

基于 TM 遥感影像的河口流态信息半定量化研究

乔远英, 程和琴, 宋泽坤, 吴帅虎, 杨忠勇

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 在结合潮位资料初步判断涨落潮情的基础上, 利用 Gabor 滤波和纹理熵计算等纹理特征分析方法, 从 TM 遥感影像中解译流线, 提取流向, 表征流速(分级), 由此实现了流态信息的半定量化解译。并以长江口—杭州湾北岸 Mike21_FM 潮流数学模型的模拟结果对该方法的试验结果进行了验证, 得出 TM 遥感解译的典型涨、落潮流的平均流向均方根误差(RMSE)为 9.33° , 平均的流速大小分级吻合度为 73.1%。研究表明, 基于纹理特征分析方法进行的河口流态信息遥感解译是可行的, 该方法可以实现流态信息的半定量化, 具有一定的创新性。

关键词: 流态信息; 遥感解译; Gabor 滤波; 纹理熵; 半定量化; 河口

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)05-0118-06

中图分类号: P237

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.029

Research on Information Semi-quantitation of Estuarine Flow Pattern Based on TM Remote Sensing Image

QIAO Yuan-ying, CHENG He-qin, SONG Ze-kun, WU Shuai-hu, YANG Zhong-yong

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: On the basis of preliminary judging the tide situation by tidal level, the streamline was interpreted, the flow direction was extracted and the flow velocity was represented from the Landsat TM images by the texture characteristic analysis method, such as the Gabor filtering and texture entropy calculation, then the semi-quantitative interpretation of the flow pattern was realized. The results were validated by the numerical model Mike21_FM and the average root-mean-square error (RMSE) of the flow direction of flood and ebb was 9.33° , the average fitness of flow velocity classification was 73.1%. It indicates that the remote sensing interpretation of the estuarine flow pattern by the texture characteristic analysis method to semi-quantitative flow pattern information is feasible and innovative.

Keywords: flow pattern information; remote sensing interpretation; Gabor filter; textural entropy; semi-quantitative; estuary

河口表层流态的遥感解译研究方法有干涉合成孔径雷达技术^[1], 基于连续时间序列的图像特征跟踪技术^[2], 以及基于光学遥感影像的流态表示方法。前两者为定量表达, 但由于数据资料不易获取, 费用高昂, 其应用受到了限制。光学遥感影像在流态信息解译方面的应用较广^[3-5], 但由于其主要以光谱信息为依据, 忽视了影像所包含的空间结构信息, 导致这些研究均停留在定性描述和解释, 尚未深入到定量、半定量的有效表达。

近年来, 随着遥感影像的空间分辨率越来越高, 其蕴含的纹理信息也越来越丰富, 纹理分析技术也随

之得到了广泛的应用, 如 Clausi 等^[6]运用 Gabor 小波滤波器分别对加拿大境内结冰水面 SAR 影像和 Brodatz 纹理库中影像进行综合纹理分割, 取得了良好的效果; 胡召玲等^[7]借助正交小波成功地对徐州地区部分 Radarsat 影像进行了纹理信息提取; 黄春龙^[8]利用 ALOS 影像通过各种纹理分析方法对水系进行提取研究, 用以进行地质背景环境分区。

将遥感纹理分析技术的思想引入到河口流态信息解译的研究中, 发现河口区的 TM 遥感影像经过线性拉伸等的图像增强处理后, 有着比较明显的线性纹理特征。本文拟利用 Gabor 滤波分析方法^[9]和纹

收稿日期: 2013-08-27

修回日期: 2013-09-27

资助项目: 上海市科委海洋科技专项基金项目“海岸带脆弱性评估与城市供水安全风险管控分析”(10dz1210600); 国家海洋公益性行业科研专项“中国海平面变化预测及海岸带脆弱性风险评估技术与应用”(201005019-09)

作者简介: 乔远英(1988—), 女(汉族), 山东省聊城市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与 GIS 应用。E-mail: yyqiao156@126.com。

通信作者: 程和琴(1962—), 女(汉族), 安徽省绩溪县人, 教授, 博士生导师, 主要从事河口海岸工程地貌与环境研究。E-mail: hqch@sklec.ecnu.edu.cn。

