

文章编号:1001-9014(2011)01-0055-06

土壤碱化的实测光谱响应特征

张芳^{1,3}, 熊黑钢^{2,3*}, 栾福明^{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:通过实地定点土壤取样和光谱测量,研究了实测光谱反射率与土壤PH值之间的关系.分别采用反射率 Reflectance、一阶导数 FDR、倒数之对数 $\log(1/R)$ 和波段深度 BD 四种光谱指标建立对 PH 值的多元线性回归预测模型,并且利用验证样本集对回归模型进行了检验.结果表明:野外实测反射光谱与 PH 值呈良好的正相关关系,建模精度最高, R^2 可达 0.873, 具有快速、高精度估算土壤碱化程度的潜力,既符合野外实际环境,也利于今后同遥感影像进行对应分析.光谱倒数之对数 ($\lg(1/R)$) 的建模精度略低于实测反射率建模精度,因此对实测光谱进行倒数之对数计算对于提高估算精度作用不大.而光谱微分法(FDR)和波段深度(BD)的模型判定系数分别为 0.728 和 0.648, 预测效果不理想.

关键词:实测反射率;土壤碱化;奇台绿洲
中图分类号:X87/TP79 **文献标识码:**A

Characteristics of field-measured spectral response to alkalinization soil

ZHANG Fang^{1,3}, XIONG Hei-Gang^{2,3*}, LUAN Fu-Ming^{1,3}, LU Wen-Juan^{1,3}

(1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. 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 given spots, the relationship between measured reflectance and soil PH was analyzed. Besides original field-measured spectrum (R), several spectral indices were also calculated: first derivative reflectance spectrum (FDR), inverse-log spectrum ($\lg(1/R)$) and band depth (BD). Multivariate linear regression models were built to evaluate soil alkalinization level based on these four spectral indices and the model accuracy of PH fitting was discussed with validated sample group. The results showed that there is a significant positive correlation between soil PH and original reflectance. The accuracy of the model based on original spectrum (R) is the best with a value of R^2 as high as 0.873. Thus original spectrum (R) had potential ability of rapid and exact estimation of changes in the alkalinization soil. The model can help to further the analysis of the ability of detecting alkalinization with image reflectance because of the original spectrum (R) measured directly from field. The accuracy of inverse-log spectrum predicting model was slightly lower than the accuracy of original reflectance predicting model, so inverse-log spectrum calculating was of less help to improve the predicting efficiency. The R^2 of first derivative reflectance spectrum (FDR) and band depth (BD) were 0.728 and 0.648, which were not ideal for the prediction of alkalinization.

Key words: field reflectance; soil alkalinization; Qitai oasis
PACS: 78.40

引言

碱化造成土壤板结,通透性差,植物难以生长,是新疆北疆地区土地退化的主要原因之一^[1].

遥感技术可以实现对土壤属性实时、大范围、非接触的监测,而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

收稿日期:2010-01-20,修回日期:2010-05-24

Received date: 2010-01-20, revised date: 2010-05-24

基金项目:国家自然科学基金(40771194);北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR200906125);国家自然科学基金(40861020)

作者简介:张芳(1969-),女,山东嘉祥人,博士研究生,主要研究方向为遥感应用及干旱区环境研究, E-mail: zhangf602@sohu.com.

* 通讯作者: E-mail: xhg1956@sohu.com.

性是土壤理化特征和内在结构的光谱行为的综合,对其进行研究可为土壤遥感提供了物理依据^[2].

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^[3~6]. PH 值虽然不是物质成分,但它是反映土壤碱性程度的重要指标,直观且容易测试.土壤碱化强度不同,表现出的物理化学特征不同,因此引起光谱响应特征也不同. Northcote K. H. 曾提出 PH < 8.0 为非碱化土, PH = 8.0 ~ 9.5 为碱化土, PH > 9.5 为碱土^[7]. 本文以分布有大面积碱化、强碱化土壤的新疆奇台绿洲为研究靶区,通过实地定位土壤取样和光谱测量,分析了碱化土壤的光谱响应特性,建立了不同光谱指标的土壤 PH 值预测模型,以为进一步进行碱化土壤的遥感监测提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

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°25' ~ 45°29', 东经 89°13' ~ 91°22', 属温带大陆性干旱半干旱气候,年平均气温为 5℃ 左右,年均降水 176 mm, 年均蒸发势 2141mm. 本文以奇台绿洲中部冲积平原区作为研究区域,范围为 43°56'56" ~ 44°13'24" N, 89°20'46" ~ 90°3'43" E. 其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的代表性.

