DOI: 10.5846/stxb201806071285
范海梅,蒋晓山,纪焕红,刘鹏霞,胡茂桂,秦玉涛.长江口及其邻近海域生态环境综合评价.生态学报,2019,39(13): - .
Fan H M, Jiang X S, Ji H H, Liu P X, Hu M G, Qin Y T.Integrated evaluation of the marine ecological environment in the Yangtze River Estuary and its adjacent area.Acta Ecologica Sinica,2019,39(13): - .

长江口及其邻近海域生态环境综合评价

范海梅[1],蒋晓山[1,*],纪焕红[1],刘鹏霞[1],胡茂桂[2],秦玉涛[1]

1 国家海洋局东海环境监测中心,上海 201206

2 中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101

摘要:基于 1984—2015 年监测数据,给出长江口及其邻近海域无机氮和活性磷酸盐长时间序列的变化趋势,确定了营养盐的基准年是 1987 年,基准值分别是 0.0705 mg/L 和 0.000751 mg/L。结合频数分析方法,无机氮的分区阈值为 0.339 mg/L 和 1.15 mg/L,活性磷酸盐的分区阈值为 0.0289 mg/L 和 0.0530 mg/L,研究区域可划分为三大分区:口内区、过渡区和口外区;结合生态红线、污染源等具有开发管理属性的分布,最终将研究区域分为 8 个评价单元。提出了水质环境、沉积物环境、生物生态三类三级评价指标体系,建立了海洋生态环境综合评价方法。水质环境的区域分布与生物生态相似:口内区域较差,口外区域向海逐渐趋好;沉积物环境特征:南支、北支和北港的沉积物质量略好于口外区域,口外区域好于南北槽分区和杭州湾北部。生态环境综合状况由差向好的区域变化为:Ⅳ区<Ⅴ区<Ⅲ区<Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅵ区<Ⅷ区<Ⅶ区;随时间有向好趋势。

关键词:长江口及其邻近海域;综合分区;指标体系方法;海洋生态环境;综合评价

Integrated evaluation of the marine ecological environment in the Yangtze River Estuary and its adjacent area

FAN Haimei[1], JIANG Xiaoshan[1,*], JI Huanhong[1], LIU Pengxia[1], HU Maogui[2], QIN Yutao[1]

1 *East China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Shanghai*, 201206 *China*

2 *State Key Laboratory of Resources & Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences & Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100101 *China*

Abstract: Based on monitoring data from 1984 to 2015, we report a trend analysis of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphate (PO4-P) in the Yangtze River Estuary and its adjacent area; the reference year of nutrients was determined to be 1987, and recommended reference values were 0.0705 and 0.000751 mg/L for DIN and PO4-P, respectively. Then, frequency analyses were combined to produce the partition thresholds of 0.339 and 1.15 mg/L for DIN, and those of 0.0289 and 0.0530 mg/L for PO4-P. Thus, the study area could be partitioned into three subareas: the inner area of the mouth, transition area, and outer area of the mouth. Considering the distributions of the ecological red line area and pollution sources, the study area was divided into eight comprehensive subzones. An integrated evaluation of the marine ecological environment was developed based on the index system method, which was composed of marine water, surface sediment, and biological diversity. The distribution of the marine water environment was similar to that of the biological and ecological characteristics; environmental indices improved from the inside to outside area. South Branch/North Branch/North Port was slightly better than the outside area where the sediment indices were higher than those of Hangzhou Bay/North Channel/South Channel. The distribution of the marine integrated environment was as follows: subzone IV < subzone V< subzone III < subzone I < subzone II < subzone VI < subzone VIII < subzone VII, which indicated that the integrated environment was

基金项目:上海市海洋局科研项目(沪海科 2016-05,沪海科 2016-04);国家重点研发计划(2017YFC1405002)

收稿日期:2018-06-07; **网络出版日期**:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiangxs@ eastsea.gov.cn

obviously improving with time.

Key Words: Yangtze River Estuary and its adjacent area; comprehensive subzones; index system method; marine ecological environment; integrated evaluation

长江口及其邻近海域位于长江径流与潮流,淡水与咸水相互作用的区域,存在各种不同的水系交汇的混合水域的特征,是典型的河口生态区。地貌形态上,长江口三级分叉、四口入海,包括南支、北支、南港、北港、南槽和北槽。长江口是一个复杂而又特殊的自然综合体,它对流域的自然变化和人为作用响应最敏感,与近岸海域环境变化密切相连。河口地区是人类活动最为频繁、环境变化影响最为深远的地区,对于河口环境变化及其自适应的认识,是水资源可持续利用、人工控制和合理开发的科学依据[1-3]。沿海经济的迅速发展,人口的增加,城市化水平的提高,使得长江口地区在经历自然变化的同时,更为显著地受到人类活动的深刻影响,长江口区域正面临着生态环境的严峻挑战和巨大压力。正是河口区域的自然属性和人文特征,使得长江口区域成为各方面研究的热门区域[4]。

许多国家都曾对河口、海湾以及近岸海域环境进行过调查研究[5-10]。美国和西非沿岸、印度洋、北海、亚得里亚海、日本海、泰国湾等近岸海域的类似调查显示,氮、磷等的营养物质在近岸海域水体中逐渐增多,且比例正发生变化。富营养的环境引起了浮游植物密度的增长、水体透明度的降低、某些藻类的过度增殖、深海鱼类和生物群落多样性的大规模变化,这一情况遍布整个世界的近岸海域。受长江入海和陆源污染源的影响,长江口及其邻近海域营养盐物质输入和分布特征变化是主要特征[11-14]。陈吉余和陈沈良[4]给出了上海海域水质的趋势,指出河口拦门沙附近水质也呈显著的恶化趋势,硝酸盐氮含量近 20 年增加近 4 倍;无机氮和活性磷酸盐年增长率约在 5%[15]。据 2000—2017 年中国海洋环境质量公报显示,自徐六泾以下均属劣四类水质,其中,水质评价依据中华人民共和国国家标准《海水水质标准》(GB3097—1997)。长江口及其邻近海域 20 世纪 80 年代基本无富营养化,20 世纪 80 年代末 20 世纪 90 年代初轻度富营养化,20 世纪 90 年代中后期为中度富营养化,21 世纪以来基本处于中度或重度富营养化[15-17]。浮游植物群落结构在 1984—2010 年间不断变化,甲藻和硅藻比例也在变化,这与长江排海营养盐比例的变化相一致,无机氮与活性磷酸盐比值呈下降趋势,硅酸盐排放量也不断下降[18-21]。

海洋环境评价从单一指标评价(包括水质、沉积物等)发展到海洋生态环境综合评价。广泛应用的河口生态环境综合评价模型包括:欧盟的“生态状况评价综合方法”、美国“沿岸海域状况综合评价方法[1]”、美国的河口营养状况评价[2-3]、欧盟的综合评价法[5]等。生态环境质量综合评价模型均属多参数评价体系,能够比较全面地评估河口、沿岸海域的生态环境质量和富营养化状况,反映了对河口和沿岸海域生态环境问题的认识水平和科学研究水平现状。但是,评价背景值的选择以及评价指标的权重等难点问题需要不断探索。自 20 世纪 80 年代,国内对海洋环境评价方法进行了不断探索和研究,从单因子评价方法(沉积物评价依据中华人民共和国国家标准《海洋沉积物质量》(GB18668—2002))发展到综合评价方法,从水体的富营养化评价、沉积物生态风险评价、生物多样性指数法评价,发展到对海洋生态环境的综合评价[22-24]。目前,海洋功能区环境质量综合指数法、海水增养殖区环境综合风险指数等的综合评价方法在国家海洋局发布的《2015 年中国海洋环境质量公报》中进行了示范应用。

