

基于高光谱遥感的沿海河口无机氮浓度空间分布特征 解译

张东¹, 许勇^{1,2}, 张鹰¹, 李欢¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 盐城 224000)

摘要:利用 39 组样本的野外实测光谱结合 Hyperion 影像资料, 建立了高悬沙含量沿海河口可溶性无机氮 (dissolved inorganic nitrogen, DIN) 的高光谱定量遥感解译模型, 实现 DIN 浓度空间分布规律的遥感反演及动态监测。研究发现, 当悬沙浓度 $> 0.1 \text{ kg/m}^3$ 时, DIN 浓度与悬沙含量之间呈显著的倒数相关关系, 相关系数 R^2 为 0.617。据此首先将重采样处理后的野外实测光谱与同步 DIN 浓度数据进行统计相关分析, 筛选出 2 个对 DIN 浓度变化敏感的波段, 中心波长分别为 630nm 和 804nm; 然后利用波段反射率 R_{804} 和 R_{630} 计算出仿泥沙遥感参数因子 $R_{804} \times R_{630} / (R_{804} - R_{630})$, 建立其与实测 DIN 浓度的非线性遥感模型, 29 组建模样本和 10 组检验样本的相关系数 R^2 分别为 0.746 和 0.67, DIN 浓度平均绝对误差分别为 109.07 $\mu\text{g/L}$ 和 147.58 $\mu\text{g/L}$ 。将该非线性遥感模型应用于 Hyperion 影像, 获得了射阳河口 DIN 浓度的空间分布特征, DIN 浓度的变化范围为 52 ~ 513 $\mu\text{g/L}$ 。可以看出, 在以悬沙为主要悬浮物的沿海河口, 遥感解译得到的 DIN 浓度扩散趋势与潮流的运动以及悬沙的运移规律密切相关。因此, 在无需了解水动力状况的条件下, 高光谱遥感是对 DIN 浓度进行动态监测的有效手段。

关键词:高光谱; 遥感; 河口; 无机氮; 悬沙含量

中图分类号: X87; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1435-07

Interpretation of Spatial Distribution Pattern for Dissolved Inorganic Nitrogen Concentration in Coastal Estuary Using Hyperspectral Data

ZHANG Dong¹, XU Yong^{1,2}, ZHANG Ying¹, LI Huan¹

(1. School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Urban and Resource Environment Institute, Yancheng Teacher College, Yancheng 224000, China)

Abstract: Choosing dissolved inorganic nitrogen (DIN) as one of the representative nutritional salt monitoring indexes, a hyperspectral remotely sensed inversion model was built and applied to quantitatively retrieve water quality parameters with its spatial distribution patterns in coastal estuary with high suspended sediment concentration (SSC). It was found that when SSC was larger than 0.1 kg/m^3 , DIN concentration had a notable inverse correlation with SSC and the correlation coefficient R^2 reached 0.617. Based on this conclusion, firstly the *in-situ* observed water surface remote sensing reflectance was resampled according to the spectral response characters of Hyperion sensor. And then, statistical correlation analysis between reflectance and DIN concentration was carried out. The results showed that band reflectance of R_{804} and R_{630} representing the second and first reflectance peak of water spectrum curve were sensitive to the variation of DIN concentration. And then, a pseudo remotely sensed sand parameter index $R_{804} \times R_{630} / (R_{804} - R_{630})$ was calculated for the construction of the nonlinear DIN quantitative reversion model. Correlation coefficient R^2 between observed and simulated DIN concentrations for 29 calibrating samples and 10 validating samples were 0.746 and 0.67, while their mean absolute errors reached 109.07 and 147.58 $\mu\text{g/L}$, respectively. The model was then applied on Hyperion hyperspectral image to get the spatial distribution character of DIN concentration in Sheyanghe river estuary and the DIN concentration was between 52 to 513 $\mu\text{g/L}$. Results indicated that in coastal estuary which was dominated by suspended sediments, the diffusive trends of DIN concentration reversed by remote sensing techniques had an intimate relationship with motions of tidal current and transportation attributes of SSC. As the hydrodynamic conditions were unclear, hyperspectral remote sensing technique was an effective technical way for dynamic survey of DIN concentration.