1.2 土壤样本处理

2008 年 10 月 1 ~ 13 日采用 GPS 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. 每样点用四分法采集土壤表层(0 ~ 20cm)土样,取部分土样封入铝盒,采用烘干法测定土壤水分. 其余的土壤样本在实验室内自然晾干,磨碎,过 1mm 筛,按水土比 5: 1 配置土壤浸提液,分析项目包括:pH、八大离子. pH 值使用数字式酸度计测定, K⁺、Na⁺ 采用原子吸收分光光度法测定, HCO₃⁻、CO₃²⁺ 采用双指示剂-中和滴定法测定, Cl⁻ 采用硝酸银滴定法测定, Ca²⁺ Mg²⁺、SO₄²⁻ 采用 EDTA 滴定法测定.

1.3 野外光谱测量及实测光谱预处理

采用美国 ASD 公司生产的 ASD Fieldspec HH

便携式野外光谱仪. 该光谱仪的波谱范围为 325 ~ 1075nm, 分析软件采用 ASD View Spec Pro. 实测光谱曲线在 350 ~ 900nm 间较平滑,之后随着波长的增大,噪声增大. 350 ~ 900nm 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. 测试时间为 10:00 ~ 14:00(地方时),与卫星过顶的时间基本相同. 测量期间天气状况良好,晴朗无云,风力较小,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. 测点所处的地方地面平坦,能代表周围较大面积的特征,以便于与图像匹配. 测量距离 15cm,测量土壤光谱时避开植物影响,每次测定前严格按照操作规范,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. 公式:

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

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

1.4 光谱指标提取

除了实测光谱外,还提取了以下 3 种常用的光谱指标^[8]:

$$\text{光谱倒数之对数} = \lg(1/R) \quad (2)$$

反射率一阶微分(FDR):

$$\text{FDR}(\lambda) = [R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_i)] / (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (3)$$

波段深度(BD)

$$\text{BD}(\lambda) = 1 - R(\lambda) / R_c(\lambda) \quad (4)$$

式中: R 为实测反射率, λ 为波段, $R_c(\lambda)$ 为光谱反射率的包络线, $R(\lambda) / R_c(\lambda)$ 即土壤去包络光谱,其值归一化到 0 ~ 1 的范围.

1.5 研究方法

在对碱化土壤光谱响应特征进行分析的基础上,分别建立实测反射率、光谱微分法(FDR)、光谱倒数之对数($\lg(1/R)$)及波段深度(BD)4 种光谱指标预测 PH 值的多元线性回归模型,对模型预测结果进行相关性检验. 回归分析采用 SPSS 15.0 统计软件实现.

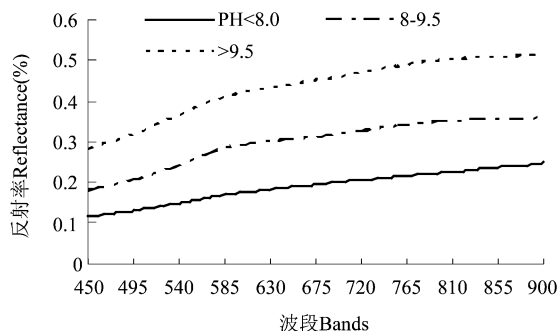


图1 碱化程度与光谱反射率之间的关系
Fig.1 The relation between soil PH and spectrum reflectance

2 结果与分析

2.1 碱化土壤的光谱响应

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^[9],土壤总体呈强碱性。PH变异系数小于10%,属于弱变异性。将所有样点的实测光谱反射率按照PH < 8.0(非碱化土),PH = 8.0 ~ 9.5(碱化土),PH > 9.5(碱土)分成3个区间计算平均值。PH值与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1)。不同碱化强度之间的光谱分离度较好,因此,研究区的碱化土壤对可见光/近红外光谱具有良好的光谱响应特征。

