

近岸海域水质富营养化监测与评价方法探讨

叶伟聪 潘永亮 黄鲲鹏 雷列辉 刘艺斯

珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东广州 510610

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15763

[摘要] 近岸海域水质富营养化是沿海生态环境退化的重要因素,对渔业资源、生态系统服务及海洋可持续利用构成威胁。本文围绕近岸海域水质富营养化的监测与评价方法展开研究,系统分析了富营养化的驱动因素及典型污染指标的动态变化特征,重点探讨了原位监测、遥感反演及多源数据融合等技术手段在实时、高精度监测中的应用。基于指标体系构建、权重确定及综合评价模型,提出了多因子分级评价方法及可视化预警系统,以期在近岸海域环境管理与决策提供技术参考。

[关键词] 近岸海域;水质富营养化;原位监测;遥感反演;综合评价

1 引言

近岸海域是海-陆界面的人-海作用区域,受工业污水、农业污水以及城市生活污水等多源污染影响,容易造成氮、磷超标以及藻类异常大量生长等水体富营养化。水体富营养化造成赤潮和底层缺氧等会导致渔业资源、海洋生态系统稳定性持续受到严重威胁,国内外已形成多方法开展水质富营养化监测与评价,如定点采样化学、遥感反演、水动力-生态模型等方法,但存在时空覆盖面小、时效性较低、综合性评估手段缺乏等问题。物联网、人工智能、大数据分析技术快速发展,实现构建高时效的多源融合监测、近岸海域富营养化状态多指标综合评价已成为可能。本文旨在探索基于原位监测、遥感反演与数据融合的综合评价方法,建立科学的指标体系与富营养化状态分级模型。

2 近岸海域水质富营养化特征分析

2.1 富营养化的主要驱动因素

近岸海域富营养化的源头具有陆源为主、源多汇少的特点,陆源贡献达75%以上,主要为工业源废水、生活废水以及农业源面源污染。其中,工业废水中的氮磷含量大,通过径流输入提供持续性的营养盐输入,生活废水中的氮磷浓度适宜,为河口区营养盐累积起着不可忽视的作用,农业源面源污染致使水体通过肥料流失增加了氮磷含量。海域来源污染主要以养殖业为源,网箱养殖造成局部海域的总磷含量迅速上升,同时由沉积物底物系统中营养物质对水体的释放也使得沉积物-水界面的氮磷输出增多形成内源营养盐输入。大气干湿沉降提供的氮量不俗,而水文动力学环境较差的半封闭湾由于换水周期较长使得营养盐不易扩散从而更易于受到外源输入和内源输入以及水文滞留的合力驱动而造成近岸海

域营养盐的富营养化污染。

2.2 典型污染指标及其动态变化规律

核心污染指标表现出时空分异和周期性波动特征。总氮和总磷浓度在河口区域最高,随着离岸距离增加呈指数衰减,叶绿素a作为生物响应指标在夏季达到峰值,与水温呈显著正相关,反映浮游植物生长异常。溶解氧表现为表层饱和而底层缺氧,底层溶解氧最低值常低于缺氧阈值,与总氮浓度呈负相关^[1]。潮汐作用引起污染物浓度半日周期波动,雨季径流冲刷使河口区域总氮浓度出现骤升,呈现明显的季节性和事件驱动特征。

2.3 富营养化对生态系统的影响

富营养化会引起一系列生态衰退,水体初级生产力显著增加引起浮游植物的群落失衡,引发赤潮,藻毒素超标威胁水质安全,底栖生物多样性降低,底质中ORP降低,激活沉积物磷输出,食物链的缩短造成鱼类的品种小型化,经济鱼类减少,系统弹性和稳定性大大减小,恢复时间长,导致长期的生态功能衰退趋势。

3 富营养化监测技术方法

3.1 原位监测技术

原位监测采用固定监测点与现场监测车相结合的方式,其中:固定监测点间距为5km×5km网格布点,安装多参数传感器(其中包括光学传感器叶绿素a浓度、离子选择电极TN和TP检测,分辨率高,响应及时、溶解氧探测器全覆盖测量整个水体、误差小);固定监测点通过安装自动采样器每6小时一次水样,低温保存以方便实验室检测;现场监测车基于无人船搭载水下光谱仪和营养盐快速分析仪,其巡航路径为之字形巡游,巡航间距加密为1km,并同步记录水温、盐

度等水文数据,所有数据均利用北斗定位,进行标记并回传,实现空间与时间上的连续监测^[2]。固定监测点与现场监测车结合,以实现有效覆盖近岸海域水质的时空监测变化,以及对污染源追踪和富营养化趋势分析提供有效的、精度高的数据。