Key words: hyperspectral; remote sensing; estuary; dissolved inorganic nitrogen; suspended sediment concentration

适量的营养盐供给是维持海洋初级生产力和海洋生态系统稳定的必要条件^[1]。但是近年来, 由于经济快速发展, 大量的工业生产和生活污水排放入海, 造成我国部分沿海及河口区域水体富营养化明显, 赤潮频发。进入 21 世纪以来, 沿海水体环境恶化的势头虽然在一定程度上得到遏制, 在局部海域甚

至有一定程度的缓解, 但环境质量下降的总体趋势

收稿日期: 2009-08-02; 修订日期: 2009-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40606044); 教育部高校博士点基金项目 (200803190007)

作者简介: 张东 (1975 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋信息技术及海洋环境过程模拟, E-mail: zhangdong@njnu.edu.cn

并未得到根本改变^[2].

利用常规观测结合遥感解译来获取水质参数的大范围空间分布特征,进而了解水质的动态变化,是有效控制和管理河口地区水体富营养化的一种行之有效的手段^[3-7]. 水质参数的遥感反演方法可归纳为 3 种类型:基于回归分析的经验半经验方法^[7-10]、基于波谱特征和生化参数之间关系的半分析方法^[11,12]以及在生物、物理学原理基础上建立的基于辐射传输模型的分析方法^[13-16]. 这些方法各有所长,但都有一定的局限性. 从应用角度来讲,经验半经验方法具有一定的物理意义,算法也比较简单,目前应用最为广泛^[17].

由于水质遥感是通过水体光谱反射率来计算水体所含各种物质的浓度的,所以对于水体中能够形成光谱信号的非色素颗粒物、浮游植物和有色可溶性有机物等的遥感反演,已有大量的研究成果^[5,6,9,10,14,16,18],但是对于水中的氮、磷营养盐来说,它们不能够直接产生光谱信号,那么用遥感的手段来获取其浓度是否可行?或者说借助水体中悬浮物对营养盐的吸附和释放作用,是否可以间接反演营养盐的浓度?这些问题对于利用遥感监测沿海河口的富营养化具有重要意义.

据此,本研究以江苏射阳河口为典型研究区,选择 DIN 作为监测指标,探讨利用高光谱遥感实现高悬沙含量沿海河口营养盐动态监测的实用方法,目的是为研究沿海河口区域的水质参数空间分布及运移规律提供可行方案和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省盐城市的射阳河口入海处,地理位置为东经 $120^{\circ}27' \sim 120^{\circ}32'$,北纬 $33^{\circ}47' \sim 33^{\circ}54'$ (图 1). 射阳河是苏北里下河地区主要的入海通道,全长 210 km,流域面积 $4\,030\text{ km}^2$. 射阳河地区属北亚热带季风气候,年平均降水量 $1\,000\text{ mm}$ 左右,雨量充沛,降水多集中在每年的 6~9 月,径流量大且年际和季节分配不均. 由于射阳河流域是江苏省乃至全国重要的粮棉产区,近年来工业发展迅速,工农业生产污水排放量增长很快,是江苏沿海除长江口北支以外污水排放量最大的河流^[1].

射阳河口海区潮汐属于不正规半日潮,是江苏沿海弱流区与强流区的过渡海域. 据 1995~2000 年实测资料统计,河口平均涨潮历时 4 h 49 min,平均落潮历时 7 h 36 min,平均潮差 2.15 m,平均潮位

0.43 m(废黄河基面). 在射阳河口处潮流沿河道方向成往复流,河口以北主流向多为 NNW-SSE,平均大潮流速 $0.62 \sim 0.67\text{ m/s}$;河口以南主流向多 NNE-SSW,平均大潮流速 1.03 m/s 左右,涨潮平均流速大于落潮平均流速^[19]. 河口的强浪向为 NE 向,平均一年中浪高 $<2\text{ m}$ 的天数为 285 d 左右,最大波高的多年平均峰值出现在 9 月,谷值出现在 6 月. 由于受季风影响,河口一般风速不大.

