

# 基于土壤光谱特征的宁夏银北地区 盐碱地盐分预测研究

张俊华<sup>1</sup>, 秦君琴<sup>2</sup>, 李明<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 新技术应用研究开发中心, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 物理与电气学院, 宁夏 银川 750021)

**摘 要:** 对宁夏回族自治区银北地区盐碱地野外土壤表层光谱反射率和土壤全盐及盐分进行定量分析, 筛选出各土壤盐分指标的敏感波段, 然后采用全回归和逐步回归的方法建立各盐分的预测模型。结果表明: 表层土壤高光谱反射率  $r$ , 及其平滑去噪处理后的值  $R$ ,  $\lg(R)$  与全盐含量呈极显著正相关关系,  $1/R$ ,  $\lg(1/R)$  与全盐呈极显著负相关关系,  $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  在特定单波段处表现更佳; 土壤表层光谱反射率与  $\text{CO}_3^{2-}$  的相关性最强, 其次是  $\text{SO}_4^{2-}$ ; 土壤光谱反射率与  $\text{Na}^+$  的相关性在各种变换方法下均较强, 其次为  $\text{Mg}^{2+}$ , 与  $\text{Ca}^{2+}$  的相关性最弱。基于  $R$  的逐步回归方程为全盐含量预测的最佳模型; 基于土壤光谱反射率拟合土壤  $\text{CO}_3^{2-}$  的准确度略高于对土壤  $\text{HCO}_3^-$ ; 敏感波段估测土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的决定系数明显高于其他阴离子; 采用  $[\lg(1/R)]'$  逐步回归得到的方程拟合土壤  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量相对于其他变换方式效果更理想。预测模型中对土壤全盐和  $\text{Na}^+$  的模型精度较高, 预测能力强; 光谱对土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的预测能力也较强; 对土壤  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的预测稳定性、预测能力和精度都较差。

**关键词:** 光谱特征; 银北地区; 盐分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0123-07

中图分类号: S143

## Prediction of Soil Salt Content Based on Spectral Characteristics of Soil in Northern Yinchuan City, Ningxia Hui Autonomous Region

ZHANG Jun-hua<sup>1</sup>, QIN Jun-qin<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The field soil surface spectral reflectance, total soil salt and other salt parameters in northern Yinchuan City, Ningxia Hui Autonomous Region were quantitatively analyzed. The field reflectance data were transformed to several spectral indices to extract sensitive wavelengths of salt parameters in surface soil. Quantitative inversion models of soil salt parameters were constructed by total regression and stepwise multiple linear regression analysis. Results showed that there were significantly positive correlations between the total salt content in surface soil and its original spectral reflectance( $r$ ), transformation of smoothing reflectance( $R$ ) and logarithmic reflectance $[\lg(R)]$ . There were significant negative correlations between the total salt content and the reciprocal of reflectance( $1/R$ ) and logarithmic reciprocal of reflectance $[\lg(1/R)]$ . The first derivate differential( $R'$ ) and the first derivate differential of logarithmic reciprocal of reflectance $[\lg(1/R)]'$  had better effect in some specific single wavelengths. The correlation between the spectral reflectance of surface soil and  $\text{CO}_3^{2-}$  was the strongest in all anions and  $\text{SO}_4^{2-}$ , next; spectral reflectance and  $\text{Na}^+$  content had strongest relationship by the four kinds of transformation method; the next was  $\text{Mg}^{2+}$ ; and the correlation with  $\text{Ca}^{2+}$  was weakest. The  $R$  based regression equation was the optimal model for prediction of the total salt content. The accuracy of  $\text{CO}_3^{2-}$  content predicted was slightly better than  $\text{HCO}_3^-$ . The determinative coefficient for  $\text{SO}_4^{2-}$  predicted based on the sensitive wavelengths was significantly higher than other anions.

收稿日期: 2012-11-20

修回日期: 2013-01-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于土壤与作物光谱特征的龟裂碱土盐碱化信息预测”(41001129); 宁夏自然科学基金项目“分数阶微积分方程的小波数值解法”(N212142)

作者简介: 张俊华(1977—), 女(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 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。

The stepwise regression by using  $[\lg(1/R)]'$  gave better effect in fitting  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$  contents, as compared with other transformations. Fitting degrees of prediction model on the soil total salt and  $\text{Na}^+$  were higher in all models and the two models had higher accuracy and strong predictive ability. Moreover, the predictive ability of spectral reflectance for  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  were stronger than other ions. There were poor performance on stability, forecast ability and the precision of the prediction models about  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ .

