

《近岸海域富营养化评价技术规范（征求意见稿）》

编制说明

标准编制组

二〇二四年六月

项目名称：《近岸海域富营养化评价技术规范》

编制单位：中国环境科学研究院、浙江省生态环境科学设计研究院、上海市环境科学研究院。

编制组主要成员：安立会、姚力芬、杨占红、雷坤、谭映宇、王彪

编制组联系人：姚力芬

目录

1 编制的必要性	1
2 任务来源.....	1
3 编制原则和编制工作流程	2
3.1 制定原则.....	2
3.2 编制工作过程.....	2
4 标准的框架结构.....	2
5 标准的适用范围.....	3
6 确定标准主要内容的依据	3
6.1 近岸海域生态分区.....	3
6.2 富营养化评价指标的构建.....	4
7 标准实施的环境效益、社会效益与经济技术分析.....	13
8 与其它现行标准和法规的关系	13

1 编制的必要性

近海富营养化是指由于人类活动导致的海水中营养盐含量增加,进而引起浮游生物过度增殖,造成水体透明度降低、溶解氧减少、生物多样性下降、赤潮频发等一系列生态环境问题的现象。近海富营养化已成为全球性的海洋环境问题,严重威胁了海洋生态安全和人类社会经济发展。

为了有效地监测、评价和管理近海富营养化,需要建立科学合理的评价标准和方法。目前,我国对近海富营养化的评价主要采用单因子法、富营养化指数法、水质指数法和营养状态质量法等国内常用的评价方法,这些方法虽然简单易行,但也存在一些不足,如忽略了近海富营养化的复杂性和多维性,缺乏对富营养化症状和生态效应的考虑,不能反映不同海域的特征和差异等。

为了克服现有评价方法的局限性,提高近海富营养化评价的科学性和实用性,本标准参考了国际上先进的第二代近海富营养化评价方法,如国外较知名的评价体系主要有巴黎-奥斯陆(OSPAR)委员会、美国河口富营养化评价法(NEEA-ASSETS)和赫尔辛基委员会(HELCOM)综合评价法等第二代评价方法,综合考虑了近海富营养化的压力因子、状态因子和响应因子,建立了基于多层次指标体系和多维度评价模型的近海富营养化评价标准。

编制本标准的目的是为了提供一个统一、规范、适用于我国不同类型近海水域的富营养化评价标准,为近海富营养化监测、评价和管理提供技术支持和方法指导。编制本标准的意义是为了促进我国近海环境保护和资源利用的协调发展,提高我国在国际上对近海富营养化问题的认识和参与度,为全球近海富营养化治理做出贡献。编制本标准的预期效果是为了能够有效地反映我国不同近海水域的富营养化程度和趋势,为制定相应的防治措施和政策提供依据,为评估防治效果和成本效益提供参考。编制本标准期望解决的问题是为了能够弥补现有评价方法在理论和实践上的不足,提高近海富营养化评价的科学性和实用性,为近海富营养化的监测、评价和管理提供一个更加完善和适用的标准和方法。

2 任务来源

中国环境科学研究院、浙江省生态环境科学设计研究院和上海市环境科学研究院共同承担国家重点研发计划-近海分区营养物基准与富营养化评价方法(2021YFC3101703),在项目工作基础上,编制《近岸海域富营养化评价技术规范》。

3 编制原则和编制工作流程

3.1 制定原则

本标准制订工作遵循以下原则：

- (1) 科学合理原则：贯彻习近平生态文明思想，坚持问题导向、目标导向、结果导向，注重相关措施的合规、科学、合理性；
- (2) 因地制宜原则：借鉴国外经验，适应我国国情，结合我国近岸海域实际监测情况；
- (3) 注重实效原则：研究目前近岸海域富营养化评价中存在的 key 问题，梳理现有标准与法规政策体系，做好相互衔接，力争实现协同高效。

