

# 季节性形变盐渍化评价指数

钱 昆<sup>1</sup>, 刘国祥<sup>1,2</sup>, 向 卫<sup>1</sup>, 陈 坤<sup>1</sup>, 孙 涛<sup>1</sup>, 张 瑞<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都

<sup>2</sup>西南交通大学高速铁路安全空间信息技术联合工程实验室, 四川 成都

收稿日期: 2022年3月21日; 录用日期: 2022年4月21日; 发布日期: 2022年4月27日

## 摘 要

现有的盐渍土遥感监测多依赖多光谱信息的专题处理与指数反演方法, 受限于土壤光谱响应特征的综合性以及“异物同谱”等问题, 客观精准的定量评价仍难以实现。为此, 本文提出了一种新型的季节性形变盐渍化评价指数, 借助高精度的时序形变信息实现对土壤盐渍化程度的评价。实验于甘肃敦煌地区选取了2018年1月至2020年1月共74景Sentinel-1A影像数据, 使用SBAS-DInSAR方法求取时序形变信息以构建季节性形变盐渍化评价指数, 联合现有的定量评价方法(如修正的盐渍化评价指数、盐分指数、归一化植被指数)开展综合的比较分析。研究表明: 季节性形变盐渍化评价指数可以较好的完成对硫酸盐渍土的定量评价; 与传统多光谱方法相比, 季节性形变盐渍化评价指数与土壤盐渍化程度相关系数的绝对值最大( $R = -0.2611$ )且曲线拟合结果明显优于其他方法(其拟合结果与土壤盐渍化程度的决定系数最大为0.3358, 而其他方法最大仅为0.2085), 验证了季节性形变盐渍化评价指数相对于多光谱指数独特的优势。

## 关键词

Sentinel-1A, 时序InSAR, 敦煌机场, 盐渍土, 盐渍化评价指数

# Seasonal Deformation Salinization Index

Kun Qian<sup>1</sup>, Guoxiang Liu<sup>1,2</sup>, Wei Xiang<sup>1</sup>, Kun Chen<sup>1</sup>, Tao Sun<sup>1</sup>, Rui Zhang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 钱昆, 刘国祥, 向卫, 陈坤, 孙涛, 张瑞. 季节性形变盐渍化评价指数[J]. 测绘科学技术, 2022, 10(2): 95-110. DOI: 10.12677/gst.2022.102010

## Abstract

The existing remote sensing monitoring of saline soil mostly relies on the thematic processing and index inversion methods of multispectral information. However, due to the comprehensive characteristics of soil spectral response and the “same spectrum of foreign objects”, it is still difficult to achieve objective and accurate quantitative evaluation. Therefore, a new seasonal deformation salinization evaluation index is proposed in this paper to realize the quantitative evaluation of soil salinization with the help of high-precision time-series deformation information. In this study, 74 Sentinel-1A images were selected from January 2018 to January 2020 in Dunhuang, Gansu Province, and the SBAS-DInSAR method was used to obtain the temporal deformation information to construct the seasonal deformation salinization evaluation index. Combined with existing quantitative evaluation methods (such as modified salinization evaluation index, salinity index and normalized vegetation index), comprehensive comparative analysis was carried out. The results show that the seasonal deformation salinization index can complete the quantitative evaluation of sulfate soil. Compared with the traditional multispectral method, the absolute value of correlation coefficient between seasonal deformation salinization evaluation index and soil salinization degree was the largest ( $R = -0.2611$ ), and the curve fitting result was significantly better than that of other methods (the maximum coefficient of correlation between fitting result and soil salinization degree was 0.3358, while the maximum coefficient of other methods was only 0.2085). The seasonal deformation salinization evaluation index has a unique advantage over the multispectral index.

## Keywords

Sentinel-1A, Time-Series InSAR, Dunhuang Airport, Saline Soil, Salinization Evaluation Index

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

传统土壤盐渍化监测方法主要是通过野外采样分析得到的，费时费力且仅适用于小范围监测，同时因为地域限制使结果不具有普遍性[1]。遥感具有大范围同步观测、快速高效、宏观综合的特点，并且随着遥感技术的发展，其已被广泛应用于盐渍化的监测评价中[2]。目前，对盐渍土的定量评价聚焦于多光谱信息的指数模型反演与信息提取，多基于光谱响应特征开展研究，但由于土壤光谱响应特征的综合性以及“异物同谱”等现象的存在，其准确程度难以保证[3]。为此，本文尝试利用盐胀形变信息对盐渍土进行定量评价的技术思路开展研究，提出新的盐渍化评价指数，借助盐渍土区域的时序形变信息开展盐渍化程度评价。

在广域盐胀形变数据采集方面，现有的地面实测手段存在观测点位稀疏、监测周期长等局限。合成孔径雷达差分干涉(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR)技术基于覆盖同一地区的两幅或多幅 SAR 影像的相位信息，可实现厘米级 - 毫米级精度的地表形变测量，是传统技术手段的有效补充[4]。

针对目前多光谱影像定量提取盐渍土的局限性，本文基于 Sentinel-1A 影像长时序数据集，充分利用短基线子集干涉(Small Baseline Subset, SBAS)技术具备的数据处理效率高、形变结果精确等优势，实现对

硫酸盐渍土时空演化特征的高精度提取与分析, 最终完成构建季节性形变盐渍化评价指数。在此基础上, 综合多种光谱指数方法进行深入探讨, 评价各指数与土壤盐渍化程度之间的相关性, 对各指数与土壤盐渍化程度的曲线拟合结果进行分析, 旨在探寻能否依据季节性形变信息可靠且精确的对土壤盐渍化程度进行评价, 从而为建立更为精确的土壤盐渍化程度反演模型奠定基础, 为盐渍土的治理、利用提供数据支持。最终得出结论: 在敦煌地区, 基于盐渍土季节性形变特性建立的季节性形变盐渍化评价指数(SDSI)与土壤盐渍化程度的相关性和曲线拟合结果, 都优秀于其他光学指数对土壤盐渍化程度的评价, 是一种优秀的盐渍化评价指数。

## 2. 季节性形变盐渍化评价指数

硫酸盐渍土地区多于降雨量大的 2~8 月发生盐胀而导致地表抬升, 1 月及 9~12 月则会发生溶蚀导致地表下沉[5], 这种性质被称作硫酸盐渍土地区的季节性形变特性。经查阅资料, 一定范围内, 硫酸盐渍土含盐量与盐胀量成正比关系, 含盐量越大区域, 盐胀量越大[6]。本文以此为理论依据构思出以季节性形变为特征量的盐渍土定量评价方法: 以每年盐胀月与非盐胀月的日均形变差为衡量标准, 差值越大则表示土壤盐渍化程度越高, 差值越小则表示土壤盐渍化程度越低。

根据上述理论方法, 需以 1 月、9~12 月的形变信息求出非盐胀月形变趋势  $a$ , 以 2~8 月的形变信息求出盐胀月形变趋势  $b$ , 所得  $b$  与  $a$  的差值即为一个能够初步表征土壤盐渍化程度的值。

假设研究区共有像元  $n$  个, 1 月、9~12 月影像共包含  $m$  天, 2~8 月共包含  $k$  天,  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  表示第  $i$  个像元第  $j$  天的形变量。

对第  $i$  个像元在非盐胀月的形变量进行加权再除以天数  $m$ , 得到第  $i$  个像元的 1 月、9~12 月的日平均形变速率  $a_i$ :

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{m} \quad (1)$$

对第  $i$  个像元在盐胀月的形变量进行加权再除以天数  $k$ , 得到第  $i$  个像元的 2~8 月的日平均形变速率  $b_i$ :

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^k b_{ij}}{m} \quad (2)$$

在土壤盐渍化程度较大的像元处  $a_i$  与  $b_i$  差值应较大, 在土壤盐渍化程度较小的像元处  $a_i$  与  $b_i$  差值应较小, 可对  $a_i$  与  $b_i$  作差:

$$s_i = b_i - a_i \quad (3)$$

以上  $s_i$  值即为本文基于硫酸盐渍土的季节性形变特征所构建的季节性形变盐渍化评价指数(Seasonal deformation salinization index, SDSI)。

