超压驱动的水力压裂在海底地层中如何生长？以南海北部水力压裂区为例

王庆[1]，孙启良[1,2]，Kehua You[3]，Martino Foschi[4,5]

[1]海洋地质资源湖北省重点实验室, 中国地质大学（武汉）, 武汉, 中国
[2]崂山国家实验室, 青岛, 中国
[3]Institute for Geophysics, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA
[4]Department of Earth Science, University of Oxford, Oxford, UK
[5]Shell International Exploration and Production BV, The Hague, The Netherlands

超压驱动的水力压裂在全世界的地层中广泛发育。它能垂直穿透数千公里的地层（图2），为深部流体向浅部运移、油气资源成藏、碳循环等等提供重要的通道作用。另一方面，水力压裂使地层结构变弱、超压流体被运移至浅部地层后也会使其变弱，因此会引发海底滑坡等海洋地质灾害。本研究使用由钻井（Well N119-5-3）和地震数据约束的COMSOL数值模型来定量探究水力压裂的生长过程及其控制因素。

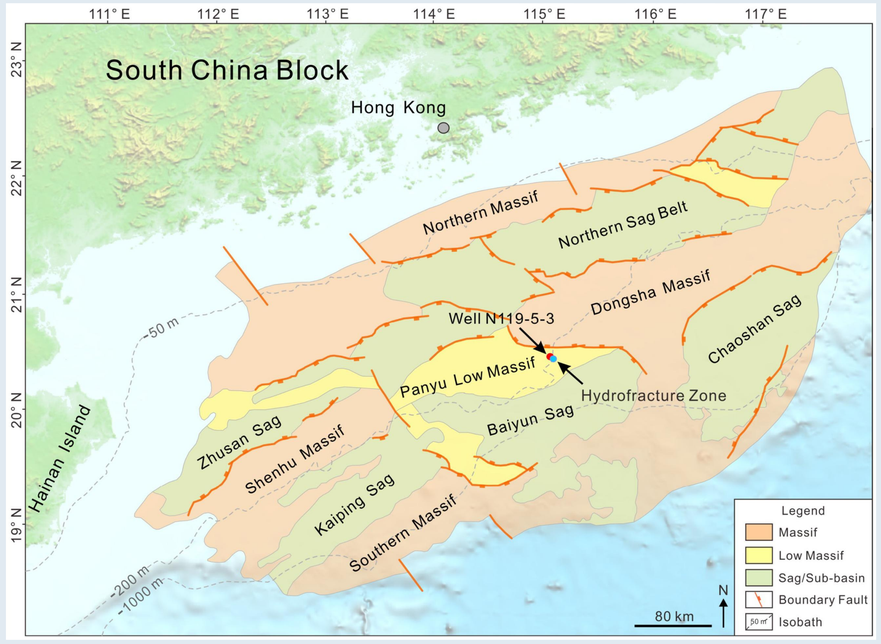


图1: 研究区的水力压力位于南海北部珠江口盆地

