

南海海底氢能潜力评估与分布预测

孙博^{1,2†}, 王亮亮^{1,2†}, 李三忠^{1,2*}, 戴黎明^{1,2}, 王秀娟^{1,2}, 索艳慧^{1,2}, 姜兆霞^{1,2}, 曹现志^{1,2}, 杨天一^{1,2}, 胡籽豪^{1,2}, 王迪^{1,2}, 刘申达^{1,2}, 吴立新^{2*}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 青岛 266100

2. 崂山实验室, 青岛海洋科学中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

† 共同第一作者

* 通讯作者, E-mail: sanzhang@ouc.edu.cn(李三忠), lxwu@ouc.edu.cn(吴立新)

2025-05-17收稿, 2026-01-25修回, 2026-01-26接受, 2026-06-24网络版发表

深部地球探测与矿产资源勘查国家科技重大专项项目(2024ZD1001002)、国家自然科学基金项目(42121005、424B2048、42176064、92358302)、中央高校基本科研业务费专项项目(202172003、202461028、202572008)和山东省海洋氢能规模化产业化开发技术路径研究重点项目资助

摘要 天然氢(即地质成因氢气, 也称天然氢气)作为一种零碳、清洁能源, 在全球“双碳”目标背景下日益受到关注, 但其有效勘探与潜力评估仍是当前面临的关键挑战。地幔(超)镁铁质岩石蛇纹石化作用是主要生氢机制, 在海底尤为广泛。海底过程生成的富集并具备可采潜力的天然氢气能源, 称为海底氢能。南海海盆作为构造复杂的边缘海, 保存了显著伸展的大陆岩石圈与减薄陆壳, 为地幔岩石水岩反应(蛇纹石化)的发生和海底天然氢气的生成与富集提供了有利条件。本文旨在通过构建并应用一套融合多源数据与数值模拟的区域天然氢气资源预测框架, 来评估南海海底氢能的潜力和分布。综合利用地质、地球物理及地球化学数据, 通过二维地球动力学数值模拟, 本文定量建立了地壳厚度与蛇纹石化程度(质量)之间的关系。研究结果表明, 南海海底天然氢气的理论资源量巨大, 预估可达 4.6×10^{14} t, 具备成为全球重要天然氢气富集区的潜力。此外, 本研究可为南海海底及其他广泛的深海大洋的海底氢能勘探开发提供重要的科学和技术参考。

关键词 南海海底, 海底氢能, 天然氢气, 数值模拟, 储量预测

1 引言

可持续能源供给和全球性气候变暖, 是人类21世纪面临的两大挑战, 因此如何应对气候变化并减少对化石燃料的依赖, 是值得全球共同关注的急迫任务。天然氢(以下简称“H₂”)作为一种清洁、高效的能源载体, 被认为是碳氢燃料或化石燃料最具潜力的替代品之一, 它可通过一系列自然(生物)化学过程生成(Zgonnik, 2020; Milkov, 2022; Wang L等, 2023; 刘全有等, 2024b), 但其重要性直至近期才逐渐受到关注(金之钧和王璐, 2022; Gallagher, 2023; Hand, 2023)。天然氢大规模生成的主要机制是(超)镁铁质地幔岩与液态水发生反应, 发生蚀变或蛇纹石化并释放H₂(Klein等, 2020)。这一过

程广泛见于裂谷边缘(如马里南部的Bourakebougou)、洋中脊(如大西洋西伊比利亚边缘)以及造山带(如比利牛斯、阿尔卑斯和巴尔干地区)等地质环境(李三忠等, 2024; 索艳慧等, 2024), 这些地区的地幔岩在靠近海底处持续发生蛇纹石化(Boillot等, 1980; Mateeva等, 2017; Prinzhofer等, 2018; Tichadou等, 2021; Hochscheid等, 2024)。这些发现表明, 天然氢的分布可能远超此前预期, 其储量规模可能显著超出已知估算。然而, 尽管天然氢前景广阔, 但其准确分布和储量评估仍面临巨大挑战, 尤其是当其处于地质构造复杂、数据获取困难的深海环境中时, 现有评估方法尚显不足。

近期已有个别研究开始尝试估算天然氢的储量潜力。例如, Ellis和Gelman(2024)结合地质类似物信息构建了

中文引用格式: 孙博, 王亮亮, 李三忠, 戴黎明, 王秀娟, 索艳慧, 姜兆霞, 曹现志, 杨天一, 胡籽豪, 王迪, 刘申达, 吴立新. 2026. 南海海底氢能潜力评估与分布预测. 中国科学: 地球科学, 56(7): 2432–2448, doi: 10.1360/SSTe-2025-0140

英文引用格式: Sun B, Wang L, Li S, Dai L, Wang X, Suo Y, Jiang Z, Cao X, Yang T, Hu Z, Wang D, Liu S, Wu L. 2026. Assessment and prediction of ocean-floor hydrogen potential and distribution in the South China Sea. Science China Earth Sciences, 69(7): 2385–2402, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1856-x>

一个简单的质量平衡模型，估算出全球区域天然氢储量可能高达 5×10^{12} t，这一数量的氢气所含能量(约 1.4×10^{16} MJ)比地球上所有已探明的天然气储量(约 8.4×10^{15} MJ)还要多一倍。然而，这类基于简单质量平衡的估算方法难以捕捉真实地质过程的复杂性和异质性，在面对复杂的构造和地质环境时，其预测精度和可靠性受到限制。相较之下，地球动力学建模凭借其模拟复杂构造过程和化学反应的能力，为深入理解构造演化与蛇纹石化生氢之间的耦合关系提供了重要工具。现有研究已经开始通过数值模拟方法研究蛇纹石化相关的 H_2 生成过程。例如，Liu Z等(2023)通过热机械数值模型模拟了地幔剥露过程，估算了北大西洋贫岩浆裂谷边缘在裂谷开放前积累的氢气产量约为 4.3×10^{18} mol($\sim 8.6 \times 10^{12}$ t)。该研究为天然氢的潜在规模提供了初步框架，但其模型主要针对相对简单的被动大陆边缘背景，可能难以适用于构造演化更为复杂、地质结构更具异质性的区域。

陆地上，随着对天然氢的勘探研究不断深入，在国内外多个沉积盆地中相继发现天然氢的存在，其成因具有多源性，主要包括水的辐射分解、水岩反应、深源氢脱气三种(刘全有等，2024b; Liu等，2025)。其中，水的辐射分解成因多见于具备古老结晶基底及高放射性元素背景的盆地中，这些放射性元素可使水分子裂解生成氢气，如四川盆地的天然氢被认为来源于花岗岩基底中水的辐射分解(刘全有等，2024a; Liu等，2025; 王晓梅等，2025)。而水岩反应，尤其是蛇纹石化，是沉积盆地中最主要的生氢途径。该过程依赖于盆地内先存(超)镁铁质岩的广泛分布和适宜的水岩反应温压条件，如松辽、渤海湾、四川、马里的Bourakebougou及巴西São Francisco盆地均可见此成因的天然氢(Prinzhofer等，2018; Donzé等，2020; Han等，2022; 刘全有等，2024a; Liu等，2025; Wei等，2025)。第三种来源为深部氢脱气，这包括地幔或地核中存储的原始氢气，以及与深大断裂相关的地幔蛇纹石化次生氢，如松辽盆地(Han等，2022; 刘全有等，2024a; Liu等，2025)。由此可见，沉积盆地中的生氢过程和水岩反应密切相关，并与大陆边缘地壳减薄背景下的海底蛇纹石化生氢机制高度相似(Jin等，2024)。然而，与陆地上沉积盆地中已开展大量天然氢的勘探工作相比，海底氢能虽处于勘探与开发的起步阶段，但是一片极具潜力的“蓝色动力”，蕴藏着巨大的深海开发前景与研究价值。

南海海盆是西太平洋一个地质构造极为复杂而典型的边缘海，其独特的构造演化历史为天然氢的生成提供了不同于北大西洋被动边缘的特殊条件。古南海在晚白垩世至早渐新世先后经历了复杂多期的裂谷作用和多阶

段海底扩张事件，这些过程导致了强烈的北部陆缘陆壳减薄、洋壳增生、断裂系统发育以及地幔岩不同程度和层次部位的剥露，特别是南海北部陆缘的拉伸减薄带和慢速扩张脊等区域表征更加明显，为多阶段、不同程度的蛇纹石化反应提供了必要的地质环境(Taylor和Hayes, 1983; 李三忠等，2012; Deng等，2020; 丁巍伟，2021)。地球物理证据(如低速地震波和高密度异常)指示，南海海盆存在广泛的幔橄榄岩剥露及蛇纹石化现象，如龙门海山被认为是蛇纹石泥火山，表现出低重力特征和极低的地震波速(1.6–3.2 km/s)，支持蛇纹石化的存在(Wang Y等，2023); 南海北部陆缘夭折裂谷中显示地幔岩蛇纹石化程度可达29%(Liu Y等，2023)。这些独特的复杂构造背景和已有的蛇纹石化迹象表明，南海海盆具备巨大的天然氢生成潜力，然而，由于其深海环境的复杂性、数据获取的挑战以及现有研究主要侧重于油气或天然气水合物勘探，对南海海盆天然氢的具体赋存状态、分布规律和资源量评估的研究几乎处于空白。全球现有相关方法难以充分刻画南海复杂的地质过程及其对生氢的影响，迫切需要研发更精细、更全面的天然氢分布和储量评估手段。

针对上述挑战和研究空白，本文旨在通过地震反射、地球化学等多学科地球数据约束下的综合地球动力学数值模拟手段，深入评判南海海盆复杂构造环境下的天然氢生成潜力。具体而言，本文将构建地壳(包括洋壳和减薄陆壳)厚度和蛇纹石化过程的关系模型，定量预测南海海底蛇纹石化的时空分布和伴生的氢气生成量，并识别潜在的天然氢有利勘探区带，提供一个更贴近实际、具有更高可靠性的区域天然氢储量评估框架。尽管数据稀缺可能带来预测不确定性，但本文旨在通过多学科数据的有效整合，为南海海底乃至其他类似复杂地质背景下海底氢能的勘探与开发提供重要的科学依据和技术支持。

2 南海区域地质概况

南海海盆是西太平洋地区最大的边缘海之一，位于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇处(汪品先，1998)。该海域不仅因蕴藏丰富的油气资源而备受关注，其独特的构造背景也使其成为探讨大规模天然氢赋存与生成的关键区域。天然氢的形成，特别是源于(超)镁铁质岩石蛇纹石化过程产生的天然氢，主要依赖于地幔岩的剥露、水与岩石的接触、适宜温压条件下水岩反应以及促进流体循环的断裂系统。南海海盆复杂的演化历史提供了满足这些关键生氢条件的独特地质环境，多方面证据共同指向其巨大的天然氢潜力。

南海地区的构造变形与演化始于中生代，先后经历

了多期次的挤压与伸展作用。从早白垩世(100 Ma)到晚白垩世(65 Ma), 在古太平洋板块低角度俯冲作用下, 包括现今南海在内的整个华南陆缘都处于类安第斯型陆缘环境(汪品先, 1998; 李三忠等, 2012)。伴随古太平洋-太平洋洋中脊于55 Ma进入俯冲带, 古太平洋板块彻底消减拆沉; 太平洋板块紧随其后俯冲, 其俯冲角度随着太平洋板片年龄越来越老而越来越大。35 Ma后, 太平洋板块发生俯冲后撤, 因此, 区域上从晚白垩世(65 Ma)至早渐新世(32 Ma), 构造形变由陆缘正向伸展裂解转变为强烈的右行右阶走滑拉分, 两者导致前期类安第斯型陆缘逐渐裂解。25 Ma后, 古南海南侧开始南东向俯冲和消亡, 其产生的拖曳作用使得南海海盆由南北向伸展转变为NW-SE向伸展, 洋中脊由东西走向转变为NE走向(李三忠等, 2012; Cui等, 2024)。上述三次根本性构造变革是南海海盆新生代发展的关键, 塑造了陆缘破裂、海底增生和潜在生氢所需的构造格局。早渐新世(32 Ma)至中新世(16 Ma)是南海海盆打开扩张和消亡终结的两个关键时期, 在古南海海盆南东向俯冲与菲律宾海板块北向楔入的共同作用下, 南海海盆经历了显著的裂解与扩张过程, 表现为超伸展陆壳减薄(Deng等, 2020)、频繁的岩浆活动(Zhang等, 2021)和局部的地幔岩剥露(Taylor和Hayes, 1983; 丁巍伟, 2021)。这种由伸展和扩张导致的强烈地壳减薄和地幔上涌, 是为蛇纹石化提供(超)镁铁质岩石基础的前提条件。从中新世(16 Ma)至今, 古南海海盆俯冲殆尽, 南海海盆扩张停止, 并开始沿马尼拉海沟向东俯冲, 此后, 南海海盆陆缘构造环境再未发生显著变化(Taylor和Hayes, 1983)。

