

doi: 10.6046/zrzyyg.2021349

引用格式: 张思源,岳楚,袁国礼,等. 基于 ENDVI-SI3 特征空间的盐渍化反演模型及风险评估[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):136-143. (Zhang S Y, Yue C, Yuan G L, et al. Salinization inversion model based on ENDVI-SI3 characteristic space and risk assessment[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4):136-143. )

## 基于 ENDVI-SI3 特征空间的盐渍化反演模型及风险评估

张思源<sup>1,2</sup>, 岳 楚<sup>1,2</sup>, 袁国礼<sup>2</sup>, 袁 帅<sup>1</sup>, 庞文强<sup>3</sup>, 李 俊<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 呼和浩特 010010; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 巴彦淖尔市现代农牧事业发展中心, 巴彦淖尔 015000)

**摘要:** 土壤盐渍化是干旱和半干旱地区面临的最严重环境风险, 利用特征参量建立特征空间的遥感方法为土壤盐渍化的及时监测与反演提供了更有效、更经济的工具和技术。目前反演盐渍化的特征参量多选用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和盐分指数(salinity index, SI), 缺乏精细化分析与地区适用性。以内蒙古乌拉特前旗为研究区, 基于 Landsat8 OLI 数据, 选用引入短波红外波段的增强型归一化植被指数(enhanced normalized difference vegetation index, ENDVI)和半干旱区反演效果最优的盐分指数 3(salinity index 3, SI3)构建 ENDVI-SI3 特征空间, 建立改进型盐渍化监测指数(improved salinization monitoring index, ISMI)模型。结果表明, ISMI 与土壤含盐量相关系数达 0.82, 反演精度优于 NDVI, EDNVI 和 SI3(-0.66, -0.70 和 0.75), 在 ISMI 基础上实现了内蒙古乌拉特前旗土壤盐渍化的定量反演分析与风险评估, 为半干旱区盐渍化反演特征空间中特征参量的选取提供了优化思路。

**关键词:** 盐渍化; 遥感模型; 增强型归一化植被指数(ENDVI); 盐分指数 3(SI3); 特征空间; 风险评估

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0136-08

### 0 引言

土壤盐渍化是气候、地形、土壤和水文地质等自然条件共同作用下, 导致水盐运动变化, 进而产生的生态问题。人类活动中的农业和水利等又对土壤盐度演化产生重要影响, 甚至导致土壤次生盐渍化<sup>[1]</sup>。例如蓄水盆地、沟渠和土壤灌溉会引起当地水盐状况的变化, 加重盐渍化进而破坏土壤肥力, 影响农作物生产, 最终威胁粮食库存。盐渍化问题对干旱、半干旱地区人口的社会和经济影响严重<sup>[2]</sup>。及时检测土壤盐分, 监测和评估土壤盐分胁迫的严重程度, 在局部和区域尺度上就显得非常重要<sup>[3]</sup>。

测量土壤盐分的传统方法是收集现场的土壤样品并在实验室分析, 以确定其溶质浓度或电导率。然而, 由于需要密集采样才能充分表征该区域的空间变异性, 既耗时又昂贵<sup>[4]</sup>。遥感(remote sensing,

RS)技术通过快速、及时、相对廉价和可重复性的数据, 对盐渍化及时监测和反演有巨大优势。地理信息系统(geographic information system, GIS)提供了在规模、时间、来源和结构方面集成不同性质数据的平台优势。通过 RS 和 GIS 配合适当的地面工作确定某一特定地区最适当的反演指标, 能够准确高效地提取盐渍信息, 目前已经成为国内外学者进行土壤盐渍化定量检测与分析的有效手段<sup>[5]</sup>。

目前已有许多国内外学者应用波段光谱组合和地表反照率等特征参量建立特征空间, 对土壤盐渍化开展定量研究, 直接解译盐渍化土壤光谱与依据植被特征间接反演相结合, 将盐渍化信息量反映至最大<sup>[6]</sup>。研究主要集中于 3 种盐渍区: 滨海盐渍区、极端干旱荒漠盐渍区和半干旱绿洲农田盐渍区。Thiam 等<sup>[7]</sup>在塞内加尔的萨卢姆河三角洲滨海区通过电导率结合高程、离河距离、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、盐分

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2022-03-18

基金项目: 中国地质调查局项目“黄河流域巴彦淖尔地区地表基岩层调查”(编号: DD20211591)和国家自然科学基金项目“典型人为有机质记录反演西藏地区近代湖泊沉积环境演变”(编号: 41872100)共同资助。

