

文章编号: 1001 - 9014(2008)02 - 0138 - 05

基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价

刘焕军^{1,2}, 张 柏¹, 王宗明¹, 宋开山¹, 胡茂桂^{1,2}, 段洪涛^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:以吉林省西部盐碱土及其光谱反射率为研究对象,采用一阶微分、去包络线方法建立各种土壤光谱指数,分析并确定反映盐碱化程度的最佳波段与土壤光谱指数,建立盐碱化土壤参数的高光谱定量模型用于评价土壤盐碱化程度.结果表明:盐碱土在 400~2500nm 的范围内主要有五个明显的吸收谷,碱斑土壤由于富含盐分在五个吸收谷范围的吸收特征均显著强于其他土壤;不同地域土壤属性间相关关系存在共性,pH 值与电导率正相关,二者都与有机质负相关;微分、去包络线方法得到的光谱指数与土壤参数的相关系数显著优于反射率,去包络线方法得到的土壤光谱指数普适性更强;基于土壤光谱指数的高光谱模型可以准确预测盐碱土 pH 值,可以用于土壤的盐碱化程度评价.

关键词:遥感;盐碱土;pH;电导率;高光谱

中图分类号: TP70; S15 **文献标识码:** A

SOIL SALINE-ALKALIZATION EVALUATION BASING ON SPECTRAL REFLECTANCE CHARACTERISTICS

LIU Huan-Jun^{1,2}, ZHANG Bai¹, WANG Zong-Ming¹,
SONG Kai-Shan¹, HU Mao-gui^{1,2}, DUAN Hong-Tao^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The hyperspectral reflectance and soil parameters (organic matter, pH, electrical conductivity (EC)) of saline soils in the west of Jilin province were measured and studied. The first derivative and continuum removal methods were introduced to build soil spectral indices, and the relationship between soil parameters and spectral indices was analyzed to make certain the best spectral bands and spectral indices which could uncover the degree of soil salinity. Then the hyperspectral models were built to evaluate soil saline-alkalization level. The results are as follows: saline soil has five apparent absorption vales in the spectral domain between 400 and 2500nm, and the five vales of vegetation-uncovered saline soil are much larger than the others' because of higher salt content; the correlation between soil parameters of saline soils in different places has the commonness of positive relationship between pH and EC, both of which negatively correlates with OM; the correlation between soil parameters and spectral indices derived from the first derivative and continuum removal methods is much more significant than that between soil parameters and reflectance, and the indices derived from continuum removal can be used more widely. The hyperspectral models based on soil spectral indices can be used to predict pH values of saline soil and evaluate the degree of soil salinity.

Key words: remote sensing; saline soil; pH; electrical conductivity; hyperspectra

引言

松嫩平原的盐碱土总面积约 342 万 hm^2 , 占平原面积的 19.4%, 超过黄淮海平原 200 万 hm^2 的盐碱化面积, 是我国土地次生盐碱化最严重、对农业影

响最大的地区之一^[1]. 严重的盐碱化问题限制了该地区农牧业的发展. 为了防治土壤盐碱化, 更加合理地开发和利用盐碱土地, 需要对盐碱土壤的理化性质及其变化进行研究. 传统的土壤盐碱化状况是通过野外土壤调查分析得到的, 不仅费时、费力, 而且

收稿日期: 2007 - 01 - 26, 修回日期: 2007 - 08 - 27

Received date: 2007 - 01 - 26, revised date: 2007 - 08 - 27

基金项目: 国家自然科学基金 (40401003), 长春市科技计划项目“长春市农安县盐碱化土地遥感监测技术”, 中科院东北地理与农业生态研究所学科前沿领域项目 (KZCX3-SW-NA3-03)

作者简介: 刘焕军 (1981-), 男, 黑龙江穆棱人, 博士生, 主要从事地物高光谱定量遥感研究.

测点少,无法揭示盐碱土的时空动态变化.利用土壤的电磁波谱信息,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碱化状况成为可能^[2].但是多光谱遥感技术难以区分轻度盐碱化与未盐碱化的土壤,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^[3].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碱化.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碱化及土壤特性^[4,5],而国内对盐碱化土壤的高光谱特征的研究较少,仅刘庆生等^[6]分析了盐分含量与上覆植被光谱的关系.

为从冗余的高光谱数据中选择能够反映松嫩平原土壤盐碱化程度差异的最佳波段,为土壤盐碱化遥感监测与评价提供理论基础,本文以吉林省大安市与前郭县盐碱化土壤为研究对象,进行野外与室内的光谱测试,利用微分、去包络线方法建立土壤光谱指数,分析吉林西部盐碱土的理化性质和反射光谱特征间的关系,确定反映盐碱化程度的最佳土壤光谱指数,并应用统计分析方法建立盐碱化土壤 pH 的定量高光谱模型,用于评价土壤盐碱化程度.

