

# 北京城市彩叶系植物秋季高光谱特征研究及差异性分析

段敏杰, 李延明, 李新宇\*, 谢军飞, 王 茜, 赵松婷, 许 蕊, 王月容

北京市园林科学研究院, 园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室, 北京 100102

**摘 要** 北京持续推进增彩延绿科技示范工程, 彩叶植物在城市园林建设和人居环境改善方面发挥着越来越重要的作用。如果能够利用高光谱技术实现快速、无损地观测城市彩叶植物区域分布特点及其生长特征变化, 可为进一步优化城市彩叶植物布局, 加快城市彩叶植物系统建设提供重要理论依据和数据支撑。高光谱遥感技术的快速发展, 不仅提供了大量地被植物光谱信息, 而且也提高了光谱分辨率及其响应范围。植物光谱具有一系列特征吸收谱带, 能够指示不同树种间的差异, 是高光谱进行树种识别的基础。以北京城市常见不同色系彩叶植物 15 种为研究对象, 运用 SR-3501 便携式地物光谱仪分析了不同色系植物叶片秋季高光谱反射曲线特征; 通过对原始光谱数据进行微分变换和特征参数提取, 进一步研究了不同色系植物反射特征波段及特征参数差异性和变化规律。结果表明: 大叶黄杨具备典型绿色植被光谱曲线特征, 即呈“峰”和“谷”的变化特征, 紫色系植物表现为同绿色系植物近似的光谱反射特征, 红色系植物与黄色系植物光谱反射特征相似; 从光谱吸收特征参数角度分析, 不同色系植物绿峰/红峰位置表现为红色系植物 > 紫色系植物 > 黄色系植物 > 绿色系植物, 而绿峰/红峰反射率、红谷位置和红谷反射率均表现为黄色系植物 > 红色系植物 > 紫色系植物 > 绿色系植物; 不同色系植物叶片光谱三边特征参数具有一定的规律性, 三边参数可以作为区分不同彩色叶植物与绿色系植物的特征参数, 其中红边幅值与红边面积、黄边幅值与黄边面积、蓝边幅值与蓝边面积可分别作为紫色系植物、红色系植物与黄色系植物区别于其他色系植物的重要光谱特征参数。

**关键词** 彩叶植物; 高光谱特征; 一阶导数; 吸收特征参数; 三边特征参数

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0841-06

## 引 言

随着城市化快速发展与居民生活水平提高, 人们对于人居环境的追求不再简单满足于粗放型绿化方式, 越来越多的人更加注重亲近自然且多姿多彩的绿化搭配形式。而且近年来, 北京市持续推进增彩延绿科技示范工程, 以期实现首都园林绿化从“绿化”向“彩化、美化”转变, 向特色、精品转变, 从而提升首都园林绿化美化质量。彩叶植物在新时代城市园林绿化规划设计中越来越受到青睐, 其不仅能够营造不同的园林景观, 而且对提高城市建设品位、改善人居环境质量、消除人们生活烦恼等方面均有积极的促进作用。如果能够快速、无损地观测城市彩叶植物区域分布特点及其生长特征变化, 可为进一步优化城市彩叶植物布局, 加快城市彩叶植物系统建设提供重要理论依据和数据支撑。据研究, 导致植物

叶片色彩各异的内在因素主要是由于植物体内叶绿体色素与液泡中色素的共同作用, 同时受外部环境变化和遗传因素等多方面综合影响造成的<sup>[1]</sup>。近年来, 随着高光谱遥感技术快速发展, 分辨率高、信息量大、数据连续性强、获取方法简便等优点也凸现出来, 其不仅提供了大量地被植物光谱信息, 促进了地物高光谱信息库的构建与分析, 而且也提高了光谱分辨率及其响应范围<sup>[2]</sup>。植物光谱具有一系列的特征吸收谱带, 这些特征谱带在不同类型树种中具有稳定的波长位置和特征形态, 能够指示出不同树种间的差异, 是高光谱进行树种识别和入侵植物物种识别的基础<sup>[3-4]</sup>。一些研究学者将其应用于不同树种识别、植被遥感信息提取与定量反演等方面<sup>[5-7]</sup>, 如 Thenkabail 等<sup>[8]</sup>研究了非洲 4 个生态区的植被和农作物的高光谱特征, 并在 400~2 500 nm 确定了 22~23 个用于植被研究的最优波段; Papeş 等<sup>[9]</sup>指出了植被特征与光谱指数的关系会随着植被类型、物种类型和作物类型的变

