

DOI: 10.11766/trxb201705220571

# 江西省红壤地区主要土壤类型的高光谱特性研究\*

赵小敏<sup>1</sup> 杨梅花<sup>1, 2</sup>

(1 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

(2 南昌师范高等专科学校, 南昌 330103)

**摘要** 土壤光谱是土壤理化性质的综合反映, 研究江西省红壤地区主要土壤类型的高光谱特性, 对土壤的精准管理和土壤数字制图有重要意义。选择有代表性的吉安县、余江县、兴国县和湾里区, 采集443个土壤表层土样, 采用ASD光谱仪测量了其可见-近红外反射高光谱(350~2 500 nm)。对光谱进行连续统去除和二阶导数处理后, 对四种主要红壤亚类及其土属的高光谱特性进行研究。然后选取反映成土母质、氧化铁(针铁矿和赤铁矿)、土壤有机质含量、黏土矿物等的光谱特征表现变量及高光谱反射率等共19个特征变量, 对光谱进行Fastclus聚类分析。结果表明: 红壤地区土壤不同亚类光谱反射率差异明显, 620 nm~740 nm的特征吸收面积黄红壤>红壤>棕红壤>红壤性土, 420 nm和447 nm的二阶导数差值黄红壤>棕红壤>红壤>红壤性土。棕红壤光谱在可见光-短波近红外光谱区域土壤反射率较高, 位于1 900 nm范围的吸收强度较其他亚类宽浅。红壤性土光谱曲线最为陡峭, 在近红外光谱区域土壤反射率最高, 在1 400 nm、1 900 nm有较强的尖锐吸收峰, 在2 200有超强吸收峰。红壤亚类光谱曲线整体走势与红壤性土亚类相似, 但在900 nm、1 400 nm、1 900 nm和2 200 nm的吸收强度较红壤性土弱, 反射曲线位置较高。不同亚类水稻土由于水淹时间的不同, 其光谱特征差异较为明显, 光谱反射率表现为淹育型水稻土>潴育型水稻土>潜育型水稻土, 620 nm~740 nm的特征吸收面积潜育型水稻土>潴育型水稻土>淹育性水稻土, 420 nm和447 nm的反射率二阶导数差值为淹育型水稻土>潴育性水稻土>潜育型水稻土, 但均高于红壤。选取的特征变量对土壤进行亚类分类的准确率为86.23%, 分类的准确度较高, 而土属的准确率仅为66.37%。可见-近红外土壤光谱特征可以作为江西红壤地区主要土壤亚类划分的定量参考指标。

**关键词** 土壤类型; 可见-近红外; 光谱特征; 红壤地区; 江西省

**中图分类号** S155.1 **文献标识码** A

土壤可见-近红外反射光谱是土壤理化特性光谱行为的综合。土壤中许多成分在可见-近红外光谱范围内具有反射与吸收特征, 可以根据它们来识别土壤中的成分, 许多学者通过分析光谱曲线形状特征、斜率变化以及吸收波段出现与否分析光谱特征, 划分土壤反射光谱曲线基本类型。早在20世纪70年代Condit<sup>[1]</sup>分析了美国 160 种土壤波段范围

为320~1 000 nm的光谱曲线, 根据曲线的斜率变化将土壤分为三类。Stoner和 Baumgardner<sup>[2]</sup>分析了来自美国和巴西485 个土壤的反射光谱(520~2 320 nm), 提出了有机质控制型、最小改变型、铁影响型、有机质影响型和铁控制型五类土壤反射光谱曲线类型。Brown 等<sup>[3]</sup>从全球收集大量的土壤样品, 应用可见-红外漫反射光谱, 建立预测

\* 国家自然科学基金项目(41361049)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室基金项目(0812201202)和江西省自然科学基金项目(201222BAB204012)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41361049), The Project of State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agricultural (No.0812201202) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No.201222BAB204012)

作者简介: 赵小敏(1962—), 教授, 博士生导师, 主要从事土壤遥感与信息、土地资源利用等研究。E-mail: zhaoxm889@126.com

收稿日期: 2017-05-22 收到修改稿日期: 2017-07-27; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-09-26

模型估算土壤黏粒、有机碳、无机碳、Fe、阳离子交换量(CEC)、氨态氮等土壤性状。Rossel和Webster<sup>[4]</sup>利用可见光红外光谱(350~2 500 nm)测定了13 654个澳大利亚土壤样品的反射率,得出可见-近红外光谱可作为识别土壤层次和土纲的技术。Vasques等<sup>[5]</sup>根据巴西的土壤分类,应用可见-红外(400~2 500 nm)光谱对巴西东南部的土纲、亚纲及各亚纲的质地进行分类取得了较好的效果。Soriano et al.<sup>[6]</sup>应用可见-红外光谱预测土壤物理、化学和生物学特性,认为易于预测的特性有土壤水分、质地、土壤碳含量、阳离子交换量、钙和镁含量、全氮、pH、微生物数量与活性等,并认为中红外光谱优于近红外光谱。Kuang和Mouazen<sup>[7]</sup>对匈牙利、德国和丹麦土壤,进行了土壤全氮、总碳和有机碳的光谱预测模型和验证模型的研究。早在20世纪90年代,中国就开展了一些区域范围内土壤反射光谱特性的研究,如吴豪翔和王人潮<sup>[8]</sup>研究了我国南方山地丘陵的砖红壤、红壤、黄壤、水稻土和紫色土等的光谱特征,王深法等<sup>[9]</sup>研究了浙江省石灰土光谱特征及其自动分类技术,黄应丰和刘腾辉<sup>[10]</sup>研究了华南砖红壤、水稻土、红壤和黄壤的光谱特征与土壤分类。早期的研究获得的土壤光谱信息有限,不能很好地支持土壤光谱响应机理和光谱分类等方面的系统研究。随着高光谱技术的发展,获得的土壤光谱信息越来越丰富,对土壤特性光谱特征及其土壤分类的研究更加深入。刘焕军等<sup>[11]</sup>在吉林农安县探索利用表层土壤反射光谱特性进行土壤分类的可行性研究。夏学齐等<sup>[12]</sup>在江苏研究了土壤阳离子交换量、有机质含量、pH、铁氧化物类型、铁铝硅等常量元素含量等重要土壤生态地球化学参数的光谱反应。彭杰等<sup>[13-14]</sup>应用土壤高光谱特性对土壤有机质含量、氧化铁含量等的光谱估算模型进行了研究。史舟等<sup>[15]</sup>基于中国西藏、新疆、黑龙江、海南等地采集的16种土类的1 581个土壤样品进行土壤光谱分类,并建立基于分类的中国不同类型土壤的有机质光谱预测模型。以上研究说明土壤可见-近红外反射光谱能够充分反映土壤理化特性,但在上述研究中,对土壤类型的研究只到土类一级,没有细分到亚类。红壤是江西分布最广、面积最大的土壤之一,为中国乃至世界上最重要的土壤资源,研究红壤地区不同土壤亚类乃至不同土属的光谱特征对其理化性质的快速估算和土壤分类等有重要意义。

