

文章编号:1001-9014(2011)04-0316-06

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

刘 炜¹, 常庆瑞^{1*}, 郭 曼¹, 邢东兴^{1,2}, 员永生¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 咸阳师范学院 资源环境系, 陕西 咸阳 712000)

摘要:使用高光谱仪 ASD Field Spec 在波长范围 400~1000 nm 内采集有机质含量不同的土壤反射光谱数据并作对数变换处理;之后在不同尺度的微分窗口下求取其一阶导数(一阶导数光谱)并进行小波阈值去噪;从一阶导数光谱中提取特征参数表征有机质含量变化. 结果表明,微分窗口尺度 $w=1\sim 5$ 时,土壤一阶导数光谱中含有大量噪声,对一阶导数光谱曲线形态和有机质吸收特征的识别造成严重干扰;微分窗口尺度 $w=6\sim 15$ 时,土壤一阶导数光谱中的噪声得到一定程度的去除,但仍无法准确判别有机质的吸收特征;微分窗口尺度 $w=16\sim 30$ 时,土壤一阶导数光谱中的噪声被有效去除,其中当 $w=19$ 时,从一阶导数光谱中提取的特征参数 MD_s^{19} 与土壤有机质含量的相关系数为 -0.803 . MD_s^{19} 能够较为准确地指示有机质含量变化,而且运算简单,易于实现,为在精准农业中采用可见/近红外反射光谱分析技术快速检测土壤有机质提供了新的途径.

关键词:可见/近红外光谱;土壤有机质;一阶导数光谱;小波去噪;特征增强;特征提取
中图分类号:S15 **文献标识码:**A

Analysis on derivative spectrum feature for SOM under different scales of differential window

LIU Wei¹, CHANG Qing-Rui^{1*}, GUO Man¹, XING Dong-Xing^{1,2}, YUAN Yong-Sheng¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Department of Resources Environment, Xian yang Normal College, Xianyang 712000, China)

Abstract: The hyper-spectral reflectance of soil was measured by a ASD FieldSpec within 400~1000 nm, then treated with logarithmic transformation. First derivative of soil spectra with different scales of differential window were acquired and denoised by the threshold denoising method based on wavelet transform. From the first derivative of soil spectra, feature parameters used as indicators for soil organic matter content were extracted. Results show that: (1) When the number of the scale of differential window was set as $W=1\sim 5$, it is difficult to identify the spectrum contour and response feature in first derivative of soil spectra because of much noise. (2) When $W=6\sim 15$, noise in first derivative of soil spectra is partly removed, and spectrum contour is identified roughly. However spectral response feature resulted from different organic content levels can not be identified clearly. (3) When $W=16\sim 30$, noise in first derivative of soil spectra is removed effectively. The coefficient of correlation between organic matter content and feature parameter MD_s^{19} is 0.803. MD_s^{19} can be used as one of the best indicators for soil organic matter content.

Key words: VIS/NIR spectrum; soil organic matter (SOM); first derivative of spectrum; wavelet denoising; feature enhancement; feature extraction

PACS: 42.72. Ai

引言

传统的土壤有机质 (Soil Organic Matter, SOM)

化学测定方法,虽然测定精度较高,但耗时、费力、成本高,而且还存在着有害、污染、测点数量和范围有限等问题. 因而无法满足精准农业、变量施肥技术对

收稿日期:2010-05-30,修回日期:2010-10-17

Received date: 2010-05-30, revised date: 2010-10-17

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB407203); 国家自然科学基金项目(30872073); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAD09B0603)

作者简介: 刘 炜(1978-),男,陕西咸阳市人,博士研究生,主要从事遥感与GIS应用研究, E-mail: york5588@nwsuaf.edu.cn.

* 通讯作者: E-mail: chqr@nwsuaf.edu.cn.

