

应用 MODIS 影像监测海州湾无机氮浓度的研究

许勇^{1,2}, 张鹰¹, 刘吉堂³, 张东¹

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210046; 2. 盐城师范学院 城市与资源环境学院, 江苏 盐城 224000; 3. 国家海洋局 连云港海洋环境监测站, 江苏 连云港 222042)

摘要: 利用连云港海州湾 2004 年至 2006 年的水质监测资料, 选取时间上完全同步的空间分辨率为 500 m 的 MODIS Terra 1B 数据, 对反射率的单波段因子和波段组合因子与可溶无机氮 (DIN) 质量浓度之间进行相关分析。从总体上看, 单波段因子与 DIN 质量浓度的相关性较低, 但在含氮基团倍频和合频吸收带附近的波段 (波段 2、7) 反射率与 DIN 质量浓度呈负相关, 显示了含氮基团对水体光谱特征的影响; 在波段组合因子中, 因子 $F_{11(3,4)}$ 和 $F_{13(3,4)}$ 与 DIN 质量浓度呈显著正相关, 用这两个因子建立 DIN 质量浓度的回归模型, R^2 都达到 0.7 以上, 相对精度达 70% 左右, 最终选择因子 $F_{11(3,4)}$ 的线性模型反演该海域的 DIN 质量浓度, 其结果与实际情况非常吻合。

关键词: 可溶无机氮 (DIN); MODIS; 海州湾

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)09-0076-06

海州湾位于黄海中部, 由于远离黑潮, 与外部水体交换弱^[1], 陆源污染物得不到及时的扩散, 加上这一海域不仅是江苏省重要的水产养殖和捕捞基地, 而且沿岸经济发达, 入海污染物增长很快, 根据江苏省海洋污染基线调查显示, 1998 年, 海州湾硝酸盐和亚硝酸盐的浓度分别比 1991 年上升了 10.67 倍和 18 倍^[2], 自 20 世纪 90 年代末以来这一海域频繁受到赤潮的侵袭, 由此造成的经济损失也不断扩大。氮是影响浮游植物生长最重要的生源元素^[3], 它们分别以可溶无机态、可溶有机态和悬浮颗粒态存在于水体中, 其中可溶无机氮 (DIN) 以硝酸盐、亚硝酸盐和氨盐的形式存在于水体中。营养盐的浓度和分布特征是影响藻类生长的限制性因素^[4], 传统的营养盐监测依赖于大范围、高频次的现场取样, 应用受到很大的限制。遥感作为一种技术手段, 具有宏观性、连续性和低成本的优势, 在海表营养盐浓度动态监测中具有很大的优势。

目前, 利用遥感手段监测水体富营养化状况主要是通过通过对叶绿素、悬浮物、透明度等指标的反演来间接确定, 如 Sabine^[5] 用叶绿素浓度计算水体富营养化水平, 焦红波等^[6] 用叶绿素、透明度等指标建立富营养化水平估算的定量模型, Harma 等^[7] 发现 MODIS 的波段组合与叶绿素、悬浮物、透明度等水质指标间有很好的相关性。直接研究水体中营

养盐光谱响应特征的比较少见, 巩彩兰等^[8] 发现黄浦江总氮浓度与 656 nm 的反射率和 880 nm 归一化反射率的一阶微分相关性较高, 雷坤等^[9] 发现太湖总氮浓度与中巴卫星 1 号 3、4 波段组合的关系比较密切。由于大部分卫星传感器重访周期较长, 而赤潮生消周期较短, 利用这些传感器进行监测有很大的局限性, 而 MODIS 具有的时间分辨率高, 光谱通道数多等特点使其在赤潮和营养盐浓度监测方面具有独特的优势。

1 数据处理

1.1 数据获取

本研究的水质资料采用连云港海州湾海域 2004 年至 2006 年的水质监测资料, 取样时间为每天上午 8:00~10:00, 水质分析由连云港海洋环境监测站按《海洋监测规范》(GB17378.4-1998) 规定的方法完成, 其中硝酸盐采用镉-镉还原法, 亚硝酸

收稿日期: 2008-03-12; 修回日期: 2008-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40606044); 中国近海海洋综合调查与评价专项项目 (JS-908-01-05); 江苏省研究生科研创新计划项目 (CX07B-041Z)

作者简介: 许勇 (1971-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 研究方向: 海洋遥感, 电话: 0515-88908871, Email: xyyc@163.com