本研究从江西省红壤地区有代表性地域的县(吉安县、余江县、兴国县和湾里区)采集了7种亚类的443个土壤样品,获取其室内可见-近红外(Vis-NIR)高光谱反射率(350~2 500 nm)。从反射光谱曲线位置、吸收峰特征和曲线的斜率等分析不同亚类土壤、亚类内不同土属的光谱特征,并探讨利用光谱特征对土壤进行分类的可能性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

样品采集的区域位于江西省的吉安县、余江县、兴国县以及南昌市的湾里区,余江县的土壤类型为典型的低丘红砂岩发育的土壤,吉安县为丘陵盆地土壤,兴国县为典型低山丘陵花岗岩发育的土壤,湾里区土壤主要是由低山区黑云母花岗岩和花岗片麻岩风化而来。根据典型性和代表性原则,随机采取443个样品,土壤亚类分别为红壤土类中的红壤亚类、黄红壤亚类、红壤性土亚类和棕红壤亚类,水稻土土类包括潜育型水稻土亚类、潜育型水稻土亚类和淹育型水稻土亚类(表1)。土样清除植物残留物和石块后,于室内自然风干,经研磨后统一过1 mm筛,四分法分成两份,一份用于实验室测定,另一份用于室内光谱测量。

### 1.2 样品分析

土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热法测定;土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定;全氮采用凯式定氮法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;有效磷采用钼锑抗比色法测定;pH采用电位法测定<sup>[16-17]</sup>。

土壤样品光谱数据的采集使用美国ASD仪器公司的FieldSpec Pro FR型光谱仪,仪器参数设置如下:其波长范围为350~2 500 nm,采样间隔为1.4 nm(350~1 000 nm)和2 nm(1 000~2 500 nm),重采样间隔为1 nm,输出波段数为2 150 nm,具体测量见文献[18]。

土壤样品放在直径10 cm,深1.5 cm,内部涂黑的盛样器皿内,土样表面刮平。每个测量点测量10条光谱,30条光谱取平均值后作为该土壤采样点的室内光谱。

### 1.3 光谱数据预处理

先对反射光谱去掉噪声较大的边缘波段350~400 nm和2 400~2 500 nm。为了消除一些不

表1 供试土壤样品基本情况

Table 1 Genetic types and number of the soil samples

土类 Soil group	亚类 Soil sub-group	土属 Soil genus	主要性状 Main characteristics	样品数 Samples number		
红壤 Red soil	棕红壤 Brown red soil	麻沙泥棕红壤 Acid crystalline rock brown red soil	土壤表层为棕红色，砂质黏壤土，屑粒状风化物，松散，母质为花岗岩风化物	36		
	黄红壤 Yellow red soil	麻沙泥黄红壤 Acid crystalline rock yellow red soil	土体颜色为棕色至淡棕色，土体厚度较大，砂质黏壤土，土体疏松	10		
	红壤 Red soil	红壤性土 Weakly red soil	麻沙泥红壤 Acid crystalline rock red soil	植物生长比较茂盛，植物根系多，自然肥力高，土体颜色以红色为主，壤质黏土	102	
			麻沙泥土 Acid crystalline rock upland soil	暗黄棕色，砂壤土，碎粒状结构，疏松，多根系	22	
			黄泥土 Quarternary red clay upland soil	红黄色，壤黏土，小块状结构，略疏松	14	
	水稻土 Paddy soil	潜育型水稻土 Gleyed paddy soil	潜育型麻沙泥田 Acid crystalline rock gleyed paddy soil	地处垌田中下部低洼处，成土母质为酸性结晶盐类风化物，湿土灰黄棕色，砂质壤土，屑粒状结构，松散，有较多的锈纹	18	
			潜育型潮沙泥田 Sediment gleyed paddy soil	地处河谷平原平地地带，土层深厚，耕作层灰棕色，粉砂质黏土，块状结构，有少量的锈斑	26	
		潜育型水稻土 Waterlogged paddy soil	潜育型麻沙泥田 Acid crystalline rock waterlogged paddy soil	潜育型红砂泥田 Red sandstone waterlogged paddy soil	土层较薄，灰棕色，黏质壤土，小块状结构，少量锈斑	66
				潜育型潮沙泥田 Sediment waterlogged paddy soil	地处低丘陵沟谷地带，棕红色，有明显的锈斑，砂质黏壤土，小团块状结构	23
				潜育型黄泥土 Quarternary red clay waterlogged paddy soil	地处河谷平原的坂田，湿土暗棕色，壤质黏土，屑粒状结构，多棕红色根锈	54
潜育型黄泥土 Quarternary red clay waterlogged paddy soil				土层深厚，质地黏重，粉砂质黏壤土，有明显的锈纹，湿土黄褐色	47	
淹育型水稻土 Submergic paddy soil		淹育型红砂泥田 Red sandstone submergic paddy soil	地处低丘坑田，耕层浅，土体颜色为红棕色，少量红色锈纹，砂壤土，疏松	13		

确定性的噪声和减少数据矩阵，对400~2400 nm的波段每10 nm进行平均，最终得到了201个波段值进行后续分析。

为了更明显地看出特征吸收峰，对光谱进行连续统去除，可以有效地突出光谱曲线吸收和反射特

征，并将其归一到一致的光谱背景上，有利于与其他光谱曲线进行特征数值比较，从而提取出特征波段进行分类识别<sup>[19]</sup>。用1减去连续统去除后的反射光谱即为特征吸收光谱（见图1）。特征吸收峰和横坐标所包围的图形为吸收面积。