1 原理与方法

1.1 原理

遥感的物理基础是建立在电磁波理论上的,高光谱遥感主要利用 350~2500nm 波谱范围.电磁波与物质间的相互作用会引起入射辐射在强度、方向、波长等方面的改变.高光谱遥感的物理基础就是准确地记录下电磁波与物质间的这种相互作用沿波长方向上的精细变化,它反映了不同地表物质与光子间相互作用的差异,从而带有了丰富的地物信息,这种信息是由地物的宏观(形态)特性和微观(分子级)特性决定的.盐碱土的表面形态、物理属性、化学成分(含盐量、有机质、矿物组成、不同离子等)决定了高光谱反射率的特性.然而,对于同一种土壤,光谱反射率的差异相对较小,而包络线消除法可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将反射率归一化到 0~1 之间,光谱的吸收特征也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,从而建立各种评价土壤盐碱化程度的土壤光谱指数.在去包络线的基础上发展了一些光谱指数^[7],主要有吸收谷左右肩部(J_L 、 J_R)与谷底

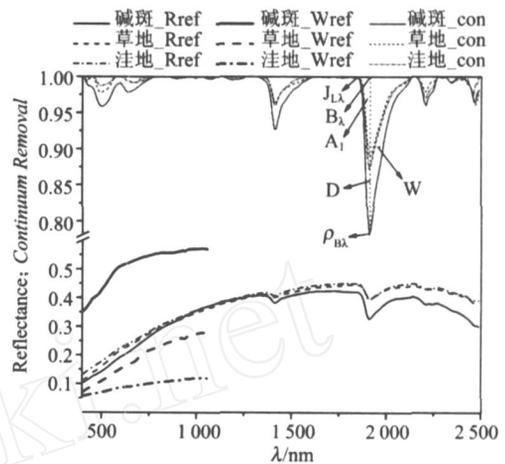


图 1 不同地表状况盐碱土野外 (_W ref)、室内 (_R ref)、去包络 (_con) 光谱曲线

Fig 1 Field (_W ref), room (_R ref) and continuum removal (_con) spectral curves of soils with different surfaces

值 (B) 及相应的波长位置 (B)、吸收深度 (D)、吸收宽度 (W , 定义为吸收深度一半所对应的 2 个波长的差值)、吸收谷总面积 (A) 和对称度 (S , $S = A_1/A$, 其中 A_1 是吸收谷左半部分的面积) (见图 1 上半部). 利用这些光谱指数与土壤理化参数的关系,建立土壤参数高光谱模型,用于土壤理化特性的评价.

1.2 土壤样品采集与处理

松嫩平原盐碱土主要分别在西部,而吉林省大安市与前郭县位于松嫩平原西部腹地,土壤盐碱化程度高,具有典型性.2005年10月在吉林省大安市与前郭县3个区域(地理坐标分别为 45.57N、124.03E, 45.61N、123.85E 和 45.12N、124.41E)分别采集了 15、6、12 共计 33 个盐碱土表层 (0~15cm) 土样.采样同时,利用 GPS 记录样点的经纬度.室内将土样研磨、风干、过 2mm 筛.有机质 (OM) 含量用重铬酸钾-硫酸溶液-元素分析仪法测定, pH 值用土:水比为 1:5 的土壤悬浊液以电位法测定,电导率 (EC) 用电导仪测定.

1.3 光谱测试方法

光谱测试采用美国分析光谱仪器公司生产的 FieldSpec 3 便携式光谱仪(波谱范围为 350~2500nm; 350~1000nm 光谱分辨率为 3nm, 1000~2500nm 为 10nm, 重采样成 1nm). 在地域 1 进行了盐碱地的野外光谱测试:天气晴朗无风,北京时间 10:00~12:00;传感器探头垂直向下,8 视场角的传感器探头与地面相距约 1.5m;测试之前先去除暗电流的影响,然后以白板进行定标;每个土样采集 10

条光谱曲线,算术平均后得到该土样的实际反射光谱数据.室内光谱测量在一个能控制光照条件的暗室内进行,土壤样本分别放置于直径 12cm、深 1.8cm 的盛样皿内,土样表面用直尺刮平;光源是功率为 1000W 的卤素灯,距土壤样品表面 100cm,天顶角 30°;探头置于离土壤样本表面 15cm 的垂直上方.其他步骤同野外测试.

