

# 绿色植物光谱特征拟合技术研究进展

许浩, 刘珩

(陆军工程大学, 南京 210001)

**摘要:**高、超光谱成像技术对伪装的隐身技术提出了新的更高的要求,研究各种植物光谱特征拟合技术,可为解决高、超光谱成像侦察下目标伪装问题探索新方法和新材料。分析了植物组成与结构对植物光谱特征的影响规律,阐述了近年来植物光谱拟合技术的进展及各光谱拟合技术的特点和优势,在光学和近红外波段,可采用叶绿素提取及改性、无机钴系颜料的合成及有机酞菁颜料的修饰及组装实现植物的类叶绿素反射特性;在短波红外波段,可采用孔、叶绿素及水或吸附剂的复合多层结构模拟植物蒸腾作用及光谱特征。

**关键词:**植物光谱特征;类叶绿素特性;蒸腾作用;光谱拟合技术

**本文引用格式:**许浩,刘珩.绿色植物光谱特征拟合技术研究进展[J].兵器装备工程学报,2018(2):157-162.

**Citation format:**XU Hao, LIU Heng. Advances in Spectral Signature Fitting of Green Plants[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(2):157-162.

中图分类号:TB-333

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2018)02-0157-06

## Advances in Spectral Signature Fitting of Green Plants

XU Hao, LIU Heng

(The Army Engineering University, Nanjing 210001, China)

**Abstract:** High spectral imaging technology puts forward updated and higher requirements for the stealth camouflage, and various plant spectral feature fitting technology can explore new methods and new materials for the target problem solving and hyperspectral imaging reconnaissance under high. This paper analyzes the influence of plant composition and structure of plant spectral characteristics, expounds the features and advantages of recent advances in plant spectral fitting technique and spectral fitting technique. In the details, in the optical and near-infrared wavelengths, the chlorophyll extraction and chlorophyll reflectance modification, modification and assembly of inorganic pigments and synthesis of cobalt organic phthalocyanine pigment plant to realize the chlorophyll reflection property of plants; in the short wave infrared band, the hole, chlorophyll and water or adsorbent composite multilayer structure to simulate the transpiration characteristics and spectral plants.

**Key words:** spectral characteristics of plants; chlorophyll characteristics; transpiration; spectral fitting techniques

高、超光谱成像技术结合了遥感技术和测谱技术的优势<sup>[1]</sup>,可对同一目标不同波段连续成像,直观反映被测物体

与背景光谱特征差异,极大地提高目标探测效率,具备从卫星和飞机平台上探测目标光谱细节的能力,对现有伪装和

收稿日期:2017-09-04;修回日期:2017-10-05

基金项目:装备预研重点实验室基金项目(614220602021702)

作者简介:许浩(1994—),男,硕士研究生,主要从事多功能复合材料研究,E-mail:xxxxxtf@163.com。

通讯作者:刘珩(1973—),女,副教授,主要从事功能材料及仿生材料研究,E-mail:87829112@qq.com。

隐身技术是空前的挑战<sup>[2]</sup>。为应对高光谱成像技术带来的威胁,必须对现有伪装技术加以改进,特别要将原有“异谱同色”的光学伪装原则改为光谱细节模拟,以最大程度地实现目标与背景的融合,提高目标的战场生存概率<sup>[3]</sup>。传统绿色伪装颜料或涂料可仿造植物的颜色,却模拟不了植物的光谱特性,不能满足先进光学侦察下的隐身要求,因此拟合绿色植物光谱特征的光学伪装技术和材料成为伪装领域的研究热点和发展趋势<sup>[4]</sup>。本文在总结植物光谱特点基础上,分析影响光谱特性的植物组成及结构,从叶绿素拟合及植物蒸腾作用等方面阐述近年来植物光谱特征拟合技术的最新研究进展。