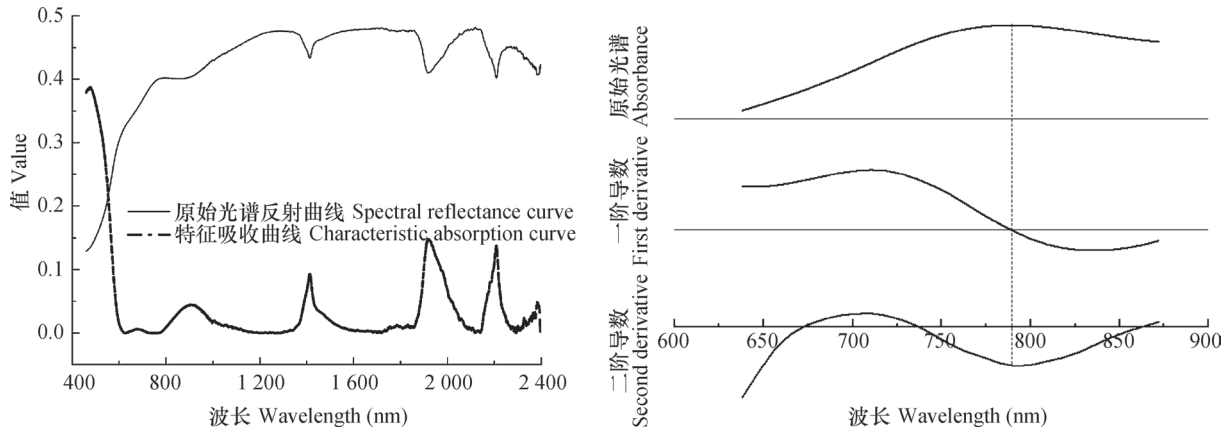


图1 光谱曲线特征提取

Fig. 1 Extraction of spectral curve characteristic

导数光谱法也是展示光谱吸收特征的一种方法，原始光谱的二阶导数对重叠光谱的较窄或者较微弱的吸收波段的分辨有明显的增强作用<sup>[20]</sup>。对原始光谱的二阶导数主要是运用于对光谱可见光区域范围，以找出不同土壤亚类和不同土属的差异性。

#### 1.4 土壤光谱特征变量提取

对光谱特征表现、反射率的强度、曲线变化的斜率和特征吸收谷的强度等进行光谱特征变量提取，初选出24个光谱特征变量，作为预选特征参数，再运用逐步判别分析方法从24个反射率值中选择最具代表性的19个光谱变量用于光谱聚类分析，其中特征吸收峰和三个弓曲差分别反映氧化铁、有机质和黏土矿物等的含量；四个波段范围的均值和三个曲线的比值反映曲线位置。聚类分析采用SAS软件的Fastclus，聚类之前所有变量均标准化，聚类的类别按照采样的土壤亚类给定7类，每种亚类内按土属再进行聚类。

## 2 结果

### 2.1 不同红壤亚类光谱特征

基于全部土壤特征变量对土壤光谱进行聚类，对聚类的同一类土壤光谱求均值得到光谱分类后的四个红壤亚类的光谱曲线（图2）。从图2可以看出，不同红壤亚类的光谱曲线有类似的趋势。在可见光-短波近红外光谱范围曲线较为陡峭，在近红外光谱区域有几个波折，1 400 nm、1 910 nm和2 200 nm有强烈的吸收峰，980 nm左右有明显的吸

收峰。由于成土环境、黏土矿物和成土母质等特性差异导致不同红壤亚类光谱曲线差异明显，整体来看，红壤性土亚类光谱反射率整体最高，黄红壤亚类反射率最低，棕红壤亚类反射率较低。红壤各亚类光谱曲线在900 nm左右均有吸收峰，在1 400 nm、1 900 nm和2 200 nm均有强的吸收峰，但不同红壤亚类的吸收峰有差异，红壤性土亚类的光谱曲线在1 400 nm、1 900 nm和2 200 nm为强烈的V形吸收峰，而其他亚类的吸收峰较宽较浅。这是由于土壤发育程度的不同，其黏土矿物、有机质含量和水分含量等的差异导致光谱曲线差异明显。在可见光-短波近红外光谱区域，红壤性土亚类反射曲线急剧上升，而黄红壤亚类在600 nm左右有较浅的有机质吸收峰。

图3a和图3b分别是红壤中不同黏土矿物和铁氧

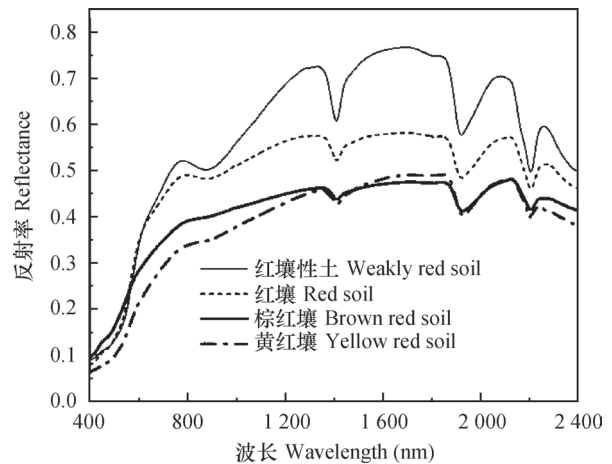


图2 不同红壤亚类土壤光谱反射率

Fig. 2 Spectral reflectance of red soil relative to sub-group



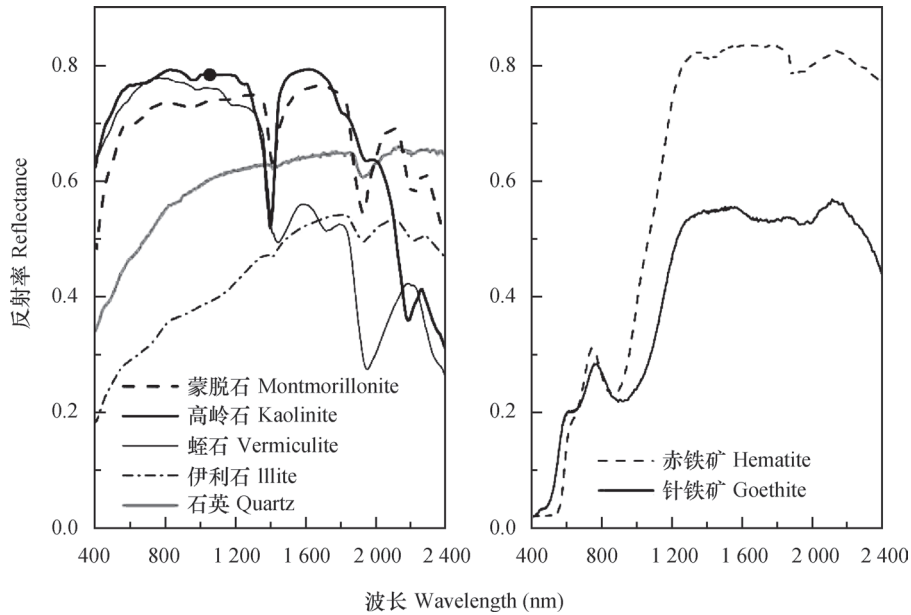


图3 红壤部分黏土矿物反射系数曲线

Fig. 3 Reflectance curve of clay minerals in red soil, such as montmorillonite, kaolinite, vermiculite, illite, quartz, hematite and goethite

