

桂北桉树人工林红壤速效钾含量高光谱反演模型研究

赵隽宇^{1,2}, 石媛媛^{1,2}, 覃祚玉^{1,2}, 潘波^{1,2}, 黄小芮³, 唐健^{1,2*}

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 广西南宁 530002; 2. 广西林用新型肥料研发中心, 广西南宁 530002; 3. 国有七坡林场, 广西南宁 530225)

摘要 以桂北桉树人工林红壤为研究对象, 测定了不同土壤速效钾含量样品的的光谱数据, 分析其光谱特征, 采用 PLS 法建立反演模型。结果表明: 该区域红壤速效钾含量的光谱敏感波段集中于 400~600、1 450、2 200 nm 等区域。经过一阶导数变换后, 能显著减少原始光谱数据中的冗余信息, 提高光谱指标与土壤速效钾含量之间的相关性。R、FDR 2 种光谱指标的全波段建模结果均优于显著性波段的建模结果, 最优模型为全波段-FDR-PLS, 模型 $R^2=0.862$, RMSE=2.718。该研究结果可为广西土壤数字制图、精准变量施肥以及土壤速效钾实时监测等近地遥感推广应用服务。

关键词 可见-近红外光谱; 近地遥感; 线性模型; 人工林; 土壤信息

中图分类号 S714.8 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)21-0154-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.037

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hyperspectral Inversion Model of Available Potassium Content in Red Soil of Eucalyptus Plantation in Northern Guangxi

ZHAO Juan-yu^{1,2}, SHI Yuan-yuan^{1,2}, QIN Zuo-yu^{1,2} et al (1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi 530002; 2. Guangxi Research and Development Center for New Forestry Fertilizer, Nanning, Guangxi 530002)

Abstract Taking red soil of eucalyptus plantation in northern Guangxi as the research object, the spectral data of different soil available potassium content samples were measured, the spectral characteristics were analyzed, and the inversion model was established by using PLS method. The results showed that the spectral sensitive bands of available potassium content mainly concentrated in the region of 400–600, 1 450, 2 200 nm and so on. After the first derivative transformation, the redundant information in the original spectral data can be significantly reduced, and the correlation between spectral indexes and soil available potassium content can be improved. The full-band modeling results of R and FDR were better than those of significant bands. The optimal model was full-band FDR-PLS, $R^2=0.862$ and RMSE=2.718. The results can be used for the application of near-ground remote sensing in Guangxi, such as soil digital mapping, precise variable fertilization and real-time monitoring of soil available potassium.

Key words Visible-near-infrared spectroscopy; Near-earth remote sensing; Linear model; Plantation; Soil information

土壤中的钾元素是植物生长发育所必需的大量养分元素, 其含量的高低也是衡量土壤向地上植物持续供应钾的能力^[1]。在人工林生产经营中, 钾肥的投入不但对农作物稳定增产起到至关重要的作用, 而且与林地生态环境有着密切关系, 土壤中钾含量过高会导致资源浪费、土壤环境污染、水污染以及土壤养分分布不平衡等问题^[2-3]。因此, 准确、高效地调查林地土壤钾含量及其地域分布状况对于人工林地减肥增效、生态可持续发展具有重要意义。传统的化学分析法采用火焰光度计和原子吸收仪测定土壤全钾含量, 但测定成本较高、耗时长, 测定结果具有一定的滞后性, 难以有效满足田间施肥管理实时性的需要^[4-5]。

高光谱(Hyperspectra)检测技术作为一种新型的样品检测技术, 具有快速、高效、成本低、样品无损且适用范围广等特点^[6-7], 其原理是利用土壤化学成分中 C—C、C—O、C—H、N—H 等官能团对高光谱波段的基频和倍频吸收获取土壤光谱数据^[8], 通过建立光谱数据与土壤养分元素含量的回归模型, 实现土壤养分元素的定性定量分析。自 20 世纪 80 年代开始, 国内外学者在土壤养分含量高光谱技术快速测定方面做了大量研究, 目前大量研究成果已经逐步应用于生

