

不同盐结皮光谱特征及其盐渍化信息预测研究

张俊华^{1,2} 孙媛^{1,3} 贾科利³ 高曦文³ 张学艺⁴

(1. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021; 2. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021;

3. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 4. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002)

摘要: 盐碱地是我国重要的后备耕地资源,为及时、准确获取土壤盐渍化信息,以宁夏银北地区不同盐结皮土壤为研究对象,运用土壤学和地统计学方法,以土壤野外原位光谱数据和室内盐分指标测定数据为基本信息源,系统分析不同盐结皮光谱特征,确定对结皮层 pH 值、电导率(EC)和盐分离子含量最敏感的土壤光谱反射率转换形式、波段和光谱盐分指数,进而建立并验证基于敏感盐分指数的盐分指标预测模型。结果表明:研究区白碱结皮光谱反射率在 450~1050 nm 波段最高,马尿碱结皮次之,黑油碱结皮最低。通过野外光谱反射率可以将研究区主要盐结皮类型进行分类。反射率平滑后再经过一阶微分、倒数对数一阶微分、连续统去除和连续统去除一阶微分转换后,最大相关系数比只作平滑处理的反射率显著增大。与 pH 值、EC 和 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 含量相关性最强的转换方式是连续统去除一阶微分,与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 含量相关性最强的转换方式是倒数对数一阶微分,与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 含量相关性最强的转换方式是一阶微分。整体上连续统去除一阶微分与各盐分指标的相关性最强。整体来看,盐分敏感区域在蓝光 450、470、485 nm 附近,绿光 501、575 nm 附近,红光 680 nm 附近和近红外多个波段。与各盐分指标相关性最强的盐分指数分别为:pH 值为盐分指数 S1, Cl^- 、 K^+ 含量为盐分指数 S13, SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量为盐分指数 S2, EC 和 HCO_3^- 、 Na^+ 含量为盐分指数 S3, CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 含量为盐结皮指数 SCI。除 CO_3^{2-} 含量外,利用敏感盐分指数可以准确预测土壤结皮层 pH 值、EC 和其他盐分离子含量,其中对 Na^+ 含量的拟合度最大。该研究可为银北地区不同盐结皮土壤分类及盐渍化信息的准确预测提供科学依据。

关键词: 盐结皮; 光谱特征; 敏感波段; 盐分指数; 预测

中图分类号: S127; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0325-09

Spectral Characteristics and Salinization Information Prediction of Different Soil Salt Crusts

ZHANG Junhua^{1,2} SUN Yuan^{1,3} JIA Keli³ GAO Xiwen³ ZHANG Xueyi⁴

(1. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. Ningxia Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Yinchuan 750021, China

3. College of Resource and Environment Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Saline-alkali land is an important reserve land resource in China. Real-time and accurate acquisition of soil information is important for the classification and evaluation of soil salinization to prevent its degradation and realize agriculture sustainable development. Selecting different soil salt crusts in northern Ningxia Yinchuan as the study objects, based on soil science and geostatistics methods, and taking the spectra data of different soil salt crusts and measured soil salinization parameters in 0~5cm layer of laboratory as the source of information, the characteristics of spectra reflectance of different salt crusts were analyzed, the sensitive spectral wavelengths or index to pH value, EC and salt ions in crust layer were selected, and then the soil salinization monitoring models were established and confirmed. Results showed that the spectral reflectance of white alkali crust was the highest among different soil saline crusts; the reflectance of equine caustic crust was next, and the reflectance of black alkali crust

收稿日期: 2018-05-22 修回日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561078)

作者简介: 张俊华(1977—),女,研究员,博士,主要从事精准农业与土壤质量提升研究,E-mail: zhangjunhua728@163.com

通信作者: 贾科利(1975—),男,教授,博士,主要从事遥感和地理信息研究,E-mail: jiakeli@163.com

was the lowest. The main salt crust types in the study region could be classified by the spectral reflectance of the field. The highest correlation coefficients between the transformations of smoothing reflectance through the first order differential, the first derivative differential of logarithmic reciprocal of reflectance, continuum removal, the first derivative of continuum removal and salinity parameters were significantly improved than the transformation of smoothing reflectance gradually. The best transformation method of reflectance about soil pH value, EC, CO_3^{2-} and Mg^{2+} were the first derivative of continuum removal; the best transformation method of reflectance about soil SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ were first derivative differential of logarithmic reciprocal of reflectance; the best transformation method of reflectance about soil HCO_3^- , Cl^- and Na^+ were the first order differential. There was the strongest correlation between the first derivative of continuum removal and salinity parameters. On the whole from different salinity parameters, the sensitive wavelength was 450 nm, 470 nm and 485 nm in blue region; 501 nm and 575 nm in green region; 680 nm in red region; there were many sensitive wavelengths in infrared region. The highest correlation coefficients between pH value, EC, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and Na^+ and nine salinity indexes was S1 (Salinity index), S3 (Salinity index), SCI (Soil crust index), S3, S13 (Salinity index 3), S2 (Salinity index), SCI, S2 (Salinity index), S13 and S3, respectively. Except for CO_3^{2-} , the models were suitable for predicting the content of soil pH value, EC, and other salinity parameters, and there was the highest R^2 about Na^+ in this region. The study would provide some beneficial references for regional soil salinity classification and prediction.

Key words: soil salt crust; spectral characteristics; sensitive wavelength; soil salt index; prediction

0 引言

盐结皮(又称盐壳)是指在气候干旱、地势低洼、地下水位较高的区域,水分强烈蒸发后,盐分在地表聚集而形成的一个特殊层次^[1]。盐结皮硬度大、抗风蚀能力强,对降低土壤风蚀具有重要作用^[2-3]。如何快速、准确地获取大面积盐结皮及盐渍化信息,并由此制定盐渍化土壤治理、改良等方面的决策,对农业可持续发展具有重要意义。遥感技术具有快速、实时、覆盖广等特点,为获取大面积盐渍化信息提供了手段。近地面高光谱遥感更是进行盐结皮及土壤盐渍化监测的一种较佳手段,利用高光谱技术监测盐结皮,对盐渍化土壤的分布、分类和盐渍化程度进行预测具有重要意义^[4]。

