

尹小君, 宁 川, 韩 峰, 等. 天山北坡土壤盐渍化光谱响应特征与动态监测的研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 277–281.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.060

天山北坡土壤盐渍化光谱响应特征与动态监测的研究

尹小君^{1,2,3}, 宁 川^{1,2,3}, 韩 峰^{1,2,3}, 张 雅^{1,2,3}, 高 军^{1,2,3}

(1. 石河子大学信息科学与技术学院, 新疆石河子 832000; 2. 新疆生产建设兵团空间信息工程技术研究中心, 新疆石河子 832000;
3. 新疆生产建设兵团空间信息工程实验室, 新疆石河子 832000)

摘要:土壤盐渍化是我国干旱区常见的生态环境问题。在分析不同地物 and 不同等级土壤盐渍化光谱特征的基础上, 运用机器学习支持向量机(support vector machine, SVM)模型, 以 Landsat-TM 和 Landsat-ETM⁺ 多光谱遥感影像和野外调查数据为数据源, 分析天山北坡典型区域土壤盐渍化的变化规律和转移特征。结果表明: 盐渍土壤区别于水体、沙漠和植被的最佳波段是 710~900 nm; 重度盐渍土壤的光谱反射率在波长为 400~900 nm 范围内普遍高于其他盐渍化土壤; SVM 模型对 1990 年、2000 年/2014 年 3 期天山北坡典型区域遥感影像的分类精度达到 84% 以上, Kappa 系数均在 0.86 以上, 土壤盐渍化面积在 1990—2000 年间增加了 1 032.86 hm², 在 2000—2014 年间减少了 1 581.84 hm²; 1990—2000 年间, 裸土转移为盐渍地的面积比较大, 2000—2014 年间, 盐渍地转化为耕地和裸土的面积比较大, 土壤盐渍化面积先增后减的变化波动, 表明随着土地利用和农田灌溉方式的改良, 新疆北疆地区土壤盐渍化程度得到了明显抑制。

关键词: 干旱区; 土壤盐渍化; 光谱响应特征; 动态监测; SVM

中图分类号: S127; S156.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0277-05

随着全球气候变暖趋势的日益加剧, 中低纬度区域的土壤盐渍化问题日益突出, 美国、中国、匈牙利、澳大利亚等国的盐渍化问题将会日益凸显, 而非洲北部与东部、南美洲、中东、中亚和南亚地区的盐渍化问题将会更加严峻^[1-5]。我国耕地中盐渍化面积达到 920.9 万 hm², 占全国耕地面积的 6.62%, 新疆盐渍化总面积为 847.6 万 hm², 现有耕地中 31.1% 的面积受到盐渍化危害^[6]。新疆是土壤盐渍化大区, 盐渍化土种类多, 被称为世界盐碱土的博物馆^[7]。新疆盐渍化问题已经成为干旱区生态环境遥感监测的重要内容^[8-9]。

新疆气候干燥, 以晴天居多, 特别适于利用遥感技术开展土壤盐渍化的研究^[10-11]。丁建丽等以渭干河-库车河流域绿洲盐渍地作为研究区, 构建多光谱遥感影像土壤盐渍化距离指数(soil distance index, SDI), 同时利用修改型土壤调整植被指数(MSAVI)、湿度指数(WI)之间的关系, 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, 模型精度高于土壤盐渍监测指数^[12-16]。买买提·沙吾提等以渭干河-库车河三角洲绿洲为研究区, 利用先进的陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)的多光谱影像, 通过植被指数综合评价, 得出盐渍化危险性区域^[17]。Akramkhanov 等通过实地调查, 结合地统计学, 研究了乌兹别克斯坦的土壤盐渍化过程, 得出一部分呈斑块状的地区将盐

渍化, 而中部地区存在盐渍化的趋势^[18]。Li 等利用 HJ-1A(环境与灾害监测卫星)高光谱数据, 构建了归一土壤含盐量指数(normal soil salt content response index, 简称 NSSRI), 对江苏省如东县的土壤盐渍化含盐量进行了反演, 反演精度比较高^[19]。各种土壤盐渍化植被指数增强了遥感影像土壤盐渍化的解释力, 但是随着机器学习技术的发展, 笔者期望能进一步提高土壤盐渍化智能化和自动化的识别能力。

