

文章编号:1001—7380(2022)01—0028—06

## 基于多光谱数据初探野生长叶榧 分布光谱特征

林春穆

(邵武将石省级自然保护区,福建 邵武 354011)

**摘要:**福建省邵武将石省级自然保护区为野生长叶榧的重要分布区域,对其在该区域内的分布特征及生存条件调查是长叶榧保护工作的重要依据。多光谱识别特征的构建是进行大范围调查的主要手段。该研究将无人机遥感和卫星遥感相结合,利用多光谱数据,对野生长叶榧的特异光谱特征进行分析。根据差异显著的植被指数,开发了用于区分长叶榧及其他伴生树种的新植被指数,即  $Y = 1.292\ 369 + 0.011\ 708\ 36X_3 + 84\ 849.3X_4 - 495\ 776.2X_8 - 44\ 008.38X_{10} + 35\ 988.67X_{12} + 16.241\ 29X_{14} - 0.201\ 897\ 2X_{16}$  ( $X_3$  为比值植被指数,  $X_4$  为土壤调节植被指数,  $X_8$  为标准差异植被指数,  $X_{10}$  为修正非线性指数,  $X_{12}$  为近红外百分比植被指数,  $X_{14}$  为绿色归一化植被指数,  $X_{16}$  为绿差植被指数)。基于  $Y$  (新植被指数),对多光谱遥感影像进行均一化,人工判别野生长叶榧的分布特征,同时随机挑选了 50 个目标野生长叶榧群落,通过野外探查校正结果,准确率达 92%。发现该自然保护区中共存在 6 个主要分布群落,均生长在研究区域内山势陡峭、峡谷深邃或多基岩裸露的陡峭坡,或山地沟谷 2 侧,陡坡密林中,悬崖上或溪流两旁的常绿阔叶林或次生灌木丛中,且多生长在海拔 250—500 m 地带,平均  $Y$  在 100 000—200 000 范围内。

**关键词:**长叶榧;遥感;无人机;多光谱特征;分布;调查

中图分类号:S712;S718.54;S757.2;S791.53

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2022.01.005

## Identification of distribution of wild *Torreya jackii* Chun in Jiangshi Nature Reserve based on spectral characteristics

Lin Chunmu

(Shaowu Jiangshi Provincial Nature Reserve, Shaowu 354011, China)

**Abstract:** Shaowu Jiangshi Provincial Nature Reserve, Fujian Province, is an important distribution area for *Torreya jackii* Chun. The investigation of distribution characteristics and living condition of wild *T. jackii* in this region provides a significant basis for conservation. The construction of multispectral identification features is the main means of a large scale investigation. In this article, the specific spectral characteristics were analyzed by using multi-spectral data combined with UAV (unmanned aerial vehicle) remote sensing and satellite remote sensing. Considering significant differences among vegetation indices, a new vegetation index,  $Y$  was developed to distinguish *T. jackii* and other associated tree species, equal to  $1.292\ 369 + 0.011\ 708\ 36X_3 + 84\ 849.3X_4 - 495\ 776.2X_8 - 44\ 008.38X_{10} + 35\ 988.67X_{12} + 16.241\ 29X_{14} - 0.201\ 897\ 2X_{16}$ , among which, Simple Vegetation Ratio presented as  $X_3$ , Soil Adjusted Vegetation Index as  $X_4$ , Normalized Difference Vegetation Index as  $X_8$ , Modified Non-Linear Index as  $X_{10}$ , Infrared Percentage Vegetation Index as  $X_{12}$ , Green Normalized Difference Vegetation Index as  $X_{14}$ , and Green Difference Vegetation Index as  $X_{16}$ . Based on  $Y$ , the multi-spectral remote sensing images of the Nature Reserve were homogenized, and artificial methods were used to distinguish the distribution characteristics of wild *T. jackii*. Meanwhile, fifty target wild *T. jackii* communities were randomly selected, with an accuracy of 92%, through field exploration. At a result, 6 main distribution communities were found in the Nature Reserve, within steep hills, either on steep slopes covered with an evergreen broad-leaved forest, secondary shrub, or on sides of deep gullies exposed

收稿日期:2021-11-29;修回日期:2021-12-20

基金项目:福建省林业科技项目"天然长叶榧种群现状与保护对策的研究"(闽林科便函[2019]16号)

作者简介:林春穆(1983—),男,福建三明人,高级工程师,硕士。主要从事自然保护区管理及野生动植物保护工作。E-mail:luomu168@

to bedrock, or in dense forests with steep slopes, on cliffs and along streams. Wild *T. jackii* community distributes between 250—500 m above sea level. The average *Y* ranged from 100 000 to 200 000.