收稿日期: 2021-03-09, 修订日期: 2021-06-06

基金项目: 北京市公园管理中心科技项目(ZX2017023), 北京市科技计划课题(D171100007117001), 园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室开放课题(STQN202201), 国家自然科学基金面上项目(31770751), 北京市自然科学基金项目(8192018)资助

作者简介: 段敏杰, 1984 年生, 北京市园林科学研究院园林生态研究所工程师 e-mail: duanminjie@163.com

\* 通讯作者 e-mail: lxy09618@163.com

化而变化。但是在应用高光谱分析不同色系彩叶植物光谱反射特征差异方面仍然没有系统性的研究。因此,本研究通过测定北京城市 15 种不同色系彩叶园林植物的秋季光谱数据,分析了不同色系彩叶植物的光谱反射特征,并研究了不同色系植物光谱吸收特征参数与光谱三边特征参数的变化,以期能够实现对不同色系彩叶植物与绿色植物的区分,为应用高光谱遥感技术观测城市彩叶植物系统建设提供理论依据和数据支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区

北京位于北纬  $39^{\circ}54'20''$ , 东经  $116^{\circ}25'29''$ , 总面积  $16\,410.54\text{ km}^2$ , 地处华北平原北部, 地势西北高耸, 东南低缓, 属典型暖温带半湿润大陆性季风气候区, 四季分明、春秋短促、冬夏较长。样品测定区位于北京市园林科学研究院内, 其是北京唯一的市级园林绿化行业公益性科研院所, 同时也是北京市科普教育基地、北京市新优园林植物中试基地和国家职业技能鉴定所。

### 1.2 试验材料

选择生长状况良好、色彩动人的彩叶植物为研究对象, 包括黄色系植物[银杏(*Ginkgo biloba*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、垂柳(*Salix babylonica*)、国槐(*Sophora japonica*)、悬铃木(*Platanus acerifolia*)]、红色系植物[元宝枫(*Acer truncatum*)、鸡爪槭(*Acer palmatum*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、红端木(*Cornus alba*)、五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)]、紫色系植物[紫叶小檗(*Berberis thunbergii* var. *atropurpurea*)、紫叶李(*Prunus cerasifera* f. *atropurpurea*)、紫叶碧桃(*Prunus persica* f. *atropurpurea*)] 三种色系 15 种彩叶植物。同时, 选取常见绿色系植物大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)作为对照研究。

### 1.3 光谱数据采集

光谱数据采集于 2017 年 10 月下旬, 为了避免灰尘对植物光谱曲线的影响, 选择在雨后晴朗无云、无风或风级小于 1 级的天气进行, 测定时间为北京时间 11:00—14:00(太阳高度角大于  $45^{\circ}$ )。采用美国 Spectral Evolution 公司研制的 SR-3501 便携式地物光谱仪进行测定, 其光谱范围是  $280\sim 2\,500\text{ nm}$ , 光谱分辨率为  $4\text{ nm}(280\sim 1\,000\text{ nm})$ 。测量光谱时, 光纤探头与白板距离保持  $5\text{ cm}$ , 每隔  $10\text{ min}$  进行一次标准白板的校正, 观测时若出现光照强度不稳定的情况, 及时校准白板。每次白板校准后, 以反射率近似为零的黑色板为背景, 测量每种植物叶片的光谱反射曲线, 测量时光纤探头垂直于植物叶片。考虑到高大乔木分枝点高, 所以采取离体测量法, 每个树种选择 3 株生长良好的有代表性植株, 于每个植株在冠层不同方向采集 3 枚叶片, 每片叶光谱的采样次数为 10 次, 取其平均值作为该叶片的光谱反射率。

