中在黄河三角洲、渤海湾、莱州湾等地区[16-17,42, 52-56]，虽然也涉及到本次研究的部分区域，然而专门对龙口市海岸带进行研究的很少[57]。龙口市海岸带一直以来比较稳定，但近几年来由于人类活动的影响，加之自然环境的反馈作用，海岸带发生了较大变化。本文在前人研究基础上，利用龙口市 1984～2004 年的 11 期遥感图像，对龙口市海岸带的变化进行了系统的研究。

2. 数据资料分析与处理

2.1 数据源

2.1.1 遥感影像数据

遥感影像是一种非常重要的地学信息源，多源性是其基本属性，不同类型的遥感影像数据具有不同的物理属性，即不同的空间分辨率、波谱分辨率和时间分辨率。因此，必须根据研究目的选择适当的遥感数据，才能更好的服务于研究需要。本文根据海岸带的变化特点，选用了物候相近的 1984 至 2004 年 20 年间 11 期遥感图像，包括 TM（含 ETM^{+}）、SPOT5 和航片 3 种遥感信息源（详见表 2-1）。

表 2-1　本次研究所用遥感影像数据列表

序号	成像时间	数据类型	波段数	地面分辨率
1	1984 年 4 月 23 日	航片	1	1.0m
2	1988 年 5 月 7 日	航片	1	1.0m
3	1992 年 4 月 26 日	TM	1－5，7	30m
4	1994 年 4 月 27 日	TM	1－5，7	30m
5	1995 年 5 月 10 日	TM	1－5，7	30m
6	1996 年 5 月 2 日	航片	1	1.0m
7	1998 年 4 月 30 日	TM	1－5，7	30m
8	2000 年 5 月 4 日	ETM^{+}	1－5，7 8	30m 15m
9	2002 年 5 月 4 日	SPOT5	1－4 5	10m（20m） 2.5m
10	2003 年 5 月 8 日	ETM^{+}	1－5，7 8	30m 15m
11	2004 年 4 月 25 日	SPOT5	1－4 5	10m（20m） 2.5m

2.1.2 其它数据

（1）龙口市 1:10000 地形图和分辨率为 1m 的 DEM，1985 年 1:50000 海图和 1:10000 土地利用调绘图，1996 年龙口市土地利用现状图等；

（2）实测资料：与成像时间同步的龙口港和南山集团北海开发区附近海域的潮位资料，以及两个海域的多年平均海面、平均高潮位、平均低潮位、海水深度测控点等；

（3）1980 年以来，与研究区相关的各种自然和社会经济统计资料，实地调查资料等。

2.2 数据预处理

遥感数据在获取过程中，由于受到遥感系统、波谱以及外界自然和人为因素的干扰和限制，不可避免的产生一定误差，这些误差导致影像质量下降，从而使图像分析精度受到影响，因此，在实际图像分析和处理前，必须对原始遥感影像进行预处理，把误差的影响降到最小。

2.2.1 遥感影像校正

影像校正，又称影像的恢复、复原，处理内容包括辐射校正和几何校正。由于传感器响应特性和大气的吸收、散射以及其它随机因素的影响，致使图像模糊失真，造成图像分辨率和对比度相对下降，即辐射失真，需要进行辐射校正；几何校正则是针对由于搭载传感器的遥感平台飞行姿态变化、地球自传、地球曲率等原因，使图像相对于地面目标产生的畸变而进行的校正。

2.2.1.1 辐射校正

本文中的辐射校正主要是大气校正，即消除由大气散射引起的辐射误差的处理过程。大气校正的方法有：①野外波谱测试回归分析法：通过将野外实地波谱测试获得无大气影响的辐射值与卫星传感器同步观测结果进行回归分析，以确定校正量，消除大气影响；②辐射传递方程计算法：测量大气参数，按理论公式求得大气干扰辐射量；③波段对比法：由于大气散射主要影响短波部分，波长的波段几乎不受影响，因此可利用某些不受大气影响或影响很小的波段来校正其它波

