

# 潍坊北部地区土壤盐分光谱特征分析

张智安<sup>1</sup>, 赵燕<sup>2</sup>, 颜秉军<sup>3</sup>, 姜涵<sup>4</sup>, 吴萱桥<sup>5</sup>

(1.山东省遥感技术应用中心, 山东 济南 250013; 2.龙口矿业集团有限公司, 山东 龙口 265701; 3.龙口市国土资源局, 山东 龙口 265701; 4.山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 5.山东黄金金创集团有限公司大柳行金矿, 山东 烟台 265615)

**摘要:**为提高海水入侵地区土壤盐分的监测效率,以潍坊北部地区作为研究区,利用高光谱测量技术野外实地测量,获得高光谱数据,并对该区域土壤盐分高光谱数据进行分析,获得土样盐分含量相关数据,与光谱数据结合分析。通过分析各类离子与全盐量之间的相关关系,分析潍北地区土壤盐分的离子构成与离子的相关来源。对高光谱原始测量数据进行包络线去除、变换,选取特征波段、一阶二阶微分变换等提高模型精度,建立高光谱数据与土壤盐分数据之间的逐步回归模型,并对模型进行精度检验,对比各类模型检验结果,分析各类离子对高光谱数据的响应效果。其中,光谱数据一阶微分变换后的逐步回归模型对土壤中  $K^+$  &  $Na^+$  估算精度较高,  $R^2 = 0.894$  且均方根误差最小,精度较高,可为该地区的高光谱土壤盐分监测提供有力的数据分析结果。

**关键词:**土壤盐分;光谱分析;相关离子;回归模型

**中图分类号:** TP79

**文献标识码:** B

**引文格式:**张智安,赵燕,颜秉军,等.潍坊北部地区土壤盐分光谱特征分析[J].山东国土资源,2017,33(12):43-48.  
ZHANG Zhi'an, ZHAO Yan, YAN Bingjun, etc. Analysis on Spectral Characteristics of Soil Salinity in Northern Weifang City[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(12): 43-48.

## 0 引言

土壤盐渍化是土地退化的主要类型之一,主要发生在干旱、半干旱地区和滨海地区,是各类自然因素和人类不合理的农业措施的作用下引起的环境问题<sup>[1]</sup>。土壤盐渍化是潍北平原可持续发展所面临的主要地质环境问题之一,是在气候、地形、水文、地质等自然因素综合影响下形成的<sup>[2]</sup>。盐渍化的土壤会影响作物的生长,导致粮食减产进而影响区域经济的发展,因此对土壤盐分的监测是利于农业生产和环境保护的重要任务。传统的土壤盐分监测方法是通过实地获取土壤样本并进行检测和分析,这样的监测方法工作量大,且难以实现大范围区域的监测<sup>[3]</sup>。随着遥感技术的发展,利用多时期遥感影像跟踪地表监测,通过不同时相的卫星遥感图像解译跟踪地表土壤的盐渍化和地表植被及地貌的变化来间接对咸淡水界的变化进行监测<sup>[4]</sup>。利用光谱的高

分辨率、波段多且连续等优点能够反映地物的细微特征,使得通过光谱特征对地物信息定量反演成为可能,很好地克服了传统人工地面监测方法的不足,已成为土壤盐分监测领域中的一种先进手段。

随着遥感技术的发展,国内外利用高光谱技术研究土壤性质有了一定进展,Dehaan R L<sup>[5]</sup>等利用土壤及相关植被的光谱特征研究土壤的盐渍化特征及其空间分布,刘焕军<sup>[6]</sup>等通过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。该文以潍北地区为研究区,通过获得的高光谱数据以及土壤盐分数据结合分析,运用逐步回归的方法对土壤中各类离子含量进行建模,分析离子相关信息并进行预测反演。

## 1 研究区域概况

潍坊市位于山东半岛中部,北临莱州湾。潍坊北部地处渤海莱州湾南岸滨海平原地区,拥有丰富

收稿日期:2017-04-17;修订日期:2017-05-24;编辑:王敏

作者简介:张智安(1961—),男,山东济南人,工程师,主要从事遥感与地理信息系统工程工作;E-mail:sdrs7260@126.com

的地下卤水资源,滩涂面积 447 km<sup>2</sup>,盐碱荒滩 2 600 km<sup>2</sup>,地势低平坡降小,是我国海(咸)水入侵最为典型和严重的地区。随着海水入侵的不断加重,滨海区域土壤发育按照潮土、盐化潮土到盐土的顺序不断发展,盐渍化程度日益加重<sup>[7]</sup>。图 1 为研究区域采样点分布图。