3.2 编制工作过程

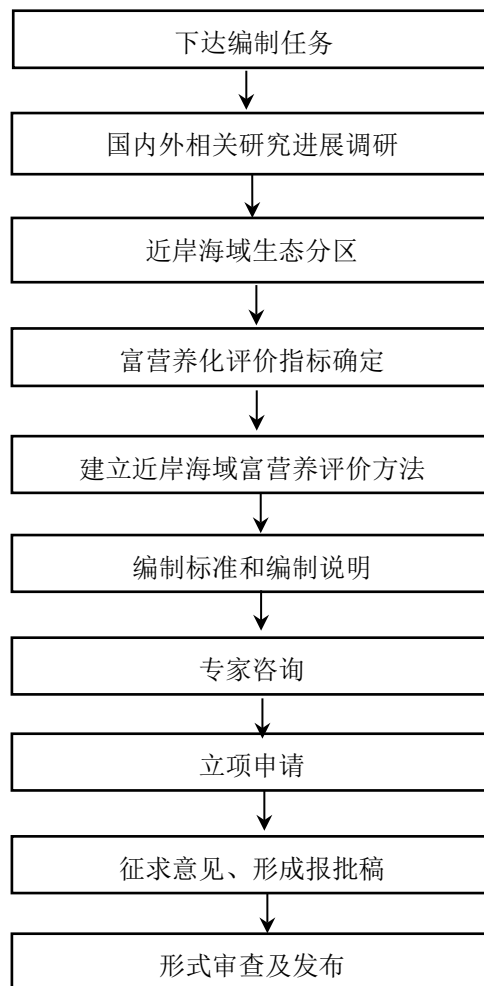


图 1 编制工作过程图

4 标准的框架结构

本标准的正文由四部分组成：

第一部分：本标准的适用范围

第二部分：本标准引用的规范性文件

第三部分：本标准中术语和定义

第四部分：本标准的核心及实质性内容。包括评价区域划分、评价流程和近海富营养化评价具体内容。

5 标准的适用范围

本文件适用于河口、海湾及近岸开阔水域等近岸海域的富营养化状况评价。

6 确定标准主要内容的依据

6.1 近岸海域生态分区

6.1.1 分区原则

近岸海域富营养化分区主要遵循如下原则：

(1) 相对一致性原则：在划分区域单元时，必须注意内部特征的一致性，但一致性的特征是相对的；

(2) 区域共轭性原则：依据空间自相关和共轭性原理，所划分的区域单元必须是完整的个体，不能存在彼此分离的部分，同时要适用于行政管理；

(3) 综合性与主导因素原则：要关注海域的综合特征，并重点考虑主导性的因素。

6.1.2 分区指标

选择水深、水温、叶绿素、营养盐、盐度等指标作为三级分区的指标

6.1.3 分区方法

采用自上而下，空间聚类算法和多变量空间数据叠加等技术方法。

6.1.4 分区结果

将全国近岸海域进行一、二、三级分区，一级分区划分为黄海、渤海、东海、台湾海峡区、南海共 5 个区域；二级分区是在一级分区的基础上，按照行政区划等指标进一步分区，详见表 1；三级分区从沿海向外海划分为 4 个区，分别为河口冲淡水海域、河口外近岸海域、非河口近岸海域和非河口外浅海海域。

6.2 富营养化评价指标的构建

富营养化是由氮、磷等营养物质含量过多所引起的水质污染现象。海水中的营养物质连同某些有机物质的存在形式和浓度直接导致海水富营养化,长期以来一直是藻类生态学家和海洋环境学家关注的焦点,其影响浮游植物的生长、繁殖和代谢,是赤潮形成和发展的物质基础。近岸海水富营养化的影响非常深远,可导致鱼类死亡、贝类养殖受损、海底植被减少、底栖动物窒息。这些影响造成巨大的经济损失和社会问题,有些损失甚至难以估量。因此进行近岸海域富营养化评价对于生态系统健康评估、水质安全和管理部门政策制定等方面都至关重要,评价指标的确定更是富营养化评价体系中的重要一环。

