

# 河口和近海水体分类分区国内外研究进展

李昭川<sup>1</sup>, 张明兴<sup>1</sup>, 康贤炜<sup>1,2</sup>, 娄亚迪<sup>1</sup>,  
王莹<sup>1</sup>, 王菊英<sup>1</sup>

(1.国家海洋环境监测中心 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 水体分类分区是河口和近海营养物基准制定和水生态环境管理的前提和基础, 对我国开展河口营养盐差异化精准管控以及陆海统筹的水质考核具有重要意义。本文梳理了美国、欧盟与我国的河口和近海水体分类分区研究进展, 结合典型案例介绍了国际上的代表性技术方法, 剖析了地形地貌、盐度、水深、水动力因素和底质类型等关键分类分区指标的生态相关性考量, 并根据现有工作基础以及我国河口和近海生态环境特征, 就总体思路、水体类型划分、指标选取等方面初步提出我国河口和近海水体分类分区框架, 以期服务于河口和近海的营养物基准标准的制修订以及水生态环境管理。

**关键词:** 营养物基准; 分类分区; 河口; 近海

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)05-0672-12

## Research progress at home and abroad on classification and segmentation of estuarine and coastal waters

LI Zhaochuan<sup>1</sup>, ZHANG Mingxing<sup>1</sup>, KANG Xianwei<sup>1,2</sup>, LOU Yadi<sup>1</sup>,  
WANG Ying<sup>1</sup>, WANG Juying<sup>1</sup>

(1.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The classification and segmentation of water bodies form the premise and basis for determining estuarine and coastal nutrient criteria, which is critical to the development of precise and differentiated estuarine nutrient control as well as water quality assessment in land-sea integration in China. Here, the research progress of classification and segmentation of estuarine offshore water bodies in the United States, the European Union and China was summarized, and the representative methodologies were introduced combined with typical cases. Key classification and segmentation factors (i.e., topography and geomorphology, salinity, bathymetry, hydrodynamic factors, and substrate) were investigated for their ecological relevance. On the basis of current studies and the characteristics of China's estuarine and coastal ecological environment, a preliminary framework for classification and segmentation of estuarine and coastal waters in China was proposed in terms of overall thoughts, classification of water body types and factor selection. Our review provides important basis for determining and revising nutrient criteria and standards, as well as for managing the ecosystems in estuarine

收稿日期: 2024-07-16, 修订日期: 2024-08-16

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2023YFC3208401); 国家生态环境基准管理项目 [JZ(2024)-03-03]

作者简介: 李昭川(1995—), 男, 辽宁大连人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋环境基准和新污染物的海洋生态毒理学研究, E-mail: zcli@nmemc.org.cn

通信作者: 王莹(1980—), 女, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为海洋生态毒理学、污染物/营养物海水水质基准/标准和生态风险评估, E-mail: wangying@nmemc.org.cn

and coastal waters.

**Key words:** nutrient criteria; classification and segmentation; estuaries; coastal waters

水质基准是水质标准制定的理论基础和科学依据,营养物水质基准/标准已成为防控水体富营养化和预防有害藻华暴发的重要手段之一,在提升特定水体用途的水生态环境质量方面发挥重要作用<sup>[1-2]</sup>。2024年1月1日,第二次修订后的《中华人民共和国海洋环境保护法》开始施行,第十六条新增了“国家鼓励开展海洋环境基准研究”,突出了海洋环境基准在我国海洋环境保护和生态环境管理中的重要作用和地位。在河口和近海营养物基准制定过程中,富营养化的发生不仅与水质条件相关,还受到区域自然地理条件和水动力条件等多种因素影响,因此,通常无法推荐一个适用于全海域的国家级营养物基准,一般需要确定营养物基准的区域单元,即水体分类分区<sup>[3-4]</sup>,以反映空间上的生态系统分布特征差异。

早在20世纪50年代,国际上就已经开展了基于河口地形特征及其成因的河口分类研究<sup>[5-6]</sup>。随着研究的不断深入,美国<sup>[3]</sup>、欧盟<sup>[4]</sup>、加拿大<sup>[7]</sup>和澳大利亚<sup>[8]</sup>等国家和地区充分考虑了自然区域和生态系统差异,逐渐建立了各自的水体分类分区方法和指标体系,首先开展了小尺度区域(如美国各沿海州、欧盟各成员国)的河口和近海水体分类分区,并制定相对应的营养物基准阈值。根据系统对营养盐响应的敏感程度和区域特异性,从地形学、水文过程和生境差异等方面,将具有相似性的河口、支流或近海划分至同一区域,以降低基准制定问题的量级,提高管理响应能力<sup>[3]</sup>。

当前,我国海洋生态环境保护管理主要依据《海水水质标准》(GB 3097—1997),无机氮和活性磷酸盐等营养物指标的标准限值主要基于美国、日本等国家的水质基准/标准限值,且未能针对河口和近海等不同类型水体进行差异化设定,难以满足不同区域特征的海洋生态环境保护管理需求。本文在综述国内外营养物基准制定过程中河口和近海水体分类分区研究进展的基础上,分析关键分区指标(如地形地貌、盐度、水

深、水动力因素和底质类型)及其生态相关性,并初步提出适用于我国未来营养物基准/标准制定的水体分类分区思路 and 方向。

## 1 国内外河口和近海水体分类分区研究概况

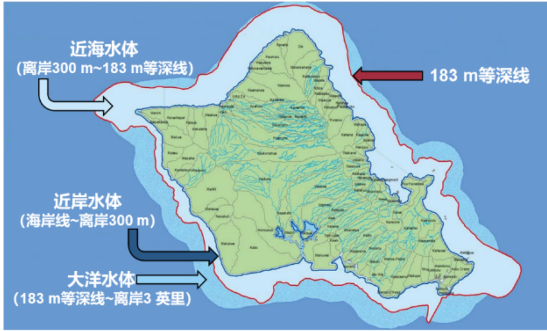
自20世纪80年代起,美国以水生态分区为基础,根据不同尺度的地貌和土地利用等要素建立了水生态区划方案并开展水环境管理。1998年,美国环保局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)发布《国家营养物基准战略》,开始制定区域性营养物基准。考虑到生态系统的变异性、复杂性和多样性以及人类活动的影响,不同类型水体的营养物基准制定存在一定差异,美国先后发布了湖泊水库(2000年)、河流(2000年)、河口和近海(2001年)、湿地(2008年)的营养物基准推导技术指南。截止到2024年6月,美国23个沿海州中的7个州,包括佛罗里达州(2018年)、加利福尼亚州(2019年)、夏威夷州(2021年)、俄勒冈州(2021年)、弗吉尼亚州(2023年)、北卡罗来纳州(2023年)和马萨诸塞州(2023年),在《河口和近海营养物基准制定技术指南》<sup>[3]</sup>的基础上发布了所管辖海域关于不同水体类型、特定河口或特定水体分区的营养物(氮、磷和叶绿素 $a$ )基准。

