



中国近海浅层气调查研究进展

段晓勇, 印 萍, 谢永清, 曹 珂, 仇建东, 李梅娜, 李 雪

Advancements in the study of shallow gas in the coastal waters of China

DUAN Xiaoyong, YIN Ping, XIE Yongqing, CAO Ke, QIU Jiandong, LI Meina, and LI Xue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024010801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国近海新构造活动断裂调查与地震勘探方法

Seismic survey and exploration methods for Neotectonic active faults in the area off China continent

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 121-132

中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展

Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 1-29

海洋沉积物中甲烷代谢微生物的研究进展

Advances in the study of methane-metabolizing microbial communities in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 82-92

杭州湾沉积物中甲烷的垂向分布及控制因素

Vertical distribution and controlling factors of methane in sediments of Hangzhou Bay

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 112-121

海底冷泉区沉积物-水界面甲烷通量原位观测研究进展

Progress in in-situ observation of methane flux at sediment-water interface in cold seep

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 167-180

海洋环境中甲烷好氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67-76



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

段晓勇, 印萍, 谢永清, 等. 中国近海浅层气调查研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 183-196.

DUAN Xiaoyong, YIN Ping, XIE Yongqing, et al. Advancements in the study of shallow gas in the coastal waters of China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 183-196.

中国近海浅层气调查研究进展

段晓勇^{1,2,3}, 印萍^{1,2,3}, 谢永清^{2,3,4}, 曹珂^{1,2,3}, 仇建东^{1,2,3}, 李梅娜^{1,2,3}, 李雪^{1,2,3,5}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 中国地质调查局舟山海洋地质灾害野外科学观测研究站, 青岛 266237
3. 自然资源部浙江沿海城市地质安全野外科学观测研究站, 杭州 310007
4. 浙江省海洋地质调查大队, 舟山 316000
5. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

摘要: 随着海洋开发利用不断深入和全球气候变化持续加剧, 近海沉积物中的浅层气(主要成分是甲烷)导致的灾害问题和可能产生的气候影响受到了进一步的关注, 但目前为止对浅层气仍然缺乏系统的认识。在此对浅层气相关的主要认识进行了全面梳理, 包括形成机理、存在形式、调查技术方法、分布特征、控制因素、主要危害等, 以为后续相关调查、理论研究和减灾防灾技术研发提供支撑。沿海三角洲平原第四纪下切河谷中充填的砂体和近海全新世细颗粒沉积物中普遍存在浅层气, 以气泡、分散气泡或溶解气的形式存在, 近海大部分地区的浅层气主要来源于生物成因。含气沉积物的声学特性(声速、声衰减等)、孔隙水化学组成(如 SO_4^{2-} 、溶解气含量)会发生明显改变, 这是支撑地球物理和地球化学探测技术应用的理论基础。浅层气的存在会改变土体力学特性, 对工程建设造成较大危害; 同时沉积物中的甲烷也会逸出到大气中, 加剧全球变暖。基于对现有成果的总结, 建议进一步加强海底浅层气形成机理、运移特性及其与气候变化的互馈机制方面的理论研究。

关键词: 甲烷; 形成机理; 分布特征; 调查方法; 危害; 中国近海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024010801

Advancements in the study of shallow gas in the coastal waters of China

DUAN Xiaoyong^{1,2,3}, YIN Ping^{1,2,3}, XIE Yongqing^{2,3,4}, CAO Ke^{1,2,3}, QIU Jiandong^{1,2,3}, LI Meina^{1,2,3}, LI Xue^{1,2,3,5}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
2. Zhoushan Marine Geological Disaster Field Scientific Observation and Research Station, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
3. Observation and Research Station of Zhejiang Coastal Urban Geological Security, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310007, China
4. Zhejiang Institute of Marine Geological Survey, Zhoushan 316000, China
5. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: With the continuous deepening of ocean development and utilization and the ongoing exacerbation of global climate change, the disaster issues caused by shallow gas (mainly methane) in nearshore sediments and the potential climate impacts have received additional attention. However, systematic understanding of shallow gas remains lacking. A comprehensive review of the main knowledge related to shallow gas is conducted, including formation mechanisms, occurrence forms, investigation techniques, distribution characteristics, controlling factors, major hazards, etc., to provide a support for subsequent related investigations, theoretical studies, and development in the technology disaster reduction and prevention. Shallow gas is commonly found in the sand bodies filled in the Quaternary incised valleys of coastal delta plains and in the fine-grained sediments of the nearshore Holocene, in the form of gas pockets, dispersed gas bubbles, or dissolved gas. In most nearshore areas, shallow gas is mainly of biogenic origin. The acoustic properties of gas-bearing sediments (such as sound velocity, sound attenuation, etc.) and the chemical composition of pore water (e.g., SO_4^{2-} , dissolved gas content) undergo significant changes, providing a theoretical basis for the application of geophysical and geochemical exploration technologies. The presence of shallow gas can alter the

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“舟山近海浅层气形成的关键控制因素和机理”(42176091); 国家重点研发计划“气候变化和人类活动对海上丝路沿线国家滨海蓝碳生态系统的耦合影响机制与合作研究”(2022YFE0209300); 中国地质调查局项目(DD20160145, DD20190276, DD20221775); 亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与灾害合作研究”; 浙江省省级地质专项资金项目([省资]2023013)

作者简介: 段晓勇(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地质环境调查研究工作, E-mail: dxiaoyong@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2024-01-08; **改回日期:** 2024-02-23. 周立君编辑

mechanical properties of sediments, causing significant hazards to engineering construction; meanwhile, methane in sediments can also escape into the atmosphere, exacerbating global warming. Based on the summary of existing achievements, it is recommended to further strengthen the theoretical research on the formation mechanisms, migration characteristics, and feedback mechanisms with climate change of submarine shallow gas.

Key words: methane; formation mechanism; distribution characteristics; investigation method; hazard; China Offshore

海底浅层气广泛分布于全球近海地区,特别是河口三角洲地区最为发育^[1]。高有机质含量的细颗粒沉积物埋藏至海底以下一定深度后会在微生物作用下持续形成甲烷等气体,即为浅层气。据估计,全球海洋沉积物中存在 $(1.1\sim 3.0)\times 10^6$ Pg 生物源甲烷^[2]。全球海洋沉积物中的甲烷量约为2022年全球释放到大气中的甲烷量(3.55亿吨)的3000~8000倍^[3]。自然条件下,形成的气体主要以分散气泡或溶解气形式存在于沉积物空(孔)隙中,部分会沿裂隙或毛细管道缓慢运移至上部密封良好的地层中形成气包(通常具有一定压力)或从海底逸出。

海底浅层气不可控逸出会对近海工程安全有极大威胁^[4],极易造成桩基失稳、海底塌陷、海底管线断裂等事故。浅层气对我国杭州湾地铁施工、舟山极岛海底原油管线等都曾造成了极大破坏^[5]。在波河三角洲(Po delta),因抽取含气水导致了近3 m的沉降^[6]。1992—1993年纳米比亚陆架浅层气大量溢出,造成大量鱼类死亡(含 H_2S),对该国的捕捞业造成致命打击^[7]。从全球尺度来看,在暖/热湿气候的三角洲地区浅层气灾害风险最高^[8]。同时也有大量科学家担忧海底甲烷释放可能会对全球气候产生显著影响,有证据表明随着全球气候变化持续加剧,海底沉积物中的甲烷释放到大气中的量在不断增加^[9]。沉积物中甲烷即使少量释放到大气都可能对全球气候造成严重影响。

因此,无论是基于当前海洋开发利用减灾防灾需求,还是从长期气候变化控制的角度出发,海底浅层气都应该引起足够的重视。但是到目前为止,仍然缺乏对海底浅层气的系统认识,主要体现在分布规律不明、形成机制不清、灾害影响难防等方面。因此,本文对与浅层气相关的调查研究进展进行了系统梳理总结,以期对浅层气相关的基础理论研究、灾害防治等提供指导。

1 浅层气的形成机理

不同埋藏深度沉积物的有机质转化过程存在显著差异,简单来说,近海底层至甲烷-硫酸盐转换界面(Sulfate-Methane Transition Zone, SMTZ)以有机

