

绿洲—荒漠交错带典型裸露地表的光谱特征

张微¹, 姚琪², 张波¹, 房世峰³

(1. 浙江国时卫星科技有限公司, 浙江 杭州 311113;

2. 中国地震台网中心, 北京 100045; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: [目的] 对绿洲—荒漠交错带典型裸露地表光谱特征进行分析, 为荒漠化治理和防沙治沙提供参考。[方法] 利用典型裸露地表的实测数据, 通过若干典型裸露地表类型的原始光谱、倒数取对数光谱、一阶导数光谱和包络线除去光谱对比, 分析各类地物识别的特征光谱区间。为了后续更好地利用高分一号影像研究荒漠地区, 选取蓝光、绿光、红光和近红外波长范围内的光谱进行进一步的分析, 并利用各波段反射率结果分别计算改进的归一化光谱指数(NDSI)、简单比值指数(SR)和光谱差值熵指数(SDI)等光谱指数。通过分析各类地物的光谱特征、光谱指数等, 对各地物进行了区分。[结果] 几类裸露地表的光谱差异性不大, 可见光到近红外均为缓慢增加; 一阶导数变换、倒数取对数和包络线去除光谱可以放大各地物间的差异性, 可以区分几类典型裸露地表。[结论] 利用原始光谱和变换后光谱计算的光谱指数差异性强, 通过一阶导数变换的 SDI 可以较好地各类典型裸露地表区分开。

关键词: 裸露地表; 盐结皮; 绿洲—荒漠交错带; 光谱反射率; 包络线去除

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)02-0177-06

中图分类号: X86

文献参数: 张微, 姚琪, 张波, 等. 绿洲—荒漠交错带典型裸露地表的光谱特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2):177-182. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.027; Zhang Wei, Yao Qi, Zhang Bo, et al. Spectral Signature of Typical Bare Surface in Oasis-desert Crisscross[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2):177-182. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.027

Spectral Signature of Typical Bare Surface in Oasis-desert Crisscross

ZHANG Wei¹, YAO Qi², ZHANG Bo¹, FANG Shifeng³

(1. Zhejiang Guoshi Satellite Science and Technology Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311113, China; 2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The measured spectra data of several typical bare surfaces were analyzed such to provide references for desertification prevention and control. [Methods] Methods of spectral analysis as moving average, reciprocal take logarithm(RLR) reflectance, first derivative transformation(FDR) and continuum removal(CR) were used to identify the sensitive band range of each ground feature. The paper aimed to explore the application of GF-1 and other extended use of that. The spectral indexes, such as normalized difference index(NDSI), simple ratio index(SR), spectral difference entropy index(SDI) were used to separate each other. [Results] Differences of the original spectral signatures among several bare surfaces were small. Spectral reflectance transited slowly from invisible value to near-infrared one, but the rate of increasing was different among each ground feature. The differences among bare surfaces could be magnified by first order derivative transformation, reciprocal logarithm transformation and continuum removal spectra. The effectiveness of transformation was all better than original spectrum. [Conclusion] Because the calculated difference was magnified between the original and the transformed spectral index, the first order derivative transformed SDI can distinguish the surface features much better.

Keywords: bare surface; salt crust; oasis-desert crisscross; spectral reflectance; continuum removal

收稿日期: 2016-08-17

修回日期: 2016-11-09

资助项目: 中国地震局星火计划项目“大凉山次级块体孕震机制及强震预测”(xh16044); 中国地震局震情跟踪定向工作任务项目(2016010103); 国家自然科学基金新疆联合基金项目(U1503184)

第一作者: 张微(1980—), 男(蒙古族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事北斗和遥感卫星的综合应用和产业化推广工作。E-mail: 5053709@qq.com.

