

基于近地高光谱的土壤氯离子含量估测

王明宽¹, 莫宏伟¹, 陈红艳²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院 地理科学系, 湖南 湘潭 411201; 2. 山东农业大学, 山东 泰安 271000)

摘要: [目的] 建立土壤氯离子与高光谱波段的多元线性回归模型, 获取盐渍化信息, 为盐分的高精度提取提供更有效的方法, 为农业生态环境重建工作提供科学依据。[方法] 以山东省垦利县作为研究区, 于 2014 年 10 月 5—7 日野外采集 93 个土壤样本, 利用 ASD 高光谱仪野外采集土样高光谱数据并进行预处理, 然后采用多元回归和主成分分析方法建立估测氯离子含量的高光谱模型, 以快速估测氯离子含量。[结果] 氯离子在近红外 749, 830, 987, 1301, 1 432, 1 486 nm 较为敏感, 在土壤光谱分析的基础上, 得到室内风干土壤氯离子含量预测最优模型, 模型均通过 *T* 检验和 *F* 检验, 能较好地预测土壤氯离子含量。[结论] 研究区土壤各组分盐离子中, 阳离子以钠离子为主, 阴离子以氯离子为主, 该模型使间接得到土壤盐分含量具有较好可行性。

关键词: 氯离子; 高光谱; 反演; 多元线性回归; 主成分分析

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)06-0214-06

中图分类号: TP79, S153.6

文献参数: 王明宽, 莫宏伟, 陈红艳. 基于近地高光谱的土壤氯离子含量估测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 214-219. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.036; Wang Mingkuan, Mo Hongwei, Chen Hongyan. Estimating content of soil chloride based on hyperspectral data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 214-219. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.036

Estimating Content of Soil Chloride Based on Hyperspectral Data

WANG Mingkuan¹, MO Hongwei¹, CHEN Hongyan²

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hu'nan University of Science and Technology, Xiangtan, Hu'nan 411201, China; 2. Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: [Objective] Constructing a multiple linear regression model of describing soil chloride ion with high spectral bands as independent variables to get soil salinization information, in order to provide a more effective method for the high precision extraction of salt, and to provide scientific basis for the reconstruction of agricultural ecological environment. [Methods] 93 field soil samples were collected and processed by high ASD spectrometer in Kenli County of Shandong Province on October 5 to 7, 2014. A estimating model was built using multiple regression and principal component analysis method to evaluating the content of chloride ion quickly. [Results] The chloride ion is sensitive in the 749, 830, 987, 1 301, 1 432 and 1 486 nm of spectral bands. An optimum model for predicting chlorine ion content in indoor dried soil was obtained on the basis of soil spectral analysis, this model was verified by Student's *t* test. [Conclusion] The cations in the soil components of the study area are mainly sodium ions, the anions are mainly chloride ions, and this model makes it possible to obtain soil salinity indirectly.

Keywords: chloride ion; hyperspectral; inversion; multiple linear regression; principal component analysis

中国分布着较大面积的盐碱土, 而且类型多样。在干旱、半干旱地区盐渍化土壤, 以水溶性的氯化物和硫酸盐为主, 土壤水溶性盐是盐碱土的一个重要属

性, 是限制作物生长的障碍因素。滨海地区由于受海水浸渍, 生成滨海盐土, 所含盐分以氯化物为主^[1]。土壤中水溶性盐的分析是研究盐渍土盐分动态的重

收稿日期: 2016-10-24

修回日期: 2016-12-21

资助项目: 湖南省教育厅科学研究项目“湘江流域土地利用变化及土壤潜力转移图谱研究”(14C0467); 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室开放基金项目(2014GISNELJ004)

第一作者: 王明宽(1991—), 男(汉族), 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 与生态补偿。E-mail: 1057647903@qq.com。

通讯作者: 莫宏伟(1968—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 副教授, 主要从事 GIS 与城乡国土资源评价方面的研究。E-mail: mhw819@sina.com.cn。