段。由于前两种方法实现起来较为困难，这里选用了简单易行的波段对比法进行大气辐射校正。通过不同波段的对比分析计算大气干扰值，一般有回归分析法和直方图法。

（1）回归分析法

在几乎不受大气影响的波段（如 TM7）和待校正的某一波段图像中，选择最黑区域（通常为高山阴影区）中的一系列目标，将每一目标在两个比较波段的亮度值提取出来进行回归分析，求出校正量。回归方程为：

$$\overline{T_i} = a_i + b_i \overline{T_7}$$

其中，$\overline{T_7}$ 为 TM7 波段的亮度均值；$\overline{T_i}$ 为待校正波段亮度均值。a_i、b_i 是利用黑区数据，用最小二乘法作直线拟合计算得到的，计算式如下：

$$b_i = \frac{\sum\left[(T_7 - \overline{T_7})(T_i - \overline{T_i})\right]}{\sum(T_7 - \overline{T_7})^2}$$

$$a_i = \overline{T_i} - b_i \overline{T_7}$$

校正公式为：

$$T_i' = T_i - a_i$$

式中，T_7、T_i 分别表示第 7 波段和第 i 波段的灰度值，T_i' 为第 i 波段校正后的灰度值。

（2）直方图法

通过灰度直方图对比找出校正量，对于不易受大气影响的红外波段（比较显著的是 TM7），如果影像范围内存在灰度值为零的地物（如高山阴影、深水体），其灰度直方图往往从原点开始，而其它波段的灰度直方图离原点有一段距离，这段距离即为大气散射影响的校正量，每个像元灰度值减去这个数值就实现了校正。本文主要采用这种校正法（图 2-1 为本次研究采用的 2000 年 TM 影像利用 TM7 对 TM3 的直方图大气辐射校正示意图）。为了验证直方图校正的精度，还利用回归分析法求出部分波段的校正量，与直方图法进行比较，发现数据吻合良好，证明这是一种快捷、方便、计算简单的辐射校正方法。

