

# 塔里木河中游典型绿洲盐渍化土壤的反射光谱特征

张飞<sup>1,2</sup>,塔西甫拉提·特依拜<sup>1,2</sup>,丁建丽<sup>1,2</sup>,买买提·沙吾提<sup>1,2</sup>,韩桂红<sup>1,2</sup>,桂东伟<sup>3,4</sup>,孙倩<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

4. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆策勒 848300)

**摘要:**研究盐渍化土壤的光谱特性是利用遥感技术实现在区域尺度上进行土壤盐渍化监测和评价的工作基础,是建立地面数据和遥感数据关系的桥梁。本文以塔里木河中游典型绿洲——渭干河-库车河三角洲绿洲为研究对象,采用光谱学技术以及多元统计相结合的方法,研究干旱区典型绿洲盐渍化土壤的反射光谱特征。首先,对光谱数据进行预处理(去噪、剔除水分吸收波段),以便消除仪器本身噪声及外界条件的影响,并且计算了部分盐渍地样本的光谱吸收特征参数,说明相同程度的盐渍化土壤具有相似的吸收特征;其次,研究盐渍化土壤的反射光谱与盐分因子(八大离子、电导率(EC)、含盐量(salt content)、pH、总溶解固体(TDS)等)之间的关系,并选择具有代表性的盐分因子与野外实测光谱数据建立定量回归模型,通过多元线性回归分析得出含盐量、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TDS、EC与原始光谱数据的相关性分别是0.746、0.908、0.798和0.933,达到了理想的效果。本研究对于干旱区典型绿洲盐渍土的光谱特征研究有着重要指示意义,为发展和完善中国盐渍土理化特征的可见光-近红外反射光谱分析理论奠定科学积累,并进一步为干旱区土壤盐渍化、沙漠化灾害等环境恶化问题的解决提供新的科学技术手段。

**关键词:**盐渍化土壤;反射光谱特征;渭干河-库车河三角洲绿洲

## 1 引言

地物波谱信息是多光谱遥感的基础,光谱信息所具有的特征反映了地物本身的存在、变化和差异。随着传感器波段的增多,以及时间分辨率的提高,遥感应用领域不断扩展及定量化应用水平不断深化,遥感应用越来越依赖于地物波谱特征研究,并发展到了定量分析的新阶段。新疆在对地物光谱的观测方面已进行了大量工作,大量的准确第一手地物实测光谱资料为卫星遥感资料的解译、判读提供强有力技术支撑,能进行很好的复合分析<sup>[1-2]</sup>。因此掌握各种地物的实测地物光谱特征,对于判读陆地卫星遥感资料上的各种地物面积等的精度将大有帮助,能够科学、准确、快速地了解盐渍地的状况,为合理利用、改善生态环境提供科学依据。

新疆是中国盐渍土集中分布的大区,总面积约 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,几乎相当于一个江苏省的面积。由于

盐分危害,这类土地生产力低下,生态脆弱,环境恶劣,一直是区域经济发展和生态建设的瓶颈。严重的盐渍化问题不仅限制了该地区农牧业的发展,还对生物圈和生态环境构成威胁<sup>[3-4]</sup>。遥感技术能够获取广域、多波段、多时相的土壤信息,使大面积实时动态监测盐渍化状况成为可能<sup>[5]</sup>。但是多光谱遥感技术难以区分轻度盐渍化与未盐渍化的土壤,高光谱遥感传感器能获取纳米级的地物连续光谱信息,精细的光谱分辨率反映了地物光谱的细微特征,使得依据诊断性的光谱吸收特征来识别地物、进行遥感定量分析、研究地物的化学成分等成为可能<sup>[6]</sup>。利用高光谱技术确定土壤的含盐量与pH值,可以区分土壤是否发生了盐渍化。近年来,国外多位学者应用高光谱技术定量半定量地研究了土壤盐渍化及土壤特性<sup>[7-8]</sup>,而国内对盐渍化土壤的高光谱特征的研究较少,刘庆生等<sup>[9]</sup>分析了盐分含量与上覆植被光谱的关系。樊彦国等<sup>[10]</sup>采用遥感技术

收稿日期:2011-10; 修订日期:2012-02.

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421302);国家自然科学基金项目(40961025);国家自然科学基金青年基金项目(40901163,41001198);新疆大学博士毕业生科研启动基金项目(BS110125);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(2010KF0003SA);教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目。

作者简介:张飞(1980-),男,陕西凤翔县人,博士,主要从事干旱区资源与环境遥感应用研究。

E-mail: zhangfei3s@yahoo.com.cn

通讯作者:塔西甫拉提·特依拜(1958-),男,维吾尔族,教授。E-mail: tash@xju.edu.cn

和BP神经网络技术,结合野外实测的盐渍土光谱特征和实验室化验的土壤含盐数据,对盐渍土盐分的遥感反演进行了模型的设计与编程实现。马诺等<sup>[11]</sup>通过野外调查以及实地测点,利用便携式光谱仪测量研究区域内不同盐渍程度的土壤光谱,分析土壤光谱曲线与土壤盐渍程度之间的关系。张芳等<sup>[12]</sup>通过实地定点土壤取样和光谱测量,研究了实测光谱反射率与土壤pH值间的关系。翁永玲等<sup>[13]</sup>通过PLSR方法,充分利用多个与土壤盐分相关的波段组合,综合所有波段信息来定量估算土壤盐分含量,提高模型的估算精度,最终实现Hyperion星载高光谱遥感数据的土壤盐分含量空间分布的定量反演。

为了从冗余的高光谱数据中选择能够反映塔里木河流域中游典型绿洲土壤盐渍化程度差异的最佳波段,从而为土壤盐渍化遥感监测与评价提供理论基础,本文以渭干河-库车河三角洲绿洲盐渍化土壤为研究对象,进行野外与室内的光谱测试,利用光谱学技术以及多元统计相结合的方法分析盐渍土盐分因子与反射光谱特征间的关系,并建立盐渍化土壤含盐量、电导率、TDS、 $\text{SO}_4^{2-}$ 指标的定量高光谱模型,用于评价土壤盐渍化程度。本研究对于干旱区典型绿洲盐渍土的光谱特征研究有着重要指示意义,为发展和完善中国盐渍土理化特征的可见光-近红外反射光谱分析理论奠定科学积累,并进一步为干旱区土壤盐渍化、沙漠化灾害等环境恶化问题的解决提供新的科学技术手段。

## 2 研究区概况

渭干河-库车河三角洲绿洲(以下简称渭-库绿洲)位于天山南麓,塔里木盆地北部,地理坐标介于 $41^{\circ}06' \sim 41^{\circ}38' \text{N}$ ,  $81^{\circ}26' \sim 83^{\circ}17' \text{E}$ ,是一个典型而完整的山前冲积扇平原,辖阿克苏地区的库车、沙雅和新和3个县(图1)。渭干河出山口呈辐射状分布,形成东西长约64km,南北宽约160 km的大扇裙绿洲,地势北高南低,平均海拔920~1100 m,总面积8346.5  $\text{km}^2$ 。属大陆性暖温带极端干旱气候,光、热资源丰富,多年年均降水量51.6 mm,水面蒸发量1992.0~2863.4 mm( $\phi 20\text{cm}$ 蒸发皿观测值),温度 $10.7^{\circ}\text{C}$ ,日照2888.7 h,全年无霜期209 d。土壤以轻壤和沙壤为主,土壤pH值为7.9~8.0,土壤耕层含盐量为0.3%~0.6%,局部地区土壤含盐量为

0.6%~1%,夹荒地土壤含盐量一般为2%左右。盐分多以氯化物、硫酸盐为主,灌区近50%为非盐化土,主要分布在灌区上游、河道及大型灌区或有完善灌排系统的土地上,重盐化土面积为26%,主要分布在非农区、荒地<sup>[14]</sup>。

## 3 数据采集与处理

### 3.1 光谱测试方法

使用美国ASD公司的FieldSpec Pro FR地物光谱仪在研究区进行了盐渍土的光谱测量。该光谱仪的波谱范围为300~2500 nm,视场角 $25^{\circ}$ ,光谱分辨率350~1000 nm为3 nm,1000~2500 nm为10 nm。野外光谱测试时,为减小太阳高度角变化对光谱测量结果的影响,测量时间集中在12:00~16:00,期间天空晴朗无云,并利用光谱仪的后处理软件ASD ViewSpecPro对采集的光谱曲线进行分析,剔除其中无效的数据,再对每类地物的多条光谱数据求平均,对实测波谱数据需要归类合并,最后使收集的数据归一化。

