

基于连续统去除法的土壤盐分含量反演研究^{*}

彭 杰¹ 迟春明¹ 向红英¹ 滕洪芬² 史 舟^{2†}

(1 塔里木大学植物科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

(2 浙江大学环境与资源学院农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058)

摘 要 通过对新疆维吾尔自治区温宿县、和田县、拜城县 191 个土样的原始反射率进行连续统去除及连续统去除的一阶微分处理, 分析了盐分的高光谱吸收特征及敏感波段, 并建立了盐分含量的多种高光谱定量反演模型。结果表明, 在 400 ~ 2 400 nm 波段, 土壤反射率与盐分含量之间无明显规律。640 ~ 700 nm 波段的连续统去除数据与含盐量呈极显著负相关, 而 710 ~ 780 nm 波段呈极显著正相关。原始反射率经连续统去除处理后, 可明显提高反演模型的预测性能。基于盐分光谱指数和吸收特征参数构建的反演模型的稳定性及预测能力不如连续统去除、连续统去除一阶微分的 400 ~ 2 400 nm 或敏感波段的偏最小二乘回归 (PLSR) 模型。所有模型中, 仅有以 400 ~ 2 400 nm 和 640 ~ 700 nm 连续统去除数据所建模型的相对分析误差 (RPD) 达 2.5 以上, 分别为 2.62 和 2.52, 且二者其余各项评价指标差异不大。以 640 ~ 700 nm 波段连续统去除数据构建的 PLSR 模型对南疆水稻土盐分含量具有很好的反演效果。

关键词 高光谱; 水稻土; 连续统去除; 盐分; 反演

中图分类号 TP701; S151.9 **文献标识码** A

盐渍化是土地退化的主要类型之一^[1], 我国耕地中盐渍化面积达到 $920.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 6.62%^[2-3], 严重制约和阻碍了我国农业的进一步发展。因此, 对盐渍化耕地进行治理与改良及种植结构调整与优化, 对我国农业的可持续发展具有深远意义。而这些决策的制定与执行的根本依据是土壤盐渍化信息。如何快速、准确、低廉地获取大面积盐渍化土壤的动态信息, 并据此合理制定盐渍化土壤治理、改良、合理利用等方面的决策, 是农业科学研究领域的新主题。遥感技术解决了传统的人工地面监测方法无法满足大面积盐渍化土壤快速监测需求的瓶颈, 为获取大面积盐渍化土壤的信息提供了新的途径, 已成为实现大尺度土壤盐渍化监测的理想手段^[4], 高光谱遥感更是进行土壤盐渍化监测较理想的一种手段^[5]。地物光谱特性是卫星遥感解译和近地传感器探测的理论基础, 是对地遥感观测和地面智能感知技术研究的重要组成部分。进行土壤盐渍化近地面高光谱试验的

相关研究, 对土壤盐渍化高光谱遥感监测的实施和应用, 具有一定的理论依据和技术支持方面的意义。

Ben-Dor 等^[6] 利用 DAIS-7915 传感器的高光谱数据定量反演了土壤湿度信息, 通过土壤湿度参数间接反演土壤盐分含量。Lu 等^[7] 采用了逐步回归分析方法, 利用 PHI (Pushbroom Hyperspectral Imager) 高光谱图像数据对新疆克拉玛依土壤盐渍化状况进行了定量制图。Weng 等^[8-9] 利用 ASD 光谱仪获得的近地面高光谱数据和 Hyperion 数据, 定量反演了黄河流域土壤盐分含量。屈永华等^[10] 利用原始反射率数据, 采用偏最小二乘回归方法建立了内蒙古河套灌区土壤盐分的定量反演模型, 验证数据的决定系数 (R^2) 为 0.73, 预测方差比为 1.79。王静等^[11] 利用一阶微分光谱数据, 采用神经网络建立了吉林省西部长岭县土壤盐分的定量反演模型, 决定系数为 0.90, 均方根误差 (RMSE) 为 0.09。樊彦国等^[12] 利用光谱曲线的形状特征参数, 采用神经网络对黄河三角洲东部地区的土壤盐分进行了定量

^{*} 国家“863”计划课题 (2013AA102301)、“973”前期专项 (2011CB411909, 2012CB426507)、国家自然科学基金项目 (41061031, 41261083, 41361048) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: shizhou@zju.edu.cn

作者简介: 彭 杰 (1977—), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 研究方向为农业资源与环境的遥感监测机理与方法。E-mail: pjzky@163.com

收稿日期: 2013-09-06; 收到修改稿日期: 2014-02-10

反演研究,所得模型的预测精度达到 62.50%。翁永玲等^[13]利用原始反射率数据,采用偏最小二乘回归(PLSR)建立了青海省茶卡-共和盆地土壤含盐量定量反演模型,建模决定系数达到 0.97,预测决定系数也达到了 0.90。卢霞^[14]利用反射率一阶导数、反射率对数一阶导数数据,运用多元逐步线性回归和曲线模拟构建了连云港典型滨海盐土土壤盐分含量的高光谱预测模型,S 函数构建土壤盐分含量的预测模型的决定系数为 0.56。赵振亮等^[15]采用反射率不同形式的微分数据,建立了新疆阿克苏地区渭-库绿洲土壤含盐量反演模型,非盐渍土模型的均方根误差为 0.46,盐渍土模型的均方根误差为 0.52。张晓光等^[16]利用反射率平滑后倒数对数,建立了吉林省西部白城市、松原市土壤含盐量的高光谱反演模型,模型的预测决定系数为 0.67,预测方差比为 1.61。

纵观国内外现有土壤盐渍化高光谱遥感监测的研究成果,在数据处理方面,鲜见系统的利用连续统数据进行土壤盐渍化高光谱遥感监测的相关报道。Dehaan 和 Taylor^[17]发现高度盐渍化土壤在某些特征波段相对于未发生盐渍化的土壤有更清晰的吸收特征。连续统去除可以凸显地物的吸收特征。因此,利用连续统数据提取土壤盐渍化信息,进行反演模型的构建,具有一定理论依据。此外,关于土壤含盐量高光谱反演方面的研究,其研究对象多集中于自然土壤,而对耕作土壤的相关研究甚少,尤其是对南疆水稻土盐渍化高光谱遥感监测方面的报道少见,耕作土壤相对于自然土壤而言,受人类活动的干扰更强烈,如灌排、土壤改良、耕作等,造成其盐分含量相对较低,但盐分组成变动较大。因此,耕作土壤盐渍化的高光谱遥感监测更具挑战性。同时,对耕作土壤进行盐渍化高光谱遥感监测,可为盐渍化区域耕作土壤的改良、治理、种植结构调整的决策提供有力的数据支持。