详细掌握土壤养分时空变异状况的需求. 现代可见/近红外反射光谱分析技术,能够充分利用全谱段或多波长光谱数据进行定性或定量分析,并且具有速度快、成本低、效率高、测量方便、测试重现性好等特点,近年来,已经被越来越广泛地应用于食品工业、石油化工、农业、制药等多个领域^[1-3]. 以往大量研究表明,可见/近红外光谱段 400 ~ 1000 nm 是土壤有机质最主要的光谱响应区域,具有对有机质含量进行定量分析的潜力^[4-6]. 一些研究^[7-8]还表明对土壤高光谱数据进行导数变换,可以在一定程度上减弱土壤类型、样品粒度等因素的影响,有助于挖掘有机质的吸收特征.

大量试验结果表明,当采用不同尺度的微分窗口对土壤高光谱数据进行导数变换时,所获取的土壤一阶导数光谱的形态会因光谱中高频噪声干扰程度的不同而产生较大差异. 实际上,对高光谱数据进行导数变换,并不完全等同于从数学意义上对连续、可微函数进行求导运算,而是在一定尺度的微分窗口下,通过一阶差商实现对一阶求导的近似代替^[9-11]. 当微分窗口取较小的尺度时,导数变换在提供精细的光谱形态变化信息的同时,也会放大光谱中的高频噪声,对光谱曲线上反射峰、吸收谷的识别、定位及相关计算造成严重干扰;当微分窗口取较大的尺度时,导数变换具有一定的平滑去噪功能(差分运算本质上也是一种加权数字平滑^[1]),并且微分窗口尺度越大,曲线平滑效果越好. 然而,在较大尺度的微分窗口下进行导数变换,也会在一阶导数光谱曲线上的极值点和拐点进行平滑,因而在降噪的过程中,也损失掉了光谱曲线上锐变尖峰成分可能携带的重要信息,导致光谱分析能力下降. 因此,选取合适的微分窗口尺度,是从土壤一阶导数光谱中提取特征参数定量检测有机质含量的一个重要前提. 试验在不同尺度的微分窗口下对土壤高光谱数据进行导数变换,并从一阶导数光谱中提取特征参数表征有机质含量变化,之后,分析微分窗口尺度变化对特征参数的影响. 试验旨在在精准农业中采用可见/近红外光谱反射光谱分析技术定量检测土壤有机质,以及提高高光谱参数准确性和实用性方面提供依据.

1 材料与方 法

1.1 样品采集与制备

土壤样品采自陕西省眉县,采样区土壤为褐土,质地为壤质粘土,土层深厚. 试验依据土壤剖面发生

层次,分层采集土壤样品,采样深度为 0 ~ 60 cm. 为了从光谱数据中消除或降低土壤水分、土壤粒度等因素的对土壤有机质吸收特征的影响,试验将土壤样品置于实验室内自然风干,之后用木棍滚压,并去除沙砾石块及植物残体,接下来研磨、过筛(100 目尼龙筛). 试验获取土壤样品 36 个,每个土壤样品分成两份,一份采用重铬酸钾法测定土壤有机质含量,另一份用来测量光谱数据. 36 个样本中,有机质含量的最大值为 43.91 g * kg⁻¹,最小值为 2.11 g * kg⁻¹,平均值为 13.72 g * kg⁻¹.

1.2 光谱测量

使用高光谱仪 ASD Field Spec 在波长范围 350 ~ 1050 nm 内,连续测量经预处理后的土壤样品的反射光谱数据,光谱采样间隔 1.4 nm,重采样间隔 1 nm. 测量光谱前将土壤样品放置在直径 16 cm,深度 3 cm 的盛样皿上,调整盛样皿使其处于水平位置,平整土样表面使样品厚度均匀. 暗室内测试光源为能够提供平行光的 1000 W 的镁光灯,距土壤表层中心 70 cm,光源照射方向与垂直方向的夹角为 15°. 经多次实验后光纤探头的视场角选定为 7.5°,置于离土样表面 40 cm 的垂直上方接收光谱数据. 测试前以白板定标,每个土壤样品采集 10 条光谱数据,然后将其算术平均值作为该土壤样品的实际光谱反射数据.