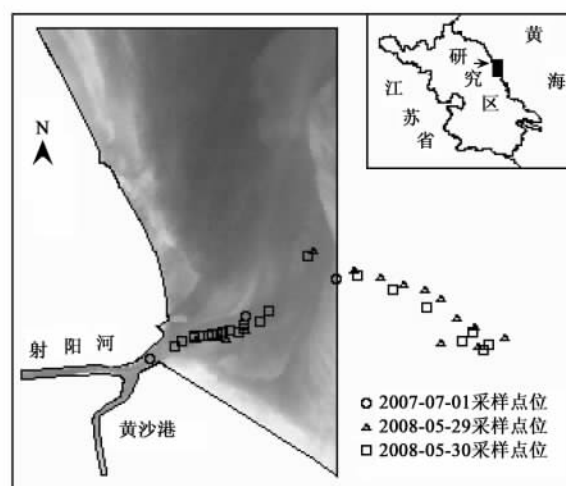


图 1 研究区 Hyperion 影像及采样点位置示意

Fig. 1 Hyperion image for study area with the location of sampling points

1.2 影像数据获取和处理

本研究采用的遥感数据为 Hyperion L1R 高光谱遥感影像数据,影像成像时间为北京时间 2007-07-11T10:17:00,成像时太阳高度角为 51.19° ,方位角为 156.50° . 影像在 $400 \sim 2\,500\text{ nm}$ 波长范围内以推扫方式获取 242 个波段数据,空间分辨率为 30 m ,幅宽为 7.5 km ^[20].

经过对 Hyperion 影像进行无效波段剔除、坏线修复、垂直条纹去除、大气校正、几何校正以及水陆分离处理后,可得到射阳河口外侧水域的水体光谱反射率影像,图 1 显示了中心波长为 804 nm 波段的研究区水陆分离结果,该影像可用于 DIN 浓度的遥感反演^[20].

1.3 野外数据采集和分析

在研究区开展了 2 次水质样本的采集和水体表层光谱的同步测量工作,采样点位置如图 1 所示. 第 1 次采样时间为 2007-07-01,沿射阳河口入海轴线布置了 3 条 80 t 木质渔船,根据全潮水文测验的要求,以 0.5 h 或 1 h 间隔一共采集了 14 个表层水样;第 2 次采样时间为 2008-05-29~2008-05-30,在河口

附近海域开展了 2 个航次的走航式采样,获得了 39 个有效表层水样. 所有水样通过实验室水质分析,获得硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮浓度以及悬浮泥沙浓度,根据《海水水质标准》(GB 3097-1997)提供的计算方法,将前 3 项浓度值换算成 DIN 浓度.

水样采集的同时,按照 NASA 的水体光谱测量规范,利用 ASD FieldSpec FR 手持式光谱仪根据表面法(above-water method)测量水体表面反射光谱,光谱仪测量范围为 325 ~ 1 075 nm,测量方向基本垂直水面,测量高度距水面约 1 m 左右^[21]. 为了使实测光谱的分析结果能够应用于 Hyperion 影像,采用高斯函数法模拟得到 Hyperion 影像的光谱响应函数,对实测光谱进行了光谱重采样处理^[22].

1.4 研究方法

本研究中采用波段比值、波段差值、波段乘积、仿泥沙遥感参数和仿植被指数方式对现场实测重采样光谱进行运算,构建反演参数,并进行 DIN 的敏感波段筛选,因子形式如表 1 所示,表中 i 和 j 分别代表实测光谱波段的中心波长, R_i 和 R_j 为对应波段的光谱反射率.

表 1 DIN 反演因子形式表

Table 1 Formation of DIN reversion indexes

因子名称	因子形式
波段比值因子	$F_1(i, j) = R_i/R_j$
波段差值因子	$F_2(i, j) = R_i - R_j$
波段乘积因子	$F_3(i, j) = R_i \times R_j$
仿泥沙遥感参数因子	$F_4(i, j) = R_i \times R_j / (R_i + R_j)$;
	$F_5(i, j) = R_i \times R_j / (R_i - R_j)$
仿植被指数因子	$F_6(i, j) = (R_i - R_j) / (R_i + R_j)$

对所筛选的 DIN 反演因子和实测 DIN 浓度进行相关分析,分别采用线性模型、对数模型、倒数模型和多项式模型来定量反演 DIN 浓度,以相关系数 R^2 、均方根误差和平均绝对误差为检验指标,评价模型反演精度. 然后将所选定的反演模型应用于 Hyperion 影像相应的波段,通过波段运算来获得 DIN 的空间分布特征.

2 结果与分析

2.1 不同 DIN 浓度水体的光谱特征

由于水体在近红外波段反射率很低而且噪声非常大,实际分析时仅采用了 350 ~ 900 nm 波段范围的水体反射率资料. 图 2 显示了 2007-07-01 实测的 14 条射阳河口水体表层光谱反射率曲线,其同步 DIN 浓度变化范围为 25 ~ 700 $\mu\text{g/L}$, 悬沙浓度变化

范围为 0.10 ~ 1.97 kg/m^3 .

