

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020210

引用格式: 吴霞,王长军,樊丽琴,等. 基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析[J]. 国土资源遥感,2021,33(2):124 – 133. ( Wu X, Wang Z J, Fan L Q, et al. An applicability analysis of salinization evaluation index based on multispectral remote sensing to soil salinity prediction in Yinbei irrigation area of Ningxia[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 124 – 133. )

# 基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析

吴 霞, 王长军, 樊丽琴, 李 磊  
(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002)

**摘要:** 土壤盐渍化是影响干旱区土壤健康的重要因素之一,因此快速获取土壤盐度信息、监测土壤盐度变化对干旱区土地资源合理利用和土壤恢复至关重要。本研究选取宁夏平原土壤盐渍化较重的银北灌区为研究区域,以野外采集的 52 个土壤样本和同时期 Landsat8 OLI 遥感影像为数据基础,采用相关分析和曲线回归分析法对基于多光谱遥感数据构建的土壤盐渍化评价指数与实测土壤电导率 (electrical conductivity, EC) 的相关关系和拟合度进行了定量化分析。结果表明: ①采样时期研究区土壤盐度较轻,非盐渍化和轻度盐渍化土壤样本合计占比 82. 68%; ②盐度指数与土壤 EC 的相关性整体高于植被指数,全样本中盐分指数  $S_3$  (salinity index 3,  $S_3$ )、盐分指数  $S_5$  (salinity index 5,  $S_5$ )、盐分指数  $S_6$  (salinity index 6,  $S_6$ ) 和盐分指数 SI (salinity index, SI) 与土壤 EC 的相关性均达到 0. 50 以上; ③全样本中与土壤 EC 拟合度较高的为盐分指数  $S_2$  (salinity index 2,  $S_2$ )、 $S_3$ 、 $S_5$  和 SI,其中  $S_5$  的表现最好 ( $R^2 = 0. 406$ ),不同盐度水平下指数与土壤 EC 的拟合度随土壤盐度升高而显著增加,中重度盐渍化中指数与土壤 EC 的拟合度最高的为指数  $S_1$  (salinity index 1,  $S_1$ ) ( $R^2 = 0. 730$ ) 和  $S_2$  ( $R^2 = 0. 724$ ); ④拟合模型中,基于 Cubic 模型、Quadratic 模型和 S 模型计算的评价指数与土壤 EC 的拟合度较高。本研究分析了多种土壤盐渍化评价指数在银北灌区土壤盐度监测中的适用性,得出的初步结论可为宁夏银北灌区土壤盐度遥感监测提供参考依据。

**关键词:** 土壤盐渍化; 盐分指数; 植被指数; 曲线拟合; Landsat  
**中图法分类号:** TP 79; S 153   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1001 – 070X (2021) 02 – 0124 – 10

## 0 引 言

土壤盐渍化是自然或人类不合理灌溉造成盐分在土壤中逐渐积累而形成的一种土壤退化现象,是干旱地区最主要的土地退化形式之一,也是制约农业发展和影响生态环境的一个重要因素<sup>[1-2]</sup>。宁夏平原虽处于内陆干旱区,年降雨量仅 200 mm 左右,但因地处黄河中上游,灌溉水源充足,农林牧渔业发达,素有“塞上江南”的美誉。与此同时,土壤盐渍化及次生盐渍化问题一直是制约宁夏平原农业可持续发展的瓶颈,尤其是宁夏北灌区,地势低洼,灌排不畅,土壤盐渍化问题十分突出<sup>[3-5]</sup>。因此,快速并精确掌握土壤盐渍化信息对区域农业用地规划、水土水资源合理配置以及土壤盐渍化综合防治等至关

重要。传统的以野外实地调查为手段获取土壤盐渍化信息的方法不仅耗时耗力,且所获取的盐渍化信息的准确性受到样点的代表性和采样数量的影响较大,难以实现大范围高精度动态监测。而遥感数据具有受地面限制少、覆盖范围广、获取速度快、历史资料丰富、成本低等优点,被广泛应用到土壤盐渍化的动态监测和评价中<sup>[6-7]</sup>。

随着传感器、信息传输、图像处理等遥感技术以及计算机技术的不断发展和提高,以有限的野外实测数据和多光谱、高光谱等遥感数据为基础,运用数学方法进行土壤盐渍化信息提取、定量化评估、模拟预测等技术日趋成熟<sup>[8-11]</sup>。研究发现裸露的土壤表面积集聚的盐结皮在可见光和近红外波段光谱反射率较强,且反射率随着土壤盐含量的增加而增强,可直接用于获取土壤盐度信息,而在盐生植被覆盖

区域红光和绿光波段则被用于间接推算土壤盐渍化程度<sup>[12-13]</sup>。随着多波段传感器的发展,诸多国内外学者们基于土壤盐分与光谱特征之间的关系及波段组合构建了大量土壤盐分指数,尝试用不同方法对区域土壤含盐量进行定量反演和预测。Allbed等<sup>[14]</sup>基于 IKONOS 卫星影像分析了 13 个土壤植被指数和盐分指数对沙特阿拉伯东部地区哈萨绿洲土壤盐度的预测能力,结果表明归一化盐分指数(normalized differential salinity index, NDSI)和盐度指数(salinity index T, SI-T)是评价植被密集均匀耕地土壤盐分的最佳指标;Elia 等<sup>[15]</sup>在对美国加利福尼亚州圣华金河谷地区土壤盐分的研究中发现,基于 Landsat7 ETM+ 影像提取的冠层盐分响应指数(canopy response salinity index, CRSI)对研究区土壤盐度较敏感,预测精度较理想( $R^2=0.79$ );陈红艳等<sup>[16]</sup>在对黄河三角洲盐渍土的研究中引入短波红外波段对传统植被指数进行扩展,提出扩展的归一化植被指数(extented normalized difference vegetation index, ENDVI),获得了较好的土壤盐分空间反演结果;王飞等<sup>[17]</sup>利用曲线模型拟合了 14 个土壤盐分指数和植被指数对新疆天山南北典型绿洲土壤盐度的敏感性,结果显示不同研究区、不同深度土壤盐度的敏感指数差异性较大。土壤盐渍化具有明显的区域特征,受气候、地形地貌、植被覆盖等影响,不同地区盐渍化土壤反射光谱特征差异性较大,虽然这些土壤盐渍化评价指数取得了较为理想的结果,但这些研究多是针对特定地区某一时期的遥感影像开展的,所建立的盐渍化评价指数在其他地区的适用性有待进一步验证。

