

广域电磁法及其应用

何继善

2014-06-03



前言

什么是地球物理？

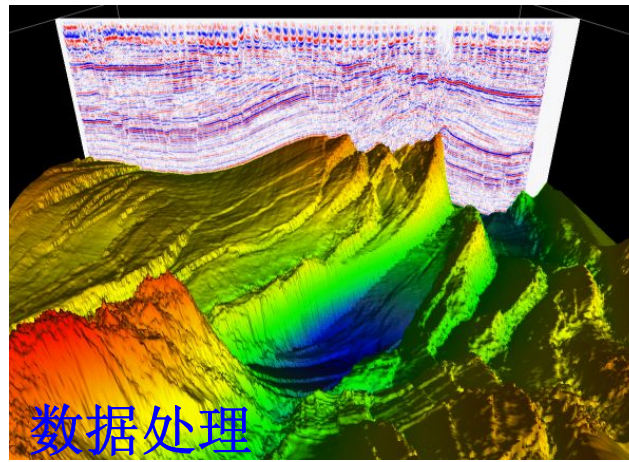
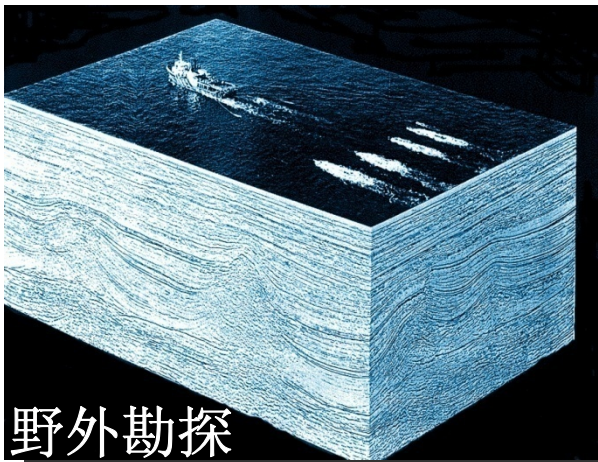


用物理的方法研究地球



前言

地球物理勘探是根据现代物理学与数学原理，应用电子与信息技术，探测地下物理参数的三维分布，以查明地质构造、寻找矿产资源 and 进行灾害预警。





前言

应用地球物理主要包括地震、重力、磁法、电法、放射性及电磁法勘探方法





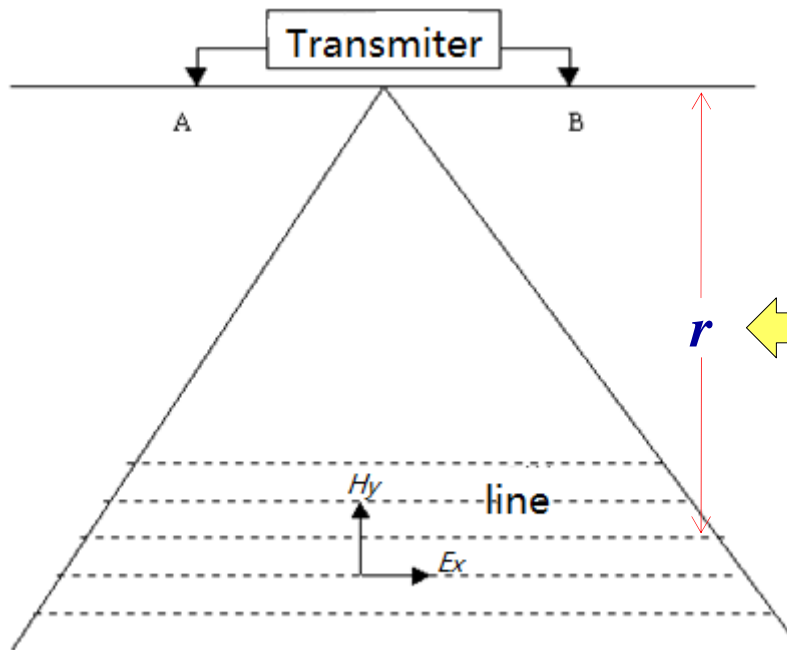
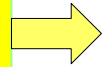
可控源音频大地电磁法 (CSAMT法)



CSAMT

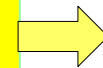
可控源音频大地电磁法：通过接地电极AB发射一系列不同频率的谐变电流，同时在远区测量电磁场的 E_x 和 H_y 分量。

接地电极AB



收发距 r 足够大

远区测量 E_x 和 H_y





解麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

法拉第定律

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

安培定理

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q$$

库仑定律

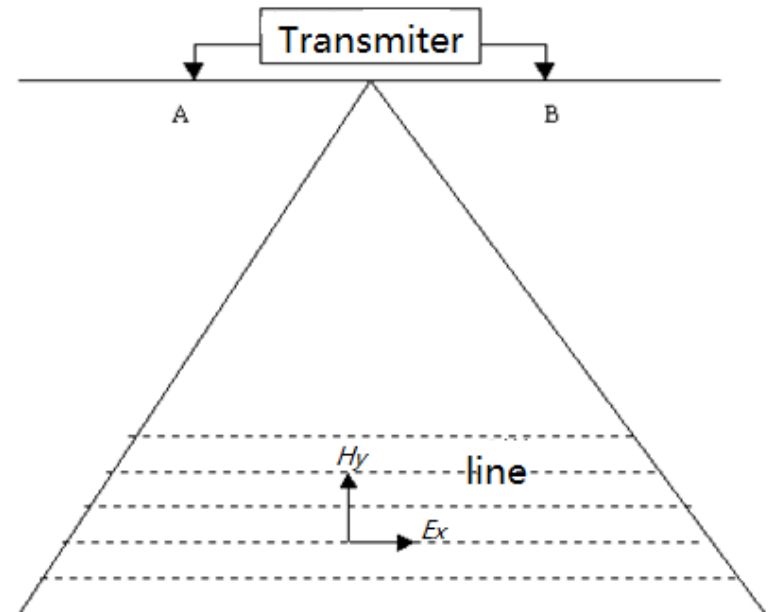
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

磁通量连续定理

可以得到

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3 \cos^2 \phi - 2 + e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

$$H_y = \frac{IdL}{2\pi r^2} \left[(1 - 4 \sin^2 \phi) I_1 K_1 + \frac{ikr}{2} \sin^2 \phi (I_1 K_0 - I_0 K_1) \right]$$





CSAMT

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3 \cos^2 \phi - 2 + e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

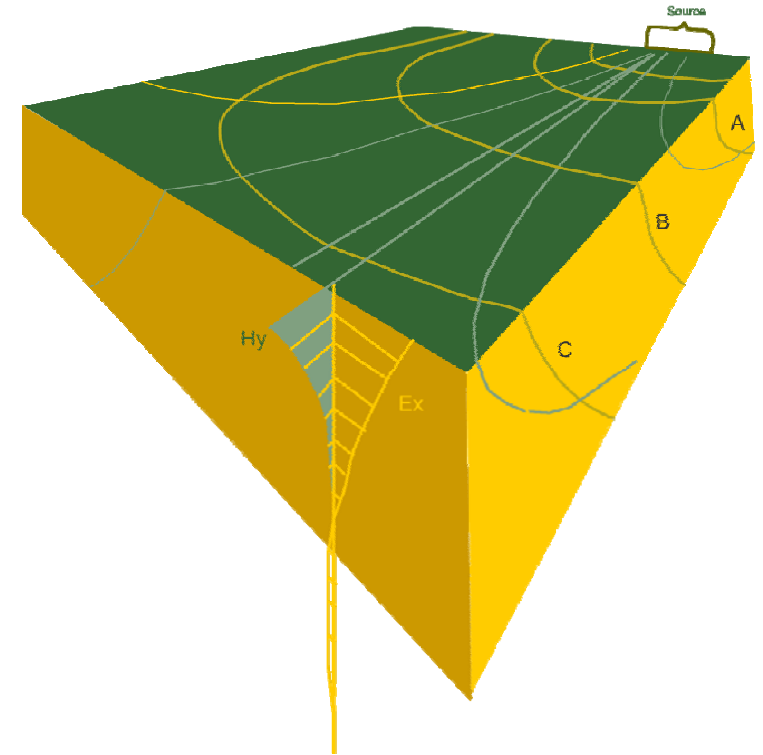
$$H_y = \frac{IdL}{2\pi r^2} \left[(1 - 4 \sin^2 \phi) I_1 K_1 + \frac{ikr}{2} \sin^2 \phi (I_1 K_0 - I_0 K_1) \right]$$

在远区可简化如下

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3 \cos^2 \phi - 2] \quad H_y = \frac{IdL}{2\pi r^3 k^2} (3 \cos^2 \phi - 2)$$

