

## 结合纹理信息 Hyperion 高光谱影像分类

张倩倩<sup>1</sup>, 陈 健<sup>1</sup>, 江 洪<sup>1,2</sup>, 唐敏忠<sup>1</sup>

(1. 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 临安 311300; 2. 南京大学  
国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 高光谱遥感光谱特征明显, 单纯利用其光谱优势难以达到影像分类精度要求, 特别是区分植被精细类别。为了进一步提高 Hyperion 高光谱影像分类精度, 研究加入包含区域亮度变化及结构特征的纹理信息, 试图提高分类精度。以杭州市余杭区百丈镇为试验区, 首先提取研究区道路、建筑物、农田、毛竹 *Phyllostachys edulis* 林、马尾松 *Pinus massoniana* 林和栎类 *Quercus* 等 7 种类型的端元光谱, 然后对端元进行线性光谱分离, 利用二阶概率矩阵对线性光谱分离出的 8 个波段提取纹理特征, 最终结合线性分离后的端元光谱实现分类。结果表明: 纹理信息融入后分类结果较单源信息光谱角制图和单源信息支持向量机方法有明显的改善, 建筑物精度分别提高了 34.13% 和 17.16%, 农田提高了 19.71% 和 9.24%, 马尾松则改善了 27.09% 和 5.42%, 栎类精度提高了近 3.00% 和 10.00%, 且一定程度上避免了椒盐效应。采用光谱与纹理信息结合的方法对 Hyperion 高光谱影像分类是可行的。分类过程中端元的提取、纹理分析时特征向量的组合及纹理移动窗口大小的选择对分类结果起重要的作用。图 6 表 1 参 19

**关键词:** 森林测计学; 遥感; 分类; 高光谱; 端元; 纹理

中图分类号: S758.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)06-0880-07

## Classification of Hyperion hyperspectral imagery data using texture

ZHANG Qianqian<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, JIANG Hong<sup>1,2</sup>, TANG Minzhong<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing has an obvious spectral signature, which can provide detailed spectral mapping across all 220 bands with high radiometric accuracy, but it is difficult to achieve classification accuracy for different cover types with their unique spectrum especially for the fine vegetation categories. To improve classification and to overcome lack of precision with the unique spectral signature of Hyperion hyperspectral imagery data, spectrum data together with textural information, which described the image's change of gray scale and structural characteristics in the research area of Baizhang Town, Yuhang District, Hangzhou City, was used with endmembers of roads, buildings, farms, *Phyllostachys edulis*, *Pinus massoniana*, *Quercus*, and other species being extracted from images based on sub-compartmental division of high resolution images. Then, from these seven mixed endmembers, linear spectral unmixing was conducted. Next, the second order probability matrix from ENvironment for Visualizing Images (ENVI) software was used to extract eight texture quantities from the unmixing results. Finally, all texture quantities together with the eight unmixing endmembers were utilized for classification, and compared to treatments of Spectral Angle Mapper and replications of Support Vector Machine with single spectral information, precision of building increased 34.13% and 17.16%, accuracy of farming improved 19.71% and 9.24%, precision of *Pinus massoniana* in-

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61190114); 浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50030); 浙江农林大学科研启动基金资助项目(2351000758)

作者简介: 张倩倩, 从事环境遥感研究。E-mail: zhangqianqian.1986@163.com。通信作者: 陈健, 从事大气气溶胶、环境遥感、土地利用等研究。E-mail: chenjian@126.com

creased 27.09% and 5.42%, accuracy of *Quercus*—oak improved 3.00% and 10.00% nearly. Classification accuracy of most cover types increased. Therefore, to achieve classification of Hyperion hyperspectral imagery data with spectrum and textural information and to solve the salt and pepper effect problem, extraction of endmembers, combinations of eigenvectors during texture analysis, and selection of the texture size's moving window, all played an important role during the classification process. [Ch, 6 fig. 1 tab. 19 ref.]

