

doi: 10.6046/zrzygg.2021427

引用格式: 代云豪,管瑶,冯春涌,等. 基于光谱指数建模的阿拉尔垦区土壤盐渍化信息提取与分析[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):205–212. (Dai Y H, Guan Y, Feng C Y, et al. Extraction and analysis of soil salinization information of Alar reclamation area based on spectral index modeling[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1):205–212.)

基于光谱指数建模的阿拉尔垦区 土壤盐渍化信息提取与分析

代云豪¹, 管 瑶¹, 冯春涌², 蒋 敏¹, 贺兴宏¹

(1. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100088)

摘要: 为了探究反演新疆维吾尔自治区阿拉尔垦区土壤盐渍化最优遥感盐分监测指数模型, 以 Landsat8 OLI 遥感影像和野外实测数据为基础, 通过盐分指数(salinity index, SI)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、修改型土壤调节植被指数(modified soil – adjusted vegetation index, MSAVI)、地表反照率(Albedo)构建遥感盐分监测指数模型(salinization detection index, SDI), 提取阿拉尔垦区土壤盐渍化信息并验证模型精度, 对比分析得出最优遥感盐分监测指数模型。结果表明: 4类遥感盐分监测指数模型中 SDI1(SI – NDVI), SDI2(SI – MSAVI), SDI3(SI – Albedo) 和 SDI4(Albedo – MSAVI) 总体分类精度为 83.45%, 69.78%, 53.23% 和 71.94%; SDI1 模型最适合反演阿拉尔垦区土壤盐渍化程度, SDI2 和 SDI4 模型对阿拉尔垦区土壤盐渍化监测有一定参考意义; 利用 SDI1 模型反演阿拉尔垦区土壤盐渍化分布, 垦区以非盐渍土和轻度盐渍土为主, 重度盐渍土和盐土主要分布在垦区的东北和东南地区。由 SI 和 NDVI 构建 SDI1 对阿拉尔垦区土壤盐渍化信息提取精度较高, 可作为反演垦区土壤盐渍化的遥感盐分监测指数模型, 可为垦区土壤盐渍化治理和防治提供有效的技术参考。

关键词: 光谱指数; 阿拉尔垦区; 土壤盐渍化; 遥感盐分监测指数模型

中图法分类号: TP 79; S 153 文献标志码: A 文章编号: 2097-035X(2023)01-0205-08

0 引言

土壤盐渍化是干旱、半干旱区农业的突出问题, 严重阻碍了地区的农业发展, 是致使土地退化和土地荒漠化的主要成因^[1-2]。南疆位于干旱区, 土壤盐渍化问题严重, 节水灌溉技术的应用有效降低了农田用水量, 但土壤次生盐渍化现象却日益增加。有效提取土壤盐渍化信息是干旱区土地可持续发展和农业科学管理的关键^[3-4]。

传统的土壤盐渍化监测需土壤采集和实验室测定, 耗时费力。遥感技术的发展弥补了传统手段的缺陷, 遥感技术凭借其独特优势被广泛应用于土壤盐渍化监测^[5-6]。最便捷的土壤盐渍化反演多是采用相关的遥感光谱指数或构建遥感盐分监测指数模型对其评价, 常用光谱指数有盐分指数(salinity in-

dex, SI)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、修改型土壤调节植被指数(modified soil – adjusted vegetation index, MSAVI)、地表反照率(Albedo)、土壤亮度指数(brightness Index, BI)等^[7-12]。新疆干旱区土壤盐渍化研究的热点区域主要集中在流域^[13-15]和垦区^[16-17]等地, 研究方法为光谱指数构建遥感盐分监测指数(salinization detection index, SDI)模型, NDVI 和 SI 构建遥感盐分监测指数模型能有效的反演其塔里木南缘于田绿洲土壤盐渍化^[18]; MSAVI 和 SI 构建的遥感盐分监测指数模型可作为玛纳斯河流域灌区土壤盐渍化信息提取指标^[19]; Albedo 与 MSAVI 构建遥感盐分监测指数模型能够较好地反映渭库绿洲土壤盐渍化情况^[20]。因此, 通过构建遥感盐分监测指数模型能较好反演干旱区土壤盐渍化信息。

以阿拉尔垦区 Landsat8 OLI 遥感影像数据和野

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-04-04

基金项目: 农业部作物需水与调控重点实验室开放课题“南疆极端干旱区不同土质点源滴灌入渗及水盐运移规律研究”(编号: FIDI2019-03-0202)、兵团重大项目子课题“新疆空中水资源利用研究与示范”(编号: 2017AA002)、兵团重点产业项目“南疆生态农田水资源多维调控模式研究”(编号: 2021DB017)、中国农业大学塔里木大学联合基金“南疆极端干旱区残余盐土滴灌水盐运移原理及水分高效利用研究”(编号: 2019TC157)和塔里木大学研究生科研创新项目“基于 3S 技术对塔里木灌区的土壤盐渍化时空动态预测分析研究”(编号: TDGRI202042)共同资助。

第一作者: 代云豪(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 3S 技术在农业工程中的应用。Email: 917473073@qq.com。