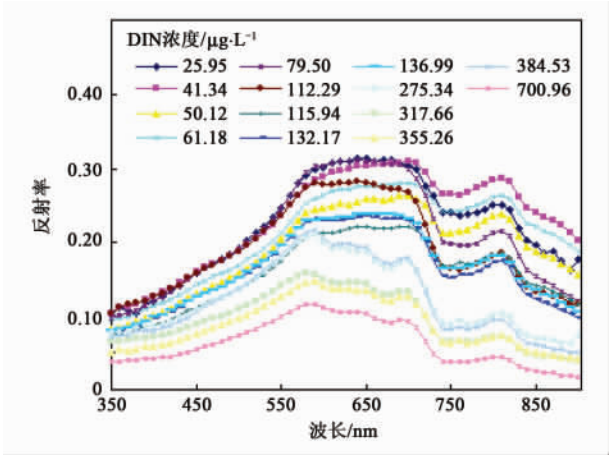


图 2 不同 DIN 浓度水体的光谱特征曲线
Fig. 2 Spectral characteristic curve for water samples of different DIN concentrations

从光谱曲线变化特征可以看出,反射率曲线在 560 ~ 690 nm、790 ~ 830 nm 之间存在第一、第二反射峰,在 720 ~ 780 nm 存在吸收谷,随着 DIN 浓度的增加,水体的反射率总体呈下降趋势, DIN 浓度越高,反射率越低,曲线越平缓. 当 DIN 浓度 > 250 $\mu\text{g/L}$ 时,第一反射峰集中在 560 ~ 590 nm 的黄光波段,第二反射峰相对低平,且 DIN 浓度越大,与第一反射峰的反射率差值越小;当 DIN 浓度 < 250 $\mu\text{g/L}$ 时,随着 DIN 浓度的减小,第一反射峰向红光波段移动,峰形扁平,而第二反射峰的反射率增长明显,与第一反射峰的反射率差值也相应减小.

造成研究区水体反射率随 DIN 浓度的增加而下降的原因在于射阳河口浮游生物密度低,悬浮泥沙含量高且变化大,悬浮泥沙是影响水体光谱反射率的主要因素,因此风浪掀沙、沿岸流输沙以及悬沙重力沉降作用下引起的水体含沙量的变化控制了水体的 DIN 浓度及其光谱特征. 通过实测数据的相关分析可知,研究区水体中悬沙浓度与 DIN 浓度之间存在显著的倒数相关关系,如图 3 所示,两者的相关系数 R^2 为 0.617. 因此在高含沙水体中,随着悬沙含量的增大,对应的 DIN 浓度降低,水体反射率反而得到提高^[23,24]. 但是当悬沙浓度 < 0.1 kg/m^3 时,两者之间没有明确的相关关系.

从 DIN 浓度变化与波长的关系分析,图 4 显示了 630、750 和 810 nm 波长的光谱反射率与 DIN 浓度之间的变化关系,这 3 个波长分别代表水体光谱曲线的第一反射峰、吸收谷和第二反射峰. 可以看出,对于上述波长,反射率随 DIN 浓度的变化呈指

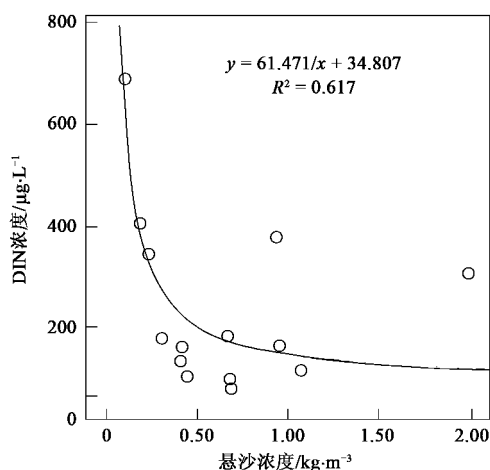


图3 DIN 浓度与悬沙浓度的相关关系

Fig. 3 Correlation between DIN concentration and suspended sediment concentration

