

# 遥感云计算平台相关文献计量可视化分析

闫凯<sup>1</sup>, 陈慧敏<sup>1</sup>, 付东杰<sup>2,5</sup>, 曾也鲁<sup>3</sup>, 董金玮<sup>4,5</sup>, 李世卫<sup>6</sup>,  
吴秋生<sup>7</sup>, 李翰良<sup>1</sup>, 杜姝渊<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 美国斯坦福卡内基研究所 全球生态学系, 加州 94305;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

5. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100101;

6. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195;

7. 美国田纳西大学 地理系, 田纳西州 37996

**摘要:** 在遥感大数据时代背景下, 遥感云计算平台的出现改变了遥感数据处理和分析的传统模式, 极大地提高了运算效率, 使得全球尺度的快速分析成为可能。国内外已有众多学者利用遥感云计算平台开展研究, 然而相对缺乏对遥感云计算平台发展和应用的客观性综述。本文基于 Web of Science (WoS) 和中国知网 CNKI (China National Knowledge Infrastructure) 的文献数据, 检索了 2011-01—2021-04 与遥感云计算平台相关的文献, 借助文献计量方法对检索到的数据进行了发文量分析、合作分析、关键词共现分析以及文献共被引分析。结果表明: (1) 国内外基于遥感云计算平台的应用研究均呈上升趋势, 中国和美国是利用遥感云计算平台进行研究最活跃的国家, 中国科学院是最活跃的机构; (2) 相关学科交叉较为广泛, 涉及遥感、环境科学与生态学、计算机科学、电子电力工程等领域, 其中遥感学科是利用遥感云计算平台研究最多的领域, 环境科学与生态学以及计算机科学与其他学科领域联系较密切; (3) 目前谷歌地球引擎 GEE (Google Earth Engine) 是应用最为广泛的遥感云计算平台, 此外亚马逊网络服务云 (Amazon Web Services Cloud)、中科院先导地球大数据挖掘分析系统 (EarthDataMiner)、PIE-Engine 等平台也处于迅速发展阶段; (4) 大范围的土地覆被制图、土地利用、植被变化、气候变化是遥感云平台的应用热点领域, 而环境健康评估和人类活动对环境的影响研究也将成为遥感云平台未来的重要应用领域。本文研究结果定量展示了遥感云计算平台的发展历程、研究热点和应用情况, 为相关研究人员把握领域发展动态并挖掘有价值的新研究方向提供了参考。

**关键词:** 文献计量, 可视化, 遥感, 大数据, 遥感云计算平台

**引用格式:** 闫凯, 陈慧敏, 付东杰, 曾也鲁, 董金玮, 李世卫, 吴秋生, 李翰良, 杜姝渊. 2022. 遥感云计算平台相关文献计量可视化分析. 遥感学报, 26(2): 310-323

Yan K, Chen H M, Fu D J, Zeng Y L, Dong J W, Li S W, Wu Q S, Li H L and Du S Y. 2022. Bibliometric visualization analysis related to remote sensing cloud computing platforms. National Remote Sensing Bulletin, 26(2): 310-323 [DOI: 10.11834/jrs.20211328]

## 1 引言

从 1960 年第一颗美国气象卫星成功发射开始, 截至 2021-01, 全球在轨卫星已超 3300 颗。随着对地观测技术的发展, 遥感传感器和平台也在不断地改进和增加, 涵盖了光学、热红外、微波、激光雷达、荧光、夜间灯光等多种观测方式。相

应地, 每日获取的遥感数据量呈现指数级增长, 空间分辨率、时间分辨率等技术指标在不断提高, 人类对地球的综合观测能力达到了空前水平 (Ma 等, 2015; 付东杰等, 2021; 李德仁等, 2014), 进而推动了遥感技术在国土资源、城市规划、农林气象、生态环境等领域的广泛应用。例如在国土变化监测方面, 使得过去的区域监测变成全覆

收稿日期: 2021-05-18; 预印本: 2021-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41901298); 中央高校基本科研业务费(编号:2652018031)

第一作者简介: 闫凯, 1988 年生, 男, 副教授, 研究方向为植被定量遥感模型、遥感产品业务化生产与分析。E-mail: kaiyan@cugb.edu.cn

盖的连续过程监测 (Liu 等, 2018); 在生态环境监测方面, 可对发生的火灾进行及时的监测与受灾面积提取, 为灾情评估和灾后修复提供重要依据 (Masocha 等, 2018)。

遥感数据已兼具了大数据的典型特征: 体量大 (volume)、多样性 (variety)、变化快 (velocity)、准确性 (veracity)、价值大 (value), 同时还呈现出新的“四多”特点: 多载荷、多分辨、多时相以及多要素 (付琨 等, 2021)。遥感数据的免费获取和处理方式的不断更新已促使我们进入一个前所未有的遥感大数据时代 (董金玮 等, 2018)。

大数据的存储、处理和共享, 对计算机的处理性能以及科研人员提出了很高的要求。传统的遥感研究需要下载大量数据, 不仅耗费人力还需大量物力; 当涉及大范围、长时间、多源遥感数据时, 需要在服务器或超级计算机上进行, 使得不具备硬件支撑的普通用户无法展开研究。遥感云计算技术的发展和平台的出现改变了传统遥感数据处理和分析的模式, 为遥感大数据挖掘、处理和分析带来了前所未有的机遇。用户无需下载数据到本地, 无需在本地安装软件, 在网页浏览器上便可编程进行云计算, 节省大量数据下载和预处理时间, 从而将更多的精力集中在科学分析上。同时, 按照一定规范存储在云平台上的长时间序列多源数据, 可有效解决数据存储格式、时空分辨率和投影不一致等问题对用户带来的困扰。用户也可以方便地公开自己的算法并将自己的资源与他人共享, 进而实现算法和数据资源的良性共享。

在多个遥感云计算平台中, 目前以美国谷歌地球引擎 GEE (Google Earth Engine) 发展最为成熟、应用最为广泛 (Gorelick 等, 2017; 付东杰 等, 2021)。其他遥感云计算平台也处于迅速发展阶段, 如美国航空航天局的 NEX (NASA Earth Exchange)、笛卡儿实验室的 Geoprocessing Platform、澳大利亚的地球科学数据立方体 (Geoscience Data Cube) (Lewis 等, 2017)、微软的行星计算机 (Planetary Computer), 以及中国科学院“地球大数据科学工程” (CASEarth) 的“地球大数据挖掘分析系统 (EarthDataMiner) 云服务” (Liu 等, 2020)、航天宏图信息技术股份有限公司所开发 PIE-Engine 等。另外, 越来越多商业公司的云服务也正积极投入到遥感云平台建设中来, 包括亚马逊

云、阿里云、腾讯云、华为云、商汤科技等。

遥感云计算平台已在土地、植被、气候、农业等领域中得到了广泛的应用, 并已有学者对这些应用进行了综述性分析。例如 Ceccherini 等 (2020) 详细介绍了遥感云平台在全球区域森林变化中的应用。付东杰等 (2021) 梳理了国内外遥感云计算平台的发展现状, 并概述了其在地球科学方面的主要应用。有别于上述综述论文, 本文将通过文献计量分析视角, 借助社会网络分析方法, 对遥感云计算平台相关的文献进行发文量分析、国家和机构合作分析、学科互动分析、关键词分析及文献共被引分析, 以此更加客观地回顾了遥感云计算平台自 2011 年以来的发展历程、研究热点及应用情况。

