

DOI: 10.5846/stxb201212291895

丁建丽, 姚远, 王飞. 干旱区土壤盐渍化特征空间建模. 生态学报, 2014, 34(16): 4620-4631.

Ding J L, Yao Y, Wang F. Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4620-4631.

## 干旱区土壤盐渍化特征空间建模

丁建丽\*, 姚 远, 王 飞

(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:** 当前, 土壤盐渍化以及因灌溉引起的土壤次生盐渍化问题是我国干旱、半干旱区所面临的主要生态环境问题。在特征空间理论的支持下, 以波谱分解技术为基础, 以 Landsat-TM、Landsat-ETM<sup>+</sup> 多光谱遥感影像和野外调查数据为基础数据源, 通过分析干旱区土壤盐渍化对地表生物物理特征的影响, 探讨了表征盐渍化过程与地表生物物理特征之间的规律及定量关系, 进而利用土壤盐渍化遥感监测中关键的 3 个指标——经过波谱分解技术获得的直接表征盐渍化的土壤盐渍化光谱、间接表征盐渍化的植被覆盖度和土壤水分含量协同构建了二维特征空间支持下的土壤盐渍化遥感监测模型 VSSI (Vegetation fraction and Soil fraction Soil Index)、SVSI (Soil water contents and Vegetation fraction Soil Index)、SSSI (Soil water contents and Soil salinization fraction Soil Index) 和三维特征空间支持下的土壤盐渍化遥感监测模型 SVWSI 和 SDI。研究结果表明: 基于三维特征空间建立的 SVWSI (Soil salinization fraction-Vegetation fraction-Water contents Soil Index) 和 SDI (Soil Distance Index) 模型对不同盐渍化程度土壤的敏感程度要高于基于传统二维特征空间建立的 VSSI、SVSI 和 SSSI 模型。其中, SVWSI 和 SDI 模型与实测 0—10 cm 土壤盐分含量决定系数分别为  $R^2 = 0.8325$  和  $R^2 = 0.8646$ , 这充分说明基于高维数特征空间所构建的土壤盐渍化遥感监测模型能更准确地反映盐渍化土壤地表盐量组合及其变化信息, 且指标简单、易于获取, 对于今后干旱区区域大尺度盐渍地信息提取以及动态监测研究具有重要意义。

**关键词:** 特征空间; 遥感; 土壤盐渍化; 渭干河-库车河三角洲绿洲

## Detecting soil salinization in arid regions using spectral feature space derived from remote sensing data

DING Jianli\*, YAO Yuan, WANG Fei

College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Key Laboratory for Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

**Abstract:** Soil salinization, especially secondary soil salinization caused by irrigation activities is one of the primary ecological and environmental concerns in the arid and semi-arid regions of China. A critical research question is to quickly and accurately monitor soil salinization in arid and semi-arid regions so that prevention strategies can be developed quickly and deployed efficiently. Traditional techniques based on field soil sampling and laboratory experiments, though could be rather accurate for the sampling sites and their immediate vicinity, can hardly produce real-time evaluation. Monitoring soil salinization using remotely sensed imageries, however, starts to attract scholarly attention during the past decades due to the almost real-time information collection, vast geographic coverage, and rich information contained in the remotely sensed imageries. The current study is an attempt to employ remote sensing technique to monitor soil salinization in the arid/semi-arid Weigan-Kuqa Delta Oasis region in Xinjiang, Western China. Data are collected from Landsat-TM and Landsat-ETM<sup>+</sup> multiple-spectral remote sensing imageries. Field soil samples at the 0—10 cm depth are obtained for validation purposes as

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程 (2013711014); 国家自然科学基金项目 (U1303381, 41261090, 41130531); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-1075); 霍英东青年教师基金项目 (121018)

**收稿日期:** 2012-12-29; **网络出版日期:** 2014-03-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ding\_jl@163.com

well. The study intends to establish a statistical relationship between the degrees of soil salinization and surface biophysical reflective characteristics that are captured by the remote sensing imageries. Spectral un-mixing analysis of the multispectral imageries produces three groups of commonly used spectral information for soil salinization monitor and evaluation, i. e., individual spectra that are sensitive to soil salinization, that can be used to derive vegetation cover, and that can be used to derive soil moisture contents. The study then combines these groups of information establish three two-dimensional and two three-dimensional soil salinization monitoring indices. The three two dimensional indices include: Vegetation fraction and Soil Index (VSSI), Soil water contents and Vegetation fraction Soil Index (SVSI) and Soil water contents and Soil salinization fraction Soil Index (SSSI). The two three-dimensional soil salinization monitoring indices include: Soil salinization fraction-vegetation fraction-Water contents Soil Index (SVWSI) and Soil Distance Index (SDI). Statistical analyses using these obtained two dimensional and three dimensional indices with field soil sample data are conducted as well. The result suggests that all the indices are able to provide sufficient monitoring and evaluating performance of the severity of soil salinization in our designated study region. Three dimensional indices, however, tend to be more sensitive to soil salinization than the two dimensional indices. In particular, SVWSI and SDI are highly correlated with soil salt contents at the 0—10 cm depth, with correlation coefficients of  $R^2=0.8325$  and  $R^2=0.8646$ , respectively. The result suggests that higher dimensional indices derived from remote sensing imageries might provide more accurate soil salinization monitoring measurements than lower dimensional indices due to enriched information structure. Since obtaining spectral information from remote sensing imageries is relatively straightforward and is often either real-time or near real-time, our suggests that rich information that can be derived from remotely sensed imageries shall be of invaluable importance to provide real-time and accurate evaluation and monitor for soil salinization monitoring and evaluation might provide timely strategies that can mitigate or even prevent further soil salinization in arid and semi-arid regions.

**Key Words:** feature space; remote sensing; soil salinization; Weigan-Kuqa river delta oasis

土壤盐渍化以及因灌溉引起的土壤次生盐渍化问题是我国干旱、半干旱区所面临的主要生态环境问题之一<sup>[1-4]</sup>,通常出现在气候干旱、土壤蒸发强度大、地下水位高且含有较多可溶性盐类的地区。土壤盐渍化问题现已成为影响绿洲农业的可持续发展、威胁绿洲生态安全和稳定的重要因素<sup>[5-6]</sup>。由于土壤盐渍化对气候、土壤、地形和水文地质等自然条件非常敏感,并随着干、湿季节的变迁而变化,因而利用传统的采样手段对区域尺度的土壤盐分变化进行监测变得较为困难<sup>[7-8]</sup>。而遥感技术因其具有监测范围大,获得资料速度快、信息量大、周期短、成本低、受地面条件限制少等优点,使得大面积实时动态监测盐渍土状况成为可能<sup>[9-10]</sup>。

目前,利用遥感图像进行土壤盐渍化信息提取的方法主要为目视解译以及结合土壤含盐量、地下水等辅助量进行自动化分类。但均存在信息提取过程受人为因素影响大、引入的辅助量会引起图像的破碎化等问题<sup>[11]</sup>。当前国内外已开展的土壤盐渍化遥感监测方法研究主要还是在定性分析的层面

