

土壤理化参数的反射光谱分析

夏学齐^{1,2}, 季峻峰², 陈骏², 廖启林³, 杨忠芳¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093

3. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018

Xia Xueqi^{1,2}, Ji Junfeng², Chen Jun², Liao Qilin³, Yang Zhongfang¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

Xia Xueqi, Ji Junfeng, Chen Jun, et al. Analysis of soil physical and chemical properties by reflectance spectroscopy. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 354-362

Abstract: Soil reflectance spectroscopy within the visible-near-infrared (VNIR) region (0.38-2.5 μm) contains much information of soil composition and their physical and chemical parameters. The determination of a soil reflectance spectrum is not only rapid, inexpensive but also non-destructive and environmental friendly, and moreover, the spatial distribution of soil reflectance information can be mapped by hyper-spectral remote sensing. Based on the large quantities of soil samples acquired in the ecogeochemical survey of Jiangsu Province, we have related the soil eco-geochemical parameters, such as cation exchange capacity (CEC), organic matter, pH, ferric oxide, and contents of Al, Fe and Si, to the reflectance parameters of soil samples. The results indicate that the CEC of soil can be accurately predicted by first derivative (FD) values of soil reflectance spectra at 1400, 1900 and 2200 nm or by reflectance values directly at the shorter wavelengths (~ 400 nm). Soil organic matter, types of iron oxides, and contents of Al, Fe and Si can also be determined by their respective relevant wavelengths on the reflectance or FD spectra. Soil pH in Jiangsu was found to be highly correlated to FD values near 656 nm; however, this relationship showed a regional dependence, which may account for the non-linear relationship between soil pH and reflectance parameters. The more complicated mechanisms relating to the relationship between soil pH and their reflectance parameters need to be further clarified.

Key words: hyper-spectral remote sensing; soil; reflectance spectrum; soil eco-geochemical parameters

摘要:土壤可见光和近红外波段(400~2 500 nm)反射光谱信息包含了大量土壤物理化学参数,土壤反射光谱测量简单、快速,无需破坏样品,而且还可以通过高光谱遥感方法制图。文中使用江苏国土生态地球化学调查中获取的大量土壤样品,研究了土壤阳离子交换量(CEC)、有机质含量、pH值、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。结果显示,土壤CEC是进行光谱预测非常成功的参数,1 400、1 900和2 200 nm附近一阶导数光谱(FD)值或短波方向反射率值均可以很好地反映土壤CEC的大小;土壤有机质含量、铁氧化物类型、铁铝硅含量均可以在反射率光谱或其一阶导数(FD)值找到相关波段;

收稿日期:2009-01-21;修回日期:2009-04-10

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”项目“面向地块的地物类型精细识别技术及其应用”(2007AA12Z181);中国地质调查局与江苏省政府合作项目“江苏省国土生态地球化学调查”(20031230008,20031230000903)

作者简介:夏学齐(1979—),男,博士,讲师,主要从事高光谱遥感、环境地球化学等方面的教学与科研工作。E-mail: xiaxueqi@cugb.edu.cn

土壤导数光谱存在的 A、B、C 和 D 峰使反射光谱方法不仅能够定量铁氧化物总量,还能鉴别铁氧化物矿物类型(针铁矿和赤铁矿)及其相对含量;江都土壤光谱的 656 nm 附近 FD 值与 pH 有很大相关性,但是江苏样品显示 pH 值光谱经验预测具有区域依赖性,可能与土壤类型有关,说明 pH 与光谱参数之间的关系并非一般的线性关系,而有更复杂的机制。

关键词: 高光谱遥感; 土壤; 反射光谱; 土壤生态地球化学参数

中图分类号: O433.4; S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2009)04-0354-09

0 前言

土壤中常量元素和微量元素含量及其阳离子交换量、pH 值等理化参数影响作物对重金属等污染物的吸收,影响土地质量和作物的产量和品质,是重要的生态地球化学因子,也是重要的土地质量地球化学评估参数。这些生态地球化学参数的传统获取方法是进行野外采样和室内化学分析,需要耗费大量人力、物力和经济成本。尤其在获取这些参数需要大面积制图的情况下,采样和分析样品数量成倍增加,不仅经济成本高,也需要耗费很长时间。

光谱学是研究电磁辐射与物质相互作用的科学。反射光谱学主要研究光照射到固体、液体或气体介质后的透射、反射、吸收和散色现象。物质对光子的吸收与其成分和结构有关。物质对光子的吸收,尤其是对不同波长的选择性吸收使我们能够从它反射光的情况判断物质化学成分和结构^[1-2]。随着光电技术、电子技术和计算机技术的发展,目前光谱仪可以在不破坏样品的情况下几分钟或几秒钟即可扫描获取样品的反射光谱曲线,具有简单、快速的特点。目前遥感技术的发展使遥感数据源具有越来越高的光谱分辨率,高光谱分辨率遥感把图像和光谱结合起来,达到“图谱合一”,在获取地表空间图像的同时,得到地物的连续丰富的光谱信息,以定量分析物质成分。因此,研究土壤地球化学参数和光谱参数之间的关系,不仅可以为定量分析土壤地球化学参数找到简单快速、不破坏样品、经济的新方法,而且可以对这些参数进行高光谱遥感制图,为快速获取这些参数的空间分布和时间变化情况,提供理论和技术方法支持。国外许多学者注意到反射光谱与多种土壤成分和土壤参数的关系^[3],比如铁氧化物^[4-5]、有机质^[6-8]以及粘土矿物与一些敏感波段的关系。可见光波段的反射光谱反映了土壤颜色,《禹贡》中出现的最早的土壤分类方法,就充分利用了黑、白、赤、黄、青、黎等土壤颜色信息。土壤中铁氧

