

基于包络线去除法的森林树种及树种组分类

张乐¹, 王志辉¹, 徐惠军¹, 丁丽霞^{2,3}, 李东⁴, 金伟⁵, 张峰⁵

(1. 浙江远卓科技有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 4. 湖州市自然资源和规划局, 浙江 湖州 313000; 5. 浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020)

摘要: 选择了毛竹 *Phyllostachys edulis*, 雷竹 *Ph. violascens* 'Prevernalis', 水竹 *Ph. heteroclada*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 常绿阔叶树(冬青 *Ilex chinensis*, 青冈 *Quercus glauca*, 石楠 *Photinia serrulata*, 茶 *Camellia sinensis*) 和落叶阔叶树(山核桃 *Carya cathayensis*, 栗 *Castanea mollissima*, 白栎 *Quercus fabri*, 枫香树 *QLiquidambar formosana*, 桑 *Morus alba*, 桃 *Amygdalus persica*) 5 个森林树种及 2 个树种组, 使用包络线去除法对去除非林地的高光谱遥感图像像元亮度值进行处理, 增强像元亮度值的差异, 选择差异性较大的特征波段进行组合降维, 然后利用野外实地调查的样地作为分类训练样本进行分类, 最后用位置精度评价对原始分类图与包络线去除法分类图进行精度评价及分析比较。结果表明, 包络线去除法的总体分类精度与总体 Kappa 系数分别为 90.5% 与 0.86, 而原始图像分类的总体分类精度与总体 Kappa 系数分别为 80.2% 与 0.78。本文使用包络线去除法把此 5 个森林树种及 2 个树种组有效地区分出来, 从而为利用高光谱遥感图像数据进行特征提取和降维及分类提供理论支撑与参考, 也可应用于林业调查、林地变更调查、各类树种及树种组分类等领域。

关键词: 遥感; 像元亮度值; 包络线去除; 树种; 树种组

中图分类号: S711 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2020)02-0091-07

Classification of Tree Species and Groups based on Envelope Removal

ZHANG Le¹, WANG Zhi-hui¹, XU Hui-jun¹, DING LI-xia^{2,3}, LI Dong⁴, JIN Wei⁵, ZHANG Feng⁵

(1. Zhejiang Yuanzhuo Technology Co., Ltd, Hangzhou 310012, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 4. Huzhou Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang, Huzhou 313000, China; 5. Zhejiang Forest Resources Monitoring Center, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Preprocessing was made on remote sensing image by Hyperion of Lin'an, Yuhang of Hangzhou and Anji of Zhejiang province. 5 species and 2 groups were selected, including *Phyllostachys edulis*, *Ph. violascens* 'Prevernalis', *Ph. heteroclada*, *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, evergreen broad-leaved forest (*Ilex chinensis*, *Quercus glauca*, *Photinia serrulata*, *Camellia sinensis*) and deciduous broad-leaved one (*Carya cathayensis*, *Castanea mollissima*, *Quercus fabri*, *Liquidambar formosana*, *Morus alba*, *Amygdalus persica*), to be classified by envelope removal. Non-forest pixel luminance value was classified by dimensionality reduction and training. Positional accuracy evaluation was used on classification accuracy of original and treated image. The results showed that the total classification accuracy and total Kappa coefficient of envelope removal method was 90.5% and 0.86 respectively, while that of original image classification was 80.2% and 0.78 respectively.

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2020-03-04

作者简介: 张乐, 本科, 从事林业调查规划设计; E-mail:595309560@qq.com。通信作者: 丁丽霞, 博士, 副教授, 从事林业遥感与信息技术应用研究; E-mail:dlxlxy@126.com。

Key words: remote sensing; pixel luminance value; envelope removal; tree species; tree groups