要方法之一,对了解盐分和作物生长的影响以及拟订改良措施都是十分必要的。利用地面测量得到的光谱数据,结合土壤样品的地球化学成分,对土壤氯离子含量进行反演,是应用光谱遥感技术定量监测盐碱化土壤盐分含量的重要方法。目前,已有很多在不同地区对土壤中氯离子、盐分含量和土壤电导率与盐分关系进行研究,但是不同地区因为受土壤母质和盐渍化成因不同,使得土壤盐分含量与各离子和电导率关系不同,并且随季节变化。本文在垦利地区野外调查和采样,通过研究高光谱特征与氯离子关系旨在了解该地区土壤盐分含量和离子状况,揭示土壤盐分分布特征。近年来,国内外许多学者在实地土壤光谱测量的基础上,通过建立各种不同类型的分析模型,实现了对有机质、pH 值、土壤水分、含盐量等土壤参数估测^[2-5]。氯离子虽然不是土壤组成重要成分,但他是反映土壤盐分的重要指标。屈永华^[6]对内蒙古河套地灌区土壤全盐、硫酸根离子、钾、钠总含量和 pH 值建立偏最小二乘回归模型,得到较好的反演精度,但是建模方法比较单一;翁永玲^[7]利用统计分析方法,对黄河三角洲盐渍土盐分特征进行了研究,结果表明研究区表层土壤总体含盐量较高且盐渍化程度差异较大;卢霞^[8]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,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;李晓明等^[9]以陕北典型半干旱区为研究对象,利用包络线去除后高光谱反射率对盐分进行定量反演研究;陈红艳^[10]采用遗传算法结合偏最小二乘(GA-PLS)构建潮土碱解氮含量回归估测模型,并取得良好结果;扶卿华等^[11-12]研究在不同质地和水盐条件下土壤光谱反射率的变化,利用 BP 神经网络能够很好地反映土壤含盐量与其反射率间的非线性映射关系;戚浩平^[13]依据土壤理化分析和实验室光谱测量数据,对茶卡-共和盆地土壤盐分及其光谱特征进行分析,发现区域盐渍土为氯化物盐土;关云秀等^[14-15]通过遥感影像数据采用多种数学统计方法对黄河三角洲盐碱地盐分反演,取得较好效果。Mitran^[16]利用高光谱数据对土壤理化性质研究,借助 DISPEC 软件筛选能够反映盐碱化特征的波段,对土壤中可交换钠比例、阳离子交换能力和镁离子预测效果较好;Farifteh 等^[17]应用最小二乘回归和人工神经网络初步构建了 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,模型精度较高;Mashimbye^[18]利用南非地区盐碱化土壤高光谱数据,采用归一化盐度指数和偏最小二乘法,构建盐分预测模型;Kobayashi^[19]对澳大利亚西部利用机载

和星载遥感数据,采用二阶导数算法校正大气高光谱数据受大气和地形因素的影响。从国内外对土壤盐分空间变异研究的成果看,虽然取得了一定的进展,但还处于描述和初步应用阶段,仍然需要不断的发展和完善。并且当前的研究主要集中在小尺度范围,对于大尺度的研究却很少。随着地理信息技术的发展,以 GIS 技术为核心的 3S 技术日益成熟,使各种空间数据的采集、更新、处理和分析能够迅速的进行。GIS 技术在数据的统计分析、模型的建立和制图方面都具有强大的功能,同时能将大量的不同来源,不同格式、结构和不同影像或分辨率的空间数据结合起来,这对地统计学空间分析无疑是一种极大的帮助。GIS 和地统计学相结合,使在大区域范围内进行地统计分析变得较为容易。土壤全盐含量与氯离子含量密切相关,土壤中的氯离子占 70.39%,钠离子占土壤阳离子的 78.1%,因此土壤中氯离子与钠离子是离子的主要形式。用遥感技术识别土壤盐碱化程度的方法土壤基础是利用不同盐碱化的土壤在其光谱反应上具有差异性,因此,研究土壤光谱特征,建立基于光谱分析的土壤氯离子定量反演模型是开展基于遥感技术的土壤盐碱化监测的基础工作。本文以近地面高光谱和实际测量的土壤氯离子数据为基础,根据相关系数确定土壤氯离子的特征波段,建立土壤氯离子与高光谱波段的多元线性回归模型,获取盐渍化信息。通过实测数据对模型进行验证,为盐分的高精度提取提供更加有效的方法,对于改善生态环境,尤其是农业生态环境具有极其重要的意义。

