

遥感云计算平台发展及地球科学应用

付东杰^{1,3}, 肖寒^{1,3}, 苏奋振^{1,3}, 周成虎^{1,3}, 董金玮^{2,3}, 曾也鲁⁴,
闫凯⁵, 李世卫⁶, 吴进^{1,3}, 吴文周^{1,3}, 颜凤芹^{1,3}

1. 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;
2. 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;
3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100101;
4. 斯坦福卡内基研究所 全球生态学系, 加州 94305;
5. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083;
6. 北京航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195

摘要: 人类已有半个多世纪的全球历史遥感数据积累, 这些不断涌现的海量遥感数据形成的遥感大数据为地球科学研究提供了丰富的数据支持; 对遥感大数据快速处理、分析和挖掘是一个新的挑战。遥感云计算平台的出现为遥感大数据挖掘提供了前所未有的机遇, 并彻底改变了传统遥感数据处理和分析的模式, 使得全球尺度的长时间序列快速分析和应用成为可能。本文系统梳理了国内外遥感云计算平台发展现状, 归纳了截止目前遥感云计算平台在地球科学领域应用的主要方向。在此基础上讨论了目前遥感云计算平台的局限性, 并展望了未来需要解决的关键技术和核心问题, 提出了中国遥感云计算平台发展的建议。随着人类对地球的认识需求提升, 遥感云计算平台将会在地学研究中发挥更大的作用, 服务于地学知识的深入及人类社会可持续发展。

关键词: 遥感, 大数据, 遥感云计算平台, 地球科学应用

引用格式: 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

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[DOI:10.11834/jrs.20210447]

1 引言

根据国际卫星对地观测委员会 CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) 的全球卫星任务统计数据, 从1960年第一颗美国气象卫星成功发射至今, 截止2020-09底, 地球轨道上已有558颗对地观测卫星, 人类已有半个多世纪全球尺度的历史遥感数据积累。遥感技术迅速发展, 空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率等技术指标不断提高, 在遥感数据的获取上也趋于多平台、多传感器、多角度的特点。遥感平台和传感器的不断改进和增加使得各种遥感数据量快速增加,

在数据层面上已经体现了体量大 (Volume)、种类多 (Variety)、变化快 (Velocity)、准确性 (Veracity) 和高价值 (Value) 的“5V”特征, 我们进入了一个前所未有的遥感大数据时代。相较于低时空分辨率或时空采样稀疏、不连续的传统遥感数据, 遥感大数据具有多方面优势: (1) 更追求高分辨率、时空连续的全局数据而不是随机或稀疏采样, (2) 更有利于洞察宏观层面的趋势而不是局部的精确度, (3) 更注重多因子相关性分析问题、而不热衷构建难度更大的因果关系。遥感大数据能提供地物更为精细的属性信息, 有助于将地球系统作为一个整体进行研究, 揭示其

收稿日期: 2020-10-09; 预印本: 2020-10-20

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (编号: XDA19060304)

第一作者简介: 付东杰, 1985年生, 男, 助理研究员, 研究方向为定量遥感。E-mail: fudj@lreis.ac.cn

通信作者简介: 苏奋振, 1972年生, 男, 研究员, 研究方向为地理信息与遥感评估、海岸带与海洋利用、空间博弈与海洋战略。E-mail: sufz@lreis.ac.cn

变量之间错综复杂的联系。

不断涌现的海量遥感数据需要大量的存储和计算资源,而传统的台式机或服务器难以满足这一需求。这促使大家寻求新的、第4种或“大数据”科学范式,这种科学范式强调国际合作、数据密集分析、巨大计算资源和高端可视化(Goodchild等,2012)。遥感云计算技术的发展和平台的出现为遥感大数据处理和分析提供了前所未有的机遇,表现在:(1)云端有海量数据资源,无需下载到本地处理,(2)云端提供批量和交互式的大数据计算服务,(3)云端提供应用程序接口API(Application Programming Interface),无需在本地安装软件,才可以进行处理分析。这彻底改变了传统遥感数据本地下载、处理和模式的模式,进一步降低了遥感数据使用的准入门槛,极大提高了运算效率,加速了算法测试的迭代过程,使得原本在台式机或服务器上难以实现的全球尺度地球系统科学快速分析和应用成为可能。

本文在分析国内外遥感云计算平台发展现状和地球科学应用的基础上,分析了现有遥感云计算平台的局限性和未来发展方向,提出中国遥感云计算平台建设和发展建议,以期为科学重大发现和国家重大应用提供支持。

2 遥感云计算平台的发展

目前遥感云计算平台主要以美国谷歌地球引擎GEE(Google Earth Engine)(Gorelick等,2017)发展比较成熟,已经得到广泛应用;中国遥感云计算平台的建设也在快速推进中,如中科院先导专项“地球大数据科学工程”的地球大数据挖掘分析系统EarthDataMiner(Liu等,2020a)、航天宏图的遥感计算云服务平台Pixel Information Expert(PIE)-Engine,已经取得了重要进展。

2.1 谷歌地球引擎 Google Earth Engine

Moore和Hansen(2011)在2011年美国地球物理联合会秋季会议首次介绍了一种利用全球尺度地球观测数据,进行云端分析的全新云计算平台—GEE,该平台集成Landsat 5/7、MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)历史遥感数据以及云端算法,依托Google公司全球百万台服务器,将这种数据密集分析、海量的计算资源和高端可视化科学范式落到实地。Hansen等(2013)最早将GEE应用于全球森林分布和变化监测,实

现了2000年—2012年30 m尺度的全球森林变化监测。该研究采用了12年共654178景Landsat影像,共1000000个Central Processing Unit(CPU)计算时,而GEE依托其10000个CPU进行云端计算,只花了4天时间便完成所有计算,该成果引起了学界和公众的广泛关注,论文引用超过3400次(据Web of Science,截止2020-08)。2019年GEE将深度学习平台TensorFlow耦合进来,进一步提升了其计算分析能力。GEE提供JavaScript和Python两种API,通过这些API可以快速建立基于GEE以及Google云的Web服务。此外,GEE用户可以通过Earth Engine Apps(<https://www.earthengine.app/>[2020-10-09])将成果进行发布。用户可以在GEE上开发自己的算法,并生产系统数据产品或部署由GEE资源支持的交互式应用程序,而无需成为应用程序开发,Web编程或HTML方面的专家。这一模式直接改变了传统遥感先下载数据,在本地用专业软件或者开发相应代码进行研究分析的方式,同时也降低了大数据分析系统的使用门槛。用户可节省大量数据下载和预处理的时间,将更多的精力集中在后端的科学分析。

