

典型龟裂碱土光谱特征分析及碱化程度预测

贾科利¹,张俊华²,秦君琴³

(1.宁夏大学资源环境学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学新技术应用研究开发中心,宁夏 银川 750021;
3.宁夏大学物理与电气学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:以宁夏银北地区典型龟裂碱土为研究对象,表层土壤光谱反射率选择平滑、倒数等 7 种数据处理方式,采用全回归、逐步回归和偏最小二乘三种回归方法,分析龟裂碱土光谱特征,筛选对土壤 pH 值和 ESP 的敏感波段,建立龟裂碱土碱化信息的预测模型。结果表明:龟裂碱土的光谱反射曲线属于缓斜型;土壤表层反射率与土壤 pH 值和 ESP 在研究波段内均呈极显著正相关关系;反射率倒数对数的一阶微分和反射率的一阶微分在特征波段范围表现较好;反射率与土壤 pH 值的相关性优于与土壤 ESP 的相关性。从拟合度和选用敏感波段的多少整体考虑,采用偏最小二乘回归来拟合土壤 pH 值和 ESP 的方程最佳,拟合度分别达到 0.93 和 0.8367。

关键词: 龟裂碱土;光谱特征;碱化信息

中图分类号: S153;S127 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0187-06

Spectral characteristics of Takyr Solonetz and prediction of alkalization information

JIA Ke-li¹, ZHANG Jun-hua², QIN Jun-qin³

(1. College of Resource and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. Applied Research and Development Center for New Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
3. School of Physics & Electrical Information Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: By using the typical Takyr Solonetz in northern Yinchuan as research object, seven methods were selected to process the reflectance data of surface soil, and total regression, stepwise regression and partial least squares regression were adopted to analyze the spectral characteristics of Takyr Solonetz, with the purpose of determining the sensitive wavelengths to pH and ESP of surface soil and establishing the prediction model of alkalization information. The results show that: the reflectance curve of Takyr Solonetz belonged to slow-oblique type; there were significant positive correlations between the reflectance and pH as well as ESP of surface soil; the methods of reciprocal, first-order differential of reciprocal logarithmic and first-order differential of reflectance were relatively good in the characteristic wavelength range; and the relativity between reflectance to pH was higher than that to ESP. Considering both the fitting degree and the quantity of sensitive wavelengths, partial least squares regression was the best method to estimate pH and ESP of surface soil, whose fitting degree were 0.93 and 0.8367 respectively.

Keywords: Takyr Solonetz; characteristic reflectance; alkalization information

土壤盐碱化是干旱、半干旱农业区主要的土地退化问题,获取有关盐碱化土壤的性状、范围、面积、地理分布及盐碱化程度等方面的信息,对治理盐碱化土壤,防止其进一步退化和农业可持续发展至关重要。而遥感以其宏观、综合、动态、快速等特点,已成为监测土壤盐碱化的一种重要探测手段。

多年来,盐渍土光谱特征研究国内外学者取得了较大的进展。Dehaan 等^[1]发现高度盐碱化的土壤在 0.68 μm 、1.18 μm 及 1.78 μm 处相对于未发生盐碱化的土壤有更清晰的吸收特征。Csillag 等^[2]研究了表层土壤的高光谱数据与土壤中 pH 值、电导率(EC)和可交换钠含量(ESC)的回归模型,指出土壤

收稿日期:2012-11-09
基金项目:国家自然科学基金(41001129);宁夏区自然科学基金(NZ12142)
作者简介:贾科利(1975—),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事 3S 应用与土地利用方面的教学与研究。E-mail: jiakeli@163.com。
通讯作者:张俊华(1977—),女,宁夏中卫人,博士,副研究员,主要研究土壤质量和废弃物资源化利用。E-mail: zhangjunhua728@163.com。

光谱在可见光波段、近红外波段以及中红外波段的反射率对于定量分析盐碱化有较好的指示作用。Yousef^[3]研究发现土壤多种光谱指数随着土壤盐碱化程度的增加而降低。扶卿华等^[4]研究表明波长 451.42 ~ 593.79 nm 区域的土壤反射率对土壤盐分含量较为敏感,即该波段范围较适用于研究区土壤盐分含量的反演。光谱特征值与土壤含盐量之间表现出良好的线性关系,光谱反射率随着含盐量的增加而升高^[5]。孙红等^[6]研究表明土壤 pH 值与光谱波长呈正相关,但相关性随波长的增加而降低。刘焕军^[7]、Sudduth 等^[8]、Zhang^[9]认为基于土壤光谱指数的高光谱模型可以准确预测盐碱土 pH 值,可用于土壤的盐碱化程度评价。然而,目前许多研究还是在定性分析层面上,立足于影像光谱数据进行数理统计处理及实现土壤盐碱化的自动识别分类,精度还较低,而定量的机理研究则更为薄弱,而且受土壤类型及当地气候和成土条件的影响,土壤盐碱成分不同,土壤光谱特征也不尽相同。

