

基于热红外发射率光谱的土壤盐分预测模型的建立与验证

阿尔达克·克里木, 塔西甫拉提·特依拜^{*}, 张飞, 雷磊, 张东

(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)

摘要: 该研究尝试性地分析盐渍化土壤热红外发射率光谱特征, 并建立土壤盐分高光谱预测模型, 旨在为遥感传感器识别土壤盐分信息奠定基础。首先, 采用 FTIR (Fourier transform infrared spectrometer) 温度与发射率分离处理软件进行土壤温度和发射率的分离。运用高斯滤波平滑法对研究区野外测量的土壤样品热红外发射率光谱数据进行滤波去噪处理。其次, 对不同土壤含盐量热红外发射率光谱数据进行特征分析; 然后在原始热红外发射率光谱数据的基础上进行 4 种形式的数学变换, 分析热红外发射率光谱数据的变换处理形式与土壤含盐量之间的定量相关性。最后, 使用多元回归方法建立预测模型并进行精度评价。结果表明: 经过数据变换处理后, 发射率光谱差异性有所提高; 以平方根变换后的热红外光谱数据建立的预测模型效果较好, R^2 达到 0.82。该研究将热红外遥感独特的发射率光谱特性应用于土壤盐渍化的实际科学问题中, 为定量地分析盐渍土热红外发射率光谱信息提供参考。

关键词: 土壤; 盐分; 光谱分析; 遥感; 盐渍化; 热红外; 发射率光谱; 逐步多元回归

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.015

中图分类号: TP79; S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0115-06

阿尔达克·克里木, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 雷磊, 张东. 基于热红外发射率光谱的土壤盐分预测模型的建立与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 115-120. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.015 <http://www.tcsae.org>
Ardak·Kelimu, Tashpolat·Tiyip, Zhang Fei, Lei Lei, Zhang Dong. Prediction model of saline of soil and its validation based on thermal infrared emissivity spectrum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 115-120. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.015 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着全球对粮食需求的不断增加, 耕地资源变得十分宝贵, 土壤盐渍化是最普遍的土地退化过程, 已成为全球性问题^[1]。新疆有丰富的石油、煤炭和矿产等资源, 但是自然环境恶劣、生态环境脆弱、土壤污染和频繁的沙尘暴天气, 给丝绸之路经济带可持续发展带来阻碍。然而, 对干旱区土壤盐渍化等环境问题进行及时有效的监测、治理, 无论是牧、农业生产还是跨区域的经济的发展, 都是一个亟待解决的问题。艾比湖流域具有重要的生态服务价值和自然资源。为了维持生态平衡, 有必要对整个流域的土壤进行实时监测和研究。遥感技术在盐渍土监测与动态分析方面取得了很大的成果, 且具有能客观地反映土壤盐渍化时空变化的监测能力^[2]。

近几年来, 国内外盐渍土的遥感监测主要是利用可见光-近红外、热红外和微波遥感以及高光谱影像结合地面实测数据, 对土壤的理化特性、生态环境和人文等

因素进行定量半定量的研究。Lenoe^[3]分别使用高盐水、低盐水和非盐水浇灌种植农作物的土壤, 并测量植被的光谱、NDVI 值和 WI 光谱数据, 并与土壤盐分含量建立关系; Wang 等^[4]利用 EO-1 Hyperion 遥感影像, 建立土壤盐度光谱指数 (spectral soil salinity index) 和土壤盐分含量 (soil salinity content) 之间的定量模型, 且对土壤含盐量进行预测, 并评价模型模拟结果和精度; 程杰等^[5], 肖青等^[6]以北京顺义试验区为研究区, 系统地剖析土壤含水量、含沙量、粒径等因素对其发射率光谱影响, 结果证明土壤发射率光谱特征与土壤中各参数的变化具有很高的相关性。夏军等^[7]在干旱区野外环境条件下, 对盐渍化土壤的发射率光谱进行测量, 分析光谱发射率值与盐渍化土壤盐分含量之间的定量关系。雷磊等^[8]以 HJ-1A 高光谱影像为源数据, 分析光谱反射率及其变换形式与野外实测土壤含量之间的相关性, 利用曲线回归方法建立土壤含盐量反演模型。计算机技术和遥感技术在盐渍化土壤盐分方面的应用也更加广泛, 但很少有学者尝试利用 2~16 μm 波段的热红外发射率光谱数据提取盐渍化土壤信息。

