

# 长白山牡丹岭典型阔叶树叶变色期高光谱及红边特性

李少平, 吴正方\*, 赵云升

(东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024)

**摘要:**以长白山牡丹岭典型阔叶木本植被为研究对象,通过冠层高光谱和微分光谱数据确定叶变色期,利用红边参数建立光谱与叶变色期的反演模型.研究表明:冠层高光谱反射比曲线可以准确反映植被秋季叶变色期的变化,并表现为三种基本类型:叶开始变色期——叶全部变色期——干枯但不落叶,叶开始变色期——部分变黄并开始落叶——未完全变黄但落叶结束,叶开始变色期——叶全部变色期——落叶;一阶微分光谱曲线与高光谱曲线能够更清晰的显示出叶开始变色期和叶完全变色期的具体日期;建立红边参数—叶变色期的反演模型, $R^2$ 均在 0.9 以上,且不同植被适合不同形式的拟合方程.对利用遥感方法定量监测山地秋季物候具有重要理论意义和广泛应用前景.

**关键词:**秋季物候;叶变色期;高光谱;微分光谱;红边参数

**中图分类号:** TP72; Q142.2 **文献标识码:** A

## Hyperspectral and red-edge characteristics of typical hardwoods leaf coloring date in Mudan Valley, Changbai Mountain

LI Shao-Ping, WU Zheng-Fang\*, ZHAO Yun-Sheng

(School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Based on the canopy hyperspectra and derivative spectra of typical hardwoods in Mudan valley, Changbai Mountain, red edge characteristics were used to determine leaf coloring date and to establish regression models of spectra and leaf coloring date. The results show that the canopy hyperspectral reflectance can accurately reflect the change of vegetation autumn leaf coloring date. The states of the leaves of typical hardwoods can be divided into three categories: the dry leaves not falling after leaf coloring date, the leaves falling out before leaf full coloring date, and the leaves falling after leaf full coloring date. The first derivative spectral curves and hyperspectral curves take clear advantage over the specific date of leaf first coloring date and leaf full coloring date. The variances of inversion models of red edge parameters and leaf coloring date are all above 0.9, and each vegetation is suitable for different forms of fitting equation. The research shows important theoretical significance and extensive application prospect on using quantitative remote sensing to monitor mountain autumn phenology.

**Key words:** autumn phenology, leaf coloring date, hyperspectrum, derivative spectrum, red edge characteristics

**PACS:** 02.70.Hm

### 引言

物候学是研究自然界以年为周期重复出现的各

种生物现象的发生时间,及其与环境条件(气候、水文和土壤)周期性变化相互关系的科学<sup>[1,2]</sup>.生物物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感

收稿日期: 2016-01-26, 修回日期: 2016-03-17

Received date: 2016-01-26, revised date: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(41171038, 41471085)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (41171038, 41471085)

作者简介 (Biography): 李少平(1986-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕博连读研究生, 主要从事长白山地区秋季物候高光谱遥感研究.

E-mail: lisp800@nenu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wuzf@nenu.edu.cn

的综合指示器,其发生时间可以反映陆地生态系统短期变化的特征<sup>[3]</sup>.传统的物候观测方法是以野外观测为基础的目视观察法,即直接在地面定点观测个体或群体生物物候现象的年内和年际变化,这种方法具有客观和准确的特点,但由于缺乏覆盖范围广、时间序列长的植物物候观测数据,难以进行大尺度的物候时空分析<sup>[4,5]</sup>.

中国植物物候观测年报所记录的植物物候期共 16 个,木本植物物候包括萌动期(芽开始膨大期、芽开放期)、展叶期(开始展叶期、展叶盛期)、开花期(花序或花蕾出现期、开花始期、开花盛期、开花末期、第 2 次开花期)、果熟期(果实成熟期、果实脱落开始期、果实脱落末期)、秋季叶变色期(叶开始变色期、叶全部变色期)、落叶期(开始落叶期、落叶末期)<sup>[6]</sup>.1906~2005 年,全球平均气温上升了  $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>,随着全球气候变暖,春、秋季的起止日期正在发生变化.由于秋季物候资料相对缺乏,与春夏季物候相比,秋季物候特别是秋季叶变色期的研究成果相对较少,且所用数据资料多为传统野外观测方法所得.

近年来,国内外已有一些秋季物候变化趋势及生长季变化的<sup>[8-13]</sup>研究成果.Menzel 利用国际物候监测网欧洲站点的物候监测数据得出,1959~1996 年间,该区域秋季叶变色期平均推迟 4.5 天<sup>[12]</sup>.仲舒颖,郑景云等根据中国物候观测网络 17 个站点的物候资料和气象资料,分析了近 40a 中国东部地区木本植物秋季叶全变色期变化及其对气候变化的响应,得出该地区木本植物秋季叶全变色期变化总体表现为推迟的趋势,推迟幅度为  $3.7\text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ <sup>[14]</sup>,并根据其中北京观测站点的物候资料及气候资料,分析了 1962~2007 年北京地区 20 种主要木本植物秋季物候对气候变化的响应情况,得出北京地区秋季延长,且叶变色期表现为推迟的趋势<sup>[8]</sup>.