产实践中^[9-13]。彭一平等^[5]以华南地区土壤为研究对象, 基于一阶微分变换的光谱数据构建了土壤全钾高光谱反演模型, 决定系数 R^2 为 0.64, 均方根误差 RMSE 为 4.850。李耀翔等^[14]对比了 PLS、SVR、PCR 3 种建模方法与 Savitzky-Golay 平滑+多元散射校正、一阶导数、二阶导数等多种光谱数据预处理方法建立模型, 认为采用 Savitzky-Golay 平滑+多元散射校正+一阶导数预处理, 以 PLS 法建立的森林土壤有机碳预测模型最优。Conforti 等^[15]采集了不同地区的 215 个土样, 建立了 PLSR 模型, R^2 达到 0.82。目前大量的研究成果主要集中于土壤有机质、水分^[16]、总氮、盐渍度等光谱吸收特征较为明显的土壤属性, 针对土壤矿质元素(如钾、钙、镁、铁)的研究相对较为缺乏。

笔者以广西桂北红壤桉树人工林土壤为研究对象, 进行土壤采样、实验室土壤样品制备与速效钾含量测定、土壤光谱数据采集与处理等, 对土壤原始光谱反射率进行一阶导数变换, 通过相关系数的显著性筛选敏感波段范围, 最后基于全波段和显著性波段运用 PLS 法、多元线性回归法建立预测模型, 以独立样本进行验证, 对比不同模型建模精度, 筛选反演土壤速效钾的最优方法, 为实现广西人工林土壤速效钾含量无损测定及制订区域化林地经营策略提供技术支撑和研究基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 土壤样品来自广西壮族自治区柳州市国有黄冕林场桉树人工林主要种植区域, 林场地处低纬度地区(108°18′26″E, 25°21′32″N), 属亚热带向中亚热带过渡带,

基金项目 广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题资助项目(2020-A-04-01); 广西创新驱动发展专项资金项目课题(桂科 AA17204087-11)。

作者简介 赵隽宇(1994—), 男, 广西南宁人, 工程师, 硕士, 从事土壤环境与遥感信息技术研究。* 通信作者, 教授级高级工程师, 博士, 从事土壤环境质量研究。

收稿日期 2021-03-15

受季风环流影响较明显。境内气候温和,年平均气温 20.4℃,夏季最高气温 38.0℃,冬季最低气温 0℃。雨量充沛,年均降雨量约 1 483.8 mm。地貌以丘陵为主,平均海拔在 200 m 以上,土壤类型主要为酸性沉积岩发育的红壤,砾石含量≤10%。该地区土地利用方式较为单一,长期种植树种为桉树(*Eucalyptus robusta* Smith),采样时为萌芽一代林,林龄 2~3 年。

1.2 土壤样品采集 采样点布设采用 ArcGis 10.1 网格化布点方式(图 1),共计 28 个采样点。实地采样时选取长势均匀、未受到病虫害侵蚀的林地,以“S”型取样法采集 0~20 cm 表层土壤,采集时剔除侵入物,将土壤样品混合后,经四分法收集 500 g 土壤,做好标记后装入自封袋。土壤样品自然风干,经研磨过筛后采用火焰光度计法测定土壤速效钾含量,另一部分过 0.149 mm 土筛用于室内高光谱数据采集。

