

# 陆地卫星50年发展和应用之路

■ 贾明群 樊奕茜

一位联合国官员在谈到陆地卫星的成功时，给出这样的评价：陆地卫星数据档案免费和在网上开放获取，就像世界上每个人都拥有了一张世界上最好的地球状况图书馆的借阅证。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.06.001

1972年，美国发射陆地卫星（Landsat）系列的第一颗星Landsat-1，宣告常规陆地观测和监测真正进入卫星时代。此后的50年里，陆地卫星系列不断给包括气象在内的学科和应用领域的科学家带来惊喜。可以说陆地卫星的发展为现代天基定量遥感开辟了道路和奠定了基础。Landsat系列卫星走过半个世纪后，更多的创新还在围绕这一已经成为经典的项目展开。陆地卫星的历史在地球轨道卫星开展地球观测（EO）技术进步领域具有突出的代表性。陆地卫星还开创了卫星数据收集的多个“第一”：最早在空间平台上对地球数据进行数字编码；率先在相同的地方太阳时固定间隔重复采集场景图像；首次同时在几个光谱带地表成像，并具有足够的几何保真度以允许对这些谱段的反应进行有意义的比较。更为珍贵的是，陆地卫星连续获得完整的50年数据（图1），8颗成功进入轨道的卫星，其有效载荷和观测性能得到实质性和持续的改进，获得的数据提供了最重要的全球环境基线。十年前，美国在纪念陆地卫星在轨运行40年时，认为该系列卫星已经成为太空遥感的黄金标准，为地球的历史留下了宝贵的记录。

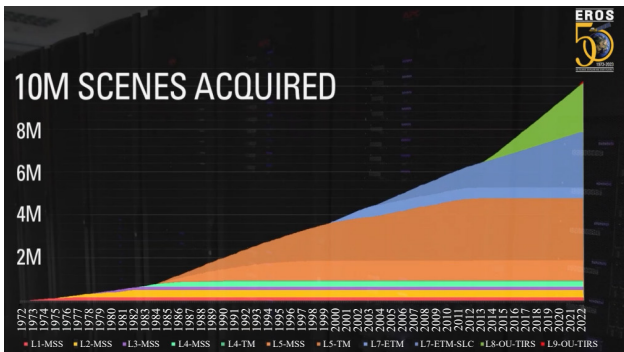


图1 1972年以来陆地卫星系列获得的场景图像数据达到1000万张 (1张场景 (scene) 图像一般覆盖地表 185 km × 170 km面积)

本文基于文献，特别是美国地质调查局（USGS）及其管理陆地卫星的地球资源观测和科学中心（EROS）和NASA等回顾陆地卫星50年发展的资料，回顾陆地卫星半个世纪的发展，试图揭示陆地卫星的发展脉络和科技创新点。

## 1 陆地卫星厚重的历史

陆地卫星的起源，还要追溯到1966年两位USGS最早从事摄影地质和水文研究的学者，他们一起向USGS局长提出研发地球观测卫星的建议。随后，学者和局长3人又与USGS所属的美国内政部部长沟通。内政部长支持了学者和局长的建议，于1966年9月21日宣布开展陆地卫星项目，并在USGS建立了EROS。1968年，USGS确定位于美国大陆中心的南达科他州东南作为EROS数据中心所在地，但直到1970年，苏福尔市才被正式确定为EROS数据中心所在地。

1970年，美国发布陆地卫星方案建议书，各方学者反应积极并提出了600多项建议。有关机构选中其中的300个方案，向提供这些建议方案的大学、联邦和国际机构、私企和美国以外组织提供试验数据和研究经费。

首颗陆地卫星发射后，1972—1980年，该项目作为NASA的试验任务管理，目的是展示陆地卫星遥感探测在研究中的潜力。随后，因为各种原因，陆地卫星项目的所属机构、资金、管理、开发和业务运行等几次易手，尤其是项目的责任在政府和私人部门之间转移，让陆地卫星技术持续进步的同时，其发展也经历了一条曲折之路（图2）。

NOAA接管陆地卫星。1979年11月，美国总统卡特发布指令，将陆地卫星的业务移交给国家海洋和大气管理局（NOAA）。这项总统指令还建议在10年内将

资助信息：国家自然科学基金项目 (42142009)

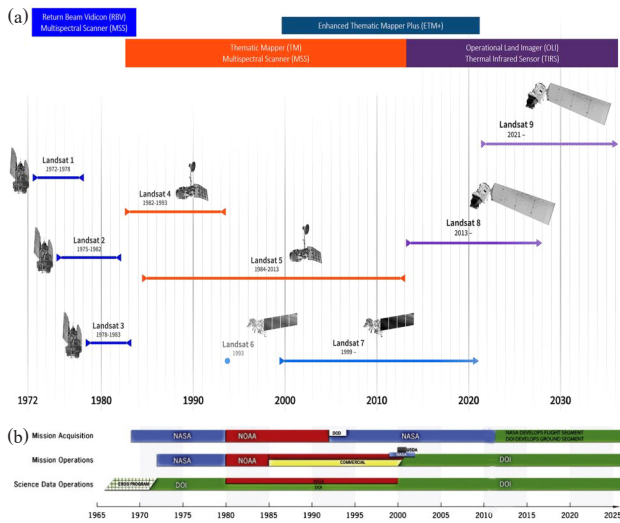


图2 1972年以来陆地卫星发射和运行情况时间表 (a, 星载关键传感器在图顶部列出) 和1965年以来陆地卫星管理机制的变更 (b, 包括 (从上到下): 卫星项目的所有权、业务运行机构和科学数据管理机构)

陆地卫星和数据分发的业务移交给私营部门。这项行政命令不仅冲击了EROS主管的陆地卫星业务的连续性, 也给陆地卫星未来命运带来了多变性。

选择NOAA接管陆地卫星并借机推向商业化, 与NOAA隶属于商业部和稳定运行着极轨气象卫星类业务有关。至少在名义上管理陆地卫星时期, 接收NOAA卫星AVHRR数据的天线, 从1987年开始也成为EROS的标记。1997年, EROS甚至用NOAA的AVHRR数据获得了第一张1 km分辨率全球陆地表面数据(图3), 为陆地卫星后续产品探路。