因此,本研究以新疆南疆地区的水稻土为研究对象,以反射率数据为基础进行连续统去除,提取连续统去除数据中能反映盐渍化信息的敏感特征波段和高光谱指数,并据此进行土壤盐分含量的高光谱定量反演模型的构建,根据反演精度的优劣,筛选出一种最佳高光谱反演模型。为本地区其他类型耕作土壤盐分含量的高光谱遥感监测提供理论依据和研究思路,同时可为其他地区耕作土壤盐渍化的相关研究提供借鉴方法,最终为耕作土壤的盐渍化评价、改良、治理、种植结构调整的决策依据提供新的信息获取途径。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

根据代表性、典型性和集中性原则,选取新疆维吾尔自治区的温宿县、和田县、拜城县为土壤样品采样区域。采用网格采样法,样点之间的距离为 50m 左右,采样深度为 0~20 cm。每个土样质量为 2 kg 左右,共采集 191 个,其中温宿县 112 个,和田县 58 个,拜城县 21 个。土壤类型为水稻土,亚类为潜育水稻土,土种为青灰泥田。土样经清除小石块及作物残留物等非土壤成分物质后,于实验室自然风干。风干后的样品经研磨过 2 mm 筛,用于盐分含量测定和光谱测试。

1.2 样品分析

土壤样品采用残渣烘干法进行含盐量测定。本次供试的 191 个土样的含盐量数据见表 1。由表 1 可以看出,不同土样的含盐量变化范围较大,最大值达到 10.55 g kg^{-1} ,而最小值仅为 0.84 g kg^{-1} ,建模样本集的标准差为 1.69,变异系数达到 62.00%,具有较大的标准差和变异系数,这有利于模型的构建,所建模型也更具普适性。

表 1 土壤含盐量统计特征

Table 1 Statistic characteristics of soil salt contents (g kg^{-1})

取样点 Location	样品数 Sample number	平均 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 SD	变异系数 VC (%)
温宿 Wensu	112	2.21	5.46	0.90	1.04	47.00
和田 Hetian	58	5.19	10.55	1.04	2.51	48.00
拜城 Baicheng	21	2.18	3.85	0.84	0.86	40.00
所有样品 Total samples	191	3.12	10.55	0.84	2.13	68.00
建模样本 Calibration	141	2.73	10.55	0.90	1.69	62.00
预测样本 Predication	50	4.19	10.21	0.84	2.78	66.00

1.3 光谱测试

采用美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR 型光谱仪进行土壤测试,其波长范围为 350 ~ 2 500 nm,光谱分辨率在 350 ~ 1 000 nm 为 3 nm,在 1 000 ~ 2 500 nm 为 10 nm。光谱测量在一个能控制光照条件的暗室内进行。光源是功率为 50 W 的卤素灯,距土壤样品表面 70 cm。土壤样品分别放置在直径 10 cm、深 1.5 cm、内部全部涂黑的培养皿内,用直尺将土样表面刮平。传感器探头位于土壤样品表面垂直上方 15 cm 处。采用 25° 视场角探头,探头接受土壤光谱的区域为直径 6.7 cm 的圆,远小于培养皿面积,这样可以保证探头接收的均为土壤的反射光谱。测试之前先进行白板校正。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 光谱数据处理及吸收特征参数提取

每个土样的光谱曲线去除噪声较大的边缘波段 350 ~ 399 nm 和 2 401 ~ 2 500 nm。采用小波去噪法对土壤光谱进行滤波去噪。数据变换包括一阶微分处理和连续统去除处理。

连续统去除处理后,提取出如下几个典型吸收特征:吸收峰总面积 (Total area of absorption peaks, TAAP)、最大吸收深度 (Maximum absorption depth, MAD)、面积归一化最大吸收深度 (Area normalized maximum absorption depth, ANMAD)。

1.5 盐分光谱指数构建

根据相关性分析结果,选择连续统去除的 673 nm、755 nm 波段构建连续统去除归一化指数 (Normalized index of continuum removal, NI_{CR})、连续统去除差值指数 (Difference index of continuum removal, DI_{CR})、连续统去除比值指数 (Ratio index of continuum removal, RI_{CR})。选择连续统去除一阶微分的 658 nm、678 nm 波段构建连续统去除一阶微分归一化指数 (Normalized index of first derivative of continuum removal, NI_{FDCR})、连续统去除一阶微分差值指数 (Difference index of first derivative of continuum removal, DI_{FDCR})、连续统去除一阶微分比值指数 (Ratio index of first derivative of continuum removal, RI_{FDCR})。具体计算公式如下。

$$NI_{CR} = \frac{R_{755} - R_{673}}{R_{673} + R_{755}} \quad (1)$$

$$DI_{CR} = R_{755} - R_{673} \quad (2)$$

$$RI_{CR} = \frac{R_{755}}{R_{673}} \quad (3)$$

$$NI_{FDCR} = \frac{FR_{678} - FR_{658}}{FR_{658} + FR_{678}} \quad (4)$$

$$DI_{FDCR} = FR_{678} - FR_{658} \quad (5)$$

$$RI_{FDCR} = \frac{FR_{678}}{FR_{658}} \quad (6)$$

式中, R_{673} 、 R_{755} 表示 673 nm、755 nm 波段的连续统去除值, FR_{658} 、 FR_{678} 表示 658 nm、678 nm 波段的连续统去除的一阶微分值。

1.6 模型构建与精度评价

建模方法采用偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 和一元线性回归。模型精度采用以下指标来评价,具体包括建模决定系数 R_C^2 、交叉验证决定系数 R_{CV}^2 、预测决定系数 R_p^2 、相对分析误差 (Relative percent deviation, RPD)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE), 均方根误差分为建模均方根误差 (Root mean square error of calibration, $RMSE_C$)、交叉验证均方根误差 (Root mean square error of cross-validation, $RMSE_{CV}$)、预测均方根误差 (Root mean square error of predication, $RMSE_p$)。建模时,随机选择 141 个样本用于建模,剩余的 50 个样本用于预测模型。