### 1.4 数据处理

利用光谱处理软件和 Origin7.0 软件对数据进行处理, 计算每种植物的光谱反射率的平均值, 并对原始光谱数据进行微分变换, 目的是消除背景噪音对目标信号的影响, 以更好地发现植物光谱变化规律<sup>[10-11]</sup>。计算公式如下

$$R'(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

式中,  $R'(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  处的一阶导数光谱;  $\lambda_i$  为每个波段的波长;  $R(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  处的原始光谱反射率。

考虑到光谱测定数据受大气中水汽的影响, 因此在使用数据时去除了受水汽影响严重的波段  $1\,350\sim 1\,416$ ,  $1\,796\sim 1\,970$  和  $2\,470\sim 2\,500\text{ nm}$ 。结合原始光谱反射率、微分光谱提取出基于高光谱位置的特征参数, 主要包括 4 个光谱吸收特征参数和 9 个光谱三边特征参数<sup>[12]</sup>(表 1), 并采用 SAS 9.2 统计软件对各个特征参数进行方差及差异性检验分析, 多重比较采用 Duncan 法( $p < 0.05$ )。

表 1 光谱特征参数

Table 1 Spectral characteristic parameter

类型	变量	定义	描述
光谱吸收特征参数	$\lambda_g$	绿峰位置	510~560 nm 范围内最大反射率所对应的波长
	$R_g$	绿峰反射率	510~560 nm 范围内最大反射率值
	$\lambda_o$	红谷位置	650~690 nm 范围内最小反射率所对应的波长
	$R_o$	红谷反射率	650~690 nm 范围内最小反射率值
光谱三边特征参数	$\lambda_r$	红边位置	680~760 nm 内一阶导数最大值对应的波长
	$D_r$	红边幅值	680~760 nm 内一阶导数光谱最大值
	$SD_r$	红边面积	680~760 nm 内一阶微分的总和
	$\lambda_y$	黄边位置	560~640 nm 内一阶导数最大值对应的波长
	$D_y$	黄边幅值	560~640 nm 内一阶导数光谱最大值
	$SD_y$	黄边面积	560~640 nm 内一阶微分的总和
	$\lambda_b$	蓝边位置	490~530 nm 内一阶导数最大值对应的波长
	$D_b$	蓝边幅值	490~530 nm 内一阶导数光谱最大值
	$SD_b$	蓝边面积	490~530 nm 内一阶微分的总和

## 2 结果与讨论

### 2.1 绿色植物叶片光谱反射特征

图 1 为健康绿色植物大叶黄杨的高光谱反射曲线，其具备典型绿色植被光谱曲线特征，即呈“峰”和“谷”的特征变化。受植物叶片叶绿素影响，在可见光 552 nm 处出现“绿峰”(表 1)，光谱反射率为 0.142。在波段 671 nm(红光)出现了波谷，称为“红谷”，此为绿色植被典型的光谱吸收带，主要是由于植物叶片叶绿素对红光的强吸收引起。在 680~760 nm 波段，反射光谱出现了植被典型的“陡坡”特征，即植被光谱曲线骤变，反射率由 0.07 突升到 0.5，称为植被“红边”，不同植物红边位置、高度和斜率各不相同，是植物具有诊断性的光谱特征之一。近红外的 760~1 300 nm 波段形成了相对稳定的反射平台，大部分能量被反射。中红外 1 300~2 500 nm 波段受绿色植物含水量的影响，吸收率大增，反射率下降明显，形成多吸收低谷现象。

