



海洋地质实验测试技术及研究进展

徐磊, 林学辉, 张媛媛, 贺行良, 徐婷婷, 张剑, 王飞飞, 梁源, 任宏波, 辛文彩, 朱志刚, 张道来, 李凤, 宋晓云, 李秋余, 武华杰, 何乐龙, 闫大伟, 姜学钧, 江云水, 宁泽, 路晶芳, 王红, 李嘉佩, 王云, 周一博

Progress in marine geological experimental testing technology and research

XU Lei, LIN Xuehui, ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, XU Tingting, ZHANG Jian, WANG Feifei, LIANG Yuan, REN Hongbo, XIN Wencai, ZHU Zhigang, ZHANG Daolai, LI Feng, SONG Xiaoyun, LI Qiuyu, WU Huajie, HE Lelong, YAN Dawei, JIANG Xuejun, JIANG Yunshui, NING Ze, LU Jingfang, WANG Hong, LI Jiawei, WANG Yun, and ZHOU Yibo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023102001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海东北部陆坡区浮游有孔虫壳体的原位微区Mg/Ca分析

In situ geochemical analysis of Mg/Ca ratios of planktonic foraminifera shells in the northeastern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 43–58

CO₂-CH₄置换水合物开采方法及其强化技术研究进展

Technological research progress on CO₂-CH₄ replacement for hydrate exploitation and enhancement

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 190–204

科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1–14

现代海洋甲烷循环过程观测及研究进展

Observation and research progress of modern oceanic methane cycle

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 67–81

两种重矿物分析方法在青藏高原东南缘伊洛瓦底江沉积物物源分析中的应用

Application of two heavy mineral analysis methods in the provenance study of Irrawaddy River sediments on the southeastern margin of Tibetan Plateau

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 181–193

惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析及石油地质意义

Reservoir condition analysis of a buried granite hill in the Huizhou Depression and its petroleum geological significance

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 126–135



关注微信公众号，获得更多资讯信息

徐磊, 林学辉, 张媛媛, 等. 海洋地质实验测试技术及研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 53-70.

XU Lei, LIN Xuehui, ZHANG Yuanyuan, et al. Progress in marine geological experimental testing technology and research[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 53-70.

海洋地质实验测试技术及研究进展

徐磊^{1,2}, 林学辉^{1,2}, 张媛媛^{1,2}, 贺行良^{1,2}, 徐婷婷^{1,2}, 张剑^{1,2}, 王飞飞^{1,2}, 梁源^{1,2}, 任宏波^{1,2},
辛文彩^{1,2}, 朱志刚^{1,2}, 张道来^{1,2}, 李凤^{1,2}, 宋晓云^{1,2}, 李秋馥^{1,2}, 武华杰^{1,2}, 何乐龙^{1,2},
闫大伟^{1,2}, 姜学钧^{1,2}, 江云水^{1,2}, 宁泽^{1,2}, 路晶芳^{1,2}, 王红^{1,2}, 李嘉佩^{1,2}, 王云^{1,2}, 周一博^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 自然资源部海洋地质实验检测中心, 青岛 266237

摘要: 实验测试处在数据获取的“第一线”, 承担着准确支撑科研论述的重要使命, 是海洋地质工作的重要组成部分。近年来随着中国海洋地质调查事业的蓬勃发展, 青岛海洋地质研究所现已建成专业学科比较齐全、海洋特色鲜明的综合性实验测试室, 检测项目涵盖无机化学分析、有机化学分析、碎屑矿物鉴定、薄岩石片鉴定、黏土矿物定量分析、粒度分析、稳定同位素分析、放射性同位素测年、释光测年、微古鉴定和岩芯管理等十多个专业类型。实验室在完成自然资源、生态、环境、农业等新领域技术与服务对接的同时, 结合深海、极地、自然资源全要素调查等科研项目设置的测试任务及研究内容, 开展创新机制探索改革, 持续形成高水平论文和创新型专利成果, 不断满足海洋基础地质调查、海洋矿产资源调查和海洋环境地质调查工作对分析测试的新要求。

关键词: 实验测试技术; 海洋地球化学分析; 地质年代分析; 岩石矿物分析; 微体古生物分析

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023102001

Progress in marine geological experimental testing technology and research

XU Lei^{1,2}, LIN Xuehui^{1,2}, ZHANG Yuanyuan^{1,2}, HE Xingliang^{1,2}, XU Tingting^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}, WANG Feifei^{1,2}, LIANG Yuan^{1,2},
REN Hongbo^{1,2}, XIN Wencai^{1,2}, ZHU Zhigang^{1,2}, ZHANG Daolai^{1,2}, LI Feng^{1,2}, SONG Xiaoyun^{1,2}, LI Qiuyu^{1,2}, WU Huajie^{1,2}, HE Lelong^{1,2},
YAN Dawei^{1,2}, JIANG Xuejun^{1,2}, JIANG Yunshui^{1,2}, NING Ze^{1,2}, LU Jingfang^{1,2}, WANG Hong^{1,2}, LI Jiawei^{1,2}, WANG Yun^{1,2}, ZHOU Yibo^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China

2. Marine Geological Experimental Testing Center of the Ministry of Natural Resources, Qingdao 266237, China

Abstract: Experimental testing is at the forefront of data acquisition and plays an important role in accurately supporting scientific studies. It is an important component of marine geological work. In recent years, with the vigorous development of China's marine geological survey, the Qingdao Institute of Marine Geology has established a comprehensive experimental testing laboratory with relatively complete professional disciplines in distinct marine characteristics. The testing projects cover over 10 scopes, including inorganic chemical analysis, organic chemical analysis, detrital mineral identification, thin-section identification, quantitative analysis of clay minerals, particle size analysis, stable isotope analysis, radioactive isotope dating, luminescence dating, microfossil identification, and core management. To integrate technologies and services in new fields of natural resources, ecology, environment, and agriculture, the laboratory combines the testing tasks and research data from scientific projects from all-range surveys on deep-sea, polar, and natural resource to explore and reform innovative mechanisms, having published many high-level papers and achieved innovative patents, and meeting the new requirements from analysis and testing in marine basic geological surveys, marine mineral resource surveys, and marine environmental geological surveys.

Key words: experimental testing techniques; marine geochemical analysis; geological age analysis; rock mineral analysis; micropaleontological analysis

地质实验测试工作是人类探索地球物质组成的多学科综合测试方法, 是推动地质工作各个环节

能够正常有序开展的重要依据和标准^[1]。地质实验测试的专业性很大程度上决定着地质工作的完成

资助项目: 地质调查专项“我国重点海域海洋自然资源综合调查与评价”(DD20230071)

作者简介: 徐磊 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地球化学方面的研究, E-mail: 2279487719@qq.com

收稿日期: 2023-10-20; 改回日期: 2024-04-23. 文凤英编辑

质量,地质工作的成果又能对实验测试数据的准确性和科学性进行验证,两者的互联互动推动地质工作高效开展。围绕国土资源“三深一土”科技创新战略,为满足海洋基础地质调查、海洋矿产资源调查和海洋环境地质调查工作对分析测试的要求,青岛海洋地质研究所稳步建成涵盖多个海洋特色的专业学科,本文系统梳理了青岛海洋地质研究所(以下简称青岛所)实验测试工作的发展历史和现状,阐述了在不同历史时期实验测试工作为海洋地质调查事业所提供的基础技术支持。

1 海洋地球化学成分分析技术

海洋地球化学成分分析通过研究海洋中各种化学物质的含量、分布、形态、转移和通量,广泛应用于海洋地质调查、海洋矿产资源开发利用、海洋生态环境等领域的海洋生态系统演化及物质循环、全球气候变化、海洋资源形成和分布等研究方向。在海洋地质调查领域,海洋地球化学成分分析技术可以为推演海洋沉积物的成因类型及形成机制^[2],了解沉积物化学组成的控制因素^[3],揭示海水化学特征及变化规律^[4]等提供科学数据支撑和依据;在海洋矿产资源开发利用领域,海洋地球化学成分分析技术为揭示海洋矿产资源的类型及分布规律^[5]、勘探石油和天然气水合物等战略资源^[6-7]、评价潜在海洋矿产资源的开采价值^[8]提供有力技术支持;在海洋生态环境领域,海洋地球化学成分分析技术可以为指示海洋古生产力水平^[9]、古气候变化^[10-11]、古环境变迁^[12]以及现代物质来源^[13-14]、沉积环境缺氧程度^[9]、海洋污染程度及生态风险程度^[15]等方面提供可靠衡量指标。

1.1 海洋地球化学成分分析技术发展历程

1.1.1 常量元素分析

2006年,青岛所结合海洋沉积物的特点,对国家标准方法 GB/T 17378.5-1998 进行了合理改进。通过探讨沉积物的粒度、空白样品对测试结果的影响以及针对氯离子的去干扰的消除方法,成功建立了一套快速准确、经济有效的海洋沉积物中有机碳的测定方法,即重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法^[16]。通过对标准物质进行测定,与德国耶拿公司 Multi C/N 3100 总有机碳/总氮分析仪的分析结果相对比,测试数据在误差范围内是一致的,证明了该法准确可靠。近十几年来,随着仪器设备的更新,基于元素分析仪、碳氮分析仪、碳硫分析仪,又进一步建

立了对沉积物中 C、N、S 等元素进行分析测试的方法,并与经典化学滴定法相结合,形成了相对完善的分析技术。实际上,沉积物中的硫元素也可以通过离子色谱法进行测定。2012—2015年,通过实验不同熔样温度、装样容器及净化方法对测试数据的影响,不断优化实验条件,进而建立了用艾斯卡试剂熔样,OnGuard-H 小柱净化分离,离子色谱法同时测定海洋沉积物中氯和硫的分析方法^[17-19]。

海洋沉积物中的氯和硫也可以通过 X 射线荧光光谱法(XRF)实现测定。XRF 是进行沉积物中常量元素测定的常规方法,对于大部分样品来说,通过粉末压片的方式即可准确测定。针对部分海洋样品的特殊性,采用熔片制样测量常量元素具有很强的实用性,能够消除样品的矿物效应和粒度效应。对于海洋沉积物、海洋岩矿样品,2008年,青岛所对熔融制备样片方法进行了探究。改进后,采用混合熔剂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: LiBO_2 : LiF 的质量比为 45:10:5)与样品质量比为 12:1 的熔样比例,在 1080℃ 的熔样温度下,熔融制备玻璃样片。此外,在熔片过程中加入了 40 mg 的 NH_4I 粉末,解决了海洋样品熔片过程中流动性差、有机质含量高、气泡驱赶等问题,极大地提高了海洋沉积物地球化学成分分析数据的精密度和准确度^[20]。

虽然 Axios 波长色散型 X 射线荧光光谱法(Axios WD-XRF)已经基本成熟,但由于其体积较大,故不便于现场测定,具有一定程度上的局限性。Epsilon 3 能量色散型 X 射线荧光光谱仪(ED-XRF)具有体积小、多元素同时快速分析、准确度高和精密度好的优点,能够作为船载仪器应用于科考现场测定海洋沉积物的元素含量,同时对于及时指导海上工作、撰写航次报告也具有重要作用。2018—2020年,通过该法对一个样品多次制样和多次测量,结果表明,ED-XRF 对主量元素以及大部分微量元素的定量分析结果较准确,与陆上实验室测定数据基本一致,较好地解决了沉积物样品中多元素快速分析问题,适用于大批量海洋地质样品分析,为中国海底资源调查工作提供了重要的技术支持^[21-22]。当前,青岛所还拥有 Zetium WD-XRF,配备充氮系统能够对液体进行测试分析;搭载微区分析,对富钴结壳、大洋多金属结壳等样品进行元素分析。

1.1.2 微量、痕量元素分析

20 世纪 90 年代,得益于标准物质的成功研制,青岛所相继针对大洋沉积物、大洋多金属结核、大气气溶胶等不同类型样品,成功建立起了测定微量

金属元素、稀土元素的测定方法。1993年,参阅有关文献,针对中太平洋区海底沉积物的特点,改进了预处理的操作程序,使得稀土元素得到富集并与主元素和其他杂质元素定量分离,消除了残存杂质元素对分析结果的影响,成功提出了能够满足该区域样品中稀土元素的测试方法^[23],并用该法测定国家一级海底沉积物标准物质和外检样品中的稀土元素,均获得了满意结果,同时填补了中太平洋区海底沉积物分析研究的空白。1997年,结合多金属结核样品的特性,建立了测试稀土元素的方法^[24]。用该法测试多金属结核国家一级标准物质(GBW 07249)中的稀土元素取得满意结果,并以此法参加了东太平洋多金属结核及沉积物标准物质研制的稀土元素定值工作。同时,也为后续研究结核、微结核、沉积物中稀土元素的富集机制和成因机制夯实了实验基础^[25]。1998年,将电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)的应用范围扩展到大气气溶胶,达到了通过一次制样实现多元素同时测定的目的,该法经国家一级标样验证可行,已用于大批次大气气溶胶样品的测定^[26-27]。1999年,对全岩样品的选取和前期处理进行了探究,掌握了从全岩样品中分离出沸石黏土的前处理方法^[28],满足了当时研究火山活动历史的需要。上述前期的工作,为今后进一步探索各种沉积环境及相关的生物化学体系的地球化学过程,了解控制多金属结核生长发育机制的因素和获取古海洋学信息积累了宝贵的测试经验。

