

# 基于GOCI数据的江苏近海营养盐遥感反演研究

陈一铭<sup>1</sup>, 孙德勇<sup>1,2</sup>, 王胜强<sup>1,2,3</sup>, 何苗<sup>4</sup>, 陈莹<sup>4</sup>,  
张海龙<sup>1,3</sup>, 张悦<sup>4</sup>

(1.南京信息工程大学海洋科学学院,江苏南京210044;2.自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室,北京100081;3.自然资源部海岸带开发与保护重点实验室,江苏南京210024;4.江苏省苏力环境科技有限责任公司,江苏南京210044)

**摘要:**营养盐是水质参数评价的重要指标,其浓度和结构直接影响海洋的生物群落,因此近海营养盐浓度准确监测及时空分布研究对海洋水质监测和海洋生态环境保护具有重要意义。本文基于江苏近海9个航次数据集,采用BP(Back Propagation)神经网络方法,输入包括GOCI卫星8波段遥感反射率数据及波段组合共14个模型参数,建立了无机氮及活性磷酸盐浓度反演模型。利用独立数据集对模型进行验证,结果表明模型精度良好。进一步将其应用于2011年至2020年的GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)影像数据分析,获得了近10年江苏近海无机氮和活性磷酸盐浓度时空分布特征。研究显示,江苏海域营养盐呈现由近岸向外海递减的趋势,在外海呈现寡营养盐现象,且有明显的冬季高、夏季低的季节变化特征。此研究结果可为长期、便捷、大范围的水质监测研究提供方法支撑。

**关键词:**无机氮;活性磷酸盐;GOCI;BP神经网络

中图分类号:X832;X87 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2024)05-0766-10

## Spatiotemporal variations of nutrients in Jiangsu coastal waters based on GOCI observations

CHEN Yiming<sup>1</sup>, SUN Deyong<sup>1,2</sup>, WANG Shengqiang<sup>1,2,3</sup>, HE Miao<sup>4</sup>, CHEN Ying<sup>4</sup>,  
ZHANG Hailong<sup>1,3</sup>, ZHANG Yue<sup>4</sup>

(1.School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, MNR, Beijing 100081, China; 3.Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210024, China; 4.Jiangsu Suli Environmental Technology Co. LTD, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Nutrients serve as crucial water quality indicators, directly influencing marine primary productivity and ecosystems. Monitoring of the spatiotemporal distribution of nutrient concentrations is vital for marine quality assessment and ecological protection in coastal waters. A Back Propagation (BP) neural network-based models were proposed for estimating dissolved inorganic nitrogen and soluble reactive phosphorus

收稿日期:2023-12-02, 修订日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(42176179, 42176181, 42106176);江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20211289, BK20210667);自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2021CZEPK02);遥感科学国家重点实验室开放基金项目(OFSLRSS202103);江苏省环保集团科研项目(JSEP-TZ-2021-1011-RE)

作者简介:陈一铭(1999—),女(满族),辽宁辽阳人,学生,硕士,主要从事海洋光学遥感研究, E-mail: 20211209008@nuist.edu.cn

通信作者:孙德勇(1984—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要从事水体光学与水色遥感方面的研究, E-mail: sundeyong@nuist.edu.cn

concentrations using *in situ* measurements from nine cruise surveys along the Jiangsu coast. This new model utilizes 14 variables as inputs, including eight remote sensing reflectance bands (matched with GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) data) and eight band combination forms. These two new models were independently validated and showed reliable inversion results. Furthermore, these models were applied to a decade's GOCI satellite data, and the results indicate a decline in nutrient levels from nearshore to offshore waters and distinct seasonal fluctuations. These findings provide support for long-term, extensive water quality monitoring initiatives.

**Key words:** dissolved inorganic nitrogen; soluble reactive phosphorus; GOCI; BP neural network

氮、磷等营养盐是海洋生物生长所必需的养分,其分布和浓度直接影响海洋中初级生产力及浮游生物的分布和数量<sup>[1]</sup>。近年来,我国沿海地区城市迅速扩张,氮、磷营养盐大量流入海洋<sup>[2]</sup>,严重影响浮游植物和动物的生长,进而对海洋生态环境造成威胁<sup>[3]</sup>。因此,快速有效地监测氮、磷浓度,了解水体富营养化程度,对水环境治理至关重要<sup>[4]</sup>。

水体氮、磷营养盐浓度的监测传统上以点位监测为主,通过现场采集水样带回实验室测定。该方法虽然准确度高,但是无法反映营养盐的总体时空状况,且费时费力,不能满足实时、快速、大尺度的监测和评价要求<sup>[5]</sup>。卫星遥感作为一种能够实现大范围对地观测的技术,可为营养盐监测提供新的方法。基于遥感的营养盐监测技术具有监测范围广、高动态等特点,可以快速提供大范围水体的营养盐浓度信息<sup>[6]</sup>,在营养盐变化较大水域的监测具有优势。

水体氮、磷营养盐浓度遥感监测的研究尚处于起步阶段,目前多采用经验方法,通过提取水面光信号特征,利用营养盐浓度与遥感反射率构建遥感探测模型<sup>[7-11]</sup>,进而应用于卫星数据获取目标水域营养盐浓度的时空分布。例如, Yu 等<sup>[9]</sup>利用国外多光谱 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 数据和匹配的实测溶解无机氮浓度数据,基于多元统计建模技术,建立了渤海 DIN 浓度的探测模型。邢前国<sup>[10]</sup>针对珠江河口水域利用 Hyperion 高光谱传感器数据和硝酸盐、磷酸盐浓度数据,建立了回归分析的营养盐遥感探测模型。许勇等<sup>[11]</sup>利用国产卫星北京一号多光谱数据与实测数据,构建了射阳河口无机氮、磷酸盐浓度遥感模型,获得两种营养盐的分布特征。随着计算机技术的迅速发展,机器学习

