文章编号:1000-7601(2019)05-0193-07

基于去包络线和连续投影算法的枣园 土壤电导率光谱检测研究

王 涛^{1,2},喻彩丽^{1,2},张楠楠^{1,2},王 斐^{1,2},白铁成^{1,3}

(1. 塔里木大学信息工程学院,新疆 阿拉尔 843300;2. 新疆南疆农业信息化研究中心,新疆 阿拉尔 843300;3. Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liège, Gembloux, Belgium 25030)

摘要:选取新疆阿拉尔市典型极端干旱区为研究对象,利用土壤高光谱特征对土壤电导率进行反演。为了准确快速检测土壤电导率,通过获取南疆阿拉尔市红枣种植区土壤电导率和高光谱信息,在去包络线处理基础上,分别采用相关性分析法和连续投影算法(SPA)筛选特征波长,并建立特征波长与土壤电导率的偏最小二乘回归模型,使用均方根误差(RMSE)、决定系数(R²)以及相对分析误差(RPD)对不同处理方法的模型效果进行评价。结果表明,基于原始光谱直接使用相关性分析法的预测精度 RMSE=0.85566,R²=0.7479,RPD=2.7569;通过去包络线处理使用相关性分析筛选特征波长后,模型的预测精度 RMSE=0.44490,R²=0.9500,RPD=6.4510;基于原始光谱使用 SPA 选择特征波长后,模型的预测精度 RMSE=0.31178,R²=0.9707,RPD=8.4445;通过去包络线处理使用 SPA 选择特征波长后,模型的预测精度 RMSE=0.30173,R²=0.9764,RPD=9.3215。综上,说明 SPA 方法具有较强的特征波长选择能力,基于去包络线处理+SPA 的偏最小二乘回归反演模型的预测精度最好,可实现新疆阿拉尔地区土壤电导率的快速检测。

关键词:土壤电导率;光谱检测;连续投影算法;去包络线;预测 中图分类号:S151.9 文献标志码:A

Spectral detection of electrical conductivity in jujube orchard soil based on continuum-removal and SPA

WANG Tao^{1, 2}, YU Cai-li^{1, 2}, ZHANG Nan-nan^{1, 2}, WANG Fei^{1, 2}, BAI Tie-cheng^{1, 3}

(1. College of Information Engineering, Tarim University, Alaer, Xinjiang 843300, China;

2. South Xinjiang Agricultural Informatization Research Center, Alaer, Xinjiang 843300, China;

3. Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liège, Gembloux 25030, Belgium)

Abstract: The typical extreme arid area of Alar City, Xinjiang was selected as the research object, and the soil electrical conductivity was inverted by using the soil hyperspectral characteristics. In order to accurately and quickly detect the soil electrical conductivity, the soil electrical conductivity and hyperspectral information of the red jujube planting area in Alar City, southern Xinjiang were obtained. Based on the continuum-removal, the correlation analysis method and the successive projections algorithm(SPA) were used to select the characteristics wavelength, and establish a partial least squares regression model of characteristic wavelength and soil electrical conductivity, using the root mean square error (*RMSE*), determination coefficient (R^2) and relative analysis error (*RPD*) to evaluate the model effect of different processing methods. The results showed that the prediction accuracy based on the original spectrum directly using the correlation analysis method was *RMSE*=0.85566, R^2 =0.7479, *RPD*=2.7569. After the feature wavelength was selected by continuum-removal, the prediction accuracy of the model was *RMSE*=0.44490, R^2 =0.9500, *RPD*=6.4510; after using the SPA to select the characteristic wavelength based on the

通信作者:白铁成(1982-)男,黑龙江绥化人,副教授,主要从事遥感与数字农业技术研究。E-mail:baitiecheng1983@163.com

收稿日期:2018-06-06 修回日期:2019-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41561088,61501314);塔里木大学校长基金项目(TDZKQN201614);塔里木大学现代农业工程重点实 验室项目(TDNC20160501)