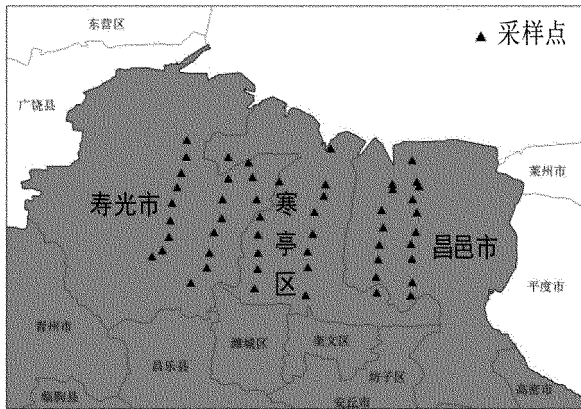


图 1 研究区域采样点分布

## 2 数据的采集处理与研究方法

### 2.1 土样采集与处理

根据研究区域情况,在研究区域内选取采样点。需要测定采样点的实测高光谱数据,土壤表层光谱数据的采集使用美国 ASD FieldspecHH 便携式高光谱仪(波谱范围为 325~1 075 nm)。为减少气候环境影响所带来的误差,测量时间大致为 10:00~14:00 之间并保证天气晴朗且无云无风。

表 2 各类离子与全盐量的相关分析

	K <sup>+</sup> & Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	全盐量
K <sup>+</sup> & Na <sup>+</sup>	1						
Ca <sup>2+</sup>	0.103	1					
Mg <sup>2+</sup>	0.652 **	0.423 **	1				
Cl <sup>-</sup>	0.956 **	0.212	0.828 **	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.858 **	0.323 *	0.417 **	0.739 **	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.253	-0.033	-0.002	0.162	0.194	1	
全盐量	0.986 **	0.246	0.742 **	0.977 **	0.859 **	0.247	1

\*\* 相关性在 0.01 层面上显著; \* 相关性在 0.05 层面上显著

### 2.2 高光谱数据处理

对野外实测的光谱数据进行预处理,每个测试样点都采集了至少 5 条光谱数据,使用

在各个采样点对土壤表层取样,采样深度为 0~20 cm。将所采的 53 个土样在实验室进行风干、剔除杂质、研磨、过 2 mm 筛后,测定土样的全盐量、各类离子含量以及 pH 值等,测定的方法按照《土壤农业化学分析方法》<sup>[8]</sup>。

### 2.2 土壤实测盐分数据与各类离子统计分析

土壤中各类离子含量不同会影响实测高光谱测量结果,土壤中各类离子含量与光谱数据间存在着不同于全盐量的相关关系。对各类离子进行统计分析,结果见表 1。

土壤样品中的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量基本接近于 0,故不讨论。由表 1 可以看出各类离子的标准差较大,说明各土壤样本中盐分含量的离散程度较高。分析各类离子含量,阳离子以 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 为主,阴离子则以 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主。

表 1 土壤样本中各类离子统计分析结果

	各类离子含量平均数(g/kg)	标准差
K <sup>+</sup> & Na <sup>+</sup>	0.280733368	0.528684846
Ca <sup>2+</sup>	0.075208046	0.054335557
Mg <sup>2+</sup>	0.045763328	0.074977152
Cl <sup>-</sup>	0.314418421	0.824641212
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.3005015	0.33505826
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.273625327	0.091630922

由表 2 可以看出,各离子间的相关分析可以看出,Cl<sup>-</sup> 与 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 含量高且相关性最高,说明土壤中 Cl<sup>-</sup> 与 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 是主要的结合方式。同时 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等离子与土壤全盐量的相关系数较高且呈显著相关。

ViewSpecPro 软件剔除光谱测量数据中有明显差别的光谱曲线,并对光谱曲线进行取均值、平滑等处理,之后删除噪声影响较大的部分,最终选取 400~900 nm 的光谱波段进行分析。光谱反射率曲线图