1.3 数据处理

可见/近红外光谱段 400 ~ 1000 nm 是土壤有机质最主要的光谱响应区域. 然而,该波长范围内土壤光谱反射率水平整体较低,有机质含量不同的各条光谱曲线之间距离较近,没有显著的峰谷特征,不利于特征参数提取^[1]. 为此,试验在波长范围 400 ~ 1000 nm 内对土壤原始光谱进行对数变换和导数变换,以增强有机质含量变化引起的光谱响应差异. 对数变换采用的计算公式为^[10-12]

$$A(\lambda) = \text{Ln}[1/R(\lambda)] \quad (1)$$

式中: λ 代表波长位置,取值区间为 400 ~ 1000 nm; $R(\lambda)$ 代表波长位置 λ nm 处的土壤原始光谱反射率; $A(\lambda)$ 是经对数变换处理后的光谱值. 导数变换采用的计算公式为^[1]

$$D(\lambda) = [A(\lambda) - A(\lambda + w)]/w \quad (2)$$

式中 w 代表微分窗口尺度; $D(\lambda)$ 代表波长位置 λ nm 处土壤光谱反射率的一阶导数; λ 的取值区间为 400 ~ 1000 nm.

2 结果与分析

2.1 对数变换对土壤有机质一阶导数光谱响应特

征的影响

图1(a)显示了波长范围400~1000 nm内,有机质含量不同(25.67,9.37,7.31,4.20 g/kg)的土壤反射光谱曲线;图1(b)是对它们进行对数变换处理后的结果.从图1(b)中可以看出,在沿着波长增加的方向上,经对数变换处理后的光谱值大致以线性趋势从2.70下降至0.80,变动区间较原始光谱有所增加;对于不同的有机质含量水平,光谱曲线整体上随有机质含量水平的提高而提高,表现出正相关性;各条光谱曲线之间的距离较图1(a)中的也有所加大.整体而言,400~1000 nm内,土壤有机质含量的变化可以从图1(b)光谱曲线的分异表现中得到一定程度的反映,但有机质含量不同的各条光谱曲线仍大致以线性趋势变化,并且没有反映样品信息突出的反射峰、吸收谷.

2.2 不同尺度的微分窗口对土壤有机质一阶导数光谱响应特征的影响

在不同尺度的微分窗口下($w = 1, 2, \dots, 30$),求取对数变换后的土壤光谱的一阶导数(一阶导数光谱),结果如图2所示;图3则显示了一阶导数光谱与有机质含量之间的相关系数.结合图2与图3可以看出,随着微分窗口尺度的逐渐增大,导数变换的

平滑效果越来越明显. $w = 1 \sim 5$ 时,微分窗口的尺度较小,导数变换的平滑作用较为有限,一阶导数光谱曲线上仍保留有大量噪声,致使曲线轮廓以及因有机质含量变化引起的响应特征受到遮蔽干扰,难以识别,敏感波段无法提取,光谱质量较差;并且在对应的微分窗口尺度下,波长范围400~1000 nm内,相关系数曲线振荡强烈,频率高、幅度大,表现很不稳定. $w = 6 \sim 15$ 时,随着微分窗口尺度的逐渐增大,导数变换的平滑作用有所提升,光谱噪声得到了一定程度的去除,土壤一阶导数光谱曲线的大致轮廓能够被识别出来;但波长范围400~1000 nm内,因有机质含量变化引起的光谱响应特征仍受到较强噪声的干扰,无法准确判别;对应微分窗口尺度下的相关系数曲线,仍然振荡频繁、起伏较大,不利于敏感波段提取.

