

基于 Hyperion 影像的射阳河口 无机氮磷浓度反演研究

潘洁^①, 张鹰^②

(^① 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; ^② 南京师范大学地理科学学院, 南京 210042)

摘要: 利用射阳河口 实测光谱及模拟 Hyperion 光谱数据与表层水体无机氮磷营养盐浓度进行相关性分析, 以及氮磷与悬沙浓度的光谱相关性分析, 构建定量模型, 实现了射阳河口 水体无机氮磷浓度的定量反演。结果表明: 现场实测光谱反射率与氮、磷浓度以及悬沙浓度间的相关性具有很强的相似性, 相关系数曲线的变化趋势几乎完全一致。对 Hyperion 的各波段与 896nm 间进行了 9 种波段组合与氮磷浓度进行相关性分析, 相关系数最大的因子为中心波长为 428nm 波段与 896nm 波段光谱反射率的归一化差值指数因子 ($F_{3(428, 896)}$), 分别为 0.80 与 0.79。以 $F_{3(428, 896)}$ 因子构建线性模型, 模型检验的相对 RMSE 分别为 36.63% 和 47.33%, 反映了模型具有良好的预测精度。同时, 模型充分显示了河口 氮磷含量与悬沙浓度的高度相关性以及氮磷含量本身的高相关性。

关键词: 射阳河口; 氮磷浓度; Hyperion 影像; 线性模型; 反演

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.03.016

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)115-0088-06

Modeling the Inorganic Nitrogen and Phosphorus Concentration in Sheyang Estuary Based on Hyperion Image

PAN Jie^①, ZHANG Ying^②

(^① College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University in Jiangsu, Nanjing 210037;

^② College of Geography Science, Nanjing Normal University in Jiangsu, Nanjing 210042)

Abstract: In this study, the correlations between experimental hyperspectral data or hyperion reflectance and total inorganic nitrogen (TIN), total inorganic phosphorus (TIP) concentration, as well as the relationship between TIN, TIP and suspended sediment concentration (SSC), were analyzed to establish the quantitative models on TIN and TIP concentration in Sheyang estuary. The results showed that: the relationship between measured spectral reflectance and TIN, TIP, SSC were performed strong similarity with almost identical trends of correlation curve. Nine combinations of Hyperion bands with band 896nm were used to analyze the correlations to TIN and TIP concentration, and the largest correlations were centered on the pseudo-NDVI factor of $F_{3(428, 896)}$ with the values of 0.80 and 0.79. The validation of linear models gives a good simulation precision with relative RMSE values as 36.63% and 47.33% for TIN and TIP, respectively. The models further represented strong correlations among TIN, TIP and SSC, and the TIN, TIP distribution patterns in Sheyang estuary could be summarized as: gradual reduction in the TIN and TIP from the shore to the open sea and a higher TIN and TIP concentration observed in the southern shore than the north. The patterns were also excellently uniform with the SSC distribution conditions.

Key words: Sheyang estuary; inorganic nitrogen and phosphorus concentration; hyperion image; linear model; quantification

收稿日期: 2010-04-07 修订日期: 2010-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40606044); 国家近海洋综合调查与评价专项资助项目(JS-908-01-05); 高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号: 200803190007)。

作者简介: 潘洁(1978~), 女, 副教授, 讲师, 主要研究方向是遥感与 GIS 应用及 3S 技术集成。

E mail: pan_jie@vip.sohu.net

1 引言

无论是在水生还是陆生生态系统中,氮、磷都是组成生物体最重要的生源元素,它们的时空分布特征对生态系统的平衡以及人类的生产和生活都有重大的影响。目前,氮、磷元素遥感监测方面的研究主要集中在对植被和土壤中氮、磷元素的估算和反演方面。关于水体中氮磷营养盐浓度遥感监测的研究尚处于起步阶段,一些学者对此进行了初步的探索:巩彩兰等发现黄浦江总氮浓度与 656nm 的反射率和 880nm 归一化反射率的一阶微分相关性较高^[1];雷坤等发现太湖总氮浓度与中巴资源 1 号卫星第 3、4 波段组合的关系比较密切^[2];许勇利用偏最小二乘结合支持向量机回归的方法定量模拟了射阳河口水体无机氮磷浓度,取得了较好的反演效果^[3]。

