

# 浙江省石灰土光谱特征及其自动识别分类技术研究\*

王深法 蒋亨显 王人潮

(浙江农业大学, 310029)

## 摘 要

本文通过石灰土专题调查,室内土壤光谱测定及其特征分析,并在此基础上进行土壤光谱自动识别分类方法的对比试验。明确了浙江省石灰土的四个土类、六个土属的光谱特征分异规律;提出了一种参数少、运算量小、精度高的光谱自动识别新方法——分层提取判别法。

**关键词** 石灰土,光谱特征,自动识别,分类技术

自本世纪 40 年代苏联学者 E. Л. Кринов 开创了包括土壤在内的地物光谱研究以来<sup>[14]</sup>,土壤光谱研究不断深入,基本上明确了土壤光谱行为是土壤内在理化特性的综合反映<sup>[1-5,15]</sup>。然而,真正用于土壤分类的研究还不多<sup>[6]</sup>。国内外土壤分类系统中,作为分类指标的土壤光谱特征,多数局限于可见光波段的门塞尔三要素(即色调、明度和彩度)。完全利用土壤的光谱信息进行发生学分类的自动识别研究还刚刚起步<sup>[7,8]</sup>。

1986 年,王人潮等人在测定浙江四个主要土类的土壤光谱的基础上,首次应用模糊数学方法,进行了土壤光谱的发生学自动识别分类尝试,取得了与现行分类 70% 以上吻合的结果<sup>[7]</sup>。1991 年,吴豪翔、王人潮改用逐步判别法,对我国南方红壤、黄壤、水稻土和紫色土,进行土壤光谱的发生学自动识别分类试验,获得了 95% 的分类精度<sup>[9]</sup>。但是,在光谱自动识别分类方法、光谱变量选择等方面,尚缺乏系统的对比分析。为此,作者在浙江石灰土专题调查基础上<sup>[9]</sup>,在土壤光谱特征分析的同时,进行了石灰土光谱的发生学自动识别分类方法的系统对比试验,得到了比较满意的结果。

## 一、地学背景、材料和方法

**1. 背景** 浙江石灰岩集中分布在绍兴—江山大断裂带以西的山地丘陵区,主要以六种灰岩地层出露,岩性变化复杂。包括最古老的震旦系白灰质灰岩,硅质灰岩和白云岩;奥陶系的瘤状灰岩;石炭系、二迭系和三迭系的纯度较高的碳酸盐沉积岩等。其中以寒武系不纯质灰岩分布最广。浙江石灰土壤,地处湿润的亚热带季风气候区,从高热中心的金衢盆地到凉爽湿润的西北山地,区域性气候差异明显。石灰岩地区原始植被已为次生林木和人工植被所代替。其中大都为灌丛稀林,也有利用较好的干果林(山

\* 本项工作在野外调查时,得到杭州、金华、衢州、湖州等市农业局和各县土肥站同志的支持;光谱测定得到中科院广州地质新技术研究所和吴豪翔同志的帮助,在此一并致谢。

核桃、板栗、香榧等); 水果园(柑桔、枇杷、枣、李等); 药材林(山茱萸、杜仲、厚朴等), 以及生长茂盛的柏木水涵林、白栎薪炭林。还有不少不堪入目的石山秃岭<sup>1)</sup>。正是由于气候的差异性、岩性的复杂性和植被覆盖的千姿百态, 造成了浙江石灰土的多样性, 发生学类型较为齐全。

**2. 供试土样** 采集于浙江石灰岩分布区的 11 个县(市)的 23 个典型剖面, 按表土、心土分层取土, 共 46 个样品。其中包括不同岩性起源, 不同发育程度的石灰土的黑色石灰土、黄色石灰土、棕色石灰土和红色石灰土四个土类, 及其所属级六个土属(表 1)。

