

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0177

福宁湾近岸海域水质状况分析与评价

刘瀚丹¹, 李增光^{1,2,3}, 万荣^{1,2,3}, 祝圆⁴,
刘欢⁴, 陈双龙⁴

(1.上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2.国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3.自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206; 4.华能霞浦核电有限公司, 福建 宁德 355100)

摘要:海水水质综合评价是近岸海域环境管理的重要依据。海湾水质受多重因素交互影响, 单一评价方法往往存在局限, 难以全面揭示其复杂动态特征。多方法评价体系在刻画水质结构、识别环境风险及研判整体状况方面具有互补优势。本研究基于 2024—2025 年福宁湾 4 个季度的监测数据, 使用单因子污染指数 (single-factor pollution index, *SFPI*) 法、水质指数 (water quality index, *WQI*) 法、营养状态指数 (nutrition quality index, *NQI*) 法和富营养化指数 (eutrophication index, *EI*) 法等多种评价方法, 从多维度综合评估该海域水质状况。结果表明, 福宁湾水质呈现明显的季节差异, 春、冬两季水质较优, 夏、秋两季相对较差; 空间分布上, 表层水质优于底层, 外湾优于内湾。整体上, 该海域处于中度富营养化水平, 氮污染较为突出, 呈现磷限制状态, 综合水质为良好至优等级。本研究可为福宁湾的水质管理和富营养化防控提供科学依据和方法支撑。

关键词: 福宁湾; 水质评价; 时空分布; 营养盐; 富营养化

中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2026)05-0797-14

Analysis and assessment of water quality status in the coastal waters of Funing Bay

Liu Handan¹, Li Zengguang^{1,2,3}, Wan Rong^{1,2,3}, Zhu Yuan⁴,
Liu Huan⁴, Chen Shuanglong⁴

(1.College of Marine Biological Resources and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.National Engineering Research Center for Distant-Water Fisheries, Shanghai 201306, China; 3.Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China; 4.Huaneng Xiapu Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 355100, China)

Abstract: Comprehensive evaluation of seawater quality serves as a crucial basis for environmental management in coastal waters. The water quality of bays is influenced by multiple interacting factors, and a single assessment method often exhibits inherent limitations, making it difficult to fully characterize the complex and dynamic environmental conditions. A multi-method evaluation framework provides complementary advantages in describing water quality structure, identifying environmental risks, and assessing overall ecological status. Based on quarterly monitoring data collected from Funing Bay during 2024–2025, this study employed several assessment approaches, including the Single-Factor Pollution Index (*SFPI*), Water Quality Index (*WQI*), Nutrition Quality Index (*NQI*), and Eutrophication Index (*EI*), to conduct a

收稿日期: 2025-11-27, 修订日期: 2026-04-03

基金项目: 企业委托项目 (24FW278); 上海市科技兴农项目 (20250926103)

作者简介: 刘瀚丹 (2001—), 男, 满族, 辽宁丹东人, 硕士, 主要研究方向为渔业水质评价, E-mail: 18406188627@163.com

通信作者: 李增光 (1986—), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为渔业生态与资源评估, E-mail: zgli@shou.edu.cn

comprehensive and multidimensional evaluation of seawater quality. The results revealed significant seasonal variations in water quality, with better conditions observed in spring and winter, and relatively poorer conditions in summer and autumn. Spatially, surface waters exhibited better quality than bottom waters, and the outer bay performed better than the inner bay. Overall, Funing Bay was characterized by a moderate eutrophication level, with nitrogen pollution as the dominant concern and a phosphorus-limited trophic state. The integrated water quality was generally maintained at good to excellent levels. This study provides scientific evidence and methodological support for water quality management and eutrophication control in Funing Bay.

Key words: Funing Bay; water quality assessment; spatiotemporal distribution; nutrients; eutrophication

海水水质评价是海洋环境管理与生态保护的基础。由于水交换能力较弱且易受陆源输入影响,近岸海域的水质问题尤为突出,因此开展系统的水质评价具有重要的现实意义^[1]。为科学评估海水质量,国内外学者已发展出多种评价方法,主要包括单因子污染指数(single-factor pollution index, *SFPI*)法、水质指数(water quality index, *WQI*)法、营养状态指数(nutrition quality index, *NQI*)法和富营养化指数(eutrophication index, *EI*)法等^[2-3]。*SFPI*是污染物浓度与标准限值的比值,可以直观反映污染物超标情况,方法简便,但难以综合刻画整体水质状况^[4-5]。*WQI*是通过多个水质参数进行标准化赋分并加权汇总得到的一个指数,适用于不同水域间的比较,但其评价结果易受指标选取与权重分配的影响^[6-7]。*NQI*与*EI*主要聚焦于水体营养盐水平及富营养化风险评估,前者通过叠加多个营养盐指标反映水体营养状态,后者基于营养盐浓度的乘积函数,对营养盐协同积累和内源释放更为敏感^[8-9]。

近年来,综合运用多种方法已成为海湾水质评价研究的重要趋势^[10]。例如,邹景忠等^[8]利用*EI*方法有效揭示了渤海湾的富营养化状况;姚开雪等^[11]结合*SFPI*与*EI*方法,指出乐清湾海域存在较为严重的富营养化问题;李保石等^[12]通过*NQI*与*EI*方法,系统分析了广海湾水体富营养化的时空变化特征,结果表明该海湾春、秋两季均呈现富营养化状态。上述研究表明,多方法综合评价体系能够为海湾水质管理提供更加全面的科学支撑和决策依据。

福宁湾位于福建省霞浦县东南部,是典型的亚热带半封闭海湾,也是闽东地区重要的水产养殖基地,该海域的水质状况直接关系到养殖业的可持续发展。早期研究显示,福宁湾长期呈现高

氮、低磷的营养盐结构特征,其中无机氮浓度冬季较高、夏季较低,且存在赤潮发生风险^[13-15]。该海域现有水质评价研究多集中于特定时段或依赖单一评价方法,且近年系统性监测数据有限,难以全面揭示该海域水质的长期变化趋势、营养盐结构的动态特征及不同评价方法的适用性差异。在当前养殖活动持续扩张与陆源输入不断加重的背景下,亟须采用多种评价方法对福宁湾水质开展系统评估,以识别水质变化的主要驱动因子。

本研究基于福宁湾2024年8月至2025年4月4个季度的系统性监测数据,采用*SFPI*法、*WQI*法、*NQI*法和*EI*法等对该海域水质状况进行评价,旨在:(1)阐明福宁湾主要水质参数的时空分布特征;(2)评估该海域营养状态、富营养化水平及整体水质状况;(3)比较不同评价方法的结果差异,探讨其在福宁湾的适用性;(4)结合历史数据对比分析,识别水质变化的主要驱动因子。研究结果可为福宁湾的水质管理、富营养化防控及养殖区科学规划提供理论依据,并为类似海湾的综合环境评价提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

福宁湾受季风和潮汐的共同作用,水动力条件复杂,水体交换能力较弱,潮流呈现明显的往复流特征,输运方向以西南向为主,这种特殊的水文条件使陆源物质易于在湾内滞留和积累^[16-17]。福宁湾周边陆域分布着多条独流入海的河流,如七都溪、罗汉溪和长溪等(图1)。在降雨季节,径流量增加,这些河流携带大量氮、磷等营养盐及污染物汇入海湾,构成重要的外源输入来源。此外,霞浦县沿海地区人口密集,渔业和海水养

殖是当地主导产业,湾内及邻近海域有大规模的延绳式网笼吊挂养殖(如牡蛎)和筏式养殖(如海带、坛紫菜)等活动。在养殖高峰期,饲料残渣及养殖废水释放的营养盐进一步加剧了湾内水体的富营养化压力^[18]。