### 3.2 土壤样本的化学分析数据获取

用METTLER TOLEDO AL204电子天平称取50 g风干土与250 ml蒸馏水混合,经过浸泡和振动使土壤盐分充分溶解后,进行土壤盐分及其组分、pH值等的测定,其中,pH值采用LP115PHMeter酸度计法测定; $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^{-}$ 采用双指示剂中和法测

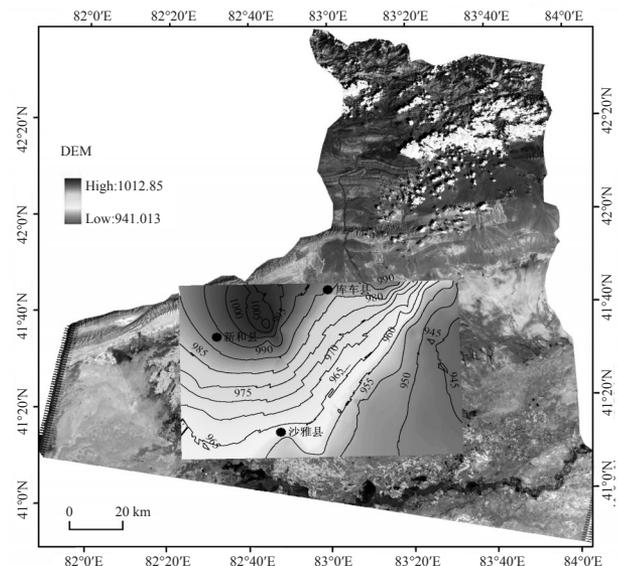


图1 研究区示意图

Fig.1 The location of the study area

定;Cl<sup>-</sup>采用AgNO<sub>3</sub>滴定法测定;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用EDTA间接滴定法测定;Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>采用EDTA络合滴定法测定;Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>采用差减法,电导率(EC)、含盐量(salt content)、总溶解固体(TDS)采用Orion 115A+仪器测定。

### 3.3 光谱数据处理

(1) 为消除高频噪声的影响,先采用多种方法进行去噪,选出最佳的平滑去噪处理方法,然后剔除水分吸收波段。

(2) 为增强光谱数据与盐渍化土壤盐分因子之间的相关关系,采用一阶、二阶微分方法去除平滑后盐渍化土壤光谱数据的部分背景、噪声影响。

(3) 为有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,利用Continuum Removal功能对盐渍化土壤光谱数据进行去包络线处理。去包络线的基础上发展一些光谱指数,主要有吸收波长波段位置、反射值、深度、宽度、斜率、对称度、面积等参数表示<sup>[15]</sup>。

## 4 结果与分析

### 4.1 光谱数据预处理分析

#### 4.1.1 光谱数据平滑去噪

为得到平稳变化,需平滑波形,以去除包含在信号内的少量噪声。如果噪声的频率较高,其量值也不大,用平滑方法可在一定程度上降低噪声<sup>[16]</sup>。常用的平滑方法有相邻平均法(Adjacent Averaging)、Savitzky-Golay滤波器平滑、FFT滤波器平滑、Percentile Filter平滑以及移动平均法等,其平滑结果见图2。

由图2可以看出:除了FFT滤波器和移动平均法平滑效果不是很理想外,其余的效果都比较好。光谱曲线经过处理后,曲线变得平滑,由此得到的新的光谱曲线是旧光谱曲线的总体趋势线。图3是处理前后光谱曲线的细节比较,为了突出差别,挑选了1950~2500 nm波段的曲线进行了放大。发现处理后的光谱曲线在有效的去除噪声的同时,