化物的光谱曲线。从图2和图3可知红壤性土亚类的黏土矿物以高岭石为主，含有一定量的赤铁矿，而红壤亚类的黏土矿物除了以高岭石为主还含有少量蛭石。黄红壤的光谱曲线位置较红壤低，在900 nm左右有明显的氧化铁吸收峰，吸收峰强度较红壤强，在400 nm~800 nm波段范围内有明显的有机质吸收峰，在水分吸收波段1 400 nm和1 900 nm有较强吸收峰，但较红壤弱，其黏土矿物与红壤类似。棕红壤光谱曲线整体较平，根据图3可以看出棕红壤的黏土矿物以高岭石、伊利石为主，含有一定量石英。

图4是对红壤不同亚类的特征吸收光谱的提取方法，图4a为连续统去除后的特征提取，图4b为二阶导数处理。图4a显示黄红壤亚类吸收光谱位置最高，红壤亚类位置较高，棕红壤亚类和红壤性土亚类几乎与x轴重叠。研究显示620~640 nm为红壤地区土壤有机质的吸收区域，因此从图4a可以看出，黄红壤亚类的有机质含量最高。Kosmas等<sup>[20]</sup>的研究表明，可见光范围的二阶导数处理能判别出土壤中的针铁矿和赤铁矿的含量，二阶导数处理的420~447 nm范围的波段能够定量估算土壤中针铁矿的含量。从图4b可以看出，447 nm和420 nm处

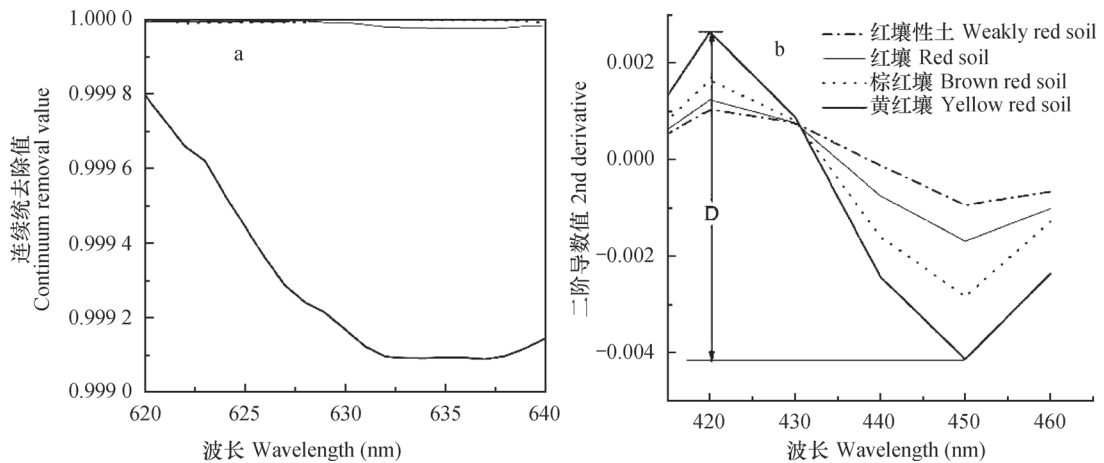


图4 不同红壤亚类土壤特征吸收光谱

Fig. 4 Characteristic absorption of spectral reflectance of red soil sub-group

反射率的二阶导数之间的距离大小为：黄红壤亚类 > 棕红壤亚类 > 红壤亚类 > 红壤性土亚类，说明黄红壤亚类中含有大量的针铁矿，棕红壤亚类中含有一定量的针铁矿，而红壤和红壤性土亚类针铁矿的含量较少。

## 2.2 不同水稻土亚类光谱特征

潜育型水稻土亚类和潜育型水稻土亚类的光谱反射曲线位置较低（图5a），但在可见光-短波近红外光谱区域，潜育型水稻土反射率较潜育型水稻土低，在950 nm左右潜育型水稻土有明显的氧化铁吸收峰，潜育土壤光谱曲线较为平滑。淹育性水稻土反射率最高，三种水稻土亚类光谱反射曲线位置为：淹育性水稻土 > 潜育型水稻土 > 潜育型水稻土，根据曲线反射率的位置高低可以用于识别不同的水稻土亚类。

江西红壤地区水稻土在一年中浸水的时间较长，有利于有机质的积累，但不同亚类在相同的管理下有机质的积累速度差异较大。从光谱曲线（图

5）可以看出在可见光-短波近红外波段范围内，潜育型水稻土光谱反射曲线位置最低，在680 nm左右有微弱的有机质吸收，说明潜育型水稻土亚类有机质含量较高。潜育型水稻土亚类光谱反射率较低，是因为其分布的地理位置较为平坦、排灌便利、土壤培肥熟化水平较高。淹育性水稻土亚类光谱反射率高于潜育型水稻土和潜育型水稻土，在1 000 nm以后光谱反射率高于0.55，而潜育型和潜育型曲线整体均在0.55以下，说明其有机质含量和土壤肥力均较低。

为了进一步分析红壤地区水稻土的光谱特征，对红砂岩母质发育的水稻土亚类的平均光谱进行光谱特征分析（图5b），从中可以看出不同亚类水稻土的光谱曲线位置与图5a类似，淹育性水稻土光谱反射率最高，潜育型水稻土在可见-近红外反射率最低、而在近红外（1 500 nm以外）其反射率高于潜育型水稻土。图6a显示不同土壤亚类总体特征吸收面积为潜育型水稻土亚类 > 潜育型水稻土亚类 >