南海海盆周边还有其他大陆架盆地, 统称南海盆地群, 在北部包括珠江口盆地、琼东南盆地和台西南盆地等新生代伸展裂陷盆地, 在南部还有与北部对应的礼乐盆地等拉分盆地和压性的南海海槽海沟盆地, 在西侧还有莺歌海等走滑拉分盆地, 在东侧还有压性的马尼拉海沟盆地。其中, 北部盆地群不仅是油气勘探热点, 而且其形成和演化机制与生氢潜力紧密相关; 这些盆地形成于强烈的伸展构造期, 受控于大规模拆离断层系统, 导致地壳极度减薄甚至地幔剥露(任建业等, 2015, 2022), 地壳厚度从约24 km减至6 km, 平均减薄系数达1.3–1.5(任建业等, 2018), 为地幔岩与下渗海水接触提供了有利条件。南海海盆及周边陆架盆地发育的断层系统主要包括深切上地幔的NE向走滑断层、张扭性NW向断层以及控制陆缘减薄的大规模拆离断层(李三忠等, 2022; 杨天一等, 2025)(图1)。这些广泛发育且可沟通深部的断裂系统极为关键, 不仅塑造了南海陆缘几何形态, 更重要的是构成了海水下渗至岩石圈地幔的主要通道, 促进

了水与超镁铁质岩石的反应, 是蛇纹石化和天然氢生成的必要条件; 此外, 地壳中矿物实际也含有相当数量的结构水(Xia等, 2006; Yang等, 2008), 在地壳厚度减薄、适宜温压条件下与上地幔接触, 也将形成蛇纹石化的有利区带。

多种地球物理和地质观测证据进一步证实了南海广泛存在蛇纹石化作用。在南海东北部边缘, 特别是在岩浆活动较少的夭折裂谷区域, 超镁铁质岩石剥露和蛇纹石化迹象尤为显著。台西南盆地南部洼地的地震数据揭示下地壳存在高速体(V_p : 7.0–8.0 km/s), 这与高达29%蛇纹石化地幔岩的相关特征一致(Wang Y等, 2023)。西南次海盆的龙门海山被确认为蛇纹石泥火山, 其极低的密度(2.1 g/cm^3)和地震波速(1.6–3.2 km/s)是典型蛇纹石化物质的地球物理响应(Liu等, 2021)。这些蛇纹石化区域通常地壳极薄(1.6–4 km), 在高水岩比和适宜温度范围内, 都强烈指示了显著的天然氢生成潜力(Klein等, 2020)。

除了局部区域的直接证据, 南海北部下地壳广泛存在的下地壳高速体(high-velocity lower crust, HVLC)也是蛇纹石化的重要地球物理指示。HVLC通常显示高地震波速度(V_p : 7.0–7.8 km/s; V_s : 3.5–3.8 km/s)和高 V_p/V_s 比值(1.85–1.96), 这些特征与部分蛇纹石化的橄榄岩吻合(Nissen等, 1995; 赵明辉等, 2022)。南海北部陆缘的洋陆转换带(ocean-continent transition zone, OCT)以强烈地壳减薄和地幔剥露为特征, 尤其在慢速和超慢速扩张中心, 蛇纹石化作用更为普遍(Wen等, 2021; 索艳慧等, 2024)。最为直接的证据来自近期在南海北侧华夏地块上的三水盆地发现的氢气高异常渗出处(Jin等, 2024)。三水盆地岩石圈相对较薄, 氢气的高异常很可能与沟通地幔的深大断裂有关, 这些断裂为地表水/海水向下运移至上地幔提供通道, 促进了蛇纹石化反应的发生。

3 南海海盆天然氢储量计算流程及模型构建

3.1 南海天然氢储量及分布预测的流程

上述诸多区域地质地球物理迹象表明, 南海海域有着巨大天然氢成藏潜力。为了定量预测南海区域天然氢的储量及其空间分布规律, 本文建立了一套地质、地球物理及地球化学数据耦合约束的地球动力学模拟流程。该方法通过整合地球动力学参数、地球物理和地球化学数据, 构建数值模型, 量化地壳(包括洋壳和减薄陆壳)厚度与蛇纹石化反应的关系, 识别高潜力勘探区带。这一方法为南海海盆天然氢资源评估和开发提供了科学基础, 研究步骤概述如下(图2):

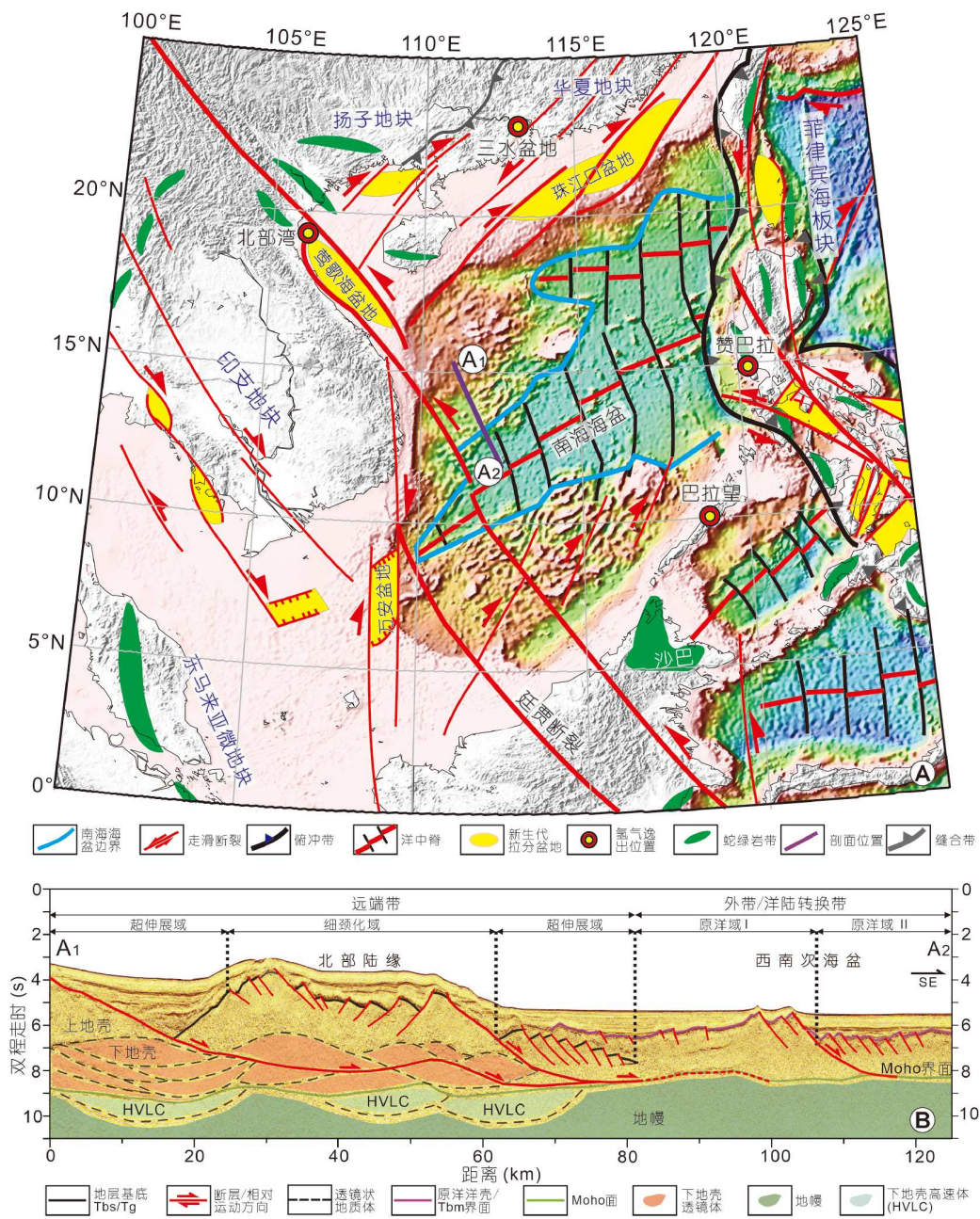


图1 南海海域及其周缘地形与构造纲要图(A; 据李三忠等, 2022修改)及北部陆缘N10测线地震剖面(B; 据杨天一等, 2025修改)

(1)数据整合与构造格架分析

本文对南海海域现有多学科数据进行了全面汇编与综合分析。这包括地质数据(如构造不整合事件、地层特征及沉积沉降史)、各类地球物理数据(如地震反射和折射剖面、重力和磁力异常)以及相关的地球化学数据(如水岩反应、流体样品中报告的氢含量)。这些集成数据为限定天然氢有利生成区带的构造格架、刻画壳幔结构提供了关键约束,并为后续的数值模型构建提供了重要的边界条件、初始条件及关键参数。

(2)俯冲与蛇纹石化过程的地球动力学建模

基于上述整合的数据,采用I2VIS数值模拟框架,构建模拟南海地区俯冲过程的二维有限差分模型。模型设置包括物理参数(黏度、密度、温度、压力)和热力学参数(热传导系数、热膨胀系数、比热容),以精确模拟地壳减薄和地幔剥露的动态过程,为蛇纹石化建模提供依据。