得到Cagniard视电阻率

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$



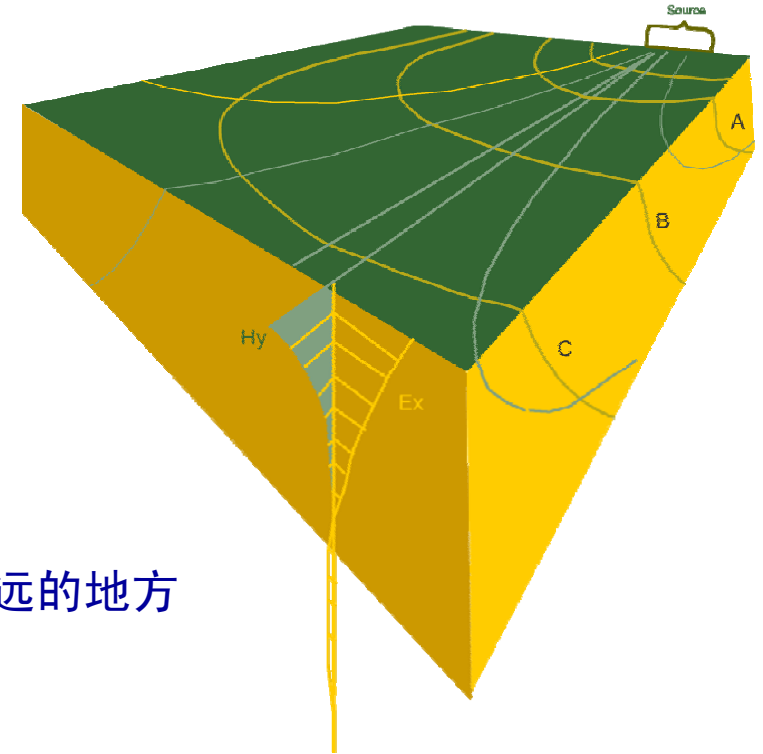


CSAMT

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$

□在CSAMT中，Cagniard视电阻率是近似公式。

□为了保证Cagniard视电阻率的准确性，只能在距离场源很远的地方测量。





CSAMT

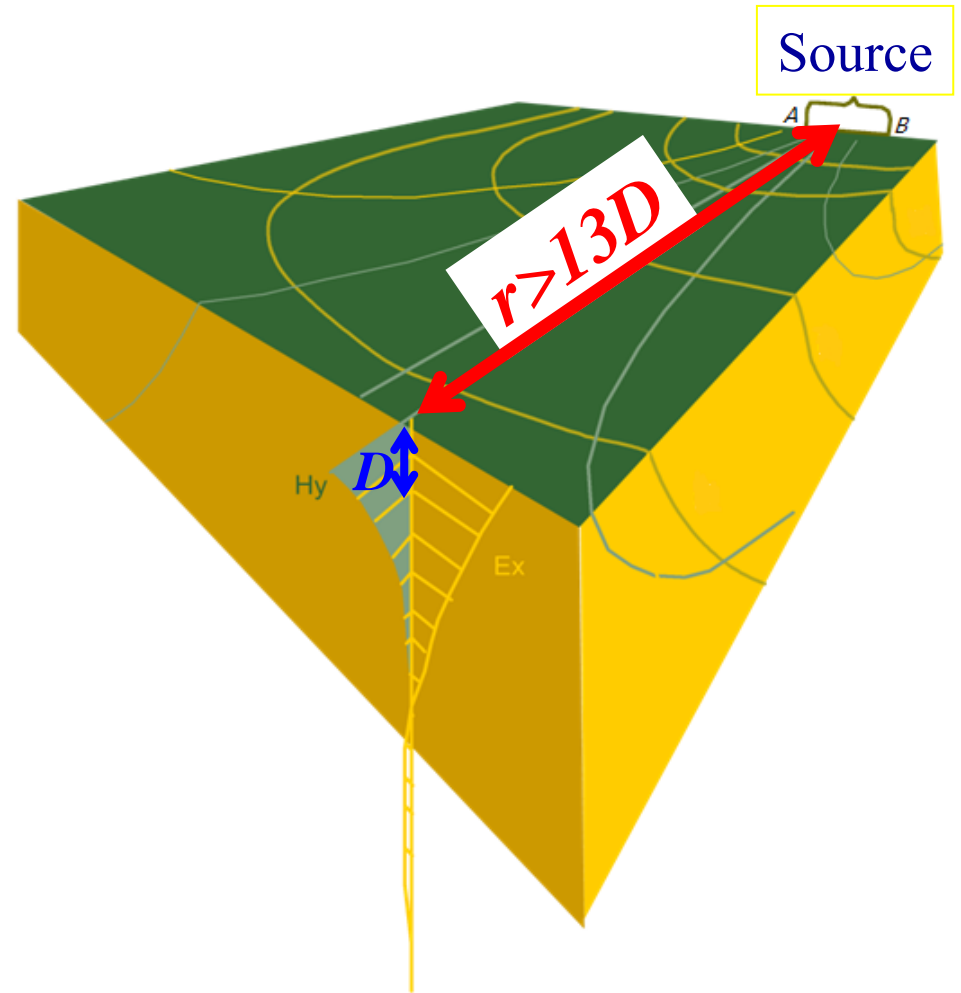
$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$

为了得到足够精确的电阻率，需要多远呢？

至少 $r > 13D$!

r 为收发距

D 为趋肤深度





广域电磁法 (WFEM)

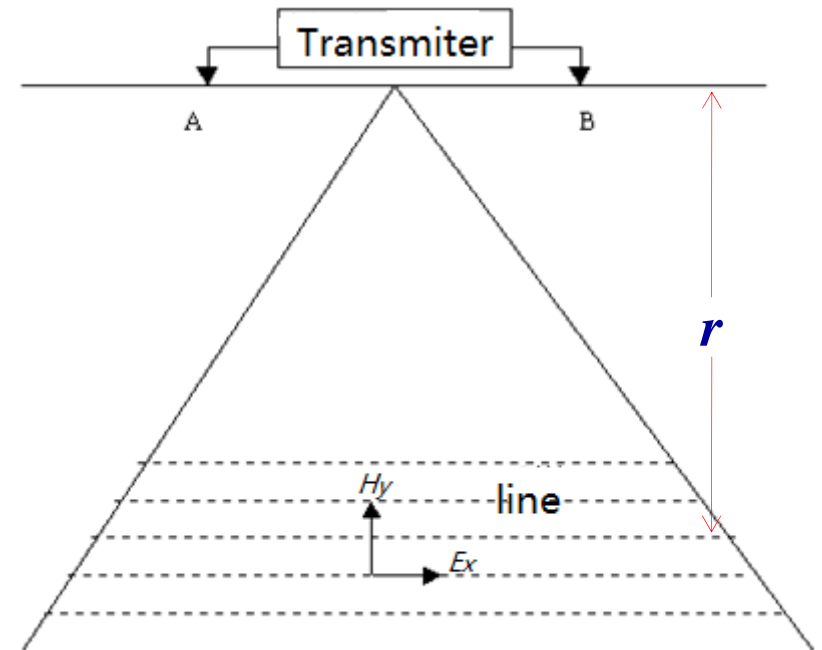


定义了一种精确的、不作任何近似的电阻率：

广域视电阻率：

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3 \cos^2 \phi - 2 + e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

$$H_y = \frac{IdL}{2\pi r^2} \left[\left(1 - 4 \sin^2 \phi \right) I_1 \left(\frac{ikr}{2} \right) K_1 \left(\frac{ikr}{2} \right) + \frac{ikr}{2} \sin^2 \phi \left(I_1 \left(\frac{ikr}{2} \right) K_0 \left(\frac{ikr}{2} \right) - I_0 \left(\frac{ikr}{2} \right) K_1 \left(\frac{ikr}{2} \right) \right) \right]$$



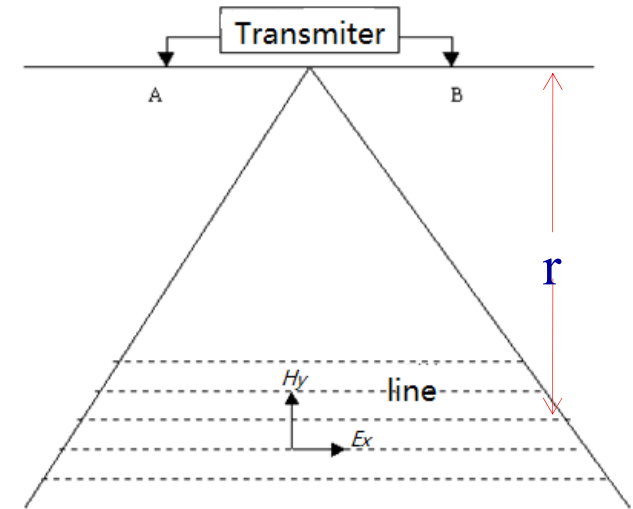


WFEM

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2 \varphi + e^{-ikr} (1 + ikr)]$$

广域视电阻率

$$\rho_{aj} = K_j \frac{\Delta V_{MN}^\omega}{I} \quad j=1,2,\dots,n$$



$$K_j = \frac{2\pi r^3}{MN \cdot AB \cdot f(p_j)}$$

$$p_j = r \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\rho_{a(j-1)}}} \quad j=1,2,\dots,n$$

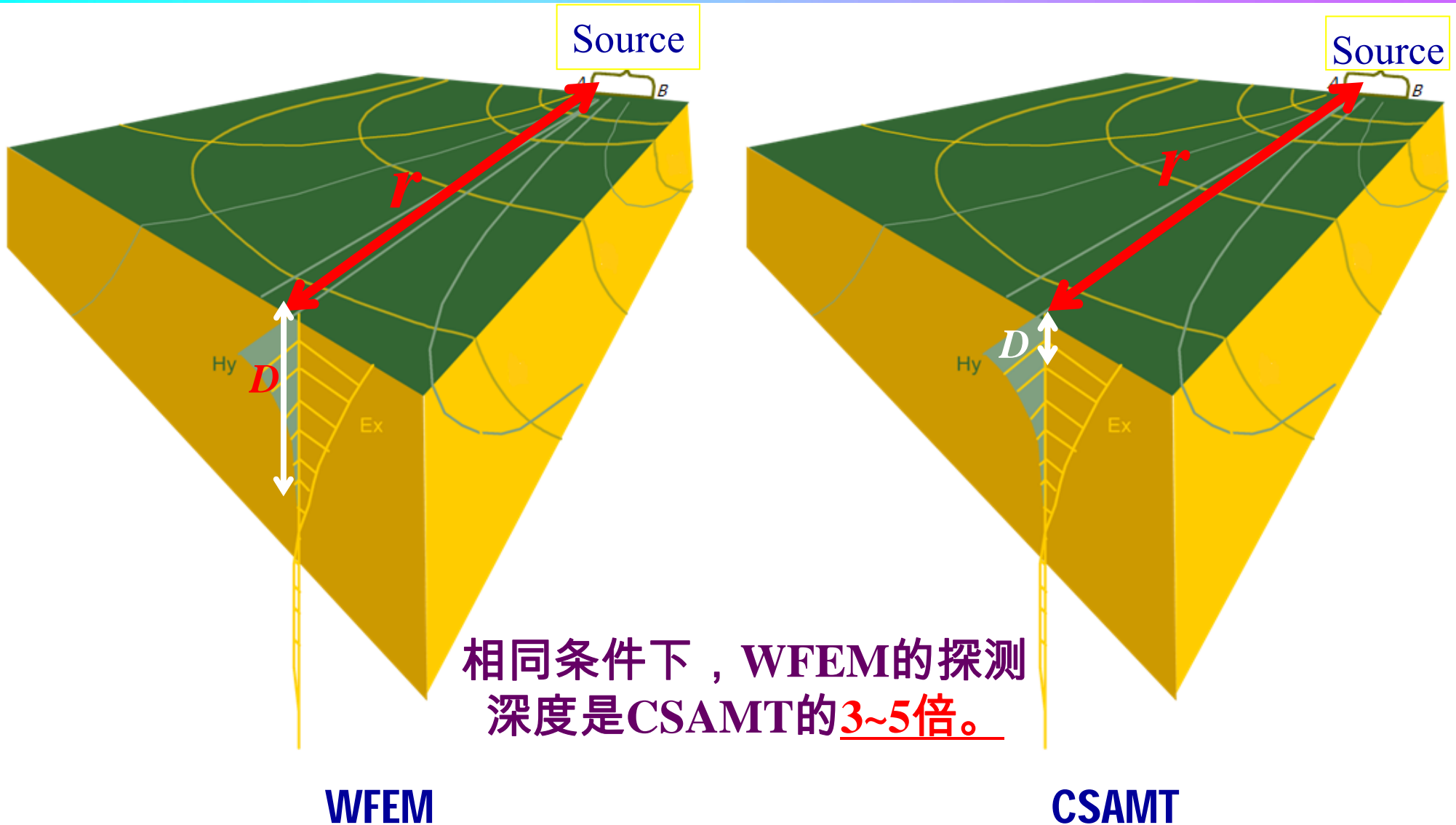
$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$$

$$f(p_j) = 1 - 3\sin^2 \varphi + \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-p_j)^n}{n!} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{p_j}{p_j + 1} \right)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot (2n-3)!!}{(2n)!!} \left(\frac{p_j}{1+p_j} \right)^{2n} \right] e^{i(\alpha - \varphi)} \right\}$$