作者简介:王涛(1982-),男,陕西西安人,讲师,主要从事遥感与数字农业技术研究。E-mail:wujiang0156@163.com

original spectrum, the prediction accuracy of the model was RMSE = 0.31178, $R^2 = 0.9707$, RPD = 8.4445; the model was predicted by continuum-removal using SPA to select the characteristic wavelength. The accuracy was RMSE = 0.303173, $R^2 = 0.9764$, RPD = 9.3215. In summary, the SPA method had strong feature wavelength selection ability. The prediction accuracy of partial least squares regression inversion model using SPA based on the continuum-removal was best, which could realize the rapid soil conductivity in Xinjiang Alar region detection.

Keywords: soil electrical conductivity; spectral detection; successive projections algorithm; continuum removal; prediction model

土壤盐渍化可造成生态环境恶化、作物生产力 下降、土壤肥力衰退,是制约农业生产和生态环境 可持续发展的主要因素之一^[1]。如何快速、实时地 获得盐渍化土壤盐分信息,一直是精准农业所面临 的一个重大课题,传统土壤盐渍化监测方法不但费 时、费力,而且分析人员必须接触一些对人体有害 的化学试剂,这显然有悖于现代农业的要求^[2-4]。 高光谱遥感凭借其波段多且连续、信息丰富、可同 时估算多种成分等特点,为土壤盐渍化监测提供了 新手段,很好地克服了传统人工监测方法的不足, 在土壤盐渍化监测中获得广泛应用^[5-8]。

土壤电导率是衡量土壤盐渍化程度的重要指 标,研究土壤电导率与土壤盐分的相关性以及构建 土壤盐渍化的高光谱定量反演模型是高光谱遥感 的重要内容之一。不同学者对土壤盐渍化的高光 谱定量反演进行了相关研究。Goldshlege 等^[9]通过 获取番茄地高光谱反射率与土壤盐分含量,使用偏 最小二乘法建立预测模型,取得了较好的预测精 度,其中预测均方根误差 RMSE 是 0.6%,决定系数 *R*²是 0.87。Rocha Neto 等^[10] 在巴西半干旱地区使 用土壤电导率进行土壤盐渍化评价,对比使用主成 份回归、多元线性回归和偏最小二乘法建立的预测 模型,其中使用偏最小二乘法获得了较好的预测精 度,RMSE 是 1.22, RPD 是 2.21。Peng 等^[11] 通过获 取内蒙河套地区土壤光谱与盐分信息,使用偏最小 二乘法建立土壤盐分监测模型,证明了通过外部参 数预处理(EPO)光谱,能够剔除干扰信息,提升预 测精度, RMSE 是 0.183, R² 是 0.878。彭杰等^[12] 通 过分析南疆地区土样的高光谱数据和室内测定的 盐分与电导率数据,发现高光谱信息对土壤含盐量 的响应比电导率更敏感,以含盐量为监测指标的高 光谱反演精度明显要优于电导率。李晓明等[13]通 过研究陕北典型半干旱区土壤高光谱特征对盐分 进行反演,发现土壤反射率经过包络线去除后,利 用偏最小二乘回归方法建立的反演模型具有良好 的精度, RMSE 是 1.253, R² 是 0.761。柴思跃等^[14] 以黄河三角洲土壤体积含水率、电导率为研究对 象,应用遗传偏最小二乘法(GA-PLS)建立了土壤 水分与电导率光谱模型并验证其具有良好的预测 精度,其中 RPD 是 14.87, R² 是 0.71。王爽等^[15]对 库车河三角洲土壤的高光谱反射率及其土壤含盐 量进行了研究,通过对土壤光谱反射率进行对数、 均方根、连续统去除等处理筛选敏感光谱波段,构 建地表实测光谱模型,证明反射率一阶微分光谱变 换方式最好,与土壤含盐量相关性最佳,最大相关 系数可达 0.987。

