

DOI: 10.5846/stxb202104301141

庞勇, 蒙诗栋, 史锴源, 余涛, 王晓慧, 牛晓栋, 赵旦, 刘良云, 冯敏, 覃先林, 王强, 佘袁勇. 中国天然林保护工程区森林覆盖遥感监测. 生态学报, 2021, 41(13): 5080-5092.

Pang Y, Meng S L, Shi K Y, Yu T, Wang X H, Niu X D, Zhao D, Liu L Y, Feng M, Qin X L, Wang Q, Dian Y Y. Forest coverage monitoring in the Natural Forest Protection Project area of China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5080-5092.

中国天然林保护工程区森林覆盖遥感监测

庞 勇^{1,2,*}, 蒙诗栋^{1,2}, 史锴源^{1,3}, 余 涛^{1,2}, 王晓慧^{1,2}, 牛晓栋^{1,2}, 赵 旦⁴, 刘良云⁴, 冯 敏⁵, 覃先林^{1,2}, 王 强⁶, 佘袁勇⁷

1 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

2 国家林业和草原局林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091

3 北京林业大学信息学院, 北京 100083

4 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

5 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

6 黑龙江工程学院, 哈尔滨 150008

7 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070

摘要:天然林资源保护工程(天保工程)自 1998 年开始实施至 2020 年底结束, 标志着我国林业由以木材生产为主向以生态建设为主进行转变, 对天然林资源开展定量监测与评估, 有助于全面、及时、科学地评价天保工程对森林资源的保护成效。基于公开发布的土地覆盖产品, 利用新的遥感数据合成算法构建了森林类型综合提升方法, 生产了一套我国天保工程区的森林覆盖产品, 对天保工程区 1997 年至 2020 年间的森林覆盖情况开展监测与评估。利用中国森林生态系统定位研究网络数据(CFERN)、森林资源规划设计调查数据和地面调查数据进行精度检验, 森林类型的分类精度优于 90%。分析结果显示, 自天保工程实施以来, 工程区的森林覆盖度总体呈恢复性增长趋势, 森林覆盖从 1997 年的 30.15% 增长到 2020 年的 31.74%, 净增长 1.59%, 其中, 长江上游地区森林增长量最高, 占全工程区森林增长面积的 50.97%。研究结果表明我国天保工程区内森林资源得到有效保护和恢复, 天保工程实施效果显著。

关键词:天保工程; 森林资源分布; 森林覆盖产品; 遥感监测

Forest coverage monitoring in the Natural Forest Protection Project area of China

PANG Yong^{1,2,*}, MENG Shili^{1,2}, SHI Kaiyuan^{1,3}, YU Tao^{1,2}, WANG Xiaohui^{1,2}, NIU Xiaodong^{1,2}, ZHAO Dan⁴, LIU Liangyun⁴, FENG Min⁵, QIN Xianlin^{1,2}, WANG Qiang⁶, DIAN Yuanyong⁷

1 Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 School of Information Science and Technology of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

5 Institute of Tibetan Plateau Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

6 College of Surveying and Mapping Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150008, China

7 College of Horticulture and Forestry Sciences of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

基金项目:中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020ZD002); 亚太森林恢复与可持续管理组织项目(2018P1-CAF)

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pangy@ifrit.ac.cn

Abstract: The Natural Forest Protection Project (NFPP) has been implemented since 1998 and completed by the end of 2020, which marked the transformation of China's forestry from wood production to ecological construction. Quantitative monitoring and assessing of natural forest resources is helpful to evaluate the effect of natural NFPP comprehensively, timely and scientifically. Based on the public land cover products, this paper uses new remote sensing data composition algorithm and the forest type comprehensive promotion method to produce a set of land cover products aiming at the forest coverage of the NFPP areas in China. The forest cover for NFPP is monitored and evaluated from 1997 to 2020. The classification accuracy of land cover products for NFPP is verified by the field data of the Chinese Forest Ecosystem Research Network (CFERN), forest inventory and planning data and ground survey data, which indicate the forest accuracies more than 90%. The results show that the forest coverage presents a general trend of recovery growth since the beginning of the NFPP. The forest coverage changes from 30.15% in 1997 to 31.74% in 2020, with a net increase of 1.59%, of which, the forest growth in the upper reaches of the Yangtze River is the highest, accounting for 50.97% of the total forest growth areas. The results show that the forest resources in the NFPP area are effectively protected and restored, and the implementation effect of the project is significant.

Key Words: Natural Forest Protection Project; forest resource distribution; forest coverage products; remote sensing monitoring

天然林是自然界中群落最稳定、生物多样性最丰富的陆地生态系统。全面保护修复天然林是加快构建以天然林为主体的健康稳定森林生态系统、构筑国土生态安全底线的重要举措。2000 年 10 月,国务院正式批准了《长江上游、黄河上中游地区天然林资源保护工程实施方案》和《东北、内蒙古等重点国有林区天然林资源保护工程实施方案》,实施范围涉及长江上游、黄河上中游、东北内蒙古以及新疆、海南等重点国有林区的 17 个省(区、市)的 734 个县和 167 个森工局。2011 年 5 月,为严格保护南水北调重要水源地,实施范围在一期工程基础上增加了丹江口库区的 11 个县(市、区)。实施天然林资源保护工程(简称天保工程),是我国林业由木材生产为主向生态建设为主转变的重要标志。天保二期工程于 2020 年底结束,天然林保护即将转入长期工作阶段,对天然林资源开展定量监测与评估,有助于全面、科学地评估天保工程对森林资源的保护成效,为全面推进天然林保护修复提供决策依据和科学支撑。

20 世纪 80 年代以来,我国已经形成由国家森林资源连续清查(简称“一类清查”)、森林资源规划设计调查(简称“二类调查”)、森林作业设计调查和各类专项检查核查所组成的森林资源调查监测体系,为森林资源管理和决策提供了有力的技术支撑^[1-2]。一类清查每 5 年一次,二类调查每 10 年一次,各省调查的年份不统一,均无法反映同一个时间点上(如 2000 年)的森林资源状况,且没有空间连续的森林分布图,这一问题直到 2010 年开启了全国森林资源管理“一张图”才得到解决,但“一张图”没有 2010 年之前的数据。随着对生态文明建设的高度重视和深入推进,森林资源监测面临前所未有的挑战,对现有监测体系的时效性、协同性、现势性以及信息采集能力提出了更高的要求^[3]。与森林资源调查方法不同,遥感技术以其观测范围广、监测周期长、速度快和精度高等特点为天保工程监测评价提供了便利手段。Vina 等^[4]用 MODIS 的植被覆盖度产品和 NPP 产品评价了 2000—2010 年间的中国县级尺度森林覆盖变化,研究表明天保工程的实施、减产禁伐措施对森林资源恢复起到了明显作用。Pang 等^[5]进一步指出由于人工促进森林恢复实施区域的广泛分布和地块面积多变性,有必要使用中分辨率遥感数据开展中国森林生态恢复工程的定量评估。Lu 等^[6]综合地面调查和遥感数据的研究结果表明,2000—2010 年间天保工程区的碳储量占六大生态工程区总碳储量的 58.5%,且保持着最大的碳汇能力。Chen 等^[7]用 2000—2019 年的 MODIS 时间序列 LAI 产品,评价了全球植被变绿的趋势,显示中印领先全球的植被增加趋势,其中中国天然林保护区域呈现出明显的植被增加趋势。部分学者^[8-12]在陕西省黄龙山、新疆维吾尔自治区阿尔泰山、四川省甘孜州道孚县和川中丘陵区等天保工程区开展了多期动态监测,以获取天然林资源的时空变化,掌握天保工程实施成效。