理统计特征分析方法^[10],进行长江河口地区流向的提取和流速的分级,实现流态信息的半量化,并探讨该方法的合理性。以期为河口流态信息的量化和提取提供新的视角,为光学遥感信息解译提供新的应用领域。

1 研究区域与数据来源

长江河口和杭州湾北岸水域含沙量较高,属于 II 类水体^[11],有明显的水色空间变化;且长江口属于中等强度的潮汐河口,杭州湾北岸是一个强潮海湾,含沙水体受其强劲的动力作用,表层流态特征显著,有

着明显的涨落潮变化,较为适合遥感信息的解译。

因此本文选取 1997—2010 年 8 景长江口和杭州湾北岸(121°0′—123°0′E,32°0′—30°40′N)的 Landsat TM 影像,其分辨率为 30 m×30 m。同时,从历年潮汐表查阅到遥感影像过境日长江口和杭州湾北岸各潮位站的潮位值,包括南堡镇、吴淞、横沙、中浚、北槽中、余山、大戟山、芦潮港和金山嘴 9 个潮位站。由潮位资料估计出相应的潮情、潮型^[12],初步判定出潮流的涨落状况,以便为遥感解译流态信息时提供参考。数据列表及潮情详见表 1,其中过境的具体时间为每个过境日期的 10:00 左右。

表 1 TM 遥感影像数据及其过境时间各潮位站潮情

编号	卫星过境日期	径流汛情	潮型	潮情	编号	卫星过境日期	径流汛情	潮型	潮情
1	20100221	枯季	中潮	涨潮	5	20070728	洪季	中潮	涨潮
2	20090428	枯季	大潮	落潮	6	20000614	洪季	中潮	涨潮
3	20011116	枯季	中潮	落潮	7	20031021	洪季	小潮	涨潮
4	19970411	枯季	中潮	落潮	8	19950406	洪季	小潮	落潮

2 解译原理和方法

纹理是指图像灰度等级的变化,反映了图像上地物呈现的线形纹路。遥感影像的纹理由于其具有的随机性、非重复性、不连续性,表现出一种非结构性^[13]。河口水体的 TM 遥感影像中的线形纹理则是指河口表层携沙水流流动时的流路痕迹,从遥感图像中识别和判释这些纹理结构的过程就是提取水流流态特征,解译河口流态信息的过程。

首先,基于系统校正后的 Landsat TM 影像进行了几何校正、大气校正、去条带噪声、图像增强等的预处理,经过分析比较,选择了水体散射系数最低,反射系数相对最高,受大气影响较小的近红外波段 TM₄ 进行流态图像的纹理特征分析,如 Gabor 滤波、纹理统计特征提取以及流线绘制等。且基于 ENVI 4.8 和 ArcGIS 10.0 进行的前期预处理和目视解译的流线提取,核心的 Gabor 滤波处理和纹理统计特征提取则是以 Matlab 2009b 为平台编程实现。最后利用较为成熟的潮流数学模型 MIKE 21_FM 对 TM 遥感解译的结果进行验证。

2.1 利用 Gabor 滤波方法实现流向信息定量提取

2.1.1 Gabor 滤波增强流向解译标志 纹理信息提取方法有很多,按技术原理分为统计法、结构法、模型法和变换域特征法^[14]。变换域特征法中的 Gabor 变换与人眼的生物作用相仿,可以在频域不同尺度、不同方向上提取相关的特征,这使得 Gabor 滤波在图像

处理中的特征提取等方面得到广泛应用。

Gabor 函数是唯一能够达到空域和频域联合测不准关系下界的函数^[15],具有方向、径向频率带宽及中心频率可协调的优点,能同时在时、频域达到纹理描述最优。因此,根据这些频率和带宽,设计一组 Gabor 滤波器对遥感图像进行滤波,每个 Gabor 滤波器只允许与其频率相对应的纹理顺利通过,而使其他纹理的能量受到抑制^[16],从各滤波器的输出结果中分析和提取纹理特征。常用的偶对称二维 Gabor 滤波器可表示为^[17]:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_\mu\sigma_\theta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu^2}{\sigma_\mu^2} + \frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2}\right)\cos(\omega\mu)\right] \quad (1)$$

$$(\mu = x\cos\theta + y\sin\theta, \theta = -x\sin\theta + y\cos\theta)$$

式中: $h(x, y)$ ——图像上 (x, y) 点位经过滤波后的像素值; θ ——Gabor 滤波器的方向; μ ——平行于 θ 的方向轴; ν ——垂直于 θ 的方向轴; σ_μ, σ_ν ——高斯包络在 μ 轴和 ν 轴上的标准差,用来控制滤波模板的大小; ω ——用于调制滤波的频率。

