

引用格式: Yan Xinrong, Guan Fengying. Overview of Remote Sensing Monitoring of Bamboo Resources[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 731-740. [严欣荣, 官凤英. 竹资源遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 731-740.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.4.0731

## 竹资源遥感监测研究进展

严欣荣, 官凤英

(国际竹藤中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100020)

**摘要:** 竹资源广泛分布于热带、亚热带和温带地区, 是许多不可再生资源的良好替代品, 其生长迅速、分布范围广的特点在减缓气候变化和发展中国家脱贫减困等方面发挥着重要作用。遥感技术广泛应用于资源监测、森林结构定量化反演, 具有监测范围广、时空精度高的优点。系统梳理遥感各类数据源在竹资源监测中的应用、竹资源时空动态变化监测及竹资源监测分类方法。重点总结监测制图的数据源与分类方法, 并对各类方法的精度进行统计分析。提出竹资源遥感监测要注重使用多源遥感数据和分类方法探索, 加强特殊竹种、竹特定生长阶段和竹数量与质量监测为未来研究重点, 以期对濒危野生动物保护、贫困地区脱贫、竹产业开发利用、发展中国家民生改善等提供技术支持。

**关键词:** 竹资源; 遥感; 研究进展

**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2020)04-0731-10

### 1 前言

竹资源是优良的非木质资源, 也是森林生态系统的重要组成部分, 在生物多样性与野生动物保护、维持发展中国家农民生计、发展绿色经济、减缓气候变化、改善人居环境、促进就业增收、促进南南合作等方面发挥着重要作用<sup>[1-7]</sup>。全世界竹种共有1 200余种<sup>[8-9]</sup>, 约有竹林面积1 700万hm<sup>2</sup>, 竹子广泛分布在除欧洲和西亚以外的所有大陆的热带、亚热带和温带地区, 从低地到海拔4 000 m, 主要在亚洲<sup>[10-16]</sup>。中国竹资源面积约占世界竹林面积20%<sup>[16]</sup>, 中国竹种共有40余属, 500余种, 占世界竹种42%, 位居世界第一位, 是世界上重要的竹资源产区。竹资源在生物能源、造纸、家居产品、食品加工、旅游观赏以及森林康养等行业占据着重要的地位<sup>[12,17]</sup>, 竹子开发与利用为市场提供丰富的绿色环保产品。近年来竹产品进出口贸易额不断增长<sup>[18]</sup>为竹农带去丰厚的经济收入, 同时也为竹资源分布

区提供了大量就业机会<sup>[19]</sup>。

随着竹类植物基础研究不断进步, 竹林高效培育技术的深入研究, 竹林经营朝着更加规范化、规模化的方向发展<sup>[20]</sup>, 竹林地上生物量、碳储量有明显增加<sup>[16]</sup>。及时、有效地监测竹资源分布及储量是竹产业规划和发展的关键问题之一, 也是竹林高效管理的关键。遥感是一种广泛使用的资源监测技术, 在森林资源调查<sup>[21-22]</sup>、树种识别<sup>[23]</sup>、结构参数提取<sup>[24]</sup>以及生物量反演<sup>[25]</sup>等方面发挥着重要作用。从20世纪80年代开始, 遥感技术用于监测竹资源, 目前监测数据源发展到包括光学、SAR和激光雷达等<sup>[3,26-28]</sup>多种数据, 监测内容涵盖了竹资源空间分布、空间和时间上的动态变化、数量和质量的监测、特定竹种识别、生物量反演多个方面。但在不同尺度、不同竹种和不同监测目的的竹资源遥感监测通常采用不同数据源和监测方法, 本文系统梳理了各类遥感数据源在竹资源监测中的应用、竹资源时空

收稿日期: 2019-05-06; 修订日期: 2020-05-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划专项“材用竹林高效培育与监测技术”(2018YFD0600103)。

作者简介: 严欣荣(1994—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事竹资源监测研究。E-mail: yanxinrong@foxmail.com

通讯作者: 官凤英(1974—), 女, 吉林前郭人, 研究员, 主要从事竹林经营与监测技术研究。E-mail: guanfy@icbr.ac.cn

动态变化监测及竹资源监测分类方法。

## 2 竹资源信息提取

竹资源分布监测通常采用影像解译+地面数据验证的方法,也有研究直接通过目视解译进行竹资源信息提取<sup>[29-30]</sup>,数据源和竹种的不同会采取不同的影像解译方法。与其他植被相比,竹子生长迅速,取材和经营周期短,且具有很强的扩张性<sup>[31]</sup>,因此竹资源分布监测相比其他树种需要更高的时效性。竹子容易与其他植被之间产生“同物异谱、异物同谱”<sup>[32]</sup>的现象,监测结果容易与其他植被产生错分与漏分的现象,林下灌木层的竹资源(本文简称下层竹)数量和质量与大熊猫等野生动物迁徙和保护息息相关<sup>[33]</sup>,但下层竹难以直接从遥感影像上监测到。由于地形等因素的影响,竹林分布区域的遥感影像更容易受到云雾干扰,如何有效利用云雾干扰较少的影像且提高竹资源分类精度,这些是竹资源分布监测中亟待解决的问题。

20 世纪 80 年代至 21 世纪初,竹资源遥感监测进入初级发展阶段,基于濒危野生动物大熊猫保护的严峻状况<sup>[34]</sup>,任国业<sup>[35]</sup>利用彩红外航空相片监测林下灌木层的高山箭竹,根据森林群落结构理论绘制大熊猫栖息地平武县的竹资源分布。研究使用多元回归法分析的方法建立了航空相片竹生物量模型,为大熊猫栖息地质量评定和竹资源遥感监测奠定了基础,这是国内首次将遥感技术应用于竹资源监测。Nair 等<sup>[36]</sup>首次使用多光谱数据对印度 Wayanad 区域竹资源进行监测,研究采用最大似然方法进行影像分类,这是国外首次利用遥感技术进行竹资源监测。21 世纪初至 2010 年竹资源遥感监测进入正式发展阶段,监测内容包括了区域竹林分布制图、竹林时空动态变化监测。大熊猫的食源竹监测扩展到卧龙和佛坪等自然保护区,竹种也包括了箭竹、巴山木竹和拐棍竹等,研究内容包括竹子数量与质量、物候期监测等。借助遥感技术理论与处理方法不断进步,我国南方地区、印度等地也开始材用竹种的遥感监测研究。2010 年以来,竹资源遥感监测进入快速发展阶段。越来越多的学者认识到森林碳汇、竹林碳汇在减缓气候变化和解决其他全球热点问题重要作用,竹资源遥感监测内容也扩展到竹林生物量与碳储量监测、竹林结构参数量化反演和大范围的竹资源分布图绘制,中尺度的遥感影像实现了竹林碳储量的精确监测<sup>[37]</sup>,机载<sup>[38]</sup>

