed aquaculture along the Jiangsu coast of China using

- google earth engine (2016-2022). *Remote Sensing*, 2022, 14(24): 6202.
- [34] Guan B, Ning S W, Ding X, Kang D W, Song J L, Yuan H W. Comprehensive study of algal blooms variation in Jiaozhou Bay based on google earth engine and deep learning. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 13930.
- [35] Kislik C, Dronova I, Grantham T E, Kelly M. Mapping algal bloom dynamics in small reservoirs using Sentinel-2 imagery in google earth engine. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109041.
- [36] Song T, Liu G, Zhang H J, Yan F, Fu Y B, Zhang J Y. Lake cyanobacterial bloom color recognition and spatiotemporal monitoring with google earth engine and the Forel-Ule index. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3541.
- [37] 梁顺波, 孙林, 杜永明, 赵祥. 基于 GEE 平台的每年夏冬两期土地覆盖分类方法研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024: 1-14. doi:10.14188/j.2095-6045.20240001
- [38] 陈玉萍. 基于 GEE 平台的农作物快速提取研究. *现代测绘*, 2022, 45(6): 44-47.
- [39] Lemoine G, Léo O. Crop mapping applications at scale: Using google earth engine to enable global crop area and status monitoring using free and open data sources. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). July 26-31, 2015, Milan, Italy. IEEE, 2015: 1496-1499.
- [40] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, Zhang G L, Qin Y W, Thau D, Biradar C, Moore B. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and google earth engine. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 142-154.
- [41] 蒙继华, 何荣鹏, 林圳鑫. Google Earth Engine 在农业管理中的研究现状与展望. *地球信息科学学报*, 2024, 26(4): 1002-1018.
- [42] Liu L Z, Guo Y, Li Y, Zhang Q L, Li Z Y, Chen E X, Yang L, Mu X Y. Comparison of machine learning methods applied on multi-source medium-resolution satellite images for Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) extraction on google earth engine. *Forests*, 2022, 13(5): 677.
- [43] Liu L Z, Zhang Q L, Guo Y, Li Y, Wang B, Chen E X, Li Z Y, Hao S. Mapping coniferous forest distribution in a semi-arid area based on multi-classifier fusion and google earth engine combining Gaofen-1 and Sentinel-1 data: a case study in northwestern Liaoning, China. *Forests*, 2024, 15(2): 288.
- [44] Yuan X G, Liang Y D, Feng W, Li J H, Ren H T, Han S, Liu M Q. Classification of coniferous and broad-leaf forests in China based on high-resolution imagery and local samples in google earth engine. *Remote Sensing*, 2023, 15(20): 5026.
- [45] 徐祖平, 舒朗朗, 吴文桂, 王子芝, 程鑫萌, 廖声熙. 基于 GEE 的香格里拉草地分类及其生物量遥感估算. *草业科学*, 2024, 41(10): 1-17.
- [46] Zhao F, Feng S W, Xie F, Zhu S J, Zhang S J. Extraction of long time series wetland information based on google earth engine and random forest algorithm for a plateau lake basin: A case study of Dianchi Lake, Yunnan Province, China. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109813.
- [47] Pinkeaw S, Boonrat P, Koedsin W, Huete A. Semi-automated mangrove mapping at national-scale using Sentinel-2, Sentinel-1, and SRTM data with google earth engine: a case study in Thailand. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2024, 27(3): 555-564.
- [48] Chen C, Sun W W, Yang Z H, Yang G, Jia M M, Zhang Z J, Liang J T, Chen Y K, Ren T H, Hu X B, Liu Z S. Tracking dynamics characteristics of tidal flats using Landsat time series and google earth engine cloud platform. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 209: 107751.
- [49] Caiza-Morales L, Gómez C, Torres R, Nicolau A P, Olano J M. MANGLEE: A tool for mapping and monitoring MANgrove ecosystem on google earth engine: A case study in Ecuador. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2024, 8(1): 17.
- [50] He M H, Liu Y. Analysis of lake area dynamics and driving forces in the Jiangnan Plain based on GEE and SEM for the period 1990 to 2020. *Remote Sensing*, 2024, 16(11): 1892.