射阳河口水体氮磷营养盐浓度,是决定河口水质的主要因素。目前很多研究表明水体中底部沉积物的再悬浮作用是营养盐的重要来源,这种再悬浮作用所导致的表层营养盐浓度的增加是单纯扩散作用导致营养盐浓度增加的数十倍^[4]。本研究对水体中氮磷浓度与悬浮泥沙浓度间的相关性进行了分析,在此基础上利用高光谱遥感数据与无机氮磷浓度间的相关性构建定量模型,从而实现了射阳河口水体氮磷营养盐浓度的定量反演。

2 数据获取与处理

2.1 研究区概况

射阳河口位于江苏沿海侵蚀性岸段与淤长性岸段之间,其河口北侧属于侵蚀性岸段,南侧属于淤长性岸段。由于水动力条件复杂,悬浮泥沙浓度最大可达到 $11.08\text{kg}/\text{m}^3$,最小仅为 $0.035\text{kg}/\text{m}^3$,拦门沙和航道的位置也经常发生变化^[5]。

射阳河口作为射阳河的入海口,射阳河排污量大,由 1996 年全省海洋调查结果可知,与全省其他入海河口相比,射阳河口水质最差,主要以油类,无机氮磷及重金属污染为主^[6]。

2.2 水体光谱测量数据及无机氮磷浓度获取

水体光谱测量主要是为获取离水辐射率、归一化离水辐射率和遥感反射率等遥感参数,进而通过这些参数反演得到水体信息。对于二类水体,表面上测量法是目前唯一有效的方法^[7]。

本研究对于射阳河口的水体光谱测量共进行了两次。试验 1 测量时间是 2007 年 7 月 1 日,如图 1

所示,本次试验设置 5 个测量点(s1, s2, s3, s4, s5),通过 GPS 定位, s1, s2, s3 三个测点以及 s3, s4, s5 三个测点分别位于一条直线。其中, s1, s2, s3 三个测点从 9 点至 15 点每隔一小时以上述测量方法连续测量水体光谱值。试验 2 光谱测量时间是 2008 年 5 月 29 日至 31 日,在射阳河口附近海域进行了三个航次的测量和采样,共在 60 个测点测量了水体的光谱(图 1)。每天测量的时间为 9:30~14:30。为了使所建立的模型在射阳河口及其附近海域更具有代表性,第三个航次的取样点选择在离河口较远的海域,以确保样本点不仅仅代表河口,还能代表河口附近海域。

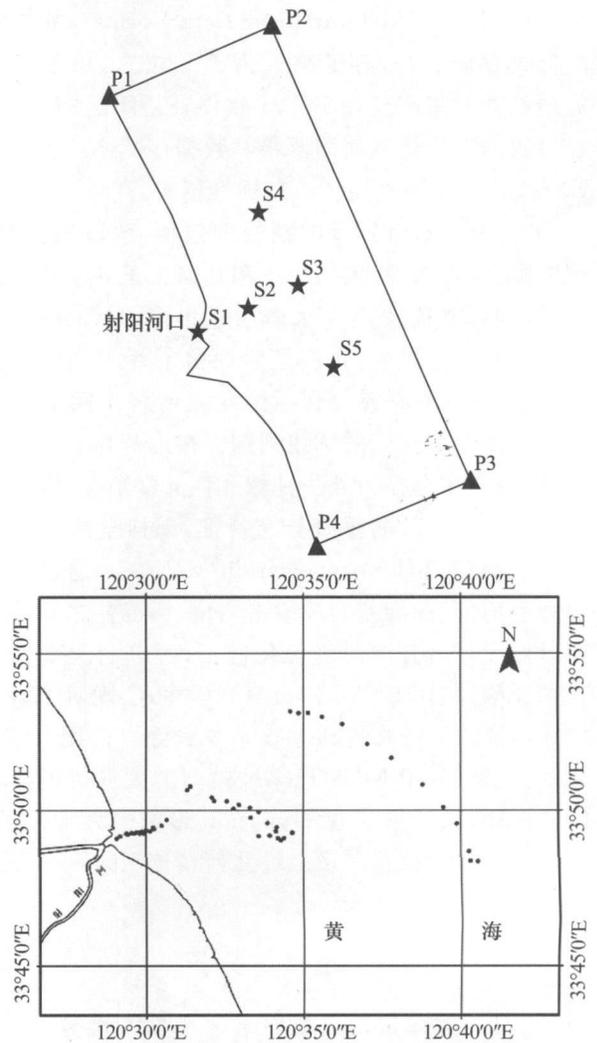


图 1 2007 年(上)及 2008 年(下)采样点的位置

两次试验光谱测量所用光谱仪是 A SD 公司生产的 FieldSpec 地物光谱仪,该仪器测定的光谱范围为 282nm~1090nm,标准板是经严格定标的反射率为 0.3 的灰板。在每个样点上按上述观测几何条件分别测取水体、天空光和标准板的 DN 值各 10 条,并同时采取水样。同时用 GPS 定位并记录当时