树种分类是森林资源管理中重要的组成部分,对科学研究和实际生产应用都有着十分重要的意义。传统的实地调查既消耗大量的时间、人力、物力和财力,又无法提供整个区域的树种分类信息。随着航空航天技术、传感器技术和图像处理技术的飞速发展,遥感图像在森林资源调查方面得到了广泛的应用,同时,利用高分辨率的卫星影像或大比例尺数字航片对树种进行分类的技术,也日益成熟。目前应用较广泛的宽波段遥感数据由于空间和光谱分辨率均较低,难以获得精确的树种分类结果,而高光谱数据波段范围更窄,能准确探测到具有细微光谱差异的各种地物类型,并借助纹理等特征分析,识别光谱相似树种^[1]。高光谱遥感的出现和发展,克服了传统遥感技术无法实现对森林植被精细类型分类的缺点,如森林树种分类等^[2]。基于高光谱遥感森林树种分类的关键是高光谱识别技术,已经广泛地应用于森林树种识别及森林制图,其识别分类效果比常规遥感有了显著的提高。陈工等人选取 Quickbird, Landsat 8, 数字高程模型 (DEM) 等多源遥感数据,利用决策树加面向对象的分类方法提取桉树 *Eucalyptus* spp. 林^[3]。然而,多数研究是建立在较理想的条件下进行的,同时由于数据处理算法的多样化,目前还没有普遍使用且行之有效的应用于森林树种分类的算法^[4]。本文对高光谱遥感图像像元亮度值进行了处理分析,从而提高了森林树种及树种组分类的精确度。然而,高光谱遥感技术在为树种的精细识别带来可能性的同时,也带来了数据冗余度大的问题。怎样在高光谱数据信息利用最大化的基础上,高效处理高光谱数据成为高光谱研究领域的焦点和未来发展的重要方向^[5]。

本文首先使用包络线去除法对有林地高光谱遥感图像数据进行处理,增强像元亮度值的差异,然后选择差异性较大的特征波段进行组合降维,最后使用监督分类中的最大似然法对所选取的波段组合图像进行分类。分类训练采用野外实地调查的样地(分类的森林树种及树种组样地)作为训练样本,从而对毛竹 *Phyllostachys edulis*, 雷竹 *Ph. violascens* 'Prevernalis', 水竹

Ph. heteroclada, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 马尾松 *Pinus massoniana* 5 个森林树种,常绿阔叶树(冬青 *Ilex chinensis*, 青冈 *Quercus glauca*, 石楠 *Photinia serrulata*, 茶 *Camellia sinensis*) 和落叶阔叶树(山核桃 *Carya cathayensis*, 栗 *Castanea mollissima*, 白栎 *Quercus fabri*, 枫香树 *QLiquidambar formosana*, 桑 *Morus alba*, 桃 *Amygdalus persica*) 2 个树种组分类。本文使用包络线去除法把 5 个森林树种及 2 个树种组有效地区分出来,以期利用高光谱遥感图像数据进行特征提取和降维及分类提供理论支撑与参考,也可应用于林业调查、林地变更调查、各类树种及树种组分类等领域。

1 数据与方法

1.1 研究区概况及数据处理

研究区域位于杭州市临安区高虹镇、余杭区百丈镇和鸬鸟镇,安吉县山川乡和天荒坪镇交界处,地理坐标为 $119^{\circ} 36'40'' \sim 119^{\circ}44'49''$ E, $30^{\circ}23'40'' \sim 30^{\circ}28'33''$ N, 以中低山丘陵为主,地势平坦,地处浙江省西北部、中亚热带季风气候区南缘,属季风型气候,温暖湿润、光照充足、雨量充沛、四季分明,为中苕溪主要支流,属长江水系(见图 1)。

Hyperion 影像是世界范围内第一个民用的全波段范围连续成像的星载高光谱影像数据源,在 $356 \sim 2577$ nm 范围内共有 242 个波段,波段宽度约为 10 nm,空间分辨率为 30 m。在分类之前,对研究区域的 Hyperion 遥感图像进行了预处理,首先,从原始图像 242 个波段中筛选出不包含坏波段且信息量相对较多的 126 个波段(见