宁夏平原地处我国西北内陆地区,干旱少雨,蒸发强烈,土壤盐渍化是制约农业发展的重要因素。目前针对宁夏平原的土壤盐渍化遥感监测研究中仅于文婧<sup>[18]</sup>利用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)评价了平罗县土壤盐渍化状况,其他指数较少应用到宁夏平原,且多个评价指标在宁夏平原的适用性对比研究尚未见相关报道。本研究以宁夏银北灌区实测土壤 EC 和 Landsat8 OLI 遥感影像为数据基础,研究不同土壤盐渍化评价指数与土壤 EC 的拟合关系,从而选取研究区最佳土壤盐度评价指数,为银北地区土壤盐渍化动态监测、有效防治、农业规划等提供技术支持。

# 1 研究区概况与数据源

## 1.1 研究区概况

宁夏银北灌区位于黄河中游上段、宁夏平原北

部(图 1),包括贺兰县、平罗县、惠农县和大武口区,属于典型的大陆性干旱气候,全年降雨量稀少,日照充足,蒸发强烈,年均蒸发量是降水量的 10 倍以上,年均地下水埋深 1.6 m,灌期(8 月)地下水埋深 1.0~1.5 m,土壤类型以盐碱土、灰钙土、白疆土和灌淤土为主<sup>[19]</sup>。受气候、地形、土壤、地下水等自然因素以及人为不合理灌溉的影响,银北灌区土壤盐渍化严重,已经成为宁夏土壤盐渍化最为严重的地区,盐碱地已占总耕地面积的 51% 以上,严重制约了当地农业生产发展<sup>[20]</sup>。随着黄河引水量的减少,银北地区土壤盐渍化有进一步加重和扩大的趋势,必将给农业生态环境造成更大危害,因此盐渍化问题成为银北地区农业生产中亟待解决的问题。

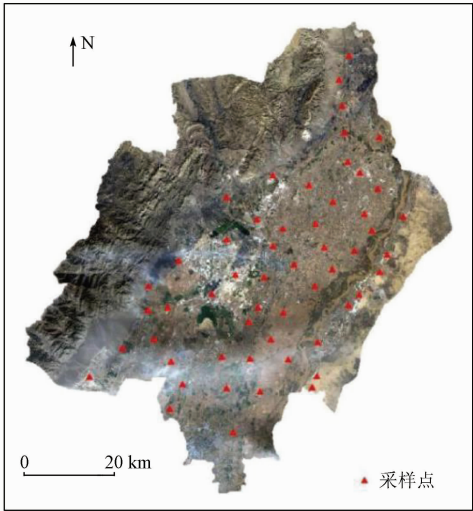


图 1 研究区影像及采样点示意图  
Fig.1 Study area image and sampling points

## 1.2 土壤样品采集及室内测定

根据研究区土地利用类型、盐渍化程度、地形地貌等均匀布设样点,共布设采样点 56 个,每个采样点的采样范围为 30 m × 30 m 的区域,与 Landsat8 OLI 影像的像元大小一致,于 2014 年 10 月 14 日—10 月 21 日进行野外土壤样品采集。每个采样点按梅花形采样法采集样区中心点和对角线上距中心点 15 m 的 4 个点的土壤混合为一个样本,采样深度为 0~20 cm,将采集的土壤样本在实验室自然风干、研磨、过 2 mm 筛后制成待测样本。样本含盐量采用电导法测定<sup>[21]</sup>,即先制备 1:5 土水比的土壤浸提液,再采用电导率仪测得土壤浸提液的 EC 值,后续直接采用土壤浸提液的 EC 值进行统计分析。

## 1.3 遥感影像获取与预处理

选取与研究区野外土壤采样时间对应的 2014 年 10 月 16 日的 Landsat8 OLI 遥感影像,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),行列号为 129/33,云量为 5.73%,数据质量良好。该影

像数据包含 OLI 陆地成像仪的 9 个波段和 TIRS 热红外传感器的 2 个波段,本研究主要采用影像的 B1—B7 进行分析,数据空间分辨率为30 m<sup>[22]</sup>。首先在 ENVI 5.3 软件中完成影像的辐射定标、大气校正、裁剪等预处理工作,再利用 ArcGIS10.1 软件提取采样点对应的影像反射率数据,用于计算相关土壤盐渍化评价指数。

2 研究方法

2.1 土壤盐渍化指数提取

研究发现遥感影像中的可见光和近红外波段对土壤盐渍化较为敏感,将其与土壤盐度关联构建土壤盐度指数,是监测裸地土壤盐渍化程度的一种有效方法<sup>[23]</sup>。另外,盐渍化土壤中的盐分对植物生长造成一定危害,盐渍化程度越重的地区植被覆盖度越低,因此植被覆盖状况是很好的盐渍化程度间接指标,据此判断土壤盐渍化程度的方法被广泛应用于土壤盐渍化遥感监测<sup>[24]</sup>。本研究在查阅相关文献的基础上,选取了 NDSI,S<sub>1</sub>,S<sub>2</sub>,SI 等 12 种土壤盐度指数;NDVI 等 7 种植被指数;以及基于 NDVI-SI 特征空间构建的土壤盐渍化遥感监测指数模型(salinization detection index,SDI)共 20 种土壤盐分评价相关指数(表 1)分析其与土壤盐度之间的定量关系。

表 1 土壤盐渍化评价指数<sup>①</sup>

Tab.1 Evaluation index of soil salinization		
指数	公式	参考文献
归一化盐分指数	$NDSI = (R - NIR)/(R + NIR)$	[14]
盐分指数 S <sub>1</sub>	$S_1 = B/R$	[14]
盐分指数 S <sub>2</sub>	$S_2 = (B - R)/(B + R)$	[14]
盐分指数 S <sub>3</sub>	$S_3 = (B \times R)/B$	[14]
盐分指数 S <sub>5</sub>	$S_5 = (B \times R)/G$	[14]
盐分指数 S <sub>6</sub>	$S_6 = (R \times NIR)/G$	[14]
盐分指数 SI	$SI = \sqrt{(B \times R)}$	[14]
盐分指数 SI <sub>1</sub> (salt index1, SI <sub>1</sub> )	$SI_1 = \sqrt{(G \times R)}$	[14]
盐分指数 SI <sub>2</sub> (salt index 2, SI <sub>2</sub> )	$SI_2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	[14]
盐分指数 SI <sub>3</sub> (salt index3, SI <sub>3</sub> )	$SI_3 = \sqrt{R^2 + G^2}$	[14]
强度指数 1(intensity index 1, Int <sub>1</sub> )	$Int_1 = (G + R)/2$	[9]
强度指数 2(intensity index 2, Int <sub>1</sub> )	$Int_2 = (G + R + NIR)/2$	[9]
归一化植被指数	$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$	[25]
扩展的归一化植被指数(enhanced NDVI,ENDVI)	$ENDVI = \frac{(NIR + SWIR_2 - R)}{(NIR + SWIR_2 + R)}$	[16]
增强型植被指数(enhanced vegetation index,EVI)	$EVI = G(NIR - R)/(NIR + 6R + 7.5B + 1)$	[16]