以流态特征较为明显的 1997 年 4 月 11 日长江河口南槽中段 400×400 个像素的窗口区域为例(图 1),在 Matlab 中编程实现 400×400 尺度,沿河槽主流方向的滤波。不同方向滤波后的图像有着不同的纹理特征信息量,经试验发现,越接近水流实际方向的滤波图像,其纹理信息量越大;在一定范围内越偏离水流实际方向的滤波图像,其纹理信息量越少。1997 年长江河口南槽的主流方向约为 150°,所以

150°方向的滤波图像纹理信息最多,灰度值分散程度较大,其变异系数均值为 1 357.3;120°方向上的纹理信息较少,其变异系数均值仅为 293.0;155°方向的纹理信息量则较为适中,其变异系数均值为 991.5;而常见的 90°,145°,180°方向的滤波图像因其方向的正

余弦项特殊或相消的缘故,显示出的纹理信息极少,变异系数几乎为零。

故经上述多个方向滤波图像的实验观察和比较,选取该试验区 155°方向的滤波图像来解译水流的流路痕迹。

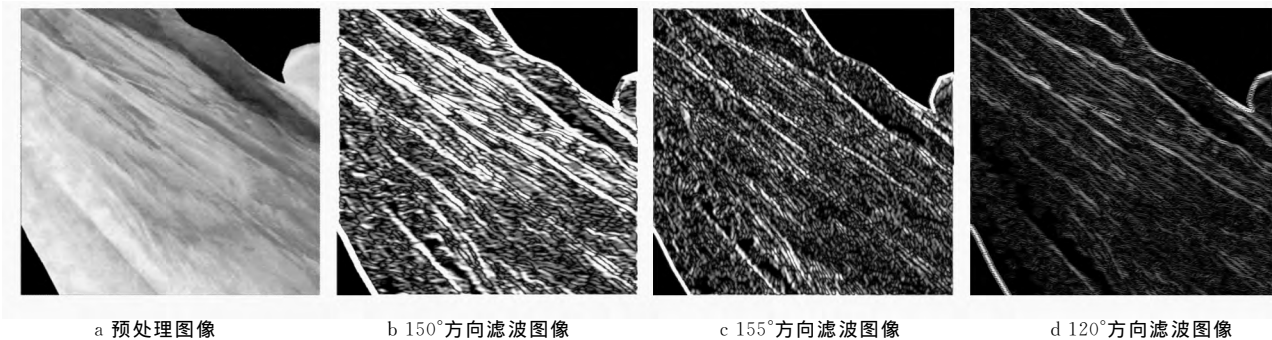


图 1 长江河口南槽中段 1997 年 4 月 11 日 TM 预处理图像及其不同方向上的 Gabor 滤波图像

另外,基于 Gabor 滤波的纹理特征图像可以体现出不同方向上的纹理细节,从而可以较好地显示出水流流动时流路痕迹的前后方向(即涨落潮方向)。例如从图 1b,1c,1d 可以看出,水流是从左上流向右下方向的,因为图像中的水流前方向流路痕迹明显清晰,形成的流线连续而绵长,水流后方向的流线则较为细小破碎,有断断续续的模糊图斑,这些特征正适合成为水流流态的解译标志。

2.1.2 流线目视解译和流向提取 在二维流场中,可以借助流线来展示其流动方向。流线是某一瞬时,在流场中画出的一条空间曲线,在该时刻,曲线上的所有质点的速度矢量均与这条曲线相切^[18]。它是欧拉法描述流动的一种方法。本文就基于上述流向的解译标志,在 ArcGIS 中对滤波图像进行流线的目视解译,主要是沿着亮度值较大的线性纹理进行流线的绘制编辑,再通过线状符号的选定,利用带箭头的线来表示流向。

流向的具体值可通过 ArcGIS 线图层的属性表中的首末点、中间点坐标统计,用“Field Calculator”的公式编写计算出来:

$$\alpha = 90^\circ - \arctan[(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)] \times 180/\pi \quad (2)$$

$$\beta = 270^\circ - \arctan[(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)] \times 180/\pi \quad (3)$$