的风速, 以便于对影像进行大气校正。

在测量水体光谱的同时, 每个样点(包括试验 1 中的 s4, s5 样点) 同时采取水样, 所采水样主要测定其中的溶解氧、化学耗氧量、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮和活性磷酸盐浓度, 由南京师范大学理化分析测试中心按照《海洋监测规范》(GB17378. 4- 1998) 规定的方法完成。

2.3 Hyperion 影像数据获取

本研究选用的 Hyperion 影像是由美国地质调查局(USGS) 处理后生成的 LIR 产品, 其 VNIR 波段和 SWIR 波段间的空间错位已经经过纠正^[8], 成像时间为北京时间 2007 年 7 月 11 日。Hyperion 数据采用 HDF(Hierarchical Data Format) 数据集的形式存储, 波段存储格式为 BIL 格式, 由于后面的预处理程序需要在 ENVI 软件环境下运行, 因此在对数据进行处理前需要将其数据存储格式转化为 ENVI 软件能够直接读取的标准格式。

对 Hyperion 影像的预处理包括: 波段剔除、坏线去除、条纹去除、大气校正和几何校正等。考虑到辐射定标、波段噪声与水体信息提取, Hyperion 影像的 242 个波段中, 我们最后保留了 8~ 57 波段共 50 个波段用于研究。利用像元灰度斜率阈值法可以实现影像各波段的坏线判别。在进行坏线修复以后, 影像上还存在另外一种像元值异常情况, 即垂直条纹。针对条纹的垂直分布特征, 采样全局归一化法 GNM(Global Normalization Method), 通过像元的列平均值、标准差与波段平均值、标准差之间的差异对像元进行分波段线性化修正, 可以消除垂直条纹的影响, 利用 ENVI IDL 编制程序, 实现对 Hyperion 影像的坏线修复和垂直条纹去除。采用 ENVI 软件自带的基于 MODTRAN 模型的大气校正模块 FLAASH 软件来实现 Hyperion 影像的大气校正。影像的几何精校正采用经过几何精校正的影像底图进行影像到影像的校正^[9]。

3 结果与分析

3.1 射阳河口无机氮磷营养盐浓度分析

根据试验二 60 个测量位点的水样室内分析, 获得水体实测无机总氮(TIN) 与无机总磷(TIP) 浓度, 与相应的悬浮浓度进行相关性分析。结果表明, 射阳河口水体无机总氮与无机总磷浓度间存在显著的线性正相关, 决定系数 R^2 达到 0. 78。同时, 氮磷浓度与悬浮浓度间的相关性具有相似的趋势, 都呈现指数相关, 且相关性都达到了显著水平(图 2), 表明在

