



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例

黄静, 赵庚星, 奚雪, 崔昆, 高鹏

引用本文:

黄静, 赵庚星, 奚雪, 崔昆, 高鹏. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 594–601.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 肖杨, 郎坤

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349–358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于淼, 杨继松, 战超, 周迪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

基于SDI校正指数的滨海平原盐渍化生态风险评价

潘肖燕, 崔江慧, 杨江燕, 关瑜, 孟泽, 刘田书, 门明新, 陈影

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 709–718 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0286>

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 484–492 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析——以珠江三角洲为例

余富祥, 胡月明, 刘振杰, 李波, 王璐

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 728–737 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0302>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄静, 赵庚星, 奚雪, 等. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 594–601.

HUANG J, ZHAO G X, XI X, et al. Extraction of soil salinization information by combining spectral and texture data in the Yellow River Delta: A case study in Kenli District, Shandong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 594–601.



开放科学 OSID

光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例

黄静, 赵庚星*, 奚雪, 崔昆, 高鹏

(山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 土壤盐渍化是制约黄河三角洲农业发展的关键问题, 及时准确地掌握土壤盐渍化信息对土地资源保护和开发利用具有积极意义。本研究以黄河三角洲核心区垦利区2019年4月17日的Sentinel-2遥感影像为数据源, 在ENVI和e Cognition软件支持下, 利用灰度共生矩阵法提取遥感影像的二阶矩、对比度、熵、相关性等纹理特征信息, 结合归一化植被指数(*NDVI*)、盐分指数(*SI*)等光谱特征信息, 通过预设分类规则实现对黄河三角洲垦利区的盐渍土分类。结果表明, 加入二阶矩、对比度、熵、相关性4个纹理特征统计量, 再结合光谱信息对垦利区盐渍土进行分类, 总体分类精度为92.4%, Kappa系数为0.89, 相较于仅利用光谱信息的分类方法, 总分类精度提高了10.5个百分点; 各分类类别的生产者精度与使用者精度较仅依靠光谱信息分类的分类结果均明显提高, 其中中度盐渍土的分类效果最好, 其生产者精度与使用者精度最高, 分别为95.0%、95.9%。本研究提出利用遥感光谱结合纹理特征实现滨海区盐渍土信息的提取方法, 提高了盐渍土分类精度, 为准确掌握研究区土壤盐渍化信息提供了新途径。

关键词: 黄河三角洲; 土壤盐渍化; 光谱特征; 纹理特征

中图分类号: TP751; S156.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2022)03-0594-08 doi: 10.13254/j.jare.2021.0025

Extraction of soil salinization information by combining spectral and texture data in the Yellow River Delta: A case study in Kenli District, Shandong Province

HUANG Jing, ZHAO Gengxing*, XI Xue, CUI Kun, GAO Peng

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Soil salinization is the key problem that restricts the agricultural development in the Yellow River Delta. It is significant to grasp the soil salinization information accurately for the protection and development of land resources. In this study, the Sentinel-2 remote sensing image on April 17th, 2019 in Kenli District, which is the core region of the Yellow River Delta, was used as the data source. Under the softwares ENVI and e Cognition, the GLCM method was used to extract the texture feature information of remote sensing images, such as Second Moment, Contrast, Entropy, and Correlation. Combined with the spectral feature information such as *NDVI* and *SI*, the classification of saline soil in the reclamation area was identified by preset classification rules. The results showed that four texture feature statistics of Second Moment, Contrast, Entropy, and Correlation were added, and the spectral information was combined to classify the saline soil in Kenli District. The overall classification accuracy and Kappa coefficient were 92.4% and 0.89, respectively. Compared with

收稿日期: 2021-01-12 录用日期: 2021-04-07

作者简介: 黄静(1997—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地遥感与信息。E-mail: 1624577894@qq.com

*通信作者: 赵庚星 E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877003); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010724); 山东省“双一流”奖补资金(SYL2017XTTD02)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877003); Major Science and Technology Innovation Project of Shandong Province(2019JZZY010724); Shandong Province “Double First-Class” Award and Subsidy Funds(SYL2017XTTD02)

the classification method using only spectral information, the overall classification accuracy was improved by 10.5 percent points. The producer and user precision of each classification category were significantly improved compared with the classification results based only on spectral information. The classification effect of moderate saline soil was the best, and the producer and user precision were the highest, which were 95.0% and 95.9%, respectively. In this study, a method of extracting salinized soil information in coastal areas using remote sensing spectrum combined with texture features was proposed, which improved the classification accuracy of salinized soil and provided a new way for accurately grasping soil salinization information.

