Landsat卫星观测下的30m全球不透水面年度动态与城市扩张模式(1972~2019)

黄昕^{1,2}, 李家艺^{1*}, 杨杰¹, 张震¹, 李冬瑞¹, 刘小平³

1. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

3. 中山大学地理与规划学院广东省城市化与地球模拟重点实验室, 广州 510006

* 通讯作者, E-mail: zjjerica@whu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-05; 收修改稿日期: 2021-04-12; 接受日期: 2021-05-25; 网络版发表日期: 2021-07-23

国家自然科学基金项目(批准号: 42071311、41771360和41971295)资助

摘要 研究采用自1972年来的超过三百万景Landsat影像, 研发了一套从20世纪70年代至今的最细时空粒度的全球不透水面产品(GISA)。以全球270个城市随机选取的120,777参考点验证, 其漏报率、虚警率和F-score分别为5.16%、0.82%和0.954。与现有全球产品相比, 本研究的亮点在于: (1) 提供1985年以前的全球不透水面(ISA)分布, 具有最长的时间跨度(1972~2019年)和最高的精度(经大量随机验证点和第三方验证样本集评价); (2) 提出一种新的全球ISA地图绘制方法, 包括半自动全局样本采集、局部自适应分类和时空后处理; (3) 我们将整个全球陆表作为实验区域来提取ISA(不是仅从城市范围内提取), 因此减少了低估。基于GISA, 本研究首次制作了长时间序列的全球城市扩张模式产品(GUEP), 并对各大洲及其代表性国家的城市扩展格局进行分析。本研究提供的两套新数据集(GISA和GUEP)将有助于进一步地理解近半个世纪以来人类对地表环境的改造。

关键词 Landsat, 城区, Google earth engine, 不透水面, 城市扩张

1 引言

半个世纪以来, 全球范围内剧烈的人类活动对气候、环境、生态系统的破坏影响了人类健康与福祉、制约了可持续发展(Mbow等, 2017; 匡文慧, 2019)。不透水面(ISA, 指具有不透水特性的人造地表结构, 主要包括屋顶、铺面、硬化地表、道路等)作为人类活动最显著的区域, 其时空动态是理解和监测人类对自然影响的重要基础参数(Seto等, 2012)。由于ISA扩张可

以防止雨水渗漏, 阻断地表蒸散(Krayenhoff等, 2018), 增加地表径流(Weng, 2001), 影响生物多样性和生态系统服务(Seto等, 2012), 许多全球组织越来越重视ISA动态监测。例如, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中增加了关于城市缓解气候变化的新章节(Seto等, 2014), 而且其第七次报告还通过了一份关于城市和气候变化的特别报告(IPCC, 2016)。此外, 《联合国生物多样性公约——城市和生物多样性展望》强调了城市土地扩张在改变生态系统服务和生物

中文引用格式: 黄昕, 李家艺, 杨杰, 张震, 李冬瑞, 刘小平. 2021. Landsat卫星观测下的30m全球不透水面年度动态与城市扩张模式(1972~2019). 中国科学: 地球科学, 51(11): 1894~1906, doi: [10.1360/N072020-0370](https://doi.org/10.1360/N072020-0370)

英文引用格式: Huang X, Li J, Yang J, Zhang Z, Li D, Liu X. 2021. 30 m global impervious surface area dynamics and urban expansion pattern observed by Landsat satellites: From 1972 to 2019. Science China Earth Sciences, 64(11): 1922~1933, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9797-9>

多样性方面的关键作用(Campbell等, 2012), 联合国可持续发展目标(SDG)也强调了城市土地变化(<https://sdg-tracker.org/cities>). 因此, 长时序、细时空粒度的全球ISA监测具有重要的研究意义.