本研究以新疆天山北坡 148 团为研究区域, 首先分析新疆天山北坡土壤盐渍化的光谱特征, 再利用机器学习的支持向量机(support vector machine, SVM)模型对 Landsat TM 和 Landsat ETM⁺ 遥感影像进行土壤盐渍化变化分析, 得出土壤盐渍化的转移特征, 明确土壤盐渍化变化规律, 掌握研究区域土壤盐渍化的格局和趋势, 对土壤盐渍化的严重地区进行重点监控, 从而为进一步防治土壤盐渍化提供理论依据。

1 研究区与试验方法

1.1 研究区

新疆生产建设兵团 148 团场位于玛纳斯河流域, 86°06′~86°24′E, 44°43′~45°44′N, 属于温带大陆性气候, 年平均气温 4.7~5.7℃, 最高气温 42.8~43.1℃, 最低气温 -43.1~39.8℃。年平均蒸发量 1 500~2 100 mm, 4—8 月蒸发量占全年蒸发量的 65%~70%。148 团属于冲积平原, 土壤类型多为盐土、草甸土及沼泽土等, 其低洼处有暗色草甸土、浅色荒漠土和盐化草甸等, 具有荒漠性的土壤植被及广阔的内陆流域。148 团场这种山地集流机制及荒漠聚热效应产生了新疆独特的绿洲生态机制, 在干旱区土壤盐渍化的研究中具有较好的典型性和代表性。

1.2 土壤盐渍化程度等级划分与试验

根据罗家雄提出的新疆土壤盐渍化程度等级划分标准,

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 时空融合的荒漠土壤盐渍化动态监测(编号: 2013ZRKXYQ18)。

作者简介: 尹小君(1977—), 女, 四川射洪人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: yinxiaojun2018@163.com。

通信作者: 宁 川, 硕士, 讲师, 主要从事遥感应用研究。E-mail: ningchuan_inf@shzu.edu.cn。

以 0~20 cm 表层土壤中盐分含量和组成作为评定基础,结合研究区特殊的地理环境和盐渍化特征,得出研究区土壤盐渍化程度划分标准^[20],如表 1 所示。

表 1 土壤盐渍化程度划分标准

编号	含盐量(%)	盐渍化程度
1	≤0.3	非盐渍化
2	>0.3~0.6	轻度盐渍化
3	>0.6~1.0	中度盐渍化
4	>1.0~2.0	重度盐渍化
5	>2.0	盐渍化

采用五点随机取样法,首先测定光谱数据,利用全球定位系统(GPS)测定该点的经纬度坐标,然后采集 0~20 cm 表层土壤,将五点土样均匀混合后,放入已编号的采样袋中,将土样带回实验室备用。采样的土样在室内阴凉处进行自然风干,碾碎后过 1 mm 筛,将处理好的土样制成待测液(土水比 1 g:5 mL),采用 pH 计测定土壤的 pH 值。

1.3 光谱测定试验

采用美国 ASD Field Spec Pro FR2500 型便携式光谱仪,Pro FR 2500 便携式光谱仪有 512 个光谱波段,其波段范围为 350~2 500 nm,采样波段宽在 350~1 000 nm 范围为 1.4 nm,在 1 000~2 500 nm 范围为 2 nm。光谱分辨率在 350~1 000 nm 范围为 3 nm,在 1 000~2 500 nm 范围为 10 nm。获取 100 个样本,其中土壤盐渍化 38 个样本(含轻度盐渍化 9 个样本,中度盐渍化 10 个样本,重度盐渍化 9 个样本,盐渍化 10 个样本),耕地 23 个样本,沙漠 13 个样本,水体 8 个样本,

裸土 18 个样本。

1.4 遥感数据获取与预处理

研究数据为 2014 年 8 月 Landsat 7 ETM⁺ 所获得的两景多光谱数据,2010 年 8 月和 1990 年 8 月 Landsat 7 TM 所获得的四景多光谱数据。其中 Landsat ETM⁺ 影像数据包括 8 个波段,band(波段)1~band5 和 band7 的空间分辨率为 30 m,band6 的空间分辨率为 60 m,band8 的空间分辨率为 15 m,南北的扫描范围大约为 170 km,东西的扫描范围大约为 183 km。具体的参数如表 2 所示。

