


矿山地质环境灾害调查监测评估预防与矿山
土地复垦及地质环境治理项目质量验收
检查评价手册





本手册不单独定价销售，随光盘附赠

X322
W-519
2

主编 王 敏

第

二

卷

数字图书馆
PDG

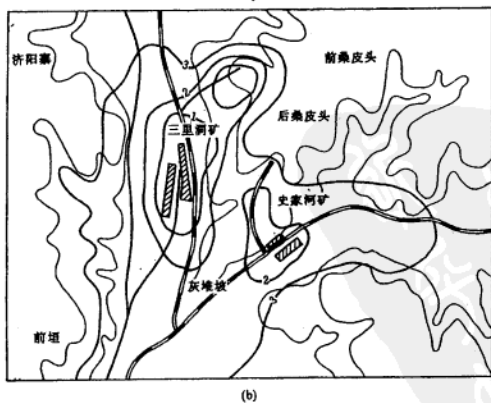
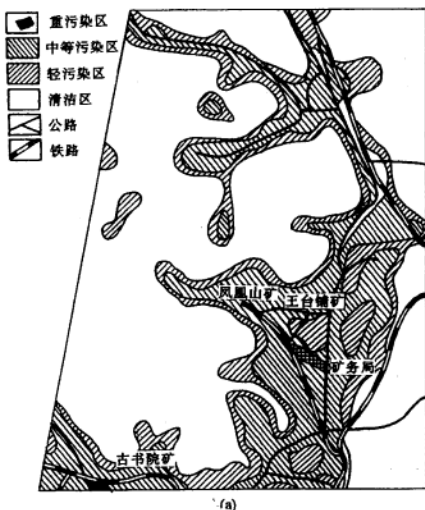


图 3-4-7 矿区大气污染状况遥感分析图
(a) 分区晕线表示; (b) 等值线表示

(一) 热污染的卫星遥感测定

目前, 卫星热红外遥感所使用的常用信息源主要有 NOAA 气象卫星 AVHRR 的第四通道 (10.5 ~ 11.3 μm)、第五通道 (11.5 ~ 12.5 μm) 和陆地卫星 TM 的第六波段 (10.4 ~ 12.5 μm)。由于 TM6 的影像分辨率为 120m, 远高于 NOAA 卫星, 且图像近似正射, 大气程差较均匀, 数据可比性强, 对于研究热场的景观结构更为有效, 因此, 利用 TM6 图像资料来研究矿区热场分布及热污染强度。

1. 图像预处理

(1) 几何纠正与配准。

TM6 图像已经过几何粗纠正, 纠正了地球自转、卫星姿态不稳定、传感器非线性响应、大气传输影响等产生的图像几何畸变, 但为了能与地图精确配准, 还需要进行几何精纠正。几何精纠正采用 TM6 与矿区 1:5 万地形图配准的方法进行。地面控制点 (GDP) 可从图像和地形图中选取道路、河流交叉口等明显、易识别地物点, 采用多项式纠正。控制点选取个数视选用校正数学模型而定, 由于热图像中可选的控制点有限, 因而校正数学模型不宜复杂, 拟合误差控制在小于 1 个像元水平。

(2) 噪声的剔除。

尽量选取无云层覆盖影像, 但受研究时段的限制, 有时图像虽然无大面积云层覆盖, 但亦有许多细小云斑, 因而需对这些云斑及其云影进行剔除。局部区域内图像特征的差异, 在图像上表现为不连续性 (如灰度级跳及纹理突变等), 采用梯度检测方法对影像进行去噪。首先是对图像进行梯度运算, 然后对梯度值进行门限化处理, 突出梯度边缘, 然后将噪声腐蚀、置零, 最后对图像进行平滑处理, 用周围值充填噪声剔除区域。具体梯度检测步骤如下:

步骤 1: 图像微分。图像函数 $f(x, y)$ 在图像坐标位置 (x, y) 处的梯度定义为: 在高散数字图像中, 对任意像元 (i, j) 处的梯度的计算方法是采用对该像元的 3×3 邻域进行差分:

$$G[f(x, y)] = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right] \quad (3-4-10)$$