**Keywords:** spectral characteristic; area of the Northern Yinchuan City; salinity

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,在盐渍土光谱特征的研究方面国内外学者取得了较大的进展。Dehaan 等<sup>[1]</sup>发现高度盐碱化的土壤在 0.68, 1.18, 1.78 nm 处相对于未发生盐碱化的土壤有更清晰的吸收特征。扶卿华等<sup>[2]</sup>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预测。Yousef<sup>[3]</sup>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。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<sup>[4-5]</sup>。对于光谱反射率与盐碱土中的盐分离子的关系,许多学者也进行了研究。李新国等<sup>[6]</sup>研究发现,采用多元回归模型预测  $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  精度较高,具有较好的适用性。李娜等<sup>[7]</sup>在玛纳斯河流域地物光谱数据库的建立研究中指出在少数光谱波段,不同地貌的含盐量及各地貌中占优势的盐离子均与光谱反射率显著相关。Chernousenko 等<sup>[8]</sup>的研究则表明由于土壤阳离子交换量和钾、钙、镁在近红外区间内没有主响应,其含量不能通过 C—H, O—H 和 N—H 化学键的吸收直接确定,但可以利用近红外光谱的少数敏感波段建模以预测荔枝土壤阳离子交换量和交换性钙含量的变化,能粗略预测交换性钾和交换性镁含量变化。屈永华等<sup>[9]</sup>在定量模型中利用偏最小二乘方法比较精确地估计了全盐(S%)、pH 值、硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )、钾钠含量( $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ )这些表示盐碱化程度的参数,并指出对于其余参数,如碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )、碳酸氢根( $\text{HCO}_3^-$ )、氯离子( $\text{Cl}^-$ )、钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )等,根据目前的数据分析,很难从遥感数据中精确估计。

宁夏银北地区降雨稀少,蒸发量大,局部地区浅层地下水位浅,盐分易于累积于土壤表层,目前该地区盐碱化土壤面积占耕地面积的 39.50%~54.7%<sup>[10]</sup>。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。

本文以宁夏银北地区盐碱地为研究对象,通过对野外表层土壤实测光谱的分析,研究土壤光谱特征,筛选出对土壤全盐及盐分的敏感波段,在此基础上采用不同回归方法构建基于野外光谱的盐碱地盐分预测模型,为快速、廉价预报土壤的盐碱化提供依据,也为利用卫星遥感数据大面积获取同类盐碱地盐碱程度提供科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

以宁夏银北西大滩为研究对象,该地位于宁夏贺兰山东麓洪积扇和平原之间,属于黄河中上游灌区(106°24' E, 38°50' N),年降水量 150~203 mm,年蒸发量 1 755.1 mm 以上。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碱土,大部分属于盐化碱土。

### 1.2 光谱数据的获取及其他指标的测定

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 < 0.3 nm。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 7 个点,每个点重复测定 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°。测定过程中,及时在每次观测前进行标准白板校正。野外光谱测定时间为 10:00—14:00,测定期间天气状况良好,晴朗无云,风力较小,光谱仪采用垂直向下测定的方法,与多数传感器采集数据的方向一致。

### 1.3 土壤样品采集与测定指标

每个样点光谱测定结束后立即标记,然后取改点土壤作为样本,采集深度为 0—20 cm,全年共 84 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。盐分指标

为全盐(质量法),  $\text{CO}_3^{2-}$  (电位滴定法),  $\text{HCO}_3^-$  (电位滴定法),  $\text{Cl}^-$  (硝酸银滴定法),  $\text{SO}_4^{2-}$  (EDTA 间接滴定法),  $\text{K}^+$  (火焰光度法),  $\text{Na}^+$  (火焰光度法),  $\text{Ca}^{2+}$  (EDTA 络合滴定法),  $\text{Mg}^{2+}$  (EDTA 络合滴定法)<sup>[11]</sup>。

### 1.4 光谱数据处理与方法

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<sup>[12]</sup> 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 ( $1/R$ )、反射率的差分( $\Delta R$ )、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, 以期构建对土壤盐分反应更敏感的光谱参数。数据变换的主要目的是降低背景噪声对土壤光谱的影响<sup>[13-15]</sup>。

土壤盐分信息的估测建模与验证。将 84 个土壤样本分为两部分, 一部分数据子集用于建模(60 个样本), 另一部分用于验证模型性能(24 个样本)。利用土壤反射光谱, 采用 SAS 软件<sup>[16]</sup> 全回归(多重线性回归分析, TR)和逐步回归法(SR)建模预测该地区盐碱土盐分指标。多重线性回归分析中, 自变量之间会存在一定程度的相关性, 若相关程度较高, 则会使各回归系数估计的方差很大, 较严重的多重共线性会导致不能准确地解释因变量的变化, 此时去除共线性严重的反射率, 剩余的反射率再次进行全回归分析( $TR'$ )。模型的稳定性用决定系数  $R^2$  检验,  $R^2$  越大, 模型越稳定; 模型的预报能力用验证样本的拟合度  $R^{2'}$  以及总均方根差 (RMSE) 来检验,  $R^{2'}$  越大、RMSE 越小, 则模型精度越高、预测能力越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤与土壤盐分的相关性

2.1.1 盐碱土表层土壤光谱特征 宁夏银北地区土壤属于苏打盐碱化土壤, 盐分组成以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  为主, 其光谱反射曲线如图 1 所示。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, 最大峰值在 1 102 nm 附近, 且整体反射率越高峰值越大。因此, 在 400~1 130 nm 表层土壤的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, 见图 1)和 3 个反射峰值(763, 948 和 1 102 nm)大致控制。