图 1 研究区域

Figure 1 Study area

表 1), 而后, 对其进行辐射校正和大气校正等预处理, 经过预处理后的高光谱遥感图像见图 2。

表 1 波段一览表
Table 1 List of bands

序号	波段号	中心波长/nm	序号	波段号	中心波长/nm	序号	波段号	中心波长/nm
1	12	467.52	43	54	894.88	85	143	1 578.32
2	13	477.69	44	55	905.05	86	144	1 588.42
3	14	487.87	45	56	915.23	87	145	1 598.51
4	15	498.04	46	57	925.41	88	146	1 608.61
5	16	508.22	47	84	983.08	89	147	1 618.71
6	17	518.39	48	85	993.17	90	148	1 628.81
7	18	528.57	49	86	1 003.30	91	149	1 638.81
8	19	538.74	50	87	1 013.30	92	150	1 648.91
9	20	548.92	51	88	1 023.40	93	151	1 659.01
10	21	559.09	52	89	1 033.50	94	152	1 669.10
11	22	569.27	53	90	1 043.59	95	153	1 679.20
12	23	579.45	54	91	1 053.69	96	154	1 689.30
13	24	589.62	55	92	1 063.79	97	155	1 699.40
14	25	599.80	56	93	1 073.89	98	156	1 709.50
15	26	609.97	57	94	1 083.99	99	157	1 719.60
16	27	620.15	58	95	1 094.09	100	158	1 729.70
17	28	630.32	59	96	1 104.18	101	159	1 739.69
18	29	640.50	60	102	1 114.28	102	160	1 749.79
19	30	650.67	61	103	1 124.37	103	161	1 759.89
20	31	660.85	62	104	1 134.47	104	162	1 769.99
21	32	671.02	63	105	1 144.57	105	163	1 780.09
22	33	681.20	64	106	1 154.67	106	164	1 790.19
23	34	691.37	65	107	1 164.77	107	193	2 082.75
24	35	701.55	66	108	1 174.87	108	194	2 092.84
25	36	711.72	67	109	1 184.97	109	195	2 102.94
26	37	721.90	68	110	1 195.07	110	196	2 113.04
27	38	732.07	69	111	1 205.17	111	197	2 123.14
28	39	742.25	70	112	1 215.27	112	198	2 133.24
29	40	752.43	71	113	1 225.37	113	199	2 143.34
30	41	762.60	72	114	1 235.47	114	200	2 153.34
31	42	772.78	73	115	1 245.57	115	201	2 163.43
32	43	782.95	74	116	1 255.67	116	202	2 173.53
33	44	793.13	75	117	1 265.77	117	203	2 183.63
34	45	803.30	76	118	1 275.87	118	204	2 193.73
35	46	813.48	77	135	1 285.97	119	205	2 203.83
36	47	823.65	78	136	1 296.07	120	206	2 213.93
37	48	833.83	79	137	1 306.17	121	207	2 224.02
38	49	844.00	80	138	1 316.27	122	208	2 234.12
39	50	854.18	81	139	1 326.37	123	209	2 244.22
40	51	864.35	82	140	1 336.47	124	210	2 254.22
41	52	874.53	83	141	1 346.57	125	211	2 264.32
42	53	884.70	84	142	1 356.67	126	212	2 274.42

由于研究区域森林覆盖率较高, 非林地所占比例虽小, 但对图像的分类却有影响。另外, 有林地与非林地之间的像元亮度值差异也较大, 故本文首先使用基于变换的主成分分析法对原始高光谱遥感图像降维, 后利用传统的监督分类方法从原始分类图像中把居民点、农地和水体等非林地去除, 即得到有林地高光谱遥感图像数据, 图 3 内白色部分是去除的非林地区域。

1.2 分类训练样本获取

本文根据森林树种的实际情况,将需分类的树种确定为毛竹、雷竹、水竹、杉木、马尾松 5 个森林树种及常绿阔叶树和落叶阔叶树 2 个树种组。每个森林树种或树种组选择 30 个以上样地,共计 260 个样地,每个样地调查面积均大于 5 000 m²,即遥感图为 5 个像元以上。野外实地调查时,使用手持 GPS 沿着每个样地走一圈得到样地范围与位置。利用 ArcGIS 软件对调查的样地进行投影定义、转换等处理,与遥感图像坐标匹配,以使用作分类训练样本及像元亮度值提取。

