

# 基于GOCI卫星的长江口水域水质反演及评价

张 鹏<sup>1</sup>, 张志林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海市海洋监测预报中心, 上海

<sup>2</sup>长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海

Email: amber\_zp@163.com

收稿日期: 2021年1月1日; 录用日期: 2021年2月1日; 发布日期: 2021年2月9日

## 摘 要

长江大保护背景下, 长江口水环境监测具有重大需求, 迫切需要快速有效的监测手段增强监测能力。本文基于长江口现场实测和GOCI卫星影像, 建立了水质参数反演模型, 实现了总磷、总氮、化学耗氧量和溶解氧的遥感反演, 具有较好的反演精度, 进一步参考海水水质标准和地表水环境质量标准, 对遥感反演的海域进行了水环境质量评价, 长江口水域水环境质量较好, 整体处于一、二类水水平, 总氮略偏高为三类水。本文提出的水质监测与评价方法能够为长江大保护提供有力的技术支撑。

## 关键词

水质遥感, GOCI水色卫星, 长江口

# Inversion and Evaluation of Water Quality in Yangtze Estuary Based on GOCI Satellite

Peng Zhang<sup>1</sup>, Zhilin Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Marine Monitoring and Forecasting Center, Shanghai

<sup>2</sup>Survey Bureau of the Hydrology and Water Resources of Changjiang Estuary, Shanghai

Email: amber\_zp@163.com

Received: Jan. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Feb. 1<sup>st</sup>, 2021; published: Feb. 9<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Under the background of the great protection of the Yangtze River, the significant requirement is about ordinary survey of water environment around Yangtze estuary, so it is urgent to form a rapid and effective monitoring method of the water environment quality of the Yangtze River. Based on the results of Marine Environment Monitoring of Shanghai and the images of GOCI satellite, this

study establishes models of the four important parameters of water quality, such as TP, TN, COD and DO and these models all have good precision. Based on the visualization of the inversion results and the observed data, this study assesses the water environment around Yangtze estuary and its adjacent waters using the water of the sea water quality standard and the surface water environment quality standard. This study finds that the water environmental quality of Yangtze Estuary is good; the overall water quality level is between grade 1 and 2 although TN is slightly higher than the grade 3. This study also provides technical basis for the prediction of water quality pollution and the protection of the Yangtze River.

## Keywords

Waterquality Remote Sensing, GOCI Satellite, Yangtze Estuary

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

长江大保护成为国家战略以来,国家对长江经济带生态环境保护的重视提到了前所未有的高度。长江口因其重要的地理位置和生态价值,成为长江大保护的重点区域。水质是反映水环境最直接的生态指标之一,研究水环境高效监测技术、探讨长江口水环境评价方法具有现实意义。

水质参数是描述自然水体中各类物理化学组成成分的特征参数。水体的光学特性,如反射率、透射率、吸收率等,能够反映水质参数的浓度变化。遥感技术可以获取水体的光谱信息,捕捉水体光学特性的变化,对水质参数的定量反演称为水质参数遥感反演。

水质参数遥感反演始于十九世纪七十年代,最初是利用遥感影像对内陆水体进行识别,并逐步实现了动态监测。近年来,随着遥感数据源更加丰富,水质参数遥感反演研究得到了较大进步,发展了包括经验和半经验模型,物理分析模型等一系列模型,模型的反演精度也获得了很大提升,不少模型已经能够满足业务化监测需要,甚至形成了许多水质参数遥感反演产品。

悬浮泥沙浓度反映了水体的透明度,其遥感反演理论较为成熟。因其相对明确的遥感监测机理,涌现了大量研究。我国近岸沿海由北向南,房宪英等[1]利用 Landsat-TM 卫星对河北省海岸带浅滩海域的悬浮泥沙含量空间分布进行了研究。孔亚珍等[2]基于 MODIS 卫星对长江口外及其邻近海域的悬浮泥沙含量进行了反演分析。何贤强等[3]利用 GOCI 卫星在长江口进行了区域性的海洋水色遥感研究。殷宇威等[4]基于 Landsat 8 OLI 影像,利用经验算法反演了南海岛礁附近水体悬浮泥沙浓度。

叶绿素-a 浓度反映了水体藻类的含量,遥感反演理论也较为成熟。高等植物叶绿体中的叶绿素主要有叶绿素 a 和叶绿素 b 两种,属于合成天然低分子有机化合物。叶绿素 a 含量越高,就表示水体的水生植物植被污染越严重,该参数可以衡量水体受到进行光合作用植被污染的情况。李旭文等[5]利用“哨兵 3 号”卫星 OLCI 影像,使用 C2RCC 算法,对南黄海叶绿素 a 及总悬浮物反演效果进行估算,得到较好的反演结果。于堃等[6]应用改进的大气校正方法对渤海海区的 MODIS 数据进行校正,并应用校正结果反演了自 2000 年至 2006 年各个年份 12 月份渤海表层水体的叶绿素 a 浓度。