**Key words:** *Torreya jackii*; Remote sensing; Unmanned aerial vehicle (UAV); Multispectral characteristic; Distribution; Investigation

长叶榧(*Torreya jackii* Chun),别名浙榧、加氏榧,又被称为山榧、臭榧、白榧、青榧等,隶属于红豆杉科(Taxaceae)的榧树属。长叶榧是榧树属中最原始也是我国特有的珍稀濒危树种<sup>[1]</sup>。同时,野生长叶榧还具有极高的生态价值和经济价值。因其自身特征是建筑、船只、家具等行业的重要材料;有研究表明在其所有营养器官中均发现了黄酮类化合物<sup>[2]</sup>,含量和种类均以1年生叶最高,所以叶片是其次生代谢产物的主要产生器官<sup>[3]</sup>;其种子也具有一定的药用价值<sup>[4]</sup>,若长期食用,可润肺、通便、驱虫等。然而,由于近年来自然环境的不断恶化以及人类活动的持续影响,野生长叶榧正常生长被严重威胁。因此,在保护长叶榧基因资源的同时也需要通过人工驯化的方式充分开发长叶榧的经济和生态价值。

长叶榧保护与驯化工作的开展需要对其野生群落分布与生长习性等有充分的了解。福建省邵武将石省级自然保护区为野生长叶榧的重要分布区域,属森林生态系统类型自然保护区。目前,我国对长叶榧的研究,主要在生物学特性、种群分布、群落特征、生长环境调查、次生代谢产物的药理作用和遗传多样性等方面<sup>[3-7]</sup>。其中,针对野生长叶榧群落分布的调查依然停留在特定区域<sup>[5]</sup>,对该区域以外的地域而言,结果的参考价值并不高,这也限制了大范围开展长叶榧的保护与驯化工作。如何在大尺度上高效地完成对野生长叶榧分布的调查,也就成为了长叶榧保护与驯化工作的关键。

遥感技术是指从远距离感知目标反射或自身辐射的电磁波、可见光、红外线,对目标进行探测和识别的技术<sup>[8]</sup>,具有众多优点。多光谱特征能够解决目前困扰的大范围识别问题,且效果有保证。通过无人机,运用多光谱技术进行目标树木的大规模识别,可缓解人力财力的负担,克服大面积识别的困难,这也是本次调查研究的创新性。目前也已经各类试验将无人机遥感技术运用到生产研究中<sup>[8-16]</sup>,并得到了可观的成果,为本次试验提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验数据与处理

图像数据来源于高景一号卫星遥感影像和大疆P4M无人机采集的多光谱图像。本次研究中的飞行平台为产于中国深圳的DJI大疆精灵Phantom 4RTK无人机,配备波长范围为390—760 nm的1英寸CMOS传感器。相机的分辨率是2 000万像素(1:2)。飞行高度120 m,飞行速度6 m/s,地面分辨率4 cm/像素。在测量之前,需要校准曝光时间。2幅暗背景图像和1幅白框图像用于镜头标定和反射率标定。2幅暗背景图像均通过贴上镜头盖采集,1幅暗背景图像的曝光时间增加了0.1 s。将反射率分别为20%,40%,60%的布放在现场,然后利用图像中的灰度值进行大气校正。光谱数据收集于2019年8月11日、9月10日和10月10日11:00至14:00。

每个样品的数字表面模型和正射影像,即上述3 d中的1 d采集的影像,由DJI Terra(版本2.2.0.15)按照标准协议生成,包括数据校准、噪声和背景去除。在8,9,10月的3个月中,分别收集了图像159,159,158张。将图像集导入DJI Terra软件(2.2.0.15版本),选择农田场景的二维地图重建,设置WGS-84坐标系和高清参数,生成3张不同时期的正射影像。整个数据校正过程包括透镜校正、反射率校正和大气校正。

