

• 保护论坛 •

# 中国森林覆盖度产品的差异性及不确定性分析

秦元伟<sup>1</sup> 董金玮<sup>1</sup> 肖向明<sup>1,2\*</sup>

1 (俄克拉荷马大学微生物与植物生物系、空间分析中心, 诺曼, 俄克拉荷马 73019, 美国)

2 (复旦大学生物多样性科学研究所, 上海 200433, 中国)

## Difference and uncertainty of forest coverage estimation in China

Yuanwei Qin<sup>1</sup>, Jinwei Dong<sup>1</sup>, Xiangming Xiao<sup>1,2\*</sup>

1 Department of Microbiology and Plant Biology, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA

2 Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

森林具有气候调节、水源涵养、生物多样性保护等众多生态服务功能(Millennium Ecosystem Assessment, 2005; van der Werf *et al.*, 2009), 同时减少毁林和森林退化也是减缓温室气体排放协议REDD+的重要内容(DeFries *et al.*, 2007; Grassi *et al.*, 2008)。为了改善日益恶化的生态状况, 提高森林资源的蓄积量, 自20世纪70年代以来, 中国实施了六大林业重点工程, 包括天然林保护工程、“三北”和长江中下游地区等重点防护林体系建设工程、退耕还林还草工程、京津风沙源治理工程、野生动植物保护及自然保护区建设工程以及重点地区速生丰产用材林为主的林业产业建设工程。在森林砍伐和林业工程的双向驱动下, 如何准确地监测中国森林覆盖度及其时空变化成为一大挑战。

王昊等(2015)基于Global Forest Watch网站(<http://www.globalforestwatch.org/>)上发布的30 m空间分辨率的全球森林数据集, 详细解读了2000–2010年中国森林面积及其变化, 并与同期其他森林数据进行了比较。研究结果认为Global Forest Watch数据质量可靠, 其与GlobeLand30数据集的森林分布有较高的空间吻合度, 建议增加该数据集在保护生物学中的应用。该对比研究有助于了解当前不同中国森林数据产品的异同, 对促进森林的精准制图及其在保护生物学中的应用具有一定

的启示作用。

GlobeLand30森林数据的精度在80%左右(Chen *et al.*, 2015), 其与Global Forest Watch的空间重合度(78.97%、83.94%、89.24%和92.93%)随着森林覆盖度(>0、>20%、>50%和>75%)的增加而增加(王昊等, 2015), 但两者在森林稀疏地区仍有较大的空间不确定性。Global Forest Watch显示2000–2010年中国森林面积的减少在37,551–42,031 km<sup>2</sup>之间, 而同期ChinaCover、森林清查、FAO FRA和NLCD显示森林面积的增加在2,370–433,810 km<sup>2</sup>之间(王昊等, 2015)。这也说明上述森林产品估算的中国森林面积尚具有较大的不确定性。本文收集了2010年主要森林数据产品(表1), 从森林定义、数据源、训练数据和结果验证数据、森林监测算法等方面探讨了中国森林覆盖度产品的差异及其原因, 以期为实现中国森林覆盖度的精准监测提供科学参考。

## 1 森林的定义

森林的定义主要包括森林的覆盖度和树高。现有森林定义中, 森林的最小覆盖度从10%到60%不等, 最低树高从0.3 m到5 m不等, 差别较大。以Global Forest Watch森林图为例, 覆盖度≥10%和≥30%的森林面积相差19.3×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, 约占全球陆地面积的13% (Sexton *et al.*, 2015)。因此, 不同的森林

收稿日期: 2015-11-23; 接受日期: 2015-11-24

基金项目: NASA 土地利用/覆盖变化项目(NNX11AJ35G、NNX14AD78G)、美国国家科学基金 EPSCoR 项目(HA-1301789)、美国国立卫生研究院项目(1R01AI101028-01A1)和国家自然科学基金(41571408)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xiangming.xiao@ou.edu