进入21世纪,ICP-AES进一步蓬勃发展,样品测试类型的覆盖范围逐步扩大至石灰岩等岩矿,同时对海洋沉积物、大洋多金属结核样品的研究也更为深入。2003年,对ICP-AES测定珊瑚礁中高含量的钙元素进行了测试尝试^[29],所测数据与传统的EDTA容量法的结果具有一致性;同时探索降低高含量钙对微量元素测定的干扰影响,微量元素的回收试验结果也令人满意,成功建立了可应用于大批量珊瑚礁样品的分析方法,使利用ICP-AES测定主量元素成为可能。与此同时,通过ICP-AES测定不同成因的海洋铁锰结核的稀土元素,探究了其地球化学特征,揭示了稀土元素的富集特征及机制^[30-32],使方法的应用空间更为广泛。虽然对ICP-AES已经有了相对成熟的应用方法,但为将仪器设备发挥更大的价值以及增加元素测试范围,仍不断探索新的元素测定方法。2011年,改进了溶矿的方式,采用HF-H₃PO₄-HNO₃-HClO₄四种混合酸在加热板上进行封闭溶矿,相较传统方法,该方法不仅降低了

敞开式溶矿易于引入污染的风险,还创新性地加入了H₃PO₄,有效抑制了硼的挥发损失。该方法的回收试验结果令人满意,成功建立了一种ICP-AES测定海洋沉积物中硼的方法^[33]。2012年,鉴于鲜有关于海洋沉积物中多元素分析的报道,探究了仪器参数的选择,充分考虑并科学校正了该实验方法存在的干扰因素,成功建立了应用ICP-MS测定海洋沉积物中痕量元素的方法,使ICP-MS更广泛地应用于地质领域。2018年,青岛所参加了能力验证计划,其中稀散元素矿石中的钨是必须实现的一个重要测试内容,为满足测试要求,成功建立了过氧化钠熔融分解测定稀散元素矿石中高含量钨的方法^[34-35]。此外,也逐步开展了电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测试方法的建立和完善。2022年,为科学评估深海沉积物中稀土资源,成功建立了高压密闭酸溶、ICP-MS测定的方法,该法适用于大批量深海富稀土沉积物中稀土元素的分析测定^[36],为沉积物物源及稀土元素赋存特征研究、评价、开发等提供了有效的技术支撑。目前,青岛所已能够对矿石样品中的常量、微量及痕量元素进行准确测定,分析测试水平已得到进一步提升。

1.1.3 易挥发性元素分析

21世纪初,技术人员对原子荧光光谱法(AFS)进行了初步的探究,推动方法较为迅速地发展起来。针对海洋沉积物中易挥发元素,2002年,通过混合酸分解、Fe³⁺消除干扰,建立了氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测量海洋沉积物中硒的测定方法^[37]。2003年,通过沸水浴条件下王水(1+1)溶矿、氯化亚锡还原,成功建立了冷原子荧光光谱法(CVAFS)测定海洋沉积物样品中汞的分析方法^[38]。在前期探索基础上,针对海洋沉积物中易挥发元素,于2010年提出用盐酸、硝酸、水(体积比3:1:4)混合酸消解样品,建立了HG-AFS测定海洋沉积物样品中砷、锑、铋、汞、硒的通用方法^[39],并广泛应用于大批量海洋沉积物样品中5种易挥发元素的准确测试分析。至此,针对易挥发性元素的分析测定的方法技术已相对成熟,为今后进行区域重金属元素分布特征及影响因素系统研究、挖掘具有重要价值的地质和环境信息、客观呈现环境污染情况、开展地球化学研究和进行生态环境质量评价提供了可靠方法技术^[40]。

1.1.4 海洋有机地球化学成分分析

自2006年以来,青岛所相继配备了气相色谱仪(GC)、高效液相色谱仪(HPLC)、气相色谱-质谱仪(GC-MS)、加速溶剂萃取仪(ASE)和气相色谱-三

重四级杆串联质谱仪(GC-MS/MS)等大型仪器设备,逐步建立了海洋沉积物有机物的检测系统。通过加速溶剂萃取/气相色谱-质谱法(ASE/GC-MS),采用硅胶-氧化铝复合净化柱,提出了一种适用于海洋沉积物中28种多氯联苯(PCBs)、16种多环芳烃(PAHs)和21种有机氯农药(OCPs)同时净化和分离的前处理方法,建立了同时测定上述65种持久性有机污染物的分析方法^[41]。同年,通过ASE提取、SPE Florisil小柱净化,建立了气相色谱(配备电子捕获检测器)同时测定海洋沉积物中21种OCPs和7种PCBs的快速分析方法^[42];建立了气相色谱(配备火焰离子化检测器)测定海底沉积物酸解烃的分析方法^[43-44]。之后,又将方法测试应用范围扩大至海洋生物、原油等样品,建立了通过GC-MS测定罗氏海盘中6种邻苯二甲酸酯类化合物(PAEs)的方法^[45];通过硅胶-氰丙基复合固相萃取柱分离原油中饱和烃及芳烃组分的前处理方法^[46]。

近10年来,新型海洋可持续性有机污染物在全球范围内引起了广泛关注,引发了相关研究的热潮。青岛所创建了沉积物中饱和烃^[47-49]、脂肪酸^[50]、脂肪醇^[51-52]、多环芳烃^[53-57]及邻苯二甲酸甲酯^[58]的提取方法及应用GC-MS的测定技术。沉积物中脂类生物标志物的研究推动了长时间尺度内古环境、古气候的重建工作。

1.2 海洋地球化学分析技术成果

1.2.1 研制标准物质

20世纪90年代初,青岛所实验室承担了《中太平洋多金属结核及海底沉积物标准物质研制》项目,完成标准物质研制及《中太平洋多金属结核及海底沉积物标准物质研制报告》及产品,即多金属结核标准物(GBW 07249)和海底沉积物标准物质(GBW 07313),其化学成分的推荐值、参考值、信息值与当时已公布的资料对比,均大大超过当时国际同类型标准物质。这两种标准物质的研制在国内尚属首例,填补了中国海洋地质标准物质的空白,具有较大的实用价值及意义。此外,该项目荣获地矿部科技二等奖,研制的标准物质获国家技术监督局批准为一级标准物质。在多种技术方法配套完成地调项目测试工作的同时,完成了黄河口标准物质的研制工作(GBW07343, GBW07344, GBW07345),填补了中国河口标准物质的空白^[59-60]。

1.2.2 制定国家标准方法

2002年,制定了《GB/T 20259-2006 大洋多金属结核化学分析方法》以及《GB/T 20260-2006 海底沉

积物化学分析方法》两项国家标准方法,在海洋地球化学分析领域广泛应用,为大洋多金属结核以及海底沉积物的化学分析提供可靠方法^[61-62]。

1.2.3 科研项目和专利获得

近年来,实验测试室海洋地球化学方向承担并完成多项科研项目,并获得多项新型技术专利技术。

2 海洋同位素与地质年代分析技术

碳、氢、氧、氮、硫等气体稳定同位素分析技术在碳循环、气候变化、生物演化、物质来源、水团组成与水体运动、地层对比等海洋生态环境、生物地球化学研究领域发挥了重要的作用^[63-68]。同位素地质年代学在矿物、地层地貌、板块构造、星球和行星物质的形成历史和演化进程上发挥重要作用^[69]。

2.1 气体稳定同位素分析发展历程

早在1980—1985年间,青岛所就开展了碳酸盐岩、有孔虫碳氧稳定同位素测试技术研究^[70],并在1998年前后尝试开展相关碳、氧稳定同位素标准物质的研制工作^[71]。2006年,在中国地质调查局“野战军”装备计划下实验测试室新引进了一台MAT 253型气体稳定同位素质谱仪,配备了CN/HO元素分析仪(EA)和微量碳酸盐制备装置(Kiel IV),并于2012年和2019年分别增配了气相色谱仪(GC-GC IsoLink)、多用途在线气体制备和导入装置(GasBench II)及气体预浓缩系统(PreCon)等较为完善的外设设备。实验技术人员逐步建立了海洋沉积物有机碳氮稳定同位素、海洋沉积物碳氧稳定同位素、海水氢氧稳定同位素、海水溶解无机碳稳定同位素、浅层气甲烷-二氧化碳碳氢稳定同位素、天然气水合物气体单体碳氢同位素等系列分析测试技术体系^[72-74]。同时,研制出中国第一套以海底沉积物为介质的自然基体型碳、氮稳定同位素标准物质(GBW04701、GBW04702和GBW04703)^[75]。

2.2 海洋地质年代分析发展历程

实验测试室拥有放射性碳同位素(¹⁴C)、电子自旋共振(ESR)、光释光(OSL)以及²¹⁰Pb、¹³⁷Cs等放射性测年技术和设备^[76-81],建立了涵盖百年-百万年尺度的第四纪年轻地质年代学测试技术,可对包括海洋沉积物、粉砂、黏土、珊瑚、木炭、贝壳、泥炭、湖泊淤泥、深海钻孔岩芯、土壤等多类型地质样品进行地质年代测定。

2.2.1 ^{14}C 测年技术

青岛所于 1982 年 8 月筹建 ^{14}C 实验室, 次年正式建成真空玻璃系统, 并于 1984 年 10 月正式发表数据^[76-78]。测试样品以碳酸盐和黏土为主, 承担了对晚第四纪地质学、考古学、海洋学、古地理学和古气候学等学科的测试工作。实验测试室是国内最早实现小样品液体闪烁计数法 ^{14}C 测年的实验室之一。业渝光带领课题组开展的“稀释技术 ^{14}C 测年及其应用研究”, 使样品用量减少到常规方法用量的 1/10, 使得小量样品也可以应用液体闪烁计数法 ^{14}C 定年, 与国内外多家实验室的比对结果表明该技术达到了国际先进水平^[79]。

2.2.2 电子自旋共振测年技术

与其他方法相比, ESR 测年有如下特点: ①测试样品范围较为广泛, 包括洞穴的碳酸盐沉积物(如石笋、石钟乳、泉华、流石、海湖相石膏等)、软体动物贝壳、化石(如牙齿珐琅质及骨化石、珊瑚等)、石英(如陶瓷、火山灰/岩、断层泥、风成黄土、洞穴及深海沉积物等); ②测年范围宽, 可达千年至两百万年, 基本覆盖了整个第四纪地质年代范围; ③非破坏性, 样品可以反复测量; ④测量信号稳定, 受周围环境影响较小^[80-82]。20 世纪 90 年代初, 青岛所建设了电子自旋共振实验室, 最初的研究对象主要是南海岛礁上的灰岩和珊瑚礁的 ESR 年龄, 为研究南海岛礁基底和珊瑚礁形成年代提供了重要数据支撑^[79-80, 83]。此外, 还开展了海岸风成砂、干旱地区石膏以及海洋沉积物石英等 ESR 测试技术研究。

2.2.3 释光测年技术

释光测年因准确性、可靠性和测试精度的进步, 已经成为一种广泛应用于年轻第四纪地质、环境、考古研究中最重要年代测试手段, 其测年范围在数百年到数十万年之间。青岛所释光测年分析实验室于 2007 年建成, 使用 DayBreak 2200 型释光能谱仪重点研究多片法石英光释光测年和探索水成沉积物的释光测试技术。2019 年, 新购入了 Lexsyg Research 型释光测量系统, 集成了多种光源、多种激发方式, 并携带 EMCCD 感光阵列摄像机, 设备性能得到最大加强。随着新设备的投入使用, 释光实验室开始进行放射性剂量测试研究、深海沉积释光测试研究以及冰川沉积释光测试研究的多方位探索。包括利用单片再生法石英释光测年技术和红外长石释光测年技术, 准确测量了西太平洋深海沉积物样品、黄河口沉积物样品、海岸带样品和山东冰川沉积物样品在内的特殊地质样品^[84-86]。

