

DOI: 10.11766/trxb201601270650

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*

曹雷^{1, 2, 3} 丁建丽^{1, 2†} 玉米提·哈力克^{1, 2, 3} 苏雯^{1, 2} 宁娟^{1, 2}
缪琛^{1, 2} 李焕^{1, 2}

(1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

(2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

(3 德国埃希施塔特-因戈尔施塔特大学数学与地理学院, 埃希施塔特 85071)

摘要 土壤盐渍化是干旱半干旱地区土地退化的主要原因之一, 给当地生态系统和社会经济的可持续发展带来了严重的威胁, 而对盐渍化空间分布信息的提取是治理盐渍化的基础。因此, 选取生态脆弱区渭一库绿洲为研究区, 利用2014年7月19日GF-1多光谱影像数据, 提取光谱指数及波段信息, 结合实际采样点的土壤表层电导率数据(0~10 cm), 采用偏最小二乘回归模型(partial least squares regression, PLSR)对土壤盐渍化进行模拟, 并对研究区盐渍化分布进行模拟和评估。结果表明: 实测土壤表层电导率与光谱指数相关性较好; 利用PLSR对渭一库绿洲土壤表层盐渍信息建模, 对土壤盐渍化信息提取效果较好, 精度较高; 充分利用了GF-1影像包含的信息, 提高了高分辨率遥感影像盐渍化信息提取的精度; 非盐渍化和轻度盐渍化面积分别占总面积的42.88%和17.16%, 绿洲中部偏东及东南区域, 盐渍化现象稍弱, 可成为今后绿洲扩张的重点方向; 而中度盐渍化、重度盐渍化和盐土面积分别占总面积的29.51%、8.57%和1.88%, 绿洲北部/西部及西南方向的重度盐渍化区域紧挨绿洲区域, 已严重威胁了绿洲经济的健康发展, 亟待治理。

关键词 土壤盐渍化; 高分一号; 光谱指数; 偏最小二乘回归法(PLSR); 渭一库绿洲

中图分类号 TP79 **文献标识码** A

土壤盐渍化现象已成为干旱半干旱地区最重要的环境问题之一^[1-3]。为合理管理现有土地资源并防止土壤盐渍化进一步恶化, 监测、评估和预测土壤盐渍化已成为绿洲生产合理布局和区域可持续发展的重要依据^[4]。而遥感技术具有监测范围大, 受地面条件限制少、获得信息速度快、周期短、成本低等优点, 使得大面积实时动态监测土壤盐渍化现象成为可能^[5]。

国内外学者利用光谱指数对土壤盐渍化进行研究已成趋势, Bao等^[6]分析了盐渍化光谱特征, 发现不同下垫面有不同的反射率。Khan和Sato^[7]研究发现不同波段组成的盐分指数, 在指示同一种盐渍化时, 表现出来的指数特征不同。哈学萍等^[8]利用Landsat影像, 提出了土壤盐渍化遥感监测指数(Salinization monitoring index, SMI), 较好地区分了不同程度的盐渍化土壤。丁

* 新疆维吾尔自治区科技援疆项目(201504051064)、高分辨率对地观测重大专项(民用部分)(95-Y40B02-9001-13/15-03-01)和国家留学基金委创新型人才培养国际合作项目(201505990312)资助 Supported by the Science and Technology Supporting Project of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (No. 201504051064), the High Resolution Earth Observation Projects (Civil Part) (No. 95-Y40B02-9001-13/1-03-01), and the Innovative Elite Training in International Cooperation Projects of China Scholarship Council (No. 201505990312)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: watarid@xju.edu.cn

作者简介: 曹雷(1992—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事干旱区资源遥感研究。E-mail: clhyesa@163.com

收稿日期: 2016-01-27; 收到修改稿日期: 2016-03-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-01

建丽等^[9]构建了最小噪声分离 (minimum noise fraction, MNF) 三维光谱特征空间, 并提出盐渍化距离 (soil distance index, SDI) 模型, 推进了盐渍化的定量研究。姚远等^[10]利用电磁感应技术和高光谱指数结合建立土壤盐渍化监测模型, 大大提高了预测精度。彭杰等^[11]在高光谱定量反演模型中, 利用偏最小二乘回归模型 (partial least squares regression, PLSR) 对盐渍化评估, 发现该方法所得模型决定系数较高。Nawar等^[12]利用 ASTER 数据, 建立土壤特性模型, PLSR 系数较高。

虽然土壤含盐量和光谱指数间的关系已经研究了几十年, 但是如何利用遥感技术在空间上区分盐渍化的等级仍然是个挑战。近年来, 国内外学者通过使用高分辨率卫星数据提高了土壤盐渍化信息的提取精度, Eldeiry 和 Garcia^[13]在区域进行了 IKONOS 与 Landsat 盐渍化提取对比研究, 发现空间分辨率对于盐渍化监测起着重要作用, 从 IKONOS 影像中得到的效果更好。牛增懿等^[14]利用高分一号影像和 Landsat 8 OLI 数据提取盐渍化信息, 发现国产高分一号影像在土壤盐渍化信息提取方面精度高、潜力大。由于国外高分影像价格昂贵, 且幅宽小, 性价比较低。随着国产“高分一号”卫星的投入使用, 为盐渍化研究提供了新的前景。高分一号 (GF-1) 卫星具有分辨率高、幅宽较宽的优势, 对地物信息展示更清楚, 精度高, 更稳定, 而目前国产高分影像的盐渍化监测研究工作并未展开。