欧盟于2003年发布“水框架指令”5号文件《过渡水体和近海类型、参照状态和分级体系》<sup>[4]</sup>,提出了基于盐度、经纬度、地貌和水文等指标的水体分类分区方法体系,并强调了分类分区应具有生态相关性。欧洲各国根据该方法体系分别开展了各自的河口及近海水体分区研究。为了解决不同国家之间的分区结果存在较大差异的问题,欧盟发布了水框架指令6号<sup>[9]</sup>、14号<sup>[10]</sup>和30号文件<sup>[11]</sup>已建立相互校准程序,随后分别于2008年<sup>[12]</sup>、2013年<sup>[13]</sup>和2018年<sup>[14]</sup>开展了3个阶段的相互校准工作,确定了40余个河口和近海的通用分区类型,并提出各个分区类型的氮、磷营养物基准和生物质量要素阈值<sup>[14-15]</sup>。

加拿大环境部长理事会于2007年发布《营

养物: 加拿大近岸海域系统管理指导框架》<sup>[7]</sup>, 提出了加拿大河口及近海水体分区应关注的重要指标, 包括地形地貌、水停留时间、咸淡水交换、盐度、水体化学特征、水深、沉积物颗粒尺寸、底质类型以及生物群落差异等。澳大利亚与新西兰环境保护委员会和农业与资源管理委员会于 2000 年发布《淡水和海水水质技术指南》<sup>[16]</sup>, 基于地理位置将澳大利亚管辖海域划分为东南、中南、西南以及热带区域, 并制定了各区域不同水体类型(河口、近岸和近海)对应的营养物基准; 2006 年, 澳大利亚联邦发布了“澳大利亚综合近海/海洋区划 4.0”<sup>[8]</sup>, 根据离岸距离、生物(底栖鱼类、海洋植物和无脊椎动物)分布、海底地貌和沉积物以及海洋学数据等划分了 60 个中尺度海洋生态区, 并在 2012 年提出了各海洋生态区的营养物基准<sup>[17]</sup>。世界各国的河口和近海水体分区体系在一定程度上反映各自国家的国情和区域特征(如环境要素和生物区系)。

近年来, 我国学者针对长江口<sup>[18]</sup>和九龙江河口<sup>[19]</sup>等开展了水体分类分区研究, 2022 年发布了团体标准《河口营养物基准制定技术指南》(T/CSES 70—2022), 提出了我国河口分区的原则性方法和重要分区因素, 积极推动了我国河口和近海水体分类分区和营养物基准研究的发展。



2 河口和近海水体分类分区方法

2.1 水体分类方法

2.1.1 美 国

US EPA 在《河口和近海营养物基准制定技术指南》中, 依据水体类型定义和地理特征, 将各沿海州所管辖的海域(多数州在 3 海里以内拥有法定管辖权)划分为河口和近海两种水体类型<sup>[3]</sup>。其中, 河口引用了 Pritchard(1967)<sup>[20]</sup>提出的经典定义, 即可与外海自由连通的半封闭沿海水体, 海水在这里被由陆地流入的淡水所冲淡, 传统的河口通常还包括感潮河段、海湾、潟湖等水体<sup>[21]</sup>; 而近海则定义为位于沿岸平均高水位基线和陆架坡折之间的海洋系统, 当存在开放性的大陆架时, 指离岸 20 海里以内的海洋系统<sup>[3]</sup>。基于指南中的定义, 各沿海州结合实际情况对所管辖的海域进行水体类型的划分。例如, 佛罗里达州按照指南要求, 将所管辖的海域划分为河口和近海两种水体类型<sup>[22-23]</sup>; 而夏威夷州则将咸水和海洋水体划分为 4 种主要类型, 依据地形地貌特征将海岸线内部的水体划分为河口和海湾, 依据水深(183 m 等深线)将海岸线外部的水体划分为开阔近海(包括近岸水体和近海水体)和大洋, 并针对各类型水体制定了相应的营养物基准(图 1)<sup>[24-25]</sup>。

| 水体分类 | 几何平均值限值         | 任意10%时间内的平均值限值  | 任意2%时间内的平均值限值   |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 河口   | 0.2             | 0.35            | 0.5             |
| 海湾   | 0.2*<br>0.15**  | 0.35*<br>0.25** | 0.5*<br>0.35**  |
| 开阔近海 | 0.15*<br>0.11** | 0.25*<br>0.18** | 0.35*<br>0.25** |
| 大洋   | 0.05            | 0.08            | 0.1             |

注: 开阔近海包括近岸水体和近海水体; 根据每日淡水输入量的不同, 针对海湾和开放近海分别制定“湿”基准(\*)和“干”基准(\*\*)

图 1 夏威夷州咸水和海洋水体分类及对应的总氮基准值(mg/L)<sup>[24-25]</sup>

Fig. 1 Classification of Hawaii State brackish and marine waters and corresponding total nitrogen criteria

2.1.2 欧 盟

欧盟同样将管辖海域划分为河口(过渡水体)和近海两种类型。河口指的是受到淡水径流显著影响的半咸性水域, 而近海是指领海基线以外 1 海里处向陆地侧的水域(图 2A)<sup>[4]</sup>。在《过渡水体和近海类型、参照状态和分级体系》中, 欧

盟提供了参考性的划分方法, 针对淡水-河口边界、河口-近海边界以及近海外部边界进行了规定<sup>[4]</sup>: 淡水-河口边界的划分, 主要依据淡/咸水边界(盐度为 0.5)或潮汐边界(图 2B); 河口-近海边界的确定, 则主要根据盐度梯度分布、地理特征、沿海国家法律规定的边界或模型预测

等方法;近海外部边界根据其定义直接确定。欧盟各成员国在遵循上述原则的基础上,结合本国实际情况,选择最具生态相关性的水体类型边界确定方法。例如,英国根据盐度划分了河口(盐度 < 30)、近海(盐度范围 30 ~ 34.5)和外海(盐

度 > 34.5) 3 种水体类型,并制定了不同水体类型的营养物基准阈值,如达到“良好”等级的 3 种水体类型的溶解无机氮基准分别为 0.420 mg/L、0.252 mg/L 和 0.210 mg/L<sup>[26]</sup>。

