DOI:10.19789/j.1004-9398.2023.02.010
文献引用:林爱轩,胡德勇.基于Sentinel-2A影像的森林蓄积量估测[J].首都师范大学学报(自然科学版),2023,44(2):60-65. LIN A X,HU D Y. Estimation of forest growing stock volume based on Sentinel-2A images[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2023,44(2):60-65.

基于Sentinel-2A影像的森林蓄积量估测*

林爱轩,胡德勇**

(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘要:森林蓄积量主要用于评价森林中全部活立木的材积总量,动态反馈森林资源变化情况,是森林资源监测的重要指标之一。为探究Sentinel-2A影像及其红边波段对森林蓄积量的估测性能,本文以黑龙江省海林市长汀林区为研究区域,基于Sentinel-2A卫星遥感影像,结合数字高程模型(DEM)数据和研究区样地调查等辅助数据,提取影像光谱信息、植被指数、地形因子,并和样地因子作为模型自变量,应用面积蓄积量作为模型因变量,建立该研究区森林蓄积量估测模型。所构建估测模型经分析评价,其精度可达到86.71%,说明Sentinel-2A影像及其红边波段数据和其他辅助数据结合,综合应用于森林蓄积量估测可达到较好估测精度。本文提出的以Sentinel-2A数据为基础的估测方案可拓展到更大区域,提升蓄积量估测的时效性,为区域森林蓄积量估测提供重要支持。

关键词:森林蓄积量;红边波段;Sentinel-2A影像
中图分类号:TP79 **文献标识码**:A

Estimation of forest growing stock volume based on Sentinel-2A images*

LIN Aixuan, HU Deyong**

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract: Forest growing stock volume is mainly used to evaluate the total volume of all living trees in the forest, and it is one of the important indicators for forest resource monitoring to dynamically feedback the change of forest resources. In order to explore the estimation performance of sentinel-2A image and its red-edge band on forest growing stock volume, this study takes Changting Forest region in Hailin City, Heilongjiang Province as the research area. Based on Sentinel-2A remote sensing images, combined with digital elevation model(DEM) data and other auxiliary data of plot survey in the study area, the spectral information of image, vegetation index and topographic factors were extracted. The forest growing stock volume estimation model of the study area is established by using the sample plot investigation factor as the model independent variable and the area volume as the model dependent variable. The model performance evaluation shows that the accuracy of the proposed model can reach 86.71%. The results show that the Sentinel-2A images and its red-edge band data combined with other auxiliary data can achieve a better estimation accuracy. The proposed estimation scheme based on

收稿日期:2021-12-08
* 国家自然科学基金项目(41671339)
** 通信作者:deyonghu@cnu.edu.cn

Sentinel-2A data can be extended to a larger area, improve the timeliness of growing stock volume estimation, and provide important support for regional forest growing stock volume estimation.

Keywords: forest growing stock volume; red-edge band; Sentinel-2A image

CLC: TP79 **DC**: A

0 引 言

森林覆盖地球上30.00%的陆地面积,是地球陆地生态系统主体,也是地球生物圈中不可或缺的一环,对全球碳循环起着重要作用。森林蓄积量可以动态反映林木资源丰富水平和森林生态环境的优劣,是衡量和评估森林经营状况、生产能力和森林资源质量的重要指标之一。传统的森林蓄积量估测方法会出现周期长、效率低、精度差以及经济成本高等问题。随着遥感技术和数学模型相结合的估测技术引入,森林蓄积量的估测精度和效率得到了极大的提高。

传统的森林活立木蓄积量调查方法主要有样地调查法、角规测树法和全林每木检尺法等[1-2],样地法经反复实践验证,其结果存在偏高现象,并且部分区域受环境条件限制进入困难,估测效率低,很难从宏观上掌握森林资源生长和分布规律,获取区域或更大尺度上的数据[3]。近年来国内外学者基于多源遥感数据结合不同估算模型[4-9],对森林蓄积量估测方法进行改革和创新,有研究尝试采用不同遥感数据对森林蓄积量估算,还有研究在现有模型上进行改进优化。