表 1 供试土样的母岩及发生学类型

Table 1 The mother rock and genetic types of the soil samples

剖面号 Profile No.	采样地点 Sampling site	成土母岩 Mother rock	发生学类型及代号 Genetic type and code	
			土类 Soil great group	土属 Soil genuse
1	余杭县石鸽乡沈家店村	碳质泥灰岩	A 黑色石灰土	A <sub>1</sub> 黑粘土
2	临安县横路乡鹤岑村	碳质泥灰岩	A 黑色石灰土	A <sub>1</sub> 黑粘土
3	诸暨市连湖乡梓里村	碳质灰岩	A 黑色石灰土	A <sub>1</sub> 黑粘土
4	临安县岛石乡下塔村	碳质灰岩	A 黑色石灰土	A <sub>2</sub> 黑粘土
5	开花乡大溪边乡	碳质灰岩	A 黑色石灰土	A <sub>2</sub> 黑粘土
6	淳安县夏中乡昌蒲村	钙质页岩	B 黄色石灰土	B <sub>1</sub> 油红黄泥
7	淳安县琅乡贡坑村	钙质页岩	B 黄色石灰土	B <sub>1</sub> 油红黄泥
8	临安县新桥乡下许村	钙质页岩	B 黄色石灰土	B <sub>1</sub> 油红黄泥
9	淳安县夏中乡童心村	钙质页岩	B 黄色石灰土	B <sub>1</sub> 油红黄泥
10	建德县芝峰乡幸福村	泥质灰岩	B 黄色石灰土	B <sub>2</sub> 油黄泥
11	常山县灰埠乡山背村	泥质灰岩	B 黄色石灰土	B <sub>2</sub> 油黄泥
12	桐庐县严陵乡金家村	泥质灰岩	B 黄色石灰土	B <sub>2</sub> 油黄泥
13	富阳县石市乡东源村	泥质灰岩	B 黄色石灰土	B <sub>2</sub> 油黄泥
14	开化县村头乡上边山村	泥质灰岩	B 黄色石灰土	B <sub>2</sub> 油黄泥
15	常山县招贤乡鸡笼山村	白云质灰岩	C 棕色石灰土	C <sub>1</sub> 油棕泥
16	长兴县煤山乡四都村	白云质灰岩	C 棕色石灰土	C <sub>1</sub> 油棕泥
17	诸暨市五一乡李五村	白云质灰岩	C 棕色石灰土	C <sub>1</sub> 油棕泥
18	杭州市西湖区周浦乡西山	纯质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
19	余杭县五常乡水泥厂后	泥质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
20	杭州市西湖区翁家山村	纯质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
21	临安县山甘乡上畔村	白云质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
22	杭州市西湖尤井村	纯质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
23	淳安县西山坪石林	白云质灰岩	D 红色石灰土	D <sub>1</sub> 油红泥
24	杭州市西湖五云山坡麓	Q <sub>1</sub> 红土	E 红壤(典型)	E 黄筋泥

**3. 测试方法** 土壤经风干、研磨、全部过 20 目筛( $<0.84\text{mm}$ ), 装盒成测试样品。在日立-340 型分光光度计上, 以 10nm 扫描间隔测定 360—2500nm 范围的土壤光谱反射率。每个样品自动记录 215 个光谱反射率数据, 同时输出光谱反射率曲线, 供光谱特征分析和计算机处理。经目试定性分析和计算机叠加分析法进行土壤光谱曲线的特征选择, 初选出 20 个光谱特征变量, 作为预选特征参数。再经差异显著性 ( $F$ ) 检验, 筛选出 16 个光谱特征变量(即表 2 中的 1—16, 17), 作为光谱自动识别建模的参数。然后, 以模糊聚类法、全变量判别法、主成分判别法和分层提取判别法, 进行土壤光谱的自动识别分类的计算机处理, 并以现行土壤分类为基准<sup>[10]</sup>, 对各类判别方法作回判检验, 以回检准确率评价其分