和地基激光雷达<sup>[39]</sup>实现了竹林结构参数的精确提取,中低分辨率影像大范围的绘制了东非<sup>[40]</sup>和全球<sup>[27]</sup>的竹资源分布。本文从数据源角度,总结了 4 种数据源以及动态监测技术在竹资源分布监测中的应用。

### 2.1 高空间分辨率遥感影像

高空间分辨率遥感影像有丰富的空间纹理信息,有研究利用目视解译方法进行竹资源监测。孙茂盛等<sup>[29]</sup>利用 QuickBird 影像对德宏州竹类资源进行目视解译,绘制竹林分布图,得到竹林面积和分布格局。付小勇等<sup>[30]</sup>根据大型丛生竹资源成伞状的影像分布特点,目视解译勾绘获得德宏州大型丛生竹资源的面积及分布情况。目视解译与勾绘是很好的竹资源监测方法,但监测精度与解译者知识储备有很大的关系,在监测效率和时效性上并不适于大范围 and 动态监测。

纹理信息挖掘和使用面向对象分割分类技术能够产生更好的精度<sup>[41]</sup>,纹理量的提取和优选也提高分类精度的关键。刘健等<sup>[32]</sup>以 ALOS 影像分析竹子和其他典型植被的纹理特征差异构建最佳纹理量,利用基于像元与面向对象分类方法表明纹理特征量用于竹资源信息监测的可行性。余坤勇等<sup>[41]</sup>基于灰度共生矩阵,分析竹资源与其它植被纹理特征差异,提出“基于光谱片层一面向纹理类”的竹资源专题信息提取技术,纹理均值、熵、角二阶矩是最佳纹理量组合。

除纹理信息外,机器学习方法对高空间分辨率影像解译表现出很高的精度,同时在下层竹的监测中具有广泛的应用前景。Ghosh 等<sup>[42]</sup>在印度西孟加拉的帕尔加那斯地区对 WorldView-2 采用面向对象的方法进行竹资源分布制图,面向对象的竹资源分类用户精度和总体精度都超 0.9。Tang 等<sup>[28]</sup>利用 WorldView-2 在卧龙自然保护区进行竹资源监测,结果表明基于对象的分类方法  $k$  最近邻精度最高,研究结果也为下层竹的监测提供了新参考,对大熊猫栖息地保护具有重要意义。

### 2.2 中空间分辨率遥感影像

中空间分辨率遥感影像由于其经济、易获取的特点,被广泛应用于竹资源分布监测。机器学习的分类方法用于中空间分辨率影像会产生更高的精度,尤其是对下层竹林的信息监测,Linderman 等<sup>[43-44]</sup>使用 Landsat TM 影像绘制了卧龙自然保护区下层竹林的空间分布,非线性人工神经网络的分类准确

率达到0.8。Shi等<sup>[45]</sup>采用反向传播BP神经网络从Landsat ETM+遥感图像中提取竹林信息,竹类获得了0.98的用户精度。Wang等<sup>[46]</sup>采用人工神经网络和GIS专家系统相结合的方法,利用ASTER影像对中国西南秦岭地区的下层竹林进行监测。研究表明将神经网络与专家系统相结合,可以成功地在复杂的森林景观中绘制下层竹林,人工神经网络、支持向量机和专家系统等分类方法在大熊猫食源竹监测中表现出了高精度,也是复杂森林景观中竹资源监测的参考。

竹资源遥感监测中“同物异谱”和“异物同谱”会影响分类结果精度,已有研究主要通过添加辅助变量、多时相影像解译和纹理信息提取来解决。高远等<sup>[47]</sup>以DEM数据和我国HJ-1A多光谱影像为数据源,研究不同坡度、坡向以及海拔等地形条件下竹资源专题信息提取效果。结果表明,海拔、坡向对竹资源的光谱反射率影响大,说明地形因子可以辅助解决中“同物异谱”和“异物同谱”问题。利用Landsat影像较高的时间分辨率和物候研究,Zhao等<sup>[40]</sup>将多时相遥感数据应用于东非竹林资源监测,研究结果表明多时相遥感影像有助于区分不同植被,解决竹林信息提取“同物异谱”和“异物同谱”问题,另通过多时相分类结果投票,能很好地提高分类精度。

### 2.3 高光谱遥感影像

高光谱遥感影像在空间纹理信息上不具优势,但相关影像产品和指数产品具有超高的时间分辨率、丰富的光谱信息和适用于大范围监测的特点。植被指数在特定条件下可以消除植被本身、环境和大气条件等因素的影响,高光谱数据的合成的植被指数产品可以准确的进行物候研究,物候研究结果辅助竹资源监测是常用的方法,这在下层竹监测中具有十分广泛的用途。Tuanmu等<sup>[33]</sup>利用MODIS地表反射率图像(MOD09Q1),根据红波段和近红外波段的地表反射率值计算宽动态范围植被指数获得林下竹林的物候特征,用11个物候特征生成的模型进行竹林分布预测,同时引入海拔变量进行竹资源信息提取。Wang等<sup>[48]</sup>利用MODIS NDVI提取的植被物候替代和量化下层竹的质量和数量,研究了大熊猫迁徙与竹子植被物候变化的关系。端元波谱提取是高光谱影像分类的主要技术,最小噪声分离结果生成的决策树实现了全球的竹资源监测<sup>[27]</sup>。Cibele等<sup>[31]</sup>研究发现利用可见光到短波红外

