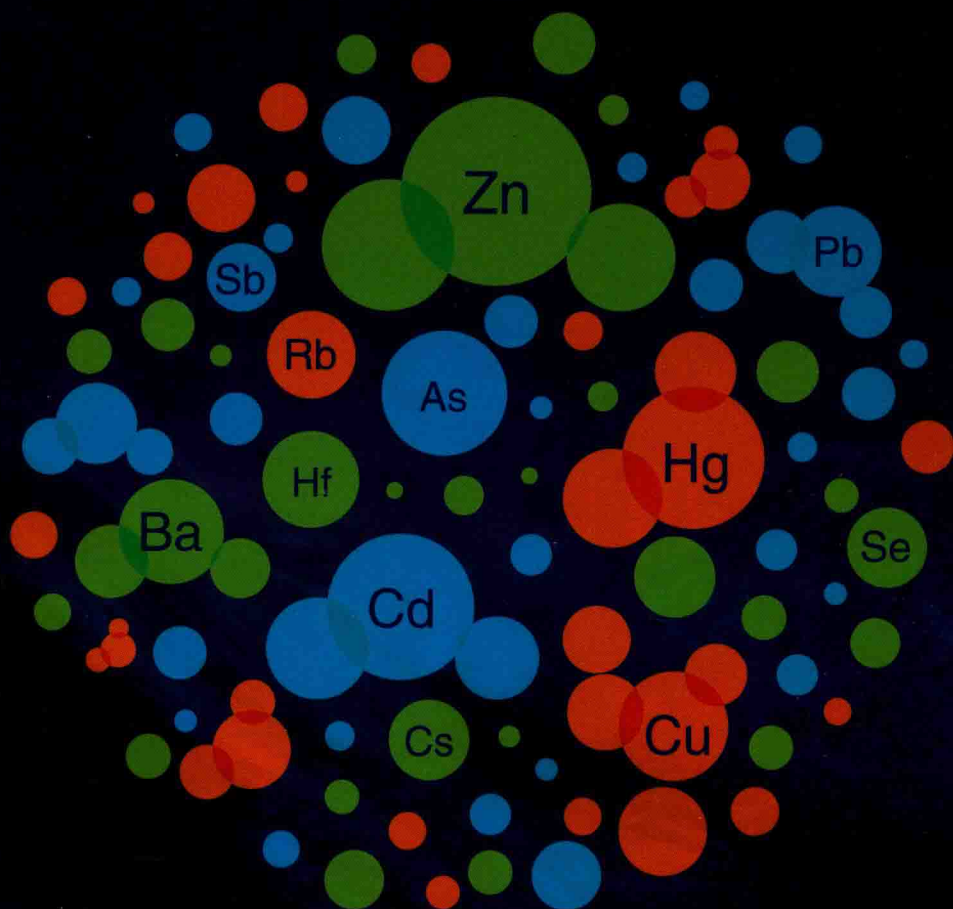




现代海洋科学：从近海到深海

渤海东海 微 / 痕量元素的 环境生物地球化学

宋金明 段丽琴 著



科学出版社

现代海洋科学：从近海到深海

渤海东海微/痕量元素的 环境生物地球化学

宋金明 段丽琴 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共分6章,第1章概述了中国东部陆架边缘海——渤黄东海的概况;第2~4章通过系统研究渤黄东海海水、颗粒物、沉积物中微/痕量元素,探讨了其分布、迁移、转化的特征;第5章从微观到宏观揭示了微/痕量元素与生态系统的耦合关系;第6章分析了微/痕量元素环境生物地球化学的发展趋势。全书在对近海微/痕量元素地球化学研究的基础上,力争揭示其在生态系统变化中的作用。

本书可供从事海洋科学、生物学、环境科学、生态学及相关领域的学生 and 研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

渤黄东海微/痕量元素的环境生物地球化学/宋金明,段丽琴著. —北京:科学出版社,2017.6

(现代海洋科学:从近海到深海)

ISBN 978-7-03-052888-9

I. ①渤… II. ①宋… ②段… III. ① 渤海-微量元素-元素地球化学 ② 渤海-痕量元素-元素地球化学 ③ 黄海-微量元素-元素地球化学 ④ 黄海-痕量元素-元素地球化学 ⑤ 东海-微量元素-元素地球化学 ⑥ 东海-痕量元素-元素地球化学 IV. ①P595

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第111900号

责任编辑:王海光 田明霞 / 责任校对:李 影

责任印制:张 伟 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:29 3/4

字数:703 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《现代海洋科学：从近海到深海》

丛书编委会

主 任 孙 松

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

刘 鹰	逢少军	宋金明	孙 黎
孙 松	孙晓霞	万世明	王 凡
王 辉	王广策	徐奎栋	阎 军
尹宝树	俞志明	张国范	

丛 书 序

海洋是地球上最大的气候调节器，是人类和其他所有生物的生命保障系统。人们虽然居住在陆地上，但生活的方方面面却与海洋密切相关：我们呼吸的氧气 70% 来自于海洋，生存所必需的水 97% 存在于海洋。有些生物可以在没有阳光和氧的环境中生存，但是任何生命都离不开水，而地球上所有水的最终源头都在海洋，正因为海洋的存在，地球上才形成了所有生物赖以生存的环境。

大多数人认为生命起源于海洋。地球上超过 80% 的生物生活在海洋中，而且在陆地上发现的生物类群在海洋中几乎都能发现，很多生活在海洋中的生物反而是特有的，例如，棘皮动物海参、海胆、海星和海蛇尾等只在海洋中生存。若以体积衡量，海洋占据了生物在地球上所能发展空间的 99%。

海洋对气候具有重要的驱动和调节作用，我们所熟知的“厄尔尼诺”“拉尼娜”等气候事件都起源于海洋，对我国影响很大的东亚季风与海洋的变化密切相关，大部分台风也是起源于海洋。

