

全球地表覆盖制图研究新范式

宫鹏¹, 张伟¹, 俞乐¹, 李丛丛^{1,2}, 王杰³, 梁璐⁴, 李雪草¹,
计璐艳¹, 白玉琪¹

1. 清华大学地球系统科学研究中心 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084;

2. Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley CA 94720-3114, USA;

3. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

4. Arkansas Forest Resources Center, University of Arkansas Division of Agriculture, School of Forestry and Natural Resources, University of Arkansas at Monticello, 110 University Court, Monticello AR 71655, USA

摘要: 全球土地覆盖制图在过去的10年中取得重要进展, 空间分辨率从300 m增加至30 m, 分类详细程度也有所提高, 从10余个一级类到包含29类的二级分类体系。然而, 利用光学遥感数据在大空间范围制图方面仍有诸多挑战。本文主要介绍在农田、居住区、水体和湿地制图方面的挑战, 讨论在使用多时相和多传感器遥感数据上的困难, 这将是未来遥感应用的趋势。由于各种地表覆盖数据产品有自己定义的地表覆盖类型体系和处理流程, 通过调和以及集成各种全球土地覆盖制图产品能够满足新的应用目的, 并且可以最大程度地利用已有的土地覆盖数据。然而, 未来全球土地覆盖制图需要能够按照新应用需求动态生成地表覆盖数据产品的能力。过去的研究表明有效地提高局部尺度制图的分类精度, 更好的算法、更多种特征变量(新类型的数据或特征)以及更具代表性的训练样本都非常重要。我们却认为特征变量的使用更重要。本文提出了一个全球土地覆盖制图的新范式。在这个新范式中, 地表覆盖类型的定义被分解为定性指标的类、定量指标的植被郁闭度和高度。非植被类型通过它们的光谱和纹理信息提取。复合考虑类、郁闭度和高度3种指标来定义和区别包含植被的地表覆盖类型。郁闭度和高度不能在分类算法中提取, 需要借助其他直接测量或间接反演方法。新的范式还表明, 一个普遍适用的训练样本集有效地提高了在非洲大陆尺度土地覆盖分类。为了确保更加容易地实现从传统的土地覆盖制图到全球土地覆盖制图新范式的转变, 建议构建一体化的数据管理和分析系统。通过集成相关的观测数据、样本数据和分析算法, 逐步建成全球土地覆盖制图在线系统, 构建全球地表覆盖制图门户网站, 为数据生产者、数据用户、专业研究人员、决策人员搭建合作互助的平台。

关键词: 遥感, 图像分类, 类别定义, 通用样本, 一体化系统, 在线制图

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 宫鹏, 张伟, 俞乐, 李丛丛, 王杰, 梁璐, 李雪草, 计璐艳, 白玉琪. 2016. 全球地表覆盖制图研究新范式. 遥感学报, 20(5): 1002-1016

Gong P, Zhang W, Yu L, Li C C, Wang J, Liang L, Li X C, Ji L Y and Bai Y Q. 2016. New research paradigm for global land cover mapping. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1002-1016 [DOI:10.11834/jrs.20166138]

1 全球地表覆盖制图的进展

全球土地覆盖制图起源于传统的调查和测绘。20世纪60年代卫星遥感技术已经出现, 20多年后人们才利用卫星遥感技术进行洲际尺度的地表覆盖制图。20世纪90年代, 研究人员开始进行

全球尺度地表覆盖制图。随着遥感技术的不断发展, 数据空间分辨率也在不断提高, 1972年首颗陆地观测卫星能够获取约80 m空间分辨率的遥感影像, 1982年陆地卫星TM数据(Landsat Thematic Mapper)的分辨率达到了30 m, 1986年SPOT卫星数

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-05-20; 优先数字出版日期: 2016-06-27

基金项目: 中国气象公益项目(编号: 201506023)

第一作者简介: 宫鹏(1965—), 男, 教授, 清华大学地球系统科学研究中心主任, 研究方向为全球土地覆盖/利用变化探测、全球环境变化与公众健康。E-mail: penggong@tsinghua.edu.cn

据的分辨率提高到了10 m。尽管出现了这些先进技术，早年发射的Landsat和SPOT卫星需要花费数十年才能完整覆盖陆地表面。直到20世纪90年代末Landsat 7的发射，获取全球覆盖的相对连续和完整的30 m分辨率数据才成为现实。

全球地表覆盖制图最初依赖气象卫星数据产品，主要是NOAA卫星甚高分辨率辐射仪(AVHRR)数据。AVHRR数据的空间分辨率低于1 km。因为早期地表覆盖制图主要目标是用于全球陆面过程模式以支持气候变化研究，人们能够接受1 km分辨率的全球土地覆盖数据产品(如Defries和townshend, 1994; Loveland和belward, 1997)。自1999年发射地球观测系统之后，人们利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据，完成了每年全球土地覆盖500 m分辨率数据产品。2011年，运用2010年前后的Landsat数据完成了首个30 m分辨率的全球地表覆盖数据集(FROM-GLC)(Gong等, 2013)。它是唯一包含二级地表覆盖类型结构的全球土地覆盖产品，一级类包含了10个较粗的陆地覆盖类别，其二级类细分为29类。它建立了以验证为目的唯一独特的区域分层随机样本集。该验证样本集的位置对公众开放，使通过国际合作提高制图精度成为可能。

尽管目前已有数套全球地表覆盖产品，但多数产品主要用于满足在气候系统研究中的陆面过程模型的应用。虽然最近已有关于全球地表覆盖数据用于满足生物多样性和农业管理方面需求的讨论(Fritz等, 2015)，但是这种数据还很少。FROM-GC全球农田制图(Yu等, 2013a)精度也不足(大约60%)，而且只有一大类。粮食估产要求更精确且更多类型的农作物分布数据。

全球地表覆盖是气候变化和可持续发展研究的一个重要变量(Yang等, 2013; Xu等, 2013)。2015年12月，在第12次国际地球观测组织(GEO)峰会和墨西哥城部长级峰会上，与会者共同讨论了为支持联合国可持续发展目标的全球地表覆盖数据产品需求。利用灵活的地表覆盖分类体系，不同的国家可获取更高分辨率的全球地表覆盖数据产品来支持其在社会经济方面的应用。这反映了世界各国对全球和国家尺度地表覆盖数据的新需求。显然，地表覆盖制图工作者尚未满足这一新需求。要满足这一需求不仅需要技术进步，而且需要根据全球制图的特点和更有效的国际合作重

新思考制图方法。本文将用实例说明一些全球地表覆盖制图的困难与挑战，以及对未来研究方向的设想。

2 困难与挑战

高分辨率全球地表覆盖制图面临诸多挑战，存在3个普遍的困难。第一、制图目的根据不同的应用需彻底改变。不同的应用要求不同的分类系统。因此，一个有固定分类系统的地表覆盖产品只能满足设定的需求，可能无法满足其他需求。此外，在没有检验是否在给定的遥感数据分类系统中有足够分离性的前提下，无法设计出一个能满足特定应用需求的分类体系。先前的经验表明，利用光学遥感数据仅对全球尺度的十多个一级类的地表覆盖类型分类，也很难完成精度好于80%的地表覆盖制图。第二、输入的特征数据(如来自遥感的光谱数据和据其算出的纹理数据，以及高程、气候等辅助数据)在地表覆盖制图中扮演十分重要的角色(Li等, 2014; Yu等, 2014a)。从干涉雷达、摄影测量和激光雷达获得的植被高度数据可能帮助进一步提高分类精度。然而，当前没有大量的植被高度数据。在全球地表覆盖制图里，微波、热红外和激光雷达数据由于分辨率不一致或探测范围不完整等原因尚未在大空间范围与光学数据集成使用。第三、一个制图者收集全球足够的训练样本数据需要花费数年时间。一个人去检验所有的地面实况也不可能满足人们对年代际或更密集的年际地表覆盖制图的需要。因此，全球地表覆盖制图要求多影像分析者的紧密合作。制图标准的一致性和由熟悉世界不同区域的人员合作十分必要。

