

风化及其它类荒漠漆表面层 对高光谱分辨率遥感的影响(二)*

R. J. P. 莱昂(Lyon)

(斯坦福大学地质与环境科学系 美国加州, 斯坦福 94305~2115)

摘要 由地表风化产生的表面覆被层的矿物质, 其质地或与它的基岩矿物相似, 或十分不同, 虽然这类表面层的厚度仅有几微米到几毫米, 但它们却完全控制了地面的反射光谱。与此相似, 有些由风吹送的尘埃、胶结物或其它附着物在表面形成的外层也是影响遥感反射光谱的重要因素。这种由胶结物形成的表层往往是深色(甚至黑色)的, 因为它们通常出现在干旱区, 故常称为“荒漠漆(“desert varnish”)”。尽管这些暗色对我们的眼睛并无特别之处, 但这类表面层(通常为粘土)在短波红外区(SWIR)具有低反射率的吸收特征, 并能据此推断它们的矿物成分。因此, 为了要在遥感图象和地面的实际“地质状况”之间建立联系, 必须对裸露岩石表面特征具有良好的了解。由于不可能在野外总能找到“新鲜”的岩石表面, 因此, 人们必需能将“岩石内部”物质的光谱和它“上、下表面”的光谱区分开。

本文以西澳大利亚中部伊尔干地区(Yilgarn)为例, 研究了该地区深度风化的镁铁质、超基性岩和长英质岩石对光谱的影响。

关键词 光谱, 荒漠漆, 铁氧物质(LDK)

1 概述

1988年底和1989年初在西澳大利亚中南部 Leonora 矿区开展了大量的野外光谱测量以支持在该地区进行的航空扫描仪金矿勘查计划。

在500多个实地样品中, 半数(a)是通过网格采样法得到的, 另一半(b)是在 GEOSCAN MKII 型航空扫描仪图象上可能出现异常的地点采集的。全部样品在实验室中用 GERIRIS MKIV 光栅光谱仪在 0.50—2.50 μm 范围内进行了光谱测量^[1-3]。250个用网格样法采集的样品其上部表面几乎具有相同的光谱, 这可解释为是由于铁氧化物(L)与铝硅酸盐粘土(DK)的一种混合效应, 并在很大程度上与内部物质, 或者与露头下部的物质无关。第二组样品采自与航空扫描图象上“异常”相对应的地点。这种图象上的差异是因为特定的蚀变矿物所致。每一种蚀变物质均会给出不同的光谱。在许多点上, 岩石上部表面的光谱与岩石内部的光谱相一致。但总的来说, 岩石的外表层与它所附着的下

* 本文由斯坦福大学 R. 莱昂教授 1994 年供稿, 张良培译, 童庆禧校。

收稿日期: 1995 年 10 月 4 日; 收到修改稿日期 1996 年 4 月 2 日

部岩石在矿物成分上并不完全相同, 如在数公里范围内所采集的纯石英样品, 其表面覆盖着一层略带棕黄色的 LDK 表层。

2 研究区的地质特征

港湾之光 (Harbour Light), 绿香蕉 (Green Banana) 以及塔山 (Tower Hill) 露天矿的成矿是在一种富含镁质和超铁镁质火山凝灰岩和集块岩 (现含绿泥石、绿帘石和滑石一片岩矿物) 互层环境下形成的。与此同时在其偏东南部的格瓦里亚 (Gwalia) 矿的子矿则处于长英质、铝酸盐和红柱石 (现已风化成绢云母和高岭石) 的地质环境下^[4]。一条干河沟在 Leonora 镇北横穿矿脉并位于覆盖现在的港湾之光矿南部宽约 200m 的含铁土层 (由 FeO_x 沉积而成, 通常称为“红土”) 之中。

3 数据收集和取样方法

第一组“格网”方式采样以一条 2.7km 的东西线为基础, 从该线的东边 500m 处开始间隔为 100m, 一直延续到矿区。对样品的光谱分析表明: 几乎所有的网格格式样品均具有相同的光谱。在第二组采样过程中遥感图象被用来控制采样的位置, 其范围仅限于在