目前大多数学者应用高分系列、Landsat TM系列、先进陆地观测卫星(advanced land observation satellite, ALOS)等遥感数据对森林蓄积量进行估测[10-12],而应用Sentinel-2A遥感数据的研究相对较少,特别是在北方针叶林为主要优势树种的林区,Sentinel-2A卫星遥感影像包含3个红边波段,对绿色植被较为敏感,在植被和农作物监测等方面具有较好的应用潜力[13-15],因此研究基于Sentinel-2A影像和其红边波段,辅以数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,结合研究区域样地调查数据,对黑龙江省牡丹江市海林市长汀林区森林蓄积量估测进行研究,探究Sentinel-2A影像及其红边波段在北方森林蓄积量估测中的应用效果。

1 数据采集

1.1 遥感数据和地形数据

研究选用欧洲航天局(简称欧空局)Sentinel-2A影像数据。Sentinel-2号为高分辨率多光谱卫星,共2颗,分为2A和2B,携带多光谱成像仪,主要用于地表环境监测,为植被生长状态、土壤覆盖、沿海区域变化等研究提供数据信息。Sentinel-2号2颗卫星同时运行,与Landsat等卫星数据相比,空间分辨率高、波段较多、重返周期短[16],可帮助使用者短时间内实现大面积监测,其最高分辨率为10 m,能够满足大多数应用领域对精度的要求。

Sentinel-2A号卫星各波段对地面环境监测具有不同意义,波段2、3和4为可见光波段,波段5、6和7为红边波段。红边波段是指电磁波谱中对绿色植物较为敏感的波段,绿色植物在670~760 nm红边波段反射率较高,可以更为直观地反映绿色植被生长状况,这是选用Sentinel-2A卫星遥感数据探究森林蓄积量估测方法的重要原因。

本研究数据下载自欧空局哥白尼数据中心(https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home),成像时间为2017年9月23日,接近样地调查数据时间,帮助提高估测的准确性。数据产品是经过几何精校正和正射校正的L1C级数据,影像质量好,可完整覆盖研究区域,且无云遮盖。研究区域长汀林区的Sentinel-2A影像,见图1(a)。

地形数据选取分辨率为30 m的航天飞机雷达地形测绘任务(the shuttle radar topography mission, SRTM)DEM数据,数据下载自美国地质调查局官网(https://lpdaac.usgs.gov/),SRTM DEM数据为美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘所得。应用地形数据能够间接反映森林生态情况,对区域气候、热量变化、水分循环等具有一定影响。本研究主要利用DEM数据提取海拔、坡度和坡向等因子,为森林蓄积量模型构建提供自变量,DEM数据见图1(b)。

1.2 样地调查数据

除DEM数据和Sentinel-2A影像外,地面数据采用研究区域样地调查数据,数据主要包含小班面积、平均胸径、平均年龄和郁闭度等信息,对建立森林蓄积量估测模型具有重要意义。选取的遥感影像和林区样地调查数据时间为同一年,时间相差不超过几个月,因此森林蓄积量变化可基本忽略不计。