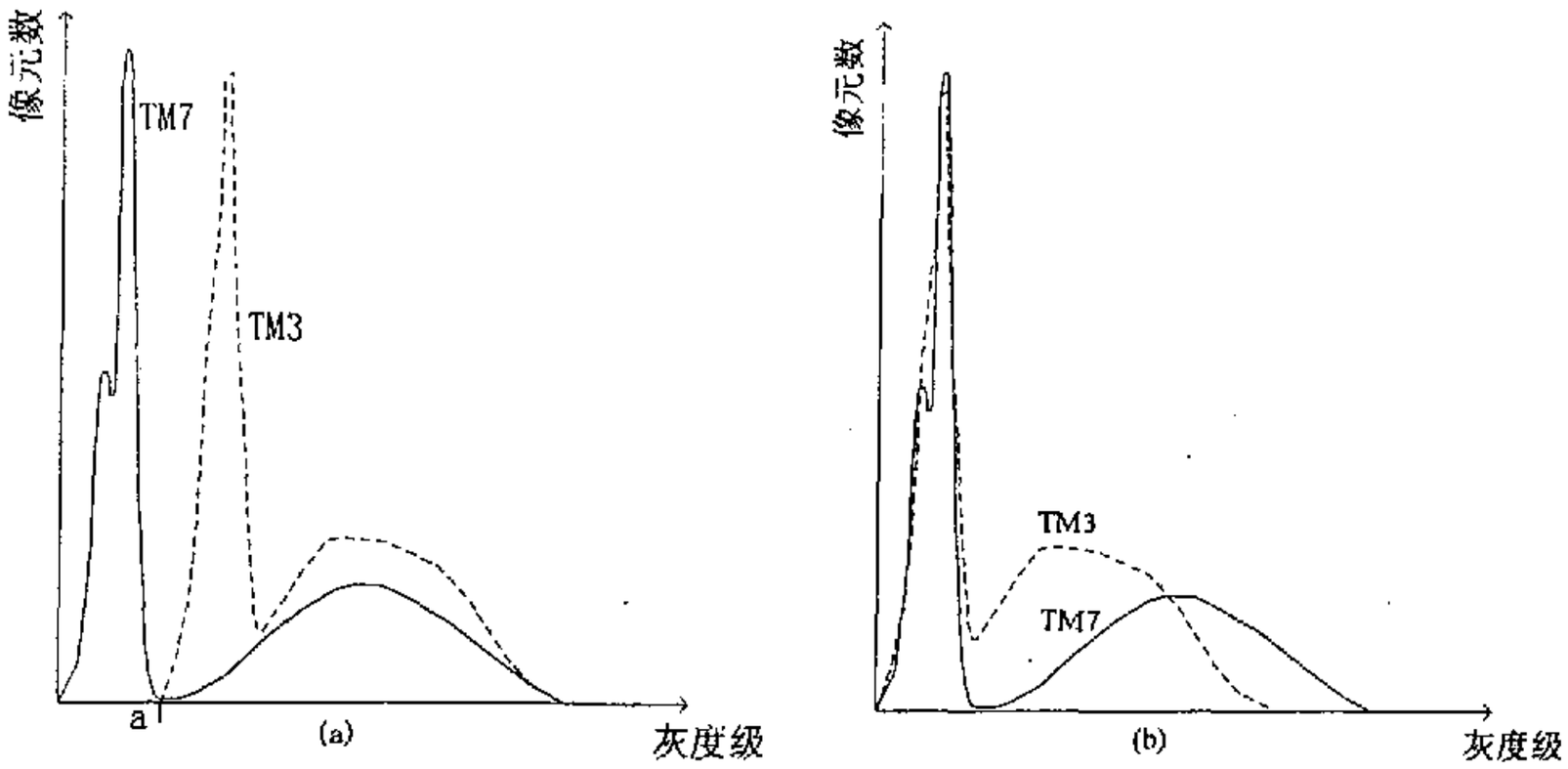


图 2-1　大气辐射校正直方图法示意图

2.2.1.2 几何校正与配准

本文采用了来自不同遥感数据源的 11 期影像，为使这些遥感数据具有相同的投影参数和坐标系统，必须进行几何校正与配准。几何校正包括几何粗校正和几何精校正，我国卫星地面站提供给用户的数据产品都是经过几何粗校正的，我们只需对影像进行几何精校正。本次几何精校正是在图像处理软件 Erdas8.6 支持下，以龙口市 1：10000 正射影像地形图（西安 80 坐标系）作为影像校正的主控图件，采用五次多项式转换模式，在地形图和相应的影像上选取 25 个地面控制点（GPC），为了不破坏原来图像的像元灰度值，用最邻近内插法对图像进行重采样，误差尽量控制在 0.5 个像元内，得到几何精纠正的数字图像。选取控制点时选取永久性的，在图像上有明显的、清晰的定位识别标志的典型地物及人工建筑物，并且在图像的边缘和内部尽量均匀分布。沿海滩涂及海域，缺乏明显的控制点，校正时主要利用陆地卫星遥感图像的几何连续性，精确配准陆地部分，同时辅以野外验证取点，这样其连续顺延的海滩部分点位误差，一般不会偏离陆地部分的点位误差。同时将海图、调绘图和土地利用现状图等各种图件也进行坐标转换（转为西安 80 坐标系），使其具有相同的坐标体系，作为分析的辅助数据。

2.2.2 噪声抑制

噪声包括随机噪声、孤立噪声、平稳周期性噪声和非平稳周期性噪声，各种噪声产生原因不同，去除噪声所用方法也各异。卫星影像中最常见的是孤立噪声，其特点是孤立的、分散的，往往和周围的亮度值有明显的差别，并且彼此不相关，

可以通过将图像像元亮度值与其邻近像元亮度值进行比较来判定[58]。通常采用的方法是：当要判定的像元亮度值 $f(i,j)$ 与周围邻近像元亮度平均值的差超过给定的阈值 ε_1，或要判定的像元亮度值与周围像元亮度值的方差 δ^2 减去图像亮度值的均方差 $\bar{\delta}^2$，其差值大于给定的阈值 ε_2 时，就认为该像元是噪声斑点。去除噪声时，往往消弱图像的边缘，为此，本文先对图像用 5×5 平滑模板处理消除噪声，然后，再采用边缘增强的方法增强边缘。

2.2.3 边缘增强

边缘增强是卷积增强的一种，它能同时保留局部反差和低频率的亮度信息，通过将原始图像全部或部分灰度值增强“添加”到同一图像的高频率要素图像上来实现的[59]。主要包括如下三个步骤：