水质参数遥感研究还涉及盐度、溶解氧、化学耗氧量、氨氮等。例如,曹仕等[7]基于 Landsat 7 ETM+ 卫星,利用神经网络法提取了盐度波谱特征,建立了海表盐度遥感反演模型,探讨了不同季节盐度遥感反演模型的适用性。崔文君等[8]通过 Landsat8OLI 遥感影像的第 3 和第 4 波段组合,反演了珠江口近岸

水域溶解氧空间分布。黄妙芬等[9]和冯爱萍[10]也分别运用遥感手段在威海北部海域和海河流域, 对化学需氧量和氮磷浓度进行了反演。

以上研究表明, 悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度的监测机理明确, 遥感反演方法较为成熟, 水体中氮磷营养盐浓度、溶解氧和化学耗氧量没有光谱响应, 缺乏明确的监测机理。然而, 悬沙浓度与氮磷营养盐浓度已被证实具有较好的相关关系[11], 因此可以间接获得浓度变化。从业务应用方面考虑, 利用经验模型反演氮磷营养盐、溶解氧和化学耗氧量具备技术可行性。

本文以长江口水域为研究对象, 区域介于东经 122°05′~123°15′之间(见图 1), 选取总氮(TN, Total Nitrogen)、总磷(TP, Total Phosphorus)、溶解氧(DO, Dissolved Oxygen)和化学需氧量(COD, Chemical Oxygen Demand)这四个可以直接用于水环境评价的水质参数。基于大范围实测和同步的 GOCI 遥感影像, 建立反演模型, 反演水质参数空间分布, 评价长江口水域水环境质量, 为长江大保护决策提供技术支撑。

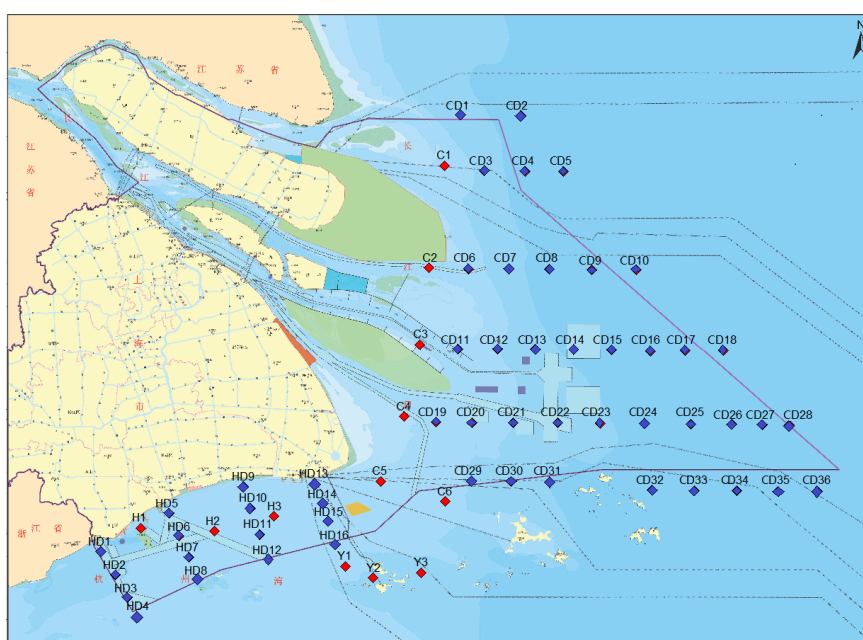


Figure 1. Study area and locations of water sampling  
图 1. 研究区和水样采集位置图

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

长江口作为世界第三大河的河口, 蕴含着丰富的淡水、泥沙、滩涂湿地及生物资源, 拥有良好的航道和岸线, 长期以来为上海社会经济可持续发展提供了重要的自然资源[12]。上海拥有近 1 万 km<sup>2</sup> 的海域面积, 其范围主要涵盖长江口内、口门以东至近 123.5 度、以及杭州湾北岸区域。长江口作为我国最大河口, 每年有大量泥沙和污染物质被径流携带入海, 其中作为浮游植物营养盐的含量很高。长江口特殊的水文条件使其成为一个对环境污染很敏感的水域[13]。

### 2.2. 实测水质数据

2018 年 6 月 5 日至 2018 年 6 月 7 日, 在长江口布设 6 个固定采样点(图 1), 编号 C1~C6, 每潮涨憩、涨急、落憩、落急四个时刻各取表层水样 1 个。同时, 在长江口外布设了 6 条走航断面(图 1), 共计 36

个采样点, 编号 CD1~CD36, 各点取表层水样 1 个。

水样的溶解氧、化学需氧量、总氮和总磷理化分析, 参照国家标准《海洋监测规范》(GB 17378-2007) 规定。利用碘量法测定溶解氧, 利用碱性高锰酸钾法测定化学需氧量, 利用过硫酸钾氧化法分别测定总氮和总磷浓度。