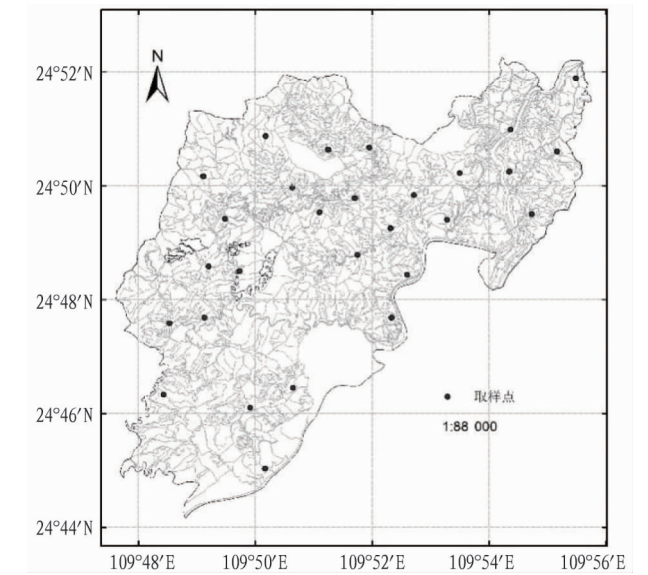


图 1 研究区域采样点分布
Fig. 1 Sampling point distribution

1.3 土壤光谱数据采集 采用 ASD FieldSpec 4 高光谱仪在暗室内测定土壤光谱数据,光谱波段介于可见-近红外波段(350~2 500 nm),分辨率 1 nm,探头视场角 15°,光源采用仪器配套的 50 W 卤素灯,光源入射角为 45°。土壤样本装入直径 7 cm,深约 1.5 cm 的样品杯,抹平并压实,探头距土壤表面 5 cm,采用仪器控制器扣除空气背景值后测定土壤光谱数据。为保证光谱数据的准确性,每个土壤样本均采集 10 次光谱数据,取算数平均值为最终土壤光谱数据。

1.4 光谱数据预处理 采用 ASD F4 仪器配套的 ViewSpecPro 6.0 对光谱数据进行预处理。首先去除光谱仪器量程两端(<400 nm,>2 400 nm)由于仪器自身性能造成光谱数据噪声较大的波段,在土壤原始光谱反射率(Raw spectral reflectance, R)的基础上,计算反射率一阶导数(First derivative of reflectivity, FDR)。一阶导数处理可以消除背景噪声的干扰,分解混合重叠峰,提高光谱分辨率和灵敏度,易找到相关性高的波段。

1.5 分析与建模方法 在土壤速效钾含量高光谱数据建模

过程中,不同的光谱数据预处理方式往往与土壤速效钾含量的相关性不同,需要对 R、FDR 分别进行相关性分析,筛选不同光谱预处理方式的敏感波段。采用典型相关分析方法对土壤速效钾含量与光谱数据进行相关性分析,筛选出显著相关波段($P<0.05$)作为自变量输入模型,相关性分析与制图采用 origin 2018 软件完成。

2 结果与分析

2.1 森林土壤速效钾含量描述性统计 用于建模的土壤速效钾样本总数为 28 个,速效钾含量平均值为 54.72 mg/kg,整体变化范围在 31.8~84.0 mg/kg,标准差 14.542 7,方差 211.49,偏差 0.396 58,峰度-0.568 7。根据《耕地质量等级》GB/T 33469—2016 可知,该区域土壤速效钾含量处于较低水平,变异系数为 26.57%,土壤速效钾空间变异性为中等水平,在该地块内具有一定的代表性。

2.2 高光谱谱图特征 从图 2 可知,不同采样点位土壤样品的差异反映在反射率的强度上,整体谱线形状基本保持一致,说明同种类型土壤样品的高光谱特征类似。在 400~800 nm 可见光区域,不同土壤样品的光谱特征差异性较小,部分波段存在交叉现象,随着波长递增,波段交叉现象逐渐减少。2 300~2 400 nm 处波段交叉现象较为严重,说明在仪器的检测范围两端光谱噪声较大。土壤样品的整体谱线在 1 000、1 400、1 800~1 900 及 2 200 nm 附近出现较为强烈的光谱吸收峰,其余波段的光谱反射率变化波动较小。原始光谱经一阶导数(FDR)变换后的谱图见图 3,不同土壤样品的谱图特征、形状基本一致。相比原始光谱 R,不同样品间的 FDR 谱图差异性较小,但作为特征识别区的吸收峰与吸收谷更加尖锐,可见光区域(400~800 nm)的噪声更加明显,吸收峰位置与原始光谱图一致(1 000、1 400、1 800~1 900 及 2 200 nm)。