绿洲—荒漠交错带是中国西北干旱、半干旱区典型区域,兼具绿洲与荒漠生态系统特征,同时也是生态环境相对敏感和脆弱的地区^[1],其间分布较为广泛的裸露地表,土地沙漠化/荒漠化严重威胁绿洲区的生态安全。由于绿洲—荒漠交错带的敏感性和脆弱性,针对其生态系统类型、生态演变等的研究以土地变化、生态系统及景观特征等^[2-3]为主,同时对于遥感技术的应用也愈来愈多,干旱区的干旱监测^[4]、荒漠化/石漠化信息提取^[5]等应用相当成熟。而对于裸土作为特殊地表,其水分含量、物质构成都是研究的重点和热点,以采用遥感手段研究裸土含水量、湿度及蒸发、植被盖度为主^[6-10]。光谱技术作为遥感的基础,是进行遥感分类、地物识别的重要基础,在干旱区,是对绿洲—荒漠交错带研究的重要工具,如针对生物结皮^[11-12]、典型植被光谱特征^[13]、盐碱地、盐渍化^[14-15]等已有较多研究基础。

裸露地表尤其是绿洲—荒漠交错带地区的裸露地表,很大程度上影响区域的生态系统质量,利用遥感手段对绿洲—荒漠交错带内的裸露地表进行研究,能够较准确地了解区域生态环境变化的趋势和方向,可以为区域生态修复、生态环境治理提供方向和参考依据。近年来,国产影像在各领域的使用逐渐扩展,尤其是高分 1 号卫星影像,其应用范围逐渐扩大。本研究旨在通过对地物实测光谱的采集,结合高分 1 号影像波段范围的设置来进行进一步的分析。分析的光谱范围集中在高分 1 号的 450~890 nm 范围内,分析结果希望能够成为利用高分 1 号影像进行生态治

理、荒漠地表地物识别的依据,能够为荒漠化治理和防沙治沙提供可参考的依据。

1 研究区概况

研究区位于新疆准噶尔盆地南缘,古尔班通古特沙漠与绿洲农业区的交错地带(87°30′50″—87°32′40″N, 44°28′30″—44°30′33″E)。研究区东侧为古尔班通古特沙漠边缘,西侧为农田区,这里地势相对平坦,在东侧荒漠中主要是沙丘和丘间沙地。研究区海拔高度相差不大,在 430~440 m 范围内;年平均降水量 190 mm,年平均气温 7℃,最高气温 40~42℃,最低气温 -38~-40℃。

研究区主要的土壤类型为盐土和草甸土,受荒漠影响较大,生态环境相对脆弱。本研究选择植被覆盖程度最高的 7—8 月为重点观测时段,该段时间易区分裸露地表和其他有植被覆盖的区域,在交错带上对不同的裸露地表均匀设置采样点,对采样点地物信息及地物光谱信息进行采集。

2 研究方法

2.1 试验方案

由于研究区位于绿洲荒漠交错带,各类裸露地表在荒漠化治理和风沙防治中有不同的作用,因此需要根据各类裸露地表的特征进一步的细分,具体划分类别如下:流水后干涸裸地、裸土地、生物结皮、盐碱地、盐结皮、翻耕后农田和沙地等。以上典型裸露地表的相关特征信息详见表 1。

表 1 研究区典型裸露地表特征

序号	地表命名	物质组成	特征
1	干涸裸地	沙壤土、风沙土	地面亮度高于同一区域其他地表类型,表层土壤颗粒较细
2	一般裸土地	风沙土	地表呈灰褐色,无植被生长
3	生物结皮	生物菌群、风沙土	地表有黑色或其他深色的干结菌群,形成稳固的结皮层
4	盐碱地	盐土,地面泛碱	地表聚集白色盐碱,土质松软
5	盐结皮	盐土、盐壳	地表有深色的胶结层,胶结程度一般
6	翻耕后农田	耕作土	农田特征,机械耕作后
7	沙地	沙土	地表为黄沙

各类裸露地表的光谱采集试验区分布在大研究区内部,每种地物至少采集 20 个点光谱数据,采集裸露地表光谱时,采取避开植被生长区,避免因植被及其根茎而造成的误差,同时选择地表相对平缓的区域采集。在数据采集过程中,选择晴朗无云的午间进行光谱采集,时间在 12:00—14:00,光纤探头距离地物

