

基于环境一号卫星的大洋河河口海域营养盐遥感反演

王 林,赵冬至*,杨建洪 (国家海洋环境监测中心海洋遥感室,辽宁 大连 116023)

摘要: 综合利用大洋河河口海域水体调查的实测数据及环境一号 CCD 影像数据,进行了该区域营养盐反演研究.结果表明,对数函数拟合 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band}2)$ 效果最佳,而线性函数拟合 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band}2)$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band}1)$ 、 TIN 与 $R_{rs}(\text{Band}1)$ 效果最佳,相关性 R^2 分别可达 0.939、0.935、0.945、0.970,未发现较佳的 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 反演模型;营养盐在可见光波段并非光敏感性物质,其与等效遥感反射率存在相关性的主要原因在于河口海域陆源输入物质典型的扩散特征,使得营养盐与某些水色参数存在较高的相关性, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 与有色溶解性有机物吸收系数 $a_g(400)$ 的相关性 R^2 分别可达 0.836、0.808、0.786、0.854,这决定了在河口海域进行营养盐遥感反演的可行性;从卫星产品专题图可看出,大洋河河口海域 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 都存在一个明显的高值区,该高值区营养盐浓度由河口向外逐渐降低,直至外海最低.

关键词: 环境一号卫星; 大洋河河口; 营养盐; 遥感反演

中图分类号: X145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)01-0136-06

Nutrients retrieval in the Dayang River Estuary based on HJ-1 satellite remote-sensed imagery. WANG Lin, ZHAO Dong-zhi*, YANG Jian-hong (Department of Ocean Remote Sensing, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China). *China Environmental Science*, 2012,32(1): 136~141

Abstract: On the basis of in situ measurement data in the Dayang River Estuary and HJ-1 satellite CCD imagery, the nutrients retrieval algorithms were studied. The nitrite ($\text{NO}_2^- \text{-N}$) concentration had the best correlation with the remote sensing reflectance (R_{rs}) in Band 2 (520~600nm), following a natural logarithmic function ($R^2=0.939$). The ammonia ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) concentration was best correlated with R_{rs} in Band 2 as well, following a linear function ($R^2=0.935$). Besides, the nitrate ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) and total inorganic nitrogen (TIN) were best correlated with R_{rs} in Band 1 (430~520nm), likewise following linear functions ($R^2=0.945$ and 0.970 respectively). However, good relationship between the phosphate ($\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$) and R_{rs} in any band was not found. Theoretically, nutrients were not optically sensitive substance in the visible light band, thus these empirical relationships between nutrients and equivalent remote sensing reflectance were largely due to the typical diffusion characteristics of river input materials, which indirectly led to high correlativity between nutrients and some optical coefficients, like the absorption of yellow substance ($a_g(400)$). The indirect correlation proposes the potential feasibility of nutrients retrieval in the estuary waters through satellite remote-sensed imagery. Applying the retrieval algorithm to the HJ-1 satellite data, a euphotic zone with extremely high concentration of nutrients was detected in the Dayang River Estuary, and various nutrients gradually declined from the estuary to open seas.

Key words: HJ-1 satellite; Dayang River Estuary; nutrients; remote sensing retrieval

河口海域是陆海相互作用耦合带和生产力最高的区域,生源元素来源丰富,各种因素(包括水动力、生物地球化学过程及人类活动等)十分复杂,其生态环境系统和生物资源的变化与人类活动和经济发展关系密切^[1].近岸海域浓度偏高的营养盐所带来的富营养化问题是我国沿岸水域最突出的环境问题之一^[2].传统的水质监测方法需要耗费较多的人力、物力与财力,而且采样点布设的数量有限,监测周期较长,难以有效的对

整体水域进行大尺度、动态的监测.遥感技术以独特的优势为水质监测开辟了新的途径,它可以实现对水体快速、大范围、低成本、周期性的动

收稿日期: 2011-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40876091);国家海洋公益性行业科研专项(201005030);国家海洋公益性重点项目(200805064);国家“863”项目(2007AA092003);上海市科学技术委员会科研计划(08DZ1206304)

