

基于三维光谱特征空间的干旱区土壤 盐渍化遥感定量研究*

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 土壤盐渍化是干旱半干旱区农业发展的重要制约因素,同时也是干旱区所面临的最主要的生态环境问题之一,因而准确获取土壤的盐渍化信息对于实时掌握其分布范围以及合理地开展盐渍化治理工作具有重要意义。选取渭干河—库车河流域绿洲典型盐渍地作为研究区,以 Landsat-TM 多光谱遥感影像为基础数据源,首先对影像进行最小噪声分离处理(MNF 变换)并计算其像元纯度指数(Pixel Purity Index, PPI),选取能表征区域特征信息的前三个波段构建 MNF 三维光谱特征空间,然后在向量空间和单行体理论的指导下,结合实地调查,提出“植被亮点区”概念,并定义“盐渍化距离指数(Soil Salinization Distance Index, SDI)”为多维向量空间中包含于单行体中的盐渍化像元到“植被亮点区”的归一化距离。最后利用不同盐分环境下的实测数据对 SDI 进行精度验证。结果显示:在低植被覆盖区,即中度、重度盐渍化区,SDI 与 0~10cm 内土壤盐分含量相关性要高于 0~20cm, $R^2 > 0.83$ 。在相对高覆盖区,即农田和轻度盐渍化区,SDI 与 0~20cm 内平均盐分含量相关性要高于 0~10cm, $R^2 > 0.81$ 。0~10cm 层二者总体精度 $R^2 = 0.81$, 0~20cm 层二者相关性总体精度 $R^2 = 0.72$ 。研究表明,SDI 指数模型简单、易于构建,精度较高,具有一定的应用价值,有利于干旱区区域大尺度盐渍化的定量分析和监测工作。

关键词 光谱特征空间;遥感数据;植被亮点区;盐渍化距离指数

中图分类号 TP79; S153 **文献标识码** A

土壤盐渍化是土地退化的主要形式之一,主要表现为抑制植物生长、降低农业生产和增加土壤侵蚀速度等^[1]。盐渍化作为荒漠化的一种,在中国西部干旱地区广泛分布^[2],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的可溶性盐类的地区。它是一定的气候、地形、水文地质等自然条件以及人类活动共同对水盐运动产生一定影响所带来的结果^[3,4]。盐渍土是我国最主要的中低产土壤类型之一,其生产力水平与其质量状况有非常密切的关系^[5]。据联合国教科文组织和粮农组织的不完全统计,全世界盐渍土面积约为 $8.31 \times 10^8 \text{ hm}^2$,严重影响生态环境和社会经济的发展^[6]。近年来,国家对西部地区的生态环境建设非常重视,对盐渍化土壤的治理也逐步加强,因而应用遥感技术提取盐渍化信息,并在此基础上开展对区域土壤盐渍化程度变化的动态监测研究对于我国西部干旱区的可持续发展具有重要的现实意义^[7-9]。

现阶段区域尺度盐渍化信息提取主要是通过遥感自动分类方法进行,有时引入土壤含盐量、地下水等辅助数据,总体上存在定量化不足、普适性不强、精度难以满足实时需求等问题^[10]。由于盐渍土与其它土壤的光谱特征差别明显,因而将遥感数据、土壤光谱数据与土壤盐分分析数据相结合进行区域土壤盐渍化的监测是最为有效的方法之一^[11]。当前已开展的盐渍化监测研究大多只考虑以裸土为主的土壤光谱信息,缺少综合考虑植被信息对盐渍化的间接响应。尽管现有的盐渍化理论研究为区域盐渍化监测提供了较为完整的分类分级体系,并提出了许多盐渍化分级的量化指标^[12-15],但多数指标为非物理参数,无法从遥感数据中直接提取。有关结果多基于统计原理难以适用于不同区域,而由常规手段获取“点状”信息所生成的盐渍化空间分布图往往存在时间滞后性^[16],且代表性差,生物物理意义不明确,因此迫

* 国家自然科学基金项目(41261090,41161063 和 41130531)、教育部新世纪优秀人才支持计划和霍英东教育基金项目(121018)资助
作者简介:丁建丽(1974—),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事资源遥感与 3S 技术应用研究。E-mail: watarid@xju.edu.cn
收稿日期:2012-12-29;收到修改稿日期:2013-03-29

切需要及时获取盐渍化分布的“面状”信息,并对盐渍化进行实时监测预报。

线性光谱分解模型把混合像元光谱看作各种端元组分的线性组合。从向量空间角度看,任意混合像元坐标位置为各端元按其相对丰度加权组成的线性和^[17]。因此,混合像元总位于各端元组分的凸包(convex hull)之内^[18-19]。这种像元向量空间的凸体几何理论有利于分析混合像元,形成了一套光谱混合分析理论(Spectral Mixture Analysis, SMA)^[20-21],并在许多遥感数据的定量应用中显示了其所具有的优势^[22-23]。最大噪声分数(Maximum Noise Fraction, MNF)变换和PPI指数计算分别作为波谱向量空间降维方法和寻找纯净像元作为终端单元的方法为该理论的应用提供了技术手段。本文以遥感数据为基础,以渭干河-库车河三角洲(以下简称渭-库绿洲)盐渍化典型研究区为例,借鉴上述理论,进行了盐渍化程度信息的提取,并提出了一种多光谱影像定量提取盐渍化信息的算法。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究选择位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地北部的渭-库绿洲为靶区(图1)。绿洲地势西高东低,地形呈东西长带形,平均海拔920~1100 m。

