

典型盐渍化土壤偏振反射高光谱特征与模型分析

韩阳*, 徐文茹, 金伦

(东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要:盐渍化土壤不仅对农业生产产生巨大的威胁,而且对生态环境也构成了巨大的破坏.本文以吉林省西部盐渍化土壤为例,将遥感信息中的偏振信息和高光谱信息相结合,通过对吉林省西部盐渍化土壤光谱特征的获取,选择合适的波段,建立普适的模型,并进行科学验证.研究表明,盐渍化土壤的偏振高光谱信息与其理化属性参数具有一定的相关关系,并具有规律性,尤其是土壤线模型,利用土壤线进行建模,可以预测土壤的盐碱化程度.

关键词:盐渍化土壤;偏振;高光谱;吉林省西部

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

Study on the polarized reflectance hyperspectral characteristics and models of typical saline soil

HAN Yang*, XU Wen-Ru, JIN Lun

(School of Geography Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Saline soil cause great damage not only to the agricultural production but also to the ecological environment. The general model for optical spectrum characteristics of the saline soil in Jilin Province was established and validated according to the polarized and hyperspectral spectral information. The results show that there is a strong relationship between the hyperspectral polarized information of saline soil and its physicochemical property parameters, especially for the soil line, from which we could calculate the soil with different of salinity.

Key words: soil salinization, polarization, hyperspectral, Western Jilin Province

PACS: 78.40.-q

引言

利用遥感技术对地球表面资源进行环境监测时,其光谱信息都会直接或间接地涉及到土壤背景的光学性质,且能反映地物本身的变化与差异.因此,作为地球表面主要地物之一的土壤,在使用遥感方法研究地表资源的分布规律及其光谱特征时,则需考虑土壤背景的光谱反射特征^[1].

高光谱遥感是目前研究地物光谱的主要遥感方法之一,得到的光谱数据分辨率高,能反映地物光谱信息的细微特征,定量分析高光谱遥感数据,诊断光谱的吸收特征,并依据其不同的光谱特征研究地物的物理化学成分,以此为依据来识别不同地物^[2].

高光谱是目前进行土壤盐渍化检测较为理想的监测手段,借助目前现有的高光谱数据对盐渍化较为严重的区域具有很好的监测效果^[3].目前,各国科学家们在研究土壤盐渍化问题中,常常使用高光谱技术进行定量或半定量地研究,能够体现其土壤特性^[4].土壤的含盐量和pH值是盐渍化土壤众多属性中比较重要的两个,高光谱技术利用其精细的光谱分辨率和连续光谱信息可以判断其属性变化,进而区分土壤是否发生了盐渍化.

偏振遥感技术目前是一种新兴的对地观测方法,在国际上倍受关注,其对地观测越来越受到世界各国科学家的重视.不同地物在经过太阳光反射后均会产生由它们自身性质决定的偏振光谱特征,

收稿日期:2014-02-08,修回日期:2015-02-05

Received date: 2014-02-08, revised date: 2015-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41301364);吉林省科技发展计划项目(20150520067JH);高等学校博士学科点专项科研基金(20120043120013)

Foundation items: Supported by National Natural Science of China (41301364), Project of Jilin Province Science and Technology Development Plan (20150520067JH), The doctoral program of Higher Education Research Fund(20120043120013)

作者简介(Biography): 韩阳(1983-), 博士,副教授,主要研究方向为偏振遥感与定量遥感

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hany025@nenu.edu.cn

Breon 等学者发现,利用 POLDER 偏振数据可以建立土壤和植被等地物的偏振反射模型^[5-6],Litvinov 等利用航空偏振平台也对地表进行了偏振测量,并归纳其所发现的偏振反射特征^[7];而 Peltoniemi 等多次对典型地物的高光谱偏振波谱进行测量,其中也包括土壤^[8]. 国内的安徽光机所乔延利、孙晓兵项目组,利用地面多波段偏振 CCD 相机系统进行了典型地物的偏振探测实验,偏振相机波长范围是 443 ~ 865 nm,工作波段 4 个,对人工目标、植被、水体等偏振特性进行了研究,特别是在可见光波段系统研究了土壤湿度的多角度多波段偏振特性,建立了土壤湿度与其偏振特性的相关关系,为偏振遥感的应用奠定了基础^[9-10].

在本文中,将盐渍化土壤的偏振高光谱信息作为重要研究对象,结合多元统计学与光谱学技术,建立吉林省西部盐渍化土壤偏振高光谱信息与其属性信息(盐度、pH 值和电导率)的定量模型,分析盐渍化土壤的偏振高光谱特征,以此来判断并评价土壤盐渍化程度.

