

土壤剖面的反射光谱研究^①

徐彬彬

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 研究表明,土壤反射光谱包含有丰富的土壤信息,可从中获取有机质含量、氧化铁含量、质地、主导粘土矿物类型等多种有用信息。本文以不同地区的土壤剖面为例,解读它们的反射光谱,以获得土壤形成特征的某些信息,为在土壤研究中进一步应用反射光谱提供有益的探索。

关键词 土壤剖面;反射光谱

地球上所有物质,无论是生物还是非生物,由于它们的组成不同,物理化学性质的差别,致使它们吸收、反射、传导电磁波的能量和波长也各相异,物质的这些特性就称为光谱特性。现今,光谱技术已经广泛地用于各项理化分析。但是,反射光谱除了作为当代蓬勃兴起的遥感技术的物理基础外,还很少直接用于理化分析。众多研究表明,土壤反射光谱包含了许多有用的信息,值得进一步研究、开发和应用^[1,2]。本文旨在研究土壤剖面的反射光谱及其与土壤形成、性状之间的关系,为在土壤研究中进一步应用它提供科学的依据。

1 影响土壤反射光谱的主要因素及其解读标志

1.1 影响土壤反射光谱的主要因素

众所周知,土壤颜色仅限于光谱的可见光波段(400~750nm)。本文所及的光谱范围为400~2500nm,不仅包括了可见光波段,而且延伸至人眼不可见的近红外(反射红外)波段,它提供的信息量远大于可见光波段。显然,影响土壤反射光谱的因素及其内涵势必必要比影响土壤颜色的更广、更丰富。

近30年来,各国学者都在致力于研究土壤反射光谱特征与土壤理化性状之间的关系,并已获得相当进展,可归纳为^[3~5]:

1. 探索了土壤反射光谱的形成机理,明确影响土壤反射光谱的主要因素是:有机质、氧化铁、质地、水分和母质。土壤其他性状,如主导粘土矿物类型,含盐量等也有较大的影响。

2. 对应于每一种影响因素,均有不同的光谱特征。这些特征包括反射率的高低及其在不同波长(段)上的变化、谱形的变化、吸收峰的强弱等等。有的还可进行定量或半定量的分析。

3. 受土壤有关性状的影响,土壤反射光谱也随土壤地理分布规律而变化。

1.2 土壤反射光谱的解读标志

既然土壤反射光谱是土壤有关性状的综合反映,那末土壤在形成过程中物质的迁移、转化和累积的某些特点也必然会直接或间接地反映在相应的反射光谱中。换言之,可以通过

① 本文所及的土壤光谱资料及分析数据是多年积累,所内外许多同志曾共同工作,恕不一一列名,谨此一并致谢。

解读土壤剖面不同发生层次的反射光谱, 获得土壤形成特征的某些信息。

研究表明, 至今从土壤反射光谱可获得的信息及其解读标志是:

1. 土壤颜色

由反射光谱可以精确地计算该土壤的色坐标或门赛尔值, 但较麻烦。也可由土壤反射光谱的可见光波段目测估计该土壤的门赛尔系统的三个色度要素: 色调(色别)取决于光谱曲线的形状, 主要是反射峰和吸收带的波长范围; 亮度(明度)取决于平均反射率的高低; 饱和度(彩度)则由互为补色的反射峰和吸收带之比值确定, 比值越大, 颜色越纯。

2. 土壤有机质含量

由于水热条件的变化, 腐殖质中胡敏酸和富里酸的比值(H/F)由北向南呈规律性的渐减。这就导致地处不同地带的土壤, 尽管有机质含量相同, 但由于H/F的比值不同, 而使土壤有不同的反射光谱特征。于是, 一般可由二个光谱特征指标来比较有机质含量的高低: 其一是400~1100nm(特别是620~660nm)平均反射率的高低。有机质含量越高, 反射率越低; 其二是光谱曲线在600nm处的形态, 即600nm处光谱曲线的“弓曲差”的大小。有机质含量越高, “弓曲差”越小, 曲线越平直。反之亦然。在含量0.5~5%时, 估测精度较高^[3, 5]。