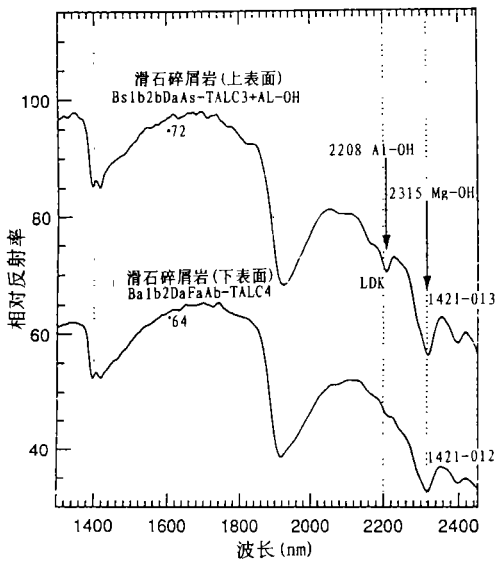


图1 单样品上、下表面的光谱

注: 上表面在 2.208μm 处显示了明显的 LDK 的反射特征值, 而下面则很弱或没有。“Bs1b2bDa”等是使用模式识别(专家系统)对硅酸盐光谱所进行的编码^[9]

Fig.1 Spectra of the top-versus bottom-side of a single specimen

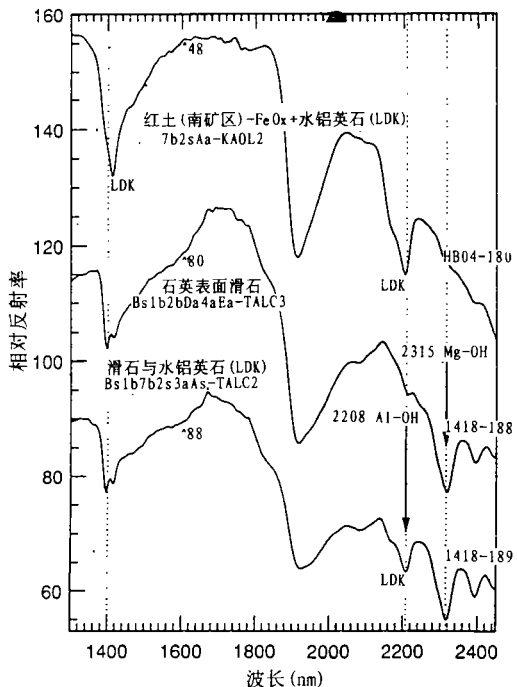


图2 几种岩矿的光谱。

注: 典型红土 LDK 型光谱(上), 同一地点 2m² 具有沙漠漆的露头岩石样品光谱(中), 以及“纯”滑石光谱(下)。

Fig.2 Spectra of some rocks and minerals

有可能通过航空扫描数据检测出矿化差异的地区。

第一组的 250 个“网格”样品显示出的光谱特征，既可能是由风吹尘埃(如很薄的表面覆被层)、也可能是“土壤”所造成的，这两者都表现为均匀的褐铁矿和退化的高岭石(LDK)光谱。第二组 250 个“扫描异常”点的样品从光谱和矿物学方面均不同于 LDK，而与其基岩相一致。对第一组样品数据的分析发现，其上表面虽是 LDK 光谱，而其下部仍显示出其母岩的光谱(图 1)。十分清楚，该地区在长期的风化作用下，LDK 物质逐渐“胶结”到上部岩石表面上，形成一种荒漠漆。由于下部岩石矿物(即滑石、绢云母、绿帘石)具有强光谱反差，因此，“透过”LDK 层仍可以发现那些表示这些矿物特征的短波红外光谱(SWIR)特征(图 2)。有时 LDK 和岩矿物质的光谱峰(尤其是滑石)都可能在野外测量的光谱数据中出现。