据联合国统计，世界上有超过 30 亿人的生计依赖于海洋和沿海的多种生物。在过去 60 多年中，人类从海洋中获取的鱼类资源超过 35 亿 t，全世界大约有 26 亿人摄入的动物蛋白来自海洋水产品，我国居民摄入的动物蛋白有 20% 以上来自于海洋。

海洋是人类赖以生存的基础，但反过来，人类又对海洋造成了极大的影响。据联合国数据显示，全球 40% 的海洋受到了人类活动的“严重影响”，包括污染、过度捕捞和沿海生物栖息地的破坏。

人类生活的陆地仅占地球表面积的 30%，对于占地球 70% 的海洋，我们应该有更多了解。1992 年在里约热内卢举行的地球首脑会议上首次提出“世界海洋日”的概念。在 2008 年第 63 届联合国大会上，将每年的 6 月 8 日定为“世界海洋日”(World Ocean Day)，以唤起人类关注海洋、保护海洋的意识。联合国秘书长潘基文就此发表致辞时指出，人类活动正在使海洋世界付出可怕的代价，个人和团体都有义务保护海洋环境，认真管理海洋资源。2009 年首个世界海洋日的主题为“我们的海洋，我们的责任”，2010 年主题“我们的海洋：机遇与挑战”，2011 年主题“我们的海洋，绿化我们的未来”，2012 年主题“海洋与可持续发展”，2013 年主题“团结一致，我们就有能力保护海洋”，2014 年主题“众志成城，保护海洋”。

让每个人了解海洋、热爱海洋，唤起人们保护海洋的意识，合理开发利用海洋，综合管控海洋，是每个海洋科技工作者的责任和义务。为传播海洋知识，及时介绍海洋科技发展最新进展，记录海洋科技发展历程，科学出版社和中国科学院海洋研究所共同商定出版《现代海洋科学：从近海到深海》丛书，本丛书涉及从近海到深海大洋各个方面的研究进展，包含海洋生物学、海洋生态学、海洋物理学、海洋化学、海洋地质学和海

洋资源开发利用等各个方面。

为把握好丛书的学术质量，我们设立了编委会，成员均为中国科学院海洋研究所各研究室的骨干科学家，他们在各自的研究领域都取得了卓越的成就。编委会将与出版社共同遴选出版物，主导丛书发展方向，确保丛书的出版质量。

我将和编委们共同努力，与出版社紧密合作，并广泛征求海洋学界朋友们的意见，争取把丛书办好。丛书前期的出版物主要是中国科学院的研究成果，我们期望后续会有更多同行参与进来，踊跃投稿或提出建议。希望丛书的出版能够为我国海洋科技发展、海洋开发利用和海洋保护起到重要的推动作用！



2015年1月于青岛

前 言

在人类认识自然的历史长河中,地球环境中的微/痕量元素在其系统循环与运转、维持生态系统平衡、生物-非生物体系和谐运行中的重要作用已被逐渐认识到,一门交叉综合的新学科——微/痕量元素的环境生物地球化学也应运而生。它既从宏观角度研究微/痕量元素的环境行为特征,又从微观角度探讨微/痕量元素的营养供给和生态毒理,涉及生物-非生物体系的深层次过程,环境生物地球化学的研究意义不言而喻。

海洋环境中的微/痕量元素在生机勃勃的水下世界扮演着“四两拨千斤”的角色,微/痕量元素的平衡维持着海洋生态系统生物群落的繁衍,失衡则导致生态系统的异常变动、生物群落的反常更替甚至某些生物群落的灭绝或“暴发”,揭示海洋环境中微/痕量元素的生态学作用与功能成为了全球变化研究的重要课题。人为活动的加剧导致大量微/痕量元素注入近海,近海环境微/痕量元素的污染已成为海洋科学技术必须要面对和解决的重要环境难题。

我们研究组长期致力于近海微/痕量元素的环境生物地球化学研究,在揭示近海微/痕量元素的生物地球化学特征、诠释微/痕量元素的生态毒理等方面都有较深入的研究,发表过大量有见地的论著。本专著就是在这一背景下,系统总结了近十几年来我们研究组在大量外海调查和室内模拟研究基础上所获得的渤海东海环境生物地球化学的系列研究成果,同时也总结归纳了部分同行的研究结果,这对于深入研究并揭示渤海东海环境生物地球化学的系统规律,丰富和发展海洋环境生物地球化学的学科体系都有重要的意义和价值。

本专著共分 6 章。

第 1 章概述了中国东部陆架边缘海渤海东海的概况,总结了渤海东海的水文气象、地理地貌、生态群落及化学环境,对其微/痕量元素的分布、生物利用性、生态毒理及环境变化的生态作用等的研究进展进行了总结。

第 2 章阐述了受人为影响严重的渤海中微/痕量元素的环境生物地球化学特征,重点对渤海湾、辽东湾、莱州湾、黄河口等重点海域的重金属进行了研究。环渤海地区经济的快速发展和人口的急剧增长,使得排入渤海海域的污染物质总量不断增加,污染物质的长期增加和积累造成了渤海环境质量的急剧恶化,污染较为严重的主要为辽河口、锦州湾、渤海湾和莱州湾等,其中重金属是主要污染物之一。渤海水中 Pb 的污染最为严重,4 个季节的浓度均值都超过国家一类海水水质标准;其次为 Hg 污染,主要是夏季的污染较为严重;其他重金属的环境质量状况相对较好,4 个季节的浓度均值都未超过国家一类海水水质标准;另外,渤海海水中的 Se、Sb 等半金属微/痕量元素有明显的“拟营养盐”作用,对渤海浮游植物生长繁殖有重要作用。渤海表层沉积物 Hg、Cu、Cd、Pb、As 含量分别为 1~2160 ng/g、9.0~35.5 μg/g、0.002~9.09 μg/g、0.02~100 μg/g、

5.03~9.84 $\mu\text{g/g}$ 。渤海表层沉积物中 Hg 含量的空间分布趋势为近岸高、外海低,而且从北向南有降低趋势;重金属 Cu 与 Hg 相反,呈现北低南高的趋势;其他三种重金属 Cd、Pb 和 As 趋势基本一致,呈现河北省和大连市近岸、黄河口海域高,高值区向南北两侧和外海减小的趋势。