全球ISA动态监测最主要的数据源来自卫星遥感观测. 随着卫星遥感数据和技术发展, 全球产品经历了从静态到动态, 从粗($\geq 1\text{km}$)到细空间尺度($\sim 30\text{m}$)的发展过程. 在公里尺度上, 欧盟联合研究中心(JRC)综合采用SPOT4卫星数据, 研发了2000年全球土地覆盖产品(简称GLC2000, 空间分辨率 1.15km)(Bartholomé和Belward, 2005). 联合国粮农组织(FAO)融合了中等分辨率的多源卫星遥感数据($250\sim 300\text{m}$), 生产了2012年空间分辨率为30弧秒的全球土地覆盖数据(简称GLC-SHARE)(Latham等, 2014). 在百米尺度上, 欧洲航天局(ESA)发布了两个年度(即2005年(Bicheron等, 2006)和2009年(Bontemps等, 2011))的300m分辨率全球产品(简称GlobCover), 并基于中分辨率成像光谱仪(MERIS)、 1km 分辨率的SPOT植被Proba-V传感器和 1km 分辨率的AVHRR卫星数据进一步开发了1992~2018年间的年度300m全球产品(简称CCI-LC)(ESA, 2017). 与此同时, 利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据, 美国国家航空航天局(NASA)发布了空间分辨率为250m的2001~2018年度全球年度土地覆盖产品(Sulla-Menashe等, 2019). 最近, 使用~180000景TerraSAR-X/TanDEM-X遥感影像, 德国航空航天中心(DLR)生产了2014年度的 12m 空间分辨率的全球建成区(built-up)产品(Esch等, 2017). 综上, 粗分辨率产品的优势在于遥感数据丰富、计算量相对较小、时间重访密集, 有利于长时序动态监测和年内物候信息表征(Xu等, 2020); 然而, 其不足之处在于对小块ISA提取能力不足(Sulla-Menashe等, 2019), 且受制于混合像素问题(Yang等, 2017). 高分辨率观测由于其对细节描述的优势, 能有效应对上述两个问题, 但也同时存在物候信息不足(Liu等, 2019b)与计算负担重的问题(Schneider, 2012). 值得注意的是, 近年来随着云计算(如Google earth engine, GEE)的兴起, 遥感数据的存储和计算能力显著提升, 全球ISA制图已进入高分辨率时代.

从1972年开始业务化运行、兼具高时空分辨率的Landsat星座, 是进行大规模ISA监测的理想观测平台(冉有华和李新, 2015; Wulder等, 2016; Gong等,

2019). 基于Landsat影像, 目前最早的高分辨率(30m)全球ISA产品是JRC发布的全球人居图层(简称GHSL)(Pesaresi等, 2015), 包括1975、1990、2000、2014四个年度. 随后, Liu等(2020)也生产了1985~2015年间的30m年度城市区域数据集(简称GAUD); Gong等(2020)制作了全球人工不透水区域(简称GAIA)来量化1985~2018年间城市ISA年度动态. 最近, JRC发布了新版GHSL, 其中包括2018年的全球ISA概率网格(Corbane等, 2020). 尽管已有上述30m全球ISA产品, 然而连续长时序的产品仍然非常稀少; 而且, 各产品在训练样本、分类方法、后处理、精度评定等方面存在较大不同, 导致它们在局部或者全球的ISA统计存在明显差异. 特别地, 由于早期Landsat有效观测不足, 目前两个30m全球年度ISA数据集GAIA和GAUD尚未提供1985年之前的全球ISA信息. 这说明全球长时序、高动态、高分辨率的ISA制图具有极大的挑战, 仍然需要新产品和新方法的研发, 以提升全球ISA制图的精度和时间跨度, 增强我们对全球ISA动态的认识. 因此, 本文的第一个贡献在于利用300多万张Landsat卫星影像, 研发制作1972~2019年全球ISA数据集(GISA).

在GISA的基础上, 本文进一步分析全球城市扩张的时序模式. 城市扩展模式能够反映城市增长的时空特征和变化规律, 对城市管理和规划具有重要意义. 我们注意到, 以往相关工作主要集中在几个发达城市(如<https://www.c40.org/networks>)、部分区域(Krayenhoff等, 2018; Xu等, 2019b), 或若干国家(Schneider和Mertes, 2014; Huang等, 2019; Li等, 2020). 然而, Reba和Seto(2020)指出, 目前的研究忽略了中小城市和全球南部地区, 而它们不仅是过去几十年城市扩张最快的地区, 也将是未来几十年的城市化热点地区(United Nations, 2018). 此外, 大多数当前研究仅采用一定间隔的监测断面(例如, 每五年或十年一次)来分析长期城市扩张模式(Schneider和Mertes, 2014; Krayenhoff等, 2018; Xu等, 2019b), 难以反映精细的时序扩张变化. 在此背景下, 基于GISA, 本文第二个贡献在于以精细时空粒度的方式分析全球长时序城市扩张模式.

2 实验数据与方法

我们采用从1972年1月至2019年11月共计

30,872,690景云覆盖80%以下的Landsat影像,利用机器学习方法在GEE上生产1972~2019年30m全球ISA产品(简称GISA)。考虑到早期Landsat数据时空覆盖缺失(网络版附图S1, <http://earthcn.scichina.com>),我们利用1972~1977年、1978~1984年合成数据分别进行第一期和第二期全球ISA制图;自1985年起,利用每年度数据进行一期ISA制图。我们最终基于GISA分析全球城市扩张。

2.1 全球ISA制图

整体技术路线采用分布式监督分类(图1),将全球陆表以边长为2°的六边形划分成1221个格网,在每一期中逐格网利用局部ISA和非ISA样本训练随机森林分类器进行监督分类,然后在整个48年间进行多时序时空后处理。

对于每个六边形,ISA制图方法主要包括以下三个步骤:

(1) 样本生产。我们设计了一系列时-空-谱规则集,从现有全球产品的一致性区域中筛选ISA和非ISA样本。值得注意的是,为保证样本质量,我们对经过上述技术获取的ISA样本进行目视检查。样本生产的时-空-谱规则集技术细节详见网络版附录1。

(2) 特征提取与分类。对于待制图年的每个六边形格网,用格网内的样本训练一个随机森林分类器,其特征包括Landsat时序-光谱信息和数字高程模型(DEM)数据计算出的地表高程和坡度信息。考虑不同DEM数

据质量差异,58°N以上的高纬度地区采用全球多分辨率地形高程数据2010(GMTD2010);其他地区采用SRTM_30数据。类似于相关研究(Sulla-Menashe等, 2019; Li等, 2020),光谱特征来自所有Landsat时序存档观测,计算其光谱反射率和归一化光谱反射率差分指数(第20、50、80百分位)及差分指数的时序标准差。

(3) 后处理。我们利用夜间灯光数据抑制干旱地区的ISA虚警,并提出时序缺失填充、时空滤波和时序推理的方案来进一步优化制图结果,后处理技术细节见附录S2。

2.2 ISA制图精度评价

对长时序跨度的全球高分辨率ISA产品的精度验证是一件极具挑战的工作。本文采用多种参考数据,包括: (1) 全球270个城市的120,777个随机样本, (2) 从全球45个典型城市的高分辨率建筑区(Liu等, 2019a)中采集的88,822个随机验证点, (3) 全球城市-农村制图项目样本(简称GRUMP)(Balk等, 2006)。在评价时,我们采用了与对应GISA产品时序一致的参考验证点。

(1) 全球270个城市的分层随机采样验证。我们总共在全球采集了10期ISA和非ISA验证样本(包括1972、1978、1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2018年度)。通过目视解译Google™ Earth上高分辨率遥感影像和GEE上的Landsat影像来标注样本。为减少人为主观因素的干扰,参考样本的勾画与制图的过程相互独立,且由不同的团队分别完成。

图1 全球ISA制图方案流程图

在每一期中,为生成空间均匀分布的参考样本,我们按照全球各大洲城市人口随机分层采样.具体地,每一年的样本采自7个人口大于500万的城市,10个人口在100~500万的城市,以及10个人口小于100万的城市,并且按照城市面积等比例采样.根据Olofsson等(2014)推荐的采样设置,每一期样本量在10,000~15,000像素,其中每个城市的样本数与其城市面积成正比.基于采集的10期独立样本共计120,777个验证点,本研究用ISA遗漏率(OE)、虚警率(CE)和用户精度与生产者精度的调和平均数(F-score)来评价全球产品的精度.附图S2展示了270个验证城市的地理空间分布及GISA在各个城市的精度.

(2) 全球45个典型城市的高分辨率建筑区产品评价.我们利用高分辨率建成区产品集(Liu等, 2019a)作为独立验证样本,评估GISA制图精度.该建成区产品集包括2012~2017年全球45个典型城市的城区-城郊.由于使用高空间分辨率多视角ZY-3号影像进行制图,该产品不仅空间分辨率高(2m),其多视角立体观测能够有效的捕捉城市三维结构,因此非常适合用作GISA精度估计.具体地,我们要求选择的验证样本点在30m×30m范围内的建成区比例大于等于80%;非ISA验证点应当满足30m×30m范围内全为背景.验证样本点间的距离保持在300m以上,以确保其空间独立.各个城市之间,所采集ISA与非ISA的样本数量与建成区产品面积成正比.而且,每个样本点需经过ZY-3影像的目视检查,以确保其可靠性.基于上述规则,总共有118,822个高分辨率验证点用于ISA产品验证,其中ISA点39,477个,非ISA点79,345个.

(3) 全球农村-城区制图项目(GRUMP)样本.我们进一步采用GRUMP(Balk等, 2006)中的聚居点(Settlement point)作为独立数据集进行精度评价.我们采取与Gong等(2020)中同样的评价方式,即对任一聚居点,在其空间距离30、100、250、500和1km范围内设置缓冲区,若缓冲区内包含20%以上的ISA,则认为该聚居点被正确识别.通过统计能够被正确识别的聚居点数,我们可以在全球范围内对产品进行精度评定.

2.3 城市扩张模式分析

2.3.1 城区ISA提取

为分析城区ISA空间扩张模式,我们参考现有方法(Zhou等, 2014),采用如下步骤从GISA中提取城区

ISA:

步骤1. 基于GISA以边长为1km×1km的滑动窗口计算建成区强度图,采用50%阈值划分为高建成强度和低建成强度区域.

步骤2. 为了将分散但空间邻接的高强度建成区斑块纳入到城区范围内,我们采用2km距离为缓冲区,将这些斑块联通,得到城区范围.需要指出的是,上述操作中的滑窗尺寸(1km)、强度阈值(50%)和缓冲区大小(2km)均根据参考文献来设置(Zhou等, 2014).