此外,目前普遍认为,当 $1.5 < RPD < 2$ 时表明模型只能对样品高含量与低含量进行粗略估测,当 $2.0 < RPD < 2.5$ 时表明模型具有较好的定量预测能力,当 $2.5 < RPD < 3.0$ 时模型具有很好的预测能力,当 $RPD > 3.0$ 时模型具有极好的预测能力^[18]。

2 结 果

2.1 不同含盐量土壤的高光谱特征分析

图 1 为不同含盐量土样的反射光谱曲线和连续统去除曲线。由图 1A 可知,不同含盐量土样的反射光谱曲线的形态没有明显差异,虽然各曲线在 1 420 nm、1 940 nm、2 340 nm 波段处有明显的吸收特征,但吸收深度与吸收面积的大小与含盐量之间并未呈现一定规律。从反射率的大小来看,在 400 ~ 2 400 nm 波段范围内,并没有按盐分含量的高低呈现递增或递减排列规律,但在 400 ~ 820 nm 波段,除含盐量为 5.73 g kg^{-1} 的曲线外,其余均按含盐量的高低呈现递减排列。

原始反射率曲线经连续统去除处理后,见图 1B,一些通过原始反射率很难发现的微弱吸收特征得到放大,可以通过连续统去除曲线明显观察出来,如在 480 nm、670 nm、745 nm、820 ~ 1 350

nm 波段,同时,原有的明显吸收带的吸收特征得到进一步加强,如 1 420 nm、1 920 nm、2 340 nm 这 3 处水分吸收带的吸收特征。此外,从连续统去除曲线还可以看出,在以 670 nm 为中心的 640 ~ 700

nm 波段,连续统去除值依含盐量高低呈现递减的排列规律,以 745 nm 为中心的 710 ~ 780 nm 波段则呈现递增的排列规律,而在其他吸收波段无明显的规律。

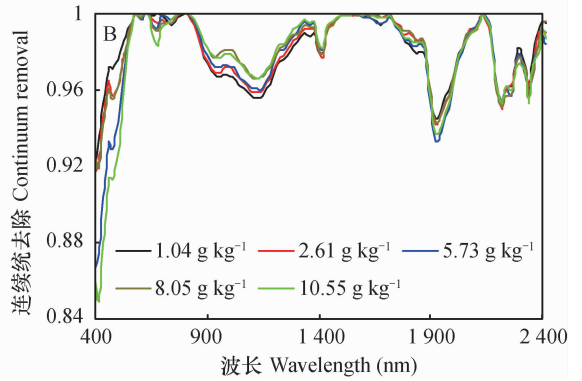
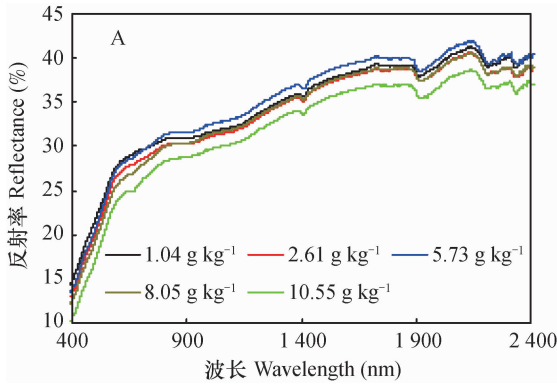


图 1 不同含盐量土样的反射率(A)和连续统去除(B)曲线

Fig. 1 Reflectances (A) and continuum removal curves (B) of soils different in salt content

为了进一步提取 640 ~ 700 nm、710 ~ 780 nm 波段的吸收特征信息,单独对 640 ~ 700 nm、710 ~ 780 nm 波段进行连续统去除,不同含盐量土样在这两个波段的连续统去除曲线见图 2。由图 2A 可见,在 640 ~ 700 nm 波段,随着含盐量的增加,连续统去除值降低,吸收面积和吸收深度变大,整个曲线在 670 nm 处达到最小值,不同含盐量土样以含盐量由高到低在此处的连续统去除值依次为 0.983、0.988、0.990、0.995、0.999。此外,虽然随着含盐量的变化,连续统

去除值、吸收深度、吸收面积有明显变化,但吸收中心所处位置一直保持不变,始终在 670 nm 波段处,并没有蓝移和红移现象。从图 2B 可知,在 710 ~ 780 nm 波段,随着含盐量的增加,连续统去除值变大,吸收面积和吸收深度变小,整个曲线在 745 nm 处达到最小值,不同含盐量土样以含盐量由高到低在此处的连续统去除值依次为 0.999、0.998、0.997、0.996、0.995。同时,在此波段,吸收中心并未因含盐量的变化而出现波动,始终在 745 nm 处。

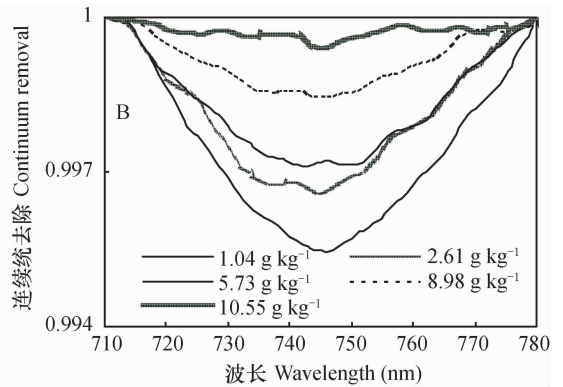
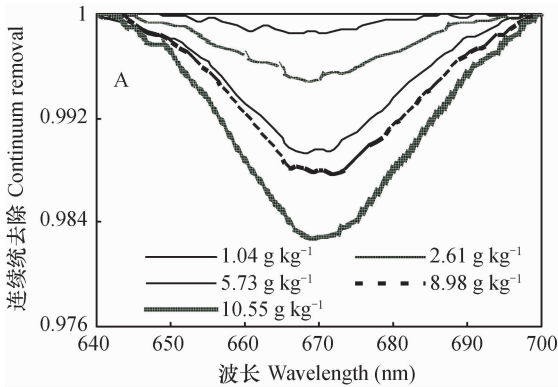