第 3 章阐述了黄海特别是南黄海微/痕量元素的环境生物地球化学特征。南黄海水体重金属的含量整体上处于中国近海中等水平,但是比天然表层海水背景值高,主要分布特点呈现:①位于我国山东半岛(35.0°N~37.0°N, 120.0°E~122.0°E)、我国江苏南部—长江口近岸(33.0°N~35.0°N, 120.5°E~122.5°E)和韩国近岸(34.5°N~36.5°N, 124.5°E~126.0°E)与岸平行的条带状高 Cd-Cu-Hg-Zn-Pb 区;②黄海海槽范围内(34°N~36°N, 124.5°E~125.5°E)的点源发散状高 Cd-Cu-Hg-Zn-Pb 区;③黄海中部、济州岛近岸,以及 33.5°N~36.0°N、122.0°E~124.5°E 的海域点源高 Pb 区。南黄海表层沉积物 Cu、Cd、Zn 在南黄海中部细粒沉积区高,在砂沉积区低;As 高含量区分布在成山角以东的残留砂区,低含量出现在现代砂区或南黄海中部泥区;Hg 高含量区出现在大河口附近,且分布复杂。胶州湾由于受人类活动影响严重,海水及沉积物中的微/痕量元素水平较高。

第 4 章阐述了东海特别是长江口邻近海域微/痕量元素的环境生物地球化学特征。自 20 世纪 80 年代初至 21 世纪初,东海海水中 Cu、Pb、Zn、Cd 浓度变化不大,年均浓度基本上都呈现先增加、后保持、再微降的不对称倒“U”形变化趋势,平面分布整体上没有呈现出明显的由沿岸向外海递减的分布特征,相对高值区经常出现在长江口、杭州湾沿岸、舟山渔场水域。自 20 世纪 80 年代初至 21 世纪初,长江口表层沉积物中重金属 Cu、Pb 的年际变化呈现先增加后降低的趋势,而 Zn 呈现降低的趋势。东海近百年来环境演变过程分为三个阶段:①20 世纪初到 20 世纪 60 年代微/痕量元素含量较为波动,埋藏通量大致在一个比较低的水平。在这期间几乎没有大的环境改变且沉积物中微/痕量元素主要为自然来源。②20 世纪 60~90 年代呈上升趋势。这一阶段是东海沿岸工农业迅猛发展的阶段,加上各项治污措施和保护措施不当,这段时期东海的环境恶化,是人类活动影响最为明显的一个阶段,这种影响在 80 年代和 90 年代表现得尤为严重。③从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初呈下降趋势。此阶段是东海沿岸环境质量不断改善的一个阶段。

第 5 章论述了渤海东海微/痕量元素与生态系统的耦合关系。渤海湾水体环境浓度水平暴露的 5 种重金属(Cd、Zn、Pb、Hg、Cu)对扇贝体内抗氧化体系生物标志物表达的影响不一致,Cd 和 Pb 对扇贝产生较为明显的氧化压力,而 Zn、Hg 和 Cu 对扇贝体内抗氧化指标表达影响并不显著,Cd 和 Pb 还对 I 相代谢酶 EROD 产生明显的抑制作用,渤海湾海水超标的 Zn 并未表现出明显的抑制作用,而达标的 Cd 却对扇贝体内抗氧化指标及代谢酶均能够产生明显的毒性,并由此引发氧化损伤,造成脂质过氧化。对 EROD、GST 和 GPx 活性而言,5 种重金属(Cd、Zn、Pb、Hg 和 Cu)对苯并(a)芘表现为明显的拮抗作用,尤以对 EROD 的作用效果最为明显。两者联合暴露时,重金属能有效降低单一苯并(a)芘暴露时对 EROD 的强烈诱导作用,EROD 由苯并(a)芘单独暴露时 76.1%的诱导率,降至与重金属单独暴露时相当的水平。重金属 Cd、Zn、Pb、Hg 和 Cu

与苯并(a)芘联合暴露时 GPx 相较于单独苯并(a)芘暴露时的酶活性分别降低了 68.9%、24.3%、72.0%、52.1%和 58.8%。渤海湾近岸海域海水,就 Hg (以平均浓度计)而言,其对真鲷仔鱼、日本对虾仔虾和四角蛤蜊的长期致死率分别为 16.3%、7.9%和 0.2%, Cd 对真鲷仔鱼、日本对虾仔虾和文蛤幼体的长期致死率分别约为 4.5%、0.4%和 10.5%, Pb 对端足类的长期致死率约为 0.3%。显然,与 Cd 和 Hg 相比, Pb 对鱼类、甲壳类和双壳类的长期致死率较低,对鱼类、甲壳类和双壳类的毒性小于 Cd 和 Hg。海水 Cd、Hg、Pb 和石油烃复合污染对常见鱼类、甲壳类和双壳类种群增长率的降低幅度分别为 6.4%、14.6%和 12.9%,重金属与难降解有机物的复合污染已对渤海的渔业资源产生了较严重的危害。

第 6 章分析了海洋微/痕量元素环境生物地球化学的趋势,指出了海水高灵敏准确的微/痕量元素定量测定是海洋微/痕量元素环境生物地球化学的基础。海洋微/痕量元素在海洋生态环境演变、生态学功能揭示、生态风险评估等领域将会变得越来越重要,其揭示的讯息也会更精细,海洋微/痕量元素环境生物地球化学的研究将会成为地球环境学的核心关注领域。

本专著的创新点主要体现在三个方面。首先,在研究的立意上,着眼于微/痕量元素海洋环境生物地球化学与生态系统演变的耦合关系;其次,在研究方法上,采用了地球化学调查-胁迫模式生物模拟-数理统计与模式的有机结合;最后,在研究创新的系统认识上,发现了中国近海海水半金属微/痕量元素的“拟营养盐”作用,揭示了重金属与有机污染物及过量氮磷的复合污染可明显导致近海生物类群生物量的降低和渔业资源的衰退,构建了沉积物中的微/痕量元素及形态指示生态环境变化的指标体系等。

本专著的研究获得了青岛国家海洋科学与技术实验室“鳌山人才”计划项目(No. 2015ASTP-OS13)、国家自然科学基金项目(No. 41676068; No. 41306070)及国家自然科学基金委员会-山东省联合基金项目“海洋生态与环境科学(No. U1606404)”研究方向“海洋生态环境变化的生物地球化学机制”的资助,特此表示感谢!