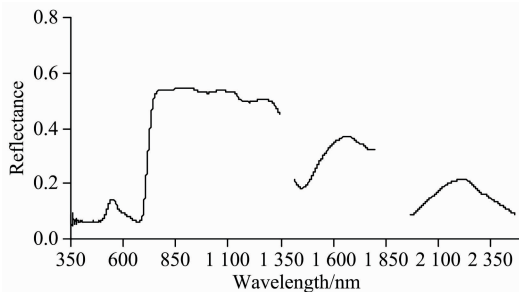


图 1 大叶黄杨叶片秋季光谱反射曲线

Fig. 1 Spectral reflectance curves of *Euonymus japonicas* leaves in autumn

### 2.2 不同彩色系植物叶片光谱反射特征

由于不同植被叶片在色素含量、叶面积、细胞结构及含水量等方面的差异，造成不同色系植物叶片的光谱反射曲线也存在明显差异<sup>[8]</sup>。

紫色系植物叶片光谱反射率曲线形态与绿色系植物相似(图 2)，但在 500~690, 760~1 000, 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm 等波段表现出差异。通过提取不同彩色系植物光谱吸收特征参数并进行方差分析，结果如表 2 所示。与绿色系植物绿峰位置(552 nm)差异显著( $p < 0.05$ )，紫色系植物在 635 nm 波段附近出现反射波峰，即“红峰”，红峰反射率均值为 0.152，相比绿色系植物的绿峰反射率增加了 6.8%。由于在叶片质地及色素含量等方面的差异，3 种紫色系植物的红峰位置对应的波段不同，但差异很小；红峰反射率以紫叶小槲为最高，其次为紫叶碧桃，紫叶李的红峰反射率最低(表 2)。

随着波段增长，紫色系植物在 673 nm 附近出现“红谷”，红谷反射率均值为 0.104，相比绿色系植物，红谷位置对应波段仅增加了 2 nm，而反射率增加了 65.8%。说明紫色系与绿色系植物的红谷位置虽然没有发生明显变化，但红谷反射率却有明显的提高。3 种紫色系植物的“红谷”位置无明显差

异，对应反射率大小则表现为紫叶碧桃>紫叶小槲>紫叶李(表 2)。

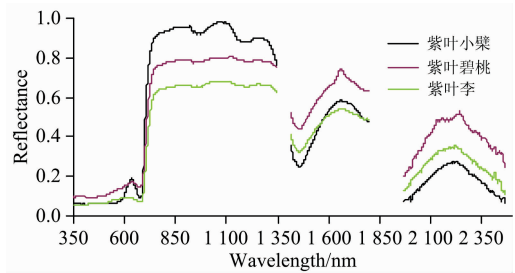


图 2 紫色系植物叶片秋季光谱反射曲线

Fig. 2 Spectral reflectance curves of purple leaf plants in autumn

表 2 不同彩色系植物光谱吸收特征参数及方差分析

Table 2 Spectral absorption characteristic parameters and variance analysis of different colorful plants

组别	植物名称	绿峰/红峰位置/nm	绿峰/红峰反射率	红谷位置/nm	红谷反射率
绿色系	大叶黄杨	552 c	0.142 c	671 b	0.063 b
	紫叶小槲	635	0.188	676	0.092
紫色系	紫叶碧桃	636	0.173	673	0.148
	紫叶李	633	0.094	671	0.072
	平均值	635 ab	0.152 c	673 ab	0.104 b
	五叶地锦	642	0.436	676	0.335
红色系	元宝枫	655	0.237	674	0.207
	鸡爪槭	654	0.395	674	0.350
	黄栌	—	—	—	—
	红瑞木	—	—	—	—
	平均值	650 a	0.356 b	675 a	0.297 a
	银杏	636	0.717	674	0.659
	鹅掌楸	638	0.644	674	0.613
黄色系	白蜡	635	0.489	676	0.340
	毛白杨	566	0.515	675	0.222
	垂柳	567	0.529	674	0.344
	国槐	636	0.573	676	0.478
	悬铃木	632	0.609	673	0.473
平均值	616 b	0.581 a	675 a	0.447 a	

注：平均值后相同字母代表差异不显著，不同字母代表差异显著( $p < 0.05$ )

Note: After the average value, the same letter represents no significant difference, while different letter represents significant difference ( $p < 0.05$ )

在近红外波段 760~1 000 nm，紫色系植物的反射率在 0.6 以上，相比绿色系植物 0.5 左右的反射率有较大幅度提高。但 3 种紫色系植物的反射率差异较大，其中紫叶小槲的反射率接近 1，紫叶碧桃在 0.8 左右，紫叶李最低(0.6 左右)，植物种间叶片内部结构的不同是造成近红外波段光谱反射率差异的主要原因。而在远红外波段 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm，紫色系植物的反射率均比绿色系植物高。3 种紫色系植物在远红外波段的反射率大小均表现为紫叶碧

