

实测反射率与影像反射率对土壤碱化预测的对比分析

张芳^{1,3}, 熊黑钢^{2,3*}, 龙桃^{1,3}, 卢文娟^{1,3}

1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046
2. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083
3. 教育部新疆绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046

摘要 以新疆奇台绿洲碱化土壤及其可见光/近红外光谱反射率为研究对象, 通过实地定点土壤取样和光谱测量, 将碱化土壤的实测反射率与同期获取的 TM 影像反射率相对照, 分析二者与土壤 pH 值的关系, 分别建立对土壤 pH 值的多元线性回归预测模型并对模型精度进行后验差检验。结果表明: 研究区土壤 pH 值与反射率呈极显著的正相关关系, pH 值增加, 反射率随之增加, 以板结为特征的碱化土壤对光谱具有良好的响应特性。实测反射率与影像反射率对研究区碱化土壤均具有良好的监测潜力。实测反射率预测 pH 值的模型精度较高, 其预测精度主要受地表板结程度的影响。植被对 TM 反射率预测精度的影响较大, 直接用 TM 反射率预测 pH 值精度较低, 去除植被影响后, 其预测模型等级与实测反射率预测模型等级接近, 均达到良。

关键词 土壤碱化; 实测反射率; TM 影像反射率; 光谱响应特征

中图分类号: TP70;S15 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0227-06

引言

盐渍土指一系列受土体中盐碱成分作用的、包括各种盐土和碱土以及其他不同程度盐化和碱化的各种类型土壤的统称。土壤盐碱化不但造成了资源的破坏、农业生产的巨大损失, 而且对生物圈和生态环境构成威胁, 因此, 准确掌握盐碱化土壤的性质、范围、程度、动态变化及未来趋势, 是制订综合治理措施, 合理利用土地的关键, 也是预报区域土壤盐碱化动态的重要依据^[1-4]。

遥感技术能大面积、重复获取区域多波段、多时相信息, 可以实现对土壤属性实时、大范围、非接触的监测。地物光谱则是遥感技术的基础, 对于地物分类、目标识别具有指纹效应, 是建立地面与空间两种信息之间关系的桥梁。土壤光谱反射特性是土壤理化特征和内在结构的光谱行为的综合, 为土壤遥感研究提供物理基础^[5-9]。

近年来, 国内外许多学者在实地土壤光谱测量及野外采样的基础上, 通过建立各种不同类型的分析模型, 实现了对有机质、土壤水分、含盐量、机械组成、酸碱度等土壤参数估测^[10-14]。pH 值是衡量土壤碱化程度的一个重要指标,

Northcote 曾提出 $\text{pH} < 8.0$ 为非碱化土, $\text{pH} 8.0 \sim 9.5$ 为碱化土, $\text{pH} > 9.5$ 为碱土^[15]。新疆是我国盐碱土分布最广、面积最大的省区, 本文在前人研究的基础上, 以分布有大面积碱化、强碱化土壤的新奇台绿洲为研究靶区, 通过实地定位土壤取样和光谱测量, 将碱化土壤的实测光谱反射率与同期的 TM 影像反射率相对照, 分析了实测反射率、影像反射率与 pH 值的关系, 建立了土壤 pH 值预测模型, 为进一步在遥感影像上定量提取可靠的碱化土壤信息提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与土壤样本处理

奇台县位于新疆维吾尔自治区东北部, 天山山脉东段, 博格达山北麓, 准噶尔盆地东南缘。地处北纬 $43^{\circ}25' \sim 45^{\circ}29'$, 东经 $89^{\circ}13' \sim 91^{\circ}22'$, 中部冲积平原区约占全县面积的 15.04%。该地区属温带大陆性干旱半干旱气候, 年平均气温为 5°C 左右, 年均降水 176 mm, 年均蒸发势 2 141 mm。本文以奇台绿洲中部平原区作为研究区域, 范围为 $43^{\circ}56'56'' \sim 44^{\circ}13'24''\text{N}$, $89^{\circ}20'46'' \sim 90^{\circ}3'43''\text{E}$ 。该区域土壤碱化特征在新疆天山北坡、准噶尔盆地南缘区域具有一定代表性。