2.2.4 铅铀测年技术

^{210}Pb 和 ^{137}Cs 是百年尺度甚至更短时间内沉积物测年的重要手段, 是测定现代沉积速率和研究环境使用最广泛的工具^[87-88]。实验测试室在 2005 年左右购置的高纯锗 γ 能谱仪和多道 α 能谱仪。在黄河三角洲的 ^{210}Pb 测年研究中, 业渝光首次提出对 ^{210}Pb 曲线进行标准化, 明显消除了 ^{210}Pb 在黄河三角洲沉积物中不规则分布的影响, 推动了黄河三角洲现代沉积作用的深入研究^[78-89]。

2.3 成果与应用

青岛所海洋同位素与地质年代分析技术发展至今, 取得了诸多研究成果, 例如主持研制中国首套海洋沉积物碳氮稳定同位素国家一级标准物质 3 种(GBW04701—GBW04703); 授权国家发明专利 1 项; 制修订地质矿产行业标准方法 6 项, 并承担多项科研项目。

3 海洋岩石矿物分析

3.1 矿物鉴定

海洋底质沉积物中碎屑矿物及其组合特征受物质来源、风化、搬运和沉积等多种因素控制, 是搬运营力对沉积物长期作用的结果, 可有效探讨沉积物的来源、搬运途径、矿物组分分异规律等信息, 也可揭示沉积环境、水动力条件和气候变化等研究提供重要依据, 是海洋沉积研究的重要内容, 沉积物中碎屑矿物的鉴定和研究具有重要意义^[90-94]。

实验室碎屑矿物鉴定为传统学科, 前处理时首先根据沉积物粒度粗细程度选取适量样品烘干后称重, 充分浸泡后, 通过 0.25 mm 和 0.063 mm 双层套筛进行水洗冲筛, 将 0.25 ~ 0.063 mm 粒级的砂烘干称重后用三溴甲烷(CHBr_3)进行轻、重矿物分离, 获得轻、重矿物后分别烘干称重。若砂样重量大于 10 g, 则利用缩分器缩分以后再进行分离。镜下鉴定采用颗粒统计法中的条带法, 在日常生产工作中鉴定不少于 300 粒, 一般为 300 ~ 400 粒, 运用奥林巴斯 SZX7 体式显微镜和蔡司 ScopeA1 偏光显微镜对这些矿物颗粒逐个进行定名, 本工作根据《海洋调查规范》GB/T12763.8-2007 第八部分海洋地质地球物理调查, 多年来该鉴定方法为地质调查项目提供优质数据支撑。

建所初期, 虽然海洋地质调查工作仅局限于渤

海、南黄海或者东海的局部区域以及河口(三角洲)地带,但矿物鉴定和分析在滨海砂矿方面做了较多工作。谭启新等^[95]提出山东半岛滨海砂矿主要由滨海砂金矿、滨海石英砂、滨海锆英石-磁铁矿、建筑用石英砂4个成矿区构成,并对滨海砂金矿中的掖县三山岛砂金矿床和招远诸流河砂金矿床中砂金的矿物学特征、物质来源及其成矿条件进行了重点研究^[96-97],进而编制了山东半岛滨海砂矿成矿条件及成矿区远景规划图^[98],从而为山东半岛砂矿的调查和研究提供了有力的支撑。孙白云^[99]研究了东海北部区域海底沉积物的碎屑矿物中重矿物的种类、组合特征,通过与长江口、黄河口和南黄海的重矿物种类、组合特征比对,认为东海北部区域的沉积物除来源于长江、黄河外,也有相当数量的沉积物为原地侵蚀成因。随着“中国浅海及其相邻陆区第四纪层型地层对比”等科研项目的开展,通过对QC2孔等钻孔中沉积物的碎屑矿物进行鉴定和研究,确定了其矿物组合、特征矿物、来源以及沉积环境变化,对南黄海区域早更新世以来的沉积地层划分具有重要意义^[90-100]。除矿物种类、组合可以反映沉积环境外,重矿物表面不同的结构特征也可以反映不同的沉积环境^[100]。此外,孙白云^[91,101]研究了长江、黄河和珠江三角洲沉积物并确定了其矿物组合特征,鉴于这三条河流所携带的沉积物对于中国近海海域底质沉积物有着巨大影响。这个时期虽然是海洋以及河口(三角洲)底质沉积物中碎屑矿物研究的初期阶段,但是上述研究成果对以后相关区域以及内容的后续研究有着重要影响。

进入21世纪,中国近海海域和海岸带的地质调查更为详细和全面,对底质沉积物的来源、搬运、沉积等过程也进行了深入探讨。利用碎屑矿物指标,基于定量物源分析,首次估算了长江—淮河—老黄河水系物质对东海北部陆架沉积的贡献,其中长江物质为主要物源,老黄河物质次之,而淮河物质最少,其贡献率低于10%,同时揭示了江苏海岸带外顺岸搬运向离岸搬运转变的现象,以及全新世早期长江流路可能的后退轨迹^[92,94,102],而东海中南部的沉积物则主要来源于长江^[103]。同样利用碎屑矿物指标,发现渤海中东部的沉积物物源可简单归结为辽河物质和黄河物质的两端元混合,在不同的沉积分区内两端元混合比例差异较大^[104],而其他小型河流的沉积物仅局限于渤海的局部区域^[105-106]。利用碎屑矿物指标在黄海区域的沉积物物源、沉积环境方面也取得了进展,比较黄海中部细砂与黄河中、上游段沉积物中的透明重矿物组合,发现二者

高度一致,从而揭示了黄海中部的沉积物主要来源于黄河,而矿物组合的差异性则归因于全新世时期和海侵期形成的不同的海洋水动力分选和不同地质阶段的混合^[107],山东半岛南岸近岸海域沉积物则主要是受该区域小型入海河流和黄河的综合影响^[93]。上述研究不仅提高了对现代黄河、长江分散体系的认识,对于理解第四纪时期古渤海的沉积过程,以及古黄河水系的演化及其相互关系也具有重要科学意义。

3.2 微束分析

扫描电子显微镜(SEM)是观测样品表面形貌的基础微束分析技术,具有成像直观、分辨率高、景深长、立体感强、样品制备简单等特点(图1),已成为微束分析测试仪器家族中的重要成员^[108-110]。

海洋地质实验检测中心的微束分析主要以冷场发射扫描电子显微镜(Cold-Field SEM)为主,与X射线能谱仪(EDS)联用,经过多年的应用和探索,在矿物与岩石鉴定、微区化学成分分析、微观表面形态观察分析等方面积累了丰富的经验。在不对微体古生物喷镀的情况下,采用低电压模式,对微体古生物的不同方位进行观察、拍照,使局部细节得以显现,并制成图版,为微体古生物鉴定提供了技术支持。采用扫描电镜和X-射线能谱仪联用的微区分析技术可以有效区分海洋沉积物中的黏土矿物微粒($<2\mu\text{m}$),例如采用该方法确定了采自西菲律宾海钻孔沉积物的黏土矿物中的伊利石、蒙脱石、绿泥石等^[111];也可在上述二者联用的情况下利用X射线能谱仪的面扫描功能,快速、有效地确定沉积物样品中的目标颗粒,例如采用该功能对样品进行逐帧扫描,最终确定了采自日本海钻孔沉积物中微米级的碳颗粒^[112]。此外,采用SEM-EDS联用微区分析技术,对采自南海西永二井的钻井岩芯中含碎屑沉积物的白云岩组成的矿物形态、形貌及微结构进行了详细的观察,对白云岩的成因和发展过程研究提供了有力支持^[113]。

3.3 粒度分析

不同粒度分析方法由于测试原理的差异,分别具有不同的优缺点,并且在测量结果上均有一定偏差。早期就有学者对松散沉积物的粒度分析方法进行了介绍,并对沉积物粒度分布参数计算方法进行了比较^[114-115]。在建所初期,沉积物粒度分析采用的方法以传统的筛析法和沉降法为主。在激光粒度仪广泛使用后,青岛所使用不同方法对南黄海沉



图 1 矿物微形貌图像

Fig.1 The SEM image of a mineral

积物进行了粒度分析及结果的对比研究,结果显示用激光粒度仪分析南黄海海域沉积物结果可靠,可以替代传统的粒度分析方法^[116]。

目前青岛所对沉积物进行粒度分析时,泥质、粉砂质样品采用激光粒度仪进行测试,含粗砂及砾石样品联合使用筛析法和激光法(即综合法)分析各粒级百分含量,当粒径大于 0.063 mm 的物质质量分数大于 85% 时,可单独采用筛析法,筛析法粒级间隔为 0.5 Φ 。

实验测试室于 2001 年引进了第一台激光粒度仪,其后持续更新测试设备,目前拥有马尔文 MS2000 型激光粒度仪两台、MS3000 型激光粒度仪一台、莱驰 AS200 型震动筛分仪两台,可以对各种沉积物样品进行粒度分析。目前青岛所对沉积物进行粒度分析时,泥质、粉砂质样品采用激光粒度仪进行测试,含粗砂及砾石样品联合使用筛析法和激光法(即综合法)分析各粒级百分含量,当粒径大于 0.063 mm 的物质质量分数大于 85% 时,可单独采用筛析法,筛析法粒级间隔为 0.5 Φ 。自 2001 年以来,已经累计完成近 20 万件粒度样品的分析测试,为海洋地质调查提供了强有力的数据支撑^[117-118]。山东半岛海域及黄河三角洲沉积物粒度分布特征以及沉积环境和沉积作用得到了广泛研究^[119-125]。渤海^[126-127]、东海^[128-129]以及冲绳海槽^[130]等区域,都进行了沉积物类型特征及其分布规律、沉积物成因及物源分析研究。

3.4 黏土矿物分析

利用 X 射线衍射技术分析黏土矿物是最简单、经济、有效的检测手段。经过几十年的发展,20 世纪 90 年代以后,全谱拟合应用到多晶体衍射的各

个传统领域,在定量分析,晶粒大小及微观结构测定等方面取得了更加准确的结果。

海洋沉积物黏土矿物 X 射线衍射分析方法参照国家标准《GBT 12763.8-2007 海洋调查规范 第 8 部分 海洋地质地球物理调查》。测试流程可分为:前处理提取 2 μm 及以下黏土矿物颗粒、上机测试、数据处理及报告整理。从 2010 年引进 D/Max-2500 型 X 射线衍射仪以来,实验室充分发挥其大功率的优点,不断尝试各种测试条件,并分析测试条件对测试结果的影响,对海洋沉积物黏土矿物 X 射线衍射分析而言,最佳的测试条件是:40 kV, 150 mA, 连续扫描模式,扫描速度为 8 $^{\circ}/\text{min}$, 采样宽度 0.024 $^{\circ}$, 测试一个样品用时 3'37", 从而达到最高的测试效率^[131]。

4 海洋微体古生物分析

青岛所海洋地质调查项目中微体古生物的样品主要来源于渤海、黄海、东海和西太平洋等海域,且以近岸陆架、河口(老/新黄河口、长江口)、三角洲(长江三角洲、黄河三角洲、浙闽沿岸)等作为主要取样区域。

4.1 有孔虫和介形虫

微体化石有别于大化石,难以用肉眼观察,所以通常将埋藏它的沉积物一起采集,然后通过实验室前处理,才能获取所需的化石标本。样品的前处理大体分为两大类:松散沉积物可通过简单物理筛洗或化学处理得到所需化石群完整的立体个体后进行识别研究,而成岩样品需要通过碎样磨片等一系列流程后通过微体化石局部某一方向截面二维结构进行识别研究。不同门类前处理方法及鉴定使用仪器均有差异。有孔虫和介形虫:含有孔虫的松散沉积物需要通过泡样(自来水或双氧水)、筛洗(0.063mm 孔径)、烘干和浮选(以四氯化碳作为浮选溶液)等前处理,然后在 ZEISS SteREO Discovery V20/V12/V8、ZEISS Stemi 508/305/DV4 双目体视显微镜下观察鉴定。岩石样品需要通过碎样、切片、磨片等相关流程,然后在 ZEISS Axio Imager M2M/A2m、ZEISS Axio Lab.A1 mat/Scope A1 生物显微镜下观察鉴定。鉴定时主要依据壳貌壳饰,房室排列方式、或不同属种切面形态内部构造等特征来确定属种归类,并进行逐壳统计。

