

# 我国土壤光谱线之研究\*

徐 彬 彬

(中国科学院南京土壤研究所)

1989年6月17日收稿

## 摘 要

通过对我国各地的土壤光谱反射率的分析表明,无论在二维或多维空间中,确有土壤光谱线存在,但不是严格的一条直线,而是有适当宽度的带。不宜用全国统一的一条土壤光谱线来作植被分析。讨论了不同土壤光谱线对绿度及植被覆盖度估计的误差。还论述了土壤光谱反射率主成分分析的结果及其物理意义。

**关键词** 土壤 反射光谱 绿度 主成份分析

在我国,除极端干旱的地区外,大部分地区都长有自然植被或人工栽培植物。随着气候的四季变化,地表植物也自然的更替和繁衍,造成土壤周而复始的裸露及至全覆盖。

土壤和植被是陆地背景的两大组分。当代蓬勃兴起的遥感技术,就是以它们的不同反射(或发射)特性为基础进行探测和识别。因此,对植被和土壤光谱信息的研究已成为当前遥感基础研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>。

自70年代后期起,国外学者先后提出,在由MSS 5和MSS 7组成的两维空间中,土壤光谱几乎沿着从座标原点出发的直线分布,人们常把这条直线称为土壤光谱线(简称土壤线)。土壤水分含量越多,则点位越靠近原点,反之则离原点越远;水体与植被则明显地分列于该土壤线之两侧;植被点到土壤线的垂直距离与植被的覆盖度密切相关,且不受土壤背景的影响。继后,又证实在由MSS(4-7)波段组成的4维空间中,土壤线依然存在,并提出以亮度(brightness)为基础的绿度(greenness)、黄度(yellowness)及“无名度”(nonsuch)的4维座标。TM波段的应用,使波段数又较MSS增加,国外有学者将上述对应MSS波段的4维空间,成功地推演到了 $n$ 维空间<sup>[1,2]</sup>。

土壤线的概念在多光谱资料的解译和分析中已被广泛的接受和应用<sup>[1,5]</sup>。本文根据我国的土壤光谱资料,就土壤光谱线及其有关问题进行探讨。

## 一、土壤光谱资料的获取

自70年代中起,先后测试了南疆、腾冲、宁芜、江西、陕西、山西等地代表我国不同自

\* 文内所及的土壤光谱资料,系多年积累的,所内外许多同志曾共同工作,恕不一一列名,谨一并致谢。

然地理带的土壤的室内外光谱。与此同时,还专门收集了全国近 50 个主要土壤类型的样品,测量其室内反射光谱。

野外测试,一般均用国产 101 W 型光谱仪,波长范围为 0.4—1.1  $\mu\text{m}$  (早期用 302 型分光光度计)。测试按统一方法进行。在选择测试点位时,既考虑土壤类型的代表性,又顾及土壤地理分布的广泛性,力求选择大面积连片,地表状况较为均一的点位。在每个点位上,搬动仪器分别在选定的 9 个点上测试,每个测点视情况重复测试 1—2 次。取 9 个测点的平均数为该点位的光谱数据。每个土壤类型的点位数适当顾及其分布面积大小和利用状况的种类,但每个土壤类型不少于 4—5 个点位。这样在一定程度上能充分保证资料的可靠性和统计的有效性。同时,还进行不同植被在不同覆盖度情况下的土被合成光谱的测试。

在野外测点上,采集表层土样进行理化分析和室内光谱测定。室内测试一般均将土样风干后,研磨过 20 孔筛 ( $<0.84 \text{ mm}$ ),然后在日立 UV-340 型分光光度计上测试其 0.4—2.5  $\mu\text{m}$  光谱。

## 二、二维土壤光谱线

由于土壤分布虽有规可循,但往往在一不大的地域就有多种土壤分布,考虑到遥感技术的宏观性和实用性,本文在讨论土壤光谱线时,不从某一土壤类型出发,而是按地区和

表 1 几个地区及全国的主要土壤光谱反射率在 MSS 5 对 MSS 7 波段的回归方程系数、  
剩余标准差和相关系数\*

Table 1 Coefficient of regression equation, correlation coefficient and surplus  
standard deviation in the MSS 5 versus 7 for soil spectral reflectance

