doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.031

基于支持向量机的土壤主要盐分离子高光谱反演模型

王海江^{1,2} 蒋天池^{1,2} YUNGER John A³ 李亚莉⁴ 田 甜^{1,2} 王金刚^{1,2}
 (1.新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,石河子 832000; 2.石河子大学农学院,石河子 832000;
 3.州长州立大学生物系,芝加哥 60466; 4.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所,乌鲁木齐 830091)

摘要:快速、无损、定量地获取土壤盐分离子组成及含量是盐渍化土壤治理、改良和利用的重要依据。以新疆盐渍化土壤为研究对象,应用高光谱分析技术获取不同区域土壤盐分离子的特征光谱,在对光谱数据去噪、数据变换基础上分析了鲜样(T1)、风干(T2)和干燥(T3)3类土壤,过2、1、0.15 mm 筛处理对离子含量光谱拟合模型精度的影响,建立了基于支持向量机的土壤主要盐分离子光谱反演模型,并对模型的精度和普适性进行了检验。结果表明:土壤原始特征光谱与盐分离子含量均不存在显著相关性,最大相关系数为 Na⁺的0.41;通过光谱数据变换能够明显增强特征波段与离子含量的相关性,K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻和 HCO₃⁻的最优变换形式分别为(lgR)'、(lgR)'、R'、(lgR)'、CR、R'和 CR,T1 处理构建的拟合模型均不能很好地反演离子含量,T3 处理的模型估测精度优于T2,土壤粒径越细对土壤离子含量的光谱反演效果越好。分析各处理模型的决定系数和标准误差表明,经T3 处理、过0.15 mm 筛所构建的离子 拟合模型预测精度最高,其中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻的 RPD 分别为 2.153、2.6745、2.051和2.7864,以未参与建模和检验的石河子垦区土样对4种离子模型的普适性检验,其 *R*²分别为0.6214、0.6897、0.6144和0.6507,说明构建的模型适于估算该区域土壤 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻的含量。 **关键词:**土壤;盐分离子;新疆;高光谱;反演模型

中图分类号: S153.6⁺1; S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)05-0263-08

Hyperspectral Inverse Model for Soil Salt Ions Based on Support Vector Machine

WANG Haijiang^{1,2} JIANG Tianchi^{1,2} YUNGER John A³ LI Yali⁴ TIAN Tian^{1,2} WANG Jin'gang^{1,2} (1. The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832000, China

2. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832000, China

3. Department of Biology, Governors State University, Chicago 60466, USA

4. Research Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences,

Urumqi 830091, China)

Abstract: The rapid, nondestructive and quantitative analysis of the composition and content of soil salt ions is an important basis for the treatment, improvement and utilization of salinized soil. Taking the saline soil of Xinjiang as the research object, the hyperspectral analysis technique was used to obtain the spectral characteristic of soil salt ions in different regions; compared the effect on the accuracy of the soil salt ions fitting model in different treatments which included fresh soil, air drying and oven-dry sample and different particle sizes (2 mm, 1 mm and 0.15 mm, respectively). After the transformation of spectral data, the spectral inversion models of main salt ions were established based on support vector machine (SVM), and the accuracy and universality of the model were tested. The results showed that there was no significant correlation between the original spectral characteristics and soil salt ions content, the optimal transformation forms of K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO²⁻, Cl⁻ and HCO⁻₃ were (lgR)', (lgR)', R', (lgR)', CR, R' and CR, respectively. The fitting models of T1 treatment cannot

收稿日期: 2018-01-31 修回日期: 2018-02-23

基金项目:国际科技合作项目(2015DFA11660)、石河子大学校级项目(RCZX201522)和石河子大学大学生研究训练计划项目 (SRP2017024)

作者简介:王海江(1980—),男,副教授,主要从事绿洲水土资源利用研究,E-mail: wanghaijiang@ shzu.edu.cn

inverse the ions content very well, the accuracy of T3 model was better than that of T2, and the smaller the soil particle size was, the better the spectral inversion effect of soil ions content was. The prediction accuracy of the ions fitting model was the highest by T3 and over 0. 15 mm sieves, the relative prediction deviation of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} were 2. 153, 2. 674 5, 2. 051 and 2. 786 4, respectively, the universality test of four ion models was carried out by using samples from Shihezi area other than modeling and validation, the R^2 of test models were 0. 621 4, 0. 689 7, 0. 614 4 and 0. 650 7, respectively. The models were suitable for estimating the content of soil K⁺, Na^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} in Xinjiang area. **Key words**: soil; salt ions; Xinjiang; hyperspectral; inverse model

0 引言

新疆盐渍土不仅在分布广度上存在明显的区域 分异性,其盐害类型也有多种,如盐胁迫、碱胁迫和 盐碱胁迫等^[1]。当土壤盐分过多时,由于某些离子 过多产生了离子的竞争作用,抑制了植物对另一些 矿质元素的吸收,从而造成矿质营养胁迫^[2],盐胁 迫的内在表现主要是渗透效应和离子毒害,往往对 植物造成的伤害也高于总盐含量^[3],因此,快速、准 确地获取土壤盐分离子含量是避免作物盐碱胁迫和 盐渍化土壤改良的关键。