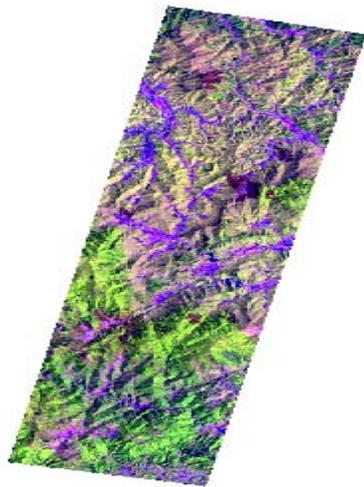


图 2 研究区示意图

Figure 2 Image of pre-processing hyperspectral remote sensing

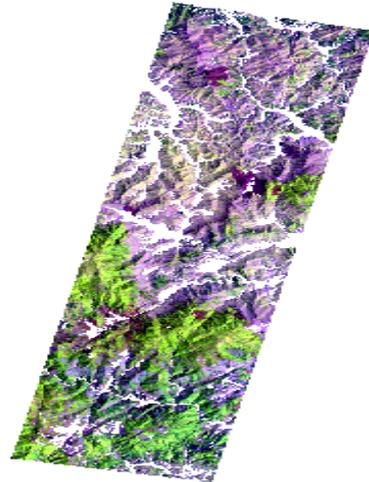


图 3 有林地示意图

Figure 3 Image after dimensionality reduction

1.3 像元亮度值提取

根据野外实地调查的样地位置,利用 ERDAS IMAGINE 软件与分类训练样本从有林地高光谱遥感图像(见图 3)中提取毛竹、雷竹、水竹、杉木、马尾松 5 个森林树种及常绿阔叶树和落叶阔叶树 2 个树种组的像元亮度值,提取的像元亮度值数量最多的是毛竹,有 6 569 个,最少的是雷竹,有 4 086 个。将每个森林树种及树种组的像元亮度值进行平均,即得到每个森林树种及树种组的像元亮度值(见图 5)。

1.4 方法

在光谱曲线相似的情况下,直接从中提取光谱特征不便于计算,需要对光谱曲线做进一步处理,以突出光谱的吸收特征。包络线去除法(continuum removal)是一种有效增强感兴趣吸收特征的光谱分析方法^[6],它可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将反射率归一化为 0~1.0,光谱的吸收特征也归一化到一致的光谱背景上,有利于与其他光谱曲线进行特征数值的比较,从而提取特征波段以供分类识别^[7]。“包络线”通常定义为逐点直线连接光谱曲线上那些凸出的峰值点,并使折线在峰值点上的外角大于 180°。以原始光谱曲线上的值除以包络线上对应的值,即为光谱去包络,其计算方法如公式(1)和公式(2)。

$$CR_j = \frac{R_j}{R_{start} + K \cdot (\lambda_j - \lambda_{start})} \quad (1)$$

$$K = \frac{R_{end} - R_{start}}{\lambda_{end} - \lambda_{start}} \quad (2)$$

式中, λ_j 是第 j 波段; CR_j 是波段 j 的包络线去除值; R_j 是波段 j 的原始光谱像元亮度值; R_{start} , R_{end} 是在吸收曲线里的起始点和末端点的原始光谱像元亮度值; λ_{start} , λ_{end} ,是在吸收曲线里的起始点波长和末端点波长; K 是在吸收曲线里起始点波段和末端点波段之间的斜率。

光谱曲线的包络线从直观上来看,相当于光谱曲线的“外壳”(见图 4,以马尾松为例),因为实际的光谱曲线由离散的样点组成,所以用连续的折线段来近似表示光谱曲线的包络线^[8]。

2 结果与分析

2.1 原始图像像元亮度值

从图 5 中可以看出, 森林树种及树种组像元亮度值曲线形状具有相似性, 但在一些波段中也存在着差别, 而这些差别正反映了它们像元亮度值特性的不同。从中选择 10 个差异性比较显著的特征波段, 分别为 32, 36, 42, 46, 59, 70, 77, 93, 107, 120 波段, 后使用这些差异性较大的特征波段进行组合降维, 从而进行森林树种及树种组分类。

2.2 包络线去除像元亮度值

使用包络线去除法对分类森林树种(毛竹、雷竹、水竹、杉木、马尾松)及树种组(常绿阔叶树和落叶阔叶树)的像元亮度值进行去包络(见图 6), 之后选择差异性较大的特征波段(即包络线去除曲线的波谷处)进行组合, 共计 9 个特征波段, 分别为 4, 22, 36, 46, 55, 60, 77, 107, 124 波段。从图中可以看出, 包络线去除像元亮度值曲线有 5 个差异性比较大的特征波段, 分别为 4, 22, 60, 77, 107 波段, 其他 36, 46, 55, 124 四个波段之间差异较小。由此可知, 这些差异性显著的特征波段都可用于森林树种及树种组分类。