建所初期 10(1979—1988 年),青岛所在有孔虫和介形虫方面的应用研究程度相对较低,研究区域

较分散,或通过编译部分国外其他区域的研究成果来进行前期的数据和研究积累。如开展中国南海西沙群岛最高岛屿——石岛晚更新世出露地层中有孔虫组合特征的研究和对比,为恢复当时的古地理环境和西沙群岛的新构造运动提供来自微体古生物学方面的证据^[132];在山东半岛南部胶州湾海底表层样中开展活体有孔虫和介形虫的研究工作,为后期开展这一地区的第四系研究,包括古地理和古环境演化研究打下了坚实基础^[133]。编译已发表的地中海西西里海峡半深海沉积物中 *Hyalinea balthica* 饰带透明虫(又称波罗的海透明虫)生态特点^[134]和印度彭纳河口湾有孔虫与盐度关系的相关文章^[135]。

建所中期十余年(1989—2000年左右),沿海第四纪地层对比等项目陆续启动,有孔虫和介形虫的应用研究得到了蓬勃发展,且取得了综合性的、高水平的、对后续研究影响深远的一批卓越成果。南黄海 QC2 系列钻孔的研究成果,建立了中国东部沿海区域海侵海退沉积层序的基本格架。其中,有孔虫化石是非常重要的证据之一,且在海侵层的命名上均有体现,如发生于距今约 1.1 万年的第一海侵事件也被称为卷转虫海侵(Ammonia 海侵);发生于晚更新世晚期距今约 2~4 万年的第二海侵层也被称为假轮虫海侵(Astrorotalia 海侵)^[136-137]。在 QC2 孔进一步的详细研究中发现,其第四海侵层中凉水种和喜凉底栖有孔虫属种以及环极介形虫属种均以优势组分出现,较好地揭示了南黄海古冷水团的存在时间约为距今 128~5 ka,这对探讨古今该冷水团的形成机制和控制因素具有极为重要的意义^[137]。在国际地质对比计划(IGCP)296 项目里,中国工作组选择泥河湾盆地中部的钱家沙洼洞沟和小渡口—郝家台两个剖面作为下更新统建议层型,介形虫类组合显示了较为良好的指相环境意义^[138],在缺少先验知识的情况下,开展了介形虫壳体中氧碳同位素和 Mg/Ca 同环境因子依赖关系的尝试性研究,为分析区域环境因子提供了一个定量化的新途径^[139]。

最近十余年(2010—2023年),随着海洋区域地质调查研究诸多项目的启动实施,先后在渤海、黄海、东海开展了一系列有孔虫和介形虫的应用研究工作。其研究方向主要体现在 3 方面:①开展表层沉积物样品中活体现生种群、死体种群与海洋物理化学生态要素(温度、盐度、深度、溶解氧、洋流水团等)之间的关联性研究^[140-142]。②通过岩芯和柱状样中有孔虫/介形虫种群的垂向变化,揭示海陆变迁史及其他古沉积环境演变^[143-151]。③基于宏观种群

和壳貌形态、微观壳体特征(壳孔和壳饰等)、壳体氧化还原敏感元素等分析工作,开展包括低氧、酸化、富营养化等在内的海洋环境污染压力的指示研究^[146,148,152-153]。

4.2 孢粉

青岛所实验测试室孢粉鉴定分析这一学科门类围绕海洋地质调查项目需求,开展孢粉学实验室处理、镜下鉴定和分析等工作,首先含有孢粉的松散沉积物通常采用酸解法进行前处理,而岩石样品则需要先进行碎样、泡样后用酸解法进行处理,然后将获取和富集的化石样品充胶制片后在 ZEISS Axio Lab.A1 pol/Axio Scope A1 pol 偏光显微镜下观察统计。孢粉的数量大、体积小,易于搬运,在较大空间范围内成分是混杂的,因此鉴定统计时第四纪化石属种丰富通常每样需 500 粒以上,其他时代每样需 200 粒以上,这样便于精确地分析和解释孢粉植物群的性质。鉴定主要依据孢粉的形态、轮廓和纹饰等特征进行属种归类,并进行逐粒统计。孢粉鉴定服务于海岸带、近海以及深远海地质调查工作,取得了一系列成果。

(1)依据南黄海 QC2 孔的孢粉分布,详细划分出了不同的孢粉气候带,为揭示南黄海地区晚第四纪以来的古植被和古气候冷暖变化发挥了重要作用^[154-156]。

(2)中国东部海区及三角洲地区新生代的沉积环境演变规律取得新认识,对植被覆盖情况进行梳理和对第四纪气候变化和海平面变化提供了新证据。主要进展包括中国东部海区、黄河三角洲、长江三角洲等地区植被覆盖情况推断以及第四纪以来经历了三次海侵与海退事件的识别,渤海和黄海沉积物源区沉积环境推断,以及沿海地区第四纪以来海平面变化规律等。通过黄河三角洲地区钻孔的沉积学和孢粉学资料综合研究,认为黄河三角洲地区更新世以来沉积环境经历了河湖相沉积-海陆交互相沉积-浅海相沉积-河口滨海相沉积过程^[157]。通过长江三角洲地区钻孔的沉积学和孢粉学资料,获得该地区新生代以来的环境变化和古气候变化特征^[157-158]。

这些认识对于解决中国东部陆架半封闭海湾海洋沉积特征、环境变迁等地质问题也具有重要理论价值,同时也为黄河三角洲、长江三角洲以及东部海区海洋环境资源保护、海洋矿产资源开发、港口码头建设等方面提供了区域性海洋地质数据,为当地社会经济发展提供基础性服务。

5 海洋地质实物样品保存技术

5.1 实物地质资料保存意义及技术应用

实物地质资料是一种宝贵的公益资源。实物地质资料是指在地质工作中获取的岩(矿)心、岩屑、标本、样品等实物及其相关资料^[159]。实物地质资料的获取花费巨大,具有原始性、唯一性与不可复现(复取)性^[160]。实物地质资料的二次开发利用将对寻找矿产资源和科学研究起到推动意义,对于减少资源浪费、提高地质工作效率有重大意义^[161]。随着科技水平的发展以及分析手段的提高,自动化仓储及管理系统^[162]、高效准确的样品数字化分析仪器^[163]、面向大众的信息发布平台^[164-165]已经成为实物地质资料保存技术的新方向。

5.2 海洋地质样品库及管理系统

20 世纪 80 年代,青岛所进行了中国黄海陆架第四纪地质标准剖面研究,积累了典型层型钻孔岩芯,随着 90 年代国际地层对比计划的陆续进行,保留的副样已完全用于实验分析,仅中国南海西沙的部分样品仍有保存。

2005 年,青岛所规划建设了面积 6000 m² 海洋地质样品库,包括常温库、低温冷库及临时存放间、设备间和处理间,能够满足 3 个项目组同时进行样品处理,库房容量能够满足 5 年以上需求。

2007 年,自行研发了海洋地质样品管理系统,采用现代仓储管理模式,全面使用条形码方式对样品进行标注,样品库的管理全部实现了信息化管理。

5.3 大洋钻探岩芯库

青岛所历经 4 年时间,建成大洋钻探岩芯库,于 2021 年 12 月 25 日正式投入使用,可同时开展岩芯共享、岩芯分析、岩芯研究等综合性岩芯科学探索。在仓储规模、温控系统、岩芯检测分析能力、成果信息化服务等方面均有全面提升。大洋钻探岩芯库主要职能包括:样品接收、分类整理、安全保存、处理加工、分析测试、数据建设、共享服务、成果展示、科普宣传等九大版块。

大洋钻探岩芯库占地面积 6800 m²,包括常温库 2500 m²、低温库 2500 m² 和实验测试区 1800 m²。常温库共设 3300 个库位,可存储约 198 000 m 岩芯;低温库是国内首家单货柜独立智能控温模式的 0~4 ℃ 库,模块化分区管理,智能精确温控,精度

在 1.5 ℃ 范围内,拥有独立知识产权,在节约能源的同时实现了岩芯的低温存储,规划总容量约为 125 000 m。大洋钻探岩芯库配备有先进的智能化仓储管理系统,能够实现常温库、低温库岩芯观测全流程自动化服务。库房容量能够满足未来 30 年地调与科研所产生的实物地质资料保管。

结合国家海洋科学研究现阶段的需求,以及保障国家能源资源调查、钻探和海洋环境生态科学研究的业务需求,大洋钻探岩芯库配备完善的岩芯分析测试设备和场地。按照学科分类,大洋钻探岩芯库目前设置 8 个相关功能实验室,分别为:岩芯非破坏性实验室、岩芯整理实验室、年代学实验室、古地磁与岩石磁学实验室、微生物学实验室、岩石矿物学实验室、有机地球化学实验室和无机地球化学实验室。

2022 年大洋钻探岩芯数字平台搭建完毕,实现了大洋钻探岩芯数据库、自动化仓储管理系统以及岩芯数字化测试数据的实时对接。优化了岩芯样品信息存储模式,提供查询及数据展示等共享功能,提高了样品信息提取和利用效率。

6 青岛所海洋地质实验测试技术优势及展望

青岛所实验测试室不断应对新时代创新驱动对实验测试提出的新要求,具备地球化学成分分析系统化、岩矿鉴定智能化、年代分析完整化、微古鉴定多元化、实验测试质量管理体系化、实物样品管理信息化、测试数据集成化的具有鲜明海洋特色的综合性实验测试技术体系、质量监控体系和装备体系。多核微区分析系统逐步实现了在兼顾常规的常量、微量元素分析的同时,具备承担元素微区扫描测试的能力;全反射 X 射线荧光光谱仪测试海水、地下水等重金属元素取得突破进展;释光测年在常规的石英定年的基础上,开发了长石测年分析技术;为充分发挥矿物自动鉴定系统的测试性能,针对海洋地质矿物组成的特殊性,构建了海洋地质矿物标准库,并在实践工作中不断补充完善;海洋微塑料测试、低本底水体、水质测试,水体有机碳、氮(或 TC、TN),地质样品形态、价态、效态、交换态等测试技术能力在实验测试工作中得到持续提升;大洋钻探岩芯数字平台实现了大洋钻探岩芯数据库、自动化仓储管理系统以及岩芯数字化测试数据的实时对接,具有较高的社会影响力和行业竞争力。

为有效保障国家深海钻探、深海能源资源调查

和海洋环境生态科学研究的业务需求,青岛所实验测试室今后将紧紧围绕国家地质事业整体布局、重大创新战略部署,找准检测领域新的契合点,加快转变发展方式,拓展和延伸测试服务领域。构建海洋基础地质调查实验测试技术、海洋矿产能源资源测试技术、生态地球化学与国土空间适宜性评价测试分析技术、计量与质量评估及标准化技术的业务新板块,形成以国土、矿产、海洋、生态、水体以及新型有机污染物齐头并进的发展态势和技术优势。抓好技术、服务两个对接,发挥技术优势,提升检测能力,着力打造实验测试“升级版”,加大从传统地质样品检测到广义地质样品检测的转换力度,加强从常量→微量→痕量、从无机物分析→有机物分析、从元素全量→元素效态和微区分析、从矿物→同位素的分析方法技术,加大技术创新力度,进一步完善气、水、土、沉积物、生物样品配套方案。着眼高起点,积极推进测试标准体系建设,在服务于海洋地质大调查的过程中抓好标准物质、标准方法和规范规程的研究制定,建立以我国为主并与国际衔接的标准、规范体系。提升青岛所海洋基础地质调查、深海能源、矿产资源、生态环境检测和监测等的创新能力,完善分析技术,丰富手段,构建学科齐备、海洋特色鲜明、综合性实验测试技术体系。

参考文献 (References)