j 为迭代次数

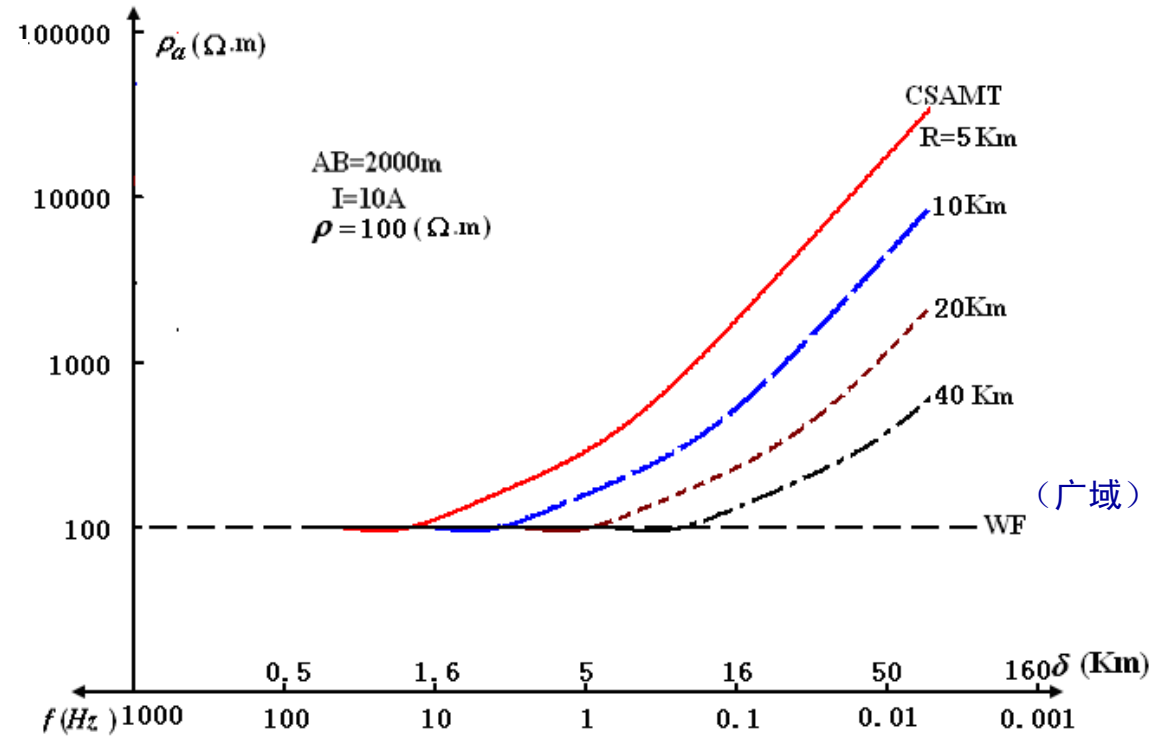
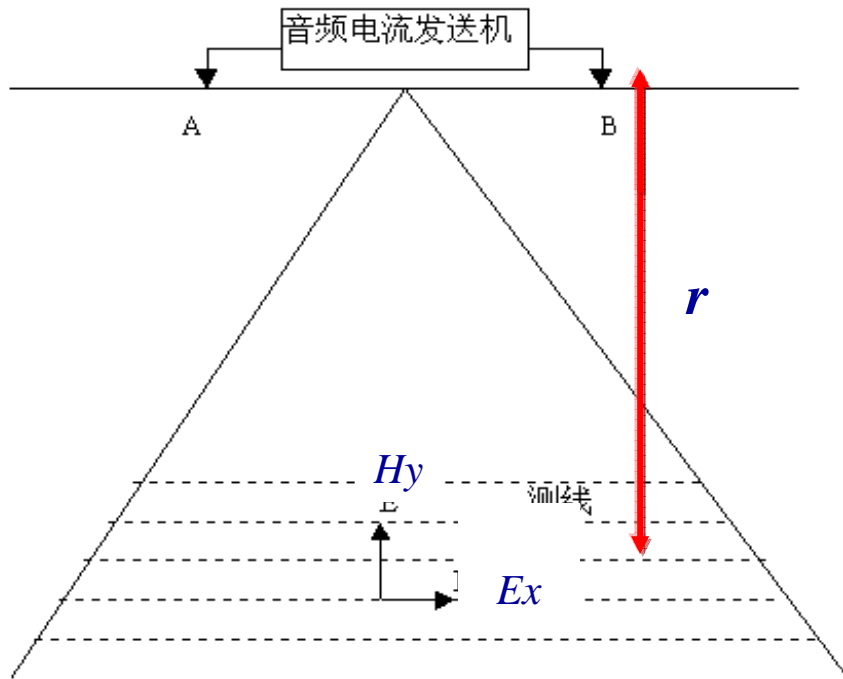


WFEM 与 CSAMT





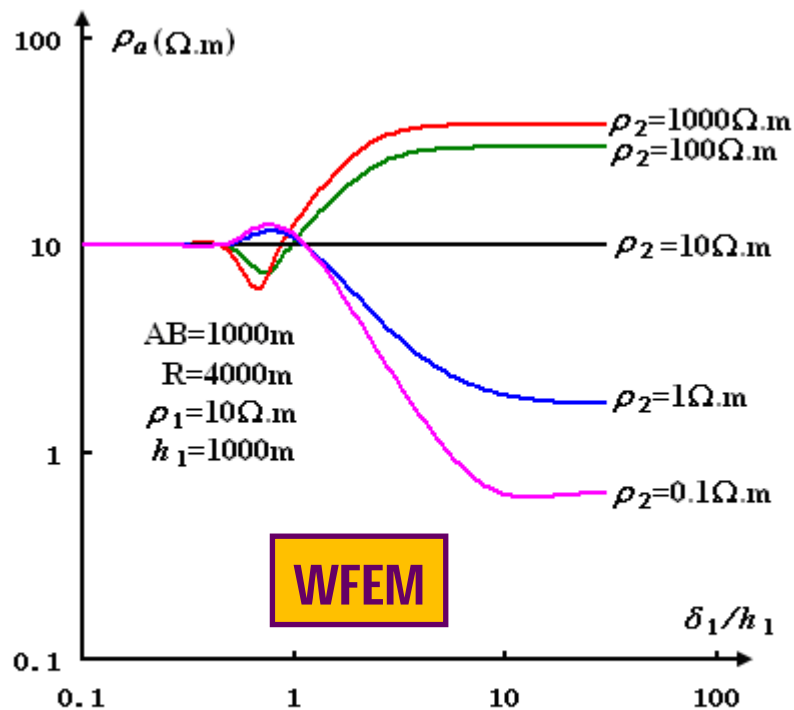
广域视电阻率 与 Cagniard视电阻率对比



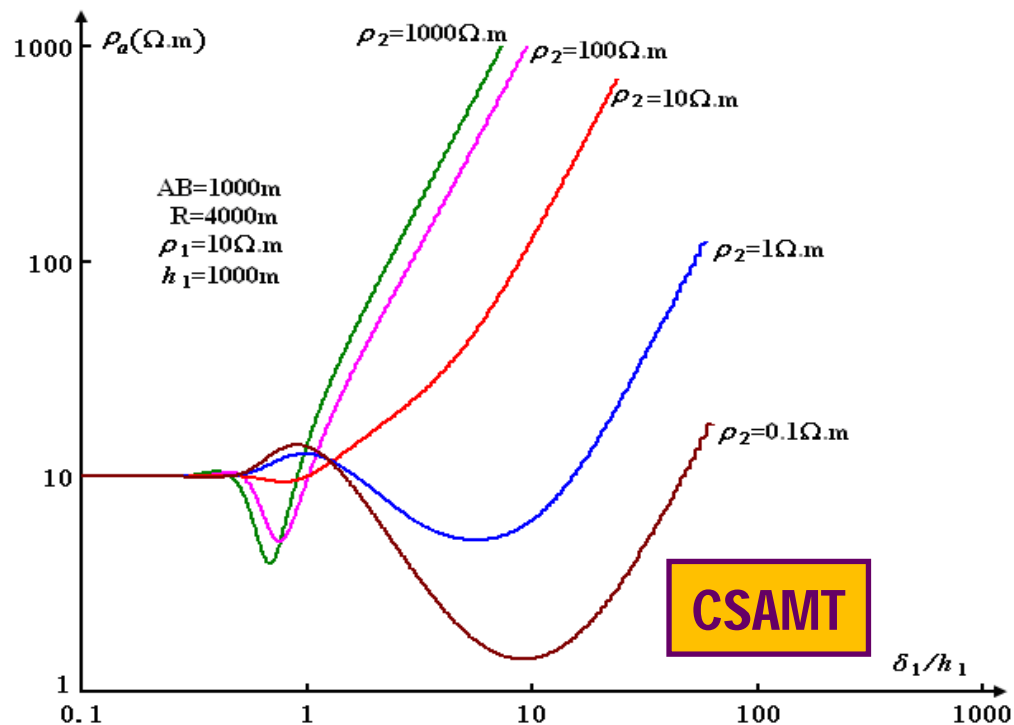
$\rho = 100 (\Omega \cdot m)$ 的大地上不同发收距的WF与CSAMT视电阻率的比较