- [51] Minh V A, Quang D N, Tinh N X, Ribbe L. Spatio-temporal dynamics monitoring of surface water bodies in Nhat Le River Basin, Vietnam, by google earth engine. *Journal of Water and Climate Change*, 2024, 15(3): 1262-1281.
- [52] Wu D, Quan D H, Jin R. Analysis of surface water area changes and driving factors in the Tumen River Basin (China and North Korea) using google earth engine (2015—2023). *Water*, 2024, 16(15): 2185.
- [53] Albarqouni M M Y, Yagmur N, Balçık F, Şekertekin A. Assessment of spatio-temporal changes in water surface extents and lake surface temperatures using google earth engine for lakes region, Türkiye. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(7): 407.
- [54] Li H, Somogyi B, Tóth V. Exploring spatiotemporal features of surface water temperature for Lake Balaton in the 21st century based on google earth engine. *Journal of Hydrology*, 2024, 640: 131672.
- [55] Pedreros-Guarda M, Abarca-del-Río R, Escalona K, García I, Parra Ó. A google earth engine application to retrieve long-term surface temperature for small lakes. case: San Pedro lagoons, Chile. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4544.
- [56] Bonkougou B, Bossa A Y, van der Kwast J, Mul M, Sintondji L O. Inner Niger Delta inundation extent (2010—2022) based on Landsat imagery and the google earth engine. *Remote Sensing*, 2024, 16(11): 1853.
- [57] Sellami E M, Rhinane H. Google earth engine and machine learning for flash flood exposure mapping case study: Tetouan, Morocco. *Geosciences*, 2024, 14(6): 152.
- [58] Sy B, Bah F, Dao H. Flood extent delineation and exposure assessment in Senegal using the google earth engine: The 2022 event. *Water*, 2024, 16(15): 2201.
- [59] Kwong I H Y, Wong F K K, Fung T. Automatic mapping and monitoring of marine water quality parameters in Hong Kong using Sentinel-2 image time-series and google earth engine cloud computing. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 871470.

- [60] Wang Q, Song K S, Xiao X M, Jacinthe P A, Wen Z D, Zhao F R, Tao H, Li S J, Shang Y X, Wang Y, Liu G. Mapping water clarity in North American lakes and reservoirs using Landsat images on the GEE platform with the RGRB model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 194: 39-57.
- [61] Wen Z D, Wang Q, Liu G, Jacinthe P A, Wang X, Lyu L L, Tao H, Ma Y, Duan H T, Shang Y X, Zhang B H, Du Y X, Du J, Li S J, Cheng S, Song K S. Remote sensing of total suspended matter concentration in lakes across China using Landsat images and google earth engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 187: 61-78.
- [62] Bhowmik S, Bhatt B. Drought monitoring using MODIS derived indices and google earth engine platform for Vadodara district, Gujarat. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2024, 52(9): 1885-1900.
- [63] Burka A, Biazin B, Bewket W. Spatial drought occurrences and distribution using VCI, TCI, VHI, and google earth engine in Bilate River Watershed, Rift Valley of Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15(1): 1-26. doi.org/10.1080/19475705.2024.2377672
- [64] 甘聪聪, 邱炳文, 张建阳, 姚铨鑫, 叶智燕, 黄姮, 黄莹泽, 彭玉凤, 林艺真, 林多多, 苏中豪. 基于 Sentinel-1/2 动态耦合移栽期特征的水稻种植模式识别. *地球信息科学学报*, 2023, 25(1): 153-162.
- [65] 冯婧文, 丁雪, 易邦进. 基于 GEE 的昆明市生态系统服务价值与生态风险变化. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 335-345.
- [66] 郭涛, 王思, 刘泳伶, 黄平, 李疆. 基于遥感云计算的自然资源动态监测研究. *中国农业信息*, 2021, 33(5): 32-41.
- [67] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, Belward A S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [68] Gray M E, Zachmann L J, Dickson B G. A weekly, continually updated dataset of the probability of large wildfires across western US forests and woodlands. *Earth System Science Data*, 2018, 10(3): 1715-1727.
- [69] 江德婷, 童旭东, 陈冬花, 刘赛赛, 杜一莎, 樊景威. 基于 GEE 云计算 LandTrendr 算法的长三角森林扰动与增益连续监测. *南京信息工程大学学报*, 2024: 1-15. doi: 10.13878/j.cnki.jnuist.20230225002.
