

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

丁建丽, 瞿 娟, 孙永猛, 张永福

(新疆大学资源与环境科学学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 土壤盐渍化是造成干旱区土地荒漠化及生态恶化的重要原因, 及时获取大尺度高精度土壤盐渍信息是防治工作的基础。选取新疆塔里木盆地北缘渭干河—库车河流域三角洲绿洲为研究区, 利用Lansat-TM数据与野外实测数据分析盐渍化土壤与修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)之间的关系, 在此基础上提出了MSAVI-WI特征空间概念, 构建了土壤盐渍化遥感监测指数模型(MWI)。结果表明: MWI与土壤表层含盐量相关性较高, 其相关性为0.844, 精度高于土壤盐渍监测常用的盐分指数与实测数据的相关性。MWI能较好的反映盐渍化土壤地表植被及土壤水分的组合变化, 具有明确的生物物理意义, 并且特征参量简单, 理论上易于理解, 实践上易于实现, MWI模型的构建有利于干旱区大尺度土壤盐渍化定量监测与评价工作的开展。

关键词: 遥感模型; 湿度指数(WI); 修改型土壤调整植被指数(MSAVI); 特征空间

1 引言

土壤盐渍化通常出现在干旱及半干旱地区, 该类地区地表蒸发强烈, 气候干燥, 地下水中含有的易溶性盐类较多。土壤盐渍化及次生盐渍化的发生发展, 对干旱区生态环境系统的稳定以及人类健康造成了严重威胁, 已引起国内外学者的广泛关注^[1]。土壤盐渍化是造成干旱区土壤荒漠化及生态恶化的重要原因^[2], 它不仅易受气候、地形、土壤、水文等自然因素的影响, 同时也对人类活动较为敏感, 因而难以针对其变化进行精确地动态监测和制图。

当前, 准确提取土壤盐渍化信息对于监测和研究土壤盐渍化动态变化有重要意义^[3]。目前在盐渍化遥感监测中, 仍以目视解译或引入辅助量的遥感图像分类方法为主提取盐渍化信息。传统的目视解译方法受人为因素影响大, 且工作强度大、效率低, 辅助量的引入易造成图像的破碎化, 精度很难满足实际要求^[4]。国内外学者针对盐渍化监测提出了许多相对完善的分类指标体系^[5-7], 但指标多为土壤的理化观测数据, 其传统的数据采集方式也难以实现大面积的区域土壤盐渍化定量监测。因而, 利用遥感技术建立定量化的评价指标变得尤为重要。近年来, 国内外的一些学者利用遥感影像反演的特征参量建立特征空间, 应用到荒漠化信息提取、土壤水分反演、干旱监测、荒漠生态系统物候循环监测等诸多研究领域并取得了很好效果^[8-12]。因此, 选择合适的特征参量建立特征空间进而提高土壤盐渍化遥感监测的精度是当前研究中具有创新性的热点问题。

收稿日期: 2012-04-25; 修订日期: 2012-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261090, 41161063); 霍英东教育基金项目(121018); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介: 丁建丽(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事遥感技术应用研究。E-mail: watarid@xju.edu.cn

新疆的盐渍化土壤分布范围广且交通通达性较差,获取充足的实地观测资料比较困难,因此迫切需要寻求一种简单实用,具有普遍适用性,且能充分挖掘图像自身信息的盐渍化监测方法。本研究以Lansat-TM数据和长时间序列的野外实测数据为基础,基于遥感特征空间理论,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,为区域尺度的土壤盐渍化遥感监测和预测研究提供强有力的支持。

2 研究区概况

渭干河—库车河三角洲绿洲位于天山以南,塔里木盆地以北。根据实地土壤采样区域确定研究区地理坐标为东经 $81^{\circ}28' \sim 84^{\circ}05'$ 、北纬 $39^{\circ}29' \sim 42^{\circ}38'$ (图1)。地势北高南低,自西北向东南倾斜,海拔1500~2000 m。是一个典型而完整的扇形平原绿洲。属于大陆性温暖带干旱气候,多年平均气温 $10.5 \sim 11.4^{\circ}\text{C}$,极端最高温度为 40.8°C ,极端最低温度 -27.8°C ,山前蒸发量1200 mm,绿洲蒸发量2356 mm,多年平均降水量55.45 mm。土壤主要为潮土和草甸土。

天然植被以芦苇(*Phragmites australis*)、骆驼刺(*Allhagi sparisifolia*)、花花柴(*Karelina caspica*)等为主。本区盐类沉积规模大,矿化度及地下水位偏高,土层构成物颗粒细,透水性差,土壤普遍盐渍化^[13],其盐渍化面积超过总面积的50%,重度盐渍化面积达到30%^[14],其发展已经威胁到绿洲的稳定性^[15]。