### 1.2 图像预处理

首先对遥感影像和无人机影像进行预处理,利用ENVI软件对前者进行几何精校正、配准、图像镶嵌与裁剪、去云及阴影处理和光谱归一化;利用大疆智图软件先对后者进行拼接后均一化,收集单波段,再进行波段合成。通过利用2者相同坐标位点进行相关匹配。利用该地区预处理后遥感影像中的红、绿、蓝和近红外4个波段进行Band Math<sup>[17]</sup>,结合无人机影像找出野生长叶榧10株及伴生树50株,计算该地区野生长叶榧和伴生树的20种植被指数(见表1),分析野生长叶榧与其伴生树的植被指数差异。

表 1 植被指数表达式及其用途		
植被指数	表达式	用途
OSAVI(Optimized Soil Adjusted Vegetation Index) 优化土壤调整植被指数	$OSAVI = \frac{1.5 \times (NIR - R)}{(NIR + R + 0.16)}$	OSAVI 基于 SAVI,它使用 0.16 的标准值作为树冠背景调整系数,该指数最适用于通过树冠可以看到土壤植被相对稀疏的地区
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) 土壤调节植被指数	$SAVI = \frac{1.5 \times (NIR - R)}{(NIR + R + 0.5)}$	SAVI 仅适合于提取某一小范围植被覆盖度变化较小区域的下垫面的植被信息,其目的是解释背景的光学特征变化并修正 NDVI 对土壤背景的敏感
SR(Simple Vegetation Ratio) 比值植被指数	$SR = \frac{NIR}{R}$	SR 是植被反射率最高的波长和叶绿素吸收最深的波长的比值
VARI (Visible Atmospheric Resistance Index) 可见大气阻力指数	$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$	VARI 是基于 ARVI,用于估算对大气影响敏感度较低的场景中的植被比例
GRVI (Green Red Vegetation index) 绿红植被指数	$GRVI = \frac{NIR}{G}$	GRVI 因为绿色和红色的反射率受叶色素变化的强烈影响对林冠的光合速率很敏感
RDVI(Ratio Difference Vegetation Index) 重归一化植被指数	$RDVI = \frac{NIR - R}{\sqrt{(NIR - R)}}$	RDVI 利用近红外和红色波长之间的差异,以及 NDVI,来突出健康的植被。它对土壤和阳光的影响不敏感
GDVI(Green Difference Vegetation Index) 绿差植被指数	$GDVI = NIR - G$	GDVI 最初是用彩色红外摄影来预测植物对氮的需求
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) 绿色归一化植被指数	$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$	GNDVI 与 NDVI 相似,但是 GNDVI 只测量 540—570nm 的绿色光谱。GNDVI 比 NDVI 对叶绿素浓度更敏感
NLI(Non-Linear Index) 非线性植被指数	$NLI = \frac{NIR^2 - R}{NIR^2 + R}$	NLI 是假设许多植被指数和地表生物物理参数之间的关系是非线性的。它线性化了表面参数的非线性关系
NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 标准差异植被指数	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	NDVI 用于监测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差,适用于植被早、中期生长阶段的动态监测
ARVI(Atmospherically Resistant Vegetation Index) 大气阻抗植被指数	$ARVI = \frac{NIR - [R - \gamma(R - B)]}{NIR + [R - \gamma(R - B)]}$	ARVI 是 NDVI 的改进,它使用蓝色波段矫正大气散射的影响(如气溶胶),把蓝色光和红光通道反射率的差值作为衡量大气影响的指标
LAI(leaf area index) 叶面积指数	$LAI = 3.618 \times EVI - 0.118$	LAI 被用来估计树叶覆盖和预测作物生长和产量
EVI(Enhanced Vegetation Index) 增强植被指数	$2.5 \times \frac{EVI = NIR - R}{NIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1}$	常用于 LAI 值高,即植被茂密区,具有较高的空间分辨率,可详细地反映地表植被特征
GEMI(Global Environmental Monitoring Vegetation Index) 全球环境监测指数	$GEMI=0.6 \times NDVI + 0.36$	是一种非线性植被指数,用于卫星图像的全球环境监测,并试图校正大气的影响
GARI (Green Atmospherically Impedance Vegetation Index) 绿波大气阻抗指数	$GARI = \frac{NIR - [G - \gamma(B - R)]}{NIR + [G - \gamma(B - R)]}$	GARI 与 NDVI 相比,该指数对叶绿素浓度的大范围变化更敏感,对大气影响不太敏感
IPVI (Infrared Percentage Vegetation Index) 近红外百分比植被指数	$IPVI = \frac{NIR}{NIR + R}$	IPVI 在功能上与 NDVI 相同,但计算速度更快
DVI(Difference Vegetation Index) 差值环境植被指数	$DVI = NIR - R$	DVI 能很好地反映植被覆盖度的变化,但对土壤背景的变化较敏感
MNLI(Modified Non-Linear Index) 修正非线性指数	$MNLI = \frac{(NIR^2 - R) \times (1 + L)}{NIR^2 + R + L}$	MNLI 是对非线性指数(NLI)的改进,非线性指数包含了土壤调整植被指数(SAVI)以说明土壤背景。ENVI 使用 0.5 的树冠背景调整系数(L)
MSR(Modified Simple Ratio) 修正单比	$MSR = \frac{\left(\frac{NIR}{R}\right) - 1}{\left(\sqrt{\frac{NIR}{R}}\right) + 1}$	MSR 通过将简单比率结合到表达式中来改进 RDVI 结果增加了对植被生物物理参数的敏感性
TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) 温度植被干旱指数	$TVDI = \sqrt{0.5 + NDVI}$	TVDI 对监测城市环境中的植被覆盖有用