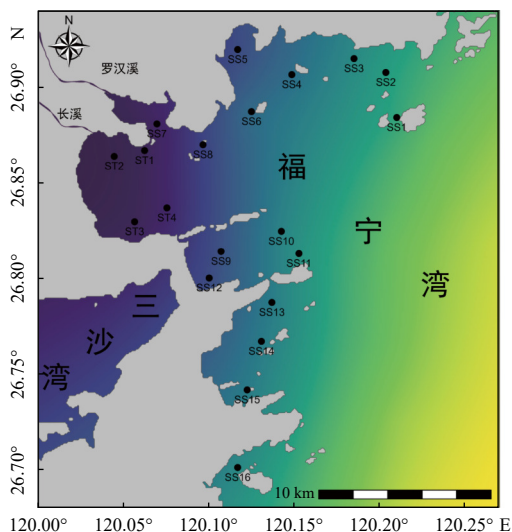


图1 采样站位

Fig. 1 Map of sampling locations

1.2 样品采集与指标分析

在福建省霞浦县福宁湾海域(120.00°E—120.28°E, 26.68°N—26.93°N)共布设20个采样站位(图1),于春(2025年4月)、夏(2024年8月)、秋(2024年11月)、冬(2025年2月)4个季节开展系统性调查采样。样品的采集方法遵循《海洋调查规范 第2部分:海洋水文观测》(GB/T 12763.2—2007)^[19],样品保存与实验分析依据《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)^[20],水质评价标准参照《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[21]相关限值要求。

现场调查中,使用SBE-19plusV2型温盐深剖面仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)测定海水温度、盐度、溶解氧(dissolved oxygen, DO)和叶绿素a(Chlorophyll a, Chl a)等理化参数。水样采集使用有机玻璃采水器,表层样取自水面下约0.5 m;底层样取自距海底约2 m的水层,以避免样品受底泥搅动的干扰。采集后的海水样品立即避光密封并低温保存,于24 h内运抵实验室完成分析。

营养盐指标包括亚硝酸态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、铵态

氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、总氮(total nitrogen, TN)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、总磷(total phosphorus, TP)及活性硅酸盐(silicate, $\text{SiO}_3\text{-Si}$)。其中, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用萘乙二胺分光光度法测定,检出限为0.002 mg/L; $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用次溴酸盐氧化法测定,检出限为0.005 mg/L; $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用镉柱还原法测定,检出限为0.01 mg/L; $\text{PO}_4\text{-P}$ 采用磷钼蓝分光光度法测定,检出限为0.0008 mg/L; TN与TP样品均经过硫酸钾氧化后按照 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的方法测定,检出限分别为0.01 mg/L与0.0008 mg/L; $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 则采用硅钼蓝分光光度法测定,检出限为0.04 mg/L。

有机物指标包括化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、五日生化需氧量(biochemical oxygen demand over 5 days, BOD_5)、溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)。其中,COD采用碱性高锰酸钾法测定; BOD_5 采用五日培养法测定;DOC和POC均通过总有机碳分析仪(total organic carbon analyzer, TOC analyzer)测定,DOC的检出限为0.03 mg/L。

所有样品分析均在实验室按照质量控制要求进行,平行样差异控制在5%以内,以确保数据的准确性与可比性。

1.3 水质综合评价方法

1.3.1 单因子指数法

在水质评价过程中,将氮、磷形态指标进行整合,其中溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)包括 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$,溶解无机磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)以 $\text{PO}_4\text{-P}$ 表征。采用DIN和DIP作为单因子评价指标,既可识别当前水质问题,又与该海域历史研究方法保持一致^[13-15]。对于每个样本,DIN和DIP的污染指数通过以下公式计算:

$$SFPI_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: C_i 和 S_i 分别为DIN和DIP实测数据和《海水水质标准》(GB 3097—1997)中基于海洋功能区划的水质标准值。当 $SFPI_i > 1$ 时,视为水质超标,表明水体已受到污染;当 $SFPI_i < 1$ 时,表示水体未受到污染,水体污染程度随 $SFPI_i$ 的增大

而增加。

1.3.2 营养状态指数法

营养状态指数法是一种基于多个代表性营养因子实测浓度与其对应水质标准值进行计算的综合评价方法,适用于不同水域类型的比较分析^[9]。本研究选取 COD、DIN、DIP、Chl *a* 4 个指标进行计算。其计算公式如下:

$$NQI = \frac{C_{COD}}{C_{S(COD)}} + \frac{C_{DIP}}{C_{S(DIP)}} + \frac{C_{DIN}}{C_{S(DIN)}} + \frac{C_{Chl\ a}}{C_{S(Chl\ a)}} \quad (2)$$

式中: C_{COD} 、 C_{DIP} 、 C_{DIN} 和 $C_{Chl\ a}$ 分别表示 COD、DIP、DIN 和 Chl *a* 的实测浓度; $C_{S(COD)}$ 、 $C_{S(DIP)}$ 、 $C_{S(DIN)}$ 和 $C_{S(Chl\ a)}$ 分别表示《海水水质标准》(GB 3097—1997)中对应指标的二类海水水质标准限值。根据 NQI , 可将海区营养状态划分为 3 类: $NQI > 3$ 为富营养化; $2 \leq NQI \leq 3$ 为中营养化; $NQI < 2$ 为贫营养化。

1.3.3 富营养化指数法

福宁湾海水的富营养化状况采用富营养化指数法进行评价^[8]。其计算公式如下:

$$EI = \frac{C_{DIN} \times C_{DIP} \times C_{COD} \times 10^6}{4500} \quad (3)$$

式中: EI 为富营养化指数(无量纲); C_{COD} 为 COD 浓度(mg/L); C_{DIN} 为 DIN 浓度(mg/L); C_{DIP} 为 DIP 浓度(mg/L)。当 $EI \geq 1$ 时,表明水体处于富营养化状态,其中, $1 \leq EI \leq 3$ 为轻度富营养化; $3 < EI \leq 9$ 为中度富营养化; $EI > 9$ 为重度富营养化。

1.3.4 海水水质综合指数法

水质状况采用海水水质综合指数法进行评价。参考《海水水质标准》(GB 3097—1997)中部分指标限值作为子指数(sub-index)的分级阈值;对于缺乏国家标准限值的营养盐及有机碳类指标,结合相关文献及实测数据的分布特征,设定五级线性阈值(表 1)^[6,22]。其计算公式如下:

$$WQI = \frac{\sum(Q_i \times P_i)}{\sum P_i} \quad (4)$$

式中: Q_i 表示第 i 个指标的标准化评分值(0~100); P_i 为第 i 个指标的权重; $\sum P_i$ 为各指标权重之和。对低于检出限的数据,以检出限(LOD)代替;缺测项在计算过程中从分子与分母中剔除。

表 1 福宁湾海域 WQI 评价指标、权重及分级标准
Tab.1 Evaluation parameters, weights and classification criteria of WQI in Funing Bay

指标	单位	P_i	优($Q_i=100$)	良($Q_i=80$)	中($Q_i=60$)	差($Q_i=40$)	极差($Q_i=20$)
DO	mg/L	4	>7.5	6~7.5	5~6	4~5	≤4
COD	mg/L	3	≤2	2~3	3~4	4~5	>5
BOD ₅	mg/L	3	≤1	1~2	2~3	3~5	>5
TP	mg/L	2	≤0.03	0.03~0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	>0.30
PO ₄ -P	mg/L	3	≤0.015	0.015~0.03	0.03~0.045	0.045~0.06	>0.06
NO ₃ -N	mg/L	3	≤0.20	0.20~0.30	0.30~0.50	0.50~1.0	>1.0
NO ₂ -N	mg/L	3	≤0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.10	>0.10
NH ₄ -N	mg/L	4	≤0.10	0.10~0.20	0.20~0.50	0.50~1.0	>1.0
TN	mg/L	1	≤1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	>6.0
SiO ₃ -Si	mg/L	2	≤0.5	0.5~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	>5.0
Chl <i>a</i>	μg/L	2	≤1	1~3	3~5	5~10	>10
DOC	mg/L	1	≤1	1~2	2~4	4~6	>6
POC	mg/L	1	≤1	1~2	2~4	4~6	>7
温度	℃	—	不计入	—	—	—	—
盐度	无量纲	—	不计入	—	—	—	—

1.3.5 潜在性富营养化模式

本研究采用郭卫东等^[23]提出的潜在性富营

养化模式对海域营养盐结构进行评价。根据该模式,营养盐结构分级标准如下:当 $N/P > 30$ 时,

为磷限制状态;当 $N/P < 8$ 时,为氮限制状态;当 $8 < N/P < 30$ 时,为非限制状态。

1.4 数据处理

所有的统计分析均在 R 4.5.0 软件中进行,相关性分析及绘图分别通过 ggplot2 和 corrplot 程序包实现。相关性检验的显著性水平设定为 $p < 0.05$ 。数据处理过程中,使用 tidyverse 程序包对数据进行整合与转换。