由于具有很好的模拟能力,被广泛应用于遥感模型建立。例如,王建平等<sup>[12]</sup>以人工神经网络方法建立了鄱阳湖氮、磷浓度模型;王云霞<sup>[13]</sup>以最小二乘支持向量机(LSSVM)法建立了辽宁铁岭清河水库的总氮、总磷模型。机器学习建立的模型精度明显优于传统统计模型。

江苏省海岸线长 954 km,在拥有连云港等深水海岸资源的同时,还有着丰富的滩涂和海洋生物资源,是重要的海洋经济发展区。近年来,随着江苏浅滩沿岸区域城市和涉海产业(如紫菜养殖)的快速发展,人类生产活动频繁,对近海生态环境系统造成的风险持续增加,尤其是营养盐的输入对水质造成了严重影响<sup>[14]</sup>。因此,急需对近海营养盐浓度开展宏观长期监测,明确营养盐的时空分布特征。目前虽然针对内陆湖泊和近岸河口已有研究者开展了营养盐遥感反演研究,但针对江苏近岸海域的研究较少,仅有的少数研究也主要集中在海州湾、射阳河口等小区域范围<sup>[15-16]</sup>。然而,近岸水体光学性质复杂多变,这使得其他区域的模型在江苏近岸可能存在较大不确定性。此外,营养盐作为非光学活性物质,如何有效量化水体遥感反射率光谱和营养盐浓度的关系是构建遥感模型的关键。传统的回归模型一般采用有限的波段组合形式作为输入,对于水体光谱特征的捕捉不足。而机器学习可输入多个参数,能够深度地挖掘水体光谱信息,可能更适用于营养盐这种非光学活性物质的反演。

因此,本研究以江苏近岸海域为例,使用对水质评估具有较大影响的活性磷酸盐(soluble reactive phosphorus, SRP)和溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)作为代表,采用实测的营养盐数据,结合机器学习算法,以水环境要素敏

感波段组合作为模型输入,构建营养盐遥感反演模型。在此基础上,利用2011年至2020年GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)静止轨道水色卫星数据实现江苏近海表层水体的DIN和SRP浓度遥感反演,并探究两种营养盐长时序空间分布特征,为江苏近岸水质监测提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本文的研究区域为江苏近海(图1),范围为 $30^{\circ}45'N-35^{\circ}20'N$ ,  $116^{\circ}18'E-121^{\circ}57'E$ ,中部苏北浅滩具有似三角洲状的地形地貌——辐射沙洲,是中国条斑紫菜筏式养殖的重要区域,而养殖筏架上的附生绿藻脱落入海被认为是影响黄海营养盐的重要因素<sup>[17]</sup>。江苏南接上海,东濒黄海,区位优势独特,水体光学性质复杂,营养盐丰富,是沿海、沿长江和沿陇海兰新线三大生产力布局主轴线交会区域,是我国重要的沿海省份。

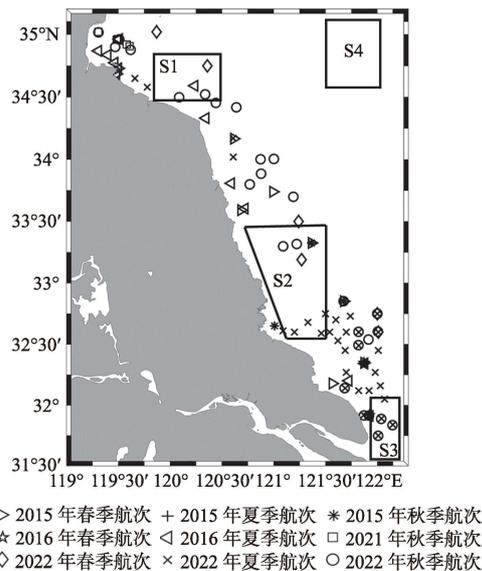


图1 航次调查站位分布及典型区域

Fig. 1 Locations of the sampling and the typical region

近岸河流携带大量陆源营养盐流入近海,因此在河口及毗邻海域营养盐浓度往往较高,而外部海域接近开阔大洋,其营养盐浓度相对较低。因此,本文选取了灌河口(S1)、苏北浅滩(S2)、长江口(S3)以及外部海域(S4)作为典型子区域,以量化分析江苏近海的营养盐时空分布特征。

### 1.2 实测数据

本文使用的实测SRP、DIN浓度为2015—2022年共9个航次的数据,涵盖春、夏和秋3个季节,每个季节各3个航次,共计467个测量点。站位分布情况如图1所示。采集表层水样,然后立即经过 $0.45\ \mu\text{m}$ 醋酸纤维微孔滤膜过滤,按照《海洋监测规范第4部分:海水分析》(GB17378.4—2007)<sup>[18]</sup>中的方法测定营养盐浓度。样品的采集、运输、储存均按《海洋调查规范第4部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)<sup>[19]</sup>规定进行。

### 1.3 卫星遥感数据

本文使用的卫星数据来自搭载在COMS卫星上的静止水色成像仪GOCI,该成像仪是第一颗地球静止轨道海洋水色遥感卫星,主要负责海洋监测。数据下载自韩国海洋卫星中心(<http://kosc.kiost.ac.kr/>)。卫星数据集主要为2011—2020年Level-1B级日产品,并使用GOCI官方数据处理软件GDPS(GOCI Data Processing Solutions)进行预处理,获得遥感反射率(remote sensing reflectance,  $R_{rs}$ )日产品,并计算得到 $R_{rs}$ 月平均及年平均产品。同时下载了其后续卫星GOCI-II的L2P级 $R_{rs}$ 日产品,用于星地匹配及精度验证。星地匹配规则如下:(1)时间窗口设定为 $\pm 1\ \text{h}$ ;(2)选取匹配点周围 $3\times 3$ 像元的平均 $R_{rs}$ 作为最终匹配值。根据上述时空匹配规则,实测数据与 $R_{rs}$ 日产品匹配后共获得103个样本点。