* 责任作者, 研究员, dz Zhao@nmemc.gov.cn

态监测,具有不可替代的优越性^[3-4]。然而,营养盐并非光敏感性物质,在自然水体中吸收、散射光能微弱,对其进行遥感反演具有一定难度,国内外相关研究成果较少。目前,营养盐遥感反演方法主要分为间接法和直接法。间接法主要是基于特定海域营养盐与某些光敏感性物质(叶绿素、海温等)的关系,建立营养盐遥感反演模型^[5]。直接法则主要利用偏最小二乘法、微分光谱技术等获得营养盐与光谱数据的关系,实现营养盐浓度的遥感反演^[6-12]。

MODIS、HY-1 等海洋水色卫星空间分辨率较低,对于河口海域水体环境要素监测存在一定难度。我国于 2008 年 9 月 6 日成功发射了第一颗专用于环境监测的环境一号卫星,其携带的 CCD 相机较高的空间分辨率可有效监测面积相对较小的河口海域,而较短的重返周期则有利于实现对水体的大规模实时监测。目前为止利用该卫星数据对河口海域营养盐遥感监测的相关研究尚未见报道。本研究利用 2009 年 5 月 6 日大洋河河口海域的实测数据,建立该区域营养盐遥感反演模型,并将其应用于环境一号 CCD 影像上,从而为分析大洋河河口海域营养盐含量时空变化特征、富营养化状况以及其它污染问题研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与站位布设

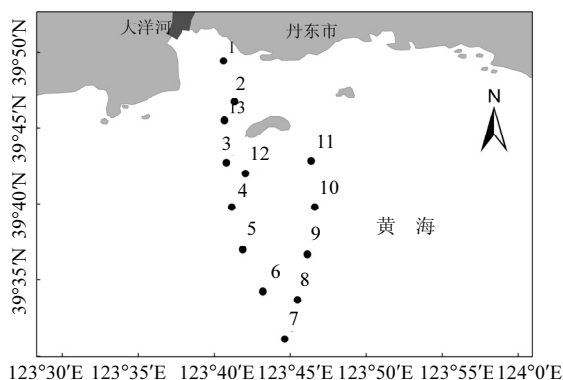


图 1 大洋河河口海域水体调查站位

Fig.1 Stations of the investigation cruise in the Dayang River Estuary

研究区域选择在我国北方大洋河河口海域。大洋河河口海域位于大洋河流域南部,具有明显的由陆地向海洋过渡性特点,自然条件复杂,生态环境脆弱。而大洋河流域处于辽东半岛的东北部,辽宁省营口市以西,丹东市以东,流域范围主要包括岫岩满族自治县大部分区域,凤城市西南部和东港市西部区域,流域面积 6515.25km²。调查于 2009 年 5 月 6 日进行,依据河口海域水体扩散特征,可体现径流输入物质的浓度梯度变化,共布设站点 13 个,如图 1 所示。

1.2 数据获取与分析

1.2.1 光谱数据获取 现场光谱测量采用水面以上测量法^[13],实验仪器为美国 ASD 公司生产的便携式双通道可见光-近红外光谱辐射计。仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 135°,仪器与海面法线方向的夹角为 40°,以避免绝大部分的太阳直射反射,并减少船舶阴影的影响。在每个站位进行 2 次独立的测量。数据处理后得到遥感反射率 R_{rs} ,按如下公式计算:

$$R_{rs} = \left[L_{sw} - rL_{sky} \right] \rho_p / L_p \pi \quad (1)$$

式中, L_{sw} 为测量水体的辐亮度; r 为气-水界面对天空漫散射光的反射率,一般情况可取 0.028,平静海面时取 0.026^[14]; L_{sky} 为天空漫散射光的辐亮度; ρ_p 为标准灰板的反射率; L_p 为测量标准板的辐亮度。

光谱数据采集于 09:00~15:00 之间完成,到达 1、2 号站点时,由于时间较早,不满足光谱测定所需太阳高度角要求,仅进行了水色和化学参数测量,未进行现场光谱测量,共获取光谱数据 11 组。

获取现场水体 ASD 光谱遥感反射率后,根据环境一号卫星 CCD 相机的光谱响应函数进行实测 $R_{rs}(\lambda)$ 的波段等效处理,具体公式如下:

$$R_{rs}(\text{Bandx}) = \frac{\int_{400\text{nm}}^{1000\text{nm}} R_{rs}(\lambda) F_s(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_{400\text{nm}}^{1000\text{nm}} F_s(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, $R_{rs}(\text{Bandx})$ 为 HJ 星 CCD 传感器 Bandx 波段的等效遥感反射率; $R_{rs}(\lambda)$ 为 ASD 光谱仪现场