本专著是集体研究成果的结晶,十多年来中国科学院海洋研究所海洋生物地球化学研究组的多位同志及研究生参与了此项研究,他们是贺志鹏、于宇、徐亚岩、吴晓丹、许思思、张英、齐君、李学刚、袁华茂、李宁、吴斌、刘伟、梁宪萌等,没有他们的付出,本专著不可能完成。同时,专著中还参考了若干渤黄东海微/痕量元素研究学者的成果,特向他们表示深深的谢意!

本专著由宋金明、段丽琴分工撰写,宋金明撰写第 3 章、第 5 章和第 6 章,段丽琴撰写第 1 章、第 2 章和第 4 章。全书图表由段丽琴绘制,宋金明负责全书的章节设计和统稿。

作为我国第一部系统阐述渤黄东海微/痕量元素环境生物地球化学的研究专著,无论是研究的深度和广度,还是采用的技术方法及撰写者的水平,都有诸多欠缺和不足,敬请读者批评指正。

宋金明

2017 年 1 月于青岛汇泉湾畔

目 录

丛书序

前言

第 1 章	概述	1
1.1	渤海东海概述	1
1.2	海洋微/痕量元素概述	31
1.3	海洋微/痕量元素研究的内容、方法与意义	37
1.4	海洋微/痕量元素研究进展	70
第 2 章	渤海微/痕量元素的环境生物地球化学	75
2.1	渤海微/痕量元素的研究概况	75
2.2	渤海海水中的微/痕量元素	79
2.3	渤海沉积物中的微/痕量元素	108
第 3 章	黄海微/痕量元素的环境生物地球化学	184
3.1	黄海微/痕量元素的研究概况	184
3.2	黄海海水中的微/痕量元素	186
3.3	南黄海表层沉积物中的微/痕量元素	203
3.4	南黄海沉积物中百年来微/痕量元素的演变	213
3.5	胶州湾的微/痕量元素	217
3.6	黄海微/痕量元素的生态风险评估	242
第 4 章	东海微/痕量元素的环境生物地球化学	253
4.1	东海微/痕量元素的研究概况	253
4.2	东海海水中的微/痕量元素	258
4.3	长江口海水中的微/痕量元素	276
4.4	东海沉积物中的微/痕量元素	284
4.5	长江口沉积物中的微/痕量元素	343
4.6	黑潮对东海微/痕量元素的影响	348
第 5 章	渤海东海微/痕量元素与生态系统的耦合关系	366
5.1	微/痕量元素对浮游植物群落生长的促进作用	366
5.2	微/痕量元素对海洋生物的抑制作用	371
5.3	海水浓度水平重金属胁迫下扇贝体内生物标志物应答	377
5.4	海水浓度水平重金属与 PAHs 复合胁迫下扇贝体内生物标志物应答	387

5.5	汞对渤海优势渔业资源生物种的影响	393
5.6	汞、镉、铅和石油烃污染对渤海优势渔业资源生物种的影响	401
第6章	海洋微/痕量元素环境生物地球化学的趋势	411
6.1	微/痕量元素高灵敏准确分析测定方法	411
6.2	微/痕量元素指示环境演变的功能	419
6.3	微/痕量元素的生态学功能	428
6.4	微/痕量元素的生态风险评价	430
参考文献		443

第 1 章 概 述

1.1 渤黄东海概述

渤黄东海指的是朝鲜半岛、九州岛、琉球岛链、台湾岛以西的渤海、黄海和东海，其范围从 23°N 到 41°N，约跨越 18 个纬度（图 1.1），在南北方向上呈狭长状，等深线大体与岸线平行，是世界上最宽阔的陆架浅海之一。其中，渤海是伸入中国大陆的一个内海，面积约 $7.7\times 10^4\text{ km}^2$ ，平均深度约 18 m，最大深度在渤海海峡老铁山水道附近，约 86 m。黄海是嵌入中国北部大陆的一个典型的半封闭海湾，平均水深 46 m，最大水深 140 m。黄海地形比较平坦，只在海区中央有一狭长的“水下洼池”，它从济州岛延伸到渤海海峡处，称为黄海槽。东海面积约为 77 万 km^2 ，大部分陆架区平均水深 370 m，最深达 2940 m，其通过琉球群岛和太平洋相连。沿着琉球群岛边缘有三个深陷区：最北面为吐噶喇海峡，最大深度浅于 1000 m；最南端，紧靠台湾东岸有大约 700 m 深的