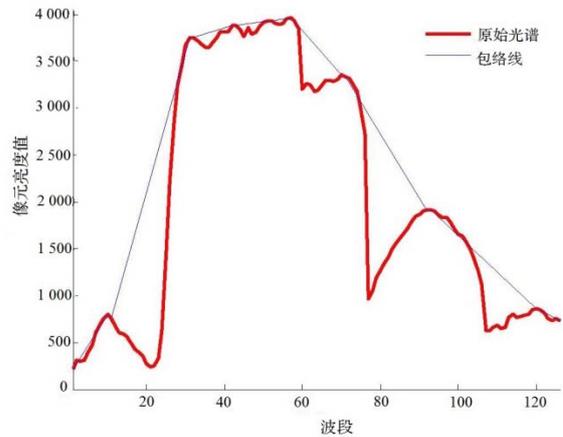
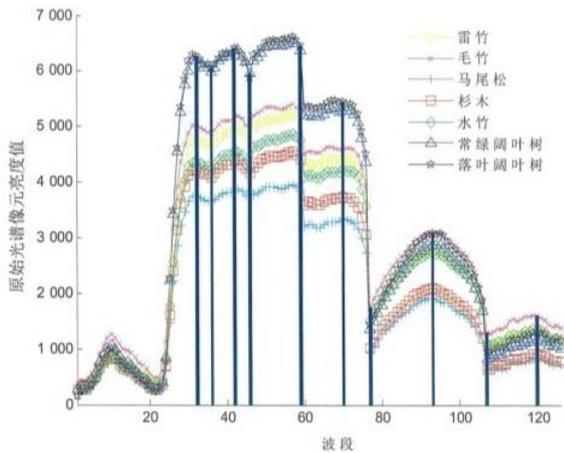


图 4 马尾松的原始光谱和包络线曲线图

Figure 4 Original spectra and envelope curve of *P. massoniana*



注: 图中柱形状标识表明所选取的差异性特征波段, 下同。

图 5 森林树种及树种组原始图像像元亮度值曲线图

Figure 5 Curves of pixel brightness value in the original image of tree species and group

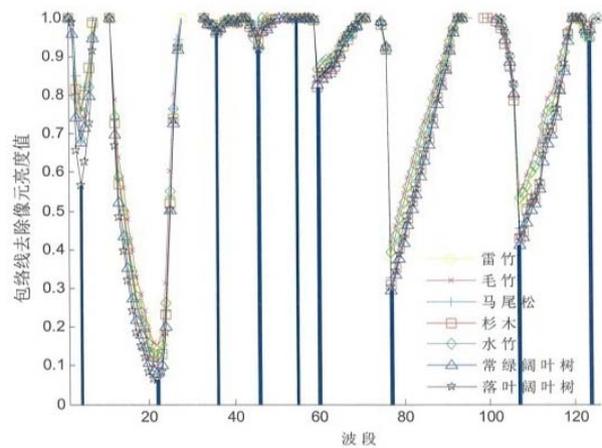


图 6 森林树种及树种组包络线去除像元亮度值曲线图

Figure 6 Envelope removal curve of pixel brightness value in the original image of tree species and group

3 森林树种及树种组分类

根据上文原始图像像元亮度值、包络线去除像元亮度值所选取的差异性特征波段进行波段组合, 从而使用监督分类中的最大似然法对所选取的波段组合图像进行分类, 分类训练样本采用野外实地调查的训练样本。由于分类结果比较零碎, 故本文采用图像的邻域分析技术, 设置 3×3 窗口的邻域范围(聚类统计领域大小为 8)和多数值分析函数计算领域中心像元的值, 从而得到斑块较整齐的分类结果专题图(见图 7, 图 8)。

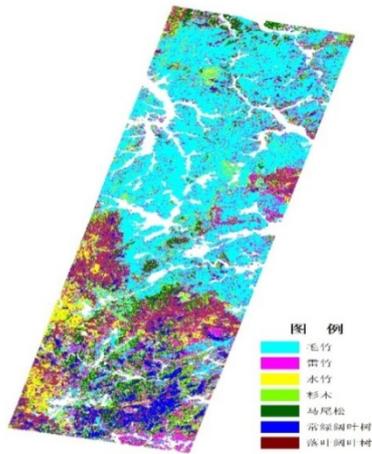


图7 原始图像分类图

Figure 7 Classification of original image

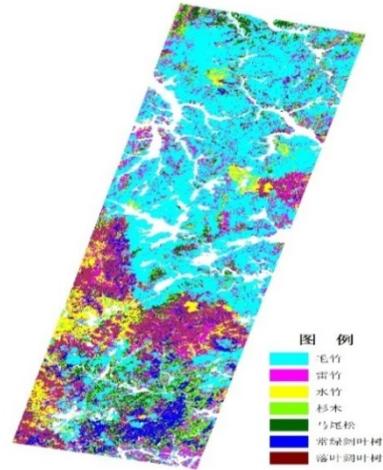


图8 包络线去除分类图

Figure 8 Classification by envelope removal

4 分类结果精度评价及分析比较

为检验原始图像与包络线去除法的分类效果，本文使用位置精度评价对其分类结果图进行了精度评价及分析比较，其分类树种及树种组的不同方法计算的生产精度、用户精度、Kappa 系数及总体分类精度与总体 Kappa 系数（见表 2）。