通信作者: 贺兴宏(1981-), 男, 教授, 主要研究方向为水资源高效利用。Email: hexinghong0611@163.com。

外实测数据为基础,基于 NDVI, Albedo, MSAVI 和 SI 构建 4 类 SDI1 (SI - NDVI), SDI2 (SI - MSAVI), SDI3 (SI - Albedo) 和 SDI4 (Albedo - MSAVI) 遥感盐分监测指数模型,探究反演阿拉尔垦区土壤盐渍化最优遥感盐分监测指数模型,为垦区精准治理土壤盐渍化提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区是新疆维吾尔自治区直辖县级市 ($E80^{\circ}30' \sim 81^{\circ}58'$, $N40^{\circ}22' \sim 40^{\circ}57'$), 属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候, 生态环境十分脆弱, 傍依塔里木河, 总面积 $4\ 197.58\ km^2$ ^[21] (图 1)。垦区内有胜利、上游、多浪水库, 年均降水量 $40.1 \sim 82.5\ mm$, 年均气温 $10 \sim 12\ ^{\circ}\text{C}$, 年均蒸发量 $1\ 876.6 \sim 2\ 558.9\ mm$, 其蒸发量远大于降水量^[22]。垦区土壤的有机质在表层集聚现象明显, 土壤氮、磷含量偏低, 土壤钾素含量较高^[23]。野生木本植物以胡杨、红柳为主, 主要经济农作物包括棉花、水稻、红枣、核桃等。

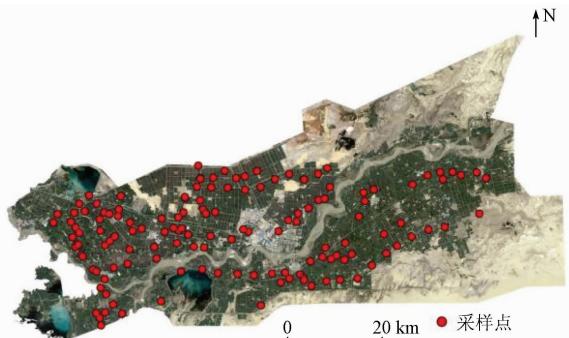


图 1 阿拉尔垦区概况及采样点分布

Fig. 1 General situation and sampling point distribution of Alar reclamation area

1.2 数据来源

遥感影像数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>), 选取云量小于 10% 的 2021 年 9 月 8 日 Landsat8 OLI 数据, 影像空间分辨率为 $30\ m$, 行列号为 146/32。室外土壤样品采集时间为 2021 年 3 月、2021 年 8 月底—9 月初, 采样点随机均匀分布在阿拉尔垦区。样点根据三角形采样法^[24]对每个样点采集 3 份 $0 \sim 10\ cm$ 表层土壤样品, 并利用 GPS 测定坐标(图 1), 室外采样点共 139 个, 样品数量共计 417 个。

1.3 数据处理

遥感影像数据经过几何纠正、辐射定标、大气校正等预处理后裁剪得到研究区影像图, 为避免水体和无植被覆盖的沙地对提取精度造成干扰, 故利用归一化土壤湿度指数(normalized difference moisture index, NDMI) 和 SWIR 波段对研究区水体和沙地掩模去除^[25]。

将土壤样品按标准规定在烘箱 $105\ ^{\circ}\text{C}$ 烘干 8 h, 将烘干后同一样点的 3 份样品磨碎均匀混合为 1 份, 剔除土壤中的植物根系、石子等后过 $2\ mm$ 筛, 取蒸馏水 $100\ ml$, 按水土比例 5:1 配置溶液, 充分均匀搅动后静止放置 $5 \sim 6\ h$ 过滤, 用上海科佑电导仪 DDS - 11A 测定土壤电导率。

1.4 光谱指数及模型

植被长势受土壤盐渍化影响, 土壤盐渍化程度越重, 植被长势将受到抑制, 通过植被指数可作为间接反映土壤盐渍化程度的依据^[25]。地表反射率受植被覆盖和土壤水分影响, 随着土壤盐渍化加重, 植被长势受到抑制, 地表反照率也会发生变化^[20]。研究发现蓝色波段、红色波段、短红外波对土壤盐渍化信息有较好响应^[26-27]。光谱指数公式及遥感盐分监测指数模型公式见表 1。

表 1 遥感光谱指数及模型

Tab. 1 Remote sensing spectral index and model

光谱指数	公式 ^①	参考文献
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	[18]
Albedo	$Albedo = 0.356B + 0.130R + 0.373NIR + 0.085SWIR_1 + 0.072SWIR_2 - 0.0018$	[20]
MSAVI	$MSAVI = \frac{(2NIR + 1) - \sqrt{(2NIR - 1)^2 - 8(NIR - R)}}{2}$	[20]
SI	$SI = \sqrt{B \cdot R}$	[18]
SDI1 模型(SI - NDVI)	$SDI1 = \sqrt{(NDVI - 1)^2 + SI^2}$	[18]
SDI2 模型(SI - MSAVI)	$SDI2 = \sqrt{(MSAVI - 1)^2 + SI^2}$	[19]
SDI3 模型(SI - Albedo)	$SDI3 = \sqrt{Albedo^2 + SI^2}$	[28]
SDI4 模型(Albedo - MSAVI)	$SDI4 = \sqrt{(1 - Albedo)^2 + MSAVI^2}$	[20][28]

①式中: $B, R, NIR, SWIR_1, SWIR_2$ 分别为 Landsat8 OLI 影像中的蓝波段、红波段、近红外波段、短红外波段 1、短红外波段 2 的反射率。