图 2 不同含盐量土样在 640 ~ 700 nm(A)和 710 ~ 780 nm(B)波段的连续统去除曲线

Fig. 2 Continuum-removal curves of soils different in salt content in 640 ~ 700 nm (A) and 710 ~ 780 nm (B) bands

2.2 土壤含盐量与高光谱数据的相关性分析

图 3 为连续统及连续统一阶微分与土壤含盐量的相关性曲线。由图 3 可知,土壤含盐量与连续统去除数据在 400 ~ 517 nm、593 ~ 708 nm、821 ~ 1 424 nm、2 192 ~ 2 223 nm、2 249 ~ 2 265 nm、2 297 ~ 2 372 nm 波段呈负相关,其中,400 ~ 452 nm、640 ~ 700 nm、890 ~ 959 nm、1 043 ~ 1 253 nm、1 385 ~

1 415 nm、2 308 ~ 2 365 nm 波段的相关性达极显著水平,最大负相关处位于 673 nm,相关系数为 -0.73,这与 Shi^[19-20]的研究结果基本吻合。在 518 ~ 592 nm、709 ~ 820 nm、1 425 ~ 2 191 nm、2 224 ~ 2 248 nm、2 266 ~ 2 296 nm、2 373 ~ 2 400 nm 波段呈正相关,其中,564 ~ 583 nm、710 ~ 780 nm、1 443 ~ 1 725 nm、1 737 ~ 1 813 nm、1 883 ~ 1 929 nm、

2 028 ~ 2 178 nm 波段的相关性达极显著水平,最大正相关位于 755 nm,相关系数为 0.48。纵观整个曲线,在 593 ~ 708 nm、709 ~ 780 nm 这两个波段各有一个分别为负、正相关的凸峰,相关系数明显要较相邻波段的高,且正、负相关性最强的波段均位于这两个波段范围内。其中,640 ~ 700 nm、710 ~ 780 nm 的相关性均达极显著水平,说明对土壤含盐量的变化非常敏感。因此,640 ~ 700 nm、710 ~ 780 nm 为土壤含盐量的连续统去除敏感波段,这与 2.1 中不同含盐量土壤高光谱特征分析的结果完全吻合。

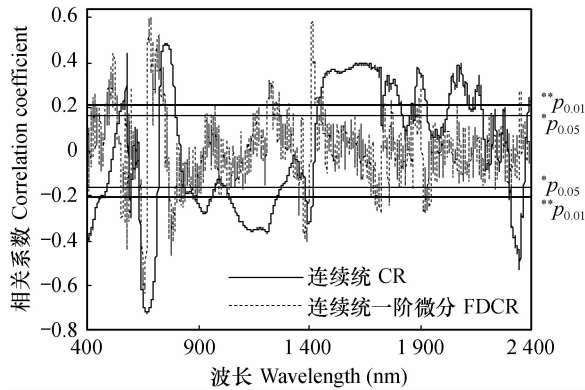


图 3 土壤含盐量与连续统及连续统一阶微分的相关性曲线 ($n = 191$)

Fig. 3 Correlation curves of soil salt content with continuum-removal reflectance (CR), and continuum-removal first derivative reflectance (FDCR) ($n = 191$)

如图 3 所示,连续统去除经一阶微分处理后,与含盐量的相关性变得较为复杂,相关性的连续性较差,正负相间,缺乏规律性,但一些波段的相关性得到了明显增强,说明微分处理可以将一些隐晦的信息释放。从整个曲线来看,经一阶微分变换后,虽然少数波段的相关性得到了提高,但大部分波段相对于连续统去除而言,其相关性并未得到改善,反而

有所下降,就整个 400 ~ 2 400 nm 波段而言,变换后达极显著水平的波段明显减少。此外,从图中可知,400 ~ 1 440 nm 波段的相关性明显要优于 1 440 ~ 2 400 nm 波段,400 ~ 1 440 nm 范围达极显著水平的波段数远远多于 1 440 ~ 2 400 nm 的,由此说明,连续统去除一阶微分的含盐量敏感波段基本处于 400 ~ 1 440 nm。在 400 ~ 2 400 nm 波段范围,658 nm 波段的负相关性最强,相关系数为 -0.64,正相关性最强的波段位于 678 nm,相关系数为 0.61。

由以上可知,对盐分含量变化最敏感的连续统去除波段位于 673 nm、755 nm 波段,连续统去除一阶微分的最敏感波段位于 658 nm 和 678 nm 波段,其中,673 nm 和 658 nm 为负相关,755 nm、678 nm 为正相关,说明随着含盐量的变化,其光谱值会明显增加或降低,而通过建立二者之间的比值指数或差值指数会进一步放大这种信息,且该光谱指数是由整个波段中对盐分含量最敏感波段所组成。所以,由此所建立的光谱指数为所有波段范围内两两组合的最佳光谱指数。因此,选择以上四个波段建立相应的盐分光谱指数。

2.3 土壤含盐量的高光谱定量反演模型构建与验证

2.3.1 基于盐分光谱指数的反演模型 根据相关性分析结果,选择正、负相关性最强的连续统去除和连续统去除一阶微分波段分别建立盐分光谱指数,不同盐分光谱指数所建模型的参数见表 2。由表 2 可以看出,连续统去除的盐分光谱指数模型的建模决定系数普遍高于连续统去除一阶微分盐分光谱指数模型,而建模均方根误差则小于它,连续统去除的盐分光谱指数模型的相关性均达到极显著水平,而连续统去除一阶微分的盐分光谱指数

表 2 土壤盐分含量的盐分光谱指数模型 ($n = 141$)

Table 2 Inversion models for soil salt content based on salt spectral indexes ($n = 141$)

光谱指数 Spectral indexes	拟合模型 Fitting models	建模决定系数 R_c^2	建模均方根误差 $RMSE_c$
NI_{CR}	$Y = -433.06x + 3.7872$	0.53 **	1.16
RI_{CR}	$Y = -216.57x + 220.36$	0.51 **	1.20
DI_{CR}	$Y = -218.06x + 3.7901$	0.43 **	1.32
NI_{FDCR}	$Y = 0.1289x + 2.96$	0.06 **	1.79
RI_{FDCR}	$Y = -0.2304x + 3.0687$	0.03	1.86
DI_{FDCR}	$Y = -3507.7x + 2.0877$	0.38 **	1.34