上,其通用性、定量化以及普适性并不令人满意<sup>[12]</sup>。而利用常规手段获取“点状”信息所生成的空间分布图往往存在时间上的滞后性<sup>[13]</sup>,并且采样样本仅考虑以裸土为主的光谱信息,缺乏对植被光谱与土壤盐渍化间接响应信息的综合考虑,从而导致了区域尺度土壤盐渍化遥感监测往往难以达到准确、实用的要求。因此,当前的研究迫切需要利用遥感影像及时获取盐渍化分布的“面状”信息,以便准确地对盐渍化进行实时监测预报。

通过利用多光谱遥感影像中所提取的各类指标构建特征空间进行盐渍化信息的提取和监测是当前土壤盐渍化遥感监测研究的先进方法。近年来,通过选取适当的指标构建二维特征空间进行土壤盐渍化信息提取的研究已见报道<sup>[14]</sup>,如:哈学萍等利用盐分指数(SI)和地表反射率(Albedo)构建了盐渍化信息提取模型,并借助决策树分类方法成功提取出了克里雅绿洲的土壤盐渍化分布信息<sup>[15]</sup>;王飞等综合分析了归一化植被指数(NDVI)与盐分指数(SI)二者之间的关系,在此基础之上提出 NDVI-SI 特征

空间概念<sup>[16]</sup>;丁建丽等从遥感影像中提取了修改型土壤调整植被指数(MSAVI)和湿度指数(WI),并基于此构建了MSAVI-WI二维特征空间用于干旱区绿洲的土壤盐渍化监测<sup>[17]</sup>。但上述研究主要是基于二维特征空间理论进行模型的构建,同时由于干旱区地表植被稀疏,单一像元内的光板地比例过高,从而导致由于光板地亮度的干扰使得遥感数据对植被的反映不是很准确。因而选用更适用于干旱区的光谱指数,通过混合像元的分解,在二维特征空间理论的基础上,构建适用于干旱区稀疏植被条件下的三维特征空间土壤盐渍化遥感监测模型就显得更为重要和关键,而这类研究在国内尚未见报道。

本研究选取具有长期研究基础的渭-库绿洲作为研究区,利用土壤水分模型(MPDI)和子像元分解模型(LSMM)提取出水分、植被和土壤信息,选择更为适合干旱区稀疏植被条件下的环境因子(VF植被丰度、SWF土壤水分丰度和SF土壤丰度)建立不同二维特征空间下的土壤盐渍化遥感监测模型(VF-SF特征空间、VF-SWC特征空间和SF-SWC特征空间),并在此基础上构建了三维特征空间下的土壤盐渍化遥感监测模型SVWSI和SDI,以期通过所建立的三维特征空间土壤盐渍化遥感监测模型实现对土壤盐渍化信息、植被丰度信息和土壤水分信息的融合,为今后在干旱区范围内开展更为精确和定量的土壤盐渍化监测研究提供思路和借鉴。

## 1 研究区概述

渭干河-库车河绿洲(简称渭-库绿洲)位于新疆塔里木盆地北缘,研究区地理坐标范围为:39°29'51"N—42°38'01"N,81°28'30"E—84°05'06"E。北邻和静县,南至塔里木河,西接拜城县,东邻轮台县和尉犁县,属于渭干河-库车河流域。地处塔克拉玛干沙漠边缘,属暖温带大陆性干旱气候,多年平均气温为10.5—11.4℃,年降水量为50.0—66.5mm,年均蒸发量为2000—2092mm,年均无霜期240d。植被以盐生植被为主,主要分布在渭库绿洲外围轻、中度盐渍化区域,包括芦苇(*Phragmites australis*)、骆驼刺(*Allhagi sparsifolia*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、盐爪爪(*kalidium gracile*)和花花柴(*Karelinia caspica*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 数据源及预处理

本研究采用2001年8月1日、2006年6月22日、2006年7月22日、2006年9月24日、2006年10月10日、2007年7月25日获取的Landsat TM、ETM<sup>+</sup>多光谱卫星遥感数据,2006年7月和2007年7月获取的土壤含盐量、土壤含水量和植被覆盖度等野外实测数据。其中遥感影像参照2001年渭-库绿洲1:1万地形图进行几何精校正,RMS控制在半个像元之内。然后运用6S模型对校正后的影像进行大气校正<sup>[18]</sup>。

### 2.2 土壤盐渍化过程响应参数提取

干旱区绿洲土壤盐分的变化容易受到3个因素的影响,分别是土壤水分因素、植被因素和盐渍地因素。一方面,土壤盐分的时空分布变化与水资源的循环过程有着极大关系,盐随水动,土壤盐分随水分的变化而发生转移。特别是在农业区,土壤盐分容易受灌溉因素的影响而产生淋溶作用而进入到地下水中。受地势的影响,地势高处的土壤盐分易向地势低处聚集,从而形成盐渍地在绿洲内部呈现斑块状分布,在绿洲外围呈现片状分布。另一方面,干旱区陆表植被的变化信息能够较好的反映区域水盐运移的变化特征和盐渍化状况。因而本研究针对研究区的盐渍化信息、植被信息和土壤水分信息进行提取。

#### 2.2.1 土壤盐渍化和植被覆盖信息提取

多年以来,国内外学者研究遥感光谱成像机理,模拟光谱混合过程,提出了多种解决混合像元问题的方法与模型,如线性、概率、几何光学和模糊模型。线性分解模型(LSMM)由于具有物理意义明确、理论基础较好、建模简单、操作简便等优势而得到广泛应用。模型定义为:像元在某一光谱波段的反射率是由构成像元的基本组分的反射率以及所占面积比例的权重系数的线性组合。本文利用LSMM模型<sup>[19]</sup>计算研究区的土壤盐渍化丰度(SF)和植被丰度(VF)。

#### 2.2.2 土壤水分信息提取

采用Ghulam提出的修正垂直干旱指数(MPDI)反演研究区地表土壤水分信息<sup>[20]</sup>,模型表达式为:

$$MPDI = \frac{R_{red} + MR_{nir} - F_v(R_{v,red} + MR_{v,nir})}{1 - F_v \sqrt{M^2 + 1}} \quad (1)$$



式中  $R_{v,Red}$ ,  $R_{v,nir}$  为红光波段与近红外波段植被反射率;  $F_V$  为被覆盖度;  $R_{nir}$ ,  $R_{Red}$  为近红外与红波段反射率;  $M$  为土壤线斜率。

### 2.2.3 盐分指数(SI)

$$SI = \sqrt{\rho_1 \times \rho_3} \quad (2)$$

式中, SI 为盐分指数<sup>[21]</sup>;  $\rho_1$ 、 $\rho_3$  为 Landsat-ETM<sup>+</sup> 相应波段反射率值。