式中, 各下标为相应的像元位置; c 为常数, 当 $c=2$ 时, 上式为 Sobel 检测算子; 当 $c=3$ 时, 为 Sethi 检测算子。

在云斑梯度计算中应用 Sobel 算子, 在云影计算中应用 Sethi 算子, 因为 Sethi 算子对边缘方向角输出的影响有明显改善。

步骤二: 梯度边缘矢量化。选取适当的门限, 滤出梯度高的图像, 然后将其矢量化。

步骤三: 矢量栅格转换, 剔除噪声。梯度边缘形成矢量多边形, 进行栅格化将其置零, 然后和原始图像进行叠合。

步骤四：平滑处理。对叠合后的图像进行平滑处理，充填噪声剔除区域。经过这四个步骤处理后，可以分别滤出图像上的云斑和云影。

2. 亮温标定

TM6 图像记录的是矿区下垫面地物的辐射温度（实测为亮温），这种辐射温度是将地物视为黑体，未经大气校正，以像元为单位的平均地面辐射温度。用这种辐射温度表征区域温度场称之为“区域亮温热场”。由于矿区范围有限，可认为矿区水汽状况基本一致，因而可直接用亮温表征矿区地面热场。

利用 TM6 热红外亮温计算模式，可得到 TM6 图像亮度值和下垫面亮温的定量关系。

首先，由式（3-4-12）将 TM6 像元亮度值转换成绝对辐射亮度值：

$$R_{TM6} = \frac{DN}{255 (R_{max} - R_{min})} + R_{min} \quad (3-4-12)$$

式中， $R_{max} = 1.896 (mW \cdot cm^{-2} \cdot sr)$ ； $R_{min} = 0.1534 (mW \cdot cm^{-2} \cdot sr)$ ；DN 为 TM6 图像像元亮度值； R_{TM6} 为绝对辐射亮度值 ($mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$)。

而单位光谱范围的辐射亮度值等于绝对辐射亮度值与其有效光谱范围之比：

$$R_b = \frac{R_{TM6}}{b} \quad (3-4-13)$$

式中， R_b 为单位辐射亮度值 ($mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)； b 为有效光谱范围 (μm)。

有效光谱范围以使传感器反应 > 50% 的部分计，取 $b = 1.239 (\mu m)$ 。单位辐射亮度值 R_b 与绝对亮温 T 的关系可由式 3-4-14 给出：

$$T = \frac{K_1}{\ln (K_2/R_b + 1)} \quad (3-4-14)$$

式中， T 为绝对亮温 (K)； $K_1 = 1260.56K$ ； $K_2 = 60.766 (mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$ 。

由式（3-4-14）所得出的 T 值为绝对温度，为了便于研究，可将其转化为摄氏温度。对 TM6 图像的每个像元所对应的地面辐射亮温进行计算，就得到了矿区瞬时地面热场及热污染源的分布状况。

（二）热污染的航空热红外遥感测定

由于卫星遥感图像 TM6 的地面分辨率较粗 ($120m \times 120m$)，掩盖了矿区地面热场的细节；同时，TM6 图像的获取受卫星运行周期和轨道的限制，不能获得任意时间段的图像。这些因素对矿区地面热污染的详细情况的研究十分不利。而航空热红外遥感则弥补了卫星遥感的以上不足。

对于某一季节的矿区地面热污染研究，航空热红外扫描飞行一般进行两个时段，即地物受太阳热辐射影响最强的中午（日航）和最弱的凌晨（夜航）。与航空热红外扫描

飞行同步地进行地面辐射温度、干湿气温的测量。由于航空热红外扫描仪用胶片作为记录地面热辐射能量的载体，因此需要对胶片进行一系列处理，才能获得地面热场和热污染信息。

1. 航空热红外扫描胶片的量化处理

为了对反映地物辐射能量大小的模拟胶片作数字处理，必须作模/数转换的扫描数字化处理，它包括采样和量化两项内容。采样是把原扫描胶片按一定的分辨率（如 250 DPI）进行离散抽样转化成一串的像元点；量化是把胶片记录的辐射能量的模拟亮度值按其大小量化为 256 级。从而将热红外扫描胶片数字化成热红外数字图像，并将数字图像按大小为 2048×1024 像元，记录密度为 1600 PBI 的记录格式分块记录在 CCT 数字磁带上。计算公式如下：

$$I = \text{INT} \left[(W_A - W_{\min}) \times \frac{256}{W_{\max} - W_{\min}} \right] \quad (3-4-15)$$