表 2 Landsat 7 ETM⁺ 卫星数据产品说明

序号	波段	波长(μm)	分辨率(m)
Band1	蓝色波段	0.45~0.52	30
Band2	绿色波段	0.52~0.60	30
Band3	红色波段	0.63~0.69	30
Band4	近红外波段	0.76~0.90	30
Band5	中红外波段	1.55~1.75	30
Band6	热红外波段	10.40~12.50	60
Band7	中红外波段	2.09~2.35	30
Band8	微米全色波段	0.52~0.90	15

在 ENVI 软件系统下,根据 2014 年 7 月 14 日至 2014 年 8 月 26 日的野外调查数据,选择 148 团场 32 个实测 GPS 地面控制点采用多项式纠正模型进行几何校正,重采样方法为最邻近内插法,校正总精度均方根值(root mean square,简称 RMS)控制在 0.42 个像元。校正后的影像经过裁剪,进行假彩色合成。选取如图 1 所示的典型区域作为研究区。

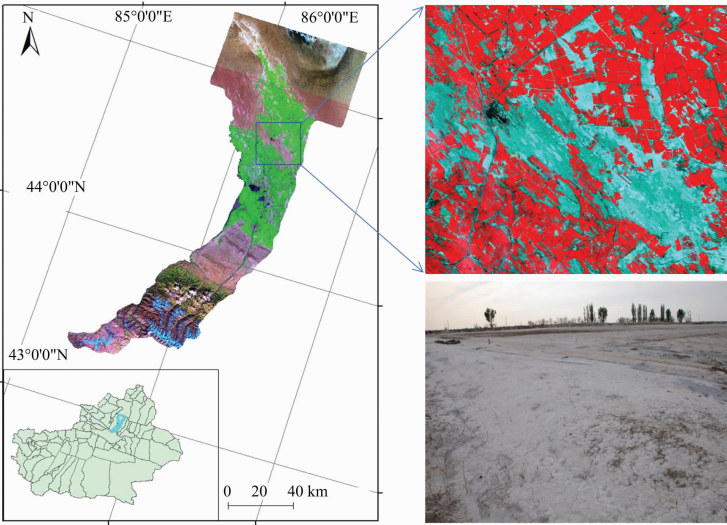


图1 研究区示意

1.5 SVM 模型

SVM 是由 Vapnik 在 1995 年提出的一种基于统计学习理论的机器学习方法^[21]。在分类中,建立 1 个分类超平面作为决策曲面,使得正例和反例之间的隔离边缘被最大化。分类超平面如下:

$$[w\phi(x)] + b = 0. \tag{1}$$

式中: b 表示偏置; w 代表分类面的权重向量; ϕ 表示输入特征向量空间到高维空间的映射。

找出最优分类超平面的过程转化为解算 1 个最优化

问题。

目标函数如下:

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^k \xi_i. \tag{2}$$

约束条件如下:

$$\text{s. t. } y_i[w\phi(x_i) + b] + \xi_i \geq 1. \tag{3}$$

式中: $i=1,2,\dots,k$; b 表示惩罚参数; ξ_i 表示松弛变量, $\xi_i \geq 0$,主要解决数据集的线性不可分。利用 Lagrange 函数将原始优化问题转化为对偶优化问题,(4)和(5)式表示为和。

目标函数如下:

$$\max_a L(a) = \sum_{i=1}^k a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j y_i y_j k(x_i, x_j) \quad (4)$$

约束条件如下:

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^k y_i a_i = 0 \quad a_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

式中: $k(x_i, x_j) = \phi(z_i) \phi(z_j)$ 代表核函数, 使用核函数将输入特征空间映射到高维空间。选择不同的核函数可以产生不同的支持向量机。本研究选择径向基核函数, 其公式如下:

$$k(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (6)$$

式中: γ 为核函数的宽度。解算公式(4)上面的对偶问题, 得到最优解, 由此得出 SVM 分类判别函数如下:

$$f(x) = \text{sgn} \left[\sum_{\text{support vector}} y_i a_i^0 k(x_i, x) - b^0 \right] \quad (7)$$