3. 土壤氧化铁含量

氧化铁主要影响土壤反射光谱的400~1100nm波段, 其中500~640nm波段平均反射率与土壤中氧化铁含量的相关性较好, 呈线性负相关。由于水稻土长期处于淹水还原条件下, 随着氧化还原电位的降低, 高价铁、锰被还原为低价的。因此, 在相同氧化铁含量时, 水稻土在该波段的反射率要低于其他土壤。如将水稻土和其他土壤分开回归, 则预测精度可有提高^[3, 5]。

在反射光谱900nm附近呈现强烈的三价铁的吸收带, 其强弱可充分显示土壤中游离氧化铁的含量^[6]。

4. 土壤质地和粘粒含量

由于土壤质地对反射光谱的影响不仅与不同粒径组合及表面状况(糙度和阴影)有关, 而且与不同粒径的化学组成也密切相关。因此, 不能笼统地说, 土壤颗粒越细, 反射率越高。因为当颗粒细至粘粒时, 使土壤持水能力增加, 反而会降低反射率。但是, 有一点是肯定的, 即不同粒径土壤的光谱差异随波长的增加而变大, 所以可用2000~2500nm的光谱段来区别土壤质地差异。

利用土壤粘粒在常温下风干后依然能吸附水分的持水特性, 可以应用反射光谱1900nm处水分吸收峰的强弱来估计该土壤中粘粒含量的多少。粘粒含量越多, 该波长上的吸收峰越强, 反射率越低^[3, 5]。

5. 土壤水分含量

只有用野外实测的土壤反射光谱才能估测土壤含水量。研究表明, 随着土壤含水量的提高, 无论在哪个波长上的反射率均会降低, 而且其差异随波长的增加而加大。因此, 尽可能应用近红外波段来估计土壤水分含量。由于各种土壤的持水能力有差异, 所以反射率变化对应于湿度变化的灵敏度范围也不同。一般含水量在10~25%, 反射率变化显著。而持水性差的土壤, 其灵敏度范围可能少于10%。当超过田间持水量时, 由于土壤表面膜水层形成镜面反射, 反而会提高反射率^[1, 7]。

6. 土壤主导粘土矿物类型

土壤中不同的粘土矿物其含水状况差异悬殊, 并会显示不同的光谱特征, 而这些特征正是用于鉴别土壤中主导粘土矿物的标志^[8]。

(1) 高岭类矿物最主要的光谱特征是 2200nm 处有极强的铝配位的羟基谱带, 有较强的 1400nm OH 吸收带、较弱的 1900nm H₂O 吸收带。这是 1:1 型高岭石几乎没有层间水和膨胀性差的典型特征。

(2) 蒙脱石富含层间水, 故以最强的 1900nm 水吸收带为特征, 而 1400 和 2200nm 的吸收相对较弱, 标志 2:1 型蒙脱石的膨胀性和吸湿力强, 含层间水最多。

(3) 蛭石在 1400 和 1900nm 处具有宽口“V”形强吸收带, 容易和蒙脱石的光谱混淆, 判断时还要辅以其他的光谱特征识别, 如 2200nm 或 2300nm 有较弱的吸收等。

(4) 伊利石的反射光谱较为特殊, 羟基等水谱带特征几乎看不出来, 这和云母的定向排列和测量光束的取向作用有关, 这也是云母类矿物光谱的主要特征。在 2200nm 处有较强吸收, 在 1400nm 和 1900nm 仅有浅窄的凹形吸收。低反射, 谱线斜率基本一致而有别于其他矿物。

(5) 区别矿物的二八或三八面体。矿物有二八和三八面体之分。2200nm 吸收带是由三价铝离子配位的 OH 谱带; 而 2300nm 是由二价镁离子配位的 OH 谱带。因此, 2200nm 和 2300nm 吸收带是区分二八、三八面体矿物的特征谱带。

土壤中常见的其他粘土矿物, 如绿泥石、三水铝石、赤铁矿、针铁矿等也可依其固有的光谱特征予以区别。

上述与土壤性状有关的各光谱特征, 不仅见诸于研究报道, 而且有的已在尝试性应用或在土壤遥感的实践中得到证实。如用机载高分辨率细分成像光谱仪在 2000~2500nm 波段探测土壤主导粘土类型等等^[1, 2, 9]。