4 风化和荒漠漆

风化及其相关联的荒漠漆产物在很大程度上改变了表面矿物学特征。晚古生代以来，长期的强风化作用以及通过对岩石硅酸盐的淋滤，生成了一种“真正”的高岭土。通常这是土壤的主要部分。其它露头地区在老表面之上形成了一层 1—2m 厚含粘土的红土层。大多数的近表面层(几厘米厚)是由精细的风吹粉沙尘所组成，它对“土壤”层提供了一种 Al 硅酸盐的特征。层状红土的光谱展现了一种由“退化的高岭石”(或水铝英石)和 FeOx 型“褐铁矿”的组合。它们不是针铁矿或赤铁矿，从而在 $0.9\mu\text{m}$ (不在 0.68 或 $0.96\mu\text{m}$) 处具有近红外(NIR)反射率的极小值，而在 $0.65\mu\text{m}$ 附近也没有吸收。

5 分 析

5.1 表面物质——红土

港湾之光矿发育在一个具有石英斑岩(现在为石英—绢云母—片岩)为底板的西部系列滑石和绿泥石片岩互层的条件下。上覆的红土层在不同部位具有不同的厚度，其最厚处位于主干河沟河床上。在矿区的许多地方，一些废石坑所表现出的光谱与红土有很大不同。这种现象可以解释为：(1) 表面土壤被挖去(留作填埋废坑之用)；(2) 矿石的氧化或硫化物；(3) 废料的影响；(4) 外来的材料，如用作建筑，制作混凝土用的沙堆。

在矿区的东面显示了一条主要为 NE—SW 走向的干河沟，上面有一由大约 3—4m 高的稀疏合欢树(*Acacia aneura*)等组成的林带。这条干河沟穿过红土层并填满了各种成分沙子。干河沟的北部和南部都是称为“风棱石”的平原。这是一种特殊的由风的作用而形成的一个非常平坦的表面，通常被约 1—5cm 大小的小石子(多为石英)所覆盖。这些砾石表面无例外地镀上一层薄薄的黄棕色铁氧化物表皮(LDK)，使其产生一种暗淡的金色。这些石英质砾石占平地面积的 5—80% 之间。此外还有一些体积更小的“铁石”，其大小约为 0.1—1.0cm 之间。它们呈黑色，非磁性，并大体上具有球形外表，但表面光滑，覆盖了表层的 1—5%。其余的大部分表面为细粒粉沙物质，呈

红褐色与部分“狐红”色。所有这些表面物质均表现出 LDK 光谱。这些具有类似表面覆盖层的几种不同物质对于我们进行多光谱扫描图象的研究是十分有益的。

5.2 土壤剖面及其位置

在某些地点，道路深切红土层之中，沿路面显露出了土壤上层的水平结构。而那些排水沟常常比道路更深地切入红土层中，显露出了基岩上部的片岩碎片，还常常伴随显露出重新胶结的“钙质土”。

根据对土壤剖面的分析显示了3个主要的分层情况：

上部 A 层为风棱石物质的“残留物”[由石英、片岩碎屑和铁石所组成]。中部 B 层为带有大量气泡的干粉沙层[称为“多孔层”5—10cm 厚^[6]]，本层中无片岩碎屑。下部 C 层为潮湿的残积土(真土壤)，5—20cm 厚，富含石膏并含有许多定向排列的片岩碎屑，向下 80m 为露头岩石的上层。

在 B 和 C 层之间有一红土层，它非常坚硬，在大范围内富含铁氧化物，其厚度至少达 1—5m。红土层的底端逐渐延伸到片岩碎屑中并常伴有重新胶结的钙质上。

B 层中含有球形和扁长形的气泡空洞，它们近水平呈层状排列，球形大小约为 1—2mm，扁长体呈“花生”状约为 1—2mm。上述 3 个层位的排列与美国内华达西部 (Yerington) 和南加利福尼亚 (Mojave) 称为“沙盖层”(相当于澳大利亚“残积层”) 的十分相似。在美国这两个地区“B”层的颜色明显不同，其中灰色调与略带红色的 A 层和 C 层形成明显对比。这是因为 B 层不含氧化铁而 A 和 C 层却含有与荒漠风化所伴生的氧化铁物质。从理论上，无论是美国和澳大利亚“B”层均是由风吹来粉沙粒大小的尘埃聚集而成的，在致密的粉沙中滞留的空气经暴雨的作用而形成空洞。这种气泡状空洞至少占了“B”层的 25%。

