

营造林成效遥感监测方法适用性研究

刘晓双¹,李才文¹,龚直文^{2*}

(1. 国家林业和草原局 西北调查规划设计院,陕西 西安 710048;2. 西北农林科技大学 经济管理学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:为改进营造林成效人工调查方法和现有遥感监测方法的局限,研究不同分辨率、不同地域条件、不同造林年限的营造林成效遥感监测效果。选取南、北方各 1 个县代表性的行政县为研究区,以生长 1~5 a 的营造林小班为对象,采用涵盖中、高分辨率的 5 种遥感影像,从不同分辨率的适用性、不同造林年限的保存状况监测、NDVI 成林状况监测、造林前地类监督分类 4 个方面对营造林成效进行监测,并通过地面调查验证监测精度。结果表明:1)宜采用与营造林小班面积相适应的分辨率进行遥感监测,建议营造林小班平均面积 $<2\text{ hm}^2$ 的地区选取 2 m 或更高分辨率。2)相较于北方,南方营造林保存状况随造林年限增加上升较快,遥感监测保存率易偏高。3)NDVI 成林状况遥感监测总精度达 87.5%,北方精度高于南方 3.2%,原因是南方易受到杂草杂灌的干扰。4)造林前地类监督分类总精度达 72.7%,北方高于南方 14.3%,原因是北方地类完整单一,易于识别。5)营造林成效采用遥感监测,成本仅为人工调查的 40.2%。营造林成效遥感监测在监测效果和精度上能够满足调查需要,监测成本也较人工调查有很大优势,可作为营造林成效监测的有效手段。

关键词:营造林成效;NDVI;监督分类

中图分类号:S771.8

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)03-0203-07

Applicability of Remote Sensing Monitoring Method to Afforestation Effectiveness

LIU Xiao-shuang¹, LI Cai-wen¹, GONG Zhi-wen^{2*}

(1. Northwest Inventory, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the limitations of artificial investigation method, to solve the existing problems in remote sensing monitoring method to investigate the afforestation effectiveness, it was proposed to study the effectiveness of afforestation with remote sensing monitoring method from the view of different resolutions, different geographical conditions, and different afforestation years. Two representative administrative counties that were selected both from southern and northern China were taken as the study areas. One to 5 years old subcompartments of afforested plantations were taken as the research objects. Remote sensing images with medium to high resolutions were extracted. The effectiveness of the afforestation was examined from aspects: the applicability of different resolutions, monitoring results to preservation conditions for different afforestation years, monitoring of forest establishment with normalized difference vegetative index (NDVI), and supervision of the land classification before afforestation. Field investigation was conducted to verify the monitoring accuracy. 1) Remote sensing monitoring should be carried out according to the resolution of afforestation subcompartment. It was suggested that the subcompartment with an average area of less than 2 hectares should select 2 (or higher) meters resolution. 2) Compared with the north,

收稿日期:2020-06-24 修回日期:2020-08-25
基金项目:国家自然科学基金(31300538,31400540);林业公益性行业科研专项(201504424)。
作者简介:刘晓双,高级工程师。研究方向:森林资源监测。E-mail: xinz_77@sina.com
*通信作者:龚直文,副教授。研究方向:森林资源监测评价与管理。E-mail: gozewe@126.com

the preservation status of afforestation in the south increased rapidly with the increase of afforestation year, and the preservation rate of remote sensing monitoring tended to be high. 3) The total precision of remote sensing monitoring of NDVI forest condition was 87.5%, the precision in the north was 3.2 percentage points higher the south due to the disturbance of weeds and shrubs in the south. 4) The total accuracy of supervision classification of forest land reached 72.7%, 14.3 percentage points higher in north than in south. The reason was that the land class in the north was complete and single, and to be identified easily. 5) The cost of remote sensing monitoring of afforestation effectiveness was only 40.2% of manual investigation. Remote sensing monitoring of afforestation effectiveness can meet the needs of investigation in terms of monitoring effect and precision, and has great advantages in monitoring cost than manual investigation, which can be used as an effective means for afforestation effectiveness monitoring.

