

全新世海侵痕迹遥感信息特征提取方法研究*

赵英时 杨 忆

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 本文应用 TM、MSS、NOAA 等多平台、多波段、多时相遥感信息,并结合地貌、水文地质、岩相、历史考古等地质学信息进行综合分析,研究华北平原全新世海侵痕迹信息的特征提取方法。研究中特别注重利用与海侵有着直接成因关系的地下咸水体及水化学特征变化所传递的信息。这些信息涉及到水、热、盐、土、植被等环境因子。通过多种图象处理方法,突出古海岸线两侧环境因子的综合差异,识别和勾绘古岸线。

关键词 全新世海侵 遥感图象处理 专题特征提取

分 类 (中图法) P531 (科图法) 57.1053

1 区域背景分析

华北平原开发历史悠久,人类活动频繁,并几经沧桑变化和古黄河水系的多次侵袭,自然环境发生过频繁而复杂的变化,是我们研究自然和人类活动对自然环境影响的典型地区。海岸变迁是全球气候变化的一种反映,是环境变迁的一个重要方面。“全新世海侵”具有全球性,在我国东部沿海均有表现。对它的深入研究,可以为全球环境变化研究提供佐证,并为区域开发利用提供一定的科学依据。

本项研究是探讨遥感在全新世以来(近万年)的长时间尺度自然环境变迁问题上应用的可能性和潜力。

海水进退、成陆先后,导致地貌类型、物质组成、地下水特征及由此而引起的人类利用程度与方式的差异。这些差异在遥感图象上留下部分痕迹。遥感通过对这些历史“痕迹”的识别,并结合它们在空间分布上的规律性,可从宏观上恢复当时的古地理环境。全新世时间尺度很长,许多古海岸河口地貌特征(如堤状堆积体、滨海洼地、扇形体等)已被后期的河流作用、人类活动等所掩盖或部分掩盖,给识别造成很大困难。因而,本项研究重点是,利

* 国家自然科学基金资助项目(19171054)

收稿日期:1995-02-10,收到修改稿日期:1995-08-20

用与海侵有直接成因关系的地下咸水体分布及水质变化所传递的信息。这些信息涉及到水、热、盐、土、植被等环境因子。由于海水入侵、顶托、渗透,在海侵及海侵波及地区普遍留下厚度、矿化度不同的地下咸水体。随着海退成陆条件和成陆先后的差异,地下咸水体的淡化程度、分布、埋深及化学成分等均有明显的差异,并呈现出与海岸近于平行的水平分带性。这在渤海湾西岸的华北平原、在莱州湾南岸的胶滩平原、及黄海西岸的苏北平原等地均有类似的特征。

从研究区的水文地质状况可知,渤海湾西—西北岸的华北平原,普遍存在着厚约 0—200m,矿化度大于 2g/l 的楔状咸水体,并从陆向海,咸水体的矿化度由 2—5—10—20g/l 逐渐增加;水化学类型呈现从重碳酸盐氯化物型—硫酸盐氯化物型—氯化物硫酸盐型—氯化物型,逐渐接近于海水^①。此外,在咸水体内缘有许多见海相化石的钻孔,证明当时确有海水存在,且咸水体与海相层呈同步分布。这充分说明咸水体与海侵在成因上的直接联系。从水化学特征的变化还可知,向陆方向咸水体淡化现象逐渐增强。