25~30 cm,垂直向下,对同一种地物记录 25 条光谱曲线,并分别命名,利用 ASD 光谱仪自带光谱数据处理软件对光谱曲线进行粗略的剔除异常值和简单降噪。利用美国 ASD 公司生产的 Field Spec 4 高分辨率地物光谱仪来采集研究区地物光谱数据,波长范围为 350~2 500 nm,涵盖了可见光(380~780 nm)和

近红外(780~5 000 nm)的一部分,波长精度为1 nm,光谱分辨率在350~1 000 nm 波长范围内为3 nm,在1 000~2 500 nm 波长范围内为10 nm。

2.2 数据预处理

对所采集的光谱数据进行甄选和处理。采用自带的 View Specpro 软件,对光谱进行初步处理和相应的变换。将同一种地物同一时间段的光谱数据进行比对,与其他光谱曲线有较大差别的数据进行剔除,然后利用光谱预处理软件进行进一步平滑、降噪及其他的数据提取和筛选工作。采用移动平均法进行平滑降噪处理,处理方式如下:

$$x_n' = \frac{x_{n-2} + x_{n-1} + x_n + x_{n+1} + x_{n+2}}{5} \quad (1)$$

式中: x_n' ——平滑处理后的光谱反射率值; x_n ——原始光谱反射率。

2.3 数据分析及利用

对所采集到的数据进行初步处理,并利用 Excel, SPSS 19.0 等数据统计和处理软件对裸露地表和对应的光谱数据进行综合分析,并根据不同的地物绘制相应的光谱曲线图。在原始光谱数据进行平滑处理的基础上,分别进行一阶导数变换(FDR)、倒数取对数变换(RLR)和基于包络线去除(continuum removal, CR)等方式处理。

$$\text{FDR}(\lambda) = [R(\lambda_i + n) - R(\lambda_i)]/n \quad (2)$$

$$\text{RLR} = \lg(1/R) \quad (3)$$

$$\text{CR}_i = R_i/R_{Hi} \quad (4)$$

$$R_{Hi} = K_i \cdot \lambda + b \quad (5)$$

$$K_i = (R_{\text{end}} - R_{\text{start}})/(\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{start}}) \quad (6)$$

式中: R ——原始光谱反射率; λ ——波长(nm); n ——一阶导数尺度,通常取1; $R_{\text{end}}, R_{\text{start}}$ ——反射波峰的终点反射率值和起点反射率值; b ——常数。

分别利用原始光谱数据、FDR, RLR, CR 这4组数据进行对比分析,同时结合地物自身特点,从多个角度分析说明不同裸露地表的光谱特性,从光谱反射率的角度说明不同裸露地表的特征,从而为利用遥感手段对裸露地表进行精细分类、防沙治沙、生态修复等提供参考。

3 结果与分析

3.1 裸露地表光谱特征分析

地物光谱是地物物理特性的体现,每种地物的光谱特征均具有独特性,由于其内部所含物质、结构不同而表现为不同的光谱反射率。分别对准噶尔盆地南缘绿洲—荒漠交错带典型裸露地表:干涸裸地、裸土地、生物结皮、盐碱地、盐结皮、翻耕后农田和沙地

等7种类型的光谱特征进行综合处理、分析。图1为这7种裸露地表经平滑处理后的光谱反射率,波长范围为350~2 500 nm。从各类裸露地表的光谱反射率来看(图1),350~570 nm 波段范围内,反射率逐渐增大,570~1 400 nm 范围各类地物的反射率均在增加,但是增加的幅度不大。1 350 nm 附近反射率有波动,这主要是因为1 350 nm 附近水汽对光谱的吸收作用,同时由于地表中水分含量不同对光谱的吸收程度也有差别,反映到光谱特征上会有较大差别。1 400~1 800 nm 波段范围内光谱反射率呈缓慢增加的趋势,且这种变化趋势在各类地物中差别不明显;随着波长的增加,光谱反射率在1 850 nm 附近变化异常,这主要是因为1 850 nm 附近的光被大气中的水分吸收,而导致这一区间的光谱反射率变得无规律可循。1 850 nm 以后的波段范围内,干涸裸地、沙地、裸土地等有相似的变化趋势,规律性不强,本研究暂不讨论。