1.4 光谱数据处理与模型建立

高光谱数据预处理.为消除高频噪声的影响,本研究采用何挺等^[8]所述 9 点加权移动平均法对高光谱反射率数据进行平滑去噪处理.

高光谱数据微分处理.光谱微分处理可以用来去除部分背景、噪声的影响^[9,10],增强光谱数据与土壤参数之间的相关关系.对平滑后的土壤光谱数据进行一阶微分计算.

去包络线与光谱指数计算.由于野外测定的光谱既有碱斑,又有草地、砂土,而室内土壤过筛后相对均一,易于比较,因此只对室内光谱数据进行去包络线计算.在遥感软件 ENVI 4.0 环境下,建立室内土壤反射光谱数据库;利用 Continuum Removed 功能对土壤光谱数据进行去包络线处理.图 1 为实验室土壤光谱曲线包络线消除前后的对比(曲线“_Rref”与“_con”).利用 Visual C# 语言编写程序确定去包络曲线吸收谷位置(肩部、极小值波长位置),计算吸收谷面积、对称度、吸收深度,得到各土壤样本的光谱指数.

采用统计分析方法对光谱反射数据及土壤光谱指数与 OM、pH 值、EC 的关系进行分析,建立各土壤参数高光谱预测模型;采用方差分析方法对回归模型进行检验;利用调整决定系数 (R_{adj}^2) 判定模型拟和优度,均方根差 (RMSE) 评价预测模型的精度.

2 结果与分析

2.1 盐碱土光谱特征

图 1 显示的是不同地表状况盐碱土(碱斑、退化草地、洼地)在野外(太阳为光源,光谱范围 400~1050nm)与室内测定的反射光谱曲线(图中表示为“_Rref”、“_Wref”),及室内光谱去包络曲线(“_con”).可以发现,碱斑、草地、洼地的野外光谱反射率依次降低,这是因为强盐碱化土壤当水分较低时,盐分在地表结晶,直接表现为其矿物的光谱特性,在可见光近红外波段形成高反射,在 470~510nm 的范围内光谱曲线斜率大;草地由于其上有矮草的覆盖,表现出枯萎植被的光谱特征,呈现微弱的红边现

象(690~730nm);洼地由于含有大量水分、表层盐分含量较低,呈现低反射特征.由于室内土壤经过风干、研磨、过筛处理,并将草屑等去除,不同地表状况土壤室内光谱反射率的差异远小于野外光谱反射率的差异,820~1380nm 范围内差异尤其小;草地与洼地土壤的反射光谱曲线形状与大小均相近,而碱斑土壤的反射率在 400~760、1380~2500nm 范围内明显低于草地和洼地,同时 400~760nm 的斜率最大,这是由于吸水盐分的存在引起的.从室内光谱去包络线的特征可以看出,3 种土壤在 400~2500nm 的范围内主要有 5 个明显的吸收谷(分别记为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5),分别位于 470~560、610~740、1370~1550、1870~2120 和 2170~2270nm,相应的吸收谷极小值的波段位置大致为 500、670、1418、1915 和 2210nm 附近.草地与洼地的吸收特征相近,只有在 G_3 范围内的吸收特征强于洼地,这是由于草地土壤中有有机质含量较高的缘故;而碱斑土壤在 5 个吸收谷范围的吸收特征均显著强于其他两种土壤,尤其是 G_3 、 G_4 所在范围,这是由于该土壤中富含盐分,由于盐分吸收水分,增强了 G_3 、 G_4 两个水分吸收带而形成的.

2.2 土壤属性

3 个研究地域的地表状况具有显著的差异.地域 1 盐碱斑与退化草地混杂镶嵌分布,碱斑表面平滑、颜色灰白、质地坚硬,仅生长单一矮草;地域 2 退化草地面积多于碱斑,碱斑为砂质;地域 3 碱斑表面呈蜂窝状,生长杂草,长势好于地域 1.这种差异是由于土壤母质、矿物组成等因素综合作用形成的.不同地域土壤属性的差异显著.表 1 显示的是不同地域不同土壤属性间的相关关系,可以看出,不同地域土壤属性间的相关关系不同,不同土壤属性间显著相关的有:地域 1 的 pH 值与 OM、EC,地域 3 的 pH 与 OM 值.不同地域土壤属性间相关关系存在共性:pH 值与 EC 正相关,二者都与 OM 负相关.这是因为盐碱化程度越高,碱性盐分含量越高,EC 越大,碱性更强,pH 值更大;而当碱性盐溶解于水中表现出强碱性时,OM 遭到破坏并溶解,OM 含量降低.