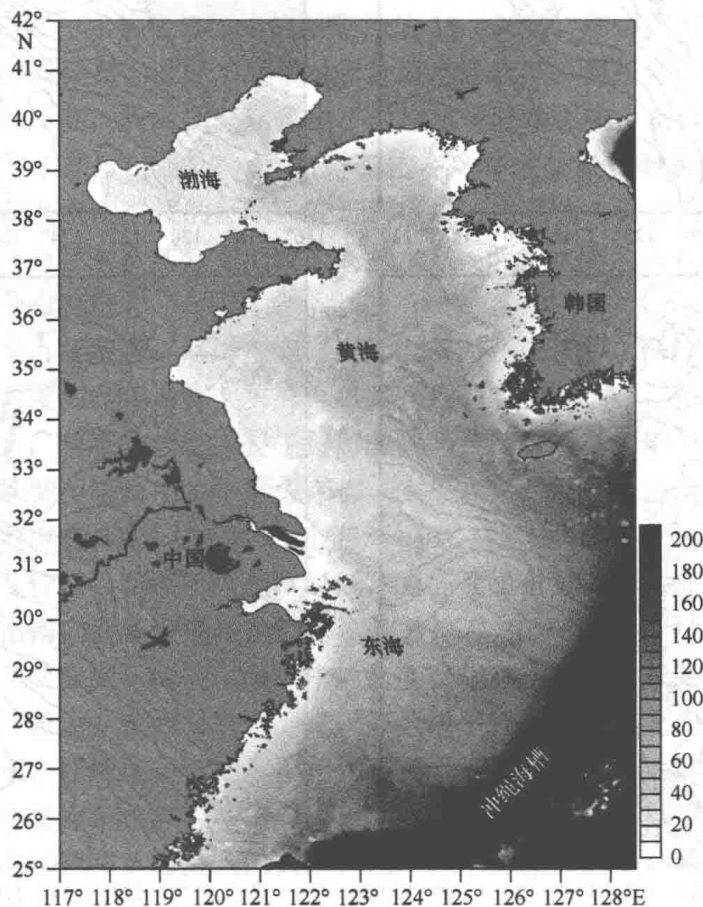


图 1.1 渤黄东海
比例尺为深度（单位：m）

海脊；在中间位于冲绳岛南侧是一个深于 1000 m 的海谷。琉球群岛的西面是冲绳海槽，其最大深度约为 2300 m。东海其余部分是一个宽广陆架，陆架北邻黄海，东北通过朝鲜海峡（或称对马海峡）和日本海相接，南面通过台湾海峡和南海相连。渤海和黄海以渤海海峡为界，黄海与东海以长江口北岸的启东角与韩国济州岛西南角的连线作为分界线。

渤黄东海的海水温度分布与变化，受海区热量平衡状况、地理环境、海流强弱、气象条件等因素的影响。中国近海温度分布的季节性差异比较明显。冬季，渤黄东海三个海区的温度均为全年最低。在深度较深的海域，等温线随纬度变化。由于受太阳辐射的影响，温度自南向北逐渐降低。从图 1.2 可以看出，渤海沿岸温度最低，可达 0℃或以

