

张丽娟, 俄胜哲, 袁金华, 等. 民勤绿洲盐渍化土壤的遥感反演及分布特征. 土壤, 2025, 57(5): 1168–1177.

民勤绿洲盐渍化土壤的遥感反演及分布特征^①

张丽娟¹, 俄胜哲^{1,2*}, 袁金华², 白艳萍², 李颖², 赵晓龙¹, 郭雨晴¹

(1 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

摘要: 基于 Landsat 系列多光谱遥感影像和野外实测土壤盐分数据, 通过盐分指数和归一化植被指数等光谱指数与土壤盐分构建遥感监测指数模型, 分析民勤绿洲盐渍化空间格局分布特征, 剖析该区域土壤盐渍化现象在年内不同季节所展现的时空分布特性。结果表明: ①考虑植被因素的土壤盐渍化遥感监测指数模型反演精度可达 0.746; ②研究区土壤盐渍化整体呈现南低北高、西低东高的分布格局, 分布受地物特征影响有所不同; ③土壤盐渍化总体呈现夏秋季盐分积累, 春冬季盐分脱降现象, 形成“降盐-积盐-积盐-降盐”的季节性特征, 季节性演变方向主要为盐土与重度盐渍化土、重度盐渍化土与中度盐渍化土间的相互转化。

关键词: 盐渍化; 时空变化; 季节特征; 遥感监测; 民勤绿洲

中图分类号: S15 文献标志码: A

Remote Sensing Inversion and Distribution Characteristics of Soil Salinization in Minqin Oasis

ZHANG Lijuan¹, E Shengzhe^{1,2*}, YUAN Jinhua², BAI Yanping², LI Ying², ZHAO Xiaolong¹, GUO Yuqing¹

(1 College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on Landsat multispectral remote sensing images and field measured soil salinity data, the remote sensing monitoring index model was constructed by using spectral indices such as salinity index and normalized vegetation index with soil salinity to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of soil salinity in Minqin Oasis in different seasons of the year. The results showed that: 1) The inversion accuracy of the remote sensing soil salinity monitoring index model was up to 0.746 considering the vegetation factor; 2) The overall distribution pattern of soil salinization in the study area was low in the south and high in the north, low in the west and high in the east, which was affected differently by terrain physical features; 3) Soil salinity accumulated in the summer and autumn and reduced in the spring and winter, forming the seasonal characteristic of “salt reduction - salt accumulation - salt accumulation - salt reduction” in a year, and the direction of seasonal evolution was mainly the mutual transformation between saline soil and heavy salinized soil, between heavy salinized soil and moderate salinized soil.

Key words: Salinization; Spatial and temporal changes; Seasonal characteristics; Remote sensing monitoring; Minqin Oasis

在干旱与半干旱的西北地区, 土壤中的盐分由于低降水、高蒸发、地下水位上升、不合理灌溉和植被退化等自然和人为因素导致盐分在地面表聚, 逐渐形成盐渍化问题^[1-3], 对生态环境的稳定与农业生产可持续发展构成严重威胁^[4-6]。位于石羊河末端的民勤绿洲, 是干旱内陆河流域土壤和生态退化的敏感脆弱区^[7-8], 在自然因素(如气候、地形)与人为活动(如利用高矿化度地下水灌溉、耕作)的综合影响下^[9-10], 土

壤盐渍化程度加剧, 土壤盐渍化空间分布复杂多样。因此, 借助遥感技术及时准确研究土壤盐渍化的空间分布特征, 对准确评估盐渍化对生态环境的潜在威胁, 推动干旱区域的可持续发展, 都具有至关重要的作用^[11]。

目前, 通过定量遥感手段监测土壤盐分信息是土壤盐渍化监测研究的热点之一。如, 杨小虎等^[12]基于 Landsat 系列遥感影像数据结合实测土壤盐分数

①基金项目: 第三次全国土壤普查省级盐碱地成果汇总项目(BGZJ-ZC23551-05)资助。

* 通信作者(eshengzhe@163.com)

作者简介: 张丽娟(1992—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染和遥感监测研究。E-mail: 1176454554@qq.com

据,选取归一化差异水体指数与土壤盐分构建高精度遥感反演模型,分析了土壤盐分空间分布特征与规律;陈红艳等^[13]引入短波红外数据改进传统植被指数建立遥感反演模型,进一步提高了植被指数与土壤盐分间的相关性,指数间的多重共线性大幅度降低;陈实等^[14]基于 MODIS 数据,分析归一化植被指数和盐分指数之间的二维特征空间关系,建立土壤盐渍化遥感监测模型,分析了北疆农区土壤盐渍化时空分布演变规律;张同瑞等^[15]利用便携式多光谱相机和 pH 计采集数据,通过筛选最优指数,建立了最佳土壤盐分反演模型;关红等^[16]通过对实测植被和土壤光谱曲线并进行多种数学变换,筛选最佳变换形式,构造盐分指数及植被指数,利用多元非线性回归分析建立了土壤盐渍化遥感监测模型,其中模拟值和实测值的相关系数达 0.758 9;刘恩等^[17]以黄河三角洲小开河引黄灌区为例,基于 Landsat8 OLI 光谱影像,选取诊断指数较大的光谱反射率和土壤盐分数据构建了土壤盐分反演模型。

然而,由于不同区域间土壤盐分空间分异情况复杂,利用遥感技术在宏观尺度上对民勤绿洲盐渍化空间分布特征的研究仍然较少。因此,本研究利用 Google Earth Engine (GEE)云平台中的 Landsat-8 OLI 数据与野外实测数据,获取遥感数据的归一化植被指

数与盐分指数等光谱指数因子,构建土壤盐渍化遥感指数监测模型,以研究民勤绿洲土壤盐渍化的空间分布特征及时空演变规律,以期为干旱地区土壤盐渍化的有效防治和区域土壤资源可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

民勤县位于甘肃省河西走廊东北部($101^{\circ}49'41''E \sim 104^{\circ}12'10''E$, $38^{\circ}30'45''N \sim 39^{\circ}27'37''N$),主要农区和人居区为石羊河在西北、东北和东南方向被巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠环绕浇灌出的一片狭长绿洲(图 1)。受地质构造演变影响,沙漠戈壁、低山丘陵和冲洪积湖积平原在民勤县均有分布。民勤是典型的温带大陆性干旱沙漠气候区,年平均降水量 113.2 mm,年平均日照时数 3 134.5 h,年平均水面蒸发量 2 664 mm,为全球极度干旱地区之一。作为民勤县唯一地表径流的石羊河水域,汇集南部祁连山区的降雨、冰川融水和盆地内极少量的降雨,携带着土壤的盐分从水势高的南部向水势低的北部迁移。境内地下水主要以地表水入渗补给、大气降水入渗补给和侧向潜流补给为主,在绿洲灌区井河混灌的灌水模式下,地下水的大量抽取使地下水位不断下降。