基于此, 本文选取干旱半干旱地区渭干河—库车河流域三角洲绿洲 (简称渭一库绿洲) 为研究

区, 利用高分辨率的 GF-1 卫星遥感影像数据, 提取光谱指数及波段信息, 结合实际采样点的土壤表层电导率数据 (0~10 cm), 采用 PLSR 模型对土壤盐渍化进行模拟, 并对研究区盐渍化分布进行预测和评估。本文有效地将国产卫星数据应用到试验研究中, 同时实现了土壤盐渍化的高精度监测, 可为政府决策部门提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭一库绿洲 (图 1) 位于塔里木盆地北缘, 天山南麓。地理坐标为 $39^{\circ}29'51'' \sim 42^{\circ}38'01''N$, $81^{\circ}28'30'' \sim 84^{\circ}05'06''E$ 。地势北高南低, 自西北向东南倾斜。平均气温 $10.5 \sim 11.4^{\circ}C$, 平均蒸发量超过 2 000 mm, 平均降水量 55.45 mm, 降水少, 蒸发强烈。自然植被稀疏, 以怪柳、盐穗木、花花柴、盐节木等植被为主。绿洲及其外围盐类沉积规模大, 矿化度及地下水位偏高, 土层构成物颗粒细, 透水性差, 区域土壤普遍呈盐渍化, 绿洲外围盐渍化现象较绿洲区域更为严重^[15-16]。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集在 2014 年 7 月 22 日—7 月 28 日完成, 采用 GPS 定位技术在绿洲选择 36 个具有代表性的样点。以 GPS 定位点为中心点, 设立以中心点为圆心、0.5 m 为半径的采样区, 每个样区均匀采集 5 个样点样品, 然后混合作为一个土壤样品。将野外带回的土壤样品, 风干研磨并过 0.5 mm 孔径的筛子, 再用蒸馏水制备 1:5 土水质量比的溶液, 静

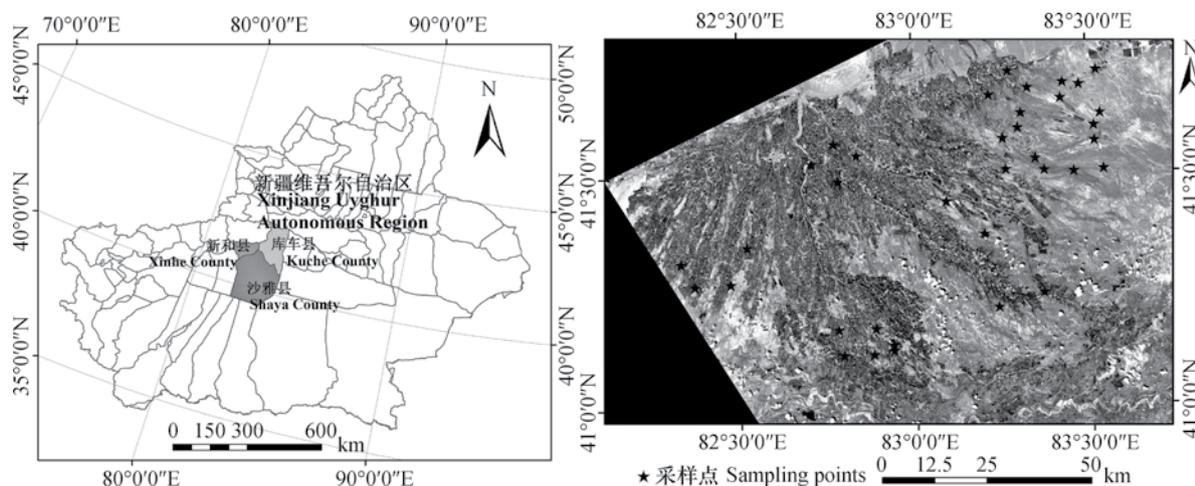


图1 采样区位置及样点分布图

Fig. 1 Location of sampling areas and distribution of soil sampling points

置过滤后，获得土壤溶液，最后使用德国WTW公司制造的Cond 7310精密仪器来测定土壤溶液的电导率（Electrical conductivity, EC）。

1.3 影像数据处理

结合采样时间，本文选择2014年7月19号准同步国产GF-1 WFV（wide field of view, WFV）影像为数据源，空间分辨率为16 m，卫星过境期间晴

朗无云，因研究区位于干旱区，地表常年干燥，地物光谱变化较小。利用软件ENVI 4.8中的 FLAASH模块对所用影像数据进行大气校正^[17]，结合研究区1:5万地形图，采用控制点—多项式拟合校正法，并通过横轴墨卡托投影及三次卷积内插法重采样进行影像数据几何精校正（误差均小于0.5个像元）。