Key words: afforestation effectiveness; NDVI; monitoring classification

随着林业“双增”目标的提出及国土绿化行动的启动,我国人工营造林每年以 400 万 hm² 以上的速度推进^[1],成为国土绿化的主要手段。营造林成效监测将对森林质量提升起到关键影响,成为全国营造林综合核查工作的关注重点,经过十几年的实践和探索,已形成了一套完整的技术体系^[2]。但目前的营造林成效监测仍突出表现在核查外业工作主要依靠現地人工核查的方式。尽管現地调查具有客观、准确的优点,但其针对性不强,且花费的人力、物力、时间成本较高。受限于人工调查成本,每年国家级的营造林成效检查均采取抽样检查方式,抽查比例在 5% 以下,难于全面反映营造林成效。

近几年随着遥感技术的发展,遥感影像的种类和数量正极大地丰富,尤其是一系列国产高质量遥感影像的问世^[3-6],丰富了数据源,降低了遥感使用成本,使营造林成效的遥感监测具备了更大的可行性。目前营造林遥感监测的研究内容主要集中在两方面:一是通过遥感对营造林实施区的空间位置合理性进行分析,以达到营造林工程的科学规划^[7-9],其考虑的因素主要有坡度^[10-11]、土壤侵蚀^[12-13]、水土流失^[14-15]等。二是探索如何利用遥感及时客观地对营造林成效进行监测、验收和评价^[16-20],主要关注营造林面积^[21]、保存率^[22-23]、区位和立地条件^[24]等。这些研究多是针对某一特定地域,或某一树种,采用单一遥感数据源,固定的监测年限,对营造林成效进行研究具有一定的局限性。对于不同气候条件下、不同树种、不同生长年限的营造林工程,不具有普遍适用性。再者,不同分辨率的遥感影像,其适用的监测范围和监测目的也不尽相同。因此,有必要研究不同分辨率遥感在营造林成效监测中的适用性,以解决大区域、多树种、不同生长年限下的营造林工程监测。

营造林成效监测主要涉及监测精度、监测效果、监测成本 3 个方面。对比分析人工和遥感监测方法

在此 3 个环节的差异,找到遥感监测效果的主要影响因素,提升遥感监测方法的适用性就成为解决生产问题的关键核心。本研究综合应用目视判读、NDVI 指数法、监督分类等遥感监测方法,从不同方面对营造林成效进行监测。选取南、北方各 1 个具有代表性的行政县作为研究区域,采用涵盖中、高分辨率的 5 种遥感影像,对生长年限 1~5 a 的营造林小班进行监测,从不同分辨率遥感影像的适用性、不同年度营造林小班保存状况监测、营造林成林状况监测、营造林小班造林前地类分类、成本效益分析等 5 方面,对营造林成效遥感监测效果进行分析和综合评价,从监测精度、监测效果、监测成本方面论证营造林成效遥感监测的适用性,进一步发挥遥感在营造林成效监测中的功能,提高检查工作效率,为生态保护修复与林业高质量发展提供理论支撑。

1 研究区概况及数据准备

1.1 研究区概况

选取我国南方和北方气候条件下 2 个典型地区作为研究区域,分别是重庆市铜梁县和陕西省榆林市榆阳区。

铜梁县位于长江上游地区、重庆西北部。地处 105°46′—106°17′E、29°31′—30°6′N。西南靠大足区,东北连合川区,南接永川区,西北邻潼南县,东南毗邻璧山区,幅员面积 1 343 km²。铜梁县属亚热带季风性湿润气候,气候温和,四季分明,雨量充沛。年平均气温 17.8℃,年平均降水量 1 075 mm,年平均空气相对湿度 82%,年平均无霜期 225 d。铜梁县地处渝西丘陵与渝东平行岭谷交界地带。地势西南高、东北低,地形以丘陵为主,境内最高海拔 902 m,最低海拔 185 m,森林覆盖率 33%。

榆阳区位于陕西省北部、榆林市中部,与内蒙古自治区的乌审旗以及榆林辖内的横山、米脂、佳县、神木相毗邻,总面积 7 053 km²。108°58′—110°24′

E,37°49′—38°58′N,海拔最高 1 413 m,最低 870 m,森林覆盖率 45.8%。榆阳区地处鄂尔多斯台地东部,属于典型的大陆性边缘季风气候,四季冷暖分明,干湿各异。年平均降水量 365.7 mm,年平均气温 8.3℃。冬季处在西伯利亚冷气团控制之下,气候寒冷干燥少雨雪。