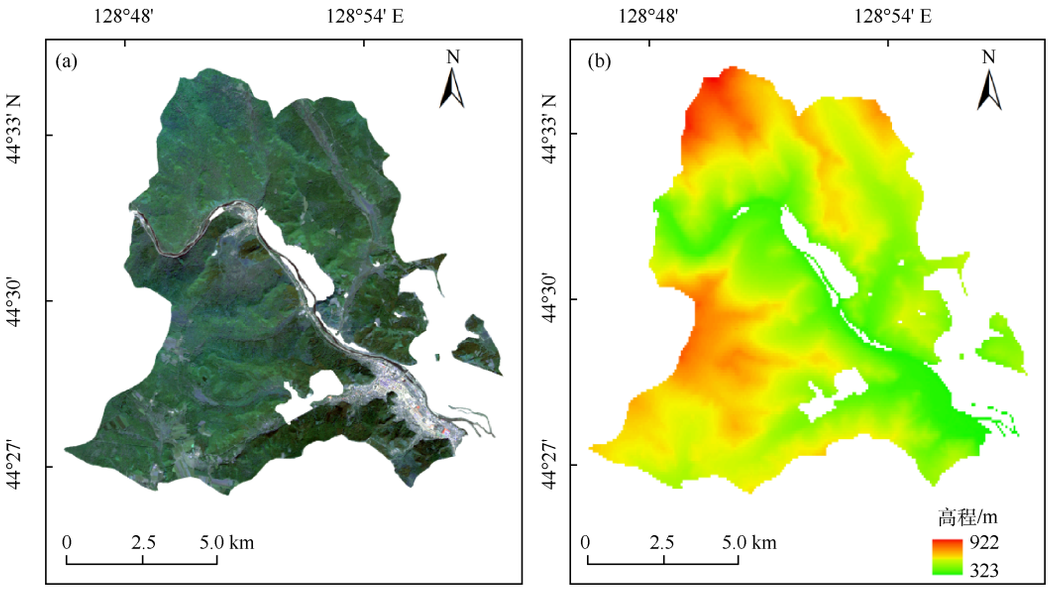


图1　研究区域概况

(a)Sentinel-2A数据;(b)数字高程模型(DEM)数据

2　研究方法

2.1　数据处理

本研究通过对Sentinel-2A影像和DEM数据预处理,提取归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)、比值植被指数(ratio vegetation index,RVI)、坡度、坡向等遥感和地形因子,结合研究区域样地调查数据中筛选出的对森林蓄积量影响较大的因子作为变量,分析其与面积(单位公顷)蓄积量的关系,应用多元线性回归法,建立研究区域森林蓄积量遥感估测模型,对研究区域内的森林蓄积量进行估算,具体数据处理步骤见图2。

2.1.1　提取遥感参量

遥感影像在成像过程中,受地表、大气、太阳高度角和传感器姿态等影响,导致遥感影像发生变形,影响数据质量。因此需要对影像进行预处理,消除地形、大气散射和吸收、地面辐射等影响,提高影像清晰度。

(1)辐射校正。地物电磁波在传播过程中会受到大气散射的影响,导致传感器接收的电磁辐射能量不能正确地反映地物特征。而对影像进行辐射定标处理的目的在于消除这些误差所产生的影响,提高影像清晰度,增强影像信息。数据的辐射亮度值(L_λ)与大气表观反射率(ρ_λ)之间具有数学关系,计算公式为:

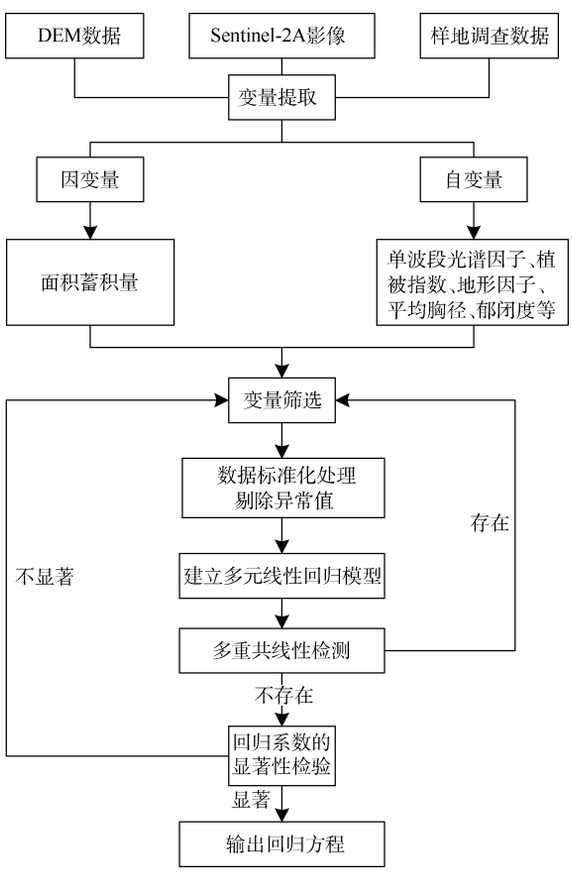


图2　技术路线

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{a_{\mathrm{ESUN}} \sin\theta}, \tag{1}$$

$$L_\lambda = \frac{\rho_\lambda \cdot a_{\mathrm{ESUN}} \sin\theta}{\pi d^2}, \tag{2}$$

