

天然气水合物勘探与开发： 理论、方法与实践

吴能友

(中国地质调查局青岛海洋地质研究所)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

研究历史和兴趣点

2002年-开采及其
环境与灾害

- 发展历史：科学好奇——工程需要——能源资源——开采及其环境与灾害

1778年-科学好奇

实验室 研究阶段

标志事件：英国科学家首次实验合成二氧化硫和氯气水合物

1934年-工程需要

管道堵塞与 防治阶段

标志事件：前苏联科学家首次在输气管道中发现水合物堵塞管道天然气输送

1969年-能源资源

资源调查 研究阶段

标志事件：美国首次利用深海钻探DSDP计划研究水合物，并开始地震调查研究

试验开采 阶段

标志事件：加拿大麦肯齐三角洲冻土带Mallik计划(5国8个机构)Mallik5L-38井水合物开发试验

- 技术领域：实验—勘探—开采—储运—利用
- 科学问题：结构、相变、形成与分解等



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

汇报提纲

- 一、水合物的概念和理论
- 二、水合物勘探开发进展
- 三、水合物钻探目标优选
- 四、水合物成藏运聚体系
- 五、水合物未来发展趋势



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

一、水合物的概念和理论



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

各类水合物样品



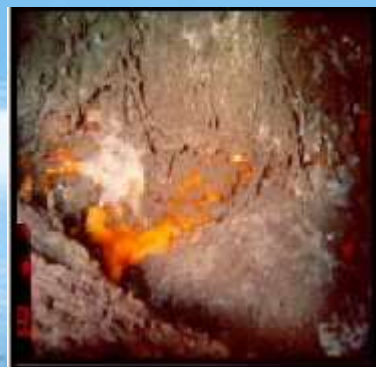
实验室合成水合物



美国布莱克海台水合物



2015年通过重力取样器采集的南海海底浅表层水合物



墨西哥湾海底直接出露的水合物



2013年南海钻探获得的水合物



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

实验室合成的水合物样品在燃烧



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

海底采集的水合物样品在燃烧



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

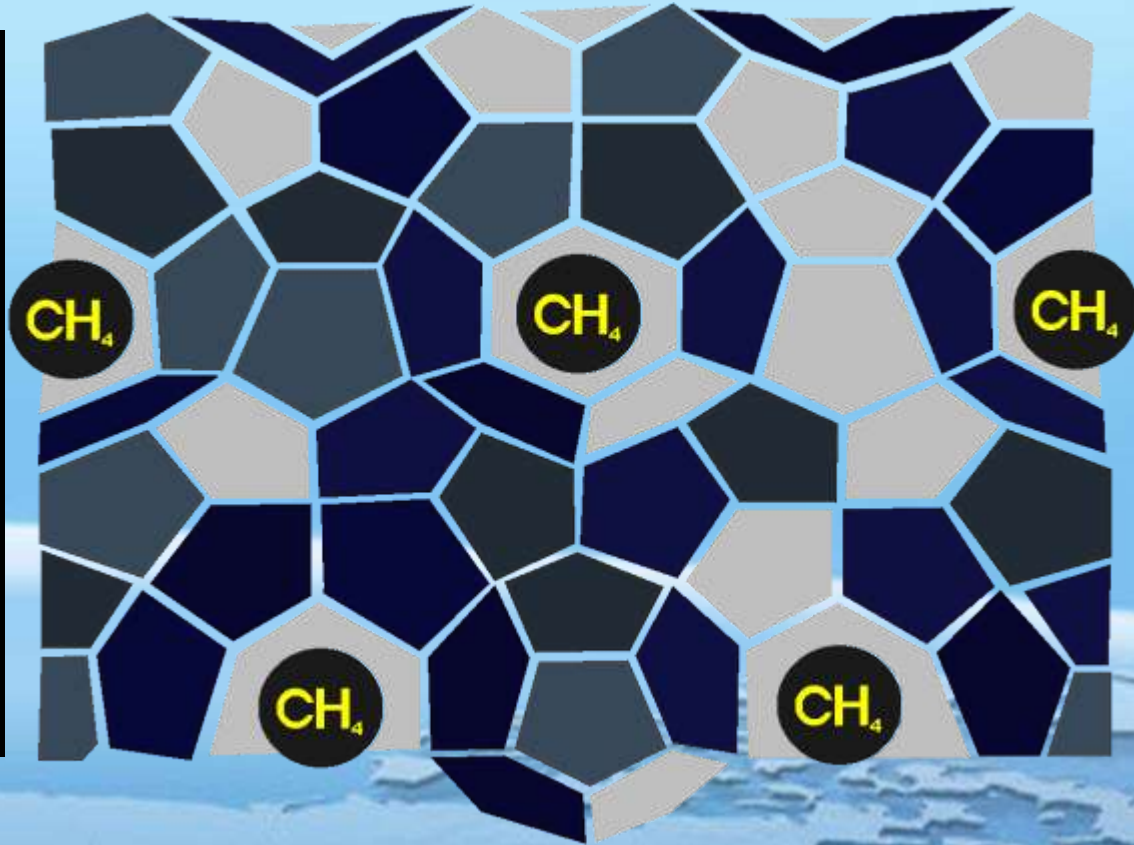
水合物的形成

液态水分子可形成几个或几十个分子连接的群族构造(**笼型结构**)，随环境变化这些构造可反复结合与离散。当水中有充分的气体分子，并在**高压低温条件**下，由**多个水分子构成的笼形结构中就包含一个气体分子**，形成固态水合物。分子群结构和气体类型有关。



水合物的笼型结构

1936年由前苏联科学院院士尼基丁首次提出，并一直沿用至今。



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

水合物的基本结构

结构I

甲烷水合物



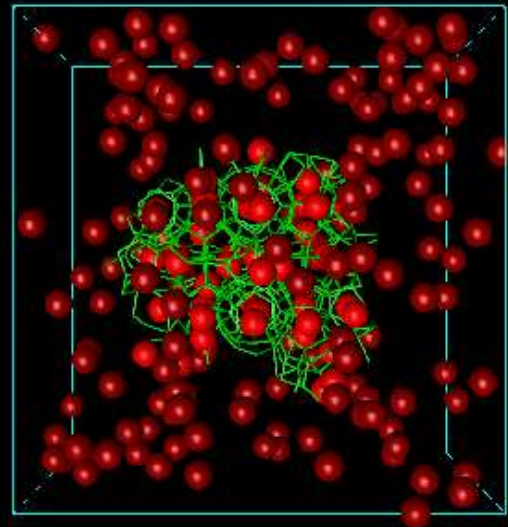
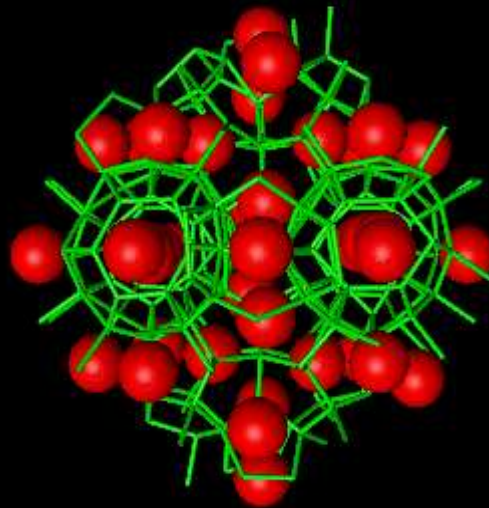
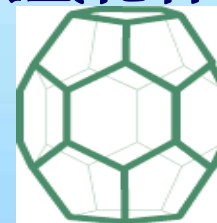
结构II

丙烷异丁烷



结构H

大分子碳氢化合物水合物



每个晶胞由46个水
分子和8个甲烷分子组成

每个晶胞由136个水
分子和24个碳氢分子组成

难以确定



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

水合物及其分布

- 水合物是一种自然界存在的、外观象冰且点火即可燃烧的固态物质，形象地称**可燃冰**，又称**气冰**、**固体瓦斯**，科学上称**天然气水合物**。
- 由甲烷等气体和水分子在高压低温条件下形成，是二十一世纪最理想的潜在替代能源。

水合物分布

(1)陆地多年冻土区：地面下200-2000m

(2)深海海底：海水300m以深，海底及海底下数几百米沉积层中



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

全球水合物资源量

全球天然气
资源量:

$0.15 \times 10^{15} \text{ m}^3$

全球水合物中
甲烷资源量:

$9 \times 10^{15} \text{ m}^3$

60倍

资源量($\times 10^{15} \text{ m}^3$)	资料来源
120	Trofimuk et al., 1981
301	Mclver, 1981
15	Makagon, 1981
1573	Cherskiy et al., 1982
15	Trofimuk et al., 1982
40	Kvenvolden and Claypool, 1988
20	Kvenvolden, 1988
20	MacDonald, 1990
26.4	Gornitz and Fung, 1994
45.4	Harvey and Huang, 1995
1	Ginsburg and Soloviev, 1995
6.8	Holbrook et al., 1996
15	Makagon, 1997
2.5	Milkov, 2004
120	Klauda and Sandler, 2005



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

陆地冻土区和海洋中的水合物资源量

冻土区资源量($\times 10^{14} \text{ m}^3$)	海洋资源量($\times 10^{16} \text{ m}^3$)	资料来源
0.57	0.5-2.5	Trofimuk et al., 1981
0.31	0.31	McIver, 1981
340	760	Dobrynin et al., 1981
1.0	1.0	Makagon, 1988
7.4	2.1	MacDonald, 1990

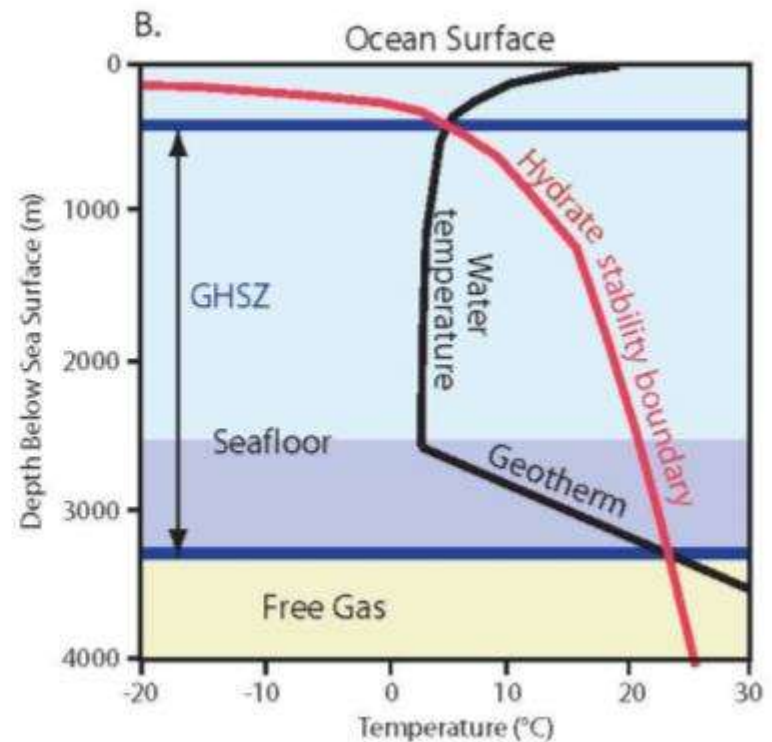
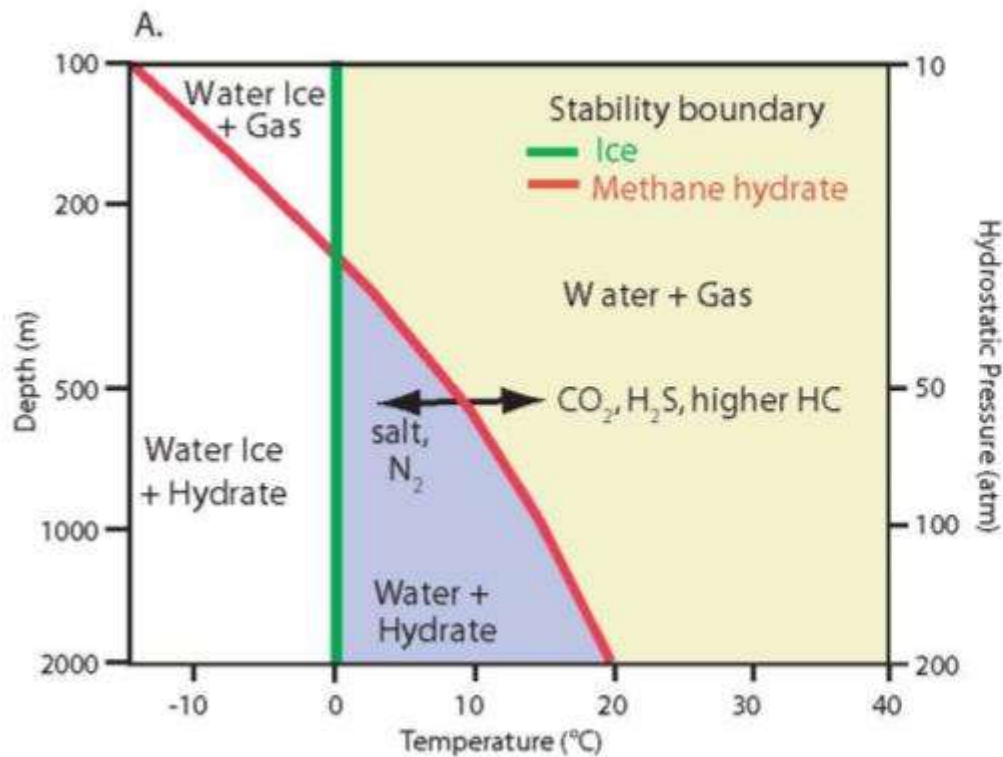
海洋水合物资源量占99%



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

影响水合物稳定的四个基本要素

温度、压力、孔隙水盐度、气体组分



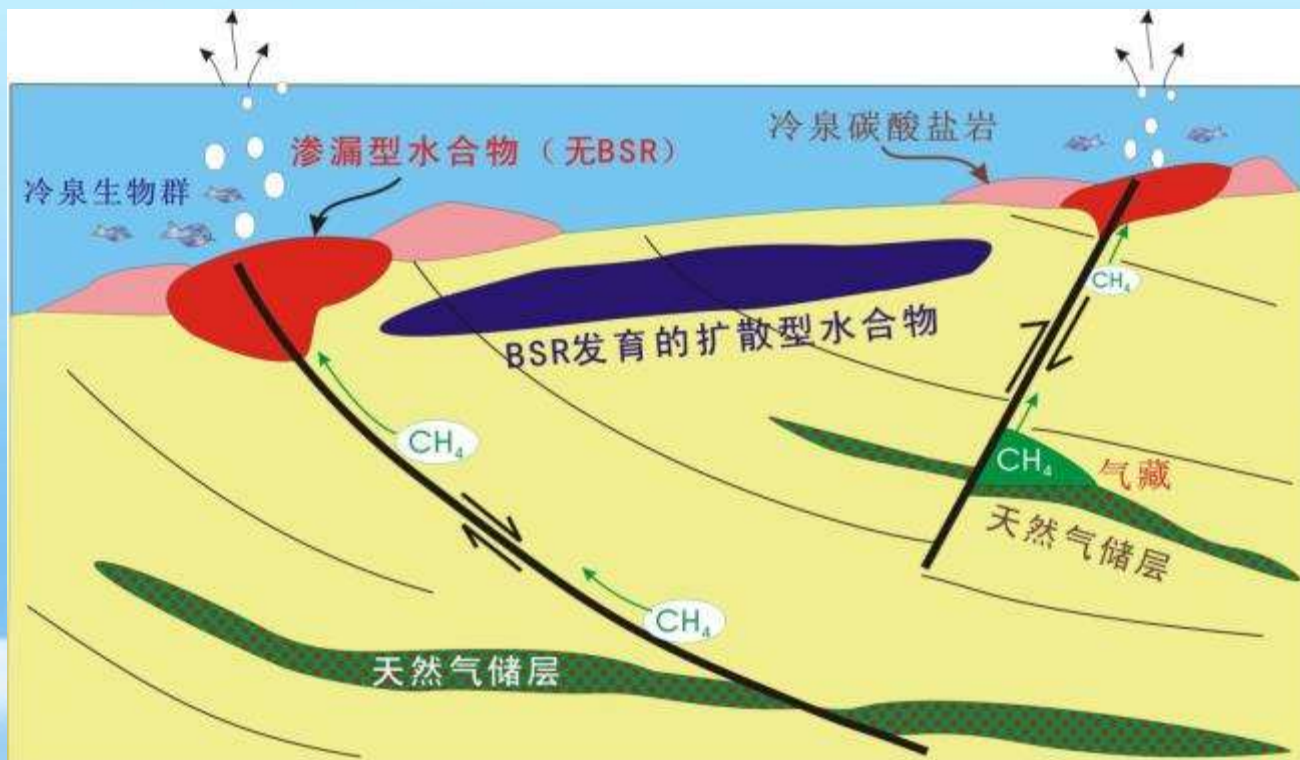
纯水(A)和海洋环境(B)天然气水合物稳定带边界



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

(Xu et al.,1999)

水合物类型及其气体来源



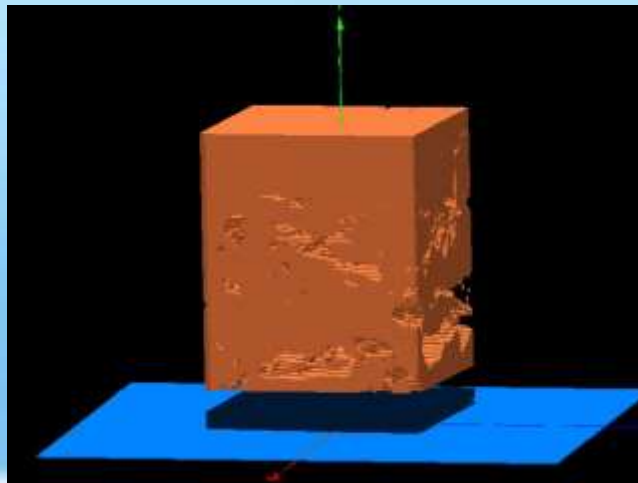
水合物类型：渗漏型(裂隙充填型) & 扩散型(孔隙充填型)

水合物气源：细菌分解有机物产生的生物气 & 碳氢化合物热解产生的深源气



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

自然界水合物赋存特征



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

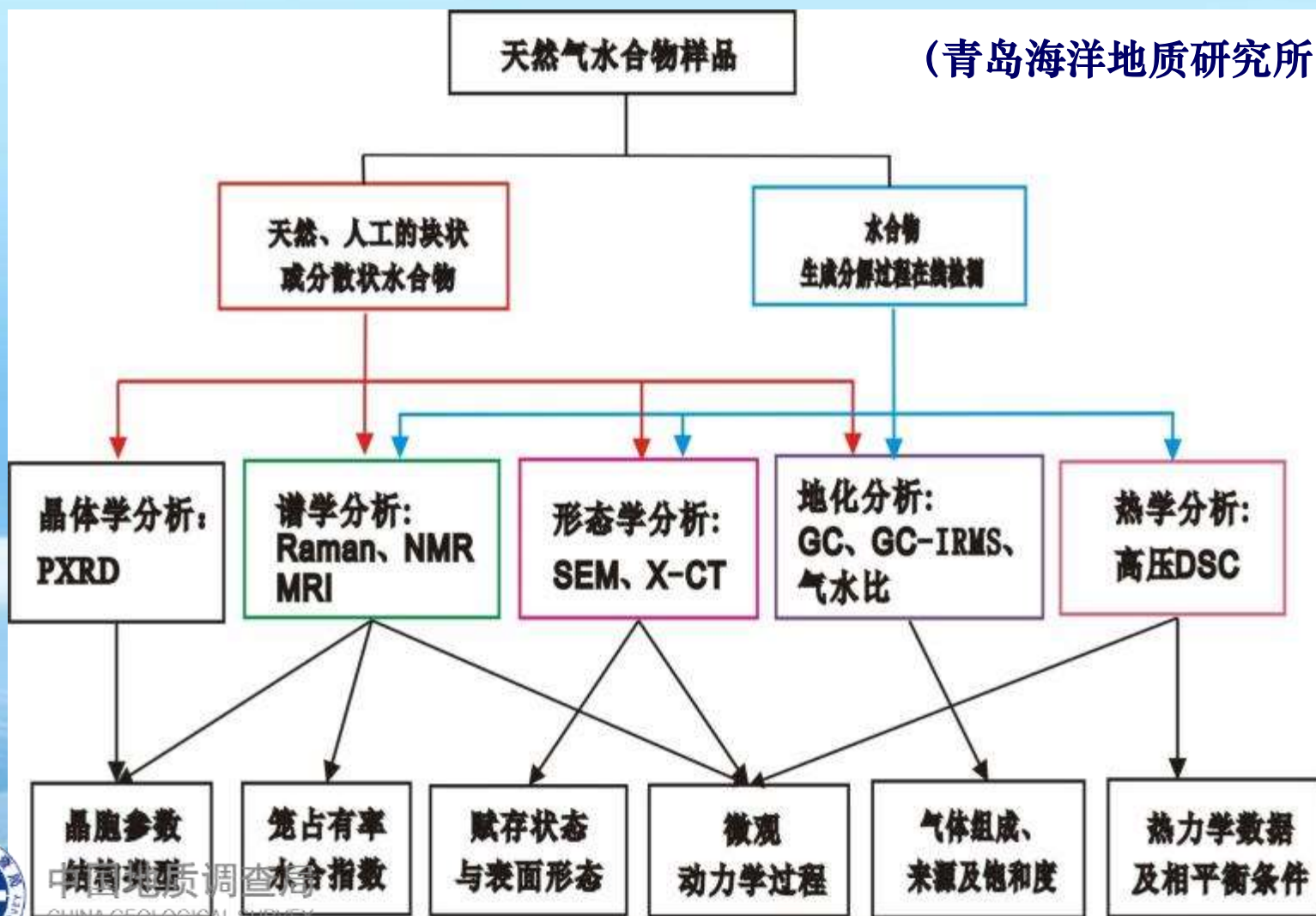
水合物的基础科学问题

- 科学问题1：结构特征与晶格参数
- 科学问题2：赋存状态和热力学参数
- 科学问题3：形成和分解的微观动力学过程
- 科学问题4：分子组成及其控制因素
- 科学问题5：形成和分解过程及其地球物理、地球化学参数变化

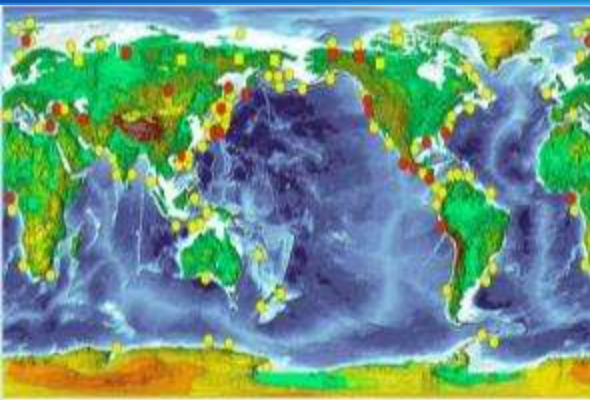


水合物的测试技术

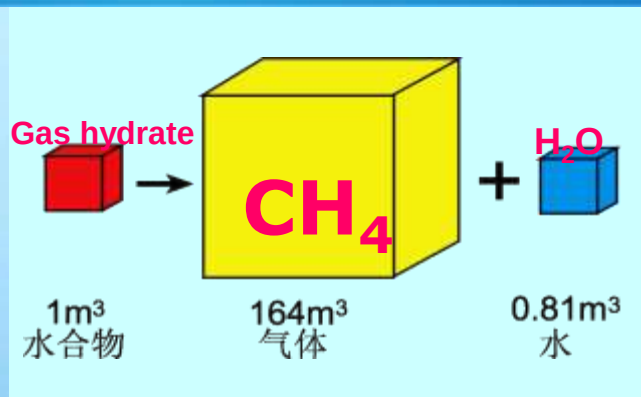
(青岛海洋地质研究所)



潜在能源、地质灾害、全球变化



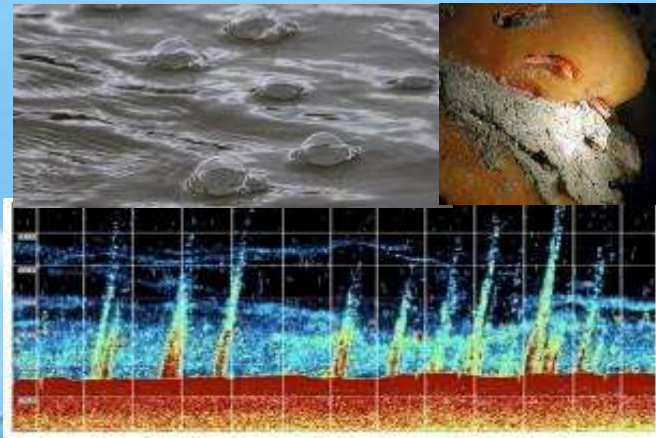
分布广



密度高



资源量大



潜在能源

表征、勘探、开采试验

地质灾害

深水油气开发、滑坡等自然灾害

全球变化

独特生物群、全球碳循环调节器、
全球气候变化响应



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

对能源和地缘政治的冲击

(迈克尔 D. 马克斯--美国政府顾问)

天然气水合物将可能改变现在的地缘政治模式。
美国、日本、印度等国家可能实现能源自给。这
一事件强烈影响着国际事务及对外政策。...现存的
世界能源贸易将彻底改变。



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

水合物：非常规油气、未探明资源

- **非常规天然气**：不能在地层和构造中流动，需要外力作用将其分解成甲烷和水，气水分离后达到开采目的。
- **未探明资源**：勘探程度低，资源量或储量随技术成熟度变化大，当前或未来技术下可能具备开采条件。
- **低能源丰度**—— 1m^3 水合物 = 164m^3 天然气 ≈ 1 bbl (0.157m^3) 原油
- **成本不确定性**——天然气需要高储存和运输成本、供需必须匹配；赋存于深水区的特征导致开采设施成本较高，但赋存于沉积物浅层特征使钻探成本降低，但地层稳定性和环境问题可能增加开采成本。



二、水合物勘探开发进展



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

水合物资源勘查方法

地球物理(地震、
浅剖等)

地球化学

地形地貌

海底摄像/ROV

海底取样

钻探取样

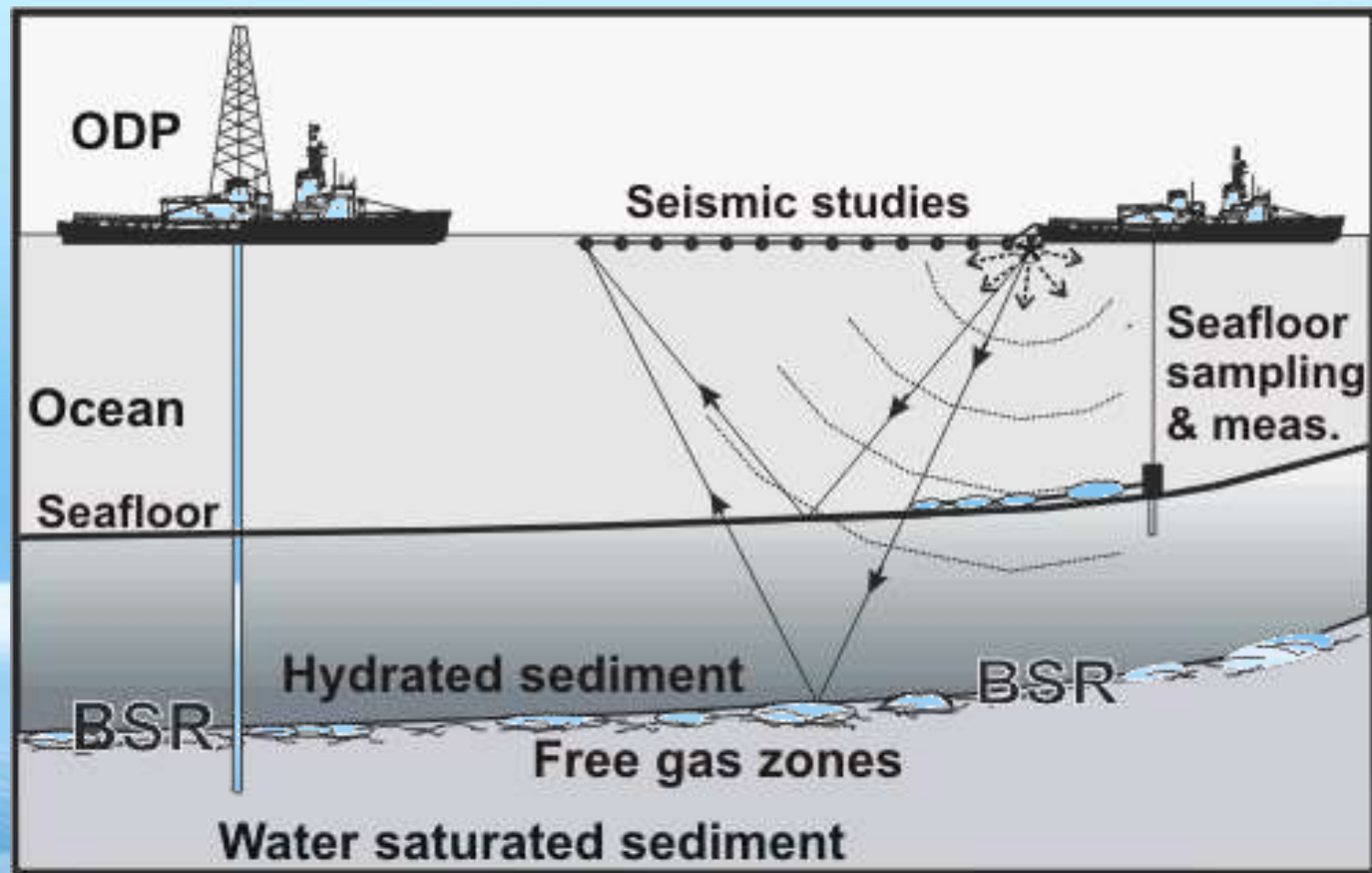
测井

- 地质条件**：有利构造部位(断层)、有利沉积区、海底表层异常信息(如冷泉、麻坑、丘状体、泥火山)、温压条件
- 地球物理特征**：BSR分布区和速度异常区、各类地震属性异常信息(如瞬时信息、波阻抗信息、反射强度、相对极性和能量半衰时及AVO等信息)
- 地球化学异常**：气源和气渗漏、气态烃、孔隙水、自生矿物(冷泉碳酸盐岩)
- 测井异常**：自然伽马、井径、电阻率、中子孔隙度、体积密度、纵横波速度、井眼温度等
- 生物异常**：管状蠕虫、双壳类、菌席、特殊生标



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

反射地震是主要方法，钻探和取样是直接手段

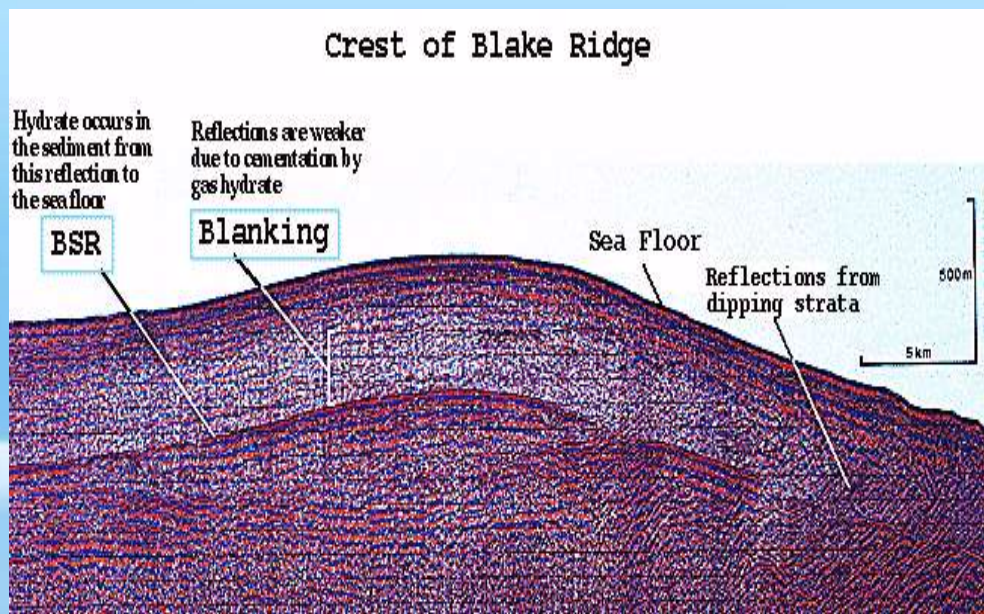


中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

似海底反射层(BSR)