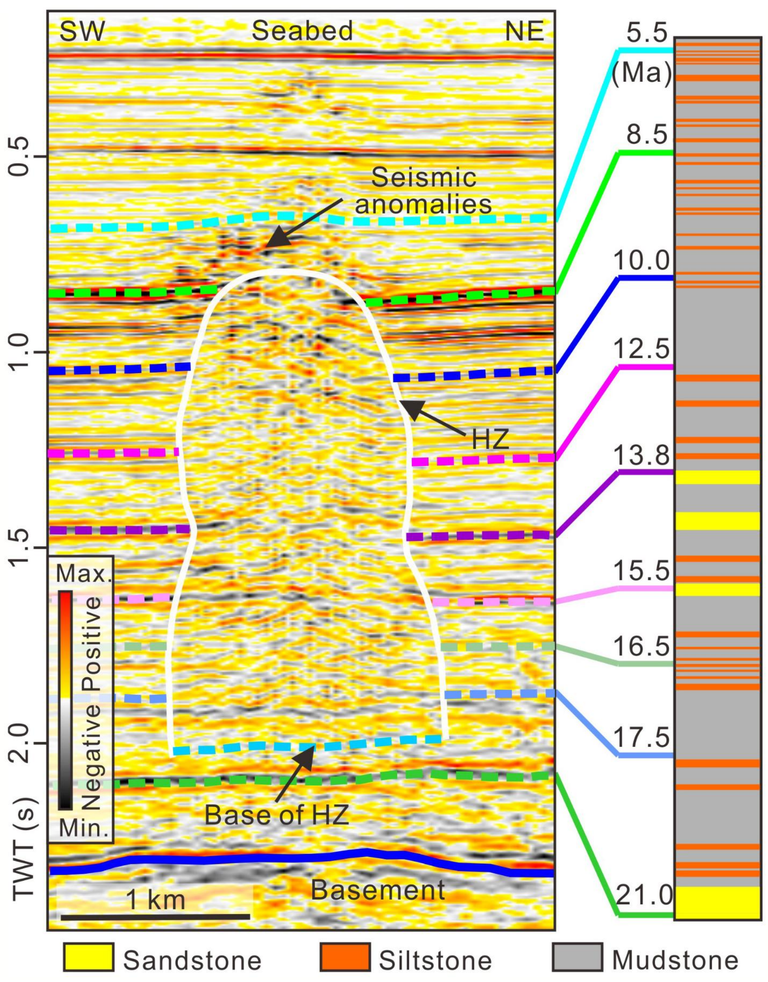


图2：水力压裂的地震响应。地震剖面显示，HZ为一条由深部气藏向上延伸的垂向反射紊乱带，高约1.73 km、半径约 700 m，穿过多套砂岩、粉砂岩和泥岩；其顶部伴随明显的高振幅含气异常。

$$p^{c}=\frac{2(\nu-1)\left(\rho g h+\sigma_{T}\right)\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}{\alpha-2\alpha\nu+[2-\alpha+2\nu(\alpha-1)]\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$$

公式1：研究区水力压裂的临界孔隙流体压力。该公式用于计算地层发生水力破裂所需的临界孔隙压力 p^c。临界压力由地层的泊松比、岩石密度、埋深、抗拉强度、Biot–Willis 孔弹性系数以及底部超压源的半径共同控制。当实际孔隙流体压力 p 超过 p^c 时，该研究区地层发生拉张破裂并形成水力裂缝。

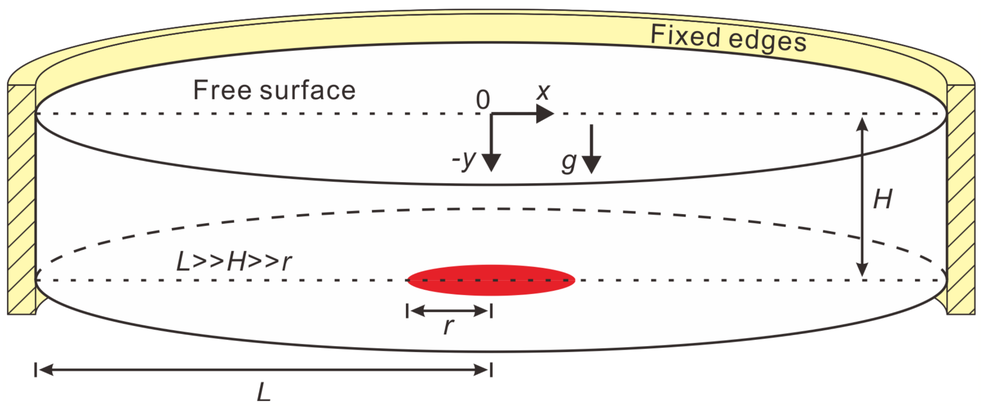


图3：COMSOL数值模型及边界条件。模型采用轴对称圆柱形计算域，高度为 H、半径为 L；底部设置半径为 r 的超压源，用于模拟深部超压向上输运超压流体。模型满足 r ≪ H ≪ L，以减小侧边界对计算结果的影响；顶部为自由表面，侧边界采用无限元区域。