第一作者: 张思源(1991-), 男, 工程师, 主要从事自然资源综合调查研究。Email: zhangsy5@qq.com。

通信作者: 袁国礼(1971-), 男, 教授, 主要从事岩石地球化学与环境地球化学研究。Email: yuangl@cugb.edu.cn。

指数(salinity index, SI)和土壤调整植被指数,采用多元回归分析建立了盐渍化模型;潘肖燕等<sup>[8]</sup>和樊彦国等<sup>[9]</sup>针对黄骅滨海盐渍区和黄河口滨海三角洲盐渍区构建 NDVI - SI 特征空间,对滨海盐渍区进行空间分析及生态风险定量评价;哈学萍等<sup>[10]</sup>基于地表反照率(Albedo) - SI 特征空间对处于极端干旱荒漠盐渍区的于田县进行盐渍化的定量研究。针对半干旱绿洲农田盐渍区的研究较多,多集中在新疆各地的绿洲农田。王飞等<sup>[11]</sup>和陈实等<sup>[12]</sup>建立基于 NDVI - SI 特征空间对塔里木南缘于田绿洲和天山北疆绿洲农区土壤盐渍化进行时空变化分析,能够显著区分不同盐渍化程度地类。在此基础上,张添佑等<sup>[13]</sup>通过增加 Albedo 和土壤湿度(wetness index, WI)等反演指标,与 SI 和 NDVI 构建了生态指数对新疆玛纳斯河流域绿洲土壤盐渍化进行监测与评价,在主成分贡献中,植被和盐分特征参量占 85% 以上,其他特征参量占比过小,造成信息冗余。在以往半干旱绿洲区域研究中,对于指数的选择多选用 NDVI 与 SI,引入拟合效果更优的指数特征参量将能达到更优拟合效果和地区适宜性。

黄河上游的内蒙古巴彦淖尔市河套灌区作为我国农业生产中重要的商品粮、油基地,是我国三大特大型灌区之一<sup>[14]</sup>。河套灌区农业生产受限于半干旱区较低的降水量,对灌溉的依赖性强,潜在的土壤次生盐渍化生态环境问题显著。对于河套灌区盐渍化信息提取和定量分析,选取适合盐渍反演指标的研究较少,仅卢晶等<sup>[15]</sup>利用 SI - MSAVI 特征空间对巴彦淖尔市磴口县进行定量监测和相关性分析。巴彦淖尔市乌拉特前旗位于河套平原东部,是河套灌区的最下游,灌区内 90% 以上的高盐高碱农田排水都注入旗内的乌梁素海,次生盐渍化形势严峻。同时由于乌拉特前旗原生盐渍土地发育,盐渍化防治难度大。掌握盐渍土地空间分布和类型程度,综合防治土壤盐渍化已成为其农业发展和土地可持续利用的首要措施<sup>[16]</sup>。本文以乌拉特前旗为研究区,基于 Landsat8 OLI 数据和野外实地采样数据,以引入短波红外波段的增强型归一化植被指数(enhanced normalized difference vegetation index, ENDVI)与半干旱区盐分拟合效果最优的盐分指数 3(salinity index 3, SI3)为特征参量,组成 ENDVI - SI3 特征空间并构建改进型盐渍化监测指数(improved salinization monitoring index, ISMI),在此基础上建立土壤特征变量与盐渍化过程的定量关系,为区域尺度的土壤盐渍化遥感监测和风险评估提供科学的参考依据。

## 1 研究区概况

乌拉特前旗位于内蒙古自治区巴彦淖尔市,河套平原东部(图 1)。地理坐标: N40°28' ~ 41°16', E108°11' ~ 109°54', 总面积为 7 476 km<sup>2</sup>。乌拉特前旗地貌类型多样,旗区内平原、丘陵、山地、沙漠交错,海拔范围为 938 ~ 2 326 m,自南向北乌拉山、白音查干山和查石太山 3 座山脉之间分别发育明安一大余太川和小余太川 2 个带状洼地,黄河在前旗境内自西向东贯穿乌拉山南部的山前洪积扇倾斜平原,即三湖河平原。中国八大淡水湖之一的乌梁素海位居旗区中央,乌梁素海西部为河套平原东缘。

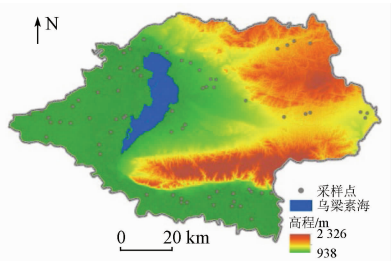


图 1 乌拉特前旗地理位置示意图

Fig. 1 Geographical position of Urad Front Banner

乌拉特前旗气候划分上属温带大陆性气候西部季风区,中亚半干旱荒漠区,冬冷夏热,四季分明。年平均气温为 5.3 ℃,年日照时数为 3 208.1 h,年平均风速为 3.4 m/s。年降水量介于 200 ~ 250 mm 之间,多集中于 6—9 月,年蒸发量为 2 217.3 mm,蒸降比大<sup>[17]</sup>。

在地质构造上,乌拉特前旗所处的河套平原属于湖相沉积的内陆封闭式断陷盆地,盆地基底从东南到西北逐渐降低;上更新统晚期,黄河形成并多次改道,导致盆内湖相沉积层上盖了黄河冲积层,现代地形雏形基本形成。地面排水受限于南高北低的地形和位于南部的黄河位置,地下径流受限于黄河流向导致含水层由西向东粒径逐渐变细,地面和地下排水条件均不利于天然径流排泄。研究区内主要为通气透水的轻质土壤,埋深较浅的地下水在强烈的蒸发作用下,构成了有利于潜水蒸发排泄的基础,这导致大量盐分富集在浅层土壤中,盐渍化问题显著<sup>[18]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 土壤数据采集与化学分析