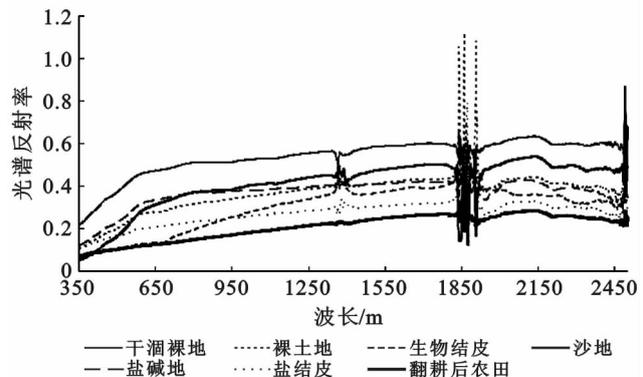


图1 几种典型裸露地表原始光谱反射率

本研究旨在探讨高分1号卫星影像的波段设置在地物分类上作用,因此,进一步的分析和讨论将在高分1号卫星影像波段范围内(450~890 nm)进行。图2为450~890 nm 的光谱反射率曲线图。由图2可以看出,几种地物的反射率在450~890 nm 波段内均呈增加的趋势,其中干涸裸地的反射率明显高于其他类型裸露地表;翻耕后农田和生物结皮的光谱反射率处于最低水平,450~690 nm 波段范围内变化较小,但是生物结皮在680 nm 附近反射率有明显增加的趋势。沙地的光谱反射率变化较为复杂,虽然初始反射率较低,但是450~590 nm 的增长率较大。其余裸露地表的光谱变化类似。从原始光谱反射率上来看,各种地物光谱曲线变化虽然有差别,但是这种差别并不明显。

3.2 光谱变换及其特征提取

从各地物原始光谱特征上来看,几种典型裸露地表的光谱差异性不大,因此需要对原始光谱进行一系

列的变换和增强处理。本次研究主要是对原始光谱进行一阶导数变换、倒数取对数变换、包络线去除变换等方式,其中一阶导数变换由于数值较小,在原有变换的基础上乘以 100。根据高分一号影像波段设置来看,波长最小为 450 nm,波长最大为 890 nm,因此分别针对 450~890 nm 的光谱反射率进行变换处理。

3.2.1 一阶导数变换 利用公式(2)计算 450~890 nm 波段范围内的反射率一阶导数变化,结果如图 3 所示。从变换后的结果来看,这一波段范围内的一阶导数均为正值,说明反射率随着波长的增加也是处于增加状态的,其中在 470 nm 附近一阶导数值集中出现波谷。在 500~560 nm 波段范围内的一阶导数值增加较快,并在 560 nm 附近出现波峰,说明在 560 nm 附近光谱反射率增长率最大,此后一阶导数值持续下降,到 650 nm 附近达到第 2 个波谷。650 nm 以后的光谱反射率值变化规律性较差,各类地物反射率变化情况也有较大差别,尤其在 650~720 nm 波段范围内各类地物特征各异,不适宜作为区分各类裸露地表的特征波段。从图 3 可知,各类地物在 470 和 560 nm 附近一阶导数变换后的值差别较大,可以较为清晰地区分开各类地物。由此可见,用于区分地物的一阶导数变换光谱区间,应选择蓝波段(450~520 nm)和绿波段(520~590 nm)范围较为适宜。