**Key words:** forest mensuration; remote sensing; classification; hyperspectrum; endmember; texture

20 世纪 80 年代, 高光谱遥感技术的出现给各领域的遥感定量研究带来了新的发展<sup>[1]</sup>。高光谱遥感数据以纳米级的超高光谱分辨率对目标空间特征成像的同时, 对每个像元可在更宽波长范围上形成几十个乃至几百个窄波段连续的光谱覆盖<sup>[2]</sup>, 从而实现依据地物光谱特征的地物成分信息反演与地物识别<sup>[3-4]</sup>。基于遥感数据实现地物分类的研究很多<sup>[5-6]</sup>, 因其数据、景观复杂程度的不同采用不同的分类方法。目前, 高光谱影像分类主要有 2 种思路: 一种是基于野外实测光谱数据, 选择特定参数或波段, 验证原样品进行回判率检验<sup>[7-8]</sup>; 另一种是基于已获遥感数据的特征空间和光谱匹配的分类方法。韩玲等<sup>[9]</sup>提出一种结合地物空间特性的高光谱图像分类方法; 曾庆伟<sup>[10]</sup>运用典型相关判别分析法实现植被类型的精细划分。通过分析、比较不同地物特定的光谱参量能够达到分类和识别的目的。但是, 对于精细的地物类型, 如马尾松 *Pinus massoniana* 林、栎类 *Quercus*、毛竹 *Phyllostachys edulis* 林等, 虽然在某波段范围内可能存在差异, 但由于其差异性不大, 利用单一的光谱特征或分类器并不能获得满意的分类效果。图像纹理可以反映图像色调作为等级函数在空间上的变化, 纹理特征的引入能够增强单个像元光谱数据的信息内容, 提高不同物体和区域的识别精度<sup>[11-12]</sup>。支持向量机在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出特有的优势<sup>[13]</sup>, 前人利用 Landsat 数据试验证明了原始光谱信息加上纹理信息可以提高影像分析的精确性<sup>[14]</sup>, 所以, 本研究将 Hyperion 高光谱数据解混后的光谱与纹理相结合, 运用支持向量机分类方法, 分析能否提高各地物分类精度, 尤其是能否提高精细植被类型的分类精度。

## 1 研究区概况及数据预处理

### 1.1 研究区概况

杭州市余杭区地理坐标为 30°09'~30°34'N, 119°40'~120°23'E, 位于杭嘉湖平原南端, 西依天目山, 南濒钱塘江, 是长江三角洲的圆心地。研究区百丈镇位于杭州市余杭区西北端, 全镇总面积 60.4 km<sup>2</sup>, 是典型的山区, 境内地势自西北向东南倾斜, 属浙北山区, 森林覆盖率达到 85%, 植被类型主要是毛竹林、马尾松林、栎类、低矮灌木等。地处北亚热带南缘季风气候区, 温暖湿润, 四季分明, 雨水充沛。

### 1.2 数据获取及预处理

研究获取了余杭区百丈镇部分地区的 2004 年 4 月 4 日 Hyperion Level 1Gst 数据产品(Hyp-L1G), 共 242 个波段。前 70 个波段为可见光近红外波段(VNIR, 400~1 000 nm), 71~242 波段为短波红外波段(SWIR, 900~2 500 nm), 空间分辨率为 30 m, 光谱分辨率达到 10 nm。在遥感图像某些波段上同谱异物现象很多, 基于高光谱数据极高的光谱分辨率, 挑选有效波段组合, 描述地面物质的差异性, 以此建立特征数据与地物之间一一对应关系。图 1 为同一空间分辨率的光谱差异比较, Hyperion 高光谱影像与同一空间分辨率的 Landsat 影像相比, 在光谱分辨率上有明显的优势。

研究首先将百丈镇矢量数据生成感兴趣区, 统一数据基准面类型及投影坐标系, 去除 44 个未定标, 2 个重复波段, 及受水汽影响严重的 20 个波段, 然后利用 FLAASH 大气校正模块对影像进行大气校正(图 2), 并利用 2005 年该区域的 IKONOS 高分辨率影像对该图像进行几何校正, 误差控制在 1 个像元内。通过目视解译挑选清晰质量较好的波段, 最后截取 100×100 个像元高光谱数据, 最终得到 1 幅 155 个波段的测试数据。

