西北林学院学报 2021,36(1):9-17
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2021.01.02

基于混合像元分解的香格里拉市高山松空间分布变化研究

刘蓉姣,张加龙*,陈培高

(西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224)

摘　要:利用香格里拉市1997—2017年每5 a的Landsat遥感影像、2018年外业调查数据、森林资源二类调查数据和DEM数据为数据源,以高山松为对象,综合运用混合像元分解技术、决策树分类和GIS技术对其空间分布变化进行分析。结果表明,1)分类中,高山松归一化多分量指数阈值为0.333,云南松归一化多分量指数阈值为0.208;云冷杉归一化多分量指数阈值为0.362。2)各年分类结果总体精度分别为69.42%、76.73%、81.07%、78.90%和76.53%。3)香格里拉市高山松覆盖面积2002年比1997年减少了13.40%,2007年比2002年减少了2.47%,2012年比2007增加了8.96%,2017年比2012年增加了4.06%,呈现出先减少后增加的趋势。4)研究区内高山松主要分布在海拔高度2 800～3 800 m,1 800～2 800 m高山松面积总体呈现为轻微下降趋势;2 800～3 300 m海拔区间1997—2007年呈现下降趋势,2007—2017年呈现上升趋势,3 300～3 800 m区间内1997—2002年高山松面积呈现下降趋势,2002—2017年高山松面积逐年上升,3 800～4 800 m区间内1997—2017年高山松面积逐年下降。利用混合像元分解构建归一化多分量指数结合决策树分类对树种分类具有一定的参考价值,高山松时空变化结果对森林资源管理和后续研究可提供科学数据支撑。

关键词:高山松;混合像元分解;决策树;归一化多分量指数;空间分布变化

中图分类号:S718.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2021)01-0009-09

Spatial Distribution Changes of the *Pinus densata* Forests in Shangri-La City Based on Mixed Pixel Decomposition

LIU Rong-jiao, ZHANG Jia-long*, CHEN Pei-gao

(*College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *Yunnan, China*)

Abstract: In this study, several data resources were adopted: Landsat remote sensing images of the Shangri-La City collected every five years from 1997 to 2017, field survey data in 2018, forest resource second-class survey data, and DEM data. *Pinus densata* forests occurring in Shangri-La was taken as the research objects. Different technologies were comprehensively used to extract relative data of *P. densata* to conduct the special distribution variations investigation, including mixed pixel decomposition technology, decision tree classification, and GIS technology. The following results were obtained: 1) in the view of classification, the threshold of normalized multicomponent index of *P. densata* was 0.333, while it was 0.208 for *P. yunnanensis*, and 0.362 for spruce-fir. 2) The values of overall classification accuracy of the study years, i.e., 1997, 2002, 2007, 2012, and 2017 were 69.42%, 76.73%, 81.07%, 78.90% and 76.53%, respectively. 3) The coverage area of *P. densata* in Shangri-La decreased by 13.40% in 2002 compared with 1997, decreased by 2.47% in 2007 compared with 2002, increased by 8.96% in 2012 compared with 2007, and increased by 4.06% in 2017 compared with 2012. 4) *P. densata* was mainly distributed in the areas with alti-

收稿日期:2019-11-13　**修回日期**:2020-08-21

基金项目:国家自然科学基金(31860207);西南林业大学科研启动基金(111932)。

作者简介:刘蓉姣。研究方向:林业3S。E-mail:1165608734@qq.com

* **通信作者**:张加龙,副教授,硕士生导师。研究方向:森林生物量遥感估测,土地利用与覆盖变化。E-mail:jialongzhang@swfu.edu.cn

tudes of 2 800 to 3 800 m, and the area with altitudes of 1 800 to 2 800 m decreased slightly from 1997 to 2017. The area with altitudes of 2 800 to 3 300 m showed a downward trend from 1997 to 2007, increased from 2007 to 2017. The area with altitudes of 3 300 to 3 800 m showed a downward trend from 1997 to 2002, and increased from 2002 to 2017. The area with altitudes of 3 800 to 4 800 m decreased year by year from 1997 to 2017. In a word, using mixed pixel decomposition to construct normalized multi-component index combined with decision tree classification demonstrated certain referential values for the classification of tree species. The spatiotemporal changes of *P. densata* provided scientific data support for forest resource management and follow-up research.

Key words: *Pinus densata*; mixed pixel decomposition; decision tree; normalized multicomponent index; spatial distribution change

香格里拉市地处世界自然遗产“三江并流”的核心地带，境内地形地貌复杂，森林资源丰富，但生态系统较为脆弱[1]。目前对其森林资源、生态环境和多树种分布等方面已有研究，但对该区域某单一树种分布变化的研究较少[2]。本研究围绕香格里拉市优势树种高山松空间分布变化展开。高山松(*Pinus densata*)是我国的特有树种，源于第三纪云南松(*P. yunnanensis*)与油松(*P. tabuliformis*)的天然杂交种，耐寒、旱、贫瘠，广泛分布于西藏东南部，川西部，云南西北部和青海南部 2 700～4 200 m 的高山地带，多成纯林分布[3-4]有较高的经济价值和生态价值。