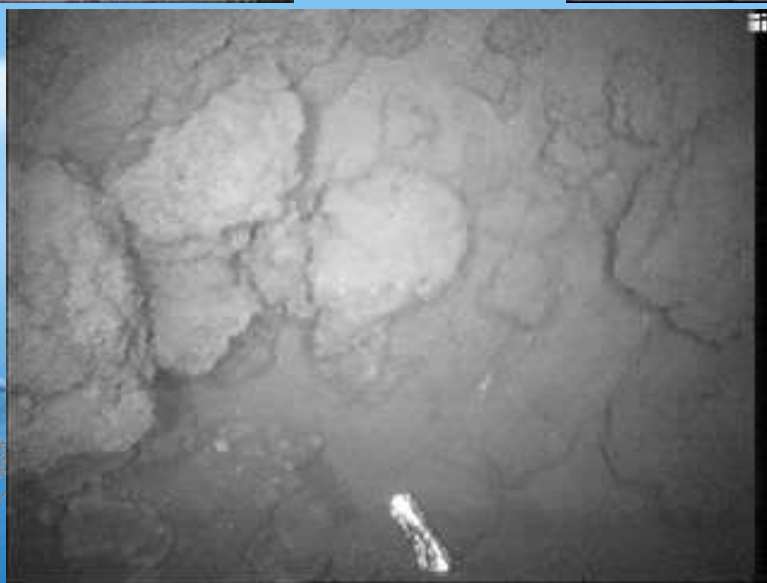
(Bottom Simulating Reflector)

- 与海底平行
- 与沉积层层面斜交
- 高振幅强反射
- 反极性
- 上方振幅减弱带



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

海底摄像



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

国际上水合物钻探项目

1. 美国东海岸布莱克海台大洋钻探计划ODP 164航次 (1995)
2. 日本南海海槽水合物钻探航次 (1999-2000, 2004)
3. 美国西海岸水合物脊大洋钻探计划ODP 204航次 (2002)
4. 美国墨西哥湾工业联合项目JIP I、II航次 (2005, 2009)
5. 美国西海岸水合物脊综合大洋钻探计划IODP 311航次 (2005)
6. 南海南部马来西亚南沙海槽盆地Gumusut-Kakap钻探航次 (2006)
7. 印度大陆边缘NGHP 01、02航次 (2006、2015)
8. 中国南海北部GMGS -1/2/3/4航次 (2007、2013、2015、2016)
9. 韩国东海郁龙盆地UBGH 01、02航次 (2007、2010)



国际上水合物钻探区域

美国阿拉斯加北坡



BP/DOE/USGS
ConocoPhillips/JOGMEC/DOE
North Slope Borough/DOE
BLM/USGS

Mallik计划 98/02/07/08



南海海槽

1999-2000

2004, 2012-2013,
2017-2018



ODP204
IODP311



ODP 164



UBGH 1、2



墨西哥湾JIP
I 和 II航次



印度NGHP 1、2, 17-18



GMGS-1,2
GMGS-3,4



Gumusut

Shell; Sabah, Malaysia



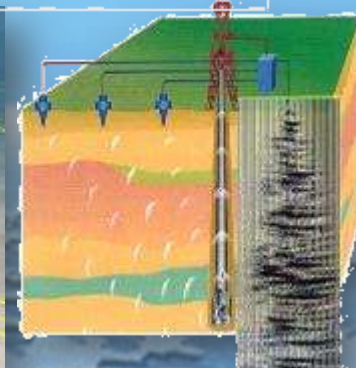
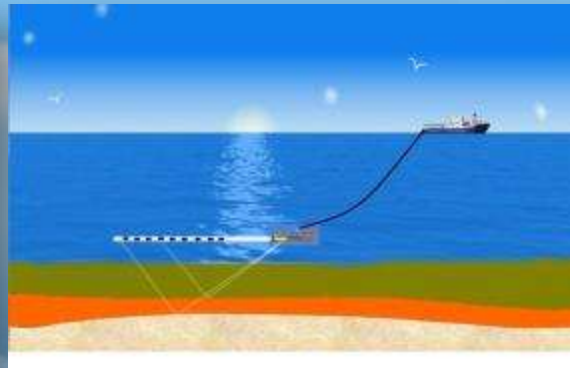
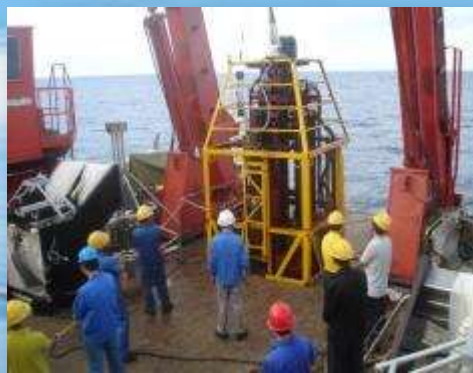
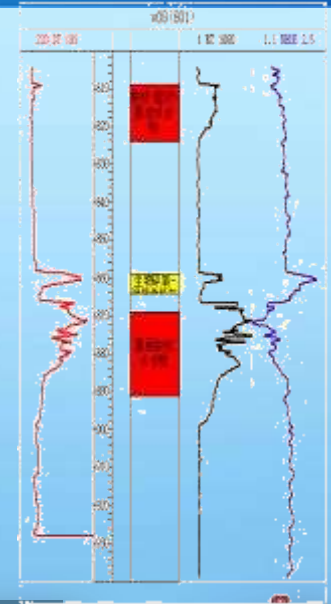
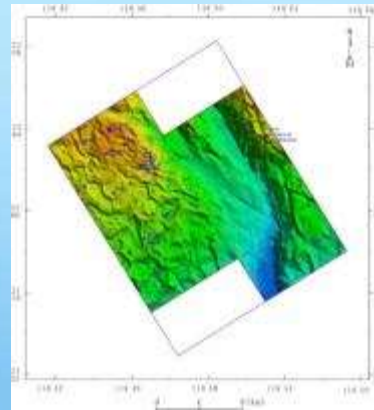
水合物勘查和资源评价科学问题

- 科学问题1：水合物运聚体系？水合物富集规律及动力学机制？
- 科学问题2：在海洋水合物系统中，甲烷储量和甲烷碳通量的控制因素有哪些？这些因素是如何随着时间产生变化的？
- 科学问题3：如何才能建立一个有效的水合物资源评价体系？
- 科学问题4：水合物储层如何响应自然的和人为的环境条件变化？



水合物高精度探测技术

- 三维高密度地震勘探技术
- 深拖式高分辨率浅地层探测技术
- 深拖式地球化学探测技术
- 保压取芯和现场测试技术
- 储层精细刻画和定量描述技术



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

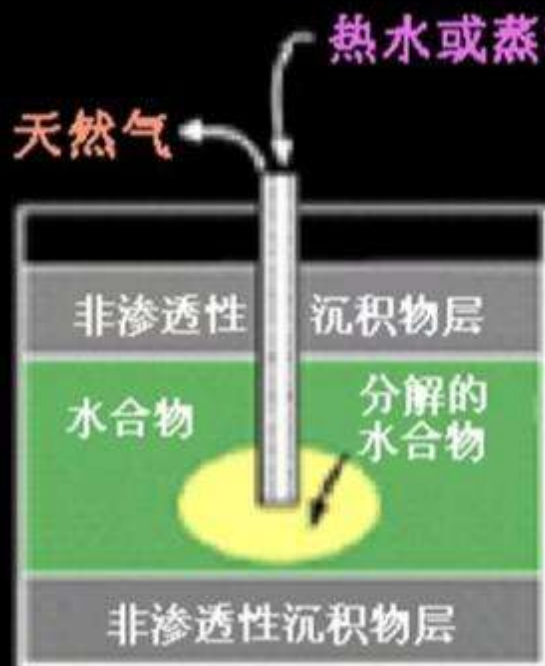
水合物资源开采方法

天然气水合物开采方法

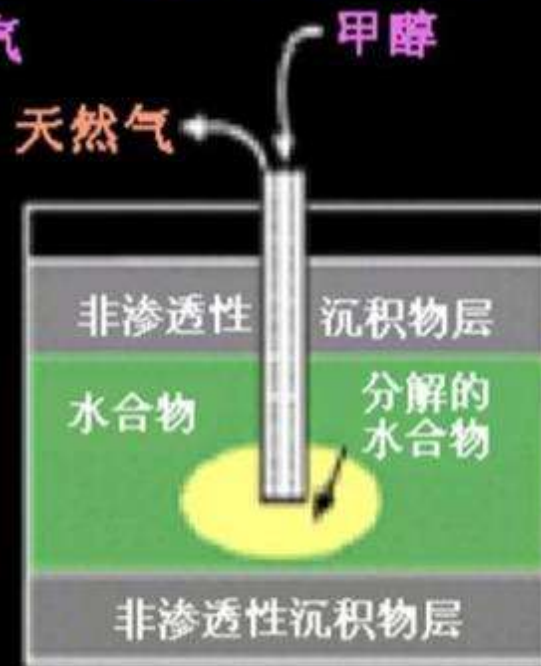
降压法



加热法

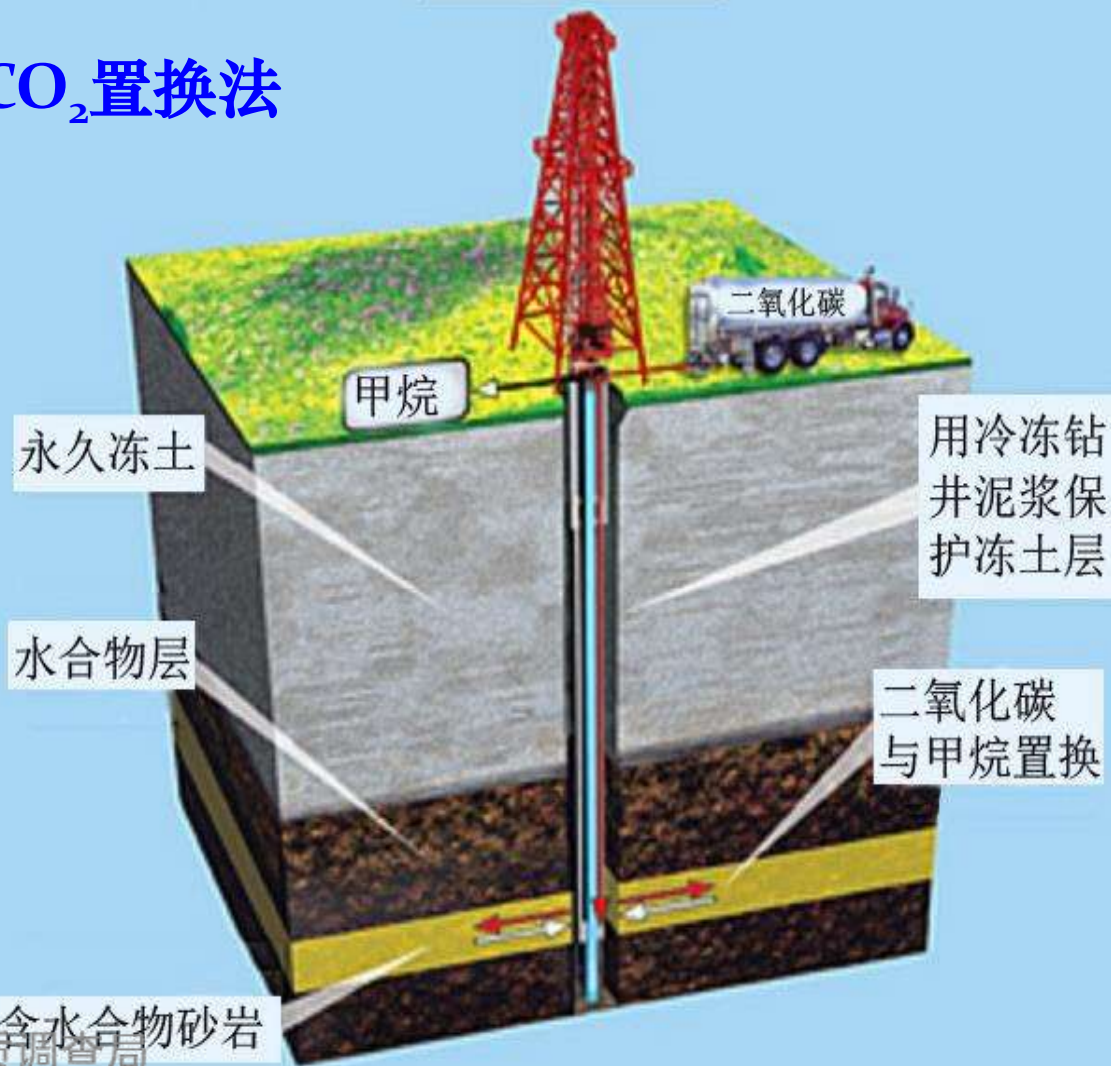


添加化学剂法



水合物资源开采方法

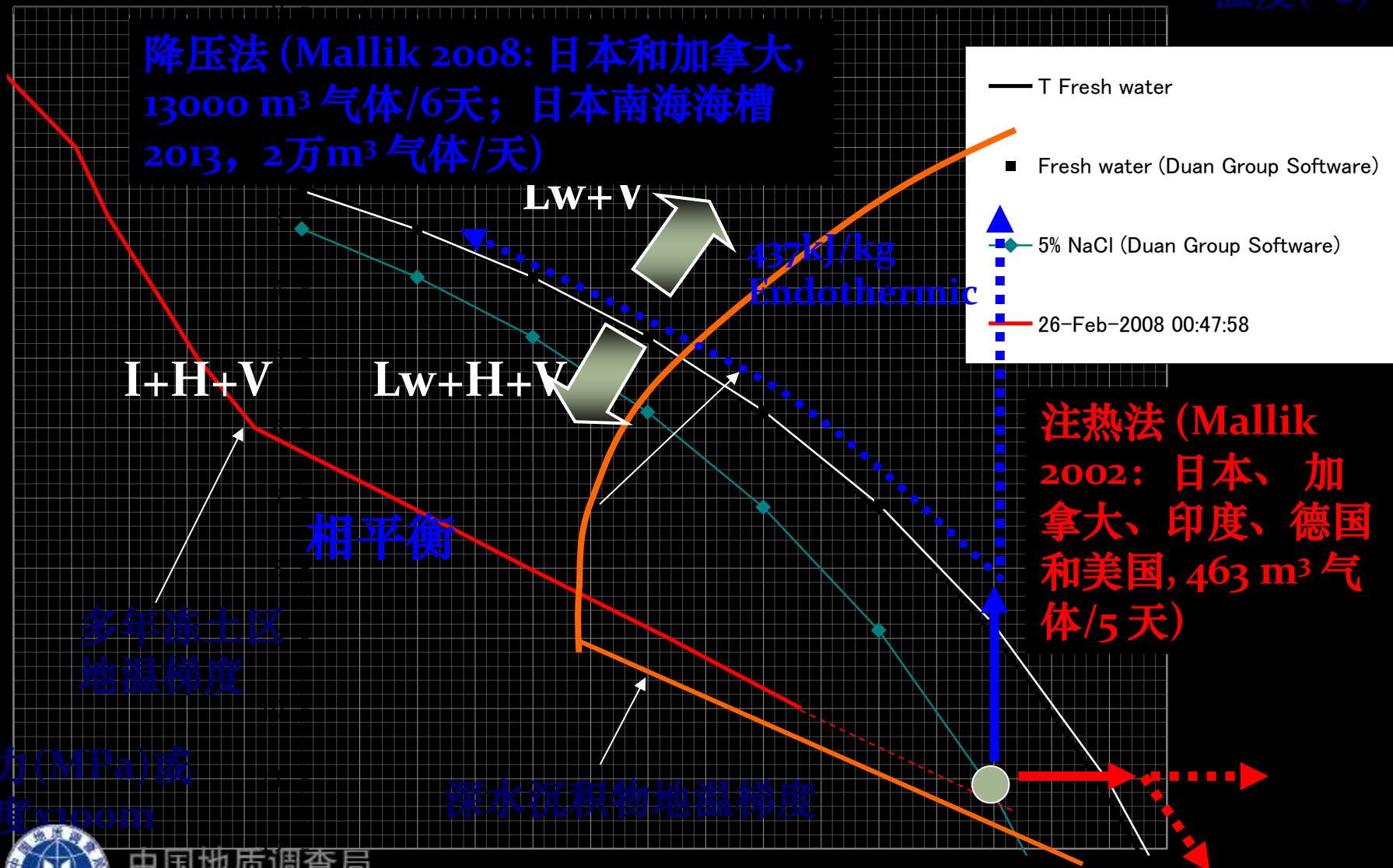
CO₂置换法



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

温度(°C)

降压法 (Mallik 2008: 日本和加拿大,
13000 m³ 气体/6天; 日本南海海槽
2013, 2万m³ 气体/天)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

国际上水合物开采试验项目

- 1.加拿大麦肯齐三角洲水合物开采试验项目 (1998/2002/2007-2008)
- 2.美国阿拉斯加北坡 水合物开采试验项目 (2007、2011-2012)
- 3.MH-21日本南海海槽开采试验 项目(2012-2013, 2017-2018)
- 4.印度大陆边缘水合物开采试验项目 (2017-2018)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

国际上水合物开采试验区域

美国阿拉斯加北坡



BP/DOE/USGS
ConocoPhillips/JOGMEC/DOE
North Slope Borough/DOE
BLM/USGS

Mallik计划 98/02/07/08



南海海槽

1999-2000

2004, 2012-2013,
2017-2018



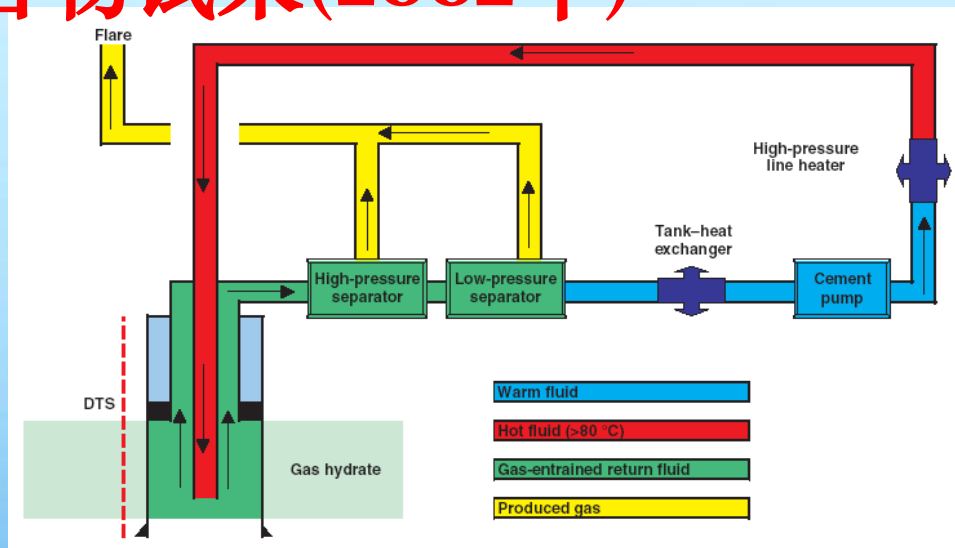
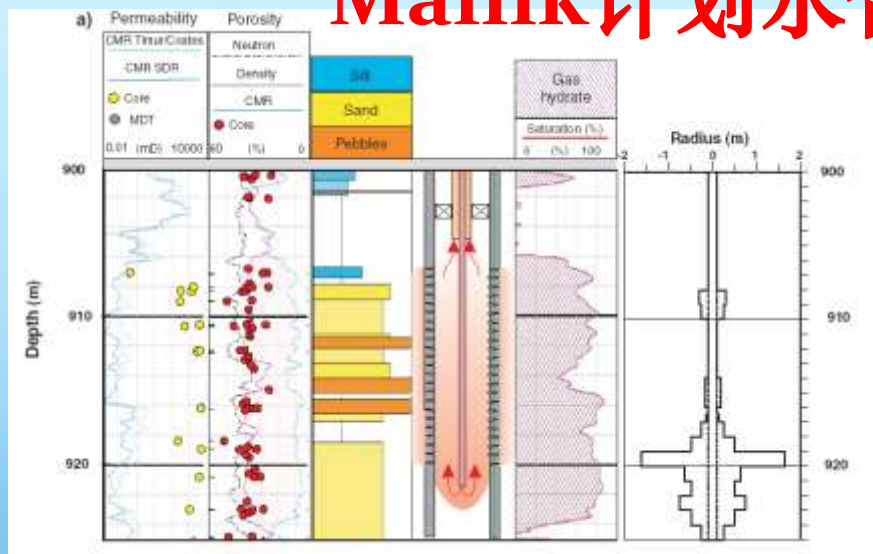
印度NGHP 1、2, 17-18



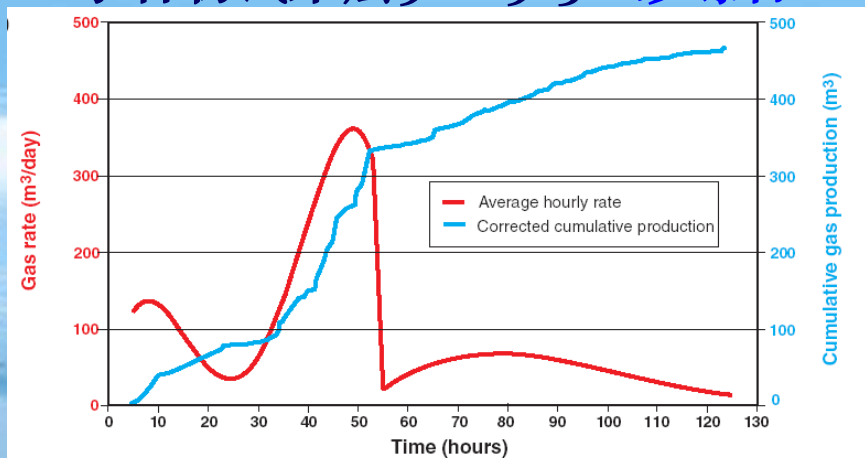
中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



Mallik计划水合物试采(2002年)



水合物试采层906-925m砂砾岩



水合物开发试验工艺和流程

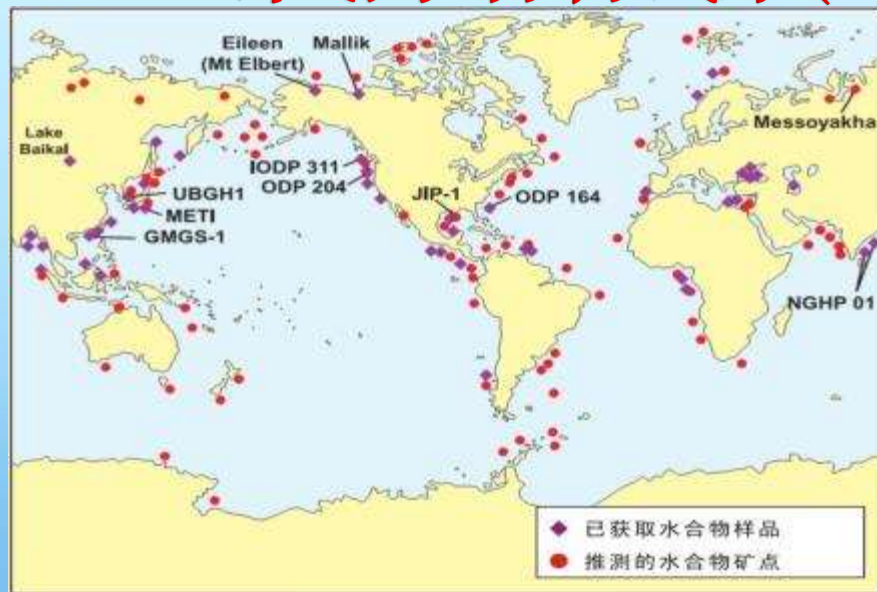
5天在冻土带含水合物沉积层中
通过注热法产出463 m³天然气。

试验结论：效率低，简单降压技术可能更为有效

，原因是Mallik富砂的含水合物沉积层具有较高的渗透性。



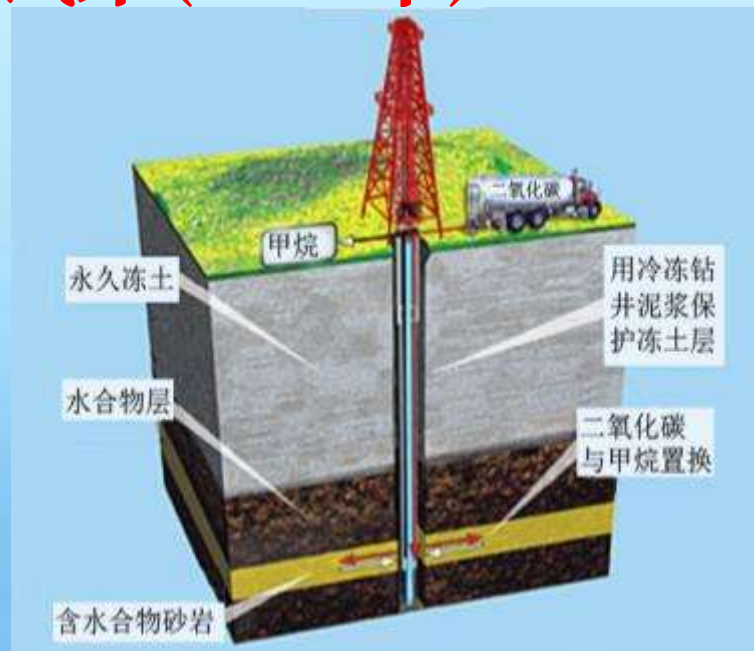
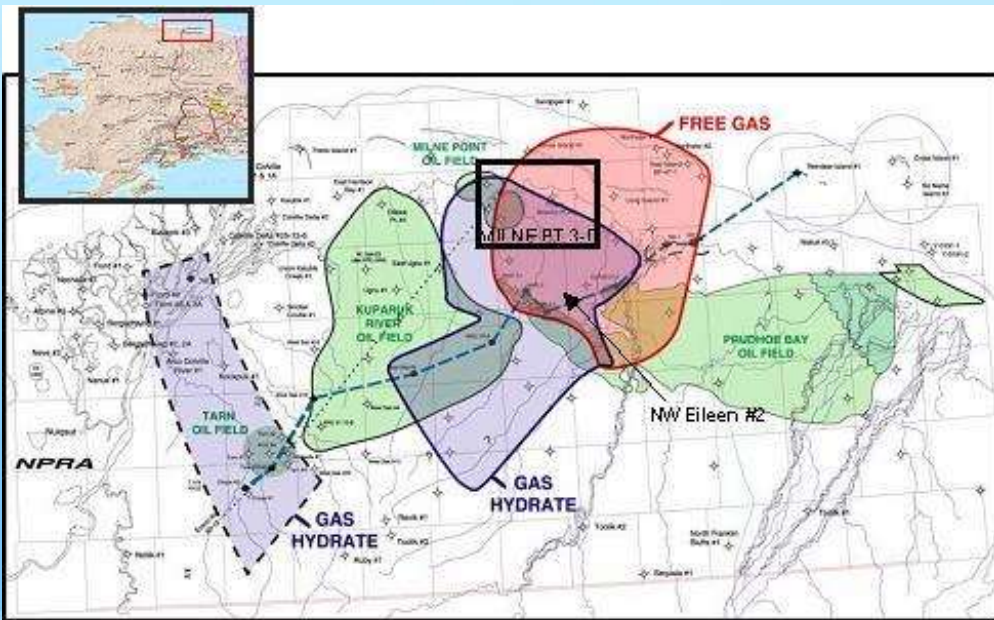
Mallik计划水合物试采(2007-2008年)



年度	井位	开采方法	连续有效生产时间	累计产量	日产
2007	Mallik2L-38	降压法+注热法	12.5小时	830m ³	由于出砂问题被迫终止
2008	Mallik2L-38	简单降压法	139小时(6天)	13000 m ³	2000~4000 m ³ /日 由于出砂问题被迫终止



阿拉斯加北坡水合物试采(2012年)

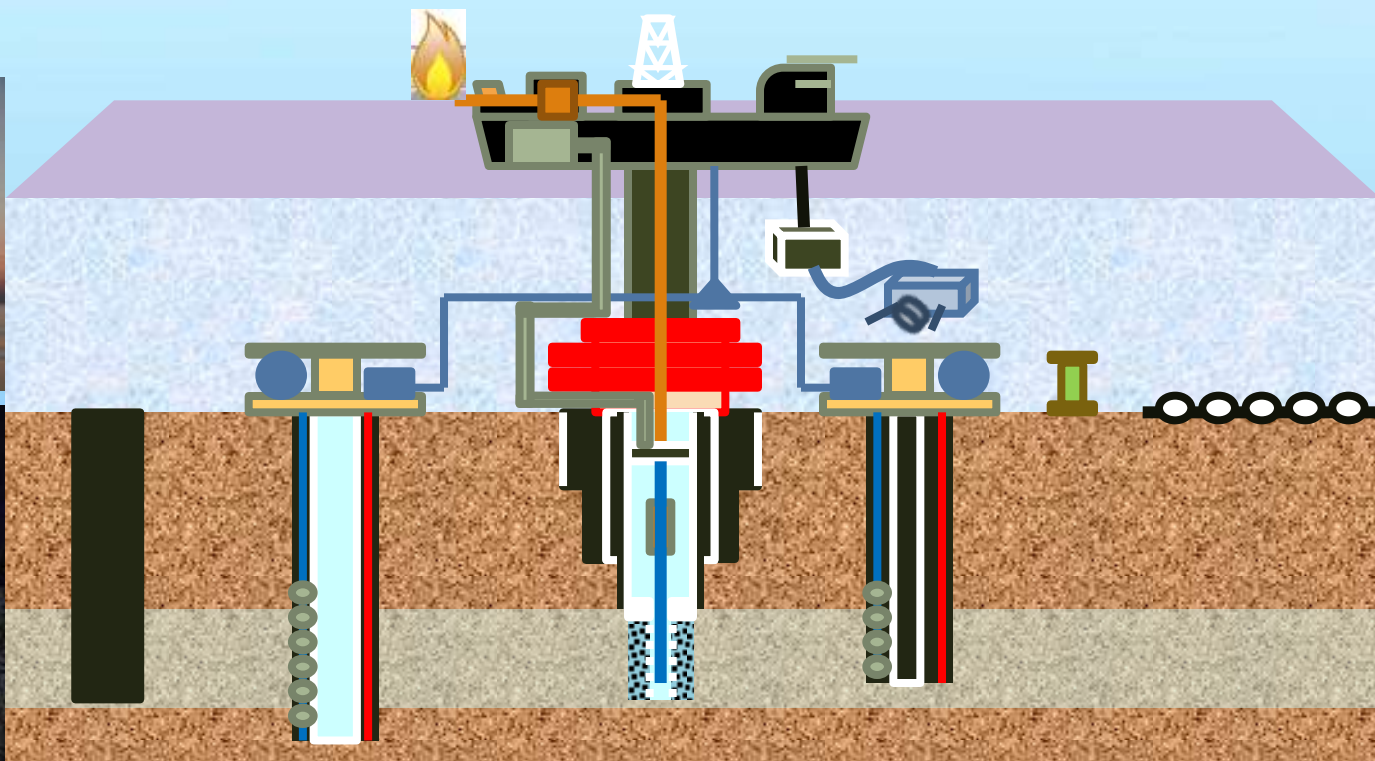


2012年2月15日至4月10日美国能源部、ConocoPhillips公司、日本国家石油天然气和金属公司、挪威Bergen大学合作，运用CO₂与CH₄水合物置换，结合降压法，水合物试采获得成功，产气2.4万方，效率低



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

南海海槽水合物试采(2013年)



地球号，**简单降压法**(在地层直接分解成甲烷和水)

1口试采井，2口监测井，1口取心井，高饱和度河道砂

原计划试采1周至1个月，但由于出砂问题而被迫中止

6天产11.9万方气、1245方水，效率低，说明技术有很大提高空间

国际上水合物试采的经验与教训

- 中-粗砂质水合物储层是试采优先目标，但南海北部目前发现的主要是粉砂质水合物储层
- 降压法试采有效，但效率需要大幅提高，原因是试采过程中传质、传热规律未掌握
- 出砂是水合物试采实施的主要风险

