

滨海盐土盐分含量与其光谱特征的关系研究

卢霞

(淮海工学院 测绘工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要:以连云港典型滨海盐土盐分含量和室内高光谱反射率为研究对象,分析了盐土的光谱特征和盐分含量的分布特点,研究了土壤盐分含量与光谱反射率及其变换形式之间的相关性。运用多元逐步线性回归和曲线模拟构建土壤盐分含量的高光谱预测模型。结果表明,盐土在 400~900 nm 范围内整体呈现先下降后缓慢上升的规律,在 600~625 nm 范围内不同土样的反射率存在较大差异。土壤盐分含量与光谱反射率的一阶导数以及反射率倒数的一阶导数存在显著相关性,与 615 nm 波段的反射率一阶导数相关性最大,相关系数达-0.739。运用 S 函数构建土壤盐分含量的预测模型精度最高, R^2 为 0.555。该研究可为深入探讨典型滨海盐土盐分含量的快速检测提供一种新的途径和方法。

关键词:盐土;高光谱;盐分含量;反射率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)05-0186-05

中图分类号: TP79, S153.6

Relationship Between Saline Concentration and Its Reflectance Spectra for Seashore Saline Soil

LU Xia

(School of Geodesy and Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

Abstract: Saline concentration and corresponding indoor hyperspectral reflectance spectra for seashore saline soil samples were taken as research objects. Characteristics of reflectance spectra and the distribution pattern of soil salinity were analyzed in detail. Accordingly, correlations between soil salinity and its reflectance spectra and transformation of spectra were discussed deeply. Then, estimation models of soil saline concentration were established by using multivariate stepwise linear regression and curve estimation method. Results showed that the reflectance spectra ranging from 400 to 900 nm presented a feature of decreasing firstly and then gradual increasing, while from 600 to 625 nm, the reflectance spectra had a large difference for different soil samples. There existed significant correlation between soil salinity and first derivatives of reflectance spectra and its inverse. The largest correlation coefficient was up to 0.739. Soil salinity can be best estimated by using S function and the R^2 was 0.555. The research may provide a new measure for further discussing the rapid detection of soil salinity at a large scale.

Keywords: saline soil; hyperspectral; saline concentration; reflectance

土壤光谱反射率能综合反映土壤的理化特征和内在结构,这为研究土壤遥感技术奠定了良好的物理基础,也为研究土壤本身属性提供了一个新的思路。近年来,国内外应用高光谱技术研究土壤理化参数的研究已经取得了一定的进展^[1-19]。

陈祯^[1]探讨了应用土壤的近红外光谱特征提取土壤水分信息,结果表明土壤水分光谱的特征波段主要有 4 个波段,分别是 1 400, 1 900, 2 050 和 2 200 nm。土壤含水量分析模型表明,在取样困难、样本容量小的条件下,利用一阶导数相对特征值变化量作为输入信

号特征矢量,遗传算法优化参数的支持向量机法进行近红外光谱反射率反演土壤重量含水量和体积含水量模型的构建效果较好。卢艳丽等^[2]利用土壤光谱反射率曲线斜率变化差异初步确定了土壤类型,并通过相关分析构建了不同土壤类型的有机质含量的回归预测模型。

刘焕军等^[3]基于室内土壤光谱反射率研究了土壤线的可行性并计算与土壤线有关的植被指数用于研究植被理化参数。刘焕军等^[4]基于土壤室内反射光谱数据应用去包络线方法提取土壤光谱指数,利用神经

收稿日期:2012-02-28

修回日期:2012-04-16

资助项目:江苏省高校自然科学研究面上项目“典型滨海盐土植被高光谱检测”(10KJB170001)

作者简介:卢霞(1976—),女(汉族),江苏省泰兴市人,博士学位,讲师,研究方向为高光谱环境遥感。E-mail:luxia1210@163.com。

网络技术进行土壤分类研究,并探讨了基于土壤反射光谱特性进行土壤分类的可行性。以上研究主要集中在如何利用土壤野外或室内的反射光谱反演或构建土壤有机质、氮、重金属、含水量的预测模型,而在探讨滨海盐渍土区的盐分含量与其反射光谱率之间的关系的研究则比较少。