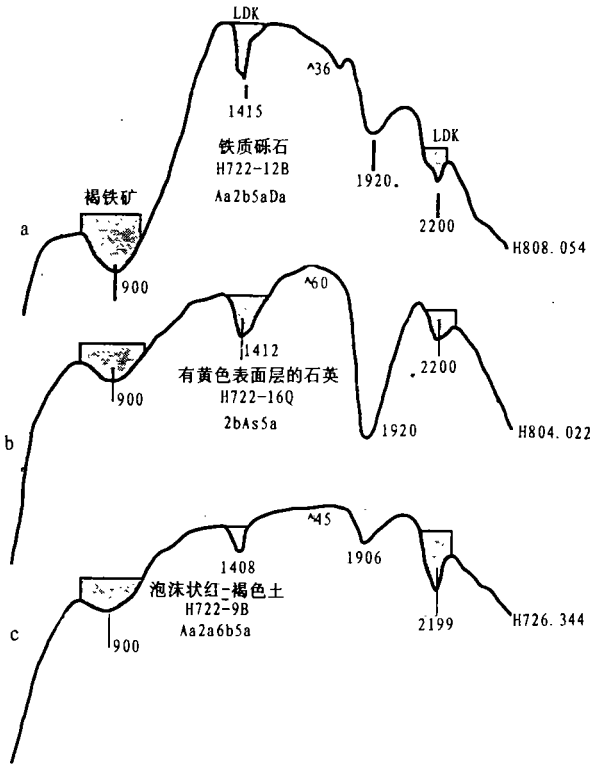


图3 风棱石平原表面的短波红外(SWIR)光谱

注：(a) 为富铁质砾石；(b) 为石英的黄色表面层；

(c) 为红—褐色泡沫状粉沙土。

3组光谱的相似性特别表现为 OH 链在

2.20 μ m 的 LDK 吸收效果。

Fig.3 SWIR spectra for the 3 components of the Gibber-plain surface

图 3 显示了“风棱石平原”表面中 3 种成分的 SWIR 光谱。它们都显示了非常类似的 LDK 型硅酸盐特征，它们非常接近于相邻的红土层露头 and 港湾之光矿南部的红土覆盖层(图 2 上)。由于 LDK 外层的存在，在航空扫描仪数据中仅有的 8 个 SWIR 波段是不可能将上述矿区(图 2 上)和图 3 所示地区的实际岩石矿物完全区分开的。与此相反，图 2 中、下和 2 上、中的滑石光谱“非常强”，能够透过 LDK 外层反映出来，因而这些特征光谱是“透明的”。

图 4 表现了 Leonora 水泥厂地区沙丘这一“外来表面材料”之一的完整光谱。可以看出，它在 1.412 和 2.199 μm 两个波段表现了极为明显的 LDK 型光谱并与“褐铁矿”在 0.90 μm 处的低值形成强烈的对比。这两个吸收峰具有明显的“左对称”性^[5]。这正是“结晶不好”的高岭石或者是水铝石英的典型特征^[7,8]。经过用“盐酸”(HCl)进行 24 小时淋滤之后，沙土完全被漂成了淡稻草黄色。图 4b 中的光谱表明，在大部分铁氧化物的光谱(0.9 μm 附近)被消除以后 LDK 表层仍然在石英沙粒的表面显示出来(以 Al-OH 在 2.200 μm 处的吸收所表现)。