2 土壤剖面反射光谱解读实例

现以全国不同地区的若干土壤剖面的反射光谱为例, 进一步说明它与土壤形成和性状之间的关系。本文仅对每一剖面择要解读, 对有些土壤性状读者可根据上述解读标志一目了然的, 只将各层有关的理化分析结果列于表 1, 备读者对照。

2.1 黑垆土剖面

本例黑垆土位于陕北安塞县, 剖面深及 4m, 其中垆土层厚近 3m, 在其上为 40cm 左右的黄土覆盖层, 其下为马兰黄土的母质层。图 1 为这三层土壤的反射光谱。为对照, 图 1 中还标上了与该剖面邻近的黄绵土(表层)的反射光谱。由图 1 可见, 剖面中垆土层的反射光谱无论在谱形, 还是在平均反射率均明显有别于其上的“黄盖

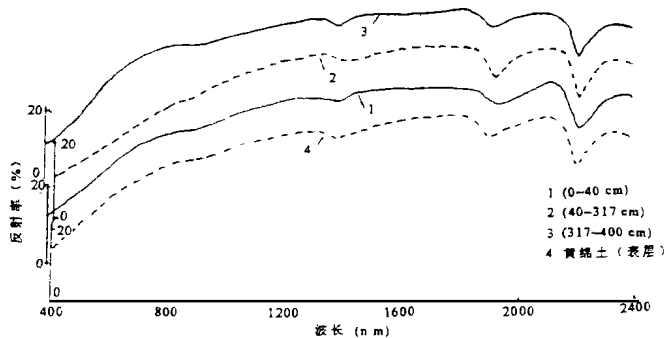


图 1 黑垆土剖面的反射光谱

层”和下垫的母质层。其差异主要在 400 ~ 1000nm 波段范围内,其次是 1900 和 2200nm 处的水分吸收带的深度不同。根据它们的反射光谱,可以对该剖面作如下解读:

表 1 土壤剖面的有关分析结果

土壤类型	采样地点	母质	采样深度 (cm)	有机质 (%)	烧失量 (%)	化学组成(占灼烧土%)										游离 Fe ₂ O ₃ (%)	<0.001 粘粒含量 (%)	主导粘土矿物*
						SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅			
黑垆土	陕西 安塞	黄土	0~37	0.86	5.91	71.72	3.87	11.53	5.24	1.91	0.60	0.07	2.42	2.06	0.11	0.91	12.9	水云母、高岭
			37~317	1.20	5.30	71.75	4.20	12.50	3.68	1.91	0.63	0.08	2.67	2.02	0.12	1.16	21.2	水云母、高岭
			317~400	0.53	7.16	70.05	3.15	11.46	7.45	2.01	0.58	0.06	2.78	1.99	0.11	1.11	12.5	水云母、高岭
黄棕壤	安徽 和县	赤山砂岩	0~18	1.68	3.40	89.02	2.13	6.28	痕迹	0.75	0.42	0.01	0.97	0.41	0.02	1.36	—	蒙脱、水云母
			18~52	0.85	6.32	76.77	5.05	15.36	痕迹	1.02	0.41	0.05	1.53	0.19	0.02	2.46	—	蒙脱、水云母
			52~80	0.58	5.49	78.55	3.68	14.58	痕迹	1.18	0.36	0.02	1.76	0.24	0	1.62	—	蒙脱、高岭
			80~120	0.44	4.81	80.36	3.35	13.08	痕迹	1.26	0.33	0.02	1.86	0.23	0	1.49	—	蒙脱、高岭
黄红壤之一	安徽 郎溪	粘土	0~9	3.20	6.79	80.94	4.67	10.55	0.13	0.49	0.90	0.09	1.44	0.34	0.05	2.26	21.5	水云母、高岭
			9~23	1.33	5.52	77.91	5.29	12.89	0.13	0.53	0.91	0.07	1.54	0.30	0.04	—	31.0	水云母、高岭
			23~57	0.71	5.73	72.47	6.69	16.11	痕迹	0.69	1.82	0.05	1.85	0.23	0	3.51	41.2	高岭、水云母
			57~105	0.47	4.96	74.76	6.00	14.65	0.07	0.63	1.89	0.07	1.82	0.19	0	—	38.7	高岭、水云母
黄红壤之二	安徽 宣城	粘土	105~125	0.36	5.56	70.83	7.53	17.24	0.03	0.69	1.97	0.09	1.89	0.15	0	—	40.6	高岭、水云母
			0~20	—	6.94	75.85	3.84	9.38	0.11	0.53	1.02	0.07	1.35	0.25	0.10	—	31.5	高岭
			20~130	—	7.42	72.00	4.53	11.65	0.11	0.62	1.05	0.07	1.58	0.22	0.06	—	40.5	高岭
			130~220	—	7.10	71.26	4.83	12.47	0.10	0.78	1.08	0.10	1.69	0.26	0.05	—	42.0	高岭
黄棕壤	南京 郊区	黄土	220~330	—	7.13	70.02	5.35	12.88	0.08	0.70	1.07	0.07	1.77	0.23	0.06	—	40.1	高岭
			330 以下	—	7.79	67.92	5.80	14.09	0.08	0.70	1.04	0.07	1.84	0.09	0.07	—	48.1	高岭
			0~16	1.97	5.72	72.83	5.66	13.98	0.83	1.24	1.14	0.11	2.37	1.33	0.16	—	23.4	水云母
			16~27	1.63	5.56	72.69	5.89	14.76	0.86	1.29	1.19	0.10	2.37	1.23	0.15	—	22.5	水云母
黄棕壤	南京 郊区	黄土	27~45	0.67	5.24	70.87	6.34	15.91	0.59	1.47	1.41	0.11	2.37	1.14	0	—	27.5	水云母
			45~80	0.42	5.10	70.13	6.58	15.46	0.85	1.49	1.21	0.10	2.38	1.14	0	—	19.0	水云母

*主导粘土矿物由样品的粘粒经 X 衍射谱测试获得。

**该剖面分析数据引自胡雪峰 的博士论文,划分的层次略有出入,且粘粒含量的划分标准为 < 0.002m。

1. 颜色有明显差异,垆土层呈均一的灰黑色,而其上下两层分别呈黄色和黄红色;
2. 垆土层的有机质、氧化铁和游离氧化铁的含量均高于其他两层,且腐殖质组成中胡敏酸和富里酸比值大于 1(实际分析结果为表层 0.89;垆土层 2.25);
3. 各层均以水云母为其主导粘土矿物,兼有一定量的高岭。但垆土层的粘粒含量要高,质地相对要细一些;
4. “黄盖层”与母质层的光谱曲线基本相重合,仅在可见光部分稍有差异,这表明它们的性状相似,只在土壤颜色、有机质含量、铁的含量等方面稍有不同。

由这些性质上的差异,可以推断当年黑垆土形成的环境条件与现在有很大不同,致使它的成土过程要比绵土强;而“黄盖层”与邻近的黄绵土表层呈现相同的反射光谱,则证明它们有相似的土壤性状和相近的成土环境,即“风成同源”。

2.2 黄棕壤剖面

本例剖面位于安徽省和县,发育在赤山砂岩母质上,此土当地称红砂土,色泽棕红,剖面下部具有网纹层,是较难得的发育良好的剖面。图 2 为该土壤剖面的反射光谱。与上述黑垆土剖面截然不同,该剖面上每一层的反射光谱各具特色。根据它们除了能获得色泽、有机质、氧化铁等含量的信息外,还能形象地观察到:

1. 铁的淋溶使表层的 900nm 附近的谱带,几乎呈一条平滑的直线,而以下各层特别是

淀积层在此有很强的吸收带。白色网纹与网纹层的红色土体氧化铁含量的差异也很明显；

2. 白色网纹的反射光谱, 几乎和蒙脱石的曲线一样, 1900nm 吸收强度大是蒙脱石的特征, 1400nm 吸收强度相对较大是表明其结晶好。除表层外, 其余各层的主导粘土矿物也均为蒙脱石。