属暖温带大陆性干旱沙漠气候,多年平均气温12.4℃,1月平均气温为-5.8℃,7月平均气温25℃。多年平均日较差14.7℃,全年>10℃的积温为4208℃,年总辐射量达 $6.117 \times 10^5 \text{ J cm}^{-2}$,年日照时数2888h,多年平均蒸发量2124mm,多年平均降水量为52mm,蒸降比约为40:1^[24]。区内土壤由于强烈的蒸腾作用,一部分演变为盐化草甸土,一部分由于土壤水分长期处于饱和状态,易生长喜湿型植物,而发育成为沼泽土壤或潜育化沼泽土。致使土壤颗粒较细,透水性差,矿化度偏高,土壤盐渍化现象较为普遍。随着表层土壤含盐量不断增加,植被覆盖度降低,严重时形成盐霜,植被覆盖度为零,形成重度盐渍化区域。盐生植被以芦苇(*Phragmites communis*)、怪柳(*Tamarix taklamakannesis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)和盐穗木(*Halostachys caspica*)等为主^[25]。

1.2 数据源与预处理

本文利用2010年8月3日获取的Landsat-TM影像,在PCI图像处理软件的几何校正模块支持下,参照渭-库地区1:1万地形图对遥感图像进行几何精校正。图像采样象元为30m×30m,几何校正误差RMS在0.5个像元之内。经几何校正后,选择6S模型对研究区进行大气校正,该模型描述了由于瑞利散射和气溶胶的存在以及大气如何影响辐射在太阳-地表-卫星传感器之间的传输过程,6S模型

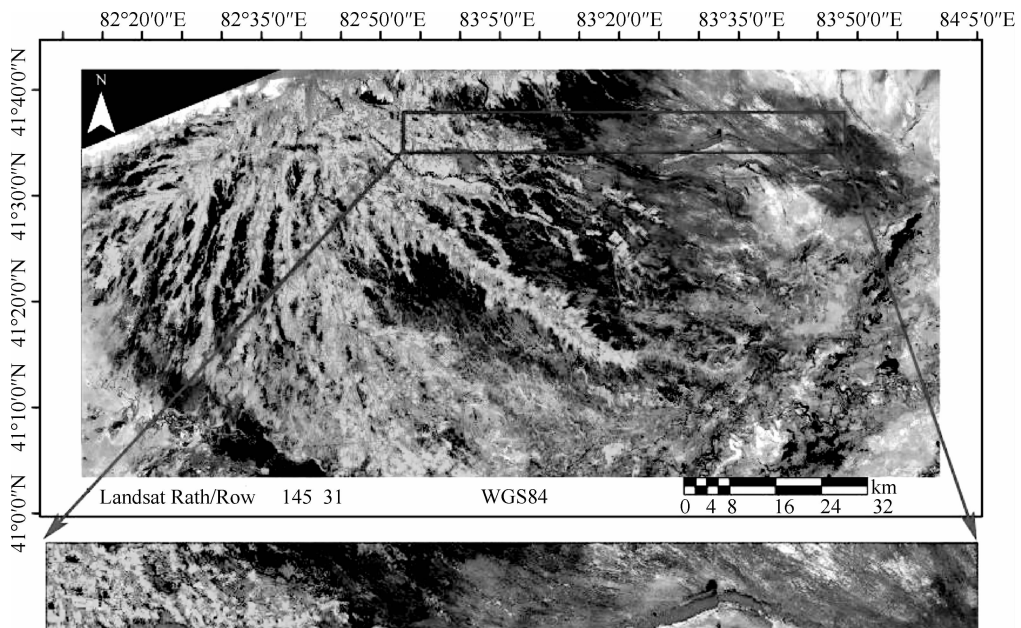


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch of the study area

应用范围广,其优点在于不受研究区特点及目标类型等的影响^[26]。大气廓线选择在中纬度夏天,大陆性气溶胶类型,地表为均匀朗伯面。最后截取典型研究区,经纬度范围为 $41^{\circ}33'49.47''\text{N} \sim 41^{\circ}35'32.99''\text{N}$, $82^{\circ}54'42.17''\text{E} \sim 83^{\circ}42'55''\text{E}$ 。另有 2008 年渭 - 库绿洲土地利用图(1:5 万)及其矢量化数据和野外实测数据。其中,野外实测数据包括样点区域植被覆盖度、土壤含水量和土壤含盐量等。

1.3 向量空间与单形体

考虑到覆盖研究区的遥感影像其像元主要是由不同程度的盐渍化土壤和植被混合而成,要将其区分必须进行混合像元分解,目前的光谱分解方法分为线性和非线性模型,其中线性模型凭借其简单易操作且精度较高等优势而得到广泛应用,但在实际应用工作中也遇到一些问题,例如难以确定分解的终端端元,常常得到 $[0, 1]$ 区间外的解,且不稳定,不利于使用多时相信息进行动态监测^[18]。所以本文尝试从数学角度即波谱空间的方法进行盐渍化信息的提取。