1.5 归一化处理

由于每个指数的量纲不同,为了消除不同变量的数据之间单位和数量级差异性带来的影响,在其建立遥感盐分监测指数模型之前对各指数归一化处理^[24],公式为:

$$X_i = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (1)$$

式中: X_i 为各指数归一化后的值; X 为各光谱指数; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为各指数最大值和最小值。

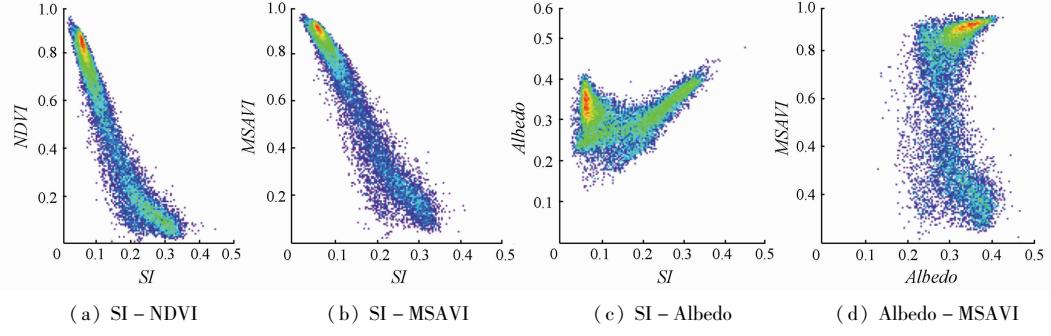


图 2 二维散点图

Fig. 2 Two dimensional scatter diagram

用ENVI5.3 中新版2D 散点图插件计算各光谱指数构建的二维散点拟合度(见表2)。

表 2 二维散点图模型拟合性

Tab. 2 Goodness of fit of two-dimensional scatter diagram model

二维散点图	光谱指数拟合公式	拟合度
SI - NDVI	线性: $Y=0.9426 - 3.063X$	$R^2 = 0.8677$
	二次: $Y=1.1651 - 6.570X + 9.8597X^2$	$R^2 = 0.9296$
	几何: $Y= -2.918X^{0.2594} + 2.2015$	$R^2 = 0.9153$
	双曲: $Y=1.0/(0.4252 + 14.226X)$	$R^2 = 0.8724$
	对数: $Y= -0.6702 - 1.565\lg X - 0.2977\lg(X)^2$	$R^2 = 0.9165$
SI - MSAVI	线性: $Y=1.0535 - 3.087X$	$R^2 = 0.8886$
	二次: $Y=1.1989 - 5.384X + 6.4754X^2$	$R^2 = 0.9143$
	几何: —	—
	双曲: $Y=1.0/(0.5506 + 9.5700X)$	$R^2 = 0.8590$
	对数: $Y= -0.8343 - 2.241\lg X - 0.6776\lg X^2$	$R^2 = 0.9097$
SI - Albedo	线性: $Y=0.2828 + 0.1859X$	$R^2 = 0.0975$
	二次: $Y=0.3632 - 1.085X + 3.5835X^2$	$R^2 = 0.3361$
	几何: —	—
	双曲: $Y=1.0/(3.5561 - 2.169X)$	$R^2 = 0.1153$
	对数: —	—
Albedo - MSAVI	线性: $Y=0.6776 - 0.2379X$	$R^2 = 0.0019$
	二次: $Y= -0.8005 + 9.8448X - 16.65X^2$	$R^2 = 0.0505$
	几何: $Y=0.2545X^{-0.0645} + 0.3284$	$R^2 = 0.0002$
	双曲: $Y=1.0/(1.5001 + 0.5041X)$	$R^2 = 0.0015$
	对数: $Y= -1.022 - 6.013\lg X - 5.416\lg X^2$	$R^2 = 0.0333$

由图2、表2可知,归一化植被指数、地表反照率、修改型土壤调节植被指数、盐分指数构建的SI - NDVI, SI - MSAVI, SI - Albedo 及 MSAVI - Albedo

2 结果与分析

2.1 二维散点图

为直观了解各光谱指数之间存在的相关性,以归一化后的SI作为坐标横轴,归一化后的NDVI, MSAVI及Albedo分别作为坐标纵轴建立SI - NDVI, SI - MSAVI 和 SI - Albedo 二维散点图;以归一化Albedo作为坐标横轴,归一化MSAVI作为坐标纵轴建立Albedo - MSAVI 二维散点图(图2)。利

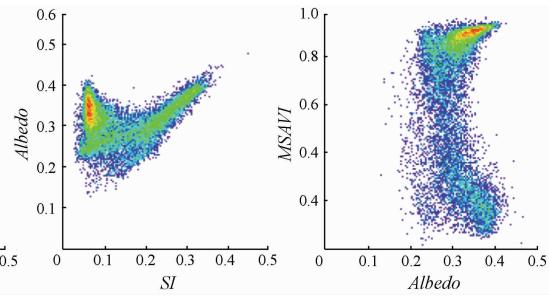


图 2 二维散点图

Fig. 2 Two dimensional scatter diagram

二维散点拟合度较好的分别为0.9296, 0.9143, 0.3361及0.0505,初步表明盐分指数和植被指数更适合构建遥感盐分监测指数模型,具体4类遥感盐分监测指数模型对阿拉尔垦区土壤盐渍化反演则需要进一步精度验证。

2.2 盐分反演

利用表1公式分别计算遥感盐分监测指数模型SDI1, SDI2, SDI3 和 SDI4,并采用Jenks自然间断点分级法将上述模型值域区间划分为5个盐渍土等级^[28](表3),得到4种模型监测的土壤盐渍化分布(图3)。