根据研究区盐渍地类型差异性与空间均匀性等因素,2019 年在野外采集 66 个土壤样品,土壤样品

的采样深度为 0 ~ 20 cm,为减少单个样品误差,在采样点周围 3 ~ 5 处多点采集组合。野外采回的样品在日光下晒干,干燥后的样品用尼龙筛过筛剔除杂质便于化学分析,具体分析项目包括:表层土壤含盐量、容重、pH、有机质、全氮、有效磷、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子、硫酸根、氯离子、碳酸氢根。

2.2 遥感数据处理

2.2.1 数据源与预处理

由于春季影像能反映植被自然生长趋势,受人为灌溉和耕作影响小,且处于返盐季节,土壤表层含盐量高<sup>[19]</sup>,故遥感数据采用 2019 年 4 月 30 日的 2 幅 Landsat8 影像,行列号分别为 128/31 和 128/32,空间分辨率为 30 m,数据均来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。陆地成像仪(operational land imager,OLI)成像过程中会受到传感器内部、太阳辐射和大气影响,所以通过 ENVI5.3 软件对原始影像数据进行辐射定标和 FLAASH 大气校正等预处理来消减误差;将校正后的影像数据进行图像融合、投影变换与裁剪处理,得到研究区影像,便于土壤盐渍化的建模反演。

2.2.2 植被指数

土壤表面的植被发育状况或盐生植物能够反映土壤盐渍化问题。在正常条件下,不健康植被的光合活性较低,导致植被的可见光反射率增加,近红外反射率降低<sup>[20]</sup>。在各种受盐胁迫的植物中,这种模式被广泛发现<sup>[21]</sup>,从而有可能从植被反射率间接反演盐渍化程度。在此基础上,植被指数常作为评价土壤盐分的间接指标。常用于反演盐分的植被指数包括 NDVI、修正土壤调节植被指数(modified soil adjusted vegetation index,MSAVI)和增强植被指数(enhanced vegetation index,EVI)等<sup>[22]</sup>。

但是多数植被指数都仅含有近红外和可见光中的 2 个波段信息,信息量较少。故在此基础上引入短波红外波段进行补充,构建含短波红外信息的拓展植被指数,有利于减少波段间的多重共线性,提高土壤盐渍化建模的精确度<sup>[23]</sup>。其中 ENDVI 为 NDVI 引入短波红外 2 波段得出,其数值大小随表层含盐量增加而减少,在植被类型复杂和稀疏程度不一的地区都有较好的反演效果,因此本文选择 ENDVI 作为反演土壤盐渍化的一个指标,其计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \tag{1}$$

$$ENDVI = \frac{NIR - R + SWIR_2}{NIR + R + SWIR_2}, \tag{2}$$

式中 NIR, R 和 SWIR<sub>2</sub> 分别为遥感影像中的近红外、红光和短波红外 2 波段的反射率值。

2.2.3 盐分指数

盐分指数作为直接反演土壤盐渍化水平的特征指标,在土壤盐渍化监测中能提供较高精度的反演结果。常见的盐分指数包括归一化盐分指数(normalized difference salinity index, NDSI)、盐分指数 1(salinity index 1, SI1)、盐分指数 2(salinity index 2, SI2)、盐分指数 3(salinity index 3, SI3)、盐分指数(salinity index, S2)、盐分指数(salinity index, SI - T)等<sup>[24]</sup>。

Khan 等<sup>[25]</sup>利用 IRS - 1B 卫星的 LISS - II 传感器提出了 NDSI 和 SI,用于评估巴基斯坦的盐渍化土地退化;Bannari 等<sup>[26]</sup>从 EO - 1 ALI 光谱波段提出了 3 种不同的盐分指标 SI1, SI2 和 SI3,用于区分摩洛哥的轻度和中度盐渍土壤,其中 SI3 具有最高的相关性;Allbed 等<sup>[24]</sup>发现在植被密度较低和裸地较多的地区, NDSI 和 SI - T 与土壤盐分的相关性最高。随后王爽等<sup>[27]</sup>和张俊华等<sup>[28]</sup>在此基础上对国内半干旱绿洲地区如宁夏银北、新疆渭干河一库车河三角洲等地的盐分光谱特征进行研究分析,光谱反演模型中 SI3 为土壤盐分反演的最佳指数, SI3 与对各项盐分指标尤其是 Cl<sup>-</sup> 和 K<sup>+</sup> 均呈极显著相关性。基于相关性最强的原则,选取 SI3 作为构建特征空间的变量之一,其计算公式为:

$$SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}, \tag{3}$$

式中 G 为遥感影像中绿光波段反射率值。

2.3 ENDVI - SI3 特征空间构建

在 ENVI5.3 平台下通过 Band Math 工具运算获得 ENDVI 与 SI3 数据,为消除变量数据的量级差异,需对研究区内 ENDVI 与 SI3 进行统计分析得出最值,然后进行标准化处理,公式为:

$$ENDVI = \frac{ENDVI' - ENDVI_{min}}{ENDVI_{max} - ENDVI_{min}} \times 100\%, \tag{4}$$

$$SI3 = \frac{SI3' - SI3_{min}}{SI3_{max} - SI3_{min}} \times 100\%, \tag{5}$$

式中: ENDVI<sub>max</sub> 和 ENDVI<sub>min</sub> 分别为 ENDVI' 的最大值和最小值; SI3<sub>max</sub> 和 SI3<sub>min</sub> 分别为 SI3' 的最大值和最小值。