数据,采用端元选择方法,竹子用户精度和生产者精度分别达到0.98和0.72。高光谱影像的竹资源监测要注重端元波谱提取和混合像元分解技术研究,同时也要加强分类结果的小区域验证。

### 2.4 激光雷达及多元遥感数据

激光雷达是一种主动遥感技术,它能够直接测量激光扫描仪与反射目标之间的距离,得到高精度的3D点云<sup>[49]</sup>,激光雷达具有精确表征森林冠层结构和估算森林生物量的潜力<sup>[50]</sup>。在竹资源遥感监测中,激光雷达技术被用于竹林结构参数提取、竞争研究和生物量反演。夏明鹏<sup>[39]</sup>利用地基激光雷达进行竹阔混交林竞争研究,通过地基激光雷达扫描数据提取竹林结构参数,提取的胸径精度 $R^2$ 在0.99以上,研究结果表明TLS技术能够满足竹林资源调查研究中的应用需求。Yan等<sup>[51]</sup>通过地面激光扫描(TLS)来分析毛竹与混交林中的阔叶树之间的竞争,研究结果表明利用TLS技术可以很好地描述阔叶树与竹之间的竞争。Cao等<sup>[38]</sup>利用机载激光雷达精确推导高分辨率DTM,提取竹林结构参数反演毛竹林中生物量。地基激光雷达在小范围结构参数提取中获得了很高精度,但不适用于大范围监测。机载激光雷达数据相比更加灵活、监测范围更广,在林分密度大的竹林中具有更多的冠层信息。

多源遥感数据的融合和结合应用于竹林资源监测,相比于单一遥感数据源会具有更多信息量,融合图像具备更好的空间纹理和目视判别效果。Liu等<sup>[52]</sup>将GF-1影像多光谱波段、全色波段和TerraSAR-X影像采用二维经验模态分解(简称BEMD)算法进行数据融合,结果表明BEMD方法能够有效提高竹林分类的精度,融合的数据也具有更好的解译精度。Liu等<sup>[53]</sup>利用Google Earth Engine云平台预处理Landsat OLI数据,添加辅助协变量(地形、植被指数、气候、土壤)应用随机森林分类器分类,结果表明辅助变量的添加能够显著提高分类精度,能够实现监测的空间单元更小以及范围更广。Du等<sup>[27]</sup>利用MODIS合成产品MOD13Q1、地表反射率数据MOD09A1和Landsat OLI数据,结合多种方式收集的样本对全球竹资源进行监测。基于对竹、阔叶树、针叶树在不同波段上的反射率差异构建决策树,首次进行了全球竹资源监测,监测总体精度0.79。

### 2.5 竹资源遥感动态监测

竹林动态监测是了解竹资源在空间和时间上



变化的重要途径,竹林动态监测是通过遥感图像解译获得不同时间的竹林分布信息,利用误差矩阵进行变化信息监测,误差矩阵可以判读竹林在土地利用变化中的增加或消减。Shah等<sup>[54]</sup>利用最大似然法分类和误差矩阵对进行竹林资源变化监测。范少辉等<sup>[55]</sup>利用3期Landsat ETM+影像结合地形图、DEM等资料,采用“基于光谱片层一面向纹理类”<sup>[41]</sup>的竹林专题信息提取方法实现了对顺昌县竹资源动态监测。邓旺华<sup>[56]</sup>采用“基于光谱片层一面向纹理类”<sup>[41]</sup>的竹林专题信息,从4个时期TM/ETM影像提取顺昌县竹资源分布图,监测了4个时期竹林变化情况。李阳光等<sup>[37]</sup>利用4个时期Landsat遥感影像,采用最大似然法提取了浙江省土地利用和竹林的时空分布信息,实现了高精度监测浙江省竹林资源动态变化。

### 3 竹资源监测方法

本文整理了1989~2019年竹资源遥感监测相关研究(表1),对竹种(表2)和方法(表3)进行了总结与整理。对监测精度也做了相应统计,分别为总体精度(简称OA, Overall Accuracy)和竹类用户精度(简称UA, User Accuracy)。

竹资源监测区域国内主要有两大自然保护区、福建、浙江、广西和云南部分区域,国外主要有印度、巴西和东非等国。竹资源监测竹种(表2)以毛竹和大熊猫主食竹类居多,其他竹种有滇西南分布的大型丛生竹、牡竹、簕竹和其他下层竹。

从数据源来说,彩红外相片、IRS 1C、TM/ETM、MODIS、Hyperion EO-1、WorldView、激光雷达等多源遥感数据都可用于不同尺度竹资源监测;从信息提取方法来说,监督分类、非监督分类、决策树分类、基于像元与面向对象的分类、机器学习图像分类、影像纹理信息提取等方法用于不同尺度的竹资源监测;基于林冠层的竹种分类方法主要分为两类,上层竹分类多使用监督分类方法,下层竹多使用森林群落结构知识及物候差异方法。上层竹研究要比下层竹更多,也具有更稳定的分类精度。

提高竹资源监测的精度,首先要解决的是竹林与其他植被“同物异谱”和“异物同谱”的问题,使用多时相遥感影像是最有效的途径之一,要充分挖掘中尺度遥感影像时相差异信息,应用竹类植物与阔叶树、针叶树及其他混交树种不同季节的光谱差异

能够改善监测精度,竹子与其他植被的物候差异可以为多时相影像解译提供理论支撑。

多元遥感数据的融合和辅助协变量的添加能够有效增加影像的信息量,进而提高分类精度。已有研究表明多时相、多元遥感影像和机器学习的分类方法能有效提高精度,应对竹资源监测中数据融合方法应加以探讨,研究不同区域和竹种的适用的数据融合方法。地形、植被指数、气候和土壤等协变量添加能够提高监测精度,但各协变量的贡献率还未有深入研究,应针对不同竹种和不同区域进一步研究及验证。

提高下层竹监测精度,要加强下层竹和林冠层植被的物候研究,MODIS影像和指数产品可以辅助进行物候差异研究,利用森林群落结构、物候差异能够辅助进行下层竹监测,已有研究中机器学习分类方法都产生了较高精度。从影像角度来说,下层竹要多利用冬季影像,冬季影像可以获得更好的竹分类精度<sup>[40,58]</sup>。