表 3 阿拉尔垦区土壤盐渍化分类

Tab. 3 Classification of soil salinization in Alar reclamation area

模型	非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	重度盐渍土	盐土
SDI1	< 0.27	[0.27, 0.46]	[0.46, 0.67]	[0.67, 0.85]	≥ 0.85
SDI2	< 0.21	[0.27, 0.40]	[0.46, 0.62]	[0.62, 0.80]	≥ 0.80
SDI3	< 0.13	[0.13, 0.18]	[0.18, 0.24]	[0.24, 0.30]	≥ 0.30
SDI4	> 1.09	[0.97, 1.09]	[0.85, 0.97]	[0.74, 0.85]	≤ 0.74

由图3可知,遥感盐分监测指数模型SDI1和SDI2反演阿拉尔垦区土壤盐分以轻度盐渍土、非盐渍土为主,中度盐渍土、重度盐渍土和盐土主要分布在垦区的东北、东南地区。遥感盐分监测指数模型SDI3反演阿拉尔垦区土壤盐分则以轻度盐渍土和中度盐渍土为主,重度盐渍土少量分布在垦区的东北、东南地区,盐土在垦区几乎无分布。遥感盐分监

测指数模型 SDI4 反演阿拉尔垦区土壤盐分以非盐渍土为主, 中度盐渍土和重度盐渍土主要分布在垦区的东北、东南地区, 较 SDI2 模型差异在于重度盐渍土和盐土的分布较少 4 类遥感盐分监测指数模型

在一定程度上都有所差异, 因此对模型进行精度验证, 选取反演精度较高的遥感盐分监测指数模型是十分必要的。

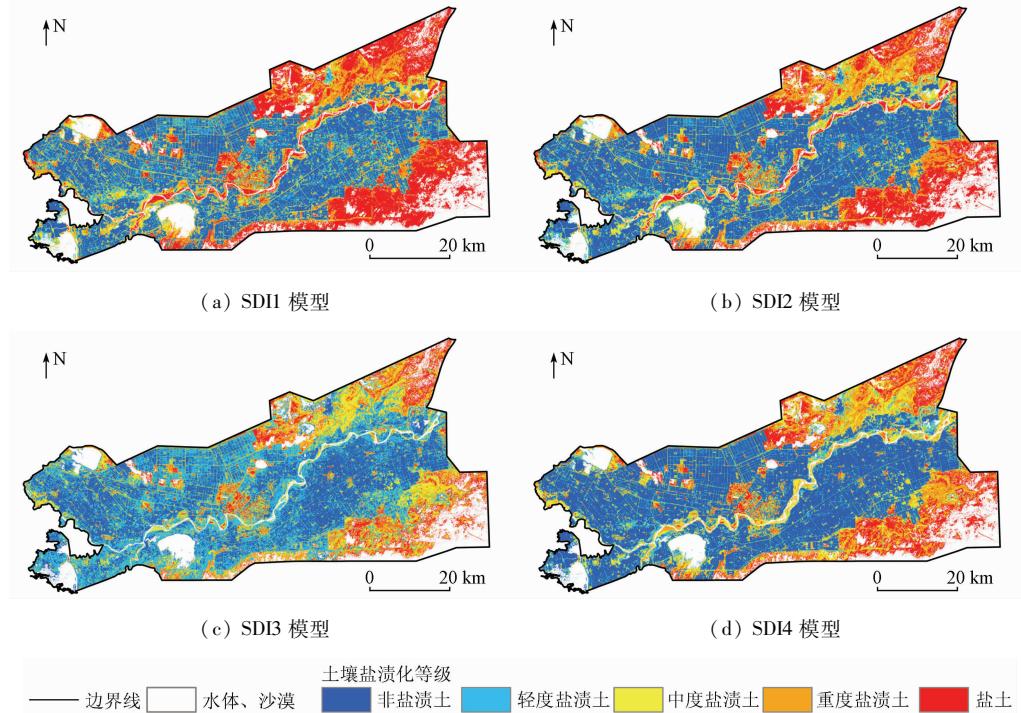


图 3 不同模型下的阿拉尔垦区土壤盐渍化等级分布

Fig. 3 Distribution of soil salinization grade in Alar Reclamation Area under different models

2.3 精度评价

查阅南疆地区遥感盐渍土相关研究, 参考王遵亲等^[29]的干旱区土壤盐渍化分级指标, 按土壤盐渍化等级标准^[30]所对应的土壤电导率值进行盐渍化等级划分^[31]: 非盐渍土含盐量 $< 2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 轻度盐渍土含盐量 $[2, 4) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 中度盐渍土含盐量 $[4, 8) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 重度盐渍土含盐量 $[8, 16) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; 盐土含盐量 $\geq 16 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。按此标准测定土壤采样数据的电导率并进盐渍化分级, 判定遥感盐分监测指数模型 SDI1, SDI2, SDI3 和 SDI4 精度, 结果如表 4、图 4 所示。

表 4 模型样点精度验证

Tab. 4 Accuracy verification of model sample points

模型	样点分类正确	样点分类错误					总体精度/%
		非盐	轻度	中度	重度	盐土	
SDI1	116	10	2	6	3	2	23 83.45
SDI2	97	6	6	16	6	8	42 69.78
SDI3	74	35	3	14	6	7	65 53.23
SDI4	100	3	6	18	6	6	39 71.94