1) 浙江石灰土专题调查报告, 油印本。

类精度。

表 2 石灰土光谱特征变量 F 检验\*

Table 2 F-test of spectral characteristic variables of the limestone soil

序号 Sequence No.	名 称 Name	变量内涵 Variable connotation	F		序号 Sequence No.	名 称 Name	变量内涵 Variable connotation	F	
			土类 Great group	土属 Genus				土类 Great group	土属 Genus
1	特征点	$\rho_{0.9\mu}$	35.29	19.73	11	弓曲差	$\frac{\rho_{0.78\mu} + \rho_{1.22\mu}}{2} - \rho_{0.9\mu}$	12.31	7.42
2	特征点	$\rho_{1.41\mu}$	51.69	8.50	12	吸收谷深	$\frac{\rho_{1.1\mu} + \rho_{1.6\mu}}{2} - \rho_{1.4\mu}$	22.52	17.10
3	特征点	$\rho_{1.92\mu}$	36.73	20.11	13	吸收谷深	$\frac{\rho_{1.85\mu} + \rho_{2.15\mu}}{2} - \rho_{1.92\mu}$	39.28	29.27
4	特征点	$\rho_{2.21\mu}$	45.82	25.36	14	吸收谷深	$\frac{\rho_{2.15\mu} + \rho_{2.27\mu}}{2} - \rho_{2.21\mu}$	20.32	17.11
5	特征点	$\rho_{2.5\mu}$	46.70	25.49	15	比值变量	$\rho_{0.78\mu} / \rho_{0.9\mu}$	49.21	29.04
6	特征点	$\rho_{2.45\mu}$	33.96	18.23	16	比值变量	$\rho_{1.2\mu} / \rho_{0.9\mu}$	0.28	0.34
7	差值变量	$\rho_{0.6\mu} - \rho_{0.4\mu}$	18.07	11.84	17	比值变量	$\rho_{1.2\mu} / \rho_{0.9\mu}$	34.17	18.72
8	特征波段	$\bar{\rho}_{0.85-1.1\mu}$	40.09	22.42	18	比值变量	$\rho_{1.6\mu} / \rho_{1.41\mu}$	0.18	0.66
9	特征波段	$\bar{\rho}_{1.95-2.1\mu}$	45.45	24.67	19	比值变量	$\rho_{2.5\mu} / \rho_{1.92\mu}$	0.31	0.57
10	弓曲差	$\frac{\rho_{0.4\mu} + \rho_{0.6\mu}}{2} - \rho_{0.5\mu}$	21.34	19.82	20	比值变量	$\rho_{2.15\mu} / \rho_{2.21\mu}$	0.15	0.66

\* 剔除 F<1 的 16、18、19、20 序号的四个变量,其余 16 个变量作为建模参数。

## 二、结果与讨论

### (一) 石灰土光谱特征

将土壤光谱反射率原始数据输入计算机,按土壤调查分类的土类、土属进行归类综合,经视屏显示、反拍成像,手工描绘,获得石灰土平均光谱曲线(图 1、3)。同样,经计算机处理获得 16 个光谱特征变量的土壤光谱特征曲线(图 2、4)。从两种曲线图中,可以看出浙江石灰土的土类、土属心土层的光谱分异十分明显,具体表现如下:

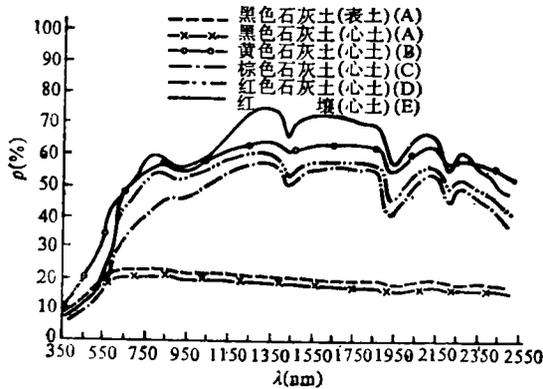


图 1 四类石灰土的光谱反射曲线

Fig. 1 Spectral reflectance curves of the four limestone soil

1. 黑色石灰土 土壤光谱反射率为石灰土之最低。表、心土层的光谱反射曲线,在 360—600nm 都以匀坡上升到 20% 左右后就开始缓降,除在 1920nm、2210nm 两个水份吸收带略有波动外,几乎呈一平直线向中红外波段延

伸,无明显特征表现。这可能与碳质灰岩赋予该土壤较高的碳化有机质( $> 3\%$ ),掩盖了铁、水吸收特征有关;也与该土壤剖面发育极差、通体黑色(2.5Y3—4/1—2)的特征相一致。尽管如此,土属级光谱仍有分异,其中黑粘土反射率最低,在 1920nm 层间水吸收特征也比黑泥土明显,也可能是质地差异引起的光谱响应<sup>[9]</sup>。

2. 黄色石灰土 这是光谱反射率最高的一类石灰土,中红外波段最高可达 60% 以上。在 360—600nm 波段似“微波”状斜坡上升,表现出微弱的铁“吸收边”特征<sup>[12]</sup>;在 900nm 附近的三价铁吸收谱呈“洼地”状显露;在 1410nm 羟基水吸收带、1920nm 层间水吸收带和 2210nm 铝羟基水吸收带表现明显,但其强度不及红色石灰土和棕色石灰土。黄色石灰土中又以油红黄泥土属光谱反射率为最高,三个水分吸收带的强度较弱,区别于油黄泥土属。

