

渤海陆源入海排污口的多尺度遥感监测分析

邬明权, 牛 铮*, 高 帅, 许时光, 王李娟

(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 陆源入海排污口是主要的海洋污染源之一, 陆源入海排污口调查是海洋环境监测的重要内容。故此, 针对陆源入海排污口监测与评价的业务需求, 参照现行“陆源入海排污口及邻近海域生态环境监测指南”(HY/T086—2005), 在综合考虑各类卫星传感器应用能力与经济性的基础上, 研究提出了一种利用多尺度卫星遥感数据对陆源入海排污口监测的方法。通过中分辨率卫星遥感数据的水质参数反演, 结合水体光谱特征, 进行渤海海域水质评价, 划分重点监测区域, 再利用高分辨率遥感影像, 进行排污口的解译与制图。试验结果表明, 该方法可以准确识别陆源入海排污口的分布及污染类型, 对该区环境整治具有深远科学意义。

关键词: 渤海; 陆源入海排污口; 遥感; 污染监测

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00405

1 引言

陆源入海排污口是主要的海洋污染源之一, 对陆源入海排污口调查, 是海洋环境监测的重要内容。近年来, 国内各级海洋环境监测机构, 相继开展了陆源入海排污口调查工作, 国家海洋局也发布了“陆源入海排污口及邻近海域生态环境评价指南”^[1](HY/T086—2005)(以下简称评价指南)。对此, 以往采用的方法主要是实地采样化学分析方法, 调查与分析工作量巨大, 且成本很高。本文采用卫星遥感技术对近岸陆源入海排污口进行调查^[2-3]。

针对陆源入海排污口监测的业务需求和卫星遥感数据的特点, 作者综合考虑陆源入海排污口调查业务运行的经济性和效益, 对陆源入海排污口的调查进行了尝试, 提出一种多尺度遥感数据调查陆源入海排污口的方法。该方法充分发挥不同尺度卫星遥感数据在数据获取能力和经济上的差异, 利用中分辨率卫星数据进行大范围的环境监测, 框定重点监测区域, 再以高空间分辨率卫星遥感数据, 对重点区域进行排污口分析解译, 确定排污口位置

和类型。

2 研究区与数据

2.1 渤海入海处地理背景

渤海是中国的内海(图1)。三面环陆, 在辽宁、河北、山东、天津三省一市之间, 东面经渤海海峡与黄海相通。具体位置为: 北纬 $37^{\circ}07'$ ~ $41^{\circ}00'$ 、东经

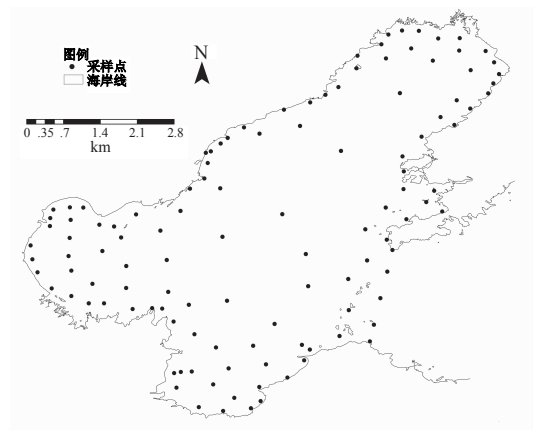


图1 研究区及采样点分布图

Fig. 1 Locations of the field data

收稿日期: 2011-09-10; **修回日期:** 2012-05-22.

基金项目: 国家海洋局“海洋环境保护与减排”专项“渤海环境立体监测与动态评价”课题(BH2009RS); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950603); 公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201006042)。

作者简介: 邬明权(1983-), 男, 湖南株洲人, 助理研究员, 博士, 研究方向: 农业遥感与海洋遥感。

E-mail: wumq@irsa.ac.cn

* **通讯作者:** 牛 铮(1965-), 北京人, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 全球变化遥感。E-mail: niuz@irsa.ac.cn

117°35′~121°10′。渤海周围有 3 个主要海湾:北面辽东湾、西面渤海湾、南面莱州湾。渤海海域面积 77 284km²,大陆海岸线长 2668km,平均水深 18m,最大水深 85m,20m 内的浅海海域面积占一半以上。渤海地处北温带,夏无酷暑,冬无严寒,多年平均气温 10.7℃,降水量 500~600mm,海水盐度为 30°。