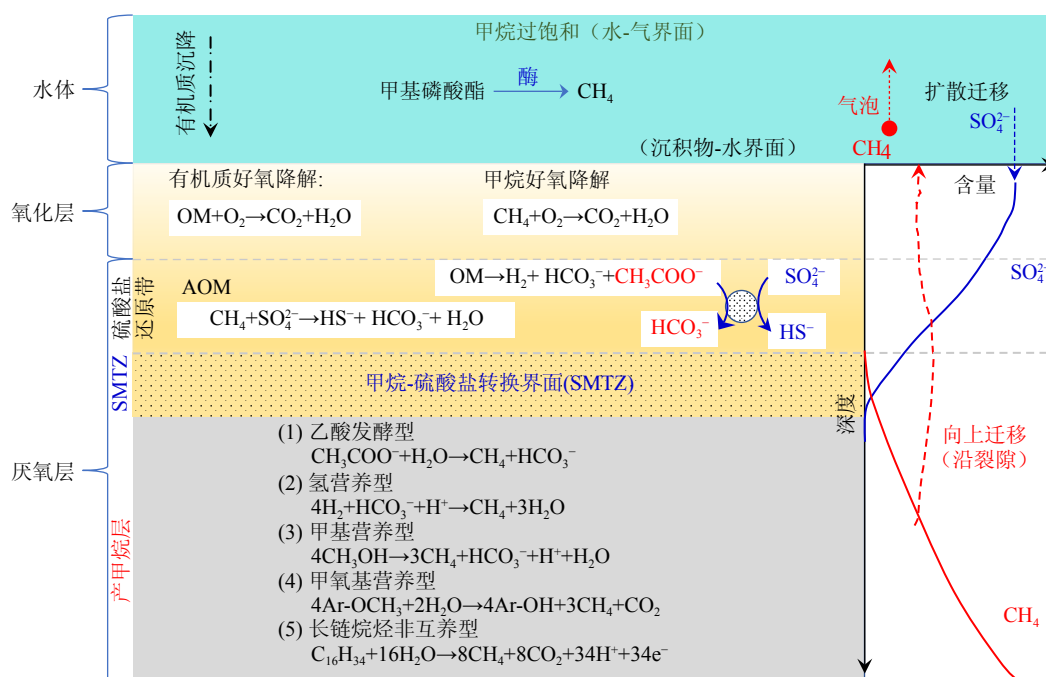
质氧化产生二氧化碳为主,由氧气或硫酸根作为氧化剂。全球海洋沉积物中每年有45~61 Tg 甲烷被硫酸盐厌氧氧化,其中80%是发生在近海水深<200 m的区域内^[10]。在下部厌氧层,大量的硫酸盐被还原成 HS^- ,导致自上至下在一定深度范围内呈现明显的硫酸盐浓度梯度(图1),这是SMTZ存在的主要原因。

埋藏至一定深度后,沉积物由氧化环境过渡为还原环境,有机质在微生物的作用下形成甲烷。甲烷的形成与沉积物性质、环境温度、pH、孔隙水中有机质和离子组成等因素密切相关^[11]。根据目前的研究,沉积物中的甲烷形成至少包括五种不同的途径^[12]。其中乙酸发酵型和氢营养型是大量研究中普遍认同的观点,对甲基营养型、甲氧基营养型和长链烷烃非互养型近年来陆续被发现,关注相对较少,并且与前两种路径不同,即使在高盐环境下仍能继续生产甲烷^[13-16]。

已有研究中所提出的各个反应机理^[12, 17]能够在一定程度上解释实际环境中SMTZ以下所检测到的甲烷和二氧化碳同位素的关系。比如说乙酸发酵路径所形成的甲烷中75%的氢原子来源于醋酸的甲基,余下部分来源于环境中的水;而氢营养型形成的甲烷中的氢原子均来自于环境中的水,这两种机理能够很好地解释环境中检测到的 CH_4 中氢同位素组成差异^[18]。但是这两种机理均无法解释为何在很多沉积物剖面中 CH_4 和 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 同步平行变化。

根据波罗的海沉积物 ^{14}C 示踪研究的结果^[17],沉积物中甲烷降解速率逐渐从硫酸盐区过渡到甲烷区,从而表明终端步骤并没有像之前怀疑的那样对上游水解和发酵过程施加反馈控制。乙酸盐是这两个层位碳矿化的关键中间体,然而,醋酸盐并没有直接转化为甲烷,而是通过一个额外的次末端步骤将乙酸转化为二氧化碳、二氧化碳再次利用前一过程中乙酸还原当量物质(如 H_2)转化为甲烷。也就是说,沉积物中甲烷的形成机理可能并不像之前所认识的醋酸盐氧化和二氧化碳还原是两个独立的过程,而是由醋酸经二氧化碳同步互养形成甲烷。

在近年的研究中,甲基化合物(如甲醇、硫醇

图 1 近海沉积物中不同深度产甲烷相关生物地球化学过程示意图^[16]Fig.1 Schematic representation of methane-related biogeochemical processes at different depths in nearshore sediment^[16]

等)^[19]、甲氧基化合物^[20]、甚至是长链烷烃^[21]都能是微生物产甲烷的可用前驱体。同时,甲烷也作为一种副产物广泛存在于藻类、真菌等主导的生物地球化学循环过程中^[22]。自然环境中的产甲烷过程仍然有较多未解之谜。

2 浅层气主要存在形式

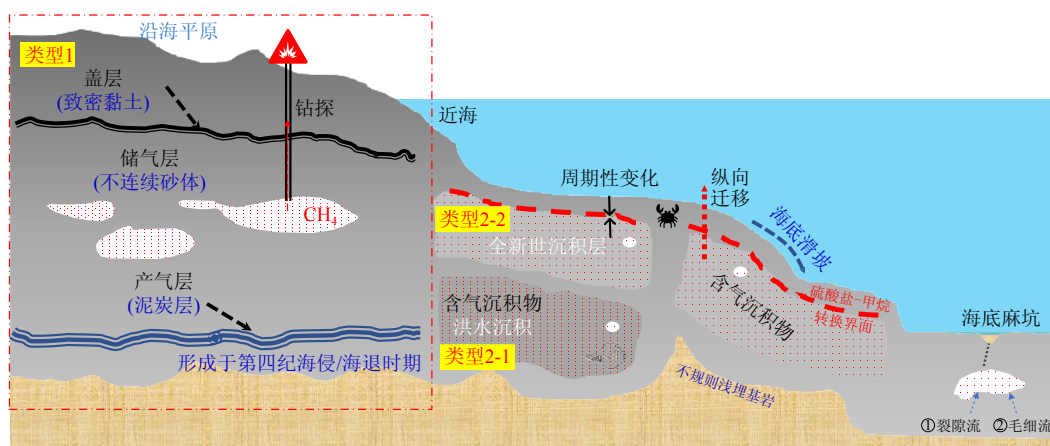
海底浅层气的形成、分布及其影响因素是决定浅层气致灾能力及海底沉积物中碳循环的几个关键要素,有约 3%~4% 被埋入海底沉积物中的有机质转化为甲烷^[10],甲烷的形成、聚集等对近海工程安全和沉积物中的碳循环都具有重要影响。

海底浅层气分布与所处地质环境密切相关,近海地区以生物成因浅层气为主,普遍埋藏深度较浅(<100 m),局部地区会存在来源于深部地层的热成因气体。根据目前已有调查研究,对近海沉积物中的浅层气分布情况进行了系统总结,总的来说主要以两种形式存在(图 2):类型 1 为第四纪下切河谷和冲蚀沟槽等砂体中的浅层气,主要以气包形式存在,通常具有一定压力;类型 2 为细颗粒沉积物中分散存在的小气泡和溶解气。

类型 1: 沿海平原和近海地区聚集于第四纪下切河谷、冲蚀沟槽中不连续分布的砂体中的浅层气,具有完备的生气层、储气层和盖层结构,主要以气囊形式存在,通常具有较高的气压^[23-26]。这种类

型的浅层气下部是形成于第四纪海侵和海退时期的高有机质泥炭层,为浅层气的形成提供了充足的有机质;上部是致密的硬黏土层,并具有较高的孔隙水压力,密封良好,为浅层气封堵创造了良好条件,具有良好的生-储-盖条件,是这一类浅层气的典型特征,这也是杭州湾沿海平原中普遍存在的浅层气储存形式^[26]。这种浅层气生成主要受古沉积环境和沉积时间、古气候、海平面变化等因素控制,与现今沉积环境的变化无明显的相关性。在全新世时期形成的具有类似地层结构的地区也会形成这一类型的浅层气,比如说在挪威近海^[27]、孟加拉国东南部^[28],全新世沉积层中的粗颗粒沉积物中甲烷含量高,但相对来说密封条件较差。这种类型的浅层气具备一定的商业开采价值,在我国杭州湾、江苏沿海平原等地都曾进行过小规模开采。

类型 2: 细颗粒沉积物中以分散气泡或溶解气形式存在的浅层气呈现为自生自储的特征。根据其沉积物堆积特性可进一步分为两个亚类:一类是近海稳定沉积环境下形成的沉积物中存在的浅层气,另一类是洪水等事件性因素导致的快速堆积沉积物中存在的浅层气。因洪水等事件性因素影响形成的巨厚沉积层中的浅层气主要以分散气泡或溶解气形式存在于沉积物间隙中^[29-34]。快速堆积沉积物中有机质可利用潜力巨大,且经受从氧化环境到还原环境的快速转变,具备快速产气能力,主要以含气沉积物形式在一些小河三角洲中普遍存

图2 近海松散细颗粒沉积物中的浅层气主要存在形式^[16]Fig.2 Main forms of shallow gas in offshore fine-grained sediments^[16]

在。在亚得里亚海西部^[31]、罗纳河三角洲前缘^[29]、比利时近海^[34]，均发现浅部生物成因气在空间上与洪水沉积驱动下快速堆积形成的较厚高有机质含量细颗粒沉积有关。根据波河三角洲19个沉积物柱样中甲烷含量的分析^[32-33]，尽管几乎所有的样品中均检测到了生物成因的甲烷，但所有气体浓度最高的地区都与最近在三角洲最活跃的水道(Po di Pila)附近堆积最厚的洪水沉积物有关。

全新世地层中形成的浅层气主要以含气沉积物形式存在，这是近海环境中分布最广的浅层气存在形式，具有SMTZ是这一类型浅层气的典型特征^[35-37]，并且SMTZ深度会受到现代沉积环境和生物活动的明显影响，如在土耳其马尔马拉海^[36]、西班牙西北圣西蒙湾^[35]、韩国东南部^[38]、中国近海^[39]等均发现浅层气分布区皆与全新世沉积物分布区吻合。全新世细颗粒沉积物中分散存在的气泡是目前全球近海浅层气分布最广的形式，且具有较强的持续产气能力，对沿海工程桩基、海底管线等具有直接威胁。