见图 2。

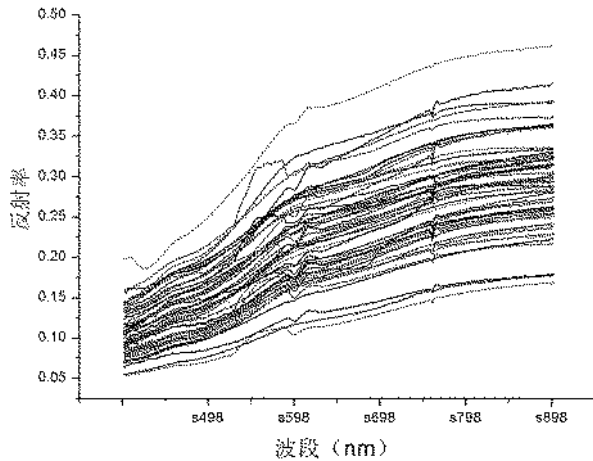


图 2 实测高光谱数据曲线图

在现有的高光谱数据处理方法中,光谱微分处理通过计算原始光谱反射率不同阶数的微分值来提取光谱参数,是最常用的处理方法之一。研究表明,光谱的低阶微分处理对噪声影响敏感性较低,因而在实际应用中通过微分变换获得的数据更为有效<sup>[9]</sup>。基于此类研究,对获得的实测光谱曲线进行低阶微分变换,以提高分析精度(图 3、图 4)。

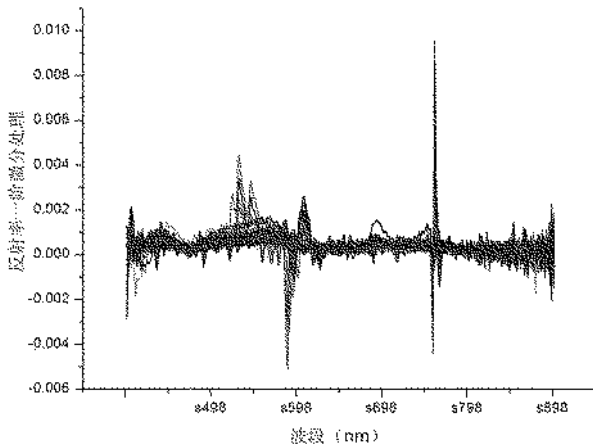


图 3 反射率一阶微分处理曲线

包络线从外观上看就相当于原始反射光谱曲线的“外壳”像用一层薄膜包裹凹凸不平的固体物,薄膜只与固体物的凸出部分接触<sup>[10]</sup>。实际的光谱曲线是由离散的样点组成,所以可用连续的折线来近似光谱曲线的包络线<sup>[11]</sup>。包络线去除法(continuum removal)是一种有效增强感兴趣吸收特征的光谱分析方法<sup>[12]</sup>。光谱的吸收特征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(图 5)。

