

基于遥感反演的莱州湾水色变化的多时相分析*

姜丽君¹ 王庆^{1①} 徐洋¹ 战超¹ 王红艳¹ 刘亚龙² 姜丽丽³

(1. 鲁东大学海岸研究所 烟台 264025; 2. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站 烟台 264006;

3. 烟台鲁达环境影响评价有限公司 烟台 264004)

摘要 悬浮泥沙和叶绿素是海洋水色的重要部分,是反映河口海岸地区生态环境状况的重要指标。本文基于 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像,在不依赖地面实测数据的条件下,结合水文气象数据,利用光谱信息建立水色遥感模型对莱州湾 1996—2015 年不同时期的悬浮泥沙和叶绿素变化进行研究。研究表明:(1) 此模型可以快速反演出较大空间尺度内的水色时空分布情况。(2) 1996—2015 年这一时期内悬浮泥沙浓度变化明显,枯水期的悬浮泥沙扩散范围总体大于丰水期,悬浮泥沙高浓度区主要分布在黄河口附近海域和沿岸区域,泥沙主要来源于陆源输沙和海水中的泥沙再悬浮,悬浮泥沙的扩散主要受潮流的影响,风和波浪等动力因素也在一定程度上影响着悬浮泥沙的扩散;(3) 此外,莱州湾叶绿素高浓度区主要分布在莱州湾东—南部海域,其分布具有明显的季节性,春季(5月)海水温度升高,水中营养物质垂直混合好使得叶绿素浓度处于较高态势。

关键词 莱州湾;水色遥感模型;悬浮泥沙;叶绿素

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20171200315

悬浮泥沙和叶绿素是海洋水色的重要部分,是影响河口海岸地区生态环境的重要指标(Li *et al.*, 2016; 李清泉等, 2016; Wolanski *et al.*, 2016; 徐红云等, 2016)。悬浮泥沙携带大量的污染物,其在河口和近岸区域的扩散严重影响水质,并改变水体的光学性质(陈斌等, 2015)。叶绿素是海水中浮游植物含量的表征,通过叶绿素浓度的研究能够预测赤潮,评价海洋污染(丛丕福等, 2005; Guðmundsson *et al.*, 2016; Kovács *et al.*, 2017)。因此,对于近岸海域的悬浮泥沙扩散和叶绿素浓度的变化监测就显得十分重要。以往的水色研究主要通过定点采取水质样品进行实验分析,无法全面反映整个研究区的真实情况。遥感技术的发展使得以往常规方法中调查速度慢、效率低、周期长,数据离散的情况得到改善,海洋水色监测有了极大改善,水色反演算法也在不断优化更新。

针对水体悬浮泥沙的遥感监测,学者们已开展了广泛的研究。如恽才兴等(1981)根据影像灰度值对

水体悬浮泥沙进行反演,并根据悬沙含量分为浑水舌、浊水、沉积羽流、冲淡水四类;樊辉等(2007)基于悬沙遥感参数建立的对数模型研究了黄河口含沙水体的光谱特征;李洪灵等(2006)基于实测光谱数据,将 Landsat ETM+的第四波段和第一波段的比值建立线性模型,模型相关系数为 0.96;陈勇等(2012)利用 Gordon 模型反演了 1974—2009 年长江口地区的表层悬沙浓度,其相对误差为 30.04%;张春桂等(2008)基于 MODIS 数据,通过对红波段、近红外波段以及两波段的比值和泥沙指数建立的悬沙反演模型比较,发现以红波段为遥感参数构建的模型能更好地反演鄱阳湖丰水期的悬浮泥沙;Doxaran 等(2002)在研究法国吉伦港水体的光谱特征时,建立了基于 SPOT 单波段影像的对数关系和泥沙参数 $Rrs(850)/Rrs(550)$ 关系,实验表明 $Rrs(850)/Rrs(550)$ 对悬浮泥沙浓度变化敏感;Ramakrishnan 等(2013)基于 OCM 数据和实测泥沙数据,利用 AWSS 算法反演了印度坎贝湾的悬

*国家自然科学基金项目, U1706220 号, 41471005 号, 41271016 号; 国家重点研发计划项目, 2017YFC0505902 号。姜丽君, 硕士, E-mail: jlj543358@163.com

通讯作者: 王庆, 博士生导师, 教授, E-mail: schingwang@126.com

收稿日期: 2017-12-16, 收修改稿日期: 2018-01-28

沙含量,实验证明这种算法能够区分高浓度含沙水体浓度变化的细小差异。Furgerot 等(2016)用直接和光学方法在高流速和高浓度悬沙的法国西北圣米歇尔山湾进行悬浮泥沙浓度测量,结果表明悬浮泥沙的浓度与河流输沙量高度相关。Van Der Zanden 等(2017)提出在大型实验室波浪作用下悬浮泥沙浓度变化的新主张,破波明显影响泥沙浓度,并且与湍流动力和底层物质显著相关。Wackerman 等(2017)采用6个参数的经验模型观测湄公河十年内河流悬浮泥沙浓度的变化情况,在河流高流量和低流量期间,其分布有显著差异。

目前基于遥感反演的叶绿素浓度的方法可以分为经验公式法和模型算法(刘良明,2005)。Rundquist 等(1996)实验表明,对于水色复杂的水体,叶绿素在近红外波段与红光波段反射值呈明显的异向性,因此采用近红外波段和红光波段的比值可以更好地来估计叶绿素的浓度。Yang 等(2000)用 SPOT 卫星近红外波段与红光波段的比值法得出的叶绿素估算模型(XS3/XS2)能很好地估算叶绿素的浓度。刘大召等(2010)利用珠江口叶绿素浓度与一阶导数光谱值的三次多项式进行反演,决定系数可达到0.7815。沈春燕等(2005)利用神经网络方法对珠江口海域的叶绿素浓度进行反演,结果表明决定系数是0.8848时反演精度最高。Jo 等(2016)根据非线性叶绿素的时间和空间变化规律,研究了东海和日本海的叶绿素变化趋势。Yang 等(2017)研究各波段反射率与叶绿素 a 浓度的关系,确定叶绿素 a 的敏感区,研究表明R716/R667呈高度相关($r=0.82$)。