从数学角度看,遥感影像是个三维矩阵,随着遥感影像波段增多,其波段数值也在不断加大,因而三维以上空间情况很难直观表达,这就需要将多波段遥感数据进行数据降维处理,而 MNF 变换是当前能够降低多光谱数据维数的有效方法^[27]。研究采用该方法用于降低多光谱数据维数,将影像噪声减到最小,并按信息量进行波段排列,使得波段的数目减少,这是进行后续端元分析所必需的。通常情况下,很难在遥感数据中集中识别纯端元,因为几乎没有像元只包含一种物质。因此,利用严格数学方法确定光谱最纯像元的方法是:将去除噪声后干净的 MNF 影像的 n 维散点图反复投影到一个随机单位向量上。从数学的观点来看,遥感影像中的各像元,在几何空间里的散点可以抽象成一个单形体,而端元位于该单形体的顶点上。典型的单形体方法如 PPI 即可计算像元的“纯度”,从而可以提取纯净像元,帮助寻找终端单元。可以设置纯净像元指数的阈值,纯净像元指数大于该值的像元即被认为是较纯净的像元,纯净像元指数算法的本质就是基于以上理论寻找单形体的顶点和边。光谱混合分析模型(SMA)可以把图像光谱描述为“纯净”的终端单元的线性组合。如式(1)和式(2)所示,三维空间中单形体(图 2)的任一点 P 是 4 个顶点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的线性组合。在该模型中,混合像元在向量空间里坐标被描述为可以分解成各终端单元的相

对含量^[28]。

$$p = k_1 p_1 + \dots + k_i p_i + \dots + k_n + 1 p_n + 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} = 1 \quad (2)$$

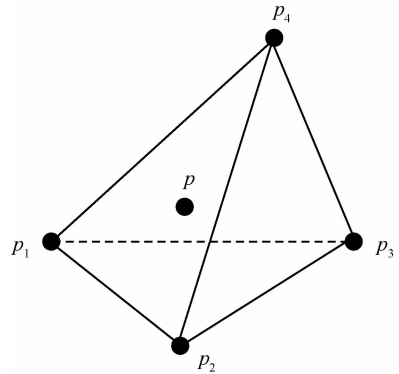


图 2 三维空间里的单形体

Fig.2 Single lines in 3D space

2 结果

2.1 MNF 三维光谱特征空间散点图分布特征

MNF 变换后生成的图像,其信息量随波段数的增加而减少,一般前 3 个波段就能较完整的表达区域特征信息,将前 3 个波段投影到三维空间中进行分析,可以发现空间中地物端元的几何空间位置明确,具有四个顶点,大致成四面体,符合上述单形体理论,较纯净的像元则集中在单形体的顶点和边上,从而勾勒出四面体的形状。

天山南麓前山带白垩纪和第三纪地层中含盐分很多,当河流经过此地时,由地表径流和地下水等方式将含有盐分的土壤或者粉砂壤冲刷到渭 - 库绿洲平原区,在蒸发引力的强力作用下,将盐分聚集到地表,随着盐渍化程度的加重,地表植被覆盖度逐渐降低,严重时表层土壤有盐霜分布,寸草不生。在水分一定的情况下,绿洲农业发展面临的重要制约因子就是土壤盐渍化,可以说地表土壤盐分含量的多寡是干旱区绿洲植被与土壤像元尺度下配比的主要决定因素,基于此,本文借鉴混合像元分解的方法确定盐渍化程度,将盐渍化看作是“植被”与“盐霜(白色)”的组合,其在图像上表现为不同地物(主要是植被和无盐渍化土壤)像元尺度下的纯净度。

灌溉农业是绿洲经济发展的重要支柱,为了维持高效灌溉农业的持续发展,必须降低作物生产区的土壤含盐量至作物的可忍耐水平。在排水条件

良好的情况下,农业用地土壤盐分含量始终维持在较低水平,据野外采样点实测数据统计分析可知,土壤表层 0~20 cm 盐分含量均值为 0.2 g kg^{-1} ,在植被覆盖度较高的区域用取网格法测量覆盖度,样方大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。在研究区植被极为稀疏时则使用目估法获取覆盖度信息。经过采样分析,得出覆盖度均值最小值为 55%,最大值为 95%,统计后均值为 75%,平均含水量为 15.3 g kg^{-1} 。由于同等条件下土壤盐分的含量越少,植被生长状况就越好,且植被覆盖越高在前 3 个波段具有较高的反射率,因此本文定义土壤盐分含量小于 0.2 g kg^{-1} ,植被覆盖不小于 75% 的区域为“植被亮点区”,并以“植被亮点区”为标准,进行不同盐渍化程度的界

