

引用格式: Bian Lingling, Wang Juanle, Guo Bing, *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.
[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.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0211

基于特征空间的黄河三角洲垦利县土壤盐分 遥感提取

边玲玲^{1,2}, 王卷乐^{2,4}, 郭兵¹, 程凯^{2,3}, 魏海硕^{1,2}

(1. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 土壤盐渍化是实现土地资源可持续利用所面临的重要挑战, 在我国滨海的黄河三角洲区域遥感定量反演适宜方法可为区域盐渍化监测与防治提供技术方法参考。研究以 Landsat 8 OLI 数据和野外实测数据为基础, 提取关键地表特征参量, 量化探讨土壤盐分与地表生物物理参数之间的规律及关系, 建立黄河三角洲土壤盐分最优反演模型。结果表明: Albedo-MSAVI、SI-Albedo、SI-NDVI 反演精度分别为 83.4%、88.8% 和 80.6%。分析认为 SI-Albedo 模型最适用于滨海地区盐渍化程度反演, 对滨海地区土壤盐分的预测能力较强; Albedo-MSAVI、SI-NDVI 模型对内陆干旱、半干旱地区的盐渍化信息提取具有一定的参考意义。基于精度最高的 SI-Albedo 所反演的结果来看, 垦利县盐渍化程度自东向西总体呈高低高走向, 与该区域盐分积聚的成因机理相符。

关键词: 盐渍化; 特征空间; 遥感反演; 黄河三角洲; 垦利县

中图分类号: TP753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0211-08

1 引言

土地退化问题在世界范围内受到广泛关注。2016 年联合国颁布《2030 年可持续发展议程》^[1-2], 该发展议程包括 17 个可持续发展目标(SDGs), 其中 SDGs 15 主要强调实现生态环境可持续发展, 抑制土地退化等问题。土地退化表现形式包括土壤盐渍化、土地荒漠化、土地沙化, 抑制土地退化对维持可持续发展具有重要意义。土壤盐渍化(Soil Salinization)是指土壤中累聚的盐分含量超过正常耕作土壤的水平从而影响作物生长的自然灾害^[3]。它

是由气候、生态、水文等自然条件以及不合理的灌溉技术、地下水开采等人为因素共同作用的结果。土壤盐渍化的发生严重影响农业作物、经济作物的生长, 限制土地生产力, 给耕地资源带来巨大压力, 加重生态环境恶化, 从而制约社会和经济可持续发展, 危及人类健康^[4]。目前全球共有约 9.3 亿 hm^2 的盐渍化土地^[5], 并且每年都在呈增长趋势。其中我国就有 3 600 万 hm^2 盐渍土地, 主要分布在干旱(新疆、甘肃)、半干旱以及滨海地区(黄河三角洲)。由于盐渍化区域面积广阔, 人工调查和监测成本大、周期长, 基于遥感手段监测土壤盐渍化对于支撑全球可

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-01-07

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA19040501), 防灾减灾知识服务系统(CKCEST-2018-2-8), 中国科学院“十三五”信息化专项科学大数据工程项目(XXH13505-07)。

作者简介: 边玲玲(1994—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事土地资源与遥感应用研究。E-mail: bianll@reis.ac.cn。

通讯作者: 王卷乐(1976—), 男, 河南洛阳人, 博士, 研究员, 主要从事资源环境数据集成与共享研究。E-mail: wangjl@igsrr.ac.cn。

持续发展目标实现具有重要的科学和现实意义。

学者对土壤盐渍化的研究重点开始主要在盐渍土分类以及盐分的测定方法上,20世纪70年代以来,国内外学者开始对土壤盐渍化的提取方法展开研究,基于多元遥感数据的土壤盐渍化遥感解译逐渐成为重要手段。刘志明等^[6]通过遥感解译与实地调查详解的方法得到吉林省西部地区的盐渍化分布。张素铭等^[7]通过对 Landsat 8 遥感影像波段组合,利用相关性较好的光谱参量,构建土壤盐分监测最优模型,得到2001~2009年黄河三角洲盐分动态监测变化。张成雯等^[8]利用中巴地球资源卫星多光谱影像,应用BP人工神经网络模型,分析监测黄河三角洲土壤盐分分布。许迪等^[9]采用NDVI植被指数和监督分类相结合的方法,动态监测青铜峡灌区土壤盐碱化分布。何祺胜等^[10]采用决策树分类方法设置各节点分类器,结果表明能够较好地提取新疆地区盐渍地信息。塔西甫拉提等^[11]利用 Landsat ETM 数据,采用最大似然分类方法,对新疆阿克苏地区盐渍化信息进行提取。但上述多种方法仍存在缺陷,在遥感分类方法中多使用监督分类、非监督分类、神经网络自动提取、目视解译等方法,此类半自动分类方法耗时耗力,工作强度大,效率低,解译周期长,受主观影响程度较高,难以开展长时间序列盐渍化动态监测。