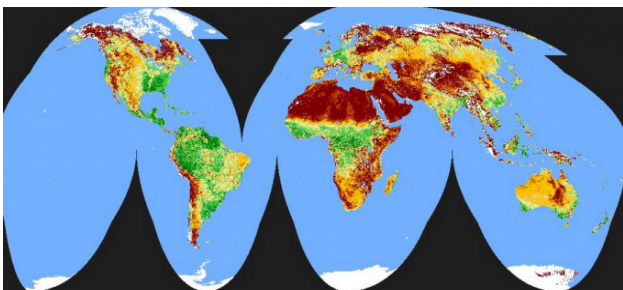


图3 USGS EROS基于NOAA的AVHRR数据开发的1 km分辨率全球陆地地图

1989年3月, 乔治·布什总统上任不久, 主要因为资金问题, NOAA曾经下令30天内关闭Landsat-4和Landsat-5。100位国会议员给时任美国副总统、负责美国空间委员会的奎尔写信, 呼吁保留陆地卫星项目。副总统选择了支持陆地卫星, 3月底宣布由NASA、国防部和其他机构支付陆地卫星项目所需的大部分资金, 而EROS仅需保证剩余的少量资金即可。

到6月, 空间委员会一致建议1990年前提供陆地卫星项目资金, 布什政府宣布保留陆地卫星项目。

**被私有化。**1982年开始, 陆地卫星项目开启商业化过渡。1983年2月, 里根总统通过签署一份备忘录, 正式授权陆地卫星商业化。1984年6月, 美国通过了《土地遥感法》, 直接推动陆地卫星商业化进程。有关方面启动竞争程序, 找寻可以接管陆地卫星的私企。在知名企业柯达公司退出这项竞争后, 一家合资企业EOSAT公司成为唯一竞争者。EOSAT于1985年接管了陆地卫星, 并接受NOAA的指导。但其图片的商业市场未能发展起来。受市场左右, 这段时间研究人员不得不为一张陆地卫星图像支付数千美元。根据1997年美国国家科学院的一项研究, 这阻碍了遥感图像更广泛的科学使用。美国于1992年通过了《陆地遥感法1992》, 从而废除了1984年的法案, 随后依据新法案终止了陆地卫星的商业化。停止商业化后, 自Landsat-7于1999年发射, 政府向陆地卫星产品支付成本补贴, 补贴的数额一直保持在每幅图像600美元的水平。随着技术进步, 陆地卫星图片成本逐渐下降, 美国对卫星数据政策进行了微调, 例如, 购买了陆地卫星图像的用户, 可以自由分享, 从而促进了陆地卫星数据在美国内外的传播。该政策调整还促使一些用户自愿组成联合体, 一起购买和分享陆地卫星数据, 有效降低了数据费用。

在陆地卫星私有化过程中, 特别是1984年《土地遥感法》的颁布, 给陆地卫星研发人员带来了极大的不确定性。这时, 主管部门NOAA和USGS针对该法律, 签署了备忘录协议, 最终确保陆地卫星管理机构EROS是所有遥感数据的唯一存档机构, 宣示了政府部门针对商业化设施的地位, 也最终保护了陆地卫星已经和将要获取的大量数据。2001年, USGS从NASA收回陆地卫星业务。

**再次私有化未果。**2002年前后, 即陆地卫星停止私有化后10年, 在美国国会一再要求将陆地卫星私有化的背景下, “如果没有商业参与, 陆地卫星就可能消失”的说法甚嚣尘上。NASA发布招标公告, 要求私人卫星公司能制作出Landsat-7的替代卫星, 总部均位于科罗拉多州丹佛市的两家卫星私企——DigitalGlobe和Resource21公司曾有意参与竞标。

然而, 即使是私人卫星公司, 也认识到一旦收费获取卫星数据, 研究用数据的订单肯定不足, 而商业需要同样严重不足。公司计划通过将分辨率提高到10 m以吸引更大的市场, 尽管这样的市场到底是怎样的规模, 是否能够支撑卫星研发和运行成本, 尚不清

晰。而一旦市场需求不足，陆地卫星用户，尤其是学者们怀疑，私人公司会通过抬高卫星产品价格来维持收支平衡。2004年还曾经提出在NOAA的极轨气象卫星上增加陆地卫星载荷的计划，后因成本高昂和可能对气象卫星带来影响而作罢。

这一将陆地卫星“改弦”的计划，直到2005年布什政府干预，提出陆地卫星连续性任务(LDCM)，才将陆地卫星计划从被终止的边缘拉回。实际上，围绕陆地卫星的管理和研发过程，甚至可以用“混乱”来形容，教训非常深刻。例如，让陆地卫星成为珍贵资源的观测数据连续性，并非源自该项目的精心规划和制度保障，而是建立在可遇不可求的幸运：Landsat-5超出设计寿命20多年的红利。陆地卫星系列从一开始就缺少整体设计，而是单个或最多成对(Landsat-1/Landsat-2, Landsat-4/Landsat-5)进行论证、规划和执行。即使是在10年前，当研发成本约10亿美元、设计寿命5年的LDCM(Landsat-8)在2013年升空后，其后继卫星计划依然是混乱的。

## 2 陆地卫星的50年技术发展历程

陆地卫星在技术不断升级、后续卫星连续发射保证数据连续的同时，还历经了名称变更、管理机制和主管部门摇摆、卫星数据最早走向全面免费开放等发展阶段。

1972年7月23日，第一颗陆地卫星(Landsat)发射升空时，被命名为ERTS A(Earth Resources Technology Satellite A, 地球资源技术卫星A星, 图4)。全球陆地卫星图像从此有了一个先进和稳定的来源，开始赢得越来越多的学者关注并将全球陆地图像数据逐渐应用于更多和不同的领域。



图4 Landsat-1和Landsat-2最初被命名为ERTS A和B

1975年1月，ERTS B星发射前8天，NASA将ERTS B卫星更名为Landsat-2，该名称被一直延续下来。为了获取更多的陆地卫星数据，同年在加拿大和巴西最先建立了地面站，还与意大利、伊朗等国签订了协议。这一年，陆地卫星数据的发布也从NASA的GSFC转到了EROS。直到2021年Landsat-9发射，陆地卫星经历了50年的技术升级(表1)。