桃>紫叶李>紫叶小檗。

综合分析,紫色系植物的红峰位置与绿色系植物存在显著差异,可用作紫色系植物区别于健康绿色植物的重要特征参数,3种紫色系植物在不同波段虽然也表现出差异,但规律性不一致。

红色系植物叶片光谱反射曲线在 620~680, 720~1 300, 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm 波段与绿色系植物差异明显(图 3)。与绿色系植物绿峰相比,红色系植物红峰位置红移现象显著,红峰反射率与绿峰反射率差异相对显著( $p<0.05$ ),且有较大幅度提高(表 2)。随着波段的生长,红色系植物在 675 nm 附近形成红谷,这与绿色系植物在 671 nm 附近出现红谷的特征较为相似;但红色系植物的红谷反射率均值较高,为 0.297,显著高于绿色系植物( $p<0.05$ )。由此说明,在 620~680 nm 波段内红色系植物的红峰与红谷均有红移现象,对应反射率相比绿色系植物均显著提高。在 5 种红色系植物中,黄栌和红端木在 620~680 nm 波段未出现红峰和红谷,而是直接突升至近红外反射平台(图 3)。

相比绿色系植物,红色系植物在近红外波段 720~1 300 nm 区间反射率较高(图 3),但不同红色系植物之间的反射率差异也较大,反射率大小表现为红端木>黄栌>五叶地锦>鸡爪槭>元宝枫。而在远红外波段 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm,红色系植物反射率均高于绿色系植物(图 3);不同红色系植物间在两个远红外波段 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm 的反射率表现出一致的变化趋势,即红端木>黄栌>鸡爪槭>五叶地锦>元宝枫。综合分析,红色系植物在 620~680 和 720~1 200 nm 范围内的反射光谱特征及其光谱吸收特征参数均与绿色系植物存在较大差异,可作为区别于健康绿色植物的重要参数。

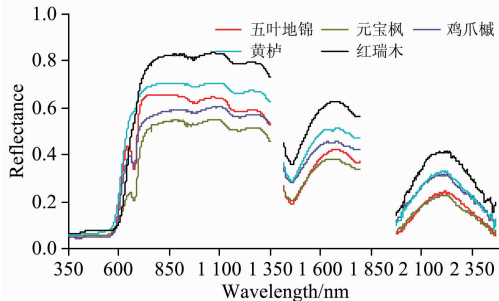


图 3 红色系植物秋季光谱反射曲线

Fig. 3 Spectral reflectance curves of red leaf plants in autumn

黄色系植物在 510~650 nm 波段范围内与绿色系植物的光谱特征差异明显(图 4),其反射率在 510 nm 处由 0.15 急剧上升至 540 nm 处的 0.5 左右,而常见绿色植物仅从 510 nm 处的 0.08 上升至 552 nm 处的 0.14。相比绿色系植物,黄色系植物的红峰与红谷也都出现红移,尤其是红峰在 616 nm 出现,红移现象较为显著;黄色系植物红峰与红谷对应的反射率也均有显著提高(表 2)。说明红峰位置、红谷位置及反射率也是黄色系植物区别于绿色系植物的重要光谱特征参数。

7 种黄色系植物中以银杏的红峰与红谷反射率最高,分

别达 0.717 与 0.659(表 2),其次为鹅掌楸,而白蜡的红峰与红谷反射率为最低。叶片质地的差异可能是造成同一色系不同树种间红峰与红谷反射率差异的主要原因。

与绿色系植物相比,黄色系植物在近红外波段 700~1 200 nm 的反射率较高,均在 0.6 以上(图 4)。而在远红外波段 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm,黄色系植物也比绿色系植物的反射率高。整体说明,黄色系植物在 620~680, 720~1 300, 1 400~1 700 和 1 970~2 400 nm 等波段与绿色系植物的反射光谱特征具有明显差异,为黄色系植物区别于健康绿色植物的重要参考波段。

