

# 基于星载 SAR 图像的一次黄海溢油事件分析

张沈阳<sup>1</sup>, 郑 汲<sup>1</sup>, 徐 青<sup>2,3</sup>, 程永存<sup>4</sup>

(1. 浙江省河海测绘院, 浙江 杭州 310008; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 丹麦技术大学国家空间研究所, 哥本哈根)

**摘要:**以发生于黄海的一次溢油事件为例, 基于2007年10月11日的欧洲环境卫星 ENVISAT ASAR 图像, 首先通过先验知识和其他多源卫星数据对海面溢油事件的发生进行验证, 然后采用神经网络方法对该图像进行分割, 提取出溢油发生时间、形状、面积、周长、位置等信息, 最后结合油膜形状、风场资料等信息初步估计油膜的可能成因和最小存在时间。从 SAR 图像得到的溢油信息与水动力数值模型以及溢油扩散模型相结合可以预测溢油扩散轨迹, 为海洋灾害应急部门提供必要信息。

**关键词:**溢油; 星载 SAR 图像; 合成孔径雷达; 人工神经网络; 黄海

**中图分类号:** X55      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2013)S1-0047-04

我国海洋油污问题相当严重。据国家海洋局统计, 中国沿海地区平均每4d发生一起溢油事故。仅1998—2008年, 中国管辖海域就发生了733起船舶污染事故。近几年来, 重大溢油事故频发: 2010年大连石油管线爆炸, 致1500t原油泄漏入海, 造成当地海域的生态危害或将持续10a; 2011年7月, 渤海溢油事件造成5500km<sup>2</sup>(大致相当于渤海面积的7%)海水被污染, 是我国迄今为止最严重的海洋环境生态事故。这些溢油事件不仅造成了重大的经济损失, 而且严重破坏了海洋生态环境。因此, 及早对溢油进行监测, 并采取有效措施保护海洋环境十分重要。

随着卫星遥感技术的高速发展, 遥感技术已经越来越多地应用于海面溢油监测中, 特别是合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)凭借其全天候、全天时以及高空间分辨率等特点成为海面溢油监测的重要工具<sup>[1-3]</sup>。在 SAR 图像上, 海面油膜一般表现出黑色条状或斑块特征, 这是由于油膜的存在使产生 Bragg 散射的短表面波受到阻尼, 造成海面粗糙度降低, 使雷达接收的后向散射回波减少。

近十几年来, 各国科学家对基于星载 SAR 数据的溢油监测进行了研究, 提出了图像分割法、特征提取法和海面溢油与疑似溢油分类法等溢油监测方

法, 在溢油监测与分类方面取得了较好的结果<sup>[4-9]</sup>。

本文以黄海 ENVISAT ASAR(advanced synthetic aperture radar)溢油图像为例, 利用神经网络法对溢油图像进行分割, 提取溢油特征, 获取溢油发生时间、地点、形状、面积、周长等信息。

## 1 研究数据

本文选择一景2007年10月11日01:58UTC获取的欧洲环境卫星 ENVISAT ASAR 溢油图像(图1), 图像覆盖区域为黄海(121°40'12" E ~ 122°46'56" E, 34°19'39" N ~ 35°26'27" N), 像元大小为6512×8781, 工作模式为VV极化模式, 工作波段为C波段, 入射角为20°~45°, 空间分辨率为30m×30m。图中用a和b标注的椭圆区域中的暗斑可能为溢油。

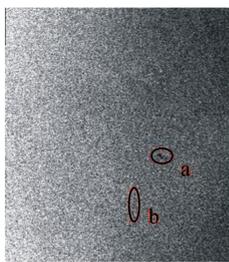
图1(c)为原始 ASAR 图像(图1(a))经过滤波抑噪(Gamma滤波, 窗口大小为5×5)和地理定位后的结果。与原始图像相比可以看出, 预处理后的图像更为平滑, 且图像对比度增加。

## 2 SAR 图像人工目视解译

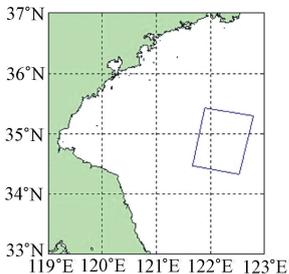
除油膜外, 由其他大气或者海洋现象引起的类油膜在 SAR 图像上也可能表现为暗斑特征, 比如低