## 1 绿色植物光谱特征及影响因素

不同种类的绿色植物因生长环境(土壤、气候、灌溉、施肥、气候、地形等)不同而产生形貌上的差异,但其反射光谱却具有相似的特征。图1为4种植物(梧桐、月季、罗汉松及樟树)的光谱测试结果,从图1可看出,4种植物的光谱曲线虽不完全重合,却具有相似的趋势。在380~2500 nm波长范围内有3个显著的光谱特征,即550 nm波长处绿色反射峰及670~780 nm波长范围内反射率陡升,780~1300 nm波长范围的近红外高反射,1490 nm和1950 nm波长处的特征吸收峰。植物的光谱特性取决于其内在组成和结构<sup>[5]</sup>,在可见光和近红外波段,植物中的叶绿素分子在特定波长的吸收形成了绿色反射峰及近红外反射率陡升,植物组织和细胞结构对入射光的反射、吸收和透射造成植物近红外高反射平台,水在短波红外的振动吸收形成了植物的两个特征吸收峰。

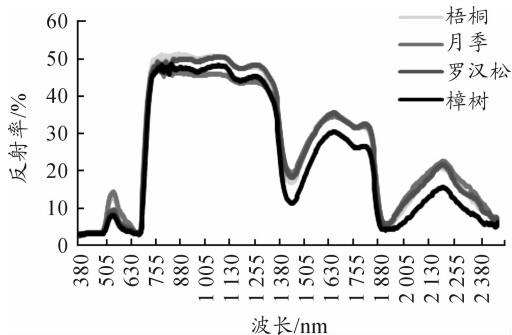


图1 不同种类绿色植物光谱曲线

### 1.1 叶绿素对植物光谱特征的影响

叶绿素是影响植物光学波段光谱特性主要因素,叶绿素分子中含有的卟啉大 $\pi$ 共轭结构,在紫外及可见光区域有两个特征吸收谱带:一是400~450 nm紫外区域强吸收Soret带(即B带),峰值波长位于420 nm附近,它由卟啉分子 $a_{2u}(\pi) \rightarrow e_g(\pi^*)$ 跃迁产生;二是500~700 nm可见光区域若干个弱吸收Q带,峰值波长位于650 nm附近,它由卟啉分子 $a_{1u}(\pi) \rightarrow e_g(\pi^*)$ 跃迁产生<sup>[6]</sup>。位于两个谱带附近的大

部分能量被吸收,而在两个吸收带间,由于吸收作用较小,反射强,对应的反射峰值波长在550 nm左右,植物呈现出绿色。在700 nm以外的近红外区域,叶绿素对入射能量无吸收,光谱呈高反射特征。

### 1.2 叶片多孔结构对植物光谱特征的影响

植物叶片通常由表皮、叶脉和叶肉三部分组成,表皮细胞无色透明,有利于光线进入,反射率仅为2%~3%;叶脉是叶片上的维管束,面积小且不含叶绿素,对植物光谱几乎无影响;叶肉内的栅栏组织与海绵组织中存在大量的空气,形成多重的空气-细胞壁界面,入射光在到达叶片下表皮之前被多次反射、透射<sup>[7]</sup>,部分入射光又被反射出叶片。在此机制作用下,植物叶片在780~1300 nm具有40%~60%的高反射率,而这种反射与光的波长无关。叶片多孔结构多次散射形成植物在此区域的“近红外高原”。

### 1.3 含水量对植物光谱特征的影响

植物的红外光谱响应受水分子的振动吸收影响,水分子中的O-H键在1450 nm和1930 nm处具有强烈的特征吸收谱带,在960 nm及1190 nm处出现微弱的特征吸收峰<sup>[8]</sup>。但在400~1300 nm波段内植物的反射率主要受叶绿素和叶片组织结构<sup>[9]</sup>的影响,因此弱的水分子吸收峰对植物的反射率影响不显著。图2为樟树叶片分别低温冷冻干燥24 h、36 h、48 h后的光谱曲线。从图2中可以看出,在光学和近红外波段,由于植物的叶绿素和叶片结构没有被破坏,仍然保持植物的光谱反射特性;在红外波段内,随着干燥时间延长,叶片含水量减少,植物红外波段的反射率升高,随着植物中水分的蒸发,水的特征吸收峰减弱直至消失。