土壤具有较强的空间异质性,传统的土壤盐分 离子测定时效性差,数据量少且不具有代表性,高光 谱遥感技术凭借其较高的光谱分辨率具备了定量获 取土壤养分、盐分、水分含量的研究潜力。BEN-DOR 等^[4]利用近红外光谱估算了土壤的粘粒含量、 水分含量、全氮含量、碳酸盐含量、表面积和阳离子 交换量,其光谱反射数值与土壤矿质氮含量也有较 好的相关性[5];魏昌龙等[6]认为具有相似光谱曲线 的土壤具有相似的有机质和阳离子交换量,利用 SAM - PLSR 方法能够很好地预测土壤有机质和阳 离子交换量。彭杰等^[7]分析了新疆、浙江和吉林3 个区域盐渍化土壤的高光谱特征,表明不同区域土 壤的光谱特征差异较大,但通过数据处理可以获取 较好的盐分含量预测;SRIVASTAVA等^[8]利用可见 光和近红外波段发现,在1390~2400 nm 范围内光 谱对土壤盐分变化较为敏感,建立的模型可以解释 电导率以及相关的盐分离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和钠吸附比;屈永华等^[9]利用偏最小二乘法建立光 谱数据模型对 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、pH 值有较高的反演 精度, R_{PD}均大于1.6。

已有的研究中基于高光谱的土壤盐分含量反演 精度差异较大,如 WENG 等^[10]建立的盐分高光谱 定量估测模型决定系数为 0.89,ZHANG 等^[11]研究 的决定系数为 0.58,屈永华等^[9]研究的决定系数为 0.73,卢霞^[12]测定的决定系数为 0.56。综上所述, 利用高光谱技术能够建立土壤反射特征和盐分含 量、离子组成的拟合关系^[13],但因成土母质、样品干 燥方式、粒径大小、建模方法等因素的不同,其预测 精度差异较大。基于此,本文以新疆盐渍化土壤为 研究对象,分析不同土壤干燥处理、过筛粒径所获取 的土壤光谱特征与盐分离子含量的拟合关系,探究 如何利用高光谱反射特征提高土壤盐分离子含量反 演的准确性,以期为盐渍化土壤的高光谱定量监测 提供理论依据,也为新疆盐渍化土壤的改良利用奠 定基础。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与处理

新疆高温干燥和强烈蒸发条件,决定了土壤的 上升水流占优势。在自然条件下,土壤的淋溶过程 和脱盐过程十分微弱,土壤中的可溶性盐,借助毛管 水上行积聚于表层,导致土壤普遍积盐,形成大面积 的盐土。盐土的盐分组成与母岩的类型和成分有密 切的联系,为了获取更具有代表性、典型性、盐分离 子组成丰富的样品,在查阅大量资料的基础上,土壤 样品采集于新疆维吾尔自治区的北疆和南疆盐分含 量较重的农田,其中采集北疆博乐地区 80 个,昌吉 地区 120 个,南疆阿克苏地区 84 个,喀什地区 68 个,和田地区 72 个,石河子垦区 104 个,共计 528 个 土壤样品。为了更好地验证盐分离子拟合模型的精 度,将石河子垦区 104 个土样不作为建模和外部检 验样本,用于模型构建后检验模型的普适性。

土壤样品采集于地表 0~5 cm 土层,分别在每 一个采样点的东、西、南、北 4 个方向,5 m 范围内随 机再采集 1 个土样,5 个土样混合后作为该采样点 待测样品,质量约 2 kg。采集后迅速封装在自封袋 中,拍摄样点周边自然景观并记录采集土壤样品的 经纬度坐标,带回实验室后去除砾石及动植物残骸 等杂质。去杂后的 424 个土壤样品(除石河子垦区 土样)分为 T1、T2 和 T3 3 种处理,T1 保持鲜样状 态,T2 为自然风干,T3 为干燥箱 105~110℃干燥, T1 处理过 2 mm 筛,T2 和 T3 处理研磨后分别过 2、 1、0.15 mm 筛,处理后的土壤样品待测光谱反射数 值。土壤盐分含量及离子组成测定方法参见文 献[14]。

1.2 土壤样品分析

试验共采集新疆南、北疆土壤样品 528 个,测定 土壤总盐含量和离子组成,其中 CO₃ 在偏碱性土壤 环境中大都与 Ca²⁺、Mg²⁺结合为沉淀,因此未检测 出其含量。为了获取离子组成丰富度和值域宽的数 据,对建模和外部检验的 424 个测定数据进行了筛 选,剔除数值和盐分组成相似的样本,最终筛选出 135 个样本(博乐 28 个,昌吉 36 个,阿克苏 24 个, 喀什 21 个,和田 26 个),其中建模样本 90 个,外部 检验样本 45 个,石河子垦区的 104 个样本筛选出 40 个作为模型普适性检验的独立样本。模型构建 和检验样本盐分含量及其描述性统计分析见表 1, 样本阳离子中 Na⁺含量最高,最大值达到 2.45 g/kg, 平均值为 0.825 g/kg, 阴离子中 SO₄²⁻ 的含量最高, 最大值为 1.41 g/kg, 平均值为 0.53 g/kg, HCO₃⁻ 的 含量最少, 平均值为 0.041 g/kg。变异系数又称离 散系数,反映样品的离散程度,变异系数越大,样品 离散程度越大。按照变异系数的等级划分: $C_V <$ 10% 为弱变异性; 10% $\leq C_V <$ 100% 为明变异性; 10% $\leq C_V <$ 100% 为中等变异性; $C_V \ge 100\%$ 为强变异性^[15]。土壤盐分含量、离子中 K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻的变异系数均大于 100%,属于 强变异, Ca²⁺、Mg²⁺和 HCO₃⁻属于中等变异, HCO₃⁻ 的变异系数最小为 15%。各离子含量较大的变异 系数说明数据离散度高, 有利于模型的构建。