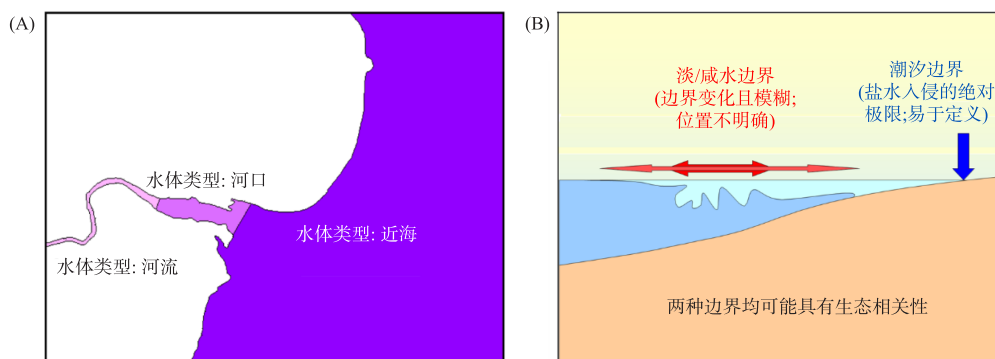


图2 欧盟水体类型(A)及淡水-河口边界划分方法(B)<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Categories of European Union waters (A) and methods for defining the freshwater boundary of transitional waters (B)

## 2.2 水体分区方法

### 2.2.1 美国

根据河口对营养物富集的敏感性,US EPA 提供了综合的分区指导框架,涵盖地形地貌、水动力因子和生境群落等多种关键因素,以指导各沿海州对河口进一步分区。其中水动力因子考虑了层化和环流特征、水停留时间、水交换(径流、潮汐和波浪)和潮差等因素;生境和群落类型主要包括海草、红树林、泥滩、深水航道、牡蛎礁和水生沼泽等。同时,底质类型(砂质和泥质)和盐度(如低盐、中盐和高盐)也能够影响生境和群落分布<sup>[3]</sup>,可以作为河口分区的考量因素。与河口分区方法类似,近海分区首先考虑地貌特征,如大陆架的宽窄、海底坡度及粗糙度;其次是物理和水文因素,如垂直盐度分布、季节性海平面波动、水色和锋面;最后考虑生境和群落特征,包括红树林、海草、海藻和珊瑚礁等<sup>[3]</sup>。

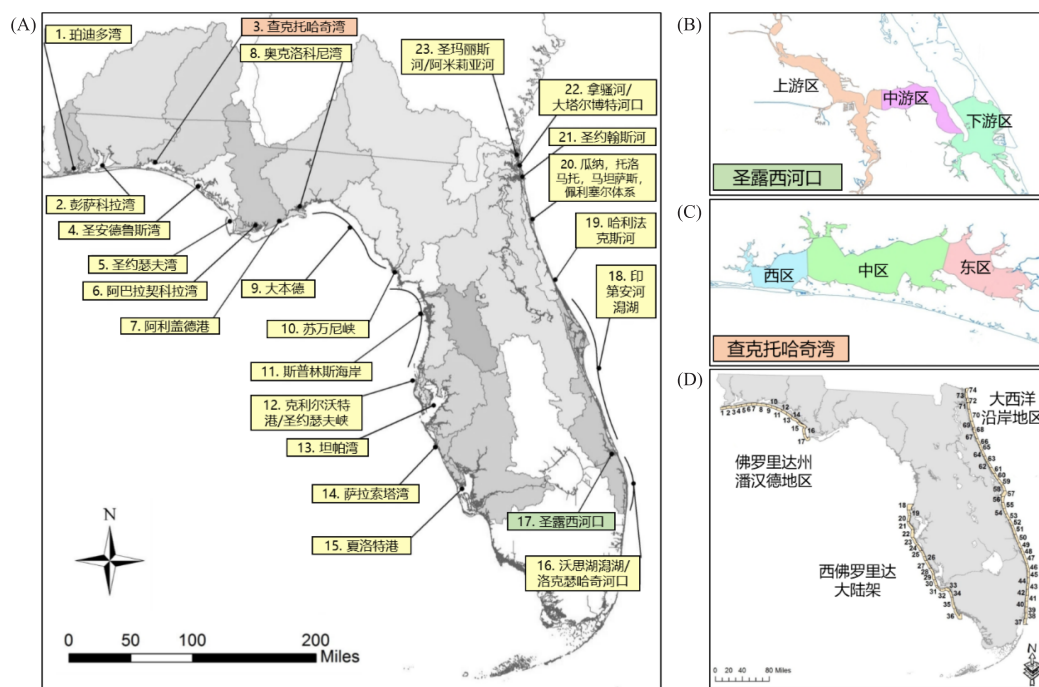
在实践中,美国各州往往针对管理需求和特定区域的生态环境特征建立具有区域针对性的分区方法。以佛罗里达州为例,该州环保局于2012年针对辖区内(南部海域除外)的河口和近海,基于水体分区单元提出营养物水质基准<sup>[22-23]</sup>。对于佛罗里达州河口,首先根据自然地理边界划分为23个河口区(图3A),并依据长期平均盐度分布、海草分布和地貌特征等因素,进一步划分

为89个尺度更小的分区单元<sup>[22]</sup>。例如,圣露西河口基于等盐度线,分为上、中和下游3个分区单元,各分区单元的盐度中位数分别为2.7、17.1和31.5(图3B);而查克托哈奇湾在考虑盐度梯度的基础上,进一步考虑了不同分区单元的海草分布差异,如西区以大西洋二药藻(*Halodule wrightii*)和泰来藻(*Thalassia testudinum*)为主,而东区分布的海草主要包括川蔓藻(*Ruppia maritima*)和美洲苦草(*Vallisneria spiralis*) (图3C)<sup>[22]</sup>。对于近海,则基于物理因素(风、潮汐、淡水流入和洋流等)和浊度等因素划分成大西洋沿岸、佛罗里达州潘汉德地区以及西佛罗里达大陆架3个区,并进一步基于4海里以内的水色卫星水体识别码划分成74个分区单元(图3D)<sup>[23]</sup>。

### 2.2.2 欧盟

欧盟水框架指令5号文件<sup>[4]</sup>提出基于类型学的河口及近海分区方法,旨在通过简单的物理分类的方式划分兼具生态相关性和易于实施的水体分区单元,从而建立针对各类水体的特定参照状态。该方法包括A型分区法和B型分区法,两者分别针对河口及近海建立了不同的分区指标体系。A型分区法采用了年平均盐度、平均潮差(仅河口)和平均水深(仅近海)3项指标划分区域<sup>[4]</sup>。然而,由于其不能确保分区结果与当





(A) 佛罗里达州河口; (B) 圣露西河口; (C) 查克托哈奇湾; (D) 佛罗里达州近海<sup>[22-23]</sup>

图3 美国佛罗里达州(南部海域除外)河口及近海分区

Fig. 3 Classification and segmentation of estuarine and coastal waters in Florida (except for south Florida), United States