1996年陆地卫星数据处理被提升到了新高度：1979—1992年MSS的超过35万个场景和1982—1992年TM的超过32万场景资料，完成从胶片向数字磁带的转化。

1998年，基于陆地卫星数据的首个美国国家高程数据集(National Elevation Database, NED)完成。1999—2014年，NED成为USGS旗舰高程产品。进入21世纪，基于Landsat-5数据，首个国家陆地表面数据集(National Land Cover Dataset, NLCD)于2000年发布(图5)，极大地促进了陆地卫星数据的应用。

表1 陆地卫星系列的发展概要

卫星编号	发射年份	设计寿命/运行/a	主要技术创新、更新及意义
Landsat-1	1972	1/5.5	2个载荷MSS(多光谱扫描仪, 79 m分辨率)和RBV(返回光束摄像机), 前者图像优于后者
Landsat-2	1975	3/6.0	与前颗卫星相同
Landsat-3	1978	3/5.1	MSS增加一个额外热光谱波段, 与Landsat-2一起每9 d提供一张完整全球地图
Landsat-4	1982	3/11.4	专题成像仪(TM)分辨率提高到30 m, 已经成为历史数据分析基准, NASA第一颗携带GPS的卫星, 尽管当时计划中的24颗GPS卫星仅4颗在轨
Landsat-5	1984	3/27.7	由于配备了附加燃料箱, 一直运行到2013年6月, 实际设计寿命达29 a, 绕地球超过15万圈, 传回图像250万幅; 地面系统部分自动化, 并鼓励美国以外学者参与研究
Landsat-6	1993	5/0	
Landsat-7	1999	5/13.8 ETM+的扫描线校正器于2003年5月失效	增强型专题成像仪(ETM+), 增加一个15 m分辨率的多光谱传感器, 全球覆盖更加系统, 热波段的分辨率提高到60 m, 可与其他陆地卫星数据相互比较(1999年12月Terra卫星携带MODIS和ASTER进入轨道)
Landsat-8 (LDCM)	2013	5 (10年燃料)/--	又称为陆地卫星数据连续性任务(LDCM), 载荷引入了15~100 m分辨率的下一代OLI(业务陆地成像仪)和TIRS(热红外传感器), 每天收集图像超过700张, 是20世纪80年代的14倍
Landsat-9	2021	5 (10年燃料)/--	增加针对沿海/气溶胶的“超绿”(443 nm)频道和卷云探测的1380 nm频道, 其中LDCM每天获得场景图数提高到400张
未来Landsat Next	大约21世纪30年代初	--/--	由于Landsat-9研发主要遵从LDCM的原则, 以数据持续为主, 科学上的创新将在21世纪30年代初升空的Landsat follow上实现

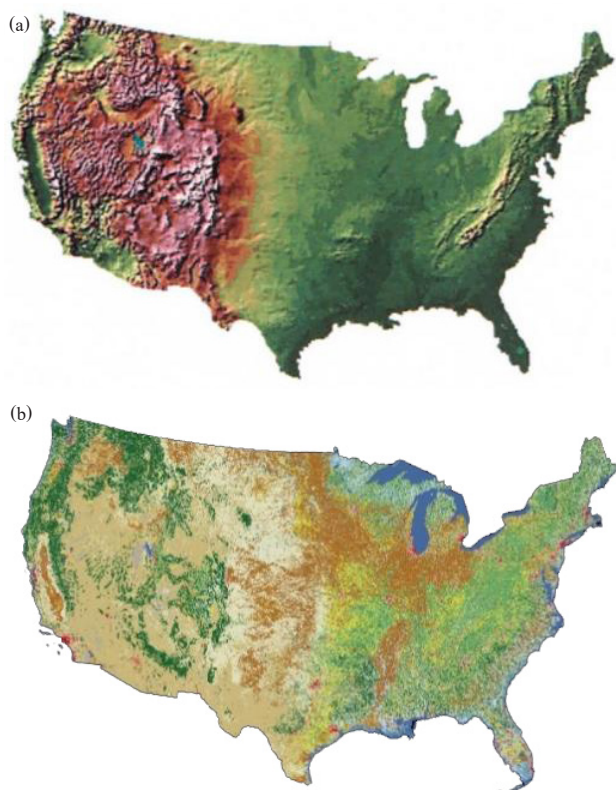


图5 美国大陆高程数据图(a)和国家陆地表面数据图(b)

为了进一步提高陆地卫星数据的精准和不同卫星之间载荷仪器的一致性,从Landsat-5开始,增加了一项被称为“underfly”(轨道下方伴飞)的关键措施,即新的卫星升空后,先不进入预定轨道,而是让卫星在其前任轨道的下方进行几天伴飞,目的是获得两颗卫星更多的重叠观测数据,进行一致性等关键检测,完成后再送入高度为438 mile (1 mile $\approx$ 1.6 km)的运行轨道。“underfly”过程得到的新发射卫星和前任卫星准同时获得的图像,帮助研究人员开展各种分析,从而让陆地卫星系列不同卫星间具有更好的一致性和资料可比性。以Landsat-9与其前任Landsat-8的“underfly”为例(图6),该措施发现两颗卫星数据在所有波段的共配准(co-registration)小于2.2 m。

### 3 陆地卫星的国际化和数据走向公开获取

早在Landsat-1升空后第2年,即1973年6月,EROS举办了陆地卫星主题国际培训,来自十多个国家的33位学员参加了培训。而针对美国各部门的国内培训,直到1977年才开始,这反映了Landsat项目和卫星一样具有全球视野。国际培训采取学术讲座和实习相结合的方式。值得强调的是,在培训最后一周,国际学员尝试利用陆地卫星图像解决本国的实际问题,可以获取最先进的本国陆地资源图像学成返回,很好