(3)蛇纹石化与氢气产率的定量分析

二维数值模型的地球动力学演化结果提供了地壳厚度、

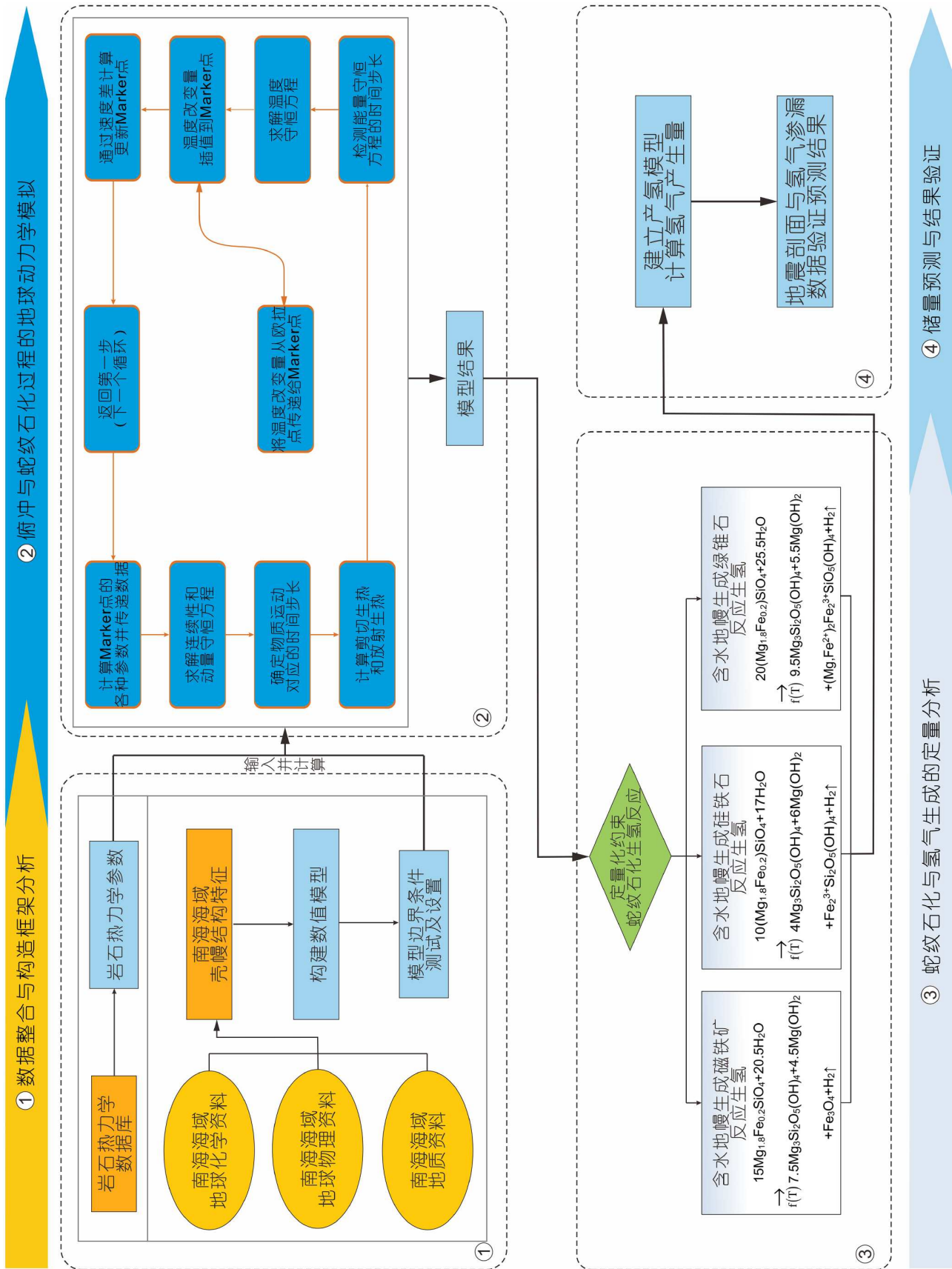


图2 研究方案与计算流程

地幔剥露、温度压力以及流体通道等关键因素的时空分布，这些因素是控制蛇纹石化程度或质量的重要变量。通过对模型网格点进行采样，本文定量确定了地壳厚度与蛇纹石化质量之间的关系。这使得本文能够系统性地、定量地计算南海海域内不同构造域(如减薄陆壳、洋陆转换带、增生洋壳)的蛇纹石化程度及其时空演化。总之，该阶段量化由地球动力学模型得出的不同地壳条件下的蛇纹石化程度和分布。

(4) 储量预测与结果验证

随后，本文通过考虑已知的海底三种产氢蛇纹石化关键反应，对产氢过程进行定量约束。将这些反应的定量约束与地球动力学模型计算得出的蛇纹石化时空分布及程度相结合，本文建立了区域性的氢气生成模型。该模型量化地质时间尺度内蛇纹石化反应释放的氢气总量。最终，利用氢气生成模型的输出结果来预测南海区域潜在天然氢聚集的空间分布并估算区域储量。这些预测结果随后将通过与已发现的天然氢异常(如渗漏点数据)以及现有与蛇纹石化或潜在氢气藏或圈闭相关的地震剖面解释进行对比来加以验证。

3.2 数值模型的构建

本文基于有限差分法(FDM)和交错网格标记(MIC)技术建立数值模型，采用I2VIS数值模拟方法。该方法是一种被广泛认可的地球动力学工具，可以用于研究俯冲-碰撞随时间和温度变化下的动力学演化过程(Gerya和

Yuen, 2003)。本文所有模型计算均采用黏塑性非牛顿流变学，考虑了榴辉岩、橄榄石-尖晶石和尖晶石-钙钛矿相变以及绝热、剪切热、潜热和放射性加热的影响。模型长宽分别是4000、1000 km，通过非均匀2041×381矩形网格进行构建。模型在横向上分为大陆域和大洋域，大陆域地壳部分为2层，陆壳厚20 km，由两层组成，上、下陆壳厚度各为10 km，均为长英质，具有湿石英岩的流变性。大洋域洋壳厚度设定为10 km，由一层热液蚀变玄武岩和辉绿岩(4 km厚)组成，其下层是一层6 km厚的辉长岩，其流变性分别为湿石英岩和斜长石；地幔则主要为橄榄岩，通过规定地幔初始薄弱带(倾角30°)启动俯冲，该薄弱带具有湿橄榄石的流变性和低脆性/塑性强度。

在模型右侧的远场区域，定义了恒定的板块速度 5 cm yr^{-1} ，而在左侧设置了 1 cm yr^{-1} 的速度。大洋岩石圈的初始热结构由半空间冷却模型定义，板块厚度为95 km。在所有实验中，大洋岩石圈的半空间冷却年龄均取为40 Myr。除上边界和下边界保持开放外，所有力学边界条件均为自由滑移。岩石圈顶面视为内部自由表面，上覆22 km厚的低黏度层(10^{18} Pa s)，空气密度为 1 kg m^{-3} ($<18 \text{ km}$)，海水密度为 1000 kg m^{-3} (图3)。

模型遵循三大平衡关系方程并对三组数值模拟方程进行求解，并考虑俯冲水合作用对蛇纹石化的影响。

(1) 物质守恒方程，遵循不可压缩的连续性方程：

$$\text{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中， $\mathbf{v}$ 表示模型中某微元体的运动速度。

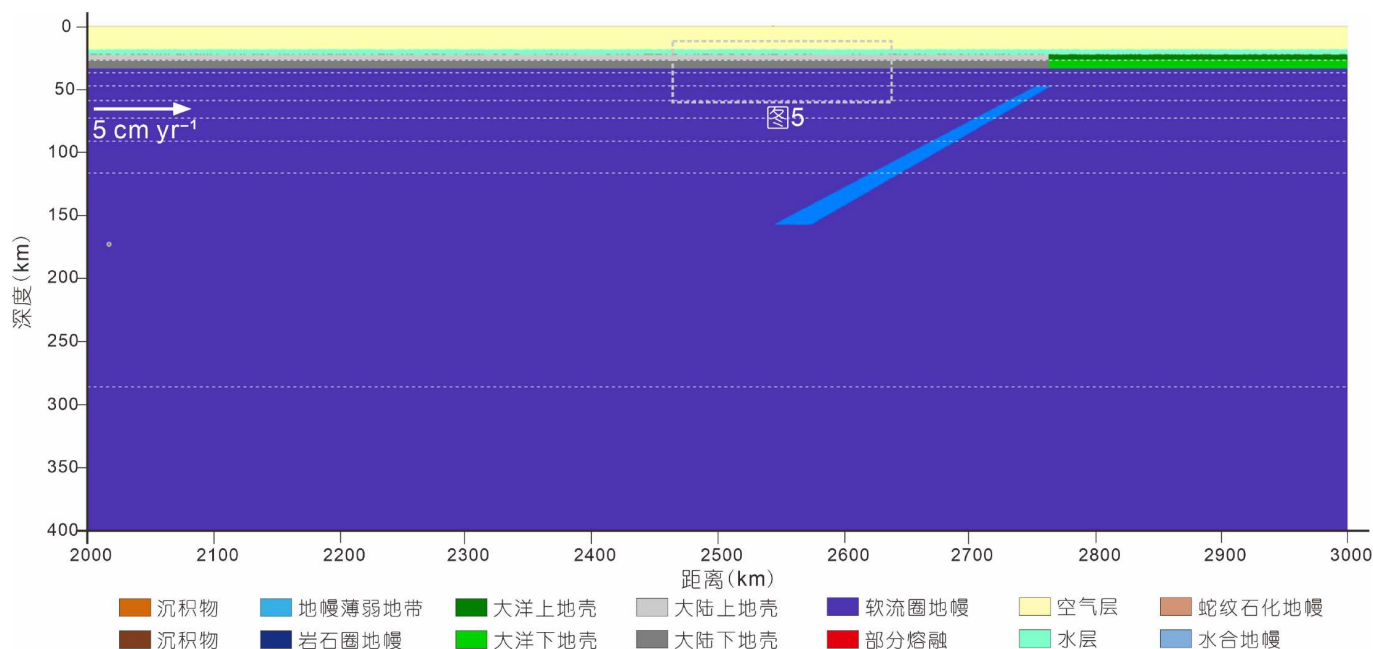


图3 初始模型设置

(2)动量守恒方程, 遵守Navier-Stokes方程:

$$\text{div}(\sigma') = \text{grad}(P) - \rho g \quad (2)$$

式中, σ' 表示偏应力张量, P 表示模型中某一点压力, ρ 表示模型中某一点密度, g 表示重力加速度。

(3)遵守热守恒方程:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\text{div}(-k \cdot \text{grad}(T)) + H \quad (3)$$

式中, C_p 表示在一个恒定压力下热容量, T 表示质点温度, k 表示在计算过程中与岩石组成、温度、压力相关的热传导系数, H 表示热产生率, 包括放射热、剪切热、绝热和潜热, DT/Dt 表示拉格朗日点处温度随时间的变化率。

在模型的运行过程中, 通过设定蛇纹石化的塑性应变率和塑性应变标准, 本文假设只有活动断层才能作为流体循环的有效通道。塑性应变由非关联塑性流动定律给出, 该定律允许根据Drucker-Prager屈服方程检查屈服面, 并允许在剪切带或“断层”中局部化变形。蛇纹石化临界应变率 $\varepsilon_p^{\text{cri}}$ 设定为 $1 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$, 而蛇纹石化应变临界标准值 $\varepsilon_p^{\text{cri}}$ 则设置为0.1–0.5之间(Liu Z等, 2023)。

在模拟过程中, 模型遵循蛇纹石化反应热力学公式, 该式是据Schmidt和Poli(1998)提出地幔岩相图中蛇纹石生成量与地壳深度的线性关系, 该公式以质点所处温压条件来求解蛇纹石生成量, 为蛇纹石化生氢反应提供了简化数学模型。

(4)遵守蛇纹石化热力学公式(Schmidt和Poli, 1998):

$$k_1 = 751.490422 + 6.00773668 \times 10^{-3} \times (y - sy1) - 0.034690759 \times 10^{-6} \times (y - sy1)^2 \quad (4)$$

式中, k_1 表示模型中某一点反应过程中蛇纹石的生成量, y 表示模型中某一点蛇纹石化反应发生的深度, $sy1$ 表示模型中某点海平面的高度, 则式中的 $y - sy1$ 则表示该点所处的地壳深度(图4)。

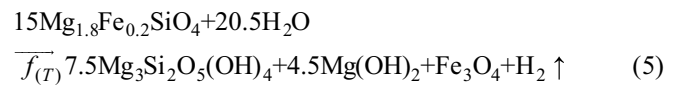
以往的研究表明(Schmidt和Poli, 1998), 只有当上地幔橄榄岩含水量达到2.0 wt%时, 才会触发蛇纹石化反应。蛇纹石化反应开始以后, 橄榄岩还会持续吸水, 不断提高蛇纹石化程度, 直到含水量达到约13.5 wt%, 即完全蛇纹石化。基于此, 本文将2 wt%的含水量设定为橄榄岩蛇纹石化反应启动的临界条件。水化地幔细分为两部分: (i)上部较冷的蛇纹石化区, 和(ii)下部较热、水合但未蛇纹石化区。通过自由能最小化, 从热力学数据中获得了稳定的矿物成分和水含量, 作为压力和温度的函数。然而需要指出的是, 为简化模型, 我们仅设定了

蛇纹石化反应开始的临界条件, 并未进一步考虑蛇纹石化程度变化对模型结果的影响。这一局限性将在未来研究中通过多参数耦合的数值模拟进行深入探讨。

3.3 蛇纹石化过程及生氢量的定量约束

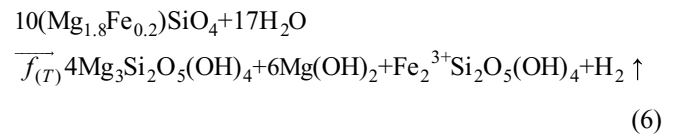
蛇纹石化水岩反应是地质体天然氢气藏形成的主要来源(Klein等, 2020), 因此对其反应过程中氢气生成量的量化研究是量化南海海域天然氢气储量与分布、揭示南海海域海底氢能潜力的关键。在反应过程中, 当含水地幔与超基性岩(橄榄石)发生蛇纹石化反应时, 最终将其中的Fe导向两个端元: (1)Fe以磁铁矿形式赋存; (2)Fe以硅铁石或绿锥石态赋存(Huang等, 2023; Liu Z等, 2023)。在此, 本文对蛇纹石化反应的生氢过程进行量化研究, 以推算每千克地幔岩的平均生氢量。