## 2 技术路线与研究方法

首先, 提取原始影像的端元光谱, 利用线性光谱混合模型对提取的端元进行解混, 以此为基础提取图像纹理特征, 然后将光谱与纹理信息结合, 参与分类, 并与单独利用光谱信息的分类精度进行比较,

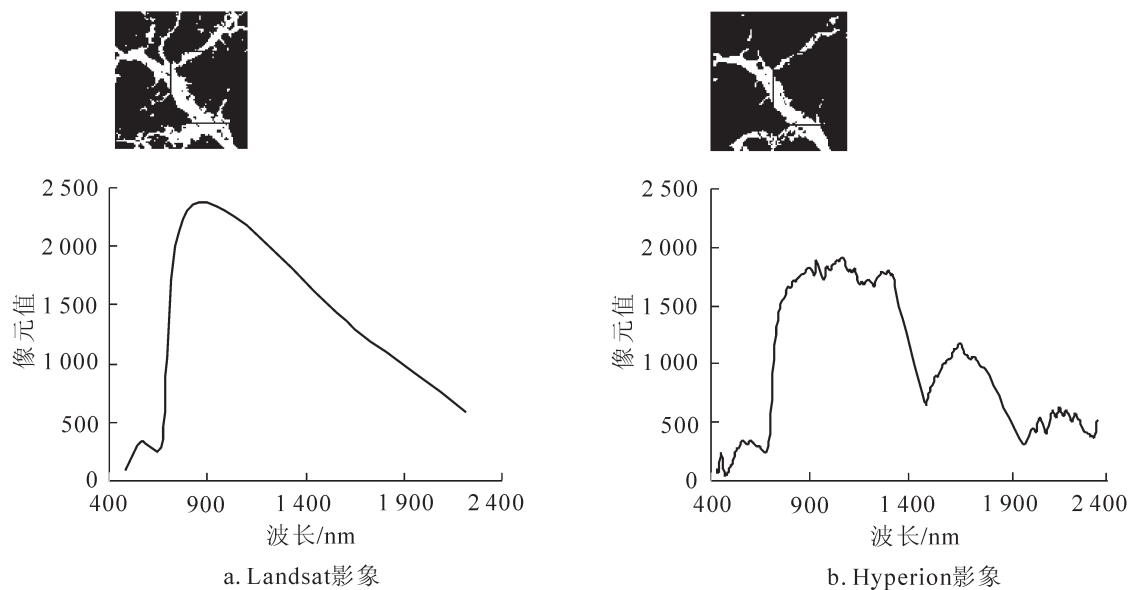


图1 同一空间分辨率 Landsat 与 Hyperion 植被光谱曲线差异

Figure 1 Differences of spectral curve between Landsat and Hyperion with the same species and the same space resolution