地环境条件的生态相关性,因此多数欧盟成员国采用指标体系更为丰富的B型分区法,即通过选取决定区域特征的物理和化学因素确定水体分区单元的所属类型,进而综合考虑区域生物群落结构和组成特征差异。B型分区法包含强制指标和可选指标两大类,其中强制指标包括地理位置、潮差和盐度,可选指标涵盖分层混合特征、水停留时间(主要针对河口和封闭海湾)、海岸开敞度、水深、海流速度、平均水温、浊度、底质类型、水温范围和地形等(表1)。例如,英国水质标准咨询机构采用B型分区法,依据分层混合特征、盐度、平均潮差、海岸开敞度、水深和底质类型等指标,将英国及爱尔兰管辖海域划分为6种河口分区类型和11种近海分区类型(表2)<sup>[27]</sup>。欧洲各国根据上述分区方法和相互校准程序<sup>[9-11]</sup>,在波罗的海、东北大西洋、地中海和黑海4个区域共确定了12个河口和31个近海通用分区类型,不同区域和不同水体类型所采用的分区指标有所差异<sup>[14]</sup>。与美国相比,欧盟所建立的分区体系明确了各个分区指标对应的定性或定量划分范围,在实际操作中更具优势。

生物质量要素(如浮游植物、大型藻类、底

栖生物和鱼类等类群的组成、丰度和多样性等指标)是欧盟评价水体生态状况的主要因素<sup>[4]</sup>。为了验证基于物理水文等要素划分的水体分区单元与生物质量要素间是否具有高度耦合性,欧盟从生态相关性的角度出发,建立了水体分区评估方法<sup>[28]</sup>。例如,波罗的海沿岸国家为简化水体分区类型,建立了“伞形”分区体系,筛选出盐度、水停留时间和水深作为波罗的海重要的分区因素,基于波罗的海38个站位的硅藻(春季和秋季)、甲藻(春季和夏季)、蓝藻(夏季)和绿藻(夏季)等浮游植物类群总生物量的占比,采用三因素方差分析验证了3种分区指标的生态相关性。评估结果表明,盐度和水深能够显著影响不同浮游植物类群总生物量的季节性占比,分区指标具有一定的生态相关性<sup>[28]</sup>。

### 2.2.3 我国

随着国际上河口水质管理理念的日益成熟,我国学者陆续开展适用于营养物基准制定的河口及近海水体分类与分区研究,从单纯考虑地形地貌和水动力因子等物理学要素逐渐变为综合考虑生态要素的响应及各因素间的因果联系<sup>[21]</sup>。例如,刘保莉等<sup>[19]</sup>结合流域的行政区划和河口

表 1 欧盟水框架指令河口及近海水体类型学指标体系(B 型分区法)<sup>[4]</sup>

| Tab.1 Typology factors for transitional and coastal waters of European Union Water Framework Directive (for System B) |                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 分区指标                                                                                                                  | 等级划分                                                            |
| 地理位置(纬度/经度)                                                                                                           | —                                                               |
| 潮差                                                                                                                    | 低(< 1 m)、中(1 ~ 5 m)、高(> 5 m)                                    |
| 盐度                                                                                                                    | 淡水(< 0.5)、低盐(0.5 ~ 5或6)、中盐(5或6 ~ 18或20)、高盐(18或20 ~ 30)、真盐(> 30) |
| 分层混合特征                                                                                                                | 永久完全混合、部分分层、永久分层                                                |
| 潮间带面积占比                                                                                                               | 小(< 50%)、大(> 50%)                                               |
| 水停留时间                                                                                                                 | 短(数天)、中(数周)、长(数月至年)                                             |
| 海岸开敞度                                                                                                                 | 开阔、较开敞、开敞、半开敞、半封闭和全封闭                                           |
| 水深                                                                                                                    | 浅(< 30 m)、中(30 ~ 50 m)、深(> 50 m)                                |
| 海流速度                                                                                                                  | 低(< 1 knot)、中(1 ~ 3 knot)、高(> 3 knot)                           |
| 平均水温                                                                                                                  | —                                                               |
| 浊度                                                                                                                    | —                                                               |
| 底质类型                                                                                                                  | 坚硬石质、砂质、泥质、混合型                                                  |
| 水温范围                                                                                                                  | —                                                               |
| 地形                                                                                                                    | —                                                               |

注: 潮间带面积占比综合考虑了水深、潮差、水停留时间和地形等指标; 河口推荐的指标选取优先排序为经纬度、潮差、盐度、分层混合特征、潮间带面积占比、水停留时间和其他; 近海推荐的指标选取优先排序为经纬度、潮差、盐度、海岸开敞度、水深和其他, 未明确推荐优先性的指标可按与区域生态相关性程度选取

表 2 基于欧盟水框架指令的英国及爱尔兰河口及近海水体类型学<sup>[27]</sup>

Tab.2 Typology for transitional and coastal waters of the United Kingdom and Republic of Ireland implementing the European Union Water Framework Directive

| 分区类型 | 分层混合特征 | 盐度    | 平均潮差 | 海岸开敞度 | 水深    | 底质类型 | 备注    |
|------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| TW1  | 部分分层   | 中/高盐  | 高潮差  | 半封闭   | 浅水潮间带 | 砂/泥质 | —     |
| TW2  | 部分分层   | 中/高盐  | 中等潮差 | 半封闭   | 浅水潮间带 | 砂/泥质 | —     |
| TW3  | 完全混合   | 中/高盐  | 高潮差  | 半封闭   | 开阔潮间带 | —    | —     |
| TW4  | 完全混合   | 高/真盐  | 中等潮差 | 半封闭   | 开阔潮间带 | 砂/泥质 | —     |
| TW5  | —      | 高盐    | 中等潮差 | 半封闭   | —     | —    | 海湾    |
| TW6  | 部分分层   | 低盐至高盐 | —    | 半封闭   | 浅     | 泥质   | 潟湖    |
| CW1  | —      | 真盐    | 高潮差  | 开敞    | —     | —    | —     |
| CW2  | —      | 真盐    | 中等潮差 | 开敞    | —     | —    | —     |
| CW3  | —      | 真盐    | 低潮差  | 开敞    | —     | —    | —     |
| CW4  | —      | 真盐    | 高潮差  | 半开敞   | —     | —    | —     |
| CW5  | —      | 真盐    | 中等潮差 | 半开敞   | —     | —    | —     |
| CW6  | —      | 真盐    | 低潮差  | 半开敞   | —     | —    | —     |
| CW7  | —      | 真盐    | 高潮差  | 半封闭   | —     | —    | —     |
| CW8  | —      | 真盐    | 中等潮差 | 半封闭   | —     | —    | —     |
| CW9  | —      | 真盐    | 低潮差  | 半封闭   | —     | —    | —     |
| CW10 | —      | 真盐    | —    | 半封闭   | —     | —    | 潟湖    |
| CW11 | —      | 真盐    | 中等潮差 | 半封闭   | —     | —    | 海湾(浅) |
| CW12 | —      | 真盐    | 中等潮差 | 半封闭   | —     | —    | 海湾(深) |