盐结皮光谱信息受盐分组成、结晶颗粒大小、紧实程度等影响,其光谱特征差异较大。FARIFTEH等^[5]研究了实验室 MgCl_2 、 NaCl 、 KCl 、 K_2SO_4 、 MgSO_4 或 Na_2SO_4 不同浓度条件下的土壤光谱特征,结果表明,盐分浓度下降,土壤敏感波段的数量和清晰度也减少;其中光谱对 MgCl_2 和 MgSO_4 的预测精度最高,对 KCl 和 Na_2SO_4 的预测精度最低。HOWARI等^[6]在实验室研究了盐分分别为 NaCl 、 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 和 $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的土壤结皮光谱特征,指出其光谱可以应用于特定条件下识别、诊断不同盐结皮主要光谱特征。SRIVASTAVA等^[7]研究发现,在 1 390 ~ 2 400 nm 范围内光谱对土壤盐分变化较为敏感,基于敏感波段建立的模型可以准确预测土壤电导率(EC)和 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 含量。王海江等^[8]在

盐分敏感波段基础上,建立了能够准确预测新疆盐渍化土壤中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量的模型。这些研究为土壤盐渍化监测提供了依据,但实验室光谱测定前土壤经过风干、研磨、过筛、平整等人为操作,盐结皮的自然结构已遭破坏,其光谱特征也发生变化。因此,本文以宁夏银北地区不同盐结皮土壤为研究对象,通过野外原位土壤光谱测定,结合样本 pH 值、EC 和盐分离子含量,分析不同盐结皮光谱特征异同点,确定不同盐分指标与原始光谱反射率相关性最强的转换方式和敏感波段,筛选光谱盐分指数,建立各盐分指标预测模型,以期为不同盐结皮土壤分类及盐渍化信息定量反演提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处宁夏回族自治区银北地区(106°24' ~ 106°69'E, 38°50' ~ 39°04'N),位于宁夏贺兰山东麓洪积扇和平原之间,年降水量为 150 ~ 203 mm,年蒸发量 1 755.1 mm 以上,地形低洼,排水条件很差,是一个水分与盐分汇集的地区,形成了大面积盐渍化土壤。

1.2 光谱数据及指标测定

野外土壤光谱采用美国 Unispec-SC 单通道便携式光谱仪,探测波段为 310 ~ 1 130 nm,分辨率小于 10 nm,绝对精度小于 0.3 nm,于 2017 年 4 月中旬进行测定。测定时光谱仪探头设置在垂直距离土表上方 20 cm 处,视角为 8°。光谱测定时间为 10:00—14:00,天气状况良好,晴朗无云,风力较小,

光谱仪垂直向下。测定过程中,在每次观测前进行标准白板校正。每个样点重复测定 5 次,取平均值作为该样点的光谱反射值。相同类型不同盐渍化程度的盐结皮土壤各采集 10 个不同的点,共 60 个样

品。光谱测定后在原处采集 0 ~ 5 cm 土壤样品,带回室内风干后测定土壤有机质、养分、pH 值、EC 和 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量,测定方法参照文献[9],结果如表 1 ~ 3 所示。

表 1 不同盐结皮土壤有机质和养分状况

Tab.1 Soil organic matter and nutrients of different soil salt crusts

盐结皮类型	有机质质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
白碱结皮	10.12	0.32	20.30	3.59	106.79
马尿碱结皮	9.03	0.55	35.00	4.48	205.59
黑油碱结皮	18.79	0.30	21.70	22.11	306.39
瓦碱结皮	17.73	0.31	25.20	14.24	132.73
光板地	9.03	0.55	35.00	20.59	44.80
无结皮	11.25	0.40	21.70	8.90	306.39

表 2 不同盐结皮层 pH 值及 EC

Tab.2 Soil pH value and EC of different soil salt crusts

盐结皮类型	pH 值					EC				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	最小值/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	最大值/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	平均值/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	标准差/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	变异系数/%
白碱结皮	8.37	8.52	8.46	0.27	3.23	8.53	11.61	10.74	0.59	5.44
马尿碱结皮	9.66	10.10	9.81	0.24	2.46	6.73	12.09	8.62	4.03	46.71
黑油碱结皮	9.08	9.38	9.28	0.82	8.8	5.66	10.12	8.76	1.90	21.63
瓦碱结皮	9.59	9.90	9.75	0.38	3.92	7.05	16.11	13.2	5.14	38.95
光板地	9.26	9.90	9.58	0.76	7.98	1.83	11.03	7.73	3.30	42.68
无结皮	8.15	8.36	8.24	0.80	9.69	2.17	8.05	6.86	5.40	78.68

表 3 不同盐结皮土壤盐分指标

Tab.3 Soil salinity parameters of different soil salt crusts

盐结皮类型	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	盐分类型
	质量比	质量比	质量比	质量比	质量比	质量比	质量比	质量比	
白碱结皮	2.35	451.49	5 700.38	5 652.72	37.96	8 866.13	165.73	7.39	氯化物-硫酸盐型
马尿碱结皮	536.04	872.44	3 252.89	3 186.62	28.49	5 997.60	43.13	33.59	氯化物-硫酸盐型
黑油碱结皮	61.63	351.54	6 573.76	11 870.01	163.01	6 144.63	56.01	850.03	硫酸盐型
瓦碱结皮	1 169.12	1 752.18	827.85	640.24	12.85	22 148.31	61.50	22.74	碳酸盐-重碳酸盐型
光板地	0	585.02	3 941.57	1 684.35	13.48	4 743.36	35.55	3.59	氯化物-硫酸盐型
无结皮	2.36	447.57	488.94	1 786.89	32.12	1 329.79	97.45	81.49	硫酸盐型

如表 2 所示,研究区土壤盐结皮 pH 值和电导率均较高。供试土壤盐结皮各盐离子含量差异非常大,表 3 为相同类型盐结皮盐离子含量的平均值。阴离子中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量普遍较高, HCO_3^- 含量高于 CO_3^{2-} 含量,阳离子中 Na^+ 含量显著高于其他离子。马尿碱结皮 pH 值最高,瓦碱结皮次之,无结皮轻度盐碱土最低,白碱结皮也较低;黑油碱结皮中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量最高, Mg^{2+} 含量也高于其他结皮层;瓦碱结皮 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量较高。根据不同类型盐碱地分类^[10],白碱结皮、马尿碱结皮和光板地属于氯化物-硫酸盐型,黑油碱结皮和无结皮土壤属于硫酸盐型,瓦碱结皮属于碳酸盐-重碳酸盐型。

1.3 土壤盐结皮敏感波段及盐分指数的计算

对去噪后的光谱数据进行 Savitzky - Golay 平滑 (T1)、平滑后一阶微分 (T2)、平滑后倒数对数一阶微分 (T3)、平滑后连续统去除 (T4)、平滑后连续统去除一阶微分 (T5) 5 种转换方式^[8,11-12],转换后与土壤盐分指标进行相关分析,确定最佳反射率转换方式,然后用该方式转换后的反射率来计算光谱盐分指数,计算方法^[13-17]如表 4 所示。