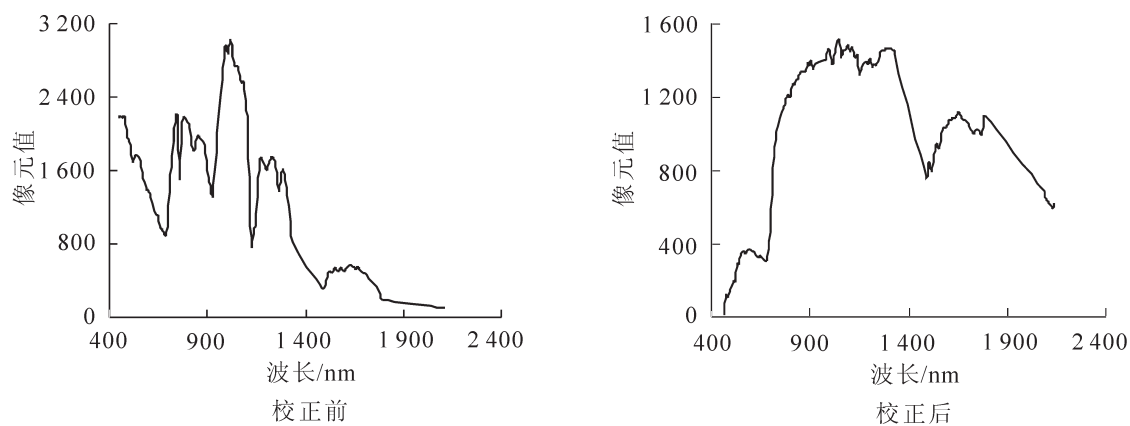


图2 大气校正前后植被光谱曲线对比

Figure 2 Comparison of vegetation spectral curve before and after correcting

分析纹理特征的加入对分类精度的提升效果，具体操作流程如图3。

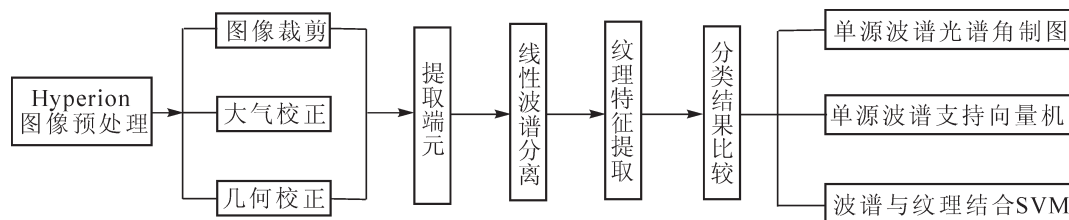


图3 技术路线

Figure 3 The technical route

### 2.1 端元提取

在一幅图像中，光谱端元的选择和识别对于基于光谱匹配的影像分类结果精度有至关重要的作用。在端元提取的过程中，像元的光谱特征并不是单一的，来源于反射光谱库中的光谱端元可以表示为真正的端元。然而，由于缺少光谱库数据或光谱属性的实际测量，根据已有的土地覆盖类型图像提取端元成为一种行之有效的方法<sup>[15]</sup>。

对照百丈镇 IKONOS 1 m 高分辨率全色影像及余杭区百丈镇 2005 年森林资源二次调查小斑面, 在原始 Hyperion 影像上选择公路训练样本 40 个, 建筑物训练样本 31 个, 农田训练样本 45 个, 毛竹林训练样本 113 个, 栎类训练样本 58 个, 马尾松林训练样本 59 个, 其他训练样本 31 个。样点的均值作为各地物类型各波段的取值, 确定 end member 的光谱值(图 4), 从而保证端元提取的精确性。

## 2.2 线性波谱分离(LSU)

通过大气校正克服了由于大气传输过程中引起的部分非线性混合光谱效应<sup>[16]</sup>, 而通常情况下, 高光谱图像中每个像元都可以近似认为是图像中各个端元的线性混合<sup>[2]</sup>, 线性波谱混合模型是混合像元分解的常用方法, 可用以下公式表达:

$$R_i = \sum_{j=1}^n f_j a_{ij} + \varepsilon_i$$

其中:  $R_i$  为第  $i$  波段的像元光谱反射率,  $n$  为基本组分个数,  $f_j$  为第  $j$  个基本组分(end member)所占的分量值,  $a_{ij}$  为第  $j$  个基本组分在  $i$  个波段的光谱反射率,  $\varepsilon_i$  为残余误差值(即光谱的非模型化部分)。

通过线性光谱混合模型对提取后的 7 个端元光谱进行解混, 分解结果由道路、建筑、农田、毛竹林、栎类、马尾松林、其他等 7 个端元分量图像和 1 个均方误差(RMS)图像组成, 分量图像反映的是所选取端元(end member)的光谱反射特征, RMS 图像反映的是混合模型的精确程度。这 8 个波段构成一幅图像参与下一步纹理特征的提取。