表1 2010年中国森林面积数据集概要  
Table 1 Summary of forest cover dataset in China in 2010

Table 1 Summary of forest cover dataset in China in 2010

	森林数据集	面积 ( $\times 10^6$ km $^2$ )	森林的定义 Forest definition	空间分辨率 Spatial resolution	数据源 Data sources	算法 Algorithm	训练样本 Training samples	验证样本 Validation samples	产品精度 Forest data accuracy
Forest cover dataset (Hansen et al., 2013)	2.58	(1) 高度3-30 m、植被覆盖度>20%的阔叶林、针叶林和混交林; (2)高度0.3-5 m, 覆盖度>20%的灌木林; (3)高度0.3-30 m, 覆盖度>20%的园地和绿地的植被	30 m	HJ-1A/B遥感影像为主, 250 m MODIS NDVI	面向对象分 类	监督分类(决策树)	基于概率的分层随机采样	全国抽样	全国平均精度一级94%, 二级86%
Global Forest Watch (Hansen et al., 2013)	1.74 (1.84)	冠层郁闭度> 20% (10%), 高度> 5 m的植被	30 m	主要生长季Landsat ETM+遥感图像大/气顶层反射率的特征指标	Landsat TM/ETM+为主, HJ-1为补充	监督分类(决策树) MODIS 森林覆盖度产品解译森林覆盖度、森林覆盖率增加和减少	基于概率的分层随机采样	全国抽样	森林覆盖率增加和减少判别整体精度> 99%
GlobeLand30 (Chen et al., 2015)	2.13	遥感图像建立的解译标志	30 m	主要生长季云量较少的人机交互目视解译	Landsat TM/ETM+、CBERS 和HJ-1A	基于像元、面向对象和DEM、Google Map和土地利用的野外照片等多源参考数据	分层随机采样获得1.6×10 <sup>5</sup> 个像元	以上, 森林用户精度84%	整体精度在80%以上。
NLCD (Liu et al., 2014; Zhang et al., 2014)	2.27	冠层郁闭度> 10%的有林地、灌木林、疏林地和其他林地	1:100,000	Landsat TM/ETM+、CBERS 和HJ-1A	监督分类	野外观测获得的解释标志	10%随机县域调查点	95%以上。	地利用图的重叠和野外调查
MCD12Q1 (IGBP) (Friedl et al., 2010)	1.74	木本植被覆盖度> 60%, 树高> 2 m	500 m	32-day BRDF校正后的地表反射率、增强型植被指数和地表温度, 以及上述三个指标的最大值、最小值和平滑双极化数据	监督分类	基于Landsat或更高分辨率遥感数据解译陆地上1,860个训练样区	分层随机采样	10份, 交叉验证	整体精度75%
JAXA F/NF (Shimada et al., 2014)	2.00	木本植被覆盖度> 10%	50 m	6-9月份的25 m PALSAR 精细双极化数据	监督分类	全球15个区域的森林和非森林训练样本	Degree Confluence	Project、FAO 森林面积和Google Earth高清影像。	85%、91%、95%
OU F/NF (Qin et al., 2015)	2.02	木本植被覆盖度> 10%	50 m	6-9月的50 m PALSAR 精细双极化数据和250 m MODIS NDVI	监督分类	基于野外照片和Google Earth高清影像选择东南亚森林、农田、建设用地和水体样点1.4×10 <sup>7</sup> 个样本	统计数据	从Google Earth高清影像中目视解译获得的3.6×10 <sup>5</sup> 个样本	96%
FAO FRA (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012)	2.07	树高> 5 m, 冠层覆盖度> 10%, 占地> 0.5 ha; 包括能达到上述阈值的林地	国家	国家森林统计数据	统计数据	固定样地(地面样地41.5万, 遥感样地284.4万)	调查统计数	-	-
第八次森林清查 8 <sup>th</sup> Forest Resource Inventory of China (国家林业局, 2014)	2.08	森林植被郁闭度≥20%的有林地、乔木树种郁闭度在10-20%的疏林地, 以及灌木林地、未成林地、苗圃地等, 基本面积> 667 m $^2$	省域	-	-	分省抽样	95%	-	-

定义被认为是导致森林产品存在较大差异和不确定性的主要原因(Qin *et al.*, 2015; Sexton *et al.*, 2015)。

## 2 森林监测的数据源

(1) Landsat 和 HJ-1 遥感数据是 ChinaCover、GlobeLand30、Global Forest Watch 和 NLCD 的主要数据源, 其空间分辨率较高, 可有效降低混合像元的影响, 但观测频率较低, 易受云和阴影的影响(Ju & Roy, 2008)。ChinaCover、GlobeLand30 和 NLCD 使用无云和少云的单景遥感影像(Liu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; 吴炳方等, 2014; Chen *et al.*, 2015), 而 Global Forest Watch 使用了主要生长季的所有 Landsat ETM+ 大气顶层的反射率数据, 增加了数据的利用效率, 并进行了无效观测值的去除和图像均一化预处理(Hansen *et al.*, 2013)。

