

## 基于包络线法的不同树种叶片高光谱特征分析

丁丽霞<sup>1,2</sup>, 王志辉<sup>1</sup>, 葛宏立<sup>1,2</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. 浙江农林大学 环境科技学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 高光谱遥感的出现使树种的精细识别成为可能, 而高光谱数据具有波段多、数据量大、冗余度大等特点, 利用高光谱遥感技术进行树种鉴别时, 光谱特征的选择及提取是个非常重要的过程。选择了樟树 *Cinnamomum camphora*, 麻栎 *Quercus acutissima*, 马尾松 *Pinus massoniana* 和毛竹 *Phyllostachys pubescens* 4 个树种, 利用包络线去除法对 ASD 高光谱仪实测的原始光谱数据处理, 比较原始光谱和包络线去除曲线图, 选择差异较大的波段用于识别不同树种, 用欧氏距离法检验所选择的波段识别不同树种的效果。结果证明, 利用波段较窄的高光谱数据能够挖掘出不同树种的光谱差异, 实现不同树种的鉴别; 包络线去除法能够有效解决高光谱数据冗余的问题, 对 4 个树种叶片的高光谱进行波段选择, 能够将有效波段减少到 8 个, 为 484~493, 670~679, 971~980, 1 162~1 171, 1 435~1 444, 1 773~1 782, 1 918~1 927 和 2455~2464 nm, 并得到较理想的树种鉴别效果。图 5 表 2 参 11

**关键词:** 森林经理学; 树种识别; 高光谱; 包络线去除; 欧氏距离

**中图分类号:** S757      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2010)06-0809-06

## Continuum removal based hyperspectral characteristic analysis of leaves of different tree species

DING Li-xia<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-hui<sup>1</sup>, GE Hong-li<sup>1,2</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. School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** The development of hyperspectral remote sensing technology enables the precise identification of tree species possible. Because hyperspectral data are characterized by multiple bands, large database and great redundancy, the extraction and selection of the spectral characteristics is a very important process when identifying the tree species with hyperspectral remote sensing technology. The method of continuum removal was used to deal with the original spectral data of four tree species measured by ASD hyperspectral instrument. The curves of the original spectrum and the continuum removal were compared and the bands with greater differences were selected to identify the different tree species. Then the Euclidean distance method was used to test the selective bands identifying different tree species. The results showed that the continuum removal was an effective method of feature band extraction. Eight effective bands were selected with the continuum removal, including 484-493, 670-679, 971-980, 1 162-1 171, 1 435-1 444, 1 773-1 782, 1 918-1 927 and 2 455-2 464 nm. They could identify different tree species effectively. [Ch, 5 fig. 2 tab. 11 ref.]

**Key words:** forest management; tree species identification; hyperspectral; continuum removal; Euclidean distance

收稿日期: 2010-01-07; 修回日期: 2010-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771725); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA12Z109); 浙江省林业厅资助项目(07A16); 浙江省教育厅资助项目(20060651)

作者简介: 丁丽霞, 副教授, 博士, 从事林业遥感与信息技术研究。E-mail: dlxlxy@126.com

如何快速精确地获取森林树种的空间分布信息是森林资源管理工作与生态学家一直致力于攻克的难题<sup>[1-2]</sup>。遥感技术应用于林业的40多年里,大面积应用多光谱遥感数据(如TM, SPOT)进行的森林资源分类只能分到树种组或简单地将树种分为针叶和阔叶两大类。近年来,高光谱遥感技术的出现与应用,为解决大面积森林树种精细识别提供了新的途径。高光谱遥感与多光谱遥感相比,具有波段多,波段窄和波段连续的特点,为研究人员提供了关于地物更细致的光谱信息<sup>[3]</sup>,能够探测到具有细微光谱差异的各种物体,因此,能够大大地改善对植被的识别和分类精度<sup>[4]</sup>。在利用和处理高光谱数据时通常都会遇到数据量大和数据冗余度高的问题。高光谱波段一般都是上百个,甚至上千个;数据采样间距一般都在纳米级,造成了相邻波段的高度相关性,冗余度也随之增加。如何既有效地利用高光谱数据的最大信息,又能较快地处理高光谱数据,成为高光谱遥感的研究热点。其中,有关光谱特征选择和特征提取的研究是一个重要方向。国内外学者对此进行了广泛研究。Zhu等<sup>[5]</sup>将基于联合熵的算法用于最优波段选择和影像融合质量评价;张辉等<sup>[6]</sup>使用一种基于包络线的新型滤波方法有效地消除信号中的各种低幅度噪声;Kuo等<sup>[7]</sup>系统地研究了特征提取算法,如可分性分析特征提取、非参数可分性分析、非参数加权特征提取等算法。此外,光谱特征选择与提取的方法还有光谱吸收特征参数、光谱编码、导数光谱和光谱吸收指数等等<sup>[10]</sup>。本研究利用包络线去除法对实测的树种叶片高光谱反射率数据进行处理分析,充分发挥包络线去除法的优势,挖掘树种叶片光谱中的吸收特征信息,并选择区分不同树种的波段及光谱特征参量来探索高光谱遥感技术树种分类的可行性,为使用高光谱遥感数据进行大面积森林树种识别提供一些经验。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据获取