地 区	样品数 $n$	相关系数 $r$	截距 $a$	斜率 $b$	剩余标准差 $s$
腾冲(野外资料)	115	0.94	10.14	0.90	1.89
鹰潭(室内资料)	11	0.78	19.16	0.68	1.05
宁芜(野外资料)	57	0.95	6.48	0.85	1.63
宁芜(室内资料)	51	0.94	5.99	1.08	1.94
安塞(室内资料)	39	0.82	19.39	0.61	1.55
新疆(野外资料)	19	0.97	8.28	0.90	2.19
全国主要土壤 (室内资料)	277	0.91	13.28	0.86	3.29
全国主要土壤 (野外资料)	234	0.97	4.81	1.06	2.43

\* 表中新疆和全国主要土壤(野外资料)栏的光谱数据中,部分引自参考文献[6]。

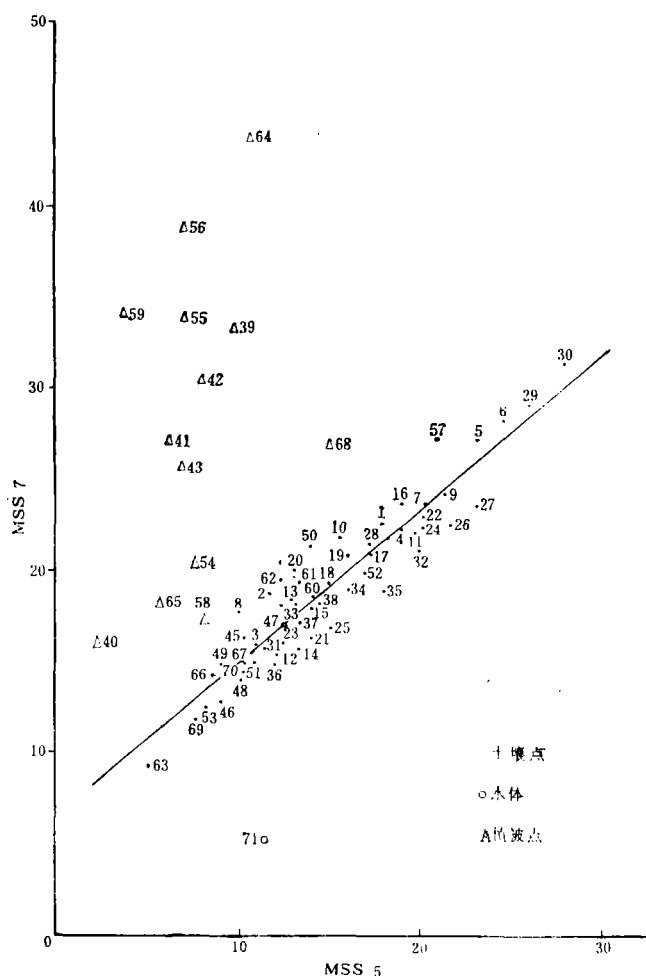


图 1 宁芜遥感试区土壤在 MSS 5 与 7 波段光谱反射率的关系

Fig. 1. Relationship between MSS 5 and 7 for spectral reflectance of soil in the Ning-Wu remote sensing test area

按光谱资料获取方式(室内或野外)进行。

根据土壤光谱资料,分别计算它们对应于 MSS5、7 波段范围内的平均反射率,并相应地标在二维平面图上,由此获得了一系列不同的土壤光谱分布图。篇幅所限,本文仅图示了宁芜地区及全国主要土壤野外测试的光谱散点图(图 1, 2)。

在图 1 中,还标出了野外实测的水体和不同覆盖度的混合光谱点。由图 1、2 可见,土壤光谱的点位均明显地呈现从座标原点附近出发的带状分布。其它地区的结果也呈同样趋势。由此可见,所谓土壤光谱线,不是严格的一条直线,而是有适当宽度的带。

这是因为土壤是一个很复杂的自然体,即使同一土壤类型中,尚有许多亚类、土属、土种之分,何况本文的各散点图中包括了多种土壤。还由于在很多情况下,土壤是以过渡类型出现。土壤的性状变异均可能使土壤光谱有一定的变幅。尚且有测试仪器的误差等。凡此,均会造成土壤光谱线是一条有一定宽度的带状。由图 1、2 相比可见,由于全