### 2.2.4 土壤调整植被指数(TSAVI)<sup>[22]</sup>

$$TSAVI = \frac{a(NIR - aR - b)}{aNIR + R - ab + x(1 + a^2)} \quad (3)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为土壤背景线的斜率和截距; NIR、 $R$  为近红外、红光波段反射率。

## 2.3 多维特征空间与土壤盐渍化遥感监测模型

研究基于波谱分解技术基础, 利用盐渍化土壤遥感监测中 3 个关键指标(土壤盐渍化光谱特征、植被覆盖特征和土壤水分含量特征)解决以往传统遥

感监测土壤盐渍化的弊端—混合像元问题; 在特征空间理论支持下构建二、三维特征空间土壤盐渍化遥感监测模型, 并利用实测数据验证。

### 2.3.1 二维特征空间土壤盐渍化遥感建模研究

为了进一步研究土壤盐渍化和植被丰度之间的关系, 依次选用 2001 年 8 月 1 日、2006 年 6 月 20 日、7 月 22 日、9 月 24 日、10 月 10 日、2007 年 7 月 25 日共 6 期遥感图像绘制了用盐渍化丰度(SF)和植被丰度(VF)构成的 VF-SF 特征空间(图 1)。为了研究土壤水分与植被丰度的关系, 研究选择上述 6 期遥感影像绘制出了用土壤水分(SWC)和植被丰度(VF)构成的 VF-SWC 特征空间(图 1)。二者建立的散点图形状为三角形, 其相关性为正相关。同样研究选择上述 6 期遥感影像, 研究了盐渍化丰度与土壤湿度间的关系, 并绘制出了用盐渍化丰度(SF)和土壤湿度(SWC)构成的 SF-SWC 特征空间(图 1)。

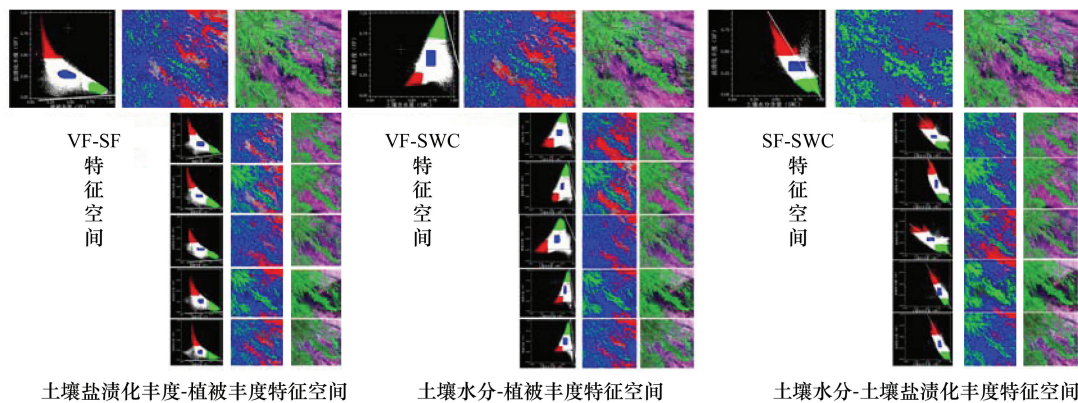


图 1 基于二维特征空间的土壤盐渍化监测模型

Fig.1 soil salinization model based on spectral feature space for two dimensions

通过上述建立的 3 个特征空间可以看出, 研究所建立的散点图的形状均为三角形, 其相关性除 VF-SWC 特征空间为正相关外, 其余均呈现为负相关, 在所构成的特征空间中, 不同的盐渍化土壤均具有显著规律。其中, 红色区域为重度或者极重度盐渍化区域, 蓝色区域为中轻度盐渍化区域, 绿色区域主要为农田种植区。研究以 2006 年 7 月和 2007 年 7 月为例, 以均匀抽样的方式定量地揭示了 SF 和 VF、SWC 和 VF、SWC 和 SF 之间的关系, 从图 2 中可以看出均存在着较好的线性或非线性定量关系。

图 3 为 VF-SF 特征空间简化示意图, A、B 分别表示的是干燥的裸土(SF 大, VF 小)和湿润的裸土

(SF 和 VF 都小), 随着地表覆盖度的降低, 像元级裸土面积逐渐增大, 图像色调逐渐变亮, 土壤盐渍化程度不断提高, C 点表示植被覆盖度高, 土壤盐分含量低, 土壤水分充沛, B—C 表示土壤盐分占有量较少, 土壤水分充沛, 植物生长不受盐分胁迫影响低, 植被覆盖度高, 土壤持水性较好, 温度较低, 积盐率相对较低, 盐分不易聚集于陆地表面的像元, 被定义为“低盐边”。图 3 中 A、B、C 代表了 VF-SF 特征空间的 3 种极端现象, 在植被生长的不同时期, 地表植被覆盖状况对应的 VF-SF 都分布在 ABC 这个多边形区域内。