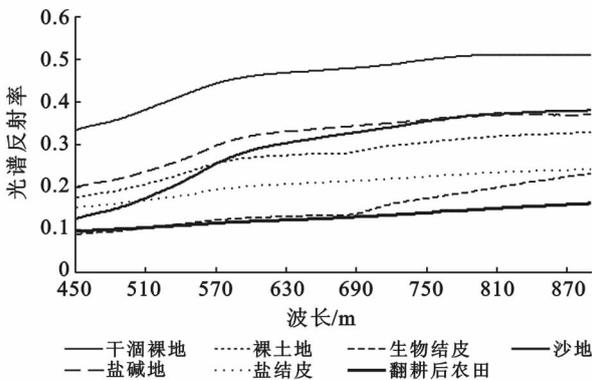


图 2 典型地表 450~890 nm 波段反射率曲线

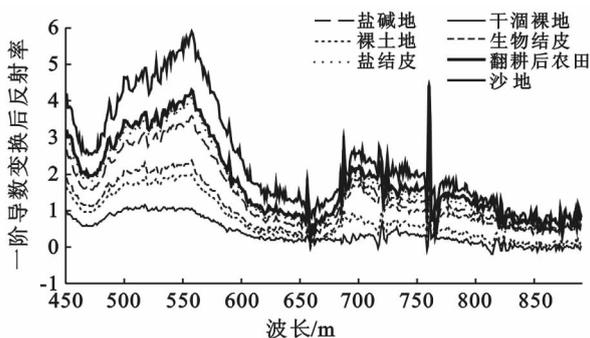


图 3 一阶导数变换后各地物反射率曲线

3.2.2 倒数取对数变换 将原始光谱数据经平滑处理后,按照公式(3)进行变换处理,按照倒数取对数变换可以在一定程度上放大地物之间的细微差别,结果如图 4 所示。从各地物表现的特征来看,生物结皮和沙地的变化特征和其他几类裸露地表的变化特征差异性较大;干涸裸地与翻耕后农田虽然值上有差别,但是二者的变化趋势几乎是一致的;裸土地、盐碱地和盐结皮三者的变化趋势基本一致,盐结皮的值保持在较低状态。根据各类裸露地表倒数取对数变换后的结果,各地物在各波段处的差值和变化趋势类似,对各地物的区分效果不明显。

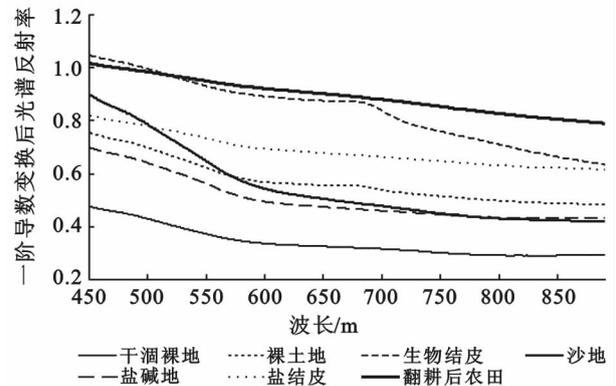


图 4 倒数取对数后光谱反射率曲线

3.2.3 基于包络线去除光谱变换 包络线去除光谱可以消除由于大气条件、仪器自身因素所带来的干扰,能够凸显由于地物自身物理特性、物质组成等所引起的光谱差异,图 5 为包络线去除后的光谱反射率曲线图。从图 5 可知,生物结皮、翻耕后农田包络线消除后反射率与其它地物的特征区别较大,生物结皮、翻耕后农田在蓝波段(450~520 nm)变换后光谱下降,而其它地物则是随着波长增加而增加;在绿波段(520~590 nm)生物结皮和翻耕后农田呈缓慢下降的趋势,而其它地物则迅速增加;在红波段(630~690 nm)生物结皮反射率迅速下降并达到极小值也是最小值,翻耕后农田则是缓慢平滑下降;近红外(770~890 nm)生物结皮呈逐渐上升的趋势,而翻耕后农田总体保持基本不变。从其他几类地物的包络线去除光谱特征来看,沙地的变化趋势也与其它几类不同,主要在蓝波段和绿波段的变化上有所差别,沙地的增长率较快,基本均在 590 nm 附近达到极大值,590 nm 以后波段均呈缓慢下降的趋势。从变化趋势上看蓝波段、绿波段和红波段较为适宜用来进行波段组合,从而区分各类地物。