本文利用 102F 便携式光谱仪对艾比湖流域不同土壤表层的发射率光谱进行野外测量, 利用 FTIR 温度与发射率分离处理软件环境进行温度与发射率分离, 得到土壤发射率光谱数据, 分析不同盐分含量的热红外发射率光谱特征, 对盐渍化土壤热红外发射率光谱原始数据进行 4 种变换, 然后与土壤含盐量进行相关性分析, 利用多元回归方法建立土壤含盐量预测模型, 利用实测的盐分数

收稿日期: 2015-04-08 修订日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41130531); 博士创新项目 (XJUBSCX-2012027); 开放课题 (XJDX0201-2012-08)

作者简介: 阿尔达克, 女, 哈萨克族, 新疆伊犁人, 博士生, 主要研究方向为干旱土壤遥感应用研究。乌鲁木齐 新疆大学资源与环境科学学院、新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 830046。Email: ardak426@126.com

*通信作者: 塔西甫拉提·特依拜, 男, 维吾尔族, 新疆伊宁人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地图学与地理信息系统。乌鲁木齐 新疆大学资源与环境科学学院、新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 830046。

Email: tash@xju.edu.cn

据对模型进行验证和精度评价, 以期为干旱区盐渍化土壤信息定量提取提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖位于新疆准噶尔盆地西南处, 地理位置在 $43^{\circ}44' \sim 45^{\circ}10'N$ 和 $82^{\circ}35' \sim 83^{\circ}11'E$ 之间, 是整个艾比湖流域的河流和盐土的汇集中心^[9]。随着生态环境的改变, 湖泊不断萎缩, 现湖泊面积只剩 542km^2 。艾比湖流域是中国罕见的荒漠—湖泊湿地, 属于典型的温带—大陆性干旱气候, 气候极端干旱, 年平均降水量在 90.9mm 左右, 自然灾害十分严重, 土壤盐渍化和荒漠化过程普遍而又强烈, 蒸发量达 $1\,600\text{mm}$ ^[10]。由于地表径流和地下水的作用, 在河谷沿岸和湖滨地带广泛分布着盐化草甸土、盐化沼泽土和盐渍土等。

1.2 野外样本的采集与处理

本文选取艾比湖流域内的盐渍土为研究对象, 于 2013 年 4 月 24 日至 5 月 6 日, 利用 GPS 定点采集试验土壤。艾比湖流域大部分地区存在荒漠化和盐渍化现象且非常严重, 因此针对该研究区特有的地理特征, 采样点尽量选在离湖区较远、较干旱、地势平坦的不同区域的表层土壤 ($0 \sim 20\text{cm}$ 深度)。在整个流域内共均匀采集 110 个样品。