6.2.1 富营养化评价方法及评价指标研究进展

(1) 第一代海水富营养化评价法

第一代富营养化评价的概念起源于陆地湖沼学研究,并被早期的海洋学家引用到近海富营养化问题的研究中,这一概念认为,当营养盐输入增大或减小时,水体生态系统会直接进行线性的响应和表达,导致浮游生物生物量的增减,因此营养盐的多寡能直接表征系统的富营养化状态。根据第一代富营养化概念模型,第一代富营养化评价方法主要强调营养盐在富营养化状态中的作用,最早出现的是单因子指数法,后来又采用多因子的组合来反映富营养化程度,如富营养化指数法(EI),营养状态质量法(NQI)。另外,还有根据近海系统模糊性和不确定性而提出的模糊数学法和神经网络等方法。其主要评价指标如表1。

表1 第一代海水富营养化评价方法评价指标

序号	方法	评价指标
1	富营养化指数法(EI)	化学需氧量(COD)
		溶解无机氮(DIN)
		溶解无机磷(DIP)
2	氮磷比值法	溶解无机氮(DIN)
		活性磷酸盐(DIP)
3	营养状态质量法(NQI)	化学需氧量(COD)
		溶解无机氮(DIN)
		溶解无机磷(DIP)
4	水质指数法	叶绿素a(Chl-a)
		化学需氧量(COD)

		溶解无机氮 (DIN)
		溶解无机磷 (DIP)
		溶解氧 (DO)
5	营养盐正态分布法	溶解无机氮 (DIN)
		溶解无机磷 (DIP)
6	溶解氧饱和参数法	溶解氧 (DO)
		多以如下指标为主:
		化学需氧量 (COD)
7	神经网络法	溶解无机氮 (DIN)
	模糊数学法	溶解无机磷 (DIP)
		叶绿素 a (Chl-a)
		溶解氧 (DO)

(2) 第二代海水富营养化评价方法

以营养盐为基础的第一代富营养化评价方法，在某些情况下并不能很好地反映出富营养化的程度，国际上很多海洋研究机构开始尝试建立多参数的第二代海水富营养化评价模。海水第二代富营养化评价方法是在第二代海水富营养化模型的基础上建立的，与第一代的主要区别在于第二代海水富营养化评价方法强调富营养化的过程而不仅仅是营养盐的输，主要包括综合评价法 (OSPAR)、河口富营养化评价法 (NEEA-ASSETS) 和波罗的海行动计划 (HELCOM) 等。其主要评价指标如表 2。

表 2 第二代海水富营养化评价方法评价指标

评价方法	指示因子	评价指标
		河流等陆源 TN 和 TP 排海通量
	营养盐富集因子	(因)
		DIN 和 DIP 浓度和比值 (果)
综合评价法		Chl-a 浓度
	直接效应	浮游植物优势种
		大型藻类等
	间接效应	海水缺氧程度 (DO)
		有机碳/有机物浓度变化

		底栖动物（长期变化） 鱼类（死鱼事件等）
河口富营养化评价法	压力因子	陆源 DIN 排放； DIN 浓度 Chl-a
	状态-初级症状	大型藻类 附生植物 缺氧状况
	状态-次级症状	水下植被 有害赤潮 有毒赤潮
	响应趋势	稀释能力（水动力敏感度） 冲刷能力（水动力敏感度） 陆源 DIN 排放
	营养盐富集因子	DIN 浓度 DIP 浓度 Chl-a
HELCOM 方法	直接效应	透明度 缺氧情况
	间接效应	底栖无脊椎动物

6.2.2 我国现行海水水质标准

根据我国现行的海水水质标准（GB3097-1997），其中富营养化评价的相关参数如表 3 所示。这些指标都是常规监测指，有长时间序列的历史监测数据，且有统一的分析标准。因此在后续指标筛选中会参考此标准。