SVM 以严格的数学理论为基础, 克服了传统经验学习和启发式学习的靠经验和启发的先验成分。同时结构风险最小化原则, 提高了置信水平, 克服了过学习的问题, 得到全局最优解。

2 结果与分析

2.1 典型地物光谱特征分析

由图 2 可知, 不同地物的光谱反射率不同。盐渍土、水体与沙漠的光谱曲线的变化均是平滑缓慢的, 且盐渍土的光谱值最高, 其次是水体和沙漠。而植被光谱变化较大, 在 500 ~ 580 nm 波段间出现小波峰, 680 nm 出现波谷, 随后在 700 ~ 760 nm 波段间出现波峰, 而在 710 nm 以上植被的光谱数值变化趋于平滑, 并且其光谱值大于盐渍土, 其原因与土壤物化特性、水分动态以及植被叶面反射率特性等有关。

2.2 不同等级土壤盐渍化光谱特征分析

不同程度盐渍化土壤的光谱特征均不相同, 总体上比较平缓, 其中重度盐渍土光谱数值最高, 其次是中度盐渍土和轻度盐渍土, 而非盐渍化土壤的光谱数值最低。结合 148 团场土壤盐渍化的覆被特征分析(图 3)可知, 重度盐渍化区域, 土壤表层有白色盐霜, 其土壤光谱反射率大于其他等级。而中度盐渍化和轻度盐渍化区域, 地表局部有盐结皮或盐斑, 土壤光谱反射率略低。非盐渍化土壤区域, 光谱反射率最低。

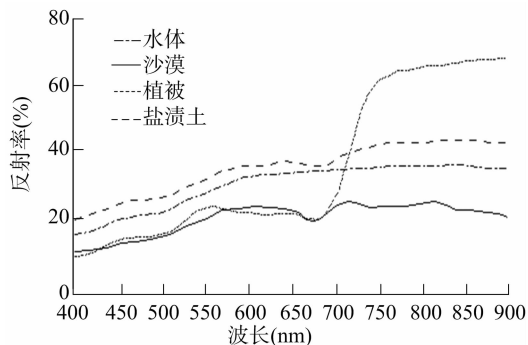


图2 典型地物光谱反射率

重度盐渍土的光谱反射率在波长 400 ~ 900 nm 范围内普遍高于其他盐渍化土壤, 主要是因为, 重度盐渍土表层覆有盐霜或盐结皮, 盐分均为白色晶体, 使得地表光滑而亮白, 光谱反射率较大。土壤盐分含量越高, 盐渍化程度越重, 光谱反射能力也就越强。

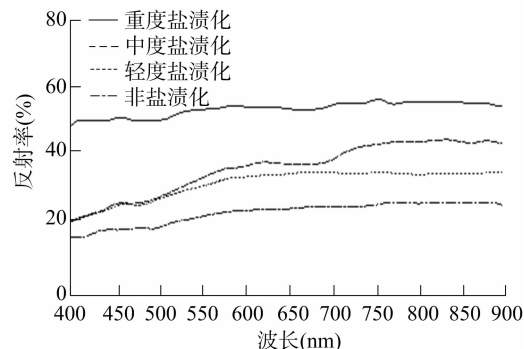


图3 不同等级土壤盐渍化光谱反射率

2.3 干旱区土壤盐渍化动态监测

2.3.1 干旱区土地覆盖分类与分类精度分析 经过对研究区多次考察, 对训练样本进行多次分析试验, 确定准确的地物光谱特征, 选择径向基核 SVM 模型进行分类处理。由图 4 可知, 三期遥感影像盐渍地总体上分布在沙漠边缘, 部分分布在耕地的周边, 其中 2000 年盐渍地面积呈现大幅增加趋势, 主要因素是地下水和人为弃耕。