收稿日期: 2010-01-22, 修订日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771194, 40861020)和北京市属高等学校人才强教计划项目(R200906125)资助

作者简介: 张芳, 女, 1969年生, 新疆大学资源与环境科学学院博士研究生 e-mail: zhangf1103@yahoo.com.cn

* 通讯联系人 e-mail: xhg1956@sohu.com

2008年10月1日—13日采用GPS(global positioning system)定位技术在该区未开垦荒地布点40个,样点尽可能规则,遍及所有荒地类型,且样点周围土壤性质相对成因一致,环境因子类似,异质性较小。每样点采集土壤表层(0~20 cm)土样,采集的土壤样本在实验室内自然晾干,磨碎,过1 mm筛,按水土比5:1配置土壤浸提液,pH值使用数字式酸度计测定。

1.2 野外光谱测量及实测光谱数据的预处理

采用美国ASD(analytical spectral devices)公司开发生产的ASD Fieldspec HH便携式野外光谱仪。该光谱仪的波长范围为325~1 075 nm,分析软件采用ASD View Spec Pro。实测光谱曲线在350~900 nm间较平滑,之后随着波长的增大,噪声增大。350~900 nm已经包括了遥感常用的可见光和近红外波段,这一区间实测光谱数据质量可满足本文分析要求。

野外光谱测量与土壤取样同期同点进行。测量期间天气状况良好,晴朗无云,风力较小,测试时间为10:00~14:00(地方时),与卫星过顶的时间基本相同。光谱仪采用垂直向下测量的方法,与多数传感器采集数据的方向一致。测点所在地地面平坦,能代表周围较大面积的特征,以便于与图像匹配。测量距离15 cm,测量土壤光谱时避开植物影响,每次测定前去除暗电流影响,进行标准白板定标。为保证光谱数据具有代表性,对同一种地物采取5次测量取算术平均值,得到该地物的反射光谱曲线。

采用移动平均法对实测光谱进行去噪处理,即选取测定样本某一点前后光谱曲线上一定范围测定它的平均值作为该点的值,用式(1)表示

$$R'_i = \frac{1}{2k+1}(R_{i+1} + R_{i-k+1} + \dots + R_i + \dots + R_{i+k}) \quad (1)$$

式中: R'_i 为样本第*i*点的反射率值(均值), $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

1.3 遥感影像预处理

选用的遥感影像为对地观测卫星LANDSAT5的TM(thematic mapper)影像。影像获取时间与野外采样时间吻合,为2008年10月3日。LANDSAT轨道是与太阳同步的近极地圆型轨道,高度705 km,每16天覆盖地球一次,实际上通过中纬度地区都在上午9~10时左右,这种近乎一致的光照条件,使相同的地物具有相似的色调和灰度值,便于进行一致的分类、识别和对比。且TM数据具有较高的空间分辨率和多光谱特性,数据的长序列连续性以及优越的性价比,易于获取等特点,对中等尺度地域监测非常适用。

本研究对影像进行了严格的预处理以使影像与数据采集时研究区的辐射与空间属性真值尽可能地接近。利用地面控制点对影像进行几何校正,校正误差小于0.5个像元。然后对影像进行辐射定标并利用6S模型进行大气校正,最终获取近似地表真实反射率图像。

1.4 模型精度检验

本文采用后验差法^[16]对模型进行精度检验,对预报精度级别^[17]做出判定,判定标准见(表1)。

1.5 研究方法

在对实测的土壤光谱反射率同TM影像的反射率进行对应分析的基础上,利用多元线性回归分析分别建立实测反射率及影像反射率对pH值的预测模型;采用后验差方法对模型精度进行讨论,分析误差产生原因;用归一化植被指数NDVI(normalized difference vegetation index)讨论影像光谱中的植被影响。回归分析用SPSS15.0统计软件实现,NDVI通过ENVI4.3遥感软件提取。