龟裂碱土,俗称白僵土,属于盐碱土纲碱土类盐渍龟裂碱土亚类,是在荒漠草原条件下经过盐土脱盐和水蚀风蚀作用而形成的碱化土壤^[10]。主要分布于宁夏银川平原、新疆和内蒙古河套平原的西部。宁夏银川平原龟裂碱土面积约有 4.38×10^4 hm²,其中绝大部分分布于古老河成阶地上^[11]。该地区土壤虽然理化性状不良,多为低产田或撂荒地,但地势平坦,土层深厚,是当地主要的耕地后备资源。因此,本文以宁夏银川平原龟裂碱土为研究对象,通过对野外实测光谱的分析,研究土壤光谱特征,筛选出土壤 pH 值、ESP 的敏感波段,在此基础上采用不同回归方法构建基于龟裂碱土的碱化程度预测模型,为快速、廉价预报土壤的盐碱化信息提供依据,也为利用卫星遥感数据大面积获取同类盐渍土盐碱程度提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏银北西大滩位于宁夏贺兰山东麓洪积扇和平原之间(106°24'209"E, 38°50'289"N),为一碟形洼地,向北倾斜,地面比降平均为 1/5700。属于黄河中上游半干旱、半荒漠境盐渍区。因地形低洼,排水条件很差,是一个水分与盐分汇集的地区,故地下水位高,矿化度大,以至于这一地区形成了大面积的盐土和白僵土。研究区属典型的温带大陆性气候,全年日照充足,温差较大,无霜期短。年降水量约为 150 mm,年蒸发量 1 755.1 mm 以上。该地区土壤盐分

以碳酸钠和碳酸氢钠为主, $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 含量占阴离子总量的 80% 以上。本研究选取的撂荒地表层土壤 pH 值在 9.16 ~ 10.29 之间,碱化度在 37.10% ~ 61.55% 之间。

1.2 光谱数据的测量及其他指标的测定

土壤表层光谱采用美国产 Unispec - SC 型单通道便携式光谱仪进行测定,该光谱仪探测波段为 310 ~ 1 130 nm,分辨率 < 10 nm,绝对精度 < 0.3nm。测定时选取一块平坦且表观土壤属性均一的地块,于每个月中旬测定土壤表层光谱,全年测定 12 次,每次选取约 6 个点,每个点重复测量 10 次(光谱测定后标记该点),取平均值作为此次的光谱反射值。光谱仪探头设置在距离地面 1.0 m 处,视角为 8°。测量过程中及时在每次观测前进行标准白板校正。野外光谱测量时间为 10:00 ~ 14:00,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。

1.3 土壤样品采集与处理

每个样点光谱测定结束后立即标记,然后取该点土壤作为样本,采集深度为 0 ~ 20 cm,全年共 72 个土样。室内风干后,剔出植物残茬、石粒、砖块等杂质,根据土壤盐碱化指标测定的粒径过筛,pH 值采用酸度计法,碱化度中交换性钠采用火焰光度法,CEC 采用醋酸钠 - 火焰光度法。

1.4 光谱数据处理方法

土壤光谱数据预处理:为消除高频噪声的影响,本研究采用何挺等^[12]9 点加权移动平均法对高光谱反射率原始数据(r)进行平滑去噪处理(R)。

本研究除对平滑后的原始反射光谱数据分析外,还对平滑后反射光谱进行了以下 6 种变换:反射率的倒数($1/R$)、反射率的导数(DR)、反射率的对数($\lg R$)、反射率的一阶微分(R')、反射率对数的一阶微分($\lg R'$)和反射率倒数对数的一阶微分($\lg(1/R))'$,并进行同步分析,以期构建对土壤盐碱程度反应更敏感的光谱参数。利用土壤反射光谱,通过 SAS 软件^[13]中全回归(Total regression, TR)、逐步回归(Stepwise regression, SR)和偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)过程建模预测龟裂碱土碱化指标。