基金项目: 国家自然科学基金(41006108); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金(201113); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(2011001)。

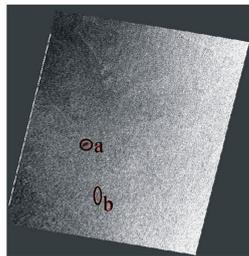
作者简介: 张沈阳(1981—), 男, 浙江金华人, 工程师, 主要从事海洋水文和测绘研究。E-mail: 399971530@qq.com



(a) 黄海 ENVIATASAR 图像



(b) SAR 图像覆盖区域的地理位置 (方框所示区域)



(c) ENVIATASAR 原始图像经过滤波抑噪和地理定位之后

图 1 ENVIAT ASAR 溢油图像及其地理位置

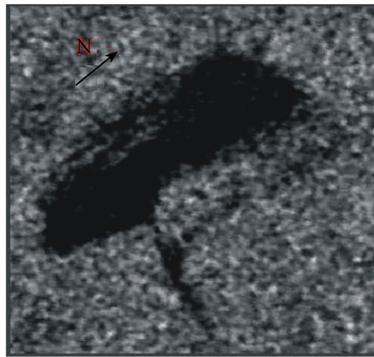
风速区、油脂状海冰、背风岬角、降雨、内波、天然生物膜、上升流等<sup>[4]</sup>。类油膜现象增加了 SAR 监测溢油的难度。此外, SAR 监测溢油受海面上空风速的影响较大, 一般认为 3~7 m/s 是监测溢油的最佳风速。风速太小 (<3 m/s), 低风速区在 SAR 图像上呈现暗斑特征, 表现为类油膜现象; 风速太大 (>10 m/s), 油膜和上层海水充分混合, 造成 SAR 无法监测。

尽管目前已经研究开发出一些 SAR 海面溢油监测系统, 但人工目视解译仍占重要地位。人工目视解译是指科研工作者根据自己的先验知识, 定性提取目标信息, 如形状、位置等, 并对这些信息进行分析 and 判读, 从而识别图像上的目标物体。SAR 图像人工目视解译特征主要包括目标物形状、大小、灰度、纹理、位置、布局等, 另外, 可以与其他传感器的数据如海面风场、海表面温度等相结合, 以增加目视解译的准确性。

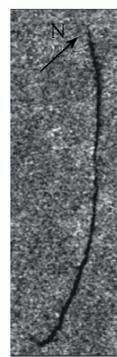
图 2 为图 1(a) 椭圆形区域 a 和 b 放大后的图像。图像对比度较大, 暗色区域易于辨认。但能在 SAR 图像上产生暗斑的不止油膜, 也有可能是类油膜现象。

**a.** 从地理位置上看, 区域 a 和 b 远离陆地, 因此不可能是背风岬角或河口区域工业排放污染物。

**b.** 从形状上看, 区域 a 成块状。在 SAR 图像上, 油脂状海冰、天然生物表面膜、低风速区、上升流、油膜等都可能形成块状暗斑, 上升流一般持续时间较长。美国宇航局喷气推进实验室物理海洋学数据分发存档中心 (PODAAC) 2007 年 10 月 ASAR 探测海域的海表面温度分布资料显示, 整个海域 10



(a) 区域 a

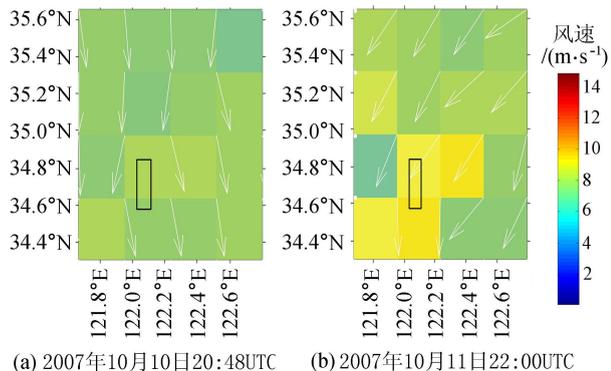


(b) 区域 b

图 2 椭圆形区域 a 和 b 放大后的图像

月的平均温度都在 19℃ 以上, 因此可知: (a) 区域 a 非上升流区; (b) 区域 a 非海冰; (c) 暗斑是天然生物表面膜的可能性很小。因为黄海海域 10 月是秋冬交替的季节, 浮游生物和鱼类活动并不强烈, 而且生物表面膜受海流影响较大, 往往在 SAR 图像上呈现出黑色螺旋状特征。