表 3 部分海水指标-摘自 GB3097-1997

序号	项目	分析方法	引用标准
1	悬浮物质	重量法	HY 003.4-91
2	大肠菌群	(1) 发酵法	HY 003.9-91
		(2) 滤膜法	

3	类大肠菌群	(1) 发酵法 (2) 滤膜法	HY 003. 9-91
4	水温	(1) 水温的铅直连续观测 (2) 标准层水温观测	GB12763. 2-91
5	pH	(1) pH 计电测法 (2) pH 比色法	GB12763. 4-91 HY 003. 4-91
6	溶解氧	碘量滴定法	GB12763. 4-91
7	化学需氧量	碱性高锰酸钾法	HY 003. 4-91
8	生化需氧量	五日培养法	HY 003. 4-91
9	无机氮 (以 N 计)	氮: (1) 靛酚蓝法	GB12763. 4-91
		(2) 次溴酸钠氧化法	GB 12763. 4-91
		亚硝酸盐: 重氮-偶氮法	GB12763. 4-91
		硝酸盐: (1) 锌-镉还原法	GB12763. 4-91
10	非离子氨 (以 N 计)	按 GB3097-1997 附录 B 中公式进行换算	
11	活性磷酸盐 (以 P 计)	(1) 抗坏血酸还原的磷钼兰法	GB12763. 491
		(2) 磷钼兰萃取分光光度法	HY 003. 4-91

6.2.3 富营养化评价指标筛选原则

富营养化评价指标的筛选，遵循以下四个原则：①与富营养化过程具有相关性，理论上应包括能够解释富营养化原因和症状的指标，可以反映出富营养化的过程；②所选指标应具有适应性，在借鉴国外成熟方法的同时，与我国具体的区域特征相结合；③数据的可获得性，在我国当前的监测体系下，能够获得长时间序列的监测数据；④指标的人为可控性，进行富营养化评价的目的不仅是