南海海槽浊积砂、
墨西哥湾水道砂
水合物储层

B

印、韩、中钻获的
裂隙、断裂控制水
合物储层

C

墨西哥湾水合物
脊的水合物丘储层

D

资料来源：

A: Collett, 1993; Collett, 1995

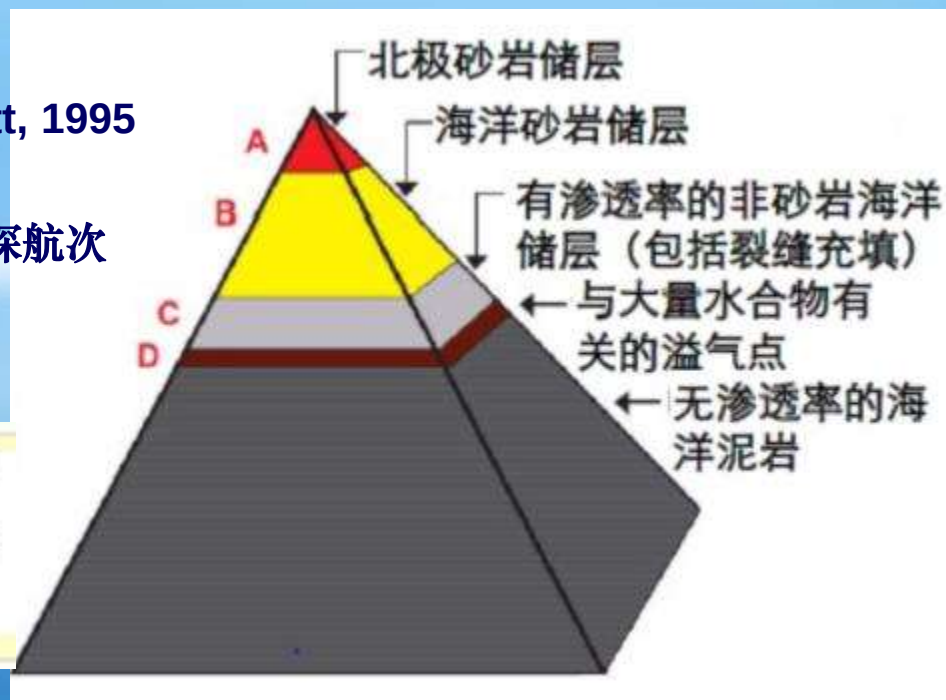
B: MMS, 2008

C: 印度、韩国水合物钻探航次

D: 墨西哥湾水合物丘

E: Collett, 1995

-
- 原地生成的资源量增加
 - 储层品质降低
 - 资源评价的可信度降低
 - 生产难度加大
 - 可能的采收率降低





水合物开采关键科学问题、关键技术

重大科学问题：

- 水合物试采过程中多相流动、传热和储层变化规律
- 水合物试采过程中出砂机理与模型

关键技术：

- 水合物试采目标综合评价技术
- 水合物高效试采技术
- 钻完井技术
- 粉砂质储层防砂技术

三、水合物钻探目标优选



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



水合物藏类型和特征



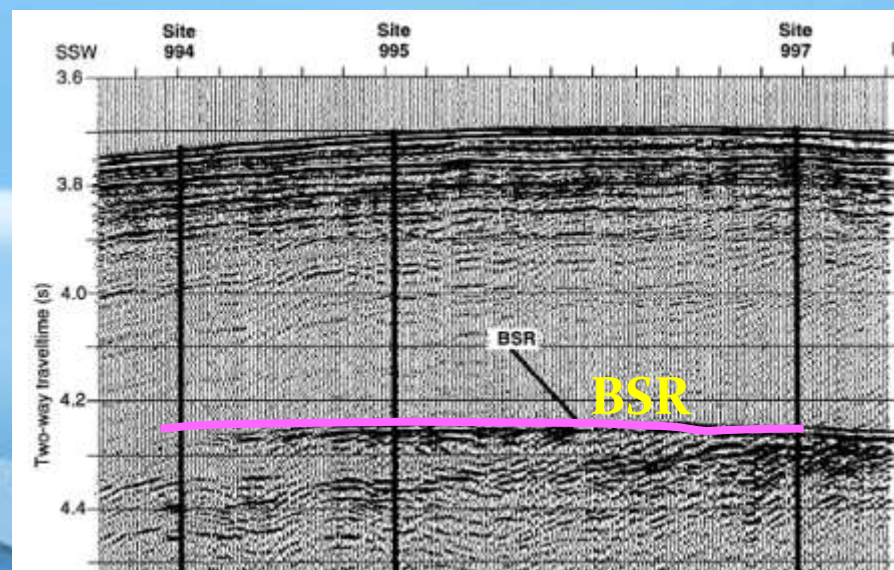
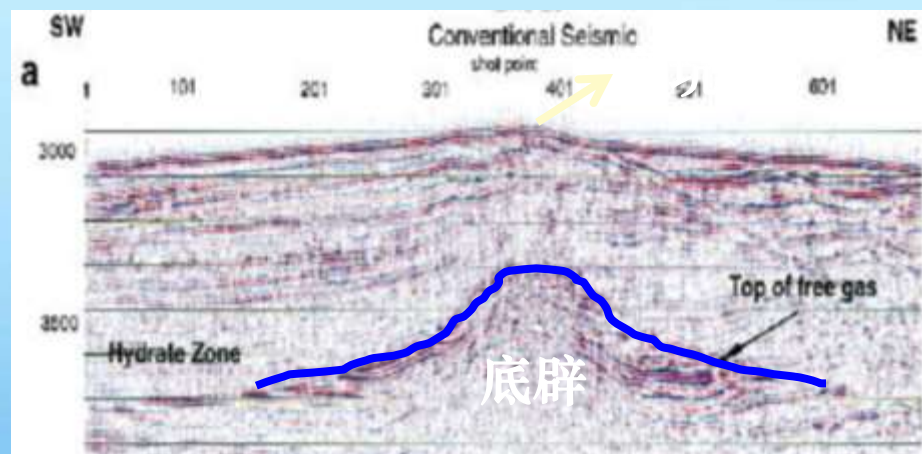
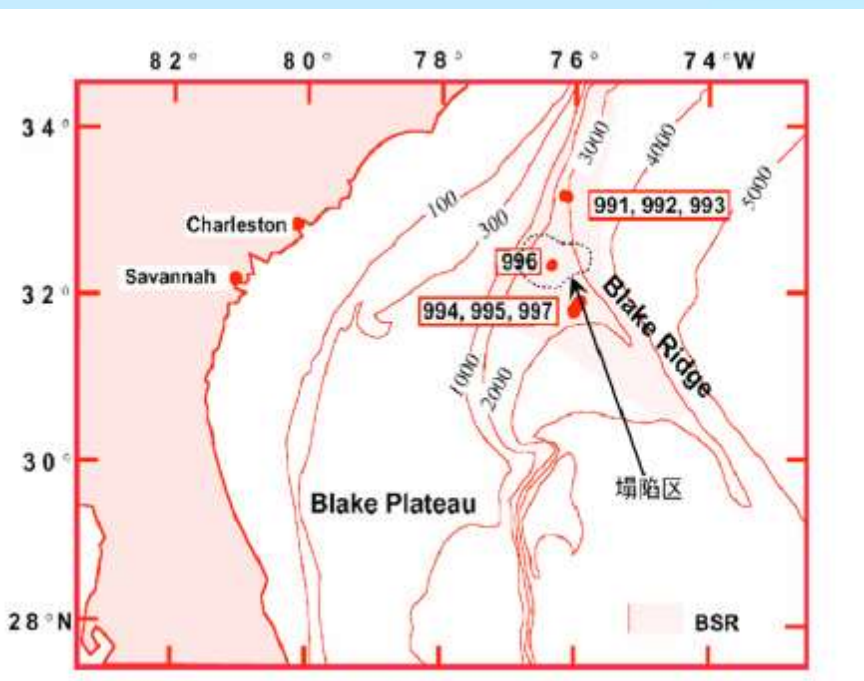
(1) 扩散型水合物: 存在于深层沉积物孔隙中的孔隙充填水合物, 分布广, 不同类型沉积物中的水合物饱和度相差较大

(2) 渗漏型水合物: 存在于海底表面或浅层与断裂、底辟等构造有关的裂隙中的裂隙充填水合物, 分布局限, 受流体活动控制

布莱克海台ODP164 (1995)

被动大陆边缘

站位选择依据：BSR和构造-地貌特征



	隆起区	脊部	底辟区
站位	991,992,993	994,995,997	996

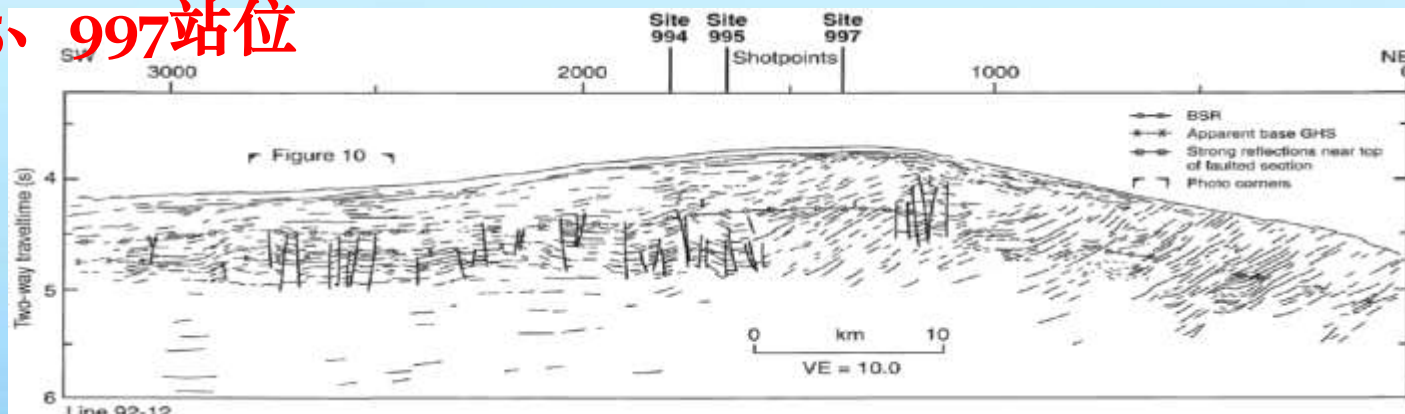
(Paull and Matsumoto, 2000)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

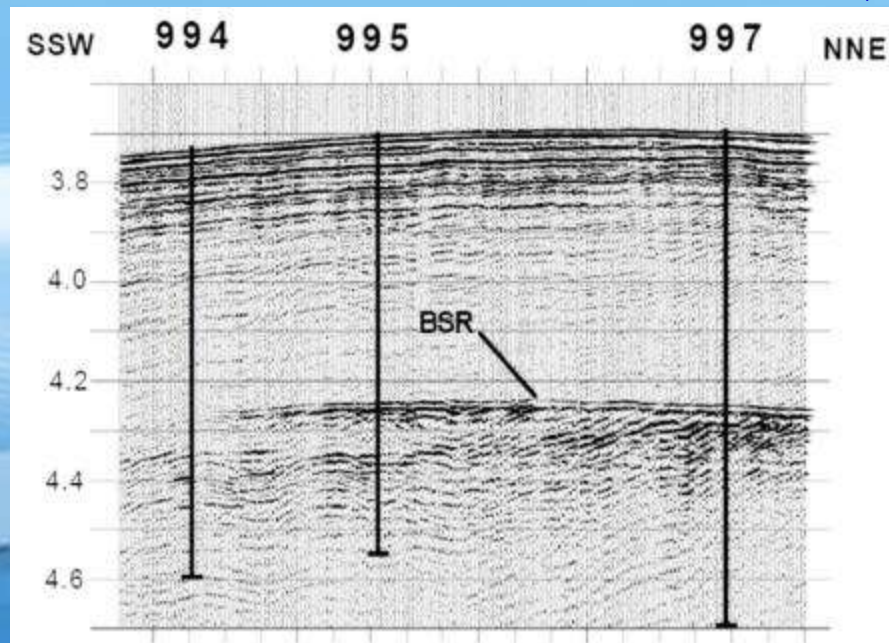


994、995、997站位



横穿布莱克海台侧翼

选择依据：有无BSR、BSR强弱



994：有水合物

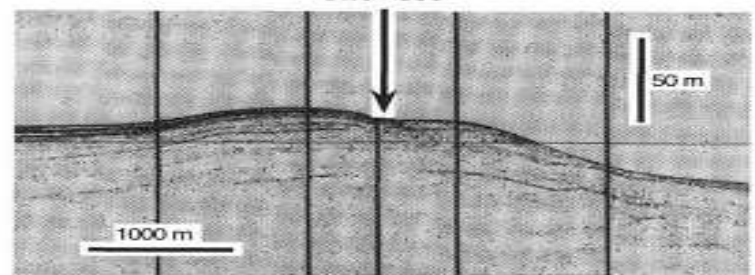
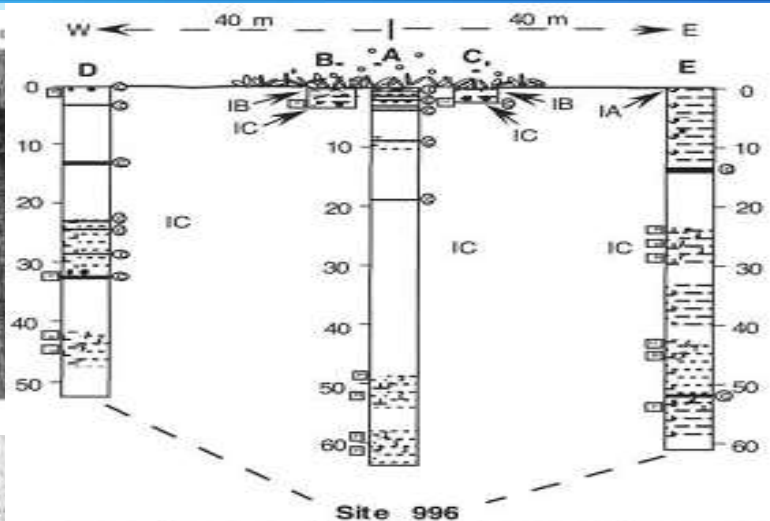
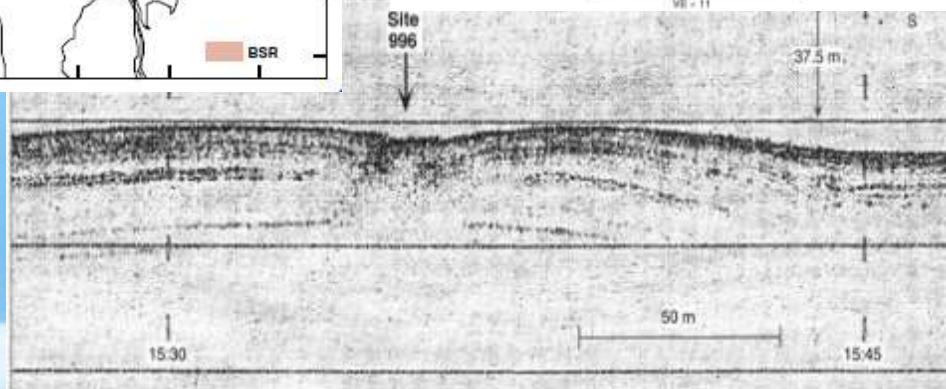
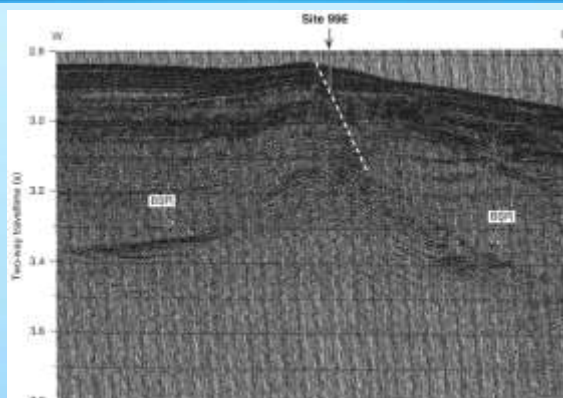
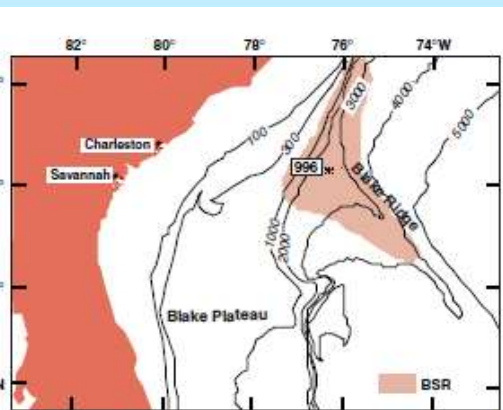
995：无水合物

997：有水合物

扩散型水合物



996站位



选择依据：底辟、麻坑、断裂

赋存沉积物：砂质软泥、富含孔虫
和硅藻的浊流沉积层



块状水合物



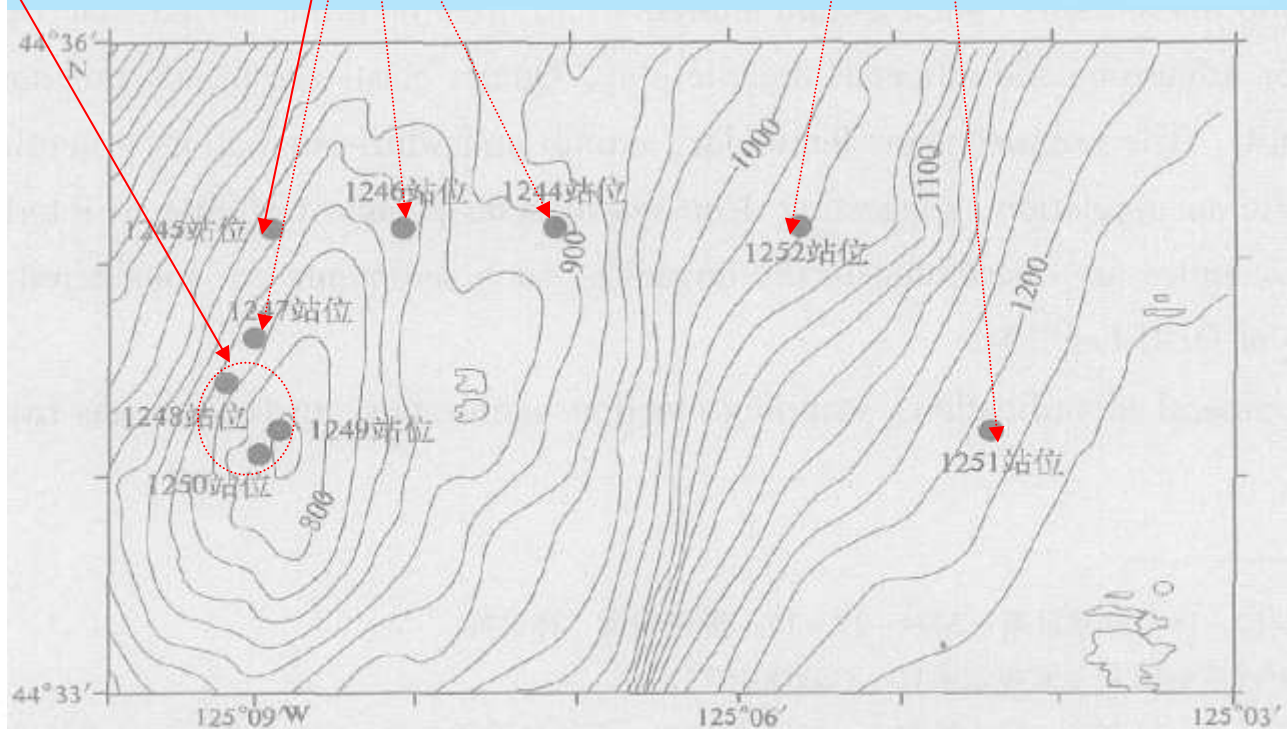
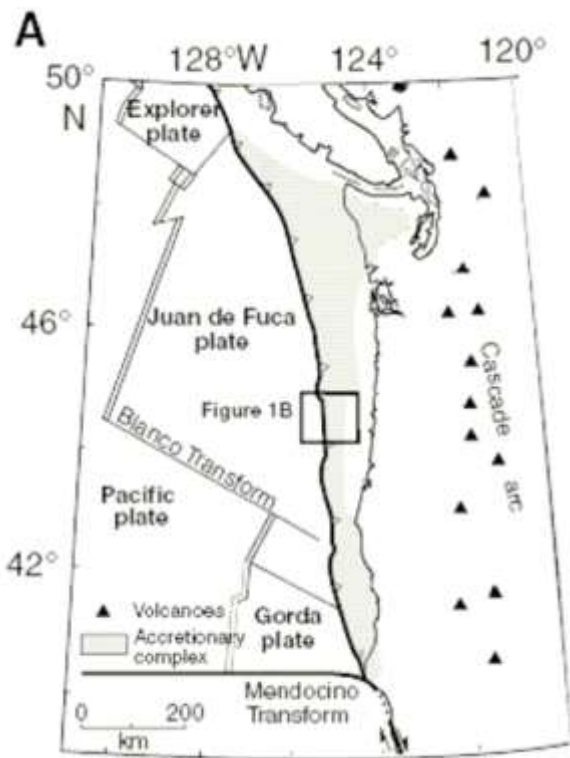
水合物脊ODP 204 (2002)

活动大陆边缘

海底气渗漏顶部

水合物脊翼部

水合物脊东部盆地



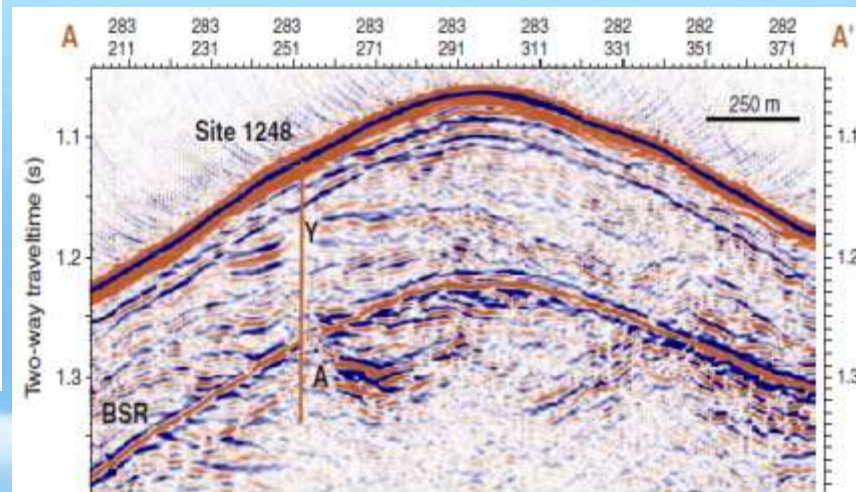
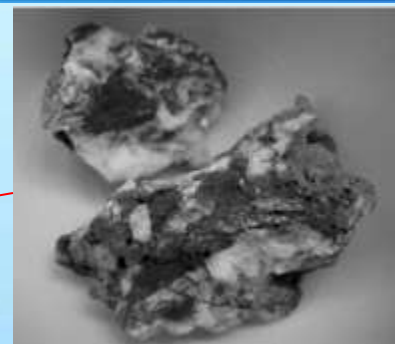
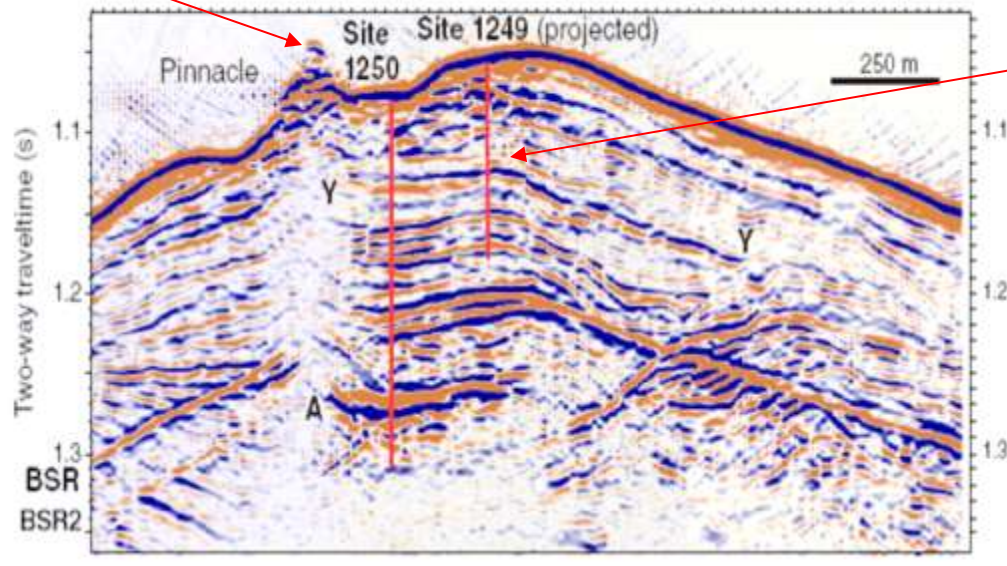
位置：俄勒冈州卡斯迪亚大陆边缘水合物脊南部

井位部署：沿水合物脊及邻近斜坡盆地分布



1248、1249、1250站位

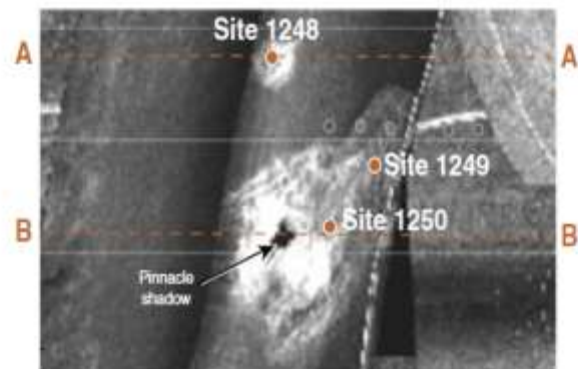
生物礁（甲烷AOM作用产物）



选择依据：强渗漏区

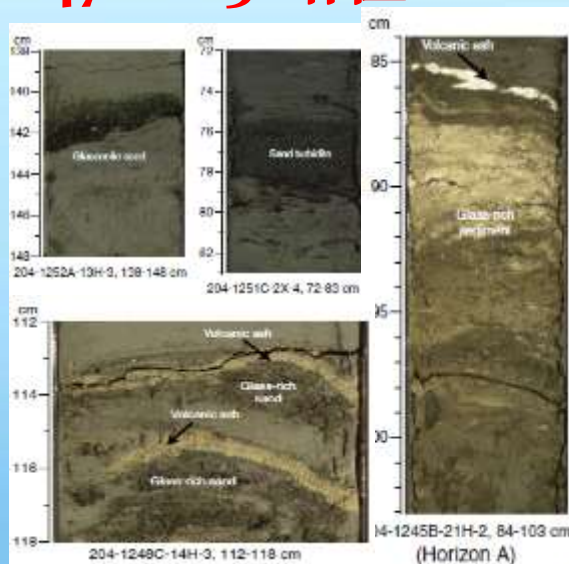
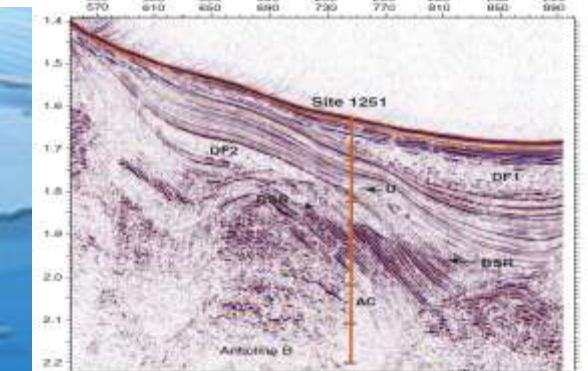
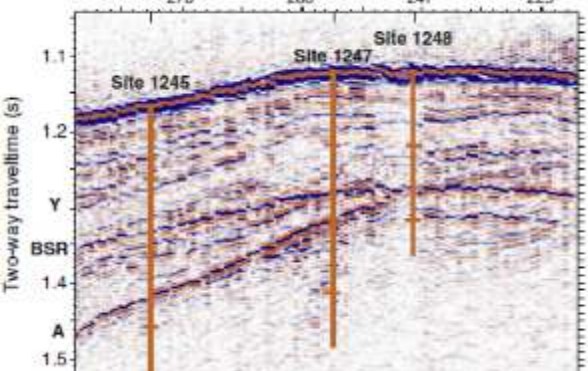
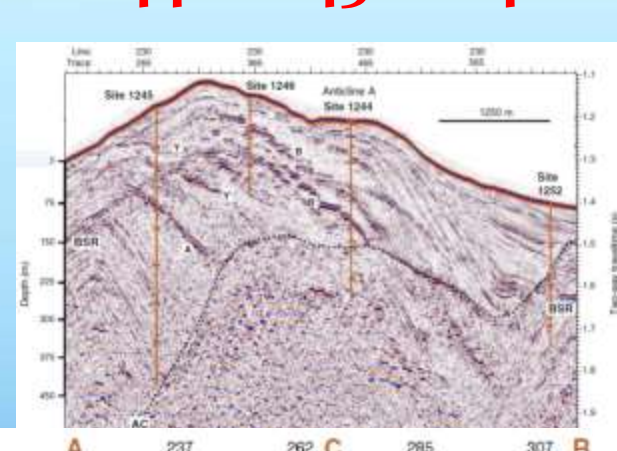
赋存沉积物：富含硅藻的粉砂质
粘土、浊流沉积

水合物从海底往下均有分布,但以
海底附近饱和度最高

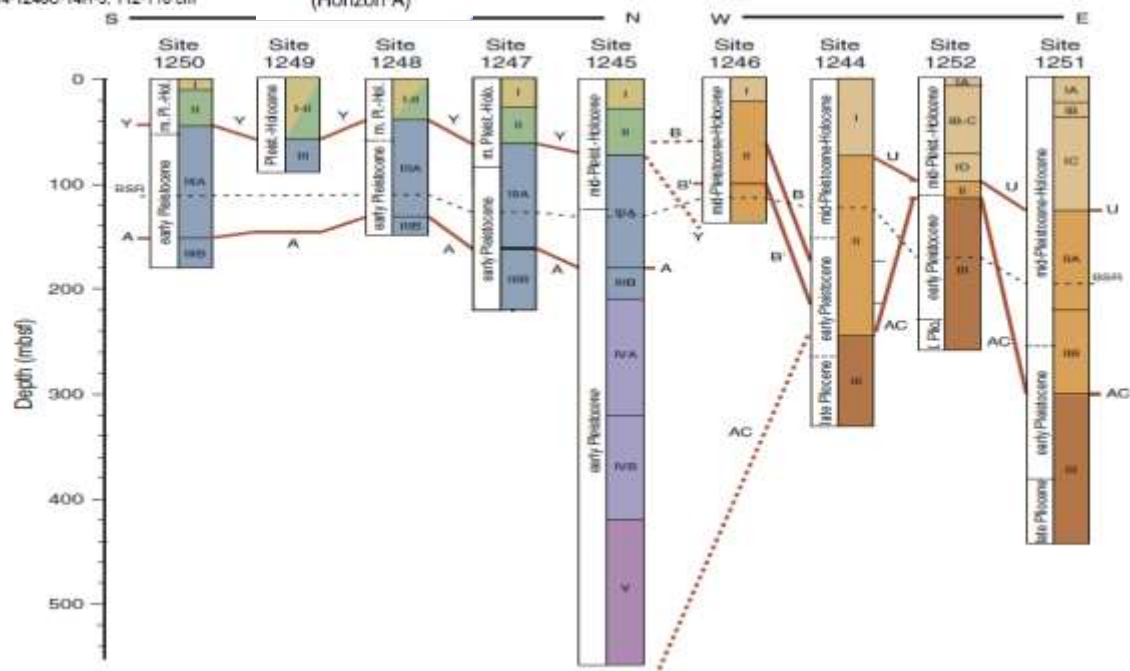




1244、1245、1246、1247、1251 站位



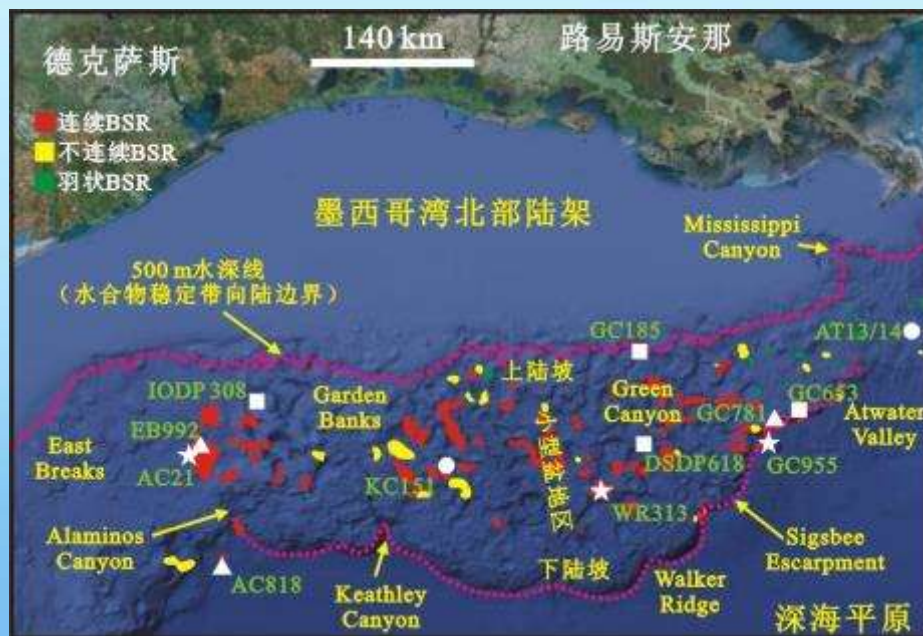
选择依据：烟囱、粗粒
沉积与富火山灰沉积间
不整合、小断距正断层
赋存沉积物：粉砂-砂油
流沉积层
水合物有利储层