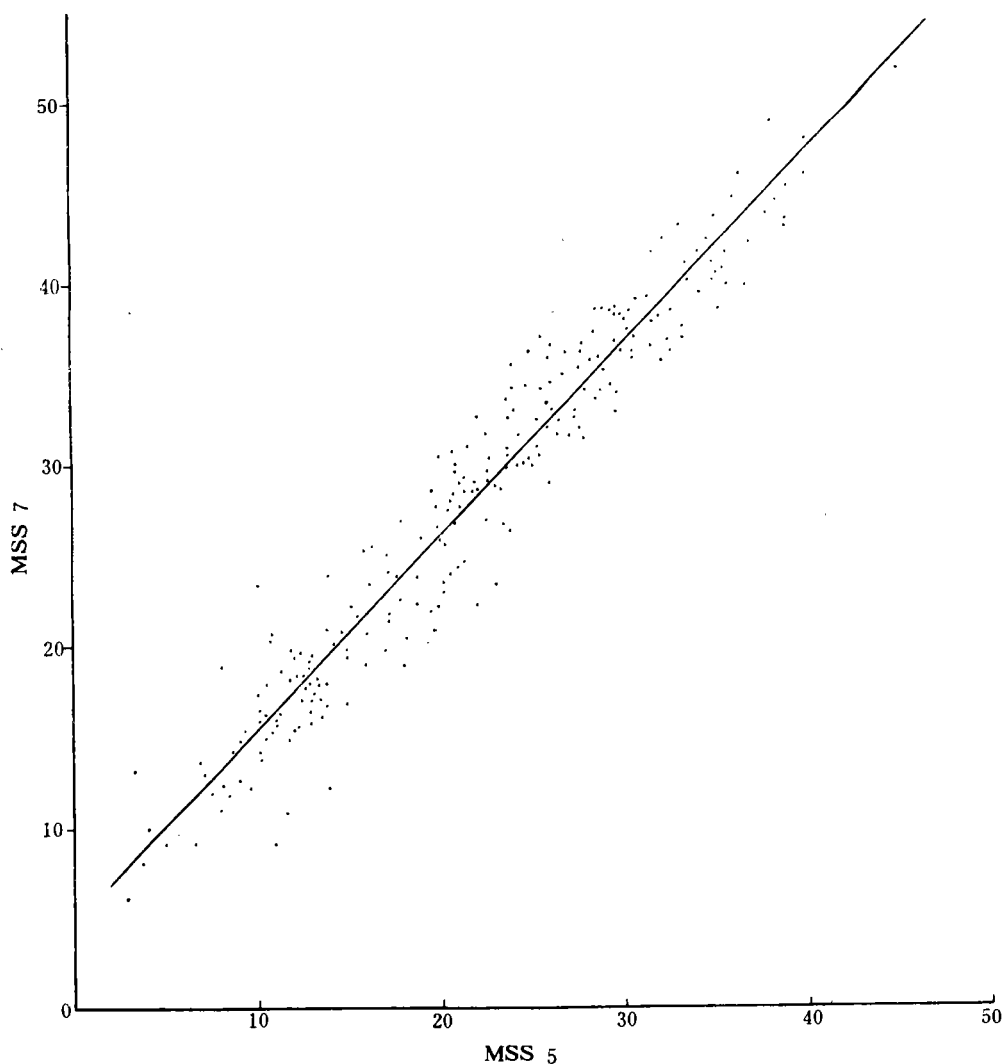


图 2 全国主要土壤在 MSS 5 与 7 波段光谱反射率的关系

Fig. 2 Relationship between MSS 5 and 7 for spectral reflectance of countrywide principal soil (field data)

国各土壤间的性状和光谱特性差异更大，所以带的宽度（或剩余标准差）要大于地区性的。

表 1 列出了我国几个典型地区及全国的土壤光谱资料在 MSS5 和 MSS7 二维平面中的直线回归方程的系数，剩余标准差和相关系数等。

由表 1 可见，无论是室内或是野外的测试资料，各回归方程的相关系数均较高，超过显著性检验标准。这证明，室内外土壤光谱在 MSS5、7 二维平面中均呈良好的线性分布。但这些方程的截距 ( $a$ )、斜率 ( $b$ ) 和剩余标准差 ( $s$ ) 存在一定的差异。剩余标准差的大小，反映该土壤光谱线的带宽。