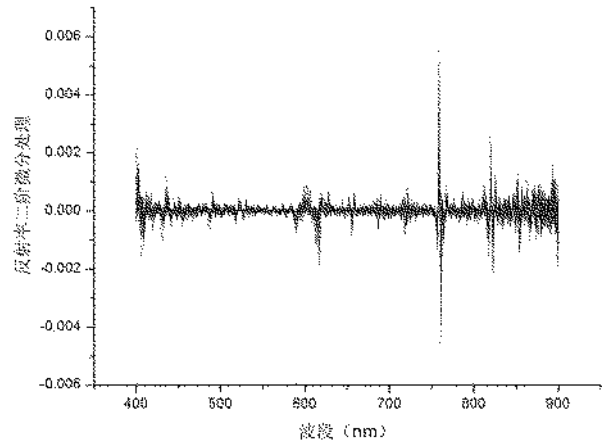


图 4 反射率二阶处理曲线

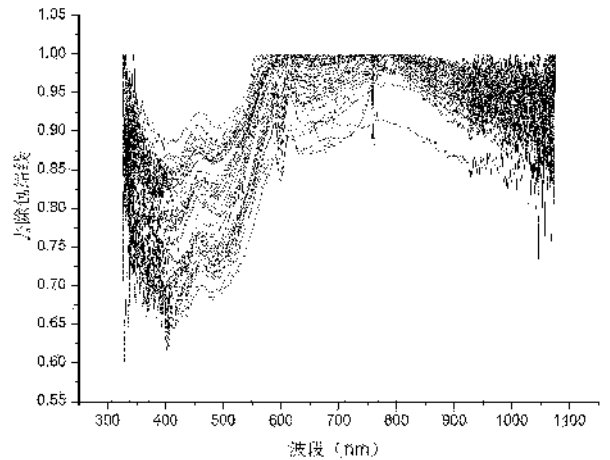


图 5 反射率包络线去除处理曲线

## 2.4 研究方法

在获取的 53 个采样点中选取 43 个用于模型的建立,剩余数据用于模型的检验。根据数据处理变换的特点进行建模,为了减小模型的计算量,提高模型精度,需要选择对土壤含盐量敏感的波段。因此用实测高光谱反射率经过微分处理后的数据和包络线去除变换后的数据与全盐量和各类离子做相关分析,并选取相关系数绝对值较高且显著相关的波段,用多元线性回归的方法建立特征波段与土壤全盐量等数据之间的线性关系模型。

## 3 建模与分析

### 3.1 特征波段选取

包络线去除法得到反射率数据后,选择有代表性的特征波段,即波段位于包络线去除均值曲线的波谷、转折点等位置,并且与全盐量等数据相关性较高的波段来进行模型的建立。

对用来建模的 43 个点的包络线去除后的光谱数据与全盐量和各类离子数据做相关分析。分析结果显示包络线去除后的光谱数据在波段 720~900 nm 处相关系数绝对值较高 ( $|r| \geq 0.4$ ) 且为显著相关。

同样方法对微分变换处理后的光谱数据进行波段的选取,一阶微分变换数据中共选取 87 个波段作为模型建立的自变量选取波段,二阶微分变换数据

表 3 包络线去除回归模型

包络线去除数据逐步回归模型		R <sup>2</sup>	RMSE
全盐量	$Y = 637.935 - 551.167 * X_{833} - 464.225 * X_{720} - 471.833 * X_{855} + 1003.274 * X_{801} - 819.569 * X_{792} + 411.085 * X_{723} + 224.614 * X_{866}$	0.754	0.912
K <sup>+</sup> & Na <sup>+</sup>	$Y = 215.541 - 162.092 * X_{855} + 108.482 * X_{866} - 186.26 * X_{833} + 126.0696 * X_{762} - 101.251 * X_{761}$	0.620	0.350
Cl <sup>-</sup>	$Y = 376.976 - 345.517 * X_{833} + 115.933 * X_{811} - 147.398 * X_{830}$	0.626	0.546

其中, X<sub>833</sub>, X<sub>720</sub>, X<sub>855</sub>, X<sub>801</sub>, X<sub>792</sub>, X<sub>723</sub>, X<sub>866</sub>, X<sub>762</sub>, X<sub>761</sub>, X<sub>830</sub>, X<sub>811</sub> 分别代表选取的 833 nm, 720 nm, 855 nm, 801 nm, 792 nm, 723 nm, 866 nm, 762 nm, 761 nm, 830 nm, 811 nm 特征波段包络线去除后反射率的值。

从模型的稳定性和预测能力两个方面对模型进行检验。模型的稳定性用决定系数 R<sup>2</sup> 的大小检验, R<sup>2</sup> 越大, 模型越稳定<sup>[13]</sup>; 模型的监测能力用均方根误差 (RMSE) 来检验, RMSE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (P_i - M_i)^2} \quad (1)$$

在公式(1)中, m 为建模样本总数, P<sub>i</sub> 为各建模样本预测值, M<sub>i</sub> 为各建模样本实测值。RMSE 越小, 模型精度越高、监测及预测能力越好, 即模拟值和测最值之间的偏差越小<sup>[14]</sup>。