根据以往的地表覆盖制图经验，湿地、灌丛、居住区和农田的分类精度通常要低很多(Sullamenashe等, 2011; Gong等, 2013)。尽管水体分类精度一般高于80%，好于大多数其他类别的分类结果，但最近一项研究表明影响其他地表覆盖分类的大量普遍因素(如：云和山影)也影响对水体的分类效果(Ji等, 2015)。因此，进一步提高水体制图精度也是可能的。我们以农田、居住区、水体和湿地为例说明全球地表制图的困难、挑战、以及克服困难的策略。灌丛是草地和林地的过渡类别。4.1节将要解释，它要求更多定量信息来更好

地定义分类。为此，专家尝试将ICESat获得的约60 m直径范围内的激光雷达波形数据特征与Landsat光谱特征结合使用，能将河南境内的灌丛的分类精度提高约20%。

2.1 全球农田制图的限制和两个热带地区的研究案例

全球农田分布(包括农场)的准确信息对水资源规划、粮食安全研究、地球系统和全球变化研究都起着至关重要的作用(Thenkabail 等, 2010; Gong 等, 2013; Yu 等, 2014a)。当前基于遥感技术的全球农田制图产品有很多局限性。

用两个案例说明农田制图的限制和可能提高

的方面。利用光学数据进行农田制图，云覆盖(以及云阴影)影响严重。Eastman等人(2014)研究发现全世界昼夜完全无云覆盖天空平均发生频率仅为20.7%，并且热带(特别是印度尼西亚岛)和极地地区完全晴天发生的概率更低。因此，在热带区域容易低估农田面积(Yu 等, 2013a)。多时相的光学影像能够帮助减少云污染(Yu 等, 2013b)，但是一些区域去云的影像很难获取。合成孔径雷达数据(可以穿透云层)在这些区域内有一定的优势。图1显示了马来西亚半岛区域的先进陆地观测卫星(ALOS)L波段的合成孔径雷达影像。这种数据有潜力从自然植被中分离出人工种植的油棕树分布。

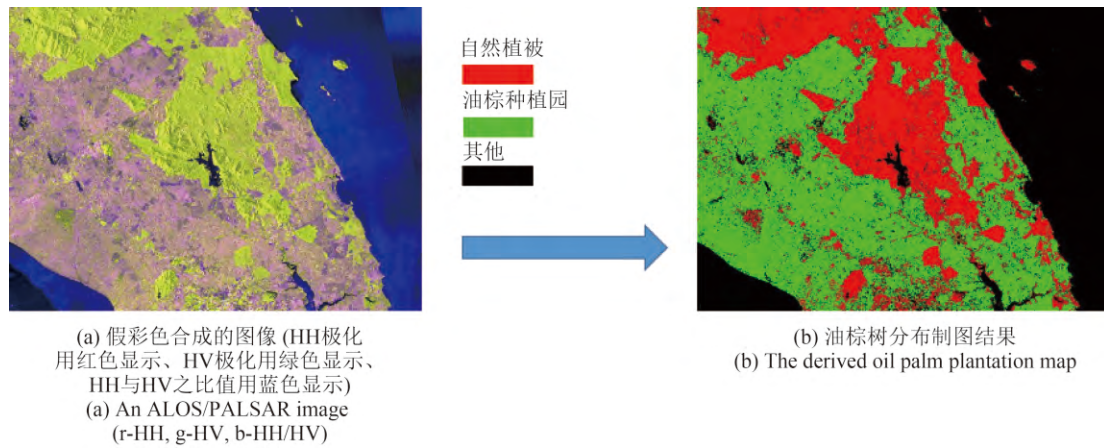


图1 利用日本先进陆地观测卫星(ALOS)L波段合成孔径雷达双极化数据假彩色合成的图像及油棕树分布制图结果
Fig. 1 An ALOS/PALSAR image(r-HH, g-HV, b-HH/HV)and the derived oil palm plantation map

另一个例子来自半干旱区(尼日利亚凯比州耶卢瓦附近)，该区域偶尔被密云影响(见图2(a))。云或阴影被误分为其他土地覆盖类型。在图2(b)中，城市边缘的云和阴影被误分为城市。这个区域有两个季节，一个短暂的雨季(通常从6月到9月)和一个较长的旱季(通常从10月到下一年5月)。在农地制图中，最大的障碍是从其他地表覆盖类型中提取出农田。在雨季，农田可能与天然植被混淆(如草地和灌丛)(图2(c))。对于植被覆盖制图，时间序列植被指数能够描述绿色植被季节性变化。一个提高全球地表覆盖制图精度的方法是利用多时相Landsat、SPOT或者Sentinel-2等卫星的时间序列数据分类。图2(d)显示采用2013年和2014年获取的Landsat多季节影像提高精度的例子。

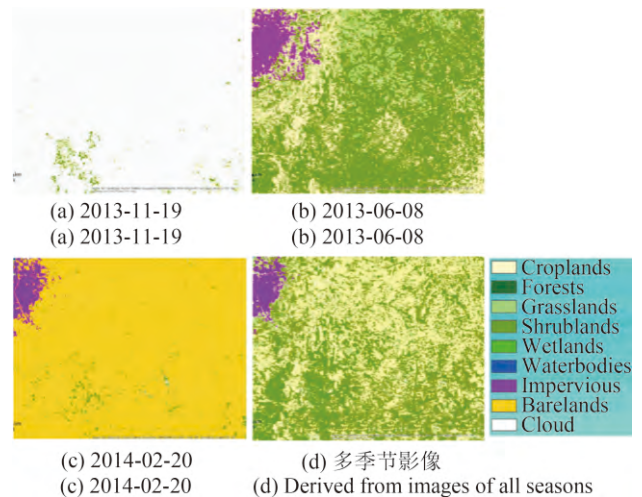


图2 获取自Landsat不同日期的尼日利亚凯比州耶卢瓦的地表覆盖数据
Fig. 2 Land cover maps derived from Landsat images acquired on different dates for Yelwa City, Kebbi State, Nigeria

2.2 全球居住区制图的挑战

据最新的世界城市化展望(United nations, 2015), 已有一多半的世界人口居住在城市, 到2050年这个比例预计达到66%。因此, 全球城市人口的集聚和快速扩张的居住区已经对公共健康(Gong等, 2012), 森林和生物多样性(Defries等, 2010; Seto等, 2012), 以及粮食安全(Foley等, 2011)产生了广泛影响。为了应对这些问题, 全球居住区动态制图至关重要。

Landsat影像是最高分辨率且拥有较长历史记录(超过30年)的全球免费可获取的30 m空间分辨率数据(Roy等, 2014)。目前有两个全球30 m居住区地图产品。一个是集成的多源数据集(Yu等, 2014b), 另一个主要由人工解译完成(Chen等, 2015)。很少有人尝试利用Landsat数据探索全球居住区自动制图, 更是缺少全球居住区连续的历史变化轨迹, 因此迫切需要对这个主题进行深入研究。

然而, 利用Landsat影像进行全球居住区制图仍然面临诸多挑战。首先, 这一类型在地球表面占比少于1%(Schneider等, 2010), 全球居住区由不同结构、物质、密度和空间形式组成, 仅仅基于光谱特征难以与其他地表类型区分。图3显示了从Landsat影像中有效地提取居住区的3个潜在的挑战。(1) 在居住区范围内的空间异质性。图3是位于中国北部的城市保定。尽管在黄色矩形区域A内是居住区, 但是他们的亮度(从缨帽变换和TC变换获得)变化明显带有非常高或非常低特点。(2) 农村居住区制图很容易与休耕地混淆(黄色区域B)。地表无植被覆盖的季节, 村庄颜色和它周围的休耕地几乎是相同的。与此同时, 这类区域整体差异很低(如图3中的白线所示)。这些降低了居住区提取的有效性(Li等, 2015)。(3) 居住区和裸地的混淆(Jia等, 2014)。图3(黄色区域C)中的小村庄和干枯的河流混淆。对于这两个例子, 仅用光谱特征是很难解决的。