2.2 数据及预处理

2.2.1 实测数据及预处理

实测数据主要包括实测排污口邻近水域光谱数据、叶绿素 a 和悬浮物浓度含量、水深、水体透明度、水温、水色、排污口经纬度坐标、风速和风向等参数。实测数据共计 202 个采样点。

水体光谱测量采用 ASD 光谱仪使用表面法测量^[4]。表面法水体光谱测量按照标准板-天空光-目标-天空光-标准板-遮阳标准板的顺序进行样点的光谱测量,且每个样点目标至少测量 20 次,天空光与参考板每次各至少测量 10 次,即每个样点目标、标准板和天空光各至少测量 20 次,遮阳标准板至少测量 10 次。取其平均值作为该点的反射光谱值。

在避开太阳直射反射、忽略或避开水面泡沫的情况下,ASD 光谱仪测量的水体光谱数据 L_{SW} 为:

$$L_{SW} = L_W + r \cdot L_{sky} \tag{1}$$

其中, L_W 为离水辐亮度; L_{sky} 为天空漫散射光,不帶有任何水体信息; $r=2.1\% \sim 5\%$, $r=r(\overline{W}, \theta_v, \varphi_v, \theta_o, \varphi_o)$ 为气-水界面对天空光的反射率,取决于太阳位置 (θ_o, φ_o) 、观测几何 (θ_v, φ_v) 、风速风向 (\overline{W}) 或海面粗糙度等因素。

在表面法观测几何条件下,平静水面可取 $r=0.022$,在 5m/s 左右风速的情况下, r 可取 0.025,10m/s 左右风速的情况下,取 0.026~0.028。由此可得离水辐亮度为:

$$L_W = L_{SW} - r \cdot L_{sky} \tag{2}$$

再利用水表面总的辐照度 $E_d(0^+)$,可以求得遥感反射比 R_{rs} ,计算公式为:

$$R_{rs} = \frac{L_W}{E_d(0^+)} \tag{3}$$

这种测量方法可以有效剔除噪音,特别是天空光信号的干扰,具有很高的精度。

2.2.2 卫星数据及预处理

(1)Landsat 数据

Landsat-TM 是搭载在 Landsat-4/5 卫星上的传感器,具有红、绿、蓝等 7 个波段,空间分辨率为 30 米,回返周期为 16 天,是一种广泛应用于水质监测的中分辨率卫星传感器。本文采用了 9 景覆盖整个渤海地区的 Landsat-TM 数据(数据获取时间为 2009 年 8 月和 9 月,轨道号为:120-122,30-34)。选取其中 6 景 Landsat-TM 数据与同步的 22 个地面实测样点进行渤海水质参数的反演。数据获取时间见表 1:

表 1 采用的 Landsat-TM 影像
Tab. 1 Landsat TM images used in our study

轨道号	获取时间
120-32	2009-8-16
120-33	2009-8-16
120-33	2009-9-17
120-34	2009-8-16
121-32	2009-8-7
121-33	2009-8-7

利用 ENVI 的辐射定标工具及 Landsat-TM 数据头文件中的增益和偏移系数,对 Landsat-TM 进行辐射定标,再用 ENVI 的 Flaash 大气校正模块对影像进行了大气校正。Flaash 大气校正的输入参数包括中心点经纬度、卫星类型、地面高度、气溶胶模式和大气模式等,在大气校正时,中心点经纬度、卫星类型、地面高度和气溶胶模式等根据数据实际情况输入或选择,大气模式根据中心点经纬度和数据日期通过查找表选择。进行大气校正获得离水亮度 L 之后再转换成离水反射率 R ,转换公式为:

$$R = L / (t \times F \times \cos \alpha) \tag{4}$$

其中: t 为太阳至水面的大气透射率; F 是大气上界太阳辐照度, α 是太阳天顶角。

采用 1:10 000 的地形图对大气校正后的影像进行了几何校正,其误差小于 0.5 个像元。

由于本研究的主要区域是水体,与陆地相比,水体反射率很低,变化没陆地明显,因此,研究前应当先将陆地区域掩膜,以免影响后续分析工作。大量研究表明归一化水体指数 NDWI 是很好的水体指示参数^[5-8],归一化水体指数 NDWI 表示为:

$$NDWI = \frac{(DN_{Green} - DN_{Nir})}{(DN_{Green} + DN_{Nir})} \tag{5}$$

其中: DN_{Green} 、 DN_{Nir} 分别为 Landsat-TM 绿波段和近红外波段的 DN 值或者反射率。水体的归一化水体指数 NDWI 值大于 0,设置阈值 0 就可以很好