本文基于前人对长江口及其邻近海域的分区和评价,结合生态红线的划分(2017 年上海市海洋局发布《上海市海洋生态红线划定方案》)、排污密集区分布等,划分了综合评价单元,建立了三类三级评价指标体系和评价模型,给出长江河口区域生态环境分布特征和趋势分析。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究区域位于 30°30′—32°00′N, 121°00′—123°20′E 范围之内,监测站位大约 70 个(图 1)。收集了

1984—2015 年长江口及其邻近海域活性磷酸盐(PO4-P)、无机氮(DIN,无机氮是氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐之和)的表层和底层的数据。评价部分主要应用了 2011—2015 年的数据,包括水质环境、沉积物环境(本文引用表层沉积物数据)和生物生态 3 个方面,水质环境指标包括无机氮(DIN: Dissolved inorganic nitrogen)、活性磷酸盐(PO4-P)、铜(Cu)、砷(As)、石油类;沉积物环境指标包括粒度、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As)、滴滴涕(DDT)、多氯联苯(PCBs)和石油类;生物生态指标包括浮游植物、浮游动物和底栖生物的多样性指数。

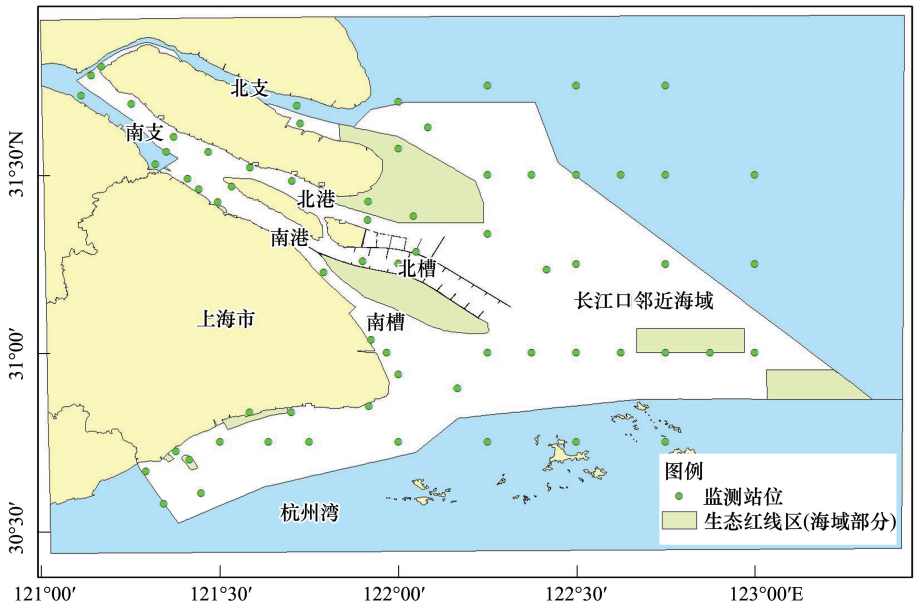

图 1　研究区域和主要监测站位分布

Fig.1　Study area and location of main sample sites

1.2　水质要素处理方法

利用水体的重金属污染指数法,对铜(Cu)、砷(As)两种元素的污染水平进行评价。计算公式如下:

$$Mw = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_S^i}$$

式中, Mw 为重金属污染指数, $Z_i = \frac{C_i}{C_S^i}$ 为第 i 种重金属的相对污染系数, C_i 为第 i 种重金属的实测浓度值, C_S^i 为第 i 种重金属引用的评价标准值,本文采用第二类海水水质标准(GB3097—1997)。

1.3　沉积物要素处理方法

1.3.1　重金属风险指数

沉积物中重金属潜在生态的风险指数是瑞典学者 Hankanson1980 年提出的,从重金属的生物毒性角度对铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、汞(Hg)、砷(As)7 种元素进行评价,使得区域沉积物环境质量评价更具有代表性。根据潜在生态危害系数法,某区域沉积物中第 i 种重金属的潜在生态危害系数 E_r^i 和沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 RIs 可分别表示为:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_s^i};\ E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RIs = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times \frac{C^i}{C_s^i}$$

式中, C_f^i 为第 i 种重金属的指数; C^i 为各样品沉积物中第 i 种重金属的实测浓度; C_s^i 为沉积物中第 i 种重金属

的背景参考值；T_r^i 为沉积物中第 i 种重金属的毒性系数，反应各种重金属元素毒性水平和生物对其污染的敏感程度；E_r^i 为沉积物中第 i 种重金属的生态危害污染程度；重金属风险指数 RIs 为某采样点或区域多种重金属潜在生态危害程度的综合值，分值越高潜在生态风险越大。本文重金属背景参考值 C_s^i 和毒性系数 T_r^i 见表 1[25]。

表 1 沉积物中重金属生态风险评价背景值及其毒性系数

Table 1 Background value and toxicity coefficient of ecological risk assessment for heavy metals in sediments

重金属 Heavy metals	铬 Cr	汞 Hg	砷 As	锌 Zn	镉 Cd	铅 Pb	铜 Cu
C_s^i /(mg/kg)	60	0.2	15	80	0.5	25	30
T_r^i	2	40	10	1	30	5	5

1.3.2 有机化学物指数

利用沉积物中滴滴涕(DDT)和多氯联苯(PCBs)的持久性有机污染水平进行评价。计算公式如下：

$$AIs = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2} Z_i = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2} \frac{C_i}{C_S^i}$$

式中，AIs 为有机化学物指数，$Z_i = \frac{C_i}{C_S^i}$ 为第 i 种有机化学物相对污染系数，C_i 为第 i 种有机化学物的实测浓度值，C_S^i 为第 i 种有机化学物引用的评价标准值，采用海洋沉积物质量第一类标准(GB18668—2002)。

1.4 生物多样性指数

生物多样性指数计算公式：

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} (P_i \times \log_2 P_i)$$

式中，H'为 Shannon-Weiver 种类多样性指数，S 为样品中的种类总数，P_i为第 i 种的个体数(n_i)与总个体数(N)的比值。

1.5 评价指标体系和模型

构建长江口及其邻近海域生态环境三级评价指标体系，选择典型指标进行生态环境综合评价，具体指标见表 2。

表 2 海域生态环境综合评价指标体系

Table 2 Index system for integrated evaluation of marine ecological environment

分目标层 Sub-target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	备注 Remarks column
水质环境 MwENV	无机氮	无机氮	MwENV is the abbreviation of
	活性磷酸盐	活性磷酸盐	“Marine water environment”.
	重金属污染指数	铜、砷	
	石油类	石油类	
沉积物环境 SdENV	重金属风险指数	铜、铅、镉、汞、砷、铬、锌	SdENV is the abbreviation of
	有机化学物指数		“ Sediment environment”.
		滴滴涕、多氯联苯	
	石油类	石油类	
生物生态 BeCHA	浮游植物	生物多样性指数	BeCHA is the abbreviation of “Biological and ecological characteristics”.

根据以下模型计算环境综合评价指数，确定海洋生态环境综合状况。评价模型如下：

$$E_i = \frac{W_i + S_i + B_i}{3}$$

E_i 为第 i 区综合指数; W_i 为第 i 区水质环境指数,用无机氮浓度赋值(Nw_i)、活性磷酸盐浓度赋值(Pw_i)、重金属污染指数赋值(Mw_i)、石油类浓度赋值(Ow_i)进行表征;即:

$$W_i = (Nw_i + Pw_i + Mw_i + Ow_i)/4$$

S_i 为第 i 区沉积物环境指数,用沉积物的重金属风险指数赋值(RIs_i)、有机化学物指数赋值(AIs_i)、石油类含量赋值(OIs_i)进行表征,并根据沉积物类型进行矫正,各个评价单元的矫正系数 k 在综合分区中给出;即:

$$S_i = k * (RIs_i + AIs_i + OIs_i)/3$$

B_i 为第 i 区生物生态指数,用浮游植物的生物多样性指数赋值(Hb_i)、浮游动物的生物多样性指数赋值(Zb_i)和底栖生物的生物多样性指数赋值(Mb_i)进行表征;即:

$$B_i = (Hb_i + Zb_i + Mb_i)/3$$

2　结果分析

2.1　评价单元的划分

评价单元划分的不确定性一方面源于海洋生态环境的周期动态变化,另外一方面由于样点数据不足以支撑对生态环境的全面描述。为了更准确的刻画长江口及其邻近海域水质环境、沉积物环境、生物生态等的变异特性,借鉴了已有的分区研究结果,例如,基于自然地理特征对长江口水域进行了分区[9],基于关键要素和梯度法对关键要素的过渡区进行了划分[24],基于营养盐聚类分析确定了春、夏、秋三个季节长江口环境分区,基于海域表层沉积物类型的分布特征的分区[26]。现有的分区研究基本是基于地理、水质、沉积物等分布特征进行的较大范围的分区,而没有考虑主要敏感功能区(湿地保护区等)、生态红线区、排污区以及工程密集区等的分布特点。另外,已有的分区是根据某次监测要素的指标数据进行的,对监测数据的偶然性和规律性考虑不足。本文在已有研究结果的基础上,考虑海洋环境功能区、红线保护区和管理需求等,对研究海域进行更细致的评价单元的划分,并对各个评价单元进行综合分区评价。