2.3.2 城市扩张类型

根据现有分类准则(Camagni等, 2002),城市扩张模式包括飞地式、内填式和边扩张式三种.给定两期城区ISA产品,新增城区ISA地块(P)的扩张类型(E)可由下式计算(Huang等, 2019):

$$E = \frac{N_p}{C}, \quad (1)$$

式中, N_p 是 P 的边长, C 是 P 与已有城区ISA地块的公共边长.当 $E=0$ 时, P 属于飞地式扩张; $0<E<0.5$ 时, P 属于边扩张类型; $E\leq 0.5$ 时, P 为内填式扩张.一般来讲,新城开发和农村居民点向城市建成区的转变是飞地式扩张地块的主要来源;内填式扩张主要反映城市土地集约利用;而边扩张主要发生在城市边缘区,是城市蔓延的主要表现形式.

考虑到1985年以前Landsat有效观测不足(附图S3),我们以1986年为起始年计算连续城市扩张模式.同时,考虑到城市扩张速度和全球规模扩张模式的计算代价,本文中计算城市扩张模式的时间间隔设置为2年.

3 结果与讨论

3.1 GISA制图结果

如表1所示,使用全球不同等级270个城市的分层随机采样验证,GISA中ISA的OE、CE和F-score分别为5.16%、0.82%和0.954;使用全球45个城市高分辨率产品的验证点,GISA中ISA的OE、CE和F-score分别为14.12%、14.25%和0.854,表明GISA的高可靠度.进一步分析GISA在城市和农村ISA制图上的表现,表2将1990年和2015年现有30m全球产品与GISA进行对比.

表 1 GISA与现有30m全球ISA产品精度对比^{a)}

全球45个典型城市的高分辨率建筑区产品评价				全球270个城市的分层随机采样验证			
GAIA	ISA	非ISA	精确率	GAIA	ISA	非ISA	精确率
ISA	29912	7237	80.52%	ISA	12765	638	95.24%
非ISA	6033	69006	91.96%	非ISA	2640	77024	96.69%
召回率	83.22%	90.51%		召回率	82.86%	99.18%	
ISA遗漏率	16.78%	ISA虚警率	19.48%	ISA遗漏率	17.14%	ISA虚警率	4.76%
ISA的F-score	0.818	整体精度	88.17%	ISA的F-score	0.886	整体精度	96.48%
GAUD	ISA	非ISA	精确率	GAUD	ISA	非ISA	精确率
ISA	29722	5389	84.65%	ISA	14339	820	94.59%
非ISA	6223	70854	91.93%	非ISA	1132	76842	98.55%
召回率	82.69%	92.93%		召回率	92.68%	98.94%	
ISA遗漏率	17.31%	ISA虚警率	15.35%	ISA遗漏率	7.32%	ISA虚警率	5.41%
ISA的F-score	0.837	整体精度	89.65%	ISA的F-score	0.936	整体精度	97.90%
GISA	ISA	非ISA	精确率	GISA	ISA	非ISA	精确率
ISA	30583	5081	85.75%	ISA	14734	314	97.91%
非ISA	5362	71162	92.99%	非ISA	671	77348	99.14%
召回率	85.08%	93.34%		召回率	95.64%	99.60%	
ISA遗漏率	14.92%	ISA虚警率	14.25%	ISA遗漏率	4.36%	ISA虚警率	2.09%
ISA的F-score	0.854	整体精度	90.69%	ISA的F-score	0.968	整体精度	98.94%

a) 左列使用全球45个典型城市的高分辨率建筑区产品评价, 右列使用全球270个城市的分层随机采样验证

表 2 GISA与现有全球30m产品(GHSL、GAIA和GAUD)在城区和农村的对比^{a)}

年份	地区	测度	GHSL	GAIA	GAUD	GISA
1990	城区	F-score	0.7989	0.7636	0.8646	0.9274
		面积(10^5km^2)	2.0277	1.3364	1.6688	2.0149
	农村	F-score	0.8923	0.8074	0.8949	0.9299
		面积(10^5km^2)	3.2913	1.9513	2.0974	2.3294
2015	城区	F-score	0.9527	0.9372	0.9696	0.9882
		面积(10^5km^2)	2.6305	2.7033	2.5606	2.7477
	农村	F-score	0.9573	0.9699	0.9878	0.9913
		Size(10^5km^2)	5.1182	4.6907	4.1050	4.7887

a) F-score评价采用在Landsat影像(1990年)和Google™ Earth上(2015年)分别随机选择27个城市的目视解译验证点

可以看出, 无论是在城市还是农村地区, GISA的F-score都为最高. 此外, GISA所识别的农村ISA的面积也大于GAIA和GAUD, 这在一定程度上反映出GISA对小块ISA的遗漏更少.