定。图 3 中的 A 区是纯净植被端元的位置,其对应分布于图 4 中的 A 区即“植被亮点区”。

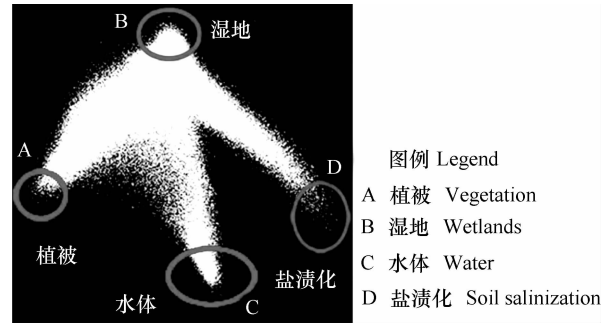


图 3 “纯净”像元在 MNF 前三维空间里的分布
Fig. 3 Distribution of pure pixels in pre-MNF 3D space

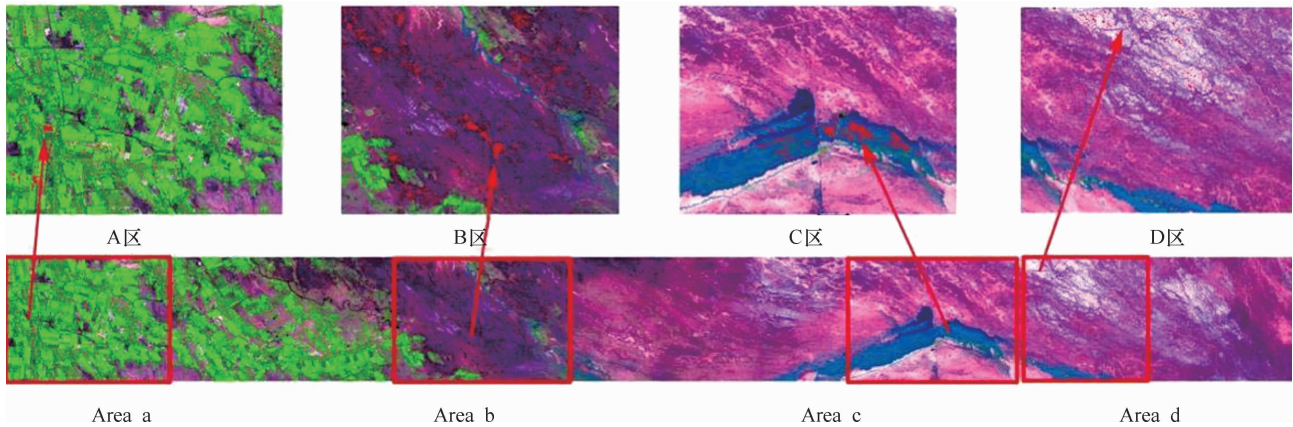


图 4 各地物纯净像元分布图
Fig. 4 Distributions of pure pixel of various ground objects

地形是影响土壤盐渍化的形成条件之一。地面径流和地下径流随地形条件的变化,在中小地形的低洼部位,分布着不同类型的盐渍化土壤,图 4 中的 B 区是绿洲农业灌溉用水的首要接受区,由于地势的原因,经多年积累后形成了湿地,地下水位较高,在毛管引力作用下很容易形成盐渍化现象。植被类型以灌木为主,覆盖度较低,由实地目测得出该地区样点覆盖范围为 5%~30%。盐分含量较农业种植区有所提升,调查结果显示,土壤表层 0~20 cm 盐分含量为 16.3 g kg^{-1} ,平均含水量为 19.5 g kg^{-1} ,是中度盐渍化的主要分布区。其纯净像元分布于如图 3 中的 B 区。

当地表完全被盐渍化时,会形成盐霜(白色)或盐壳(灰色或浅灰色)。其纯净像元分布于如图 3 中的 D 区。地表土壤上部盐分含量达到 100 g kg^{-1} 以上,地表光裸或者仅生长极为稀疏盐生植被,平均含水量为 0.2 g kg^{-1} 。

通过以上分析得知,同等土壤条件下植被覆盖度的大小可以间接表征土壤盐分含量的多寡,图 5 在去除水体的情况下详细演示了土壤发生盐渍化的过程,即与“植被亮点区”距离越远的像元,盐渍化程度越高,距离“植被亮点区”越近的像元,盐渍化程度越低。所以本文借助空间两点间的距离函数(单行体内任一点到植被亮点的距离)表达不同地物的线性组合方式和盐渍化程度,这种表达方式的转变即考虑了混合像元中的线性(地物组合)和非线性因素(临边效应),也反映了盐渍化土壤盐分、水分组合及其变化特征。

2.2 盐渍化距离指数模型的建立

从上述分析中可得,不同的终端单元有不同的几何位置,同样作为混合光谱的盐渍土像元的几何位置也随着盐渍化程度的不同而存在差异,因而可以使用前述单形体理论进行盐渍化程度的提取。由图 5 分析得知,盐渍化像元到“植被亮点区”的距