## 2 文献检索与分析方法

### 2.1 检索策略

检索数据来源为 Web of Science (WoS) 中的核心数据集以及中国知网 CNKI (China National Knowledge Infrastructure) 中的学术期刊和学位论文。在 WoS 中, 检索方式选择高级检索, 检索式根据主题 TS (Topics) 确定, 文献类型选择 Article 与 Review, 语言为 English, 导出格式为 .txt, 导出内容涵盖了标题、来源、发表年份、摘要、关键词等。CNKI 中检索方式采取专业检索, 检索式根据主题 SU (Subject) 和篇名、关键词、摘要 TKA (Title, Keywords, Abstract) 确定, 仅选取中文文献, 导出格式为 RefWorks, 导出内容包括标题、摘要、关键词、发表年份与来源等。随着近几年来越来越多的遥感云计算平台的出现与使用, 且目前应用最为广泛的平台 GEE 在 2011 年被详细介绍, 所以时间跨度从 2011 年开始, 通过检索得到 2021 年发文量已远超 2015 年一整年, 时间跨度最终选为 2011 年至 2021-04-12。

由于本篇综述重点关注遥感云计算平台的发展, 而非更大范畴的遥感云计算, 因而在人工筛选环节我们通过人工阅读文献的方式将研究内容不涉及遥感云计算平台的文献进行了剔除。例如, 在 WoS 检索得到的数据库中, Deng 等 (2013) 发表的“Web-service-based Monitoring and Analysis of Global Agricultural Drought”一文主要介绍了一种建立全球农业干旱监测和预报系统的网络服务

方法,并没有涉及遥感云计算平台,因此予以删除。而在CNKI检索得到数据库中也有类似的情况,晏磊等(2019)发表的“中国无人机遥感技术突破与产业发展综述”一文,主要阐述总结了

中国无人机遥感的发展进程,与本文研究关注主题不符,同样予以剔除。经过人工筛选环节,最终从WoS和CNKI数据库中分别筛选出512篇和286篇与本文研究主题高度相关的文献,这些文献最终被应用于本文的研究。分析中具体检索式及检索结果如表1所示。

表1 基于WoS与CNKI 2011年—2021年数据检索结果  
Table 1 Data retrieval results of WoS and CNKI from 2011 to 2021

数据库	检索式	检索结果/篇	筛选结果/篇
WoS	((TS="remote sensing" OR TS="rs") AND (TS="big data" OR TS="big earth data" OR TS="cloud computing" OR TS="cloud platform" OR TS="earth engine"))	871	512
CNKI	(SU=('遥感' + 'remote sensing') AND SU=('大数据'+ 'big data'+ 'big earth data'+ '云计算'+ '云平台'+ 'cloud computing'+ 'cloud platform'+ 'earth engine')) OR (TKA=('遥感'+ 'remote sensing') AND TKA=('大数据'+ 'big data'+ 'big earth data'+ '云计算'+ '云平台'+ 'cloud computing'+ 'cloud platform'+ 'earth engine'))	2264	286

注:TS:WoS主题;SU:CNKI主题;TKA:篇名、关键词、摘要。

## 2.2 分析方法与工具

本文主要使用CiteSpace工具,采用文献计量分析法以及社会网络分析法对检索到的文献进行科学计量分析。主要就遥感云计算平台的发展历程、合著网络、学科互动及研究热点展开讨论。

### 2.2.1 文献计量分析法

文献计量是一种集数学、统计学和文献学为一体,基于数理统计的定量分析方法(钟赛香等,2014)。该方法主要对文献引文、作者和关键词等做共词分析,从而客观地评估研究领域的发展历程、研究热点并预测未来发展趋势(Donth等,2020;Liu和Gui,2016;Van Raan,2014);还可以处理大量的“文献数据”,使研究者发现该领域的潜在结构;通过将数据可视化分析,允许研究人员更直接掌握该领域的研究内容并减少研究者的主观偏见(Hu等,2017;Zupic和Čater,2015;Zyoud和Zyoud,2021)。

文献计量方法起源较早(Kessler,1963;Small,1973),但是随着带有引文数据并易于访问的在线数据库(如WoS)的增加和用于文献计量分析软件(如CiteSpace,HiteCite,BibExcel)的开发,才逐渐引起学者的广泛关注,现已被应用到信息科学、社会学、科学史、自然地理学和测绘学等多种领域(Bornmann和Mutz,2015;Chen等,2011;Daim等,2006;Gingras,2010;Yan等,2021)。

### 2.2.2 社会网络分析方法

社会网络分析方法(Social network Analysis)又

称结构分析法(Structural Analysis),是一种考虑个体之间互相依赖性的定量分析方法。社会网络由节点和线组成,它可以直观地展示网络的整体结构、个人在网络中的位置以及与其他个人的关系(Wolfe,1995)。社会网络分析法在合著网络分析与关键词共现网络分析中已得到了很好地应用(李亮和朱庆华,2008;魏瑞斌,2009)。

中介中心性BCD(Betweenness Centrality Degree)可以衡量节点在网络中的重要性。有两类节点可能具有较高的中介中心性:(1)与其他节点高度相连的枢纽节点;(2)位于不同聚类之间的节点(Chen等,2012a)。BCD的函数表达式如下:

$$BCD(\text{node}_i) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\rho_{jk}(i)}{\rho_{jk}}$$

式中, $\rho_{jk}$ 代表结点 $j, k$ 之间的最短路径数, $\rho_{jk}(i)$ 代表通过结点 $i$ 的路径数(Cui等,2019;Yan等,2021)。

在合著网络中,节点可以代表国家或机构,路径则代表了国家与国家或机构与机构之间的联系;同理,在关键词共现网络分析中,节点代表关键词,连接两节点的路径代表了这两个关键词同时出现在一篇文献中。具有高中介中心性的节点在可视化网络分析时会以紫色圆圈显示出来(Fang等,2018)。

### 2.2.3 CiteSpace知识图谱可视化工具

CiteSpace是由陈超美教授开发的一款能够进行可视化分析的知识图谱工具(Chen等,2012a;Chen,2006),可以用来帮助用户快速而方便地把



握某一科学领域中的前沿方向和热点问题，找出研究中的知识基础和关键文献，识别该领域中的主要研究人员和主要研究机构（侯剑华和胡志刚，2013）。CiteSpace 凭其使用操作简单，适用于多种数据库格式的数据，可以绘制多种图谱，可视化效果好，提供信息量大，自动标识，图谱易解读等强大功能优势吸引了各个专业学科的研究人员（陈悦等，2015）。

本文主要使用 CiteSpace 软件进行了国家和机构的合著网络分析，关键词和共被引分析，绘制了国家和机构合著网络图谱、关键词时区图谱以及引文爆发图谱，以此发现研究领域的热点及研究趋势。

### 3 结果与分析

#### 3.1 发文量分析

##### 3.1.1 国内外年际发文量分析

发文量是科学界对某一领域关注程度的总体表征，可在一定程度上可视化该领域的动态发展（Li 等，2017）。基于检索结果绘制了 2011 年—2021 年国内外发文数量（图 1），国际总发文量 512 篇，国内总发文量 286 篇。虽然 2021 年检索时间截止 04-12，但无论中文还是英文文献的数量都高于 2015 年一整年的发文量。2011 年—2013 年英文文献数量低于中文文献数量，这与检索文献类型、期刊影响因子以及发稿周期有一定关系。2017 年开始英文文献数量持续超于中文文献数量，2018 年中文文献和英文文献发文量都呈现骤增状态，2020 年达到高峰。其中，中文文献 98 篇，英文文献 192 篇。这显示出利用遥感云计算平台进行研究受到越来越多研究者的关注和重视。总的来说，2011 年—2017 年为遥感云计算平台相关研究的起步发展阶段，2018 年至今为遥感云计算平台的快速发展阶段。

##### 3.1.2 国家和机构发文量分析

在 CiteSpace 软件中对 WoS 中检索到的近 11 年数据分别进行国家和机构的合作网络分析，根据分析结果选取了发文量排名前 10 的国家和机构，分别统计了其发文量百分比（图 2，图 3）。发文量位居首位的国家是中国，占总发文量的 33.58%，远超出发文量排名第 2 的美国的 27.34%，英国发