式中：I 为采样量化后的像元亮度值；INT 表示取整函数； W_A 为胶片上某点的密度值； W_{\max} 、 W_{\min} 为胶片上的最大和最小密度值。

2. 热红外图像与彩红外图像的匹配处理

航空热红外扫描图像存在着严重的几何畸变，必须将图像上的地物恢复、纠正到真实的空间位置。一般方法是从大、中比例尺的地形图上选取易分辨、易定位、均匀分布的地面控制点，每幅图像的控制点数在十个以上，然后采用多项式进行坐标变换和双线性插值法重采样。

为了将热红外图像和彩色红外图像进行相关分析，以进一步揭示矿山大气污染机理和综合影响因素，可将两种图像信息相匹配处理。其数字图像处理过程如图 3-4-8 所示。

这时，对热红外扫描图像的纠正不是以地形图作为纠正后的坐标参考系，而是以彩红外图像作为其坐标参考系。即把热红外扫描图像纠正至彩红外扫描图像所表达的几何关系上。此时，热红外波段与彩红外的三个波段组合在一起构成新的“多波段图像”。

3. 热场分类与温度量测

因为航空热红外扫描仪没有内定标装置，则扫描胶片上所记录的密度与地面温度场之间的关系不能定量表达。因此，在热红外扫描胶片数字化后，应将像元的亮度值与地面辐射温度同步测量数据建立相关关系。

在进行地面辐射温度同步测量时充分考虑矿区下垫面的特点，分别选定裸土、沥青路面、混凝土路面、房顶、煤堆、矸石山、水体、耕地和植被作为测量目标，每种不同类型地物测量 3~5 点，对近 40 个测温点所测辐射温度与图像上量测得到的这些测温点所处像元的亮度值进行线性回归分析，可得：

$$\begin{cases} t_{\text{H}} = 5.952 + 0.1004G & r = 0.827 \\ t_{\text{K}} = -9.825 + 0.0667G & r = 0.875 \end{cases} \quad (3-4-16)$$

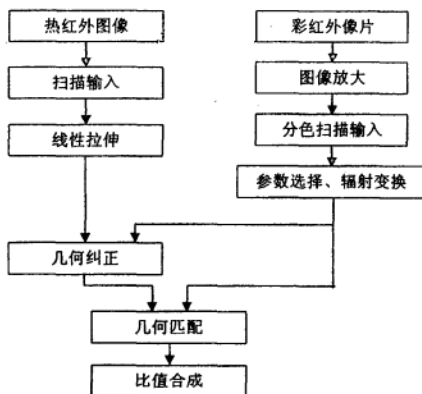


图 3-4-8 数字图像处理过程框图

式中, $t_{\text{日}}$ 、 $t_{\text{夜}}$ 分别表示与日航、夜航同步的地面辐射温度值 ($^{\circ}\text{C}$); G 为图像上对应的像元亮度值; r 为相关系数。

依据图像上像元亮度值的大小, 将热红外扫描图像采用密度分割技术予以分类。根据像元亮度值的不同分成 7 级, 每级用不同颜色表示, 则不同颜色表示不同的温度, 其对应关系见表 3-4-2。

表 3-4-2 热红外图像亮度值的分级及其与地面辐射温度的关系

时相	分级与对应颜色	1 (紫色)	2 (紫色)	3 (紫色)	4 (紫色)	5 (紫色)	6 (紫色)	7 (紫色)
日航	亮度值范围	255~180	180~160	160~140	140~120	120~100	100~80	80~0
	温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	>24	24~22	22~20	20~18	18~16	16~14	<14
夜航	亮度值范围	255~205	205~175	175~145	145~115	115~85	85~55	55~0
	温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	>4	4~2	2~0	0~-2	-2~-4	-4~-6	<-6

经分类得出的温度值是地物的辐射温度, 它与地物的真实温度 t_b 之间存在着 $t_b = \epsilon^{\frac{1}{4}} \cdot t$ 的关系。因矿区下垫面的各种地物发射率 ϵ 的平均值接近于 1, 则可认为 $t_b \approx t$, 即直接将辐射温度当作地物的真实温度。