天保工程区的全区域和全过程监测面临着范围面积广、空间异质性强和时间跨度大等特点,生产时空一致性强的大区域高精度森林覆盖产品具有较高难度。因此,如何准确监测我国天保工程区的森林覆盖情况并分析其时空变化成为一大挑战。当前国际上存在多套涵盖全天保工程区的全球土地覆盖遥感产品,包括:美国马里兰大学 1998 年发布的 UMD Land Cover Classification 1998 土地覆盖分类数据,该产品利用 AVHRR 数据,在 1°, 8 km 和 1 km 三种不同空间尺度上,将全球分为 14 种不同土地覆盖类型^[13-15];国际卫星陆地地面气候项目 (ISLSCP) 数据计划 II 发布的 IBGP 全球土地覆盖数据 GLCC 1992^[16] 和 MODIS 2001^[17] 生产全球土地覆盖分类;欧洲航天局自 2005 年执行 GlobCover 计划,利用 ENVISAT 卫星的 MERIS 数据 (300 m) 生产的 GlobCover 2005 和 GlobCover 2009 两期全球陆地覆盖产品^[18-19]。近年来,得益于计算机超算平台和大数据云服务的技术发展,土地覆盖产品的空间分辨率逐渐从公里级别提高到 30 m 甚至 10 m 尺度。马里兰大学 Hansen 等^[20] 发布的 2000—2012 年全球 30 m 森林覆盖和森林变化数据;Gong 等^[21] 利用 Landsat TM/ETM+ 获得首套全球尺度的 30 m 空间分辨率的土地覆盖类型数据 FROM-GLC 30,并在此基础上利用 Sentinel-2 影像更新生产了 10 m 空间分辨率的土地覆盖数据 FROM-GLC10^[22];刘涵和宫鹏等^[23-24] 基于智慧遥感制图 iMap 架构,获取了 21 世纪以来全球逐年/季节的 30 m 土地覆盖和土地利用制图;陈军等^[25-27] 开放共享了 2000 年、2010 年、2020 年覆盖全球陆域的 GlobeLand 30 产品,产品的全球验证点精度为 80.3%。吴炳方等^[28-30] 基于 Landsat TM/ETM 和 HJ-1 卫星数据完成中国 2010 年土地覆盖数据 ChinaCover 2010,并利用面向对象的向量相似性变化检测方法更新得到中国 2000 年土地覆盖产品 ChinaCover 2000;Zhang 等^[31-32] 采用 DataCube 架构数据组织,基于全球地物图像光谱库的时序分类算法生产了全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 GLC_FCS 30,全球验证的产品精度为 82.5%。

当前,我国天保工程资源评价的已有研究仍局限于特定区域,对全工程区系统性的研究较少,难以体现天保工程全局的实施效果及其空间分布特征。现阶段全球和全国尺度的土地覆盖产品虽相对丰富,但不同产品间的森林覆盖分布仍存在较大差异^[33-34]。针对上述问题,本文在已有公开发布的土地覆盖产品基础上,利用新的遥感数据合成算法和森林类型综合提升方法,生产了一套针对我国天保工程区森林覆盖情况的数据产品,对 1997 年启动前到 2020 年结束的 23 年间森林覆盖状况进行监测与评估,以系统评价天保工程实施过程中森林覆盖动态变化。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

如图 1 所示,根据天保工程分区和地理分布特征,将天保工程实施范围分为长江上游地区、黄河上中游地区、东北和内蒙古重点国有林区、新疆重点国有林区、海南重点国有林区 5 个分析单元。工程区内覆盖天然林面积约 7330 万 hm^2 ,占全国天然林总面积约 69%。

1.2 遥感数据及预处理

研究采用美国地质调查局 (USGS) Landsat 5/7/8 卫星地表反射率数据,选择云覆盖低于 70% 的地表反射率影像作为输入数据,基于改进的最佳像元权值合成算法^[35],通过 Google Earth Engine (GEE) 云数据平台合成了全国天保工程范围 1997 年和 2020 年两期生长季的无云遥感影像。影像包含 8 个通道:蓝波段 (452—512 nm),绿波段 (533—590 nm),红波段 (636—673 nm),近红外波段 (851—879 nm),短波红外 1 (1566—1651 nm),短波红外 2 (2107—2294 nm),归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 和归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI)。

1.3 遥感土地覆盖产品收集及预处理

本研究收集并整理了公开发布的 3 套共 9 个时期土地覆盖产品 (表 1),包括 GlobalLand 30^[25-27] (<http://www.globallandcover.com/>) 的 2000、2010 和 2020 年产品,GLC_FCS 30^[31-32] (<http://data.casearth.cn/sdo/detail/5fbc7904819aec1ea2dd7061>) 的 2000、2015 和 2020 年产品,以及 ChinaCover^[28-30] 的 2000、2010 和 2015 年产品。