1 实验与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在吉林省西部长岭县,位于松嫩平原西南部,是吉林省土壤盐渍化的重要区域,具有一定的典型性,土壤盐渍化程度较高. 东与农安县接壤,西与内蒙古科尔沁左翼中旗毗连,南与双辽县、公主岭市交界,北与乾安、通榆、前郭县为邻. 全县研究区总面积为 5 728.4 km²,总人口 64 万人. 地理位置在 123°06'E ~ 124°45'E,43°59' ~ 44°42'N 之间. 研究区内无山脉河流,地势较为平坦,海拔 140 ~ 274 米之间,从东南到西北略呈倾斜. 全县属中温带半干旱大陆性气候,平均气温 4.9 °C,四季分明,年均降水量 472.5 mm,全年日照达 2 871.5 h,无霜期 142.7 天. 长岭县盐渍化土壤主要以苏打盐渍土为主,近年来由于该地区受到自然变化和人类活动的影响,土壤盐渍化程度有不断扩大的趋势.

1.2 数据采集

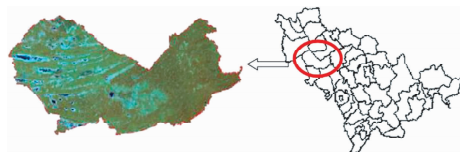


图 1 研究区示意图
Fig. 1 Study area

盐碱化土壤样本的采集时间为 2013 年 6 月,在研究区内共布点 51 个,每个样点使用 X 采样方式取土,用剖面法采集土壤表层 0 ~ 30 cm 深度的土壤,并利用 GPS 定位技术进行地理位置的记录. 将采集的盐碱化土壤进行样本制作,一分为二,一份用于光谱测量实验,另一份用于土壤属性分析.

盐渍化土壤光谱数据的采集仪器是野外便携式高光谱仪(ASD FieldSpec® 3),由美国 ASD 公司生产. 波段范围 350 ~ 2 500 nm,分辨率分别是 3 nm@350 ~ 1 000 nm 和 10nm@1 000 ~ 2 500 nm. 在此范围内可进行连续测量,视场角 25°,垂直于土壤表面 20 cm 进行测量. 在进行偏振光谱数据获取时,将偏振镜头装置在 ASD 光纤前,偏振镜头是特制的汤姆逊棱镜,偏振镜头上有 0° ~ 360° 范围的刻度,可以自由旋转. 室内光谱测量在暗室内进行,土壤样本分别放置于直径 10 cm、深 3.5 cm 的容器内,且表面用毛玻璃片刮平. 每次光谱测试前,需要对仪器进行 30 min 预热,而且光谱测试前需要进行白板定标. 对所获取的盐碱化土壤样本均采集 10 个数据,并取平均值为一个样本数据的最后结果. 采用的光谱测量平台是由东北师范大学赵云升教授研发的大型 BRDF 测试平台,人工光源是经过改进后的卤族光源,可以自行调节光源角度位置(入射角)、探测角度和方位角度,角度的改变由电机控制,可以机械或人工方式调整角度. 见图 2. 将 ASD 高光谱仪、BRDF 平台与偏振镜头进行绑定,既可以获得多角度偏振高光谱信息.

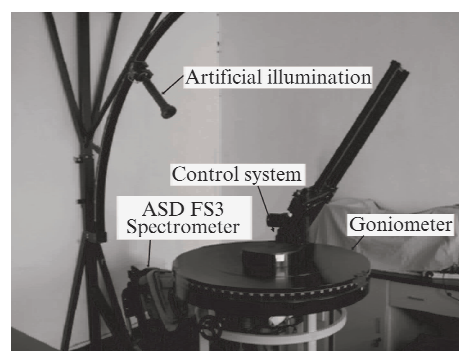


图 2 室内大型 BRDF 平台与 ASD 光谱仪
Fig. 2 Large-scale test platform BRDF and ASD spectrometer

本文在研究过程中,对土壤样本进行室内控制实验,这是由于野外采集的盐渍化土壤的盐度范围比较窄,比实际理论值范围小,因此,在实验中,本研究模拟自然条件下可能存在的各种含盐状况,用人

工方法配制了不同盐度的土壤样本,为创建具有适用性、广泛性的土壤光谱特征提供模拟实验数据.实验室内设置了不同盐度的土壤样本,实验中控制添加的盐分为硫酸钠,包括:0.02%、0.03%、0.04%、0.05%、0.07%、0.09%、0.11%、0.15%、0.32%和0.50%等10个不同盐度梯度,取值范围覆盖了野外常见的盐碱化土壤盐度范围.为了确保数据的准确性,减小系统误差,每个盐度梯度的土壤样本做5次重复实验.