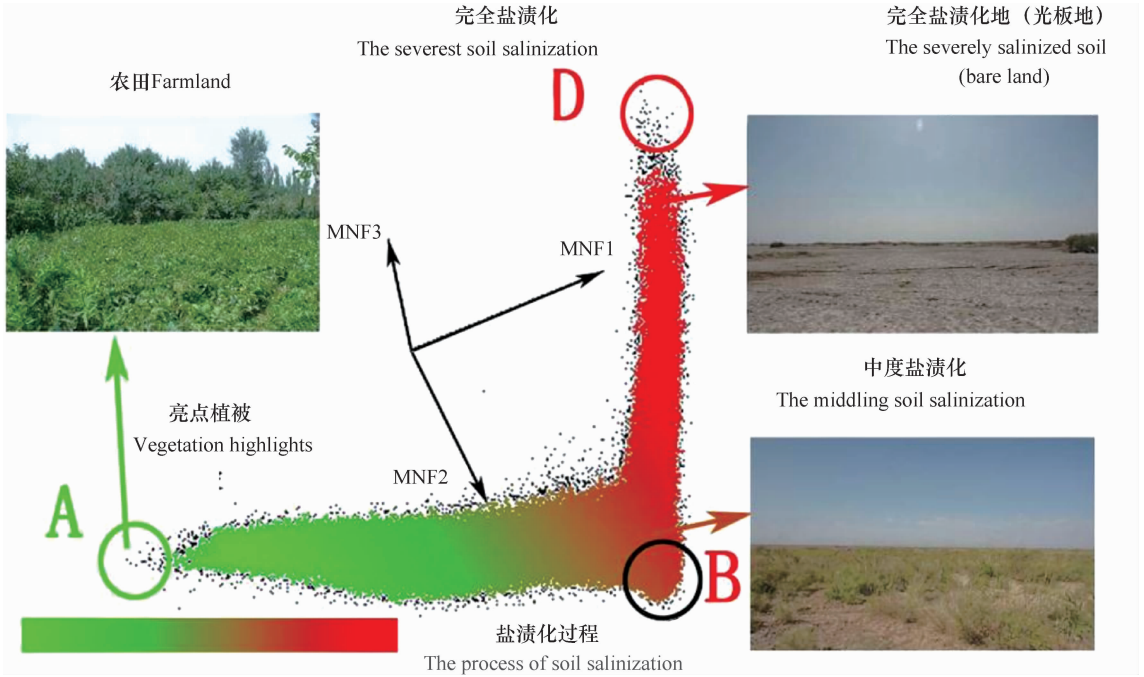


图 5 去除水体后“纯净”像元在 MNF 前三维空间里的分布

Fig. 5 Distribution of de-watered pure pixels in pre-MNF 3D space

离能够表达不同程度盐渍化信息,从而得到盐渍化距离指数 SDI。以下是对盐渍化距离指数的计算方法和相关定义:

设一种“植被亮点区”中一点的三维光谱信号为:

$$M_v = \{x_v, y_v, z_v\} \quad (3)$$

式中, M_v 为“植被亮点区”的三维光谱信号; x_v, y_v, z_v 分别为该区域 MNF 特征空间的三个特征分量。

设盐渍化像元三维光谱信号为:

$$M_s = \{x_s, y_s, z_s\} \quad (4)$$

式中, M_s 为盐渍化像元的三维光谱信号; x_s, y_s, z_s 分别为该区域 MNF 特征空间的三个特征分量。

计算盐渍化像元的三维光谱信号到“植被亮点区”的距离为 $|\overrightarrow{M_s M_v}|$, 即 d_s , 公式为:

$$d_s = |x_s - x_v, y_s - y_v, z_s - z_v| \quad (5)$$

设完全盐渍化像元的终端端元为:

$$M_0 = \{x_0, y_0, z_0\} \quad (6)$$

式中, M_0 为完全盐渍化像元的终端端元; x_0, y_0, z_0 分别为该区域 MNF 特征空间的三个特征分量。

同样可以计算完全盐渍化像元的终端端元到“植被亮点区”的距离为 $|\overrightarrow{M_0 M_v}|$, 即 d_0 , 公式为:

$$d_0 = |x_0 - x_v, y_0 - y_v, z_0 - z_v| \quad (7)$$

因此,可以定义盐渍化距离指数 (SDI) 为:

$$SDI = D_s / D_0 \quad (8)$$

使用以上的方法可以进行盐渍化距离指数程度制图,完全盐渍化区域值为 1,非盐渍化的区域为 0,盐渍化区域 SDI 值为 0 至 1 之间。因为信息被 MNF 压缩到靠前的波段,所以选取了前 3 个波段使用上述方法进行计算,得到盐渍化距离指数图(图 6)。图中颜色越暗的像元表示盐分含量越低,反之较高。较暗像元主要分布在绿洲内及其周围,较亮像元分布在绿洲外围地势较低的区域,这一结果符合研究的实际情况,也说明模型提取结果基本可靠。