根据 TM6 图像和航空热红外扫描的图像处理结果, 可分别编绘出矿区中午和凌晨

时的地面热场强度图，见图 3-4-9。

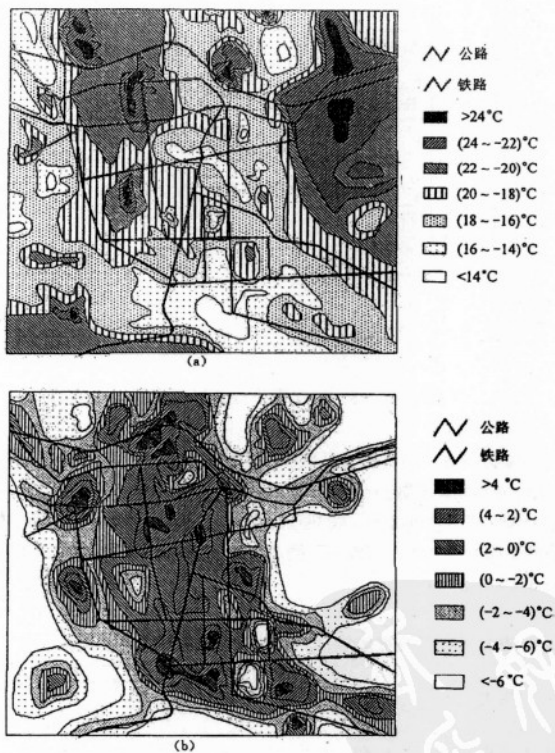


图 3-4-9 某矿区冬季地面热场强度分布图

(a) 日航地面热场; (b) 夜航地面热场

(三) 地面热场分析及其对大气污染的影响

根据 TM6 图像处理结果所绘制的地面热场强度图、土地利用现状图以及热源的分
布等资料，可进行地面热场分析，找出其中的变化规律，明确热污染或热岛现象的缘
由以及地面热场与大气污染的关系。

该矿区每日排放的大量大气污染物，主要来源于煤矿的粉尘，运煤及其他车辆排放的尾气，煤加工业和其他工业排出的废气和生活废气。根据与地面热场遥感调查同步进行的大气污染物取样化验结果，位于矿区中心的大气污染物 NO_x 、 SO_2 和 TSP（降尘）浓度，清晨比中午分别高 2 倍、1.5 倍和 0.5 倍。

一个地区的大气污染程度与污染源所排出的污染物总量有关，但污染程度的时空分布又受到气象等条件的控制。地面热场的存在改变了低空气温场，从而形成区域“热岛”现象，热岛的动力效应能够增强夜间对流性的环流，产生区域的锋面逆温，阻碍大气污染物的扩散。

某一局部区域的气温往往是一定范围内不同类型下垫面的综合，而航空热红外扫描图像上每一个像元点正是记录了一定范围内不同下垫面总的辐射能量的平均值。为了寻找低空气温场与地面辐射温度场之间的关系，在进行地面辐射温度测量的同时，用干湿温度计进行低空（离地面 1.5m）气温测量。对测得的近 40 个点的两个时段数据进行回归分析，经统计检验均呈显著相关（图 3-4-10）。

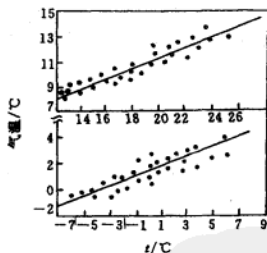


图 3-4-10 地面辐射温度与低空气温关系

清晨: $Y = 1.357 + 0.367t$, $R = 0.7892$; 中午: $Y = 3.624 + 0.382t$, $R = 0.8234$

因此可以认为，低空气温与地面辐射温度之间存在着线性对应的关系。则低空气温场与地面辐射温度场具有相同的形态。

从凌晨和中午的地面辐射温度场分布图可看出，矿区热岛效应凌晨比中午更加明显。因此凌晨的大气热力环流比中午强，所形成的锋面逆温也强，使得凌晨大气污染物比中午更不利于扩散，清晨各主要污染物浓度较中午大。特别是煤矿储煤场和排矸场，本身就是一个大的污染源，白天受太阳辐射影响，煤堆热辐射能力增强，中午时（13:30~14:30左右）达到最大，达 36°C 以上。即使是在凌晨，煤堆自身的热辐射温度也超过 5°C ，形成明显的地面热场中心，不利于大气污染物的扩散。