表1 土壤光谱指数

Table 1 Soil spectral indices

光谱指数 Spectral indices	公式 Formulas	参考文献 References
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	$(NIR-R) / (NIR+R)$	[18]
土壤调节植被指数 Soil adjusted vegetation index (SAVI)	$(NIR-R) / (NIR+R+L) \times (1+L)$	[20]
归一化盐分指数 Normalized differential salinity index (NDSI)	$(R-NIR) / (R+NIR)$	[15]
盐分指数Salinity index (SI-T)	$(R-NIR) \times 100$	
亮度指数 Brightness index (BI)	$\sqrt{R^2 + NIR}$	
盐分指数Salinity index (SI)	$\sqrt{B \times R}$	[8]
盐分指数1Salinity index 1 (SI1)	$\sqrt{G \times R}$	[10]
盐分指数2 Salinity index 2 (SI2)	$\sqrt{G^2 \times R^2 + NIR^2}$	
盐分指数3Salinity index 3 (SI3)	$\sqrt{G^2 + R^2}$	
盐分指数Salinity index (S1)	B / R	[20]
盐分指数Salinity index (S2)	$(B-R) / (B+R)$	
盐分指数Salinity index (S3)	$(G \times R) / B$	
盐分指数Salinity index (S5)	$(B \times R) / G$	
盐分指数Salinity index (S6)	$(R \times NIR) / G$	
强度指数Intensity index 1 (Int1)	$(G+R) / 2$	[19]
强度指数Intensity index 2 (Int2)	$(G+R+NIR) / 2$	
波段1 Band1 (B1)	$B (0.45 \sim 0.52) \mu m$	
波段2 Band2 (B2)	$G (0.52 \sim 0.59) \mu m$	
波段3 Band3 (B3)	$R (0.63 \sim 0.69) \mu m$	
波段4 Band4 (B4)	$NIR (0.77 \sim 0.89) \mu m$	

注：B：蓝波段；G：绿波段；R：红波段；NIR：近红外波段；L：土壤调节因素，常量，一般取0.5 Note: B: Blue band, G: Green band, R: Red band, NIR: Near infrared band. L: Soil regulation factor; Constant, L=0.5

1.4 光谱指数

光谱指数与土壤理化性质相关性显著,因此,光谱指数可以作为评估土壤盐渍化程度的指示器^[18-19]。而盐渍化土壤能够影响植被的生长,影像上植被的反射率可以间接反映土壤盐分^[20-21],将植被指数和盐分指数相结合构造土壤盐渍化特征空间能够较好反映盐渍化分布状况。盐渍化程度越严重,其光谱反射率越高,非盐渍化反射率在可见光至近红外波段是最低的,而重度盐渍化反射率最高^[22]。本研究主要选取16种指数与4个波段用于反映土壤盐渍化信息,见表1。

1.5 偏最小二乘法回归(PLSR)

PLSR具有多元回归分析、典型相关分析和主成分分析的基本功能与优点,在多个领域广泛适用,也是光谱技术建模中的常用分析方法。该方法常用于多自变量对多因变量回归建模中,尤其在样本数量少或自变量多重相关等情况下,该方法较传统回归分析方法更具优势^[23-24]。对系统解释能力强的综合变量可被PLSR有效提取,而无解释作用的变量则被剔除,从而达到优化多变量间的多重相关性干扰现象的效果,使之对因变量具有最强的解释能力进而进行回归分析^[25-26],PLSR可以挖掘出具体的内涵数据,更多详细原理参见文献[27]。

1.6 模型的建立与检验

本研究采用PLSR模拟实测样本的电导率与光谱指数间的数学关系,建立模型来预测电导率^[28]。PLSR模型中,将全部实测电导率从大到小的顺序排列,剔除偏差较大的数据,按照选两个留一个的原则,选择实测电导率数据建模和验证。本文采用软件The Unscrambler X 10.3选取24个样本的实测电导率用来建模,剩下12个样本进行验证,最后采用决定系数(coefficient of determination, R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)及实际分类结果来判定建模效果, R^2 越大, RMSE越小,精

度越高,即模型模拟的结果就越可靠精确^[29]。

2 结果

2.1 土壤电导率与光谱指数之间的相关性

采用经过预处理的GF-1 WFV影像在软件ENVI4.8中根据光谱指数公式进行波段计算,分别得到各个光谱指数的灰度图,然后根据野外采样点由GPS定位的经纬度坐标,将实测样点和影像上光谱指数进行空间上的一一对应,从灰度图中提取实测样点的光谱指数,二者的相关性见表2。结果表明电导率与土壤调节植被指数(SAVI)、归一化植被指数(NDVI)、归一化盐分指数(NDSI)、盐分指数(SI)、盐分指数1(SI1)、盐分指数(S5)、波段3(B3)、波段4(B4)呈中度相关,且相关性均在0.01水平下极显著,这些光谱指数预测土壤盐渍化的能力较强;而盐分指数S1、S2和强度指数(Int2)与电导率相关性不显著,对土壤盐渍化的预测能力较差。因此分别选用土壤调节植被指数(SAVI)、波段(B3)和盐分指数(S5)进行光谱指数对比,结果如图2所示。