	表 1	土壤盐分	含量和离	子组成	艾描述	性统计	分析		
Tab. 1	Descriptive	statistical	analysis o	of soil	salt c	ontent	and io	n compo	sition

+ +4		全盐质量比/								
样平		(g•kg ⁻¹)	K *	Na ⁺	Ca ² +	Mg^{2} +	SO_4^2 -	Cl -	HCO ₃ -	
	最小值	0.68	0.052	0.125	0.110	0.005	0.110	0.030	0.005	
总样本(135个)	最大值	17.15	1.064	2.450	0.580	0.415	1.410	0.760	0.060	
	平均值	5.30	0.430	0.825	0.325	0.270	0.530	0.180	0.041	
	最小值	0.68	0.052	0.125	0.110	0.005	0.110	0.030	0.005	
建模样本(90个)	最大值	17.15	1.064	2.450	0.580	0.415	1.410	0.760	0.060	
	平均值	3.26	0.385	0.940	0.310	0.155	0.605	0.210	0.033	
	最小值	2.79	0.205	0.140	0.125	0.030	0.130	0.040	0.018	
检验样本(45个)	最大值	10.89	0.980	1.325	0.510	0.395	0.620	0.470	0.057	
	平均值	6.49	0.490	0.615	0.355	0.310	0.330	0.130	0.046	
总样本标准差		6.23	0.44	0.97	0.29	0.18	0.67	0.39	0.006	
总样本变异系数/%		118	102	118	89	67	126	217	15	

1.3 光谱测定

采用美国 ASD 公司 Field Spec Pro FR 型光谱 (仪进行土壤样品测试,其波长范围 350~2 500 nm, 其中 350~1 000 nm、1 000~2 500 nm 波段光谱分 辨率分别为 3、10 nm,采样间隔分别为 1.4、2 nm。 取制备好的土壤样品放置于半径 5 cm、深 1.5 cm (认为是光学上无限厚)的黑色盛样皿内,土壤装填 容重约 1.4 g/cm³。光谱测定在暗室中进行,采用 200 W 卤素灯置于目标两侧,光源入射角度 25°,距 离目标 30 cm,8°视场角的传感器探头置于离土壤样 本表面 15 cm 的垂直上方,探头接收光谱的区域为 直径 2.1 cm 的圆,小于盛样皿的面积,探头接收的 均为土壤的反射光谱。测试之前先以白板进行定 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。

1.4 光谱数据的处理

每个土样采集到的光谱曲线运用光谱数据处理 软件 ViewSpecPro 进行拼接校正,然后求出 10 条光 谱曲线平均值作为对应样本的光谱反射率。采用移 动平均法对光谱数据平滑去除噪声作为数值分析的 原始光谱反射率(R),而后对土壤样本光谱反射数 据进行开根号处理(\sqrt{R})、对数处理($\lg R$)、倒数处理 (1/R)、原始光谱一阶微分(R')和二阶微分(R'')、 一阶微分根号处理($\sqrt{R'}$)、二阶微分根号处理 ($\sqrt{R''}$)、对数一阶微分处理(($\lg R$)')、对数二阶微 分处理(($\lg R$)'')、倒数一阶微分((1/R)')、倒数二 阶微分((1/R)'')和连续统去除处理(CR),数据的 各种变换与处理采用 Unscrambler 9.7 软件。

1.5 模型构建与检验

在进行光谱数据变换和筛选的基础上,选取与 土壤盐分离子显著相关波段多的变换形式,采用支 持向量机(Support vector machine,SVM)构建盐渍土 盐分离子含量光谱反演模型。设定 SVM 类型为 4 (即 v – SVR),核函数类型为 2(即 RBF),采用训练 集交叉验证和网格搜索法(Grid search)进行参数寻 优,依据均方差最小原则确定惩罚参数 C 和 RBF 核 参量 g 的值;相关计算用 Matlab R2012a 软件的 libsvm 3.11 工具箱实现。 模型的精度评价参数主要有建模数据集决定系数 R_{eal}^2 、标准误差 RMSEE,内部交叉验证 R_{ev}^2 和标准误差 RMSECV,外部检验数据集决定系数 R_{val}^2 和标准误差 RMSEP,以及测定值标准偏差与标准预测误差的比值 RPD。其中决定系数越大,标准误差越小模型预测精度越高,RPD 大小 2.0 说明模型适于估算土壤属性,RPD 小于 1.5 时,模型不可靠;RPD 在 1.5~2.0 之间,模型的可靠性可以通过不同的建模方法得到提高。