截止2019-09,GEE共享数据量已超过29 PB,包括超过290个公共的数据集、500万景影像,每天数据量增加大约4000景影像,包括(1)遥感影像数据,包括全球尺度的陆地资源卫星Landsat系列、哨兵Sentinel系列、中等分辨率成像光谱仪MODIS,以及局部区域的高分辨率影像等数据;(2)地形数据,包括地形数据包括全球高程数据,如SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)等,以及区域高程数据,如ArcticDEM等;(3)土地覆被数据,包括全球土地覆被,如GlobCover等,以及区域土地覆被,如NLCD(National Land Cover Database)等;(4)天气、降雨和大气数据,包括表面温度和发射率、长期气候预测和历史插值地表变量、卫星观测反演的大气数据以及短时间预测和观测的天气数据等;(5)人口数据,包括WorldPop和GPW(Gridded Population of the World)两类数据;(6)其他栅格数据,包括全球森林冠层树高Global Forest Canopy Height数据等;以及(7)部分矢量数据,如RESOLVE Ecoregions等(表1)。同时,GEE用户也可以上传自己栅格或矢量数据到Assets进行后续分析。GEE数据集的访问地址为:<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/>[2020-10-09]。

表1 GEE主要共享数据集

Table 1 The primary shared dataset of GEE

	数据集	标称空间分辨率	时间粒度	时间覆盖	空间覆盖	
Landsat	Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	16 d	2013—现在	全球	
	Landsat 7 ETM+	30 m	16 d	2000—现在	全球	
	Landsat 5 TM	30 m	16 d	1984—2012	全球	
	Landsat 4—8 surface reflectance	30 m	16 d	1984—现在	全球	
	Landsat 1—5 MMS	60 m	16 d	1972—1999	全球	
Sentinel	Sentinel 1 A/B ground range detected	10 m	6 d	2014—现在	全球	
	Sentinel 2A MSI	10/20 m	10 d	2014—现在	全球	
	Sentinel-3 OLCI EFR: Ocean and Land Color Instrument	300 m	约2 d	2016—现在	全球	
	Sentinel-5P TROPOMI: TROPospheric Monitoring Instrument	0.01 弧度	近实时	2018—现在	全球	
遥感影像 MODIS	MOD08 atmosphere	1°	每天	2000—现在	全球	
	MOD09 surface reflectance	500 m	每天/8 d	2000—现在	全球	
	MOD10 snow cover	500 m	每天	2000—现在	全球	
	MOD11 temperature and emissivity	1000 m	每天/8 d	2000—现在	全球	
	MCD12 Land cover	500 m	每年	2000—现在	全球	
	MOD13 Vegetation indices	250/500 m	16 d	2000—现在	全球	
	MOD14 Thermal anomalies & fire	1000 m	8 d	2000—现在	全球	
	MCD15 Leaf area index/FPAR	500 m	4 d	2000—现在	全球	
	MOD17 Gross primary productivity	500 m	8 d	2000—现在	全球	
	MCD43 BRDF-adjusted reflectance	500/1000 m	8 d/16 d	2000—现在	全球	
	MOD44 veg. cover conversion	250 m	每年	2000—现在	全球	
	MCD45 thermal anomalies and fire	500 m	30 d	2000—现在	全球	
	ASTER	L1 T radiance	15/30/90 m	每 d	2000—现在	全球
		Global emissivity	100 m	一次	2000—2010	全球
	SMAP	Global soil moisture	0.25 度	3 d	2010—现在	全球
其他遥感数据 航空遥感数据	PROBA-V top of canopy reflectance	100/300 m	2 d	2013—现在	全球	
	EO-1 hyperion hyperspectral radiance	30 m	基于目标	2001—现在	全球	
	DMSP-OLS nighttime lights	1 km	每年	1992—2013	全球	
	VIIRS Nighttime	15 弧秒	月	2012—现在	全球	
	Planet SkySat Public Ortho Imagery	0.8/2 m	无周期	2014—2016	全球部分区域	
	USDA NAIP aerial imagery	1 m	半年	2003—2018	美国本土	
地形数据	Shuttle Radar Topography Mission	30 m	单次	2000	60°N—54°S	
	USGS National Elevation Dataset	10 m	单次	多次	美国	
	USGS GMTED2010	7.5 弧秒	单次	多次	83°N—57°S	
	GTOPO30	30 弧秒	单次	多次	全球	
	ETOPO1	1 弧分	单次	多次	全球	
	ALOS DSM	30 m	单次	多次	全球	
	Australian 5M DEM	5 m	单次	多次(2001—2015)	澳大利亚	