### 2.3. 遥感数据

遥感数据选择了与水样采集同步的 GOCI 遥感影像。GOCI 影像来自于 2010 年韩国发射的全球第一颗地球同步轨道海洋水色卫星 COMS, 其搭载的 GOCI 传感器成为全球水色遥感研究领域的焦点。GOCI 获取的遥感图像以 130°E, 36°N 为中心, GOCI 的空间分辨率为 500 米, 观测覆盖面积为 2500 km × 2500 km, 覆盖朝鲜、日本、中国东海岸和台湾北部海岸的部分地区, 覆盖我国的渤海、黄海和东海部分海域。

GOCI 水色卫星提供 6 个可见光波段和 2 个近红外波段。GOCI 最大的特点是每天可提供覆盖范围内 8 个时刻的观测数据, 从 00:00 GMT (格林威治时间)到 07:00 GMT, 其高时间分辨使其可用于对海洋现象和过程进行短时间内的动态观测, 并增加获取数据的概率。

### 2.4. 遥感数据预处理

#### 1) 辐射定标

辐射定标是将传感器接收到的数字化 DN 值转换得到辐射亮度值的过程[14]。ENVI 软件可对卫星影像按照以下公式进行辐射定标处理[14]:

$$L = offset + scale \times DN \quad (1)$$

式中, *offset* 为偏量, 值为 0; *DN* 代表相关卫星产品的数字化数值, *L* 为转换后的辐射亮度, *scale* 为放大系数, 值为  $10^{-6}$ 。

#### 2) 几何校正

由于地球曲率, 大气折射和地形波动的影响, 传感器获得的遥感图像存在畸变, 使用有畸变的遥感图像, 会给定量分析的位置配准产生影响, 因此需进行遥感影像的几何校正[15]。几何校正分为几何粗校正和精校正。卫星影像虽然经过了卫星提供单位的几何粗校正, 但仍不能满足精度需求, 需进行几何精校正。几何精校正主要是利用 ARCMAP 软件, 添加研究区域坐标准确的海图作为底图, 选择已知精确的地面控制点, 对遥感图像的随机畸变和其他未知系统畸变进行校正, 利用数学模型对遥感图像的几何畸变过程进行近似, 并利用遥感图像与标准地图之间的畸变获得几何畸变模型, 然后利用该模型对遥感图像几何畸变进行校正。

#### 3) 大气校正

大气校正从卫星传感器提取出准确海洋水色辐射的过程[16]。能够准确地提取影像中观测目标的光谱信息是利用遥感信息建立模型的基础。如果不存在大气情况的影响, 太阳辐射可以直接照射在地表上, 其中地物吸收部分辐射, 其余辐射经地物反射回太空, 因此, 传感器采集的辐射值是地表物体对光谱的反射的真实反映。然而实际太阳辐射传输过程中受到大气、太阳位置、地形影响, 传感器记录的数据存在误差。太阳辐射在传输过程中收到的大气散射和吸收作用是辐射误差的主要来源, 因此对遥感图像进行大气校正处理, 主要是消除太阳辐射由大气吸收与散射产生的影响。

本研究利用 ENVI 软件中的 QUAC、3S 和 FLASSH 大气校正法, 分别对 GOCI 影像进行了大气校正, 从校正后的影像中提取典型地物(水体、植被、裸地)光谱曲线, 与典型地物光谱对比, 3S 校正后结果最吻合典型地物光谱曲线特征, 因此本研究最终选择了 3S 方法。

#### 4) 水陆分离

由于水体和陆体的光谱差异性较大, 且云层在整个遥感监测区域分布不均匀, 为了减少计算时间, 利用基于决策树的监督分类和非监督分类方法将研究目标区域水域与陆地分离, 裁剪出来单独进行计算。

### 2.5. 水质参数遥感反演方法

水质参数遥感反演是通过卫星传感器接收的离水反射率, 对水体中特定物质, 主要是总氮、总磷以及化学需氧量等进行反演[17], 本文采用经验模型[18], 对水质参数进行遥感反演。

经验模型是最常用的水色遥感反演算法, 广泛应用于一类水体和二类水体。反演一类水体的精度较高, 二类水体由于水体成分较复杂, 水体各成分浓度与表观光学量之间呈现非线性关系, 为了提高二类水体经验算法的精度, 一般考虑选择多波段的遥感数据或讨论多种形式的遥感波段组合。本文利用经验模型, 采用已知形式的函数对反射率  $R$  与实测参数值进行相关分析, 若相关性高, 就认为该函数近似于所要求的关系式。在经验模型建立过程中, 将选择的遥感参数与参数值进行回归分析, 采用线性函数、多次多项式函数、指数函数、幂函数等进行拟合, 根据实测值与反演值的拟合效果选择最优的回归函数, 从而建立反演模型。该模型算法简单, 操作简单便捷, 在低浓度水体中效果较好, 适用于容易获取实测数据的地区。

### 2.6. 水质评价方法

化学需氧量和溶解氧的评价参照国家标准《海水水质标准》[19]。总氮和总磷的评价参照《地表水环境质量标准》[20], 其原因是《海水水质标准》中无总氮和总磷, 考虑到长江口及临近海域受径流影响较大, 兼具内陆淡水特征。海水总氮和总磷在无海水水质标准可参考的情况下, 参考《地表水环境质量标准》, 可在一定程度上为掌握长江口氮磷营养盐浓度分布, 提供间接参考。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 水质参数反演模型