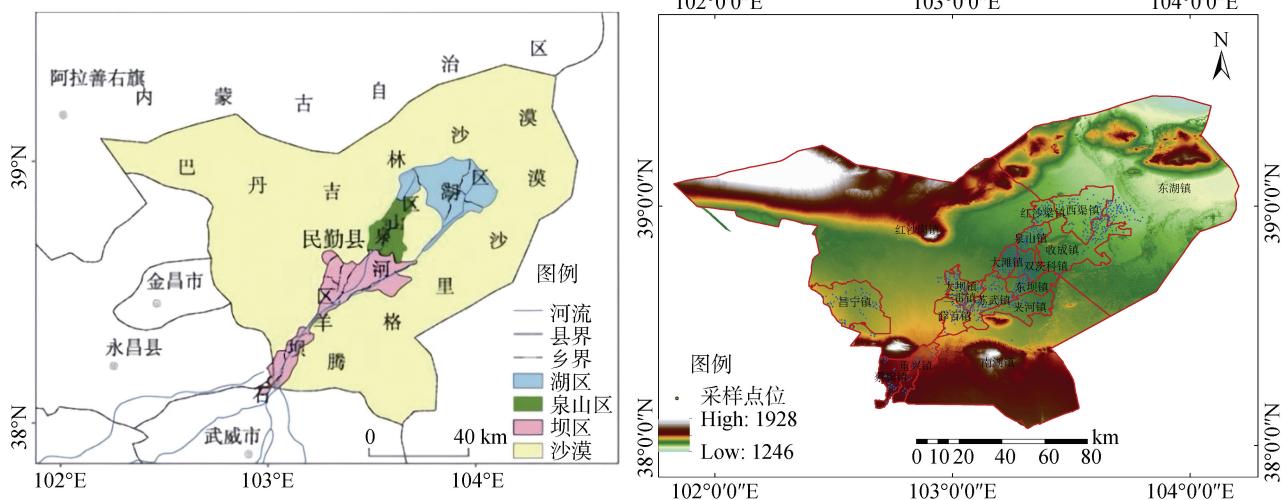


图 1 研究区与采样点位置
Fig. 1 Location of study area and sampling sites

民勤县国土总面积 1.58 万 km²,沙漠及各类荒漠化土地面积占全县土地总面积的 81.76%,而可利用的绿洲仅为 0.289 万 km²,包括城镇、灌区和废弃的盐碱荒地。据调查,绿洲耕地面积 0.119 7 万 km²,盐碱地总面积 0.117 4 万 km²,其中盐碱耕地 0.052 7

万 km²(占比 44.9%),盐碱荒地 0.064 7 万 km²。土壤类型主要有灰棕漠土、风沙土、草甸土、盐土等自然土壤和经长期灌溉淋溶、耕作施肥等人为因素影响形成的绿洲灌漠土。土壤盐渍化类型多以硫酸盐-氯化物型为主。土壤质地以粉砂质壤土为主,通透性好,

蓄水保肥能力较强,易产生盐渍化。植被类型主要包括粮食作物及蔬菜、葵花、瓜果、小茴香等农作物,以及红沙、白刺、盐爪爪、沙蒿、柽柳、盐地碱蓬、芦苇、芨芨草等自然植被。农作物种植制度为玉米、小麦、水稻等一年一熟制。

1.2 数据来源

1) 土样采集与分析。2022年9月27日至12月1日进行野外土壤调查采样,同时用GPS记录采样点经纬度信息。此时地表多为农作物植被覆盖,采样时去除地表杂物等,采用网格法布设点位,五点法采集样点四周土壤表层0~20 cm土壤进行混合,并用四分法缩分后留作样本,共采集土壤样品225个。将土样在实验室内进行风干、研磨、过筛处理,按1:5土水质量比制备土壤浸提溶液,用多功能分析型离子色谱仪测定土壤八大盐分离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})含量,以八大盐分离子含量之和计算土壤含盐量。

2) 遥感影像数据获取。本研究选取采样期间的2022年10月Landsat 8 OLI遥感数据源作为土壤盐渍化遥感监测的主要影像数据,另选取民勤县2022年3月、6月、9月、12月共4期遥感影像用于研究绿洲区域土壤盐分含量年内季节性动态变化。遥感影像空间分辨为30 m,下载于GEE(Google earth engine)云端运算平台(<https://code.earthengine.com/>),影像数据已进行裁剪拼接、去云处理、辐射定标等预处理。利用ENVI5.6软件中的“Band Math”对波段反射率进行选取的光谱指数计算,在ArcGIS10.8软件中加载遥感指数计算结果,并通过“多值提取至点”工具,提取土壤盐分实测点位地理坐标对应的光谱指数值。

1.3 研究方法

1) 土壤盐渍化监测光谱指数获取。依据前人研

究^[18],选取遥感光谱指数土壤盐分指数(SI)^[19]和间接反映土壤含盐量的归一化差值植被指数(NDVI)^[20],构建土壤盐分含量反演模型。本研究采用Landsat系列遥感数据,依据NDVI和SI构建二维特征空间,建立土壤盐渍化特征遥感指数模型MSDI^[21],旨在宏观监测土壤盐渍化分布特征。

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}} \quad (1)$$

$$SI = \sqrt{P_{blue} \times P_{red}} \quad (2)$$

$$MSDI = \sqrt{(NDVI - 1)^2 + SI^2} \quad (3)$$

式中: NDVI指归一化植被指数; SI指土壤盐分指数; MSDI指土壤盐渍化特征监测指数; P_{nir} 、 P_{blue} 、 P_{red} 分别指近红外波段、蓝光波段和红光波段反射率值。

2) 数据的归一化处理。为了消除各指数量纲不同(单位、数量级差异)带来的影响,将数据线性转换到[0, 1]范围内。在对光谱参数建立模型前,采用ArcGIS软件计算研究区内NDVI和SI的最大值和最小值,并对数据进行归一化处理。

$$N = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100\% \quad (4)$$

$$S = \frac{SI - SI_{min}}{SI_{max} - SI_{min}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 指计算的归一化植被指数的最小值、最大值; SI_{min} 、 SI_{max} 指计算的盐分指数的最小值、最大值; N 、 S 指归一化植被指数、盐分指数的归一化值。

3) 遥感监测指数模型构建与验证。在ArcGIS中提取盐渍化指数模型信息,然后按照干旱区盐碱耕地土壤盐渍化程度分类分级标准(表1),得到基于Landsat 8 OIL的土壤遥感反演盐渍化程度等级图,进而分析研究区土壤盐分空间格局。