表 2 两种波段选择法分类图的生产精度、用户精度、Kappa 系数、总体分类精度与总体 Kappa 系数

Table 2 Production accuracy, user accuracy, Kappa coefficient, total classification accuracy and total Kappa coefficient of the original image and with envelop removal

树种（组）	原始图像			包络线去除法		
	生产精度	用户精度	Kappa 系数	生产精度	用户精度	Kappa 系数
毛竹	33.3	50.0	0.94	80.0	100.0	1.00
雷竹	98.9	92.1	0.85	92.9	91.6	0.84
水竹	73.3	100.0	1.00	100.0	80.0	0.78
杉木	45.5	100.0	1.00	50.0	71.4	0.72
马尾松	80.0	100.0	1.00	69.2	90.0	0.87
常绿阔叶树	90.0	77.1	0.73	93.6	87.9	0.85
落叶阔叶树	97.3	94.7	0.94	97.6	97.6	0.98
总体分类精度		80.2			90.5	
总体 Kappa 系数		0.78			0.86	

从表 2 可知，包络线去除法所选取的特征波段各类指标值都比原始图像分类结果高，其总体分类精度与总体 Kappa 系数分别为 90.5%与 0.86；而原始图像分类的总体分类精度与总体 Kappa 系数分别为 80.2%与 0.78。由此可知，包络线去除法所选取的特征波段都能有效地把毛竹、雷竹、水竹、杉木、马尾松、常绿阔叶树和落叶阔叶树 5 个森林树种及 2 个树种组区分出来。

5 结论与讨论

本文使用传统监督分类中的最大似然法对原始光谱与包络线去除法所选取的特征波段组合图进行分类，从分类的结果来看，包络线去除法总体分类精度与总体 Kappa 系数分别为 90.5%和 0.86；而原始图像总体分类精

度为 80.2%，总体 Kappa 系数为 0.78。研究表明，包络线去除法的总体分类精度与总体 Kappa 系数都比原始图像高，由此可知，包络线去除法能够有效地把毛竹、雷竹、水竹、杉木、马尾松 5 个森林树种，常绿阔叶树和落叶阔叶树 2 个树种组区分出来。

与多光谱遥感图像进行森林树种及树种组识别相比，高光谱遥感图像能够使得森林树种及树种组识别精度有所提高。高光谱遥感图像不仅包含高分辨率的光谱信息，同时还具有一定的空间信息（纹理信息、数学形态学信息等），综合利用这些光谱特征和空间特征能够提高分类精度，但是过多的特征会造成数据冗余和计算量的增加。因此，在分类之前，有必要在不损失有用信息的前提下提取光谱特征进行降维从而提高分类精度。

高光谱遥感图像特征提取和分类是图像处理领域中一个实际存在且具有挑战性的问题，其光谱分辨率很高，一般波段宽度小于 10 nm，在林业的定量监测与分析方面具有很大的潜力。目前对森林树种及树种组分类识别的方法较为普遍，而且分类效果差，本文对高光谱遥感图像像元亮度值进行处理，增强像元亮度值的差异，选择差异性较大的特征波段进行组合降维，从而提高森林树种及树种组分类的精确度。本文的研究结果将为利用高光谱遥感图像数据进行特征提取和降维及分类提供理论支撑与参考，也可应用于林业调查、林地变更调查、各类树种及树种组分类等领域。

参考文献:

- [1] 王妮, 彭世揆, 李明诗. 基于树种分类的高分辨率遥感数据纹理特征分析[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(2): 210-217.
- [2] 朱炜, 李东, 沈飞, 等. 高光谱遥感森林树种分类研究进展[J]. 浙江林业科技, 2013, 33(2): 84-90.
- [3] 陈工, 李琦, 张彦南, 等. 多源遥感信息提取桉树人工林[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(2): 78-87.
- [4] 曾庆伟, 武红敢. 基于高光谱遥感技术的森林树种识别研究进展[J]. 林业资源管理, 2009(5): 109-114.
- [5] 李子艺, 王振锡, 岳俊, 等. 基于 BP 神经网络的高光谱果树树种识别研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 410-414.
- [6] RAYMOND F K, ROGER N C. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption feature and stepwise multiple linear regression[J]. *Remot Sens Environ*, 1999, 67: 267-287.
- [7] 陈述彭, 宽庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 163-164.
- [8] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 145-148.