1 研究区概况

垦利县位于山东省东北部黄河三角洲地区的黄河最下游入海口处。其位置为北纬 $37^{\circ}24'$ — $38^{\circ}10'$,东经 $118^{\circ}15'$ — $119^{\circ}19'$ 。县域呈西南、东北走向,南北纵距 55.5 km,东西横距 96.2 km。东濒渤海,西北与利津县隔黄河相望,南接东营市东营区,东北部与东营市河口区毗邻。垦利县属黄河冲积平原,地形沿黄河走向,自西南向东北倾斜,地面坡度为 1/10 000。主要土壤类型有褐土、潮土、盐土、水稻土和砂姜黑土。黄河是辖内的唯一客水河,自董集乡罗家村起,由西向东在新安乡入渤海,境内长 110 km。黄河三角洲的沉积环境、气候条件和土壤母质决定了原生盐渍化土壤在区域内广泛分布,超过 50% 的土地为不同程度的盐渍化土壤^[20]。伴随着当地农业的发展、平原水库的修建和重灌轻排的耕作方式,加上区域本身地下水埋深浅且矿化度高,使黄河三角洲土壤次生盐渍化日趋加剧。受盐渍化的影响使得该区原

本脆弱的生态系统发生退化,植被生境和多种珍稀的野生动物栖息地遭到威胁,土壤盐渍化已成为当地生态系统和农业可持续发展最重要的环境问题。

2 材料与方法

2.1 试验设计

首先根据地形图制定野外采样路线,利用 GPS 确定位置,用 ASD 高光谱仪测定点光谱数据,采样点应尽量均匀分布到研究区的盐碱土中,2014 年 10 月 5—7 日野外采集 93 个土壤样本;然后将获取的盐碱土光谱数据进行去噪处理,得到不同氯离子含量盐碱土光谱曲线图,并挖掘盐碱土光谱曲线特征;最后对盐碱土光谱数据定量分析,包括单波段与氯离子浓度的相关性分析,波段间相关性分析,筛选出能够表征氯离子浓度信息的最佳波段组合。

2.2 土样与高光谱数据预处理

研究中用到的数据采集分析工具有美国 ASD FieldSpec 3 光谱仪、ASD ViewSpec Programs、SPSS 19.0、Office 2010。高光谱采集用到的 ASD FieldSpec 3 光谱仪测量光谱范围为 350~2 500 nm;350~1 000 nm 范围内光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm,在 1 000~2 500 nm 范围内光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。将所采集的 93 个土样敲碎,剔除土壤以外的侵入体,过 1 mm 孔径的筛子并分为两部分:一部分土样化学分析,获取氯离子含量,另外一部分自然风干用于高光谱分析。

土壤近地面反射光谱特征是土壤表层内在理化特性的一种综合反映,盐渍土反射光谱特征主要取决于土壤盐分含量及盐分组成,同时也受到土壤母质、土壤质地、有机质含量、矿物成分及土壤湿度等的影响。室内光谱研究排除了大气干扰,降低了土壤颗粒阴影效应,信噪比高,因此,实验室土壤光谱特征分析是盐渍土遥感定量研究的重要组成。光谱测定分别在等同于暗室的实验室和晴天有光照室外分开进行,每次采集目标光谱前后都进行参考板校正,在视场范围内重复测量 10 次,为降低土样光谱各向异性的影响,获取土样 4 个方向的光谱曲线,取算术平均后得到该土样的反射光谱数据。

2.3 高光谱波段筛选

高光谱数据含有波段数目比较多,一般到几百到上千波段,虽然高光谱为揭示地物的反射特征提供了很好的数据,但是也带来了一系列问题。首先是各个波段之间具有很大的相关性,相互之间影响使预测能力下降;其次是波段的个数远远大于观测样本的个数,如果是最小二乘法样本数尽量是自变量的 2 倍以

上,这就需要从庞大的波段自变量选择主要的敏感波段建立模型。由于影响氯离子的一个很主要的因素就是水分,而且光照、大气还会影响光谱特征,导致土壤实测光谱与实际反射光谱差异,因此本文将土壤状态分为室内风干土、室外风干土、室内原状土,并且对土样的高光谱反射率进行一阶微分处理,一阶微分可以扩大土壤样品之间的光谱特征差异,提高相关性,绘制土样高光谱与氯离子含量相关系数折线图(图 3),寻找在不同状况下的土壤的敏感波段^[17]。