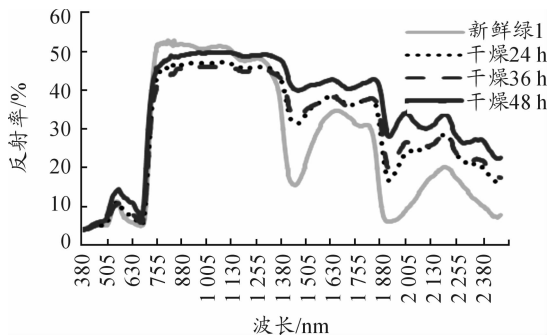


图2 樟树叶片干燥不同时间的光谱曲线

## 2 类叶绿素光谱拟合技术进展

绿色植物的可见光-近红外光谱特征主要受叶绿素影响,分析叶绿素分子结构特点及吸收、反射规律,开发能拟合有叶绿素光谱特征的绿色材料,是当前伪装技术及材料研究的热点,具有重要的军事和经济价值。目前类叶绿素光谱特征拟合技术主要有3种,一是通过提取或改性植物叶绿素模拟植物光谱技术;二是掺杂不同元素的尖晶石型无机颜料光谱拟合技术;三是构建类叶绿素结构的酞菁颜料合成技术。

## 2.1 叶绿素提取及改性光谱拟合技术

叶绿素的提取方法主要有丙酮研磨法、抽滤法、有机溶剂浸泡法、超声波提取法及微波辅助提取等方法,其中,提取溶剂有乙醇、丙酮、石油醚及不同配比混合剂<sup>[10]</sup>。杨玉杰以提取出的叶绿素乙醇溶液为原材料,将防水膜、叶绿素/PVA薄膜、封水袋、纸张按顺序用聚氨酯胶黏剂粘结在一起,得到植物叶片仿生材料<sup>[11]</sup>,光谱特性测试表明,仿生叶片具有植物在530 nm的特征反射峰和650~680 nm的特征吸收峰,随着光照、受热、酸、碱等对叶绿素分子的降解,封装在PVA薄膜内的叶绿素因变性造成反射曲线发生变化,3个月内仿生叶片与植物的光谱相似度达98%,超过6个月已不具有植物的光谱特性。

将叶绿素通过皂化、酸化、离子取代、成盐改性,可提高叶绿素的分解温度和稳定性。种亚莉制备了铜、铁、锌、钙元素取代的水溶性叶绿素衍生物<sup>[12]</sup>,其在370~440 nm和620~670 nm区间内存在两个吸收峰,与叶绿素较为一致。刘志明研究发现叶绿素铜钠盐与叶绿素的光谱特征更为相似,在85℃以上发生吸热分解<sup>[13]</sup>,虽高于天然叶绿素40℃的分解温度,但其稳定性和耐久性仍难满足伪装的需求。

## 2.2 无机颜料光谱拟合技术

目前迷彩伪装中绿色光谱特征模拟大都采用铬绿颜料,通过经验配色或计算机配色达到与植物同色的基本要求,但铬绿颜料在近红外区域,反射率呈缓慢上升趋势,与植物在该波段的陡升存在较大差异。