表1 土壤盐渍化分级
Table 1 Soil salinized degree

盐碱地分级	非盐渍化土	轻度盐渍化土	中度盐渍化土	重度盐渍化土	盐土
遥感反演区间	<0.243 69	0.243 69~0.360 24	0.360 24~0.560 04	0.560 04~0.826 44	>0.826 44
土壤含盐量(g/kg)	<2.5	2.5~6.0	6.0~12.0	12.0~20.0	>20.0

在筛选并剔除异常值后,使用225个实测的土壤含盐量数据,与相应30 m×30 m像元的遥感数据反演预测结果,通过Origin2024软件进行线性拟合,对土壤盐渍化监测指数模型进行精度验证。通过决定系数(R^2)和总均方根误差(RMSE)来评估模型的稳定性与预测性能。 R^2 的取值范围为0~1,数值越大,表明模型的稳定性和拟合效果越好。RMSE越接近0,

模型值和实测值越接近,表明模型精度越高。RMSE计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z^*(SI) - z(SI)}^2 \quad (6)$$

式中: m 为样本总数; $z^*(SI)$ 为土壤盐分预测值, $z(SI)$ 为土壤盐分实测值。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分反演模型构建及验证

在以土壤含盐量实测值为自变量、光谱指标

MSDI 为因变量的条件下, 对样点数据进行线性回归分析, 以验证土壤盐渍化遥感指数模型 MSDI 的可靠性(图 2)。结果显示, 民勤绿洲土壤盐分实测值与模型反演值之间的相关系数达 0.863 8, 决定系数 R^2 达 0.746 22, 总均方根误差 RMSE 为 2.79。表明考虑植被指数和土壤盐分指数建立的模型在反演值与真实值之间具有较高的相关性, 模型的可信度较高, 证明该模型适用于民勤绿洲土壤盐渍化遥感监测。

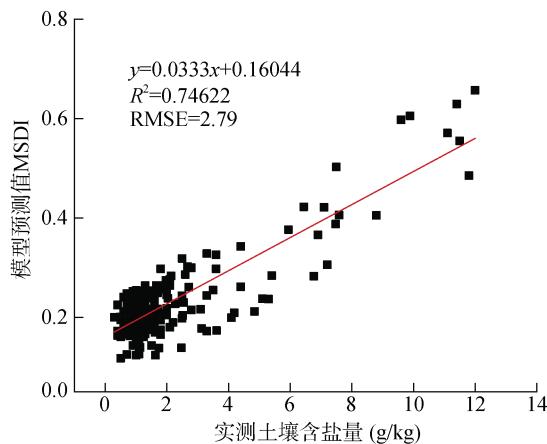


图 2 土壤含盐量实测值与预测值散点图

Fig. 2 Scatterplot of measured soil salinity and fitted soil salinity inversed

2.2 土壤盐渍化程度空间分布

2.2.1 土壤盐渍化整体空间分布特征 利用光谱指数反演模型对民勤绿洲土壤盐分进行反演, 并对盐渍化分布进行分级和统计, 结果如图 3 所示。民勤绿洲不同盐渍化程度土壤面积大小依次为盐土、非盐渍化土、轻度盐渍化土、中度盐渍化土和重度盐渍化土。其中, 重度盐渍化土和盐土($\geq 12.0 \text{ g/kg}$)共占比 53.348%, 整体盐分较高。区内土壤含盐量分布具有明显区域差异性, 非盐渍化土主要位于沙漠绿洲的西南部和北部中心区域, 土壤含盐量较低; 而在绿洲中心位置、北部东侧和西侧某些地区以盐渍化土为主, 其中重度盐渍化土斑块状分布于中部东侧靠近腾格里沙漠及东北部的部分区域。北部地区(湖区)盐分含量高于南部(泉山区、坝区), 主要是由于研究区北部位于石羊河流域末端, 上中游河水携带众多溶解度高的矿物质(如氯化物、硫酸盐等)在下游积聚, 导致北部成为积盐场所。而沿经度方向, 在中部东侧边缘区和西南部分区域盐分含量较高, 可能是因为其位于低

山丘陵狼跑泉山、红崖山与阿拉古山、苏武山等剥蚀山末缘夹积的平缓低洼地带, 因而大部分盐分沉积下来, 且沙漠边缘地表植被稀疏, 蒸发强烈, 导致盐分离子含量较高。

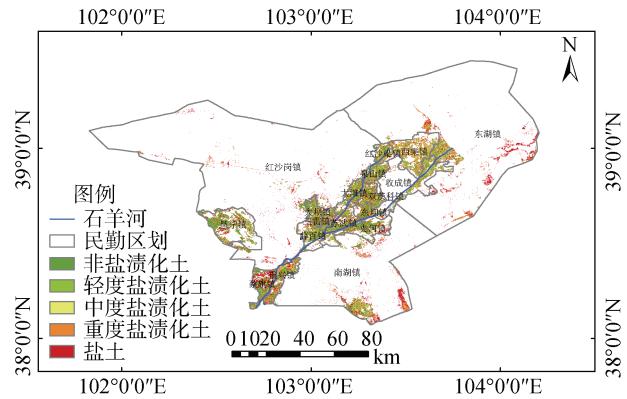


图 3 盐分含量反演等级分布图
Fig. 3 Distribution of soil salinity degrees inversed by remote sensing monitoring indices

非盐渍化土广泛分布于地势海拔较高的各乡(镇)灌淤土、潮土以及各级渠道旁土壤中, 以昌宁镇、坝区苏武乡和薛百乡所占面积最大, 泉山区零星分布在大滩和双茨科镇, 湖区则主要分布在收成镇, 占整个绿洲区总耕地面积(仅包括坝区、泉山区、湖区灌区面积)的 14.67%; 轻度盐渍化土主要分布在坝区北部及夹河中部, 在泉山区主要分布在泉山镇、大滩乡和双茨科镇, 湖区在西渠镇和收成镇, 其面积占整个绿洲区总耕地面积的 14.597%; 中度盐渍化土主要分布在泉山区红沙梁镇、湖区西渠镇和东湖镇, 坝区也有零星分布, 但面积相对较小, 占整个绿洲区总耕地面积的 17.378%; 重度盐渍化土占整个绿洲区总耕地面积的 22.550%, 主要分布在坝区蔡旗镇、重兴镇、三雷镇和双茨科镇, 泉山区红沙梁镇, 湖区西渠镇和东湖镇大部分村庄; 盐土所占比例相对较大, 占盐渍化总面积的 30.798%, 高达中度盐渍化土壤的 2 倍, 主要分布在东湖镇、红沙岗镇、南湖镇、蔡旗镇和昌宁镇。