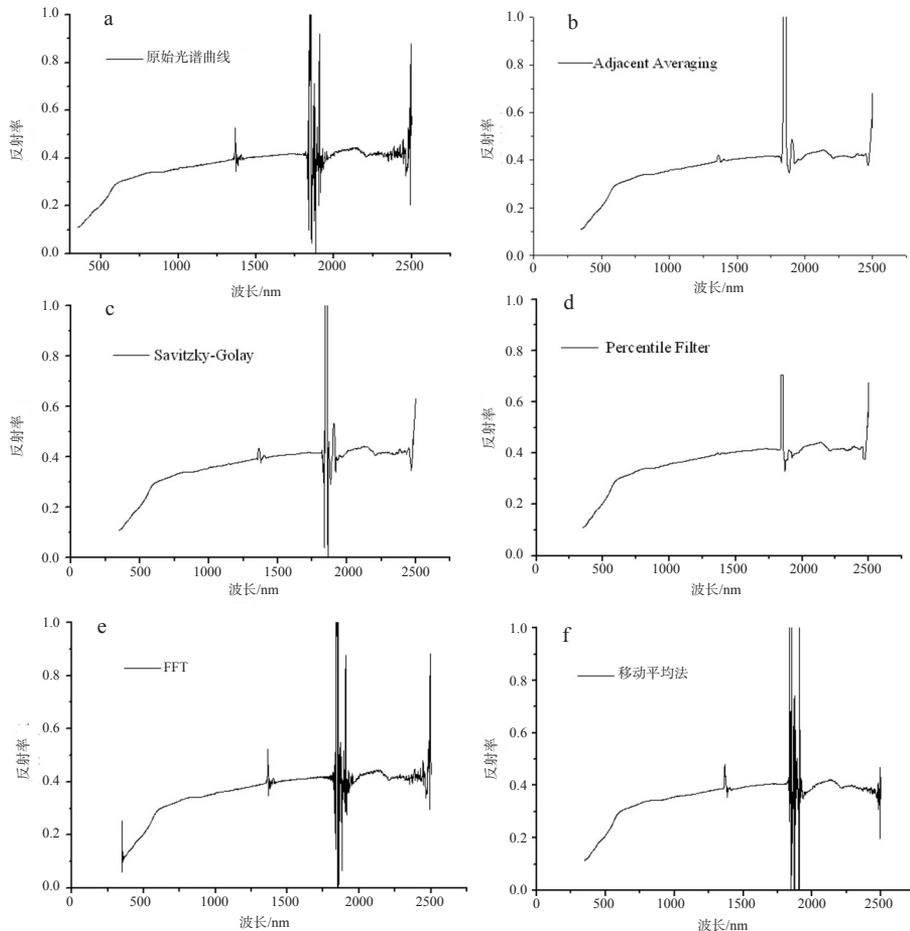


图2 原始土壤光谱曲线以及平滑后的曲线图

Fig.2 The original soil spectral curves as well as the smoothed curve

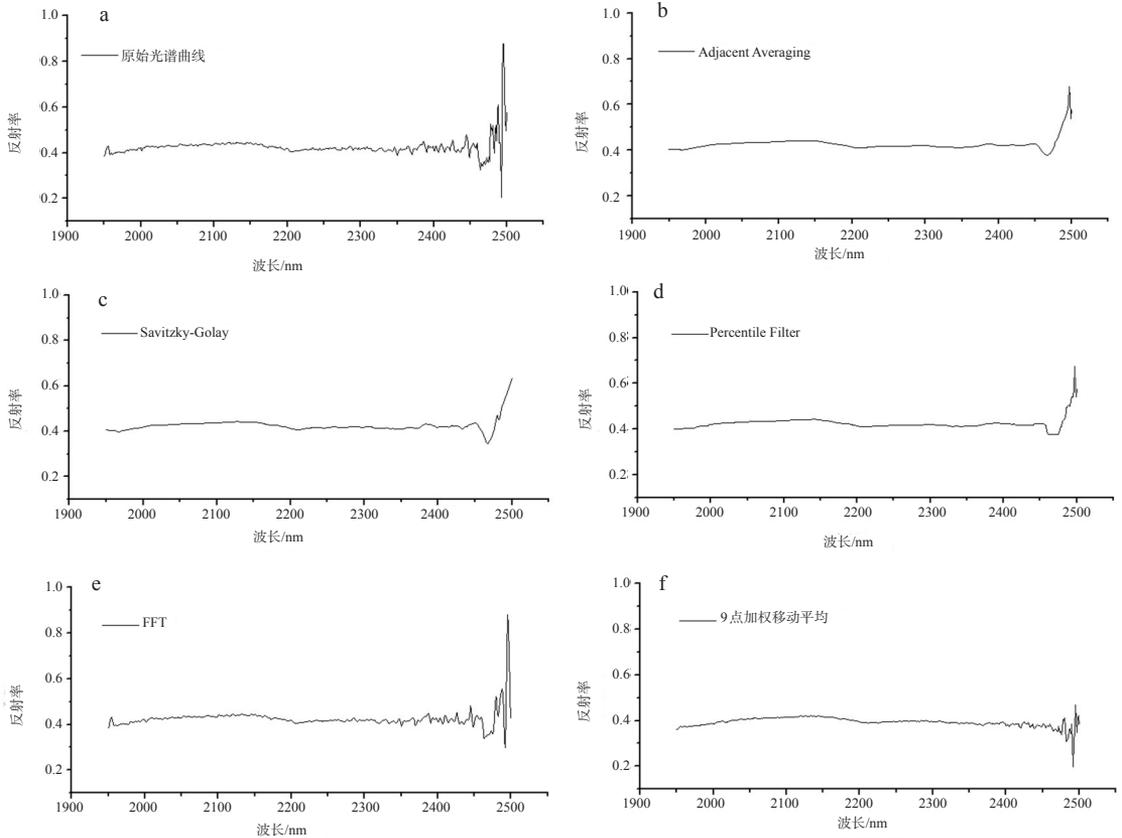


图3 平滑处理前和平滑处理后的光谱曲线

Fig.3 Smoothing of the spectral curve before and after the processing

保存了光谱的总体趋势,更好的体现了光谱的吸收特征。

#### 4.1.2 剔除水汽吸收波段

为使野外地面测量结果与遥感数据相匹配,以及更好的与实验数据相关联,需要剔除水汽吸收峰影响严重的波段区域,去除明显错误波段数值,这对后期做相关性分析及模型构建十分有利。通过分析具体数据和借鉴有关文献的结论<sup>[17]</sup>,具体剔除范围包括:1351~1409 nm、1796~1949 nm、2451~2500 nm。

#### 4.1.3 光谱微分

微分光谱技术是一种在遥感数据处理中特别有应用前景的分析方法。Cloutis的研究表明,光谱的低阶微分处理对噪声影响敏感性较低,因而在实际应用中更为有效<sup>[18]</sup>。一般认为,导数光谱可去除部分线性或接近线性的背景、噪声对目标的影响。虽然更为高阶的导数也有人研究过,但一阶或二阶导数往往更为有用且包含了大部分的信息。计算公式如下<sup>[19-20]</sup>:

$$R'(\lambda_i) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})] / (2\Delta\lambda) \quad (1)$$

$$R''(\lambda_i) = [R'(\lambda_{i+1}) - R'(\lambda_{i-1})] / (2\Delta\lambda) \\ = [R(\lambda_{i+1}) - 2R(\lambda_i) + R(\lambda_{i-1}))] / (\Delta\lambda^2) \quad (2)$$

式中: $\lambda_i$ 为每个波段的波长; $R'(\lambda_i)$ 和 $R''(\lambda_i)$ 分别为波长 $\lambda_i$ 的一阶和二阶微分光谱; $\Delta\lambda$ 为波长 $\lambda_{i-1}$ 到 $\lambda_i$ 的间隔,视波段波长而定。 $\Delta\lambda$ 的选择是十分重要的:如果 $\Delta\lambda$ 太小,噪声会很大,影响所建分析模型的质量;如果 $\Delta\lambda$ 太大,平滑过度,会失去大量的细节信息。

另外,根据数理研究的成果,导数光谱技术能压缩背景噪声对目标信号的影响或不理想的低频信号,因而被应用在许多遥感研究中。例如,相对于植被的光谱曲线,土壤的光谱曲线是接近线性的。所以从理论上讲,二阶导数可以非常好地消除土壤背景信号。如图4a所示的渭-库绿洲测得的典型的两条光谱曲线,对于只有非光合作用的物质——土壤,其光谱曲线缓慢变换,而植被反射曲线具有典型的光合作用特点。对这两条曲线进行一

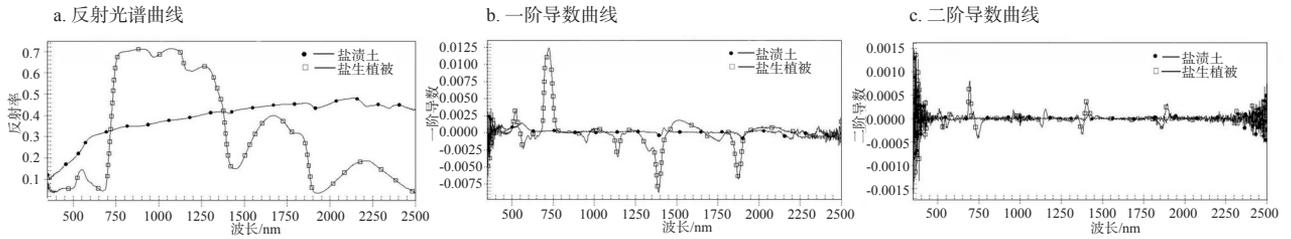


图4 盐渍土与盐生植被反射光谱(a)及一阶导数(b)、二阶导数曲线(c)

Fig.4 The curve of vegetation and soil (a), first derivative (b) and second derivative (c)

阶导数、二阶导数运算得出如图4b、4c所示结果。

图4表明:①导数光谱能够方便地用来确定光谱曲线弯曲点、最大和最小反射率处的波长位置等光谱特征。②在光谱变化区域,如植被光谱蓝边、黄边和红边等。导数光谱能够消除土壤背景的干扰。③导数光谱对光谱信噪比非常敏感,一般只是在光谱曲线变化区域才能够应用,如近红外反射平台是非常重要的植被特征,但进行一阶导数处理后,该光谱范围的植被信息丢失,只留下噪声信息。④土壤的导数曲线值整体上很小,而植被由于绿边效应,其导数值在700~750 nm,为一尖峰,这导数值十分大,同时土壤光谱在这个范围内一阶导数值接近于0。利用这一特点就可用来对混合光谱中的土壤信号进行压缩。⑤应用一、二阶导数光谱对地物进行特征提取,然后用提取出来的特征参数对地物进行识别和分类。其效果是二阶高于一阶。

#### 4.1.4 光谱吸收特征参数提取

地物光谱曲线反映了地物的吸收和反射特征,大多数地物具有典型的光谱波形特征。因此,对光谱吸收特征参数(SAFP)的提取将成为未来高光谱信息处理研究的主要方向<sup>[21]</sup>。根据有关研究<sup>[22]</sup>,从光谱曲线中提取的光谱吸收特征可以用吸收波长波段位置(P)、反射值(R)、深度(H)、宽度(W)、斜率(K)、对称度(S)、面积(A)等参数表示(图5)。

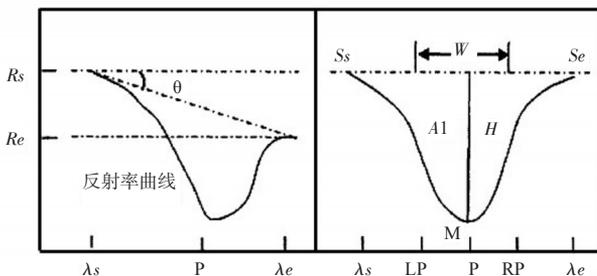


图5 地物光谱吸收特征参数示意图<sup>[22]</sup>

Fig.5 Diagram showing the parameter of absorption spectrum

利用这些参数可以对地物进行识别和分类,不同地物光谱曲线,其吸收波峰波谷形状、位置、宽度、深度和对称度等属性也不同。据此,郑兰芬、王晋年<sup>[23]</sup>建立了光谱吸收指数(SAI)进行高光谱图像处理 and 地物识别。每一个光谱吸收特征可以由光谱吸收谷点M及其两个肩部 $S_s$ 和 $S_e$ 组成,或由吸收峰值点及其两个肩部组成。如图5所示, $R_s$ 、 $\lambda_s$ 为吸收左肩的反射率和波长位置; $R_e$ 、 $\lambda_e$ 为吸收右肩的反射率和波长位置; $R_m$ 、 $\lambda_m$ (即P点处)为吸收谷点的反射率和波长位置。吸收波段宽度 $W = \lambda_e - \lambda_s$ ;吸收波谷的对称度 $S = (\lambda_e - \lambda_m) / W$ ;吸收肩部反射率差为 $\Delta R = R_e - R_s$ 。由此可得“非吸收基线”方程:

$$WR - \Delta R\lambda = WR_s - \Delta R\lambda_s \quad (3)$$

非吸收基线表达了无光谱吸收特征地物的光谱贡献与光谱行为。将非吸收基线简化为直线,吸收位置的光谱值与相应基线值的比值倒数定义为光谱吸收指数:

$$SAI = [WR_s + (1 - W)R_e] / R_m \quad (4)$$

SAI从本质上表达了地物光谱吸收系数的变化特征。通过试验分析可知SAI较全面地反映了地物光谱曲线的识别特征,比SAFP效果更佳,更能消除非研究地物光谱的影响<sup>[24]</sup>。实验中对部分盐渍地样本的原始光谱曲线提取光谱吸收特征参数,结果如表1、表2。发现部分样本特征值都很接近,说明属于同一程度的盐渍化土壤。