## 3. 研究区域与数据

### 3.1. 研究区域概况

甘肃是中国盐渍土分布最为广泛的省份之一, 盐碱地面积 1414 万  $\text{hm}^2$ 。敦煌地区位于甘肃省酒泉市、河西走廊最西端, 地势南高北低。该地区地处内陆、远离海洋, 属于典型的干旱气候区。区域内植被覆盖率低, 土壤大部分呈现出沙化和盐渍化特质, 生态环境非常脆弱, 是极为典型的干旱区土地盐渍化区

域[7]。敦煌市的年平均气温为  $9.6^{\circ}\text{C}$ ，最低和最高气温相差  $60^{\circ}\text{C}$  以上；降水主要集中于夏季，年平均降水量为  $38.4\text{ mm}$ ，蒸发量达到  $2581.7\text{ mm}$  [2]。

敦煌机场自始建以来，逐年出现道面鼓胀变形破坏，跑道破坏发生的时间是每年的 2~4 月及 7~8 月，并且有雨后集中破坏的特点。经开挖破坏面发现鼓胀地段的道面基层和土基都存在盐分聚集现象，多为芒硝晶体，实验测定该地属硫酸盐渍土[5]。盐渍土是指易溶盐含量超过 0.3% 的土壤，其特殊的工程性质(如盐胀性、溶陷性、腐蚀性等)影响建筑物地基的稳定性[8] [9]。其中硫酸盐渍土的盐胀特性对敦煌机场地基的影响最为显著，由于硫酸钠结晶时吸收大量水而造成体积膨胀，使土粒间的孔隙增大，土粒松散，形成盐结壳剥离的蓬松层，从而导致机场道面破坏，严重影响机场正常运营的安全[10]。

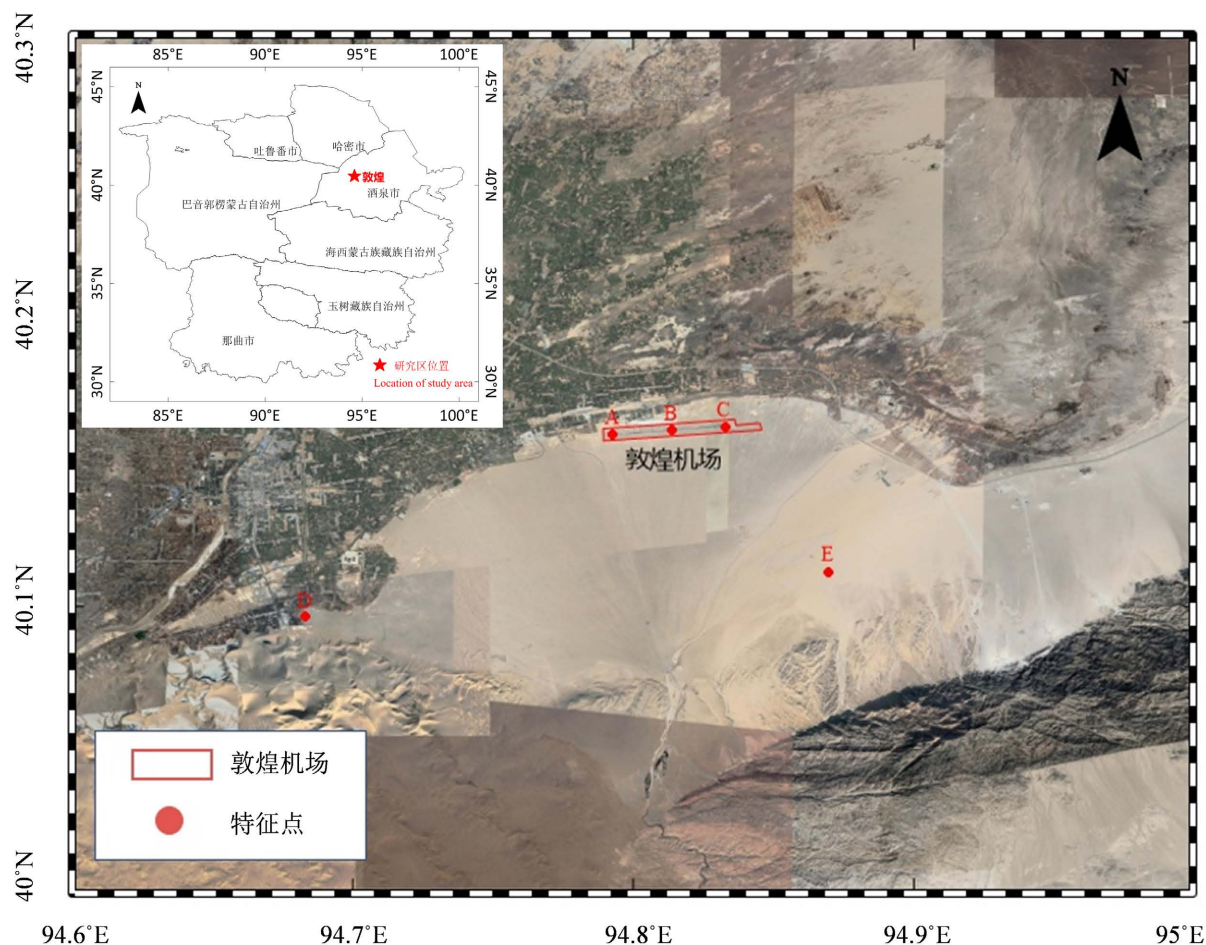


Figure 1. Schematic diagram of Dunhuang Airport and surrounding area

图 1. 敦煌机场及周边地区示意图

### 3.2. 卫星 SAR 数据

针对研究区的空间分布及其地形地质特征，为了对其进行大范围的形变监测以更好的描述该区域的形变规律特征，本实验选用 2018 年 1 月至 2019 年 12 月共 57 景 Sentinel-1A 影像数据，使用 SBAS-DInSAR 时序形变解算方法，设定垂直基线阈值为 200 米，时间基线阈值为 49 天，分别获得 200 个差分干涉组合，并分别得到了各干涉组合的差分结果。影像数据详细信息见表 1。

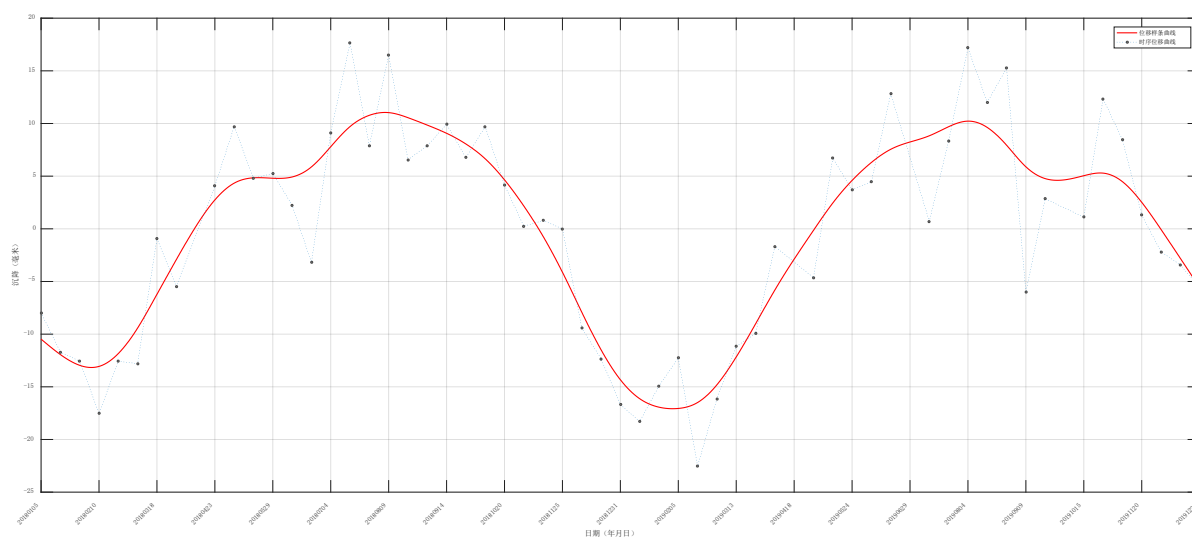
**Table 1.** SAR satellite image data information**表 1.** SAR 卫星影像数据信息