3 研究方法

3.1 盐渍化分类体系

渭库绿洲地区气候干旱、蒸发作用强烈,绿洲边缘地势较为平坦,地下水埋深较浅,通过毛细作用,水分不断蒸发,造成盐类物质不断积聚于地表,形成盐渍化土壤^[16]。研究区各种等级盐渍化土壤分布状况受到水质矿化度、地形、地貌、灌排、人为等多种因素影响,主要表征是地表盐斑大小以及密度百分比的差异化。土壤盐渍化分级标准依据自治区水利厅制定的《新疆县级盐碱地改良利用规划工作大纲》(表1),结合相关研究成果^[17,18]和研究区多次实地调查,采用强度分类方法^[19],从地表农作物生长的状况及表层土壤单位面积内含盐量等方面考虑,将盐渍土自动分级(图2)。

3.2 盐渍化土壤光谱响应特征参量

渭库绿洲地区盐渍土的空间分布广泛,且程度不一,选择合理的盐渍化响应参数可以更为快速、准确地获取研究区土壤盐渍化信息。研究区内植被类型根据土壤含盐量可以分

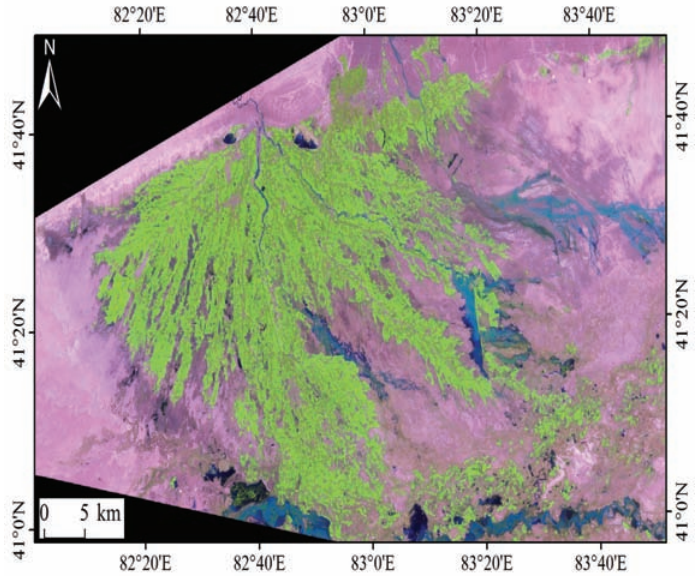


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表1 研究区盐渍化类型划分体系(据新疆县级盐碱地改良利用规划工作大纲)

Tab. 1 Classification system of soil salinization (according to the working outline about the reuse of salted soil at county level in Xinjiang)

| 盐渍化程度 | 饱和浸出液 电导率EC ₂₅ (dsm ⁻¹) | 盐分 (g.kg ⁻¹) | 地表植物效应 |
|---------|---|-----------------------------|--|
| 非盐渍化土壤 | 0~2 | <1.0 | 包括农作物长势较好的耕地,乔木、灌木的林地,畜牧为主的草地以及芦苇地等 |
| 轻度盐渍化土壤 | 2~4 | 1.0~3.0 | 于非盐渍地间布,植被盖度在15%~30% |
| 中度盐渍化土壤 | 4~8 | 3.0~5.0 | 片状分布,植被盖度较小,约10%~15%左右 |
| 重度盐渍化土壤 | 8~16 | 5.0~10.0 | 有明显的盐结皮,仅生长有盐穗木等耐盐植物,植被覆盖度极小,在5%~10%左右 |

为农田植被和盐生植被。农田种植区分布在绿洲中上游地区,土壤水分含量较高,土壤含盐量低。已有研究^[20]发现土壤盐分是土壤化学因子中影响植被分布的主要因子,王飞等^[21]利用NDVI进行盐渍化信息提取研究,结果显示效果较好,实验证明,NDVI对土壤背景的变化较为敏感^[22]。在低密度植被覆盖区,NDVI受土壤背景影响较大,从而低估了一些植被信息。MSAVI考虑了裸土土壤线,能较好消除土壤及植被冠层背景影响,指示研究区的植被信息。