续表

	数据集	标称空间分辨率	时间粒度	时间覆盖	空间覆盖
	AHN Netherlands 0.5m DEM	0.5 m	单次	多次(2007—2012)	荷兰
	Canadian Digital Elevation Model	0.75 弧秒	单次	多次	加拿大
	ArcticDEM	2/5 m	单次	多次	60°N 以北, 及阿拉斯加, 勘察加半岛
	CryoSat-2 Antarctica 1km DEM	1 km	单次	多次(2010—2016)	南极
	WWF HydroSHEDS Hydrologically Conditioned DEM	3/15/30 弧秒	单次	2000	全球
土地覆被	GlobCover	300 m	无周期	2009	90°N—65°S
	USGS National Landcover Database	30 m	无周期	1992—2016	美国本土
	UMD global forest change	30 m	每年	2000—2019	80°N—57°S
	JRC global surface water	30 m	每月	1992—2019	78°N—60°S
	GLCF tree cover	30 m	5年	1992—2016	全球
	USDA NASS cropland data layer	30 m	每年	1992—2019	美国本土
天气, 降水和大气	Global precipitation measurement	6 弧分	3 小时	2014—现在	全球
	TRMM precipitation	15 弧分	3 小时/每月	1998—现在	50°N—50°S
	CHIRPS precipitation	3 弧分	5 d	1981—现在	50°N—50°S
	NLDAS-2/2.1	7.5 弧分	1 小时	1979—现在	北美
	GLDAS-2/2.1	15 弧分	3 小时	1948—现在	全球
	NCEP reanalysis	2.5 度	6 小时	1948—现在	全球
	ORNL DAYMET weather	1 km	每年	1980—现在	北美
	GRIDMET	4 km	每天	1979—现在	美国本土
	NCEP global forecast system	15 弧分	6 小时	2015—现在	全球
	NCEP climate forecast system	12 弧分	6 小时	1979—现在	全球
	WorldClim	30 弧秒	12 景影像	1960—1990	全球
	NEX downscaled climate projections	1 km	每天	1950—2099	北美
人口	WorldPop	100 m	5 年	多次(2000—2020)	全球
	GPW	30 弧秒	5 年	2000—2020	85°N—60°S
其他数据 部分矢量数据	Global Forest Canopy Height	30 弧秒	单次	2005	全球
	RESOLVE Ecoregions		单次	2017	全球
	US EPA Ecoregions		单次	2013	美国
	Large Scale International Boundary		单次	2017	全球
	TIGER : US Census States/Road/Countries/Blocks		单次	2010, 2018	美国
	WWF HydroSHEDS Free Flowing Rivers Network v1		单次	2000	全球
	FAO Global Administrative Unit Layers		单次	2015	全球
	GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space		单次	2017	全球
	Global Power Plant Database		单次	2018	全球
	NOAA NHC HURDAT2 Atlantic hurricane catalog		单次	1851—2018	大西洋盆地
	NOAA NHC HURDAT2 Pacific hurricane catalog		单次	1949—2018	太平洋盆地
	WDPA: World Database on Protected Areas		每月	2017—现在	全球

GEE 提供了大量函数, 包括 11 个大类, 即 (1) 数值运算 Numerical operations, (2) 数组/矩阵运算 Array/matrix operations, (3) 机器学习 Machine learning, (4) 其他逐像素影像操作, (5) 核运算 Kernel operations, (6) 其他影像运算 Other Image Operations, (7) 数据整合 Reducers, (8) 几何运算 Geometry Operations, (9) 表格/集合运算 Table/collection operations, (10) 矢量/栅格运算 Vector/raster operations, (11) 其他数据类型 Other data types。这些函数的运算模式主要有 8 种, 即 (1) 逐像素 Per pixel, (2) 逐矢量 Per feature, (3) 逐影像 Per image, (4) 逐影像瓦片 Per image tile, (5) 逐瓦片 Per tile, (6) 上下文相关 Context-dependent, (7) 流 Streaming, (8) 离散/聚集 Scatter/gather

(Tamiminia 等, 2020)。

2.2 其他遥感云计算平台

除了 Google 公司的 GEE, 其他遥感云计算平台也发展起来, 例如美国航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 NEX (NASA Earth Exchange) (Nemani 等, 2010)、笛卡尔实验室 Descartes Labs、Amazon Web Services (AWS)、数据立方体 Data Cube、CODE-DE (Copernicus Data and Exploitation Platform-DE) 以及中国的地球大数据挖掘分析系统 EarthDataMiner 和 PIE-Engine 等 (表 2)。同时, 越来越多的商业公司, 包括阿里云、腾讯云、商汤科技的 SenseEarth 平台也相继投入到遥感云计算平台的建设中来。

表 2 当前国际和国内主要遥感云计算平台对比
Table 2 Comparison of main remote sensing cloud computing platforms

遥感云计算平台	可用数据	API	网址
GEE(美国)	遥感影像数据, 地形数据, 土地覆被数据, 天气、降雨和大气数据, 人口数据等, 部分矢量数据	JavaScript, Python	https://earthengine.google.com/
NEX(美国)	MODIS, Landsat, VIIRS, GOES, Sentinel-2, NEX 降尺度气候模拟数据集等	MATLAB, IDL 等	https://www.nasa.gov/nex/
笛卡尔实验室 Descartes Labs (美国)	遥感影像 (Landsat, Sentinel, SPOT, Pleiades 等), 气象数据 (NCEP CFSR, NOAA GSOD, NOAA GFS 等), 高程数据, 地理位置/AIS 数据, 土地利用数据等	Python	https://www.descarteslabs.com/
AWS(美国)	Landsat 8, Sentinel 1/2, 中巴地球资源卫星 (CBERS) 数据, OpenStreetMap 数据等	C++, Go, Java, JavaScript, .NET, Node.js, PHP, Python, Ruby	https://aws.amazon.com/cn/earth
数据立方体 Data Cube(澳大利亚)	Landsat, Sentinel, MODIS, 水体, 潮间带高程, 植被覆盖, 动态土地覆被数据集等	Python	https://www.opendatacube.org
CODE-DE(德国)	Sentinel, Landsat, 土地覆被	Python	https://code-de.org/
地球大数据挖掘分析系 统 EarthDataMiner(中国)	卫星遥感数据, 生物生态数据, 大气海洋数据, 基础地理数据及地面观测数据; 地层学与古生物数据、中国生物物种名录、微生物资源数据、组学数据	Python	http://earthdataminer.casearth.cn/
PIE-Engine(中国)	Landsat, Sentinel, 葵花-8 数据集	JavaScript	https://engine.piesat.cn/engine/#/home

注: 缩写全称 VIIRS: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, GEOS: Geostationary Operational Environmental Satellite, IDL: Interface description language, NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, GSOD: Global Summary of the Day, GFS: Global Forecast System, GFSAD: Global Food Security Support Analysis Data, CBERS: China - Brazil Earth Resources Satellite program.

