

# 基于高光谱遥感技术的伪装材料的光谱特性分析

付严宇, 杨忱\*, 李德军, 谭海峰, 孙晓锐, 金椿柏

空军航空大学, 吉林 长春 130000

**摘要** 通过采集 9 种常见伪装材料及背景的光谱, 进行基于反射率光谱的伪装材料的光谱分析和提取工作, 然后对原始反射率光谱曲线和经包络线去除法变换后的曲线进行分析, 并利用多种光谱差异算法对光谱数据进行计算, 进而对伪装效果进行评估。通过实验得到了在可见光图像上难以区分的几组伪装目标的光谱特征差异, 对伪装检测的波段选取及伪装材料的选择提供了参考依据。

**关键词** 光谱学; 高光谱遥感技术; 伪装材料; 光谱特性; 包络线去除; 光谱差异

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2030003

## Spectral Characteristics of Camouflage Materials Based on Hyperspectral Remote Sensing

Fu Yanyu, Yang Guang\*, Li Dejun, Tan Haifeng, Sun Xiaorui, Jin Chunbai

Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130000, China

**Abstract** Herein, we collected the spectra of nine types of common camouflage materials and backgrounds to analyze and extract the spectra of camouflage materials based on reflectance spectra. Then, after envelope removal, we analyzed the original reflectance curves and the spectral curves and used several spectral difference algorithms to calculate the spectral data and then evaluate the camouflage effect. Differences in the spectral characteristics of several groups of camouflage targets, which are difficult to distinguish in visible images, are obtained via experiments, thus providing a basis for selecting bands and camouflage materials.

**Key words** spectroscopy; hyperspectral remote sensing; camouflage material; spectral characteristics; envelope removal; difference between spectra

**OCIS codes** 300.6170; 070.479; 010.0280

## 1 引言

在现代战争中,为实现“隐真示假”,通常会采取一些伪装措施,以减小目标和背景对电磁波的反射或辐射能量差异<sup>[1]</sup>。伪装材料利用对其人眼视觉的影响使肉眼很难在可见光图像上发现伪装目标<sup>[2]</sup>,比如,将待伪装目标涂成与周围环境相匹配的颜色。

近几十年来,在世界各国军事科技逐渐发展的背景下,如何能够有效识别和揭露伪装目标,成为各军事强国关注的重点。使用传统的可见光、红外等

成像手段对伪装目标进行检测的效果不佳。高光谱遥感技术能够获取伪装材料的细节光谱特征,以极高的光谱分辨率直接对伪装材料进行光谱差异的定量分析,在伪装目标检测方面具有很大的应用潜力,为伪装目标检测提供了新思路和新方法。自 20 世纪 90 年代以来,美军就提出了高光谱探测概念,并进行了一系列高光谱野外测试,还在多种战场背景中对涂有军用涂料的靶板、军用和民用车辆进行了测试,结果显示,可以选择合适的光谱波段来区分背景和目标<sup>[3]</sup>。2015 年,印度理工学院的 Kumar 和

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-01-25; 录用日期: 2021-02-04

通信作者: \*yg2599@126.com

Ghosh<sup>[4]</sup>应用中波红外(MWIR)波段的高光谱成像技术对场景中的伪装目标进行了检测;该检测方法采用了已经很成熟的无监督目标检测算法(Reed Xiaoli、K-Means 和 ISODATA),并成功地从背景中提取出了伪装目标,这表明该波段的光谱能够很好地用于伪装目标的检测。2018 年,印度理工学院的 Yadav 和 Arora 以及印度德里理工大学的 Tiwari 和 Ghosh<sup>[5]</sup>利用高光谱遥感技术结合雷达技术进行了伪装目标的检测,他们利用独立成分分析和光谱匹配算法在高光谱数据中检测伪装网,缩小了探测潜在伪装目标的位置范围。

使用高光谱遥感技术进行伪装目标揭露首先需要解决以下问题:1)伪装材料的光谱特征;2)相同颜色不同材质目标的光谱差异;3)在当前伪装装备与背景光谱近乎一致的前提下,如何将伪装目标检测出来。解决上述问题是揭露伪装、满足战场情报时效性、有效进行伪装目标检测的基础。