Table 1 Criterion judge of precision of prediction models

预测等级	<i>p</i>	<i>c</i>	预测等级	<i>p</i>	<i>c</i>
优	>0.95	<0.35	合格	>0.70	<0.65
良	>0.8	<0.50	不合格	≤0.70	≥0.65

2 结果与分析

2.1 实测光谱反射率与TM影像反射率的关系

对地物的实测光谱进行分析,最终要根据其响应特征同遥感影像相结合,为遥感手段对地物的准确译解提供依据。研究区碱化土壤表面特征主要表现为板结。中度碱化区一般为土壤表面散布着数平方米大小的板结地块,随着碱化强度增加,板结地块面积增大到数十至数万平方米。对40个样本所测得的pH值进行数据特征统计,pH最大值、最小值、均值和变异系数分别为10.58,7.77,9.16和8.413%。按照土壤酸碱分级标准^[18],土壤总体呈强碱性。在pH值最高的样点上,表现为大面积的白板地,几乎没有植被生长,在TM影像上也是反射率最高的部分,可以看做纯粹的裸土象元,因此可利用白板地检验实测波谱与影像波谱的相关程度。考

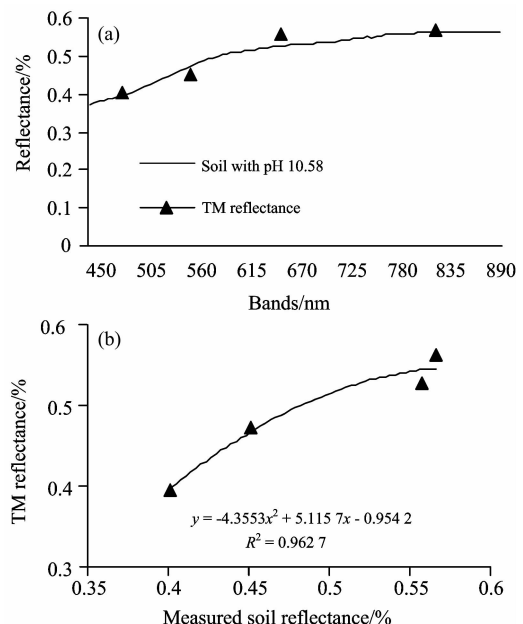


Fig. 1 Relation between measured reflectance and TM reflectance

(a): TM reflectance and measured reflectance of the soil with pH 10.58; (b): Correlation relationship between the two kinds of reflectance

虑到 GPS 定位可能产生的误差,在图像上以 pH 10.58 的光板地样点为中心,按 3 × 3 象元对 TM1~4 波段反射率取平均值同该点实测反射率进行比较[图 1(a)]。实测反射率与影像反射率在 TM1, TM2 和 TM4 非常接近,但是 TM3 波段的实测值则略高于影像值,说明这个波段的实测值和影像值之间存在一定误差。对实测反射率和影像反射率进行回归分析[图 1(b)],决定系数 $R^2 = 0.9627$,相关性很高,可以认为大气校正效果较好,经过大气校正的影像反射率近似于地表真实反射率,因此可以将土壤实测光谱对 pH 值的预测精度同去除大气影响后的影像光谱对 pH 值的预测精度进行对比分析。

2.2 碱化土壤的光谱特征

TM1~4 波段的范围分别为可见光 TM1(450~520 nm), TM2(520~600 nm), TM3(630~690 nm)和近红外 TM4(760~900 nm),因此本文对实测光谱取 450~900 nm 与之进行对应,并按照 TM 的波段范围将实测光谱同样区间内的光谱计算平均值,分别用 band1, band2, band3, band4 表示。