地将陆地掩膜掉。

由于部分数据被云覆盖,为去除云需进行云掩膜。云层在 TM1 到 TM5 波段的反射率比水体的反射率要高,在 TM4 波段云层的反射率高于 0.005,而水体的反射率则低于 0.005,设置阈值为 0.005 可以很好地将云层掩膜。

(2)快鸟数据

快鸟(QuickBird)卫星是美国 DigitalGlobe 公司 2001 年 10 月发射的一颗亚米级分辨率的商业卫星,其全色波段空间分辨率为 0.61m,多光谱波段空间分辨率为 2.4m,重访周期为 1-7d。

本文主要利用快鸟数据对排污口进行目视解译。其覆盖范围为天津、秦皇岛、莱州湾和葫芦岛近海区域,数据获取时间分别为 2009 年 8 月 8 日,2009 年 8 月 11 日,2009 年 8 月 3 日和 2009 年 5 月 13 日。

3 陆源入海排污口遥感监测方法

陆源入海排污口调查的主要任务和目标是全面掌握排污口的位置、排污种类及主要污染物浓度,并对监测结果进行科学评价,为排污口的管理提供科学依据。针对陆源入海排污口调查工作,国家海洋局制定了“陆源入海排污口及邻近海域生态环境评价指南”,其提供了一套较完整的陆源入海排污口评价工作模式,确定了水质监测的评价因子,如化学需氧量(COD)、氨氮、叶绿素 a 和悬浮物浓度等,并规定了水质监测的方法。

多尺度遥感数据陆源入海排污口监测方法主要参照评价指南提供的陆源入海排污口评价方法,综合考虑中高空间分辨率遥感数据在适用范围和经济性方面的差异,采用中分辨率卫星遥感数据(Landsat-TM),结合地面实际测量排污口邻近水域水体光谱特征和叶绿素 a、悬浮物等水质参数浓度数据,构建遥感数据的水质环境评价指数,进行大范围的水体环境质量监测,划分重点监测区域,再利用高空间分辨率卫星遥感数据(快鸟)进行重点区域的目视解译,获取排污口的精确位置信息,判定排污口污染类型,最后通过野外实地调查,进行解译精度的验证,实现对排污口位置和类型的监测与制图。具体技术路线如图 2。

3.1 水质参数的反演方法

本文中的水质评价参数系应用遥感技术进行

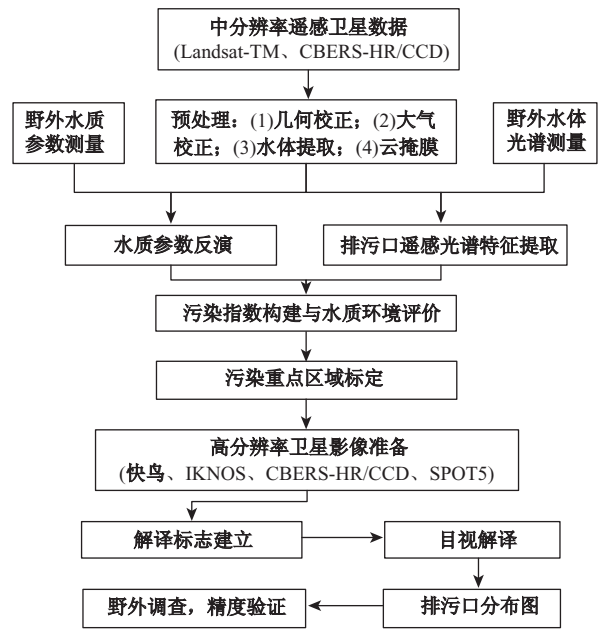


图 2 多尺度遥感数据的排污口监测流程图
Fig. 2 Flow chart of the land-sourced sewage outfalls monitoring

水质参数因子的反演而获得,其成本低,节省人力和物力,同时可获得大范围的区域面数据。但目前利用遥感技术并不能完全反演“评价指南”中规定的水质评价参数,仅能反演叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度等参数。因此,本研究主要利用叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度进行水质参数的反演,并在此基础上进行水质评价。水质参数具体反演方法参见文献[9]、[12]。