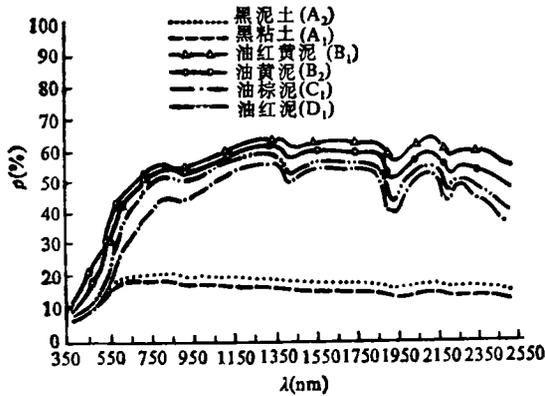


图 3 石灰土六个土属的心土光谱反射曲线  
Fig. 3 Subsoil spectral reflectance curves of six soil genera of limestone soils

位羟基水吸收带,强度均超过红色石灰土。其中,1920nm 处呈宽口深底的“V”型谷,“谷深”(特征变量 13)超过红壤。显示出该土壤较高的粘化程度和 2:1 型粘土矿物为主的特征<sup>[2,5]</sup>,这与该土壤粘土质地和水云母为主伴有一定量高岭石相符<sup>1)</sup>。

4. 红色石灰土 光谱反射率处于黄色石灰土和棕色石灰土之间。在 360—600nm 波段也呈“反弓状”铁“吸收边”,反映在 500nm 处的“弓曲差”(特征变量 10)为石灰土之首,但仍小于红壤吸收强度。1410nm、1920nm、2210nm 三处水分“吸收谷深”与棕色石灰土接近;除 1920nm 层间水吸收带呈宽口深底的“V”型谷和强度接近红壤外,其余 2 个水份吸收带远远小于红壤;总体反射率也低于红壤。这也与浙江红色石灰土的实际性状相吻合,即具有红化(5YR8/8)、粘化(粘土质地)、酸化( $\text{pH} < 5.5$ )的红壤特征,

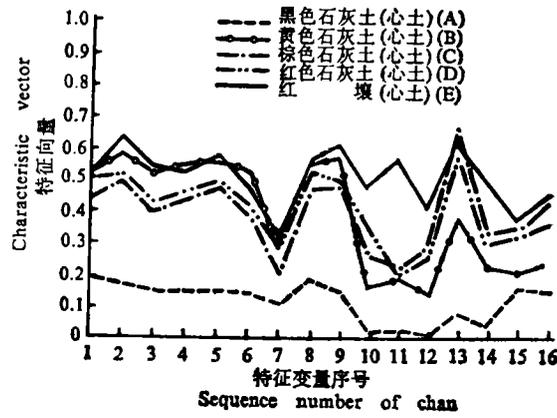


图 2 四类石灰土的光谱特征曲线  
Fig. 2 Spectral characteristic curves of four limestone soil

3. 棕色石灰土 光谱反射率低于黄色石灰土和红色石灰土,尤其在 600—800nm 区域反射率特别低。在 360—600nm 段出现“反弓状”铁“吸收边”,其吸收强度超过红色石灰土。这与白云质灰岩赋予该土壤较高的全铁量(7—11%)和较高的游离氧化铁( $> 3\%$ )有关<sup>1)</sup>。1410nm 羟基晶格结构水吸收带、1920nm 层间水吸收带和 2210nm 铝配

1) X-衍射分析结果,另文报道。

表 3 石灰土光谱特征变量的主成份分析

Table 3 Principal component analysis of soil spectral characteristic variables of limestone soil