2 结果与分析

2.1 龟裂碱土表层土壤光谱特征分析

戴昌达等^[14]根据 360 ~ 2 500 nm 的土壤光谱反射率,将我国主要土壤的光谱反射特性曲线划分为平直型、缓斜型、陡坎型和波浪型 4 类。宁夏银北地

区的光谱反射曲线属于缓斜型(图 1)。从龟裂碱土表层土壤的光谱特征曲线来看:在 400 ~ 570 nm 的范围内光谱曲线斜率较大,且在 570 nm 附近有一拐点(特征点)出现;571 ~ 888 nm 范围内斜率较小,反射率缓缓增强,但在 763 nm 附近有一个小的反射峰出现;在 889 ~ 990 nm 处又有较大一个反射峰出现;从 991 ~ 1 130 nm 出现最大的反射峰,最大峰值为 1 102 nm 附近,且整体反射率越高峰值越大。根据土壤表层光谱特征曲线分析,龟裂碱土表层土壤光谱特征曲线可分为 400 ~ 570 nm、571 ~ 888 nm、889 ~ 990 nm、991 ~ 1 130 nm 四段和 763、948 nm 和 1 102 nm 3 个反射峰值。

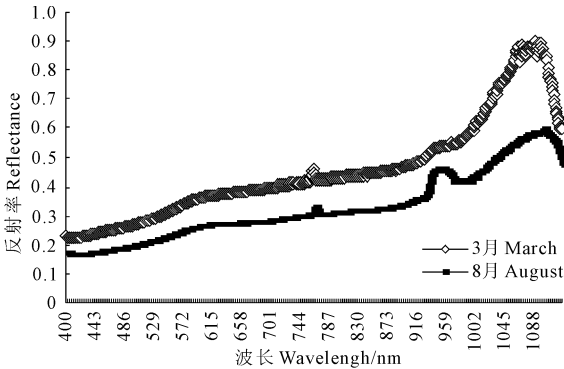


图 1 龟裂碱土表层土壤光谱特征曲线

Fig.1 Characteristic curve of surface soil of Takyr Solonchets

2.2 龟裂碱土表层盐碱化程度预测

2.2.1 龟裂碱土表层土壤光谱与 pH 值的相关性

土壤 pH 值是反映土壤酸碱性程度的重要指标,土壤碱化程度不同,土壤表面表现出的物理化学特征不同。因此,碱化程度对野外实际环境中土壤表面性状的影响是土壤碱化遥感监测的重要依据^[15]。从表 1 可以看出,原始光谱反射率 r 、平滑后的反射率 R 、平滑后平方根 3 种处理后结果与土壤 pH 值呈极显著正相关,且相关系数差异很小,而平滑后倒数、平滑后对数的倒数 2 种处理结果与土壤 pH 值呈极显著正相关关系;平滑后倒数对数的一阶微分、平滑后一阶微分和差分 3 种处理结果与土壤 pH 值关系无规律。

根据龟裂碱土表层土壤光谱反射曲线选择了一些特征点作为特征参数来描述光谱曲线的形状特征,并用它们与土壤 pH 值的关系筛选对估测土壤 pH 值的敏感波段和特征值。从表 1 可以看出,光谱数据平滑后的数值与土壤 pH 值的相关性与原始光谱数据同土壤 pH 值的相关系数在 763 nm 处明显较高,但在其它 6 个特征波段的差别都非常小;平滑后的倒数与土壤 pH 值的相关性增强,在 400 ~ 570 nm

特征波段其与 pH 值的相关系数的绝对值在 8 种处理方式中最大;在 571 ~ 888 nm 波段平滑后倒数对数的一阶微分相关性最强(相关系数高达 0.8124),其次为倒数对数的一阶微分;在 889 ~ 990 nm 特征波段平滑后的一阶微分相关性最强;991 ~ 1 130 nm 特征波段倒数对数的一阶微分相关系数最大(0.8561);在第一个反射峰处反射率的倒数与土壤 pH 值间的相关系数最大;在后两个反射峰处平滑后的反射率与土壤 pH 值的相关性最强。所以,8 种处理方式在 7 个特征参数上的最佳表现并不固定,各有优劣,但整体来看,反射率的倒数、反射率的倒数对数的一阶微分和反射率的一阶微分在特征波段范围表现较好,反射率和反射率的倒数在单波段反射峰值处表现较佳。而原始反射数值、反射率倒数的对数、反射率的平方根和反射率差分这 4 种处理方式表现相对差一些,微分处理的稳定性较差。所以,土壤其它盐碱化指标与光谱特征的相关性分析只采用反射率、反射率的倒数、反射率的倒数对数的一阶微分和反射率的一阶微分 4 种方法来分析。