注: TW1—TW6为河口; CW1—CW12为近海, 其中, 英国及爱尔兰近海无CW9类型水域

地貌特征,采用威尼斯盐度分类体系对九龙江河口进行分区,最终确定了 3 个具有显著物理和生化属性区别的分区单元(图 4A);刘录三等<sup>[18]</sup>以长江口自然地理特征为基础,利用层级分区的方法根据地形、盐度和生境等因素将长江口及邻近海域划分为 4 个分区单元(图 4B),并采用单因素分析方法对各分区的水体特征和沉积物特征进行一致性检验;黄金良等<sup>[29]</sup>基于地理信息系统技术开展中国主要入海河流的河口集水区的划分及其分类,建立了涵盖物理、水文、化学

和生态特征的指标体系,采用聚类分析方法将我国河口划分成 5 类,并用快速生物评价法验证河口分类的合理性,该分类法为进一步开展我国河口和近海营养物基准分区与制定提供了依据。团体标准《河口营养物基准制定技术指南》(T/CSES 70—2022)中强调了地理形态和盐度分布在河口分区中的重要性,提出了基于图层叠加和归类等的河口水体分区方法,以及基于统计学和氮磷营养物、叶绿素、透明度或浊度等因子的分区验证方法<sup>[30]</sup>。

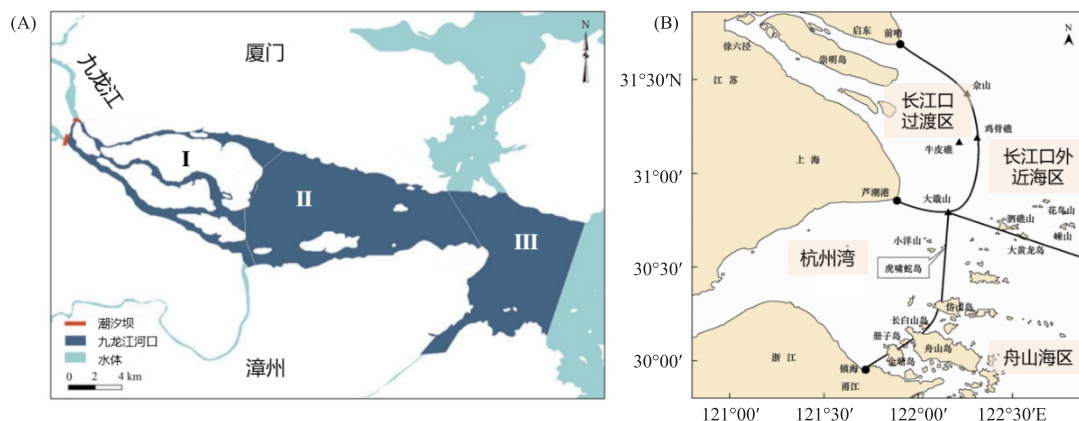


图 4 九龙江口(A)<sup>[19]</sup>及长江口(B)<sup>[18]</sup>水体分区结果

Fig. 4 Segmentation of the Jiulong estuary (A) and Yangtze estuary (B)

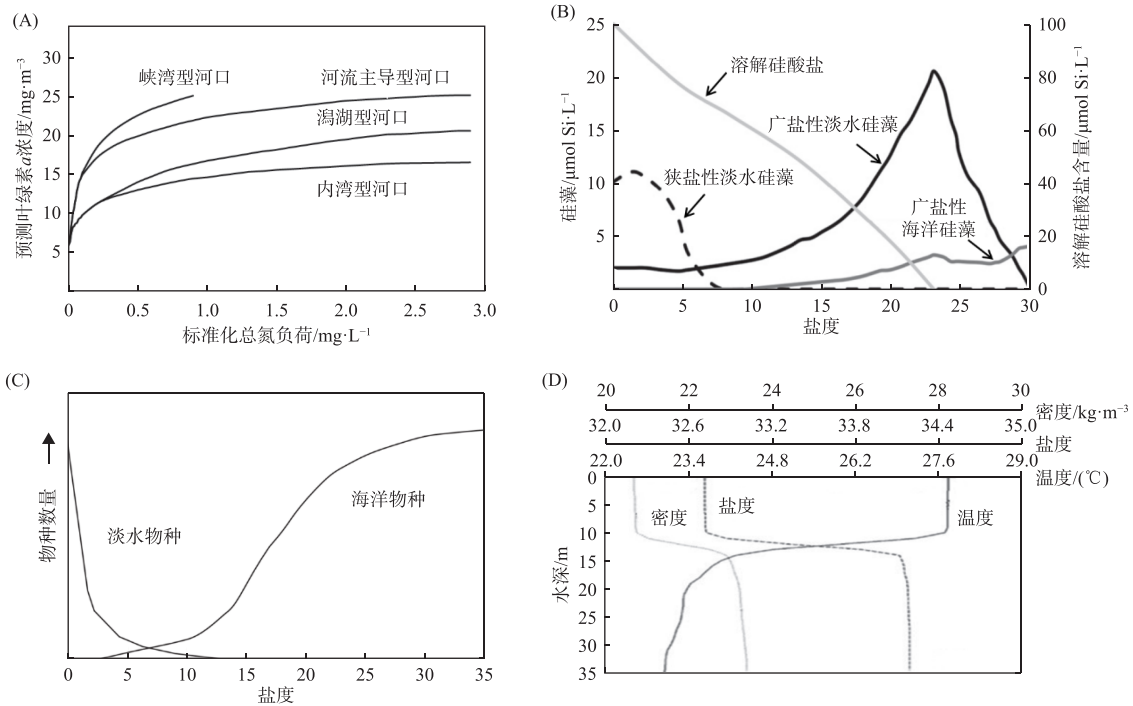
## 2.3 河口和近海水体分类分区关键因素考量

### 2.3.1 地形地貌

地形地貌可以初步评估河口响应的敏感性<sup>[3]</sup>,在河口水体分区中常被优先考虑。不同国家根据各自的区域特征对河口的地形地貌分类有所差异,例如,美国将河口分为河流主导型、潟湖型、内湾型和峡湾型等,在相同营养负荷条件下,不同类型河口对叶绿素生物变量的响应表现出一定差异(图 5A)<sup>[21,31]</sup>;澳大利亚新南威尔士州将辖区内的 184 个河口分为湖泊型(开阔内湾、溺谷型河口等)、河流型(波浪主导型)和潟湖型(间歇性开阔潟湖),每种河口对叶绿素的生态响应随着相应的稀释和冲刷特征表现出显著差异<sup>[21,32]</sup>;李俊龙等<sup>[33]</sup>将我国 65 个河口分为河口型海湾、构造型海湾和潟湖湾,发现大部分构造型海湾对营养盐负荷相对敏感,其他类型河口对负荷敏感性变化较大,而 3 种类型河口的富营养化敏感性总体分布比例相当。