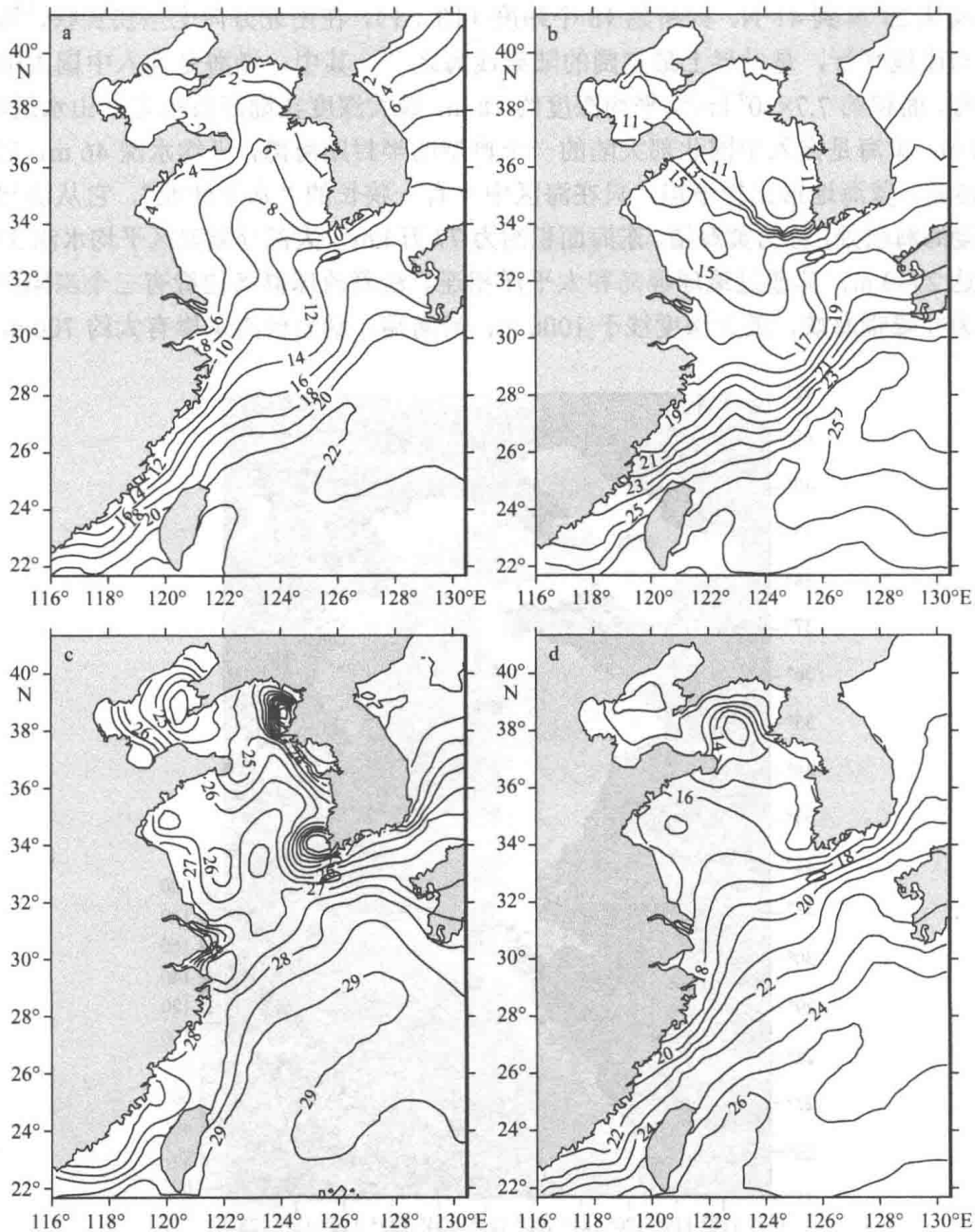


图 1.2 渤黄东海四季代表月份的表层温度分布（孙湘平，2008）
a. 2 月； b. 5 月； c. 8 月； d. 11 月

下。渤海内区温度的分布平行于等深线,随着水深变深,温度逐渐增加,温度最高的区域位于渤海海峡附近。由于渤海水深较浅,其温度的垂向分布几乎上下一致。黄海海域由于受到黄海暖流的影响,中部有明显的暖水舌由南向北伸展,可达渤海海峡附近。暖水舌中间水温高于两侧,而且由南向北,温度递减。黄海沿岸的温度分布也基本平行于等深线。东海表层温度分布为东北—西南走向,且等温线密集,这反映了黑潮和台湾暖流水对东海陆架的入侵。黑潮及其流经区域的温度高于其他区域,在渤黄东海形成了两条暖水舌。在东海的西北部,由于黄海沿岸流形成的冷水舌伸向东南,被南面的台湾暖流暖水舌和东北面的黄海暖流暖水舌所包围,使得等温线呈“S”状。台湾海峡的水温由西向东增加,等温线分布与海峡走向一致。

夏季,渤黄东海三个海区的温度为全年最高。虽然温度也大致存在随纬度升高而降低的趋势,但是由于强烈太阳辐射的影响,表层水温的分布趋于一致,地区差异较小。由于夏季混合较弱,大多数海区出现季节性跃层,海水层化明显,表底层温差增大。渤海的表层水温为 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$ 。由于受陆地的影响,其深水与浅水区表现出与冬季相反的温度结构,即近岸水温高,而远岸温度较低,三大海湾的水温高于渤海中部水温。在渤海海峡的西北部存在一个冷水中心。渤海的底层存在两个冷水中心,分别位于辽东湾口和渤海的中部。冷水中心的温度较周围要低 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。黄海的表层水温在 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$,北黄海的大部分区域仍由较弱的暖水舌控制,总体上黄海中部区域的温度分布比较均匀。在黄海的底部,也存在冷水块,与岸边的温差可达 $13\sim 20^{\circ}\text{C}$,称为黄海冷水团。东海表层等温线趋于沿等深线分布,近岸水温相对于外海水温较低。但是到了底层,温度的分布与表层相反,为近岸高,外海低,这是由于沿岸水受陆地影响,出现了高温特征。

渤黄东海的海水盐度(图1.3)分布与变化,受海区盐量平衡状况、蒸发降水、入海径流、环流强弱及水团消长的影响。在近海区域,主要为入海径流形成的低盐水系,而在外海区域,则为黑潮及其分支形成的高盐水系,两种水团的消长就构成了渤黄东海海域盐度的主要分布特征。

冬季,风速大,蒸发强,而降水弱,再加上入海径流量小,沿岸流较弱,导致渤黄东海三个海区的盐度为全年最高。另外,冬季强烈的对流和混合,使得渤海、黄海盐度垂直分布比较一致。渤海的盐度主要受黄海暖流和黄河径流的影响。黄海暖流的高盐水舌向西经渤海海峡伸至渤海中央,形成东部、中央高,而沿岸较低的格局。渤海中部及渤海海峡附近的盐度在 $31.5\sim 32.0$ 。三个海湾相比,辽东湾的盐度最高,渤海湾受黄河径流的影响,盐度较低,而莱州湾盐度最低,其等盐线自黄河口向外成弧状分布。黄海的表层盐度存在由南向北逐渐递减的趋势,其盐度在 $30.0\sim 34.0$ 。与温度相同,受高盐水舌的影响,中间盐度高于两侧,而东岸的盐度又略高于西岸。东海的等盐线分布比较密集,东西向差异较大。在西部沿岸一带,等盐线平行于海岸南北向分布。这是由于长江冲淡水顺岸南流,导致这一带的盐度相比于夏季还要低。在外海区域,盐度分布比较均匀。黑潮区的盐度为 34.75 ,对马暖流区的盐度为 $34.0\sim 34.5$ 。同温度的分布类似,在黄海沿岸流、台湾暖流和黄海暖流的共同作用下,东海北部的等盐线呈现“S”状弯曲。台湾海峡的盐度仍然是自西向东递增,近岸的低盐主要是由于浙闽沿岸流南下导致的,等盐线分布与海峡走向一致。