热成因浅层气在近海地区也有分布，但仅分布于局部有断层与深部联通的区域，如台湾西南海域^[40]，存在大量含气沉积物和海底泥火山，其成因与天然气水合物沿断层的上升密切相关。墨西哥湾^[41]、巴伦支海^[42]、日本海^[43]、珠江口盆地^[44]等区域，同样发现了显著的浅层气异常，相对来说埋藏较深，以来源于深部的热成因甲烷为主，与生物成因浅层气的碳同位素组成具有较明显的差异。

3 浅层气调查技术方法

因海底浅层气对海洋工程安全和海底沉积物

碳循环的重要影响，国内外采用地球物理方法对浅层气进行了大量调查^[32, 35, 45]，基于声学反射信号异常特征、海底微地貌特征等识别海底沉积物中的浅层气和海底浅层气溢出情况，主要用于大范围探测浅层气分布特征。沉积物取样后进行气体含量及相关地球化学指标测试也在不断应用中，其能够准确获得沉积物中甲烷含量随深度的变化趋势。多种方法相结合能够获得较为丰富的浅层气形成、分布和运移等信息。

3.1 地球物理方法

利用地球物理方法，基于声传播特性对海底地层结构进行探测是目前海洋调查中普遍采用的方法之一。气体取代了沉积物孔(空)隙中的部分水，可使纵波传播速度明显降低，对高频声波具有较强的散射效应，这种效应与气泡的数量、大小和深度分布密切相关^[38, 46-47]。基于目前的研究，有多种地球物理信号特征被认为与浅层气有关：声学空白、声学扰动、声学幕、声学穹顶等。基于地球物理信息，能够较为清晰地展示浅层气分布区和含气层顶界埋深，但是无法获取含气层随深度变化的信息(图3)。

3.2 地球化学方法

沉积物中甲烷的存在是证明浅层气存在的最直接证据。最可靠的鉴定方法是直接检测沉积物中的游离气体或孔隙水中溶解的甲烷。目前的研究一般是将采集的沉积物柱状样或钻孔样品采集上船后取一部分未扰动的原样放入样品瓶中，然后加入饱和NaCl溶液后密封倒置冷藏保存，运回实验室后充分混匀再检测其顶空气中的甲烷和二氧

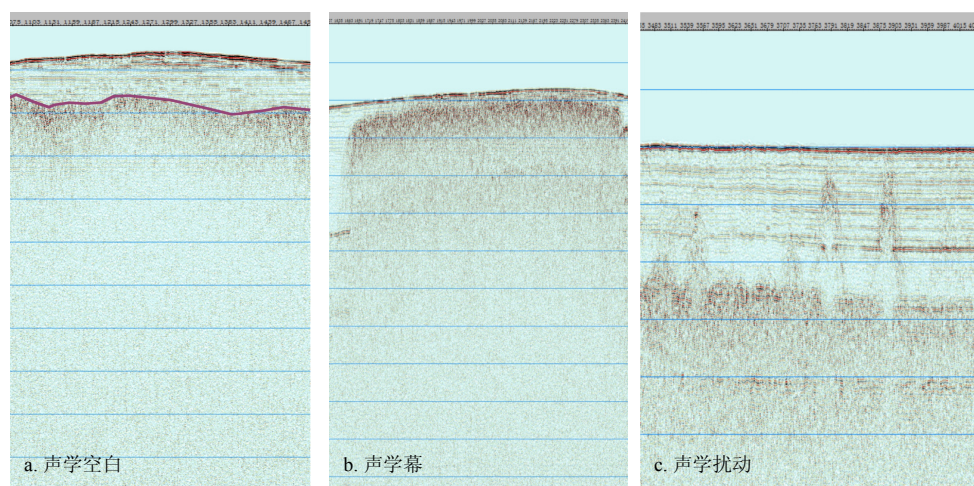


图 3 典型含浅层气地球物理剖面图
Fig.3 Typical shallow gas geophysical profiles

化碳含量及同位素组成^[48]。这一采样过程在沉积物采集上船后 35 分钟内完成就能够获得比较可靠的结果^[49]。基于采样测试能够获取精细的浅层气含量及同位素组成随地层深度的变化数据,部分测试结果见本文 4.2 节。基于采样测试获取的甲烷和二氧化碳同位素组成数据,是判别沉积物中浅层气来源的重要指标,可以较好的区分生物成因与热成因,但无法进一步细致区分具体由哪种路径产生^[16]。

中国地质调查局青岛海洋地质研究所以及其他一些研究人员也曾尝试采用原位测试方法^[50-51],比如对静力触探(CPT)平台进行改造,将半透膜置于钻头中,通过气管获取钻进过程中不同深度地层的含气量数据。或者通过改造钻探方式原位采气,当钻进至目标层之上,将钻头替换为锥形钻头和多孔花管与活动套管组合,依靠钻机动力将花管压入目标层,然后上提钻杆使活动套管上移漏出多孔花管,地层中的浅层气通过花管沿钻管溢出至船上收集装置中,从而实现原位采气(图 4)。

3.3 原位监测方法

沉积物中的浅层气随地层深度变化呈现出一定差异,不同层位有机碳年龄、压力、孔隙水组成等均具有较为明显的差异^[52],因此不同深度的浅层气的形成、运移等过程都可能存在差异。但是,到目前为止对不同深度的浅层气对比研究基本是空白。

近年来,中国地质调查局青岛海洋地质研究所围绕舟山某围填成陆区浅层气灾害防治需求,对海底浅层气原位监测进行了大量技术探索^[51]。通过构建的浅层气运移三维在线监测系统(三维井组结构见文献^[51]),利用不同深度多井组配合实现了不

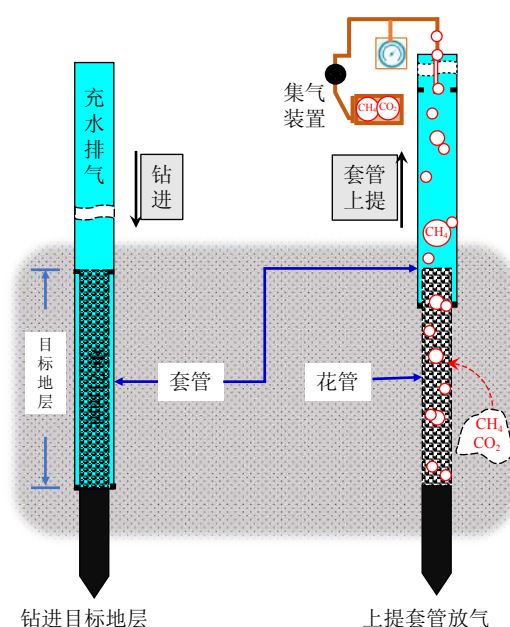


图 4 基于钻探或 CPT 平台的海底原位取气方法示意图
Fig.4 Schematic diagram of subsea in-situ gas extraction method based on drilling or CPT platform

同层位浅层气、地下水运移协同监测(单井结构如图 5 所示),初步揭示了不同深度浅层气在人为活动与环境要素耦合作用下的运移机制。监测指标主要包括四大类,浅层气指标:气体组分、同位素组成、溢出通量;地下水指标:水位、温度、电导率、离子组成、氢氧同位素组成;土体参数:分层沉降速率、孔压、侧移;背景环境参数:气象参数、潮汐。

3.4 其他辅助方法

通过一些与浅层气相关的特征来辅助识别浅层气也被广泛应用,比如海底麻坑、孔隙水压力

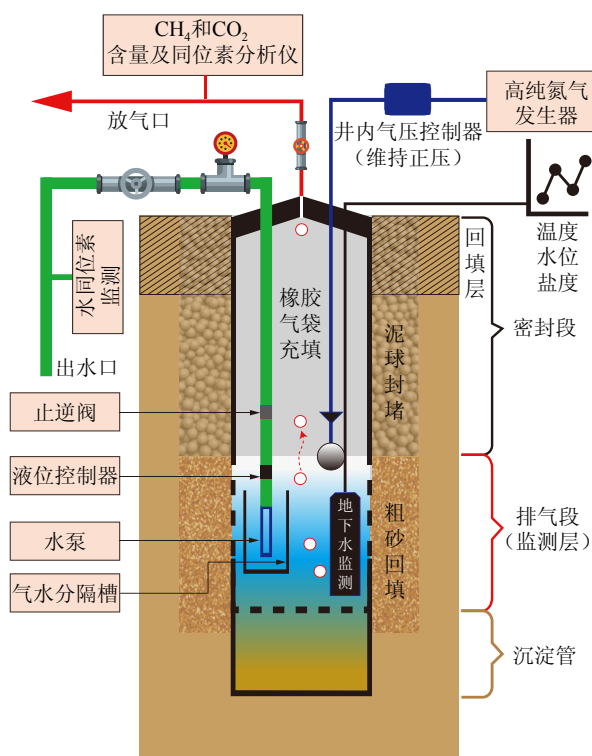


图5 浅层气监测井结构示意图

Fig.5 Structure of a shallow-gas-monitoring well

等。当海底沉积物中的浅层气短时间内大量逸出会形成海底麻坑,从而麻坑被认为是浅层气可能存在的证据之一。但是随着研究的不断深入,研究人员发现麻坑也有可能是由于海底地下水排泄^[53-54]、人为盗采海砂、甚至是脊椎动物活动^[55]等因素造成的。需要强调的是海底麻坑需要在特定的沉积环境下才能稳定存在,如沉积速率极低、沉积动力较弱时,否则麻坑形态无法稳定保持。