随着遥感技术的发展,特别是具有中低空间分辨率的遥感卫星的陆续发射,为物候观测提供了一种新途径.遥感观测具有覆盖范围广、空间连续、多时相等特点,能够很好地反映植物季节性生长过程及年际变化等特征,可以作为监测植被物候变化的依据<sup>[5,15-20]</sup>.本研究以长白山牡丹岭典型木本植被秋季叶变色期高光谱数据为基础,通过分析微分光谱和红边参数来提取植被冠层高光谱中对叶变色期最为敏感的特征参数,从而建立光谱参数与植被秋季叶变色期的反演模型.为利用高光谱遥感物候期提出新的研究方法和基础.

## 1 研究区概述

图 1 为研究区位置图,研究区位于长白山牡丹岭,敦化市江源镇南山,温带季风气候,年均温  $3.8^\circ\text{C}$ ,山区年降水量 700 mm.土壤为暗棕壤,山地植被主要为次生林和人工林,次生林主要包括蒙古栎林、核桃楸林、水曲柳林及杨桦林等阔叶混交林,人工林主要包括红松林和落叶松林,主要研究对象树龄 10~30 年,山地平均海拔 790 m.实验点地理坐标为  $43^\circ06'47.13''\text{N}, 128^\circ05'50.96''\text{E}; 43^\circ06'47.13''\text{N}, 128^\circ05'49.86''\text{E}; 43^\circ06'42.13''\text{N}, 128^\circ05'50.88''\text{E}$ .

实验观测了蒙古栎、核桃楸、黄檗、山桃、白桦、枫桦、柳树、青楷槭、色木槭、椴树、鹅耳枥木、榆树和水曲柳等研究区典型树种,本文选择蒙古栎、核桃楸和黄檗作为主要研究对象.

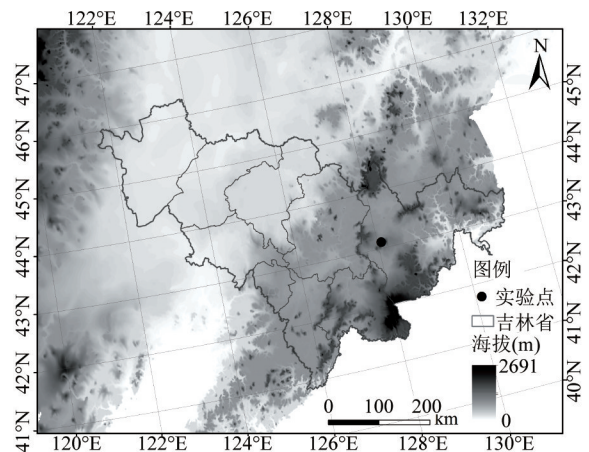


图 1 研究区位置  
Fig. 1 Studied area

## 2 高光谱数据测量及处理

### 2.1 仪器与平台

本研究光谱测试采用野外便携式地物光谱仪 ASD FieldSpec 3 和地物野外测量平台. ASD 可以实时测量地物目标 350~2500 nm 波段范围内的高光谱数据,光谱采样间隔:350~1050 nm 波段为 1.4 nm;1000~2500 nm 波段为 2 nm.光谱分辨率:350~700 nm 为 3 nm;700~1400 nm,1400~2100 nm 为 10 nm.仪器前视场角  $25^\circ$ ,配有 40 cm × 40 cm  $\text{BaSO}_4$  标准白板用以定标.地物野外测量平台为配合 ASD 光谱仪的野外测量作业而制作,主体由底座支架、带有刻度的圆环底座和光纤支架组成,圆环底座内径 80 cm 带有三个支架,可以在任意平面上调

节到水平状态. 光纤支架半径 40 cm, 支架可以在圆环上 360° 旋转控制探测方位角, 也可以在  $2\pi$  空间内进行  $\pm 90^\circ$  旋转控制探测天顶角. 本研究光谱测量时间为 2013 年 9 月 15 日至 10 月 5 日, 北京时间 9:00 ~ 13:00, 天气晴朗、无云, 逐日观测, 入射天顶角即太阳天顶角大于  $45^\circ$ , 探测天顶角  $45^\circ$ , 探测方位角  $180^\circ$ .

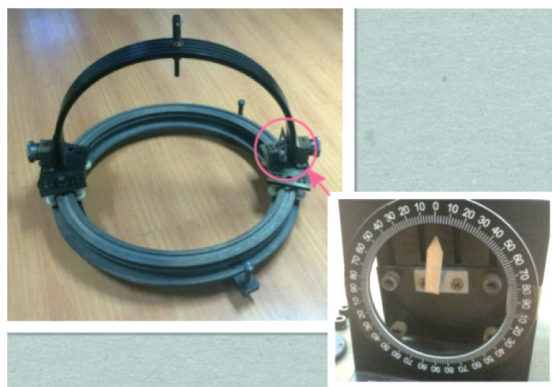


图 2 ASD Fieldspec3 和地物野外测量平台  
Fig. 2 ASD Fieldspec3 & field measurement platform

## 2.2 样品采样及处理

研究主要对象为植被冠层. 由于研究区为山区, 山地植被茂密, 郁闭度达到 90% 以上, 树龄在 10 年以上, 树高达到 8 m 以上, 受环境和设备限制, 直接实地进行光谱观测比较困难, 因此采取采样并搭建模拟冠层方法来进行数据测量.

采样时每一种植被均选取同一棵树同一一级枝杈顶端能够接受太阳直射、长势相同且无病虫害的若干三级、四级枝叶. 为了更好地模拟冠层原状态, 将野外测量平台放置在林边太阳直射位置, 平台下面铺垫 30 cm 林下土壤作为载物台, 测量时将采下的植被枝杈按照原生长状态和冠层郁闭度捆扎好, 保持叶片倾角和枝杈间夹角不变, 放置在载物台中央. 每一种样品从采下到观测时间不超过 10 分钟.