Keywords: Yellow River Delta; soil salinization; spectral signature; textural feature

土壤盐渍化是制约我国农业发展的重要影响因素之一。盐渍土信息的获取及监测预警一直是学术界关注的热点^[1-4]。黄河三角洲地处山东省环渤海滨海地区,是国家级高效生态经济区,同时是山东半岛蓝色经济区的重要组成部分,该区土壤盐渍化问题严重,及时准确地掌握当地土壤的盐渍化信息,能够为该区农业生产及土地管理提供科学依据。

遥感影像具有获取速度快、重复周期短、视域广阔等特点,因此遥感方法已成为土壤盐渍化信息提取的重要手段,被广泛应用于盐渍化土壤的动态监测。而相较于内陆地区,滨海盐渍区由于受到气候、水文、人类活动等诸多复杂因素的影响,盐渍土的形成与变化规律更为复杂,其严重的光谱混淆问题也是该区土壤盐渍化遥感提取的难点之一。针对黄河三角洲盐渍化信息的提取及其水盐特征,学者们已开展了较多的研究,多数研究仍通过实测方法获取土壤盐分数据,进而进行GIS的时空分析。王卓然等^[5]利用统计分析、GIS插值、缓冲区分析等方法,分析了黄河三角洲垦利区的土壤水盐状况及其空间变异规律;杨劲松等^[6]通过加入协同变量的协同克里格方法,提高黄河三角洲土壤盐分估算的精度;付腾飞等^[7]利用GIS和地统计学的方法对黄河三角洲土壤含盐量的时空变异特征进行了研究。但野外测量往往需要消耗大量人力、物力和财力,难以实现区域土壤盐渍化的快速动态监测。近年来,不少学者对土壤盐渍化信息获取的遥感方法进行探索,取得了较好的研究进展,如张同瑞等^[8]基于遥感影像,利用归一化植被指数(NDVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)三种指数分别与实测的土壤含盐量构建多种模型,优选出土壤盐分含量的最优估测模型,反演得到了无棣县的土壤盐分信息;陈红艳等^[9]基于Landsat 8 OLI多光谱影像,利用改进植被指数构建土壤盐分含量的支持向量机模型,获得了较好的土壤盐分空间分布反演结果;张素铭等^[10]利用野外实测土壤

盐分数据与遥感影像相结合的方法,通过筛选土壤盐分敏感波段和光谱参量,构建土壤盐分估测模型;樊彦国等^[11]利用BP神经网络构建黄河三角洲地区永安镇的土壤盐分遥感反演模型,证明利用该模型预测的土壤含盐量精度明显提高。但总体看,目前利用遥感对黄河三角洲土壤盐渍化信息提取的研究主要基于遥感影像的光谱信息,通过构建植被指数或筛选遥感影像的敏感光谱波段,结合地面实测的盐分数据反演土壤的盐分信息,没有充分考虑遥感影像的纹理特征信息,将光谱信息与纹理特征信息有机结合进行土壤盐渍化信息提取的方法有待进一步探索和研究。

因此,本研究在现有利用光谱信息提取土壤盐渍化信息的基础上,加入遥感影像的纹理特征信息,尝试将光谱与遥感影像的纹理特征信息结合,提取土壤的盐渍化信息,旨在为提取黄河三角洲土壤盐分信息提供一种更精准便捷的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择黄河三角洲核心区域垦利区(图1)为研究区,其位于黄河入海口处(37°24'~38°10'N、118°15'~119°19'E),总面积2 331 km²,属暖温带大陆性季风气候,四季变化明显,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。受黄河多次改道和入海泥沙沉积的影响,该区地貌类型十分复杂,地势自西南向东北呈扇形略微降低。该区地下水埋藏较浅,矿化度较高,土壤质地偏轻,毛细作用强烈,盐渍化问题十分普遍^[12],反盐、积盐现象十分严重^[13]。主要农作物为小麦、玉米、棉花和水稻,广种薄收,管理较差,产量较低,盐荒地大量分布,地类光谱混淆严重。