注:Y - 土壤含盐量, x - 盐分光谱指数值 Notes: Y-soil salt content, x-value of salt spectral index

模型除 DI_{FDCR} 、 RI_{FDCR} 达极显著水平外, NI_{FDCR} 未达显著水平, 说明以连续统去除所建的模型优于连续统去除一阶微分的模型, 这主要是因为连续统去除经一阶微分处理后数据波动性较大所造成。在所有盐分光谱指数模型中, 以 NI_{CR} 所构建的模型的决定系数最高且均方根误差最小, 分别为 0.53 和 1.16。

2.3.2 基于吸收特征参数的反演模型 为了提取不同含盐量土样在 640 ~ 700 nm 和 710 ~ 780 nm 波段的吸收特征信息, 专门对这两个波段单独进行了连续统去除, 并计算了这两个波段的 TAAP、MAD、ANMAD 的数值, 在此基础上构建了盐分含量与该两个波段吸收特征参数的拟合模型, 模型的具体参数见表 3。由表 3 可知, 虽然所有模型的相关性均达到极显著水平, 但以 640 ~ 700 nm 波段提取

的吸收特征参数所建模型明显要优于 710 ~ 780 nm 波段吸收特征参数的对应模型, 640 ~ 700 nm 波段所建模型的决定系数均在 0.6 以上, 均方根误差均在 1.10 以下, 而 710 ~ 780 nm 波段所建模型的决定系数均在 0.31 以下, 均方根误差在 1.40 以上。在 640 ~ 700 nm 波段的吸收特征参数模型中, 不同模型的决定系数、均方根误差的差异不大, 相对比较而言, 以 TAAP 参数所建模型的决定系数最高, 且均方根误差最小, 决定系数为 0.66, 均方根误差仅为 1.06。在 710 ~ 780 nm 波段的吸收特征参数模型中, 以 ANMAD 所建立模型的决定系数最高、均方根误差最小, 但与 640 ~ 700 nm 波段模型相比, 尚有一定差距。纵观所有模型的决定系数和均方根误差, 以 640 ~ 700 nm 波段的 TAAP 所建模型为最佳。

表 3 土壤盐分含量的吸收特征参数模型

Table 3 Inversion models for soil salt content based on spectral absorption indexes

光谱吸收指数 Spectral absorption indexes	拟合模型 Fitting models	建模决定系数 R_c^2	建模均方根误差 $RMSE_c$
TAAP _{640 ~ 700nm}	$Y = 15.374x + 1.9318$	0.66 **	1.06
MAD _{640 ~ 700nm}	$Y = 434.4x + 1.767$	0.61 **	1.10
ANMAD _{640 ~ 700nm}	$Y = 8.635x^2 - 1.006.8x + 30.777$	0.63 **	1.08
TAAP _{710 ~ 780nm}	$Y = -6.7429x + 5.5527$	0.16 **	1.56
MAD _{710 ~ 780nm}	$Y = -381.86x + 5.9336$	0.14 **	1.57
ANMAD _{710 ~ 780nm}	$Y = 623.19x - 9.9121$	0.31 **	1.40

注: Y - 土壤含盐量, x - 吸收特征参数值 Notes: Y - soil salt content, x - absorption characteristic parameters

2.3.3 基于连续统去除及其一阶微分数据的反演模型 为了考查连续统去除法对土壤盐分含量预测模型的改善效果, 本文有针对性地对原始反射率的数据进行了对应的统计, 具体结果见表 4。由表 4 可知, 无论是反射率与连续统去除, 还是反射率一阶微分与连续统去除一阶微分对应的波段相比, 经连续统去除处理之后, 无论是建模集的决定系数、均方根误差, 还是验证集的决定系数、均方根误差, 均得到了明显的改善, 如以 400 ~ 2400 nm 波段建模为例, 反射率建模集和验证集的决定系数、均方根误差分别为 0.54、1.16 和 0.44、1.32, 而连续统去除对应的数据为 0.78、0.82 和 0.70、0.85, 说明经连续统去除后, 使得一些原本被遮蔽的盐分光谱吸收特征信息被释放出来, 从而使预测模型得到明显改善。因此, 对原始反射率进行连续统去除处理,

对于提高土壤含盐量预测模型的精度和稳定性具有关键作用。就连续统去除和连续统去除一阶微分二者比较而言, 虽然连续统去除一阶微分建模集的决定系数和均方根误差要优于连续统去除, 但验证集的结果却正好相反, 说明微分处理虽然能提高少数波段的相关性, 但整体效果欠佳, 所建模型的稳定性反而有所下降。此外, 连续统去除的不同波段建模效果进行比较而言, 以 400 ~ 2400 nm 波段建模效果最佳, 640 ~ 700 nm 波段效果其次, 710 ~ 780 nm 的效果最差。但通过比较 400 ~ 2400 nm 波段和 640 ~ 710 nm 建模集与验证集的决定系数、均方根误差, 发现二者之间的差异并不明显, 因此, 说明 640 ~ 700 nm 波段基本包含了土壤盐分高光谱信息的全部内容。

表 4 土壤盐分含量的 400 ~ 2 400 nm 波段及敏感波段的 PLSR 模型

Table 4 PLSR inversion models for soil salt content based on 400 ~ 2 400 nm bands and sensitive bands

光谱指标 Spectral indexes	建模波段 Modeling wave bands (nm)	建模集 Calibration		验证集 Cross validation	
		R_c^2	$RMSE_c$	R_{cv}^2	$RMSE_{cv}$
反射率 Reflectance	400 ~ 2 400	0.54 **	1.16	0.44 **	1.32
	640 ~ 700	0.54 **	1.15	0.51 **	1.18
	710 ~ 780	0.35 **	1.38	0.27 **	1.48
	640 ~ 780	0.53 **	1.16	0.51 **	1.20
连续统去除 CR	400 ~ 2 400	0.78 **	0.82	0.70 **	0.85
	640 ~ 700	0.75 **	0.84	0.68 **	0.88
	710 ~ 780	0.57 **	1.14	0.31 **	1.43
	640 ~ 780	0.63 **	1.08	0.57 **	1.14
反射率一阶微分 FD	400 ~ 2 400	0.58 **	1.13	0.29 **	1.67
	400 ~ 1 440	0.50 **	1.21	0.35 **	1.45
连续统去除一阶微分 FDCR	400 ~ 2 400	0.82 **	0.80	0.56 **	1.14
	400 ~ 1 440	0.55 **	1.15	0.37 **	1.36