3.3 波段组合及地物识别方法分析

为了能够将实测光谱与遥感影像结合进行地物

分类,需将实测光谱及其变换结果与影像设置的波段进行衔接,分别选取高分一号的 4 个波段:蓝波段(450~520 nm)、绿波段(520~590 nm)、红波段(630~690 nm)和近红外(770~890 nm),设置的波段范围基本上和 TM 的 1—4 波段吻合,所包含的信息也类似。蓝波段多用于识别水体,绿波段则多用于植被分类和识别,红波段则用途广泛,对裸露地表、植被、岩性、地层等特征均能提信息,近红外波段则可用于更多领域^[16]。因此,结合前面对各类变换后光谱在各地物区分中的效果,进一步的研究中将主要选择蓝波段、绿波段及红波段来进行后续的计算和研究。

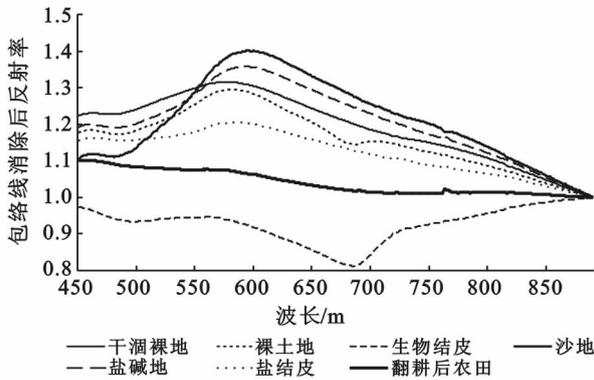


图 5 包络线去除后各地物反射率曲线

目前常用的光谱指数多是利用存在较大差异的波段间的差、比值以及二者组合的方式来放大地物之间的差别。通过前面的分析可知,几类典型裸露地表在蓝波段和绿波段表现出来的差异较大,红波段也有所差别,因此可借助这 3 个波段的组合来进行区分。因此,可借鉴常用的归一化指数(NDSI)、简单比值指

数(SR)、光谱差值商指数(SDI)等来计算各类裸露地表的指数进行区分。其中各类指数的计算公式为:

$$\text{NDSI} = \frac{R_{\text{GRE}} - R_{\text{BLU}}}{R_{\text{GRE}} + R_{\text{BLU}}} \quad (7)$$

$$\text{SR} = \frac{R_{\text{GRE}}}{R_{\text{BLU}}} \quad (8)$$

$$\text{SDI} = (R_{\text{GRE}} - R_{\text{BLU}}) / R_{\text{RED}} \quad (9)$$

式中: R_{GRE} ——红波段的反射率值; R_{BLU} ——蓝波段反射率值; R_{RED} ——红波段反射率值。

分别利用公式(7)~(9)计算各类地物原始光谱、变换后光谱的光谱指数,结果如表 2 和图 6 所示。

从图 6 和表 2 所显示的结果来看,经过变换后的光谱更能凸显各地物之间的光谱差异,而通过光谱组合成的光谱指数进一步扩大各地物间的差别。通过分析和观察各类光谱变化后计算得到的结果发现,各地物光谱经过一阶导数变换后计算的各光谱指数数值之间差别明显。其中,光谱差值商指数(SDI)在各地物间计算值差别最为明显,因其利用了 3 个波段的组合,最大限度地保留地物信息,比较容易在 SDI 数值上区分各地物。由此可见,虽然绿洲荒漠交错带几类典型裸露地表在原始光谱变化特征上差异性不强,但是通过光谱变换,可以增强地物间光谱特征上的微小变化。通过分析可知,经过光谱变换和波段组合后的计算结果在各地物间的差别有所增强,尤以经过一阶导数变换后的光谱计算结果的差异性最大,利用此变换后的光谱指数更能突显这些差别,其中光谱差值商指数(SDI)可以较为明确地区分开各类裸露地表。因此,该方法可作为利用高分 1 号卫星影像进行荒漠区典型裸露地表精细识别和分类。