1.2 土壤盐分数据的采集与处理

本研究于2019年4月10—15日进行了垦利区野外调查采样,为确保样点均匀分布,在研究区每5 km×5 km的网格内,避开水体、建设用地和滩涂,预

布设3~5个样点,最终布设242个采样点,样点分布见图1。采用校正后的EC110便携式盐分计测定土壤表层0~15 cm土层土壤电导率数据,各采样点的实地坐标采用手持GPS定位仪测定。野外实测土壤电导率 $EC_e(\text{dS}\cdot\text{m}^{-1})$ 与含盐量 $St(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ 之间利用关系方程 $St=2.18EC_e+0.727^{[5]}$ 进行转换,最终得到所有样点的土壤盐分含量数据。

1.3 遥感影像的获取与预处理

本研究以垦利区2019年4月17日的Sentinel-2遥感影像为数据源。首先,在ENVI软件中筛选出遥感影像的红、绿、蓝、近红外四个波段,得到10 m分辨率的遥感影像;然后,在ArcGIS软件中将遥感影像按研究区矢量边界进行裁剪;最后,剔除研究区内的水体、建设用地和滩涂,获得研究区的Sentinel-2遥感影像(图2)。

1.4 地类类别的划分

根据鲍士旦^[14]提出的盐渍土分类标准,结合实地勘察经验和研究区遥感影像的目视解译建立研究区遥感影像的分类方案,将研究区盐渍土划分为1、2、3、4四个等级,分别代表轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土和盐土四个类别(表1)。

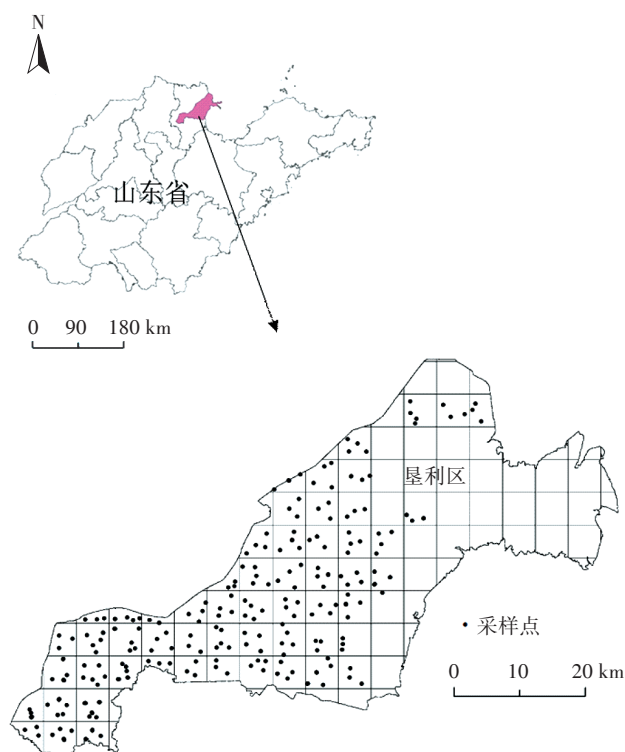


图1 研究区位置与采样点分布

Figure 1 Study area location and sampling point distribution

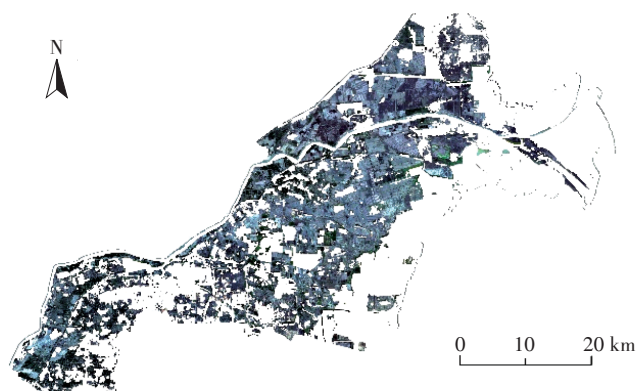


图2 研究区遥感影像(扣除水体、滩涂等)

Figure 2 Remote sensing image of the study area(excluding water body and tidal flat)

表1 研究区盐渍土遥感影像分类

Table 1 Classification of remote sensing image of saline soil in the study area

等级 Level	类别 Category	定义 Definition
1	轻度盐渍土	表面有小麦等农作物,表层土壤盐分含量为 $1\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,植被覆盖度约15%
2	中度盐渍土	表面有棉花等耐盐碱性较强的农作物,表层土壤盐分含量为 $2\sim 4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,植被覆盖度约5%
3	重度盐渍土	表面有柽柳、碱蓬等耐盐性植物,表层土壤盐分含量为 $4\sim 6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,植被覆盖度约1%
4	盐土	表面基本无植被,表层土壤盐分含量 $>6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,表层为盐壳的光板地