## 2 光谱曲线处理及分析方法

高光谱遥感技术从空间、时间、光谱三个不同的维度来观测目标,从而获得更全面、更详细的目标信息。通过探测得到的光谱特征曲线,可反演出对应每一个像素的目标组成成分,从目标材质的光谱属性入手,区分背景与目标的差异<sup>[6]</sup>。

### 2.1 包络线去除法

高光谱遥感技术能够获取伪装目标的光谱特征。对于从高光谱图像上提取的光谱曲线,可以利用包络线去除法来突出目标的光谱特征。包络线去除法是一种有效的光谱分析方法,它可以有效地突出光谱曲线的吸收特征和反射特征,并将反射率归一化为 0~1.0,光谱的吸收特征也能归一化到一致的光谱背景上,有利于与其他光谱曲线进行特征数值的比较。包络线通常定义为采用直线逐点连接光谱曲线上那些凸出的峰值点,并使折线在峰值点上的外角大于 180°。用原始光谱曲线上的值除以包络线上对应的值,即为光谱去包络,其计算公式为

$$R_{Cj} = \frac{R_j}{R_{\text{start}} + K \cdot (\lambda_j - \lambda_{\text{start}})}, \quad (1)$$

$$K = \frac{R_{\text{end}} - R_{\text{start}}}{\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{start}}}, \quad (2)$$

式中: $\lambda_j$  是第  $j$  波段的波长; $R_{Cj}$  是波段  $j$  的包络线去除值; $R_j$  是波段  $j$  的原始光谱反射率; $R_{\text{end}}$  和  $R_{\text{start}}$  是吸收曲线起始点和末端点的原始光谱反射率; $\lambda_{\text{end}}$  和  $\lambda_{\text{start}}$  是吸收曲线起始点和末端点的波长;

$K$  是吸收曲线在起始点波段和末端点波段之间的斜率<sup>[7]</sup>。

从直观上来看,光谱曲线的包络线相当于光谱曲线的“外壳”。因为实际的光谱曲线由离散的样点组成,所以用连续的折线段来近似表示光谱曲线的包络线。

### 2.2 欧氏距离

欧氏距离<sup>[8]</sup>是一种描述确定量之间相似性的准则,反映两种目标光谱曲线的差异,能对伪装效果进行评价。两种目标的欧氏距离定义为

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^L (a_i - b_i)^2}, \quad (3)$$

式中: $D$  为欧氏距离; $a_i$  和  $b_i$  分别表示在  $i$  波段的光谱反射率。同一条件下, $D$  越大,表示两种目标的区分度越大,伪装效果越差。

### 2.3 光谱信息散度

光谱信息散度<sup>[9]</sup>(SID)用来衡量高光谱图像中两个不同像元之间的相似性。欧氏距离考虑了光谱本身的变动性,能对光谱数据进行更好的评价。若  $P$  和  $Q$  的光谱曲线概率密度分布分别为  $P = (p_1, p_2, \dots, p_L)$  和  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_L)$ , 其中  $p_i =$

$$\frac{x_i}{\sum_{i=1}^L x_i}, q_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^L y_i}, \text{ 则 } P \text{ 与 } Q \text{ 的光谱信息散度为}$$

$$\text{SID}(P, Q) = \sum_{i=1}^L (p_i - q_i) \lg \frac{p_i}{q_i}. \quad (4)$$

光谱信息散度的值越大,说明二者的差异越大,伪装效果越差。

### 2.4 光谱角度匹配

光谱角度匹配<sup>[10]</sup>(SAM)算法将光谱数据看作是一个  $n$  维的特征向量,通过计算两种光谱之间的“角度”来确定两者的相似性。计算公式为

$$S_A(a, b) = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}}, \quad (5)$$

式中: $S_A(a, b)$  为光谱角。光谱角的值越接近 0,说明两种光谱的形状越相似,匹配度越高。

### 2.5 分段编码匹配

高光谱数据通常存在大量的数据冗余,为实施匹配,将光谱进行二值编码,用简单的 0 和 1 来表示光谱。编码方法为

$$\begin{cases} h(n) = 0, x_i \leq T \\ h(n) = 1, x_i > T \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $x_i$  是像元第  $i$  通道的亮度值;  $h(n)$  是像元第  $i$  通道的编码;  $T$  为阈值, 通常为光谱的平均亮度。将两种光谱数据编码后进行匹配, 根据匹配系数的大小来判断两组数据的相似度。为了提高匹配的精度, 通过将光谱分成多个区域, 进行分段编码<sup>[11]</sup>。