主成份 Principal component	1	2	3	4	5	6	7	8	
特征值 Characteristic value	12.023	3.047	0.485	0.233	0.110	0.070	0.016	0.013	
累计贡献率 Cumulative contribution	75.145	94.187	97.219	98.674	99.362	99.801	99.817	99.830	
特征变量	$x_1$	0.274	-0.164	-0.111	-0.182	0.117	-0.107	0.143	-0.223
	$x_2$	0.275	-0.166	0.075	0.026	-0.031	-0.066	-0.110	0.127
	$x_3$	0.258	0.248	0.159	0.054	-0.059	-0.095	-0.109	-0.100
	$x_4$	0.266	0.213	0.144	-0.016	-0.060	-0.134	-0.104	0.044
	$x_5$	0.272	-0.182	0.143	0.012	-0.016	0.066	-0.087	0.011
	$x_6$	0.253	-0.266	0.168	-0.012	-0.056	0.027	-0.070	-0.033
	$x_7$	0.253	-0.149	-0.543	-0.195	-0.079	0.236	0.600	0.295
	$x_8$	0.277	-0.147	-0.075	-0.147	0.090	-0.136	0.045	-0.210
	$x_9$	0.272	-0.184	0.137	0.035	0	0.012	-0.105	0.003
	$x_{10}$	0.216	0.316	-0.409	-0.375	-0.326	0.149	0.620	-0.006
	$x_{11}$	0.246	0.177	-0.202	0.745	-0.504	-0.095	0.075	-0.047
	$x_{12}$	0.228	0.327	-0.173	0.145	0.422	-0.251	0.094	-0.522
	$x_{13}$	0.246	0.280	-0.436	-0.012	0.315	-0.532	-0.092	0.595
	$x_{14}$	0.257	0.207	0.039	0.251	0.482	0.703	-0.122	0.102
	$x_{15}$	0.193	0.399	0.264	-0.335	-0.233	0.032	0.257	-0.304
	$x_{16}$	0.193	0.371	0.507	-0.098	-0.190	0.093	0.267	0.243

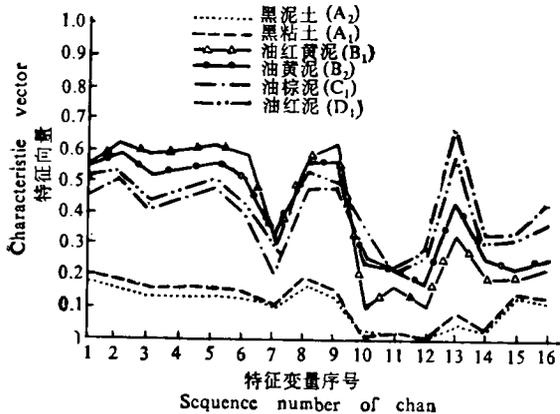


图 4 石灰土六个土属的心土光谱特征曲线

Fig. 4 Subsoil spectral characteristic curves of the six soil genera of limestone soils

进行系统聚类, 土壤样本被分为: {6、7、8、9、10、11、13}; {12、14、16、17、18、19、20、21、22、

其盐基饱和 (> 80%)、交换量较大 (ECEC>23cmol/kg 土)、粘土矿物以 2:1 型的水云母为主而区别于红壤<sup>[9],1)</sup>。

(二) 土壤光谱自动识别分类

利用石灰土心土层的光谱特征量为参数, 分别以模糊聚类分析、全变量判别、主成分判别、逐步判别和分层提取判别等五种方法, 进行计算机自动识别的发生学分类试验, 其结果如表 4。

1. 模糊聚类分析<sup>[7]</sup> 这是一种

利用样品间模糊关系进行聚类分析的分类方法。本试验以截值  $\lambda = 0.999$

1) 浙江石灰土专题调查报告。(油印本)

表 4 五种自动识别分类的精度

Table 4 Accuracies of the five automatic classification methods

样品类 Sample No.	原分类号 Original classifi- cation No.	模糊聚类 Fuggy cluster		全变量判别 Discrimination with all variables		主成分判别 Principal compenent discrimination		逐步判别 Stepwise discrimination		分层提取判别 Multi-level discrimination	
		上类 Great group	土属 Genus	土类 Group great	土属 Genus	土类 Great group	土属 Genus	土类 Great group	土属 Genus	土类 Great group	土属 Genus
1	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>
2	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>
3	A <sub>2</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>
4	A <sub>2</sub>	E	A <sub>2</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>
5	A <sub>2</sub>	E	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>	A	A <sub>2</sub>
6	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>
7	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>
8	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>
9	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>
10	B <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>
11	B <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>
12	B <sub>2</sub>	D	D <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>
13	B <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>
14	B <sub>2</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>	B	B <sub>2</sub>
15	C <sub>1</sub>	C	D <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>
16	C <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>
17	C <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	C <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>
18	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
19	D <sub>1</sub>	D	D <sub>2</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
20	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	C	C <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
21	D <sub>1</sub>	D	D <sub>3</sub>	A	B <sub>2</sub>	A	B <sub>1</sub>	B	B <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
22	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
23	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	B <sub>1</sub>	D	B <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>	D	D <sub>1</sub>
正确率	100	73.9	65.2	87.0	70.0	91.3	70.0	87.0	82.6	100	91.3