获取遥感反射率; $F_s(\lambda)$ 为日地平均距离处大气层外太阳辐照度; $S_x(\lambda)$ 为 Bandx 波段的光谱响应函数。

1.2.2 水色参数获取 色素浓度测量采用荧光法^[15],测量时使用美国 Turner 公司生产的 TD-700 实验室荧光仪.数据处理后可得叶绿素 a 浓度(Chl-a)和脱镁叶绿素浓度(Pheo),将两浓度之和作为总叶绿素浓度(TChl).荧光仪定标采用 Sigma 公司生产的 Chl-a 标准样品。

总悬浮物浓度(TSM)测量采用重量法,称量时使用有效数字至少 4 位的电子天平称量。

有色溶解性有机物(CDOM)吸收系数测量采用实验室分光光度计法^[16],测量时使用 Hitachi 公司生产的 U-3010 型紫外-可见分光光度计.CDOM 浓度高低用 400nm 波段处的吸收系数 $a_g(400)$ 表示。

共获取水色参数数据 13 组。

1.2.3 营养盐等参数获取 硝酸盐(NO_3^- -N)、亚硝酸盐(NO_2^- -N)以及铵盐(NH_4^+ -N)测量采用盐酸萘乙二胺分光光度法,样品测量使用 7230 分光光度计,将 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 以及 NH_4^+ -N 浓度之和作为总溶解性无机氮(TIN).无机磷(PO_4^{3-} -P)测量采用磷钼兰法^[17],样品测量使用 7230 分光光度计.需要说明的是,营养盐测量后发现 13 号站点 NO_3^- -N 数值异常,建模及相关性分析时未采用.共获取 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 以及 PO_4^{3-} -P 数据 13 组, NO_3^- -N 数据 12 组。

盐度(Sal)数据采用 Hydrolab 多参数水质仪现场测量获得.到达 13 号站点时,测量盐度所用的多参数水质仪供电蓄电池电量不足,未进行盐度测量.共获取盐度数据 12 组。

1.2.4 卫星数据获取 在 HJ-1A 卫星和 HJ-1B 卫星上均装载的 2 台 CCD 相机设计原理完全相同,以星下点对称放置,平分视场、并行观测,联合完成对地刈幅宽度为 700km、地面像元分辨率为 30m、4 个谱段的推扫成像.本研究未能获取 5 月 6 日外业调查当日卫星数据,而于 5 月 24 日获取一景 HJ-1A CCD2 影像。

CCD 影像的预处理主要包括:辐射校正、几何校正和大气校正等。

辐射校正:利用绝对定标系数将 CCD 图像 DN 值转换为辐亮度图像的公式为:

$$L = \frac{\text{DN}}{A} + L_0 \quad (3)$$

式中, A 为绝对定标系数增益; L_0 为绝对定标系数偏移量,转换后辐亮度单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$.其中 A 和 L_0 的具体参数由《环境减灾星座 A/B 星各载荷在轨绝对辐射定标系数》^[18]提供(中国资源卫星应用中心,2009)。

几何校正:选用经过空间配准的 1:5 万地形图为参考图像,在 ENVI 4.7 支持下对环境一号卫星 CCD 影像进行几何校正,图像重采样采用最近邻点法,总误差控制在 0.5 个像元内。

大气校正:采用 ENVI 4.7 软件下的 FLAASH 大气校正模块对环境一号卫星 CCD 数据进行大气校正,输入相关参数,计算得到大气校正后的遥感反射率图像。

1.3 算法精度评价指标

本研究营养盐反演算法精度评价指标采用均方根误差(e_{rms})和相对误差(e_r)。

2 结果与讨论

2.1 营养盐遥感反演模型建立

将经 HJ-1A CCD2 光谱响应函数处理后的 4 个波段的等效遥感反射率分别与营养盐浓度进行相关性分析,结果如表 1 所示.可发现, Band1 (430~520nm)、Band2(520~600nm) 以及 Band3 (630~690nm)的等效遥感反射率均与 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 以及 TIN 存在较高的相关性,除 $R_{rs}(\text{Band3})$ 与 NO_2^- -N 相关性相对较低外,其余 R^2 均高于 0.85,且大部分在 0.90 以上;而 Band4 (760~900nm)的等效遥感反射率与所有营养盐参数的相关性均非常低,可见该波段在营养盐反演中并不适用;值得注意的是,未发现任何波段与 PO_4^{3-} -P 存在明显的相关性.总体看来,HJ-1A CCD2 Band1、Band2 以及 Band3 可用于 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 以及 TIN 的遥感反演,结合表 1 确定将 Band2 作为反演 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 的敏感波段,Band1 作为反演 NO_3^- -N、TIN 的敏感波段,而 PO_4^{3-} -P 不存在任何敏感波段。