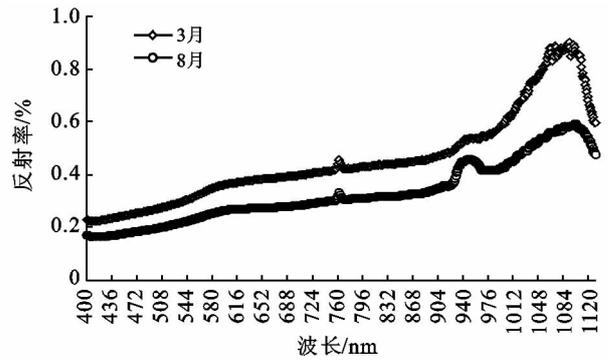


图 1 宁夏银北地区盐碱地表层土壤光谱特征曲线

2.1.2 表层土壤光谱与全盐含量的相关性 研究区春季干旱、多风, 升温较快, 蒸发量大; 夏季炎热, 雨量集中; 秋季短暂, 降温快; 冬季干冷, 降雪少。研究区土壤属于盐化碱土, pH 值在 8.81~10.30, 而全盐含量范围在 1.07~5.64 g/kg, 平均值为 2.98 g/kg。在土壤表层光谱数据的 7 种数学变换方法与土壤全盐含量的相关关系中(如表 1 所示, 数据未全部列出),  $r, R, \lg(R)$  与全盐含量呈极显著正相关关系,  $1/R, \lg(1/R)$  与全盐呈极显著负相关关系。1/R 变换方法综合表现最佳, 其在整个研究波段内的相关系数普遍居首位, 均达到极显著正相关水平; 7 种光谱数据在整个研究波段的最佳表现并不固定, 各有优劣, 但整体来看,  $R$  和  $1/R$  在特征波段范围且相关系数较大,  $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  在特定单波段处表现较佳, 而  $r, \lg(R), \lg(1/R)$  和  $DR$  这 4 种变换方法表现相对差一些。所以, 土壤其他盐分指标与光谱特征的相关性分析只采用  $R, 1/R, (R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  这 4 种方法来分析。

表 1 不同变换形式下反射率与土壤全盐的相关性

波段/nm	特征参数	$R$	$1/R$	$(R)'$	$[\lg(1/R)]'$
400~570	极值	0.66	-0.71	-0.51	0.57
	极值波段	570	570	405	520
571~888	极值	0.68	-0.74	0.82	0.81
	极值波段	885	888	646	698
889~990	极值	0.75	-0.82	0.82	-0.82
	极值波段	990	990	916	916
991~1 130	极值	0.88	-0.89	0.89	-0.81
	极值波段	1 090	1 091	1 029	1 029
763	均值	0.63	-0.69	0.12	-0.24
948	均值	0.66	-0.73	0.43	-0.36
1 102	均值	0.86	-0.88	0.039	-0.20

2.1.3 表层土壤光谱与土壤阴离子含量的相关性 土壤在可见及近红外波段的光谱特征起因于其矿物成分的电子跃迁及分子振动, 土壤成分的电子过程主要是由  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  引起, 土壤成分的振动过程主要

是由  $H_2O$ ,  $OH^{-1}$ ,  $CO_3^{2-}$  等阴离子基团的倍频或合频引起<sup>[17]</sup>。银北地区盐碱土中阴离子以  $HCO_3^{-}$  和  $CO_3^{2-}$  含量最大,其次为  $Cl^{-}$  含量,  $SO_4^{2-}$  含量最低。从 4 种反射率数据变换方法下土壤表层光谱特征与阴离子的关系来看(表 2),土壤表层光谱反射率与  $CO_3^{2-}$  的相关性最强,最大相关系数达到 0.75

(767 nm)。其次是  $SO_4^{2-}$ ,与  $HCO_3^{-}$  和  $Cl^{-}$  的相关性较弱,其中  $R$  和  $1/R$  这 2 种方式与这 2 种阴离子含量相关性普遍未达到显著水平,但这 2 种离子采用  $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  方式处理后相关性在 571~1 130 nm 波段范围内呈显著相关关系,但在 3 个反射峰值处相关性较弱,未达显著水平。

表 2 不同变换方式下反射率与土壤阴离子含量的相关系数

波段/nm	$CO_3^{2-}$				$HCO_3^{-}$			
	$R$	$1/R$	$(R)'$	$[\lg(1/R)]'$	$R$	$1/R$	$(R)'$	$[\lg(1/R)]'$
400~570	0.52	-0.56	-0.55	0.52	0.34	-0.36	-0.40	0.43
极值波段	565	520	400	409	—	—	—	559
571~888	0.52	0.55	0.71	0.75	0.30	-0.34	-0.68	0.71
极值波段	586	571	795	767	—	—	742	732
889~990	0.56	0.55	0.66	0.67	0.37	-0.45	0.62	-0.69
极值波段	971	571	978	978	—	—	915	915
991~1 130	0.56	0.57	0.60	0.58	0.52	-0.55	0.59	-0.66
极值波段	1 128	1 128	1 008	1 008	1 108	1 109	1 023	1 104
763	0.39	-0.41	0.68	-0.74	0.21	-0.26	-0.33	-0.02
948	0.52	-0.50	0.02	0.04	0.35	-0.43	-0.28	0.44
1 102	0.55	-0.52	0.05	-0.15	0.50	-0.52	-0.23	-0.04