从可用数据, API 和计算平台几个方面, 对其他遥感云计算平台进行归纳, 可得知:

(1) 可用数据。大部分的遥感云计算平台上

的可用数据为公开免费获取的中低分辨率卫星遥感数据 (如 Landsat, Sentinel, MODIS 等), 高程数据, 土地利用数据, 和模型模拟结果数据, 如

NEX 降尺度气候模拟数据集, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 数据等 (表1)。除卫星遥感之外, 地球大数据挖掘分析系统 EarthDataMiner 还提供多学科数据, 例如, 生物生态数据, 大气海洋数据, 基础地理数据及地面观测数据等。笛卡尔实验室 Descartes Labs 除了提供免费数据, 还提供商业数据, 例如 SPOT (Satellite Pour l' Observation de la Terre) 卫星数据, 船舶轨迹数据 AIS (Automatic Identification System) 等

(2) API。表1中几种遥感云计算平台提供的API接口中, Python API接口最多, 有6个。NEX 提供 MATLAB, IDL 接口, PIE Engine 提供 JavaScript API接口。

(3) 计算平台类型。几种遥感云计算平台都部署在云端, 例如 NEX 部署在 NASA Ames 研究中心的先进超算部门, 笛卡尔实验室 Descartes Labs 部署在 Google 云平台, AWS 部署在亚马逊云, CODE-DE 部署在法兰克福数据中心, 地球大数据挖掘分析系统 EarthDataMiner 部署在地球大数据科学工程云平台, PIE Engine 部署在华为云和亚马逊云。

除了上述遥感云计算平台, 基于商汤 SenseRemote 智能遥感解译算法的 SenseEarth (<https://rs.sensetime.com/> [2020-10-09]), 阿里达摩院的泛自然资源行业人工智能引擎 Analytical Insight of Earth (AI EARTH) (<https://cn.aliyun.com/> [2020-10-09]), 以及腾讯联合多家科技公司推出 “WeEarth 超级地球” (<https://cloud.tencent.com/> [2020-10-09]) 也在空间数据处理方面有较快的进展, 已经应用于违建监管、路网规划等城市管理领域, 生态管理等自然资源领域, 保险、期货等商业领域。

3 遥感云计算平台的地球科学应用

截止到2020-09, 遥感云计算平台以GEE应用最为广泛, 其他的还包括NEX, EarthDataMiner等。这里以GEE的科学应用为例, 对遥感云计算平台在地球科学方面的应用进行概述。自GEE发布以来, 研究人员已经利用GEE开展了影像处理、水土气生4个方面应用以及在土地覆被、城市、农业、灾害和其他地学领域的工作 (Amani等, 2020; Tamiminia等, 2020) (图1)。

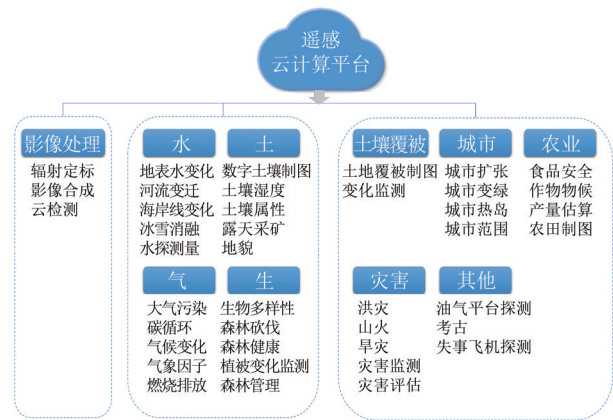


图1 遥感云计算平台在地学领域的应用

Fig. 1 Earth science applications of remote sensing cloud computing platform

以 Nature (含子刊)、Science (含子刊) 和美国国家科学院院刊 (PNAS) 为主期刊上发表的文章为例, 截止2020-08底, GEE 被应用于多个方面: (1) 与土地覆被/土地利用相关应用: 如全球/区域森林变化 (Bastin 等, 2017; Ceccherini 等, 2020; Finer 等, 2018; Hansen 等, 2020; Hansen 等, 2013; Qin 等, 2019)、全球/区域地表水变化 (Donchyts 等, 2016; Pekel 等, 2016; Wang 等, 2020; Zou 等, 2018)、农田制图 (Zeng 等, 2018)、油棕制图 (Ordway 等, 2019)、城市制图 (Liu 等, 2020b)、湖泊浮游植物制图 (Ho 等, 2019)、全球潮滩变化 (Murray 等, 2019)、三角洲变化 (Nienhuis 等, 2020)、全球河流冰覆盖变化 (Yang 等, 2020)、海岸侵蚀 (Overeem 等, 2017)、地貌 (Ielpi 和 Lapôtre, 2020; Valenza 等, 2020), (2) 植被变化相关应用, 包括全球树林恢复潜力 (Bastin 等, 2019)、北极变绿 (Myers-Smith 等, 2020)、植物入侵 (Venter 等, 2018)、碳循环 (Badgley 等, 2017; Bogard 等, 2019; Maxwell 等, 2019; Roopsind 等, 2019; Stocker 等, 2019)、植物蒸腾 (Liu 等, 2020c)、物候 (Laskin 等, 2019)、产量估算 (Burke 和 Lobell, 2017)、生物多样性 (Betts 等, 2017; Dethier 等, 2019; Jung 等, 2019; Pfeifer 等, 2017), (3) 动物相关应用, 如动物栖息地 (Joshi 等, 2016)、动物进化 (Miller 等, 2019)、动物群落变化 (Giezendanner 等, 2020; Hendershot 等, 2020), (4) 气候变化相关应用: 如自然灾害 (Walter 等, 2019)、气候变化 (Tuckett 等, 2019; Venter 等, 2020)、冰冻圈 (Chudley 等, 2019; Kraaijenbrink 等, 2017;

Ryan等, 2019)、山脉积雪厚度, (5) 人类社会经济活动相关应用: 如全球城市可达性 (Weiss等, 2018)、人类健康 (MacDonald和Mordecai, 2019; Wu等, 2020)、考古 (Orengo等, 2020)、社会经济应用 (Müller等, 2016; Watmough等, 2019; Yeh等, 2020)等。