① 生产包含边界信息的高频率要素图像。生产高频率图像所使用的内核大小根据图像的粗糙度来选择。粗糙的图像采用小规模的滤波（例如 3×3 像元），而大规模的滤波所使用的内核尺寸（例如 9×9 像元）用于平滑图像。

② 将原始图像中每一个像元值的所有灰度级或部分灰度级加到该图像的高频率要素图像上去。

③ 将合成的结果图像进行反差拉伸处理。

本次研究采用 3×3 像元的卷积核，对原始图像进行边界增强，增强后的图像更能清晰地表现出图像的纹理特征，且不同土地利用类型的边缘线也十分明显，更加有利于地物的判读提取。

2.2.4 研究区裁切

一景 TM 影像的覆盖面积约 185×185Km^2，一景 SPOT 影像的覆盖面积约 60×60 Km^2，无论 TM 还是 SPOT，研究对象在整景影像中只占很小的一部分，为了在今后工作中提高图像处理和分析速度，有必要将研究范围裁出。本次研究首先依据龙口市 1:10000 地形图和 1:50000 海图矢量化生成研究区范围边界，然后运用图像掩膜（Mask）方法从较正好的影像中切割出研究区范围，得到本次研究的遥感数据信息，面积共 181 Km^2。

2.3 海岸带遥感影像专题信息增强处理

2.3.1 海岸带遥感影像特征分析

遥感数据的多光谱波段，每个波段有其各自的特点和用途，对地物的可识别性表现出明显的差异性，只有通过影像特征分析，根据研究对象选择合适的波段，地物识别才能取得最佳效果。海岸带是一个海陆交接的复杂地带，涉及海、陆两方面，其信息量在各波段存在很大的分异性，因此，海岸带遥感影像特征分析，是本次研究不容忽视的一个问题，是进行各种图像分析、信息提取的基础。

2.3.1.1 各波段影像光谱特征分析

表 2-2 和表 2-3 给出了研究区 TM 影像和 SPOT 影像各波段的光谱范围及其在海岸带研究中的主要用途。其中，TM1、2、3 和 SPOT 1、2 波段为可见光波段，对水体的穿透能力较其它波段强，是水深探测的有利波段，可用于海域研究、低潮线的提取，并且易于区分人造地物类型；TM4 和 SPOT 3 波段为近红外波段，水体在该波段吸收较为强烈，但水面信息较前者丰富；TM5、7 和 SPOT 4 波段为红外波段，海陆界限清晰可辨，可实现海陆分离，而且影像最为清晰，对陆上各种地类的提取较为有利。

表 2-2　海岸带 TM 影像各波段光谱特征分析表

波段序号	波段范围	主要应用领域
TM1	0.45～0.52μm 蓝色	对水体有透射能力，图像色调由水域至陆地依次加深，能够反映浅水水下特征；对海洋潮汐的反映也较明显
TM2	0.52～0.60μm 绿色	由于植被在绿色波段有一个反射峰，可用来探测植被；对水体也具有一定的穿透能力，可用于波段组合进行水深探测；滩地分布清晰
TM3	0.63～0.69μm 红色	可用于建设用地研究，对道路、人造地物、沙砾场等反映明显；水域穿透能力较好，信息丰富，可明显反映河口区海水团涌入淡水的情况，以及海水中的泥沙流等
TM4	0.76～0.90μm 近红外	水体透过率较低，水体、陆域对比度加大
TM5	1.55～1.75μm 短波红外	水陆边界清晰，利于水边线的提取；可区分土壤含水量，有利于海岸带地区高潮线的判读
TM7	2.08～2.35μm 短波红外	特性与 TM5 接近，还可用于监测地物热辐射和水体热污染，以及岩石分类

表 2-3　海岸带 SPOT 影像各波段光谱特征分析表

波段序号	波段范围	主要应用领域
SPOT1	0.50～0.59μm 绿色	对水体有一定的穿透深度，在干净的水域能穿透 10-20m；可区分人造地物类型
SPOT2	0.61～0.68μm 红色	对城市道路，大型建筑工地反映明显，海水中的泥沙流也有明显反映
SPOT3	0.79～0.89μm 近红外	干净水域水面的反射率为 1%，水面呈黑色或者暗黑色
SPOT4	1.58～1.75μm 短波红外	水陆边界清晰，利于水边线的绘制；可区分土壤含水量