由表 4 可知, 利用遥感盐分监测指数模型反演阿拉尔垦区土壤盐分, SDI1 模型样点分类正确个数较多, SDI3 模型样点分类正确个数较少, SDI1 模型、SDI2 模型、SDI3 模型、SDI4 模型总体精度分别为

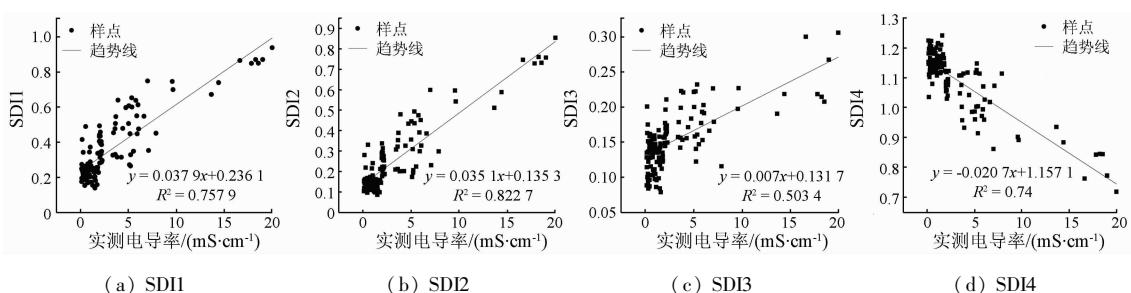


图 4 模型与实测电导率拟合

Fig. 4 Fitting between model and measured conductivity

83.45%, 69.78%, 53.23% 和 71.94%。样点分类错误中, SDI1 模型样点分类错误主要为非盐渍土, SDI2 模型样点分类错误主要为中度盐渍土, SDI3 模型样点分类错误主要为非盐渍土, SDI4 模型样点分类错误主要为中度盐渍土。

由遥感盐分监测指数模型与实测电导率拟合效果可知(图 4), SDI 模型、SDI2 模型、SDI3 模型、SDI4 模型的拟合度分别为 0.7579, 0.8227, 0.5034 和 0.7400, SDI 模型、SDI2 模型、SDI3 模型与实测电导率呈正相关, SDI4 模型与实测电导率呈负相关。

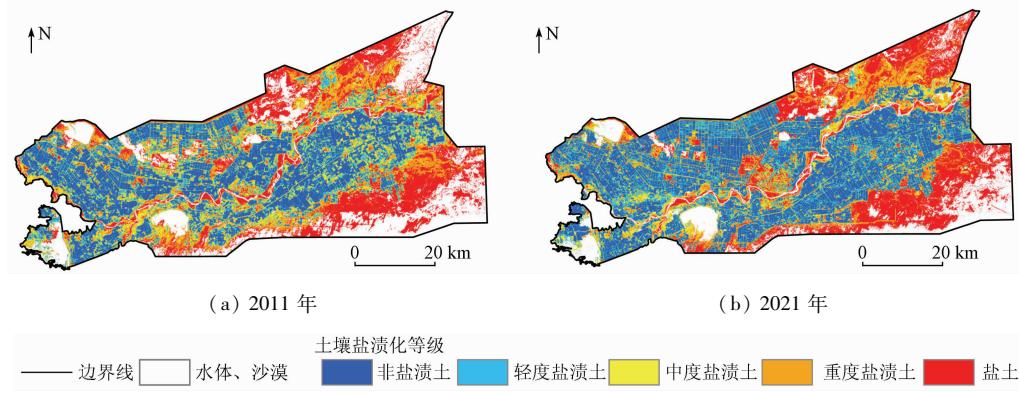


图 5 2011、2021 年阿拉尔垦区土壤盐渍化等级分布

Fig. 5 Distribution of soil salinization grade in Alar reclamation area in 2011 and 2021

表 5 2011 年、2021 年阿拉尔垦区土壤盐渍化面积统计

Tab. 5 Statistics of soil salinization area in Alar

reclamation area in 2011 and 2021 (km²)

年份	非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	重度盐渍土	盐土
2011 年	906.31	524.37	519.46	538.39	787.72
2021 年	1116.39	606.86	410.34	506.88	830.03

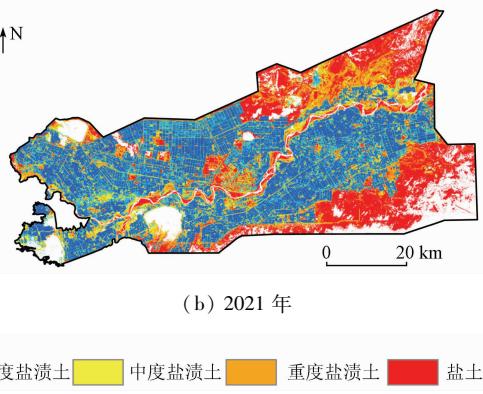
由图 5 分布状况并结合奥维地图分析, 非盐渍土主要分布在垦区农田, 轻度盐渍土呈零散形分布于垦区内, 中度盐渍土、重度盐渍土主要分布在阿拉尔市中心、垦区南部和垦区东北地区, 盐土主要分布在垦区东北和东南地区。