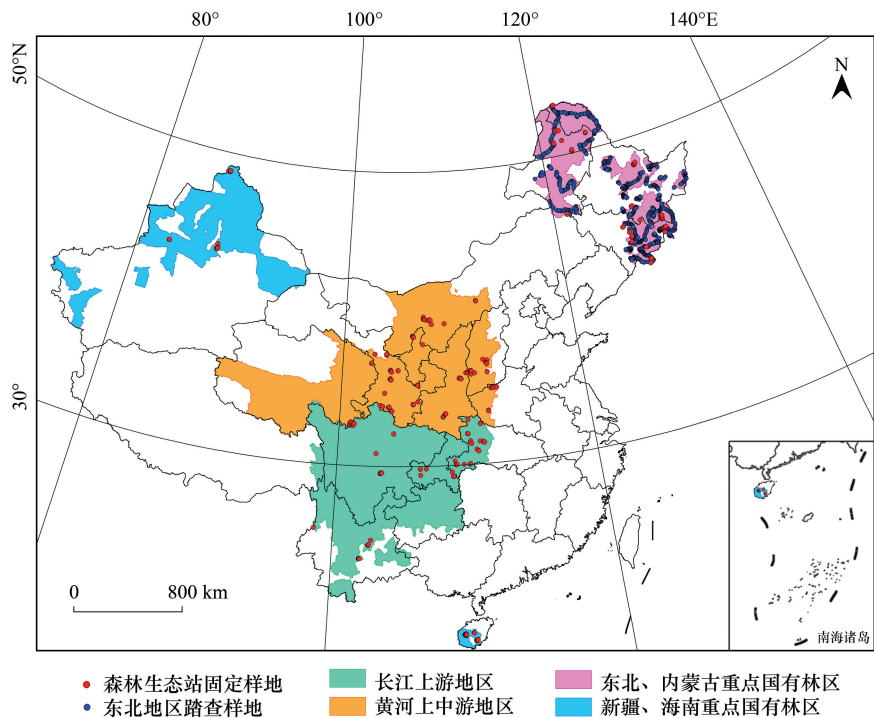


图 1 我国天保工程区实施范围以及验证样地点

Fig.1 The coverage of natural forest protection project of China and the verification sample sites

GlobalLand 30 产品分为耕地、森林、水体、人造地表等 10 个一级类; GLC_FCS 30 产品分为 30 个精细类别,如森林分为常绿/落叶/开放落叶/密闭落叶阔叶、常绿/落叶/开放落叶/密闭落叶针叶以及混交林等; ChinaCover 的 6 个一级类型为联合国政府间气候变化框架土地覆被类型,包括林地、草地、耕地、湿地、人工表面和其他,以及 38 个基于碳收支的土地覆被分类系统二级类型。由于不同土地覆盖产品的分类系统存在差异,且同一土地覆被类型的定义方式也有所不同。为了更好地利用各分类产品,经综合分析各产品的类别定义、评估不同产品的数据一致性同时兼顾天保工程土地覆盖监测具体需求,将各产品统一分类体系,分为 10 个一级类别,即耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰雪,其中,森林类型的定义为乔木覆盖且郁闭度不低于 30%的土地,具体归类详见表 2。

表 1 土地覆盖产品收集情况

Table 1 Collection of land cover products

分类产品	发布机构	数据来源	产品年份		
Land cover products	Issued organization	Data source	Production year		
GlobalLand 30	国家基础地理信息中心	Landsat TM/ETM+/OLI HJ-1 A/B	2000	2010	2020
GLC_FCS 30	中国科学院	Landsat TM/ETM+	2000	2015	2020
ChinaCover	中国科学院	Landsat TM/ETM+HJ-1 A/B	2000	2010	2015

1.4 土地覆盖产品生产方法

本研究从数据处理至产品生产全链条采取全自动运算方式(图 2):采用大数据云平台预处理数据、自动选取类型样本、机器学习分类、规则约束分类后处理以及专家知识判读更新等,生产了我国天保工程区 1997 年和 2020 年两期森林覆盖分类产品。在数据源构建方面,对合成的无云遥感影像以 2.1°× 2.1°空间范围(瓦片)进行划分,相邻瓦片之间互为重叠 0.1°,全工程区共划分为 149 个数据瓦片,构建出天保工程遥感数据集。

表 2 不同土地覆盖产品统一分类体系

Table 2 The harmonization of the classification system for different land cover products

统一代码 Unicode	类别 Category	GlobalLand 30 代码 GlobalLand 30 code	GlobalLand 类别 GlobalLand category	Chinacover 代码 Chinacover code	Chinacover 类别 Chinacover category	GLC_FCS30 代码 GLC_FCS30 code	GLC_FCS30 类别 GLC_FCS30 category
1	耕地	10	耕地	301	水田	10	旱地
				302	旱地	11	禾本旱地
2	森林	20	森林			20	水浇地
				101	常绿阔叶林	12	树本旱地
				102	落叶阔叶林	50	常绿阔叶林
				103	常绿针叶林	60	落叶阔叶林
				104	落叶针叶林	61	开放落叶阔叶林 (0.15<fc<0.4)
				105	针阔混交林	62	密闭落叶阔叶林 (fc>0.4)
				109	稀疏林	70	常绿针叶林
				111	乔木园地	71	开放常绿针叶林 (0.15< fc <0.4)
				113	乔木绿地	72	密闭常绿针叶林 (fc >0.4)
						80	落叶针叶林
						81	开放落叶针叶林 (0.15< fc <0.4)
3	草地	30	草地			82	密闭落叶针叶林 (fc >0.4)
						90	混交林
				201	温性草原	120	草地
				202	高寒草原	121	稀疏植被 (fc<0.15)
				203	温性草甸	122	稀疏禾本植被 (fc<0.15)
				204	高寒草甸		
				205	草丛		
				206	稀疏草地		
				207	草本绿地		
4	灌木	40	灌木	106	常绿阔叶灌丛	130	灌木林
				107	落叶阔叶灌丛	140	常绿灌木林
				108	常绿针叶灌丛	150	落叶灌木林
				110	稀疏灌丛	152	稀疏灌木植被 (fc<0.15)
				112	灌木园地		
				114	灌木绿地		
5	湿地	50	湿地	401	乔木湿地	153	湿地
				402	灌木湿地		
				403	草本湿地		
6	水体	60	水体	404	湖泊	180	水体
				405	水库/坑塘		
				406	河流		
				407	运河/水渠		
7	苔原	70	苔原	601	苔藓/地衣	190	地衣与苔藓
8	人工表面	80	人工表面	501	建设用地	200	不透水面
				502	交通用地		
				503	采矿场		
9	裸地	90	裸地	602	裸岩	201	裸地
				603	戈壁	202	硬质裸地
				604	裸土	210	非硬质裸地
				605	沙漠		
				606	盐碱地		
10	冰/雪	100	冰/雪	607	冰川/永久积雪	220	永久性冰雪

分类样本训练集决定了机器学习分类模型的分类精度,为构建可信分类样本库,在收集的 3 套共 9 个分类产品的基础上求取 2000—2020 年间同类土地覆盖类型的交集区域,自动生成各覆盖类型的分类样本库。分类

时按照逐瓦片范围从对应区域样本库内随机抽样一定数目样本(每类别样本数目不超过 1 万个)来训练和验证随机森林分类模型,从而得到土地覆盖分类结果。采用规则约束的方法对土地覆盖分类结果进行分类后处理,将分类结果与目标年份接近的其他土地覆盖产品来综合决策森林的部分,即在森林并集区域里通过众数投票方式来最终确定的森林结果,森林并集之外的区域则采取其他产品投票决定。在分类后处理的基础上,经过人工目视判别得到 2020 年土地覆盖结果。