标准化处理后,修正异常值,利用标准化后的 ENDVI 和 SI3 数据构建二维散点图(图 2),横坐标为 ENDVI,代表地表植被覆盖度的变化,纵坐标为 SI3,代表土壤表层含盐量的变化。由散点图和前人研究<sup>[29]</sup>可得,ENDVI 与 SI3 大致呈负相关,即当土壤表层含盐量逐渐增加时,地表植被受盐分胁迫,其

生长受到影响,植被覆盖度降低。

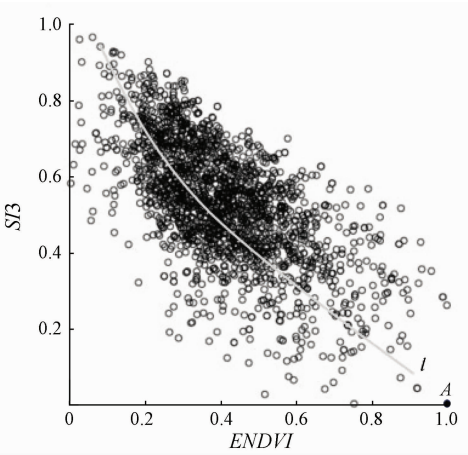


图 2 ENDVI - SI3 二维散点图

Fig.2 ENDVI - SI3 two - dimensional scatter plot

2.4 盐渍化监测模型的构建

根据 Verstraete 等<sup>[30]</sup>的研究结果,垂直于特征轨迹曲线 *l* 的直线能够将不同程度的盐渍化土壤区分开,图 2 中任一点到点 *A*(1,0) 的距离可以表示土壤表层含盐量情况,点 *A* 为 *ENDVI* 为 1, *SI3* 为 0 的理想点,特征空间内的点距离点 *A* 越远,土壤盐渍化程度越高。基于此建立特征空间土壤盐渍化监测模型 *ISMI* 为:

$$ISMI = \sqrt{(ENDVI - 1)^2 + SI3^2} \text{。} \quad (6)$$

3 模型应用及验证

3.1 ISMI 精度验证

利用 ArcGIS 软件的 Extract Values to Points 功能,计算 66 个采样点对应的 *ISMI*,与实测表层土壤含盐量作相关性分析。结果显示,*ISMI* 与实测含盐量相关系数达到了 0.82,并且通过 0.01(双侧)水平的显著性检验。与此同时将各项指数分别提取并与含盐量做相关性分析(表 1),发现 *ISMI* 与含盐量的相关系数不仅高于 *ENDVI* 和 *SI3* 与含盐量的相关系数,也高于任意一项单独指数与含盐量的相关系数,即 *ISMI* 在反演盐分的精确度上明显优越于单项指数。在单项指数的比较中,*ENDVI* 显著优于其他植被指数和增强型植被指数,相较于未引入短波红外的 *NDVI* 反演精度也有明显提升;在各项盐分指数中,*SI* 和 *SI3* 等指数与含盐量的相关系数均超过了 0.7,反演结果较优,*SI3* 反演结果在盐分指数中最优。从相关分析结果可以看出,*ENDVI* 与 *SI3* 这 2 个特征参量的优越性高于其他指数,同时 *ISMI* 对于土壤盐渍化的反演精度相较于单独的 *NDVI*,*ENDVI* 和 *SI3* 大幅提升,说明 *ISMI* 能够较好地反映研究区土壤盐渍化现状,能够利用 *ISMI* 对研究区的盐渍土壤进行快速定量监测。

表 1 指数相关性分析结果

Tab.1 Results of index correlation analysis

指数	全称	公式 <sup>①</sup>	相关系数
NDVI	归一化植被指数	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	-0.66
ENDVI	增强型归一化植被指数	$ENDVI = \frac{NIR - R + SWIR_2}{NIR + R + SWIR_2}$	-0.70
EVI	增强植被指数	$EVI = 2.5 \frac{NIR - R}{NIR + 6R - 7.5B + 1}$	-0.54
EEVI	扩展型增强植被指数	$EEVI = 2.5 \frac{NIR - R + SWIR_2}{NIR + 6R - 7.5B + 1}$	-0.46
MSAVI	修正土壤调节植被指数	$MSAVI = \frac{1}{2} [(2NIR - 1) - \sqrt{2(NIR + 1) - 8(NIR - R)}]$	-0.67
SI	盐分指数	$SI = \sqrt{BR}$	0.72
ESI	增强型盐分指数	$ESI = \frac{\sqrt{BR} + SWIR_1}{SWIR_1}$	0.73
SI3	盐分指数 3	$SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}$	0.75
ESI3	增强型盐分指数 3	$ESI3 = \frac{\sqrt{(G^2 + R^2 + SWIR)^2}}{SWIR_1}$	0.64
S2	盐分指数	$S2 = \frac{B - R}{B + R}$	0.62
ES2	增强型盐分指数	$ES2 = \frac{B - R + SWIR_2}{B + R + SWIR_2}$	-0.61
SI - T	盐分指数	$SI - T = \frac{R}{NIR} \times 100$	0.68
ESI - T	增强型盐分指数	$ESI - T = \frac{R}{NIR + SWIR_2}$	0.73
NDSI	归一化盐分指数	$NDSI = \frac{R - NIR}{R + NIR}$	0.43
ENDSI	增强型归一化盐分指数	$ENDSI = \frac{R - NIR}{R + NIR + SWIR_2}$	0.61