1.5 遥感影像特征提取

1.5.1 纹理特征提取

纹理反映了遥感影像灰度模式的空间分布,包含了图像的表面信息及其与周围环境的关系,是参与遥感影像识别的重要特征^[15-18]。不同盐渍化程度土壤的植被类型、覆盖程度、地表特征明显不同,因此其纹理特征具有较大差异,是提取土壤盐渍化信息的重要依据。多波段影像纹理的本质是目标地物分布在波谱空间中的表现形式^[19],而经主成分变换后的影像其第一主分量集中了所有波段的大多数信息,因此,本研究采用影像主成分变换第一主分量进行纹理特征的提取。

首先对预处理后的研究区遥感影像进行主成分变换,再利用灰度共生矩阵法(GLCM)提取研究区遥感影像主成分变换后的第一主分量的纹理特征值。然后,参照实地采样点的盐分数据,将采样点划分为轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土、盐土四类,并在每个分类类别中均匀随机选择20个采样点,统计

各纹理特征值的平均值,作为该类地物类别的纹理统计特征值(表2)。

由表2可知,不同盐渍化土壤之间的纹理特征值存在差异,可根据此特征差异建立相应的分类规则,对研究区盐渍土进行分类。ULABY等^[20]的研究发现,在基于GLCM多个纹理特征中,对比度、二阶矩、相关性、熵四种纹理特征互不相关且能给出较高的分类精度,因此,本研究利用盐渍土各纹理特征统计量中二阶矩、对比度、熵、相关性之间统计量的差异,区分不同盐渍化程度的土壤。各纹理特征描述如下:

(1)二阶矩(Second moment):描述影像灰度分布的匀质性与一致性。影像纹理均匀性强时,二阶矩大;影像纹理均匀性弱时,二阶矩小。

(2)对比度(Contrast):反映遥感影像清晰度,表示图像小区域变化情况,图像小区域内变化大时,对比度值大。

(3)熵(Entropy):度量遥感影像纹理特征值是否杂乱,影像纹理不一致时,熵较大。

(4)相关性(Correlation):表示相邻像元灰度值线性依赖程度,描述影像线性目标方向性。当线性地物成某一方向排列,该方向的相关性明显高于其他方向。

轻度盐渍土表面有植被覆盖,纹理信息较复杂,均匀性较差,因此其二阶矩较小,熵值、对比度及相关性值较大;盐土表面为盐壳的光板地,基本无植被覆盖,因此其表面均匀性强,区域变化情况较小,故其二阶矩值较大,熵值、对比度及相关性值较小。

1.5.2 光谱特征提取

光谱特征是描述分割后影像对象及对象中像元的所有特征的集合。除均值、亮度、标准差等常见的光谱特征参数外,自定义的光谱特征参数能够提高分类精度。本研究利用归一化植被指数和盐分指数对研究区盐渍土进行分类。

(1)归一化植被指数。绿色植被在近红外波段有强反射,在红光波段有强吸收。受盐渍化影响的植物

近红外波段反射率降低,其植被指数均较低,因此,利用植被指数可有效提取土壤的盐渍化信息^[21]。本研究利用归一化植被指数(NDVI)提取土壤盐渍化信息,其计算公式为:

$$NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)$$
 (1)

式中:NIR、R分别表示近红外波段、红光波段的地面反射率。

(2)盐分指数。KHAN等^[22]的研究证明土壤盐渍化的程度受遥感影像红、蓝波段的影响较大,并将这两个波段确定的参数称为盐分指数(SI),其计算公式为:

$$SI=\sqrt{B \times R}$$
 (2)

式中:R和B分别表示遥感影像中的红波段和蓝波段的反射率值。

1.6 图像分割与分类

分别选择30、65、85、125、155五个尺度对预处理后的遥感影像进行分割,经多次试验,最终将分割尺度设置为85,形状因子和光滑度因子分别设置为0.1和0.5,各波段权重均为1。此参数条件下遥感影像分割最适宜,最适合进行研究区盐渍土信息的提取。根据分割后遥感影像对象与分类类别间关系的不确定性,基于影像光谱与纹理特征将分割后的对象依次划分到指定类别中,实现研究区盐渍土信息的提取。