目前,与植物光谱拟合较好的无机颜料是尖晶石型的钴系颜料,其特性取决于 $\text{Co}^{2+}$ 的含量和在不同配位场中的d轨道的电子状态。由晶体场理论可知<sup>[14]</sup>,过渡族 $\text{Co}^{2+}$ ( $d_7$ )处于球形对称的势场中时,5个d轨道( $d_{xy}$ 、 $d_{xz}$ 、 $d_{yz}$ 、 $d_{x^2-y^2}$ 、 $d_{z^2}$ )五重简并。当 $\text{Co}^{2+}$ 位于八面体配位时,简并的能量发生分裂,轨道之间产生能级差<sup>[15,16]</sup>。根据配合物电子吸收光谱, $\text{Co}^{2+}$ ( $d_7$ )在波长700~1 000 nm处,低吸收高反射,在650~700 nm之间有吸收峰,对应于低反射,这与植物光谱在此波段的反射特性很相似。

近年来,采用元素掺杂的手段研究不同离子、含量、合成条件对钴系颜料的光谱反射特性及与植物光谱拟合程度的影响规律。通过对钴蓝颜料进行不同元素掺杂及含量控制,采用适当的制备工艺和参数<sup>[17-20]</sup>,高温烧结的钴蓝改性颜料,在近红外波段具有与植物相似的光谱特性。Yoneda等<sup>[21]</sup>系统地研究了铝、反应物粒径等对色调的影响,得到一系列具有与叶片相似的光谱反射曲线。Ianoş等<sup>[22]</sup>通过溶液燃烧合成法探究了低钴含量蓝色颜料的近红外反射特性,平均反射率达到59%。美国Ferro公司研制的以“伪装绿”命名的绿色颜料能够很好地模拟绿色植被在可见光近红外的光谱反射曲线,被应用在地面装备的伪装隐身<sup>[23]</sup>。刘珩研究了具有 $\text{Co}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Al}_y\text{Cr}_{2-y}\text{O}_4$ 化学计量比的系列尖晶石型钴系颜料,通过改变掺杂离子的种类及含量,调整制备工艺参数影响发色离子配位场而改变钴蓝的反射特性,在可见光与近红外波段与植物光谱实现较好拟合<sup>[24]</sup>。

## 2.3 类叶绿素结构有机颜料光谱拟合技术

从植物中提取叶绿素或人工合成叶绿素,其光谱特性与叶绿素拟合程度高,但稳定性差、易降解、着色力差。酞菁具有超强的着色能力,较好的化学惰性和热稳定性,在工业染料、颜料等领域有广泛应用。酞菁与叶绿素卟啉均具有大 $\pi$ 电子离域结构。实测一种无金属酞菁与植物的光谱反射曲线,基本形状相似,有一绿色的反射峰,近红外反射率陡升,但与植物相比,无金属酞菁在陡升时的峰值波长有100 nm左右的红移。由于酞菁类化合物具有很强的配位能力,能够与周期表中几乎所有金属形成配合物,酞菁苯环周边和非周边有16个位置可被各种基团取代,形成分子结构、电子结构、光谱性能可调的酞菁化合物,通过对酞菁分子进行结构修饰,改进合成工艺与提纯方法,为有机颜料实现与植物的“同谱同色”提供一种途径。

目前,从理论上研究酞菁的构效关系及设计化合物分子是材料研究的新趋势,采用量子化学密度泛函理论计算酞菁及其类似物的几何构型、光谱性能等取得了与实验非常一致的结果。Petit等用密度泛函理论的B3LYP方法在LANL2DZ基组水平上研究了细菌叶绿素的第一过渡金属配合物的电子吸收光谱<sup>[25]</sup>。姜建壮课题组研究了酞菁、氮杂酞菁及其类似物的分子、电子结构与电子吸收光谱、振动光谱、导电性的关系<sup>[26,27]</sup>。贡雪东等开展了酞菁和亚酞菁及其取代物的研究,探讨了取代基种类及取代位置对分子几何构型、电子结构和电子光谱的影响<sup>[28]</sup>。本课题组采用DBU液相催化法,以 $\alpha$ 位取代的邻苯二甲酰在催化剂作用下与氯化金属反应,形成的金属酞菁通过提纯,测试其光谱反射性能,探究了离子种类、取代基团、合成温度、反应时间对酞菁化合物光谱性能的影响,初步合成了峰值波长蓝移的硝基酞菁钴。