墨西哥湾JIP I和II航次(2005、2009)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



井名	API号	纬度(北)	经度(西)	水深 (英尺)	井深 (钻台之下英尺)	井深 (海底之下英尺)
AC21-A	608054007000	26 55 23.8503	94 54 00.0702	4889	6700	1760
AC21-B	608054007100	26 56 39.1900	94 53 35.6216	4883	6050	1116
GC955-H	608114053700	27 00 02.0707	90 25 35.1142	6670	8654	1933
GC955-I	608114054400	27 00 59.5305	90 25 16.8928	6770	9027	2205
GC955-Q	608114054300	27 00 07.3484	90 26 11.7156	6516	8078	1511
WR313-G	608124003900	26 39 47.8841	91 41 01.9404	6562	10200	3586
WR313-H	608124004000	26 39 44.8482	91 40 33.7467	6450	9770	3269

(Boswell et al., 2013)

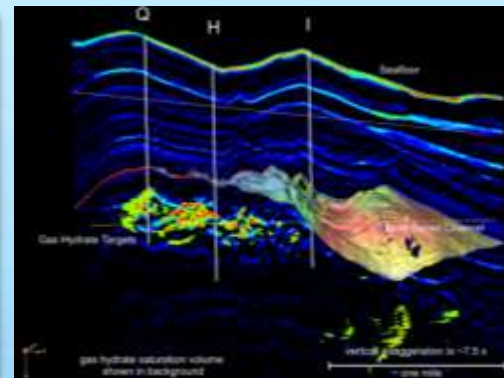
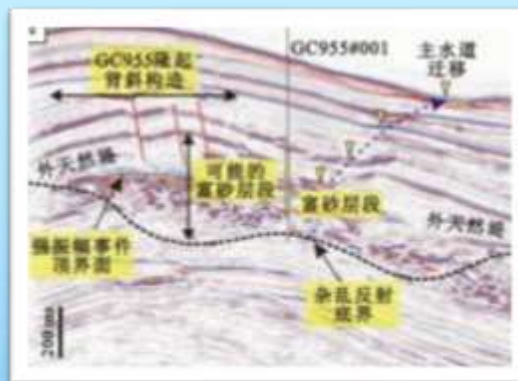


早期研究泥质沉积物中扩散型水合物，2005年钻探发现这类水合物不利于开采；2009年钻探测井对砂层内高饱和度水合物进行研究



限制性海底扇中的高饱和度砂质储层

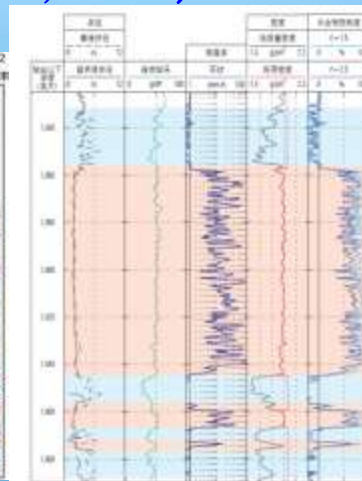
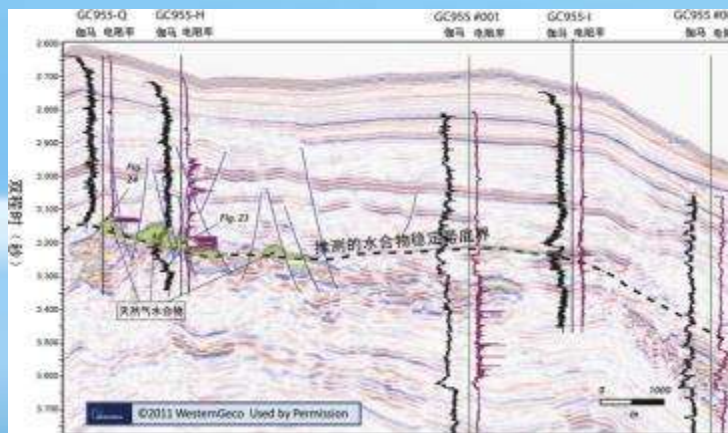
GC



GC955站位 (Boswell et al., 2012a, 2012b)

墨西哥湾站位及沉积环境背景
(Kendall, 2006)

选择依据：强振幅、杂乱反射、水道形态、下切/侵蚀



地震反演显示不规则强振幅；测井高电阻率显示砂层水合物，饱和度50-85%。



印度活动大陆边缘NHGP(2006)

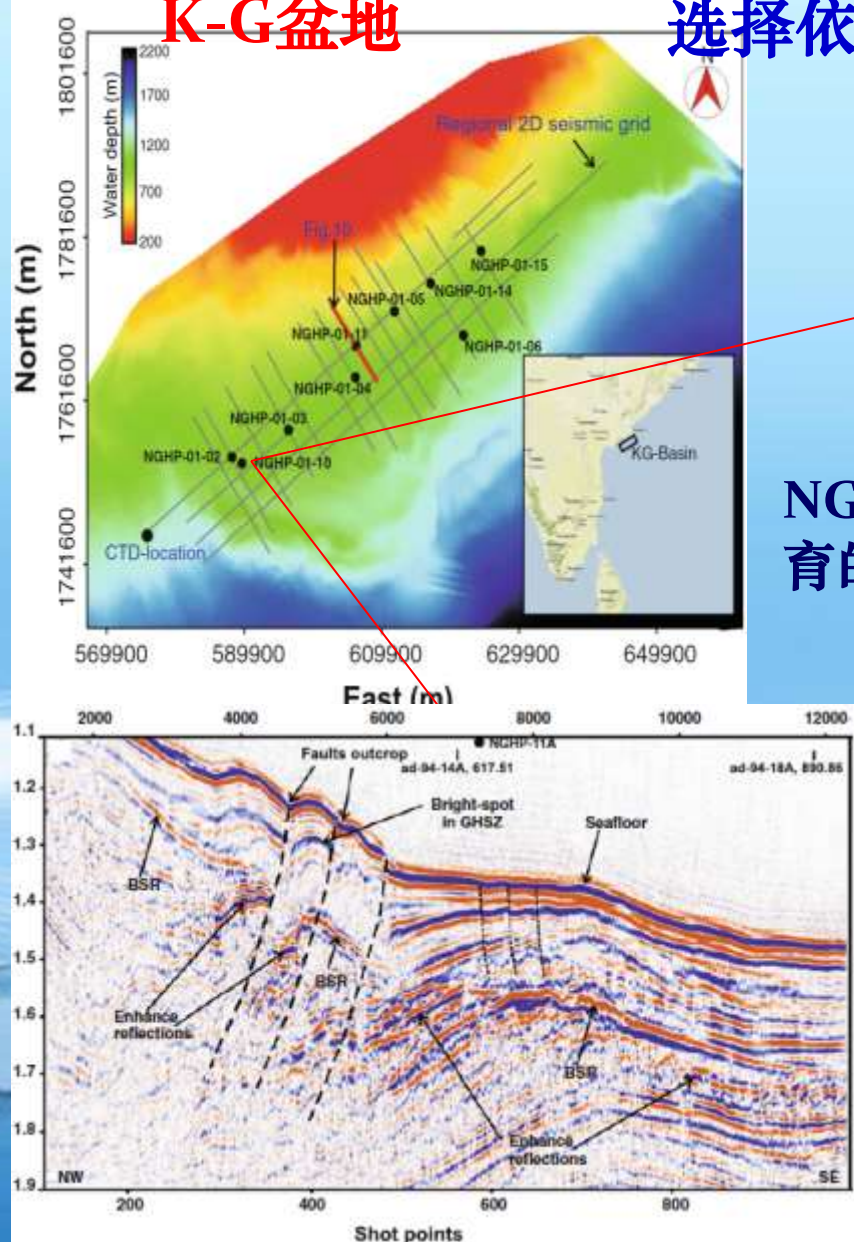


- K-K盆地1个站位
- K-G盆地15个站位
- 曼哈纳迪盆地4个站位
- 安达曼岛近海1个站位
- K-G盆地发现裂隙充填型块状水合物
- 安达曼岛近海海底以下600米深处发现了富含水合物的火山灰层

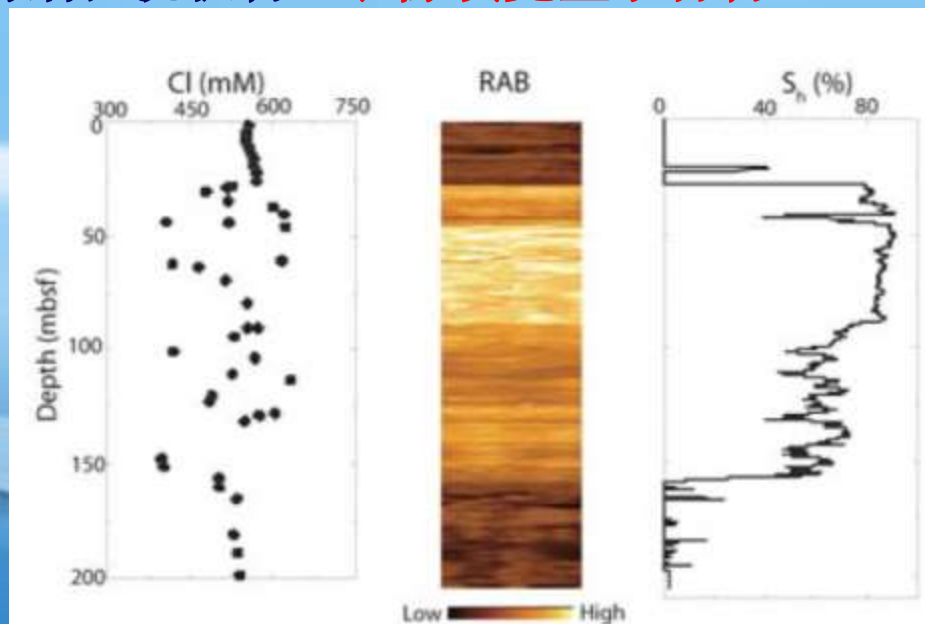


K-G盆地

选择依据：麻坑、泥火山和地震剖面亮点



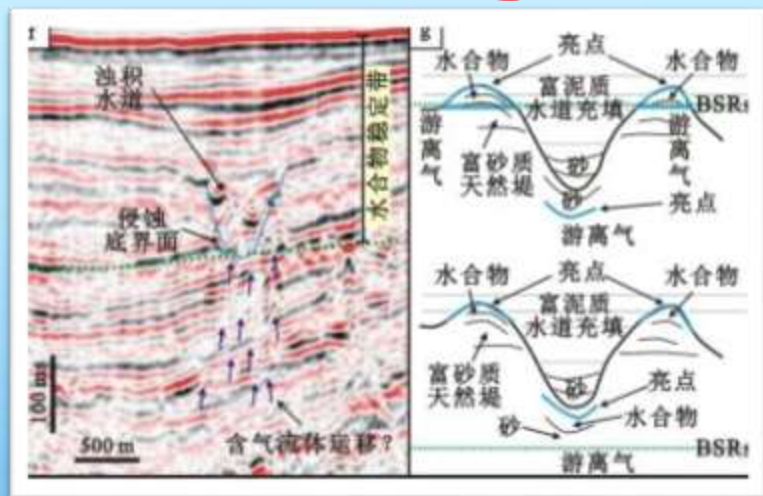
NGHP-01-10站位发现块状水合物存在于裂隙发育的细粒沉积物—**裂隙填充型水合物**





K-K盆地

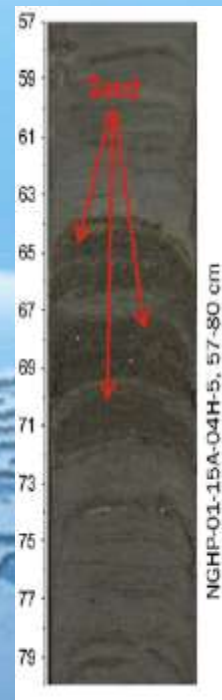
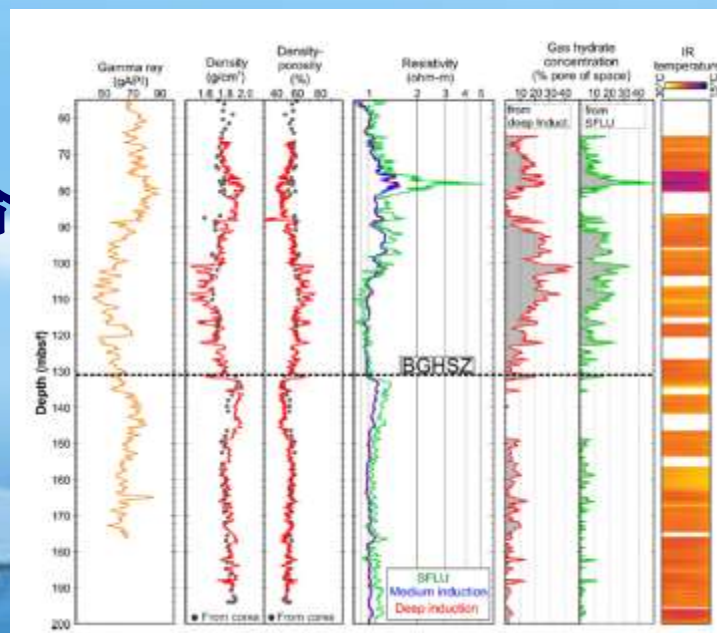
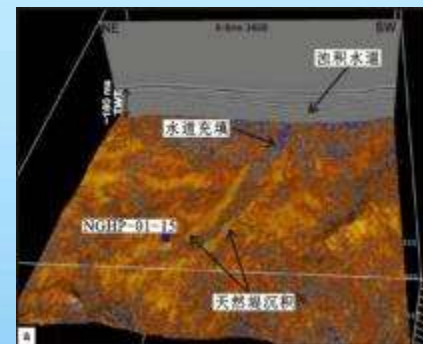
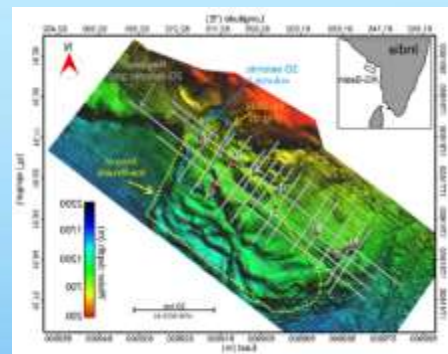
选择依据：强振幅、杂乱反射、
水道形态和空间展布、下切/侵蚀



印度陆缘浊积水道与水合物地震解释模式
(Riedel et al., 2011)

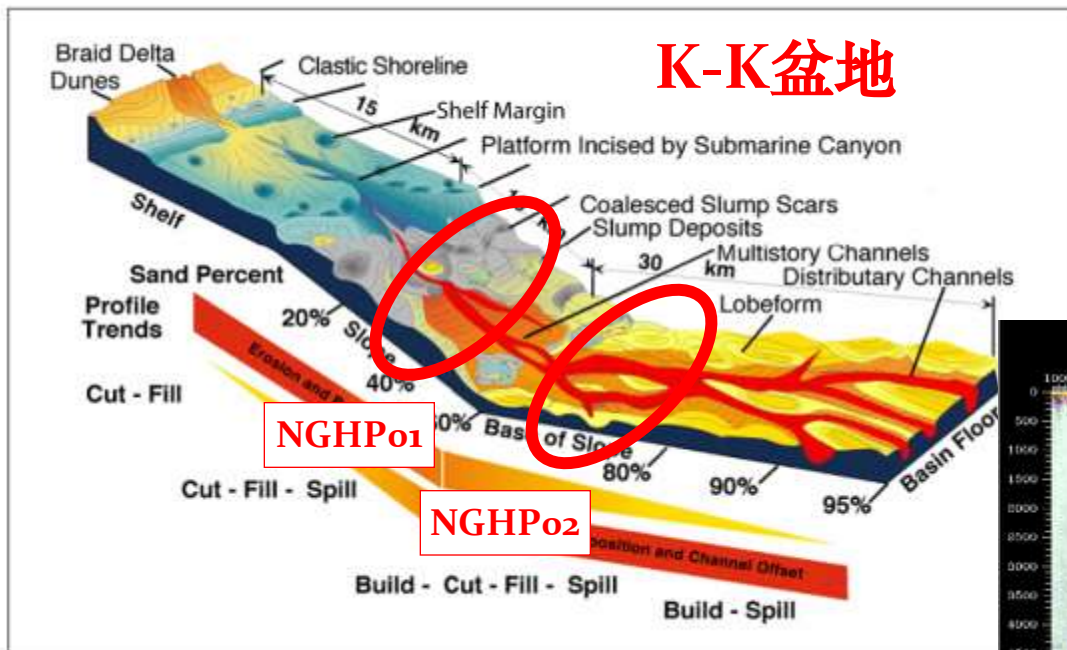
NGHP01-15: 水道-天然堤复合
体系砂质沉积物分布直接控制
水合物产出

海底之下80m砂质沉积物中，
饱和度高达40%。

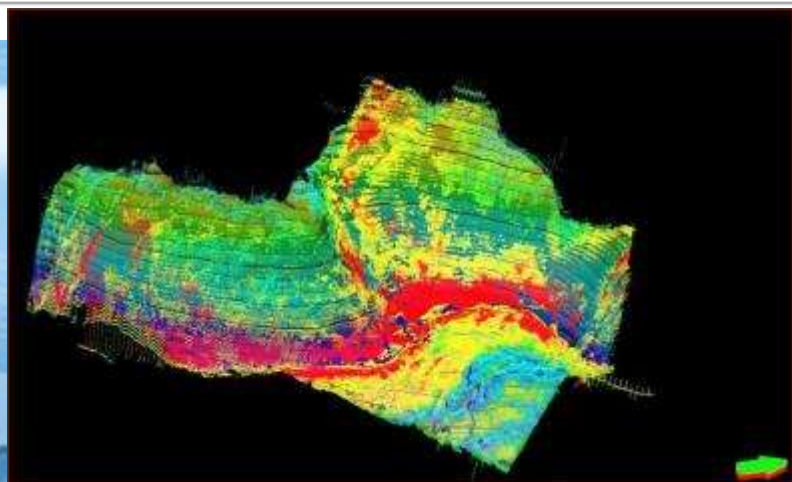
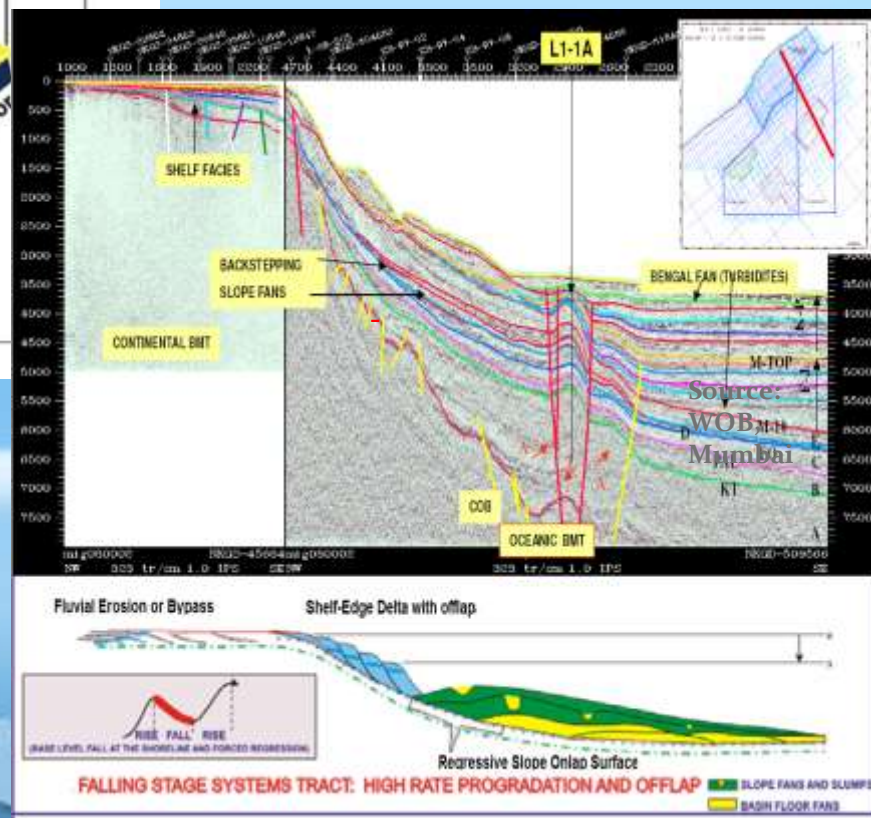




K-K盆地



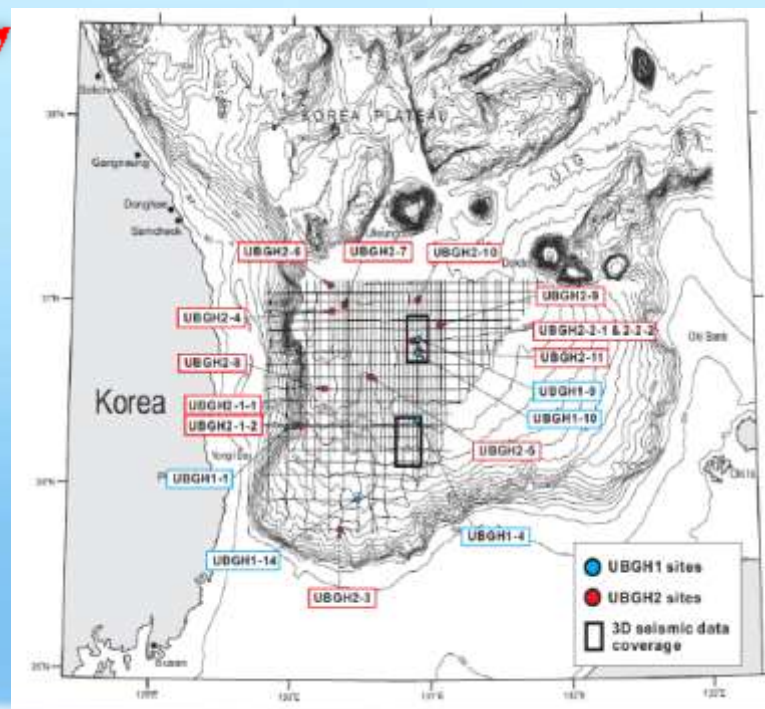
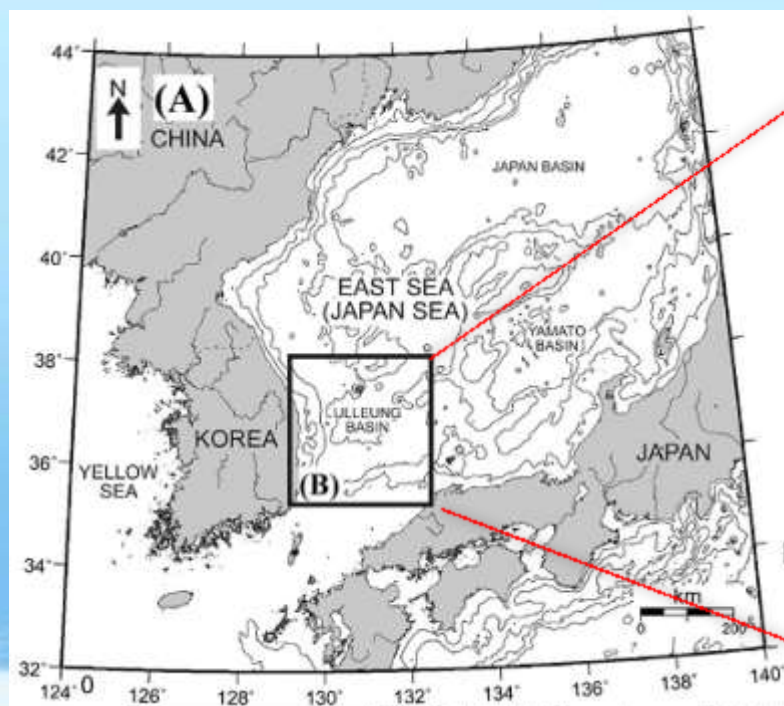
印度大陆边缘带水道供给的 海底扇系统(限制性海底扇) (Collett, 2014)



韩国郁龙盆地(2007、2010)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



Hole	Location		Water depth (mbss)	BSR/BGHSZ * depth (mbsf)
	Latitude (N)	Longitude (E)		
UBGH1-01A	36° 15' 04.16"	130° 02' 03.25"	1444.0	184
UBGH1-04A	36° 16' 04.33"	130° 54' 23.24"	1841.4	194*
UBGH1-04B	36° 16' 05.21"	130° 54' 23.04"	1841.4	194*
UBGH1-04C	36° 16' 05.49"	130° 54' 22.83"	1841.4	194*
UBGH1-09A	36° 42' 49.19"	130° 54' 00.29"	2099.1	177*
UBGH1-09B	36° 42' 49.27"	130° 54' 00.22"	2099.1	177*
UBGH1-09C	36° 42' 48.97"	130° 54' 00.47"	2099.1	177*
UBGH1-10A	36° 38' 07.69"	130° 54' 00.24"	2077.0	182*
UBGH1-10B	36° 38' 07.89"	130° 54' 00.01"	2077.0	182*
UBGH1-11A	35° 50' 47.52"	130° 28' 01.30"	1356.3	174

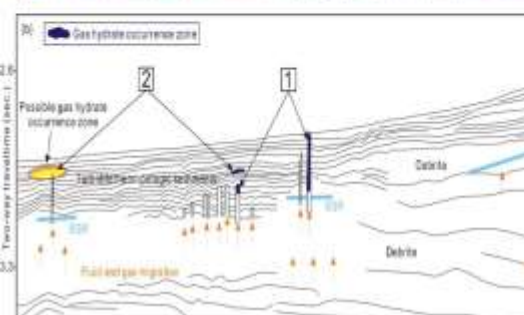
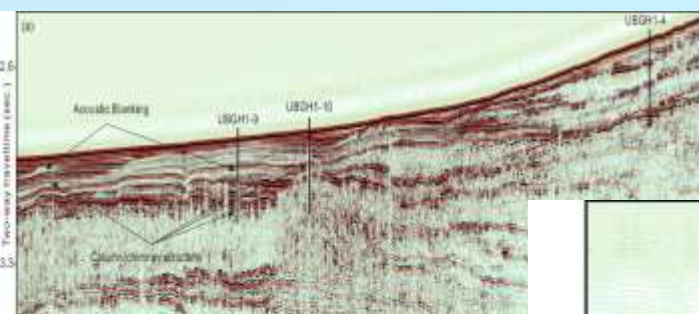
站位选择依据：BSR、气烟囱

	BSR	气烟囱
UBGH1	1、7、11	2、6、9
UBGH2	5、9	1、2、11

(Ryu et al., 2013)

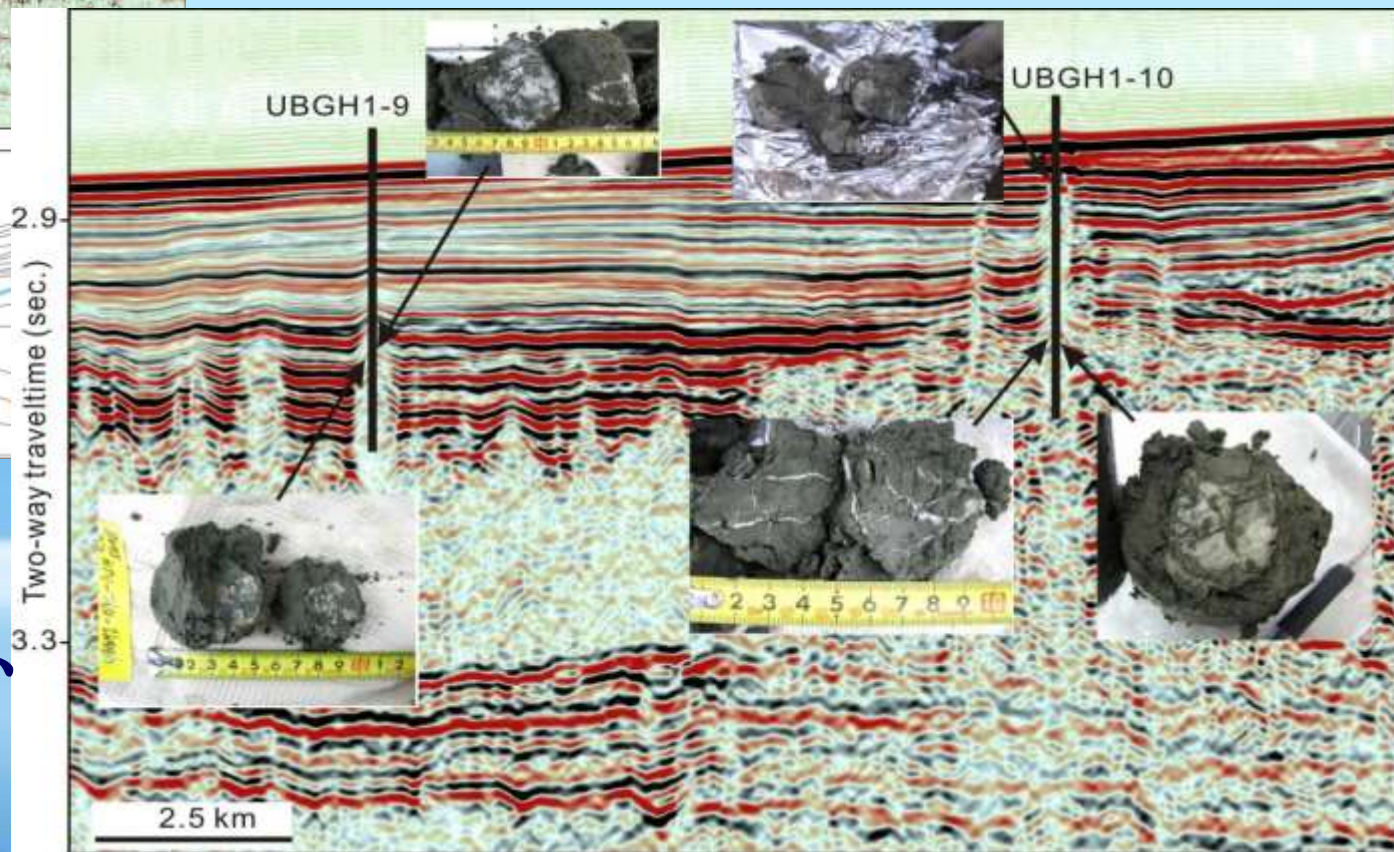


UBGH1-4站位发现扩散型水合物； UBGH1-9、10站位发现裂隙充填水合物



2007年

选择依据：BSR、
烟囱、浊流沉积

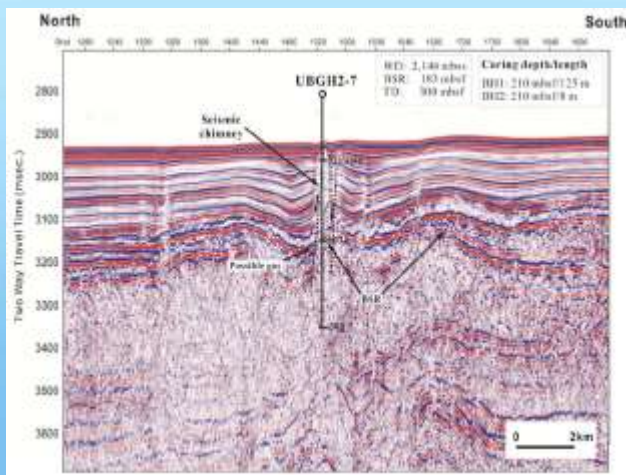


水深1800米以上，UBGH1-10, UBGH1-9 , UBGH1-4站位分别发现130m、100m及1m厚的水合物。

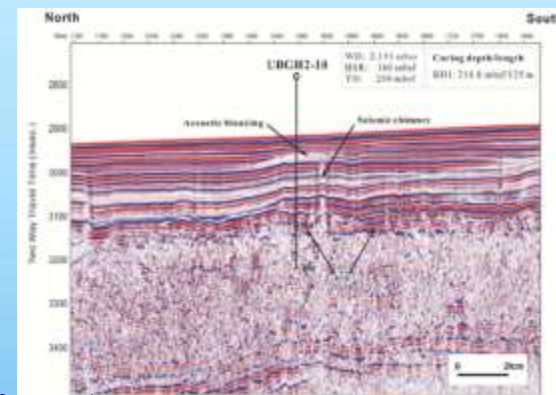
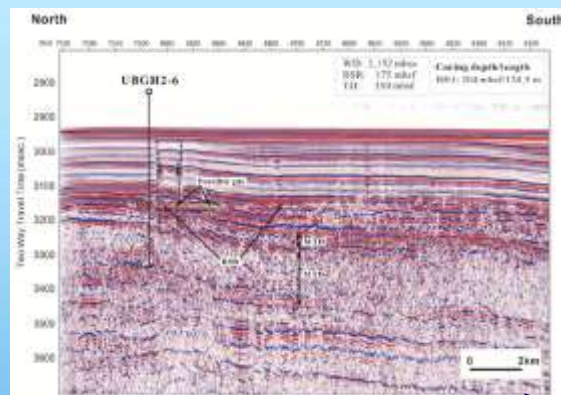
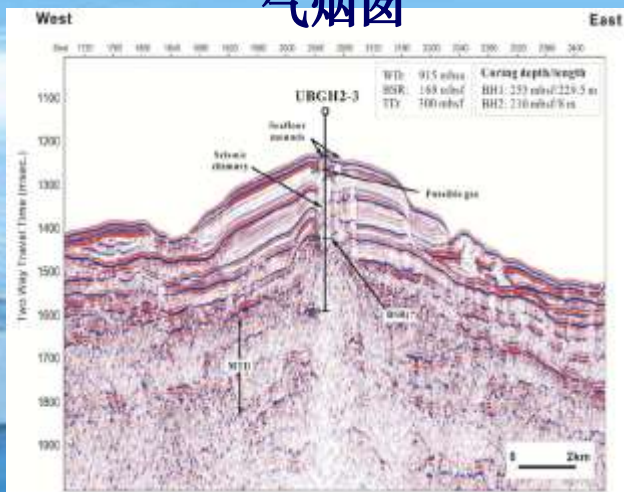