此外,利用了连续变化检测算法(Continuous Change Detection and Classification, CCDC)^[36-37]生成 1997 至 2020 年的长时间序列土地覆盖变化检测结果。最后,以 2020 年的土地覆盖结果为基准,结合 CCDC 变化检测结果对 1997 年的土地覆盖结果进行一致性分析与更新,最终得到天保工程区 1997 年和 2020 年土地覆盖产品。

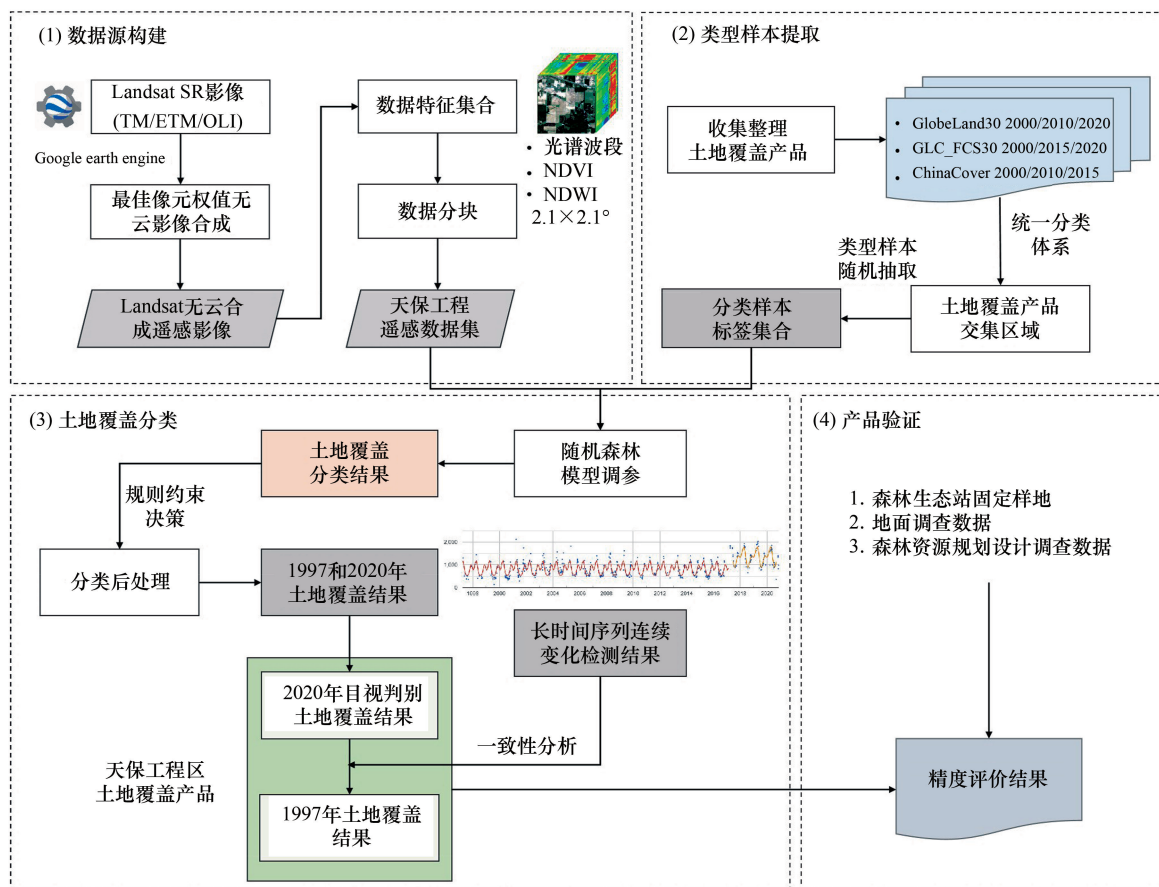


图 2 天保工程区土地覆盖产品生产流程

Fig.2 The workflow of land cover products in natural forest protection project

1.5 土地覆盖变化分析方法

对 2020 和 1997 年的两期土地覆盖产品,在 10 个一级类层面使用专题图数学差值的方法生成类型变化图,通过对变化图中数值的解析和分析,得到各类型互相转换的统计矩阵。进一步对森林类型的转入和转出进行分析,得到森林类型的净变化与交互变化。

1.6 验证数据

为了从定量层面对天保工程土地覆盖产品进行准确评估,采用中国森林生态系统定位研究网络(Chinese Forest Ecosystem Research Network, CFERN)样地数据、森林资源规划设计调查数据和地面调查数据分别从像元尺度和小班尺度来验证 2020 年天保土地覆盖产品的分类精度。其中,(1)收集了 92 个 CFERN 森林生态站

从 2017 到 2019 年调查的共 1806 块固定样地,固定样地形状为方形,样地面积 0.04—0.06 hm²。收集的 1806 块固定样地中,位于天保工程区范围内的样地有 1018 块(图 1),这些样地在 2017 和 2019 年调查的地物类型与 2020 年基本无变化,大部分森林生态站观测地物为森林样地(985 块),少数为荒漠草原样地、灌木林样地、林内观测室和水量观测平衡场;(2)2020 年东北、内蒙古地区共计 8895 个野外实地踏查数据,踏查范围涵盖黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东部以及河北北部地区,调查内容有样地位置定位、地类信息描述、拍照记录等调查,记录的地物类型涵盖耕地、林地、草地、湿地、水体、荒漠、人工表面、裸地共 8 类。调查的 8895 个野外样地中有 963 个位于天保工程区范围内,其中耕地、森林、湿地和草地类型占大多数(图 1);(3)2019 年湖北省森林资源规划设计调查小班数据,通过将二类调查小班矢量数据转换为栅格数据,结合小班地类属性字段对栅格数据进行地类合并,共选择 163875 条小班记录构建地表覆盖类型检验样本。

2 结果

2.1 精度验证

2.1.1 中国森林生态系统定位研究网络验证结果

本研究采用混淆矩阵计算精度结果,统计显示,天保工程土地覆盖遥感数据在 CFERN 的森林生态站点处精度较高,其中森林类别的用户精度为 98.30%,生产精度达 100%,各类型总体分类精度为 98.04%,存在少量草地、灌木、耕地、人工表面误分为森林的情况。

2.1.2 野外实地踏查点验证结果

将 2020 年东北踏查数据与土地覆盖产品进行精度统计,表 3 分类混淆矩阵结果显示,森林类别的分类精度均高于 90%,其中用户精度为 95.60%,生产精度为 96.40%,各类型总体分类精度为 89.82%,少部分草地、灌木和湿地被误分为森林。

表 3 2020 年东北地区野外实地踏查验证点分类混淆矩阵
Table 3 Classification confusion matrix of land cover verification points by field survey in northeast China in 2020