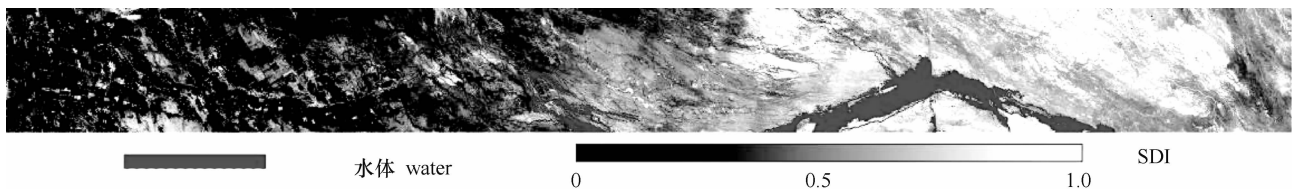


图 6 研究区盐渍化距离指数图

Fig. 6 Diagram of the salinization distance index of the study area

2.3 盐渍化距离指数模型的验证

为了测试指数模型在不同的盐分环境下的准确性,本文依据野外实测点数据分布特征和 MNF 光谱特征空间中像元的空间变异特征,参考《中国盐渍土》中的盐渍化等级标准(重度盐化土,含盐量 0.4%~1.0%;中度盐化土,含盐量 0.2%~0.4%;轻度盐化土,含盐量 0.1%~0.2%;非盐化土,含盐量小于 0.1%)^[29],将散点图大致分为 4 个典型样区,如图 7 所示,样区 1~4 分别对应于农田种植区、轻度盐渍化分布区、中度盐渍化分布区和重度盐渍化分布区。将每个采样区内的实测土壤表层 0~10cm、0~20 cm 平均盐分数据分别与图像对应点的 SDI 值进行回归分析,统计分析结果见表 1。从表 1 可得:(1)在光谱研究中发现,植被覆盖度过多会干扰土壤光谱对土壤盐分含量的响应关系,表层 0~10 cm 结果显示农田分布区的相关性低于植被覆盖相对较低的轻度、中度、重度盐渍化分布区。但指数在综合考虑水热组合和图像噪声后,相对降低了植被对土壤光谱的影响,保持了较高的相关性。随着覆盖度的不断降低,相关性依次增高。总体精度 R^2 达到了 0.84,预测结果较为理想;(2)在 0~20 cm 平均盐分数据相关性分析中发现,在中度、重度盐渍化区域内的相关性要低于 0~10 cm,究其原因可能是干旱区低覆盖区的土壤盐分剖面类型多为表聚型,土层 10 cm 以上盐分含量较高,其他土层含

盐量明显低于该层,盐分落差较大,使得土壤光谱反射率对表层的敏感性低于深层,而在高覆盖区,如农田及其周围盐生植被生长区,表层土壤易受到灌溉、地面风速和温度的影响,结果在 0~20 cm 范围内土壤盐分较 0~10 cm 稳定,相关性较高。通过上述分析可得,在不同的植被覆盖环境下,根据需要进行选择适宜的模型对于精确、定量地提取盐分信息至关重要。

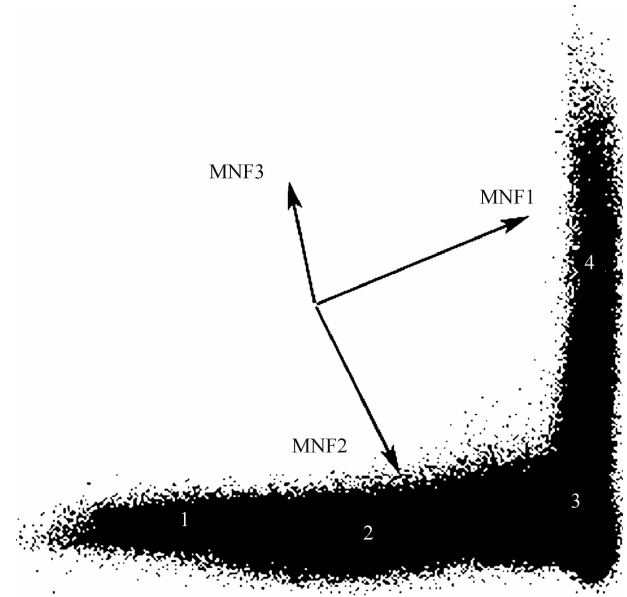


图 7 三维空间采样点示意图

Fig. 7 Distribution of sampling in 3D space

表 1 盐渍化距离指数 (SDI) 与土壤盐分数据统计回归分析

Table 1 Statistical regression analysis of salinization distance index (SDI) with soil salt content