Modelled parameters and main results	Value	References
Bottom radius of the hydrofracture zone r	700 m	Sun et al. (2021)
Rock density (ρ)	2200 kg/m^3	Ning et al. (2013), He et al. (2022)
Biot-Willis poro-elastic coupling constant α	0.72	Hornbach et al. (2004), Paterson and Wong (2005), Rozhko et al. (2007)
Poisson ratio of strata ν	0.3017	Ning et al. (2013), He et al. (2022)
Maximum overpressure in the deep-seated reservoir p_b	16.7 MPa	Chen et al. (2006), Guo et al. (2011)
Rock tensile strength σ_T	2.8 MPa	Ning et al. (2013), Xie et al. (2021)
Original permeability of sandstone	282.8 mD	This study (Well N119-5-3)
Original permeability of siltstone	45 mD	This study (Well N119-5-3)
Original permeability of mudstone	5.5 mD	This study Well N119-5-3)
Weighted average of permeability growth rate in fracture	112 mD/MPa	Yang et al. (2001), Yang et al. (2007)
Height of the hydrofracture zone	1730 m	Sun et al. (2021), This study (Well N119-5-3)

图4：数值模型的主要参数。模型参数主要依据研究区钻井资料和前人研究确定。

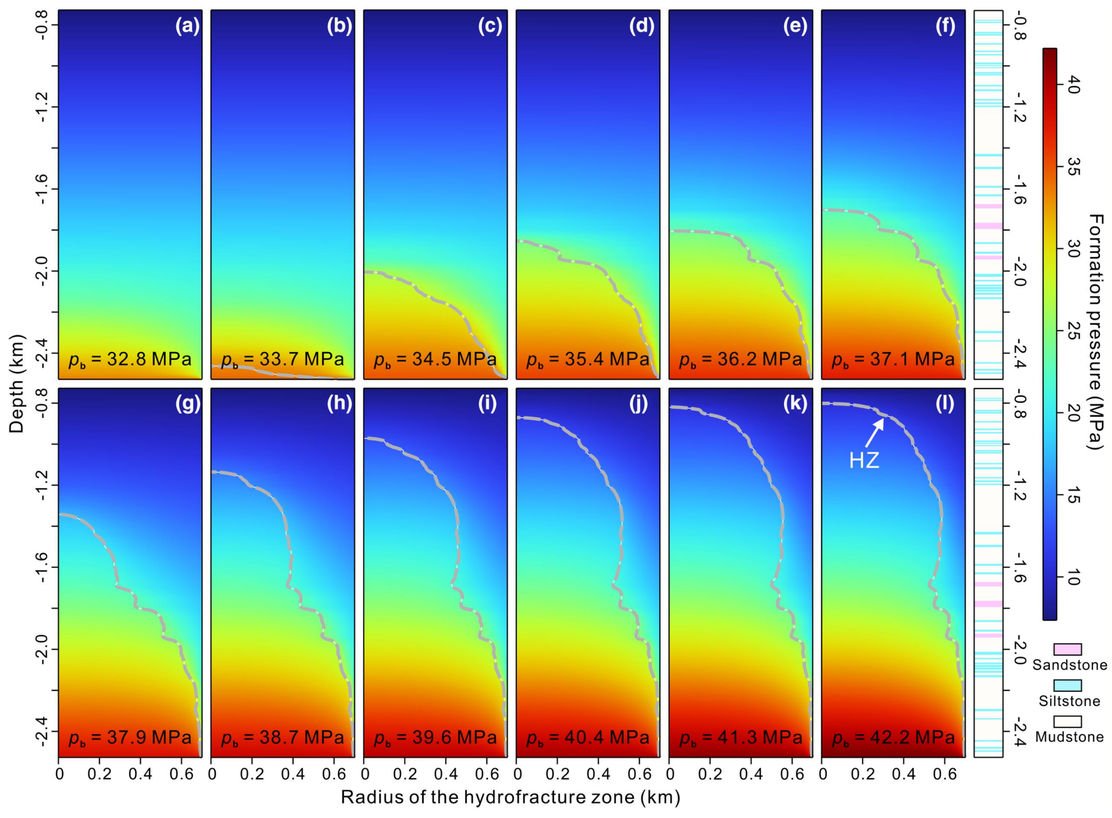


图5：水力压裂的生长过程。随着底部超压由约 32.8 MPa 持续升高至 42.2 MPa，地层逐渐达到临界破裂压力，水力压裂由深部超压源顶部开始向上生长。裂缝带在不同岩性中的宽度和生长速度存在明显差异：高渗透率砂岩中裂缝带较窄、继续向上生长需要更大的超压；低渗透率泥岩中裂缝带较宽，更容易发生水力压裂。模拟得到的裂缝带半径约为 525–700 m，与地震资料解释结果一致。