## 2.3 高光谱数据预处理

利用 ASD 光谱仪 RS<sup>3</sup> 光谱预处理软件对数据进行预处理, 去除大气散射对光谱曲线的干扰, 剔除异常光谱曲线, 对光谱曲线进行基线校正, 修正曲线偏移或漂移现象.

对修正后光谱曲线利用 Savitzky-Golay 卷积平滑方法进行曲线平滑处理, 去除高频随机噪声, 并对光谱反射率进行一阶微分的计算. Savitzky-Golay 卷积平滑方法利用最小二乘拟合系数作为数字滤波响应函数来对原光谱进行卷积平滑处理, 其平滑公式为:

$$X_i^* = \frac{\sum_{j=-r}^r X_{i+j} W_j}{\sum_{j=-r}^r W_j}, \quad (1)$$

式中  $X_i^*$ ,  $X_i$  分别是平滑后和平滑前光谱数据向量中的一个元素;  $W_j$  是移动窗口平滑中的权重因子 (本研究取窗口长度为 5)

## 3 结果与讨论

植被在不同波段内表现出不同的吸收反射特征, 根据这些特征可以有效地监测其生理状态的相关信息. 植被在某些特征波长处光谱反射率的变化对叶片生化组分的多少非常敏感. 在春夏季节, 由于日照时间增长, 植物细胞合成较多的叶绿素. 大多数植物的叶片颜色呈现绿色是由于叶片中的叶绿素含量占优势. 在秋季, 短日照、低温等外界环境因子对植物产生影响, 使植物叶片合成叶绿素的速率变低, 造成叶片细胞内叶绿素的含量减少. 而低温有利于类胡萝卜素的合成, 叶片细胞内类胡萝卜素的合成速率增加, 造成叶片内的类胡萝卜素的含量升高, 这样就使植物叶片呈现黄色<sup>[21]</sup>.

叶绿素含量变化对反射光谱的影响主要体现在可见光波段. 在可见光波段, 光合色素是光线的主要吸收者, 而叶绿素是光合色素的主要成分. 植物秋季叶变色期, 叶片叶绿素含量降低, 对可见光的反射增强. 700 ~ 750 nm 波段是反射率“红边”区. 植被的反射光谱曲线在此波段急剧上升, 由于红波段叶绿素的强吸收致使反射率较低, 红光波段一阶微分光谱最大值得称为红边. 红边的位置与两侧反射率的差异密切相关, 受到红边叶绿素吸收能力和红外波段细胞结构与冠层结构反射能力的共同影响. 与可见光波段相比, 近红外波段一阶微分光谱更适用于叶片及冠层级别的遥感研究<sup>[22]</sup>. 因此, 红边的变化是

研究植被冠层秋季叶变色期的重要生理参数之一。

根据微分光谱计算不同植被的红边参数,本研究所采用的红边参数有:

- (1)红边位置  $\lambda_{red}$ :红光范围(680 ~ 760 nm)内一阶微分光谱最大值所对应的波长(单位 nm);
- (2)红边振幅(又称红边斜率)  $D\lambda_{red}$ :红光范围(680 ~ 760 nm)内一阶微分光谱反射率的最大值;
- (3)红边面积(红边峰值面积)  $S_{red}$ :680 ~ 760 nm 之间的一阶微分光谱所包围的面积(无量纲和单位);
- (4)红边核心面积  $SD_{red}$ :红边核心区(721 ~ 735 nm)反射率一阶微分积分和(无量纲和单位)。

### 3.1 植被秋季叶变色期随冠层高光谱反射曲线的变化

根据每日物候观测资料和冠层高光谱反射曲线(图 3-1,3-2,3-3),可以将观测期内不同植被叶变色期物候现象分为三种情况:

- (a)开始变黄(叶开始变色期)—完全变黄(叶全部变色期)—干枯但不落叶,典型植被为蒙古栎;
- (b)开始变黄(叶开始变色期)—部分变黄并开始落叶—未完全变黄但落叶结束,典型植被为核桃楸;
- (c)开始变黄(叶开始变色期)—完全变黄(叶全部变色期)—落叶,典型植被为黄檗. 本文以蒙古栎、核桃楸和黄檗为主要研究对象。

图 3、4、5 分别为蒙古栎、核桃楸和黄檗叶变色期的高光谱反射曲线,波段范围 350 ~ 800 nm. 从图中可以看出,随着日期的变化,叶片内叶绿素逐渐减少,在 750 ~ 800 nm 红光波段反射率逐渐降低,而在 500 ~ 590 nm 的黄、绿光波段,由于叶片内叶黄素的增加,叶绿素的绿反射峰向黄光移动. 图 3-1 中 10 月 2 日 ~ 10 月 5 日光谱曲线绿光波段反射峰完全消失,波峰向红光波段移动,并且红光波段反射率远低于之前,说明 10 月 2 日以后,蒙古栎叶片已经由绿色完全变为黄色,叶片水分含量降低,逐渐干枯. 图 3-2 中由于核桃楸叶片变色与落叶同时发生,观测至 10 月 1 日,叶片没有完全变黄但已经落光. 图 3-3 中黄檗的反射光谱曲线随时间变化明显分为三个阶段:叶片开始变黄但绿色远多于黄色;叶片未完全变黄但主体表现为黄色;叶片完全变黄.