该海域无机氮与无机磷在来源上具有一致性, 且这种来源与水体中的悬浮颗粒浓度有密切的联系。

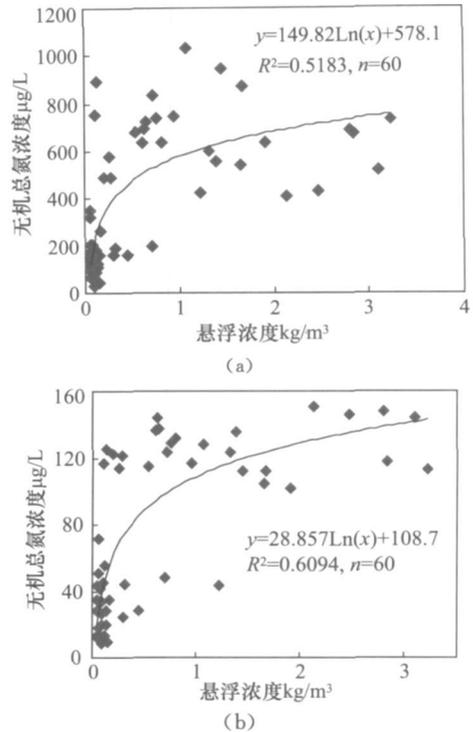


图 2 射阳河口水体无机总氮总磷与悬沙浓度相关性分析

3.2 射阳河口无机氮磷营养盐光谱特征分析

对射阳河口水体无机总氮、无机总磷及悬沙浓度与光谱反射率作相关性分析(图 3), 结果表明, 无机总氮、无机总磷浓度与反射率间的相关性在 350nm~ 580nm 间呈现负相关, 相关系数不超过 0. 3; 波长大于 580nm 后, 正相关性逐渐增大, 最大相关性出现在 810nm~ 820nm 间, 最大相关系数接近 0. 7; 波长大于 820nm 后相关系数又逐渐下降。而且该海域无机总氮、无机总磷浓度与光谱间的相关性几乎是一致的, 在同一波长上, 它们间相关系数最大相差不超过 0. 07, 而且它们的相关系数曲线在随波长变化而变化的趋势上几乎完全一致。相对而言, 悬沙浓度与光谱相关性自波长大于 580nm 开始相关系数都显著大于无机总氮总磷的相关系数, 且最大相关性也有所推后, 但随波长变化的总体趋势和无机总氮、总磷基本一致。由此可见, 射阳河口表层水体无机总氮与总氮浓度与悬浮颗粒浓度间存在密切的联系。

射阳河口位于江苏沿海中部, 沿岸属于粉沙淤泥质海岸, 沿岸海域水体混浊, 泥沙含量高, 同时, 射阳河口和江苏中部大部分河流一样, 在河口附近有闸, 闸门大部分时间处于关闭状态, 也就是说在该河口附近, 污染物并非时时刻刻都通过河流向海中排放, 当闸门关闭时, 内源性的释放也就是沉积物在悬

浮过程中的释放成为该海域营养盐的主要来源,尽管这些营养盐从根本上来讲大都来自于陆源的排放^[3]。正是由于沉积物的再悬浮过程中的释放是射阳河口营养盐的主要来源,才使得无机总氮、总磷和悬沙浓度与光谱间的相关性具有高度的一致性,因此构建无机氮磷等营养盐的定量预测模型必须考虑到悬沙浓度的直接影响。

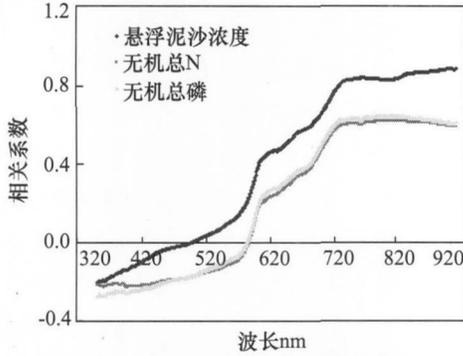


图3 射阳河口水体无机总氮总磷及悬沙浓度与光谱反射率相关性分析。

3.3 基于 Hyperion 高光谱数据的射阳河口无机氮磷浓度定量模型构建

模型构建前,有必要对实测的光谱数据按光谱响应函数进行光谱重采样,以模拟传感器的光谱响应特征。由于未能从 NASA 获得 Hyperion 的光谱响应函数,而 Hyperion 是高光谱影像,各波段半高宽(FWHM)很窄,可以用高斯函数模拟它的光谱响应函数^[10]。将模拟得到的 Hyperion 各波段反射率及波段组合因子分别与悬沙浓度作相关性分析,通

过相关性分析寻找敏感波段或波段组合来构建射阳河口悬沙浓度的定量反演模型。已有研究表明,一阶或二阶微分因子虽能体现高光谱数据的优势,但这一因子对传感器的灵敏度和信噪比的要求很高,对大气校正等影像预处理的要求也十分苛刻,如果通过影像不能获得与水面实测光谱完全一致的光谱曲线,则用微分因子构建的模型很难在影像反演中获得令人满意的结果^[3]。因此,本研究不再考虑用微分因子作为敏感波段构建反演模型。