2 结果与讨论

2.1 主要水质参数的时空分布特征

2024—2025 年,福宁湾主要水质参数表现出明显的时空异质性(图 2—图 4)。空间分布上,水质呈近岸高、外湾低和底层高、表层低的特征,与其他半封闭海湾的变化规律基本一致^[11]。季节变化方面,各水质指标存在一定波动,但空间分布格局总体稳定。

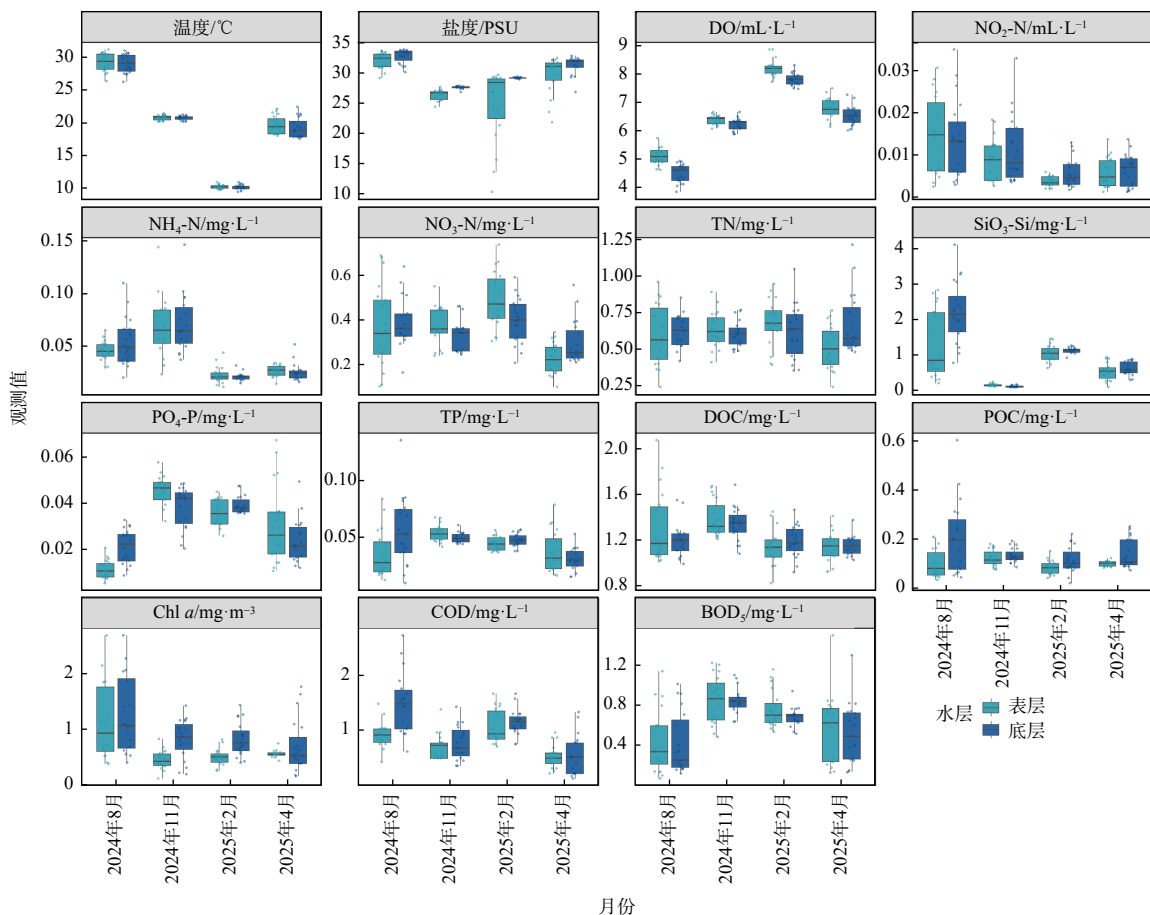


图 2 2024—2025 年 4 个季节表层、底层水质指标分布箱线图

Fig. 2 Boxplot of seasonal distribution of surface and bottom water quality indicators (2024-2025)

盐度监测结果显示,底层盐度普遍高于表层,夏季整体高于其他季节,其中夏季底层最高达 33.8,冬季表层最低(8.53);秋季盐度变幅最大且中位数偏低(图 2),表明该季节各站间盐度差异较为显著。表层 DOC 浓度整体变化幅度较小,其中夏季表层 DOC 最大值为 0.83 mg/L,为各季节表层中的最高值,秋季底层 DOC 出现调查期间的最大值(2.56 mg/L)。POC 浓度范围为 0.01 ~

0.71 mg/L,其中最大值出现在夏季底层,最小值出现在春季表层。COD 与 BOD₅ 浓度分别在秋季底层(9.63 mg/L)和夏季表层(1.84 mg/L)达到峰值,表明夏、秋季有机物降解过程较为活跃。氮营养盐浓度整体较高,底层富集明显。春季底层 DIN 达 1.38 mg/L,显著高于福宁湾历史同期水平(0.18 ~ 0.27 mg/L)^[13]。磷营养盐浓度变化相对平稳,DIP 浓度范围为 0.01 ~ 0.07 mg/L,整

体偏低,其中夏季最低(0.01~0.03 mg/L),该结果与已有研究结果^[13-15]一致。

与2002年至2004年的监测结果(0.07~0.55 mg/L)^[13-15]相比,福宁湾 DIN 浓度显著上升,氮磷污染负荷总体呈加剧趋势,其中氮营养盐的增加尤为突出,成为福宁湾水环境变化的突出特征。

该趋势在春、夏季表现更为明显,可能与养殖活动输入的氮负荷超过水体自净能力,从而导致底层水体中的氮积累有关;秋、冬季虽有一定程度的大型藻类养殖对营养盐存在一定的吸收作用,但尚不足以完全平衡前期积累的氮负荷,导致该海域营养盐压力持续增长。