2.2.2 龟裂碱土表层土壤光谱与 ESP 的相关性

土壤碱化度(ESP, Exchangeable sodium saturation percentage)也是衡量土壤碱化程度的重要指标之一。从表 2 可以看出,反射率与土壤 ESP 呈正相关关系,而反射率的倒数与 ESP 呈负相关关系,且二者与 ESP 间的平均相关系数均达到显著水平。在 400 ~ 570 nm 波段范围内, $1/R$ 与土壤 ESP 相关系数最大,另外三个波段范围内均为 $(\lg(1/R))'$ 与土壤 ESP 的相关性最强,在三个反射峰值处则分别为前三种数据处理方式下相关性较强。土壤 pH 值和 ESP 密切相关,但从表 2 和表 3 综合来看,各种处理情况下的反射率与土壤 pH 值的相关性普遍强于与土壤 ESP 的相关性,所以通过反射率估测土壤 pH 值相对土壤 ESP 来说更精确一些。

2.3 土壤碱化指标的预测模型

2.3.1 pH 值预测模型的建立 采用全回归(TR)、逐步回归(SR)和偏最小二乘回归(PLSR)对 4 种数据处理方式下反射率拟合土壤表层 pH 值的方程(表 3)。从表 3 可以看出,三种回归方法中全回归的拟合度最大,四种反射率处理方式下平滑后反射率对 pH 值的拟合度最大,其次为反射率倒数,倒数对数的一阶微分拟合结果最差。偏最小二乘回归在利用平滑后反射率时拟合度明显高于逐步回归拟合度,其它三种反射率采用逐步回归和偏最小二乘回归的拟合度相差不大(逐步回归的拟合度较偏最小二乘回归拟合度平均大 3.94%),但偏最小二乘回

归选择的波段明显少于逐步回归。综合来看,平滑后反射率采用偏最小二乘回归的拟合方程最佳,拟合度达到 0.93,而且敏感波段相对较少(分别为 763 nm、887 nm、994 nm 和 1 102 nm)。

表 1 不同数据处理方式下反射率与土壤 pH 值的相关性 (n = 60)