表 1 不同地域土壤属性间的显著相关关系列表

	OM	pH	EC
OM	1	-0.74 ₁ ^{**} ; -0.87 ₃ ^{**}	-0.76 ₂
pH	-	1	0.68 ₁ ^{**}
EC	-	-	1

注: ** ,显著性水平为 0.01.相关系数下标表示不同地域编号.

2.3 土壤属性与光谱特征关系

不同地域土壤属性间相关关系有差异,相应地,不同地域土壤属性与土壤光谱特征的相关关系也不同.表 2列出了不同地域 OM、pH、EC与土壤光谱反射率、一阶微分、去包络光谱指数之间的最大相关系数 (R_{OM}^2 、 R_{pH}^2 、 R_{EC}^2) (地域 2样点较少未列出).不同地域不同土壤属性与一阶微分、去包络线光谱指数的相关系数显著优于反射率.说明微分与去包络光谱处理方法部分消除了测试过程中噪声的影响,起到了归一化作用;从相关系数大小来看,微分的结果略优于去包络线,但微分方法得到的不同地域、不同土壤参数的最大相关系数所在波段位置差异较大,即基于此相关关系所建立的土壤参数光谱模型自变量不同,模型普适性差;由去包络线方法得到的土壤光谱指数只与光谱吸收谷的形状特征有关,对于特定的土壤类型(如盐碱土),吸收谷的位置是相对固定的,该光谱指数与土壤参数的相关关系更为稳定,同时二者的最大相关系数与 G_5 相联系,因而基于此关系得到的模型更适于不同类型土壤盐碱化程度的比较与评价.值得注意的是,地域 1与地域 3土壤电导率与各光谱特征的相关系数 (R_{EC}^2) 均相反 (地域 1为负相关,地域 3为正相关),说明地域 1与地域 3的盐离子成分不同.

2.4 土壤参数高光谱模型

对于不同地域,由于土壤理化参数及其与光谱指数间相关关系的差异,土壤参数高光谱模型也不同.图 2显示的是不同地域基于一阶微分、 $G_5 - J_R$ 的 pH 高光谱预测模型 (a,地域 1; b,地域 3). 2个模型的 F检验显著性水平均为 0.0001,调整决定系数均大于 0.8,均方根差在 0.25以下,地域 3的均方根差为 0.1,说明模型的预测精度较高,稳定性好,可以用于盐碱土 pH值的预测.

表 2 土壤参数与光谱反射率、一阶微分、去包络线特征指数最大相关系数对比

Table 2 The biggest correlation coefficients between soil parameters and reflectance, spectral indices

	/nm	R_{OM}^2	/nm	R_{pH}^2	/nm	R_{EC}^2
反射率	地域 1	1030 - 0.57	1140	0.20	500	- 0.48
	地域 3	1225 - 0.89**	2310	0.86**	475	0.48
	all	1135 - 0.75**	1490	0.27	810	0.52
一阶微分	地域 1	1420 - 0.87**	2260	0.92**	1930	0.88**
	地域 3	520 - 0.95**	2260	0.95**	1905	- 0.75**
	all	2265 - 0.81**	2260	0.77**	2010	0.83**
去包络线	吸收特征	R_{OM}^2	吸收特征	R_{pH}^2	吸收特征	R_{EC}^2
光谱指数	地域 1	G_5-S 0.80**	G_5-W 0.83**	G_2-B - 0.84**		
	地域 3	G_5-S 0.91**	G_5-J_R 0.98**	G_3-L 0.52		
	all	G_5-S 0.73**	G_5-S - 0.81**	G_4-W 0.60**		

注: ** ,显著性水平为 0.01.

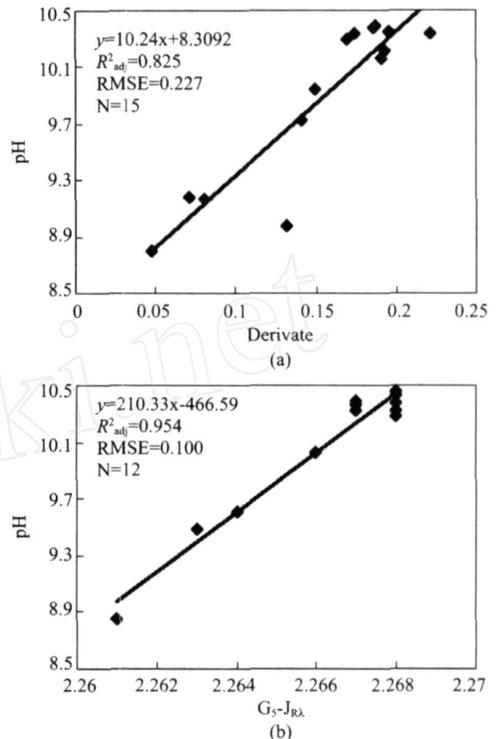


图 2 基于一阶微分、 $G_5 - J_R$ 的 pH 高光谱模型 (a,地域 1; b,地域 3) Fig 2 pH spectral models basing on derivate and $G_5 - J_R$ (a, region1; b, region 3)