统计分析发现, GOCI 影像的 443 nm 和 490 nm 波段处的反射率  $R_{443}$  和  $R_{490}$ , 对水质参数浓度较为敏感。其中, 化学需氧量与  $R_{490}$  和  $R_{443}$  上加下减的比值形式相关性较好, 溶解氧和总氮与  $R_{490}$  相关性较好, 总磷与  $R_{443}$  相关性较好。

分别采用线性关系、指数关系、对数关系、幂函数关系、二次多项式关系以及三次多项式关系对化学需氧量、溶解氧、总氮和总磷浓度进行模型搭建并且通过对比分析模型的结果发现对于这四种水质参数浓度而言, 非线性拟合的结果较差  $R^2$  普遍都小于 0.5, 而线性模型拟合结果  $R^2$  可以达到 0.8 以上, 因此本研究最终采用线性拟合的方法对各水质参数浓度进行模型构建。

$$y = ax + b \quad (2)$$

式中,  $y$  指反演值,  $a$  为常数,  $b$  为截距,  $x$  为自变量。

通过利用传统的波段组合的方法(总共可以分为四种, 单波段法, 多波段线性组合法, 双波段比值法以及多波段比值法), 结合具体的波段信息进行随机组合, 考虑到各水质参数浓度的实测数据的大小和量级问题, 具体采用单波段法和多波段线性组合法比较符合实测数据的量级。

具体的, 将上述几种敏感波段的多波段比值的组合分别作为自变量  $x$  进行模型反演, 比较各模型的  $R^2$ , 最终选取  $R_{490}$ 、 $R_{443}$ 、 $R_{443} + R_{490}$ 、 $R_{443} - R_{490}$  作为自变量采用的波段组合, 建立如表 1 所示的各水质参数反演模型。

**Table 1.** Water quality inversion models**表 1.** 各水质参数反演模型

|       | 水质参数反演模型(mg/L)   | 反演精度 |
|-------|--|------|
| 化学需氧量 | $COD = 10.744 \times (R_{443} + R_{490}) / (R_{443} - R_{490}) + 43.926$ | 95%  |
| 溶解氧   | $DO = -0.0624 \times R_{490} + 40.389$                                   | 71%  |
| 总氮    | $TN = 0.0018 \times R_{490} + 0.087$                                     | 88%  |
| 总磷    | $TP = 0.0003 \times R_{443} - 0.0442$                                    | 73%  |

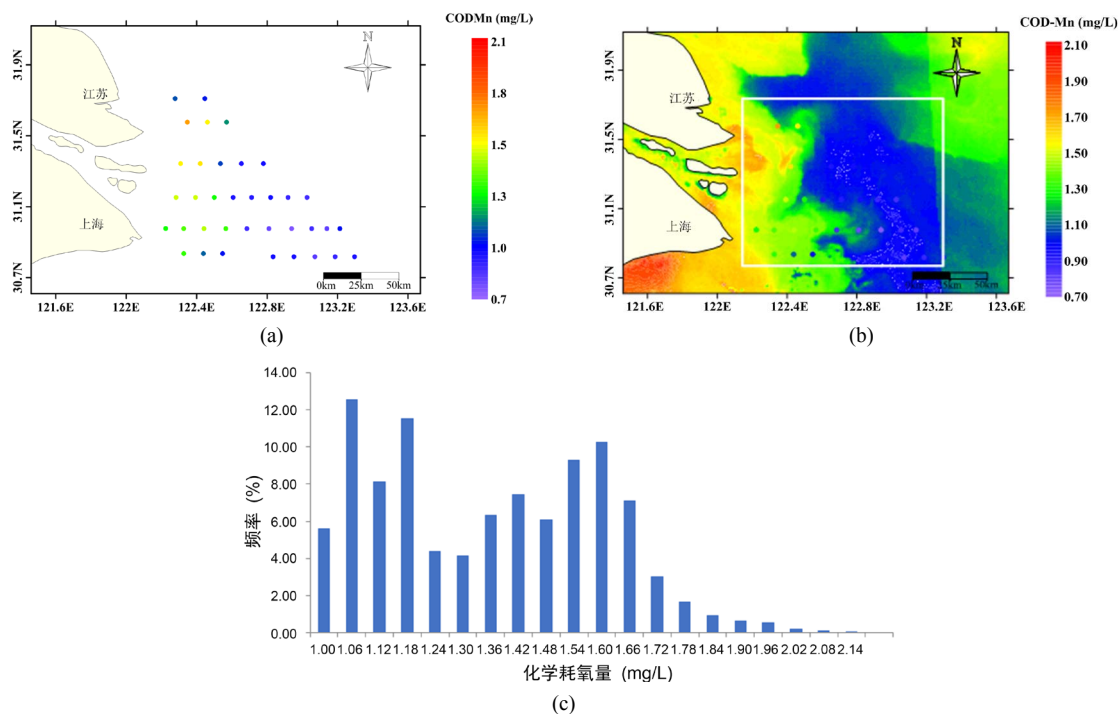
如表 1 所示, 表中各自变量  $R_{490}$ 、 $R_{443}$  分别代表着波长为 490 nm 和 443 nm 波段的反射率。水质参数反演模型的反演结果与实测数据对比, 可看出化学耗氧量反演精度最高为 95%, 溶解氧浓度反演精度最低为 71%, 总氮反演精度为 88%, 总磷反演精度为 73%, 所建模型可满足反演要求。