结合海洋生态红线区和重点排污口等,根据河口悬浮物环境特征、水团特征、水质环境特征、沉积物环境特征、生物生态等进行综合的评价单元划分。通过综合分区得到的每个子区域,都是具有一定的生态环境特征或者特别功能特征(重点排污口、红线保护区等),因此,每个子区域的独一无二的属性,影响或决定了各个子区域的站位布局、综合评价和管理需求。重点排污区、红线区等都需要增加监测力度、管理措施,为达到控制污染、保护环境的目的而积累成果。

2.1.1　营养盐基准值

长江口及其邻近海域的富营养化严重。1988 年是无机氮和活性磷酸盐含量快速增长的转折年(图 2 和图 3),之后无机氮和活性磷酸盐含量呈波动上升趋势,可见,营养盐的发展变化是从快速增长,到缓慢波动增长的,这与总体水质变化趋势相一致,也说明了营养盐是该海域水质环境最重要的代表性污染物。该海域营养盐输入主要以水平输运为主,长江径流携带入海、沿岸的污水排放占绝大部分。长江口及其邻近海域无机氮含量的快速增长与人类活动的影响有关,长江沿江流域的化肥施用量不断增长,其中氮肥从 20 世纪 60 年代的每年几十万吨,增长到 20 世纪 80 年代的 400×10^4—500×10^4 t/a,氮肥用量的快速增长直接或间接地导致了水体中硝酸盐含量的增加,而生活污水排放量的逐年增加也是氮营养盐含量增加的主要原因之一。

根据 1984—2015 年长江口及其邻近海域营养盐数据,对无机氮(DIN)、活性磷酸盐(PO4-P)的表、底层年均变化趋势进行分析评价,发现:无机氮和活性磷酸盐具有线性上升趋势,1988 年是营养盐含量的快速增长的起始年,之后持续攀升,因此,活性磷酸盐和无机氮的基准年确定为 1987 年,1984—1987 年营养盐要素的平均值为基准值(表 3)。2000 年以来,无机氮主要处于高位震荡状态,而活性磷酸盐则直线上升。无机氮表、底含量相差较大,活性磷酸盐表、底含量差别相对较小。

表 3 长江口及其邻近海域海水营养盐的基准值

Table 3 Reference value of nutrient elements in Yangtze River Estuary and its adjacent area

年份 Year	活性磷酸盐 PO4-P/(mg/L)	无机氮 DIN/(mg/L)
1984	0.000687	0.0275
1985	0.000916	0.0699
1986	0.000702	0.0703
1987	0.000701	0.114
平均值 Average value	0.000751	0.0705

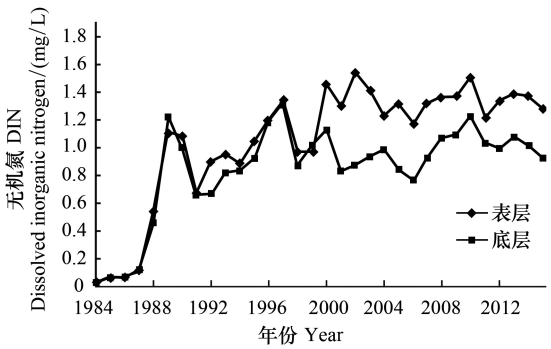

图 2 1984—2015 年研究区域无机氮年均含量变化趋势

Fig.2 Trend of annual mean DIN from 1984 to 2015 in study area

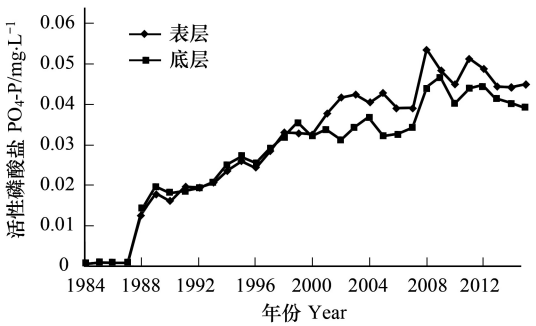

图 3 1984—2015 年研究区域活性磷酸盐年均含量变化趋势

Fig.3 Trend of annual mean PO4-P from 1984 to 2015 in study area

2.1.2 营养盐分区阈值

根据频数分析法,应用 2000—2015 年长江口及其邻近海域所有站位、所有月份、表底层监测数据(无机氮和活性磷酸盐的样本量均为 3397 个)频数分布,绘制频数分布曲线图(图 4—图 6)。由频数分布曲线图也可以发现,活性磷酸盐在水体中的浓度变化(时间和空间)分布,是单一峰的正态曲线,并且标准差比较小(0.0178),说明活性磷酸盐的浓度分布曲线比较陡峭,其值集中的分布在均值(0.0410)两侧。无机氮在水体中的浓度值曲线为两个正态分布曲线,均值较小分布曲线体现了底层水体的分布状况,另一个正态分布曲线体现了表层水体的分布状况;比较两者的均值和标准差发现,底层水体分布曲线的均小于表层的,说明表层水体无机氮的分布变化范围比较大,同时受长江淡水和海水的影响显著。

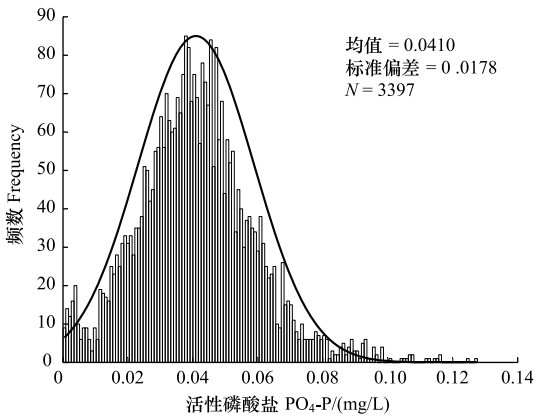

图 4 2000—2015 年研究区域活性磷酸盐频数分布曲线

Fig.4 Frequency distribution of PO4-P from 2000 to 2015 in study area

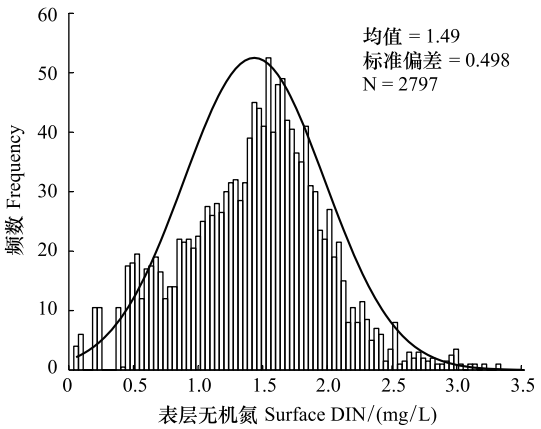

图 5 2000—2015 年研究区域表层无机氮频数分布曲线

Fig.5 Frequency distribution of surface DIN from 2000 to 2015 in study area

参照美国国家环境保护局推荐的方法[6],分别取第 25 百分点和 75 百分点作为目前营养盐分级的参照状态,得到 2000 年后无机氮和活性磷酸盐的分级阈值(表 4)。活性磷酸盐表底数据频数分布曲线的第 25 百分点和 75 百分点的值分别为 0.0289 和 0.0530,作为活性磷酸盐分区阈值;无机氮表层数据频数分布曲线的第 25 百分点和 75 百分点的值分别为 1.15 和 1.82,底层数据频数分布曲线的第 25 百分点和 75 百分点的值分别为 0.195 和 0.339,选择底层曲线的第 75 百分点和表层曲线的第 25 百分点的值分别为 0.339 和 1.15,作为无机氮分区阈值。