穗帽变换不仅去除了原始遥感影像中各波段之间的冗余信息,而且变换之后的结果成为了有重要物理意义的参数^[23]。其变换后的第一及第二个特征在许多研究中得到广泛的应用,然而湿度信息参数(Wetness Index, WI)却很少被使用,尤其在盐渍化信息提取方面。经过穗帽变换的第三特征空间湿度指数,反映了地面的水分条件,特别是土壤的湿度状态。地下潜水是土壤盐分的重要来源之一,地下水埋深和矿化度是决定盐分能否聚集到土壤中的先决条件^[24]。研究区降水少,蒸发量大,发生较强盐渍化的地方没有地表水补给,表层土壤湿度受地下水影响较大。根据实测,地下水位相对高的地方(0~5 cm和0~50 cm)土壤湿度一般较大,同时土壤容易发生盐渍化。在母质等因素固定的情况下,土壤光谱受土壤湿度制约比较明显,土壤水分含量约大于5%时,随土壤水分含量的增加反射率呈指数下降趋势^[25]。野外实测土壤表层含水量数据与WI值的相关系数为0.816,表明WI可以较好揭示研究区土壤盐渍化信息。

根据野外实地调查,并查阅相关文献^[26,7],由于研究区地势北高南低,流域上游地区在进行灌溉时盐分随水向地势较低的中下游地区聚集。总体上盐渍地主要分布在渭干河和库车河的下游,从景观角度来说主要分布于绿洲和沙漠之间的交错带^[28]。可以看出盐渍化土壤主要分布于绿洲边缘,与绿洲呈犬牙状交错,绿洲区域东北边的非农区及荒地盐渍化最为严重。

3.3 特征参量反演

选择2009年9月16日成像的Lansat-TM数据进行盐渍化研究。另有2009年10月的渭—库绿洲地区土壤含水率和土壤含盐量等野外实测数据。遥感数据的预处理包括几何精校正和应用COST模型的大气校正。图像空间分辨率30 m×30 m,几何校正精度误差(RMS)小于0.5。选择COST模型对研究区进行大气校正,根据研究区盐渍地实际分布现状,截

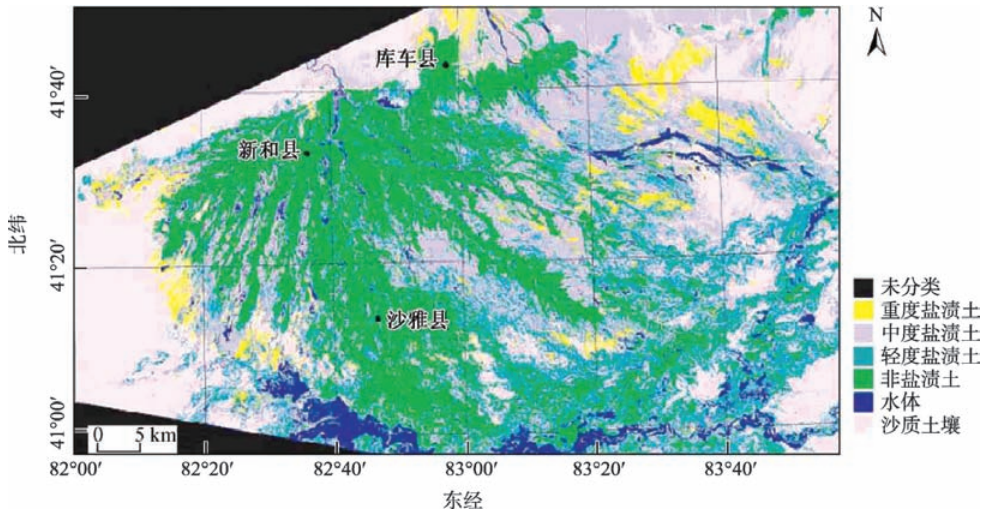


图2 渭库绿洲土壤盐渍化分级图

Fig. 2 Classification result of soil salinization of the Weigan-Kuqa watershed

取典型研究区, 坐标范围为 $82^{\circ}10'40''\sim 83^{\circ}37'26''\text{E}$ 、 $41^{\circ}30'\sim 41^{\circ}50'55''\text{N}$ 。

WI和MSAVI这两个特征参量的计算均依赖于影像的反射率值。对于TM而言, 可见光~红外6个波段数据蕴含着丰富的植被和土壤信息, 经穗帽变换后的第三个分量主要反映湿度特征, 则湿度(Wetness)可表示为^[29]:

$$WI = 0.1446TM1 + 0.1761TM2 + 0.3322TM3 + 0.3396TM4 - 0.6210TM5 - 0.4186TM7 \quad (1)$$

为了减少土壤调整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)中裸土影响, Qi^[30]等发展了修改型土壤调整植被指数(MSAVI), 表示为:

$$MSAVI = \left[(2TM4 + 1) - \sqrt{(2TM4 + 1)^2 - 8(TM4 - TM3)} \right] / 2 \quad (2)$$