式中: α ——落潮流线指示的方向值; β ——涨潮流线指示的方向值; (x_1, y_1) ——当前点的地理坐标; (x_2, y_2) ——下一点的地理坐标; $\arctan()$ ——某值的反正切函数。

值得注意的是,解译效果和精度在不同水域有着较大的差异,在狭长的河槽河道中,往复流的流向清晰,解译准确;在口外拦门沙地带,水团涡旋,流向复

杂难辨,解译时需要区分开流线和边际线与不同水团的交汇界限等,需结合经验知识和潮位资料进行准确的判释和解译。

2.2 利用纹理统计特征分析方法实现流速信息半定量分级

纹理统计法是纹理分析的基本方法,将纹理属性描述为随机变量,并计算其统计量^[19],这较为符合河口流态纹理特征随机、不规则的特点。纹理统计法的基础是灰度共生矩阵,它是由图像灰度级 $Z(i, j)$ 之间的联合概率密度 $P(i, j, d, \theta)$ 所构成的矩阵,通过计算图像中特定方向(θ)和特定距离(d)的两像元间从某一灰度过渡到另一灰度的概率,来反映图像在间隔、方向、变化幅度及快慢方面的综合信息。它能反映图像中任意两点间灰度的空间相关性,但它不能直接用于区分纹理的特性。因此,在灰度共生矩阵的基础上,用不同的权矩阵对其进行滤波,提取出用来定量描述纹理特征的统计属性,如对比度、熵、方差、均值、变异性等特征量。

其中熵值(ENT)是图像所具有的信息量的度量〔公式(4)〕。若图像没有任何纹理,则熵接近于零;若图像充满着细纹理,则图像的熵值较大;若图像中分布着较少的纹理,则该图像的熵值较小^[20]。

$$ENT = - \sum_{\substack{0 \leq i \leq m \\ 0 < j < n}} P(i, j) \lg P(i, j) \quad (4)$$

式中: $P(i, j)$ ——灰度共生矩阵第 i 行第 j 列元素的值; $\lg P(i, j)$ —— $P(i, j)$ 的对数值; m, n ——灰度共生矩阵的总行数和总列数。

作为流态纹理图像的一个统计量,熵值可以理解为流场中水流的一种不确定性^[20],或称混乱程度和活跃状态。经研究发现,往复流中细长密集的纹理熵

值较大,对应的流态应较强,水流湍急;若粗宽的纹理不太明显时,熵值较小,此时即可理解为对应的流态较弱,水流较为平缓。拦门沙地带的旋转流,若根据流体力学中的弗劳德数的判定,当弗劳德数稍大于 1 时,水浅流急,处于超临界的流动状态,即高流态,而此时流态纹理也表现的较为复杂,熵值比较高,反之亦然。

因此,本文认为流速大小跟熵值呈正相关的关系,可采用熵值的分级来表征流速的大小分级。为避免分级图像过于破碎,先利用聚类分析方法将具有相

似值的邻近 10 个单元归为一个类别,然后进行基于自然断点的级别分类,总体分为 3 个等级:流速较大、流速中等、流速较小。

同样,以 1997 年 4 月 11 日长江口南槽中段落潮流态图 400×400 个像素的窗口区域为例,在 ENVI 中进行了纹理熵的提取,然后转到 ArcGIS 中进行 Aggregation(聚类)分析,最后基于聚类后的熵值图像进行流速大小等级的划分(图 2)。由图 2 可见,该区域的流速大部分是中等和较大的,符合南槽水流湍急的特点。

