

基于被子植物叶类器官的仿生伪装材料设计

刘志明*, 吴文健, 胡碧茹

国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073

* E-mail: liuzhiming1979@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-08-29; 接受日期: 2007-10-24

国防科技大学校预研资助项目

摘要 对比了被子植物叶片和花瓣的显微组织结构和反射光谱, 研究表明被子植物叶类器官具有相似的组织结构特征和近红外反射光谱. 根据叶类器官的组织结构特征以及决定其反射光谱的物质组成, 提出了基于被子植物叶类器官的仿生伪装材料模型, 并进行了模型的原理验证性实验. 实验结果表明, 在 300~2600 nm 光谱范围内, 仅简化后的含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱的相似度就在 96.9% 以上. 这种全新的伪装材料在紫外、可见光和近红外波段具有与植被叶片非常相似的光谱反射特征, 其伪装效果可望有效对抗高光谱和超光谱成像侦察.

关键词

伪装材料
仿生
叶类器官
光谱

天然植被是伪装目标最基本的环境背景, 也是伪装工程最基础的模拟对象. 随着高光谱和超光谱成像侦察技术的发展和运用, 目前的传统伪装材料已无法对抗精细的光谱侦察. 其根本原因在于, 传统的伪装材料不具有自然植被的组织结构、物质成分和生命活动特征, 导致了其反射光谱虽能够在可见光和近红外波段实现与植被环境总体上的相似, 却无法实现完全的、精细的光谱匹配. 这种致命的缺陷是无法通过传统的材料方法和技术手段得以改进的, 必须从伪装材料的基本结构和物质组成上进行彻底的改革, 植物仿生是最佳的技术途径, 我们在此方面开展了初步的研究^[1].

早在 20 世纪六、七十年代, 遥感领域就已经对植物叶的反射光谱开展了仿真模拟研究^[2,3], 并在上述基础上逐步建立了植物反射光谱的冠层模型. 为遥感评估植物的生化性质, 从 20 世纪 90 年代, 人们就开始研究植物叶和冠层的遥感反射光谱与生化

成分的关系^[4~13], 1992 年~1993 年进行的 ACCP 项目在此方面开展了很多细致的工作^{1~3)}, 目前已逐步建立森林生态系统生化成分含量的遥感反射光谱的动态评估模型^[14]. 但相关的研究工作主要是从植物学、遥感等方面研究它们之间的关系, 利用植物反射光谱特征产生机理进行伪装材料研发的工作还未见报道.

1 被子植物叶片和花瓣的组织结构

我们分别对法国梧桐叶片、箭竹叶片、杜鹃花花瓣玫瑰花瓣和进行了显微观测, 分别见图 1~4 所示. 切片机型号: Leica RM2015, 切片厚度: 10~15 μm , 光学显微镜型号: Olympus CX4, 扫描电镜型号: 日立 JSM-6360LV.

1.1 被子植物叶片的组织结构

通常被子植物叶片由表皮、叶肉和叶脉 3 部分构成^[15]. 叶肉组织中, 海绵组织细胞所含的叶绿体比栅

1) Aber J D, Martin M, Wessman C. Calculated leaf carbon and nitrogen, 1992 (ACCP). 1999

2) Yoder B, Johnson L. Seedling canopy chemistry, 1992~1993 (ACCP). 1999

3) Aber J D, Martin M E. Visible and near-infrared leaf reflectance spectra, 1992~1993 (ACCP). 1999