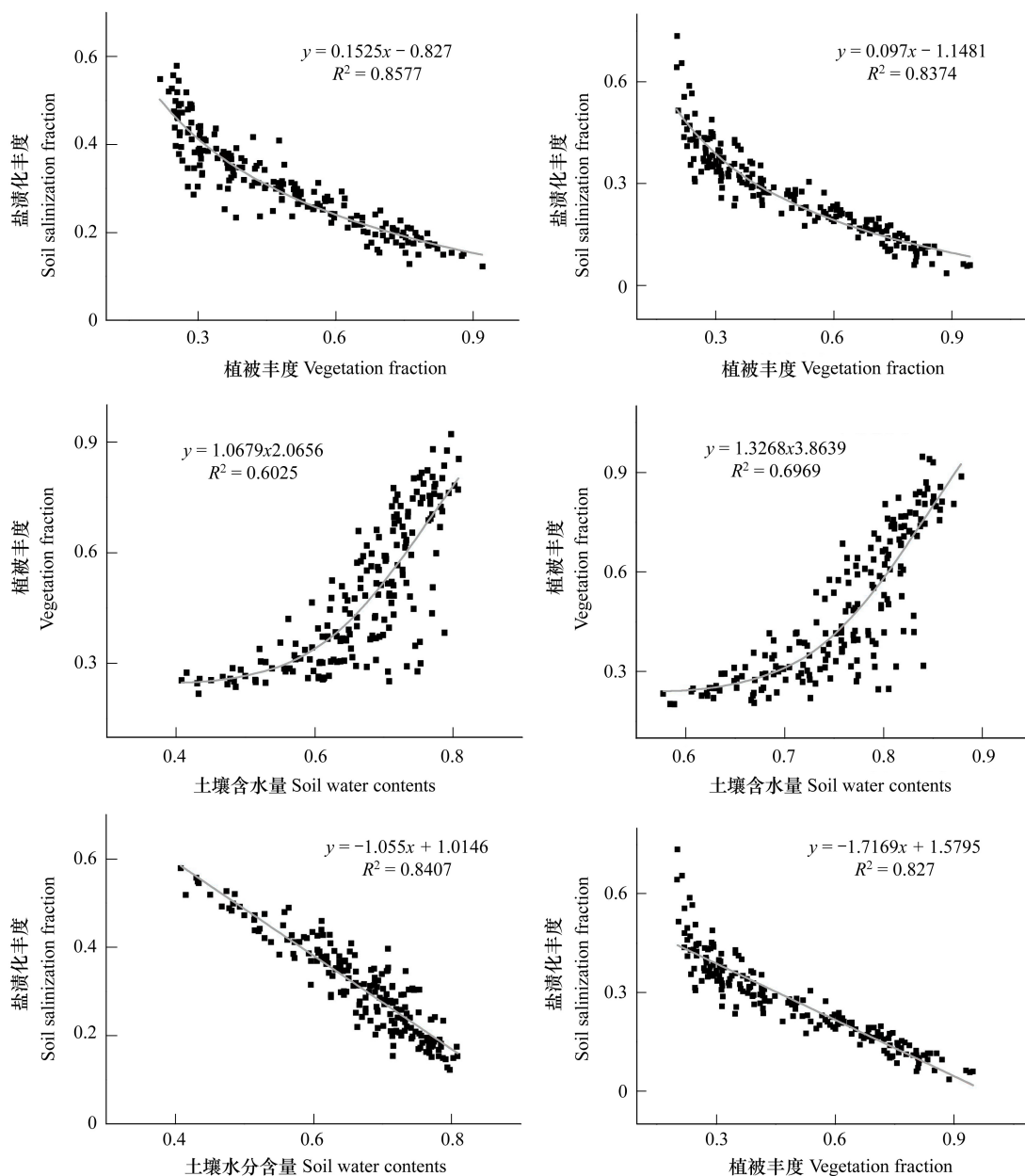


图2 土壤盐渍化响应参数间定量关系

Fig.2 Quantitatively relationship among VF, SWC and SF

图4为VF-SWC特征空间简化示意图,A为植被覆盖度的高区域,土壤水分充沛,土壤盐分含量低,水热组合为最优状态。B、C分别表示湿润的地带(VF小,SWC大)和干燥的裸土(VF小,SWC小),A—B被定义为“低盐边”,临近此边的像元土壤水分充沛,土壤盐分含量较少,植物生长受盐分胁迫影响低,植被覆盖度高,积盐率相对来说较低,盐分不易聚集于陆地表面。

图5为SF-SWC特征空间简化示意图,如图所示,在该特征空间中,可以选择基于代表盐渍化趋势

线的垂线来建立区分不同盐渍化土壤的监测指数,即在上述垂直方向上划分SWC-SF特征空间,以此将不同程度盐渍化土壤区进行区分,即:

$$SF = -\frac{1}{e}SWC + f(4)$$

#### (1) VSSI与SVSI模型构建

由于土壤中的可溶性盐分借助毛管上升至地表,因而从散点图6中可以看出,离“低盐边”越近的像元,植被覆盖度就越高,土壤盐分占有量就越少,由此得出SWC-VF特征空间土壤盐渍化监测模型

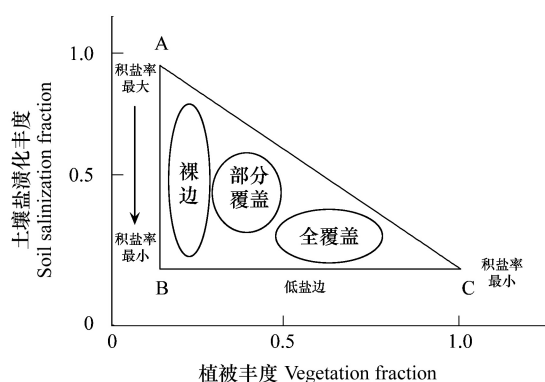


图3 土壤盐渍化丰度和植被丰度构成的三角形空间

Fig.3 VF/SF feature space

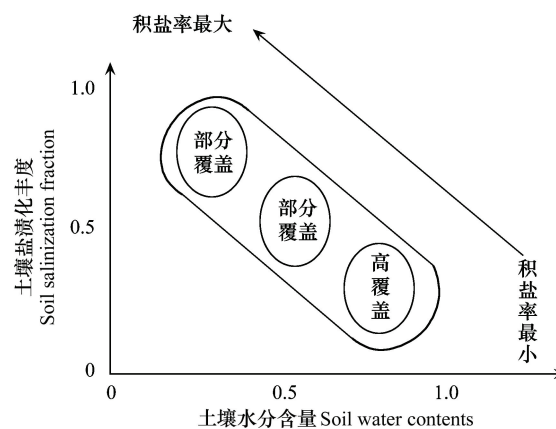


图5 盐渍化丰度和土壤水分构成的特征空间

Fig.5 SF/SWC feature space

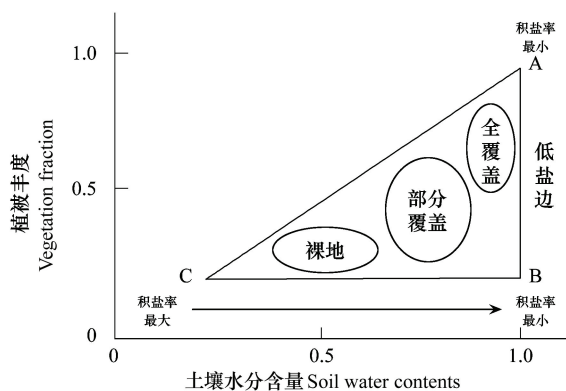


图4 植被丰度和土壤水分构成的三角形空间

Fig.4 VF/SWC feature space

(SVSI) 和 VF-SF 特征空间土壤盐渍化监测模型 (VSSI)。

$$VSSI = \frac{SF - (aVF + b)}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (5)$$

$$SF_{\min} = aVF + b \quad (6)$$

式中, SF 为像元土壤盐渍化丰度; VSSI 为土壤盐渍化遥感监测指数;  $SF_{\min}$  为“低盐边”方程,  $a$ 、 $b$  为低盐边拟合参数, VF 为像元植被丰度, 对应一定 VF 值下的 SF 最低值。