(2) BRDF 校正后的地表反射率、增强型植被指数和地表温度, 以及上述三个指标的年最大值、最小值和平均值是 MCD12Q1 的主要数据源, 其空间分辨率较粗, 混合像元较多, 但观测频率较高, 适合于大面积森林制图(Friedl *et al.*, 2010)。

(3) ALOS PALSAR 的精细双极化数据是 JAXA FNF 的主要数据源, 其不受天气状况的影响, 但易受地形和土壤含水量的影响。地形校正和滤波往往用于去除其斑点噪声(Shimada *et al.*, 2014)。

(4) ALOS PALSAR 的精细双极化数据和 MODIS NDVI 是 OU FNF 的主要数据源, 两种数据的融合综合了森林的结构、生物量和光谱信息, 有效降低了森林的误判(Qin *et al.*, 2015)。

(5) 调查和统计数据是中国第八次森林清查和 FAO FRA 的主要数据源, 该数据能刻画森林宏观变化趋势, 但空间分辨率较粗(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012; 国家林业局, 2014)。

## 3 算法训练数据和结果验证数据

以遥感数据为数据源的森林覆盖度监测通过野外调查数据、高分影像等建立森林和非森林的训练样本或解译标志。训练样本和解译标志的数量、空间分布和代表性直接决定了森林监测算法的阈值。基于调查和统计数据的第八次森林清查和 FAO FRA 则不需要训练数据。森林覆盖度结果的验证主

要通过随机采样、分层随机采样或者野外调查数据进行精度评价。

## 4 森林覆盖度估算方法

(1) 人机交互目视解译。需要大量的人力物力, 效率相对较低, 且年际间的稳定性和可比性较差, 解译精度取决于遥感数据的质量和解译人员的专业判断。

(2) 自动分类算法, 包括监督分类、面向对象分类和基于像元、面向对象和知识的分类。该方法基于训练样本获得的阈值进行自动分类, 并可引入专家知识等提高分类精度、效率较高, 结果在年际间的稳定性和可比性较好。

(3) 调查统计数据。基于上百万个固定样地的调查结果被认为是可靠的, 被广泛地用于估算森林面积和生物量的变化, 但需要大量的人力物力、5–10 年调查和数据分析周期(Fang *et al.*, 2001, 2014)。

## 5 小结与讨论

森林定义的差异是森林数据空间和面积不确定性的主要原因, 因此, 今后森林制图可以采用相似的森林定义。大尺度森林制图需要大量的野外调查数据和样本数据进行算法训练和结果验证, 森林样本数据的共享可以提高大尺度森林遥感监测的效率和准确度。俄克拉荷马大学地球观测和模拟研究中心(Earth Observation and Modeling Facility)建立了全球野外照片数据库开放共享平台(<http://www.eomf.ou.edu/photos/>), 长期致力于促进科研人员共享野外调查数据, 推动大尺度土地利用/覆盖分类制图的发展(Xiao *et al.*, 2011)。目前该平台已有超过 15 万张覆盖全球的野外照片。

AVHRR、MODIS、Landsat、Sentinel、CBERS 和 HJ 等遥感数据的开放获取极大丰富了森林遥感制图的数据源, 其中 AVHRR 和 Landsat 均可回溯到 20 世纪 70 年代。充分利用每一个有效观测的像元进行大尺度森林制图, 需要构建海量遥感数据的存储能力和运算能力, 如 Google Earth Engine 的云计算(Hansen *et al.*, 2013), 其效率和结果年际间的稳定性和可比性较高。

光学遥感能够反映森林的绿度和物候信息, 雷达遥感能够反映森林的空间结构和地上生物量信息, 激光遥感能有效探测森林的高度和冠层结构信

息, 叶绿素荧光数据能够探测森林的光合作用强度。因此, 促进多源遥感数据的融合, 发挥不同传感器的优势, 将促进森林面积(Dong *et al.*, 2012a; Qin *et al.*, 2015)、树高(Simard *et al.*, 2011; Cartus *et al.*, 2012)、树密度(Crowther *et al.*, 2015)、树龄 (Kou *et al.*, 2015)、地上生物量(Saatchi *et al.*, 2011; Peregon & Yamagata, 2013)和总初级生产力GPP (Damm *et al.*, 2010)的多角度、多层次监测。