化物^[4,9]、碳酸盐^[10]、有机质^[11-13]和粘土矿物^[14-16]具有光谱特征。Shepherd 等于 2002 年建立了土壤光谱库^[17],并使用可见光和近红外反射光谱方法统计了交换性 Ca、Mg 及 pH 值和 CEC 等土壤基本性质,并认为这些预测机制可能在于对一些土壤性质对某种或者某些具有光谱特征的土壤成分的依赖。目前国内该方面的研究相对较少,如刘伟东 2002 年建立反射率倒数的对数的一阶导数模型,预测了土壤有机质含量^[18]。

1 数据获取和研究方法

1.1 样品和地球化学数据来源

土壤样品和地球化学数据来源于“江苏省国土生态地球化学评价”项目,均为农田水稻根系土。其中江都市样品为近似网格采样,采样密度为一个样/16 km²,共获取样品 80 个;其他样品为近似随机采样,样品遍布江苏省,共有 204 个样品。

样品地球化学数据的分析严格执行了中国地质调查局颁布的《生态地球化学评价样品分析指南(试行 2004.3)》。数据分析质量采用了插入标准物质、重复样等各种质量控制手段。分析指标包括生态地球化学填图项目要求^[9]中的 52 个常量和微量元素含量、pH 值和有机碳含量(TOC),江都样品还分析了阳离子交换量(CEC),样品地球化学分析工作在江苏省岩矿分析测试中心完成。

1.2 光谱获取和处理方法

本文研究使用的光谱均是室内光谱仪测量所得,所用仪器为 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda 900 光谱仪。该仪器具有全反射、双单色仪的光学系统。光学元件表面涂有 SiO₂ 以达到耐用的目的,在 VNIR 波段范围内,每个单色仪均使用了全息光栅。光谱测试范围 400~2 500 nm,采样间隔 2 nm,共有 1 061 个波段。标准板是 spectralon。每个样品测试时间大约 7 min。测试的所有土壤和沉积物样品都按照 Balsam 和 Deaton^[20]以及 Ji 等^[4]的方

法进行制备: 首先将样品仔细研磨过 100 目筛, 这样可以排除颗粒大小对光谱的影响。筛子为尼龙制品, 以避免铁筛对重金属和土壤光谱的影响。研磨后的样品放置于载玻片上, 用蒸馏水稀释成泥状并压平, 在低温 ($<40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下缓慢烘干后上机测试。

为突出某些物质特征性吸收峰等标志性光谱特征, 在进行光谱分析时, 除了使用原始反射率光谱数据外, 还进行了光谱一阶导数变换。光谱一阶导数 (FD) 处理可以消除由于粒度、基体效应等因素, 使光谱信息更容易反映样品化学成分。本文所用导数变换使用 Unscrambler 软件中的 Savitzky-Golay 平滑二次曲线拟合求导方法, 窗口设置为 20 nm, 以降低噪音对求导结果的影响。测试所得原始反射率光谱以及其变换光谱在 ENVI 软件里按照各研究区和光谱变换形式建立光谱库, 便于研究时提取和分析。光谱参数和地球化学指标的相关分析运算由 Microsoft EXCEL 2000 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤主要组成成分的光谱特征

土壤是多种成分的混合物, 土壤中典型成分主要有 4 类: (1) 以石英和长石为代表的原生矿物, 这些物质构成土壤的骨架; (2) 粘土矿物, 土壤和沉积物中典型的粘土矿物有伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石等; (3) 铁氧化物, 主要是包括赤铁矿和针铁矿; (4) 有机质, 主要有腐殖质、木质素、纤维素、树脂和其他复杂化合物。粘土矿物、铁氧化物和以腐殖质为代表的有机质是影响土壤光谱的主要成分, 同时

也是土壤中的主要活性成分, 这些成分影响土壤的保水、保肥能力以及土壤污染物的迁移转化。这些土壤典型活性成分的反射光谱见图 1。

电子过程造成的光谱吸收能量较大, 所以电子过程造成的光谱特征通常在可见光波段附近, 土壤光谱的电子过程主要是由 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 引起的。铁的未充满轨道的外层电子易受晶体场影响, 与周围离子作用而产生电子能级跃迁, 它产生了 760~1 300 nm 波段内的光谱特性; Fe^{2+} 的吸收波长位于 430、450、510、550 以及 1 000~11 000 nm; Fe^{3+} 的吸收波长位于 400、450、490、700 以及 870 nm 等处。赤铁矿具有在 800~1 000 nm 有很强的吸收带、750 nm 附近有很强的反射峰和曲线向蓝波段陡降等三价氧化铁的典型特征; 在 400~550 nm 的蓝波段内呈现吸收特性; 在 1 200~2 500 nm 的近红外区还具有高反射几乎不吸收的特点。针铁矿也具有典型的 900 nm 强吸收带和 550 nm 处低反射率的氧化铁特征。570~620 nm 的反射峰和宽大的 900 nm 吸收带是针铁矿区别于赤铁矿的特征, 该区域是针铁矿典型的黄橙色光谱。