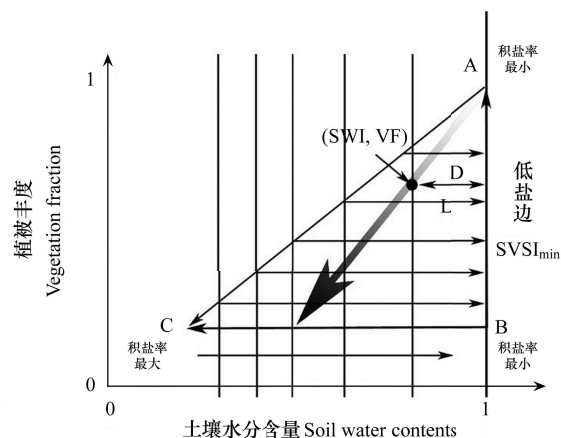
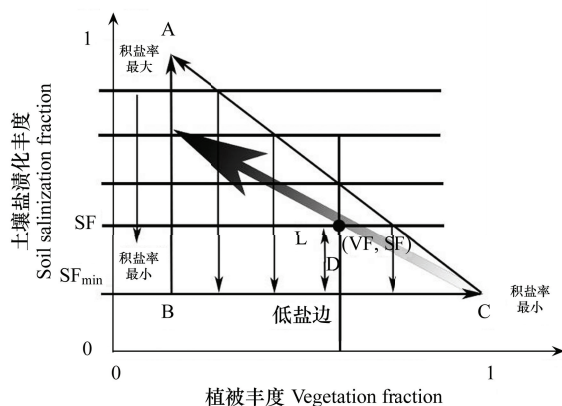


图6 VF-SF 特征空间盐渍化模型构建示意图

Fig.6 The model of soil salinization in VF/SF feature space

$$SVSI = \left| \frac{SF - (c_v F + d)}{\sqrt{1 + c^2}} \right| \quad (7)$$

$$SWC_{\min} = cVF + d \quad (8)$$

式中, SVSI 指土壤盐渍化遥感监测指数; SWC

指像元湿度信息; VF 指像元植被丰度;  $SWC_{\min}$  指“低盐边”方程, 对应一定 VF 值下的 SWC 值最高;  $c$ 、 $d$  为低盐边拟合参数。

## (2) SSSI 模型构建

图7 为 SWC-SF 特征空间简化示意图, 从任意一

点到直线 T 的垂直距离能说明土壤盐渍化状况,即离直线 T 越远的像元土壤盐渍化现象就越严重,水分含量少,植被覆盖度低,离直线 T 越近的像元土壤盐渍化现象就越轻,土壤水分越充沛,植被覆盖度高。在 SWC-SF 特征空间任意取一点 D(SWC, SF),根据从点到直线的距离方程,可以得到从 D(SWC, SF)到直线 T 的距离为 EF。

$$EF = \frac{1}{\sqrt{e^2 + 1}} (\text{SWC} + e \cdot \text{SF}) \quad (9)$$

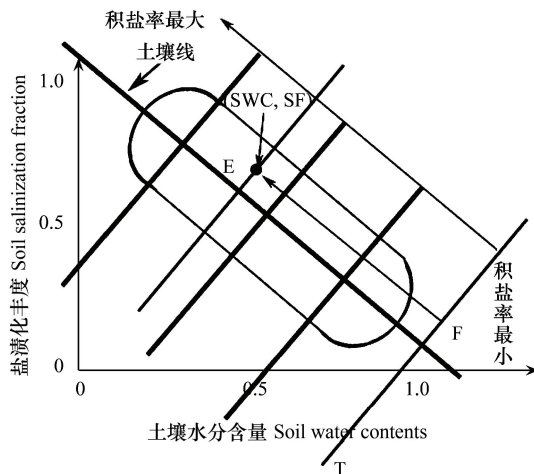


图7 SWC-SF 特征空间模型构建示意图

Fig.7 The model of soil salinization in SF/SWC feature space

通常来说,最为接近 T 线的空间就是较湿润分布区或者是水体,而远离线 T 的则都是土壤盐渍化状况较为严重,土壤表层较为干旱区域。进而进一步建立基于 SWC-SF 特征空间土壤的盐渍化遥感监测的指数(SSSI)。

$$\text{SSSI} = \frac{1}{\sqrt{e^2 + 1}} (\text{SWC} + e \cdot \text{SF}) \quad (10)$$

式中,SF 为土壤盐渍化的丰度;SSSI 为土壤盐渍化遥感监测指数; $e$  为土壤线斜率;SWC 为像元土壤的水分信息。

### 2.3.2 基于三维特征空间的土壤盐渍化遥感建模研究

研究利用不同的两种方式来构建三维的特征空间。一为尝试利用研究中提取出来的土壤水分、盐渍地信息和植被构建三维特征空间,进而以特征空间散点走势的规律为基础构建模型构建。二为利用 MNF 变换之后的前 3 个波段在 N 维空间中的构建模型,尝试从数学的角度即波谱空间方法进行盐渍化信息的提取和模型构建。

#### (1) SVWSI 模型构建

在土壤、土壤盐渍信息和植被构建的三维特征空间中,散点集高端代表生态环境比较好的农田种植区也就是“低盐区”,为了要维持高效灌溉农业的可持续发展,则必须要降低作物根区土壤的含盐量到适宜作物的生长水平,而散点集低端则代表植被的覆盖度低,土壤盐分的含量比较高,土壤的含水量低的区域。在排水条件良好的情况下,农业用地的土壤盐分含量一般保持在较低水平,根据野外采样点的实测数据统计分析可得知,土壤的表层 0—10 cm 盐分的含量均值是 0.2 g/kg,最大值是 95%,均值是 75%,平均土壤的含水量为 15.3 g/kg,覆盖度的最小值是 55%。由于绿洲的农产品种植和其他植被的覆盖面积比较大,然而水域和盐渍化区域的面积相对较小,因此散点集呈现两头尖,中间粗的形态。

基于此将定义研究区内的像元到低盐区的距离以来表征土壤的盐渍化程度(图 8)。从而可得到三维特征空间的土壤盐渍化遥感监测的模型(Soil salinization fraction-Vegetation fraction-Water contents Soil Index, SVWSI)。下边是对 SVWSI 模型的相关定义和计算方法:

可设低盐分布区的平均三维光谱的信号为:

$$Sr = \{x_r, y_r, z_r\} \quad (11)$$

计算它到低盐区的距离是  $L$ , 即:

$$L = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2} \quad (12)$$

即三维特征空间的土壤盐渍化遥感监测模型

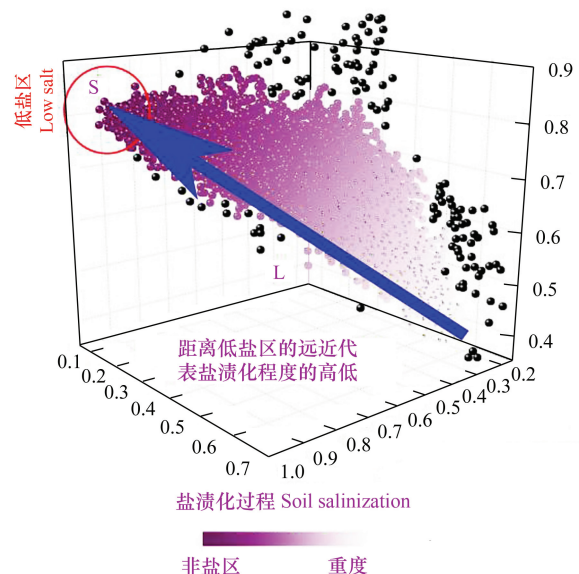


图8 三维特征空间模型构建示意图

Fig.8 The model of soil salinization in 3D space



(SVWSI)为:

$$SVWSI = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2} \quad (13)$$

式中,  $x, y, z$  分别为空间任意一点的坐标;  $x_r$  为土壤盐渍化的丰度;  $y_r$  为土壤水分;  $z_r$  为植被的丰度。

## (2) SDI 模型构建

MNF 变换的结果使图像信息量随着波段数的增加而减少, 一般来说前 3 个波段能比较完整的表达区域的特征信息, 把前 3 个波段投影至 MNF 三维空间中进行相关分析, 可发现特征空间中的地物端元的几何空间位置较明确, 农田“纯净像元”成线状分布(图 9), 而且土壤农田盐分的含量比较少, 在此可假设成立一条“低盐基准线”(AK)。距离线 AK 越近的像元土壤的盐渍化程度就越低。即距“低盐基准线”越远的像元, 土壤盐渍化的程度就越高, 而距“低盐基准线”越近的, 土壤盐渍化的程度越低。则可借助特征空间中的一点到线的距离函数来表达不同地物的土壤盐渍化程度和线性组合方式, 这种表达方式的转变不仅考虑了混合像元中的线性(地物组合)还考虑非线性因素(临边效应), 同时也反映了土壤水分组合方式、盐分及其变化特征。

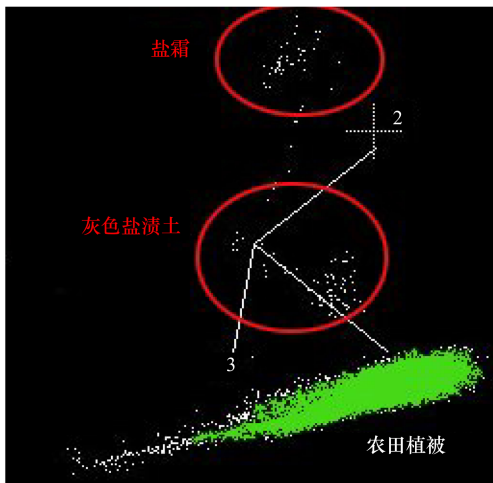


图 9 “纯净”像元在 MNF 前三维空间里的分布

Fig.9 Location of “pure pixels” in the 3D MNF space

不同的终端单元就有不同的几何位置, 同样对于混合光谱的土壤盐渍化的像元也就会随着土壤的盐渍化程度的不同有不一样的几何位置。由图 10

分析可知, 土壤盐渍化的像元到“低盐基准线”的距离可以表达不同程度的土壤盐渍化信息, 进一步得出土壤盐渍化的距离指数(soil salinization distance index, SDI)。下边是土壤盐渍化相关定义和距离指数计算方法:

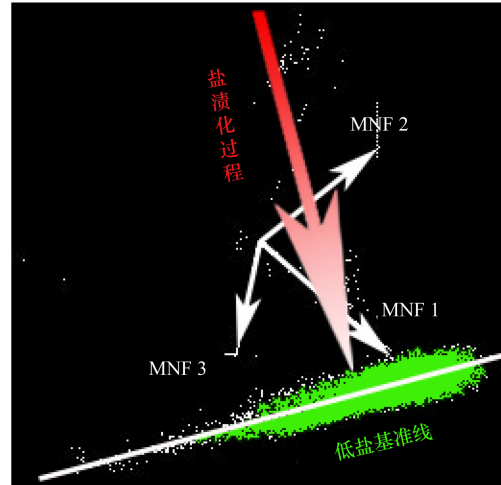


图 10 土壤盐渍化过程表达

Fig.10 Expression of soil salinization process

设“低盐基准线”一端平均的三维光谱信号为:

$$Mv = \{xv, yv, zv\} \quad (14)$$

设“低盐基准线”另一端的平均三维光谱信号为:

$$Mk = \{xk, yk, zk\} \quad (15)$$

“低盐基准线”方程为:

$$\frac{x - xv}{xv - xk} = \frac{y - yv}{yv - yk} = \frac{z - zv}{zv - zk} \quad (16)$$

设土壤盐渍化的像元三维光谱信号为:

$$Ms = \{xs, ys, zs\} \quad (17)$$

计算土壤盐渍化的像元到“低盐基准线”的距离为  $L$ , 即:

$$L = \left\| \frac{|xv - xs, yv - ys, zv - zs| \times |xk - xs, yk - ys, zk - zs|}{|xv - xk, yv - yk, zv - zk|} \right\| \quad (18)$$

设完全土壤的盐渍化像元终端的端元三维光谱信号为:

$$M0 \{x0, y0, z0\} \quad (19)$$

同样可计算它到“低盐基准线”的距离为

$L_0$ , 即:

$$L_0 = \left\| \frac{|xv - x0, yv - y0, zv - z0| \times |xk - x0, yk - y0, zk - z0|}{|xv - xk, yv - yk, zv - zk|} \right\| \quad (20)$$

定义土壤的盐渍化距离指数:

$$SDI = \frac{L}{L_0}$$
(21)

可使用以上方法进行 SDI 计算以及制图,完全盐渍化的区域值为1,非盐渍化的区域则为接近于

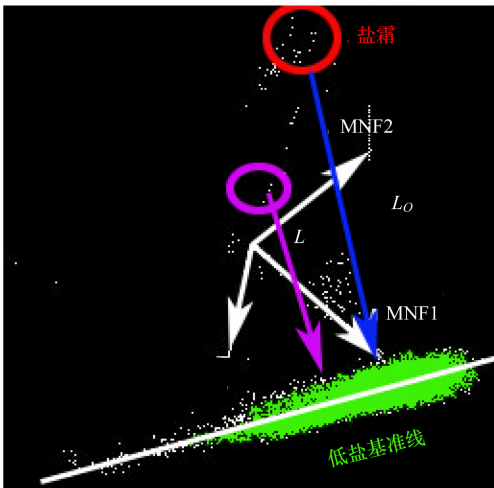


图 11 土壤盐渍化距离指数构想示意图

Fig. 11 Distance for different Soil Salinization in 3D MNF space

0,土壤盐渍化的区域 SDI 值在 0 到 1 之间。因为遥感影像的信息被 MNF 变换压缩至靠前波段,因此选取前三波段使用上述的方法进行计算,可得到 SDI 图(图 11)。

3 结果与分析

3.1 土壤盐渍化和植被丰度信息提取及其验证

在本研究中,端元是从图像中进行获取,通过用最小噪声分离 (Minimum Noise Fraction, MNF) 变化来进行数据降维和噪声剔除,并将干净的 MNF 影像进行像元纯度计算 (Pixel Purity Index, PPI),通过多维散点图确定终端端元。经过反复比对和分析,最终确定植被、水体、灰色盐壳和白色盐壳四种地物为研究区基本端元,并将端元带入到模型中求解,将结果中灰色盐壳和白色盐壳丰度信息合并为土壤盐渍化丰度信息,并利用 2006 年 7 月和 2007 年 7 月实测数据及相关指数对土壤盐渍化丰度和植被丰度进行精度对比验证(表 1 和表 2)。