(续表)		
指数	公式	参考文献
扩展的增强型植被指数(extented enhanced vegetation index,EVI)	$EVI = 2.5(NIR + SWIR_1 - R)/(NIR + SWIR_1 + 6R - 7.5B + 1)$	[16]
冠层盐响应指数	$CRSI = \sqrt{\frac{NIR \times R - G \times B}{NIR \times R + G \times B}}$	[17]
联合光谱指数(combined spectral response index, CORSI)	$CORSI = \frac{(B + G)}{(R + NIR)} \times NDVI$	[17]
广义植被指数(generalized difference vegetation index, GDVI)	$GDVI = (NIR - G)/(NIR + G)$	[26]
盐渍化遥感监测指数模型	$SDI = \sqrt{(NDVI - 1)^2 - SI^2}$	[27]

①表中: B,G,R,NIR,SWIR<sub>1</sub> 和 SWIR<sub>2</sub> 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段及 2 个短红外波段的反射率。

2.2 数据分析方法

2.2.1 相关分析

相关分析(correlation analysis)是研究现象之间是否存在某种依存关系,并对具体有依存关系的现象探讨其相关方向以及相关程度的一种统计方法<sup>[28]</sup>。本研究中应用相关分析方法研究土壤盐渍化评价指数与土壤 EC 的关联程度。

2.2.2 曲线回归分析

本研究采用线性、对数、逆模型等 11 种曲线回归模型(表 2)分析土壤 EC 与上述土壤盐分指数、植被指数的线性关系。拟合结果中仅保留通过显著性检验(Sig. <0.05)的回归模型,并引用决定系数 R<sup>2</sup>和均方根误差(root mean square error,RMSE)评价不同曲线模型对土壤盐分的拟合精度。

表 2 曲线回归模型及其公式<sup>①</sup>

Tab.2 Curve regression model and its mathematical expression	
曲线模型	公式
线性函数(Linear)	$Y = b_0 + b_1t$
对数函数(Logarithmic)	$Y = b_0 + b_1\ln t$
逆模型(Inverse)	$Y = b_0 + b_1/t$
二次函数(Quadratic)	$Y = b_0 + b_1t + b_2t^2$
三次函数(Cubic)	$Y = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3$
复合函数(Compound)	$Y = b_0b_1^t$
幂函数(Power)	$Y = b_0t^{b_1}$
S 函数	$Y = e^{(b_0+b_1/t)}$
增长函数(Growth)	$Y = e^{(b_0+b_1t)}$
指数函数(Exponential)	$Y = b_0e^{b_1t}$
逻辑函数(Logistic)	$Y = (1/u + b_0b_1^t)^{-1}$

①表中: b<sub>0</sub>,b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>,b<sub>3</sub>,u 为拟合方程系数; Y 为土壤 EC; t 为土壤盐分指数和植被指数。

3 结果分析

3.1 土壤盐度描述性统计分析

将研究区土壤样本按含盐量划分为非盐渍化

( $<0.1\%$ )、轻度盐渍化( $0.1\% \sim 0.3\%$ )、中度盐渍化( $0.3\% \sim 0.6\%$ )和重度盐渍化( $>0.6\%$ )样本,由于中度和重度盐渍化土壤样本较少,故将二者合并为中重度盐渍化样本进行统计,全样本及不同盐度水平土壤 EC 统计特征如表 3 所示。结果显示研

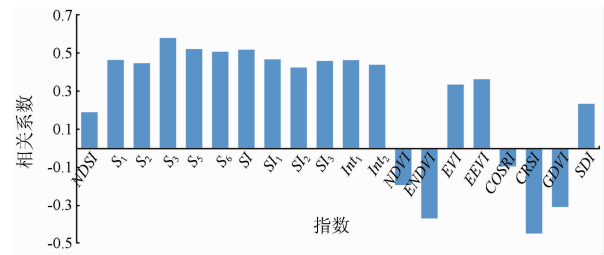
究区土壤样本中以非盐渍化和轻度盐渍化土壤为主,合计占比 82.68%,整体样本的土壤 EC 变异系数(1.78)较大,属于强变异水平,表明土壤盐度空间变异较大。

表 3 研究区土壤 EC 的统计特征  
Tab.3 Statistical characteristics of soil EC in the study area

统计特征	样本数	最小值/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	均值/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	变异系数
全样本	52	0.04	7.52	0.84	1.50	1.78
非盐渍化	20	0.04	0.27	0.19	0.08	0.40
轻度盐渍化	23	0.29	0.99	0.47	0.20	0.42
中重度盐渍化	9	1.08	7.52	3.24	2.51	0.77

3.2 评价指数与土壤盐度之间的相关性分析

利用 SPSS 25 软件的相关分析工具计算各土壤盐渍化评价指数与土壤 EC 的相关系数,并绘制指数与土壤 EC 相关性图(图 2)。分析可知,12 个盐分指数中  $S_3$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  和 SI 与土壤 EC 相关系数均在



0.50 以上,呈较强的正相关关系,其余盐分指数与土壤 EC 呈较弱的正相关关系。植被指数中 EVI、EEVI 和 SDI 与土壤 EC 呈较弱正相关,其余植被指数均呈现负相关关系,其中指数 CRSI 与土壤 EC 相关系数最大( $R = -0.45$ ),但仍属于较弱的相关关系,由此可见,植被指数与土壤 EC 的相关关系整体弱于盐分指数。

3.3 评价指数与土壤盐度的曲线拟合结果分析

利用 SPSS 25 软件中的曲线估算模型拟合研究区土壤盐渍化评价指数与土壤盐度之间的关系,全样本评价指数与土壤 EC 的拟合结果如表 4 所示,轻度盐渍化与重度盐渍化土壤 EC 与各盐渍化评价指数的拟合结果如表 5 和表 6 所示,非盐渍化土壤所有评价指数与土壤 EC 拟合结果均不显著,在此不进行分析。