同时, 也利用GEE将相关工作进行了典型应用展示 (软件即服务, Software as a Service, SaaS), 例如: 全球森林监测 (Global Forest Watch, <https://www.globalforestwatch.org/> [2020-10-09]), 生命地图 (Map of Life, <https://mol.org/> [2020-10-09]), 全球地表水制图 (<https://global-surface-water.appspot.com/>, aqua-monitor.appspot.com [2020-10-09]), 疟疾分布制图 (The Disease Surveillance and Risk Monitoring, <https://www.disarm.io/> [2020-10-09]), 土地覆被制图样本点选取 (Collect Earth, <http://www.openforis.org/> [2020-10-09]), 手机数据采集工具 (Open Data Kit Collect, <https://opendatakit.org/> [2020-10-09]), 全球捕鱼监测 (Global Fishing Watch, <http://globalfishingwatch.org/> [2020-10-09]), 蒸散发估算 (EEFlux, <http://eefflux-training.appspot.com/> [2020-10-09]), 生物多样性 (EarthEnv, <http://www.earthenv.org/> [2020-10-09]), 大气模拟计算 (Climate Engine, <https://clim-engine.appspot.com/> [2020-10-09]), 在线土地覆被制图 (Re-Map, <https://remap-app.org/> [2020-10-09]), 全球可达性制图 (<https://access-mapper.appspot.com/> [2020-10-09]), 历史环境和气候分析 (EarthMap, <https://earthmap.org/> [2020-10-09])。

由此可见, 遥感云计算的应用已成为研究土地利用变化、生态和环境变化、气候变化等地理学领域前沿问题的重要工具, 并已开始应用于经济研究等方面。大尺度、高分辨率、长时间序列的快速计算和应用成为可能, 且这些数据与计算结果可在遥感云计算平台方便地进行共享, 迎来了向多种应用场景开放的局面。

4 遥感云计算平台的局限性和启示

遥感云计算平台取得了较大的进展, 并推动了全球尺度重要科学成果的出现。但目前国际上主流的遥感云计算平台仍以国外相关机构或公司开发的产品为主 (如GEE, AWS)。充分认识当前

领先的遥感云计算平台, 并在此基础上推动我们自主研发平台的建设, 是中国地球科学领域亟待解决的问题。目前遥感云计算平台还有一定的局限性。这也是未来发展中国自主遥感云计算平台的着力点。

4.1 当前遥感云计算平台局限性

目前遥感云计算平台的局限性体现在存储和计算资源有限性, 部分数据类型格式不兼容, 对不同投影的转换和支持不够, 难以实现像元间计算, 不支持移动端, 地图出版模块欠缺。

(1) 存储和计算资源的有限性: 以GEE为例, 一般用户的存储空间 (Assets) 只有250 G, 另外, GEE在海量栅格数据处理速度上较为便捷, 但在海量矢量数据 (例如Orbcomm卫星在2018年每天的全球AIS数据量达到千万条数据记录) 处理速度上, 优势并不明显。

(2) 部分数据类型格式不兼容: 以GEE为例, 目前支持的数据格式有矢量的shp格式, 文本的csv格式, 以及栅格geotiff格式, TFRecord格式。而对于科学研究中常用的HDF (Hierarchical Data Format) 格式, LiDAR (Light Detection and Ranging) 点云数据格式等并不支持, 这限制了遥感云计算平台的应用领域。

(3) 对不同投影格式支持不够: 目前遥感云计算平台仅支持类似WGS84的投影, 而对于其他投影并不支持。若试验区在北极或者南极, 在WGS84坐标系下, 遥感数据的像元在北极或者南极会被放大拉伸, 同时, 有可能丢失可能发现的空间相关信息。

(4) 难以实现像元间计算: 目前很多遥感计算分析模型都用到了像元间的分析模型, 例如用到了滑动窗口的时空融合模型STARFM (Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model) (Gao等, 2006), 这些遥感模型目前比较难在遥感云计算平台 (除了NEX) 上面实现。

(5) 不支持移动端的应用: 目前遥感云计算平台并没有完全支持手机, 平板移动端, 而移动端的支持, 意味着用户可以随时用手机, 平板查看, 记录和分析当前位置的云端遥感数据, 矢量数据。和实地验证信息进行结合, 可以迅速获得在室内无法取得的信息。

(6) 排版制图模块不够完善: 对于科研用户来说, 高质量的结果分析图, 对于科研成果共享,

发表非常重要。以GEE为例,目前结果只能在地图上显示,并不能完成标准制图工作,包含指南针,图例和比例尺等以及常用图片(格式pdf, eps或者tif)的输出。

4.2 对中国遥感云计算平台发展的启示

在认识目前遥感云计算平台局限性的基础上,中国遥感云计算平台在发展过程中需要考虑以下几点:

(1) 整合多源数据资源,特别是国产遥感数据。目前中国已有资源系列、高分系列、风云系列、海洋系列、环境与灾害监测系列等遥感卫星数据,将包括国产遥感数据在内的中国自主数据整合入遥感云计算平台数据集,将是中国自主遥感云计算平台的独特优势,在国内相关的地学应用中将发挥重要作用。

(2) 保证遥感数据质量和可靠性。数据是遥感云计算平台的基础,高质量和可靠的数据,如标准化、带质量控制信息的国产遥感数据产品(例如地表反射率),会让更多的用户参与和使用中国数据,有助于提升中国遥感产业,发展国际影响力。

(3) 推动数据驱动的新地学研究范式。在遥感大数据时代背景下,基于共享、开放的遥感云计算平台,和海量遥感数据,进行多因子相关性分析,对地学事件和地学要素时空关联进行更深入的理解,有利于推动新的地学知识发现。

4 结 论

遥感大数据时代已经来临,如何充分挖掘遥感大数据,实现全面快速的地球空间信息感知,是地球科学领域共同面对的挑战。遥感云计算平台为海量地球空间信息处理提供了机遇,并且在地球科学领域已得到了众多应用。相比于国外,目前中国的遥感云计算平台尚处于起步阶段,但中国国产卫星的使用将使得中国遥感云计算平台具有独特优势。随着技术的发展,以及人类进一步认识地球的需求,遥感云计算平台将得到更多的应用和发展,为更深入理解地学规律,实现人类社会可持续发展提供科学支撑。

参考文献(References)

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]

Badgley G, Field C B and Berry J A. 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 3(3): e1602244 [DOI: 10.1126/sciadv.1602244]