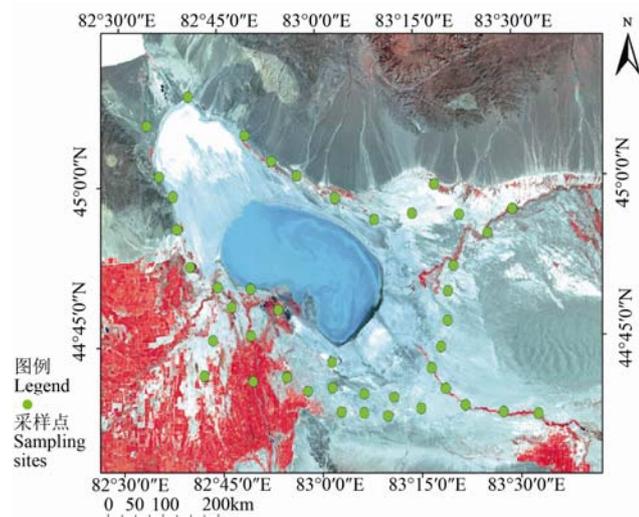


图 1 研究区和采样点分布图

Fig.1 Map of study area and distribution of soil sampling points

将野外采集土样带回实验室经自然风干后称质量记点号, 将实测的 110 个土壤样本分为两部分, 其中随机抽出 65 个用于建立预测模型, 其余 45 个用于预测模型的验证。风干完成的土样磨碎, 过 0.25mm 筛, 过筛后的 110 等份土样每份质量为 200g , 登记每个点的地理位置编号装入袋子。利用德国 WTW (Wissenschaftlich Technische Werkstätten) 公司生产的 inoLab® Cond 7310 电导率仪在土水比 1:5 的土壤悬浊液中测定盐度, 然后数据换算成土壤样本的含盐量 (g/kg), 用于建立预测模型和验证。

1.3 发射率光谱的野外测量

本文在野外利用美国 D&P 公司生产的 102F 便携式光谱仪进行土壤光谱的测量。仪器的参数如表 1 所示。土壤发射率光谱在晴朗无风、温度适中的天气条件下测量, 测量时间为北京时间 09:00-12:00, 地点在艾比湖保护区内。采用冷热黑体标定, 然后用液氮冷却该仪器 5 min; 设定仪器的温度等其他参数后开始测定每个采样点热红外辐射数据。操作时传感器距目标土壤样品须小于 1m 。

表 1 FTIR 光谱仪参数

Table 1 FTIR spectral instrument parameter	
光谱范围 Spectral range/ μm	2~16
光谱分辨率 Spectral resolution/ cm^{-1}	4,8,16
光谱精度 Spectral accuracy/ cm^{-1}	± 0.02
工作温度范围 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	0~45
噪声等效温差 Noise/ $^{\circ}\text{C}$	0.01
尺寸 Size/ $\text{cm} \times \text{cm} \times \text{cm}$	$36 \times 20 \times 23$

在 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 的热红外光谱范围内, 假设地表为朗伯表面, 大气下行热辐射各向同性, 传感器所接收到的热辐射能量主要受自然地表, 大气吸收、大气辐射和物体表面辐射能量, 太阳入射总热辐射的反射的影响; 因此, 在温度为 T 时, 红外光谱仪传感器接收到的总辐射亮度为:

$$L_{\text{means}}(\lambda, T) = [\varepsilon_i L_{\text{bb}}(\lambda, T) + (1 - \varepsilon_i) L_{\text{DWR}}(\lambda)] \sigma_{\text{atm}} + L_{\text{UWR}}(\lambda) \quad (1)$$

式中: ε_i 为物体自身的发射率; $L_{\text{bb}}(\lambda, T)$ 为在温度 T 时黑体的辐射亮度, 可由普朗克黑体辐射公式求得, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \Omega)$; $L_{\text{DWR}}(\lambda)$ 为大气下行辐射, 包括地物目标对大气向下方向、环境背景散射和太阳入射总热辐射的反射 (一般可以忽略对太阳入射的反射), W/m^2 ; L_{UWR} 为地物目标与传感器之间大气向上的热辐射, 称为大气上行辐射, W/m^2 ; σ_{atm} 为地物目标与传感器间大气透过率; λ 为物体反射率; T 为物体温度, $^{\circ}\text{C}$ ^[11]。

当探测目标到传感器距离小于 1m 时可以忽略大气上行辐射和大气透过率^[12]。经过变换, 得到探测目标在温度 T 时的发射率的简单计算公式:

$$\varepsilon_i = \frac{L_{\text{means}}(\lambda, T) - L_{\text{DWR}}(\lambda)}{L_{\text{bb}}(\lambda, T) - L_{\text{DWR}}(\lambda)} \quad (2)$$

1.4 温度与热红外发射率光谱的分离

热红外遥感反演一定要分离温度和发射率。假定一个温度初值, 模拟生成一组等间隔的温度, 计算每个温度值所对应的地物发射率曲线的平滑度指数。Ingram 平滑度指数 (SI, smoothness of index) 定义为^[13]:

$$\text{SI} = \sum_{j=2}^{N-1} \left(\varepsilon_j - \frac{\varepsilon_{j-1} + \varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}}{3} \right) \quad (3)$$