竹资源监测要根据竹种、竹林分布特点和监测范围选取影像数据源和分类方法,大范围散生竹监测宜采用中分辨率和高光谱遥感影像,Google Earth<sup>[53]</sup>等云计算平台的应用可以有效提高监测效率,机器学习分类相比其他分类方法会产生更高精度,波谱提取、混合像元分解、决策树等方法对高光谱影像分类更优。小范围丛生竹监测要采用高分辨遥感影像或激光雷达数据,高分辨率影像要采用纹理特征选取或面向对象分割分类方法。激光雷达数据能够获取胸径树高等竹林结构参数,结构参数能够实现小范围竹林生物量和碳储量的准确监测,进而实现竹林产量的精确监测。竹资源主要分布区的影像容易受到云雾影像,机载或无人机影像获取能效解决监测数据缺乏问题。

### 4 遥感在竹资源监测其他方面应用

遥感技术可用于竹林扩张监测<sup>[57]</sup>、叶面积指数反演<sup>[61]</sup>、碳储量反演<sup>[62]</sup>、生物量反演<sup>[38]</sup>和竹林灾害监测<sup>[63]</sup>研究,为竹林经营管理提供重要理论与技术支撑。Dutta等<sup>[57]</sup>使用Landsat、IRS、Resourcesat-2遥感数据进行牡竹的扩张监测。Cibele等<sup>[31]</sup>利用可见光到短波近红外数据数据,采用EMC和IES端元选择方法监测巴西部分区域的竹扩张情况。叶面积指数(LAI)是区域和全球环境变化以及生态、碳循环和生物多样性研究的重要指标,很多学者基

表 1 竹资源遥感监测数据源及方法

Table1 Data sources and methods for remote sensing monitoring of bamboo resources						
竹种	地点	方法	辅助数据	数据源	精度 OA/UA	参考
大型丛生竹	云南德宏州	数字化	/	QuickBird, GeoEye-1, HyperionEO-1	/	2012 <sup>[29-30]</sup>
牡竹	西高止山脉, 印度	数字化	/	Landsat MSS, TM, ETM+, IRS P6 LISS III, Resourcesat-2 LISS III	/	2016 <sup>[57]</sup>
印度籐竹	Wayanad, 印度	MLC	/	IRS 1C	/	1998 <sup>[36]</sup>
毛竹	福建永安市	MLC	地形信息	HJ-1A	0.75/	2014 <sup>[47]</sup>
牡竹	喜马拉雅邦, 印度	MLC	/	IRS P6 LISS III	0.87~0.89/0.74~0.85	2015 <sup>[54]</sup>
毛竹	浙江	MLC	资源清查数据	Landsat TM	0.76~0.85/0.91~0.95	2018 <sup>[16]</sup>
秦岭箭竹和 华西箭竹	佛坪自然保 护区, 中国	MLC, ANN, 混合神经网络和专家系统的分类系统	地面调查数据集	ASTER	0.52, 0.63, 0.72/	2009 <sup>[46]</sup>
巴山木竹	佛坪自然保 护区, 中国	MLC, MDC, ANN	/	Landsat TM/ETM+	0.82, 0.81, 0.83/	2009 <sup>[58]</sup>
/	帕尔加那斯, 印度	MLC, SVM, RF	地面调查数据	WorldView 2	0.58, 0.91, 0.87/0.4, 0.89, 0.82, 0.4	2014 <sup>[42]</sup>
毛竹、雷竹	浙江	MLC, MF	/	MODIS 地表反射率和合成产品 (MOD13Q1)	/0.77~0.79	2017 <sup>[16]</sup>
毛竹	顺昌县, 中国	GLCM, MLC	/	Landsat TM/ETM	0.84/	2009 <sup>[41]</sup>
毛竹	顺昌县, 中国	非监督分类, MLC 和子象元分类	/	TM	0.7, 0.78, 0.83/0.65, 0.68, 0.84	2010 <sup>[59]</sup>
下层竹	卧龙自然保 护区, 中国	ANN	/	Landsat TM	0.8	2005 <sup>[43]</sup>
毛竹	临安, 浙江	反向传播 BP 神经网络		Landsat ETM+	0.93/0.98	2009 <sup>[45]</sup>
巴山木竹和 拐棍竹	卧龙自然保 护区, 中国	物候指数建模	海拔信息	MODIS 反射率, 合成产品 MOD09Q1	/	2010 <sup>[33]</sup>
/	印度东北部	BI	/	IRS P6 LISS-III	0.84	2010 <sup>[60]</sup>
牡竹	Mogi-Guaçu, 巴西	EMC, IES	/	ProSpecTIR-V	0.64, 0.63/0.9, 0.76	2015 <sup>[31]</sup>
巴山木竹和 拐棍竹	卧龙自然保 护区, 中国	k-NN, gk-NN	/	WorldView-2	0.76, 0.82 /0.92, 0.93	2016 <sup>[28]</sup>
毛竹	漓江流域, 中国	BEMD 融合, 基于规则的特征提取	/	TerraSAR-X, Gaofen-1(多光谱和全色)	0.71	2017 <sup>[52]</sup>
/	全球	DT	调查数据, 统计数据 和文献数据	MODIS 地表反射率, 合成产品 (MOD13Q1), Landsat8 OLI	0.79/0.87	2018 <sup>[27]</sup>
毛竹	福建	GLCM\RF	地形, 植被, 气候, 土壤	Landsat TM	0.73~0.93/	2018 <sup>[53]</sup>
/	东非三国	RF	MODIS NDVI, 地面收集数据	Landsat OLI	/0.84	2018 <sup>[40]</sup>

于遥感技术反演竹资源叶面积指数。Du 等<sup>[64]</sup>使用 Landsat TM 数据研究毛竹叶面积指数的反演。Zhang 等<sup>[65]</sup>基于 IRS P6 LISS 3 图像,对中国福建省竹林叶面积指数估算方法进行比较研究,研究中采用经验统计方法和归一化距离方法。生物量是植被固碳能力的重要指标,Chen 等<sup>[66]</sup>利用多个 Sentinel-2 数据,估算中国浙江省竹林的地上生物量。Li