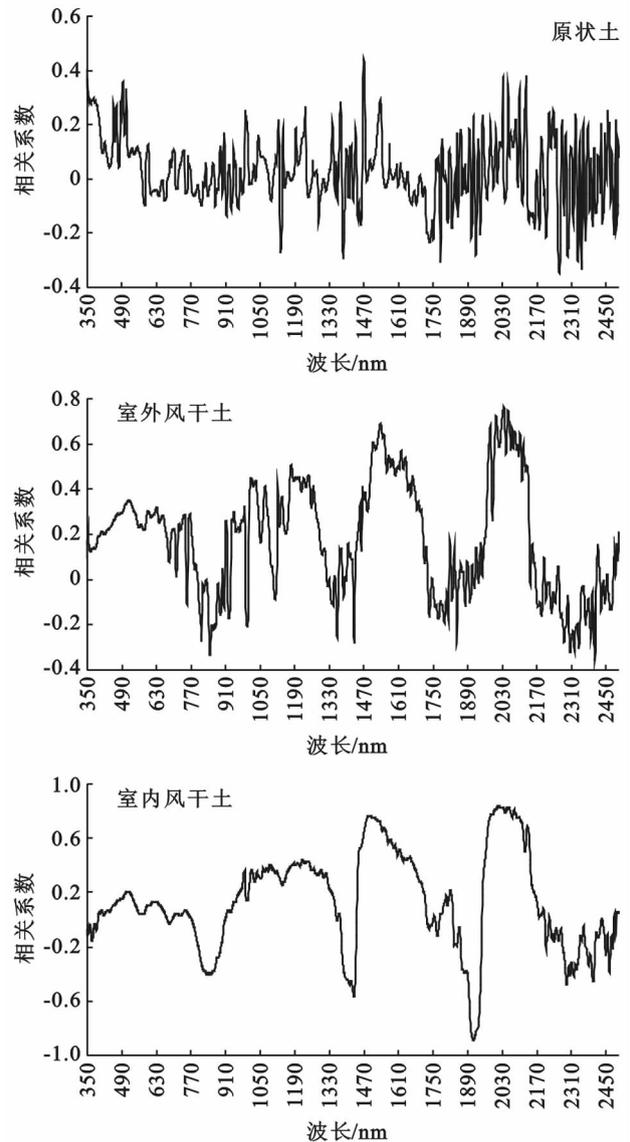


图 3 不同状态土样与氯离子相关性

从土壤与氯离子相关性光谱曲线(图 3)可发现室内风干土样排除水分、光照和大气影响后,光谱更为光滑易判断筛选相关性最高的敏感波长。针对不同状态土样一阶微分处理后进行敏感波长的筛选如表 1 所示。通过上面的波段范围可以看出,在 3 种不同状态土壤中氯离子含量对可见光中的绿光和红光、

近红外波段较敏感,如果能用这些波段建立与氯离子的关系模型,就可以通过遥感影像(特别是 Landsat)

的波谱特征建立与氯离子的关系,为多光谱遥感影像定量反演氯离子提供基础。

表 1 敏感波长统计结果

土样状态	敏感波长/nm											
室内风干土	518	633	752	849	1 018	1 249	1 430	1 497	1 818	1 915	2 135	
室外风干土	527	634	767	847	1 020	1 114	1 431	1 540	1 620	1 845	1 982	2 037
原状土	494	598	669	905	1 134	1 470	1 538	1 780	1 924	2 032	2 126	

3 结果与分析

3.1 一元线性回归分析

对从 3 种状态土样筛选的敏感波长建立一元线性回归模型,入选变量和常数项的 sig. < 0. 1, VIF < 10,所以具有显著性,求得决定系数(R^2)和标准误差(RMSE)(表 2)。通过分析发现,采用一元线性回归分析建立反演氯离子的模型,决定系数最大为 0. 562,相关性很低。将 31 个验证样本代入检验,得到的最大 R^2 为 0. 432, RMSE 为 0. 266,由于此方法作为变量的波长只有一个,大量反映氯离子含量特征的波长丢失,预测效果不是很好,需要寻找更优模型以实现预测氯离子目的。

表 2 一元线性回归模型

土样状态	建模方程	R^2	RMSE
室内风干土	$y=0.757+1249.334b_{518}$	0. 562	0. 201
室外风干土	$y=-0.214+3674.866b_{1020}$	0. 369	0. 279
室外原状土	$y=-0.189+11572.044b_{494}$	0. 223	0. 517