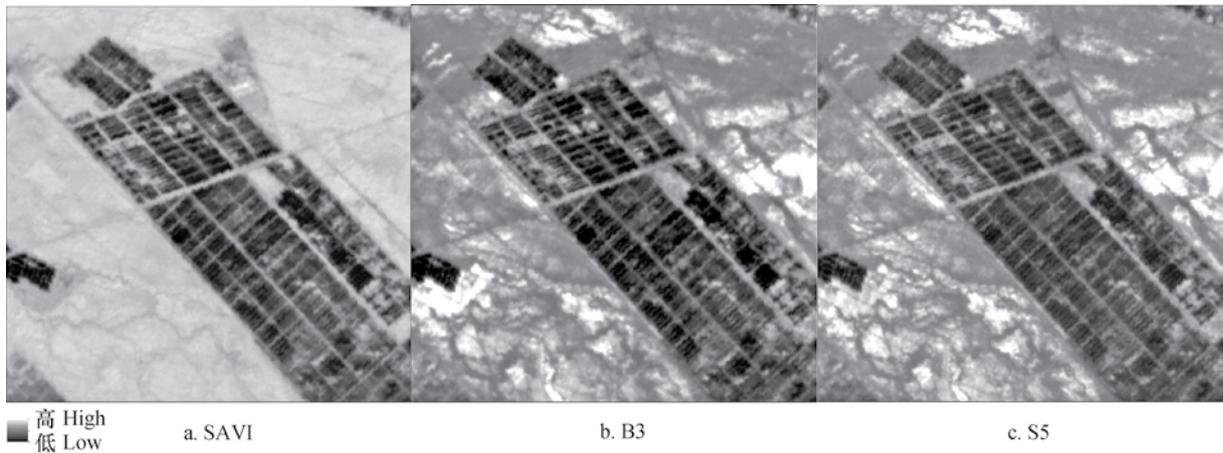
通过图2可以看出SAVI评估植被的效果较好,稀疏和茂密的植被易被区分,这与SAVI与实测电导率成负相关且相关性最高的结果是相符的,但是对于其他地物的信息表达较为模糊,如对盐渍化的信息表达较差,这是因为SAVI对外部因素敏感度较低,如土壤背景。B3波段对土壤盐渍化的信息表达的相对较好,但是忽略了一些细节,使得一些生长稀疏的植被不能完整的表达,对盐渍化程度区分的不显著;而盐分指数S5表达盐渍化的程度很明显,但是对植被的覆盖程度细节表达不明显,植被密度低、收割过的植被易和盐渍化程度较轻的土壤混分。结合已有研究,可以发现这些指标共同应用于土壤盐渍化的评估研究可以取得一定的成功。

表2 电导率与光谱指数之间的相关性

Table 2 Correlation coefficient between electrical conductivity and spectral indices

SAVI	NDVI	NDSI	SI-T	BI	SI	SI1	SI2	SI3	S1
-0.580**	-0.576**	0.576**	0.573**	-0.443**	0.517**	0.503*	-0.342*	0.499**	-0.311
S2	S3	S5	S6	Int1	Int2	B1	B2	B3	B4
-0.296	0.493**	0.550**	-0.451**	0.465**	-0.056	0.481**	0.442**	0.532**	-0.522**

注: **表示在0.01水平极显著, *表示在0.05水平显著 Note: ** indicates very significant at 0.01 levels; * indicates significant at 0.05 levels



注：SAVI：土壤调节植被指数、B3：波段3、S5：盐分指数 Note: SAVI: Soil adjusted vegetation index, B3: Band3, S5: Salinity index

图2 不同光谱指数效果图

Fig. 2 Effect drafts of different spectral indices

2.2 电导率与光谱指数的PLSR建模

电导率测量时会因外界因素对测量结果产生影响，同时单一变量无法揭示多种光谱指数间的微观信息，因此本研究对实测电导率进行4种简单数学变换。采用PLSR对5种不同电导率数学形式与光谱指数进行建模并验证（表3）。

由表3可知，电导率的倒数形式和对数形式建模精度较高，决定系数 R^2 分别为0.69和0.64，均为高度相关，且均方根误差较小，表明这两种模型较好。通过光谱指数与实测电导率模型的回归系数图

（图3），可以看出两种模型中各变量的回归系数各不相同，即各变量在模型中的权重有差异。其中，S6所占权重最大，对盐渍化程度预测能力较强，NDVI和NDSI所占权重次之，而可见光波段和近红外波段（ $0.77 \sim 0.89$ ） μm 在PLSR模型中所占权重最为微弱，预测土壤盐渍化的能力最差。SI-T在倒数形式建模中的权重较小，SI在对数形式建模中权重最低，说明不同光谱指数在不同电导率转换模型中所起的作用不同，对土壤盐渍化的预测能力也各不相同。

表3 电导率转换形式与光谱指数的PLSR模型精度

Table 3 Precision of PLSR model for transformation of electrical conductivity and spectral indices

电导率变换形式 Transformation of electrical conductivity	建模样本数 Number of samples for modeling	验证样本数 Number of samples for validation	建模样本决定系数 Determination coefficient of modeling samples (R^2)	均方根误差 RMSE
实测电导率 Measured EC (R)	24	12	0.47	4.16
实测电导率倒数 Reciprocal of measured EC ($1/R$)	24	12	0.69	0.58
实测电导率对数 Logarithm of measured EC ($\lg R$)	24	12	0.64	0.36
实测电导率均方根 Square root of measured EC (\sqrt{R})	24	12	0.56	0.82
实测电导率对数的倒数 Reciprocal of logarithm of measured EC ($1/\lg R$)	24	12	0.25	2.04