本研究以研究区实地调查资料为基础,通过人机交互的方式选择提取效果最佳的阈值,对盐渍土进行分类。首先,利用分割后对象的光谱特征信息,得到仅利用光谱信息分类的研究区土壤盐分分类结果(图3a);然后,加入遥感影像的纹理特征信息,通过研究区盐渍土分类规则(表3),得到利用遥感光谱与纹理特征信息结合的研究区土壤盐分分类结果(图3b)。

1.7 分类结果精度评价

利用e Cognition软件建立242个样本点的待评价工程,根据TTA Mask计算混淆矩阵,最终得到总体分类精度、Kappa系数、生产者精度、使用者精度等精度

表2 地物纹理统计特征值
Table 2 Statistical feature values of texture

类别 Category	均值 Mean	方差 Variance	协同性 Homogeneity	对比度 Contrast	相异性 Dissimilarity	熵 Entropy	二阶矩 Second moment	相关性 Correlation
轻度盐渍土	22.67	0.83	0.60	1.15	0.85	1.49	0.26	0.57
中度盐渍土	22.99	0.69	0.71	0.98	0.70	1.37	0.33	0.33
重度盐渍土	24.76	0.52	0.72	0.74	0.59	1.29	0.48	0.21
盐土	25.04	0.48	0.74	0.68	0.52	1.13	0.55	0.19

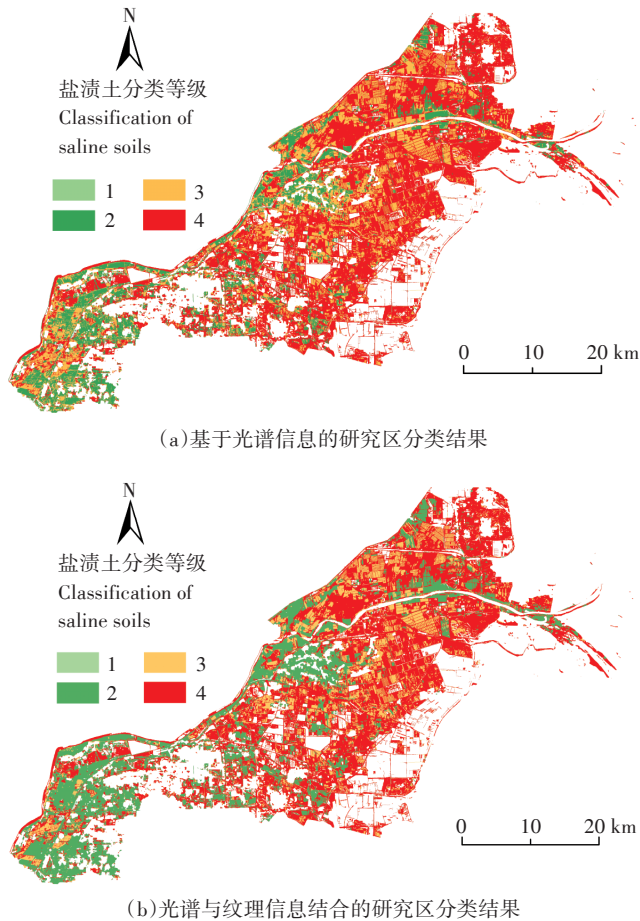


图3 研究区土壤盐分分类结果

Figure 3 Classification results of soil salinity in the study area

评价指标。具体精度评价指标含义如下:

(1)总体分类精度:遥感影像中所有正确分类的像元数与采样点总数的比值。

(2)Kappa系数:COHEN^[23]提出的用于表示分类结果比随机分类精确多少的指标。Kappa值介于0~1之间,Kappa值越大表示分类精度越高。

(3)生产者精度:整个遥感影像中被正确分为该类的像元数与该类真实参考总数的比值。

(4)使用者精度:被正确分到该类的像元总数与整个影像被分为该类的像元总数间的比值。

2 结果与分析

2.1 分类结果

图3a和图3b分别为基于光谱信息和光谱与纹理信息结合的研究区分类结果。表4为利用光谱与纹理信息结合的分类方法得到的研究区土壤盐分分类结果统计表(扣除滩涂、水体等),结合图3b分析研究区不同等级的盐渍土的空间分布规律。研究区不同