2.2 土壤碱化程度、化学性质及土壤水分与不同波段光谱间的关系

(1) 波段划分。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解译提供依据。TM具有较高的空间分辨率,多光谱特性,价格较低,易于获取等特点,对中等区域的环境监测具有优势。为了今后进一步用遥感影像监测土壤碱化,并反演碱化土壤的演变规律,根据TM影像的波段设置,对实测光谱波段进行区间划分。TM1~4波段的范围分别为可见光TM1(450~520nm)、TM2(520~600nm)、TM3(630~690nm)、近红外TM4(760~900nm),因此按照TM的波段范围将实测光谱同样区间内的光谱值计

表1 不同波段实测光谱与土壤化学性质、含水率的相关性

Table 1 Matrix of the correlation coefficients among different spectral bands and soil-chemical parameters and soil moisture

	PH	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	含水率 moisture
band1	0.917 **	0.676 **	0.774 **	0.233	-0.356 *	-0.563 **	-0.444 **	-0.025	0.334 *	0.403 **
band2	0.915 **	0.681 **	0.764 **	0.213	-0.373 *	-0.557 **	-0.482 **	-0.028	0.306	0.354 *
band3	0.902 **	0.679 **	0.757 **	0.194	-0.378 *	-0.535 **	-0.480 **	-0.029	0.278	0.323 *
band4	0.886 **	0.729 **	0.768 **	0.200	-0.411 **	-0.525 **	-0.461 **	-0.052	0.246	0.314 *

*表示显著性水平为0.05,**表示显著性水平为0.01。

算平均值,分别用band1、band2、band3、band4表示。

(2) 相关性分析。土壤组成、土壤水分、土壤理化特性等都是影响土壤光谱的重要因素。对40个土壤样本的PH值、含水率、八大离子同band1~4进行相关性分析(表1)。四个波段与PH值相关系数最高,均在0.01水平上呈极显著的正相关,其次是与碱性离子CO₃²⁻、HCO₃⁻亦呈极显著正相关。说明土壤碱度是由CO₃²⁻、HCO₃⁻决定的。Mg²⁺、Ca²⁺与四个波段之间的关系表现一致,均为极显著负相关,这是因为Ca²⁺、Mg²⁺可以置换土壤胶体上的代换性Na⁺,使得碱度降低。土壤含水率与反射率呈现一定的相关性,但显著程度远不如PH值。band1与土壤含水率在0.01水平上显著相关,相关系数较低。其他三个波段与土壤含水率仅在0.05水平上相关,相关系数也较低。通常情况下,含水率越高,反射率越低,表1中含水率与反射率表现出一定的正相关关系可能是由于以下原因造成的:①研究区土壤含水率均值为5.3%,为0~20cm深度的含水率。由于地处西北干旱区,加之10月初为旱季,采样前数日及采样期间基本未受雨水影响,测量光谱的土壤表面湿度要低于0~20cm剖面湿度,低含水率对光谱影响不大。②从野外实际观察来看,随着碱化强度的增加,土壤表面从疏松向板结变化,严重板结处形成2~3cm的硬壳,结构紧密,通透性差,使得结壳下方水分不易散失,起到了一定的保水作用。

采用回归分析建立各个波段范围与土壤PH值之间的定量关系(表2),土壤PH值与反射率呈良好的线性关系,各个波段反射率对土壤碱化程度均有良好的探测能力。

表2 不同波段实测光谱反射率的PH预测模型

Table 2 The prediction model based on different spectral bands

Y	实测反射率(x) Measured reflectance	预测模型 predicting models	R ²	RMSE	P
预测 PH Measured PH	band1	Y = 9.415x + 6.903	0.840	0.12	0
	band2	Y = 8.33x + 6.618	0.833	0.114	0
	band3	Y = 7.766x + 6.474	0.813	0.111	0
	band4	Y = 7.261x + 6.264	0.784	0.112	0