## 3 植物多孔结构与蒸腾作用模拟技术进展

绿色植物在780~2 500 nm波段内的光谱特征与其叶片的多孔结构及所含水分有关,水分子中的羟基伸缩振动和变角振动使植物在1 440 nm和1 920 nm处呈现两个明显的吸收峰。叶片组织结构有利于植物对水分和矿物质的吸收和运输,同时通过蒸发带走能量,降低表面温度。国内外诸多科研人员围绕多孔结构及实现蒸腾作用的仿生材料开展了研究。对植物叶片多孔结构的研究主要为叶片孔径对水分运输的影响<sup>[29,30]</sup>,叶片孔隙度的研究<sup>[31,32]</sup>及叶片多孔结构作为生物活性材料的载体等<sup>[33,34]</sup>;而对于蒸腾作用而言,目前的研究主要集中在气候、环境对蒸腾作用的影响等方面<sup>[35]</sup>,由于在冠层尺度测量蒸腾作用的不确定性<sup>[36]</sup>,可采用气孔计<sup>[37]</sup>、气体分析仪<sup>[38]</sup>、热平衡流量计<sup>[39]</sup>、数值模拟等方法对其进行效果评估等。在实现材料与植物的光谱相似性方面,模拟多孔结构、蒸腾作用主要从两个方面入手,一是根据植物叶片结构特征分层模拟,二是研制多孔保水材料制备含水涂层模拟植物光谱特征。

### 3.1 多孔含水结构模拟技术

刘志明等<sup>[40-41]</sup>通过用透光纤维素薄膜、叶绿素铜钠盐以及具有疏松多孔结构的海绵制作了一种多层结构的仿生叶片模型,验证植物多孔结构对光谱特性的影响,如图3,加入了叶绿素铜钠盐的含水海绵在光学和近红外波段表现出与叶绿素相似的光谱特性,表明其海绵的多孔结构可以很好地模拟植物的“近红外高原”,但由于其体积较大,难以在装备上大规模应用。杨玉杰<sup>[42]</sup>将仿生色素微胶囊和含水颗粒融合在表面具有皮层的多孔纤维素材料中,比较完整地还原叶片的真实结构,实验测得与叶片的光谱曲线也较为相似。随着水分和叶绿素的挥发,复合结构的光谱特性后期与植物光谱发生较大偏离。

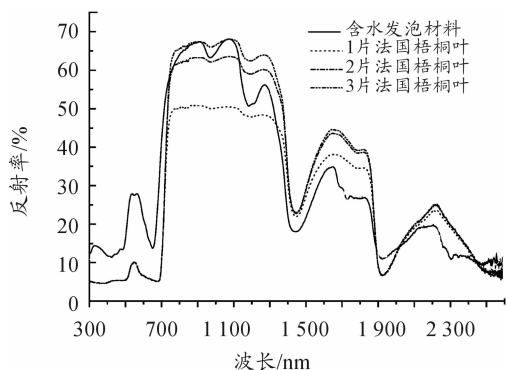


图3 含水发泡材料与法国梧桐叶片的反射光谱比较

郭利、李澄等<sup>[43-44]</sup>采用 C-H 键含量相对较低的含氟聚氨酯树脂,研制了高岭土、微晶纤维素与酰胺复合的高吸水材料,并以其为填料制备高吸水填料涂层,取得了与植物光谱较为相似的特性。在不影响涂层性能的前提下,保水填料的稳定性是须攻克的技术难题。