式中: TM4为TM影像第4波段; TM3为TM影像第3波段。

3.4 模型参数正规化处理

统计土壤调整植被指数(MSAVI)和土壤湿度(WI)最大值和最小值, 并利用统计值进行数据正规化处理。

$$W = \frac{WI - WI_{\min}}{WI_{\max} - WI_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

$$M = \frac{MSAVI - MSAVI_{\min}}{MSAVI_{\max} - MSAVI_{\min}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: WI_{\min} —WI最小值; WI_{\max} —WI最大值; W —WI的归一化值; $MSAVI_{\min}$ —MSAVI最小值; $MSAVI_{\max}$ —MSAVI最大值; M —MSAVI归一化值。

4 MSAVI-WI特征空间

4.1 基于MSAVI-WI特征空间的盐渍化过程分析

在干旱地区, 年降水量少, 造成水分因子成为植被生长的限制性因子, 相对会对土壤湿度较为敏感。对于0~10 cm层土壤而言, 深层土壤含水量对植被变化的影响没有表层土壤明显^[31]。以MSAVI为横坐标, 代表地表植被的覆盖率的变化; 以WI为纵坐标, 代表在

相同的地表植被覆盖率下土壤湿度的变化。随着盐渍化程度的增加，地表植被盖度逐渐降低，从而导致土壤水分平衡发生变化，地表逐渐发展为无植被覆盖地重盐渍化程度的裸土类型。从特征空间，可以看到植被指数与表层土壤水分之间有着明显的互动关系：当水分供给好的时候，作物长势好，植被指数值高；植被生物量增加降低了地表蒸散阻力，土壤水分充足，盐分含量低，水热组合为较佳状态；随着地表覆盖度降低，温度升高，水分流失严重，盐渍化程度不断加重。在轻度盐渍化区域，土壤盐分含量较少，植物生长受盐分胁迫影响小，土壤持水性较好，温度较低，积盐率相对较低，盐分相对不易聚集于地表。MSAVI-WI特征空间可以较好反映盐渍土与盐生植被及土壤水分之间生物物理变化过程。

如图3所示，在MSAVI-WI特征空间中，不同程度盐渍化土壤的散点分别集中于散点图的不同部分，随着植被覆盖度的增加，湿度不断增加，盐渍化程度呈递减的趋势。在这一过程中，研究区内盐渍地空间分布在宏观上表现为沿绿洲外围呈环形分布依次为轻度盐渍地、中度盐渍地、重度盐渍地。以上土壤盐渍化在MSAVI-WI特征空间中呈现的分布规律与野外考察情况及图2是一致的。

4.2 特征空间盐渍化监测模型的构建

图4为MSAVI和WI拟合图，红线为其趋势线，表明二者之间存在显著的非线性关系。Verstraete等^[32]的研究表明，可以利用垂直于代表盐渍化趋势线E—F的直线在垂直方向上划分MSAVI-WI特征空间，将不同程度盐渍化土壤区分开。选择代表盐渍化趋势线的垂线建立区分不同程度盐渍化土壤的最优指数(图5)。可以用MSAVI和WI的定量关系来描述盐渍化趋势。垂线方向在MSAVI-WI在特征空间的位置可以用MSAVI和WI二元线性多项式表达，即： $I=1/a \times MSAVI - WI$ ，其中a由MSAVI和WI的拟合斜率确定，本研究中