卫星名称	成像时间	轨道号	极化方式	入射角/ $^{\circ}$	分辨率/m
Sentinel-1A	2018.1~2019.12	99	VV	36.3	$2 \times 14$

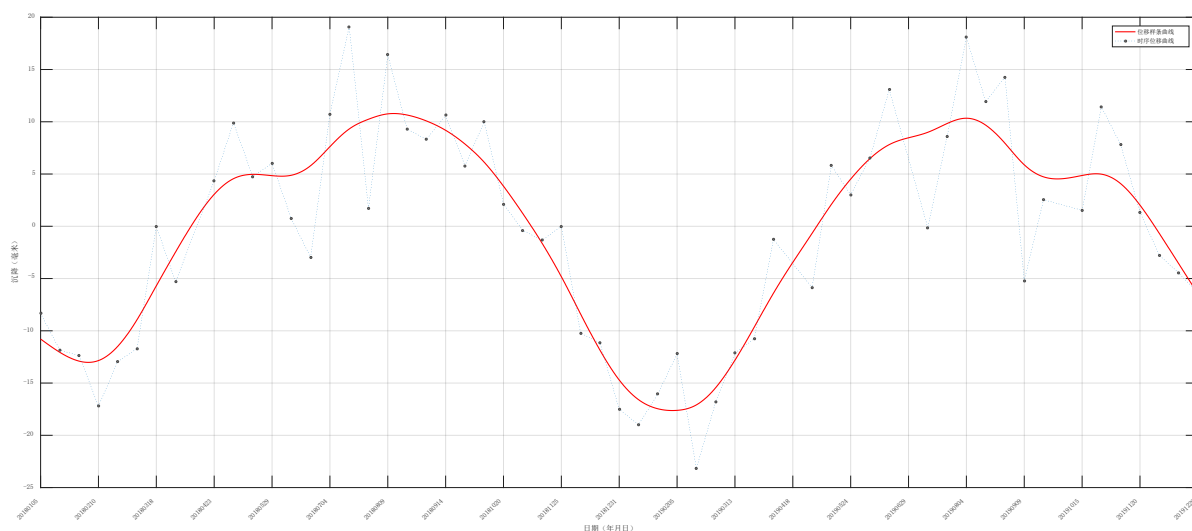
## 4. 结果与分析

### 4.1. 硫酸盐渍土地区季节性形变特征验证

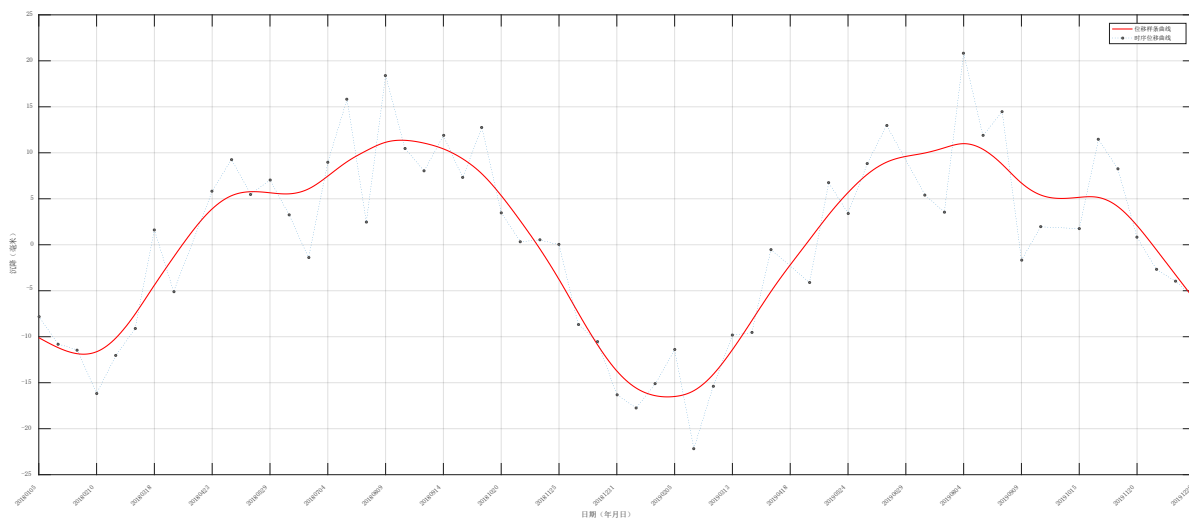
为了探究硫酸盐渍土地区盐渍土的盐胀特性与该地季节性形变特征的相关性,在文献所述受影响较大的敦煌机场选取特征点 A、B、C (见图 1)并分析其时序形变过程,得到特征点的时序形变图如图 2 所示。



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Time series deformation diagram of Dunhuang Airport

图 2. 敦煌机场选点时序形变图

从敦煌机场选取的特征点时序形变图中发现，基于 SBAS-DInSAR 技术得到的敦煌机场特征点的时序形变特征与文献实测数据所示盐渍土盐胀规律高度吻合：文献记录每年的 2~4 月及 7~8 月盐胀破坏跑道，形变监测每年 2~4 月及 7~8 月地表发生抬升。这表明敦煌机场硫酸盐渍土的盐胀作用影响了地表了形变，两者高度相关。