这种地下水分布及化学特征的差异,直接控制着地表一定深度的水热条件与水盐动态变化,影响到地表土壤的发育,导致土壤盐渍化的带状分布,即从海向陆的分布为盐土区—重盐渍区—中盐渍区—轻盐渍区—非盐渍区。可见,土壤盐渍化的宏观分布主要受地下水作用的控制,当然也与平原微地貌及地表水有关。土壤盐渍化程度又直接影响到土地利用条件和土地覆盖现状,影响植被的发育。盐渍化,因处于不同季节、或因化学成分不同、或因对作物生长的抑制作用强弱的差异等影响,导致在遥感图象上形成不同的影象模式。例如,氯化物盐土区,因 Cl 离子的吸湿性,土壤湿度较大,而呈暗色斑;而以 SO₄、HCO₃ 离子为主的盐渍土多呈浅色调。又如,春季,干旱多风,地下盐分运移至地表,使地面返盐,出现盐霜甚至盐壳,而多呈灰白、浅黄等浅色不规则斑块;秋季,相对多雨,可溶性盐分淋溶,而 Cl 离子的吸湿性,使含 Cl 离子为主的盐渍土多呈不规则的暗色斑块,但部分地区因 Na 离子不易淋溶,且透水、通气性差,易于板结,使含 Na 离子的盐渍土多呈浅色斑块。因而,秋季遥感图象上盐渍化地区常呈深浅不一的斑纹、斑块。

综上所述,从某种意义上讲,在研究区现代景观特征中,与古海侵痕迹有关的主导环境因子是土壤盐渍化。它与其它环境因子一起综合构成本区域特有的景观模式。在遥感图象上反映为一种特有的“土壤盐渍化—植被—土地利用—地貌”综合信息模式。遥感研究全新世古海岸需要采用多种数据处理方法,突出海侵界线两侧这些景观特征的综合差异,以便识别和提取全新世海侵痕迹。

由于研究对象的多样性以及环境背景的复杂性,根据目标信息的基本特征——空间分布、波谱反射与辐射及时相变化特征,遥感数据的选择关键在于选择对上述环境因子分别敏感的波段和波段组合,以及充分利用它们在波段间的光谱差异和光谱特征随时间变化的差异,来提高识别能力。因此,波段选择上是以多波段的 TM 为主,在 TM、MSS 可见光—近红外的基础上,特别注重 TM 所独有的中红外、热红外波段,并辅之以 NOAA 的热红外波段。在时相选择中,抓住了两个特征时段,即冬春(3 月份)气候干旱,地面返盐,且多裸露状,地面

^① 河北省水文地质局(1:50 万)说明书,1975.

水盐动态特征及地貌均反映明显; 春末(5月中旬)、秋(9月下旬)作物成熟期, 水盐土条件的差异集中地反映在作物的类别与长势上。在此基础上, 又收集了该区十多幅不同时期的图象, 基本反映了该区自然景观年度变化及季节变化的特点。

2 遥感数据的预处理

图象处理工作主要是在 ER Mapper 图象处理系统上进行。

由于研究区覆盖范围较广, 数据量过大, 所以, 首先对现有的遥感数据进行重采样压缩处理。TM 磁带数据经压缩后, 空间分辨率约 120m; 扫描数字化数据 TM、MSS, 空间分辨率约 80m, 均可满足本项研究的需求。各类遥感数据经几何校正后确保在统一的坐标系下与其它遥感和非遥感数据的空间配准。经过多次迭代, 最终拟合精度在一个象元以内。因研究区跨越两幅图象, 则须进行图象镶嵌。图象镶嵌是在不同时相、不同波段的 TM、MSS、NOAA 之间进行的。为了取得较好的镶嵌效果, 分别对每幅图象进行了亮度与对比度的调整以及接合线两侧数据的处理。

研究中所用的遥感信息, 各有自身的信息特点及应用的能力。为了进一步了解这些遥感数据的特征, 对主要的原始遥感数据进行了特征分析, 包括统计分析、相关分析、信息量分析等。这是选择优化组合方案和下一步图象处理中选择波段数据的重要依据。

TM 数据统计分析结果表明(表 1), 亮度覆盖等级 TM1、5、7 最宽; 标准差 TM5、7 最大, 表明其地物亮度取值距均值的离散程度最大, 地物间的差异可能表现最大。

表 1 TM 数据统计分析结果

Tab. 1 Statistical analysis of TM data

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
最小值	1	1	1	1	1	1	1
最大值	255	134	176	166	255	255	255
均值	88.1	42.4	49.3	81.7	97.7	142.1	97.7
标准差	11.71	8.94	15.93	16.39	30.13	14.9	30.13