土壤或沉积物成分的振动过程造成的吸收效应通常在较长的红外波段, 主要是由 H_2O 、 $-\text{OH}$ 、 CO_3^{2-} 等基团的倍频或合频引起的。土壤光谱总是在 1 400 nm 和 1 900 nm 出现水的倍频和合频两个特征谱带, 这是因为土壤中含有较多次生粘土矿物, 它们层间的结合水会在 2 200 nm 和 2 300 nm 出现吸收峰。像高岭石等二八面体层状硅酸盐, 其结构中的 OH 绕铝配位, 吸收谱带常出现在 2 200 nm 附近, 而像蒙脱石等三八面体层状硅酸盐, 其结构中的

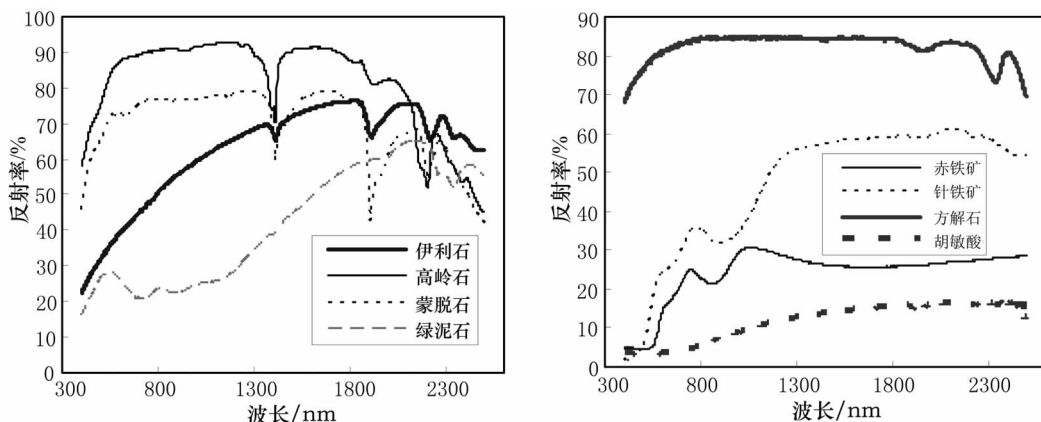


图 1 土壤和沉积物主要成分的反射光谱(胡敏酸为实测, 其他取自 JPL 光谱库)

Fig. 1 Reflectance spectra of main components of soil and sediment (humic acid from measurement and others from JPL spectral library)

OH 绕镁配位, 吸收谱带常出现在 2 300 nm 附近。 CO_3^{2-} 的倍频或合频常出现在 2 350 nm 和 2 550 nm 附近^[1]。

实测土壤样品光谱的基本形状(图 2)都相似, 与 Ben-Dor 等^[21]和 Sheperd 等^[17]描述的土壤光谱基本形状类似, 在 1 400、1 900 和 2 200 nm 附近都存在与粘土矿物相关的吸收峰; 900 nm 附近存在浅而宽的吸收, 是 Fe^{3+} 吸收的结果, 光谱反射率从近红外波段到短波方向降低, 是铁离子在可见光区域由于电荷转移吸收的结果。一阶导数变换(FD)通过计算各波段间的斜率, 突出了反射率的变化。尤其可见光波段, 吸收峰很多, 又相互重叠相互干扰, 通过 FD 变换, 可以突出这些峰的位置和强度。完整反射率光谱吸收峰对应的 FD 峰产生在左右两肩, 并随着吸收强度增加右肩 FD 值增加, 左肩 FD 值减少。

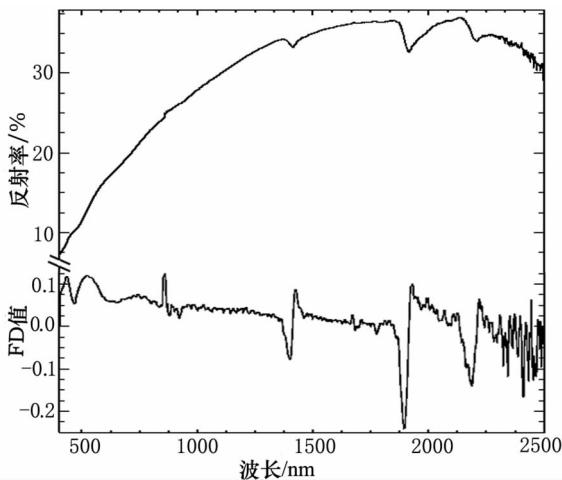


图 2 典型土壤样品反射率光谱(Ref)及其一阶导数(FD)光谱

Fig. 2 Reflectance spectrum and FD transformation for a typical soil sample

2.2 土壤有机质的光谱反应

土壤有机质是各种有机成分的混合物, 这些有机成分包含了大量的 O-H、C-H、N-H 等基团, 这些基团间的倍频、合频等振动造成电磁波在可见光和近红外波段具有很宽的且相互重叠的吸收。Xia 等^[22]通过实验证明, 很难找到土壤和沉积物中的有机质的标志性吸收峰, 有机质的增加对土壤或沉积物光谱最明显的改变是降低了土壤光谱反射率。相关分析也显示(图 3), 土壤总有机碳含量与可见光近红外波段反射率均呈负相关关系, 其中 1 500~1 900 nm 附近相关性最强。因此, 使用光谱反射率