2011—2021 年, 垦区土壤盐渍化面积呈现出非盐渍土、轻度盐渍土面积增加, 中度、重度盐渍土面积下降, 盐土面积增加。其中, 非盐渍土面积增加 210.08 km², 增加的区域主要分布在垦区北部、南部和东部地区, 由中度盐渍土和重度盐渍土转入为主; 轻度盐渍土面积增加 82.49 km², 增加的区域以零散化分布在垦区; 中度盐渍土、重度盐渍土面积分别减少 109.12 km² 和 31.51 km², 减少的区域主要在垦区南部和东部地区; 盐土面积增加 42.31 km², 增加的区域则主要位于垦区东北和东南地区。近 10 a 间, 垦区的北部、南部和东部地区非盐渍土明显增加, 土壤盐渍化程度有所改善。

综上, SI 和 NDVI 光谱指数构建遥感盐分监测指数模型 SDI1 其分类总体精度达 83.45%, 模型与实测电导率拟合 $R^2 = 0.7579$, 综合对比选择 SDI1 模型对阿拉尔垦区土壤盐渍化信息提取较好, 更适合反演垦区土壤盐渍化程度。

2.4 阿拉尔垦区土壤盐渍化时空分布

采用 SDI1 模型对 2011 年、2021 年垦区影像数据进行土壤盐渍化等级划分(图 5), 统计去除水体和沙地面积后的阿拉尔垦区不同程度土壤盐渍化面积(表 5)。



3 讨论

1) 模型选择。常规土壤盐分监测多由野外数据采集结合实验室测定得来, 多光谱遥感数据获取简单、成本低、易操作, 直接通过光谱指数构建遥感盐分监测指数模型, 能快速对其研究区土壤盐分进行测定。选择模型时, 考虑不同研究区所处地理位置的地形和气候条件存在差异性, 不同光谱指数构建的遥感盐分监测指数模型精度结果不一致, 直接选取一种模型反演垦区盐分, 不能确保为最优精度。边玲玲等^[28]对黄河三角洲垦利县土壤盐渍化反演中认为遥感盐分监测指数模型 SDI3(SI-Albedo)效果最佳, 冯娟等^[20]认为 SDI4(Albedo-MSAVI)反演新疆渭库绿洲土壤盐分精度更高, 故选择不同光谱指数构建常用 4 类遥感盐分监测指数模型进行对比分析。

2) 模型精度。对 4 类遥感盐分监测指数模型总体精度进行验证, 盐分指数和归一化植被指数构建的遥感盐分监测指数模型对阿拉尔垦区土壤盐渍化反演效果更好。由总体精度对比可知, 植被指数参与构建的遥感盐分监测指数模型 SDI1, SDI4 和 SDI2 高于无植被指数参与构建的遥感盐分监测指数模型 SDI3, 其原因可能是遥感影像选择为植被覆

盖旺盛时期,此时植被指数能反映出植被长势状况,植被长势受不同盐分含量影响,故而更能间接反映出垦区土壤盐渍化状况。同时,SDI2,SDI4 模型对阿拉尔垦区非盐渍土和轻度盐渍土反演效果较好,对中度盐渍土、重度盐渍土和盐土反演效果较差,说明 SDI2,SDI4 模型对垦区土壤盐渍化监测具有一定参考意义,但适宜性还需进一步验证。总之,不同研究区应根据自身特性合理选择光谱指数构建遥感盐分监测指数模型,以便能精确反演土壤盐分信息。

3) 垦区土壤盐分分布。通过遥感盐分监测指数模型 SDI1 对阿拉尔垦区土壤盐渍化进行反演,反演结果中农田分布状况同吴家林^[27]基于高光谱研究垦区棉田土壤盐渍化结果基本一致。土壤盐渍化分布受自然因素和人为因素影响^[10],土壤水分对土壤盐分影响较大,土壤中的盐分会随着水分的迁移而迁移^[1]。垦区位于新疆南部干旱区,光照强,蒸发量较大,土壤水分蒸发会携带盐分一同上移,农田多在春季或冬季采用漫灌洗盐,采用膜下滴灌控制水量和土壤盐分,极大降低了农田中表层土壤的盐分含量,故垦区农田主要以非盐渍土和轻度盐渍土为主。通过结合奥维地图分析,垦区重度盐渍土和盐土主要是裸地和植被覆盖稀少的沙地,日照时间长、降水量和灌水量低是导致土壤盐分多量汇集在土壤表层形成盐斑的原因之一。

土壤盐渍化反演精度一定程度上受遥感影像数据分辨率影响,本研究选取 Landsat8 卫星数据,空间分辨率 30 m,故分类精度只能是一个近似区域,若进一步提高土壤盐渍化反演精度,可采用高分辨率的遥感影像数据,如国产高分系列、WorldView 系列、GeoEye 系列、IKONOS 系列等。

4 结论

研究利用 Landsat8 OLI 遥感影像,通过盐分指数(SI)、归一化植被指数(NDVI)、地表反照率(Albedo)、修改型土壤调节植被指数(MSAVI)构建遥感盐分监测指数模型 SDI1,SDI2,SDI3 及 SDI4 对阿拉尔垦区土壤盐渍化进行信息提取,结合实测电导率进行精度评价,得出以下结论:

1) 遥感盐分监测指数模型 SDI1,SDI2,SDI3 及 SDI4 与实测电导率的拟合度分别为 0.757 9,0.822 7,0.503 4 和 0.740 0,样点总体分类精度为 83.45%,69.78%,53.23% 和 71.94%,综合比较,阿拉尔垦区土壤盐渍化信息提取的模型精度依次是 SDI1 > SDI2 > SDI4 > SDI3。