Bastin J F, Berrahmouni N, Grainger A, Maniatis D, Mollicone D, Moore R, Patriarca C, Picard N, Sparrow B, Abraham E M, Aloui K, Atesoglu A, Attore F, Bassüllü Ç, Bey A, Garzuglia M, García-Montero L G, Groot N, Guerin G, Laestadius L, Lowe A J, Mamane B, Marchi G, Patterson P, Rezende M, Ricci S, Salcedo I, Diaz A S P, Stolle F, Surappaeva V and Castro R. 2017. The extent of forest in dryland biomes. *Science*, 356(6338): 635-638 [DOI: 10.1126/science.aam6527]

Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C M and Crowther T W. 2019. The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448): 76-79 [DOI: 10.1126/science.aax0848]

Betts M G, Wolf C, Ripple W J, Phalan B, Millers K A, Duarte A, Butchart S H M and Levi T. 2017. Global forest loss disproportionately erodes biodiversity in intact landscapes. *Nature*, 547(7664): 441-444 [DOI: 10.1038/nature23285]

Bogard M J, Kuhn C D, Johnston S E, Striegl R G, Holtgrieve G W, Dornblaser M M, Spencer R G M, Wickland K P and Butman D E. 2019. Negligible cycling of terrestrial carbon in many lakes of the arid circumpolar landscape. *Nature Geoscience*, 12(3): 180-185 [DOI: 10.1038/s41561-019-0299-5]

Burke M and Lobell D B. 2017. Satellite-based assessment of yield variation and its determinants in smallholder African systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(9): 2189-2194 [DOI: 10.1073/pnas.1907842116]

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]

Chudley T R, Christoffersen P, Doyle S H, Bougamont M, Schoonman C M, Hubbard B and James M R. 2019. Supraglacial lake drainage at a fast-flowing Greenlandic outlet glacier. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(51): 25468-25477 [DOI: 10.1073/pnas.1913685116]

Dethier E N, Sartain S L and Lutz D A. 2019. Heightened levels and seasonal inversion of riverine suspended sediment in a tropical biodiversity hot spot due to artisanal gold mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(48): 23936-23941 [DOI: 10.1073/pnas.1907842116]

Donchyts G, Baart F, Winsemius H, Gorelick N, Kwadijk J and van de Giesen N. 2016. Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6(9): 810-813 [DOI: 10.1038/ncli-

- mate3111]
- Finer M, Novoa S, Weisse M J, Petersen R, Mascaro J, Souto T, Stearns F and Martinez R G. 2018. Combating deforestation: From satellite to intervention. *Science*, 360(6395): 1303-1305 [DOI: 10.1126/science.aat1203]
- Gao F, Masek J, Schwaller M and Hall F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2207-2218 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872081]
- Giezendanner J, Pasetto D, Perez-Saez J, Cerrato C, Viterbi R, Terzago S, Palazzi E and Rinaldo A. 2020. Earth and field observations underpin metapopulation dynamics in complex landscapes: near-term study on carabids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(23): 12877-12884 [DOI: 10.1073/pnas.1919580117]
- Goodchild M F, Guo H D, Annoni A, Bian L, de Bie K, Campbell F, Craglia M, Ehlers M, van Genderen J, Jackson D, Lewis A J, Pesaresi M, Remeteý-Fülöpp G, Simpson R, Skidmore A, Wang C L and Woodgate P. 2012. Next-generation digital earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(28): 11088-11094 [DOI: 10.1073/pnas.1202383109]
- 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 A J, Burns P, Ervin J, Goetz S J, Hansen M, Venter O, Watson J E M, Jantz P A, Virnig A L S, Barnett K, Pillay R, Atkinson S, Supples C, Rodríguez-Buritica S and Armenteras D. 2020. A policy-driven framework for conserving the best of Earth's remaining moist tropical forests. *Nature Ecology and Evolution*, 4: 1377-1384 [DOI: 10.1038/s41559-020-1274-7]
- 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]
- Hendershot J N, Smith J R, Anderson C B, Letten A D, Frishkoff L O, Zook J R, Fukami T and Daily G C. 2020. Intensive farming drives long-term shifts in avian community composition. *Nature*, 579(7799): 393-396 [DOI: 10.1038/s41586-020-2090-6]
- Ho J C, Michalak A M and Pahlevan N. 2019. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 574(7780): 667-670 [DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7]
- Ielpi A and Lapôtre M G A. 2020. A tenfold slowdown in river meander migration driven by plant life. *Nature Geoscience*, 13(1): 82-86 [DOI: 10.1038/s41561-019-0491-7]
- Joshi A R, Dinerstein E, Wikramanayake E, Anderson M L, Olson D, Jones B S, Seidensticker J, Lumpkin S, Hansen M C, Sizer N C, Davis C L, Palminteri S and Hahn N R. 2016. Tracking changes and preventing loss in critical tiger habitat. *Science Advances*, 2(4): e1501675 [DOI: 10.1126/sciadv.1501675]
- Jung M, Rowhani P and Scharlemann J P W. 2019. Impacts of past abrupt land change on local biodiversity globally. *Nature Communications*, 10: 5474 [DOI: 10.1038/s41467-019-13452-3]
- Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F and Immerzeel W W. 2017. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature*, 549: 257-260 [DOI: 10.1038/nature23878]
- Laskin D N, McDermid G J, Nielsen S E, Marshall S J, Roberts D R and Montaghi A. 2019. Advances in phenology are conserved across scale in present and future climates. *Nature Climate Change*, 9(5): 419-425 [DOI: 10.1038/s41558-019-0454-4]
- Liu J, Wang W and Zhong H. 2020a. EarthDataMiner: a cloud-based big earth data intelligence analysis platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 509: 012032 [DOI: 10.1088/1755-1315/509/1/012032]
- Liu X P, Huang Y H, Xu X C, Li X C, Ciais P, Lin P R, Gong K, Ziegler A D, Chen A P, Gong P, Chen J, Hu G H, Chen Y M, Wang S J, Wu Q S, Huang K N, Estes L and Zeng Z Z. 2020b. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, 3(7): 564-570 [DOI: 10.1038/s41893-020-0521-x]
- Liu Y L, Kumar M, Katul G G, Feng X and Konings A G. 2020c. Plant hydraulics accentuates the effect of atmospheric moisture stress on transpiration. *Nature Climate Change*, 10(7): 691-695 [DOI: 10.1038/s41558-020-0781-5]
- MacDonald A J and Mordecai E A. 2019. Amazon deforestation drives malaria transmission, and malaria burden reduces forest clearing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(44): 22212-22218 [DOI: 10.1073/pnas.1905315116]
- Maxwell S L, Evans T, Watson J E M, Morel A, Grantham H, Duncan A, Harris N, Potapov P, Runtting R K, Venter O, Wang S and Malhi Y. 2019. Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Science Advances*, 5(10): eaax2546 [DOI: 10.1126/sciadv.aax2546]
- Miller E T, Leighton G M, Freeman B G, Lees A C and Ligon R A. 2019. Ecological and geographical overlap drive plumage evolution and mimicry in woodpeckers. *Nature Communications*, 10: 1602 [DOI: 10.1038/s41467-019-09721-w]
- Moore R T and Hansen M C. 2011. Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis//AGU Fall Meeting Abstracts. [s.l.]: AGU
- Müller M F, Yoon J, Gorelick S M, Avise N and Tilmant A. 2016. Impact of the Syrian refugee crisis on land use and transboundary freshwater resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(52): 14932-14937 [DOI: 10.1073/pnas.1614342113]
- Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, Ferrari R, Johnston R, Lyons M B, Clinton N, Thau D and Fuller R A. 2019. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738): 222-225 [DOI: 10.1038/s41586-018-0805-8]