由图可知, pH 值在 < 10.2 时,其与光谱指数 (一阶微分、 $G_5 - J_R$) 之间为线性关系,高光谱模型模拟效果较理想; pH 值 > 10.2 时,模型出现过饱和现象,盐碱土光谱指数对 pH 值的变化不再敏感,而 pH 值 > 10.2 的采样点一般为碱斑,预测碱斑的 pH 值对于评价盐碱化程度已没有任何意义 (碱斑已是严重盐碱化程度),即只要判定该样点为碱斑就已达到目的.所以基于土壤光谱指数的高光谱模型可以预测盐碱土的 pH 值,尤其是轻、中度盐碱化土壤,可以用于土壤的盐碱化程度评价.

与已有研究相比,本研究得到的盐碱化评价光谱模型精度较高,是因为已有研究大多以单波段反射率或多波段反射率组合作为模型自变量,而本文以利用去包络线方法获取的反射光谱曲线吸收谷相关参数作为模型自变量,吸收谷参数是基于土壤反射光谱波形特征得到的光谱指数,比反射率对土壤表面状况、噪声、测试条件等影响的敏感性更低,建立的模型鲁棒性更强.

3 结语

1. 盐碱土在 400 ~ 2500nm 的范围内主要有 5 个明显的吸收谷,分别位于 470 ~ 560、610 ~ 740、

1370 ~ 1550, 1870 ~ 2120和 2170 ~ 2270nm. 草地与洼地土壤的吸收特征相近,而碱斑土壤由于富含盐分在5个吸收谷范围的吸收特征均显著强于其他土壤.

2 不同地域土壤属性间相关关系存在共性: pH值与 EC正相关,二者都与 OM负相关.

3 微分、去包络线方法得到的光谱指数与土壤属性的相关系数显著优于反射率,从相关系数大小来看,微分的结果略优于去包络线,但去包络线方法得到土壤光谱指数普适性更强,适于不同类型土壤盐碱化程度的比较与评价.

4 基于土壤光谱指数的高光谱模型可以准确预测盐碱土 pH值,可用于土壤的盐碱化程度评价.

REFERENCES

- [1] LI Qu-Sheng, QU Shan-Wen, DENG Wei Study on the secondary saline-alkalization of land in songnen plain [J]. *Scientia Geographica Sinica* (李取生, 裘善文, 邓伟. 松嫩平原土地次生盐碱化研究. *地理科学*), 1998, 18 (3): 268—272.
- [2] GUAN Yuan-Xiu, LU Huan A review of regional soil salinization monitoring by remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (关元秀, 刘焕. 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.
- [3] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near-infrared spectral features of salt crusts formed from different brines [J]. *Annali di Chimica*, 2004, 94 (4): 315—323.
- [4] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80: 406—418.
- [5] Ben-Dor R, Patkin A, Banin A, et al Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data—a case study over clayey soils in Israel [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23 (6): 1043—1062.
- [6] LU Qing-Sheng, LU Gao-Huan, LI Hui-Guo Preliminary study on relationships between soil salinity and above vegetation field-derived spectra in Liaohe River Delta, Liaoning Province, China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (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.
- [7] PU Rui-Liang, GONG Peng *Hyperspectral Remote Sensing and its Applications* [M]. Beijing: Higher Education Press (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.
- [8] HE Ting, WANG Jing, CHENG Ye, et al Study on spectral features of soil Fe₂O₃ [J]. *Geography and Geo-Information Science* (何挺, 王静, 程焱, 等. 土壤氧化铁光谱特征研究. *地理与地理信息科学*), 2006, 3 (2): 30—34.
- [9] XU Wei-Dong, YN Qiu, KUANG Ding-Ba Comparison of different spectral match models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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.
- [10] DUAN Hong-Tao, ZHANG Bo, LU Dian-Wei, et al Relationship between fluorescence peak spectral features and chlorophyll- in lake Chagan [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (段洪涛, 张柏, 刘殿伟, 等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 响应关系研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25 (5): 355—359.