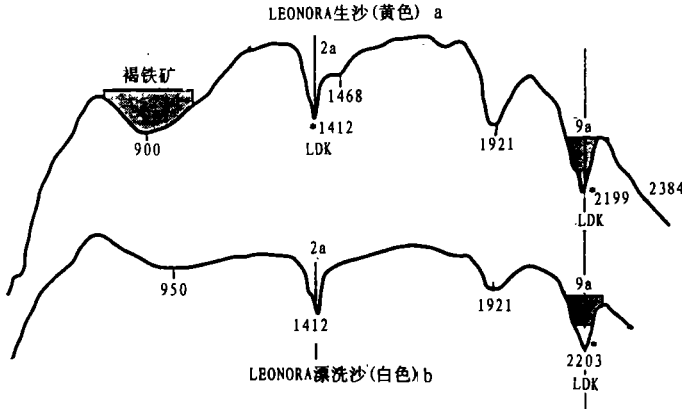


图 4 具有典型 LDK 光谱的外来石英沙丘物质的 SWIR 光谱

注：(a) 略带黄色的红色原始物质的光谱；(b) 将沙石用 2 mol / L HCl 进行 24 小时沥滤后展现的光谱。

FeO_x 矿物质已基本消除，而样品则形成干草色。

Fig.4 SWIR spectra for the exotic quartz sand dune material, showing a typical LDK spectrum.

6 表面层 —— 物理和化学性质

图 5A — F 包含了这些荒漠漆外层的物理、化学性质的重要信息。Leonora 水泥厂地区的大“沙丘”直接由航空扫描仪成象。它们在图象中的任何部位均表现为明亮的高岭石异常特征。研究表明：这种物质主要是沙粒大小的石英和大约 5% 的更小的石膏颗粒(有可能来自附近的盐湖)与更少量的亚微米级铁石(FeO_x) 所组成。据悉，这些材料为

沙丘沙, 它们取自 Menzies 以南 130km 处 Kalgoorlie—Leonora 主高速路附近的大型 NE—SW 走向的沙丘。

6.1 物理性质

图 5A—D 是这些沙石的扫描电镜(SEM)图象, 图 5A 和图 5C 是原始生沙的图象, 而图 5B、5D 是用 HCl 沥滤 24 小时后的沙石图象。(这些 SEM 图象可与它们在图 4 中的红外光谱进行比较)。对我们研究最重要的是那些附着在每一个沙粒表面的很小(亚微米)、亮色调的碎屑。理论上认为: 这就是在 SWIR 光谱中可以识别的 LDK 粘土材料。在沥滤后(图 5D), 表面更光滑, 但仍有一些 LDK 粘土粘附在表面上。在 FeO_x 被漂去后, 沙的颜色明显地变亮, 这从它们在 $0.90\mu\text{m}$ 附近的红外光谱形状可以得到证实。

6.2 化学性质

图 5E 和 5F 为沙粒固结后抛光面的“后向散射电子显微镜(BSE)图片, 其中物质的灰度等级与所观察元素原子序数有关(Si, 14; Al, 13; Fe, 26), 平均原子序数愈大, 其亮度也愈高。图中小片较亮白色区可能是叠加于中灰色调表面覆被层物质(LDK)的铁石(FeO_x)颗粒(2), 而这种覆被层物质系由 FeO_x (褐铁矿)和退化高岭石粘土紧密混合而成。这种表皮为多孔质地并有不同厚度。沙粒的环氧塑脂固结材料为暗黑色(3), 而沙粒(1), (主要为纯 Si)则呈亮灰色。图 5E 为原沙, 而图 5F 为经酸漂洗后的沙。

我们对硅、铝和铁进行的分析表明: 沙粒内部主要由 Si 组成, 同时含有很少的 Al 和 Fe。但外层的情况则相反, 在荒漠漆中发现有很高的 Al 和 Fe 含量, 并在铝—硅粘土与 FeO_x 物质的混合物中也有相当数量的 Si, 这再一次证实了 LDK 概念的正确性。