### 3.2. 水质参数反演及评价

参数反演结果包括实测数据分布图、反演数据分布图、各参数各区间段频率分布图。为了更直观的看出实测和反演结果的差异, 分别将实测结果和反演结果进行了空间分布图的绘制, 并将两者进行叠加。如果颜色差异比较小, 说明反演结果较好, 反之则说明, 反演结果较差。同时对各参数各区间段范围内, 进行频率统计, 得到各参数各区间段内的频率分布图, 依次反映长江口区域内各水质参数的数值分布情况。

#### 3.2.1. 化学需氧量

图 2(a)为长江口化学需氧量实测结果, 图 2(b)为研究区化学需氧量遥感反演结果, 通过对比分析, 其反演精度达到 95%, 实测与预测结果的空间分布趋势较为吻合。实测和反演结果都表明, 靠近长江口处化学需氧量较高, 从口内向口外呈现明显的浓度递减梯度变化。



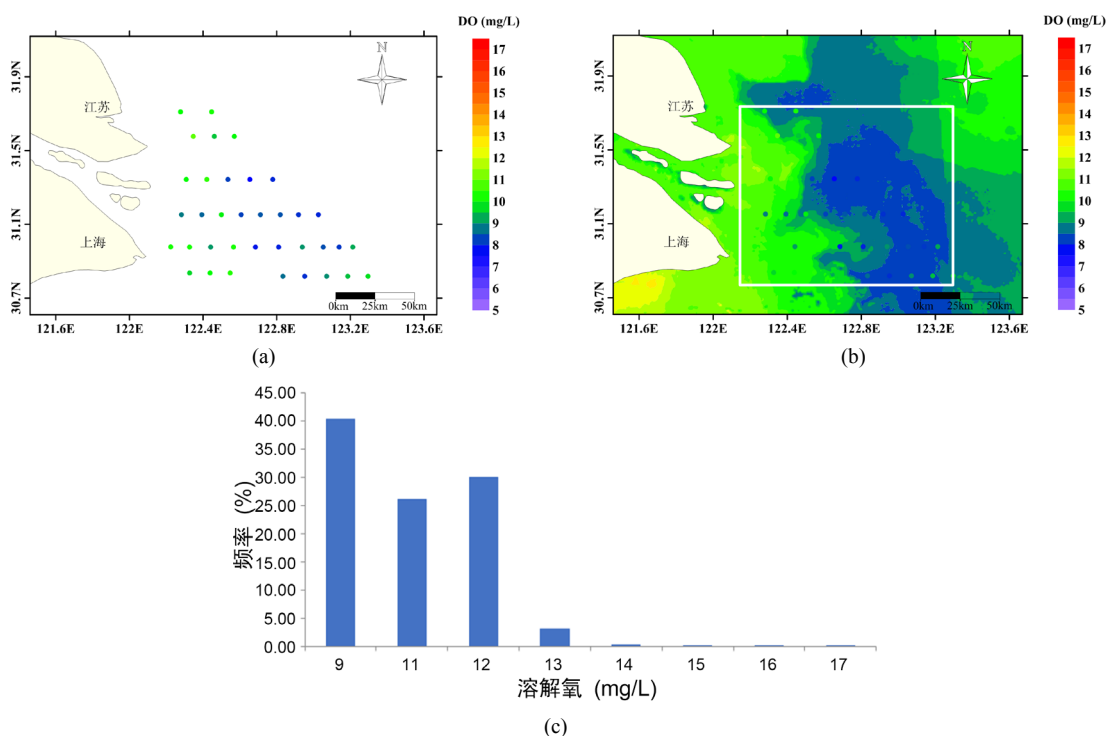
**Figure 2.** COD measured and inversed data. (a) Measured data; (b) Inversed data; (c) Frequency square distribution diagram

**图 2.** 化学需氧量反演与实测对比。(a) 实测数据; (b) 反演数据; (c) 频率分布图

通过对遥感反演结果进行了统计归类分析, 绘制了频率分布图(图 2(c)), 统计频率分布呈双峰特点。研究表明, 长江口化学耗氧量 COD 整体处于 2 mg/L 以下, 浓度集中在 1~1.6 mg/L, 最大浓度值为 2.09 mg/L, 最小浓度值 0.94 mg/L, 平均浓度值为 1.33 mg/L。根据海水水质标准(GB3097-1997), 当海水 COD < 2 mg/L, 属于海洋一类水。由此, 可认为长江口水域 COD 整体处于海水一类水水平。