本研究实验地点为浙江省临安市浙江农林大学校内植物园,选择了樟树 *Cinnamomum camphora*, 麻栎 *Quercus acutissima*, 马尾松 *Pinus massoniana* 和毛竹 *Phyllostachys pubescens* 等4种南方常见的树种进行试验,其中前3种分别是常绿阔叶树、落叶阔叶树、常绿针叶树,都是南方森林典型的树种类型。采样时各种树选取5株,采集10片·株<sup>-1</sup>向阳面的成熟叶,共50个叶片样本。野外采样在晴朗的天气进行,选择生长茂盛的树进行树叶采集,放在保鲜箱里,并迅速带到室内利用ASD FieldSpec Pro FR野外光谱辐射仪进行光谱测量。该光谱仪的波段范围为350~2500 nm,共2150个波段,为了光谱测量的准确性和稳定性,利用该光谱仪配套的植被高密度探头进行光谱测量,阔叶树种叶片紧贴探头进行测量,针叶树种的针叶紧密排列一层,再紧贴探头进行光谱测量,测完10片树叶进行1次标准白板的校正。为减小仪器和观测时产生的误差,各个叶片重复测10次求平均值作为该叶片的光谱测量值,将10片·株<sup>-1</sup>树叶光谱反射率进行平均,求得每株树的光谱反射率;而后对各种树的5株树的光谱反射率值取平均值,得到各种树的光谱反射率值。

### 1.2 包络线去除法

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<sup>[8]</sup>,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<sup>[9]</sup>。“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(2)。

光谱曲线的包络线从直观上来看,相当于光谱曲线的“外壳”(图1,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<sup>[10]</sup>。

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

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

式(1)(2)中： $\lambda_j$  是第  $j$  波段； $R_G$  是波段  $j$  的包络线去除值； $R_j$  是波段  $j$  的原始光谱反射率； $R_{\text{end}}$  和  $R_{\text{start}}$  是在吸收曲线里的起始点和末端点的原始光谱反射率； $\lambda_{\text{end}}$  和  $\lambda_{\text{start}}$  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。

## 2 结果与分析

### 2.1 原始光谱曲线分析

图 2 显示了 4 种树叶原始光谱反射率曲线。从图中可看出这 4 种树具有相似的光谱曲线形状，只是樟树和麻栎在波长 2 400 ~ 2 500 nm 处的光谱反射率与其他 2 种树叶略有不同，并且出现吸收谷，这主要是由于在这波段间被水的强吸收带所支配的。此外，在一些波段里也有差别，而这些差别反映了它们光谱特性的不同。从中选择那些差异性比较显著的波段(波段范围为 10 nm)，共计 11 个波段并取之平均值进行比较(图 3)。从图中可看出在波段 883 ~ 892, 970 ~ 979, 1 071 ~ 1 080, 1 657 ~ 1 666, 1 811 ~ 1 820 和 2 212 ~ 2 221 nm 处具有明显的差异。特别在波段 1 657 ~ 1 666 nm, 4 种树光谱差异性最大。而在波段 548 ~ 557, 1 193 ~ 1 202, 1 264 ~ 1 273, 1 443 ~ 1 452 和 1 922 ~ 1 931 nm 处其差异性稍小。

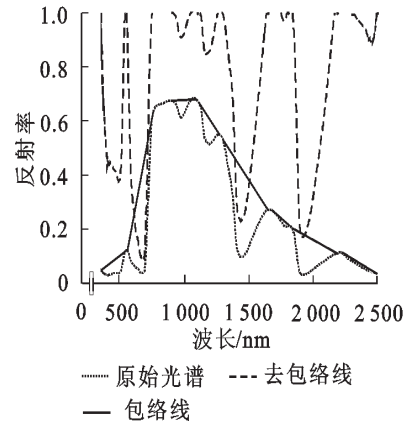


图 1 马尾松的原始光谱、去包络线和包络线曲线图

Figure 1 Curve of the original spectrum, continuum removal and continuum of *Pinus massoniana*