文量占比位居第 3，为 6.06%。澳大利亚和意大利的发文量相等，占比均为 5.69%。发文量排名前 10 的机构中有 7 个来自中国（图 3），这与中国发文量排名位居第一相呼应。其中中国科学院以 40.11% 的发文量占比位居第一，占比是发文量排名第 10 的机构的 12 倍；中国科学院大学和武汉大学分别以 18.13% 和 11.54% 的发文量占比排名第 2 和第 3。美国虽然发文量位居第 2，但是其机构发文量占比靠后，可以看出，中国学者是利用遥感云计算平台进行研究的中坚力量。

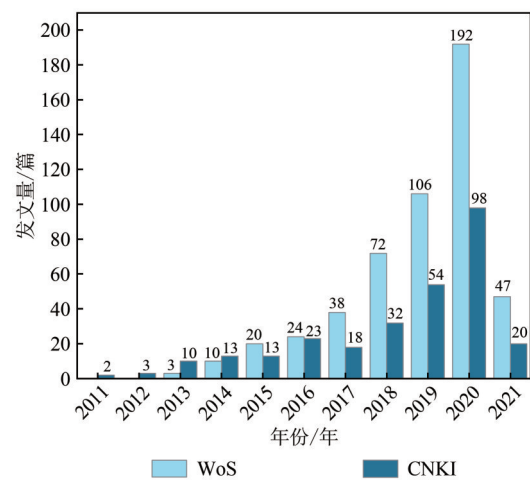


图 1 2011 年—2021 年年际发文数量变化  
Fig. 1 Yearly publications from 2011 to 2021

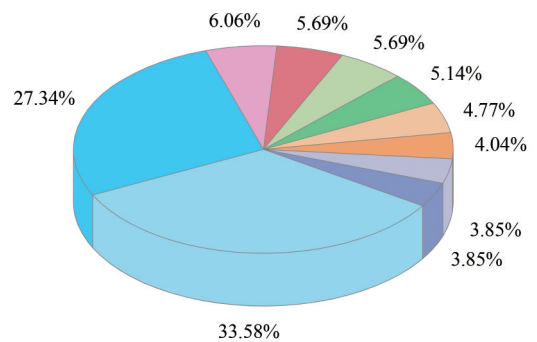


图 2 2011 年—2021 年遥感云计算平台发文量排名前 10 国家占比  
Fig. 2 The top 10 countries with most papers on remote sensing cloud-computing platform from 2011 to 2021

##### 3.1.3 期刊发文量分析

学术期刊是研究者发表成果的主要途径，统计遥感云计算平台研究论文的来源期刊有助于研究人员进行相关文献的查阅和投稿。本文统计了 2011 年—2021 年中发文量排名前 10 的期刊，如表 2

所示。其中刊载篇数最多的期刊是影响因子为4.848的《Remote Sensing》，载文量为156篇。其次是影响因子高达10.164的《Remote Sensing of Environment》，其载文量为58篇。近年来，随着遥感云计算平台的蓬勃发展和应用领域的不断拓展，主要遥感类期刊纷纷加大了对该领域的关注，如《Remote Sensing of Environment》、《IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing》、《Remote Sensing》等国际期刊均开设了与之相关的专刊或专栏，以系统性收录该领域的前沿研究进展。

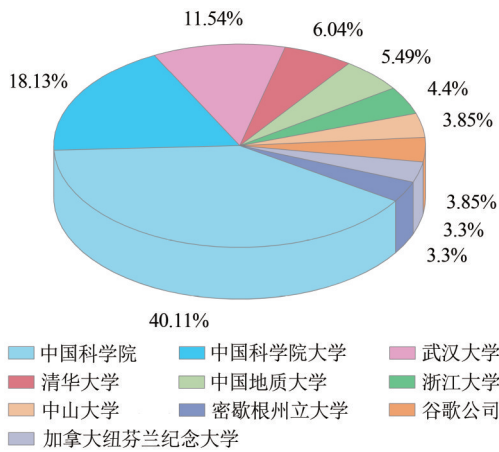


图3 2011年—2021年遥感云计算平台发文量排名前10机构占比

Fig. 3 The top 10 institutions with most papers on remote sensing cloud-computing platform from 2011 to 2021

### 3.2 合作分析

在合作关系中，中介中心性的大小与国家（机构）在同一篇文章中出现的次数有关，国家（机构）的中介中心性越强，则该国家（机构）与其他国家（机构）的合作和联系更密切，在合著知识图谱中，代表该国家（机构）的紫色圆圈厚度越大。在CiteSpace中，通过设置阈值为top n=50得到图4、图5与表3、表4，其中42个发文国家中共存在193对合作关系，116个发文机构中共存在222对合作关系。在所有国家中，中国的发文频次最高，美国的中介中心性最高，可以看出中国学者对遥感云计算平台的研究多于其他国家，美国是该研究领域最活跃的国家。英国的发文频次虽然位居第3，但其中介中心性较低，说明其研究与外部合作交流较少，大多由本土学者完成。

在合著机构中（图5，表4），中国科学院的发

文频次以及中介中心性均为最高，在该研究领域最为活跃；谷歌公司及清华大学有较高的中介中心性，与其他机构联系较为密切。中国科学院大学和武汉大学，虽然发文频次较高，但其中介中心性低于清华大学以及谷歌公司。发文量排名前10的机构中还有中国地质大学、中山大学、加拿大纽芬兰纪念大学和密歇根州立大学。

表2 2011年—2021年遥感云计算平台发文量排名前10的期刊

Table 2 The top 10 journals with most papers on remote sensing cloud-computing platform from 2011 to 2021

期刊	篇数	影响因子 (2021)
《Remote Sensing》	156	4.848
《Remote Sensing of Environment》	58	10.164
《IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing》	27	3.784
《Sensors》	18	3.576
《ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing》	18	8.979
《International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation》	12	5.933
《ISPRS International Journal of Geo-Information》	11	2.899
《IEEE Access》	9	3.367
《Journal of Applied Remote Sensing》	7	1.530
《International Journal of Digital Earth》	5	3.538



图4 合著国家知识图谱

Fig. 4 The knowledge map of collaboration countries

### 3.3 学科分析

从图6中，可以看出关于遥感云计算平台的研究存在学科交叉现象，39个学科之间存在着187对学科交叉与相互应用的关系，其中遥感学科的发文频次最高（表5），这离不开遥感云计算平台为遥感研究者带来的便利，例如研究者可直接使用

云平台中存储的多源遥感数据集进行遥感大数据的快速处理，但其中介中心性在所列学科中偏低，说明在该领域利用遥感云计算平台进行研究的学者与其他领域联系不密切。环境科学与生态学的发文频次和中介中心性均较高，计算机科学和自然地理学虽然发文频次较低，但其中介中心性较高，说明环境科学与生态学、计算机科学和自然地理学与其他学科领域联系较密切。排名前10的学科还有地球科学多学科、地质学和电子电气工程。工程学覆盖了多类专业，例如测绘类、电气信息类、海洋工程类、农业工程类与土木建筑类等，前文分析可知利用遥感云计算平台开展研究的学科之间联系较为密切，所以工程学具有最高的中介中心性0.75是合理的。



图5 合著机构知识图谱

Fig. 5 The knowledge map of collaboration institutions

表3 合著国家频次及中介中心性

Table 3 The frequency and betweenness centrality degree of collaboration countries

国家	频次	中介中心性
中国	183	0.35
美国	149	0.50
英国	33	0.10
澳大利亚	31	0.09
意大利	31	0.20
德国	28	0.24
加拿大	26	0.03
荷兰	22	0.05
西班牙	21	0.03
印度	21	0.07