1.2 遥感数据选择

按照遥感数据选择的原则,选择的遥感数据按分辨率从低到高依次为:Landsat-5、Landsat-8、资源 02C、RapidEye、资源三号(表 1)。

1.3 遥感数据预处理

对 2 个研究区遥感影像进行预处理,包括校正、融合、增强、镶嵌。对于 Landsat-5、Landsat-8、采用几何校正,中误差控制在 0.5 像元以内;对于资源 02C、RapidEye、资源三号采用正射校正,中误差控制在 1 像元以内。对包含全色波段的 Landsat-8、资源三号,需对多光谱数据和全色数据分别正射校正,

再进行多光谱与全色的融合,生成高分辨率多通道影像(表 2)。

1.4 营造林数据准备

收集 2 个研究区 2008—2012 年 5 个年度共 6 440 个营造林小班的作业设计图及营造林小班因子一览表,进行图纸扫描、校正、矢量化以及数据入库,形成营造林小班地理空间数据库,以实现图形与属性的一一对应。

表 1 遥感数据选择

Table 1 Selection of remote sensing data			
遥感数据源	分辨率 /m	波段	每平方米千米 价格/元
Landsat-5	30	7 个多光谱波段	免费
Landsat-8	15	8 个多光谱波段,1 个全色波段	免费
资源 02C	10	3 个多光谱波段	0.56
RapidEye	5	5 个多光谱波段	11
资源三号	2.1	4 个多光谱波段,1 个全色波段	1.6

表 2 遥感数据预处理方法和精度

Table 2 The pretreatment methods and precision of different remote sensing images				
遥感数据	处理流程	校正方法	校正精度	融合方法
Landsat-5	校正、增强、镶嵌	几何校正	RMS<0.5 像元	——
Landsat-8	校正、融合、增强、镶嵌	几何校正	RMS<0.5 像元	比值变换
资源 02C	校正、增强、镶嵌	正射校正	RMS<1 像元	——
RapidEye	校正、增强、镶嵌	正射校正	RMS<1 像元	——
资源三号	校正、融合、增强、镶嵌	正射校正	RMS<1 像元	高通滤波

2 营造林成效遥感监测

2.1 不同分辨率遥感影像的适用性分析

为比较不同分辨率的遥感影像对不同面积的营造林小班的监测效果,将 2 个研究区营造林小班按面积分为 4 组,分别为:<0.5 hm²、0.5~1 hm²、1~2 hm²、>2 hm²,对这 4 组中每个营造林小班采用 5 种不同分辨率的遥感影像逐一进行目视解译,分为可辨识和不可辨识 2 类。可辨识的标准为轮廓清晰,与周围地物在色调、形状、纹理上有明显差异(表 3)。

由表 3 可见,随着营造林小班面积的增大,各种分辨率的遥感影像对营造林小班的辨识力都在提高。对于<0.5 hm²的营造林小班,分辨率 10~30 m 的中低分辨率遥感数据很难将其识别,辨识率低于 22.9%;只有 2.1 m 分辨率的资源三号数据,分辨能力较好,达到 80%以上。当面积>2 hm²,分辨率优于 10 m 的遥感影像对营造林小班的分辨能力已经接近或超过 90%。

由此可见,不同分辨率遥感影像的适用性,取决于营造林小班面积。南北方营造林小班面积差异较

大,需要根据情况选择适宜的分辨率。对于南方营造林区,以铜梁县为例,50%以上的营造林小班面积均在 0.5 hm² 以下,采用 2.1 m 分辨率的资源三号卫星影像比较适宜,其对 0.5 hm² 以下的营造林小班辨识度可达 80%以上。对于北方营林区,以榆阳区为例,所有营造林小班面积都在 2 hm² 以上,采用 10 m 以上分辨率的遥感影像即可达到较好效果,如 10 m 的资源 02C、5 m 的 RapidEye、2.1 m 的资源三号均可达到 89%~98%的辨识度。