2.3.4 模型的验证与优选 为了比较不同光谱指标对土壤含盐量的预测能力,本文利用独立于建模样本外的 50 个预测样本对所有定量估测模型进行了测试和对比(表 5)。由表 5 可知,除 710 ~ 780 nm波段的吸收特征参数模型的预测值与实测值之间未达到显著水平,以 658 nm、678 nm 波段连续统去除一阶微分构建的 NI_{FDCR} 与 RI_{FDCR} 模型中的预测值与实测值之间仅达到显著水平外,其余模型的均达到极显著水平。同时,反射率与连续统去除、反射率一阶微分与连续统去除一阶微分的对应模型相比,经连续统去除处理之后, R_p^2 、 $RMSE_p$ 、RPD 均得到了明显的改善。此外,以盐分光谱指数和吸收特征参数所建模型的预测能力不如以 400 ~ 2 400 nm 波段或盐分敏感波段所建的 PLSR 模型,前者所有模型中 RPD 最高为 1.42,后者的达到 2.62。

纵观所有模型的 RPD 值,以 710 ~ 780 nm 波段连续统去除数据、400 ~ 2 400 nm 连续统去除一阶微分数据所建 PLSR 模型的 RPD 分别为 1.55 和 1.97,说明模型只能粗略地估测土壤盐分含量的高低。以 640 ~ 780nm 波段连续统去除数据所建 PLSR 模型的 RPD 为 2.07,表明模型能较好地预测土壤盐分含量。以 400 ~ 2 400 nm 和 640 ~ 700 nm 波段连续统去除数据所建 PLSR 模型的 RPD 分别为 2.62 和 2.52,说明模型对土壤盐分含量具有很好的预测能力。但这两个模型之间的 R_p^2 、 $RMSE_p$ 、RPD 非常相近,并没有显著差异,而从模型的复杂程度

来比较,640 ~ 700 nm 波段相对于 400 ~ 2 400 nm 波段而言,具有更少的变量,数据处理的工作量更少,建模过程也更简单、快速。因此,基于该点考虑,640 ~ 700 nm 波段可以取代 400 ~ 2 400 nm 波段。在所有模型中,RPD 均未达到 3.0 以上。

3 讨论

土壤高光谱特征是其内在理化特性的外在表现,影响因素众多,如有机质、氧化铁、土壤水分、土壤质地等。目前,大多数研究多集中于单一因素对土壤高光谱特征的影响,如有机质^[21]、氧化铁^[22]、盐分^[23]等均有相关报道。但对于多因素之间高光谱特征相互影响的研究鲜见报道,尤其是关于土壤盐分与有机质之间的相关研究。已有大量研究表明,有机质的存在能明显降低土壤反射率^[24-26],其敏感波段基本位于可见光波段,不同研究者因土壤类型或成土过程的不同,所得结论存在一定的差异,但大部分位于 600 ~ 800 nm^[21,27-30]。本文通过比较不同盐分含量土样的高光谱特征和相关性分析,发现盐分也能降低土壤反射率,且对盐分敏感的波段为 640 ~ 700 nm 和 710 ~ 780 nm 波段。由此可知,有机质与盐分的高光谱特征波段具有高度的重叠性。本次采集的土壤类型为水稻土,其含盐量相对较低,平均值为 3.12 g kg⁻¹,而有机质含量要高于盐分含量,一般大于 10 g kg⁻¹。因此,含量相对占优的有机质是否会遮蔽土壤盐分的高光谱信息,

表 5 不同模型的预测效果

Table 5 Predictions of different salt prediction models

光谱指标 Spectral indexes	建模波段 Modeling wave bands (nm)	预测集 Prediction			
		R_p^2	RMSE _p	RPD	
反射率 Reflectance	400 ~ 2 400	0.55 **	1.90	1.46	
	640 ~ 700	0.51 **	1.95	1.42	
	710 ~ 780	0.43 **	2.23	1.25	
	640 ~ 780	0.52 **	1.94	1.43	
连续统去除 CR	400 ~ 2 400	0.82 **	1.06	2.62	
	640 ~ 700	0.79 **	1.10	2.52	
	710 ~ 780	0.58 **	1.79	1.55	
	640 ~ 780	0.73 **	1.34	2.07	
反射率一阶微分 FD	400 ~ 2 400	0.64 **	1.88	1.48	
	400 ~ 1 440	0.46 **	2.16	1.29	
连续统去除一阶微分	400 ~ 2 400	0.69 **	1.41	1.97	
	FDCR	400 ~ 1 440	0.47 **	2.02	1.37
	NI _{CR}	673、755	0.50 **	2.09	1.33
	RI _{CR}	673、755	0.50 **	2.09	1.33
	DI _{CR}	673、755	0.50 **	2.09	1.33
	NI _{FDCR}	658、678	0.11 *	2.85	0.97
	RI _{FDCR}	658、678	0.11 *	2.91	0.95
	DI _{FDCR}	658、678	0.45 **	2.07	1.34
	TAAP _{640 ~ 700nm}	640 ~ 700	0.49 **	1.98	1.40
	MAD _{640 ~ 700nm}	640 ~ 700	0.50 **	1.96	1.42
ANMAD _{640 ~ 700nm}	640 ~ 700	0.33 **	2.27	1.22	
TAAP _{710 ~ 780nm}	710 ~ 780	0.03	2.74	1.01	
MAD _{710 ~ 780nm}	710 ~ 780	0.02	2.75	1.01	
ANMAD _{710 ~ 780nm}	710 ~ 780	0.03	2.75	1.01	