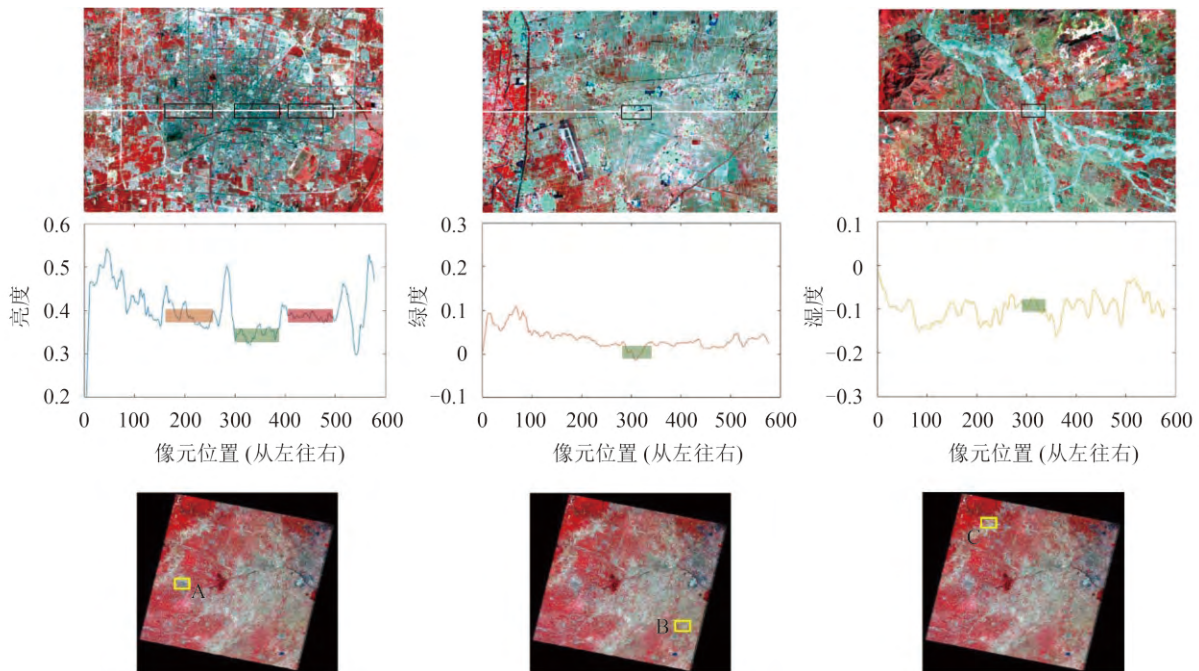


图3 Landsat TM图像提取居住区遇到的困难: 以保定地区为例

Fig. 3 Challenges in mapping human settlements with Landsat TM images(scene p123r033)

除了由光学特征引起的混淆, 当运行全球的居住区制图时会有更多的实际困难。城市发展在不同区域是空间异构的; 每景影像质量可能改变(如: 因为云污染和季节动态或者大气环境差异)。由于从区域到全球尺度可能的不一致, 给自动化

影像分类带来了巨大挑战。为了避免全球的空间异构影响, 根据生物地理单元将全球制图问题分为多个部分, 分别处理可能更合适(Schneider等, 2010)。此外, 通过掩模非居住区来提取居住区可能大大节省计算时间。最后, 反映人类聚集特征

的夜间灯光数据可直接从卫星观测，可作为居住区制图的一部分(Elvidge 等，2007)。人们从越来越多的公开社会资源(如兴趣点导航数据，街道地图)中也可以获得不同城市基础数据。这些都可用于提高全球居住区制图精度(Goodchild, 2007; Hu 等，2016)。

2.3 水体提取的主要困难

陆表水域是水资源管理和野生生物保护的一个重要变量。在区域尺度，水体比较容易识别。但在全球尺度，因为各阶段冰冻或融化的水体和不同的光照条件，他们的光谱特征随时空变化(Ji 等，2015)。

首先，水体和阴影之间容易误分。云和山的阴影(特别是当被冰雪覆盖时)容易被误分为水体。通过利用卫星传感器的视角，太阳天顶角和方位角以及云的相对高度，基于云和云影的几何关系，可剔除部分云的阴影。水体通常分布在平坦地形条件下，利用地形信息，也可剔除部分山的阴影。

再次，在高纬度区域，由于极夜现象，地表反射数据比正常的水体反射数据更低(如图4(a)所示)。当极夜发生时，在这些区域的地表覆盖类型是冰雪，其光谱形状和水体相似(如图4(b)所示)。这些区域都可能被误分为水体。因此，应检测极夜发生期并排除这些被误分的水体。

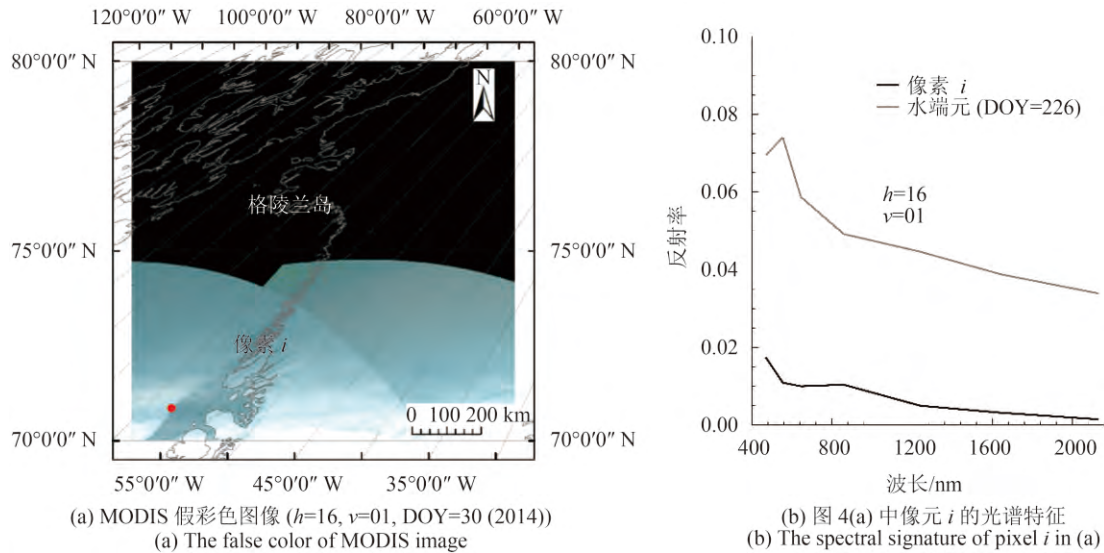


图 4 MODIS假彩色以及像元*i*的光谱特征

Fig. 4 The false color of MODIS image and the spectral signature of pixel i in Fig.4(a)

最后，如果传感器的高度角等于太阳的高度角，并在同一法线平面，镜面反射会导致很高的水体反射。因此，水体像元可能被误分为云。对于这些区域，我们需要采用时间序列数据进行处理。

2.4 湿地遥感制图的挑战

许多应用需要实时且准确的全球尺度湿地信息，如生物多样性保护和碳固存研究。由于空间和时间多变的水体环境，湿地的光谱特征也随之变化。同一个位置一年内的湿地状况往往高度动态，这已促使人们提出动态地表覆盖类型的概念(Sun 等，2014; Dronova 等，2015)。湿地里或周围

陡峭的环境梯度产生狭窄的交错群落经常在传感器分辨能力之外(Gallant, 2015)。由于上述原因，在全球地表覆盖数据产品中，湿地通常是被分得最差的类型之一(Gong 等，2013)。在亚马逊盆地，利用粗分辨率的光学数据进行湿地分类，所能探测到的湿地面积低于用SAR数据所得湿地制图结果的25%(Hess 等，2015)。在区域尺度，通过解译Landsat及相似传感器类型的光学影像，中国已经完成4个不同自然年的湿地产品(Niu 等，2012)。通过对不同年的湿地制图产品的时间一致性检查可以大大提高湿地制图的精度。因为执行全球尺度的类似项目需要更多的人力，所以需在发展精