3.2 遥感反演技术

遥感反演建立卫星与无人机多层次监测。卫星采用北斗卫星影像获取中高分卫星数据,在叶绿素 a 浓度上运用改进三波段模型,利用特制红边波段计算荧光基线高度,使用水体浊度校正模型对悬浮物干扰进行校正,反演效果较好,且误差在可接受范围内。无人机搭载高光谱相机近岸十公里进行精细化监测,光谱空间分辨率较高,波段较多,选用机器模型对总氮和总磷浓度的反演,模型的输入为波段反射率、波段比值以及实测的反演值,可实现厘米级分辨率的近岸遥感反演。无人机数据可以达到每日更新,并能够灵活进行空间覆盖及及时响应,作为卫星遥感在近岸浅水区监测的补充,结合多源遥感以及原位监测数据可以建立精度较优、时空上连续的近岸海域富营养化监测模型,为科学评价及预警提供依据。

3.3 数据融合与质控方法

数据融合与质控方法建立时空匹配与三级校验相结合的数据处理流程,实现原位监测与遥感数据的高精度融合。

在时空融合环节,将原位点数据与遥感面数据统一到 1km×1km 网格,并按小时级时间尺度对齐,对缺失数据采用相邻时刻线性拟合补充,保证插值误差低于 5%。进行三级质量控制,一级为传感器自校准,每日自动校正,漂移超过 2% 触发报警;二级为实验室比对,每周随机抽取十分之一原位水样,采用国家标准方法测定污染指标,偏差超过十分之一时修正传感器系数;三级为算法过滤,结合 Grubbs 异常值检验和卡尔曼滤波对多源数据进行平滑处理,剔除极端异常值并优化时间序列连续性^[3]。经过该流程处理后,形成时空连续、有效率高于 95% 的数据集,为近岸海域富营养化综合评价模型提供高质量输入,确保监测结果的可靠性与科学性。

4 富营养化综合评价方法

4.1 指标体系构建与权重确定

指标体系以构建以理化、生物、生态多维指标体系为核心,构建以理化指标(包括总氮、总磷、溶解氧、水体透明度)、生物指标(包括叶绿素 a 含量、浮游生物群落多样性指数)及生态指标(包括底栖动物丰富度、赤潮频次)为核心的指标体系,来反映近岸海域富营养化现状。

权重确定采用改进层次分析法,通过邀请 15 名水环境和海洋生物相关专家对指标开展两两比较赋分,形成判断阵,并用一致性检测确认矩阵的合理性,之后通过计算得出各指标权重,各指标权重确保总氮和总磷的贡献程度最大,叶绿素 a 次之,并分别给溶解氧、水透明度、生物多样性和底栖密度以及赤潮频率赋值,构建出比较科学、可量化的评价模型,为下一步的富营养化状态分级和预警奠定基础。

4.2 富营养化状态分级模型

营养化状态分级模型采用加权综合指数法,定义公式为:

$$FEI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i$$

其中, w_i 为各指标权重, S_i 为标准化指标值,标准化通过极值法处理:

$$S_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

S_i 取值在 0~1 之间。划分五个级别 $FEI(0.2 \leq FEI \leq 0.4)$

表示轻度富营养;(0.4< $FEI \leq 0.6$) 中度富营养;(0.6< $FEI \leq 0.8$) 严重富营养。 $FEI > 0.8$ 为重度富营养。本模型引入动态修正系数进一步提升区域的适用性:河口区由于径流冲刷较大,乘以 1.1 的修正系数^[4];养殖区由于内源营养盐释放强烈,乘以 1.2 的修正系数,提升特定功能区的评价精度与科学性,使模型可以显示空间异质性和环境驱动力的影响。

4.3 评价结果可视化与预警系统

构建基于 GIS 平台的评价结果可视化与预警系统,实现富营养化状态的空间动态呈现。

系统通过自然断点法对 FEI 指数划分等级色块,并叠加原位监测点位和遥感反演数据生成高精度空间分布图,支持月、季、年多时间尺度对比,可直观显示高值区迁移路径与演变趋势。预警模块设置三级阈值:FEI 大于 0.6 触发黄色预警,每周通报;FEI 大于 0.7 启动橙色预警,每日监测;FEI 大于 0.8 发布红色预警,并启动应急响应^[5]。系统与 LSTM 水文预测模型耦合,预测未来七天富营养化变化趋势(预测精度 $R^2=0.85$),并生成管控建议,包括削减陆源排放和调整养殖投饵策略,实现“评价、预警、决策”闭环,支持管理部门科学调控近岸海域营养状态。

5 实例分析与应用

5.1 监测案例概况

我国东部某半封闭海湾总占地面积约 280km²,受到 3 条入海河流径流输入与沿岸 5 万 m² 的网箱养殖区影响,海域年平均发生赤潮次数 2~3 次,基于历年的监测资料,海域 TN