样区 Sampling area	变量 ¹⁾ Variable	分布范围 Distribution range	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	回归模型 Regression model	决定系数 R^2	采样点数 Number of samples
1 区 No. 1 area	S(0~10cm)	0.18~0.6	0.37	0.13	$y = 0.281x + 0.1265$	0.7789	14
	S(0~20cm)	0.14~0.58	0.36	0.12	$y = 0.3004x + 0.1216$	0.8111	
	SDI	0.16~0.29	0.23	0.04			
2 区 No. 2 area	S(0~10cm)	5.24~15.51	10.68	3.19	$y = 0.0132x + 0.2687$	0.7916	16
	S(0~20cm)	4.43~13.17	9.27	2.35	$y = 0.0132x + 0.2634$	0.8204	
	SDI	0.3~0.5	0.39	0.04			
3 区 No. 3 area	S(0~10cm)	5.9~30.3	26.34	7.27	$y = 0.0121x + 0.3304$	0.8357	16
	S(0~20cm)	5.5~21.6	20.44	4.97	$y = 0.0132x + 0.3797$	0.6214	
	SDI	0.4~0.72	0.53	0.09			
4 区 No. 4 area	S(0~10cm)	60.32~101.3	82.11	14.8	$y = 0.0073x + 0.2382$	0.8469	9
	S(0~20cm)	46.8~73.2	59.47	8.8	$y = 0.0083x + 0.3415$	0.5442	
	SDI	0.67~0.99	0.84	0.11			
总体 Total	S(0~10cm)	0.18~101.3	21.33	28.72	$y = 0.0068x + 0.3224$	0.8101	54
	S(0~20cm)	0.14~73.2	16.63	20.3	$y = 0.0094x + 0.3119$	0.7213	
	SDI	0.16~0.99	0.46	0.21			

1) S 为土壤盐分 S stands for soil salinity

需要指出,虽然验证的数据总体变化趋势是一致的,但 SDI 观测值与表层 0~10cm 和 0~20cm 平均土壤盐分相关系数分别为 0.81 和 0.72,相关系数不是很理想,究其原因可能是模型没有完全消除植被光谱和土壤水分的影响,下一步的研究重点就是考虑以上因素,完善模型的数学表达式。此外,由于土壤盐渍化的产生是由于土壤母质、地形、地下水、气候等具有地域及时域差异性明显的多种因素综合作用的结果,因而土壤光谱特征易受多方面因素的影响。因此,有效地将不同空间和时间尺度的遥感数据进行地表参数化的高精度反演并与地表辅助数据相结合是提高土壤盐渍化监测模型普适性的关键。

3 结 论

土壤盐渍化问题始终是干旱区可持续发展和改善环境质量的战略问题。而作为国家后备土地资源的西部,若能有效定量地评价干旱区、半干旱区的土壤盐渍化状况,对于区域农业可持续发展和西部大开发至关重要。本研究针对多光谱遥感影像,通过选取 MNF 变换后的前 3 个波段,在 n 维可视化器中建立了三维光谱特征空间,同时借助单行体理论,提出“植被亮点区”概念,并发现单行体内的散点到“植被亮点区”的空间距离可以表征盐渍化程度,基于此建立 SDI 模型。经检验,SDI 与野外观测数据的变化总体趋势保持一致,其盐渍化信息提取精度与地表植被覆盖度相关性较大,模型有效地反映了地表覆盖、水热组合及其变化,实现了对研究区土壤盐分的有效监测,具有较为明确的生物物理意义。由于土壤盐渍化的产生是由于土壤母质、地形、地下水、气候等具有地域及时域差异性明显的多种因素综合作用的结果,因而土壤光谱特征易受多方面因素的影响。因此,有效地将不同空间和时间尺度的遥感数据进行地表参数化的高精度反演并与地表辅助数据相结合是提高土壤盐渍化监测模型普适性的关键。

参 考 文 献

- [1] Graciela M, Zinck J A. Remote sensing of soil salinization impact on land management. Boca Raton: CRC Press, 2009
- [2] 关元秀,刘焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述. 遥感技术与应用, 2001, 16(1): 40—44. Guan Y X, Liu H. A review of regional soil salinization monitoring by remote sensing (In Chinese). Remote Sensing Technology and Application, 2001, 16(1): 40—44
- [3] 单奇华,张建锋,唐华军,等. 质量指数法表征不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的影响. 土壤学报, 2012, 49(6): 1094—1102. Shan Q H, Zhang J F, Tang H J, et al. Characterization of effects of management modes on quality of coastal salt-affected soils with quality index (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1094—1102
- [4] Sreenivas K, Venkataratnam L, Narasimha R P V. Dielectric properties of salt-affected soils. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(4): 641—649
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837—845. Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837—845
- [6] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. 地理学报, 2012, 67(9): 1233—1245. Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1233—1245
- [7] 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. Jiang H N, Ding J L, Tashpolat·Tiyip, et al. Extraction of salinized information in arid area based on ETM+ data (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 222—228
- [8] 韩桂红,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等. 基于典范对应分析的干旱区春季盐渍化特征研究. 土壤学报, 2012, 49(4): 681—687. Han G H, Tashpolat·Tiyip, Mamat-sawut, et al. Characterization of soil salinization in arid area based on canonical correspondence analysis (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 681—687
- [9] 张芳,熊黑钢,安放舟,等. 基于盐(碱)生植被盖度的土壤碱化分级. 土壤学报, 2012, 49(4): 681—687. Zhang F, Xiong H G, An F Z, et al. Classification of soil alkalinization based on halophyte coverage (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 681—687
- [10] 谭军利,康跃虎,焦艳平,等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征. 农业工程学报, 2008, 24(6): 59—63. Tan J L, Kang Y H, Jiao Y P, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt-affect drip irrigation in different planting years (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 59—63
- [11] 张飞,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,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. Zhang F, Ding J L, Tashpolat·Tiyip, et al. Correspondence analysis of relationship between characteristics and spectra of soil salinization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 513—519
- [12] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near-infrared spectral features of salt crusts formed from different brines. Annali di Chimica, 2004, 94(4): 315—323
- [13] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization.

- Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 406—418
- [14] Ben-Dor R, PatkIn A, Banin A, et al. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data – a case study over clayey soils in Israel. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(6): 1043—1062
- [15] 王静, 刘湘南, 黄方, 等. 基于 ANN 技术和高光谱遥感的盐渍土盐分预测. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 161—166. Wang J, Liu X N, Huang F, et al. Salinity forecasting of saline soil based on ANN and hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 161—166
- [16] 夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 高光谱遥感图像的单体体分析方法. *中国图像图形学报*, 2004, 9(12): 1486—1490. Xia X Q, Tian Q J, Du F L. Analysis of hyperspectral remote sensing images using a simple method (In Chinese). *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(12): 1486—1490
- [17] Quattrochi D, Goodchild M. *Scale in remote sensing and GIS*. New York: CRC Press, 1997
- [18] Bordman J W, Kruse F A. *Environmental Research Institute of Michigan*. An, Arbor, 1994
- [19] Smith M O, Ustin S L, Adamas J B, et al. Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31(1): 1—26
- [20] Smith M O, Ustin S L, Adamas J B, et al. Vegetation in deserts: II. Environmental Influences on Regional Abundance. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31(1): 27—52
- [21] Small C. The Landsat ETM plus spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/ 化所有的图是否已 2): 1—17
- [22] Wu C, Murray A T. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 493—505
- [23] 张芳, 熊黑钢, 努尔巴依·阿布都沙力克, 等. 新疆天山北坡常见盐生植物端元尺度光谱特征及识别. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 227—232. Zhang F, Xiong H G, Nurbay · Abdulalih, et al. Response characteristics of the field-measured spectrum for the four general types of halophyte and species recognition in the northern slope area of Tianshan Mountain in Xinjiang (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(1): 227—232
- [24] 买买提·沙吾提, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于 GIS 的干旱区土壤盐渍化敏感性评价——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例. *资源科学*, 2012, 34(2): 353—358. Mamatsawut, Tashpolat · Tiyip, Ding J L, et al. A GIS-based assessment on sensitivity of soil salinization in arid areas: A case study of the Weigan-Kuqa River Delta (In Chinese). *Resources Science*, 2012, 34(2): 353—358
- [25] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 塔里木河中游绿洲盐漠带典型盐生植物光谱特征. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 607—617. Zhang F, Tashpolat · Tiyip, Ding J L, et al. Spectral reflectance characteristics of typical halophytes in the oasis salinization-desert zone on middle reach of Tarim River, China (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(7): 607—617
- [26] 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. Wang F, Ding J L, Wu M C. Remote sensing monitoring models of soil salinization based on NDVI-SI feature space (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 168—173
- [27] Green A A, Berman M, Switzer P, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE*, 1988, 26(1): 65—74
- [28] Dennison P E, Roberts D A. The effects of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in southern California chaparral. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2/3): 295—309
- [29] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. *中国盐渍土*. 北京: 科学出版社, 1993. Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. *The salt-affected soil in China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993

QUANTITATIVE REMOTE SENSING OF SOIL SALINIZATION IN ARID REGIONS BASED ON THREE DIMENSIONAL SPECTRUM EIGEN SPACES

Ding Jianli Yao Yuan Wang Fei

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

Abstract Soil salinization is a critical constraint for agriculture development in arid and semiarid areas, and also one of the most important environmental problems. Therefore, obtaining accurate soil salinization information is crucial to salinization management in those areas. The current study is attempting to derive a relatively straight forward soil salinity index from Landsat TM remote sensing images. First, perform minimum noise fraction (MNF) of the images and calculate their pixel purity index (PPI); select the first three bands that are good to characterize the feature information of a region to construct a MNF spectral eigenspace; then put forward the concept of “vegetation highlight area” by combining field investigations and following the vector space and single line theories and define soil salinization distance index (SDI), so as

to enable the multi-dimensional vector space to include the normalized distance from a salinization pixel within the single line to the vegetation highlight area; and in the end verify SDI for precision using the data obtained in field investigations of regions different in salinization level. Results show that in areas low in vegetation coverage, that is, areas moderate and severe in salinization, SDI is more closely related to the average soil salt content in the 0 ~ 10 cm soil layer, ($R^2 > 0.83$) than in the 0 ~ 20 cm soil layer, while in areas high in vegetation coverage, that is, farmland of areas low in soil salinization, it is just the reverse ($R^2 > 0.81$), indicating that the overall precision of SDI in prediction of soil salinity in the 0 ~ 10 cm soil layer is $R^2 = 0.81$, and in the 0 ~ 20 cm soil layer $R^2 = 0.72$. The findings suggest that the SDI index model is simple and easy-to-construct and yet quite high in precision, so it is of high practical value and can be used to help quantitatively analyze and monitor soil salinization on a large scale in the arid and semiarid areas.

Key words Spectrum eigen space; Remote sensing data; Vegetation highlight area; Salinization distance index

(责任编辑:檀满枝)