将所有样点的实测光谱反射率和 TM 影像反射率按照 $pH < 8$ (非碱化土)、 $pH 8 \sim 9.5$ (碱化土)和 $pH > 9.5$ (碱土)分成 3 个区间计算平均值,可以看出 pH 值与各反射率之间呈现良好的正相关关系,碱化程度增加,反射率随之增加(图 2)。不同碱化程度土壤的光谱分离度较好,因此可见光/近红外实测光谱与影像光谱均具有良好的监测碱化的能力。同时碱化土壤的实测光谱与影像光谱有明显差异,实测光谱随着波长的增加,反射率基本呈均匀增加[图 2(a)],而影像光谱的 TM2 波段则表现出明显的吸收特征[图 2(b)]。这是因为所有样点的地物光谱主要为两类:土壤和植被。影像光谱同实测光谱的区别在于它是土壤和植物的混合光谱。根据实地考察,10 月初研究区绿色植物主要是芨芨草和苦豆子,其他大部分碱化土壤区域生长的耐盐碱植物已经变成红色。对两类不同颜色植物的光谱进行对比,碱蓬变红后原来在绿波段 500~580 nm 的小反射峰移到了红波段 600~650 nm 处,绿波段成了反射率最低的波段,这可能是造成 TM2 降低的原因(图 3)。从图 2(b)也可以看出, TM2 的下降深度随着 pH 值的降低而增大,这与实地考察情况相符。考察中发现,植物对土壤碱化具有负向的指示特征,植物盖度及种类随着碱化强度的增加而减少。在 $pH > 10$ 的碱土区域,除了碱包上可见零星植物外,板结表面由于结构紧密,通透性差,植物难以生长。在 pH 7.7 的样点,通过样方测量,植被盖度高达 50%以上,由此可见, pH 值越小的样点,光谱反

射率受到植被影响越大。

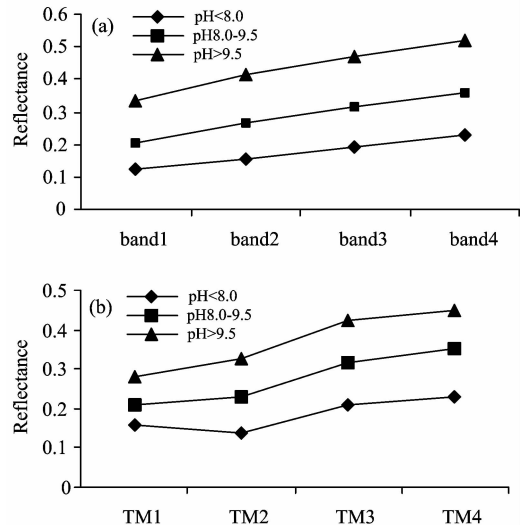


Fig. 2 Spectral response characteristics of alkalinization soil
(a): Spectral response characteristics based on measured reflectance
(b): Spectral response characteristics based on TM reflectance

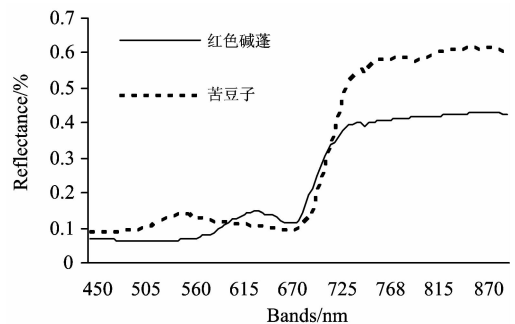


Fig. 3 Spectra of different color plant

2.3 建模与检验

2.3.1 实测光谱预测 pH 值模型的建立

将 40 个样本按照 pH 值分布区间随机分成两组,选取其中 23 个样本,采用多元线性回归分析方法建立实测光谱对 pH 值的预测模型,用最小二乘法进行直线拟合。因变量为实测 pH 值,自变量 X_1, X_2, X_3, X_4 分别为 band1, band2, band3, band4 波段范围内反射率均值, R 为因变量和自变量的相关系数, R^2 为回归方程的判定系数, RMSE 是均方根误差, P 代表方程的显著性水平(表 2)。另外 17 个样本用来讨论预测 pH 值与实测 pH 值相关程度(图 4)。