图 2 土壤 EC 与盐渍化评价指数之间的相关性图  
Fig.2 Correlation between soil EC and salinization evaluation index

表 4 盐渍化评价指数与全样本土壤 EC 之间的曲线拟合结果

Tab.4 Curve fitting results between salinization evaluation index and soil EC(Full sample)

模型	NDSI		$S_1$		$S_2$		$S_3$		$S_5$		$S_6$		SI	
	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
线性函数	0.036	0.729	0.215	0.657	0.199	0.664	0.335	0.605	0.272	0.633	0.257	0.640	0.268	0.635
对数函数			0.195	1.055			0.215	1.541	0.216	1.547	0.172	1.389	0.216	1.545
逆模型	0.025	0.733	0.175	0.674	0.298	0.622	0.089	0.708	0.161	0.680	0.082	0.711	0.163	0.679
二次函数	0.036	0.729	0.293	0.624	0.278	0.631	0.367	0.591	0.346	0.600	0.290	0.625	0.337	0.604
三次函数	0.036	0.729	0.304	0.619	0.327	0.609	0.395	0.577	0.406	0.572	0.319	0.612	0.382	0.583
复合函数	0.095	0.761	0.129	0.720	0.122	0.726	0.293	0.610	0.292	0.652	0.246	0.668	0.288	0.658
幂函数			0.121	0.728			0.261	0.694	0.264	0.691	0.211	0.718	0.262	0.693
S 函数	0.063	0.765	0.112	0.734	0.168	0.670	0.156	0.747	0.225	0.744	0.138	0.750	0.225	0.719
增长函数	0.095	0.761	0.129	0.720	0.122	0.726	0.293	0.610	0.292	0.652	0.246	0.668	0.288	0.658
指数函数	0.095	0.761	0.129	0.720	0.122	0.726	0.293	0.610	0.292	0.652	0.246	0.668	0.288	0.658
逻辑函数	0.095	0.761	0.129	0.720	0.122	0.726	0.293	0.610	0.292	0.652	0.246	0.668	0.288	0.658
模型	$SI_1$		$SI_2$		$SI_3$		$Int_1$		$Int_2$		NDVI		ENDVI	
	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
线性函数	0.218	0.656	0.180	0.672	0.210	0.659	0.214	0.658	0.193	0.667	0.036	0.729	0.135	0.690
对数函数	0.181	1.400	0.153	1.028	0.175	1.188	0.178	1.389	0.163	1.130	0.032	0.788	0.150	1.433

(续表)

模型	$SI_1$		$SI_2$		$SI_3$		$Int_1$		$Int_2$		$NDVI$		$ENDVI$	
	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$
逆模型	0.142	0.687	0.125	0.694	0.138	0.689	0.140	0.688	0.133	0.691	0.025	0.733	0.165	0.678
二次函数	0.269	0.635	0.233	0.650	0.259	0.639	0.264	0.637	0.252	0.642	0.036	0.728	0.205	0.662
三次函数	0.292	0.625	0.257	0.640	0.281	0.629	0.286	0.627	0.277	0.631	0.036	0.728	0.205	0.662
复合函数	0.255	0.690	0.192	0.718	0.250	0.694	0.252	0.692	0.212	0.710	0.095	0.761	0.161	0.730
幂函数	0.235	0.711	0.178	0.729	0.231	0.713	0.233	0.712	0.196	0.723	0.082	0.762	0.171	0.722
S 函数	0.207	0.728	0.159	0.738	0.204	0.729	0.205	0.729	0.175	0.735	0.063	0.765	0.182	0.714
增长函数	0.255	0.690	0.192	0.718	0.250	0.694	0.252	0.692	0.212	0.710	0.095	0.710	0.161	0.730
指数函数	0.255	0.690	0.192	0.718	0.250	0.694	0.252	0.692	0.212	0.710	0.095	0.710	0.161	0.730
逻辑函数	0.255	0.690	0.192	0.718	0.250	0.694	0.252	0.692	0.212	0.710	0.095	0.710	0.161	0.730

模型	$EVI$		$EEVI$		$COSRI$		$CRSI$		$GDVI$		$SDI$	
	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$
线性函数	0.110	0.699	0.131	0.692	0.009	0.739	0.199	0.664	0.095	0.706	0.055	0.722
对数函数	0.100	1.611	0.119	1.142	0.006	0.770	0.221	0.895	0.114	0.912	0.053	0.753
逆模型	0.070	0.716	0.108	0.701	0.003	0.741	0.245	0.645	0.140	0.688	0.051	0.723
二次函数	0.110	0.699	0.207	0.661	0.014	0.737	0.284	0.628	0.114	0.699	0.058	0.720
三次函数	0.210	0.660	0.213	0.658	0.015	0.769	0.284	0.628	0.186	0.670	0.059	0.720
复合函数	0.050	0.757	0.078	0.749	0.051	0.769	0.169	0.709	0.135	0.744	0.118	0.754
幂函数	0.050	0.758	0.076	0.751	0.044	0.770	0.176	0.698	0.136	0.737	0.118	0.755
S 函数	0.040	0.761	0.073	0.752	0.034	0.772	0.183	0.684	0.138	0.728	0.117	0.756
增长函数	0.050	0.757	0.078	0.749	0.051	0.769	0.169	0.709	0.135	0.744	0.118	0.754
指数函数	0.050	0.757	0.078	0.749	0.051	0.769	0.169	0.709	0.135	0.744	0.118	0.754
逻辑函数	0.050	0.757	0.078	0.749	0.051	0.769	0.169	0.709	0.135	0.744	0.118	0.754

表 5 盐渍化评价指数与土壤 EC 之间的曲线拟合结果(轻度盐渍化)  
Tab.5 Curve fitting results between salinization evaluation index and soil EC(Slight salinization)