#### 4.2 盐渍化土壤光谱特征分析

由于土壤中的盐分均为白色晶体,土壤中所含盐分的多寡能够影响土壤光谱的总亮度。所以,在遥感图像上可以根据地物影像色调的深浅来区分出不同程度的盐渍化土壤(图6),也可根据实测数据做出盐渍化土壤光谱曲线图(图7)。其中,非盐渍土表层土壤含盐量为0~15 g/kg,轻度盐渍土表层土壤含盐量为15~45 g/kg,中度盐渍土表层土壤

表 1 部分盐渍地样本在 1415nm 附近的光谱曲线特征及吸收特征参数

Tab.1 Spectral curve characteristic and parameter of absorption in part of saline soil samples around 1415 nm

样本	波谷波长位置/nm	波谷点反射值	波谷宽度/nm	波谷深度	波谷面积	波谷斜率	波谷对称度	波谷 SAI
1	1412	0.462	144	0.015	2.564677	0.000104	0.729167	-3.61688
2	1416	0.395	135	0.067	2.264271	0.000074	0.696296	-2.36203
3	1413	0.481	110	0.015	1.902577	0.000100	0.700000	-1.46778
4	1415	0.428	361	0.017	3.699675	0.000053	0.761773	-14.9533
5	1413	0.414	158	0.013	1.770384	0.000089	0.797468	-4.28502
6	1413	0.388	223	0.014	2.677252	0.000085	0.856502	-9.84278
7	1415	0.365	354	0.013	4.074390	0.000031	0.822034	-9.60548
8	1412	0.423	114	0.009	1.649653	0.000061	0.684211	-0.84870
9	1413	0.381	94	0.010	1.229690	0.000074	0.638298	-0.69029
10	1413	0.437	314	0.020	4.860862	0.000054	0.783439	-11.1396
11	1446	0.376	364	0.037	12.93368	-0.000027	0.670330	10.76064

表 2 部分盐渍地样本在 1920nm 附近的光谱曲线特征及吸收特征参数

Tab.2 Spectral curve characteristic and parameter of absorption in part of saline soil samples around 1920nm

样本	波谷波长位置/nm	波谷点反射值	波谷宽度/nm	波谷深度	波谷面积	波谷斜率	波谷对称度	波谷 SAI
1	1919	0.469	311	0.045	13.12437	0.000080	0.707395	-15.4414
2	1915	0.399	271	0.032	10.85579	0.000089	0.811808	-15.1654
3	1913	0.491	305	0.051	10.3688	0.000095	0.721311	-16.8758
4	1936	0.423	302	0.043	12.32946	0.000060	0.645695	-11.7210
5	1914	0.432	273	0.030	8.495211	0.000103	0.820513	-16.5764
6	1940	0.391	277	0.046	13.26953	0.000079	0.707581	-14.4297
7	1930	0.358	303	0.034	11.12588	0.000023	0.663366	-4.81844
8	1920	0.424	330	0.030	11.1778	0.000052	0.663636	-12.1297
9	1919	0.390	323	0.023	9.79384	0.000050	0.678019	-12.1564
10	1942	0.398	311	0.079	19.24262	0.000032	0.607717	-6.60302
11	1945	0.260	316	0.129	40.87713	-0.000076	0.632911	30.62692

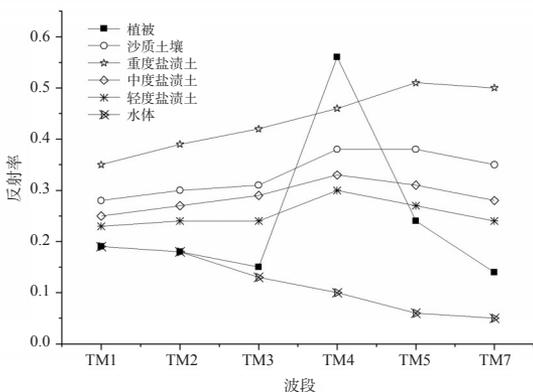


图 6 典型地物波谱响应曲线图

Fig.6 Spectral response curve of typical objects

含盐量为 45 ~ 75 g/kg, 重度盐渍土表层土壤含盐量  $\geq 75\text{g/kg}$ 。虽然受土壤含盐量的影响, 反射率曲线形态各不相同, 但仍然存在一些共同性质, 如图 8 所示:

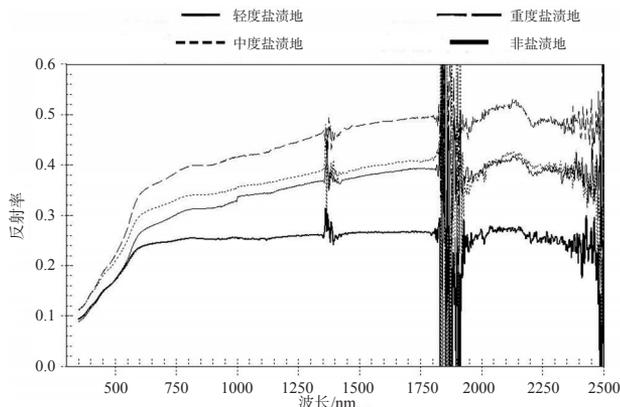


图 7 盐渍化土壤光谱曲线图

Fig.7 Spectral curve of soil salinization

(1) 盐渍化土壤的光谱曲线总体上变化比较平缓, 而且多数土壤的光谱反射率在可见光部分不太高, 光谱特征形态上很相似, 基本平行。许多波段间具有良好的正相关性, 一般在较短波段反射率高

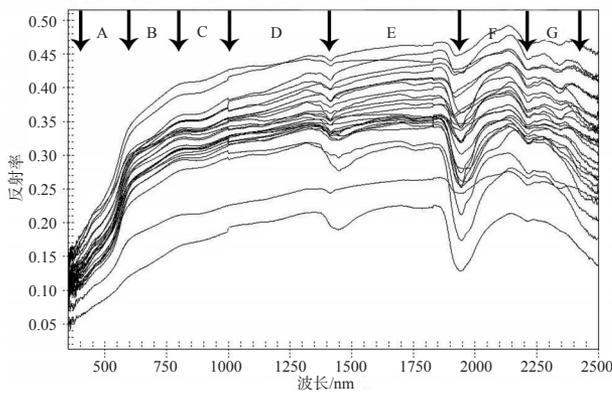


图8 盐渍化土壤的光谱反射率曲线与部分特征点分布  
Fig.8 Salt-affected soil spectral reflectance curve and some characteristics of distribution

时,较长波段也具有高反射率。不同含盐量土壤样本的光谱差别主要有2个:①不同程度的盐渍土在光谱反射率强度上的不同;②对于不同程度的盐渍土类型,一些特征吸收带的出现位置和表现的相对强度不同。

(2) 以 1400 nm 水吸收带为界,在 350~1400 nm 间的光谱反射率随波增加具有单调上升的趋势,而在 1400~1900 nm 间,土壤的光谱反射率曲线变化平缓,1900~2100 nm 间,土壤的光谱曲线随波长增加单调上升,2100~2500 nm 间则呈递减趋势。在 400~1400 nm 间,土壤样本的光谱反射率

大多能由 3 个折线段和一些特征吸收带来表示。

(3) 在 1400~1900 nm 两个水汽吸收带之间,光谱曲线的变化平缓,基本上为一条水平的直线,可用 1650 nm 来控制。1950 nm 处光谱曲线呈现明显的“V”字型。