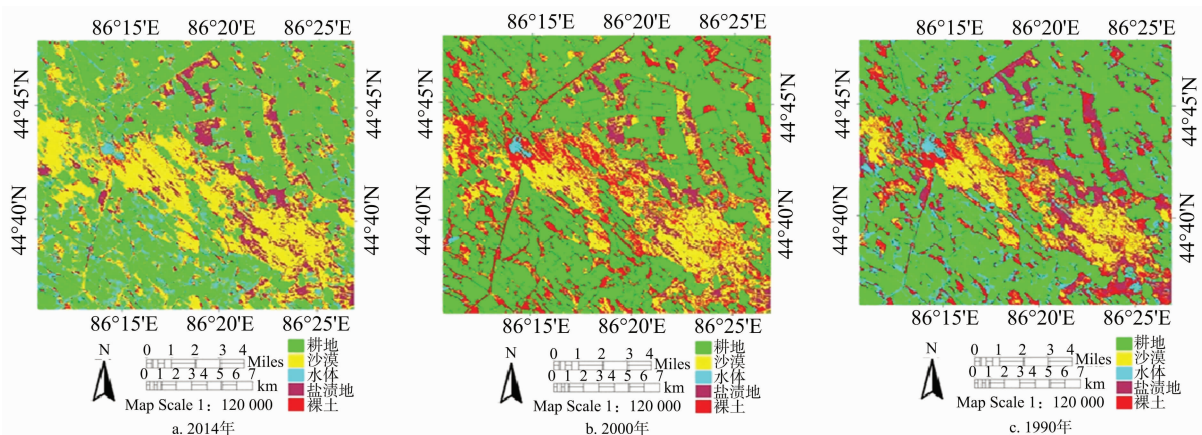


图4 土壤盐渍化分类

采用混淆矩阵法对遥感图像处理结果进行精度评价, Kappa 系数用来代表整个混淆矩阵的精度参数:

$$\text{Kappa} = [N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum (x_{i+} x_{+i})] / (N^2 - \sum x_{i+} x_{+i}) \quad (8)$$

式中: x_{ii} 是误差矩阵中第*i*行、第*i*列上的样本数; x_{i+} 和 x_{+i} 分别是第*i*行和第*i*列总样本的数目和; N 代表总样点数; r 表示矩阵的行数。对各期遥感影像随机抽样,进行分类精度检验(表3),可知分类精度达到84%以上,Kappa系数均在0.86以上,分类结果较为理想。

表3 分类精度检验

年份	总精度(%)	Kappa 系数
1990	84.186 3	0.864 2
2000	87.164 5	0.876 5
2014	86.532 7	0.885 6

2.3.2 土壤盐渍化变化分析 对2014年、2000年和1990年的土壤盐渍化进行变化分析(图5),可以得出,1990—2000

年经过10年,研究区土壤盐渍化面积呈现上升趋势,增加了1 032.86 hm²。土地开发利用的强度加大和不合理的灌溉,导致土壤盐渍化现象加重。2000—2014年经过14年,土壤盐渍化面积有所减少,其面积减少为1 581.84 hm²,说明公众对土壤盐渍化危害的认识不断加深,并采取了一定的改良治理措施和滴灌、喷灌灌溉技术的应用,使得盐渍化土壤的治理朝着良性方向发展。

研究区盐渍化区域在绿洲外部呈条状,内部呈斑块分布。1990年,盐渍化土壤多分布在耕地和沙漠的边缘及过渡带处;2000年,盐渍化土壤分布较为分散,在绿洲内部均有零星分布;2014年,盐渍化土壤分布在灌区周围的荒地及地势低洼排水不畅的沙漠边缘地带。土壤盐渍化变化趋势是依据地形地貌的不同沿地下水流向,有向沙漠深处蔓延的趋势。