若超基性岩中Fe最终均以磁铁矿形式赋存, 则发生如下反应:

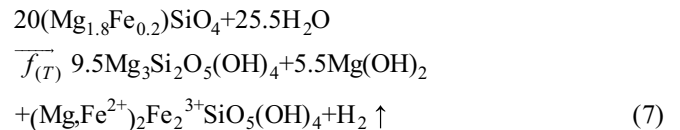


若超基性岩中的Fe最终均进入富铁蛇纹石端元, 将以硅铁石态或绿锥石态赋存。

(i)Fe以硅铁石态赋存, 发生如下反应:



(ii)Fe以绿锥石态赋存, 发生如下反应:



式中, $f_{(T)}$ 表示该反应的发生程度(即地幔岩的蛇纹石化量), 是关于温度的函数。在蛇纹石化反应过程中, 水分子与原岩中的矿物反应, 其中橄榄石中的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , 而使 H_2O 被还原为 H_2 。由反应关系式可知, Fe在蛇纹石化过程中存在三种反应路径: 若Fe最终进入磁铁矿, 则根据反应式摩尔数关系此过程每消耗15 mol橄榄石可生成1 mol H_2 ; 若Fe最终进入富铁蛇纹石端元, Fe以硅铁石态或绿锥石态赋存, 则此过程生成1 mol H_2 需分别消耗10和20 mol橄榄石, 这为量化研究橄榄石蛇纹石化过程生氢量提供了理论范围。在模拟过程中, 参照以往的研究(Huang等, 2023; Liu Z等, 2023), 简化了模型的计算过程, 将反应过程中的橄榄石消耗量取平均值, 即每生成1 mol H_2 消耗15 mol橄榄石。

基于以上反应过程中橄榄石消耗量与最终生氢量的

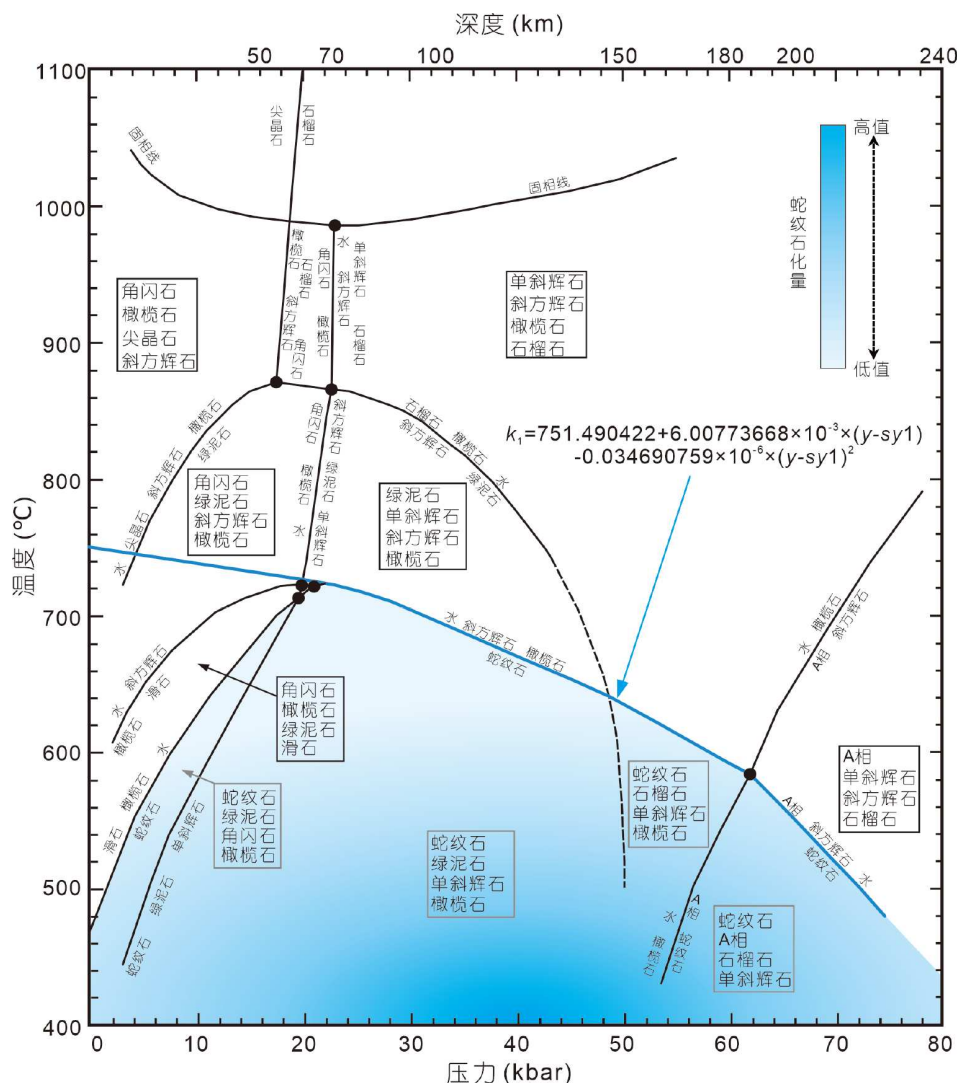


图4 水饱和和平均地幔橄榄岩的蛇纹石化相图(据Schmidt和Poli, 1998修改)

对应关系,可知每千克橄榄石(约6.81 mol)的生氢量约为454 mmol。前人研究表明, Fe^{3+} 约占蛇纹石中Fe含量的一半,在此基础上,每千克地幔岩石发生水岩反应的平均生氢量应为227 mmol(Klein等, 2009; Andreani等, 2013; Liu Z等, 2023)。这一估计值与热力学模拟实验所得的结果(150–300 mmol/kg; Albers等, 2021)也较为一致。为了更合理地代表真实地质环境的复杂性,在本文的数值模拟中,同时采用了以下两种方案:(1)以Liu Z等(2023)提出的平均生氢量(227 mmol/kg)进行基准模拟;(2)以Albers等(2021)提供的地幔橄榄岩生氢量上下限值(150与300 mmol/kg)分别进行模拟,以此作为约束天然氢气储量预测的上下边界,实际条件下地幔橄榄岩的生氢量也很可能位于上述范围内。这种多方案的设置有助于更全面地评估不同条件下海底天然氢气储量的可能变化范围。

4 南海海盆扩张过程模拟与蛇纹石化质量计算

4.1 南海海盆扩张及蛇纹石化过程模拟

图5展示了在前文设定边界条件下,俯冲作用驱动的岩石圈构造演化关键阶段的模型结果,特别聚焦于横向距离2450–2650 km、深度20–60 km的区域(模型整体范围见图3)。蛇纹石化层(表现为橙色区域)在天然氢生成中起着重要作用。

在模拟时间5.15 Myr时(图5A),洋壳板片开始向大陆板块俯冲,陆缘地壳相对稳定,2600–2650 km区域因俯冲作用逐渐隆起。此时,物质场未显示明显的蛇纹石化层,表明蛇纹石化反应尚未发生。俯冲持续至5.81 Myr时(图5B),蛇纹石化作用开始在岩石圈地幔上部(约35 km深度)出现,形成初期的蛇纹石化层。这表明俯冲板片带下的岩石圈地幔开始与可能来自脱水反应或上涌

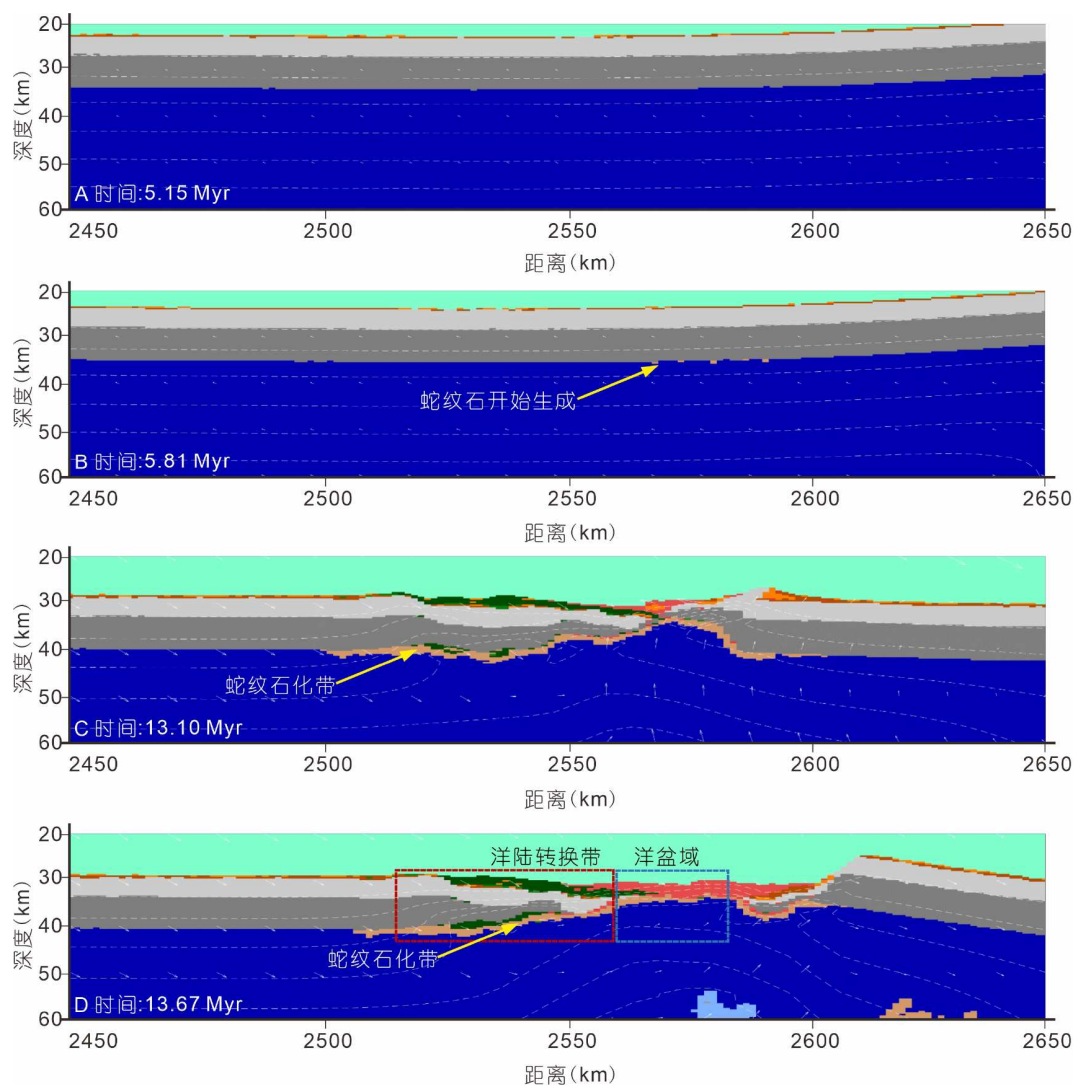


图5 数值模拟演化结果。图中浅灰层是上陆壳，深灰层是下陆壳，深蓝层是陆幔，橙色是蛇纹石化橄榄岩，深绿层是熔体，红色层是增生洋壳

的流体发生水热反应。随着俯冲进一步发展(图5C; 13.10 Myr), 陆缘陆壳和大陆岩石圈地幔都在区域性伸展作用下发生显著的正断层作用而减薄。这些新生伸展断裂为地表水体或更深部流体的垂向运移提供了高效通道, 海水沿断裂进入到抬升的大陆岩石圈地幔中, 导致蛇纹石化空间范围迅速扩大, 形成规模更大的蛇纹石化层。在此阶段, 区域速度场也指示流变模式转变, 陆壳开始强烈减薄, 呈楔形向海方向延伸, 并伴随洋中脊的开始增生和地幔物质的上涌。至13.67 Myr时(图5D), 模型展现了大陆岩石圈破裂向海底扩张增生的关键过渡阶段, 岩石圈上地幔持续抬升并在伸展应力下缩颈化变薄直至最终断离。物质场结构显示, 在距离2520–2560 km范围内, 陆壳已大幅减薄, 其下方发育着广泛的蛇纹石化上地幔。这一蛇纹石化大陆岩石圈地幔与减薄的陆壳, 一起构成了典型OCT的结构构造特征。在紧邻的向海侧(模