基于遥感反演的水色研究通常需要地面监测数据与遥感数据建立联系进行分析,目前许多学者对黄河河口地区的悬浮泥沙分布情况进行研究(Zhang *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017),以莱州湾为单独研究对象的水色研究也不多见,以往的研究都是在各自实测数据的基础上建立模型进行表层悬浮泥沙的反演,实验结果都能够比较好的说明悬浮泥沙分布情况,这种模型精度对实测数据要求很高。地面同步监测数据的获取在时空推广上受到很多因素限制,由于无法获取研究时期的地面同步监测数据,本文针对黄河口高浓度含沙水体对莱州湾海域的影响,基于水体的光学性质尝试采用遥感影像数据对莱州湾海域1996—2015年不同时期和不同动力条件下的水色变化进行分析,重点研究表层悬浮泥沙的分布和扩散特征以及叶绿素的变化情况。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

莱州湾位于渤海南部,山东半岛西北部,是一个半封闭海湾。西起现代黄河河口,东至岬岛高角。莱州湾水深大部分在10m以内,最大水深出现在海湾东北部岬岛高角外,深达18m。本区春季风速较大,其中四月最大,月平均风速在4.7—6.5m/s,九月风速最小,月平均风速在2.7—4.3m/s。湾东部风向以NNE和NE向为主,中部为NNW和NNE向为主,西部为NE向。本区波浪以季风控制的风浪为主,风向变化,波浪方向也随之发生变化。莱州湾西-南海岸地势平坦,沿岸已发育了广阔的淤泥质潮滩。黄河、小清河、潍河、胶莱河等主要河流在莱州湾入海,其中黄河带来的入海泥沙占沿岸河流入海泥沙总量的99.75%。在黄河口附近的潮汐、剪切锋等海洋动力作用下,黄河泥沙输运扩散受到阻碍(Qiao *et al.*, 2008)。本区是不规则的混合半日潮区,以刁龙嘴为界,东部为不规则半日潮流,西部为规则半日潮流,平均潮差(小清河口)1.7m,黄河口附近是莱州湾的强流区,黄河口以东湾内流速逐渐减小,在龙口和羊角沟附近形成弱流区。涨潮流流向为南偏东,落潮流流向为北偏西(中国海湾志编纂委员会,1997)(图1)。

1.2 数据及预处理

本文研究区域为莱州湾水域(图1)。研究数据主要有landsat TM、ETM+和OLI影像,具体研究遥感影像信息如表1。其中8幅代表丰水期(图2,图5)的情况,8幅代表枯水期(图3,图6)的情况。研究影像质量较好,无云覆盖。

基于研究区的表层悬浮泥沙和叶绿素的分布研究,考虑到潮流和风的影响,本文用潮汐模型同化Topex/Poseidon卫星的数据来计算上述研究影像成像时的潮位数据和潮汐状况;文中用到的风向和风速等数据均来自ECMWF(欧洲中尺度天气预报中心模式)。

2 研究方法

2.1 悬浮泥沙反演模型研究

悬浮泥沙是影响水质的重要参数之一,水体中悬浮泥沙含量直接影响水体浑浊度、水色等,当水体中泥沙含量增加时,会使得光谱曲线峰值往长波方向移动,水体在可见光和近红外波段的反射率明显增高。利用单波段比值法计算悬浮泥沙的依据是选择对悬浮泥沙变化敏感而对其他物质(叶绿素、黄色物

质等)变化不敏感的波段, 对于低浓度的含沙水体反射峰在 510—600nm, 而 500—520nm 对叶绿素变化不敏感, 一般选择 510nm 为理想波段。在 560—650nm