将模拟得到的 Hyperion 各波段反射率分别与无机总氮、总磷浓度作相关性分析,结果表明,无机总氮、总磷浓度与 Hyperion 光谱反射率最大相关性对应的波长为 824nm,最大相关系数分别为 0.62 与 0.65。由于单波段相关性分析相关系数只有 0.6 左右,说明依赖单一波段不能很好地反演氮磷浓度。鉴于无机氮磷和悬沙浓度与光谱间的相关性具有高度的一致性,而 Hyperion 中心波长 896nm 的单波段对射阳河口悬沙浓度的反演具有很好的精度^[11],因此,为了提高氮磷浓度的反演精度,对 Hyperion 的各波段与 896nm 间进行了 9 种波段组合(表 1)。通过 9 种波段组合分别与 60 个测点的无机氮磷浓度进行相关性分析,最后找出相关系数最大的因子为 $F_{3(428, 896)}$,即中心波长为 428nm 波段与 896nm 波段光谱反射率的归一化差值指数因子与无机总氮、总磷浓度的相关系数最大,分别为 0.80 与 0.79(图 4)。

表 1 单波段因子和波段组合因子

因子	表达式	因子	表达式	因子	表达式
$F_{1(i)}$	R_i	$F_{2(i, 896)}$	$R_i \times \ln R_{896}$	$F_{3(i, 896)}$	$(R_i - R_{896}) / (R_i + R_{896})$
$F_{4(i, 896)}$	$R_i \times R_{896}$	$F_{5(i, 896)}$	$R_i - R_{896}$	$F_{6(i, 896)}$	$R_i \times \ln R_{896} / (R_i + R_{896})$
$F_{7(i)}$	e^{R_i}	$F_{8(i, 896)}$	R_i / R_{896}	$F_{9(i, 896)}$	$R_i \times R_{896} / (R_i + R_{896})$

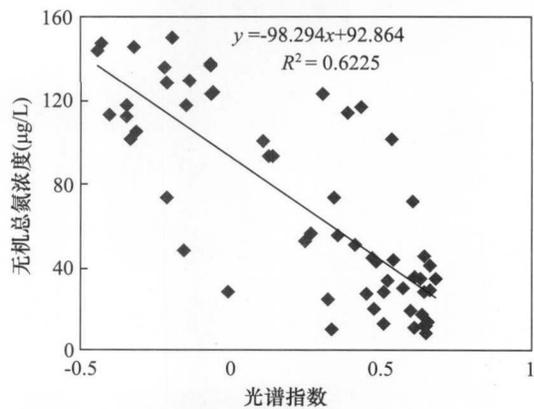
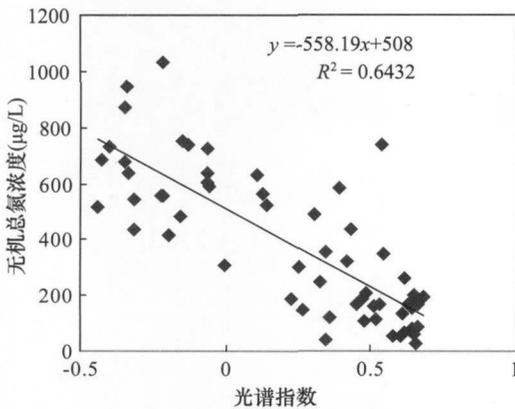


图 4 射阳河口水体无机总氮总磷浓度与 $F_{3(428, 896)}$ 因子相关性分析

以 Hyperion 428nm 波段与 896nm 波段光谱反射率的归一化差值指数因子与无机总氮、总磷含量的相关性构建定量模型(图 5),如式(1)和(2)所示:

$$TIN = -558.19 * (R_{428} - R_{896}) / ((R_{428} + R_{896}) + 508) \quad (1)$$

$$TIP = -98.294 * (R_{428} - R_{896}) / ((R_{428} + R_{896}) + 92.864) \quad (2)$$

其中, *TIN*, *TIP* 分别指射阳河口表层水体无机总氮与总磷浓度(μg/L)。氮磷定量模型都为线性模式,定量反演的因子也相同,这也再次印证了河口水体氮磷浓度的高相关性。

3.4 模型检验

以 2007 年进行的实验 1 中 S1, S2 和 S3 三个监测位点不同时间的实测无机总氮、总磷浓度及相应时间的光谱测量数据对上述模型进行检验。实测光谱进行重采样以模拟 Hyperion 影像各波段的反射率。模型检验采用常用的相对根均方差法(RRMSE, Relative Root Mean Square Error)对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析,相对 RMSE 值的计算

见公式(3)。

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3)$$

其中, P_i 和 O_i 分别为预测值和观测值, \bar{O} 为观测值的平均值^[12]。以模拟 Hyperion 光谱数据来定量反演射阳河口无机总氮、总磷浓度模型检验的 RRMSE 分别为 36.63% 和 47.33%。对于不同年份不同条件下的建模数据和检验数据而言,这样的检验精度反映了上述模型具有良好的预测精度。同时,模型充分显示了河口无机氮磷含量与悬沙浓度的高度相关性以及氮磷含量本身的高相关性。