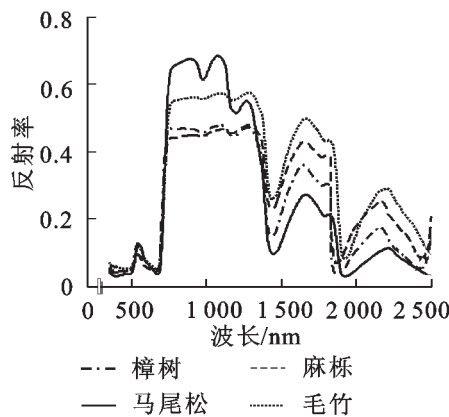
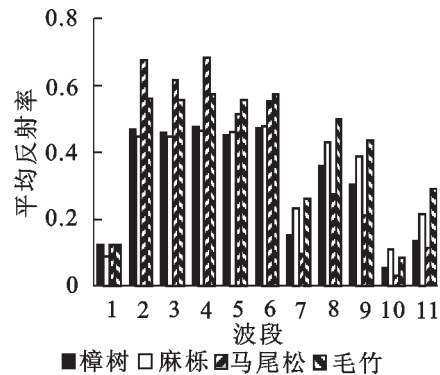


图 2 4 种树原始光谱曲线图

Figure 2 Curve of the original spectrum of four species trees



1~11 分别为波段 548~557, 883~892, 970~979, 1 071~1 080, 1 193~1 202, 1 204~1 273, 1 443~1 452, 1 657~1 666, 1 811~1 820, 1 922~1 931, 2 212~2 221 nm

图 3 4 种树不同波段间原始光谱反射率平均值比较

Figure 3 Comparison of reflectance average of the original spectrum of different bands of four species trees

### 2.2 包络线去除分析

包络线的节点，即原始光谱曲线凸出的峰值点。如果某一波段光谱一阶微分值为 0，且光谱二阶微分值小于 0 时，即可确定此波段为包络线节点。初步确定樟树、麻栎、马尾松和毛竹等 4 个树种的光谱包络线节点(表 1)，4 个树种在同一波峰的位置略有不同。为了在相同波段内对这 4 种树的原始光谱曲线进行分析对比，需统一不同树种的光谱包络线节点。例如，在樟树、麻栎、马尾松和毛竹的第 1 个波峰所对应的波长位置分别为 357, 358, 375 和 368 nm，为使包络线与原始光谱曲线的交点唯一，需取它们的相近值或平均值作为第 1 个包络线的起始节点，其节点值是 350 nm；第 2 个波峰

所对应的波长位置分别 543, 544, 544, 和 550 nm, 也取它们的相近值或平均值作为第 1 个包络线的末端节点, 其节点值是 540 nm, 这样就得到第 1 个包络线特征波段是 350 ~ 540 nm。依据此方法, 依次可选择 8 个显著的特征波段作为包络线去除区域, 它们分别是 350 ~ 540, 550 ~ 750, 900 ~ 1 050, 1 100 ~ 1 260, 1 290 ~ 1 640, 1 650 ~ 1 800, 1 810 ~ 2 170 和 2 190 ~ 2 500 nm。在确定包络线区域后, 再利用公式(1)与(2)对原始光谱进行包络线去除。

表 1 4 个树种的包络线节点选择结果

Table 1 Continuum node selection results of the 4 tree species

树种	波峰位置/nm										
	第 1 波峰	第 2 波峰	第 3 波峰	第 4 波峰	第 5 波峰	第 6 波峰	第 7 波峰	第 8 波峰	第 9 波峰	第 10 波峰	第 11 波峰
樟树	357	543	759	802	900	1 101	1 275	1 645	1 771	1 810	2 170
麻栎	358	544	768	915	1 120	1 285	1 660	1 811	2 170		
马尾松	375	544	756	885	1 081	1 262	1 645	1 810	2 173		
毛竹	368	550	751	1 116	1 295	1 672	1 812	2 208			

经过包络线去除处理后, 从图 4 中能看出这 4 种树的包络线去除曲线具有明显差异, 有利于区分不同树种。为进一步比较其差异性, 在这 8 个区域里每个区域的最低点(波谷)内选取波段宽度为 10 nm 并计算其包络线去除值的平均值进行比较(图 5)。从图中可看出在 484 ~ 493, 1 435 ~ 1 444 和 2 455 ~ 2 464 nm 波段之间具有明显的差异, 其中差异性最显著的是波段 2 455 ~ 2 464 nm。其余 5 个波段之间的差异性稍小。