根据第八次森林清查, 中国人工林(桉树、橡胶等)面积占森林面积的36%, 但蓄积量只占17%(国家林业局, 2014)。人工林取代天然林对生态往往具有负面效应, 难以替代天然林在生物多样性保护和生态服务等方面的作用(Barlow *et al.*, 2007; Meyfroidt & Lambin, 2011)。因此, 采用遥感技术进行大尺度人工林的长时间序列遥感监测有助于掌握其时空格局, 为分析其生态效应和制定人工林的发展规划、天然林保护等政策提供数据基础和科学依据(Dong *et al.*, 2012b, 2013; le Maire *et al.*, 2014; Kou *et al.*, 2015)。

## 参考文献

- Barlow J, Gardner TA, Araujo IS, Avila-Pires TC, Bonaldo AB, Costa JE, Esposito MC, Ferreira LV, Hawes J, Hernandez MM, Hoogmoed MS, Leite RN, Lo-Man-Hung NF, Malcolm JR, Martins MB, Mestre LAM, Miranda-Santos R, Nunes-Gutjahr AL, Overal WL, Parry L, Peters SL, Ribeiro-Junior MA, da Silva MNF, Motta CD, Peres CA (2007) Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **104**, 18555–18560.
- Cartus O, Kellndorfer J, Rombach M, Walker W (2012) Mapping canopy height and growing stock volume using airborne lidar, ALOS PALSAR and Landsat ETM. *Remote Sensing*, **4**, 3320–3345.
- Chen J, Chen J, Liao AP, Cao X, Chen LJ, Chen XH, He CY, Han G, Peng S, Lu M, Zhang WW, Tong XH, 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.
- Crowther TW, Glick HB, Covey KR, Bettigole C, Maynard DS, Thomas SM, Smith JR, Hintler G, Duguid MC, Amatulli G, Tuanmu MN, Jetz W, Salas C, Stam C, Piotto D, Tavani R, Green S, Bruce G, Williams SJ, Wiser SK, Huber MO, Hengeveld GM, Nabuurs GJ, Tikhonova E, Borchardt P, Li CF, Powrie LW, Fischer M, Hemp A, Horneier J, Cho P, Vibrans AC, Umunay PM, Piao SL, Rowe CW, Ashton MS, Crane PR, Bradford MA (2015) Mapping tree density at a global scale. *Nature*, **525**, 201–207.
- Damm A, Elbers J, Erler A, Gioli B, Hamdi K, Hutzler R, Kos- vancova M, Meroni M, Miglietta F, Moersch A, Moreno J, Schickling A, Sonnenschein R, Udelhoven T, van der Linden S, Hostert P, Rascher U (2010) Remote sensing of sun-induced fluorescence to improve modeling of diurnal courses of gross primary production (GPP). *Global Change Biology*, **16**, 171–186.
- DeFries R, Achard F, Brown S, Herold M, Murdiyarso D, Schlamadinger B, de Souza C (2007) Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science & Policy*, **10**, 385–394.
- Dong JW, Xiao XM, Chen BQ, Torbick N, Jin C, Zhang GL, Biradar C (2013) Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, **134**, 392–402.
- Dong JW, Xiao XM, Sheldon S, Biradar C, Duong ND, Hazarika M (2012a) A comparison of forest cover maps in Mainland Southeast Asia from multiple sources: PALSAR, MERIS, MODIS and FRA. *Remote Sensing of Environment*, **127**, 60–73.
- Dong JW, Xiao XM, Sheldon S, Biradar C, Xie GS (2012b) Mapping tropical forests and rubber plantations in complex landscapes by integrating PALSAR and MODIS imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **74**, 20–33.
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001) Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**, 2320–2322.
- Fang JY, Guo ZD, Hu HF, Kato T, Muraoka H, Son Y (2014) Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, **20**, 2019–2030.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012) *Global Forest Resource Assessment (FRA) 2010: Main Report*. Rome, Italy.
- Friedl MA, Sulla-Menashe D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A, Huang XM (2010) MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 168–182.
- Grassi G, Monni S, Federici S, Achard F, Mollicone D (2008) Applying the conservativeness principle to REDD to deal with the uncertainties of the estimates. *Environmental Research Letters*, **3**, 1–12.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, **342**, 850–853.
- Ju JC, Roy DP (2008) The availability of cloud-free Landsat ETM plus data over the conterminous United States and globally. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 1196–1211.
- Kou WL, Xiao XM, Dong JW, Gan S, Zhai DL, Zhang GL, Qin YW, Li L (2015) Mapping deciduous rubber plantation areas and stand ages with PALSAR and landsat images. *Remote Sensing*, **7**, 1048–1073.