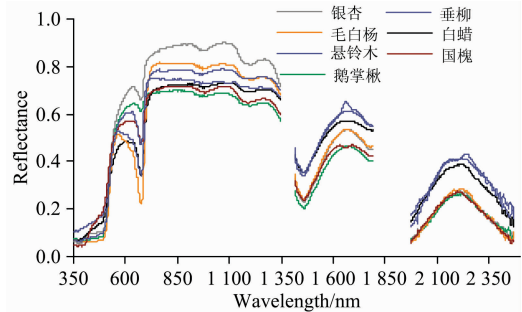


图 4 黄色系植物秋季光谱反射曲线

Fig. 4 Spectral reflectance curves of yellow leaf plants in autumn

综合分析,紫色系植物光谱反射特征表现为同绿色系植物近似的光谱反射曲线特征,红色系植物与黄色系植物光谱反射特征相似。3种彩色系植物均表现出自身特有的光谱特征。从绿峰和红谷的角度分析可知,不同色系植物绿峰位置表现为红色系植物>紫色系植物>黄色系植物>绿色系植物,而绿峰反射率、红谷位置和红谷反射率均表现为黄色系植物>红色系植物>紫色系植物>绿色系植物。

### 2.3 不同彩色系植物叶片光谱三边特征参数差异性分析

通过对大叶黄杨和 15 种彩色系植物秋季叶片原始光谱反射率、微分光谱的计算,提取出高光谱的光谱三边特征参数并进行方差分析,结果如表 3 所示。对比绿色系植物大叶黄杨光谱特征可知,不同色系植物红边位置整体表现为绿色系植物>紫色系植物>红色系植物=黄色系植物,彩叶植物的红边位置显著区别于绿色系植物( $p<0.05$ ),且均有“蓝移”的现象,即红边位置向短波方向移动了 5~16 nm;红边幅度和红边面积均以紫色系植物为最大,相比绿色系植物、黄色系植物与红色系植物,红边幅值分别增加了 112.9%, 74.8% 与 23.1%,红边面积分别增加了 42.5%, 115.7% 和 180.9%。说明紫色系植物的红边位置、红边幅度和红边面积等光谱特征参数与其他色系植物具有较大差异。

黄边位置、黄边幅值与黄边面积均以红色系植物最大,且显著高于其他色系植物( $p<0.05$ )。其中红色系植物的黄边位置出现在 617 nm,比紫色系植物、绿色系植物与黄色系植物分别红移了 8, 48 与 54 nm。红色系植物的黄边幅值与黄边面积相比其他色系植物也有显著增加,其中黄边幅值是绿色系植物、紫色系植物与黄色系植物的 3.62, 3.27 和 4.38 倍,而黄边面积则分别为绿色系植物、紫色系植物与黄色系植物的 5.08, 4.92 与 3.85 倍。说明黄边幅值与黄边面积可以作为

红色系植物区别于其他色系植物的重要光谱特征参数。

不同色系植物的蓝边位置无明显差异,但蓝边幅值和蓝边面积均以黄色系植物为最高,且显著区别于其他色系植物( $p < 0.05$ )。其中黄色系植物的蓝边幅值和蓝边面积分别是绿色系植物的3.95和4.14倍,紫色系植物的28.01和28.11倍,以及红色系植物的58.71和63.11倍。由此分析,蓝边幅值和蓝边面积是黄色系植物区别于其他色系植物的重

要特征参数。

综合分析表明,不同色系植物叶片光谱三边特征参数具有一定的规律性,三边参数可以作为区分不同彩色叶植物及其与绿色植物的特征参数,其中红边幅值与红边面积、黄边幅值与黄边面积、蓝边幅值与蓝边面积可分别作为紫色系植物、红色系植物与黄色系植物区别于其他色系植物的重要光谱特征参数。

表3 不同彩色叶植物光谱三边特征参数及方差分析

Table 3 Spectral triangulation characteristic parameters and variance analysis of different color-leaved plants