野外采集的盐渍化土壤由东北师范大学“土壤地理实验室”内进行样本处理,经过自然风干、研磨、过1 mm孔径筛,使用电导仪对盐碱土壤属性进行分析与测定,包括:盐度(Salinity)、pH值和电导率(EC).

1.3 光谱数据处理与建立模型

由于外部环境背景因素、仪器因素等影响,在对盐碱土壤的偏振光谱获取过程中,盐碱土壤的偏振光谱中含有噪声.为此我们对光谱数据进行预处理,在提取光谱信息时增强了光谱的有效性和准确度,最大程度地消除噪声影响^[11].在本文中所使用的去噪方法是移动平均法,公式如下:

$$R_i' = \frac{1}{2k+1}(R_{i-k} + R_{i-k+1} + \dots + R_i + \dots + R_{i+k}), \quad (1)$$

其中, R_i' 为土壤样本第*i*点的偏振反射率均值.

在光谱数据处理方面,首先对得到的光谱反射率及其一阶微分光谱数据进行预处理,得到光谱数据特征点.文中采用了土壤线的概念来反映盐渍化土壤的光谱特征,同样可揭示土壤的物理、化学属性.土壤线的定义如下:

$$NIR = \alpha R + \beta, \quad (2)$$

其中, NIR 与 R 分别是土壤在近红外波段与可见光红光波段的图像强度或反射率.其中 α 是土壤线的斜率, β 是土壤线的截距.可见光红光波段的波段范围为650~670 nm,波段宽度20 nm,中心波段660 nm;近红外波段的波段范围为820~840 nm,波段宽度20 nm,中心波段830 nm.

同时采用SPSS13.0统计分析软件建立盐碱化土壤偏振光谱与土壤属性关系模型,对经过预处理的光谱数据与土壤属性参数的关系进行分析,并利用模型决定系数(R^2)和均方根差误差(RMSE)对模型进行检验. R^2 越大,说明模型越稳定;用均方根差误差(RMSE)评价预测模型的精度,RMSE越小,说明模型精度越高,预测能力越好^[12].

2 结果与讨论

2.1 盐碱土多角度偏振光谱曲线特征分析

图2是盐碱土样本在0°偏振状态时的高光谱反射率图,入射角度45°,探测角度为45°,方位角度180°,这与传统的垂直入射角度的高光谱反射率曲线具有相似性.尽管由于盐度不同的影响,各个土壤样本的偏振高光谱曲线各不相同,但仍然存在一些共同性质:(1)不同盐度的盐渍化土壤的偏振高光谱曲线总体上形态相似,其偏振高光谱反射率值在可见光波段范围内较低,变化比较平缓,从350~800 nm附近的可见光区域开始,光谱曲线呈现单调上升趋势,此区间内光谱曲线斜率较大.(2)800 nm波段范围之后的光谱曲线变化较为平缓,接近于1450 nm附近、1940 nm附近和2210 nm附近光谱曲线呈现出明显的反射低谷,其中1450 nm附近和1940 nm附近的反射低谷较为明显,是由于水分含量不同而造成的,而在2210 nm附近的反射低谷是由于土壤中有有机化合物等物质含量大小造成的.

盐渍化土壤样本在不同盐度条件下的偏振光谱曲线(图3),从曲线规律上我们可以发现,随着盐度的增大,盐渍化土壤光谱反射率是减小的,达到某临界值后,继续增大土壤盐度范围,反射率会随之增大.这一现象与土壤含水量光谱曲线相似,是由于1450 nm附近和1940 nm附近是水分吸收带,同时对盐分也有强烈的吸收能力,在这两个波段范围内,体现了明显的吸收谷特征.随着盐含量的增大,土壤中的水对其吸收能力逐渐饱和,由于土壤中的盐分均为白色晶体,使得盐含量的增大影响了土壤光谱的总亮度,进而其提高了其光谱反射率.因此我们可以根据色调的深浅来区别遥感影像上不同程度的盐渍化土壤.