2 结果与分析

2.1 土壤原始光谱与盐分离子含量的相关性

图 1 为土壤总盐、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO²⁻、 Cl⁻和 HCO₃ 含量与原始光谱反射率的相关系数, 各指标间相关系数差异较大。总盐含量在350~ 501 nm 波长与光谱反射率呈现负相关,随着波长的 增加相关系数变为正值,在波长为992 nm 时相关系 数为0.30,在1012 nm 处有一个明显的波谷,相关 系数下降为0.24,随后呈现缓慢增加的趋势,波长 在1763~1778 nm 时相关系数达到最大,为0.35; Na⁺的相关系数在 482 nm 处达到最大,为 0.41,随 后随着波长的增加相关系数减小:Cl⁻的相关系数 在484 nm 达到最大,为0.34,随后相关系数减小,在 2176 nm 处相关系数接近 0; SO4 和 Ca2+ 的变化趋 势相似,在350~1277 nm 和350~1237 nm 范围内, 相关系数为正,其余范围内相关系数变为负值,其最 大相关系数分别为 0.27 和 0.26; K⁺ 的最大相关系 数出现在 445 nm 附近,为-0.31,Mg²⁺与土壤原始 光谱反射率的相关性均为负相关,波长在1906 nm 处相关系数达到最大,为-0.32。



characteristics

2.2 基于 SVM 的模型构建

为了能够获得更好的土壤盐分离子含量与光谱 特征之间的拟合关系,对原始光谱反射率进行不同 形式的变换,以消除光谱数据噪声并显著提高反演 模型的拟合精度^[16-17]。表 2 是筛选出的土壤光谱 反射率最优数据变换,利用 SVM 方法构建的不同处 理盐分离子含量的拟合模型,由表2可知,T1、T2和 T3 处理中,土壤的过筛处理对光谱反演盐分离子含 量的拟合精度都有影响,不同的盐分离子最佳的数 据变换形式也是不同的。从模型建立、交叉验证和 外部检验的决定系数和标准误差来看,T3处理优于 T1、T2 处理,其中T1 处理7种盐分离子的拟合模型 精度均较差, R_{a1}^2 最大为 K⁺的 0.521 8, R_{a2}^2 为 0.410 7, R²_{xa}为 0.373 2, RPD 为 1.052 5, 说明在 T1 处理下, 利用光谱反射特征无法拟合土壤盐分离子的含量。 从 T2 和 T3 处理来看, 土壤盐分离子含量拟合在各 种过筛处理的最优数据变换是相同的,盐分离子 K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、SO²⁻、Cl⁻和HCO⁻。的最优变 换形式分别为(lgR)'、(lgR)'、R'、(lgR)'、CR、R'和 CR,同一种处理在过2、1、0.15 mm 筛后,均表现为 过筛直径越小,模型拟合精度越高。从过筛处理的 拟合精度来看,T2 处理过 2 mm 筛后 Na⁺和 SO₄²⁻的 RPD 大于 1.5 小于 2.0, T3 处理中 K⁺、Na⁺、Mg²⁺、 Ca²⁺、SO₄²⁻和 Cl⁻的 RPD 均大于 1.5 小于 2.0,说 明模型的可靠性可以通过不同的建模方法得到提 高;T2 处理过 1 mm 筛后 Na⁺、K⁺和 SO²⁻ 的 RPD 大于 1.5 小于 2.0, 而 T3 处理 K⁺、Na⁺和 SO²⁻ 的 RPD 大于 2.0 说明模型适于估算土壤属性;T2 处理 过 0.15 mm 筛后 SO₄²⁻ 的 RPD 大于 2.0, T3 处理 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻的 RPD 均大于 2.0。HCO₃⁻ 在 T1、T2 处理过 2、1、0.15 mm 筛后, R_{al}^2 、 R_{av}^2 和 R_{val}^2 均小于 0.5, RPD 均小于 1.5, 拟合精度较差, 无法很 好地预测土壤 HCO3 含量。

2.3 构建模型的普适性检验

为了能够更好地检验模型的普适性,将研究区 石河子垦区筛选出的40个土壤样品作为独立样本, 对通过检验(RPD大于2.0)的K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻ 拟合模型进行普适性检验。如图2所示,K⁺、 Na⁺、Ca²⁺和SO₄²⁻离子含量的独立检验 R^2 均大于 0.61,其中Na⁺的 R^2 最大为0.6897,说明试验中选 取南、北疆多地区土壤样本构建的模型,在石河子垦 区土壤样本未作为模型建立和外部检验样本的前提 下,也能够较好地预测土壤中K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻离子含量,模型具有一定的普适性。从模型的 预测散点图来看,所构建模型的预测值大于实测值, 其中K⁺、Na⁺和SO₄²⁻离子都表现出含量越高,实测 值和预测值越接近的趋势,在离子含量较低时实测 值与预测值差异较大。