数关系衰减,而且随着波长的增加,衰减速率加快,反射率值之间的差距加大,这一特征显示出可以从光谱反射率的波段组合入手来实现 DIN 浓度的遥感反演。

2.2 DIN 敏感波段筛选

结合不同 DIN 浓度水体的光谱特征,根据表 1 确定的 6 个反演因子对实测光谱重采样反射率进行运算,来实现 DIN 敏感波段的筛选。将计算得到的反演因子与实测 DIN 浓度建立相关系数矩阵,图 5 分别显示了其中相关系数较高的因子 F_2 和 F_5 对应的相关系数矩阵结果,相关系数最高可达 0.85 以上,这表明波段差值作为因子组成部分能够较好地反映 DIN 浓度的变化。

进一步从因子 F_2 和 F_5 的相关系数二维空间分布形态来看,因子 F_2 的高相关性区域集中在对角线

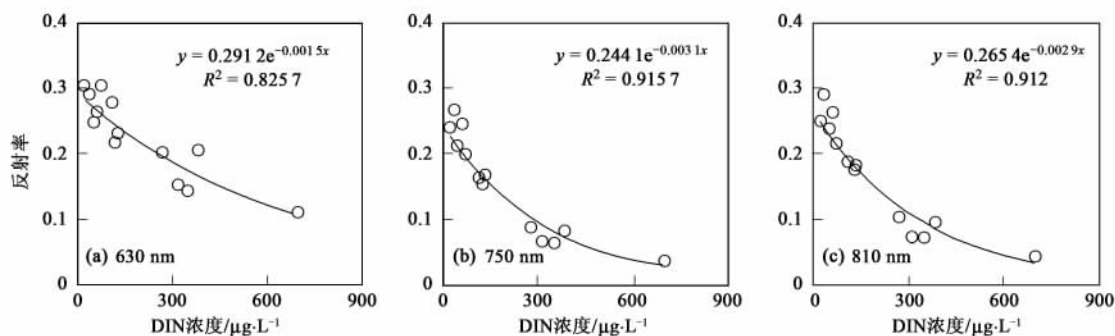


图4 不同波段光谱反射率与 DIN 浓度变化关系

Fig. 4 Correlation between spectral reflectance and DIN concentrations at different wavelengths

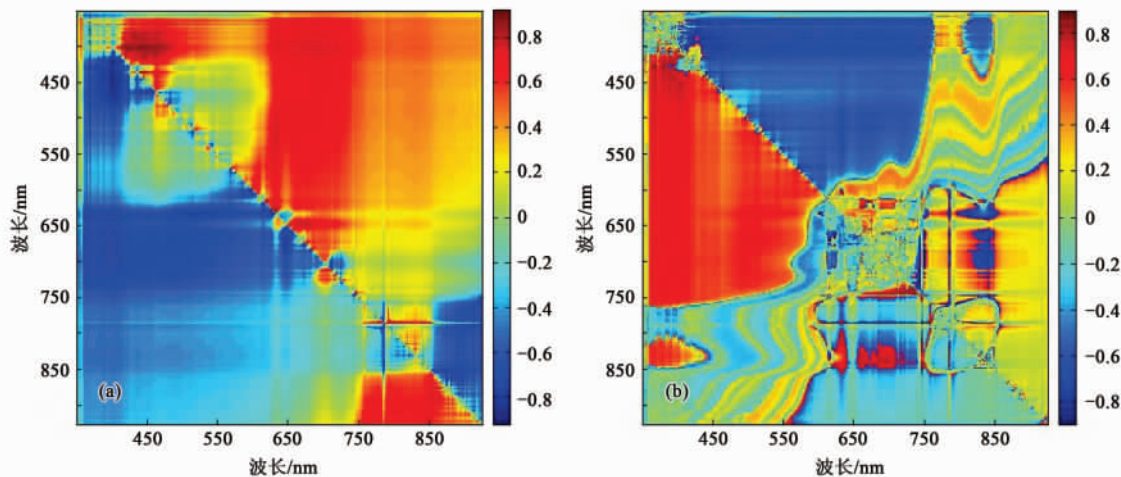


图5 DIN 反演因子与 DIN 浓度的相关关系矩阵

Fig. 5 Correlation coefficient matrixes for DIN reversion indexes and DIN concentration

附近,因为反射光谱在相邻波段存在高相关特征,所以因子 F_2 不适宜用于 DIN 浓度反演;而因子 F_5 的

高相关性区域离对角线较远,主要集中在反射光谱的第一和第二反射峰附近的矩形区域,因此适合作为 DIN 浓度反演因子来反演 DIN 浓度.与此同时,从图 4(b)中筛选出 6 个 DIN 浓度反演敏感波段,对应的中心波长分别为 630、641、661、804、814 和 824 nm.