2.2 不同年度营造林小班保存状况监测

根据《全国营造林综合核查规程与规范》中关于保存标准的定义,乔木郁闭度≥0.2,或灌木覆盖度≥0.3 时,为保存。如果乔木郁闭度或灌木覆盖度达不到 0.2 和 0.3 时,调查株数保存率(即小班保存株数占总株数的比例)。如果株数保存率≥80%为保存。

利用 2013 年的资源三号遥感影像对营造林小班进行保存状况目视解译,按造林 1 a 后、造林 2 a 后、造林 3 a 后、造林 4 a 后、造林 5 a 后,分别统计铜梁县和榆阳区 2008—2012 年 5 个年度的保存率(表 4)。保存率的计算方法采用面积保存率,即判

为保存的营造林小班面积与营造林小班总面积之比。结果显示,随着造林年限的增加,目视解译判读保存率和现地验证保存率都在逐年上升,直到造林4 a 后上升趋势开始逐渐放缓。

表 3 不同分辨率和不同面积营造林小班的可辨识个数和比例

数据源	<0.5 hm ² (个数,比例)	0.5~1 hm ² (个数,比例)	1~2 hm ² (个数,比例)	>2 hm ² (个数,比例)
Landsat-5(30 m)	0,0	46,3.8%	31,3.5%	546,65.7%
Landsat-8(15 m)	106,3.2%	63,5.2%	467,52.6%	614,73.9%
资源 02C(10 m)	759,22.9%	469,38.4%	649,73.1%	744,89.5%
RapidEye(5 m)	1 872,56.5%	929,76.1%	792,89.2%	776,93.4%
资源三号(2.1 m)	2 671,80.6%	1 077,88.2%	855,96.3%	816,98.2%

表 4 目视解译和现地验证保存率对照

Table 4 Comparison table for visual interpretation and field validation of forest preservation rate %						
造林年限	铜梁县			榆阳区		
	判读保存率	验证保存率	判读误差	判读保存率	验证保存率	判读误差
造林 1 a 后	83.7	80.4	4.1	76.2	78.4	-2.8
造林 2 a 后	84.4	81.0	4.2	76.8	80.3	-4.4
造林 3 a 后	86.7	82.6	5.0	78.2	80.8	-3.2
造林 4 a 后	93.1	91.8	1.4	81.6	82.5	-1.1
造林 5 a 后	95.3	94.1	1.3	91.4	89.7	1.9

通过对比 2 个研究区 5 个年度未成林造林地小班的保存率判读和验证情况,可见代表南方监测区的铜梁县判读保存率普遍高于验证保存率,代表北方监测区的榆阳区则判读保存率大部分都低于验证保存率。对以上 2 种情况的目视解译错误小班进行分析,得知地域自然条件差异是造成 2 种截然不同

判读误差的主要原因。对于南方监测区,水热条件较好,植被生长旺盛,营造林小班在造林初期常常由于抚育不及时造成杂草杂灌丛生,使影像植被特征偏高,从而使目视解译保存率偏高。对于北方监测区,干燥少雨,植被生长条件较差,营造林小班杂草杂灌较少,使目视解译成林率偏低。

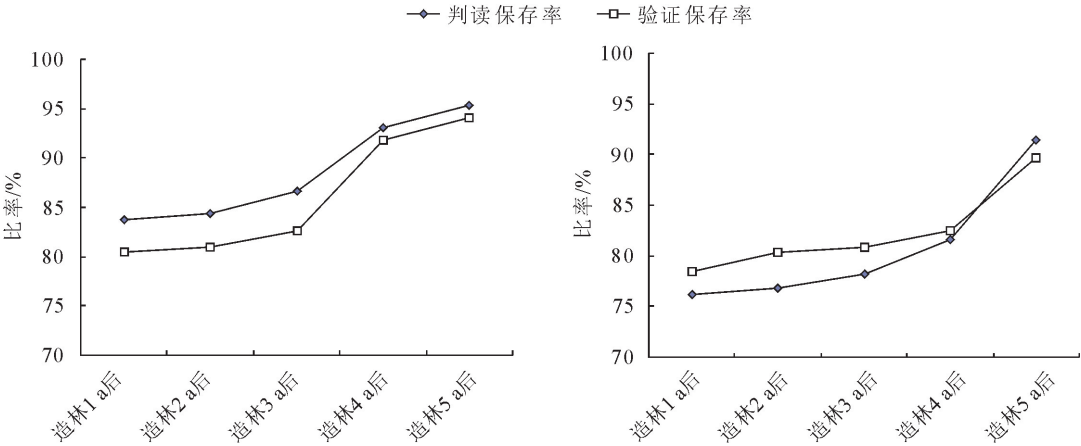


图 1 目视解译和现地验证保存率趋势

Fig. 1 The tendency for visual interpretation and field validation of forest preservation rate