23};{1,2,3};{4,5}和{15} 5类。其分类正确率,土类级为 73.9%;土属级只有 65.2%。

2. 全变量判别 采用 Bayes 准则,用前述 F 检验后筛选出来的 16 个光谱特征变量为参数,建立判别函数(1):

$$D_g(X) = \ln P_g + Cog + C_1X_1 + \dots + C_mX_m \quad (1)$$

式中  $P_g$  为  $g$  类样本的先验概率,可用样本频率代替,即  $P_g = \frac{n_g}{n}$  ( $n_g$  为各类样本数,  $n$  为总样本数);  $Cog = 1, 2, \dots, G$  ( $G$  为总分类数);  $C$  为判别参数;  $m$  为参数总个数。

本判别分类正确率,土类级达 87%;土属级也只有 70%。且所用变量较多。

3. 主成分判别<sup>[12]</sup> 仍用上述 F 检验筛选出来的 16 个光谱特征变量作主成分变换处理,然后选用贡献率最大的前 4 个主成分为参数(表 3),再按上述判别函数进行建模识

别。其分类精度,土类级有所改善,达到 91.3%;土属级仍在 70% 的正确率水平。该方法有压缩信息、减少运算量的作用。但光谱特征变量仍未减少,精度提高也不显著。

4. 逐步判别法<sup>[8]</sup> 这是一种改进的模式判别方法。其判别函数与一般判别相仿,只是在判别过程中采用变量“有进有出”的算法,使判别式始终保留“重要变量”作为参数。本试验先以 16 个光谱特征变量为初始参数,经逐步筛选最后留下 7 个变量(按其“重要性”顺序排列为 15、4、10、8、7、13、16)。该法分类的精度也不理想,土类与土属分别只有 87% 和 82.6%。吴豪翔<sup>[9]</sup>曾采用此法获得了较高的分类精度,可能与选用了 215 个原始光谱数据的平均值作为其中一个参数有关,这就动用了整个光谱数据而大大增加了运算量。

5. 分层提取判别 在上述几种自动识别中,对各类样本判别时,均以相同数量的光谱变量建模,并作“全方位”的重复判别。这样为了顾及各类样本的判别效果就要选用较多的变量,其结果很难发挥出各类样本所固有的个性特征优势,众多的变量甚至会出现相互抵消的“平滑效应”,使分类精度降低。为此,本试验设计了一种根据土壤光谱特征分析和 F 检验结果,“因土制宜”地选择特征变量为参数,分层建模、分层提取的判别方法。其判别过程如下:

第一层,选用第 1 光谱特征变量为参数,建立判别函数(2)、(3),从全部样本中识别出黑色石灰土中的黑粘土(A<sub>1</sub>)和黑泥土(A<sub>2</sub>)两个土属。

$$D_1(X) = \frac{5}{23} - 2345.92 - 208.74X_1 \quad (2)$$

$$D_2(X) = \frac{3}{23} - 1978.23 - 190.91X_1 \quad (3)$$

第二层,经第一层提取后的剩余样本,用第 10 光谱特征变量为参数,建立判别函数(4),从中提取出黄色石灰土中的油红黄泥土属(B<sub>1</sub>)。

$$D_3(X) = \frac{4}{23} - 64.37 - 31.36X_{10} \quad (4)$$

第三层,经第二层提取后的剩余样本,用第 15 光谱特征变量为参数,建立判别函数(5),提取出黄色石灰土中的油黄泥土属(B<sub>2</sub>)。

$$D_4(X) = \frac{5}{23} - 275.43 + 14.33X_{15} \quad (5)$$

第四层,经第三层提取后的剩余样本,用第 4、7 两个光谱特征变量为参数,建立二元判别函数(6)、(7),从而将棕色石灰土和红色石灰土的两个土属(C<sub>1</sub>,D<sub>1</sub>)区分开来。

$$D_5(X) = \frac{3}{23} - 1978.23 - 190.91X_1 - 228.29X_7 \quad (6)$$

$$D_6(X) = \frac{6}{23} - 314.89 + 50.88X_1 + 75.80X_7 \quad (7)$$

分层提取判别的结果,使土类级分类精度达到了 100%;而土属级的分类精度也提高到 91.3% 水平。而且只动用了 5 个光谱特征变量,达到了变量少、精度高、运算量小的良好效果(表 4)。