6.3 荒漠漆的其它研究——西澳大利亚佩斯及埃及

作者对西澳佩斯(Perth)海岸地区土壤物质的颗粒状表面覆被层进行的研究表明在佩斯土壤腐质层之下的“黄沙”(或称“砖沙”)通常具有一层由富含铁的氧化物物质组成的表面覆被层, 它们还有较弱的阳离子交换能力, 而且这种“铁”质能够被植被和小草从黄沙中汲取。此外, 对从埃及采集的表面有中至重度荒漠漆覆被的 5 个长英质花岗岩样品的研究也发现, 这种荒漠漆表面的光谱与绢云母的光谱类似。而岩石内部的光谱只有一个样品具有绢云母特性, 其余的均只表现出蒙脱石的光谱。这就表明, 在埃及研究区“荒漠漆”表面层是由绢云母胶结而成, 而西澳大利亚依尔干(Yilgarn)地区无序的高岭土(LDK)外层和美国西南部沙漠其荒漠漆表面则由蒙脱石所组成^[6]。

7 结 论

本研究目的是试图解释为什么在以 Leonora 城为中心 20km^2 范围超过 75% 的地区无论是航空成象光谱还是地面按网格采样光谱都具有相同的红外光谱(LDK)特征。

1. 这些表面物质可能有两种来源: 其一附着于岩石表面上由风吹来的泥沙; 其二

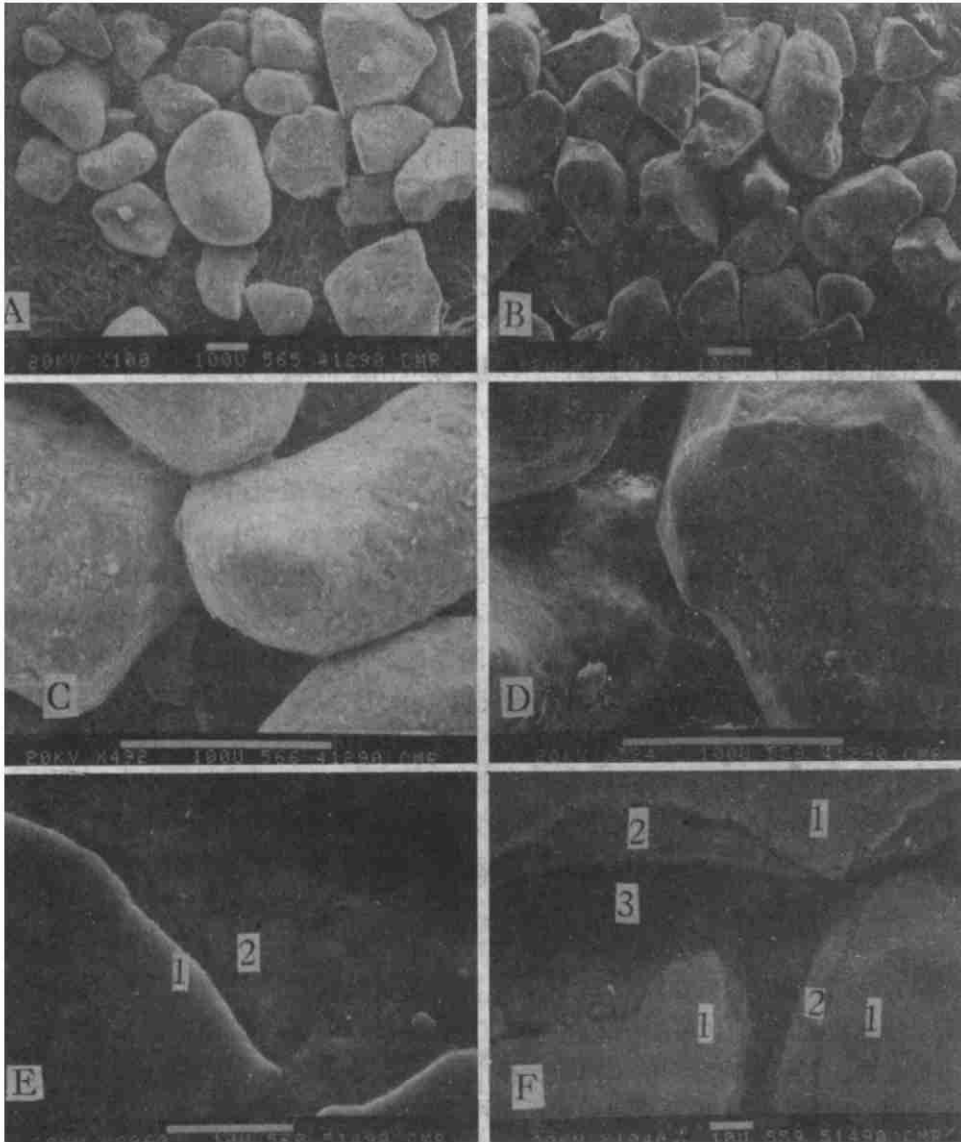


图 5 A—D 为 Leonora 水泥厂用沙的扫描电子显微图象照片;

E—F 为沙的内部抛光面向散射电子显微照片

注: 图中 A—D 白色标尺为 $100\mu\text{m}$, A, 生沙 $\times 100$; B, 用 HCl 过滤后的沙 $\times 100$;

C, 生沙 $\times 500$; D, HCl 过滤沙 $\times 500$. E—F 中 1 为亮灰色石英(SiO_2)颗粒; 2 为具有微米级 FeO 微粒的中灰色、多孔质 LDK 表面层, 3 为黑色环氧树脂固定剂。