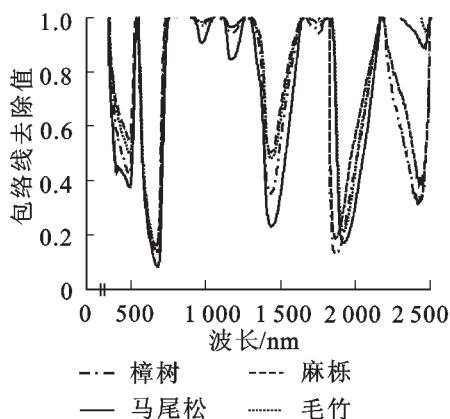


图 4 4 种树光谱去包络曲线图

Figure 4 Curve of the continuum removal of four species trees

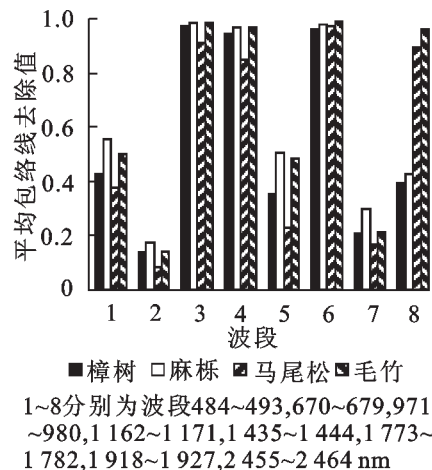


图 5 4 种树 8 个波段间光谱包络线去除的平均值比较

Figure 5 Comparison of the average of the continuum removal of eight bands of four species trees

### 3 结果分析与检验

为检验以上方法所选波段识别树种的效果, 本研究使用欧氏距离法<sup>[11]</sup>。以包络线去除法所选波段检验为例, 首先计算所选波段的各个树种 50 个样本的包络线去除平均值, 然后以任一种树为比较树种, 分别计算各个树种每个样本与比较树种的平均值之间的欧氏距离, 如公式(3)所示, 最后计算这 50 个样本的欧氏距离平均值, 如公式(4)所示。如果不同树种间欧氏距离的平均值大于同树种欧氏距离的平均值, 则说明所选波段能够有效区分不同树种。原始光谱所选波段的检验过程相同。

$$d_{MN} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{Mk} - \bar{x}_{Nk})^2} \quad (3)$$

$$D_{MN} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k d_{MN} \quad (4)$$

式(3)(4)中： $d_{MN}$ 是树种  $M$  第  $i$  个样本与比较树种  $N$  之间的欧氏距离； $D_{MN}$ 是树种  $M$  与树种  $N$  之间欧氏距离的平均值； $x_{Mk}$ 是树种  $M$  第  $i$  个样本第  $k$  波段原始光谱反射率、包络线去除值； $\bar{x}_{Nk}$ 是比较树种  $N$  第  $k$  波段 50 个样本原始光谱反射率、包络线去除的平均值； $i$  是样本个数( $i = 1, 2, 3, \dots, 50$ )； $n$  是波段总数； $K$  样本总数( $K = 50$ )。

由表 2 可看出，原始光谱和包络线去除所选波段的不同树种间欧氏距离的平均值都大于同树种欧氏距离的平均值，且不同树种间的欧氏距离，包络线去除法的要大于原始光谱的。可见，根据原始光谱和包络线去除曲线图的差异性所选择的波段都能够有效区分不同树种，而包络线去除法选择的波段效果更好。

表 2 2 种方法所选波段的不同树种间欧氏距离

Table 2 Euclidean distance of the selected band with the two methods of the double tree species

树种	樟树		麻栎		马尾松		毛竹	
	原始光谱	包络线去除	原始光谱	包络线去除	原始光谱	包络线去除	原始光谱	包络线去除
樟树	0.084 7	0.170 3	0.177 1	0.282 0	0.393 7	0.534 4	0.358 5	0.591 8
麻栎	0.190 1	0.285 7	0.058 2	0.151 7	0.493 4	0.610 0	0.271 0	0.550 7
马尾松	0.383 4	0.530 0	0.480 0	0.588 8	0.095 4	0.118 2	0.454 3	0.337 3
毛竹	0.352 5	0.577 4	0.268 9	0.510 0	0.458 5	0.350 6	0.107 1	0.061 8