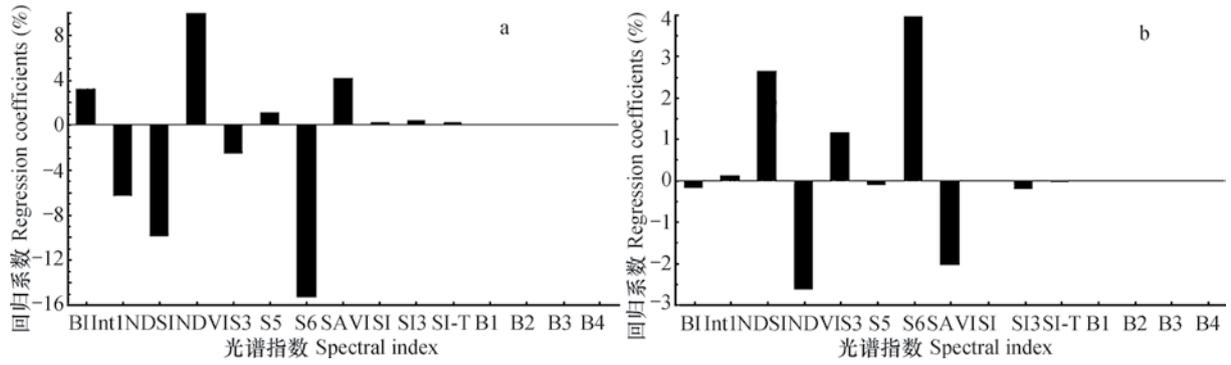


图3 电导率的倒数形式 (a) 和对数形式 (b) 的PLSR模型回归系数

Fig. 3 Regression coefficients of reciprocal (a) and logarithmic (b) PLSR models of electrical conductivity

2.3 土壤盐渍化信息建模效果比较

近年来一些土壤学的研究表明：土壤含盐量可以用EC_{1:5}来代替进行分析，主要是因为土壤盐分与土壤浸提液电导率之间显著相关。根据联合国粮食及农业组织（FAO）土壤盐渍化分类系统^[30]，利用实测电导率将土壤盐渍化分为五个等级：EC_{1:5} > 16 dS m⁻¹为盐土、16 dS m⁻¹ > EC_{1:5} > 8 dS m⁻¹为重度盐渍化、8 dS m⁻¹ > EC_{1:5} > 4 dS m⁻¹为中度盐渍化、4 dS m⁻¹ > EC_{1:5} > 2 dS m⁻¹为轻度盐渍化、2 dS m⁻¹ > EC_{1:5}为非盐渍化。为进一步比较电导率倒数建模和电导率对数建模的适用性，部分建模效果图见图4。

为了明显突出不同地物的信息，选择图4c为原始影像中波段（R:B3、G:B4、B:B2）合成的假彩色影像，与图4a倒数建模和图4b的对数建模影像进行对比，图4a的倒数建模效果优于图4b的对数

建模。图4a的具体效果表现为：卫星垂直投影下的地表覆被的非盐渍现象与盐渍现象区分明显，混淆信息和错分现象较少，不同程度盐渍化表征纹理清晰，层次结构明显，利于判别，土壤盐渍化程度与目视解译情况更相符；图4b对数建模中，非盐渍化和轻度盐渍化信息混淆明显，错分现象严重，与实际情况相差较大。因此电导率倒数形式建模较对数形式建模效果更好。

2.4 PLSR模型分析与精度检验

通过上述对比可以发现：基于电导率倒数转换的模型更优，12个土壤样本为验证样本，来检验反演的倒数形式模型的稳定性和预测能力（图5）。可以看出，该模型的检验样本R²为0.78，RMSE为0.53。而建模样本精度R²为0.69，RMSE为0.58，该模型精度优于Bouaziz等^[21]利用MODIS数据和多元线性回归建模精度（R²=0.40），及Fourati