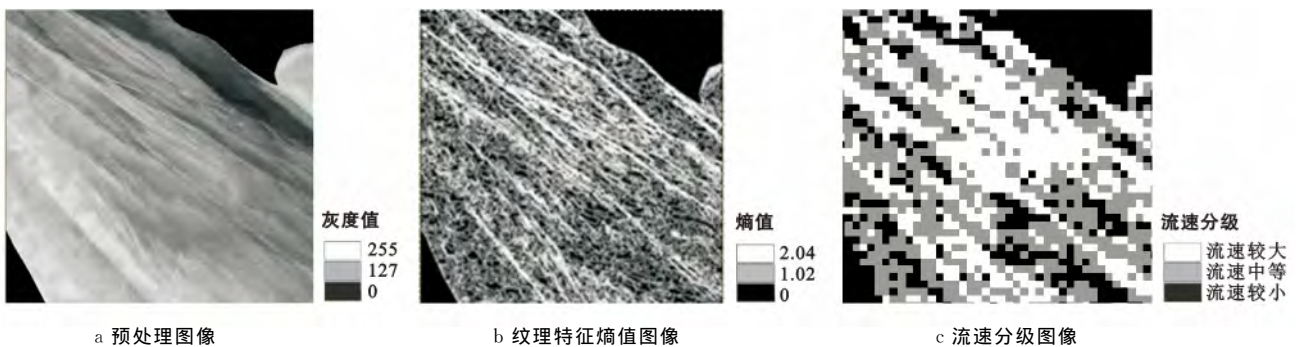


图 2 长江河口南槽中段 1997 年 4 月 11 日 TM 图像及基于其纹理熵的流速分级

3 结果验证及讨论

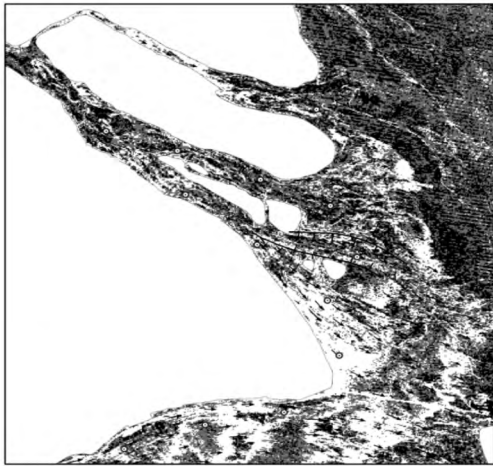
由于研究区域广泛,基于同一时刻不同地点的水流场实测数据的获取难以实现。本文利用本课题组建立的长江口—杭州湾二维潮流数学模型的模拟结果对文中基于 TM 影像纹理特征进行遥感解译出的流场进行验证。该模型是基于 MIKE21_FM 计算软件,采用非结构网格建立的,它计算结果稳定性好,而且经过大量野外实测资料的验证,精度误差仅 10%,可用于类似地区的应用研究^[21]。利用该数学模型模拟与 TM 遥感影像过境日相应时刻的长江口和杭州湾潮流场,并对 8 个时相的遥感解译结果与潮流数学模型模拟结果进行对比验证。本文选取可以代表典型落潮流时段的 2001 年 11 月 16 日 10:00 和代表典型涨潮流时段的 2007 年 4 月 28 日 10:00 两个时刻的对比图进行验证(图 3)。

TM 遥感解译的底图是流速大小分级图。从宏观上来看,流速大小分级的遥感解译结果与模型模拟结果基本一致,流向的趋势亦大致相同。尤其是落潮时期的北港、南支—南港—南槽区域,以及涨潮时期的北支、南支、北港、北槽、杭州湾北岸区域,流速分级和流向吻合度均较好。

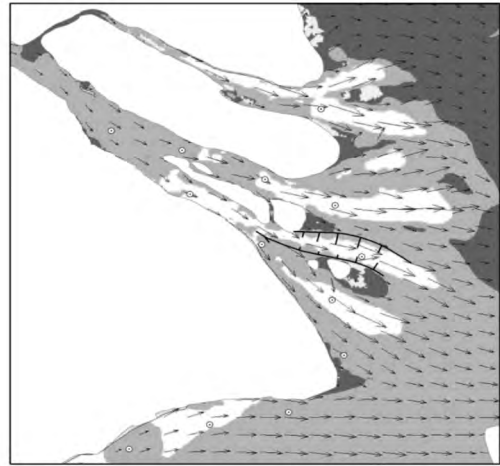
在长江口和杭州湾北岸的典型岸段均匀选取 S_1 — S_{13} 共 13 个验证点,对涨、落潮流向的遥感解译结