(4) 在 1900~2100 nm 之间,土壤的光谱曲线变化平缓,为单调递增的,2100~2500 nm 间,光谱曲线的总体趋势递减,在 2200 nm 和 2300 nm 有较弱的水分吸收带,光谱的总体趋势可以由 2150 nm 和 2500 nm 间的连线段来表示,大多数土壤的光谱曲线随波长增加递减。因此,在可见光-近红外-短波红外波段土壤的光谱反射率曲线的形状大致可由 7 个折线段 (350→600→800→1000→1350→1900→2100→2500 nm, 分别对应图 8 中的 A~G) 和 6 个吸收深度 (560 nm、900 nm、1420 nm、1950 nm、2200 nm 和 2340 nm) 来大致控制。

参照刘伟东<sup>[25]</sup>提出的方法,本文选择了一些特征点并设计一些特征参数描述光谱的形状特征:①特征位置的反射率,如:  $R_{400}$ 、 $R_{600}$ 、 $R_{800}$ 、 $R_{1000}$ 、 $R_{1300}$ 、 $R_{1800}$ 、 $R_{2140}$ 、 $R_{2400}$  等;②特征光谱段的趋势斜率,如 SA、SB、SC、SD、SE、SF、SG 等,计算方法如下:

$$S = (R_i - R_j) / (\lambda_i - \lambda_j) \quad (5)$$

表 3 盐渍化土壤光谱曲线控制点的特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of control points of spectrum curve

土样	$R_{400}$	$R_{600}$	$R_{800}$	$R_{1000}$	$R_{1300}$	$R_{1800}$	$R_{2140}$	$R_{2400}$	SA ×100	SB ×100	SC ×100	SD ×100	SE ×100	SF ×100	SG ×100
soil1	0.121	0.292	0.358	0.385	0.418	0.451	0.478	0.438	0.086	0.033	0.014	0.011	0.011	0.029	-0.015
soil2	0.103	0.252	0.304	0.322	0.345	0.365	0.389	0.366	0.075	0.026	0.009	0.008	0.007	0.016	-0.006
soil3	0.121	0.279	0.334	0.356	0.385	0.414	0.437	0.406	0.079	0.028	0.011	0.010	0.010	0.023	-0.010
soil4	0.109	0.269	0.325	0.340	0.358	0.375	0.388	0.352	0.080	0.028	0.008	0.006	0.006	0.024	-0.012
soil5	0.126	0.290	0.340	0.358	0.387	0.416	0.438	0.409	0.082	0.025	0.009	0.010	0.010	0.017	-0.008
soil6	0.156	0.291	0.330	0.347	0.374	0.394	0.405	0.372	0.068	0.020	0.008	0.009	0.007	0.032	-0.020
soil7	0.104	0.242	0.286	0.301	0.324	0.346	0.364	0.329	0.069	0.022	0.008	0.008	0.007	0.021	-0.010
soil8	0.113	0.252	0.308	0.325	0.340	0.351	0.347	0.289	0.070	0.028	0.009	0.005	0.004	0.035	-0.023
soil9	0.103	0.238	0.290	0.309	0.332	0.351	0.370	0.337	0.068	0.026	0.010	0.008	0.006	0.028	-0.012
soil10	0.139	0.259	0.307	0.326	0.347	0.353	0.356	0.313	0.060	0.024	0.010	0.007	0.002	0.042	-0.024
soil11	0.133	0.296	0.350	0.372	0.399	0.434	0.458	0.434	0.082	0.027	0.011	0.009	0.012	0.018	-0.005
soil12	0.084	0.176	0.211	0.226	0.248	0.264	0.276	0.254	0.046	0.018	0.008	0.007	0.005	0.017	-0.010
soil13	0.166	0.329	0.387	0.411	0.444	0.462	0.491	0.469	0.082	0.029	0.012	0.011	0.006	0.022	-0.006
soil14	0.130	0.259	0.308	0.328	0.344	0.343	0.343	0.299	0.065	0.025	0.010	0.005	0.000	0.045	-0.023
soil15	0.113	0.227	0.277	0.297	0.317	0.310	0.281	0.218	0.057	0.025	0.010	0.007	-0.002	0.056	-0.040
soil16	0.128	0.265	0.307	0.322	0.338	0.349	0.345	0.286	0.069	0.021	0.008	0.005	0.004	0.049	-0.025
soil17	0.127	0.255	0.303	0.323	0.344	0.352	0.368	0.336	0.064	0.024	0.010	0.007	0.003	0.023	-0.014
soil18	0.130	0.260	0.303	0.321	0.345	0.362	0.383	0.356	0.065	0.022	0.009	0.008	0.006	0.017	-0.009
soil19	0.122	0.285	0.348	0.371	0.395	0.407	0.416	0.366	0.082	0.032	0.012	0.008	0.004	0.038	-0.021
soil20	0.170	0.343	0.405	0.426	0.442	0.438	0.455	0.428	0.087	0.031	0.011	0.005	-0.001	0.014	-0.005

式中： $S$  为斜率； $R$  为反射率； $\lambda$  为波长(下同)； $i, j$  表示波段号， $i > j$ 。从图 8 中可以看出，这些参数基本控制了光谱曲线的形状特征和吸收带特征。此处主要计算了 400 ~ 600 nm、600 ~ 800 nm、800 ~ 1000 nm、1000 ~ 1300 nm、1500 ~ 1800 nm、1950 ~ 2140 nm、2250 ~ 2400 nm 的斜率，分别对应于  $SA$ 、 $SB$ 、 $SC$ 、 $SD$ 、 $SE$ 、 $SF$ 、 $SG$ 。

表 3 列出了选取的盐渍化土壤反射光谱曲线的形状特征点的分析参数，由特征位置的反射率连成的曲线能够大致描述土壤的光谱反射率曲线形状(图 9)，盐渍化土壤样本 1(soil1)的反射光谱曲线与该光谱特征位置点的特征参数曲线，除了明显的吸收峰外，两条曲线均能较好地吻合，特征参数曲线可以大致描述土壤反射光谱曲线的形状特征。表 3 中，不同土壤的反射光谱曲线的特征参数基本都不一样，说明选取的土壤反射光谱特征点的特征参数在简化了光谱数据的同时，在区分认识盐渍化土壤反射光谱曲线方面具有重要意义。

#### 4.3 盐渍化土壤盐分因子与野外光谱关系研究

当干旱、半干旱区植被覆盖度低于 25% ~ 35% 时<sup>[26]</sup>，土壤的光谱特征差别明显，利用遥感、土壤光谱数据与土壤盐分分析数据相结合进行土壤盐渍化监测是最为有效的方法之一。作者在对野外光谱数据进行预处理的基础上，将进一步探讨盐渍化土壤盐分因子与野外光谱(预处理后)之间的关系，并建立模型。尝试利用土壤光谱信息推断渭-库绿洲土壤盐渍化状况。

##### 4.3.1 盐分因子与盐渍地光谱的相关分析

对 2010 年 10 月份 53 个样品的 1583 个变量 1569 个光谱波(350 ~ 2500 nm，剔除了一些水分影响较大的波段)与 14 个盐分因子( $EC$ 、含盐量、 $TDS$ 、 $pH$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Cl^-/SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ 、 $(Na^+ + K^+)/(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ )进行两两间相关分析，14 个盐分因子与 1569 个光谱波段之间的相关性(Pearson 相关系数)结果分析如下：

(1) 在 0.01 置信度水平下，含盐量(salt content)与 350 nm ~ 1000 nm、1481 ~ 1658 nm、1659 ~ 1779 nm、2071 nm、2075 ~ 2076 nm、2095 ~ 2098 nm、2126 ~ 2128 nm、2131 ~ 2165 nm、2167 ~ 2168 nm、2171 nm、2174 ~ 2330 nm 显著相关；在 0.05 置信度水平下，含盐量(salt content)与 1001 ~ 1329 nm、2041 ~ 2070 nm、2072 ~ 2074 nm、2077 ~ 2094 nm、2099 ~ 2125 nm、2129 ~ 2130 nm、2166 nm、2169 ~