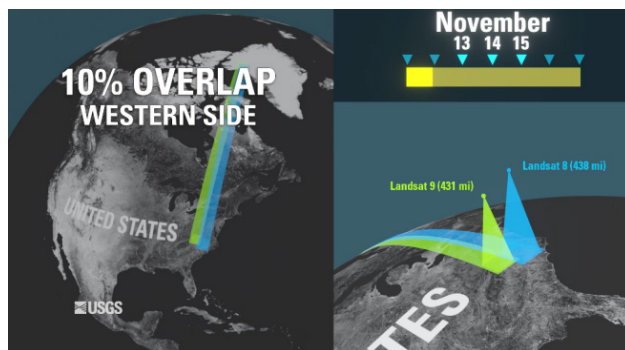


图6 2021年11月Landsat-8和Landsat-9联合“underfly”实施示意图

地宣传和放大了陆地卫星的效益。陆地卫星主题培训班随后根据需求,每年或每两年举办一次。

陆地卫星最初的数据政策,是用户通过支付复制和分发边际成本获得数据。例如,1972—1978年,个人获得摄影图像需要支付20美元,1979—1982年数字数据的支付费用为200美元。1984年出台的《陆地卫星商业化法》推高了收费标准。

直到2008年10月,USGS推出通过互联网向任何人免费提供陆地卫星档案内容的政策。这一前所未有的政策,极大地推动了陆地卫星在各行业更加广泛的应用。虽然美国气象卫星数据自1979年就可以免费获得,但因为陆地卫星的分辨率较气象卫星高很多,USGS的这项政策依然受到关注并产生了极大的影响。其中一些从气象和其他卫星获得数据的用户,转到更加精细的陆地卫星数据。数据公开后的2009财年,陆地卫星场景下载数突破100万,是2001财年提供数量(2.5万)的40倍。随着陆地卫星的数量增加,以及卫星数据全球一致性处理等方便用户手段的增加(见下节),陆地卫星的应用得到极大地提高(图7)。

尽管陆地卫星开放带来美国 and 全球应用的巨大效益,但美国政府也曾试图恢复对地球观测产品收费。2018年,美国政府首先将对地球观测数据收费指向陆地卫星和美国农业部的空中测量项目(Aerial-Survey Programme)遥感产品。当时美国内政部已经咨询陆地卫星数据收费会如何影响科研和其他用户。而政府的这一企图遭到科学界的一致反对,认为陆地卫星数据如果再收费,将是一个巨大的“挫折”。

实际上,类似2018年的收费企图,至少在2012年也发生过,最后因调查方得到结论“陆地卫星的收益远远超过成本”,并指出卫星数据收费本身要浪费金钱,同时扼杀科学和创新,阻碍政府国家安全的监测能力。

学者指出,陆地卫星图像没有完美的替代品,商

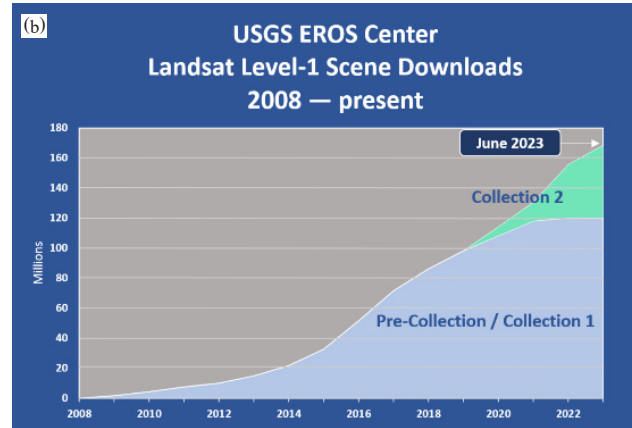
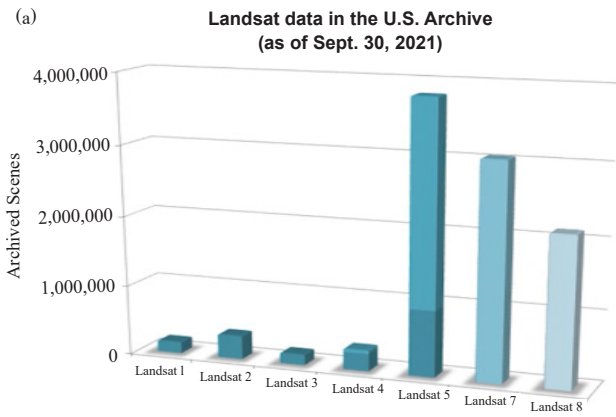


图7 陆地卫星的数据量 (a) 和2008年数据开放以来的下载量 (b)

业化高分辨率卫星图像对许多研究人员来说太昂贵了。虽然欧洲的哨兵-2卫星能够提供免费的类似图像，而且每5 d覆盖全球一次，分辨率可达10 m，但陆地卫星50年记录的厚度没有比肩者。获得如此长时间的数据对于确定诸如生态系统、农田、水体等随着时间发生的变化，档案越长、越密集，就越有价值。

#### 4 陆地卫星数据处理和应用

陆地卫星半个世纪的发展，伴随着技术进步和遥感基础设施改进，直到Landsat-7时代，才进入真正的不断更新的全球数据时代。然而，全球变化和地球系统等领域的研究发现，将陆地卫星50年数据进行时间轴的对比分析，是该系列卫星最大的优势所在。特别是，当陆地卫星种类逐渐增多，一些陆地观测卫星，如欧洲的哨兵系列卫星的性能已经全面超过陆地卫星的情况下，陆地卫星借助其历史可用数据的时间维度，依然是珍贵和不可替代的数据源。

##### 4.1 早期应用：让图像说话

陆地卫星最早期的数据是记录在胶片上的图像，

因此卫星应用只能停留在“看图识字”的水平上，且数据的发布和共享等受到极大限制。1976年，通过引进I<sup>2</sup>S扫描系统，可以将胶片上的陆地卫星图像扫描进入计算机（图8），从而实现了陆地卫星的数字化图像。

此时陆地卫星得到较为广泛的应用，特别是随着卫星数据下传能力提高、全球陆地卫星地面站的增加以及数字化处理手段的改进，使得陆地卫星数据准时可用性、数据处理便捷性等同时得到改进。但照片形式的陆地卫星产品还是最直接的卫星探测的结果，EROS的照片实验室一直运行到2005年才完全关闭。

##### 4.2 数字化建设

20世纪80年代后期，NASA提出的EOS（地球观测系统）项目，确立了全球地球观测数据向着协调、多源观测数据、标准数据产品和将这些产品与地球系统模式整合的发展方向。在这样的方向上，基于卫星遥感的数据成为特别重要的地球环境演化记录，受到更多关注。