黄明祥等^[15]以杭州湾南岸不同围垦历史条件下形成的海涂盐土为研究对象,重点研究了海涂土壤反射光谱特征及其土壤砂粒含量的预测模型。Farifteh 等^[16]应用最小二乘回归(PLSR)和人工神经网络法(ANN)初步构建了 3 种情况(实验室、野外和高光谱遥感影像)下的土壤盐分与土壤反射光谱之间的预测模型,模型精度高。结果表明,土壤盐分与土壤反射光谱呈现线性函数关系。Zhang 等^[17]采用植被指数应用多元偏最小二乘法探讨了耐盐植被与其根部土壤盐分之间的关系。

本研究以典型滨海盐土区的土壤反射光谱特征与其土壤盐分含量之间的关系为研究对象,在分析滨海盐土反射光谱特征的基础上,对光谱数据进行各种预处理,选用典型参数作为模型的自变量,应用线性和非线性模型,对土壤盐分含量进行预测,并分析了不同的模型对预测精度的影响,可为探讨土壤盐分的光谱诊断特征提供思路,也可为应用高光谱遥感技术大尺度地快速检测土壤盐分提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于连云港市临洪河口与北太平庄闸之间的狭长地带,该区域内盐沼植被丰富,主要的植物群落有大米草群落、芦苇群落、盐蒿群落和碱蓬群落等。区域土壤为黄淮冲积物,经海上盐化和成陆后经淡水淋融而成。地势低平,排水不畅,地下水矿化度大于 2 g/L。土壤质地中壤—轻黏,适耕性差,保水保肥较好,土壤肥力中等,潜在肥力高。气候属暖温带南缘湿润性季风气候,常年平均气温 14℃,多年平均降水量 930 mm。

1.2 土壤样线布设和样本采集

为探讨盐沼植被区域土壤盐分含量的空间分布特征以及土壤盐分与土壤反射率可能存在的反演关系,从两个方向上采集土壤样本。一是沿着研究区域的南北方向即沿着临洪河方向,以距海的距离远近采集土壤样本。二是沿着研究区域的東西方向按照盐沼植被分布的特点和类型采集土壤样本。调查区内共设 4 条样线。1 号线自滨海的海岸向南,随着距海远近,沿着临洪河采集 5 个土样,分别记为 S_{19} , S_{18} ,

S_{20} , S_{10} , S_{21} 。根据地貌变化、植被种类布设另外 3 条样线,均垂直于 1 号样线。2 号样线起点为距离大新六圩东南方向 514 m,沿线采集 4 个土样,分别记为 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 。3 号样线基于植被种类不同,采集 5 个土样,分别记为 S_5 , S_6 , S_7 , S_8 , S_9 。4 号样线的样点几乎都分布于盐沼,处于路边坡下,共采集 7 个土样,分别记为 S_{11} , S_{12} , S_{13} , S_{14} , S_{15} , S_{16} , S_{17} 。采集的土壤样共 21 个,所有土壤样品的采样深度均为 0—20 cm,采样时间为 2011 年 4 月 23 日。采集好的土样带回实验室,经烘干、研磨并通过 1 mm 孔筛以备测试土样理化性状和反射光谱。

1.3 分析测定

1.3.1 土壤盐分含量的测定 利用雷磁 DDSJ-308A 测定样品溶液的电导率,然后运用数理统计方法对土壤盐分含量和电导率进行回归分析,得出电导率与土壤盐分含量成一次线性相关,从而得出溶液的盐度,最后根据数学关系换算为土壤盐分含量。