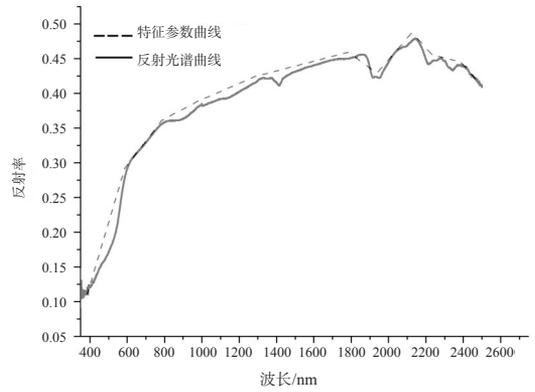


图 9 盐渍化土壤样本 1 的光谱反射曲线和特征参数曲线  
Fig.9 The spectral reflectance and characteristic parameters curves of salt-affected soil sampling 1

2170 nm、2172 ~ 2173 nm 显著相关；

(2) 在 0.01 置信度水平下， $TDS$  与 350 ~ 1000 nm、1182 nm、1189 ~ 1193 nm、1195 ~ 1225 nm、1228 ~ 1233 nm、1239 ~ 1240 nm、1242 ~ 1250 nm、1252 nm、1254 ~ 1265 nm、1267 ~ 1278 nm、1280 nm、1285 ~ 1291 nm、1297 nm、1299 nm、1302 ~ 2054 nm、2070 ~ 2077 nm、2095 ~ 2099 nm、2104 ~ 2109 nm、2114 ~ 2117 nm、2119 ~ 2120 nm、2125 ~ 2330 nm 显著相关。在 0.05 置信度水平下， $TDS$  与 1001 ~ 1163 nm、1164 ~ 1181 nm、1183 ~ 1188 nm、1194 nm、1226 ~ 1227 nm、1234 ~ 1238 nm、1241 nm、1251 nm、1253 nm、1266 nm、1279 nm、1281 ~ 1284 nm、1292 ~ 1296 nm、1298 nm、1300 ~ 1301 nm、2055 ~ 2069 nm、2078 ~ 2094 nm、2100 ~ 2103 nm、2110 ~ 2113 nm、2118 nm、2121 ~ 2124 nm 显著相关。

(3) 在 0.01 置信度水平下， $EC$  与 351 ~ 355 nm、357 ~ 358 nm、361 nm、363 ~ 753 nm、756 nm 显著相关。在 0.05 置信度水平下， $EC$  与 350 nm、356 nm、359 ~ 360 nm、362 nm、754 ~ 755 nm、757 ~ 2330 nm 显著相关。

(4)  $pH$  值与 350 ~ 1329 nm、1481 ~ 1779 nm、2041 ~ 2330 nm 不相关。

(5)  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $Cl^-/SO_4^{2-}$ 、 $(K^+ + Na^+)/ (Ca^{2+} + Mg^{2+})$  与 350 ~ 1329 nm、1481 ~ 1779 nm、2041 ~ 2330 nm 不相关。

(6)  $HCO_3^-$  与 350 ~ 666 nm、668 ~ 671 nm、677 ~ 678 nm、687 ~ 688 nm、692 ~ 1000 nm 不相关。在 0.05 置信度水平下， $HCO_3^-$  与 667 nm、672 ~ 676 nm、679 ~ 686 nm、689 ~ 691 nm、1001 ~ 2330 nm 显著负

相关。

(7)  $\text{SO}_4^{2-}$ 与2041~2111 nm不相关。在0.01置信度水平下, $\text{SO}_4^{2-}$ 与350~731 nm显著相关。在0.05置信度水平下, $\text{SO}_4^{2-}$ 与732~1779 nm、2112~2330 nm显著相关。

(8) 在0.01置信度水平下, $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ 与350~1329 nm、1481~1779 nm、2041~2330 nm显著负相关。

通过上述分析绘制出盐分因子与光谱反射率在不同置信度水平下的相关系数图(图10)。

从图10中发现14个盐分因子中,含盐量、TDS、EC、 $\text{SO}_4^{2-}$ 在0.01和0.05置信度水平下与原始

光谱数据均具有相关性,含盐量的相关系数最高值达到0.43左右,TDS的相关系数最高值达到0.44左右,EC的相关系数最高值达到0.4左右, $\text{SO}_4^{2-}$ 的相关系数最高值也到0.4左右。而 $\text{HCO}_3^-$ 在0.05置信度水平下与光谱数据有相关性,最高值达到-0.31左右, $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ 在0.01置信度水平下与光谱数据有相关性,最高值达到-0.55左右。除了这些盐分因子外,pH、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 、 $(\text{K}^++\text{Na}^+)/(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与光谱数据均没有相关性,说明原始光谱数据只与部分盐分因子有着直接密切内在关系,这为后续建立盐分因子定量模型打下基础。

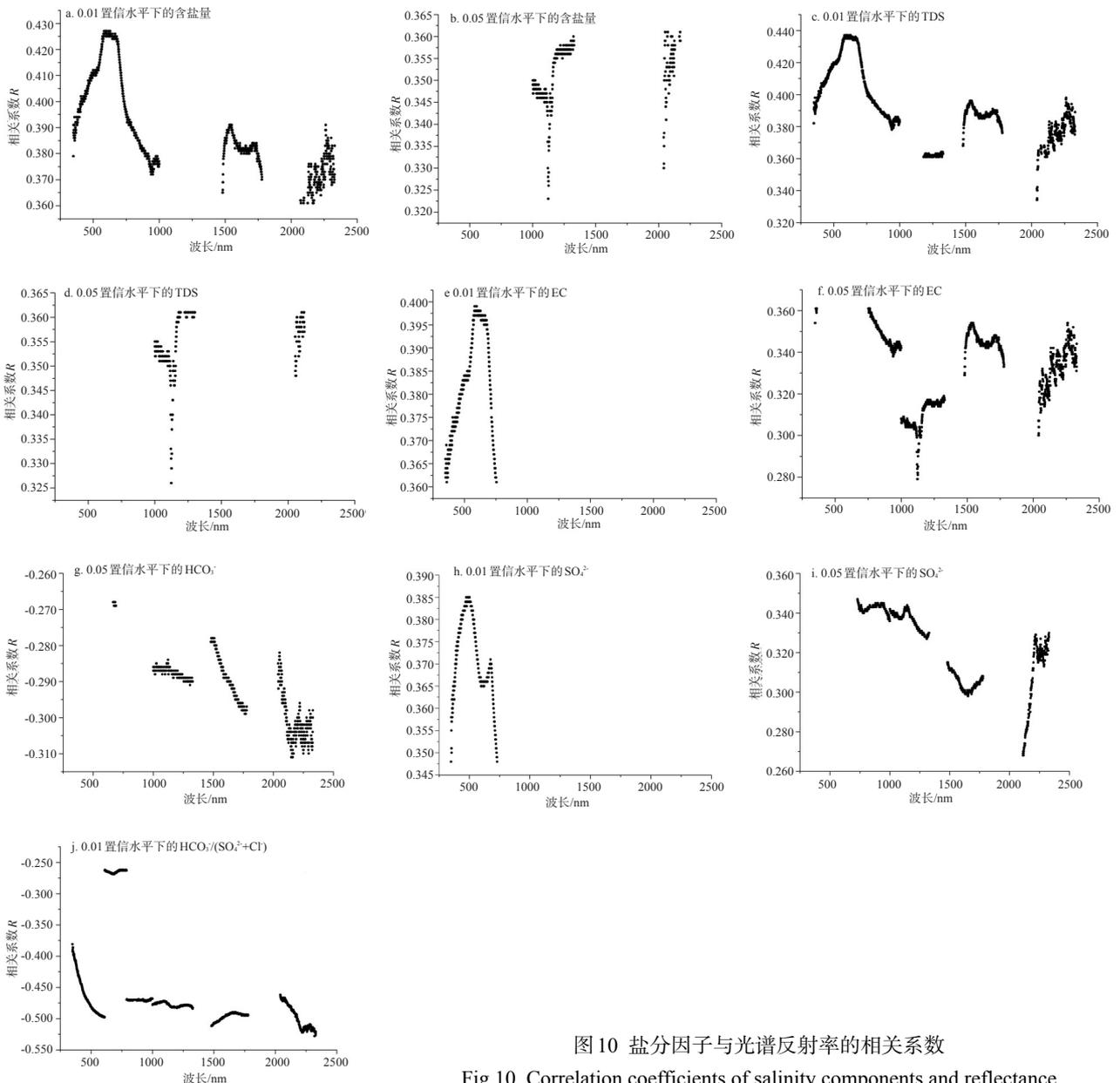


图10 盐分因子与光谱反射率的相关系数

Fig.10 Correlation coefficients of salinity components and reflectance

### 4.3.2 多元线性回归分析

由于土壤含盐量的大小可以反映盐渍化的程度,电导率是国际上通用的评价土壤盐渍化程度的指标之一。总溶解固体含量(Total Dissolved Solids, TDS)与土壤盐渍化的形成和发展关系十分密切。TDS愈大,土壤盐渍化愈重,反之愈轻。研究区盐渍化土壤盐分多以氯化物、硫酸盐为主。所以选用含盐量、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TDS、EC 指标具有一定的代表性。首先,将其指标作为因变量,在 0.05 置信度水平下与之相关的光谱波段作为自变量;然后,利用 SPSS 软件进行后向多元线性回归分析(Backward multiple linear regression),回归分析结果见表 4。