Table 2 Prediction model based on measured reflectance

方程	r	R^2	RMSE	P
$Y = 6.304 + 20.878X_1 - 33.058X_2 + 18.043X_3 + 4.074X_4$	0.934	0.873	0.106	0

P 为 0, 预测方程达到极显著水平。自变量和因变量的相关系数高达 0.934, 说明实测光谱对土壤碱化程度有良好的预测能力。

17 个验证样本的 pH 预测值与实测值的相关系数下降, R^2 为 0.7567, 经对样点逐一核对, 主要原因是由于土壤表面板结形态的差异造成的。例如 pH 10.32 的样点在大面积

的光板上散布着数十厘米见方的碱包。碱包是由于碱性离子在水解时产生的 CO_2 从板结表面薄弱处逸出形成的,其表面较光板地疏松,反射率低。分析使用的光谱是同一地点包括非板结处的多条光谱曲线的平均值,测点表面板结处与非板结处比例选择不当可能使平均值出现低估或高估现

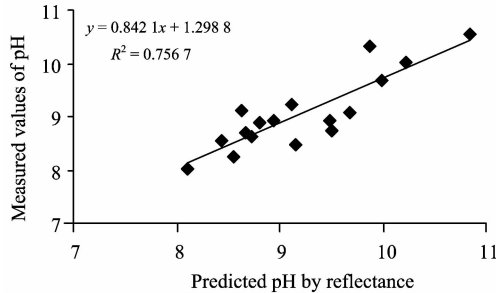


Fig. 4 Correlation relationship between predicted pH and measured pH based on measured reflectance

Table 3 Prediction model based on TM image

方程	r	R^2	RMSE	P
$Y = 5.928 - 8.348\text{TM}_1 + 7.976\text{TM}_2 - 0.224\text{TM}_3 + 8.638\text{TM}_4$	0.888	0.788	0.176	0

Table 4 Prediction model based on TM image when the vegetation factor be removed

方程	r	R^2	RMSE	P
$Y = 6.309 - 7.792X_1 + 6.378X_2 - 0.057X_3 + 8.896X_4$	0.892	0.796	0.169	0

图 5 给出了未考虑植被影响和考虑植被影响两种预测 pH 值与实测 pH 值的相关性检验。未考虑植被因素模型预测结果的 R^2 较低,仅为 0.3116。去除植被影响后,预测结果与实测值的相关性明显提高, R^2 从 0.3116 增加到 0.6008。从图上可以看出,预测值与拟合曲线的偏离明显缩小,用

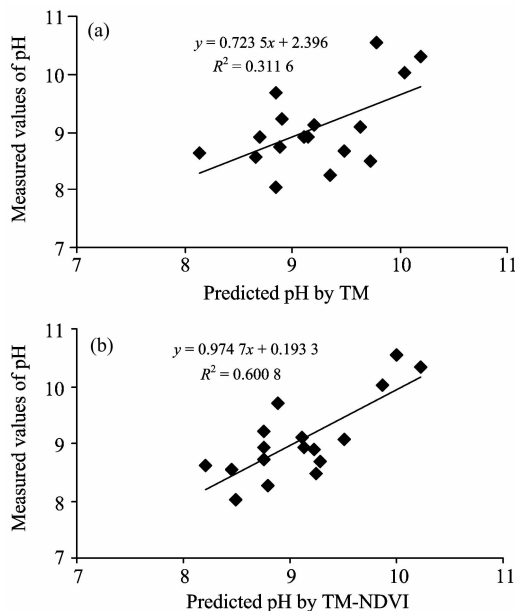


Fig. 5 Correlation relationship between predicted pH and measured pH based on TM image