注: $NIR$ (near infrared)为近红外波段反射率, $R$ (Red)为红外波段反射率, $G$ (Green)为绿光波段反射率, $B$ (Blue)为蓝光波段反射率, $L$ 为土壤调节系数, $\gamma$ 为光学路径效应因子(通常取 1.0)。



### 1.3 测定方法

多元回归分析(Multiple Regression Analysis)因变量为新得到的植被指数  $Y$ ,影响因变量的 20 个自变量分别为  $X_1—X_{20}$ ,其中每个自变量代表 1 种植被指数,分别代表  $VARI, TVDI, SR, SAVI, RDVI, OSAVI, NLI, NDVI, MSR, MNLI, LAI, IPVI, GRVI, GNDVI, GEMI, GDVI, GARI, EVI, DVI, ARVI$ 。假设每个自变量对因变量  $Y$  的影响都是线性的,进而得到关于  $Y$  和  $X$  的关系式,即为本次试验的新植被指数。

利用 R 语言 lm 函数对野生长叶榧及其伴生树的 20 种植被指数数据进行多元回归分析。再将新关系式代入  $ENVI$  中进行 Band Math,得到新植被指数图,通过观察该图,清楚地分辨野生长叶榧及其伴生树。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区域内野生长叶榧的光谱特征

2.1.1 多元回归分析结果 如表 2 所示,多元回归分析显示其中 7 种植被指数与  $Y$  值呈显著相关,分别为  $X_3(SR), X_4(SAVI), X_8(NDVI), X_{10}(MNLI), X_{12}(IPVI), X_{14}(GNDVI), X_{16}(GDVI)$ ,其置信区间如表 3 所示。最终得到了新的植被指数  $Y$  及其伴生树的植被指数  $X$  线性回归表达式:

$$Y = 1.292\ 369 + 0.011\ 708\ 36X_3 + 84\ 849.3X_4 - 495\ 776.2X_8 - 44\ 008.38X_{10} + 35\ 988.67X_{12} + 16.241\ 29X_{14} - 0.201\ 897\ 2X_{16}$$

表 2 回归分析结果

模型	估值	标准误	$T$ 值	$P$ 值
(常数)	2.028	0.366 6	5.533	0.000 001 09***
$X_3$	1.164	0.574 1	2.028	0.047 802*
$X_4$	186 300	50 560	3.686	0.000 553***
$X_8$	-320 500	87 330	-3.669	0.000 581***
$X_{10}$	-28 050	7 950	-3.528	0.000 896***
$X_{12}$	83 510	23 670	3.528	0.000 896***
$X_{14}$	45.55	14.6	3.120	0.002 972**
$X_{16}$	-0.119 6	0.041	-2.917	0.005 247**

注:\* 为  $P$  值在 0.01 与 0.05 之间,\*\* 为  $P$  值在 0.001 与 0.01 之间,\*\*\* 为  $P$  值在 0 与 0.001 之间。