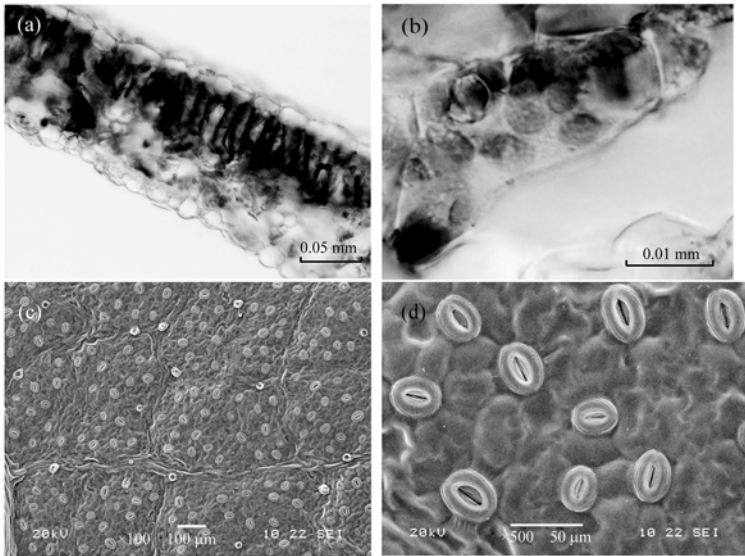


图 1 法国梧桐叶片的组织结构显微照片

(a) 叶片横切显微照片; (b) 叶绿体形态显微照片; (c) 下表皮扫描电镜照片; (d) 下表皮气孔扫描电镜照片

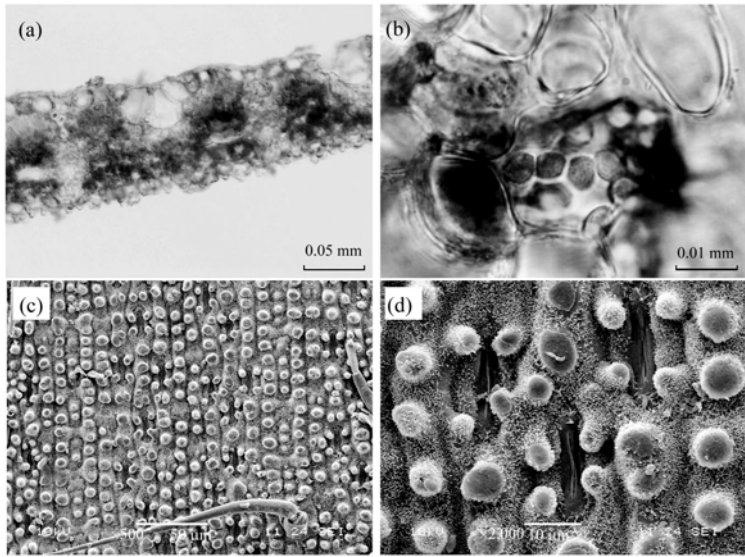


图 2 箭竹叶片的组织结构显微照片

(a) 叶片横切显微照片; (b) 叶绿体形态显微照片; (c) 下表皮扫描电镜照片; (d) 下表皮气孔扫描电镜照片

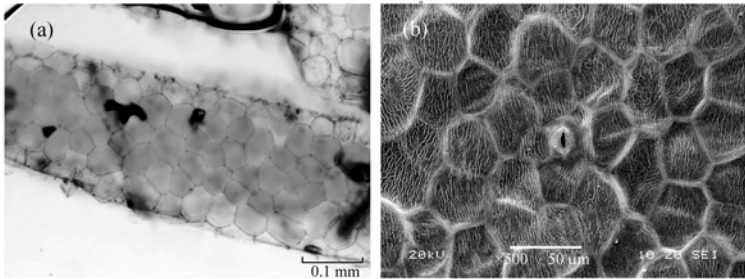


图 3 杜鹃花花瓣的组织结构显微照片

(a) 花瓣的横切显微照片; (b) 花瓣的气孔扫描电镜照片

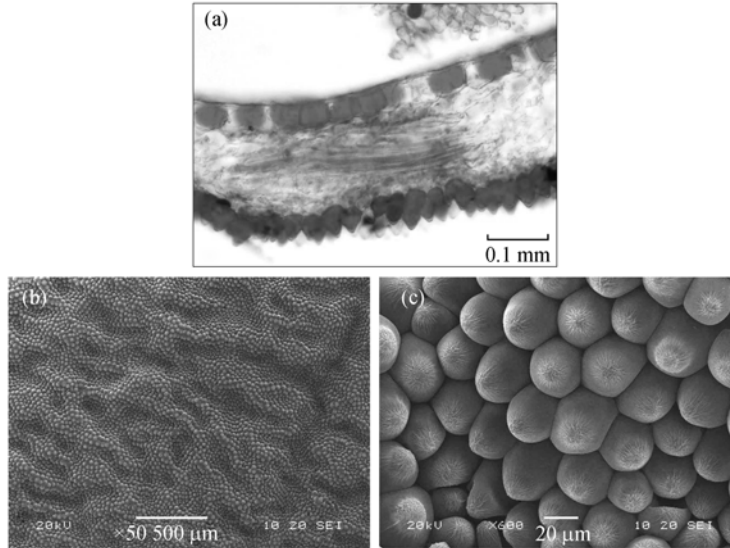


图4 玫瑰花瓣的组织结构显微照片

(a) 花瓣的横切显微照片; (b) 花瓣的上表皮扫描电镜照片; (c) 上表皮球状突起的扫描电镜照片

栏组织细胞少并具有细胞间隙, 所以从叶的外表可以看出其近轴面颜色深而远轴面颜色浅, 这样的叶称为异叶面. 有些植物的叶两面受光情况差异不大, 叶肉组织中没有明显的栅栏组织和海绵组织分化, 这样的叶称为等面叶. 我们研究了法国梧桐的异面叶叶片和箭竹的等面叶叶片的显微组织结构, 分别如图1和2所示.

图1(a)~(d)分别是法国梧桐的叶片横切显微照片、叶绿体形态显微照片、叶片下表皮扫描电镜照片和叶片下表皮气孔扫描电镜照片. 图1(a)清晰地显示了法国梧桐叶片的三层结构, 叶肉中栅栏组织的柱状细胞特征和海绵组织的疏松多孔特征得到了很好的验证, 并可以发现叶绿体在栅栏组织中数量较多、在海绵组织中数量较少. 图1(b)描述了叶绿体的大小和形态, 这是植物叶呈现绿色的根本原因. 图1(c)所示的是法国梧桐叶片下表皮的形貌, 上面的气孔呈不规则分布状态, 气孔密度约为 210 个/mm^2 . 图1(d)所示的是法国梧桐叶片下表皮的细微形貌, 主气孔呈椭圆形, 大小约为 $34 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$.