之间叶绿素有少量吸收, 620nm 处遥感反射率对高浓度悬沙变化敏感, 所以另一理想波段选为 620nm。因此, 单纯用单波段遥感数据计算悬浮泥沙的含量时

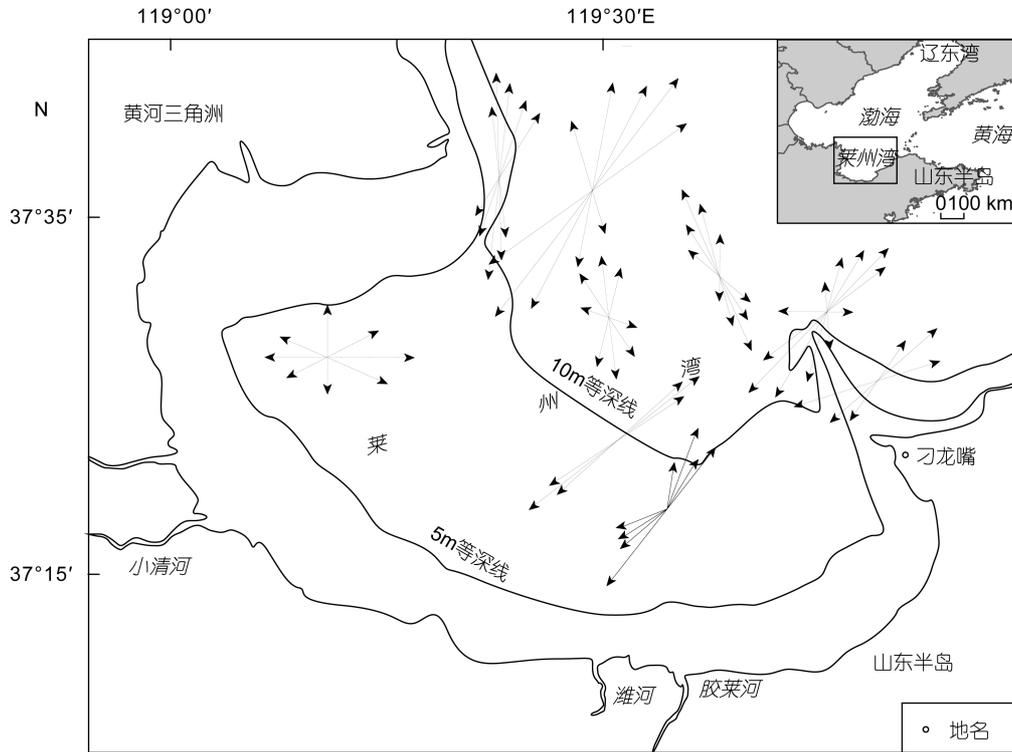


图 1 莱州湾地理位置和表层潮流分布图

Fig.1 Geographical location and surface tidal distribution map of Laizhou Bay

表 1 获取遥感图像时的潮汐、风速、风向数据

Tab.1 Data of tide, wind speed and wind direction in remote sensing images

序号	卫星影像		潮汐状况	风速(m/s)	风向	径流状况
	日期	传感器				
1	1996-07-02	TM	落潮	3.5	SES	丰水期
2	1997-09-07	TM	落潮	4.1	SE	丰水期
3	1998-05-05	TM	落潮	7.1	SE	枯水期
4	1998-09-10	TM	涨潮	4.3	WNW	丰水期
5	1999-10-23	TM	落潮	3.9	WNW	丰水期
6	2000-05-02	TM	落潮	3.7	SE	枯水期
7	2001-03-18	ETM+	涨潮	5.0	WN	枯水期
8	2003-09-24	ETM+	涨潮	4.5	SSE	丰水期
9	2005-05-08	TM	落潮	6.3	WNW	枯水期
10	2007-06-15	TM	落潮	3.5	SE	丰水期
11	2009-05-03	TM	涨潮	4.0	SSE	枯水期
12	2010-09-11	TM	涨潮	4.7	NE	丰水期
13	2013-05-30	OLI	落潮	5.0	WNW	枯水期
14	2014-03-14	OLI	涨潮	3.3	NE	枯水期
15	2014-07-20	OLI	涨潮	3.7	NE	丰水期
16	2015-05-04	OLI	涨潮	5.9	SSE	枯水期

一般采用红蓝波段比值法, 即: N_{RED}/N_{BLUE} 。式中: N_{RED} 为红光波段的亮度值, 如 TM/ETM+传感器的 3 波段, OLI 传感器的 4 波段。 N_{BLUE} 为蓝光波段的亮度值, 如 TM/ETM+传感器的 1 波段, OLI 传感器的 2 波段。

2.2 叶绿素反演模型研究

叶绿素是水中浮游植物的主要色素, 叶绿素的浓度常用来评估水体的富营养化程度。在开阔的大洋中, 水体中叶绿素的浓度仅为 $0.01\text{mg}/\text{m}^3$, 但是在近岸地区则能达到 $10\text{mg}/\text{m}^3$, 在富营养化的水体中其含量更是高达 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。本文为了快速获得叶绿素年际变化, 采用近红外波段和红外波段比值进行实验, 即: N_{NIR}/N_{RED} 。式中: N_{NIR} 为近红外波段的亮度值, 如 TM/ETM+传感器的 4 波段, OLI 传感器的 5 波段, N_{RED} 为红光波段的亮度值, 如 TM/ETM+传感器的 3 波段, OLI 传感器的 4 波段。

2.3 水体信息处理方法

基于水体本身以及所含物质的光学特性进行水色分析, 结果与提取水体信息的质量显著相关。本文针对莱州湾水体的复杂性, 提出一套优化的水体信息处理流程。

首先, 对研究区影像进行预处理, 大气校正的精度影像反演的结果, 所有影像采用直方图归一化处理, 利用归一化水体指数(MNDWI) (徐涵秋等, 2005) 提取莱州湾水体信息, 设置阈值大于 0 去除水体中的干扰信息。其次, 利用波段比值提取悬浮泥沙和叶绿素的信息。再次, 对悬浮泥沙和叶绿素信息进行加强

处理, 采用线性拉伸, 剔除各时期研究影像中的异常值。最后, 根据各时相影像的分布特征进行分类, 值类似的代表浓度相近的水体。将悬浮泥沙分为 6 类, 叶绿素分为 5 类。

3 结果与讨论

3.1 莱州湾丰枯水期悬浮泥沙分布特征

莱州湾表层悬浮泥沙反演结果表明(图 2 为丰水期, 图 3 为枯水期), 莱州湾内高浓度的表层悬浮泥沙主要分布在黄河河口附近海域, 并沿海岸向南扩散至小清河河口附近, 呈条带状分布, 东—南海域表层悬浮泥沙浓度低分布少。不同时期不同条件下莱州湾内表层悬浮泥沙扩散范围不同。

在丰水期, 莱州湾内表层悬浮泥沙的分布相对比较集中, 各海区水体的含沙量差距悬殊, 高浓度含沙水体主要分布在黄河河口周围近岸海域, 小清河以北的海域也有少量分布。莱州湾内的低含沙水体面积相对较大, 并且黄河河口附近高浓度的表层悬浮泥沙具有东偏南方向上的扩散规律。在其他河流入海口附近, 水体的含沙量相对较高, 不同时期不同影响条件下的扩散距离不等。