盐采用萘乙二胺分光光度法, 氨盐采用次溴酸盐氧化法。取 2004 年 7 月 21 日、10 月 3 日, 2005 年 8 月 25 日, 2006 年 8 月 10 日、8 月 17 日、10 月 2 日至 10 月 6 日的监测资料, 监测点位共有 17 个(包括常设点位和临时点位), 剔除指标不全的数据, 共得到 41 组水质资料。

使用影像为从 NASA 网站下载的 2004 年 7 月 21 日、10 月 3 日, 2005 年 8 月 25 日, 2006 年 8 月 10 日、8 月 17 日、10 月 3 日和 10 月 5 日的 MODIS Terra 1B 数据, 所有影像成像时天空晴朗, 成像质量很高。由于空间分辨为 250 m 的数据光谱通道太少, 而 1 km 的数据空间分辨率又太低, 因此采用

有 7 个波段的空间分辨率为 500 m 的数据, 其中第 1、2 波段是由空间分辨为 250 m 的数据重采样得到的。使用 ENVI 中的 Georeference MODIS 模块进行几何校正, 并去除“弯弓”效应, 大气校正采用基于直方图的暗像元法, 每个波段减去该波段反射率的最小值, 以去除大气程辐射的影响^[10]。

1.2 相关性分析

首先对 MODIS 数据反射率的单波段因子和波段组合因子与 DIN 的浓度之间进行相关分析, 若 R_i ($i=1\cdots 7$) 表示各波段反射率, 分别计算下列各因子(表 1)与 DIN 的浓度之间的相关系数(Pearson 系数)。

表 1 单波段因子和波段组合因子

Tab. 1 Single band factors and multi-bands factors

因子	表达式	因子	表达式	因子	表达式
$F_{1(i)}$	R_i	$F_{6(i)}$	$\ln R_i$	$F_{11(i,j)}$	$(R_i+R_j)/(R_i-R_j)$
$F_{2(i)}$	R_i^2	$F_{7(i,j)}$	R_i-R_j	$F_{12(i,j)}$	$R_i \times R_j / (R_i+R_j)$
$F_{3(i)}$	R_i^3	$F_{8(i,j)}$	$R_i \times R_j$	$F_{13(i,j)}$	$R_i \times R_j / (R_i-R_j)$
$F_{4(i)}$	e^{R_i}	$F_{9(i,j)}$	R_i / R_j	$F_{14(i,j)}$	$(R_i+R_j) / (R_i \times R_j)$
$F_{5(i)}$	$R_i^{1/2}$	$F_{10(i,j)}$	$(R_i-R_j)/(R_i+R_j)$	$F_{15(i,j)}$	$(R_i-R_j) / (R_i \times R_j)$

1.3 拟合分析和建模

从相关性分析的结果中筛选出与 DIN 质量浓度相关性较高的因子, 分别选取线性、二次多项式、三次多项式、指数、对数、幂函数等模型构建 DIN 质量浓度的回归模型, 将样本随机分为建模组和检验组, 分别有 28 个样本和 13 个样本, 用建模组样本建立模型, 用检验组样本加以检验并进行比较, 从中选择合适的模型用于海表面 DIN 质量浓度的反演。

2 结果与讨论

2.1 含氮基团的光谱特征

当分子振动为简谐振动时, 无论分子处于哪一个能级, 它只吸收一定频率的电磁辐射并跃迁到下一个高的能级, 实验表明, 每一种基团都有其特定的吸收频率, 这种能表明基团存在的特征吸收峰称为基频。 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 等基团的基频吸收峰都在中红外区。而由于分子的非简谐振动, 量子力学证明, 分子会发生振动量子数大于 1 的跃迁, 其吸收频率被称为第一倍频、第二倍频、第三倍频,

这些倍频吸收峰往往在近红外区。另外, 当两个以上的基频吸收同时发生时, 在这两个基频的波数(波长的倒数)和及波数差处也会出现分子吸收, 这些吸收频率称为合频^[11]。含氮基团的倍频和合频吸收带一般在 780~830 nm、1 020~1 060 nm、1 460~1 570 nm 和 1 960~2 200 nm 处。虽然这些基团含量较低, 对光谱影响较小, 但在土壤和植被方面的大量研究证明了利用遥感手段监测氮素含量的可行性^[12,13]。