表中 G 、 R 、 B 和 NIR 分别指绿光 (492 ~ 577 nm)、红光 (622 ~ 770 nm)、蓝光 (455 ~ 492 nm) 和近红外波段 (770 ~ 1 050 nm) 反射率经最佳方式转换后的值。 L 是增强 R 和 G 之间差异的校正系数,在分子为负值时 L 取值 2 ~ 4,本文中 L 取值为

表4 盐分指数计算公式

Tab.4 Soil salinity indexes for soil salinity assessments

盐分指数名称	计算公式	文献序号
盐分指数(SI-T)	$SI-T = \frac{R}{NIR} \times 100$	[13]
归一化盐分指数(NDSI)	$NDSI = \frac{R-NIR}{R+NIR}$	[14]
盐分指数1(Salinity index 1, SI1)	$SI_1 = \sqrt{GR}$	[15]
盐分指数2(Salinity index 2, SI2)	$SI_2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	[15]
盐分指数3(Salinity index 3, SI3)	$SI_3 = \sqrt{G^2 + R^2}$	[15]
盐分指数(Salinity index, SI)	$S_1 = \frac{B}{R}$	[16]
盐分指数(Salinity index, S2)	$S_2 = \frac{B-R}{B+R}$	[16]
盐分指数(Salinity index, S3)	$S_3 = \frac{GR}{B}$	[16]
土壤结皮指数(Soil crust index, SCI_{GRNIR})	$SCI_{GRNIR} = \frac{1-L R-G }{GRNIR}$	[17]

2^[17]。GRNIR为红光、绿光和近红外波段的平均值。

1.4 盐分预测模型建立

60个样本分两部分,随机取40个样本用于建模,20个样本用于验证模型检验。将9个光谱指数与不同盐分指数做相关性分析,筛选出相关性最强的指数来建立各盐分指标的预测模型。利用敏感光谱指数,采用多项式、指数函数、幂函数等方法建模预测土壤pH值、EC和盐分离子含量,选择决定系数最大的方程为预测模型。模型的预测能力用验证样本的决定系数 R^2 来检验,决定系数越大,模型预测能力越强。

2 结果与分析

2.1 不同类型盐结皮土壤光谱特征

不同类型盐结皮土壤光谱特征基本相似(图1),450~600nm反射率逐渐增大,在600nm附近有明显的反射峰,而后反射率缓慢降低,但降幅不大。从不同类型盐结皮光谱曲线看,各类型盐结皮光谱反射率差异明显,其中白碱结皮光谱反射率最高,在600nm附近反射率接近1;马尿碱结皮次之。黑油碱结皮光谱反射率最低,从可见光到近红外波段反射率变化不大,在450~1050nm反射率较白碱结皮、马尿碱结皮、瓦碱表皮、光板地和无结皮土壤分别低509.62%~747.18%、240.63%~575.86%、71.46%~138.24%、107.74%~294.19%和11.08%~36.95%(平均分别低604.77%、393.88%、92.21%、182.91%和16.72%)。整体来看,不同结皮层在蓝光波段和近红外波段反射率差异更显著。

2.2 光谱反射率与土壤结皮盐分指标相关性分析

将光谱反射率经过5种方式转换后与各盐分指标进行相关性分析,结果显示,平滑后的反射率与各盐

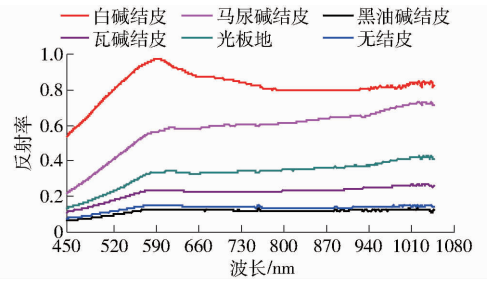


图1 不同盐结皮土壤光谱特征曲线

Fig.1 Characteristic curves of spectral of different soil salt crusts

分指标的相关性最稳定,与盐结皮pH值、EC和 Na^+ 含量普遍呈极显著正相关关系(图2),其中与 Na^+ 含量的相关性最强,在450~1050nm波段内平均相关系数达0.87;其次为EC。平滑后反射率与其他离子呈负相关关系,其中与 Cl^- 、 Mg^{2+} 含量分别达极显著和显著负相关水平。反射率作一阶微分转换后的结果与土壤盐分指标相关性很不稳定,正负及相关系数的大小无规律,但特定波段的相关系数得到放大。平滑后反射率经过连续统去除后与 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 含量的相关性较强,其中与 CO_3^{2-} 含量在560~930nm普遍呈显著正相关关系,在640~870nm达显著相关关系;与 HCO_3^- 含量在640~890nm也达显著正相关,630~860nm呈显著负相关关系。

表5为结皮层光谱反射率经5种转换方式后与各盐分指标间最强相关性所对应的波长及相关系数。可以看出,原始反射率只经过平滑转换后与土壤pH值、EC和 Cl^- 、 Na^+ 含量呈极显著相关,与其他6种离子均不相关。反射率平滑后经一阶微分、倒数对数一阶微分、连续统去除、连续统去除一阶微分转换后相关系数普遍增大,尤其是 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量增幅显著。与各盐分指标相关性最强的变换方式如下:pH值、EC和 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 含量是T5, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 含量是T3, HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 含量是T2。所以,反射率采用T5或T4处理后可以准确估测盐结皮的pH值和EC,诊断氯化物、碳酸盐-重碳酸盐型盐结皮;采用T3后可以准确诊断硫酸盐型盐结皮。不同转换方式下反射率与其他盐分指标最敏感波段分别为:T1在蓝光450nm、绿光536nm和近红外波段1033~1050nm;T2在近红外波段877~1050nm;T3处于红光635nm、近红外825~995nm;T4在蓝光455nm附近、绿光590nm附近和近红外1010~1050nm处;T5在绿光507、584nm,在红光波段范围敏感波段较多但不集中,近红外波段在913、935、1050nm。不同转换方式下这些敏感波段可以准确诊断不同类型盐结皮。