3. 随着土壤淋溶作用的加强, 表层粘粒不断淋失蒙脱石明显减少, 而水化云母相对增加, 表现在 1400、1900、2200nm 的吸收强度均最低, 而淀积层正相反, 能反映粘粒含量及蒙脱石特征的 1900nm 处具有很强的吸收带。

从这个剖面中, 可以看到母质的“烙印”。尽管现有的研究表明, 母质对黄棕壤性质的影响随着发育程度而减弱。但是, 从图 3 中还能显示出由母质造成的对反射光谱的影响。图 3 所列的是发育于不同母质上的黄棕壤(表层)的反射光谱。这些剖面相距不过近百公里, 均位于海拔高度大体相同的丘陵岗顶, 地表又都长有较好的马尾松林。图中曲线 3 就是上例中的发育于红色赤山砂岩的黄棕壤, 其可见光部分明显呈现红色物体的光谱特征。又如氧化铁含量, 经分析表明, 花岗岩母质最高(7.32%), 而其相应土壤的含铁量(5.73%)和游离氧化铁含量(2.28%)也是最高, 故其曲线上 900nm 的铁的吸收峰显然强于其他三者。再如, 由响岩(主要成分为碱性长石等)发育的黄棕壤, 以伊利石为主导粘土矿物, 因此曲线中 1400nm 处几无吸收峰, 而赤山砂岩发育的黄棕壤, 以蒙脱为主, 粘粒含量也较其他三者多, 因此曲线中无论是 1900nm 还是 1400nm 的吸收峰均最强。