波段/nm	$Cl^{-}$				$SO_4^{2-}$			
	$R$	$1/R$	$(R)'$	$[\lg(1/R)]'$	$R$	$1/R$	$(R)'$	$[\lg(1/R)]'$
400~570	0.25	-0.26	0.37	-0.16	0.36	-0.22	-0.42	0.41
极值波段	—	—	—	—	—	—	480	418
571~888	0.33	-0.33	0.59	-0.58	0.16	0.23	-0.53	0.61
极值波段	—	—	826	826	—	—	621	648
889~990	0.30	-0.30	0.48	-0.41	0.25	0.15	0.68	0.68
极值波段	—	—	947	947	—	—	984	984
991~1 130	0.23	-0.25	0.48	0.48	0.25	0.27	0.73	0.71
极值波段	—	—	994	1 002	—	—	1 116	1 115
763	0.33	-0.33	-0.02	-0.03	-0.16	0.23	0.13	-0.27
948	0.27	-0.28	0.44	0.38	0.25	-0.15	0.31	0.44
1 102	0.22	-0.23	-0.04	0.05	-0.09	0.23	-0.08	-0.42

2.1.4 表层土壤光谱与土壤阳离子含量的相关性  
银北地区盐碱土中阳离子以  $Na^{+}$  含量最高(在所测定的土样中,  $Na^{+}$  含量平均占 4 种阳离子总和的 75.80%),其次为  $K^{+}$  和  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  含量最低。从 4 种数据变换方法下土壤表层光谱特征与阳离子的关系来看(表 3),土壤光谱反射率与  $Na^{+}$  的相关性在 4 种变换方法下均较强,相关系数普遍大于 0.60,以  $[\lg(1/R)]'$  的相关性最佳;其次为  $Mg^{2+}$ ,但前 2 种变换方法相关系数较小;反射率与  $K^{+}$  的相关性相对较弱,与  $Ca^{2+}$  的相关性最弱。 $Na^{+}$  浓度在 400~570, 571~888, 889~990, 991~1 130 nm 与土壤光谱呈显著相关性,3 个反射峰值处在 763 nm 相关性最好,其余 2 个峰值处相关性很差; $Mg^{2+}$  与土壤光谱在 1 102 nm 2 个个反射峰值处相关性很强。所以,表层敏感波段

反射率与土壤阳离子之间的良好相关性为其光谱估测模型的建立提供了科学基础。

## 2.2 土壤盐分指标预测模型的建立

针对反射率的 4 种变换方法,选择该地区盐碱地表层土壤光谱特征的 4 个折线段(400~570~888~990~1 130 nm)和 3 个反射峰值(763,948 和 1 102 nm)中与土壤各盐分指标相关系数最大的敏感波段,进行了全回归和逐步回归分析,由于有些波段反射率间具有明显的共线性,通过全回归方法诊断出共线性后剔除存在共线性的反射率,将剩余的其他敏感波段反射率再次进行全回归( $TR'$ ),最终得到土壤盐分的预测模型。

通过分析比较,建立与土壤全盐和分盐含量之间的预测模型(表 4)。

表 3 不同变换方式下反射率与土壤阳离子的相关系数

波段/nm	K <sup>+</sup>				Na <sup>+</sup>			
	R	1/R	(R)'	[lg(1/R)]'	R	1/R	(R)'	[lg(1/R)]'
400—570	0.29	-0.25	-0.54	0.43	0.61	-0.64	-0.44	0.46
极值波段	—	—	564	563	570	569	406	519
571~888	0.26	0.25	-0.59	0.61	0.62	-0.64	0.67	0.75
极值波段	—	—	656	656	584	570	845	593
889~990	0.25	0.19	0.60	-0.62	0.61	-0.61	0.75	0.75
极值波段	—	—	945	945	888	888	954	954
991~1 130	0.31	0.25	0.61	-0.65	0.61	-0.61	0.74	0.82
极值波段	—	—	1 111	1111	994	994	1 010	1 049
763	-0.26	0.25	0.47	-0.46	0.60	-0.61	0.13	-0.22
948	0.25	-0.19	-0.20	0.29	0.43	-0.44	0.33	-0.29
1 102	0.05	0.04	0.65	-0.65	0.56	-0.53	0.08	-0.19
	Ca <sup>2+</sup>				Mg <sup>2+</sup>			
	R	1/R	(R)'	[lg(1/R)]'	R	1/R	(R)'	[lg(1/R)]'
400—570	0.26	-0.20	-0.43	0.40	0.45	-0.41	-0.52	0.57
极值波段	—	—	400	400	400	400	536	419
571~888	0.10	0.11	-0.59	0.69	0.14	0.12	0.64	-0.61
极值波段	—	—	623	623	—	—	604	882
889~990	0.31	0.26	0.54	-0.64	0.50	0.44	0.60	-0.65
极值波段	—	—	945	945	947	947	928	898
991~1 130	0.36	0.30	0.56	-0.58	0.56	0.49	0.74	-0.74
极值波段	—	—	1 109	1 109	1 128	1 128	1 100	1 100
763	-0.10	0.11	0.45	-0.38	-0.14	0.12	0.44	-0.31
948	0.31	-0.26	-0.28	0.38	0.50	-0.44	-0.32	0.43
1 102	0.14	-0.05	0.48	-0.51	0.31	-0.21	0.70	-0.75