模型	$S_3$		$S_5$		$SI$		$SI_2$		$Int_2$		$CRSI$		$GDVI$	
	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$
线性函数	0.320	0.080	0.279	0.082	0.270	0.082	0.302	0.081	0.293	0.081				
对数函数	0.224	0.226	0.26	0.227	0.225	0.226	0.267	0.177	0.259	0.191				
逆模型					0.176	0.088	0.227	0.085	0.220	0.085				
二次函数	0.333	0.079	0.360	0.077	0.338	0.079	0.359	0.077	0.344	0.078	0.329	0.079		
三次函数			0.362	0.077	0.341	0.078	0.356	0.077	0.342	0.078	0.329	0.079	0.419	0.074
复合函数	0.292	0.080	0.245	0.082	0.241	0.082	0.283	0.081	0.272	0.081				
幂函数	0.198	0.085	0.193	0.085	0.197	0.085	0.249	0.083	0.239	0.083				
S 函数							0.211	0.085	0.201	0.086				
增长函数	0.292	0.080	0.245	0.082	0.241	0.082	0.283	0.081	0.272	0.081				
指数函数	0.292	0.080	0.245	0.082	0.241	0.082	0.283	0.081	0.272	0.081				
逻辑函数	0.292	0.080	0.245	0.082	0.241	0.082	0.283	0.081	0.272	0.081				

表 6 盐渍化评价指数与土壤 EC 之间的曲线拟合结果(中重度盐渍化)  
Tab.6 Curve fitting results between salinization evaluation index and soil EC(Moderate and severe salinization)

模型	$S_1$		$S_2$		$S_3$		$S_5$		$S_6$		$SI$		$SI_1$	
	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$	$R^2$	$RMSE/(mS \cdot cm^{-1})$
线性函数	0.578	0.767	0.604	0.744										
对数函数	0.610	1.881												
逆模型	0.638	0.711												
二次函数	0.722	0.623	0.717	0.628										
三次函数	0.724	0.621	0.711	0.635										
复合函数	0.664	0.949	0.692	0.921	0.463	0.983	0.507	0.939	0.493	0.984	0.523	0.931	0.502	0.934
幂函数	0.699	0.913			0.528	0.895	0.508	0.913	0.501	0.902	0.523	0.931	0.491	0.913



(续表)														
模型	S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>		S <sub>5</sub>		S <sub>6</sub>		SI		SI <sub>1</sub>	
	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )
S 函数	0.730	0.872	0.498	1.063			0.463	0.925			0.476	0.912		
增长函数	0.664	0.949	0.692	0.921	0.463	0.983	0.507	0.939	0.493	0.984	0.523	0.931	0.502	0.934
指数函数	0.664	0.949	0.692	0.921	0.463	0.983	0.508	0.939	0.493	0.984	0.523	0.931	0.502	0.934
逻辑函数	0.664	0.949	0.692	0.921	0.463	0.983	0.507	0.939	0.493	0.984	0.523	0.931	0.502	0.934
模型	SI <sub>2</sub>		SI <sub>3</sub>		Int <sub>1</sub>		Int <sub>2</sub>		EEVI		CRSI			
	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE/ (mS·cm <sup>-1</sup> )
线性函数										0.580	0.766			
对数函数										0.553	3.000			
逆模型										0.520	0.819			
二次函数														
三次函数														
复合函数	0.511	0.915	0.493	0.937	0.498	0.935	0.517	0.915	0.623	0.770	0.515	0.946		
幂函数	0.487	0.912	0.481	0.919	0.486	0.916	0.495	0.906	0.588	0.780	0.496	0.961		
S 函数										0.548	0.803	0.477	0.974	
增长函数	0.511	0.915	0.493	0.937	0.498	0.935	0.517	0.915	0.623	0.770	0.515	0.983		
指数函数	0.511	0.915	0.493	0.937	0.498	0.935	0.517	0.915	0.623	0.770	0.515	0.983		
逻辑函数	0.511	0.915	0.493	0.937	0.498	0.935	0.517	0.915	0.623	0.770	0.515	0.983		

分析各盐渍化评价指数对研究区全样本土壤 EC 的拟合结果可知,12 个盐分指数中 S<sub>5</sub>对土壤 EC 的拟合效果最好(三次函数模型, R<sup>2</sup> = 0.406),其次为指数 S<sub>3</sub>(三次函数模型, R<sup>2</sup> = 0.395),盐分指数 NDSI 拟合效果最差( R<sup>2</sup> = 0.095),其余盐分指数与土壤 EC 的最优拟合模型 R<sup>2</sup> 介于 0.257 ~ 0.382 之间,预测 RMSE 在 0.577 mS/cm 以上。9 个植被指数对研究区土壤 EC 的拟合度整体低于盐分指数,表现最好的为 CRSI 指数,拟合度接近于盐分指数的中等拟合水平(三次函数模型, R<sup>2</sup> = 0.284)。拟合模型中,有 15 个指数均是三次函数模型的拟合度最高,二次函数模型次之;复合函数模型、增长函数模型、指数函数模型和逻辑函数模型的拟合度略低且拟合结果一致;对数函数模型、逆模型和 S 模型的拟合效果较差;线性函数模型的拟合效果不理想,拟合度最高为指数 S<sub>3</sub>( R<sup>2</sup> = 0.335),低于该指数拟合度最高的三次函数模型。

由表 5 和表 6 可知,随着土壤盐度水平的增加,盐渍化评价指数对土壤 EC 的拟合效果显著提升。

轻度盐渍化土壤样本中拟合度最高为基于三次函数模型的指数 GDVI,拟合度 R<sup>2</sup> = 0.419,其次为指数 S<sub>5</sub>和 SI<sub>2</sub>,指数 S<sub>3</sub>, SI, Int<sub>2</sub>和 CRSI 对轻度盐渍化土壤 EC 拟合效果显著,其余指数拟合结果均不显著,最优拟合模型为二次函数模型或三次函数模型。中重度盐渍化样本中有 13 个指数(11 个盐分指数,2 个植被指数)与土壤 EC 呈显著性拟合关系,指数 S<sub>1</sub>和 S<sub>2</sub>对中重度盐渍化土壤 EC 的拟合效果最好,指数 S<sub>1</sub>的 S 模型、二次函数模型、三次函数模型和幂函数模型,指数 S<sub>2</sub>的二次函数模型和三次函数模型的拟合度 R<sup>2</sup> 均达到 0.700 以上。指数 S<sub>1</sub>的 S 函数模型拟合度最高( R<sup>2</sup> = 0.730),但 RMSE 较大(0.872 mS/cm),因此,选择 RMSE 最小(0.621 mS/cm),拟合度相近的三次函数模型( R<sup>2</sup> = 0.724)评价中重度盐渍化土壤盐度更为合适。