2.2 光谱吸收特征参数提取

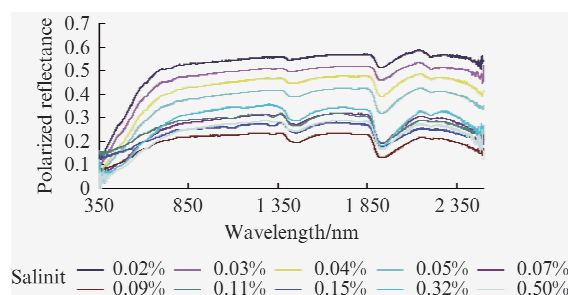


图3 350~2500 nm波段范围内不同盐度的盐渍化土壤偏振高光谱曲线

Fig. 3 Polarized reflectance with different soil salinity between 350~2500 nm

光谱曲线形态能够反映出地物的吸收与反射特性,而且典型地物具有其典型的光谱曲线波形特征. 地物光谱曲线中可以提取出光谱吸收特征,用光谱反射率(R)、波段位置(P)、宽度(W)、深度(H)、面积(A)、斜率(K)、对称度(S)等参数表示. 在对地物进行判别与分类时,可以利用光谱曲线中的形状、波峰与波谷的位置、形状、深度以及宽度等参数特征. 不同地物的光谱曲线特征由于其波峰、波谷的位置、形状、宽度和深度等不同,因此可使用以上参数对地物进行判别与分类,见图 4.

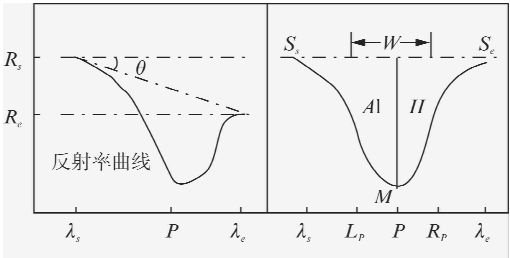


图 4 地物光谱吸收特征参数示意图^[13]
Fig.4 Curves of absorption spectrum with different parameters

在本研究中,我们采用光谱吸收指数(SAI)^[13]对光谱采集数据进行识别与光谱曲线处理,公式如下:

$$SAI = [WR_s + (1 - W)R_e]/R_m \quad , \quad (3)$$

SAI 可以从本质上表达地物光谱的变化特征^[2]. 光谱吸收特征可以由光谱吸收谷点 M 及其两个肩部组成, λ_s 、 R_s 分别为吸收左肩的波长位置和光谱反射率, λ_e 、 R_e 分别为吸收右肩的波长位置和光谱反射率, λ_m 、 R_m 为吸收谷点的波长位置和反射率,吸收波段宽度 $S = (\lambda_e - \lambda_m)/W$.

由图 3 我们发现,土壤光谱曲线中的 1 450 nm 附近和 1 940 nm 附近的光谱曲线比较特殊,呈现波谷状,其他波段位置的偏振高光谱曲线较为平缓变化. 为此,我们将实验采集的原始偏振光谱数据分别在 0°偏振和 90°偏振的状态下进行参数提取,结果见表 1、表 2.

2.3 微分光谱曲线特征分析

光谱微分技术是对反射光谱进行数学模拟和计算不同阶数的微分值,对光谱曲线弯曲点及最大、最小反射率的波长位置能够迅速准确地确定. 微分技术对光谱信噪比非常敏感,能去除噪音对目标光谱

表 1 0°偏振和 90°偏振状态下盐渍化土壤样本在 1 450 nm 附近的偏振高光谱曲线特征及吸收特征参数
Table 1 Absorption parameters of saline soil samples under 0°and 90°polarizer near the band of 1 450 nm

波谷波长 位置/nm	反射率		宽度/nm		深度		积		斜率		对称度		波谷 SAI	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1 445	0.549	0.612	134	142	0.015	0.013	2.564	2.397	0.000 104	0.000 131	0.729	0.691	-3.161	-2.989
1 456	0.498	0.523	146	147	0.076	0.078	2.265	2.223	0.000 072	0.000 081	0.697	0.704	-2.438	-2.328
1 449	0.447	0.563	112	109	0.016	0.019	1.904	2.012	0.000 100	0.000 132	0.702	0.731	-1.202	-1.319
1 461	0.388	0.548	362	349	0.017	0.019	3.689	3.923	0.000 045	0.000 049	0.761	0.749	-12.228	-12.721
1 442	0.272	0.335	159	158	0.014	0.013	1.773	1.927	0.000 098	0.000 076	0.797	0.789	-4.299	-4.919
1 448	0.196	0.263	224	223	0.013	0.012	2.672	2.781	0.000 077	0.000 078	0.876	0.812	-9.287	-8.729
1 452	0.265	0.373	95	101	0.009	0.011	2.092	1.938	0.000 085	0.000 082	0.821	0.786	-0.834	-0.779
1 464	0.237	0.259	315	308	0.020	0.022	1.763	1.923	0.000 034	0.000 031	0.684	0.692	-10.697	-10.891
1 457	0.286	0.322	117	119	0.010	0.013	1.229	1.387	0.000 061	0.000 049	0.638	0.684	-3.973	-4.128
1443	0.243	0.312	128	124	0.018	0.023	4.860	5.024	0.000 076	0.000 070	0.785	0.687	-4.283	-3.991