3.2 光谱特征的分析

除富含叶绿素和悬浮物外,陆源入海排污口邻近海域的光谱特征与清洁水体光谱特征也有较大的差异,因而陆源入海排污口邻近海域的光谱特征也是识别排污口的重要依据。根据叶绿素与悬浮物的敏感波段,可以选择对叶绿素与悬浮物敏感的波段反射率作为排污口邻近海域的水体的光谱特征。

3.3 水质评价模式

陆源入海排污口邻近海域的水质评价采用两种模式,分别为单要素评价和综合评价。本研究采用“评价指南”的水质评价模式,引入排污口邻近海域水体的光谱特征,实现对陆源入海排污口邻近海域的水质评价。

(1)单要素评价

单要素评价是对水质的多个监测指标进行逐一评价,以确定水体中的超标污染物和主要污染物。评价标准采用“污水综合排放标准”(GB8978-1996)^[10-11],评价方法采用单因子评价法。计算公式为:

$$P_i = \frac{M_i}{S_i}$$

(6)

其中: P_i 为 i 监测指标的污染指数; M_i 为 i 监测指标的浓度; S_i 为 i 监测指标的标准值。

(2)综合评价

综合评价是在单要素评价的基础上进行,从整体上反映一个排污口邻近海域的综合状况,目的是对排污口进行分级评价,划分重点监测区域。综合评价公式是:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

(7)

其中: P 为总体水质指数。指数值越高,水质越差,周围越可能存在排污口。

水质参数可利用中分辨率卫星遥感数据进行反演,计算各单要素污染指数,获得总体水质指数,将水质指数按照大小进行分级可以划分重点监测区域,从而可以大大降低监测范围。

3.4 建立高分辨率卫星数据的排污口解译标志

在利用中分辨率影像圈定重点监测区域后,利用高空间分辨率影像进行排污口的解译。其解译标志主要包括排污口形状和邻近水域水体颜色。

(1)形状:在高空间分辨率影像上,往往可以直接看到排污口,且排污口排出的水体多呈扇形。

(2)水色:在真彩色影像中,当水体污染浓度较大且水色显著地变黑、变红或者变黄,并与背景颜色有较大的差异。

(3)光谱特征:当水体高度富营养化,水体受到严重有机污染,浮游生物浓度高时,在近红外波段影像污染水体反射率较高。

4 排污口的遥感监测与结果分析

4.1 水质参数的反演

本文利用渤海实测叶绿素浓度和总悬浮物浓度数据,以及对应像元的离水反射率,采用经验-统计方法构建了总悬浮物浓度数据模型,其中随机选取的 15 个样本点数据用于模型的构建,其余样本点用于模型的验证。反演模型构建的详细情况请

见参考文献[9],叶绿素 a 的反演模型参见文献[12],具体应用模型见表 3。

表 3 水质参数 Landsat-TM 估算模型
Tab. 3 Estimation models of CHL by Landsat-TM reflectance

Y	X	模型
C	$X = LG(TM1/TM2)$	$Y = 10^{(1.03 - 2.4 \times X + 0.32 \times X^2 - 0.29 \times X^3)}$
LG	$X_1 = TM2$	$Y = -0.06X_1 + 0.004X_2 + 0.537$
SS	$X_2 = TM3$	

4.2 排污口 光谱特征的识别提取

分别选取污染程度轻、较轻、重和较重的 4 个排污口邻近水域水体光谱进行特征提取分析(图 3),其中,6、4、9 和 11 号排污口污染程度分别为较轻、轻、较重和重。从图中可以发现,污染程度越重在 TM2 波段附近的反射率越高,且有往长波方向移动的趋势,同时在 TM3 波段会呈现一个谷值,因此,选 TM2 和 TM3 波段为排污口的特征波段。

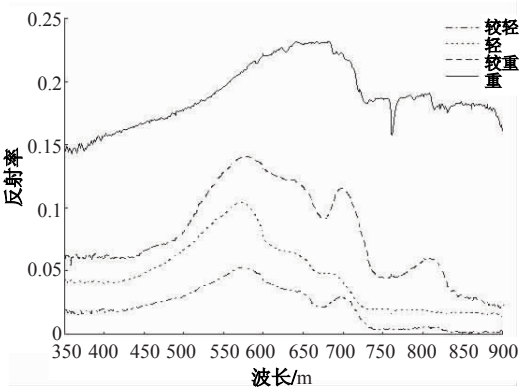


图 3 典型排污口光谱特征分析
Fig. 3 Spectral signature of typical land-sourced sewage outfalls