### 3.2 植物蒸腾作用模拟技术

蒸腾作用是植物通过叶片将水分蒸发到大气中,使得有生命的叶片与无生命的物体具备截然不同的热特征<sup>[45]</sup>。为模拟植物的蒸腾作用,袁智<sup>[46]</sup>系统研究了多种材料的吸/脱附速率、吸/脱附量。设计了由表面涂层、保水层、吸脱附层和吸脱附速率控制层组成的模拟植物叶片热特性的结构,结合高导热系数的膨胀石墨-氯化钙混合吸附剂的仿生叶片,模拟真实叶片热红外辐射特性,两者辐射温度差值在 2℃ 以内,说明其可以很好的模拟植物蒸腾作用影响下的生命特征、光谱特性。潘家亮等<sup>[47]</sup>复合集成了高导热膨胀石墨、水合盐吸脱附剂的仿生红外伪装材料,由于吸附剂中含有膨胀石墨,虽模拟了植物的蒸腾作用,但光谱曲线偏差较大。

通过吸脱/附剂模拟叶片的蒸腾作用,依赖于环境中的含水量、蒸发量等因素,而植物生长过程所需水分的运输依赖自身的“生物泵”效应,“生物泵”长时间高效运转的核心是叶片上的气孔蒸腾作用及由之产生的叶肉组织的负压诱导<sup>[48]</sup>。李萌<sup>[49]</sup>基于植物体内水分运输的机理及气孔蒸腾

的机理,设计并制作了由微孔膜、多孔介质、储液池三部分组成的仿生微流控泵<sup>[50]</sup>。可通过调节孔尺寸及孔间距,控制水蒸气的扩散速度。该装置的优势是无需外围能源,无机械部件,不依赖驱动流体介质物理性质,流速稳定和易于集成,可组装避免外界气候、环境如温度、气流等因素的影响等。装置的微型化、集成化、实用化成为进一步研究的目标。

## 4 结束语

随着高、超光谱成像技术的发展,植物光谱拟合技术逐步从单一的光学波段向近红外、短波红外波段扩展,拟合精度越来越高,以满足“同谱同色”的伪装技术要求。国内植物仿生材料在机理研究和应用创新方面还不够完善,国外相关研究因涉及军事应用背景,公开发表的成果很少。从单一技术和材料中可看出,多波段兼容的技术和材料也是近年来研究的热点,高反射低钴含量蓝色颜料在拟合近红外反射特性基础上,可提高反射太阳辐射的能力,降低目标表面温度,达到光学和红外兼容的伪装效果。

由于不同波段植物光谱特性的影响因素不同,应以机理研究为基础,探究反射光谱形成的微观成因,设计材料的组成、结构,研究吸附材料的蒸发、吸附脱附机制,研制多孔保水填料与类叶绿素光谱填料及树脂基复合,开展仿生植物涂层材料的研究,以解决不同波段植物光谱特征拟合技术的兼容性和应用性难题。

## 参考文献:

- [1] 张良培. 高光谱目标探测的进展与前沿问题[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(12): 1387-1394.
- [2] DOMBROWSKI M S, WILLSON P D. Defeating camouflage and finding explosives through spectral matched filtering of hyperspectral imagery[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1997: 2933.
- [3] 马丽芳, 时家明, 陈宗胜. 绿色伪装涂料可见光和近红外反射率的探讨[J]. 红外技术, 2010(5): 268-272.
- [4] 杨玉杰, 刘志明, 胡碧茹. 基于光谱分析的植物叶片仿生伪装材料设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1668-1672.
- [5] 刘志明, 胡碧茹, 吴文健, 等. 高光谱探测绿色涂料伪装的光谱成像研究[J]. 光子学报, 2009(4): 885-890.
- [6] LANGHOFF S R, DAVIDSON E R, GOUTERMAN M, et al. Zero field splitting of the triplet state of porphyrins. II [J]. Journal of Chemical Physics, 1975, 62(1): 169-176.
- [7] 代敬雪. 林地型伪装织物加工工艺及性能的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
- [8] WOOLEY J T. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves[J]. Plant Physiology, 1971, 47(5): 656-662.