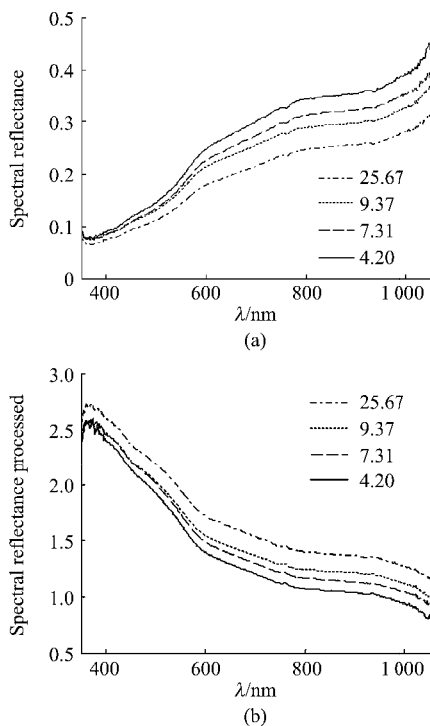


图1 对数变换对土壤光谱反射率的影响
Fig.1 Effect of logarithmic transformation on soil spectra under different organic matter content levels

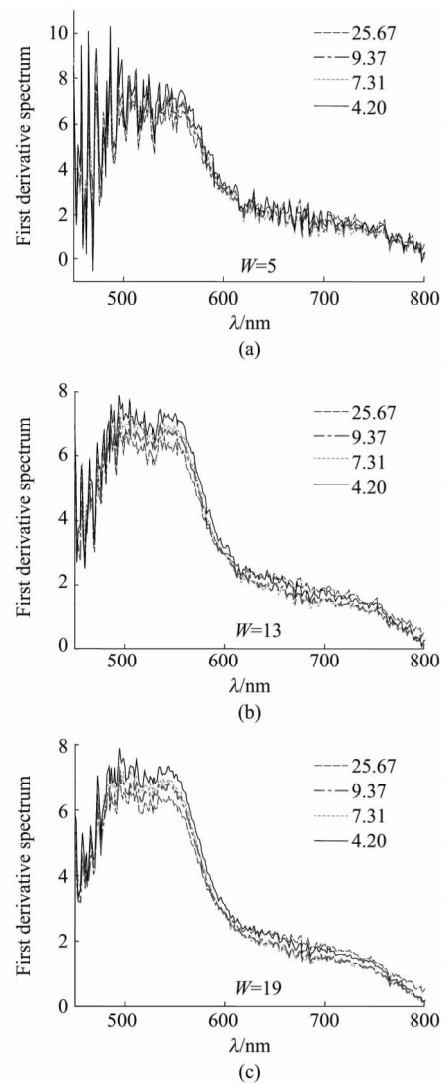


图2 不同尺度的微分窗口对土壤一阶导数光谱响应特征的影响
Fig.2 First derivative of soil spectra under different soil matter organic content levels and different scales of differential window

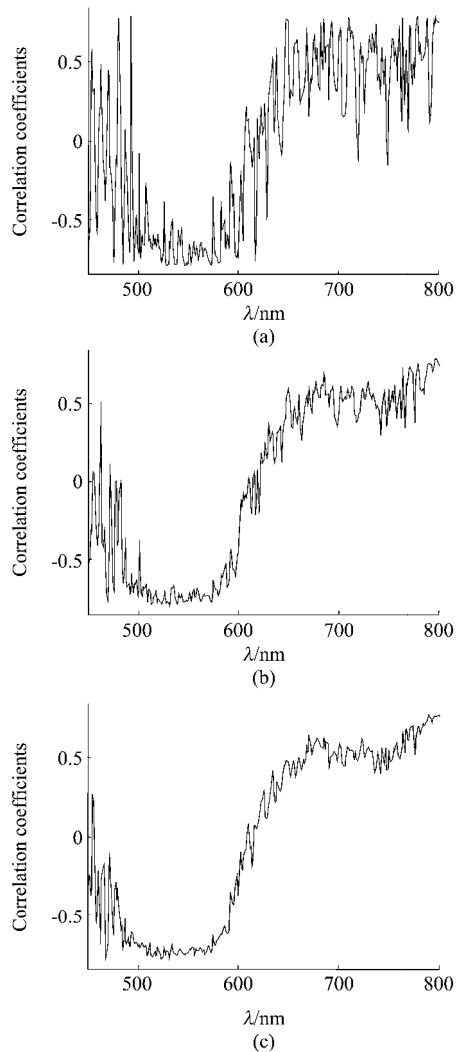


图3 不同尺度的微分窗口对土壤一阶导数光谱与有机质含量相关系数的影响

Fig. 3 Correlation coefficients between organic matter contents and first derivative of soil spectra under different scales of differential window