3 讨论

光谱分析技术在分析土壤成分含量以及理化特

第5期

表 2 土壤盐分离子含量反演的模型构建 Tab. 2 Models of hyperspectral inversion for soil salt ions content

	过筛/	土壤盐分	最优变换	模型建立		交叉验证		外部检验		
处理	mm	离子		$R_{\rm cal}^2$	RMSEE	R_{cv}^2	RMSECV	$R_{\rm val}^2$	RMSEP	- RPD
	2	K *	CR	0. 521 8	2.4244	0.4107	3. 302 5	0.3732	4.3116	1.0525
T1		Na ⁺	(lg <i>R</i>)'	0.4121	2.7032	0.3669	3.5410	0.4017	4.6989	1.0792
		Mg^{2} +	(1/R)'	0.3927	2. 543 8	0.1948	2.3952	0.2167	2.9033	0.3306
		Ca ² +	(lg <i>R</i>)'	0.3268	2.7901	0.1269	3.9126	0.3092	5.1379	0.7744
		SO_4^2 -	R'	0.2877	3.3624	0.2146	4.9645	0.3556	2.9343	0.7658
		C1 -	R''	0.3837	4.4480	0.2191	2.8948	0.1690	3.0454	1.0907
		HCO ₃ -	CR	0.1781	4.8390	0. 297 4	3.6737	0.1596	4.2349	0.4418
	2	K *	(lg <i>R</i>)'	0.7105	1.6074	0.6482	2.3431	0.5126	3.4178	1.3587
		Na ⁺	$(\lg R)'$	0.7568	1.406 5	0.6845	1.9006	0.5604	2.9999	1.6534
		Mg^{2} +	R'	0.5971	1.8579	0.5625	3.3963	0.4185	4.0509	1.2059
		Ca ² +	$(\lg R)'$	0.6795	1.7220	0.6043	2.8629	0.4265	3.6395	1.3170
		SO_4^2 -	CR	0.7436	1.5692	0.6664	2.2160	0.5508	3.006 5	1.5203
		Cl -	R'	0.7096	1.7011	0.6297	2.5087	0.4601	3.4834	1.4078
		HCO ₃	CR	0.3652	3.0566	0. 295 4	3.9341	0.2824	4.4808	0. 526 3
		K *	$(\lg R)'$	0.7889	1.5027	0.734 1	2.1330	0. 591 4	2.4413	1.5009
		Na ⁺	$(\lg R)'$	0.8283	1.2416	0.7531	1.9734	0.6116	2.3386	1.963 6
		Mg^{2} +	R'	0.6270	1.7333	0. 592 4	3. 271 1	0.5187	3. 329 1	1.2383
T2	1	Ca ² +	$(\lg R)'$	0.7429	1.5033	0.6535	2.4508	0. 549 5	3.2416	1.2013
		SO_4^2 -	CR	0.8027	1.4447	0.7372	2.2005	0.6034	2.4044	1.7657
		Cl -	R'	0.7331	1.5133	0.6283	2.8313	0.5728	2.9525	1.3523
		HCO ₃ ⁻	CR	0.3506	3.2096	0.3053	4.0887	0.2200	4.2222	0.8881
	0. 15	K *	$(\lg R)'$	0.8002	1.3244	0.7096	1.9736	0.6439	1.272 5	1.6046
		Na ⁺	$(\lg R)'$	0.904 1	1.1360	0.7943	1.273 5	0. 693 9	1.6837	1.9718
		Mg^{2} +	R'	0.6307	1.3793	0. 593 1	2.7286	0.5728	2.7013	1.6894
		Ca ² +	$(\lg R)'$	0.7565	1.7705	0.6855	1.8573	0.6244	2.4828	1.9219
		SO_{4}^{2} -	CR	0.8769	1.2268	0.7500	1.3086	0.7138	1.1901	2.5431
		Cl -	R'	0. 799 7	1.3562	0.6813	2.900 5	0.6261	2.4402	1.8459
		HCO ₃	CR	0.3750	3.0830	0.4504	3.6246	0.2716	3.485 5	1.0895
	2	K *	(lg <i>R</i>)'	0.7820	1.7385	0.6979	2.2996	0. 586 4	3.1602	1.6734
		Na ⁺	$(\lg R)'$	0.8059	1.4798	0.7892	1.8847	0.6572	2.6248	1.7320
Τ3		Mg^{2} +	R'	0.6441	1.8896	0.6386	3.0642	0.5486	3.8294	1.5024
		Ca ² +	$(\lg R)'$	0.7068	1.8771	0.6440	2.7618	0.5625	3.3637	1.5989
		SO_{4}^{2}	CR	0.7972	1.7122	0.7034	2.1337	0.6176	2.9199	1.7205
		C1 -	R'	0.7226	1.8149	0. 685 3	2.3258	0.5842	3. 198 0	1.6280
		HCO ₃	CR	0. 374 2	3. 115 5	0.3619	3. 631 9	0.3692	4. 120 3	0. 734 7
	1	K *	$(\lg R)'$	0.8117	1. 533 7	0.7515	2. 133 1	0.6880	2.2297	2.0398
		Na *	$(\lg R)'$	0.8953	1. 283 6	0.8148	1. 765 4	0.7048	2. 130 5	2. 162 3
		Mg ² ⁺	R'	0.6400	1. 836 8	0.6195	2.8947	0. 592 5	3. 112 9	1.6407
		Ca^{2+}	$(\lg R)'$	0.7624	1.607 3	0.6722	2.5578	0.6308	2.8846	1.7015
		SO ₄ -	CR	0.8637	1.4895	0. 799 6	2.0366	0.6917	2. 161 5	2.0819
		Cl -	<i>R'</i>	0.7790	1. 592 8	0.6862	2. 271 7	0.6498	2.8796	1.7689
		HCO ₃		0. 378 8	3. 533 1	0.3940	3.6625	0. 296 5	3.9519	1.0124
	0.15	K *	$(\lg R)'$	0.8331	1. 459 4	0.8177	1.8177	0.7099	1.6549	2. 153 0
		Na	$(\lg R)'$	0.9126	1.3517	0.8699	1. 247 4	0.7276	1.2637	2.6745
		Mg ² +	R'	0.6601	1.4960	0.6326	2.6802	0.5870	2.300.2	1.949 2
	0.15	Ca^{2+}	$(\lg R)'$	0.7670	1.1776	0.6927	1.7467	0.6638	2.2503	2.0510
		S0 ₄	CR	0.9411	1.4522	0.8613	1. 250 7	0.7764	1. 150 2	2.7864
		Cl -	<i>R'</i>	0.8227	1.8091	0.7704	2. 523 9	0. 694 4	2.4861	1.7879
		HCO ₃	CR	0.3812	3.2909	0.4523	3.4172	0.3415	3.2118	1.0991