图 3 为 ASAR 成像当天研究海域 2007 年 10 月 10 日 20:48UTC (成像前 5 h) 以及 2007 年 10 月 11 日 22:00UTC (成像后 20 h) 的 QuikSCAT 散射计观测的瞬时海面风场信息。图中矩形区域为 2 块暗斑所处位置。从图 3 可以看出: 成像前 5 h 研究海域风速都在 6.8 m/s 以上, 风向为北风; 成像后 20 h 研究海域风速都在 5.6 m/s 以上, 风向为东北风。尽管 ASAR 成像时瞬时风场数据缺失, 但从图 3 可以推断暗斑所处位置的风速应为 7~8 m/s, 风向大致为北风, 所以暗斑所处区域不存在低风速区 (风速小于 3 m/s), 而且在 7~8 m/s 风速下自然生物膜很难被 ASAR 探测到, 因为在高风速下自然生物膜早已扩散消失。综合以上分析, 区域 a 暗斑应是海面溢油。



(a) 2007年10月10日20:48UTC (b) 2007年10月11日22:00UTC

图 3 ASAR 图像覆盖区域瞬时风速和风向

区域 b 暗斑成线状, 在 SAR 图像上, 内波、船尾迹和航行中的船舶非法排污引起的溢油都表现为一定宽度的线形结构。但是船尾迹表现为直线, 溢油则随着船的航行轨迹表现为折线, 而内波表现为明暗相间的弧线特征。因此, 该线状暗斑不可能为内波或船尾迹。黄海海域航线密集, 由此分析, 该区域线状

暗斑很可能是船只航行过程中非法排放的油污。

### 3 SAR 溢油图像分割与信息提取

#### 3.1 SAR 溢油图像分割

为了识别和分析油膜区域,必须把油膜区域从背景海水中分离提取出来,因此必须对 SAR 图像进行分割。目前,图像分割是 SAR 溢油监测研究的重点,主要有单一阈值法<sup>[2]</sup>、自适应阈值法<sup>[10]</sup>、水平集法<sup>[11]</sup>、人工神经网络法<sup>[12-13]</sup>。

本文采用目前应用最为广泛的误差反向传播前馈网络,即 BP(back propagation)网络。BP 网络模型包括一个输入层,一个或多个隐层,一个输出层。

BP 网络模型输入层神经元个数为 1,为图像像素的 DN 值即强度值;隐层神经元个数根据 Kolmogorov 定理<sup>[14]</sup>确定为 3 个;输出层神经元个数为 1。输出值 0 表示为暗斑,1 表示为海水。学习速率定为 0.01,最大训练步数为 15 000。

从 13 景可能含有溢油的 ENVISAT ASAR 图像上选取 102 个暗斑子图像(含油膜和类油膜),其中 52 个作为训练数据,50 个作为测试数据。在作为训练数据的 52 个 SAR 子图像中分别选取 100 个暗斑像素点的 DN 值和 100 个海水像素点的 DN 值,并将这 200 个像素点的 DN 值转化为灰度值(0~255)。

用训练好的 BP 网络对区域 a 和 b 油膜进行分割,结果见图 4。

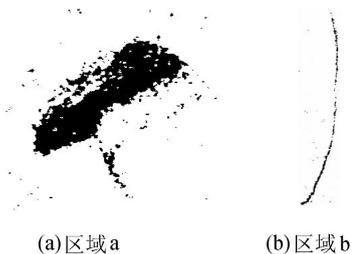


图 4 SAR 图像分割后的溢油区域(黑色为溢油)

用均方误差为 0.049 573 的 BP 网络对 50 个测试数据进行测试,结果可以分为 3 类:①第 1 类。42 幅图像的分割效果较好,能够准确识别海水为 1,油膜为 0,识别精度达 84%。②第 2 类。有一定的分割效果,但对于海水像素和油膜像素存在误判,这样的图像有 2 幅。③第 3 类。完全不能把暗斑识别为 0,背景海水识别为 1,该类图像有 6 幅。具体分割效果如图 5 所示。