在枯水期, 除个别年份(2000 年)莱州湾内高含沙水体除在黄河河口附近海域分布以外, 还呈现出向东偏南方向扩散的趋势, 莱州湾内水体含沙量整体偏高。表层悬浮泥沙的扩散范围明显高于丰水期, 从 1998-05-05 的反演结果来看, 莱州湾内从黄河河口向

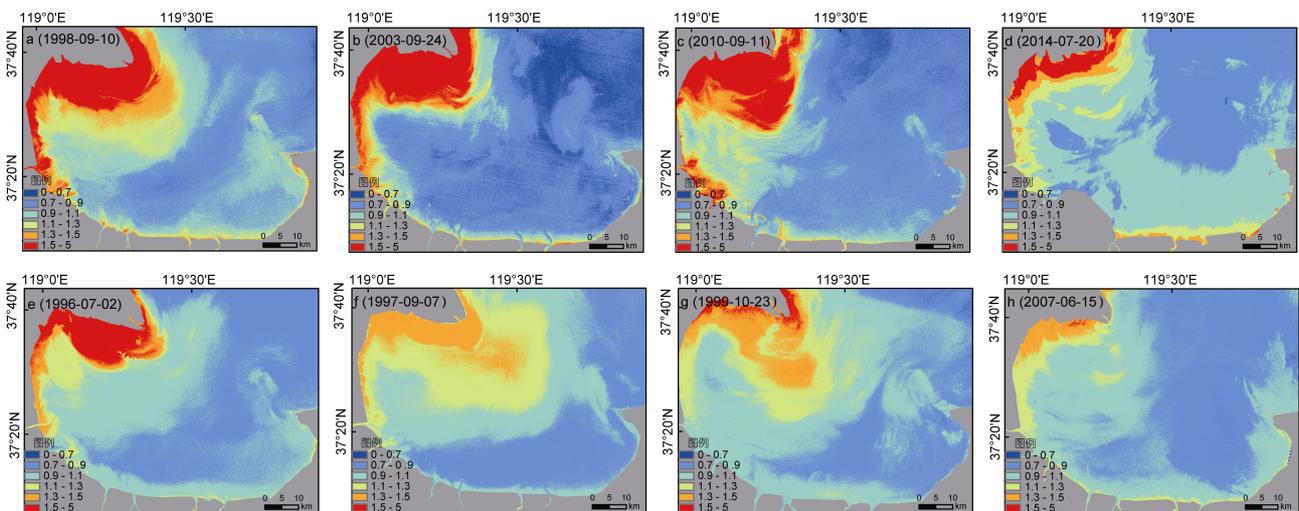


图 2 莱州湾丰水期表层悬浮泥沙浓度反演图

Fig.2 Remote sensing inversion of Surface suspended sediment in Laizhou Bay during high water period
注: 上 4 图为涨潮期, 下 4 图为落潮期

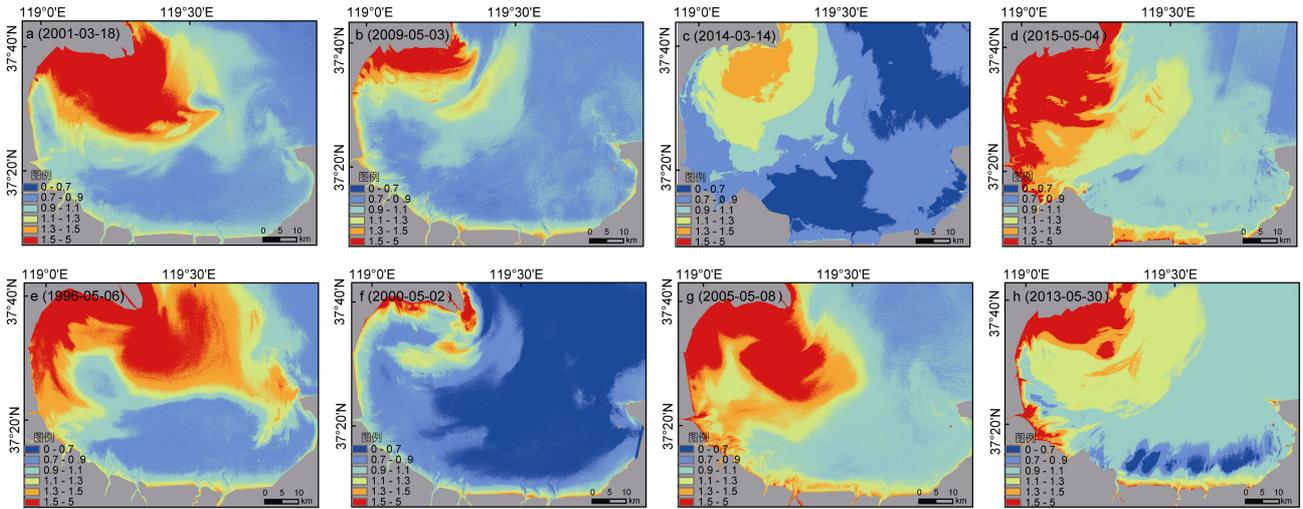


图 3 莱州湾枯水期表层悬浮泥沙浓度反演图

Fig.3 Inversion of Surface suspended sediment in Laizhou Bay during low water period

注: 上 4 图为涨潮期,下 4 图为落潮期

东至刁龙嘴连线的附近海域仍然具有大面积的高浓度的表层悬浮泥沙, 这也能说明枯水期的莱州湾含沙量整体高于丰水期。

3.2 莱州湾表层悬浮泥沙分布与扩散机制分析

黄河丰、枯水期对莱州湾表层悬浮泥沙分布具有重要影响, 在丰水期, 潮流流速分布大致为黄河河口门外最高并向南北两侧呈舌状递减, 流速等值线呈椭圆状, 其长轴走向为 NNW-SSE 向, 最大流速位于黄河河口沙嘴附近。在枯水期, 其长轴走向变为