由于受传感器分辨率的限制和地面地形气候多样性等因素的影响，遥感影像中，像元通常都是几种地物的混合体，很少由单个均匀的地表覆盖类组成[5]。使用高分辨率影像进行目视解译所花费的代价太大，无法实现大范围的分类[6]。而对于中低分辨率影像来说，混合像元的存在很大程度上降低了分类精度。如果每个混合像元都可以被分解并且其覆盖类型组分(通常称为端元组分)占像元的百分比(丰度)也能够被求出，分类将会更精确。多年来，国内外学者利用混合像元分解技术提高遥感分类的准确性，并取得了有效进展。杨超[7]利用混合像元分解技术进行土地利用/覆被类型细分类。王铭[8]采用 GOCI 遥感影像提取时令水体及变化检测。H. Luy[9]利用混合像元分解对卫星时间序列数据准确地估算了泛太平洋 25 个城市的植被。M. Dawelbait *et al*[10]利用混合像元分解技术，监测 North Kurdufan State (Sudan)1987－2008 年的沙漠化过程，并在时间序列下分析了研究区内沙漠与植被覆盖的空间特征及时间变化特征。陈虹兵等[11]利用像元二分模型法和线性光谱混合模型法对提取植被覆盖度，对比分析 2 种模型的适用性，最后利用线性光谱混合模型生成了延庆区植被覆盖分布图，为县域尺度应用 Landsat 8 OLI 影像估测植被覆盖度提供参考。博文杰等[12]利用线性光谱混合模型提取莆田市常太镇枇杷树信息，绘出枇杷树的(*Eriobotrya japonica*)丰度图，据此估计出枇杷的种植面积。

本研究运用混合像元分解结合决策树分类，提取香格里拉市高山松空间分布情况，分析出高山松面积的动态变化和高山松林地的发展趋势，对香格里拉市森林资源的及时保护和进行宏观决策提供参考依据。同时，建立的高山松分类指数对高山松分类研究具有一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 数据源

香格里拉市是迪庆藏族自治州下辖市之一，位于云南省西北部的滇、川、藏大三角区域，地理位置 99°20′－100°19′E、26°52′－28°52′N[13]。香格里拉市地形呈现西北高、东南低，最高点海拔 5 545 m，最低点海拔 1 503 m，海拔高差 4 042 m，平均海拔 3 459 m，地貌形态集山地、高原、盆地、河谷为一体[14]，市境内的土地总面积为 1 141 739 hm^2，林业用地面积 950 911.7 hm^2，占 83.3%，森林覆盖率为 74.99%，据 2016 年全国森林资源二类调查统计，云冷杉、高山松、高山栎、云南松为主要优势树种，占全市森林面积的 90.8%[15](图 1)。

收集的数据有遥感数据和外业数据。遥感数据分别为香格里拉市 1997、2002、2007、2012 年的 Landsat 5 TM 数据和 2017 年 Landsat 8 OLI 影像。其中，2012 年 Landsat TM 退役，采用时间相近的 2011 年的影像代替，形成每 5 a 间隔的时间序列影像集(表 1)，研究区所在影像的轨道号为 132/040、132/041、131/041，三景影像覆盖了整个研究区，按照研究区边界进行了裁剪，不存在拼图问题[16]。同时收集了 2016 年的全国森林资源二类调查数据，香格里拉市 DEM 数据。外业数据收集于 2018 年 4 月，对香格里拉市 42 块 30 m×30 m 的样地(168 个样地点)进行坐标定位、周围地物情况记录、4 个方位拍照和样地内树种进行树高胸径测量。

表 1　研究区 Landsat 影像

Table 1　Landsat images in the research area

年份	ID	获取时间	云层覆盖/%
2017	LC08L1TP132040201712162017122401T1	2017/12/16	0.78
	LC08L1TP132041201712162017122401T1	2017/12/16	0.45
	LC08L1TP131041201712252018010301T1	2017/12/25	0.3
2012	LT51320412011286BKT00	2011/10/13	19.52
	LT51320402011014BKT00	2011/01/14	18.15
	LT51310412011007BKT00	2011/01/07	0.22
2007	LT51310412007060BJC00	2007/03/01	1
	LT51320402007003BJC01	2007/01/03	23
	LT51320412006288BJC00	2006/10/15	15
2002	LT51310412002302BJC00	2002/10/29	0.13
	LT51320402002005BJC00	2002/01/05	0.15
	LT51320412002005BJC00	2002/01/05	2.8
1997	LT51310411997320BKT01	1997/11/16	7
	LT51320401997279BKT00	1997/10/06	16
	LT51320411997311BKT00	1997/11/07	4



图 1　香格里拉市位置

Fig. 1　The location of Shangri-La

1.2　研究方法

以 Landsat 遥感影像为数据源,首先,对 5 期影像进行辐射定标、大气校正、几何校正和地形校正的数据预处理;其次,通过最小噪声分离、纯净像元指数计算和 N 维可视化,获取植被、裸地和阴影的纯净像元;然后利用线性波谱分离和最小能量变化进行丰度提取;接下来,利用分量构建指数,获取植被指数及 DEM 数据;最后,利用获取的分类因子构建多元数据进行决策树分类并验证分类结果(图 2)。

1.2.1　*数据预处理*　利用 Envi 对 Landsat 遥感影像进行了辐射定标,大气校正,几何校正,地形校和镶嵌裁剪的预处理,最终获取研究所需影像。其中,几何校正利用一幅精纠正过的香格里拉市 SPOT 5 影像为基准影像,校正中每一景影像选择了 30 个控制点,平均 RMS 误差控制在 30 m 内。香格里拉市地形和地势落差较大,采用地形校正的方法来补偿由于不规则的地形起伏而造成的地物亮度的变化[17],校正过程采用 J. Nichol et al[18] 的坡度匹配模型。一副研究区影像涉及 3 景数据,在完成各景的地形校正后,利用研究区的矢量边界进行切割,将裁剪后的 3 景图像进行镶嵌后形成研究区整体图像。外业数据处理,根据外业调查数据所记录的东西南北情况及所拍摄照片,运用 ArcGIS 获取实地高山松光谱曲线。