2.3 DIN 定量遥感反演模型

将所筛选的 6 个敏感波段按波长分为两组,一组中心波长为 630、641 和 661 nm,另一组中心波长为 804、814 和 824 nm,然后按因子 F_5 一共建立 9 组波段组合形式,利用重采样反射率分别计算出不同波段组合的结果,在 SPSS 软件中建立它们与 DIN 浓度之间的定量反演模型.

因为当悬沙浓度较高时,DIN 浓度与悬沙浓度之间存在显著的倒数相关关系,所以在第二次采样数据中,首先剔除 14 个悬沙浓度 $< 0.10 \text{ kg/m}^3$ 的样本点数据,然后在剩余的 39 组数据中,任取 29 组用于模型的建立,其余 10 组用于模型的精度验证.模拟结果表明:对于所有的 9 组波段组合,倒数模型均有良好的反演精度,其中 804 和 630 nm 波段组合 $F_5(804, 630)$ 的结果精度最高,如图 6 所示, R^2 为 0.612,均方根误差为 $324.40 \text{ } \mu\text{g/L}$,平均绝对误差为 $150.01 \text{ } \mu\text{g/L}$,对应的 DIN 浓度倒数反演模型如式(1)所示:

$$\text{DIN}_s = \frac{-34.684}{F_5(804, 630)} + 215.717 \quad (1)$$

式中, DIN_s 为遥感反演的无机氮浓度 ($\mu\text{g/L}$).

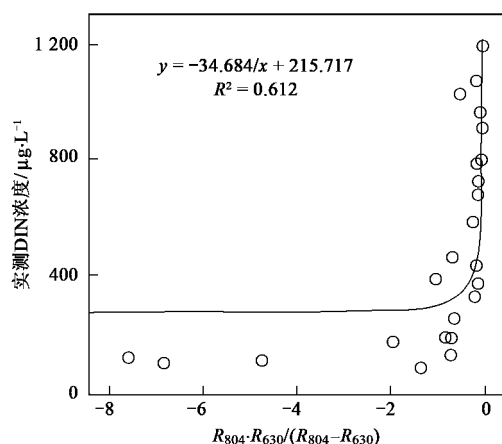


图 6 DIN 浓度反演的倒数模型

Fig. 6 Inverse model for DIN concentration reversion

但是从图 6 可以发现,在 DIN 浓度较高时,该模型的模拟曲线与实测值拟合程度较好,而 DIN 浓度较低,特别是当 DIN 浓度 $< 150 \text{ } \mu\text{g/L}$ 时,模拟曲

线与实测值偏离较远,模拟值大于实测值.因此,在倒数反演模型的基础上,进一步建立 DIN 与仿泥沙遥感参数因子的非线性模型,如式(2)所示:

$$\text{DIN}_s = \frac{-15.735}{F_5(804, 630)} + 566.4e^{2F_5(804, 630)} + 56.943 \quad (2)$$

非线性模型的精度比倒数反演模型有明显改善,其 R^2 提高到 0.746,平均绝对误差降低到 $109.07 \text{ } \mu\text{g/L}$,均方根误差变化不大,为 $316.12 \text{ } \mu\text{g/L}$.模拟结果验证如图 7 所示, R^2 为 0.67,均方根误差为 $305.71 \text{ } \mu\text{g/L}$,平均绝对误差为 $147.58 \text{ } \mu\text{g/L}$,说明反射率曲线的第二和第一反射峰的组合能够有效应用于 DIN 浓度的遥感反演.