确湿地制图的自动算法上做更多努力。由于有些湿地类型是高度动态的，未来可以尝试整合降水数据和水文模型进行湿地制图。

2.5 使用多时相和多传感器数据的挑战

多时相数据能够区分地表覆盖类型光谱属性的细微差别。大多数研究是用多时相的光谱数据或植被指数来探测那些很难通过单时相影像获得的景观要素的季相差异。除了使用多时相数据进行地表覆盖分类之外，近期出现的一个趋势是使用多时相影像做时间轨迹分析。这种分析将按时间密集排列的同一地域的叠图所表征的特定地表覆盖类别的时间特征，作为该类地类的季节变化或物候变动的代理特征。这项技术对检测生态系统特性中(如：长期的森林干扰)细微的季节或年际变化特别有效(Kennedy等, 2010; Huang等, 2010; Liang等, 2014; Sulla-menashe等, 2014)。通常这类方法包括过滤时间序列曲线以便增强信噪比，建立能反映各个阶段生态系统过程的时间序列指数，如初始生长期、持续生长阶段、时间序列指数的坡度变化等。高质量和高时间频率影像的获取是该技术最大的障碍。在Landsat数据开放之前，普遍应用粗分辨率传感器数据(Myneni等, 1997; Lunetta等, 2006)。相比其他技术，这种分类方法是高度依赖一系列参数，如所采用的过滤方法能否恰当地反映参数的特性。用户需要意识到优化参数随站点和传感器而改变，这给增加训练样本和延长研究时间带来困难。

随着数据可用性的提高，需要使用来自多传感器的数据。不同传感器的观测视角不同会引起应用困难。如图像配准和几何校正无法保证被不同传感器观测的同一位置的像元反映的是同一目标。很少有研究检验来自多传感器的数据观测几何的差异对地表覆盖分类的影响(Xin等, 2013)。分类后比较技术要求先对每景单时相图像进行分类，然后按时间顺序比较分类的地表覆盖。由于这种技术不需要密集的叠图，因此可以使用更多不同的传感器数据。但是，它的分类效果很大程度上依赖在每个时相的分类精度，而且分类误差会传递到后续的分析结果(Coppin等, 2004)。使用时间过滤和启发式推理，或者基于马尔可夫随机场的时空一致性检验能够进一步提高独立分类地图的精确性(Liu和Cai, 2012; Li等, 2015; Wang

等, 2015)。在MODIS数据集里的五个全球地表覆盖产品，采用后验概率的后处理改进方法对每年分类结果进行集成分类，减少了不是由地表覆盖变化引起的不同年份间地表覆盖的变动的情况(Friedl等, 2010)。

3 改进分类结果增加数据可用性的努力

3.1 调和分类结果

调和地表覆盖图的目的是增加数据的兼容性和可比性，并减少数据的不确定性(Herold等, 2006)。全球尺度的地表覆盖在区域上存在很大不确定性。例如，20世纪末，不同来源农田区域评估范围从11.1亿ha到36.2ha(Biradar等, 2009)。在不同的全球制图数据中，农田范围的不一致性也十分明显(Fritz等, 2011; Vancutsem等, 2013)。

如前所述，对于不同应用，地表覆盖制图通常使用特定的分类体系。采用标准化分类体系既不可能也不必要，只会限制所制作的地表覆盖图的适用性。但是，当某一个具体区域没有满足新的地表覆盖分类结果时，用一个为不同目的而完成的地表覆盖数据产品一般比一无所有要好。这时，需要对已存在的制图产品的缺陷有所了解。即使存在多个地表覆盖图的情况下，对于一个新的应用需求来说，可能任何一个都不理想。用特定的规则整合来自不同来源不同分类结果的数据产品可能效果更好。信息融合有时也被看做是数据调和(See和Fritz, 2006)。但是，集成不同的地图以期改进地表覆盖数据集存在一定的问题。因为不同图之间存在大量差异，如制图时间不同，数据集和输入特征值不同，方法论和分类系统定义和图例不同等(Herold等, 2006; Verburg等, 2011)。目前已经建立起几种从多种地表覆盖图合成一个新的数据产品的方法：基于模糊度排序法(Jung等, 2006)，基于专家知识和区域地图的方法(Fritz等, 2011; Vancutsem等, 2013)或者基于集成规则的方法(Yu等, 2014b)。集成多分类器输出结果的技术是数据挖掘的一个子学科，通常被称为“堆叠算法”、“集成分类”或者“再学习”。将遥感数据和分类结果堆叠能够创造一个比任何单独的分类法更好精度的合成图(Clinton等, 2009, 2015)。但这些尚未在洲和全球尺度进行测试。

显而易见,如果有足够的观测数据和计算资源,可以调整训练样本并根据新的分类体系重新进行图像分类,这种情况下,调和已有分类结果并不是一个最佳的选择。当观测数据有限,而需要使用二手数据研发历史土地利用变化产品时,有必要使用数据调和方法(Hurt等,2011)。这时,有必要使用能够重新分配统计或空间数据到他们可能位置的一些空间数据分解方法(Radke和Flodmark,1999;Sleeter等,2012)。

3.2 数据(特征)比分类方法更重要

许多新的算法(分类方法)被引入遥感领域,并有助于改进地表覆盖制图结果。然而,通过对连续15年发表在《Photogrammetric Engineering and Remote Sensing》中有关分类的文献的再分析,Wilkinson(2005)发现新的算法可能很难提高地表覆盖和土地利用制图结果。此外,Yu等人(2014b)建立了一个关于地表覆盖制图活动空间化的文献数据库(除了传统信息文献数据库中包括的,还收集了记录地图制图的位置,分类系统,数据应用类型,数据获取年份,分类方法类型和地图精度等信息)。通过比较分类精度和算法、分类精度和输入数据(特征)的关系,发现由不同算法产生的精度差异没有不同数据类型造成的精度差异大。

为了进一步验证这个发现,Li等人(2014)对广州市同一个区域比较了13种监督分类算法和2种非监督分类算法。这些方法包括几个人工智能算法,而影响分类结果的其他因素保持不变。使用4个波段TM数据(除了两个中红外波段)对8个地表覆盖和土地利用类别进行分类,这些算法生成的最高的精度的Kappa系数在0.82到0.87之间。用4个通用的光谱波段(蓝色、绿色、红色和近红外),地表覆盖分类精度可以达到整体精度高于85%,而在不同算法中精度差异基本在5%以内。当在分类中增加两个中红外TM波段后,整体精度增加了3%—5%。使用中国的卫星数据(中巴地球资源卫星02B,HJ-1B和北京一号)对同一区域使用同样的训练和验证样本,得到了相似的发现。当从参与分类的光谱数据计算几个纹理特征并将其用于分类时,大多数分类方法整体精度会再增加2%—5%。这些结果使我们认为:使用充足的训练样本和设定适当的分类算法参数,提高地表覆盖制图精度应着力于构建更有效的数据特征。随着各种

各样的地理空间数据类型的增加,应将其他环境数据,如气候和地形数据用作额外的数据特征来提高全球地表覆盖制图精度。

3.3 其他进一步提高地表覆盖制图结果的问题

对于高质量的地表覆盖制图,适当的数据和训练样本都是重要的。粗分辨率的数据可通过多种方式免费获取。这是全球地表覆盖制图的基础。希望未来有更多的可获得的免费Landsat数据,EOS和NOAA卫星系列数据。Sentinel系列卫星将要加入更多高质量的地球观测数据。日本、法国、中国、印度和巴西以及其他国家也将贡献可免费获得的地球观测数据(Belward和Skien,2015)。

然而,如何更容易地获取高分辨率数据仍然是一个问题。识别更精细的地表覆盖类型,如小尺度低强度的非洲农业用地,需要空间分辨率高于1m的影像。目前这样的数据从技术角度是可以完成的,但是从经济和可运行的角度并不能覆盖全球。谷歌地球是以浏览为目的的最大的高分辨率数据收集者。2011年,通过全球的评估,接近世界陆地面积60%被高分辨率影像覆盖(高于2.5m的分辨率)(Gong等,2013)。随着更多新的高分辨率卫星进入轨道运行,有必要建立一种机制来组织各种利益相关者发展覆盖全球的定期数据集。

训练样本的数据收集是影响图像分类结果的一个重要因素(Gong和Howarth,1990)。Li等人(2014)发现大多数算法能用充足的典型训练样本和合理的算法参数设置实现优质的分类结果。为了运行出可靠的结果,专家从当地观测得到的训练样本数据很有价值(Radoux等,2014)。但是,目前在全球尺度还无法完整获得这样的数据。