### 3.2 植被秋季叶变色期随冠层一阶微分光谱曲线的变化

图 6 为蒙古栎叶变色期冠层一阶微分光谱曲线,波段范围 680 ~ 760 nm. 图中可以明显看出叶变

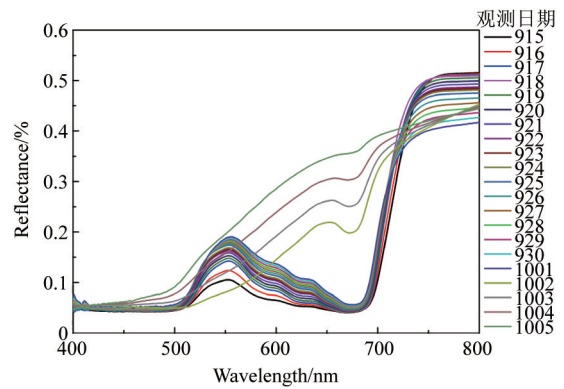


图 3 蒙古栎叶变色期高光谱反射曲线  
Fig. 3 Hyperspectra of Mongolia Oak leaf coloring

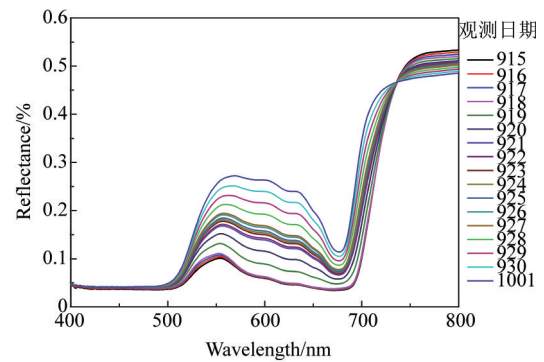


图 4 核桃楸叶变色期高光谱反射曲线  
Fig. 4 Hyperspectra of Manchurian Walnut leaf coloring

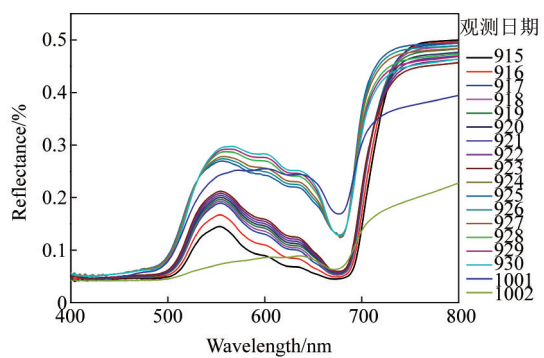


图 5 黄檗叶变色期高光谱反射曲线  
Fig. 5 Hyperspectra of Amur Cork leaf coloring

色期分为三个阶段:从 9 月 17 日开始叶片开始变色,9 月 17 日 ~ 10 月 1 日叶片逐渐逐渐由绿色变为黄色,10 月 2 日以后叶片完全表现为黄色. 与图 3-1 相比较,蒙古栎冠层微分光谱曲线比原反射率曲线更清晰地显示出 9 月 17 日为叶开始变色期.

图 7 为核桃楸叶变色期冠层微分光谱曲线,图

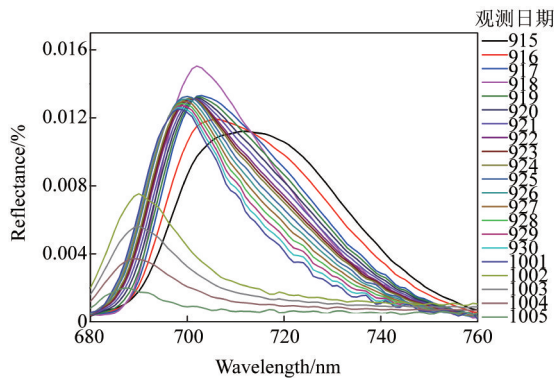


图6 蒙古栎叶变色期微分光谱  
Fig. 6 Derivative spectra of Mongolian Oak leaf coloring

中可以看出核桃楸叶片开始变色在9月17日,9月28日开始叶片完全变黄.

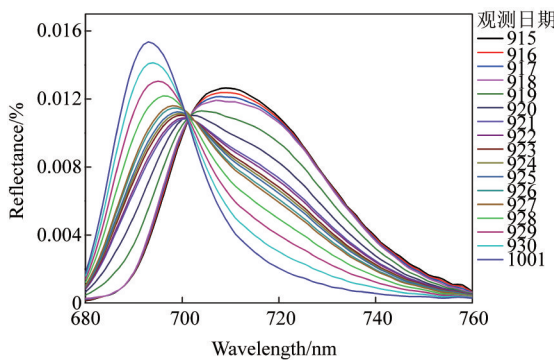


图7 核桃楸叶变色期微分光谱  
Fig. 7 Derivative spectra for the Manchurian Walnut leaf coloring

图8为黄槲叶变色期微分光谱,与黄槲的高光谱反射率曲线相同,微分光谱也体现出黄槲叶片在叶变色期的三个阶段变化,9月17日开始变黄,9月30日之后完全变黄,但微分光谱中叶开始变色期和叶全部变色期的区分更为明显.