### 1.4 BP神经网络简介

BP神经网络是一种使用误差反传原理(error back-propagation algorithm)进行训练的多层前馈(multi-layer perceptron, MLP)神经网络模型,被广泛应用于分类、模式识别和函数逼近等任务。BP神经网络由输入层、输出层和多个隐含层组成,同层节点之间没有连接,相邻层之间的节点互相连接,前一层的输出作为后一层的输入,运行机制主要包括信息的正向传播和误差的反向传播两个过程<sup>[20]</sup>。

### 1.5 DIN、SRP浓度反演模型简介

输入变量是构建BP神经网络模型的关键参数,其变化严重影响神经网络的性能和准确度。为了更准确地反演浓度,本文尝试增加叶绿素

*a*、总悬浮物敏感波段组合, 间接反演水体中营养盐浓度。叶绿素 *a* 与总悬浮物浓度的反演参考针对浑浊水体的 Tassan 算法<sup>[21]</sup>, 具体反演模型如下:

$$R = \frac{R_{rs}(\lambda_i)}{R_{rs}(\lambda_j)} \times \frac{R_{rs}(\lambda_m)}{R_{rs}(\lambda_n)} \quad (1)$$

$$\log(\text{Chl}a) = c_1 + c_2 \log_{10}(R) + c_3 \log_{10}^2(R) \quad (2)$$

$$\text{TSM} = 10^{\{c_0 + c_1 [R_{rs}(555) + R_{rs}(670)] + c_2 \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}\}} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_i, \lambda_j$  分别为接近叶绿素吸收最大值和最小值的波段;  $\lambda_m, \lambda_n$  分别位于叶绿素吸收峰的两边, 是次级波段;  $c_1, c_2$  为常数。对于 GOCI,  $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_m, \lambda_n$  分别为 443 nm、555 nm、412 nm 和 490 nm。在计算 TSM 浓度时, 基于 GOCI 卫星波段设置, 采用卫星  $R_{rs}(660)$  波段代替模型  $R_{rs}(670)$  波段。BP 神经网络的输入参数包括 GOCI 卫星 8 波段  $R_{rs}$  数据及上式中 6 种  $R_{rs}$  的波段组合, 共 14 个, 具体输入参数列于表 1。

表 1 BP 神经网络具体输入参数

Tab.1 Specific input parameters of BP neural network

输入变量	组合形式	具体参数
1	$X$	$X = R_{rs}(412), R_{rs}(443), R_{rs}(490), R_{rs}(555), R_{rs}(660), R_{rs}(680), R_{rs}(745), R_{rs}(865)$
2	$\left(\frac{X_1}{X_2}\right)\left(\frac{X_3}{X_4}\right)$	$X_1 = R_{rs}(443), X_2 = R_{rs}(555), X_3 = R_{rs}(412), X_4 = R_{rs}(490)$
3	$\log_{10}(X)$	$X = \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)} \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(490)}$
4	$\log_{10}^2(X)$	$X = \frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)} \frac{R_{rs}(412)}{R_{rs}(490)}$
5	$\frac{X_1}{X_2}$	$X_1 = R_{rs}(490), X_2 = R_{rs}(555)$
6	$10^X$	$X = \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}, R_{rs}(555) + R_{rs}(660)$

BP 神经网络的性能受隐藏层节点数影响, 较多的隐藏层节点数可以提高模型的性能, 但可能导致训练时间过长<sup>[22]</sup>。经过多次训练尝试, 最终隐藏层节点数分别为 4 和 2。在此条件下, 训练模型的学习速率设置为 0.01, 最大训练次数为 1000 次。构建 BP 神经网络时, 为了在修正速率时避免计算 Hessian 矩阵<sup>[23]</sup>, 选用的训练函数为 levenberg-marquardt(LM)反向传播算法。

### 1.6 精度评价指标

本文将样本数据集按照 7 : 3 的比例划分为训练集和测试集, 利用独立数据集对反演模型进

行验证。所使用的精度评价指标包括相关系数 ( $R$ )、均方根误差 ( $RMSE$ )、平均绝对百分比误差 ( $MAPE$ )、标准差 ( $SD$ ), 表达式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (6)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中:  $n$  表示样本数量;  $x_i$  表示第  $i$  个样本的实测值;  $y_i$  表示第  $i$  个样本的反演值;  $\bar{x}$  表示实测值的平均值;  $\bar{y}$  表示反演值的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实测 DIN、SRP 浓度分布特征

本文收集处理了多个不同年份、不同季节航次现场实测营养盐数据, 并绘制其频数分布直方图, 结果如图 2 所示。两种营养盐大致呈现正态分布趋势, 其标准差分别为 0.121 mg/L、0.006 mg/L。DIN 浓度变化范围较大, 其最大值与最小值分别为 0.679 mg/L 和 0.033 mg/L, 平均值为 0.22 mg/L。而 SRP 浓度范围为 0.003 mg/L 至 0.026 mg/L, 平均值为 0.01 mg/L, 测量结果与唐得昊等<sup>[24]</sup>的实测结果相似。

### 2.2 DIN、SRP 浓度反演模型开发及验证

利用 BP 神经网络方法, 将表 1 所示参数作为输入, 以两种营养盐浓度为目标参数进行训练, 得到 DIN 与 SRP 浓度反演模型。利用 30% 样本数据作为独立验证集数据对模型效果进行检验, 图 3 为实测营养盐浓度值与其模型反演值的散点对比情况。可以看出, 大多数散点都集中在 1 : 1 线附近, 实测营养盐浓度和反演营养盐浓度相关性较高, 相关系数  $R$  分别为 0.83 ( $p < 0.001$ ) 与 0.72 ( $p < 0.001$ )。DIN 反演模型的  $MAPE$  为 44.80%, SRP 反演模型的  $MAPE$  为 62.64%。 $RMSE$  均处于较低水平, 分别为 0.059 mg/L、