表 1 河口海域营养盐参数与 4 个波段的等效遥感反射率间相关性分析结果

Table 1 Correlation analysis results between nutrients and equivalent remote sensing reflectance

项目	$R_{rs}(\text{Band1})$	$R_{rs}(\text{Band2})$	$R_{rs}(\text{Band3})$	$R_{rs}(\text{Band4})$
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	0.868	0.880	0.746	0.245
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.928	0.935	0.894	0.417
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.970	0.940	0.927	0.072
TIN	0.945	0.931	0.931	0.064
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	0.195	0.183	0.254	0.226

分别将 $R_{rs}(\text{Band2})$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $R_{rs}(\text{Band1})$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TIN 进行线性、对数以及 e 指数模型回归分析,算法精度见表 2。 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 反演时,对数模型表现最佳,相关性 R^2 为 0.939,平均相对误差为 26.9%,均方根误差为 $0.09148\mu\text{mol/L}$,线性模型次之,e 指数模型最差; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 反演时,线性模型与对数模型表现近似,线性模型相对较佳,e 指数模型最差; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TIN 反演时,线性模型表现最佳,对数模型次之,e 指数模型最差。此外, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 反演模型的平均相对误差普遍偏高,分析原因在于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 2 个极低值点($0.31429,0.25714\mu\text{mol/L}$)反演相对误差较大造成。因此,本研究选择对数模型反演 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,而选择线性模型反演 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN。

表 2 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 反演精度统计

Table 2 The statistics of various nutrients retrieval accuracy

反演参数	模型类型	$e_{rms}(\mu\text{mol/L})$	平均 $e_t(\%)$	R^2
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$y=a+bx$	0.12825	45.3	0.880
	$y=a+b\ln x$	0.09148	26.9	0.939
	$y=ae^{bx}$	0.31236	51.2	0.286
	$y=a+bx$	1.14213	31.1	0.935
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$y=a+b\ln x$	1.28712	22.6	0.917
	$y=ae^{bx}$	2.38377	45.1	0.715
	$y=a+bx$	0.94456	55.0	0.970
	$y=a+b\ln x$	1.01887	71.5	0.965
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$y=ae^{bx}$	2.91601	103.0	0.712
	$y=a+bx$	2.17396	27.5	0.945
	$y=a+b\ln x$	2.19964	31.3	0.944
	$y=ae^{bx}$	4.13978	52.9	0.802

2.2 营养盐遥感反演机制分析

大量研究表明, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 以及 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在可见光波段吸收、散射光能微弱,但其与遥感反射率存在的相关性该如何解释成为本研究亟需解决的关键问题。将河口海域理、化以及光学参数等作相关性分析,主要包括:代表径流扩散状况的指数 Sal;水色参数 Tchl、TSM 以及 $a_g(400)$;营养盐参数 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TIN 以及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$,分析结果如表 3 所示。Sal 与其他因子(除 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 外)均存在一定的相关性,其中,与颗粒态物质的相关性明显低于溶解态物质(除 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 外),说明河口海域的污染物质主要来自陆源径流输入,而且径流输入的溶解态物质均匀扩散到海水中,且就本研究而言,线性扩散特征明显,而颗粒态物质的线性扩散特征相对较弱;此外, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 与水色参数中溶解态 $a_g(400)$ 的相关性 R^2 分别可达 0.836、0.808、0.786、0.854,普遍高于颗粒态水色参数 Tchl、TSM;值得注意的是,本研究中 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 与其他参数均不存在明显的相关性,可见其来源和扩散特征与其他参数不同,在今后研究中需引起重视。基于以上分析,可知河口海域陆源径流输入物质典型的扩散特征,及在此基础上使得营养盐参数与某些水色参数存在较高的相关性是进行河口海域营养盐遥感反演的重要依据。