孔隙水压力与浅层气的封存密切相关,在沿海平原地区普遍发现临近含气层的盖层之中孔隙水压力明显偏高,对浅层气具有较好的封堵作用^[25]。因此,某种程度上,孔隙水压力异常与浅层气的存在可能具有相关性,但这并不能作为浅层气存在的有效证据。

4 近海浅层气分布特征

4.1 平面分布特征

浅层气在中国近海广泛分布(图6),分布区与沉积物组成和物质供给条件密切相关。根据现有数据来看,中国近海浅层气主要分布在长江口、黄河口、珠江口、辽河口等河口三角洲区域^[56],同时在细颗粒沉积物的主要沉积区如山东半岛周边^[57]、南

黄海等区域^[58-59]也普遍存在。到目前为止相关的调查研究工作并未对近海实现全覆盖,在已开展调查的近岸湾区中均查明存在浅层气,据此推测浅层气的实际分布范围要远大于图面所展示的范围。

据东海实测数据显示,浅层气顶界埋深变化范围较大($<1\sim48$ m),与中国近海其他区域浅层气顶界埋深相当。在杭州湾、浙江近岸等区域含气层顶界埋深较浅,靠近外侧区域浅层气埋深显著增加^[39]。整体来看,浅层气的埋深与沉积物厚度分布密切相关,较高的沉积速率、较厚的高有机质含量细颗粒堆积层有利于浅层气的形成^[52]。

4.2 垂向分布特征

到目前为止,绝大部分调查研究工作并未对沉积物中的浅层气垂向分布进行深入研究,基本都是以地球物理调查圈定分布区为主,部分结合地球化学手段对SMTZ进行分析。图7展示的是杭州湾南部某围填成陆区典型剖面中的浅层气分布情况,从图中可知浅层气分布在多层中,第1层主要位于第四系全新统中部海相层(mQ_4^2),SMTZ界面深度约5 m;第二层位于海底以下35~60 m。这两层均以颗粒较细的海相沉积物为主,中间夹杂粉砂层,并未见明显的气体运移至砂层,呈现为自生自储特性。这是近海沉积物中浅层气最典型的存在形式,主要是因为相对于沿海平原地区,近海沉积物中的浅层气形成时间不够长、埋藏深度不够深;同时产气层以缓慢堆积的全新世沉积物为主,有机质含量要远低于沿海平原地区产气层中的有机质含量;并且自全新世以来海平面相对比较稳定,未能在此期间形成良好的生储盖地层结构。

5 影响浅层气形成和分布的关键因素

浅层气形成与环境条件(温度、压力等)、沉积物中有机碳的年龄、沉积物厚度、孔隙水性质等密切相关,整体来说,有机碳越年轻、沉积层厚度越厚(可能至少需 >4 m)、孔隙水交换能力越弱(不利于硫酸根离子迁移),整体产气能力越强^[35-36],外部条件的周期性变化(如温度)也会对浅层气的形成产生影响^[48, 63]。

沉积物厚度的影响:根据丹麦奥尔胡斯湾地球化学示踪研究的结果^[48],随着全新世沉积厚度的增加(5~10 m),SMTZ的深度逐渐变浅($>4\sim2.5$ m)。泥层厚度超过8~9 m出现浅层气,沉积速率和泥层厚度的增加对深层产气能力具有一定影响,产气

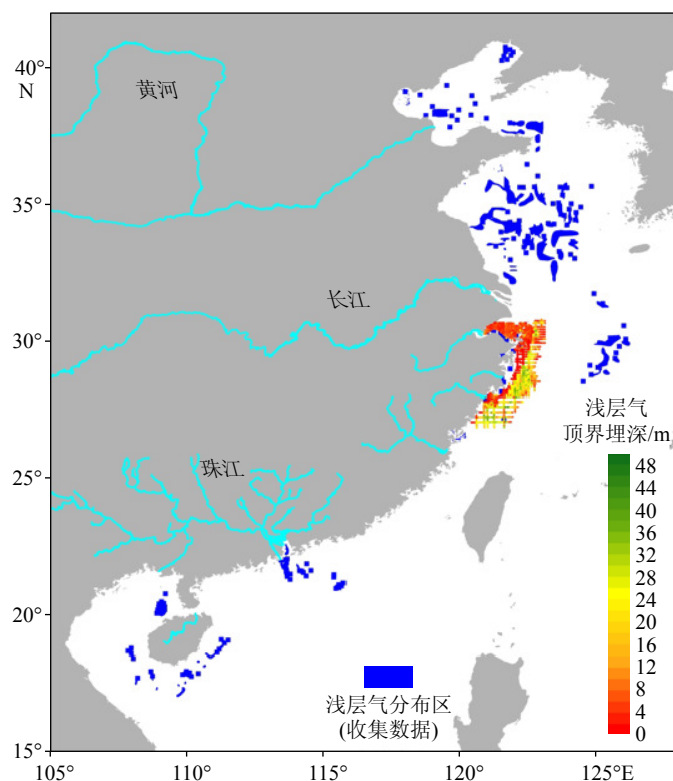


图 6 中国近海沉积物中浅层气分布范围

数据见文献 [56-62]。

Fig.6 Distribution of shallow gas in sediments offshore China

Data are collected from references [56-62].

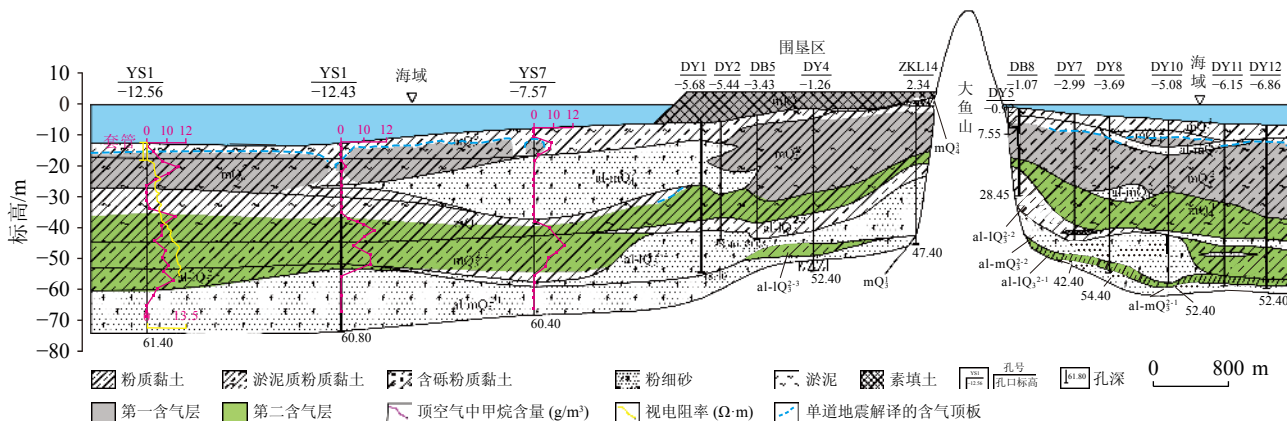


图 7 杭州湾南部某围填成陆区典型剖面浅层气分布

Fig.7 Shallow gas distribution in a typical section of a land reclamation area in the south of Hangzhou Bay

能力和甲烷通量的增加促进 SMTZ 变浅。根据本团队对中国东海内陆架浅层气分布的调查, 也发现 SMTZ 与全新世沉积物厚度密切相关, 沉积物变厚使 SMTZ 变浅 (图 6)。

水深的影响: 水深可能会限制浅层气的形成和分布。在波罗的海^[64], 含气层广泛分布于 20~360 m 水深范围内, 海底以下的浅层气埋藏深度变化极小, 研究者认为这是因甲烷气体的扩散要快于溶解

态甲烷的缘故。在韩国东南沿海泥质区^[65], 沉积物中浅层气声学异常在水深 102 m 处消失, 研究者认为是因水深增加、温度降低而增加了孔隙水中甲烷的溶解度, 导致气泡消失, 从而使游离气体的形成限制在水深 102 m 以内。但是, 随着水深的增加离岸距离也显著增加, 陆源颗粒物的堆积量会显著减少, 沉积物厚度受到限制, 因此, 这种水深与浅层气之间的相关性可能是沉积物厚度限制导致的。

环境因素的影响: 环境因素的改变会限制微生物活性、影响反应物质的供给等, 从而限制或促进产气。比如, 切萨皮克湾(Chesapeake bay)的浅层生物气分布存在明显的季节性变化, 浅层气在垂直方向上存在 0.5 m 的季节性波动, 并且因浅层气导致回反射区域同样存在季节性变化, 在夏季高温期间扩大, 冬季低温期间缩小, 很显然这种回反射的变化并不是因为沉积物类型的差异导致的^[66]。在德国的埃肯弗德湾(Eckernförde bay), 水体温度和压力的变化会导致海底浅层气物探信号强度的变化, 并且由于水体的传导较慢, 相对于大气温度会有 3~4 个月的滞后^[49]。根据巴拉顿湖(Balaton)的沉积物中地震调查资料^[63], 湖底至含气层的深度呈现明显的年度和季节性变化, 含量变化显著。