### 3 实验流程

#### 3.1 实验方案设计

为了更科学地显示和分析伪装目标的光谱特性差异, 本次实验方案如图 1 所示。

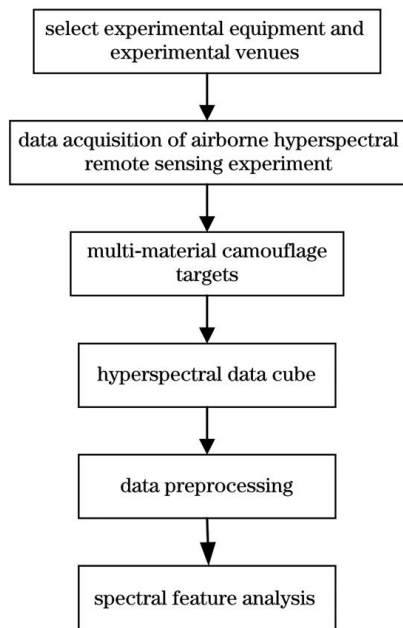


图 1 实验设计流程图

Fig. 1 Flow chart of experimental design

具体的实验设计流程如下:

1) 针对战场环境中使用的目标材质的差异, 选

取伪装目标经常使用的绿色木板 A、绿色钢板 B、银白色木质模型 C、银白色铁质模型 D、丛林雨衣 E、丛林迷彩服 F、翠绿色假草坪 G、浅绿色假草坪 H、绿色植被 I 进行测试, 如图 2 所示。

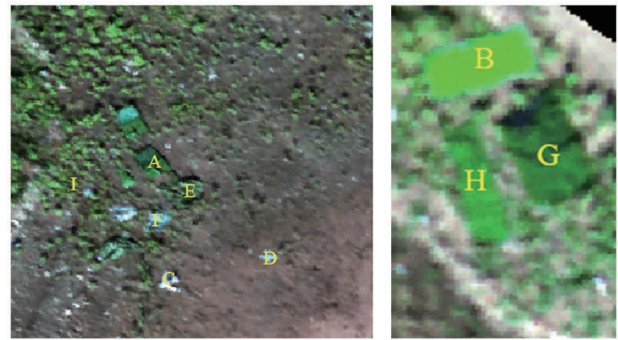


图 2 实验布置图

Fig. 2 Experimental layout

2) 数据获取当天的天气晴朗, 地面能见度不小于 15 km, 无卷云、浓积云等, 光照稳定; 测量时间内空中风力小于 4 级, 且地面风力小于 3 级, 测量时段为上午 10:00—12:00, 此时段内有足够大的太阳高度角, 光照条件稳定, 满足成像条件。

#### 3.2 实验数据

实验数据的采集通过无人机平台和光谱仪完成。无人机平台为大疆 M600 Pro 型六轴无人机, 其有效载荷为 6 kg, 续航时间为 25 min。高光谱遥感影像的获取设备为 Resonon Pike L 型高光谱成像仪, 如图 3 所示。该光谱系统的光谱范围为 400~1000 nm, 光谱分辨率最高可达 2.1 nm, 有效波段数为 150 个, 具体参数如表 1 所示(其中的  $f$  表示焦距)。采集高光谱影像, 对影像进行预处理后再用于后续实验分析, 预处理过程包括辐射校正、几何校正、图像镶嵌和裁剪。