广域视电阻率与 Cagniard视电阻率对比



二层大地上的广域电磁法视电阻率曲线

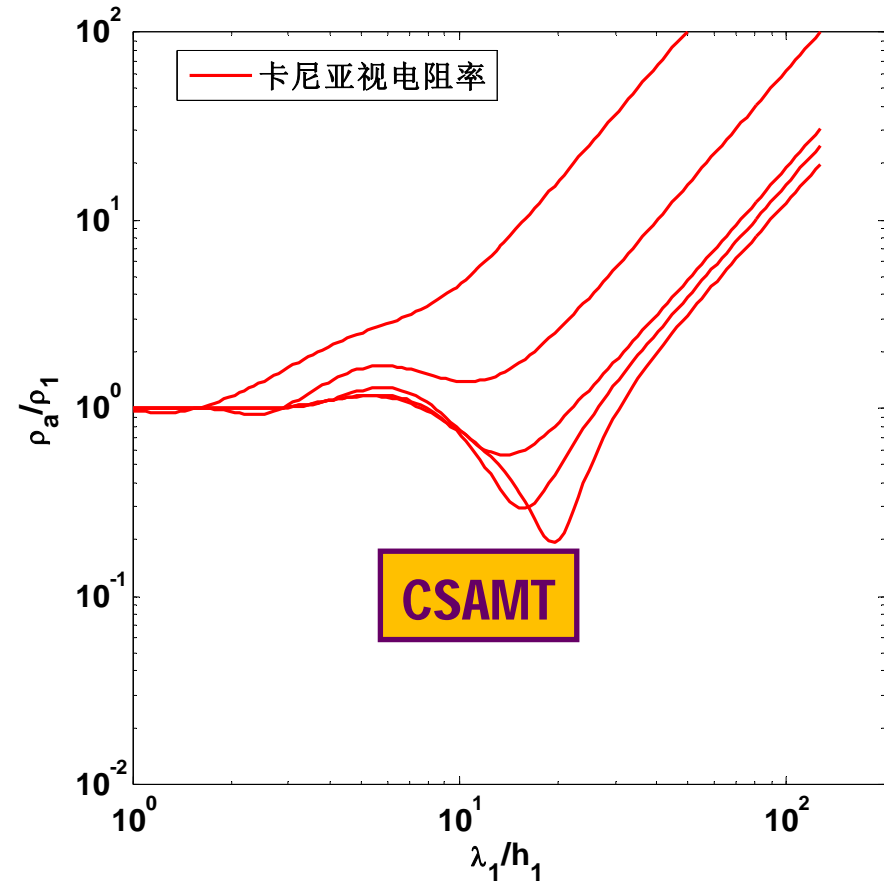
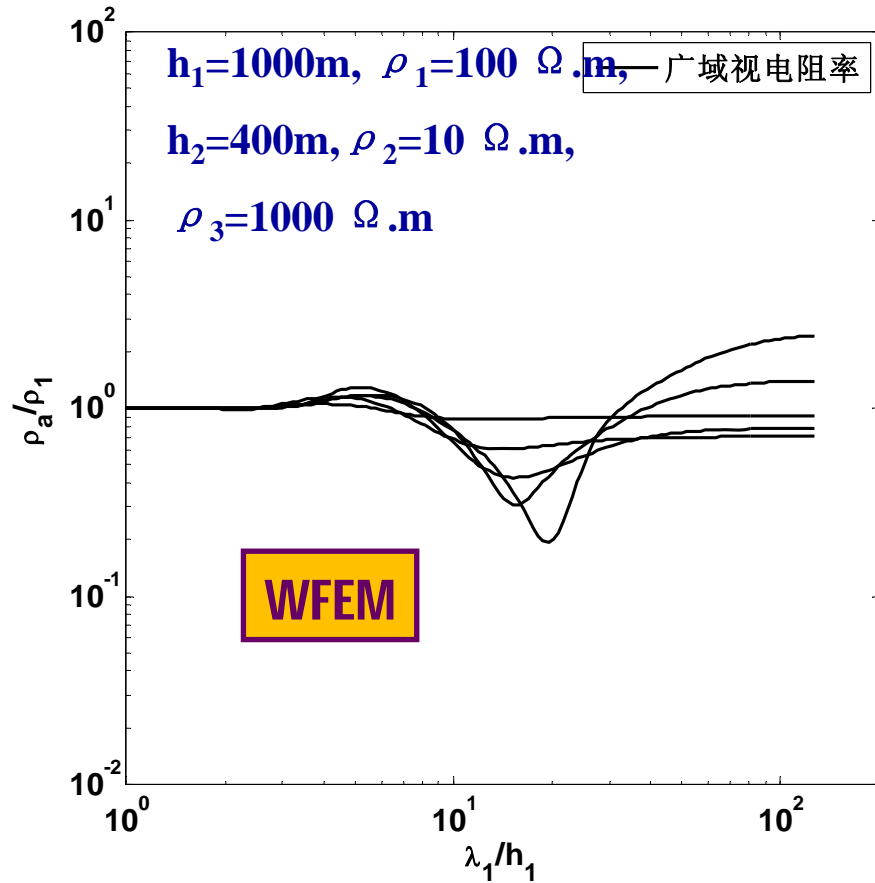


二层大地上CSAMT视电阻率曲线

广域电磁法的响应优于CSAMT ($r=4km$)



广域视电阻率与 Cagniard视电阻率对比



广域电磁法对中间良导层响应优于CSAMT



2^n 序列伪随机信号



2^n 序列伪随机信号

$$F_k(t) = \bigoplus_{i=1}^k f_i(t)$$

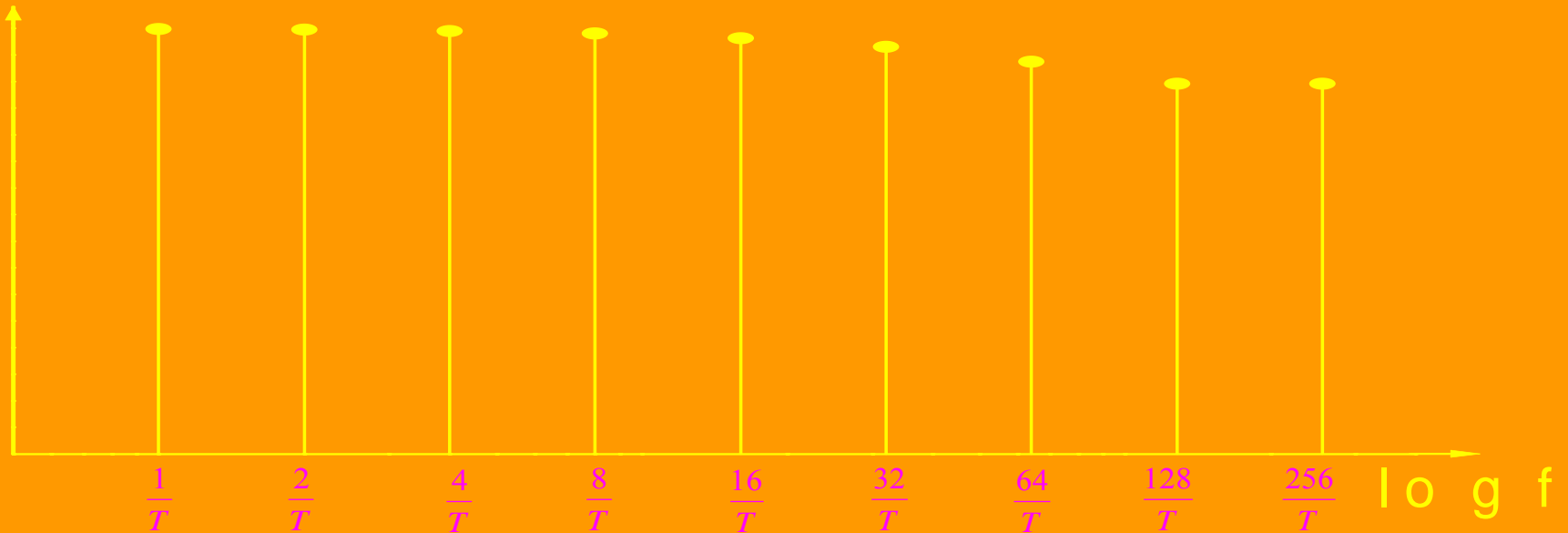
$$f_i(t) = \begin{cases} 1 & 2^i n \leq t < 2^i n + 2^{i-1} \\ -1 & 2^i n + 2^{i-1} \leq t < 2^i(n+1) \end{cases}$$

$$a_{(k+2)} = 1 \left(a_k / 2^k \right)^f \cdots (a_k / 2)^f (a_k) (a_k) (a_k / 2)^b \cdots \left(a_k / 2^k \right)^b T$$