1.3.2 土壤反射率测量 采用美国 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 便携式光谱仪(350~1 050 nm)进行土壤反射率测量。测量时,将处理好的土样置于直径 9.5 cm,深 1.8 cm 的玻璃器皿中,充满后将土壤表面刮平;室内照明光源距土样表面的距离为 100 cm,照明角度为 45°;光谱仪的裸光纤探头置于土样的正上方 18 cm;整个操作过程要求在暗室进行,测试人员着装黑色或深灰色,光谱仪需预热 15 min,照明光源需预热 20 min,以确保光谱测试外在客观条件一样。每个土样测定 10 条光谱反射率曲线后,取平均值作为该土样的光谱反射率值。

1.4 数据处理

文中土壤样品的盐分数据用 SPSS 软件进行处理分析;盐土反射光谱数据首先用 Excel 软件进行反射率、反射率一阶导数和反射率对数的一阶导数处理,之后利用 SPSS 软件对整理后的数据进行相关分析、多元统计回归等分析处理。

2 结果与讨论

2.1 滨海盐土盐分含量的数据统计分析

研究区域内 4 条样线、21 个土样的盐分含量的统计分析结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,土壤盐度的含量在 0.205~17.289 g/kg,平均值 3.537,标准差 4.691,峰度 5.99,数据分布集中于中数,也就是说数据分布比较陡峭、狭窄,数据空间变异性大。数据变异系数为 133%。

本文采用域法识别特异值(即偏离均值加减 3 倍标准差的数值),并以正常的最大值和最小值来代替

特异值。土壤样本的特异值检验参数为:盐含量的平均值为 3.537 g/kg,标准差为 4.691 g/kg,正值区

间为(0,17.61)。按照域法进行检验,结果表明土壤盐分数据不存在特异值,均符合标准。

表 1 土样盐分含量的统计分析结果

要素	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
盐分含量	0.205	17.289	3.537	4.691	133	2.05	5.99

在特异值识别的基础上,对 4 条样线上的土样的盐分含量进行趋势分析。1 号样线上分布 5 个土样 S₁₉,S₁₈,S₂₀,S₁₀,S₂₁,其中 S₁₉ 位于临洪河入海口附近,S₁₈,S₂₀,S₁₀ 3 点沿着临洪河依次布设,S₂₁ 位于临洪河支流新沐河旁。在临洪河上的 3 点,随着距海的距离越来越远,土样的盐分含量依次递减,但 S₂₁ 样点的盐分含量则又急剧上升,但仍然低于 S₁₉。其他 3 条样线的布设均沿着盐沼植被分布坡面进行,其土样盐分含量的分布没有明显的递增递减规律,但土样 S₂ 的盐分含量最大,为 15.942 g/kg,也低于 S₁₉;除此之外,土样的盐分含量大都介于 0.3~6.5 g/kg。对于这 3 条样线上的土壤盐分含量是否对盐沼植被群落结构空间分布格局有一定影响尚待进一步研究。

2.2 滨海盐土反射光谱特征分析

21 个土样的室内反射光谱如图 1—2 所示。图 1 列出了 1—10 土样的室内反射光谱曲线,土样 1 的反射光谱与其他土样相比,反射曲线显得较为异常。除了反射率在 400~900 nm 波段范围内明显高于其他样本之外,波形也明显不同,呈现一种逐渐递增的趋势。其他土样的反射率从 400 nm 开始逐渐下降,到 450 nm 附近降到了最低点,此后反射率逐渐上升;在 600~625 nm 波段范围内,除 2 号和 6 号土样之外,其他土样的反射率呈现双倒 U 型的起伏规律。

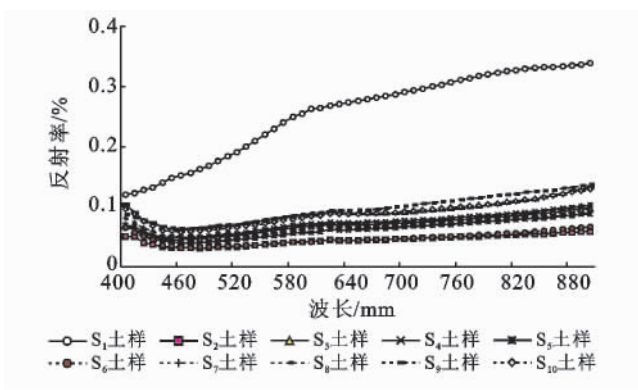


图 1 1—10 土样的室内反射光谱曲线

图 2 列出 11—21 土样的室内反射光谱曲线,反射率从 400 nm 开始逐渐下降,到 450 nm 附近降到了最低点,此后反射率逐渐上升;在 600~625 nm 波段范围内,除 17 和 21 土样之外,其他土样的反射率呈