表 3 自变量置信区间

自变量	置信区间
$X_3$	(0.011 708 36, 2.316 827)
$X_4$	(84 849.3, 287 849.6)
$X_8$	(-495 776.2, -145 127)
$X_{10}$	(-44 008.38, -12 088.91)
$X_{12}$	(35 988.67, 131 023.1)
$X_{14}$	(16.241 29, 74.850 99)
$X_{16}$	(-0.201 897 2, -0.037 274 64)

注:显著性水平为 97.5%。

2.1.2 结果分析 在 20 种植被指数中,通过软件分析发现  $SR, SAVI, NDVI, MNLI, IPVI, GNDVI, GDVI$  的差异较明显,利用这 7 种植被指数进行多元回归分析,并成功得到新的植被指数  $Y$  表达式,根据  $Y$  可得到野生长叶榧及其伴生树的光谱图像,并且在这个图像上野生长叶榧及其伴生树种具有明显的光谱差异。

对运用  $Y$  得到的新遥感图像进行图像的均一化后结果如图 1 所示。

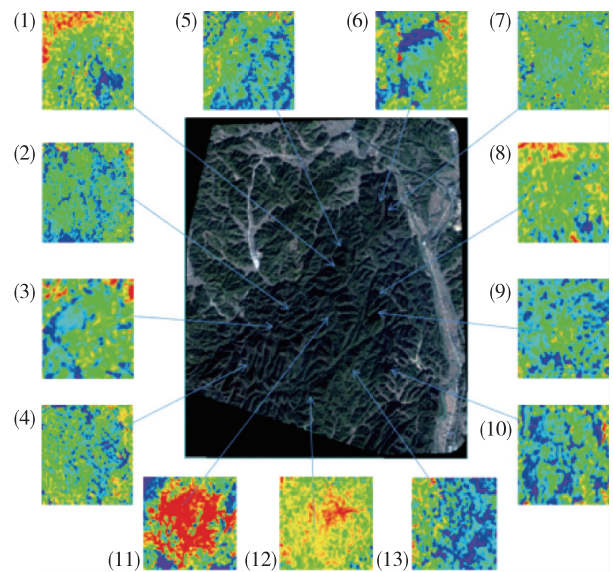


图 1 研究地区野生长叶榧与伴生树的植被指数差异

图 1 中(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9)、(10)是野生长叶榧,在图中显示绿色,而(11)、(12)、(13)则是几个典型的野生长叶榧伴生树种,在图中显示红色,黄色,蓝色等,2 者差异较明显,可以直接用肉眼分辨。

在上述的植被指数图中,选取具有代表性的数据,进行差异显著性检验,结果如图 2。

由图 2 可知:野生长叶榧及其伴生树存在光谱差异,前者植被指数在 200 000—250 000 之间,而后的植被指数在 150 000—200 000 之间,差异显著,2 者在图像上容易分辨,说明通过该方法区分野生长叶榧及其伴生树,可信度较高。