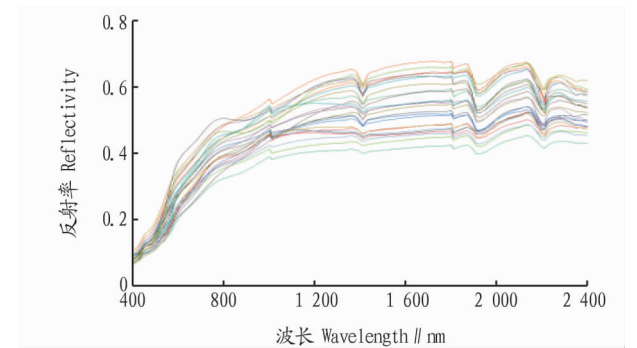


图 2 原始光谱反射率
Fig. 2 Original spectral reflectance

2.3 土壤速效钾含量相关性 为进一步筛选特征光谱,提高模型拟合精度,采用 person 相关性分析法分析土壤速效钾含量与光谱数据的相关性,筛选相关性较高的波段建立模型(图 4)。土壤原始光谱反射率 R 与速效钾含量相关性系数均为正值,在 400~600、1 450、2 200 nm 附近相关系数较高,600~1 000 nm 波段相关系数相对其他波段明显较低,因此,选取 580、600、1 020、1 450、2 200 nm 5 个敏感波段建立模型。土壤原始光谱一阶导数变换 FDR 与土壤速效钾含量相关性出现负值,在 2 300~2 400 nm 波段附近呈显著负相关($P<$

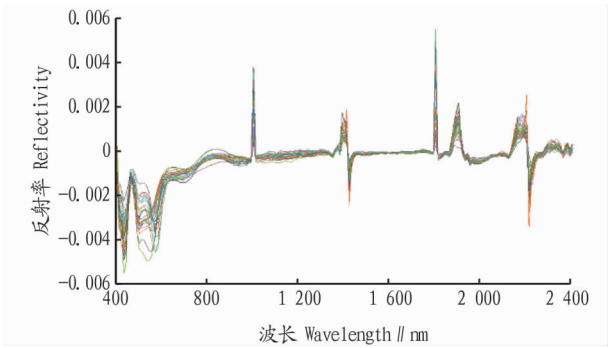


图3 光谱一阶导数

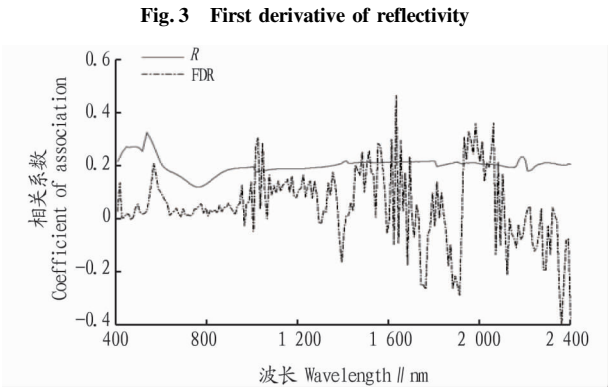


Fig.3 First derivative of reflectivity

图4 不同光谱指标与土壤速效钾 person 相关性

Fig.4 Correlation between different spectral indexes and soil available potassium Person

0.05),在1 600 nm 附近呈显著正相关($P<0.05$),整体波段相关性系数波动幅度较大。FDR 显著性波段选择为1 000、1 650、1 600、2 100、2 380 nm 5 个波段建立模型。