Table 1 Correlation coefficients between reflectance analyzed by different data processing methods and soil pH (n = 60)								
数据处理方式 Analysis method	数值 Value	波段 Wavelength/nm						
		400 ~ 570	571 ~ 885	885 ~ 990	991 ~ 1130	763	948	1102
r	最小值 $V_{\min}$	0.6516	0.7175	0.6093	0.6028			
	最大值 $V_{\max}$	0.7755	0.7755	0.7754	0.7754	0.7175	0.6125	0.6710
	均值 $V_{\text{ave.}}$	0.7175	0.7551	0.7197	0.7030			
	RMSE	0.0029	0.0007	0.0057	0.0036			
R	最小值 $V_{\min}$	0.6520	0.7361	0.6159	0.6234			
	最大值 $V_{\max}$	0.7747	0.7749	0.7748	0.7690			
	均值 $V_{\text{ave.}}$	0.7175	0.7552	0.7201	0.7041	0.7444	0.6162	0.6902
	RMSE	0.0029	0.0007	0.0056	0.0034			
	最值波段 Wavelength _m /nm	570	584	887	994			
1/R	最小值 $V_{\min}$	-0.7850	-0.7848	-0.7645	-0.7457			
	最大值 $V_{\max}$	-0.6815	-0.7388	0.6046	0.6003			
	均值 $V_{\text{ave.}}$	-0.7558	-0.7548	-0.7047	-0.6650	-0.7533	-0.6049	-0.6367
	RMSE	0.0021	0.0007	0.0055	0.0035			
	最值波段 Wavelength _m /nm	570	570	888	994			
lg(1/R)	最小值 $V_{\min}$	-0.7830	-0.7829	-0.7717	-0.7615			
	最大值 $V_{\max}$	-0.6711	-0.7390	-0.6110	-0.6142	-0.7503	-0.6113	-0.6653
	均值 $V_{\text{ave.}}$	-0.7418	-0.7569	-0.7146	-0.6873			
	RMSE	0.0025	0.0007	0.0056	0.0035			
(R)'	最小值 $V_{\min}$	-0.5739	-0.7689	-0.3731	0.6018			
	最大值 $V_{\max}$	0.2750	0.7810	0.7916	0.8053			
	均值 V_{ave}	-0.2435	0.0020	0.3415	0.0880	0.2347	0.3373	-0.1917
	RMSE	0.0160	0.0224	0.0289	0.0329			
	最值波段 Wavelength _m /nm	406	755	954	1010			
(lg(1/R))'	最小值 $V_{\min}$	0.2189	-0.7277	-0.7830	-0.7653			
	最大值 $V_{\max}$	0.6080	0.8124	0.6037	0.8561			
	均值 $V_{\text{ave.}}$	0.4489	0.1875	-0.1889	0.0253	-0.3367	-0.2791	0.1731
	RMSE	0.0055	0.0232	0.0390	0.0336			
	最值波段 Wavelength _m /nm	520	594	954	1015			
$\sqrt{R}$	最小值 $V_{\min}$	0.6626	0.7380	0.6136	0.7617			
	最大值 $V_{\max}$	0.7797	0.7797	0.7737	0.7662	0.7477	0.6139	0.6784
	均值 $V_{\text{ave.}}$	0.7308	0.7565	0.7179	0.6965			
	RMSE	0.0027	0.0007	0.0057	0.0035			
$\triangle R$	最小值 $V_{\min}$	-0.5724	-0.7576	-0.3667	-0.6816			
	最大值 $V_{\max}$	0.2707	0.7935	0.7885	0.8007	-0.3378	0.1696	0.0530
	均值 $V_{\text{ave.}}$	-0.2448	0.0031	0.3436	0.0823			
	RMSE	0.0160	0.0225	0.0287	0.0323			

2.3.2 土壤 ESP 预测模型的建立 反射率利用四种数据处理方式后对土壤 ESP 的拟合同样与 pH 值不同,四种处理方式中反射率的一阶微分拟合效果最好(表 4),但逐步回归与全回归拟合方程相同;其次为反射率倒数对数的一阶微分,拟合度均高于 0.83;平滑后反射率拟合效果最差。三种回归方法仍然为全回归的拟合度最大,偏最小二乘回归的拟合度有较大幅度的降低。但从拟合度和选用敏感波

段的多少整体来看,反射率倒数对数的一阶微分采用偏最小二乘回归方法拟合方程最佳,该方程拟合度为 0.8367,选用的敏感波段有 3 个,分别为 697、763 和 954 nm。如果不考虑敏感波段的多少,则为反射率的一阶微分采用全回归的方法拟合效果最理想。

表 2 不同数据处理方式下反射率与土壤 ESP 的相关系数 ($n = 60$)
Table 2 Correlation coefficients between reflectance analyzed by different data processing methods and soil ESP ($n = 60$)

波段/nm Wavelength	数值 Value	R	$1/R$	$(R)'$	$(\lg(1/R))'$
400 ~ 570	均值 $V_{ave.}$	0.6398	- 0.6884	- 0.2174	0.3831
	最小值 V_{min}	0.5522	- 0.7207	- 0.4054	- 0.0055
	最大值 V_{max}	0.6888	- 0.583	0.1614	0.5239
	最值波段 Wavelength _m /nm	570	570	406	512
	RMSE	0.0028	0.0025	0.0110	0.0079
571 ~ 888	均值 $V_{ave.}$	0.6673	- 0.6928	- 0.0275	0.1945
	最小值 V_{min}	0.6499	- 0.7205	- 0.6798	- 0.5805
	最大值 V_{max}	0.6888	- 0.6752	0.6485	0.7602
	最值波段 Wavelength _m /nm	570	570	697	697
	RMSE	0.0007	0.0007	0.0183	0.0195
889 ~ 990	均值 $V_{ave.}$	0.5477	- 0.5683	0.2587	- 0.1431
	最小值 V_{min}	0.4015	- 0.6764	- 0.4986	- 0.7920
	最大值 V_{max}	0.6527	- 0.4189	0.7802	0.6730
	最值波段 Wavelength _m /nm	888	889	954	954
	RMSE	0.0082	0.0084	0.0347	0.0449
991 ~ 1130	均值 $V_{ave.}$	0.5837	- 0.5885	0.0775	0.0099
	最小值 V_{min}	0.4650	- 0.6328	- 0.6558	- 0.7370
	最大值 V_{max}	0.6343	- 0.4861	0.7299	0.7220
	最值波段 Wavelength _m /nm	1064	994	1070	1010
	RMSE	0.0036	0.0032	0.0287	0.0286
763	均值 $V_{ave.}$	0.6760	- 0.7050	0.0513	- 0.1687
948	均值 $V_{ave.}$	0.4022	- 0.4196	0.4906	- 0.4777
1102	均值 $V_{ave.}$	0.5752	- 0.5737	- 0.0369	- 0.0765