1.2.2　*基于混合像元分解的决策树分类*

1.2.2.1　*高山松、土壤、阴影分量提取*　样地调查中高山松多成纯林分布(图 3),森林中郁闭度不是很高的地方存在一些裸露的土壤。在日光斜照射下,具有一定高度的地物都会形成阴影,树木也不例外[19],而且香格里拉市地势落差较大,阴影在影像中的存在就更明显了。所以在只包含某一个树种的影像中一个像元内就可能同时包含植被、土壤、阴影多个地物的光谱信息。

首先,对遥感影像进行最小噪声分离(minimum noise fraction)判断图像数据维数,分离数据中的噪声[20],降噪后前 5 个波段已经集中了数据的 85%以上的信息,对前 5 个波段进行 PPI 计算获取纯净像元。其次,通过 N 维可视化结合图像端元和参考端元选取高山松、裸地、阴影的端元。对照影像

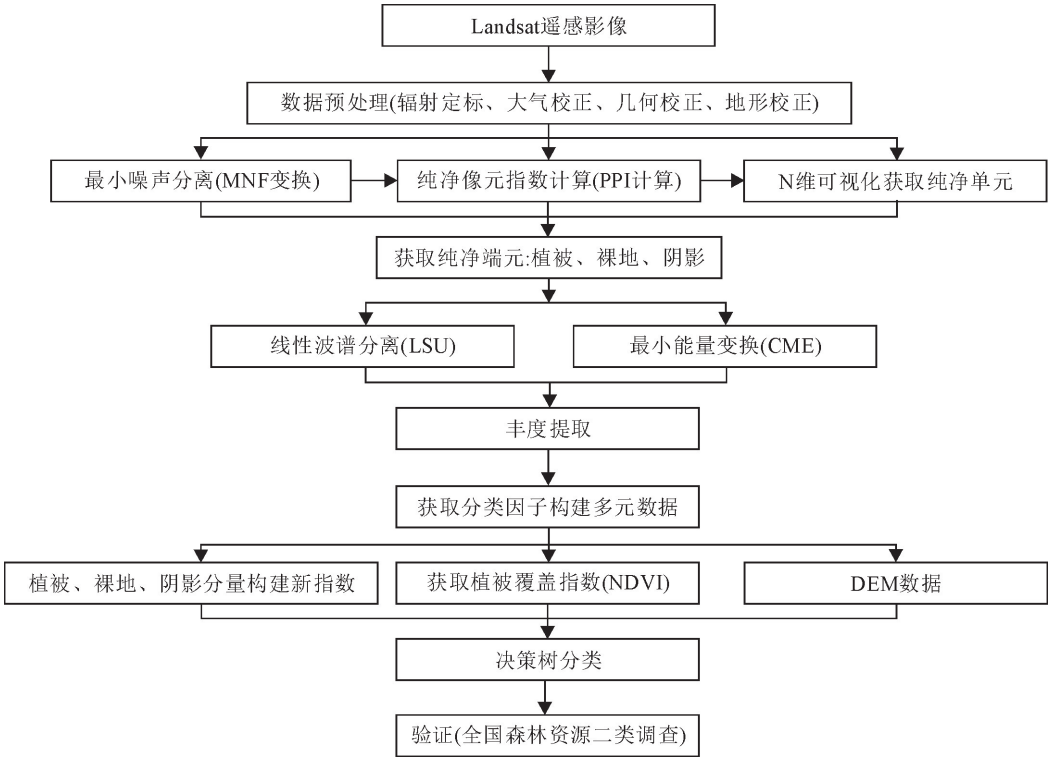


图 2 技术路线

Fig. 2 Flowchart of methodology



图 3 外业调查

Fig. 3 Field survey

通过不断调整获取裸地和阴影的纯净端元，利用外业数据绘制的实地高山松波谱曲线和 Landsat 影像不断调整，获取高山松纯净端元。最后，在 N 维可视化中勾选的高山松绘制波谱曲线并与外业调查数据获取的高山松进行对比，得到高山松与实地外业数据获取的高山松波谱曲线对比情况(图 4)。利用 IDL 编写的完全约束最小二乘算法[21]混合像元分解扩展工具对地物端元进行混合像元分解，避免了提取的丰度中出现负值的现象。

1.2.2.2 决策树提取高山松空间分布 基于该特征运用丰度中 3 个分量构建植被-土壤指数、植被-阴影指数、植被-土壤-阴影指数和归一化多分量指数 4 种新的指数[22-23]，新指数用于决策树中来区别植被里的高山松、云南松、云冷杉和其他植被的关键数据。利用 ENVI 5.3 进行波段计算构建指数(表 2)。

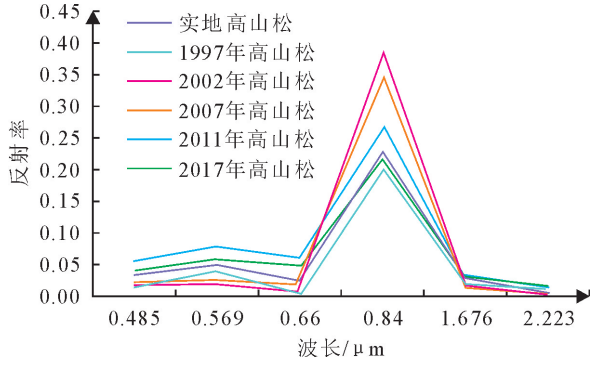


图 4 高山松光谱曲线对比

Fig. 4 Comparison of spectral curves of *Pinus densata* from 1997 to 2017

表 2 新指数计算公式

Table 2 New index calculation formulae

指数	计算公式
植被-土壤指数	$(b2-b1)/(b2+b1)$
植被-阴影指数	$(b2-b3)/(b2+b3)$
植被-土壤-阴影指数	$((b2+b1)-b3)/((b2+b3)+b1)$
归一化多分量指数	$((b2+b3)-b1)/((b2+b3)+b1)$