类别 Category	耕地 Cropland	森林 Forest	草地 Grass	灌木 Shrub	湿地 Wetland	水体 Water	人工表面 Impervious	裸地 Bare land	合计 Total	用户精度 User accuracy
耕地 Cropland	316	9	3	1	7	5	3	2	346	0.9133
森林 Forest	3	348	3	3	3	2	2	0	364	0.9560
草地 Grass	4	3	55	3	26	0	1	3	95	0.5789
灌木 Shrub	0	0	0	13	0	0	0	0	13	1.0000
湿地 Wetland	0	0	0	0	72	3	0	0	75	0.9600
水体 Water	0	0	0	0	0	24	0	0	24	1.0000
人工表面 Impervious	1	1	3	1	0	2	34	0	42	0.8095
裸地 Bare land	0	0	0	0	1	0	0	3	4	0.7500
合计 Total	324	361	64	21	109	36	40	8	963	
生产精度 Producer accuracy	0.9753	0.9640	0.8594	0.6190	0.6606	0.6667	0.8500	0.3750		0.8982

2.1.3 森林资源规划设计调查小班验证结果

图 3 展示了栅格化的 2019 年湖北省森林二类调查数据与其他土地覆盖产品的结果。以 2019 年湖北省森林二类调查数据为验证,与天保工程土地覆盖产品的混淆矩阵结果显示(表 4),森林类别的用户精度为 87.60%,生产精度为 92.80%,总体分类精度为 84.00%。由于一些新造未成林地、新退耕还林林地与部分耕地的光谱差异不太明显,造成严重的两者相互错分现象。灌木、裸地、草地的误分率与漏分率也较高。部分水田在森林二类调查数据中的地类为水体,而在分类影像中被分为了耕地,也是造成分类精度不高的原因。

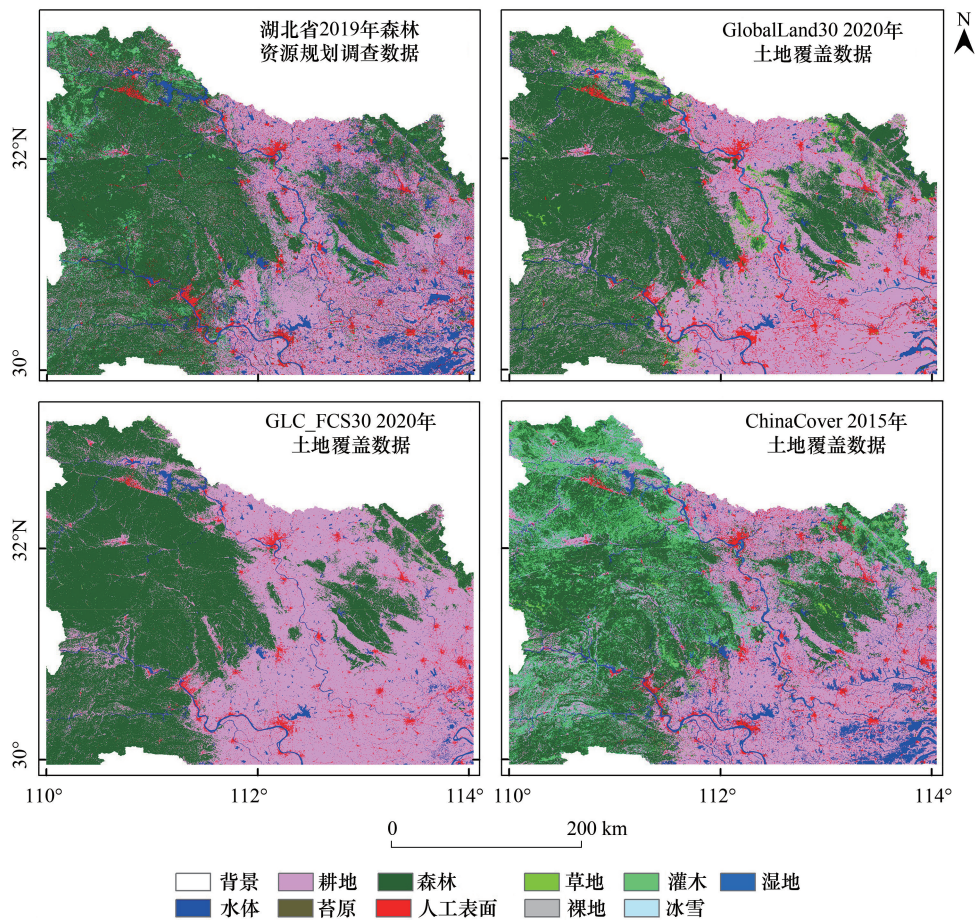


图 3 2019 年湖北省森林资源规划调查数据和其他三种分类产品

Fig.3 Forest resource inventory and planning data of Hubei Province in 2019 and the other three land cover products

表 4 2019 年湖北省森林资源规划调查小班区划验证结果分类混淆矩阵

Table 4 Classification confusion matrix of land cover verification results by forest resource planning and inventory data of Hubei Province in 2019

类别 Category	耕地 Cropland	森林 Forest	草地 Grass	灌木 Shrub	水体 Water	人工表面 Impervious	裸地 Bare land	合计 Total	用户精度 User accuracy
耕地 Cropland	25087093	6885264	3003	859395	704067	860622	445725	34845169	0.7200
森林 Forest	6784451	92658577	7734	4300389	698556	803973	525554	105779234	0.8760
草地 Grass	35222	122622	66	27815	34040	19023	24560	263348	0.0003
灌木 Shrub	96	1276	0	7128	2	2	36	8540	0.8347
水体 Water	88483	97428	15	16623	4162167	34548	7100	4406364	0.9446
人工表面 Impervious	414172	83093	5	27361	72648	4215615	25224	4838118	0.8713
裸地 Bare land	170	344	0	43	212	3487	747	5003	0.1493
合计 Total	32410501	99850682	10823	5238786	5675616	5937523	1031107	150155038	
生产精度 Producer accuracy	0.7741	0.9280	0.0061	0.0014	0.7338	0.7100	0.0007		0.8401

2.2 天保工程区森林覆盖空间分布格局

基于 2020 年土地覆盖产品,利用空间统计和数据分析方法,从东北及内蒙古重点国有林区、黄河上中游地区、长江上游地区、新疆和海南重点国有林区共五个区域研究天保工程区的森林分布特征,揭示天保工程区