2.2.2 土壤盐渍化局部空间分布特征 结合盐渍化土壤分布区的地形、海拔、土壤母质、水文、地质、地下水水位等地物特征进行分析发现: ①海拔高度相对较低、地形低洼的湖盆洼地、山间低谷多分布盐渍化土壤, 如蔡旗镇的白圪垯滩、山水沟、干草坑, 西渠镇的辉煌村、雨圣村、志云村、珠明村、水圣村、火坎村、外西村、巨元村, 红沙梁镇的义地村、花寨村、新沟村、上王化村等地区盐渍化土壤分布较多; ②湖泊周围容易出现土壤盐渍化状况, 历史上诸多湖

水盆地蒸发干涸演变成盐湖，如东湖镇的青土湖，重兴镇的柴湖、苇湖，三雷镇和苏武镇的北草湖，西渠镇的白土井，南湖镇的汤家海盐池等地形成盐湖区土壤母质，含盐量较高，为盐渍化发展提供了物质基础，且在盐湖附近也有盐渍化现象；③土壤质地黏重地区也存在盐渍化现象，如石羊河上游的重兴镇和蔡旗镇河流湿地与红崖山人工沙漠水库等组成的湿地土壤、南湖镇的榆树湖表层黏质土壤覆盖层，抑制毛管水上升和水分蒸发，同时又对洗盐排碱起阻滞作用，不利于土壤脱盐，而风沙土的存在也加速土壤返盐，如南湖镇的沙枣树坑、掌心子、甘家海子、大沙窝井，东湖镇的独沙窝、红沙岗镇的张家井湾等都是绿洲在向沙漠退化发展过程中形成的风沙土，毛管水上升快且高度高，土壤极易产生盐渍化；④地下水水位较高地区盐渍化土分布也比较严重，石羊河阶地外河两岸周边地下水水位较高，尤其在石羊河下游的收成镇和西渠镇，地下水和土壤中的盐分在蒸发作用下发生表聚，土壤的盐分含量升高。此外，靠近红崖山水库的重兴镇东风村、黑山村、红旗谷等地受到蓄水水库顶托，地下水水位也相对较高，土壤盐渍化程度也较为严重。

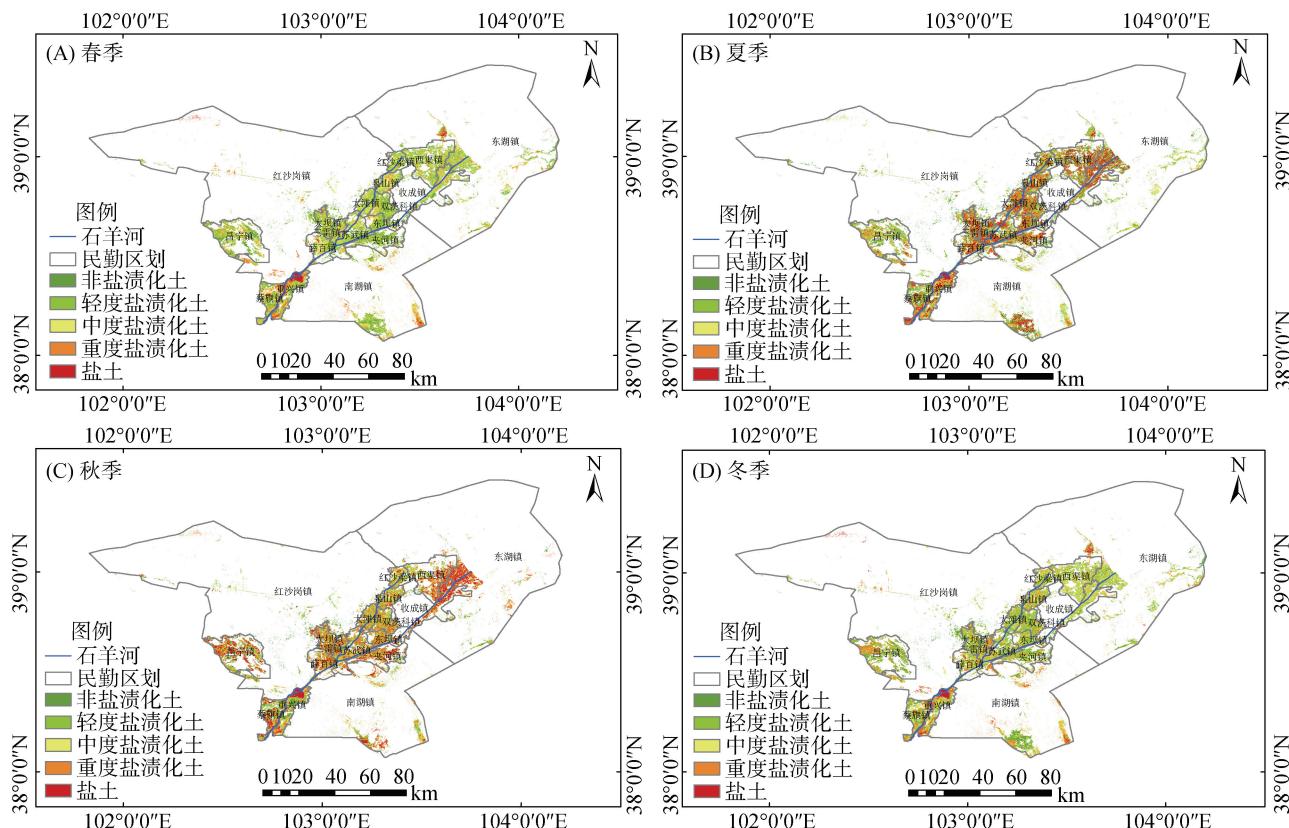


图 4 2022 年四季各类盐渍化土壤空间分布
Fig. 4 Spatial distribution soils with various salinized degrees in four seasons of 2022

2.3 土壤盐渍化程度时间分布

2.3.1 土壤盐渍化季节分布特征

为了将民勤绿洲土壤盐渍化程度的年内变化更加直观地反映出来，本研究分别对 2022 年 3 月(春季)、6 月(夏季)、9 月(秋季)和 12 月(冬季)4 期遥感影像进行反演(图 4)，并依据 Jenks 自然间断点分类法^[22]分别计算年内各季节不同盐渍化程度土壤面积及其占比。结果显示，民勤县春、夏、秋、冬四季各类盐渍土壤面积值分别为 2 803.196、2 898.101、2 587.660 和 2 801.689 km²。春—冬，盐渍化土总面积呈先减少后增加的变化趋势；春—秋，盐渍化土面积总体降低了 157.77 km²，其中春—夏减少了 32.4 km²，夏—秋减少了 124.65 km²；秋—冬，盐渍化土面积总体呈增加趋势，增加了 88.74 km²。春季，盐渍化土主要为中度盐渍化等级，面积为 1 060.713 km²，占比 37.83%，其次为轻度盐渍化等级，面积为 1 013.720 km²，占比 36.163%。夏季，轻度、中度、重度盐渍化土和盐土均分布较多，面积分别为 655.155、630.405、634.996 和 584.528 km²，占比分别为 22.606%、21.752%、21.911% 和 20.169%。秋季，盐渍化土分布在中、重度盐渍化和盐土等级，其中中度和重度盐渍化土面积高达 1 357.17 km²，共