表 2 0°偏振和 90°偏振状态下盐渍化土壤样本在 1 940 nm 附近的偏振高光谱曲线特征及吸收特征参数
Table 2 Absorption parameters of saline soil samples under 0°and 90°polarizer near the band of 1 950 nm

波谷波长 位置/nm	反射率		宽度/nm		深度		面积		斜率		对称度		波谷 SAI	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1 951	0.516	0.562	311	298	0.045	0.032	12.132	11.323	0.000 081	0.000 076	0.707	0.813	-15.441	-14.232
1 939	0.462	0.490	297	309	0.043	0.049	10.872	12.376	0.000 090	0.000 083	0.811	0.792	-17.281	-16.991
1 931	0.392	0.492	301	322	0.051	0.053	10.346	10.762	0.000 098	0.000 078	0.732	0.774	-16.872	-15.729
1 959	0.321	0.403	328	359	0.046	0.042	12.672	13.341	0.000 060	0.000 059	0.645	0.701	-11.727	-12.593
1 941	0.192	0.289	287	299	0.030	0.032	8.389	9.782	0.000 103	0.000 012	0.823	0.698	-17.451	-16.663
1 940	0.131	0.253	249	258	0.023	0.029	13.538	15.229	0.000 079	0.000 069	0.703	0.742	-4.783	-5.803
1 934	0.194	0.359	303	331	0.079	0.059	11.128	12.828	0.000 023	0.000 032	0.664	0.782	-12.332	-10.229
1 930	0.179	0.293	330	319	0.051	0.050	11.177	10.391	0.000 045	0.000 055	0.663	0.772	-6.034	-5.304
1 942	0.181	0.243	321	312	0.034	0.044	9.792	8.292	0.000 050	0.000 067	0.677	0.645	-10.221	-9.388
1955	0.169	0.345	311	297	0.079	0.073	19.242	18.391	0.000 043	0.000 042	0.603	0.504	-9.489	18.334

特征的影响. 为了更明显地表达光谱曲线的起伏变化, 对图 3 中的偏振光谱数据进行一阶微分变换. 反射率一阶微分采用有限差分微分法^[14], 即

$$FDR(\lambda) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_i)] / (\lambda_{i+1} - \lambda_i), \quad (4)$$

式中, λ_i 是波段的波长, $R(\lambda)$ 是波长 λ 的反射率值, $FDR(\lambda)$ 为 λ_i 的一阶微分光谱. 我们发现, 经一阶微分计算后的土壤样本偏振光谱特征, 可以减少地形、光照等条件变化引起的影响, 还能增强光谱差异, 体现光谱特征, 有效地限制了噪音对土壤光谱的影响(图 5).

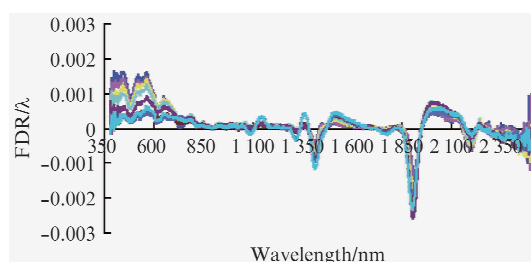


图 5 350 ~ 2 500 nm 波段范围内不同盐度范围的偏振光谱一阶微分曲线

Fig. 5 Polarized first order derivative spectral curves ($FDR(\lambda)$) with different soil salinity between 350 ~ 2500 nm

盐渍化土壤偏振高光谱数据在经过一阶微分处理后, 可以发现, 在以下五个波段位置有明显的极大值或极小值: 450 nm 附近(G1)、580 nm 附近(G2)、1 450 nm 附近(G3)、1 940 nm 附近(G4)和 2 210 nm 附近(G5). 这 5 个极值点的光谱吸收特征均显著强于其它波段范围, 尤其是 G3 和 G4 两个波段位置的极值, 极值特征尤为显著, 这是因为 1 450 nm 附近和 1 940 nm 附近是土壤光谱的水分吸收带, 由于盐分能够强烈吸收水分, 从而增强了这两个波段位置的光谱特征.