尽管已有研究利用土壤电导率和含盐量指标, 取得了相对理想的反演效果,但不同区域的土壤结 构、成分差异显著,高光谱响应和敏感波长也具有 一定的差异性。因此,本文在总结前人研究基础 上,以新疆阿拉尔典型沙壤土为研究区,依据高光 谱影像数据与土壤电导率实测数据,重点验证连续 投影算法(SPA)用于土壤电导率敏感特征波长的选 择能力,并分析了去包络线方法的光谱预处理能 力,使用偏最小二乘回归法(PLSR)建立土壤电导率 检测模型。为利用遥感技术快速监测新疆南部地 区土壤盐渍化提供理论依据和模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于新疆阿拉尔市十团,东经 81°13′3″, 北纬 40°34′45″,试验地海拔约 1 020 m,为典型极端 干旱气候区。年均降水量 40.1~82.5 mm,年均气温 10.8℃,年均蒸发量 1 976.6~2 558.9 mm,土壤质地 为沙壤土,属氯化物-硫酸盐类土壤类型,0~100 cm 平均土壤容重 1.34 g·cm⁻³,土壤含盐量 1.2~1.5 g ·kg⁻¹,pH 8.49,土壤盐碱化严重。

1.2 样品采集与土壤电导率测定

以样区中心为起点,沿东、南、西、北四个方向 采样,每个方向的样点分布于一条直线上,样点之 间的距离为50m左右,分别采集土壤表层盐分已结 晶的表层土和0~20 cm的正常土壤,每个土样采集 重量为2kg左右,分别按1:99,2:98,…,99:1 的比例混合共获得142份不同盐分的土壤样本。将 样本带回实验室自然风干,磨细过筛,过筛孔径为2 mm,用于光谱测试和电导率的测定,电导率采用水 土比为5:1,利用 DDS-307 电导率仪直接进行测 定^[12]。如表1 是根据 SPXY 算法^[16]挑选出的100 份样品作为定标集,其他40 份土壤样品作为预 测集。

1.3 土壤光谱测定

土壤光谱测定采用 Zolix Gaia Sorter 近红外成 像高光谱仪,光谱测定范围 900~1 700 nm(实际测 量到 1 750 nm),光谱分辨率 5 nm,光谱采样点 4 nm,共 256 个波段测定获取高光谱数据,每次测量 前进行标准白板校正,每个样点重复采集 10 条光谱 曲线(在 ENVI 5.3 软件中导出光谱曲线),取平均值 作为该样本的光谱吸收度,具体采集方法参考文 献^[12-13],剔除了 2 份异常样本后(光谱曲线缺失), 共获得 140 个有效样本,如图 1 光谱吸收谱。

1.4 建模方法及评价指标

通过获取试验区样点光谱特征,分析其与土壤 电导率的相关性遴选敏感波长,同时使用连续投影 算法筛选敏感波长,分别用于土壤电导率的定量反 演,采用 PLSR 方法建立土壤电导率的定量反演模 型,并利用检验样点进行反演精度的对比研究。

表1 校正集和预测集土壤电导率统计

 Table 1
 The statistics of soil electrical conductivity in calibration and validation set

数据集 Data set	样本数 Sample size	最小值 Min. value	最大值 Max. value	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation
训练集 Training set	100	0.2720	10.5400	5.6561	2.8131
预测集 Testing set	40	1.1440	9.8700	1.1440	2.5422





1.4.1 去包络线算法 在光谱曲线相似的情况下, 直接从中提取光谱特征不便于计算,因此需要对光 谱曲线做进一步处理,以突出光谱特征。包络线消 除法可以有效突出光谱曲线的吸收、反射和发射特 征,并将其归一到一个一致的光谱背景上,有利于 和其他光谱曲线进行特征数值的比较,本研究使用 matlab 编程实现对土壤原始光谱进行包络线去除处 理,具体算法参考文献^[17-19]。

