

# 山东招远金矿区赤松针叶反射光谱 红边的季节特征\*

吴继友 杨旭东 张福军

(山东大学光电子信息工程系 济南 250100)

倪健

(中国科学院植物研究所生态研究室 北京 100093)

田文新 解立业

(山东省地质矿产局地质遥感应用研究中心 济南 250011)

**摘要** 对山东招远金矿区进行了赤松针叶反射光谱红边3个特征波长参量 $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$ 随季节变化规律的研究,结果表明,矿区相对于背景区,3个特征波长参量在全年内均呈现不同程度的“蓝移”,当年生叶和去年生叶分别以秋季和春季“蓝移”最大,说明春季和秋季是高光谱分辨率遥感探测赤松林下金属矿藏的最好季节。

**关键词** 金矿区, 赤松, 季节特征, 红边蓝移, 最佳季节

Collins、Chang 和 Horler 于 1983 年研究了植物红光反射率边界(680—800nm, 简称红边)的反射率特征,指出地下矿藏中的重金属元素,使红边波长“蓝移”是一稳定而明显的特征<sup>[1-3]</sup>。J. R. Miller 等与吴继友一块研究了加拿大 10 种树的季节模式<sup>[4]</sup>,指出红边特征随季节的长期大趋势变化与叶绿素含量随季节的大趋势变化相关,短期小波动变化与降雨量和气温有关。矿区与非矿区树木反射光谱特征随季节的变化规律对选择最佳季节和时机、用高光谱分辨率遥感图象探测林下金属矿藏有重要意义。以前对树木反射光谱的季节特性研究,只强调了一些树种的季节规律<sup>[4-6]</sup>,很少将矿区和非矿区的树木反射光谱季节特性作对照研究。该文对山东省招远金矿区与对照区赤松针叶反射光谱的红边位置随季节的变化规律给以研究讨论。

## 1 实验场地与研究方法

### 1.1 实验场地

根据山东省地质矿产局第六地质队的探矿钻孔资料,实验场地选在招远市台上金矿区 $0.5 \times 1.0 \text{ km}^2$

范围的 3 个采样点。这 3 个采样点均处丘陵高坡,海拔高度 159—234m,坡向偏东,坡度 10—25°,土壤厚度 30—40cm,土壤有机质 1.16%—1.35%;土壤酸碱度 6.40—6.42;排水条件较好,地理环境及气象条件接近相同。作为背景对照区的采样点 B 在 900m 以下才有金矿体,品位约 5g/t,很难被赤松吸收到;取名为 L13R 的采样点在 500m 以下有品位约 22g/t 的金矿体,可作为深矿体矿区采样点;取名为 L11U 的采样点为地表浅矿采样点,品位约 5g/t。

1991 年 4 月 30 日对该 3 个采样点赤松针叶样品中 Au、Ag、Cu、Pb 含量的分析表明, L11U 和 L13R 的 Au 含量分别是背景区 B 的 6.17 和 4.27 倍; Ag 含量分别是背景区 B 的 18.6 和 1.69 倍; Cu 含量分别为背景区 B 的 2.58 和 1.18 倍; Pb 含量分别是背景区 B 的 2.05 和 1.39 倍<sup>[7]</sup>。

### 1.2 赤松针叶的取样、光谱反射率的测量及特征参量的提取

从 1991 年 4 月 30 日—11 月 14 日的春、夏、秋 3 个季度内,每隔半月左右,在晴天无云天气的

\* 国家自然科学基金资助项目。

该项工作受到山东省地矿局及地质六队的大力支持,在具体工作中,刘崇群、考庆田、李长征、潘竹平等同志给予了热情帮助,山东大学蒋本和、冯素萍、张永贤等同志参加了测量工作,在此致谢。