### 三、综合分析评价

1. 诊断黑色石灰土主要依据是具有深厚的细有机质的黑色诊断表土层。它是大量低碳比 ( $C/N \leq 13$ ) 的细有机质积聚的结果<sup>[10]</sup>。而大量有机质的存在,会降低土壤光谱反射率,其影响主要在可见光及近红外波段<sup>[3]</sup>。黑色石灰土的低碳氮比有机质,不仅表土而且心土层的光谱反射率均属最低一类(图 1)。因此,选用近红外波段的特征变量(900nm 反射率),即可将其判别出来。黑色石灰土的黑粘土和黑泥土两个土属,主要与碳质泥灰岩和碳质灰岩所造成的质地差异有关。壤粘质地的黑粘土,光谱反射率高于粘土质地的黑粘土,这与 Gerbermann 的研究结果是一致的<sup>[13]</sup>。因此,可以利用土壤光谱反射率的差异(第 1 变量)将黑色石灰土的两个土属区别开来。

2. 黄色石灰土、棕色石灰土和红色石灰土同属于铁硅铝土纲,均具有铁硅铝诊断表下层<sup>[10]</sup>。而这一诊断层的三个核心指标:(1) 2:1 型的或 2:1:1 型的粘粒矿物为主;(2) 土壤游离  $Fe_2O_3 \geq 2\%$ ;(3) 阳离子交换量较大 ( $CEC > 24\text{cmol}(+)/\text{kg}$  粘粒)。这在三类土壤的光谱特征中都有所反映:第一,在 1410nm 呈浅“V”形吸收谷,但其强度不及典型红壤;在 1920nm 处为宽口深底的“V”形强吸收谷,强度超过典型红壤;在 2210nm 处虽有一定吸收,但强度远不及典型红壤;800—1200nm 波段有铁谱带,这可认为是 2:1 型粘粒矿物所致<sup>[2]</sup>。第二,氧化铁对光谱的影响主要反映在 400—1100nm 范围,其中 500—640nm 波段的反射率与土壤中氧化铁含量成线性负相关<sup>[3]</sup>。这可用 500nm “弓曲差”和 900nm “弓曲差”反映出来,其吸收强度按黄色石灰土、棕色石灰土、红色石灰土上顺序递增,但仍未超过典型红壤。第三,阳离子交换量可在 1850—2130nm 波段吸收强度表现出来,并集中地反映在该吸收带的最低点 1920nm 的反射率上,该点的反射率与 CEC 呈负相关<sup>[4]</sup>。除粉砂含量较高的油红黄泥外(粉/粘  $> 1.8$ ),三类石灰土的其余土属在 1920nm 处的反射率均低于典型红壤,正说明阳离子交换量超过红壤。黄色石灰土、棕色石灰土和红色石灰土,其发生学的本质区别应是脱硅富铝化强度上的差异。且集中表现在游离氧化铁富集程度上的分异。因此,可以用反映氧化铁多寡的可见光部分的铁“吸收边”(第 7、10、15 变量);近红外波段的三价铁吸收凹地(第 11 变量),分别建立光谱判别模式,以“分层提取法”将不同富铁程度的三类石灰土的土属逐一区分开来。

3. 在土壤光谱自动识别分类中,土壤光谱特征变量选择,判别函数建立和提取层次的确定,应当是“因土制宜”充分发挥专家智能。本试验是针对石灰土的光谱特征选择的,而对其他土壤则应选择能反映各自本质特征的光谱变量和判别函数。例如,同样具有高有机质表层的高山香灰土和泥炭土,其光谱特征本试验虽未涉及,但因它们在发生学分类中,分别属于铁铝土纲的黄壤土类和潮湿土纲的泥炭土类<sup>[10]</sup>,在光谱判别分类中也相应地选择能反映出“铁铝心土层”和“泥炭表层”的光谱特征变量,而区别于只具暗色表土层的黑色石灰土。因此,本文提出的分层提取的光谱自动识别分类的方法、原则上是具有一定的普遍意义的。

## 四、结 语

1. 四类石灰土的光谱特征分异明显,黑色石灰土反射率最低,光谱曲线在 600nm 以后几乎呈一平直线向中红外区域伸展,无明显的吸收特征。其中黑粘土土属反射率比黑泥土土属更低,在 1920nm 水吸收带略有波动。