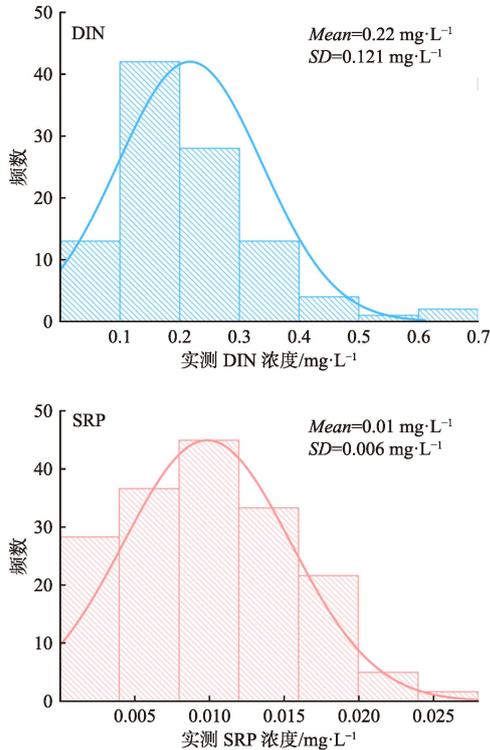


图2 实测营养盐浓度频数分布直方图

Fig. 2 Distribution histograms of measured nutrient concentration

0.004 mg/L, 优于许勇等<sup>[11]</sup>的结果。综上所述, BP神经网络模型预测结果良好, 模型反演结果可信。

### 2.3 江苏近海 DIN、SRP 浓度时空变化特征

为分析江苏近海表层水体营养盐浓度的长期变化情况, 将本文构建的营养盐反演模型应用于 2011—2020 年 GOCI 年平均  $R_{rs}$  产品中, 得到 DIN、SRP 10 年平均浓度分布, 如图 4 所示。在空间分布上, 反演的两种营养盐分布趋势是一致的, 整体上呈近岸浓度高、离岸浓度低的特点, DIN 与 SRP 浓度标准差分别为 0.225 mg/L 和 0.005 mg/L。DIN 浓度的高值大多出现在入海河流河口附近海域(如灌河口、射阳河口附近海域)以及对流扩散能力较弱的半封闭海湾(如琼港附近海域和海州湾等)(图 4a)。SRP 浓度由近岸向外海呈递减趋势, 在外海呈现寡营养盐现象, 在苏北浅滩附近有一个狭长的带状高值区(图 4b)。根据季节将实测数据进行分类, 并运用插值方法制作了春、夏、秋 3 个季节的营养盐浓度平面图。通过对比分析, 发现卫星反演得到的两种营养盐分布图与实测数据插值得到的分布图基本吻合。

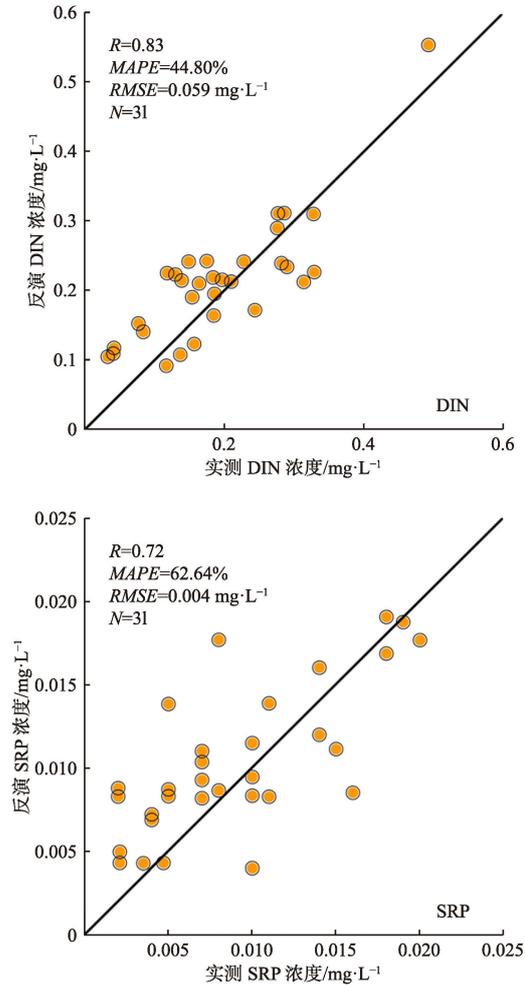


图3 营养盐浓度反演模型检验样本散点图

Fig. 3 Scatter plot of nutrient concentration inversion model test samples

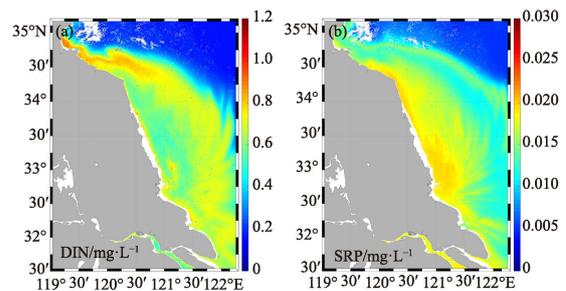


图4 2011—2020 年江苏近海营养盐浓度年平均空间分布

Fig. 4 Annual average spatial distribution of nutrient concentration in Jiangsu coastal waters from 2011 to 2020