注:R²为回归方程的判定系数,RMSE为均方根误差,P代表方程的显著性水平。

2.3 土表板结对光谱的影响

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. 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. 光谱对土壤碱化程度的良好响应特性正是基于板结对光谱的影响. 以 PH = 10.11 号样点为例,板结处比未板结处光谱反射率增加明显(图 2),但从曲线形态上来看变化不大,基本平行,很像是整条反射率曲线的线性上移(图 2a). 包络线消除法可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将反射率归一化到 0 ~ 1 之间,光谱的吸收特征也归一化到一致的光谱背景上,有利于光谱曲线之间进行特征数值的比较^[10]. 对两种土壤表面的光谱曲线进行去包络线处理,可以看出它们在 450 ~ 580nm、600 ~ 740nm 有两个明显的吸收谷,但土壤板结处的吸收面积较未板结处明显缩小,吸收波段宽度变窄为 450 ~ 520nm、600 ~ 700nm,吸收谷的中心值向短波方向移动(图 2b). 这说明板结使土壤表面平坦光滑,吸收减少,反射能量增强. 因此,板结斑块占土壤面积的比例、板结强度均直接影响光谱反射率的大小.

另外,板结除了使得地表平滑外,板结对土表的颜色也产生明显的影响. 将土壤表层土样同中国标准色卡进行比对^[11],研究区的土壤色调以 10YR 为主,明度从 4 至 8,彩度从 2 至 4. 经观察,板结主要影响土壤表面颜色明度. 明度指土壤颜色的相对明亮度,把绝对黑作为 0,绝对白作为 10,由 0 到 10 逐渐变得明亮. PH < 8.5 时样点在不同明度的分布比例同 PH 8.5 ~ 9.5 区间内的分布情况接近,以明度为 6 的样点为多,明度为 7 的样点约为 17%,没有明度为 8 的样点(表 3). 在 PH 值 > 9.5 的样点中,超过 80% 样点的明度均在 7 以上,没有明度低于 6 的样点,整体样本表现出 PH 值增加,明度增加的趋势. 土壤明度与反射率的关系可用公式(5)^[12]表示, R 为反射率, ρ_0 为系数, θ_i 和 θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角. k 为取值在 0-1 的表示物体表面亮度的无量纲变量. 土壤明度越高,反射率越高,因此强碱化使土表面明度增加也是反射率增加的原因之一.

$$R(\theta_i, \theta_v) = \frac{\rho_0}{(\cos\theta_i \cos\theta_v)^{1-k}}, \quad (5)$$

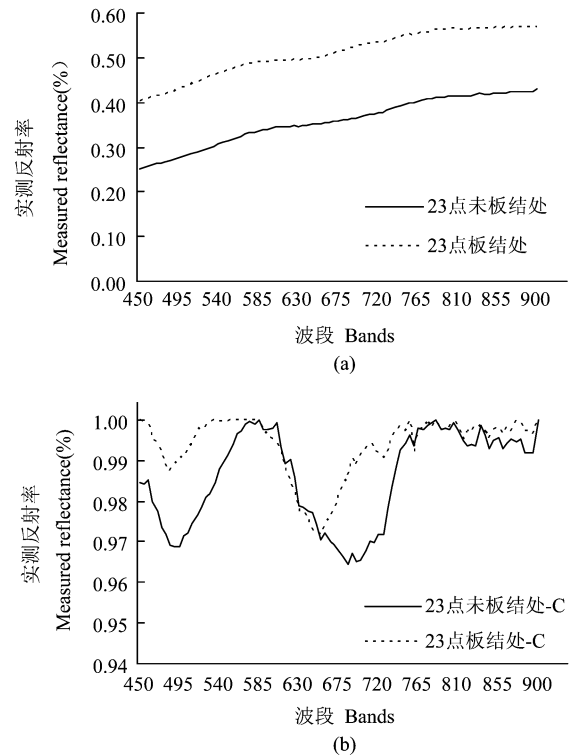


图 2 板结对光谱特征的影响

Fig. 2 Influence of soil hardening state on spectral response characteristics

(a) - - - - : harden soil at site 23; — non-harden soil at site 23

(b) - - - - : continuum removal of harden soil at site 23; — continuum removal of non-harden soil at site 23