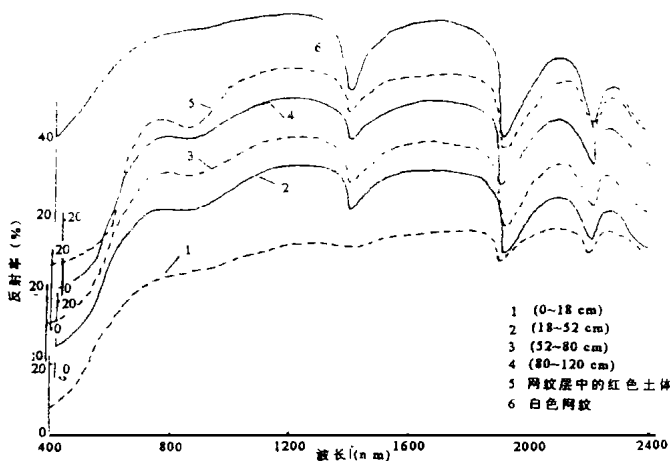


图 2 黄棕壤剖面的反射光谱

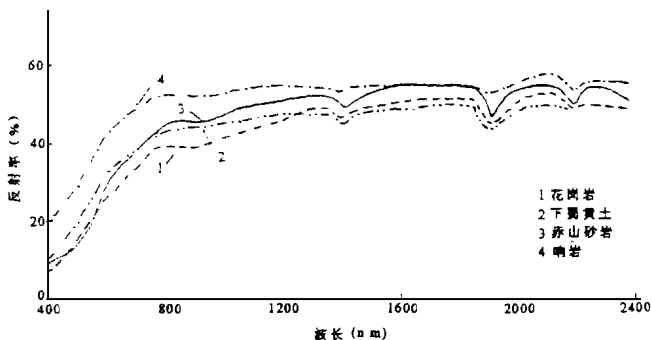


图 3 发育于不同母质上的黄棕壤的反射光谱

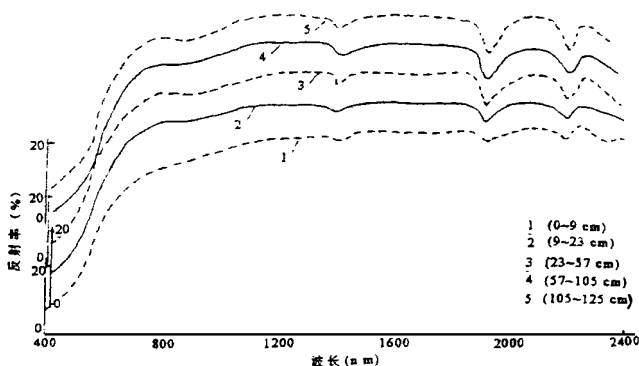


图 4 黄红壤剖面之一的反射光谱

2.3 黄红壤剖面之一

本剖面位于安徽省郎溪县,母质是第四纪红色粘土。图 4 为该剖面的反射光谱。这 5 条反射光谱曲线的差异主要表现在 3 方面:其一在 700nm 左右的红光波段,反映了土色的变化,表土呈黄棕色,而心土和底土仍呈红色,显示这类土壤过渡性特点;其二是在 900nm 附近铁的吸收带,也反映了铁的淋溶随含量的增加而逐步增强;其三则在 1900~2400nm,特别是在其中的二个水谱带,反映了它们质地的渐变和主导粘土矿物的差异。其中表层和亚表层似以水云母为主导粘土矿物,而底土和心土三层则是高岭为主。判断依据仍是 1400nm、2200nm 等吸收强度的消长。1900nm 有一定的吸收强度则表明有一定的蒙脱石存在。有文献提到安徽郎溪一带有的黄红壤剖面“可以清楚地划分为上下两段,上段近似下蜀黄土,下段似属冲积性红粘土母质。上段土层中的水云母含量比下段土层高”^[10]。本例似也应属此类。

2.4 黄红壤剖面之二

近年来,对安徽省宣州市的一个古土壤剖面有不少研究报道。该剖面位于宣州市郊向阳乡,陈山旧石器出土遗址,分别于 1988 年和 1989 年被确定为宣州市和安徽省重点文物保护单位,原为宣州市第一砖瓦厂的取土处。剖面位于丘陵漫岗顶部,地表为马尾松林,间有少量杉树,另有低矮草灌。该剖面的具体描述及各项分析结果见参考文献^[11]和有关论文^①(笔者未另做分析)。图 5 为它们的反射光谱。关于该剖面的反射光谱解读,拟讨论以下 3 个方面:

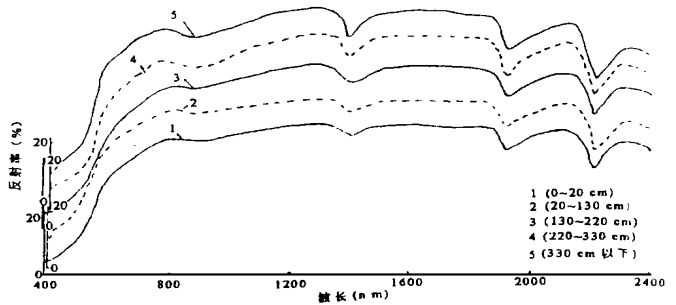


图 5 黄红壤剖面之二的反射光谱

1. 本剖面虽与上例(郎溪剖面)一样,均属黄红壤,并都发育于第四纪红色粘土,但从反射光谱来看,已无明显上下两段之感。主要表现有两点:其一是表层和淀积层的土壤颜色已趋红色;其二是全剖面以 2200nm 的最强吸收表明主导粘土矿物均以高岭为主。1400nm、1900nm 的宽口“V”形吸收显示有一定的蛭石存在。并不像上例那样,上段以水云母为主。同时可观察到,本剖面随着深度加大,2200nm 处吸收峰的谱形越来越深,也越来越尖,表明高岭的含量越来越多。这些都清楚地显示了两个剖面间成土过程中环境条件的差异。

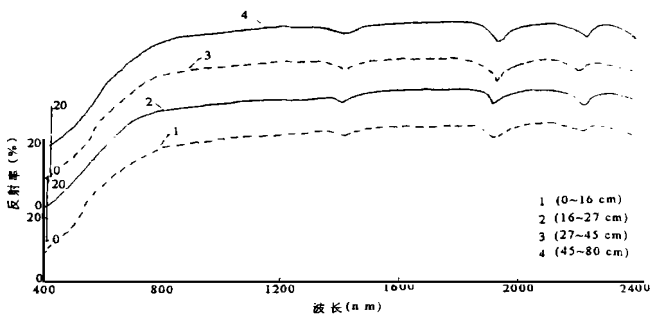


图 6 下蜀黄土上发育的黄棕壤剖面的反射光谱

2. 图 6 为南京市郊下蜀黄土上发育的黄棕壤剖面的反射光谱。由图 6 及前述的图 4 和

① 胡雪峰, 1998 年, 赣皖第四纪红色粘土成因与环境变化, 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文。