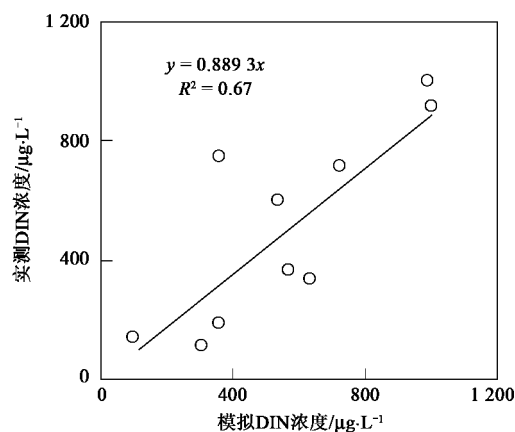


图 7 DIN 浓度反演验证

Fig. 7 Comparison for simulated and observed DIN concentrations

2.4 DIN 浓度的空间分布规律

将建立的非线性反演模型运用于 Hyperion 反射率影像进行波段运算,获得 DIN 浓度的空间分布如图 8 所示.从 DIN 浓度的扩散趋势来看,遥感解译结果表明其与潮流的运动有很好的对应关系.据多年统计分析可知,射阳河口区的潮流在河口处沿河道方向成往复流,在口门外低于 -2.0 m 等深线的海区涨潮流由北向南,落潮流由南向北^[19].而由实测潮位资料可知,2007-07-11 潮汐从 06:00 开始退潮,直至 13:00 到达停潮,因此在 Hyperion 影像成像时刻,研究区处于落潮后期,落潮流由南向北运动.因此,随着海水落潮,由射阳河和黄沙港下泄的水流挟带的 DIN 由河口向外扩散,在河口以内,射阳河入海河道两侧的 DIN 浓度低于河道中部,与河道的汇水特性以及水流运动特性相一致;黄沙港入海河道则由河道往河口浓度逐渐减小,同样也符合河道向外海排污时的浓度递减的特征.在河口以

外,河口南侧区域的 DIN 浓度明显低于河口北侧区域,而在河口北侧,DIN 浓度的空间分布表现为有规律的舌状分带梯度分布,越往分带中心 DIN 浓度越高,这与潮流落潮时由南向北运动的趋势是一致的,而且随着潮流向北运动,分带中心逐渐向河口以北移动,DIN 也向河口北侧扩散.另外在河口以外,越靠近岸边,DIN 浓度越低,表明在岸边潮流较弱,水体的交换能力较低.

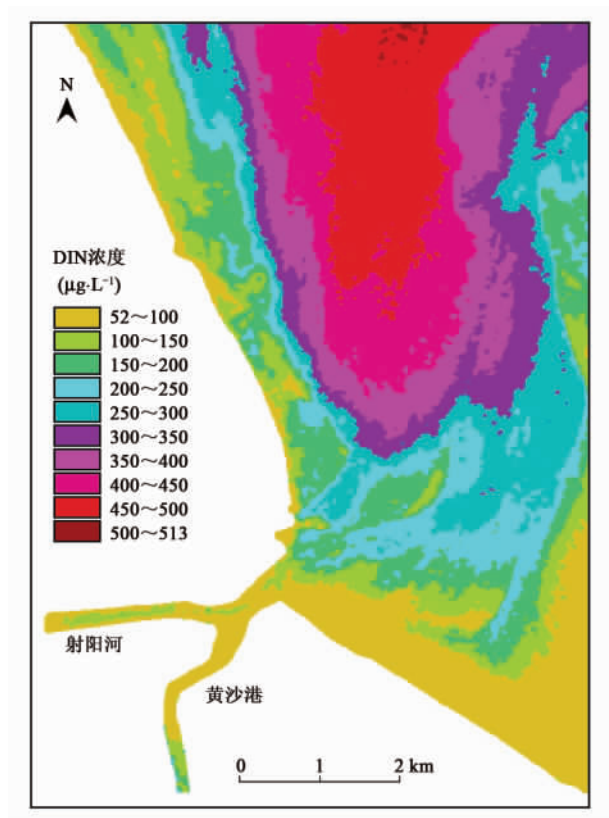


图8 射阳河口表层 DIN 浓度的空间分布

Fig. 8 DIN concentration distributive pattern at water surface in Sheyanghe River estuary

3 结论

(1)在浮游生物密度低、悬浮泥沙含量高且变化大的沿海河口,悬沙含量的变化控制了水体 DIN 浓度的大小及其空间分布状态.当悬沙含量 $> 0.1 \text{ kg/m}^3$ 时,DIN 浓度与悬沙含量之间存在显著的倒数相关关系, R^2 为 0.617,可借助悬沙水体光谱特征进行 DIN 浓度的遥感反演.但是当悬沙含量 $< 0.1 \text{ kg/m}^3$ 时,两者之间没有明确的相关关系.

(2)Hyperion 影像中心波长为 630 和 804 nm 的波段是 DIN 浓度反演的敏感波段,仿泥沙遥感参数因子 $R_{804} \times R_{630} / (R_{804} - R_{630})$ 是 DIN 浓度反演的最

佳遥感因子.利用仿泥沙遥感参数因子建立非线性模型,可有效进行 DIN 浓度的定量遥感反演.