表 3 采样点土壤颜色明度分布

Table 3 The distribution of lightness of soil samples

明度 lightness	PH < 8.5	PH = 8.5 ~ 9.5	PH > 9.5
4	0	4.3%	0
5	33%	17.4%	0
6	50%	60.9%	18.2%
7	17%	17.4%	63.65%
8	0	0	18.2%

2.4 预测模型的建立与检验

按照 PH 值分布区间随机将样本分成两组,选取其中 23 个样本,采用多元回归分析方法建立实测光谱、光谱微分法(FDR)、光谱倒数之对数($\lg(1/R)$)和波段深度(BD)对应 TM 工作波段范围的 PH 值预测模型(表 4). 另外 17 个样本用来检验预测 PH 值与实测 PH 值相关程度(图 3). 从 P 值看,所有光谱指标建立的回归模型都达到了显著性水平. 实测反射率的建模精度最高,判定系数为 0.873,其次是光谱倒数之对数 $\lg(1/R)$,与实测光谱预测模型的判定系数较接近,为 0.850. 光谱微分法(FDR)建模精度有所降低, R^2 为 0.728,预测效果不如实测

表 4 基于不同光谱指标的 PH 值预测模型

Table 4 The prediction model based on different spectral indices

光谱指标 spectral indices	预测模型 predicting model	R	R ²	RMSE	P	备注 remarks
实测光谱 Measured reflectance	$Y = 6.304 + 20.878X_1 - 33.058X_2 + 18.043X_3 + 4.074X_4$	0.934	0.873	0.106	0	Y: 实测 PH 值, 自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为 (450 ~ 520nm)、(520 ~ 600nm)、(630 ~ 690nm)、(760 ~ 900nm) 各光谱指标均值
FDR	$Y = 7.483 + 4952.05X_1 - 1960.997X_2 + 1270.957X_3 - 3230.739X_4$	0.853	0.728	0.226	0	
lg(1/R)	$Y = 12.54 - 11.695X_1 + 29.071X_2 - 23.326X_3 - 0.875X_4$	0.922	0.850	0.125	0	
BD	$Y = 10.207 - 9.018X_1 - 4.307X_2 - 35.274X_3 + 8.05X_4$	0.805	0.648	0.292	0.001	