收稿日期: 1996 年 2 月 12 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 25 日

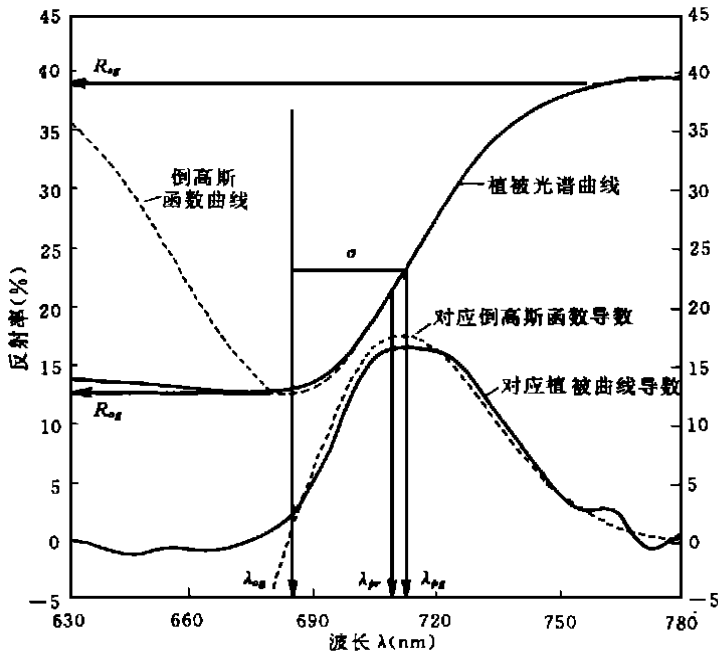


图 1 植被红边反射率倒置高斯模型

Fig. 1 The inverted Gaussian model of red reflectance edge for vegetation

上午 10 点至下午 3 点，采集 3 个采样点的赤松针叶样品，并在阳光下分别测量当年叶与去年叶的光谱反射率。为减少采样误差，赤松针叶样品均按各采样点的眼观平均色取 12—14 龄赤松南向针叶。

测量仪器为 PIS-A 型便携式瞬态光谱仪，光纤导光，光栅分光，光谱范围为 400—1038.75nm，光谱分辨率为 2.5nm，波长误差 ±1nm，等效噪声反射率 ±1%，512 元线列硅光电二极管作为光接收元件，视场 20°，20s 内测完一条光谱曲线（包含 512 个光谱数据）。测量时将 4—5 束针叶拢在一起作为被测目标，水平放置。光谱仪器入射光线垂直于太阳光入射面，且与地面法线夹角小于 30°。

为提取红边光谱特征波长参量和克服噪声影响，用倒置高斯模型曲线<sup>[8]</sup>（图 1 中点线）的一半拟合野外测得的赤松反射率曲线，求得样本的倒置高斯模型特征参量  $R_{og}$ 、 $\lambda_{og}$ 、 $R_{sg}$ 、 $\sigma$  及  $\lambda_{pg} = \lambda_{og} + \sigma$ 。

倒置高斯模型曲线的定义公式为

$$R(\lambda) = R_{og} + \frac{R_{sg} - R_{og}}{1 + e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{og})^2}{2\sigma^2}}}$$

式中， $\lambda$  为波长， $R(\lambda)$  为光谱反射率。

$\lambda_{og}$  对应红边范围最低反射率波长即叶绿素吸收峰波长，它也是红边的起始波长； $R_{og}$  为最低反射率； $R_{sg}$  对应近红外肩 (reflectance shoulder) 反射率，即近红外波段 760—800nm 范围内的高反射率； $\sigma$  为拐点波长与  $\lambda_{og}$  的差值； $\lambda_{pg} = \lambda_{og} + \sigma$  即为倒置高斯模型曲线的红边拐点波长；实测红边反射率曲线的拐点波长  $\lambda_{pr}$  如图 1 所示，由实测反射率曲线的一阶导数谱极大值波长位置求得。

通常用  $\lambda_{pr}$  的减少来表现红边的蓝移<sup>[3]</sup>。倒置高斯模型曲线是用函数公式对实测曲线的平滑<sup>[8]</sup>，它以  $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$  值的减少表现红边蓝移的趋势。在光谱仪分辨率不够高、红边区取值点少或信噪比不够高以致不能分辨  $\lambda_{pr}$  值时，用倒置高斯模型曲线拟合红边数据点，求得  $\lambda_{og}$ 、 $\lambda_{pg}$  来表现植被的红边位置特性就非常必要了。此外，倒置高斯模型也是提取植被红边特征参量、浓缩实测红边数据的方便手段。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 赤松红边特征波长与其生机的关系

植物的红边反射率一阶导数谱一般均有 2 个潜在的峰，前峰对应 705nm 左右，后峰对应 720nm 左右<sup>[3, 7, 9]</sup>，如图 1、图 2 所示。