注：表中 $b1$ 表示丰度图中土壤波段，$b2$ 表示丰度图中树种(高山松、云冷杉、云南松)波段，$b3$ 表示丰度图中阴影波段。

运用 4 种指数分离高山松与其他树种，决策最优指数进行分类。4 种指数总体精度都不差，但相

比较归一化多分量指数精度最高,归一化多分量指数总体精度都高于 87%,其他 3 种指数精度在 84%～87%,结合归一化多分量指数经过多次试验通过制定规则见图 5,运用该规则进行分类,将影像分为高山松、云南松、云冷杉、其他林、非林地 5 类。香格里拉市云南松和云冷杉是占比较大的优势树种,占香格里拉市林地总面积的 31.85%[24],该规则通过海拔和其他树种的归一化指数先分类出了香格里拉市两大优势树种,这能更准确得到高山松空间分布情况。

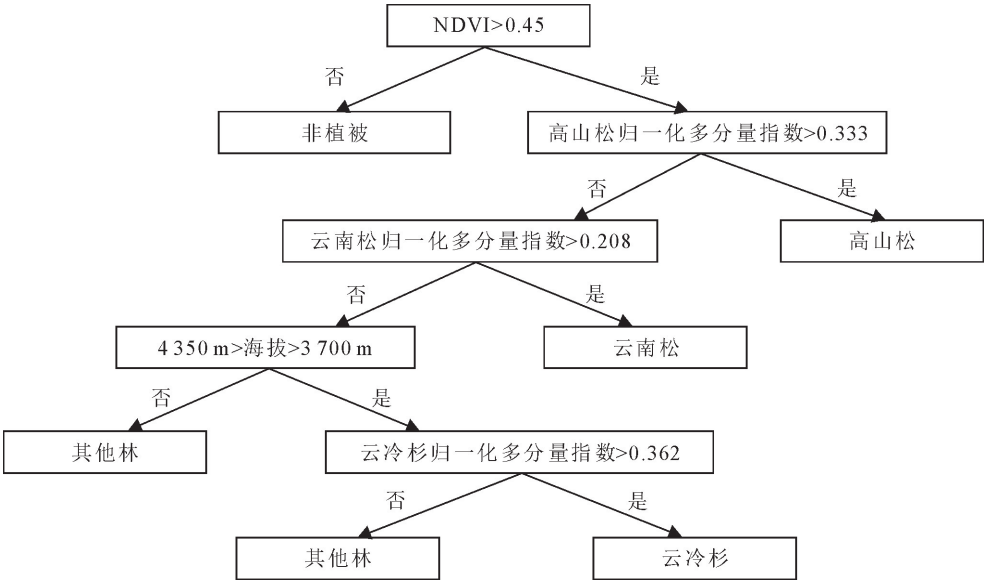


图 5　决策树分类示意

Fig. 5　Knowledge expert decision tree

1.2.2.3　精度评价　研究采用混淆矩阵[25]进行分类结果精度验证。通过统计树种的面积与香格里拉市面积并计算其比例[26],运用公式(1)计算出验证点个数为 507 个。随机筛选出 507 个验证点,其中高山松的验证点 76 个,云冷杉 105 个,云南松 42 个,其他树种 208 个,非植被 76 个。对本研究分类结果进行了验证。

$$n=B(1-\pi_i)\pi_i/b_i^2 \tag{1}$$

式中,n 为验证点个数,B 为卡方分布临界值,由$(1-\alpha)/k$ 决定,其中 α 为置信度,k 为分类个数。π_i 为第 i 类地物的比例,b_i 为每个像元的分类绝对误差(一般取 5%)。

通过计算统计 $K=3$,$\alpha=5\%$,$x^2_{(1.016\,666)}=5.7311$[17]。最终计算出:

$$n=\frac{B}{4b^2}=\frac{5.731\,1}{4\times0.05\times0.05}=573 \tag{2}$$

$$N=5.731\,1\times(1-0.67)\times\frac{0.67}{(0.05)^2}=507 \tag{3}$$

2　结果与分析

对分类结果进行了验证,精度评价结果见表 3。各年分类结果总体精度分别为 69.42%、76.73%、81.07%、78.90%和 76.53%。其中高山松的分类精度较好,其次是云冷杉和云南松,非林地与其他林错分的情况相对多一些。