图2为箭竹叶片的组织结构显微照片. 图2(a)清晰地显示了叶肉组织的均一薄壁特征, 表明箭竹叶为等面叶, 表皮中几个较大的伸向叶肉组织的表皮细胞为运动细胞. 图2(b)描述了箭竹叶片中叶绿体的形态和分布情况. 图2(c)和(d)所示的分别是箭竹叶片

下表皮及其表面气孔的扫描电镜照片. 可以发现, 箭竹叶片下表皮上有很多疣状突起, 并附有表皮毛, 分布在疣状突起之间的气孔呈椭圆形并已关闭, 气孔大小为 $30 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 沿叶脉方向分布, 密度约为 504 个/mm^2 .

1.2 被子植物花瓣的组织结构

花瓣的表皮层上也有气孔和表皮毛, 有的气孔很像营养叶的气孔, 或者有较不分化的气孔. 有些植物花瓣的表皮层细胞垂周壁上呈波纹状或具内脊. 外壁特别是在近轴面外壁上可能有凸起或突起. 花瓣的内部组织结构也有些像叶子, 但较简化. 细胞疏松排列, 很像平常叶子中较少胞间隙的海绵组织, 且花瓣的维管组织也较退化^[16].

图3(a)是杜鹃花花瓣横切显微照片, 图3(b)是花瓣表面气孔的扫描电镜照片. 图3(a)清晰地显示了花瓣的表皮和类海绵组织二层结构, 并可以观察到表皮细胞基本不含色素, 紫色的花色苷色素^[17]主要分布在类海绵组织的细胞中, 类海绵组织细胞的二维大小约为 $50 \mu\text{m}$. 图3(b)所示的是紫色杜鹃花花瓣下表皮上的气孔, 观察结果表明表皮上的气孔的数量非常少, 并且有单元结构为五边形和六边形的网络状波纹.

图4(a)~(c)分别是紫色玫瑰花瓣横切显微照片和花瓣上表皮的扫描电镜照片及其放大照片.

图 4(a)清晰地显示了花瓣的表皮和类海绵组织二层结构, 并可以观察到类海绵组织的细胞基本不含色素, 紫色的花青苷色素^[17]主要分布在表皮细胞中, 类海绵组织细胞不规则, 其二维大小约为 20 μm , 上表皮细胞呈桃状突起, 并较类海绵组织细胞稍大. 图 4(b)所示的是紫色玫瑰花瓣上表皮的形貌, 观察结果表明上表皮有波状起伏. 从图 4(c)所示的放大照片可以清楚地看到上表皮细胞具有精细的球状突起, 它们导致了光线在花瓣表面的强烈漫反射, 这也是为什么玫瑰花瓣从上面看起来亮度非常均匀的主要原因.