占比 52.45%，其次为盐土，面积为 552.042 km^2 ，占比 21.334%。冬季，则以中度盐渍化等级居多，面积 993.467 km^2 ，占比为 35.460%，其次为轻度盐渍化等级，面积 848.587 km^2 ，比例为 30.288%。

不同类型盐渍化土壤随季节的变化程度也不同（图 5）。非盐渍化土的面积随季节呈先增加后减少再增加的趋势，其中夏季和冬季增加了 120.017 和 125.288 km^2 ，增幅达 48.3% 和 60.5%，夏–秋非盐渍化土面积减少了 185.788 km^2 ，占比由 13.561% 降至 8.008%；轻度和中度盐渍化土面积呈春、冬季增高，夏、秋季降低的趋势，春–夏轻、中度盐渍化土降幅分别为 35.4%、40.6%，秋–冬轻、中度盐渍化土增幅分别为 80.08%、50.58%；重度盐渍化土和盐土面积呈夏、秋季增高，春、冬季降低的趋势，其中盐土在春–夏面积大幅度增加，秋–冬面积大幅度降低，骤增和骤降面积分别为

523.041 和 468.746 km^2 ，春–夏重度盐渍化土和盐土增幅分别为 57.9% 和 850.7%，秋–冬重度盐渍化土和盐土降幅分别为 22.0% 和 84.9%。综合对比表明，研究区春季和冬季轻度和中度盐渍化土分布面积增加，重度盐渍化土和盐土分布减少，而在夏季和秋季轻度和中度盐渍化土分布减少，重度盐渍化土和盐土分布增加。各季节土壤盐分总体上表现为夏秋季盐分积累、春冬季盐分脱降的现象，形成了年内“降盐–积盐–积盐–降盐”的季节性变化规律。

2.3.2 盐渍化程度季节变化分析

对非盐渍化土壤至盐土 5 个等级分别赋值 1 ~ 5，并依据表 2 对年内不同季节研究区土壤盐渍化程度反演图进行叠。分析并融合，得到不同季节不同盐渍化等级的变化图（图 6），随后对土壤盐渍化空间分布图进行分类统计和提取，分析土壤盐渍化的空间变化。

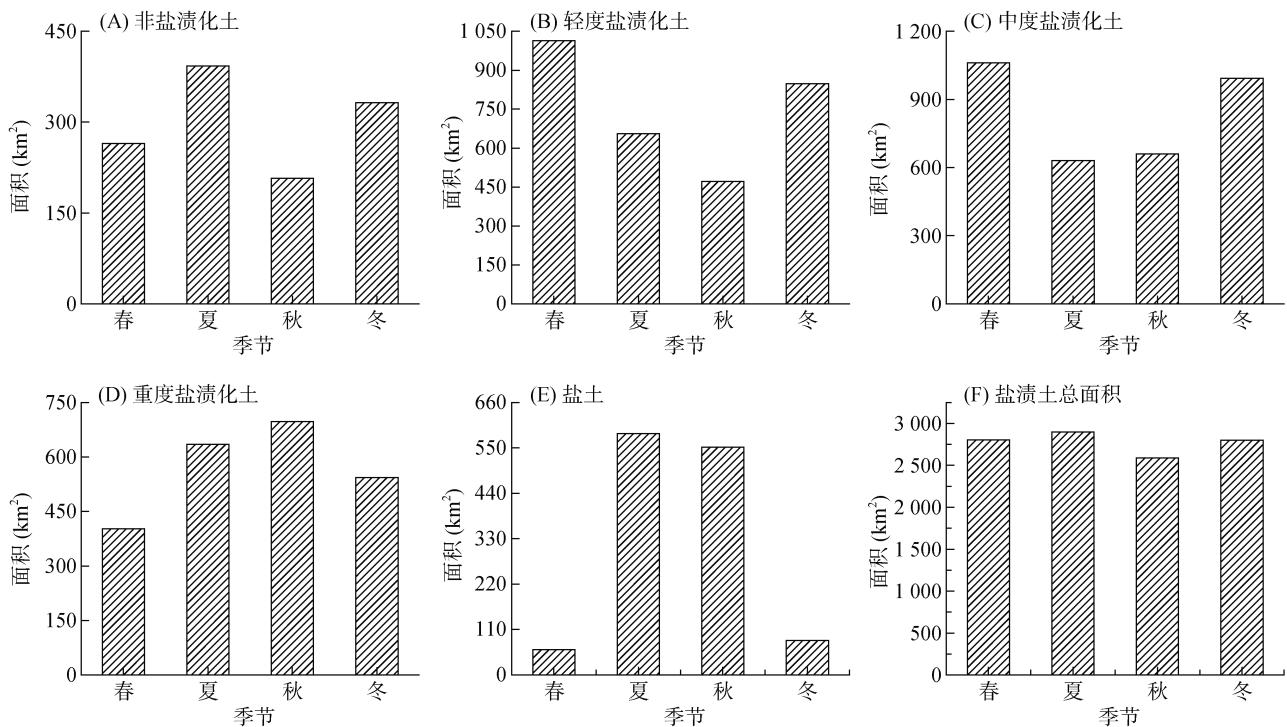


图 5 民勤县 2022 年四季不同程度盐渍化土壤变化规律

Fig. 5 Area changes of soils with various salinized degrees from March to December, 2022 in Minqin County

表 2 民勤绿洲土壤盐渍化发展分级

Table 2 Transformation between soil salinized degrees in Minqin Oasis

明显逆转 (变化等级 ≤ -2)	逆转 (变化等级 = -1)	稳定 (变化等级 = 0)	发展 (变化等级 = 1)	严重发展 (变化等级 ≥ 2)
3→1、4→1、4→2 5→1、5→2、5→3	2→1、3→2 4→3、5→4	1→1、2→2 3→3、4→4、5→5	1→2、2→3 3→4、4→5	1→3、1→4、1→5 2→4、2→5、3→5

结果显示，春–夏、夏–秋、秋–冬研究区土壤盐渍化有所逆转(变化等级 ≤ -1)地区总面积分别为 838.743 、 552.436 、 1259.218 km^2 ，土壤盐渍化有所