从20世纪末到21世纪初开始，陆地卫星数据经过

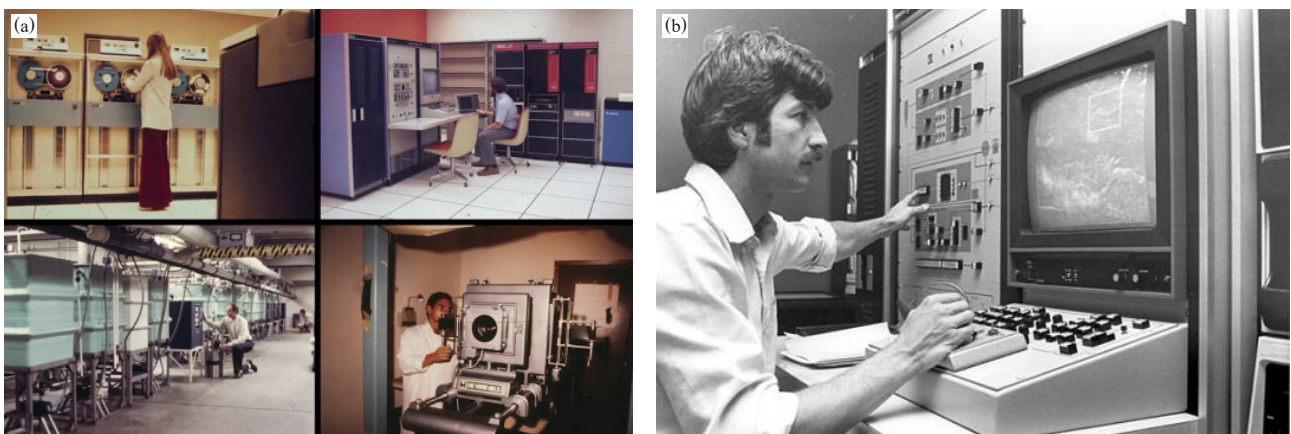


图8 20世纪70年代初陆地卫星数据处理场景 (a) 和I<sup>2</sup>S扫描系统 (b)

多方的不断努力，率先给出全球陆地连续和不断精确化的数据。这一尝试主要基于：1) 1999年进入轨道的Landsat-7卫星已经可以给出基本实现全球覆盖的数据；2) 从Landsat-5卫星发射以来，全球陆地卫星地面站得到有效扩展；3) Landsat-5和Landsat-7卫星之间的相互校准取得显著改进，并使得完全校准的数据记录可以前推到Landsat-1的MSS数据。在这样的背景下，NASA和USGS从20世纪90年代末开始，联合赞助了地球覆盖数据集（GeoCover datasets，现称为Global Land Survey，全球陆地调查）项目，2001年前后，建立了Landsat-7 ETM+陆地卫星数据标准。

项目的实施和数据标准的应用，最早获得了5年期的全球无云、经过几何校正的陆地卫星数据集。该数据集以研究即用格式（analysis ready format，即Level 1T (L1T) 格式）提供给数据用户，数据还嵌入了准确的地理登记信息及用数字地形进行的几何订正。L1T数据不仅为开发陆地卫星数据更多产品打下了基础，加上2008年陆地卫星数据全面开放和免费提供，从而迎来了陆地卫星数据应用的一个高峰。

### 4.3 LGAC项目

如果要将陆地卫星所有图像整合起来，获得连续的全球图像，一个主要困难就是早期的陆地卫星，受到卫星和地面系统的限制，也受到所需计算、联网和储存能力范围的限制，USGS并没有获得完整的陆地卫星的全球数据。一些数据，尤其是美国本土以外数据，被存放在全球各地不同数据地面站或用户手里。为此，一项名为陆地卫星全球档案合集（Landsat Global Archive Consolidation, LGAC）的项目，2010年开始由USGS发起实施。LGAC的目标就是整合尽可能

能多的国际地面站的Landsat数据档案，使全球Landsat用户更容易获取数据，并显著提高给定范围内的观测频率，扩展陆地卫星数据的科学用途，如历史演变的检测和分析等。

该项目试图将全球多个地面站收集的陆地卫星数据整合到一个档案中。这面临很多挑战，例如，各种数据格式和处理方式、未知的数据格式和处理方法（站点不再活动）、数据介质存储年龄和条件等。

陆地卫星数据，尤其是早期数据大多在世界各地被接收，使得USGS以外的陆地卫星数据比其保存的还要多，其中大部分是独一无二的。USGS通过LGAC项目试图将这些数据纳入一个单一的、普遍可用的、集中的全球档案库。LGAC通过清点由综合控制系统保存的数据，获取数据、更新和应用标准，得到全球数据的L1T产品。截至2015年1月1日，USGS数据档案馆共有超过553万张陆地卫星图像，其中，LGAC项目贡献了大约320万张图像，较原始档案数量翻了一番多。另外，还有230万张LGAC项目图像被确认，正在添加到档案中。然而，最初3颗卫星在南美洲、非洲和西亚等地区覆盖不足（图9），弥补的困难极大。虽然后续卫星情况逐步好转，但至少在2008年中止商业化数据政策之前，数据全球覆盖的完整性相对不足。

### 4.4 调和陆地/哨兵（HLS）项目

2013年，Landsat-8发射，欧洲陆地观测卫星哨兵-2的A星和B星分别在2015年和2017年进入轨道。在主要观察目标方面，具有可比性观测传感器的两个卫星系列各有特点，如果融为一体会发生什么？于是，调和Landsat/哨兵-2（Harmonized Landsat Sentinel-2, HLS）项目开始实施。

Landsat Global Archive Consolidation Scenes  
Landsat 1 - 3 (WRS1)  
Number of Scenes as of 31 December 2022: 401,031