2.1.3　营养盐分区

利用无机氮分区阈值,根据 2015 年 8 月份无机氮分布特征进行分区,总体上整个监测区域分为口内区、过渡区和口外区(图 7)。

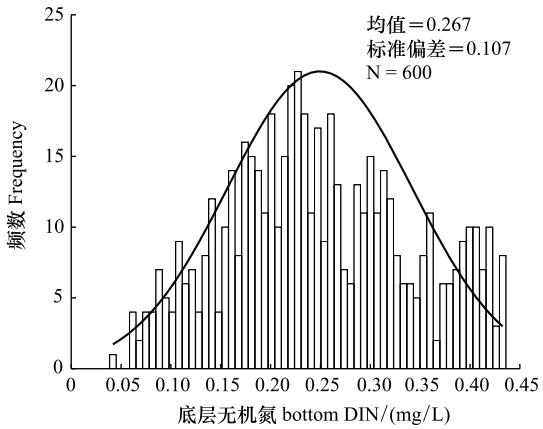

图 6　2000—2015 年研究区域底层无机氮频数分布曲线

Fig.6　Frequency distribution of bottom DIN from 2000 to 2015 in study area

表 4　基于营养盐要素频数分布的分级阈值

Table 4　Grading threshold based on frequency distribution of nutrient elements

营养盐要素 Nutrient elements	活性磷酸盐 PO4-P	无机氮 DIN	
层次	表/底层	表层	底层
样本数 Sampling number	3397	2797	600
均值 Average value(50%)	0.0410	1.49	0.267
标准差 Standard deviation	0.0178	0.498	0.107
25%	0.0289	1.15	0.195
75%	0.0530	1.82	0.339

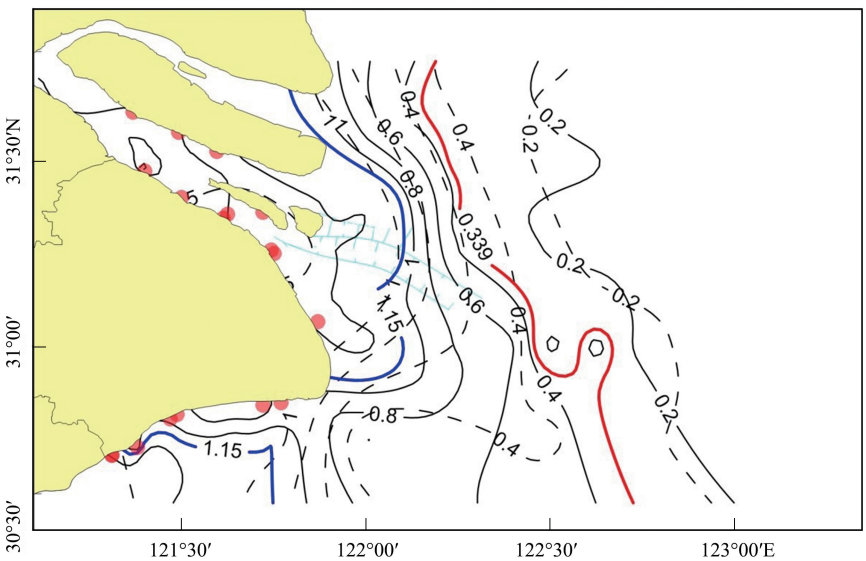

图 7　2015 年 8 月无机氮表底层分布特征(实线:表层;虚线:底层)

Fig.7　Distribution of DIN on August 2015 (solid lines: surface; dash lines: bottom)

利用活性磷酸盐分区阈值,根据 2015 年 8 月份活性磷酸盐分布特征进行分区,总体上整个监测区域分为

口内区、过渡区和口外区(图 8)。

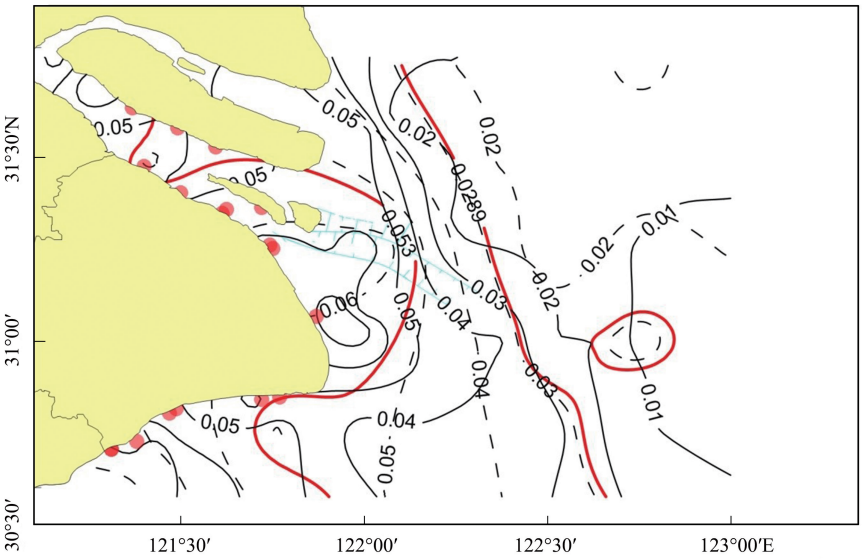

图 8 2015 年 8 月活性磷酸盐表底层分布特征(实线:表层;虚线:底层)

Fig.8 Distribution of PO4-P on August 2015 (solid lines: surface; dash lines: bottom)

水体环境的营养盐的分布特征相似,基本表现为从口内区域向口外区域逐渐减少,偶尔沿岸局部区域出现高值。水体环境中重金属污染指数和石油类分布规律性较差,区域特征不明显,在航道、排污口、港口码头偶尔会出现高值。因此,根据水体物质的分布规律进行分区的决定要素是无机氮和活性磷酸盐。

2.1.4 综合分区

沉积物重金属风险指数、有机化学物指数等主要分布特征为沿岸排污口区域、口门、港口工程区或近海区域偶尔间断会出现高值或者低值,整个区域没有明显规律;而沉积物类型分布从口内到口外的变化规律明显[26]。

浮游植物和浮游动物种类的组成和生态类型混杂,群落结构呈现多种结构复合的特征,其单一性群落特征不明显。浮游植物组成中以近岸低盐性类群、河口半咸水类群和淡水类群为主,还有外海高盐类群和海洋广布性类群,浮游植物分布受温、盐影响明显,具有较明显的区域特征。浮游动物种类组成大致可分为五大群落:淡水生态群落、半咸水河口生态群落、低盐近岸生态群落、温带外海高盐生态群落和热带高温高盐生态群落。

海洋生态红线制度是指为维护海洋生态健康与生态安全,将重要海洋生态功能区、生态敏感区和生态脆弱区划定为重点管控区域并实施严格分类管控的底线约束制度,旨在对具有重要保护价值和生态价值的海域实施分类指导、分区管理和分级保护。上海市海洋生态红线区包括自然保护区、饮用水水源保护区、特别保护海岛、重要滨海湿地、重要渔业海域、整治修复岸线、自然岸线等。