将实测敦煌机场及周边地区土壤盐渍化分区资料[11]重新绘制后如图 3 示：

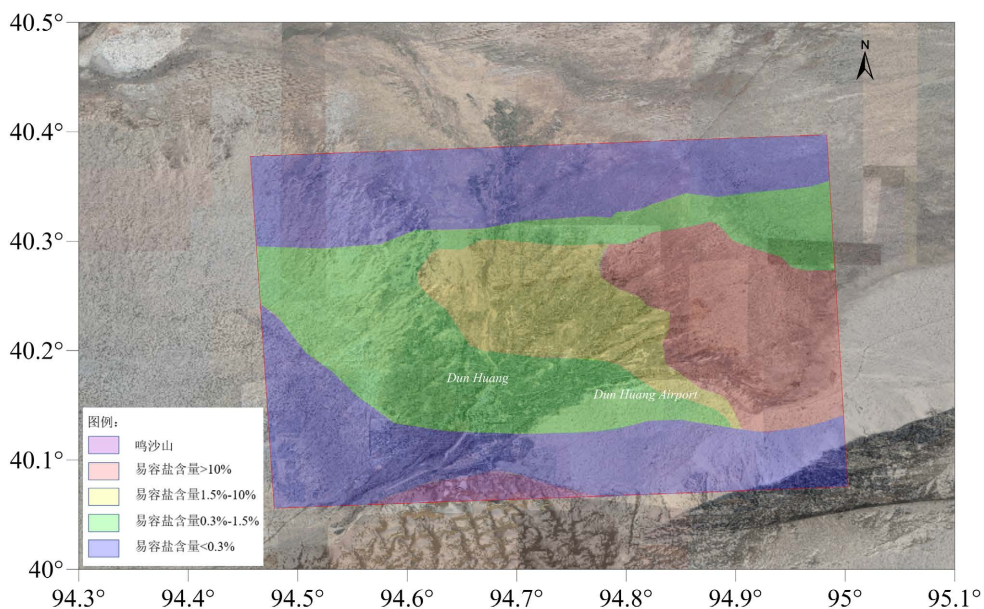


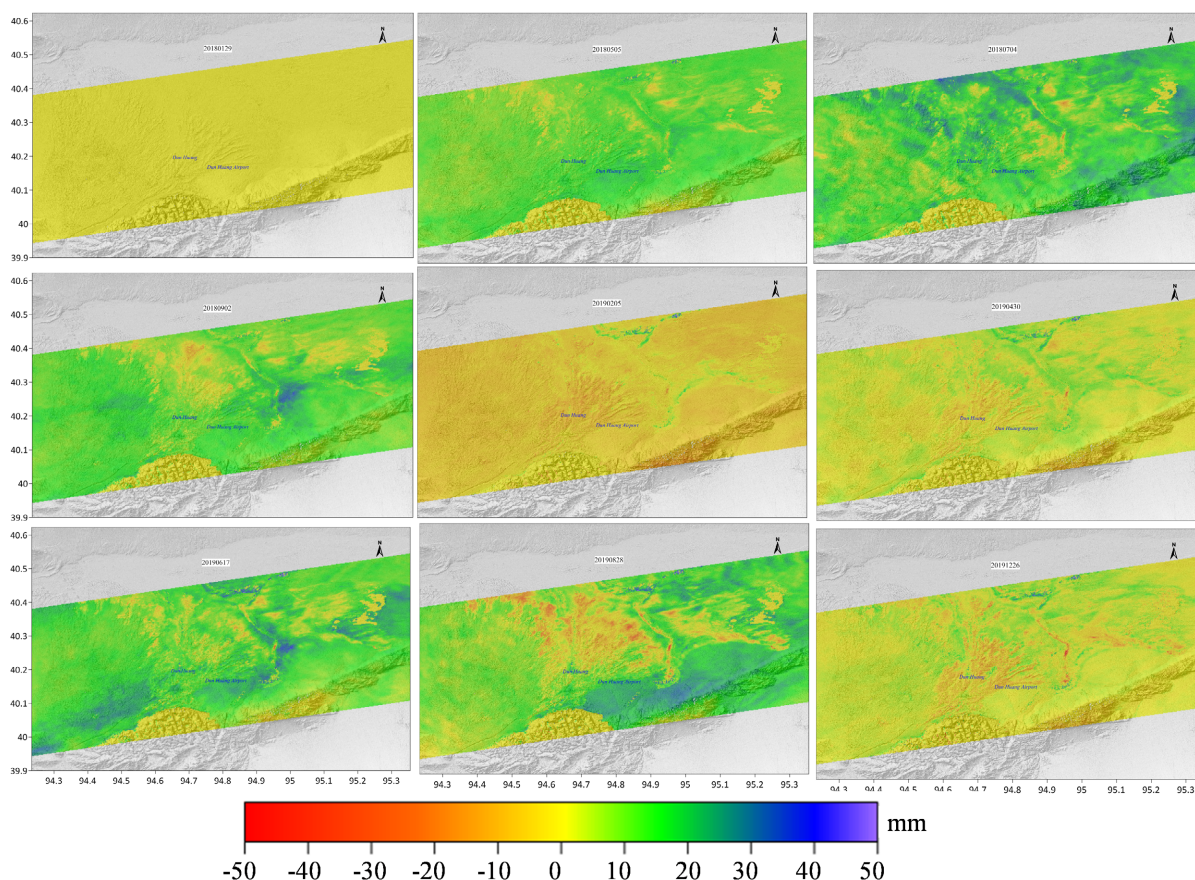
Figure 3. Zoning map of soil salinization degree of the site (salt content in the figure refers to so-luble sulfate and soluble chloride salts)

图 3. 场区土壤盐渍化程度分区图(图中易容盐含量指较易溶的硫酸盐和极易溶解的氯盐)

在易溶盐含量小于 0.3% 的非盐渍土地区随机选点 D、F (见图 1)，通过观察 D、F 特征点时序形变图

发现其并无类敦煌机场特征点的时序形变规律，进一步验证了是敦煌机场硫酸盐渍土的盐胀作用影响了地表形变。

为了更为严谨直观的验证季节性形变盐渍化评价指数的科学性，每三月一景绘出敦煌机场附近区域累计形变图(见图 4)，联合场区土壤盐渍化程度分区图(见图 3)，佐证了盐渍土季节性形变规律与土壤盐渍化程度的强相关性。



**Figure 4.** Accumulative settlement map near Dunhuang Airport

**图 4.** 敦煌机场附近区域累计沉降图

#### 4.2. 比较验证指数选取

为了探究本文提出的季节性形变盐渍化评价指数的可行性，借助目前主流大范围遥感探测盐渍土盐渍化程度的方法与之比较。

目前借助遥感光谱探测土壤含盐量的方式主要有两种[12]。第一种是在植被覆盖度较低(植被覆盖度小于 15%)或盐渍化较为严重的裸土地区，利用遥感原始波段光谱直接测量其土壤光谱信息，并与土壤盐分进行关联，定量获取其含盐量值。这些指数包括：盐分指数(Salinity Index, SI) [13]，归一化盐分指数(Normalized Difference Salinity Index, NDSI) [14]等，对于含盐量信息更为敏感。第二种是基于盐渍化土壤因其盐分含量超过正常阈值进而影响到植被的生理参数，因此出现的红光波段反射率增加和近红外波段反射率降低的现象，从而利用植被光谱间接推理土壤中的盐分含量。涉及的植被指数有归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [15]，增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)

[16], 土壤调节植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI) [17], 广义植被指数(Generalized Difference Vegetation Index, GDVI) [18], 冠层响应含盐量指数(Canopy Response Salinity Index, CRSI) [19], 大气阻抗植被指数(Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI) [20], 联合光谱响应指数(Combined Spectral Response Index, COSRI) [21], 扩展的增强型植被指数(Extended Enhanced Vegetation Index, EEVI) [22]等。除此之外, 还有多种综合考虑其植被因素和盐量因素的指数, 如修正的盐渍化评价指数(Modified Salinization Detection Index, MSDI) [2], 盐渍化遥感监测指数(Salinization Detection Index, SDI) [23]等。

综合以上, 选取 3 个指数参与对比实验, 其中 SI 面向植被覆盖少的区域, NDVI 面向植被覆盖多的区域, MSDI 综合 SI 与 NDVI 的特点评定土壤盐渍化程度, 详见下表 2:

**Table 2.** Spectral index

**表 2.** 光谱指数

光谱指数	公式	参考文献
SI (盐分指数)	$\text{sqrt}(b_2 \times b_4)$	[13]
NDVI (归一化植被指数)	$(b_8 - b_4)/(b_8 + b_4)$	[15]
MSDI (修正的盐渍化评价指数)	$\text{sqrt}\left(\left(\frac{b_8 - b_4}{b_8 + b_4} - 1\right)^2 + \left(\frac{b_3 - b_4}{b_3 + b_4}\right) \times \left(\frac{b_2 - b_3}{b_2 + b_3}\right)\right)^2$	[2]

注:  $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_8$  分别为哨兵 2 影像中的蓝、绿、红、近红外四个波段的反射值。

### 4.3. 数据分析与方法

#### 4.3.1. 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[24]。本文应用相关分析方法以研究土壤盐渍化评价指数与土壤盐渍化程度的关联程度。

#### 4.3.2. 曲线回归分析

本文采用高斯、指数、傅里叶等 5 种回归模型(表 3)分析土壤盐渍化程度与上述指数的线性关系。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  $R^2$  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。

**Table 3.** Regression model and formula

**表 3.** 回归模型及公式

回归模型	公式
Gaussian (高斯)	$a_1 * \exp\left(c_1 - \left(\frac{x - b_1}{c_1}\right)^2\right)$
Exponential (指数)	$a * \exp(b * x) + c * \exp(d * x)$
Fourier (傅立叶)	$a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w)$
Polynomial (多项式)	$a_1 * x^3 + a_2 * x^2 + a_3 * x + a_4$
Smoothing Spline (平滑样条)	由平滑参数 $p$ 计算的分段多项式



#### 4.4. 土壤含盐量描述性统计分析

根据实测盐渍化程度将研究区土壤样本按含盐量(即易容盐含量,包括硫酸盐和氯盐)划分为非盐渍化(<0.3%)、轻度盐渍化(0.3%~1.5%)、中度盐渍化(1.5%~10%)和重度盐渍化(>10%)样本,以此用于相关性分析,如表 4 所示:

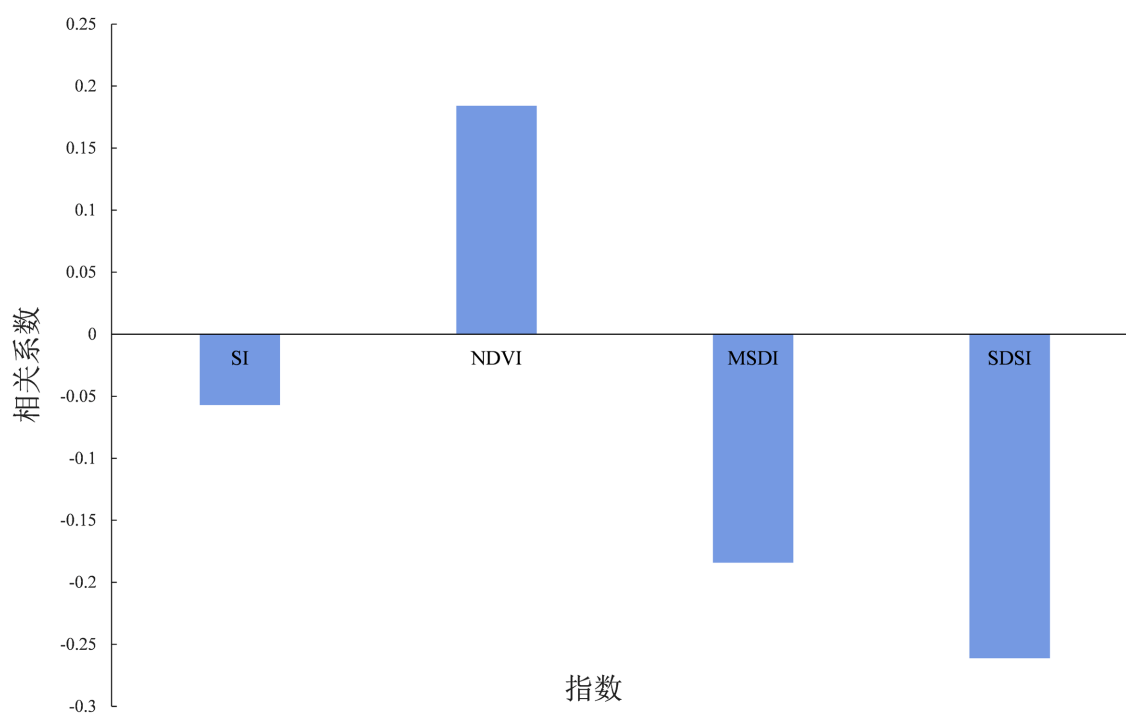
**Table 4.** Classification of salinization degree

**表 4.** 盐渍化程度分类

土壤盐渍化程度	易溶盐含量
非盐渍土	<0.3%
轻度盐渍化	0.3%~1.5%
中度盐渍化	1.5%~10%
重度盐渍化	>10%

#### 4.5. 评价指数与土壤含盐量之间的相关性分析

为了数值化各土壤盐渍化评价指数与土壤盐渍化程度的相关性,本文使用 MATLAB 计算各土壤盐渍化评价指数与土壤盐渍化程度的相关系数,并绘制指数与土壤含盐量相关系数图(图 5)。相关系数图显示,4 个指数呈现 3 负 1 正,其中 SI、MSDI、SDSI 与土壤盐渍化程度相关系数均为负数,仅 NDVI 与其相关系数为正数;同时 SDSI 与土壤盐渍化程度的相关系数的绝对值最大( $R = -0.2611$ ),较其他指数相关性最好,NDVI ( $R = 0.1842$ )与 MSDI ( $R = -0.1842$ )次之,而 SI 最小,仅为 $-0.0571$ ,表明 SI 基本上与土壤盐渍化程度无关。



**Figure 5.** Correlation coefficient diagram between soil salinization degree and salinization evaluation index

**图 5.** 土壤盐渍化程度与盐渍化评价指数之间的相关系数图

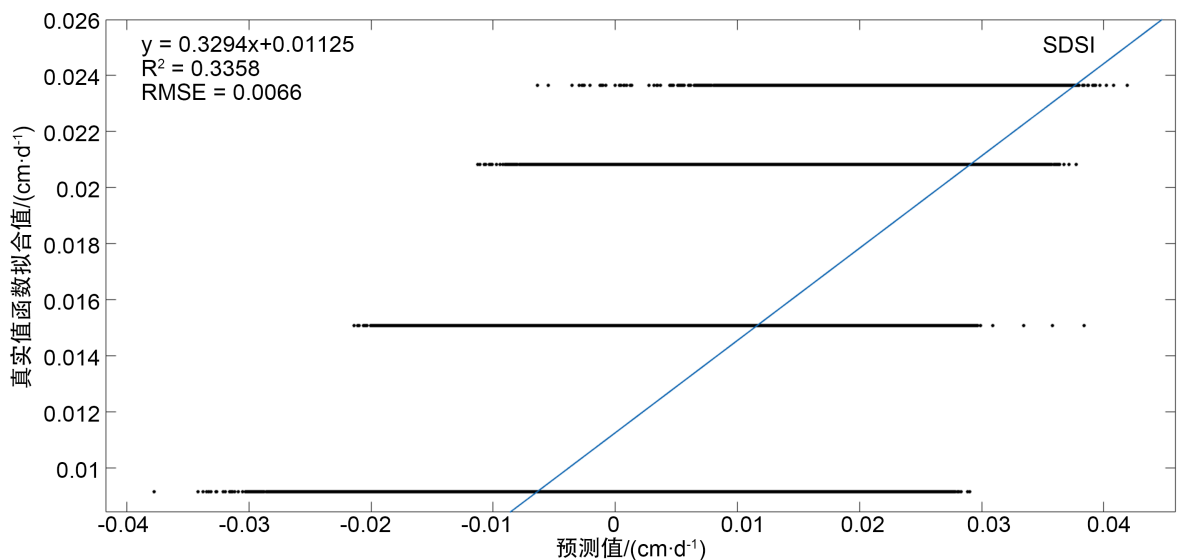
### 4.6. 评价指数与土壤含盐量的曲线拟合结果分析

为了探究不同盐渍化程度评价指数对土壤含盐量的曲线拟合结果的优异程度与反演土壤含盐量的可行性，利用 MATLAB 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渍化程度之间的关系，全样本评价指数与土壤含盐量的拟合结果如表 5 所示。

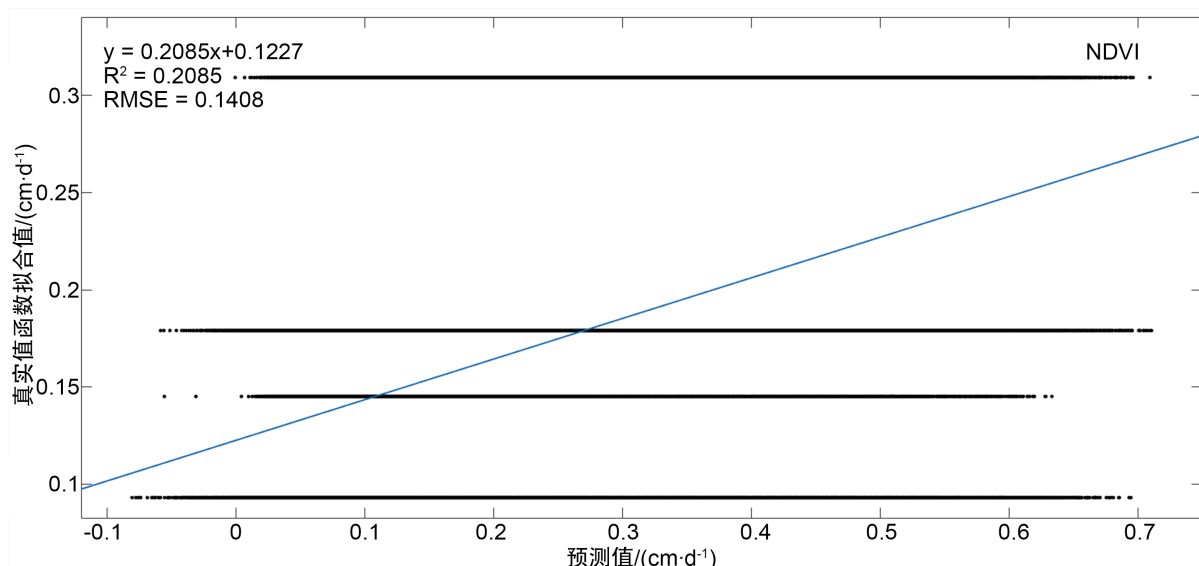
**Table 5.** Results of curve fitting between salinization evaluation index and salinization degree of whole sample soil  
**表 5.** 盐渍化评价指数与全样本土壤盐渍化程度之间的曲线拟合结果