1.4.2 相关性分析 通过对土壤高光谱进行去包 络线归一化处理与不同的土壤电导率逐波段来进 行相关分析,筛选相关系数高的波长为土壤含盐量 敏感波长^[7,11],计算土壤光谱每个波长与土壤盐分 的相关系数 *r_i*,如式:

$$r_i = \frac{Cov(R, EC)}{\sqrt{D(R) \ \sqrt{D(EC)}}}$$

式中,*r_i*为土壤电导率(*EC*)与光谱吸光度及其变换 形式(*R*)的相关系数,*i*为波段号,*D*表示方差。

1.4.3 SPA 方法 连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)通过计算吸光度矩阵中某一波 长对其他波长的投影,在该波长序列中选取投影量 最大的波长作为下一个波长,序列中的每个波长都 与其前一个波长相关性最小,能最大程度消除共线 性对模型的干扰,降低建模过程的复杂度,以其简 便、快速的特点得到越来越多的应用,本文对土壤 的原始光谱和预处理光谱数据的校正集与验证集 进行 SPA 选择,SPA 选择变量数的最优区间是[2, 50],具体算法参考文献^[20-22]。

1.4.4 PLSR 方法 通过获取样点光谱特征,遴选 特征波段,采用最小二乘回归方法(partial least squares regression, PLSR)方法^[23-25]建立土壤电导 率的定量监测模型,并利用检验样点进行模型精度 对比研究。

1.4.5 反演精度检验 反演模型精度检验通过对 比均方根预测误差(root mean square error, *RMSE*), 决定系数(R^2)以及相对分析误差(residual predictive deviation, *RPD*)进行判断^[27-28]。*RMSE* 是一个表示 模型预测值误差大小的指标,均方根误差越小,其 预测精度越高;计算检验样点的 *RMSE*,如式:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} p_i - M_i}{n - 1}}$$

其中,*P*_i为检验样点定量反演预测值,*M*_i为检验样 点的实测值。

R² 是一个判断模型预测值和实测值之间相关 性大小的指标,其值越接近1,其精度越高,拟合程 度越好,预测值与实测值的相关性越好,观测点在回归直线附近越密集,一般来说 R² > 0.7 则模型的预测结果可信度较高,反之,模型预测结果不可靠。R² 计算公式如下:

$$R^2 = \frac{S_R}{S_r} = 1 - \frac{S_\varepsilon}{S_r}$$

其中,*S_R*为回归平方和,*S_e为残差平方和,S_r为总离 差平方和。*

RPD 用来验证模型的稳定性和预测能力。一般情况下,当*RPD* > 3,则模型具有较高的稳定性和良好的预测能力。*RPD* 计算公式如下:

$$RPD = \frac{SD}{SEP}$$

其中,SD 为预测样品的标准偏差,SEP 为预测标准 分析误差。

2 结果与分析

2.1 相关性分析法与 PLSR 模型

分析土壤电导率与不同波长光谱特征的相关 性,基于原始光谱相关性分析如图 2a 所示,相关系 数曲线表明,光谱吸光度与土壤电导率在 1 400~ 1 600 nm 之间曲线变化相对平稳波动小,具有良好 相关性;在 1 350~1 400 nm 之间相关系数曲线呈明 显的波峰;在 1 000~1 300 nm 之间,随着波长的增 加,相关系数整体呈增减趋势;在 900~960 nm, 1 650~1 750 nm 之间相关系数曲线跳跃厉害,不宜 用作土壤电导率模型的建立^[11]。对原始光谱经过 包络线去除获取的归一化吸光度如图 2b 所示,土壤 电导率与光谱吸光度在 1 400~1 500 nm 之间具有 良好相关性,且曲线变化相对平稳波动小;960~ 1 300 nm 之间随着波长的增加,相关系数呈递减趋 势;900~960 nm,1 500~1 750 nm 曲线跳跃厉害,不 宜用作土壤电导率模型的建立。