注: R 为因变量和自变量的相关系数, R²、RMSE、P 含义同表 2 注解。

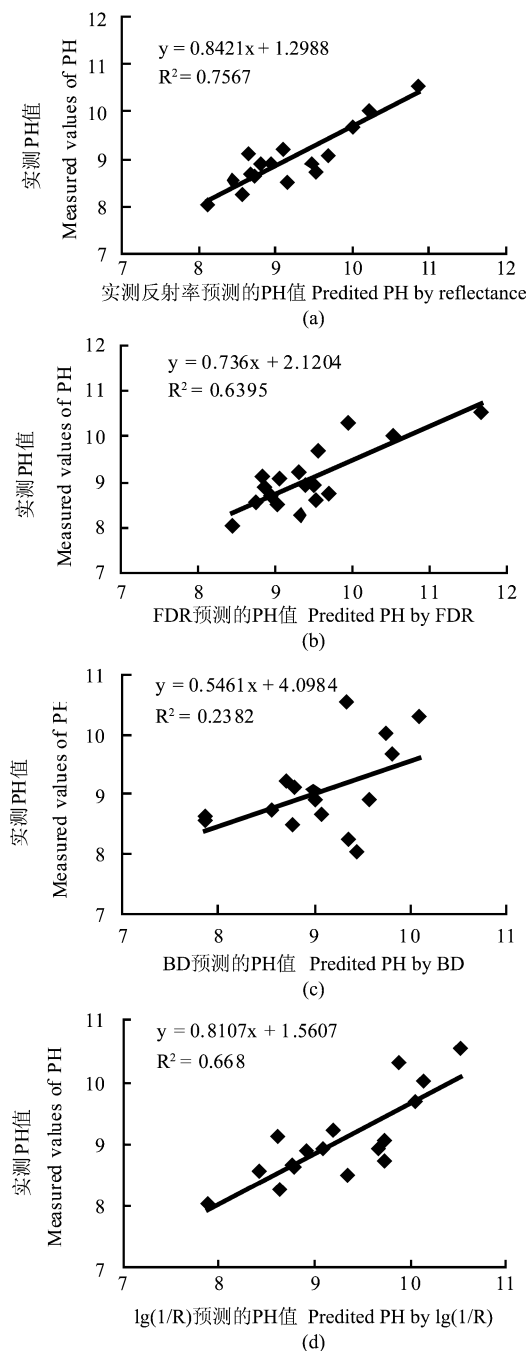


图 3 模型预测 PH 值与实测 PH 值的相关性检验

Fig.3 The test of correlation between predicted PH and measured PH

反射率与光谱倒数之对数 lg(1/R) 理想. 波段深度 (BD) 的建模精度最低.

预测 PH 值与实测 PH 的相关性检验情况与此相似, 实测光谱检验的 R² 最高, 其次为光谱倒数之对数 lg(1/R) (图 3), 说明直接使用实测测量值就可以达到满意的预测效果, 这对今后的遥感监测研究十分有利. 而对原始光谱进行倒数之对数计算对于提高估算精度作用不大. 波段深度 (BD) 的检验精度最低, R² 仅有 0.2382, 可见该指标对碱化土壤不敏感, 不具备预测能力.

3 结论与讨论

(1) 碱化土壤对光谱具有良好的响应特性. 研究区土壤 PH 值与反射率呈极显著的正相关关系. 碱化程度增加, 板结强度加大, 土壤表面变得光滑, 颜色明度提高, 反射率随之增加.

(2) 四种光谱指标中, 利用实测原始光谱反射率预测 PH 值精度最高, 这对监测十分有利. 因为直接采用野外实测光谱最为简单直接, 不用进行各种光谱变换, 既可以减少累积误差, 也符合野外实际环境, 更利于今后同遥感影像进行对应分析, 因此实测光谱可以作为监测土壤碱化的有效手段. 光谱倒数之对数 lg(1/R) 的模型预测效果略低于实测光谱模型, 因此对原始光谱进行倒数之对数计算对于提高估算精度作用不大. 波段深度 (BD) 对土壤碱化不敏感, 基本不具有监测能力. 光谱微分法 (FDR) 建模精度不如实测光谱理想.

(3) 土壤含水率与反射率呈现一定的相关性. 但由于研究区地处干旱区, 采样期又为旱季, 土壤表面干燥, 土壤含水率对实测光谱的影响不如反映碱化强度的土壤板结特征显著. 地表的板结状况是影响实测光谱对 PH 值预测精度的主要因素.

REFERENCES

[1] Ke F D B A. Fundamental of Soil Science [M]. Beijing:

- Science Press (B. A. 柯夫达. 土壤科学原理. 北京: 科学出版社), 1983.
- [2] ZHANG Fei, DING Jian-Li, Tashpolat · Tiyp, *et al.* Spectral Data Analysis of Salinity Soils with Ground Objects in the Delta Oasis of Weigan and Kuqa Rivers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张飞, 丁建丽, 塔西甫拉提 · 特依拜, 等. 渭干河—库车河三角洲绿洲盐渍化地物光谱数据分析. 光谱学与光谱分析), 2008, **28** (12): 2921—2926.
- [3] SONG Tao, BAO Yi-Dan, HE Yong. Research on the Method for Rapid Detection of Soil Moisture Content Using Spectral Data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (宋韬, 鲍一丹, 何勇. 利用光谱数据快速检测土壤含水量的方法研究. 光谱学与光谱分析), 2009, **29** (3): 675—677.
- [4] J. Farifteh, F. van der Meer, M. van der Meijde, *et al.* Spectral characteristics of salt-affected soils: A laboratory experiment. *Geoderma*. 2008, **145**: 196—206.
- [5] Ignacio Melendez-Pastor, Jose Navarro-Pedreño, Ignacio Gomez, *et al.* Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. *Geoderma*. 2008, **145**: 1—7.
- [6] ZHU Deng-Sheng, WU Di, SONG Hai-Yan, *et al.* Determination of organic matter contents and pH values of soil using near infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the CSAE* (朱登胜, 吴迪, 宋海燕, 等. 应用近红外光谱法测定土壤的有机质和 pH 值. 农业工程学报), 2008, **24** (6): 196—199.
- [7] LI Shu-Gang, WANG Zhou-Qiong. Desert Alkaline Soil [M] (李述刚, 王周琼. 荒漠碱土. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社), 1988.
- [8] WANG Lu, LIN Qi-Zhong, Jia Dong, *et al.* Study on the Prediction of Soil Heavy Metal Elements Content Based on Reflectance Spectral [J]. *Journal of Remote Sensing*, (王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究. 遥感学报), 2007, **11** (6): 906—913.
- [9] Agricultural Bureau of Uygur Autonomous Region of Xinjiang, Soil Survey Office of Uygur Autonomous Region of Xinjiang. Soil in Xinjiang. Beijing: Science Press (新疆农业厅, 新疆土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京: 科学出版社), 1996.
- [10] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, WANG Zong-Ming, *et al.* Soil Saline-alkalization Evaluation Basing on Spectral Reflectance Characteristics [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价. 红外与毫米波学报), 2008, **27** (2): 138—142.
- [11] Institute of Soil Science, CAS, Nanjing. Soil standard color System of China [M]. Nanjing: Nanjing Press (中国科学院南京土壤研究所. 中国标准土壤色卡, 南京: 南京出版社), 1989.
- [12] LIANG Shun-Lin. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces [M]. Beijing: Science Press (梁顺林. 定量遥感. 北京: 科学出版社), 2009, 20.

(上接 20 页)

探测器 MTF 和亚像元探测仪器的探测器 MTF, 解释了实际应用的亚像元探测仪器为何选择 50% 像素位移, 指导亚像元探测仪器的设计和效果分析。

对于不可避免的图像噪声, 通过仿真实验验证了超分辨率图像重建会引起严重的噪声放大, 使图像信噪比降低, 质量恶化. 结合图像处理方法, 采用维纳滤波器对高斯噪声进行滤波, 发现维纳滤波器对放大后的高斯噪声可以有效滤除; 散粒噪声在放大过程中会产生“波纹”形状的噪声, 因此传统的中值滤波不能有效地滤除, 针对这一问题, 本文提出了基于图像序列的中值滤波. 基于图像序列的中值滤波利用了图像序列包含的冗余信息, 首先对图像序列上各像素点是否被噪声污染进行了判断, 然后通过非

线性的“截断”操作对受到噪声污染的点进行强行滤除, 该方法比传统的中值滤波更有效地滤除“波纹”形状的噪声, 也不会带来图像的平滑, 达到了很好的滤波效果。

本文对超分辨率图像重建引起的噪声放大予以

研究, 并且针对放大后的散粒噪声设计出了有效的滤波方法, 对实际的超分辨率图像重建应具有指导意义。

REFERENCES

- [1] CHEN Bo-yang, CHEN Gui-lin, SUN Sheng-li. Application of sub-pixel technology for image collection system [J]. *Infrared Technology* (陈博洋, 陈桂林, 孙胜利. 亚像元技术在图像采集系统中的应用. 红外技术), 2007, **29** (4): 226—230.
- [2] GUO Qiang, XU Jian-min, CHEN Gui-lin. Study on improving image spatial resolution of optical instruments with linear sensors in three-axis body-stabilized platform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭强, 许健民, 陈桂林. 三轴稳定平台下提高线列探测器光学遥感仪图像空间分辨率的方法研究. 红外与毫米波学报), 2005, **24** (01): 39—44.
- [3] CHEN Bo-yang, Study on improving the apparatus resolution of the apparatus on geosynchronous meteorological satellite for visible light [D]. *Doctoral Thesis of Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy Sciences* (陈博洋. 提高静止轨道气象卫星可见光对地观测的研究. 上海技术物理研究所博士学位论文), 2008, **5**: 69—73.