$w = 16 \sim 30$ 时,随着微分窗口尺度的不断增大,导数变换对光谱曲线的平滑作用进一步加强,土壤一阶导数光谱中的噪声得到有效去除,曲线轮廓更加清晰.从图2(c)中还可以发现,波长范围450~600 nm内,有机质含量不同的各条光谱曲线均存在一个“凸”状的特征峰;其中在“凸”状特征峰的核心区域,波长范围500~570 nm内,一阶导数光谱值维持在一个较高的平台上小幅振荡;对于不同的有机质含量水平,该波长范围内的光谱值随有机质含量的增加整体呈下降趋势,相对于其它波长位置,该波长范围内的光谱值表现出了较为一致、显著的响应特征.从图3(c)中还可以看出,波长范围500~570 nm内相关系数数值小幅波动,表现较为稳定.

鉴于 $w = 16 \sim 30$ 时,波长范围500~570 nm内的土壤一阶导数光谱值相互之间比较接近,而且波动程度不大;对有机质含量变化,整体上也表现出了较为一致、显著的响应特征,试验考虑以该波长范围内光谱值的平均值作为特征参数表征有机质含量变化.采用的计算公式为

$$MD_s^w = \frac{1}{71} \cdot \sum_{\lambda=500}^{570} D_s^w(\lambda) \quad (3)$$

式中, λ 代表波长位置; w 代表微分窗口尺度, $w = 1, 2, \dots, 30$; $D_s^w(\lambda)$ 代表经对数变换处理后,微分窗口尺度为 w ,波长位置 λ nm处的土壤一阶导数光谱值; MD_s^w 则是波长范围500~570 nm内 $D_s^w(\lambda)$ 的平均值.接下来,试验进一步计算了当微分窗口取不同的尺度时, MD_s^w 与土壤有机质含量之间的相关系数,结果如图4(a)所示.从图中可以看出,随着微分窗口尺度的逐渐扩展,相关系数曲线先下降、后上升,大体上呈开口向上的“凹”状波形;其中,在“凹”状波形的前段,当微分窗口取较小的尺度时,相关系数曲线有一定的起伏波动;当微分窗口尺度 $w = 16 \sim 20$ 时,相关系数值处于“凹”状波形的底部区域,基本保持在 $-0.800 \sim -0.805$ 之间,变化趋势十分稳定;其中, $w = 19$ 时,相关系数取得负的最小值 -0.803 .显然,在所有的微分窗口尺度中,当 $w = 19$ 时得到的 MD_s^{19} 更适合用作特征参数指示有机质含量变化.

2.3 不同尺度的微分窗口对小波去噪后一阶导数光谱响应特征的影响

为了进一步分析微分窗口尺度变化对土壤有机质一阶导数光谱响应特征的影响,试验对各个微分窗口尺度下的土壤一阶导数光谱,进行了小波阈值去噪处理(以“sym8”作为小波母函数,分解尺度 $J = 3$,选择“Heursure”阈值选取规则和“sln”阈值调整方法^[13,14]),结果如图5所示.从中可以看出,经小波阈值去噪处理后,各个微分窗口尺度下的土壤一阶导数光谱的曲线轮廓,都变得十分清晰、光滑;波长范围450~600 nm内的“凸”状特征峰在不同的有机质含量水平下的分异表现也较为明显.同样,为了表征土壤有机质含量变化,试验在不同尺度的微分窗口下,求取波长范围500~570 nm内经小波去噪后的一阶导数光谱值的平均值 MD_d^w 作为特征参数,采用的计算公式为

$$MD_d^w = \frac{1}{71} \cdot \sum_{\lambda=500}^{570} D_d^w(\lambda) \quad (4)$$