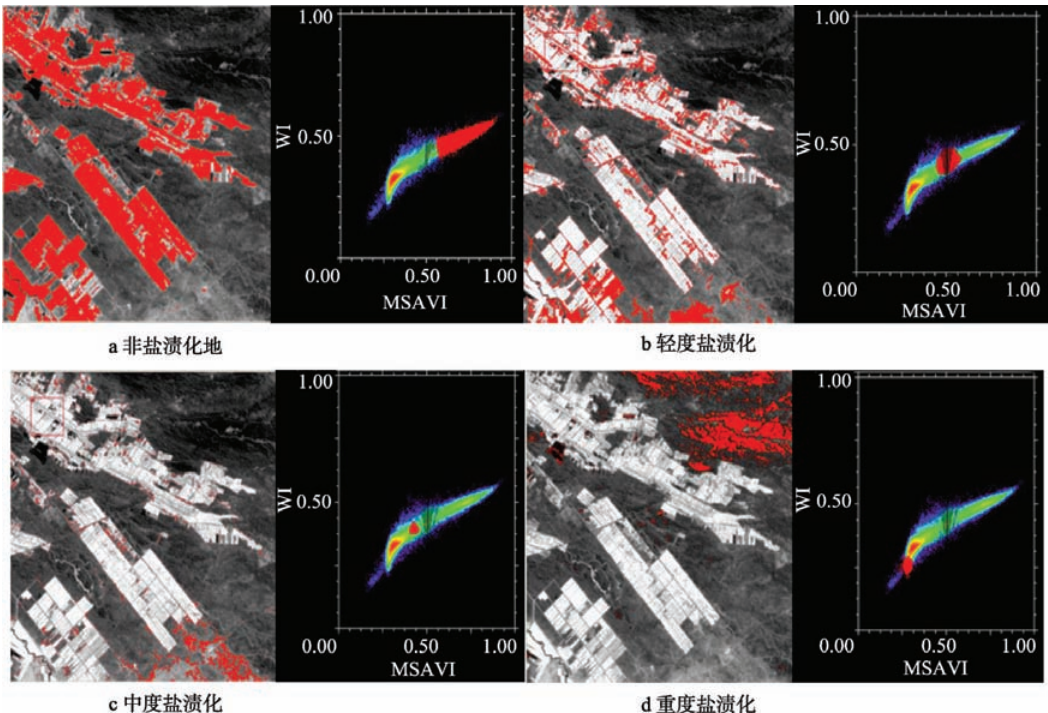


图3 MSAVI-WI特征空间中不同盐渍化土壤分布对比

Fig. 3 Different contents of soil salinization in image and MSAVI-WI space

a 为 0.433, 通过将不同盐渍化程度的最大值和最小值对应的 MSAVI 和 WI 值代入公式定位垂线。图 4 表明, 图中任一点到 D(1, 1) 的距离越远, 土壤盐渍化程度越重, 反之亦然。特征空间中任意点 C 到点 D 的距离 L :

$$L = \sqrt{(MSAVI - 1)^2 + (WI - 1)^2} \quad (5)$$

进而建立特征空间盐渍化监测模型:

$$MWI = \sqrt{(MSAVI - 1)^2 + (WI - 1)^2} \quad (6)$$

式中: MWI 为盐渍化遥感监测指数。

4.3 精度验证

样点采集是利用 GPS 技术, 结合研究区的地形图、土壤图等辅助信息进行样点的选择, 所选样点基本覆盖研究区的主要土地利用类型并符合随机分布规律, 便于统计分析。绿洲、绿洲荒漠交错带、绿洲外围均有样区分布。并且考虑到后期研究所需验证, 研究区采样点均选择了地面范围大、地物类型单一、地形平坦的地区进行采样。在 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样区分布 5 个土壤样本采集点, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样区采集 3 个土壤样本。在每一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地中心位置挖 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 土壤剖面(0~10cm, 10~30cm, 30~50cm)至潜水面, 在各层重复三次抽取土样。通过随机提取研究区 32 个采样点的土壤盐渍化遥感监测指数(MWI)值, 并与土壤表层的含盐量数据进行线性回归分析, 对 MWI 监测模型进行精度检验(表 2)。结果表明其相关性达到了 0.844。由于影像与实测数据时相上的略微差异, 理论上会对精度有一定影响, 但考虑到此季节该区域气象条件较恒定, 故基本上可忽略该影响。用常规盐渍化遥感监测中常用的盐分指数与实测数据做相关性分析, 相关性(S)为 0.722。由此可见土壤盐渍化监测模型(MWI)精度要高于盐分指数与实测数据的相关性, 对研究区不同盐渍化程度地类分布有较好的反映, 表明 MWI 模型的结果真实可信。

利用图 3 得到不同盐渍化程度的区域, 确定对应于 MWI 图像不同盐渍化程度区域, 并统计对应的不同盐渍化程度的 MWI 值。表 3 显示了不同盐渍化地类的 MWI 平均值, 利用差异性矩阵进行分析, 分析结果显示非盐渍地的 MWI 值与盐渍地 MWI 值的差值较为明显。其中非盐渍地与轻度盐渍地盐渍化遥感监测指数(MWI)值差异最小, 差异值为 0.036。非盐渍地与中度盐渍地盐渍化遥感监测指数(MWI)值差异值为 0.221, 非盐渍地与重度盐渍地盐渍化遥感监测指数(MWI)值差异性最大, 达 0.354。根据不同盐渍化程度