表 2 TM 数据主成分分析结果

Tab. 2 Principal component of TM data

	方差 百分比 %	特 征 向 量						
		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
PC1	81.52	0.225	0.177	0.318	0.020	0.631	0.143	0.631
PC2	10.26	-0.087	-0.075	-0.173	0.956	0.075	-0.180	0.075
PC3	6.35	0.052	0.056	0.105	-0.166	0.070	-0.973	0.070
PC4	1.64	0.618	0.351	0.516	0.229	-0.296	0.027	-0.296

主成分分析是按方差性质将各波段的方差相对集中到前几个主成分中, 各主成分间具独立性, 从而有效地压缩和分离信息, 便于各波段信息量分析。结果说明(表 2), 第一、二、三

主分量集中了 TM7 个波段总信息量的 98.1%。其中 PC1 占 81.52%。构成 PC1 的特征向量中, TM5、7 最高, 分别为 0.631, 占各波段特征向量和的 59%。可见 PC1 主要反映的是 TM5、7 的信息, TM3、1、2 也有部分贡献; PC2 占 10.26%, 主要反映的是 TM4 的信息。信息量的计算表明, TM 的 7 个波段中, TM5、7 信息量最大, 各占总信息量的 24.5%, 往下依次是 TM3 (13.2%)、TM1 (9.1%)、TM2 (7.2%)、TM4 (6.8%)、TM6 (6.6%)。相关分析结果表明, 中红外 TM5、7 之间, 可见光 TM3、2、1 之间, 相关性很高。而 TM4、TM6 光谱信息有较大的独立性。合成方案选择时, 考虑到信息量大、相关性小、独立性强等原则, 选用 TM453, TM471 合成图象, 总体解译效果更好。

MSS 的 4 个波段数据特征分析结果表明, M7 信息量最大, 占 4 个波段总信息量的 43.09%。往下依次是 M6 (23.05%)、M5 (15.84%)、M4 (12.15%); 标准差也呈同样的趋势。NOAA 的 5 个波段数据的特征分析结果表明, b4 信息量最大, 往下依次是 b5、b3、b2、b1; 标准差也呈同样趋势; 而相关分析表明热红外的 b4、5、3 之间相关性高。

3 专题信息的特征提取

首先, 运用分层分析方法, 根据影象色调、形态、纹理结构、土地利用状况等, 将研究区的地下水分布分为三个分区, 即全咸水区、淡咸水区、全淡水区 (表 3)。再根据各分区地理景观特点, 分别选择相应的波段组合和图象处理方法。这里, 中部淡咸水区是重点, 也是全新世古海岸线之所在。古岸线分析过程见图 1。

表 3 研究区地下水分区/盐渍化影象特征

Tab. 3 Image feature of underground water sub-areas/soil salinization

地下水分区	盐渍分区	土地利用	影 象 特 征	古海岸
全咸水区	氯化物 盐土区	光板地 盐田	除东南部沿海为亮白色的光板地外总体为暗色背景上, 不同色调的土地利用状况。	北端在 I、II 线以东。
	氯化物 重盐渍区 硫酸盐	荒地 水田 低产耕地	亮度低、绿度低、湿度高。隐约可见与现代岸线近于平行的弧形条带, 即为古堤状堆积体、堤间低地及古滨海洼地等所致。	南端在 III、IV—静海—沧州以东
淡咸水区 (咸水体上漂浮着浅层淡水)	SO ₄ -Cl 中盐渍区 Cl-SO ₄	低产耕地	色调不均匀, 多呈不规则的花斑状、斑块状、纹理结构较粗。	北端在 V 线向海一侧。
	重碳酸盐轻盐渍区	耕地	多因盐渍化程度差异及条带状、岛状浅层淡水所致。	南端在 V—N 线以东
全淡水区	非盐渍区	高产耕地	色调较均匀, 纹理结构较细, 亮度高、绿度高、湿度低。	基本在 VI 线向陆一侧。