式中 λ 代表波长位置; w 代表微分窗口尺度, $w = 1,$

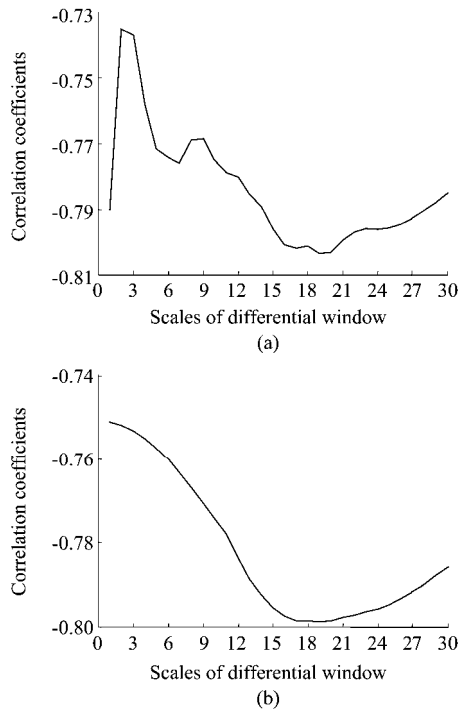


图4 不同尺度的微分窗口对特征参数的相关系数的影响
Fig. 4 Correlation coefficients between organic matter contents and feature parameters under different scales of differential window

2, ..., 30; $D_d^w(\lambda)$ 代表经对数变换及小波阈值去噪处理后,微分窗口尺度为 w 的土壤一阶导数光谱值. MD_d^w 则是波长范围 500 ~ 570 nm 内 $D_d^w(\lambda)$ 的平均值.

试验计算了 MD_d^w 与土壤有机质含量之间的相关系数,结果如图4(b)所示.从图中可以看出,当微分窗口尺度逐步扩展时,相关系数曲线呈开口向上、十分光滑的“凹”状波形,其整体变化趋势与图4(a)中相关系数曲线的整体变化趋势大体一致;但波动程度明显降低,曲线形态十分光滑;相对于图4(a),图(4)b中相关系数曲线的整体变动区间有所收窄,在 $-0.797 \sim -0.753$ 之间;当微分窗口尺度 $w = 15 \sim 21$ 时,相关系数值处于“凹”状波形的底部区域;其中,当 $w = 20$ 时,相关系数取得了负的最小值 -0.797 . 对比 MD_s^{19} 和 MD_d^{20} ,可以看出二者的微分窗口尺度值相差不大,对应的相关系数数值也较为接近,但 MD_s^{19} 的表现更好一些;同时,其相关计算较 MD_d^{20} 也更容易实现、易于掌握、推广. 故试验认为 MD_s^{19} 更适合用作特征参数指示有机质含量变化.

3 讨论

可见/近红外光谱段 400 ~ 1000 nm 是土壤有机

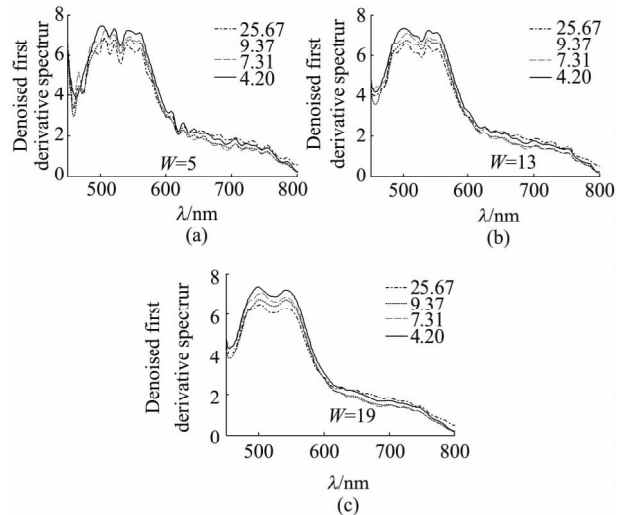


图5 不同尺度的微分窗口对去噪后的土壤一阶导数光谱响应特征的影响

Fig. 5 Denoised first derivative of soil spectrum under different soil matter organic content levels and different scales of differential window