南北方 2 个研究区判读保存率和验证保存率的走势基本一致,保存率均逐年增加,但增加趋势有所不同。南方监测区的铜梁县造林 4 a 后保存率有大幅增长,造林 5 a 后趋于平缓,说明对于南方监测区,造林 4 a 后的保存率达到了较好的状态。北方监测区的榆阳区造林 5 a 后保存率才呈现明显上升,后续仍有一定增长空间,说明对于北方监测区,造林 5 a 后的保存率还没有达到最理想状态。

2.3 营造林成林状况监测

归一化植被指数(NDVI)用于监测植被变化的可靠性已被国内外各类研究证实^[25-27]。很多研究表明^[28-34],归一化植被指数(NDVI)对低覆盖率,尤其是覆盖率<80%的植被敏感,适合营造林初期的成林状况监测。因此选取 NDVI 指数法,采用资源三号遥感数据,以 5 a 为监测周期,监测营造林小班成林状况。计算公式如下:

$$NDVI=[p(nir)-p(red)]/[p(nir)+p(red)]$$

(1)

式中, $p(nir)$ 为近红外波段的反射率, $p(red)$ 为红波段的反射率。设 $NDVI1$ 为造林前的归一化植被指数, $NDVI2$ 为造林后的归一化植被指数,令 $d=NDVI2-NDVI1$,若 $d>\alpha$,归为成林;反之,归为未成林。

α 为阈值变量。阈值变量通过现地建立解译标志确定,从造林小班中选取成林小班作为样本,计算其造林前后遥感影像 $NDVI$ 差值,取最小差值作为阈值。2 个研究区的 α 值分别为:铜梁县 0.42,榆阳区 0.38。

成林率的计算方法采用面积成林率,即判为成林的营造林小班面积与营造林小班总面积之比。将 $NDVI$ 估测的成林率与现地验证的成林率作对比,验证监测精度(表 5)。

表 5 NDVI 成林率和现地验证成林率对照表

Table 5 Comparison table for NDVI and field validation of forest rate

研究区	NDVI 成林率	验证成林率	精度
铜梁县	81.3	94.1	86.4
榆阳区	80.4	89.7	89.6
总计	81.0	92.6	87.5

$NDVI$ 成林状况遥感监测总精度达 87.5%,代表北方的榆阳区 $NDVI$ 成林率监测精度高于南方的铜梁县 3.2%。经分析,造成南方 $NDVI$ 成林率

表 6 营造林小班前地类分类精度验证

Table 6 Classification accuracy verification for land types of the plots before afforestation

类型	2 个研究区			铜梁县			榆阳区		
	验证小班	正确小班	精度/%	验证小班	正确小班	精度/%	验证小班	正确小班	精度/%
有林地	21	17	81.0	21	17	81.0	0	0	0
灌木林地	8	5	62.5	2	1	50.0	6	4	66.7
耕地	1 481	1 027	69.3	1 463	1 011	69.1	18	16	88.9
其他地类	4 930	3 632	73.7	4 768	3 491	73.2	162	141	87.0
总计	6 440	4 681	72.7	6 254	4 520	72.3	186	161	86.6

2.5 成本效益分析

经过对 2 个研究区的调查走访,了解基于人工现地调查的营造林成效县级自查工作投入的人力、时间、经费等情况。同时,统计本次基于遥感的营造林成效监测所投入的人力、时间、经费等。以 50 hm² 营造林核查任务为标准,分别计算 2 种调查方

表 7 人工调查与遥感监测成本对照

Table 7 The cost comparison table for manual survey and remote sensing monitoring

调查方法	研究区	工作量	工资/元	交通费/元	遥感数据费/元	两县平均费用/元
人工调查	铜梁县	6 人,1 个月	24 000	6 000	0	25 500
	榆阳区	5 人,1 个月	15 000	6 000	0	
遥感监测	铜梁县	3 人,0.5 个月	6 000	0	4 000	10 250
	榆阳区	3 人,0.5 个月	4 500	0	6 000	