随后,国内外学者将研究重点转移到特征空间理论,并将其应用到盐渍化监测、土壤水分反演、干旱监测等领域^[12-13]。丁建丽等^[14-15]通过构建地表特征向量和盐渍土发生过程之间的定量关系,结果表明该监测模型能较好地反演渭干河—库车河三角

洲的土壤盐分分布。冯娟等^[16]利用 Albedo-MSA-VI 之间的关系构造特征空间,结果显示地表反照率与土壤调整型植被指数构造的监测模型与土壤盐分相关性较高,能够较好地对渭库绿洲的土壤盐渍化进行定量分析与监测。哈学萍等^[17]基于 SI-Albedo 特征空间,利用盐分指数—地表反照率与土壤盐分的关系,快速、准确地提取了克里雅河流域绿洲的盐渍化信息。杨劲松等^[18]利用电磁感应仪 EM38 对黄河三角洲滩涂区的盐渍化进行研究,结果表明 NDVI 指数和土壤电导率之间有着显著的对应关系,土壤电导率对不同深度的土壤盐分有不同的响应效果^[19]。由上可见,不同方法的应用效果有显著差异,选择与土壤盐分相关性较高的生物物理特征参量构建特征空间模型,从而提高土壤盐渍化的精度和效率成为当前迫切需要解决的问题。

以 Landsat 8 OLI 卫星数据和野外实测样点数据为信息源,通过构建地表特征变量和盐渍土发生过程之间的定量关系,获取山东省垦利县的土壤盐分信息,以期探索适宜于黄河三角洲地区的定量遥感提取土壤盐分方法。

2 数据源与方法

2.1 研究区概况

垦利县位于山东省北部、黄河下游末端,介于 $37^{\circ}24' \sim 38^{\circ}10' \text{ N}$ 、 $118^{\circ}15' \sim 119^{\circ}19' \text{ E}$ 之间。垦利县所在的黄河三角洲属于大陆性季风气候,降水分布不均匀,多年平均降水量为551.6 mm,多年平均蒸发量为1 928.2 mm,年蒸降比约为3.5:1,蒸发量远高于降雨量。图1为研究区位置与采样点分布图。

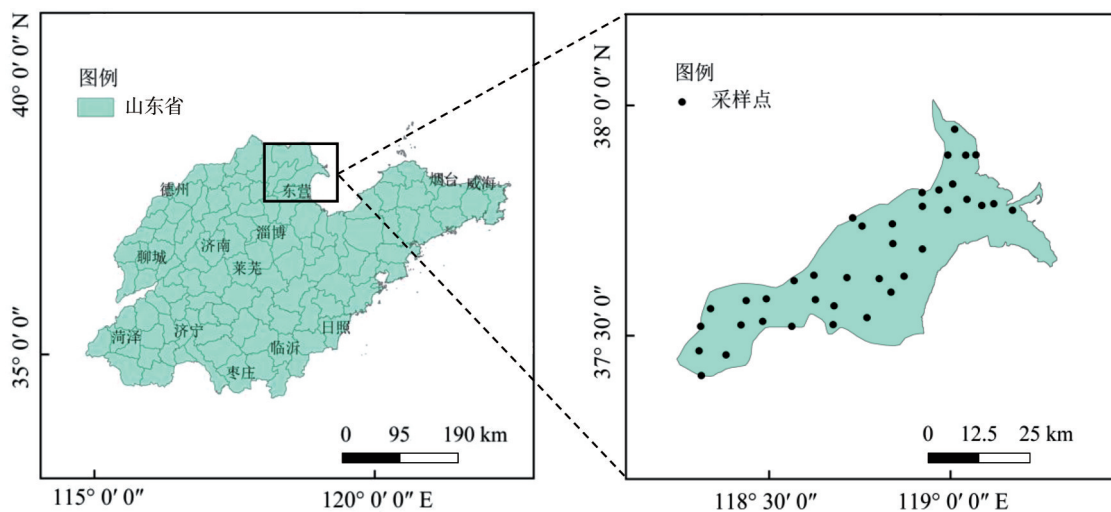


图1 研究区位置与采样点分布图

Fig.1 Geographic location and sampling point distribution

2.2 数据源与预处理

选取空间分辨率为 30 m 的 Landsat 8 OLI 作为遥感数据源,成像时间为 2014 年 3 月 30 日。该时期地面植被生长稀疏,天气晴朗,云量覆盖范围少,便于地面土壤盐分含量反演。利用 ENVI 软件对 Landsat 8 OLI 影像进行预处理,包括辐射定标、FLAASH 大气校正、几何校正。通过垦利县行政区域矢量图对影像进行裁剪,得到预处理后的垦利县遥感影像图。