发展(变化等级 ≥ 1)地区总面积依次为 1260.07 、 1014.039 、 554.102 km^2 ，在春–夏和夏–秋有所逆转地区总面积小于有所发展地区总面积，在秋–冬有所

逆转地区的总面积远大于有所发展地区总面积。在 3 个时段中, 土壤盐渍化的发展(等级变化=1)面积表现出先增加后减少的趋势。夏-秋, 盐渍化发展的土壤面积达到 676.273 km^2 , 占整个研究区总面积的 26.135%, 相比春-夏增加了 114.854 km^2 , 而相比秋-冬减少了 215.599 km^2 。而土壤盐渍化严重发展(变化等级 ≥ 2)的土壤面积在 3 个时段内呈现出逐渐减少的趋势。其中, 春-夏严重发展的面积为 698.651 km^2 , 占总面积的 24.924%; 而秋-冬这一面积减少至仅 93.428 km^2 , 占比 3.617%, 年内降幅高达 86.6%, 说明夏季土壤盐渍化程度较高, 这可能是由于研究区正处于作物生长旺盛期, 高矿化度地下水灌溉用量较大, 在蒸发和蒸腾双重作用下, 地下水中的盐分积累在土壤中, 引起土壤积盐; 秋季由于气候干燥且蒸发强烈, 加上地表植被覆盖减少, 使土壤深层的盐分容易随地下水蒸提及地表并积累。相比之下, 春季和冬季的土壤盐分含量相对较低, 这可能与冬春灌和春季冰雪融化水分较为充足有关, 冬季保证作物正常生长的冬灌后, 表层土壤盐分含量因为冬灌而降低, 而到春季冰雪融化水分较为充足, 盐分随着水分的淋溶向土层深处迁移。

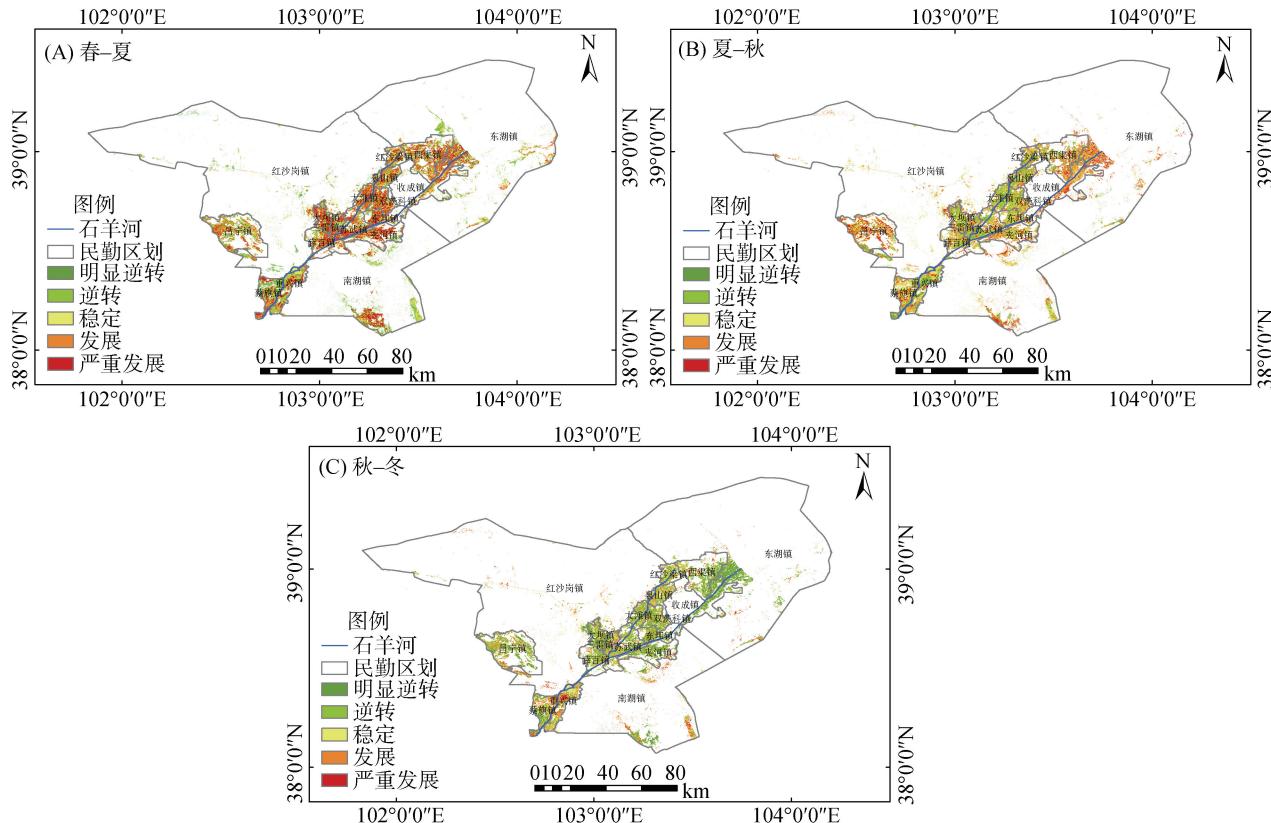


图 6 春、夏、秋、冬四季民勤绿洲土壤盐渍化发展变化
Fig. 6 Seasonal evolution of soil salinity in Minqin Oasis

2.3.3 土壤盐渍化结构季节变化分析

利用 ArcGIS 将反演得到的土壤盐渍化分类结果转为矢量数据, 再对各季矢量数据进行叠置分析, 最后对相同盐渍化程度进行融合, 得到不同盐渍化程度土壤面积, 再利用 Excel 统计分析得出不同季节各种盐渍化程度土壤之间的转移矩阵。

结合图 6 及表 3 可知, 春-夏, 民勤绿洲土壤盐渍化有所逆转地区主要在昌宁镇、蔡旗镇、重兴镇和东湖镇等乡镇, 转化方向主要包括重度盐渍化土向中度盐渍化土转化(158.397 km^2)、中度盐渍化土向轻度盐渍化土转化(298.822 km^2), 及轻度盐渍化土向非盐渍化土转化(220.254 km^2); 土壤盐渍化有所发展的地区广泛分布于整个研究区, 几乎没有未变或减轻的区域, 其中轻度盐渍化土向重度盐渍化土转化 223.953 km^2 , 中度盐渍化土向重度盐渍化土转化 258.789 km^2 , 而中度盐渍化土向盐土转化 214.525 km^2 。