水团特征、水体营养盐分布、沉积物类型、生物生态组成等水体基本属性是评价单元划分的基础,然后结合生态红线区、污染源分布、海洋工程区等具有开发管理属性的分区,具体划分 8 个评价单元(表 5、表 6、图 9)。

2.2 指标分级与赋值评价

指标分级和赋值评价是指标体系模型的难点之一,海域生态环境的周期性和趋势性变化既是分级评价的基础,又是评价的结果,因此,为了准确的确定研究海域环境指标体系的特征,本文参考了前人的相关研究成果。郑丙辉基于多年营养盐数据在分区的基础上进行了长江口区域基准值的研究[27],本文借鉴其研究方法并丰富了数据源,进一步研究了水体中无机氮、活性磷酸盐等水质要素的分级与赋值。基于长江口及毗邻海

域沉积物生态环境质量评价和潜在生态风险评价,给出了沉积物质量指标的分级与赋值[28-29]。在长江口海域环境指标阈值的研究方法和相关成果的基础上,本文根据长江口及其邻近海域多年监测数据和环境特征,确定各个评价指标的标准值范围及其对应的评价指数,具体见表 7。

表 5　长江口及其邻近海域各分区的环境特征

Table 5　Environment features of subzones in Yangtze River Estuary and its adjacent area

环境特征 Environment features	Ⅰ区 Sz Ⅰ	Ⅱ区 Sz Ⅱ	Ⅲ区 Sz Ⅲ	Ⅳ区 Sz Ⅳ	Ⅴ区 Sz Ⅴ	Ⅵ区 Sz Ⅵ	Ⅶ区 Sz Ⅶ	Ⅷ区 Sz Ⅷ	备注 Remarks column
水团特征	低盐	低盐	低—中	低—中	中盐	中盐	高盐	高盐	盐度
Water masses	低	低—中	中	高	高	中—高	低	低	悬浮物浓度
底质类型 Sediment type	砂质粉砂	砂	砂质粉砂、砂	粉砂质砂、砂	粘土质粉砂	粘土质粉砂	粘土质粉砂、砂	粘土质粉砂	粉砂在整个海域均有分布
矫正系数 Compensation factor	1	1.1	1	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9	用于沉积物环境指数矫正

“Sz Ⅰ”代表 subzone Ⅰ,“Sz Ⅱ”代表 subzone Ⅱ,…,“Sz Ⅷ”代表 subzone Ⅷ

表 6　各分区重点污染源、生态红线分布以及管理目标*

Table 6　Major pollutant sources, ecological red line areas and management targets of subzones

分区 Subzones	污染源 Pollutant sources	生态红线区 Ecological red line areas	管理目标 Management targets	具体位置 Locations	备注 Remarks column
Ⅰ区 Sz Ⅰ	长江	生态红线区	污染源监控、禁止开发	北支	本文称这 5 个区域为
Ⅱ区 Sz Ⅱ	长江、排污口	生态红线区	污染源监控、减排、禁止开发	南支	“口内区域”
Ⅲ区 Sz Ⅲ	—	生态红线区	禁止开发	北港	
Ⅳ区 Sz Ⅳ	黄浦江、排污口	生态红线区	污染源监控、减排;禁止开发	南港、南槽、北槽	
Ⅴ区 Sz Ⅴ	排污口	生态红线区	污染源减排;禁止开发	杭州湾北部	
Ⅵ区 Sz Ⅵ	—	—	—	过渡区	本文称这 3 个区域为
Ⅶ区 Sz Ⅶ	—	—	—	北支外区域	“口外区域”
Ⅷ区 Sz Ⅷ	—	生态红线区	限制开发	近海区域	

* 本表中未出现具体排污口名称或生态红线区名称,“—”表示分区内不存在

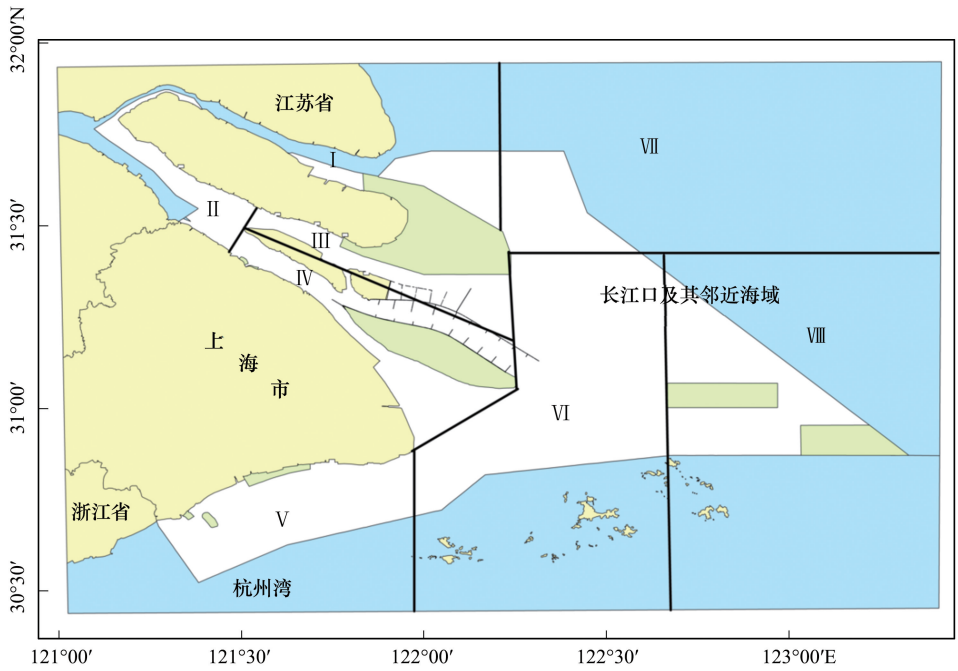

图 9　综合分区

Fig.9　Comprehensive subzones

根据综合评价指标体系模型,计算获得综合指数 E_i 在 1—4 之间,数值越大代表环境越好,具体水质环境指数、沉积物环境指数、生物生态指数、综合评价指数分级及其环境特征见表 8。

表 7 海域生态环境综合评价指标标准与赋值

Table 7 Index standards and assignment values for integrated evaluation of marine ecological environment

分目标层 Sub-target layer	准则层 Criteria layer	标准值范围 Index standards	赋值 Assignment values	分目标层 Sub-target layer	准则层 Criteria layer	标准值范围 Index standards	赋值 Assignment values
水质环境	无机氮	<0.2	4	沉积物环境	重金属	<30	4
MwENV		0.2—0.35	3	SdENV	风险指数	30—50	3
		0.35—1.15	2			50—70	2
		>1.15	1			>75	1
	活性磷酸盐	<0.015	4		有机化学物指数	<0.1	4
		0.015—0.03	3			0.1—0.15	3
		0.03—0.05	2			0.15—0.2	2
		>0.05	1			>0.2	1
	重金属	<0.1	4		石油类	<10	4
	污染指数	0.1—0.15	3			10—20	3
		0.15—0.2	2			20—30	2
		>0.20	1			>30	1
	石油类	<0.01	4	生物生态	生物多样	>2.5	4
		0.01—0.05	3	BeCHA	性指数	1.5—2.5	3
		0.05—0.1	2			0.5—1.5	2
		>0.1	1			<0.5	1

表 8 海域生态环境综合评价中目标层的分级与评价

Table 8 Grades and assessment of target layers for integrated evaluation of marine ecological environment