表 1 VF 和 TSAVI 与实测土壤盐分相关性分析

Table 1 Relationship among VF, TSAVI and measured soil salt contents

实测数据 The measured data	植被丰度 Vegetation fraction		土壤调整植被指数 Transform Soil-Adjusted Vegetation Index	
	回归模型	决定系数	回归模型	决定系数
2006 年植被覆盖度实测数据 The measured data of vegetation cover in 2006	$Y = 0.5045x + 0.1519$	$R^2 = 0.8574$	$Y = 0.6415x + 0.0691$	$R^2 = 0.8211$
2007 年植被覆盖度实测数据 The measured data of vegetation cover in 2007	$Y = 0.5357x + 0.083$	$R^2 = 0.8462$	$Y = 0.4444x + 0.0261$	$R^2 = 0.8154$

表 2 SF 和 SI 与实测土壤盐分相关性分析

Table 2 Relationship among SF, SI and measured soil salt contents

实测数据 The measured data	土壤盐渍化丰度 Soil salinization fraction		盐分指数 Salt index	
	回归模型	决定系数	回归模型	决定系数
2006 年土壤表层盐分实测数据 The measured data of soil surface salinity in2006	$Y = 62.05x + 0.0166$	$R^2 = 0.7105$	$Y = 0.0042x + 0.0813$	$R^2 = 0.6669$
2007 年土壤表层盐分实测数据 The measured data of soil surface salinity in2007	$Y = 39.405 x + 10.575$	$R^2 = 0.7078$	$Y = 0.0034x + 0.0917$	$R^2 = 0.6592$

研究分别选取实测点植被覆盖度数据对 TSAVI 和分解后的植被丰度 (VF) 进行相关性分析(表 1),选取实测点土壤含盐量数据对 SI 和分解后的土壤盐渍化丰度 (SF) 进行相关性分析(表 2)。分析结果

如表 1 和表 2 所示,研究区 2006 年 VF 和 TSAVI 与实测数据之间的相关性较高,决定系数分别为 0.8574 和 0.8211,而 2007 年分别达到 0.8462 和 0.8154。研究区 2006 年 SF 和 SI 与实测数据之间的

决定系数分别为 0.7105 和 0.6669,而 2007 年则分别达到 0.7078 和 0.6592,这表明研究所采用的线性光谱分解方法,其所具有的定量化程度及信息提取精确较高,与其他方法相比具有一定的优越性,能较好地反应研究区内植被和盐渍化分布状况。

### 3.2 土壤水分信息提取及其验证

MPDI 模型反演的土壤水分预测值分别与 2006 年 7 月和 2007 年 7 月获取的土壤水分数据进行相

关性分析,结果见表 3。可以看到,土壤水分(0—10 cm)实测值和模型估测值的变化趋势基本一致,决定系数分别达到了 0.7512 和 0.7815。同时也表明,MPDI 模型能够反映地表覆盖和水热组合及其变化,具有明确的生物物理意义,可以作为反映干旱区土壤湿地状况的监测模型,具有操作性强,预测精度高和数据易获取等优势。

表 3 土壤水分预测值与实测数据相关性分析  
Table 3 Relationship between MPDI and SI and measured soil water contents'

实测数据 The measured data	2006 年 7 月 MPDI 预测值 The predictive value of MPDI in July, 2006		2007 年 7 月 MPDI 预测值 The predictive value of MPDI in July, 2007	
	回归模型	决定系数	回归模型	决定系数
土壤表层水分实测数据 The measured data of soil surface moisture	$Y=0.9074x+0.0625$	$R^2=0.7512$	$Y=0.7982x+0.021$	$R^2=0.7815$

### 3.3 土壤盐渍化遥感监测模型验证

研究利用 2006 年 7 月和 2007 年 7 月获取的实测土壤表层 0—10 cm (A 层)、10—30 cm (B 层)、30—50 cm (C 层)平均盐分数据,分别与对应采样点

图像 VSSI 模型、SVSI 模型、SSSI 模型、SVWSI 和 SDI 模型模拟值进行相关性分析,以测试遥感监测模型精度(表 4)。

表 4 模型预测值与土壤盐分实测数据相关性分析  
Table 4 Relationship between predicted values of the model and measured soil salt contents

土壤分层 Soil stratification	VF-SF 特征空间盐渍化监测指数 Vegetation fraction and Soil fraction Soil Index	SWC-VF 特征空间盐渍化监测指数 Soil water contents and Vegetation fraction Soil Index	SWC-SF 特征空间盐渍化监测指数 Soil water contents and Soil salinization fraction Soil Index	三维特征空间盐渍化距离指数 Soil salinization fraction-Vegetation fraction-Water contents Soil Index	盐渍化距离指数 Soil Distance Index
A 层(0—10 cm) Layer A(0—10 cm)	$Y=0.1016x+0.1571$ $R^2=0.7493$	$Y=0.0884x+0.0179$ $R^2=0.7866$	$Y=0.1082x-0.0296$ $R^2=0.714$	$Y=0.0913x+0.1083$ $R^2=0.8325$	$Y=0.0582x+0.0249$ $R^2=0.8646$
B 层(10—30 cm) Layer C(10—30 cm)	$Y=0.068x+0.6571$ $R^2=0.4114$	$Y=0.0402x+0.481$ $R^2=0.2749$	$Y=0.0585x+0.5116$ $R^2=0.3521$	$Y=0.0426x+0.5835$ $R^2=0.3063$	$Y=0.0268x+0.3294$ $R^2=0.3076$
C 层(30—50 cm) Layer C(30—50 cm)	$Y=0.3009x+0.5464$ $R^2=0.5436$	$Y=0.2043x+0.4171$ $R^2=0.4768$	$Y=0.3099+0.4078$ $R^2=0.6645$	$Y=0.2205x+0.5124$ $R^2=0.5508$	$Y=0.1542x+0.2713$ $R^2=0.687$

5 种土壤盐渍化监测模型能够较好的指示地表 A 层(0—10 cm)土壤盐渍化程度,反演精度较高。其中 SDI 模型和 SVWSI 模型对表层土壤盐分含量较为敏感,其他模型次之。对于 B 层(10—30 cm)和 C 层(30—50 cm),5 种土壤盐渍化遥感监测模型效果总体上低于 A 层,C 层土壤盐分相关性要高于 B 层,相关性最低的为 B 层。

导致产生以上结果的原因可能是:(1)遥感图像的光谱特征反应土壤表层信息比底层更为敏感,致使其相关性高于底层土壤盐分;(2)干旱区的土壤盐分剖面类型多为表聚型,土层 0—10 cm 的土壤盐