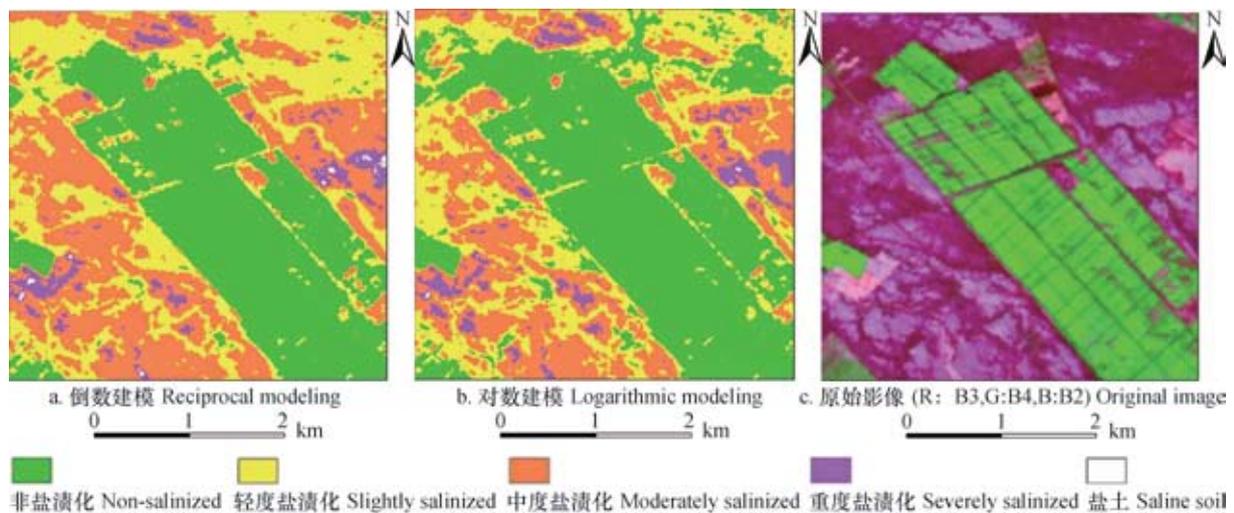


图4 建模效果局部图对比

Fig. 4 Local figure modeling results

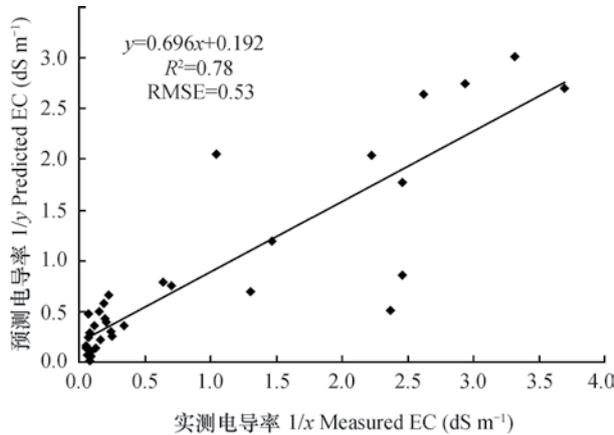


图5 电导率预测值和实测值关系散点图

Fig. 5 Scatter plot of measured and predicted electrical conductivities

等^[19]利用Landsat 8 OLI数据和PLSR建模精度 ($R^2=0.58$, $RMSE=0.66$)。基于高分影像的盐渍地电导率的倒数形式模型模拟值与实测值一致性较好,精度较高,因此利用电导率结合光谱指数监测盐渍化可行。

2.5 渭一库绿洲土壤盐渍化制图

基于PLSR电导率倒数模型,进行土壤盐渍化制图(图6)。其中,非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化、盐土面积分别占总分类面积的42.88%、17.16%、29.51%、8.57%、1.88%,渭一库绿洲的非盐渍化面积最大,中度盐渍化所占面积比例次之,盐土的面积最小。

从分类结果看(图6),基于PLSR电导率倒数

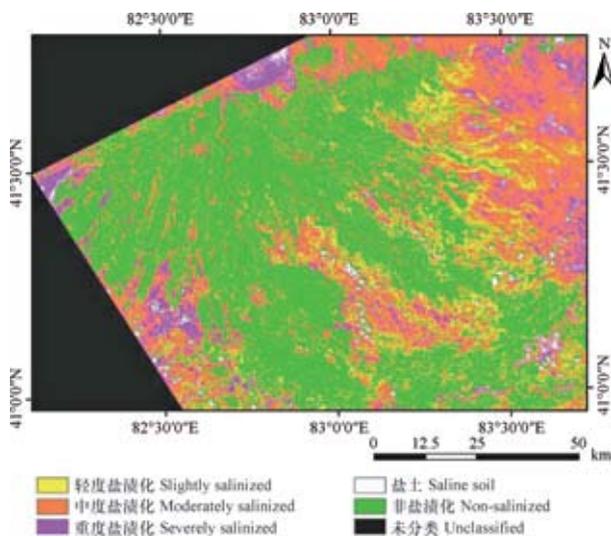


图6 土壤盐渍化分类图

Fig. 6 Soil salinization classification map

模型的盐渍化信息提取结果,清楚地反映了盐土、重度、中度和轻度不同程度的盐渍化土壤的分布信息,突破了传统监督分类方法的局限性。同时,可以看出研究区绿洲非盐渍化主要集中在植被覆盖区域,主要是由于灌溉和排水技术的改善,作物生长比较茂盛,棉花是该地区的主要作物,随着价格的上涨,整个棉田的面积在扩大;轻度盐渍化主要在绿洲边缘,是绿洲与较重程度盐渍化土壤间的缓冲区;中度盐渍化占有的比重较大,由于农药和肥料等不合理的使用,使得盐渍化程度较为明显;重度盐渍化离绿洲区域较远,植被稀疏,地理环境条件较差,但是易与裸地和光板地混淆,主要是重度盐渍地和光板地的反射较强;而盐土的比例相对较小,且远离绿洲,说明该区域盐渍化程度高,不利于绿洲扩张。绿洲中部偏东及东南区域,盐渍化现象稍弱,可成为今后绿洲扩张的重点方向;而绿洲北部/西部及西南方向的重度盐渍化区域紧挨绿洲区域,已严重威胁到了绿洲经济的健康发展,亟待治理。

3 结 论

本文首次尝试使用国产“高分一号”卫星高分辨率遥感影像,基于光谱指数与实测表层电导率数据,采用PLSR方法建立盐渍化信息提取模型。在渭一库绿洲用实测电导率倒数形式进行PLSR建模精度较高,PLSR模型对土壤盐渍化信息提取效果较好,充分利用了影像包含的信息,提高了高分辨率遥感影像盐渍化信息提取的精度。通过土壤盐渍化研究,可以指示哪些农田受到盐渍化危害严重,利于农业的精细化管理。在渭-库绿洲中部偏东及东南区域,盐渍化现象稍弱,可成为今后绿洲扩张的重点方向;绿洲北部/西部及西南方向的重度盐渍化区域紧挨绿洲区域,已严重威胁到了绿洲经济的健康发展,亟待治理。虽然基于PLSR可以成功提取渭一库绿洲土壤盐渍化信息,但本研究仅选择了一景GF-1 WFV影像,下一步工作拟选取多景GF-1 WFV影像展开盐渍化动态研究。