型距离2560–2580 km), 上涌的地幔物质发生部分熔融, 伴随地幔剥露和海底扩张的启动, 这标志着新洋壳的出现和海底扩张中心的建立。这个模型模拟结果揭示了在俯冲末期和大陆裂解早期, 蛇纹石化作用在大陆岩石圈地幔中的启动、发展和扩展过程。蛇纹石化地幔的形成与伸展断裂导致的流体深部循环以及岩石圈地幔的抬升密切相关。

4.2 蛇纹石化质量与地壳厚度关系

为了定量评估蛇纹石化作用与地壳结构之间的关系, 本文提取了数值模型在13.67 Myr这一时刻各点的地壳(含减薄陆壳或洋壳)厚度和对应的蛇纹石化质量数据(图6)。基于这些数据, 本文分析了蛇纹石化质量随地壳厚度的变化规律(图7)。根据地壳厚度和预期构造域的差异, 本文将分析区域划分为薄洋壳伸展/洋盆地(地壳厚度

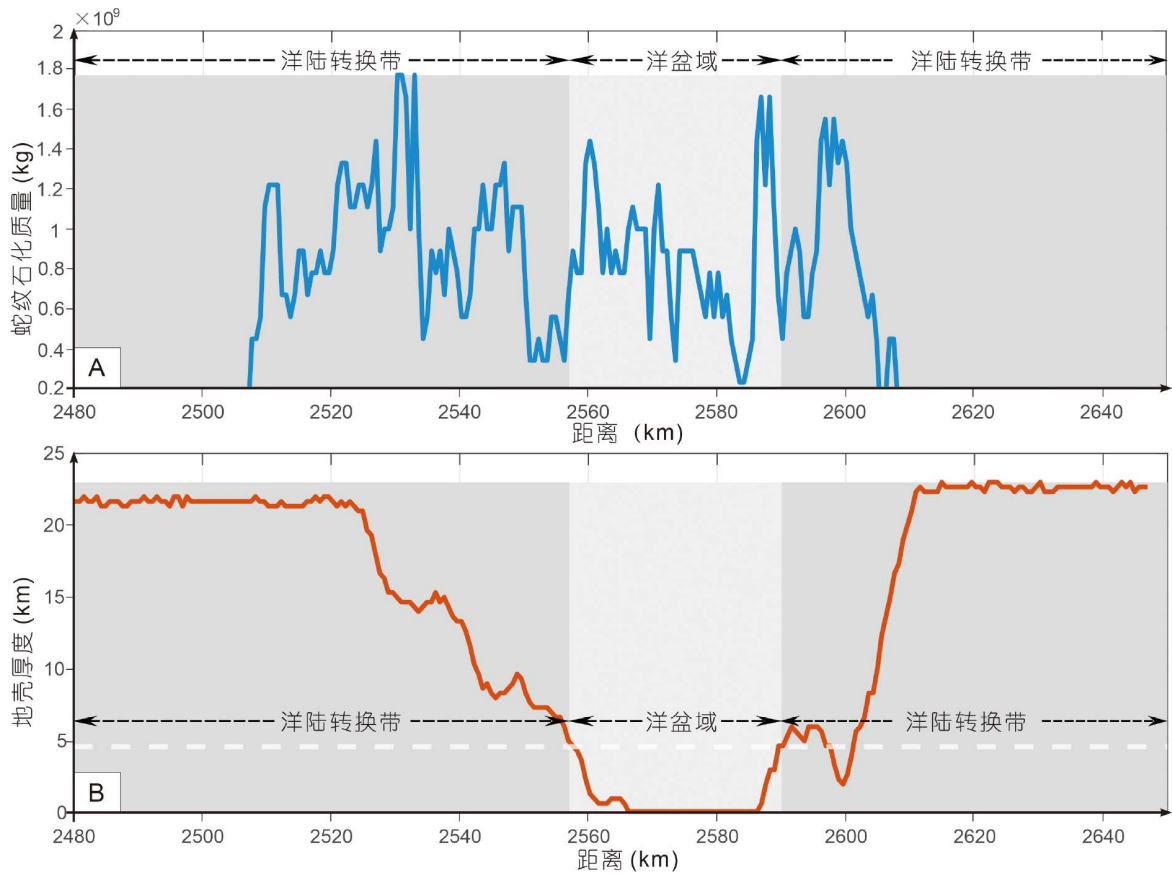


图6 模型年龄13.67 Myr时蛇纹石化质量(A)及地壳厚度(B)剖面关系

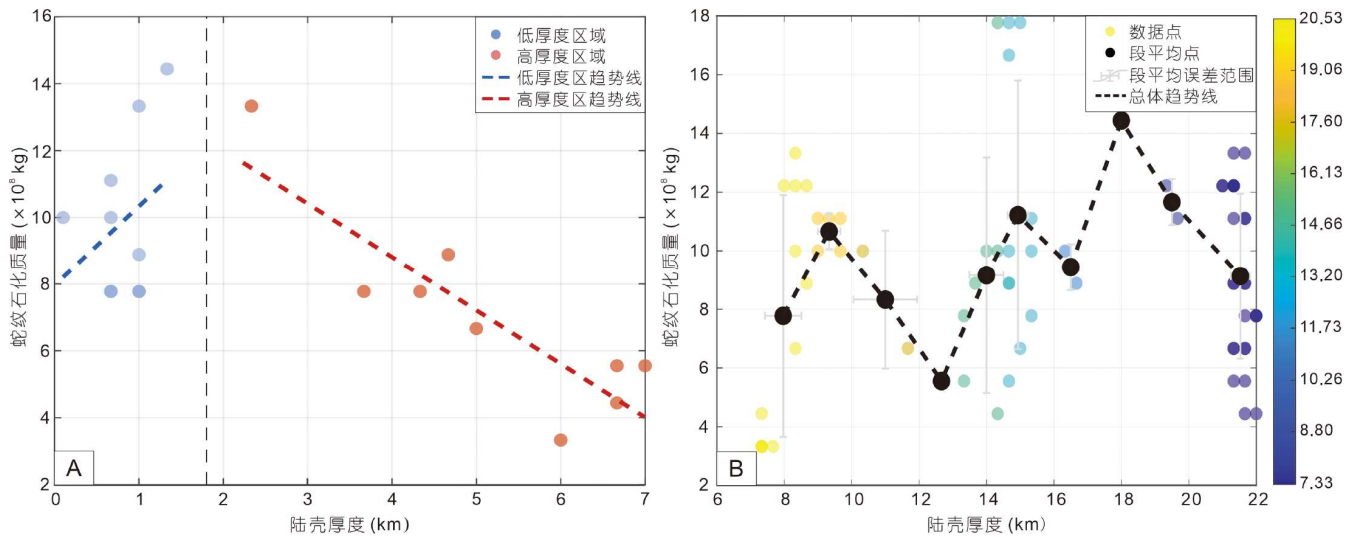


图7 蛇纹石化质量与地壳厚度的关系。(A) 洋盆地；(B) 洋陆转换带

<7 km)和大陆-洋陆转换带(地壳厚度>7 km)。
在薄地壳伸展/洋盆地(图7A)，蛇纹石化质量与地壳厚度之间呈现分段线性关系。当地壳厚度小于约1.5 km时，蛇纹石化质量随地壳厚度增加而线性增加，拟合关

系约为 $M_{\text{serp}} = 2.37 \times 10^8 \times D_{\text{Crustal Thickness}} + 7.97 \times 10^8$ ，其中 $D_{\text{Crustal Thickness}}$ 为地壳厚度(km)， $R^2=0.11$ 。这种不显著的相关性是由于该区域对应着南海海域中的强烈扩张带，即南海海盆中的新生洋壳与扩张中心，此处受到构造断

裂和岩浆活动的剧烈影响,蛇纹石化过程更为复杂,从而削弱了蛇纹石化质量与地壳厚度之间的相关性。对此,本文为简化模型的计算过程,采用线性相关的拟合关系来表示这个地带的趋势。在地壳厚度介于约1.5–7 km之间时,蛇纹石化质量随地壳厚度增加呈线性递减趋势,拟合关系约为 $M_{\text{serp}} = -1.03 \times 10^8 \times D_{\text{Crustal Thickness}} + 8.94 \times 10^8$, $R^2=0.76$, 具有较高的相关性。这种变化可能反映了在地壳较薄的洋盆域,1.5 km可能是蛇纹石化反应的一个关键阈值。地壳厚度小于1.5 km时,水岩反应条件(如温度和水岩比例)可能逐渐优化,导致蛇纹石化质量增加;而当厚度超过1.5 km后,地壳增厚可能限制流体渗透或反应效率,从而使蛇纹石化质量减少。图6中洋盆域(2560–2590 km)的蛇纹石化质量峰值(约 1.8×10^9 kg)也支持这一复杂变化趋势。

在大陆域-洋陆转换带(图7B),蛇纹石化质量与地壳厚度之间的关系呈现非线性特征。蛇纹石化质量随地壳厚度的增加先升高,并在地壳厚度约18 km处达到最大值,约为 1.45×10^9 kg。当地壳厚度进一步增加时,蛇纹石化质量则随之降低。虽然无法给出精确的数学表达式,但趋势线清晰地勾勒出这种存在最优地壳厚度的非线性关系。18 km的地壳厚度可能对应于最适宜蛇纹石化的地质条件。图7中洋陆转换带区域的蛇纹石化分布也显示出较厚的地壳(10–15 km)与高蛇纹石化质量的对应关系。当地壳厚度超过18 km后,过厚的地壳可能限制流体通道或反应效率,导致蛇纹石化质量下降。

5 南海海盆天然氢计算检验与资源潜力

5.1 数值模拟结果与实际地质证据的对比

利用二维地球动力学数值模型,本文模拟了特定边界条件下俯冲消减时陆缘裂解和洋盆开启过程,重点关注边缘海大陆岩石圈地幔蛇纹石化作用的发生、演化及其与构造变形的耦合关系。为了验证模型的有效性,将模拟结果与南海北部被动陆缘的地质和地球物理观测证据进行对比,并在本文模型中提取不同温度结构下的蛇纹石化质量与前人研究成果结合进行分析。

模型结果表明,在南海海盆北缘的OCT及洋中脊处可能分布有数量可观的蛇纹石化地幔(图5D),这与上地幔橄榄岩在此区域发生水岩反应相对应。洋陆转换带因其特殊的地壳结构和深部流体循环条件,往往被认为是发生大规模蛇纹石化反应的有利区带,并具有巨大的天然氢气生成潜力(Manatschal和Müntener, 2009; 汪小妹等, 2010; 索艳慧等, 2024)。因此,结合实际地质资料

证明模拟结果中预测的蛇纹石化地幔的存在,对于验证模型的可靠性至关重要。

南海北部被动陆缘是研究大陆裂谷和OCT的天然实验室。大量油气地球物理勘探(特别是地震反射和折射剖面)和钻探资料揭示,南海北部陆缘具有由陆向海岩石圈显著减薄的总体特征,发育大规模的伸展拆离系统,包括控制裂谷盆地形成的同沉积正断层体系和切穿整个地壳甚至岩石圈地幔的大型拆离断层(Lister等, 1986; Franke等, 2014; 任建业等, 2018)。尤其在南海北部深水区,广泛识别出超伸展(hyper-extended)构造,陆壳厚度减薄至数千米甚至缺失,其下方为经过强烈构造变形甚至剥露到海底的大陆岩石圈地幔(Savva等, 2013; Franke等, 2014)。与强岩浆型裂谷陆缘不同,南海北部OCT区域岩浆活动较弱,地球物理证据(如高速异常、磁性特征)指示剥露的地幔可能发生了广泛的蛇纹石化作用(Savva等, 2013; Brune等, 2017)。例如, Savva等(2013)在南海海域西部的一条地震剖面上,识别出高度减薄的大陆地壳与下伏地幔之间的界面,并结合地震观测特征,将其解释为部分蛇纹石化的地幔。他们认为该地幔隆起的最上部是一层蛇纹石层,对应于蛇纹石化前锋,并推测其成因可能与该区域拆离断层内的流体循环密切相关。Yu等(2017)结合跨南海海盆的OBS973-1和OBS973-3地震剖面的速度模型,揭示了南海海盆北缘OCT区域下方地壳减薄至约4.5 km,指示了大陆边缘的极度拉伸。同时,他们在OCT区域及南海扩张脊中心附近观测到薄的、具有相对较高纵波速度的层位,并将其解释为蛇纹石化的上地幔(图8D)。赵明辉等(2022)在南海北部陆缘OBS2018-H2剖面也识别到下地壳高速层的存在。Pichot等(2014)对穿过南海西南次海盆的剖面研究也表明,在地壳底部存在与上地幔蛇纹石化反应有关的具有相对较高速度的物质带。