注:回归模型中因变量为氯离子含量(y),b 为高光谱波长反射率,例 b_{518} 为 518 nm 波长反射率。下同。

3.2 多元线性回归分析

在回归分析中,如果有 2 个或 2 个以上的自变

量,就称为多元回归。事实上,一种现象常常是与多个因素相联系的,由多个自变量的最优组合共同来预测或估计因变量,比只用一个自变量进行预测或估计更有效,更符合实际。多元逐步回归法是根据土壤中氯离子含量与土壤反射光谱的相关分析,找出与氯离子相关性较好的光谱特征段,对氯离子含量与特征波段的光谱变量进行多元回归分析^[8,21]。根据回归系数和 F 统计量最高、均方根误差最小的原则,选择氯离子高光谱遥感监测的最佳回归模型。多元逐步回归分析方法简单明了,常被用来确定对于某种化学成分敏感的波长,并说明敏感波长与这种化学成分含量有较好的相关性,据此可以用这些确定的波长位置来估计氯离子含量。对室内风干土样的高光谱经过一阶微分处理的数据进行回归分析,要求 sig < 0. 1, VIF < 10 才具有显著性。对 6 种不同状态下的土样进行波长逐步回归分析建模,结果详见表 3。以上分析结果表明,室内风干一阶微分土样模型决定系数最高为 0. 86,入选波长分别是 806,848 和 1 089 nm、其 RMSE 为 0. 104 2。并对模型进行检验和检验,将 31 个土壤样本进行氯离子预测得到的 R^2 为 0. 751,预测氯离子与实测氯离子相关性斜率为 1. 354,入选的波长为近红外,表明预测效果较好,构建的模型具有实际应用价值。

表 3 多元逐步回归模型

土样状态	回归方程	R^2	RMSE
室内风干一阶微分	$y=0.435+808.828b_{848}+1255.462b_{806}-1537.622b_{1089}$	00. 86	0. 104 2
室内风干去噪	$y=0.13-14.706b_{377}+19.459b_{573}-32.813b_{850}+21.685b_{976}+8.205b_{1795}$	00. 785	0. 141 6
室外风干去噪	$y=-0.119+0.64b_{1818}+0.045b_{1903}+1.104b_{547}$	00. 751	0. 124 0
室外风干一阶微分	$y=0.055-3112.541b_{758}+1931.494b_{1175}+23.711b_{1815}+2179.572b_{2037}$	00. 709	0. 165 0
室外原状一阶微分	$y=-1.096+8852.043b_{1233}+14619.903b_{1470}-13611.145b_{1605}+2.903b_{1846}$	00. 374	0. 370 0
室外原状土	$y=0.101+16.05b_{763}-10.265b_{926}-3.584b_{1093}$	00. 359	0. 245 0

3.3 主成分回归分析

主成分回归分析是一种多元回归分析方法,被广泛应用在化学与测谱学分析中。它利用全部光谱信息并进行压缩,将高度相关的波长点归于一个独立变量,提取为数不多的独立变量建立回归方程,通过

内部检验来防止过度拟合。用预测均方根误差(RMSEP)来评价模型的预测能力。通过降维的方法,对输入的 2 150 个波段进行因子分析,得到 11 个主成分因子,解释方差累计 92%,预测方程较稳定。对选取的 11 个因子作多元线性回归分析,建模样本

62 个,验证样本 31 个,分别得到模型的决定系数 R^2 和均方根差 RMSE。通过 SPSS 19.0 对输入变量进行分析,得到的 11 个因子和方差,根据主成分=因子 \times 对应方差算术平方根得到 11 个主成分。对 11 个主成分建立回归方程结果:模型决定系数 $R^2 = 0.842$,RMSE=0.122,将 31 个样本代入得到预测的决定系数为 $R^2 = 0.765$,RMSE=0.182,可见预测氯离子的主成分分析方法较合适,具有实际的预测意义。

3.3.1 降低输入变量建模 高光谱的多波段,维数较高且样本较少,可以采取对 2 150 个波段进行求取

区间平均值的方法和选取部分波段的方法,鉴于减小输入变量,对区间间隔的决定可以参照遥感影像(Landsat 8 的波谱范围)。去掉水汽吸收的 825 nm 波段,Landsat 8 的 OLI 陆地成像仪的波段范围是 433~1 390 nm。① 高光谱的 350~2 500 nm 波段范围中选择 400~1 500 nm 作为入选变量建立与氯离子的模型;② 分别以 5,9,15 和 23 nm 为间隔波段求取波段区间平均数作为输入变量建立模型。波段区间平均值变量法,以不同间隔平均值为变量分别建立模型(表 4)。