森林覆盖变化的区域分异规律。从整体看(图4),天保工程区的森林覆盖呈现东北、中部、西南丰富密集,西北稀疏量少的特点,多数森林位于在崇山峻岭之中。(1)东北及内蒙古等重点国有林区森林分布集中,主要分布在大兴安岭、小兴安岭和长白山脉地区,森林类型以落叶针叶林、落叶针阔混交林为主。区域森林覆盖程度高,森林覆盖率为69.11%,大兴安岭林区呈现森林与草地、湿地交错分布的格局,小兴安岭和长白山林区的森林与农田交错分布。(2)黄河上中游地区森林集中于我国400 mm等降水线以东的半湿润区,主要分布在祁连山脉、六盘山、贺兰山、黄龙山、吕梁山、太行山脉和秦岭地区,以常绿阔叶林、落叶阔叶林和针阔混交林为主。该区域日照充足,降水较少,森林覆盖率为15.15%,林区多呈现森林与草地、灌木交错分布的格局。(3)长江上游地区森林集中分布于山地区域,主要分布在大巴山脉、横断山脉一带,以常绿针叶林和常绿阔叶林为主。该地区温度及降水等气候条件优越,森林覆盖较高,森林覆盖率为52.54%,林区的森林与草地、农田交错分布。(4)新疆重点国有林区的森林主要分布在新疆天山山脉和阿尔泰山地区,以山地针叶林、落叶阔叶林为主,区域光照丰富,干燥少雨,受气温和降水影响,森林覆盖较低,森林覆盖率为5.82%,森林多与草地交织共存。(5)海南重点国有林区的自然条件优越,水、热、光资源丰富,森林主要分布在海南霸王岭和尖峰岭一带,以常绿阔叶林、热带山地/低地雨林为主。该区域森林覆盖率很高,森林覆盖率为74.80%。

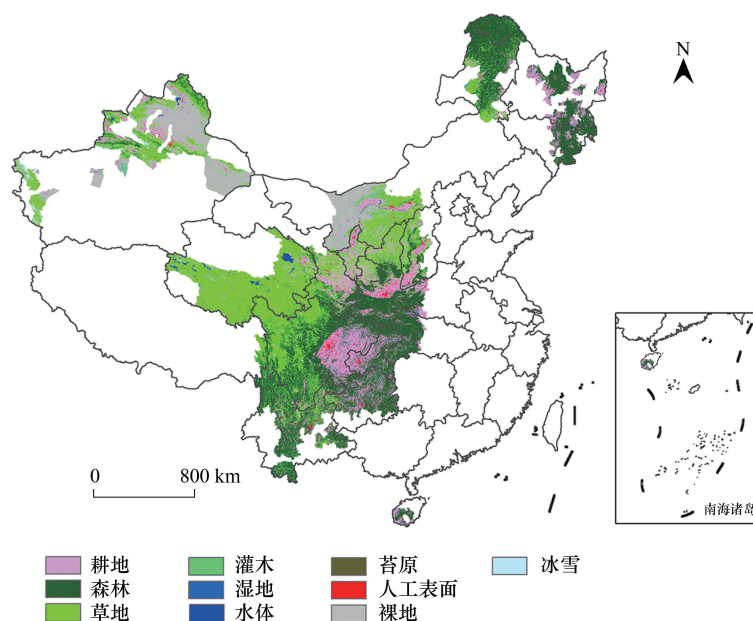


图4 天保工程区2020年土地覆盖产品

Fig.4 Land cover map of natural forest protection project in 2020

2.3 天保工程区森林覆盖变化时空分析

1997至2020年间,我国天保工程区森林覆盖整体呈增加趋势。从时间上看,截止2020年天保二期工程结束,全工程区森林面积净增加了1.59%(表5),森林净增长速率(净增长面积占1997年总森林面积的比例)为5.27%。其中,东北、内蒙古重点国有林区的森林覆盖在20多年间增加不明显,保持相对稳定态势,森林面积净增加了0.26%,森林净增长速率为0.38%;长江上游林区、黄河上中游林区的森林覆盖均表现出明显增长,森林面积分别净增加了2.74%和1.19%,森林净增长速率分别为5.49%和8.55%;新疆重点国有林区表现出较强的增长态势,森林面积净增加了1.07%,森林增长速率为22.50%;海南重点国有林区森林覆盖增加最快,森林面积净增加23.11%,森林增长速率达44.72%。

从各区域的森林增长面积来看(图5),长江上游地区森林增长量最高,森林净增长占全工程区森林增长面积的50.97%,其次为黄河上中游地区以及新疆重点国有林区,分别占森林总增长面积的29.00%和12.35%,

海南重点国有林区森林增长相对较少,占森林总增长面积的 5.53%,东北及内蒙古等重点国有林区森林变化较稳定,森林增加不显著,森林净增长占森林总增长面积的 2.15%。

表 5 1997 至 2020 年天保工程区森林覆盖率变化
Table 5 Statistic for forest changes results of natural forest protection project during 1997 to 2020

区域 Region	1997 年	2020 年	净增加 Net gain	稳定森林 Stable forest	森林增加 Forest gain	森林减少 Forest loss
天保工程区 Natural forest protection project areas	30.15%	31.74%	1.59%	28.86%	9.52%	4.24%
东北和内蒙古重点国有林区 The key state-owned forest region of northeast China and the Inner Mongolia	68.85%	69.11%	0.26%	67.45%	2.42%	2.02%
长江上游地区 Upper reaches of the Yangtze River	49.80%	52.54%	2.74%	47.05%	11.03%	5.54%
黄河上中游地区 Upper-middle reaches of Yellow River	13.96%	15.15%	1.19%	13.36%	12.82%	4.27%
海南重点国有林区 Key state-owned forest region in Hainan	51.69%	74.80%	23.11%	50.57%	46.89%	2.17%
新疆重点国有林区 Key state-owned forest region in Xinjiang	4.75%	5.82%	1.07%	4.49%	27.85%	5.33%

从空间分布上看(图 6),森林明显增加的区域主要位于大兴安岭南部、小兴安岭和长白山脉的东部、山西西部、陕西中部和秦岭地区、宁夏南部、甘肃东南部、四川西部、重庆北部、贵州西部、云南北部以及新疆天山南部和阿尔泰山南部林区,和海南省西南部。森林减少区域主要分布在大兴安岭和横断山脉一带。

3 讨论

3.1 无云影像合成

由于光学卫星传感器的大气效应、视野限制和极易受云雾影响等原因,很难直接获得完整覆盖大区域的无云图像,影像无云合成方法主要用于解决云的影响、气溶胶污染、观测视角效应和数据利用等问题。天保工程区纬度跨越大且涉及多个不同气候带区域,这给无云影像合成带来一定挑战,本研究以地理位置和生态分区将全国天保工程区划分为若干区域,对每个区域分别采用不同参数合成植被生长季的无云遥感影像,合成出的无云无缝高质量影像为后续土地覆盖制图提供了重要且完整的图像信息基础。本文优化了最佳像元选取准则,解决了合成影像中由于多时相数据造成的“斑块”问题,提高了合成影像的辐射一致性。对于云、雪覆盖较多的海南、新疆等少数区域,把影像选取范围扩展到目标年份前后两年的数据。