- [1] 谷明欣. 浅析地质工作中地质实验测试重要性[J]. *世界有色金属*, 2018(19): 209-210. [GU Mingxin. Importance of geological experiment in geological work[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018(19): 209-210.]
- [2] 姜学钧, 林学辉, 姚德, 等. 不同成因的海洋铁锰氧化物沉积物中稀土元素的地球化学特征[J]. *海洋科学*, 2004, 28(7): 7-12. [JIANG Xuejun, LIN Xuehui, YAO De, et al. Geochemistry of rare earth elements for different genetic marine ferromanganese deposits[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(7): 7-12.]
- [3] 陈弘, 刘坚, 王宏斌. 琼东南海域表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(6): 39-45. [CHEN Hong, LIU Jian, WANG Hongbin. Geochemical characteristics and geological significance of major elements in surface sediments in Qiongdongnan area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(6): 39-45.]
- [4] 范佳慧, 窦衍光, 赵京涛, 等. 东海陆坡-冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 102-114. [FAN Jiahui, DOU Yanguang, ZHAO Jingtao, et al. Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 102-114.]
- [5] 王建强, 张建伟, 薛林福, 等. 黄骅拗陷孔南地区孔二段时期元素地球化学特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 61-69. [WANG Jianqiang, ZHANG Jianwei, XUE Linfu, et al. Element geochemistry of the second member of Kongdian formation in southern Huanghua depression and its implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 61-69.]
- [6] 李从玲. 近代海洋沉积物(层)中姥鲛烷/植烷比值及其地球化学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(4): 77-88. [LI Congling. Pristane/phytane ratio in recent marine sediment (sedimentary layer) and its geochemical significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(4): 77-88.]
- [7] 邓义楠, 方允鑫, 张欣, 等. 南海琼东南海域沉积物的微量元素地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 70-81. [DENG Yinan, FANG Yunxin, ZHANG Xin, et al. Trace element geochemistry of sediments in Qiongdongnan area, the South China Sea, and its implications for gas hydrates[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 70-81.]
- [8] 宋维宇, 李超, 孟祥君, 等. 九州-帕劳海脊南段共生多金属结核与富钴结壳地球化学特征及其资源意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 149-157. [SONG Weiyu, LI Chao, MENG Xiangjun, et al. Geochemical characteristics and resource significance of polymetallic nodules and cobalt-rich crusts in the southern Kyushu-Palau ridge[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 149-157.]
- [9] 刘峰, 蔡进功, 陈爱国, 等. 巢湖栖霞组碳酸盐结源岩元素地球化学特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 121-127. [LIU Feng, CAI Jingong, CHEN Aiguo, et al. Element geochemistry of the carbonate source rock of the Lower Permian Chihhsia formation in Chaohu region, Anhui and their implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 121-127.]
- [10] 周世光, 业渝光, 刘新波. 海南岛三亚三井珊瑚礁中稀土元素地球化学特征及其古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(2): 104-111. [ZHOU Shiguang, YE Yuguang, LIU Xinbo. Geochemical characteristics of ree in coral reef of sanya-3-well and its paleoclimatic significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(2): 104-111.]
- [11] 曹军骥, 张小曳, 王丹, 等. 晚新生代风尘沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 97-101. [CAO Junji, ZHANG Xiaoye, WANG Dan, et al. Ree geochemistry of Late Cenozoic eolian sediments and the paleoclimatic significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 97-101.]
- [12] 梁宏锋. 大洋钻探与海洋地球化学: 微量元素及稳定同位素地球化学记录[J]. *海洋科学*, 1996, 20(3): 19-24. [LIANG Hongfeng. ODP and geochemistry of ocean: rare elements and isotope geochemistry records of marine geologic environments[J]. *Marine Sciences*, 1996, 20(3): 19-24.]
- [13] 李小月, 刘珊珊, 张勇, 等. 山东半岛南部海域表层沉积物主要元素分布特征及影响因素[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(5): 15-22, 69. [LI Xiaoyue, LIU Shanshan, ZHANG Yong, et al. Distribution pat-

- tern and influencing factors of the major elements in surface sediments off south Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(5): 15-22,69.]
- [14] 褚征,胡宁静,刘季花,等.西菲律宾海表层沉积物稀土元素地球化学特征及物源指示意义[J].*海洋地质与第四纪地质*,2016,36(5): 53-62. [CHU Zheng, HU Ningjing, LIU Jihua, et al. Rare earth elements in sediments of west Philippine sea and their implications for sediment provenance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 53-62.]
- [15] 刘金庆,印萍,张勇,等.滦河口沉积物重金属分布及生态风险评估[J].*海洋地质与第四纪地质*,2016,36(5): 43-52. [LIU Jinqing, YIN Ping, ZHANG Yong, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments of the Luanhe River estuary and ecological risk assessment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 43-52.]
- [16] 刘昌岭,朱志刚,贺行良,等.重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法快速测定海洋沉积物中有机碳[J].*岩矿测试*,2007,26(3): 205-208. [LIU Changling, ZHU Zhigang, He Xingliang, et al. Rapid determination of organic carbon in marine sediment samples by potassium dichromate oxidation-ferrous sulphate titrimetry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2007, 26(3): 205-208.]
- [17] 张媛媛,贺行良,孙书文,等.元素分析仪-同位素比值质谱仪测定海洋沉积物有机碳稳定同位素方法初探[J].*岩矿测试*,2012,31(4): 627-631. [ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, SUN Shuwen, et al. A preliminary study on the determination of organic carbon stable isotope of marine sediment by element analyzer-isotope ratio mass spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(4): 627-631.]
- [18] 张媛媛,余小林,贺行良,等.离子色谱法测定沉积物中氯[J].*理化检验-化学分册*,2012,48(6): 664-666,670. [ZHANG Yuanyuan, SHE Xiaolin, HE Xingliang, et al. IC determination of chlorides in sediments[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2012, 48(6): 664-666,670.]
- [19] 张媛媛,林学辉,贺行良,等.离子色谱法同时测定海洋沉积物中氯和硫[J].*分析科学学报*,2015,31(2): 249-252. [ZHANG Yuanyuan, LIN Xuehui, HE Xingliang, et al. Determination of chlorine and sulfur in marine sediment by ion chromatography[J]. *Journal of Analytical Science*, 2015, 31(2): 249-252.]
- [20] 徐婷婷,夏宁,张波.熔片制样-X射线荧光光谱法测定海洋沉积物样品中主次量组分[J].*岩矿测试*,2008,27(1): 74-76. [XU Tingting, XIA Ning, ZHANG Bo. Determination of major and minor components in sea sediment samples by fused bead-X-ray fluorescence spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2008, 27(1): 74-76.]
- [21] 张颖,汪虹敏,王赛,等.X荧光光谱仪在实验室-调查船测定海洋沉积物元素的对比研究[J].*海洋科学进展*,2018,36(4): 550-559. [ZHANG Ying, WANG Hongmin, WANG Sai, et al. Comparison of energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer used in the lab and on the research vessel for the determination of element concentrations in marine sediments[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(4): 550-559.]
- [22] 汪虹敏,张颖,徐磊,等.能量色散X射线荧光光谱法测定海洋碎屑沉积物中28种元素[J].*海洋科学进展*,2020,38(1): 70-80. [WANG Hongmin, ZHANG Ying, XU Lei, et al. Determination of twenty-eight elements in marine clastic sediment samples by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(1): 70-80.]
- [23] 周世光.中太平洋(CC区)海底沉积物中稀土元素的测试及其分布模式研究[J].*海洋学报*,1993,15(6): 55-59. [ZHOU Shiguang. Measurement and distribution pattern of rare earth elements in sea-floor sediments of Central Pacific Ocean (CC zone)[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(6): 55-59.]
- [24] 周世光,林学辉,任思鸿.大洋多金属结核中稀土元素的测定及其地球化学特征[J].*岩矿测试*,1997,16(1): 28-32. [ZHOU Shiguang, LIN Xuehui, REN Sihong. Determination and geochemical characteristic study of rare earth elements in deep sea polymetallic nodules[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 1997, 16(1): 28-32.]
- [25] 刘季花,林学辉,梁宏锋,等.东太平洋海底结核及相关沉积物的稀土元素地球化学特征[J].*海洋学报*,1999,21(2): 134-141. [LIU Jihua, LIN Xuehui, LIANG Hongfeng, et al. REEs geochemistry of nodules and associated sediments from the eastern Pacific[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(2): 134-141.]
- [26] 刘昌岭,宋苏硕,夏宁,等.青岛市区大气颗粒物中重金属的浓度及其来源研究[J].*青岛大学学报*,1998,11(3): 44-48. [LIU Changling, SONG Suqing, XIA Ning, et al. Study on concentrations and sources of heavy metals in the atmospheric particulate matters in Qingdao urban districts[J]. *Journal of Qingdao University*, 1998, 11(3): 44-48.]
- [27] 林学辉,刘昌岭,张红,等.离子体发射光谱法同时测定大气气溶胶中多种金属元素[J].*岩矿测试*,1998,17(2): 143-146. [LIN Xuehui, LIU Changling, ZHANG Hong. Determination of metal elements in aerosol by ICP-AES[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 1998, 17(2): 143-146.]
- [28] 刘季花,林学辉.大洋沉积物稀土元素地球化学研究中样品的选取和前期处理[J].*海洋地质动态*,1999(10): 1-3. [LIU Jihua, LIN Xuehui. Sample selection and preliminary treatment for geochemical study of rare earth elements in ocean sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 1999(10): 1-3.]
- [29] 林学辉,刘昌岭.单道扫描电感耦合等离子体发射光谱法测定珊瑚礁中主量和微量元素[J].*岩矿测试*,2003,22(3): 225-227. [LIN Xuehui, LIU Changling. Determination of major and trace elements in coral accumulation samples by sequential ICP-AES[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(3): 225-227.]
- [30] 姜学钧.海洋铁锰氧化物沉积物中常、微量元素的地球化学特征[D].中国海洋大学,2008. [JIANG Xuejun. Geochemistry of Major and Minor Elements in Marine Ferromanganese Oxide Deposits[D]. Ocean University of China, 2008.]
- [31] 姜学钧,文丽,林学辉,等.稀土元素在成岩型海洋铁锰结核中的富集特征及机制[J].*海洋科学*,2009,33(12): 114-121. [JIANG Xuejun, WEN Li, LIN Xuehui, et al. Enrichment mechanism of rare earth element in marine diagenetic ferromanganese nodule[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(12): 114-121.]
- [32] 姜学钧,林学辉,姚德,等.稀土元素在水成型海洋铁锰结壳中的富集特征及机制[J].*中国科学:地球科学*,2011,41(2): 197-204. [JIANG Xuejun, LIN Xuehui, YAO De, et al. Enrichment mechanisms