2.1　高山松空间分布变化

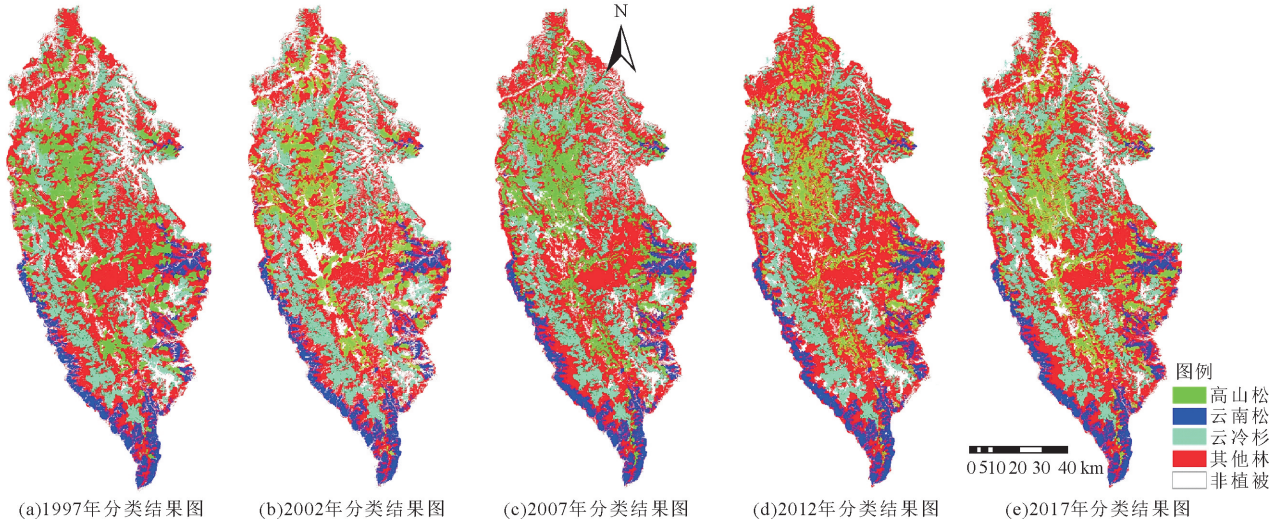
运用基于混合像元分解的决策树分类,得到分类结果(图 6),红色区域为其他树种空间分布情况,其他树种包括了如车桑(*Dodonaea viscosa*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、华山松(*Pinus armandii*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)其他等多种树种;绿色区域为高山松空间分布情况;蓝色区域为云南松空间分布情况;电气石绿色区域为云冷杉空间分布情况。其他树种与云冷杉空间分布情况有重叠部分,而且两者的空间分布面积最大。

对高山松总面积进行了统计(图 7)。1997 年高山松的总体覆盖面积为 1 608.67 km^2,占香格里拉市植被面积的 17.08%。2002 年高山松总面积为 1 393.07km^2,占香格里拉市植被面积的 14.79%。2007 年高山松总面积为 1 358.66 km^2,占香格里拉市植被面积的 14.42%。2012 年高山松总面积为 1 480.46 km^2,占香格里拉市植被面积的 15.72%。2017 年高山松总面积为 1 541 km^2,占香格里拉市植被面积的 16.36%。2002 年高山松覆盖面积比 1997 年减少了 13.40%,2002 年比 2007 年减少了 2.47%,2012 年高山松覆盖面积比 2007 年增加了 8.96%,2017 年比 2012 年增加了 4.06%。不同年份香格里拉市高山松分布状况不同,不同年份受降

表 3 精度评价结果

Table 3 Accuracy evaluation results

年份	分类数据	真实样本数据							总体精度	Kappa 系数
		云南松	云冷杉	高山松	其他林	非植被	总计	制图精度		
1997 年	云南松	32	0	1	1	3	37	76.19%	69.42%	0.5913
	云冷杉	0	71	0	28	15	114	67.61%		
	高山松	2	1	63	20	0	86	82.89%		
	其他林	8	22	5	138	10	183	66.35%		
	非植被	0	11	7	21	48	87	63.15%		
	总计	42	105	76	208	76	507			
2002 年	云南松	28	0	1	1	5	34	66.67%	76.73%	0.6904
	云冷杉	1	86	0	21	5	113	81.90%		
	高山松	3	1	62	13	5	84	81.57%		
	其他林	7	10	2	154	2	175	74.04%		
	非植被	3	8	11	20	59	101	77.63%		
	总计	42	105	76	208	76	507			
2007 年	云南松	30	0	0	0	5	35	71.43%	76.53%	0.6814
	云冷杉	0	79	2	9	9	99	75.24%		
	高山松	1	0	67	5	0	73	88.15%		
	其他林	10	25	5	159	9	208	76.44%		
	非植被	1	1	2	35	53	92	69.74%		
	总计	42	105	76	208	76	507			
2012 年	云南松	29	0	0	0	4	33	69.05%	78.90%	0.7149
	云冷杉	0	90	0	21	9	120	85.71%		
	高山松	1	1	68	2	0	72	89.47%		
	其他林	9	12	3	161	11	180	77.40%		
	非植被	3	2	5	24	52	86	68.42%		
	总计	42	105	76	208	76	507			
2017 年	云南松	32	0	1	1	3	37	76.19%	81.07%	0.7437
	云冷杉	0	88	2	21	5	116	83.81%		
	高山松	1	2	65	0	0	68	84.21%		
	其他林	9	9	5	168	10	201	80.77%		
	非植被	0	6	3	18	58	85	76.31%		
	总计	42	105	76	208	76	507			



(a)1997年分类结果图 (b)2002年分类结果图 (c)2007年分类结果图 (d)2012年分类结果图 (e)2017年分类结果图

图 6 分类结果

Fig. 6 Classification results

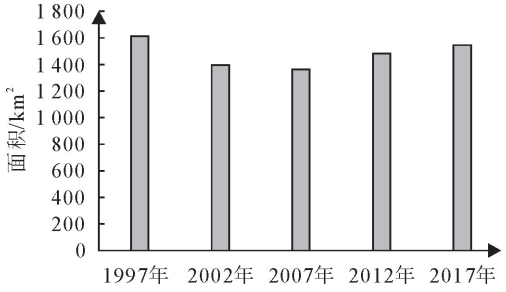


图 7　各年香格里拉市高山松面积统计

Fig. 7　*P. densata* areas of the study years in Shangri-La city

水、气温、人为行为、自然更替等不同因素的影响都可能影响香格里拉市高山松覆盖面积。

应用 ArcGIS 中叠加分析的交集取反分析(symmetrical difference)[27],将相邻年份高山松空间分布进行交集取反分析,获得相邻年份高山松增量或减量的空间分布情况,通过分析图 8 可知,1997－2002 年 5 a 间高山松急剧减少,2002－2007 年高山松总面积减少量低于 1997－2002 年。2012－2017 年高山松面积增量小于 2007－2012 年的增量。