表 4 不同间隔波段精度比较

间隔波段/nm	建模 R^2	建模 RMSE	验证 R^2	验证 RMSE	选入变量	变量数目/个
5	0.829	0.209 5	0.542 9	0.162	b_{157} b_{205} b_{229} b_{338}	403
9	0.840	0.098	0.721	0.137	b_{64} b_{71} b_{141} b_{174}	239
15	0.721	0.234	0.632	0.142	B_{37} b_{14} b_{68} b_{84}	144
23	0.810	0.228	0.523	0.151	B_{51} b_{33} b_{29}	94

b_{157} , b_{205} 和 b_{68} 等分别代表每 5 个波长平均值作为一个均波长,将 350~2 500 nm 波段分成 403 个均波长,第 157 个均波长、第 205 个均波长和第 68 个均波长。根据上表分析发现,将土壤高光谱每隔 9 nm 求取平均波长得到的入选变量构建反演模型精度最高,得到的 $R^2 = 0.84$,RMSE 为 0.098,验证 $R^2 = 0.721$,RMSE 为 0.137,选取的波段分别是:917~925,980~988,1 610~1 618 和 1 907~1 915 nm。对高光谱 400~1 500 nm 作为入选变量建立的模型 $R^2 = 0.778$,RMSE=0.144,将 31 个样本验证得到的 $R^2 = 0.812$,RMSE=0.114,入选的波段为 674,653,860,1 195 nm,对应 Landsat 8 影像的波段 4、波段 5 和波段 9,为遥感影像反演土壤中氯离子及其盐分提供参考。

本研究对采集的土壤样本经不同处理方式获取高光谱数据,借助多元线性回归和主成分分析方法构建土壤氯离子预测模型,采用间隔波长平均值法构建模型自变量,经过对照试验和精度可靠性对比得到最优预测模型: $y = 0.435 + 808.828b_{848} + 1255.462b_{806} - 1537.622b_{1089}$ (y 为 Cl^- 含量),氯离子在近红外 749,830,987,1 301,1 432,1 486 nm 较为敏感,为研究区盐碱地防治和治理提供科学参考。

4 结论

(1) 经过逐步多元线性回归分析得到在高光谱波段中对土壤氯离子相关性较强的有 545,653,674,758,815,860,1 021,1 175,1 195,1 249,1 815 nm,并通过敏感波长建立回归模型,决定系数最大为

0.86, RMSE 为 0.104 2,模型预测 R^2 为 0.51,具有实际的预测氯离子含量重要意义。研究区土壤各组分盐离子中,阳离子以钠离子为主,阴离子以氯离子为主,间接得到土壤盐分含量具有较好可行性。

(2) 通过对高光谱数据预处理和数学模型的建立,得到选入的波段或波段区间,对应多光谱影像的可见光波段和近红外波段,为多光谱遥感影像的反演提供基础。

(3) 土壤氯离子含量与土壤反射率不存在显著相关性,与土壤反射率一阶微分存在显著相关。选择的最优波段与前人总结的略有差异,可能原因:研究区域的不同和土壤类型的不同;本文研究的土壤样本室内外与是否风干,测试时的光照、角度的设置等客观因素也会影响研究结果。

(4) 土壤盐分的变化是一个动态的过程,土壤盐分离子有空间变异性外也存在时间的变异性,同时也要尽可能获取更多更全面的相关数据,如土壤物理性质、土地利用状况、区域地理环境特征等数据,以使后续分析工作易于进行。

【参 考 文 献】

- [1] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 2 版. 北京: 农业出版社出版, 1986: 115-137.
- [2] 宋韬, 鲍一丹, 何勇. 利用光谱数据快速检测土壤含水量的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 675-677.
- [3] 朱登胜, 吴迪, 宋海燕, 等. 应用近红外光谱法测定土壤的有机质和 pH 值[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 196-199.
- [4] Sánchez N, Martínez Fernández J, Piles M, et al.