学者已经开始尝试通过国际网络征集志愿者来收集和验证全球地表覆盖数据产品(See等,2015a),并根据先前的地表覆盖数据产品制作混合数据产品(See等,2015b)。这是一个值得努力的国际合作方向,但是很难招募到来自当地而具有相似解译技能的志愿者。因此,建立一个国际志愿者网络更多的是一个社会问题(要求拥有长期良好的技术交流和经济补助),而不是技术问题。可代替它的方法是鼓励终端用户介入到他们感兴趣的数据产品生产。开发一个使终端用户可参与数

据产品运行的框架有诸多优势。通常终端用户对感兴趣区域有更多的本地知识。未来招募志愿者工作应该关注积累当地的终端用户知识。技术和数据支持应该来自专业的数据生产商。因此，通过便于终端用户制作他们自己的地图并将他们当地的知识吸收到全球尺度制图中，有可能建立全球制图主人翁意识。这可能是更可持续且经济可行的方法。

收集全球训练样本的另一个途径是在一个单位集中开展样本采集工作。30 m全球地表覆盖制图正是这样完成的(Gong等, 2013)。上面建议的终端用户制图模式可与集中样本采集的方法相结合。为了有更多的生产者与终端用户合作, 需要开发出更多用户友好的数据处理和分析工具。

4 新的研究范式

为了更好地利用现有和未来的数据和技术, 进一步提高全球制图的能力, 需要超越传统制图思考的范畴。传统而言, 一旦地图制图完成, 需要想尽办法充分地利用现有的产品, 因为大量资源被投入到制作这个数据产品上。制作新的数据产品, 专家经验、遥感数据和实地数据收集都很耗费资源。而这些资源被一次性使用之后, 只留下一个制图产品, 实际上是很可惜的。应尽可能收集先前制图所做过的那些努力(专家经验和数据), 以达到再使用的目的。未来需要建立区域和全球地表覆盖制图的新框架。首先, 需要重新思考和设计分类体系。其次, 需要开发新的方法, 在不同的时间和地点新的地表覆盖制图中使用累积先前收集的经验、遥感数据和训练样本。再次, 开发一个一体化的数据管理和分析系统。最后, 开发一个开放的门户网站, 使任何一个几乎不具备地表覆盖制图技能的人在这一网站上做出本地甚至更大尺度的地表覆盖制图。

4.1 回到分类的本质

利用遥感数据进行地表覆盖制图是一个从有细节的全球影像中获得适合人类感知世界分类的过程。理想情况下, 已有遥感数据应能支持分类体系中的类别辨识。但是, 通常不是这种情况。例如, 森林可能被定义为“郁闭度大于15%, 半落叶阔叶树高于5 m”。这个定义包含多种信息的组

合。不难想象一个郁闭度20%的林地和一个有同类树但80%郁闭度的林地可能有明显的光谱差异。落叶林是特定季节的现象, 可能很难辨别是冬季落叶还是旱季。此外, 对于相对密集的森林, 来自同一视角的影像不可能包含足够多的关于树木高度的信息。因此, 提倡通过分别提取类型定义中的不同信息的方法来完成地表覆盖制图(Gong等, 2013)。光谱数据可能仅仅适于分离一些简单的覆盖类型, 并不适合确定林冠郁闭度和植被高度。后两类信息需要依赖不同的数据源或分析算法, 不应该全依靠光谱数据进行推断。当通过光谱解混获得林冠郁闭度数据时(Gong等, 1994), 可以通过分类体系中关于相应郁闭度的定义来进一步区分森林类型。植被高度可以通过数字摄影测量技术、雷达干涉技术或者激光雷达测量技术获得(Gong等, 1999; Chen等, 2007; Abdullahi等, 2016)。当获得植被高度时, 就能从灌丛中分离出高于5 m的树木, 也能从森林中筛除低于5 m的灌丛。

因此, 尽可能地保留用于地表覆盖制图的大量原始数据至关重要。如果有原始的林冠郁闭度数据, 我们总能回到原始数据根据不同分类系统对林冠郁闭度的规定来重新获取地表覆盖的类型。保留用于训练或验证样本的原始数据(如叶型, 林冠郁闭度和高度), 当不同的应用需要新分类系统时, 就能保证可以按新分类系统重新定义一个新类别的灵活性。因此, 样本数据库不应仅仅包括样本位置和已划分的地表覆盖类别, 而应是将用于定义样本位置类型的原始数据或特征都储存在样本数据库里。

4.2 普适样本库的建立

在局地制图中, 一个位置的训练样本通常不能用于另一个位置, 因为在另一个位置可能有新的覆盖类型。但是, 对于全球制图而言, 整个世界是一个封闭的系统。只要有全世界各种地表覆盖类型的各个季节动态的典型样本, 就不需要每年都收集训练样本数据。因此, 有可能建立在全球和大陆尺度具有空间和时间代表性的普适训练样本库。适合各种季节动态制图的普适样本库从未建设过, 但建设这样的样本库很有必要。

以非洲为例, 用Landsat影像进行地表覆盖制图。根据“所见即所得”的原则, 依照季节性特点,

采集了多季节的训练样本(15805个点位)和验证样本(7436个点位)。训练样本单元的位置是基于2010年全球地表覆盖制图项目中训练样本的位置(Gong等, 2013)。以此为基础, 又增加了与先前样本在光谱空间上存在显著差异的新的样本单元, 从而丰富了原有的训练样本库。希望将训练数据库建成可包含各地主要季节的物候信息动态普适样本Multi-Season (Universally Applicable Sample)。对于每个样本位置, 季节被定义成3个月的均等间隔, 分为季节1(3月—5月), 季节2(6月—8月), 季节3(9月—11月), 季节4(12月—下一年2月)。此外还增加一个最绿季样本(GRS)。

表1展示了使用普适样本做的分类和传统分类结果的比较。用普适样本做分类, 不论验证数据的季节是否和训练样本数据相同, 结果来自多季节的训练样本时常会有更高的精度。也就是说, 在一年内从任何时间获得影像采集的普适样本更具有时间代表性, 因为他们包含了一年内植被主要的光谱动态特征。因此, 这些样本可用于到任何Landsat数据以便获得相对较高精度的结果。

表1 应用普适样本进行分类和传统分类的比较

Table 1 Comparison of universal classification and traditional classification

		测试数据					普适样本
		季节1	季节2	季节3	季节4	GRS	
训练数据	季节1	63.6	59.5	60.0	62.3	55.7	60.4
	季节2	60.3	63.1	59.5	61.1	64.8	61.6
	季节3	60.0	59.9	62.1	60.4	62.5	60.9
	季节4	61.3	59.8	61.2	63.3	63.2	61.8
	GRS	58.4	57.0	57.0	57.6	68.3	59.3
	普适样本	63.9	63.0	62.8	64.4	68.0	64.4

注: 普适样本将所有季节的训练样本数据和验证样本数据分别合并在一起使用。所以在非洲有73608个训练样本点和34498个验证样本点。

4.3 一体化的数据管理和数据生产系统

地表覆盖制图包含3个必不可少的环节: 数据收集、数据处理和数据发布。在全球范围内完成地表覆盖制图, 在需要收集和处理的巨大数据, 和可用的人力资源之间存在巨大的差距。因此, 需要开发能够提供尽可能多的自动化操作的专用软件工具包。需要一个完整的数据管理系统负责

支持数据存储和高效的数据检索(图5), 所有处理过程的输入和输出数据都应通过这个系统管理和检索。数据管理系统是一个支持其他软件工具工作的平台。卫星影像的元数据和有效数据图框应该被独立收集和存储, 以作为数据检索和数据处理与分析的重要辅助数据。这个数据管理系统应设计为高度可扩展的, 以适应渐进式的数据积累和处理。系统应提供批量数据转换和批量数据备份工具。