3 结 论

- 1) 龟裂碱土的光谱反射曲线属于缓斜型,其光谱反射率曲线的形状大致可由 4 个折线段(400 ~ 570 ~ 888 ~ 990 ~ 1 130 nm)和 3 个反射峰(763 nm、948 nm 和 1 102 nm)来控制。
- 2) 原始反射率、平滑后倒数、平滑后对数的倒数 3 种处理结果与土壤 pH 值和 ESP 在研究波段内均呈极显著正相关关系;平滑后倒数对数的一阶微分、平滑后一阶微分和差分 3 种处理结果与土壤 pH 值关系无规律性。
- 3) 反射率的倒数、反射率的倒数对数的一阶微

分和反射率的一阶微分在特征波段范围表现较好,反射率和反射率的倒数在单波段反射峰值处表现较佳。

4) 反射率与土壤 pH 值的相关性普遍优于与土壤 ESP 的相关性。从拟合度和选用敏感波段的多少整体考虑,采用偏最小二乘回归来拟合土壤 pH 值和 ESP 的方程最佳,拟合度分别达到 0.93 和 0.8367。

该方法可用于盐分表聚型土壤且土壤盐分主要为碳酸钠和碳酸氢钠,但对于因水分欠缺和盐分离子迁移困难的盐分土内聚积型土壤或盐分与龟裂碱土不同的土壤是否可以应用还有待近一步研究。

表 3 敏感波段反射率对龟裂碱土表层 pH 值的拟合方程 ($n = 60$)

Table 3 The simulated equations of sensitive wavelengths to surface pH of Takyr Solonetz ($n = 60$)

数据处理方式 Analysis method	回归方法 Regression method	回归方程 Regression equations	F	拟合度 R^2 Fitting degree(R^2)
R	TR	$\text{pH} = 8.08 + 3.52R_{570} - 3.04R_{584} + 23.01R_{763} - 30.74R_{887} + 0.53R_{948} + 6.65R_{994} + 1.68R_{1102}$	8.58	0.9375
	SR	$\text{pH} = 8.58 - 1.99R_{948} + 2.86R_{1102}$	9.12	0.8154
	PLSR	$\text{pH} = 8.17 + 22.08R_{763} - 29.65R_{887} + 7.18R_{994} + 1.60R_{1102}$	12.37	0.9300
$1/R$	TR	$\text{pH} = 11.11 - 0.24(1/R_{570}) - 3.00(1/R_{763}) + 5.29(1/R_{888}) + 0.09(R_{948}) - 2.75(R_{994}) - 0.56(1/R_{1102})$	7.11	0.8951
	SR	$\text{pH} = 9.15 - 0.68(1/R_{570}) - 2.67(1/R_{763}) + 0.09(1/R_{948}) - 2.75(1/R_{994})$	10.19	0.8046
	PLSR	$\text{pH} = 11.20 - 1.08(1/R_{1102})$	33.91	0.7723
$(R)'$	TR	$\text{pH} = 9.23 - 61.74(R_{406})' - 155.84(R_{763})' - 121.77(R_{755})' - 161.55(R_{948})' - 39.78(R_{954})' + 213.85(R_{1010})' + 12.39(R^{1102})'$	1.46	0.7187
	SR	$\text{pH} = 9.28 - 98.12(R_{763})' - 110.44(R_{948})' + 173.37(R_{1010})'$	5.89	0.6884
	PLSR	$\text{pH} = 0.63(R_{1010})'$	16.91	0.6284
$(\text{Lg}(1/R))'$	TR	$\text{pH} = 10.48 + 278.46(\text{Lg}(1/R_{520}))' + 1034.52(\text{Lg}(1/R_{594}))' + 165.98(\text{Lg}(1/R_{763}))' + 15.57(\text{Lg}(1/R_{948}))' - 123.93(\text{Lg}(1/R_{954}))' - 88.08(\text{Lg}(1/R_{1015}))' + 72.66(\text{Lg}(1/R_{1102}))'$	1.14	0.6662
	SR	$\text{pH} = 10.47 + 272.81(\text{Lg}(1/R_{520}))' + 1018.48(\text{Lg}(1/R_{594}))' + 161.18(\text{Lg}(1/R_{763}))' - 123.86(\text{Lg}(1/R_{954}))' - 87.88(\text{Lg}(1/R_{1015}))' + 69.99(\text{Lg}(1/R_{1102}))'$	1.66	0.6659
	PLSR	$\text{pH} = 10.04 - 318.11(\text{Lg}(1/R_{954}))' + 102.62(\text{Lg}(1/R_{1015}))'$	8.66	0.6200