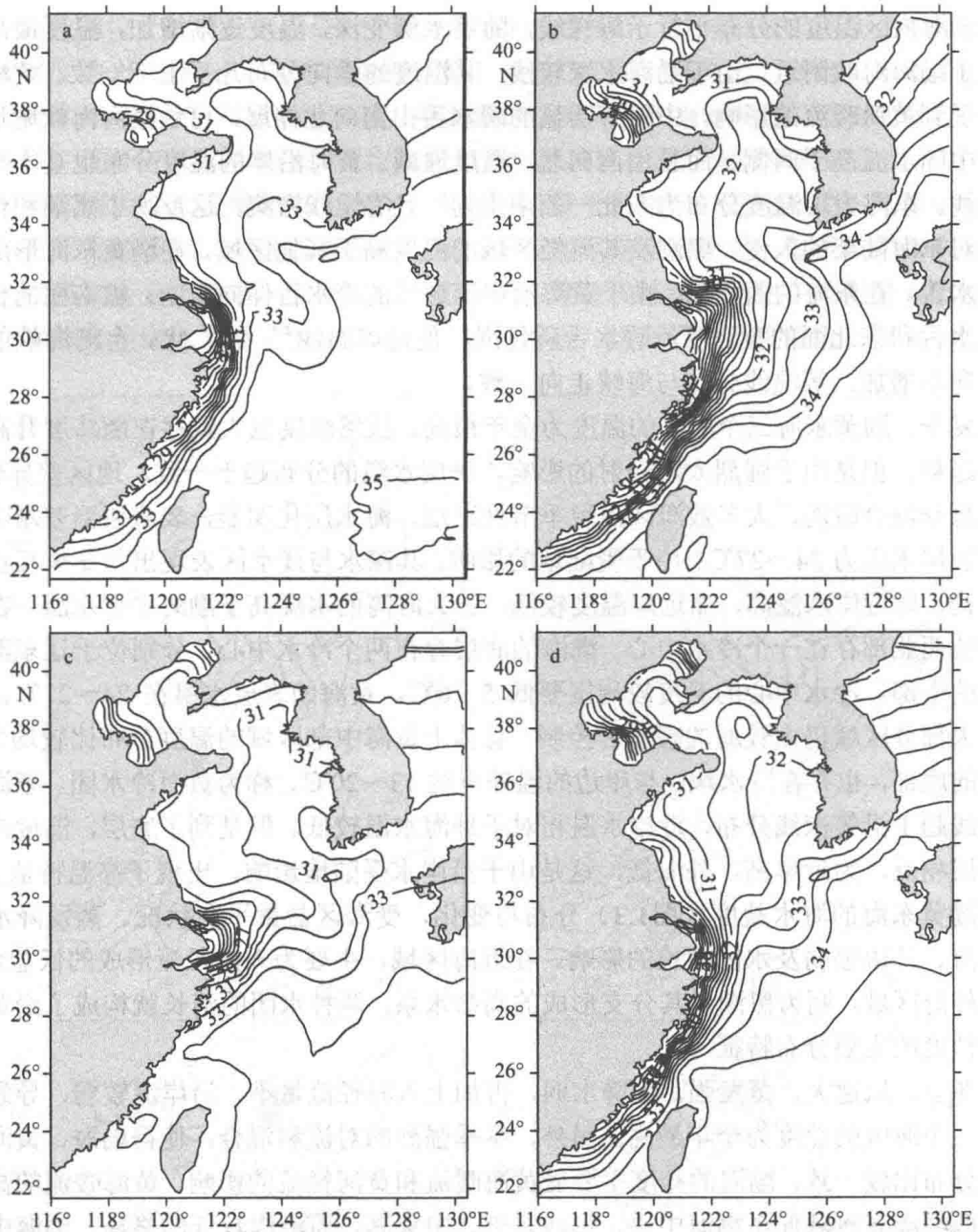


图 1.3 渤黄东海四季代表月份的表层盐度分布 (孙湘平, 2008)

a. 2 月; b. 5 月; c. 8 月; d. 11 月

夏季, 风速小, 蒸发弱, 降水集中, 入海径流也最大, 因此渤黄东海三个海区的盐度达到全年最低。由于冲淡水的势力强、扩展范围大, 导致在河口附近产生了较强的盐跃层。渤海表层的盐度在 30.5 以下。由于受高盐水舌入侵的影响, 在辽东半岛西岸出现闭合高盐区。辽东湾、渤海湾和莱州湾三大海湾的等盐线均比较密集, 而且辽东湾和渤海湾的等盐线基本沿等深线分布, 莱州湾的等盐线同夏季等温线一致, 自黄河口向外成弧状分布。而底层盐度分布则基本保持了冬季的分布趋势, 只是盐度值有所降低。在黄海海区, 高盐水舌的分布不如冬季明显, 而且主轴向东偏移。苏北沿岸流的流轴也不如冬季清晰, 与长江冲淡水相连成片。在垂直方向上, 黄海冷水团区域为低温高盐水, 在

冷水团上边界, 存在较强的盐跃层。东海海区盐度的分布主要受长江冲淡水影响。夏季由于长江的径流量最大, 长江冲淡水的范围也达到最大。取 32.0 等盐线作为长江冲淡水的影响范围, 则其可达到济州岛以东。长江冲淡水的冲溢和扩展方向, 首先顺着长江入海的方向, 进而受到台湾暖流的顶托转向东北, 而后又转向东南。在垂直方向上, 长江冲淡水的影响深度仅在 6 m 左右 (杨晓丹, 2013)。

渤黄东海的环流主要包括渤黄东海的环流 (图 1.4)。影响环流的主要因素包括季风、河流入海、黑潮及潮致余流等。渤黄东海的环流又分为两大流系: 沿岸流系和外海流系。沿岸流系主要包括了渤海沿岸流、黄海沿岸流和东海沿岸流。外海流系主要包括黑潮及其分支, 分别为东海黑潮、台湾暖流、对马暖流及黄海暖流。

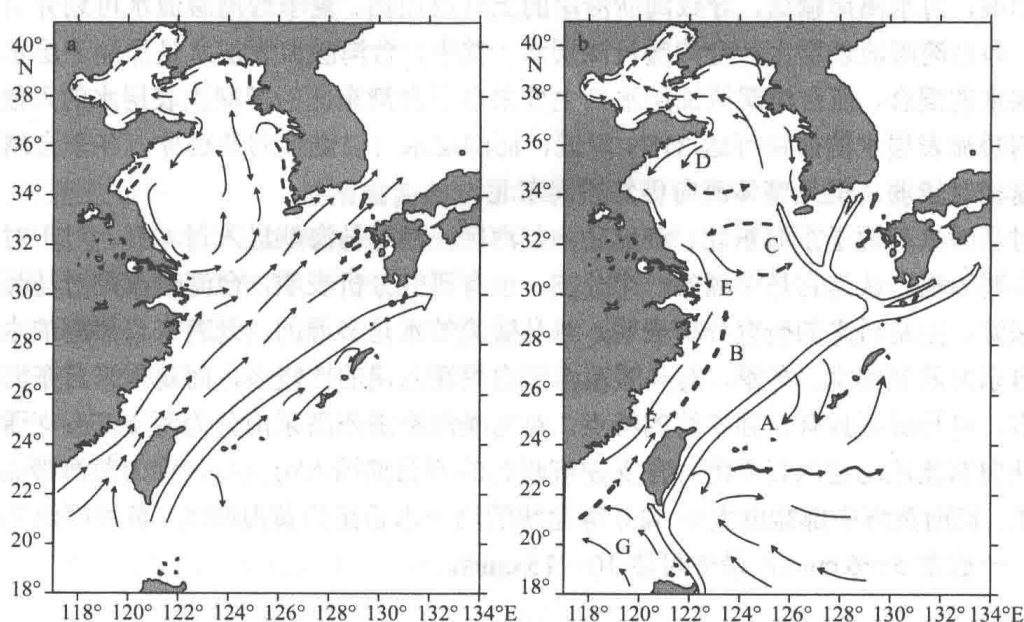


图 1.4 渤黄东海环流场

a. 夏季; b. 冬季 (A. 黑潮, B. 台湾暖流, C. 黄海暖流, D. 黄海沿岸流, E. 沪浙闽沿岸流, F. 广东沿岸流, G. 南海暖流)