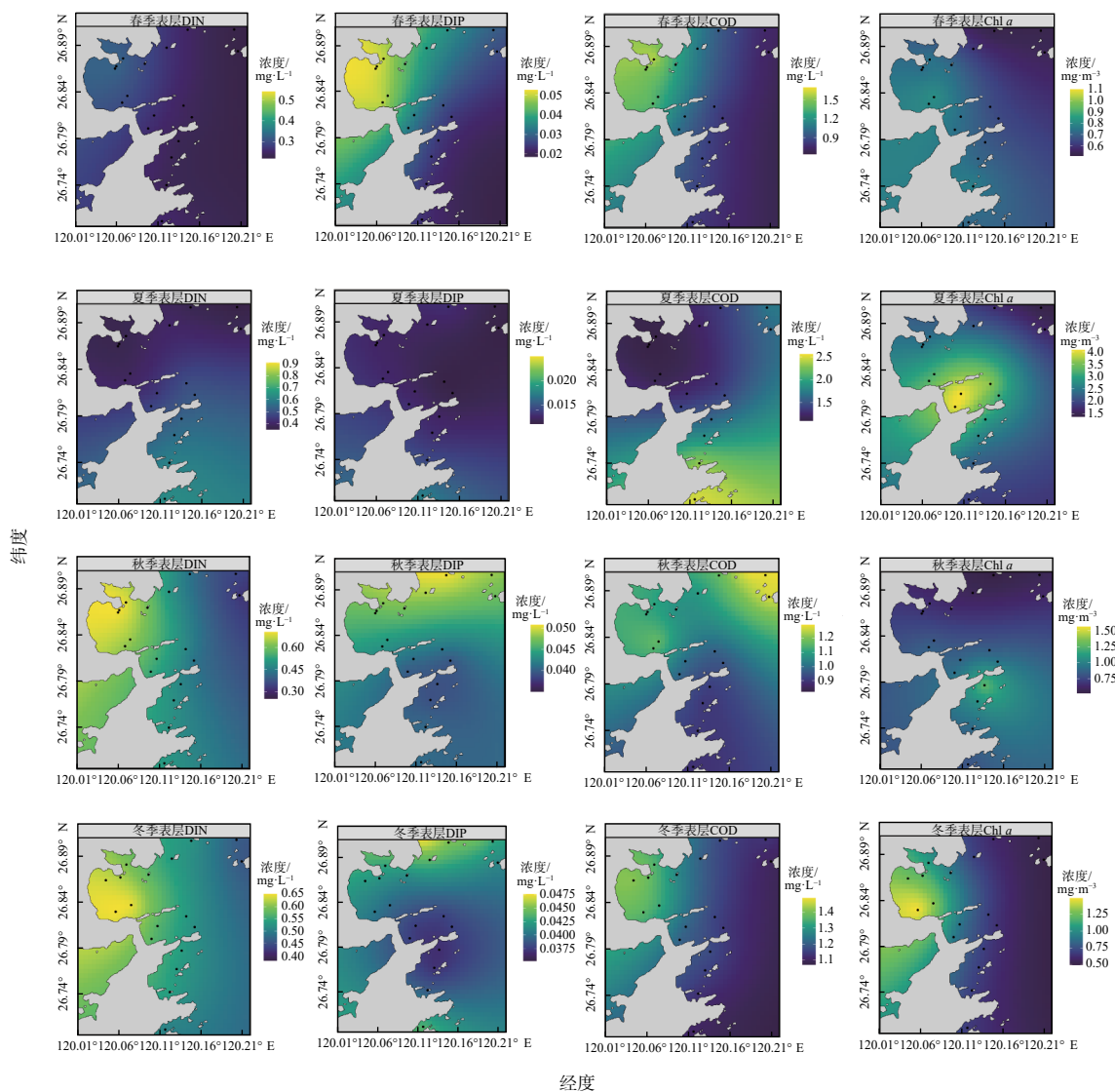


图3 2024—2025年4个季节表层水质参数(DIN、DIP、COD、Chl a)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of surface water quality parameters (DIN, DIP, COD, Chl a) by season (2024-2025)

2.2 氮磷比的时空分布与水质特征

氮磷比(N/P)是评估水体营养盐结构及其限制状态的关键指标,直接影响浮游植物的生长与群落结构,并对富营养化进程及赤潮风险具有重要指示意义^[12,24]。基于N/P的分析结果可揭示福宁湾水体中氮、磷元素的动态变化特征。

2024—2025年监测结果表明,N/P呈现明显的时空异质性(图5)。在季节变化上,N/P总体呈现春夏季较高和秋冬季较低的特征。其中,春季与夏季的平均值分别为38.6和67.5,均高于秋季(16.4)和冬季(22.0),这与刘炜等^[13]的研究结果基本一致。该结果表明暖季无机氮相对富集,在

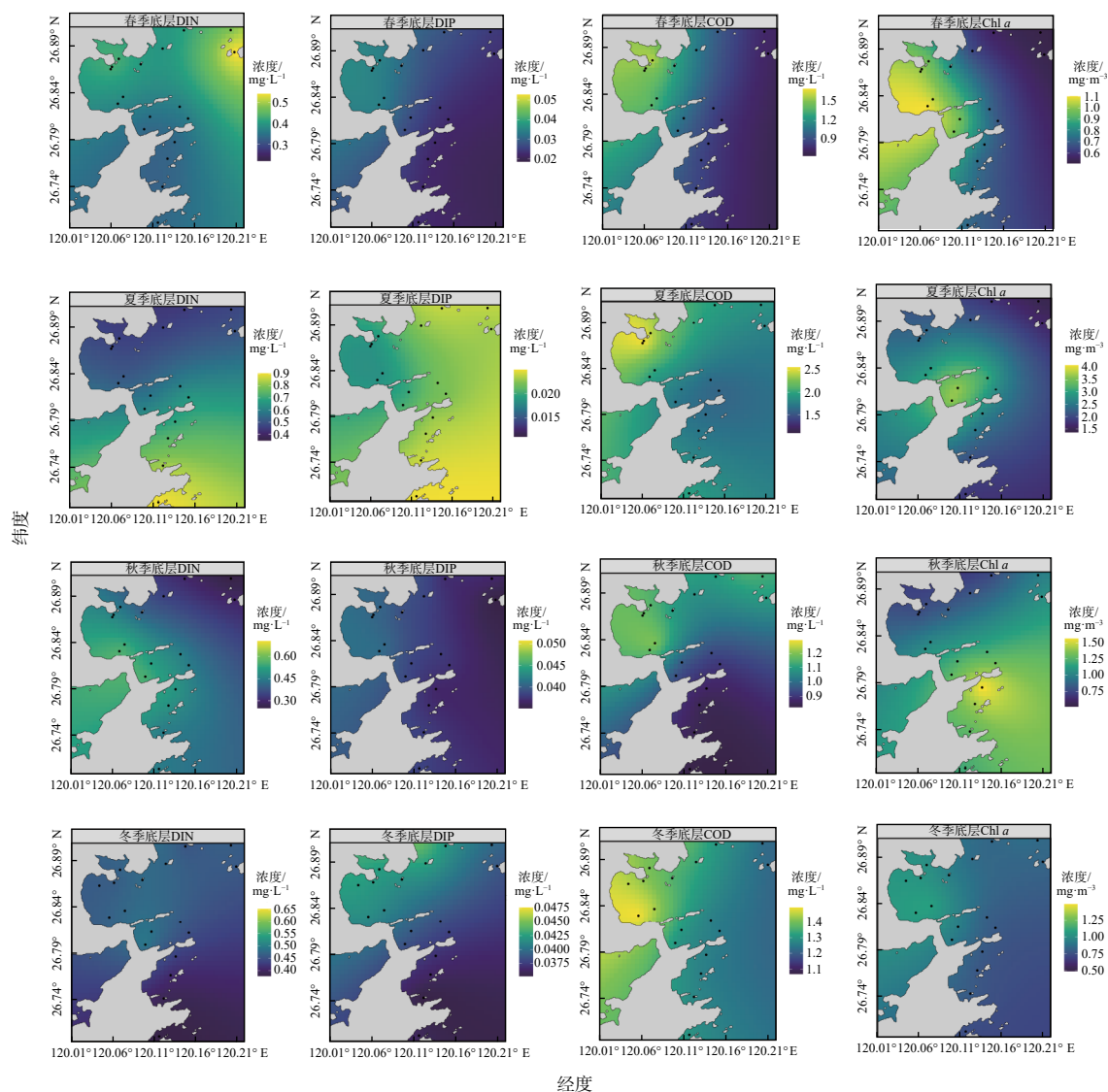


图4 2024—2025年4个季节底层水质参数(DIN、DIP、COD、Chl *a*)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of bottom water quality parameters (DIN, DIP, COD, Chl *a*) by season (2024-2025)

夏季高温与强光照条件下,浮游植物快速生长增强了对磷的消耗,从而进一步加剧了水体的磷限制。在空间分布上,春季表层及夏季底层部分近岸站位的 N/P 较高,其中部分站位超过 30,最大值达到 67.5,这一特征表明,近岸区域氮输入较为显著,可能与养殖活动增强导致的氮排放增加有关。秋冬季 N/P 整体下降,部分区域接近甚至低于 Redfield 比值(16:1),表明营养盐限制状态可能由磷限制向氮限制转变,这与戴红等^[14-15]关于秋、冬季营养盐分布的结论一致。

与历史数据相比,本次调查的 N/P 整体高于 2002—2004 年同期水平。与福宁湾相比,邻

近的三沙湾和罗源湾虽同样存在磷限制风险,但其 N/P 相对较低,磷限制程度弱于福宁湾^[25-26]。福宁湾长期维持的高氮、低磷营养盐结构,近年来已演变为氮富集增强、磷限制加剧的趋势^[13]。尽管戴红等^[14-15]指出 N/P 高于 16:1 并非赤潮暴发的唯一或必要条件,但持续增强的磷限制状态仍可能增加有害藻华暴发的潜在风险。

2.3 盐度与营养盐的相关性分析

盐度是反映海水受陆源输入及水体混合过程影响的重要指标。通常情况下,随着盐度升高,营养盐浓度总体呈下降趋势^[25]。本研究结果表明,不同水层中盐度与营养盐的相关性存在明