孔隙水组成的影响: 孔隙水中的挥发性脂肪酸、无机碳等是浅层气形成的重要前驱体, 同时孔隙水(淡水)向上运移会清除沉积物中的硫酸盐, 导致沉积物产甲烷过程提前(SMTZ 界面上移), 使上层沉积物中甲烷含量增高^[11, 67-68]。在珠江口^[69], 孔隙水中的甲烷和硫酸盐分布具有明显的季节性变化。洪季淡水注入明显影响了沉积物孔隙水中的硫酸盐含量, 硫酸盐含量的季节性变化控制了沉积物中的 SMTZ 深度。受地下水排泄的影响, 导致由沉积物进入水体中的甲烷和二氧化碳量比其他没有地下水排泄的区域显著偏高, 研究者认为甲烷是来源于微生物对泥浆中的有机碳和泥层底部更新世泥炭分解, 而二氧化碳是随孔隙水自深部迁移而来^[70]。

6 浅层气主要危害

甲烷或其他气体(如 CO_2) 从沉积物中逸出是沿海平原、河口和大陆架非常常见的现象^[1, 51], 气体运

移或逸出会破坏土体结构和海底微地貌, 威胁工程设施(图 8)和人类社会安全, 影响生态系统功能, 可能对人类社会和生态系统产生重大影响。浅层气造成的危害至少有以下 9 种形式(图 9), 包括钻井作业时的井喷或火灾、桩基失稳、聚集后扰动燃爆(围填区)、海底塌陷、海底滑坡、海底管线断裂、地下水水质恶化、海洋生物死亡与全球变暖^[16]。

6.1 影响工程安全

含气沉积物的工程地质特征发生了明显变化^[4, 71], 这直接减少了对沉积物和海底设施的支撑作用。浅层气诱发的海上工程事故较多, 如杭州湾大桥和杭州地铁 1 号线等都建在含气沉积物分布区, 在这些工程的施工过程中, 都曾发生过浅层气引起的井喷、海底坍塌、燃爆等事故(图 8)^[4, 72]。浅层气也会对海底电缆、输油/水管道构成致命威胁, 沉积物中不断释放的气体使原本浅埋在海底的管道暴露在海底之上, 在持续的海浪和潮汐的影响下, 它不可避免地会疲劳断裂。沉积物中气体的存在使孔隙水压力显著增加, 使沉积物中的脆弱层更加不稳定, 如果孔隙水压力足够高, 可能导致海底滑坡^[73-76]。流体运移在奥尔比亚三角洲^[73]、科林斯湾部分三角洲^[74]、尼日尔东部近海三角洲^[75]、塔霍河三角洲^[76]的沉积物滑移过程中发挥了重要作用。在世界各地的几个大陆斜坡上也发现了滑坡与麻坑的联系^[73]。

近年来, 通过在舟山某围填成陆区进行持续监测^[51], 发现海底沉积物中的浅层气极易因扰动向上运移后在地表硬化层下聚集形成气包, 近地表施工扰动极易引发燃爆事故。

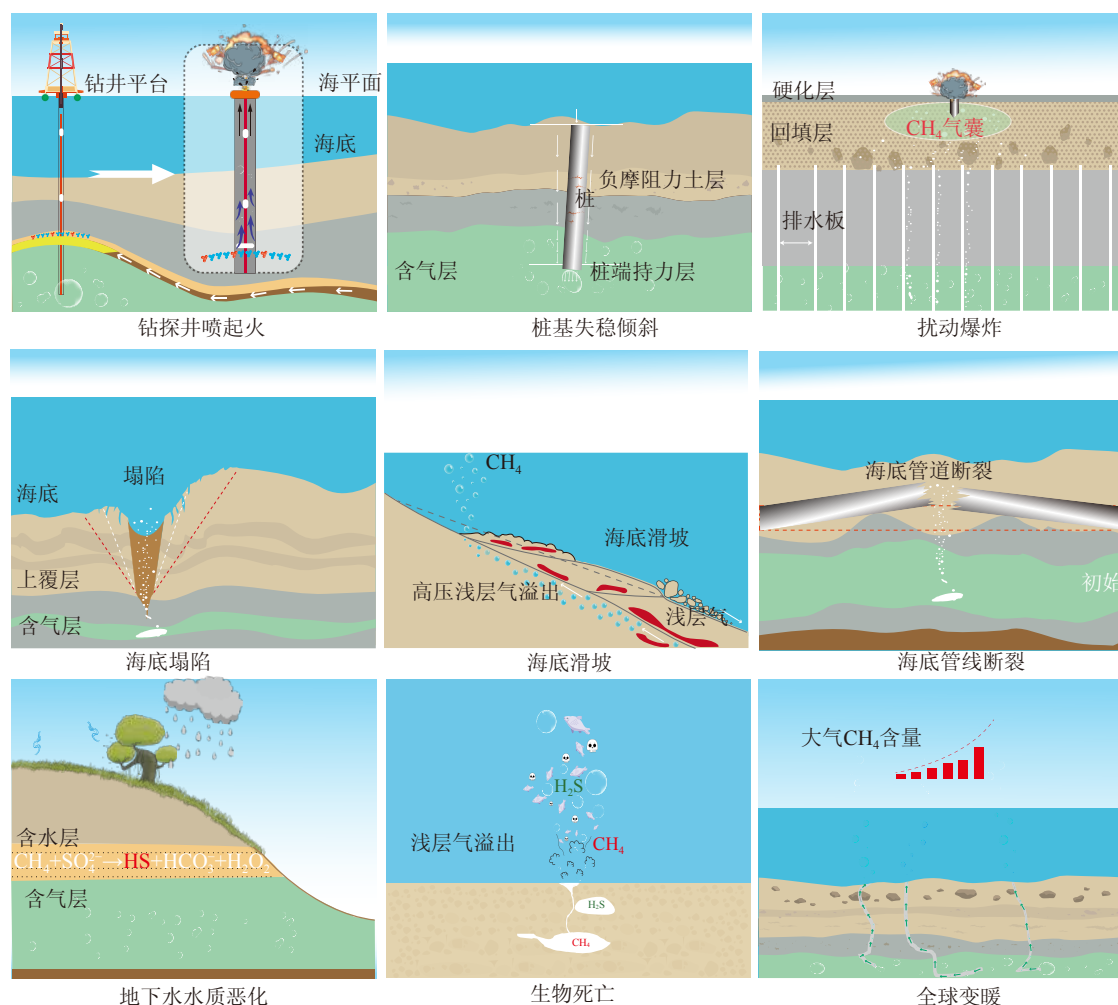
6.2 影响碳循环

沉积物中的甲烷一直在向大气中释放, 其对全



图 8 杭州湾工程地质勘察过程中浅层气灾害事故^[77]

Fig.8 Shallow gas disaster in the process of geoenvironmental investigation in Hangzhou Bay^[77]

图 9 浅层气存在可能导致的危害^[16]Fig.9 Possible hazards induced by shallow gas^[16]

球气候变化的影响应引起高度重视。据估计,埋藏到海底沉积物中的有机碳有约 3%~4% 转化为甲烷^[10],目前全球海洋沉积物中大约有 $(1.1\sim 3.0)\times 10^6$ Pg 生物成因 CH_4 ^[2]。每年 2~6 Tg CH_4 从海洋逃逸到大气^[78]。根据现有数据^[79-80],海洋对全球大气中甲烷的贡献相对较小(约 4%),甚至比面积小得多的湖泊和河流还要小。即使是流入大陆架的小河也会产生可识别的甲烷通量,并与海底浅层气存在关联性^[81]。许多科学家仍然担心,海底释放的甲烷可能会对全球气候变化产生重大影响。在一些区域的研究表明,水体中的 CH_4 主要来源于沉积物,例如北冰洋西部^[82]、北海^[9]、波罗的海^[83-84]、西伯利亚北极大陆架^[85]、楚科奇盆地南部^[86] 和北极^[87]。

在大多数情况下,甲烷以气泡形式从沉积物中释放,气泡的时空差异较大因而难以测量^[88]。沉积物甲烷通量受水动力条件^[9]、全新世地层厚度和古地形^[83]、局部环境条件^[89] 等因素影响较大。据模型估算,全球近海 CH_4 总排放量估计为 6~12 Tg/a^[78]。

以往的研究中均认为从沉积物释放到水体的甲烷被生物地球化学过程消耗殆尽,难以进入大气。然而,根据墨西哥湾的一项研究,至少在水深不超过 600 m 的水域,溶解和氧化不会显著消耗从沉积物中逸出的甲烷^[90]。因此,海洋向大气释放甲烷的潜力可能被严重低估。

一些研究人员认为,无论是地质历史时期还是当前,海洋沉积物中的甲烷都没有大量释放到大气中,而是直接参与了海洋碳循环^[89]。根据格陵兰和南极冰芯的信息,在第四纪暖期,沉积物并不是大气甲烷增加的主要贡献者^[91]。在阿拉伯海,水体 CH_4 的主要来源由原位形成,沉积输入贡献较少^[92]。在以扩散控制甲烷通量为主的环境中,碳酸盐自生作用是海洋碳埋藏的重要组成部分,约相当于大陆架和深海中碳酸盐积累量的 15%^[93]。但是,全球气候变化也可能影响沉积物中的甲烷释放^[94],陆坡上部以及冻土区的水合物对气候变化最为敏感^[95]。根据模拟结果^[96],未来 100 年海底变暖将导致海底释