### 2.2 野生长叶榧分布区域

运用多元回归分析的结果进行计算,根据目标植被指数差异,寻找野生长叶榧的分布地区,如图 3 所示。图 3 中①、②、③、④、⑤、⑥是研究区域的野生长叶榧种植区域。

通过实地考察发现,光谱影像反映的野生长叶

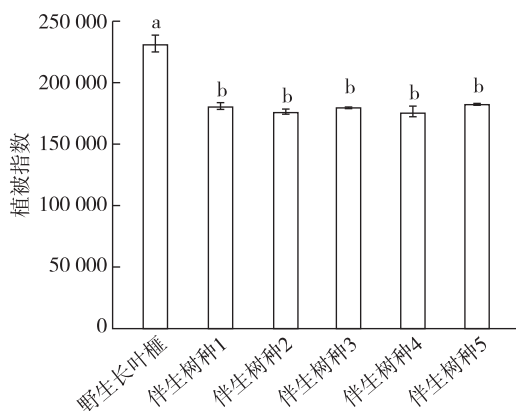


图2 研究地区野生长叶榧与伴生树的植被指数差异

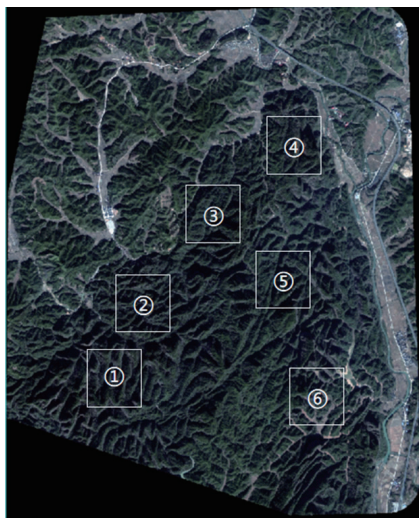


图3 研究地区野生长叶榧的分布区域图

榧的生长区域与实际接近,并通过该影像发现野生长叶榧通常生长在山势陡峭、峡谷深邃等地,且其多生长在海拔250—500 m地带,属于低山地貌。

本次试验表明:在6个野生长叶榧生长区域内,1号样地平均植被指数为246 378,海拔最高480 m,最低280 m;2号样地平均植被指数为267 854,海拔最高493 m,最低203 m;3号样地平均植被指数为286 352,海拔最高450 m,最低270 m;4号样地平均植被指数为286 354,海拔最高468 m,最低251 m;5号样地平均植被指数为275 862,海拔最高496 m,最低263 m;6号样地平均植被指数为268 571,海拔最高468 m,最低264 m。野生长叶榧生长区域内6个样本的平均植被指数在200 000—300 000范围内,海拔在250—500 m范围内。对照组1号样地平均植被指数156 800,海拔最高521 m,最低256 m;2号样地平均植被指数186 598,海拔最高534 m,最

低海拔356 m。野生长叶榧伴生树生长区域内2个样本的平均植被指数在100 000—200 000范围内,海拔在200—600 m范围内。

### 3 结论与讨论

利用ENVI生成的植被指数结果图几乎再现了样本植被覆盖情况,并且依据20种植被指数结果,可分辨出野生长叶榧和其伴生树在光谱上的差异,加以利用;再运用多元回归分析,得到一个关于SR,SAVI,NDVI,MNLI,IPVI,GNDVI,GDVI新的植被指数,由于该指数为差异较大的7种植被指数,因而结果较准确。

这7种植被指数差异明显的原因可能为:

①NDVI用于监测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差<sup>[18]</sup>。表明NDVI特征时间序列可有效体现植被的物候信息<sup>[19]</sup>。②SR是植被反射率最高的波长和叶绿素吸收最深的波长的比值。可高效分辨出不同植被<sup>[20]</sup>。③SAVI表示某一范围植被覆盖度变化较小区域下垫面的植被信息,其目的是解释背景的光学特征变化并修正NDVI对土壤背景的敏感,同样对于识别地面不同植被有显著作用<sup>[21]</sup>。④MNLI包含了土壤调整植被指数(SAVI)以说明土壤背景以及不同植被之间的区别<sup>[22]</sup>。⑤IPVI在功能上与NDVI相似,也可有效地反映植被的物候信息,但运算速度比NDVI快。⑥GNDVI同样也是用于检测植被的生长状态,但它只测量540—570 nm的绿色光谱且对叶绿素浓度极度敏感,能够迅速识别野生长叶榧与其伴生树的差别。⑦GDVI对土壤的背景极为敏感,所以可准确高效的辨别2者的差异<sup>[23]</sup>。

本次实地考察从影像识别出的野生长叶榧中随机挑选了野生长叶榧50株,其中46株是正确的,4株是错误的,分别为白栎、乌饭树、连蕊茶和阔叶箬竹,正确率高达到了92%,结果理想。本次研究过程中的错误识别可能是由于采样时间的影响及树形的影响等。