①式中 *B* 和 *SWIR*<sub>1</sub> 分别为遥感影像中蓝光和短波红外 1 波段的反射率值。

为了避免水体与山体对于盐渍土壤提取的干扰,以中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心的 中国 1: 100 万比例尺地貌类型空间分布数据与土地利用数据为原始数据,将其平滑并修正提取出水体、山体和沙丘数据,通过掩模去除后,进一步对平原区不同程度的盐渍化土壤进行统计分析,根据《中国盐渍土》中半干旱、干旱区的盐化分级<sup>[31]</sup>将盐渍化程度分为 5 级(表 2)。

表 2 基于 ISMI 的盐渍土壤分级

Tab.2 Classification of saline soil based on ISMI

盐渍化程度	土壤含盐量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	ISMI	植被生长状况	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
非盐渍土	<1	<0.20	正常	907.44	18.89
弱度盐渍土	[1,2)	[0.20,0.27)	轻微	2 591.16	53.93
中度盐渍土	[2,4)	[0.27,0.41)	受限	968.72	20.16
强度盐渍土	[4,6)	[0.41,0.56)	不良	174.42	3.63
盐土	≥6	≥0.56	困难	163.20	3.40

根据不同程度盐渍土对应的 *ISMI* 进行重分类,得到乌拉特前旗土壤盐渍化空间分布情况(图 3),



研究区内盐渍土分布以乌梁素海为界,呈西高东低,不同程度的盐渍土分布广泛,各个乡镇的盐渍化程度有较大差异。

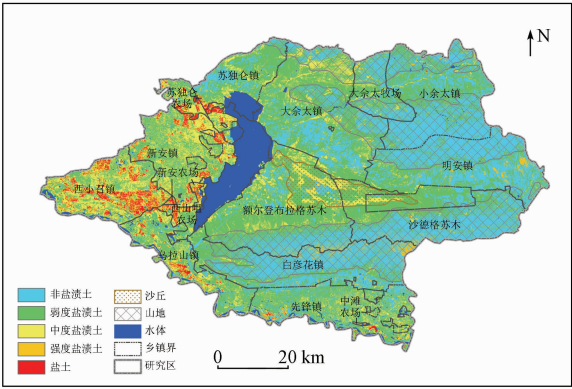


图3 基于 ISMI 的乌拉特前旗盐渍土壤空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of saline soil in Urad Front Banner based on ISMI

除含有大面积水体的乌梁素海渔场外,弱中度盐渍土在各乡镇均有大面积分布,两者占比在 40% ~ 65% 左右。综合分析表明,研究区内土壤盐渍化程度高,ISMI 均值为 0.25。将水体和山体掩模后的平原地区 ISMI 均值为 0.26,逼近中度盐渍化的水平,需要重视盐渍化现状问题的乡镇为西小召镇、新安农场、西山咀农场和苏独仑农场。

3.2 盐渍化风险评估模型

3.2.1 盐渍化风险评估因子处理

利用 SPSS 软件对土壤分析项目做相关性分析,计算 Pearson 相关系数并进行显著性检验。筛选出与 ISMI 存在显著相关 ( $P < 0.05$ ) 的含盐量、有机质、有效磷、钙离子、镁离子、钠离子、硫酸根和氯离子 8 个变量指标,作为盐渍化风险评估因子。

灰色关联分析法为通过比较关联度大小得出待识别对象对研究对象影响程度的数据分析方法,能够衡量数据间的同步变化程度<sup>[32]</sup>。将 ISMI 作为灰色关联分析法的母序列,将 8 个变量指标作为子序列,利用 MATLAB 程序分别计算出子序列的各项与母序列参数的灰色关联系数最后得出灰色关联度,将其标准化后得到评价因子对应的权重(表 3)。利用 ArcGIS 软件的 Interpolation 功能对 8 个评估因子选择 Kriging 插值法进行空间插值,Kriging 插值法广泛应用于土壤科学中不规则分布样点的空间插值<sup>[33]</sup>。同时将 8 个因子插值得到的评估中间层栅格,运用自然断点法将其重分类为 10 级,通过 ArcGIS 软件的 Raster Calculator 功能将 8 个评估中间层的重分类栅格计算加权得到研究区土壤盐渍化风险评估值(salinization risk assessment value, SRAV),公式为:

$$SRAV = 1 - \sum_{j=1}^m w_j \gamma(x_{i0}, x_{ij}) \quad (7)$$

式中:  $\gamma(x_{i0}, x_{ij})$  为点  $i$  在第  $j$  个评估因子上相较于与指标变量  $x_{i0}$  的灰色关联度;  $w_j$  为第  $j$  个评估因子的权重系数;  $m$  为评估因子的个数,本文为 8 个。

表3 盐渍化风险评估因子相关性筛选及赋权  
Tab.3 Correlation screening and weighting of salinization risk assessment factors