图 5 和图 6 分别为 2011 年 1 月至 2020 年 12 月的表层水体 DIN 和 SRP 浓度多年月平均空

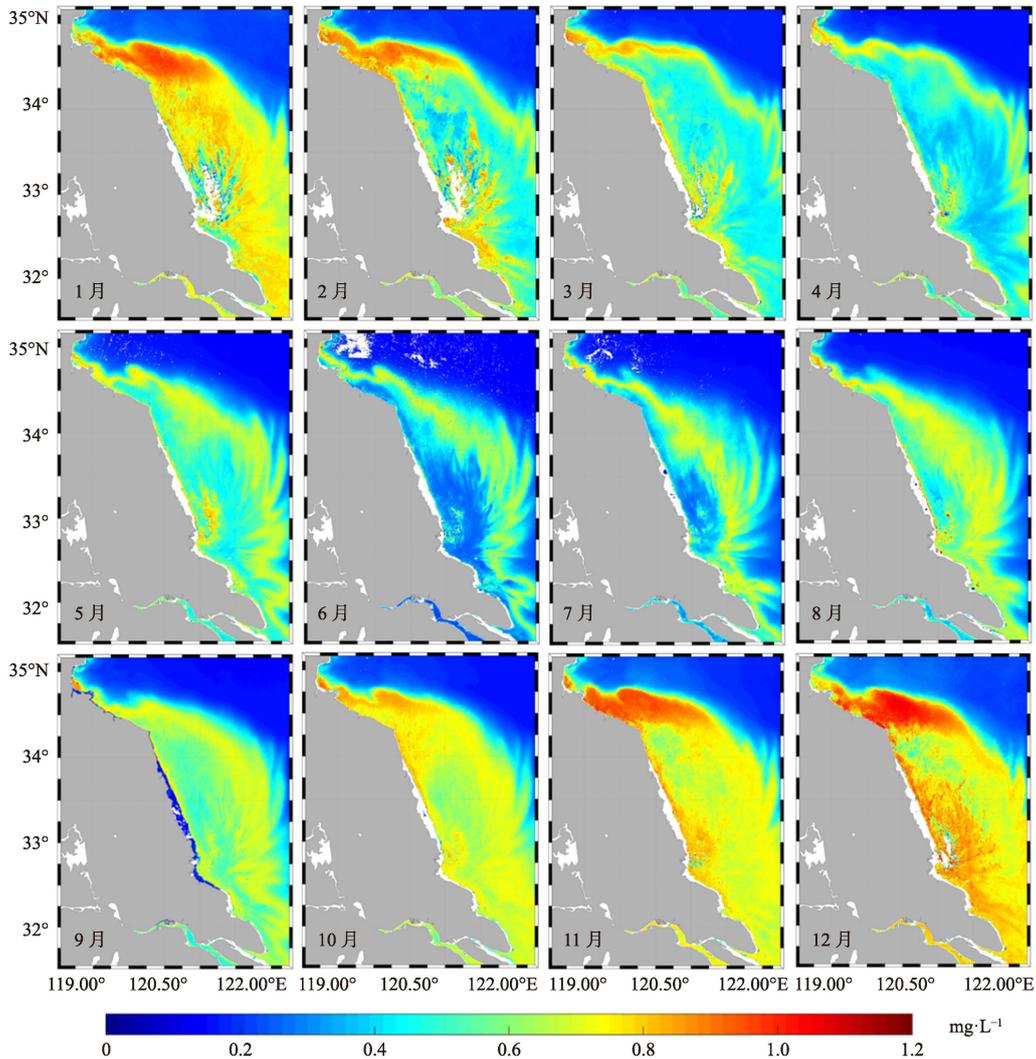


图 5 2011—2020 年江苏近海 DIN 浓度月平均空间分布

Fig. 5 Monthly average spatial distribution of DIN concentration in Jiangsu offshore waters from 2011 to 2020

间分布。从不同月份的反演结果来看,各月营养盐浓度的空间分布与年平均浓度分布类似,高值区均在近岸,并且 12 月—2 月长江口及邻近海域 DIN 和 SRP 浓度较高,3 月至 7 月逐渐下降,8 月开始回升,具有明显的季节性变化特征。季节上,从冬季到秋季的 4 个季节内,整个江苏沿岸海域 DIN 和 SRP 浓度在冬季最高,夏季最低,春季与秋季相差不大。这一结果与张传松等<sup>[25]</sup>的遥感反演研究结果相符。区域上,海州湾、长江口海域 DIN 浓度较高,并且呈现出由近岸向外海递减的趋势,梯度变化显著。SRP 在表层呈现出相似分布趋势,在苏北浅滩附近和长江口海域存在明显的营养盐浓度高值区。

为了量化江苏附近海域不同月份营养盐浓

度变化,分析了灌河口(S1)、苏北浅滩(S2)、长江口(S3)及外部海域(S4)4 个典型区域 2011—2020 年的营养盐浓度月变化趋势,结果如图 7 所示。典型区域 DIN 和 SRP 浓度的季节变化呈现相似的趋势,冬季最高,每年最高值一般出现在 1 月或者 12 月;夏季最低,每年最低值一般出现在 6 月或者 8 月。灌河口海域 DIN 和 SRP 浓度季节变化幅度尤为明显,变化量分别为 0.47 mg/L 和 0.0074 mg/L。外海区域的 DIN 和 SRP 浓度的波动相对较小,浓度较为稳定。上述结论与前人研究成果相契合,例如,张海波等<sup>[26]</sup>发现南黄海夏季营养盐组分相较于春季显著下降。同样,许海华等<sup>[27]</sup>的研究亦表明,江苏盐城近岸海域夏季营养盐浓度明显低于春季和秋季。戚劲<sup>[28]</sup>