式中: ε_j 表示某一地表温度对应的第 j 波段的发射率值; N 为波段数。找到使平滑度指数 SI 最小时发射率曲线所对应的温度, 将该温度值作为地物的最佳估计温度, 并带入式 (2) 便计算出物体发射率。

课题组在光谱平滑迭代法和 Ingram 平滑度指数基础上开发 FTIR 温度与发射率分离处理软件 V1.0 (软件登记号为: 2014SR021958), 在软件界面输入 FTR 光谱仪导

出的辐射亮度和大气下行辐射亮度值，设置各参数后系统自动计算出研究区样品的温度，并导出各样品的发射率光谱^[14]。

1.5 热红外发射率光谱预处理与相关性分析

在 Origin8.5 软件环境下采用高斯滤波平滑法对发射率光谱曲线进行平滑处理，消除噪音等引起的误差；为了更好地分析和提高发射率光谱灵敏度，对热红外发射率光谱 B 进行对数、平方根、一阶导数、二阶导数等数学变换。最后，将热红外发射率光谱曲线与 110 个土壤含盐量数据进行相关性分析。相关系数 r_j 的计算公式为：

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)(SC_i - \bar{SC})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)^2 \sum_{i=1}^n (SC_i - \bar{SC})^2}} \quad (4)$$

式中： R_{ij} 为第 i 个土壤采样单元在第 j 波段的热红外发射率光谱及变换结果； \bar{R}_j 为 n 个土壤采样单元在第 j 波段的热红外发射率光谱 4 种变换形式的平均值； SC_i 为第 i 个土壤采样单元的含盐量； \bar{SC} 为所有土壤采样单元含盐量的平均值； n 为土壤采样单元的总个数。

1.6 土壤含盐量预测模型及验证

土壤热红外发射率光谱受到多种因素的影响，特性也会在几个敏感波段上体现。通过相关性分析找到与土壤特性的响应敏感波段并采用多元线性回归的方法建立土壤含盐量的预测模型。通过均方根误差 (RMSE) 对模型进行精度评价，公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(S_i) - Z(S_i)]^2} \quad (5)$$

式中： $Z^*(S_i)$ 表示模型预测盐分值； $Z(S_i)$ 表示野外实测盐分值。

2 结果与分析

2.1 盐渍化土壤热红外发射率光谱曲线特征分析

为了系统地研究不同含盐量土壤的热红外发射率光谱特征，从 110 个土壤样品中随机选取能代表整个研究区盐分含量的 5 条发射率光谱曲线，并分析特征。图 2 为 5 条含盐量分别为 0.1、2.3、9.7、26.22 和 49.8 g/kg 的土壤热红外发射率光谱曲线。从曲线整体效果来看：随

着土壤含盐量的增加，发射率光谱也增加，曲线变化趋势相对一致；在 8.0~11.2 μm 范围内曲线变化幅度比较大，先减少后增加，出现 1 个波谷和 1 个波峰；其中含盐量 49.8 g/kg 与其他盐分含量所对应曲线有明显的差异，发射率曲线一直递增；在曲线 8.0~9.2 μm 范围内，每个含盐量所对应的发射率曲线减少；9.2~13.1 μm 范围内，随着含盐量的增加，发射率也增加；13.1~14 μm 几乎所有曲线变化幅度趋于平缓。含盐量 49.8 g/kg 的样本热红外发射率光谱高于其他 4 类，可能原因是采样点选在盐分高度积聚的区域，使得对土壤热红外发射率光谱曲线特性的影响比较大。对比所有不同含盐量发射率光谱曲线的变化特征，可以确定土壤热红外发射率光谱总体上随着含盐的增加而增加，由此可见，9.2~11.2 μm 范围是对土壤盐土的敏感波段。