第 2 类图像的产生可能是以下原因:由于 BP 网络分割图像的原理是对图像中的每个像素进行识别,而测试数据共 50 个,9868 500 个像素,每个 DN 值都介于 0~255 之间,这势必会导致有极少一部分来自不同种类(油膜和类油膜)的像素具有相同的 DN

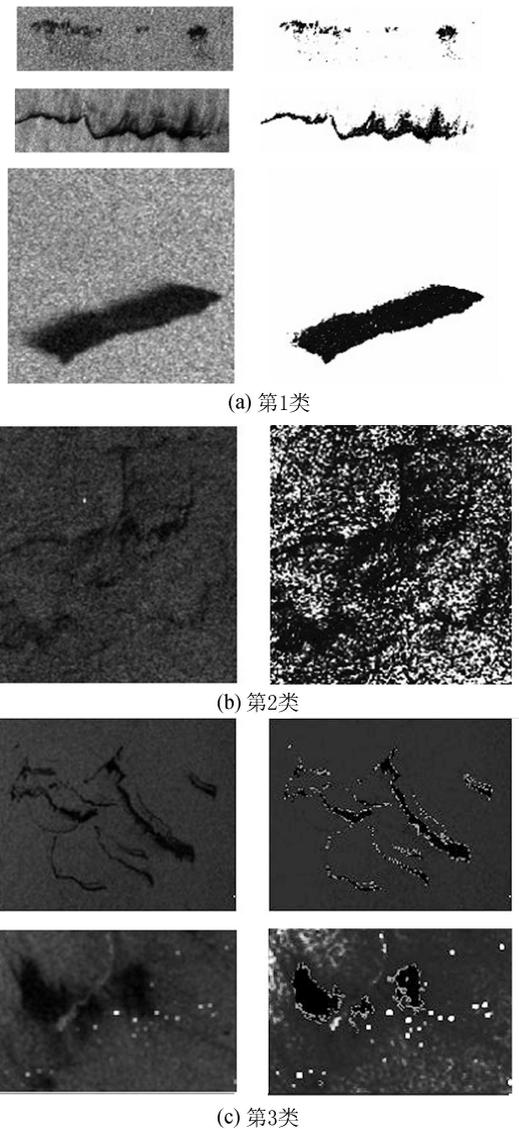


图 5 分割效果

值从而造成识别错误。50 个测试数据中只有 2 个测试数据产生这种识别错误,这在可接受范围之内。

第 3 类图像的产生应该是训练数据的不平衡性引起的。假设以训练数据 DN 值的平均值来表征训练数据的种类,对 52 个训练子图像求其 DN 值的平均值,发现平均值在 100 以上的有 31 组,40~100 的有 17 组,其中 80 以上 7 组,6~40 的只有 4 组。再对比测试数据 DN 平均值,发现 100 以上的有 32 组,40~100 11 组,其中 80 以上 8 组,6~40 的只有 7 组。而测试数据中分割效果较好的 42 个子图像的 DN 平均值都在 40 以上,这其中有 40 个子图像的 DN 平均值在 80 以上。而完全不能识别的 6 组测试数据,其 DN 平均值都在 35 以下。从以上分析可以发现,测试数据中分割效果好的图像其 DN 平均值在训练数据中的出现频率非常高(训练数据中有 38 组数据的 DN 平均值在 80 以上,同时测试数据中 DN 平均值在 80 以上的 40 组数据都取得了很

好的分割效果);反之,在测试数据中分割效果很差的图像其 DN 平均值在训练数据中的出现频率非常低(训练数据中只有 4 组数据的 DN 平均值在 40 以下,同时测试数据中 DN 平均值在 35 以下的 6 组数据的分割效果都非常差),说明训练数据种类的不平衡会极大影响测试的效果。

### 3.2 SAR 图像溢油信息提取

用 BP 神经网络法从背景海水中分割出溢油(图 5),计算得:区域 a 溢油的面积为  $3.30 \text{ km}^2$ ,周长为  $27.55 \text{ km}$ ;区域 b 溢油的面积为  $1.14 \text{ km}^2$ ,周长为  $24.70 \text{ km}$ ,长度为  $12.21 \text{ km}$ ,宽度为  $0.14 \text{ km}^2$ 。区域 a 油膜覆盖区域为  $122.028^\circ \text{ E} \sim 122.059^\circ \text{ E}$ ,  $34.809^\circ \text{ N} \sim 34.840^\circ \text{ N}$ ;区域 b 油膜覆盖区域为  $122.097^\circ \text{ E} \sim 122.113^\circ \text{ E}$ ,  $34.578^\circ \text{ N} \sim 34.667^\circ \text{ N}$ 。