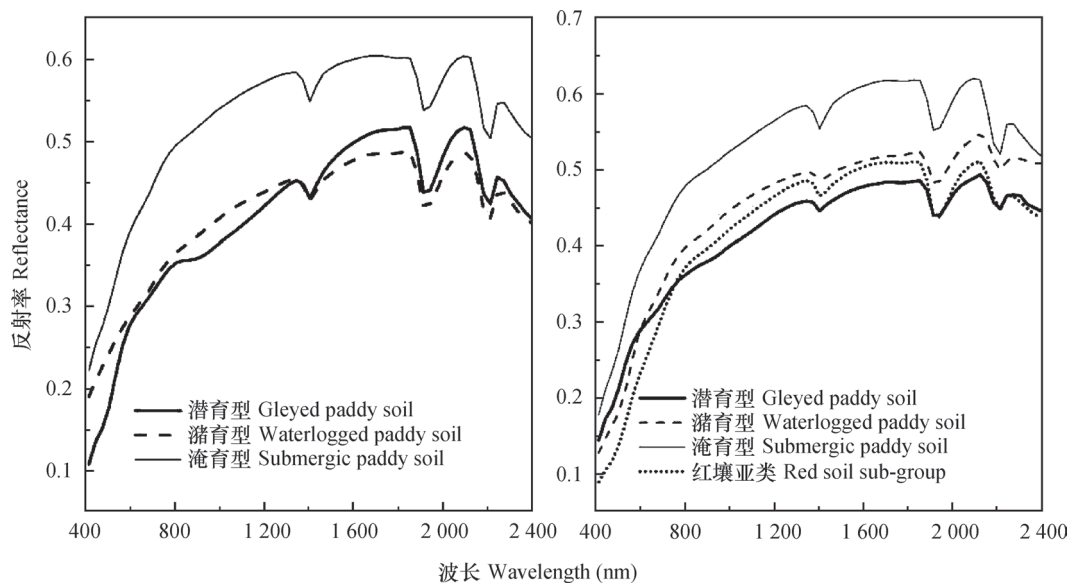


图5 不同水稻土亚类和红壤亚类土壤光谱反射率

Fig. 5 Spectral reflectance of paddy soil and red soil sub-group

淹育型水稻土亚类 > 红壤亚类。

由于土壤受不同水分作用以及淹水时间长短的影响，光谱曲线不仅表现在有机质的差异上，而且反映在氧化铁的氧化还原程度上。水稻土中还原淋溶、氧化淀积交替过程造成不同亚类水稻土耕层土壤氧化铁含量差异明显。图6b显示不同水稻土亚类在422~445 nm光谱区域二阶导数之间距离的

大小，根据二阶导数距离的大小可以判定针铁矿的含量，红壤地区水稻土针铁矿为土壤晶体氧化铁<sup>[21]</sup>，淹育型水稻土亚类在422~445 nm光谱差值最大，表明其含晶体氧化铁最多。潜育型水稻土氧化条件较好，因此较多的氧化铁结晶成为晶质铁<sup>[22]</sup>，表现在422~445 nm光谱区域的二阶导数差值较大，而潜育性水稻土因长期浸水，部分

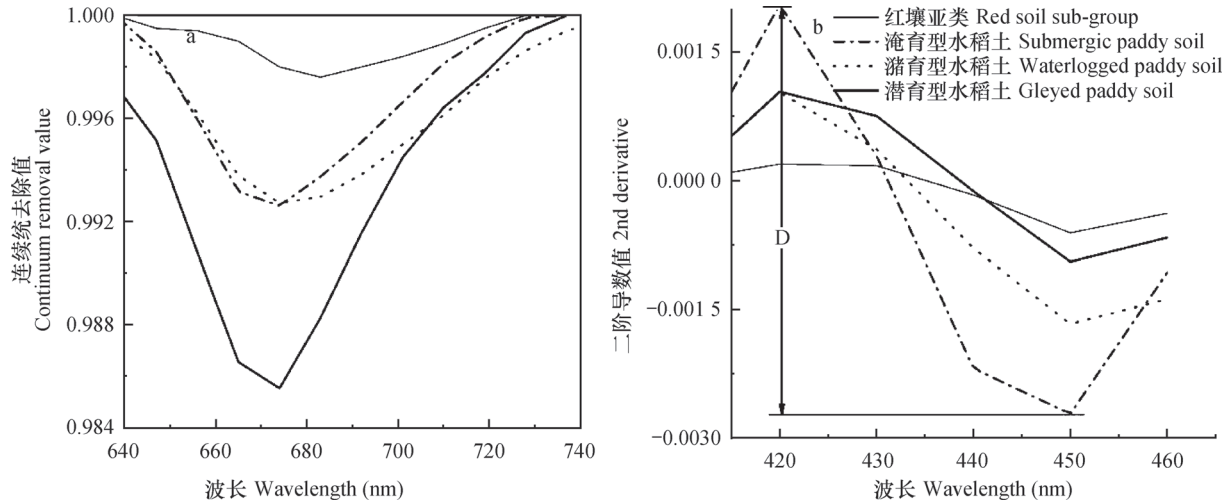


图6 不同水稻土亚类和红壤亚类特征吸收光谱曲线

Fig. 6 Characteristic absorption of spectral reflectance of paddy soil and red soil sub-group

氧化铁处于还原状态，晶体铁相对较少，表现在422~445 nm波段之间的二阶导数差值较小。图6b显示红壤亚类在422 nm和445 nm这两个波段的二阶导数差值最小，可推断出红壤亚类的针铁矿含量最少，这与图4的结果一致，因此422~445nm波段范围的二阶导数是一项衡量晶体氧化铁含量的综合指标，因而其对水稻土发生学研究具有一定的研究意义。

根据图3的黏土矿物的光谱曲线可以推断出红壤地区红砂岩发育而来的水稻土与红壤亚类的黏土矿物类似，以高岭石和伊利石为主，含有一定量的蛭石、蒙脱石和石英，与其起源土壤一致。

### 2.3 潞育型水稻土不同土属的光谱特征

土壤光谱是土壤物理和化学行为的光谱综合，从土壤反射光谱能识别土壤主导形成过程和一些附加的成土过程，但成土母质、水文条件和土地利用方式的差异，土壤反射光谱具有特定的光谱特征，因此，还应该从土属来分析江西红壤地区不同水稻土的光谱特征。图7为红壤地区分布面积较大的潞育型水稻土的四种土属的平均光谱反射率。显示潞育型麻沙泥田光谱反射率最低，在540 nm左右、950 nm左右和650 nm左右分别为有微弱的氧化铁和有机质吸收峰，潞育型麻沙泥田的成土母质为酸性结晶岩类，其土壤养分含量和氧化铁含量均较高，因此光谱反射曲线位置整体较低。在1 900 nm和2 200 nm有强烈的吸收、在1 400 nm有较强吸收，根据图4可推断出这类土属的黏土矿物以高岭石为主，含有少量的伊利石和蒙脱石。

潞育型黄泥田是由第四纪红色黏土发育而来，光谱反射率较低，在540 nm、950 nm、650 nm、1 400 nm、1 900 nm和2 200 nm左右的吸收峰较麻沙泥田稍弱，土壤养分含量较高，黏土矿物以伊利石和高岭石为主，含有少量的蛭石。

潞育型红泥田和潞育型潮沙泥田光谱曲线位置较高，在1 400 nm有较强的吸收峰，2 200nm有最强吸收峰，这两种土属的黏土矿物均是以高岭石为主，含有少量的蒙脱石、蛭石和伊利石。潞育型红沙泥田由红砂岩形成红泥红壤水耕熟化而来，土壤光谱反射率最高，根据图4可推断出该土属石英含量较高，在400~1 400 nm曲线比较平滑，未出现吸收峰，这类土属土壤有机质含量和氧化铁含量均