古海岸说明: I: 现代海岸附近; II: 狼坨子—歧口—泥沽—白沙岭—汉沽附近; III: 南大港—沙井子—巨葛庄—张贵庄—侯口—宁河附近; IV: 草泊洼南缘—天津西—团泊—黄骅附近; V: 南皮—大城—文安—水清东—大青堡—黄庄—油葫芦洼群南缘—滦河三角洲前缘—七里海内侧附近; VI: 献县—河间—任丘—白洋淀—雄县—固安—黄庄洼群北, 扇缘地带—逐渐与 V 合并。

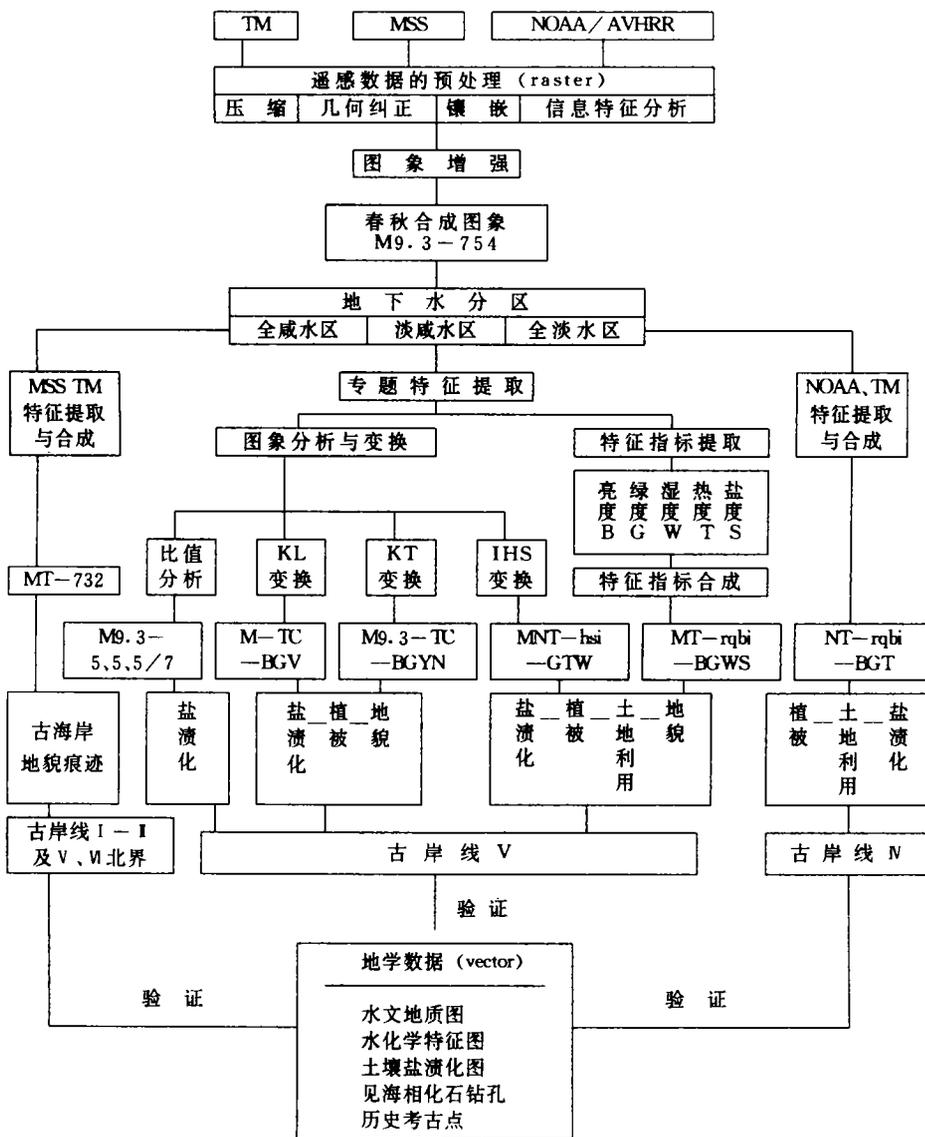


图 1 古岸线分析过程

Fig. 1 Analysis procedure of Paleo-coastal lines

3.1 图象分析与变换

整个图象处理过程中, 首先须对每张图象进行亮度和对比度的调整, 如线性、局部分段线性拉伸, 对数、指数拉伸, 直方图均衡化、高斯均衡化等。以改善图象识别环境。

根据各遥感数据统计分析和主成分分析的结果, 以及对识别目标地学规律的研究, 有针对性组合波段, 以突出有用信息。如根据上述的春秋(干湿)季土壤盐渍化的不同特点, 选择了春秋不同波段的合成图象 M9.3-754, 以拉大它们的差异, 较好地揭示出地下水三分区和

盐渍化五分带的特点。又如根据渤海湾西岸古海岸堤状堆积体与堤间低地、古滨海洼地的不同特点,选择了 TM、MSS 不同时相、不同波段特征提取与合成图像 MT-732,来突出这些与现海岸形态相似的不同宽度的明暗条带,以识别和勾绘出 I—IV 古岸线及 V—VI 古岸线的北界^[1]。