## 2.3 纹理分析

灰度联合概率矩阵(共生矩阵)法是对图像所有像元进行统计查, 是一种经典的纹理统计分析方法<sup>[17]</sup>。本研究利用二阶概率矩阵(co-occurrence texture)法提取纹理特征, 即: 在灰度共生矩阵的基础上再提取纹理特征量, 通过二阶概率矩阵, 得到了中值(mean), 协方差(variance), 同质性或称为逆差距(homogeneity), 反差(contrast), 差异性(dissimilarity), 熵(entropy), 二阶距(second moment)和自相关(correlation)8 种纹理信息的特征统计量。

对解混后的 7 个端元及 1 个误差图像组成的 8 个波段运行二阶概率矩阵后, 产生 64 个分量图像波段, 加之经过线性波谱分离的 8 个波段, 共 72 个波段参与遥感分类。

## 2.4 支持向量机

支持向量机(SVM)是在统计学理论上发展起来的一种新型机器学习方法, 通过引入结构风险最小化原理, 最优化理论和核方法演化而成的一个一般化线性分类器, 是一个能够将不同类样本在样本空间分隔的超平面, 即给定一些标记好的训练样本, SVM 算法输出一个最优化的分隔超平面。在分类识别中, SVM 学习方法特有的优势, 可有效地避免高光谱分类时的 Hughes 现象, 虽存在耗时问题但已在高维度光谱分析中成功应用<sup>[18]</sup>。核函数能巧妙地解决低维空间向量映射到高维空间带来的复杂度增加问题, 因此成为 SVM 的关键。目前, 研究对 SVM 核函数及其参数的选择仍没有形成一个统一的模式, RBF 核函数有自己独有的特点<sup>[13]</sup>, 因此, 本研究采用该函数, 参与最终的分类。

## 3 结果与分析

为了更好地证明波谱与纹理结合方法对分类精度的提高, 将它们与单源信息光谱角制图与单源信息支持向量机 2 种方法做了比较(图 5)。

从图 5 可以看出: 由于数据冗余及噪声的存在, 单纯利用光谱信息的光谱角填图方法得到的分类结果有大量的椒盐效应, 错分现象严重。运用支持向量机方法虽然使这一现象大大缓解, 但仍然大量存在, 而结合纹理信息后则有效地避免了这一现象, 其中农田、马尾松和栎类分类效果最好, 呈连续面状