等<sup>[16]</sup>使用 Landsat TM 和 OLI 图像提取了浙江竹林的光谱、植被指数和纹理特征等遥感变量,用逐步回归方法选择变量建立竹林地上碳估算模型。冰雹灾害是竹林经营的威胁之一,Xu 等<sup>[63]</sup>利用 MODIS LAI 数据和通量塔测量数据研究 2008 年中国南方冰雹天气对竹林总生产量(GPP)和蒸发蒸腾量(ET)的影响。多个方面的竹资源监测为竹林经

表 2 文献中监测的竹种

Table 2 Bamboo species monitored in the literature	
竹种	拉丁名
巴山木竹	<i>Bashania fargesii</i>
秦岭箭竹	<i>Fargesia qinlingensis</i>
华西箭竹	<i>Fargesia nitida</i>
拐棍竹	<i>Fargesia robusta</i>
牡竹	<i>Dendrocalamus strictus</i>
雷竹	<i>Phyllostachys praecox</i>
毛竹	<i>Phyllostachys edulis</i>
印度箭竹	<i>Bambusa bambos</i>
其他下层竹(文中未具体列出)	/
其他大型丛生竹(文中未具体列出)	/

营、产量估算以及防灾减灾提供了重要的技术支持,遥感灵活快速的监测方式大大减少了监测成本。

5 讨 论

遥感技术在竹资源监测各方面的广泛应用,为竹林开发、经营、管理与决策提供重要的技术保障。充分发挥遥感技术监测竹资源的优点,能够为世界各国竹产业快速发展提供强有力的帮助。福建、江西、浙江是中国毛竹主产区,多个方面的竹资源监测为当地竹产业的发展提供了强有力的数据支撑,毛竹等散生竹的分布范围与储量监测,为林业部门对竹产业规划、开发和发展提供数据保障,为中国贫困地区脱贫攻坚和乡村振兴提供有力帮助。两大自然保护区中箭竹、巴山木竹和拐棍竹分布与竹

子丰度遥感监测,为大熊猫和其他濒危野生动物保护提供技术支撑。印度、东非、老挝、越南等国竹资源监测,为发展中国家竹资源开发和相关政策制定提供了数据保障,为当地农民提供大量就业机会。

利用遥感技术来进行竹资源监测,以后要重点关注以下 4 个方面:

(1)加强多源遥感数据使用和分类方法探索,研究竹类植物和其他植被物候差异,充分利用影像的时相信息,提高遥感监测竹资源分类精度。利用多元遥感数据和新兴的分类方法进行监测,探索适用于不同监测尺度的分类方法。

(2)重视特殊竹种的监测,助力特色竹产业发展。东南亚国家和中国滇西南地区特色经济竹种资源丰富,但本底数据不清很大程度上限制了特色竹产业的发展。特色经济竹种是贫困地区脱贫攻坚和实现乡村振兴的新途径,要充分利用遥感技术调查本底数据为特色竹产业发展提供基础数据。滇西南特色经济竹种如巨龙竹、龙竹等大型丛生竹分布分散,不宜采用低分辨率遥感影像,高分辨率影像或无人机遥感影像纹理信息挖掘更适用于此类竹种监测。

(3)注重竹特定生长阶段的监测,竹类资源的分布对一些濒危野生动物的迁徙具有重要影响。竹子周期性大面积开花导致大熊猫栖息地的破碎化和食物质量的下降<sup>[67]</sup>,对大熊猫的生存造成严重威胁,及时有效的监测可以避免生态脉冲事件(竹子开花)对濒危野生动物和生态环境产生威胁。自

表 3 文献中竹资源遥感监测方法

Table3 Remote sensing monitoring methods for bamboo resources in the literature		
缩写	中文名称	英文名称
MLC	最大似然法分类器	Maximum Likelihood Classifier
MDC	马氏距离分类器	Mahalanobis Distance Classifier
ANN	人工神经网络	Artificial Neural Networks
SVM	支持向量机	Support Vector Machine
RF	随机森林	Random Forest
GLCM	灰度共生矩阵	Gray-Level Co-Occurrence Matrix
BI	竹指数	Bamboo Index
k-NN	k-最近邻	K-Nearest Neighbor
gk-NN	地理加权的 k-NN 分类器	Geostatistically-Weighted K-Nn Classifier
DT	决策树	Decsion Tree
MF	匹配滤波	Matched Filtering
BEMD	二维经验模态分解	Bidimensional Empirical Mode Decomposition
IES	交互式端元选择	Interactive Endmember Selection
EMC	端元均方根误差、最小光谱角	Endmember Average Root Mean Square Error(EAR), Minimum Average Spectral Angle(MASA), Count-Based(Cob)