模型中: $R_{1021\text{nm}}$ 代表波长 1021nm 的反射率,其余雷同。利用表中的模型进行含盐量、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TDS、EC 回归预测,模型预测值与 53 个样品实际观测值之间都有较强的正相关,含盐量的相关系数 R 最小,为 0.746。而电导率的相关系数 R 最大,为 0.933。这说明在 0.05 置信度水平下,EC 与光谱波段之间的关系最为显著,用原始光谱数据就可以更好的来反演 EC。由于所选择的光谱数据为原数据,所以,在计算 14 个盐分因子与 1569 个光谱波段(350 ~ 1329 nm、1481 ~ 1779 nm、2041 ~ 2330 nm)之间的 Pearson 相关系数时发现,除了少数盐分因

子外,它们之间的相关性并不显著。所以,除了直接对反射率进行分析以外,还应采用以下光谱变换形式:去包络线、反射率的倒数、反射率对数的倒数、反射率的一阶微分、反射率对数的一阶微分、平方根的一阶微分、倒数的二阶微分、对数的倒数的二阶微分、反射率的对数、反射率的平方根、反射率倒数的一阶微分、对数的倒数的一阶微分、反射率的二阶微分、反射率对数的二阶微分、平方根的二阶微分等来与盐渍化土壤盐分因子建立模型。

## 5 结论与讨论

(1) 通过光谱数据的预处理可以消除噪声并突出地物光谱的某些细微差别。采用的平滑方法有相邻平均法(Adjacent Averaging)、Savitzky-Golay 滤波器平滑、FFT 滤波器平滑、Percentile Filter 平滑以及移动平均法。通过比较分析后,发现除了 FFT 滤波器和移动平均法平滑效果不是很理想外,其余的效果都比较好。光谱曲线经过处理后,曲线变得平滑,由此得到的新的光谱曲线是旧光谱曲线的总体趋势线。

(2) 对盐渍化土壤光谱曲线进行了特征分析,发现在可见光-短波近红外波段土壤的光谱反射率

表 4 回归分析结果

Tab.4 The result of backward multiple linear regression

指标	回归模型	相关系数
含盐量 (g/kg)	$6.3 + 388.7R_{1021\text{nm}} + 1017.9R_{1100\text{nm}} - 3833.5R_{1124\text{nm}} - 598.6R_{1129\text{nm}} + 2838.2R_{1142\text{nm}} + 384.3R_{1329\text{nm}} - 2279.0R_{2042\text{nm}} + 2836.5R_{2052\text{nm}} - 324.9R_{2055\text{nm}} + 1268.5R_{2057\text{nm}} - 549.3R_{2059\text{nm}} - 3101.7R_{2063\text{nm}} + 1735.9R_{2066\text{nm}} + 2496.6R_{2068\text{nm}} - 2114.4R_{2078\text{nm}} - 1429.9R_{2083\text{nm}} + 625.6R_{2093\text{nm}} - 823.2R_{2099\text{nm}} + 3793.0R_{2104\text{nm}} + 453.2R_{2111\text{nm}} - 924.6R_{2119\text{nm}} - 2622.1R_{2125\text{nm}} - 1040.1R_{2166\text{nm}} + 706.1R_{2170\text{nm}} + 1192.5R_{2173\text{nm}}$	R=0.746
$\text{SO}_4^{2-}$ (g/100g)	$0.3 + 6.9R_{132\text{nm}} - 6.4R_{904\text{nm}} + 7.4R_{1010\text{nm}} - 15.6R_{1126\text{nm}} + 6.7R_{1313\text{nm}} + 3.3R_{1486\text{nm}} - 2.9R_{1673\text{nm}} + 2.8R_{1773\text{nm}} - 14.8R_{2117\text{nm}} + 16.4R_{2163\text{nm}} - 11.5R_{2174\text{nm}} - 11.7R_{2197\text{nm}} + 6.0R_{2213\text{nm}} + 8.0R_{2217\text{nm}} - 8.7R_{2222\text{nm}} - 9.9R_{2230\text{nm}} - 18.2R_{2253\text{nm}} + 22.2R_{2258\text{nm}} + 3.1R_{2261\text{nm}} - 8.3R_{2271\text{nm}} + 2.9R_{2276\text{nm}} + 4.9R_{2282\text{nm}} + 6.4R_{2286\text{nm}} + 8.8R_{2290\text{nm}} - 17.0R_{2296\text{nm}} + 17.9R_{2300\text{nm}} - 16.3R_{2307\text{nm}} + 10.4R_{2312\text{nm}} + 14.8R_{2316\text{nm}} - 17.3R_{2318\text{nm}} + 10.1R_{2320\text{nm}} - 22.0R_{2322\text{nm}} + 4.5R_{2324\text{nm}} + 4.2R_{2326\text{nm}} + 6.5R_{2330\text{nm}}$	R=0.908
TDS (mg/L)	$-11710.8 + 4.6 \times 10^5 R_{1021\text{nm}} + 1.7 \times 10^6 R_{1124\text{nm}} - 1.5 \times 10^6 R_{1129\text{nm}} - 9.5 \times 10^6 R_{1132\text{nm}} + 7.6 \times 10^6 R_{1140\text{nm}} + 1.7 \times 10^6 R_{1183\text{nm}} + 3.2 \times 10^6 R_{2055\text{nm}} - 2.5 \times 10^6 R_{2057\text{nm}} + 5.2 \times 10^6 R_{2059\text{nm}} - 9.5 \times 10^6 R_{2061\text{nm}} + 4.5 \times 10^6 R_{2064\text{nm}} + 4.5 \times 10^5 R_{2067\text{nm}} + 3.2 \times 10^6 R_{2069\text{nm}} - 5.7 \times 10^6 R_{2078\text{nm}} + 1.3 \times 10^6 R_{2083\text{nm}} - 7.3 \times 10^5 R_{2086\text{nm}} - 1.1 \times 10^6 R_{2093\text{nm}} - 2.7 \times 10^6 R_{2100\text{nm}} + 1.7 \times 10^6 R_{2103\text{nm}} - 4.4 \times 10^5 R_{2110\text{nm}} - 4.2 \times 10^5 R_{2113\text{nm}} + 5.7 \times 10^6 R_{2118\text{nm}} - 2.1 \times 10^6 R_{2124\text{nm}}$	R=0.798
EC (/ms/cm)	$43.3 - 2545.0R_{350\text{nm}} - 8263.2R_{356\text{nm}} + 4368.9R_{360\text{nm}} + 7286.4R_{362\text{nm}} + 884.4R_{755\text{nm}} - 9543.0R_{926\text{nm}} + 8856.4R_{935\text{nm}} + 3475.4R_{1005\text{nm}} - 2806.1R_{1124\text{nm}} - 923.3R_{1481\text{nm}} - 2566.7R_{1707\text{nm}} - 3054.4R_{2042\text{nm}} + 403.5R_{2052\text{nm}} + 2569.7R_{2056\text{nm}} + 745.1R_{2059\text{nm}} - 7553.5R_{2063\text{nm}} + 9646.5R_{2069\text{nm}} - 1695.959R_{2074\text{nm}} - 1453.8R_{2085\text{nm}} + 2987.5R_{2099\text{nm}} - 5715.4R_{2170\text{nm}} + 9091.7R_{2199\text{nm}} - 5374.8R_{2219\text{nm}} - 5658.0R_{2226\text{nm}} + 589.6R_{2241\text{nm}} - 3463.2R_{2257\text{nm}} - 1044.7R_{2261\text{nm}} + 3856.9R_{2265\text{nm}} + 754.5R_{2269\text{nm}} + 5711.546R_{2272\text{nm}} + 2986.2R_{2278\text{nm}} + 3942.0R_{2282\text{nm}} + 2136.9R_{2298\text{nm}} - 1545.3R_{2300\text{nm}} - 987.5R_{2304\text{nm}} - 839.6R_{2309\text{nm}} - 5181.5R_{2313\text{nm}} - 1435.6R_{2317\text{nm}} + 2091.1R_{2323\text{nm}} + 3153.5R_{2325\text{nm}} - 3256.9R_{2330\text{nm}}$	R=0.933