根据上述分析结果,研究区全样本、轻度盐渍化和中重度盐渍化样本的最优评价指数分别为 S<sub>5</sub>、GDVI 和 S<sub>1</sub>,最优拟合模型均为三次函数模型,其预测结果如图 3 所示。

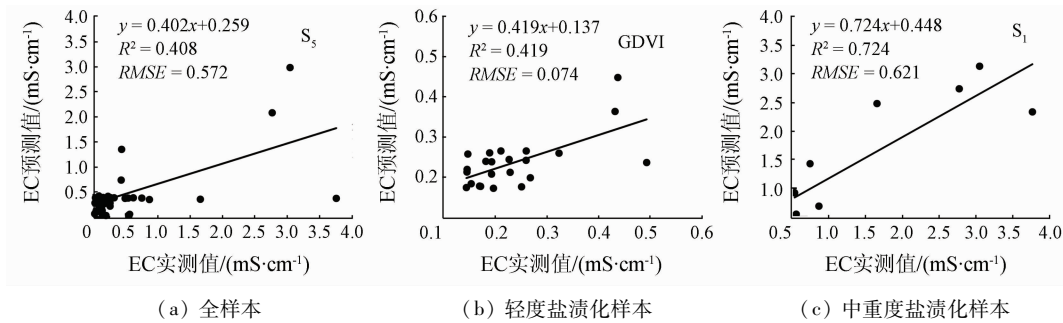


图 3 不同盐度水平土壤 EC 预测值与实测值关系散点图

Fig. 3 Scatter plot of relationship between predicted and measured values of EC

### 3.4 研究区土壤 EC 空间分布

以研究区遥感影像为基础,利用最优预测指数  $S_5$  和三次函数模型绘制研究区土壤 EC 分布图(图4)。整体来看研究区土壤盐渍化程度较低,非盐渍化和轻度盐渍化土壤约占研究区总面积的 85.57%,中重度盐渍化土壤面积约为 15.57%,主要分布在研究区中部、北部地势较低洼地区,以及黄河东岸沿岸区域,盐渍化土壤分布情况与野外采集样本的描述性统计结果较为一致。

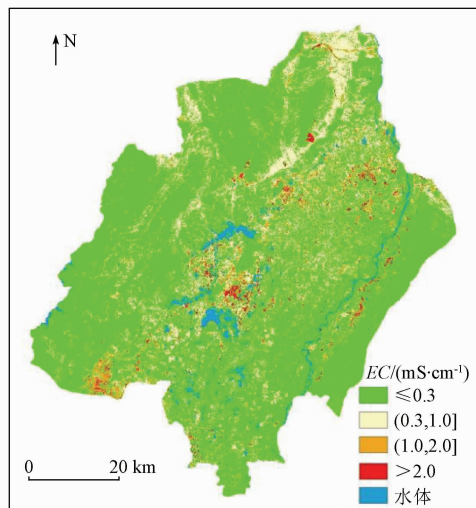


图4 研究区土壤 EC 分布图

Fig. 4 Distribution map of soil EC in the study area

## 4 讨论

目前已有许多学者基于遥感影像光谱信息建立了众多土壤盐渍化评价指数<sup>[14,17,29]</sup>,这些指数中仅有 SI,SDI,NDVI,CRSI 等在宁夏银川平原的土壤盐度监测中得到应用<sup>[18-19,30]</sup>,其他指数较少应用到宁夏银北地区。本研究以采集的宁夏银北灌区 52 个表层土壤样本为基础,结合该地区同时期多光谱遥感影像,提取并分析了 20 个土壤盐度指数和植被指数对研究区土壤 EC 的拟合效果,既扩大了这些评价指数的应用范围,又丰富了宁夏银北灌区土壤盐渍化遥感监测研究。

干旱区土壤盐度受降雨、蒸发、农业灌溉等影响,季节变化明显<sup>[9,31]</sup>。从所采集的 52 个表层土壤样本来看,研究区土壤以非盐渍化和轻度盐渍化为主,中重度盐渍化土壤仅占 17.32%,这主要与研究区土壤盐度随季节变化有关。宁夏银北灌区冬春季干旱少雨,土壤多以裸露为主,蒸发强烈,盐分随水向土壤表层聚集,因此表层土壤盐度水平较重;而夏秋季节由于作物覆盖、降雨、灌溉等影响,盐分随水向土壤深层运动,表层土壤盐度较低。本研究

中土壤采样时间为深秋季节,表层土壤含盐量较少,与研究区实际情况一致。

已有研究表明在裸土或植被覆盖度较低的区域,盐分指数是直接监测土壤盐度的有力手段,植被覆盖度较高的地区,植被指数可作为间接监测土壤盐度的重要方法<sup>[17]</sup>。从评价指数与土壤盐度的相关性分析可知,研究区 12 个盐分指数与全样本土壤 EC 一致呈正相关且相关系数较大,植被指数与土壤 EC 的正负相关性和相关系数均差异较大,因此选取盐分指数对银北灌区秋季作物收获后、植被覆盖度较低时节的土壤盐度进行监测具有一定的实际应用意义。此外,研究区土壤盐度越高,盐分指数和植被指数均表现为与土壤 EC 的相关系数越大,说明研究区土壤盐度越高,评价指数对土壤 EC 的解释越准确,这与前人的研究结果高度一致<sup>[1,32]</sup>。

不同地区土壤盐渍化发生、发展和变化规律差异性较大<sup>[2,17,33-34]</sup>。通过对 20 个评价指数与研究区土壤 EC 的曲线拟合结果来看,盐分指数对土壤 EC 的拟合度整体高于植被指数,但拟合度并不高(全样本中最高拟合度  $R^2$  仅为 0.408),究其原因可能是研究区深秋季节表层土壤盐度较低,土壤反射光谱信息相对较复杂,对土壤盐度的解释力度较弱。拟合模型中三次函数模型、二次函数模型、复合函数模型等非线性模型对土壤 EC 的拟合效果较好,线性函数模型表现较差,进一步验证了前人对于土壤盐度与评价指数并非简单线性关系的结论<sup>[7,23,35]</sup>。

## 5 结论

本研究以宁夏银北灌区为研究对象,通过对研究区秋季 52 个表层土壤样本盐度、盐渍化评价指数与土壤 EC 的相关性以及曲线拟合结果分析,得出以下结论:

1)全样本土壤 EC 介于 0.04 ~ 7.52 mS/cm 之间,且空间变异程度较大,变异系数为 1.78,非盐渍化和轻度盐渍化土壤样本合计占比 82.68%。