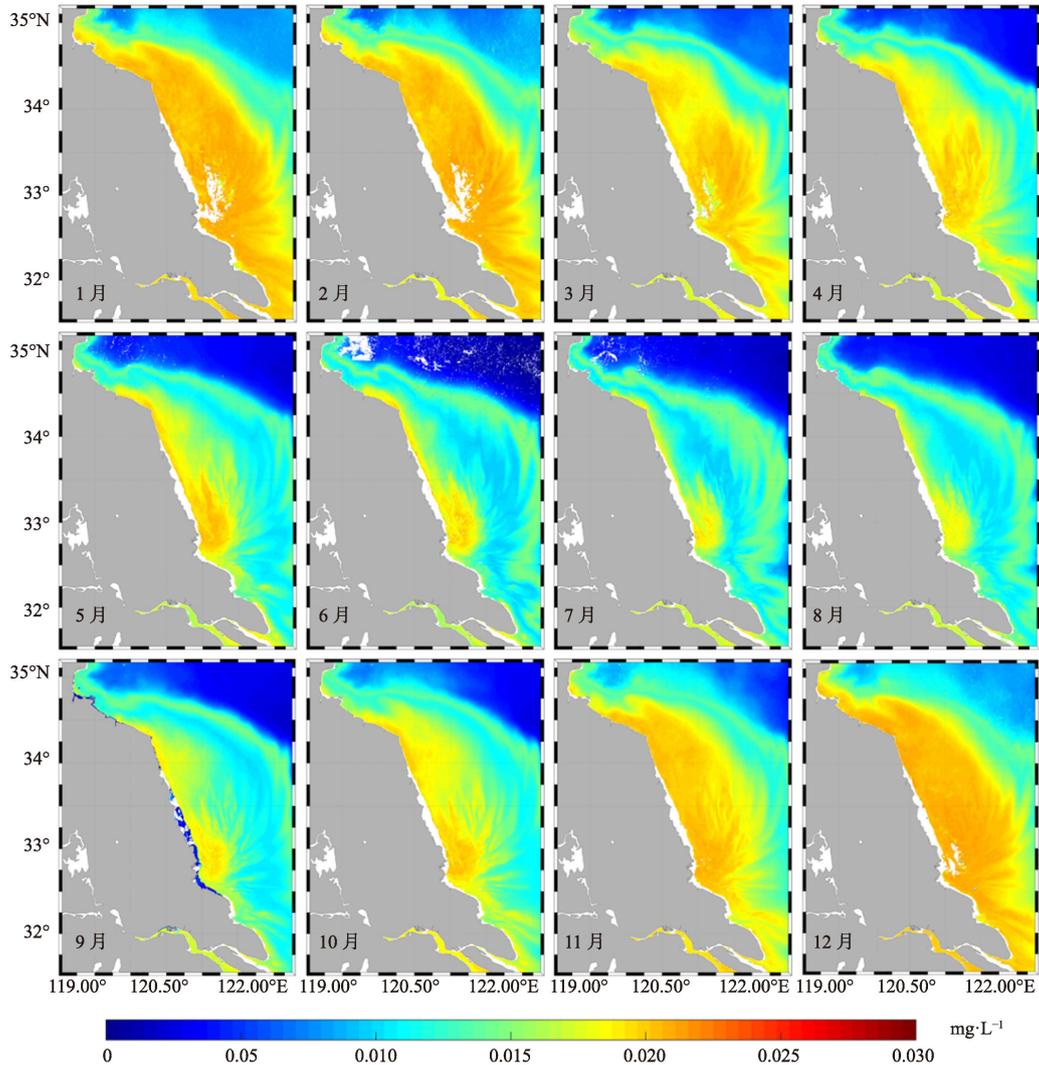


图6 2011—2020年江苏近海SRP浓度月平均空间分布

Fig. 6 Monthly average spatial distribution of SRP concentration in Jiangsu offshore waters from 2011 to 2020

和张传松等<sup>[25]</sup>对长江口海域的营养盐分布情况进行了反演研究,其中包含了南通附近的海域。通过对比分析,他们发现冬季该区域的营养盐浓度较高,而夏季较低。另外,卢灿灿<sup>[29]</sup>的研究涉及了苏北浅滩的营养盐数据,其季节分布的结果与本文的研究结果一致。

需要指出的是,虽然本文卫星反演营养盐分布结果与前人研究结果基本一致,但由于冬季实测数据不足,导致未能对卫星反演的冬季营养盐结果进行充分的验证。在将来的工作中,我们将加强对冬季营养盐实测数据的采集积累,以进一步对本文的卫星反演结果进行验证。

春季南黄海营养盐主要受径流输入<sup>[30]</sup>和沿岸流混合以及北部青岛冷水团和外海暖流影

响<sup>[31-32]</sup>,各营养盐均呈现明显的江苏近海高、北部区域低的分布特征。夏季营养盐组分较春季下降明显,虽然陆地径流的养分输入量最大,但由于光合作用增强,浮游植物在光和温度的作用下迅速生长繁殖,并不断摄取大量养分<sup>[33]</sup>,同时,夏季期间海温升高使得海水层化增强<sup>[34]</sup>,底层高浓度营养盐水体受到阻碍,表层水体无法得到补充,因此,夏季营养盐浓度降低。秋季时,南黄海底层冷水团几乎消失,同时受到风力增强影响,均匀层水体的深度迅速增加,而较浅水域的温跃层明显减弱。因此,在海州湾出现了高浓度的氮、磷营养盐分布。长江口以北地区,黄海沿岸冷水进入东海北部有所加强,向附近海域提供了高浓度的营养盐。冬季时,长江冲淡水流入减