### 3.4 关键词分析

#### 3.4.1 关键词共现分析

关键词作为论文主题的高度概括，它出现的频率和关联程度可揭示某领域研究的热点和发展趋势。在CiteSpace中经过多次实验后，将阈值分别

设置为top  $n=50$  以及  $g$ -index  $k=5$  绘制 WoS 与 CNKI 数据库的关键词时区图谱 (图 7 (a)、图 7 (b))。时区图中每个年份的关键词均为该关键词首次出现的年份，以后每年该关键词出现几次，代表该关键词的节点也会变大；紫色圆圈越厚，代表该关键词的中介中心性越高。可以将对遥感云计算平台的研究划分阶段，从而进一步深入分析每个阶段的研究热点。

表4 合著机构频次及中介中心性

Table 4 The frequency and betweenness centrality degree of collaboration institutions

机构	频次	中介中心性
中国科学院	73	0.61
中国科学院大学	33	0.14
武汉大学	21	0.03
清华大学	11	0.35
中国地质大学	10	0.02
浙江大学	8	0.06
中山大学	7	0.04
谷歌公司	7	0.32
加拿大纽芬兰纪念大学	6	0.12
密歇根州立大学	6	0.09

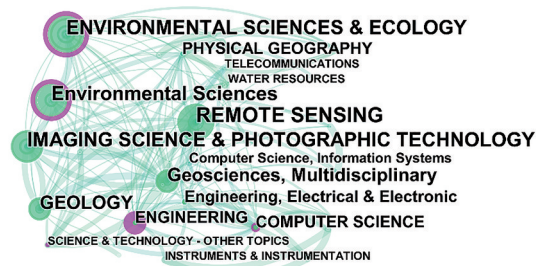


图6 遥感云计算平台主要研究领域及其关系

Fig. 6 Major research areas and connections of remote sensing cloud-computing platform

基于 WoS 的关键词时区图 (图 7 (a))，可以将其划分为 2013 年—2015 年与 2016 年—2021 年两个阶段，因为基于 WoS 检索到的数据没有涵盖 2011 与 2012 年 (图 1)，所以在这两年没有关键词时间段。

2013 年—2015 年为遥感云计算平台的起步发展阶段。2013 年的高频关键词主要是云计算 (cloud computing)，2014 年出现的高频关键词有遥感 (remote sensing)、系统 (system)、挑战 (challenge)，云计算与遥感均有紫色外圈，说明其与其他关键



词共现频率较高。谷歌地球引擎 (Google Earth Engine) 是 2015 年的高频关键词, 该年还出现了分类 (classification)、陆地卫星 (Landsat)、大数据 (big data)、地图 (map)、指数 (index)、表现 (performance) 等关键词。在 2013 年—2015 年这个阶段中, 云计算和云平台的出现改变了传统遥感数据存储与处理的方式, 为遥感大数据面临的挑战带来了解决办法; 遥感云计算平台上有多种遥感数据集供研究者直接使用, 例如 Landsat 数据集、MODIS 数据集、地形数据集等, 其中 Landsat 作为最为著名的陆地资源卫星之一, 其遥感影像数据在云平台上成为使用热点。通过遥感云计算平台还可以实现快速、实时大范围的制图, 例如 Hansen 等 (2013) 首次完成了全球范围的森林变化制图。

表 5 频次排名前 10 的学科及中介中心性  
Table 5 The top 10 disciplines and betweenness centrality degree

学科	频次	中介中心性
遥感	264	0.03
环境科学与生态学	232	0.25
影像科学与摄影技术	225	0.03
环境科学	217	0.15
地球科学多学科	174	0.05
地质学	174	0.05
工程学	90	0.75
电子电力工程	73	0.10
计算机科学	70	0.16
自然地理学	66	0.12

2016 年—2021 年为遥感云计算平台的快速发展阶段, 研究热点也在逐渐变多。出现的高频关键词有时间序列 (time series)、植被指数 (vegetation index)、算法 (algorithm)、产品 (product)、图像 (image)、准确度 (accuracy)、动态 (dynamics)、气候变化 (climate change)、土地覆盖 (land cover)、中等分辨率成像光谱仪 (MODIS)、地表水 (surface water)、机器学习 (machine learning)、随机森林 (random forest)、分辨率 (resolution)、哨兵 1 号卫星 (Sentinel-1)、哨兵 2 号卫星 (Sentinel-2) 和合成孔径雷达 (SAR)。可以看出该阶段使用遥感云计算平台的应用领域在不断扩展, 涵盖了土地覆盖/土地利用变化、植被变化、气候变化、自然灾

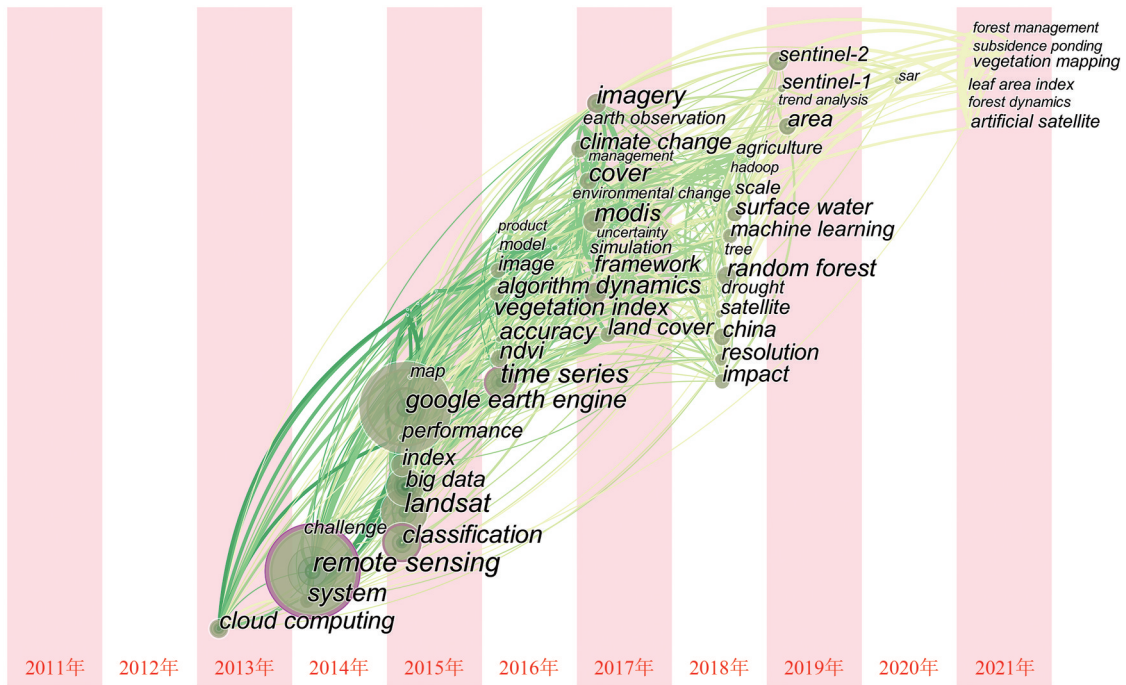
害、农业、水文等相关领域。图像处理也是研究热点, 研究者通过遥感云计算平台可以直接使用已有算法或者自己设置算法进行影像数据的处理。机器学习作为一种分类算法已广泛应用于遥感数据处理 (Schulz 等, 2018), 已成为云平台中研究者的使用热点。哨兵系列数据作为合成孔径雷达数据, 不仅用于陆地和海洋监测, 还可用于紧急救援服务, 成为研究者进行研究较常见的遥感数据集。