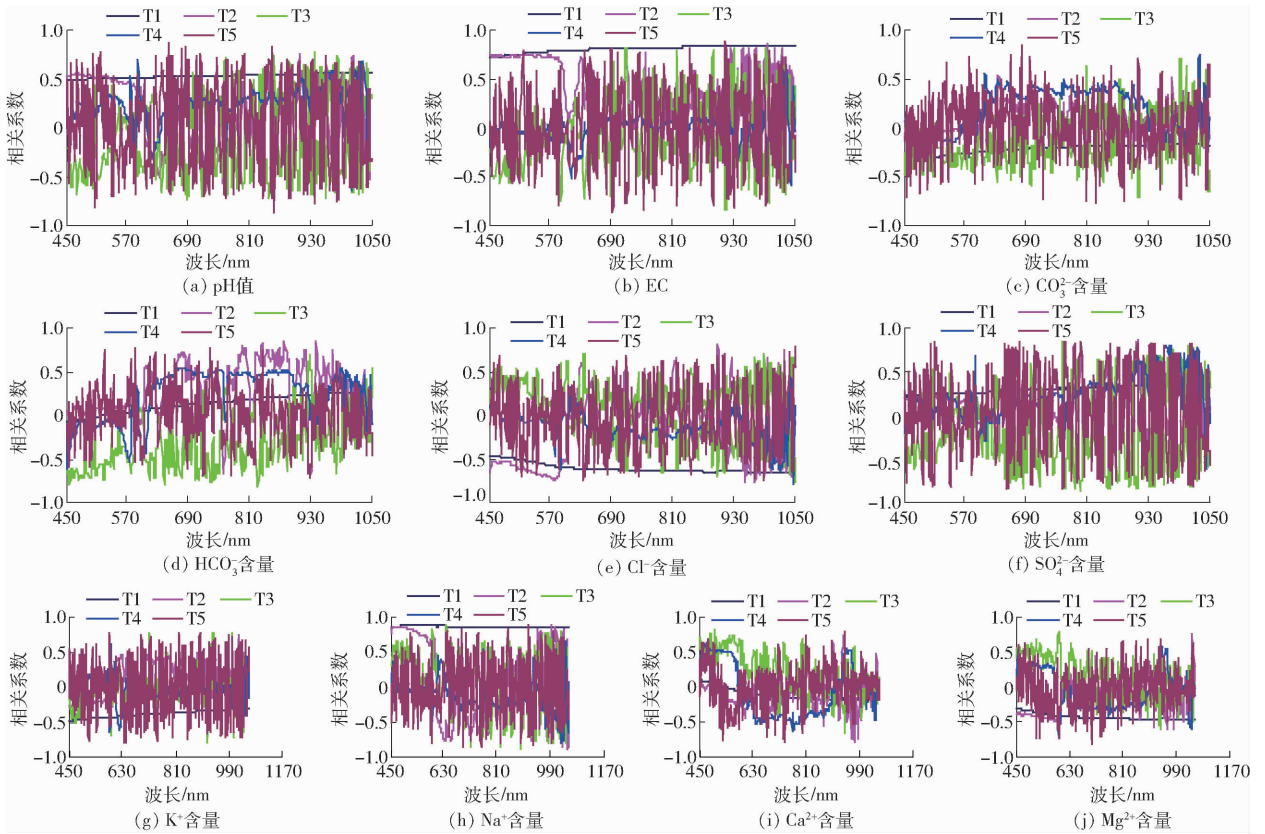


图 2 不同盐结皮单波段反射率与土壤盐分指标的相关系数变化

Fig.2 Changes of correlation coefficients of single wavelengths reflectance to soil salinity parameters at different soil salt crusts

表 5 不同光谱数据转换方式下最强相关性与敏感波段

Tab.5 Correlation coefficients and sensitive wavelengths between salinity parameters and transformed methods

指标	转换方式	pH 值	EC	CO ₃ ²⁻ 含量	HCO ₃ ⁻ 含量	Cl ⁻ 含量	SO ₄ ²⁻ 含量	Ca ²⁺ 含量	Mg ²⁺ 含量	K ⁺ 含量	Na ⁺ 含量
相关系数	T1	0.563 7 **	0.801 3 **	0.236 3	0.178 1	-0.614 4 **	0.278 5	-0.204	-0.421 3	-0.358 8	0.856 6 **
	T2	0.750 3 **	-0.890 5 **	0.567 4 **	0.836 2 **	0.818 9 **	0.859 9 **	-0.783 9 **	0.773 3 **	0.747 8 **	0.895 6 **
	T3	0.782 1 **	-0.867 **	0.716 8 **	-0.809 **	-0.765 7 **	-0.868 4 **	0.815 0 **	0.793 8 **	-0.787 0 **	0.893 2 **
	T4	0.703 5 **	0.693 4 **	0.744 9 **	-0.615 7 **	-0.777 9 **	0.824 2 **	0.643 9 **	-0.739 3 **	-0.640 8 **	-0.786 2 **
	T5	0.862 7 **	0.893 3 **	0.835 0 **	0.772 7 **	0.777 9 **	0.846 9 **	0.792 2 **	-0.825 7 **	-0.785 6 **	0.893 3 **
敏感波段/nm	T1	1 039	1 033	450	1 047	1 050	1 048	1 037	1 039	450	536
	T2	908	995	1 044	877	898	908	967	1 042	1 015	1 047
	T3	938	914	993	826	1 050	796	499	593	914	635
	T4	589	1 033	1 030	451	1 048	1 013	461	591	585	1 026
	T5	650	913	680	584	1 050	507	935	701	636	913

注：**表示在 1% 水平上显著，下同。

确定与不同盐分指标相关性最强的反射率最佳转换方式后，分别在绿光(492 ~ 577 nm)、红光(622 ~ 770 nm)、蓝光(455 ~ 492 nm)和近红外波段(770 ~

1 050 nm)4 个波段内选取该转换方式下相关性最强的波段(表 6)。不同盐分指标在各波段范围内敏感波段不尽相同。从 10 个盐分指标整体来看，蓝光

表 6 不同盐分指标各区间敏感波段与最佳转换方式

Tab.6 Sensitive wavelengths and the best transformed method of different salinity parameters

指标	pH 值	EC	CO ₃ ²⁻ 含量	HCO ₃ ⁻ 含量	Cl ⁻ 含量	SO ₄ ²⁻ 含量	Ca ²⁺ 含量	Mg ²⁺ 含量	K ⁺ 含量	Na ⁺ 含量
蓝光/nm	467	489	481	470	450	467	486	479	487	454
绿光/nm	503	514	532	577	575	501	499	528	498	501
红光/nm	650	691	680	675	629	681	666	701	634	720
近红外/nm	858	913	827	877	898	796	791	935	914	1 047
转换方式	T5	T5	T5	T2	T2	T3	T3	T5	T3	T2

波段 450、470、485 nm 附近,绿光波段 501、530、575 nm附近,红光波段 680 nm 附近是盐分的敏感区域,近红外波段范围较广,各盐分指标敏感波段较多,但无明显集中区域。从这些波段就可以准确诊断出不同类型盐结皮土壤。