放约 4.73 亿吨甲烷(占全球储量的 0.03%),这不会对全球气候产生重大影响。

从上述讨论中可以清楚地看出,气候变化与海底沉积物甲烷释放的相互作用机制具有较大不确定性,这是预测未来气候变化的主要不确定因素^[97]。在现代高强度人为活动影响下,向沉积物输送的碳正在减少,沉积溶解和再矿化正在增加,从而导致随后整体碳保存减少^[98]。这必然会使海底沉积物中的碳循环变得更加复杂和不可预测。

6.3 影响生态系统

浅层气对生态系统的影响同样可能具有重要的经济和社会意义。据报道,纳米比亚大陆架曾发生了严重的浅层气生态灾害。1992—1993 年,由于浅层气大量逸出形成的缺氧条件导致黑鲈数量的一半死亡,对该国的捕捞业产生了重大影响^[7]。不受控制的浅层气运移在逐渐增加,导致人们越来越关注其潜在的负面环境影响,包括甲烷和其他物质污染地下水的风险^[99]。

在大多数情况下,虽然浅层气可能不会造成如此严重的生态灾害,但其对生态系统的影响不容忽视。在许多地方,生物种群的分布受到浅层气的影响^[100-101]。例如在孔卡诺湾(法国南布列塔尼)的浅水区,观察到单倍体生物的密集定居点与麻坑区完全重叠^[102]。在瓜纳巴拉湾,由于底栖有孔虫组合的多样性和密度减少,气体释放强烈的地区会影响底栖动物群^[103]。在阿穆尔斯基湾(日本海),在气体含量高的地区,已经观察到硅藻数量的增加和一些硅鞭毛虫的异常形式的存在^[24]。

7 总结与展望

海底浅层气广泛存在于近海松散细颗粒沉积物中,对近海工程和全球气候变化都具有重大影响,查明其来源、掌握其分布规律,才能制定切实可行的预防对策。目前已经对相关方面具有了一定的认识,但是仍然存在一些不确定的问题,已有的认识主要包括以下几个方面。

(1)形成机制:根据目前研究推测至少存在 5 种不同形式的产甲烷路径,沉积物中的 CH_3COO^- 、 HCO_3^- 、甲基化合物(如 CH_3OH)、甲氧基化合物(Ar-OCH_3)、甚至是长链烷烃($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)都能够成为微生物的产甲烷前驱体。同时,一些非产甲烷过程也会形成甲烷副产物。

(2)存在形式:海底浅层气有两种主要存在形

式,包括气包(通常具有一定压力)和分散气泡与溶解气。在沿海平原区普遍发育的古河道砂体中存在的浅层气普遍为气包,并具有一定压力,具备明显的生气层、储层和盖层,与古地形演化密切相关。在近海全新世细颗粒沉积物中或者是一些中小河流因洪水等事件性因素而快速堆积的沉积物中,存在的浅层气一般是以分散气泡和溶解气形式存在,呈现为明显的自生自储特性,主要分散于细颗粒沉积物的空(孔)隙中,局部也会形成小型的气囊。

(3)探测方法:浅层气探测常用的方法包括地球物理和地球化学方法。地球物理方法(如浅地层剖面调查)利用气泡存在导致沉积物声速衰减、反射增强等特性可获取含气层顶界深度。地球化学方法通过柱状样或钻探取样后测试顶空气中的甲烷含量能够直接证实浅层气的存在,同时可准确获取不同深度沉积物中的含气量。地球化学和地球物理方法相结合可获取较大范围内浅层气的三维分布特性信息。

(4)分布特征:中国近海浅层气广泛分布,与陆源物质供给条件密切相关,浅层气分布区主要聚集在长江三角洲、黄河三角洲、珠江三角洲、辽河三角洲等近海区域,同时在细颗粒沉积物堆积较多的环山东半岛泥质区、南黄海等也较为发育。整体来看,浅层气的分布与沉积环境密切相关。

(5)影响因素:沉积物中的甲烷来源于生物地球化学过程,浅层气形成与环境条件(温度、压力等)、沉积物中有机碳的年龄、沉积物厚度、孔隙水性质等密切相关,整体来说,有机碳越年轻、沉积层厚度越厚(可能至少需 $>4\text{ m}$)、孔隙水交换能力越弱(不利于硫酸根离子迁移)整体产气能力越强,外部条件的周期性变化(如温度)也会对浅层气的形成产生影响。

(6)主要危害:根据目前所掌握的信息,海底浅层气的存在至少会造成 9 个方面的危害,可概括为对涉海工程和对生态系统的危害。对涉海工程的危害主要表现为钻探井喷起火、桩基失稳、海底塌陷、海底滑坡、海底管线断裂、聚集后扰动燃爆(围填成陆区)。对生态系统的危害主要体现在导致地下水水质恶化(形成 HS^-)、大量溢出导致生物死亡、加剧全球气候变化。

基于已有认识,结合当前调查研究和应用中迫切需要解决的关键问题,提出急需持续并深入开展如下工作:

(1)阐明形成机理:虽然目前的研究工作指出多种可能被用于产甲烷的前驱体,并采用同位素示

踪等方法推测了可能的产甲烷路径,但是仍然无法解释真实环境中观测到的部分情况。一是甲烷和二氧化碳的碳同位素平行变化,根据已有认识二氧化碳是甲烷形成过程的前驱体,产物与前驱体之间的同位素组成必然不可能同步贫化或富集。二是甲烷生成后是否存在进一步循环,目前对这一方面的研究基本是空白,但是根据钻探采样测试结果,从SMTZ界面往下沉积物中的甲烷含量并没有太显著差异,而是随着深度增加含量逐渐趋于稳定,这就存在多种可能的解释,即甲烷含量达到一定之后产甲烷过程停止、并且甲烷持续处于相对静止状态未参与其他生物地球化学过程;也可能形成的甲烷在持续的参与地球化学过程,并与二氧化碳保持某种稳态循环。这些问题充分说明目前对沉积物中甲烷形成机制的认识仍然有很多不足,需要进一步基于真实环境条件开展研究工作。

(2)掌握运移机制:掌握运移机制是制定有效减灾防灾对策的关键。毛细流和裂隙流是沉积物中流体运移的两种主要方式,根据目前的理论和调查结果,近海细颗粒沉积物中的浅层气运移可能主要依赖于裂隙流,而沿海平原区域气包的形成主要归功于粗颗粒间的毛细流。根据项目组在舟山某围填成陆区近三年的监测结果,浅层气的运移与地下水关系密切,且不同层位展现为不同的行为特征。这种复杂人为活动影响下,气-水-土多相耦合作用机制较为复杂,特别是在此基础上叠加生物地球化学过程,这使得浅层气的运移行为较难被直观展示。基于原位监测体系的长时间序列监测将有助于揭示浅层气的运移机制及其控制因素。

(3)揭示其对气候变化与人为活动的响应特征:海底沉积物是目前全球已知的最大甲烷储库,沉积物中极少量的甲烷泄露都可能导致大气环境中甲烷含量剧烈波动,已经在部分区域观测到随着全球气候变化和人为活动的加剧导致沉积物中的甲烷释放增加。加强对不同环境背景下的沉积物甲烷释放过程和通量对比研究,开展持续调查监测,掌握海底沉积物甲烷储存和释放现状,揭示影响甲烷释放的主要机制,预测未来人为活动和气候变化影响下海底沉积物中甲烷可能的环境行为,对有效管控全球气候变化具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 段晓勇. 近海沉积物中的甲烷[J]. 地球, 2023(5): 28-31. [DUAN Xiaoyong. Methane in coastal sediment[J]. Earth, 2023(5): 28-31.]
- [2] Lee T R, Phrampus B J, Skarke A, et al. Global estimates of biogenic methane production in marine sediments using machine learning and deterministic modeling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(7): e2021GB007248.
- [3] International Energy Agency. Methane Tracker Database, IEA, Paris. License: Creative Commons Attribution CC BY-SA 4.0. 2022.
- [4] Xu Y S, Wu H N, Shen J S, et al. Risk and impacts on the environment of free-phase biogas in Quaternary deposits along the Coastal Region of Shanghai[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 137: 129-137.
- [5] 朱瑶宏, 黄燕庆, 曾洪贤, 等. 杭州湾大桥南岸工程地质特征与浅层气分布[J]. 岩土力学, 2002, 23(S1): 215-219. [ZHU Yaohong, HUANG Yanqing, ZENG Hongxian, et al. Engineering geological features and shallow gas distribution in south bank of Hangzhou bay bridge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(S1): 215-219.]
- [6] Teatini P, Tosi L, Strozzi T. Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B8): B08407.
- [7] Emeis K C, Brüchert V, Currie B, et al. Shallow gas in shelf sediments of the Namibian coastal upwelling ecosystem[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(6): 627-642.
- [8] Kortekaas S, Sens E, Sarata B. Shallow gas hazard linked to world-wide delta environments[M]//Gourvenec S, White D. *Frontiers in Offshore Geotechnics II*. London: CRC Press, 2010: 221-225.
- [9] Borges A V, Champenois W, Gypens N, et al. Massive marine methane emissions from near-shore shallow coastal areas[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27908.
- [10] Egger M, Riedinger N, Mogollón J M, et al. Global diffusive fluxes of methane in marine sediments[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(6): 421-425.
- [11] Glombitza C, Egger M, Røy H, et al. Controls on volatile fatty acid concentrations in marine sediments (Baltic Sea)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 258: 226-241.
- [12] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial Formation and oxidation of methane[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1-3): 291-314.
- [13] Zhuang G C, Elling F J, Nigro L M, et al. Multiple evidence for methylotrophic methanogenesis as the dominant methanogenic pathway in hypersaline sediments from the Orca Basin, Gulf of Mexico[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 187: 1-20.
- [14] Zhuang G C, Lin Y S, Bowles M W, et al. Distribution and isotopic composition of trimethylamine, dimethylsulfide and dimethylsulfoniopropionate in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 2017, 196: 35-46.
- [15] Zhuang G C, Heuer V B, Lazar C S, et al. Relative importance of methylotrophic methanogenesis in sediments of the western Mediterranean Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 224: 171-186.
- [16] Duan X Y, Yin P, Tsona N, et al. Biogenic methane in coastal unconsolidated sediment systems: a review[J]. *Environmental Research*, 2023, 227: 115803.
- [17] Beulig F, Røy H, Glombitza C, et al. Control on rate and pathway of anaerobic organic carbon degradation in the seabed[J]. *Proceedings of*