最终影响盐分含量的反演精度,是值得进一步深入研究的问题。

土壤盐分是 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 、 SO_4^{4-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 八大主要离子中的阴阳离子两两组合的综合体,大部分研究者通常将其作为一个整体来研究它的高光谱特征,但不同的盐分组成土壤的高光谱特征存在较大的差异^[31-33]。以往的相关研究基本均集中在某一区域的自然土壤,而本研究则是以耕作土壤为研究对象,自然土壤相对于耕作土壤而言,受人类活动的干扰较少,某一固定区域土壤盐分的组成相对稳定,且具有高度相似性。因此,由于盐分组成所带来的光谱差异较少。而自然土壤由于人类的灌排、土壤改良、耕作等活动的影响,造成不同区域甚至同一区域不同管理者的条

田的盐分组成产生较大差异。同时,本次采集的土样覆盖了温宿县、和田县、拜城县 3 个不同的地区,不同地区之间相距甚远。所以,因成土母质、成土过程的不同,也是其盐分组成差异的另一个主要原因。因此,在本研究中,由于盐分组成引起的土样之间盐分高光谱响应波段的差异,对获取高精度的反演模型具有一定的负面影响。

至今为止,关于土壤盐渍化高光谱响应的研究,大部分趋向于土壤盐渍化程度越高光谱反射越强的结论。而本研究中的结果显示,随含盐量的增加,土壤反射率有下降的趋势,这是因为 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等离子具有高度吸湿性,从周围环境吸收了大量的水分,从而导致反射率降低^[34]。

4 结 论

在 400 ~ 2 400 nm 波段,土壤反射率的大小与盐分含量之间并无明显规律,但在 400 ~ 820 nm 波段,除含盐量为 5.73 g kg^{-1} 的曲线外,其余均按含盐量的高低呈现递减排列。原始反射率经连续统去除处理后,在以 670 nm 为中心的 640 ~ 700 nm 波段,连续统去除值依含盐量高低呈现递减的排列规律,以 745 nm 为中心的 710 ~ 780 nm 波段则呈现递增的排列规律。在 400 ~ 452 nm、640 ~ 700 nm、890 ~ 959 nm、1 043 ~ 1 253 nm、1 385 ~ 1 415 nm、2 308 ~ 2 365 nm 波段,盐分含量与连续统去除数据呈极显著负相关,最大负相关处位于 673 nm,相关系数为 -0.73 。在 564 ~ 583 nm、710 ~ 780 nm、1 443 ~ 1 725 nm、1 737 ~ 1 813 nm、1 883 ~ 1 929 nm、2 028 ~ 2 178 nm 波段呈极显著正相关,最大正相关位于 755 nm,相关系数为 0.48 。连续统去除经一阶微分变换后,对相关性的改善作用不明显。反射率经连续统去除处理后,建模精度得到明显改善。在所有模型中,仅有以连续统去除 400 ~ 2 400 nm 波段和连续统去除 640 ~ 700 nm 所建模型的 RPD 达到了 2.5 以上,分别为 2.62 和 2.52,具有很好预测土壤盐分含量的能力。经过比较其余各项评价指标,二者差异不明显。因此,基于省时省力的角度考虑,将连续统去除 640 ~ 700 nm 的 PLSR 模型确定为南疆水稻土盐分含量的最佳反演模型。

参 考 文 献

- [1] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议. 干旱区地理,2000,23(2):177—181. Tian C Y,Zhong H F,Liu G Q. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21's century in Xinjiang (In Chinese). Arid Land Geography,2000,23(2):177—181
- [2] 石玉林.《中国 1:100 万土地资源图》土地资源数据集. 北京:中国人民大学出版社,1991. Shi Y L. Land resources data sets of "1:1 million map of Chinese land resources" (In Chinese). Beijing:China Renmin University Press,1991
- [3] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京:中国农业出版社,1998. The National Soil Survey Office. Soils of China (In Chinese). Beijing:China Agriculture Press,1998
- [4] Metternicht G I,Zinck J A. Remote sensing of soil salinity:Potentials and constraints. Remote Sensing of Environment,2003,85(1):1—20
- [5] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. 地理学报,2012,67(9):1233—1245. Li J G,Pu L J,

Zhu M,et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research (In Chinese). Acta Geographica Sinica,2012,67(9):1233—1245

- [6] Ben-Dor E,Patkin K,Banin A,et al. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data. A case study over clayey soils in Israel. International Journal of Remote Sensing,2002,23(6):1043—1062
- [7] Lu N,Zhang Z,Gao Y. Recognition and mapping of soil salinization in arid environment with hyperspectral data. Geoscience and Remote Sensing Symposium,2005,6:4520—4523
- [8] 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. International Journal of Remote Sensing,2008,29(19):5511—5531
- [9] Weng Y L,Gong P,Zhu Z L. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River delta region of China using EO-1 hyperion data. Pedosphere,2010,20(3):378—388
- [10] 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. 光谱学与光谱分析,2009,29(5):1362—1366. Qu Y H,Duan X L,Gao H Y,et al. Quantitative retrieval of soil salinity using hyperspectral data in the region of Inner Mongolia Hetao irrigation district (In Chinese). Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(5):1362—1366
- [11] 王静,刘湘南,黄方,等. 基于 ANN 技术和高光谱遥感的盐渍土盐分预测. 农业工程学报,2009,25(12):161—166. Wang J,Liu X N,Huang F,et al. Salinity forecasting of saline soil based on ANN and hyperspectral remote sensing (In Chinese). Transactions of the CSAE,2009,25(12):161—166
- [12] 樊彦国,侯春玲,朱浩,等. 基于 BP 神经网络的盐渍土盐分遥感反演模型研究. 地理与地理信息科学,2010,26(6):24—27. Fan Y G,Hou C L,Zhu H,et al. Research on salinity inversion from remote sensing of saline soil based on BP neural network (In Chinese). Geography and Geo-Information Science,2010,26(6):24—27
- [13] 翁永玲,戚浩平,方洪宾,等. 基于 PLSR 方法的青海茶卡-共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演. 土壤学报,2010,47(6):1255—1263. Weng Y L,Qi H P,Fang H B,et al. PLSR-based hyperspectral remote sensing retrieval of soil salinity of Chaka-Gonghe Basin in Qinghai Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2010,47(6):1255—1263
- [14] 卢霞. 滨海盐土盐分含量与其光谱特征的关系研究. 水土保持通报,2012,32(5):186—190. Lu X. Relationship between saline concentration and its reflectance spectra for seashore saline soil (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(5):186—190
- [15] 赵振亮,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等. 塔里木河中游典型绿洲土壤含盐量的光谱特征. 自然灾害学报,2012,21(5):72—78. Zhao Z L,Tiyip T,Zhang F,et al. Spectral characteristics of soil salt content in typical oasis of Tarim River's middle reaches (In Chinese). Journal of Natural Disasters,2012,21(5):72—78
- [16] 张晓光,黄标,季峻峰,等. 基于可见近红外高光谱的东北盐渍土盐分定量模型研究. 光谱学与光谱分析,2012,32(8):2075—2079. Zhang X G,Huang B,ji J F,et al. Quantitative pre-