4.3 水质评价与重点监测区的划分

采用叶绿素 a 浓度、总悬浮物浓度、TM2 波段反射率和 TM3 波段反射率为评价因子,利用公式(6)进行单因素水质评价,其中, TM2 波段反射率和 TM3 波段反射率的标准值为清洁水体的反射率值。再利用公式(7)进行水质评价,获得总体水质指数分布图,对总体水质指数分布图进行密度分割,划分重点监测区域。

4.4 排污口的遥感解译与制图

对于排污口的重点监测区,采用高分辨率的快

鸟数据,选取了天津、莱州湾、秦皇岛和葫芦岛 4 区域,进行排污口的解译制图(图 4)。首先,根据排污口的形状和水色特征找出监测区域内的排污口,标定其位置;然后,依据排污口附近有无工厂等周边环境特征,对排污口邻近水域作光谱分析,解译判定排污口的污染类型,划分出河流入海口或工业排污口;最后,通过实地调查验证排污口解译的正确性,并进一步确定排污口的污染类型。本研究在重点监测区域共发现排污口 23 个,经过实地调查发现,只有一处排污口位置解译错误,排污口位置解译正确性超过 90%,排污口污染类型属性方面在卫星影像上只能大致区分为工业排污口和河流入海口等,更为详细的划分需实地调查才能准确获得。

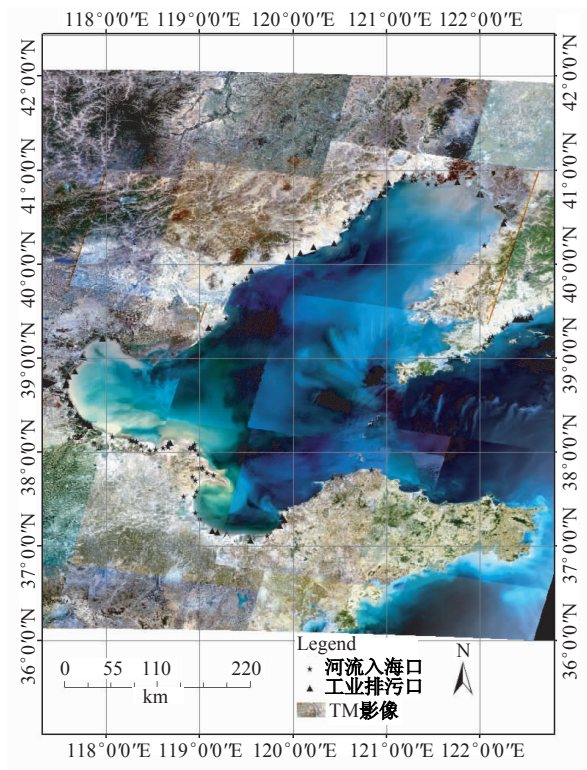


图 4 渤海入海排污口分布图

Fig. 4 Mapping of land-sourced sewage outfalls in circum-Bohai region

5 结论与讨论

利用多尺度卫星遥感结合渤海海域地面实测水质参数与水体光谱数据,通过中分辨率卫星遥感的水质参数反演,结合水体光谱特征,进行了渤海海域水质评价,划分重点监测区域,再利用高分辨率遥感影像,进行了排污口的解译与制图,形成了

一套渤海陆源入海排污口多尺度遥感调查方法。该研究表明:

(1)应用卫星遥感技术进行陆源入海排污口的监测可为传统实地调查方法提供辅助信息,降低陆源入海排污口监测的工作量和成本,提高工作效率。

(2)目前,卫星遥感技术仅能反演排污口评价因子中的部分水质参数^[13-16],其他大部分参数,如 COD、重金属含量等尚无法监测,因此,本方法仅适用于较大范围的、水色明显变化的污染排污口调查。实地调查依旧是排污口监测中的主要技术手段,但随着高光谱卫星技术的发展,卫星遥感将可实现更多排污口评价参数的监测。