基于 CNKI 的关键词时区图 (图 7 (b)), 可以将其划分为 2011 年—2017 年与 2018 年—2021 年两个阶段。

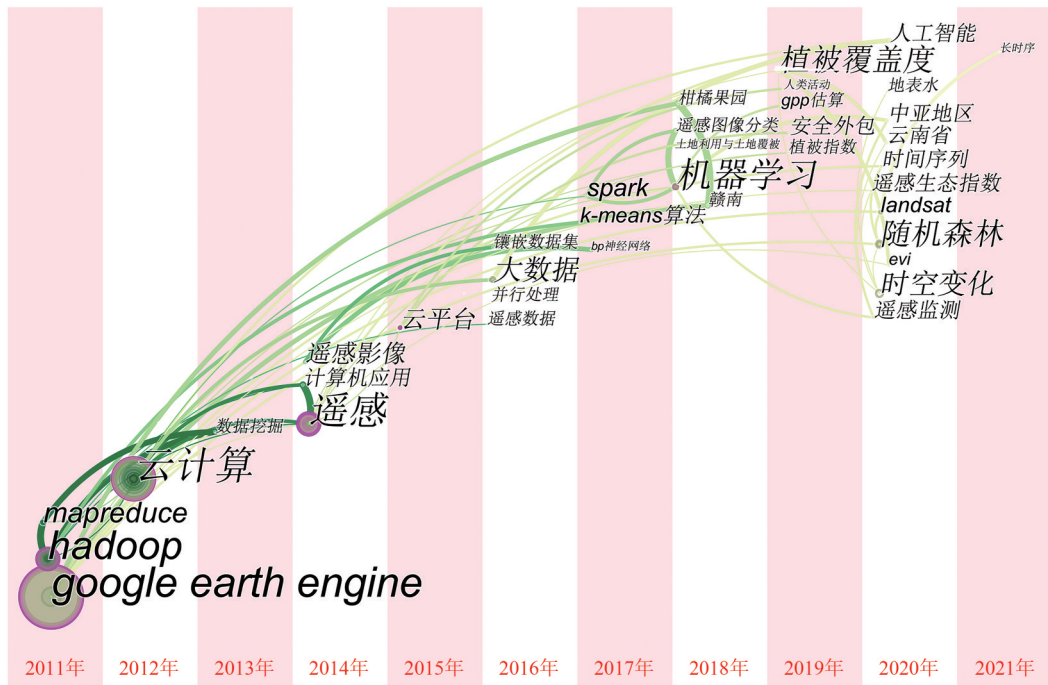
2011 年—2017 年为遥感云计算平台的起步发展阶段。高频关键词有谷歌地球引擎、Hadoop、MapReduce、云计算、数据挖掘、遥感、大数据、并行处理、云平台、Spark 以及 k-means 算法。云计算和云平台的出现为遥感大数据处理和数据挖掘带来了发展潜力。谷歌地球引擎 GEE 是由 Moore 和 Hansen 2011 年在美国地球物理联合会的秋季会议上首次介绍的一种云计算平台, 我国学者在该平台发展之初便开始使用并成为研究热点。Hadoop 和 Spark 是另外两种常见的云平台, MapReduce 作为 Hadoop 的组件之一可为海量数据提供计算也成为了研究热点。

2018 年—2021 年为遥感云计算平台的快速发展阶段, 每个年段的关键词开始变多, 说明遥感云计算平台开始应用于多个方面, 尤其在 2019 年与 2020 年。近几年出现的高频关键词有机器学习、随机森林、土地利用与土地覆被、植被覆盖度、遥感生态指数、GPP 估算、地表水、时空变化等。可以看出该阶段国内研究学者的研究领域主要包括土地、植被、气候与水文。

国内外高频研究热点均包括谷歌地球引擎 GEE, 说明该平台得到了研究人员的高度认同与使用, 并已发表多篇与 GEE 相关的综述性研究论文 (Kumar 和 Mutanga, 2018; Tamiminia 等, 2020; Wang 等, 2020; Amani 等, 2020; Boothroyd 等, 2021)。在遥感云计算平台起步阶段的研究热点均包括遥感、大数据, 在快速发展阶段的研究热点应用领域均涵盖了植被、土地、气候与水文。较于不同的是 Hadoop 与 Spark 云计算平台一度是中国研究者所关注的研究热点; 国际研究热点比国内要多, 例如分类算法、遥感数据集是国际学者的研究热点, 在国内分析中较为少见。



(a) 基于 WoS 的 2011 年—2021 年关键词时区图  
(a) The time-zone map of keywords from WoS from 2011 to 2021



(b) 基于 CNKI 的 2011 年—2021 年关键词时区图  
(b) The time-zone map of keywords from CNKI

图 7 基于 WoS 和 CNKI 的 2011 年—2021 年关键词时区图

Fig. 7 The time-zone map of keywords from WoS and CNKI from 2011 to 2021

### 3.4.2 关键词聚类分析

对图 7 (a) 中的关键词进行聚类共得到 8 个聚类 (图 8), 分别为 “#0 谷歌地球引擎 (Google Earth Engine)”, “#1 公开地图数据 (OpenStreetMap data)”,

“#2 监测环境变化 (monitoring environmental change)”, “#3 水产养殖池 (aquaculture pond)”, “#4 土地覆盖分类 (land cover classification)”, “#5 使用 MODIS (using MODIS)”, “#6 亚热带中国 (subtropical China)”,



“#7农田制图 (crop mapping)”。聚类包含关键词个数从0—7由大到小递减,即#0聚类为包含关键词个数最多的类别,#7聚类反之。与关键词共现分析中得出的结论不谋而合,遥感云计算平台研究热点包括土地、森林、水资源、多源数据、共享资源等话题。

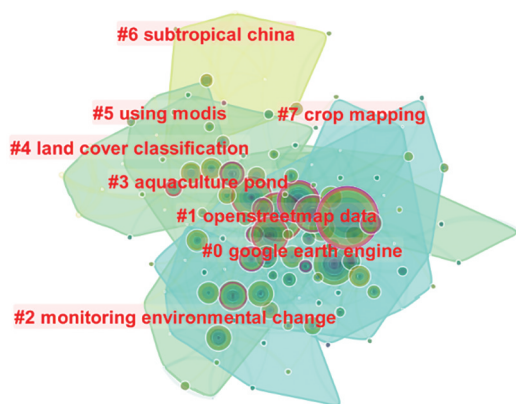


图8 基于WoS的关键词聚类知识图谱

Fig. 8 The cluster knowledge map of keywords from WoS

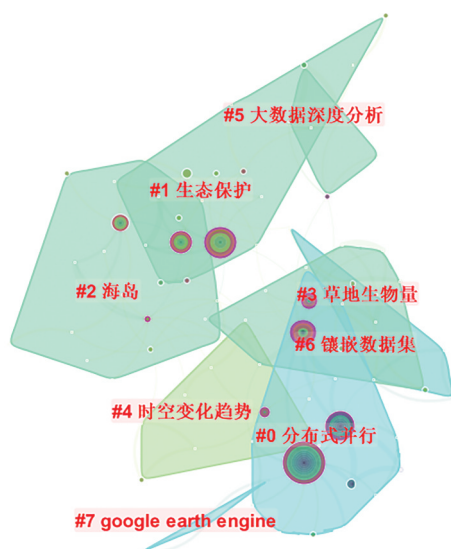


图9 基于CNKI的关键词聚类知识图谱

Fig. 9 The cluster knowledge map of keywords from CNKI

对图7(b)中的关键词进行聚类共得到8个聚类(图9),分别为“#0分布式并行”,“#1生态保护”,“#2海岛”,“#3草地生物量”,“#4时空变化趋势”,“#5大数据深度分析”,“#6镶嵌数据集”,“#7Google Earth Engine”。从图9中可以看出,聚类比较分散,与关键词分析中得出的结果不太一致,不如基于WoS的关键词聚类图谱(图8)效果好,这和总的发文量以及论文质量有一定关系;另外可以看出基于WoS与CNKI的聚类结果不一

致,与中英文内容差异有关。

### 3.5 文献共被引分析

文献共被引是指两篇被引文献在同一篇施引文献中同时作为参考文献出现,共被引分析可以展示出研究领域的高引论文,得到关键文献,为希望快速而较为全面地了解领域研究进展情况的学者提供文献阅读推荐。CiteSpace软件中涵盖了J.Kleinburg的突发检测算法,通过该算法可对文本数据进行挖掘,对数据流进行爆发性检测,并在庞大的数据中提取有意义的、在一段时间内引起过相关主题密集增长的结构点。在本研究中,该结构点表现为在一定时间内出现爆发式引用的文献,以突现强度量化该文献在一定时间内造成的影响。在CiteSpace软件中,以1a为时间间隔单位,选择每个时间段被引频次在前50的文献节点,得到爆发引文(图10),深蓝色初现时间结点为该文献发表时间,红色为出现爆发式引用的时间段。