我们的研究成果表明，卫星和航空热红外遥感图像及适量的地面实测数据，是研究工矿区地面热场可靠而有效的信息源。它克服了常规方法采样点少、代表性差的缺陷；

它对阐明环境及其对大气污染的影响有普遍意义。

六、矿区地表塌陷的遥感研究

地下煤炭资源的大规模开采，破坏了上覆岩层的稳定性，从而破碎、垮落，导致地表的下沉、塌陷。这些地表塌陷造成大面积土地资源的破坏，在高潜水位地区甚至出现大量积水，导致区域生态环境的变化。因此，对煤矿塌陷区因地制宜进行复垦、治理，对恢复被破坏的土地资源，维护区域的生态环境有重要意义。为此，需要掌握塌陷地随开采活动的扩展规律，塌陷区面积、破坏程度，积水区范围和深度，水污染状况等数据资料。采用常规的技术手段，如地形测量是难以胜任的，特别是对于积水塌陷区来说更是如此。遥感图像则能快速、周期性地提供塌陷区的大量有关信息，为矿区土地复垦工程服务。

对于地表塌陷区的动态扩展研究，最有效的遥感调查方法是利用矿区的多时相航空遥感图像，进行叠合分析。在河北某矿，我们使用时间差为十年左右的多时相、不同片种的航空摄影图像，包括全色黑白像片、彩色红外像片和多光谱图像，对这些图像进行计算机处理，提取塌陷区扩展规律，其处理过程如图 3-4-11 所示。

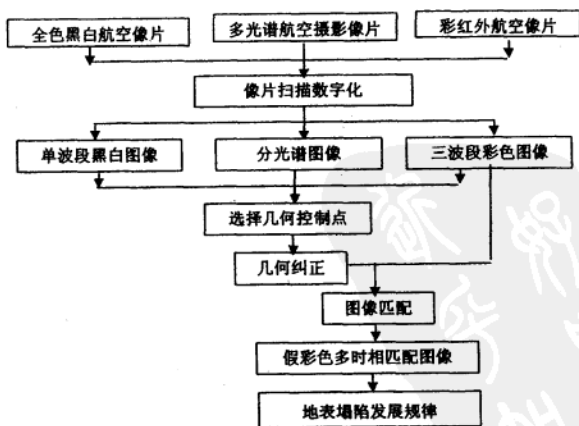


图 3-4-11 矿区地表塌陷动态扩展遥感研究图像处理流程图

经过以上处理，将所有图像在几何关系上进行匹配，并从各时相图像中各抽取一个波段分别赋予不同的显示颜色，组成假彩色多时相匹配图像。该图像清晰地表示了在不

同时期，塌陷区的形态。由此，结合地下煤炭开采的地质、采矿条件，可以得出塌陷区动态发展规律。

对该矿的地表塌陷区进行分析，可以得出，每开采 100 万 t 煤炭，则地表塌陷区面积增加 13hm²。塌陷区的扩展方向与地下开采方向基本一致，但塌陷区的形成落后于地下采空区的产生，且塌陷区在煤炭开采 1~2 年后才能稳定。

塌陷积水区在黑白像片上呈现为深灰—灰黑色调，而在彩红外像片上则为深黑色，边界清晰可辨。积水的深浅在彩红外像片上表现为不同的色调，通过图像分析和实地采样，可以圈定不同的积水类型和深度。通常将这种积水区分为四种类型：深水区、浅水区、沼泽区和浸润区。在彩红外航空像片上的解译标志见表 3-4-3。

表 3-4-3 河北某煤矿塌陷积水区分类遥感图像解译标志

分区类型	彩红外像片解译标志
深水区	一般位于塌陷坑的中部，由于水体对红外波的强吸收，图像上呈深黑色调，在含砂量大的区域则呈青色并夹杂有白色
浅水区	位于深水区外围，呈黑色调。由于出露水面植物的强红外反射，使背景呈暗红色调，有时还隐约可见“孤岛”现象
沼泽区	位于浅水区外围，土壤含水量达饱和状态，呈黑色，但在该区往往植物生长茂盛而呈红色，故图像上呈现为红黑相间
浸润区	位于沼泽区或浅水区外围，土壤含水量较高，呈浅黑色，由于浸润作用，一般庄稼生产不茂盛，庄稼等植物呈斑状、不均匀分布的红色

非积水塌陷区的塌陷边界、形态也可从彩红外像片上提取。将提取的有关信息、数据转绘到地形图或地图上可以编制成有关塌陷区状况的专题图，利用计算机或电子求积仪还可以求算各类塌陷区的面积。这些图件和数据资料是制定塌陷区治理方案的重要基础资料。图 3-4-12 是河北某煤矿塌陷区的遥感分类解译图，其中利用了航空遥感图像和 SPOT 卫星影像的资料。