### 3.2.2. 溶解氧反演及评价

图 3(a)为溶解氧实测结果, 图 3(b)为研究区溶解氧遥感反演结果, 通过对比分析, 溶解氧反演精度为 71%, 实测与预测结果的空间分布趋势较为吻合。实测和反演结果都表明, 靠近长江口处溶解氧的浓度较高, 从口内向口外呈现明显的浓度递减梯度变化。



**Figure 3.** DO measured and inversed data. (a) Measured data; (b) Inversed data; (c) Frequency square distribution diagram  
**图 3.** 溶解氧反演与实测对比。(a) 实测数据; (b) 反演数据; (c) 频率分布图

通过对遥感反演结果进行了统计归类分析, 绘制了频率分布图(图 3(c)), 统计频率分布呈双峰特点。研究表明, 长江口溶解氧浓度较高, 整体高于 9 mg/L, 其中 9~17 mg/L 范围最为集中, 最大浓度值为 17 mg/L, 最小浓度值 8 mg/L, 平均浓度值为 9.86 mg/L。

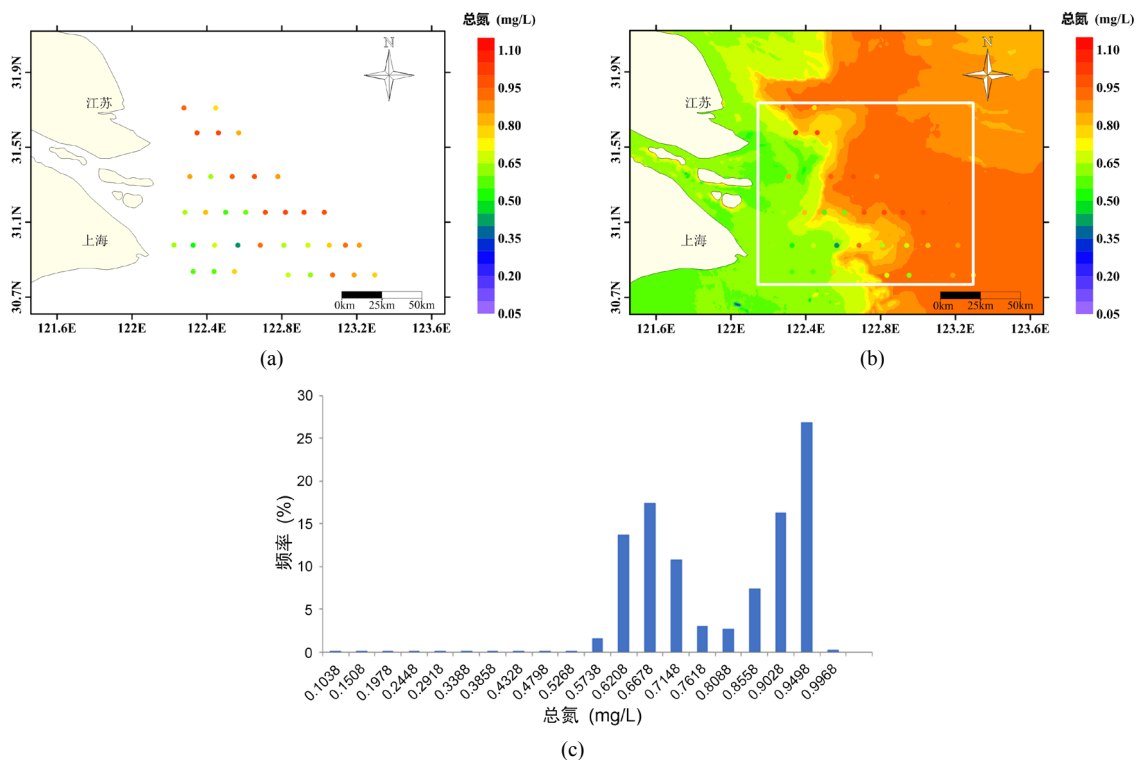
根据海水水质标准(GB3097-1997), 当海水 DO > 6 mg/L, 属于海洋一类水。由此, 可认为长江口水域的溶解氧 DO 整体处于海水一类水水平。

### 3.2.3. 总氮反演及评价

图 4(a)为长江口水域总氮浓度的实测结果, 图 4(b)为研究区总氮浓度遥感反演结果, 通过对比分析, 其反演精度达到 88%, 实测与预测结果的空间分布趋势较为符合。无论实测还是反演结果都表明, 靠近长江口口门以及近岸 50 km 以内总氮浓度较低, 向外呈现明显的浓度递增梯度变化。

从图 4(c)总氮浓度分布图可以看出, 长江口水域水体的总氮浓度集中在 0.8~1 mg/L, 最大浓度值为 0.95 mg/L, 最小浓度值 0.06 mg/L, 平均浓度值为 0.78 mg/L。参考地表水环境质量标准(GB 3838-2002),