2010年

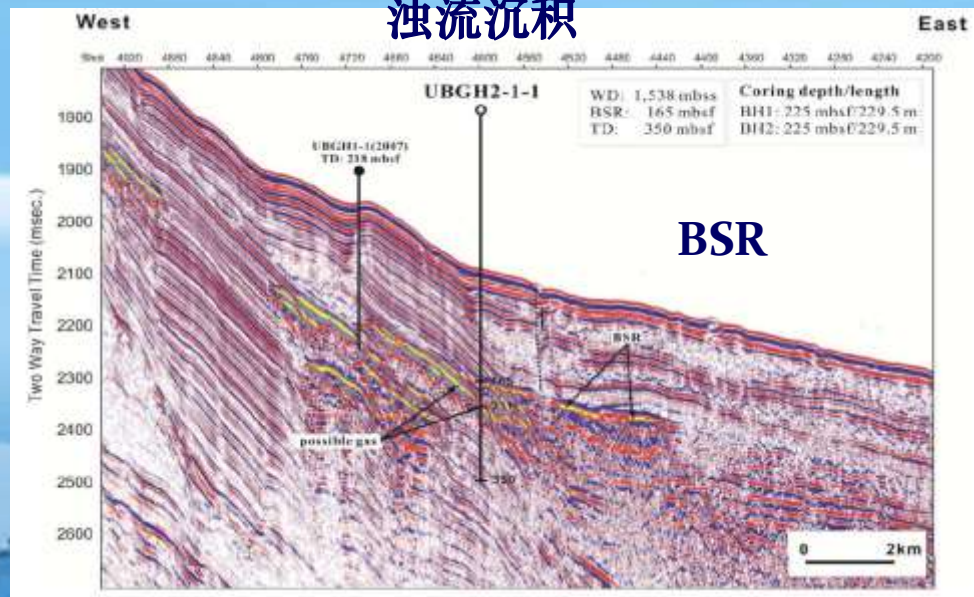
选择依据：气烟囱(2-2-1, 2-3, 2-7, 2-11站位)、浊流沉积(2-2-2, 2-5, 2-6, 2-9, 2-10)、BSR(2-1-1)



气烟囱

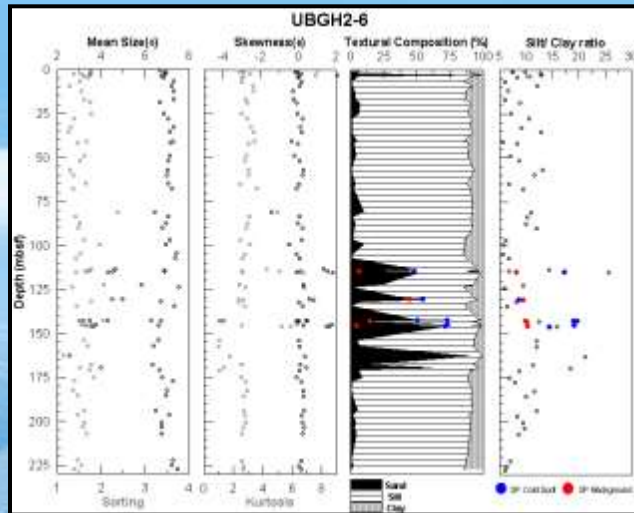
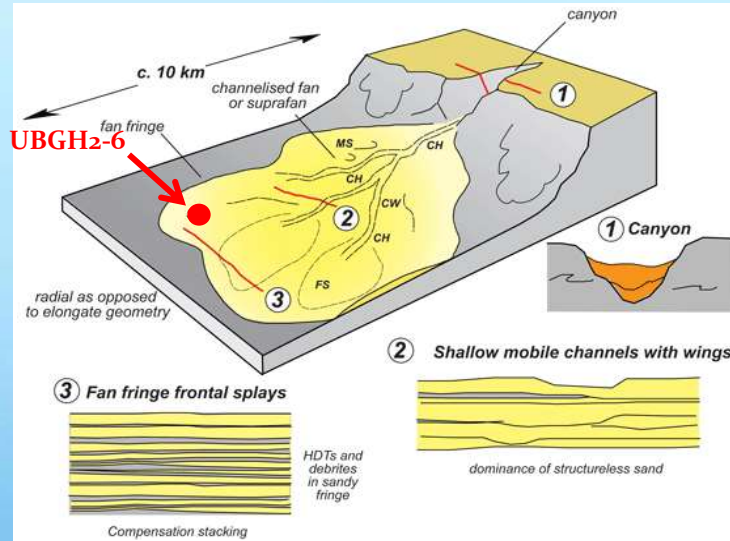


浊流沉积

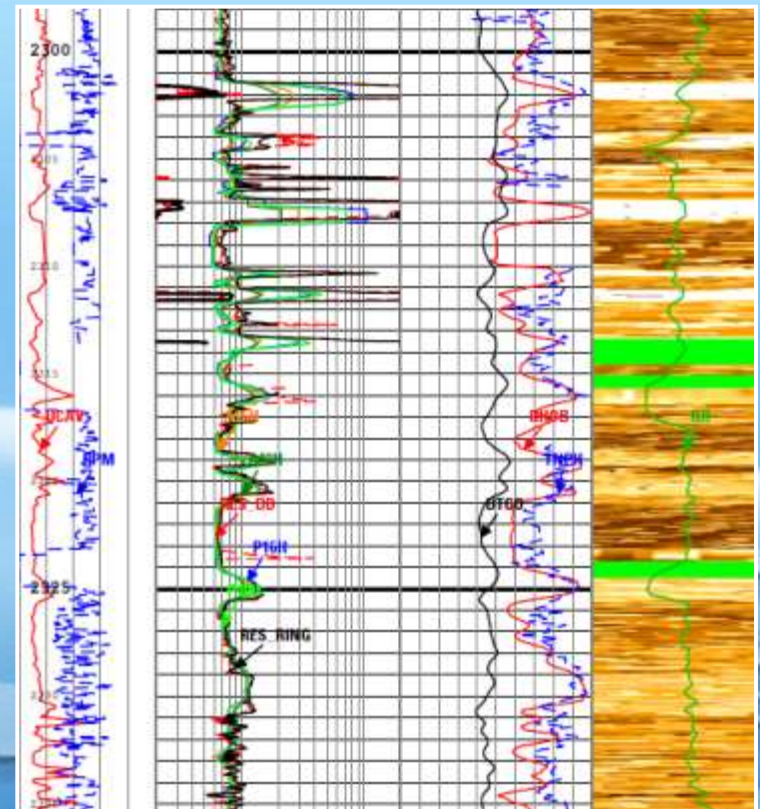


BSR

水合物主要发育于碎屑流、浊流沉积中



Deep Button Resistivity (REC_BD) RAB6 RM		Bulk Density (RHOB) DV6MT RM	
0.2	ohm.m	20	g/cm3
Phase Shift Resistivity 16 inch Spacing at 2 Mhz, Environmentally Corrected (P16H) DV6MT RM		Thermal Neutron Porosity (Ratio Method) in Selected Lithology (TNPH) DV6MT RM	
0.2	ohm.m	20	m3/m3
8	in	13	0.4
Rotational Speed (RPM) RAB6 RM		Delta-T Compressional (DTCO)	
0	c/min	100	us/ft
Ring Resistivity (RES_RING) RAB6 RM		Gamma Ray (GRI) RAB6 RM	
0.2	ohm.m	20	gAPI
			150

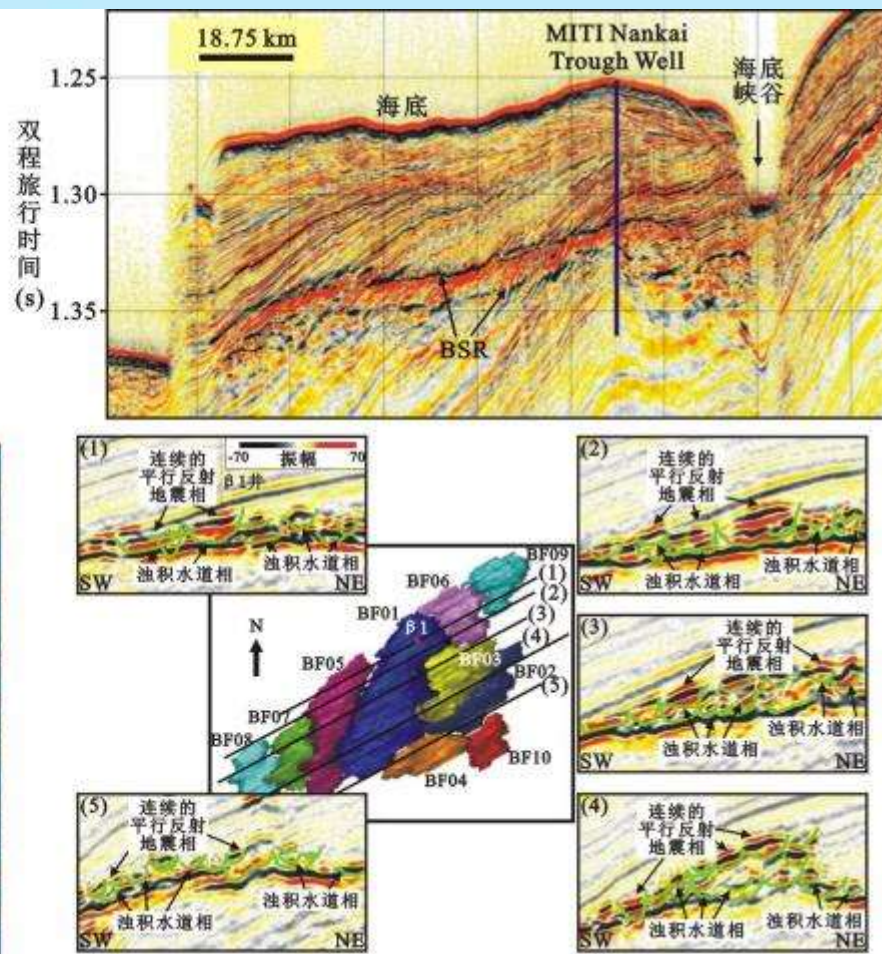
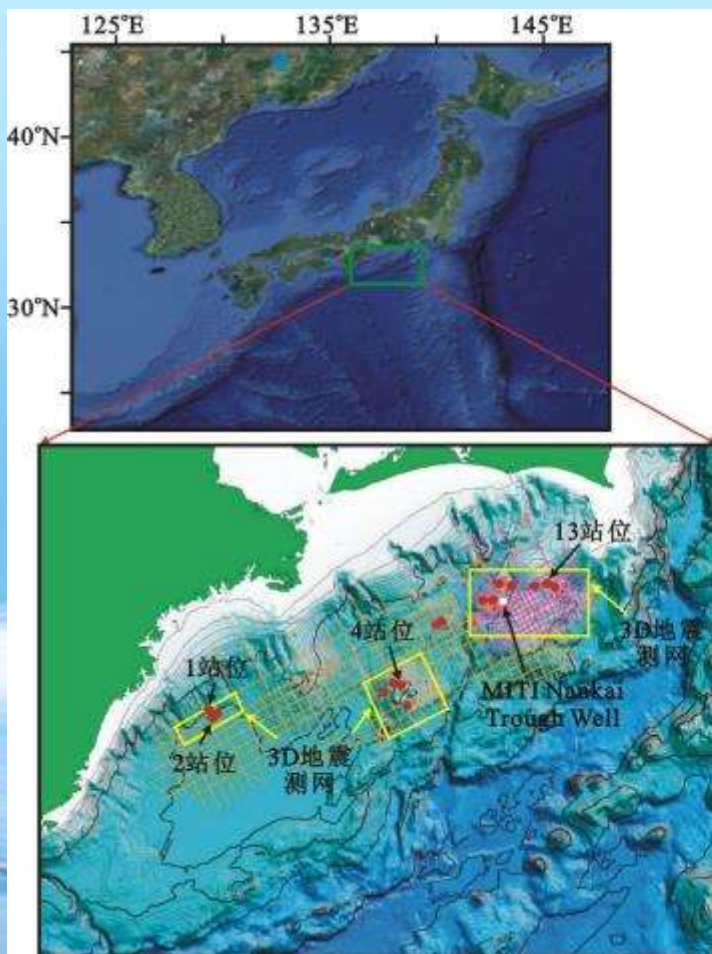


韩国御龙盆地: UBGH2-6
(Collett, 2014)

站位选择依据:

第一期以
BSR和背
斜构造为
依据

第二期以
强振幅反
射和富砂
质浊积水
道砂体为
主要依据

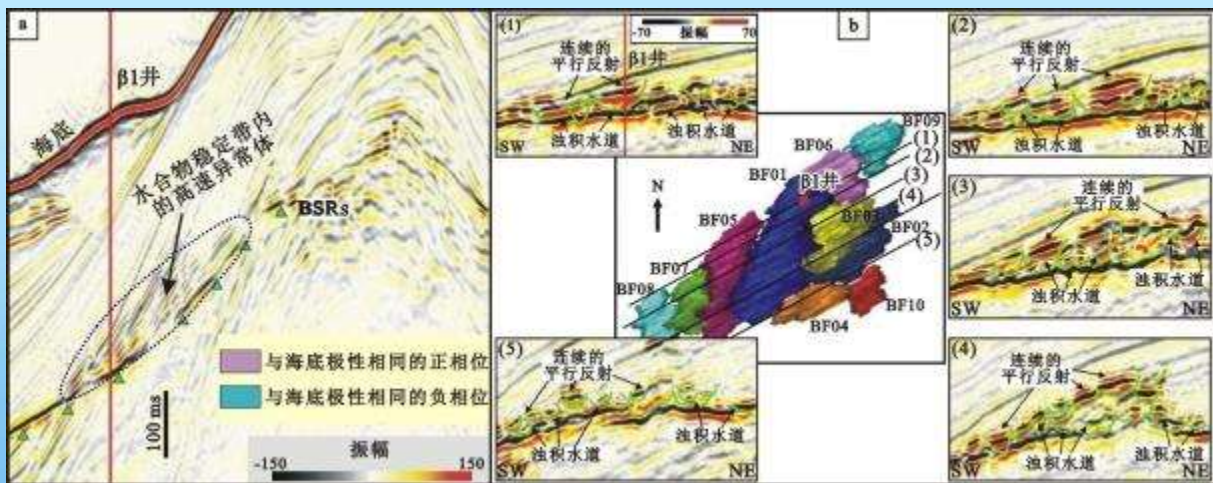


(Noguchi et al., 2011)



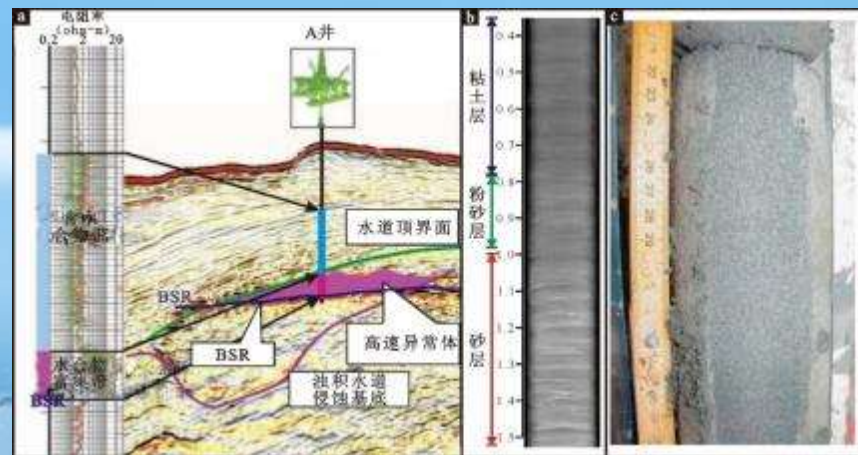
浊积砂体（水道砂体）

选择依据：强振幅
反射、高速异常体、
水道剖面形态、下
切/侵蚀特征



日本南海海槽过井地震剖面及浊积水道平面展布
(Noguchi et al., 2011)

水合物的聚集和分布与浊积水道砂体具有良好的空间匹配关系，这些浊积砂体也被称为“水合物富集带”，其地质储量占了整个南海海槽的一半 (Fujii et al., 2009)



以砂体为目标的水合物站位地震剖面、岩芯和砂质沉积物实物样品 (Tsuji et al., 2009)



水合物钻探目标选择的主要依据

- 地质条件：有利构造位置(断层、烟囱、泥火山)、有利沉积体(水道/浊流沉积、海底扇)、地貌异常(冷泉、麻坑、丘状体)等
- 地球物理特征：BSR、速度异常、各类地震属性异常(瞬时信息、波阻抗、反射强度、相对极性和能量半衰时等)
- 地球化学异常：气渗漏、气态烃、孔隙水、自生矿物、冷泉碳酸盐岩

针对不同类型的水合物钻探目标，具有不同的选择依据

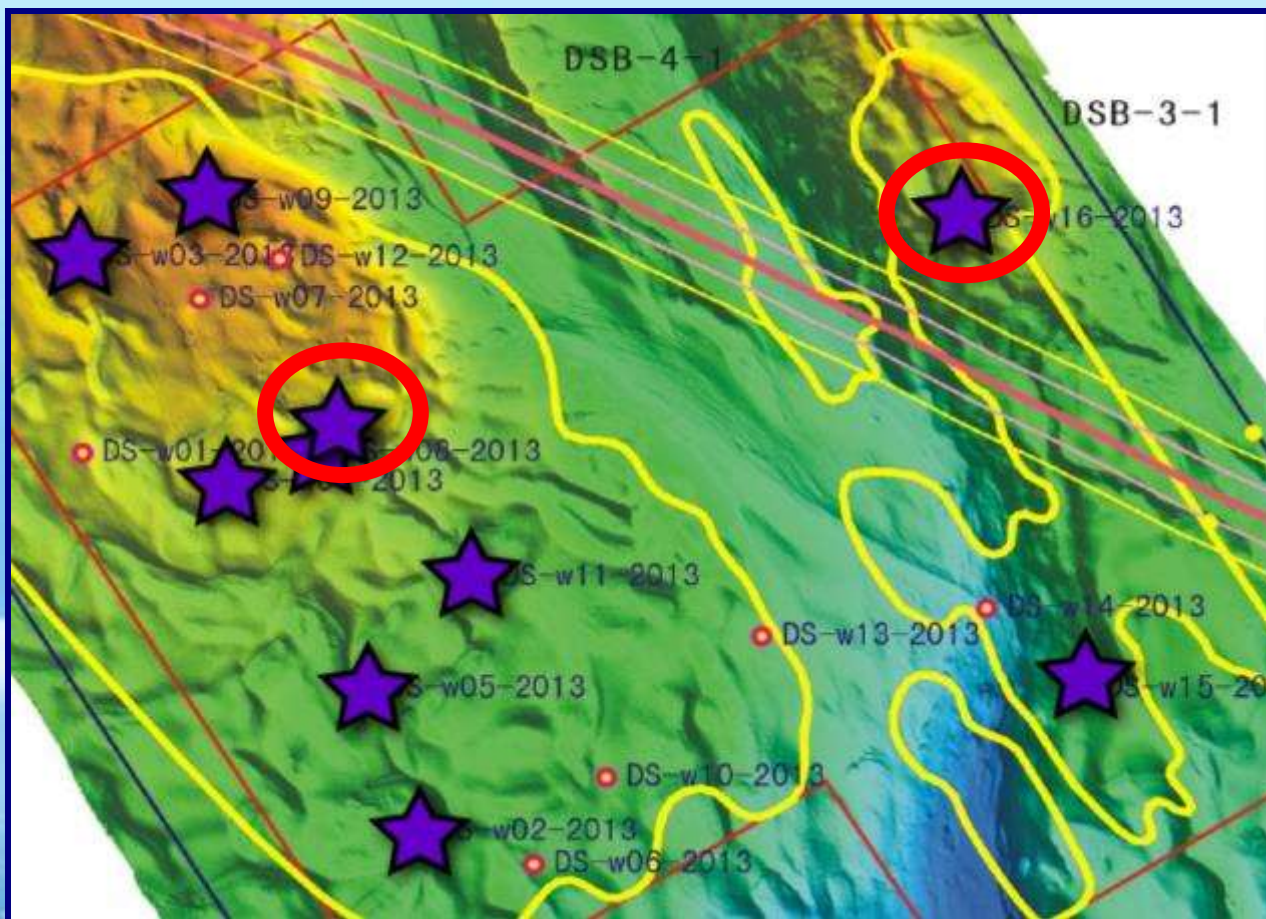


水合物钻探目标选择的主要依据

- 扩散型水合物：BSR清晰、连续，且具有一定分布范围；**有利沉积体-砂质水合物储层——强振幅、杂乱反射、高速异常、水道形态和空间展布、下切/侵蚀**
- 渗漏型水合物：气渗漏、气烟囱、断层、麻坑、丘状体、自生碳酸盐岩、特殊生物
- 井位目标层段：水合物富集特征明显如速度异常、地震响应特征、速度-振幅异常结构、强振幅；地震属性综合检测效果良好