## 4 油膜存在时间估计

海面油膜常见的形状为线状、弯曲状、角状、块状<sup>[15]</sup>。这 4 种形状油膜的形成受到船体运动轨迹、海表面风、海表面流、溢油类型、溢油排放量等多方面因素的影响,本文只考虑影响油膜形状形成的主要因素,进而粗略判断油膜的存在时间。

由于风场和海流场在一段时间内很难保持一致,所以线状油膜的形成很有可能是因为船只在航行过程中非法排污造成的,一般认为船只航行速度和方向是影响油膜形状的主要因素。弯曲状油膜形状虽然是弧形的,但没有很大角度的变化,说明它持续受到某个方向风场的影响。由于角状油膜形状上有比较大的角度变化,因此首先考虑风场资料。如果风向和油膜形状、角度的改变匹配,则认为风场是影响油膜形状的主要因素(对于某些海表面流很强的区域也要考虑流场信息),如果风场资料与油膜形状的改变不匹配,再考虑海表面流对油膜形状的影响。块状油膜最复杂,一般存在时间较长,长时间受到风场和海流场的影响,加上油膜自身各种物理、化学变化,使得油膜形状非常不规则,很难判断存在时间。

区域 b 油膜大致成线状,说明该油膜很有可能是船只在航行过程中非法排污造成的。而油膜与背景海水对比度比较大,没有出现羽化现象,说明油膜存在时间不长,可认为船只的航行方向和速度是影响油膜形状的主要因素。溢油存在时间与油膜长度/船只航行速度大致相当,不同类型的船只航行速度不一样,但 SAR 观测到油膜时该油膜可能已经存在海面上存在一段时间了,所以通过船只航行速度算出的油膜排放时间应是最小油膜存在时间。

从灰度特征上看,区域 a 油膜的边缘有些模糊,与海水的对比度也没有区域 b 油膜强,虽然区域 a

油膜成块状,但其边缘部分已经出现了不连通的小块油膜,有少许地方已经和海水混合,成为与背景海水一样的灰色,说明油膜已经开始发生物理、化学变化。从形状上看,虽然该海域的风向为北风至东北风,但其形状与风向关系不大,说明区域 a 油膜受到了风场和海流场长时间作用,单从一幅 SAR 图像已经很难判断其存在时间了。但可以肯定区域 a 油膜不是船只在航行过程中非法排污造成的,有可能是类似于海上石油钻井平台等海上工程排污引起的。

## 5 结语

本文以一次黄海溢油事件为例,从一景 ENVISAT ASAR 图像出发,通过先验知识和多源卫星数据(风速和海表面温度),人工解译出 SAR 图像上的暗斑为溢油。采用神经网络方法从背景海水中分割出溢油,提取溢油面积、周长、地理位置等信息,并结合油膜形状和风速资料粗略判断油膜的成因和最小存在时间,结果表明,星载 SAR 能很好地应用于海面溢油监测。研究结果还可以与溢油扩散数值模型相结合,预测溢油运动轨迹,指导溢油监测与应急,并为溢油对近岸湿地、海滩和其他脆弱环境的影响提供环境信息。

### 参考文献:

- [1] FISCELLA B, GIANCASPRO A, NIRCHIO F, et al. Oil spill detection using marine SAR images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18):3561-3566.
- [2] SOLBERG A H S, DOKKEN S T, SOLBERG R. Automatic detection of oil spills in ENVISAT, radarsat and ERS SAR images[J]. IGARSS2003, 2003, 4:2747-2749.
- [3] BREKKE C, SOLBERG A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95:1-13.
- [4] ALPERS W H, ESPEDAL A. Oils and surfactants[M] // CHRISTOPHER R J, APEL J R. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual. Washington D C: US Department of Commerce, 2004:263-276.
- [5] SOLBERG A H S, STORVIK G, SOLBERG R, et al. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(4):1916-1924.
- [6] WU S Y, LIU A K. Towards an automated ocean feature detection, extraction and classification scheme for SAR imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5):935-951.
- [7] FRATE F D, PETROEHI A, LICHTENEGGER J, et al. Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5):2282-2287. (下转第 55 页)