- [9] 刘畅,孙鹏森,刘世荣.植物反射光谱对水分生理变化响应的研究进展[J].植物生态学报,2016,40(1):80-91.
- [10] 黄之杰,费逸伟,黄之宁.叶绿素在绿色伪装涂料中的应用研究[J].现代涂料与涂装,2006(4):13-14,17.
- [11] 杨玉杰,胡碧茹,吴文健.植物叶片仿生伪装材料的设计与制备[J].国防科技大学学报,2011(5):50-53.
- [12] 种亚莉.叶绿素铁钠盐的制备研究[D].西安:陕西科技大学,2014.
- [13] 黄持都,胡小松,廖小军,等.叶绿素研究进展[J].中国食品添加剂,2007(3):114-118.
- [14] 高向阳.新编仪器分析-[M].2版.北京:科学出版社,2004.
- [15] SHAABAN E R, MOHAMED S H. Journal of non-crystalline solids[M]. North-Holland,1968.
- [16] 刘竹波,叶明泉,韩爱军.尖晶石型钴蓝颜料的研究进展[J].化工进展,2008(4):483-487.
- [17] KURAJICA S, POPOVIĆ J, TKALČEK E, et al. The effect of annealing temperature on the structure and optical properties of sol-gel derived nanocrystalline cobalt aluminate spinel[J]. Materials Chemistry & Physics, 2012, 135(2/3): 587-593.
- [18] CHEN Z, SHI E, LI W, et al. Particle size comparison of hydrothermally synthesized cobalt and zinc aluminate spinels[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 85(12):2949-2955.
- [19] TORQIAN L, DAGHIGHI M. Effects of  $\beta$ -alanine on morphology and optical properties of  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  nanoparticles as a blue pigment[J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(2):739-744.
- [20] SALEM S. Effect of calcination temperature on colorant behavior of cobalt-aluminate nano-particles synthesized by combustion technique[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2014, 20(3):818-823.
- [21] YONEDA M, GOTOH K, NAKANISHI M, et al. Influence of aluminum source on the color tone of cobalt blue pigment[J]. Powder Technology, 2016.
- [22] IANOȘ R, MUNTEAN E, PĂȚURARIU C, et al. Combustion synthesis of a blue Co-doped zinc aluminate near-infrared reflective pigment[J]. Dyes & Pigments, 2017, 142: 24-31.
- [23] Ferro. Infrared Thermometer Emissivity tables [EB/OL]. 2014.
- [24] LI L, LIU H, LI B Z, et al. Modification and spectral properties research of cobalt blue pigments[J]. Material Research Innovations, 2015, 19(S6):S6-69-S6-72.
- [25] † J S S, † R G S P, † S R F, et al. Effect of axial substitution on the optical limiting properties of indium phthalocyanines[J]. J. phys. chem. a, 2000, 104(7):1438-1449.
- [26] 蔡雪.在密度泛函理论基础上研究酞菁类化合物的结构,光谱及OFET性质[D].济南:山东大学,2009.
- [27] 张跃兴.酞菁类配合物的构效关系及其半导体性质的量子化学研究[D].济南:山东大学,2009.
- [28] GONGXUEDONG S X. A density functional theory study on the structure and property of four cyanines[J]. Journal of Nanjing University of Science & Technology, 2002, 137(1): 104-126.
- [29] SANG J L, KIM H, AHN S. Water transport in porous hydrogel structures analogous to leaf mesophyll cells[J]. Microfluidics & Nanofluidics, 2015, 18(5/6):775-784.
- [30] KIM H, KIM H J, HUH H K, et al. Structural design of a double-layered porous hydrogel for effective mass transport[J]. Biomicrofluidics, 2015, 9(2):18.
- [31] YU Ting, DIAO Wuwei, ZHANG Youmin, et al. A comparative study on leaf anatomical structure of 2 species in ligularia[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017.
- [32] LIU Y, HU J, LIU F, et al. Characterization of pore structure of different kind tobacco leaves[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(3):84-88.
- [33] 김호용, 박진호, 변준호, et al. Porous beads with leaf-stacked structure as a practical carrier for bioactive molecules[J]. 한국고분자학회 학술대회 연구논문 초록집, 2016.
- [34] XU Huaqiu, ZHANG Shuzhen, HE Wen, et al.  $\text{SiO}_2$ -carbon nanocomposite anodes with a 3D interconnected network and porous structure from bamboo leaves[J]. RSC Advances, 2016, 6(3):1930-1937.
- [35] AOUADE G, JARLAN L, EZZAHAR J, et al. Using ISBA model for partitioning evapotranspiration into soil evaporation and plant transpiration of irrigated crops under semi-arid climate[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.
- [36] DURIGON A, LIER Q D J V, METSELAAR K. Forcing variables in simulation of transpiration of water stressed plants determined by principal component analysis[J]. International Agrophysics, 2016, 30(4):431-445.
- [37] ANSLEY R J, DUGAS W A, HEUER M L, et al. Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*) [J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(275):847-856.
- [38] LORENZI F D, RANA G, FERREIRA M I, et al. Sap flow transpiration measurements in a table grape vineyard growing in Southern Italy. [J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(537).
- [39] LORENZI F D, RANA G, FERREIRA M I, et al. Sap flow