(3)遥感排污口监测的关键是排污口评价因子的遥感反演,选择合适的数据,构建高精度的排污口评价因子遥感反演模型,是进行高精度的排污口监测之关键。

(4)陆源排污口的排污过程往往具有间歇性的特点,利用遥感技术进行周期性的监测,对排污口识别与突发污染事件的监测具有重要的意义。

致谢:对国家海洋局北海环境监测中心、烟台海洋环境监测中心站、天津海洋环境监测中心站、秦皇岛海洋环境监测中心站和大连海洋环境监测中心站,提供实测叶绿素和总悬浮物浓度数据等深表感谢。

参考文献:

- [1] HY/T 086—2005. 陆源入海排污口及邻近海域生态环境评价指南[S].
- [2] 王迪峰,龚芳,潘德炉,等. 海监航空遥感平台及其在近海水体环境质量监测中的应用[J]. 海洋学报,2009,31(2):49-56.
- [3] 付东洋,潘德炉,丁又专,等. 台风对海洋叶绿素 a 浓度影响的定量遥感初探[J]. 海洋学报,2009,31(3):46-56.
- [4] 唐军武,田国梁,汪小勇,等. 水体光谱测量与分析:水面以上测量法[J]. 遥感学报,2004,8(1):37-44.
- [5] 张佳华,姚红梅,李莉,等. 基于遥感和地面试验的水分指数与土壤湿度及生理指标关系[J]. 农业工程学报,2010,26(4):151-155.
- [6] 张友军,王军战,鲍春松. 多源遥感数据反演土壤水分方法[J]. 水科学进展,2010,21(2):222-228.
- [7] 李文波,于春颖,张秋文,等. 基于归一化水体指数的水域面积估算研究[J]. 人民长江,2008,39(2):11-36.
- [8] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595.

- [9] 邬明权, 韩松, 赵永清, 等. 应用 Landsat-TM 影像估算渤海叶绿素 a 和总悬浮物浓度[J]. 遥感信息, 2012(待发表).
- [10] GB8978-1996. 污水综合排放标准[S].
- [11] 贝竹园, 周晓燕, 祝翔宇, 等. 陆源入海排污口环境监测评价模式的探讨[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(2): 85 - 89.
- [12] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 中国科学院博士论文. 1999.
- [13] Gitelson AA, Yacobi YZ, Schalles JF *et al.* Remote estimation of phytoplankton density in productive waters[J]. *Advanc in Limnol*, 2000(55): 121 - 136.
- [14] 周冠华, 柳钦火, 马荣华, 等. 基于半分析模型的波段最优化组合反演混浊太湖水体叶绿素 a[J]. *J. Lake Sci. (湖泊科学)*, 2008, 20(2): 153 - 159.
- [15] 王艳红, 邓正栋, 马荣华. 基于实测光谱与 MODIS 数据的太湖悬浮物定量估测[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(3): 509 - 515.
- [16] 催延伟, 张杰, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 10 - 18.

Land-sourced Sewage Outfalls Monitoring in Circum-Bohai Region Using Multi-scale Remote Sensing Data

WU Mingquan, NIU Zheng, GAO Shuai, XU Shiguang and WANG Lijuan

(*State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: Land-sourced sewage outfall is one of the main marine pollution sources. Monitoring of land-sourced sewage outfalls is the main content of marine environmental monitoring. However, due to the limitation of remote sensing technology, there are very few reports about land-sourced sewage outfalls monitoring using remote sensing technology, although it is the main information detection technology for a large area. To meet the needs of land-sourced sewage outfalls monitoring, this paper proposed a novel land-sourced sewage outfalls monitoring method using remote sensing technology by referencing to the current “land-sourced sewage outfall and adjacent marine ecological environment monitoring Guide” (HY/T086 - 2005) of China. Considering the ability and the economic effectiveness of different satellite data, multi scale remote sensing data was used in this method. With multi scale remote sensing data, the observed ground water quality parameters and spectral data, water quality parameters were extracted. Then Bohai Sea water quality was assessed by water quality parameters and spectral characteristics. And the key monitoring area was found out based on the result of water quality assessment. Finally, positions of land-sourced sewage outfalls were detected using high resolution remote sensing data in the key monitoring area. Validation of this method was conducted in the circum-Bohai region, China, and high positioning accuracy was acquired. Using this method, efficiency of land-sourced sewage outfalls monitoring can be improved greatly, while the cost and workload can be substantially reduced.

Key words: Bohai Sea; land-sourced sewage outfalls; remote sensing; pollution monitoring