NWN-ESE 向, 河口一侧流速迅速递减, 向东偏南方向流速变小(图 4)。以 1996-07-02、1998-05-05、1998-09-10、2001-03-18 四期影像为例, 莱州湾内表层悬浮泥沙枯水期的高浓度悬浮泥沙扩散范围要高于丰水期, 排除风的影响, 主要是由于黄河丰水期入海径流量大、流速快, 悬浮泥沙可以冲越过黄河河口外高流速带, 在更大的海域内扩散稀释, 而枯水期的入海径流量小、流速慢, 悬浮泥沙扩散范围仅限于黄河河口外的高流速带及其内侧, 表层悬浮泥沙浓度高。

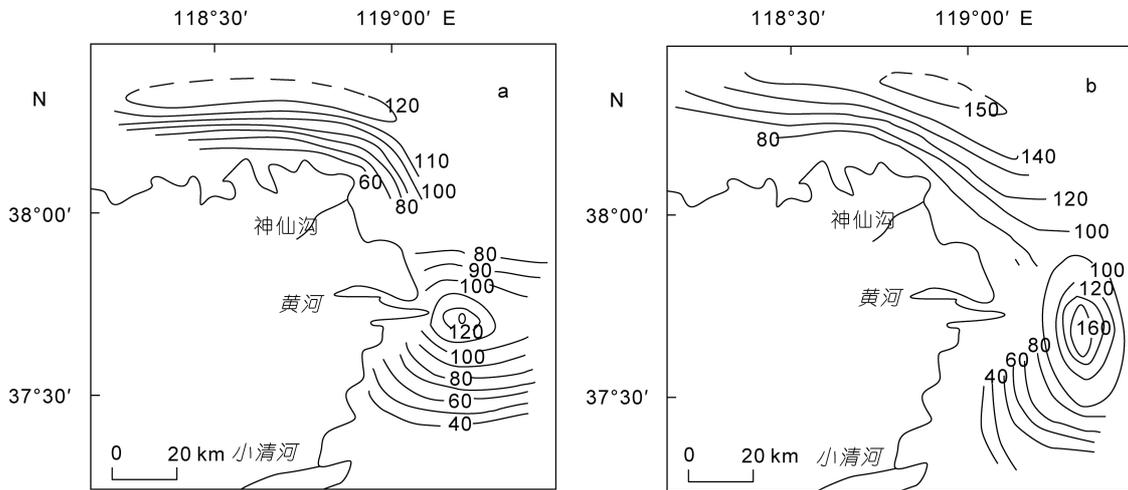


图 4 黄河口区春季(a)和夏季(b)最大流速分布图

Fig.4 Maximum velocity distribution of spring (a) and summer (b) in the Yellow River Estuary

注: 据中国海湾志(第二分册), 有修改

莱州湾表层悬浮泥沙的分布扩散除了与丰、枯水期有关外, 还受到海洋动力因素的影响。潮流是莱州

湾的主要海流运动, 也是泥沙扩散的主要动力(刘艳霞等, 2013), 李蒙蒙等(2014)证明了黄河口沙嘴附近

的莱州湾西岸海域存在潮流剪切锋。受黄河口沙嘴的挑流影响,在黄河河口外的弧形高流速带对黄河入海泥沙的扩散起重要作用,大部分入海泥沙呈 NE-SW 向移动。在潮流剪切锋的阻碍作用下,大部分的入海泥沙在莱州湾西岸浅海区域扩散、沉降,无法继续向莱州湾深海区域扩散。本文以潮流条件为依据进行分析,在图 2、图 3 所示的莱州湾表层悬浮泥沙反演图中,在涨潮期,莱州湾入海悬浮泥沙在弧形高流速带和潮流剪切锋的共同控制作用下向黄河河口北侧、南侧和莱州湾西岸扩散,影响范围主要是 5m 等深线以浅的近岸海域,在黄河河口东南、南方向的悬浮泥沙浓度最高,随着潮流动力的减弱以及莱州湾南岸潮余流自东向西运动的影响,表层悬浮泥沙沿海岸线向南扩散至小清河河口附近,莱州湾湾内水体含沙量整体偏低。在落潮期,莱州湾内高浓度的表层悬浮泥沙除在黄河口附近海域分布外,受潮流的影响还向东偏南方向呈片状扩散,影响范围扩大到 10m 等深线附近的海域,这样就大大增加了莱州湾内水体的悬浮泥沙浓度。

影响表层悬浮泥沙分布的动力因素还包括海风、波浪、风暴潮等,本文研究影像不存在风暴潮的影响。以风向条件为依据进行研究,选取 SSE 和 WNW 风向的丰枯水期影像共八幅,相同风向条件下的涨落潮因素已经考虑在内。影像成像时刻的风速、风向和潮汐状况见表 1,在图 3 所示莱州湾枯水期表层悬浮泥沙反演图中,比较风向 SSE 条件下 2009-05-03 和 2015-05-04 两幅影像,在风向相同,均为涨潮的情况下,风速越大,表层悬浮泥沙的扩散范围越大,莱州湾内水体含沙量也相应提高。在枯水期陆源水沙的补给能力不高,近岸浅海底质细颗粒沉积物在风浪等动力作用下悬浮并随落潮流的方向向湾内扩散,风速越大,扩散距离越远。在图 2 所示莱州湾丰水期表层悬浮泥沙反演图中,风速大小对悬浮泥沙扩散范围影响表现不明显。如 1999-10-23 期影像,在落潮流和 WNW 风的共同作用下高浓度的表层悬浮泥沙水体向湾内扩散,但是输沙量比较小。