七、工矿区固体废弃物分布状况的遥感调查分析

在矿区，固体废弃物是主要污染源之一，并与大气和水体的污染关系密切。通过遥感信息可以调查固体废弃物的类型、分布状况，甚至体积大小，从而为环境综合治理提供基础资料。

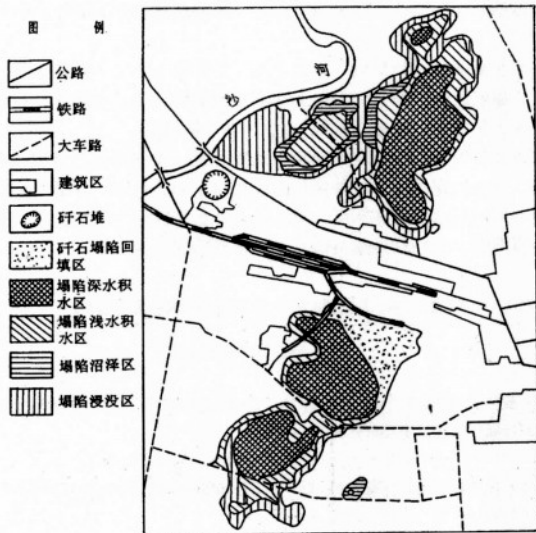


图 3-4-12 煤矿积水塌陷区遥感分类解译图

表 3-4-4 工矿区固体废弃物的彩色红外影像特征

废弃物种类	影像特征		
	色调	形态	位置及其他
煤矸石	黑色	较规则堆积, 面积大, 立体感强	位于煤堆附近, 有小道连接
洗选废渣	黑色、褐红色、灰白色	面积大, 堆积不太规则, 有立体感	位于选煤厂附近, 周围烟囱多, 或位于空旷田野附近
工厂废料	青色、灰色、黑色、白色等	不规则堆积状, 面积较大, 有立体感	位于工厂附近, 附近可见烟囱或高大厂房
生活垃圾	黑色、灰白色与红色调相间	面积小, 无立体感	位于居民区周围或道路边

矿区固体废弃物可分为两大类, 即工业固体废弃物, 如煤矸石、洗选废渣、工业废料等; 以及生活固体废弃物, 如生活垃圾等, 这些固体废弃物的航空彩色红外影像的基本

特征如表 3-4-4 所列。其分布图利用 GIS 的功能绘制相当简便。

对大型固体废弃物堆,如矿石堆,可利用立体量测仪器量测边长和高差等参数,然后按多边形锥体计算体积。

固体废弃物对区域生态环境的影响不仅表现在占用大片土地,而且会污染大气。其中所含的重金属离子等有害物质经雨水冲刷、侵蚀,对土壤和地面、地下水源将造成污染。在矿区规划时,应在工程地质和水文地质工作的基础上,认真选择固体废弃物的堆放场所。

八、工矿区水环境的遥感调查

矿产资源开发将对地表水体和地下水资源带来不同程度的影响,在高潜水位矿区,如华东、华南和沿海一些矿区,地下开采往往出现大面积积水,破坏土地的原有使用价值。在广大缺水矿区,则往往使本来不丰富的地表水资源更加短缺,并且不同程度地污染水资源。利用遥感图像可以提取地表水的分布状况,对水体污染作出评价。为合理利用现有水源、开发新水源和矿区生产建设提供不可缺少的资料。

在彩红外图像上地表水体分布及污染程度的主要解译标志是:形状、大小和色调。由于在遥感图像上一般只能对地表水的混浊度、表面油膜等污染作定性分析,难以定量地分析、评价污染物的浓度,因此一般还应结合水样常规监测、化验,以提供所需的数据与资料。表 3-4-5 为华北某矿区水体污染等级的遥感解译标志。可将解译出的河流、湖泊、水塘按其形状、大小、位置及污染等级投影转绘到地理底图上,编制专题图。

表 3-4-5 水体污染等级的遥感解译标志

污染等级	直接解译标志	间接解译标志
尚清洁	均匀深蓝色,一般水体面积较大	附近排污口少,有清水补给源
受污染	不均匀黑色调,一般水体面积较小	多位于河流上段或在田野中
重污染	不均匀黑色调,有油膜呈白色,泡沫呈黄色	多分布在工业区和居民点中,有排污口与之相连通
严重污染	不均匀黑色调,有油膜,泡沫多,或有红色斑块	主要在河流的中下游段,排污口较集中,有污水排入,漂浮物多