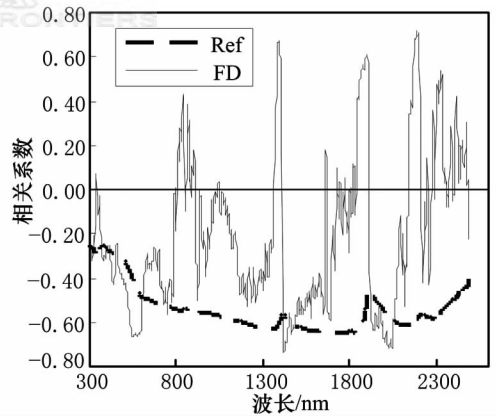


图 3 江苏土壤 TOC 含量与光谱反射率(Ref)及 FD 值相关系数($n=204$)

Fig. 3 Correlation coefficients of soil TOC to spectral reflectance and FD values from Jiangsu

值可以预测土壤 TOC 含量(图 4)。

与 FD 光谱的相关分析表明, TOC 与 1 400、1 900 和 2 200 nm 附近的光谱 FD 值具有较高正相关或者负相关关系。该波段对应了土壤粘土矿物的 O-H 吸收峰, 这种相关是由于土壤 TOC 和粘土矿物含量普遍存在相关性造成的。统计分析还表明, TOC 与这些吸收峰附近的 FD 值存在指数关系, 使用这种间接关系比直接使用光谱反射率能更好预测土壤 TOC 含量(图 4)。

2.3 土壤 CEC 的光谱预测模型

阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)是评价土壤肥力和环境质量的重要指标。它直接反映土壤可以提供速效养分的数量, 也能表示土壤保肥能力、缓冲能力的大小。阳离子交换量(或吸收容量)是指在一定 pH 值条件下每 1 000 g 干土所能吸附的全部交换性阳离子的厘摩尔数(cmol/kg), 受胶体数量、胶体类型和土壤 pH 值等因素共同影响。土壤 CEC 的光谱分析表明, 1 400、1 900 和 2 200 nm 附近 O-H 吸收峰可以反映土壤 CEC 的大小。一般 CEC 越高的样品, 其吸收峰深度越深。由于吸收峰对应左右肩部 FD 值的绝对值反应了吸收峰深度, 从而使用这些肩部的 FD 值可以非常好地预测土壤 CEC 值(图 5)。

将 CEC 与没有经过光谱变换的反射率也同样进行了回归分析, 发现短波波段的反射率与 CEC 具有很强烈的负相关关系, 并可以使用 400 nm 附近的反射率值直接预测土壤 CEC。对此, 可以作以下解释: 形成土壤 CEC 的主要物质为粘土矿物、铁氧

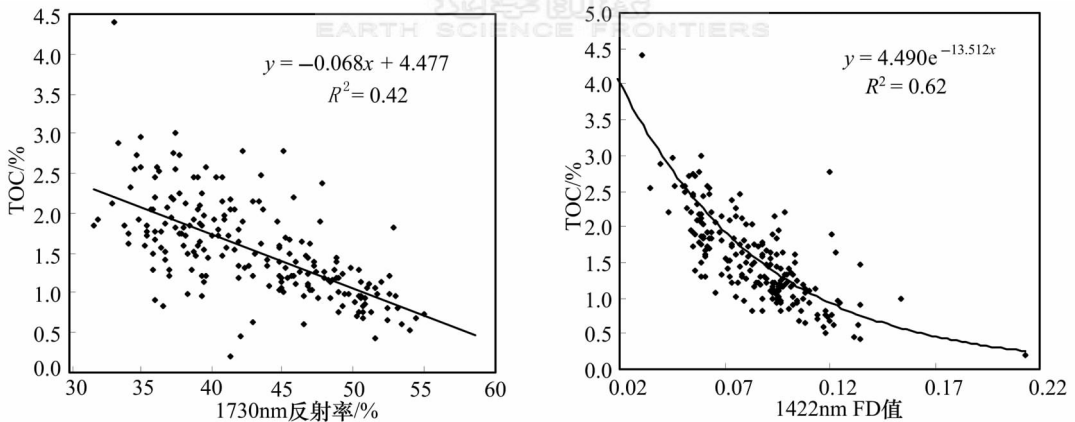


图4 江苏农田土壤光谱反射率(左)及FD值(右)与TOC的散点关系

Fig. 4 Scatterplots of soil reflectance (left) and FD values to TOC (right) from Jiangu

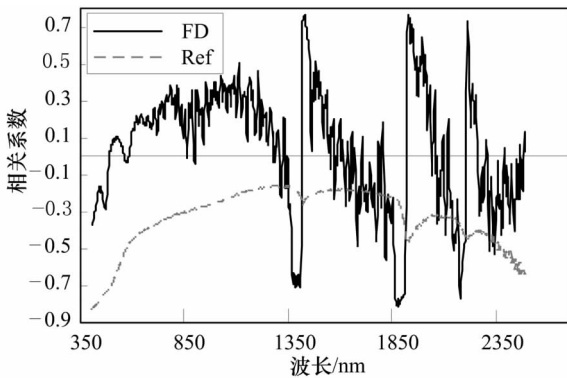


图5 土壤CEC与光谱反射率(Ref)和FD值的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients of soil reflectance and FD values to CEC