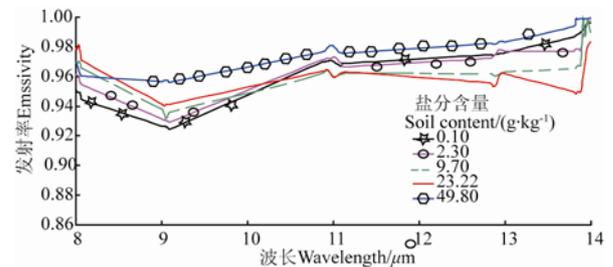
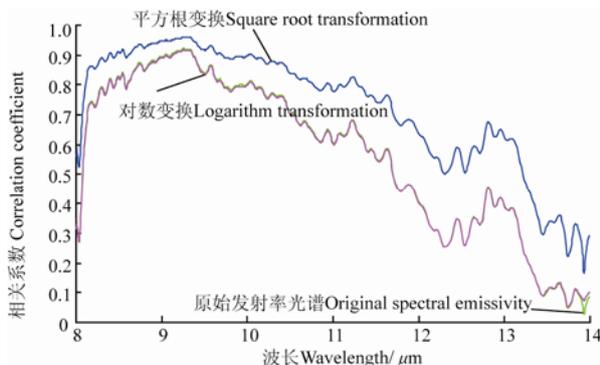


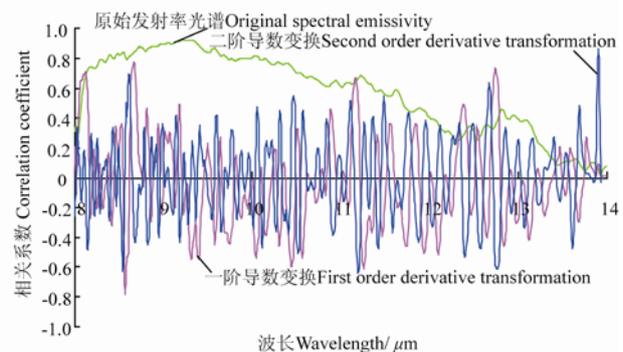
图 2 不同含盐量土壤热红外发射率光谱特征
Fig.2 Thermal infrared emissivity spectral curves of soil with different salt content

2.2 发射率光谱与土壤含盐量的相关性分析

对数、平方根、一阶导数、二阶导数等数学变换后的发射率光谱与土壤含盐量进行相关性分析，如图 3 所示。可以看出，土壤发射率光谱经过数学变换后与盐分数据的相关系数都有了一定的变化。对数变化后发射率光谱曲线变化不明显，几乎与原始发射率光谱重叠；平方根变化后的发射率光谱与土壤含盐量的相关性最显著，曲线幅度与原始发射率光谱相似，但相关系数最高达 0.95，对应波段在 8.5~9.5 μm 范围，所有相关系数都在 0.85 以上；一阶导数和二阶导数变换后的光谱与土壤盐分的相关性也有所提高，呈负相关，11.2、12.5~14 μm 处相关系数大于原始反射率光谱。通过分析可以看出，研究区盐渍化土壤发射率光谱的平方根变换与盐分含盐量的相关性最高，筛选出的敏感波段见表 2。



a. 原始光谱、对数变换、平方根变换
a. Original, logarithm and square root transformation



b. 原始光谱、一阶变换和二阶变换
b. Original, first order derivative and second order derivative transformation

图 3 盐渍化土壤含盐量与发射率光谱、变换后光谱的相关系数

Fig.3 Correlation coefficient between salinization soil content and original and its transformation spectral emissivity

表 2 不同光谱变换处理的多元逐步回归建模结果

Table 2 Result of stepwise multi analytical regression model based on different preprocessing

数学变换 Mathematical transformation	响应波段 Corresponding band/ μm	预测模型 Regression model	建模集 Modeling		验证集 Validation	
			R^2	F 检验	R^2	RMSE
原始光谱 Original spectral emissivity	9.3	$Y = 805.9x - 743.42$	0.66	166.7	0.708	1.769
对数变换 Logarithmic transformation	9.4	$Y = 682.4x + 491.6$	0.78	188	0.610	3.191
平方根 Square root transformation	9.4	$Y = 0.909x + 1.057$	0.94	289	0.822	0.926
一阶导数 First order derivative transformation	9.5	$Y = 145x + 673$	0.75	109	0.700	1.973
二阶导数 Second order derivative transformation	9.2	$Y = 243x + 740$	0.73	99	0.770	1.881