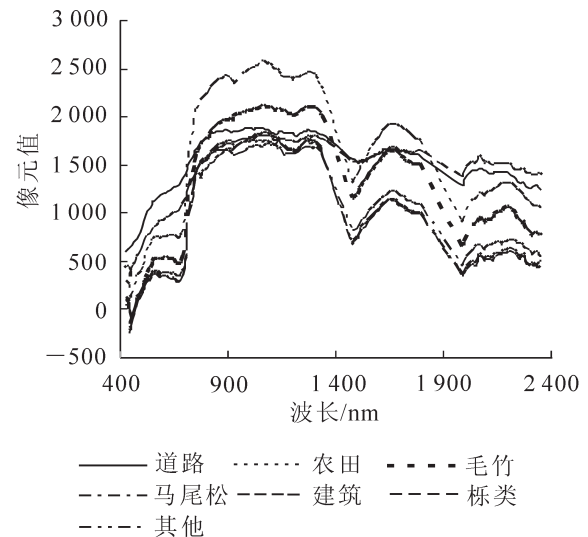


图 4 端元光谱曲线

Figure 4 The spectral curve of extracted end members

分布, 分类斑块完整。

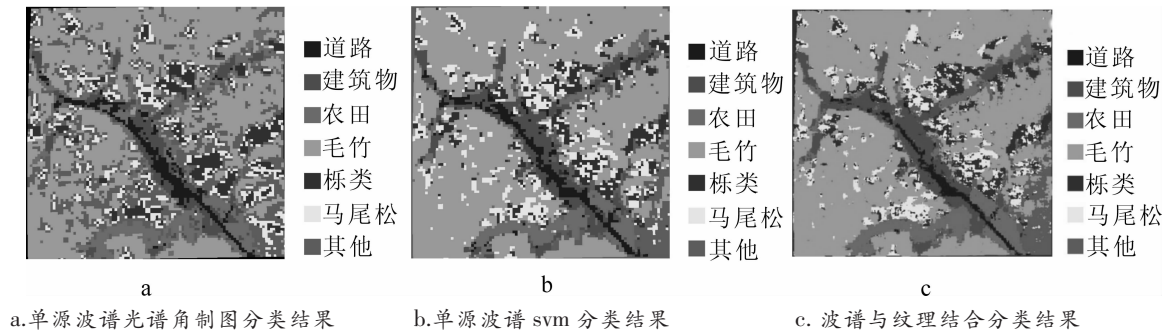


图5 分类结果比较

Figure 5 Results of image classification based on different methods

为了更好地说明该方法的有效性, 分别对公路、建筑物、农田、毛竹林、栎类、马尾松林和其他样本选择 42, 62, 76, 193, 82, 77 和 53 个检验样本, 建立混淆矩阵, 定量分析评价该方法较其他 2 种方法精度的提高(图 6)。通过比较得出, 单源信息的支持向量机方法较光谱角制图法, 各地物精度有明显的提高, 而结合纹理信息后除道路外, 各地物分类精度又有提高。其中建筑物、其他灌木、农田、马尾松林精度提高最为明显, 建筑物精度较前 2 种方法分别提高了 34.13% 和 17.16%, 农田提高了 19.71% 和 9.24%, 马尾松林则改善了 27.09% 和 5.42%。相比单源信息的支持向量机分类, 由于纹理特征加入削弱了道路有用光谱信息, 道路与建筑物、农田的纹理特征相似, 尤其是道路 20.11% 错分给建筑物, 使其分类精度降低, 形状不完整, 与其他光谱相似的分类目标混叠而没被分离成独立的对象。

纹理分析时, 移动窗口大小的选择在纹理特征提取过程中作用尤为重要<sup>[19]</sup>。本研究比较了  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$  和  $11 \times 11$  的窗口大小对分类精度的影响(表 1)。结果显示:  $5 \times 5$  窗口总体精度及 Kappa 系数最高, 不同纹理窗口对地物生产者精度与用户精度产生不同的影响。因此, 选择适宜的移动窗口对提高分类精度至关重要。

#### 4 结论与讨论

高光谱遥感以其高光谱分辨率, 图谱合一和光谱波段多等 3 个特点显著优于其他多光谱数据, 这也为获取地物在一定范围内连续精细的光谱曲线, 深入地考察精细植被类型的光谱响应机制提供条件。纹理特征的加入, 使研究区总体精度较 2 种单纯利用波谱信息方法分别提高了 11.70% 和 4.90%, Kappa 系数由 0.61, 0.76 改善到 0.82, 由此验证了该方法的有效性。验证结果也表明, 纹理分析虽广泛应用于高分辨率遥感影像, 但结合其他辅助要素, 在较低空间分辨率遥感数据上也能得到较好的分类结果。

波谱与纹理的结合能够有效地消除图像椒盐效应, 基本发挥高光谱遥感的光谱优势, 提高研究区分类精度; 要想提高精细植被类型分类精度, 单纯利用一种分类器或者提取某一特征并不能取得满意的效果, 多种分类器的结合或是特征的综合运用是提高分类精度的有效办法。

纹理分析时, 分类精度并未因纹理窗口的增大而提高, 不同的纹理窗口对分类精度产生不同的影响; 选择二阶概率矩阵全部 8 个特征向量, 运算量较大, 比较耗时。因此, 如何有效地选择适宜的移动窗口, 并根据不同地物的特性选用合理的特征或特征向量组合, 以减小运算量, 实现最优的分类效果,