### 3.3 利用红边参数建立植被秋季叶变色期回归模型

作为植被生长季的最后阶段,植被秋季叶变色期时间短,肉眼观测界限模糊难以确定.与高光谱曲线相比,植被的一阶微分曲线对叶变色期的时间变化更为敏感,从一阶微分曲线中提取红边位置、红边振幅、红边面积、红边核心面积四个红边参数,分别建立三种植被光谱—叶变色期回归模型,赋值叶开始变色期即叶变色第一天为1,叶变色第二天为2,……叶变色第n天即叶完全变色前一天为n.

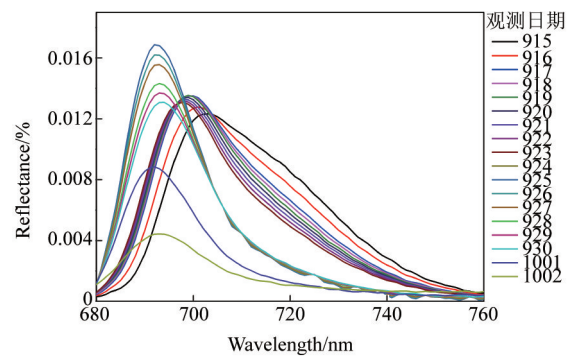


图8 黄槲叶变色期微分光谱  
Fig. 8 Derivative spectra of Amur Cork leaf coloring

表1 蒙古栎红边参数与叶变色期的回归结果  
Table1 Regression models of red edge parameters and leaf coloring date for the Mongolian Oak

红边参数	回归方程	R <sup>2</sup>
红边位置	$y = -2.8992x + 2039$	R <sup>2</sup> = 0.95
	$y = -0.0523x^2 + 70.417x - 23639$	R <sup>2</sup> = 0.95
	$y = 0.0298x^3 - 62.655x^2 + 43925x - 1E + 07$	R <sup>2</sup> = 0.95
红边振幅	$y = 2E + 308x^{-330.8}$	R <sup>2</sup> = 0.83
	$y = -5251.8x + 77.089$	R <sup>2</sup> = 0.46
	$y = 5E + 06x^2 - 147997x + 1059.9$	R <sup>2</sup> = 0.78
红边面积	$y = 9E + 09x^3 - 4E + 08x^2 + 5E + 06x - 21369$	R <sup>2</sup> = 0.82
	$y = 3E - 23x^{-12.4}$	R <sup>2</sup> = 0.44
	$y = -117.53x + 57.307$	R <sup>2</sup> = 0.95
核心面积	$y = -785.33x^2 + 525.61x - 73.277$	R <sup>2</sup> = 0.99
	$y = -7322.8x^3 + 8206.2x^2 - 3137.4x + 421.72$	R <sup>2</sup> = 0.99
	$y = 0.012x^{-7.205}$	R <sup>2</sup> = 0.70
核心面积	$y = -371.36x + 24.377$	R <sup>2</sup> = 0.95
	$y = -1026.5x^2 - 283.12x + 22.614$	R <sup>2</sup> = 0.95
	$y = 184686x^3 - 25157x^2 + 722.17x + 9.3853$	R <sup>2</sup> = 0.95
	$y = 0.0049x^{-2.271}$	R <sup>2</sup> = 0.70

表2 核桃楸红边参数与叶变色期的回归结果  
Table 2 Regression models of red edge parameters and leaf coloring date for the Manchurian Walnut

红边参数	回归方程	R <sup>2</sup>
红边位置	$y = -0.9241x + 654.36$	R <sup>2</sup> = 0.87
	$y = 0.1148x^2 - 162.41x + 57420$	R <sup>2</sup> = 0.97
	$y = -0.0128x^3 + 27.014x^2 - 19067x + 4E + 06$	R <sup>2</sup> = 0.97
红边振幅	$y = 2E + 308x^{-153.6}$	R <sup>2</sup> = 0.97
	$y = 19.201x - 0.1618$	R <sup>2</sup> = 0.33
	$y = 40507x^2 - 910.66x + 5.1673$	R <sup>2</sup> = 0.54
红边面积	$y = 3E + 07x^3 - 1E + 06x^2 + 11112x - 40.722$	R <sup>2</sup> = 0.55
	$y = 112065x^3.2447$	R <sup>2</sup> = 0.25
	$y = -140.25x + 67.465$	R <sup>2</sup> = 0.89
核心面积	$y = 2682.8x^2 - 2535.9x + 600.89$	R <sup>2</sup> = 0.98
	$y = -75339x^3 + 103287x^2 - 47258x + 7219.3$	R <sup>2</sup> = 0.99
	$y = 3E - 05x^{-14.57}$	R <sup>2</sup> = 0.96
核心面积	$y = -227.58x + 18.694$	R <sup>2</sup> = 0.89
	$y = 7042x^2 - 1080.5x + 43.137$	R <sup>2</sup> = 0.97
	$y = -297789x^3 + 60159x^2 - 4152.1x + 100.81$	R <sup>2</sup> = 0.99
	$y = 0.0006x^{-3.073}$	R <sup>2</sup> = 0.94

表 3 黄檗红边参数与叶变色期的回归结果  
Table 3 Regression models of red edge parameters and leaf coloring date for the Amur Cork