模型	SDSI		SI		NDVI		MSDI	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
高斯函数	0.1348	0.0075	0.1234	1.8973	0.1109	0.1492	0.2085	0.1408
指数函数	0.2809	0.0078	0.1234	1.8973	0.2074	0.1409	0.2085	0.1408
傅里叶函数	0.3358	0.0066	0.1234	1.8973	0.2085	0.1408	0.2085	0.1408
多项式函数	0.3358	0.0066	0.1234	1.8973	0.2085	0.1408	0.2085	0.1408
平滑样条函数	0.3097	0.0067	0.1218	1.8991	0.1978	0.1417	0.1978	0.1417

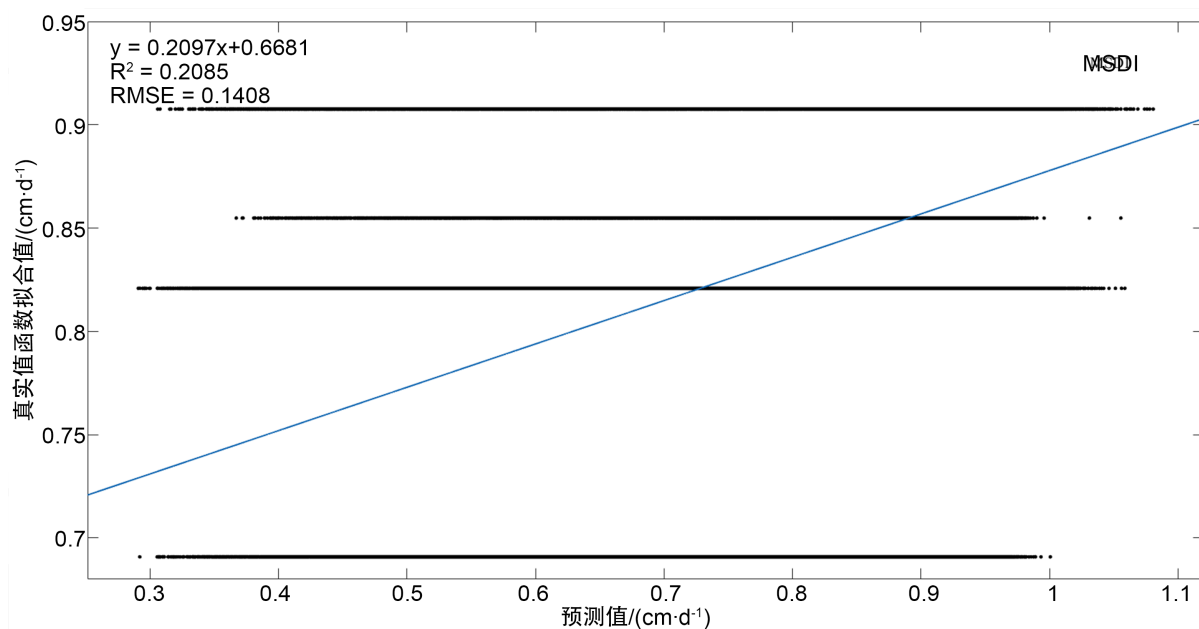
各盐渍化评价指数对研究区全样本土壤盐渍化程度的拟合结果表明，4 个盐渍化评价指数中 SDSI 对土壤盐渍化程度的拟合效果最好(三次多项式函数模型和傅里叶函数模型， $R^2 = 0.3358$ )，SI 的拟合效果最差(高斯函数模型、指数函数模型、三次多项式函数模型和傅里叶函数模型， $R^2 = 0.1234$ )，NDVI (三次多项式函数模型和傅里叶函数模型， $R^2 = 0.2085$ )与 MSDI (高斯函数模型、指数函数模型、三次多项式函数模型和傅里叶函数模型， $R^2 = 0.2085$ )的拟合效果介于两者之间；对所有盐渍化评价指数最优拟合函数模型为傅里叶函数模型和三次多项式函数模型。除去效果较差的 SI，其余三个指数基于三次多项式函数模型预测结果如图 6 所示。因采用的真值数据为前人研究[11]仅有四值，所以在图上显示的点 y 值仅有四种，但可以从中大致观测其趋势。由预测结果图可以看出，基于硫酸盐渍土的季节性形变特征，构建的季节性形变盐渍化评价指数(SDSI)的预测结果与真实值较为接近，能够比较好的解释盐渍化程度，而其他的指数效果不太理想。



(a) SDSI 预测值与真实值函数拟合值关系散点图



(b) NDVI 预测值与真实值函数拟合值关系散点图



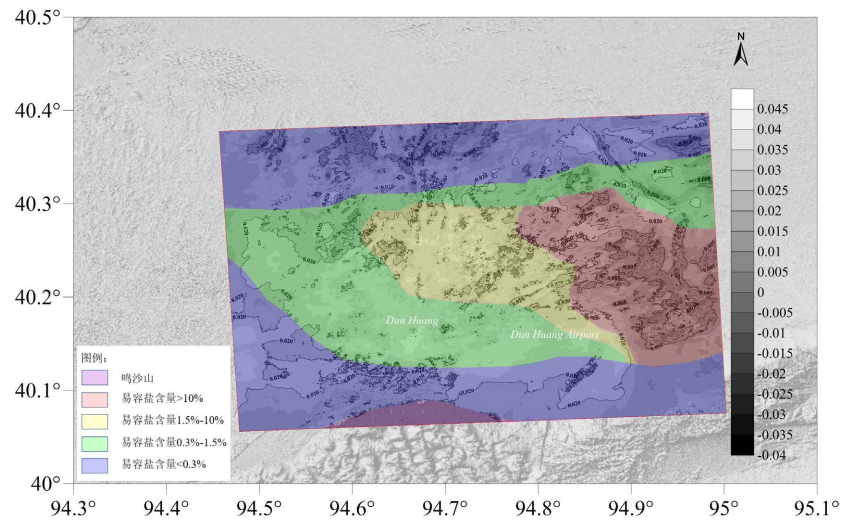
(c) MSDI 预测值与真实值函数拟合值关系散点图

**Figure 6.** Scatter diagram of the fitting relationship between predicted value and real value of each salinization evaluation index