监测精度偏低的原因是南方植被生长旺盛,营造林小班内杂草杂灌易占据优势,使 $NDVI$ 成林率监测不能较好地反映营造林树种的状况。

2.4 营造林小班造林前地类分类

造林前地类反映了造林规划实施是否科学合理,对造林前地类进行分类,能够反映是否存在重复造林和毁林造林等情况,是营造林监测的一个重要指标。对于在原本林分条件较好的有林地、灌木林地,不应实施营造林工程。因此对造林前地类为有林地或灌木林地的营造林小班需要额外关注。据此制定营造林小班造林前地类分类类型:有林地、灌木林地、耕地、其他地类。

采用基于最大似然法的监督分类,对营造林小班造林前期的影像进行分类,并以现地验证地类为参照,进行分类精度检验(表 6)。精度均采用生产者精度,即某类分类正确的小班数占此类现地验证小班数的比率。

北方区的榆阳区分类精度较南方区的铜梁县高 14.3%,不同地类的分类精度也均高于南方区。原因有两方面:一是北方地区平均营造林小班面积较大,在相同分辨率条件下使用监督分类更容易判别;二是北方地区地类较完整单一,不同地类的类间光谱差异较大,分类正确率高,而南方地区的地类分布零散破碎,不同地类植被特征相似,类间光谱差异小,自动分类时容易错分。

式所耗费的工作成本(表 7)。

以 50 hm² 为例,基于人工现地调查的营造林成效监测,需要投入 5~6 人 1 个月的时间,而基于遥感的营造林成效监测只需投入 3 人 0.5 个月,加上遥感影像购置费,基于遥感的营造林成效监测总花费仅为人工现地调查的 40.2%。

3 结论与讨论

遥感影像分辨率的选取与营造林小班的面积直接相关。对于小班平均面积 $>2\text{ hm}^2$ 的地区,宜使用 $2\sim 10\text{ m}$ 分辨率的遥感数据。对于小班平均面积 $<2\text{ hm}^2$ 的地区,宜使用 2 m 以上分辨率。

随着造林年限的增加,保存状况呈逐年上升。南方监测区造林 4 a 后保存合格率可达到较好的状态并趋于平缓。北方监测区造林 5 a 后保存合格率仍有一定增长空间。

采用NDVI监测成林状况,精度可达 87.5% 。其优点是可将成林指标以具体的数字呈现,更加清晰、直观、有可比性,有别于传统成林状况调查一刀切的做法。缺点是NDVI值无法排除来自其他植被的干扰,如杂草杂灌也会使NDVI值虚高,有时无法准确反映未成林造林地的成林状况。

采用计算机监督分类法对营造林小班的造林前地类进行分类, 2 个研究区的综合分类精度为 72.7% 。其中,北方研究区监督分类效果较好,精度达 86.6% 。由于北方研究区地类整齐单一、营造林小班完整连片、面积较大,在遥感影像上类间光谱差异大,采用计算机监督分类可达到较理想效果。

营造林成效遥感监测还具有一些其他优点,如遥感影像成果清晰直观、营造林小班面积勾绘和求算准确方便、成果可形成地理空间数据库利于信息化管理。

营造林成效遥感监测与传统的现地调查监测方法相比,人力、物力和时间成本较低。经统计,营造林成效遥感监测总花费仅为人工现地调查的 40.2% 。

参考文献:

[1] PAYN T,CARNUS J M,FREER-SMITH P,*et al.* Changes in planted forests and future global implications and future global implications[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352 (9):57-67.

[2] 于晓光,王小昆,蒋爱军,等. 中高分辨率遥感影像在营造林成效监测应用中的探讨[J]. 林业资源管理, 2012(10):59-63.

YU X G,WANG X K,JIANG A J,*et al.* Discussion on application of medium and high resolution remote sensing images in afforestation effect monitoring[J]. Forest Resources Management, 2012(10):59-63. (in Chinese)

[3] 张永军,熊金鑫,余磊,等. 严密定位模型辅助的国产卫星影像匹配[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014, 39(8):897-900.