现倒 U 型的起伏变化规律。综合以上分析,21 个土样的反射率从整体上看呈现先下降后上升的变化趋势,但在 600~625 nm 范围内,反射率存在较大差异。

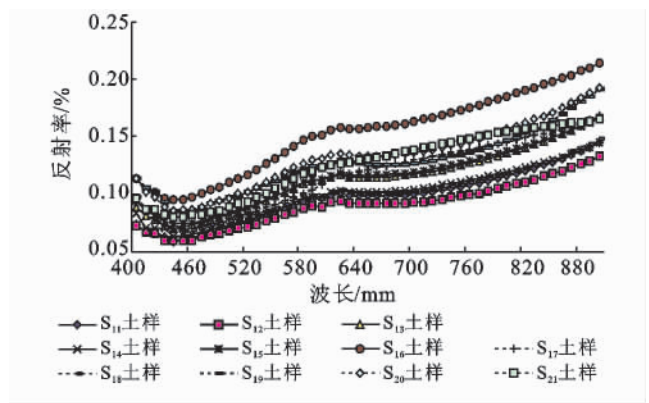


图 2 11—21 土样的室内反射光谱曲线

2.3 基于小样本条件下的滨海盐土盐分含量高光谱预测模型

2.3.1 滨海盐土盐分含量与其对应室内反射光谱的相关分析 依据以上对盐土室内反射光谱特征的分析,很难直接从光谱曲线上识别盐分含量在反射光谱曲线上的诊断特征。本文将 21 个土壤样本的盐分含量与其对应的介于 400~900 nm 的反射率、反射率的一阶导数以及反射率对数的一阶导数分别进行相关分析,因数据不满足正态分布的条件,故采用 Spearman 斯皮尔曼秩相关系数。

表 2 中列出了与盐分含量显著相关的波段反射率、反射率的一阶导数或反射率对数的一阶导数。从表 2 中可以看出,土壤盐分含量与 400~900 nm 波段范围内的光谱反射率不存在显著相关,而与反射率的一阶导数以及反射率对数的一阶导数则存在显著相关,盐分含量与反射率一阶导数相关系数最大为 -0.739;与反射率对数的一阶导数相关系数最大为 -0.599。盐分含量与反射率一阶导数或对数一阶导数显著相关的敏感波段存在较强的一致性,主要体现在 401,402,417,418,429,433,522,600,601,602,614,615 和 616 nm。

2.3.2 滨海盐土盐分含量的高光谱预测模型 以上土壤盐分含量与土壤室内反射光谱及其变换形式的

相关分析结果显示,土壤盐分含量与土壤室内反射光谱在某些波段处的反射率一阶导数以及反射率对数的一阶导数存在显著相关。因此,将表 2 筛选出的敏感波段的反射率一阶导数和反射率对数一阶导数分别与土壤盐分含量进行回归分析。将 400,401,402,416,417,418,429,433,522,600,601,602,614,615,616,763 nm 波段的反射率一阶导数,或 401,402,417,418,429,433,437,454,521,522,550,600,601,602,614,615,616,697,717,732,738,739,762,767,771 和 827 nm 波段的反射率对数一阶导数,分别作为自变量,土壤盐分含量作为因变量;最终对模型的贡献达到显著水平而留在模型中的有 $(R_{601})'$, $(R_{416})'$, $\lg(R_{739})'$ 。逐步回归的结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,基于反射率的一阶导数构建的土壤盐分含量高光谱模型精度要明显高于基于反射率对数的一阶导数,调整后的 R^2 为 0.359,模型估算标准误差为 3.847。