水质环境指数 W_i Indices of MwENV W_i	$W_i \leqslant 1.5$	$1.5 < W_i \leqslant 2.5$	$2.5 < W_i \leqslant 3.5$	$W_i > 3.5$
水质环境评价 Assessment of MwENV	水质环境差	水质环境一般	水质环境较好	水质环境好
沉积物环境指数 S_i Indices of SdENV S_i	$S_i \leqslant 1.5$	$1.5 < S_i \leqslant 2.5$	$2.5 < S_i \leqslant 3.5$	$W_i > 3.5$
沉积物环境评价 Assessment of SdENV	沉积物环境差	沉积物环境一般	沉积物环境较好	沉积物环境好
生物生态指数 B_i Indices of BeCHA B_i	$B_i \leqslant 1.5$	$1.5 < B_i \leqslant 2.5$	$2.5 < B_i \leqslant 3.5$	$B_i > 3.5$
生物生态评价 Assessment of BeCHA	生物生态差	生物生态一般	生物生态较好	生物生态好
综合指数 E_i Integrated indices E_i	$E_i \leqslant 2$	$2 < E_i \leqslant 2.5$	$2.5 < E_i \leqslant 3$	$E_i > 3$
评价结果 Integrated evaluation	环境差	环境一般	环境较好	环境好

2.3 水质环境、沉积物环境、生物生态评价

2.3.1 水质环境评价

2012—2015 年水质环境评价发现(表 9),水质总体有改善向好的趋势,其中口外区域的趋势较明显。空间分布表现为从口内区域向口外区域逐渐变好:口内区域除了Ⅴ区(杭州湾北部)在 2012 年出现水质环境评级为差和Ⅲ区(北港)在 2014 年水质环境评级为较好,其他区域和年份评级均为一般;口外区域除了Ⅵ区(过渡区)在 2012 年和 2013 年出现评级一般,其他区域和年份评级均为较好。

综合多年的比较,各区域从差到好的排序为:Ⅴ区<Ⅰ区<Ⅳ区<Ⅱ区<Ⅲ区<Ⅵ区<Ⅶ区<Ⅷ区。研究区域

海水水质主要受长江陆源入海污染物的影响,使得该区域呈显著的富营养化状态。但是,上海市沿岸的排污影响也不容忽视,尤其是杭州湾北部、南槽、北槽是人类活动强度较大区域,同时又是重要滨海湿地和自然岸线的保护区域。

表 9　2012—2015 年水质环境指数及其评价结果

Table 9　Indices and assessment of marine water environment from 2012 to 2015

年份	水质环境指数	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区	Ⅴ区	Ⅵ区	Ⅶ区	Ⅷ区
Year	Indices of MwENV	Sz Ⅰ	Sz Ⅱ	Sz Ⅲ	Sz Ⅳ	Sz Ⅴ	Sz Ⅵ	Sz Ⅶ	Sz Ⅷ
2012	活性磷酸盐/(mg/L)	0.052	0.052	0.055	0.074	0.087	0.051	0.026	0.012
	赋值	1	1	1	1	1	1	3	4
	无机氮/(mg/L)	1.60	1.58	1.99	1.64	1.22	1.00	0.63	0.27
	赋值	1	1	1	1	1	2	2	3
	石油类/(mg/L)	0.039	0.018	0.011	0.030	0.259	0.093	0.013	0.155
	赋值	3	3	3	3	1	2	3	1
	重金属污染指数	0.16	0.12	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12
	赋值	2	3	3	3	3	3	3	3
	水质环境指数	1.75	2	2	2	1.5	2	2.75	2.75
	水质评价结果	一般	一般	一般	一般	差	一般	较好	较好
2013	活性磷酸盐/(mg/L)	0.033	0.047	0.042	0.056	0.072	0.036	0.021	0.022
	赋值	2	2	2	1	1	2	3	3
	无机氮/(mg/L)	1.96	1.94	2.28	2.25	1.66	1.16	0.76	0.40
	赋值	1	1	1	1	1	1	2	2
	石油类/(mg/L)	0.025	0.015	0.012	0.026	0.021	0.018	0.023	0.026
	赋值	3	3	3	3	3	3	3	3
	重金属污染指数	0.26	0.15	0.16	0.16	0.12	0.11	0.07	0.08
	赋值	1	2	2	2	3	3	4	4
	水质环境指数	1.75	2	2	1.75	2	2.25	3	3
	水质评价结果	一般	一般	一般	一般	一般	一般	较好	较好
2014	活性磷酸盐/(mg/L)	0.027	0.045	0.028	0.048	0.054	0.023	0.011	0.004
	赋值	3	2	3	2	1	3	4	4
	无机氮/(mg/L)	1.90	1.57	1.06	1.54	1.86	1.02	0.60	0.28
	赋值	1	1	2	1	1	2	2	3
	石油类(mg/L)	0.070	0.026	0.032	0.038	0.034	0.038	0.042	0.038
	赋值	2	3	3	3	3	3	3	3
	重金属污染指数	0.15	0.16	0.12	0.13	0.1	0.08	0.07	0.05
	赋值	2	2	3	3	3	4	4	4
	水质环境指数	2	2	2.75	2.25	2	3	3.25	3.5
	水质评价结果	一般	一般	较好	一般	一般	较好	较好	较好
2015	活性磷酸盐/(mg/L)	0.055	0.052	0.051	0.063	0.058	0.031	0.021	0.009
	赋值	1	1	1	1	1	2	3	4
	无机氮/(mg/L)	1.31	1.5	1.5	1.48	1.15	0.52	0.3	0.17
	赋值	1	1	1	1	1	2	3	4
	石油类/(mg/L)	0.054	0.074	0.048	0.050	0.047	0.020	0.015	0.062
	赋值	2	2	3	2	3	3	3	2
	重金属污染指数	0.07	0.11	0.12	0.13	0.10	0.08	0.09	0.07
	赋值	4	3	3	3	3	4	4	4
	水质环境指数	2	1.75	2	1.75	2	2.75	3.25	3.5
	水质评价结果	一般	一般	一般	一般	一般	较好	较好	较好

2.3.2 沉积物环境评价

2012—2015 年沉积物环境评价发现(表 10),沉积物环境稳定,Ⅲ区、Ⅳ区(北港、南港、南槽、北槽)略有向好趋势。各分区之间比较,从差到好为:首先Ⅳ区(南港、南槽和北槽)最差;其次是Ⅵ区、Ⅷ区(过渡区和近海区域);然后是Ⅴ区、Ⅶ区(杭州湾北部和北支外区域);Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区(南支、北支和北港)最好。与水质区域分布特征不同,南支、北支和北港的沉积物质量好于口外区域。南港、南槽和北槽和杭州湾北部是码头、排污口、工程分布集中,有机化学物指数、重金属风险指数、石油类均为沉积物质量污染因素。

从 4 年沉积物环境评价发现,北支和北支外区域受持久性化合物污染较严重;南槽、北槽和口外区域石油类明显高于其他区域;重金属风险指数北支低于其他区域。研究区域沉积物重金属风险指数排序:汞>镉>铅>砷>铜>铬>锌。