渤海沿岸流分为辽东沿岸流及渤莱沿岸流, 它们主要受到季风、黄海暖流及入海径流的影响。其中辽东沿岸流每年会有两次方向上的改变, 夏季主要方向向西, 其余季节向东。渤莱沿岸流则终年皆向东流, 从渤海海峡的南端流出渤海, 并绕过成山头继续向南流动。黄海沿岸流为低盐水, 上接渤莱沿岸流, 绕过成山头沿苏北沿岸向南输送, 基本沿 40~50 m 等深线运动, 并在 32°N 附近转向东南, 侵入东海, 其流向为终年偏南。黄海东岸沿岸流, 也称西朝鲜沿岸流, 它沿着朝鲜半岛的西海岸 20~40 m 等深线由北向南流动, 流速由北向南逐渐增大, 在济州岛西北面 34°N 附近, 与台湾暖流分支及长江冲淡水混合, 并进入对马海峡, 成为对马暖流的来源之一。东海沿岸流主要指闽浙沿岸流, 因为流层较浅, 受季风的影响显著。夏季受偏南季风影响, 沿闽浙沿岸向北流动, 它的特征是流层比较浅, 流幅比较宽, 流速在 20 cm/s 左右。冬季偏北风期间, 它贴岸南流, 流幅较窄, 流速较强, 流向稳定。在春、秋交替季节, 由于季风风向比较凌乱, 表层流的流向也不稳定。

黑潮作为北太平洋的一支西边界流,是北赤道流北向分支的延伸,沿菲律宾东岸向北流动,在我国台湾以东进入渤黄东海。经过和台湾东北部大陆坡折区的碰撞后,转向东北流动,并沿大陆架边缘与大陆坡毗连区到达 30°N 、 129°E 附近,然后转向东运动,最终从吐噶喇海峡流出渤黄东海,在 35°N 附近离岸东流,成为黑潮延伸体返回北太平洋。黑潮具有流速大、流量强及高温高盐的特点。

台湾暖流位于闽浙沿岸流的外侧,是外海向陆架入侵的主要流系,它对东海陆架大部分区域的物理环境有着重要影响。台湾暖流与 $50\sim 100\text{ m}$ 等深线的走向一致,除表层($0\sim 5\text{ m}$)可能受偏北季风的影响向南流动以外,全年向北流动,甚至在东北季风强盛时期也是这样。它以高盐水舌的态势沿 123°E 向北流动,可达长江口位置。夏季受西南风的影响,海水离岸输送,导致闽浙沿岸的上升流加强。夏季台湾暖流水可划分为上下两层,即台湾暖流表层水和台湾暖流深层水。其中,台湾暖流表层水是黑潮表层水和台湾海峡水的混合,而台湾暖流深层水则主要来自于台湾东侧的黑潮次表层水的入侵。夏季台湾暖流表层水的前锋可达 31°N 附近,而深层水可以继续向北延伸。冬季台湾暖流的流速相对较弱,但是整体流向仍然指向东北。

对马暖流起源于东海东北、济州岛南部海区,经对马海峡进入日本海。对于对马暖流,早期的观点认为它是黑潮的一个分支。也有研究分析表明,台湾暖流是对马暖流的主要来源。但是后来的研究分析表明,对马暖流的水是多源的,既有来自黑潮的水,又有来自东海陆架的水。冬季,对马暖流水来自黑潮入侵的比较多,而夏季来自东海陆架的较多。对马暖流具有夏强冬弱的特点。对马暖流在济州岛东南分为两支,右支通过对马海峡向东北流动进入日本海,左支在济州岛的西北部插入南黄海,称为黄海暖流。从定量上,把南黄海中部盐度大于 32.0 等盐线的这一水舌定为黄海暖流。黄海暖流的流速很弱,一般在 $5\sim 6\text{ cm/s}$,最大可达 $10\sim 15\text{ cm/s}$ 。

1.1.1 渤海

1.1.1.1 地形地貌

渤海位于 $37^{\circ}07'\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $117^{\circ}35'\text{E}\sim 121^{\circ}10'\text{E}$,是深入中国大陆的一个近封闭型的浅海,其南、北、西三面环陆,东面以渤海海峡与黄海相通,其间以北起辽东半岛南端的老铁山角、南至山东半岛北端的蓬莱角一线与黄海分界,沿渤海海岸带环绕辽宁、河北、山东和天津四省市。渤海东北西南向长约 555 km ,东西向宽约 346 km ,海域面积约 $7.7\times 10^4\text{ km}^2$,海岸线总长度约为 3780 km ,其中陆地岸线约为 3020 km ,平均水深约为 18 m ,最大水深约为 80 m ,大部分水域水深较浅,深度低于 30 m 的水域占渤海总面积的 95% ,是一个典型陆架浅海。南北对峙的山东半岛与辽东半岛形成渤海的口门,该处又被庙岛列岛将其与黄海隔开。口门北侧和南侧是渤海与黄海水体交换的进出水口。由于渤海是一个瓶颈式的半封闭内海,自身水体交换异常缓慢,估计整个渤海海水的循环周期需要 $40\sim 200$ 年,自身的纳污净化能力非常有限(王继刚,2006)。渤海海底平缓,由周边向口门方向倾斜,坡度为 $0^{\circ}0'28''$ 。按照渤海三角形的地理特征,整个渤海大致可分为辽东湾、莱州湾、渤海湾和中央盆地 4 个水域(图 1.5)。