3.1.1 比值分析与比值合成 比值分析用来消除大气影响、地形因子影响及乘法性噪声,并可突出波谱曲线所显示的斜率不同的地物,是特征提取的又一有效方法。应用中,我们采用了单波段比、混合波段比等方法,所得图象经对比度调整、统计分析,并与实际地类进行对照。结果表明:TM 7/2 更多地反映亮度信息;TM 5/4 更多地反映湿度信息;M3—5/M9—7、M3—5×M3—7/M9—7 利用了波谱特征的时间差,更好地反映了盐渍化的斑块信息。于是,把专题信息较集中的组分进行比值合成,同类比值图象单一合成,其视觉效果不佳;不同类别的混合比值合成,效果明显改善;而将比值图象与不同时相的单波段图象混合复合处理,如 M9—5 (R)、M3—5 (G)、M3—5/M9—7 (B),对中—轻盐渍区的盐渍斑块有明显增强,对中全新世古海岸 (V 岸线) 两侧的盐渍化差异也有所增强。

3.1.2 KL 变换(主成分分析) KL 变换是在统计特征基础上的多维正交线性变换。它具有信息分离和提取的效果。据前述的主成分分析结果可知, TM、MSS、NOAA 的第一、二、三主分量分别集中了它们各自总信息量的 98.1%、94.06%、99.1%。因而它们的主成分合成图象均有效地综合了它们的有用信息,减少了信息维数。然而,这类合成图象往往难以直接与景观特征相联系,有失真感。因此,为了改善主成分合成图象的效果,本研究中对这类图象作进一步处理,或作 IHS 变换,或与其它图象合成,或进行 KT 变换。

3.1.3 KT 变换(TC 穗帽变换) KT 变换是为了使 KL 变换各组分具明确意义,对图象的特征向量做适当的旋转,即通过线性变换多维空间旋转,使其前三个特征变量具有明确的物理—景观意义。如 TM 突出反映亮度 (B)、绿色 (G)、湿度 (W);而 MSS 突出反映了亮度 (B)、绿色 (G)、黄色 (Y),剩余部分反映的是噪声及遗留的信息。其变换公式为:

$$\begin{aligned} \text{TM: } B &= b_1 \times 0.3037 + b_2 \times 0.2793 + b_3 \times 0.4743 + b_4 \times 0.5585 + b_5 \times 0.5082 + b_7 \times 0.1863 \\ G &= b_1 \times -0.2848 + b_2 \times -0.2435 + b_3 \times -0.5436 + b_4 \times 0.7243 + b_5 \times 0.0840 + b_7 \times \\ &\quad -0.1800 \\ W &= b_1 \times 0.1509 + b_2 \times 0.1973 + b_3 \times 0.3279 + b_4 \times 0.3406 + b_5 \times -0.7112 + b_7 \times - \\ &\quad 0.4572 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MSS: } B &= b_4 \times 0.332 + b_5 \times 0.603 + b_6 \times 0.675 + b_7 \times 0.262 \\ G &= b_4 \times -0.283 + b_5 \times -0.660 + b_6 \times 0.557 + b_7 \times 0.388 \\ Y &= b_4 \times -0.899 + b_5 \times 0.428 + b_6 \times 0.076 + b_7 \times 0.041 \\ N &= b_4 \times -0.016 + b_5 \times 0.131 + b_6 \times -0.452 + b_7 \times 0.882 \end{aligned}$$

经 KT 变换的图象 TM—TC—BGW,特别是春秋不同时相的图象,经 KT 变换后,如 M9.3—TC—rgbi—BGYN,使土壤的亮度、湿度分量与植被的绿色分离,较好地反映出土壤盐渍化—植被信息以及它们在中全新世古海岸线两侧的差异。

3.1.4 IHS 彩色变换 遥感数据的红绿蓝 (RGB) 变量间往往相关性较高,对任一分量的调整均会影响到其它分量,因此往往虽经多方调整,色彩仍较单调,显示效果不佳;而明度、

色度、饱和度 (IHS) 分量间相关性低, 独立性强, 易于对任一分量作单独处理, 便于改善图象显示效果和进行信息的提取。因而, 我们对 RGB 形式显示不佳的图象再经过数学转换, 而呈 IHS 组合形式, 如 MNT-hsi-GTW, 即 h-MSS 7/5 反映绿度、s-NOAA b3 反映热度、i-(TM5+TM7)/2 反映湿度, 其合成图象不仅增强了视觉效果, 而且突出了古岸线 V 世界南端两侧土壤盐渍化—植被—土地利用等的综合差异。

3.2 特征指标提取与组合

考虑到土壤盐渍化与土壤的温度、湿度相关, 以及古海岸与水、热、盐、土、植被等环境综合信息有关, 专题信息的特征提取还可以通过遥感信息的亮度 (B)、绿度 (G)、湿度 (W)、热度 (T) 等多种特征指标的提取来实现。

3.2.1 亮度指数 (Brightness) ——反映地物的反射、辐射强度。 根据 TM7 个波段统计分析结果, 构成亮度的主要成分是可见光 TM1, 近红外 TM4 和中红外 TM5、7。可见光的 TM2、3 亮度较低。考虑到 TM5、7 相关性很高, 故亮度指数多用 TM1、4、5 表示。例如, $B1 = (b1^2 + b4^2 + b5^2) / 3$, $B2 = \sqrt{(b1^2 + b4^2 + b5^2)} / 3$ 等。

3.2.2 绿度指数 (Greenness) ——反映植被信息 它主要由对植被高反射的近红外波段 (IR) 以及与之呈负相关的可见光红波段 (R) 构成。 $G1 = NDVI = (IR - R) / (IR + R)$, $G2 = RVI = IR / R$ 等。其中, 标准化植被指数 NDVI 对植物生长状况及覆盖度表示尤佳。

3.2.3 湿度指数 (Wetness) ——反映地物景观的湿度差异。 中红外波段 TM5 (1.55—1.75um), TM7 (2.08—2.35um) 处于水的吸收带, 对湿度反映灵敏。尤其是 TM5, 它包含了对土壤湿度最敏感的 1.5—1.73um 波段。故湿度指标多用单波段 TM5 或 TM5+7、(TM5+7)/2 等表示。

3.2.4 热度指数 (Thermoness) ——反映地物景观的温度差异 热度指标用热红外波段的 TM6 (10.4—12.5um) 或 NOAA 的 b3、4、5 来表示。