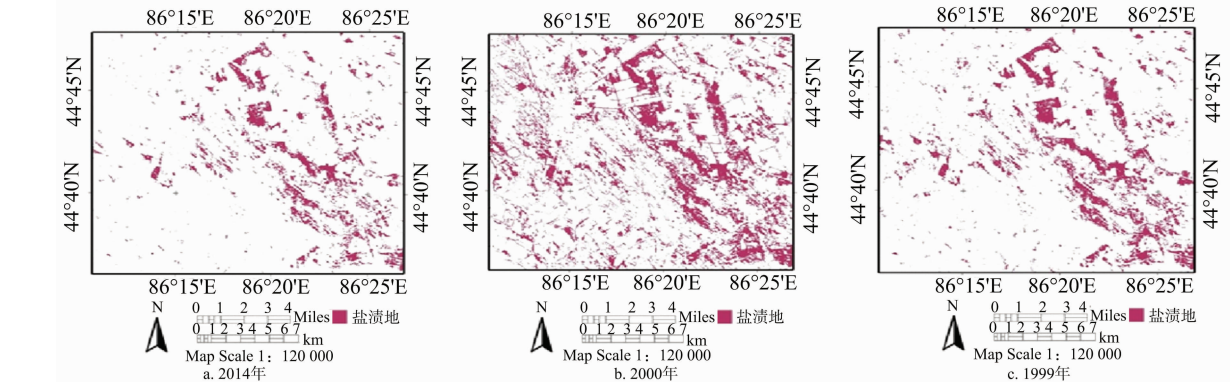


图5 土壤盐渍化变化分析

2.3.3 土壤盐渍化转移分析 为了进一步探讨研究区土壤盐渍化变化转移信息,分别对1990年、2000年、2014年3期遥感影像分类进行差异分析,得出相邻2个时期的盐渍化面积转移矩阵表。从表4、表5可知,研究区土壤盐渍化与耕地、沙漠、水体和裸土之间转移变化明显。表4中,横向为2000年土地变化统计数据,纵向为1990年土地变化统计数据。在1990—2000年间,盐渍化总体面积在增加,增加面积为1 032.86 hm²,盐渍化变化为其他类型土地的面积为

775.40 hm²。裸土转移为盐渍地的面积最大,为762.68 hm²,其次是沙漠,面积为717.24 hm²。表5中,横向为2014年土地变化统计数据,纵向为2000年土地变化统计数据。2000—2014年间,盐渍化总体面积在减少,减少的面积为1 581.84 hm²,盐渍化变化为其他类型土地的面积为2 991.71 hm²。盐渍地转移为耕地的面积最大,为1 415.32 hm²,盐渍地转移为裸土的面积 of 1 302.01 hm²。

表4 1990—2000年土壤盐渍化面积转移矩阵

	hm ²				
类别	耕地	沙漠	水体	盐渍地	裸土
耕地	19 812.14	923.39	37.12	321.17	519.32
沙漠	371.17	7 912.54	20.19	212.17	410.53
水体	21.17	11.07	272.89	30.07	10.15
盐渍地	298.17	717.24	30.17	3 365.12	762.68
裸土	319.16	262.38	51.65	211.99	7 200.45
变化	1 009.67	1 914.08	139.13	775.40	1 702.68
差值	791.33	-900.02	-66.67	1 032.86	-857.40

研究区盐渍化土壤总面积从1990年的4 140.52 hm²增长到2000年的5 173.38 hm²,再降低到2014年的3 591.54 hm²。盐渍化土壤面积的减少以及良好的发展趋势与近些年人们对土壤盐渍化的严格控制是分不开的。1990—2000年10年间裸土转化为盐渍地的面积比较大,说明人类对裸土没有进行合理的改良和利用,同时不合理的灌溉造成耕地边缘的裸土盐渍化日益严重,继而导致裸土转化为盐渍化的面积大大增加。2000—2014年14年间盐渍化土地转化

为耕地的面积最大,其次是裸土。说明人类加大了土地利用程度,开垦屯田,增加了耕地面积,同时改善了灌溉方式,采用滴灌和喷灌合理控制了土壤的盐渍化程度。

3 结论

本研究通过干旱区土壤盐渍化的光谱信息,利用SVM模型对土壤盐渍化进行识别,从而进行土壤盐渍化动态监测,结论如下:

表 5 2000—2014 年土壤盐渍化面积转移矩阵

hm²

类别	耕地	沙漠	水体	盐渍地	裸土
耕地	20 132.15	528.45	13.72	1 415.32	2 252.75
沙漠	612.17	5 170.78	20.17	217.15	260.45
水体	102.66	0.00	275.67	57.23	67.15
盐渍地	387.97	697.12	30.12	2 181.67	294.66
裸土	378.19	2 548.25	5.67	1 302.01	5 170.74
变化	1 480.99	3 773.82	69.68	2 991.71	2 875.01
差值	2 729.25	-2 645.88	73.06	-1 581.84	1 425.39