九、工矿区植被分布与覆盖率的遥感调查研究

自然环境由许多因素构成,大气、土壤、植被、水体等构成生态系统,其中绿色植

被是区域贴近自然、保存自然的重要成分，是人类生存的必要条件。绿色植被在某种程度上反映了一个区域的环境质量。绿被能起到吸收一部分大气污染物、降低热场效应、降低噪声、防止水土流失等作用。因此绿被状况是区域生态环境是否良好的重要标志，是环境调查和环境质量评价中不可缺少的内容。

关于区域绿被的概念，目前还无统一的标准，调查方法也不尽相同。有的仅进行园林调查，用公园和片林的面积来代表区域的绿化水平；有的则将公园、行道树和庭院绿化也算作绿被的组成部分；有的从生态环境出发，将农田也包括在植被之中。至于调查方法，有的采用估算，有的则采用典型抽样实测，而后再进行推算。由于矿区绿地分布的特殊性，要进行全面实测极其困难。遥感信息由于其本身的特点，能提供瞬时、宏观的地面实况，为提高矿区植被调查速度和精度提供了行之有效的的方法和手段。

（一）调查方法

航空彩红外像片以摄影胶片记录了来自地物的电磁波反射能量，是地物真实的再现。在彩红外像片上，可以用目视解译法识别植被种类、圈定植被覆盖面积。但是这种圈定对工矿区大量呈零星分布的植被来说，效率和精度都很低。为了提高植被提取效率和量算的精度，我们设计了一种计算机辅助航空遥感图像植被调查方法：首先把航空彩红外像片扫描数字化，然后通过对数字图像的一系列处理，完成植被的自动提取、识别、量算和统计。其明显的优点是可以量算出投影面积为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的绿地。该方法的处理过程如图 3-4-13 所示。

（二）图像预处理

1. 图像扫描数字化

航空彩红外摄影像片是以摄影胶片为介质的模拟方式来记录遥感信息的。地物的近红外波段、红波段和绿波段能量（通过黄色滤镜消除蓝波段）在图像上分别以红色、绿色和蓝色予以记录。为了获得能应用计算机进行图像处理的数字图像，应对胶片进行扫描数字化。对于摄影比例尺为 1:1 万的彩红外像片，为了能提取单株植物，则单株植物（以冠径 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 计算）在数字图像的尺寸不能小于 1 个像元，因此扫描分辨率至少为 250dpi，在实际应用中，扫描分辨率采用 300dpi。扫描采用彩色方式，记录像元的 RGB 亮度分量。扫描后，得到分析所用的彩红外数字图像。

2. 图像几何纠正

由于航空摄影、像片冲洗及扫描过程中，存在着诸如飞行姿态变化、大气不均匀折射、地形起伏、摄影机光学畸变、冲洗过程的人工操作、扫描仪的非线性响应等因素的影响，使得经扫描数字化得到的数字图像存在着几何和光谱辐射失真。因此，需要对数字图像逐幅进行几何纠正、辐射校正。

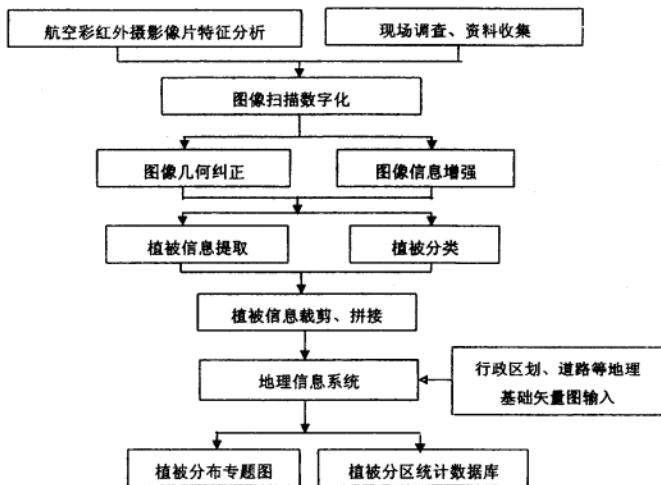


图 3-4-13 矿区植被遥感研究流程图

几何纠正采用二元二次多项式拟合法。从图像和地图上选择多个明显易量测、均匀分布的地物特征共轭点（对二元二次多项式而言，共轭点个数应大于 6 个），按最小二乘法求解多项式系数，建立几何变换方程：