2.3 预测模型建立与精度检验

在土壤光谱发射率数据的变换和分析的基础上, SPSS17.0 软件平台下采用多元回归方法建立含盐量的预测模型。将实测的 110 个土壤样本分为两部分, 其中随机抽出 65 个用于建立预测模型, 其余 45 个用于预测模型的验证。土壤盐分含量实测值作为因变量, 原始发射率光谱及变换后的发射率光谱波段作为自变量, 进行多元回归分析, 建立土壤盐分含量的预测模型。

通过决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、 F 值对所建立的预测模型和精度进行评价, 表 2 所示。RMSE 值越小说明预测值和测量值之间的偏差就越小, 模型的预测结果越可靠。由表 2 可知, 平方根变换的预测模型精度最佳, 检验样本决定系数 (R^2) 为 0.822、均方根误差 (RMSE) 为 0.92, F 检验也是所有模型中最大的, 土壤盐分含量的实测值及预测值比较见图 4。由图 4 可知, 艾比湖流域盐渍化土壤的热红外发射率光谱平方根变换和盐分存在线性关系。

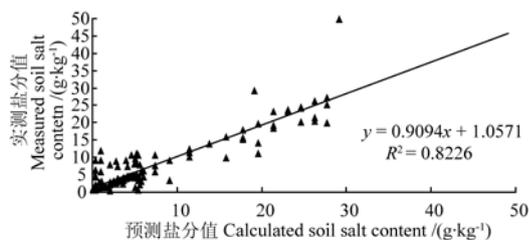


图 4 基于发射率光谱平方根变换的土壤盐分含量预测值与实测值的比较

Fig.4 Comparison of measured and predicted salinity soil based on square root transformation for spectral emissivity

2.4 讨论

研究结果表明盐渍土热红外发射率光谱的特征是随着含盐量的变化而变化, 随着土壤盐分含量的增加土壤发射率光谱也逐渐增加, 而盐分含量过高, 其发射率光谱也偏高。目前为止, 研究盐渍化土壤发射率光谱特征的研究较少。张彦俊等^[15]认为在 $8 \sim 10.8 \mu\text{m}$ 范围内, 盐结晶发射率增大, 盐分含量与土壤发射率呈正比关系; 本研究结论与上述研究结果基本一致, 但光谱敏感波段范围有差异, 热红外发射率光谱与土壤含盐量响应波段在 $9.21 \sim 12 \mu\text{m}$ 范围内最为显著。而利用热红外定量地反演土壤含沙量、盐分、水分的研究比较多^[16-18]。但如

何减少或消除土壤发射率光谱异质性, 提高预测模型的精度研究鲜有报道。侯艳军^[19]等在准噶尔东部进行土壤采集和分析, 利用偏最小二乘法建立的连续去除一阶导数预测模型能够更好地估算土壤全磷而且精度较高。本研究对研究区盐渍化土壤发射率光谱做平方根处理后, 提高了与含盐量的相关性, 且所建立预测模型的精度也较高。但是, 土壤的热红外发射率光谱受土壤质地、粗糙度、不同类型、含水量、矿化度、有机质和温度等外界因素的影响^[20]。为了避开这些影响因素, 本文样品的发射率光谱在干旱、地势平坦、水分含量极少等条件下测量。尝试性地将热红外发射率光谱应用于艾比湖地区土壤的盐分含量提取的基础性研究中, 由于该研究区所采样点表层土壤极为干旱, 可以忽略水分对发射率光谱的影响, 没有细致地考虑盐分其他属性特征。在以后研究工作中将盐离子与电导率、介电常数、水分含量等特性相结合, 更进一步分析土壤热红外发射率与土壤的理化特性之间的规律与关系。

3 结论

研究区土壤含盐量的敏感波段位于 $9.2 \sim 11.2 \mu\text{m}$ 范围内, 发射率与土壤含盐量呈高度的相关性, 在 $8.5 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 之间, 波段较宽, 相关系数最高能达到 0.95, 所有相关系数都在 0.85 以上。达到最高值后, 随着波长的增加, 相关系数逐渐降低, 直到 $13 \mu\text{m}$ 以后降低到 0.4 以下。说明运用热红外遥感技术估计和监测土壤盐渍化具有很大的开发潜力。4 种不同变换处理后的光谱发射率曲线形状差异明显; 平方根, 对数和原始发射率光谱曲线非常相似; 一阶导数, 二阶导数变换方法都在相同的几个波段处剧烈变化, 放大了原始光谱信息, 但程度各不相同。各种变换能够反映土壤特性的微观信息, 对于消除或减弱土壤背景噪声、提高信噪比、增强目标光谱信息方面作用明显。