基于多元逐步线性回归构建的土壤盐分含量模型完全满足回归方程检验和回归系数检验,但判定系数 R^2 数值较小,另外从回归平方和(SSR)和残差平方和(SSE)的数值及其含义来看,自变量以外的其他因素对因变量的影响还是比较大的。鉴于以上分析,本文基于相关分析的结果,将与土壤盐分含量相关系数绝对值最大的 615 nm 处反射率的一阶导数作为自变量 x ,土壤盐分含量作为因变量 y ,采用各种曲线模拟的方法得到土壤盐分含量的估算模型,结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,运用 S 函数得到土壤盐分含量高光谱预测模型精度较高,多重判定系数达 0.555,

估算标准误差为 0.826,显著性检验 p 为 0.000,而且回归平方和远大于残差平方和。综合多元逐步线性回归和曲线模拟法构建的土壤盐分含量高光谱预测模型,以 615 nm 处反射率的一阶导数作为自变量,运用 S 函数构建土壤盐分含量的高光谱预测模型最高。

表 2 土样盐分含量与其对应反射率及其变换的相关分析结果

定义	波段	r	波段	r
反射率一阶导数	400	0.516*	522	0.458*
	401	0.548*	600	-0.440*
	402	0.451*	601	-0.538*
	416	0.455*	602	-0.477
	417	0.668**	614	-0.584*
	418	0.645**	615	-0.739**
	429	0.443*	616	-0.523*
	433	0.447*	763	0.434*
	反射率对数一阶导数	401	-0.513*	602
402		-0.599**	614	0.449*
417		-0.579**	615	0.495*
418		-0.542*	616	0.529*
429		-0.444*	697	0.461*
433		-0.473*	717	0.448*
437		-0.439*	732	-0.575**
454		-0.451*	738	0.586**
521		-0.438*	739	0.562**
522		-0.482*	762	-0.465*
550		-0.461*	767	0.445*
600		0.491*	771	0.547*
601		0.552**	827	0.453*

注: **表示显著性水平为 1%; *表示显著性水平为 5%; r 表示相关系数。

表 3 应用多元逐步线性回归法构建滨海盐土盐分含量的高光谱预测模型

自变量	模型	判定系数 R^2	调整后的 R^2	估算标准误差	显著性检验 p
$(R_{601})', (R_{416})'$	$Y_{\text{salt}} = 12.724 - 27.896 \cdot 2(R_{601})' + 3.646 \cdot 637(R_{416})'$	0.424	0.359	3.847	0.007
$\lg(R_{739})'$	$Y_{\text{salt}} = 10.187 - 12718.561(\lg R_{739})'$	0.260	0.221	4.243	0.018

表 4 应用曲线模拟法构建滨海盐土盐分含量的高光谱预测模型

模型	判定系数 R^2	调整后的判定系数 R^2	估算标准误差	显著性检验 p
线性函数 $y = -28420.5x + 11.918$	0.263	0.224	4.235	0.018
对数函数 $y = -77.462 - 9.919 \ln x$	0.323	0.288	4.057	0.007
逆函数 $y = -7.525 + 0.003x$	0.366	0.333	3.926	0.004
二次函数 $y = 32.410 - 159587x + 2E+008x^2$	0.406	0.340	3.906	0.009
幂函数 $\ln y = \ln(1.22E-011) - 3.147 \ln x$	0.517	0.491	0.861	0.000
S 函数 $\ln y = -2.845 + 0.001/x$	0.555	0.532	0.826	0.000

3 结论

本文分析了土壤盐分含量与土壤反射率及其变换形式之间的相关性,并运用多元逐步线性回归和曲线模拟方法构建土壤盐分含量高光谱预测模型。

(1) 研究区域内土壤反射光谱特征在 400~900 nm 范围内整体上呈现先下降后缓慢上升的规律;但在 600~625 nm 范围内,反射率存在较大差异。

(2) 土壤盐分含量与土壤反射率不存在显著相关;与土壤反射率一阶导数和反射率对数的一阶导数存在显著相关;与 615 nm 波段的反射率一阶导数相关性最大,相关系数为-0.739。