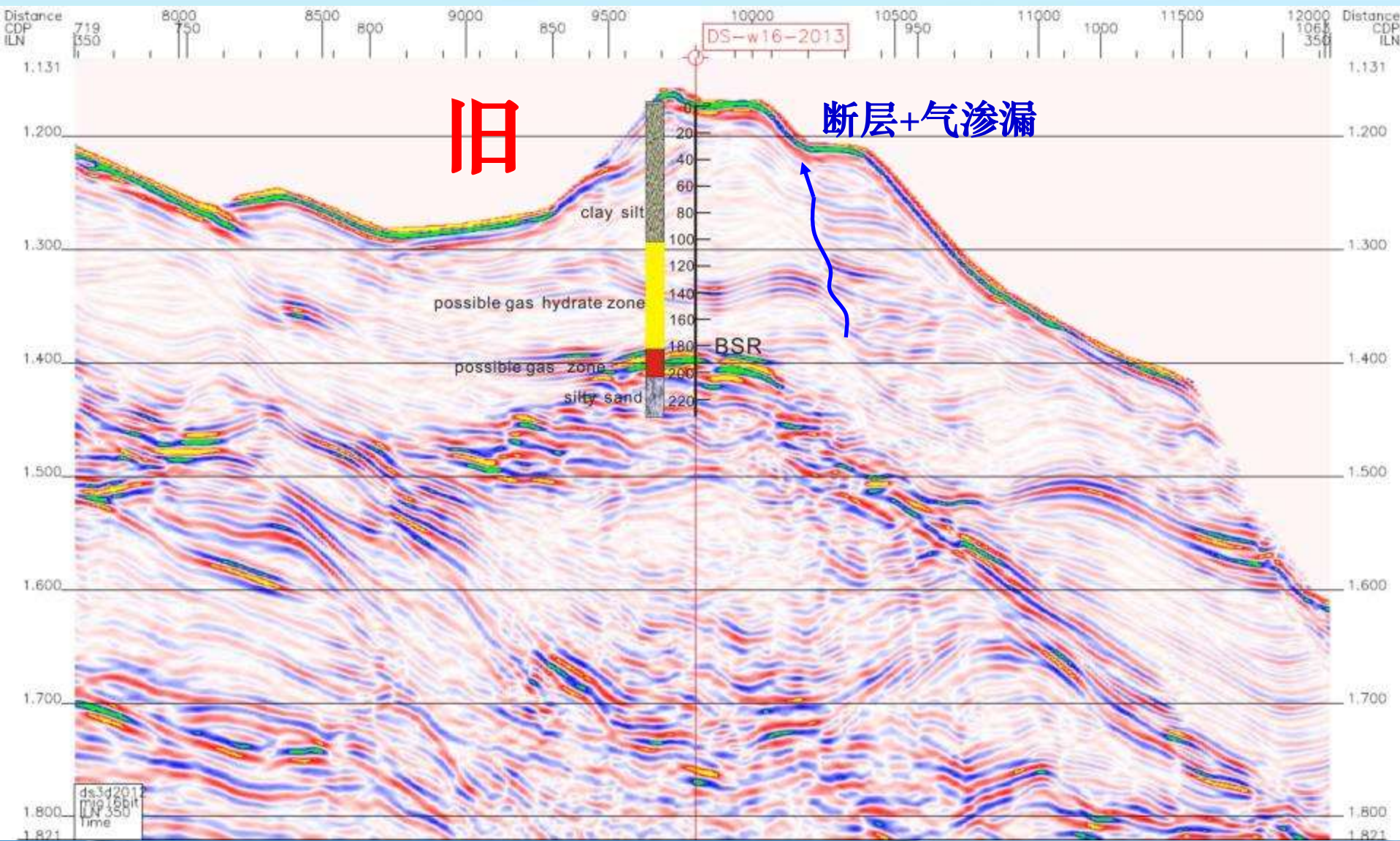
钻探目标和井位部署案例分析

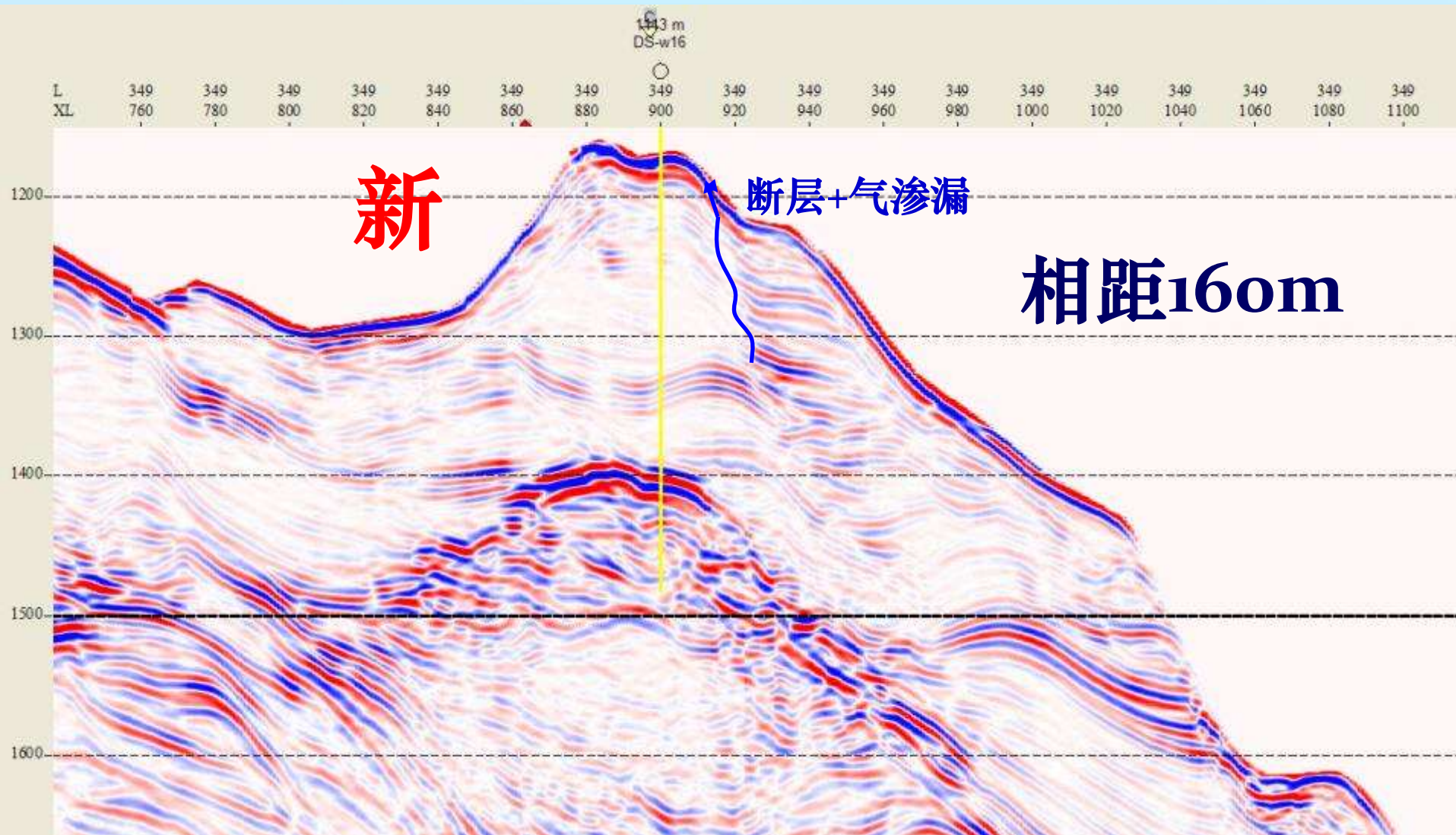


8号站位

16号站位

2013年南海北部某区水合物钻探站位

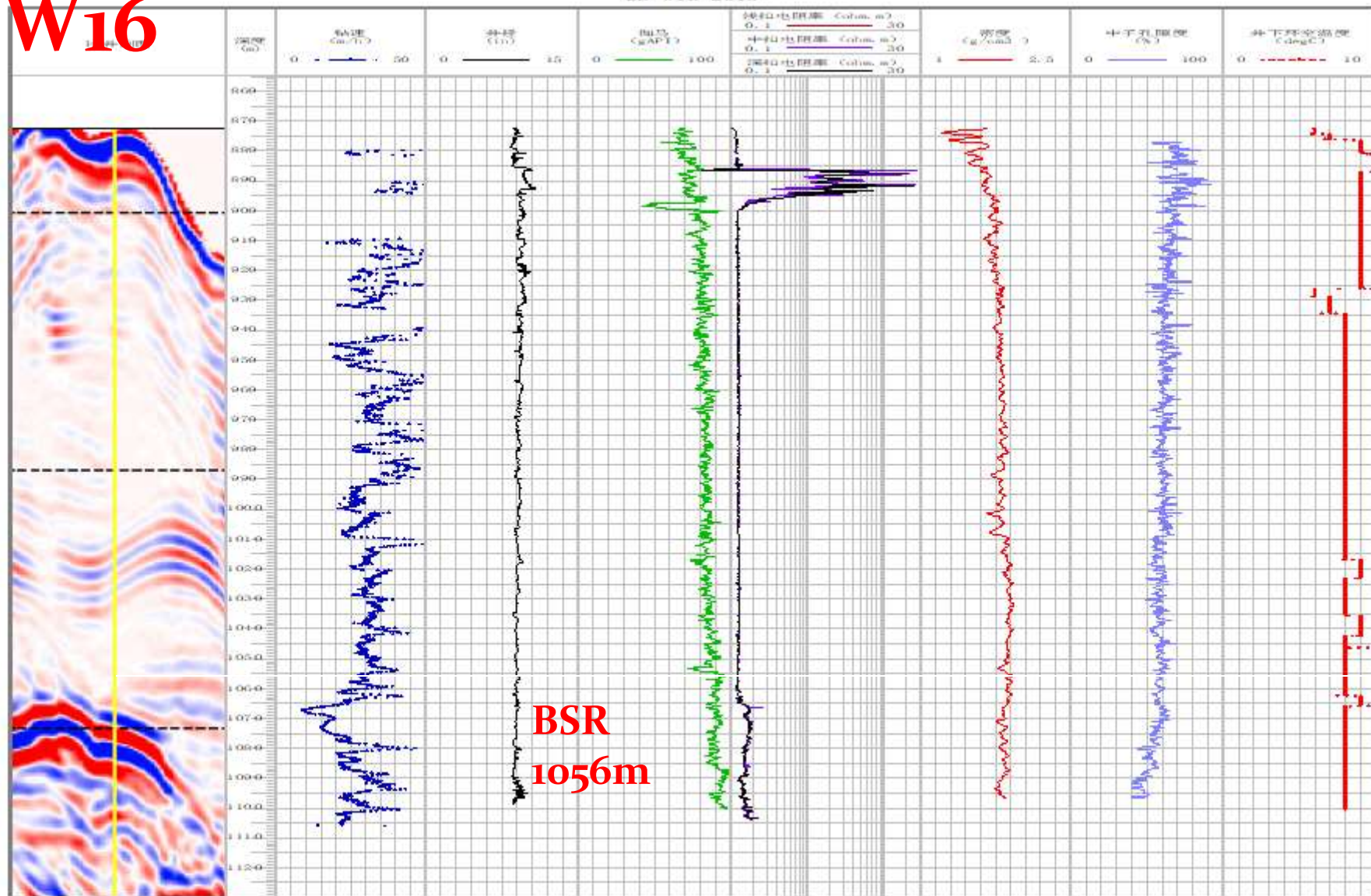


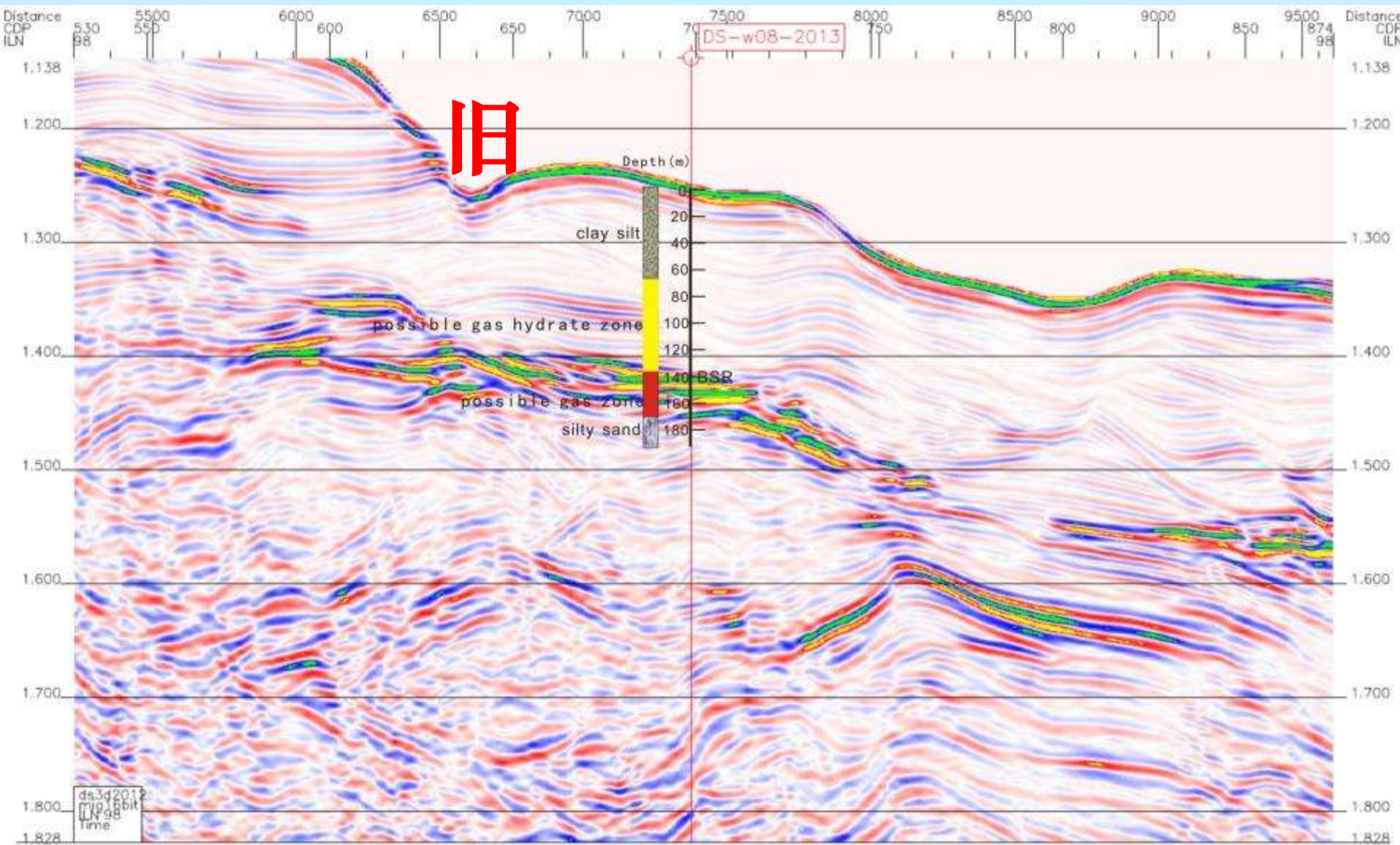


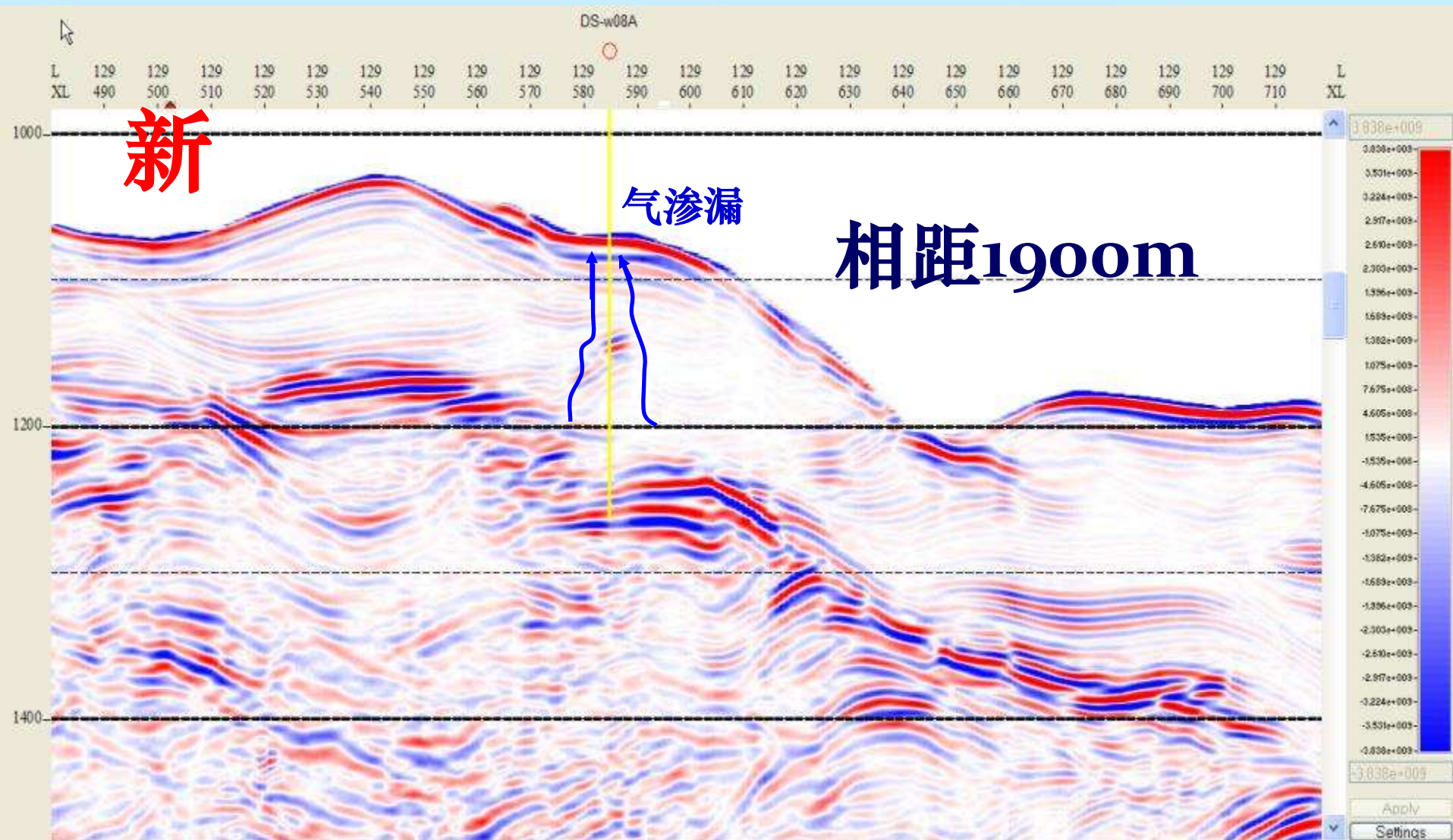


W16

DS-W16-2013



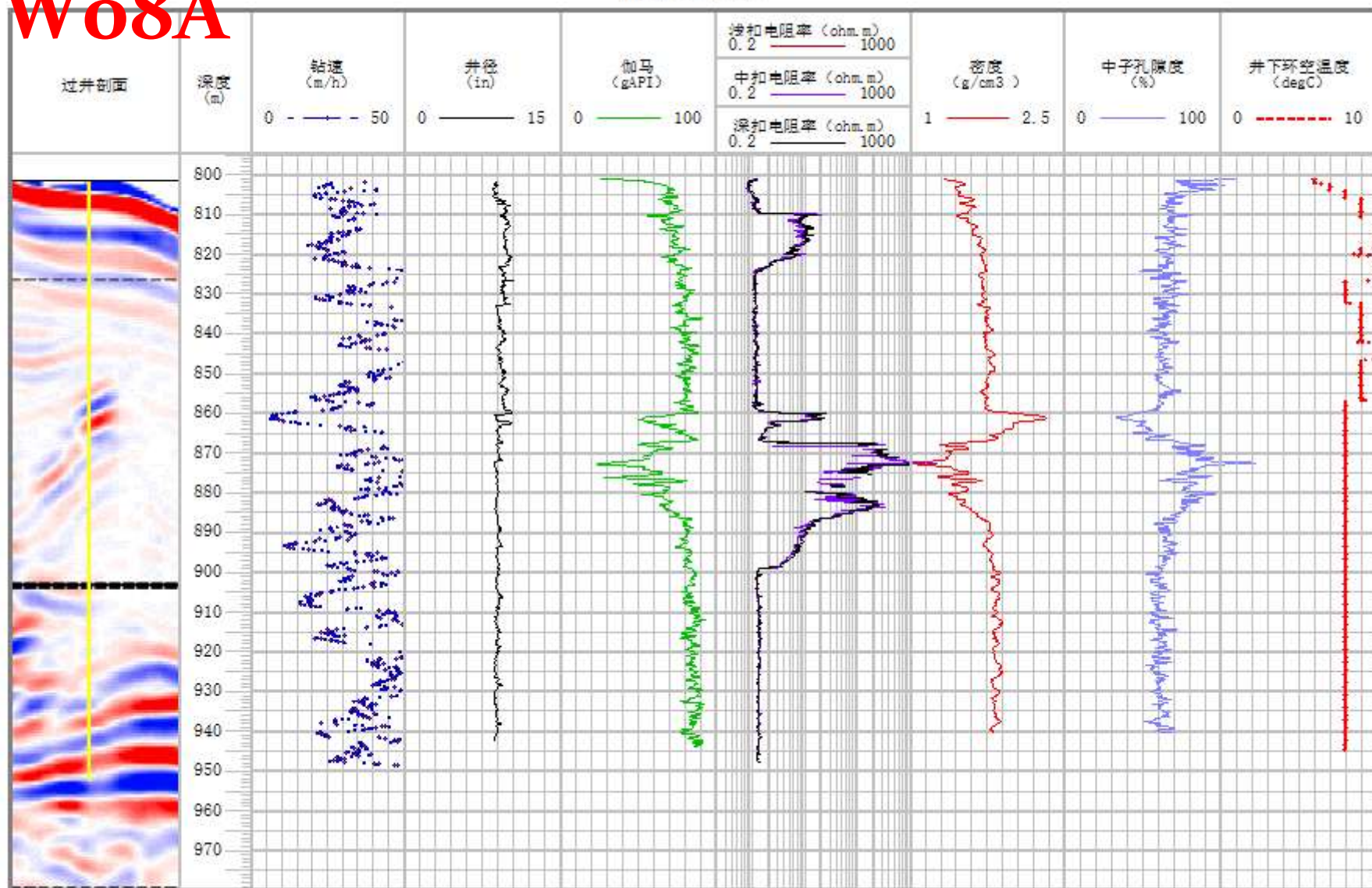






Wo8A

DS-W08-2013



四、水合物成藏运聚体系



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



水合物油气系统

近年来在水合物形成、分布以及稳定条件的研究取得了关键性进展，**水合物油气系统**概念在国际上已经获得了共识 (Collett, 2009)。

Gas-hydrate Petroleum System

1. Gas hydrate stability conditions

Formation temperature

Formation pressure

Gas chemistry

Pore-water salinity

2. Gas source: availability of gas

3. Availability of water included within the hydrate structure

4. Migration of gas included within the hydrate structure

5. Reservoir rocks, traps, and seals

6. Timing

水合物油气系统

水合物稳定条件

- 温度
- 压力
- 气体组份
- 孔隙水盐度

气源

水的有效性

气体或含气流体运移

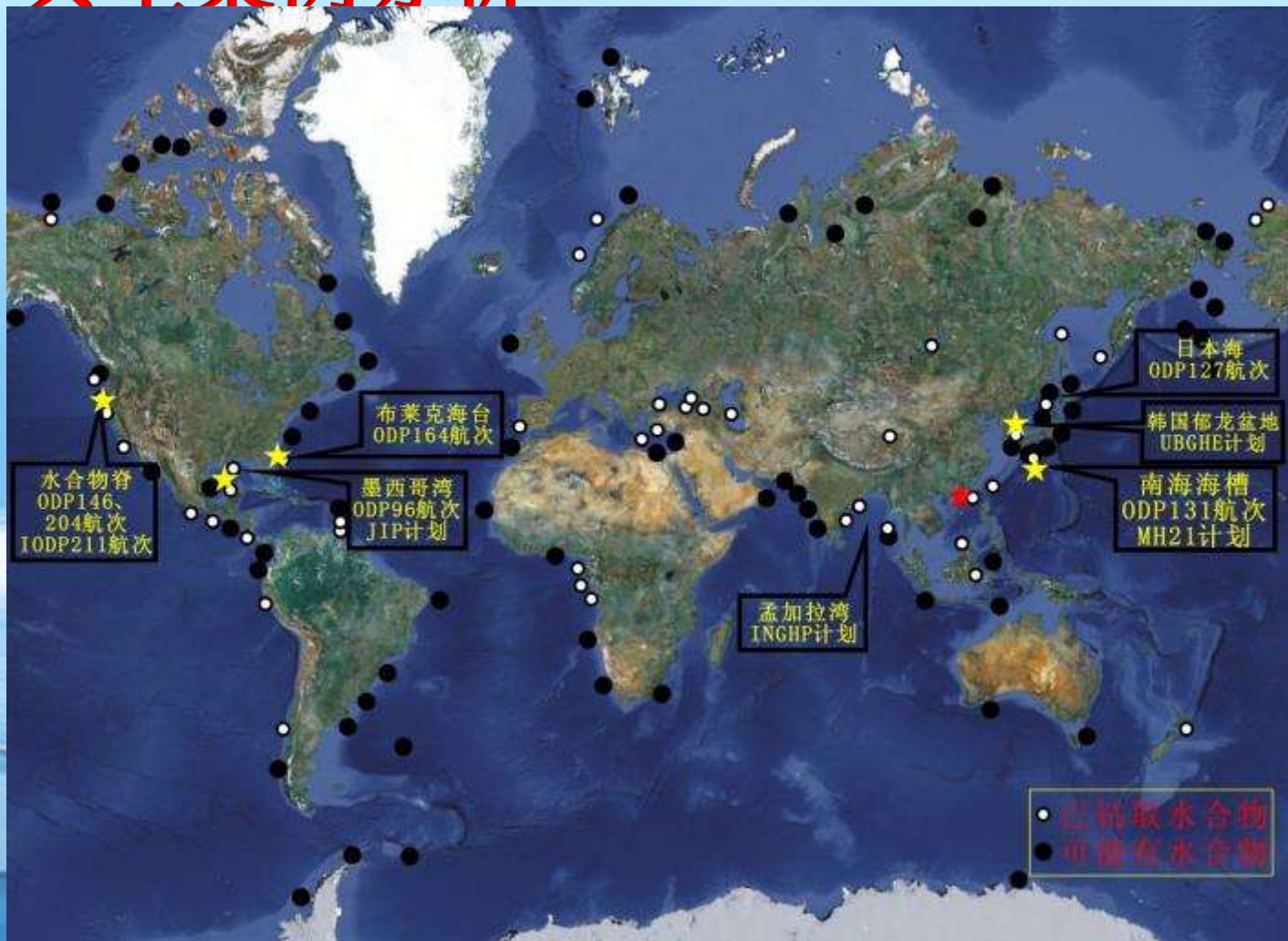
沉积条件（储层、盖层及圈闭条件）

演化时间

综合考虑物理化学条件及地质背景，水合物油气系统可作为水合物资源前景评价快速方法



典型案例分析



实例分析

布莱克海台

水合物脊

南海海槽

郁龙盆地

墨西哥湾

总结 ↓ 对比

应用：神狐海城



布莱克海台

DSDP and ODP sites within the Black region

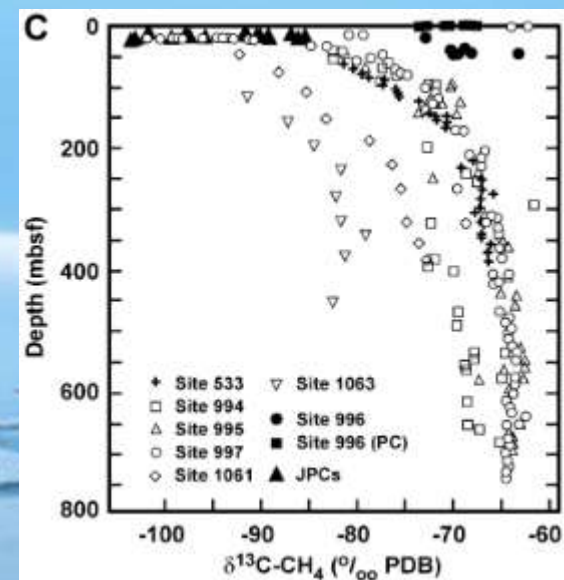
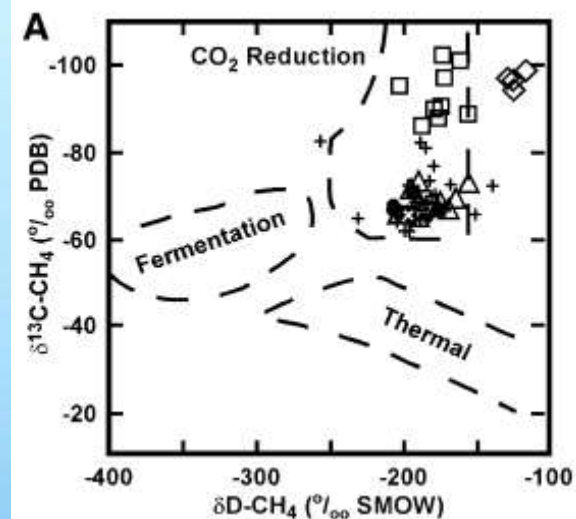
Location ^a				Water depth (m)	Borehole depth (m)	BSR (present?)	BSR (depth) (mbsf) ^b
Leg	Site	Latitude (N)	Longitude (W)				
DSDP 11	102	30° 43.93'	74° 27.14'	3426	661	Yes	~ 600 ^a
	103	30° 27.08'	74° 34.99'	3946	449	No	
	104	30° 49.65'	74° 19.64'	3811	617	Yes	~ 600 ^a
DSDP 76	533	31° 15.6'	74° 52.2'	3194	399	Yes	~ 600 ^c
DSDP 164	991	32° 59.018'	75° 55.801'	2567	56.6	No	—
	992	32° 58.542'	75° 54.961'	2587	50.3	No	—
	993	32° 57.779'	75° 53.685'	2642	51.9	No	—
	994	31° 47.141'	75° 32.751'	2808	704	No	—
	995	31° 38.210'	75° 31.343'	2789	704	Yes	440 ^a
	996 ^d	32° 29.633'	76° 11.454'	2170	63	No	
	997	31° 50.588'	75° 28.118'	2770	750	Yes	464 ^a
	1054	33° 0.000'	76° 17.000'	1291	200	Yes	~ 300 (0.38 s)
	1055	32° 47.041'	76° 17.179'	1798	128	Yes	~ 320 (0.42 s)
ODP 172	1056	32° 29.102'	76° 19.799'	2166	155	Equivocal	
	1057	32° 1.732'	76° 4.754'	2584	136	Yes	~ 415 (0.525 s) ^c
	1058	31° 41.402'	75° 25.804'	2984	164	Yes	~ 450 (0.57 s) ^c
	1059	31° 40.461'	75° 25.127'	2985	98	Yes	~ 450 (0.57 s) ^c
	1060	30° 45.597'	74° 27.990'	3481	170	Yes	~ 490 (0.625 s) ^c
	1061	29° 58.498'	73° 35.993'	4046	350	Yes	~ 510 (0.65 s) ^c
	1062	28° 14.789'	74° 24.420	4763	248	Equivocal	

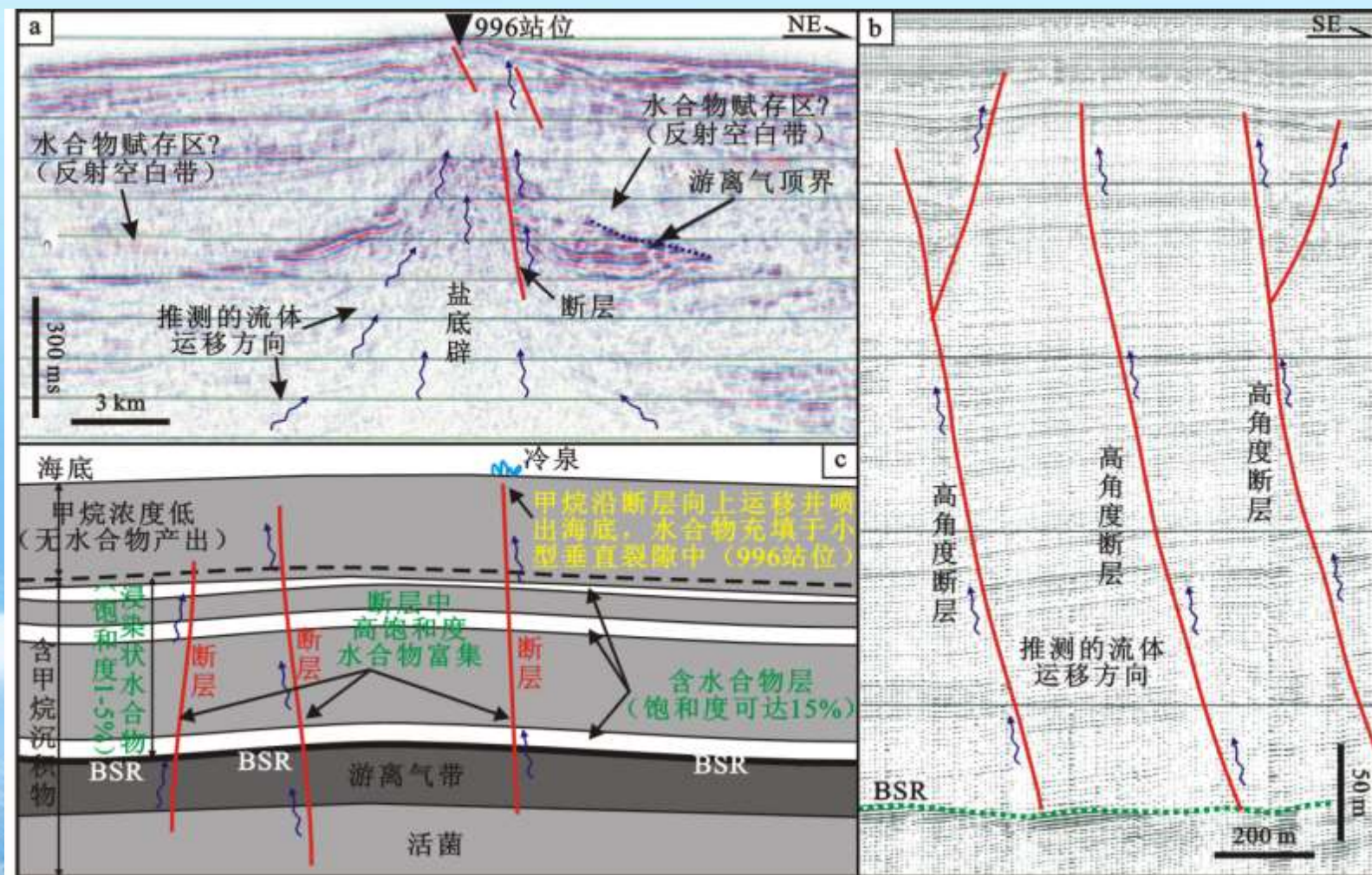
温压条件:

水深>2000 m, 温度3.5 °C, 地温梯度33.7-36.9 °C/km

气源条件: 微生物成因—CO₂降解

(Borowski, 2004)





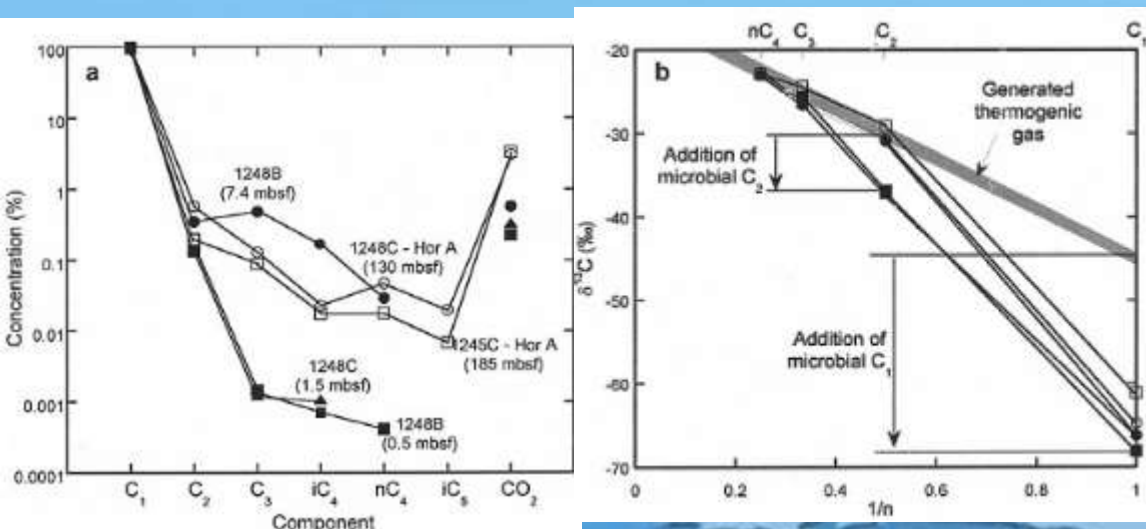
运移条件: 底辟+伴生断层、高角度断层

沉积条件: 等深流沉积, 沉积速率最高可达30.3 cm/ka



水合物脊

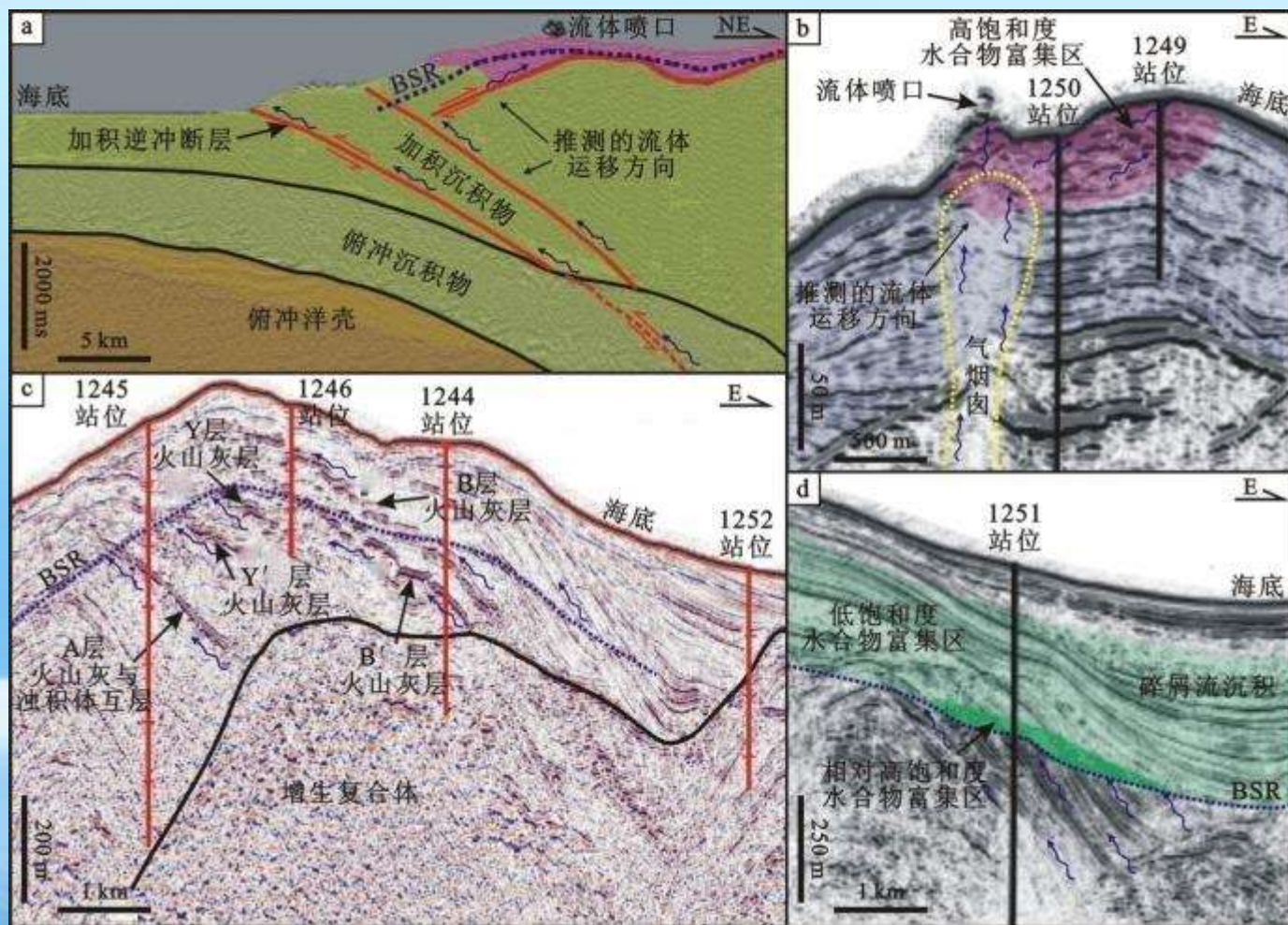
Characteristic	Site						
	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250
Number of holes	6 (A-F)	5 (A-E)	2 (A, B)	2 (A, B)	3 (A-C)	12 (A-L)	6 (A-F)
Latitude (N)	~44° 35.17'	~44° 35.17'	~44° 35.16'	~44° 34.66'	~44° 34.45'	~44° 34.22'	~44° 34.11'
Longitude (W)	~125° 7.18'	~125° 8.94'	~125° 8.13'	~125° 9.01'	~125° 9.15'	~125° 8.84'	~125° 9.00'
Water depth (mbsf)	~895	~870	~850	~835	~830	~775	~792
Bottom water temperature (°C)	4.05	3.98	4.54	3.75	4.14	4.5	4.22
Geothermal gradient (°C/km)	60	55	61	52	57	49	53
Maximum penetration depth (mbsf)	380	540.3	180	270	194	90	210
Depth of BSR (mbsf)	127–129	134	114	129–134	115	115 (not penetrated)	114
Depth of Horizon A (mbsf)	Not present	180	Not present	150–165	127–129	No data	148–152
Pore water salinity near the base of GHSZ (g/kg)	33	35	36	35	34	No data	35
Calculated base of GHSZ ^a (mbsf)	137	149	115	156	131	136	133