表 4 敏感波段反射率对土壤表层全盐含量的预测方程

变换形式	回归方法	回归方程	决定系数 R <sup>2</sup>
R	SR	$y = -1.29 + 15.01R_{570} - 10.25R_{948} - 23.88R_{1090} + 30.90R_{1102}$	0.83
1/R	SR	$y = 8.45 - 1.49(1/R_{570}) + 0.26 R_{990}$	0.75
(R)'	SR	$y = 2.31 - 269.31(R_{405}') + 4430.89(R_{646}')'$	0.63
[lg(1/R)]'	SR	$y = 3.54 + 1058.51[\lg(1/R_{520})]' - 558.32[\lg(1/R_{1029})]'$	0.61

2.2.1 土壤全盐预测模型的建立 4 种反射率变换方法中 R 全回归产生的方程决定系数最大 (R<sup>2</sup> = 0.83), 但选用了 570, 763, 885, 948, 990, 1 090 和 1 102 nm 共 7 个敏感波段, 且从模型输出结果来看 763, 885 和 1 090 nm 这 3 个波段具有共线性, 去除后的再次全回归结果敏感波段数减少为 1 个 (570 nm), 但方程的决定系数大大降低 (R<sup>2</sup> = 0.60); 逐步回归方程决定系数较全回归略小 (R<sup>2</sup> = 0.83, 见表 4, 方程未全列出), 敏感波段减少到 4 个, 故选择逐步回归方程为基于 R 的全盐含量预测模型。

1/R 通过全回归产生的方程决定系数在所有方程中最高 (R<sup>2</sup> = 0.85), 但选用的敏感波段也有 7 个;

逐步回归方程决定系数 R<sup>2</sup> 为 0.75, 选用了 2 个敏感波段。

反射率采用 (R)' 和 [lg(1/R)]' 的回归方程决定系数偏低, 拟合效果相对都不理想。

2.2.2 土壤阴离子预测模型的建立 对土壤表层 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的拟合结果表明 (表 5), 采用 (R)' 得到的方程决定系数最大, 但涉及到 5 个敏感波段, [lg(1/R)]' 得到的方程决定系数略小, 但只涉及到 3 个敏感波段, 所以选择此方程来预测土壤 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的含量。采用 R 和 1/R 时与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量间均未达到显著相关关系, 故未建立这 2 种变换方法下的预测模型; (R)' 和 [lg(1/R)]' 获得的方程决定系数相差很小, 各方程 R<sup>2</sup>

>0.60,其中 $[\lg(1/R)]'$ 决定系数略高。基于土壤光谱反射率拟合土壤  $\text{CO}_3^{2-}$  的准确度略高于对土壤  $\text{HCO}_3^-$ 。

基于  $R$  和  $1/R$  与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关性都很差,回归方程的决定系数很低,所以此处只列出了决定系数较高情况下的方程。 $(R)'$ 和 $[\lg(1/R)]'$ 2种变换方

法下方程的决定系数差异较小。土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量低于  $\text{Cl}^-$  (其含量大概为  $\text{Cl}^-$  的 1/2 甚至更低),但采用敏感波段估测其含量的决定系数却明显高于其他阴离子,后 2 种反射率变换方法下两种回归方法的平均决定系数分别比  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  高出 0.08, 0.13和 0.15。