表 2 各类裸露地表原始光谱及变换光谱指数

指数类型	光谱类别	干涸裸地	裸土地	生物结皮	盐碱地	盐结皮	翻耕后农田	沙地
简单比值法	原始光谱	1.194 3	1.280 8	1.218 1	1.311 3	1.171 9	1.120 4	1.567 3
	一阶导数变换	0.703 5	0.861 6	0.645 9	1.140 0	1.151 7	1.124 6	1.000 0
	倒数取对数	0.818 8	0.844 8	0.913 6	0.814 7	0.911 3	0.949 7	0.748 2
	包络线消除	1.057 1	1.090 5	1.005 0	1.116 1	1.039 1	0.992 2	1.204 1
归一化指数	原始光谱	0.088 6	0.123 1	0.098 3	0.134 7	0.079 2	0.056 8	0.221 0
	一阶导数变换	-0.174 1	-0.074 3	-0.215 2	0.065 4	0.070 5	0.058 7	0.000 0
	倒数取对数	-0.099 6	-0.084 1	-0.045 2	-0.102 1	-0.046 4	-0.025 8	-0.144 0
	包络线消除	0.027 7	0.043 3	0.002 5	0.054 9	0.019 2	-0.003 9	0.092 6
差值商指数	原始光谱	0.152 4	0.203 9	0.165 0	0.210 8	0.134 4	0.097 3	0.292 6
	一阶导数变换	-1.366 1	-0.473 6	-0.738 2	0.447 8	0.307 4	0.189 4	0.000 0
	倒数取对数	-0.241 0	-0.194 1	-0.098 4	-0.252 7	-0.102 9	-0.055 5	-0.400 3
	包络线消除	0.058 9	0.093 5	0.005 7	0.111 7	0.040 0	-0.008 3	0.182 0

4 讨论与结论

(1) 典型裸露地表的光谱反射率在一定范围内

存在相似性,从可见光到近红外都是呈缓慢增加的趋势,结合目前国产高分 1 号卫星的波段设置,在 450~890 nm 波段内进行深入分析,该波长范围内光谱反

射率变化缓慢,仅干涸裸地反射率一直较高。

(2) 通过一阶导数变换、倒数取对数变换、包络线消除变换后的光谱明显有别于原始光谱,变换后的各地物光谱特征差异性显著,尤其是经过一阶导数变换和包络线去除后的光谱,生物结皮、翻耕后农田、沙地、盐结皮等特征各异。