表 4 一阶微分变换回归模型

一阶微分处理逐步回归模型方程		R <sup>2</sup>	RMSE
全盐量	$Y = 1.179 + 4632.487 * X_{419} - 2923.034 * X_{861} - 4214.527 * X_{803} - 3402.011 * X_{439} + 3925.695 * X_{427} - 2474.595 * X_{465}$	0.765	0.892
K <sup>+</sup> & Na <sup>+</sup>	$Y = 0.545 + 581.517 * X_{419} - 1118.984 * X_{803} - 752.257 * X_{861} - 763.18 * X_{749} + 1878.304 * X_{450} - 2520.963 * X_{486} + 933.893 * X_{427} + 707.081 * X_{833} - 801.012 * X_{736} - 243.668 * X_{764}$	0.894	0.185
Cl <sup>-</sup>	$Y = -0.403 + 2213.571 * X_{419} - 1392.119 * X_{861} - 1631.053 * X_{440} - 2012.543 * X_{803} + 2204.826 * X_{427} - 965.918 * X_{438}$	0.754	0.443

其中的 X<sub>419</sub>, X<sub>861</sub>, X<sub>803</sub>, X<sub>439</sub>, X<sub>427</sub>, X<sub>465</sub>, X<sub>450</sub>, X<sub>486</sub>, X<sub>833</sub>, X<sub>736</sub>, X<sub>764</sub>, X<sub>440</sub>, X<sub>438</sub> 等分别代表各波段一阶微分处理后反射率的值。

从模型的稳定性与精度的检验数值可以看出, 全盐量数据与一阶微分处理后的实测高光谱数据模型 R<sup>2</sup> 值高于包络线去除法回归模型, 模型稳定性

中共选取 62 个波段作为模型建立的自变量选取波段。

### 3.2 模型建立

#### 3.2.1 包络线去除数据波段选取逐步回归模型

利用 SPSS 软件对选取的特征波段与实测土壤全盐量和离子含量进行逐步回归模型的建立, 分别得到光谱波段与土壤全盐量、K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 的多元线性回归方程。结果见表 3。

根据回归模型的 R<sup>2</sup> 和 RMSE 可以看出, K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 均方根误差较小, 全盐量 R<sup>2</sup> 最大模型稳定度较高。

#### 3.2.2 光谱微分变换逐步回归模型

采用逐步回归法对相关分析后选取的不同波段光谱数据进行建模, 即用选取的实测光谱一阶、二阶微分处理数据与 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 和土壤全盐量理化数据进行线性回归拟合, 分析各离子实测含量与光谱数据的拟合程度和实测高光谱数据的各类微分变换对模型拟合的影响。

一阶微分处理可以消除例如部分线性或接近线性的噪声光谱、背景等对目标光谱的影响<sup>[15]</sup>。对原始数据进行一阶微分处理, 利用 SPSS 软件进行分析并建立模型, 得到一阶微分处理后的光谱数据与实测盐分、各类离子数据的回归方程。结果见表 4。

较好, 均方根误差 (RMSE) 相对较大; 用 K<sup>+</sup> & Na<sup>+</sup> 数据建立的模型 R<sup>2</sup> 为 0.894, RMSE 为 0.185, 精度高且稳定, 相对于其他离子建模效果最佳。

相较于一阶微分处理, 二阶微分处理可以很好地消除基线漂移和背景信号, 提高分析精度, 增强部分波段反射率与地表参数的相关性<sup>[15]</sup>。利用 SPSS 软件进行分析并建立模型, 得到二阶微分处理后的

光谱数据与实测盐分数据的回归方程。结果见表 5。

其中的 X711, X526, X750, X524, X579 等分别代表各波段二阶微分处理后反射率的值。

通过检验数据可以看出, 经过二阶微分处理后的实测高光谱数据与  $K^+ \& Na^+$ ,  $Cl^-$  建立的模型决

定系数  $R^2$  分别为 0.772 和 0.843,  $RMSE$  值较小, 模型精度也比较高。全盐量与二阶微分处理数据建立的模型相较于一阶和包络线去除建立的模型稳定性较高且均方根误差较小, 最适合对全盐量进行反演预测。而  $K^+ \& Na^+$  与一阶微分变换后数据建立的模型  $R^2$  最高且  $RMSE$  最小。