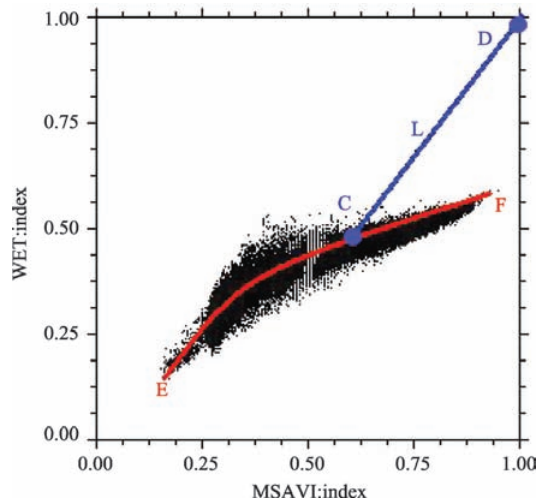


图 4 MWI 模型构建示意图

Fig. 4 Model of Salinization Detection Index (MWI)

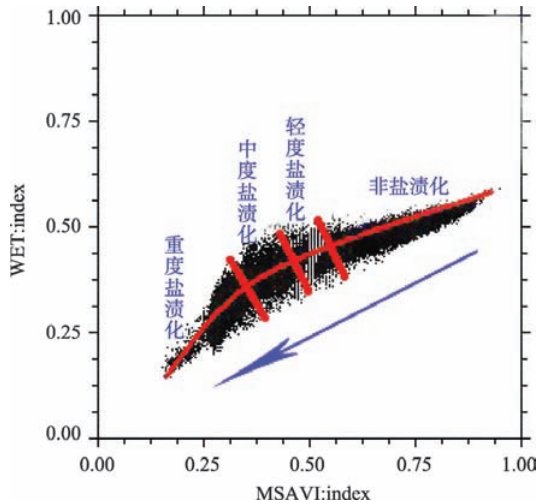


图 5 MWI 模型表达示意图

Fig. 5 Distance for different levels of soil salinization in MSAVI-WI space

表2 盐渍化遥感监测指数(MWI)、盐分指数SI与实测土壤含盐量数据

Tab. 2 Salinization detection indexes (WMI), SI and measured salt contents (MWIs)

| 样点 | 经度(°) | 纬度(°) | 测量值/(g·kg ⁻¹) | MWI | SI |
|----|-----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| 1 | 83.40028 | 41.68778 | 131.5 | 0.938707 | 0.238226 |
| 2 | 83.42889 | 41.66028 | 49.7 | 0.93024 | 0.278668 |
| 3 | 83.45639 | 41.64639 | 96.78 | 0.866995 | 0.330074 |
| 4 | 83.40111 | 41.61528 | 55.9 | 0.889987 | 0.243386 |
| 5 | 83.27444 | 41.68472 | 38 | 0.931653 | 0.217102 |
| 6 | 83.27889 | 41.65417 | 62 | 0.887298 | 0.220319 |
| 7 | 83.28694 | 41.62417 | 83.2 | 0.939983 | 0.247172 |
| 8 | 83.22361 | 41.67056 | 10.4 | 0.678111 | 0.202622 |
| 9 | 83.23444 | 41.60806 | 34.6 | 0.896232 | 0.256114 |
| 10 | 83.25806 | 41.58167 | 77.6 | 0.9096 | 0.228994 |
| 11 | 83.33028 | 41.68611 | 61.5 | 0.955427 | 0.260059 |
| 12 | 83.32083 | 41.63472 | 61.6 | 0.9372 | 0.237652 |
| 13 | 83.26556 | 41.51194 | 35.4 | 0.880627 | 0.296578 |
| 14 | 83.26972 | 41.42861 | 63.4 | 0.93604 | 0.258094 |
| 15 | 83.32639 | 41.39722 | 0.5 | 0.517221 | 0.175464 |
| 16 | 83.20139 | 41.37250 | 64 | 0.970437 | 0.260584 |
| 17 | 83.15167 | 41.27611 | 110 | 0.909999 | 0.258094 |
| 18 | 83.28333 | 41.26056 | 60.1 | 0.912912 | 0.261316 |
| 19 | 83.36667 | 41.24389 | 11.5 | 0.870263 | 0.224533 |
| 20 | 82.88500 | 41.17111 | 0.3 | 0.540026 | 0.159809 |
| 21 | 82.93667 | 41.13556 | 9 | 0.804509 | 0.246418 |
| 22 | 82.79528 | 41.11389 | 6.7 | 0.583151 | 0.161032 |
| 23 | 82.87944 | 41.11556 | 26.3 | 0.793453 | 0.237485 |
| 24 | 82.52222 | 41.34917 | 3.9 | 0.776549 | 0.236247 |
| 25 | 82.47611 | 41.27028 | 57.2 | 1.002537 | 0.25454 |
| 26 | 82.41889 | 41.37222 | 2.1 | 0.658922 | 0.187657 |
| 27 | 82.71056 | 41.52667 | 1.3 | 0.524365 | 0.17328 |
| 28 | 82.75333 | 41.52972 | 0.2 | 0.570268 | 0.169957 |
| 29 | 82.78361 | 41.48917 | 0.1 | 0.544527 | 0.154063 |
| 30 | 82.71250 | 41.58167 | 0.2 | 0.672986 | 0.200825 |
| 31 | 82.77250 | 41.56917 | 0.2 | 0.503162 | 0.158743 |
| 32 | 82.837780 | 41.54444 | 0.2 | 0.539069 | 0.163188 |