参 考 文 献

[1] Metternicht D G, Zinck D A. Remote sensing of soil salinization-Impact on land management. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008

- [2] 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-affected field under mulch-drip irrigation in different planting years (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (6) : 59—63
- [3] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 实测高光谱和HSI影像的区域土壤盐渍化遥感监测研究. 光谱学与光谱分析, 2014, 34 (7) : 1948—1953
Lei L, Tashpolat · Tiyip, Ding J L, et al. Study on the soil salinization monitoring based on measured hyperspectral and HSI data (In Chinese) . Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34 (7) : 1948—1953
- [4] Ding J L, Yu D L. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Weigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. Geoderma, 2014, 235/236 (4) : 316—322
- [5] 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 (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (16) : 4620—4631
- [6] Bao B R C, Sankar T R, Dwivedi R S, et al. Spectral behavior of salt-affected soils. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16 (12) : 2125—2136
- [7] Khan N M, Sato Y. Monitoring hydro-salinity status and its impact in irrigated semi-arid areas using IRS-1B LISS-II data. Asian Journal of Geoinformatics, 2001, 1 (3) : 63—73
- [8] 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. 土壤学报, 2009, 46 (4) : 698—703
Ha X P, Ding J L, Tashpolat · Tiyip, et al. SI-Albedo space-based extraction of salinization information in arid area (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (4) : 698—703
- [9] 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. 土壤学报, 2013, 50 (5) : 853—861
Ding J L, Yao Y, Wang F. Quantitative remote sensing of soil salinization in arid regions based on three dimensional spectrum eigen spaces (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (5) : 853—861
- [10] 姚远, 丁建丽, 张芳, 等. 基于高光谱指数和电磁感应技术的区域土壤盐渍化监测模型. 光谱学与光谱分析, 2013, 33 (6) : 1658—1664
Yao Y, Ding J L, Zhang F, et al. Research on model of soil salinization monitoring based on hyperspectral index and EM38 (In Chinese) . Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33 (6) : 1658—1664
- [11] 彭杰, 刘焕军, 史舟, 等. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演. 农业工程学报, 2014, 30 (17) : 167—174
Peng J, Liu H J, Shi Z, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (17) : 167—174
- [12] Nawar S, Buddenbaum H, Hill J. Digital mapping of soil properties using multivariate statistical analysis and ASTER data in an arid region. Remote Sensing, 2015, 7 (2) : 1181—1205
- [13] Eldeiry A A, Garcia L A. Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72 (1) : 201—211
- [14] 牛增懿, 丁建丽, 李艳华, 等. 基于高分一号影像的土壤盐渍化信息提取方法. 干旱区地理, 2016, 39 (1) : 171—181
Niu Z Y, Ding J L, Li Y H, et al. Soil salinization information extraction method based on GF-1 image (In Chinese) . Arid Land Geography, 2016, 39 (1) : 171—181
- [15] 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 soil information in arid based on ETM+ data (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (2) : 222—228
- [16] 姚远, 丁建丽, 雷磊, 等. 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性. 生态学报, 2013, 33 (17) : 5308—5319
Yao Y, Ding J L, Lei L, et al. Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagnetic induction instruments (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (17) : 5308—5319
- [17] 陈趁新, 胡昌苗, 霍连志, 等. Landsat TM 数据不同辐射校正方法对土地覆盖遥感分类的影响. 遥感学报, 2014, 18 (2) : 320—334
Chen C X, Hu C M, Huo L Z, et al. Effect of different radiation correction methods of Landsat TM data on

- land-cover remote sensing classification (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18 (2): 320—334
- [18] Zhang T T, Zeng S L, Gao Y, et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 2011, 11 (6): 1552—1562
- [19] Fourati H T, Bouaziz M, Benzina M, et al. Modeling of soil salinity within a semi-arid region using spectral analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8 (12): 11175—11182
- [20] Allbed A, Kumar L, Aldakheel Y Y. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 2014, 230: 1—8
- [21] Bouaziz M, Matschullat J, Gloaguen R. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil. *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, 343 (11): 795—803
- [22] Setia R, Lewis M, Marschner P, et al. Severity of salinity accurately detected and classified on a paddock scale with high resolution multispectral satellite imagery. *Land Degradation & Development*, 2013, 24 (4): 375—384
- [23] 王海红, 张花玲, 任少亭, 等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究. *农业机械学报*, 2014, 45 (7): 133—138
- Wang H H, Zhang H L, Ren S T, et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristics (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (7): 133—138
- [24] 刘艳芳, 卢延年, 郭龙, 等. 基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建. *土壤学报*, 2016, 53 (2): 332—341
- Liu Y F, Lu Y N, Guo L, et al. Construction of calibration set based on the land use types in visible and near-infrared (VIS-NIR) model for soil organic matter estimation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 332—341
- [25] 李微, 李媛媛, 田彦, 等. 基于包络线法的滨海滩涂 PLSR 盐分模型研究. *海洋科学进展*, 2014, 32 (4): 501—507
- Li W, Li Y Y, Tian Y, et al. Study on the PLSR salt content model of coastal shoals based on enveloping line method (In Chinese). *Advances in Marine Science*, 2014, 32 (4): 501—507
- [26] 庞国锦, 王涛, 孙家欢, 等. 基于高光谱的民勤土壤盐分定量分析. *中国沙漠*, 2014, 34 (4): 1073—1079
- Pang G J, Wang T, Sun J H, et al. Quantitative analysis of soil salinity content with hyperspectral data in Minqin, Gansu, China (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2014, 34 (4): 1073—1079
- [27] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1999
- Wang H W. Partial least square regression and its application (In Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 1999
- [28] Nawar S, Buddenbaum H, Hill J. Estimation of soil salinity using three quantitative methods based on visible and near infra reflectance spectroscopy: A case study from Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8 (7): 5127—5140
- [29] 张娟娟, 熊淑萍, 时雷, 等. 基于近红外光谱分析的土壤全氮含量估测研究. *土壤*, 2015, 47 (4): 653—657
- Zhang J J, Xiong S P, Shi L, et al. Soil nitrogen content prediction with near infrared spectroscopy (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (4): 653—657
- [30] Abrol I P, Yadav J S P, Massoud F I. Salt-affected soils and their management. Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO soils bulletin, 1988