### 2.3.2 盐度

盐度作为表征生物地球化学过程的重要参数<sup>[19,37]</sup>,是各国河口和近海营养物基准制定以及富营养化评价水体分类方法中的主要考虑因素之一。一方面,盐度反映了咸淡水混合的物理过程以及营养盐的陆源输入和循环<sup>[3]</sup>;另一方面,盐度能够影响区域内微藻(如硅藻,见图 5B)和大型藻类、浮游动物及底栖动物等生物类群的种类、丰度和生物量<sup>[34,38-40]</sup>,进而影响生物群落的生态平衡和营养结构。有研究以英国泰晤士河河口为例,建立了关于河口区物种分布的双向生态渐变模型(图 5C)<sup>[35]</sup>,相较于河口区,盐度高于 30 的海域通常盐度变化幅度较小,生存条件相对稳定,生物种类和数量往往呈现出增加的趋势<sup>[40]</sup>。此外,盐度能够决定赤潮生物是否快速繁殖或稳定聚集<sup>[41]</sup>,区域水体盐度变化到赤潮生物最适生长范围往往是诱发赤潮(如夜光藻、东海原甲藻、锥状斯克里普藻等)的关键外部条件



(A) 基于剂量-响应模型预测的美国不同类型河口叶绿素 *a* 浓度与标准化总氮负荷间的关系<sup>[31]</sup>; (B) 不同硅藻在盐度梯度下的变化模型<sup>[34]</sup>; (C) 河口区物种分布的双向生态渐变模型<sup>[35]</sup>; (D) 珠江口近海夏季密度、盐度和温度垂向分布<sup>[36]</sup>

图 5 河口分区指标的生态相关性

Fig. 5 Ecological relevance of segmentation factors in estuaries

之一<sup>[42-43]</sup>。

关于划分水体类型时的盐度边界选取在不同研究领域存在一定差异。在营养物基准研究方面, 国际上通常参考广为接受的威尼斯盐度分

类体系<sup>[44]</sup>, 分别将盐度 0.5 和盐度 30 作为淡水-河口以及河口-近海的边界。在富营养化评价方面, 盐度 0.5 或 2 以及盐度 18 或 25 常被用作水体分类的边界值(表 3)。

表 3 营养物基准制定和富营养化评价中基于盐度的水体分类比较

Tab.3 Comparison of salinity-based water classification in nutrient criteria derivation and eutrophication assessment

| 研究领域    | 国家/组织            | 基于盐度( <i>S</i> )的水体分类            | 参考文献  |
|---------|------------------|----------------------------------|-------|
| 营养物基准制定 | 美国/欧盟            | 淡水区: $S < 0.5$                   | [3-4] |
|         |                  | 低盐区: $0.5 \leq S < 5$ 或6         |       |
|         |                  | 中盐区: 5或6 $\leq S < 18$ 或20       |       |
|         |                  | 高盐区: 18或20 $\leq S \leq 30$      |       |
|         |                  | 真盐区: $S > 30$                    |       |
|         | 美国(ASSETS)       | 感潮淡水区: $S < 0.5$                 | [45]  |
|         |                  | 混合区: $0.5 \leq S \leq 25$        |       |
|         |                  | 海水区: $S > 25$                    |       |
|         |                  | 河口: $0.5 \leq S \leq 18$         |       |
|         |                  | 近岸水体: $S < 30$                   |       |
| 富营养化评价  | 欧盟(OSPAR COMPP)  | 河口/湾口以内近海水体: $30 \leq S \leq 32$ | [46]  |
|         |                  | 河口/湾口以外近海水体: $32 < S \leq 34.5$  |       |
|         |                  | 外海水体: $S > 34.5$ 或35             |       |
|         |                  | 感潮淡水区: $S \leq 2$                |       |
|         |                  | 混合区: $2 < S \leq 25$             |       |
|         | 中国(HJ 1300—2023) | 海水区: $S > 25$                    | [47]  |

注: ASSETS: 河口营养状况综合评价(Assessment of Estuarine Trophic Status); OSPAR: 东北大西洋海洋环境保护公约综合评价法(Oslo and Paris Comprehensive Procedure)



### 2.3.3 水深

水深能够在多个层面影响河口/近海生态系统的生境特征,如分层混合特征和光穿透情况等<sup>[28]</sup>,进而影响生物群落分布,因此可以作为水体分区的有效指标之一。跃层深度是生物学上的重要参数<sup>[28]</sup>,在跃层深度附近的海水水温、盐度和密度等物理性质均可以发生跃变,导致营养盐、溶解氧和叶绿素等的垂直分布出现明显的差异<sup>[48]</sup>。跃层深度受季节和陆架地形等因素影响,例如珠江口邻近海域夏季跃层显著,近海温盐跃层深度分布在10 m左右(图5D),外海陆架跃层深度为50~70 m,而冬季海水混合剧烈,跃层现象不明显<sup>[36]</sup>。此外,由于光在海水中的穿透能力随着水深的增加而急剧减弱,因此水深直接影响依赖光进行光合作用的海洋生物的分布,例如,全球范围内大部分海草物种通常分布在水深30 m以内的海域<sup>[49]</sup>。

### 2.3.4 水动力因素

在河口和近海水体分区过程中,常见的水动力因素包括层化特征、水停留时间、冲刷和潮差等,这些是表征河口对营养负荷敏感性的重要因素。高度分层的系统比垂直混合的系统更容易形成缺氧现象,跃层的出现不仅限制了溶解氧向下输移,还保留了海水透光层中的营养物质,使得浮游植物更容易利用这些营养物质进行繁殖<sup>[3]</sup>。水停留时间能够衡量河口的营养物负荷,停留时间相对较短的河口能够更快地输出营养物质,使得河口的营养物浓度相对较低<sup>[3]</sup>。此外,水停留时间还决定了营养盐在河口系统的可利用时间,停留时间小于赤潮生物增殖时间的河口通常能够抑制赤潮的形成<sup>[3,33]</sup>。平均潮差>2 m的河口对来自淡水径流的含氮营养物通常表现出较强的耐受性,其叶绿素 $a$ 含量一般低于潮差相对较小的河口,这可能与潮汐混合、流速、光穿透和沉积物再悬浮等过程有关<sup>[50]</sup>。