2) SDI2 和 SDI4 总体反演精度近 70%,表明在

一定程度上对阿拉尔垦区土壤盐渍化监测有一定的参考意义。

3) 利用遥感盐分监测指数模型 SDI1 对阿拉尔垦区土壤盐渍化信息提取,阿拉尔垦区以非盐渍土和轻度盐渍土为主,非盐渍土分布在垦区西部、北部和东部地区,轻度盐渍土则零散分布于垦区。中度盐渍土、重度盐渍土和盐土主要分布在垦区南部、东北和东南地区。

参考文献(References):

- [1] 麦麦提吐尔逊·艾则孜.绿洲土壤盐渍化及水盐调控[M].北京:北京理工大学出版社,2016.
- [2] Aizezi M. Soil salinization and water salt regulation in oasis [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press,2016.
- [3] 买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,丁建丽,等.干旱区土壤盐渍化遥感监测及评价研究[M].北京:北京理工大学出版社,2018.
- [4] Shatiwu M,Tashenputali N,Ding J L,et al. Remote sensing monitoring and evaluation of soil salinization in arid areas [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press,2018.
- [5] 贾萍萍,尚天浩,张俊华,等.利用多源光谱信息反演宁夏银北地区干湿季土壤含盐量[J].农业工程学报,2020,36(17):125–134.
- [6] Jia P P,Shang T H,Zhang J H,et al. Inversion of soil salinity in dry and wet seasons based on multi – source spectral data in Yinbei area of Ningxia, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(17):125–134.
- [7] 虎胆·吐马尔白,赵永成,马合木江·艾合买提,等.北疆常年膜下滴灌棉田土壤盐分积累特征研究[J].灌溉排水学报,2016,35(1):1–5.
- [8] Tumaerbai H,Zhao Y C,Aihemaiti M,et al. Study on characteristics of cotton field soil salt accumulation under perennialmulched drip irrigation in Northern Xinjiang [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2016,35(1):1–5.
- [9] 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.
- [10] Wu Y K,Liu G M,Shu L T,et al. Accurate evaluation of regional soil salinization using multi – source data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(11):3528–3533.
- [11] Alqasemi A S,Ibrahim M,Al – Quraishi A M F,et al. Detection and modeling of soil salinity variations in arid lands using remote sensing data [J]. Open Geosciences,2021,13(1):443–453.
- [12] Sidike A,Zhao S,Wen Y. Estimating soil salinity in Pingluo County of China using QuickBird data and soil reflectance spectra [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2014,26:156–175.
- [13] Wang F,Chen X,Luo G P,et al. Detecting soil salinity with arid fraction integrated index and salinity index in feature space using Landsat TM imagery [J]. Journal of Arid Land,2013,5(3):340–353.
- [14] 哈学萍,丁建丽,等.基于 SI – Albedo 特征空间的干旱区盐渍化土壤信息提取研究——以克里雅河流域绿洲为例[J].土壤学报,2009,46(3):381–390.