- the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(2): 367-372.
- [18] 贺行良, 王江涛, 刘昌岭, 等. 天然气水合物客体分子与同位素组成特征及其地球化学应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 163-174. [HE Xingliang, WANG Jiangtao, LIU Changling, et al. Guest molecular and isotopic compositions of natural gas hydrates and its geochemical applications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(3): 163-174.]
- [19] Vanwonterghem I, Evans P N, Parks D H, et al. Methylophilic methanogenesis discovered in the archaeal phylum Verstraetearchaeota[J]. *Nature Microbiology*, 2016, 1: 16170.
- [20] Mayumi D, Mochimaru H, Tamaki H, et al. Methane production from coal by a single methanogen[J]. *Science*, 2016, 354(6309): 222-225.
- [21] Zhou Z, Zhang C J, Liu P F, et al. Non-syntrophic methanogenic hydrocarbon degradation by an archaeal species[J]. *Nature*, 2022, 601(7892): 257-262.
- [22] Liu L Y, Xie G J, Ding J, et al. Microbial methane emissions from the non-methanogenesis processes: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151362.
- [23] Weschenfelder J, Klein A H F, Green A N, et al. The control of paleo-topography in the preservation of shallow gas accumulation: examples from Brazil, Argentina and South Africa[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 172: 93-107.
- [24] Karnaukh V N, Astakhov A S, Vereshchagina O F, et al. Formation of subsurface shallow gas accumulations in Amurskiy Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) as a result of postglacial sea-level change, paleoceanographic conditions and hydrological activity[J]. *Marine Geology*, 2016, 372: 31-52.
- [25] Lin C M, Li Y L, Zhuo H C, et al. Features and sealing mechanism of shallow biogenic gas in incised valley fills (the Qiantang River, eastern China): a case study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(4): 909-922.
- [26] 林春明, 张霞, 徐振宇, 等. 长江三角洲晚第四纪地层沉积特征与生物气成藏条件分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 589-601. [LIN Chunming, ZHANG Xia, XU Zhenyu, et al. Sedimentary characteristics and accumulation conditions of shallow-biogenic gas for the Late Quaternary sediments in the Changjiang River Delta area[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 589-601.]
- [27] Brekke T, Lønne Ø, Ohm S E. Light hydrocarbon gases in shallow sediments in the northern North Sea[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(1-2): 81-108.
- [28] Rahman M, Mainul Kabir S M, Imam B, et al. Occurrence, distribution, and origin of shallow biogenic gas in Late Quaternary unconsolidated sand deposit of shahbazpur structure, southern Bangladesh[J]. *Petroleum and Coal*, 2018, 60(6): 1216-1227.
- [29] García-García A, Orange D, Lorenson T, et al. Shallow gas off the Rhône prodelta, Gulf of Lions[J]. *Marine Geology*, 2006, 234(1-4): 215-231.
- [30] García-García A, Tesi T, Orange D, et al. Understanding shallow gas occurrences in the Gulf of Lions[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(2): 143-154.
- [31] García-García A, Orange D L, Miserocchi S, et al. What controls the distribution of shallow gas in the western Adriatic Sea?[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(3-4): 359-374.
- [32] Orange D L, García-García A, McConnell D, et al. High-resolution surveys for Geohazards and shallow gas: NW Adriatic (Italy) and Iskenderun bay (turkey)[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, 26(2): 247-266.
- [33] Orange D L, García-García A, Lorenson T, et al. Shallow gas and flood deposition on the Po Delta[J]. *Marine Geology*, 2005, 222-223: 159-177.
- [34] Missiaen T, Murphy S, Loncke L, et al. Very high-resolution seismic mapping of shallow gas in the Belgian coastal zone[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(16): 2291-2301.
- [35] Iglesias J, García-Gil S. High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gas seeps in San Simón Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(2): 103-114.
- [36] Vardar D, Alpar B. High-resolution seismic characterization of shallow gas accumulations in the southern shelf of Marmara Sea, Turkey[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(3): 589-609.
- [37] 李凤, 段晓勇, 贺行良, 等. 杭州湾沉积物中甲烷的垂向分布及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 112-121. [LI Feng, DUAN Xiaoyong, HE Xingliang, et al. Vertical distribution and controlling factors of methane in sediments of Hangzhou Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 112-121.]
- [38] Kim D C, Lee G S, Lee G H, et al. Sediment echo types and acoustic characteristics of gas-related acoustic anomalies in Jinhae Bay, southern Korea[J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(1): 47-61.
- [39] 陈雨洋. 长江水下三角洲浅层气发育特征与环境效应[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2023. [CHEN Yufeng. Development and environmental effects of shallow gas in the Yangtze subaqueous delta[D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2023.]
- [40] Chiu J K, Tseng W H, Liu C S. Distribution of gassy sediments and Mud volcanoes offshore southwestern Taiwan[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, 17(4): 703-722.
- [41] Meckel T A, Mulcahy F J. Use of novel high-resolution 3D marine seismic technology to evaluate Quaternary fluvial valley development and geologic controls on shallow gas distribution, inner shelf, Gulf of Mexico[J]. *Interpretation*, 2016, 4(1): SC35-SC49.
- [42] Andreassen K, Nilssen E G, Ødegaard C M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(2): 155-171.
- [43] Lee S H, Chough S K. Distribution and origin of shallow gas in deep-sea sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(4): 204-209.
- [44] Sun Q L, Wu S G, Cartwright J, et al. Shallow gas and focused fluid flow systems in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 315-318: 1-14.
- [45] García-García A, Levey M D, Watson E B. High resolution seismic study of the Holocene infill of the Elkhorn Slough, central California[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 55: 108-118.
- [46] Tóth Z, Spiess V, Mogollón J M, et al. Estimating the free gas content in Baltic Sea sediments using compressional wave velocity from