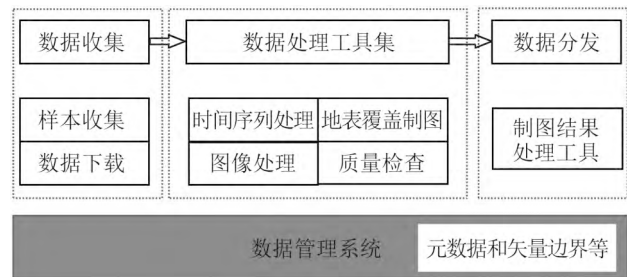


图5 全球尺度的地表覆盖制图的数据管理和处理系统
Fig. 5 A data management and processing system for global scale land cover mapping

全球地表覆盖制图需要大量的样本和数据。因此需要为一些类型的数据开发分批下载软件工具。支持样本解译的工具能提高样本采集效率和精度。这个工具应能够给解译人员展现所有可获得的信息, 如假彩色影像、光谱、年度降水时间序列等。此外, 一些便利的工具, 如快速检测不同类别分离度和光谱解混等工具, 可在线提供给影像解译人员。

为了满足尽可能多的预处理需求, 还需开发一个自动的预处理系统。大气校正, 云和云影检测, 地形校正, 影像重投影, 重采样和影像镶嵌是典型的图像预处理程序。缺失数据处理和时序序列滤波也是典型的时间序列预处理程序。如果没有批处理功能, 对全球尺度的卫星数据进行这类预处理会需要大量人力。用于可视化数据概览和数据一致性检验的工具, 对数据质量检查也很重要。全球尺度范围的监督和非监督分类通常需要高性能计算。需要基于高性能计算平台架构开发特征提取, 样本组织, 分类器训练和计算资源分配等的专用软件工具。多源数据应用需要自动的影像重投影和重采样。

清晰简洁的表现形式对地表覆盖制图发布很

重要。通常做法是提供可快速浏览的缩略图和分层表达多时相地表覆盖图。全球地表覆盖数据的潜在用户通常不熟悉遥感技术，地表覆盖数据最好能按照用户容易使用的形式提供。地表覆盖图的分辨率和投影通常和原始的卫星影像相同，软件工具应该能够自动地拼接所选区域的图像，并能转换拼接的影像到用户指定的投影类型和分辨率。终端用户常常搞不清地表覆盖类型含义，因此需要开发一个能提供地表覆盖图类型解释和类型转换的软件工具。

目前，这些需求功能分散在不同的系统中。需要将他们集成到数据管理和处理系统中以尽可能自动化地实现这些功能。

4.4 世界上任何地方都支持制图者制图的门户网站

全球地表覆盖制图门户网站可以基于前述的数据管理和分析系统构建(图6)。这个门户网站可以使数据用户和生产者，专家和非专业人员一起

致力于样本收集和处理，并能将数据用户变成当地的、区域的和全球的地表覆盖制图在线生产者。这样的网站能够存储管理所有生产者、志愿者和其他数据用户贡献的训练样本，也能很好地管理原始数据、样本的光谱特征和时间序列影像，以及其他相关的有价值的信息，比如实地照片。本网站还应进一步接入可公开访问的地表覆盖参考数据网站，比如GOF-C-GOLD参考数据网站，也能无缝集成其他参考数据，如GLC-2000数据库，GlobCover 2005数据库，陆地生物生态系统参数化数据库，可见光红外成像辐射计数据库，全球地表覆盖国家制图组织2008训练数据集，以及来自东京大学的城市数据集。

这个门户网站将连接到地表覆盖数据众包网站，如Geo-Wiki，实现自动化地集成它们的本地知识，包括当地用户的输入、评论和上传的照片等。这个门户网站还需要支持访问官方统计资料，如联合国粮农组织(UN/FAO)的森林资源评



图6 全球地表覆盖制图门户网站

Fig. 6 Global land cover mapping portal

估。除此以外, 该网站还应集成对在线地图服务的访问, 比如谷歌地球和必应地图等。这些遥感地表图像对用户判断地物类型, 实现正确的解译有重要价值。

全球地表覆盖制图门户网站为了同时展现多种地表覆盖数据, 需要定义地表覆盖数据的在线数据访问规范, 并通过支持多种代表性地表覆盖数据, 如MOD12Q1, GlobalLand30, GlobCover, FROM-GLC, US National Land Cover等数据展示其有效性。

为了支持调和或集成已有的地表覆盖数据, 需要基于可获得的参考数据实现交叉比较、验证和集成功能。参考数据可以来自谷歌地球和必应地图的高分辨率图像, 来自公众参与的众包兴趣点数据以及野外照片。最终, 在这个门户网站里, 用户可以方便地评估、改进、调和或集成已有的地表覆盖数据, 满足其特定的分类需求。

这样一个全球地表覆盖制图门户网站的研究工作已经在2015年10月的亚太GEOSS会议上启动。目前是GEO2016年工作项目的一部分。这个门户网站已经得到中国GEO、ISPRS和多个全球地表覆盖研究团队的支持, 有望在2016年底上线。

5 结 语

虽然全球地表覆盖制图已取得了一些成绩, 但是利用光学遥感数据大空间范围的地表制图仍面临诸多挑战。不仅是在农田、居住区、水体和湿地制图方面, 而且在使用多时相和多传感器遥感数据上也存在困难。本文用实例说明了全球地表覆盖制图的一些挑战, 以及对未来研究方向的设想。我们提出了全球地表覆盖制图研究新范式。为了实现从传统的土地覆盖制图到全球土地覆盖制图新范式的转变, 建议构建一体化的数据管理和生产系统, 并通过集成相关的观测数据、样本数据和分析算法, 建成全球地表覆盖制图在线系统和门户网站, 为数据用户、数据生产者、专业研究人员以及决策人员搭建合作的桥梁。未来全球地表覆盖制图应能够按照新应用需求动态生成地表覆盖数据产品, 从而更好地支持气候变化和可持续发展等研究, 以及支持数据产品在社会和经济方面的广泛应用。

注: 该文是根据Gong, et al., 2016, Annals of GIS发表的英文论文改编而成。

参考文献(References)

- Abdullahi S, Kugler F and Pretzsch H. 2016. Prediction of stem volume in complex temperate forest stands using TanDEM-X SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 174: 197–211 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.012]
- Belward A S and Skoien J O. 2015. 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 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.009]
- Biradar C M, Thenkabail P S, Noojipady P, Li Y J, Dheeravath V, Turral H, Velpuri M, Gumma M K, Gangalakunta O R P, Cai X L, Xiao X M, Schull M A, Alankara R D, Gunasinghe S and Mohideen S. 2009. A global map of rainfed cropland areas (GMRCA) at the end of last millennium using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(2): 114–129 [DOI: 10.1016/j.jag.2008.11.002]
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H and Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7–27 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002]
- Chen Q, Gong P, Baldocchi D and Tian Y Q. 2007. Estimating basal area and stem volume for individual trees from lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12): 1355–1365 [DOI: 10.14358/PERS.73.12.1355]
- Clinton N E, Gong P, Jin Z Y, Xu B and Zhu Z L. 2009. Meta-prediction of *Bromus tectorum* invasion in central Utah, United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(6): 689–701 [DOI: 10.14358/PERS.75.6.689]
- Clinton N, Yu L and Gong P. 2015. Geographic stacking: decision fusion to increase global land cover map accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 57–65 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.010]
- Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, Muys B and Lambin E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9): 1565–1596 [DOI: 10.1080/0143116031000101675]
- DeFries R S and Townshend J R G. 1994. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17): 3567–3586 [DOI: 10.1080/01431169408954345]
- DeFries R S, Rudel T, Uriarte M and Hansen M. 2010. Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3(3): 178–181 [DOI: 10.1038/ngeo756]