变量	相关系数 $r$	显著水平 $P$	样本数	灰色关联度 $\gamma$	权重 $w$
镁离子/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.836	<0.001	66	0.909	0.126
含盐量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.820	<0.001	66	0.917	0.127
氯离子/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.772	<0.001	66	0.897	0.124
钠离子/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.752	<0.001	66	0.884	0.123
硫酸根/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.635	<0.001	66	0.833	0.115
钙离子/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.524	<0.001	66	0.949	0.132
有机质/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	-0.327	0.007	66	0.924	0.128
有效磷/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.289	0.019	66	0.900	0.125
钾离子/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.228	0.065	66	0.949	—
pH	0.212	0.087	66	0.958	—
全氮/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	-0.203	0.103	66	0.927	—
容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	-0.196	0.115	66	0.952	—
碳酸氢根/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.061	0.629	66	0.939	—

3.2.2 盐渍化风险评估模型精度评价

将土壤盐渍化风险值 SRAV 与 ISMI 通过 MATLAB 软件进行函数拟合,得出拟合程度最高的模型为 Polynomial 多项式逼近的 quadratic polynomial 二次多项式,Robust 选择最小绝对残差(least absolute residua, LAR)模型,  $x$  为 SRAV,  $y$  为 ISMI,得其函数关系如图 4 所示。

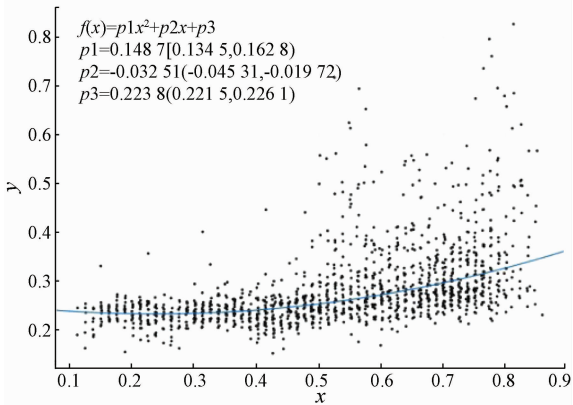


图4 SRAV 与 ISMI 的函数关系

Fig.4 Functional relationship between SRAV and ISMI

函数关系式为:

$$f(x) = p1x^2 + p2x + p3 \quad (8)$$

结果显示,确定系数  $R^2$  达到了 0.62,均方根误差为 0.06,误差平方和为 301.80,从拟合结果来看,基于二者存在较强相关性,拟合效果总体较好,表明基于 ISMI 构建后续盐渍化风险模型有较高精

度,但在 SRAV 高值区拟合效果较差,因为 SRAV 高值时,高值影响因子较多,高盐渍化风险成因复杂,后续研究可以继续通过引入更多元类型的盐渍化风险评估因子来校正 SRAV,达到较好的高值拟合效果。

3.2.3 盐渍化风险空间分布与评估分级

盐渍化风险评估值空间分布具有明显的空间差异性(图5)。对 SRAV 进行统计分析可得,SRAV 范围为 0.11~0.86,平均值为 0.35,总体盐渍化风险较大,以乌梁素海为界呈西高东低的状态。

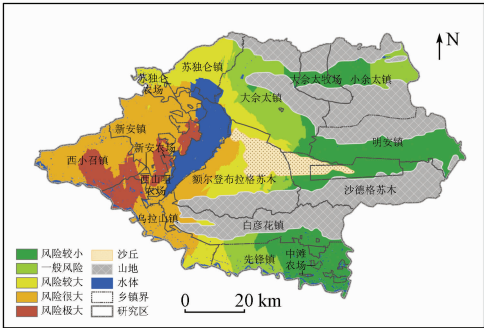


图5 乌拉特前旗土壤盐渍化风险评估空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of soil salinization risk assessment in Urad Front Banner

参考相关研究分等定级方法<sup>[32,34]</sup>及研究区实际情况,除去山体、水体和沙丘后,可将研究区土壤盐渍化风险评估值分为5级(表4)。由风险分级表明,研究区内风险较大及以上的区域占比总和已达 54.40%;而一般风险以下的区域占比仅为 45.60%。风险很大区域占比最大,比例为 29.43%,总面积达到 1 420.06 km<sup>2</sup>;风险较大区域面积为 803.66 km<sup>2</sup>,占比 16.66%。综合来看,基于 ISMI 的盐渍化风险评估模型能够有效评估盐渍化生态问题的风险,能实现低成本高精度的定期盐渍化风险评估,为农业生产和生态保护提供背景资料。

表4 乌拉特前旗土壤盐渍化风险评估分级  
Tab.4 Grading for risk assessment of soil salinization in Urad Front Banner

风险等级	风险程度	风险值	面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%
1	风险极大	≥0.75	401.17	8.31
2	风险很大	[0.5,0.75)	1 420.06	29.43
3	风险较大	[0.3,0.5)	803.66	16.66
4	一般风险	[0.2,0.3)	796.60	16.51
5	风险较小	<0.2	1 403.39	29.09

4 结论与讨论

1)由乌拉特前旗改进型盐渍化监测模型可得,

ISMI 与实测含盐量呈显著相关,相关系数达 0.82,在 0.01(双侧)水平上通过显著性检验,高于 ENDVI 与 SI3 的相关系数(-0.70 和 0.75),同时也高于其他指数的相关系数。与之前研究中 ENDVI 与含盐量的相关系数也高于 NDVI 的相关系数(-0.66),半干旱区中 SI3 在盐度指数里反演效果最好的结论吻合。相较于 NDVI,ENDVI 和 SI3 等单项指数,ISMI 的反演精度显著提升。