2.4 土壤全钾光谱反演模型 采用 R 、FDR 的全波段(400~2 400 nm)以及这 2 种指标的显著性波段, R (580、600、1 020、1 450、2 200 nm)、FDR(1 000、1 650、1 600、2 100、2 380 nm)作为模型自变量输入,土壤速效钾含量为因变量,采用 Leave-one-out 交叉验证法确定模型中最佳因子个数,分别建立 PLS 模型,模型基本参数见表 1。全波段模型中,FDR-PLS 模型主成分个数为 6 个,模型精度 $R^2=0.862$, $RMSE=2.718$,优于 R -PLS 模型,说明一阶导数变换能显著减少光谱数据冗余量,提高建模精度。显著性波段模型中, R -PLS、FDR-PLS 模型 R^2 均未达到 0.7,模型精度较低,但主成分个数为 5 个,相比以全波段建模,其模型复杂度显著降低,运算量小,适合开发便携式设备进行土壤速效钾的实地、实时估测。以独立样本对最优模型(全波段 FDR-PLS)进行验证(图 5)。验证样本中,土壤速效钾含量范围在 40~60 mg/kg 占总样本的 60%,速效钾含量大于 60 mg/kg 时,预测值与观测值偏离较大。模型验证拟合精度 R^2 为 0.865 8,高于建模精度,说明该模型具备一定的外推应用能力。

3 讨论与结论

3.1 结论 通过对桂北红壤区土壤高光谱数据进行特征分析,确定了土壤速效钾含量的光谱敏感波段(400~600、1 450、2 200 nm),采用一阶导数变换对原始光谱指标进行前处理,将 R 、FDR 全波段数据与显著相关波段作为自变量,同

表 1 全波段与显著性波段土壤速效钾 PLS 预测模型

Table 1 PLS prediction model of soil available potassium in full band and significant band

光谱指标 Spectral indexes	全波段模型 Full-band inversion model			显著性波段模型 Significant band inversion model		
	主成分 Principal components	R^2	RMSE	主成分 Principal components	R^2	RMSE
R	7	0.763	3.412	5	0.587	4.741
FDR	6	0.862	2.718	5	0.661	4.162

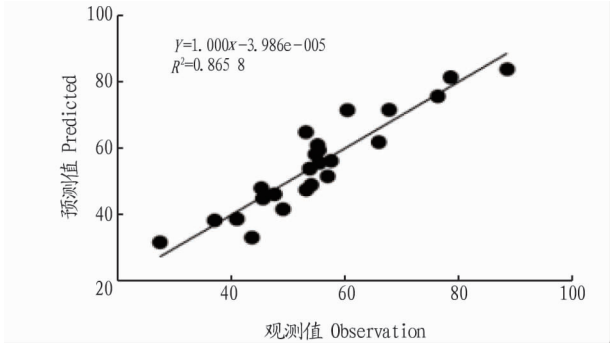


图5 全波段 FDR 预测模型

Fig.5 Full-band FDR prediction model

时采用 PLS 法建立光谱数据模型。研究表明:①一阶导数变换能显著减少原始光谱数据中的冗余信息,提高光谱指标与土壤速效钾含量之间的相关性;② R 、FDR 2 种光谱指标的全波段建模结果均优于显著性波段的建模结果,最优模型为全波段-FDR-PLS,模型 $R^2=0.862$, $RMSE=2.718$;③显著性波段建立的模型主成分个数较少,模型复杂程度、计算量等显著降低,可为今后开发便携式设备提供数据基础。