对比本文二维数值模拟结果(图8A,范围见图5D)与南海北部陆缘(图8B和8D)的地震剖面结构,可以发现模型成功再现了这些非火山型陆缘的关键构造要素。模拟结果显示,随着伸展作用进行,陆壳经历显著减薄并被一系列海倾伸展断层切割。在模型裂解晚期(图8A),地壳减薄至极致,其下方裸露的大陆岩石圈地幔发生了大规模蛇纹石化(橙色区域),形成了类似南海北部陆缘所揭示的超伸展和蛇纹石化地幔剥露构造。模型中蛇纹石化地幔楔的几何形态、与上方薄地壳或新生洋壳的接触关系,与实际地震剖面中推断的蛇纹石化地幔的结构特征具有较好的一致性(图8B和8D)。

图8C中所示为模型所示物质场模型(图8A)的纵波速度模型结果。模型结果显示,高速异常带位置与物质场

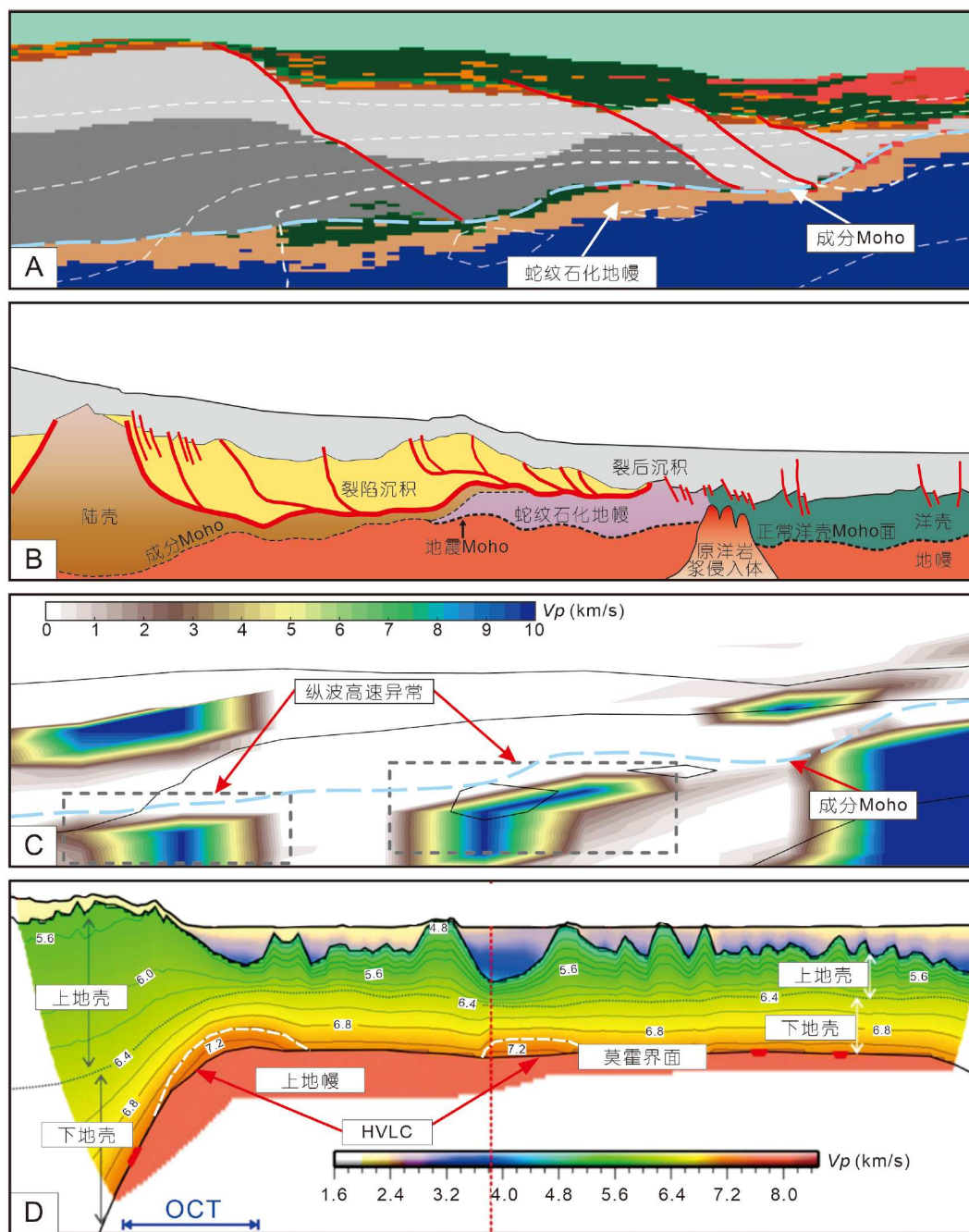


图8 模拟结果物质场(A)与南海北部陆缘地震剖面(B; 据任建业等, 2018修改)和纵波速度模拟结果(C)与剖面纵波速度模型(D; 据Yu等, 2017修改)的结构对比

模拟结果、南海北部陆缘剖面(图8B)的蛇纹石化地幔带表现出良好的一致性, 在纵向上表现为沿成分莫霍面下方呈不连续带状分布。而在南海北部陆缘另一条剖面的纵波速度模型(图8D)中, 洋陆转换带的HVLC同样也位于莫霍面下方, 呈不连续的带状分布, 两者在空间分布上相吻合。值得注意的是, 在扩张中心区域同样也表现出大范围的高速异常区, 但这是扩张中心异常的热演化

导致, 而非蛇纹石化过程。

本文认为区域性大规模蛇纹石化地幔的出现很可能是由深部断裂引导流体进入地幔以及地壳水在减薄条件下驱动蛇纹石化的物理过程, 与目前普遍认为在慢速/超慢速扩张脊和非火山型陆缘下地幔蛇纹石化的主要机制相符。在大陆伸展和裂解过程中, 陆壳减薄导致下方陆幔抬升, 与陆壳含水矿物接触, 压力降低; 同时, 大型

拆离断层或高角度正断层为海水或深部脱水流体向热的陆幔岩石渗透提供了主要通道。这些条件促进了陆幔橄榄岩的蛇纹石化,生成蛇纹石、磁铁矿和副产物氢气。

尽管二维模型在刻画复杂三维结构方面存在局限,且不同的模型参数设置会影响裂谷的细节,但本文模型所模拟出的由陆壳减薄、大型断层发育、大陆岩石圈地幔抬升伴随蛇纹石化地幔形成直至剥露的主要构造历程,与南海北部陆缘的实际地质和地球物理观测结果高度吻合。这表明本模型能够合理地反映南海北部陆缘主要的裂谷样式和蛇纹石化过程,为进一步探讨蛇纹石化对岩石圈流变性、应力场以及氢气生成潜力的影响奠定了基础。

此外,温度是控制蛇纹石化过程中氢气生成的关键因素。已有研究表明(黄瑞芳等, 2016; Song等, 2021),蛇纹石化过程的产氢速率在约300 °C时达到峰值,此时水岩反应最为剧烈、氢气产率最高;而当温度低于200 °C或高于350 °C时,产氢速率则显著下降。这表明蛇纹石化反应及其产氢速率与温度密切相关。同时, Klein等(2019)的研究也指出, 300–400 °C是最适合氢气生成的温度区间。

为进一步探究本文模型中蛇纹石化反应过程对温度的敏感性,这里提取了不同温度条件下的蛇纹石化质量分布(图9)。结果显示,随着模拟温度升高,蛇纹石化质量呈现明显的正态分布趋势:在低于300 °C的条件下,蛇纹石化程度较低;当温度达到300 °C左右时,蛇纹石化质量显著增加,伴随的氢气生成量也随之快速上升;在362.5 °C左右达到蛇纹石化质量的峰值,随后随着温度继续升高,蛇纹石化质量逐渐降低,特别是在420 °C以上时迅速衰减。这一模拟结果与Klein等(2019)提出的地幔冷却蛇纹石化过程高度一致,一方面验证了本研究数值模拟结果的可靠性,另一方面也再次强调了温度在蛇纹石化产氢过程中所起的核心控制作用。

5.2 南海海域天然氢时空分布与资源潜力初步评估

本文核心贡献在于首次对广阔的南海海域进行了天然氢生成潜力的系统性定量预测与评价。区别于以往对特定区域或单一地质过程的定性描述或局部模拟,本文首次创新建立了基于地球物理观测(地壳厚度)约束的蛇纹石化范围定量模型(见4.2节,图7),并将其应用于整个南海海域的地壳结构格架(图10B),从而实现了天然氢地质资源潜力的空间可视化(图10C)和总量估算,并在图10A和10D展示了多路径生氢过程(地幔岩生氢量为150、227、300 mmol/kg时)的模拟结果。其中地幔岩生氢量为150、300 mmol/kg的模拟结果分别代表着上地幔橄榄岩

生氢量上、下限的模拟结果(Albers等, 2021),这约束了预测的南海海底天然氢气储量范围。模拟得到的生氢量曲线刻画了南海海域生氢潜力在经纬度上的变化,两组曲线均表现出“两端高、中间低”的特征,这可能意味着南海海盆周缘的生氢潜力要显著高于中央海盆区。

模拟结果预测南海天然氢的理论总生氢量(地质资源量)高达 4.6×10^{14} t。这一惊人的数量级(万亿吨级别)初步揭示了南海海盆可能是一个具有全球性意义的天然氢资源富集区,若能证实其中一部分得到了有效聚集、成藏和保存,则可能对未来能源结构产生深远影响。然而,本文必须强调,这一估算值反映的是基于当前模型理解的地质历史时期内由蛇纹石化作用产生的氢气总量上限,而非当前技术与经济条件下可发现或开采的储量。从潜力到可采储量的转化,受到氢气运移路径、圈闭有效性、保存或封盖条件以及可能的后期消耗(如海量海底微生物的代谢消耗)等多种复杂地质因素的制约,有待后续勘探工作的深入验证。

尽管如此,本文首次给出的全域性、定量化的预测结果,为认识南海海盆天然氢资源潜力奠定了重要的基础。图10C所展示的天然氢生成潜力空间分布图谱,清晰地揭示了南海海盆内部显著的氢气成藏潜力差异性,这种非均质分布格局与区域地壳结构类型和构造演化历史紧密耦合。预测结果显示,南海中央海盆的广大海底,由于发育了相对年轻且较薄的洋壳(图10B; <7 km),其下伏大洋岩石圈地幔经历蛇纹石化的总体积相对有限,预测的单位面积天然氢生成潜力普遍较低(图10C; 4.6×10^{11} t/单位面积,对应两组生氢曲线的中心低值区),这与快速扩张脊形成的洋壳水化程度相对较低的普遍认识基本一致。然而,在洋壳厚度极薄的区域(如扩张中心附近, ~2 km),模型预测存在局部潜力高值,这与图7A中极薄地壳条件下蛇纹石化量随厚度增加而急剧上升的趋势相符,暗示了洋脊增生系统作为天然氢活跃生成带的潜力,这与很多现今洋中脊热液喷口观测到天然氢气泄漏非常一致。与深海盆形成鲜明对比的是,南海周缘的陆缘区域,特别是经历强烈伸展减薄的洋陆转换带(图10D所示生氢量高值区, 5–7°N与15–25°N,分别对应南海南部与北部陆缘),被预测为天然氢生成潜力最为富集的区域(图10C; $>6 \times 10^{11}$ t/单位面积,部分区域 $>7 \times 10^{11}$ t/单位面积)。这些区域的地壳厚度(约10–25 km)恰好落入了本研究模型(图7B)预测的蛇纹石化潜力峰值区间(峰值约在18 km)。