2.3.1.2 各波段影像统计特征分析

统计分析是遥感图像数据分析的基本方法，它从不同角度反映图像所包含的信息特点。统计值主要包括亮度值范围、均值、标准差等，既是波段性质的反映，又是图像变换的数学基础。表 2-4 和表 2-5 分别为 2000 年 TM 和 2004 年 SPOT 图像的统计值。

表 2-4　研究区 2 000 年 TM 数据各波段光谱特征统计表

波段	最小值	最大值	平均值	标准差	亮度值范围
1	81	208	100.466	10.794	127
2	54	203	80.018	15.717	149
3	38	248	81.081	28.747	210
4	11	126	53.590	27.099	115
5	6	240	84.511	50.249	234
7	5	217	66.006	41.194	212

表 2-5　研究区 2004 年 SPOT 数据各波段光谱特征统计表

波段	最小值	最大值	平均值	标准差	亮度值范围
1	24	207	70.377	26.369	183
2	79	248	121.955	20.408	169
3	63	214	83.434	9.406	151
4	15	230	72.856	36.192	215

2.3.1.3 波段选择

波段选择，就是根据待提取地物的特点，从众多遥感数据中选取几个波段作为特征波段，经过变换组合后，最大程度的突出目标信息。本文在波段选择时，主要从两个角度考虑：

（1）目标单一时的波段选择。海水是单一目标，就要选择对该目标反映最为敏感的波段或波段组合。以 TM 影像为例，虽然 7 个多光谱波段均对海水有所反映，然而水体衰减系数最小值出现在 0.50～0.56μm 的蓝、绿波段[60]，也就是 TM1、TM2 波段，说明 TM1、TM2 可以反映水体深度； TM3 和 TM4 波段，水体的衰减系数增大，穿透能力降低，但分辨能力增强，信息量比前两个波段丰富的多，能很好地反映水面信息或浅水区信息；TM5、TM7 波段的信息很相似且水体部分色调单一，不易分出层次，一般不用于水体研究，但由于水体对红外波段的吸收最为强烈，水陆形成鲜明对比，因此这两个波段常用来提取水边线，进行水陆分离。

（2）多目标时的波段选择。陆域目标类型多样，要保证分类精度，必须对各个波段进行综合分析，选择反映地物信息量最为丰富的波段或波段组合。目前已有多种有效的定量方法用于多目标的波段选择，如信息量分析法、各波段相关系数分析法、最佳波段组合指数法、主成分分析法、多维亮度重叠指数法等。本次研究主要从信息量、波段间相关性和最佳波段组合指数法三方面考虑，以 2000 年陆域 TM 影像为例具体说明。

信息量的分析，本文采用 Shannon 定义的信息的度量标准——信息熵，对各波段所包含的信息进行定量分析。设一幅数字图像有 g_1，g_2，…，g_G，共 G 阶灰度值，各级灰度值出现的概率分别为 P_1，P_2，…，P_G，按 Shannon 定义的信息熵，该幅图的信息熵（H）可表示为：

$$H = -\sum_{i=0}^{G} P_i \log_2 P_i$$

相关系数是反映波段间信息的冗余度，相关系数越大，信息的冗余度就越大，组合到一起会存在相当大的重叠信息，从而导致合成图像的总信息量不高。选择时一般选择相关性小的波段进行组合，以深入的分析和处理。

最佳波段组合指数法，是美国查维茨教授提出的定量评价波段组合信息量大

小的一个最佳指数公式（***OIF***）：

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n} R_{ij}}$$

式中 S_i 为第 i 个波段的标准差，S_i 越大，该波段图像的信息量就越大；R_{ij} 表示第 i 个波段与第 j 个波段的相关系数，R_{ij} 越小，两个波段之间的独立性就越高。***OIF*** 值越大，波段组合越优越，信息量越丰富。

表 2-6　研究区 2000 年陆域 TM 影像各波段信息量表

波段	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
信息量	5.447	5.861	6.584	5.752	6.868	6.857