2.3 盐分指数与土壤结皮盐分指标相关性分析

由各盐分指数与盐分指标间的相关性可见(表7),SI-T与各盐分指标的相关性最弱,普遍未达显著水平;NDSI与 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量的相关性达极显著水平;SI1、SI2和SI3与各盐分指标相关性

普遍达显著或极显著水平(除 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量外);SI与pH值、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 含量相关性达极显著,与其他盐分指标无相关性;S2与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量的相关系数最大,说明S2可以准确诊断、预测硫酸盐型盐结皮,尤其是黑油碱结皮盐渍化程度;S3与各盐分指标间的相关性均达极显著水平,其中与EC和 HCO_3^- 、 Na^+ 含量的相关性居9种指数之首,说明其可以准确诊断、预测重碳酸盐型结皮盐渍化程度;SCI与 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 含量的相关性最强,它对碳酸盐结皮诊断及预测相对较准确。

表7 不同盐分指数与各盐分指标的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients between salinity indexes and salinity parameters

盐分指数	pH值	EC	CO_3^{2-} 含量	HCO_3^- 含量	Cl^- 含量	SO_4^{2-} 含量	Ca^{2+} 含量	Mg^{2+} 含量	K^+ 含量	Na^+ 含量
SI-T	0.2418	-0.0493	-0.4208*	0.2440	-0.3580	0.0776	0.4231*	0.2811	0.4410*	-0.1216
NDSI	0.1527	-0.4418*	-0.4235*	0.3181	-0.5436**	0.2332	-0.3087	0.8278**	0.3639*	0.8111**
SI1	-0.5160**	0.4035*	0.1214	0.7321**	-0.7827**	0.4783**	0.1983	0.4251	0.5826**	0.8718**
SI2	-0.6137**	0.6373**	0.0022	0.4448**	-0.7902**	0.7050**	-0.8286**	-0.5447**	0.7310**	-0.6330**
SI3	0.6032**	0.6446**	0.0028	0.4391**	-0.7970**	0.7088**	-0.8281**	-0.5553**	0.7314**	-0.6599**
SI	0.8453**	-0.2388	-0.5120**	0.0757	0.1405	0.6274**	-0.1211	0.6297**	0.6232**	0.0913
S2	-0.6057**	0.8996**	-0.5121**	0.1845	-0.0327	-0.9196**	0.8254**	0.9014**	0.4013	0.7896**
S3	-0.6792**	0.9057**	0.5138**	0.8122**	0.7369**	-0.8629**	0.7495**	0.5609**	-0.7100**	0.9349**
SCI	-0.5898**	0.8203**	-0.5877**	-0.5675**	0.1068	0.7632**	-0.8362**	-0.4948**	-0.2931	-0.6393**

注: *表示在5%水平上显著,下同。

2.4 盐分指数对土壤盐分指标的预测

根据不同盐分指标与盐分指数的相关性,筛选出与土壤盐分指标相关性最强的盐分指数建立预测模型(表8)。从表8可以看出,除了 CO_3^{2-} 含量外,其他盐分指标与光谱指数构建的预测模型相关较高。利用剩余20个样本对土壤pH值、EC及盐分离子含量预测模型进行验证显示(图3),除了 CO_3^{2-} 含量外,利用预测模型预测的盐分指标与实测值相关性较高,均通过了显著性检验。表明利用光谱盐分指数可以准确预测土壤结皮层除 CO_3^{2-} 含量外的pH值、EC和其他盐分离子含量。

表8 敏感盐分指数对盐渍化土壤盐分指标的预测方程

Tab.8 Predicted equations of salinity index to salinity parameters of soil crust

盐分指标	预测方程	R^2
pH值	$y = 1 \times 10^6 S_1^2 - 1913.1S_1 + 8.8919$	0.5628**
EC	$y = 1 \times 10^6 S_2^2 + 7 \times 10^6 S_3 + 10565$	0.8376**
CO_3^{2-} 含量	$y = 2 \times 10^{-7} SCI^2 + 0.0015SCI + 2.1371$	0.3201
HCO_3^- 含量	$y = -826054S_3^2 + 2635.1S_3 + 0.2848$	0.7361**
Cl^- 含量	$y = 10.078e^{-687.97S_3}$	0.6295**
SO_4^{2-} 含量	$y = 0.1724e^{-3438.8S_2}$	0.8077**
Ca^{2+} 含量	$y = -6 \times 10^{-8} SCI^2 - 0.0016SCI - 1.3523$	0.6945**
Mg^{2+} 含量	$y = 0.0003S_2^2 - 0.06S_2 + 1.0463$	0.6368**
K^+ 含量	$y = -7 \times 10^7 S_3^2 - 37475S_3 + 9.919$	0.5018*
Na^+ 含量	$y = 196206S_3^2 + 655.51S_3 + 0.131$	0.9032**

3 讨论

研究发现,白碱结皮在450~1050nm波段反射率最高,马尿碱结皮次之,黑油碱结皮最低,这是由于土壤中所含盐分多少会影响土壤光谱的总亮度,土壤含盐量越高光谱反射能力也就越强^[18-20]。研究区白碱结皮地表有不同厚度的白色盐霜,含 Cl^- 及 SO_4^{2-} 较多^[21],NaCl为白色立方晶体或细小的结晶粉末或白色颗粒状晶体,Na₂SO₄属于单斜晶系,集合体呈致密块状或皮壳状,故光谱反射率较高。颜安等^[22]在罗布泊“大耳朵”干盐湖遥感影像研究中指出部分区域表面覆盖有白色盐霜,盐分主要以氯化物-硫酸盐为主,部分垄上有裂隙发育,影像上位于湖心的广大浅色区域,色调发白,反射率较高,与本研究结果相似。研究区马尿碱地表起初呈白色,后出现大量晶体,呈不同程度的黄色至黄褐色,含 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 较多,Na₂CO₃和NaHCO₃都是白色粉末,在与水结合后释出CO₂,所以该结皮层蓬松且有蜂窝状外观,表面相对较粗糙,故表层反射率较白碱结皮低。黑油碱结皮吸湿性强,含 Cl^- 及 Mg^{2+} 多,由于该结皮呈褐色或黑色,故光谱反射率很低。瓦碱结皮单个龟裂块表面平坦光滑,含碳酸钙6%~23%,重碳酸盐含量为0.02%~