2.4 盐渍化程度对土壤线参数的影响

图 6 是不同盐渍化程度的土壤样本(1 ~ 8 号样本)在偏振状态为 0° 、探测天顶角为 0° 、探测方位角为 180° 状态下不同盐度的土壤线图像. 由图 2 可以看出, 总体上, 斜率随土壤盐渍化程度的升高而减小, 截距随土壤盐渍化程度的升高而升高, 土壤线的决定系数(R^2)的变化没有规律. 由于样品 8 的盐度过高, 土壤中的水对其吸收能力逐渐饱和, 而土壤中的盐分均为白色晶体, 使得盐分含量的增大影响了土壤光谱的总亮度, 进而影响了其光谱反射率, 从而使样品 8 的土壤线斜率变大. 通常来说, 野外真实土壤盐度一般不会超过 0.1%, 所以样品 8 我们可以

不加以考虑. 土壤的盐渍化程度与土壤线的斜率呈相关系数为 0.944 1 的线性负相关, 与土壤线的截距呈相关系数为 0.856 的线性正相关. 可利用土壤线进行建模, 预测土壤的盐碱化程度.

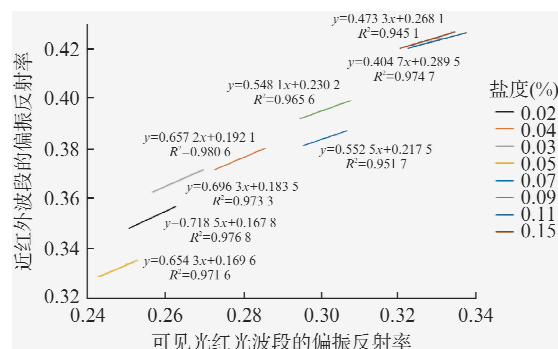


图 6 不同盐度盐渍化土壤线

Fig. 6 Soil line of the tested soil with different Salinity

2.5 土壤理化属性与偏振光谱特征的关系分析

土壤的光谱特征是由土壤本身的属性决定的, 土壤光谱反射特性综合反映土壤其他理化性状的指标^[15]. 盐度(Salinity)、pH 值和电导率(EC)都是盐渍化土壤重要的理化性能指标. 土壤盐度表示其盐分含量的大小; 土壤 pH 值主要表示土壤的酸碱度, 土壤太酸或者太碱会使作物生长受到很大影响甚至不能生长; 土壤 EC 是土壤内离子含量的总体表现, 对于盐碱地而言, 它的作用体现在作为重要的盐分指标, 可以表征土壤的盐碱化程度和发展趋势.

由上面的图 2 和图 4 可知, 1 450 nm 附近(G3)和 1 940 nm 附近(G4)的光谱极值点位置特征较其它波段尤为明显, 这两个波段位置本身是两个重要的水分吸收带, 由于土壤样本是盐渍化土壤, 其含盐量较高, 易吸收水分, 致使这两个波段范围内有明显的光谱特征. 因此, 在这两个波段范围区域内, 以盐碱化土壤偏振光谱反射率(Reflectance)为自变量, 以土壤属性参数(Salinity、pH 值和 EC)为因变量, 建立盐渍化土壤偏振光谱模型, 分析盐渍化土壤偏振光谱数据与相关属性参数的关系.

可以看出, 在 G3 和 G4 两个波段范围内, 土壤偏振高光谱与不同的土壤属性间具有相关关系. 随着盐度的增大, 土壤的偏振高光谱反射率先降低再升高, 这与土壤含水量的光谱反射率变化有一定的相似性. 由于土壤 pH 值和土壤 EC 分别表示的是土壤中 H^+ 浓度和土壤中离子总体的浓度, 是和土壤内化合物成分分不开的, 这些相互关联在光谱曲线上有所体现, 与光谱反射率存在相关关系, 并可以进

表 3 G3 和 G4 波段附近偏振反射率-土壤属性模型的建立

Table 3 Polarized reflectance-Soil properties Models near G3 and G4

波段位置	理化属性	偏振状态	光谱反射率(R)-理化属性回归模型	R^2	RMSE
G3	Salinity	0° 偏振	$y = 31.333x^2 - 191.29x + 0.4678$	0.545 6	0.428 5
		90° 偏振	$y = 50.714x^2 - 284.33x + 0.6275$	0.635 8	0.437 9
G4	Salinity	0° 偏振	$y = 55.620x^2 - 340.65x + 0.4812$	0.872 4	0.443 7
		90° 偏振	$y = 47.638x^2 - 265.36x + 0.5564$	0.719 8	0.441 8
G3	pH 值	0° 偏振	$y = 0.1176x^2 - 2.6531x + 15.215$	0.800 8	0.500 5
		90° 偏振	$y = 0.1173x^2 - 2.6669x + 15.513$	0.650 5	0.513 1
G4	pH 值	0° 偏振	$y = 0.0612x^2 - 1.5438x + 9.7335$	0.882 5	0.504 0
		90° 偏振	$y = 0.1703x^2 - 3.7754x + 21.233$	0.804 8	0.607 7
G3	EC	0° 偏振	$y = -0.0007x^3 + 0.0202x^2 - 0.1484x + 0.5161$	0.615	0.414 5
		90° 偏振	$y = 15.237x^3 - 44.506x^2 + 41.07x - 11.607$	0.775 4	0.410 5
G4	EC	0° 偏振	$y = 13.221x^3 - 38.28x^2 + 34.915x - 9.8618$	0.520 7	0.432 9
		90° 偏振	$y = 10.227x^3 - 29.644x^2 + 27.001x - 7.3965$	0.644 9	0.423 8