表 2-7　研究区 2000 年陆域 TM 影像相关系数矩阵表

波段	1	2	3	4	5	7
1	1					
2	0.971	1				
3	0.903	0.946	1			
4	0.106	0.236	0.253	1		
5	0.547	0.670	0.757	0.703	1	
7	0.706	0.793	0.880	0.491	0.952	1

表 2-8　2000 年陆域 TM 影像不同波段组合的指数因子值

排序	OIF 值	波段组合	排序	OIF 值	波段组合	排序	OIF 值	波段组合
1	41.632	1、4、7	7	37.639	2、3、4	13	30.268	2、5、7
2	41.251	3、4、7	8	36.072	2、4、5	14	29.872	1、3、5
3	40.226	1、4、5	9	33.086	4、5、7	15	29.249	2、3、5
4	40.034	1、3、4	10	31.827	3、5、7	16	26.377	2、3、7
5	39.297	3、4、5	11	31.580	1、5、7	17	26.366	1、3、7
6	37.966	2、4、7	12	31.446	1、2、4	18	25.898	1、2、5

由表 2-6、表 2-7 和表 2-8 得知，TM 数据的第 5 波段的信息熵最大，包含的信息最为丰富，7 波段仅次于 5 波段，位居第二，但两者之间具有很强的相关性，相关系数高达 0.952，在多数情况下我们只取其一；第 4 波段除与 5 波段相关性

较高外，与其余波段的相关性都低，说明其信息量最为独立，是研究区第二重要波段；三个可见光波段中，3 波段的信息熵最大，2 波段次之，1 波段最差。从优化指数值看， 1、4、7 波段组合的 OIF 值最高，3、4、7 波段组合仅次于 1、4、7，也具有较高的 OIF 值。综合考虑，对于 2000 年 TM 影像，提取陆域地物时，我们选择 3、4、7 波段进行组合。

2.3.2 遥感影像增强与变换

遥感影像中含有大量地物特征信息，通过不同的灰度或亮度表现出来，图像增强的目的就是拉大地物特征间表现的这种灰度或亮度差异，从而增强感兴趣地物和周围地物间的反差，突出相关专题信息，使分析者能更容易地识别图像内容，提取有用定量化信息。图像增强方法众多，按照作用的空间一般分为光谱增强（突出灰度信息）和空间增强（突出几何信息，如线条、边缘和纹理结构特征）；从数学形式上看，又可分为点处理（像元对比度增强、比值处理、直方图均衡、光谱转换等）和邻域处理（空间滤波、卷积运算、傅里叶变换等）[61]。

遥感图像增强和变换的方法虽然多种多样，但它的应用是有针对性的，取决于研究的对象和目的。必须根据遥感图像特征、分析方法以及目标地物的影像特征，有意识地选择合适的增强方法，才能突出目标地物信息，达到增强的目的。本次研究主要探讨了如下几种图像增强处理方法在海岸带信息提取中的应用：

2.3.2.1 彩色合成

遥感影像处理中，彩色合成是应用最广泛的一种增强方法。遥感图像的单波段图像是一个灰度图，人眼对灰度级的分辨能力远远不及对彩色的分辨能力，而且地物的差异更多地表现在不同的波段上，彩色合成的目的就是将反映在不同波段上的地物差异综合地表现出来，以扩大地物间差异，同时利用人眼对色彩较高的分辨能力，提高地物判译效果。其方法是选定 3 个单波段影像，分别指定红、绿、蓝三种颜色，建立每个波段的亮度和色彩的变换表，将变换结果合成即可。

2.3.2.2 线性拉伸

线性拉伸，是按照一定比例，把原始影像的亮度值范围按线性模型扩展到任意指定范围，增强波段光谱值之间的对比度，获得最大可能动态范围的反差增强，

从而突出图像的细微变化。方法是首先利用直方图找出集中的亮度值范围[a，b]，然后选定扩展后的亮度值范围[m，n]，设原来图像的灰度值为 z，扩展后的灰度值为 Z，根据以下公式进行线性拉伸：

$$Z = \frac{n-m}{b-a}(z-a)+m$$

通过域值分割获得的海域图像，大量的像元集中在一个很窄的亮度值范围内，大大降低了人眼对地物目标的分辨能力，经过线性拉伸后，水体不同深度的层次感得到加强，从而促进水深信息的提取。