能否用全国统一的土壤光谱线来代替各地区的土壤光谱线。本文采用数理统计中两条回归线的比较法<sup>[7]</sup>，将全国的土壤光谱线的回归方程与各地区的回归方程进行了逐一统计检验，包括对剩余标准差、斜率、截距的无显著差异检验。结果表明：各回归线间只有部分剩余标准差间的差异不明显，绝大部分的斜率、截距均存在明显差异。可见，勉强地将全国统一的土壤光谱线来替代各地区的，势必造成较大的误差，尤其截距的差异会直接造成对植被覆盖度的错判。关于这一点以下还将专门讨论。

### 三、多维空间的土壤光谱线

上述讨论仅是在由 MSS 5 和 7 波段组成的二维平面中。在多维空间中，光谱信息提取处理的方法很多，如 Kauth 和 Thomas 提出的 4 维 tasseled cap 变换就是其中一例<sup>[8]</sup>。本文根据 R. D. Jackson 推演的  $n$  维空间光谱指标的计算方法<sup>[2]</sup>，分别计算了上述各地区及全国的土壤光谱在多维空间中的亮度和绿度。

根据计算公式，有二个土壤点和一个植被点的光谱资料，即可计算获得亮度和绿度方程。为便于比较。本文在计算中所选用的土壤点，均位于回归线上不同位置的两个点。

如根据宁芜地区野外测试资料，按 4 个 MSS 波段计算的亮度方程为：

$$BR = 0.5322x_4 + 0.5100x_5 + 0.5100x_6 + 0.4435x_7 \quad (1)$$

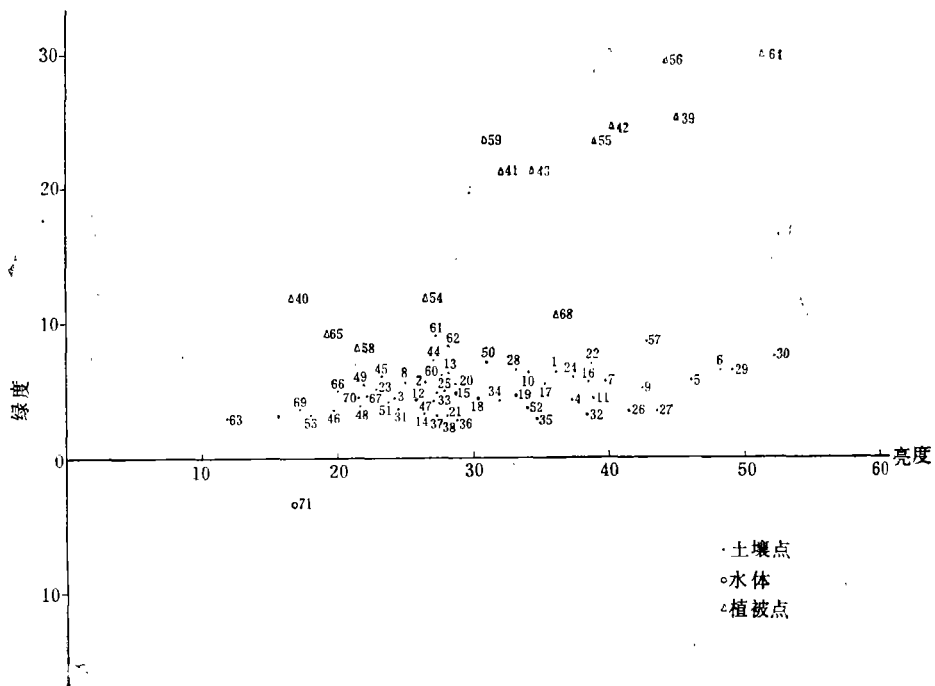


图 3 宁芜遥感试验区土壤亮度与绿度的关系

Fig. 3 Relationship between soil brightness and greenness in the Ning-Wu remote sensing test area