行曲线拟合,取得良好效果(见表3).表3是土壤偏振高光谱反射率与土壤各个属性间的关系模型,经过F检验,发现均存在显著地函数关系.利用此关系模型,可以准确地预测盐渍化土壤的pH值和EC,可以用于土壤盐渍化程度的评价.

2.6 盐渍化土壤偏振度信息与土壤理化属性之间的关系

在偏振遥感中,我们常使用偏振度DOP(Degree of Polarization)作为定量指标来描述地物目标偏振反射特征.偏振度的数据获取与计算是通过偏振片透光轴与消光轴,只需计算这两个方向的偏振数据即可.计算公式如下:

$$DOP = \frac{R_{90} - R_0}{R_{90} + R_0}, \quad (5)$$

其中, R_{90} 是利用透光轴方向土壤样本在偏振角90°时偏振反射率, R_0 是消光轴方向的0°时偏振反射率.

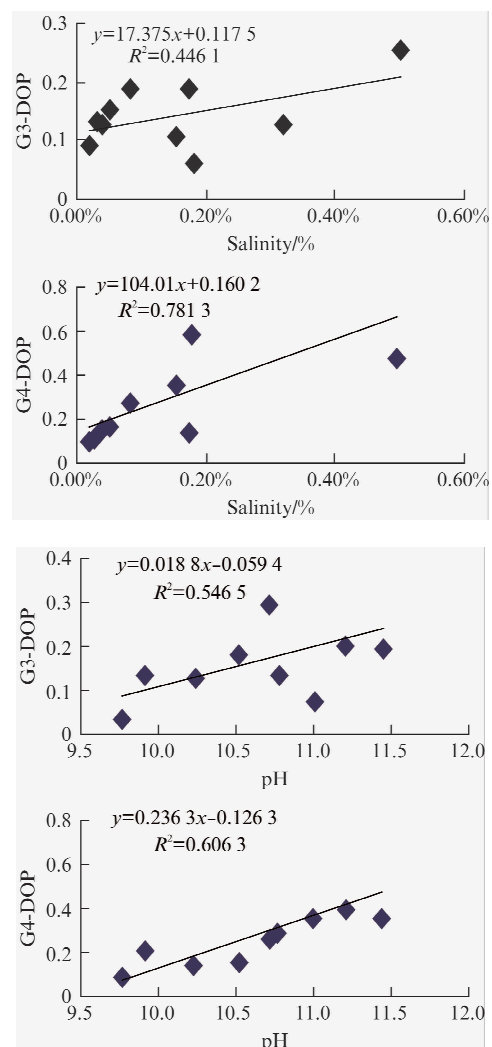
运用式(5),对上述偏振信息进行偏振度计算,并与盐渍化土壤三个属性进行关系分析构建数学模型,见图7,计算模型决定系数(R^2)判定模型拟合优度,可以看出偏振度数据与土壤属性的关系,随着土壤属性数据的增大,其偏振度越大,呈现出线性规律.

经过F检验,我们发现模型中的偏振度与土壤属性数据之间存在显著的函数关系.通过以上分析,验证了盐渍化土壤在不同波段范围内的偏振光谱信息的响应与变化,比较传统的高光谱而言,偏振光谱在监测盐渍化土壤理化属性变化这一问题研究上又提供了新思路.

3 结论

通过对吉林省西部盐渍化土壤350~2500 nm范围内的偏振高光谱研究,我们发现有以下结论:

(1) 尽管各个盐渍化土壤的偏振高光谱曲线表达了不同盐度的土壤样本,但总体上曲线形态相似,变化较为平缓,从350~800 nm附近的可见光区域开始,光谱曲线呈现单调上升趋势,此区间内光谱曲线斜率较大.之后的光谱曲线变化较为平缓,接近于1450 nm附近、1940 nm附近和2210 nm附近光谱