- Myers-Smith I H, Kerby J T, Phoenix G K, Bjerke J W, Epstein H E, Assmann J J, John C, Andreu-Hayles L, Angers-Blondin S, Beck P S A, Berner L T, Bhatt U S, Bjorkman A D, Blok D, Bryn A, Christiansen C T, Cornelissen J H C, Cunliffe A M, Elmendorf S C, Forbes B C, Goetz S J, Hollister R D, de Jong R, Loranty M M, Macias-Fauria M, Maseyk K, Normand S, Olofsson J, Parker T C, Parmentier F J W, Post E, Schaepman-Strub G, Stordal F, Sullivan P F, Thomas H J D, Tømmervik H, Treharne R, Tweedie C E, Walker D A, Wilmsking M and Wipf S. 2020. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nature Climate Change*, 10(2): 106-117 [DOI: 10.1038/s41558-019-0688-1]
- Nemani R, Votava P, Michaelis A, Melton F S, Hashimoto H, Cristina M, Wang W L and Ganguly S. 2010. NASA earth exchange: a collaborative earth science platform//AGU Fall Meeting Abstracts. [s. l.]: AGU
- Nienhuis J H, Ashton A D, Edmonds D A, Hoitink A J F, Kettner A J, Rowland J C and Törnqvist T E. 2020. Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. *Nature*, 577(7791): 514-518 [DOI: 10.1038/s41586-019-1905-9]
- Ordway E M, Naylor R L, Nkongho R N and Lambin E F. 2019. Oil palm expansion and deforestation in Southwest Cameroon associated with proliferation of informal mills. *Nature Communications*, 10: 114 [DOI: 10.1038/s41467-018-07915-2]
- Orongo H A, Conesa F C, Garcia-Molsosa A, Lobo A, Green A S, Madella M and Petrie C A. 2020. Automated detection of archaeological mounds using machine-learning classification of multisensor and multitemporal satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(31): 18240-18250 [DOI: 10.1073/pnas.2005583117]
- Overeem I, Hudson B D, Syvitski J P M, Mikkelsen A B, Hasholt B, van den Broeke M R, Noël B P Y and Morlighem M. 2017. Substantial export of suspended sediment to the global oceans from glacial erosion in Greenland. *Nature Geoscience*, 10: 859-863 [DOI: 10.1038/ngeo3046]
- 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]
- Pfeifer M, Lefebvre V, Peres C A, Banks-Leite C, Wearn O R, Marsh C J, Butchart S H M, Arroyo-Rodríguez V, Barlow J, Cerezo A, Cisneros L, D’Cruze N, Faria D, Hadley A, Harris S M, Klingbeil B T, Kormann U, Lens L, Medina-Rangel G F, Morante-Filho J C, Olivier P, Peters S L, Pidgeon A, Ribeiro D B, Scherber C, Schneider-Maunoury L, Struebig M, Urbina-Cardona N, Watling J I, Willig M R, Wood E M and Ewers R M. 2017. Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature*, 551(7679): 187-191 [DOI: 10.1038/nature24457]
- Qin Y W, Xiao X M, Dong J W, Zhang Y, Wu X C, Shimabukuro Y, Arai E, Biradar C, Wang J, Zou Z H, Liu F, Shi Z, Doughty R and Moore B. 2019. Improved estimates of forest cover and loss in the Brazilian Amazon in 2000 - 2017. *Nature Sustainability*, 2(8): 764-772 [DOI: 10.1038/s41893-019-0336-9]
- Roopsind A, Sohngen B and Brandt J. 2019. Evidence that a national REDD+ program reduces tree cover loss and carbon emissions in a high forest cover, low deforestation country. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(49): 24492-24499 [DOI: 10.1073/pnas.1904027116]
- Ryan J C, Smith L C, van As D, Cooley S W, Cooper M G, Pitcher L H and Hubbard A. 2019. Greenland Ice Sheet surface melt amplified by snowline migration and bare ice exposure. *Science Advances*, 5(3): eaav3738 [DOI: 10.1126/sciadv.aav3738]
- Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Seneviratne S I and Peñuelas J. 2019. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 12(4): 264-270 [DOI: 10.1038/s41561-019-0318-6]
- 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
- Tuckett P A, Ely J C, Sole A J, Livingstone S J, Davison B J, van Wessem J M and Howard J. 2019. Rapid accelerations of Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt. *Nature Communications*, 10: 4311 [DOI: 10.1038/s41467-019-12039-2]
- Valenza J M, Edmonds D A, Hwang T and Roy S. 2020. Downstream changes in river avulsion style are related to channel morphology. *Nature Communications*, 11: 2116 [DOI: 10.1038/s41467-020-15859-9]
- Venter Z S, Aunan K, Chowdhury S and Lelieveld J. 2020. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(32): 18984-18990 [DOI: 10.1073/pnas.2006853117]
- Venter Z S, Cramer M D and Hawkins H J. 2018. Drivers of woody plant encroachment over Africa. *Nature Communications*, 9: 2272 [DOI: 10.1038/s41467-018-04616-8]
- Walter T R, Haghighi M H, Schneider F M, Coppola D, Motagh M, Saul J, Babeyko A, Dahm T, Troll V R, Tilmann F, Heimann S, Valade S, Triyono R, Khomarudin R, Kartadinata N, Laiolo M, Massimetti F and Gaebler P. 2019. Complex hazard cascade culminating in the Anak Krakatau sector collapse. *Nature Communications*, 10: 4339 [DOI: 10.1038/s41467-019-12284-5]
- Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Dong J W, Qin Y W, Doughty R B, Menarguez M A, Chen B Q, Wang J B, Ye H, Ma J, Zhong Q Y, Zhao B and Li B. 2020. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989—2016. *Nature Communications*, 11: 3471 [DOI: 10.1038/s41467-020-17103-w]
- Watmough G R, Marcinko C L J, Sullivan C, Tschirhart K, Mutuo P K, Palm C A and Svenning J C. 2019. Socioecologically informed use of remote sensing data to predict rural household poverty. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(4): 1213-1218 [DOI: 10.1073/pnas.1812969116]
- Weiss D J, Nelson A, Gibson H S, Temperley W, Peedell S, Lieber A, Hancher M, Poyart E, Belchior S, Fullman N, Mappin B, Dalrymple U, Rozier J, Lucas T C D, Howes R E, Tusting L S, Kang S Y, Cameron E, Bisanzio D, Battle K E, Bhatt S and Gething P W.