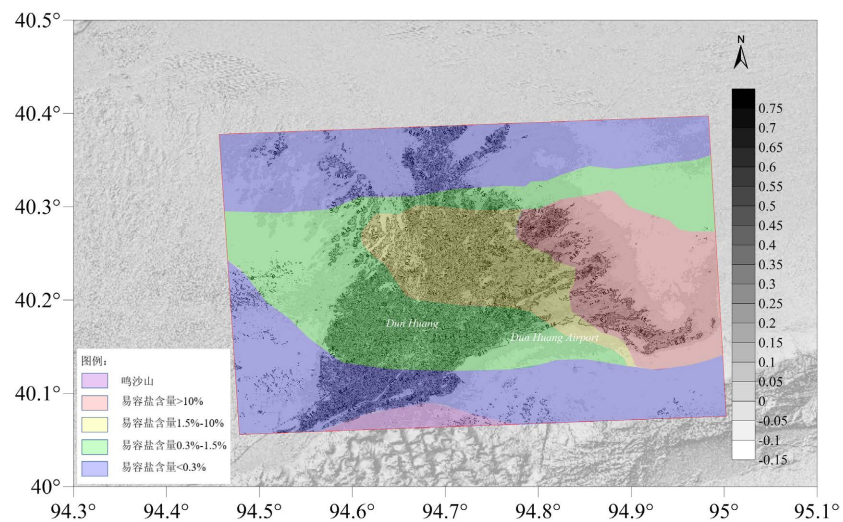
**图 6.** 各盐渍化评价指数预测值与真实值拟合值关系散点图

#### 4.7. 各土壤盐渍化指数与土壤盐渍化程度真实区块关系分析

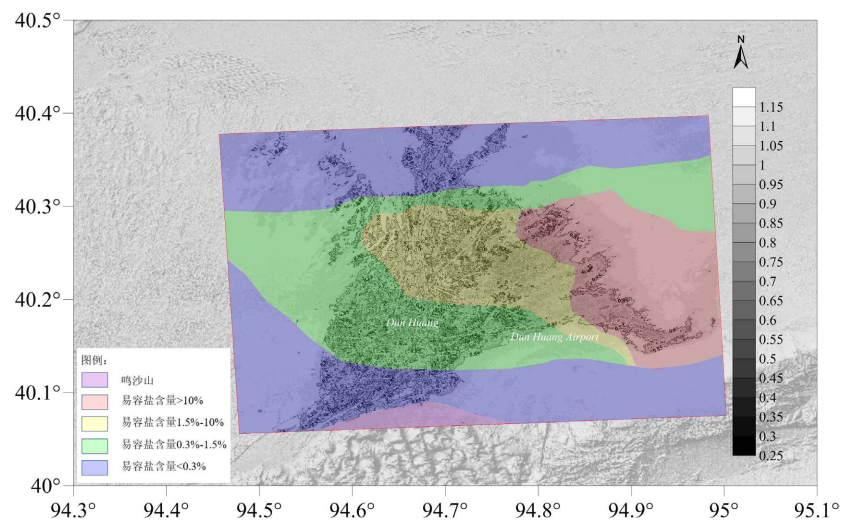
为了更直观的分析各指数与土壤盐渍化程度的关系，根据实验结果得到的各指数等值线图与真实盐渍化区块叠加后如图 7 所示。图中显示出，基于多光谱构建的指数(NDVI、MSD、SI)更多的是对城区的提取，对盐渍化程度并不太敏感。而基于硫酸盐渍土的季节性形变特征构建的指数 SDSI 对真实的盐渍化区块有一定真实的描述，最开始是随盐渍化程度上升而变大，之后随盐渍化程度继续变大而下降(拟合曲线见图 8)。



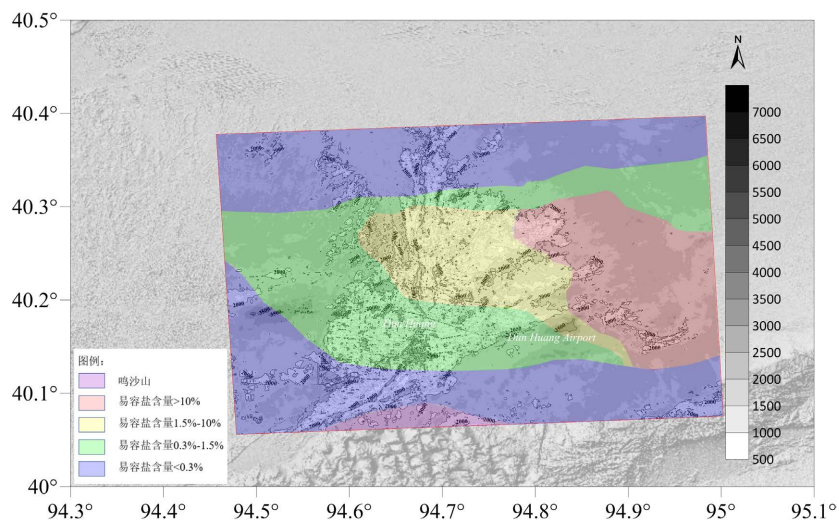
(a) SDSI 叠加真实区块效果图



(b) NDVI 叠加真实效果图



(c) MSDI 叠加真实区块效果图



(d) SI 叠加真实区块效果图

Figure 7. Each index superposes the real salinization block map

图 7. 各指数叠加真实盐渍化区块图

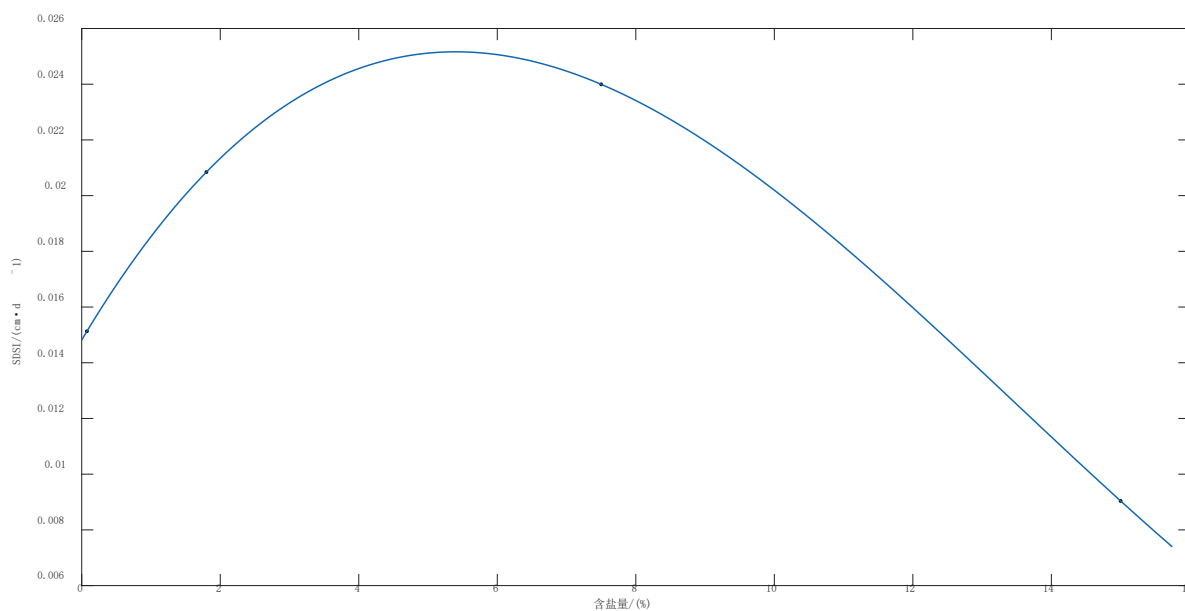


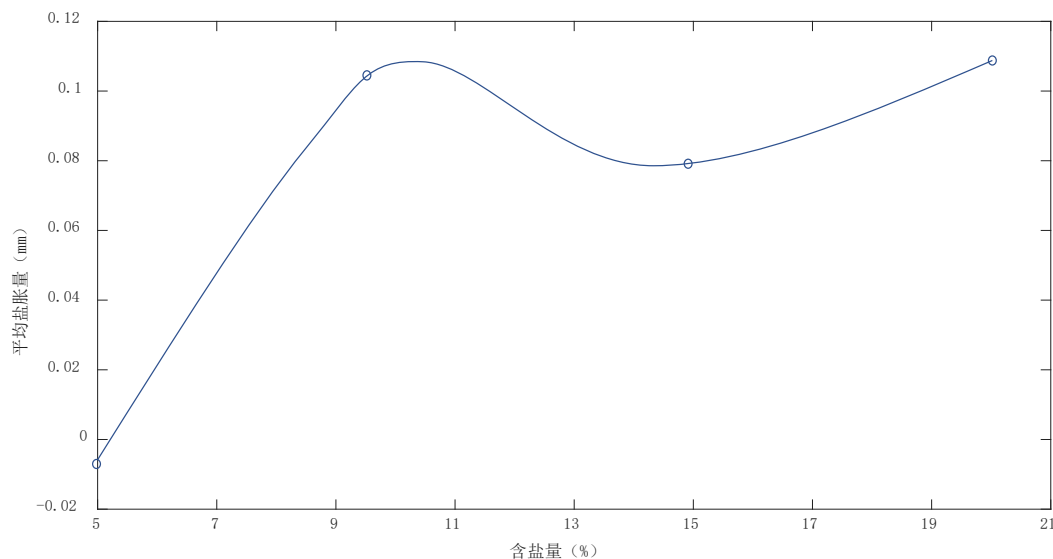
Figure 8. Fitting result diagram of SDSI with cubic polynomial function of soil salinity