绘制观测值与预测值之间的 1:1 关系图,直观地展示模拟值与观察值的拟合度和可靠性^[13],结果显示无机总氮与总磷浓度模拟值多数大于对应的观测值(图 5),特别是无机磷浓度模拟值基本都在对角线上方,说明模型对射阳河口无机磷浓度的定量反演会有一定程度的增大,但不会影响整个射阳河口无机总氮总磷分布趋势的定量模拟。

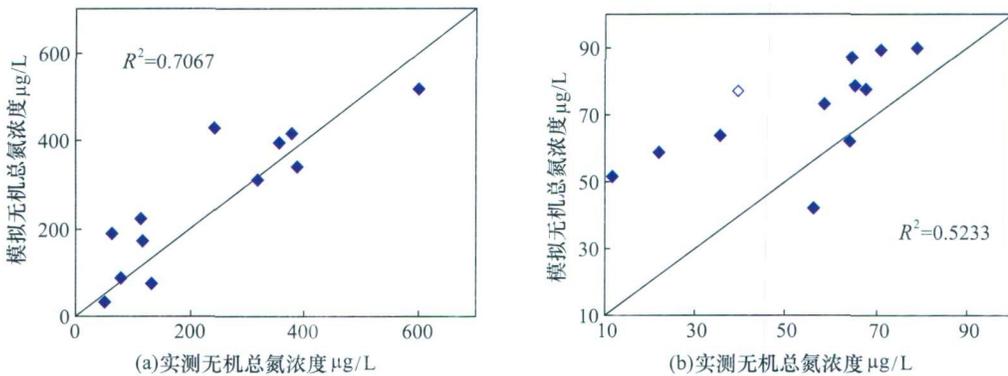


图 5 射阳河口总氮(a)与总磷(b)浓度预测值与实测值比较

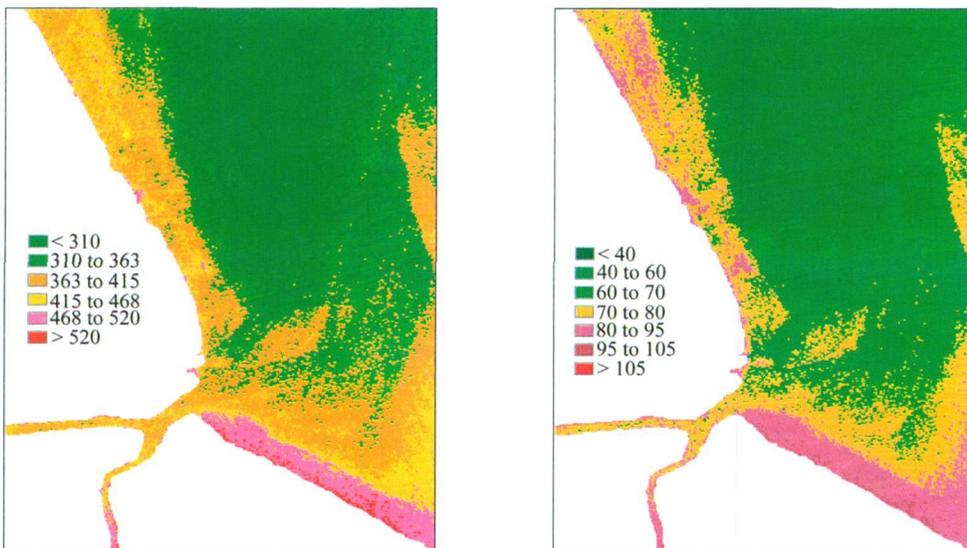


图 6 Hyperion 影像射阳河口无机总氮(左)总磷(右)浓度反演结果(单位 g/L)

3.5 模型反演

使用 Hyperion 影像将上述射阳河口无机总氮、总磷浓度反演模型应用于影像反演,如图 6,结果表明射阳河口无机总氮、总磷浓度有由近岸向远海递减的规律,浓度的分布特点与悬沙浓度的分布规律基本一致,也表现为在河口南侧浓度高于北侧。