表 5 敏感波段反射率对土壤表层阴离子的预测方程

阴离子	变换形式	回归方法	回归方程	$R^2$
$\text{CO}_3^{2-}$	$R$	TR	$y = -0.49 - 351.16R_{565} + 380.39R_{586} - 15.15R_{948} - 46.74R_{971} - 7.98R_{1102} + 41.11R_{1128}$	0.47
	$1/R$	TR	$y = 4.30 + 18.16(1/R_{520}) - 35.53(1/R_{571}) + 19.88(1/R_{763}) - 2.23(1/R_{948}) - 1.70(1/R_{1102})$	0.67
	$(R)'$	TR	$y = 4.07 + 619.33(R_{100})' + 1582.38(R_{763})' + 713.65(R_{795})' + 1218.71(R_{978})' + 218.72(R_{1008})'$	0.69
	$[\lg(1/R)]'$	SR	$y = 4.07 - 702.28[\lg(1/R_{109})]' - 1457.90[\lg(1/R_{763})]' - 1328.38[\lg(1/R_{978})]'$	0.63
$\text{HCO}_3^-$	$(R)'$	SR	$y = 3.62 - 7573.17(R_{742})' + 694.87(R_{1024})'$	0.60
	$[\lg(1/R)]'$	SR	$y = 4.10 - 4116.51[\lg(1/R_{732})]' - 1224.83[\lg(1/R_{1104})]'$	0.62
$\text{Cl}^-$	$(R)'$	TR	$y = 2.31 + 4.41(R_{826})' - 1072.31(R_{947})' + 107.72(R_{994})'$	0.61
	$[\lg(1/R)]'$	TR'	$y = 1.15 + 1583.42[\lg(1/R_{947})]' - 1014.43[\lg(1/R_{994})]'$	0.57
$\text{SO}_4^{2-}$	$(R)'$	SR	$y = 1.08 + 87.51R_{480} - 74.39R_{984} + 19.04R_{1116}$	0.75
	$[\lg(1/R)]'$	TR'	$y = 1.19 + 423.02[\lg(1/R_{648})]' - 40.58[\lg(1/R_{1115})]'$	0.73

2.2.3 土壤阳离子预测模型的建立 研究区土壤表层阳离子以  $\text{Na}^+$  为主(占阳离子的 75 %左右)。在土壤  $\text{Na}^+$  的拟合方程中,4种反射率变换方法下敏感波段均不存在共线性,全回归和再次全回归方程完全相同。在  $R$  和  $1/R$  的拟合方程中逐步回归方程决定系数偏低,但全回归选用的敏感波段多达 6~7 个,所以全回归得到的方程也并非最佳预测方程;后两种变换方法下逐步回归方程的决定系数与二次全回归方程相近,而且逐步回归方程所选用的敏感波段明显少于二次全回归法。

综合敏感波段和决定系数的大小来看, $[\lg(1/R)]'$ 采用逐步回归得到的方程拟合土壤  $\text{Na}^+$  的效果最理想。利用各种方法所得的预测土壤  $\text{K}^+$  的方程决定系数明显低于  $\text{Na}^+$ 。前 2 种反射率变换方法下对土壤  $\text{K}^+$  的拟合方程决定系数平均只有 0.22, $(R)'$ 全回归方程决定系数  $R^2$  达到 0.60,但敏感波段有 564, 656,763,945,1102 和 1111 nm;综合来看, $[\lg(1/R)]'$ 在采用逐步回归法时拟合土壤  $\text{K}^+$  含量相对于其他方式最为理想( $R^2 = 0.61$ ,敏感波段为 656, 945 和 1111 nm)。

表 6 敏感波段反射率对土壤表层阳离子的预测方程

阳离子	变换形式	回归方法	回归方程	$R^2$
$\text{Na}^+$	$R$	TR	$y = 8.27 - 634.47(R_{570}) + 677.11(R_{584}) + 166.43(R_{763}) - 324.10(R_{888}) - 44.15(R_{948}) + 167.43(R_{994}) - 21.52(R_{1102})$	0.81
	$1/R$	TR	$y = 11.28 + 2.52(1/R_{570}) - 22.37(1/R_{763}) + 48.36(1/R_{888}) + 18.54(1/R_{948}) - 58.78(1/R_{994}) + 18.13(1/R_{1102})$	0.80
	$(R)'$	SR	$y = 6.23 + 1774.61(R_{1010})'$	0.76
	$[\lg(1/R)]'$	SR	$y = 19.256 + 1669.12[\lg(1/R_{519})]' + -2614.73[\lg(1/R_{954})]' + 2285.73[\lg(1/R_{1049})]'$	0.88
$\text{K}^+$	$(R)'$	SR	$y = 4.55 - 0.33(R_{564})' - 0.30(R_{656})' - 0.32(R_{763})' - 0.31(R_{945})' - 0.33(R_{1102})' - 0.30(R_{1111})'$	0.60
	$[\lg(1/R)]'$	SR	$y = 0.15 - 477.98[\lg(1/R_{656})]' + 87.70[\lg(1/R_{945})]' + 36.38[\lg(1/R_{1111})]'$	0.61
$\text{Ca}^{2+}$	$(R)'$	TR	$y = 8.62 + 700.55(R_{100})' + 16565(R_{623})' + 3413.51(R_{763})' - 2831.38(R_{945})' + 228.99(R_{1102})' + 92.97(R_{1109})'$	0.65
	$[\lg(1/R)]'$	TR'	$y = 2.22 - 13627[\lg(1/R_{623})]'$	0.43
$\text{Mg}^{2+}$	$(R)'$	SR	$y = 1.66 - 1133.26(R_{536})' + 7425.62(R_{604})' - 314.52(R_{928})' + 135.06(R_{1102})' - 59.1(R_{1110})'$	0.71
	$[\lg(1/R)]'$	SR	$y = 3.12 + 1881[\lg(1/R_{898})]' + 707.77[\lg(1/R_{1102})]'$	0.70