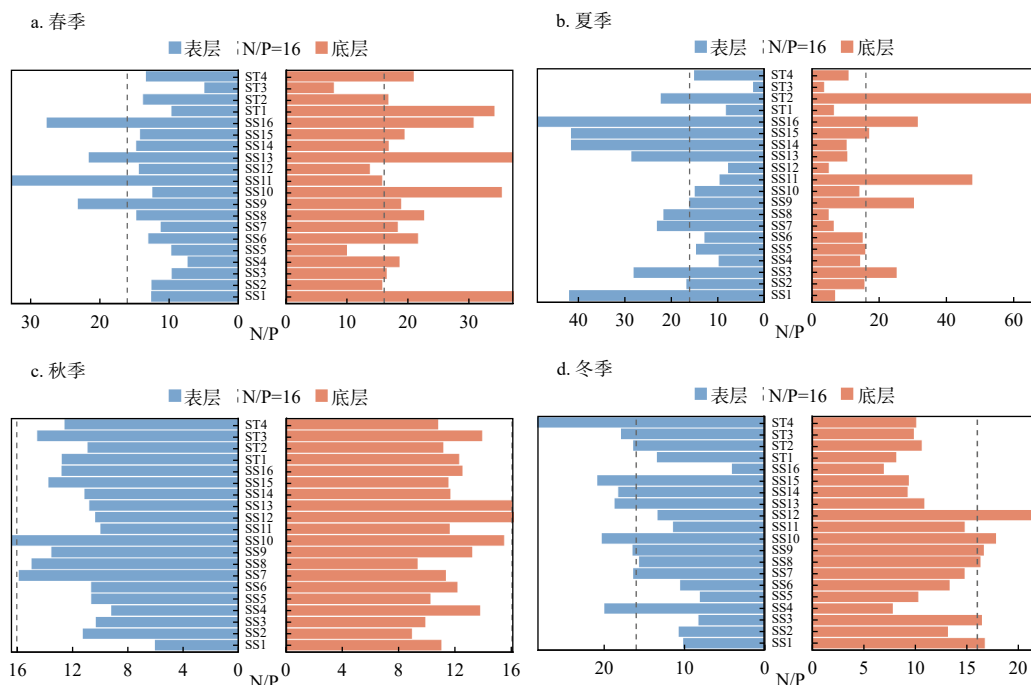


图5 2024—2025年4个季节福宁湾海域 N/P 分布

Fig. 5 Seasonal distribution of N/P in Funing Bay waters (2024-2025)

显差异,并呈现显著的季节变化(图6)。在表层水体中,夏季盐度与TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈显著正相关关系,其中盐度与TN的相关系数为0.57($p<0.05$);而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 与盐度呈显著负相关关系($r=-0.39$, $p<0.05$)。相比之下,底层水体中盐度与营养盐的相关性整体较弱,冬季尤为明显,各营养盐与盐度的相关系数均接近0($p>0.05$),表明盐度对营养盐分布的指示作用有限,水体可能受多种因素共同控制。

从季节变化来看,福宁湾盐度与营养盐的相关性在夏、秋两季显著,在春、冬两季较弱。春季表层盐度与TN呈显著负相关关系($r=-0.39$, $p<0.05$),该结果与三沙湾的相关研究一致^[25];而在夏季则转为显著正相关关系($r=0.57$, $p<0.05$)。这一差异可能与季节性人类活动及水动力条件变化有关。夏季正值贝类养殖高峰期,水产养殖投饵与废水排放可显著增加水体中TN和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的输入负荷;同时,外海高盐水入侵增强,减弱了陆源淡水的稀释作用。上述因素共同作用导致夏季表层盐度与氮营养盐呈显著正相关关系^[27-28]。在夏季底层水体中,盐度与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 呈显著正相关关系($r=0.44$, $p<0.05$),表明盐

度可能通过影响沉积物中磷的释放与吸附过程,从而调控水体中磷的分布。类似现象在莱州湾亦有报道,高盐水入侵可改变沉积物中磷的形态及其吸附过程,进而影响水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度^[29]。此外,秋季正值海带和坛紫菜快速生长阶段,大型藻类对营养盐的吸收作用增强,可能导致部分营养盐由表层向底层转移,从而使盐度与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 相关性表现出一定的滞后效应。

2.4 基于多元指数的水质与富营养化评价

2.4.1 单因子水质指数法

在近岸海域,DIN和DIP作为浮游植物生长的关键营养盐,直接影响海域初级生产力,是富营养化和藻华现象发生的主要驱动因子^[30]。2024—2025年福宁湾4个季节监测结果表明,DIN和DIP污染较为突出(表2)。从季节变化来看,DIN污染指数总体表现为春季最高,夏、秋季次之,冬季相对较低。春季表层DIN平均指数达4.21,所有站位均超过标准限值,这可能与陆源径流增强及养殖活动增加的叠加效应有关;夏季底层DIN平均指数仍达3.46,所有站位均高于标准限值,表明养殖活动带来的外源氮输入具有持续性。DIP污染虽在多数站位超过标

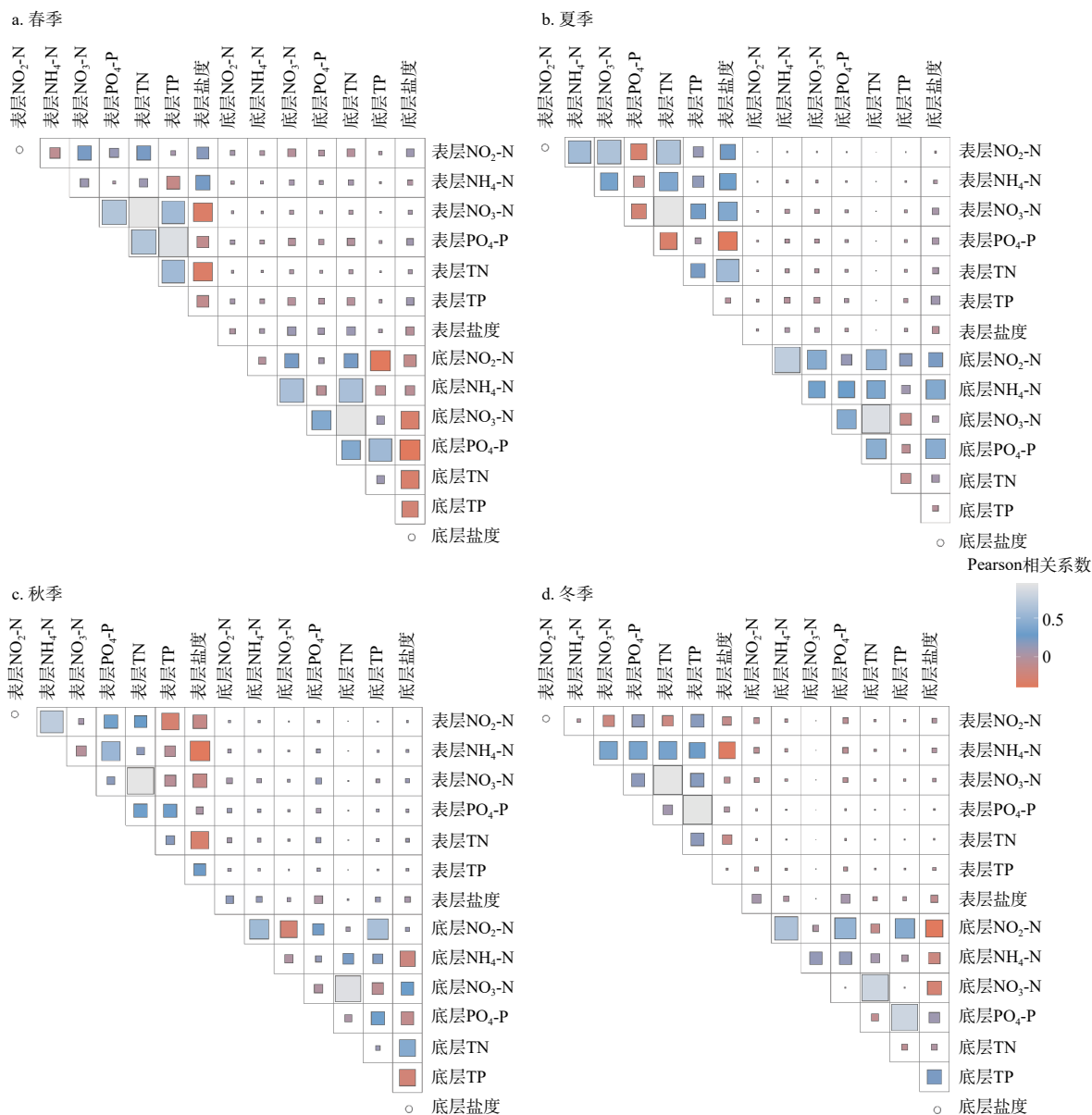


图6 2024—2025年4个季节福宁湾表层与底层主要水质参数的相关性矩阵

Fig. 6 Correlation matrix of major surface and bottom water quality parameters in Funing Bay by season (2024-2025)