结合图 6 及表 4 可知, 夏-秋, 民勤绿洲土壤盐渍化有所逆转地区主要在重兴镇、薛百镇、三雷镇、大坝镇、苏武镇和大滩镇等乡镇, 转化方向主要为重度盐渍化土向中度盐渍化土转化(133.963 km^2)、盐土向重度盐渍化土转化(161.978 km^2); 土壤盐渍化有所

表3 春-夏民勤绿洲土壤盐渍化转移矩阵(km^2)
Table 3 Soil salinity transfer matrix from spring to summer in Minqin Oasis

春季	夏季				
	非盐渍化土	轻度盐渍化土	中度盐渍化土	重度盐渍化土	盐土
非盐渍化土	114.578	53.287	46.359	32.796	17.978
轻度盐渍化土	220.254	224.127	182.340	223.953	163.040
中度盐渍化土	53.366	298.822	235.202	258.789	214.525
重度盐渍化土	2.718	75.685	158.397	98.468	67.003
盐土	0.206	1.229	7.211	20.856	31.971

表4 夏-秋民勤绿洲土壤盐渍化转移矩阵(km^2)
Table 4 Soil salinity transfer matrix from summer to fall in Minqin Oasis

夏季	秋季				
	未盐渍化土	轻度盐渍化土	中度盐渍化土	重度盐渍化土	盐土
未盐渍化土	139.150	123.516	57.586	28.760	9.986
轻度盐渍化土	41.914	232.608	189.032	76.887	45.207
中度盐渍化土	9.623	62.879	205.878	176.035	119.340
重度盐渍化土	4.849	28.073	133.963	253.727	187.691
盐土	11.692	24.148	73.317	161.978	189.786

发展地区主要在西渠镇、东湖镇、昌宁镇和蔡旗镇等乡镇，其中轻度盐渍化土向中度盐渍化土转化 189.032 km^2 ，中度盐渍化土向重度盐渍化土转化 176.035 km^2 ，重度盐渍化土向盐土转化 187.691 km^2 ，整个研究区土壤盐渍化情况均有所好转。春-夏土壤盐渍化发展和严重发展的区域，在夏-秋土壤盐渍化发生逆转和明显逆转，说明盐渍化土分布范围减小，土壤盐渍化程度好转。

结合图6及表5可知，秋-冬，民勤绿洲土壤盐

渍化有所逆转地区集中在西渠镇、东湖镇、薛百镇、三雷镇和大坝镇等乡镇，转化方向主要为重度盐渍化土向轻度盐渍化土转化(206.150 km^2)，及盐土向中度盐渍化土转化(168.781 km^2)；土壤盐渍化有所发展地区集中在重兴镇、蔡旗镇、三雷镇等乡镇，其中轻度盐渍化土向中度盐渍化土转化 198.453 km^2 ，中度盐渍化土向重度盐渍化土转化 160.655 km^2 。这段时期土壤盐渍化以稳定为主，盐渍化土分布范围依然较广。

表5 秋-冬民勤绿洲土壤盐渍化转移矩阵(km^2)
Table 5 Soil salinity transfer matrix from fall to winter in Minqin Oasis

秋季	冬季				
	未盐渍化土	轻度盐渍化土	中度盐渍化土	重度盐渍化土	盐土
未盐渍化土	93.436	75.783	29.944	7.106	0.145
轻度盐渍化土	34.589	189.678	198.453	46.619	1.401
中度盐渍化土	31.262	184.247	274.380	160.655	8.213
重度盐渍化土	46.413	206.150	246.915	170.976	25.784
盐土	86.777	132.100	168.781	121.983	40.948

通过对不同季节土壤盐渍化结构变化的分析可以看出，民勤绿洲土壤盐渍化年内季节性演变方向主要是盐土与重度盐渍化土、重度与中度盐渍化土之间的相互转变，其中盐土的变化幅度最大，说明民勤绿洲土壤盐渍化较严重。

3 讨论

3.1 盐渍化模型验证

本研究在探讨运用遥感方法监测民勤绿洲土壤

盐渍化特征时，考虑了裸土与植被双重遥感影像信息，将盐渍化过程对植被生长状态的影响间接体现在遥感数据中，计算归一化植被指数(用于量化植被覆盖与生长状态)与盐分指数(直接反映土壤盐分含量)，构建土壤盐渍化的遥感监测综合指数模型。结果表明，遥感指数反演模型的反演值与野外实测值之间的相关系数达 0.8638 ，决定系数 R^2 为 0.746 ，RMSE 为 2.79 ，表明模型稳定性和准确性较高，用于民勤绿洲土壤含盐量反演可行，同陈实等^[14]与王飞等^[18]的研

究结论一致。模型对研究区盐渍化土壤的反演效果理想, 其一是选取的遥感影像时间处于采样期间, 天气晴朗少云, 反演精度较高; 其二是选取的 Landsat 系列数据时间跨度较长, 并进行大气校正、辐射校正、去云处理等, 减少了环境对传感器的影响, 从而提高了反演精度。

3.2 盐分分布特征及其原因探究

通过对民勤绿洲不同盐渍化程度土壤分析发现, 民勤绿洲土壤盐分呈现为绿洲的西南部和北部中心区域土壤含盐量较低, 而在绿洲中心位置、北部东侧和西侧某些地区土壤含盐量高, 北部地区(湖区)盐分含量高于南部地区(泉山区、坝区)的分布特征, 这与之前研究结果相似^[23-25]。如, 陈丽娟等^[26]结合经典统计学与地统计学方法, 对该区土壤的全盐及盐基离子空间分布规律进行分析, 发现土壤含盐量在纬度方向从南到北、在经度方向从西到东呈增大趋势, 其中从西到东方向的盐分累积更显著。民勤县地处于干旱荒漠区, 气候干旱少雨, 蒸降比大, 此条件下风化沉积物中的可溶性盐易积聚于地表。而石羊河流域下游的民勤绿洲, 成为携带祁连山融化雪水、冬春雨水和基本径流的高矿化度河水的最终积盐场, 历史上白土井盐池、青山湖、黄草湖等盐池留下的化学沉积物也为土壤盐渍化提供了物质基础。此外, 用高矿化度地下水灌溉农田^[27], 在反复提取和下渗的作用下, 民勤土壤盐渍化分布加剧, 由此形成研究区的盐渍化空间分布差异。