表3 分类规则

Table 3 Classification rules

提取类别 Category	提取规则 Regulation
轻度盐渍土	(1) $NDVI > 0.50$ (2) $SI < 0.08$ (3) $0.20 < \text{Second moment} < 0.30$ (4) $1.00 < \text{Contrast} < 1.20$ (5) $1.40 < \text{Entropy} < 1.60$ (6) $0.45 < \text{Correlation} < 0.60$
中度盐渍土	(1) $0.20 < NDVI \leq 0.50$ (2) $0.08 \leq SI < 0.15$ (3) $0.30 \leq \text{Second moment} < 0.40$ (4) $0.80 < \text{Contrast} \leq 1.00$ (5) $1.30 < \text{Entropy} \leq 1.40$ (6) $0.30 < \text{Correlation} \leq 0.45$
重度盐渍土	(1) $0.12 < NDVI \leq 0.20$ (2) $0.15 \leq SI < 0.18$ (3) $0.40 \leq \text{Second moment} < 0.50$ (4) $0.70 < \text{Contrast} \leq 0.80$ (5) $1.20 < \text{Entropy} \leq 1.30$ (6) $0.20 < \text{Correlation} \leq 0.30$
盐土	(1) $NDVI \leq 0.12$ (2) $SI \geq 0.18$ (3) $0.50 \leq \text{Second moment} < 0.60$ (4) $0.60 < \text{Contrast} \leq 0.70$ (5) $1.00 < \text{Entropy} \leq 1.20$ (6) $0.10 < \text{Correlation} \leq 0.20$

盐渍化程度的土壤中,盐土分布面积最广,占盐渍土总面积的59.98%,主要分布在研究区东部滨海地区,西部、西南部分区域有零星分布;其次是中度盐渍土,占盐渍土总面积的22.54%,主要分布在研究区西南部、黄河沿岸和居民区附近;重度盐渍土多集中分布于研究区中部的盐土与中度盐渍土之间,是盐土与中度盐渍土之间的缓冲区域;轻度盐渍土面积最小,仅占研究区盐渍土总面积的2.17%,零星分布于研究区中部与西南部。造成此分布规律的主要原因是研究区东部滨海地区主要受海水入侵影响,地下水矿化度高,因此土壤盐渍化程度高;中部居民区密集,受人类耕作等生产活动的影响,盐渍化程度相对偏低;黄河沿岸地势较高,且黄河丰富的淡水资源对表层土壤有灌洗作用,降低了该区的盐渍化程度;西南部地势相对较高,因此盐渍化程度低。

2.2 精度分析

表5为基于分类规则的研究区盐渍土分类结果精度评价表,由表5可以看出:①利用光谱与纹理信息结合的分类方法提取盐渍地信息的总体分类精度为92.4%,与仅利用光谱信息分类的分类方法相比,总分类精度提高了10.5个百分点,Kappa系数由0.75提高至0.89。②利用光谱信息的研究区分类结果中,

表4 光谱与纹理信息结合的研究区土壤盐分分类结果统计(扣除滩涂、水体等)

Table 4 Statistical results of soil salt classification in the study area based on the combination of spectral and texture information (excluding tidal flats and water bodies)

等级 Level	类别 Category	光谱与纹理信息结合分类 Classification based on the combination of spectral and texture information		光谱信息分类 Classification based on the texture information	
		像元数 Pixel number	所占比例 Proportion/%	像元数 Pixel number	所占比例 Proportion/%
1	轻度盐渍土	3 367 821	2.17	1 799 646	1.16
2	中度盐渍土	34 985 263	22.54	17 862 549	11.50
3	重度盐渍土	23 774 525	15.31	51 526 647	33.19
4	盐土	93 119 559	59.98	84 058 326	54.15

表5 基于分类规则的研究区盐渍土分类结果精度评价

Table 5 Accuracy evaluation of classification results of saline soil in the research area based on classification rules

分类方法 Classification method	类别 Category	轻度盐渍土 Lightly salted soil	中度盐渍土 Moderately salted soil	重度盐渍土 Heavily saline soil	盐土 Saline soil
光谱与纹理信息结合分类	生产者精度	92.3%	95.0%	91.9%	86.1%
	使用者精度	90.9%	95.9%	89.5%	88.6%
	总体分类精度:92.4%, Kappa 系数:0.89				
光谱信息分类	生产者精度	80.1%	84.2%	82.4%	77.1%
	使用者精度	82.1%	89.5%	71.8%	72.9%
	总体分类精度:81.9%, Kappa 系数:0.75				