样性指数、景观均匀度指数、优势度指数等来掌握水域空间异质性的动态变化。景观多样性指数、景观均匀度指数和景观优势度指数的计算公式<sup>[8]</sup>分别为

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{- \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i}{\ln m} \quad (3)$$

$$D = H_{\max} + \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (4)$$

式中: $P$ 为景观类型; $i$ 为所占面积的比例; $m$ 为景观类型数量; $H_{\max}$ 为景观多样性指数的最大可能取值。

## 5 结 语

水域保护和水生态环境建设在人口、资源、环境平衡和经济社会协调发展具有重要意义。做好水域保护和水生态环境建设,涉及余姚市经济、技术等多个方面,以及种群、群落、生态系统、景观生态系统等多个层次。近几年来,余姚市积极开展生态护岸、环保疏浚等工作,应用景观生态学理论开展了水域保护与水生态环境建设的实践与探索,取得了良好的效果。建议今后将水土保持、农村水环境整治等有关工程进行整合,加强生态学过程的观测和分析,

(上接第46页)

### 参考文献:

- [1] 何结兵,洪宝宁. CFG 桩复合地基桩土应力比数值分析[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2004,7(1):61-64.
- [2] 陈昌仁,侯新宇,郭洪涛. CFG 桩复合地基承载力经验公式的修正及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):321-324.
- [3] 安建国. 含有缺陷桩的桩基础竖向承载性状的三维有限元分析[D]. 天津:天津大学,2006.
- [4] 宋祖民. 缺陷桩水平承载性状的数值模拟[D]. 天津:天

(上接第50页)

- [8] 徐青,郑汲,程永存,等. 应用纹理分析识别 SAR 海上溢油图像[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(5):569-574.
- [9] 邹亚荣,王华,朱海天,等. 海上溢油 SAR 图像分割算法研究[J]. 海洋环境科学,2009,28(3):313-315.
- [10] SOLBERG A H S, BREKKE C P, HUSOY O. Oil spill detection in radarsat and envisat sar images [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3):746-755.
- [11] CHAN T, VESE L. Active contours without edge[J]. IEEE Trans Image Proc, 2001, 10:66-277.
- [12] CHENG Yong-cun, LI Xiao-feng, XU Qing, et al. SAR

以进一步利用景观生态学理论指导余姚市的水域保护和水环境建设。

### 参考文献:

- [1] 水行政执法责任制工作手册[M]. 杭州:浙江省水利厅, 2010.
- [2] 董哲仁,孙东亚,王俊娜,等. 河流生态学相关交叉学科进展[J]. 水利水电技术,2009,40(8):36-43.
- [3] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [4] 余姚市水域保护规划[R]. 杭州:浙江省水利河口研究院,2009.
- [5] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [6] 陈吉江,严永红,陈起红. 陆埠水库人工湿地生态系统设计及探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(增刊2):249-251.
- [7] 张世瑕,王紫雯,张继明. 流域湿地的景观生态特性分析与景观特征指数的运用:以杭州沿山河流域和西溪湿地为对象[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(6):1054-1060.
- [8] 董哲仁,孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

(收稿日期:2012-09-21 编辑:骆超)

津大学,2006.

- [5] 卓华雄. 浅谈特殊环境中 CFG 桩复合地基的缺陷[J]. 山西建筑,2009,35(30):93-94.
- [6] 刘学峰,李麦玲,李发成. CFG 桩桩体浅部断裂问题的探讨[J]. 陕西建筑,2009(3):38-40.
- [7] 贾志刚,吴雄志,焦利国. 长螺旋 CFG 桩施工质量缺陷及改进措施实例[J]. 山西建筑,2007,33(8):117-118.
- [8] 詹云刚. CFG 桩复合地基加固深厚软基沉降计算研究[D]. 南京:南京工业大学,2005:42-43.
- [9] GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S].

(收稿日期:2012-12-05 编辑:胡新宇)

observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(2):350-363.

- [13] 石立坚,赵朝方,刘朋. 基于纹理分析和人工神经网络的 SAR 图像中海面溢油识别方法[J]. 中国海洋大学学报,2010,39(6):1269-1274.
- [14] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:100-110.
- [15] ESPEDAL H A, WAHL T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(1):49-65.

(收稿日期:2013-01-28 编辑:胡新宇)