3.2 已有土地覆盖产品对新分类产品的影响分析

三种共 9 期土地覆盖产品采用的分类策略以及分类系统不同,这种差异和不确定性在做分类系统转换前已经存在,是各产品在相同区域一致性低的主要因素之一。如在我国南部以及西南部的亚热带和热带地区,GLC_FCS 30 产品相较其他产品而言识别的灌木较多森林较少,对于东北地区,ChinaCover 产品的湿地类别与其他产品表现出较大差异,在西北干旱地区,各产品间的森林、草地和灌木类型相互差别都较大。同时,同系列土地覆盖产品间的不同时期也出现部分内容有较大分歧。本研究的分类训练样本来自于各产品类别相同

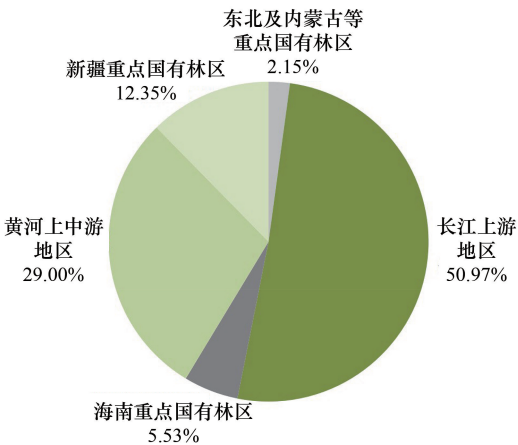


图 5 1997 年至 2020 年天保工程区各区森林面积增长百分比
Fig.5 Percentage of forest area increasing in each reagon of natural forest protection project from 1997 to 2020

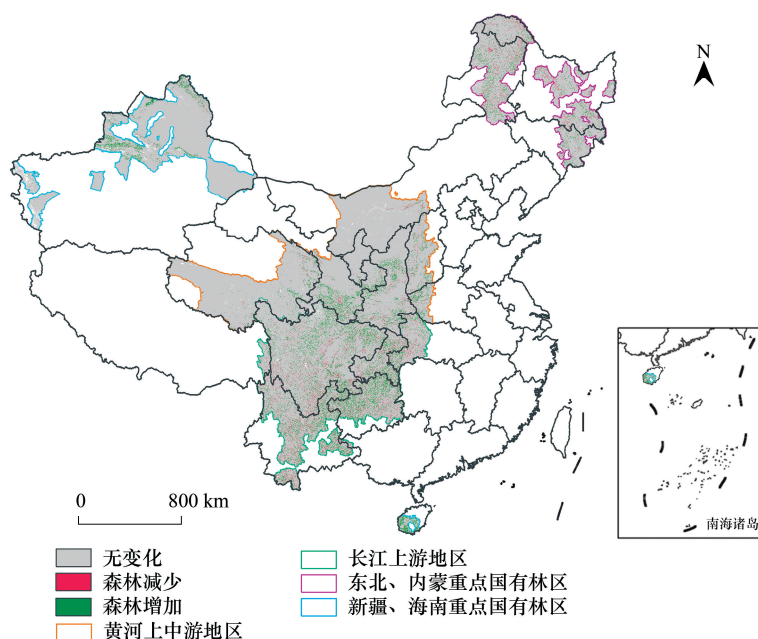


图6 1997年至2020年天保工程区森林变化空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of forest changes of natural forest protection project between 1997 and 2020

的区域,分类产品间的不一致性问题则会造成局部地区某些类别的分类样本过少从而直接影响分类结果的稳定。虽然通过增加临近区域样本的迁移复用能略微提高分类精度,但有限样本的稳定分类依然是下一步需解决的问题。本研究生产的土地覆盖产品是一套专门针对我国天保工程区森林覆盖监测的数据产品,在公开发布的土地覆盖产品基础上构建可信分类样本库,采用森林确信分布区域(森林交集)和森林最大可能分布区域(森林并集)的约束规则来综合决策森林的部分,能更好地避免森林的误分和漏分。如图2所示的,天保工程区土地覆盖产品生产流程中对2020年的基准产品还专门设计了目视检查的环节,通过有经验的判读人员将分类结果和高分辨率影像、合成的分类用遥感影像进行判读和比对,对自动分类不正确的斑块进行人工修改,从而确保基准产品的准确性。但由于时间和投入的因素,本文的结果仅对东北国有林区的一部分进行了检查和修改,其他地方如果也进行严格修改,有望进一步提高分类产品的精度。

3.3 干旱和半干旱区森林识别

我国生态环境脆弱的干旱和半干旱区广泛分布着的灌木林发挥了显著的生态防护作用。干旱/半干旱区的灌木林遥感识别一直是一个难点,由于灌木林生长比较低矮,且光谱曲线易和草地发生混淆,分类精度普遍比较低,基于几套全球土地覆盖产品也难以找到共同的区域,因此对该区域的森林覆盖存在低估情况。联合国粮农组织 Bastin 等^[38]应用 Google Earth 平台上大量的高时空分辨率影像对 210000 个 0.5 hm^2 样地进行图像解译,估计全球干旱区森林覆盖。研究表明,2015 年干旱区森林比先前中低空间分辨率遥感影像估计的面积更大,总面积接近热带雨林或者北方森林的面积。对于干旱区森林尤其是灌木林的分类,有赖于森林资源基础数据、调查数据以及高空间分辨率影像来提高信息提取精度,这也是今后研究中需要提高的地方。

4 结论

本文在已公开发布的土地覆盖产品基础上,研制了我国天保工程区 1997 年和 2020 年的森林覆盖产品,分析了天保工程实施的 23 年间森林覆盖的空间分布及变化。

(1) 利用中国森林生态站样地数据、地面调查数据以及森林资源二类调查数据验证了 2020 年的土地覆盖产品,统计结果表明天保工程土地覆盖产品精度较高,森林类型的用户精度分别为 98.30%、95.60%、

87.60%,生产精度分别为 100%、96.40%、92.80%,总体分类精度为 98.04%、89.82%、84.01%。

(2)自 1997 年开展天保工程截止 2020 年结束,全工程区森林覆盖呈增加趋势,森林覆盖率增加了 1.59%,其中长江上游地区森林增长量最高,占全工程区森林增长面积的 50.97%,其次为黄河上中游地区 and 新疆重点国有林区,分别占全工程区森林增长面积的 29.00%和 12.35%,海南重点国有林区、东北及内蒙古等重点国有林区的森林增长相对缓慢,占全工程区森林增长面积的 5.53%和 2.15%。