五个分类类别均存在明显错分现象,加入纹理信息后,误判率明显降低。③从各类别的提取精度看,中度盐渍土的生产者精度与使用者精度最高,分别为95.0%、95.9%,其次是轻度盐渍土,其生产者精度与使用者精度分别为92.3%、90.9%;盐土的生产者精度与使用者精度最低,分别为86.1%、88.6%。

3 讨论

本研究利用遥感影像光谱与纹理特征信息结合的分类方法对研究区盐渍土进行分类,分类精度相较于仅依靠光谱信息的分类方法明显提高,这与马长辉等^[17]、缪琛等^[22]的研究结果一致,说明加入纹理信息能够提高遥感影像信息提取的精度;同时,本研究利用面向对象法,首先将遥感影像分割为不同多边形,再根据不同多边形属性间的差异进行分类,相较于像元分类更快捷,提高了遥感影像信息提取的速率。

不同类别盐渍土的提取精度有明显差异,与其地表覆盖状况有较大关系,中度、轻度盐渍土地表有植被覆盖,纹理信息较复杂,加入纹理特征信息对遥感影像进行分类,能够降低遥感影像的分类难度,明显提升其分类精度;而重度盐渍土与盐土地表相对均匀,有极少甚至没有植被覆盖,纹理特征较少,加入纹

理特征信息无法完全消除其错分误差。因此,如何进一步提取土壤盐渍化空间特征信息来减轻错分误差还需进一步研究。

垦利区4月份的土壤表层水分蒸发强烈,土壤积盐严重,是一年中盐分聚集的高峰期,此时植被生长状况较好,不同盐渍化程度的土壤植被生长状况不同,在遥感影像上容易通过植被覆盖状况区分不同等级盐渍土。因此,本研究利用4月份Sentinel-2遥感影像的光谱及纹理信息等空间信息提取土壤盐渍化信息,使结果可信度更高。

王卓然等^[5]的研究表明,垦利区盐渍土分布的空间格局受黄河和渤海的影响显著,是黄河与高矿化海水相互作用的结果,距黄河越远或距渤海越近,土壤含盐量越高,这与本研究获取的土壤盐渍化空间特征一致。

4 结论

本研究利用Sentinel-2遥感影像,通过光谱与纹理特征信息结合的方法实现垦利区4月份土壤盐渍化信息的提取,并结合实地采样的样点数据进行精度评价,得出以下结论:

(1)本研究通过统计研究区采样点纹理特征值的均值筛选出二阶矩、对比度、熵、相关性四个纹理特征

统计量,参与垦利区盐渍土信息提取,最终总体分类精度92.4%,Kappa系数0.89,分类结果精度较高,说明本研究所选纹理特征值是有效的。

(2)与仅利用光谱信息分类的方法相比,本研究利用光谱与纹理信息结合的分类方法提取垦利区盐渍土信息,总体分类精度提高10.5个百分点,其中中度盐渍土的分类效果最好,其生产者精度与使用者精度分别为95.0%、95.9%,盐土分类效果最差,其生产者精度与使用者精度分别为86.1%、88.6%。加入纹理特征信息的分类结果有效减少了基于像元光谱信息分类方法可能出现的“椒盐噪声”,总体分类效果显著提升。

(3)研究区盐土分布面积最广,占盐渍土总面积的59.98%,主要分布在研究区东部滨海地区;中度盐渍土多分布在研究区的西南部、黄河沿岸和居民区附近;轻度盐渍土分布面积最小,零星分布于研究区西南部与中部。

本研究提出利用遥感影像光谱和纹理特征信息结合的分类方法对垦利区盐渍化土壤进行分类,明显提高了盐渍土的分类精度和效果,为更加准确地提取研究区土壤盐渍化信息提供了新途径。

参考文献:

- [1] 姜世成,周道玮,靳英华. 松嫩平原盐碱化草地消融期土壤水盐运移特征[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2006, 38(4): 124-128. JIANG S C, ZHOU D W, JIN Y H. Characteristic of moisture and salt dynamic in saline-alkalized grassland of Songnen Plain during thawing period[J]. *Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition)*, 2006, 38(4): 124-128.
- [2] 佟才,王志平,段丽杰. 盐渍化土地恢复调控的研究进展[J]. 北方环境, 2004, 29(5): 32-35. TONG C, WANG Z P, DUAN L J. Review on recovery of soil salinization[J]. *North Environment*, 2004, 29(5): 32-35.
- [3] 曹雷,丁建丽,玉米提·哈力克,等. 基于国产高分一号卫星数据的区域土壤盐渍化信息提取与建模[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1399-1409. CAO L, DING J L, UMUT H, et al. Extraction and modeling of regional soil salinization based on data from GF-1 Satellite[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1399-1409.
- [4] 李素艳,翟鹏辉,孙向阳,等. 滨海土壤盐渍化特征及土壤改良研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1069-1078. LI S Y, ZHAI P H, SUN X Y, et al. Saline-alkali soil characteristics and improvement in coastal area[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(6): 1069-1078.
- [5] 王卓然,赵庚星,高明秀,等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(2): 154-161. WANG Z R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Characteristics of soil water and salt spatial variations in the spring season in typical Yellow River Delta areas of Kenli County, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(2): 154-161.
- [6] 杨劲松,姚荣江,刘广明,等. 黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其CoKriging估值[J]. 干旱区研究, 2006(3): 439-445. YANG J S, YAO R J, LIU G M, et al. Spatial variability of soil salinity in the Yellow River Delta and its estimation by CoKriging method[J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(3): 439-445.
- [7] 付腾飞,张颖,高金尉,等. 黄河三角洲土壤盐分时空变异特征研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 50-60. FU T F, ZHANG Y, GAO J W, et al. Study on spatio-temporal variability of saline soil salinity in the Yellow River Delta[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 50-60.
- [8] 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. ZHANG T R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Soil salinity estimation based on near-ground multispectral imagery in typical area of the Yellow River Delta[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 248-253.
- [9] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等. 基于改进植被指数的黄河口盐渍土盐分遥感反演[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 107-114. 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): 107-114.
- [10] 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. ZHANG S M, ZHAO G X, WANG Z R, 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.
- [11] 樊彦国,侯春玲,朱浩,等. 基于BP神经网络的盐渍土盐分遥感反演模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 24-27. FAN Y G, HOU C L, ZHU H, et al. Research on salinity inversion from remote sensing of saline soil based on BP neural network[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(6): 24-27.
- [12] 李光超. 黄河三角洲土壤盐渍化研究综述[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(Z1): 113-115. LI G C. A summary on soil salinization of Yellow River Delta[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(Z1): 113-115.
- [13] 常春艳,赵庚星,王凌,等. 黄河口生态脆弱区土地利用时空变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 226-234. CHANG C Y, ZHAO G X, WANG L, et al. Land use spatiotemporal changes and its driving forces analysis in vulnerable ecological region of Yellow River Estuary[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24): 226-234.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Analysis of soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 杨淑莹,胡军,曹作良. 基于图像纹理分析的目标物体识别方法[J]. 天津理工学院学报, 2001, 17(4): 31-33. YANG S Y, HU J, CAO Z L. Object recognition system based on image texture analysis[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2001, 17(4): 31-33.

- [16] CELIK T, TIAHJADI T. Multiscale texture classification using dual-tree complex wavelet transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(3):331-339.
- [17] 马长辉, 黄登山. 纹理与几何特征信息在高空间分辨率遥感影像分类中的应用[J]. *测绘地理信息*, 2019, 44(6):66-70, 92. MA C H, HUANG D S. Application of texture features and geometric feature information in high spatial resolution remote sensing image classification[J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 44(6):66-70, 92.
- [18] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. ICA结合纹理特征的SVM盐渍化信息提取研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(9):193-197, 201. ZHANG F, TASHPOLAT T, DING J L, et al. Study on soil salinization extravtion with SVM's classification based on ICA and texture features[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(9):193-197, 201.
- [19] 舒宁. 卫星遥感影像纹理分析与分形分维方法[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1998(4):91-94. SHU N. Remote sensing image texture analysis and fractal assessment[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1998(4):91-94.
- [20] ULABY F T, KOUYATE F, BRISCO B, et al. Textural information in SAR images[J]. *IEEE Geosciences & Remote Sensing Letters*, 1986, 24(2):235-245.
- [21] 缪琛, 丁建丽, 占玉林, 等. 基于GF-2数据的田间尺度盐渍化提取——以新疆艾比湖流域为例[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(1):69-77. MIAO C, DING J L, ZHAN Y L, et al. Extraction of soil salinization in arid area based on GF-2 data: A case study in Ebinur Lake basin[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(1):69-77.
- [22] KHAN N M, RASTOSKUEV 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.
- [23] COHEN J. A coefficient of agreement for nominal scales[J]. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, 20(1):37-46.