- (a): Based on TM reflectance;
(b): The vegetation factor be removed

象,若除去该点,则 R^2 上升为 0.783。

2.3.2 TM 影像预测 pH 值模型的建立

将 23 个样点的 TM1~TM4 波段影像反射率与实测 pH 值进行回归分析,建立多元线性预测模型(表 3)。 P 值为 0,预测模型达到了极显著的水平, R^2 为 0.788,明显低于实测光谱预测模型的判定系数, EMSE 明显增加。这是由于影像的反射率是基于像元尺度的,是像元内所有地物光谱特征的综合反映,不是单纯土壤光谱特征,导致误差增大。研究区的主要地物为土壤和植被,因此在消除大气影响后,植物是碱化土壤遥感监测的主要影响因素。

归一化植被指数 NDVI 是近红外波段和红光波段的归一化比值,可以反映植被的生长状况和生物量^[19]。提取 40 个样点的 NDVI 值,范围在 0.002~0.11 之间。将 NDVI 作为一个参量,对 23 个样点 TM 各波段反射率减去其 NDVI 值,再与 pH 值进行拟合,发现判定系数 R^2 提高到 0.796(表 4)。

NDVI 作为参量可以明显减轻遥感影像监测碱化时植被因素的影响,其作用对 $\text{pH} < 9.5$ 的样点尤为明显。

2.3.3 实测反射率与影像反射率模型精度的对比分析

采用后验差法分别对基于实测反射率、影像反射率、消除植被影响的影像反射率对 pH 值的预测模型的精度进行检验并对预报精度级别做出判定(表 5)。实测光谱的 pH 预测模型精度级别和去除植被影响的 TM 影像预测模型的精度级别均为良,按照 $P > 0.95$ 且 $C < 0.35$ 为优的标准,二者的模型预报等级接近于优。直接用 TM 影像进行预测时,模型等级达到合格等级,但是后验差比值明显加大,说明拟合残差序列的均方差增大,拟合效果降低。

通过以上分析可知, TM 影像在有效消除植被影响后,其对 pH 值的预测能力与实测光谱接近,具有良好的监测区域土壤碱化的潜力和应用前景。

Table 5 Precision validation of three prediction models

	实测反射率	TM 影像	TM-NDVI
后验差比值 C	0.3498	0.5460	0.3530
小误差频率 P	0.9412	0.8824	0.9412
模型拟合效果	良	合格	良

3 结论与讨论

研究区土壤 pH 值与实测反射率及影像反射率均呈极显著的正相关关系。碱化程度增加,反射率随之增加。碱化土

壤对光谱具有良好的响应特性,实测光谱与遥感手段均可以作为监测土壤碱化的有效手段。

利用实测光谱预测 pH 值,模型精度等级可达到良以上,误差主要来自样点土壤表面板结地块的分布情况。

在对遥感影像进行了严格的大气校正、采样与影像的获取时间吻合较好、采样前数日及采样期间基本未受雨水影响、实测光谱数据采集的条件较为一致且与影像反射率相关性较高的情况下,影响遥感影像预测精度的主要因素为植被。直接利用 TM 影像所建的回归模型对 pH 值进行预测,模型等级为合格,但是误差明显。利用 NDVI 作为参量来消

除植被影响后,模型的预测精度明显提高,误差减小,模型等级为良,与实测光谱的预测精度接近。

采样季节也是土壤碱化监测时应考虑的一个重要问题,四月份积雪刚消融完,土壤湿度大,水解反应使得土壤表面碱度变化大,不稳定。十月份较干旱,板结现象突出,易于监测。但是耐盐碱植物大部分发红或发黄,植被种类不同,变化程度也不一致,可能会部分地影响植被信息的提取精度。可以考虑在六月前后生物量最大时再次采样,分析不同季节碱化土壤的监测效果和影响因素,以确定最佳监测方案。