2.3 卫星遥感产品的实现

由于受天气、海况以及卫星过境时间等多种因素影响,本研究所能获取距 5 月 6 日外业调查时间最近且图像质量最好的卫星数据为 5 月 24 日 HJ-1A CCD2 影像。本文营养盐反演基础在于河口海域陆源径流输入物质典型的扩散特征,而北方地区 5 月份为枯水季节,河口径流量较少且相对稳定,因此基于 5 月 6 日实测数据所建模型可用于 5 月 24 日卫星数据。将 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 反演模型应用于环境一号卫星 CCD 数据,得到营养盐浓度卫星产品专题图(图 2)。 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 都表现为在大洋河河口有一个明显的高值区,该高值区营养盐浓度由河口向外逐渐降低,直至外海最低。因此,大洋河河口海域营养盐遥感反演具有可行性,从而为河口海域这一特殊区域水体中营养盐的遥感反演研究提供参考。

表 3 河口海域理、化以及光学参数间相关性分析结果
Table 3 Correlation analysis results among physical, chemical and optical parameters

调查参数	径流指数	水色参数			营养盐参数				
	Sal	TChl	TSM	$a_g(400)$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TIN	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$
Sal	1								
TChl	0.422	1							
TSM	0.487	0.407	1						
$a_g(400)$	0.809	0.570	0.600	1					
$\text{NO}_2^- \text{-N}$	0.837	0.472	0.768	0.836	1				
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.755	0.431	0.857	0.808	0.966	1			
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.950	0.400	0.402	0.786	0.826	0.718	1		
TIN	0.911	0.489	0.670	0.854	0.981	0.935	0.911	1	
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	0.021	0.009	0.132	0.147	0.180	0.209	0.065	0.108	1

注: TChl表征浮游植物含量,因此这里将其归为颗粒态物质

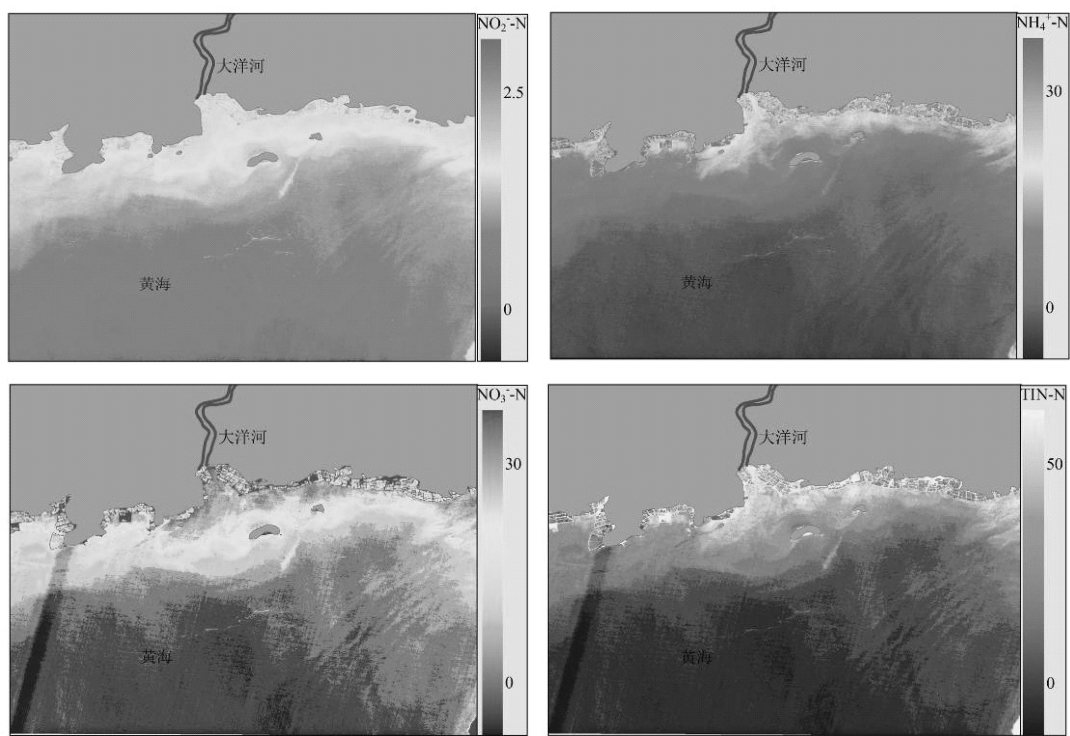


图 2 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 TIN 卫星产品专题图
Fig.2 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and TIN satellite products
单位为 $\mu\text{mol/L}$