红边参数	回归方程	R <sup>2</sup>
红边位置	$y = -1.2947x + 908.46$	R <sup>2</sup> = 0.88
	$y = -0.0365x^2 + 49.538x - 16779$	R <sup>2</sup> = 0.88
	$y = -0.0746x^3 + 155.76x^2 - 108413x + 3E + 07$	R <sup>2</sup> = 0.92
	$y = 2E + 308x^{-155.3}$	R <sup>2</sup> = 0.77
红边振幅	$y = -2757.4x + 45.145$	R <sup>2</sup> = 0.49
	$y = 10584x^2 - 3060.6x + 47.301$	R <sup>2</sup> = 0.49
	$y = 4E + 08x^3 - 2E + 07x^2 + 230466x - 1042.7$	R <sup>2</sup> = 0.50
	$y = 1E - 16x^{-8.988}$	R <sup>2</sup> = 0.74
红边面积	$y = -105.24x + 47.279$	R <sup>2</sup> = 0.92
	$y = -256.57x^2 + 88.914x + 10.897$	R <sup>2</sup> = 0.93
	$y = -9327.9x^3 + 10347x^2 - 3909.4x + 510.99$	R <sup>2</sup> = 0.93
	$y = 0.0075x^{-6.842}$	R <sup>2</sup> = 0.81
核心面积	$y = -298.56x + 15.033$	R <sup>2</sup> = 0.84
	$y = -10414x^2 + 247.04x + 9.4924$	R <sup>2</sup> = 0.87
	$y = 2E + 06x^3 - 207638x^2 + 5590.7x - 31.724$	R <sup>2</sup> = 0.91
	$y = 0.0604x^{-1.208}$	R <sup>2</sup> = 0.72

表 1、2、3 分别是蒙古栎、核桃楸和黄檗红边参数反演冠层叶变色期的一元回归模型,对每个回归方程进行 F 检验,显著性系数 P 均小于 0.01,说明这些模型达到了 0.01 的显著性水平.从表中可以看出,同一种植被不同红边参数的拟合结果不同;其中三种植被红边振幅的拟合效果均不理想,因此红边振幅这一参数不适合用于反演冠层级别的叶变色期.根据拟合方程的 R<sup>2</sup> 和方程的复杂程度选择拟合精度高且简便的回归模型,结果如图

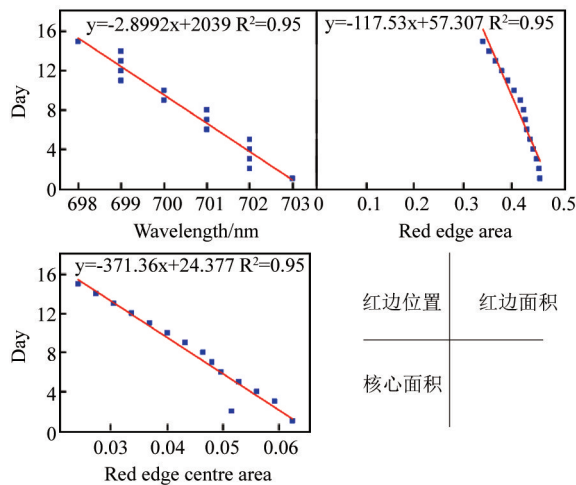


图 9 蒙古栎拟合结果  
Fig. 9 Fitting results of Mongolian Oak

从拟合图中看出,红边位置、红边面积和红边核心面积三种参数对蒙古栎、核桃楸和黄檗的叶变色期反演模型的 R<sup>2</sup> 均在 0.9 以上,具有较高的拟合精度.不同植被适合不同形式的拟合方程,蒙古栎红边

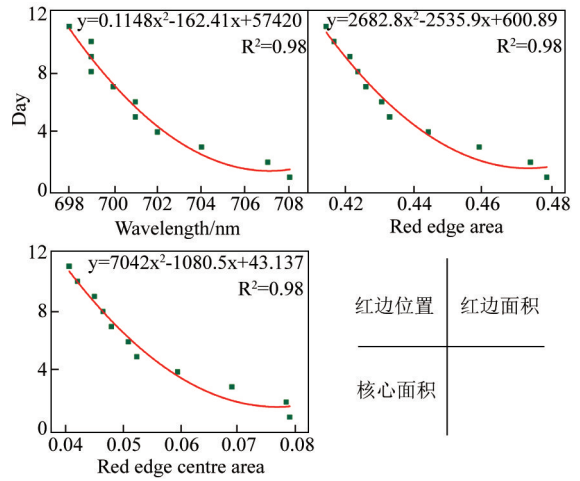


图 10 核桃楸拟合结果  
Fig. 10 Fitting results of Manchurian Walnut

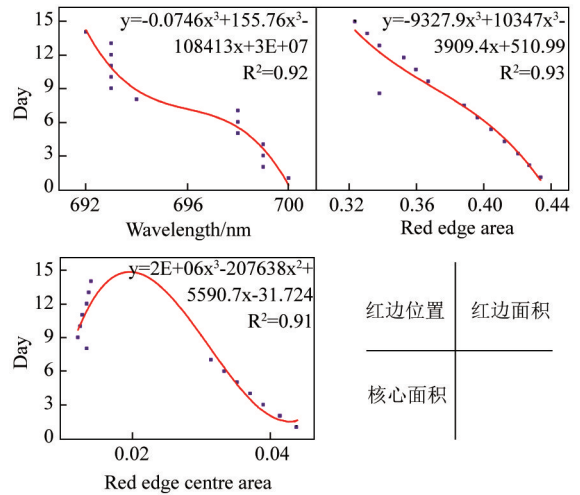


图 11 黄檗拟合结果  
Fig. 11 Fitting results of Amur Cork

参数对叶变色期的拟合方程均为线性拟合,核桃楸红边参数对叶变色期的拟合方程均为二项式拟合,而黄檗红边参数对叶变色期的拟合方程均为三项式拟合.