- [70] 闫志远, 张圣微, 王怡璇. 基于 GEE 的 1982—2021 年内蒙古地区植被覆盖度时空动态及气候响应特征. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 94-102.
- [71] Velastegui-Montoya A, Montalv n-Burbano N, Carri n-Mero P, Rivera-Torres H, Sadeck L, Adami M. Google earth engine: A global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 2023, 15(14): 3675.
- [72] Khan S M, Shafi I, Butt W H, de la Torre Diez I, Flores M A L, Gal n J C, Ashraf I. A systematic review of disaster management systems: approaches, challenges, and future directions. *Land*, 2023, 12(8): 1514.
- [73] Liu C C, Shieh M C, Ke M S, Wang K H. Flood prevention and emergency response system powered by google earth engine. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1283.
- [74] Amani M, Ghorbanian A, Ali Ahmadi S, Kakooei M, Moghimi A, Mirmazloumi S M, Moghaddam S H A, Mahdavi S, Ghahremanloo M, Parsian S, Wu Q S, Brisco B. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 5326-5350.
- [75] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 刘一韬, 李世卫. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4): 600-611.
- [76] Dinerstein E, Olson D, Joshi A, Vynne C, Burgess N D, Wikramanayake E, Hahn N, Palminteri S, Hedao P, Noss R, Hansen M, Locke H, Ellis E C, Jones B, Barber C V, Hayes R, Kormos C, Martin V, Crist E, Sechrest W, Price L, Baillie J E M, Weeden D, Suckling K, Davis C, Sizer N, Moore R, Thau D, Birch T, Potapov P, Turubanova S, Tyukavina A, de Souza N, Pintea L, Brito J C, Llewellyn O A, Miller A G, Patzelt A, Ghazanfar S A, Timberlake J, Kl ser H, Shennan-Farp n Y, Kindt R, Lilles  J P B, van Breugel P, Graudal L, Voge M, Al-Shammari K F, Saleem M. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *Bioscience*, 2017, 67(6): 534-545.
- [77] 郭静, 龙慧灵, 何津, 梅新, 杨贵军. 基于 Google Earth Engine 和机器学习的耕地土壤有机质含量预测. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 130-137.
- [78] 王汇涵, 张泽, 康孝岩, 林皎, 印彩霞, 马露露, 黄长平, 吕新. 基于 Sentinel-2A 的棉花种植面积提取及产量预测. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 205-214.
- [79] 马丹, 汤志伟, 马小玉, 邵尔辉, 黄达沧. 基于 GEE 的中国不同生态系统林火驱动力研究. *应用科学学报*, 2024, 42(4): 684-694.
- [80] 赵梓琦. 基于 GEE 的黑龙江省松花江流域水质等级遥感反演. *价值工程*, 2023, 42(35): 133-135.
- [81] Waleed M; Sajjad M; Shazil M S; Tariq M; Alam M T. Machine learning-based spatial-temporal assessment and change transition analysis of wetlands: An application of google earth engine in Sylhet, Bangladesh (1985—2022). *Ecological Informatics*, 2023, 75: 102075.
- [82] Kerdiles H, Rembold F, Meroni M, Urbano F, Lemoine G, Perez-Hoyos A, Csak G. ASAP—Anomaly hot spots of agricultural production, a new global early warning system for food insecure countries. 2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics. August 7-10, 2017, Fairfax, VA, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [83] Sulova A, Jokar Arsanjani J. Exploratory analysis of driving force of wildfires in Australia: An application of machine learning within google earth engine. *Remote Sensing*, 2020, 13(1): 10.
- [84] Tao H, Song K S, Liu G, Wen Z D, Wang Q, Du Y X, Lyu L L, Du J, Shang Y X. Songhua River basin's improving water quality since 2005 based on Landsat observation of water clarity. *Environmental Research*, 2021, 199: 111299.
- [85] 牟晓莉, 李贺, 黄翀, 刘庆生, 刘高焕. Google Earth Engine 在土地覆被遥感信息提取中的研究进展. *国土资源遥感*, 2021, 33(2): 1-10.