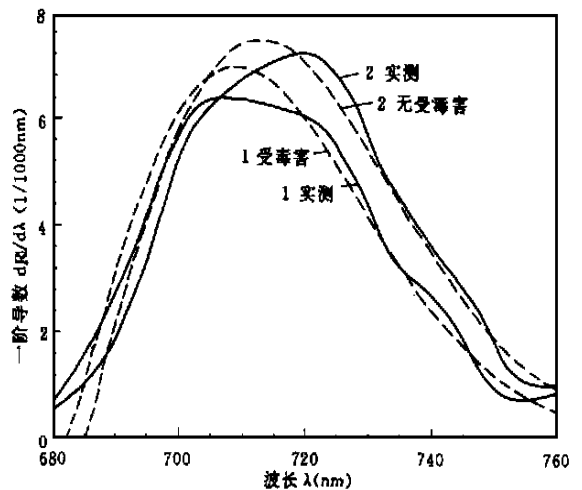


图 2 植被红边反射率一阶导数谱曲线

Fig. 2 The first derivative spectrum curve of red reflectance edge for vegetation

由于气候适宜, 赤松的当年生叶和去年生叶无论在背景区还是金矿区在夏季均生长旺盛, 生机好, 其红边反射率一阶导数谱曲线的主极大峰(一阶导数值最高的峰)均为后峰, 此时  $\lambda_{pr} > \lambda_{pg}$ , 如图 2 中右边实、虚两曲线所示; 背景区或金矿区的当年生叶和去年生叶在秋季及金矿区的赤松去年生叶在春季, 由于气温较低及金属矿藏的影响, 其生机均较差, 其反射率一阶导数谱曲线的主峰均为前峰, 此时,  $\lambda_{pr} \leq \lambda_{pg}$ , 如图 2 中左边实、虚两曲线所示, 这与 Horler 及 Boochs 的测量结果一致<sup>[3,9]</sup>。生机较

差与较强相比植物红边特征波长  $\lambda_r$  蓝移是由叶内叶绿素含量和细胞结构受生长条件影响共同决定的。

## 2.2 红边特征波长季节变化特征

当年生叶和去年生叶的多样本多次测量(10—30次)平均红边反射率特征波长  $\lambda_{pr}$ ,  $\lambda_{pg}$ ,  $\lambda_{og}$  随季节的变化曲线如图 3 所示, 左图对应当年生叶, 右图对应去年生叶, 横座标用儒略历日期(Julian Day, 定义 1 月 1 日为第 1 天, 12 月 31 日为第 365 天, 润年 2 月 28 日后加 1 天)表示。

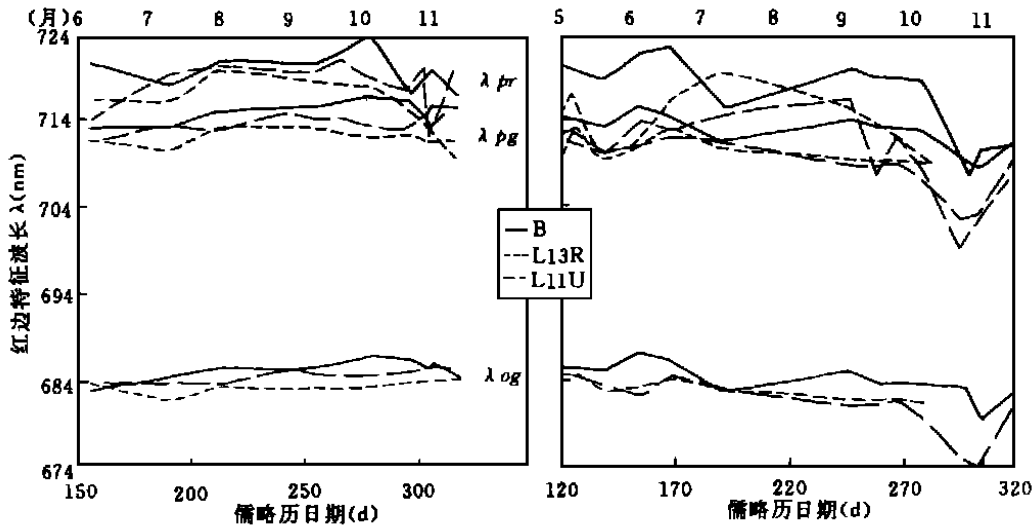


图 3 赤松针叶红边反射率特征波长随季节的变化

Fig. 3 Seasonal curves of characteristic wavelengths of red-edge for Korean pine leaves

由图 3 不难看出  $\lambda_{pr}$ ,  $\lambda_{pg}$ ,  $\lambda_{og}$  具有基本相同的季节变化特征:

### 当年生叶

背景区: 从春季 5 月底 (J150) 开始发芽到秋季 10 月初 (J270) 天气开始变凉,  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$  均呈上升趋势(红移), 这是背景区赤松受重金属离子影响很小, 当年生叶在这个时期生长旺盛的表现; 10 月初以后到深秋 11 月中旬 (J318), 该红边 3 个特征波长均呈现下降趋势(蓝移), 这是天气渐冷, 赤松生长受到抑制的表现<sup>[3,9]</sup>。

矿区 (L13R, L11U): 从春季 5 月底 (J150) 到深秋 11 月中旬 (J318), 矿区的  $\lambda_{pr}$  与背景区的  $\lambda_{pr}$  呈现相同的变化趋势, 表现了赤松由春、夏季生长旺盛到秋天衰落的大趋势; 但在这 3 个季度内,  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$  的矿区值均低于同一天的背景区值, 这表明赤松光谱除受季节影响外, 同时受地下金属矿藏的影响较重而产生蓝移。矿区  $\lambda_{pg}$  和  $\lambda_{og}$  的季节变化规律与背景区稍有不同, 在 3 个季度内均

呈较背景区更缓慢的上升趋势(红移), 而秋季的蓝移或无或很缓慢。在由夏季转入秋季的过程中, 矿区赤松同时受气温变低及金属矿藏的影响, 与仅受气温影响的背景区相比,  $\lambda_{pr}$  由夏季持平或缓慢红移转向秋季蓝移日期提前(背景区 J278, 10 月 5 日左右; 矿区 J258, 9 月 15 日左右; 见图 3 中左图  $\lambda_{pr}$  曲线)。倒置高斯模型参量  $\lambda_{pg}$  和  $\lambda_{og}$  有对实测参量  $\lambda_{pr}$  平滑的作用, 其转向蓝移日期提前更大(背景区 J278, 10 月 5 日左右, 矿区 J244, 9 月 1 日左右, 见图 3 中左图  $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$  曲线)。这就造成秋季 3 个特征波长对背景区对应波长的较大蓝移。

### 去年生叶

背景区:  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$  在春季 4 月底 (J120 左右) 到 6 月中旬 (J169 左右) 均呈微弱上升(红移), 且  $\lambda_{pr} > \lambda_{pg}$ , 这是去年生叶返青生长, 生机增强的表现; 6 月中旬后经夏季至秋季初始 (9 月中旬, J258 左右), 呈微弱降低, 这是去年生叶生机基本达到顶点并开始衰落的表现; 从 9 月中旬以

后, 气温下降较快, 去年生叶叶绿素减退加快, 逐渐变黄, 叶内细胞衰退加快, 该3个红边波长均下降(蓝移)很快。

矿区:  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$ 3个波长在3个季度内均低于背景区(蓝移); 这是矿区重金属离子长期在树内积累产生影响的结果。在4月底(J120左右)至6月中旬(J169左右)的春季, 气温较低, 再加金属矿藏的影响, 矿区赤松返青推迟, 生机较差, 造成赤松去年生叶反射率一阶导数谱以前峰为主峰,  $\lambda_{pr}$ 接近于 $\lambda_{pg}$ , 其值较低, 相对背景区有最大蓝移; 在6月中旬至9月上旬的夏季, 去年生叶生机较好, 一阶导数谱转入以后峰为主峰,  $\lambda_{pr}$ 转高,  $\lambda_{pr} > \lambda_{pg}$ ,  $\lambda_{pg}$ 变化不大或缓慢蓝移; 9月中旬以后转入秋季, 去年生叶转入死亡阶段, 叶绿素含量快速下降, 叶内细胞衰退很快, 导致3个红边波长快速蓝移。

### 3 结 语

(1) 赤松针叶内叶绿素和细胞结构均受季节气候和地下矿藏的影响, 而赤松的光谱特征参量又直接受前两者影响, 因此赤松的光谱特征参量  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$ 均受后两者的影响而变化。

(2) 植物的红边反射率一阶导数谱一般均有两个潜在的峰, 前峰对应705nm左右, 后峰对应720nm左右, 其主极大值波长位置  $\lambda_{pr}$ 可用来表示植物的生机。赤松生长旺盛, 生机较好时, 其红边反射率一阶导数谱曲线的主极大峰为后峰,  $\lambda_{pr} > \lambda_{pg}$ ; 生机较差时, 其红边反射率一阶导数谱曲线的主峰为前峰,  $\lambda_{pr} \leq \lambda_{pg}$ , 生长条件由好变差时, 生机亦由好变差, 便产生植物红边特征波长  $\lambda_{pr}$ 的蓝移; 反之, 产生红移, 这是由叶内叶绿素含量和细胞结构受生长条件影响共同决定的。