2)ISMI 显示研究区盐渍化程度较高,平均值为 0.25。平原地区的 ISMI 平均值达到 0.26,接近中度盐渍化水平。盐土与强度盐渍土 ISMI 在[0.41,0.56)和≥0.56 的范围的总面积达到了 337.62 km<sup>2</sup>,占平原总面积的 7.03%,严重影响农业生产,需积极采取排水、冲洗、改良等脱盐农业措施,控制用水,实行保墒,井、渠双排,井、沟双排,防止土壤次生盐渍化引发的一系列生态退化及农业减产等问题。

3)盐渍化风险评估因子权重大小排序为:钙离子>有机质>含盐量>镁离子>有效磷>氯离子>钠离子>硫酸根,盐渍化风险评估因子插值赋权计算得到盐渍化风险评估值,其值处于 0.11~0.86 之间,平均值为 0.35,分级后研究区内风险较大及以上的区域占比总和已达 54.40%,总体盐渍化风险较大,以乌梁素海为界呈西高东低的状态,原因是乌梁素海西部土地主要利用类型只有水浇地,且位于河套灌区,灌溉采用矿化度较高的黄河水淹灌且土壤粉粒含量高,水分入渗速度慢,盐分常年滞留。

参考文献(References):

[1] 朱庭芸.灌区土壤盐渍化防治[M].北京:农业出版社,1992:32-37.  
Zhu T Y. Soils - salinity control in irrigation area[M]. Beijing: Agricultural Press,1992:32-37.

[2] Kovda A. Loss of productive land due to salinization[J]. Ambio, 1983,12(2):1-4.

[3] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008(5):837-845.  
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica,2008(5):837-845.

[4] Allbed A, Kumar L. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: A review[J]. Advances in Remote Sensing,2013,2(4):373-385.

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

[6] 赵剑桥.土壤盐渍化的遥感监测方法及应用[J].农村经济与科技,2018,29(7):41-42.  
Zhao J Q. Remote sensing monitoring method of soil salinization and its application[J]. Rural Economy and Science - Technology,

- 2018, 29(7): 41–42.
- [7] Thiam S, Villamor G B, Faye L C, et al. Monitoring land use and soil salinity changes in coastal landscape: A case study from Senegal[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(5): 259–260.
- [8] 潘肖燕, 崔江慧, 杨江燕, 等. 基于 SDI 校正指数的滨海平原盐渍化生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5): 709–718.
- Pan X Y, Cui J H, Yang J Y, et al. Ecological risk assessment of salinization in coastal plain based on SDI correction index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 709–718.
- [9] 樊彦国, 张维康, 刘敬一. 基于植被指数-盐分指数特征空间的黄河三角洲盐渍化遥感监测研究[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(5): 137–141.
- Fan Y G, Zhang W K, Liu J Y. Remote sensing monitoring model of soil salinization in the Yellow River delta zone based on vegetation index-salt index feature space[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(5): 137–141.
- [10] 哈学萍, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于 SI-Albedo 特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 698–703.
- Ha X P, Ding J L, Tashpolat T, et al. SI-Albedo space-based remote sensing synthesis index models for monitoring of soil salinization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 698–703.
- [11] 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, 8.
- Wang F, Ding J L, Wu M C. Remote sensing monitoring models of soil salinization based in NDVI-SI feature space[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 168–173, 8.
- [12] 陈实, 徐斌, 金云翔, 等. 北疆农区土壤盐渍化遥感监测及其时空特征分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(12): 1607–1615.
- Chen S, Xu B, Jin Y X, et al. Remote sensing monitoring and spatial-temporal characteristics analysis of soil salinization in agricultural area of northern Xinjiang[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1607–1615.
- [13] 张添佑, 王玲, 王辉, 等. 玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境遥感监测研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3009–3018.
- Zhang T Y, Wang L, Wang H, et al. Assessment of soil salinization ecological environment change in the Manas River basin using remote sensing technology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3009–3018.
- [14] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 1–17.
- Shi H B, Yang S Q, Li R P, et al. Soil water and salt movement and soilsalinization control in Hetao irrigation district: Current state and future prospect[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 1–17.
- [15] 卢晶, 张绪教, 叶培盛, 等. 基于 SI-MSAVI 特征空间的河套灌区盐碱化遥感监测研究[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 169–175. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020.01.23.
- Lu J, Zhang X J, Ye P S, et al. Remote sensing monitoring of salinization in Hetao irrigation district based on SI-MSAVI feature space[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(1): 169–175. doi: 10.6046/gtzyyg. 2020.01.23.
- [16] 孙国军, 孙涛. 乌拉特前旗现代绿洲农业发展对策研究[J]. *地域研究与开发*, 2011, 30(6): 136–139.
- Sun G J, Sun T. Study on modern oasis agricultural influencing factors and its countermeasures in Wulate County[J]. *Areal Research and Development*, 2011, 30(6): 136–139.
- [17] 孙国军. 基于 BP 人工神经网络的内蒙古乌拉特前旗生态环境脆弱性评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2009.
- Sun G J. Evaluation of eco-environment fragility with BP artificial neural networks in Wulate County, Inner Mongolia, China[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2009.
- [18] 王学全, 高前兆, 卢琦. 内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J]. *干旱区资源与环境*, 2005(6): 120–125.
- Wang X Q, Gao Q Z, Lu Q. Effective use of water resources and salinity and waterlogging control in the Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005(6): 120–125.
- [19] 李超, 文天晟, 张凤荣, 等. 半干旱沙区土类/亚类的遥感调查制图方法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 189–196.
- Li C, Wen T S, Zhang F R, et al. Method for remote sensing survey and mapping of soil types and subtypes in semi-arid sand region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 189–196.
- [20] Weiss E, Marsh S E, Pfriman E S. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(6): 1005–1028.
- [21] Tilley D R, Ahmed M, Son J H, et al. Hyperspectral reflectance response of freshwater macrophytes to salinity in a brackish subtropical marsh[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3): 780–789.
- [22] 孙媛. 基于土壤和植被光谱信息的宁夏银北地区土壤盐碱化程度反演研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- Sun Y. Inversion of the degree of soil salinization based on spectra of soil and vegetation in northern Yinchuan Plain of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [23] 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): 107–112.
- 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): 107–112.
- [24] 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: 1–8.
- [25] Khan N M, Rastokuev 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: 96–109.
- [26] Bannari A, Guedon A M, El-Harti A, et al. Characterization of slightly and moderately saline and sodic soils in irrigated agricultural land using simulated data of advanced land imaging (EO-1) sensor[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*,