征参数方面表现出良好的预测能力。在土壤水 分^[18]、盐分^[7-8]、有机质^[19-20]、氮素含量等^[21-24]方 面已开展了大量的研究,但土壤样品的光谱测试大 都经过风干、过筛等预处理,以消除土壤含水率和粒 径对光谱测量结果造成的影响^[13]。KIRSHNAN 等^[25]将土壤样品采集、风干、去杂和过筛后,放入 105℃干燥箱干燥 24 h,然后测定土壤样品的光谱特 征参数,所构建的土壤有机质光谱反演模型决定系 数 R^2 达到 0.873; DALAL 等^[26] 对采集后的土壤样品 经风干、粉碎,过2 mm 和 0.25 mm 筛预处理,分析 土壤近红外光谱与土壤含水率、有机碳和全氮含量 的相关性,发现土壤粒径越细光谱特征参数对土壤 属性反演精度越高;土壤的光谱反射率随着粒径的 增大吸光度显著增大,其反射率降低[27],土壤光谱 反射率与土壤粒径呈负相关关系,土壤粒径小于 0.15 mm 时,反射率增长趋势更为明显^[28];武红旗 等^[29]比较了未研磨和过2 mm 筛的土样的光谱特 征,利用光谱参数拟合土壤有机质含量的精度,结果 表明过2mm 土样所建立的有机质含量预测模型精 度较高;朱琦等^[30]分析了土壤样品过 20、40、60、80、 100 目筛所建立的土壤全氮含量光谱反演模型,显 示粒径小的土样模型预测精度较高。本研究中土壤 取鲜样的光谱反演模型精度较差,不能够预测土壤

盐分离子含量,主要是因为土壤水分具有较宽泛的 光谱吸收带,随土壤含水率的增加反射率呈指数下 降趋势^[31],对其他土壤属性光谱特征的掩盖作用明 显^[32];从土样风干、干燥和粒径组成上来看,干燥处 理后利用光谱反演盐分离子含量模型的预测能力较 好,粒径在 0.15 mm 处理拟合精度较高。

由于土壤中水溶性盐基离子含量、组成、结合 方式的差异,在离子特征波段的提取和光谱拟合 模型构建上往往难度较大。代希君等[33]在新疆的 研究表明,土壤中 HCO₃、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、Mg²⁺能 够和光谱反射数值形成较理想的相关性,所构建 的模型 RPD 均大于 2,反演精度相对依次降低;刘 亚秋等^[17]在黄河口区研究认为 Cl⁻、Na⁺与土壤光 谱均具有较好的相关性,而其他离子与土壤光谱 的相关性相对较弱,无法预测其含量:屈永华等^[9] 在内蒙古河套灌区研究表明,利用光谱分析技术 能够很好地预测土壤中 SO₄⁻、K⁺、Na⁺含量,对于 其余离子包括 Cl⁻、Ca²⁺和 Mg²⁺等难以从遥感数 据中精确估计;张俊华等^[34]在宁夏银北地区构建 预测模型表明, Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 的预测精度较 高,其他离子预测稳定性和精度较差。综上所述, 不同区域因成土过程、土壤母质的差异,其土壤光 谱特征参数与模型拟合精度也存在差异,但共同