- Ha X P, Ding J L, et al. SI – ALbedo space based extraction of salinization information in arid area [J]. Journal of Soil, 2009, 46 (3) :381 – 390.
- [10] 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 – 112,113,114.
- 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 – 112,113,114.
- [11] 陈实,高超,徐斌,等.新疆石河子农区土壤含盐量定量反演及其空间格局分析[J].地理研究,2014,33(11):2135 – 2144.
- Chen S,Gao G,Xu B,et al. Quantitative inversion of soil salinity and analysis of its spatial pattern in agricultural area in Shihezi of Xinjiang[J]. Geographical Research,2014,33(11):2135 – 2144.
- [12] 丁建丽,姚远,王飞.干旱区土壤盐渍化特征空间建模[J].生态学报,2014,34(16):4620 – 4631.
- Ding J L,Yao Y,Wang F. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(16):4620 – 4631.
- [13] 史晓艳,李维弟,余露,等.玛纳斯河流域农灌区土壤盐渍化遥感定量评价[J].灌溉排水学报,2018,37(11):69 – 75,83.
- Shi X Y,Li W D,Yu L,et al. Remote sensing quantitative evaluation of soil salinization in agricultural irrigation areas of Manas River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(11):69 – 75,83.
- [14] 丁邦新,白云岗,柴仲平,等.塔里木河下游绿洲灌区土壤盐渍化特征及季节性变化规律[J].水土保持通报,2020,40(2):77 – 84,2.
- Ding B X,Bai Y G,Chai Z P,et al. Soil salinization characteristics and its seasonal variation in oasis irrigation district of lower reaches of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(2):77 – 84,2.
- [15] 杨小虎,罗艳琴,杨海昌,等.玛纳斯河流域绿洲农田土壤盐分反演及空间分布特征[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):156 – 161.
- Yang X H ,Luo Y Q,Yang H C,et al. Soil salinity retrieval and spatial distribution of oasis farmland in Manasi river basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2021,35(2):156 – 161.
- [16] 白建铎,彭杰,白子金,等.干旱区棉田表层土壤盐渍化时空变异研究[J].土壤通报,2021,52(3):527 – 534.
- Bai J D,Peng J,Bai Z J,et al. Clarifying spatial – temporal variability of surface soil salinization in arid cotton fields[J]. Chinese Journal of Soil Science,2021,52(3):527 – 534.
- [17] 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]. Science Geographic Science,2015,35(12):1607 – 1615.
- [18] 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.
- [19] 张添佑,王玲,曾攀丽,等.基于MSAVI – SI特征空间的玛纳斯河流域灌区土壤盐渍化研究[J].干旱区研究,2016,33(3):499 – 505.
- Zhang T Y,Wang L,Zeng P L,et al. Soil salinization in the irrigated area of the Manas River Basin based on MSAVI – SI feature space [J]. Arid Zone Research,2016,33 (3) :499 – 505.
- [20] 冯娟,丁建丽,魏雯瑜.基于Albedo – MSAVI特征空间的渭库绿洲土壤盐渍化研究[J].中国农村水利水电,2018(2):147 – 152.
- Feng J,Ding J L,Wei W Y. Remote sensing modeling of soil salinization information in arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2018(2):147 – 152.
- [21] 宋奇,冯春晖,高琪,等.阿拉尔垦区近30年耕地变化及其驱动因子分析[J].国土资源遥感,2021,33(2):202 – 212. doi: 10.6046/gtzyyg.2020183.
- Song Q,Feng C H,Gao Q,et al. Change of cultivated land and its driving factors in Alar Reclamation Area in the past thirty years [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2021,33(2):202 – 212. doi:10.6046/gtzyyg.2020183.
- [22] 新疆生产建设兵团年鉴编辑委员会.兵团年鉴[M].新疆:新疆生产建设兵团年鉴社,2020.
- Editorial Committee of Xinjiang Production and Construction Corps Yearbook. Corps yearbook [M]. Xinjiang: Xinjiang Production and Construction Corps Yearbook Society,2020.
- [23] 莫治新,柳维扬,伍维模.新疆阿拉尔垦区土壤发生特性及系统分类研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):40 – 43,57.
- Mo Z X,Liu W Y,Wu W M. Research on the genetic characteristic and taxonomy of soils in Aral irrigated area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2009,27(6):40 – 43,57.
- [24] 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.
- [25] 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. doi:10.6046/gtzyyg.2020210.
- Wu X,Wang C 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. doi:10.6046/gtzyyg.2020210.
- [26] Wivedi R S,Rao B R M. The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt – affected soils[J]. International Journal of Remote Sensing,1992,13(11):2051 – 2058.
- [27] 吴家林.阿拉尔垦区棉田土壤盐渍化的遥感监测与植棉效益分析[D].阿拉尔:塔里木大学,2021.
- Wu J L. Remote sensing monitoring and cotton plantation benefit analysis of cotton field soil salinization in Alar Reclamation Area [D]. Aral: Tarim University,2021.

- [28] 边玲玲,王卷乐,郭兵,等.基于特征空间的黄河三角洲垦利县土壤盐分遥感提取[J].遥感技术与应用,2020,35(1):211–218.
Bian L L, Wang J L, Guo B, et al. Remote sensing extraction of soil salinity in Yellow River delta Kenli County based on feature space [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35 (1) : 211 – 218.
- [29] 王遵亲,祝寿泉,尤文瑞,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
Wang Z Q, Zhu S Q, You W R, et al. Saline soil in China [M].
- Beijing: Science Press, 1993.
- [30] Staff U S S L. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils [J]. Agriculture Handbook, 1954, 60:83 – 100.
- [31] 李艳菊,丁建丽,米热古力·艾尼瓦尔.渭—库绿洲土壤剖面盐分分布特征及驱动因子分析[J].灌溉排水学报,2019,38(6): 58 – 65.
Li Y J, Ding J L, Ainiwaer M. Soil salt distribution and the factors affect it in Ogan Kucha River Oasis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (6) : 58 – 65.

Extraction and analysis of soil salinization information of Alar reclamation area based on spectral index modeling

DAI Yunhao¹, GUAN Yao¹, FENG Chunyong², JIANG Min¹, HE Xinghong¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

2. Department of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100088, China)

Abstract: This study aims to explore the optimal remote sensing salinization detection index (SDI) model for the inversion of soil salinization in the Alar reclamation area. Based on Landsat8 OLI remote sensing images and field measured data, this study built the remote sensing SDI models using the salinity index (SI), the normalized difference vegetation index (NDVI), the modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), and the surface albedo. Then, using these models, this study extracted the soil salinization information on the Alar reclamation area and verified the model precision. Finally, this study determined the optimal remote sensing – based SDI model through comparative analysis. The results are as follows. The four types of remote sensing – based SDI models SDI1 (SI – NDVI), SDI2 (SI – MSAVI), SDI3 (SI – Albedo), and SDI4 (Albedo – MSAVI) had general classification precision of 83.45%, 69.78%, 53.23%, and 71.94%, respectively. Model SDI1 was the most suitable for the inversion of the degree of soil salinization in the Alar reclamation area. Models SDI2 and SDI4 can be utilized as a reference for soil salinization monitoring of the Alar reclamation area. As revealed by the inversion results of the SDI model, the reclamation area is dominated by non – saline and lightly saline soils, with heavily saline soil and saline soil primarily distributed in the northeast and southeast. Model SDI1 established based on SI and NDVI has high accuracy in extracting the soil salinization information of the Alar reclamation area and can be used as the remote sensing – based SDI model for the inversion of soil salinization in reclamation areas. This study can provide an effective technical reference for the control and prevention of soil salinization.

Keywords: spectral index; Alar reclamation area; soil salinization; remote sensing salinity detection index model

(责任编辑:李瑜)