准限值,但其污染程度整体低于DIN,反映出福宁湾持续高氮的营养盐特征。

与历史数据相比,福宁湾营养盐污染程度呈现明显上升趋势。刘炜等^[13]和戴红等^[15]基于2002—2004年的数据指出,福宁湾DIN浓度为0.07~0.38 mg/L,虽已表现出富营养化状态,但整体水平仍低于本研究观测值。与邻近海湾相比,罗源湾在2015年枯水季DIN污染指数最大值为2.07,在2009年7月DIP污染指数最大值为2.17^[31-32],均低于本研究观测值,进一步表明

福宁湾氮磷污染程度高于周边海域。单因子指数评价结果表明,福宁湾当前呈现以氮污染突出、磷污染并存的特征,该特征与我国多数近岸海湾的营养盐污染格局^[11,23]相一致。

2.4.2 NQI与EI评价结果分析

营养状态指数(NQI)和富营养化指数(EI)是评价水体营养状态和富营养化程度的常用指标^[10-11]。本研究评估结果显示(表3,图7),福宁湾整体处于轻度至中度富营养化状态,NQI均值为2.56~3.79,EI均值为1.08~5.26。与历史研

表 2 2024—2025 年福宁湾 DIN、DIP 单因子指数(不同水层和季节)

Tab.2 Assessment of single-factor index (DIN, DIP) in Funing Bay (different water layers and seasons) for 2024-2025 survey

季节	水层	DIN			DIP		
		指数范围	平均值	超标站点个数	指数范围	平均值	超标站点个数
春季	表层	2.40 ~ 7.89	4.21	20	2.10 ~ 5.78	3.10	20
	底层	1.95 ~ 6.44	3.59	20	2.04 ~ 4.80	2.99	20
夏季	表层	2.17 ~ 8.90	4.27	20	0.96 ~ 7.12	2.85	19
	底层	1.54 ~ 5.89	3.46	20	0.71 ~ 3.80	1.72	17
秋季	表层	2.38 ~ 5.11	3.70	20	2.25 ~ 4.38	3.29	20
	底层	2.38 ~ 5.11	3.49	20	2.21 ~ 3.56	2.96	20
冬季	表层	1.25 ~ 3.92	2.60	20	0.92 ~ 4.97	2.62	19
	底层	1.25 ~ 3.92	2.60	20	0.93 ~ 8.72	2.17	20

究相比, 2024 年夏季底层 NQI 为 3.79, 高于 2002 年夏季的 3.01^[13], 表明该海域富营养化压力仍然较高, 尤其在养殖高峰期表现更为突出。 EI 评价结果显示, 该海域全年处于富营养化状态: 春季为轻度富营养化(表层 $EI = 1.22$, 底层 $EI = 1.08$); 夏季表层升至中度($EI = 3.71$); 秋冬季整体维持在中度富营养化水平, 其中 EI 全年最大

值为 5.26, 出现在冬季底层。与周边海域相比, 福宁湾富营养化程度低于三沙湾(2020 年春季 $EI = 5.86$, 秋季 $EI = 7.79$), 但高于罗源湾 2012 年同期水平(春季 $EI = 1.1$, 秋季 $EI = 4.0$)^[25-26]。这表明福宁湾虽未达到重度富营养化, 但已呈现全年性中度富营养化的区域特征。

表 3 2024—2025 年福宁湾 4 个季节海水营养状态指数(NQI)与富营养化指数(EI)

Tab.3 Nutrient quality index (NQI) and eutrophication index (EI) of seawater in Funing Bay by season (2024-2025 Survey)

季度	层次	$NQI(\pm SD)$	营养状态(NQI)	$EI(\pm SD)$	营养状态(EI)
春季	底层	2.76 ± 1.27	中营养化	1.08 ± 0.90	轻度富营养化
	表层	2.56 ± 1.30	中营养化	1.22 ± 0.86	轻度富营养化
夏季	底层	3.79 ± 0.98	富营养化	1.18 ± 0.75	轻度富营养化
	表层	2.86 ± 1.05	中营养化	3.71 ± 2.02	中度富营养化
秋季	底层	3.31 ± 0.57	富营养化	4.63 ± 1.90	中度富营养化
	表层	3.58 ± 0.58	富营养化	3.36 ± 1.64	中度富营养化
冬季	底层	3.46 ± 0.66	富营养化	5.26 ± 2.42	中度富营养化
	表层	3.78 ± 0.87	富营养化	4.49 ± 1.36	中度富营养化

对比 NQI 与 EI 的评价结果(表 3), 两种方法在识别富营养化总体趋势上具有一致性, 均显示出内湾高于外湾、底层高于表层的特征。但两者对富营养化的响应程度存在差异: EI 对营养盐的协同积累更为敏感, 尤其在底层及秋冬季表现更为明显。以秋季为例, 底层 EI 为 4.63 ± 1.90 , 高于表层 3.36 ± 1.64 , 同时也高于同期的 NQI (底层为 3.31 ± 0.57 , 表层为 3.58 ± 0.58), 这一差异主要与两种方法的计算方式有关: EI 采用乘积模型, 对 DIN 和 DIP 协同升高具有放大效应; 而 NQI

采用线性加和模型, 更能反映陆源输入和水体混合稀释的综合影响。例如, 夏季表层 EI 为 3.71, 已达到中度富营养化水平, 而同期 NQI 为 2.86, 仍处于中营养化水平。因此, NQI 在表征受外源输入影响的长期营养水平变化方面相对稳定。

2.4.3 WQI 综合评价结果分析

WQI 作为多指标综合评价方法, 通过整合 DO、COD 及 Chl a 等关键参数, 能够全面反映水体的综合质量状况, 适用于受多种因素共同影响的海湾水环境评价^[6-7]。相较于侧重营养盐负荷