表现为土壤中离子含量较高的优势类型模型预测 精度也较高,这或许也说明了高光谱反射特征机 理是对土壤主要离子组成的响应。本研究中通过 对土壤样品的干燥和过筛处理,基于 SVM 方法构 建了土壤盐分离子含量的拟合模型,结果表明 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻离子含量能够通过光谱模 型进行很好的预测,这与代希君等^[33]研究的结果 存在差异,尤其是土壤中含量较低的 HCO₃⁻离子, 本研究在任何一种处理方法中都无法很好地预测 其含量,但在代希君等^[33]研究中预测精度是最好 的,这或许跟土壤样品的颗粒组成、有机质、氮素 含量、氧化铁、土壤质地、试验方法等因素有关,具 体原因还需要进一步试验研究和验证。

4 结论

(1) 土壤盐分离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、

Cl⁻和 HCO₃⁻含量与原始光谱反射率的相关性较 差,通过不同数据变换处理能够明显增强离子含量与 光谱特征的相关关系,依据构建模型的 R^2 ,K⁺、Na⁺、 Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻和 HCO₃⁻的最优变换形式分别 为(lgR)'、(lgR)'、R'、(lgR)'、CR、R'和 CR,土壤样品处 理的差异对最优光谱数据变换的形式影响不大。

(2)比较土壤样品鲜样、风干和干燥处理,干燥 后测定光谱特征拟合盐分离子含量的模型精度较高,土壤粒径越细对土壤离子含量的光谱反演效果 越好;对土样经干燥、过 0.15 mm 筛构建的离子含 量拟合模型精度最高,其中 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻ 的 RPD 分别为 2.153、2.674 5、2.051 和 2.786 4,对 4 种离子模型的普适性检验,其 R^2 分别为 0.621 4、 0.689 7、0.614 4 和 0.650 7,说明模型适于估算该区 域土壤 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 SO₄²⁻ 的含量。

参考文献

- 都金标,张福锁,毛达如,等. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J]. 土壤通报,2005,36(3): 299-303.
 XI Jinbiao, ZHANG Fusuo, MAO Daru, et al. Saline-soil distribution and halophyte resources in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 299-303. (in Chinese)
- 2 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010. GUO Quanen. The response mechanism of soil salt ion transfer and diversity rule to environment factors and risk analysis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 3 张永峰,殷薄. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 草业学报, 2009,18(1): 46-50. ZHANG Yongfeng, YIN Bo. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago* sativa at seedling stage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 46-50. (in Chinese)
- 4 BEN-DOR E, BANIN A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties [J]. SSSAJ, 1995, 59(2):364-372.
- 5 ENDOVITSKY A P, MINKINA T M, KALINICHENKO V P, et al. The association of ions in the soil solution of saline soils[J]. American Journal of Agricultural & Biological Science, 2014, 9(2): 238 244.
- 6 魏昌龙,赵玉国,李德成,等.基于相似光谱匹配预测土壤有机质和阳离子交换量[J].农业工程学报,2014,30(1):81-88. WEI Changlong, ZHAO Yuguo, LI Decheng, et al. Prediction of soil organic matter and cation exchange capacity based on spectral similarity measuring[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(1):81-88. (in Chinese)
- 7 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, 30(17): 167-174. PENG Jie, LIU Huanjun, SHI Zhou, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):167-174. (in Chinese)
- 8 SRIVASTAVA R, SETHI M, YADAV R K, et al. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for rapid characterization of saltaffected soil in the indo-gangetic plains of haryana, India [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2017,45(2): 307-315.
- 9 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.

QU Yonghua, DUAN Xiaoliang, GAO Hongyong, et al. Quantitative retrieval of soil salinity using hyperspetral data in the region of Inner Mongolia Hetal irrigation district [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(5): 1362 - 1366. (in Chinese)

- 10 WENG Y L, GONG P, ZHU Z L. Reflectance spectroscopy for the assessment of soil salt content in soils of the Yellow River delta of China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(19): 5511-5531.
- 11 ZHANG T T, ZENG S L, GAO Y, et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(6): 1552 - 1562.
- 12 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. LU Xia. Relationship between saline concentration and its reflectance spectra for seashore saline soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 186-190. (in Chinese)
- 13 李民赞,郑立华,安晓飞,等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法及传感技术[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(3): 73-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130315&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2013.03.015.
 LI Minzan, ZHENG Lihua, AN Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy

[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 73 - 87. (in Chinese)

- 14 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 15 吕真真,刘广明,杨劲松.新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J].土壤学报,2013,50(2):289-295. LÜ Zhenzhen, LIU Guangming, YANG Jingsong. Soil salinity characteristics of manas river valley in Xinjiang [J]. Acta

Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 289 - 295. (in Chinese)