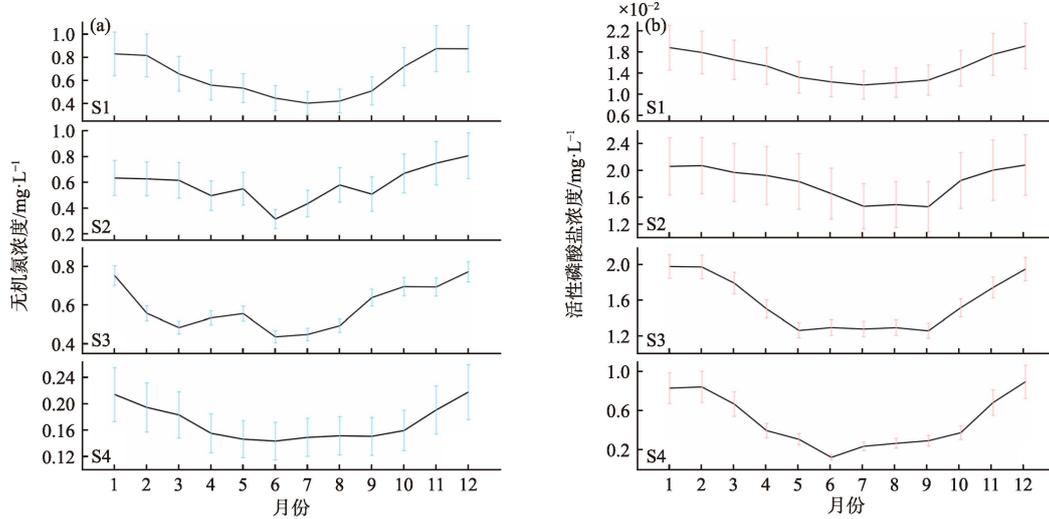


图 7 2011—2020 年 4 个典型区域营养盐浓度月平均变化趋势

Fig. 7 Monthly average variation trend of nutrient concentration in four typical regions from 2011 to 2020

弱,对东海和南黄海营养盐的贡献达到全年最低水平,虽然陆地径流的养分输入最小,但是冬季的养分浓度在 4 个季节中却最高,其原因是冬季浮游植物光合作用减少,对养分的摄入最减少。

长江冲淡对江苏近岸营养盐的影响复杂多变。季节变化不仅影响长江径流量,还改变江苏近岸海域的水文、气象和生物活动,进而影响营养盐循环与分布。据长江冲淡水转向理论<sup>[35]</sup>,夏季冲淡水部分南下或向东南扩展,部分转向北或东北,使江苏南部海域受到的影响小于冬季,这是解释长江口近岸海域营养盐浓度在冬季明显高于夏季所普遍接受的理论之一<sup>[36]</sup>。春、夏季径流量大,冲淡作用强,淡水携带营养盐进入海域,降低浓度,同时生物活动旺盛也影响营养盐

吸收。夏季海水层化阻碍底层营养盐补充表层,故浓度最低。秋、冬季径流量小,冲淡作用减弱,营养盐可能受沉积、海洋动力等因素影响,生物活动减弱导致浓度积累。此外,季节变化的长江冲淡水对江苏近岸营养盐的影响是多方面的,如径流量、生物活动、流场和混合作用等。这些因素共同导致营养盐循环和分布的季节性变化。为了更准确地了解这种影响,还需进行长期、系统的观测和研究。

图 8 是 2011 年至 2020 年月平均营养盐浓度距平变化情况。从时间尺度上可以看出,2011 年至 2020 年长江口及苏北浅滩邻近海域 DIN 月平均浓度波动上升,SRP 月平均浓度整体下降,结论与图 5 结果一致。此现象可能与农业

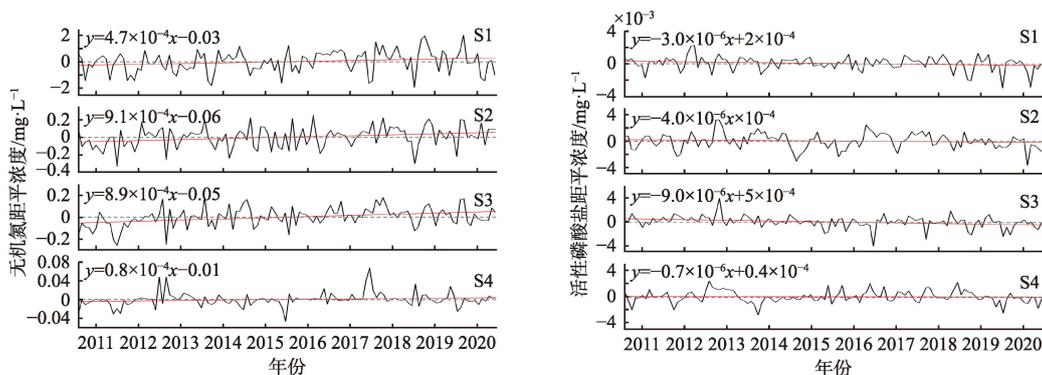


图 8 2011—2020 年 4 个典型区域月平均营养盐浓度距平变化情况

Fig. 8 Monthly average nutrient concentration anomaly in four typical regions from 2011 to 2020

生产方式的变化和限磷政策的实施有关<sup>[37]</sup>,农业生产主要以氮肥为主,减少了磷酸盐的陆源污染输入,同时也与当地政府主管部门控制陆源污染输入、推广健康生态养殖等一系列取得成效的措施有关。灌河口及外海区域营养盐浓度较为稳定,整体波动较小。从时间尺度来看,4个典型区域的营养盐浓度在2013年及2017—2019年都表现出不同程度的正向扰动,这可能与降水量及河流径流量有关。

### 3 结论

(1)本研究利用BP神经网络,加入水环境要素敏感波段组合作为模型输入,建立了DIN和SRP浓度的GOCI遥感反演模型。DIN和SRP浓度精度验证相关系数分别为0.83、0.72,结果表明,本文建立的模型预测精度良好,适用于江苏近海营养盐浓度的遥感反演。

(2)基于本文建立的氮、磷反演模型,分析了2011—2020年江苏近海氮、磷的时空分布。在空间分布方面,高值区主要在海州湾—苏北浅滩—长江口海域一带,并由近岸向外海递减,在外海区域呈寡营养盐状态。在时间分布上,营养盐浓度呈季节规律变化,冬季值最高,夏季值最低。