方程用 47 和 17 号点计算。

绿度方程为:

$$GR = -0.3059x_4 - 0.6184x_5 + 0.6344x_6 + 0.3487x_7 \quad (2)$$

方程用 42 和 17 号点计算。

式中  $x_4-x_7$  分别为 MSS 4—7 波段的平均反射率。若用 42 和 47 号点计算的绿度方程为:

$$GR = -0.3060x_4 - 0.6184x_5 + 0.6343x_6 + 0.3487x_7$$

将上下二个绿度方程对照后发现,除了由于四舍五入的影响使方程中  $x_4$  和  $x_6$  的系数有万分之一差别外,其余一样。这证实了在高维空间中土壤光谱线的存在,并且其性质与二维空间中是一致的。即植被点到土壤线的垂直距离仅与植被覆盖度有关,而与土壤背景无关。

图 3 表示的是用 (1)、(2) 两式分别计算的宁芜地区野外测试光谱点的亮度和绿度。

由图 3 可见,所有的土壤点几乎都沿着平行于亮度轴的带状分布,而各植被点则按覆盖度的高低,以不同的绿度值 ( $y$  轴)位于土壤线之上。

由图 1 与图 3 对照可见,图 3 基本上就是由图 1 经坐标轴旋转到  $x$  轴与土壤光谱线平行。只是由于加入了 MSS 4 和 6 波段的信息,使点位的相对位置略有变动。经比较,二维的绿度信息大致反映了四维的 90%<sup>[2]</sup>。

#### 四、土壤光谱的主成分分析

主成分分析已被广泛用于遥感信息的提取。它的明显优点就在于它能应用数学方法找出新的、个数比原变量少得多的综合指标,并使这些综合指标彼此无相关性,而又反映原来较多指标所提供信息的主要部分。

根据新疆、腾冲和宁芜等地区的室内外土壤光谱资料的主成分分析的结果表明<sup>[9,10]</sup>:无论是室内资料,还是野外测试结果;也不论是按 MSS 波段,还是按 TM 波段,土壤光谱的各波段反射率均呈正的线性相关,且相关性均极高。第 1、2 两个主成分的贡献率之和一般均达到 95% 以上,这说明用这两个主成份所提供的信息几乎可以完全反映 MSS

表 2 新疆、腾冲、宁芜地区土壤光谱第 1、2 主成分贡献率

Table 2 Explained variance of first and second principal components of soil spectral reflectance from Xinjiang, Tengchong and Ning-Wu regions

地 区	贡献率(%)		累计贡献率(%)
	主成分		
	1	2	
新疆(室内资料)	93.90	5.52	99.42
腾冲(野外资料)	69.50	26.96	96.46
腾冲(室内资料)	72.48	27.37	99.85
宁芜(室内资料)	88.92	10.30	99.22