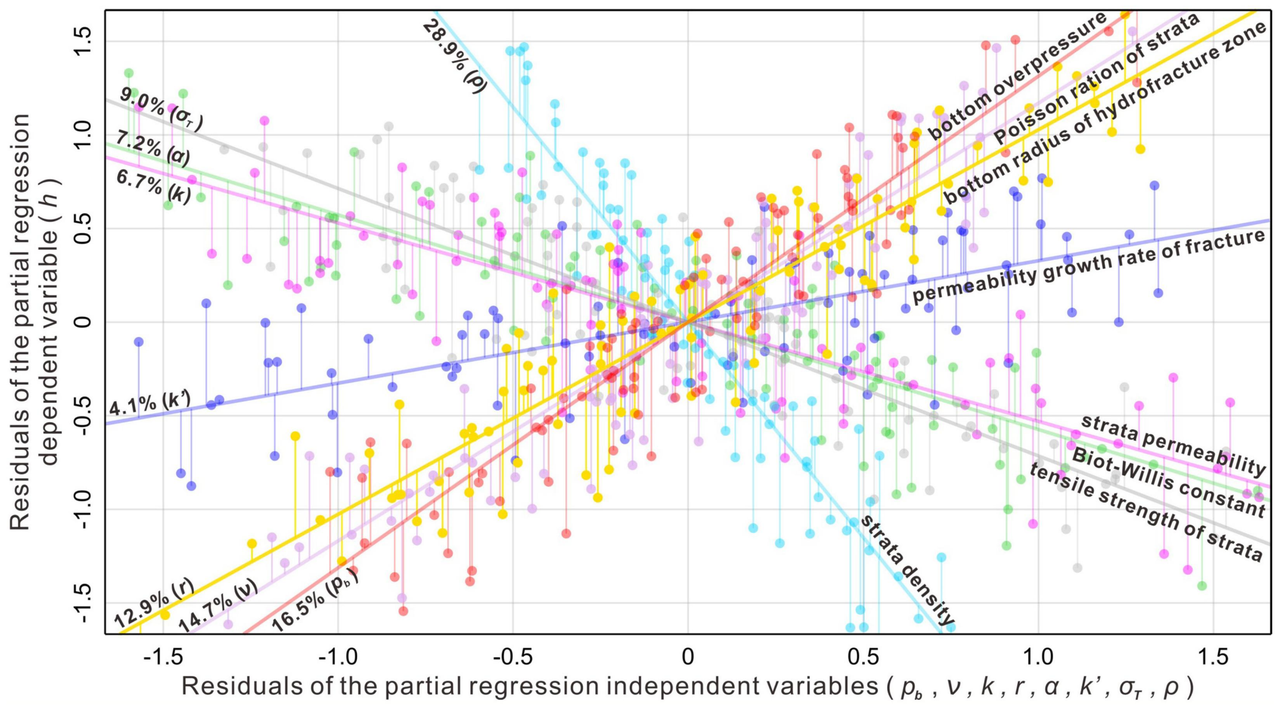


图6：水力压裂的敏感性分析。结果表明，不同参数对水力压裂最终生长高度的影响程度不同。其中，地层密度、底部超压、泊松比和底部半径是最主要的控制因素，合计贡献约 73.0%。底部超压、泊松比、底部半径和裂缝渗透率增长率增大时，会促进水力压裂向上生长；而地层密度、抗拉强度、Biot–Willis 系数和地层渗透率增大时，则会抑制其生长。

参考文献
Wang, Q., Sun, Q., You, K., and Foschi, M., 2024, Overpressure-driven hydrofracture growth in the northern South China Sea: Basin Research, v. 36, doi:10.1111/bre.12894.