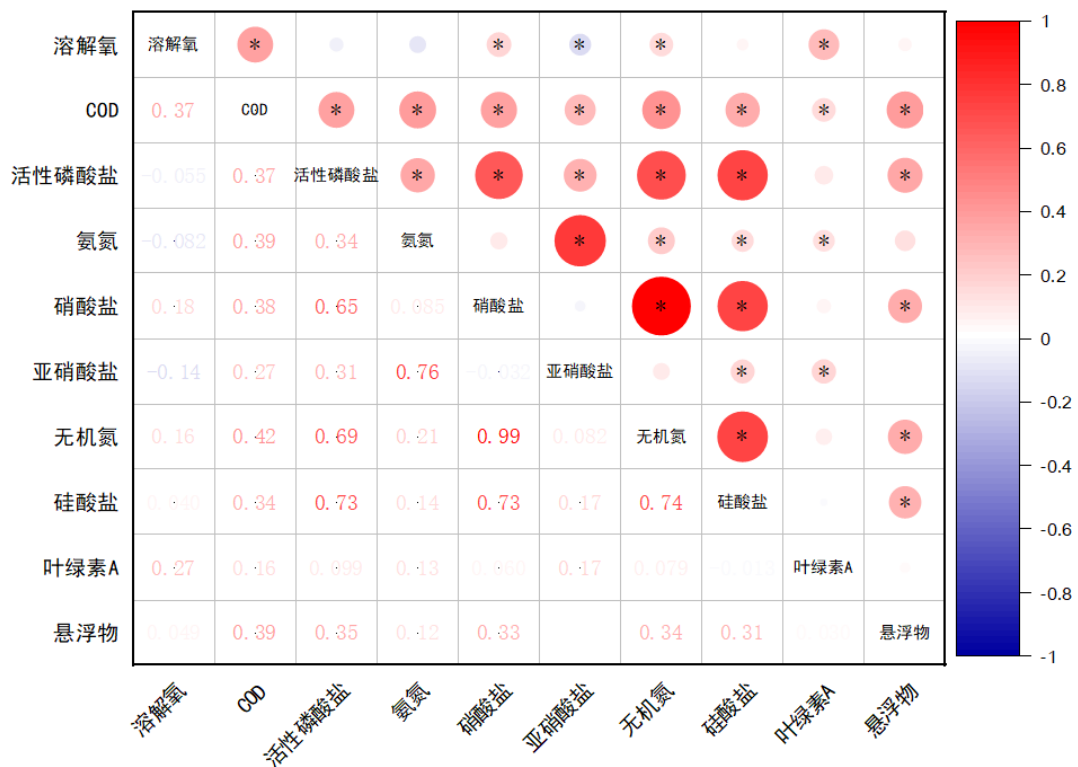
6.2.4 富营养化评价指标筛选

(1) 相关性分析和主成分分析

相关性分析是一种用来确定两个或多个变量之间关系的统计方法。在统计学和数据分析中，相关性分析通常用来衡量两个或多个变量之间的关联程度。这种关联可以是正相关（即一个变量增加，另一个变量也增加）、负相关（一个变量增加，另一个变量减少）或者无关（两个变量之间没有明显的关系）的。在相关性分析中，最常用的指标是相关系数，它可以衡量两个变量之间的线性关系强度。常见的相关系数包括皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient）和斯皮尔曼相关系数（Spearman rank correlation coefficient）。皮尔逊相关系数用于衡量两个连续变量之间的线性关系，而斯皮尔曼相关系数则用于衡量两个变量之间的等级关系，即这两个变量的取值是有序的。相关性分析在各个领域都有广泛的应用，例如经济学、生物学、医学、社会科学等。研究变量之间的关系可以更好地理解数据，制定决策等。

主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）是一种常用的降维技术，用于将多个相关性较高的变量转换为少数几个无关的主成分，以便更好地理解数据的结构和减少数据的维度。在指标筛选中，可以使用主成分分析来尝试降低数据的维度，以便更好地理解水质指标之间的关系。在主成分分析中，首先计算出原始数据的协方差矩阵，然后求解该矩阵的特征值和特征向量。特征向量构成了新的主成分，而特征值表示了每个主成分的解释方差。通常，选择前几个特征值较大的主成分，这些主成分能够解释大部分数据的方差，从而实现降维。

为了最大程度筛选出可用于富营养化评价的全部指标，选取 2010-2020 年长江口-杭州湾及浙江沿岸的历史数据，包括无机氮（DIN）、活性磷酸盐（SPR）、叶绿素 a（Chla）和溶解氧（DO）等 10 个水质参数。从各水质监测指标的相关性系数矩阵和显著性检验结果得出，各监测指标之间存在显著相关性（图 2）。通过主成分分析，得出指标间主成分特征值、方差百分比以及各成分累积贡献率（表 4）。根据主成分分析的基本要求，发现前三个主成分的特征值分别为 3.921、1.817、1.406，均大于 1，且累积贡献率达到了 71.43%，所以提取三个主成分，从而达到数据降维的目的。为了对各主成分相关指标进行分析，将每个主成分与各指标相关系数进行旋转，得出旋转后的成分与原始指标变量的因子载荷矩阵（表 5）。



注： * $p < 0.05$ ，相关性显著。

图 2 各水质监测指标的相关性系数和显著性检验结果

表 4 特征值及主成分贡献率与累积贡献率

主成分	特征值	方差百分比	累计贡献率 (%)
1	3.921	39.210	39.21
2	1.817	18.168	57.38
3	1.406	14.056	71.43
4	0.921	9.212	80.65
5	0.752	7.519	88.16
6	0.408	4.084	92.25
7	0.358	3.584	95.83
8	0.245	2.452	98.28
9	0.172	1.715	100.00
10	0.000	0.000	100.00

表 5 旋转后的成分矩阵

指标	PC1	PC2	PC3
溶解氧	0.0854	-0.1545	0.7055
COD	0.3170	0.1456	0.3690
活性磷酸盐	0.4238	0.0299	-0.2041
氨氮	0.2158	0.6027	-0.0334
硝酸盐	0.4337	-0.2904	-0.0444
亚硝酸盐	0.1682	0.6407	-0.0839
无机氮	0.4549	-0.1993	-0.0500
硅酸盐	0.4159	-0.1444	-0.2019
叶绿素 a	0.0809	0.1700	0.5173
悬浮物	0.2514	-0.0814	0.0584

通过主成分分析和相关性分析，得到溶解氧（DO）、活性磷酸盐（SRP）、氨氮（NH₄）、硝酸盐（NO₃）、亚硝酸盐（NO₂）、无机氮（DIN）、硅酸盐（SiO₃）和叶绿素 a（Chl-a）共 8 个指标。