3 结论

3.1 HJ-1A CCD2 Band2 波段为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 反演的敏感波段,Band1 为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TIN反演的敏感波段,由对数函数拟合 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band2})$ 效果最佳,相关性 R^2 可达 0.939,而由线

性函数拟合 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band2})$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $R_{rs}(\text{Band1})$ 、TIN 与 $R_{rs}(\text{Band1})$ 效果最佳,相关性 R^2 分别可达 0.935、0.945、0.970,未发现较佳的 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 遥感反演模型。
3.2 Sal 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及 $a_g(400)$ 存在较高的相关性, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、

NO_3^- -N 与 $a_g(400)$ 的相关性分别可达 0.836、0.808、0.786,因此,河口海域陆源径流输入物质典型的扩散特征,及在此基础上使得营养盐参数与某些水色参数存在较高的相关性是进行河口海域营养盐遥感反演的重要依据。

3.3 从卫星产品专题图可看出,大洋河河口海域 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 以及 TIN 都存在一个明显的高值区,该高值区营养盐浓度由河口向外逐渐降低,直至外海最低。

参考文献:

- [1] 胡莹莹,王菊英,张志锋,等.辽河口近岸海域水体营养物推荐基准值的制定方法 [J]. 中国环境科学, 2011,31(6):996-1000.
- [2] 李小斌,陈楚群,施 平,等.珠江口海域总无机氮的遥感提取研究 [J]. 环境科学学报, 2007,27(2):313-318.
- [3] Pekka H, Jenni V, Tuula H, et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semiempirical algorithms in Finland [J]. The Science of the total Environment, 2001,268:107-121.
- [4] Dmitry P, Robert S, Anton K, et al. Operational algorithm for the retrieval of water quality in the GreatLakes [J]. Remote Sensing of Environment, 2005,97:352-370.
- [5] Ana Silió-Calzada, Annick Bricaud, Bernard Gentili. Estimates of sea surface nitrate concentrations from sea surface temperature and chlorophyll concentration in upwelling areas a case study for the Benguela system [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112:3173-3180.
- [6] 许 勇.江苏沿海无机氮磷营养盐遥感监测研究 [D]. 南京:南京师范大学, 2009.
- [7] 刘 征,贺军亮,彭 林,等.黄壁庄水库总氮、总磷含量与反射光谱特征的关系 [J]. 石家庄学院学报, 2009,11(3):45-55.
- [8] 赵旭阳,刘 征,贺军亮,等.黄壁庄水库水质参数遥感反演研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2007,23(6):46-49.
- [9] 巩彩兰,尹 球,匡定波.黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析 [J]. 遥感学报, 2006,10(6):69-75.
- [10] 雷 坤,郑丙辉,王 桥.基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感 [J]. 环境科学学报, 2004,24(3):376-380.
- [11] 王学军,马 廷.应用遥感技术监测和评价太湖水质状况 [J]. 环境科学, 2000,21(6):65-68.
- [12] 王建平,程声通,贾海峰,等.用 TM 影像进行湖泊水色反演研究的人工神经网络模型 [J]. 环境科学, 2003,24(2):18-24.
- [13] NASA/TM-2003-211621/Rev4 Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols [S].
- [14] Mobley C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. Applied Optics, 1999,38(36): 7442-7455.
- [15] NASA/TM-2002-210004/Rev3 Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation fluorometric chlorophyll a: sampling, laboratory methods, and data analysis protocols [S].
- [16] NASA/TM-2000-209966/Rev2 Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples [S].
- [17] GB/T 17378.4-2007 海洋监测规范 [S].
- [18] 环境减灾星座 A/B 星各载荷在轨绝对辐射定标系数 [R]. 北京:中国资源卫星应用中心, 2009.

致谢: 感谢国家海洋环境监测中心海洋遥感室全体工作人员的协助。

作者简介: 王 林(1981-),男,河北沧州人,研究员,硕士,主要从事海洋光学与水质遥感研究.发表论文 5 篇。