(1)测定了水体、沙漠、植被、盐渍土的光谱反射率,分析了盐渍土的光谱特征,在 400~900 nm 盐渍土光谱变化比较平缓,710 nm 以后由于植被光谱反射率进入近红外反射平台,增加了盐渍土与植被光谱反射率的差异。同时,盐渍土与水体和沙漠的光谱反射率差异也比较大。因此,710~900 nm 是盐渍土区别于水体、沙漠和植被的最佳波段。

(2)分别对不同程度的盐渍化土壤进行光谱反射率分析,得出整体上不同程度盐渍化土壤的光谱反射率变化比较平缓,其中重度盐渍土的光谱反射率在波长 400~900 nm 范围内普遍高于其他盐渍化土壤。为了减少识别的误差,本研究增加了重度盐渍土的采样点。

(3)利用 SVM 模型对土壤盐渍化进行动态监测,包括干旱区土地覆盖分类与分类精度评价、土壤盐渍化的变化特征和土壤盐渍化转移分析。利用 SVM 模型对 1990 年、2000 年、2014 年 3 期遥感影像进行干旱区土地覆盖分类,分类精度达到 84% 以上,Kappa 系数均在 0.86 以上;3 期遥感影像中,土壤盐渍化面积是先增加再减少,2000 年土壤盐渍化面积最大,主要是依据地形地貌的不同沿地下水流向,有向沙漠深处蔓延的趋势。1990—2000 年间,裸土转移为盐渍地的面积比较大;2000—2014 年间,盐渍地转化为耕地和裸土的面积比较大,说明 1990—2000 年间,人们对裸土没有进行合理的改良和利用,同时不合理的灌溉造成耕地边缘的裸土盐渍化日益严重;2000—2014 年间,人类加大了土地利用程度,开垦屯田,增加耕地面积,同时改善了灌溉方式,采用滴灌和喷灌合理控制了土壤的盐渍化程度。

SVM 模型具有严格的统计学理论基础,提高了土壤盐渍化识别的精度和土壤盐渍化识别的自动化程度。本研究对于今后土壤盐渍化的动态监测的智能化和自动化研究具有重要的参照价值。

参考文献:

- [1] 王玉刚,肖笃宁,李彦,等. 新疆三工河流域尾间绿洲地下水变化与土壤积盐的响应[J]. 生态学报,2007,27(10):4036-4044.
- [2] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, et al. Salinity increases mobility of heavy metals in soils[J]. 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[J]. 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[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1):33-41.
- [5] 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[J]. 地理学报, 2012, 67(9):1233-1245.
- [6] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):837-840.
- [7] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2):177-181.
- [8] Rao B R M, Sharma R C, Ravisanakar T, et al. Spectral behaviour of salt-affected soils[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12):2125-2136.
- [9] Letey J, Hoffman G J, Hopmans J W, et al. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4):502-506.
- [10] 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[J]. 生态学报, 2010, 30(10):2695-2705.
- [11] 王玉刚,肖笃宁,李彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5262-5270.
- [12] 丁建丽,姚远,王飞. 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[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):853-861.
- [13] 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.
- [14] 哈学萍,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,等. 基于 SI-Albedo 特征空间的土壤盐渍化遥感监测指数研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(4):698-703.
- [15] 哈学萍,丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,等. 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[J]. 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):168-173.
- [17] 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[J]. 资源科学, 2012, 34(2):353-358.
- [18] Akramkhanov A, Brus D J, Walvoort D J J. Geostatistical monitoring of soil salinity in Uzbekistan by repeated EMI surveys[J]. Geoderma, 2014, 213:600-607.
- [19] Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. Monitoring soil salt content using HJ-1A hyperspectral data: a case study of coastal areas in Rudong County, eastern China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 25(2):213-223.
- [20] 罗家雄. 新疆垦区的地下水临界深度[J]. 新疆农业科学, 1985(1):19-22.
- [21] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3):273-297.