2)盐度指数与全样本土壤 EC 均为正相关,相关性最高的为指数  $S_3$ ,相关系数为 0.58,其次为  $S_5$ 、 $S_6$  和 SI,植被指数 CRSI 与土壤 EC 相关性相对较高(相关系数为 -0.45),其余植被指数与土壤 EC 相关性较小。

3)指数对不同盐度水平土壤 EC 的拟合度表现为随土壤盐度升高而显著增加,全样本中与土壤 EC 拟合度较高的为盐分指数  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_5$  和 SI,其中指数  $S_5$  的表现最好 ( $R^2 = 0.406$ ),对中重度盐渍化土壤 EC 的拟合度最高的为指数  $S_1$  ( $R^2 = 0.730$ ) 和  $S_2$  ( $R^2 =$

0.724)。

4)7种曲线拟合模型中,基于三次函数模型、二次函数模型和S函数模型计算的评价指数与土壤EC的拟合度较高。

上述研究得出的初步结论可为宁夏银北灌区土壤盐度大尺度遥感监测提供一定理论基础,但整体相关性和拟合度并不高,需要进一步加大数据量或改进研究方法,提高盐渍化评价指数对土壤盐度的定量解释力度,同时也可更准确地筛选出适合宁夏银北灌区的盐渍化评价指数。此外,银北地区土壤盐度随季节变化较大,本研究仅针对深秋时节的土壤盐度进行了分析,下一步需要考虑土壤表层盐分含量较高的春季、植被覆盖度较高的夏季指数与土壤盐度的关系,以评价各指数在银北灌区不同季节土壤盐度监测中的适用性。

**参考文献 (References):**

[1] 张雅莉,尔达克·克里木. 基于 Landsat8 OLI 影像光谱的土壤盐分估算模型研究[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):87-94. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 01. 12.

Zhang Y L, Kelimu A. Estimation model of soil salinization based on Landsat8 OLI image spectrum[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(1):87-94. doi:10.6046/gtzyyg. 2018. 01. 12.

[2] 厉彦玲. 黄河三角洲土壤质量退化对土地利用/覆被变化的响应研究[D]. 泰安:山东农业大学,2018.

Li Y L. Response of soil quality degradation to land use/cover changes in the Yellow River delta[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2018.

[3] 吴加敏,姚建华,张永庭,等. 银川平原土壤盐渍化与中低产田遥感应用研究[J]. 遥感学报,2007,11(3):414-419.

Wu J M, Yao J H, Zhang Y T, et al. Remote sensing application study on the soil salinity and the medium & low yield croplands in Yinchuan Plain(YCP)[J]. Journal of Remote Sensing,2007,11(3):414-419.

[4] 李剑萍,马力文,苏占胜,等. 宁夏银北地区盐碱地遥感调查分析[C]//周光召. 加入 WTO 和中国科技与可持续发展——挑战与机遇、责任和对策(下册). 北京:中国科学技术出版社,2002:136-139.

Li J P, Ma L W, Su Z S, et al. Remote sensing investigation and analysis of saline alkali land in Yinbei area of Ningxia[C]//Zhou G Z. China's accession to WTO and China's science and technology and sustainable development:Challenges and opportunities, responsibilities and Countermeasures (Volume II). Beijing: China Science and Technology Press,2002:136-139.

[5] 李重阳,宋豫秦. 宁夏银北灌区土壤盐渍化时空分布特征[J]. 人民黄河,2014,36(8):134-136,140.

Li C Y, Song Y Q. Spatial-temporal distribution characteristics of soil salinization in northern Yinchuan plain of Ningxia[J]. Yellow River,2014,36(8):134-136,140.

[6] 吴亚坤,刘广明,苏里坦,等. 多源数据的区域土壤盐渍化精确评估[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(11):3528-3533.

Wu Y K, Liu G M, Su L T, et al. Accurate evaluation of regional soil salinization using multi-source data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(11):3528-3533.

[7] 吐尔逊·艾山,海米提·司马义. 土壤盐渍化遥感监测研究进展综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2008,109(1):1-7.

Hasan T, Ishmael H. Research progress and summary of remote sensing monitoring of soil salinization[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition),2008,109(1):1-7.

[8] 胡婕. 基于多源遥感的干旱地区土壤盐分反演研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.

Hu J. Estimation of soil salinity in arid area based on multi-source remote sensing[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2019.

[9] 梁静,丁建丽,王敬哲,等. 基于反射光谱与 Landsat 8 OLI 多光谱数据的艾比湖湿地土壤盐分估算[J]. 土壤学报,2019,56(2):320-330.

Liang J, Ding J L, Wang J Z, et al. Quantitative estimation and mapping of soil salinity in the Ebinur Lake wetland based on Vis-NIR reflectance and Landsat 8 OLI data[J]. Acta Pedologica Sinica,2019,56(2):320-330.

[10] 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[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(6):24-27,115.

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[J]. Geography and Geo-Information Science,2010,26(6):24-27,115.

[11] 缪琛. 基于时空序列重构的物候与土壤盐渍化关系研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2017.

Miu C. Study on the relationship between phenology and soil salinization based on spatial and temporal sequence reconstruction: A case study of Ugan-Kugqa oases[D]. Urumchi: Xinjiang University,2017.

[12] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints[J]. Remote Sensing of Environment,2003,85(1):1-20.

[13] 扶卿华,倪绍祥,王世新,等. 土壤盐分含量的遥感反演研究[J]. 农业工程学报,2007(23):48-54.

Fu Q H, Ni S X, Wang S X, et al. Retrieval of soil salt content based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007(23):48-54.

[14] Allbed A, Kumar L, Aldakheel Y Y. 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.

[15] Elia S, Todd H S, Dennis L C. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment,2015,169(9):335-343.

[16] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等. 基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演[J]. 农业工程学报,2015,31(5):107-114.



Chen H Y,Zhao G X,Chen J C,et al. Remote sensing inversion of saline soil salinity based on modified vegetation index in estuary area of Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(5):107-114.

[17] 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 F,Ding J L,Wei Y,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 [J]. Acta Ecologica Sinica,2017. 37(15):5007-5022.

[18] 于文婧. 基于环境小卫星和 GIS 的灌区土壤盐渍化研究[D]. 北京:中国农业大学,2016.

Yu W J. Study of the soil salinization in irrigated area based on HJ satellite and GIS [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.

[19] 孙玉芳. 基于遥感监测指数模型的银川平原土壤盐渍化动态研究[J]. 地下水,2019,41(5):80-82.