- diction of soil salinity content with visible-near infrared hyperspectra in northeast China (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2075—2079
- [17] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3): 406—418
- [18] Saeyes W, Mouazen A M, Ramon H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Biosystem Engineering*, 2005, 91(4): 393—402
- [19] Shi Z, Huang M X, Li Y. Physico-chemical properties and laboratory hyperspectral reflectance of coastal saline soil in Shangyu City of Zhejiang Province, China. *Pedosphere*, 2003, 13(3): 193—198
- [20] Shi Z, Cheng J L, Huang M X, et al. Assessing reclamation levels of coastal saline lands with integrated stepwise discriminant analysis and laboratory hyperspectral data. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 154—160
- [21] 彭杰, 周清, 张杨珠, 等. 有机质对土壤光谱特性的影响研究. *土壤学报*, 2013, 50(3): 517—524. Peng J, Zhou Q, Zhang Y Z, et al. Effect of soil organic matter on spectral characteristics of soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 517—524
- [22] 彭杰, 向红英, 周清, 等. 土壤氧化铁的高光谱响应研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(2): 502—506. Peng J, Xiang H Y, Zhou Q, et al. Influence of soil iron oxide on VNIR diffuse reflectance spectroscopy (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(2): 502—506
- [23] Wang Q, Li P H, Maina J N, et al. Study of how salt types greatly shape soil reflectance spectra versus salt concentrations. *Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(9): 1503—1510
- [24] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 1965, 100(2): 130—138
- [25] Dematte J A M, Garcla G J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(2): 327—342
- [26] 彭杰, 张杨珠, 周清, 等. 去除有机质对土壤光谱特性的影响. *土壤*, 2006, 38(4): 453—458. Peng J, Zhang Y Z, Zhou Q, et al. Spectral characteristics of soils in Hunan Province as affected by removal of soil organic matter (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(4): 453—458
- [27] 周清, 周斌, 张杨珠, 等. 成土母质对水稻土高光谱特性及其有机质含量光谱参数模型影响的研究初探. *土壤学报*, 2004, 41(6): 905—911. Zhou Q, Zhou B, Zhang Y Z, et al. Influence of parent materials on paddy soil hyperspectral characteristics and SOM spectral-parameter-models (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 905—911
- [28] 刘焕军, 张柏, 赵军, 等. 黑土有机质含量高光谱模型研究. *土壤学报*, 2007, 44(1): 27—32. Liu H J, Zhang B, Zhao J, et al. Spectral models for prediction of organic matter in black soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 27—32
- [29] 贺军亮, 蒋建国, 周生路, 等. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 638—643. He J L, Jiang J G, Zhou S L, et al. The hyperspectral characteristics and retrieval of soil organic matter content (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 638—643
- [30] 纪文君, 史舟, 周清, 等. 几种不同类型土壤的 VIS-NIR 光谱特性及有机质响应波段. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 277—282. Ji W J, Shi Z, Zhou Q, et al. VIS-NIR reflectance spectroscopy of the organic matter in several types of soils (In Chinese). *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 277—282
- [31] Howari F M. Reflectance spectra of common salts in arid soils (320 ~ 2500 nm): Application of remote sensing. USA: University of Texas at El Paso, 2001
- [32] Howari F M, Goodell P C, Miyamoto S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. *Journal of Environment Quality*, 2002, 31: 1453—1461
- [33] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near-infrared spectral features of salt crusts formed from different brines. *Annali di Chimica*, 2004, 94(4): 315—323
- [34] Karavanova E I, Shrestha D P, Orlov D S. Application of remote sensing techniques for the study of soil salinity in semi-arid Uzbekistan//Bridges E M, Hannam I D, Oldeman L R. Response to land degradation. New Delhi, India: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, 2001: 261—273

INVERSION OF SOIL SALT CONTENT BASED ON CONTINUUM-REMOVAL METHOD

Peng Jie¹ Chi Chunming¹ Xiang Hongying¹ Teng Hongfen² Shi Zhou^{2*}

(1 College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

(2 Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract A total of 191 soil samples were collected from Wensu, Hetian and Baicheng counties for analysis of original reflectances, which were then subjected to continuum removal and first derivative of continuum removal for analysis of hyperspectral absorption characteristics and sensitive bands of salts. On such a basis, a number of hyperspectral inversion models for quantification of soil salt contents (S_i) were established. Results show that there was no obvious relationship

between soil reflectance and S_i in 400 ~ 2 400 nm bands, and an apparent negative relationship between the data of continuum removal and S_i in 640 ~ 700 nm bands and a positive one in 710 ~ 780 nm bands. Prediction accuracies of the inversion models were improved significantly after the original reflectances underwent continuum removal. The inversion models established on spectral indices and spectral absorption features were inferior in stability and prediction accuracy to the PLSR models based on spectral reflectance in 400 ~ 2 400 nm bands or sensitive bands after continuum removed (CR) and first derivative of continuum removal (FDCR). Among all the models, the inversion models between S_i and FDCR were higher in determination coefficient and lower in root mean square error than the inversion models between S_i and CR. But the former was lower than the latter in prediction accuracy. Among all the inversion models, only the ones based on full spectrum and 640 ~ 700 nm continuum removal were higher than 2.5 in RPD, reaching 2.62 and 2.52, respectively and moreover, little difference was found between the two in all the other evaluation indices. The PLSR inversion model based on the continuum-removal data of the 640 ~ 700 nm bands is the most effective one in predicting S_i of paddy soils in Southern Xinjiang Uygur Autonomous Region of China.

Key words Hyperspectral; Paddy soil; Continuum removal; Salt; Inversion

(责任编辑:陈德明)