#### 4 结论

- (1)冠层高光谱反射率曲线可以准确反映植被秋季叶变色期的物候变化,并表现为三种基本类型:
  - 开始变黄(叶开始变色期)—完全变黄(叶全部变色期)—干枯但不落叶,典型植被为蒙古栎;
  - 开始变黄(叶开始变色期)—部分变黄并开始落叶—未完全变黄但落叶结束,典型植被为核桃楸;
  - 开始变黄(叶开始变色期)—完全变黄(叶全部

变色期)一落叶,典型植被为黄槲。

(2)与高光谱曲线相比,一阶微分光谱曲线能够更清晰的显示出叶开始变色期和叶完全变色期的具体日期。

(3)红边位置、红边面积和红边核心面积为对植被秋季叶变色期敏感的红边参数,其反演模型的 $R^2$ 均在0.9以上,具有较高的拟合精度.不同植被适合不同形式的拟合方程,蒙古栎红边参数对叶变色期的拟合方程均为线性拟合,核桃楸红边参数对叶变色期的拟合方程均为二项式拟合,而黄槲红边参数对叶变色期的拟合方程均为三项式拟合。

植被秋季叶变色期的影响因素包括植被生理参数(叶绿素、花青素、叶黄素等)的变化和生长环境的变化(温度、水分、日照长度、土壤条件等).利用高光谱数据反演植被冠层级别的秋季叶变色期,并提取对叶变色期敏感的光谱参数是一种对植被秋季物候期机理研究的新方法.植被的光谱特征决定其遥感影像特征,因此对植被秋季光谱特征的提取与分析为提高植被秋季遥感影像解译精度提供重要依据.不同植的光谱特征可以表现出不同的物候期阶段,为秋季遥感影响树种识别和地物分类提供重要的参考依据.本文利用植被秋季冠层高光谱数据及其一阶微分数据研究植被秋季叶变色期,提取对叶变色期敏感的红边光谱参数并建立光谱—物候期反演模型,为秋季物候研究提供一种新的遥感方法.今后要增加研究对象的种类并将影响因素多元化,进行高精度、多角度、长时间序列的植被秋季物候研究。

## References

- [1] ZHU Ke-zhen, WAN Min-wei. Phenology[M]. Changsha: Hunan Education Publishing House (竺可桢,宛敏渭.物候学,长沙:湖南教育出版社),1999:1-4.
- [2] LIETH. Phenology and seasonality modeling[M]. New York: Springer-Verlag, 1974: 4.
- [3] CHEN Xiao-qiu, HU Bing, YU Rong. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern china[J]. *Globe Change Biology*,2005, **11**(7):1118-1130.
- [4] RICOTTA, AVENA. The remote sensing approach in broad-scale phenological studies[J]. *Applied Vegetation Science*, 2000, **3**(1):117-122.
- [5] WHITE, HOFFMAN, HARGROVE, et al. A global framework for monitoring phenological responses to climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(4).
- [6] LAI Xin, FAN Guang-zhou, LIU Ya-xing. Prediction about Future Plant Phenology Variation in China[J]. *Journal of Arid Meteorology* (赖欣,范广洲,刘雅星.中国植物物候变化预测.干旱气象),2011, **29**(3):7.
- [7] Climate change 2007-the physical science basis: Working group contribution to the fourth assessment report of the ipcc [R]. UK: Cambridge, 2007.
- [8] ZHONG Shu-ying, ZHENG Jing-yun, GE Quan-sheng. Dynamics of autumn phenophase of woody plants in Beijing region in 1962-2007 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (仲舒颖,郑景云,葛全胜.1962~2007年北京地区木本植物秋季物候动态.应用生态学报),2008, **19**(11):2352-2356.
- [9] XU Wen-feng, HE Xing-yuan, CHEN Wei, et al. Responses of Shenyang Urban Tree Phenology to Climate Warming [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (徐文锋,何兴元,陈伟,等.沈阳城市森林主要树种物候对气候变暖的响应.应用生态学报),2006, **17**(10):1777-1781.
- [10] WANG Chuan-hai, WU Fei-qian, LI Shu-juan, et al. Phenological Changes of Ligneous Plants in Xi'an Botanic Garden in Last 15 Years [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology* (王传海,吴飞倩,李淑娟,等.西安植物园木本植物近十余年物候变化的特征分析.中国农业气象),2007, **27**(4):261-264.
- [11] CHEN Xiao-qiu, YU Rong. Spatial and Temporal Variations of the Vegetation Growing Season in Warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica* (陈效逯,喻蓉.1982~1999年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化.地理学报),2007, (01):41-51.
- [12] MENZEL A. Trends in phenological phases in europe between 1951 and 1996 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2000, **44**(2):76-81.
- [13] SHUTOVA E, WIELGOLASKI F E, KARLSEN S R, et al. Growing seasons of nordic mountain birch in northernmost europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, **51**(2):155-166.
- [14] ZHONG Shu-ying, ZHENG Jing-yun, Ge Quan-sheng. Change of Autumnal Leaf Coloring of Woody Plants in Eastern China for the Last 40 Years [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology* (仲舒颖,郑景云,葛全胜.近40年中国东部木本植物秋季叶全变色期变化.中国农业气象),2010, **31**(1):1-4.
- [15] SCHWARTZ M D. Green-wave phenology [J]. *Nature*, 1998, **394**(6696):839-840.
- [16] REED B C, BROWN J F, VANDERZEE D, et al. Measuring phenological variability from satellite imagery [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1994, **5**(5):703-714.
- [17] MOULIN S, KERGOAT L, VIOVY N, et al. Global-scale assessment of vegetation phenology using noaa/avhrr satellite measurements [J]. *Journal of Climate*, 1997, **10**(6):1154-1170.
- [18] MYNENI R B, KEELING C D, TUCKER C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 1997, **386**(6626):698-702.
- [19] PIAO Shi-long, FANG Jing-yun, ZHOU Li-ming, et al. Variations in satellite-derived phenology in china's temperate vegetation [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(4):672-685.
- [20] SCHWARTZ, REED, WHITE. Assessing satellite-derived start of season measures in the conterminous USA [J]. *International Journal of Climatology*, 2002, **22**(14):1793-1805.
- [21] FU Jing-jing. The analysis of autumn red leaves index and