表 4 敏感波段反射率对龟裂碱土表层 ESP 的拟合方程 ($n = 60$)

Table 4 The simulated equations of sensitive wavelengths to surface ESP of Takyr Solonetz ($n = 60$)

数据处理方式 Analysis method	回归方法 Regression method	回归方程 Regression equations	F	拟合度 R^2 Fitting degree(R^2)
R	TR	$\text{ESP} = 40.46R_{570} + 114.19R_{763} + 0.49R_{888} - 121.40R_{948} - 41.73R_{948} + 161.48R_{1064} - 97.11R_{1102}$	1.51	0.644
	SR	$\text{ESP} = 29.41 + 76.52R_{570} - 68.08R_{948} + 31.37R_{1064} + 11.26R_{1102}$	2.90	0.6237
	PLSR	$\text{ESP} = 24.78 + 80.67R_{570}$	9.03	0.4744
$1/R$	TR	$\text{ESP} = 267.79 - 5.88(1/R_{570}) - 60.19(1/R_{763}) - 505.94(1/R_{889}) + 19.94(1/R_{948}) + 203.50(1/R_{994}) + 14.73(1/R_{1102})$	2.73	0.7663
	SR	$\text{ESP} = 267.79 - 5.88(1/R_{570}) - 60.19(1/R_{763}) - 505.94(1/R_{889}) + 19.94(1/R_{948}) + 203.50(1/R_{994}) + 14.73(1/R_{1102})$	2.73	0.7663
	PLSR	$\text{ESP} = 78.74 - 8.80(1/R_{570})$	10.81	0.5194
$(R)'$	TR	$\text{ESP} = 56.72 + 2771.70(R_{406})' - 30943(R_{697})' - 1257.51(R_{763})' - 2518.43(R_{948})' + 5955.31(R_{954})' + 1038.84(R_{1070})' - 286.66(R_{1102})'$	5.89	0.9115
	SR	$\text{ESP} = 56.72 + 2771.70(R_{406})' - 30943(R_{697})' - 1257.51(R_{763})' - 2518.43(R_{948})' + 5955.31(R_{954})' + 1038.84(R_{1070})' - 286.66(R_{1102})'$	5.89	0.9115
	PLSR	$\text{ESP} = 47.66(R_{516})' - 5.49(R_{954})' + 1294.90(R_{1070})'$	12.91	0.7416
$(\text{Lg}(1/R))'$	TR	$\text{ESP} = 57.13 + 579(\text{Lg}(1/R_{512}))' + 22795(\text{Lg}(1/R_{697}))' + 2494.91(\text{Lg}(1/R_{763}))' - 1138.05(\text{Lg}(1/R_{948}))'$	3.76	0.868
	SR	$\text{ESP} = 53.22 + (\text{Lg}(1/22405R_{697}))' + 2475.51(\text{Lg}(1/R_{763}))' - 6724.11(\text{Lg}(1/R_{954}))' + 1060.51(\text{Lg}(1/R_{1102}))'$	10.96	0.8623
	PLSR	$\text{ESP} = 54.29 + 20209(\text{Lg}(1/R_{697}))' + 2564.38(\text{Lg}(1/R_{763}))' - 6883.80(\text{Lg}(1/R_{954}))'$	13.67	0.8367

参 考 文 献:

[1] 王彦辉.几个树种的树冠降雨特征[J].林业科学,2001,37(4):2-9.