- of rare earth elements in marine hydrogenic ferromanganese crusts[J]. *Science China Earth Science*, 2011, 54(2): 197-203.]
- [33] 辛文彩, 林学辉, 徐磊. ICP-AES 测定海洋沉积物中的硼 [J]. 现代仪器, 2011, 17(5): 91-92. [XIN Wencai, LIN Xuehui, XU Lei. Determination of boron in marine sediment samples by ICP-AES[J]. *Modern Instruments*, 2011, 17(5): 91-92.]
- [34] 林学辉, 辛文彩, 徐磊. 过氧化钠熔融-电感耦合等离子体发射光谱法快速测定稀散元素矿石中高含量钨 [J]. 分析试验室, 2018, 37(11): 1324-1326. [LIN Xuehui, XIN Wencai, XU Lei. Rapid determination of tungsten in scattered elements mineral by ICP-AES with sodium peroxide alkali fusion[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2018, 37(11): 1324-1326.]
- [35] 辛文彩, 林学辉, 徐磊. 电感耦合等离子体质谱法测定海洋沉积物中 34 种痕量元素 [J]. 理化检验-化学分册, 2012, 48(4): 459-461, 464. [XIN Wencai, LIN Xuehui, XU Lei. ICP-MS determination of 34 trace elements in marine sediments[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2012, 48(4): 459-461, 464.]
- [36] 辛文彩, 朱志刚, 宋晓云, 等. 应用电感耦合等离子体质谱测定深海富稀土沉积物中稀土元素方法研究 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(9): 92-96. [XIN Wencai, ZHU Zhigang, SONG Xiaoyun, et al. On pretreatment method for the determination of rare earth elements in deep sea REY-rich sediments by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(9): 92-96.]
- [37] 刘昌岭, 宋苏顷, 李学刚, 等. 海洋沉积物中硒的分析方法研究 [J]. 海洋科学, 2002, 26(11): 47-49. [LIU Changling, SONG Suqing, LI Xuegang, et al. Study on analytical method for selenium in marine sediment[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(11): 47-49.]
- [38] 张红, 夏宁, 宋苏顷, 等. 海洋沉积物中汞的分析方法研究 [J]. 光谱实验室, 2003, 20(6): 859-863. [ZHANG Hong, XIA Ning, SONG Suqing, et al. Study on analytical method for mercury in marine sediment[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2003, 20(6): 859-863.]
- [39] 辛文彩, 张波, 夏宁, 等. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定海洋沉积物中砷、锑、铋、汞、硒 [J]. 理化检验-化学分册, 2010, 46(2): 143-145. [XIN Wencai, ZHANG Bo, XIA Ning, et al. HG-AFS determination of As, Sb, Bi, Hg and Se in marine sediment[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2010, 46(2): 143-145.]
- [40] 刘珊珊, 张勇, 毕世普, 等. 青岛近海底质沉积物重金属元素分布特征及环境质量评价 [J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 891-897. [LIU Shanshan, ZHANG Yong, BI Shipu, et al. Distribution and environment assessment of heavy metals in sediments of Qingdao offshore[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 891-897.]
- [41] 贺行良, 夏宁, 王江涛, 等. 海洋沉积物中多氯联苯、多环芳烃和有机氯农药的同时净化与分离 [J]. 岩矿测试, 2011, 30(3): 251-258. [HE Xingliang, XIA Ning, WANG Jiangtao, et al. Simultaneous purification and separation of polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in marine sediments[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(3): 251-258.]
- [42] 贺行良, 夏宁, 张媛媛, 等. ASE/GC-MS 法同时测定海洋沉积物中 65 种多氯联苯、多环芳烃与有机氯农药 [J]. 分析测试学报, 2011, 30(2): 152-160. [HE Xingliang, XIA Ning, ZHANG Yuanyuan, et al. Simultaneous determination of 65 polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in marine sediments by GC-MS with accelerated solvent extraction[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2011, 30(2): 152-160.]
- [43] 贺行良, 张媛媛, 夏宁, 等. 快速、同时测定海洋沉积物中 21 种有机氯农药和 7 种多氯联苯 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 418-423. [HE Xingliang, ZHANG Yuanyuan, XIA Ning, et al. Rapid and simultaneous determination of 21 kinds of organochlorine pesticides and 7 kinds of polychlorinated biphenyls in marine sediments[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(3): 418-423.]
- [44] 贺行良, 朱志刚, 张媛媛. 海底沉积物酸解烃分析方法 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 825-828. [HE Xingliang, ZHU Zhigang, ZHANG Yuanyuan. The analytical method for acidolysis hydrocarbons in marine sediments[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2011, 35(6): 825-828.]
- [45] 张道来, 林学辉, 周明, 等. 气相色谱-质谱法快速测定罗氏海盘中 6 种邻苯二甲酸酯类有机污染物 [J]. 岩矿测试, 2012, 31(1): 159-165. [ZHANG Daolai, LIN Xuehui, ZHOU Ming, et al. Determination of six phthalate ester contaminants in *Asterias Rollestoni* bell samples by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1): 159-165.]
- [46] 李凤, 张媛媛, 贺行良, 等. 硅胶-氰丙基复合固相萃取柱分离原油中饱和烃及芳烃组分 [J]. 分析测试学报, 2013, 32(7): 796-802. [LI Feng, ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, et al. Determination of saturated and aromatic hydrocarbons in petroleum with SiO_2/C_3 -CN composite solid phase extraction cartridges[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2013, 32(7): 796-802.]
- [47] 陈立雷, 贺行良, 刘昌岭, 等. 海底环境促使 C_4 、 C_5 异构体分异因素的研究 [J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 69-74. [CHEN Lilei, HE Xingliang, LIU Changling, et al. Study of factors leading to differentiation of C_4 and C_5 in submarine environment[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(9): 69-74.]
- [48] 李小琳, 贺行良, 李凤, 等. 加速溶剂萃取法提取海洋沉积物中正构烷烃的方法研究 [J]. 分析测试学报, 2014, 33(11): 1244-1249. [LI Xiaolin, HE Xingliang, LI Feng, et al. Study on accelerated solvent extraction of *n*-alkanes in marine sediments[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2014, 33(11): 1244-1249.]
- [49] 李凤, 徐刚, 贺行良, 等. 东海近岸表层沉积物中正构烷烃的组成、分布及来源分析 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(3): 398-403. [LI Feng, XU Gang, HE Xingliang, et al. Composition, distribution and source of *N*-alkanes in surface sediments from the coast of East China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(3): 398-403.]
- [50] 李小琳, 贺行良, 李凤, 等. 加速溶剂萃取技术提取海洋沉积物中游离态脂肪酸的方法研究 [J]. 岩矿测试, 2014, 33(6): 885-891. [LI Xiaolin, HE Xingliang, LI Feng, et al. Study on accelerated solvent extraction of free fatty acids in marine sediments[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(6): 885-891.]
- [51] 李凤, 刘亚娟, 王江涛, 等. 东海赤潮高发区沉积物柱状样中正构烷烃和脂肪醇的分布与来源 [J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 988-995. [LI Feng, LIU Yajuan, WANG Jiangtao, et al. Distribution and sources of *n*-alkanes and fatty alcohol in core sediments of red tide-

- frequent-occurrence area in the East China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 988-995.]
- [52] 李凤, 贺行良, 徐刚, 等. 东海近岸表层沉积物中脂肪酸与脂肪醇的组成以及分布与来源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 13-18. [LI Feng, HE Xingliang, XU Gang, et al. Composition, distribution and source of fatty acids and fatty alcohols in marine surface sediments of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 13-18.]
- [53] 刘娜, 印萍, 朱志刚, 等. 胶州湾大沽河河口表层沉积物中多环芳烃分布特征、来源及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 831-837. [LIU Na, YIN Ping, ZHU Zhigang, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Dagu River estuary in Jiaozhou Bay, China[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(6): 831-837.]
- [54] 张道来, 刘娜, 朱志刚, 等. 山东半岛典型海岸带多环芳烃分布特征、来源解析及风险评价[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(5): 521-529. [ZHANG Daolai, LIU Na, ZHU Zhigang, et al. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from typical coastal areas of the Shandong Peninsula[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(5): 521-529.]
- [55] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 滦河口表层沉积物中重金属和多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1198-1206. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, LIU Jinqing, et al. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Luan River estuary: distributions, sources and ecological risk assessments[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(4): 1198-1206.]
- [56] 吴倩, 张道来, 杨培杰, 等. 南大港湿地表层沉积物中多环芳烃污染特征及潜在生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(11): 22-29. [WU Qian, ZHANG Daolai, YANG Peijie, et al. Characteristics of PAHs in surface sediments and ecological risk assessment: a case from the Nandagang wetlands[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(11): 22-29.]
- [57] 刘强, 高建华, 石勇, 等. 北黄海北部表层沉积物中多环芳烃的分布特征及控制因素分析[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(1): 53-58. [LIU Qiang, GAO Jianhua, SHI Yong, et al. Distribution characteristics and controlling factors of PAHs in surface sediments in north of north Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(1): 53-58.]
- [58] 张道来, 刘娜, 朱志刚, 等. 青岛市典型海岸带表层沉积物中邻苯二甲酸酯的组成、分布特征及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(5): 652-657. [ZHANG Daolai, LIU Na, ZHU Zhigang, et al. Distribution, chemical composition and ecological risk assessment of phthalic acid esters in surface sediments from typical coastal zones of Qingdao City[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(5): 652-657.]
- [59] 辛文彩, 夏宁, 徐磊, 等. 长江三角洲沉积物标准物质研制[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(4): 388-395. [XIN Wencai, XIA Ning, XU Lei, et al. Preparation of Yangtze River delta sediment reference materials[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(4): 388-395.]
- [60] 辛文彩, 夏宁, 徐磊. 珠江三角洲沉积物标准物质研制[J]. *地质与资源*, 2018, 27(3): 293-297. [XIN Wencai, XIA Ning, XU Lei. Preparation of certified reference material for Pearl River delta sediment[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(3): 293-297.]
- [61] 夏宁, 宋苏顷, 刘昌岭, 等. 大洋多金属结核化学分析方法标准的研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(6): 935-940. [XIA Ning, SONG Suqing, LIU Changling, et al. Study on the standards of analytical methods for marine polymetallic nodules[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(6): 935-940.]
- [62] 夏宁, 宋苏顷, 刘昌岭, 等. 海底沉积物分析测试方法标准的研究[J]. *海洋科学*, 2002, 26(11): 53-56. [XIA Ning, SONG Suqing, LIU Changling, et al. Study on standard of analytical methods for marine sediment[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(11): 53-56.]
- [63] 焦念志, 李超, 王晓雪. 海洋碳汇对气候变化的响应与反馈[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(7): 668-681. [JIAO Nianzhi, LI Chao, WANG Xiaoxue. Response and feedback of marine carbon sink to climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(7): 668-681.]
- [64] 陈中笑, 赵琦. 全球碳循环研究中的 $\delta^{13}\text{C}$ 方法及其进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1225-1233. [CHEN Zhongxiao, ZHAO Qi. $\delta^{13}\text{C}$ methods and its progress in the study of global carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1225-1233.]
- [65] 章斌, 郭占荣, 高爱国, 等. 用氢氧稳定同位素揭示闽江河口区河水、地下水 and 海水的相互作用[J]. *地球学报*, 2013, 34(2): 213-222. [ZHANG Bin, GUO Zhanrong, GAO Aiguo, et al. An analysis of the interaction between river water, groundwater and seawater in Minjiang River estuary region, Fujian Province, based on stable isotopes D and ^{18}O [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(2): 213-222.]
- [66] 张锡根, 阎葆瑞. 太平洋水-沉积物系统氢氧同位素与海洋环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(2): 27-34. [ZHANG Xigen, YAN Baorui. Hydrogen-oxygen isotopic composition in pacific ocean water-sediment system and ocean environment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(2): 27-34.]
- [67] 邹建军, 宗炯, 朱爱美, 等. 37ka 以来日本海沉积物有机质碳和氮稳定同位素变化及其古海洋学意义[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 123-135. [ZOU Jianjun, ZONG Xian, ZHU Aimei, et al. Stable carbon and nitrogen isotope variations in sedimentary organic matter in the sea of Japan since 37 ka: paleoceanographic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 123-135.]
- [68] 谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2292-2298. [XIE Bin, LI Yunkai, ZHANG Hu, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292-2298.]
- [69] 刘广山. 海洋放射年代学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2016. [LIU Guangshan. *Marine Radiocronology*[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2016.]
- [70] 郭卫东. 轻元素稳定同位素的标准评述[J]. *海洋地质动态*, 1997(12): 4-6. [GUO Weidong. Standard review of stable isotopes of light elements[J]. *Marine Geological Dynamics*, 1997(12): 4-6.]
- [71] 郭卫东, 寇亚平. 大洋有孔虫碳、氧稳定同位素标准物质的研制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(3): 95-102. [GUO Weidong,