野外实测验证数据采于 2014 年,共有 36 个样点数据,采样点在垦利县地区均匀分布(如图 1 所示)。样点坐标是 GPS RTK 实地测量得到,可达到厘米级的定位精度,盐分含量是高灵敏度土壤盐分测定仪在同期多次测量求取均值得到,保证了结果的可靠性。

2.3 研究方法

2.3.1 反演参数选择

利用 Landsat 8 OLI 影像数据提取土壤盐分信息涉及反演的参数有:地表反照率、土壤调整植被指数、归一化植被指数和盐分指数。

地表反照率(Albedo)是指地表感热通量与潜热通量之比,是维持地表辐射平衡的关键参数。提取地表反照率,利用 Liang^[20]建立的反照率反演公式:

$$\text{Albedo} = 0.356B + 0.13R + 0.373\text{NIR} + 0.085\text{SR1} + 0.072\text{SR2} - 0.0018 \quad (1)$$

其中:B、R、NIR、SR1、SR2、对应 OLI 影像的蓝色波段、红色波段、近红外波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段反射率的值。

土壤调整植被指数(MSAVI)在反演中考虑到裸地土壤线的影响,能更好地凸显植被较少的土壤信息。利用土壤调整植被指数(MSAVI)提取植被信息,表示为:

$$\text{MSAVI} = \frac{-\sqrt{(2\text{NIR} + 1)^2 - 8(\text{NIR} - R)} + 2\text{NIR} + 1}{2} \quad (2)$$

其中:NIR、R 分别表示 OLI 影像近红外波段、红色波段反射率的值。

归一化植被指数(NDVI)可以作为间接表征土壤盐渍化的理化参数。利用 NDVI 提取植被信息,表示为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (3)$$

其中:NIR、R 分别为 OLI 影像的近红外波段、红色波段反射率的值。

盐分指数(SI)是描述土壤盐渍化的重要因素。利用盐分指数(SI)提取盐分信息表示为^[21]:

$$\text{SI} = \sqrt{B \times R} \quad (4)$$

其中:B、R 分别为 OLI 影像的蓝色波段、红色波段反射率的值。

由于各个指数的数值以及量纲不统一,为保证后期数据计算,归一化处理各个指数。利用 ENVI 统计工具,统计土壤调整植被指数(MSAVI)、地表反照率(Albedo)、盐分指数(SI)、归一化植被指数(NDVI)的最大值和最小值,利用 ENVI 统计值进行数据归一化处理,得到土壤调整植被指数(MSAVI)归一化值 M、地表反照率(Albedo)归一化值 A、归一化植被指数(NDVI)归一化值 N、盐分指数(SI)归一化值 S。

2.3.2 特征空间原理

Albedo-MSAVI 特征空间^[16]如图 2(a)所示。A 点代表重度盐渍化地,植被覆盖度低,地表反照率高(低 MSAVI 高 Albedo);B 点代表裸地;C 点代表高植被覆盖区,在土壤含水量充足的情况下,该点的反照率相对较低(高 MSAVI 低 Albedo)。

SI-Albedo 特征空间如图 2(b)所示。盐分指数与地表反照率具有显著的线性特征,地表反照率随着盐分指数的增高而增高,盐渍化过程越来越严重。

SI-NDVI 特征空间^[15]如图 2(c)所示。A 点代表重度盐渍化地,土壤盐分高,植被覆盖度低(低 NDVI 高 SI);B 点代表裸地;C 点代表高植被覆盖区。

通过回归统计分析得到地表反照率(Albedo)与土壤调整植被指数(MSAVI)Albedo-MSAVI、盐分指数(SI)与地表反照率(Albedo)SI-Albedo、盐分指数(SI)与归一化植被指数(NDVI)SI-NDVI 之间的相关性较高。利用 3 组土壤光谱特征参数构建特征空间,建立反演监测模型。

3 结果与分析

3.1 特征空间

3.1.1 Albedo-MSAVI 特征空间及其特性

Albedo-MSAVI 特征空间反演模型,以归一化 MSAVI 为横轴,归一化 Albedo 为纵轴建立二维散点图,如图 3 所示。在特征空间散点图中,可以看到地表反照率与土壤调整植被指数存在着与图 2(a)相似的非线性关系,以图中 MSAVI、Albedo 坐标(0,1)点为参照点,散点图中任意点到参照点的距离反映了盐渍化的程度,距离越近盐渍化越严重,