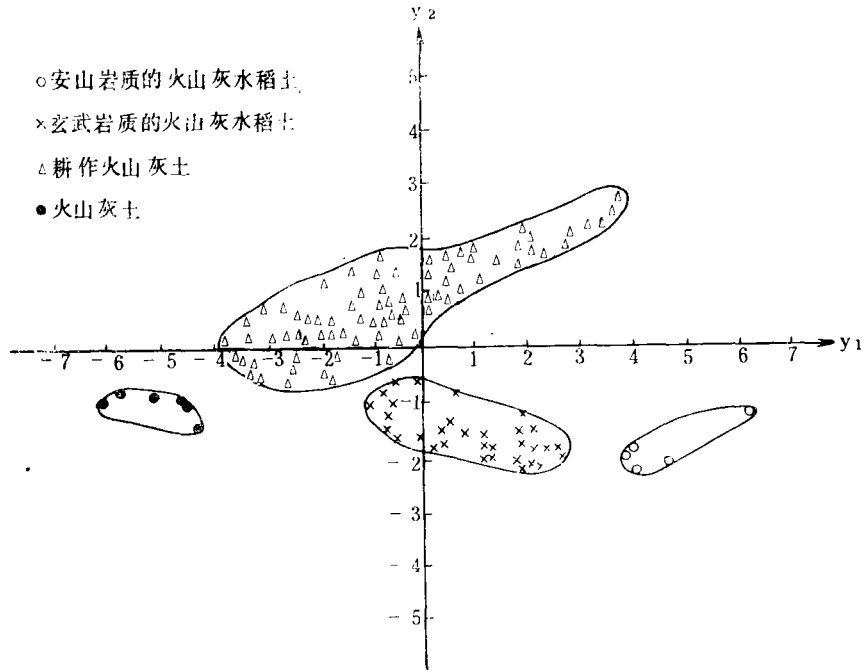


图 4 107 个土壤样品的光谱资料按第 1、2 主成份的分类

Fig. 4. Classification of 107 soil samples based on the 1st and 2nd principal components

或 TM 波段所有的全部信息。其中第 1 主成分的贡献率占据了主要部分(见表 2)。这又表明,土壤光谱的主成分分析也可证实有多维空间中土壤光谱线的存在。如以腾冲地区的土壤光谱资料为例。图 4 和 5 分别是 107 个土样室内光谱测试资料和 115 个野外点位光谱测试资料的主成分分析的结果。

由图 4 可见,107 个样品光谱点分别聚集于自然状态的火山灰土、耕作火山灰土和分属于玄武岩及安山岩质的火山灰水稻土四个围线内。由图 5 可见,115 个野外点位分别聚于水面、荒地、落干水稻田和小麦田四个围线内。

通观室内外土壤光谱的主成分分析资料,第 1 主成分显示着物体的总的反射水准,即决定于该物体的平均亮度水准,也就是上述提到的亮度。故第 1 主成分的特征向量的各分量均为正值,且数值大致相同。第 2 主成分则表示该物体的波谱中,长波波段与短波波段反射水准之比例,故第 2 主成分的特征向量中,相应于波长小于黄红光的波段(即 0.4—0.55 或 0.6 微米)的各分量均为负值,而红光及近红外波段均为正值,且两者的绝对值相近,因此经线性组合后的第 2 主成分的代数值直接反映了该物体的长波波段反射水准。

第 1 主成分反映着土壤的总亮度,就腾冲地区来说,决定土壤样品亮度的主要是有机质含量和暗色矿物的多寡;决定野外测试点位土壤亮度的主要是水分含量。这也是图 4、5 的第 1 主成分物理意义。在图 4 中,自然状态的火山灰土富含有机质(一般均在 20% 左右),则集中在图的左边。经耕种后,有机质含量下降,点位逐渐右移。由于水旱两种耕作方式,影响土壤性状,明显导致土壤光谱特性的分异。由于安山岩中暗色矿物(黑云母、

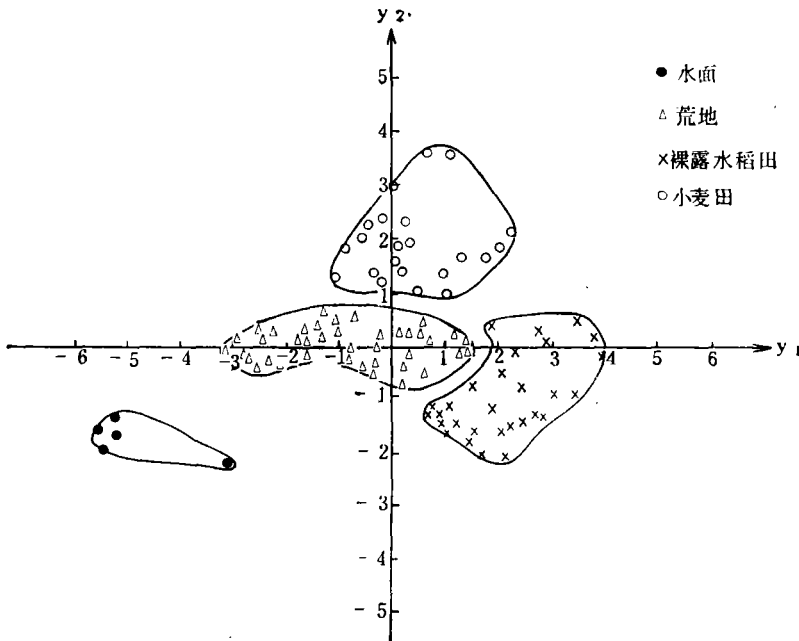


图5 115个野外点位的光谱资料按第1、2主成份的分类

Fig. 5 Classification of 115 field observation points based on the 1st and 2nd principal components