针对这些问题,在改进过程中提出以下解决方案:(1)选择长叶榧和其伴生树种差异大的时间采样;(2)尽可能找到野生长叶榧及其伴生树在多光谱影像上差异较大的地方。

#### 参考文献:

[1] 原雅楠,李正才,王 斌,等.不同品种榧树针叶-土壤C、N、P

- 生态化学计量特征研究[J].林业科学研究,2020,33(6):49-56.
- [2] 王昌腾.野生生长叶榧树生物学特性与保护研究[J].林业科技通讯,2005(10):6-7.
- [3] 李建辉,金则新,李钧敏.长叶榧黄酮类化合物含量及成分分析[J].植物研究,2007,27(1):50-54.
- [4] 金珊珊,李建辉,金则新,等.濒危植物长叶榧种子化学成分分析[J].浙江林业科技,2008,27(3):22-25.
- [5] 李钧敏,金则新,周 扬.长叶榧叶片次生代谢产物含量分析[J].西北林学院学报,2007,22(2):123-126.
- [6] 王昌腾.浙江省野生生长叶榧资源现状及保护对策[J].安徽农业科学,2005,33(3):432-450.
- [7] 周伟伦,陈水飞,李 垚,等.浙江仙居长叶榧树、刺叶栎资源现状调查及分析[J].中国野生植物资源,2020,39(8):65-71.
- [8] 刘杏娥.基于遥感技术预测小黑杨人工林木材性质的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2005.
- [9] 裴浩杰,冯海宽,李长春,等.基于综合指标的冬小麦长势无人机遥感监测[J].农业工程学报,2017,33(20):74-82.
- [10] 刘 杨,冯海宽,黄 珏,等.基于无人机高光谱影像的马铃薯株高和地上生物量估算[J].农业机械学报,2021,52(2):188-198.
- [11] 王 娟,陈永富,陈 巧,等.基于无人机遥感的森林参数信息提取研究进展[J].林业资源管理,2020(5):144-151.
- [12] 郑晓岚,张显峰,程俊毅,等.利用无人机多光谱影像数据构建棉苗株数估算模型[J].中国图象图形学报,2020,25(3):520-534.
- [13] 李 维.无人机遥感技术在林业资源调查与病虫害防治中的应用[J].中国农业文摘,2019(5):45-60.
- [14] 李 浩,郑恒宇,陈学永.无人机遥感技术在森林病虫害监测中的应用[J].南方论坛,2019(17):55-59.
- [15] 高娟婷,孙飞达,霍 霁,等.无人机遥感技术在草地动植物调查监测中的应用与评价[J].草地学报,2021,29(1):1-9.
- [16] 顾泽鑫,王白娟,苏文苹,等.高光谱无人机遥感影像识别技术在茶园病虫害防治中的应用研究[J].经济师,2020(12):61-62.
- [17] 翟东昌,陈红梅.基于邻域熵的高光谱波段选择算法[J].计算机应用,2012,42(2):485-492.
- [18] 杨 志.陕北榆神矿区生态地质环境特征及煤炭开采影响机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [19] 丁艳玲.植被覆盖度遥感估算及其真实性检验研究[D].长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2015.
- [20] 刘秀英.玉米生理参数及农田土壤信息高光谱监测模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [21] 李昭阳.多源遥感数据支持下的松嫩平原生态环境变化研究[D].长春:吉林大学,2006.
- [22] 赵成义.陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究[D].北京:中国农业科学院,2004.
- [23] 王克如.基于图像识别的作物病虫害诊断研究[D].北京:中国农业科学院,2005.

(上接第 27 页)

- [2] 中华人民共和国国务院令 第 474 号. 风景名胜区条例[EB/OL]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5139422.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5139422.htm), 2006-11-20.
- [3] 张同升,孙艳芝.自然保护区优化整合对风景名胜区的影响[J].中国国土资源经济,2019(10):8-19.
- [4] 高吉喜,徐梦佳,邹长新.中国自然保护区 70 年发展历程与成效[J].中国环境管理,2019(4):25-29.
- [5] 唐芳林,吕雪蕾,蔡 芳,等.自然保护区整合优化方案思考[J].风景园林,2020,27(3):8-13.
- [6] 李 鑫,宋松松,金赞涵.新形势下浙江省风景名胜区定位与发展——基于自然保护地体系构建下的研究[J].城市规划,2020,44(Suppl.1):35-41,91.
- [7] 陈耀华,陈远笛.风景名胜区的历史功能与当代使命[J].中国园林,2019,35(3):16-20.
- [8] 国家林业和草原局公告(2021 年第 20 号)[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20211028/113024491707534.html>, 2021-10-28.
- [9] 靳川平,刘晓曼,王雪峰,等.长江经济带自然保护区边界重叠关系及整合对策分析[J].生态学报,2020,40(20):7323-7334.
- [10] 孙艳玲.不同类型自然保护区区域重叠问题探析——以甘肃省为例[J].农业开发与装备,2019(8):26-28.
- [11] 马童慧,吕 偲,雷光春.中国自然保护区空间重叠分析与保护地体系优化整合对策[J].生物多样性,2019,27(7):758-771.