根据总氮浓度大于 0.5 mg/L, 小于 1 mg/L 为三类地表水, 可认为长江口总氮浓度处于三类水水平。

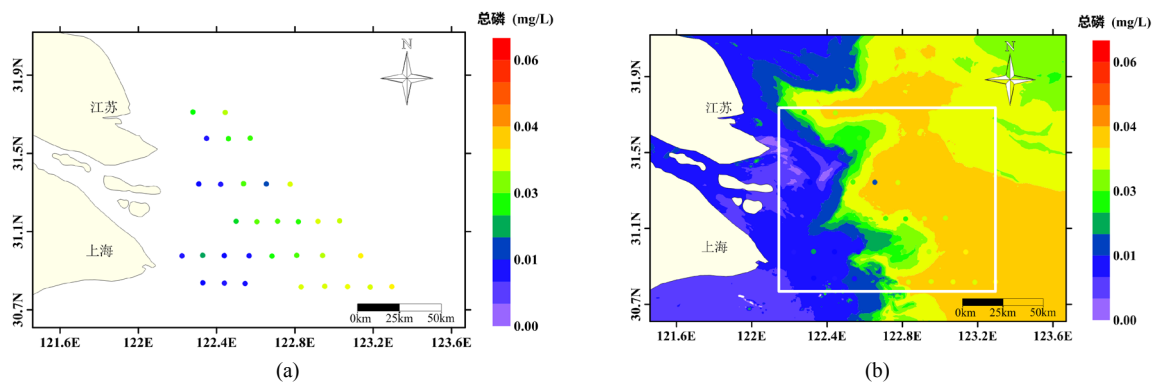


**Figure 4.** TN measured and inversed data. (a) Measured data; (b) Inversed data; (c) Frequency square distribution diagram  
**图 4.** 总氮反演与实测对比。(a) 实测数据; (b) 反演数据; (c) 频率分布图

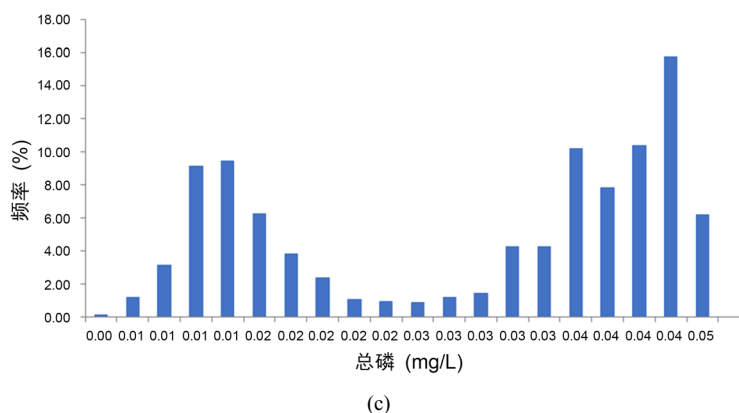
### 3.2.4. 总磷反演及评价

图 5(a)为总磷实测结果, 图 5(b)为研究区总磷遥感反演结果, 通过对比分析, 总磷反演精度为 73%, 实测与预测结果的空间分布趋势较为吻合。实测和反演结果都表明, 靠近长江口处总磷的浓度较低, 从口内向口外呈现明显的浓度递增梯度变化。

从图 5(c)总磷浓度分布图可以看出, 长江口水域水体的总磷浓度集中在 0.01~0.05 mg/L, 最大浓度值为 0.044 mg/L, 最小浓度值 0.002 mg/L, 平均浓度值为 0.028 mg/L。参考地表水环境质量标准(GB 3838-2002), 根据总磷浓度小于 0.02 mg/L 为一类、小于 0.1 mg/L 为二类水的标准, 可认为长江口总磷浓度整体处于二类水标准, 距岸 50 km 以外区域可达一类水标准。







**Figure 5.** TP measured and inversed data. (a) Measured data; (b) Inversed data; (c) Frequency square distribution diagram  
**图 5.** 总磷反演与实测对比。(a) 实测数据; (b) 反演数据; (c) 频率分布图

#### 4. 结论

本研究基于现场观测成果, 分析了遥感影像与水质参数的相关关系, 建立了水质参数反演模型, 实现了水质参数的遥感反演。

与传统的海洋水色遥感关注的叶绿素 a、悬浮泥沙浓度等参数不同, 本研究更多的关注于化学需氧量、溶解氧、总氮和总磷这四个不受关注但是却同样能反映海洋水质状况的水质参数进行遥感反演研究, 填补了这些水质参数遥感反演的技术空白。

同时, 本研究利用先进的实测手段获得了众多的实时水质参数数据, 改善了传统研究获得实测数据困难、模型精度不够的缺陷, 为模型的反演提高了精度。

本研究还将反演结果与实测数据对比验证, 评价了遥感反演精度, 并结合海水水质标准、地表水环境质量标准, 对长江口及附近海域进行了水环境质量评价(表 2)。长江口水域整体水环境质量较好, 处于一、二类水水平, 总氮略偏高为三类水水平。