2.2　香格里拉市高山松随高程的分布变化

结合 DEM 数据得知,每年高山松空间分布的海拔范围情况分别为:1997 年高山松分布的高程范围是 1 827.3～4 516.5 m,2002 年高山松分布海拔范围 1 995.2～4 483.8 m,2007 年高山松分布海拔范围 2 094.3～4 371.1 m,2012 年高山松分布海拔范围 2 100.4～4 360.5 m,2017 年高山松分布海拔范围 2 092.6～4 250 m。对同一海拔区间的不同年份高山松覆盖面积占当年高山松总面积的百分比进行了简单统计对比。海拔在 1 800～2 300 m 的不同年份高山松覆盖率分别为:0.27%、0.11%、0.02%、0.04% 和 0.02%。2 300～2 800 区间每年高山松森林覆盖情况分别是:4.28%、3.31%、2.38%、2.55%和 2.59%。2 800～3 300 m 区间高山松面积占当年高山松总面积的比率分别为:30.93%、29.95%、30.02%、35.61% 和 36.81%。3 300～3 800 m 海拔区间内的高山松覆盖率是最高的,该区间高山松面积占当年高山松总面积的比率分别为:56.14%、58.00%、57.60%、58.45% 和 58.36%。3 800～4 300 m 海拔区间的高山松面积与当年高山松总体面积之间的比值分别为 8.30%、8.54%、3.23%、3.36%和 2.22%。4 300～4 800 m 海拔区间的高山松面积与当年高山松总体面积之间的比值分别为 0.08%、0.09%、0.004%、0.002%和 0.003%。该区间是每年中高山松分布最少的区间。

每年高山松分布区间最低海拔为 1 827.3 m,最高海拔为 4 483.8 m。利用 ArcGIS 软件的空间分析结合重分类将高山松分布区域海拔高度划分 6 个高程区,分别为 1 800～2 300、2 300～2 800、2 800～3 300、3 300～3 800、3 800～4 300、4 300～4 800 m。由图 9 可知,不同海拔区间对比高山松分布情况为:3 300～3 800 m＞2 800～3 300 m＞3 800～4 300 m＞1 800～2 300 m＞4 300～4 800 m。

3　结论与讨论

以香格里拉市高山松为研究对象,利用 1997 年至 2017 年的 Landsat 遥感影像,通过混合像元分解结合决策树分类,获取了 1997 年至 2017 年近 20 a 高山松空间分布,分析其长时间序列变化情况。1997、2002、2007、2012 年和 2017 年分类总体精度分别为:69.42%、76.73%、81.07%、78.90% 和 76.53%。

通过多次试验将分类的阈值从一年推广到多年进行分类。其中,NDVI 植被指数区分林地非林地阈值为 0.45,高山松归一化多分量指数阈值为 0.333,云南松归一化多分量指数阈值为 0.208,区分云冷杉的归一化多分量指数值为 0.362,高程为 3 700～4 350 m。

香格里拉市高山松覆盖率在 1997－2002 年急剧减少,2002 年高山松覆盖面积比 1997 年减少了 13.40%,2007 年高山松覆盖面积比 2002 年减少了 2.47%,从 2007－2012 年和 2017 年香格里拉市高山松覆盖率都在逐年增加,增幅没有很大,2012 年高山松覆盖面积比 2007 年增加了 8.96%,2017 年比 2012 年高山松覆盖面积增加了 4.06%。其中 1997－2002 年变化最显著。

结合高程分析了高山松的空间分布情况。1997、2002、2007、2012 年和 2017 年香格里拉市高山松主要分布在海拔高度为 2 800～3 800 m 的地区,高山松生长分布最低海拔 1 800 m,最高海拔为 4 400 m。不同海拔区间对比高山松分布情况为:3 300～3 800 m＞2 800～3 300 m＞3 800～4 300＞1 800～2 300 m＞4 300～4 800 m。其中高山松最适宜生存海拔为 3 300～3 800 m。总之,不同年份香格里拉市高山松分布状况不同,不同年份的降水、气温、人为行为、自然更替等不同因素都会影响香格里拉市高山松覆盖面积。

随着遥感技术的不断发展,对树种分类的探究也越来越被需要。研究树种分布空间变化首先要能准确进行树种分布的提取,这就取决于分类结果,然而影响分类精度的关键因素之一是分类方法的选取。由于本研究区面积过大、地形差异大、植被覆盖