ZHANG Y J,XIONG J X,YU L,*et al.* Automatic matching for optical imagery acquired from domestic satellites based on rigorous orientation model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8):897-900. (in Chinese)

[4] 王佳,尹华丽,王晓莹,等. 基于资源三号影像的森林蓄积量估测遥感因子选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(12): 29-33.

WANG J,YIN H L,WANG X Y,*et al.* Remote sensing factor optimization for volume estimation based on ZY-3 images[J]. Journal of Central South University of Forest & Technology, 2015, 35(12):29-33. (in Chinese)

[5] 韩杰,谢勇,吴国玺,等. 国产高分辨率卫星影像几何定位研究[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4):100-107.

HAN J,XIE Y,WU G X,*et al.* Geo-positioning accuracy analysis for domestic high-resolution satellite imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(4):100-107. (in Chinese)

[6] 吴发云,徐泽鸿,杨雪清. 国产遥感影像在森林资源调查和灾害评估中的应用产业化研究[J]. 林业资源管理, 2011(5):112-117.

[7] 莫琴,陈志泊,谢士琴,等. 高分辨率林业生态工程监测系统研建与应用[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(4):737-742.

MO Q,CHEN Z B,XIE S Q,*et al.* Developing a system for monitoring high resolution forestry ecological projects[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34 (4):737-742. (in Chinese)

[8] 李明泽,郭鸿郡,范文义,等. 基于GWR的大兴安岭森林立地质量遥感分析[J]. 林业科学, 2017, 53(6):56-66.

LI M Z,GUO H J,FAN W Y,*et al.* Remote sensing analysis of forest site quality in Daxing'an Mountain based on GWR[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(6):56-66. (in Chinese)

[9] 刘萍. 当前我国造林工作存在的问题及对策的思考[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2):130-132.

LIU P. Thoughts on the problems and countermeasures of afforestation in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2):130-132. (in Chinese)

[10] 陈文思,朱清科,刘蕾蕾,等. 陕北半干旱黄土区沙棘人工林的死亡率及适宜地形因子[J]. 林业科学, 2016, 52(5):9-16.

CHEN W S,ZHU Q K,LIU L L,*et al.* Mortality and appropriate topographical conditions of seabuckthorn plantation in semi-arid region of loess plateau in north Shaanxi, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5):9-16. (in Chinese)

[11] 张怡吟,朱清科,任正龔,等. 地形对陕北黄土区衰退沙棘人工林天然更新的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2):300-306.

ZHANG Y N,ZHU Q K,REN Z Y,*et al.* Modeling the effects of topography on the natural renewal of declining seabuckthorn forest in loess plateau of northern Shaanxi Province[J]. Forest Research, 2017, 30(2):300-306. (in Chinese)

[12] 吴季秋,肖明,杨钧婷,等. 海南昌化江下游流域土壤侵蚀分布特征研究[J]. 水土保持应用技术, 2012, 147(3):12-15.

WU J Q,XIAO M,YANG J T,*et al.* Research on distribution characteristics of soil erosion in the lower reaches of Changhua River in Hainan[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2012, 147(3):12-15. (in Chinese)

[13] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波. 基于遥感和ULSE模型评价1995—2005年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7):1197-1203.

[14] 徐涵秋,张博博,关华德,等. 南方红壤区林下水土流失的遥感判别——以福建省长汀县为例[J]. 地理科学, 2017, 37(8):

1270-1276.

XU H Q,ZHANG B B,GUAN H D,*et al.* Detection of soil erosion area under forest canopy in the red soil region of southern China using remote sensing techniqueschangting country, Fujian Province[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(8): 1270-1276. (in Chinese)

[15] 张博博,徐涵秋,胡秀娟,等. 福建长汀河田盆地林地水土流失区的遥感判别[J]. 遥感信息,2017,32(4):112-119.

ZHANG B B,XU H Q,HU X M,*et al.* Discrimination of understory soil erosion based on remotesensing technique in Hettian basinal area of County Changting, Fujian Province[J]. Remote Sensing Information,2017,32(4):112-119. (in Chinese)

[16] 赵子忠,桑娟萍,廖永峰. 退耕还林工程中遥感技术应用研究现状[J]. 西北林学院学报,2012,27(4):203-206.