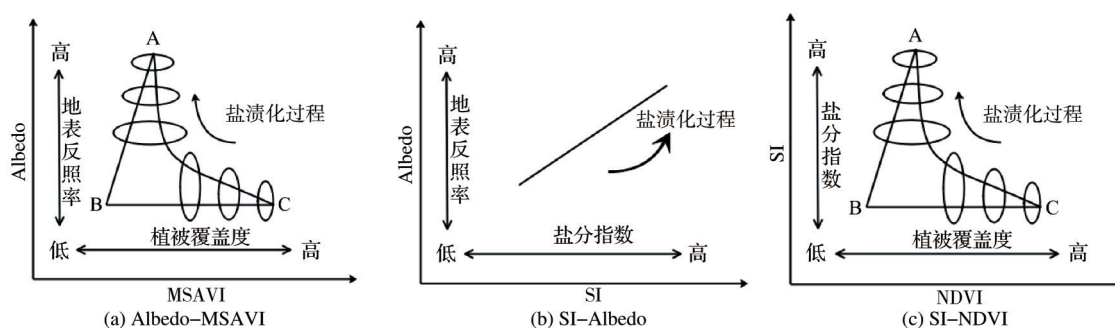


图2 特征空间原理

Fig.2 Principle of feature space

反之亦然。二维特征空间中任意点到(0,1)点距离为D,在此基础上构建遥感监测模型为:

$$SDI = \sqrt{(1 - \text{Albedo})^2 + \text{MSAVI}^2} \quad (5)$$

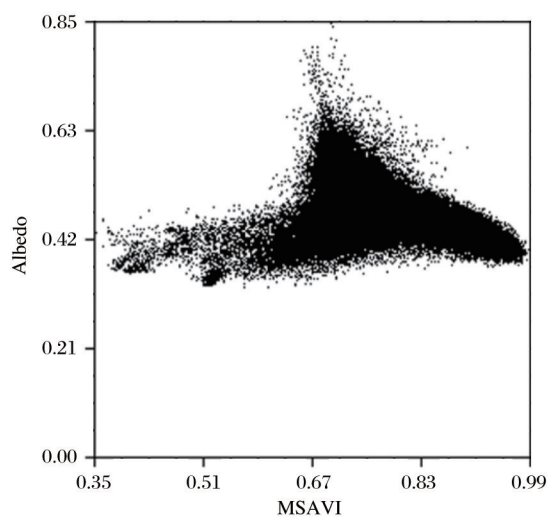


图3 Albedo-MSAVI散点图

Fig.3 Albedo-MSAVI scatter plot

3.1.2 SI-Albedo特征空间及其特性

SI-Albedo特征空间反演模型,以归一化SI为横轴,归一化Albedo为纵轴建立二维散点图,如图4所示。在特征空间散点图中,散点图呈带状分布(与图2(b)相似),随着盐分指数的升高,盐渍化程度越来越严重,以图中盐分指数为0,地表反照率为0的点作为参照点,散点图任意点距离该点越近,则土壤盐渍化程度越轻,反之亦然。距离二维特征空间中任意点到(0,0)点距离为D,在此基础上构建遥感监测模型为:

$$ASI = \sqrt{SI^2 + \text{Albedo}^2} \quad (6)$$

3.1.3 SI-NDVI特征空间及其特性

SI-NDVI特征空间反演模型,以NDVI为横轴,SI为纵轴建立二维散点图,如图5所示。以NDVI、SI坐标(1,0)点作为参照点,距离该点越远,其

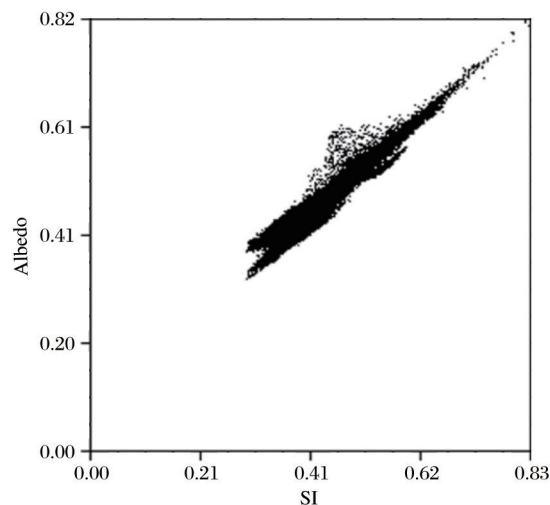


图4 SI-Albedo散点图

Fig.4 SI-Albedo scatter plot

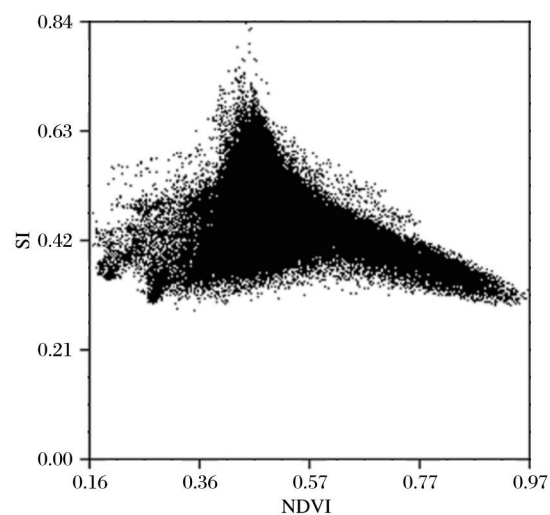


图5 SI-NDVI散点图

Fig.5 SI-NDVI scatter plot

盐渍化程度越严重(与图2(c)相似)。二维特征空间中任意点到(1,0)点距离为D,在此基础上构建遥感监测模型:

$$SDI = \sqrt{(\text{NDVI} - 1)^2 + SI^2} \quad (7)$$

3.2 盐分反演分布图

Jenk 自然间断点分级法是基于统计学理论进行分级,该方法的优点是能够使各等级内的方差之

和最小^[22]。利用该方法将监测模型 SDI(Albedo-MSAVI)、ASI(SI-Albedo)、SDI(SI-NDVI)分为 5 个值域区间(表 1)。

表 1 垦利县盐渍化监测指标
Table 1 Monitoring indicators of salinization in Kenli County

盐渍化程度	非盐渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐土
SDI	≤0.68	>0.68, ≤0.84	>0.84, ≤0.89	>0.89, ≤0.98	>0.98, ≤1.21
ASI	≤0.58	>0.58, ≤0.66	>0.66, ≤0.72	>0.72, ≤0.80	>0.80, ≤1.40
SDI	≤0.007	>0.007, ≤0.08	>0.08, ≤0.15	>0.15, ≤0.23	>0.23, ≤0.57

利用 ArcGIS 提取盐渍化指标信息,最终得到 3 种监测模型盐渍化等级分布图(如图 6 所示)。从空间分布来看,3 种模型均从整体上揭示了本区域盐渍化程度较高的共性现象,其中 Albedo-MSAVI、SI-NDVI 反演分布图中,中度盐渍化、重度盐渍化区域较大,主要集中在西南、东北地区;轻度盐渍化范围较小,主要分布在中部地区;盐渍化程度总体表现为从东向西逐渐加重。SI-Albedo 反演分布图中,中度盐渍化与重度盐渍化主要分布在中部地区、沿海部分地区;轻度盐渍化主要分布在黄河两岸以及河流湖泊附近;非盐渍化地区主要分布在黄河两岸。从水体滩涂以西地区,以轻度盐渍化过渡到中度盐渍化再过渡到重度盐渍化,盐渍化程度总体呈高低高走向,即沿海和内陆边缘地区盐渍化程度最重,中部地区盐渍化程度轻。

3.3 精度分析

根据我国土壤盐渍化分级标准,参考鲁如坤 2000 版《土壤农业化学分析与方法》^[23],将滨海、半湿润半干旱、干旱区土壤盐渍化程度分为以下 5 类:非盐渍化土壤,土壤盐分<1.0 g·kg⁻¹;轻度盐渍化

土壤,土壤盐分 1.0~2.0 g·kg⁻¹;中度盐渍化土壤,土壤盐分 2.0~4.0 g·kg⁻¹;强度盐渍化土壤,土壤盐分 4.0~6.0 g·kg⁻¹;盐土,土壤盐分>6.0 g·kg⁻¹。按照此标准对实地测量样点数据进行盐渍化分级。将实测值盐渍化程度与各模型预测值盐渍化程度进行对比,判定 Albedo-MSAVI、SI-Albedo、SI-NDVI 特征空间监测模型反演精度,模型精度验证结果如表 2 所示。

表 2 模型精度验证
Table 2 Accuracy verification of the models

模型	分类正确	分类错误	总体精度
Albedo-MSAVI	30	6	83.4%
SI-Albedo	32	4	88.8%
SI-NDVI	29	7	80.6%

由表可见,基于 Albedo-MSAVI 特征空间监测模型 SDI,总体分类精度 83.4%;基于 SI-Albedo 特征空间构建监测模型 ASI,总体分类精度 88.8%;基于 SI-NDVI 特征空间构建监测模型 SDI,总体分类精度 80.6%。以精度最高的特征空间 SI-Albedo 构建监测模型统计不同程度盐渍化土壤面积占土壤