对土壤  $\text{Ca}^{2+}$  的回归方程中, $(R)'$ 和 $[\lg(1/R)]'$ 采用全回归和逐步回归的方程完全相同;对土壤  $\text{Ca}^{2+}$  的拟合采用 $(R)'$ 下的全回归方程决定系数最大,但选用敏感波段较多。该地区土壤  $\text{Mg}^{2+}$  含量虽然非常低,

但其含量与反射率的相关性却较  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  高,仅次于  $\text{Na}^+$ ,所以根据反射率预测其含量的决定系数也较高。在敏感波段的选择中,虽然  $R$  和  $1/R$  与  $\text{Mg}^{2+}$  含量的相关性较好,但采用不同回归方法建立拟合方程

后,其决定系数较低,不能较准确地拟合  $Mg^{2+}$  的含量,而采用后 2 种变换方法决定系数相对较高,平均达到 0.72,可以粗略估测  $Mg^{2+}$  的含量。在考虑敏感波段和决定系数时,  $[\lg(1/R)]'$  采用逐步回归的方法预测  $Mg^{2+}$  效果相对最好。

### 2.3 土壤盐分预测模型的验证

为了检验模型的预测效果,利用 24 个验证样本对表层土壤不同盐分预测模型进行了验证。综合考虑模型的决定系数和选用波段的多寡来选择预测模型。采用模型预测值与实测值之间的拟合度  $R^2'$  及预测总均方根差 (RMSE) 来进行验证。由表 7 可见,除  $Ca^{2+}$  和  $Cl^-$  外,其他各盐分指标的光谱预测值与其实测值之间具有较好的相关性,拟合度  $R^2' > 0.59$ ,其中对土壤全盐的拟合度最高,对  $Na^+$  拟合度次之,而且对这 2 个指标拟合的 RMSE 也最小,说明这 2 个模型的精度较高,预测能力很强;光谱对土壤  $SO_4^{2-}$  和  $Mg^{2+}$  的预测能力也较强;对土壤  $Cl^-$  和  $Ca^{2+}$  的预测模型的稳定性、预测能力和精度都较差。

表 7 土壤盐分模型验证指标

盐分指标	决定系数 $R^2$	拟合度 $R^2'$	总均方根差 RMSE
全盐	0.83	0.87	0.13
$CO_3^{2-}$	0.63	0.65	0.31
$HCO_3^-$	0.62	0.61	0.19
$Cl^-$	0.61	0.53	0.45
$SO_4^{2-}$	0.75	0.72	0.21
$Na^+$	0.76	0.86	0.11
$K^+$	0.61	0.59	0.48
$Ca^{2+}$	0.43	0.36	0.52
$Mg^{2+}$	0.70	0.66	0.27

注: $R^2$  为模型建立时的决定系数; $R^2'$  指预测值与模拟值拟合时的拟合度。

## 3 结论

(1) 表层土壤光谱  $r, R, \lg(R)$  与全盐含量呈极显著正相关关系,  $1/R, \lg(1/R)$  与全盐呈极显著负相关关系。 $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  在特定单波段处表现较佳,而  $r, \lg(R), \lg(1/R)$  和 DR 这 4 种变换方法表现相对差一些。

(2) 土壤阴离子中,土壤表层光谱反射率与  $CO_3^{2-}$  的相关性最强,最大相关系数达到 0.750 3;其次是  $SO_4^{2-}$ ,与  $HCO_3^-$  和  $Cl^-$  的相关性较弱;土壤阳离子中,土壤光谱反射率与  $Na^+$  的相关性在 4 种变换方法下均较强,且  $R$  和  $1/R$  与  $Na^+$  呈极显著相关关系(相关系数普遍大于 0.60);其次为  $Mg^{2+}$ ,但前 2 种变换

方法相关系数较小;反射率与  $K^+$  的相关性相对较弱,与  $Ca^{2+}$  的相关性最弱。

(3) 基于  $R$  的逐步回归方程为全盐含量预测的最佳模型;反射率采用  $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  的回归方程决定系数偏低,拟合全盐+的效果相对都不理想;预测土壤  $CO_3^{2-}$  的含量时  $(R)'$  和  $[\lg(1/R)]'$  获得的方程决定系数相差很小,其中  $[\lg(1/R)]'$  决定系数略高;基于土壤光谱反射率拟合土壤  $CO_3^{2-}$  的准确度略高于对土壤  $HCO_3^-$ ;敏感波段估测土壤  $SO_4^{2-}$  含量的决定系数明显高于其他阴离子;采用  $[\lg(1/R)]'$  逐步回归得到的方程拟合土壤  $Na^+$ ,  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  含量相对于其他方式效果最理想。