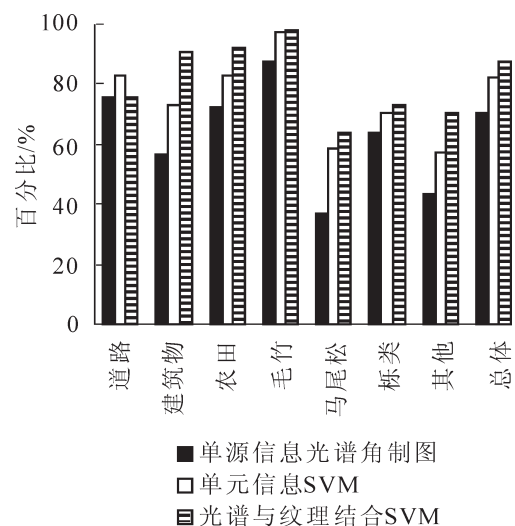


图6 各地物分类精度比较

Figure 6 Different classification accuracy based on different methods

表 1 不同纹理窗口大小分类结果比较

Table 1 Comparison of accuracy between different sizes of texture moving window

类别	3×3		5×5		7×7		9×9		11×11	
	生产者 精度/%	用户 精度/%	生产者 精度/%	用户 精度/%	生产者 精度/%	用户 精度/%	生产者 精度/%	用户 精度/%	生产者 精度/%	用户 精度/%
道路	73.57	85.20	75.81	86.12	88.14	60.50	89.36	62.04	89.15	61.92
建筑	89.59	85.71	90.48	86.34	75.64	81.55	77.55	82.42	78.45	82.11
农田	91.65	91.36	92.08	93.23	84.93	92.42	85.18	93.31	84.80	93.16
毛竹林	98.13	93.65	98.35	94.39	97.54	95.22	97.17	95.87	97.43	96.29
栎类	71.27	71.26	73.16	73.45	74.07	71.35	76.18	73.68	77.49	74.48
马尾松林	61.79	66.86	63.91	68.23	66.26	65.40	69.03	67.83	69.25	68.22
其他	66.71	80.80	70.23	81.68	59.27	76.56	63.65	78.50	66.63	80.46
总体精度/%	86.29		87.32		84.58		85.72		86.09	
Kappa 系数	0.81		0.83		0.80		0.81		0.81	

还需进行深入的分析 and 探讨。本研究以百丈镇  $100 \times 100$  像元区域为试验区，范围小，栎类、马尾松林等精细植被类型栽植比例也较小，能否以同样的方法在大范围、植被种类繁多且栽植比例高的区域成功推广还需要做进一步的研究。

#### 参考文献：

- [1] 吴见, 彭道黎. 高光谱遥感林业信息提取技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(9): 2305 – 2312.  
WU Jian, PENG Daoli. Advances in researches on hyperspectral remote sensing forestry information-extracting technology [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2011, **31**(9): 2305 – 2312.
- [2] 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.
- [3] 盖颖颖, 范闻捷, 徐希孺, 等. 基于高光谱数据的呼伦贝尔草原花期物种识别和覆盖度估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(10): 2778 – 2783.  
GAI Yingying, FAN Wenjie, XU Xiru, *et al.* Flower species identification and coverage estimation based on hyperspectral remote sensing data in Hulunbeier Grassland [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2011, **31**(10): 2778 – 2783.
- [4] 修丽娜, 刘湘南, 刘美玲. 镉污染水稻高光谱诊断分析与建模[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(1): 192 – 196.  
XIU Li'na, LIU Xiangnan, LIU Meiling. Analysis and modeling of hyperspectral singularity in rice under Cd pollution [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2011, **31**(1): 192 – 196.
- [5] 罗虹, 徐京华, 蔡国林. 决策树算法在西藏遥感影像分类中的应用研究[J]. 测绘, 2011, **34**(1): 3 – 6.  
LUO Hong, XU Jinghua, CAI Guolin. The application research of decision tree algorithm in Tibet remote sensing image classification [J]. *Surv Map*, 2011, **34**(1): 3 – 6.
- [6] 张锦水, 何春阳, 潘耀忠, 等. 基于 SVM 的多源信息复合的高空间分辨率遥感数据分类研究[J]. 遥感学报, 2006, **10**(1): 49 – 57.  
ZHANG Jinshui, HE Chunyang, PAN Yaozhong, *et al.* The high spatial resolution RS image classification based on SVM method with the multi-source data [J]. *J Remote Sens*, 2006, **10**(1): 49 – 57.
- [7] 王志辉. 高光谱遥感在森林树种识别中的应用[D]. 临安: 浙江农林大学, 2007.  
WANG Zhihui. *Application of Hyperspectral Remote Sensing in Forest Tree Species Discrimination* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2007.
- [8] 张芳, 熊黑钢, 努尔巴依·阿布都沙力克, 等. 新疆天山北坡常见盐生植物端元尺度光谱特征及识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(12): 3336 – 3341.  
ZHANG Fang, XIONG Heigang, NURBAY Abdusalih, *et al.* Response characteristics of the field-measured spectrum for the four general types of halophyte and species recognition in the northern slope area of Tianshan Mountain in Xinjiang [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2011, **31**(12): 3336 – 3341.
- [9] 韩玲, 张若岚, 谢秋昌. 结合地物空间特性的高光谱图像分类方法研究[J]. 测绘科学, 2011, **36**(3): 150 –