3.3 盐渍化时空分布特征

盐分季节变化的一般规律为: 春季积盐, 夏季淋洗脱盐、秋季蒸发再度积盐、冬季趋于稳定。但本研究中, 重度盐渍化和盐土在春季减轻, 在夏季加重, 这可能是因为研究区 3 月为初春, 气温还比较低, 冬灌的水分使水盐运移的向下淋洗超过上升作用^[28], 植物枯萎使土壤中盐分运移积累缓慢, 且地表凋谢植物能抑制水分蒸发流失, 加上春耕的翻土、灌溉等农耕活动导致表层土壤含盐量下降, 因此春季土壤盐渍化程度轻。而夏季初(6 月)气温回升, 蒸发作用强烈, 降水极少, 蒸降比较高, 且不合理的大水漫灌也会抬高地下水位, 水中的盐分在毛细管力作用强于重力下渗作用的情况下于土壤地表返盐积累, 成为返盐高峰期, 研究区该时期土壤以重度盐渍化土和盐土为主。王卓然^[29]利用 2 月、4 月、8 月、11 月的黄河三角洲土壤盐分数据, 得到黄河三角洲土壤盐渍化季节变化规律为: 夏季大幅减轻-秋季大幅加重-冬季略有加重-次年春季略有减轻, 即冬季>春季≈秋季>夏季;

付腾飞^[30]选取 2011 年 4 月、9 月及 11 月的黄河三角洲土壤盐分数据, 分析研究区土壤盐渍化程度的季节变化, 得到秋季>夏季>春季。由此可见, 研究手段以及选择的月份不同, 最终得到的结果也不完全相同。本文因用一个月的平均值作为一个季节的值, 因此得到的结果与前人的结果略有出入。

研究区年内土壤盐分含量季节特征明显, 表现为夏、秋季盐分积累, 春、冬季盐分脱降的现象, 土壤盐渍化在春-夏、夏-秋程度加深, 秋-冬程度缓解, 这与窦超银等^[31]的研究结论“盐分运动受水分运动影响明显, 周年盐分动态可以分为春季强烈蒸发积盐阶段、灌溉淋洗稳定阶段、雨季淋溶脱盐阶段、秋季蒸发积盐阶段和冬季相对稳定阶段 5 个阶段”有所不同。春季土壤的盐分含量并不高, 这是因为民勤绿洲地处沙漠腹地, 属于极度干旱地区, 因降水量极少, 每年要进行冬春灌, 以保证作物正常生长, 且冬季的冻结期较长, 而春季 3 月冰雪基本融化, 较强的淋洗作用使盐分向土层深处迁移; 秋浇后至冬季冻结期土体持续脱盐, 使冬季盐分含量也不高。翌年春灌前与年前秋浇前相比, 秋浇农田脱盐显著, 而春灌农田经历冻融过程后和年前秋浇前相比积盐 7.26%^[32]。

4 结论

1) 通过对土壤含盐量实测值与土壤盐渍化遥感反演指数的相关性进行分析, 生成了土壤盐渍化遥感监测指数模型 MSDI。该指数能够在宏观层面上有效地定量描述民勤绿洲的土壤含盐量。

2) 研究区土壤盐分含量以绿洲西南部和北部中心地区表层较低, 中部、北部偏东和偏西部部分地区较高。在地形海拔低洼、土壤母质黏重、地下水水位较高的湖泊、盐湖等地物特征明显的地区, 盐渍化空间分布明显。

3) 研究区土壤盐渍化程度总体上表现为夏秋季盐分积累、春冬季盐分脱降的现象, 形成了年内“降盐-积盐-积盐-降盐”的季节性特征。民勤绿洲土壤盐渍化年内季节性演变方向主要是盐土与重度盐渍化土、重度盐渍化土与中度盐渍化土之间的相互转化, 其中盐土的变化幅度最大。

参考文献:

- [1] Wang H S, Jia G S. Satellite-based monitoring of decadal soil salinization and climate effects in a semi-arid region of China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(5): 1089–1099.

- [2] 赵欣悦, 席海洋, 赵静, 等. 阿拉善地区土壤盐渍化的遥感反演及分布特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 27–36.
- [3] 李建国, 潘励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233–1245.
- [4] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265–268.
- [5] 陈亚新, 史海滨, 魏占民, 等. 土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 买买提·沙吾提. 干旱区土壤盐渍化遥感监测与预警网络传输系统研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [7] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 孔祥德, 等. 干旱区绿洲土壤利用景观空间格局动态变化研究——以渭干河—库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 167–174.
- [8] 丁建丽, 瞿娟, 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.
- [9] 骆玉霞, 陈焕伟. GIS 支持下的 TM 图像土壤盐渍化分级[J]. 遥感信息, 2001, 16(4): 12–15.
- [10] 吉别克·哈力克巴义, 丁建丽, 谢力扎提·哈布尔. 干旱区土壤盐渍化时空动态变化及影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 112–116, 278.
- [11] 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19–24.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张同瑞, 赵庚星, 高明秀, 等. 基于近地面多光谱的黄河三角洲典型地区土壤含盐量估算研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 248–253.
- [16] 关红, 贾科利, 张至楠. 采用高光谱指数的龟裂碱土盐碱化信息提取与分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4153–4158.
- [17] 刘恩, 王军涛, 常步辉, 等. 小开河引黄灌区土壤盐渍化定量遥感反演[J]. 中国农村水利水电, 2019(12): 20–24.
- [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.
- [19] 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.
- [20] Khan N M, Sato Y. Environmental land degradation assessment in semi-arid Indus basin area using IRS-1B LISS-II data[C]//IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 9–13, 2001, Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2001: 2100–2102.
- [21] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213–238.
- [22] Wu D, Jia K L, Zhang X D, et al. Remote sensing inversion for simulation of soil salinization based on hyperspectral data and ground analysis in Yinchuan, China[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(6): 4641–4656.
- [23] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区表层土壤盐分空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 136–141.
- [24] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 等. 民勤绿洲不同土壤利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 406–414.
- [25] 杨永春. 干旱区流域下游绿洲环境变化及其成因分析——以甘肃省河西地区石羊河流域下游民勤县为例[J]. 人文地理, 2003, 18(4): 42–47.
- [26] 陈丽娟, 冯起, 成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 99–105.
- [27] 黄翠华, 薛娴, 彭飞, 等. 不同矿化度地下水灌溉对民勤土壤环境的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 590–596.
- [28] 赵露, 叶含春, 王振华, 等. 基于 SHAW 模型的北疆地区不同滴灌年限棉田冻融期土壤水热盐动态模拟研究[J]. 土壤, 2024, 56(3): 623–638.
- [29] 王卓然. 黄河三角洲典型地区土壤水盐动态规律、影响因素与预测模型[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [30] 付腾飞. 滨海典型地区土壤盐渍化时空变异及监测系统研究应用[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
- [31] 窦超银, 康跃虎, 万书勤. 地下水浅埋区重度盐碱地覆膜咸水滴灌水盐动态试验研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 524–532.
- [32] 范理权. 冻融期“秋浇/春灌”农田水盐归趋及翌年春灌制度优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.