表 10 2012—2015 年沉积物环境指数及其评价结果

Table 10 Indices and assessment of sediment environment from 2012 to 2015

年份 Year	沉积物环境指数 Indices of SdENV	Ⅰ区 Sz Ⅰ	Ⅱ区 Sz Ⅱ	Ⅲ区 Sz Ⅲ	Ⅳ区 Sz Ⅳ	Ⅴ区 Sz Ⅴ	Ⅵ区 Sz Ⅵ	Ⅶ区 Sz Ⅶ	Ⅷ区 Sz Ⅷ
2012	石油类(mg/kg)	9.47	10.46	5.80	24.82	6.62	12.69	13.700	35.66
	赋值	4	3	4	2	4	3	3	1
	重金属风险指数	75	44	44	40	48	38	39	32
	赋值	1	3	3	3	3	3	3	3
	有机化学物指数	1.20	0.62	0.28	0.50	0.59	0.56	0.88	0.64
	赋值	1	1	1	1	1	1	1	1
	沉积物环境指数	2	2.6	2.7	1.8	2.4	2.1	2.6	1.5
	沉积物评价结果	一般	较好	较好	一般	一般	一般	较好	差
2013	石油类(mg/kg)	*	3.64	5.55	24.81	19.21	16.28	23.05	22.70
	赋值	4	4	4	2	3	3	2	2
	重金属风险指数	26	26	46	59	40	47	33	36
	赋值	4	4	3	2	3	3	3	3
	有机化学物指数	0.04	0.03	0.12	0.04	0.10	0.14	0.07	0.07
	赋值	4	4	3	4	3	3	4	4
	沉积物环境指数	4	4.4	3.3	2.4	2.7	2.7	3.3	2.7
	沉积物评价结果	好	好	较好	一般	较好	较好	较好	较好
2014	石油类(mg/kg)	16.00	7.38	16.59	21.96	19.33	38.66	34.21	35.02
	赋值	3	4	3	2	3	1	1	1
	重金属风险指数	36	29	43	47	42	35	41	48
	赋值	3	4	3	3	3	3	3	3
	有机化学物指数	0.17	0.10	0.16	0.29	0.14	0.18	0.18	0.08
	赋值	2	3	3	1	3	2	2	4
	沉积物环境指数	2.7	4	3	1.8	2.7	1.8	2.2	2.4
	沉积物评价结果	较好	好	较好	一般	较好	一般	一般	一般
2015	石油类(mg/kg)	8.85	2.89	3.64	11.83	15.68	26.6	28.92	23.62
	赋值	4	4	4	3	3	2	2	2
	重金属风险指数	34	25	33	33	46	29	29	32
	赋值	3	4	3	3	2	4	4	3
	有机化学物指数	0.17	0.11	0.06	0.05	0.08	0.06	0.08	0.06
	赋值	2	3	4	4	4	4	4	4
	沉积物环境指数	3	4	3.7	3	2.7	3	3.7	2.7
	沉积物评价结果	较好	好	好	较好	一般	较好	好	较好
	矫正系数	1	1.1	1	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9

“*”表示未检出

2.3.3　生物生态评价

2012—2015 年生物生态评价发现(表 11),口内区域生物生态略有趋好,口外区域变化不明显。各区域之间比较结果为:Ⅵ区、Ⅶ区、Ⅷ区(口外区域)最好;Ⅰ区(北支)其次;其他区域较差。生物生态与水质环境的区域特征相似。

表 11　2012—2015 年生物生态指数及其评价结果

Table 11　Indices and assessment of the biological and ecological characteristics from 2012 to 2015

年份 Year	生物生态指数 Indices of BeCHA		Ⅰ区 Sz Ⅰ	Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区 Sz Ⅱ、Sz Ⅲ、Sz Ⅳ	Ⅴ区 Sz Ⅴ	Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ区 Sz Ⅵ、Sz Ⅶ、Sz Ⅷ
2012	浮游植物	多样性指数	0.86	1.28	0.43	1.53
		赋值	2	2	1	3
	浮游动物	多样性指数	2.54	2.22	2.05	2.72
		赋值	4	3	3	4
	底栖生物	多样性指数	1.44	0.37	0.89	1.78
		赋值	2	1	2	2
	生物生态指数		2.7	2.0	2.0	3.0
	生物生态评价结果		较好	一般	一般	较好
2013	浮游植物	多样性指数	2.57	1.49	1.06	2.33
		赋值	4	2	2	3
	浮游动物	多样性指数	1.62	1.86	2.23	2.79
		赋值	3	3	3	4
	底栖生物	多样性指数	0.4	0.45	0.83	2.67
		赋值	1	1	2	4
	生物生态指数		2.7	2.0	2.3	3.7
	生物生态评价结果		较好	一般	一般	好
2014	浮游植物	多样性指数	1.34	1.83	1.17	1.8
		赋值	2	3	2	3
	浮游动物	多样性指数	2.05	1.75	1.54	2.82
		赋值	3	3	3	4
	底栖生物	多样性指数	2.51	0.84	0.7	3.25
		赋值	4	2	2	4
	生物生态指数		3.0	2.7	2.3	3.7
	生物生态评价结果		较好	较好	一般	好
2015	浮游植物	多样性指数	2.11	1.57	1.78	2.54
		赋值	3	3	3	4
	浮游动物	多样性指数	2.85	2.13	1.81	2.99
		赋值	4	3	3	4
	底栖生物	多样性指数	0.25	0.39	0.68	2.47
		赋值	1	1	2	3
	生物生态指数		2.7	2.3	2.7	3.7
	生物生态评价结果		较好	一般	较好	好

2.4　生态环境综合评价

2012—2015 年通过指标体系方法(表 12),对水质环境、沉积物环境和生物生态评价发现,总体上,研究海域的生态环境有所改善。各分区生态环境综合排序为:Ⅳ区<Ⅴ区<Ⅲ区<Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅵ区<Ⅷ区<Ⅶ区。

Ⅳ区、Ⅴ区(南港、南槽、北槽和杭州湾北部)从水质环境、沉积物环境和生物生态三个方面均是污染严重的区域;而Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区(南支、北支和北港)沉积物环境明显好于Ⅳ区、Ⅴ区(南港、南槽、北槽和杭州湾北部),因此,虽然整个口内区域的水质环境差异不明显,但是综合考虑时,Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区(南支、北支和北港)

表现出了优势。而口外区域Ⅵ区、Ⅶ区、Ⅷ区的水质环境、生物生态是所有区域中较好。

比较不同的年份,总体有向好趋势。口外区域的年度变化为:2015 年综合环境最好,其次是 2013 年较好,2014 年较差,2012 年综合环境最差。口内区域则表现为:2014 年和 2015 年综合环境持平最好,其次是 2013 年,2012 年也是最差的。

表 12 2012—2015 年生态环境综合指数及其评价结果

Table 12 Integrated indices and evaluation of marine ecological environment from 2012 to 2015

年份 Year	综合指数 Integrated indices	Ⅰ区 Sz Ⅰ	Ⅱ区 Sz Ⅱ	Ⅲ区 Sz Ⅲ	Ⅳ区 Sz Ⅳ	Ⅴ区 Sz Ⅴ	Ⅵ区 Sz Ⅵ	Ⅶ区 Sz Ⅶ	Ⅷ区 Sz Ⅷ
2012	水质环境指数	1.75	2	2	2	1.5	2	2.75	2.75
	沉积物环境指数	2	2.6	2.7	1.8	2.4	2.1	2.6	1.5
	生物生态指数	2.7	2	2	2	2	3	3	3
	综合指数	2.2	2.2	2.2	1.9	2.0	2.4	2.8	2.4
	综合评价结果	一般	一般	一般	差	差	一般	较好	一般
2013	水质环境指数	1.75	2	2	1.75	2	2.25	3	3
	沉积物环境指数	4	4.4	3.3	2.4	2.7	2.7	3.3	2.7
	生物生态指数	2.7	2	2	2	2.3	3.7	3.7	3.7
	综合指数	2.8	2.8	2.4	2.1	2.3	2.9	3.3	3.1
	综合评价结果	较好	较好	一般	一般	一般	较好	好	好
2014	水质环境指数	2	2	2.75	2.25	2	3	3.25	3.5
	沉积物环境指数	2.7	4	3	1.8	2.7	1.8	2.2	2.4
	生物生态指数	3	2.7	2.7	2.7	2.3	3.7	3.7	3.7
	综合指数	2.6	2.9	2.8	2.3	2.3	2.8	3.1	3.2
	综合评价结果	较好	较好	较好	一般	一般	较好	好	好
2015	水质环境指数	2	1.75	2	1.75	2	2.75	3.25	3.5
	沉积物环境指数	3	4	3.7	3	2.7	3	3.7	2.7
	生物生态指数	2.7	2.3	2.3	2.3	2.7	3.7	3.7	3.7
	综合指数	2.6	2.7	2.7	2.4	2.5	3.2	3.6	3.3
	综合评价结果	较好	较好	较好	一般	一般	好	好	好