由GISA可见, 从1972~2019年, 全球ISA面积从 $190,775.42\text{km}^2$ (95%置信区间(CI): $[189,891.90\text{km}^2, 191,658.93\text{km}^2]$) 增长到 $813,228.11\text{km}^2$ (95%CI:

$[811,945.156\text{km}^2, 814,511.063\text{km}^2]$), 面积增加约3.23~3.29倍. 近48年来, 全球ISA年均增长率为3.13% (95%CI: $[3.12\%, 3.15\%]$), 其中亚洲最大(4.24%), 非洲次之(4.07%), 欧洲(2.62%)和北美(2.04%)最小. 图2展示1972年(图2a)到2019年(图2b)的ISA空间扩张. 1972年全球ISA主要分布在北美洲(35.74%, 95%CI: $[35.58\%, 35.91\%]$), 欧洲(27.46%, 95%CI: $[27.32\%$,

图2 GISA产品中1972年(a)和2019年(b)ISA分布
每个像素表示 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ 范围内ISA的面积

28.58%]) 和亚洲(26.16%, 95%CI: [26.04%, 26.28%]). 1984年欧洲ISA面积超过北美洲, 直到1988年被亚洲反超(30.97%, 95%CI: [30.90%, 31.04%]). 在整个时序上看, 除亚洲和非洲之外, 其他大洲以20世纪90年代为转折点, 逐渐进入低速扩张。

从近50年时序动态上看, GISA与全球现有产品表现出较好的一致性(图3)。GHSL虽然能监测20世纪70

年代的ISA分布, 但仅有的5个时序(即1975、1990、2000、2014和2018年)难以刻画近半个世纪来ISA的连续变化。另一方面, 由于早期Landsat观测数据有限(附图S1), GAIA和GAUD从1985年开始提供ISA产品, 在20世纪90年代之前均存在一定程度低估。对此, GISA提供1972~1984年间的2期ISA, 并通过时序填充克服观测数据不足(附图S1)。以中国西安为例(附图S4), 由

图3 在全球和大洲尺度对比GISA与现有30m分辨率产品的ISA扩张表现

其中大洋洲与亚洲合并于同一子图

于Landsat在1985~1988年没有拍摄东亚地区(附图S1), GAIA和GAUD无法获取该时期ISA, 而GISA可以通过时序填充解决这个问题. 由图3可见, GISA的全球ISA面积略高于GAIA和GAUD. 可能原因是GAIA和GAUD在提取ISA将制图区域约束在城市范围内(Gong等, 2020; Liu等, 2020), 而GISA没有采用任何模板限制制图范围. 应当注意到, 仅GAIA与GISA提供2015年后的ISA动态, 而且, 仅GISA提供了最近的(即2019年)全球ISA结果. 此外, 在第三方验证点(包括GRUMP聚居点(图4)和高分辨率建成区产品(表1))的评价下, GISA优于GAIA和GAUD. 利用270个全球城市的随机采样点验证, GISA的整体精度也是最优(表1).

有效观测(特别是早期观测)不足会影响长时序ISA产品的可靠性. 整体来看, Landsat的有效观测随时间推移变多, 自1999年起, 年度有效观测基本能实现全球陆地覆盖(附图S1). 附图S3统计了Landsat数据缺失率(DR)和GISA产品缺失率(PR). 某时期DR或PR分别表示在2019年全球ISA范围内该时期内Landsat数据缺失或GISA产品缺失的面积百分比. 如附图S5所示, Landsat有效观测在1985~1988年间缺失较多, 主要分

图4 使用GRUMP聚居点对比GISA与现有30m全球ISA产品

其中探测点越多表明制图效果越好

布在亚洲、澳洲、非洲(附图S1). 更为严重的是, 在西伯利亚和几内湾区域, 1999年前仅有少量观测(附图S1). 为了克服数据缺失的问题, GISA对早期影像进行多年度合成, 提供了2期低产品缺失率的全球ISA产品(即1972~1977年和1978~1984年各一期). 进一步地, 早期(如1999年以前)ISA分类的缺失能够通过时空后处

理算法得到有效地解决, 如附图S3所示, PR显著低于DR. 值得注意的是, 由于270个城市的部分验证点位于数据缺失区域, 所以填充前后GISA产品F-score从0.92提升到0.95.

3.2 全球城市扩张模式分析

从1986~2018年, 我们统计全球各大洲每两年城区ISA扩张类型(图5), 进一步对比近30年来各国的扩张模式, 并按照扩张类型的比例降序排列, 列出排名前10的国家(附表S2).