MWI的均值,通过密度分割划分特征空间,建立四个区间:非盐渍化地(<0.555),轻度盐渍化地(0.555~0.591),中度盐渍化地(0.591~0.776),重度盐渍化地(0.776~0.909)。通过上述结果表明,遥感监测指数MWI可以有效反映地表植被变化和盐分水量组合,可以作为盐渍化土壤的指标加以应用。

表 3 不同盐渍化土地 MWI 平均值

Tab. 3 Salinization Detection Indexes (MWIs) of different levels of soil salinization

| 盐渍化土地 | MWI |
|-------|-------|
| 非盐渍地 | 0.555 |
| 轻度盐渍地 | 0.591 |
| 中度盐渍地 | 0.776 |
| 重度盐渍地 | 0.909 |

5 结 论

土壤盐渍化问题是影响干旱区绿洲稳定与生态环境质量的关键问题所在,是阻碍新疆绿洲农业生产可持续发展的最大问题。应用遥感技术原理和方法,针对区域大尺度土壤盐渍化信息提取做了相关工作,初步获得以下结论:

(1) 利用遥感影像,结合野外采样数据、实验分析数据提取了盐渍土的光谱特征信息。利用修改型土壤调整植被指数(MSAVI)和湿度(WI)指数构成特征空间,建立了MWI模型,该模型能够有效、快速的提取区域土壤盐渍化信息,为今后的土壤盐渍化监测提供一个新的方法。结果表明了对于研究区非盐渍地和重度盐渍地的分布能够有效地进行区分,有利于提高土壤盐渍化遥感解译精度。

(2) 利用遥感技术的特征指数和盐渍土光谱特征之间的关系,可用来反演区域土壤的盐分信息。考虑到干旱区特殊的地理环境,这种方法提取盐渍化信息在理论上易于理解和实践,有利于盐渍化定量分析与监测。

该二维特征空间具有原理简单、操作方便的优点。但在实际应用中,由于不同地域时空条件的差异,可能会造成研究结果产生一定的误差。在以后的工作中,应进一步采用多时相、多分辨率遥感数据分析不同时空尺度的MSAVI-WI特征空间形态特征,深入研究MWI对不同深度土壤盐渍化实际估算能力的差异,不断提高MSAVI-WI特征空间在盐渍化遥感监测方面的应用水平。

参考文献 (References)

- [1] Bayaer W, Yanjun Shen, Audengaowa A et al. Using remote sensing to evaluate land salinization in typical areas of Inner-Mongolia, China. Geoscience and Remote Sensing Symposium: IEEE Computer and Remote Sensing Society. 2005 Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston: IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2005. 2888-2890.
- [2] Amezketa E. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. Journal of Arid Environments, 2006, 67(4): 594-606.
- [3] Chi Tao, Liu Huiyang, Chen Ming. Developing Design for Soil Salinization Sensor Based on Electromagnetic and ETM-technology. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA): Changsha University Of Science and Technology, Hunan Science and Technology, IEEE Computer Society. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. New York: IEEE Computer Society, 2010. 1101-1104.
- [4] 扶卿华, 倪绍祥, 王世新, 等. 土壤盐分含量的遥感反演研究. 农业工程学报, 2007, 3(1): 48-54.
- [5] 骆玉霞, 陈焕伟. GIS支持下的TM图像土壤盐渍化分级. 遥感信息, 2001, (4): 12-15.
- [6] Xue Yueju, Hu Yuemin, Liu Shuguan et al. Improving land resource evaluation using fuzzy neural network ensembles. Pedosphere, 2007, 17(4): 429-435.