然保护区应当加强食竹类濒危野生动物食源监测,为保护区内濒危动物食源和生物多样性保护提供有效保障。

(4)注重竹资源数量与质量监测,利用高分辨率遥感影像和激光雷达技术获取竹林重要结构参数,进而得到竹资源数量信息。竹林相比大多数森林具有更高的经营强度,因此养分、水分监测是竹资源质量监测重点。要利用多光谱或者高光谱数据进行竹林肥力、水分和病虫害监测,以期能够指导竹林施肥、灌溉和病虫害防治,为竹产业健康发展提供技术支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] Liu J G, Linderman M, Ouyang Z Y, *et al.* Ecological Degradation in Protected Areas: The Case of Wolong Nature Reserve for Giant Pandas[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 98-101. doi:10.1126/science.1058104.
- [2] Johnson K G, Schaller G B, Hu J C. Responses of Giant Pandas To a Bamboo Die-Off[J]. *National Geographic Research*, 1988, 4(2): 161-177. doi:10.1109/IEMBS.2001.1019548.
- [3] Fava F, Colombo R. Remote Sensing-based Assessment of the 2005~2011 Bamboo Reproductive Event in the Arakan Mountain Range and Its Relation with Wildfires[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 14. doi:10.3390/rs9010085.
- [4] Ly P, Pillot D, Lamballe P, *et al.* Evaluation of Bamboo as an Alternative Cropping Strategy in the Northern Central Upland of Vietnam: Above-ground Carbon Fixing Capacity, Accumulation of Soil Organic Carbon, and Socio-economic Aspects[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 149(1): 80-90. doi:10.1016/j.agee.2011.12.013.
- [5] Zhang T, Liang F, Hu W H, *et al.* Economic Analysis of a Hypothetical Bamboo-biochar Plant in Zhejiang Province, China[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(12): 1220-1225. doi:10.1177/0734242x17736945.
- [6] Lu H. F, Cai C J, Zeng X S, *et al.* Bamboo vs. Crops: An integrated Emergy and Economic Evaluation of Using Bamboo to Replace Crops in South Sichuan Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 464-473. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.193.
- [7] Andres V, Scott B, Zhang H M, *et al.* Evaluating MODIS Data for Mapping Wildlife Habitat Distribution[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2160-2169. doi:10.1016/j.rse.2007.09.012.
- [8] Zhang Xinping. Development Prospects of Bamboo and Rattan in the World[J]. *World Forestry Research*, 2003, 16(1): 26-30.[张新萍.世界竹藤发展趋势[J].世界林业研究, 2003, 16(1): 26-30.]
- [9] Jiang Zehui. *World Bamboo and Rattan*[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002.[江泽慧.世界竹藤[M].沈阳:辽宁科学技术出版社, 2002.]
- [10] Scurlock J M O, Dayton D C, Hames B. Bamboo: An Overlooked Biomass Resource?[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2000, 19(4): 229-244. doi:10.1016/s0961-9534(00)00038-6.
- [11] Shanmughavel P, Peddappaiah R S, Muthukumar T. Biomass Production in An Age Series of Bambusa Bambos Plantations[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2001, 20(2): 113-117. doi:10.1016/s0961-9534(00)00069-6.
- [12] Yang Y M, Wang K L, Pei S J, *et al.* Bamboo Diversity and Traditional Uses in Yunnan, China[J]. *Mountain Research and Development*, 2004, 24(2): 157-165. doi:10.1659/0276-4741.
- [13] Yen T M, Ji Y J, Lee J S. Estimating Biomass Production and Carbon Storage for a Fast-growing Makino Bamboo (*Phyllostachys Makinoi*) Plant based on the Diameter Distribution Model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(3): 339-344. doi:10.1016/j.foreco.2010.04.021.
- [14] Yen T M, Lee J S. Comparing Aboveground Carbon Sequestration between Moso Bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Forests based on the Allometric Model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(6): 995-1002. doi:10.1016/j.foreco.2010.12.015.
- [15] Inoue A, Sakamoto S, Suga H, *et al.* Construction of One-way Volume Table for the Three Major Useful Bamboos in Japan[J]. *Journal of Forest Research*, 2013, 18(4): 323-334. doi:10.1007/s10310-012-0366-x.
- [16] Li Y G, Han N, Li X J, *et al.* Spatiotemporal Estimation of Bamboo Forest aboveground Carbon Storage based on Landsat Data in Zhejiang, China[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 22. doi:10.3390/rs10060898.
- [17] Köhl M. *Tropical Forestry Handbook: Bamboo, The Plant and Its Uses*[M]. Switzerland: Springer-Verlag, 2016.
- [18] Wu Junqi, Zhang Yu. Status and Trend of International Trade of Bamboo and Rattan Commodities[J]. *World Forestry Research*, 2009, 22(3): 69-71.[吴君琦,张禹.世界竹藤商品贸易现状及趋势[J].世界林业研究, 2009, 22(3): 69-71.]
- [19] Nath A J, Sileshi G W, Das A K. Bamboo based Family Forests Offer Opportunities for Biomass Production and Carbon Farming in North East India[J]. *Land Use Policy*, 2018, 75: 191-200. doi:10.1016/j.landusepol.2018.03.041.
- [20] Fan Shaohui, Liu Guanglu, Su Wenhui, *et al.* Advances in Research of Bamboo Forest Cultivation[J]. *Forest Research*, 2018, 31(1): 137-144.[范少辉,刘广路,苏文会,等.竹林培育研究进展[J].林业科学研究, 2018, 31(1): 137-144.]
- [21] Wang Zongmei, Xu Tianshu, Yue Caimei. Forest Inventory and Planning, 2016, 41(4): 1-6.[王宗梅,徐天蜀,岳彩梅.基于高分辨率遥感影像的森林信息提取方法综述[J].林业调查规划, 2016, 41(4): 1-6.]
- [22] Li X J, Du H Q, Mao F J, *et al.* Estimating Bamboo Forest Aboveground Biomass Using EnKF-assimilated MODIS LAI Spatiotemporal Data and Machine Learning Algorithms[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 445-