3 讨论

(1)综合分区与环境变化及海域功能划分相辅相成

研究海域水体中的无机氮和活性磷酸盐主要来源于长江径流,从上世纪 80 年代起,长江排海通量的年增长率和研究海域年均浓度增长率之间具有显著的相关性[15]。营养盐物质浓度分布特征受径流和潮流动力交换的影响,体现了河口区此消彼长的动力过程。综合分区随着径流与潮流的动力过程而变化的,从而产生环境特征的季节年度变化。在长江河口区域典型的口内区(淡水区)、过渡区(最大浑浊带区)和口外区(咸水区)的基础上,还要考虑环境变化、海域功能特性、红线划分等多方面的因素,实现研究区域评价单元的动态划分,可见,分区与评价相辅相成。

(2)评价模型中指标及其权重、分级标准与评价等问题有待深入探索

本文建立了基于三级三类评价指标体系的综合评价模型,包括水质环境指标、沉积物环境指标、生物生态指标。但是,针对特定的海洋功能区选择具有代表性的评价指标、指标权重,相应的指标分级标准的划分和综合指数等级评价等,均为综合评价模型中涉及到的重点问题,需要继续深入分析探索。

(3)通过生态环境评价发现环境保护管理问题

南港、南槽、北槽、杭州湾北部区域生态环境比较差,除了陆源入海污染物的影响外,沿岸人类活动开发强度较大使之成为生态环境的敏感脆弱区。2015 年来,在全国污染防治行动计划的指导下,上海市非常重视海

洋生态环境保护与陆海统筹建设,实施了强化入河入海排污口监督,提标改造排放工程,削减养殖总量,优化养殖布局等一系列环保措施。研究海域的生态环境综合状况随时间向好趋势明显,2015 年以后该海域生态环境质量必然呈波动式趋好态势,继续跟踪趋势性监测评价,更有助于海洋环境保护和资源环境的可持续发展。

4　结论

长江口及其邻近海域无机氮和活性磷酸盐的基准年是 1987 年,基准值分别是 0.0705 mg/L 和 0.000751 mg/L;无机氮的分区阈值为 0.339 mg/L 和 1.15 mg/L,活性磷酸盐的分区阈值为 0.0289 mg/L 和 0.0530 mg/L。结合生态环境分布特征和生态红线区,将长江口及其邻近海域划分为 8 个评价单元,利用评价模型进行区域生态环境评价,生态环境由差向好的区域变化特征为:Ⅳ区<Ⅴ区<Ⅲ区<Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅵ区<Ⅷ区<Ⅶ区;随时间向好趋势明显。

致谢:感谢国家海洋局东海环境监测中心的同事们在现场采样、实验室分析、数据处理等方面的辛苦工作。感谢审稿老师的宝贵的修改意见和建议。

参考文献(References):

[1] Katsanevakis S, Stelzenmuller V, South A, Sørensen T K, Jones P J S, Kerr S, Badalamenti F, Anagnostou C, Breen P, Chust G, D′Anna G, Duijn M, Filatova T, Fiorentino F, Hulsman H, Johnson K, Karageorgis A P, Kröncke I, Mirto S, Pipitone C, Portelli S, Qiu W F, Reiss H, Sakellariou D, Salomidi M, van Hoof L, Vassilopoulou V, Vega Fernández T, Vöge S, Weber A, Zenetos A, Hofstede R T. Ecosystem-based marine spatial management: review of concepts, policies, tools, and critical issues. Ocean & Coastal Management, 2011, 54(11): 807-820.

[2] Kitsiou D, Karydis M. Coastal marine eutrophication assessment: a review on data analysis. Environment International, 2011, 37(4): 778-801.

[3] Karydis M, Kitsiou D. Eutrophication and environmental policy in the Mediterranean Sea: a review. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(8): 4931-4984.

[4] 陈吉余, 陈沈良. 长江口生态环境变化及对河口治理的意见. 水利水电技术, 2003, 34(1): 19-25.

[5] OSPAR. Second OSPAR integrated report on the Eutrophication status of the OSPAR maritime area. The OSPAR Commission, Eutrophication Series, London, 2008. [2018-03-26]. https://www.ospar.org/documents? v=7107.

[6] Office of Water, Office of Science and Technology. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual Estuarine and Coastal Marine Waters (EPA-822-B-01-003). Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2001. [2017-08-26]. https://www.epa.gov/nutrient-policy-data/criteria-development-guidance-estuarine-and-coastal-waters.

[7] Tarazona J V, Fresno A, Aycard S, Ramos C, Vega M M, Carbonell G. Assessing the potential hazard of chemical substances for the terrestrial environment. Development of hazard classification criteria and quantitative environmental indicators. Science of the Total Environment, 2000, 247(2/3): 151-164.

[8] Ren J, Gao B B, Fan H M, Zhang Z H, Zhang Y, Wang J F. Assessment of pollutant mean concentrations in the Yangtze estuary based on MSN theory. Marine Pollution Bulletin, 2016, 113(1/2): 216-223.

[9] 刘录三, 孟伟, 田自强, 蔡玉林. 长江口及毗邻海域大型底栖动物的空间分布与历史演变. 生态学报, 2008, 28(7): 3027-3034.

[10] Mironova E I, Telesh I V, Skarlato S O. Ciliates in plankton of the Baltic Sea. Protistology, 2014, 8(3): 81-124.

[11] 王保栋, 战闰, 藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径. 海洋学报, 2002, 24(1): 53-58.

[12] 石晓勇, 王修林, 韩秀荣, 祝陈坚, 孙霞, 张传松. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1086-1092.

[13] 周俊丽, 刘征涛, 孟伟, 李政, 李霁. 长江口营养盐浓度变化及分布特征. 环境科学研究, 2006, 19(6): 139-144.

[14] 李峥, 沈志良, 周淑青, 姚云. 长江口及其邻近海域磷的分布变化特征. 海洋科学, 2007, 31(1): 28-36, 42-42.

[15] 范海梅, 高秉博, 余江, 刘志国. 上海海域营养盐趋势与长江排海量相关性研究. 上海环境科学, 2015, 34(1): 1-6.

[16] 韩秀荣, 王修林, 孙霞, 石晓勇, 祝陈坚, 张传松, 陆茸. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1097-1101.

[17] 全为民, 沈新强, 韩金娣, 陈亚瞿. 长江口及邻近水域富营养化现状及变化趋势的评价与分析. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 13-16.

[18] 黄尚高, 杨嘉东, 暨卫东, 杨绪琳, 陈国祥. 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系. 台湾海峡, 1986, 5(2): 114-123.

[19] 杨晓兰, 林以安, 张健. 长江口邻近海域的环境水化学特征. 东海海洋, 1989, 7(2): 60-65.
[20] 李丹. 中国东部若干入海河流水化学特征与入海通量研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
[21] 方倩. 东海主要化学污染物来源和近 30 年排海通量变化规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
[22] 黄秀清, 齐平, 秦渭华, 曹维, 蒋晓山, 刘莲, 蔡燕红. 象山港海洋生态环境评价方法研究. 海洋学报, 2015, 37(8): 63-75.
[23] 范海梅, 李丙瑞, 徐韧, 李亿红, 叶属峰. 基于综合指数法的长江口及其邻近海域水质环境综合评价. 海洋学研究, 2011, 29(3): 169-175.
[24] 范海梅, 徐韧, 李丙瑞, 李志恩. 基于关键要素分布特征的长江口及其邻近海域分区研究. 海洋学研究, 2011, 29(4): 50-56.
[25] 孙毅, 母清林, 佘运勇, 王剑, 王艳华. 长江口及邻近海域沉积物重金属分布特征及生态风险评价. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 107-112.
[26] 陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 152-156.
[27] 郑丙辉. 入海河口区营养盐基准确定方法研究——以长江口为例. 北京: 科学出版社, 2013: 123-182.
[28] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 李志恩. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评价. 生态环境, 2007, 16(2): 389-393.
[29] 王丽萍, 周晓蔚, 郑丙辉, 付青. 长江口及毗邻海域沉积物生态环境质量评价. 生态学报, 2008, 28(5): 2191-2198.