表 5 二阶微分变换回归模型

二阶微分处理逐步回归模型方程		$R^2$	RMSE
全盐量	$Y=1.856+16796.199 * X711-22702.411 * X526+4775.213 * X766+6667.823 * X750-7654.838 * X524-9128.688 * X579$	0.812	0.798
$K^+ \& Na^+$	$Y=0.481-1157.793 * X763+5858.684 * X711-5791.842 * X526+675.49 * X614+2575.15 * X750-864.577 * X699$	0.772	0.271
$Cl^-$	$Y=0.398+7688.202 * X711-4276.765 * X526+3063.82 * X766+3553.802 * X750-4368.777 * X579-2641.472 * X722+1484.687 * X619-3020.584 * X667$	0.843	0.353

### 3.3 模型的检验与预测

模型的建立是利用 53 个采样点中随机抽取的 43 个点进行的, 剩余采样点数据可用于对各个模型、各类离子的预测精度和预测效果进行检验。根据  $R^2$  与  $RMSE$  的值可知, 对  $K^+ \& Na^+$  而言一阶微分变换后建模效果最佳, 而对于全盐量与  $Cl^-$  而言二阶微分变换后建模效果最佳。对这三个模型进行检验, 绘制散点图可以直观的看出建立模型的拟合效果(图 6、图 7、图 8)。

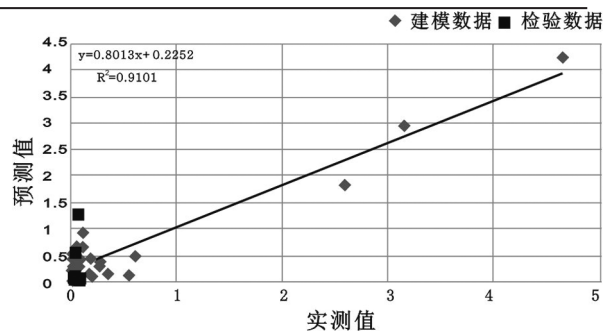


图 8  $Cl^-$  预测值与实测值检验结果散点图

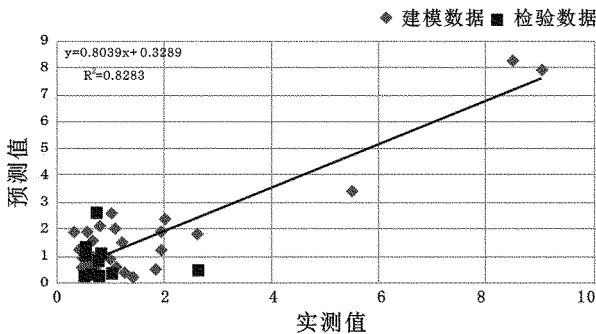


图 6 全盐量预测值与实测值检验结果散点图

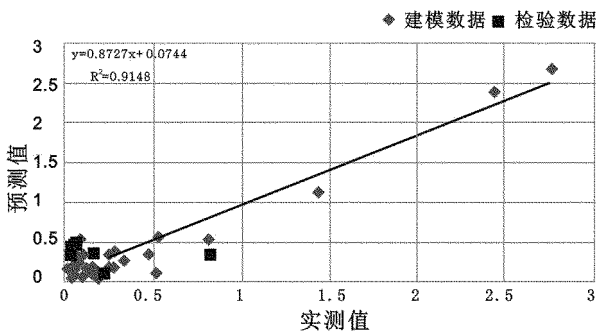


图 7  $K^+ \& Na^+$  预测值与实测值检验结果散点图

## 4 结论

(1) 对土壤中各类离子进行分析, 可以了解潍坊北部地区的土壤盐分特征和各类离子分布状况, 其中  $K^+ \& Na^+$  和  $Cl^-$  占比最大, 说明该地区土壤中的盐以氯化物为主。

(2) 土壤高光谱数据因为其波段的连续性可以反映出土壤盐分含量的细微差异, 但原始测量的光谱反射率曲线形态相似, 不容易区分光谱特征。对实测的高光谱数据进行包络线去除, 一阶、二阶微分处理变换后可以更好地从光谱形态上分析光谱吸收特征。

(3) 对光谱进行各类变换后的数据对土壤盐分含量更为敏感, 相关性提高从而选出特征波段, 利用逐步回归法对处理变换后的光谱数据进行建模, 可以看出不同离子对于光谱的敏感波段不同, 不同的光谱处理方式也影响模型的精度。其中  $K^+ \& Na^+$  与一阶微分处理后的光谱数据建模效果较好, 而全盐量和  $Cl^-$  则与二阶微分处理后的光谱数据建模效果较好。