457. doi:10.1016/j.agrformet.2018.04.002.
- [23] Harrison D, Rivard B, Sánchez-Azofeifa A. Classification of Tree Species based on Longwave Hyperspectral Data from Leaves, A Case Study for a Tropical Dry Forest[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 93-105. doi:10.1016/j.jag.2017.11.009.
- [24] Shen X, Cao L, Chen D, *et al.* Prediction of Forest Structural Parameters Using Airborne Full-waveform LiDAR and Hyperspectral Data in Subtropical Forests[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 27. doi:10.3390/rs10111729.
- [25] Huang Jinlong, Ju Weimin, Zheng Guang, *et al.* Estimation of Forest Aboveground Biomass Using High Spatial Resolution Remote Sensing Imagery [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6497-6508.[黄金龙, 居为民, 郑光, 等. 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6497-6508.]
- [26] Xia Mingpeng, Guan Fengying, Fan Shaohui, *et al.* Application Status and Prospect of TLS in Forest Resources Inventory [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 238-244.[夏明鹏, 官凤英, 范少辉, 等. TLS技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 238-244.]
- [27] Du H Q, Mao F J, Li X J, *et al.* Mapping Global Bamboo Forest Distribution Using Multisource Remote Sensing Data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(5): 1458-1471. doi: 10.1109/jstars.2018.2800127.
- [28] Tang Y W, Jing L H, Li H, *et al.* Bamboo Classification Using WorldView-2 Imagery of Giant Panda Habitat in a Large Shaded Area in Wolong, Sichuan Province, China[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1957. doi:10.3390/s16111957.
- [29] Sun Maosheng, Qian Qiang, Fu Xiaoyong, *et al.* Application of High-Resolution Remote Sensing to Bamboo Resources Inventory in Dehong Prefecture [J]. World Bamboo and Rattan, 2012(4): 8-11.[孙茂盛, 钱强, 付小勇, 等. 高分辨遥感技术在德宏州竹类植物资源调查中的应用[J]. 世界竹藤通讯, 2012(4): 8-11.]
- [30] Fu Xiaoyong, Sun Maosheng, Yang Yuming, *et al.* Application of Remote Sensing on Resource Monitoring of Big Cluster Bamboo Forest in Dehong Prefecture, Yunnan[J]. Journal of West China Forestry Science, 2012(4): 88-92.[付小勇, 孙茂盛, 杨宇明, 等. 遥感技术在德宏州大型丛生竹资源监测中的应用研究[J]. 西部林业科学, 2012(4): 88-92.]
- [31] Amaral Cibele H, Roberts Dar A, Almeida Teodoro I R, *et al.* Mapping Invasive Species and Spectral Mixture Relationships with Neotropical Woody Formations in Southeastern Brazil [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 108: 80-93. doi: 10.1016/j.isprsjprs. 2015. 06.009.
- [32] Liu Jian, Yu KunYong, Xu ZhangHua, *et al.* Study on Texture Characteristics Construction for Bamboo Resources Thematic Information Extraction [J]. Remote Sensing Information, 2010(6): 87-94.[刘健, 余坤勇, 许章华, 等. 竹资源专题信息提取纹理特征量构建研究[J]. 遥感信息, 2010(6): 87-94.]
- [33] Mao-Ning T, Andres V, Scott B, *et al.* Mapping Understory Vegetation Using Phenological Characteristics Derived from Remotely Sensed Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8): 1833-1844. doi:10.1016/j.rse.2010.03.008.
- [34] De Wulf Robert R, Goossens Roland E, MacKinnon John R, *et al.* Remote Sensing for Wildlife Management: Giant Panda Habitat Mapping from Landsat MSS images[J]. Geocarto International, 1988, 3 (1) : 41-50. doi: 10.1080/10106048809354132.
- [35] Ren Guoye. Remote Sensing Survey of Giant Panda Edible Bamboo Resources [J]. Remote Sensing Information, 1989 (2): 34-35.[任国业. 大熊猫主食竹资源的遥感调查[J]. 遥感信息, 1989(2): 34-35.]
- [36] Nair P V, Menon A R R. Estimation of Bamboo Resources in Kerala by Remote Sensing Techniques [J]. Current Science, 1998, 75(3): 209-210.
- [37] Li Yangguang, Du Huaqiang, Mao Fangjie, *et al.* Information Extracting and Spatiotemporal Evolution of Bamboo Forest based on Landsat Time Series Data in Zhejiang Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3): 88-96.[李阳光, 杜华强, 毛方杰, 等. 基于时序 Landsat 数据的浙江省竹林信息提取及时空演变[J]. 林业科学, 2019, 55(3): 88-96.]
- [38] Cao L, Coops N C, Sun Y, *et al.* Estimating Canopy Structure and Biomass in Bamboo Forests Using Airborne LiDAR Data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 148: 114-129. doi: 10.1016/j.isprsjprs. 2018.12.006.
- [39] Xia Mingpeng. Study and Application of TLS Technology in Investigation of Bamboo forest-A Case Study on the Competition of Bamboo and Broadleaf Mixed Forest[D]. Beijing: Chinese academy of forestry, 2017.[夏明鹏. TLS技术在竹林调查中的研究与应用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.]
- [40] Zhao Y Y, Feng D L, Jayaraman D, *et al.* Bamboo Mapping of Ethiopia, Kenya and Uganda for the Year 2016 Using Multi-temporal Landsat Imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 116-125. doi:10.1016/j.jag.2017.11.008.
- [41] Yu Kunyong, Liu Jian, Xu Zhanghua, *et al.* Study on Bamboo Resources Thematic Information Extraction in the South of China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 449-455.[余坤勇, 刘健, 许章华, 等. 南方地区竹资源专题信息提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 449-455.]
- [42] Ghosh A, Joshi P K. A Comparison of Selected Classification Algorithms for Mapping Bamboo Patches in Lower Gangetic Plains Using very High Resolution WorldView 2 imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 298-311. doi: 10.1016/j.jag. 2013. 08.011.