(3) 矿区与背景区的赤松相比, 除同时受季节气候影响外, 矿区还受地下金属矿藏的影响, 从而造成光谱3个特征波长  $\lambda_{pr}$ 、 $\lambda_{pg}$ 、 $\lambda_{og}$ 的矿区相对“蓝移”及秋季当年生叶和春季去年生叶的“蓝移”

加剧。用遥感手段从高空向林冠探测, 所看到的赤松针叶在秋季以当年生叶为主(去年生叶多已脱落, 未脱落的也生长在下部), 在春季以去年生叶为主(当年生叶尚未长出或长出很少)。因此, 春秋两季是用高光谱分辨率成像光谱仪遥感探测赤松林下金属矿藏的最佳季节。特别是春季, 去年生叶3个特征波长差别更大, 更为有利。

### 参 考 文 献

- [1] Collins, W., Chang, S. H., Raines G., Canney, F., Ashley, R. · Airborne Biogeochemical Mapping of Hidden Mineral Deposits. *Econ. Geol.*, 1983, **78**: 737-749.
- [2] Chang, S. H., Collins, W. · Confirmation of the Airborne Biophysical Mineral Exploration Technique Using Laboratory Methods. *Econ. Geol.*, 1983, **78**: 723-736.
- [3] Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J. · The Red Edge of Plant Leaf Reflectance. *Int. J. Remote Sensing*, 1983, **4**: 273-288.
- [4] Miller, J. R., Wu Jiyou, Boyer M. G., Belanger M., Hare E. W. · Seasonal Patterns in Leaf Reflectance Red-edge Characteristics. *Int. J. Remote Sensing*, 1991, **12**: 1509-1523.
- [5] Boyer, M., Miller, J., Belanger, M., Hare, E. W., Wu Jiyou. Senescence and Spectral Reflectance in Leaves of Northern Pin Oak. *Remote Sensing of Environment*, **25**: 71-87.
- [6] Blackburn, G. A., Milton E. J. · Seasonal Variations in the Spectral Reflectance of Deciduous Tree Canopies. *Int. J. Remote Sensing*, 1995, **16**: 709-720.
- [7] 吴继友, 倪健, 冯素萍, 蒋本和, 张永贤, 叶正丰. 山东省招远金矿区春季赤松林的植物地球化学和反射光谱特征. *环境遥感*, 1994, **9**(2): 113-121.
- [8] Miller, J. R., Hare, E. W., Wu, Jiyou. Quantitative Characterization of the Vegetation Red Edge Reflectance. I. An Inverted-gaussian Reflectance Model. *Int. J. Remote Sensing*, 1990, **11**: 1755-1773.
- [9] Boochs, F., Kupfer, G., Dockter K. · Shape of the Red Edges Vitality Indicator for Plants. *Int. J. Remote Sensing*, 1990, **11**: 1741-1753.

### 作 者 简 介

吴继友, 男, 1941年5月生, 1965年毕业于山东大学物理系物理专业, 现任光电系教授, 从事光电技术及植被遥感方面的科研和教学工作, 已发表论文30余篇。

## Seasonal Characteristics of Spectral Reflectance of Korean Pine Leaves in the Gold Mine Area of Zhaoyuan City in Shandong Province

Wu Jiyou Yang Xudong Zhang Fujun

(Dept. of Photoelectronics and Information Engineering, Shandong University, Jinan, 250100)

Ni Jian

(Ecology Laboratory, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100093)

Tian Wenxin Xie Liye

(Center for Reseach of Geology Remote Sensing Application, Geology and Mineral Bureau of Shandong Province, Jinan, 250011)

**Abstract** This paper discusses the seasonal characteristics of three characteristic wavelengths of  $\lambda_{pr}$ ,  $\lambda_{pg}$ ,  $\lambda_{og}$  of Red-Edge reflectance for the Korean Pine leaves in gold mine area of Zhaoyuan City, Shandong Province. The results indicate that the three characteristic wavelengths in gold mine area show annual blue shifts in varying degrees against background area and the blue shifts are the biggest in fall for the first-year leaves and in spring for the second-year leaves, therefore, spring and autumn are the best season for detecting metal mineral under Korean Pine Forests using remote sensing method.

**Key words** Gold mine area, Korean Pine, Seasonal characteristics, Blue shifts of red edge, Best season