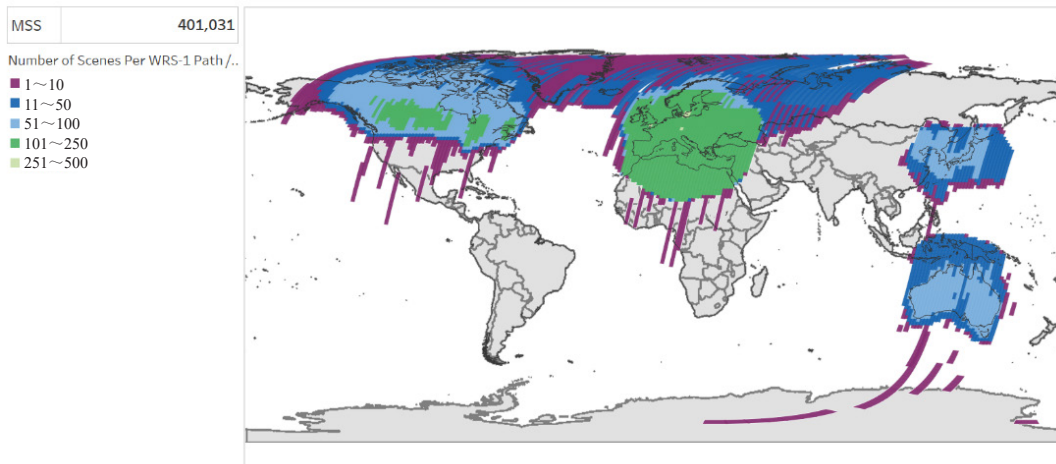


图9 截至2022年12月31日，陆地卫星LGAC项目收集的前3颗卫星数据（图中给出每条轨道收集的场景图数量）

HLS项目集合了陆地卫星和哨兵卫星各自优势，使得各自载荷的传感器得到的数据可以一起使用，就像是来自同一颗卫星（图10），而实际是在两条轨道上的卫星，也提升了数据覆盖的时间分辨率。HLS基于陆地卫星和哨兵卫星数据，同时参考NASA的MODIS数据，尤其是NOAA每1~2 d全球覆盖的极轨气象卫星数据，实现了每2~3 d生成完整的全球覆盖产品，这是单一系列卫星很难做到的。除了双方的数据调和，技术互补也是HLS项目的优势之一。例如，基于Landsat-8上的热红外传感器（TIRS）数据，可以生成地表温度产品。虽然哨兵-2载荷中并没有可比的热红外数据，但调和依然重要，因为哨兵-2能提供的陆地卫星所有光谱的补充地理位置，对于产品非常重要。

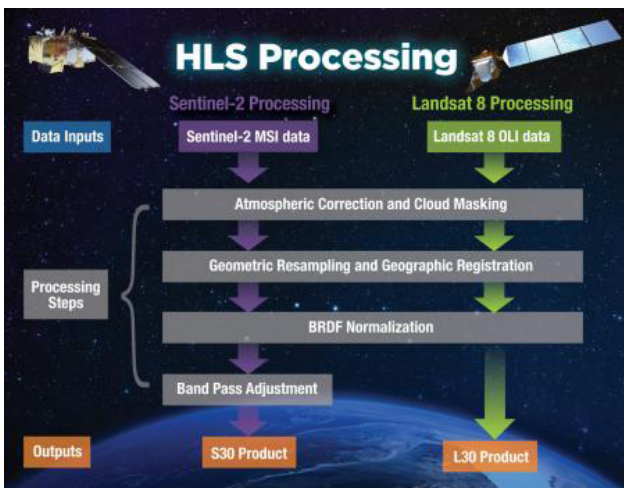


图10 HLS数据处理流程

#### 4.5 陆地卫星数据合集1和合集2项目

在2010年实施的LGAC项目，已经将数十年间运行的陆地卫星分散在全球各地下传数据在USGS的EROS集中。此时，虽然可以提供全球数据，但这些数据并非统一进行了处理，而是采用各种方式进行的处理。全球数据虽然被集中到了EROS，但陆地卫星数据的一致性不够，其原因主要是不同来源数据对陆地卫星原始仪器数据处理的算法等不一致，加上数十年里卫星仪器换代、传感器和地面系统技术的更新等。LGAC后，陆地卫星数据只能根据用户要求进行处理，而全球一致处理的数据集并不可用。

2016年9月，USGS通过第一次基于全球数据收集的数据，采用当时最先进的校准技术，将Landsat-1—Landsat-8卫星Level 0数据和所有最新获取的数据，处理和生成为Level 1数据并被标记为Collection 1（合集1）。合集1的形成，实现了陆地卫星数据的分层（T1、T2和近实时层NT等3层）管理，确保了所有Level 1

数据具有一致的数据质量。2020年，在合集1产品中，结合2014年立项的陆地变化监测、评估和估测（Land Change Monitoring, Assessment and Projection, LCMAP）项目的成果，首次将33年基于卫星的美国陆地变化数据向公众发布。

随着2021年Landsat-9卫星被送入轨道，Collection 2（合集2）项目启动，该项目在前期项目成功基础上，力求在数据准确性方面再进一步。合集2项目采用了很多新技术和产品，其中包括和国际伙伴之间的密切合作。例如：1）通过与欧空局（ESA）的全球参考图像（GRI）基准调和，利用Landsat-8的OLI数据改进绝对地理定位精度；2）利用新的数字高程模型（DEM）进行垂直校准，改进垂直精度；3）改进辐射校准，尤其是针对Landsat-5和Landsat-8卫星数据；4）给出Landsat-4—Landsat-9全球覆盖的Level 2地表反照率和地表温度产品；5）通过商业云直接访问、分析陆地卫星数据。

#### 5 陆地卫星的科学价值依然在挖掘中

陆地卫星的早期开创者很少预见到随后50年里该卫星项目取得的巨大成功，这或许有点像当下，我们也很难说清楚陆地卫星生成的丰富的海量数据遇见人工智能、机器学习等新技术，能够带来什么更具颠覆性、创造性和引领性的成功。陆地卫星从最初的仅关注可见光和近红外相片呈现和陆地影像的视觉解释，到以全球为目标、经过大气和地形以及不同卫星更新传感器间校准、时间跨度达到半个世纪的数据一致性整合的全球陆地数据合集，是这一时期卫星遥感领域借助遥感、数据算法和大地测量等技术进步的代表作，得到了极大发展。截至21世纪10年代中期，全球超过35个国家都发射了陆地卫星（图11）。