(3)从空间分布上看,森林明显增加的区域主要位于大兴安岭南端、小兴安岭和长白山脉的东部、山西西部、陕西中部和秦岭地区、宁夏南部、甘肃东南部、四川西部、重庆北部、贵州西部、云南北部、新疆天山南部和阿尔泰山南部林区,以及海南省西南部。森林减少区域主要分布在大兴安岭和横断山脉一带。

(4)整体上看,天保工程实施有效保护和恢复了我国天保工程区内的森林资源,森林覆盖范围稳定增加,天保工程实施效果显著。

致谢:中国森林生态系统定位研究网络样地数据由国家林业和草原科学数据中心提供,2020 年东北、内蒙古野外实地踏查数据由中国科学院东北地理与农业生态研究所提供,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 黄国胜,刘谦,史京京.大数据时代林地一张图建设构想.林业资源管理,2018,(3):1-4,14-14.
- [2] 高金萍,高显连,孙忠秋,于慧娜.新时期东北内蒙古重点国有林区森林资源监测发展对策研究.林业资源管理,2020,(2):9-13.
- [3] 黄国胜.创新推动森林资源监测发展的思考.林业资源管理,2017,(3):1-5.
- [4] Viña A, McConnell W J, Yang HB, Xu ZC, Liu JG. Effects of conservation policy on China's forest recovery. Science Advances, 2016, 2 (3): e1500965.
- [5] Pang Y, Wang G, Mang S L, Xu Z, Zhai H, Yang Z, Innes J L. Comment on "Effects of conservation policy on China's forest recovery". Science Advances, 2016, 2 (3): e1500965.
- [6] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115 (16): 4039-4044.
- [7] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2 (2): 122-129.
- [8] 赵鹏祥,强建华,张会儒,陈国领.基于 RS 的黄土高原天然林资源时空动态变化分析.林业科学研究,2007,20(3):307-311.
- [9] 刘洋,肖中琪,张怀清,姚博,黄建文.新疆阿尔泰山天然林保护工程区 2000—2016 年林地类型变化分析.林业资源管理,2019,(1):70-77.
- [10] 赖家明,杨武年.基于 RS 的川西天然林区近 29 年植被覆盖动态变化.国土资源遥感,2018,30(4):132-138.
- [11] 黄建文,胡庭兴,张忠辉.天然林资源保护工程监测技术.北京:中国林业出版社,2012.
- [12] 罗新蕊,杨武年,陈桃.川中丘陵区植被遥感动态监测及其驱动力分析.长江流域资源与环境,2019,28(1):103-111.
- [13] Hansen M, DeFries R, Townshend J R G, Sohlberg R. UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0. College Park, Maryland: Department of Geography, University of Maryland, 1998.
- [14] Hansen M C, Reed B. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7):1365-1373.
- [15] Hansen M, Defries R S, Townshend J R G, Sohlberg R A. Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7):1331-1364.
- [16] Loveland T R, Brown J, Ohlen D, Reed B, Zhu Z, Yang L, Howard S, Hall F G, Collatz G J, Meeson B W, Los S O, Brown De Colstoun E, Landis D R. ISLSCP II IGBP DISCover and SiB Land Cover, 1992-1993. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2009.
- [17] Friedl M A, Strahler A H, Hodges J, Hall F G, Collatz G J, Meeson B W, Los S O, Brown De Colstoun E, Landis D R. ISLSCP II MODIS (Collection 4) IGBP Land Cover, 2000-2001. Oak Ridge: ORNL DAAC, 2010.
- [18] Arino O, Gross D, Ranera F, Leroy M, Bicheron P, Brockman C, Defourny P, Vancutsem C, Achard F, Durieux L, Bourg L, Latham J, Di

- Gregorio A, Witt R, Herold M, Sambale J, Plummer S, Weber J L. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS//Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain, IEEE, 2008.
- [19] Bicheron P, Amberg V, Bourg L, Petit D, Huc M, Miras B, Brockmann C, Hagolle O, Delwart S, Ranera F, Leroy M, Arino O. Geolocation assessment of MERIS GlobCover orthorectified products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 2972-2982.
- [20] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O, Townshend J R G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013, 342(6160): 850-853.
- [21] 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, Chen J. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2607-2654.
- [22] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Ping Suen H, Guo J, Xu N, Li W J, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- [23] 宫鹏. 智慧遥感制图(iMap). *遥感学报*, 2021, 25(2): 527-529.
- [24] Liu H, Gong P, Wang J, Wang X, Ning G, Xu B. Production of global daily seamless data cubes and quantification of global land cover change from 1985 to 2020-iMap World 1.0. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112364.
- [25] 陈军, 陈晋, 廖安平, 曹鑫, 陈利军, 陈学泓, 彭舒, 韩刚, 张宏伟, 何超英, 武昊, 陆苗. 全球 30 m 地表覆盖遥感制图的总体技术. *测绘学报*, 2014, 43(6): 551-557.
- [26] Chen J, Ban Y F, Li S N. China: open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [27] 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, Mills J. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7-27.
- [28] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [29] 吴炳方, 钱金凯, 曾源, 祁彩梅, 宋杨. 中华人民共和国土地覆被地图集(1: 1 000 000). 北京: 中国地图出版社, 2017.
- [30] 吴炳方. 中国土地覆被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [31] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Xie S, Gao Y. Fine land-cover mapping in China using Landsat Datacube and an operational SPECLib-based approach. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1056.
- [32] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 2753-2776.
- [33] Gao Y, Liu L Y, Zhang X, Chen X D, Mi J, Xie S. Consistency analysis and accuracy assessment of three global 30-m land-cover products over the European Union using the LUCAS Dataset. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3479.
- [34] Feng M, Bai Y. A global land cover map produced through integrating multi-source datasets. *Big Earth Data*, 2019, 3(3): 191-219.
- [35] Pang Y, Li Z Y, Fan S X, Meng S L. Fill invalid pixels of thematic map using composited IMAGE//Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019: 6748-6751.
- [36] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote sensing of Environment*, 2014, 144: 152-171.
- [37] Zhu Z, Zhang J X, Yang Z Q, Aljaddani A H, Cohen W B, Qiu S, Zhou C L. Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238: 111116.
- [38] Bastin J F, Berrahmouni N, Grainger A, Maniatis D, Mollicone D, Moore R, Patriarca C, Picard N, Sparrow B, Abraham E M, Aloui K, Atesoglu A, Attore F, Bassüllü Ç, Bey A, Garzuglia M, García-Montero L G, Groot N, Guerin G, Laestadius L, Lowe A J, Mamane B, Marchi G, Patterson P, Rezende M, Ricci S, Salcedo I, Diaz A S P, Stolle F, Surappaeva V, Castro R. The extent of forest in dryland biomes. *Science*, 2017, 356(6338): 635-638.