Sun Y F. Study on soil salinization dynamics in Yinchuan Plain based on remote sensing monitoring index model[J]. Ground Water,2019,41(5):80-82.

[20] 阿也提古丽·斯迪克. 宁夏平罗土壤含盐量遥感估算方法研究[D]. 南京:南京大学,2011.

Sidike A. Estimation model of salt content in soils by remote sensing: A case study of Pingluo County, Ningxia Province, China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.

[21] 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.

Lu R K. Soil agrochemical analysis methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[22] Rai A K, Mandal N, Singh A, et al. Landsat 8 OLI satellite image classification using convolutional neural network [J]. Procedia Computer Science, 2020, 167: 987-993.

[23] 蒲 智,于瑞德,尹昌应,等. 干旱区典型盐碱土壤含盐量估算的最佳高光谱指数研究[J]. 水土保持通报,2012,32(6):129-133.

Pu Z, Yu R D, Yin C Y, et al. Optimal hyperspectral indices for soil salt content estimation on typical saline soil in arid areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 129-133.

[24] 张智韬. 基于遥感技术的灌区动态信息监测[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2005.

Zhang Z T. Dynamic information monitoring in irrigation district based on remote sensing [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2005.

[25] 王 飞,丁建丽. 基于土壤植被光谱协同分析的土壤盐度推理模型构建研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(6):1848-1853.

Wang F,Ding J L. Soil salinity modelling study with salinity inference model based on the integration of soil and vegetation spectrum in arid land [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6):1848-1853.

[26] Wu W C. The generalized difference vegetation index (GDVI) for dryland characterization[J]. Remote Sensing, 2014, 6(2): 1211-1233.

[27] 王 飞,丁建丽,伍漫春. 基于 NDVI-SI 特征空间的土壤盐渍化遥感模型[J]. 农业工程学报,2010,26(8):168-173.

Wang F,Ding J L,Wu M C. Remote sensing monitoring models of soil salinization based on NDVI-SI feature space[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 8, 168-173.

[28] 尹德光. 农业统计学[M]. 北京:中国统计出版社,1995.

Yin D G. Agricultural statistics [M]. Beijing: China Statistics Press, 1995.

[29] 曹 雷,丁建丽,玉米提·哈力克,等. 基于国产高分一号卫星数据的区域土壤盐渍化信息提取与建模[J]. 土壤学报,2016, 53(6):1399-1409.

Cao L,Ding J L,Halik U,et al. Extraction and modeling of regional soil salinization based on data from GF-1 satellite[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1399-1409.

[30] 关 红,贾科利,张至楠,等. 盐渍化土壤光谱特征分析与建模[J]. 国土资源遥感,2015,27(2):100-104. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2015. 02. 16.

Guan H,Jia K L,Zhang Z N,et al. Research on remote sensing monitoring model of soil salinization based on spectrum characteristic analysis[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2):100-104. doi:10. 6046/gtzyyg. 2015. 02. 16.

[31] 买买提·沙吾提,丁建丽,等. 基于 GIS 的干旱区土壤盐渍化敏感性评价——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学,2012,34(2):353-358.

Sawut M,Ding J L,et al. A GIS-based assessment on sensitivity of soil salinization in arid areas: A case study of the Ugan-Kuqa River delta[J]. Resources Science, 2012, 34(2): 353-358.

[32] 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 J,Liu H J,Shi Z,et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(17): 167-174.

[33] 江红南. 新疆不同区域土壤盐渍化光学遥感定量监测研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.

Jiang H N. Quantitative monitoring on soil salinization utilizing optical remote sensing in different regions of Xinjiang [J]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[34] 赵 群,吴加敏. 基于遥感技术的银川土地盐渍化动态监测研究[J]. 现代农业科技,2009,517(23):312-314,317.

Zhao Q,Wu J M. Dynamic monitoring of land salinization in Yinchuan based on remote sensing [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009, 517(23): 312-314, 317.

[35] 阿尔达克·克里木,尼格拉·塔什甫拉提,等. 艾比湖自然保护区荒漠-盐生植被 VIS-NIR 光谱反射特征研究[J]. 草地学报,2016,24(2):453-458.

Kelimu A,Tashpolat N,et al. Study on hyperspectral reflectance characteristics of typical vegetation in Ebinur Lake wetland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(2): 453-458.

An applicability analysis of salinization evaluation index  
based on multispectral remote sensing to soil salinity  
prediction in Yinbei irrigation area of Ningxia

WU Xia, WANG Zhangjun, FAN Liqin, LI Lei

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Soil salinization is one of the important factors that affect the soil health in the arid area, so it is very important to obtain the information of soil salinity and monitor the change of soil salinity for the rational use of land resources and soil restoration in the arid area. Based on 52 soil samples collected in the field and Landsat 8 OLI remote sensing images obtained at the same time, the correlation and curve regression analysis were used to quantitatively analyze the correlation and fitting degree between the soil salinization evaluation index based on multispectral remote sensing data and the measured soil Electrical Conductivity (EC). The results are as follows: ① The soil salinity in the study area is relatively light, and the total proportion of non-salinized and slightly salinized soil samples is 82.68%; ② The correlation between salinity index and soil EC is higher than that of vegetation index. The correlation between salinity index  $S_3(S_3)$ , salinity index  $S_5(S_5)$ , salinity index  $S_6$  (salinity index,  $S_6$ ) and salinity index  $S_i$  (salinity index, SI) is above 0.50; ③ Salinity indexes  $S_2(S_2)$ ,  $S_3$ ,  $S_5$  and  $S_i$  have the highest fitting degree with soil EC in the whole sample, among which  $S_5$  has the best performance ( $R^2 = 0.41$ ). The fitting degree of index and soil EC increases significantly with the increase of soil salinity under different salinity levels. The highest fitting degree of salinity index and soil EC is  $S_1(R^2 = 0.73)$  and  $S_2(R^2 = 0.72)$ ; ④ In the fitting model, the evaluation index and soil EC calculated based on cubic model, quadratic model and S model has a high fitting degree. This study has analyzed the applicability of various soil salinization evaluation indexes in soil salinity monitoring of Yinbei irrigation area, and the preliminary conclusions can provide reference for remote sensing monitoring of soil salinity in Yinbei irrigation area of Ningxia.

**Keywords:** soil salinization; salinity index; vegetation index; curve fitting; Landsat

(责任编辑: 李瑜)