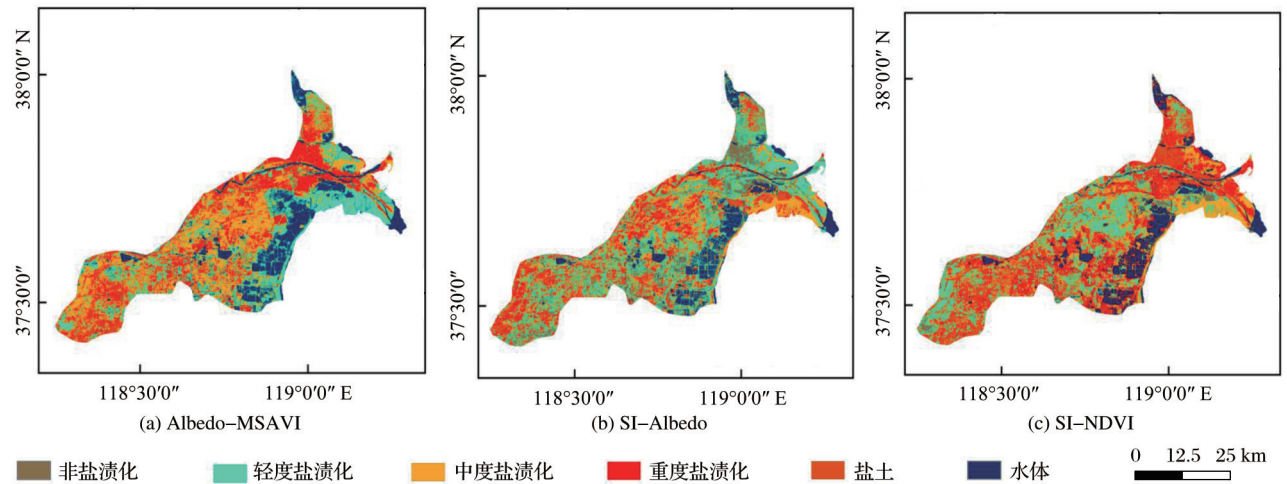


图 6 垦利县盐渍化分布等级图
Fig.6 Distribution chart of salinization distribution in Kenli County

总面积的比例,可以得出垦利县的盐渍化程度较严重,约有80%的面积受到土壤盐渍化的侵蚀。其中中度盐渍化面积较大,达到54 234 hm²,占到垦利县总面积29.5%;其次是轻度盐渍化区域达到48 371 hm²,占垦利县总面积26.3%;重度盐渍化面积达到34 282 hm²,占垦利县总面积18.7%;盐土面积6 979 hm²,占垦利县总面积4%。

4 讨论

4.1 反演模型对比

由盐分指数(SI)、地表反照率(Albedo)构建的SI-Albedo特征空间监测模型总体精度最高,总体精度为88.8%;其次是Albedo-MSAVI特征空间,总体精度为83.4%;最后是SI-NDVI特征空间,总体精度为80.6%。基于SI-Albedo特征空间相对比Albedo-MSAVI特征空间、SI-NDVI特征空间精度较高,其原因是盐分指数(SI)与地表反照率(Albedo)作为直接反映盐渍化程度的两个重要生物物理参数,组成的特征空间模型反演精度要高于其他两个由间接特征参数参与组成的特征空间模型反演精度,较适用于监测黄河三角洲盐渍化。然而,对于内陆地区不同于滨海地区的地理环境,植被覆盖度低、年降水量少,植被信息与水分信息对盐渍化则更为敏感。特征空间Albedo-MSAVI、SI-NDVI能够更显著地突出植被信息以及与植被相关的地物光谱参量,对内陆盐渍化提取有一定积极意义,但其适用性还需进一步的实验验证。总之,利用特征空间构建模型进行盐渍化信息提取,根据不同地理区域选择合适的光谱特征参量能够更为科学、准确地提取盐分信息。

4.2 盐分空间分布及其原因分析

特征空间Albedo-MSAVI、SI-Albedo、SI-NDVI构建模型反演的盐渍化空间分布的共性特征是垦利县盐渍化面积所占比重总体较大,盐渍化程度以黄河为轴、呈对称分布,黄河附近均呈轻度盐渍化状态,但沿海地区出现中度盐渍化、重度盐渍化和盐土现象,这与张素铭等^[7-8]研究结果基本一致。不同模型反演的差异特征在于,Albedo-MSAVI、SI-NDVI构建模型中的中度盐渍化、重度盐渍化、盐土所占比重相对较大。这一原因可能是遥感影像选取时间为春季,植被指数对生长势头较弱的植被信息提取敏感性较弱,从而影响盐分指数。地表反照率(Albedo)与盐分指数(SI)所在的波段对土壤