Fig.5 A—D These four views are Scanning Electron Micrographs (SEM) of the Leonora Concrete Plant sand; E—F These lower two views are Back Scattered Electron (BSE) Micrographs of polished mounts of the sands, as used for Electron Dispersed X-ray (EDX) analysis of the interiors of the sands

覆盖并粘着于表面的 LDK 物质。

2. 只有那些在 SWIR 光谱区具有很强的吸收特性的岩石矿物(如含有滑石、绢云母等矿物的岩石), 与 LDK 表面层相比, 无论是航空还是地面光谱均有可能表现出其岩石的“真实”特性。

3. 在化学上, 这些 LDK 荒漠漆表皮富有 Al—Si(也有一些铁), 与铁氧化物铝—硅成分一样也可从它们红外光谱推演出来。LDK 表皮往往出现在石英颗粒表面上。

4. 在依尔干岩块西缘的约克(York Leonora 西南 400km)和金树林(Golden Grove 在 Leonora 以西 300km)地区也发现了类似的 LDK 表面层光谱特征。由 C. Butt 提供的依尔干岩块以西亚兰比和加宾(Yallanbee, Gabbin)地区及其以东阿格纽和马维尔·洛奇(Agnew, Marvel Loch)地区的其它“铝—硅砾岩”样品全部都表现出 LDK 光谱。这种覆被层效应有可能遍及到全省, 但覆被层的物质可能严格按风成尘埃的矿物成分而在区域上有所变化。

5. 在靠近大林断裂带(Darling Fault)(依尔干岩块最西部)南北 100km 范围内的波丁顿、贾拉达尔以及唐尼布鲁克(Boddington, Jarrahdale, Donneybrook)所采集的红土(“砖红壤”)样品, 在其表面样品的光谱中未表现出 LDK 光谱特征, 但是清晰地显示了针铁矿和三水铝矿的光谱。上述两种物质的出现可从几位作者的研究中得到进一步的证实^[9, 10]。这两种物质的形成可能是大林山脉(Darling Range)在地质上近期抬升 200—300m 造成淋溶作用加剧的结果。