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 \\ Y = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2 \end{cases} \quad (3-4-17)$$

式中：X、Y 为原图像坐标；x、y 为纠正后图像（地图）坐标； a_i 、 b_i 为多项式变换系数。

从纠正后图像出发，依次对每个像元（x，y）进行变化纠正，反求该像元在原图像中的位置（X，Y），再使用双线性内插法求算应回填到纠正后图像的灰度值，即对原始图像进行重采样，以此获得几何纠正图像：

$$G(X, Y) = (1-s)(1-t)g_{i,j} - (1-s)tg_{i,j+1} + s(1-t)g_{i+1,j} + stg_{i+1,j+1} \quad (3-4-18)$$

式中：G(X，Y) 为纠正后图像（X，Y）像元处的灰度值； $g_{i,j}$ 、 $g_{i,j+1}$ 、 $g_{i+1,j}$ 、 $g_{i+1,j+1}$ 分别为原始图像上能完全包围（x，y）点的四个像元的灰度值；s、t 分别为点（x，y）离像元 $g_{i,j}$ 的横向和纵向距离。

3. 图像辐射校正

一个辐射失真的图像可表达为:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (3-4-19)$$

其中, $g(x, y)$ 为失真图像; $f(x, y)$ 为真实图像; $h(x, y)$ 为所有产生失真的因素; $n(x, y)$ 为加性噪声。

图像辐射校正可采用最大熵恢复法予以校正。设 $f(x, y)$ ($1 \leq x \leq N, 1 \leq y \leq N$) 是一幅大小为 $N \times N$ 的图像, 则其总能量为:

$$E = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (3-4-20)$$

图像的熵为:

$$H_f = - \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) \ln f(x, y) \quad (3-4-21)$$

考虑到图像中噪声可正可负, 为保证图像的非负性, 定义噪声为:

$$n'(x, y) = n(x, y) + B \quad (3-4-22)$$

其中, B 为幅值最大的噪声。

于是, 噪声的熵 H_n 可定义为:

$$H_n = - \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N n'(x, y) \ln n'(x, y) \quad (3-4-23)$$

最大熵恢复就是在满足图像总能量不变和图像的退化模型(式 3-4-19)的条件下, 使恢复后的图像熵和噪声熵达到最大。利用求条件极值的 Lagrange 乘法子, 可得:

$$\hat{f}(x, y) = \exp \left[-1 + \beta \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} \times f(x, y) \times h(i-x, j-y) \right] \quad x, y = 1, 2, \dots, N \quad (3-4-24)$$

$$\hat{n}(x, y) = \exp(-1 + \lambda_0/\rho) \quad x, y = 1, 2, \dots, N \quad (3-4-25)$$

其中, β 和 λ_{ij} 是 $(N^2 + 1)$ 个 Lagrange 乘子, ρ 是加权因子, 为一常数; $\hat{f}(x, y)$ 和 $\hat{n}(x, y)$ 分别是 $f(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 的估计值, 而且它们满足下列约束条件:

$$\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \hat{f}(x, y) = E \quad (3-4-26)$$

将式 3-4-24 和式 3-4-25 带入式 3-4-26、式 3-4-27, 可得 $N^2 + 1$ 个方程, 由此联立方程可解得 $N^2 + 1$ 个未知数 β 和 λ_{ij} , 从而可逐点求得 $\hat{f}(x, y)$ 的值。

在实际图像处理中, 由于图像幅面非常大(一般 $N \geq 4000$), 无法建立也难以求解一个 $N^2 + 1$ 个方程的方程组。因此必须寻找更有效的方法。由熵的定义可知, 熵的大小取决于图像的性质, 当图像具有均匀的灰度时熵最大。最大熵恢复的目的是使恢复后的图像灰度分布更均匀。若把考察的对象设定为图像的一个局部, 那么可以认为, 对于一幅待恢复图像而言, 恢复的结果不仅应使整幅图像的熵最大, 而且每一个局部的局部熵也应达到最大, 同时每个局部的能量也趋于相等。依据这一思想, 用局部最大熵来对