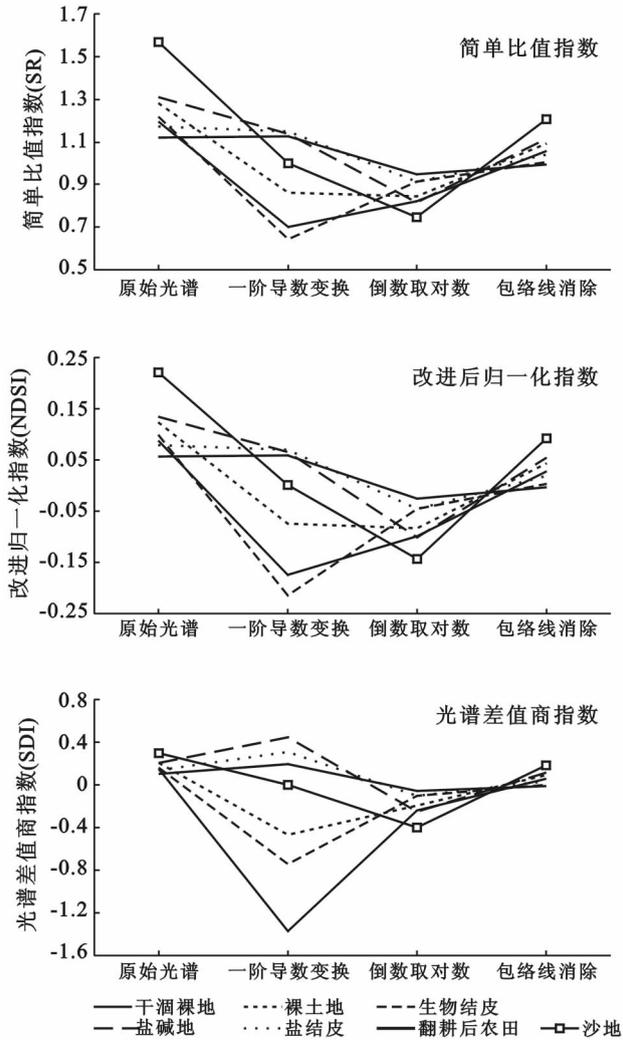


图 6 典型裸露地表光谱指数变化

(3) 利用波段组合的方式扩大各类地物间区别,本研究利用 NDSI, SR, SDI 等 3 种光谱指数,结果显示,一阶导数变换后的各光谱指数可以明显区别各类地物,尤其是利用 SDI 计算的光谱指数,各地物间差异性更大。将为利用高分 1 号卫星进行地物识别提供可参考依据。

(4) 本研究对绿洲—荒漠交错带几种典型裸露地表的光谱特性进行了分析,并基于光谱数据变换,计算了几类光谱指数,对各类地物进行了区分,效果

相对较好。但是这些结果都是基于实测光谱数据,尚未应用到实际影像当中,因此实际的应用效果尚不清楚。因而在今后的研究当中,仍需将实测光谱所得到的结果与高分影像相结合,从影像中进行信息提取。

[参 考 文 献]

- [1] 吕光辉,杜昕,杨建军,等. 阜康绿洲—荒漠交错带荒漠植被群落稳定性[J]. 干旱区地理,2007,30(5):660-665.
- [2] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等. 绿洲—荒漠交错带环境特征初步研究[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1104-1108.
- [3] 张瑞,刘芳,郝玉光,等. 乌兰布和东北部荒漠—绿洲生态交错带植被特征及其群落多样性研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(7):196-200.
- [4] 刘欢,刘荣高,刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展[J]. 地球信息科学学报,2012,14(2):232-239.
- [5] 胡顺光,张增祥,夏奎菊. 遥感石漠化信息的提取[J]. 地球信息科学学报,2010,12(6):870-879.
- [6] 王昌佐,王纪华,王锦地,等. 裸土表层含水量高光谱遥感的最佳波段选择[J]. 遥感信息,2003(4):33-36.
- [7] 孔金玲,李菁菁,甄珮珮,等. 微波与光学遥感协同反演旱区地表土壤水分研究[J]. 地球信息科学学报,2016,18(6):857-863.
- [8] 郑小坡,孙越君,秦其明,等. 基于可见光—短波红外波段反射率的裸土土壤含水量反演建模[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(8):2113-2118.
- [9] 蒋金豹,张玲,崔希民,等. 基于 L 波段的裸土区土壤水分微波遥感反演研究[J]. 土壤,2014,46(2):361-365.
- [10] 崔耀平,刘彤,赵志平,等. 干旱荒漠区植被覆盖度变化的遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(3):305-312.
- [11] 冯秀绒,卜崇峰,郝红科,等. 基于光谱分析的生物结皮提取研究:以毛乌素沙地为例[J]. 自然资源学报,2015,30(6):1024-1034.
- [12] 陈晋,杨伟,张元明,等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮反射光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(1):28-32.
- [13] 张波,牛婷,房世峰,等. 荒漠—绿洲交错地带典型植被光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(4):1104-1108.
- [14] 张飞,塔西普拉提·特依拜,丁建丽,等. 塔里木河中游典型绿洲盐渍化土壤的反射光谱特征[J]. 地理科学进展,2012,31(7):921-932.
- [15] 张飞,丁建丽,塔西普拉提·特依拜,等. 基于对应分析的土壤盐渍化现状特征及其与光谱关系研究[J]. 土壤学报,2009,46(3):513-519.
- [16] 梅安新,彭望球,秦其明,等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.