References

- [1] WANG Zun-qin(王遵亲). Soil Salinization in China(中国盐渍土). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1993.
- [2] Amezketa E. Journal of Arid Environments, 2006, 67: 594.
- [3] XI Jin-biao, ZHANG Fu-suo, TIAN Chang-yan, et al(郗金标, 张福锁, 田长彦, 等). Salt Plant in Xinjiang(新疆盐生植物). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2006.
- [4] GUAN Yuan-xiu, LIU Gao-huan, LIU Qing-sheng, et al(关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2001, 5(1): 46.
- [5] García P Rodríguez, Ma E Pérez González, Guerra A Zaballos. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12): 2713.
- [6] Haubrock S N, Chabrilat S, Lemmertz C, et al. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(1): 3.
- [7] WU Jia-min, YAO Jian-hua, ZHANG Yong-ting, et al(吴加敏, 姚建华, 张永庭, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007, 11(3): 414.
- [8] HUANG Ming-xiang, CHENG Jie-liang, WANG Ke, et al(黄明祥, 程街亮, 王珂, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2009, 46(5): 932.
- [9] HUANG Ming-xiang, SHI Zhou, LI Yan, et al(黄明祥, 史舟, 李艳, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(4): 378.
- [10] Farifteh J, Van der F Meer, Van der M Meijde, et al. Geoderma, 2008, 145: 196.
- [11] Ignacio Melendez-Pastor, Jose Navarro-Pedreno, Ignacio Gómez, et al. Geoderma, 2008, 147(3): 126.
- [12] Daniel Kassahun, Nitin K Tripathi, Kiyoshi Honda. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(19): 4213.
- [13] Houssa R, Pion J C, Yesou H. Photogrammetry & Remote Sensing, 1996, 51: 284.
- [14] FU Qing-hua, NI Shao-xiang, WANG Shi-xin, et al(扶卿华, 倪绍祥, 王世新, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2007, 23(1): 48.
- [15] LI Shu-gang, WANG Zhou-qiong(李述刚, 王周琼). Desert Alkaline Soil(荒漠碱土). Urumqi: Xinjiang People Press(乌鲁木齐: 新疆人民出版社), 1988.
- [16] CHEN Nan-xiang(陈南祥). Geotechnical Investigation & Surveying(工程勘察), 1999, (3): 35.
- [17] YANG Zhong-ping, LU Wen-xi, LI Ping(杨忠平, 卢文喜, 李平). Journal of Hydraulic Engineering(水利学报), 2005, 36(12): 1475.
- [18] Agricultural Bureau of Uygur Autonomous Region of Xinjiang, Soil Survey Office of Uygur Autonomous Region of Xinjiang(新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室). Soil in Xinjiang(新疆土壤). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1996.
- [19] LIANG Shun-lin(梁顺林). Quantitative Remote Sensing(定量遥感). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2009.

Contrastive Analysis on Soil Alkalinization Predicting Models Based on Measured Reflectance and TM Image Reflectance

ZHANG Fang^{1, 3}, XIONG Hei-gang^{2, 3*}, LONG Tao^{1, 3}, LU Wen-juan^{1, 3}

1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2. Urban Department of College of Art & Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Oasis Ecology(Xinjiang University)Ministry of Education, Urumqi 830046, China

Abstract Based on the monitored data of soil pH and measured Vis-NIR reflectance on spot in Qitai oasis alkalinized area in Xinjiang, as well as comparison of the relationship between measured reflectance and soil pH and the relationship between TM reflectance and soil pH, both of the reflectance multivariate linear regression models were built to evaluate soil alkalinization level, and the model accuracy of pH fitting was discussed with error inspection of post-sample. The results showed that there is a significant positive correlation between soil pH and reflectance. With pH rising the reflectance increased concurrently. So the alkalinization soil characterized by hardening had good spectral response characteristics. Both measured reflectance and TM image reflectance had good potential ability for change detection of the alkalinization soil. The pH predicting model of measured reflectance had higher accuracy and the major error was from different hardening state. If building model by TM reflectance directly, the accuracy of fitting was lower because of the vegetation information in image spectrum. With the vegetation factor removed with NDVI, the accuracy of TM predicting model was near the accuracy of measured reflectance predicting model, and both of the model levels were good.

Keywords Soil alkalinization; Measured reflectance; TM image reflectance; Spectral response characteristic

(Received Jan. 22, 2010; accepted Apr. 26, 2010)

* Corresponding author