在全球范围内, 近30年来城区ISA的连续扩展均以边扩张类型为主, 除大洋洲(非显著性增长)和北美(2008年以后有一定震荡)以外, 全球各洲的边扩张模式随时间线性增长, 这说明城市蔓延是全球的普遍现象, 而且正在加速. 总的来讲, 北美洲的边扩张比例最高, 可能由于该地区的城市低密度蔓延(Bae和Richard-

son, 2017). 从时序上看, 非洲和亚洲不仅是城市化进程最快的地区(United Nations, 2018), 也是全球城市线性加速蔓延的主要地区(图5). 以柬埔寨和老挝两个亚洲典型边扩张国家为例(附表S2), 近三十年来, 这两个国家从低收入国家晋升到中低收入水平, 经济的迅速发展导致建成区沿主要交通道路迅速扩张. 与此同时, 城镇人口的激增对住房需求提出挑战, 而柬埔寨和老挝的很多城市依赖土地财政, 以土地为资金来源, 土地价格上升使得中心城市发展空间受到限制, 形成边缘城市化快速扩张的格局(图6a、6c). 典型边扩张国家中也有多个在非洲(附表S2). 相比于欧美亚洲大城市发展逐渐进入精明增长阶段, 非洲大城市近几年依旧以加速外延扩张为主(图6c~6f)(Xu等, 2019a).

近三十年来欧亚大陆和大洋洲飞地式扩张比例最多, 且表现出先降后升的U形趋势(图5). 飞地式扩张主要包括两种来源: (1) 城市范围扩张过程中农村居民点

图 5 全球和大洲尺度上的城市扩张模型

图6 亚洲和非洲典型大城市的城市扩张进程

(a) 柬埔寨首都金边; (b) 老挝首都万象; (c) 加纳首都阿克拉; (d) 布隆迪首都布琼布拉; (e) 安哥拉首都本格拉. 子图中城市ISA叠置于真彩色影像之上

向城市建成区的转变; (2) 新城开发和城市疏散¹⁾. 近三十年来, 亚洲城市化的主要推力来自农村人口向城市高速流动. 土地建设使得市政范围不断扩大, 同时也表现为大量农村土地向城市土地转化. 举例来说, 中亚的土库曼斯坦的飞地式模式占比最大(38.16%, 见附表S2), 图7a展示了首都阿什哈巴德和其相邻的阿尔哈州的城市扩张情况. 由图可见, 该城市飞地扩张主要来自从农村向城市转化(图7b和7c)和少量城郊外基础设施的扩建(如图7d). 欧洲和大洋洲虽然飞地式扩张比例大, 但其来源与亚洲不同. 到20世纪80年代, 大量的欧洲和大洋洲国家都已经达到了成熟的城市化水平. 由于“城邦制”等历史原因, 大量的欧洲和大洋洲城市以中小规模和紧凑空间格局为特点. 而很多欧洲大城市围绕其城区建设了较多的绿地(例如环城绿带(Mace等, 2016)), 以限制城市扩张. 与此同时, 将大都市的建

设压力向外疏散, 在老城区外规划和建设新城区, 实现旧城重建与新城开发的和谐统一. 因此, 近三十年来, 欧洲的城市发展表现出较高的飞地式扩张比例. 例如, 芬兰作为典型的飞地式扩张国家, 是有机疏散这一城市规划理论最早实践的国家之一(见附表S2, 图7e).

除了欧美表现出一定周期性波动变化, 近三十年来全球城市内填式扩充比例在逐渐减少(图5). 当城市发展到一定历史时期, 城市土地供给达到饱和, 必定会进入再开发阶段, 实现城市资源的梳理整合和再分配. 因此, 内填式扩张主要发生在高度城市化(如日本), 或者城市首位度过高的国家²⁾(如尼泊尔, 见附表S2). 例如, 20世纪50~70年代, 日本的人口、产业以及相关功能迅速向东京、大阪和名古屋三大城市圈集中, 形成了大城市圈“过密”和农村边远地区“过疏”的基本结构(图8). 因此, 近年来日本对城市开发建设约束较多, 城

1) 有机疏散是指在大城市附近建设具有一定城市功能的半独立城镇, 以控制大城市的扩张.

2) 城市首位度指的是一个国家的发展(如人口、经济活动、服务业等)在多大程度上集中在少数几个城市.

图 7 飞地式扩展典型区域

(a) 阿什哈巴德及阿尔哈州; (b), (c) 农村向城市转化; (d) 城郊基础设施建设; (e) 芬兰南部

市空间发展的刚性边界十分明确, 力图遏制城市过度扩张、维持适度规模、提升土地价值, 表现为城市内部更新和内填式扩张为主的格局。又例如, 尼泊尔的城市首位度过高, 使得国家层面的发展模式主要表现为首都加德满都的城市扩张模式。因其被群山包围(图 9a), 加德满都对外物理扩张程度有限, 城市发展中相当比重的城市更新, 即大量的内填式扩充, 导致了古建筑群的损毁和拥挤的新城镇群(图 9b~9c)。许多拉美国家