参考文献	爆发强度	爆发引用时间	持续时间
Ma, 2015	5.1	2016—2017	
Hansen, 2013	3.68	2016—2017	
Yang, 2011	3.14	2014—2017	
Xiong, 2017	2.95	2019—2021	
Giachetta, 2015	2.92	2017—2018	
Gorelick, 2017	2.86	2019—2021	
Adam, 2010	2.4	2016—2017	
Chen, 2012	2.4	2016—2017	

图10 2011年—2021年引文爆发前8篇文献

Fig. 10 The top 8 most cited references from 2011 to 2021

由图10可知, Ma等(2015)一文的爆发强度最强,为5.1,爆发引用时间为2016年—2017年,该文献分析了遥感大数据及其面临的挑战,以及当时最先进的遥感大数据处理技术;介绍了云计算平台(例如亚马逊云、微软云、Hadoop平台)的优势,成为研究者了解遥感云计算平台发展可借鉴的一篇文献。Hansen等(2013)一文的爆发强度为3.68,位居第二,其爆发引用时间为2016年—2017年,该文献完成了首次全球森林变化制图研究,证实了遥感云计算平台的发展为全球大规模研究带来了可能。Giachetta(2015)的爆发引用时间为2017年—2018年,该文献在Hadoop环境下为地理空间数据处理提供了更好的数据管理和处理算法。Hadoop技术是在GEE使用之前应用较为广泛的云计算平台技术。Yang等(2011)、Adam等

(2010) 和 Chen 等 (2012b) 这 3 篇文献爆发引用时间均在 2018 年之前, 处于遥感云计算平台起步发展阶段 (图 1), 研究者可以了解在遥感大数据需求下云计算平台为地球数据处理带来的优势。爆发引用时间从 2019 年—2021 年的两篇文献均提到了目前应用最广泛的云平台 GEE。Gorelick 等 (2017) 是第一篇由 GEE 主要开发者来全面介绍 GEE 的综述论文, 其详细介绍了 GEE 的数据分布模式、系统结构、应用以及未来面临的挑战; Xiong 等 (2017) 充分利用 GEE 完成了非洲大陆的自动农田制图, 同时将算法部署在该平台上供其他研究学者使用。

### 3.6 研究热点与研究趋势分析

通过关键词共现和文献共被引分析, 我们将对研究热点与研究趋势展开讨论。

研究学者的研究热点主要集中于土地覆盖/土地利用的要素类监测、植被变化、气候变化、水文与自然灾害等方面。遥感云计算平台的产生使得全球研究成为可能, 云平台提供了更高的可访问性和经济性, 具有灵活的处理能力、内存和磁盘大小。GEE 是研究学者广泛使用的遥感云平台, 虽然早期就有, 但近几年才开始广泛应用。遥感云平台涵盖多种数据集, 例如卫星数据、地形数据、土地覆被数据、人口数据、降水和大气数据等。Landsat, MODIS 与 Sentinel-1/Sentinel-2 卫星数据是研究中较为常见的数据, 并有研究者将卫星数据融合, 从而达到空间分辨率和时间分辨率的更好结合 (DeVries 等, 2020)。

在关键词共现分析中没有体现出与人类活动、健康相关的研究热点。事实上, 已有研究者将人类活动对环境的影响在区域范围内展开论述 (Benz 等, 2017; Chaussard 和 Kerosky, 2016), 而云平台的出现使得研究者可以更方便地展开全球范围的研究。城市健康和人类健康都是大家日常生活中关注的热点话题, 有学者通过利用 GEE 调查了影响疾病产生和分布的因素, 包括森林火灾 (Reddington 等, 2015)、年龄和性别 (Smith 和 Kerbache, 2017)。遥感云计算平台未来有望在人类活动与健康领域得到更充分的使用, 并影响到更广泛的学科领域。

## 4 结论和展望

### 4.1 主要结论

遥感云计算平台为激增的遥感大数据处理带来了极大的方便, 通过对遥感云计算平台研究相关文献的计量分析, 得出以下结论:

(1) 国内外对遥感云计算平台的研究均呈上升趋势, 2019 年与 2020 年呈现研究骤增态势。

(2) 中美两国是利用遥感云计算平台进行研究的主要国家, 中国是发文量最多的国家, 美国是活跃度最高的国家。中国科学院是发文量及活跃度最高的机构。谷歌地球引擎 GEE 是国内外近年来广泛使用的遥感云计算平台。

(3) 遥感云计算平台的研究领域涉及多个学科, 发文频次最高的是遥感学科, 这和遥感云计算平台的设计目的相吻合, 遥感云计算平台在环境科学、生态学及地质学方面也得到了广泛应用。通过遥感云计算平台开展的研究热点领域集中在土地覆盖/土地利用变化 (包括大范围农田制图等)、植被变化 (包括全球森林变化、物候、产量估算、植物蒸腾等)、气候变化 (包括气候变化、降水等)、水文 (包括地表水等)、自然灾害 (包括干旱、水涝、旱灾监测等) 等相关应用方面。同时, 该技术未来有望在公共健康与人类活动研究等领域发挥重要作用。

### 4.2 不足

受限于工具和数据筛选策略, 本研究有如下两点不足:

(1) 从数据来源看, 本文使用查准策略在 WoS 与 CNKI 数据库中进行数据检索, 经过人工筛选得到最后需要的文献数据, 在此过程中可能出现漏选的情况。

(2) 在可视化分析时, 经过在 CiteSpace 中设置阈值, 使得图谱美观清晰, 部分文献、主题词、学科并没有办法在图谱上完全展示, 但其仍属于该领域研究的内容。

### 4.3 未来发展趋势

利用遥感云计算平台开展的研究正处于发展上升阶段, 其中美国的谷歌地球引擎 GEE 应用最为广泛。随着中国在遥感领域的持续进步和越来越

越多的中国研究机构/企业加入到遥感云计算平台的开发中, 诸如中国科学院先导专项 A “地球大数据科学工程” 的地球大数据挖掘分析系统 EarthDataMiner 以及航天宏图信息技术股份有限公司的遥感计算云服务 PIE-Engine 等国产平台的不断完善, 也发挥了重要作用。

虽然遥感云计算平台正处于快速发展阶段, 但其还有一定局限性, 例如存储和计算资源的有限、信息服务层次的欠缺、部分数据类型的限制和数据质量控制的不统一等问题正限制着遥感云计算平台的进一步应用 (付东杰等, 2021; Wu 等, 2020)。上述问题将在未来遥感云计算平台发展过程中得到重点关注。此外, 基于遥感云计算平台的二次开发建立更便于用户使用和交互的应用工具 (如吴秋生开发的 GEEmap) (Wu, 2020)、APP (如 Global Surface Water Explorer) (Pekel 等, 2016) 是近年来以及未来的重要发展方向。

当前国内外研究学者利用遥感云计算平台进行研究的主要领域集中在遥感学科, 与其他学科之间的交叉联系将不断加强。与之相关的研究热点将从土地覆被/土地利用相关变化、植被变化、气候变化、水文、自然灾害等方面, 不断向诸如环境健康、公共卫生等更广阔的领域拓展。