2.2 相关性分析结果

从单波段因子与 DIN 质量浓度的相关性分析的结果中(图 1), 可以发现近红外波段(波段 2、5、6、7)的反射率大都与 DIN 质量浓度呈负相关, 在可见光波段, 红波段和绿波段与 DIN 质量浓度呈正相关, 蓝光波段呈负相关。在含氮基团倍频和合频吸收带附近的 MODIS 相应波段(波段 2、7)的反射率与 DIN 质量浓度呈负相关这一结果反映了含氮基团对这些波段反射率的影响。从总体看, 单波段因子与 DIN 质量浓度的相关性都较低, R 最大不超过 0.4, 因此, 不采用单波段因子建立 DIN 质

量浓度的回归模型。

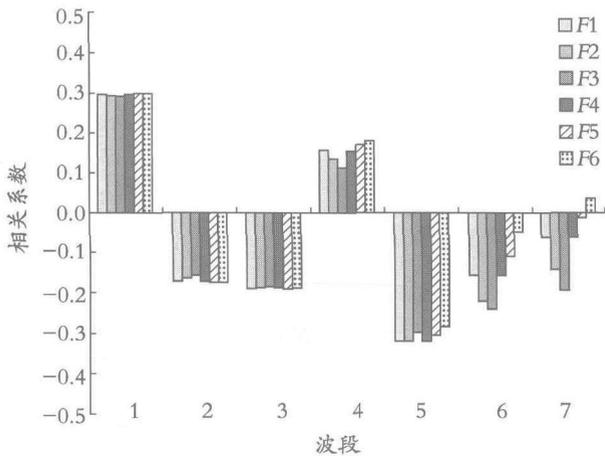


图1 单波段因子与 DIN 质量浓度的相关性

Fig. 1 The correlation between single band factors and concentration of DIN

波段组合因子中与 DIN 质量浓度相关性高的有 F_{11} 和 F_{13} (图 2), 其中 $F_{11(3,4)}$ (0.8436)、 $F_{11(5,6)}$ (0.7155)、 $F_{11(5,7)}$ (0.7104) 和 $F_{13(3,4)}$ (0.8132) 等因子的相关性较为突出。这一结果显示 DIN 质量浓度与 3

波段、4 波段的差值呈显著负相关, 这表明 DIN 质量浓度与叶绿素浓度之间存在密切的联系, 因为 MODIS 第 3 波段位于叶绿素的吸收峰, 4 波段位于叶绿素的反射峰; 此外, 这一特征还可能与水体中悬浮物有关, 因为 MODIS 的第 4 波段位于悬浮物第一反射峰附近^[14], 其反射率与悬浮物浓度呈正相关, 而悬浮作用所造成的表层营养盐质量浓度的增加是单纯扩散作用导致营养盐质量浓度增加的数十倍^[15]。除此之外, 其它的波段组合因子与 DIN 质量浓度的相关性都比较低。

2.3 建立模型和检验

将数据随机地分为建模组和检验组, 分别有 28 组和 13 组数据, 用波段组合因子中相关性最高的 $F_{11(3,4)}$ 和 $F_{13(3,4)}$ 这两个因子, 分别选择线性、二次多项式、三次多项式、指数、对数、幂函数等模型, 用建模组样本建立 DIN 质量浓度的回归模型, 从所建立的模型中选取 R^2 最大的 4 个模型, 并分别检验其预测的相对精度 (表 2)。