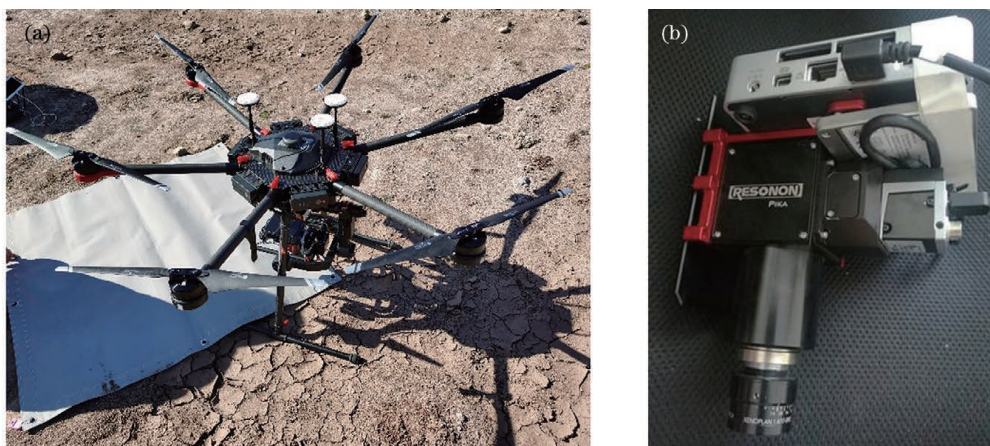


图 3 实验设备图。(a) 搭载有光谱仪的大疆无人机; (b) 成像光谱仪

Fig. 3 Experimental equipment. (a) DJI UAV equipped with spectrometer; (b) imaging spectrometer

表 1 Resonon Pike L 高光谱成像仪的参数

Table 1 Parameters of Resonon Pike L hyperspectral imager

Sensor performance index	Value
Spectral range / nm	400–1000
Spectral resolution / nm	2.1
Spatial resolution / cm	5
Number of bands	150
Field of view / (°)	17.6
Interval / nm	4
Number of spectral channels	281
Number of spatial channels	900
Maximum number of frames per second	249
Bit depth	12
Weight / kg	0.6
Size / (cm × cm × cm)	10.0 × 12.5 × 5.3
Connection method	USB 3.0
Aperture	$f/2.4$
Pixel size / $\mu\text{m}$	5.86
Average root-mean-square radius / $\mu\text{m}$	6

## 4 光谱数据分析

### 4.1 原始光谱曲线分析

在森林环境中,作战目标通常会采用绿色作为伪装色,以与森林环境相匹配。图 4(a)所示为绿色钢板与绿色木板的反射光谱曲线,可见:绿色木板的光谱曲线在 400~600 nm 波长范围内总体呈现先上升后下降的趋势,并在 534 nm 波长处出现反射峰值;绿色钢板的光谱曲线在 400~600 nm 波长范围内呈现先下降后上升再下降的趋势,并在波长 522 nm 处出现反射峰值;在 400~477 nm 波长范围内,绿色木板的反射率高于绿色钢板;在 477~572 nm 波长范围内,绿色钢板的反射率高于绿色木板;在 572~780 nm 波长范围内,绿色木板的反射率高于绿色钢板;在 677 nm 波长处,绿色钢板出现吸收谷;在 800~850 nm 波长处,绿色钢板的反射率突增,而绿色木板的光谱曲线较为平稳,未出现明显的反射峰或吸收谷。在近红外波段内,绿色钢板与绿色木板的波动情况相似,但反射率差异较大,绿色钢板的反射率高于绿色木板,并且二者在 915 nm 波长处的反射率差值最大,可达 0.19。这说明在此波段可以将二者进行区分。