辉长石、角闪石等)含量较少,故由安山岩质火山灰上发育的水稻土位于图1右侧。由于野外测试时,正当旱季,落干的水稻土表层非常干燥,增加亮度,故它的点位于图5的右侧,低反射率的水面在图5的左下方,湿度介于两者之间,地表有干枯荒草覆盖的荒地点位,则在中部。

第2主成分反映着物体550—600毫微米前后反射能力之比例。就本例,图4中第2主成份的物理意义为反映土壤样品中铁的形态。在旱作条件下,土壤中铁一般以氧化铁形态存在,铁的氧化物在失水情况下呈鲜艳的红色。因此,土壤中氧化铁含量越高,色泽越红,其红光波段的反射必然越强,点位位于图的上部。反之,种稻后,在长期渍水条件下,随着氧化还原电位的降低,高价铁逐步还原成亚铁,氧化亚铁一般呈浅蓝、灰蓝或微灰绿色。故水稻土必然在蓝光波段的反射率强,位于图的下部。图5中,第2主成份的物理意义则明显反映地表绿色植物的覆盖度,即前述的绿色。如图中最高的二个点位,也是小麦长势最好的,测试时(2月份)小麦高已达40cm,覆盖度达90%以上。

关于图4、5在第2主成份的物理含义上的差异,国外也有类似的报道<sup>[4]</sup>。据认为,由于红色土壤的特殊性态,使其光谱反射率的第2主成分正交于土壤亮度和绿色。所以应提出土壤平面的概念,而不同植被的覆盖度则从该平面向外生长。因此,上述图4可理解为X-Y平面,而图5则为X-Z平面。由于我国的红壤广泛分布于南方十三个省区,因此在应用土壤光谱资料进行分析时应加以注意。这也是本文选择云南腾冲地区的土壤光谱为例的原因。

## 五、绿 度

用卫星遥感资料来研究绿色植物,受到土壤背景及其各种变化的影响,而绿度是有助于植被分析的,它是正交于土壤亮度的一个物理量。

图 6 显示了图 3 中各植被点 (主要是小麦) 的覆盖度与 MSS 四维空间中绿度的线性关系。

根据计算,其相关系数为 0.9968,回归方程为

$$y = -0.4611 + 2.7423x$$

式中  $y$  为覆盖度的回归值,  $x$  为绿度值。

由图 6 和计算结果可知,绿度与植被覆盖度间呈现极好的线性关系。但是,从图 3 中应看到,所有的土壤点均有一定的绿度值,从最小的 2.73 到最大的 8.42 个绿度单位。也就是说,在宁芜地区,即使是裸露土壤,还有可能被判读为具有 7—22% 的植被覆盖度。换言之,只有当植被覆盖度大于 25% 左右时,才有可能被识别。

从表 1 中可见,宁芜地区野外测试资料回归方程的剩余标准差还算是小的。计算表明,随着剩余标准差的增加,引起植被覆盖度的可判性的起点也就越高,有的要达到 30% 以上的覆盖度始可识别。

还应注意,在应用 Jackson 推演的方法计算亮度和绿度时,只需用 2 个土壤点和一个植被点,这就导致了亮度和绿度方程的多解性(其它计算方法也存在)。若把现在的回归直线视作平均土壤光谱线,那末用任意选择的二个土壤点作为计算点时,有可能产生四种极端情况,其中两种是上下交叉通过平均土壤光谱线;另两种是位于平均土壤光谱线的两侧,并有相当间距的平行线。无论那一种情况,都会使土壤光谱线的截距或斜率引起变化,使植被点到土壤光谱线的垂距变化,导致绿度值的变化。另一方面,计算表明,一旦选定两个土壤点后,用不同覆盖度的植被点来计算绿度系数,基本上是没有差异的。应注意,上述四种情况中,有一种情况是对植被分析有利的,特别是在低覆盖度时,即在图 3 中,选用平行于亮度轴,而又具最低绿度值的两个土壤点作土壤光谱线时,其植被覆盖度的最低识别线,可降至 10% 以下。