(3) 土壤盐分含量预测模型结果显示,应用 S 函数构建的土壤盐分含量高光谱预测模型精度最高,判定系数 R^2 为 0.555,能够用于土壤盐分含量的野外速测。

尽管 Farifteh 等^[16]认为土壤盐分与土壤反射呈现线性关系,但通过本文对连云港典型滨海区盐土盐分含量与其对应室内反射光谱的相关分析和构建预测模型来看,土壤盐分与土壤反射率的一阶导数虽然用线性函数也可模拟,但用 S 函数模拟精度相对要更高一些。两者之间研究成果存在差异,其可能的原因是:研究区域的不同以及土壤类型的不同可能对研究结果存在一定程度的影响;本文研究土壤反射率仅仅限于风干碾磨的土样,且在暗室条件下进行的光谱测定,测试光照、角度的设置等客观因素都有可能影响研究成果。尽管如此,以上原因分析也仅仅是从主观、定性角度出发的,在以后的研究中,应着重定量分析这些客观要素,以挖掘出真正的原因,进而也可进一步验证本文的研究成果。

[参 考 文 献]

- [1] 陈祯. 基于近红外光谱分析的土壤水分信息的提取与处理[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
- [2] 卢艳丽,白由路,杨俐苹,等. 东北平原不同类型土壤有机质含量高光谱反演模型同质性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2):456-463.
- [3] 刘焕军,张柏,宋开山,等. 基于室内光谱反射率的土壤线影响因素分析[J]. 遥感学报,2008,12(1):119-127.
- [4] 刘焕军,张柏,张渊智,等. 基于反射光谱特性的土壤分
- 类研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(3):624-628.
- [5] 刘焕军,张柏,刘殿伟,等. 松嫩平原典型土壤高光谱定量遥感研究[J]. 遥感学报,2008,12(4):647-654.
- [6] 乔璐. 哈尔滨城区土壤高光谱特性与 TM 遥感的定量反演[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [7] 韩阳,赵云升,赵乃卓,等. 森林土壤多角度高光谱偏振反射影响研究初探[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(3):702-706.
- [8] 程街亮. 土壤高光谱遥感信息提取与二向反射模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [9] 杨永兴,刘长娥,杨杨,等. 长江河口九段沙上沙湿地芦苇与土壤之间营养元素的灰色关联分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1294-1301.
- [10] 魏娜. 土壤含水量高光谱遥感监测方法研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [11] 刘焕军,张新乐,郑树峰,等. 黑土有机质含量野外高光谱预测模型[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(12):3355-3358.
- [12] 卢艳丽,白由路,王磊,等. 黑土土壤中全氮含量的高光谱预测分析[J]. 农业工程学报,2010,26(1):256-261.
- [13] 温健婷,张霞,张兵,等. 土壤铅含量高光谱遥感反演中波段选择方法研究[J]. 地球科学进展,2010,25(6):625-629.
- [14] 黄长平,刘波,张霞,等. 土壤重金属 Cu 含量遥感反演的波段选择与最佳光谱分辨率研究[J]. 遥感技术与应用,2010,25(3):353-357.
- [15] 黄明祥,程街亮,王珂,等. 海涂土壤高光谱特性及其砂粒含量预测研究[J]. 土壤学报,2009,46(5):932-937.
- [16] Farifteh J, Van der Meer F, Atzberger C, et al. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN)[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,110(1):59-78.
- [17] Zhang Tinting, Zeng Shenglan, Gao Yu, et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity[J]. Ecological Indicators, 2011,11(6):1552-1562.
- [18] 徐彬彬. 我国土壤光谱曲线之研究[J]. 环境遥感,1991,6(1):61-71.
- [19] Liu W D, Baret F, Gu X F, et al. Relating soil surface moisture to reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,81(2):238-246.