图 8. SDSI 与土壤含盐量三次多项式函数拟合结果图

## 5. 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，这些指数中或是依据可见光和近红外波段对土壤盐渍化的敏感性，将其与土壤含盐量关联构建土壤含盐量指数，或是依据盐渍土中的盐分对植物生长造成的危害，盐渍化程度越重的区域植被覆盖率越低，以植被的覆盖状况作为判断土壤盐渍化程度的间接指标。本文基于时序形变信息构建的季节性形变盐渍化评价指数(Seasonal deformation salinization index, SDSI)，提取盐渍土的季节性盐胀溶蚀特征，从另一个角度分析其与盐渍化程度的定量关系。

有研究表明[6],在一定范围内,盐胀现象会随着含盐量变大而剧烈,但含盐量到达某一值时,反而会使盐胀量降低。图9为杨鹏[6]对敦煌机场采样使用控制变量法进行的单次冻融循环下的室内试验,探究得到盐分富集层含盐量与土样平均盐胀量的关系,图中所示盐胀量随含盐量先增后减再增的趋势与本文图9示SDSI与土壤含盐量三次多项式函数拟合结果SDSI随含盐量先增后减的趋势吻合,进一步验证了SDSI与平均盐胀量的相关性。



**Figure 9.** Relationship between salt content of salt enrichment layer and average salt expansion of soil sample [6]  
**图9.** 盐分富集层含盐量与土样平均盐胀量的关系[6]

## 6. 结论

本文基于盐渍土季节性形变特征构建了新的盐渍化评价指数 SDSI,在敦煌地区较其他常规多光谱指数方法更为精确的完成了对硫酸盐渍土的评价,验证了以形变信息定量评价硫酸盐渍土的科学性与可行性,并得出以下结论:

1) SDSI 与土壤盐渍化程度相关系数相对较高( $R = -0.2611$ ),NDVI ( $R = 0.1842$ )与 MSDI ( $R = -0.1842$ )次之,SI 最小,仅为 $-0.0571$ ,表明相对于基于多光谱信息的光学指数,基于形变信息的 SDSI 与土壤盐渍化程度的相关性更好。

2) 4 个盐渍化评价指数中 SDSI 对土壤盐渍化程度的拟合效果最好( $R^2 = 0.3358$ ),SI 的拟合效果最差( $R^2 = 0.1234$ ),NDVI ( $R^2 = 0.2085$ )与 MSDI ( $R^2 = 0.2085$ )的拟合效果介于两者之间,表明 SDSI 相较于其他指数在硫酸盐渍土地区反演盐渍化程度有明显的优势。

3) 对于敦煌地区,面向植被覆盖少的区域的指数 SI,面向植被覆盖多的区域的指数 NDVI,以及综合 SI 与 NDVI 的特点评定土壤盐渍化程度的指数 MDSI,对盐渍化程度的判别都不太理想。而基于硫酸盐渍土季节性形变特征构建的指数 SDSI 较好的还原了已有研究对敦煌地区盐渍化程度的分类结果。根据 SDSI 于敦煌地区对盐渍化程度的判别结果,其随盐渍化程度加深先变大后变小。

本研究得出的初步结论可为基于硫酸盐渍土季节性形变特征定量分析盐渍化程度提供一定研究思路和理论基础,但受易溶盐含量真值数据限制,SDSI 整体相关性和拟合度还并不高,为提高 SDSI 对土壤含盐量的定量解释力度,还需更为精细地采集研究区的土壤易溶盐含量数据。此外,本文针对的是季节性形变可以解释硫酸盐渍土盐渍化程度,而非解释所有种类的盐渍土。未来的盐渍化程度评价模型也

不应该是单一指数的模型，而是多种指数综合的更为细分的模型，在对盐渍化程度定量识别的道路上，还需要更多的数据与研究来支撑更优更具有普适性的模型。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(42071410); 四川省科技计划项目(2018JY0564, 2019ZDZX0042, 2020JDTD0003, 2020YJ0322)。

## 参考文献

- [1] 关元秀, 刘高焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(1): 40-44.
- [2] 杜婷, 焦继宗, 颀耀文, 等. 利用 Landsat 影像定量评价土地盐渍化的方法探索——以瓜州-敦煌地区为例[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(1): 51-55.
- [3] 李和平, 田长彦, 乔木, 吴世新. 新疆耕地盐渍土遥感信息解译标志及指标探讨[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 218-222.
- [4] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 蔡国林. InSAR 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [5] 杨茂华. 敦煌机场道面病害分析[J]. 青海交通科技, 2006(5): 32-32.
- [6] 杨鹏. 粗颗粒盐渍土在温度与水分边界年度循环条件下的变形特性及机理研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学.
- [7] 甘肃省统计局. 甘肃发展年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [8] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1991-1995.
- [9] 严耿升, 张虎元, 王志硕, 等. 风电场盐渍土地基静载试验研究[J]. 西北水电, 2011(6): 75-80.
- [10] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 28-32.
- [11] 张平川, 董兆祥. 敦煌民用机场地基的破坏机制与治理对策[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 78-80.
- [12] 王飞, 丁建丽, 魏阳, 周倩倩, 杨晓东, 王前锋. 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.
- [13] Douaoui, A.E.K., Nicolas, H. and Walter, C. (2006) Detecting Salinity Hazards within a Semiarid Context by Means of combining Soil and Remote-Sensing Data. *Geoderma*, **134**, 217-230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.10.009>
- [14] Khan, N.M., Rastoskuev, V.V., Sato, Y. and Shiozawa, S. (2005) Assessment of Hydrosaline Land Degradation by Using a Simple Approach of Remote Sensing Indicators. *Agricultural Water Management*, **77**, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.038>
- [15] Brunner, P., Li, H.T., Kinzelbach, W., et al. (2007) Generating Soil Electrical Conductivity Maps at Regional Level by Integrating Measurements on the Ground and Remote Sensing Data. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 3341-3361. <https://doi.org/10.1080/01431160600928641>
- [16] Lobell, D.B., Lesch, S.M., Corwin, D.L., et al. (2010) Regional-Scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-Year MODIS EVI and NDVI. *Journal of Environmental Quality*, **39**, 35-41. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0140>
- [17] Allbed, A., et al. (2014) Assessing Soil Salinity Using Soil Salinity and Vegetation Indices Derived from IKONOS High-Spatial Resolution Imageries: Applications in a Date Palm Dominated Region. *Geoderma*, **s230-s231**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025>
- [18] Wu, W. (2014) The Generalized Difference Vegetation Index (GDVI) for Dryland Characterization. *Remote Sensing*, **6**, 1211-1233. <https://doi.org/10.3390/rs6021211>
- [19] Scudiero, E., Skaggs, T.H. and Corwin, D.L. (2015) Regional-Scale Soil Salinity Assessment Using Landsat ETM+ Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **169**, 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.026>
- [20] Scudiero, E., Skaggs, T.H. and Corwin, D.L. (2014) Regional Scale Soil Salinity Evaluation Using Landsat 7, Western San Joaquin Valley, California, USA. *Geoderma Regional*, **2-3**, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.10.004>
- [21] Fernández-Buces, N., Siebe, C., Cram, S., et al. (2006) Mapping Soil Salinity Using a Combined Spectral Response Index for Bare Soil and Vegetation: A Case Study in the Former Lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments*, **65**, 644-667. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.08.005>
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 乔舰. 组内相关系数的理论基础及建模应用[J]. 统计与信息论坛, 2016, 31(11): 44-48.