(3)从射阳河口的 DIN 遥感解译结果可以看出,DIN 浓度的变化范围为 $52 \sim 513 \mu\text{g/L}$,其扩散趋势与河口区沿岸流的水动力条件有密切关系:靠近岸边的区域潮流较弱,水体的交换能力较低,因此 DIN 浓度较低;而在河口外测,随着落潮流沿河口由南向北运动,DIN 浓度的高值区逐渐向北运移并同时得到有效扩散.

致谢:郭洪涛、龚明劼、程军利、潘洁参与了野外光谱采样工作,谨致谢忱.

参考文献:

- [1] 江苏省海洋污染基线调查队. 江苏省海洋污染基线调查报告[R]. 南京:河海大学出版社, 2001. 37-83.
- [2] 江苏省环保厅. 江苏省近岸海域环境质量报告(2003-2007) [EB/OL]. <http://www.jshb.gov.cn/jshb/xxgk>.
- [3] Voutilainen A, Pyhalahti T, Kallio K Y, *et al.* A filtering approach for estimating lake water quality from remote sensing data [J]. *Int J Appl Earth Obs*, 2007, **9**: 50-64.
- [4] 李云梅,黄家柱,韦玉春,等. 湖泊富营养化状态的地面高光谱遥感评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1170-1175.
- [5] 王晓梅,唐军武,宋庆君,等. 黄海、东海水体总吸收系数光谱特性及其统计反演模式研究[J]. *海洋与湖沼*, 2006, **37**(3): 256-263.
- [6] 韩震,金亚秋,恽才兴. 神舟三号 CMODIS 数据获取长江口悬浮泥沙含量的时空分布[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(3): 381-386.
- [7] 毛志华,朱乾坤,龚芳,等. CMODIS 资料提取叶绿素 a 浓度的反演算法研究[J]. *海洋学报*, 2006, **28**(3): 57-63.
- [8] Esaias W E, Abbott M R, Barton I, *et al.* An overview of MODIS Capabilities for ocean science observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, **36**(4): 1250-1263.
- [9] Allee R J, Johnson J E. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll-a and Secchi disc depth of Bull Shoals reservoir, Arkansas, USA [J]. *Int J Remote Sens*, 1999, **20**: 1057-1072.
- [10] Glenn F C, Wang J, Josefino C C. Transformation of global satellite chlorophyll retrievals with a regionally tuned algorithm [J]. *Remote Sens Environ*, 2004, **90**: 373-377.
- [11] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semi-analytic radiance model of ocean color [J]. *J Geophys Res*, 1988, **93**: 10909-10924.
- [12] Carder K L, Chen F R, Lee Z P, *et al.* Semi-analytic moderate resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures [J]. *J Geophys Res*, 1999, **104**: 5403-5421.
- [13] Sathyendranath S, Prieur L, Morel A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters [J]. *Int J Remote*

- Sens, 1989, **10**: 1373-1394.
- [14] Morel A, Berthon J F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **34**: 1545-1562.
- [15] Gordon H R. Dependence of the diffuse reflectance of natural waters on the sun angle [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **34**: 1484-1489.
- [16] 李云梅,黄家柱,陆晓宁,等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测 [J]. *海洋与湖沼*, 2006, **37**(2): 171-177.
- [17] 李四海,唐军武,恽才兴. 河口悬浮泥沙浓度 SeaWiFS 遥感定量模型 [J]. *海洋学报*, 2002, **24**(2): 51-58.
- [18] 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系 [J]. *遥感学报*, 2000, **4**(1): 41-45.
- [19] 徐群,陆瑞兴,马启南,等. 射阳闸闸下感潮河段电厂码头和取水工程淤积研究 [J]. *海洋工程*, 2006, **24**(3): 49-55.
- [20] 张东,张鹰,李欢,等. 基于组分反演的高光谱潮间带表层沉积物自动分类研究 [J]. *海洋学报*, 2008, **30**(3): 62-71.
- [21] 唐军武,田国良,汪小勇,等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法 [J]. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37-43.
- [22] 赵祥,梁顺林,刘素红,等. 高光谱遥感数据的改正暗目标大气校正方法研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2007, **37**(12): 1653-1659.
- [23] 逢勇,颜润润,余钟波,等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2456-2464.
- [24] 樊辉,黄海军,唐军武. 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2007, **32**(7): 601-604.