分含量较高,而其他土壤层含盐量明显低于该层,盐分的落差较大。此外,由于研究区位于极端干旱区,而本研究野外的采样时间为 7 月中下旬,该月份的降水量较干季有所增加,研究区的盐渍土受降水因素的影响而被淋洗,导致土壤表层积聚的盐分随雨水下渗,这使得研究区表层土壤盐渍化程度有所减轻的同时,也造成了研究区土壤盐分过渡层(B 层)的土壤盐分含量变化剧烈且不稳定,因而与表层的土壤盐分相比,其特征差异较大;(3)同样是由于降水的原因,虽然 7 月份研究区的降水次数较干季更为频繁,但单次降水量依旧较少,其降水量不足以使



得表层土壤盐分向更深层的土壤中(C层)下移,因而C层土壤盐分含量较其它层相对稳定。

#### 4 结论

(1) 本研究深入探讨了光谱混合分析方法在Landsat-TM、ETM<sup>+</sup>多光谱遥感数据上的应用,其中包括光谱混合分析模型的选择、最优端元组分类与取值的确定。研究对光谱混合分析结果(土壤盐渍化丰度和植被丰度)进行精度评价,并经过实测数据验证,结果表明,

应用混合像元分解模型求解得到的研究区地物丰度信息,能够很好地解决遥感图像像元精度的限制。所得到的盐渍化丰度和植被丰度精度较其他信息获取方式比较而言有所提升,且能够很好得直接或者间接揭示研究内盐渍化状况。

(2) 研究选取适用于干旱区的土壤水分模型(MPDI)反演研究区地表土壤水分,经过实测数据验证。结果显示,0—10 cm 土壤水分实测数据和模型预测值具有较好的相关性。表明 MPDI 能够反映地表覆盖和水热组合及其变化,将其作为反映干旱区土壤湿地状况的监测模型具有操作性强,预测精度高和数据易获取等优势。

(3) 研究借助特征空间理论,结合遥感图像分析及野外考察,发现由土壤盐渍化丰度、植被丰度和土壤水分三者两两之间所构建 VSSI、SVSI、和 SSSI 土壤盐渍化遥感监测模型能够较好地反演地表(0—10 cm)土壤盐渍化程度,且反演精度较高。其中 SVSI 模型对表层土壤盐分含量较为敏感,VSSI 模型和 SSSI 模型次之。

(4) 本文深入挖掘多维遥感信息,同时考虑土壤盐渍化过程中多重响应参量,在三维特征空间下构建了 SVWSI 和 SDI 土壤盐渍化遥感监测模型,通过试验对比与分析,SVWSI 和 SDI 模型对不同程度盐渍化土壤敏感性要高于 VSSI、SVSI、和 SSSI,两个模型与表层土壤盐分之间的决定系数分别达到 0.8325 和 0.8646。

本研究通过融合土壤盐渍化信息、植被丰度信息和土壤水分信息,借助多维特征空间相关理论,以水盐多角度混合约束的建模思路为指导,构建了不同维数的土壤盐渍化遥感信息定量反演模型。所建立的模型具有明确的生物物理意义,且指标简单、容

易获取、有利于土壤盐渍化的定量分析与监测,对于今后干旱区盐渍地信息的提取和动态监测研究具有重要的参照价值。

#### References:

- [1] Wang Y G, Xiao D N, Li Y, Li X Y. Response of salt accumulation in soil to groundwater changes at the oasis in the lower reaches of Sangong River, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4036-1263.
- [2] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, Faz A, Martinez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 2011, 85(8): 1318-1324.
- [3] Aldakheel Y Y. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2011, 39(2): 171-180.
- [4] Muyen Z, Moore G A, Wrigley R J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 33-41.
- [5] Gao T T, Ding J L, Ha X P, Zhang F, Wang F. The spatial variability of salt content based on river basin scale a case study of the delta oasis in Weriga - Kuqa watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [6] Wang Y G, Xiao D N, Li Y. Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5262-5270.
- [7] Ding J L, Wu M C, Tiyp T. Study on soil salinization information in arid region using remote sensing technique. *Agriculture Sciences in China*, 2011, 10(3): 404-411.
- [8] Hanson B, Hopmans J W, Simunek J. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 810-810.
- [9] Rao B R M, Ravisankar T, Dwivedi R S, Das S N, Dwivedi R S, Thammappa S S, Venkataratnam L. Spectral behaviour of salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2125-2136.
- [10] Letey J, Hoffman G J, Hopmans J W, Grattan S R, Suarez D, Corwin D L, Oster J D, Wu L, Amrhein C. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(4): 502-506.
- [11] Zhang R Q, Song N P, Wang X N, Cai S M. Visual analysis of saline soil spatial-temporal variation using Geo-information TuPu. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(9): 230-235.
- [12] Fu Q H, Ni S X, Wang S X, Zhu Y. Retrieval of soil salt content based on remote sensing. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 32(1): 97-101.
- [13] Wu Y K, Yang J S, Liu G M. Spatial variability of soil salinity

using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 148-152.

- [14] Ha X P, Ding J L, Tiyip T, Gao T T, Zhang F. SI-Albedo space-based remote sensing synthesis index models for monitoring of soil salinization. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 698-703.
- [15] Ha X P, Ding J L, Tiyip T, Luo J Y, Zhang F. SI-Albedo space-based extraction of salinization in arid area. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 381-390.
- [16] Wang F, Ding J L, Wu M C. Remote sensing monitoring models of soil salinization based on NDVI-SI feature space. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 168-173.
- [17] Ding J L, Qu J, Sun Y M, Zhang Y F. 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. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 223-232.
- [18] Ghulam A, Qin Q M, Zhu L J. 6S Model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(4): 611-618.
- [19] Wu C S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM<sup>+</sup> imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 480-492.
- [20] Ghulam A, Qin Q M, Teyip T, Li Z L. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(2): 150-164.

#### 参考文献:

- [1] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦, 李小玉. 新疆三工河流域尾间绿洲地下水变化与土壤积盐的响应. *生态学报*, 2007, 27(10): 4036-1263.
- [5] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 张飞, 王飞. 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.
- [6] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性. *生态学报*, 2007, 27(12): 5262-5270.
- [11] 张荣群, 宋乃平, 王秀妮, 蔡思敏. 盐渍土时空变化信息的图谱可视化分析. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 230-235.
- [12] 扶卿华, 倪绍详, 王世新, 周艺. 土壤盐分含量的遥感反演研究. *农业工程学报*, 2007, 32(1): 97-101.
- [13] 吴亚坤, 杨劲松, 刘广明. 基于遥感和电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 148-152.
- [14] 哈学萍, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 高婷婷, 张飞. 基于SI-Albedo特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究. *土壤学报*, 2009, 46(4): 698-703.
- [15] 哈学萍, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 罗江燕, 张飞. 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. *土壤学报*, 2009, 46(3): 381-390.
- [16] 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.
- [17] 丁建丽, 瞿娟, 孙永猛, 张永福. 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. *地理研究*, 2013, 32(2): 223-232.
- [18] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于6S模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正. *北京大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(4): 611-618.