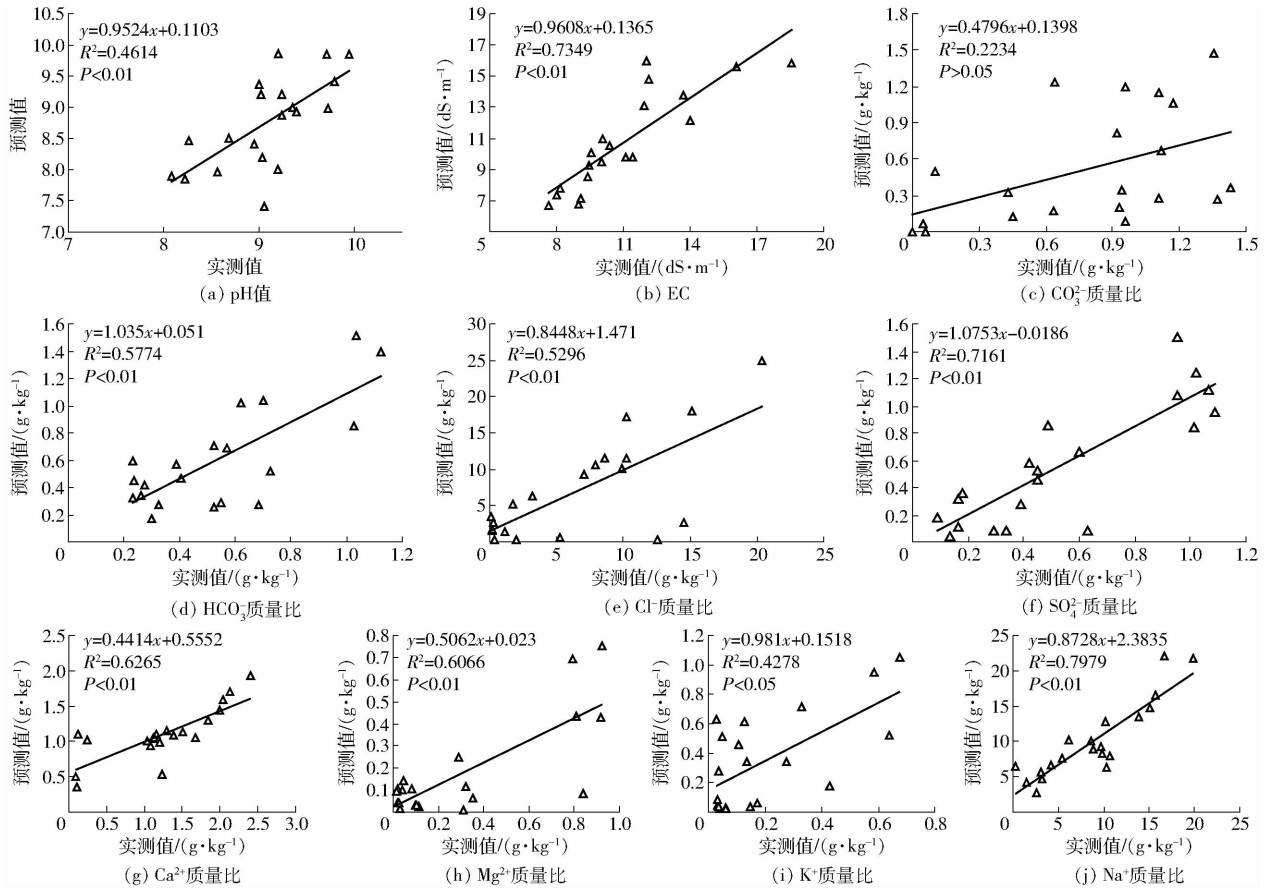


图 3 盐结皮盐分指标拟合模型的验证

Fig. 3 Model checking of soil salinity parameters of soil crusts

0.09%^[21],但由于表面具有很多0~5 mm甚至更大裂隙,故其光谱反射率较白碱结皮、马尿碱结皮等低。颜安等^[22]发现龟裂状干盐壳呈龟裂状六边形,地表常见龟裂缝,表面粗糙,异常坚硬,影像上位于浅色纹理处,色调灰白,与本研究结论一致。有研究指出约60%有结皮的土壤在近红外波段吸收率高于无结皮土壤,但差异并不显著^[23],这应该与结皮层表面特征和盐分含量密切相关。普通地物光谱吸收峰宽度为30 nm左右,成像光谱测量技术获得的图像光谱分辨率在10 nm或更小,因此能够区分具有诊断性光谱特征的地表物质,从而可以区分不同盐壳^[24]。本研究中不同类型的盐结皮土壤光谱反射率差异显著性也不尽相同,不同结皮在蓝光波段和近红外波段反射率差异更显著。通过野外光谱反射率可以将研究区主要盐结皮类型进行分类。

通过光谱数据转换能够明显增强特征波段与离子含量的相关性。本研究结果表明,与pH值、EC和 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 含量相关性最强的反射率转换方式是T5,与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 含量相关性最强的转换方式是T3,与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 含量相关性最强的转换方式为T2,因为光谱微小变换在消除漂移基线或是平滑背景的干扰下,可以提供较原光谱精度更高的

分辨率和更清晰的光谱轮廓,能够增强高光谱数据与土壤含盐量间的相关程度^[8,25]。整体上T5与各盐分指标的相关性最强,这是由于连续统去除和微分处理都可以将一些隐晦的信息释放,反射率经过这两种变换将某些波段与盐分指标的相关性进行双倍扩大^[11]。从所有盐分指标整体来看,盐分敏感区分别为蓝光波段450、470、485 nm附近,绿光波段501、575 nm附近,红光波段680 nm附近,近红外区多个波段范围。大量研究表明盐渍化土壤在462、680、1180、1780 nm和451~593 nm、640~700 nm、710~780 nm波段反射率与土壤盐分含量都呈显著相关性^[25-28],与本研究结论基本一致。土壤 Na^+ 含量与各光谱反射率或光谱指数的相关性最强,这是由于该地区含有大量的 Na^+ , Na^+ 含量直接决定盐分含量^[29]。

相比其他盐分指数,常见的对于盐度信息敏感的指数有盐分指数(SI-T)、归一化盐分指数(NDSI)、盐分指数(SI1、SI2、SI3)、盐分指数(S1、S2、S3)等^[13-17]。ALLBED等^[13]指出NDSI和SI-T可以准确预测植被稀疏地区和裸地土壤盐碱化信息,但本研究中土壤SI-T指数与各盐分指标间相关性普遍未达显著水平。王爽等^[25]对新疆渭干河-