本文认为, OCT区域通常伴随着地幔的显著抬升、基底岩石的断裂破碎、地壳的强烈减薄以及深大断裂系统的发育,这些构造特征极大地促进了深部流体(如海

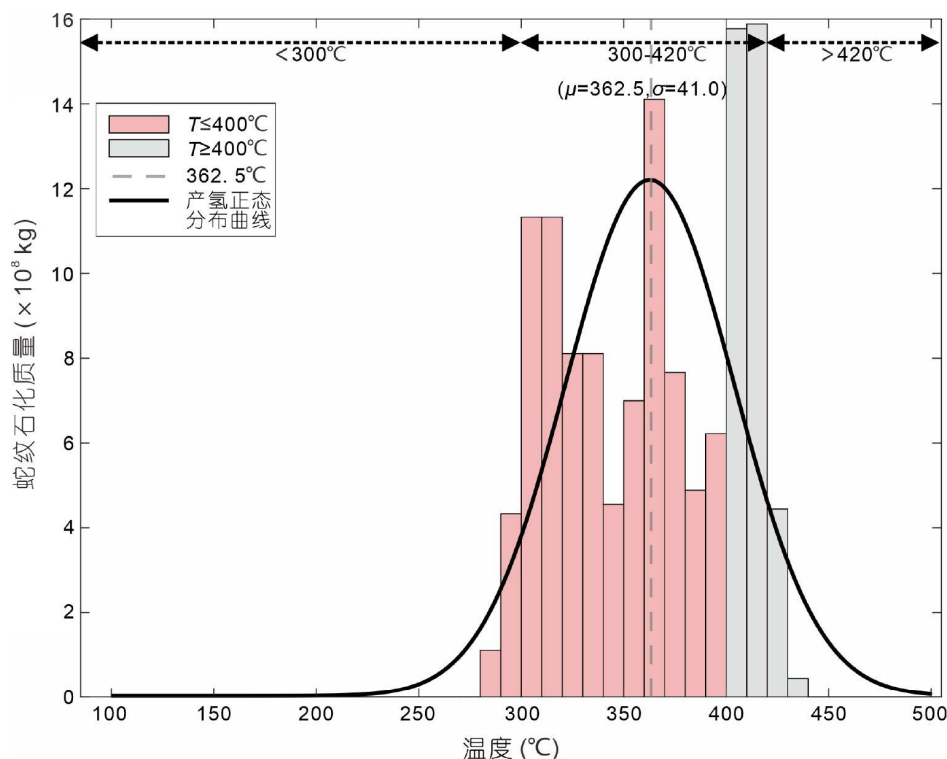


图9 不同温度下的蛇纹石化质量分布图

水)的渗透循环,为地幔橄榄岩等超镁铁质岩发生大规模、长时间的蛇纹石化反应创造了极为有利的物理化学条件。因此,模型预测的高潜力区与有利于蛇纹石化发生的构造背景高度吻合。例如,在中建南盆地东侧、南沙海域广泛分布的OCT区域以及南海北部陆缘的水合物分布区段,均显示出极高的生氢潜力。特别是,水合物分布区的氢气开采,可以采用“多气合采”进行。

此外,受马尼拉俯冲带脱水流体影响的南海东部次海盆边缘,也被识别为潜力较高的区域,这进一步印证了活动构造带的流体对促进蛇纹石化的重要作用(Deschamps等, 2013)。剖面上,本文预测结果也与前人通过地震波速度等地球物理方法推断的南海海盆蛇纹石化地幔分布范围(见5.1节;图8D)在空间上具有良好的一致性,增强了模型预测的可靠性。综上所述,西沙海槽、琼东南、中建南、南沙海槽、万安及北康等大型沉积盆地,因其普遍叠置于具有高生氢潜力的基底之上,且具备良好的盖层和圈闭条件,构成了未来南海海底氢能勘探最具前景的目标区带。

5.3 预测结果的验证、局限性与展望

鉴于目前南海海域尚未开展针对天然氢资源的系统性直接勘探或钻探,本文预测结果的准确性尚无法通过直接手段进行验证。然而,位于南海东缘的菲律宾赞巴

拉(Zambales)蛇绿岩杂岩体,作为全球已知的天然氢富集区之一,其地质实例为本文提供了重要的区域类比验证。赞巴拉地区发育大规模蛇纹石化超基性岩体,并已在气体渗漏点检测到高浓度的(41.4%–58.5%)天然氢(Abrajano等, 1988, 1990; Vacquand, 2011),其氢气成因被普遍归因于蛇纹石化作用。尽管赞巴拉蛇绿岩的构造背景(与俯冲相关的蛇绿岩就位)与南海海盆的主要形成机制(大陆裂解和海底扩张)存在差异,但两者在天然氢生成的关键地质要素——即富含橄榄石的地幔岩、充足的水供应以及提供流体通道的构造活动(断裂系统)——具有显著的相似性。此外,位于菲律宾西南部的巴拉望蛇绿岩带也检测到有低含量氢气的逸出(Mitchell, 1986; Yumul等, 2009)。因此,赞巴拉及巴拉望的天然氢发现,从成因机制和有利地质环境的角度,为本文预测的南海OCT和洋中脊等区域同样具备优越生氢条件的推论提供了强有力的间接支持。

在前人优选的天然氢有利成藏区带中,南海海域内及周缘发育的一系列中生代盆地,如三水盆地、莺歌海盆地,虽尚未探明大规模的天然氢气藏,但具备良好的盖层条件,有利于大储量氢气成藏(孟庆强等, 2021)。在三水盆地, H_2 浓度高异常出现在多条断裂带,最大值为6948 ppm,其 δ^2H 值($<-650\text{‰}$)指向其很有可能来自深部的蛇纹石化反应,结合三水盆地相对较薄的地壳厚度

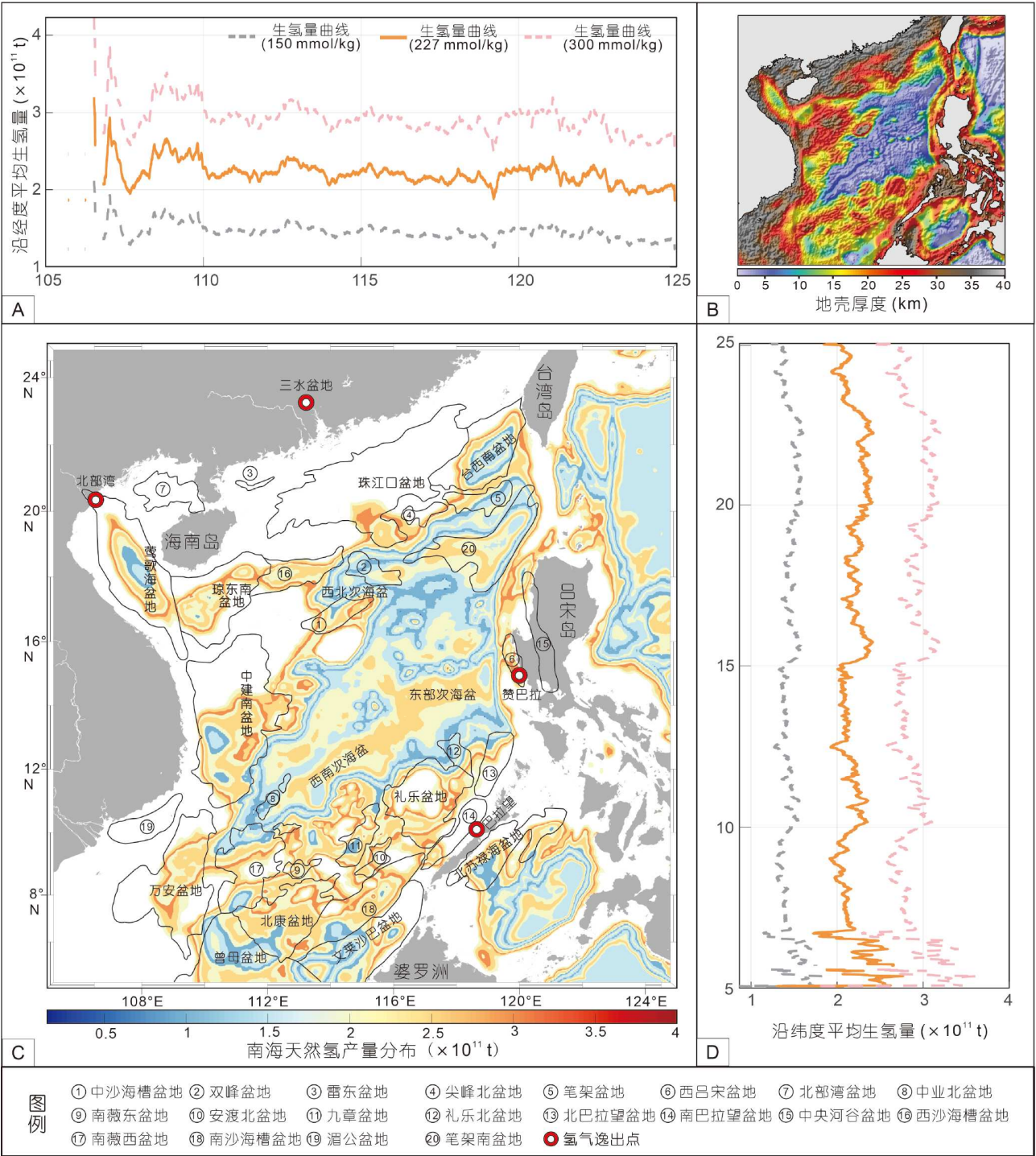


图 10 多路径生氢过程(地幔岩生氢量为150、227、300 mmol/kg时)的经纬度分布结果(A和D)、南海及邻区海域地壳厚度(B; 据Gozzard等, 2019修改)以及天然氢产量分布预测(C)

与深大断裂的存在,使得海水、大气水能够沿活动断裂向下渗透至岩石圈地幔,与(超)镁铁质的上地幔发生蛇纹石化反应排出氢气,从而形成了高浓度氢气的逸出点(Jin等, 2024)。这体现了三水盆地中的高浓度氢气流与南海海底天然氢气在成因上的高度相关,同时也在机制

上佐证了本文所提出海底氢能成藏机制的合理性。在莺歌海盆地,北部湾西缘一带也检测到数个氢气高异常带(54 ppm)(Shakirov等, 2019)。这一系列发现,不仅为本研究预测结果提供事实依据,也为将来的天然氢勘探指明了潜在靶区。

当然,本研究预测也存在一定局限性。首先,所采用的蛇纹石化-地壳厚度模型是对复杂地质过程的简化,可能未能完全涵盖所有影响因素(如流体来源与通量、确切的温压路径、岩石初始组分差异)。其次,从蛇纹石化量到氢气产量的换算基于理想化学计量,实际产率可能受到反应动力学和环境条件的影响。再者,本文预测主要反映的是氢气的“生成潜力”(源岩潜力),并未模拟氢气生成后的运移、聚集和保存过程,这些过程对于形成经济可采的氢气藏至关重要。氢气作为一种活性极强的气体,其在地壳中的有效富集需要特定的输导体系和有效的封盖条件,且可能受到微生物消耗等因素的影响。

展望未来,本文预测结果为南海海底氢能的勘探指明了方向,后续工作将聚焦于本文预测的高潜力区,特别是大型沉积盆地内的构造有利部位(如断裂带、基底隆起、圈闭)。将综合运用高精度地球物理探测(如地震、重磁)、海底地球化学勘查(如水体和沉积物中的溶解氢、甲烷浓度异常调查、海底冷泉或热液活动调查)、岩石学与流体包裹体分析、分子动力学模拟等多种技术手段,开展针对性的调查与研究,以期发现天然氢活动的直接证据(如气体渗漏),限定氢气的来源、运移路径和赋存状态。最终,通过科学钻探获取岩心和流体样品,进行直接原位测试和高保真分析,是验证预测结果、评价南海海底氢能真实潜力和储量的必由之路。本文作为南海海底氢能评价的初步探索,希望能为推动这一新兴能源领域的深入研究与勘探实践提供科学依据。

致谢 本研究得到了崂山实验室、深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心、中国海洋大学专项经费的支持。