2018. A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015. *Nature*, 553(7688): 333-336 [DOI: 10.1038/nature25181]
- Wu X, Braun D, Schwartz J, Kioumourtzoglou M A and Dominici F. 2020. Evaluating the impact of long-term exposure to fine particulate matter on mortality among the elderly. *Science Advances*, 6(29): eaba5692 [DOI: 10.1126/sciadv.aba5692]
- Yang X, Pavelsky T M and Allen G H. 2020. The past and future of global river ice. *Nature*, 577(7788): 69-73 [DOI: 10.1038/s41586-019-1848-1]
- Yeh C, Perez A, Driscoll A, Azzari G, Tang Z Y, Lobell D, Ermon S and Burke M. 2020. Using publicly available satellite imagery and deep learning to understand economic well-being in Africa. *Nature Communications*, 11: 2583 [DOI: 10.1038/s41467-020-16185-w]
- Zeng Z Z, Estes L, Ziegler A D, Chen A P, Searchinger T, Hua F Y, Guan K Y, Jintrawet A and Wood E F. 2018. Highland cropland expansion and forest loss in Southeast Asia in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 11(8): 556-562 [DOI: 10.1038/s41561-018-0166-9]
- Zou Z H, Xiao X M, Dong J W, Qin Y W, Doughty R B, Menarguez M A, Zhang G L and Wang J. 2018. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(15): 3810-3815 [DOI: 10.1073/pnas.1719275115]

Remote sensing cloud computing platform development and Earth science application

FU Dongjie^{1,3}, XIAO Han^{1,3}, SU Fenzhen^{1,3}, ZHOU Chenghu^{1,3}, DONG Jinwei^{2,3}, ZENG Yelu⁴,
YAN Kai⁵, LI Shiwei⁶, WU Jin^{1,3}, WU Wenzhou^{1,3}, YAN Fengqin^{1,3}

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

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

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

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

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

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

Abstract: Global scale historical remote sensing data has been accumulated for more than half a century. The remote sensing big data formed by these continuously emerging massive remote sensing data provides abundant data support for Earth science research. Furthermore, it is a new challenge for the rapid processing, analysis and mining of remote sensing big data. The emergence of Remote Sensing Cloud Computing Platform (RS-CCP) provides unprecedented opportunities for remote sensing big data mining. Meanwhile, it completely changes the traditional remote sensing data processing and analysis mode, making it possible to quickly analyze and apply long-term sequences on a global scale. This study systematically combed the state-of-the-art development of Google Earth Engine (GEE), including the origin, current progress, petabyte scale catalog of public and free-to-use geospatial datasets, computing capability for planetary-scale analysis of Earth science data, Application Programming Interface (API), and GEE Apps. Combined with GEE, the RS-CCPs at home and abroad, including NASA Earth Exchange, Descartes Labs, Amazon Web Services (AWS), Data Cube, Copernicus Data and Exploitation Platform-DE (CODE-DE), CASEarth EarthDataMiner, Pixel Information Expert (PIE)-Engine, were analyzed from the aspects of public data achieve, platform type, and APIs. Meanwhile, the RS-CCP developed by Chinese Business Company were also taken into account, such as SenseEarth, Analytical Insight of Earth (AI EARTH), WeEath. Furthermore, this study summarized the main applications of RS-CCPs in the field of Earth sciences according to Amani et al. (2020) and Tamiminia et al. (2020). Specifically, the RS-CCPs based applications published on *Nature* (and its series), *Science* (and its series) and *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS) were summarized as applications related to land cover/land use, vegetation changes, animal, climate change, Human social and economic activities. On this basis, the limitations of current RS-CCPs were discussed, such as (1) Limited storage and computing resources, (2) Some geospatial data types are not compatible, (3) Insufficient support for different projection formats, (4) Difficult to achieve calculation between pixels, (5) Not support mobile applications, (6) The typesetting and drawing module is not perfect. The key technologies and core issues that need to be resolved in the future were prospected. Subsequently, some recommendations were provide for the development of China's RS-CCP: (1) Integration of multi-source data resources, especially domestic remote sensing data, (2) Guarantee the quality and reliability of domestic remote sensing data, (3) Promote a new data-driven geoscience research paradigm. With the increasing demand of human understanding of the Earth, RS-CCPs will play a greater role in Earth science, serving the deepening of Earth science knowledge and the sustainable development of human society.

Key words: remote sensing, big data, remote sensing cloud computing platform, earth science application