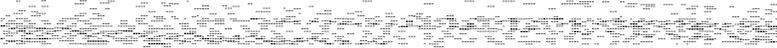
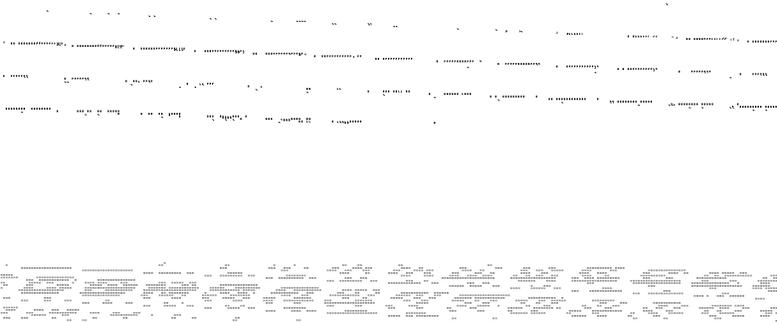
3.2.5 盐度特征指数 (Saltness) ——反映土壤盐渍化差异 利用盐渍化在春秋时节及不同波段图象的特征, 用 M3 月—5/M9 月—7 等表示。

通过以上特征指标提取的专题图象再进行多种复合处理和综合分析。如: TM—rgbi—BGWT 即 B—(TM1²+TM4²+TM5²)/3 赋予红色、G—(TM4—TM3)/(TM4+TM3) 赋予绿色、W—(TM5+TM7)/2 赋予蓝色、T—TM6, 赋予明度 (Intensity); MT—rgbi—BGWS, B—MSS 3 月—(M5²+M7²)/2、G—MSS 9 月—(M7—M5)/(M7+M5)、W—TM 5 月—TM5、S—MSS 3 月、9 月—M5/M7 等。它们分别不同程度地增强了土壤盐渍化—植被—土地利用—地貌等组合特征, 突出了中全新世海侵界线两侧地理景观的综合差异; 而 NT—rgbi—BGT 突出反映了早全新世海侵界线两侧植被—土地利用—盐渍化的景观差异。

上述多种方法的专题特征提取, 相互印证, 相互补充, 从而识别和勾绘出全新世古海岸线。

4 遥感与地学信息的综合分析

经历数千年的时间尺度, 自然环境发生了巨大的变化, 虽经多种专题信息提取, 尚有不



- 2 李铁芳等. 遥感图象数字处理原理与应用. 云南科技出版社, 1987.
- 3 彭望碌等. TM 数据的 Kauth-Thomas 变换在盐渍土分析中的作用. 环境遥感, 1989, (3) .
- 4 Gillespie A. R et al. Color enhancement of highly correlated images, 1: Decorrelation and HSI contrast stretches, *Remote sensing of environment*, 1986, **20** (3): 209-235.

A STUDY ON METHODS OF EXTRACTING REMOTE SENSING INFORMATION FEATURES OF THE HOLOCENE TRANSGRESSION TRACES

Zhao Yingshi Yang Yi

(Graduate School, Academia Sinica, Beijing 100039)

Abstract

In this paper, the integrated analysis of multi-spectral, and multi-temporal remote sensing image data (TM, MSS, NOAA/AVHRR) and geoscience data (geomorphological, hydrogeological, lithofacies, archaeological) have been carried out to identify paleo-coastal lines since the Holocene Epoch in the eastern part of North-China plain. The emphasis of the study is placed on the utilization of information reflecting spatial distribution of salt groundwater and changes of water chemical components, which are closely related to paleo sea transgression and are reflected by environmental factors such as water, heat, salt, soil and vegetations. Some image processing methods are used, so as to better reflect the combined landscape features of soil salinization-vegetation-landuse-geomorphy. Further, integrated processing for images concentrating thematic informations has effectively enhanced the differences of landscapes, for two sides of transgression boundary in the Holocene Epoch. Finally, supported by GIS, a variety of thematic maps are digitized. On the basis of spatial registration, an integrated dataset is generated and used for synthetical analysis for defining and verifying the paleo-coastal lines.

Key words Holocene transgression, Remote sensing image processing, Extraction of thematic features