含盐量较为敏感,不易受植被信息的干扰,因此与Albedo-MSAVI、SI-NDVI空间分布不同且精度更高。

结合精度最高模型SI-Albedo特征空间反演的空间结果来看其可能的原因和驱动力。中部、西南部地区人口密集、人类建设活动频繁,土地利用结构复杂,农业用地所占比重较大,绿地、林地所占比重较小,且在土地使用过程中对地下水的开采利用强度大,使得该地区盐渍化程度较重。东北部地区位于黄河入海口,地势低平,易发生海水倒灌,盐分易聚集于此;加之地下水普遍埋藏深度较浅,矿化度较高,地下水的盐分通过毛管上升作用不断向地表累积,使得盐渍化程度较重。非盐渍化以及轻度盐渍化区域主要分布在河流附近,其原因可能是垦利县河流大多为淡水,土壤受黄河水的影响以及农作物灌溉排水,使得河流附近的土壤积盐量较少,盐渍化程度较轻。

5 结语

选取黄河三角洲垦利县为研究区,以Landsat 8 OLI影像为数据源,结合实地采样盐分数据,研究地表反照率与土壤调整植被指数(Albedo-MSAVI)、盐分指数与地表反照率(SI-Albedo)、盐分指数与归一化植被指数(SI-NDVI)的定量关系,从而构建Albedo-MSAVI、SI-Albedo、SI-NDVI特征空间,建立盐渍化监测模型。模型反演结果表明:由盐分指数与地表反照率(SI-Albedo)构建的监测模型反演精度要高于Albedo-MSAVI、SI-NDVI模型,该模型能够快速提取垦利县盐渍化信息,较适宜于黄河三角洲盐渍化的动态监测。但在内陆干旱、半干旱地区,由于各地区盐渍化成因不同,土壤水分、植被覆盖等都会影响遥感影像的光谱特征,Albedo-MSAVI、SI-NDVI可能有更好的表现。针对不同地理环境区域,选择合适的特征参量构建特征空间能够提高盐渍化信息的科学性和准确性。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所黄翀副研究员提供样点数据!

参考文献(References):

- [1] Guo Huadong. A Project on Big Earth Data Science Engineering[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(8):818-824.[郭华东. 地球大数据科学工程[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(8):818-824.]