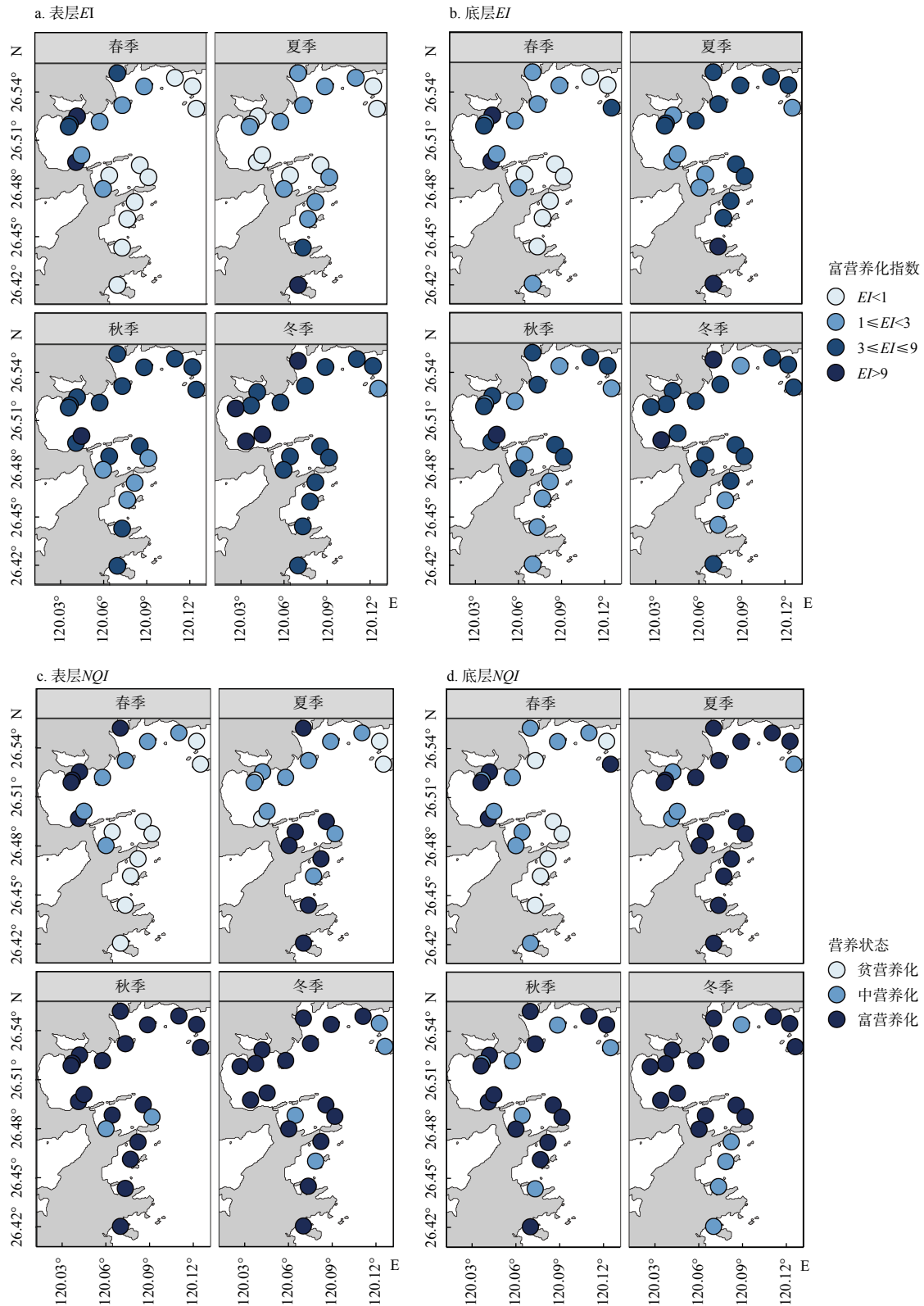


图7 2024—2025年4个季节营养状态质量指数空间分布

Fig. 7 Seasonal spatial distribution of the nutrient status quality index in 2024-2025

的 NQI 与 EI 模型, WQI 更能反映水体的自净能力与生态系统的综合响应, 从而能为水质管理提

供多维度的科学依据。基于 2024—2025 年的监测数据, WQI 评价结果显示福宁湾水质整体维持

在良至优的水平(图 8 和表 4),表明水体仍具有一定的自净能力,水质呈现明显季节性波动,其中春、冬季较好,而夏、秋季有所下降,在各季节与水层中,夏季底层 *WQI* 均值最低,为 76.99。

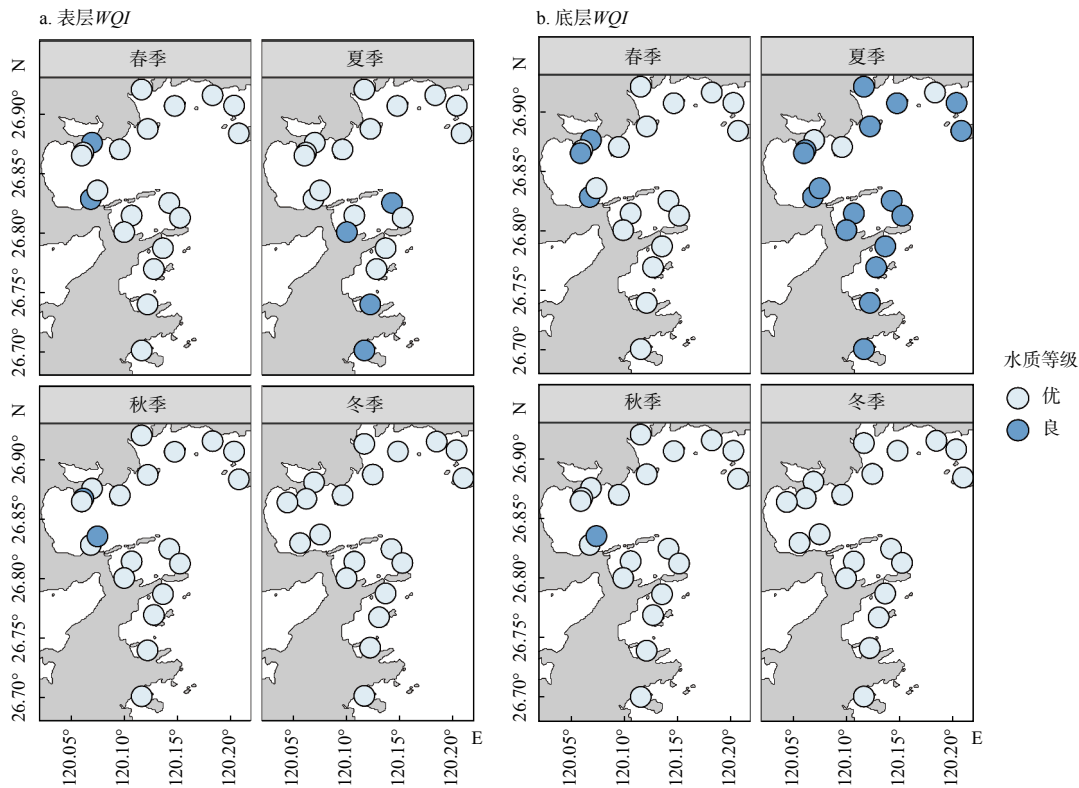


图 8 2024—2025 年 4 个季节水质等级空间分布

Fig. 8 Seasonal spatial distribution of water quality grades in 2024-2025

表 4 2024—2025 年 4 个季节各水层水质指数 (*WQI*) 均值与标准差及营养状态

Tab.4 Mean, standard deviation of water quality index (*WQI*) and trophic status by season and water layer (2024-2025)

季节	水层	<i>WQI</i> (± <i>SD</i>)	营养状态
春季	表层	88.97 ± 5.96	优
	底层	86.97 ± 5.79	优
夏季	表层	83.01 ± 5.34	优
	底层	76.99 ± 3.88	良
秋季	表层	83.66 ± 3.03	优
	底层	84.22 ± 3.59	优
冬季	表层	86.75 ± 2.55	优
	底层	87.09 ± 3.24	优

与历史研究相比,当前福宁湾水质虽未达到贫营养化水平,但 *WQI* 整体呈下降趋势,表明水质存在一定程度的恶化,这可能与持续的养殖活动引起的氮、磷负荷升高以及水体自净能力减

弱有关。在空间分布上,福宁湾表层水体整体优于底层、外湾优于内湾,该特征较为稳定,与乐清湾湾顶区高于湾口区的污染分布特征一致^[11]。值得注意的是,尽管 *NQI* 与 *EI* 的评价结果均显示福宁湾海域在夏、秋、冬季普遍处于富营养化或中度富营养化状态,但是 *WQI* 评价结果显示其整体水质仍维持在良至优的水平。这一差异体现了 *WQI* 模型的综合性:其指标体系(表 1)额外引入了 DO、COD 等关键参数,能更全面地反映水体自净能力。综上所述,尽管福宁湾当前营养盐负荷较高,但水体自净能力在一定程度上缓冲了水质恶化趋势,使其综合水质尚未出现明显恶化。

2.5 综合讨论

本研究通过整合多种水质评价方法,对福宁湾 2024—2025 年水质的时空变化、营养盐结构及富营养化状况进行了系统性评估。结果表明,

福宁湾水质在时间上表现为春、冬季较优和夏、秋季较差的特征;在空间上表现为表层优于底层、外湾优于内湾的特征。不同评价方法所揭示的水质状况存在差异,反映出福宁湾海域水环境的多面性与复杂性。

营养状态与富营养化评价结果显示, NQI 与 EI 方法均表明福宁湾已处于中度富营养化水平,且在空间上表现为内湾和底层指数较高,在时间上表现为夏、秋季指数较高。两种方法在总体变化趋势上具有一致性,但响应机制存在差异: NQI 为多指标线性加和模型,主要受外源营养盐输入总量的影响; EI 为营养盐浓度乘积模型,对营养盐的协同积累及沉积物内源释放过程更为敏感^[10]。综合两者结果表明,福宁湾的富营养化不仅由陆源输入驱动,也可能受沉积物内源释放的显著影响,且在水交换较弱的底层及内湾区域表现更为明显。 $SFPI$ 评价结果进一步表明,氮污染是福宁湾最突出的水质问题,多数站点在多个季节均出现 DIN 超标,且污染较历史水平有

所升高。结合 N/P 分析可知,该海域长期处于磷限制状态($N/P>30$),这种高氮、低磷的营养盐结构可能会增强浮游植物对磷的竞争,从而对藻类群落结构及生态功能产生影响。与上述侧重营养盐的评价方法不同, WQI 通过引入 DO 、 BOD_5 、 COD 等指标,能够综合反映水体自净能力与有机污染水平。结果表明,尽管营养盐负荷较高,福宁湾水体仍具备一定的水质缓冲能力。然而,夏季底层 WQI 显著下降,表明在热分层和耗氧过程加剧的条件下,水体自净能力减弱,水质恶化风险有所增加。