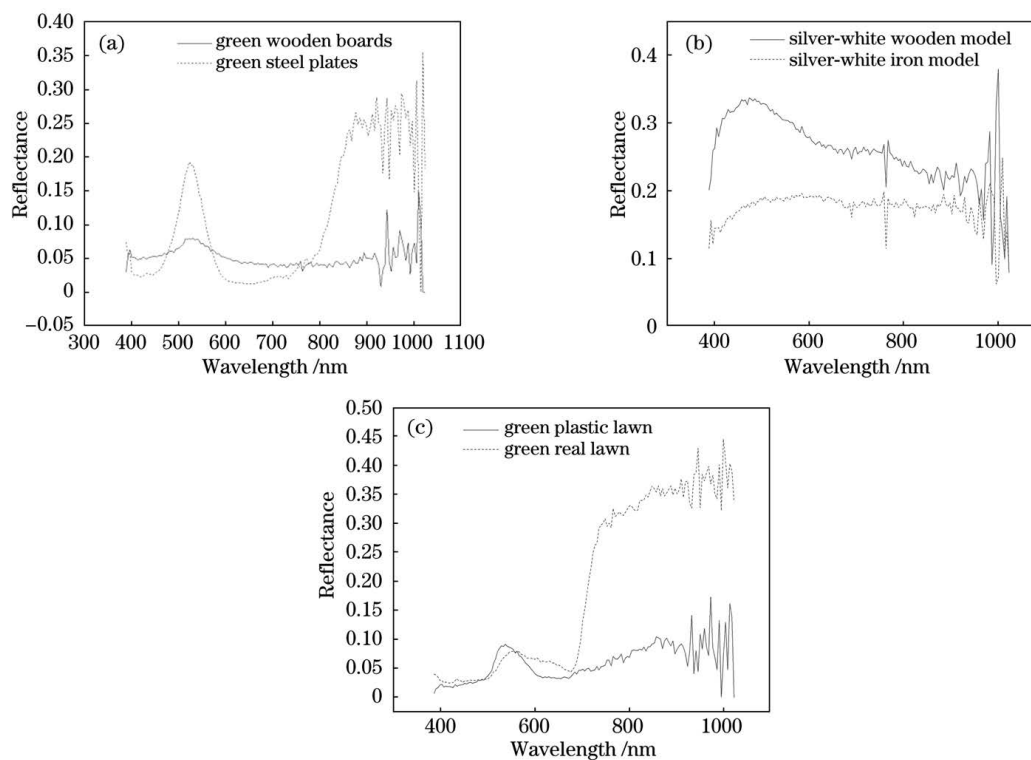


图 4 原始光谱曲线。(a)绿色木板与绿色钢板;(b)银白色木质模型与银白色铁质模型;(c)绿色假草坪与绿色真草坪  
 Fig. 4 Original spectral curves. (a) Green wooden boards and green steel plates; (b) silver-white wooden model and silver-white iron model; (c) green plastic lawn and green real lawn

在雪地环境中,通常会选择银白色材料进行伪装作业,因此本文对银白色木质与铁质模型进行了比对。从图 4(b)所示的光谱曲线可以看出:银白色木质模型的光谱反射率在 400~500 nm 波长范围内逐渐上升,在 500 nm 波长处开始下降,而银白色铁质模型的光谱反射率在各波段变化不大;尽管二者在 500 nm 波长处的光谱反射率差异达到了最大,但对比度在图像上相差得不是特别明显。这一点可以为伪装作业提供参考。

由图 4(c)可以看出:在 400~680 nm 波长范围内,绿色真草坪与绿色假草坪的光谱曲线走势几乎一致;在 550 nm 处,即在可见光范围内,二者难以区分;在 680~780 nm 波长范围内,绿色真草坪的反射率从低水平迅速升高,即出现“红边”,并在此后的 780~1000 nm 范围内保持较高水平;假草坪不存在“红边”现象,而且在近红外波段内,反射率的变

化不明显。

#### 4.2 包络线去除分析

由图 5(a)可见:在形态上去包络线后的光谱曲线突出了吸收峰和反射峰,绿色木板和绿色钢板在 550 nm 处均存在反射峰;二者的光谱曲线在 400~500 nm 和 600~700 nm 范围内均存在吸收峰,光谱反射率差异明显,在此波段可以将二者很好地区分。由图 5(b)可见:包络线去除后,银白色木质模型与银白色铁质模型的光谱曲线交叉在一起,二者的区分度不是很大,这为伪装材料的选择提供了参考。由图 5(c)可以看出,经包络线去除后的绿色真草坪的“红边”进一步凸显;在 560 nm 处,绿色假草坪和绿色真草坪存在反射峰,且均在 700 nm 处存在吸收峰,可以利用该特点对伪装中使用的绿色假草坪与绿色真草坪进行区分。