果与数值模拟结果进行比较(图 4),发现落潮的流向解译结果更接近于数值模拟结果。为更精确地表示流向和流速大小分级的遥感解译结果,对其进行误差统计分析,流向误差用均方根误差(RMSE)来表示^[22],流速大小分级则用吻合度来度量,得出 2001 年 11 月 16 日 10:00 的落潮流向的均方差方根误差为 6.8° ,流速大小分级的吻合度为 84.6%。2007 年 4 月 28 日 10:00 的涨潮流向的均方根误差为 19.03° ,流速大小分级的吻合度为 61.5%。这说明落潮流态解译效果较涨潮流态解译效果更好。两者平均后的流向的均方根误差为 9.33° ,平均后的流速大小分级的吻合度为 73.1%,在解译结果允许的误差范围之内。

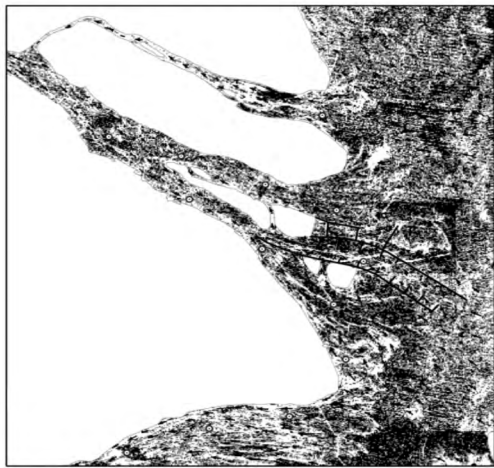
验证结果表明,利用 Gabor 滤波方法解译潮流方向、纹理熵表征流速分级的方法,在一定程度上是可行的,但有些区域由于两者方法的局限性和差异性不能达到吻合。这是因为基于纹理特征的光学遥感解译方法比较适合对悬沙浓度适中的河口河槽进行流态信息解译,含沙量太低或太高的水域都会因线状纹理不明显而受到限制,如南支上段和 $121^\circ 20' E$ 以东的外海区域悬沙浓度很低,水体反射率也低,流态信息难以解译;北支中段和杭州湾北岸落潮时期的高浓度悬沙区域因反射亮度太大,显示不出水流的流路痕迹,也不易提取流态信息,从而导致解译的误差较大。这是遥感解译方法较数值模型方法的不足之处。



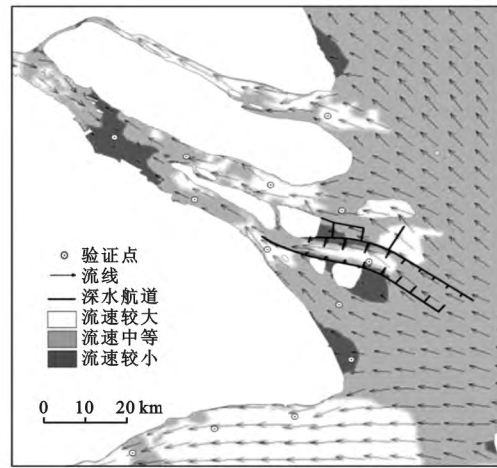
a 2001年11月16日10:00落潮流态的TM遥感解译



b 2001年11月16日10:00落潮流态的Mike21_FM模拟



c 2007年4月28日10:00涨潮流态的TM遥感解译



d 2007年4月28日10:00涨潮流态的Mike21_FM模拟

图 3 长江口和杭州湾北岸落、涨潮流态遥感解译结果和 Mike21_FM 模拟对比

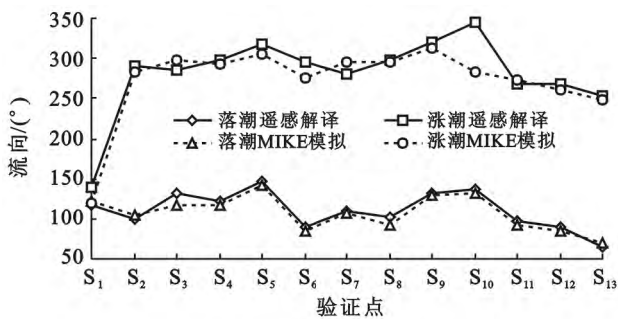


图 4 涨落潮流向的遥感解译结果和数学模拟结果的对比

4 结论

本文提出了基于纹理特征的河口流态信息光学遥感解译方法,通过对长江河口及杭州湾北岸近年来的 TM 遥感影像进行的预处理、图像增强、纹理特征解译等过程,实现了河口表层流态信息从定性描述到半量化表征的初步研究。利用 Mike21_FM 数值