兼具过度城市化和高城市首位度的特点(Atienza和Aroca, 2013), 在近30年来城市物理扩张中也表现相当比重的内填式发展(表2)。

4 总结与展望

本研究采用自1972~2019年的30,872,69景Land-sat影像, 生产了迄今为止最长时序、最细时空尺度的

图 8 日本(a)及其三大城市群((b)~(d))的城市扩张进程

图 9 加德满都山谷的城市扩张过程

(a) 全局扩张动态, 1990年是该地区Landsat卫星观测的开始年份; (b), (c) 局部高分细节变化

全球不透水面动态产品。基于GISA产品, 我们制作了首个全球城市每隔两年的空间扩张模式数据集 (GUEP)。这些全球产品对我们进一步了解半个世纪以来人类对自然环境的利用和改造具有至关重要的作用。

从几种当前产品的对比来看, 尽管总体趋势一致, 但它们在区域或者全球ISA动态监测上都存在一定程度的差异, 这归因于它们在定义、数据、方法、样本上的不同, 也反映出以精细空间分辨率和长时间序列绘制全球ISA是一项极具挑战性的工作。客观来讲, 每

种产品在不同的区域或者时间上都有各自的优缺点。今后, 建议引入详细的第三方样本, 对现有的30m ISA全球产品进行细时空粒度的验证。同时, 根据验证结果, 融合和优化现有产品, 使得我们关于全球长时序高动态ISA的知识更为精确可靠。在经过一个多世纪的快速扩张后, 全球各地城市正处在不同的城市化阶段, 而我们的GUEP第一套是对全球近30年所有城市的扩张模式进行了全面、及时和时空连续的基础数据集。这两套全球产品集可通过以下网址获取: <http://ir-sip.whu.edu.cn/resources/dataweb.php>。

参考文献

- 匡文慧. 2019. 全球城市人居环境不透水面与绿地空间特征制图. 中国科学: 地球科学, 49: 1151–1168
- 冉有华, 李新. 2015. 全球第一个综合高分辨率土地覆盖图——中国 30m 分辨率全球土地覆盖图评述. 中国科学: 地球科学, 45: 1243–1244
- Atienza M, Aroca P. 2013. Concentration and growth in Latin American Countries. In: Cuadrado-Roura J R, Aroca P, eds. *Regional Problems and Policies in Latin America. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Berlin, Heidelberg: Springer. 113–133
- Bae C H C, Richardson H W. 2017. *Urban Sprawl in Western Europe and the United States*. London: Routledge, 344
- Balk D L, Deichmann U, Yetman G, Pozzi F, Hay S I, Nelson A. 2006. Determining global population distribution: Methods, applications and data. *Adv Parasit*, 62: 119–156
- Bartholomé E, Belward A S. 2005. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int J Remote Sens*, 26: 1959–1977
- Bicheron P, Leroy M, Brockmann C, Krämer U, Miras B, Huc M, Niño F, Defourny P, Vancutsem C, Arino O, Ranera F, Petit D, Amberg V, Berthelot B, Gross D. 2006. Globcover: A 300 m global land cover product for 2005 using ENVISAT MERIS time series. In: *Proceeding of the Second International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. 538–542
- Bontemps S, Defourny P, Van-Bogaert E, Arino O, Kalogirou V, Perez J R. 2011. GLOBCOVER 2009-Products description and validation report. Technical Report. Paris, France: UCLouvain and ESA
- Camagni R, Gibelli M C, Rigamonti P. 2002. Urban mobility and urban form: The social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecol Econ*, 40: 199–216
- Campbell, Chan L, Custot J, Elmqvist T, Agbemenya R, Alfsen C, Allsopp N, Anderson P, Andersson E, Anh D, Barbe A, Barbosa O, Bernal J, Birch S, Boone R, Combes B, Cooper H, Dogsé P, Zhang R. 2012. *Cities and Biodiversity Outlook-Action and Policy: A Global Assessment of the Links between Urbanization, Biodiversity, and Ecosystem Services*
- Corbane C, Sabo F, Politis P, Syrris V. 2020. GHS-BUILT-S2 R2020A - built-up grid derived from Sentinel-2 global image composite for reference year 2018 using Convolutional Neural Networks (GHS-S2Net). Technical Report. European Commission, Joint Research Centre (JRC)
- ESA. 2017. Land cover CCI product user guide version 2. ESA Libin, Belgium
- Esch T, Heldens W, Hirner A, Keil M, Marconcini M, Roth A, Zeidler J, Dech S, Strano E. 2017. Breaking new ground in mapping human settlements from space—The Global Urban Footprint. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 134: 30–42
- Gong P, Li X, Wang J, Bai Y, Chen B, Hu T, Liu X, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y. 2020. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sens Environ*, 236: 111510
- Gong P, Li X, Zhang W. 2019. 40-year (1978–2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing. *Sci Bull*, 64: 756–763
- Huang X, Xia J, Xiao R, He T. 2019. Urban expansion patterns of 291 Chinese cities, 1990–2015. *Int J Digital Earth*, 12: 62–77
- IPCC. 2016. Report of the forty-third session of the IPCC, Nairobi, Kenya, 11–13 April 2016. Technical Report. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/final_report_p43.pdf
- Krayenhoff E S, Moustauoui M, Broadbent A M, Gupta V, Georgescu M. 2018. Diurnal interaction between urban expansion, climate change and adaptation in US cities. *Nat Clim Change*, 8: 1097–1103
- Latham J, Cumani R, Rosati I, Bloise M. 2014. Global land cover share (GLC-SHARE) database beta-release version 1.0-2014. Technical Report. FAO: Rome, Italy
- Li X, Zhou Y, Zhu Z, Cao W. 2020. A national dataset of 30 m annual urban extent dynamics (1985–2015) in the conterminous United States. *Earth Syst Sci Data*, 12: 357–371
- Liu C, Huang X, Zhu Z, Chen H, Tang X, Gong J. 2019a. Automatic extraction of built-up area from ZY3 multi-view satellite imagery: Analysis of 45 global cities. *Remote Sens Environ*, 226: 51–73
- Liu C, Zhang Q, Luo H, Qi S, Tao S, Xu H, Yao Y. 2019b. An efficient approach to capture continuous impervious surface dynamics using spatial-temporal rules and dense Landsat time series stacks. *Remote Sens Environ*, 229: 114–132
- Liu X, Huang Y, Xu X, Li X, Li X, Ciais P, Lin P, Gong K, Ziegler A D, Chen A, Gong P, Chen J, Hu G, Chen Y, Wang S, Wu Q, Huang K, Estes L, Zeng Z. 2020. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nat Sustain*, 3: 564–570
- Mace A, Blanc F, Gordon I R, Scanlon K. 2016. A 21st century metropolitan green belt. Technical Report. The London School of Economics and Political Science, London, UK
- Mbow H O P, Reisinger A, Canadell J, O'Brien P. 2017. Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SR2). Technical Report. Ginevra, IPCC
- United Nations. 2018. 2018 Revision of World Urbanization Prospects. Technical Report. <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Olofsson P, Foody G M, Herold M, Stehman S V, Woodcock C E,