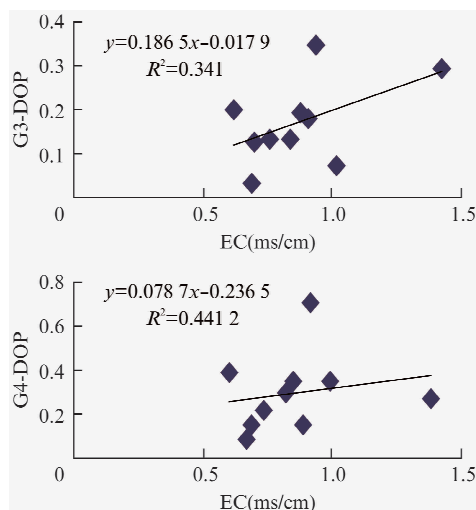


图7 G3和G4波段DOP-土壤属性模型

Fig. 7 DOP-Soil properties Models near G3 and G4

曲线呈现出明显的反射低谷,其中1450 nm附近和1940 nm附近的反射低谷较为明显。

(2) 盐渍化土壤曲线具有规律性,光谱反射率是先随着盐度的增大而减小的,然后随着盐度的继续增大,反射率也会随之增大。这是因为随着盐分含量的增大,土壤中的水对其吸收能力逐渐饱和,由于土壤中的盐分均为白色晶体,使得盐分含量的增大影响了土壤光谱的总亮度,进而其提高了其光谱反射率。因此我们可以根据色调的深浅来区别遥感影像上不同程度的盐渍化土壤。

(3) 尽管盐度的土壤样本所获得的土壤线不同,但总体来说,其趋势是有相同性的,随着盐渍化程度的增强,土壤线的斜率变小,截距变大。由此可以推断,土壤的盐渍化程度与土壤线的参数具有一定的相关性。偏振信息与土壤理化属性(盐度、EC和pH值)之间可以建立数学回归模型,发现它们之间具有一定的相关关系,通过对模型进行F检验,我们发现二者之间存在着显著的函数关系。

References

- [1] Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, *et al.* Reflectance properties of soils[J]. *Advances in Agronomy*, 1985, **38**: 1-44.
- [2] ZHANG Fei, TASHPOLAT Tiyp, DING Jian-li, *et al.* The study on the reflectance spectral characteristic of salt-affected soil in typical oasis of the middle reaches of Tarim River[J]. *Progress in Geography* (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.

- [3] Yong-Ling W, Peng G, Zhi-Liang Z. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River Delta Region of China using EO-1 hyperion data[J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(3): 378-388.
- [4] LIU Huan-jun, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, *et al.* Soil saline-alkalization evaluation basing on spectral reflectance characteristics[J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (刘焕军,张柏,王宗明,等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价,红外与毫米波学报), 2008, **27**(2): 138-142.
- [5] Breon FM, Tanre D, Lecomte P, *et al.* Polarized reflectance of bare soils and vegetation: measurements and models[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1995, **33**(2): 487-499.
- [6] Maignan F, Breon F M, Fedele E, *et al.* Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling[J]. *Remote Sensing Environ.*, 2009, **113**: 2642-2650.
- [7] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B, *et al.* Reflection models for soil and vegetation surfaces from multiple-viewing angle photopolarimetric measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, **111**: 529-539.
- [8] Peltoniemi J, Hakala T, Suomalainen J, *et al.* Polarised bi-direction factor measurement from soil, stone and snow[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, **110**: 1940-1953.
- [9] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin, *et al.* Experimental study on polarization characteristic of man-made object[J]. *High Technology Letters* (孙晓兵,乔延利,洪津,等. 高科技通讯), 2003, **13**(152): 23-27.
- [10] Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Measurements of multi-angle polarization properties of the water-bearing yellow brown soil using multi-band polarimetric imagery in the laboratory[C]. *SPIE*, 2009, **7160**: 71600V-1-11.
- [11] LI Hui, LIN Qi-zhong, WANG Qin-jun, *et al.* A novel hyperspectra absorption enhancing method based on morphological Top-Hat transformation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (李慧,蔺启忠,王钦军,等. 光谱学与光谱分析), 2010, **30**(3): 644-647.
- [12] HAN Yang, ZHAO Yun-sheng, WANG Ye-qiao. Quantitative research on spectral polarization characteristics of soil with different water content[J]. *Journal of Remote Sensing* (韩阳,赵云升,王野乔. 不同含水量土壤偏振光谱特征定量分析,遥感学报), 2013, **17**(5): 1082-1086.
- [13] ZHENG Lan-fen and WANG Jin-nian. A study on imaging spectrometry and its extraction of image spectral information[J]. *Remote Sensing of Environment* (郑兰芬,王晋年. 成像遥感光谱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.
- [14] Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote Sensing of Soil Properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**: 170-183.
- [15] Madeira Netto J. Spectral reflectance properties of soils[J]. *Photo-interpretation*, 1996(2): 59-76.