温压条件:
水深>800 m, 温度4 °C, 地
温梯度52-60 °C/km

气源条件:
微生物成因、热成因

(Tréhu et al., 2003)

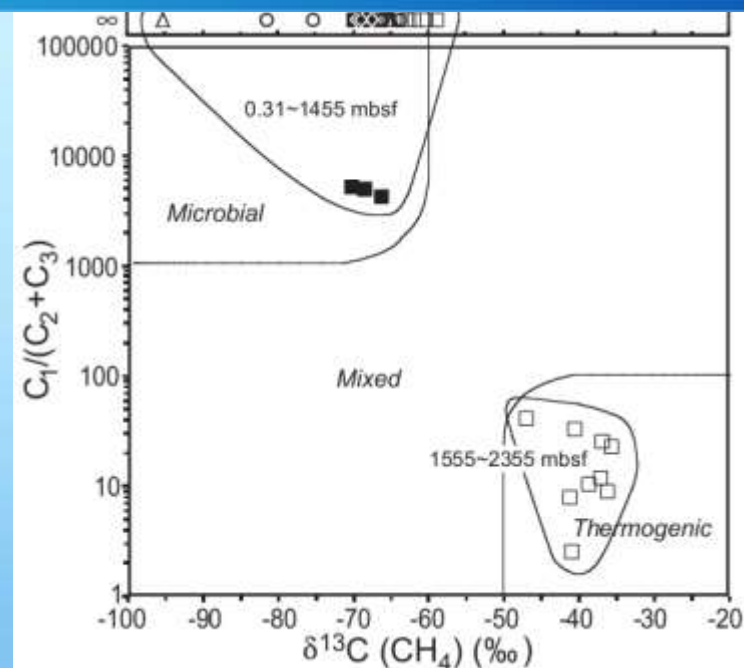
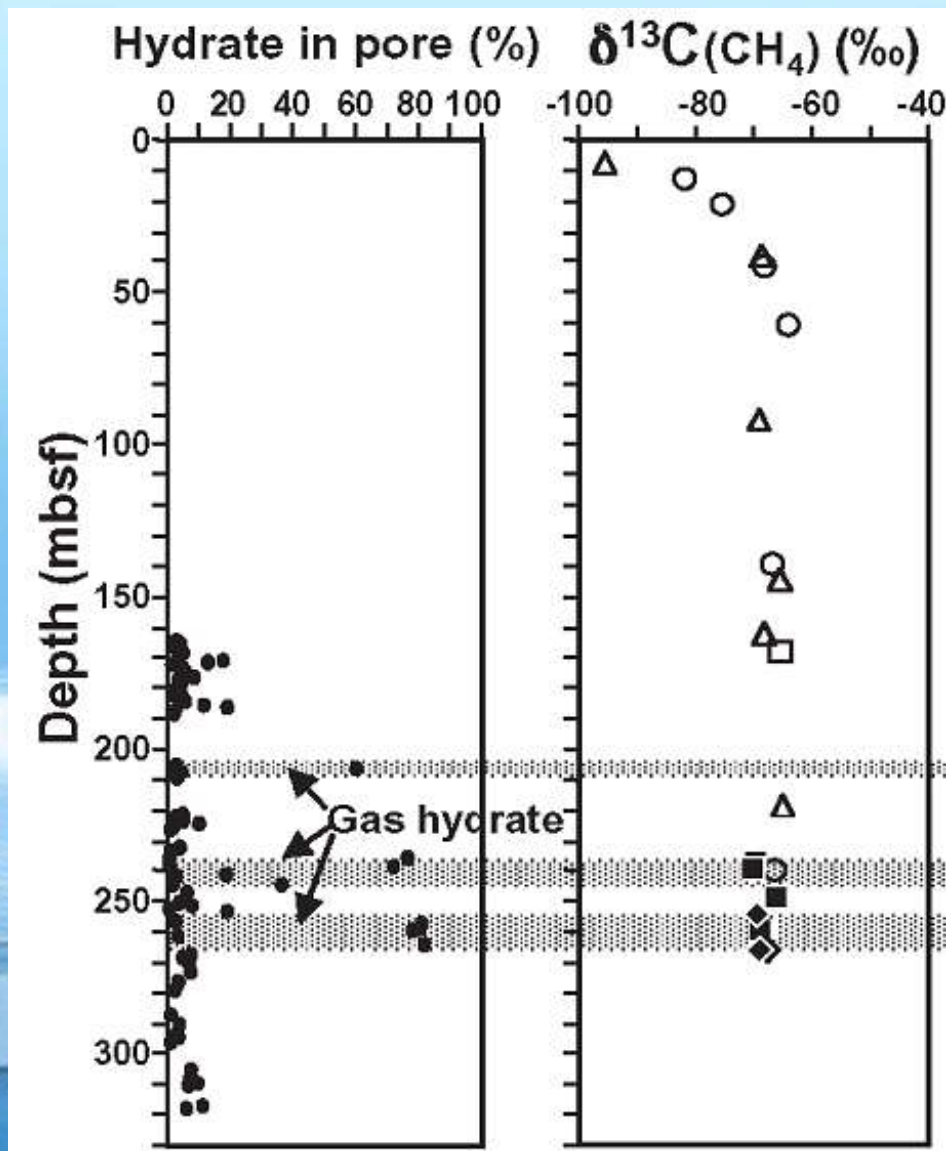


运移条件： 增生楔断裂、气烟囱、火山灰-浊积体互层
沉积条件： 浊流、碎屑流等粗粒沉积单元

日本南海海槽



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



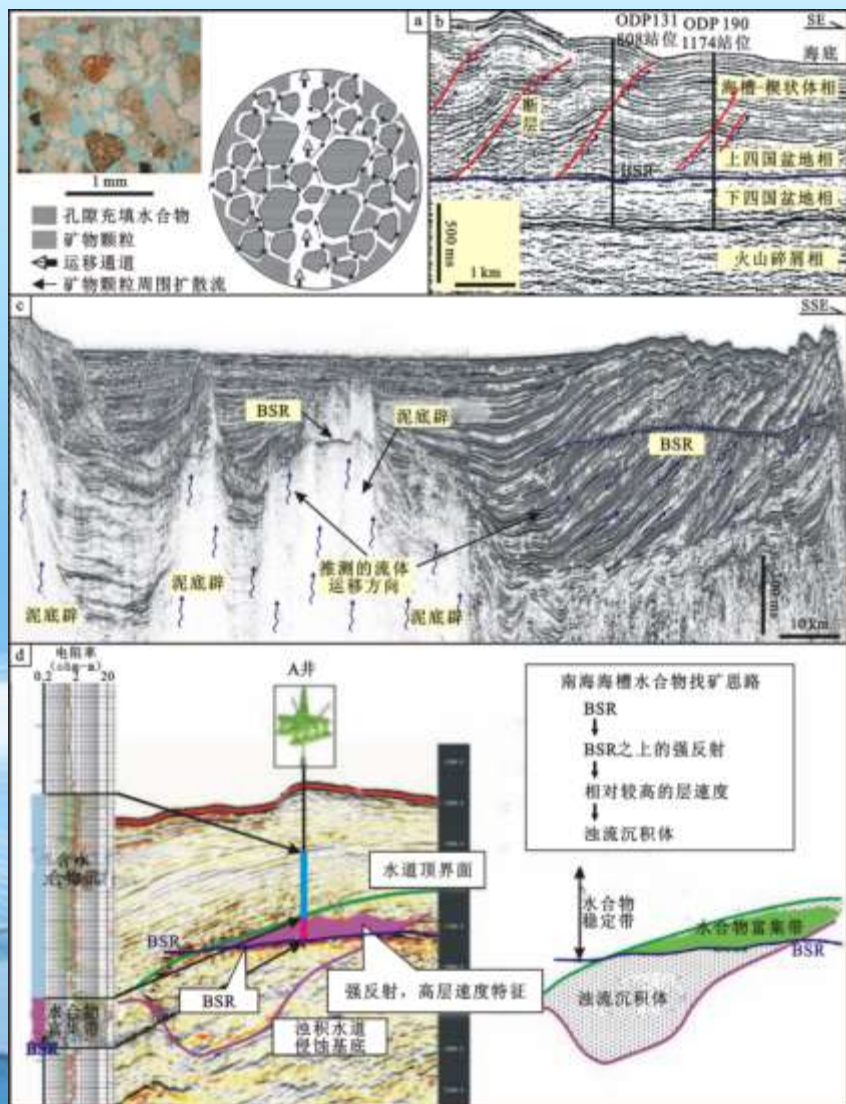
温压条件:

水深 > 1000 m, 温度 3 °C, 地温梯度
95-120 °C/km

气源条件:

微生物成因、少量热成因

(Waseda and Uchida, 2004)



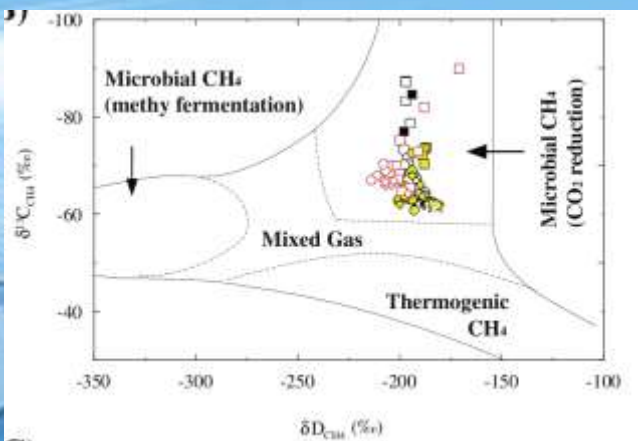
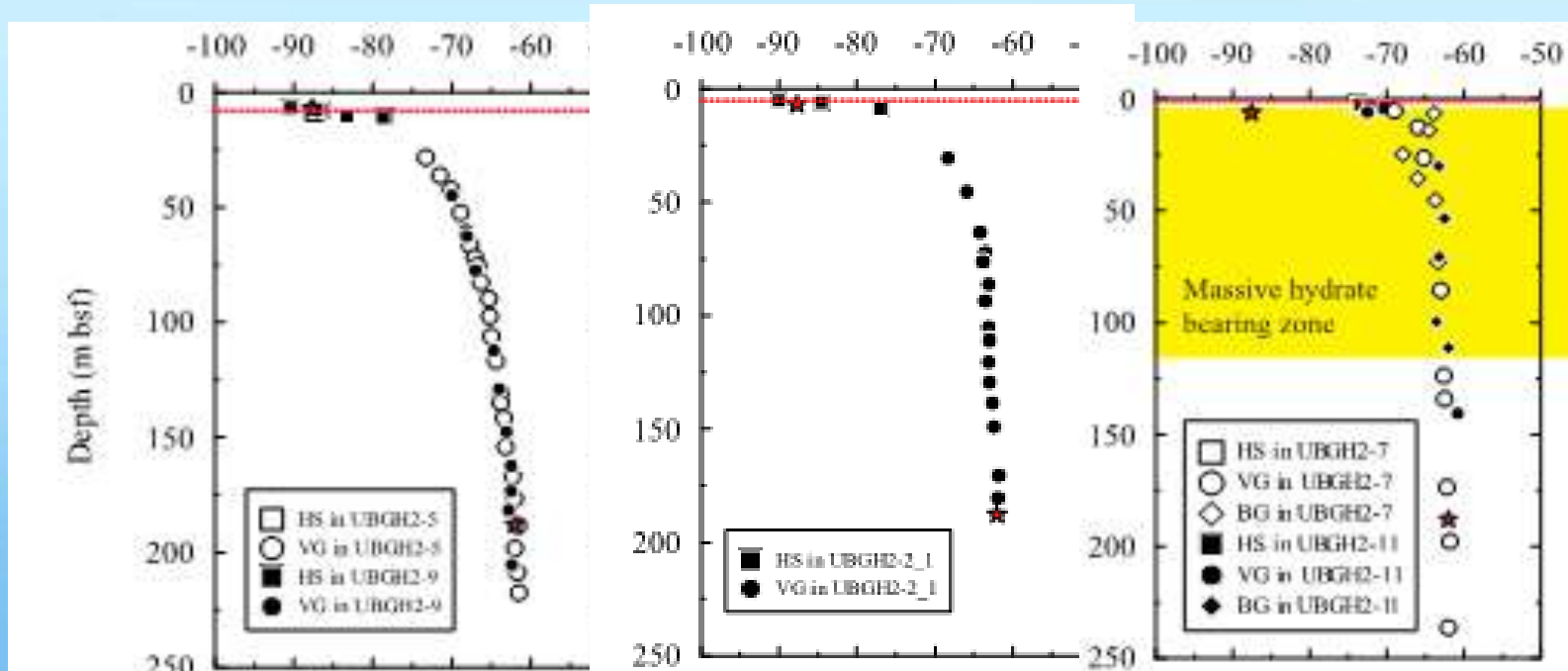
运移条件:

- 沉积物破碎带或颗粒间孔隙喉道
- 俯冲背景下增生楔中的逆冲断层

沉积条件:

富砂质浊积水道砂体

南海海槽内赋存于浊积水道砂中的水合物是目前海域最适宜开采的水合物类型，16个浊积水道中的水合物储量约占整个南海海槽的一半！

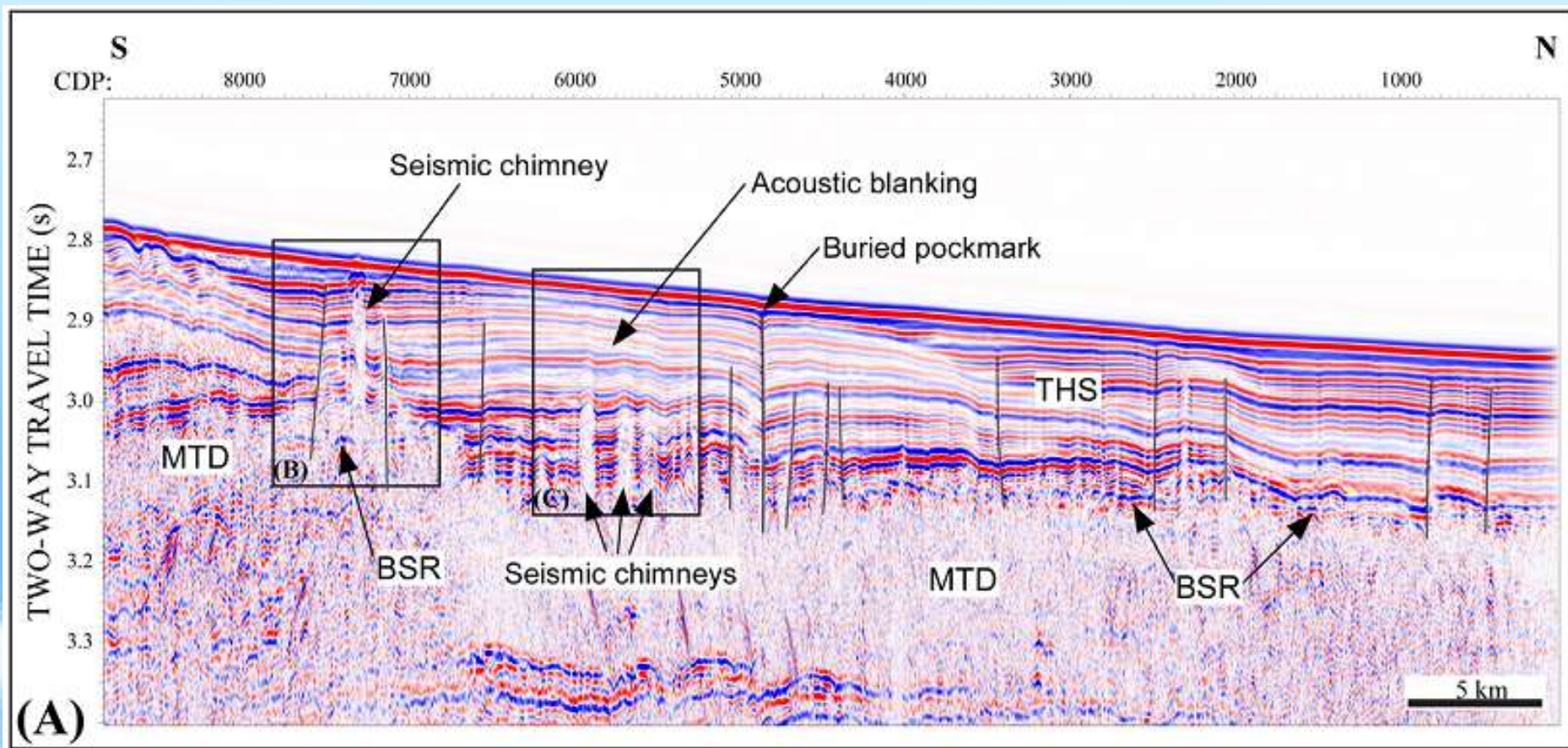


温压条件:

水深 > 1300 m, 温度 3 °C, 地温梯度 95-120 °C / km

气源条件:
微生物成因

(Choi et al., 2013)



运移条件：气烟囱、高角度断层

沉积条件：浊积砂体、块体流搬运沉积体 (MTD)

(Riedel et al., 2013)



墨西哥湾

Lease Block No.	AC818	GC955	WR313
Well Name	AC818#1	GC955#1	WR313#1
Water Depth (m)	2744	2026	1917
Base of gas hydrate stability (m)	3197	2499	2758
Seafloor to base of gas hydrate stability (m)	453	473	841
Thermal gradient (mK/m)	~44	~32	~19
Target Facies sampled at the well	Frio volcaniclastic Oligocene sand	Pleistocene levee sands	Sheet sands within a minibasin

温压条件:

水深 > 2000 m, 温度 4 °C。东部和中部地温梯度大约为 10-25 °C/km, 西部则升高至 25-40 °C/km

气源条件:

微生物成因、热成因

(Hutchinson, 2008)



运移条件:

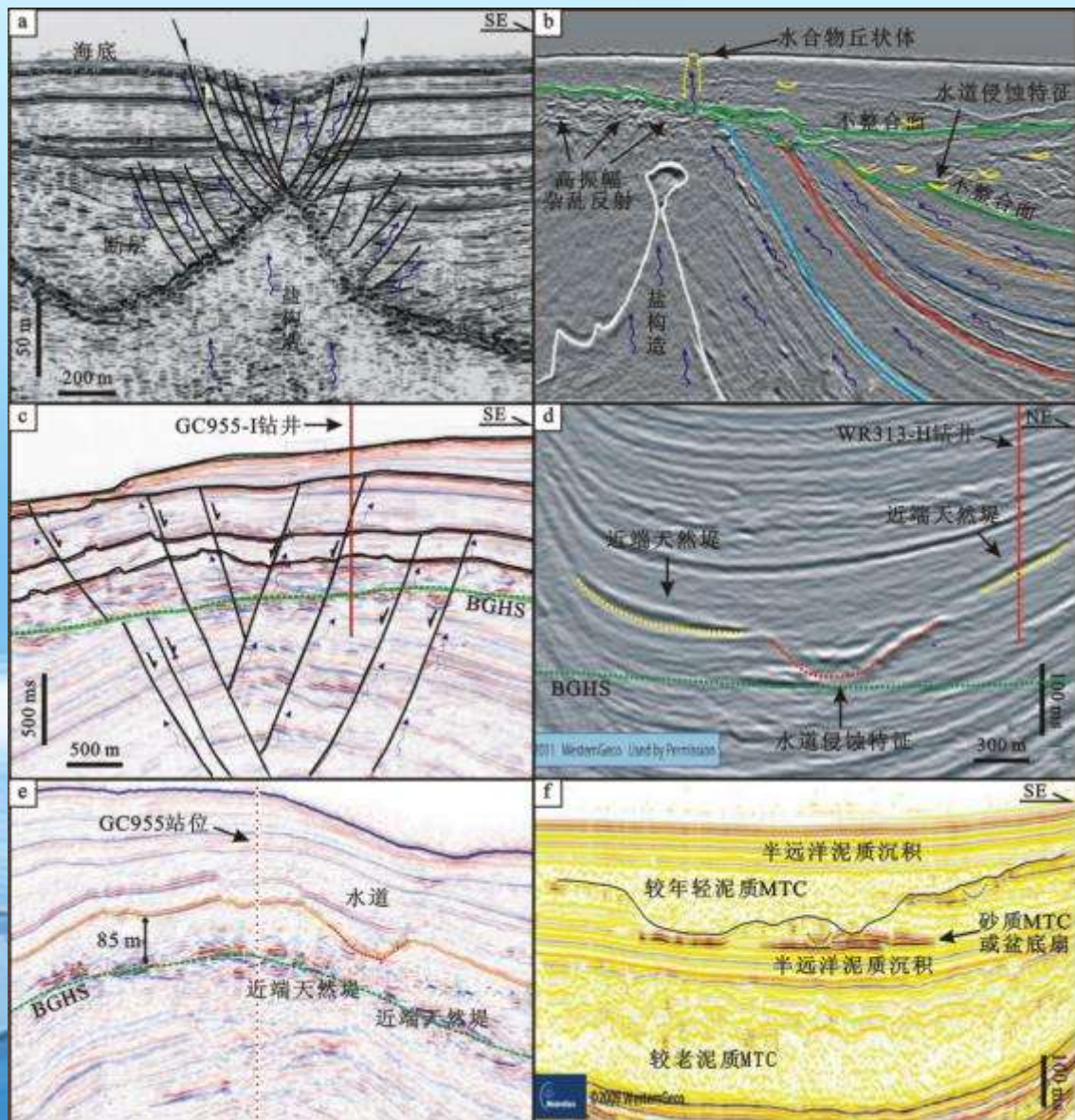
盐体

**盐底辟导致的地层倾斜
断层**

沉积条件:

**富砂质浊流沉积体
块体搬运沉积体**

**墨西哥湾和南海海槽的水合物
储层类型，即富砂质浅层深水
沉积体是今后南海北部水合物
勘探的主要目标！**





典型水合物区要素对比

水合物 赋存区	水合物油气系统要素			
	海底温度(°C)/地 温梯度(°C/km)	气源	流体运移条件	储集空间类型
布莱克 海台	3.5/33.7-36.9	微生物成因	与底辟伴生的断层 微小孔隙喉道 刺穿BSR的高角度断层	等深流沉积体
水合物脊	4/52-60	微生物成因+ 热解成因	增生楔断裂 火山灰-浊积体互层	浊积砂体 碎屑流沉积
南海海槽	3/45-80	微生物成因+ 热解成因	孔隙喉道 逆冲断层 倾斜地层	浊积水道
郁龙盆地	3/95-120	微生物成因	气烟囱及伴生断层 倾斜地层	块体流沉积体 浊积砂体
墨西哥湾	4 /10-40	微生物成因+ 热解成因	盐体 盐底辟导致的倾斜地层 断层	浊积水道 块体流沉积体



水合物运聚体系的提出

流体运移条件和水合物储集空间是水合物藏关键控制因素

水合物油气系统  水合物运聚体系

水合物运聚体系：优良的流体运移条件+有利的沉积空间展布

构造学上的运移通道识别和沉积学上的储集空间刻画

运移通道和有利沉积体分别构成了水合物藏的“骨骼”和“血液”



水合物运聚体系的意义

- **水合物分布的关键控制因素：**精细的沉积学解剖和流体运移的分析是分析水合物不均匀性分布的关键
- **水合物站位选择的重要标志：**墨西哥湾—海底扇、日本南海海槽—浊积水道、南海东沙—流体运移通道
- **水合物资源评价的重要依据：**水合物饱和度、水合物层厚度和分布面积三个参数中，饱和度和“运”即流体运移直接关联，水合物层厚度和分布则是“聚”的直接表现
- **水合物成藏理论的发展和延续：**将“运”和“聚”这两个关键问题有机结合，是对前期水合物成藏理论的总结和发展，更是针对具体区域的实际表征，也是分析水合物不均匀性分布的关键

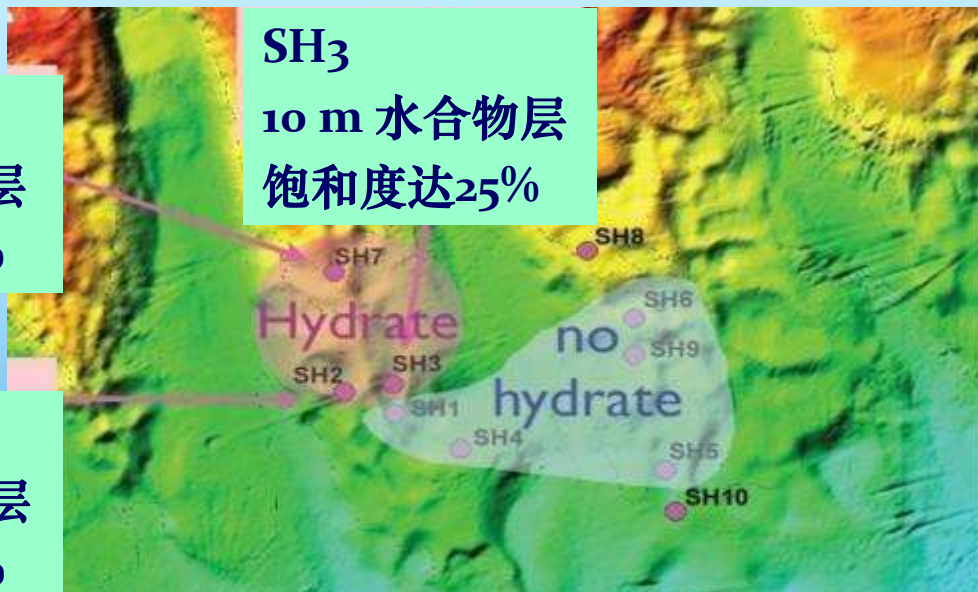


神狐海域水合物分布的不均一性

SH7
25 m 水合物层
饱和度达44%

SH2
30 m 水合物层
饱和度达48%

SH3
10 m 水合物层
饱和度达25%



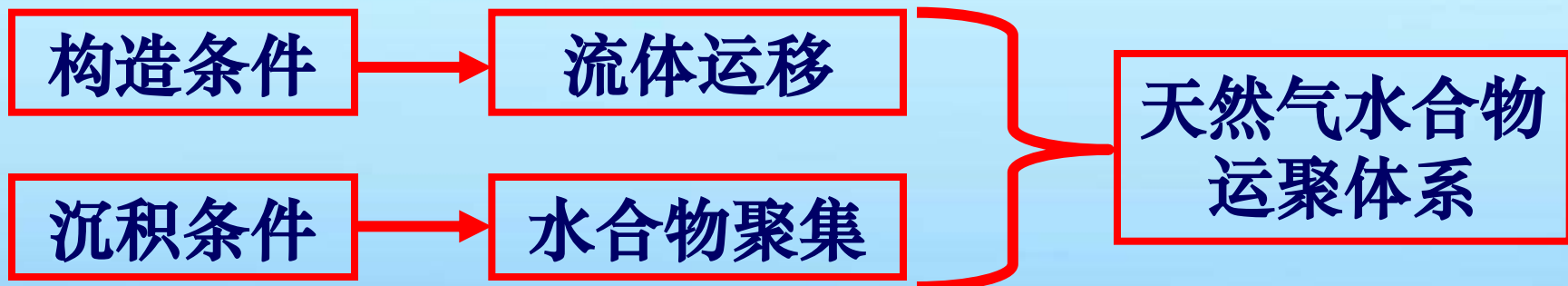
南海北部陆坡区四大水合物研究区块：琼东南、西沙、神狐、东沙（自西向东）。



Site↵	Water depth (m)↵	Seafloor temperature (°C)↵	Seafloor pressure (MPa)↵	Geothermal gradient (°C/km)↵	Depth of BSRs from geophysical data (mbsf)↵	Depth of the BGHZ↵ (mbsf)↵	Depth of BGHSZ↵ (mbsf)↵	Average saturation of hydrates (%)↵	Depth of SMI (mbsf)↵
SH1↵	1262↵	5.21↵	12.78↵	47.53↵	242↵	—↵	—↵	—↵	27.0↵
SH2↵	1230↵	4.84↵	12.46↵	46.95↵	209↵	229↵	221↵	21.10↵	26.0↵
SH3↵	1245↵	5.53↵	12.61↵	49.34↵	196↵	206↵	—↵	20.25↵	27.0↵
SH4↵	1290↵	—↵	13.06↵	—↵	190↵	—↵	—↵	—↵	—↵
SH5↵	1423↵	4.72↵	14.40↵	67.60↵	170↵	—↵	179↵	—↵	21.0↵
SH6↵	1217↵	—↵	12.33↵	—↵	220↵	—↵	—↵	—↵	—↵
SH7↵	1105↵	6.44↵	11.20↵	43.65↵	170↵	184↵	168↵	23.09↵	17.0↵
SH9↵	1265↵	—↵	12.81↵	—↵	225↵	—↵	—↵	—↵	—↵



神狐海域水合物运聚体系研究



三种流体运移通道:

- 1.底辟构造(气烟囱)
- 2.上新世正断层
- 3.更新世滑脱断层

底辟构造和断层
构成的复合流体运移通道
形态、规模、内部结构、两者
及其与周围地层的接触关系

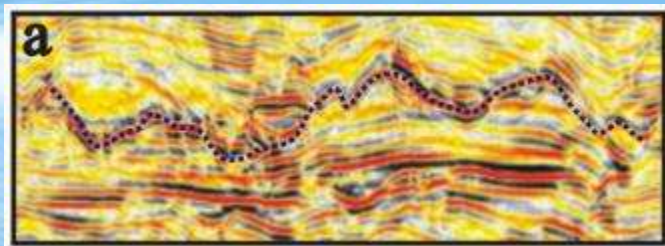
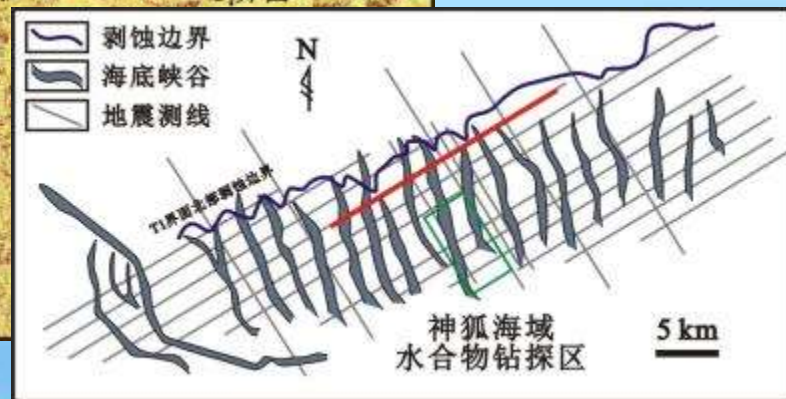
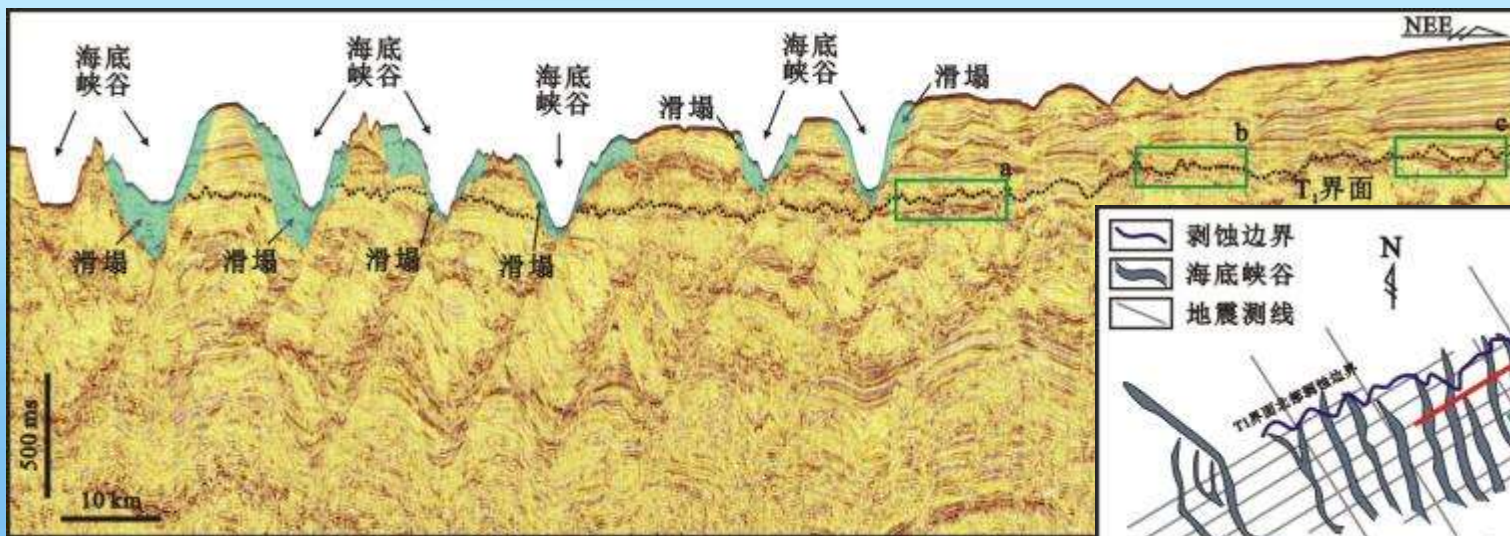
三期侵蚀-沉积事件:

- 1.浊积水道侵蚀-再沉积
- 2.陆坡进积-沉积物失稳(滑移沉积体)
- 3.现代海底峡谷-滑塌沉积

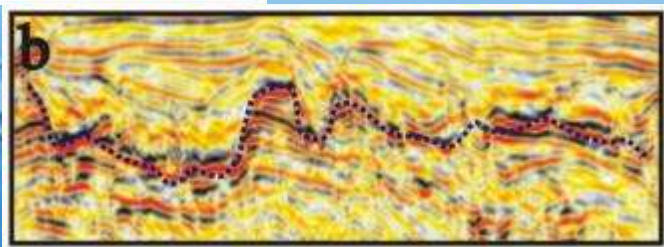


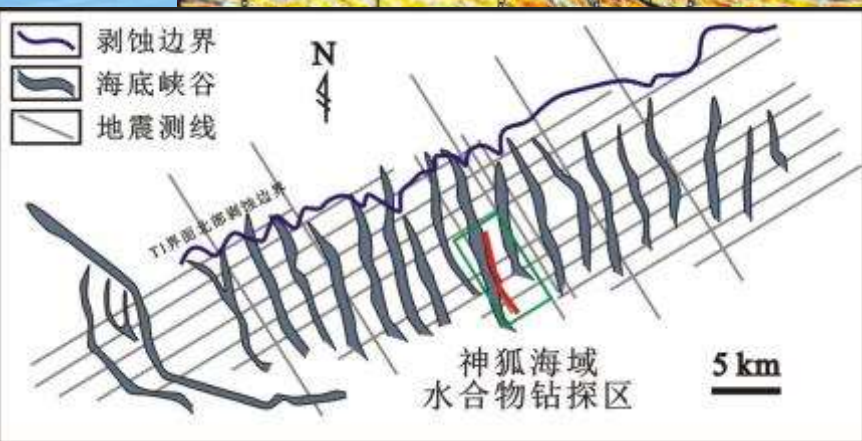
神狐海域水合物沉积控制因素

1、 T_1 界面时期 (1.8 Ma) 浊积水道侵蚀-再沉积事件

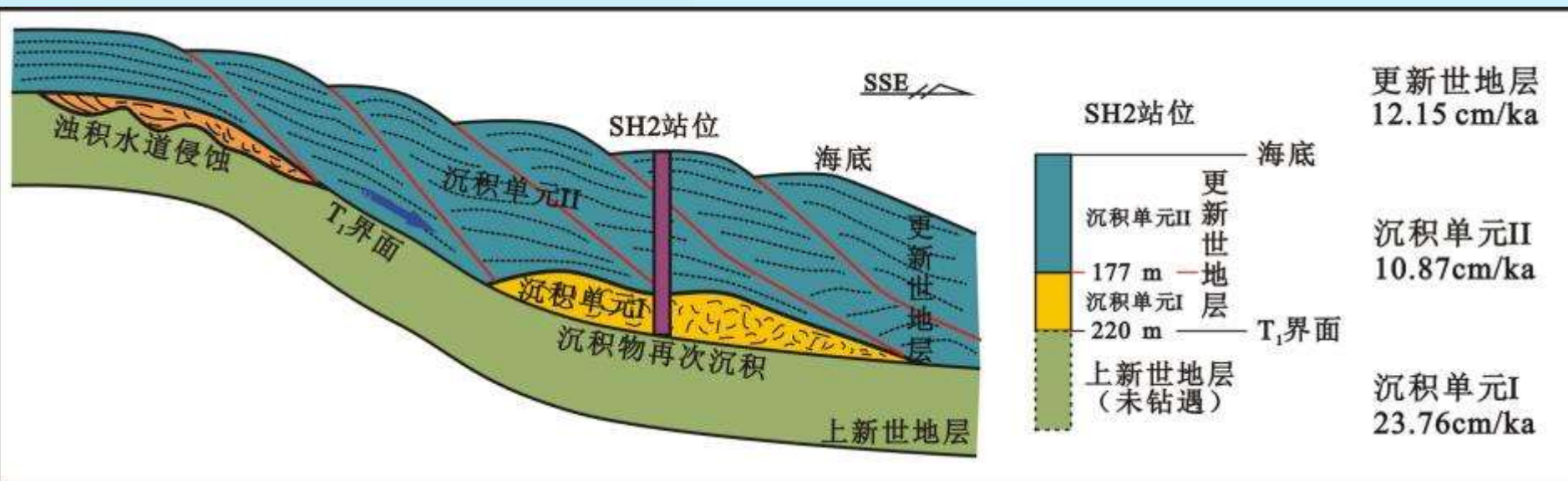


更新统底部 (T_1 界面) 存在明显的不整合特征, 解释为一系列小型浊积水道, 存在侵蚀-再沉积。





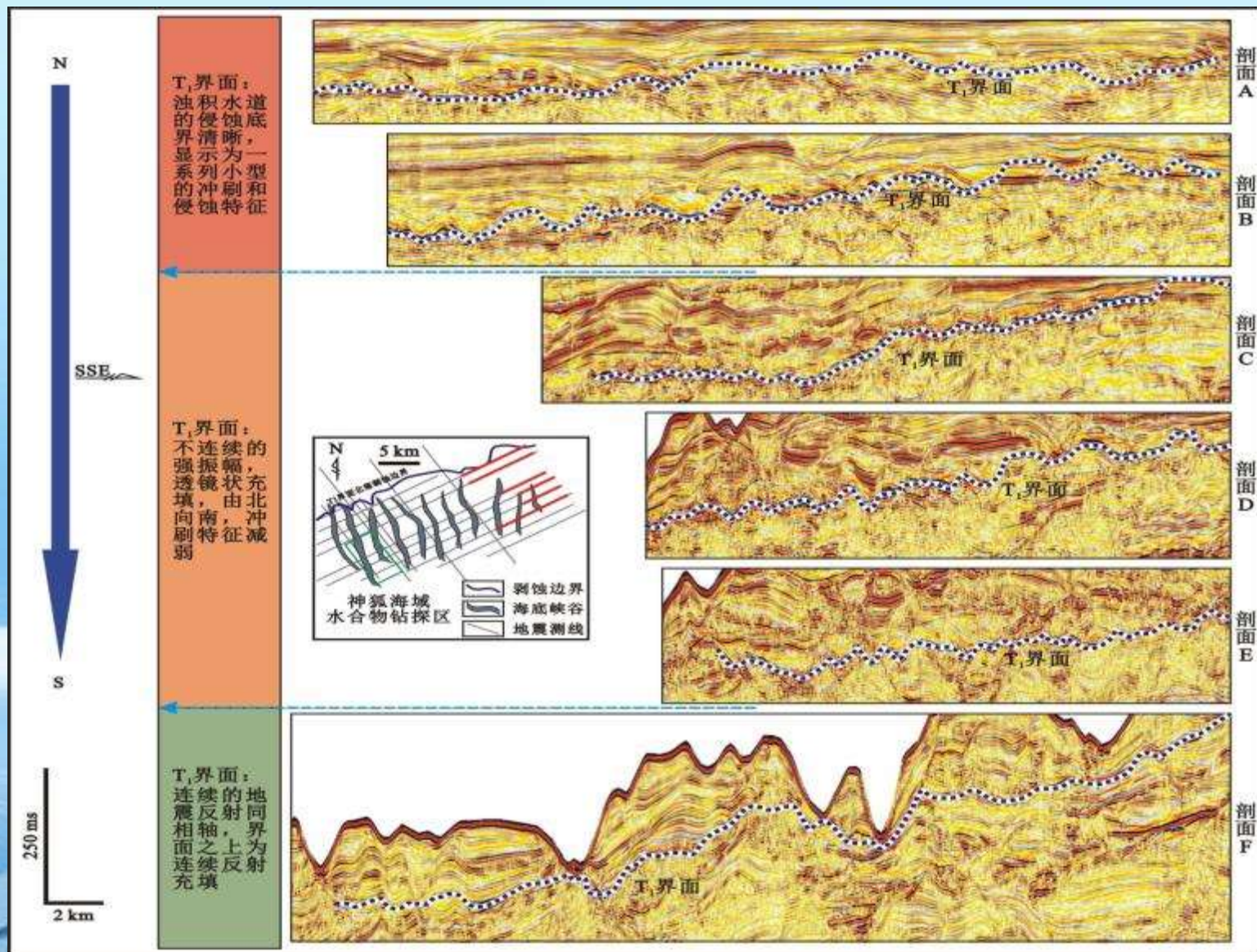
BSR(T₁)之上细粒泥质粉砂/粉砂质泥，实际上为2套不同成因的沉积单元，即下部的浊流侵蚀再沉积单元和上部的滑移体沉积单元。



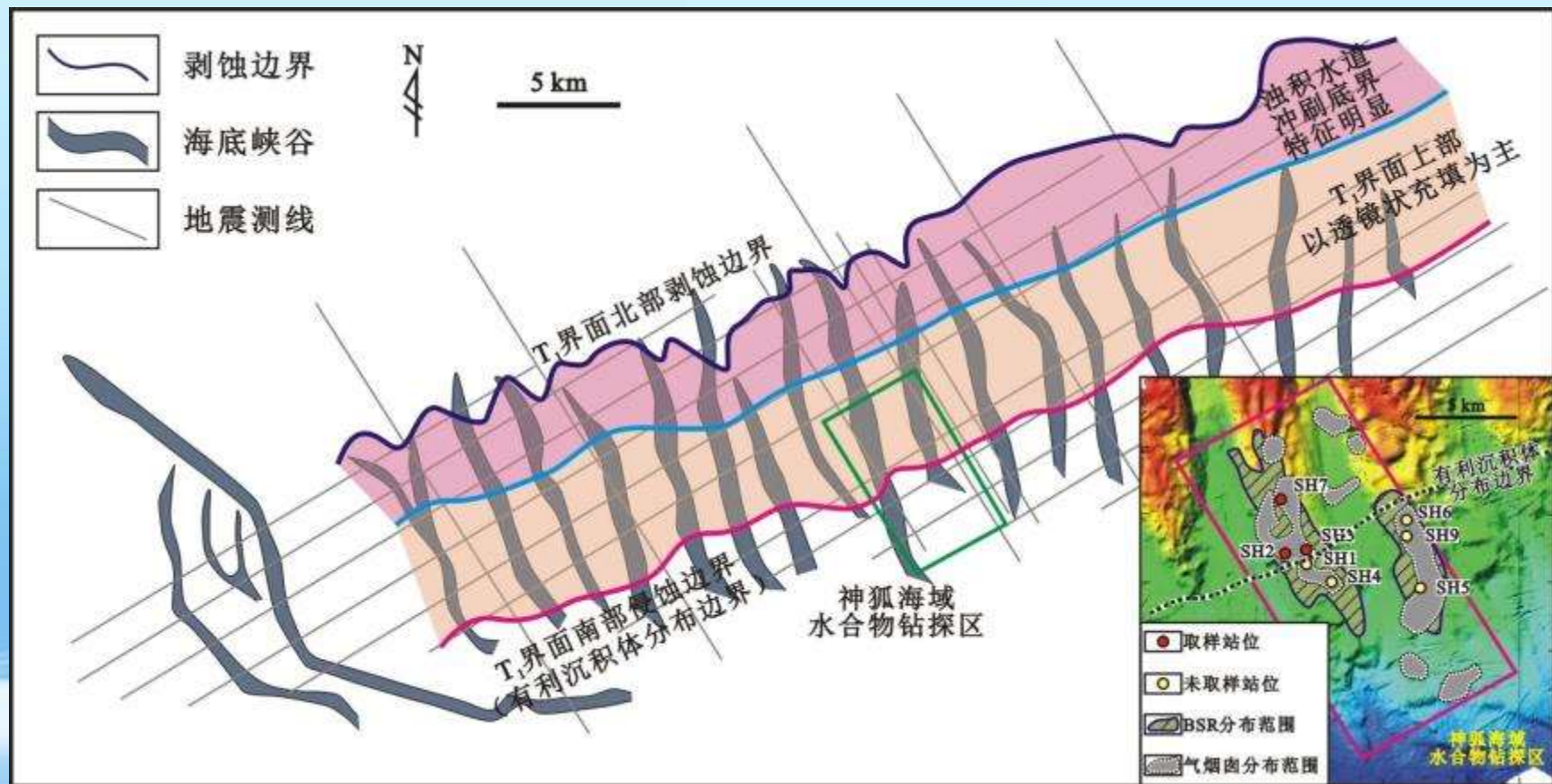
SH2站位:

平均沉积速率: 更新统12.15 cm/ka、沉积单元II 10.87cm/ka、
沉积单元I 23.76 cm/ka

相同粒度条件下, 沉积速率较大的沉积物储层物性条件相对较好
沉积单元I可为神狐海域水合物提供适宜的储集空间



自北向南 T_1 界面侵蚀特征逐渐由强变弱

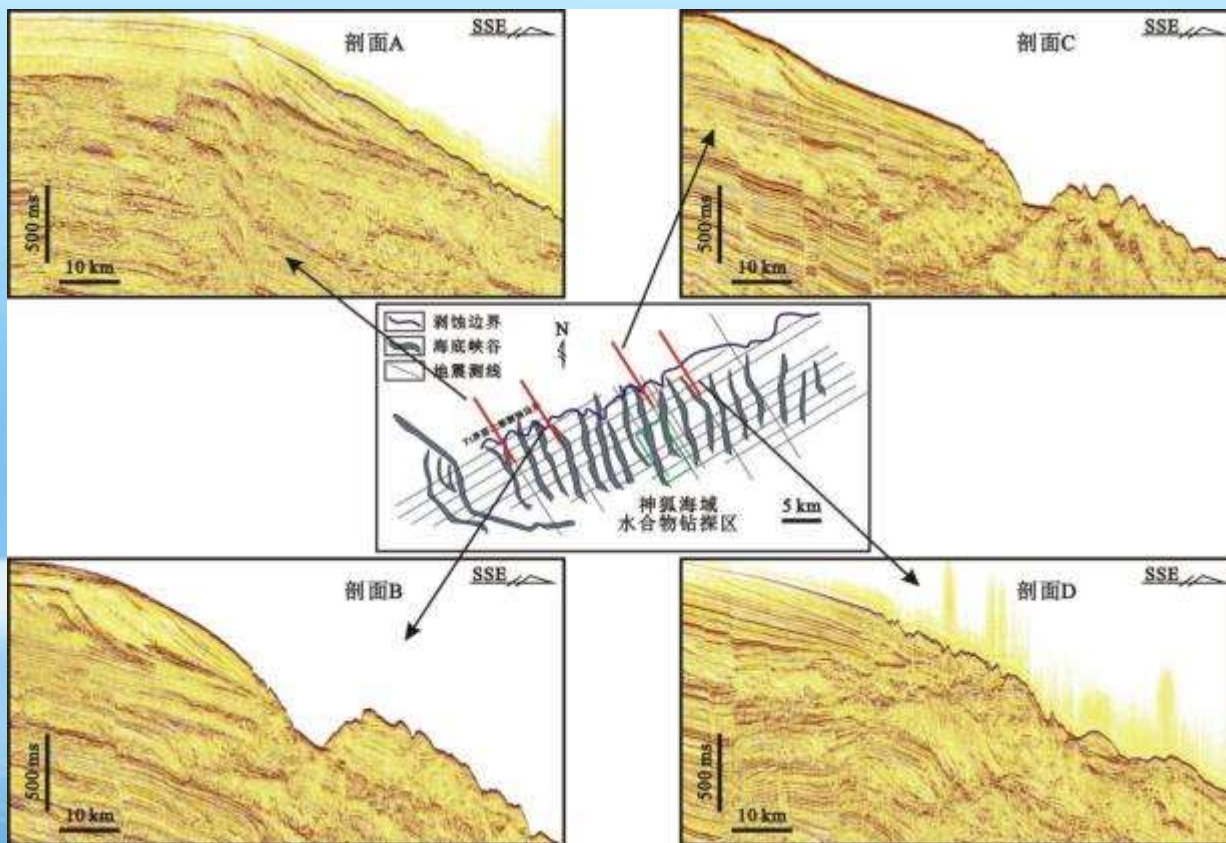


确定了沉积物再沉积的边界，其范围与T₁界面的侵蚀边界大致平行。将沉积范围与水合物钻探站位位置进行对比，发现靠近南部的站位均位于有利沉积带之外，如SH₁、SH₄、SH₅、SH₆和SH₉站位。



神狐海域水合物沉积控制因素

2、陆坡进积-沉积物失稳（滑移沉积体）事件



地震剖面上能够观察到明显的陆架-陆坡进积特征。陆坡强烈进积所带来的大量沉积物容易发生失稳，从而形成滑移沉积体。



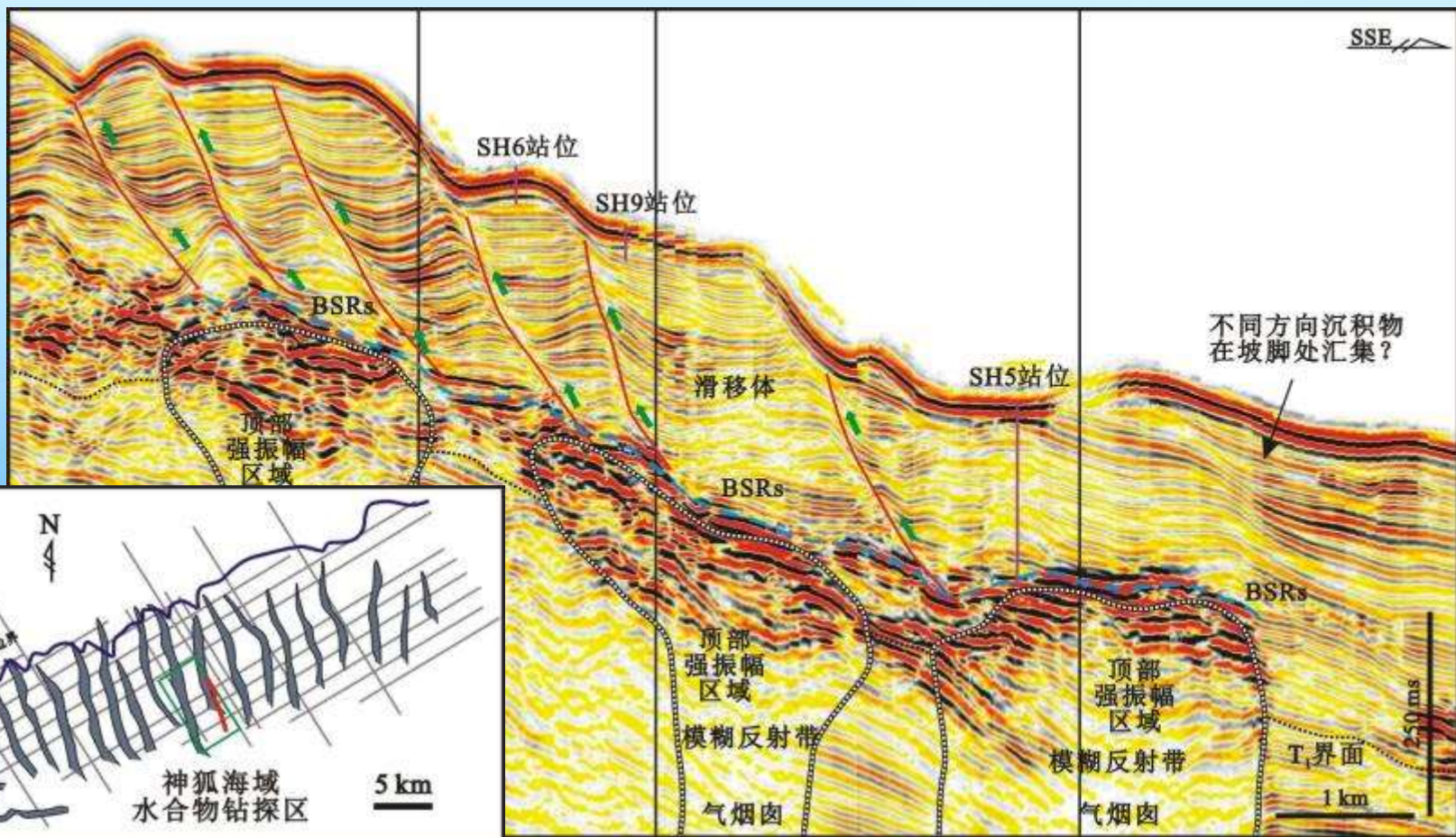
沉积单元II(滑移沉积体):

- 横向连续性和垂向继承性好
- 覆于沉积单元I之上，阻碍了单元I内含气流体垂向运移
- 内部发育了众多NEE向滑脱断层，沟通了海底和气烟囱，导致流体逃逸



沉积单元I发育水合物

沉积单元II不具水合物

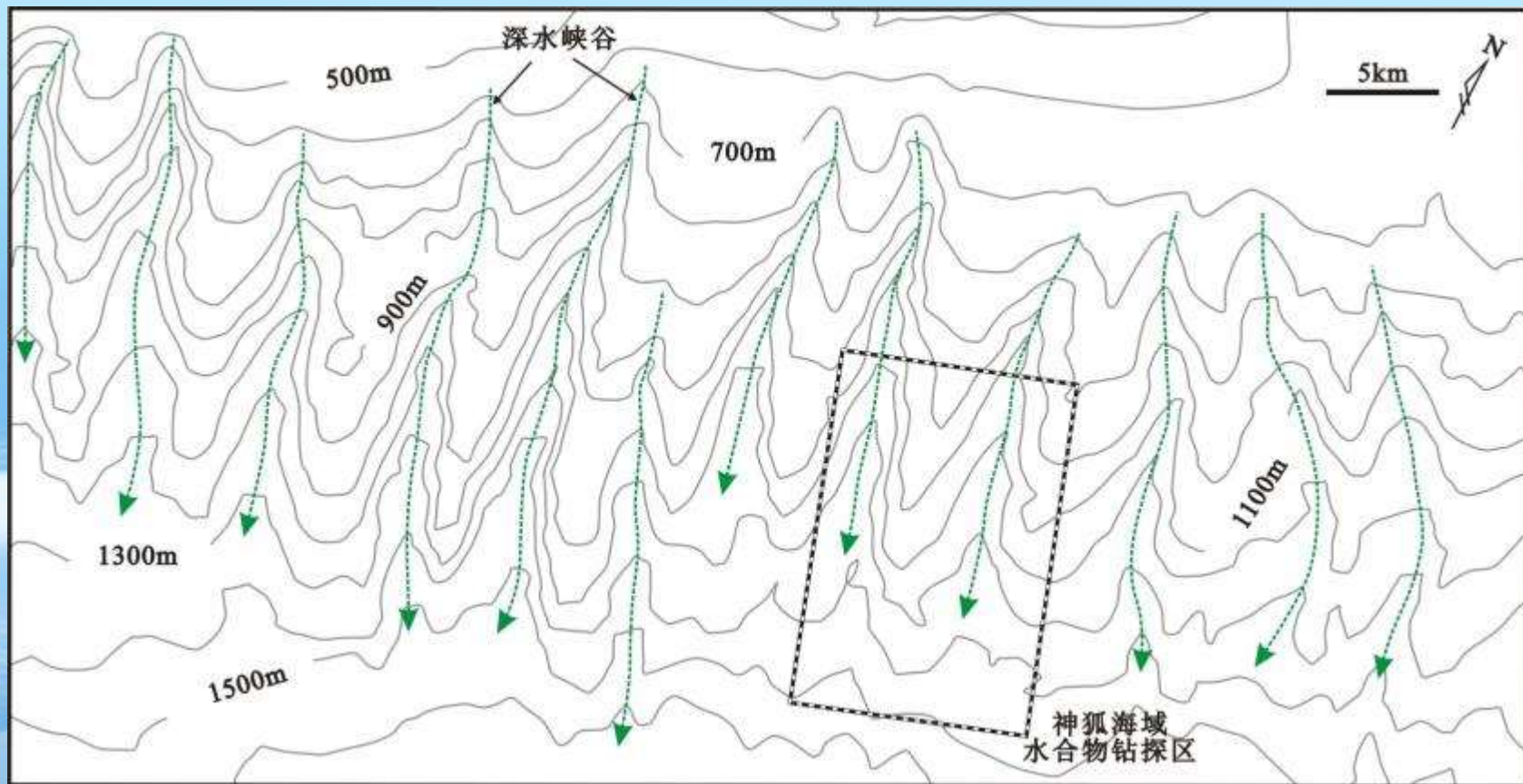


钻探区东侧过SH6-SH9-SH5站位的地震剖面：东部未发现水合物站
位均位于有利沉积带之外，BSR之上均为沉积单元II滑移沉积体

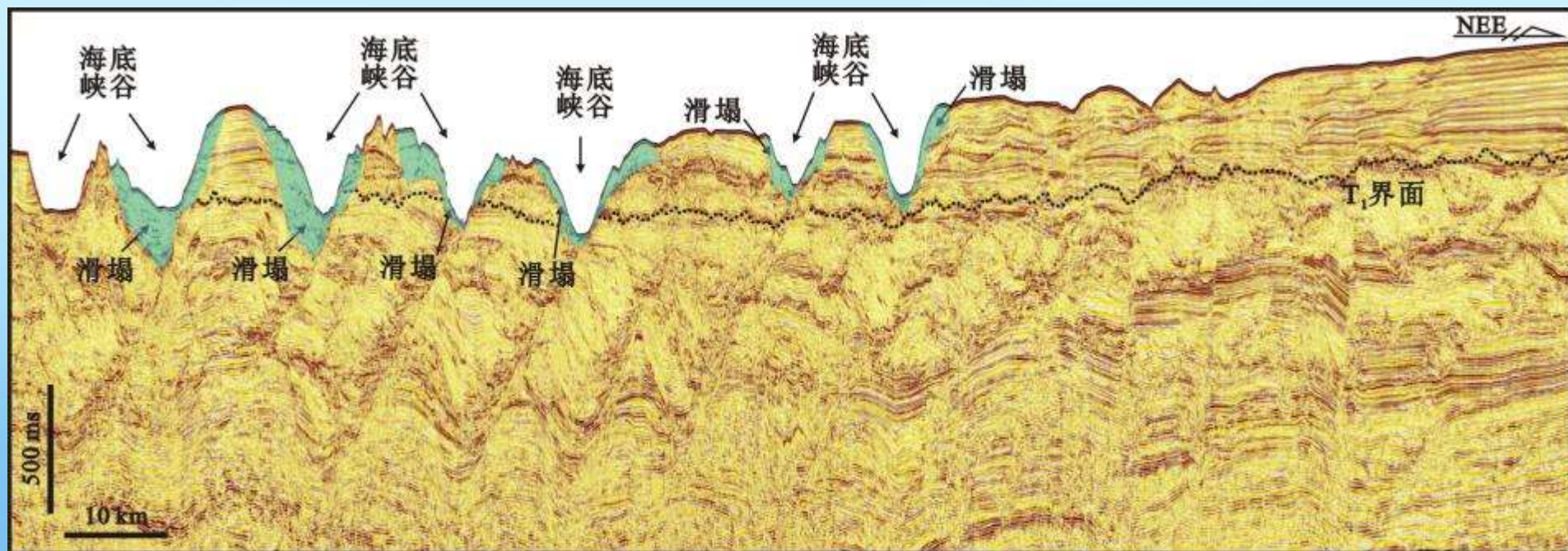


神狐海域水合物沉积控制因素

3、现代海底峡谷-滑塌沉积事件



神狐海域发育了20多条陆坡限制型峡谷，与下陆坡沉积物失稳相关



现代海底峡谷及滑塌沉积体对神狐海域内沉积单元I的分布造成了明显的改造，使其分布呈现为孤立的块体（斑状分布），从而造成了有利沉积体的平面分布不均匀性特征，控制了天然气水合物横向不均匀分布。



神狐海域水合物运聚体系

- 有利构造条件：上新世正断层
- 不利构造条件：断至海底的更新世滑脱断层
- 有利沉积条件：浊积水道侵蚀-再沉积的沉积体
- 不利沉积条件：陆坡进积造成的滑移沉积体
- 不均匀分布原因：现代海底峡谷的发育及峡谷两侧发育的滑塌沉积体

更新世以来的构造和沉积特征及演化
是控制水合物成藏和分布的关键因素之一

五、水合物未来发展趋势



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

面临挑战

- 天然气水合物资源评价
- 天然气水合物开采：方法、技术和有效性、安全性
- 天然气水合物引起的地质灾害
- 全球碳循环中的天然气水合物
- 天然气水合物油气系统-运聚体系
- 天然气水合物实验室和野外表征

(Methane Hydrate Community Workshop Report,

June 4-6, 2013, Consortium for Ocean Leadership, Washington, D.C.)



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

研究重点

- **水合物储层特性**：这是确定储层能否开采的依据
- **产气潜力评价**：开采前的规定动作
- **开采技术模拟试验**：通过实验模拟和数值模拟，试验水合物的开采过程，提供开采组合工艺，是大规模开采的必经之路
- **有效开采技术、开采安全控制技术和方案**：实现水合物作为一种能源的关键，需要针对具体的储层特征
- **现场开采试验**：适合于已发现高饱和度砂质水合物的地区，且具备开采潜力
- **开采监测，技术、经济和环境评价**：水合物开采的保障



研究方向1、 资源评价和全球碳循环

- 科学问题1：在海洋水合物系统中，甲烷储量和甲烷碳通量的控制因素有哪些？这些因素是如何随着时间产生变化的？
- 科学问题2：如何才能建立一个有效的水合物产状评价体系？
- 科学问题3：水合物储层如何响应自然的和人为的环境条件变化？



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

研究方向2、开采试验

- 科学问题₁: 对海洋水合物开采试验来说, 何种开采方式是比较理想的?
- 科学问题₂: 海洋水合物储层中哪一关键参数影响开采速率?
- 科学问题₃: 对于海洋水合物储层, 最低的开采速率是多大? 需要进行多长时间的开采试验才能说明其经济性、技术有效性和安全性?



研究方向3、地质灾害

- 科学问题1：什么样的人为地质灾害会影响水合物开采？ 如何控制？
- 科学问题2：是否存在单一的因自然条件改变引起的水合物地质灾害？ 如何预测因自然条件改变引起的地质灾害？
- 科学问题3：地质历史时期地质灾害与因自然条件改变引起水合物分解之间的关联性如何？



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

谢谢
敬请批评指正



中国地质调查局
CHINA GEOLOGICAL SURVEY