- Dronova I, Gong P, Wang L and Zhong L H. 2015. Mapping dynamic cover types in a large seasonally flooded wetland using extended principal component analysis and object-based classification. *Remote Sensing of Environment*, 158: 193–206 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.027]
- Eastman R, Warren S G and Hahn C J. 2014. Climatic Atlas of Clouds over Land and Ocean. Available online at: <http://www.atmos.washington.edu/CloudMap/index.html>. (Last visited on Nov. 25, 2015)
- Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C, Baugh K E, Howard A T, Milesi C, Bhaduri B and Nemani R. 2007. Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Sensors*, 7(9): 1962–1979 [DOI: 10.3390/s7091962]
- Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, Cassidy E S, Gerber J S, Johnston M, Mueller N D, O'Connell C, Ray D K, West P C, Balzer C, Bennett E M, Carpenter S R, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockström J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D and Zaks D P M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369): 337–342 [DOI: 10.1038/nature10452]
- Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A and Huang X M. 2010. MODIS collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 168–182 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016]
- Fritz S, See L, McCallum I, You L Z, Bun A, Moltchanova E, Duerauer M, Albrecht F, Schill C, Perger C, Havlik P, Mosnier A, Thornton P, Wood-Sichra U, Herrero M, Becker-Reshef I, Justice C, Hansen M, Gong P, Abdel A S, Cipriani A, Cumani R, Cecchi G, Conchedda G, Ferreira S, Gomez A, Haffani M, Kayitakire F, Malanding J, Mueller R, Newby T, Nonguierma A, Olusegun A, Ortner S, Rajak D R, Rocha J, Schepaschenko D, Schepaschenko M, Terekhov A, Tiangwa A, Vancutsem C, Vintrou E, Wenbin W, van der Velde M, Dunwoody A, Kraxner F and Obersteiner M. 2015. Mapping global cropland and field size. *Global Change Biology*, 21(5): 1980–1992 [DOI: 10.1111/gcb.12838]
- Fritz S, You L Z, Bun A, See L, McCallum I, Schill C, Perger C, Liu J G, Hansen M and Obersteiner M. 2011. Cropland for sub-Saharan Africa: a synergistic approach using five land cover data sets. *Geophysical Research Letters*, 38(4): L04404 [DOI: 10.1029/2010GL046213]
- Gallant A L. 2015. The challenges of remote monitoring of wetlands. *Remote Sensing*, 7(8): 10938–10950 [DOI: 10.3390/rs70810938]
- Gao F, de Colstoun E B, Ma R H, Weng Q H, Masek J G, Chen J, Pan Y Z and Song C H. 2012. Mapping impervious surface expansion using medium-resolution satellite image time series: a case study in the Yangtze River Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 33(24): 7609–7628 [DOI: 10.1080/01431161.2012.700424]
- Gong P, Biging G S, Lee S M, Mei X, Sheng Y, Pu R, Xu B, Schwarzr K P and Mostafa M. 1999. Photo ecometrics for forest inventory. *Geographic Information Sciences*, 5(1): 9–14 [DOI: 10.1080/10824009909480508]
- Gong P and Howarth P J. 1990. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(5): 597–603
- Gong P, Liang S, Carlton E J, Jiang Q W, Wu J Y, Wang L and Remais J V. 2012. Urbanisation and health in China. *The Lancet*, 379(9818): 843–852 [DOI: 10.1016/S0140-6736(11)61878-3]
- Gong P, Miller J R and Spanner M. 1994. Forest canopy closure from classification and spectral unmixing of scene components-multisensor evaluation of an open canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5): 1067–1080 [DOI: 10.1109/36.312895]
- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y C, Zhao Y Y, Liang L, Niu Z G, Huang X M, Fu H H, Liu S, Li C C, Li X Y, Fu W, Liu C X, Xu Y, Wang X Y, Cheng Q, Hu L Y, Yao W B, Zhang H, Zhu P, Zhao Z Y, Zhang H Y, Zheng Y M, Ji L Y, Zhang Y W, Chen H, Yan A, Guo J H, Yu L, Wang L, Liu X J, Shi T T, Zhu M H, Chen Y L, Yang G W, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z L, Chen J and Chen J. 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7): 2607–2654 [DOI: 10.1080/01431161.2012.748992]
- Goodchild M F. 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4): 211–221 [DOI: 10.1007/s10708-007-9111-y]
- Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Komareddy 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]
- Hess L L, Melack J M, Affonso A G, Barbosa C, Gastil-Buhl M and Novo E M L M. 2015. Wetlands of the lowland Amazon basin: extent, vegetative cover, and dual-season inundated area as mapped with JERS-1 synthetic aperture radar. *Wetlands*, 35(4): 745–756 [DOI: 10.1007/s13157-015-0666-y]
- Hu T Y, Yang J, Li X C and Gong P. 2016. Mapping urban land use by using Landsat images and open social data. *Remote Sensing*, 8(2): 151 [DOI: 10.3390/rs8020151]
- Huang C Q, Goward S N, Masek J G, Thomas N, Zhu Z L and Vogelmann J E. 2010. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 183–198 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.017]
- Hurt G C, Chini L P, Frolking S, Betts R A, Feddema J, Fischer G, Fisk J P, Hibbard K, Houghton R A, Janetos A, Jones C D, Kindermann G, Kinoshita T, Klein Goldewijk Kees, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, van

- Vuuren D P and Wang Y P. 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109(1/2): 117–161 [DOI: 10.1007/s10584-011-0153-2]
- Ji L Y, Gong P, Geng X R and Zhao Y C. 2015. Improving the accuracy of the water surface cover type in the 30m FROM-GLC product. *Remote Sensing*, 7(10): 13507–13527 [DOI: 10.3390/rs71013507]
- Jia K, Liang S L, Zhang N, Wei X Q, Gu X F, Zhao X, Yao Y J and Xie X H. 2014. Land cover classification of finer resolution remote sensing data integrating temporal features from time series coarser resolution data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93: 49–55 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.004]
- Jung M, Henkel K, Herold M and Churkina G. 2006. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling. *Remote Sensing of Environment*, 101(4): 534–553 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.020]
- Kennedy R E, Yang Z Q and Cohen W B. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: I. LandTrendr-Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12): 2897–2910 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008]
- Li C C, Wang J, Wang L, Hu L Y and Gong P. 2014. Comparison of classification algorithms and training sample sizes in urban land classification with landsat thematic mapper imagery. *Remote Sensing*, 6(2): 964–983 [DOI: 10.3390/rs6020964]
- Li X C, Gong P and Liang L. 2015. A 30-year (1984–2013) record of annual urban dynamics of Beijing City derived from Landsat data. *Remote sensing of Environment*, 166: 78–90 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.007]
- Liang L, Chen Y L, Hawbaker T J, Shu Z L and Gong P. 2014. Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series Landsat data. *Remote Sensing*, 6(6): 5696–5716 [DOI: 10.3390/rs6065696]
- Liu D S and Cai S S. 2012. A spatial-temporal modeling approach to reconstructing land-cover change trajectories from multi-temporal satellite imagery. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(6): 1329–1347 [DOI: 10.1080/00045608.2011.596357]
- Loveland T R and Belward A S. 1997. The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: first results. *International Journal of Remote Sensing*, 18(15): 3289–3295 [DOI: 10.1080/014311697217099]
- Lunetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, Lyon J G and Worthy L D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105(2): 142–154 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.018]
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G and Nemani R R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626): 698–702 [DOI: 10.1038/386698a0] [DOI: 10.1038/386698a0]
- Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q and Gong P. 2012. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 57(22): 2813–2823 [DOI: 10.1007/s11434-012-5093-3]
- Radke J and Flodmark A. 1999. The use of spatial decompositions for constructing street centerlines. *Geographic Information Sciences*, 5(1): 15–23 [DOI: 10.1080/10824009909480509]
- Radoux J, Lamarche C, Van Bogaert E, Bontemps S, Brockmann C and Defourny P. 2014. Automated training sample extraction for global land cover mapping. *Remote Sensing*, 6(5): 3965–3987
- Roy D P, Wulder M A, Loveland T R, Woodcock C E, Allen R G, Anderson M C, Helder D, Irons J R, Johnson D M, Kennedy R, Scambos T A, Schaaf C B, Schott J R, Sheng Y, Vermote E F, Belward A S, Bindschadler R, Cohen W B, Gao F, Hipple J D, Hostert P, Huntington J, Justice C O, Kilic A, Kovalsky V, Lee Z P, Lyburner L, Masek J G, McCorkel J, Shuai Y, Trezza R, Vogelmann J, Wynne R H and Zhu Z. 2014. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145: 154–172 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001]
- Schneider A, Friedl M A and Potere D. 2010. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on 'urban ecoregions'. *Remote sensing of Environment*, 114(8): 1733–1746 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.03.003]
- See L M and Fritz S. 2006. A method to compare and improve land cover datasets: application to the GLC-2000 and MODIS land cover products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1740–1746 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.874750]
- See L, Fritz S, Perger C, Schill C, McCallum I, Schepaschenko D, Duerauer M, Sturn T, Karner M, Kraxner F and Obersteiner M. 2015a. Harnessing the power of volunteers, the internet and Google Earth to collect and validate global spatial information using Geo-Wiki. *Technological Forecasting and Social Change*, 98: 324–335 [DOI: 10.1016/j.techfore.2015.03.002]
- See L, Schepaschenko D, Lesiv M, McCallum I, Fritz S, Comber A, Perger C, Schill C, Zhao Y Y, Maus V, Siraj M A, Albrecht F, Cipriani A, Vakolyuk M, Garcia A, Rabia A H, Singha K, Marcarini A A, Kattenborn T, Hazarika R, Schepaschenko M, van der Velde M, Kraxner F and Obersteiner M. 2015b. Building a hybrid land cover map with crowdsourcing and geographically weighted regression. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*