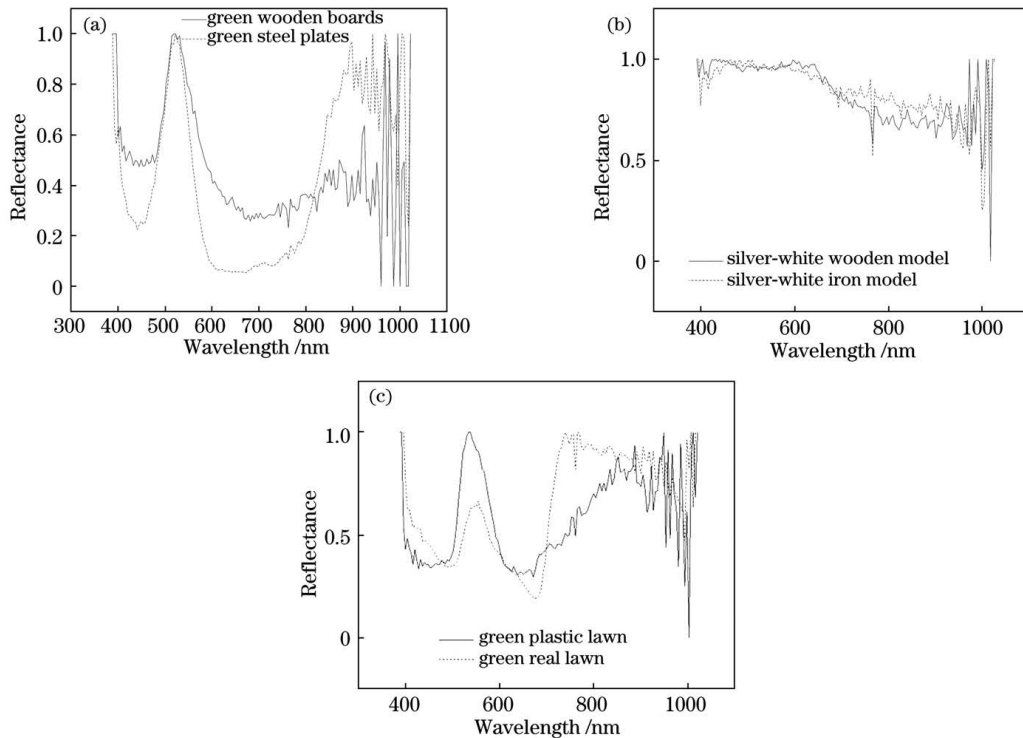


图 5 包络线去除后的光谱曲线。(a)绿色木板与绿色钢板;(b)银白色木质模型与银白色铁质模型;(c)绿色假草坪与绿色真草坪

Fig. 5 Spectral curves after envelope removal. (a) Green wooden boards and green steel plates; (b) silver-white wooden model and silver-white iron model; (c) green plastic lawn and green real lawn

## 5 伪装效果评价

基于光谱差异<sup>[12]</sup>对伪装效果进行分析。将丛林雨衣 E、丛林迷彩服 F、翠绿色假草坪 G、浅绿色假草坪 H、绿色植被 I 的光谱数据进行对比。

首先计算伪装目标与背景的欧氏距离,计算结

果如表 2 所示。由表 2 可见:丛林迷彩服 F、丛林雨衣 E 与绿色植被 I 的欧氏距离均较小,分别为 0.1859 和 0.0986;翠绿色假草坪 G、浅绿色假草坪 H 与绿色植被 I 的欧氏距离均较大,分别为 0.9763 和 1.1543。原因是丛林雨衣 E 与丛林迷彩服 F 制作材料、伪装设计与植被一致。通过分析高光谱曲

线可以发现,在可见光图像上难以区分的绿色植被与绿色假草坪,采用高光谱探测后区分度明显,这说明利用绿色假植被进行伪装很容易被探测到。

表 2 基于欧氏距离的伪装效果评价

Table 2 Evaluation of camouflage effect based on Euclidean distance

	E	F	G	H
I	0.0986	0.1859	0.9763	1.1543

光谱信息散度和光谱角度的计算值分别如表 3、4 所示。光谱信息散度越小,代表两条曲线越相似;光谱角度越小,说明伪装效果越好。可以发现,丛林迷彩服 F、丛林雨衣 E 与绿色植被 I 最相似。综合来看,丛林迷彩服、丛林雨衣与绿色植被最相似,假草皮在可见光图像上与真草皮很相近,但利用高光谱分析可以很容易将二者区分开来。对光谱数据进行分段编码,从光谱匹配系数看,丛林迷彩服 F、丛林雨衣 E 与绿色植被 I 的匹配程度较高,如表 5 所示,伪装效果较好。

表 3 基于光谱信息散度的伪装效果评价

Table 3 Evaluation of camouflage effect based on spectral information divergence

	E	F	G	H
I	0.0123	0.0195	0.0208	0.0395

表 4 基于光谱角度匹配的伪装效果评价

Table 4 Evaluation of camouflage effect based on spectral angle matching

	E	F	G	H
I	0.0936	0.1183	0.1789	0.2871

表 5 基于分段编码匹配的伪装效果评价

Table 5 Evaluation of camouflage effect based on segment coding matching

	E	F	G	H
I	0.8904	0.8646	0.4782	0.4911

## 6 结 论

本文针对战场环境中伪装常用的伪装涂色及材料进行了光谱曲线及光谱数据分析,利用包络线去除法突出了光谱差异,通过三组不同伪装材的光谱数据分析可以得到以下结论:

1) 绿色木质材料与绿色钢质材料的波动情况相似,但在 800~1000 nm 波段范围内二者的反射

率差异明显,绿色钢板明显高于绿色木板,可以在该波段范围将这两类材料进行区分。银白色木质材料与银白色铁质材料在光谱特征上的差异不是十分明显,这为伪装材料的选取提供了依据;对于绿色真草坪与绿色假草坪,可以利用植被特有的“红边”效应将二者区分开来;丛林迷彩服与丛林雨衣的光谱特征与绿色植被的光谱特征相近,与绿色假草坪的反差较大,因此伪装中使用绿色假草坪效果会较差。

2) 准确探测伪装材料的光谱特征是成功实施伪装作业以及揭露伪装的重要保证,对战场环境的高光谱遥感图像进行特征提取不仅可以实时掌握战场情况的变化,还可以研制出更好的伪装材料,为更好的光学伪装方法提供技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] Fang H, Li A H, Wang T, et al. Synthetic evaluation method of hyperspectral camouflage effect based on intuitionistic fuzzy decision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051003. 方浩, 李艾华, 王涛, 等. 基于直觉模糊决策的高光谱伪装效果综合评估方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051003.
- [2] Wang H, Bai T Z. Evaluation of optical camouflage based on tolerance nearness sets theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1210001. 王贺, 白廷柱. 基于容限近集理论的光学伪装评价研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1210001.
- [3] Ma Y P, Zhang W, Liu D X. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets [J]. *Aerospace Shanghai*, 2012, 29(1): 37-40, 59. 麻永平, 张炜, 刘东旭. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析 [J]. *上海航天*, 2012, 29(1): 37-40, 59.
- [4] Kumar V, Ghosh J K. Camouflage detection using MWIR hyperspectral images [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017, 45(1): 139-145.
- [5] Yadav D, Arora M K, Tiwari K C, et al. Detection and identification of camouflaged targets using hyperspectral and LiDAR data [J]. *Defence Science Journal*, 2018, 68(6): 540-546.
- [6] Fang Y M, Yang F, Li X Q. Detection of damage on the surface of Korla fragrant pear using hyperspectral images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 141017. 方益明, 杨帆, 李晓勤. 库尔勒香梨表面损伤的高光谱图像检测方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(14): 141017.

- [7] Han Z Y, Zhu X C, Wang L, et al. Hyperspectral evaluation of SPAD value of apple tree canopy based on continuum-removed method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 023001.  
韩兆迎, 朱西存, 王凌, 等. 基于连续统去除法的苹果树冠 SPAD 高光谱估测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 023001.
- [8] Guo T, Hua W S, Liu X, et al. Comprehensive evaluation of optical camouflage effect based on hyperspectra [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101002.  
郭彤, 华文深, 刘恂, 等. 一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101002.
- [9] Xia B, Zhao X J. An unsupervised band selection algorithm based on spectral information divergence [J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(7): 212-215, 251.  
夏冰, 赵勋杰. 基于光谱信息散度的非监督波段选择 [J]. *计算机应用与软件*, 2015, 32(7): 212-215, 251.
- [10] Zhang X B, Yuan Y, Wang Q. Spectral discrimination method based on information divergence of gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0530001.  
张修宝, 袁艳, 王潜. 基于梯度的信息散度的光谱区分方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0530001.
- [11] Xu Z, He M X, Li P F, et al. Spectral matching algorithm applied to identify the terahertz spectrum of *Caulis Spatholobi* and *Caulis Sargentodoxae* [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1): 42-47.  
徐哲, 何明霞, 李鹏飞, 等. 光谱匹配算法应用于鸡血藤与大血藤的太赫兹光谱区分 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(1): 42-47.
- [12] Feng R, Wu J W, Wang H B, et al. Influence of drought stress on maize in the seedling stage on spectral characteristics at the critical developmental stage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(7): 2222-2228.  
冯锐, 武晋雯, 王宏博, 等. 玉米苗期干旱胁迫对关键生育期的光谱特征影响分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(7): 2222-2228.