库车河三角洲绿洲进行盐分遥感监测时发现利用抛物线模型与最佳土壤盐分指数 SI3 构建的地表光谱模型效果最为理想。本研究发现 S1 与土壤 pH 值相关系数最大; SI3 与各盐分指标间相关性均达极显著水平,尤其是对 Cl^- 、 K^+ 含量相关系数居 7 个盐分指数之首,故 SI3 可以准确诊断、预测氯化物-硫酸盐型盐结皮及其盐渍化程度; S2 与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量的相关系数最大,故 S2 能够准确诊断、预测硫酸盐型盐结皮及其盐渍化程度,尤其是黑油碱结皮; S3 与各盐分指标间的相关性均达极显著水平,其中与 EC 和 HCO_3^- 、 Na^+ 含量的相关性居 9 种指数之首,由于 Na^+ 在研究区含量居所有阳离子之首,所以 S3 对不同盐结皮的诊断与预测精度整体优于其他盐分指数; SCI 与 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 含量的相关性最强,故 SCI 可以较准确诊断、预测碳酸盐-重碳酸盐型结皮即瓦碱结皮及其盐渍化程度。大量研究表明土壤野外实测光谱可以准确预测盐碱土 pH 值,可用于土壤的盐渍化程度评价与预测^[30-31]。屈永华等^[32]利用偏最小二乘方法比较精确地预测了全盐、 SO_4^{2-} 、 K^+ + Na^+ 含量;李娜等^[33]研究发现土壤含盐量、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量和 pH 值与光谱反射率之间的显著相关,并在确定盐离子敏感波段的基础上建立多元回归模型,该研究结果与本研究较相似。张俊华等^[34]研究表明,光谱反射率对 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量的预测精度较高,其他离子含量预测稳定性和精度较差。王海江等^[8]室内实验结果表明 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子含量能够通过光谱模型进行很好的预测。整体来看,研究区除 CO_3^{2-} 含量外,利用土壤盐分指数可以准确预测结皮层 pH 值、EC 和其他盐分组成,其中对 Na^+ 含量的预测决定系数最大,EC 次之。野外光谱测定虽然会受到天

气和地表植被的影响,但土壤盐结皮未经人为扰动,盐分表聚性增强了土壤反射率,增加了反射率对具有盐结皮土壤盐渍化信息预测的准确性。但盐壳光谱反射率表与其表面粗糙度、龟裂结构及地表含水量密切相关^[24],所以,采用野外光谱预测土壤盐渍化信息要尽量减弱或消除这些因素对结果的影响。

4 结论

(1) 研究区不同盐结皮土壤光谱反射率差异较大,其中白碱结皮光谱反射率在研究波段最高,马尿碱结皮次之,瓦碱结皮居中,黑油碱结皮最低。通过野外光谱反射率可以将研究区主要盐结皮类型进行分类。

(2) 平滑后的反射率与各盐分指标的相关性最稳定。与结皮层 pH 值、EC 和 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 含量相关性最强的转换方式是反射率连续统去除一阶微分,与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 含量相关性最强的转换方式是倒数对数的一阶微分,与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 含量相关性最强的转换方式为一阶微分。从 10 个盐分指标来看,盐分的敏感区域在蓝光波段 450、470、485 nm 附近,绿光波段 501、575 nm 附近和红光波段 680 nm 附近,近红外波段范围较广,各盐分指标敏感波段较多。

(3) 与各盐分指标相关性最强的盐分指数分别为: pH 值为 S1, SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量为 S2, EC 和 HCO_3^- 、 Na^+ 含量为 S3, CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 含量为 SCI, Cl^- 、 K^+ 含量为 SI3。 Na^+ 含量与各盐分指数的相关系数普遍明显大于其他离子。除 CO_3^{2-} 含量外,利用敏感盐分指数可以准确估测土壤盐结皮其他盐分指标,其中对 Na^+ 含量的拟合度最大,EC 次之,阴离子中对 SO_4^{2-} 含量的预测拟合度最高,阳离子中除 Na^+ 含量外,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的拟合度也较高。

参 考 文 献

- 1 王晓静,徐新文,雷加强,等. 咸水滴灌下林带的盐结皮时空分布规律[J]. 干旱区研究, 2006, 23(3): 399-404. WANG Xiaojing, XU Xinwen, LEI Jiaqiang, et al. Spatiotemporal distribution of salt crust in a shelter-forest belt under drip-irrigation with salt water[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(3): 399-404. (in Chinese)
- 2 张建国,徐新文,雷加强,等. 极端干旱区咸水滴灌林地盐结皮对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 34-39. ZHANG Jianguo, XU Xinwen, LEI Jiaqiang, et al. Effects of salt crust on soil evaporation condition with saline-water drip-irrigation in extreme arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 34-39. (in Chinese)
- 3 NIELD J M, NEUMAN M K, O'BRIEN P, et al. Evaporative sodium salt crust development and its wind tunnel derived transport dynamics under variable climatic conditions[J]. Aeolian Research, 2016, 23: 51-62.
- 4 MULLER S J, VAN NIEKERK A. Identification of WorldView-2 spectral and spatial factors in detecting salt accumulation in cultivated fields[J]. Geoderma, 2016, 273: 1-11.
- 5 FARIFTEH J, VAN DER MEER F, VAN DER MEIJDE M, et al. Spectral characteristics of salt-affected soils: a laboratory experiment[J]. Geoderma, 2008, 145: 196-206.
- 6 HOWARI F M, GOODELL P C, MIYAMOTO S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1453-1461.
- 7 SRIVASTAVA R, SETHI M, YADAV R K, et al. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for rapid characterization of salt-