- marine seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2014, 119(12): 8577-8593.
- [47] Tóth Z, Spieß V, Jensen J. Seismo-acoustic signatures of shallow free gas in the Bornholm Basin, Baltic Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 88: 228-239.
- [48] Flury S, Røy H, Dale A W, et al. Controls on subsurface methane fluxes and shallow gas Formation in Baltic Sea sediment (Aarhus Bay, Denmark)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 188: 297-309.
- [49] Wever T F, Abegg F, Fiedler H M, et al. Shallow gas in the muddy sediments of Eckernförde Bay, Germany[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(14-15): 1715-1739.
- [50] 吴秀山, 童仁园, 李青. 近海浅层气甲烷浓度原位在线监测方法与仪器研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(1): 153-158. [WU Xiushan, TONG Renyuan, LI Qing. In-situ online monitoring method and instrument study for methane concentration in offshore shallow gas[J]. *Chinese Journal of sensors and actuators*, 2023, 36(1): 153-158.]
- [51] 段晓勇, 印萍, 曹珂, 等. 中国地质调查局舟山海洋地质灾害野外科学观测研究站进展与成果[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(6): 88-92. [DUAN Xiaoyong, YIN Ping, CAO Ke, et al. Introduction of Zhoushan marine geologic hazards field scientific observation and research station, China geological survey[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(6): 88-92.]
- [52] 贺行良, 谭丽菊, 段晓勇, 等. 杭州湾沉积物中硫酸盐—甲烷转换带内的碳循环[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 51-60. [HE Xingliang, TAN Liju, DUAN Xiaoyong, et al. Carbon cycle within the sulfate-methane transition zone in the marine sediments of Hangzhou Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(3): 51-60.]
- [53] Liao C C. Discussion of "Formation mechanism of large pockmarks in the subaqueous Yellow River Delta" [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(9): 1149-1150.
- [54] Tian Z C, Guo X J, Qiao L Z, et al. Formation mechanism of large pockmarks in the subaqueous Yellow River Delta[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(6): 651-659.
- [55] Schneider von Deimling J, Hoffmann J, Geersen J, et al. Millions of seafloor pits, not pockmarks, induced by vertebrates in the North Sea[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 478.
- [56] 李萍, 杜军, 刘乐军, 等. 我国近海海底浅层气分布特征[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(1): 69-74. [LI Ping, DU Jun, LIU Lejun, et al. Distribution characteristics of the shallow gas in Chinese offshore seabed[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(1): 69-74.]
- [57] 仇建东, 刘健, 孔祥淮, 等. 山东半岛南部滨浅海区的海洋灾害地质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 27-33. [QIU Jiandong, LIU Jian, KONG Xianghuai, et al. Marine geo-hazards in the coastal and offshore area of southern Shandong peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 27-33.]
- [58] 孔祥淮, 刘健, 杜远生, 等. 南黄海西部滨浅海区灾害地质因素特征及分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 43-52. [KONG Xianghuai, LIU Jian, DU Yuansheng, et al. Characteristics and distribution of geo-hazard factors in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 43-52.]
- [59] 张志忠, 顾兆峰, 刘锡清, 等. 南黄海灾害地质及地质环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 15-22. [ZHANG Zhizhong, GU Zhao-feng, LIU Xiqing, et al. Hazardous geology and marine geologic environmental evolution in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 15-22.]
- [60] 武彬, 林丰增, 张艺武, 等. 福建宁德近岸海域海底浅层气分布特征及成因分析[J]. *华东地质*, 2022, 43(1): 87-93. [WU Bin, LIN Fengzeng, ZHANG Yiwu, et al. Distribution characteristics and genesis analysis of submarine shallow gas in Ningde coastal area, Fujian province[J]. *East China Geology*, 2022, 43(1): 87-93.]
- [61] 邢磊, 焦静娟, 刘雪芹, 等. 渤海海域浅层气分布及地震特征分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(11): 70-78. [XING Lei, JIAO Jingjuan, LIU Xueqin, et al. Distribution and seismic reflection characteristics of shallow gas in Bohai Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(11): 70-78.]
- [62] 赵卫, 熊元凯, 宫少军, 等. 天津近海海底地质灾害类型及声学特征[J]. *海洋科学*, 2021, 45(2): 119-126. [ZHAO Wei, XIONG Yuankai, GONG Shaojun, et al. Acoustic characteristics and types of submarine geological hazards in Tianjin offshore areas[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(2): 119-126.]
- [63] Visnovitz F, Bodnár T, Tóth Z, et al. Seismic expressions of shallow gas in the lacustrine deposits of Lake Balaton, Hungary[J]. *Near Surface Geophysics*, 2015, 13(5): 433-447.
- [64] Laier T, Jensen J B. Shallow gas depth-contour map of the Skagerrak-western Baltic Sea region[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(2): 127-141.
- [65] Lee G H, Kim D C, Kim H J, et al. Shallow gas in the central part of the Korea Strait shelf mud off the southeastern coast of Korea[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(16): 2036-2052.
- [66] Hagen R A, Vogt P R. Seasonal variability of shallow biogenic gas in Chesapeake Bay[J]. *Marine Geology*, 1999, 158(1-4): 75-88.
- [67] Albert D B, Martens C S, Alperin M J. Biogeochemical processes controlling methane in gassy coastal sediments: part 2: groundwater flow control of acoustic turbidity in Eckernförde Bay Sediments[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(14-15): 1771-1793.
- [68] Valentine D L. Biogeochemistry and microbial ecology of methane oxidation in anoxic environments: a review[J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2002, 81(1-4): 271-282.
- [69] Wu Z J, Zhou H Y, Ren D Z, et al. Processes controlling the seasonal and spatial variations in sulfate profiles in the pore water of the sediments surrounding Qi'ao Island, Pearl River Estuary, southern China[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 98: 26-35.
- [70] Frederick J M, Buffett B A. Submarine groundwater discharge as a possible Formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2016, 121(3): 1383-1404.
- [71] Sun H Y, Chen Z X, Lai X H, et al. Influence of shallow gas on the geotechnical properties of pockmark soil: a case study in the East China Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 93: 101966.
- [72] Lin C M, Gu L X, Li G Y, et al. Geology and Formation mechanism of Late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(5): 613-625.

- [73] Dalla Valle G, Gamberi F. Pockmarks and seafloor instability in the Olbia continental slope (northeastern Sardinian margin, Tyrrhenian Sea)[J]. *Marine Geophysical Research*, 2011, 32(1-2): 193-205.
- [74] Papatheodorou G, Ferentinos G. Submarine and coastal sediment failure triggered by the 1995, $M_s = 6.1$ R Aegion earthquake, Gulf of Corinth, Greece[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(3-4): 287-304.
- [75] Riboulot V, Cattaneo A, Sultan N, et al. Sea-level change and free gas occurrence influencing a submarine landslide and pockmark Formation and distribution in deepwater Nigeria[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 78-91.
- [76] Terrinha P, Duarte H, Brito P, et al. The Tagus River delta landslide, off Lisbon, Portugal. Implications for Marine geo-hazards[J]. *Marine Geology*, 2019, 416: 105983.
- [77] 林春明, 张霞. 江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [LIN Chunming, ZHANG Xia. Late Quaternary Stratigraphy, Sedimentology and Natural Gas Geology in the Jiangsu-Zhejiang Coastal Plain[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
- [78] Weber T, Wiseman N A, Kock A. Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4584.
- [79] Palma-Silva C, Marinho C C, Albertoni E F, et al. Methane emissions in two small shallow neotropical lakes: the role of temperature and trophic level[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 373-379.
- [80] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, et al. The global methane budget 2000-2017[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [81] Hu Y, Li H D, Xu J. Shallow gas accumulation in a small estuary and its implications: a case history from in and around Xiamen Bay[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(24): L24605.
- [82] Kudo K, Yamada K, Toyoda S, et al. Spatial distribution of dissolved methane and its source in the western Arctic Ocean[J]. *Journal of Oceanography*, 2018, 74(3): 305-317.
- [83] Hilligsøe K M, Jensen J B, Ferdelman T G, et al. Methane fluxes in marine sediments quantified through core analyses and seismo-acoustic mapping (Bornholm Basin, Baltic Sea)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 239: 255-274.
- [84] Schmale O, Schneider Von Deimling J, Gülzow W, et al. Distribution of methane in the water column of the Baltic Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(12): L12604.
- [85] Shakhova N, Semiletov I, Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: implications for the marine methane cycle[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): L09601.
- [86] Matveeva T, Savvichev A S, Semenova A, et al. Source, origin, and spatial distribution of shallow sediment methane in the Chukchi Sea[J]. *Oceanography*, 2015, 28(3): 202-217.
- [87] Berchet A, Pison I, Crill P M, et al. Using ship-borne observations of methane isotopic ratio in the Arctic Ocean to understand methane sources in the Arctic[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(6): 3987-3998.
- [88] Scandella B P, Delwiche K, Hemond H F, et al. Persistence of bubble outlets in soft, methane-generating sediments[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2017, 122(6): 1298-1320.
- [89] Coffin R B, Smith J P, Plummer R E, et al. Spatial variation in shallow sediment methane sources and cycling on the Alaskan Beaufort Sea Shelf/Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 186-197.
- [90] Solomon E A, Kastner M, Macdonald I R, et al. Considerable methane fluxes to the atmosphere from hydrocarbon seeps in the Gulf of Mexico[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 561-565.
- [91] Petrenko V V, Smith A M, Brook E J, et al. $^{14}\text{CH}_4$ measurements in Greenland Ice: investigating last glacial termination CH_4 sources[J]. *Science*, 2009, 324(5926): 506-508.
- [92] Jayakumar D A, Naqvi S W A, Narvekar P V, et al. Methane in coastal and offshore waters of the Arabian Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 74(1): 1-13.
- [93] Akam S A, Coffin R B, Abdulla H A N, et al. Dissolved inorganic carbon pump in methane-charged shallow marine sediments: state of the art and new model perspectives[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 206.
- [94] George R, Gullström M, Mtolera M S P, et al. Methane emission and sulfide levels increase in tropical seagrass sediments during temperature stress: a mesocosm experiment[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(4): 1917-1928.
- [95] Mestdagh T, Poort J, De Batist M. The sensitivity of gas hydrate reservoirs to climate change: perspectives from a new combined model for permafrost-related and marine settings[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 169: 104-131.
- [96] Kretschmer K, Biastoch A, Rüpke L, et al. Modeling the fate of methane hydrates under global warming[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(5): 610-625.
- [97] Dean J F. Old methane and modern climate change[J]. *Science*, 2020, 367(6480): 846-848.
- [98] Keil R. Anthropogenic forcing of carbonate and organic carbon preservation in marine sediments[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2017, 9: 151-172.
- [99] Schout G, Hartog N, Hassanizadeh S M, et al. Impact of an historic underground gas well blowout on the current methane chemistry in a shallow groundwater system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(2): 296-301.
- [100] Bravo M E, Aliotta S, Fiori S, et al. Distribution, vertical position and ecological implications of shallow gas in Bahía Blanca estuary (Argentina)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 202: 222-231.
- [101] de Carlos A, Martínez-Carreño N, Barros-García D, et al. Geochemical and microbial context of the gassy sediments in the Ría de Vigo (NW of Spain)[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 1-12.
- [102] Champilou J B, Baltzer A, Murat A, et al. New evidence of perfect overlapping of *Haploids* and pockmarks field: is it a coincidence?[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105961.
- [103] Delavy F P, de Figueiredo Jr A G, Martins M V A, et al. High-resolution acoustic mapping of gas charged sediments and living benthic foraminifera assemblages from the NE Region of the Guanabara Bay (Rj, Brazil)[J]. *Journal of Sedimentary Environments*, 2016, 1(3): 367-392.