上述对法国梧桐叶片、箭竹叶片以及杜鹃花、玫瑰花花瓣的显微研究表明, 花瓣与叶片相比组织结构仅有表皮和类海绵组织的分化, 细胞内色素的分散形式也比较简单, 表皮上气孔很少且存在周期性的起伏.

2 被子植物叶片和花瓣的光谱反射特征

我们在室内测试了多种被子植物的叶片和花瓣的反射光谱, 光谱仪型号为日立 U-4100 紫外/可见/近红外光谱仪, 通用测试光谱范围为 200~2600 nm, 数据采样间隔为 1 或 2 nm.

2.1 被子植物叶片的光谱反射特征

图 5 为实测不同月份异面叶和等面叶叶片的反射光谱, 其中图 5(a)和(b)分别是实测的长沙地区不同月份法国梧桐叶和狗尾草叶的紫外/可见/近红外反射光谱. 图 5 表明, 异面叶植物和等面叶植物随季节的变化它们叶的反射光谱也发生了变化. 这些变化主要体现在色素反射峰的强度和范围, 以及水分的特征吸收强度. 然而, 虽然所测试的异面叶和等面叶

的叶肉组织不同, 但它们的反射光谱都呈现出 4 个共同的特点^[18,19]:

(1) 可见光部分的反射率较低, 且在 330~450 nm 和 680 nm 处的蓝、红光呈低谷, 在 550 nm 的绿色波段出现一个小反射峰, 这是叶绿素等植物色素的光谱吸收特性所致;

(2) 在 680~750 nm 的红光波段处有一陡坡, 反射率从较低的水平迅速上升, 而且不同植物的光谱位置和反射率斜率基本一致. 这是植被反射光谱曲线最明显的特征, 称为“红边”;

(3) 在 780~1300 nm 的近红外区稳定地保持较高反射率, 一般为 40%~60%. 这也是植物反射光谱曲线独有的特征, 称为“近红外高原”;

(4) 在 1300 nm 附近, 反射率明显下降, 而且随后一直保持较低的水平, 并呈现明显的水分吸收带.

这四个特点是健康绿色植物叶片内物质组成和微观组织结构的本质反映, 并不会因色素和水分含量的变化而变化, 也不会因植物叶的种类不同而变化.

2.2 被子植物花瓣的光谱反射特征

早在 1790 年, 德国诗人、哲学家和博物学家歌德就在其著名的论文《植物的变态》种提出花是适应于繁殖功能的变态枝条, 至今有许多形态学和分子生物学证据支持他的观点. 依据歌德的观点, 从形态上花冠的组成花瓣具有叶的一般性质^[15]. 花瓣既然具有叶的一般性质, 那么其反射光谱特征与叶片相比有什么不同呢? 我们研究了几种花瓣的反射光谱特征, 并与法国梧桐叶片的反射光谱进行了对比.