2^n 序列伪随机信号

波形

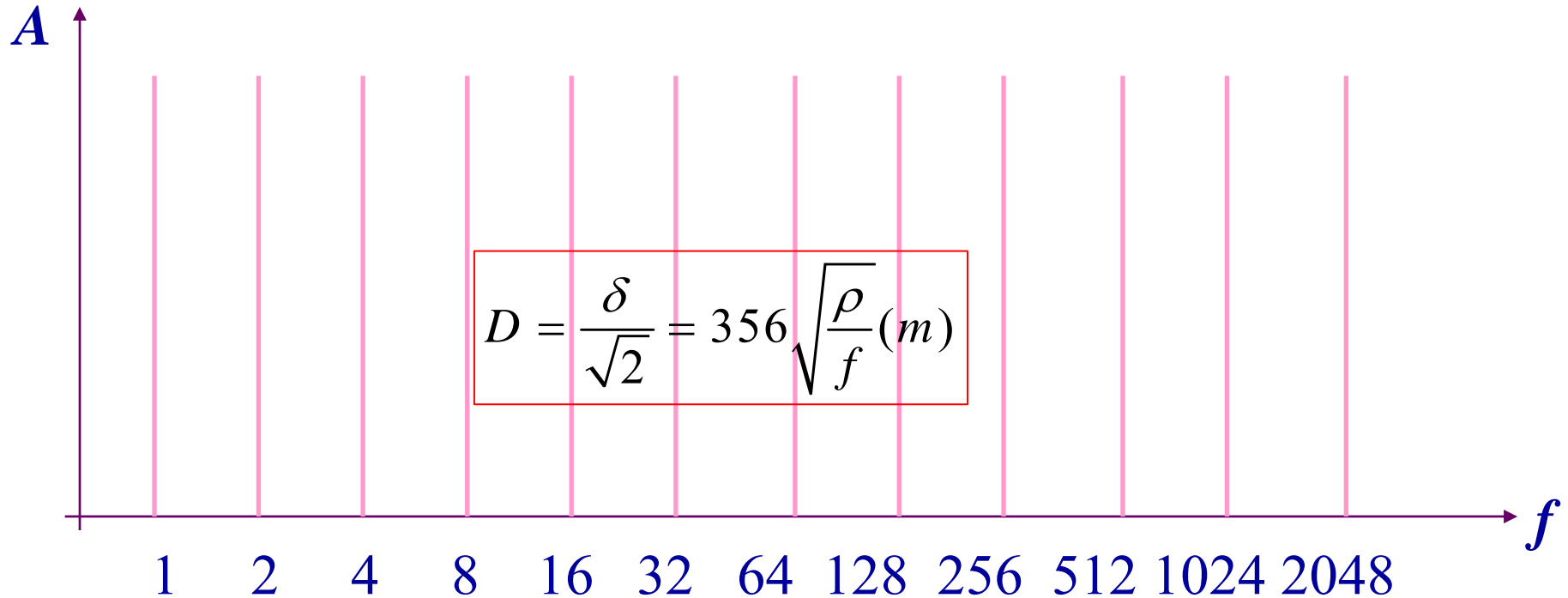




2^n 序列伪随机信号

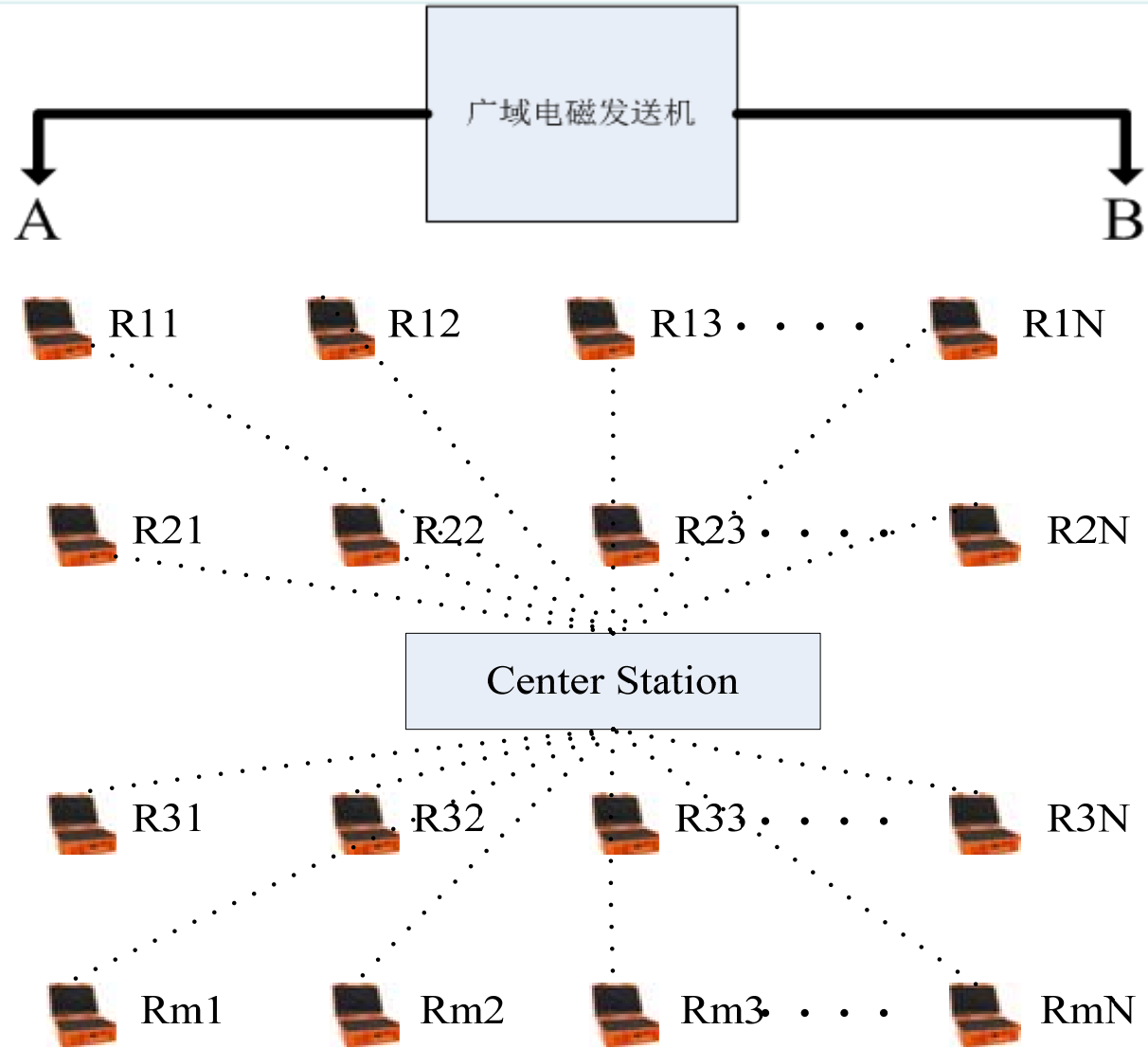
理想的场源:

- (1) 频率在对数坐标轴上均匀分布
- (2) 各频率振幅相同
- (3) 各频率相位相同
- (4) 所有频率同时发射





广域电磁法
+
 2^n 序列伪随机信号
=
三维广域电磁法





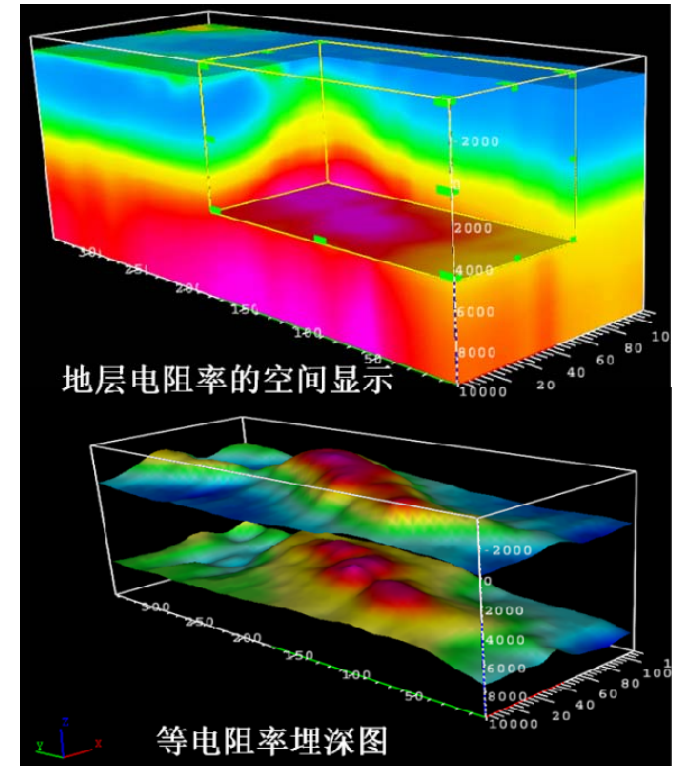
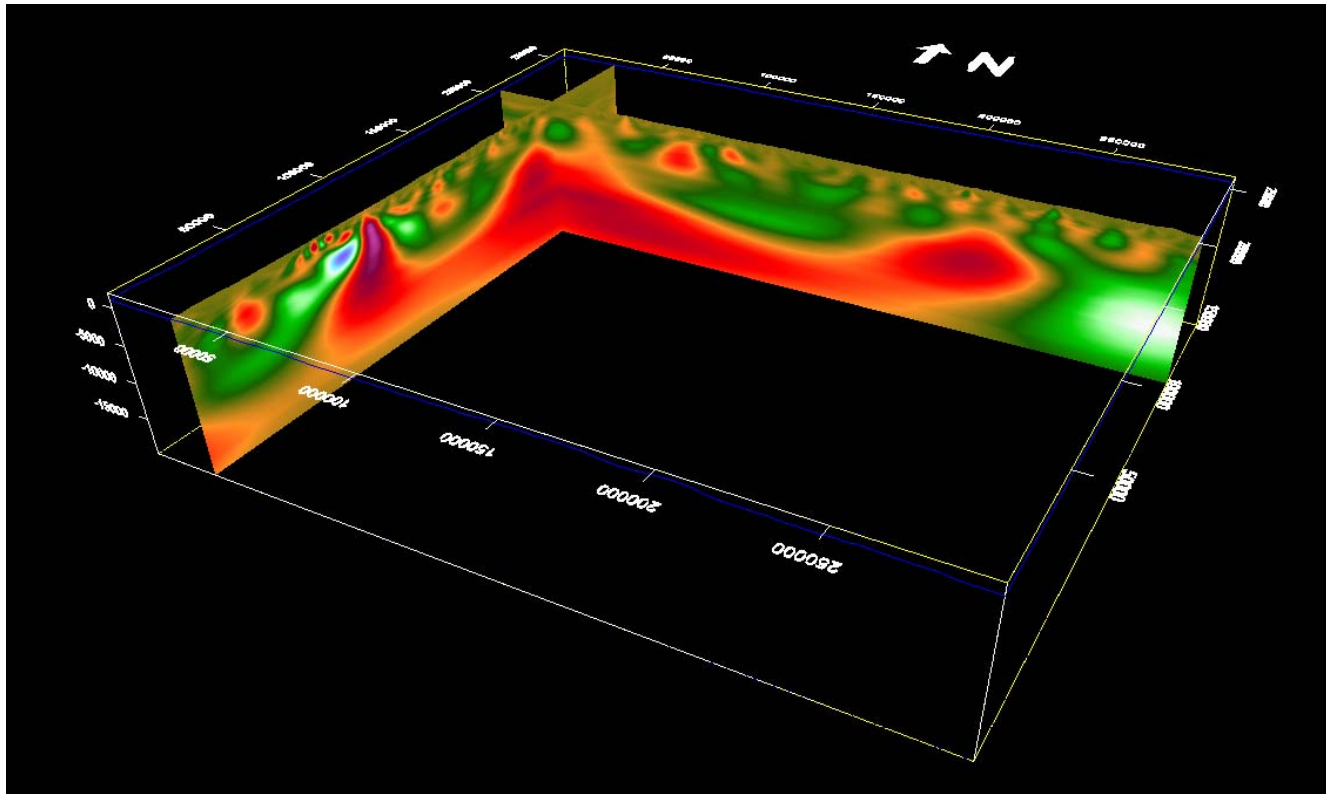
发射系统