- Wulder M A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens Environ*, 148: 42–57
- Pesaresi M, Ehrlich D, Florczyk A J, Freire S, Julea A, Kemper T, Soille P, Syrris V. 2015. GHS built-up grid, derived from Landsat, multitemporal (1975, 1990, 2000, 2014). Technical Report. European Commission, Joint Research Centre, JRC Data Catalogue
- Reba M, Seto K C. 2020. A systematic review and assessment of algorithms to detect, characterize, and monitor urban land change. *Remote Sens Environ*, 242: 111739
- Schneider A. 2012. Monitoring land cover change in urban and peri-urban areas using dense time stacks of Landsat satellite data and a data mining approach. *Remote Sens Environ*, 124: 689–704
- Schneider A, Mertes C M. 2014. Expansion and growth in Chinese cities, 1978–2010. *Environ Res Lett*, 9: 024008
- Seto K C, Dhakal S, Bigio A, Blanco H, Delgado G C, Dewar D, Huang L, Inaba A, Kansal A, Lwasa S, McMahon J E, Müller D B, Murakami J, Nagendra H, Ramaswami A. 2014. Chapter 12- Human settlements, infrastructure and spatial planning. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von-Stechow C, Zwickel T, Minx J C, eds. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. IPCC Working Group III Contribution to AR5. Cambridge: Cambridge University Press
- Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 16083–16088
- Sulla-Menashe D, Gray J M, Abercrombie S P, Friedl M A. 2019. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product. *Remote Sens Environ*, 222: 183–194
- Weng Q. 2001. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environ Manage*, 28: 737–748
- Wulder M A, White J C, Loveland T R, Woodcock C E, Belward A S, Cohen W B, Fosnight E A, Shaw J, Masek J G, Roy D P. 2016. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sens Environ*, 185: 271–283
- Xu G, Dong T, Cobbinah P B, Jiao L, Sumari N S, Chai B, Liu Y. 2019a. Urban expansion and form changes across African cities with a global outlook: Spatiotemporal analysis of urban land densities. *J Cleaner Production*, 224: 802–810
- Xu G, Jiao L, Liu J, Shi Z, Zeng C, Liu Y. 2019b. Understanding urban expansion combining macro patterns and micro dynamics in three Southeast Asian megacities. *Sci Total Environ*, 660: 375–383
- Xu Y, Yu L, Peng D, Zhao J, Cheng Y, Liu X, Li W, Meng R, Xu X, Gong P. 2020. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980–2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm. *Sci China Earth Sci*, 63: 1390–1407
- Yang Y, Xiao P, Feng X, Li H. 2017. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 125: 156–173
- Zhou D, Zhao S, Liu S, Zhang L, Zhu C. 2014. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sens Environ*, 152: 51–61

(责任编辑: 施建成)