## 4 结论

本研究分析了 4 个不同树种叶片的实测光谱曲线，虽然不同树种原始光谱曲线具有相似的光谱特点，但不同树种的光谱曲线还是存在着微小差异，选择差异较大的波段可用于区分不同的树种。利用包络线去除法对原始高光谱数据处理，包络线去除曲线中差异较大的波段可作为区分不同树种的最佳波段。利用欧氏距离法验证 2 种方法选择的波段，发现包络线法选择的波段能够更好地区分不同树种。包络线去除法充分利用了高光谱的连续性，将原始光谱里的微小变化与差异进行了扩大，在高光谱数据用于树种鉴别时，是一种有效的高光谱特征提取法。

根据原始光谱曲线的差异所选取的区分 4 个不同树种有 11 个波段，绿光波段有 1 个，其波长为 548 ~ 557 nm；其余 10 个波段都分布在近红外波段，并且差异性最大的也属于近红外波段，其波长为 1 657 ~ 1 666 nm。而包络线去除法选择 8 个波段，其中 1 个青光波段，其波长为 484 ~ 493 nm；1 个红光波段，其波长为 670 ~ 679 nm；其余 6 个波段为近红外波段，差异性最大的波段是 2 455 ~ 2 464 nm。由上可知，用于识别不同树种的波段大都位于近红外波段区域内，其差异性最大的波段也在近红外波段内。

## 5 讨论

本研究的树木叶片光谱数据是室内采集的，其数据没有任何外界因素的干扰。一般在野外采集的光谱数据会在 1 500 nm 和 1 900 nm 左右受到大气中水分的影响而失去数据，而本研究利用原始光谱和包络线去除法选择的最佳波段中都有 1 450 nm 和 1 920 nm 左右的波段，因而这 2 个波段对于野外获得的光谱数据进行树种鉴别就不适用了。

从波段宽度来看，区分不同树种所选择的波段宽度都在 10 nm 左右，说明要区分不同树种，须充分利用高光谱数据波段窄的优势，挖掘不同树种的高光谱信息的特征差异。目前，已有一些高光谱遥感卫星数据能够提供波段足够窄的图像数据，且覆盖红光、近红外等波段，如 MODIS 图像有 9 个近红外波段，EO-1 Hyperion 图像有 216 个近红外波段。本研究结果将为利用图像数据进行大面积森林

树种的高光谱遥感识别与监测提供一些经验。

#### 参考文献:

- [1] 夏伟伟, 韩海荣, 伊力塔, 等. 庞泉沟国家级自然保护区森林景观格局动态[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (6): 723 - 727.  
XIA Weiwei, HAN Hairong, YI Lita, *et al.* Dynamics of forest landscape pattern in Pangquangou National Nature Reserve [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (6): 723 - 727.
- [2] 施拥军, 徐小军, 杜华强, 等. 基于BP神经网络的竹林遥感监测研究[J]. 浙江林学院学报, 2008, **25** (4): 417 - 421.  
SHI Yongjun, XU Xiaojun, DU Huaqiang, *et al.* Remote sensing image based bamboo forest monitoring with a back propagation(BP) neural network[J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, **25** (4): 417 - 421.
- [3] SALEHIA B, ZOEJ M J V. Wavelet-based reduction of hyperspectral imagery[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **36**: 332 - 337.
- [4] 谭炳香. 高光谱遥感森林应用研究探讨[J]. 世界林业研究, 2003, **16** (2): 33 - 37.  
TAN Bingxiang. Application of hyperspectral remote sensing in forestry [J]. *World For Res*, 2003, **16** (2): 33 - 37.
- [5] ZHU Xiaokun, JIA Yonghong. *Solution to Joint Entropy and its Applications in Remote Sensing* [EB/OL]. [2009-10-31]. <http://citeseer.ist.psu.edu/707140.html>.
- [6] 张辉, 黄永强. 包络滤波算法及其在图像去噪中的应用[D]. 广州: 中山大学, 2008: 40 - 42.  
ZHANG Hui, HUANG Yongqiang. *Envelope Filtering Algorithm and its Application in Image Denoising*[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2008: 40 - 42.
- [7] KUO B C, LANDGREBE D. *Improved Statistics Estimation and Feature Extraction for Hyperspectral Data Classification* [D]. West Lafayette: Purdue University, 2001: 34 - 36.
- [8] RAYMOND F K, ROGER N C. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption feature and stepwise multiple linear regression [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, **67**: 267 - 287.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 宋运红, 李振祥, 孙连辉, 等. 马氏距离与欧氏距离方法在地球化学异常处理中的对比[J]. 吉林地质, 2008, **27** (4): 117 - 121.  
SONG Yunhong, LI Zhenxiang, SUN Lianhui, *et al.* Contrast between mahalanobis distance and euclidean distance in geochemical exploration processing[J]. *Jilin Geol*, 2008, **27** (4): 117 - 121.