200kW



三维反演成像



地球物理数据处理及反演系统



广域电磁法案例

国内应用广泛

油气勘探

金属矿探测





案例1：油气勘探

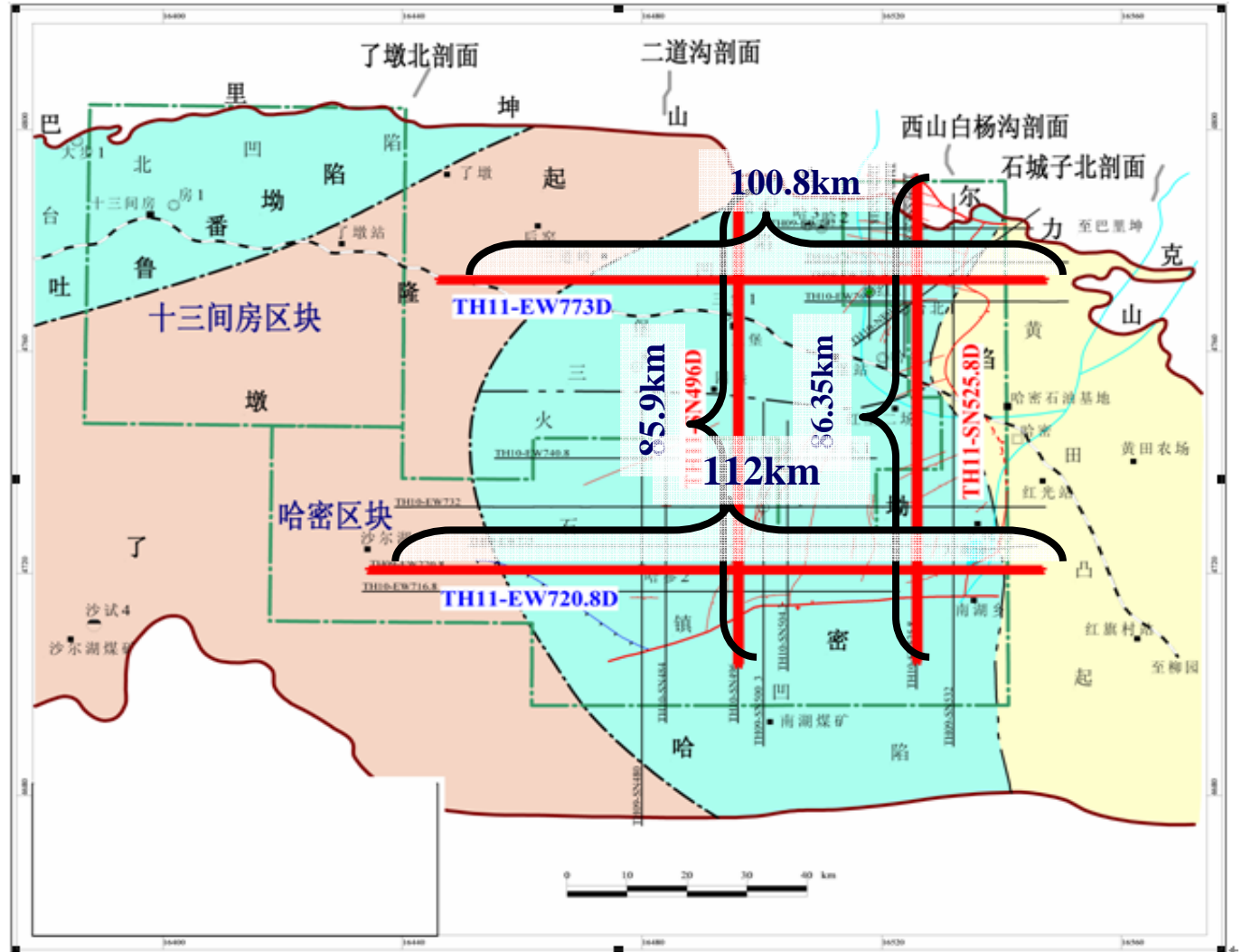
时间：2012-2013

工区：哈密盆地

方法：广域电磁法、地震

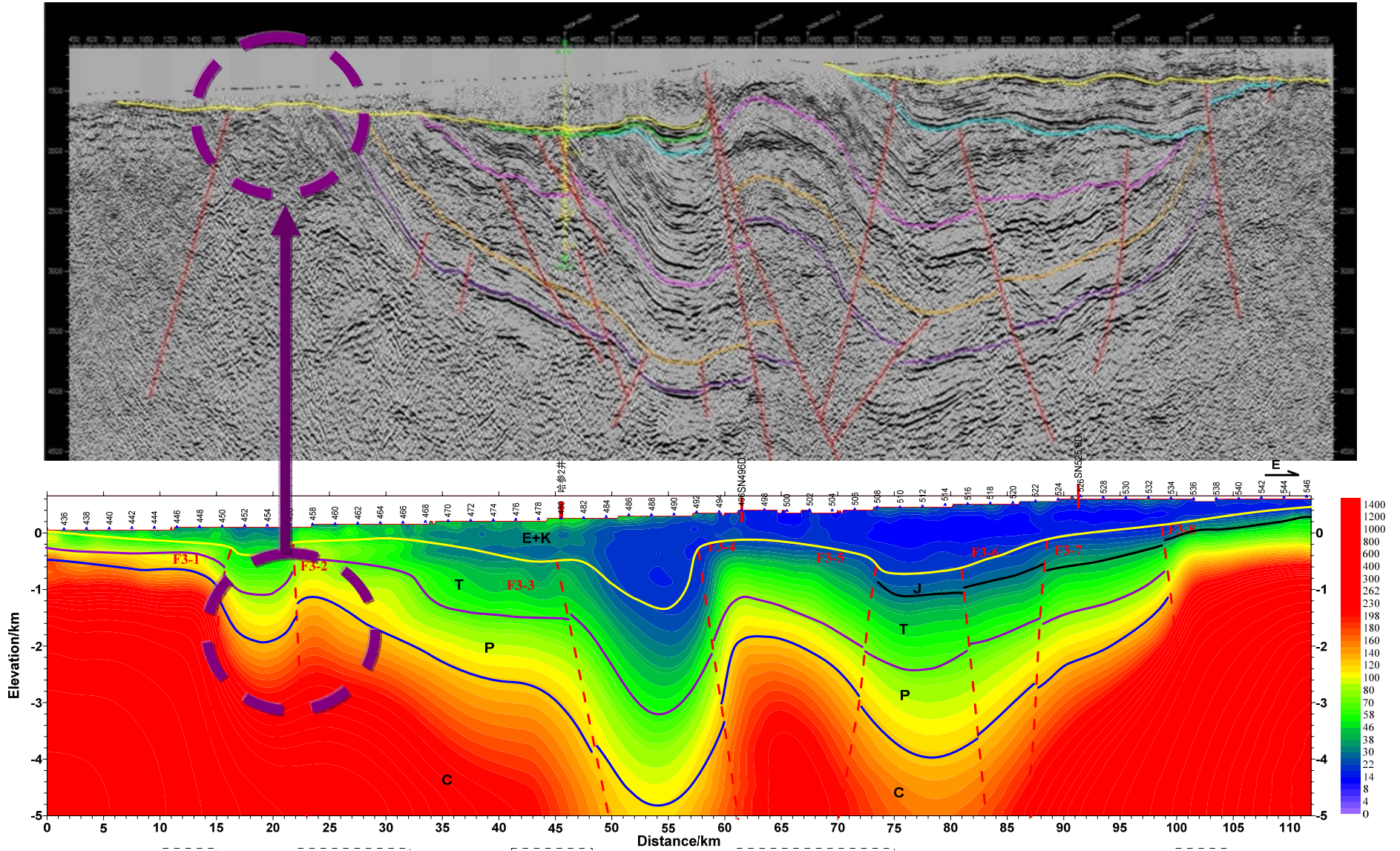
长度：400km

面积：10000km²





案例1：油气勘探





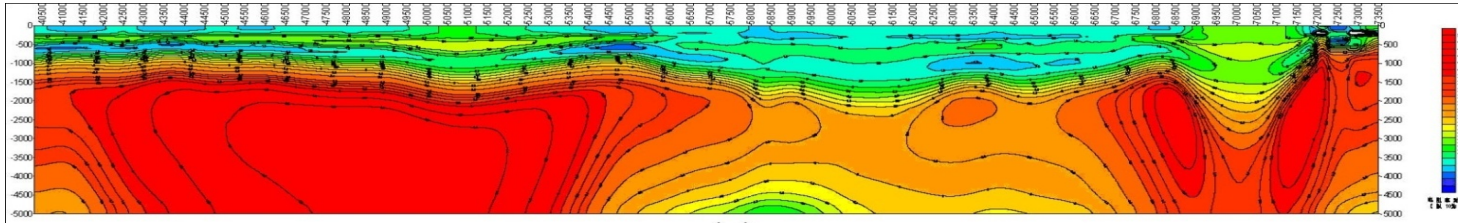
案例1：油气勘探

时间：2009

工区：大杨树盆地

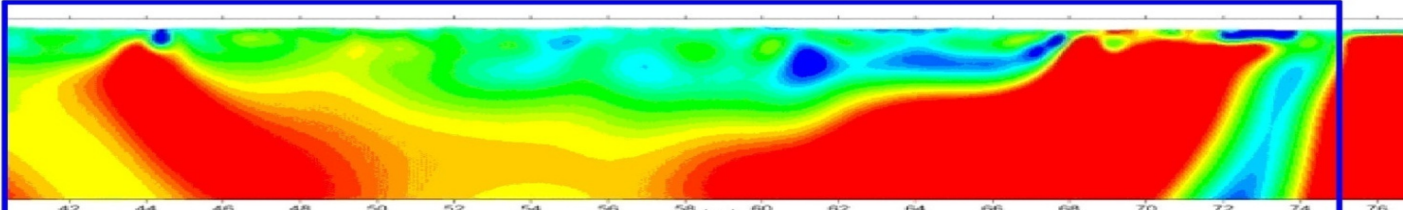
目的层为火山岩，地震属性不明显

方法：广域电磁法、MT、地震



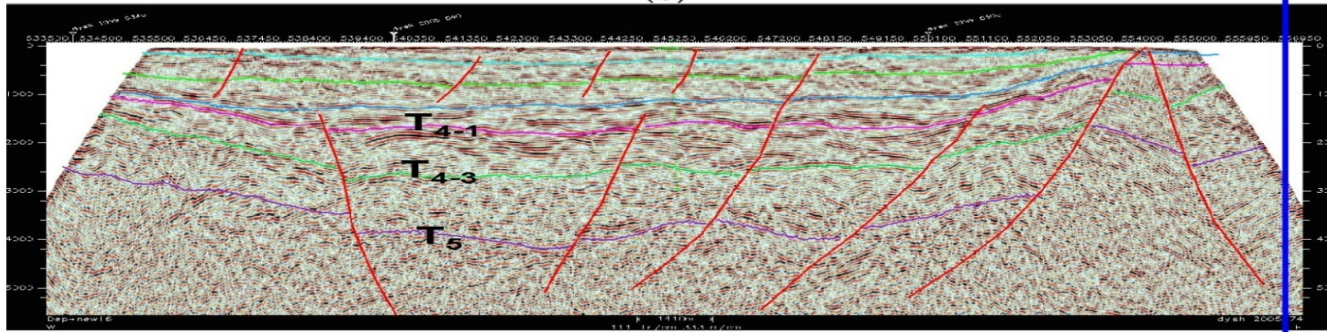
(a)

WFEM



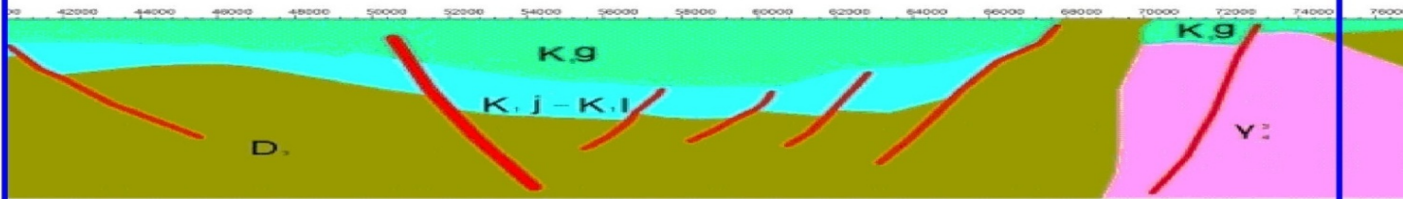
(b)

MT



(c)

地震



(d)

地质剖面



广域电磁法 在页岩气勘探中的应用



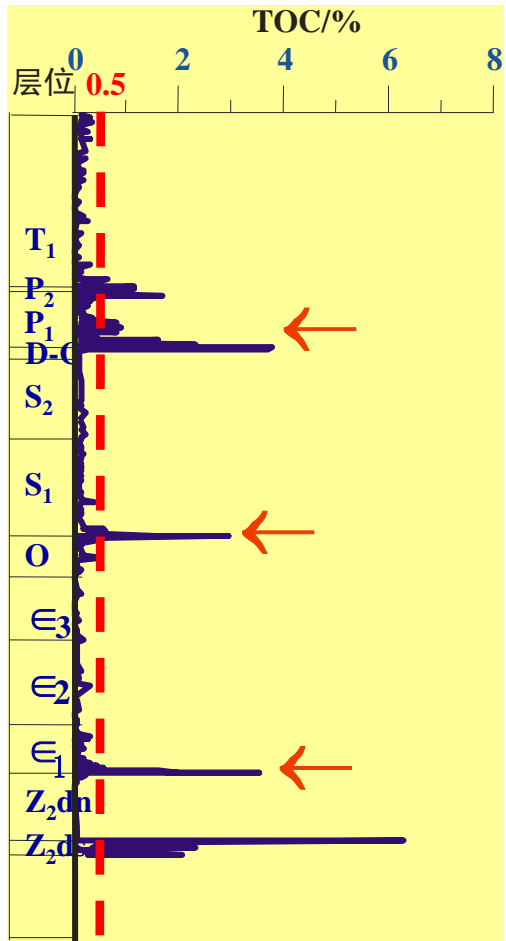
- 页岩气在美国的成功开发引起中国的兴趣。
- 中美页岩气的储量相当。
- 中国的地形地质相对美国更为复杂，导致页岩气的开发难度更大。