ZHAO Z Z,SANG J P,LIAO Y F. Present situation of applying remote sensing technology to the project of returning farmland to forest[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(4):203-206. (in Chinese)

[17] 邢元军,彭检贵,徐金铎,等. 基于遥感技术的退耕还林工程动态监测研究——以四川天全县为例[J]. 中南林业调查规划,2016,35(2):22-28.

[18] 赵子忠,芦维忠. 基于遥感技术的退耕还林监测研究——以甘肃省清水县为例[J]. 林业资源管理,2010(8):63-67.

[19] 袁士保,赵云龙,孟佩. 自主多源高分辨率卫星遥感监测技术在北京市平原造林工程中的应用[J]. 林业资源管理,2016(4):140-144.

YUAN S B,ZHAO Y L,MENG P. Application of independent multi-source and high-resolution satellite remote sensing monitoring technology in plain afforestation projects in Beijing[J]. Forest Resources Management,2016(4):140-144. (in Chinese)

[20] 党普兴. 林业生态工程综合评价指标体系与定量评价方法研究——以三北防护林体系建设四期工程第一阶段为例[J]. 西北林学院学报,2014,29(1):244-252.

DANG P X. Indicator system and the quantitative method of post-evaluation for comprehensive effectiveness of forestry ecological engineering—a case study on the first stage of the construction of Three North Shelterbelt system’s phase IV project[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(1):244-252. (in Chinese)

[21] 周德成,赵淑清,朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响——以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1866-1878.

ZHOU D C,ZHAO S Q,ZHU C. Impacts of the sloping land conversion program on the land use/cover changes in the loess plateau;a case study in Ansai County of Shaanxi Province,China[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(11): 1866-1878. (in Chinese)

[22] 黄建文,鞠洪波,赵峰,等. 利用遥感进行退耕还林成活率及长势监测方法的研究[J]. 遥感学报,2007,11(6):899-905.

[23] 黄建文,陈永富,陈巧. 利用 3S 技术进行退耕还林工程信息提取的研究[J]. 林业科学研究,2010,23(4):500-504.

[24] 梅浩. 中国省域人工造林成效动态综合评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志,2019,38(12):3577-3584.

MEI H. Dynamic comprehensive evaluation and influencing factors of afforestation efficiency at province scale in China [J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(12):3577-3584. (in Chinese)

[25] JUNIOR R F V,SIQUEIRA H E,VALERA C A,*et al.* Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing approach: an application to the Environmental Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil) [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2019,14(2):20-33.

[26] ZHANG Y,LING F,M. FOODY G,*et al.* Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007-2016 [J]. Remote Sensing of Environment,2019,224(1):74-91.

[27] NANZAD L,ZHANG J H,TUVDENDOR J B,*et al.* NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016 [J]. Journals of Arid Environments,2019,164(1):69-77.

[28] 甄计国,陈亚伟. 植被指数与退耕还林(草)初期的遥感监测应用[J]. 遥感技术与应用,2006,21(1):41-48.

[29] 方雨晨,王培燕,田庆久. 不同覆盖度下小麦农田土壤对 NDVI 影响模拟分析[J]. 遥感技术与应用,2017,32(4):660-666.

FANG Y C,WANG P Y,TIAN Q J. Simulation and analysis on the influence of soil background of wheat farmland on NDVI under different vegetation coverage[J]. Remote Sensing Technology and Application,2017,32(4):660-666. (in Chinese)

[30] 虞连玉,蔡焕杰,姚付启,等. 植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):231-239.

[31] 孟佩,刘学敏. 内蒙古乌兰察布市国家重点生态工程区植被指数变化特征[J]. 林业资源管理,2018,(4):17-21.

[32] 凌成星,刘华,纪平,等. 基于无人机影像 VDVI 指数的植被覆盖度估算——以陕西神木防护林工程研究区为例[J]. 森林工程,2021,37(2):57-66.

[33] 孙拱,邢涛,邢艳秋,等. 基于遥感数据的净月潭公园植被冠层叶片含水率反演[J]. 森林工程,2019,35(5):32-38.

[34] 陈仙春,赵俊三,陈磊士,等. 基于 Landsat 影像的玉溪市红塔区土地覆盖分类及变化分析[J]. 森林工程,2019,35(3):1-8.