(4)土壤中各种因素都会影响高光谱数据的准确性,野外光谱数据采集过程中各种未知因素都会影响光谱的测定,因此需要获取更多数据以验证模型的准确性,更好地提高模型的精度。

## 参考文献:

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报, 2008,(5):837-845.  
 [2] 杜东,刘宏伟,刘志涛,等.莱州湾南岸海(咸)水入侵监测技术方法体系构建[J].山东国土资源,2015,31(5):49-53.  
 [3] 彭杰,刘焕军,史舟,等.盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演[J].农业工程学报,2014,(7):167-174.  
 [4] 秦鹏,姚春梅,王集宁,等.淮北平原土壤盐渍化现状及成因分析[J].山东国土资源,2013,29(9):95-98.  
 [5] 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 (3): 406-417.  
 [6] 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[J].红外与毫米波学报,2008,(2):138-142.

[7] 刘衍君,曹建荣,高岩,等.莱州湾南岸海水入侵区土壤盐渍化驱动力分析与生态对策[J].中国农学通报,2012,(2):209-213.  
 [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].南京:河海大学出版社,2000:21-59.  
 [9] 曹文涛,吴泉源,王菲,等.基于野外实测光谱的淮北地区土壤全盐量监测研究[J].土壤通报,2016,(2):265-271.  
 [10] 张雪红,田庆久.基于连续统去除法的冬小麦叶片氮积累量的高光谱评价[J].生态学杂志,2010,(1):181-186.  
 [11] 丁丽霞,王志辉,葛宏立.基于包络线法不同树种叶片高光谱特征分析[J].浙江林学院学报,2010,(6):809-814.  
 [12] 谢伯承,薛绪掌,刘伟东,等.基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析[J].土壤学报,2005,(1):171-175.  
 [13] 徐驰,黄介生.土壤含盐量高光谱定量反演研究[J].中国农村水利水电,2014,(4):1-3.  
 [14] 丁建丽,伍漫春,刘海霞,等.基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍化监测研究[J].光谱学与光谱分析,2012,(7):1918-1922.  
 [15] 张东,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等.分数阶微分在盐渍土高光谱数据预处理中的应用[J].农业工程学报,2014,(24):151-160.

## Analysis on Spectral Characteristics of Soil Salinity in Northern Weifang City

ZHANG Zhǎn<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>, YAN Bingjun<sup>3</sup>, JIANG Han<sup>4</sup>, WU Xuanqiao<sup>5</sup>

(1. Shandong Remote Sensing Technology Application Center, Shandong Jinan 250013, China; 2. Longkou Mining Group Limited Corporation, Shandong Longkou 265701, China; 3. Longkou Bureau of Land and Resource, Shandong Longkou 265701, China; 4. Geography and Environment College of Shandong Normal University, Shandong Jinan 250014, China; 5. Daliuhang Gold Mine of Shandong Jinchuang Gold Limited Corporation, Shandong Yantai 265615, China)

**Abstract:** In order to improve the monitoring efficiency of soil salinity in seawater intrusion area, setting northern region in Weifang city as the study area, by using hyperspectral measurement technology, hyperspectral data of soil salinity in the region has been gained and analyzed, and relevant data of soil salt content has also been gained. Through analysis on the relationship between various ions and total salt contents, ion composition and ion source of soil salinity in Northern Weifang have been analyzed. Through removing and transforming of original hyperspectral data, choosing characteristic bands, first and second order differential transformation, the accuracy of the model can be improved. Stepwise regression model between hyperspectral data and soil salinity data can be established, and the accuracy of the model has been checked, various types of model test results have been compared, and the response effect of various ions on hyperspectral data has been analyzed. Among them, by using regression model of first order differential transform, the estimation accuracy of  $K^+$  and  $Na^+$  in soil is high,  $R^2 = 0.894$ , the error of root mean square is small, and the accuracy is high. It can provide useful data for hyperspectral monitoring of soil salinity.

**Key words:** Soil salinity; spectral analysis; related ions; regression model