discoloration process for Gingko Biloba Metasequoia Glyptostrobooides based on GIS in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University. (付静静. 基于gis的四川盆地秋季红叶指数与银杏、水杉秋叶变色过程分析. 四川农业大学), 2012.

[22] MALTHUS T J, MADERIA A C. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by Botrytis Fabae[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **45**:107 – 116.

(上接 541 页)

- [4] Hao J, Zhou L, Qiu M, Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials [J]. *Phys. Rev. B*, 2011, **83**:165107 – 165119.
- [5] Watts C M, Liu X, Padilla W J, Metamaterial electromagnetic wave absorbers [J]. *Adv. Mater.* 2012, **24**:OP98 – OP120.
- [6] Wang Y T, Cheng B H, Ho Y Z, *et al.* Gain-assisted hybrid-superlens hyperlens for nano imaging [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**:22953 – 22960.
- [7] Cheng B H, Lan Y C, Tsai D P, Breaking optical diffraction limitation using optical hybrid-super-hyperlens with radially polarized light [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**:14898 – 14906.
- [8] Muskens O L, Diederhofen S L, Weert M H M, *et al.* Epitaxial growth of aligned semiconductor nanowire metamaterials for photonic applications [J]. *Adv. Funct. Mater.* 2008, **18**:1039 – 1046.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2008, **100**:207402 – 207405.
- [10] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, *et al.* Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2009, **95**:241111 – 241113.
- [11] Hao J, Wang J, Liu X, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2010, **96**:251104 – 251106.
- [12] Zhang N, Zhou P, Cheng D, *et al.* Dual-band absorption of mid-infrared metamaterial absorber based on distinct dielectric spacer layers [J]. *Opt. Lett.* 2013, **38**:1125 – 1127.
- [13] Niesler F B P, Gansel J K, Fischbach S, *et al.* Metamaterial metal-based bolometers [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2012, **100**:203508 – 203511.
- [14] Jaruwongrungrsee K, Withayachumnankul W, Wisitsoraat A, *et al.* Metamaterial-inspired microfluidic-based sensor for chemical discrimination [J]. *IEEE Sensors*, 2012, **21**:01 – 04.
- [15] Wang Y, Sun T, Paudel T, *et al.* Metamaterial plasmonic absorber structure for high efficiency amorphous silicon solar cells [J]. *Nano Lett.* 2012, **12**:440 – 445.
- [16] Cheng D, Xie T, Zhang H, *et al.* Pantoscopic and polarization-insensitive perfect absorbers in the middle infrared spectrum [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**:1503 – 1510.
- [17] Lee H M, Wu J C. A wide-angle dual-band infrared perfect absorber based on metal-dielectric-metal split square-ring and square array [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012, **45**:205101 – 205106.
- [18] Hendrickson J, Guo J, Zhang B, *et al.* Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures [J]. *Opt. Lett.* 2012, **37**:371 – 373.
- [19] Chen K, Adato R, Altug H, Dual-band perfect absorber for multi-spectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**:7998 – 8006.
- [20] Zhang S, Fan W J, Paniou N C, *et al.* Experimental Demonstration of Near-infrared Negative-Index Metamaterials [J], *Phys. Rev. Lett.* 2005, **95**:137404 – 137407.
- [21] Kischkat J, Peters S, Gruska B, *et al.* Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride [J]. *Appl. Opt.* 2012, **51**:6789 – 6798.
- [22] Smith D R, Schult S, Markos P, *et al.* Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J], *Phys. Rev. B*, 2002, **65**:195104 – 195108.
- [23] Ho C P, Pitchappa P, Kropelnicki P, *et al.* Development of polycrystalline silicon based photonic crystal membrane for mid-infrared applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2014, **20**:4900107 – 4900113.
- [24] Pitchappa P, Ho C P, Kropelnicki P, *et al.* Dual band complementary metamaterial absorber in near infrared region [J], *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**:193109 – 193115.
- [25] Zhou J, Economou E N, Koschny T, *et al.* Unifying approach to left-handed material design [J]. *Opt. Lett.* 2006, **31**:3620 – 3622.
- [26] Pang Y, Cheng H, Zhou Y, *et al.* Analysis and design of wire-based metamaterial absorbers using equivalent circuit approach [J]. *J. Appl. Phys.* 2013, **113**:114902 – 114908.
- [27] Zhou J, Koschny T, Soukoulis C M, An efficient way to reduce losses of left-handed metamaterials [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**:11147 – 11152.
- [28] Hu C, Zhao Z, Chen X, *et al.* Realizing near-perfect absorption at visible frequencies [J]. *Opt. Express*. 2009, **17**:11039 – 11044.