- KOU Yaping. Preparation of carbon and oxygen stable isotope reference material for oceanic foraminifera[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(3): 95-102.]
- [72] 贺行良, 刘昌岭, 王江海, 等. 气相色谱-同位素比值质谱法测定天然气水合物气体单体碳氢同位素[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(1): 154-158. [HE Xingliang, LIU Changling, WANG Jiangtao, et al. Measurement of carbon and hydrogen isotopes of natural gas hydrate-bound gases by gas chromatography-isotope ratio mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1): 154-158.]
- [73] 陈立雷, 张媛媛, 贺行良, 等. 海洋沉积物有机碳和稳定氮同位素分析的前处理影响[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1046-1051. [CHEN Lilei, ZHANG Yuanyuan, HE Xingliang, et al. The research on sample-pretreatment of organic carbon and stable nitrogen isotopes in marine sediments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1046-1051.]
- [74] 常文博, 李凤, 张媛媛, 等. 元素分析-同位素比值质谱法测量海洋沉积物中有机碳和氮稳定同位素组成的实验室间比对研究[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(4): 535-545. [CHANG Wenbo, LI Feng, ZHANG Yuanyuan, et al. Inter-laboratory comparison of measuring organic carbon and stable nitrogen isotopes in marine sediments by elemental analysis-isotope ratio mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(4): 535-545.]
- [75] 秦德谔, 贺行良, 张媛媛, 等. 渤海东海海洋沉积物中碳氮稳定同位素标准物质研制[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(1): 75-81. [QIN Dedi, HE Xingliang, ZHANG Yuanyuan, et al. The preparation of carbon and nitrogen stable isotopes reference materials using sediments from the Bohai and East China Seas[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(1): 75-81.]
- [76] 业渝光, 王雪娥, 刁少波, 等. ^{14}C 测定年代报告 (HD) I[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1989, 9(1): 115-120. [YE Yuguang, WANG Xue'e, DIAO Shaobo, et al. Reports of ^{14}C dating (HD) I[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1989, 9(1): 115-120.]
- [77] 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 现代黄河三角洲 ZK226 孔岩芯 ^{210}Pb 、Al、Fe、Mn 和 Cu 的地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1991, 11(4): 25-33. [YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo, et al. Geochemistry of ^{210}Pb , Al, Fe, Mn, and Cu of core ZK226 in the modern Huanghe River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1991, 11(4): 25-33.]
- [78] 业渝光, 薛春汀, 刁少波. 现代黄河三角洲瓣模式的 ^{210}Pb 证据[C]//中国地质学会同位素地质专业委员会年轻地质年代学技术方法和成果讨论会. 南京: 中国地质学会同位素地质专业委员会, 1986. [YE Yuguang, XUE Chunting, DIAO Shaobo. ^{210}Pb evidence of the modern Yellow River Delta pattern[C]//Symposium on Technical Methods and Achievements of Young Geochronology by the Isotope Geology Professional Committee of the Chinese Geological Society. Nanjing: Isotope Geology Professional Committee of the Chinese Geological Society, 1986.]
- [79] 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 西沙石岛风成灰岩的 ESR 和 ^{14}C 年龄[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(2): 103-110. [YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo, et al. ^{14}C and ESR ages of Eolian calcarenite from Shidao Island of Xisha Islands[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(2): 103-110.]
- [80] 刁少波, 贺行良, 何乐龙, 等. 深海碳酸盐岩 ESR 测年信号的热力学特征[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(8): 1-6. [DIAO Shaobo, HE Xingliang, HE Lelong, et al. Thermodynamic properties of ESR signals of deep-sea carbonate[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(8): 1-6.]
- [81] 业渝光, 刁少波, 高钧成. 干旱地区石膏 ESR 测年的初步研究[J]. *核技术*, 2003, 26(1): 66-67. [YE Yuguang, DIAO Shaobo, GAO Juncheng. ESR dating of gypsum in arid regions[J]. *Nuclear Techniques*, 2003, 26(1): 66-67.]
- [82] 高璐. 石英 ESR 信号特征研究[D]. 中国地震局地质研究所硕士学位论文, 2011. [GAO Lu. Study on ESR signal characteristics of quartz[D]. Master Dissertation of Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2011.]
- [83] 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 南海全新世珊瑚礁 ESR 和铀系年龄的研究[J]. *地质论评*, 1991, 37(2): 165-171. [YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo, et al. ESR and uranium series ages of Holocene coral reefs in the South China Sea[J]. *Geological Review*, 1991, 37(2): 165-171.]
- [84] 陈强, 业渝光, 刁少波. 多片再生法在海洋沉积物测年中的应用[J]. *核技术*, 2011, 34(2): 107-110. [CHEN Qiang, YE Yuguang, DIAO Shaobo. OSL dating of marine sediments using multiple-aliquot regeneration-dose method[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(2): 107-110.]
- [85] 何乐龙, 辛文彩, 张剑, 等. 海洋沉积物光释光测年中铀、钍、钾的 γ 能谱法分析[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(12): 68-76. [HE Lelong, XIN Wencai, ZHANG Jian, et al. γ -Spectrometric determination of U, Th and K for OSL dating of marine sediments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(12): 68-76.]
- [86] 王照波, 王江月, 何乐龙, 等. 山东蒙山九龙潭冰川堆积“垄槽序列”的特征及演化过程研究: 兼论冰川、泥石流堆积序列的差异性[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(1): 105-116. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue, HE Lelong, et al. Characteristics and evolution process of the ridge-groove sequence of the Jiulongtan glacial accumulation in Mengshan, Shandong: with the discussion on the difference of accumulation sequence of glacier and debris flow[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(1): 105-116.]
- [87] Li Q B, Jacob D J, Fairlie T D, et al. Stratospheric versus pollution influences on ozone at Bermuda: reconciling past analyses[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D22): 4611.
- [88] Kim G, Hussain N, Scudlark J R, et al. Factors influencing the atmospheric depositional fluxes of stable Pb, ^{210}Pb , and ^7Be into Chesapeake Bay[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2000, 36(1): 65-79.
- [89] 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 冲积物中石英 ESR 测年的研究[J]. *地质科技情报*, 1991, 10(2): 93-96. [YE Yuguang, HE Jie, DIAO Shaobo, et al. ESR dating of quartz in fluvial sediments[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1991, 10(2): 93-96.]
- [90] 高金满, 卢效珍, 赵珍清. 南黄海 QC₂ 孔碎屑矿物的分布于组合特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 8(3): 43-52. [GAO Jinman, LU Xiaozhen, ZHAO Zhenqing. Distribution and association characteristics of clastic minerals in hole QC₂ of south Huanghai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1988, 8(3): 43-52.]

- [91] 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23-34. [SUN Baiyun. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang River delta sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(3): 23-34.]
- [92] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海西北部陆架表层沉积物重矿物组合及其沉积环境指示[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 114-125. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The heavy mineral assemblages of the surface sediments on the northeast shelf of the East China Sea and their environmental implication[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(6): 114-125.]
- [93] 宁泽, 韩宗珠, 林学辉, 等. 山东半岛南部近岸海域碎屑矿物对中小河流的物源响应[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 57-68. [NING Ze, HAN Zongzhu, LIN Xuehui, et al. Provenance response of detrital minerals from medium and small rivers in offshore southern Shandong Peninsula[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(4): 57-68.]
- [94] Qin Y C, Wang Z B, Jiang X J, et al. Quantitative sediment provenance of the northwestern East China Sea: evidence for tidal current-driven offshore transport and paleogeographic implications[J]. *Geomorphology*, 2023, 430: 108668.
- [95] 谭起新, 孙岩, 王志喜, 等. 山东半岛滨海砂矿特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(4): 11-19. [TAN Qixin, SUN Yan, WANG Zhixi, et al. Characters of the coastal placer deposits, Shandong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1984, 4(4): 11-19.]
- [96] 谭启新, 孙岩, 王志喜, 等. 山东半岛莱州湾东部滨海砂金矿初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(4): 7-16. [TAN Qixin, SUN Yan, WANG Zhixi, et al. Preliminary research in littoral placer gold in eastern Laizhou Bay of Shandong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(4): 7-16.]
- [97] 王志喜. 山东半岛诸流河下游砂金矿地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(3): 101-106. [WANG Zhixi. Geological characteristics of placer gold in lower reaches of Zhuliuhe River of Shandong Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(3): 101-106.]
- [98] 地质矿产部海洋地质研究所矿产室. 山东半岛滨海砂矿成矿条件及成矿远景区划图[M]. 济南: 山东省地图出版社, 1987. [Mineral Department, Institute of Marine Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. Metallogenic Conditions and Prospective Planning Map of Coastal Placer Mines in Shandong Peninsula[M]. Jinan: Shandong Map Publishing House, 1987.]
- [99] 孙白云. 东海沉积物中某些重矿物特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(3): 109-116. [SUN Baiyun. Characteristics of some heavy minerals in sediments of East China Sea and their significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(3): 109-116.]
- [100] 赵珍清, 卢效珍. 江苏南通 QC₅ 孔第四系碎屑矿物特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(3): 83-92. [ZHAO Zhenqing, LU Xiaozhen. Features and geological significance of Quaternary detrital minerals from hole QC₅ in Nantong of Jiangsu Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(3): 83-92.]
- [101] 孙白云. 黄河口区全新世沉积物中的碳酸盐矿物[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(4): 31-41. [SUN Baiyun. Carbonate minerals in Holocene deposits in the Huanghe River (Yellow River) delta area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1988, 8(4): 31-41.]
- [102] 宁泽, 徐磊, 林学辉, 等. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 58-69. [NING Ze, XU Lei, LIN Xuehui, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 58-69.]
- [103] 陆凯, 秦亚超, 王中波, 等. 东海中南部海域表层沉积物碎屑重矿物组合分区及其物源分析[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8): 20-26. [LU Kai, QIN Yachao, WANG Zhongbo, et al. Heavy mineral provinces of the surface sediments in central-southern East China Sea and implications for provenance[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(8): 20-26.]
- [104] Qin Y C, Mei X, Jiang X J, et al. Sediment provenance and tidal current-driven recycling of Yellow River detritus in the Bohai Sea, China[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106473.
- [105] 王利波, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾中部晚第四纪沉积物物源与沉积环境: 来自碎屑矿物和自生黄铁矿的证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 39-48. [WANG Libo, LI Jun, ZHAO Jingtao, et al. Late Quaternary sediment provenance and palaeoenvironment in Liaodong Bay, Bohai Sea: evidence from detrital minerals and authigenic pyrite[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(2): 39-48.]
- [106] 王利波, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积物碎屑矿物组合分布及其对物源和沉积物扩散的指示意义[J]. 海洋学报, 2014, 36(2): 66-74. [WANG Libo, LI Jun, ZHAO Jingtao, et al. Detrital mineral assemblages and distributions as indicators of provenance and dispersal pattern in surface sediments from Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(2): 66-74.]
- [107] Qin Y C, Xue C T, Jiang X J. Tidal current-dominated depositional environments in the central-northern Yellow Sea as revealed by heavy-mineral and grain-size dispersals[J]. *Marine Geology*, 2018, 398: 59-72.
- [108] 陈莉, 徐军, 陈晶. 扫描电子显微镜显微分析技术在地球科学中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(9): 1347-1358. [CHEN Li, XU Jun, CHEN Jing. Applications of scanning electron microscopy in earth sciences[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(10): 1768-1778.]
- [109] 陈意, 胡兆初, 贾丽辉, 等. 微束分析测试技术十年(2011—2020)进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 1-35. [CHEN Yi, HU Zhaochu, JIA Lihui, et al. Progress of microbeam analytical technologies in the past decade (2011—2020) and prospect[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(1): 1-35.]
- [110] 程秀花, 李艳广, 叶美芳, 等. 西北地区地质实验测试技术研究进展及其在地质调查中的应用[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 170-190. [CHENG Xiuhua, LI Yanguang, YE Meifang, et al. Progress in the research on geochemical analytic technique and its application in geological survey in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022,

- 55(3): 170-190.]
- [111] Yu Z J, Wan S M, Colin C, et al. Co-evolution of monsoonal precipitation in East Asia and the tropical Pacific ENSO system since 2.36Ma: new insights from high-resolution clay mineral records in the west Philippine Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 45-55.
- [112] Shen X Y, Wan S M, Colin C, et al. Increased seasonality and aridity drove the C4 plant expansion in central Asia since the Miocene-Pliocene boundary[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 502: 74-83.
- [113] Xu H, Zhang W W, Wei K, et al. Ferroan dolomites in Miocene sediments of the Xisha Islands and their genetic model[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(1): 165-180.
- [114] 赵珍清. 研究松散沉积物粒度分布的一种新手段[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(1): 115-122. [ZHAO Zhenqing. A new method of grain size analysis of loose sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(1): 115-122.]
- [115] 赵珍清. 南黄海沉积物粒度分布参数计算方法的比较[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992, 12(3): 95-107. [ZHAO Zhenqing. Comparison of calculating methods for grain-size distribution parameters of sediments in south Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(3): 95-107.]
- [116] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 南黄海沉积物不同粒度分析结果的对比研究[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(10): 5-7. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Comparison of different grain size analyses for sediments in the south Yellow Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(10): 5-7.]
- [117] 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 等. 中国东部近海现代沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 14-20. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, LIU Jinqing, et al. Modern sedimentation environments in the coastal zone of East China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 14-20.]
- [118] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1447-1462. [MEI Xi, LI Xuejie, MI Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [119] 孔祥淮, 刘健, 李巍然, 等. 山东半岛东北部海底表层沉积物粒度分布特征和沉积作用研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(3): 37-47. [KONG Xianghuai, LIU Jian, LI Weiran, et al. Study on grain-size distribution of surface sediments and modern sedimentation in the littoral zone in the northeastern part of the Shandong Peninsula[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(3): 37-47.]
- [120] 毕世普, 孔祥淮, 张勇, 等. 胶州湾浅表地层沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(10): 1-7. [BI Shipu, KONG Xianghuai, ZHANG Yong, et al. Grain-size distribution pattern of the shallow sediments of the Jiaozhou Bay and its environmental implications[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(10): 1-7.]
- [121] 宋红瑛, 刘金庆, 印萍, 等. 日照近海表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(3): 96-104. [SONG Hongying, LIU Jinqing, YIN Ping, et al. Grain size characteristics of the surface sediment and sedimentary environment in Rizhao offshore[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(3): 96-104.]
- [122] 李军, 胡邦琦, 李国刚, 等. 山东半岛近海不同粉砂粒级含量分布的空间差异性及其沉积学意义[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 64-75. [LI Jun, HU Bangqi, LI Guogang, et al. Spatial variability of different silt components and its sedimentary significance offshore Shandong Peninsula[J]. *Haiyang Xue*, 2017, 39(1): 64-75.]
- [123] 薛允传, 尹延鸿, 高抒. 黄河三角洲北部潮间带沉积物的粒度特征[J]. 海洋科学, 2001, 25(5): 50-54. [XUE Yunchuan, YIN Yanhong, GAO Shu. Grain size characteristics of tidal flat sediments, northern Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(5): 50-54.]
- [124] 周良勇, 李安龙, 龚淑云, 等. 黄河口附近海域表层悬浮体分布及粒度特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 33-38. [ZHOU Liangyong, LI Anlong, GONG Shuyun, et al. Spatial distribution and grain-size characteristics of suspended matters in surface water of Yellow River mouth[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 33-38.]
- [125] 丁喜桂, 叶思源, 宫少军, 等. 黄河三角洲 ZK1 孔岩芯环境敏感粒度组分及沉积环境分析[J]. *世界地质*, 2010, 29(4): 575-581. [DING Xigui, YE Siyuan, GONG Shaojun, et al. Analysis on environmentally sensitive grain-size population and sedimentary environment of ZK1 drilling core in Yellow River delta[J]. *Global Geology*, 2010, 29(4): 575-581.]
- [126] 尹延鸿, 周青伟. 渤海东部地区沉积物类型特征及其分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 47-54. [YIN Yanhong, ZHOU Qingwei. Characteristics and distribution of sediment types in eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(2): 47-54.]
- [127] 王中波, 李日辉, 张志珣, 等. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 101-109. [WANG Zhongbo, LI Rihui, ZHANG Zhixun, et al. Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai Bay and adjacent areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 101-109.]
- [128] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1039-1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: indication for sedimentary environments[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1039-1049.]
- [129] 窦衍光, 陈晓辉, 李军, 等. 东海外陆架-陆坡-冲绳海槽不同沉积单元底质沉积物成因及物源分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 21-31. [DOU Yanguang, CHEN Xiaohui, LI Jun, et al. Origin and provenance of the surficial sediments in the subenvironments of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 21-31.]
- [130] 李军, 高抒, 孙有斌. 冲绳海槽南部 A23 孔浊流沉积层的粒度特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 11-16. [LI Jun, GAO Shu, SUN Youbin. Grain-size characteristics of turbidite sediments in core A23 from the southern Okinawa trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(2): 11-16.]
- [131] 江云水. 测试条件对海洋粘土矿物 XRD 分析结果的影响[J]. 科技创新与应用, 2020(32): 81-83, 85. [JIANG Yunshui. The effect of