组别	植物名称	红边位置 /nm	红边幅值	红边面积 /cm <sup>2</sup>	黄边位置 /nm	黄边幅值	黄边面积 /cm <sup>2</sup>	蓝边位置 /nm	蓝边幅值	蓝边面积 /cm <sup>2</sup>
绿色系	大叶黄杨	704 a	0.989 b	46.743 ab	569 b	0.192 b	6.190 b	521 a	0.288b	6.435 b
	紫叶小檗	695	3.019	82.658	602	0.337	12.670	491	0.012	0.157
紫色系	紫叶碧桃	701	1.725	60.903	628	0.093	4.468	520	0.058	1.617
	紫叶李	701	1.575	56.287	597	0.045	2.032	522	0.052	1.258
	平均值	699 b	2.107 a	66.616 a	609 a	0.159 b	6.390 b	511 a	0.041 c	1.011 c
	五叶地锦	688	1.998	31.815	605	0.851	38.005	501	0.017	0.399
红色系	元宝枫	688	1.414	32.110	628	0.315	16.244	517	0.024	0.513
	鸡爪槭	688	1.258	20.446	606	0.693	32.595	499	0.014	0.227
	黄栌	688	0.532	10.830	607	0.773	42.549	512	0.027	0.814
	红瑞木	688	0.823	23.376	637	0.842	27.670	500	0.016	0.299
	平均值	688 c	1.205 ab	23.715 c	617 a	0.695 a	31.412 a	506 a	0.019 c	0.450 c
	银杏	688	1.305	20.396	564	0.320	12.692	518	1.364	32.765
黄色系	鹅掌楸	688	0.547	8.194	565	0.301	9.108	518	1.456	33.386
	白蜡	688	1.964	36.447	564	0.188	6.165	518	0.732	20.978
	毛白杨	688	2.750	58.536	560	0.096	10.150	518	1.350	30.833
	垂柳	688	2.086	43.273	560	0.076	5.938	518	0.958	25.547
	国槐	688	1.497	22.553	565	0.211	5.062	518	0.919	25.869
	悬铃木	687	1.831	26.778	562	0.297	8.013	518	1.201	29.455
	平均值	688 c	1.711 ab	30.882 bc	563 b	0.213 b	8.161 b	518 a	1.140 a	28.405 a

注:平均值后相同字母代表差异不显著,不同字母代表差异显著( $p < 0.05$ )

Note: After the average value, the same letter represents no significant difference, while different letter represents significant difference ( $p < 0.05$ )

### 3 结论

地物高光谱特征研究是遥感理论与应用研究的基础,高光谱数据波段多且波段连续的特性,可以为不同植物树种提供更多光谱反射率信息。通过对北京市15种不同色系彩叶植物叶片高光谱特征进行分析,得到如下结论:

(1)不同色系植物反射光谱特征不同,紫色、红色、黄色3种不同色系植物光谱曲线各自表现出自身特有的光谱特征。紫色系植物光谱反射特征表现为同绿色系植物近似的光谱反射曲线特征,红色系植物与黄色系植物光谱反射特征相似。3种彩色系植物绿峰位置、绿峰反射率、红谷位置和红谷反射率均远远高于绿色系植物。绿峰位置、绿峰反射率、红谷位置和红谷反射率可以作为彩色系区别于绿色系植物的

基本特征参数。

(2)不同彩色系植物叶片光谱三边特征参数具有一定的规律性,三边参数可以作为区分不同彩色叶植物及其与绿色系植物的特征参数,其中红边幅值与红边面积、黄边幅值与黄边面积、蓝边幅值与蓝边面积可分别作为紫色系植物、红色系植物与黄色系植物区别于其他色系植物的重要光谱特征参数。

通过对北京市不同色系彩叶植物秋季光谱反射曲线特征、光谱吸收特征参数以及三边特征参数等的分析,进一步完善了彩色系植物地物光谱数据库,同时也明确了不同彩色系植物叶片秋季光谱特征与绿色植物的差异,为高光谱技术监测城市彩叶植物应用提供了技术支撑。不同彩叶植物在不同季节的光谱特征差异,以及同一种植物在不同季节的光谱特征变化在今后仍需进一步研究分析。

### References

- [1] LI Wei-xing, YANG Shun-bo, HE Zhi-chong, et al(李卫星, 杨舜博, 何智冲, 等). Acta Horticulturae Sinica(园艺学报), 2017, 44(9): 1811.