模型对长江河口和杭州湾北岸流态信息的模拟对该方法进行验证,表明在悬沙浓度适中的水域,基于 TM 遥感图像的河口流态信息可以从纹理特征的角度进行研究,通过纹理统计特征量的提取以及频域滤波的处理来表征流速分级和流动方向的方法是可行的。这为河口流态信息的遥感解译提供了一种新的思路和方法,并可为相应施工要求的港口工程建设提供一定的参考。

在技术方法上本文有创新之处,如同时在时、频域达到双优选的 Gabor 滤波器在增强流态解译标志,提高流向判释准确度方面具有很大的优势,能很好地提取出不同方向上的潮流特征,较传统的特征统计方法虽然更适合解译潮流的流向,但对流线的解译却是通过受主观因素影响较大的目视解译方法提取出来的,其结果具有一定的误差。用计算机自动提取流线应更为快速、方便和精确。另外,纹理统计特征量——熵值是表征潮汐河口流速的重要参数,但为了

提高处理精度,还需考虑更多的流态解译影响因素来综合分析和判定。

[参 考 文 献]

- [1] Goldstein R M, Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. *Nature*, 1987,328:707-709.
- [2] Christian M S, Seemann J, Friedwart Z. The near-surface current velocity determined from image sequences of the sea surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001,39(3):492-505.
- [3] 罗健,龚静怡,张行南. 九龙江口及厦门湾悬沙分布和输移沉积的多时相遥感分析[J]. *水利水运科学研究*, 1999(4):368-376.
- [4] 丁晓英,许祥向. 应用遥感技术分析韩江河口悬沙的动态特征[J]. *国土资源遥感*, 2007(3):71-73.
- [5] 恽才兴. 图说长江河口演变[M]. 北京:海洋出版社, 2010:163-224.
- [6] Clausi D A, Jernigan M E. Designing Gabor filters for optimal texture separability[J]. *Pattern Recognition*, 2000,33(11):1835-1849.
- [7] 胡召玲,郭达志,盛业华. 基于小波分解的星载 SAR 图像纹理信息提取[J]. *遥感学报*, 2001,5(6):424-427.
- [8] 黄春龙. 基于纹理的水系信息提取及其特征分析[D]. 长春:吉林大学, 2009:32-37.
- [9] Alexander B, Long S, Paul F. Detecting rock glacier flow structures using Gabor filters and IKONOS imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,125:227-237.
- [10] Bovik A C, Clark M, Geisler W S. Multichannel texture analysis using localized spatial filters[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990,12(1):55-73.
- [11] 韩震. 海岸带淤泥质潮滩和 II 类水体悬浮泥沙遥感信息提取与定量反演研究[D]. 上海:华东师范大学, 2009:7-27.
- [12] 杨世纶. 海岸环境和地貌过程导论[M]. 北京:海洋出版社, 2003:91-95.
- [13] 李春华. 基于光谱信息和空间信息的高分辨率遥感图像模式识别[D]. 福州:福建师范大学, 2007:31-34.
- [14] 周坚华. 遥感图像分析与空间数据挖掘[M]. 上海:上海科技教育出版社, 2010:91-103.
- [15] Turner M. Texture discrimination by Gabor functions[J]. *Biological Cybernetics*, 1986,55(2/3):71-82.
- [16] 宇洁,关泽群. 不同成像条件下目标纹理特征描述之间的转换方法研究[J]. *测绘通报*, 2012(S):375-379.
- [17] 陈小光,封举富. Gabor 滤波器的快速实现[J]. *自动化学报*, 2007,33(5):457-461.
- [18] 苏芳珍. 流线与迹线的区别与联系[J]. *延安大学学报*, 1995,14(2):59-62.
- [19] 马莉,范影乐. 纹理图像分析[M]. 北京:科学出版社, 2009:19-28.
- [20] 李三平,葛咏,李德玉. 遥感信息处理不确定性的可视化表达[J]. *国土资源遥感*, 2006(2):20-26.
- [21] 宋泽坤,程和琴,胡浩,等. 长江口北支围垦对其水动力影响的数值模拟分析[J]. *人民长江*, 2012,43(15):59-63.
- [22] Wu Hui, Zhu Jianrong, Shen Jian, et al. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011,116(C8):1-21.