陆地卫星在轨运行的半个世纪里，地球人口从38亿激增到超过80亿，地球环境不可避免地受到人类活动更加深入的影响。自1972年以来，Landsat系列的8颗地球观测卫星已经提供了超过1100万个Level 1（按比例校准的辐射度）场景。Level 2（大气校正的全球表面反射率和地表温度）和Level 3（动态地表水范围、积雪覆盖区域、燃烧区域）科学产品和美国分析就绪数据（ARD）等被广泛应用于监测、评估和预测土地利用、土地覆盖和土地状况的变化如何影响人类和自然。Landsat产品可通过EarthExplorer、Google Earth Engine、Amazon Web Services（AWS）Commercial Cloud、Machine to Machine应用程序编程接口（API）、GloVis、LandsatLook Viewer和地球资源观测与科学（EROS）科学处理架构（ESPA）下载或访问。2013年，

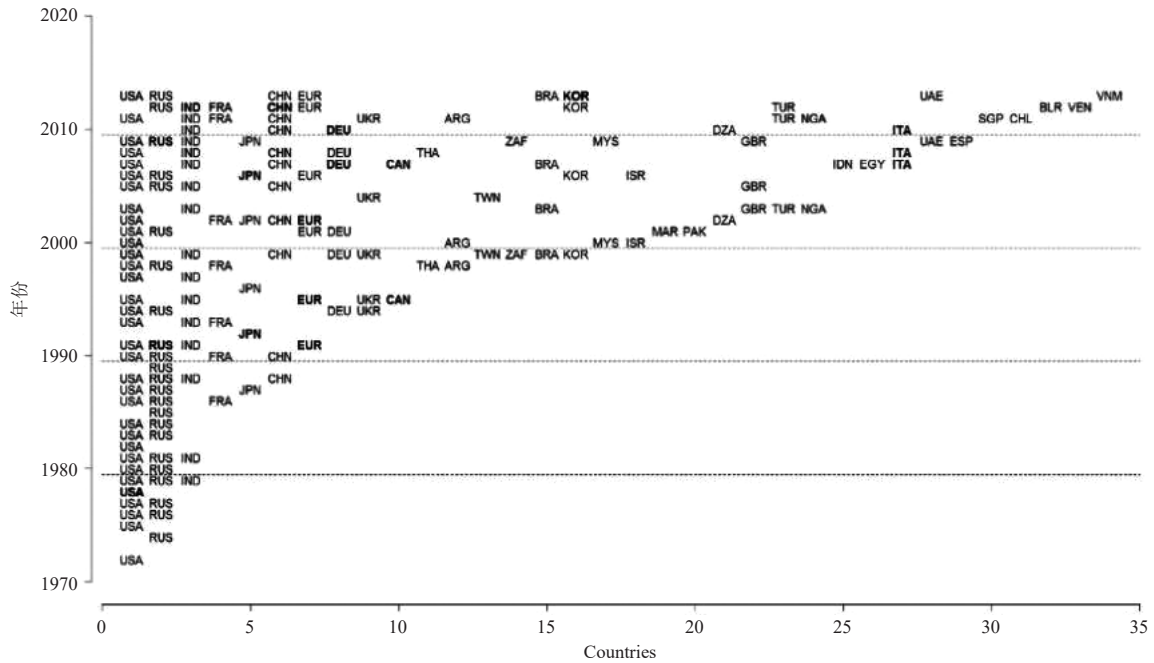


图11 不同国家发射1颗或多颗极地轨道地面成像卫星情况 (粗体字代表至少发射了1个合成孔径雷达传感器, 各国名称缩写按 ISO 3166-A3标准)

USGS曾公布了对陆地卫星用户的调查, 发现免费和开放陆地卫星图像每年可产生20多亿美元的经济效益, 这和当时陆地卫星每年大约0.8亿美元的预算形成鲜明对比。这次调查涉及近1.35万受访者, 学者占一半以上, 且大多为美国境外用户。

计划于本世纪30年代初投入运行的下一代陆地卫星Landsat Next将采用更精细化的设计, 实现几乎全链条的地球环境数据的获取(图12)。

一位联合国官员在谈到陆地卫星的成功时, 给出这样的评价: 陆地卫星数据档案免费和在网开放

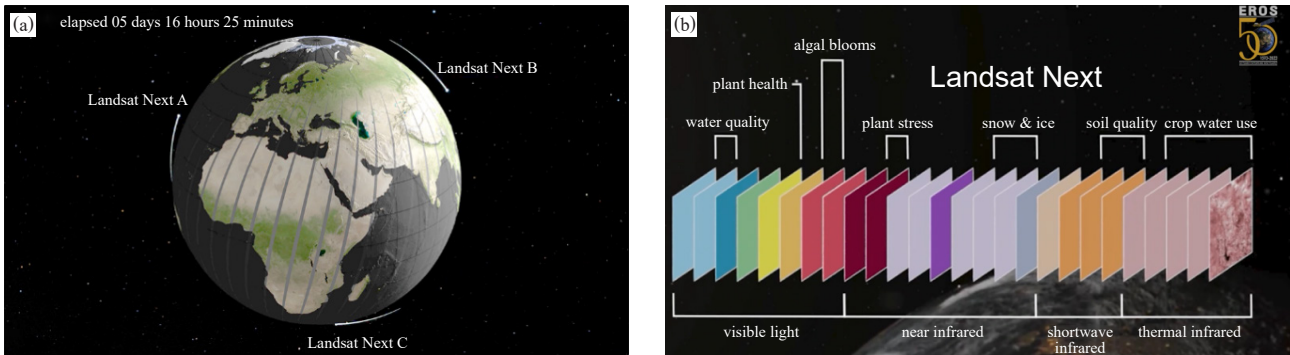


图12 陆地卫星后继项目3颗卫星轨道示意图 (a) 和探测要素 (b)

获取, 就像世界上每个人都拥有了一张世界上最好的地球状况图书馆的借阅证。尽管陆地卫星半个世纪的发展受到政府政策摆动的影响, 但最终取得成功的经验, 可以概括为几点: 1) 领先于时代的卫星设计和视角是决策者最需要的素质。陆地卫星从思想火花到最终实现, 众多学者和决策者都发挥了作用, 其中USGS最早洞见到陆地卫星的设计, 其数据能够用来定期监测地球广泛的物理和生态环境, 从而服务于全球人类福祉, 算是其中最重要的科学灵魂, 即使早期