综合来看,福宁湾的水质呈现出高营养盐压力与一定水质自净能力并存的特征,与周边海域相比(表5),其富营养化程度虽低于三沙湾,但高于罗源湾历史水平,且呈现持续加剧趋势。未来管理应重点关注氮污染控制与磷限制调控,并持续开展对夏、秋季底层水体溶解氧与营养盐积累的监测,以降低水质恶化及生态风险进一步发展的可能性。

表5 福宁湾及周边海域水质研究概况

Tab.5 Water quality studies of Funing Bay and surrounding coastal areas

区域	年份	研究方法	富营养化状态
罗源湾 ^[31]	2009	$SPFI$ 、 EI	海湾整体表现为氮限制性富营养化,北部区域富营养化程度相对较高
罗源湾 ^[32]	2015—2019	$SPFI$	富营养化状态由中度污染转为轻度污染,营养水平由接近富营养化逐渐恢复至中度营养状态
罗源湾 ^[26]	2012	$SPFI$ 、 N/P	水质空间分布表现为湾口较好,向内湾逐渐恶化;季节上春季优于秋季,秋季富营养化程度较高;氮限制现象普遍存在
三沙湾 ^[25]	2021	$SPFI$ 、 N/P	夏季氮、磷浓度平均值最高;春季部分站位处于富营养化状态,夏、秋季各站位均表现为富营养化
三沙湾 ^[33]	2020	$SPFI$ 、 EI	整体处于重度富营养化状态,秋季污染最为严重,春季次之,夏季相对较轻
福宁湾 ^[13]	2002—2004	NQI 、 N/P	福宁湾整体为中营养化状态,部分季节表现为富营养化,营养盐结构以磷限制为主
福宁湾 ^[14-15]	2002—2003	N/P 、 EI	福宁湾海域已呈现明显的富营养化状态,营养盐结构表现为磷限制状态

3 结论

(1)福宁湾水质具有明显的时空分异特征:时间上表现为春、冬季优于夏、秋季,空间上表现为表层优于底层、外湾优于内湾。与历史研究相比,该分布格局总体稳定,但近年夏季底层水质恶化程度有所加重,主要表现为底层溶解氧浓度降低及营养盐积累增强,表明季节性水质波动幅度呈增加趋势。

(2)福宁湾营养盐结构长期表现为高氮、低

磷特征, N/P 普遍高于Redfield比值,水体处于磷限制状态。与历史数据相比,氮污染负荷有所增加,营养盐结构失衡程度加剧。 NQI 与 EI 评价结果一致表明福宁湾处于中度富营养化水平,其中 NQI 主要反映外源输入对整体营养水平的影响, EI 对底层沉积物内源释放过程更为敏感。

(3)多方法评价结果表明,福宁湾水环境具有一定复杂性。单因子指数评价结果显示氮污染具有全湾性和常年性特征, N/P 评价结果表明磷限制持续存在,两者共同促进富营养化发展。

NQI 与 *EI* 均反映出富营养化特征, 而 *WQI* 评价结果显示该湾综合水质在多数时段仍处于良或优等级, 说明水体自净能力在一定程度上能够缓冲营养盐累积带来的影响。但夏季底层 *WQI* 下降, 表明该缓冲能力在特定季节存在减弱趋势。

参考文献:

- [1] Zhu B, Bai Y, Zhang Z, et al. Satellite remote sensing of water quality variation in a semi-enclosed bay (Yueqing Bay) under strong anthropogenic impact[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 550.
- [2] 林晓娟, 高 姍, 仇天宇, 等. 海水富营养化评价方法的研究进展与应用现状[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(4): 373-384.
- [3] 胡序朋, 邵君波, 唐静亮, 等. 近岸海域富营养化评价方法的研究进展和比较[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(1): 35-43.
- [4] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005(03): 321-325.
- [5] 王 维, 纪 枚, 苏亚楠. 水质评价研究进展及水质评价方法综述[J]. *科技情报开发与经济*, 2012, 22(13): 129-131.
- [6] Uddin M G, Nash S, Olbert A I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107218.
- [7] Syeed M M M, Hossain M S, Karim M R, et al. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2023, 18: 100247.
- [8] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. *海洋环境科学*, 1983(02): 41-54.
- [9] 陈于望. 厦门港海域营养状况的分析[J]. *海洋环境科学*, 1987(03): 14-19.
- [10] Wang H, Wan X, Wang S, et al. Assessment of eutrophication characteristics and evaluation of the first-generation eutrophication model in the nearshore waters of Shantou City[J]. *Sustainability*, 2023, 15(20): 14866.
- [11] 姚开雪, 印 瑞, 王 洋, 等. 乐清湾海域营养盐时空分布特征及其富营养化评价[J]. *海洋开发与管理*, 2024, 41(09): 121-132.
- [12] 李保石, 厉丞烜, 金玉休, 等. 广海湾海域营养盐时空分布及富营养化评价[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(05): 657-663.
- [13] 刘 炜, 李奶姜, 李 婕. 福宁湾水质状况及其水体富营养化的初步探讨[J]. *海洋通报*, 2008(01): 111-115.
- [14] 戴 红, 陈国斌, 李伏庆. 福建福宁湾无机氮含量的变化特征及其对浮游植物的影响[J]. *台湾海峡*, 2006(01): 59-67.
- [15] 戴 红, 张文斌, 陈国斌. 福宁湾活性磷酸盐和无机氮的时空变化特征[J]. *海洋环境科学*, 2006(01): 71-75, 93.
- [16] 伊兆哈, 胡日军, 李 毅, 等. 福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(06): 53-66.
- [17] Sun J, Peng L, Zhu X, et al. The effects of changes in the coastline and water depth on tidal prism and water exchange of the Laizhou Bay, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1459482.
- [18] David C P C, Sta. Maria Y Y, Siringan F P, et al. Coastal pollution due to increasing nutrient flux in aquaculture sites[J]. *Environmental geology*, 2009, 58(2): 447-454.
- [19] GB/T 12763.2—2007 海洋调查规范 第2部分: 海洋水文观测[S].
- [20] GB 17378.4—2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S].
- [21] GB 3097—1997 海水水质标准[S].
- [22] Wu L, Zhang Y, Wang Z, et al. Method for screening water physicochemical parameters to calculate water quality index based on these parameters' correlation with water microbiota[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16697.
- [23] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. *台湾海峡*, 1998(01): 64-70.
- [24] Redfield A C. The influence of organisms on the composition of seawater[J]. *The sea*, 1963: 26-77.
- [25] 黄亚玲, 李 悦, 陈志平, 等. 三沙湾营养盐时空分布特征及其潜在影响因素识别[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(03): 440-448.
- [26] 王继纲, 邝伟明, 霍云龙, 等. 2012年春秋季罗源湾表层海水水质状况及富营养化评价[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(02): 247-253.
- [27] Qi Z H, Shi R J, Yu Z H, et al. Nutrient release from fish cage aquaculture and mitigation strategies in Daya Bay, southern China[J]. 2019, 146: 399-407.
- [28] Chen C, Lao Q, Zhou X, et al. Changes in hydrodynamics and nutrient load of the coastal bay induced by Typhoon Talim (2023)[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1383528.
- [29] Zhang H, Xin M, Lin C, et al. Phosphorus distribution in the water and sediment of Laizhou Bay and sediment phosphorus release potential[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 846: 157483.
- [30] Reed M L, Pinckney J L, Keppler C J, et al. The influence of nitrogen and phosphorus on phytoplankton growth and assemblage composition in four coastal, southeastern USA systems[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 177: 71-82.
- [31] 张 超, 马启敏. 罗源湾水质评价与富营养化研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(S1): 398-402.
- [32] 吴如林, 谢蓉蓉, 张梦露. 清海退养前后近海水域水质变化分析研究——以福建省罗源湾为例[J]. *福建轻纺*, 2021(01): 15-19, 24.
- [33] 曹诺彤, 李青生, 蒋金龙. 三沙湾氮磷时空变化及其影响因素分析[J]. *海洋开发与管理*, 2024, 41(09): 79-88.