## 参考文献 (References)

- Adam E, Mutanga O and Rugege D. 2010. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecology and Management*, 18(3): 281-296 [DOI: 10.1007/s11273-009-9169-z]
- Amani M, Ghorbanian A, Ahmadi S A, Kakooei M, Moghimi A, Mirmazloumi S M, Moghaddam S H A, Mahdavi S, Ghahremanloo M, Parsian S, Wu Q S and Brisco B. 2020. 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*, 13: 5326-5350 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052]
- Benz S A, Bayer P and Blum P. 2017. Identifying anthropogenic anomalies in air, surface and groundwater temperatures in Germany. *Science of the Total Environment*, 584-585: 145-153 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.139]
- Boothroyd R J, Williams R D, Hoey T B, Barrett B and Prasojo O A. 2021. Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *WIREs Water*, 8(1): e21496 [DOI: 10.1002/wat2.1496]
- Bornmann L and Mutz R. 2015. Growth rates of modern science: a bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 66(11): 2215-2222 [DOI: 10.1002/asi.23329]
- Ceccherini G, Duveiller G, Grassi G, Lemoine G, Avitabile V, Pilli R and Cescatti A. 2020. Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015. *Nature*, 583(7814): 72-77 [DOI: 10.1038/s41586-020-2438-y]
- Chaussard E and Kerosky S. 2016. Characterization of black sand mining activities and their environmental impacts in the Philippines using remote sensing. *Remote Sensing*, 8(2): 100 [DOI: 10.3390/rs8020100]
- Chen C M. 2006. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3): 359-377 [DOI: 10.1002/asi.20317]
- Chen C M, Hu Z G, Liu S B and Tseng H. 2012a. Emerging trends in regenerative medicine: a scientometric analysis in CiteSpace. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 12(5): 593-608 [DOI: 10.1517/14712598.2012.674507]
- Chen Y, Chen C M, Liu Z Y, Hu Z G and Wang X W. 2015. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains. *Studies in Science of Science*, 33(2): 242-253 (陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. 2015. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. *科学学研究*, 33(2): 242-253) [DOI: 10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009]
- Chen Y C, Yeh H Y, Wu J C, Haschler I, Chen T J and Wetter T. 2011. Taiwan's national health insurance research database: administrative health care database as study object in bibliometrics. *Scientometrics*, 86(2): 365-380 [DOI: 10.1007/s11192-010-0289-2]
- Chen Z Q, Chen N C, Yang C and Di L P. 2012b. Cloud computing enabled web processing service for earth observation data processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(6): 1637-1649 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2205372]
- Cui X T, Guo X Y, Wang Y D, Wang X L, Zhu W H, Shi J H, Lin C Y and Gao X. 2019. Application of remote sensing to water environmental processes under a changing climate. *Journal of Hydrology*, 574: 892-902 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.04.078]
- Daim T U, Rueda G, Martin H and Gerdri P. 2006. Forecasting emerging technologies: use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(8): 981-1012 [DOI: 10.1016/j.techfore.2006.04.004]
- Deng M X, Di L P, Han W G, Yagci A L, Peng C M and Heo G. 2013. Web-service-based monitoring and analysis of global agricultural drought. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79(10): 929-943 [DOI: 10.14358/PERS.79.10.929]
- DeVries B, Huang C Q, Armston J, Huang W L, Jones J W and Lang M W. 2020. Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote*



- Sensing of Environment, 240: 111664 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111664]
- Dong J W, Kuang W H and Liu J Y. 2017. Continuous land cover change monitoring in the remote sensing big data era. *Science China Earth Sciences*, 60(12): 2223-2224 (董金玮, 匡文慧, 刘纪远. 2018. 遥感大数据支持下的全球土地覆盖连续动态监测. *中国科学: 地球科学*, 48(2): 259-260) [DOI: 10.1007/s11430-017-9143-3]
- Donthu N, Kumar S and Pattnaik D. 2020. Forty-five years of Journal of Business Research: a bibliometric analysis. *Journal of Business Research*, 109: 1-14 [DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.10.039]
- Fang Y, Yin J and Wu B H. 2018. Climate change and tourism: a scientometric analysis using CiteSpace. *Journal of Sustainable Tourism*, 26(1): 108-126 [DOI: 10.1080/09669582.2017.1329310]
- Fu D J, Xiao H, Su F Z, Zhou C H, Dong J W, Zeng Y L, Yan K, Li S W, Wu J, Wu W Z and Yan F Q. 2021. Remote sensing cloud computing platform development and Earth science application. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 220-230 (付东杰, 肖寒, 苏奋振, 周成虎, 董金玮, 曾也鲁, 闫凯, 李世卫, 吴进, 吴文周, 颜凤芹. 2021. 遥感云计算平台发展及地球科学应用. *遥感学报*, 25(1): 220-230) [DOI: 10.11834/jrs.20210447]
- Fu K, Sun X, Qiu X L, Diao W H, Yan Z Y, Huang L J and Yu H F. 2021. Multi-satellite integrated processing and analysis method under remote sensing big data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(3): 691-707 (付琨, 孙显, 仇晓兰, 刁文辉, 闫志远, 黄丽佳, 于泓峰. 2021. 遥感大数据条件下多星一体化处理与分析. *遥感学报*, 25(3): 691-707) [DOI: 10.11834/jrs.20211058]
- Giachetta R. 2015. A framework for processing large scale geospatial and remote sensing data in MapReduce environment. *Computers and Graphics*, 49: 37-46 [DOI: 10.1016/j.cag.2015.03.003]
- Gingras Y. 2010. Revisiting the “Quiet Debut” of the Double Helix: A bibliometric and methodological note on the “Impact” of scientific publications. *Journal of the History of Biology*, 43(1): 159-181 [DOI: 10.1007/s10739-009-9183-2]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O and Townshend J R G. 2013. High-resolution global maps of 21st-Century forest cover change. *Science*, 342(6160): 850-853 [DOI: 10.1126/science.1244693]
- Hou J H and Hu Z G. 2013. Review on the application of CiteSpace at home and abroad. *Journal of Modern Information*, 33(4): 99-103 (侯剑华, 胡志刚. 2013. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望. *现代情报*, 33(4): 99-103) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-0821.2013.04.022]
- Hu K, Qi K L, Guan Q F, Wu C Q, Yu J M, Qing Y, Zheng J, Wu H Y and Li X. 2017. A scientometric visualization analysis for nighttime light remote sensing research from 1991 to 2016. *Remote Sensing*, 9(8): 802 [DOI: 10.3390/rs9080802]
- Kessler M M. 1963. Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, 14(1): 10-25 [DOI: 10.1002/asi.5090140103]
- Kumar L and Mutanga O. 2018. Google earth engine applications since inception: usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, 10(10): 1509 [DOI: 10.3390/rs10101509]
- Lewis A, Oliver S, Lyburner L, Evans B, Wyborn L, Mueller N, Raevksi G, Hooke J, Woodcock R, Sixsmith J, Wu W J, Tan P, Li F Q, Killough B, Minchin S, Roberts D, Ayers D, Bala B, Dwyer J, Dekker A, Dhu T, Hicks A, Ip A, Purss M, Richards C, Sagar S, Trenham C, Wang P and Wang L W. 2017. The Australian Geoscience Data Cube—Foundations and lessons learned. *Remote Sensing of Environment*, 202: 276-292 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.015]
- Li D R, Zhang L P and Xia G S. 2014. Automatic analysis and mining of remote sensing big data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 43(12): 1211-1216 (李德仁, 张良培, 夏桂松. 2014. 遥感大数据自动分析与数据挖掘. *测绘学报*, 43: 1211-1216) [DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0187]
- Li L, Liu Y, Zhu H H, Ying S, Luo Q Y, Luo H, Kuai X, Xia H and Shen H. 2017. A bibliometric and visual analysis of global geontology research. *Computers and Geosciences*, 99: 1-8 [DOI: 10.1016/j.cageo.2016.10.006]
- Li L and Zhu Q H. 2008. An empirical study of coauthorship analysis using social network analysis. *Information Science*, 26(4): 549-555 (李亮, 朱庆华. 2008. 社会网络分析方法在合著分析中的实证研究. *情报科学*, 26(4): 549-555) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-7634.2008.04.017]
- Liu C L and Gui Q C. 2016. Mapping intellectual structures and dynamics of transport geography research: a scientometric overview from 1982 to 2014. *Scientometrics*, 109(1): 159-184 [DOI: 10.1007/s11192-016-2045-8]
- Liu J, Wang W and Zhong H. 2020. EarthDataMiner: a cloud-based big earth data intelligence analysis platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 509(1): 012032 [DOI: 10.1088/1755-1315/509/1/012032]
- Liu X P, Hu G H, Chen Y M, Li X, Xu X C, Li S Y, Pei F S and Wang S J. 2018. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing of Environment*, 209: 227-239 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.055]
- Ma Y, Wu H P, Wang L Z, Huang B, Ranjan R, Zomaya A and Jie W. 2015. Remote sensing big data computing: challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 51: 47-60 [DOI: 10.1016/j.future.2014.10.029]