我们分别测试了广玉兰花瓣、康乃馨花瓣、玫瑰

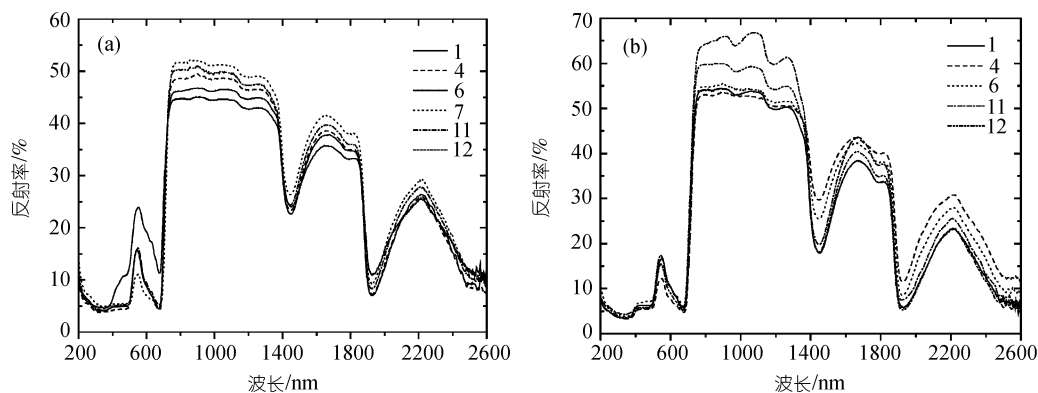


图 5 不同月份异面叶和等面叶的反射光谱

(a) 法国梧桐叶片的反射光谱; (b) 狗尾草叶片的反射光谱

花瓣、杜鹃花花瓣和月季花瓣在 200~2600 nm 之间的反射光谱, 如图 6 所示, 并同时与法国梧桐叶片的反射光谱进行了对比. 从图 6 中可以看出, 在可见光谱范围内, 不同植物花瓣的反射光谱差异很大. 即使同样都呈紫红色的玫瑰花瓣、杜鹃花花瓣和月季花瓣, 它们的反射光谱在 380~780 nm 之间的峰位和峰高也不相同, 这是植物的花色具有“万紫千红”特征的根本原因. 并且, 在这一光谱范围内, 测试的花瓣的反射率都高于叶片的光谱反射率, 这应是花比叶更加“夺目”的重要原因之一. 在 780~2600 nm 的近红外光谱范围内, 花瓣的反射光谱特征与法国梧桐叶片的反射光谱特征基本一致, 都具有“近红外高原”特征和明显的水分吸收带, 不同之处是在“近红外高原”波段花瓣的反射率皆高于叶片的反射率, 这一现象应是花瓣表皮上的微观周期性结构对光线的强烈散射所致.

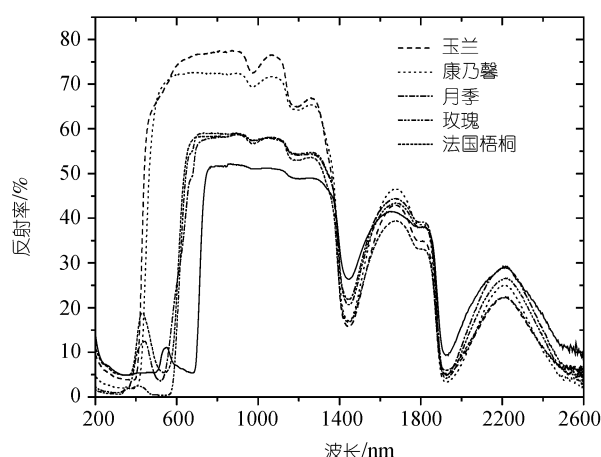


图 6 几种花花瓣的反射光谱

通过上述分析可知, 花瓣与叶片相比虽含有不同的植物色素, 但具有类似的组织结构和物质组成, 这使得它们虽然在可见光范围内反射光谱差异较大, 但在近红外光谱范围内反射光谱的特征基本一致. 这一现象更加充分地表明对于植物叶类器官, 决定其可见光范围内反射光谱特征的主要因素是所含有的色素, 决定其近红外反射光谱特征的主要因素是其疏松多孔的组织结构和细胞内的水分.

3 仿生伪装材料的模型及实验验证

3.1 仿生伪装材料模型

上述对被子植物叶片和花瓣的研究结果表明,

叶类器官中叶肉组织的分化并不影响它们具有共同的光谱特征. 从仿生模型的完整性出发, 我们将初步采用二层复合结构模拟植物叶类器官中的表皮组织和叶肉组织, 分别为: 仿表皮组织的仿生透光膜、仿叶肉组织的仿生疏松多孔结构.

采用透光性好、耐水能力强的高分子薄膜, 模拟植物叶类器官的表皮层. 参考植物叶类器官中叶肉组织的相关结构参数, 采用发泡的聚氨酯材料模拟叶片叶肉组织. 其中, 选择稳定性较高的植物色素衍生物作为颜料, 并对其进行微胶囊化处理, 以实现叶绿体形态和功能的模拟; 以高吸水性树脂制备的椭球型颗粒存储一定量的水分, 以实现植物细胞中液泡的模拟. 设计如图 7 所示的结构作为植物叶类器官仿生伪装材料的基本结构.