参 考 文 献

- [1] Lyon, R. J. P. Effects of weathering, desert-varnish, etc., on spectral signatures of mafic, ultramafic and felsic rocks, Leonora, West Australia. In Remote Sensing Science for the Nineties—IGARSS 90, Proceedings. 1989 III. 1719—1722.
- [2] Lyon, R. J. P., F. R. Honey. Relating ground mineralogy via spectral signatures to 18-channel airborne imagery obtained with the Geoscan MK II Advanced Multispectral Scanner: A 1989 case history from the Leonora. Western Australia gold district. Proc. Seventh Thematic Conf. Rem. Sens for Explor. Geol., Calgary, Alberta, Canada 1989 Oct 2—6, 331—348.
- [3] Lyon, R. J. P., F. R. Honey. Direct mineral identification (DMI) with Geoscan Mk II Advanced Multi-spectral Scanner (AMSS), Proc SPIE Conf. on “Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment.,” Orlando, FA, 1990, April 16—17.
- [4] Hallberg, J. A. Geology and mineral deposits of the Leonora-Laverton area, northeastern Yilgarn Block, Western Australia. Hesperian Press, Victoria Park, Western Australia, 1985, 139.
- [5] Lyon, R. J. P., Zhu Hua. Spectral band shapes as criteria for mineral discrimination in field spectroscopy. Proc. Seventh Thematic conf. Rem. Sens for Explor. Geol., Calgary, Alberta, Canada 1989 Oct 2—6, 411—423.
- [6] Springer, M. E. 1958 Desert pavement and vesicular layer of some desert soils in the desert of the Lahontan Basin. Nevada. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 1958, 22, 63—66.
- [7] Butt, C. R. M. Aluminosilicate cementation of saprolites, grits and silcretes in Western Australia. Jour. Geol. Soc. Aust. 1983, 30, 179—186.
- [8] Butt, C. R. M. 1985 Granite weathering and silcrete formation on the Yilgarn Block, Western Australia, Aust. Jour. Earth Sciences, 32, 1985, 415—432.
- [9] Monti, R. The Boddington lateritic gold deposit. Western Australia: A product of supergene enrichment processes. Publ. 11, Geology Department & University Extension, Nedlands, Western Australia, 1989,

355—368

- [10] Sadlier, S. B., Cilkes, R. J. Development of bauxite in relation to parent material near Jarrahdale. Western Australia. Jour. Geol. Soc. Aust., 1976, 23: 333—344.

作 者 简 介

R. J. P. 莱昂(Lyon), 男, 1928年生, 毕业于西澳大学地质系, 教授。1954年获美国伯克利加州大学矿产与构造地质学博士; 1963—1965年在美国宇航局阿默斯研究中心从事博士后研究; 1965年执教于美国斯坦福大学; 1972年起任教授。曾任美国应用地球科学接纳委员会和奖励委员会委员, 国际地质对比计划遥感光谱特征工作组委员, 现任国际《环境遥感》编委, 国际地质遥感专题会议执行委员会成员。

The Effects of Weathering and Other Varnish-like Coatings on High Spectral Resolution Airborne Imagery (Part two)

R. J. P. Lyon

(Dept. of Geological & Environmental Sciences Stanford University, Stanford, CA, 9405-2115, USA)

Abstract Surface weathering produces coatings of mineral materials which may be similar to, or quite different from, the minerals of the underlying parent rock. These coatings are usually only microns to millimeters in thickness, but they completely control the reflectance spectra of the terrain. In a similar way coatings formed from adherence of wind-borne dusts, cemented or not, will also dominate the reflectance spectra as seen in remotely sensed imagery. Cemented coatings are often dark-colored (even black) and are usually termed “desert varnish” from their common occurrence in arid regions. Despite their featureless, dark color to our eyes, these coatings (often clays), show characteristic reflectance minima in the short-wave infrared (SWIR) regions, by which their mineralogical composition can be deduced. Thus to relate remotely sensed imagery to actual ground “geology” requires a good knowledge of the surficial character of the exposed rock outcrops. It is not always possible to find “fresh” surfaces in the field, and one must always differentiate “upper-surface” spectra (and also “lower-surface” spectra) from the spectra of the “inner rock” materials.

This paper describes the spectral effects in deeply-weathered Mafic, Ultrabasic, and Felsic Rocks in arid terrains of the central Western Australia.

Key words Spectra, Desert varnish, Iron-oxide-bearing material(LDK)