- Masocha M, Dube T, Mpofu N T and Chimunhu S. 2018. Accuracy assessment of modis active fire products in southern african savannah woodlands. *African Journal of Ecology*, 56(3): 563-571 [DOI: 10.1111/aje.12494]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Reddington C L, Butt E W, Ridley D A, Artaxo P, Morgan W T, Coe H and Spracklen D V. 2015. Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. *Nature Geoscience*, 8(10): 768-771 [DOI: 10.1038/ngeo2535]
- Schulz K, Hänsch R and Sörgel U. 2018. Machine learning methods for remote sensing applications: an overview//Proceedings Volume 10790, *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*. Berlin, Germany: SPIE [DOI: 10.1117/12.2503653]
- Small H. 1973. Co-citation in the scientific literature: a new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24(4): 265-269 [DOI: 10.1002/asi.4630240406]
- Smith J M and Kerbache L. 2017. Topological network design of closed finite capacity supply chain networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 45: 70-81 [DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.08.001]
- Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S and Brisco B. 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164: 152-170 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001]
- Van Raan A F J. 2014. *Advances in bibliometric analysis: research performance assessment and science mapping//Bibliometrics: Use and Abuse in the Review of Research Performance*. London: Portland Press Limited: 17-28
- Wang L, Diao C Y, Xian G, Yin D M, Lu Y, Zou S Y and Erickson T A. 2020. A summary of the special issue on remote sensing of land change science with Google earth engine. *Remote Sensing of Environment*, 248: 112002 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112002]
- Wei R B. 2009. An empirical study of keywords network analysis using social network analysis. *Journal of Intelligence*, 28(9): 46-49 (魏瑞斌. 2009. 社会网络分析在关键词网络分析中的实证研究. *情报杂志*, 28(9): 46-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1965.2009.09.010]
- Wolfe A W. 1995. *Social network analysis: methods and applications*. *Contemporary Sociology*, 91(435): 219-220
- Wu B F, Tian F Y, Zhang M, Zeng H W and Zeng Y. 2020. Cloud services with big data provide a solution for monitoring and tracking sustainable development goals. *Geography and Sustainability*, 1(1): 25-32 [DOI: 10.1016/j.geosus.2020.03.006]
- Wu Q S. 2020. Geemap: a Python package for interactive mapping with Google Earth Engine. *Journal of Open Source Software*, 5(51): 2305 [DOI: 10.21105/JOSS.02305]
- Xiong J, Thenkabail P S, Gumma M K, Teluguntla P, Poehnelt J, Congalton R G, Yadav K and Thau D. 2017. Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126: 225-244 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019]
- Yan K, Zou D X, Yan G J, Fang H L, Weiss M, Rautiainen M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2021. A bibliometric visualization review of the MODIS LAI/FPAR products from 1995 to 2020. *Journal of Remote Sensing*, 2021: 7410921 [DOI: 10.34133/2021/7410921]
- Yan L, Liao X H, Zhou C H, Fan B K, Gong J Y, Cui P, Zheng Y Q and Tan X. 2019. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: a review. *Journal of Geo-Information Science*, 21(4): 476-495 (晏磊, 廖小罕, 周成虎, 樊邦奎, 龚健雅, 崔鹏, 郑玉权, 谭翔. 2019. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述. *地球信息科学学报*, 21(4): 476-495) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180589]
- Yang C W, Goodchild M, Huang Q Y, Nebert D, Raskin R, Xu Y, Bambacus M and Fay D. 2011. Spatial cloud computing: how can the geospatial sciences use and help shape cloud computing?. *International Journal of Digital Earth*, 4(4): 305-329 [DOI: 10.1080/17538947.2011.587547]
- Zhong S X, Qu B, Su X Y, Mao P and You X B. 2014. Progress in Chinese geography research reflected from *Acta Geographica Sinica* during 1934-2013: a bibliometrics analysis. *Acta Geographica Sinica*, 69(8): 1077-1092 (钟赛香, 曲波, 苏香燕, 毛鹏, 游细斌. 2014. 从《地理学报》看中国地理学研究的特点与趋势——基于文献计量方法. *地理学报*, 69(8): 1077-1092) [DOI: 10.11821/dlxb201408005]
- Zupic I and Čater T. 2015. Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3): 429-472 [DOI: 10.1177/1094428114562629]
- Zyoud S H and Zyoud A H. 2021. Coronavirus disease-19 in environmental fields: a bibliometric and visualization mapping analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 23(6): 8895-8923 [DOI: 10.1007/s10668-020-01004-5]

## Bibliometric visualization analysis related to remote sensing cloud computing platforms

YAN Kai<sup>1</sup>, CHEN Huimin<sup>1</sup>, FU Dongjie<sup>2,5</sup>, ZENG Yelu<sup>3</sup>, DONG Jinwei<sup>4,5</sup>, LI Shiwei<sup>6</sup>, WU Qiusheng<sup>7</sup>,  
LI Hanliang<sup>1</sup>, DU Shuyuan<sup>1</sup>

*1. School of Land Science and Techniques, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

*2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

*3. Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, Stanford CA 94305, USA;*

*4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China;*

*5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

*6. Beijing Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China;*

*7. Department of Geography, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, United States*

**Abstract:** In the context of big data Remote Sensing (RS), the development of RS cloud computing platforms has changed the mode of RS traditional data processing and analysis. It also has greatly improved the computing efficiency, which enables it to quickly analyze long-term time-series on the global scale. Although many scholars have conducted related works with RS cloud computing platforms, an objective review on the development and application of RS cloud computing platforms is still lacking. In this study, we retrieved the research literature related to RS cloud computing platforms between January 2011 and April 2021 based on the Web of Science and China National Knowledge Infrastructure. The retrieved data were analyzed in terms of publication volume, collaboration analysis, keyword co-occurrence analysis, and co-citation analysis using bibliometric methods. Results show that (1) the number of studies based on RS cloud computing platforms is increasing. China and the United States are the most active countries in this field, and the Chinese Academy of Sciences (CAS) is the most active institution. (2) The intersection of related disciplines is extensive, and it involves RS, environmental science and ecology, computer science, engineering, electrical and electronics, and other disciplines. Among them, RS is the most researched field using cloud computing platforms, and environmental science and ecology and computer science are more closely connected with other disciplinary fields. (3) At present, Google Earth Engine is a widely used RS cloud computing platform. In addition, Amazon Web Services Cloud, Earth Data Miner (a pioneering earth data mining and analysis system of CAS), PIE-Engine, and other platforms are also in a rapid development stage. (4) Large-scale land cover mapping, land use, vegetation dynamics, and climate change have been the main application areas. Environmental health assessment and research on the impact of human activities on the environment will also be important application areas of the platforms in the future. These results quantitatively demonstrated the development history, research hotspots, and applications of RS cloud computing platforms, which provide a reference for relevant researchers to grasp the development dynamics of the field and explore valuable new research directions.

**Key words:** bibliometric, visualisation, remote sensing, big data, remote sensing cloud computing platform

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41901298); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2652018031)