2.3.2.3 比值增强

波段比值法，是将不同波段同一像元灰度值相除，生成一幅增强图像。在比值图像上，像元的亮度反映了两个波段光谱比值的差异，这种算法对于提取缓慢变化的过渡带的线性特征十分有效，而且还能压制一定的噪声影响[62]。本次研究主要用波段比值法进行水深信息增强处理，反复试验表明，比值图像可以消除因波浪造成的光谱明暗差异，同时增大不同水深之间的对比度，突出水深信息。

2.3.2.4 图像融合

图像融合，是按照一定的规则（或算法），将单一传感器的多波段信息或不同类别传感器所提供的信息加以综合，获得比任何单一数据更精确更丰富的信息，生成一幅具有新的空间、波谱、时间特征的合成图像，是一种高级图像处理技术。它不仅仅是数据间的简单叠加，而是强调信息的优化，消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾，互补改善遥感信息提取的及时性和可靠性，并突出有用的专题信息，增加解译的可能性。ETM 和 SPOT 影像都含有全色波段，全色波段具有较高的空间分辨率和较强的纹理特征，将其与各自的多光谱波段融合后，既能融入高分辨率图像的细节信息，又能保留多光谱波段丰富的光谱信息，可大大提高图像的清晰度和分类精度。遥感数据融合的方法很多，有加权融合、HIS 变换融合、主成分变换融合、K－T 变换融合、小波变换融合、Brovey 融合算法等。不同融合方法对不同数据源影像的融合效果不同，取决于影像数据特点和融合的应用目的。本次研究进行影像融合处理的目的是提高融合影像的分类精度，根据 TM 和 SPOT 影像的各自特点，分别采用 SFIM 算法和主成分分析变换

两种融合方法实现各自多光谱波段与全色波段的数据融合。

SFIM 变换全称为 Smoothing Filter-based Intensity Modulation 变换[63]，是刘建国（2000 年）提出的一种基于平滑滤波亮度调节的融合方法，计算公式如下：

$$IMAGR_{SFIM} = \frac{IMAGR_{low} \times IMAGR_{high}}{IMAGR_{mean}}$$

其中，$IMAGR_{SFIM}$ 表示用该算法生成的融合影像；$IMAGR_{low}$ 表示的低分辨率影像，在此表示 TM 的 6 个多光谱波段；$IMAGR_{high}$ 表示高分辨率影像，即为 TM 的全色波段；$IMAGR_{mean}$ 表示模拟分辨率影像，可以通过对全色波段进行低通均值滤波来获取，本次研究采用 5×5 的均值滤波算子。

经过低通滤波处理得到的模拟影像（$IMAGR_{mean}$），去掉了全色波段 $IMAGR_{high}$ 的高频信息，保留了低频光谱信息，将其再与高分辨率的全色影像进行比值运算时，就可消除高分辨率图像的光谱干扰和地形反差，仅保留高分辨率影像的纹理细节信息。因此，SFIM 算法被视为在低分辨率影像中仅引入高分辨率影像的纹理特征的算法，能够很好地保留原低分辨率影像的光谱特点。该算法比较适合于 TM8 与 TM 其它多光谱波段数据的融合，融合后影像能够明显提高分类精度[64-65]。

主成分变换融合法是先对多光谱图像进行主成分变换，然后用高分辨率的全色图像替代第一主分量并进行逆变换得到融合图像。它是基于这样的假设：主成分变换后的第一主分量包含了多个波段的信息，与全色波段的数据信息相似，因此，用高分辨率的全色波段数据替换第一主分量得到的融合图像既保持了多光谱的图像特征，也具备了高分辨率图像特点。这种算法在 SPOT 图像的多光谱波段和全色波段数据融合时，是较为有效的[66]。

3. 龙口市海岸带遥感影像专题信息提取

本次研究对海岸带遥感影像专题信息提取的内容有海岸线、高潮线、低潮线和沿海的部分陆域信息，涉及海域、陆地两方面，提取过程较为复杂，必须针对提取地物的光谱特征，选取合适的遥感影像，设计合理的图像处理和分析方法，