2009,39: 2795 – 2811.

[27] 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 S,Ding J L,Wang L,et al. Remote sensing monitoring of soil salinization based on surface spectral modeling[J]. Arid Land Geography,2016,39(1):190 – 198.

[28] 张俊华,孙 媛,贾科利,等. 不同盐结皮光谱特征及其盐渍化信息预测研究[J]. 农业机械学报,2018,49(12):325 – 333,370.

Zhang J H,Sun Y,Jia K L,et al. Spectral characteristics and salinization information prediction of different soil salt crusts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):325 – 333,370.

[29] Al – Khakani E T,Yousif S R. An assessment of soil salinity and vegetation cover changes for a part of An – Najaf governorate using remote sensing data[J]. Journal of Physics: Conference Series,2019,1234: 012023.

[30] Verstraete M M,Pinty B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1996,4(5):1254 – 1265.

[31] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993:333 – 335.

Wang Z Q,Zhu S Q,Yu R P,et al. Salt – affected soils in China [M]. Beijing:Science Press,1993:333 – 335.

[32] 李自珍,李维德,石洪华,等. 生态风险灰色评价模型及其在绿洲盐渍化农田生态系统中的应用[J]. 中国沙漠,2002(6):95 – 100.

Li Z Z,Li W D,Shi H H,et al. Gray model for ecological risk assessment and its application in salinization oasis agroecosystem [J]. Journal of Desert Research,2002(6):95 – 100.

[33] 李仙岳,崔佳琪,史海滨,等. 基于指示 Kriging 的土壤盐渍化风险与地下水环境分析[J]. 农业机械学报,2021,52(8):297 – 306.

Li X Y,Cui J Q,Shi H B,et al. Analysis of soil salinization risk and groundwater environment based on indicator Kriging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):297 – 306.

[34] 李冬顺,杨劲松,姚荣江. 生态风险分析用于苏北滩涂土壤盐渍化风险评估研究[J]. 土壤学报,2010,47(5):857 – 864.

Li D S,Yang J S,Yao R J. Application of ecological risk analysis to soil salinization risk assessment of coastal tidal flat in north Jiangsu Province[J]. Acta Pedologica Sinica,2010,47(5):857 – 864.

Salinization inversion model based on ENDVI – SI3 characteristic space and risk assessment

ZHANG Siyuan<sup>1,2</sup>, YUE Chu<sup>1,2</sup>, YUAN Guoli<sup>2</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>, PANG Wenqiang<sup>3</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Bayannur City Modern Agriculture and Animal Husbandry Development Center, Bayannur 015000, China)

**Abstract:** Soil salinization is the most severe environmental risk in arid and semi – arid areas. The remote sensing method that constructs a characteristic space based on characteristic parameters provides an effective and economical tool and technique for the timely monitoring and inversion of soil salinization. Presently, the normalized difference vegetation index (NDVI) and the salinity index (SI) are mainly selected as the characteristic parameters for salinization inversion, while refined analysis and regional applicability are lacking. This study investigated Urad Front Banner in Inner Mongolia based on the Landsat8 OLI data. The ENDVI – SI3 characteristic space was constructed using the enhanced normalized difference vegetation index (ENDVI) that introduced the shortwave infrared band and the salinity index 3 (SI3) with the best inversion effect for semi – arid areas. Accordingly, the improved salinization monitoring index (ISMI) model was built. The results show that the correlation coefficient between ISMI and soil salt content was up to 0.82, and the inversion precision of the ISMI model was higher than that of NDVI, EDNVI, and SI3 (– 0.66, – 0.70, and 0.75, respectively). Based on the ISMI, this study achieved the quantitative inversion analysis and risk assessment of soil salinization in Urad Front Banner. This study provides an approach for selecting the optimal characteristic parameters of the characteristic space in the salinization inversion of semi – arid areas.

**Keywords:** salinization; remote sensing model; ENDVI; SI3; feature space; risk assessment

(责任编辑: 张 仙)