DIN 和 SRP 是近岸海域的常规水质监测指标，同样其可直接反映水体中的营养状况，故选取其作为富营养化评价指标。其中 DIN 中通常包含硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮，为避免指标冗余故只选择 DIN。硅酸盐不是常规监测指标，且硅酸盐中硅元素通常来源于自然界，受人类活动进入河口的硅酸盐通常含量较少，故不选择硅酸盐。至于具体的营养盐指标，有采用无机氮、无机磷的，也有采用总氮、总磷的。从目前国际上的研究趋势看，人们更倾向于采用总氮、总磷来衡量某一海域的营养盐状况，因为氮、磷不同形态之间的相互转化对于维持浮游植物生长十分重要，故将总氮、总磷、无机氮和活性磷酸盐作为压力指标。

叶绿素 a 是植物光合作用的光捕获和传递的关键色素，是衡量水体中叶绿体植物生物量的直接指标。叶绿素 a 的浓度与浮游植物生物量之间存在着良好的相关性，因此可以作为评价水体富营养化程度的重要指标。相比于浮游植物细胞丰度，叶绿素 a 的浓度在水体中更稳定，更容易测量和监测。叶绿素 a 的浓度虽然能反映叶绿体植物的生物量，但对于其他类型的浮游生物（如蓝细菌）则无法提供信息，因此可能无法全面评估水体的生态系统状况。浮游植物细胞丰度直接反映了水体中浮游植物的数量，是生物量的一个指标。它可以提供对浮

游植物生态系统的直接评估。其丰度的增加可能导致富营养化问题，如藻华爆发等。综合来看，考虑选取叶绿素 a 浓度和浮游植物细胞丰度均作为富营养化评价的初级状态指标。

溶解氧 (DO) 是水体中水生生物生存和繁殖的关键因素之一。水中的鱼类、无脊椎动物和其他水生生物都需要足够的溶解氧来维持其生命活动。因此，溶解氧浓度的变化可以反映水体生态系统的健康状况。富营养化通常导致水体中生物过度生长，尤其是藻类，藻类的呼吸作用消耗大量的溶解氧。同时海水表层大量的浮游植物衰亡后会沉降到水底，腐败过程中仍会消耗水体中的溶解氧，在一定条件下可发展为低氧区。因此溶解氧不仅是生态健康的重要指标，同时也是水体营养状况的预警指标，考虑将近岸海域底层溶解氧作为富营养化评价的次级状态指标。

除上述之外，大型藻类的爆发和有害藻华事件也是典型的严重富营养化症状，因此考虑将大型藻类的爆发和有害藻华事件纳入富营养化评价指标之一。

由于富营养化评价并非实时评价，即当公众或环境管理者看到评价结果时，实际上是去年甚至几年以前的富营养化状况，而不是当前的富营养化状况。因此，应当加入未来变化预期这一评价因子，进一步反映富营养化的动态变化状况，以便于环境管理者决策。叶绿素 a 的浓度最能直接反映水体中富营养化状况，这里本方法选用近三年叶绿素 a 的趋势变化作为响应指标，以判断研究区域富营养化状况是否改善。

(3) 评价指标确定

根据压力-状态-响应模型，我们将上述指标进行了划分（表 6）。

表 6 近岸海域富营养化评价指标

指标	类别	评价指标	备注
压力指标	营养盐压力	总氮浓度 (TN) / 溶解性无机氮 (DIN)	
		总氮浓度 (TP) / 活性磷酸盐 (SRP)	
状态指标	初级状态	叶绿素 a	---
		浮游植物细胞总丰度	
	次级状态	底层溶解氧 DO	---
大型藻类/有害藻华事件		---	
响应指标	未来变化预期	未来叶绿素 a 年变化率	

6.2.5 小结

近海海域富营养化评价如果仅停留在营养盐变化的基础上,将无法满足科学研究和海域管理的要求。充分利用已知数据所包含的各种信息反应富营养化的成因,表现出由富营养化引起的一系列症状,突破以往单纯依靠营养盐评价海洋富营养化的常规做法。并结合数据可获得性、和指标的人为可控性等原则,最终建立的综合评价模型,包含压力指标(TN 和 TP)、初级响应指标(Chl-a 和浮游植物细胞丰度)和次级响应指标(DO 和赤潮/大型藻事件),该评价指标的确立对于评价近岸海域的环境质量、研究赤潮灾害、控制环境污染和保护海洋生态环境等都具有重要意义。