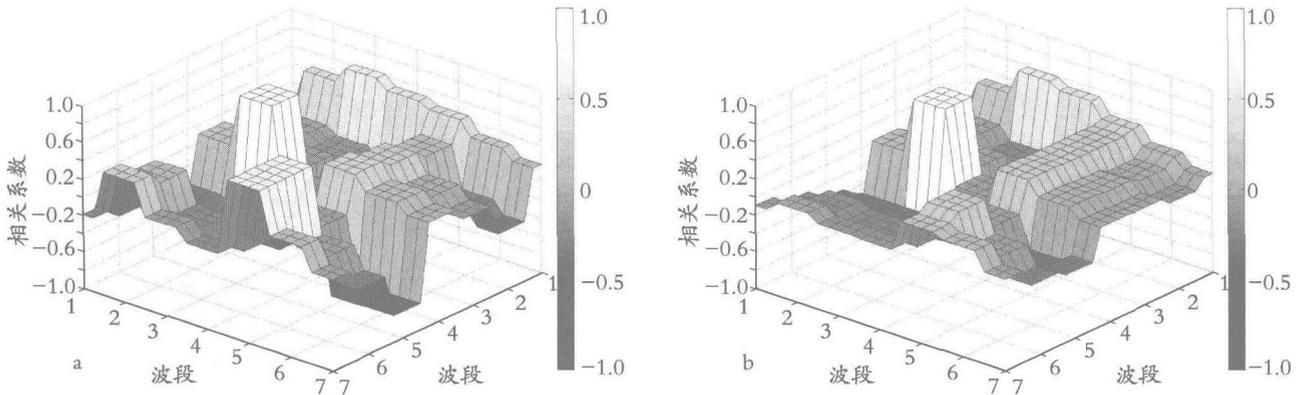


图2 波段组合因子与 DIN 质量浓度间的相关系数

Fig. 2 The correlation between multi-bands factors and DIN concentration

a. 因子 F_{11} 与 DIN 质量浓度间的相关系数; b. 因子 F_{13} 与 DIN 质量浓度间的相关系数

a. The correlation between factors of F_{11} and DIN concentration; b. The correlation between factors of F_{13} and DIN concentration

表 2 DIN 质量浓度回归模型及其预测相对精度比较

Tab. 2 The models of DIN concentration and their relative accuracy

X	模 型	R^2	建模组预测相对精度 (%)	检验组预测相对精度 (%)
$F_{11(3,4)}$	$Y=7.86X+9.83$	0.724	67.87	68.46
$F_{11(3,4)}$	$Y=0.06X^2+5.49X+25.51$	0.729	67.26	68.91
$F_{11(3,4)}$	$Y=-0.02X^3+1.3X^2-14.1X+111.9$	0.767	69.30	76.69
$F_{13(3,4)}$	$Y=-68.7X^3+286.9X$	0.729	68.48	74.57

表 2 表明, 用上述两个波段组合因子所建立的回归模型, 其 R^2 都达到 0.7 以上, 平均相对精度达到了 70% 左右, 检验组的相对精度普遍高于建模组。在所有的模型中, 尽管因子 $F_{11(3,4)}$ 的线性模型的 R^2 和相对精度并不是最高的, 但是该模型建模组和检验组在相对预测精度上的差别是最小的, 这显示了该模型具有较高的稳定性, 加上其形式最为简

约, 因此, 选择该模型作为 DIN 质量浓度的反演模型。

$$Y=7.86X+9.83 \quad (1)$$

将模型的预测值和实测值进行比较 (图 3) 发现两者相差不大, 其中建模组样本的平均绝对误差为 $31.1 \mu\text{g/L}$, 均方根误差 (RMSE) 为 $34.4 \mu\text{g/L}$;

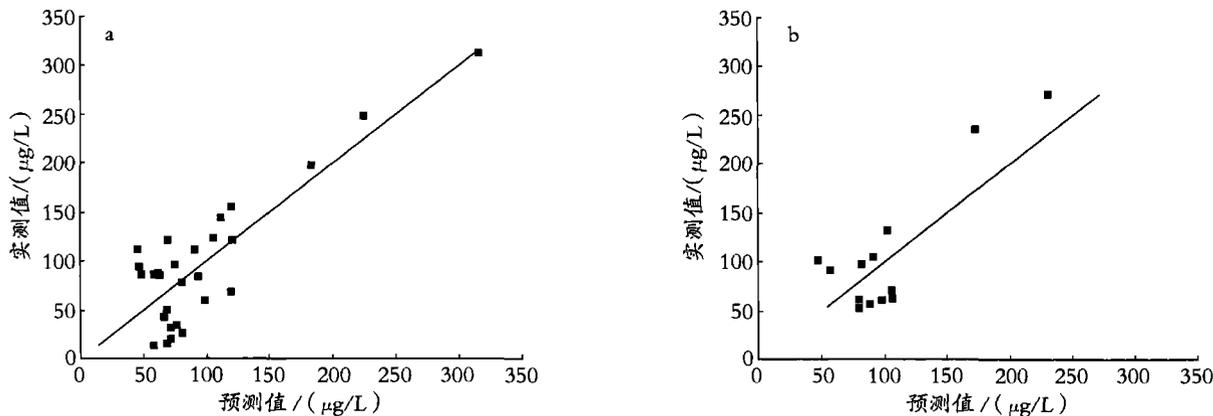


图 3 DIN 质量浓度回归模型预测值与实测值比较

Fig. 3 Plots of measured DIN concentration against the value estimated by the model