曲线的形状大致可由7个折线段(350 nm→600 nm→800 nm→1000 nm→1350 nm→1900 nm→2100 nm→2500 nm)和6个吸收深度(560 nm、900 nm、1420 nm、1950 nm、2200 nm和2340 nm)来大致控制。另外,不同盐渍化土壤的反射光谱曲线的特征参数基本都不一样,说明选取的土壤反射光谱特征点的特征参数在简化了光谱数据的同时,在区分认识土壤反射光谱曲线方面具有重要意义。

(3) 利用土壤光谱数据推断渭-库绿洲土壤盐渍化状况。探讨盐渍化土壤盐分因子与光谱反射率之间的关系,并通过多元线性回归分析建立了具有代表性盐分因子的模型:含盐量模型相关系数 $R$ 为0.746, $SO_4^{2-}$ 模型相关系数 $R$ 为0.908,TDS模型相关系数 $R$ 为0.798,EC模型相关系数 $R$ 为0.933。反演效果比较理想。要更好的探讨光谱测量数据与盐渍化土壤盐分因子的关系需要进行大量的地面光谱测量。由于地面光谱测量结果受到环境因素(时间、季节、天气、太阳入射角等)的影响,所以构建一个反映盐分因子的最佳模型并不是一项简单的任务。

总之,地物光谱研究是遥感理论研究和应用研究的基础。此次研究是一个开始,在今后将采用可见/近红外光谱技术,寻找出各种光谱变换形式对于盐渍化土壤盐分因子最为敏感的波段,建立基于单个敏感波段的数学模型以便更准确反演盐渍地理化特征。本文对研究区盐渍化土壤进行定量的研究,相信对研究区,乃至干旱区的各种遥感研究有所帮助。地物光谱研究与实验基础研究的结合,即宏观和微观研究的结合,将是未来遥感研究的热门领域。各种光谱分析技术将会得到广泛应用,并且实验研究将会作为光谱研究的基础应用其中。深入广泛的开展地物光谱研究和实验基础研究能对盐渍地地物机理研究工作产生一些有益的影响。

## 参考文献

- [1] 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. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 28-32.
- [2] 刘传胜,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽. 基于遥感与GIS的于田绿洲土地覆盖动态研究. 中国沙漠, 2003, 23(1): 59-63.
- [3] 郗金标,张福锁,毛达如,等. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源. 土壤通报, 2005, 36(3): 299-303.
- [4] 王宏,塔西甫拉提·特依拜,谢霞,等. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型的土壤盐渍化敏感性评价. 地理科学进展, 2011, 30(5): 593-599.
- [5] 关元秀,刘高焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述. 遥感技术与应用, 2001, 16(1): 40-44.
- [6] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near-infrared spectral features of salt crusts formed from different brines. *Annali di Chimica*, 2004, 94(4): 315-323.
- [7] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3): 406-417.
- [8] Ben-Dor E, Patkin K, Banin A, et al. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data: A case study over clayey soils in Israel. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(6): 1043-1062.
- [9] 刘庆生,刘高焕,励惠国. 辽河三角洲土壤盐分与上覆植被野外光谱关系初探. 中国农学通报, 2004, 20(4): 274-278.
- [10] 樊彦国,侯春玲,朱浩,等. 基于BP神经网络的盐渍土盐分遥感反演模型研究. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 24-28.
- [11] 马诺,杨辽,李均力. 焉耆盆地土壤盐渍化的光谱特征分析. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 114-117.
- [12] 张芳,熊黑钢,栾福明,等. 土壤碱化的实测光谱响应特征. 红外与毫米波学报, 2011, 30(1): 55-60.
- [13] 翁永玲,戚浩平,方洪宾,等. 基于PLSR方法的青海茶卡-共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演. 土壤学报, 2010, 47(6): 1255-1263.
- [14] 胡顺军,宋郁东,田长彦,等. 渭干河平原绿洲适宜规模. 中国科学: D辑, 2006, 36(增刊II): 51-57.
- [15] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 53.
- [16] 蒲智. 干旱区盐碱土盐分含量的高光谱定量反演: 以三工河流域为例[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2010.
- [17] Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral analysis. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(2): 170-183.
- [18] Cloutis E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2215-2242.
- [19] 许卫东,尹球,匡定波. 地物光谱匹配模型比较研究. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 296-300.
- [20] 周萍,王润生,阎柏琨,等. 高光谱遥感土壤有机质信息

- 提取研究. 地理科学进展, 2008, 27(5): 27-34.
- [21] 王晋年, 张兵, 刘建贵, 等. 以地物识别和分类为目标的高光谱数据挖掘. 中国图象图形学报, 1999, 4(11): 957-964.
- [22] 王晋年, 郑兰芬, 童庆禧. 成像光谱图像吸收鉴别模型与矿物填图研究. 环境遥感, 1996, 11(1): 20-31.
- [23] 郑兰芬, 王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取分析研究. 环境遥感, 1992, 7(1): 49-58.
- [24] 苏红军, 杜培军, 盛业华. 高光谱遥感数据光谱特征提取算法与分类研究. 计算机应用研究, 2008, 25(2): 390-394.
- [25] 刘伟东. 高光谱遥感土壤信息提取与挖掘研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [26] Karavanova E I, Shrestha D P, Orlov D S. Application of remote sensing techniques for the study of soil salinity in semi-arid Uzbekistan//Bridges E M, Hannam I D, Oldeman L R, et al. Response to Land Degradation. New Delhi, India: Oxford & IBH Publishing Co.Pvt.Ltd., 2001.

## The Study on the Reflectance Spectral Characteristic of Salt-Affected Soil in Typical Oasis of the Middle Reaches of Tarim River

ZHANG Fei<sup>1,2</sup>, TASHPOLAT Tiyip<sup>1,2</sup>, DING Jianli<sup>1,2</sup>, MAMAT Sawut<sup>1,2</sup>, HAN Guihong<sup>1,2</sup>,  
GUI Dongwei<sup>3,4</sup>, SUN Qian<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Xinjiang 830011, China;

4. Cele National Station of Observation & Research for Desert-Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele 848300, China)

**Abstract:** With the economic development and the population increase, unreasonable land development has caused ecological problems such as degradation, while soil salinization becomes a major concern in arid and semi-arid areas. It is a basic work to study the spectrum characteristics of soil salinization by using remote sensing technology to achieve the monitoring and evaluation of soil salinization at regional scale, and to establish the relationship between ground data and remote sensing data. In this paper, the author takes the delta oasis of Weigan and Kuqa rivers located in the middle reaches of Tarim River as study areas by using spectroscopy technology and multivariate analysis technology method. This paper studies the correlations between salt-affected soil chemical properties and reflectance spectrum in the middle reaches of Tarim River. Firstly, ASD spectrometer was used to measure spectral data in surface features. The spectral data should be removed from the equipment itself and the external conditions such as noise. Aiming at this experimental application study, we chose appropriate methods from the existing spectral matching processing technologies such as spectral absorption index. Secondly, the paper focused on retrieving soil chemical characteristic parameters (including ions, electricity conductivity, salt content, pH, TDS) from the hyperspectral data. By using single-correlation analysis, the quantifying regression models between salinized soil reflectance and soil ions, electricity conductivity, salinity, pH, TDS were established. It is shown that the correlation coefficient of salt content is 0.746, of sulfate ion is 0.908, of total dissolved solid is 0.798 and of electricity conductivity is 0.933. The result achieved a good effect. To sum up, the result of this research will produce a significant meaning for the research on the saline-alkali soil in the arid area. Furthermore, since a large part of Xinjiang belongs to the arid area, taking the delta oasis of Weigan and Kuqa rivers as the study areas has realistic meanings to the environmental research in the arid area.

**Key words:** salt-affected soil; reflectance spectral characteristic; the delta oasis of Weigan and Kuqa rivers

本文引用格式:

张飞, 塔西甫拉提·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. 地理科学进展, 2012, 31(7): 921-932.