[2] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,等.六盘山主要植被类型冠层截留特征[J].应用生态学报,2010,21(10):2487-2493.

[3] 吕瑜良,刘世荣,孙鹏森,等.川西亚高山不同暗针叶林群落类型的冠层降水截留特征[J].应用生态学报,2007,18(11):2398-2405.

[4] 朱金兆,刘建军,朱清科,等.森林凋落物层水文生态功能研究[J].北京林业大学学报,2002,24(5/6):30-34.

[5] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山主要森林类型枯落物水文生态功能[J].北京林业大学学报,2009,31(1):91-99.

[6] 李德生,张 萍,张水龙,等.黄前库区森林土壤蓄水能力研究[J].南京林业大学学报,2004,28(1):25-28.

[7] 刘世荣,温远光,王 兵,等.中国森林生态系统水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1996:12-30.

[8] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等.宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J].水土保持学报,2005,19(3):134-138.

(上接第 192 页)

参 考 文 献:

[1] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. Remote Sens. Envir., 2002,80:406-417.

[2] Csillag F, Pasztor L, Bieh L. Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils[J]. Remote Sensing of Environment, 1993,(43):231-242.

[3] Yousef Y. Aldakheel. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-hassa Oasis, saudi arabia [J]. J Indian Soc Remote Sens, 2011,39(2):171-180.

[4] 扶卿华,倪绍祥,王世新,等.土壤盐分含量的遥感反演研究[J].农业工程学报,2007,23(1):48-54.

[5] 马 诺,杨 辽,李均力.焉耆盆地土壤盐渍化的光谱特征分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):114-117.

[6] 孙 红,李民赞,赵 勇,等.露天煤矿排土场地表的光谱特征和土壤参数分析[J].光谱学与光谱分析,2009,29(12):3365-3368.

[7] 刘焕军,张 柏,刘殿伟,等.松嫩平原典型土壤高光谱定量遥

[9] 崔鸿侠,张卓文,陈玉生,等.三峡库区莲峡河小流域马尾松水文生态效应[J].中南林学院学报,2005,25(2):46-49.

[10] 李衍青,张铜会,赵学勇,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J].草业学报,2010,19(5):267-272.

[11] 杨志鹏,李小雁,孙永亮,等.毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征[J].水科学进展,2008,19(5):693-698.

[12] 杨志鹏,李小雁,刘连友,等.毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征[J].科学通报,2008,53(8):939-945.

[13] 李怀珠.论宁夏六盘山地区针阔混交林水源涵养林工程建设现状及发展规划[J].宁夏农林科技,1999,(3):22-24.

[14] 郭明春.六盘山叠叠沟小流域森林植被坡面水文影响的研究[M].北京:中国林业科学研究院,2005:47

[15] 杜阿朋,王彦辉,管 伟,等.六盘山叠叠沟小流域的土壤石砾含量坡面分布特征[J].水土保持学报,2009,23(5):77-80.

[16] 林业部科技司.森林生态系统定位研究方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994.

[17] 刘建立.六盘山叠叠沟坡面生态水文过程与植被承载力研究[D].北京:中国林业科学研究院,2008.

感研究[J].遥感学报,2008,12(4):647-654.

[8] Sudduth K A, Kitchen N R, Sadler E J, et al. VNIR spectroscopy estimates of within-field variability in soil properties[J]. Progress in Soil Science, 2010,1(3):153-163.

[9] Zhang F, Tiyip T, Ding J L, et al. Spectral reflectance properties of major objects in desert oasis: a case study of the Weigan-Kuqa river delta oasis in Xinjiang, China[J]. Environ Monit Assess,2012,184(8):5105-5119.

[10] 殷允相.龟裂碱土的形成、性质及改良途径[J].土壤通报,1985,5:206-208.

[11] 黄振华.宁夏白疆土的改良[J].土壤,1961,6:11-14.

[12] 何 挺,王 静,程 烨,等.土壤氧化铁光谱特征研究[J].地理与地理信息科学,2006,3(2):30-34.

[13] 黄 燕,吴 平.SAS 统计分析及应用[M].北京:机械工业出版社,2007.

[14] 戴昌达.中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究[C]//遥感文献.北京:科学出版社,1981.

[15] 张 芳,熊黑钢,丁建丽,等.碱化土壤的野外及实验室波谱响应特征及其转换[J].农业工程学报,2012,28(5):101-107.