Extraction and Modeling of Regional Soil Salinization Based on Data from GF-1 Satellite

CAO Lei^{1, 2, 3} DING Jianli^{1, 2†} UMUT Halik^{1, 2, 3} SU Wen^{1, 2} NING Juan^{1, 2} MIAO Chen^{1, 2}
LI Huan^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

(2 Key Laboratory of Oasis Ecosystem of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

(3 Faculty of Mathematics and Geography, Catholic University of Eichstaett-Ingolstadt, Eichstaett 85071, Germany)

Abstract 【Objective】 Soil salinization, being one of the main causes of land degradation in arid and semi-arid regions, poses a great threat to sustainable development of the local social economy and ecological system. 【Method】 How to extract the information of spatial distribution of soil salinization is the foundation for management of soil salinization. Therefore, the Weigan-Kuqa Oasis, an area rather fragile in ecology, was selected as an object in this study, using the GF-1 satellite multispectral images of the date of July 19, 2014 as the main data source. A total of 16 spectral indices i.e. Normalized difference vegetation index (NDVI), soil adjusted vegetation index (SAVI), normalized differential salinity index (NDSI), salinity index (SI-T), brightness index (BI), salinity index (SI), salinity index 1 (SI1), salinity index 2 (SI2), salinity index 3 (SI3), salinity index (S1), salinity index (S2), salinity index (S3), salinity index (S5), salinity index (S6), intensity index 1 (Int1), intensity index 2 (Int2), and four bands, i.e. band 1 (B1), band 2 (B2), band 3 (B3) and band 4 (B4), were chosen for analysis. The images in pretreatment were computed by band in line with the spectral index formulas with the aid of software ENVI4.8. Hence, gray scale maps of different spectral indices were derived and pixel values of the 36 sampling points corresponding to the gray scale maps were extracted. The data of electrical conductivities in the surface soil layers (0~10 cm) of those sampling sites during 22~28 July 2014 were also collected for analysis of Pearson correlation with the pixel values using software SPSS 19.0. Thus sensitivities of different spectral indices to the data of soil salinization were figured out. PLSR models were built and validated for relationships of the mathematical formulas for five different electrical conductivities (i.e. measured conductivity, reciprocal of measured conductivity, logarithm of measured conductivity, MSR of measured conductivity and reciprocal of the logarithm of measured conductivity) with spectral indices. Measured conductivities of 24 samples were used for modeling and the remaining 12 samples for validation with the aid of the Unscrambler X10.3 software. 【Result】 Results show: 1) the measured surface soil conductivities are closely related to spectral indices, and moderately to SAVI, NDVI, NDSI, SI, SI1, S5, B3 and B4, with all correlations being significant at the 0.01 level; 2) based on the GF-1 satellite images PLSR was used for modeling of surface soil salinization in the Weigan-Kuqa Oasis. The model based on reciprocal of electrical conductivity is better than all the others with $R^2=0.69$ and $RMSE=0.58$ dS m^{-1} . For the validation model R^2 is 0.78 and $RMSE$ 0.53 dS m^{-1} . In the images of satellite vertical projection salinized and non salinized patches in the land cover can be clearly distinguished from each other, with little confusing or mistaking information. Characteristic texture of salinization relative to degree is distinct, showing a clear layered structure, easy to distinguish and making the visual interpretation of the images more consistent with the actual degree of soil salinization. Consequently the effect of information extraction of soil

salinization is quite good and high in precision; 3) this study made full use of the information contained in GF-1 images, thus improving precision of the extraction of soil salinization information from GF-1 images. Non-salinized soil and slightly salinized soil in the oasis accounts for 42.88% and 17.16%, respectively, of total in area. Soil salinization is quite mild in the middle by east and southeast of the oasis, which suggests that the oasis may expand towards that direction in future. Moderately salinized soil, severely salinized soil and salinized soil in the oasis accounts for 29.51%, 8.57% and 1.88%, respectively, of the total in area. The severely salinized soil is distributed closely on the north/west and southwest of the oasis and has already posed a serious threat to healthy development of the oasis economy and calls urgently for management. **【Conclusion】** The study on use of GF-1 images to evaluate soil salinization may provide a scientific basis for prediction of salinization in future and assessment of the current situation and for the government in decision-making for management of soil salinization.

Key words Soil salinization; GF-1; Spectral indices; PLSR; Weigan-Kuqa oasis

(责任编辑：檀满枝)