- [ 2 ] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHANG Li-fu(童庆禧, 张 兵, 张立福). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2016, 20(5): 689.
- [ 3 ] Kisshore B S P C, Kumar A, Saikia P, et al. Journal of Asia-Pacific Biodiversity, 2020, 13(4): 637.
- [ 4 ] WU Jian, PENG Jian, WANG Meng-he, et al(吴 见, 彭 建, 王孟和, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(4): 1225.
- [ 5 ] LIANG Liang, ZHANG Lian-peng, LIN Hui, et al(梁 亮, 张连蓬, 林 卉, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2013, 46(1): 18.
- [ 6 ] LIU Ke, ZHOU Qing-bo, WU Wen-bin, et al(刘 轲, 周清波, 吴文斌, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(3): 155.
- [ 7 ] LIU Dong-wei, SUN Bing, CHEN Yong, et al(刘东蔚, 孙 冰, 陈 勇, 等). Journal of Nanjing Forestry University • Natural Sciences Edition(南京林业大学学报 • 自然科学版), 2014, 38(2): 111.
- [ 8 ] Thenkabail P S, Enclona E A, Ashton M S, et al. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3-4): 354.
- [ 9 ] Papeş M, Tupayachi R, Martínez P, et al. Journal of Vegetation Science, 2010, 21(2): 342.
- [10] Tsai F, Philpot W. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 41.
- [11] Zarco-Tejada P J, Pushnik J C, Dobrowski S, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(2): 284.
- [12] Yan X, Shi W Z, Zhao W J, et al. Analytical Letters, 2014, 47(3): 526.

## Study on Hyperspectral Characteristics and Difference of Urban Colorful Plants in Beijing in Autumn

DUAN Min-jie, LI Yan-ming, LI Xin-yu\*, XIE Jun-fei, WANG Qian, ZHAO Song-ting, XU Rui, WANG Yue-rong  
Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space, Beijing 100102, China

**Abstract** Along with promoting the color extension green technology demonstration project in Beijing, color-leaf plants play an increasingly prominent role in urban landscape construction and improvement of the living environment, especially in recent years. If the regional distribution and growth characteristics of urban colorful leaf plants can be observed quickly and lossless by using hyperspectral technology, important theoretical basis and data support can be provided for further optimizing the layout of urban colorful leaf plants and accelerating the construction of urban color-leaf plants system. In recent years, the rapid development of hyperspectral remote sensing technology provides a lot of ground cover plant spectral information and improves the spectral resolution and response range. Plant spectrum has a series of characteristic absorption bands, which can indicate the differences between different tree species, and is the basis of hyperspectral tree species identification. This paper selected 15 species of colorful leaf plants with different color systems in Beijing as the research object. Moreover, the SR-3501 portable surface feature spectrometer was used to analyze the characteristics of the hyperspectral reflection curve of leaves of plants of different color families in autumn. The difference and variation of the characteristic bands and characteristic parameters of plants of different color families were further studied through the differential transformation and feature parameter extraction. The results showed that *Euonymus japonicus* had the characteristics of typical green vegetation spectral curve, which were the changes of “peak” and “valley”; the spectral reflection characteristic of purple leaf plants was similar to that of green plants; the spectral reflection characteristic of red leaf plants was similar to that of yellow leaf plants. Based on spectral absorption characteristic parameters, the green/red peak position of different color plants showed a trend of red leaf plants > purple leaf plants > yellow leaf plants > green leaf plants, and green/red peak reflectivity, red valley location and red valley reflectivity were all represented by the yellow leaf plants > red leaf plants > purple leaf plants > green leaf plants. The characteristic spectrum parameters of the three sides of different color plants had certain regularity and can be used as the characteristic parameters to distinguish the different colored plants with green plants. In comparison, the red amplitude and red edge area, yellow amplitude and yellow edge area, blue amplitude and blue edge area could be used as the important spectral characteristic parameters to distinguish the purple leaf plants, the red leaf plants and the yellow leaf plants from green plants. This study provides a theoretical basis for applying the hyperspectral technique in the future observation of urban color leaf plant system construction.

**Keywords** Colorful plants; Hyperspectral characteristic; First derivative; Absorption characteristic parameters; Trilateral characteristic parameters

\* Corresponding author

(Received Mar. 9, 2021; accepted Jun. 6, 2021)