质最主要的光谱响应区域.然而,在该波长范围内,土壤光谱反射率水平整体较低,有机质含量不同的各条光谱曲线之间距离较近,没有显著的峰谷特征,不利于特征参数提取^[1].为此,试验对土壤原始光谱进行对数变换,以增强有机质含量变化引起的光谱响应差异.除对数函数外,还可以选取其它具有较强放大增益的函数,如正切函数、指数函数等作为变换函数对有机质的响应特征进行增强处理.此外,还可以考虑针对能够反映有机质吸收特性的敏感波段,给变换函数的自变量赋以一定的偏移量,以尽可能地将敏感波段置于具有最佳放大增益效果的对应的自变量的取值区间,进一步提升某些特定敏感波段在解释有机质含量变化中的作用.

在可见/近红外反射光谱分析技术中,利用导数变换可以获取精细的光谱形态变化信息,并能够增强局部位置(如极值点、拐点等)光谱反射率对目标物质含量变化的响应差异.对于土壤高光谱数据,除一阶导数变换外,还可以在选取具有合适尺度的微分窗口的前提下,考虑采用二阶或三阶等更高阶次导数变换,以进一步挖掘因有机质吸收引起的峰谷特征;之后,根据反射峰(吸收谷)的形态,选择合适的吸收特征描述方法,以提取稳定性更强,敏感程度也好的特征参数表征有机质含量变化.

4 结论

试验对土壤原始光谱进行了对数变换,导数变

换以及小波阈值去噪处理;之后,在不同尺度的微分窗口下分析土壤一阶导数光谱对有机质含量变化的响应特征,并提取特征参数 MD_s^w 和 MD_d^w . 试验得到的结论如下:

(1) 微分窗口尺度 $w = 1 \sim 5$ 时,土壤一阶导数光谱中含有大量噪声,致使光谱曲线的形态和有机质的吸收特征难以识别,敏感波段无法提取,光谱质量较差.

(2) 微分窗口尺度 $w = 6 \sim 15$ 时,土壤一阶导数光谱中的噪声得到了一定程度的去除,光谱曲线的大致轮廓能够被识别出来,但因有机质含量变化引起的光谱响应差异仍无法得到准确判别.

(3) 微分窗口尺度 $w = 16 \sim 30$ 时,土壤一阶导数光谱中的噪声得到了有效地去除;波长范围 450 ~ 600 nm 内呈现出“凸”状的特征峰;其中,在“凸”状特征峰的核心区域,波长范围 500 ~ 570 nm 内,一阶导数光谱值对有机质含量变化整体表现了出较为一致、显著的响应特征.

(4) 特征参数 MD_s^{19} 与土壤有机质含量的相关系数为 -0.803 ,相对于 MD_d^{20} , MD_s^{19} 可以更好地用来指示有机质含量变化.

波长范围 400 ~ 1000 nm 内,土壤有机质吸收引起的光谱曲线的变化比较微弱,一般均先要求对土壤原始光谱进行某种变换,以增强光谱响应差异,之后提取特征参数检测有机质. 在光谱特征增强的数学变换方法中,对数变换,指数函数变换、导数变换等都应用较多. 可以针对光谱形态和有机质的吸收特性,对各种增强方法进行更加细致地调整、改进,或者加以综合运用,并选取恰当的吸收特征描述方法^[1],以提取稳定性更强、敏感程度更好的特征参数,为采用可见/近红外反射光谱分析技术快速检测土壤有机质,提供更实用、有效的途径,这将是下一步研究工作重点.