中国南方页岩气形成条件及有利地区

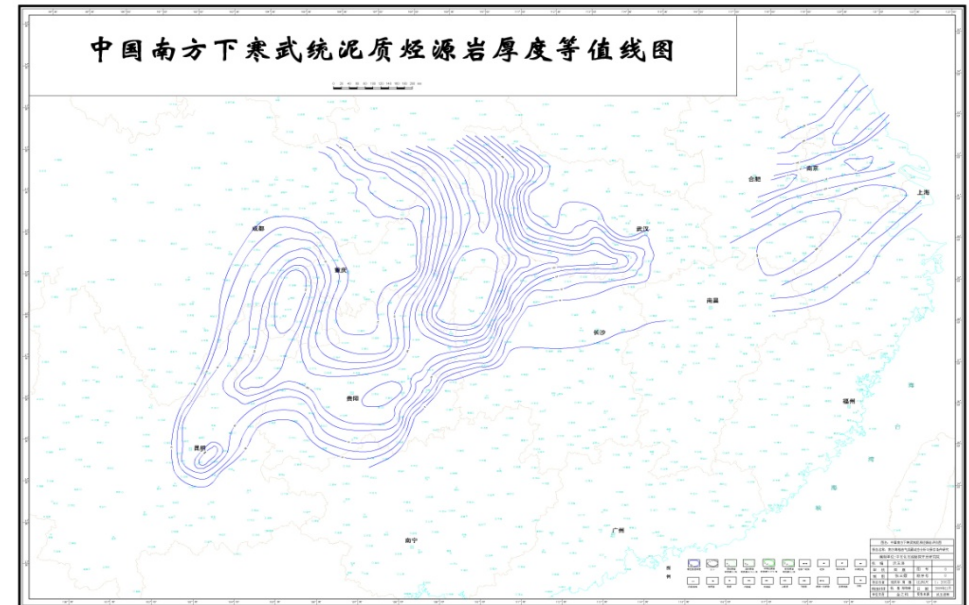
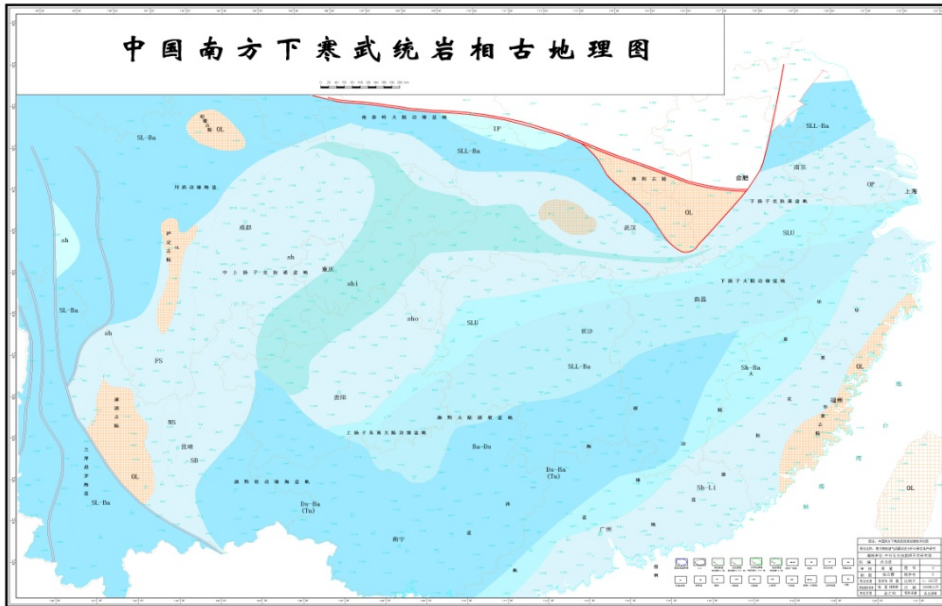
- 面积大、时代老、有机质丰富、成熟度高等是南方海相—海陆过渡相区域性主力泥质烃源岩
- 海相—海陆过渡相

地层层序				绝对年龄 (Ma)	剖面	
界	系	统	组			
古生界	P	P ₂	长兴组	P _{2c}	250	
			龙潭组	P _{2l}		
		P ₁	茅口组	P _{1m}		
			栖霞组	P _{1g}		
			梁山组	P _{1l}		
	C	C ₂	船山组	C _{2c}	280	
			黄龙组	C _{2k}		
		C ₁	总长沟组	C _{1z}		
	D	D ₃		405		
		D ₂				
		D ₁				
	S	S ₂		440		
		S ₁				
		O	O ₃		500	
	O ₂					
	O ₁					
	Є	Є ₃		570		
		Є ₂				
		Є ₁				
Z	Z ₂	灯影组	Z _{2d_n}	850		
		陡山沱组	Z _{2d}			
	Z ₁	南沱组	Z _{1h}			
		莲沱组	Z _{1l}			
始生界	Eo	Eo ₃		1000		
		Eo ₂		1400		
		Eo ₁				





下寒武统



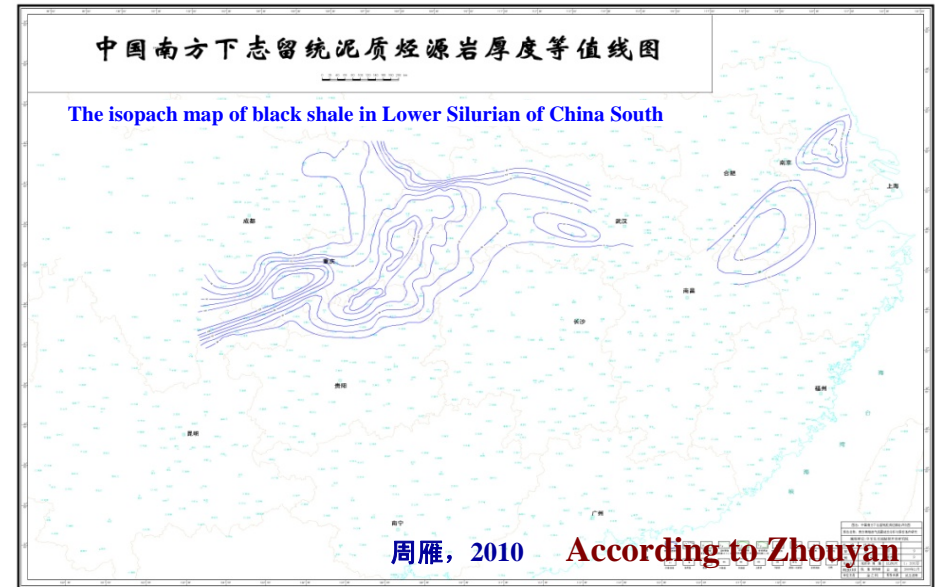
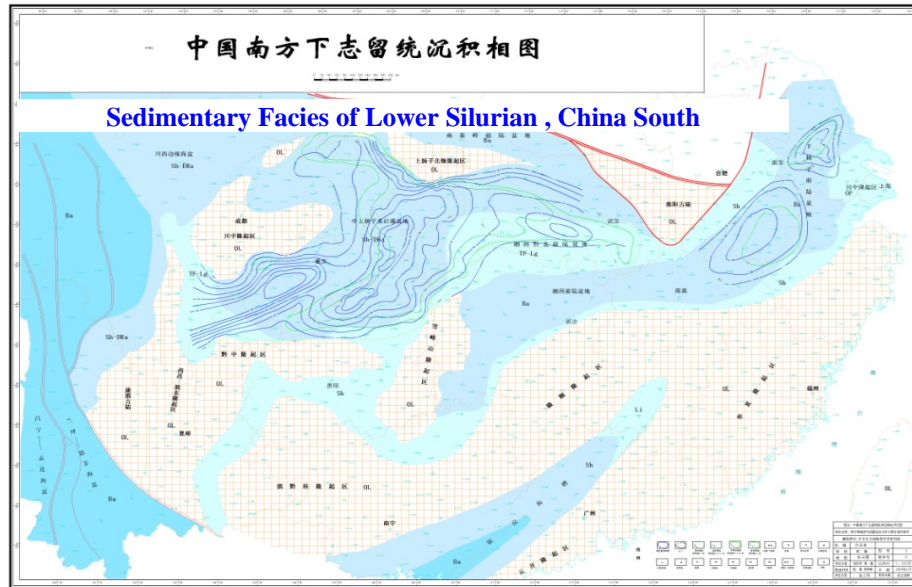
沉积环境：中上扬子地区为被动大陆边缘—克拉通盆地相，下扬子地区以被动大陆边缘相为主。

页岩厚度：以暗色硅质页岩为主，存在三个沉积中心，下扬子100-300m，中上扬子100-200m，四川盆地100-150m。

岩性：黑色页岩。



下志留统龙马溪组



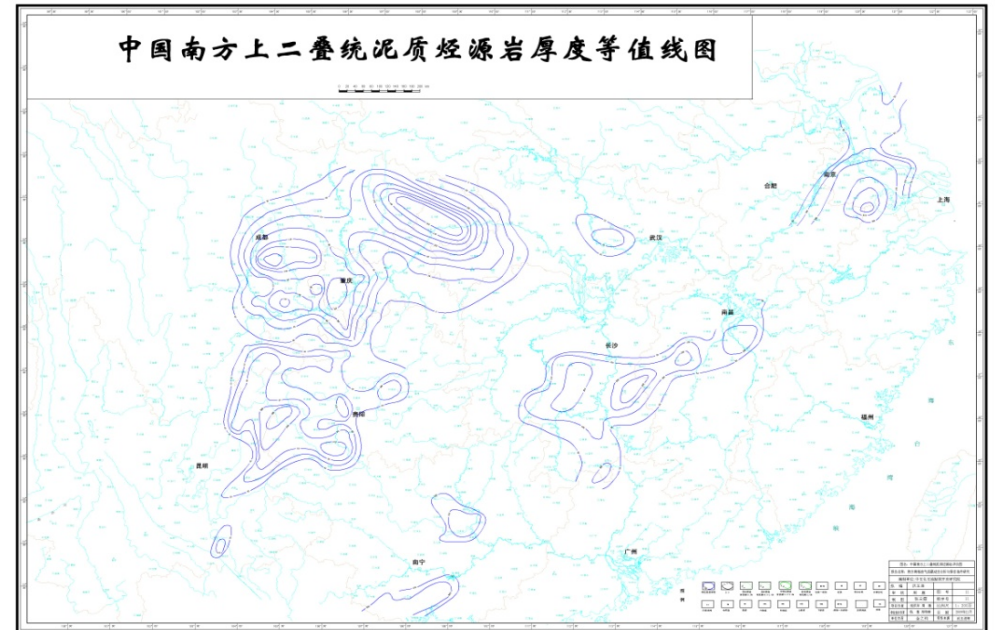
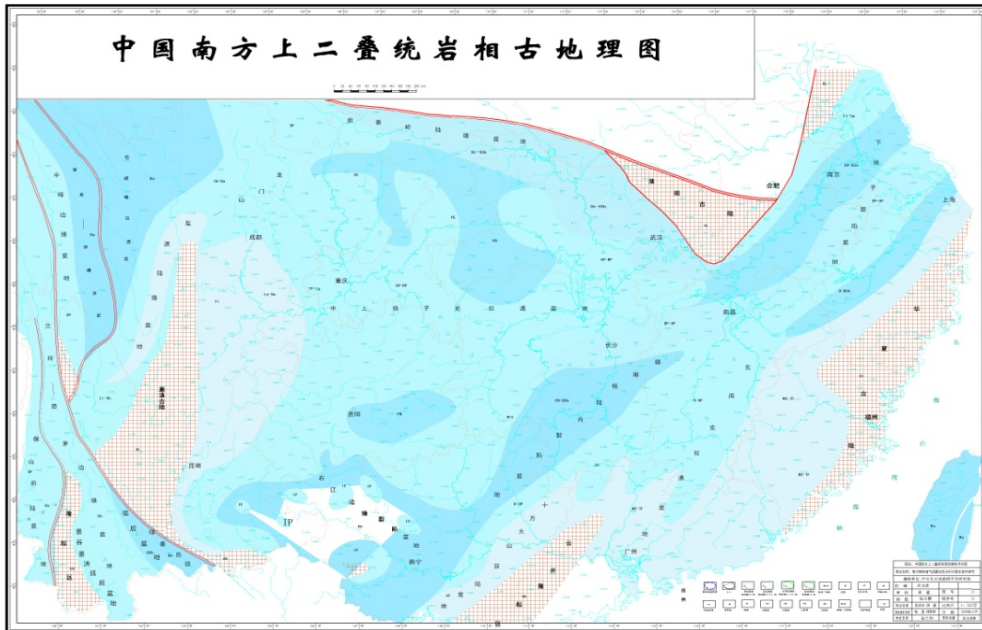
沉积环境：中上扬子地区为前陆盆地—克拉通盆地沉积，下扬子地区前陆盆地沉积。