浓度在 0.8~2.5mg/L，TP 浓度在 0.06~0.3mg/L，属于典型的富营养化敏感区。研究着重选取藻类生长繁盛期，根据河流入海口、养殖区与湾中心 3 种功能区进行监测布点。为保障该时期样品采集数据的覆盖率和准确性，设计 8 个固定多参数监测站位，装备光学、离子选择电极和溶解氧探头，规划 2 条无人船巡航航路，实时获取高分辨率的巡航数据，采集实时水温、盐度、Chl-a、TN 和 TP 等重要水质指标，为富营养化水平的评价提供高质量的数据信息。

5.2 数据采集与处理流程

数据采集主要包括原位测定数据和遥感反演数据，原位测定主要为网格固定监测站 TN、TP、Chl-a、DO、透明度等水质参数及其留样开展在线自动监测并用于验证校正无人船测量数据。无人船按照网格化方式以 1~1.5km 的步进测取表层海水的高光谱以及水文参数数据，重点关注河口区域、养

殖区域及湾中心功能区。北斗遥感影像数据获取采用 5 天一景的周期，利用多波段算法反演 Chl-a 的表层高光谱数据，北斗空间分辨率是 2m 和 10m，所得到的数据粒度为 20m 的网格。数据通过 3 级质量控制处理完成：其中一级数据质量检查为传感器每天（24 小时）的自动运行自校准，校准误差控制在±2%以内，二级数据质控为实验室开展 10%抽样检查，计算比对测定值和原位值，当偏差超过 10%时更新传感器系数，三级质控即在算法上应用卡尔曼滤波融合处理方法，对原位、无人船、卫星/航空的数据进行平滑、时间和空间的统一，最终形成高精度、1km 网格、1 小时分辨率数据，有效率达 96.3%，以此为富营养化综合评价提供精度保障。

5.3 评价模型应用结果分析

评价模型实现了对富营养化动态变化的精准捕捉，具体结果如表 1 所示。

表 1 评价模型应用结果

监测区域	5 月 FEI 值	7 月 FEI 值	10 月 FEI 值	主要超标指标	富营养化等级变化
河口区	0.58	0.76	0.42	TN、Chl-a	轻度→中度→轻度
养殖区	0.65	0.83	0.59	TP、Chl-a	中度→重度→轻度
湾中心	0.32	0.45	0.28	无	中营养→轻度→中营养

河口区 FEI 由 5 月的 0.58 升至 7 月 0.76，然后 10 月降到 0.42，符合 TN 与 Chl-a 呈季节性峰值变化的特点，富营养化等级从轻度升至中度，而后回到轻度；养殖区在受到明显内源排放影响的特征下，FEI 从 0.65 升至 0.83 后降至 0.59，指标超标主要表现为 TP 与 Chl-a，呈中度升至重度，而后又降到轻度富营养化；而湾中心区 FEI 的变动呈平稳走势，由 0.32 升至 0.45 再降到 0.28，表现为中营养到轻度的波动态势，反映其受外源污染和水动力调剂的影响不大。结果表明评价模型能较好地反映出不同功能区富营养化动态变化。

6 结语

综上所述，本文从近岸海域水质富营养化的主要驱动因子与典型污染指标、主要影响效应等方面进行了系统梳理，从原位监测、遥感反演与多源数据融合等方面系统建立了近岸海域水质富营养化的监测技术体系，基于理化、生物、生态三维指标体系与加权综合指数分级模型，实现富营养化程度可视化及动态警戒，基于东部半封闭海湾实例验证表明，研究建立的模型可以明确表示不同功能海域在不同时节所具有的富营养化变化及其超出标准可能性，对海洋污染治理和

修复具有一定的指导意义。今后，还需进一步提高高动态海域监测准确度及近岸水域保护协作措施方面的研究，以期为近岸保护提供更有效的解决方案。

[参考文献]

[1]李微微, 杨雯, 马新, 等. 秦皇岛近岸海域水质富营养化概况分析[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42 (07): 51-55.

[2]李钢, 卞少伟. 唐山市近岸海域水质富营养化评价及防治对策[J]. 绿色科技, 2025, 27 (06): 159-162.

[3]杨小琛, 刘翼翔, 章航滔, 等. 针对湖泊水体富营养化的水质监测预警系统设计[J]. 海河水利, 2022, (03): 24-26+56.

[4]刘丽华, 贺琦, 兰景权, 等. 福建省近岸海域环境因子分布特征及富营养化评价[J]. 海洋科学, 2021, 45 (12): 97-107.

[5]王金迪, 钱建国, 邱银国, 等. 富营养化湖泊水环境监测模拟平台研发与应用[J]. 测绘通报, 2024, (06): 120-126.