3.3 莱州湾丰枯水期叶绿素时空分布特征及分析

在空间变化上,过去 20 年中莱州湾表层水体叶绿素分布具有相对稳定性。叶绿素高浓度区主要分布在黄河河口南侧的小范围近岸海域,在莱州湾南岸浅海区域和刁龙嘴南侧的东岸海域呈片状分布,不同时期不同影响条件下的扩散范围不同。莱州湾内弱流区主要分布在莱州湾的东岸及南岸海域,控制着

叶绿素的输移扩散。在刁龙嘴西北海域,涨潮流为 WS 向,落潮流为 EN 向,涨潮流速与落潮流速相近。从莱州湾叶绿素反演图 5、图 6 来看,莱州湾内叶绿素的浓度与分布范围在丰水期与枯水期有明显变化,丰水期莱州湾内叶绿素分布面积广泛,高浓度叶绿素水体面积小,主要是由于丰水期入海径流量大,流速快,叶绿素水体冲破弱潮流的影响,在整个莱州湾内扩散。枯水期莱州湾内清洁水体和叶绿素高浓度水体有明显区分,由于入海径流量变小,流速变慢,叶绿素水体受弱潮流的控制,只在莱州湾东—南海域扩散输移,再加上黄河入海径流带来的陆上营养物质不足,所以在莱州湾的西岸的水体叶绿素含量低。

在丰水期以 1998-09-10 和 1996-07-02 两期影像为例,莱州湾内叶绿素分布面积较大,清洁水体分布在潮流剪切锋附近,面积小。涨潮时莱州湾东—南海域叶绿素含量较高,由于黄河径流带来大量陆上营养物质,黄河口附近小范围海域分布高浓度的叶绿素,落潮时莱州湾内叶绿素分布与涨潮时分布比较一致。在枯水期以 2000-05-02 和 2009-05-03 两期影像为例,莱州湾内涨落潮时不同区域叶绿素的含量相差较大,涨潮时,高浓度的叶绿素主要分布在莱州湾东—南海域,并在潮流作用下向莱州湾内扩散,在余潮流和风浪的作用下少量扩散至莱州湾的西岸海域,该海域叶绿素含量明显偏低,落潮时,莱州湾内清洁水体面积较大,在潮流控制下高浓度的叶绿素主要分布在莱州湾东—南海域和黄河河口附近海域。

在季节变化上,叶绿素浓度有明显的季节变化特征。3 月份莱州湾叶绿素浓度相对较低,随着光照时间变长,水温升高,5、6 月份浮游植物达到生长高峰,莱州湾内叶绿素的含量明显高于其他月份,7 月份莱州湾内叶绿素的含量逐渐达到峰值,之后随着海水中的营养物质被大量消耗,直到 10 月份莱州湾内的营养物质耗尽,水温降低,浮游植物生长活动变弱,叶绿素的含量也迅速下降。

在莱州湾沿岸,尤其是刁龙嘴附近海岸,近些年防潮大堤和人工岸线等人类活动(许士国等, 2015)使得区域内水文过程发生变化,沿岸水体自净能力降低,水体中浮游植物吸取营养物质大量生长,并在潮流和风浪的作用下向湾内扩散。

4 结论

针对黄河口高浓度含沙水体对莱州湾海域的影响,本文尝试采用遥感影像数据对莱州湾海域

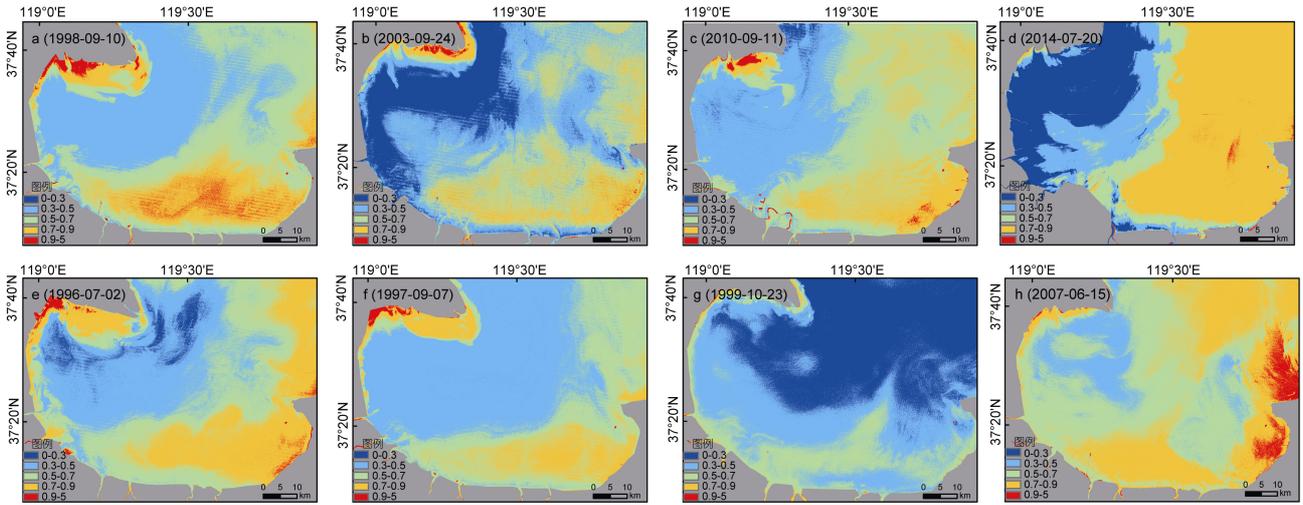


图 5 莱州湾丰水期叶绿素浓度反演图

Fig.5 Inversion of chlorophyll in Laizhou Bay during high water period
注：上 4 图为涨潮期，下 4 图为落潮期