式中:ρ_λ为大气表观反射率;L_λ为辐射亮度值;d为日地距离;a_{ESUN}为太阳辐照度;θ为太阳高度角。

(2)大气校正。遥感数据为Sentinel-2A的L1C级数据,未经过大气下垫面校正。应用欧空局开发的Sen2Cor插件对Sentinel-2A影像进行大气校正,基于影像的半经验大气校正方法,经Sen2Cor处理后的L1C级数据升级为L2A级数据。L2A数据输出的是大气校正后的正反射地表反射率产品,剔除了B10卷云波段。

(3)单波段因子提取。对经过预处理后的遥感影像进行单波段反射率因子提取,由于植物的光谱特性,其在不同波段的反射率和吸收率不同,在不同波段影像上的灰度值不同,反馈信息也不同。本文应用Sentinel-2A影像及其红边波段探究森林蓄积量估测模型,因此从影像中提取与研究区域植被生长密切相关的数据,用于森林蓄积量估测模型建立。根据经验[17]以林区小班为单位提取波段2~7、11~12作为单波段因子,其中5、6、7波段为红边范围波段,探究其与森林蓄积量关系。

(4)植被指数因子提取。植被指数为影像波段的加减乘除或线性、非线性组合运算结果,能在一定程度上减少地形起伏变化、土壤背景、气溶胶散射等因素干扰,增强影像中植被信息,充分利用光谱信息反映区域内植被覆盖度和生长状况。本文主要提取了NDVI、归一化红边植被指数(normalized difference vegetation index red edge, NDVIre)、差值植被指数(difference vegetation index, DVI)和RVI共4种植被指数。

NDVI能反映植物冠层的背景影响,对绿色植物敏感,常用来监测植被覆盖度和绿色植被生长状态,计算公式为

$$I_{NDV} = (I_{NIR} - I_R)/(I_{NIR} + I_R), \quad (3)$$

式中:I_{NIR}为近红外波段反射率;I_R为红外波段反射率。

红边波段对植被变化更加敏感,能够感知植被的微小变化,因此在NDVI归一化植被指数上作了改进,将红光波段替换为Sentinel-2A的红边波段b5[18],计算NDVIre归一化红边植被指数,计算公式为

$$I_{NDVre} = (I_{NIR} - B_5)/(I_{NIR} + B_5), \quad (4)$$

式中B_5为Sentinel-2A的红边波段反射率。

DVI对地表土壤背景变化敏感,可以一定程度上反映植被覆盖度变化,计算公式为

$$I_{DV} = (I_{NIR} - I_R)。 \quad (5)$$

RVI为近红外和红外波段之比,RVI与叶绿素含量相关性较高,对植被生物量估算具有重要意义,并且RVI对植被十分敏感,常用于反映植被覆盖程度,计算公式为

$$I_{RV} = (I_{NIR}/I_R)。 \quad (6)$$

2.1.2 提取地形因子

对获取的30 m分辨率的DEM数据影像进行拼接、裁剪,提取地形变量因子坡度和坡向。森林地的地形影响林地立木生长所需的水热和土壤条件,因此海拔、坡度、坡向等地形因子对森林蓄积量有着间接影响,为此选取坡度、坡向2个地形因子,探究其与森林蓄积量相关性,判断是否能作为自变量代入回归估测模型中。

2.1.3 提取样地因子

以森林小班级尺度为单位,根据先验知识在样地调查数据中筛选出平均胸径、平均年龄、郁闭度等和林地树木生长状况相关并对森林蓄积量有影响的因子作为变量,进一步探索其与森林蓄积量之间的相关性,将其作为自变量建立森林蓄积量估测模型,提高模型稳定性和估测精度。

2.2 研究方法

面积蓄积量与各变量因子间的相关性(表1),根据其筛选用于建立估测模型的变量。选取具有显著相关的NDVI、NDVIre、RVI、平均胸径、平均年龄、郁闭度和部分波段代入模型中进行回归,其中红边波段构建的植被指数值NDVIre与单位公顷蓄积量之间相关性显著,对模型构建具有重要意义。

森林蓄积量估测模型基于多元线性回归方法,随机抽取80%样本数据用于建立模型,将小班面积蓄积量作为因变量,以小班为单位的光谱、植被指数、地形和样地调查数据因子作为自变量,建立森林蓄积量估测模型,即假定面积蓄积量与光谱、植被指数等因子存在线性相关,设面积蓄积量为V,总共有n个自变量对面积蓄积量有影响,即$x_1, x_2, \cdots, x_n$,

$$V = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (7)$$

式中:ε随机变量;$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_n$为回归方程系数;$x_1, x_2, \cdots, x_n$为植被指数、影像波段等对面积蓄积量产生影响的变量。