a. 建模组; b. 检验组

a. modeling group; b. testing group

检验组样本平均绝对误差为 $35.5 \mu\text{g/L}$, 均方根误差为 $37.2 \mu\text{g/L}$ 。从图 3 中可以发现当 DIN 质量浓度较高时模型的相对误差较小, 将所有样本按实测 DIN 质量浓度分为 $\geq 100 \mu\text{g/L}$ 和 $< 100 \mu\text{g/L}$ 两组, 质量浓度 $\geq 100 \mu\text{g/L}$ 的样本组模型的平均相对误差为 22.34%, 而质量浓度 $< 100 \mu\text{g/L}$ 的样本组平均相对误差为 47.56%, 而根据 2004 年至 2006 年整个的监测资料, 海州湾海域 DIN 质量浓度均值 $186 \mu\text{g/L}$, 这从一个侧面证明了该模型的有效性和实际应用价值。

将上述模型应用于影像进行反演, 从反演结果 (图 4) 可以发现: 在海州湾海域, 近岸的 DIN 质量浓度明显高于远海, DIN 质量浓度最高的区域主要分布在临洪河口、灌河口、埭子口、烧香河口和绣针河口等河口附近, 这反映了该海域的营养盐主要来源于陆源排放, 上述河口也是该海域周边主要的排污口; 此外, 2006 年时 DIN 质量浓度明显高于 2004 年, 反映了污染日趋严重的态势。总之, 反演结果与实际情况吻合得相当好, 这一方面证明

了模型的有效性, 另一方面也证明了利用 MODIS 1B 数据监测 DIN 质量浓度的可行性。

3 结论

单波段因子与 DIN 质量浓度的相关性较低, 但在含氮基团倍频和合频吸收带附近的 MODIS 相应波段 (波段 2、7) 的反射率与 DIN 质量浓度呈负相关这一结果反映了含氮基团对这些波段反射率的影响。

波段组合因子中 $F_{11(3,4)}$ 和 $F_{13(3,4)}$ 与 DIN 质量浓度呈显著正相关, 这既反映了 DIN 质量浓度与叶绿素浓度间的联系, 同时也表明含氮营养盐与水体中悬浮颗粒之间呈正相关, 这与营养盐主要来自于悬浮物释放的结论相吻合。

用上述两个波段组合因子分别建立 DIN 质量浓度的回归模型, R^2 最高达到 0.767, 对 DIN 质量浓度预测的平均相对精度达到了 70% 左右, 其中因子 $F_{11(3,4)}$ 的线性模型不仅形式最为简约, 而且稳定性好, 用该模型进行反演的结果与实际情况吻合得