陆地卫星数据主要被用于基本的地质制图。2) 数据开放是推动科技创新最有效的手段之一。陆地卫星本身的技术发展是科技创新不断进步的体现, 然而, 依据陆地卫星的创新和创造, 即其巨大应用价值潜力的挖掘, 却是陆地卫星数据以及数据管理政策共同操纵的。其中, 陆地卫星从用户出发, 为了大量减少数据处理、更新和校准等繁杂、耗时和费力的过程, 推出数据合集和在线分析数据等服务, 是推动陆地卫星得

(下转20页)

- [79] Scheuerer M, Hamill T M. Statistical postprocessing of ensemble precipitation forecasts by fitting censored shifted gamma distributions. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(11): 4578-4596.
- [80] Delle Monache L, Nipen T, Liu Y, et al. Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(11): 3554-3570.
- [81] Baran S, Möller A. Joint probabilistic forecasting of wind speed and temperature using Bayesian model averaging. *Environmetrics*, 2015, 26(2): 120-132.
- [82] Schefzik R, Thorarinsdottir T L, Gneiting T. Uncertainty quantification in complex simulation models using ensemble copula coupling. *Statistical Science*, 2013, 28(4): 616-640.
- [83] Clark M, Gangopadhyay S, Hay L, et al. The Schaake shuffle: a method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 243-262.
- [84] 郝翠, 张迎新, 王在文, 等. 最优集合预报订正方法在客观温度预报中的应用. *气象*, 2019, 45(8): 1085-1092.
- [85] Rasp S, Lerch S. Neural networks for postprocessing ensemble weather forecasts. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(11): 3885-3900.
- [86] Herman G R, Schumacher R S. Using reforecasts to improve forecasting of fog and visibility for aviation. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(2): 467-482.
- [87] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 2006, 313(5786): 504-507.
- [88] 王可心, 包云轩, 朱承瑛, 等. 随机森林回归法在冬季路面温度预报中的应用. *气象*, 2021, 47(1): 82-93.
- [89] 韩念霏, 杨璐, 陈明轩, 等. 京津冀站点风湿要素的机器学习订正方法. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 489-500.
- [90] Ke G, Meng Q, Finely T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree//31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). San Diego, 2017.
- [91] 谭江红, 陈伟亮, 王珊珊. 一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验. *气象科技进展*, 2018, 8(5): 46-50.
- [92] 张早, 章猛, 韩业, 等. 一种基于卷积神经网络的气温预测系统及方法. 中国专利: CN202010114142.6, 2020.
- [93] Shi X J, Chen Z R, Wang H, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. *arXiv*, 2015: 1506.04214.
- [94] 孙健, 曹卓, 李恒, 等. 人工智能技术在数值天气预报中的应用. *应用气象学报*, 2021, 32(1): 1-11.
- [95] 智协飞, 王田, 季焱, 等. 基于深度学习的中国地面气温的多模式集成预报研究. *大气科学学报*, 2020, 43(3): 435-446.
- [96] 倪铸, 梁萍. 基于LSTM深度神经网络的精细化气温预报初探. *计算机应用与软件*, 2018, 35(11): 233-236.
- [97] 陶晔, 杜景林. 基于随机森林的长短期记忆网络气温预测. *计算机工程与设计*, 2019, 40(3): 737-743.
- [98] 于振龙, 许东峰, 姚志雄, 等. 基于多变量LSTM神经网络模型的PDO指数预测研究. *海洋学报(中文版)*, 2022, 44(6): 58-67.
- [99] 门晓磊, 焦瑞莉, 王鼎, 等. 基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法. *气候与环境研究*, 2019, 24(1): 116-124.

(上接9页)

到最广泛应用的重要因素。3) 卫星数据, 尤其是数十年长期数据的可获取和可应用之间包含的资源成本、可行的创新“最后一公里”越来越需要国际合作的解决方案。未来陆地卫星更全面的发展离不开国际陆地卫星之间的互动、对比和技术交流, 而陆地卫星国际合作的深化, 令人可以期待更多的创新成果。

中国是就陆地卫星开发利用最早与美国合作的国家之一。1985年4月, 中美签订了促进在遥感、制图、

地理信息系统及其他领域合作的议定书, 1985年和1986年美国和中国学者分别完成对对方的访问, 中方人员还在EROS工作了一段时间, 对陆地卫星的运行和维护、数据生成和处理等环节有了亲身体验。中国在利用美国陆地卫星开展研发和应用方面的成果, 详见本期封三文章。

### 深入阅读

Belward A, Skoien J O, 2014. Who launched what, when and why: trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 115-128.

Blumenfeld J, 2021. A harmonious new dataset, January 25, 2021. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/a-harmonious-new-dataset/>

Crawford C J, Roy D, Arab S, et al., 2023. The 50-year Landsat collection 2 archive. *Science of Remote Sensing*, 8: 100103.

Kazemi J, 2023. Landsat: a case study for transitioning from commercialization to more open policy. 2023 WMO Core Satellite Data Workshop, December 5-7, 2023, Geneva.

Landsat Legacy Project Team, 2017. *Landsat's enduring legacy: pioneering global land observations from space*, the American Society for Photogrammetry and Remote, Sensing, Maryland, USA.

Molder E B, Schenkein S F, McConnell A E, et al, 2022. Landsat data

ecosystem case study: actor perceptions of the use and value of Landsat. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 805174.

National Research Council, 2013. *Landsat and beyond: sustaining and enhancing the Nation's land imaging program*. Washington, DC: The National Academies Press.

Ojima D S, DeFries R S, Goward S N, et al., 2022. *Landsat@50*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(6): 340-342.

Popkin G, 2018. US government considers charging for popular Earth-observing data. *Nature*, 556: 417-418.

Wulder A, Coops C, 2014. Satellites: make Earth observations open access. *Nature*, 513: 30-31.

Zhang Y, Woodcock C E, Arévalo P, et al, 2022. A global analysis of the spatial and temporal variability of usable Landsat observations at the pixel scale. *Frontiers in Remote Sensing*, 3: 894618.

(作者单位: 中国气象局气象发展与规划院)