- [7] Ding Han, Wang Renchao, Wu Jiapin et al. Quantifying land use change in Zhejiang coastal region, China using multi-temporal Landsat TM / ETM+ images. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 712-720.
- [8] 潘竞虎, 秦晓娟. 基于植被指数—反照率特征空间的沙漠化信息遥感提取——以张掖绿洲及其附近区域为例. *测绘科学*, 2010, 35(3): 193-195.
- [9] 田苗, 王鹏新, 孙威. 基于地表温度与植被指数特征空间反演地表参数的研究进展. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 698-705.
- [10] 张红卫, 陈怀亮, 申双和, 等. NDVI—ST特征空间及干湿边变化特征. *气象科技*, 2010, 38(1): 86-95.
- [11] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度——植被指数特征空间的区域土壤干湿状况. *生态学报*, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [12] Dall'Olmo G, Karnieli A. Monitoring phenological cycles of desert ecosystems using NDVI and LST data derived from NOAA-AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(19): 4055-4071.
- [13] 江红南, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于ETM+数据的干旱区盐渍化土壤信息提取研究. *土壤学报*, 2008, 45(2): 222-228.
- [14] 张飞. 干旱区绿洲盐渍化地光谱、空间特征与成分研究——以渭干河—库车河三角洲绿洲为例. 乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文, 2007.
- [15] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 等. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河—库车河流域三角洲绿洲为例. *生态学报*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [16] 罗江燕. 基于3S技术的土壤盐渍化影响因素研究. 乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文, 2009.
- [17] 江红南. 基于3S技术的干旱区土壤盐渍化时空变化研究. 乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文, 2007.
- [18] 容芳芳. 干旱区土地利用/覆盖变化(LUCC)及其盐渍化效应. 乌鲁木齐: 新疆大学硕士学位论文, 2010.
- [19] 赵忠海. 遥感技术在密云水库北部土壤侵蚀调查中的应用. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(4): 100-104.
- [20] 王雪梅, 柴仲平, 塔西甫拉提·特依拜. 渭干河—库车河三角洲绿洲土壤盐分对植被分布格局的影响. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 221-223.
- [21] 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. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 168-173.
- [22] 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504-515.
- [23] 张浩, 李志华, 何蛟涛, 等. 干旱区盐渍土形成和水盐运移机理. *生物学通报*, 2011, 46(4): 10-12.
- [24] 林川, 宫兆宁, 赵文吉. 基于中分辨率TM数据的湿地水生植被提取. *生态学报*, 2010, 30(23): 6460-6469.
- [25] 刘培君, 张琳, 艾里西尔·库尔班, 等. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法. *遥感学报*, 1997, 1(2): 135-138.
- [26] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 渭干河—库车河土壤盐渍化现状特征及其与光谱的关系. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 227-235.
- [27] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于对应分析的土壤盐渍化现状特征及其与光谱关系研究. *土壤学报*, 2009, 46(3): 513-519.
- [28] 买买提·沙吾提, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于遥感的渭干河—库车河三角洲绿洲土壤盐渍化监测及成因分析. *地理科学*, 2011, 31(8): 976-981.
- [29] Crist E P, Kauth R J. The tasseled cap se-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 52(1): 81-86.
- [30] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2002. 378-379.
- [31] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 715-718.
- [32] Michel M Verstraete, Bernard Pinty. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1254-1265.

The retrieval model of soil salinization information in arid region based on MSAVI-WI feature space: A case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa watershed

DING Jianli, QU Juan, SUN Yongmeng, ZHANG Yongfu

(Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resources and Environment Science,
Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Soil salinization is one of the major causes for soil desertification and ecological degradation in arid region. Acquiring large-scale and high-precision soil salinization information in real or near-real time is critical for preventing and mitigating soil salinization. The study area is located in Weigan-Kuqa oasis on the northern margin of the Tarim Basin. By analyzing Landsat-TM satellite image and soil samples obtained from field survey, we intend to investigate the relationship between Wet Index (WI) and Modified Soil-adjusted Vegetation Index (MSAVI). These two indices are often regarded as very important land cover biophysical parameters that are strongly descriptive of soil salinization in a certain degree. The study proposes a concept of MSAVI-WI feature space and builds a soil salinity monitoring index (MWI) model based on the analysis. The results indicate that there is a strong correlation between the MWI and surface soil salinity (with an R-squared of 0.844). Monitoring soil salinization with MWI is more precise than the salt indexes commonly used in traditional remote sensing monitoring methods. Difference matrix analysis also suggests that MWI detects different degrees of soil salinity and the changes of different combination of the vegetation and soil moisture better in the study area. Additionally, this index has a clear biophysical meaning that is often well accepted and understood. The study suggests that MWI will be helpful to monitor and evaluate soil salinization in arid region on large scale.

Key words: remote sensing model; wet index (WI); modified soil adjusted vegetation index type (MSAVI); feature space