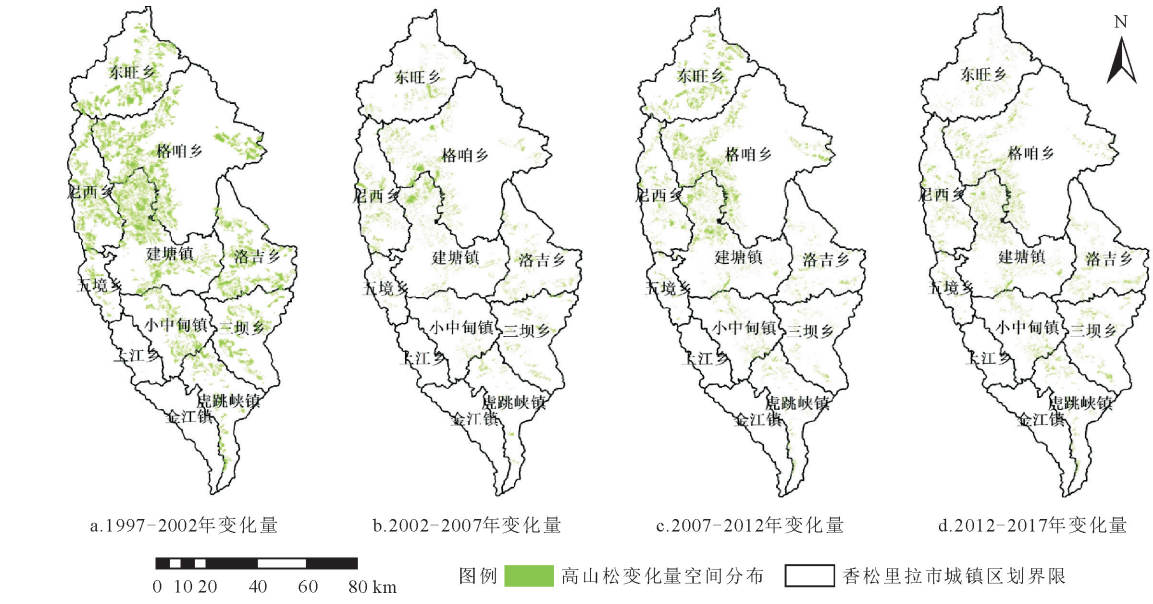


图 8 高山松分布变化

Fig. 8 Distribution change maps of *P. densata*

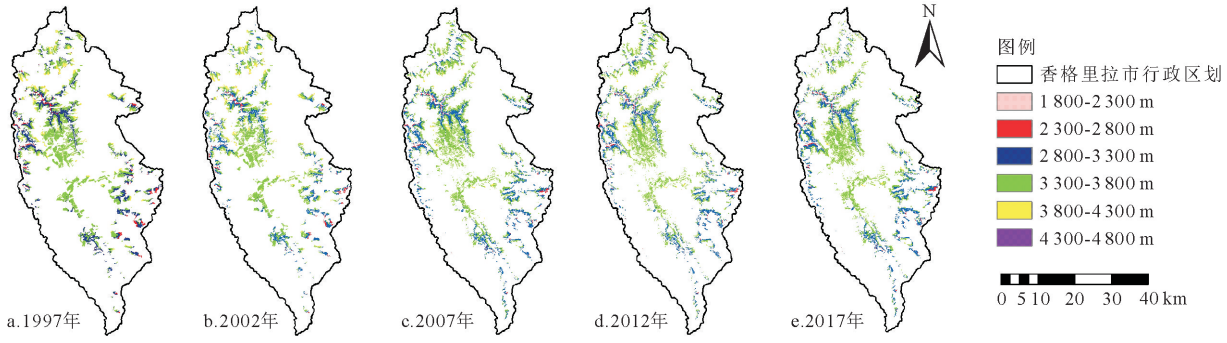


图 9 各年各海拔区间高山松空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of *P. densata* at different altitudes in each year

率高、生物多样性丰富以及遥感影像分辨率低等因素的影响，运用光谱信息、坡度、坡向、纹理等特征难以区分出不同的树种，因此采用混合像元分解结合决策树进行分类，在解决多光谱数据由于大气散射和空间分辨率低等问题造成的光谱混合现象后，结合前人经验运用决策树进行分类，获取了香格里拉市高山松空间分布情况，为后序分布变化提高可靠数据。今后希望能用分辨率较高的数据对林分区别较大的区域进行混合像元结合决策树准确分类更多树种。

参考文献：

[1] 陆驰，张加龙，王爱芸，等. 基于森林小班的香格里拉市高山松生物量遥感建模[J]. 西南林业大学学报：自然科学，2017，37(3)：152-158.
LU C，ZHANG J L，WANG A Y，*et al* . Building the model on the estimation of *Pinus densata's* biomass in Shangri-La City based on forest subcompartment and remote sensing images [J]. Journal of Southwest Forestry University Natural Sciences：Sci. Edi. ，2017，37(3)：152-158. (in Chinese)

[2] 杨明星，张加龙，曹影，等. 基于 Landsat 8 的云南松光谱端元选择与评价研究[J]. 西南林业大学学报：自然科学，2017，37(3)：165-169.
YANG M X，ZHANG J L，CAO Y，*et al*. Evaluation on spectral endmember of *Pinus yunnanensis* franch based on Landsat 8s [J]. Journal of Southwest Forestry University Natural Sciences：Sci. Edi. ，2017，37(3)：165-169. (in Chinese)

[3] 张焱，舒清态，徐云栋，等. 香格里拉高山松天然林最优树高曲线研究[J]. 林业资源管理，2016(1)：46-51.
ZHANG Y，SHU Q T，XU Y D，*et al*. Study on optimal height-curve model of natural *Pinus densata* forest in Shangri-La [J]. Forest Resources Management，2016(1)：46-51. (in Chinese)

[4] 吴明山，许彦红，王俊峰，等. 因子分析在林地更新评价中的应用--以香格里拉高山松为例[J]. 西南林业大学学报：自然科学，2011，31(6)：36-39.

[5] 唐世浩，朱启疆，李小文，等. 高光谱与多角度数据联合进行混合像元分解研究[J]. 遥感学报，2003，7(3)：182-189.

[6] 蓝金辉，邹金霖，郝彦爽，等. 高光谱遥感影像混合像元分解研究进展[J]. 遥感学报，2018，22(1)：13-27.