本文根据土壤含盐量发射率光谱的物理化学机理, 在野外环境条件下测定土壤的热红外发射率光谱数据, 将 $350 \sim 2500 \text{ nm}$ 光谱反射率波段进行延伸, 从一个新的角度探索土壤盐分与发射率之间的定量关系。下一步研究内容: 将热红外遥感影像与野外采样点结合, 建立盐渍化土壤的热红外发射率与土壤盐分的定量关系, 以便更宏观地对盐渍化现象进行分析与监测。

[参 考 文 献]

- [1] Bayaer W, Shen Yanjun, Audengaowa A. Using remote sensing to evaluate land salinization in typical areas of Inner Mongolia, China [C]. 2005 IEEE International, 2005: 2888—2890.
- [2] Farifteh J, Farshad A, George R J. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics[J]. *Geoderma*, 2006, 130(34): 191—206.
- [3] Leone A P, Menenti M, Buondonno A, et al. A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(12): 39—48.
- [4] Wang Yongling, Gong P. 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.
- [5] 程杰, 柳钦火, 李小文, 等. 基于相关性的中热红外温度与发射率分离算法[J]. *中国科学*, 2008, 38(2): 261—272. Cheng Jie, Liu Qinhua, Li Xiaowen, et al. The correlation based mid-infrared temperature and emissivity separation algorithm[J]. *Science in China*, 2008, 38(2): 261—272. (in Chinese with English abstract)
- [6] 肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率光谱特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(5): 373—378. Xiao Qing, Liu Qinhua, Li Xiaowen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(5): 373—378. (in Chinese with English abstract)
- [7] 夏军, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 热红外发射率光谱光谱在盐渍化土壤含盐量估算中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 2956—2961. Xia Jun, Tashpolat-Tiyip, Mamat-Saut, et al. Application study of the thermal infrared emissivity spectra in the estimation of salt content of saline soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 2956—2961. (in Chinese with English abstract)
- [8] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于 HJ-1A 高光谱影像的盐渍化土壤信息提取——以渭干河-库车河绿洲为例[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1104—1109. Lei Lei, Tashpolat-Tiyip, Ding Jianli, et al. Soil salinization information extraction by using hyperspectral data of HJ-1A HIS: A case study in the oasis of Ugan & Kuqa, Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1104—1109.
- [9] 吉力力·阿不都外力, 米热班·阿布里米提, 刘东伟, 等. 艾比湖干涸湖底不同景观类型下富盐沉积物盐分积聚特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1426—1432. Abuduwaili Jilili, Abulimiti Mireban, Liu Dongwei, et al. Characteristics of salt accumulation in salt-rich sediments under different landscapes in the Ebinur lake playa, Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1426—1432. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何学敏, 吕光辉, 秦璐, 等. 艾比湖荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量数据特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6655—6665. He Xueming, Lü Guanghui, Qin Lu, et al. Research on data characteristics during non-growing season of desert-wetland ecosystem in Ebinur Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6655—6665. (in Chinese with English abstract)
- [11] Christoph C B. Iterative retrieval of surface emissivity and temperature for a hyperspectral sensor[C]//First JPL Workshop on Remote Sensing of Land Surface Emissivity, JPL, 1997: 6—8.
- [12] Hook S J, Kahle A B. The micro Fourier transform interferometer(μ FTIR): A new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surfaces[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56(3): 172—181.
- [13] Ingram P M, Muse A H. Sensitivity of iterative spectrally smooth temperature-emissivity separation to algorithmic assumptions and measurement noise[J]. *IEEE Transactions on GEO Science and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2158—2167.
- [14] 夏军. 准东煤田土壤重金属污染高光谱遥感监测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014. Xia Jun. Study on the Monitoring of Soil Heavy Metal Pollution with Hyperspectral Remote Sensing in the Eastern Junggar Coalfield[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张严俊. 干旱区盐渍化土壤热红外发射率光谱特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014. Zhang Yanjun. Study of the Thermal Infrared Emissivity Spectra in the Soil Salinization in Arid Land[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [16] French A N, Schmugge T J, Kustas W P. Estimating surface fluxes over the SGP site with remotely sensed data[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25(2): 167—172.
- [17] Song Xiaoning, Ma Jianwei, Li Zhaoliang, et al. Estimation of vegetation canopy water content using Hyperion hyperspectral data[J]. *PubMed Journal*, 2014, 33(10): 2833—2837.
- [18] Mamat Sawut, Abduwasit Ghulham, Tashpolat Yiyip, et al. Estimating soil sand content using thermal infrared spectra in arid lands[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 203—210.
- [19] 侯艳军, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 等. 荒漠土壤全磷含量热红外发射率光谱估算研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35 (2): 350—354. Hou Yanjun, Tashpolat-Tiyip, Zhang Fei, Study on estimation of deserts soil total phosphorus content from thermal-infrared emissivity[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* 2015, 35 (2): 350—354. (in Chinese with English abstract)