(4) 建立的预测模型中对土壤全盐的拟合度最高,对  $Na^+$  拟合度次之,而且拟合的 RMSE 也最小,说明这 2 个模型的精度较高,预测能力很强;光谱对土壤  $SO_4^{2-}$  和  $Mg^{2+}$  的预测能力也较强;对土壤  $Cl^-$  和  $Ca^{2+}$  的预测模型的稳定性、预测能力和精度都较差。

### [ 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. Environ., 2002, 80(3):406-417.
- [2] 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.
- [3] Aldakheel Y Y. 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] Mettemicht G L, Zink J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints [J]. Remote Sensing of Environment, 2003,85(1):1-20.
- [5] 张俊华,贾科利.基于水稻冠层 NDVI 的土壤盐碱化信息预测研究[J].水土保持通报,2012,31(6):113-116.
- [6] 李新国,李和平,任云霞,等.开都河流域下游绿洲土壤盐渍化特征及其光谱分析[J].土壤通报,2012,43(1):166-170.
- [7] 李娜,吴玲,王绍明,等.玛纳斯河流域土壤盐渍化现状及其与光谱关系研究[J].江西农业大学学报,2011,33(6):1242-1247.
- [8] Chernousenko G I, Kalinina N V, Khitrov N, et al. Quantification of the areas of saline and solonchic soils in the Ural Federal Region of the Russian federation [J]. Genesis and Geography of Soils, 2012,44(4):367-379.
- [9] 屈永华,段小亮,高鸿永,等.内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(5):1362-1366.

(下转第 164 页)

水平分布格局。

单株油松树下穿透雨的变化明显受到降雨量的影响。在研究期间,随着降水量的增加,穿透雨率呈上升的趋势。

研究发现,冠层结构的特征对穿透雨空间分布具有重要的影响。观测点的离树干距离、冠层厚度、郁闭度是影响穿透雨空间变异的重要因素。由多元线性回归模型 3 个因子的贡献率,离树干距离对穿透雨空间分布的影响最大(贡献率 71.6%),其次为郁闭度(贡献率 21.5%),相对最小的为冠层厚度(贡献率 6.9%)。离树干距离是一个多因子的综合指标,它并非直接决定了穿透雨空间的分布,实际上它对穿透雨空间分布的影响是综合了冠层厚度、郁闭度、开枝角度等冠层结构因素的结果,这种影响具备综合性的特质,在穿透雨的空间变异中起到了主导作用。林外降雨经过油松冠层后,被具有一定厚度的枝叶所拦截,但是枝叶在空间上并不是均匀分布和完全覆盖的,郁闭度的大小反映了枝叶覆盖程度的大小,覆盖程度越大,截留量越大,穿透雨越小。由于郁闭度并不能完全反映出枝叶的截留作用,而冠层厚度又是一个冠层特性的重要指标,它对树冠的截留作用也具有一定的影响。

本文研究的降雨量、降雨强度、测点上方的冠层厚度、郁闭度和离主树干距离这 5 个因素中,除了降雨量之外,其余因素对穿透雨的影响在 0.05 的水平下并不显著,这说明影响林冠穿透降雨空间分布的因素非常复杂,它还与风向等气象因素有关,它们之间的相关程度还需进一步的确定和研究。

研究单株油松树下穿透雨空间分布的特征对林地土壤的水分分布及养分的循环和利用有重要意义,需要进行更深入的研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests [J]. *Journal of Hydrology*, 1993,150(2):217-275.
- [2] Bonell M. Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale [J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998,34(4):765-785.
- [3] McCulloch J G, Robinson M. History of forest hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 1993,150(2):189-216.
- [4] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies: An international and historical perspective of forest impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 1993,145(3):217-230.
- [5] 盛后财. 原始红松林降雨截留再分配及其影响因子研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2009.
- [6] Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, et al. Rainfall concentration under olive trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2002,55(1):53-70.
- [7] 李振新,郑华,欧阳志云,等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. *生态学报*,2004,24(5):1015-1021.
- [8] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性[J]. *生态学报*,2006,26(9):2877-2886.
- [9] 曹云,黄志刚,郑华,等. 杜仲林下穿透雨时间及空间分布特征[J]. *中南林业科技大学学报*,2008(6):19-24.
- [10] 严海霞,何文寿. 宁夏银北地区盐碱地改良与水稻种植技术探讨[J]. *湖北农业科学*,2010,49(11):2693-2695,2708.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [12] 何挺,王静,程焯,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] 王静,何挺,李玉环. 基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J]. *遥感学报*,2005,9(4):438-445.
- [14] Mahlein A K, Steiner U, Hillnhütter C, et al. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases [J]. *Plant Methods*, 2012,8(3):1-13.
- [15] 高志海,白黎娜,王瑛瑜,等. 荒漠化土地土壤有机质含量的实测光谱估测[J]. *林业科学*,2011,47(6):9-16.
- [16] 黄燕,吴平. SAS 统计分析及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [17] Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains(I): spectral analysis[J]. *Remote Sens. Envir.*, 1998,65(2):170-183.

(上接第 129 页)