采用试验 1 实测数据资料,选择该时段中与影像成像时间处于同一潮时的无机总氮与总磷浓度,根据这些浓度值进行插值,将插值所得结果与反演结果进行比较以验证模型的精度。共随机地选择了 50 个验证点,经过比较,无机总氮、磷浓度预测的 RMSE 误差为分别为 65.44 $\mu\text{g/L}$ 和 8.524 $\mu\text{g/L}$,相对 RMSE 值分别为 39.2% 和 47.5%,表明模型用于影像反演的有效性。

4 结束语

本文利用射阳河口实测光谱及模拟 Hyperion 光谱数据与表层水体无机氮磷营养盐浓度进行相关性分析,以及氮磷与悬沙浓度的光谱相关性分析,构建定量模型,实现了射阳河口水体无机氮磷浓度的定量反演。

通过分析现场实测光谱反射率与无机氮、磷浓

度以及悬沙浓度间的相关关系,发现三者与实测光谱间的相关性具有很强的相似性,相关系数曲线的变化趋势几乎完全一致。再通过对实测光谱进行光谱重采样模拟 Hyperion 影像各波段的反射率后所做的相关性分析也得到了相同的结果。

对 Hyperion 的各波段与 896nm 间进行了 9 种波段组合与氮磷浓度进行相关性分析,结果表明,相关系数最大的因子为 $F_{3(428,896)}$,即中心波长为 428nm 波段与 896nm 波段光谱反射率的归一化差值指数因子与无机总氮、总磷浓度的相关系数最大,分别为 0.80 与 0.79。以 $F_{3(428,896)}$ 因子构建线性模型,模型检验的相对 RMSE 分别为 36.63% 和 47.33%,反映了模型具有良好的预测精度。同时,模型充分显示了河口无机氮磷含量与悬沙浓度的高度相关性以及氮磷含量本身的高相关性。

由此可见,射阳河口海域无机氮磷营养盐在来源上具有高度的一致性,考虑到河口闸门的存在,在没有开闸的情况下可以认为该海域氮磷大多来源于水体中颗粒物在悬浮过程中的释放,这一结果也表明在射阳河口,能够反映悬浮颗粒浓度的光谱特征波段同时也能够作为表征氮磷浓度的特征波段。

参考文献

- [1] 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):910-916.
- [2] 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.
- [3] 许勇.江苏沿海无机氮磷营养盐遥感监测研究[D].南京师范大学,2009.
- [4] 逢勇,韩涛,李一平,等.太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算[J].环境科学,2007,28(9):1960-1964.
- [5] 张忍顺,陆丽云,王艳红.江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J].地理研究,2002,21(4):469-478.
- [6] 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[M].河海大学出版社,2001(10):12-53.
- [7] 唐军武,田国良,汪小勇,等.水体光谱测量与分析 I:水面以上测量法[J].遥感学报,2004,8(1):37-44.
- [8] 谭炳香,李增元,陈尔学,等.EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理[J].遥感信息,2005(6):36-41.
- [9] 张东,张鹰,李欢.海岸带星载高光谱遥感影像预处理方法[J].海洋科学进展,2009,27(1):92-97.
- [10] 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.
- [11] Pan J., Zhang Y., Xu Y.. Assessment of water quality in Sheyang Estuary(China) using hyperspectral data[C]// SPIE, 2009(7471):1-10.
- [12] Michele R., Nicola L., Zina F. Evaluation and application of the OILCROP SUN model for sunflower in southern Italy [J]. Agricultural Systems, 2003(78):17-30.
- [13] Snyder R. L., Spano D., Cesaraccio C., et al. Determining degree day thresholds from field observations[J]. International Journal of Biometeorology, 1999,42(4):177-182.

第七届京港澳测绘技术交流会 9 月召开

第七届京港澳测绘技术交流会拟定于 2011 年 9 月 22—25 日在澳门特别行政区召开。为促进北京、香港和澳门三地测绘技术及经验的互相交流、提升测绘技术水平、加强测绘同行的友谊与合作,2011 年澳门地图绘制暨地籍局主办、北京测绘学会、香港测量师学会、香港工程测量师学会、香港理工大学共同协办“第七届京港澳测绘技术交流会”。借此机会,三地的测绘专家与学者将共聚一堂,共同发表论文、分享经验、深入交流及探讨测绘技术未来发展方向。本届京港澳测绘技术交流会主题为:“测绘科技创新与城市发展”。围绕这个主题,将安排来自北京、香港、澳门等地的测绘科技工作者进行会议学术交流,并出版论文集。