化物和有机质等活性物质, 这些物质伴随在一起形成细小吸附性胶体颗粒。而这些活性物质的光谱反射率都有一个共同的特点, 在短波段, 都是从长波到短波方向的反射率值逐渐降低, 即这些物质无论哪一种都会使波段反射率降低。而构成土壤骨架的石英和长石等, 没有这个特点, 它们的反射率从长波到短波段都很高, 并且比较平直。

2.4 土壤 pH 值的光谱反应

土壤 pH 是另一重要的土壤化学变量, 对土壤许多化学反应和化学过程都有很大影响, 对土壤中的氧化还原、沉淀溶解、吸附、解吸和配合反应起支配作用^[23]。土壤 pH 对植物和微生物所需养分元素以及污染重金属的有效性有显著影响。回归分析表明, 江都 80 个土壤样品光谱的 656 nm 附近 FD 值与 pH 值有很大相关性(图 7)。

土壤的 pH 值是土壤溶液在达到平衡后 H^+ 活度的负对数。实验室测量用一定水土比(1:5, 1:10 等)

形成土壤溶液达到平衡。土壤是 pH 值 H^+ 的缓冲系统。土壤 pH 比较稳定。显然, H^+ 不具备光谱特征, 并且土壤光谱测量也不是测量溶液, 而是测量土壤固体成分的反射特征, 因此不可能通过光谱直接测定 pH。但是, 土壤 pH 是土壤这个复杂混合物组成的系统的固有属性。它是由各土壤组成成分等相互作用形成的缓冲系统, 即这些可以具有光谱特性的土壤成分相互作用共同控制了土壤 pH。笔者推测, 江都土壤 pH 的光谱反应可能是由于 pH 对铁氧化物各种形态相互转化的影响所致。熊毅^[24] 讲述过 pH 对氧化铁形态转化的影响。由于土壤环境不同, 土壤中同时存在两种以上的氧化铁(针铁矿、赤铁矿、纤铁矿、无定形氧化铁)。无定形氧化铁与游离氧化铁(无定形氧化铁和晶质氧化铁之和)的比值与体系的 pH 呈良好的负相关^[25]。所以, 江都土壤 pH 值的光谱反应可能是依赖铁氧化物形式的间接预测。

对江苏 204 个样品的统计分析发现, 江苏数据则不符合江都数据集建立的预测模型。但是把江苏数据某些区域分区, 则发现许多地区 pH 值与光谱反射率或 FD 值的某些波段相关性明显, 这说明 pH 值光谱经验预测具有区域依赖性, 可能跟土壤类型有关, 即不同土壤类型或者不同区域土壤符合不同的规律。说明 pH 与光谱参数之间的关系并非一般的线性关系, 而有更深和更复杂的机制。土壤 pH 不可能有直接的光谱反应, 通过其他具有光谱反应的物质成分形成的间接关系往往会很复杂。

2.5 土壤铁氧化物类型的光谱鉴别方法

在土壤反射光谱的可见光波段, 反射率曲线从长波向短波段明显下降, 这主要是由土壤铁氧化

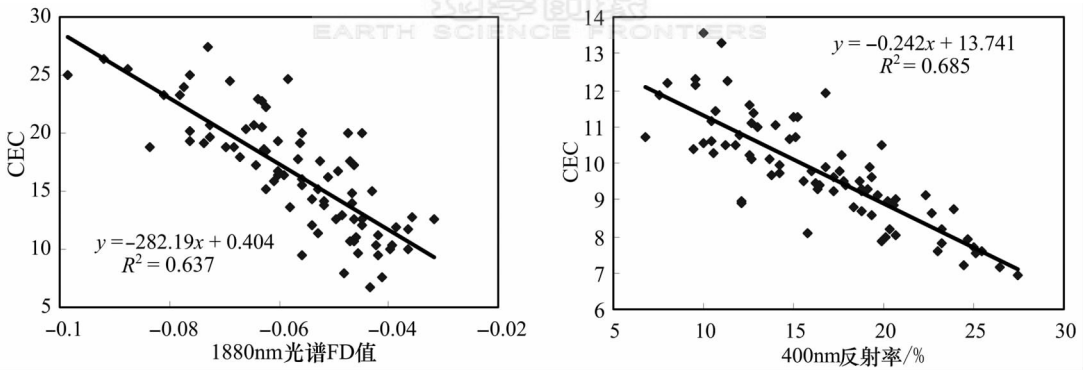


图6 CEC与1880 nm处光谱FD值(左)以及400 nm反射率值(右)的回归关系
Fig. 6 Relationship of soil CEC to FD value at 1880 nm (left) and reflectance at 400 nm (right)

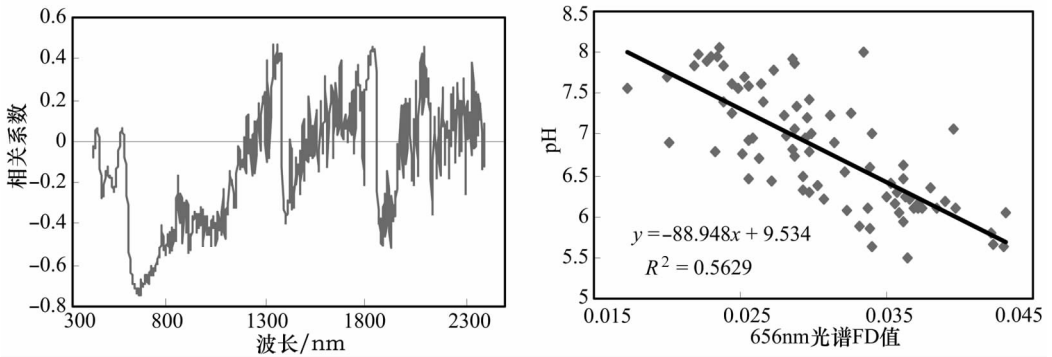


图7 江都土壤pH值与光谱FD值的相关系数及其与656 nm FD值散点关系
Fig. 7 Correlation coefficients of soil pH vs. FD values, and the scatterplot of pH vs. FD value at 656 nm