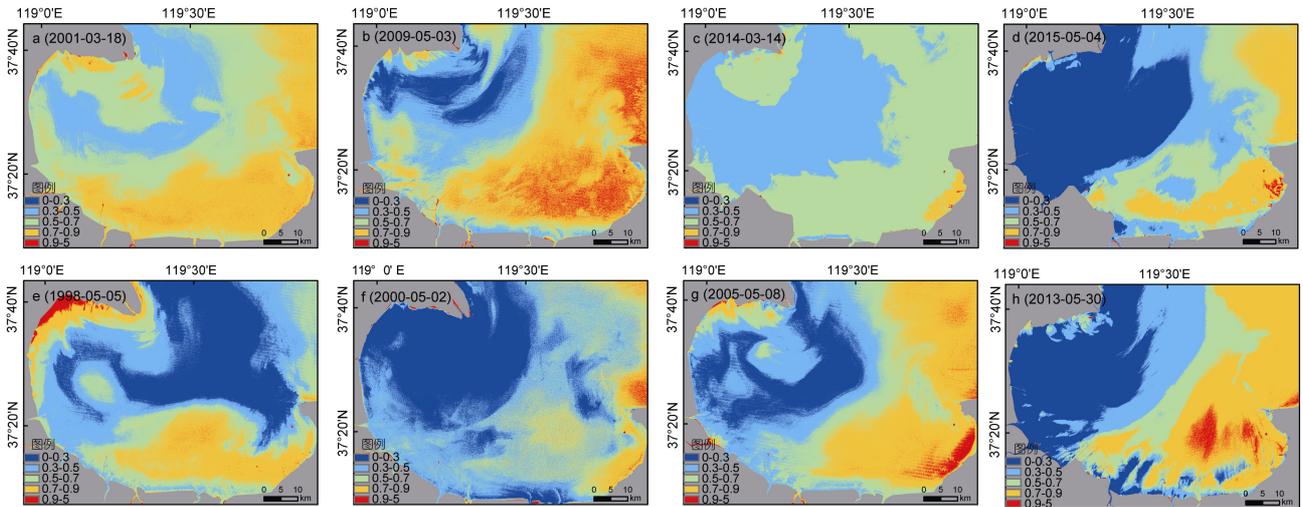


图 6 莱州湾枯水期叶绿素浓度反演图

Fig.6 Inversion of chlorophyll in Laizhou Bay during low water period
注：上 4 图为涨潮期，下 4 图为落潮期

1996—2015 年不同时期和不同动力条件下的表层悬浮泥沙的分布和扩散以及叶绿素的变化情况进行分析，得到如下结论：

(1) 在只利用遥感影像提取的水体光谱信息建立水色反演模型，可以进行较大空间尺度的水域表层悬浮泥沙和叶绿素反演，能够快速查明水色变化情况。

(2) 莱州湾海域的悬浮泥沙分布范围受丰枯水期入海径流的影响，枯水期的分布范围要大于丰水期，黄河河口外的高流速带和潮流剪切锋共同控制着悬浮泥沙的扩散方向和范围，莱州湾高浓度悬浮

泥沙主要分布在黄河河口至小清河口附近海域。通常在 5 级以下风力的情况下，风对莱州湾表层悬浮泥沙的扩散有影响，但悬浮泥沙扩散和分布的总体特征没有改变，潮流仍然是悬浮泥沙扩散的主要动力，莱州湾高流速区与表层悬浮泥沙高浓度区伴随出现。

(3) 莱州湾海域的叶绿素高浓度水体主要分布在莱州湾东—南海域，呈片状分布，在潮流等动力作用下从近岸向湾内扩散。莱州湾内不同区域不同季节的叶绿素含量不同，丰水期的叶绿素覆盖范围要大于枯水期，枯水期的叶绿素含量明显高于丰水期。叶绿素浓度的分布也有明显的季节性，冬季浓度最低，