### 2.3.5 底质类型

底质类型是描述海底栖息地的关键参数,主要包括砂质、泥质和岩石等,能够影响海草床和大型底栖动物的分布。例如,我国山东海草场的大叶藻属海草场主要分布于泥沙底质,而虾海藻属海草场常见于岩石硬质底质的浅水海域<sup>[51]</sup>。

对于大型底栖动物而言,砂质底质通常分布在水动力活跃的海区,沉积物中有机质含量较低,营养相对贫乏,底栖生物栖息地稳定性较弱,不利于固着型生物的生存<sup>[52]</sup>,以移动能力高、掘洞型、爬行/游泳型和滤食性动物为主<sup>[53]</sup>;泥相底质能够吸附大量有机质<sup>[54]</sup>,以食沉积物物种为主;而岩礁区生境多样,能够为固着型生物提供良好的附着基质,同时岩礁上各种藻类形成的藻丛为底栖动物提供了丰富的营养物质和生存场所,主要包括食藻动物、捕食性动物、滤食性和沉积食性动物,物种性状类型多样,生态系统相对稳定<sup>[53]</sup>。

## 3 我国河口和近海水体分类分区初步展望

在同一水体分区内,由于具有相似的水文水质条件、水生生物特性以及对营养物输入的响应特征等,水体生产力和营养状况呈现出较好的相关性<sup>[22]</sup>。因此,水体分类分区是河口和近海营养物基准制定的前提和基础,对我国开展河口营养盐差异化精准管控以及陆海统筹的水质考核等生态环境管理具有重要意义。基于我国现有研究工作基础以及河口和近海生态环境特征,对我国河口和近海水体分类分区提出以下展望(图6)。

(1)我国海域跨越暖温带、亚热带和热带3个气候带,海洋生态系统复杂多样,当前开展全海域的大尺度海洋水体分类分区工作面临较大挑战。建议从河流-河口-近海连续体角度出发,优先针对受赤潮、低氧/缺氧等生态环境问题影响严重的重点海域,如辽东湾、长江口-杭州湾和珠江口等,开展水体分类分区研究。

(2)盐度是反映河口区水动力特征和生物生态特征的重要指标。河口盐度受降雨量、径流和潮汐作用等因素的影响,在不同季节、水期和年份间不断变化。然而,基于动态等盐度线划分水体类型在实际操作上存在困难,且不利于生态环境管理。因此,从管理层面的可操作性和围填海等人类活动影响等角度出发,同时考虑到富营养化引起的浮游植物大量繁殖通常发生在海水表层,建议以近年的表层平均盐度分布作为主要依据,结合国际主流的威尼斯盐度分类体系、

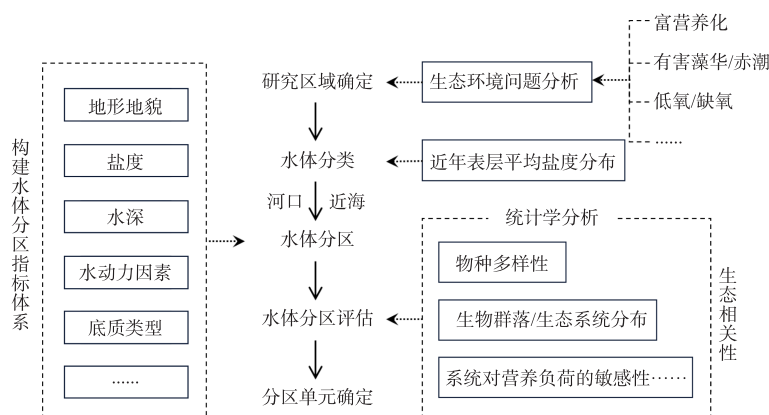


图6 我国河口和近海水体分类分区框架

Fig. 6 Schematic framework of classification and segmentation of estuarine and coastal waters in China

河口区域生态渐变模型等,划分河口和近海水体类型。

(3)基于对国内外河口和近海水体分类分区总体发展趋势的分析,建议构建兼具共性和区域差异化特征的水体分类分区框架,以地形地貌、盐度、水深、水动力因子和底质类型等为分区依据,统筹考虑系统对营养负荷的敏感性、典型生物群落和生态系统分布以及物种多样性等,对分区结果进行生态相关性评估,有机串联各个分区指标间的因果联系,服务于河口和近海的营养物基准/标准制修订以及水生态环境管理。

### 参考文献:

- [1] DAI M H, ZHAO Y Y, CHAI F, et al. Persistent eutrophication and hypoxia in the coastal ocean[J]. Cambridge Prisms: Coastal Futures, 2023, 1: e19.
- [2] 俞志明, 陈楠生. 国内外赤潮的发展趋势与研究热点[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 474-486.
- [3] BARRERA J, CANTILLI R, DAVIS I, et al. Nutrient criteria technical guidance manual: estuarine and coastal marine waters. EPA-822-B-01-003[R]. Washington, DC: Office of Water U. S. Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology, 2001.
- [4] EC. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) guidance document No. 5, transitional and coastal waters typology, reference conditions and classification systems[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [5] KETCHUM B H. The flushing of tidal estuaries[J]. Sewage and Industrial Wastes, 1951, 23(2): 198-209.
- [6] PRITCHARD D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. Journal of Marine Research, 1952, 11(2): 106-123.
- [7] CCME. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: nutrients: canadian guidance framework for the management of nearshore marine systems[R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007.
- [8] Commonwealth of Australia. A guide to the integrated marine and coastal regionalisation of Australia Version 4.0[R]. Canberra: Department of the Environment and Heritage, 2006.
- [9] EC. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) guidance document No. 6, towards a guidance on establishment of the intercalibration network and the process on the intercalibration exercise[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [10] EC. Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) guidance document No. 14, the intercalibration process 2004-2006[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005.
- [11] EU. Procedure to fit new or updated classification methods to the results of a completed intercalibration exercise, guidance document No. 30[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2015.
- [12] EC. Commission Decision 2008/915/EC of 30 October 2008 establishing, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, the values of the Member State monitoring system classifications as a result of the intercalibration exercise[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008.
- [13] EU. Commission Decision 2013/480/EU of 20 September 2013 establishing, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, the values of the Member State monitoring system classifications as a result of the intercalibration exercise and repealing Commission Decision 2008/915/EC[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2013.