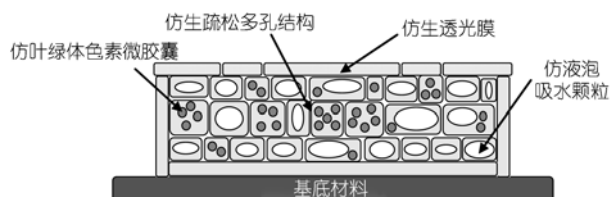


图 7 植物叶类器官仿生伪装材料结构示意图

3.2 实验验证

为了初步验证植物叶类器官仿生伪装材料设计的合理性和可行性, 我们简化了材料模型以进行原理验证实验. 基本方法是制备含有植物色素的聚氨酯发泡材料, 并在发泡材料吸水后测试其光谱反射性质.

采用“箱式”发泡的方法制备含有植物色素的聚氨酯发泡材料, 其中油溶性叶绿素与浸膏状叶黄素的比例为 3:1. 试制发泡材料的原料配比见表 1.

使用表 1 中所示的第四个原料配比时发泡效果较好, 制备的含有植物色素的聚氨酯发泡材料的显微照片如图 8 所示, 并在一致的比例尺下将其与睡莲叶横切显微照片进行了比较. 图 8 表明, 此种配比制备的聚氨酯发泡材料与睡莲叶片通气组织的尺寸和结构基本一致.

图 9 所示的是 300~2600 nm 之间含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱比较. 在 550 nm 附近, 含水发泡材料呈现一个与法国梧桐叶片基本一致的反射峰, 但反射率偏高, 进一步试验表明, 提高色素的含量可以有效降低可见光波段的反射率; 650 nm

表 1 含有植物色素的聚氨酯发泡材料的原料配比

聚醚多元醇/g	水/g	硅油/g	胺类催化剂/g	锡类催化剂/g	叶绿素铜/g	叶黄素/g	异氰酸酯/g	效果
100	2.25	1.25	0.25	0.25	4.15	0.655	32.2	收缩
100	2.25	1.25	0.2	0.2	4.15	0.655	28.2	脆化
100	2.25	2	0.25	0.25	4.15	0.655	33	收缩
100	2.25	2	0.25	0.2	4.15	0.665	33	较好

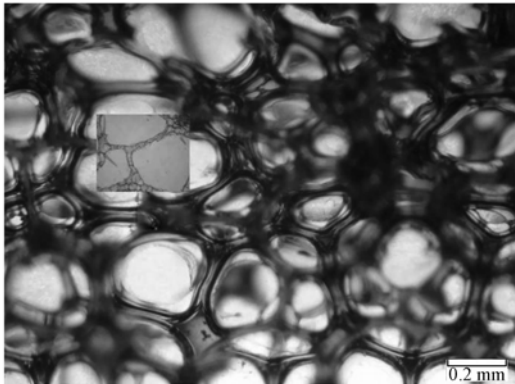


图 8 聚氨酯发泡材料与睡莲叶片横切的显微照片比较

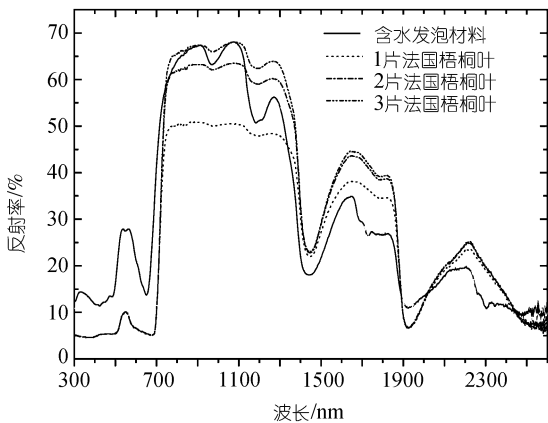


图 9 含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱比较

附近出现的红光低谷比法国梧桐叶片位于 680 nm 的红光低谷提前了 30 nm, 这主要是由于油溶性叶绿素的特征吸收带位于 650 nm; 在 650~780 nm 的波长范围内, 含水发泡材料的光谱反射率发生了从低到高的显著变化, 表现出明显的“红边”特征, 其一阶微分峰值位于 687 nm, 较法国梧桐叶片位于 717 nm 的一阶微分峰值提前了 30 nm; 在 780 nm 后的近红外波段, 含水发泡材料的反射光谱不但呈现出高原平台形状, 而且出现了位于 970, 1190, 1440 和 1920 nm 处的四个水分吸收带; 含水发泡材料的反射光谱在

1700 和 2300 nm 附近出现了特征波动, 与法国梧桐叶片的反射光谱有所不同, 这一现象主要是由发泡材料与植物细胞壁的成分差异所致.