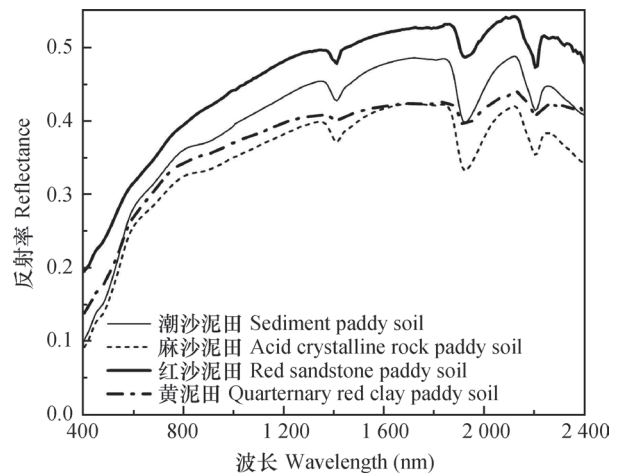


图7 不同潞育型水稻土土属的光谱平均反射率

Fig. 7 Mean reflectance of waterlogged paddy soil relative to soil genus

较低,土壤含沙较多,黏粒含量低。潜育型潮沙泥田光谱反射曲线位置较高,其是由河流沉积物发育而形成的土壤水耕熟化形成,土壤含沙量较高,由于地势平坦,土壤肥力较高。土壤光谱曲线在650 nm和950 nm左右有微弱的氧化铁和有机质吸收峰。

#### 2.4 基于土壤光谱特征的土壤分类精度

在土壤发生分类和土壤理化属性的研究中,光谱特征显示了它的综合特点,因此研究了应用光谱反射特性用于土壤分类。红壤地区不同亚类或不同土属的光谱特征分类结果见表3。应用光谱特征对试验土壤亚类的判定结果效果较好,精确率为86.23%,发生的误判主要是在红壤亚类与淹育型水稻土之间。对土属的判定效果较低,精确率仅有66.37%。在土壤亚类的判定中,黄红壤和潜育型水稻土的效果最好,226个样品中仅有7个样品判断错误。棕红壤的判定效果较差,判断的准确率仅有44.44%。在土属的判定中,麻沙泥红壤土属的判定最差,112个土属有64个判断错误,仅有48个土属判断正确,准确率仅有42.86%。但应注意的是,土属的判断错误主要是存在于相同亚类不同土属之间,以及红壤亚类和棕红壤亚类之间,是由于这些土壤类型在理化特性上有许多相似之处。

### 3 讨论

对土壤进行快速分类,一直是土壤分类及土壤遥感分类等领域学者关注的主要科学问题之一。本文对江西省红壤地区主要土壤不同亚类或不同土属的土壤光谱特征进行分析,选取19个有代表性的土壤光谱特征参数,尝试从光谱的角度对红壤地区的主要土壤类型进行类型划分做了一些探讨。

江西红壤地区红壤土类与水稻土土类之间的光谱特征差异明显,主要原因是土壤水分、土壤质地和结构、土壤中不同物质组分等的差异造成。由于土壤颜色、土壤黏土矿物组成、土壤结构和土壤氧化铁含量等各不相同,红壤土类中不同亚类之间的光谱反射特征差异也明显。

江西红壤地区水稻土不同亚类之间由于水耕熟化差异性和淹水时间的长短不一,表现在光谱特征上的差异也较为明显。淹育型水稻土光谱反射曲线位置最高,在可见光—近红外区域反射率较大,吸收峰不如另外两个水稻土亚类明显。潜育型水稻土

光谱曲线位于潜育型和淹育型之间,潜育型水稻土光谱反射曲线位置最低。620 nm~740 nm的特征吸收面积潜育型水稻土最大、潜育型水稻土其次、淹育型水稻土最低。研究表明620 nm~740 nm的特征吸收面积与有机质含量成正相关<sup>[23-24]</sup>。水分条件的不同是造成不同亚类水稻土有机质含量差异的原因之一。潜育型水稻土由于长期浸渍,有利于有机质积累,有机质含量最高,潜育型水稻土由于能灌能排,土壤通透性良好加之耕作管理施肥水平高有机质可以获得补充,因此该土壤的有机质含量也较高。此外,土壤腐殖质组成中胡敏酸和胡敏酸/富啡酸值随着土壤水分含量的增加而增大,有机质对土壤光谱的主要贡献为胡敏酸<sup>[25]</sup>,这可能是不同亚类土壤光谱差异的另一原因。420 nm和447 nm处光谱反射率的二阶导数差值淹育型水稻土最高、潜育型水稻土最低,但均显著高于红壤亚类。水稻土因水分作用氧化条件差及有机质累积,三价铁离子被有机酸络合,不利于水化铁的脱水作用进而利于针铁矿的形成<sup>[26]</sup>,使得水稻土中针铁矿含量高于红壤。相比潜育型水稻土和淹育型水稻土,还原性较强的潜育型水稻土其晶质铁含量低。但由于采集的不同亚类的水稻土仅为红壤地区,土壤样品的成土母质相对具有代表性,但运用到其他土壤类型时仍然需要验证。

选取的19个特征变量对主要土壤类型进行判别,结果显示土壤亚类划分的准确率为86.23%,因此利用土壤光谱特征可作为江西红壤地区主要土壤亚类划分和土壤属性研究的重要定量参考指标。而土属之间划分的准确率仅为66.37%,说明依靠土壤光谱特性用于现行土壤发生分类中土属类型之间的判别还需要进一步研究,但说明了利用光谱特征用于土壤系统分类中基层分类的可能性。

研究表明应用光谱特征进行土壤亚类的分类准确率较高,因此选取的光谱特征参数可作为江西省典型红壤地区主要土壤亚类分类及其土壤属性研究的定量指标。对土壤亚类分类出现误判的土壤而言,究其原因多数是在现行土壤分类中土壤性质存在过渡特征或仅仅是发育程度深浅的土壤亚类之间,主要集中在红壤亚类和棕红壤亚类之间以及与淹育型水稻土亚类之间,因为红壤亚类与棕红壤亚类是过渡性的,因此光谱差异较小;淹育型水稻土属于水耕熟化时间短、水稻土发育程度不深、还保留有其发育前土壤类型大量特性的土壤,而江西红