- tions of the European Communities, 2013.
- [14] EU. Commission Decision 2018/229/EU of 12 February 2018 establishing, pursuant to Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, the values of the Member State monitoring system classifications as a result of the intercalibration exercise and repealing Commission Decision 2013/480/EU[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2018.
- [15] PHILLIPS G, KELLY M, TEIXEIRA H, et al. Best practice for establishing nutrient concentrations to support good ecological status: JRC Technical Report EUR 29329 EN[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.
- [16] ANZECC, ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality[R]. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, 2000.
- [17] HALE J, BUTCHER R, COLLIER K, et al. ANZECC/ARMCANZ Water quality guidelines revision: Ecoregionalisation and ecosystem types in Australian and New Zealand marine, coastal and inland water systems[R]. Canberra: Environment Department of Sustainability, Water, Population and Communities, 2012.
- [18] 刘录三, 郑丙辉, 孟伟, 等. 基于自然地理特征的长江口水域分区[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5042-5054.
- [19] LIU B L, CAO W Z, HUANG Z, et al. Developing nutrient criteria for the Jiulong River Estuary, Southeast China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(2): 1-13.
- [20] PRITCHARD D W. What is an estuary: physical viewpoint [M]//LAUFF G H. Estuaries. Washington: American Association for the Advancement of Science, 1967, 83: 3-5.
- [21] 刘静, 刘录三, 林岩璇, 等. 基于环境风险管理的我国河口分类框架探讨 [C]//2016 中国环境科学学会学术年会论文集 (第一卷). 海口: 中国环境科学学会, 2016: 629-639.
- [22] USEPA. Technical support document for U. S. EPA's proposed rule for numeric nutrient criteria for Florida's estuaries, coastal waters, and South Florida inland flowing waters, Volume 1: estuaries[R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [23] USEPA. Technical support document for U. S. EPA's proposed rule for numeric nutrient criteria for Florida's estuaries, coastal waters, and South Florida inland flowing waters, Volume 2: Coastal Waters[R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2012.
- [24] HAWAII. Hawaii Administrative Rules title 11 department of health, chapter 54 water quality standards[R]. Pearl City: Department of Health Environmental Management Division Clean Water Branch, 2021.
- [25] Hawaii State Department of Health Clean Water Branch. Marine water quality assessment methodology for the 2016 integrated report[R]. Honolulu, Hawaii: Hawaii State Department of Health Clean Water Branch, 2015.
- [26] UKTAG. UK environmental standards and conditions (Phase 2). final[R]. Bristol: UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive, 2008.
- [27] UKTAG. UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive: guidance on typology for coastal & transitional waters of the UK and Republic of Ireland (Final)[R]. Bristol: UK Technical Advisory Group, 2003.
- [28] SCHERNEWSKI G, WIELGAT M. A Baltic Sea typology according to the EC-Water Framework Directive: Integration of national typologies and the water body concept[J]. Coastline Reports, 2004, 4: 1-26.
- [29] 黄金良, 李青生, 黄玲, 等. 中国主要入海河流河口集水区划分与分类[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3516-3527.
- [30] 中国环境科学学会. 河口营养物基准制定技术指南: T/CSES 70—2022[S]. 北京: 中国环境科学学会, 2022.
- [31] GLIBERT P M, BOYNTON W R, FLEMER D, et al. Nutrients in estuaries, A summary report of the National Estuaries Experts Workgroup, 2005—2007[R]. Washington, DC: National Estuarine Experts Workgroup, 2010.
- [32] ROPER T, CREESE B, SCANES P, et al. Assessing the condition of estuaries and coastal lake ecosystems in NSW, Monitoring, evaluation and reporting program, Technical report series[R]. Sydney: Office of Environment and Heritage, 2011.
- [33] 李俊龙, 郑丙辉, 刘永, 等. 中国河口富营养化对营养盐负荷的敏感性分类[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(4): 455-467.
- [34] LANCELOT C, MUYLAERT K. Trends in estuarine phytoplankton ecology[J]. Treatise on Estuarine and Coastal Science, 2011, 7: 5-15.
- [35] ATTRILL M J, RUNDLE S D. Ecotone or ecocline: ecological boundaries in estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55(6): 929-936.
- [36] 张燕, 夏华永, 钱立兵, 等. 2006年夏、冬季珠江口附近海域水文特征调查分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 20-28.
- [37] COOPER N S. The effect of salinity on tropical ocean models [J]. Journal of Physical Oceanography, 1988, 18(5): 697-707.
- [38] 黄彬彬, 郑淑娴, 蔡伟叙, 等. 珠江口枯水期和丰水期中小型桡足类组成、丰度分布及其与环境因子的关系[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(6): 852-858.
- [39] RYBAK A S. Species of *Ulva* (Ulvothlyceae, Chlorophyta) as indicators of salinity[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 253-261.
- [40] 张敬怀. 珠江口及邻近海域大型底栖动物多样性随盐度、水深变化趋势[J]. 生物多样性, 2014, 22(3): 302-310.

- [41] GLIBERT P M. Harmful algae at the complex nexus of eutrophication and climate change[J]. *Harmful Algae*, 2020, 91: 101583.
- [42] 徐金涛, 姚远, 杨雯, 等. 2022年秦皇岛近岸海域赤潮成因初探[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3): 817-826.
- [43] 何恩业, 王丹, 卢勇夺, 等. 典型东海原甲藻赤潮过程的环境影响因子分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(6): 63-73.
- [44] ANONYMOUS. Final resolution. The Venice System for the classification of marine waters according to salinity[M]//D'ANCONA U. Symposium on the Classification of Brackish Waters. Venice: Archivio di Oceanografia e Limnologia, 1959, 11: 243-248.
- [45] BRICKER S B, FERREIRA J G, SIMAS T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169(1): 39-60.
- [46] OSPAR. Common procedure for the identification of the eutrophication status of the OSPAR maritime area[R]. London: OSPAR Commission, 2013.
- [47] 生态环境部. 海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范: HJ 1300—2023[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023.
- [48] 陈法锦, 陈淳青, 周凤霞, 等. 秋季珠江口外海海域的生态环境特征[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6): 844-852.
- [49] MINGUITO-FRUTOS M, BOADA J, PAGÈS J F, et al. Species-specific acclimatization capacity of key traits explains global vertical distribution of seagrass species[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2023, 32(6): 976-986.
- [50] MONBET Y. Control of phytoplankton biomass in estuaries: a comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries[J]. *Estuaries*, 1992, 15(4): 563-571.
- [51] 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. *生物多样性*, 2013, 21(5): 517-526.
- [52] 李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等. 底质类型对三亚湾潮间带大型底栖动物生态功能的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(10): 1559-1571.
- [53] 李雪, 李亚芳, 陈清华, 等. 大亚湾潮间带大型底栖动物群落结构特征及其影响因素[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(3): 42-50.
- [54] 高爱根, 陈全震, 曾江宁, 等. 浙江苍南泥相潮间带春末底栖动物生态特征[J]. *海洋科学*, 2006, 30(5): 92-96.

(本文编辑: 胡莹莹)