- ing, 103: 48–56 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.016]
- Seto K C, Güneralp B and Hutrya L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40): 16083–16088 [DOI: 10.1073/pnas.1211658109]
- Sleeter B M, Sohl T L, Bouchard M A, Reker R R, Soulard C E, Acevedo W, Griffith G E, Sleeter R R, Auch R F, Sayler K L, Prisley S and Zhu Z L. 2012. Scenarios of land use and land cover change in the conterminous United States: utilizing the special report on emission scenarios at ecoregional scales. *Global Environmental Change*, 22(4): 896–914 [DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.03.008]
- Sulla-Menashe D, Friedl M A, Krankina O N, Baccini A, Woodcock C E, Sibley A, Sun G Q, Kharuk V and Elsakov V. 2011. Hierarchical mapping of northern Eurasian land cover using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 392–403 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.09.010]
- Sulla-Menashe D, Kennedy R E, Yang Z Q, Braaten J, Krankina O A and Friedl M A. 2014. Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 151: 114–123
- Sun F D, Zhao Y Y, Gong P, Ma R H and Dai Y J. 2014. Monitoring dynamic changes of global land cover types: fluctuations of major lakes in China every 8 days during 2000–2010. *Chinese Science Bulletin*, 59(2): 171–189 [DOI: 10.1007/s11434-013-0045-0]
- Thenkabail P S, Hanjra M A, Dheeravath V and Gumma M. 2010. A holistic view of global croplands and their water use for ensuring global food security in the 21st century through advanced remote sensing and non-remote sensing approaches. *Remote Sensing*, 2(1): 211–261 [DOI: 10.3390/rs2010211]
- United Nations. 2015. *World urbanization prospects: the 2014 revision*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York.
- Vancutsem C, Marinho E, Kayitakire F, See L and Fritz S. 2013. Harmonizing and combining existing land cover/land use datasets for cropland area monitoring at the African continental scale. *Remote Sensing*, 5(1): 19–41 [DOI: 10.3390/rs5010019]
- Verburg P H, Neumann K and Nol L. 2011. Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17(2): 974–989 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x]
- Wang J, Zhao Y Y, Li C C, Yu L, Liu D S and Gong P. 2015. Mapping global land cover in 2001 and 2010 with spatial-temporal consistency at 250 m resolution. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 38–47 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.007]
- Wilkinson G G. 2005. Results and implications of a study of fifteen years of satellite image classification experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3): 433–440 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.837325]
- Xin Q C, Olofsson P, Zhu Z, Tan B and Woodcock C E. 2013. Toward near real-time monitoring of forest disturbance by fusion of MODIS and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 135: 234–247 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.04.002]
- Xu G H, Ge Q S, Gong P, Fang X Q, Cheng B B, He B, Luo Y and Xu B. 2013. Societal response to challenges of global change and human sustainable development. *Chinese Science Bulletin*, 58(25): 3161–3168 [DOI: 10.1007/s11434-013-5947-3]
- Yang J, Gong P, Fu R, Zhang M H, Chen J M, Liang S L, Xu B, Shi J C and Dickinson R. 2013. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, 3(10): 875–883 [DOI: 10.1038/nclimate1908]
- Yu L, Liang L, Wang J, Zhao Y Y, Cheng Q, Hu L Y, Liu S, Yu L, Wang X Y, Zhu P, Li X Y, Xu Y, Li C C, Fu W, Li X C, Li W Y, Liu C X, Cong N, Zhang H, Sun F D, Bi X F, Xin Q C, Li D D, Yan D H, Zhu Z L, Goodchild M F and Gong P. 2014a. Meta-discoveries from a synthesis of satellite-based land-cover mapping research. *International Journal of Remote Sensing*, 35(13): 4573–4588 [DOI: 10.1080/01431161.2014.930206]
- Yu L, Wang J, Clinton N, Xin Q C, Zhong L H, Chen Y L and Gong P. 2013a. FROM-GC: 30 m global cropland extent derived through multisource data integration. *International Journal of Digital Earth*, 6(6): 521–533 [DOI: 10.1080/17538947.2013.822574]
- Yu L, Wang J and Gong P. 2013b. Improving 30 m global land-cover map FROM-GLC with time series MODIS and auxiliary data sets: a segmentation-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 34(16): 5851–5867 [DOI: 10.1080/01431161.2013.798055]
- Yu L, Wang J, Li X C, Li C C, Zhao Y Y and Gong P. 2014b. A multi-resolution global land cover dataset through multisource data aggregation. *Science China Earth Sciences*, 57(10): 2317–2329 [DOI: 10.1007/s11430-014-4919-z]

New research paradigm for global land cover mapping

GONG Peng¹, ZHANG Wei¹, YU Le¹, LI Congcong^{1,2}, WANG Jie³, LIANG Lu⁴, LI Xuecao¹, JI Luyan¹,
BAI Yuqi¹

1. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Environmental Science, Policy, and Management, University of California, Berkeley CA 94720-3114, USA;

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

4. Arkansas Forest Resources Center, University of Arkansas Division of Agriculture, School of Forestry and Natural Resources, University of Arkansas at Monticello, 110 University Court, Monticello AR 71655, USA

Abstract: Important progress has been achieved in global land cover mapping in the past decade. For example, spatial resolution has increased from 300 m to 30 m. The level of classification detail has also improved from a plane level to a two-layered hierarchical classification scheme with 29 classes. However, major challenges emerge in mapping at a fine spatial scale with primarily optical data. This paper introduces the major challenges in mapping croplands, human settlements, water, and wetlands. The challenges in the use of multi-temporal and multi-sensor data, which may be useful in the future applications of remotely sensed data, are also discussed. Some of the on-going efforts to improve the quality of global land cover maps are then summarized. We argue that although harmonizing and integrating various global land cover products may be worthwhile for land cover data developed in the past, existing technologies provide sufficient data for improved map making if extra efforts are exerted. Developing and selecting effective algorithms, as well as several input variables (new types of data or features) for classification, and utilizing representative training samples are among the effective conventional measures for improving mapping accuracies at local scales. Data are more important than algorithms with regard to improving mapping accuracies. Finally, a new paradigm for global land cover mapping is proposed. This new paradigm includes a view of vegetation classes based on their types and form, canopy cover, and height. The appropriate determination of a vegetation class requires complementary information on canopy cover and height that cannot be extracted with classification algorithms. The new paradigm also suggests that a universally applicable training sample set is effective in improving land cover classification at the continental scale of Africa. To ensure an easy transition from traditional land cover mapping to the new paradigm of global land cover mapping, we recommend the creation of an all-in-one data management and analysis system. This system can be used as a foundation for a global land cover mapping portal that links freely accessible cyberspace resources and bridges data users and producers, specialists, and laymen toward a gradually evolving online global land cover mapping system.

Key words: remote sensing, image classification, class definition, universal sampling, all-in-one system, on-line mapping

Supported by National Grant Administrated by China Meteorological Administration (No.201506023)