- [20] 王琿, 盘毅, 李华, 等. 基于快速傅里叶红外光谱仪的自然地物光谱发射率测量[J]. 红外技术, 2009, 31(4): 210—214. Wang Hui, Pan Yi, Li Hua, et al. Measuring spectral emissivity of natural objects with FTIR[J]. Infrared Technology, 2009, 31(4): 210—214. (in Chinese with English abstract)

Prediction model of saline of soil and its validation based on thermal infrared emissivity spectrum

Ardak·Kelimu, Tashpolat·Tiyip^{*}, Zhang Fei, Lei Lei, Zhang Dong

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

2. Key Laboratory of Oasis Ecology under Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In arid and semi-arid inland areas, due to high evapotranspiration, the minerals in the soil water accumulation in the soil surface, soil salinization becomes a serious threat to the local agricultural production, ecological stability and economic development. At present, most research on remote sensing technology to monitor the saline soil is focused on quantifying the relationship between the saline soil salt content and its associated, environmental factors or human factors and visible-near infrared, thermal infrared, or microwave remote sensing data. In this paper, we took the Ebinur Lake in the northeast of Junggar Basin Xinjiang as the study area. Thermal infrared emissivity spectra unique characteristics were used to determine the degree of soil salinization. First, we used the platform of FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) temperature and emissivity separation processing software to separate temperature and emissivity in order to obtain the original soil emissivity spectral data. Then, the spectrum smoothing iterative method was used to separate the soil emissivity and thermometers for elimination of environmental and human-caused errors when collecting spectral emissivity data in order to get the real soil emissivity spectral information. After that, we used Gaussian filter smoothing method to filter noise spectral data. In addition, we mixed the pure soil with salt to achieve five different soil salt contents: 0.1, 2.3, 9.7, 26.22, 49.8 g/kg soil and a pure soil with no salt addition, and analyzed the thermal infrared emissivity spectral characteristics of them. The raw spectral data from them were de-noised by square root transformation, logarithmic transformation, the first derivative, and the second derivative. The four transformations were compared in their normalized ratio, and we determined the relationship between spectral data and soil salinity. We also used stepwise multiple regression equation to establish six different forms of forecasting models. By comparing the models of analysis, the establishment of the square root transformation had the highest prediction accuracy and R^2 was greater than 0.82. By use of stepwise multiple regression model for each data set, the modeling results very stable, and test sample coefficient of determination $R^2=0.82$, the root mean square error(RMS) is 0.92. Prediction model had performed very well, between the Ebinur basin of thermal emissivity spectra of soil salinization in square root transformation and salt content has exist a function form. In this study, we discussed the hyperspectral remote sensing monitoring technology that can be used to predict the soil salt in Ebinur Lake basin, it provided the technical methods for the large-scale, low-cost and real-time monitoring the soil salinity. Such variation of emissivity method would promote the development and application of hyperspectral remote sensing technology monitoring on the space-time dynamic of arid land saline soil for future regional ecological restoration.

Key words: soils; salts; spectrum analysis; remote sensing; salinization; soil salinity; thermal infrared; emissivity spectra; stepwise multiple regression