基于土壤原始光谱选择相关系数高的波长,用 于建立土壤电导率监测模型^[13,15]。通过研究不同 波长吸光度与土壤电导率相关性,发现在 1 350~ 1 560 nm 波长的相关性较好,其中以 1 439 nm 相关 系数最高,另一方面,在相关系数曲线上具有明显 的波谷的波长是土壤电导率的特征波长,如:1 350 ~1 400 nm 及 1 450~1 560 nm 范围之间,1 358, 1 378,1 439, 1 491,1 549 nm 可作为土壤电导率监 测模型的特征波长^[13],如图 3a。然后利用 PLSR 方 法,建立电导率监测模型为:

$$T_s = -49.1190 + 1.0411 \times R_{1358}$$

$$-0.3164 \times R_{1378} - 1.7389 \times R_{1439}$$

 $-0.5499 \times R_{1491} + 1.6138 \times R_{1549}$

其中,*R*₁₃₅₈,*R*₁₃₇₈,*R*₁₄₃₉,*R*₁₄₉₁,*R*₁₅₄₉ 分别为 1 358, 1 378,1 439,1 491 nm 和 1 549 nm 波长的吸光度, *T_s*为土壤电导率。提取的主成份个数是 3 个。为了 考察回归方程的模型精度,在样品光谱采集时,利 用同步采集的 40 个样本点作为检验样点绘制预测 图,如图 3b。定量反演的预测均方根误差 *RMSE* 为 0.85566,决定系数 *R*² 为 0.7479,相对分析误差 *RPD* 为 2.7569,预测精度相对较低。

基于去包络线归一化光谱选择相关系数高的 波长,用于土壤电导率监测模型^[13,15]。如图 4,通过 研究不同波长吸光度与土壤盐电导率相关性,发现 在 1 350 ~ 1 500 nm 波长的相关性较好,其中以 1 443 nm 相关性最高;另一方面,在相关系数曲线中 具有明显的波谷的波长是土壤电导率的特征波长, 如:1 350 ~ 1 400 nm 及 1 450 ~ 1 560 nm 范围之间, 1 341,1 358,1 385, 1 443,1 467 nm 可作为土壤电 导率反演的特征波段^[13,19],如图 4a。然后利用 PLSR 方法,建立土壤电导率监测模型为:



图 2 土壤光谱与土壤电导率相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of soil spectrum and soil electrical conductivity



注:图中"□"为选择的特征波长。下同。

Note: " \square " in the figure is the selected characteristic wavelength. The same below.

图 3 基于土壤原始光谱筛选特征波长与土壤电导率预测

Fig.3 The prediction model of soil electrical conductivity based on the original spectra correlation analysis



图 4 基于包络线去除光谱筛选特征波长与土壤电导率预测

Fig.4 The prediction model of soil electrical conductivity based on the continuum-removal original spectra

$$T_{s} = 1.1376 + 4.5626 \times R_{1341}$$

- 4.6909 × R_{1358} - 9.6961 × R_{1385}
- 4.0857 × R_{1443} - 1.4945 × R_{1467}

其中, *R*₁₃₄₁, *R*₁₃₅₈, *R*₁₃₈₅, *R*₁₄₄₃, *R*₁₄₆₇分别为1341,1358, 1385,1443,1467 nm 波长的吸光度, 提取的主成份 个数是3个。为了考察回归方程的模型精度, 使用 采集的40个样本点作为检验样点绘制预测图, 如图 4b。定量反演的预测均方根误差 *RMSE*为0.44490, 决定系数 *R*²为0.9500, 相对分析误差 *RPD*为6.4510, 预测精度相对原始光谱较好。

2.2 SPA 特征波长选择与 PLSR 模型

对土壤原始光谱的数据校正集进行 SPA 选择, SPA 选择变量数的最优区间是[2,50]^[20]。如图 5a 为 SPA 算法对土壤原始光谱数据进行压缩后所选择 的特征波长。统计建模结果表明:针对原始光谱反映 土壤电导率对应波段主要集中在 1 300~1 600 nm 附 近, 与图 3a 在 1 300~1 600 nm 的吸收峰和吸收谷基本 一致。利用 PLSR 方法, 建立土壤电导率监测模型为:

 $T_s = 3.1575 - 0.9573 \times R_{1443}$

+ 0.7783 ×
$$R_{1501}$$
 + 0.3237 × R_{1136}

+ 0.0811 ×
$$R_{1595}$$
 - 0.1639 × R_{1355}

其中, *R*₁₄₄₃, *R*₁₅₀₁, *R*₁₁₃₆, *R*₁₅₉₅, *R*₁₃₅₅, 分别为1443, 1501, 1136, 1595 nm 和1355 nm 波长的吸光度, 提取的主成 份个数是5个。为了考察回归方程的模型精度, 使用采 集的40个样本点作为检验样点绘制预测图, 如图5b。 定量反演的预测均方根误差 *RMSE* 为0.31178, 决定系 数*R*² 为0.9707, 相对分析误差 *RPD* 为8.4445, 预测精度 相对于相关性分析建模的预测精度更好。

对去包络线归一化光谱的数据校正集进行 SPA 选择,如图 6a,利用 PLSR 方法,建立土壤电导率监

测模型为:

$$T_{s} = 15.4226 - 0.5074 \times R_{1446}$$

+ 0.4355 × R_{1402} + 0.4201 × R_{1341}
- 0.5404 × R_{1375} + 0.0835 × R_{1661}
+ 0.1112 × R_{1595}
年中, R_{1476} , R_{1476} , R_{1576} , R_{1507} , β_{1507} , β_{1507

其

1 402,1 341,1 375,1 661 nm 和 1 595 nm 波长的吸 光度,提取的主成份个数是5个。为了考察回归方 程的模型精度,使用采集的40个样本点作为检验样 点绘制预测图,如图 6b。定量反演的预测均方根误 差 RMSE 为 0.30173, 决定系数 R² 为 0.9764, 相对分 析误差 RPD 为 9.3215, 预测精度最好。





Fig.5 The prediction model of soil electrical conductivity based on original spectra used by SPA





2.3 PLSR 模型定量反演精度比较

本文提出的不同处理方法的结果如表 2 所示. 综合比较,本研究使用去包络线+相关性分析方法 的定量反演模型的 RMSE = 0.44490, R² = 0.9500 和 RPD=6.4510,要优于直接对原始光谱进行相关性分 析的建模预测精度 RMSE = 0.85566, R² = 0.7479 和 RPD=2.7569,这与柴思跃^[14]和李晓明等^[13]的研究 结果类似,证明了去包络算法的可行性。通过 SPA 选择特征波长的反演精度可以发现,SPA 方法的预 测精度较高,优于相关性分析法。去包络处理+SPA 定量反演模型的 RMSE = 0.30173. R² = 0.9764 和 RPD=9.3215,是所有模型预测精度最好的,说明 SPA 具有较强的特征波长选择能力,采用去包络处 理结合 SPA 方法的建模效果最为理想。

讨 论 3

在使用偏最小二乘法建立土壤电导率监测模 型的方法中,不同的学者在选取特征波长和进行光 谱预处理时选择了不同的方法,得出了不同的结论。

表 2 不同方法对土壤电导率的检测精度对比

Table 2 Comparison of son conductivity detection in unreferr method	Table 2	Comparison	of soil	conductivity	detection	$_{in}$	different	methods
---	---------	------------	---------	--------------	-----------	---------	-----------	---------

光谱处理与特征波段选取方法 Spectral processing and feature band selection method	建模方法 Modeling method	决定系数 <i>R</i> ²	均方根误差 RMSE	相对分析误差 RPD
相关性分析法 Correlation analysis	PLSR	0.7479	0.85566	2.7569
去包络处理+相关性分析 Continuum removal and Correlation analysis	PLSR	0.9500	0.44490	6.4510
原始光谱+SPA Original spectrum and SPA	PLSR	0.9707	0.31178	8.4445
去包络处理+SPA Continuum removal and SPA	PLSR	0.9764	0.30173	9.3215