**Table 2.** Water quality evaluation at Yangtze Estuary

**表 2.** 长江口水体质量评价结论

| 水质参数  | 反演精度 | 参考标准      | 水质评价    |
|-------|------|-----------|---------|
| 化学需氧量 | 95%  | 海水水质标准    | 一类水     |
| 溶解氧   | 71%  | 海水水质标准    | 一类水     |
| 总氮    | 88%  | 地表水环境质量标准 | 三类水     |
| 总磷    | 73%  | 地表水环境质量标准 | 一类水、二类水 |

四个水质参数中, 溶解氧和化学需氧量参考了海水水质标准, 总氮和总磷无海水水质标准可以参考, 然而这两个指标是最能直接体现长江口水环境富营养化程度的参数, 建议环保部门加强相关标准制订, 以适应国家对长江口水生态环境保护的需求。

#### 参考文献

- [1] 房宪英, 姜太良. 河北省海岸带浅滩海域含沙量分布特征[J]. 黄渤海海洋, 1986, 4(3): 35-41.
- [2] 孔亚珍, 丁平兴, 贺松林, 何超, 肖文军. 长江口外及其邻近海域含沙量时空变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 446-454. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1671-6647.2006.04.005>

- [3] He, X.Q., Bai, Y., Pan, D., Huang, N.L., Dong, X., Chen, J.S., Chen, C.T.A. and Cui, Q.F. (2013) Using Geostationary Satellite Ocean Color Data to Map the Diurnal Dynamics of Suspended Particulate Matter in Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.023>
- [4] 殷宇威, 唐丹玲, 刘宇鹏. 南海岛礁附近悬浮泥沙时空分布的遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 435-444.
- [5] 李旭文, 魏爱泓, 姜晟, 王甜甜, 纪轩禹, 张悦, 矫新明. 基于“哨兵 3 号”卫星 OLCI 影像和 C2RCC 算法的南黄海叶绿素 a 及总悬浮物反演效果分析[J]. 环境监测与预警, 2020, 12(2): 6-12. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1674-6732.2020.02.002>
- [6] 于堃, 陆殿梅, 熊黑钢. 近 7 年来渤海海区冬季表层海水叶绿素浓度的遥感反演及其变化分析[J]. 遥感信息, 2009(6): 55-62. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-3177.2009.06.013>
- [7] 曹仕. 南海北部香港海域海水盐度遥感反演模型[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [8] 崔文君, 夏丽华, 解学通, 潘翠红. 基于实测光谱的珠江口溶解氧反演模型[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2017, 16(6): 84-92. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1671-4229.2017.06.013>
- [9] 黄妙芬, 王忠林, 邢旭峰, 陈亮, 孙忠泳. 威海市褚岛北部海域 CDOM 和 COD 分布特征遥感分析[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 63-70.
- [10] 冯爱萍, 吴传庆, 王雪蕾, 王洪亮, 周亚明, 赵乾. 海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2999-3008. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-6923.2019.07.037>
- [11] 李恩. 基于无人机高光谱的氮磷含量反演方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [12] 潘莹莹, 冯文静, 陈明. 长江口杭州湾氮磷污染源分析及防治对策[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(10): 79-80+109.
- [13] 王洁, 王杰, 许佳峰, 栾奎峰, 杨奕杰, 吕阳阳. 长江口邻近海域海表温度变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 624-634. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.007>
- [14] Bondarenko, S., Dydyshka, Y., Kalinovskaya, L., Sadykov, R. and Yermolchik, V. (2020) One-Loop Electroweak Radiative Corrections to Lepton Pair Production in Polarized Electron-Positron Collisions. *Physical Review D*, **102**, Article ID: 033004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.033004>
- [15] Yu, C., Li, Z.H. and Penna, N.T. (2020) Triggered Afterslip on the Southern Hikurangi Subduction Interface Following the 2016 Kaikōura Earthquake from InSAR Time Series with Atmospheric Corrections. *Remote Sensing of Environment*, **251**, Article ID: 112097. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112097>
- [16] 王盛, 王魏平, 张真. 基于非规则表面分割的纹理贴附式几何校正算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(11): 154-158+238. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1000-386x.2020.11.026>
- [17] 谭小琴, 罗勇, 赵铮, 甘先霞, 张洪吉, 陈建华. 基于高分遥感的河流水质反演研究——以金马河温江段为例[J]. 环境生态学, 2020, 2(7): 29-36.
- [18] 陈俊英, 邢正, 张智韬, 劳聪聪, 栗现文, 王海峰. 基于高光谱定量反演模型的污水综合水质评价[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 200-209. <http://dx.chinadoi.cn/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.023>
- [19] 吴旭云, 裘诚, 王岳峰, 王统泽, 袁瑞. 上海海域海水水质变化趋势及应对措施[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(1): 46-50.
- [20] 周昀, 陈飞, 姚建国, 马贞依, 李军. 地表水环境质量标准中有机物的荧光特征分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 55-59+66.