3.2 讨论 由于土壤高度的空间变异性,不同区域的立地条件与土壤本底状况不同,因此,该研究参考了大量研究成果^[17-19],对土壤样品进行风干、研磨、过筛处理,消除土壤水分以及土壤粒径对光谱数据采集的影响。同时采用暗室进行土壤光谱反射率的室内测定,相比野外测量更容易控制光源单一性,大幅消除了自然因素和人为因素对土壤光谱数据采集的影响。初步确定了适宜桂北红壤区桉树人工林土壤的前处理及光谱数据采集方法,为土壤光谱数据库的建立以及反演模型的外推应用提供了前期基础。同时,该研究填补了广西红壤区域土壤矿质元素高光谱快速反演研究的空白,但目前的研究仅仅针对红壤,在今后的研究中应加入赤红壤、砖红壤、石灰土等广西主要土壤类型,为指导土壤管理、精准变量施肥等工作奠定基础。

参考文献

[1] 姜子绍,宇万太. 农田生态系统中钾循环研究进展[J]. 应用生态学报, 2006,17(3):3545-3550.
[2] 曹继钊,李孝忠. 桉树人工林沃土保育与可持续经营思考[J]. 广西林业科学,2017,46(2):233-236.
[3] 王嘉琛,赵隼宇,黄康庭,等. 桂北土壤肥力质量对尾叶桉人工林连栽连作的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2019,39(1):106-113.
[4] 谢文. 基于高光谱技术的森林土壤不同养分含量光谱特征及估测模型研究[D]. 南昌:江西农业大学,2017.

3 讨论

腊叶标本烘干过程中影响最终成品品质的主要因素有温度和时间等。该研究针对腊叶标本的烘干温度和时间等因素进行试验设计,得出效果较好的升温模式,旨在应用于新型腊叶标本烘干装置的研发,工艺成熟以后可针对腊叶标本烘干设置固定的工作程序与参数,对其进行批量生产。而新型的腊叶标本烘干装置的产生,不仅会提高标本制作的便易性,也将会为植物腊叶标本制作节省更多时间获得更高的品质。但该试验的研究相对来说较简单,烘干的植物种类较单一,因为不同质地植物(如草本、木本;叶革质、纸质等)的界面温度可能会有所差异,相关的研究还需要进行进一步的探索。

如果从原理层次来看,植物本身颜色的呈现是在内在色素的作用下表现出来的,而植物的主色绿色就是叶绿素的外观体现,干燥过程中颜色的改变主要有损耗和褐变 2 个原因^[7]。因为新鲜植物的含水量较高,如果在烘干过程中快速将温度提升较高,很容易破坏其中的叶绿素,造成烘干过程中植物颜色的劣变,试验结果中梯度升温在一定程度上虽保留了忍冬、丹参的色彩度,但对比原植物颜色还是有些变淡,这便证明了色素损耗这一结论。而植物标本烘干过程中变色的另一个原因——酶促反应本质上是一个与物理变化相伴随的复杂生理生化过程,水分是酶活性的前提,植物标本在烘干过程中,前期如果温度过高,在植物含水量充足的情况下酶活性升高,加速蛋白质和叶绿素降解,标本易被烘至黑褐色,这反映了组织内有机物质的转化程度,属于酶促反

应进程。而适度缓慢的失水凋萎能够在一定程度上排出标本的水分,逐渐终止变化,固定标本的外观颜色。梯度升温的标本烘干方法的实质在于合理地调控植物标本的变色程度和干燥速度,使两者相互协调进行,以期在较短的时间得到较好的效果^[8]。

不光是植物腊叶标本的烘干,这种梯度升温的模式还能应用于部分花类、叶类药材的烘干^[9-10],希望该研究的试验结果能够为植物标本的烘干工艺乃至药材的烘干工艺提供一定的思路。