- le Maire G, Dupuy S, Nouvellon Y, Loos RA, Hakarnada R (2014) Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, **152**, 136–149.
- Liu JY, Kuang WH, Zhang ZX, Xu XL, Qin YW, Ning J, Zhou WC, Zhang SW, Li RD, Yan CZ, Wu SX, Shi XZ, Jiang N, Yu DS, Pan XZ, Chi WF (2014) Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, **24**, 195–210.
- Meyfroidt P, Lambin EF (2011) Global forest transition: prospects for an end to deforestation. *Annual Review of Environment and Resources*, **36**, 343–371.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Peregon A, Yamagata Y (2013) The use of ALOS/PALSAR backscatter to estimate above-ground forest biomass: a case study in Western Siberia. *Remote Sensing of Environment*, **137**, 139–146.
- Qin YW, Xiao XM, Dong JW, Zhang GL, Shimada M, Liu JY, Li CG, Kou WL, Moore III B (2015) Forest cover maps of China in 2010 from multiple approaches and data sources: PALSAR, Landsat, MODIS, FRA, and NFI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **109**, 1–16.
- Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ETA, Salas W, Zutta BR, Buermann W, Lewis SL, Hagen S, Petrowa S, White L, Silman M, Morel A (2011) Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **108**, 9899–9904.
- Sexton JO, Noojipady P, Song XP, Feng M, Song DX, Kim DH, Anand A, Huang C, Channan S, Pimm SL, Townsend JR (2015) Conservation policy and the measurement of forests. *Nature Climate Change*, doi: 10.1038/nclimate2816.
- Shimada M, Itoh T, Motooka T, Watanabe M, Shiraishi T, Thapa R, Lucas R (2014) New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, **155**, 13–31.
- Simard M, Pinto N, Fisher JB, Vaccini A (2011) Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **116**.
- State Forestry Administration of the People's Republic of China (国家林业局) (2014) *General Situation of Forest Resource in China: 8th Forest Resource Inventory* (中国森林资源简况: 第八次全国森林资源清查). (in Chinese)
- van der Werf GR, Morton DC, DeFries RS, Olivier JGJ, Kasibhatla PS, Jackson RB, Collatz GJ, Randerson JT (2009) CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, **2**, 737–738.
- Wang H (王昊), Lü Z (吕植), Gu L (顾垒), Wen C (闻丞) (2015) Observations of China's forest change (2000–2013) based on Global Forest Watch dataset. *Biodiversity Science (生物多样性)*, **23**, 575–582. (in Chinese with English abstract)
- Wu BF (吴炳方), Yuan QZ (苑全治), Yan CZ (颜长珍), Wang ZM (王宗明), Yu XF (于信芳), Li AN (李爱农), Ma RH (马荣华), Huang JL (黄进良), Chen JS (陈劲松), Chang C (常存), Liu CL (刘成林), Zhang L (张磊), Li XS (李晓松), Zeng Y (曾源), Bao AM (包安明) (2014) Land cover changes of China from 2000 to 2010. *Quaternary Sciences (第四纪研究)*, **34**, 723–731. (in Chinese with English abstract)
- Xiao XM, Dorovskoy P, Biradar C, Bridge E (2011) A library of georeferenced photos from the field. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **92**, 453–454.
- Zhang ZX, Wang X, Zhao XL, Liu B, Yi L, Zuo LJ, Wen QK, Liu F, Xu JY, Hu SG (2014) A 2010 update of National Land Use/Cover Database of China at 1:100000 scale using medium spatial resolution satellite images. *Remote Sensing of Environment*, **149**, 142–154.

(责任编辑: 周玉荣)