- transpiration measurements in a table grape vineyard growing in Southern Italy. [J]. *Acta Horticulturae*, 2000, 537 (537).
- [40] 刘志明, 吴文健, 张勇. 植物叶片仿生伪装结构模型设计[J]. *功能材料*, 2007(A08):3119-3122.
- [41] 刘志明, 吴文健, 胡碧茹. 基于被子植物叶类器官的仿生伪装材料设计[J]. *中国科学(E辑:技术科学)*, 2009(1):174-180.
- [42] 杨玉杰, 刘志明, 胡碧茹. 基于光谱分析的植物叶片仿生伪装材料设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6):1668-1672.
- [43] 郭利. 模拟绿色植被光谱特征的近红外伪装涂层研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [44] 李敏, 李澄, 郑顺利, 等. 模拟绿色植物光谱的填料设计与涂层制备研究[J]. *红外技术*, 2015, 37(9):788-792.
- [45] BROGE N H, MORTENSEN J V. Deriving Green Crop Area Index and Canopy Chlorophyll Density of Winter Wheat from Spectral Reflectance Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81:45-57.
- [46] 袁智. 植物叶片蒸腾作用模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
- [47] 潘家亮, 张拴勤. 高导热仿生红外伪装材料设计与制备研究[J]. *联合作战伪装技术与应用研究*, 2014:369-372.
- [48] 张开平. 基于气孔蒸腾机理的仿生微流控泵[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [49] 李萌. 仿生微流控泵的微孔扩散机制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [50] 闵伶俐, 陈松月, 盛智芝, 等. 仿生微流控的发展与应用[J]. *物理学报*, 2016, 65(17):153-168.

(责任编辑 唐定国)

(上接第 142 页)

- [22] FAVARETO D, MORETTI E, PELLEGRINI P. On the explorative behavior of max-min ant system[M]. *International Workshop on Engineering Stochastic Local Search Algorithms. Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics*, Springer Berlin Heidelberg, 2009:115-119.
- [23] STUTZLE T, HOOS H H. MAX-MIN Ant System[J]. *Future Generation Computer System*, 2000, 16:889-914.
- [24] BRAYSY O, GENDREAU M. Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1):104-118.
- [25] SUBRAMANIAN A, DRUMMOND L M A, BENTES C, et al. A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery [J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 37(11):1899-1911.
- [26] SUBRAMANIAN A, UCHOA E, OCHI L S. A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(10):2519-2531.
- [27] HASEGAWA M, IKEGUCHI T, AIHARA K. Combination of chaotic neurodynamic with the 2-opt algorithm to solve traveling salesman problems [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(12):2344-2347.

(责任编辑 杨继森)