- 16 向红英,柳维扬,彭杰,等. 基于连续统去除法的南疆水稻土有机质含量预测[J]. 土壤,2016,48(2): 389-394.
- XIANG Hongying, LIU Weiyang, PENG Jie, et al. Predicting organic matter content in paddy soil using method of continuum removal in southern Xinjiang, China [J]. Soils, 2016, 48(2): 389-394. (in Chinese)
- 17 刘亚秋,陈红艳,王瑞燕,等. 基于可见/近红外光谱的黄河口区土壤盐分及其主要离子的定量分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1925-1935.
- LIU Yaqiu, CHEN Hongyan, WANG Ruiyan, et al. Quantitative analysis of soil salt and its main ions based on visible/near infrared spectroscopy in estuary area of Yellow River [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(10): 1925-1935. (in Chinese)
- 18 王海江,张花玲,任少亭,等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究[J/OL].农业机械学报,2014,45(7): 133-138.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140721&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2014.07.021. WANG Haijiang, ZHANG Hualing, REN Shaoting, et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance
- characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 133 138. (in Chinese)
 19 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等. 荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 113 120.
 HOU Yanjun, TASHPOLAT·Tiyip, MAMAT·Sawut, et al. Estimation model of desert soil organic matter content using
- hyperspectral data [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 113-120. (in Chinese) 20 孙建英,李民赞,唐宁,等. 东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(8): 1502-1505. SUN Jianving, LI Minzan, TANG Ning, et al. Spectral characteristics and their correlation with soil parameters of black soil in

SUN Jianying, LI Minzan, TANG Ning, et al. Spectral characteristics and their correlation with soil parameters of black soil in northeast China [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(8):1502 – 1505. (in Chinese)

21 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. LU Yanli, BAI Youlu, WANG Lei, et al. Determination for total nitrogen content in black soil using hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 256-261. (in Chinese)

22 张娟娟,田永超,姚霞,等. 基于高光谱的土壤全氮含量估测[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 881-890.

- ZHANG Juanjuan, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Estimating soil total nitrogen content based on hyperspectral analysis technology [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 881-890. (in Chinese)
- 23 徐丽华,谢德体,魏朝富,等.紫色土土壤全氮和全磷含量的高光谱遥感预测[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3): 723-727.

XU Lihua, XIE Deti, WEI Chaofu, et al. Prediction of total nitrogen and total phosphorus concentrations in purple soil using hyperspectral data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013,33(3):723-727. (in Chinese)

- 24 张瑶,李民赞,郑立华,等.基于近红外光谱分析的土壤分层氮素含量预测[J].农业工程学报,2015,31(9):121-126.
- ZHANG Yao, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Prediction of soil total nitrogen content in different layers based on near infrared spectral analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 121-126. (in Chinese)
- 25 KIRSHNAN P, ALEXANDER J D, BUTLER B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. SSSAJ, 1980, 44(6) :1282 - 1285.
- 26 DALAL R C, HENRY R J. Simultanous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry[J]. SSSAJ, 1986,50(1): 120-123.
- 27 鲍一丹,何勇,方慧,等. 土壤的光谱特征及氮含量的预测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(1):62-65. BAO Yidan, HE Yong, FANG Hui, et al. Spectral characterization and N content prediction of soil with different particle size and moisture content [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(1): 62-65. (in Chinese)
- 28 马创,申广荣,王紫君,等.不同粒径土壤的光谱特征差异分析[J].土壤通报,2015,46(2):292-298. MA Chuang, SHEN Guangrong, WANG Zijun, et al. Analysis of spectral characteristics for different soil particle sizes [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 292-298. (in Chinese)
- 29 武红旗,范燕敏,何晶,等.不同粒径土壤的反射光谱对荒漠土壤有机质含量的响应[J].草地学报,2014,22(2):266-270. WU Hongqi, FAN Yanmin, HE Jing, et al. Response of soil hyperspectral characteristics of different particle sizes to soil organic matter [J]. Acta Agrectir Sinica, 2014, 22(2):266-270. (in Chinese)
- 30 朱琦,董桂梅,杨仁杰,等.土壤粒度差异对光谱法检测土壤全氮含量的影响研究[J].天津农学院学报,2015,22(4): 29-32.

ZHU Qi, DONG Guimei, YANG Renjie, et al. Influences of soil particle size difference on detecting total nitrogen contents in soil by spectrometry [J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 2015, 22(4): 29-32. (in Chinese)

- 31 何挺,王静,程烨,等. 土壤水分光谱特征研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 1027 1032.
 HE Ting, WANG Jing, CHENG Ye, et al. Spectral features of soil moisture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 1027 1032. (in Chinese)
- 32 刘秀英,王力,宋荣杰,等.黄绵土风干过程中土壤含水率的光谱预测[J/OL].农业机械学报,2015,46(4):266-272. http: //www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150439&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015. 04.039.

LIU Xiuying, WANG Li, SONG Rongjie, et al. Prediction of soil moisture content in air-drying loess using spectral data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):266-272. (in Chinese)

- 33 代希君,张艳丽,彭杰,等. 土壤水溶性盐基离子的高光谱反演模型及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 139-145. DAI Xijun, ZHANG Yanli, PENG Jie, et al. Prediction and validation of water-soluble salt ions content using hyperspectral data [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 139-145. (in Chinese)
- 34 张俊华,秦君琴,李明.基于土壤光谱特征的宁夏银北地区盐碱地盐分预测研究[J].水土保持通报,2013,33(5):123-129,164.

ZHANG Junhua, QIN Junqin, LI Ming. Prediction of soil salt content based on spectral characteristics of soil in Northern Yinchuan City, Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 123 – 129, 164. (in Chinese)