REFERENCES

- [1] LI Min-Zan, HAN Dong-Hai, WANG Xiu. *Spectral analysis technology and its application* [M]. Beijing: Science Press (李民赞,韩东海,王秀. 光谱分析技术及其应用. 北京: 科学出版社), 2006: 115 - 279.
- [2] HE Yong, SONG Hai-Yan, Pereira A G, et al. Measurement and analysis of soil nitrogen and organic matter content using near-infrared spectroscopy techniques [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 2005, **6B**(11): 1081 - 1086.
- [3] BAO Yi-Dan, HE Yong, FANG Hui, et al. Spectral characterization and N content prediction of soil with different particle size and moisture content [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (鲍一丹,何勇,方惠,等. 土壤的光谱特征及氮含量的预测研究. 光谱学与光谱分析), 2007, **27**(1): 62 - 65.
- [4] HE Ting, WANG Jing, LIN Zong-Jian, et al. Spectral features of soil organic matter [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2009, **12**(1): 33 - 40.
- [5] LIU Huan-Jun, ZHANG Bai, LIU Dian-Wei, et al. Study on quantitatively remote sensing typical soils in Songnen plain, northeast China [J]. *Journal of Remote Sensing* (刘焕军,张柏,刘殿伟,等. 松嫩平原典型土壤高光谱定量遥感研究. 遥感学报), 2008, **12**(4): 647 - 654.
- [6] SHA Jin-Ming, CHEN Peng-Cheng, CHEN Song-Lin. Characteristics analysis of soil spectrum response resulted from organic material [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (沙晋明,陈鹏程,陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究. 水土保持研究), 2003, **10**(2): 21 - 24.
- [7] Ben-Dor E. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400 ~ 2500 nm) during a controlled decomposition process [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **61**: 1 - 15.
- [8] SONG Hai-Yan, HE Yong. Determination of the phosphorus, potassium contents and pH values in soils using near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition* (宋海燕,何勇. 近红外光谱法分析土壤中磷、钾含量及 pH 值的研究. 山西农业大学学报: 自然科学版), 2008, **28**(3): 275 - 278.
- [9] WANG Ji-Hua, ZHAO Chun-Jiang, HUANG Wen-Jiang. *Base and application of quantitative remote sensing technique in agriculture* [M]. Beijing: Science Press (王纪华,赵春江,黄文江. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社), 2008: 156 - 159.
- [10] GONG Cai-Lan, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Correlations between water quality indexes and reflectance spectra of Huangpujiang river [J]. *Journal of Remote Sensing* (巩彩兰,尹球,匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析. 遥感学报), 2006, **10**(6): 910 - 916.
- [11] LI Xin-Zhen, CHE Gang-Ming, FENG Jian-Hu, et al. *Computational methods* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press (李信真,车刚明,封建湖,等. 计算方法. 西安: 西北工业大学出版社), 2000: 172 - 175.
- [12] WAN Yu-Qing, TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping. *Hyperspectral remote sensing and its application* [M]. Beijing: Science Press (万余庆,谭克龙,周日平. 高光谱遥感应用研究. 北京: 科学出版社), 2006: 22 - 189.
- [13] XU Wei-Dong, YIN Qiu, KUANG Ding-bo. Decision tree classification of hyperspectral image based on discrete wavelet transform [J]. *Journal of Remote Sensing* (许卫东,尹球,匡定波. 小波变换在高光谱决策树分类中的应用研究. 遥感学报), 2006, **10**(2): 204 - 210.
- [14] JIANG Qing-Song, WANG Jian-Yu. Study on signal-to-noise ratio estimation and compression method of operational modular imaging spectrometer multi-spectral images [J]. *Acta Optica Sinica* (蒋青松,王建宇. 实用型模块化成像光谱仪多光谱图像的信噪比估算及压缩方法研究. 光学学报), 2003, **23**(11): 1335 - 1340.