- Hyperspectral derived indices for soil moisture estimation at very high resolution[C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014;2898-2901.
- [5] Ghosh G, Kumar S, Saha S K. Hyperspectral satellite data in mapping salt-affected soils using linear spectral unmixing analysis[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012,40(1):129-136.
- [6] 屈永华,段小亮,高鸿永,等.内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(5):1362-1366.
- [7] 翁永玲,宫鹏.黄河三角洲盐渍土盐分特征研究[J].南京大学学报:自然科学,2006,42(6):602-610.
- [8] 卢霞.滨海盐土盐分含量与其光谱特征的关系研究[J].水土保持通报,2012,32(5):186-190.
- [9] 李晓明,韩霖昌,李娟.典型半干旱区土壤盐分高光谱特征反演[J].光谱学与光谱分析,2014,34(4):1081-1084.
- [10] 陈红艳,赵庚星,张晓辉,等.基于遗传算法结合偏最小二乘的潮土碱解氮高光谱特征及含量估测[J].中国农学通报,2015,31(2):209-214.
- [11] 扶卿华,倪绍祥,王世新,等.土壤盐分含量的遥感反演研究[J].农业工程学报,2007,23(1):48-54.
- [12] 张丽,蒋平安,武红旗,等.北疆典型土壤反射光谱特征研究[J].水土保持学报,2013,27(1):273-276.
- [13] 戚浩平,翁永玲,赵福岳,等.茶卡—共和盆地土壤盐分与光谱特征研究[J].国土资源遥感,2010(86):4-8.
- [14] 关云秀,刘高焕,刘庆生,等.黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J].遥感学报,2001,5(1):46-52.
- [15] 张成雯,唐家奎,于新菊,等.黄河三角洲土壤含盐量定量遥感反演[J].中国科学院研究生院学报,2013,30(2):220-227.
- [16] Mitran T, Ravisankar T, Fyze M A, et al. Retrieval of soil physicochemical properties towards assessing salt-affected soils using Hyperspectral Data[J]. Geocarto International, 2015,30(6):701-721.
- [17] 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.
- [18] Mashimbye Z E, Cho M A, Nell J P, et al. Model-based integrated methods for quantitative estimation of soil salinity from hyperspectral remote sensing data: A case study of selected South African soils[J]. Pedosphere, 2012,22(5):640-649.
- [19] Kobayashi C, Lau I C, Wheaton B, et al. Mapping of soil salinity using an airborne hyperspectral sensor in Western Australia[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2015:2684-2687.
- [20] 李新举.黄河三角洲土壤质量时空演变及可持续利用评价研究[D].山东泰安:山东农业大学,2005.
- [21] 蒲智,于瑞德,尹昌应,等.干旱区典型盐碱土壤含盐量估算的最佳高光谱指数研究[J].水土保持通报,2012,32(6):129-133.

(上接第 213 页)

- [8] 赵颖,王志堂.建筑垃圾减量化回收利用[J].科学与财富,2012(11):369-369.
- [9] 蒋长兴.浅述土石方施工的技术措施与现场管理[J].河南科技,2013(20):162-162.
- [10] 周厚贵,曹生荣,申明亮.土石方调配研究现状与发展方向[J].木工程学报,2009(2):131-138.
- [11] 聂晓波.浅析土石方工程项目的精细化管理[J].经营管理者,2012(11):295-295.
- [12] 王壮志.公路建设中考虑施工次序与土质的土石方调运方法研究及软件实现[D].湖南长沙:长沙理工大学,2004.
- [13] 胡程顺,钟登华,张静,等.土石方动态调配模型与可视化研究[J].中国工程科学,2003,5(12):73-79.
- [14] 曹生荣,申明亮,王先甲.通用土石方调配管理系统的研究与实现技术[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(6):13-17.
- [15] 朱玉龙.中国建筑垃圾回收再利用经济价值的探索[N].科技日报,20121126(8).
- [16] 李颖,郑胤,陈家珑,等.北京市建筑垃圾资源化利用政策研究[J].建筑科学,2008,24(10):4-7.
- [17] 李树逊,罗攀,庞晓明,等.建筑垃圾资源化利用状况及其生命周期评价[J].复旦学报:自然科学版,2013,52(6):817-821.
- [18] Papargyropoulou E, Preece C, Padfield R, et al. Sustainable construction waste management in Malaysia: A constructor's perspective[C]// Misbe 2011-International Conference on Management and Innovation for A Sustainable Built Environment, 2011.
- [19] 李文广.民营企业发展战略问题研究:以土石方工程企业为例[D].河南郑州:河南大学,2013.