图5可以清楚地看出下蜀黄土分布的“纬度效应”,即在长江中下游地区,随着纬度的降低下蜀黄土和网纹红土呈现此消彼长的现象。同时,由这3张图也可看出气候环境条件对土壤形成的差异。南京地区的黄棕壤全剖面以水云母为主,有一定量的高岭和蛭石,而郎溪剖面则分为上下二段,过渡到宣州剖面全部以高岭为主,兼有一定量的蛭石。

3. 从本剖面的反射光谱来看,未能发现与古土壤及古气候冷暖旋回直接有关的光谱特征。唯有各土层的900nm处的吸收强度与对应层次的磁化率呈较好的反向变化趋势。据研究,风成沉积——古红土的磁化率可以作为衡量气候环境变迁的一种敏感参数或代用指标。然而,土壤随着富铝化程度的加深,游离态铁的增加,磁化率究竟应该增加还是减少,目前还有不同的理解^[11]①。因此,上述“对应关系”的机理及可靠性均需继续探讨。但900nm附近是三价铁的特征谱带,直接反映了土壤中游离氧化铁的含量,这一点是不容置疑的。所以,只要土壤中游离氧化铁与磁化率之间存在一定的关系,那么就有可能为土壤反射光谱的应用增添一个新的途径。有研究表明,黄土的光谱亮度值与磁化率间也存在负相关关系^[12]。但笔者认为,不如900nm的吸收强度与磁化率之间的关系,在光谱机理上更直接,更易理解。

由上述可见,土壤反射光谱含有丰富的土壤信息。笔者认为,测试方法简便固然是它的优点,但由于前期样品处理较粗糙,导致测试结果的精细程度还无法与常规的土壤理化分析结果相比。这也限制了它的进一步开发、应用,致使它目前只限于应用在宏观的(如遥感)半定量的监测中。随着进一步的深入研究和测试技术的改进^[1,2],有望得到更为理想的结果,也会促进它更广泛用于土壤科学中。

参 考 文 献

- 1 彭玉魁等. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究. 土壤学报, 1998, 35(4): 553~559
- 2 Ben-Dor E, Banin A. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 364~372
- 3 Swain P H and Davis S M. Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGRAW HILL International Book Company, 1978, 153~160
- 4 Михайлова Н А, Орлов Д С. Оптические свойства почв и почвенных компонентов. МОСКВА: “НАУКА”, 1986, 33~56
- 5 徐彬彬等. 土壤光谱反射特性与理化性状的相关分析. 见: 宁芜土壤遥感研究专辑. 北京: 科学出版社, 1987, 66~76
- 6 地质部情报研究所编. 矿物岩石的可见——中红外光谱及其应用. 见: 遥感专辑第一期. 北京: 地质出版社, 1980
- 7 朱永豪等. 不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义. 土壤学报, 1984, 21(2): 194~202
- 8 Xu B B et al. Pedosphere, 1995, 5(2): 135~142
- 9 郑兰芬. 红外细分光谱扫描遥感技术在金矿地质方面的应用研究. 见: 遥感应用的实践与创新. 北京: 测绘出版社, 1990, 154~169
- 10 熊毅、李庆远主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1990, 378~379
- 11 杨浩等. 红土系列剖面磁化率特征与古气候冷暖变换. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 195~199
- 12 高万一等. 黄土反射光谱研究与气候波动. 见: 刘东生等主编. 黄土第四纪地质全球变化(第三集). 北京: 科学出版社, 1992, 92~100

① 胡雪峰. 1998年. 赣皖第四纪红色粘土成因与环境变化. 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文.