参考文献

- 丁巍伟. 2021. 南海大陆边缘动力学: 从陆缘破裂到海底扩张. *地球科学*, 46: 790–800
- 金之钧, 王璐. 2022. 自然界有氢气藏吗? *地球科学*, 47: 3858–3859
- 黄瑞芳, 孙卫东, 丁兴, 等. 2016. 橄榄石和橄榄岩蛇纹石化过程中气体形成的对比研究. *中国科学: 地球科学*, 46: 97–106
- 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 2012. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争. *海洋地质与第四纪地质*, 32: 35–53
- 李三忠, 索艳慧, 周洁, 等. 2022. 微板块与大板块: 基本原理与范式转换. *地质学报*, 96: 3541–3558
- 李三忠, 索艳慧, 姜兆霞, 等. 2024. 氢构造与海底氢能系统. *科学通报*, 69: 4696–4703
- 刘全有, 吴小奇, 孟庆强, 等. 2024a. 天然氢气: 一种潜在的零碳能源. *科学通报*, 69: 2344–2350
- 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 2024b. 地球多层圈有机-无机相互作用的资源效应. *天然气地球科学*, 35: 741–762
- 孟庆强, 金之钧, 孙冬胜, 等. 2021. 高含量氢气赋存的地质背景及勘探前景. *石油实验地质*, 43: 208–216
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 2015. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示. *地学前缘*, 22: 102–114
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析. *地球物理学报*, 61: 4901–4920
- 任建业, 罗盼, 高圆圆, 等. 2022. 南海西南次海盆地壳岩石圈伸展破裂过程的构造、沉积和岩浆作用记录. *地球科学*, 47: 2287–2302
- 索艳慧, 姜兆霞, 李三忠, 等. 2024. 海底氢气成藏模式与全球分布. *地学前缘*, 31: 175–182
- 汪品先. 1998. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系. *第四纪研究*, 3: 213–221
- 汪小妹, 曾志刚, 欧阳荷根, 等. 2010. 大洋橄榄岩的蛇纹石化研究进展评述. *地球科学进展*, 25: 605–616
- 王晓梅, 何坤, 杨春龙, 等. 2025. 四川盆地深层天然氢气形成机制. *中国科学: 地球科学*, 55: 596–612
- 杨天一, 唐勇, 任建业, 等. 2025. 南海西南次海盆地陆缘演化与幕式扩张的岩浆-构造-地层记录. *地球科学*, 50: 195–216
- 赵明辉, 袁野, 张翠梅, 等. 2022. OBS2018-H2测线反射与折射数据联合揭示南海北部陆缘洋陆转换带的深部地震结构. *地球物理学报*, 65: 2210–2225
- Abrajano T A, Sturchio N C, Bohlke J K, et al. 1988. Methane-hydrogen gas seeps, Zambales Ophiolite, Philippines: Deep or shallow origin? *Chem Geol*, 71: 211–222
- Abrajano T A, Sturchio N C, Kennedy B M, et al. 1990. Geochemistry of reduced gas related to serpentinization of the Zambales Ophiolite, Philippines. *Appl Geochem*, 5: 625–630
- Albers E, Bach W, Pérez-Gussinyé M, et al. 2021. Serpentinization-driven H₂ production from continental break-up to mid-ocean ridge spreading: Unexpected high rates at the west Iberia margin. *Front Earth Sci*, 9: 673063
- Andreani M, Daniel I, Pollet-Villard M. 2013. Aluminum speeds up the hydrothermal alteration of olivine. *Am Mineral*, 98: 1738–1744
- Boillot G, Grimaud S, Mauffret A, et al. 1980. Ocean-continent boundary off the Iberian margin: A serpentinite diapir west of the Galicia Bank. *Earth Planet Sci Lett*, 48: 23–34
- Brune S, Heine C, Clift P D, et al. 2017. Rifted margin architecture and crustal rheology: Reviewing Iberia-Newfoundland, Central South Atlantic, and South China Sea. *Mar Pet Geol*, 79: 257–281
- Cui Y C, Shao L, Li Z X, et al. 2024. Early Cenozoic drainage network and paleogeographic evolution within the SE Tibetan Plateau and its surrounding area: Synthetic constraints from onshore-offshore geological dataset. *Earth-Sci Rev*, 258: 104932
- Deng H D, Ren J Y, Pang X, et al. 2020. South China Sea documents the transition from wide continental rift to continental break up. *Nat Commun*, 11: 4583
- Deschamps T, Kassir-Bodon A, Sonnevile C, et al. 2013. Permanent densification of compressed silica glass: A Raman-density calibration curve. *J Phys-Condens Matter*, 25: 025402
- Donzé F V, Truche L, Shekari Namin P, et al. 2020. Migration of natural hydrogen from deep-seated sources in the São Francisco Basin, Brazil. *Geosciences*, 10: 346
- Ellis G S, Gelman S E. 2024. Model predictions of global geologic hydrogen resources. *Sci Adv*, 10: eado0955
- Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. 2014. The final rifting evolution in the South China Sea. *Mar Pet Geol*, 58: 704–720
- Gallagher J. 2023. Emissions from natural hydrogen. *Nat Energy*, 8: 774
- Gerya T V, Yuen D A. 2003. Characteristics-based marker-in-cell method with conservative finite-differences schemes for modeling geological flows with strongly variable transport properties. *Phys Earth Planet Inter*, 140: 293–318
- Gozzard S, Kusznir N, Franke D, et al. 2019. South China Sea crustal thickness and oceanic lithosphere distribution from satellite gravity inversion. *Petrol Geosci*, 25: 112–128
- Han S B, Tang Z Y, Wang C S, et al. 2022. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China:

- New insights into deep Earth exploration. *Sci Bull*, 67: 1003–1006
- Hand E. 2023. Hidden hydrogen. *Science*, 379: 630–636
- Hochscheid F, Ulrich M, Muñoz M, et al. 2024. Serpentinization as a tape recorder of (dis)continuous mantle exhumation along the alpine tethys ocean-continent-transition. *J Petrol*, 65: ega063
- Huang R F, Shang X Q, Zhao Y S, et al. 2023. Effect of fluid salinity on reaction rate and molecular hydrogen (H_2) formation during peridotite serpentinization at 300 °C. *J Geophys Res-Solid Earth*, 128: e2022JB025218
- Jin Z J, Zhang P P, Liu R C, et al. 2024. Discovery of anomalous hydrogen leakage sites in the Sanshui Basin, South China. *Sci Bull*, 69: 1217–1220
- Klein F, Bach W, Jöns N, et al. 2009. Iron partitioning and hydrogen generation during serpentinization of abyssal peridotites from 15°N on the Mid-Atlantic Ridge. *Geochim Cosmochim Acta*, 73: 6868–6893
- Klein F, Grozeva N G, Seewald J S. 2019. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116: 17666–17672
- Klein F, Tarnas J D, Bach W. 2020. Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. *Elements*, 16: 19–24
- Lister G S, Etheridge M A, Symonds P A. 1986. Detachment faulting and the evolution of passive continental margins. *Geology*, 14: 246–250
- Liu Q Y, Wei Y B, Li P P, et al. 2025. Natural hydrogen in the volcanic-bearing sedimentary basin: Origin, conversion, and production rates. *Sci Adv*, 11: eadr6771
- Liu Y T, Li C F, Wen Y L, et al. 2021. Mantle serpentinization beneath a failed rift and post-spreading magmatism in the northeastern South China Sea margin. *Geophys J Int*, 225: 811–828
- Liu Y T, Li C F, Qiu X, et al. 2023. V_p/V_s ratios beneath a hyper-extended failed rift support a magma-poor continental margin in the northeastern South China Sea. *Tectonophysics*, 846: 229652
- Liu Z L, Perez-Gussinye M, García-Pintado J, et al. 2023. Mantle serpentinization and associated hydrogen flux at North Atlantic magma-poor rifted margins. *Geology*, 51: 284–289
- Manatschal G, Müntener O. 2009. A type sequence across an ancient magma-poor ocean-continent transition: The example of the western Alpine Tethys ophiolites. *Tectonophysics*, 473: 4–19
- Mateeva T, Wolff G A, Manatschal G, et al. 2017. Preserved organic matter in a fossil Ocean Continent Transition in the Alps: The example of Totalp, SE Switzerland. *Swiss J Geosci*, 110: 457–478
- Milkov A V. 2022. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Sci Rev*, 230: 104063
- Mitchell A H G. 1986. Ophiolite detachment related to syn-collision thrusting. *J Geodyn*, 5: 257–274
- Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. 1995. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *J Geophys Res*, 100: 22407–22433
- Pichot T, Delescluse M, Chamot-Rooke N, et al. 2014. Deep crustal structure of the conjugate margins of the SW South China Sea from wide-angle refraction seismic data. *Mar Pet Geol*, 58: 627–643
- Prinzhofer A, Tahara Cissé C S, Diallo A B. 2018. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *Int J Hydrogen Energy*, 43: 19315–19326
- Savva D, Meresse F, Pubellier M, et al. 2013. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam. *Tectonophysics*, 608: 72–83
- Schmidt M W, Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth Planet Sci Lett*, 163: 361–379
- Shakirov R B, Hung D Q, Syrbu N S, et al. 2019. Features of the distribution of abnormal gasgeochemical fields in the Red River rift (Gulf of Tonkin, South China Sea). *Dokl Earth Sc*, 484: 181–184
- Song H, Ou X W, Han B, et al. 2021. An overlooked natural hydrogen evolution pathway: Ni^{2+} boosting H_2O reduction by $Fe(OH)_2$ oxidation during low-temperature serpentinization. *Angew Chem Int Ed*, 60: 24054–24058
- Taylor B, Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea Basin. In: Hayes D E, ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*. Washington: American Geophysical Union. 23–56
- Tichadou C, Godard M, Muñoz M, et al. 2021. Mineralogical and geochemical study of serpentinized peridotites from the North-Western Pyrenees: New insights on serpentinization along magma-poor continental passive margins. *Lithos*, 406–407: 106521
- Vacquand C. 2011. Genèse et mobilité de l'hydrogène dans les roches sédimentaires: Source d'énergie naturelle ou vecteur énergétique stockable. Dissertation for Doctoral Degree. Rueil-Malmaison: IFP Energies nouvelles and Paris: Institut de Physique du Globe de Paris
- Wang L, Jin Z J, Chen X, et al. 2023. The origin and occurrence of natural hydrogen. *Energies*, 16: 2400
- Wang Y L, Yan P, Yu J, et al. 2023. Geophysical evidence for a serpentine mud volcano in the relict slow-spreading center of the South China Sea. *Tectonophysics*, 846: 229665
- Wei Y B, Liu Q Y, Zhu D Y, et al. 2025. Helium and natural hydrogen in the Bohai Bay Basin, China: Occurrence, resources, and exploration prospects. *Appl Energy*, 383: 125398
- Wen Y G, Li C F, Wang L J, et al. 2021. The onset of seafloor spreading at the northeastern continent-ocean boundary of the South China Sea. *Mar Pet Geol*, 133: 105255
- Xia Q K, Yang X Z, Deloule E, et al. 2006. Water in the lower crustal granulite xenoliths from Nushan, eastern China. *J Geophys Res*, 111: 2006JB004296
- Yang X Z, Deloule E, Xia Q K, et al. 2008. Water contrast between Precambrian and Phanerozoic continental lower crust in eastern China. *J Geophys Res*, 113: 2007JB005541
- Yu Z T, Li J B, Ding W W, et al. 2017. Crustal structure of the Southwest Subbasin, South China Sea, from wide-angle seismic tomography and seismic reflection imaging. *Mar Geophys Res*, 38: 85–104
- Yumul G P, Dimalanta C B, Marquez E J, et al. 2009. Onland signatures of the Palawan microcontinental block and Philippine mobile belt collision and crustal growth process: A review. *J Asian Earth Sci*, 34: 610–623
- Zgonnik V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Sci Rev*, 203: 103140
- Zhang C M, Sun Z, Manatschal G, et al. 2021. Syn-rift magmatic characteristics and evolution at a sediment-rich margin: Insights from high-resolution seismic data from the South China Sea. *Gondwana Res*, 91: 81–96

(责任编辑: 李超)