物中铁元素的电荷转移造成的^[1]。江苏土壤中铁氧化物主要是针铁矿 (goethite) 和赤铁矿 (hematite)。铁氧化物吸收峰比较复杂, FD 变换是最适合分析铁氧化物光谱特征的方法。Balsam 和 Deaton^[20] 研究结果表明, 沉积物中的赤铁矿产生的 FD 峰在 565 nm 附近, 针铁矿在 535 nm 附近, 并且在 435 nm 附近存在次级峰。Xia 等^[22] 通过实验对长江沉积物的光谱分析表明: 长江沉积物 FD 光谱在 800 nm 以内的短波波段存在 4 个峰: 峰 A (约 435 nm)、峰 B (500~535 nm)、峰 C (565 nm)、峰 D (650~760 nm), 其中 A、B、D 峰与针铁矿有关; C、D 峰与赤铁矿的存在有关; D 峰为针铁矿和赤铁矿的公共峰。江苏土壤有两种: 一类如图 8 中 PJJ001 和 PJJ023, 与 Xia 等^[22] 描述的长江沉积物光谱类似; 另一类如图 8 中 PJJ073 和 PJJ077, B 峰宽大, 没有 C 峰。

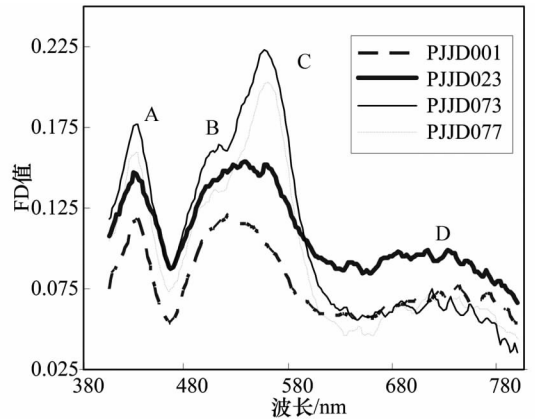


图8 江苏代表性土壤FD光谱
Fig. 8 FD spectra of typical soil samples

对代表性样品进行 CBD 处理, 去除铁氧化物后^[26], 无论第一种类型的 A、B、C、D 峰, 还是第二种类型 A、B、D 峰都消失, 说明这些峰都是由于铁氧

化物引起的。而无论对第一种类型还是对第二种类型的样品在马弗炉中 400 °C 加热使针铁矿失水转化为赤铁矿^[27], B 峰都消失, 只留有 C 峰, 说明 C 峰是赤铁矿的特征, B 峰是针铁矿存在的标志。这说明江苏存在两种土壤: 一类既有针铁矿, 又有赤铁矿, 光谱特征类似图 8 中 PJJ001 和 PJJ023, 存在 A、

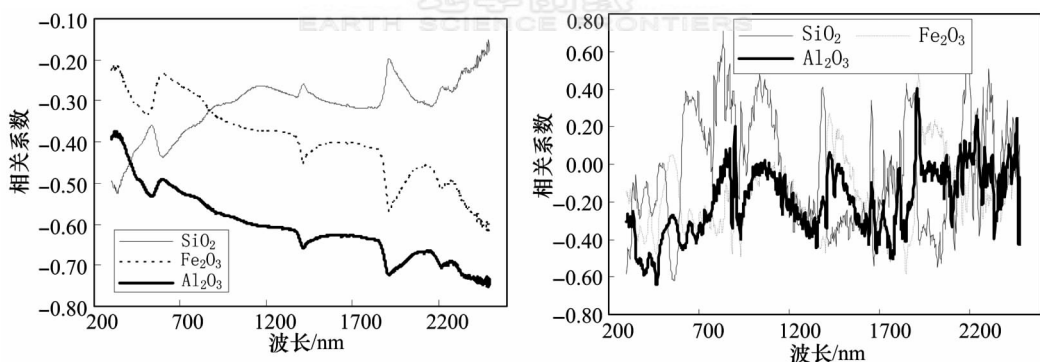


图9 硅铁铝等常量成分含量与反射率光谱和FD值的相关系数
 Fig. 9 Correlation coefficients of reflectance and FD spectra to soil SiO₂, Fe₂O₃ and Al₂O₃ contents

B、C、D峰,另一类只有针铁矿,光谱特征类似图8中PJJ073和PJJ077,只存在A、B、D峰,因此,使用FD光谱可以鉴定土壤中氧化物的类型。

江苏土壤光谱研究表明,针铁矿普遍存在,几乎所有样品光谱都存在针铁矿的标志:A峰和B峰。而只有部分样品显示具有与B峰部分重合的C峰,说明这些样品中含有赤铁矿。江苏土壤样品显示含有赤铁矿的样品主要来自两大区域:(1)江苏省境西北部微山湖以西的丰县和沛县附近地区,这些地区为徐淮黄泛平原区,成土母质为黄河冲积物;(2)沿长江地区,即由长江冲积物发育成土壤区域,典型地区为江都全新统长江冲积亚砂土地区。