- affected soil in the indo-gangetic plains of haryana, India[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017;45(2): 307 – 315.
- 8 王海江,蒋天池, YUNGER J A, 等. 基于支持向量机的土壤主要盐分离子高光谱反演模型[J/OL]. *农业机械学报*. 2018, 49(15): 263 – 270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180531&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.031.
- WANG Haijiang, JIANG Tianchi, YUNGER J A, et al. Hyperspectral inverse model for soil salt ions based on support vector machine in Xinjiang[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(15): 263 – 270. (in Chinese)
- 9 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 10 胥勤勉, 袁桂邦, 孙云霞, 等. 不同时期古黄河三角洲土壤剖面盐渍化特征[J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 941 – 946.
- XU Qinmian, YUAN Guibang, SUN Yunxia, et al. Characteristics of soil salinization of Huanghe river delta in different periods [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 941 – 946. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 彭杰, 迟春明, 向红英, 等. 基于连续统去除法的土壤盐分含量反演研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 459 – 469.
- PENG Jie, CHI Chunming, XIANG Hongying, et al. Inversion of soil salt content based on continuum-removal method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 459 – 469. (in Chinese)
- 13 ALLBED A, KUMAR L, ALDAKHEEL Y Y, et al. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries; applications in a date palm dominated region[J]. *Geoderma*, 2014, 230 – 231: 1 – 8.
- 14 KHAN N M, RASTOSKUEV V V, SATO Y, et al. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 77(1): 96 – 109.
- 15 DOUAOUI A E K, NICOLAS H, WALTER C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1): 217 – 230.
- 16 ALLBED A, KUMAR L, ALDAKHEEL Y Y. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries; application in a date palm dominated region[J]. *Geoderma*, 2014, 230: 1 – 8.
- 17 FANG Shibo, YU Weiguo, Qi Yue. Spectra and vegetation index variations in moss soil crust in different seasons, and in wet and dry conditions[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 261 – 266.
- 18 王飞, 丁建丽, 魏阳, 等. 基于 Landsat 系列数据的盐分指数和植被指数对土壤盐度变异性的响应分析: 以新疆天山南北典型绿洲为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5007 – 5022.
- WANG Fei, DING Jianli, WEI Yang, et al. Sensitivity analysis of soil salinity and vegetation indices to detect soil salinity variation by using Landsat series images: applications in different oases in Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5007 – 5022. (in Chinese)
- 19 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: 406 – 417.
- 20 ZHANG T T, QI J G, GAO Y, et al. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data[J]. *Ecol. Indic.*, 2015, 52: 480 – 489.
- 21 蒋来临, 张惠文, 马军. 盐碱地的改良和利用[J]. *新疆农业科技*, 1996(5): 25 – 26.
- 22 颜安, 蒋平安, 武红旗, 等. 基于决策树方法的罗布泊“大耳朵”干盐湖区盐壳分类研究[J]. *遥感信息*, 2009(2): 57 – 63, 75.
- YAN An, JIANG Ping'an, WU Hongqi, et al. A study on salt crust classification based on decision tree technology in Lop Nur “Great Ear” dry salt lake area[J]. *Remote Sensing Information*, 2009(2): 57 – 63, 75. (in Chinese)
- 23 DE JONG S M, ADDINK E A, WAN BEEK L P H, et al. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts[J]. *Catena*, 2011, 86: 24 – 35.
- 24 马黎春. 罗布泊干盐湖盐壳光谱特征初步研究[J]. *矿床地质*, 2010, 29(增刊): 387 – 388.
- 25 王爽, 丁建丽, 王璐, 等. 基于地表光谱建模的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1): 190 – 198.
- WANG Shuang, DING Jianli, WANG Lu, et al. Remote sensing monitoring of soil salinization based on surface spectral modeling [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(1): 190 – 198. (in Chinese)
- 26 ROSSEL R A V, BEHRENS T, BEN-DOR E, et al. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 155: 198 – 230.
- 27 METTEMICHT G I, ZINCK J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constrains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85: 1 – 20.
- 28 SONG C Y, REN H X, HUANG C. Estimating soil salinity in the Yellow River Delta, Eastern China an integrated approach using spectral and terrain indices with the generalized additive model[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 626 – 635.

- migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying[J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2018, 40(1): 619–628.
- 22 ZHU D, LIANG J, LIU H, et al. Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low temperature storage[J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2017, 98(10):3651–3658.
- 23 PEREIRA F M V, CARVALHO A D S, CABEÇA L F, et al. Classification of intact fresh plums according to sweetness using time-domain nuclear magnetic resonance and chemometrics[J]. *Microchemical Journal*, 2013, 108(3): 14–17.
- 24 中华人民共和国卫生部. 食品中水分的测定:GB 5009.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- 25 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等.干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J].*农业工程学报*,2015,31(16):296–304.
JU Haoyu, XIAO Hongwei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16): 296–304. (in Chinese)
- 26 尹慧敏,聂宇燕,沈瑾,等.基于 Weibull 分布函数的马铃薯丁薄层热风干燥特性[J].*农业工程学报*,2016,32(17):252–258.
YIN Huimin, NIE Yuyan, SHEN Jin, et al. Drying characteristics of diced potato with thin-layer by hot-wind based on Weibull distribution function[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(17): 252–258. (in Chinese)
- 27 徐建国,张森旺,徐刚,等.莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J].*农业工程学报*,2016,32(13):303–309.
XU Jianguo, ZHANG Senwang, XU Gang, et al. Thin-layer hot air drying characteristics and moisture diffusivity of lotus seeds [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(13): 303–309. (in Chinese)
- 28 张绪坤,祝树森,黄俭花,等.用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J].*农业工程学报*,2012,28(22): 282–287.
ZHANG Xukun, ZHU Shusen, HUANG Jianhua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 282–287. (in Chinese)
- 29 邵小龙,汪楠,时小转,等.水稻生长过程中籽粒水分状态和横向弛豫特性分析[J].*中国农业科学*, 2017,50(2):240–249.
SHAO Xiaolong, WANG Nan, SHI Xiaozhuan, et al. Analysis of moisture state and transverse relaxation characteristics of grains during the growth process of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2):240–249. (in Chinese)
- 30 姚康德,刘静.聚合物中的水[J].*高分子材料科学与工程*,1999(1):6–10.
YAO Kangde, LIU Jing. Water in polymers[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1999 (1):6–10. (in Chinese)
- 31 LV W, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Smart NMR method of measurement of moisture content of vegetables during microwave vacuum drying[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(12):2251–2260.
- 32 吴惠玲,王志强,韩春,等.影响美拉德反应的几种因素[J].*现代食品科技*,2010,26(5):441–444.
WU Huiling, WANG Zhiqiang, HAN Chun, et al. Factors affecting the maillard reaction [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2010,26(5):441–444. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 333 页)

- 29 ZEWDU S, SURYABHAGAVAN K V, BALAKRISHNAN M. Geo-spatial approach for soil salinity mapping in Sego Irrigation Farm, South Ethiopia[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2015, 16(1):16–24.
- 30 SUDDUTH K A, KITCHEN N R, SADLER E J, et al. VNIR spectroscopy estimates of within-field variability in soil properties [J]. *Progress in Soil Science*, 2010, 1(3): 153–163.
- 31 张芳,熊黑钢,丁建丽,等.碱化土壤的野外及实验室波谱响应特征及其转换[J].*农业工程学报*,2012,28(5):101–107.  
ZHANG Fang, XIONG Heigang, DING Jianli, et al. Characteristics of laboratory-field measured spectra responding to alkalinized soil and conversion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5): 101–107. (in Chinese)
- 32 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 hyper spectral data in the region of Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1362–1366. (in Chinese)
- 33 李娜,吴玲,王绍明,等.玛纳斯河流域土壤盐渍化现状及其与光谱关系研究[J].*江西农业大学学报*,2011,33(6): 1242–1247.  
LI Na, WU Ling, WANG Shaoming, et al. Analysis on relationships between soil salinization and spectra in Manas River Valley [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(6): 1242–1247. (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 Junqing, 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)