相当好。

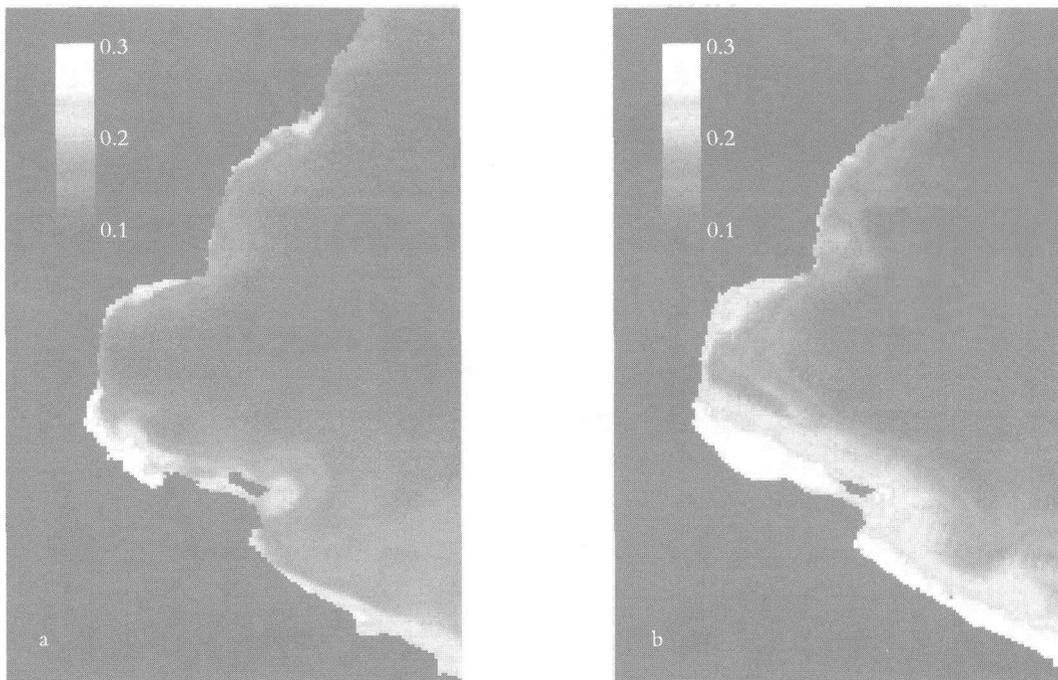


图 4 DIN 质量浓度的反演结果(mg/L)

Fig. 4 Retrieving results of DIN concentration(mg/L)

a. 2004 年 7 月 21 日; b. 2006 年 8 月 17 日

a. July 21, 2004; b. August 17, 2006

参考文献:

- [1] 郭炳火, 黄振宗, 李培英, 等. 中国近海及邻近海域海洋环境[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. 419-420.
- [2] 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]. 南京: 河海大学出版社, 2001. 37-94.
- [3] 林以安, 苏纪兰, 扈传昱, 等. 珠江口夏季水体中的氮和磷[J]. 海洋学报, 2004, **26**(5): 63-73.
- [4] 曲丽梅, 姚德, 丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 263-267.
- [5] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS-IC satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany [J]. **Remote Sensing of Environment**, 2000, **73**: 227-235.
- [6] 焦红波, 查勇, 李云梅, 等. 基于地面实测光谱的太湖水体富营养化水平估算[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 343-348.
- [7] Harma P, Vepsalainen J, Hannonen T, *et al.* Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland [J]. **The Science of the Total Environment**, 2001, **268**: 107-121.
- [8] 巩彩兰, 尹球, 匡定波. 黄浦江水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.
- [9] 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.
- [10] 祝令亚, 王世新, 周艺, 等. 应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究[J]. 遥感信息, 2006, (2): 25-28.
- [11] 李民赞, 韩东海, 王秀, 等. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 49-261.
- [12] LI Minzan, Akira Sasao, Sakae Shibusawa, *et al.* Local variability of soil nutrient parameters in Japanese small size field [J]. **Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery**, 1999, **61** (1): 141-147.
- [13] Dala R C, Henry R J. Simultaneous determination of

moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry [J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1986, 50: 120-123.

统计模式分析[J]. 水利学报, 2007, **38**(7): 799-805.

[15] 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): 1 960-1 964.

[14] 刘志国, 周云轩, 沈芳. 河口水体泥沙浓度的水面光谱

Studying on monitoring of dissolved inorganic nitrogen by using MODIS data in Haizhou Gulf

XU Yong^{1,2}, ZHANG Ying¹, LIU Ji-tang³, ZHANG Dong¹

(1.College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2.Urban and Resource Environment Institute of Yancheng Teachers College, Yancheng 224000,China; 3.Lianyungang Ocean Environmental Monitoring Station of State Oceanic Administration, Lianyungang 222042,China)

Received: Mar. , 12, 2008

Key words: dissolved inorganic nitrogen (DIN); MODIS data; Haizhou Gulf

Abstract: Red tides have been increasingly observed in the gulf of Haizhou and considered a serious environmental problem from the beginning of the new century. Eutrophication of water is an important reason of red tide occurrence. This paper used the observation data of the concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in Haizhou Gulf from 2004 to 2006 and selected MODIS Terra 1B data with 500m spatial resolution in this period of time. We established reflectance factors with single band and multi-bands, calculated correlation between each factor and the concentration of DIN. The correlations between single band factors and DIN concentration are low, but the reflectance of bands (band 2 and 7) near overtones and combination spectral lines of groups which contain nitrogen has a negative correlation with DIN concentration, this indicates the influence on spectrum of these groups. The multi-bands factors $F_{11(3,4)}$ and $F_{13(3,4)}$ have a positive correlation with DIN concentration notably, we chose these two factors to established regression models of DIN. The R^2 of the models exceeded 0.7 and their relative accuracy reached about 70%, the results of the linear model by $F_{11(3,4)}$ were consistent well with the real conditions. These improve the feasibility of this model and the validity of monitoring DIN concentration by MODIS data.

(本文编辑:康亦兼)