- testing conditions on XRD analysis results of marine clay minerals[J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(32): 81-83,85.]
- [132] 秦国权,朱雄华. 西沙群岛石岛晚更新世有孔虫化石组合及其地质意义[J]. *海洋地质研究*, 1982, 2(4): 108-112. [QIN Guoquan, ZHU Xionghua. Foraminifera assemblage of Late Pleistocene of Shidao, Xisha Islands, and its geological significance[J]. *Marine Geological Research*, 1982, 2(4): 108-112.]
- [133] 林和茂,朱雄华. 胶州湾东北角小海湾底质中有孔虫和介形类的研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(3): 67-81. [LIN Hemao, ZHU Xionghua. Study of foraminifera and ostracoda from surface sediments in a small bay of northeastern Jiaozhou Bay, Shandong[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986, 6(3): 67-81.]
- [134] 林和茂. 西西里海峡的饰带透明虫 (*Hyalinea balthica*) 及其在第四纪晚期的古气候意义[J]. *海洋地质动态*, 1985(5): 12-13. [LIN Hemao. *Hyalinea Balthica* of the sicilian channel and its paleoclimatic significance in the Late Quaternary[J]. *Marine Geology Letters*, 1985(5): 12-13.]
- [135] 朱雄华. 印度彭纳河口湾有孔虫与盐度的关系[J]. *海洋地质动态*, 1985(1): 17-19. [ZHU Xionghua. Relationship between Foraminifera and salinity in Penna estuary, India[J]. *Marine Geology Letters*, 1985(1): 17-19.]
- [136] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 1981, 55(1): 1-13. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: a preliminary study[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.]
- [137] 杨子庚, 林和茂, 王圣洁, 等. 对末次间冰期南黄海古冷水团沉积的探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(1): 48-54,56-58. [YANG Ziqian, LIN Hemao, WANG Shengjie, et al. A study of the ancient cold water mass sediments in south Yellow Sea during last interglacial[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(1): 48-54,56-58.]
- [138] 张光威, 杨子庚, 林和茂, 等. 泥河湾盆地晚上新世—早更新世时期沉积环境的划分[J]. *海洋地质动态*, 1996(2): 1-4. [ZHANG Guangwei, YANG Zigeng, LIN Hemao, et al. The division of sedimentary environment from Late Pliocene to Early Pleistocene in Nihewan Basin[J]. *Marine Geology Letters*, 1996(2): 1-4.]
- [139] 王圣洁, 杨子庚, 林和茂, 等. 介形类壳体 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ 与 Mg/Ca 比值的灰色统计特征及环境意义[J]. *科学通报*, 1995, 40(17): 1598-1601. [WANG Shengjie, YANG Ziqian, LIN Hemao, et al. Grey statistical characteristics and environmental significance of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ and Mg/Ca ratios of ostracoid shells[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(17): 1598-1601.]
- [140] 宫少军, 赵卫, 乔吉果, 等. 渤海湾西部海域底质特征及其沉积环境分析[J]. *天津科技大学学报*, 2017, 32(3): 50-57. [GONG Shaojun, ZHAO Wei, QIAO Jiguo, et al. Characteristics of western Bohai Bay Sea bottom sediment: sedimentary environment analysis[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2017, 32(3): 50-57.]
- [141] Wang F F, Gao M S, LIU J, et al. Distribution and environmental significance of live and dead benthic foraminiferal assemblages in surface sediments of Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2016, 123: 1-14.
- [142] Wang F F, Yu Z G, Xu B C, et al. Nepartak typhoon influenced bottom sediments from the Yangtze River estuary and adjacent East China Sea-foraminiferal evidence[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(4): 1049-1063.
- [143] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13,000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17-18): 2424-2438.
- [144] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 54-76.
- [145] 王飞飞, 王红, 刘健, 等. 南黄海西北部 SYS-0803 孔第四纪晚期底栖有孔虫群落特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 113-123. [WANG Feifei, WANG Hong, LIU Jian, et al. Late Quaternary benthic foraminifera of core sys-0803 from the northwestern south Yellow Sea and their paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 113-123.]
- [146] 王飞飞, 宫少军. 微生物的环境修复功能研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(5): 41-46. [WANG Feifei, GONG Shaojun. Research progress of microbes in environmental remediation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(5): 41-46.]
- [147] 王飞飞, 丁璇, 刘健. 南黄海西部陆架氧同位素 3 期以来的古沉积环境演化[J]. *微体古生物学报*, 2012, 29(3): 235-252. [WANG Feifei, DING Xuan, LIU Jian. Paleoenvironmental evolution in the western shelf of the southern Yellow Sea since the marine isotope stage 3[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2012, 29(3): 235-252.]
- [148] 王飞飞, 高茂生. 底栖有孔虫在海岸带环境污染指示方面的研究现状[J]. *微体古生物学报*, 2012, 29(4): 333-340. [WANG Feifei, GAO Maosheng. A review of the coastal environmental pollution using the benthic foraminifera as bio-indicators[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2012, 29(4): 333-340.]
- [149] Wang F F, Liu J, Qiu J D, et al. Historical evolution of hypoxia in the East China Sea off the Changjiang (Yangtze River) estuary for the last ~13,000 years: evidence from the benthic foraminiferal community[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 151-162.
- [150] 王飞飞, 张勇, 仇建东, 等. 山东半岛南部近岸海域晚第四纪以来有孔虫和介形类化石群落分布特征及古环境演化[J]. *微体古生物学报*, 2014, 31(2): 130-146. [WANG Feifei, ZHANG Yong, QIU Jiandong, et al. Late Quaternary distribution characters of foraminifera and ostracoda in the offshore area of southern Shandong Peninsula and paleoenvironmental evolution[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2014, 31(2): 130-146.]
- [151] 王飞飞, 刘健, 仇建东, 等. 南黄海中西部全新世中期以来泥质沉积厚度与成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 1-11. [WANG Feifei, LIU Jian, QIU Jiandong, et al. Thickness variation and provenance of Mid-Holocene mud sediments in the central and western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 1-11.]

- [152] 王飞飞, 于志刚, 刘健, 等. 底栖有孔虫壳貌微观特征对海域低氧及酸化环境指示的研究进展 [J]. 海洋学报, 2018, 40(5): 1-14. [WANG Feifei, YU Zhigang, LIU Jian, et al. A review of the marine hypoxia and acidification indicated by microscopic features in the benthic foraminiferal test[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(5): 1-14.]
- [153] Guo X Y, Xu B C, Burnett W C, et al. A potential proxy for seasonal hypoxia: LA-ICP-MS Mn/Ca ratios in benthic foraminifera from the Yangtze River estuary[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 245: 290-303.
- [154] 朱雄华. 南黄海 QC_2 孔海侵层与气候期的关系 [J]. 海洋地质动态, 1989(7): 7-8. [ZHU Xionghua. The relationship between the transgressive layer of QC_2 hole and climatic period in the south Yellow Sea[J]. Marine Geology Letters, 1989(7): 7-8.]
- [155] 李旭, 衡平. 黄海中部近岸浅海区第四纪孢粉及其古植被古气候意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(4): 35-42. [LI Xu, HENG Ping. Quaternary palynological strata in offshore area of the middle Yellow Sea and their significance in vegetation and climate study[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(4): 35-42.]
- [156] 李旭, 衡平. 黄海中部晚更新世以来的环境变迁 [J]. 微体古生物学报, 1992, 9(2): 209-218. [LI Xu, HENG Ping. Climatic changes in central Yellow Sea since Late Pleistocene[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1992, 9(2): 209-218.]
- [157] 路晶芳, 刘健, 胡刚, 等. 现代黄河三角洲北岸 1.9Ma 以来孢粉组合及古环境变化 [J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1335-1345. [LU Jingfang, LIU Jian, HU Gang, et al. Pollen assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the Yellow River delta since 1.9Ma[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1335-1345.]
- [158] Lu J F, Liu J, Huang W, et al. Transgressive Events since the Late Pleistocene in the Yellow River delta: grain-size distribution and palynological results[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2020, 94(4): 1194-1206.
- [159] 杨涛, 夏浩东, 邓会娟, 等. 论实物地质资料管理 [J]. 贵州地质, 2008, 25(1): 70-73. [YANG Tao, XIA Haodong, DENG Huijuan, et al. The management of object geological information[J]. *Guizhou Geology*, 2008, 25(1): 70-73.]
- [160] 张志伟, 任香爱, 米胜信, 等. 实物地质资料目录数据库建设技术方法研究与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2018. [ZHANG Zhiwei, REN Xiangai, MI Shengxin, et al. Research and Application on the Construction Technology and Methods of Physical Geological Data Catalog Database[M]. Beijing: Geology Press, 2018.]
- [161] 张业成, 曹毅然, 任香爱, 等. 实物地质资料的保护管理与开发利用 [J]. 国土资源, 2002(5): 23-25. [ZHANG Yecheng, CAO Yiran, REN Aixiang, et al. Protection, management, and development and utilization of physical geological data[J]. *Land & Resources*, 2002(5): 23-25.]
- [162] 汪洋余, 吴双, 赵剑道, 等. 自动化仓储系统在岩芯存储管理系统中的应用 [J]. 制造业自动化, 2014, 36(2): 4-5,9. [WANG Xiangyu, WU Shuang, ZHAO Jiandao, et al. The application of automated storage and retrieval system in core sample storage and management system[J]. *Manufacturing Automation*, 2014, 36(2): 4-5,9.]
- [163] 崔美慧, 董涛, 邵长凯, 等. 实物地质资料岩芯数字化实践、意义及建议 [J]. 山东国土资源, 2021, 37(6): 60-65. [CUI Meihui, DONG Tao, SHAO Changkai, et al. Practices significance and suggestions on core digitization of physical geological data[J]. *Shandong Land and Resources*, 2021, 37(6): 60-65.]
- [164] 张志伟. 国内外岩芯数字化信息发布平台建设进展 [J]. 地质论评, 2020, 66(2): 493-498. [ZHANG Zhiwei. The progress of digital core information publishing platform in China and abroad[J]. *Geological Review*, 2020, 66(2): 493-498.]
- [165] 赵世煌, 邓晃, 宋焕霞, 等. 国外实物地质资料测试服务综述及启示 [J]. 中国矿业, 2015, 24(S1): 99-101. [ZHAO Shihuang, DENG Huang, SONG Huanxia, et al. Foreign geological materials testing services review and revelation[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(S1): 99-101.]