2. 黄色石灰土反射率较高,其中又以油红黄泥土属最高,铁、水吸收特征反映明显;棕色石灰土光谱曲线中的峰、谷显著,铁、水吸收特征表现充分,接近或超过红色石灰土;红色石灰土光谱反射率曲线中,铁、水吸收带反映强烈,接近红壤谱形,但在 1920nm 处呈典型的“V”形吸收谷,且强度超过红壤,而总体反射率又较低,区别于典型红壤。

3. 利用土壤反射光谱特征变量,进行模糊聚类分析,全变量判别、主成份判别和逐步判别四种分类法,不仅选用的变量多、运算量大,而且精度难以提高。采用“分层提取判别”,可以达到少变量、快运算、高精度的分类目的,是一种符合人们传统分类逻辑的自动识别方法。

4. 本文只局限于土壤光谱数据在土壤发生分类中的应用,土壤发生分类按《中国土壤系统分类》规定,石灰土分类的诊断层除黑色石灰土为表土层外,其余都以心土层作为分类依据。因此,本文未能涉及全部表土层光谱数据。作者也曾对表土层光谱特征作过分析,但因土壤表土成土条件极不稳定,反映在光谱特征上分异规律不及心土层明显。因此,也就不敢妄言其遥感意义,有待进一步研究。

## 参 考 文 献

1. 徐彬彬等, 1980: 南疆土壤光谱反射特性与有机质含量的相关分析。科学通报,第 6 期, 282—284 页。
2. 季耿善等, 1987: 土壤粘土矿物反射特性及其土壤学上的应用。土壤学报,第 24 卷 1 期, 67—76 页。
3. 徐彬彬等, 1987: 土壤光谱反射特性与理化性状的相关分析。土壤专报,第 41 号, 66—76 页,科学出版社。
4. 季耿善等, 1987: 土壤阳离子交换量与光谱反射率的相关研究。土壤专报,第 41 号, 89—94 页,科学出版社。
5. 季耿善等, 1986: 土壤主要粘土矿物的近红外反射特性。土壤专报,第 41 号, 77—88 页,科学出版社。
6. 戴昌达, 1981: 中国主要土壤光谱反射率特性分类与数据处理的初步研究。遥感文献, 315—323 页,科学出版社。
7. 王人潮等, 1986: 浙江省主要土壤光谱反射特性及其模糊分类在土壤分类中的应用研究。浙江农业大学学报,第 12 卷 4 期, 464—671 页。
8. 吴豪翔等, 1991: 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,第 28 卷 2 期, 177—184 页。
9. 王深法等, 1987: 浙江灰岩土壤的开发利用研究初报。浙江农业大学学报,第 13 卷 2 期, 181—189 页。
10. 中国科学院南京土壤所, 土壤系统分类基金课题组, 1981: 中国土壤系统分类(二稿)。土壤学进展,特刊, 95—99 页。
11. 中国科学院空间科学技术中心, 1987: 中国地球资源光谱信息资料汇编。112—129 页,能源出版社。
12. 陈国良等, 1986: 微机应用与农业系统模型。10—101 页,陕西科学出版社。
13. 徐彬彬, 1987: 土壤光谱反射特性研究及其应用。土壤学进展,第 15 卷 1 期, 4 页。
14. Кринов Е. Л., 1947: Спектральная Отражательная Способность Природных Образований, Изд АН СССР, 97—110.
15. Карманов И. И., 1974: Спектральная Омражающая Способность И Цвет Почв, как Показатели их Свойств. Колос, Москва, p.31

## SPECTRAL CHARACTERISTICS OF LIMESTONE SOIL IN ZHEJIANG PROVINCE AND THEIR AUTOMATIC CLASSIFICATION

Wang Shenfa, Jiang Hengxian and Wang Renchao

(*Zhejiang Agricultural University, 310029*)

### Summary

Based upon the Limestone soil survey, spectral measurement and analysis, the Paper elucidates the spectral characteristics of Limestone soil in Zhejiang Province. The total spectral reflectivity increased in the order of Black Limestone soil < Brown Limestone soil < Red Limestone soil < Yellow Limestone soil.

Sixteen spectral characteristic variables were selected in the test to compare various automatic classifications. Finally, an automatic discrimination method to require less variables and shorter time for calculation but to have a high accuracy, which is 100% (soil great group) and 91.3% (soil genus),—multilevel discrimination method is suggested.

**Key words** Soil originated from limestone parent, Spectral feature, Automatic recognition, Classification technique