仅从方法的选取上进行对比,以经过预处理的光谱 进行建模的效果基本上要好于原始光谱,其中柴思 跃等[14]在使用包络线进行光谱预处理的基础上利 用 GA 选取特征波长建立预测模型的精度明显要好 于原始光谱:李晓明等[13]的结论中采用包络线去除 方法,通过相关分析选取特征波长,预测的均方根 误差明显降低了,证明了土壤反射率经过包络线去 除后,利用偏最小二乘回归方法建立的反演模型具 有良好的精度;Peng X 等^[11] 通过偏最小二乘法建 立的土壤盐分监测模型,预测的决定系数和相对分 析误差明显提高,均方根误差明显降低,证明了通 过外部参数预处理(EPO)光谱,能够剔除干扰信 息,提升预测精度;彭杰等^[12]在土壤含盐量与电导 率的高光谱反演精度对比研究中,经过连续统去除 处理,通过相关性分析选取特征波长,模型预测的 决定系数和相对分析误差均没有提高。

结合本文的结论从光谱预处理方法进行分析, 无论采用相关性分析法或 SPA 特征波长选择方法, 在包络线去除归一化光谱后模型的建模精度皆优 于原始光谱,通过去包络线归一化处理,既保持了 光谱的吸收特征又达到了去除包络线的目的,减少 其他物质光谱特征的干扰,证明了去包络线去除法 的光谱预处理能力。

4 结 论

通过分析新疆阿拉尔市十团不同试验区枣园 沙壤土的高光谱特征,对光谱进行预处理,选取特 征波长建立土壤电导率反演模型,实现了对土壤电 导率的快速检测。在包络线去除归一化光谱后的 建模精度皆优于原始光谱,经过包络线去除处理 后,相对于相关性分析法,连续投影算法选取特征 波长进行建模的精度要更好,说明基于去包络线光 谱预处理和连续投影算法建立偏最小二乘法回归 模型,可实现土壤电导率的快速检测。本研究为南 疆干旱区盐渍化土壤电导率的快速、准确检测提供 了一定的理论依据。然而对于南疆耕作的沙壤土, 其电导率是否能够完全反映土壤的含盐量,盐分含 量和电导率之间的相关关系等需要在未来工作中 加强对比研究。

参考文献:

- [1] Pang G, Tao W, Jie L, et al. Quantitative model based on field-derived spectral characteristics to estimate soil salinity in Minqin County, China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(2):546.
- [2] Rud R, Shoshany M, Alchanatis V. Spectral indicators for salinity effects in crops: a comparison of a new green indigo ratio with existing indices[J]. Remote Sensing Letters, 2011, 2(4):289-298.
- [3] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [4] Kelimu A, Tiyip T, Zhang D, et al. Calibration and validation of soil salinity estimation model based on measured hyperspectral and Aster image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(12):144-150.
- [5] Zhang D, Tiyip T, Ding J, et al. Quantitative estimating salt content of saline soil using laboratory hyperspectral data treated by fractional derivative[J]. Journal of Spectroscopy, 2016,2016(1):1-11.
- [6] 王海江,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[J].农业机械学报,2014,45(7):133-138.
- [7] 丁建丽,伍漫春,刘海霞,等.基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍 化监测研究[J].光谱学与光谱分析,2012,32(7):1918-1922.
- [8] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等.基于改进植被指数的黄河口区盐渍土 盐分遥感反演[J].农业工程学报,2015,31(5):107-114.
- [9] Goldshleger N, Chudnovsky A, Ben-Binyamin R. Predicting salinity in tomato using soil reflectance spectra [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(17):6079-6093.
- [10] Rocha Neto O, Teixeira A, Leão R, et al. Hyperspectral remote sensing for detecting soil salinization using ProSpec TIR-VS aerial imagery and sensor simulation [J]. Remote Sensing. 2017,9(1):1-16.
- [11] Peng X, Xu C, Zeng W, et al. Elimination of the soil moisture effect on the spectra for reflectance prediction of soil salinity using external parameter orthogonalization method [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(1):015014.
- [12] 彭杰,王家强,向红英,等.土壤含盐量与电导率的高光谱反演精度 对比研究[J].光谱学与光谱分析,2014,34(2):510-514.

(下转第217页)