2.6 土壤硅铁铝等常量成分的光谱反应

硅铁铝等常量成分是构成土壤的骨架成分。这3种元素含量分别与原始反射率光谱和FD光谱进行了相关分析(图9)。结果显示较长波长波段反射率与土壤铁铝含量呈明显反相关关系,多处波长FD值与土壤硅含量呈正相关或反相关。这些波段的光谱参数与土壤硅铁铝成分的散点图见图10。

3 结论

本文利用理论分析、化学实验和统计分析方法,研究了江苏省土壤阳离子交换量(CEC)、有机质含量、pH值、铁氧化物类型、铁铝硅等常量元素含量等重要土壤地球化学参数的光谱反应,得出结论:

(1)土壤CEC是进行光谱预测非常成功的参数,1400、1900和2200nm附近一阶导数光谱(FD)值或短波方向反射率值均可以很好地反映土

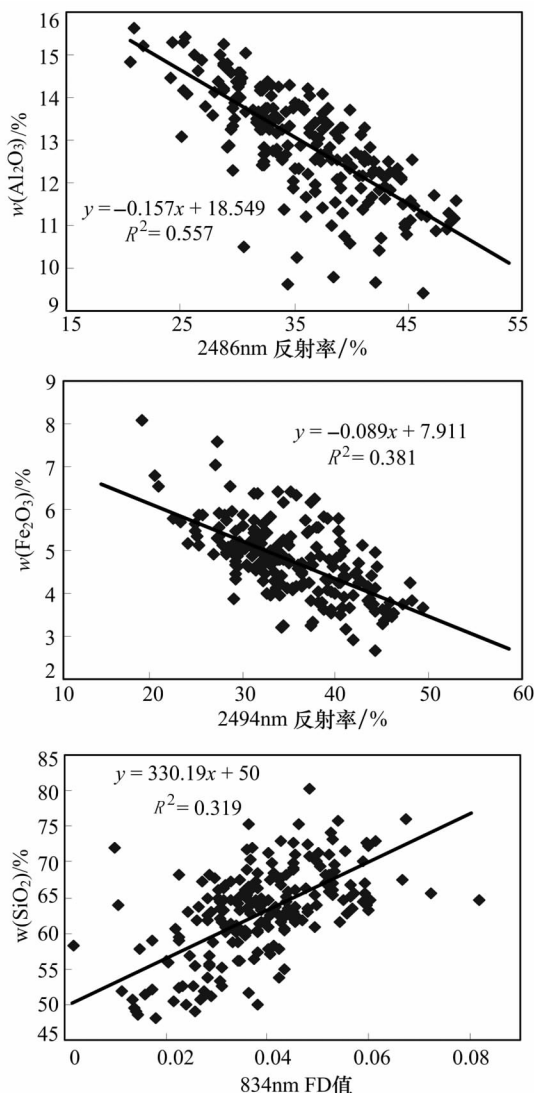


图10 土壤硅铁铝等常量成分与反射率光谱或FD值的散点关系

Fig. 10 Scatterplots of reflectance and FD values to soil SiO₂, Fe₂O₃ and Al₂O₃ contents

壤 CEC 的大小。

(2) 土壤有机质含量、铁氧化物类型、铁铝硅含量均可以在反射率光谱或其一阶导数(FD)值中找到相关波段。

(3) 土壤导数光谱存在的 A、B、C 和 D 峰使反射光谱方法不仅能够定量铁氧化物总量, 还能鉴别铁氧化物矿物类型(针铁矿和赤铁矿)以及相对含量。

(4) 江都土壤光谱的 656 nm 附近 FD 值与 pH 有很大相关性, 但是江苏样品显示 pH 值光谱经验预测具有区域依赖性, 可能跟土壤类型有关, 说明 pH 与光谱参数之间的关系并非一般的线性关系, 而有更复杂的机制。

References:

- [1] Clark R N. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999; 3-58.
- [2] Wu Y Z, Tian Q J, Ji J F, et al. Soil remote sensing research theory method and application[J]. Remote Sensing Information, 2003(1): 40-47(in Chinese).
- [3] Ben-Dor E, Banin A. Near-infrared analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 364-372.
- [4] Ji J F, Balsam W, Chen J, et al. Rapid and quantitative measurement of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequence by diffuse reflectance spectroscopy[J]. Clay and Clay Minerals, 2002, 50(2): 208-216.
- [5] White K. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using landsat thematic mapper data[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 30-29.
- [6] Ben-Dor E. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61: 1-15.
- [7] Butkute B. Near-infrared reflectance spectroscopy as a fast method for simultaneous prediction of several soil quality components[J]. Chemistry, 2004, 15(2): 12-20.
- [8] Brown D, Bricklemyer R, Miller P. Validation requirements for diffuse reflectance soil characterization models with a case study of VNIR soil C prediction in Montana[J]. Geoderma, 2005, 129: 251-267.
- [9] Madeira J, Bedidi A, Cervelle B, et al. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil mapping in Brasilia, Brazil[J]. Int J Remote Sens, 1997, 18: 2835-2852.
- [10] Ben-Dor E, Banin A. Near-infrared reflectance analysis of carbonate concentration in soils[J]. Appl Spectrosc, 1990, 44: 1064-1069.
- [11] Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near-infrared reflectance spectrophotometry[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50: 20-123.
- [12] Fidencio P H, Poppi R J, Andrade J C. Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near-infrared spectroscopy[J]. Anal Chim Acta, 2002, 453: 125-134.
- [13] Reeves J B, McCarty G W, Mimmo T. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils[J]. Environ Pollut, 2002, 116: 277-284.
- [14] Cooper C D, Mustard J F. Effects of very fine particle size on reflectance spectra of smectite and palagonitic soil[J]. Icarus, 1999, 142: 557-570.
- [15] Cloutis E A, Gaffey M J, Moslow T F. Characterization of minerals in oil sands by reflectance spectroscopy[J]. Fuel, 1995, 74(6): 874-879.
- [16] Chabrilat S, Goetz A F H, Krosley L, et al. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82: 431-445.
- [17] Shepherd K D, Walsh M G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 988-998.
- [18] Liu W D. Research on the Extraction of Soil Information by High-Spectra Remote Sensing[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2002(in Chinese).
- [19] Xi X H. Multipurpose regional geochemical survey and eco-geochemistry: New direction of Quaternary research and application[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(3): 269-274(in Chinese).
- [20] Balsam W L, Deaton B C. Sediment dispersal in the Atlantic Ocean: Evaluation by visible light spectra[J]. Rev Aquat Sci, 1991, 4: 411-447.
- [21] Ben-Dor E, Irons J R, Epema G F. Soil reflectance[M]// Rencz N. Remote Sensing for the Earth Sciences; Manual of Remote Sensing. New York: John Wiley & Sons, 1999: 111-188.
- [22] Xia X Q, Mao Y Q, Ji J F, et al. Reflectance spectroscopy study of Cd contamination in the sediments of the Changjiang River, China[J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(10): 3449-3454.
- [23] Li X H. Soil Chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 212-244(in Chinese).
- [24] Xiong Y. Soil Colloid [M]. Beijing: Science Press, 1983: 148-149(in Chinese).
- [25] Schwertmann U, Murad E. Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite[J]. Clay and Clay Minerals, 1983, 31(4): 277-284.
- [26] Mehra O P, Jackson M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate[J]. Clays Clay Miner, 1960, 7: 317-327.

- [27] Ruan H D, Frost R L, Klopogge J T. The behavior of hydroxyl units of synthetic goethite and its dehydroxylated product hematite[J]. Spectrochim Acta, Part A, 2001, 57: 2575-2586.
- [18] 刘伟东. 高光谱遥感土壤信息提取与挖掘研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [19] 奚小环. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学——第四纪研究与应用的新方向[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 269-274.
- [23] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 212-244.
- [2] 吴昉昭, 田庆久, 季峻峰, 等. 土壤光学遥感的理论、方法及应用[J]. 遥感信息, 2003(1): 40-47.
- [24] 熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 148-149.

参考文献:

《地学前缘》中文版、英文版网上查询和浏览方法

中文版

方法一:

- (1) 登录中国地质大学(北京)网站, 网址为: <http://www.cugb.edu.cn>
- (2) 点击首页右侧“特色网站”栏目下方的“地大(北京)期刊中心”选项
- (3) 在【刊物】选项选择《地学前缘》, 通过篇名、作者、作者单位、关键词、中文摘要、全文、期号 7 个字段输入检索词, 最后指定查询年限后点击【检索】按钮

方法二:

- (1) 登录中国地质大学(北京)网站, 网址为: <http://www.cugb.edu.cn>
- (2) 点击首页上部【机构设置】按钮
- (3) 在“机构设置”中的“辅助单位”中点击“期刊中心”进入期刊中心简介页面
- (4) 点击【期刊查询】按钮, 即可查阅摘要和全文
- (5) 检索同方法一的(3)步骤

方法三:

- (1) 登录中国地质大学(北京)网站, 网址为: <http://www.cugb.edu.cn>
- (2) 点击首页上侧的【数字图书】按钮
- (3) 在“数字资源”栏目下方的友情链接中点击“地大(北京)期刊中心”进入地大(北京)期刊中心页面
- (4) 检索同方法一的(3)步骤

方法四:

- (1) 登录中国地质图书馆网站, 网址为: <http://www.cgl.org.cn>
- (2) 点击首页右侧“资源导航”中的《地学前缘》
- (3) 在期刊浏览页面, 当鼠标放在各期次上时出现该期主题名称, 点击各期次可浏览 2006—1999 年各期目录, 在目录中选择文章的 PDF 全文浏览文章全文
- (4) 需要检索服务, 向下滚动期刊浏览页面点击 http://dept.cugb.edu.cn/Science_web/qkzhx/display.asp 超链接查看详细信息

方法五:

- (1) 登录世界数据中心中国地质科学数据中心网站, 网址为: <http://www.wdcgeo.net/>
 - (2) 点击首页右侧“常用链接”中的《地学前缘》期刊
- 以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

方法六:

- (1) 登录中国地质科学数据网的“国土资源科学数据共享地质科学数据节点”网站, 网址为: <http://www.geoscience.cn/>
 - (2) 点击首页下部“友情链接”中的《地学前缘》期刊
- 以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

阅读全文需要安装 Acrobat Reader(PDF)软件

英文版

《地学前缘》国际版已由爱思唯尔(Elsevier)公司出版, 可在其在线平台上(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/18725791>)浏览、查阅、下载。