- [2] Zhou Xin, Feng Tiantian, Xu Ming. Determination of Strategic Targets and Core Indicators for Sustainable Development Goals (SDGs) Integration in China based on SDG Interlinkages Analysis and Statistical Method [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(1): 20-29. [周新, 冯天天, 徐明. 基于网络系统的结构分析和统计学方法构建中国可持续发展目标的关键目标和核心指标[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(1): 20-29.]
- [3] Zou Chaoyu, Bai Gangshuan. Formation Cause and Control Methods about Soil Salinization in Hetao Irrigation Area [J]. Yellow River, 2015, 37(9): 143-148. [邹超煜, 白岗栓. 河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 143-148.]
- [4] Litalien A, Zeeb B. Curing the Earth: A Review of Anthropogenic Soil Salinization and Plant-based Strategies for Sustainable Mitigation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134235. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134235.
- [5] Wang Y, Deng C, Liu Y, *et al.* Identifying Change in Spatial Accumulation of Soil Salinity in an Inland River Watershed, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 177-185.
- [6] Liu Zhiming, Yan Ming, He Yanfen. Research on Land Saline-Alkalized in the West of Jilin Province [J]. Resources Science, 2004, 26(5): 111-116. [刘志明, 晏明, 何艳芬. 吉林省西部土地盐碱化研究[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 111-116.]
- [7] Zhang Suming, Zhao Gengxing, Wang Zhaoran, *et al.* Remote Sensing Inversion and Dynamic Monitoring of Soil Salt in Coastal Saline Area [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(4): 349-358. [张素铭, 赵庚星, 王卓然, 等. 滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 349-358.]
- [8] Zhang Chengwen, Tang Jiakui, Yu Xinju, *et al.* Quantitative Retrieval of Soil Salt Content based on Remote Sensing in the Yellow River Delta [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(2): 220-227. [张成雯, 唐家奎, 于新菊, 等. 黄河三角洲土壤含盐量定量遥感反演[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 220-227.]
- [9] Xu Di, Wang Shaoli, Cai Lingen, *et al.* Applied Study on Identification of Crops and Salinity Distribution by NDVI Index [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 5-8, 32. [许迪, 王少丽, 蔡林根, 等. 利用NDVI指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8+32.]
- [10] He Qisheng, Tashpolat Tiyp, Ding Jianli. The Extraction of Saline Soil Information in Arid Area based on Decision Tree Algorithm: A Case Study in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. Resources Science, 2006, 28(6): 134-140. [何祺胜, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽. 基于决策树方法的干旱区盐渍地信息提取—以渭干河—库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 134-140.]
- [11] Tashpolat Tiyp, Zhang Fei, Ding Jianli, *et al.* Spatial Information on Salinization of Typical Oases in Arid Areas [J]. Arid Land Geography, 2007(4): 544-551. [塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 丁建丽, 等. 干旱区典型绿洲盐渍化土壤空间信息研究[J]. 干旱区地理, 2007(4): 544-551.]
- [12] Guo B, Yang F, Fan Y, *et al.* Dynamic Monitoring of Soil Salinization in Yellow River Delta Utilizing MSAVI-SI Feature Space Models with Landsat Images [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(10): 308. doi: 10.1007/s12665-019-8319-8.
- [13] Wei H, Wang J, Cheng K, *et al.* Desertification Information Extraction based on Feature Space Combinations on the Mongolian Plateau [J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1614.
- [14] Ding Jianli, Zhai Juan, Sun Yongmeng, *et al.* The Retrieval Model of Soil Salinization Information in Arid Region based on MSAVI-WI Feature Space [J]. Geographical Research, 2013, 32(2): 223-232. [丁建丽, 翟娟, 孙永猛, 等. 基于MSAVI-WI特征空间的新疆渭干河—库车河流域绿洲土壤盐渍化研究[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 223-232.]
- [15] Wang Fei, Ding Jianli, Wu Manchun. 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): 168-173. [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.]
- [16] Feng Juan, Ding Jianli, Wei Wenxu. A Study of Soil Salinization in Weigan and Kuqa Rivers Oasis based on Albedo-MSAVI Feature Space [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(2): 147-152. [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.]
- [17] Ha Xueping, Ding Jianli, Tashpolat Tiyp, *et al.* Si-Albedo Space-based Extraction of Salinization Information in Arid Area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 381-390. [哈学萍, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 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.]
- [18] Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Zou Ping, *et al.* Characteristics of Soil Salinity Profiles and Their Electro Magnetic Response under Various Vegetation Types in Coastal Saline Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2117-2124. [杨劲松, 姚荣江, 邹平, 等. 海涂区不同植被类型下土壤盐渍剖面及其电磁感应响应特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2117-2124.]
- [19] McKinney R, Hanson A, Johnson R, *et al.* Seasonal Variation in Apparent Conductivity and Soil Salinity at Two Narragansett Bay, RI Salt Marshes [J]. Peer J, 2019, 7: e8074. doi: 10.7717/peerj.8074.
- [20] Liang S. Narrowband to Broadband Coconversions of Land Surface Albedo: Algorithms [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [21] Khan N M, Sato Y. Monitoring Hydro-salinity Status and Its Impact in Irrigated Semi-arid Areas Using IRS-1B LISS-II Data [J]. Asian J Geoinform, 2001, 1(3): 63-73.

- [22] Wu Zhaopeng, Wang Mingxia, Zhao Xiao. A Study On Desertification based on Desertification Difference Index in Jinghe Watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 188-192.[毋兆鹏, 王明霞, 赵晓. 基于荒漠化差值指数(DDI)的精河流域荒漠化研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4):188-192.]
- [23] Lu Rukun. Soil Agrochemistry Analysis Protocoes[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 2000: 85-96.[鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业科技出版社, 2000: 85-96.]

Remote Sensing Extraction of Soil Salinity in Yellow River Delta Kenli County based on Feature Space

Bian Lingling^{1,2}, Wang Juanle^{2,4}, Guo Bing¹, Cheng Kai^{2,3}, Wei Haishuo^{1,2}

(1.School of Architecture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2.State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

4.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Soil salinization is an important challenge to achieve sustainable use of land resources. The appropriate method for remote sensing quantitative inversion in the coastal Yellow River Delta region of China can provide technical reference for regional salinization monitoring and prevention. Utilizing Landsat 8 OLI image and field measured data, we extracted key surface characteristic parameters, quantitatively discussed the law and relationship between soil salinity and surface biophysical parameters and established a soil salinity inversion model. The results show that the inversion precisions of Albedo-MSAVI, SI-Albedo and SI-NDVI feature space are 83.4%, 88.8% and 80.6% respectively. The analysis shows the SI-Albedo model is suitable for the inversion of salinization level in Binhai areas. For Albedo-MSAVI and SI-NDVI models, they have certain reference significance for salinization information extraction in inland arid and semi-arid areas. Based on the inversion of the SI-Albedo feature space with the highest accuracy, the level of salinization in Kenli County is generally high-low-high trends from the east to the west, which is consistent with the formation mechanism of salt accumulation in this area.

Key words: Salinization; Feature space; Remote sensing inversion; Yellow River Delta; Kenli County