为了评价模型对森林蓄积量的估测能力,选择模型精度、平均绝对误差和均方根误差作为评价指标,计算公式为:

表1　面积蓄积量与各变量因子间相关性

序号	指数名称	相关系数
1	坡度	−0.025
2	坡向	−0.017
3	NDVI	0.236[a]
4	NDVIre	0.270[a]
5	RVI	0.227[a]
6	DVI	0.027
7	波段2	−0.218[a]
8	波段3	−0.201[a]
9	波段4	−0.298[a]
10	波段5	0.048
11	波段6	0.003
12	波段7	0.009
13	波段11	−0.296[a]
14	波段12	−0.286[a]
15	平均胸径	0.538[a]
16	平均年龄	0.326[a]
17	郁闭度	0.269[a]

注:[a]在0.01级别(双尾),相关性显著;NDVI为归一化差值植被指数;NVVIre为归一化红边植被指数;RVI为比值植被指数;DVI为差值植被指数。

$$A=\left(1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|m_i-y_i\right|}{t_i}\right)\times 100\%, \tag{8}$$

$$E_{\mathrm{MA}}=\frac{1}{n}\left|\sum_{i=1}^{n}(m_i-y_i)\right|, \tag{9}$$

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(m_i-y_i\right)^2}, \tag{10}$$

式中:A代表模型精度;E_{MA}平均绝对误差;E_{RMS}为均方根误差;m_i为第i个样地的实测值;y_i为第i个样地的估测值。

3　结果分析

3.1　森林蓄积量估测模型

在初步多元线性回归模型建立结果中,部分因子如NDVI、RVI、波段2等对其他自变量产生较大影响,出现共线性,影响模型稳定性,需剔除这些变量因子。经过多次实验保留了平均胸径、平均年龄、郁闭度、NDVIre、波段3和波段11共计6个自变量因子和因变量进行多元线性回归建模,模型拟合度较好且模型各变量显著,建模估测方程为

$$Y=-65.22+0.153X_1+6.681X_2+109.778X_3+17.353X_4+0.04X_5-0.023X_6,$$

式中:因变量Y为面积蓄积量,自变量X_1~X_6分别为平均年龄、平均胸径、郁闭度、NDVIre、X_5波段3、波段11。

3.2　估测结果精度评价

将之前保留的20.00%数据样本代入估测模型进行模型检验和精度验证,森林蓄积量估测模型精度验证数据见表2,通过计算,回归模型估测精度为86.71%,平均绝对误差为13.309,均方根误差为16.740。模型拟合效果见图3,实测值和估测值之间相关系数为0.64(>0.50),模型回归效果较好。

表2　森林蓄积量估测模型精度验证

编号	实测值/($m^3\cdot hm^{-2}$)	估测值/($m^3\cdot hm^{-2}$)	绝对误差/m^3	相对误差/%
1	57.218	67.835	10.617	18.56
2	88.389	102.859	14.470	16.37
3	123.450	122.113	1.337	1.08
4	118.410	129.362	10.952	9.25
5	101.724	105.118	3.394	3.34
6	98.834	112.884	14.050	14.22
7	78.604	101.736	23.132	29.43
8	108.222	140.503	32.281	29.83
9	88.990	106.326	17.336	19.48
10	106.914	124.038	17.124	16.02
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
75	131.202	124.114	7.088	5.40
76	83.806	98.096	14.290	17.05
77	153.720	139.610	14.110	9.18