- [43] Linderman M, Bearer S, An L, *et al.* The Effects of Understorey Bamboo on Broad-scale Estimates of Giant Panda Habitat[J]. *Biological Conservation*, 2005, 121(3): 383-390. doi: 10.1016/j.biocon.2004.05.011.
- [44] Linderman M, Liu J, Qi J, *et al.* Using Artificial Neural Networks to Map the Spatial Distribution of Understorey Bamboo from Remote Sensing Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(9): 1685-1700. doi: 10.1080/01431160310001598971.
- [45] Shi Y J, Xu X J, Du H Q, *et al.* Remote Sensing Monitoring of a Bamboo Forest based on BP Neural Network[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, 4(3): 363-367. doi: 10.1007/s11461-009-0054-y.
- [46] Wang T J, Skidmore A K, Toxopeus A G. Improved Understorey Bamboo Cover Mapping Using a Novel Hybrid Neural Network and Expert System[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(4): 965-981. doi: 10.1080/01431160802411867.
- [47] Gao Yuan, Liu Jian, Yu Kunyong, *et al.* Thematic Information Extraction of Bamboo Resources based on HJ-1 Remote Sensing Image and Terrain Factors[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(6): 52-57. [高远, 刘健, 余坤勇, 等. 基于HJ-1影像与地形因子的竹资源专题信息提取研究[J]. *遥感信息*, 2014, 29(6): 52-57.]
- [48] Wang T J, Skidmore Andrew K, Zeng Z G, *et al.* Migration Patterns of Two Endangered Sympatric Species from a Remote Sensing Perspective[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(12): 1343-1352. doi: 10.14358/pers.76.12.1343.
- [49] Li Dan, Pang Yong, Yue Cairong. A Review of TLS Application in Forest Parameters Retrieving[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(6): 34-39. [李丹, 庞勇, 岳彩荣. 地基激光雷达在森林参数反演中的应用[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(6): 34-39.]
- [50] Ville K, Jari V, Markus H, *et al.* Sparse Density, Leaf-Off Airborne Laser Scanning Data in Aboveground Biomass Component Prediction[J]. *Forests*, 2015, 6(6): 1839-1857. doi: 10.3390/f6061839.
- [51] Yan Y J, Xia M P, Fan S H, *et al.* Detecting the Competition between Moso Bamboos and Broad-leaved Trees in Mixed Forests Using a Terrestrial Laser Scanner[J]. *Forests*, 2018, 9(9): 520. doi: 10.3390/f9090520.
- [52] Liu G, Li L, Gong H, *et al.* Multisource Remote Sensing Imagery Fusion Scheme based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD) and Its Application to the Extraction of Bamboo Forest[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 16. doi: 10.3390/rs9010019.
- [53] Liu C, Xiong T W, Gong P, *et al.* Improving Large-scale Moso Bamboo Mapping based on Dense Landsat Time Series and Auxiliary Data: A Case Study in Fujian Province, China[J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(1): 1-10. doi: 10.1080/2150704x.2017.1378454.
- [54] Shipra S, Sharma D P. Land Use Change Detection in Solan Forest Division, Himachal Pradesh, India[J]. *Forest Ecosystems*, 2015, 2(1): 26. doi: 10.1186/s40663-015-0050-7.
- [55] Fan Shaohui, Guan Fengying, Su Wenhui, *et al.* Monitoring of Bamboo Resources based Remote Sensing Technology[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(5): 169-173. [范少辉, 官凤英, 苏文会, 等. 基于遥感技术的竹资源变化监测研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(5): 169-173.]
- [56] Deng Wanghua. Study on Spectral Characteristics and Remote Sensing Information Extraction Methods of Bamboo Forest: A Case Study of Shunchang County in Fujian Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009. [邓旺华. 竹林地面光谱特征及遥感信息提取方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.]
- [57] Kalloli D, Sudhakar R C. Geospatial Analysis of Reed Bamboo (*Ochlandra travancorica*) Invasion in Western Ghats, India[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 44(5): 699-711. doi: 10.1007/s12524-015-0534-5.
- [58] Wang T J, Skidmore A K, Toxopeus A G, *et al.* Understorey Bamboo Discrimination Using a Winter Image[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(1): 37-47. doi: 10.14358/pers.75.1.37.
- [59] Guan Fengying, Fan Shaohui, Cai Huali, *et al.* Study Oil the Extraction Methods of Remote Sensing Information of Bamboo Forest[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(8): 4333-4335, 4339. [官凤英, 范少辉, 蔡华利, 等. 竹林遥感信息提取方法比较研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(8): 4333-4335, 4339.]
- [60] Goswami J, Tajo L, Sarma K K. Bamboo Resources Mapping Using Satellite Technology[J]. *Current Science*, 2010, 99(5): 650-653.
- [61] Li X J, Du H Q, Mao F J, *et al.* Estimating Bamboo Forest Aboveground Biomass Using EnKF-assimilated MODIS LAI Spatiotemporal Data and Machine Learning Algorithms[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256: 445-457. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.04.002.
- [62] Mao F J, Du H Q, Zhou G M, *et al.* Coupled LAI Assimilation and BEPS Model for Analyzing the Spatiotemporal Pattern and Heterogeneity of Carbon Fluxes of the Bamboo Forest in Zhejiang Province, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 242: 96-108. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.03.022.
- [63] Xu X J, Zhou G M, Liu S G, *et al.* Implications of Ice Storm Damages on the Water and Carbon Cycle of Bamboo Forests in Southeastern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 35-45. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.04.005.
- [64] Du H Q, Fan W L, Zhou G M, *et al.* Retrieval of Canopy Closure and LAI of Moso Bamboo Forest Using Spectral Mixture Analysis based on Real Scenario Simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4328-4340. doi: 10.1109/tgrs.2011.2107327.
- [65] Zhang Z M, He G J, Wang X Q, *et al.* Leaf Area Index Esti-

- mation of Bamboo Forest in Fujian Province based on IRS P6 LISS 3 Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32 (19) : 5365-5379. doi: 10.1080/01431161.2010.498454.
- [66] Chen Y Y, Li L W, Lu D S, *et al.* Exploring Bamboo Forest Aboveground Biomass Estimation Using Sentinel-2 Data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1):1-22.doi:10.3390/rs11010007.
- [67] Li G C, Song H D, Altigani L A A, *et al.* Changes of Foraging Patch Selection and Utilization by a Giant Panda after Bamboo Flowering[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(19): 16418-16428. doi:10.1007/s11356-017-9164-5.

## Overview of Remote Sensing Monitoring of Bamboo Resources

Yan Xinrong, Guan Fengying

(*International Center of Bamboo and Rattan, Key Lab of Bamboo and Rattan Science and Technology, Beijing 100020, China*)

**Abstract:** Bamboo resources are widely distributed in tropical, subtropical and temperate regions. They are good substitutes for many non-renewable resources. Their rapid growth and wide distribution play an important role in mitigating climate change and developing countries to lift poverty and reduce poverty. Remote sensing technology is widely used in resource monitoring and quantitative mapping of forest structures, and has the advantages of wide monitoring range and high precision in space and time. This paper systematically sorts out the application of remote sensing data sources in bamboo resource monitoring, the temporal and spatial dynamic change monitoring of bamboo resources and the bamboo resource monitoring and classification method. Focus on the data sources and classification methods of monitoring and mapping, and statistical analysis of the accuracy of various methods. It is proposed that the remote sensing monitoring of bamboo resources should pay attention to use the multi-source data and classification methods, strengthen the special growth stages of bamboo species and bamboo, and monitor the quantity and quality of bamboo as the future research focus, in order to protect the endangered wild animals, poverty alleviation in poverty-stricken areas, and bamboo industry. Provide technical support for development and utilization, improvement of people's livelihood in developing countries.

**Key words:** Bamboo resources; Remote sensing; Research progress