LAN J H,ZOU J L,HAO Y S,*et al*. Research progress on unmixing of hyperspectral remote sensing imagery [J]. Journal of Remote Sensing,2018,22(1):13-27. (in Chinese)

[7] 杨超. 基于混合像元分解决策树的土地利用/覆被分类研究[D]. 昆明:云南师范大学,2017.

[8] 王铭. 基于混合像元分解的东北地区时令水体提取及变化监测[D]. 长春:中国科学院大学,2017.

[9] LUY H. Estimating urban vegetation fraction across 25 cities in *Pan*-Pacific using Landsat time series data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2017(126):11-23.

[10] DAWELBAIT M,MORARI F. Monitoring desertification in a Savannah region in Sudan using Landsat images and spectral mixture analysis [J]. Journal of Arid Environments,2012,80:45-55.

[11] 陈虹兵,黄贝贝,彭道黎. 基于混合像元分解的植被覆盖度模型比较研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):203-207,265.
CHEN H B,HUANG B B,PENG D L. Comparison of pixel decomposition models for the estimation of fractional vegetation coverage [J]. Journal of Northwest Forestry Universit,2018,33(3):203-207,265. (in Chinese)

[12] 傅文杰,戴塔根. 基于线性光谱混合模型的遥感影像枇杷树信息提取[J]. 西北林学院学报,2006,21(2):13-15.
FU W J,DAI T G. Extracting loquat thematic information based on linear spectral mixture models[J]. Journal of Northwest Forestry Universit,2006,21(2):13-15. (in Chinese)

[13] 周瑜,岳彩荣. 香格里拉县森林景观格局分析[J]. 林业建设,2009(6):25-29.

[14] 李霞,王飞,徐德斌,等. 基于混合像元分解提取大豆种植面积的应用探讨[J]. 农业工程学报,2008,24(1):213-217.
LI X,WANG F,XU D B,*et al*. Application research on the method for extracting soybean covered areas based on the pixel unmixing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(1):213-217. (in Chinese)

[15] 蒋胜昌,张加龙,陆驰,等. 考虑地形因素的像元均方差抛物线拟合高山松丰度研究[J]. 林业资源管理,2016(5):59-64.
JIANG S C,ZHANG J L,LU C,*et al*. Pixel mean variance parabola fitting of *Pinus densata* abundance based on topographic factors[J]. Forest Resources Management,2016(5):59-64. (in Chinese)

[16] 张加龙,胥辉. 基于遥感的高山松连清固定样地地上生物量估测模型构建[J]. 北京林业大学学报,2020,42(7):1-11.
ZHANG J L,XU H. Establishment of remote sensing based model to estimate the aboveground biomass of *Pinus densata* for permanent sample plots from national forestry inventory [J]. Journal of Beijing Forestry University,2020,42(7):1-11. (in Chinese)

[17] 高永年,张万昌. 遥感影像地形校正研究进展及其比较实验[J]. 地理研究,2008,27(2):467-477.
GAO Y N,ZHANG W C. Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data[J]. Geographical Research,2008,27(2):467-477. (in Chinese)

[18] NICHOL J,HANG L K,SING W M. Empirical correction of low Sun angle images in steeply sloping terrain:a slope-matching technique [J]. International Journal of Remote Sensing,2006,27(3):629-635.

[19] 岳彩荣. 香格里拉县森林生物量遥感估测研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.

[20] 林娜,杨武年,王斌. 高光谱遥感影像核最小噪声分离变换特征提取[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(8):988-992.
LIN N,YANG W N,WANG B. Hyperspectral image feature extraction via kernel minimum noise fraction transform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2013,38(8):988-992. (in Chinese)

[21] 蔡薇,郭洪海,隋学艳,等. 基于混合像元分解提取小麦种植面积的技术与方法研究[J]. 山东农业科学,2009(5):12-16.

[22] 奚祯苑,刘丽娟,陆灯盛,等. 基于线性混合像元分解技术提取山核桃空间分布[J]. 林业科学,2015,51(10):43-52.
XI Z Y,LIU L J,LU D S,*et al*. Mapping of *Carya cathayensis* spatial distribution with linear spectral mixture model [J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(10):43-52. (in Chinese)

[23] 李恒凯,欧彬,刘雨婷,等. 基于混合像元分解的高光谱影像柑橘识别方法[J]. 遥感技术与应用,2017,32(4):743-750.
LI H K,OU B,LIU Y T,*et al*. Citrus recognition methods of hyperspectral remote sensing image based on spectral unmixing model [J]. Remote Sensing Technology and Application,2017,32(4):743-750. (in Chinese)

[24] 字李,谢福明,舒清态,等. 香格里拉 4 种典型针叶树种高光谱特征分析及判别 [J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2019,48(1):55-61.
ZI L,XIE F M,SHU Q T,*et al*. Hyperspectral characteristics analysis and discriminant of 4 typical coniferous trees species in Shangri-La [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University:Natural Science Edition,2019,48(1):55-61. (in Chinese)

[25] 袁雅萍. 利用不确定性模型实现土壤推理制图中知识的获取与融合[D]. 武汉:华中农业大学,2016.

[26] ZHANG J,PHAM T T H,KALACSKA M,*et al*. Using landsat thematic mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan,China:1990-2010 [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation,2014,31(9):25-36.

[27] 于杰,孙伟雪,刘毅. 基于 ArcGIS 叠加分析工具在耕地质量等别年度更新评价中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(3):146-148.
YU J,SUN W X,LIU Y. Application of ArcGIS based overlay analysis tool in the evaluation of cultivated land quality[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2016,39(3):146-148. (in Chinese)