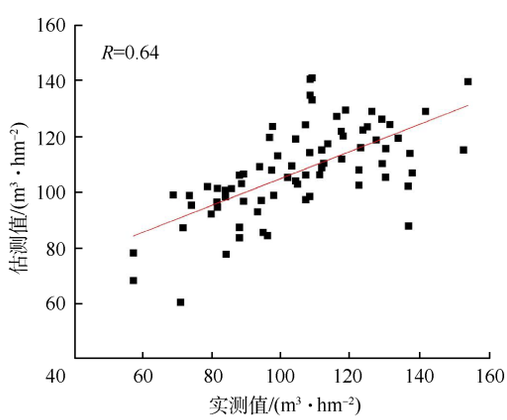


图3　多元线性回归模型精度验证拟合

4　结　论

本文研究在建立森林蓄积量多元线性回归模型过程中出现多重共线性问题,为解决此问题对自变量因子再次进行筛选,经过多次实验,最终保留

平均胸径、平均年龄、郁闭度、NDVIre、波段3、波段11共6个因子作为自变量建立估测模型。森林蓄积量估测模型精度为86.71%,平均绝对误差为13.31,均方根误差为16.74,满足相关技术规定中的误差要求。通过对模型精度检验,证明了Sentinel-2A卫星遥感影像及其红边波段对于森林蓄积量模型构建具有重要意义。

Sentinel-2A卫星遥感影像红边波段对森林植被等监测具有重要作用,研究表明将其应用于区域森林蓄积量估测,开展数据应用的精度、时效性等方面分析,对于区域或大尺度森林资源连续清查等工作具有重要应用价值。本研究应用多元线性回归方法基于Sentinel-2A影像红边波段构建的植被指数对北方以针叶林为主要优势树种的林区森林蓄积量估测进行探究,证实估测方法可进一步优化并推广,应用到相邻林分区域,提升区域蓄积量估测的时效性和准确性,为大范围区域森林蓄积量估测提供重要支持。

参 考 文 献

[1] 杨燕琼,吴奕敏,黄平,等.基于RS、GIS的林分蓄积量估测[J].华南农业大学学报,2003(3):73-77.

[2] 潘正荣.几种常用森林蓄积量调查方法对比分析[J].林业调查规划,2010,35(2):9-10.

[3] COSMO L D, GASPARINI P, TABACCHI G. A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume[J]. Forest Ecology and Management,2016,361:269-276.

[4] 杨铭,王月婷,张晓丽.基于双源遥感数据的杉木林分蓄积量估测模型研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):107-114.

[5] THIEL C, SCHMULLIUS C. The potential of ALOS PALSAR backscatter and InSAR coherence for forest growing stock volume estimation in Central Siberia[J]. Remote Sensing of Environment,2016,173:258-273.

[6] MURA M, BOTTALICO F, GIANNETTI F, et al. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 66: 126-134.

[7] 蒋馥根,孙华,ZHAO F,等.基于方差优化k最近邻法的森林蓄积量估测[J].森林与环境学报,2019,39(5):497-504.

[8] 宋亚斌,邢元军,江腾宇,等.基于距离相关系数和KNN回归模型的森林蓄积量估测研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(4):22-27+33.

[9] 周如意.基于Landsat-8遥感影像的森林蓄积量估测[D].杭州:浙江农林大学,2019.

[10] 房秀凤,谭炳香,刘清旺,等.基于纹理信息的森林蓄积量估计[J].东北林业大学学报,2017,45(11):21-25.

[11] 杨明星,徐天蜀,牛晓花,等.基于Sentinel-1A雷达影像的思茅松林蓄积量估测[J].西部林业科学,2019,48(2):52-58.

[12] LI X, LONG J, ZHANG M, et al. Coniferous plantations growing stock volume estimation using advanced remote sensing algorithms and various fused data[J]. Remote Sensing,2021,13(17):3468.

[13] 韩涛,潘剑君,张培育,等. Sentinel-2A与Landsat-8影像在油菜识别中的差异性研究[J].遥感技术与应用,2018,33(5):890-899.

[14] 濮毅涵,张栋,徐丹丹,等. Sentinel-2A红边波段对湖滨带植被分类能力的评估[J].林业资源管理,2021(2):131-139.

[15] IMMITZER M, VUOLO F, ATZBERGER C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe[J]. Remote Sensing, 2016,8(3):166.

[16] 曹霖,彭道黎,王雪军,等.应用Sentinel-2A卫星光谱与纹理信息的森林蓄积量估算[J].东北林业大学学报,2018,46(9):54-58.

[17] 曹霖.基于Sentinel-2影像的延庆区森林蓄积量遥感估测研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[18] 苏伟,赵晓凤,孙中平,等.基于Sentinel-2A影像的玉米冠层叶绿素含量估算[J].光谱学与光谱分析,2019,39(5):1535-1542.

(责任编辑:李拓宇)