(3)基于建立的神经网络反演模型,选取一定范围的典型水域,反演了该水域的DIN和SRP浓度。结果表明,在4个典型区域中,灌河口、苏北浅滩及长江口海域DIN月平均浓度呈上升趋势,而SRP浓度整体下降。外海区域营养盐浓度较为稳定,整体波动较小。

(4)地表水环境复杂,构建营养盐反演模型时需要考虑信息处理不精确、多因素等问题。针对这种情况,BP神经网络具有很强的非线性映射能力,可以较好地拟合DIN、SRP浓度与遥感反射率数据之间的非线性关系,提高了营养盐遥感反演模型的精度,证明了使用BP神经网络模型进行营养盐浓度反演的可行性。目前水质参数反演研究中神经网络算法应用广泛,但也存在一些问题。目前该模型受实测数据区域限制较大,可移植性不强,今后可以考虑添加其他区域样本进行扩展研究,获得扩展性更好的水质参数反演模型。

### 参考文献:

- [1] 张际标, 张鹏, 戴培东, 等. 海南岛近岸海域溶解无机磷时空分布及富营养化[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2541-2548.
- [2] KUCUKSEZGIN F, KONTAS A, ALTAY O, et al. Assessment of marine pollution in Izmir Bay: nutrient, heavy metal and total hydrocarbon concentrations[J]. Environment International, 2006, 32(1): 41-51.
- [3] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3212-3221.
- [4] 黄慧琴, 侯进菊, 翁辰, 等. 崇明岛典型河道水体中叶绿素a动态特征及其与环境因子的相关分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1369-1375.
- [5] WARNOCK R E, GIESKES W W C, VAN LAAR S. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea[J]. Journal of Sea Research, 1999, 42(3): 169-178.
- [6] 叶林安, 王莉波, 江志法, 等. 2015年东海区营养盐的分布变化特征[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(3): 432-439.
- [7] SONG K H, LI L, WANG Z M, et al. Retrieval of total suspended matter (TSM) and chlorophyll-a (Chl-a) concentration from remote-sensing data for drinking water resources[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(3): 1449-1470.
- [8] CHEN S S, HAN L S, CHEN X Z, et al. Estimating wide range total suspended solids concentrations from MODIS 250-m imageries: An improved method[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 99: 58-69.
- [9] YU X, YI H P, LIU X Y, et al. Remote-sensing estimation of dissolved inorganic nitrogen concentration in the Bohai Sea using band combinations derived from MODIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(2): 327-340.
- [10] 邢前国. 珠江口水质高光谱反演[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2007.
- [11] 许勇, 成长春, 张鹰, 等. 基于北京一号影像的射阳河口无机氮磷营养盐监测研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1486-1492.
- [12] 王建平, 程声通, 贾海峰, 等. 用TM影像进行湖泊水体反演研究的人工神经网络模型[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 73-76.
- [13] 王云霞. 基于Landsat8的清河水库总氮、总磷反演研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [14] 袁超, 张靖宇, 肖洁, 等. 基于哨兵2号卫星遥感影像的2018年苏北浅滩漂浮绿藻时空分布特征研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 12-20.
- [15] 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.
- [16] 潘洁, 张鹰. 基于Hyperion影像的射阳河口无机氮磷浓

- 度反演研究[J]. 遥感信息, 2011 (3): 88-93.
- [17] 张清春, 孔凡洲, 颜天, 等. 苏北浅滩养殖筏架附生绿藻入海过程在黄海绿潮形成中的作用[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1014-1020.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007, 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008..
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范 第4部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] HAGIWARA M. Removal of hidden units and weights for back propagation networks[C]//Proceedings of 1993 International Conference on Neural Networks (IJCNN-93-Nagoya, Japan), Nagoya: IEEE, 1993: 351-354.
- [21] TASSAN S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 2369-2378.
- [22] 常亮, 陈芳霖, 陈新军, 等. 基于BP神经网络的西北太平洋柔鱼资源丰度预测[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(2): 524-533.
- [23] SANGWAN P, DESHWAL D, KUMAR D, et al. Isolated word language identification system with hybrid features from a deep belief network[J]. International Journal of Communication Systems, 2023, 36(12): e4418.
- [24] 唐得昊. 江苏近岸海域生态系统健康整体性评估研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [25] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2416-2424.
- [26] 张海波, 刘珂, 苏荣国, 等. 2018年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律与营养盐相互关系探究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 30-39.
- [27] 许海华, 丁言者, 李丽花, 等. 盐城近岸海域水质分布特征及富营养化研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(8): 97-104.
- [28] 戚劲. 浙江近岸海域富营养化时空分布变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [29] 卢灿灿. 基于GOCI的长江口及邻近海域营养盐时空变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [30] 马洪瑞, 陈聚法, 崔毅, 等. 灌河和射阳河水质状况分析及主要污染物入海量估算[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(3): 92-99.
- [31] 靳姗姗, 孙俊川, 魏泽勋. 渤海沿岸流季节变化对青岛冷水团影响的初步分析[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(3): 317-328.
- [32] ZHANG Q L, LIU X Q, CHENG M H, et al. Characteristics and formation causes of Qingdao Cold Water Mass[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(4): 303-308.
- [33] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素a和初级生产力的分布[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 143-150.
- [34] 赵保仁, 任广法, 曹德明, 等. 长江口上升流海区的生态环境特征[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 327-333.
- [35] 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输运[J]. 黄渤海海洋学报, 1998, 16(2): 42-48.
- [36] 周燕, 陆建新, 余骏, 等. 浙江省近岸海域环境现状及保护对策[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(8): 41-46.
- [37] 赵玉庭, 刘霞, 李佳蕙, 等. 2013年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(1): 95-99.

(本文编辑: 胡莹莹)