6.3 富营养化评价指标的权重

建立近岸海城富营养化评价指标体系后,分析各指标间的隶属关系及赋予其对应的权重值,本研究选用在海洋生态系统评价中应用相对成熟的层次分析法,利用层次分析法进行系统分析时,应把问题层次化、条理化,并根据其相互关系按不同层次组合,形成层次模型,如表 7 所示 A 层为目标层、B 层为准则层、C 层为方案层,本文采用层次分析法对三大类指标进行集合,给予次级响应指标最高权重,初级响应指标次之,压力因子最低的权重。体现了以富营养化症状为核心的评价理念。

表 7 近岸海域富营养化评价指标体系

目标层 A	准则层 B	方案层 C
近岸海域富营养化评价指标体系 A	准则层 B1 压力指标	方案层 C1
	准则层 B2 状态指标	方案层 C2 初级状态指标
		准则层 C3 次级状态指标
	准则层 B3 响应指标	准则层 C4 响应指标

对指标权重进行合理性检验,ABC 三个层次的 CR 值都小于 0.1,通过一致性检验。近岸海域富营养化评价指标权重见表 8-表 9。

表 8 A-B 判断矩阵及权系数结果

A	B1	B2	B3	权重系数	一致性检验
B1	1	1/3	3	0.2970	$\lambda_{max} = 3.0092; CI = 0.0046$ $RI = 0.58; CR = 0.007 < 0.1; 通过$
B2	3	1	5	0.5396	
B3	1/3	1/5	1	0.1634	

表 9 B2-C 近岸海域富营养化评价指标组合权重值

目标层 A	准则层 B	方案层 C	权重值
近岸海域富营养化评价指标体系 A	压力指标 B1 0.2970	压力指标 C1 0.2970	0.2970
	状态指标 B2 0.5396	初级状态指标 C2 0.5000	0.2698
		次级状态指标 C3 0.5000	0.2698
	响应指标 B3 0.1634	响应指标 C4 0.1634	0.1634

7 标准实施的环境效益、社会效益与经济技术分析

建立基于生态分区的近岸海域富营养化评价方法具有多重效益。在环境方面，这种方法有助于保护和恢复海洋生态系统，识别并解决富营养化等问题，促进资源的可持续利用，减少污染源和废物排放，从而改善海洋环境质量。社会方面，此方法可提高公众对近岸海域生态状况的认知，为决策者提供科学依据，支持更有效的管理政策，同时也有助于相关产业的稳定发展，提升当地居民的生活质量。这些效益综合起来，有助于维护生态平衡，促进可持续发展，以及增强社会环保意识。

8 与其它现行标准和法规的关系

我国于 2005 年发布了中华人民共和国海洋行业标准《近岸海洋生态健康评价指南》，该指南中包括了河口和海湾生态系统健康评价方法。该评价方法包括五类要素：水环境、沉积环境、栖息地、生物残毒和生物。该评价方法在指标分类和选择以及等级划分上参考了美国

近岸海域状况综合评价方法,在五个指标权重的分配上则接近于近岸海域生态状况评价综合方法,强调了生物的重要性。

2020年,生态环境部发布了《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442-2020),代替了《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442-2008),其对富营养化评价采用富营养化指数法,参数少,公式简单,未考虑不同指标的贡献,未体现不同区域的差异性。2023年生态环境部发布了《海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范》(HJ 1300),该标准正文中的富营养化评价方法采用 HJ 442 的富营养化指数法,并在附录 A 以资料性附录给出了另外的富营养化评价方法。本标准与 HJ 1300 的附录相比,细化了分区,并在分区的基础上,完善评价方法,阈值以不同分区的基准为基础,并增加总氮总磷作为压力指标、营养盐和叶绿素 a 的变化趋势作为响应指标,使评价方法更加体现区域差异性,能够更可持续的支撑近岸海域富营养化评价。