随着春季气温上升,水中浮游植物迅速生长,夏季到达生长高峰,水中叶绿素浓度达到最高,秋季随着水温降低,水中营养物质也耗尽,叶绿素浓度又逐渐降低。

由于只依靠遥感数据进行水色分析,不足以精确掌握水域具体情况,针对水色时空分析机制与水环境响应等问题有待进一步研究。

参 考 文 献

- 中国海湾志编纂委员会, 1997. 中国海湾志(第二分册). 北京: 海洋出版社
- 丛丕福, 牛 铮, 曲丽梅等, 2005. 基于神经网络和 TM 图像的大连湾海域悬浮物质量浓度的反演. 海洋科学, 29(4): 31—35
- 刘大召, 张辰光, 付东洋等, 2010. 基于高光谱数据的珠江口表层水体悬浮泥沙遥感反演模式. 海洋科学, 34(7): 77—80
- 刘良明, 2005. 卫星海洋遥感导论. 武汉: 武汉大学出版社
- 刘艳霞, 黄海军, 杨晓阳, 2013. 基于遥感反演的莱州湾悬沙分布及其沉积动力分析. 海洋学报, 35(6): 43—53
- 许士国, 富砚昭, 康萍萍, 2015. 渤海表层叶绿素 *a* 时空分布及演变特征. 海洋环境科学, 34(6): 898—903, 924
- 李洪灵, 张 鹰, 姜 杰, 2006. 基于遥感方法反演悬浮泥沙分布. 水科学进展, 17(2): 242—245
- 李清泉, 卢 艺, 胡水波等, 2016. 海岸带地理环境遥感监测综述. 遥感学报, 20(5): 1216—1229
- 李蒙蒙, 王 庆, 张安定等, 2014. 最近 50a 来莱州湾西—南部潮流动力演变的数值模拟研究. 海洋学报, 36(5): 68—76
- 沈春燕, 陈楚群, 詹海刚, 2005. 人工神经网络反演珠江口海域叶绿素浓度. 热带海洋学报, 24(6): 38—43
- 张春桂, 张 星, 陈敏艳等, 2008. 福建近岸海域悬浮泥沙浓度遥感定量监测研究. 自然资源学报, 23(1): 150—160
- 陈 勇, 韩 震, 杨丽君等, 2012. 长江口水体表层悬浮泥沙时空分布对环境演变的响应. 海洋学报, 34(1): 145—152
- 陈 斌, 刘 健, 高 飞, 2015. 莱州湾悬沙输运机制研究. 水科学进展, 26(6): 857—866
- 恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全, 1981. 利用卫星象片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题. 海洋与湖沼, 12(5): 391—401, 479—481
- 徐红云, 周为峰, 纪世建, 2016. 采用遥感手段估算海洋初级生产力研究进展. 应用生态学报, 27(9): 3042—3050
- 徐涵秋, 2005. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 9(5): 589—595
- 樊 辉, 黄海军, 唐军武, 2007. 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测. 武汉大学学报(信息科学版), 32(7): 601—604
- Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S *et al*, 2002. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. Remote Sensing of Environment, 81(1): 149—161
- Furgerot L, Mouazé D, Tessier B *et al*, 2016. Sediment transport induced by tidal bores. An estimation from suspended matter measurements in the Sée River (Mont-Saint-Michel Bay, northwestern France). Comptes Rendus Geoscience, 348(6): 432—441
- Guðmundsson K, Ágústsdóttir K, McGinty N *et al*, 2016. A regional correction model for satellite surface chlorophyll concentrations, based on measurements from sea water samples collected around Iceland. Methods in Oceanography, 17: 83—96
- Jo Y H, Kim H C, Son S *et al*, 2016. Analysis of the timing of phase changes in the chlorophyll concentration in the East/Japan Sea. Continental Shelf Research, 127: 1—11
- Kovács J, Tanos P, Várbiro G *et al*, 2017. The role of annual periodic behavior of water quality parameters in primary production—Chlorophyll-*a* estimation. Ecological Indicators, 78: 311—321
- Li X F, Hou L J, Li Y *et al*, 2016. Polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon in intertidal sediments of China coastal zones: Concentration, ecological risk, source and their relationship. Science of the Total Environment, 566—567: 1387—1397
- Qiao L L, Bao X W, Wu D X *et al*, 2008. Numerical study of generation of the tidal shear front off the Yellow River mouth. Continental Shelf Research, 28(14): 1782—1790
- Ramakrishnan D, Bharti R, Das M, 2013. A technique for estimation of suspended sediment concentration in very high turbid coastal waters: An investigation from Gulf of Cambay, India. Marine Geology, 346: 256—261
- Rundquist D C, Han L, Schalles J F *et al*, 1996. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62(2): 195—200
- Van Der Zanden J, Van Der A D A, Hurther D *et al*, 2017. Suspended sediment transport around a large-scale laboratory breaker bar. Coastal Engineering, 125: 51—69
- Wackerman C, Hayden A, Jonik J, 2017. Deriving spatial and temporal context for point measurements of suspended-sediment concentration using remote-sensing imagery in the Mekong Delta. Continental Shelf Research, 147: 231—245
- Wang H J, Wu X, Bi N S *et al*, 2017. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. Global and Planetary Change, 157: 93—113
- Wei Y H, Jiao J Y, Zhao G J *et al*, 2016. Spatial-temporal variation and periodic change in streamflow and suspended sediment discharge along the mainstream of the Yellow River during 1950-2013. CATENA, 140: 105—115
- Wolanski E, Elliott M, 2016. Estuarine ecological structure and functioning. In: Wolanski E, Elliott M eds. Estuarine Ecohydrology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 157—193
- Yang M D, Sykes R M, Merry C J, 2000. Estimation of algal biological parameters using water quality modeling and SPOT satellite data. Ecological Modelling, 125(1): 1—13
- Yang Z M, Reiter M, Munyei N, 2017. Estimation of chlorophyll-*a* concentrations in diverse water bodies using

ratio-based NIR/Red indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6: 52—58
Zhang M W, Dong Q, Cui T W *et al*, 2014. Suspended sediment

monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM+imagery. *Remote Sensing of Environment*, 146: 136—147

MULTI-TEMPORAL ANALYSIS OF WATER COLOR VARIATION IN LAIZHOU BAY BASED ON REMOTE SENSING IMAGES

JIANG Li-Jun¹, WANG Qing¹, XU Yang¹, ZHAN Chao¹, WANG Hong-Yan¹,
LIU Ya-Long², JIANG Li-Li³

(1. *Coast Institute, Ludong University, Yantai 264025, China*; 2. *Yantai Marine Environment Monitoring Center Station, State Oceanic Administration, Yantai 264006, China*; 3. *Yantai Luda Environmental Impact Assessment Co., Ltd., Yantai 264004, China*)

Abstract The change of ocean color is highly influenced by suspended sediment and chlorophyll levels which are essentially reflecting the ecological environment of estuarine and coastal areas. Combined with hydrological meteorological data, Water color remote sensing models were built based on Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing images of Laizhou Bay during 1996 to 2015. According to the model inversion results, the suspended sediment concentration distribution changed obviously during the study period. The suspended sediment concentration in the dry season was higher than that in the wet season, and the zone of turbidity maximum is inferred in the Yellow River Estuary and near the southwest shore of the Laizhou Bay, the suspended sediment mainly originates from river discharge and resuspension. The diffusion of suspended sediment is mainly affected by the tidal flow field, and the dynamic factors such as wind and wave also affect the diffusion of suspended sediment. Chlorophyll concentration in some area increased significantly. The high concentration area of chlorophyll in Laizhou Bay is mainly distributed in the southeastern waters of Laizhou Bay, and its distribution is obvious seasonal. In spring (May), the temperature of seawater rises, and the vertical mixing of nutrients in water makes the chlorophyll concentration higher.

Key words Laizhou Bay; remote sensing algorithm; the suspended sediment; chlorophyll