151.

HAN Ling, ZHANG Ruolan, XIE Qiucang. Classification method of hyperspectral images combined with spatial characteristic of ground objects [J]. *Sci Surv Map*, 2011, **36**(3): 150 – 151.

- [10] 曾志伟. 基于 Hyperion 高光谱数据的森林类型精细识别研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.  
ZENG Zhiwei. *Forest Type Precise Identification Based on Hyperion Data* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [11] LONSO F G, SORIA S L. Using contextual information to improve land use classification of satellite images in central Spain [J]. *Int J Remote Sens*, 1991, **12**(11): 2227 – 2235.
- [12] ARAI K. A classification method with a spatial-spectral variability [J]. *Int J Remote Sens*, 1993, **14**(4): 699 – 709.
- [13] 陈波, 张友静, 陈亮. 结合纹理的 SVM 遥感影像分类研究[J]. 测绘工程, 2007, **16**(5): 23 – 27.  
CHEN Bo, ZHANG Youjing, CHEN Liang. RS image classification based on SVM method with texture [J]. *Eng Surv Map*, 2007, **16**(5): 23 – 27.
- [14] 刘龙飞, 陈云浩, 李京. 遥感影像纹理分析方法综述与展望[J]. 遥感技术与应用, 2003, **18**(6): 441 – 447.  
LIU Longfei, CHEN Yunhao, LI Jing. Texture analysis methods used in remote sensing images [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2003, **18**(6): 441 – 447.
- [15] ASHOORI H, FAHIMNJAD ALIMOHAMMADI A, *et al.* Evaluation of the usefulness of texture measures for crop type classification Hyperion data [J]. *Int Arch Photogramm Remo Sens Spat Inform Sci*, 2008, XXXV II(B8):999 – 1006.
- [16] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 328 – 334.
- [17] 许建东, 染鹏, 樊笑英, 等. 基于遥感影像光谱与纹理分析的地物分类: 以长白山天池火山地区为例 [J]. 地震地质, 2009, **31**(4): 607 – 616.  
XU Jiandong, LUAN Peng, FAN Xiaoying, *et al.* Analysis of spectrum and texture information on Changbaishan Tianchi volcano caldera and its application [J]. *Seismol & Geol*, 2009, 2009, **31**(4): 607 – 616.
- [18] 王立国, 赵春晖, 乔玉龙, 等. 高光谱图像分类的全面加权方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(6): 442 – 446.  
WANG Liguang, ZHAO Chunhui, QIAO Yulong, *et al.* Research on all-around weighting methods of hyperspectral imagery classification [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2008, **27**(6): 442 – 446.
- [19] LI Guiying, LU Dengsheng, EMILIO M, *et al.* Land-cover classification in a moist tropical region of Brazil with Landsat Thematic Mapper imagery [J]. *Int J Remote Sens*, 2011, **32**(23): 8207 – 8230.