我们根据相似度公式

$$\cos \theta = \frac{(\alpha, \beta)}{\|\alpha\| \|\beta\|} = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i \beta_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^l \alpha_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}},$$

($\alpha=[\alpha_i]$, $\beta=[\beta_i]$, α, β 皆为 l 维向量),

计算了 300~2600 nm 之间含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱的相似度. 经计算, 该含水发泡材料与 1 片、2 片、3 片法国梧桐叶片的反射光谱的相似度分别为 0.96914, 0.97414, 0.97548. 计算结果表明, 该含水发泡材料与法国梧桐多叶片叠加时的反射光谱比较接近. 可以预见, 进一步完善该种发泡材料的组织结构并调整其物质成分, 我们将实现对植物反射光谱的高精度模拟, 从而实现光学伪装材料的跨越性发展.

4 结论

本文对比了被子植物叶片和花瓣的显微结构和反射光谱, 研究表明叶类器官具有相似的组织结构和物质组成, 这使得它们虽然在可见光波段反射光谱差异较大, 但在近红外波段反射光谱的特征基本一致. 根据叶类器官的组织结构特征和决定其反射光谱的物质组成, 我们设计了一种全新的伪装材料, 并进行了仿生模型的原理验证性实验, 测试结果表明该种伪装材料在紫外、可见光和近红外波段具有与绿色植被非常相似的光谱反射特征, 仅简化后的含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱的相似度就在 0.969 以上, 证实了进行植物叶类器官仿生设计的可行性和有效性.

伪装材料的植物叶类器官仿生是一种全新的伪

装材料设计理念, 为从根本上实现伪装材料与植被的“同色同谱”开辟了崭新的途径, 将有力地促进伪装

材料的发展, 并为对抗高光谱和超光谱成像侦察提供更加有效的手段.

参考文献

- 1 刘志明, 吴文健, 胡碧茹. 仿植被叶片结构伪装材料. 应用化学, 2007, 24 (增刊): 211—215
- 2 Allen W A, Gausman H W, Richardson A J, et al. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. J Opt Soc Am, 1969, 59(10): 1376—1379
- 3 Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry. Rem S Env, 1989, 30(3): 271—278
- 4 Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry. Rem S Env, 1990, 30(2-3): 271—278
- 5 Govaerts Y M, Jacquemoud S, Verstraete M M, et al. Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf. Appl Optics, 1996, 35(33): 6585—6598
- 6 Andrieu B, Baret F, Jacquemoud S, et al. Evaluation of an improved version model for simulating bidirectional of sugar beet canopies. Rem S Env, 1997, 60(3): 247—257
- 7 Dawson T P, Curran P J, Plummer S E. LIBERTY-Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. Rem S Env, 1998, 65(1): 50—60
- 8 Ustin S L, Roberts D A, Pinzón J, et al. Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. Rem S Env, 1998, 65(3): 280—291
- 9 Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. Adv Space Res, 1998, 22(5): 689—692
- 10 Asner G P, Wessman C A, Schimel D S, et al. Variability in leaf and litter optical properties: Implications for BRDF model inversions using AVHRR, MODIS, and MISR. Rem S Env, 1998, 63(3): 243—257
- 11 Blackburn G A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves. Rem S Env, 1999, 70(2): 224—237
- 12 Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Rem S Env, 2001, 77(1): 22—33
- 13 Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Rem S Env, 2002, 81(2): 337—354
- 14 Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. J Plant Phys, 2003, 160(3): 271—282
- 15 周云龙. 植物生物学. 北京: 高等教育出版社, 2004
- 16 张春牛. 植物花瓣的起源及其演化. 丽水师范专科学校学报, 2001, 23(2): 51—52
- 17 项斌, 高建荣. 天然色素. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 18 Woolley J T. Reflectance and transmittance of light by leaves. J Plant Phys, 1971, 47(5): 656—662
- 19 Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, et al. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. Rem S Env, 1996, 56(3): 194—202