参考文献

- [1] 李长看. 生物标本制作技术[EB/OL]. [2020-11-06]. <https://max.book118>.
- [2] 孙立娇,金敏,刘彬彬,等. 紫花药用植物腊叶标本和浸渍标本的保色制作研究[J]. 安徽农业科学,2021,49(1):157-159.
- [3] 曹玉星. 标本意义与价值传播——兼谈南通博物苑“三韵”基本陈列[J]. 博物馆研究,2015(1):35-39.
- [4] 林巧贤,闫霖,林桂如,等. 一种腊叶标本快速干燥方法的研究[J]. 安徽农学通报,2019,25(23):146-148.
- [5] 肖本见. 浅谈药用植物腊叶标本的制作[J]. 时珍国医国药,2006,17(2):302.
- [6] 张崇霞,鲍玉军,李丹丹,等. 德美亚 1 号玉米烘干工艺优化初探[J]. 粮食储藏,2016,45(4):19-22.
- [7] 温广宇,朱文学. 天然植物色素的提取与开发应用[J]. 河南科技大学学报(农学版),2003,23(2):68-74.
- [8] 侯爽爽,罗磊. 金银花热风干燥过程中颜色的劣变机理[J]. 农产品加工(学刊),2010(10):63-65.
- [9] 朱玉芸. 酶促褐变对菊花品质的影响研究[D]. 合肥:安徽中医药大学,2018.
- [10] 孙洁,王晓,周洁,等. 变温干燥对良种金银花活性成分含量的影响[J]. 中华中医药杂志,2014,29(10):3302-3305.
- [11] 彭一平,刘振华,王璐,等. 华南地区土壤全钾含量高光谱反演模型研究[J]. 西南农业学报,2019,32(10):2383-2389.
- [12] KATUWAL S, KNADEL M, MOLDRUP P, et al. Visible-near-infrared spectroscopy can predict mass transport of dissolved chemicals through intact soil[J]. Entific reports,2018,8(1):1-9.
- [13] ROSSEL R A V, WEBSTER R. Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database[J]. European journal of soil science,2012,63(6):848-860.
- [14] 柯以侃. 分析化学手册:第 3 分册 光谱分析[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,1998.
- [15] 栾福明,熊黑钢,王芳,等. 基于小波分析的土壤速效 K 含量高光谱反演[J]. 干旱区地理,2015,38(2):320-326.
- [16] 朱淑鑫,杨宸,顾兴健,等. K 均值算法结合连续投影算法应用于土壤速效钾含量的高光谱分析[J]. 江苏农业学报,2020,36(2):358-365.
- [17] 刘秀英,石兆勇,常庆瑞,等. 黄绵土钾含量高光谱估算模型研究[J]. 土壤学报,2018,55(2):325-337.
- [18] GU X H, WANG Y C, SUN Q, et al. Hyperspectral inversion of soil organic matter content in cultivated land based on wavelet transform[J]. Computers and electronics in agriculture,2019,167:1-7.
- [19] 国佳欣,赵小敏,郭熙,等. 基于 PLSR-BP 复合模型的红壤有机质含量反演研究[J]. 土壤学报,2020,57(3):636-645.
- [20] 李耀翔,汪洪涛,耿志伟,等. 基于近红外光谱及 BP 神经网络分析法预测森林土壤有机碳含量[J]. 西部林业科学,2014,43(3):1-6.
- [21] CONFORTI M, BUTTAUFUOCO G, LEONE A P, et al. Studying the relationship between water-induced soil erosion and soil organic matter using vis-NIR spectroscopy and geomorphological analysis: A case study in southern Italy[J]. Catena,2013,110:44-58.
- [22] AMANI M, MOBASHERI M R, MAHDAVI S. Contemporaneous estimation of Leaf Area Index and soil moisture using the red-NIR spectral space[J]. Remote sensing letters,2018,9(3):264-273.
- [23] 刘伟,常庆瑞,郭曼,等. 不同尺度的微分窗口下土壤有机质的一阶导数光谱响应特征分析[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(4):316-321.
- [24] HONG Y S, YU L, CHEN Y Y, et al. Prediction of soil organic matter by VIS-NIR spectroscopy using normalized soil moisture index as a proxy of soil moisture[J]. Remote sensing,2018,10:1-17.
- [25] VISCARRA ROSSEL R A, BEHRENS T, BEN-DOR E, et al. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. Earth-science reviews, 2016,155:198-230.

(上接第 156 页)