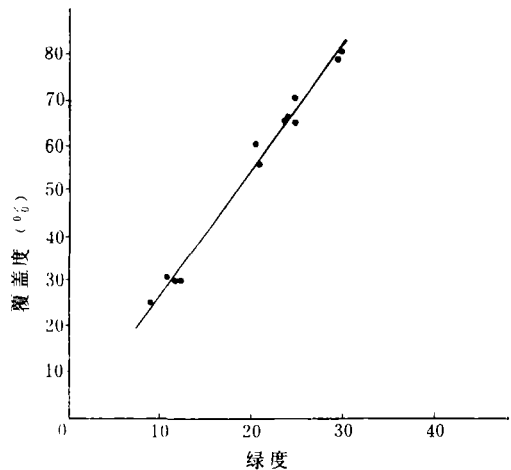


图 6 绿度与绿色植物覆盖率的关系

Fig. 6 Relationship between green canopy cover and greenness for wheat.

## 六、结 语

通过上述分析,可以认为:

1. 无论是二维或多维空间中,确有土壤光谱线存在,但不是严格的一条直线,而是有

适当宽度的带。

2. 企图用全国统一的一条土壤光谱线来作植被分析的方法是不可取的, 势必造成较大的误差。

3. 在高覆盖度地区, 可应用该地区的平均土壤光谱线作植被分析; 在低覆盖度区, 则最好选择光谱反射曲线较平缓, 5波段与 7 波段反射率的比值接近于 1 的土壤作为植被分析的基础。

4. 若采用不同土壤光谱线计算所得的绿度, 进行比较时, 应在所有的绿度数值中减去该地区裸露土壤的绿度。

5. 我国南方红壤区, 裸露土壤的绿度基数将会偏高。当采用主成份分析时, 尤应注意其第 2 主成份的物理意义。

6. 继续的研究, 应注意以下二点:

(1) 进一步测定各地区主要土壤类型的反射光谱, 以加强植被分析的土壤光谱“本底”调查。

(2) 随着遥感信息源的增加, 应进一步研究不同传感器和不同波段组合对植被分析的能力, 以获得最佳组合, 把波段数减到最少, 缩短计算机机时, 获得植被识别的满意效果。

### 参 考 文 献

- [1] Huete, A. R., et al., Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination, *Remote Sensing of Environment*, 15: 155—165, 1984.
- [2] Jackson, R. D., Spectral indices in n-space, *Remote Sensing of Environment*, 13: 409—421, 1983.
- [3] Huete, A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25: 295—310, 1988.
- [4] Pollock, R. B., et al., Estimating leaf-area index of wheat with Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 8: 307—312, 1979.
- [5] 彭德福, 农业资源光谱数据的分类识别, 全国农业遥感第一次学术交流会论文选辑, 农村实用工程技术杂志社出版, 138—149, 1985。
- [6] 中国科学院空间科学技术中心编, 中国地球资源光谱信息资料汇编, 能源出版社, 401—621, 1987。
- [7] 中国科学院数学研究所统计组编, 常用数理统计方法, 科学出版社, 116—118, 1979。
- [8] Kauth, R. J. and Thomas, G. S., The tasseled cap—A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, 41—51, 1976.
- [9] 徐彬彬, 应用光谱资料对土壤和土地利用进行数值分类, *土壤学报*, 18: 176—184, 1981。
- [10] 徐彬彬、季耿善, 宜于识别我国土壤的最佳波段组合, 中国地球资源光谱信息及其应用论文集, 能源出版社, 147—156, 1986。

## Research of China's Soil Spectral Line

Xu Binbin

(*Nanjing Institute of Soil Science, Academia Sinica*)

### Abstract

The analysis on soil spectral data obtained from the different area of our country shows that exists a soil spectral line in 2-dimension space or multidimension space, but it is not a strictly straight line, it is a belt with certain width. It is not suitable for vegetation analysis with a united soil spectral line in the whole country. The influence of different soil spectral line on plant canopy and greenness assessment was discussed. In addition, the results and physical significance of the principal component analysis on the soil spectral reflectance were described.

**Key words** Soil reflectance spectra greenness principal component analysis