表2 基于光谱特征进行土壤分类的精度

Table 2 Accuracy of soil classification based on spectral characteristic

土类 Soil group	亚类 Soil sub-group	判断正确 Correct		判断错误 Error		
		土属 Soil genus	样品数 Sample number	土属 Soil genus	样品数 Sample number	
红壤 Red soil	棕红壤 Brown red soil	麻沙泥棕红壤 Acid crystalline rock brown red soil	20	麻沙泥红壤 Acid crystalline rock red soil	6	
				淹育型麻沙泥田 Acid crystalline rock submergic paddy soil	10	
	黄红壤 Yellow red soil	麻沙泥黄红壤 Acid crystalline rock yellow red soil	10	—	0	
		红壤 Red soil	麻沙泥红壤 Acid crystalline rock red soil	48	麻沙泥土 Acid crystalline rock upland red soil	29
				麻沙泥棕红壤 Acid crystalline rock brown red soil	35	
			麻沙泥土 Acid crystalline rock upland red soil	20	麻沙泥红壤 Acid crystalline rock red soil	2
			黄泥土 Quarternary red clay upland soil	10	淹育性黄泥田 Quarternary red clay submergic paddy soil	4
		红壤性土 Weakly red soil	红砂泥红壤性土 Red sandstone upland weakly red soil	8	淹育型红沙泥田 Red sandstone submergic paddy soil	4
	水稻土 Paddy soil	潜育型水稻土 Gleyed paddy soil	潜育型麻沙泥田 Acid crystalline rock gleyed paddy soil	18	—	0
			潜育型潮沙泥田 Sediment gleyed paddy soil	20	潜育型麻沙泥田 Acid crystalline rock gleyed paddy soil	6
潜育型水稻土 Waterlogged paddy soil		潜育型麻沙泥田 Acid crystalline rock waterlogged paddy soil	46	潜育型红沙泥田 Red sandstone waterlogged paddy soil	20	
		潜育型潮沙泥田 Sediment waterlogged paddy soil	13	潜育型潮沙泥田 Sediment waterlogged paddy soil	10	
		潜育型潮沙泥田 Sediment waterlogged paddy soil	50	潜育型红沙泥田 Red sandstone waterlogged paddy soil	4	
		潜育型黄泥田 Quarternary red clay waterlogged paddy soil	22	麻沙泥棕红壤 Acid crystalline rock brown red soil	7	
				潜育型黄泥田 Quarternary red clay gleyed paddy soil	18	
淹育性水稻土 Submergic paddy soil		淹育性红沙泥田 Red sandstone submergic paddy soil	9	潜育型红沙泥田 Red sandstone waterlogged paddy soil	4	

壤地区的淹育型水稻土多是由红壤亚类经开垦水耕熟化发育而来,因此二者之间许多特性存在相似性,应用光谱特征进行区分时会有一些误判。

利用光谱特征参数对土属进行分类时结果准确率较低,主要原因是《中国土壤分类系统(1992)》的土属划分,主要从成土母质、岩性、区域水文条件和土地利用等地方性因素来划分,这些难以用光谱特征进行区分;而在光谱特征差异较大并可反演的土壤性状(如土壤水分、土壤质地、土壤结构、土壤有机质含量、土壤铁锰含量、土壤黏土矿物组成等),在土属之间有许多是相似的,难以应用光谱特征一一准确地区分不同土属的差异。土属之间应用土壤光谱特征进行分类准确率较低,也说明现行土壤分类系统基层分类过于定性,应推动量化的土壤系统分类发展和应用,同时应研究应用光谱特征进行土壤系统分类中基层分类的可能性。此外,本次研究的样品采集的是表层土壤,由于表层土壤存在部分属性不稳定,因此还应该结合心土层的土壤光谱特征并结合土壤矿物成分预测模型对红壤地区土壤光谱特征进一步研究。

## 4 结论

红壤地区土壤不同亚类光谱反射率差异明显,620 nm~740 nm的特征吸收面积黄红壤>红壤>棕红壤>红壤性土,420 nm和447 nm的二阶导数差值黄红壤>棕红壤>红壤>红壤性土。不同亚类水稻土由于淹水时间的不同,其光谱特征差异较为明显,光谱反射率表现为淹育型水稻土>潜育型水稻土>潜育型水稻土,620 nm~740 nm的特征吸收面积潜育型水稻土>潜育型水稻土>淹育型水稻土,420 nm和447 nm的反射率二阶导数差值为淹育型水稻土>潜育型水稻土>潜育型水稻土,但均高于红壤。选取的特征变量对土壤进行亚类分类的准确率为86.23%,分类的准确度较高,而土属的准确率仅为66.37%。可见一近红外土壤光谱特征可以作为江西红壤地区主要土壤亚类划分的定量参考指标。

## 参考文献

[ 1 ] Condit H R. Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of American soils. *Applied Optics*,

1972, 11 ( 1 ) : 74—86

- [ 2 ] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 ( 6 ) : 1161—1165
- [ 3 ] Brown D J, Shepherd K D, Walsh M G, et al. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 2006, 132 ( 3 ) : 273—290
- [ 4 ] Rossel R A V, Webster R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible - near infrared spectra. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62 ( 4 ) : 637—647
- [ 5 ] Vasques G M, Dematte J A M, Rossel R A V, et al. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. *Geoderma*, 2014, 223: 73—78
- [ 6 ] Soriano-disla J M, Janik L J, Rossel R A V, et al. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2013, 49 ( 2 ) : 139—186
- [ 7 ] Kuang B, Mouazen A M. Calibration of visible and near infrared spectroscopy for soil analysis at the field scale on three european farms. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62 ( 4 ) : 629—636
- [ 8 ] 吴豪翔, 王人潮. 土壤光谱特征及其定量分析在土壤分类上的应用研究. *土壤学报*, 1991, 28 ( 2 ) : 177—185
- Wu H X, Wang R C. Soil spectral characteristics and its quantitative analysis in soil classification ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28 ( 2 ) : 177—185
- [ 9 ] 王深法, 蒋亨显, 王人潮. 浙江省石灰土光谱特征及其自动识别分类技术研究. *土壤学报*, 1994, 31 ( 3 ) : 312—321
- Wang S F, Jiang H X, Wang R C. Spectral characteristics of limestone soil in Zhejiang Province and their automatic classification ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 ( 3 ) : 312—321
- [ 10 ] 黄应丰, 刘腾辉. 华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类. *土壤学报*, 1995, 32 ( 1 ) : 58—68
- Huang Y F, Liu T H. Spectral characteristics of main types of soils in Southern China and soil classification ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32 ( 1 ) : 58—68
- [ 11 ] 刘焕军, 张柏, 张渊智, 等. 基于反射光谱特性的土壤分类研究. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28 ( 3 ) : 624—628
- Liu H J, Zhang B, Zhang Y Z, et al. Soil taxonomy on the basis of reflectance spectral characteristics ( In

- Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28 (3): 624—628
- [12] 夏学齐, 季峻峰, 陈骏, 等. 土壤理化参数的反射光谱分析. *地学前缘*, 2009, 16 (4): 354—362  
Xia X Q, Ji J F, Chen J, et al. Analysis of soil physical and chemical properties by reflectance spectroscopy (In Chinese). *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (4): 354—361
- [13] 彭杰, 向红英, 周清, 等. 土壤氧化铁的高光谱响应研究. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33 (2): 502—506  
Peng J, Xiang H Y, Zhou Q, et al. Influence of soil iron oxide on VNIR diffuse reflectance spectroscopy (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33 (2): 502—506
- [14] 彭杰, 周清, 张杨珠, 等. 有机质对土壤光谱特性的影响研究. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 517—524  
Peng J, Zhou Q, Zhang Y Z, et al. Effect of soil organic matter on spectral characteristics of soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 517—524
- [15] 史舟, 王乾龙, 彭杰, 等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型. *中国科学 (地球科学)*, 2014, 44 (5): 978—988  
Shi Z, Wang Q L, Peng J, et al. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations (In Chinese). *Science China (Earth Sciences)*, 2014, 44 (5): 978—988
- [16] 张甘霖, 龚子同. *土壤调查实验室分析方法*. 北京: 科学出版社, 2012  
Zhang G L, Gong Z T. *Soil survey laboratory methods* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978  
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil physical and chemical analysis* (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [18] 纪文君, 史舟, 周清, 等. 几种不同类型土壤的 VIS-NIR 光谱特性及有机质响应波段. *红外与毫米波学报*, 2012, 31 (3): 277—282  
Ji W J, Shi Z, Zhou Q, et al. VIS-NIR reflectance spectroscopy of the organic matter in several types of soils (In Chinese). *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2012, 31 (3): 277—282
- [19] Bayer A, Bachmann M, Müller A, et al. A comparison of feature-based MLR and PLS Regression techniques for the prediction of three soil constituents in a degraded South African ecosystem. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012 (3): 495—506
- [20] Kosmas C S, Curi N, Bryant R B, et al. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48 (2): 401—405
- [21] 章明奎. 红壤性水稻土晶态氧化铁及其起源. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 1997, 23 (5): 589—594  
Zhang M K. Occurrence and origin of crystalline iron oxides in paddy soils derived from red earth (In Chinese). *Journal of Zhejiang University (Agricultural and Life Sciences)*, 1997, 23 (5): 589—594
- [22] 吴金奖, 邢世和, 林景亮. 福建红壤性水稻土发生和分类的研究. *土壤学报*, 1989, 26 (4): 371—378  
Wu J J, Xing S H, Lin J L. Study on the genesis and classification of paddy soils derived from red soil in Fujian Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (4): 371—378
- [23] Summers D M, Lewis M D, Ostendorf B, et al. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*, 2011, 11 (1): 123—131
- [24] 方少文, 杨梅花, 赵小敏, 等. 红壤区土壤有机质光谱特征与定量估算——以江西省吉安县为例. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 1003—1010  
Fang S W, Yang M H, Zhao X M, et al. Spectral characteristics and quantitative estimation of SOM in red soil typical of Ji'an County, Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 1003—1010
- [25] Henderson T L, Baumgardner M F, Franzmeier D P, et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (3): 865—872
- [26] 吴金奖, 邢世和, 林景亮. 应用穆斯堡尔谱和X射线法研究红壤性水稻土的氧化铁矿物. *土壤学报*, 1989, 26 (1): 23—30  
Wu J J, Xin S H, Lin J L. Study on iron oxide mineralogy of paddy soils derived from red earth by using Mossbauer spectroscopy and X-ray diffraction (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (1): 23—30

## Hyper-spectral Characteristics of Major Types of Soils in Red Soil Region of Jiangxi Province, China

ZHAO Xiaomin<sup>1</sup> YANG Meihua<sup>1, 2</sup>

(1 Land Resources & Environment College/Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

(2 Nanchang Teachers College, Nanchang 330103, China)

**Abstract** 【Objective】 Soil spectrum, as a comprehensive reflection of soil physical and chemical properties, is of important significance to soil quality management, digital soil mapping, analysis of soil properties and soil classification in the red soil regions. 【Method】 In this paper, a total of 443 surface soil samples were collected in the typical red soil regions, e.g. Ji'an County, Yujiang County, Xingguo County and Wanli District of Jiang Province, and visible and near infrared reflectance hyper-spectra (350 ~ 2 500 nm) of the samples were measured with an ASD spectrometer in laboratory. After the treatment of the spectra with the continuum-removal and second order derivative methods, the spectra of the four major soil subgroups and their subordinate soil families in this region were characterized. Then, 19 characteristic variables, such as spectral reflection and absorption of parent materials, iron oxide (goethite and hematite) minerals, organic matter and clay minerals and hyper-spectral reflectance, were cited as indices for Fastclus cluster analysis of the spectra. 【Result】 Results show that the soils in the region varied sharply in spectral reflectance from sub-group to subgroup. In terms of spectral characteristic absorption area, in the 620 ~ 740 nm spectral bands, the four subgroups exhibited an order of yellow red soil > red soil > brown red soil > weakly red soil, but in terms of the difference between second order derivatives at 420 nm and at 447 nm, they followed an order of yellow red soil > brown red soil > red soil > weakly red soil. The brown red soil was higher in reflectance in the Vis-NIR spectral range, but lower and wider in spectral absorption intensity in the range of 1 900 nm than all the other subgroups. The weakly red soil was the steepest in spectral curve and the highest in reflectance in the near infrared region, showing two relatively strong absorption peaks at 1 400 nm and in 1 900 nm, separately, and a super strong peak at 2 200 nm.

In terms of the peak at 2 200 nm, the sub-group of red soil was similar to the sub-group of reddish soil in spectral curve variation tendency, but lower in absorption intensity at 900 nm, 1 400 nm, 1 900 nm and in 2 200 nm and higher in position of the curve. As a result of variation of the duration of flooding, paddy soils of the four sub-groups of red soils varied greatly in spectral characteristics, and they followed an order of gleyed paddy soil > waterlogged paddy soil > submergic paddy soil in terms of spectral reflectance; an order of submergic paddy soil > waterlogged paddy soil > gleyed paddy soil in terms of spectral absorption area in the range of 620 nm ~ 740 nm; and an order of gleyed paddy soil > submergic paddy soil > waterlogged paddy soil in terms of difference between second order derivatives at 420 nm and at 447 nm. Classification, based on the 19 indices, of red soils in the region by soil subgroup reached 86.23% in accuracy and by soil family 66.37%. 【Conclusion】 Obviously soil Vis-NIR spectral characteristics can be used as quantitative indices for reference in classification by sub-group of the red soils in Jiangxi Province.

**Key words** Soil type; Vis-NIR; Spectral characteristics; Red soil region; Jiangxi Province

(责任编辑: 檀满枝)