页岩厚度：40-200m。

岩性：暗色泥页岩为主。



上二叠统龙潭组



沉积环境：中上扬子地区为克拉通盆地沉积，赣湘桂地区为陆内裂陷盆地沉积，下扬子地区为裂陷盆地沉积。

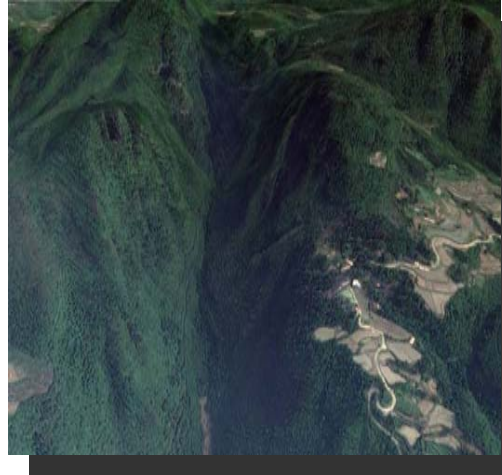
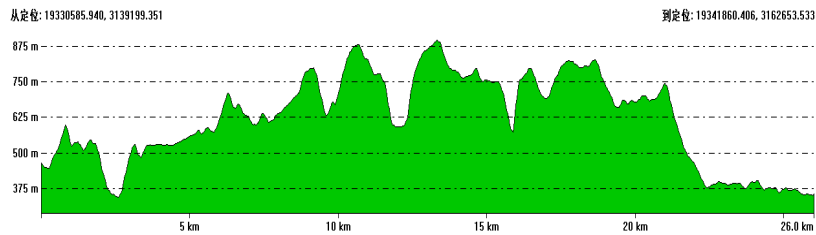
页岩厚度：60-500m。

岩性：暗色泥页岩为主。



页岩气的勘探难点

□ 地形复杂，高差大



□ 深度变化大

□ 厚度变化大

□ 大面积灰岩出露以及喀斯特地貌，地震勘探受限





页岩气的勘探难点

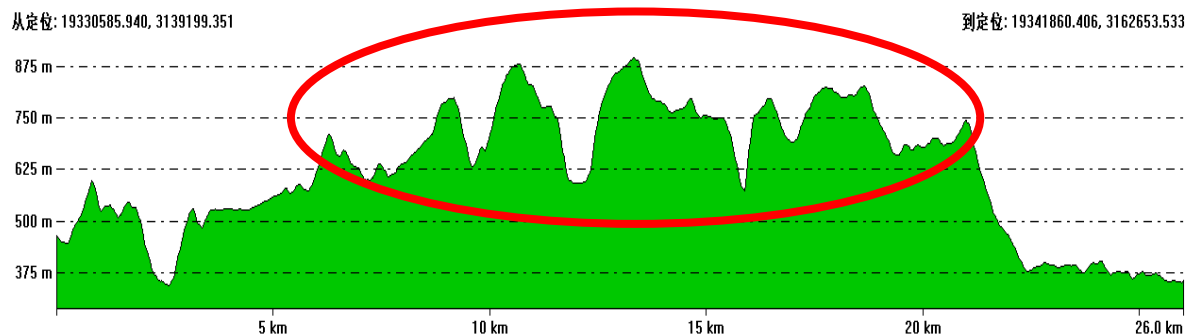
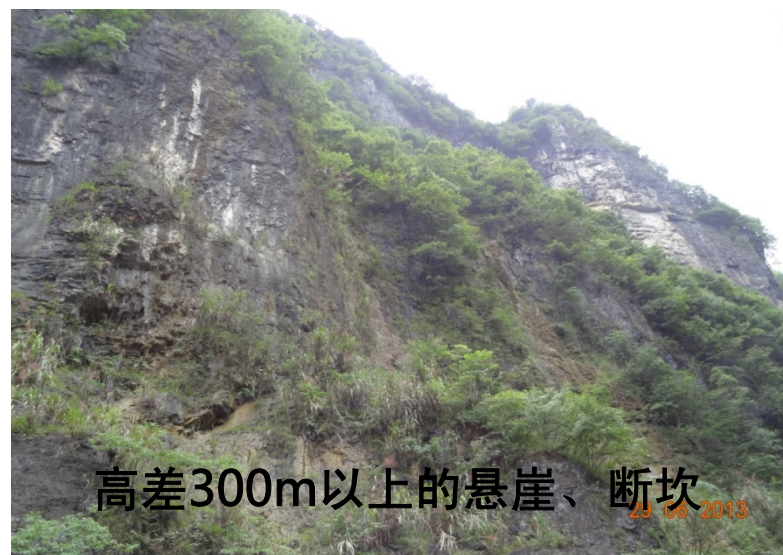
复杂地形地貌



灰岩



页岩气的勘探难点



地形复杂



页岩气的勘探难点



喀斯特地貌发育，悬崖、断崖、深沟、陡坎众多。



页岩气的勘探难点

植被覆盖率高，在**85%**以上，山上一般为松木林、竹林、灌木丛，交通沿线的平川和坡谷地一般都为农作物。



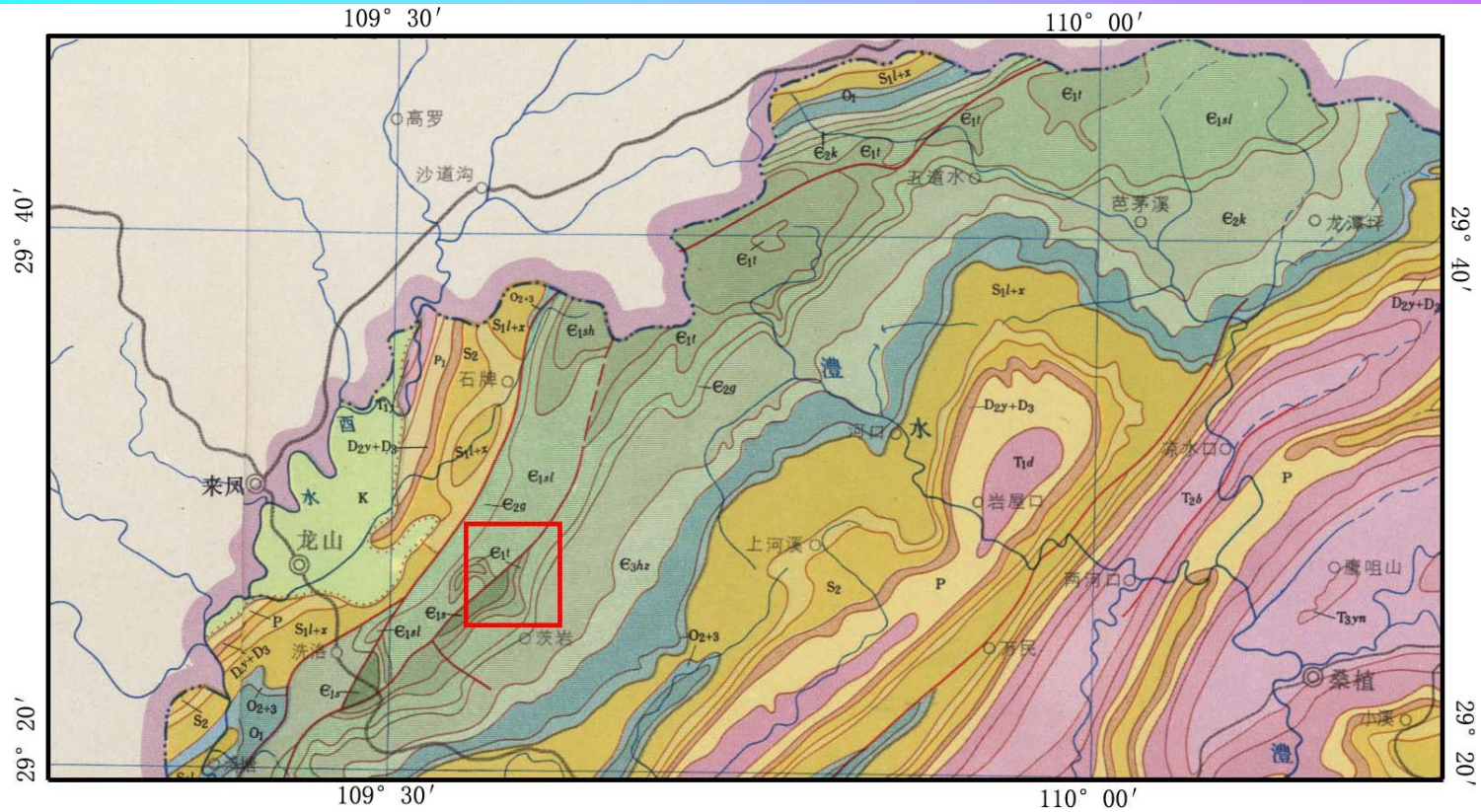


页岩气的勘探难点

- 低成本乃页岩气成功开发之关键。
- 南方地区地震勘探难度大，费用高，效果不理想。
- 炭质页岩电阻率低、极化率高，具备良好的电磁法勘探前提。
- 广域电磁法可提供炭质页岩的深度、厚度、分布，而且可提供与TOC相关的极化率信息。



案例3：页岩气勘探



- (地形复杂，石灰岩发育，地震效果不佳)
- (广域电磁法可适应)

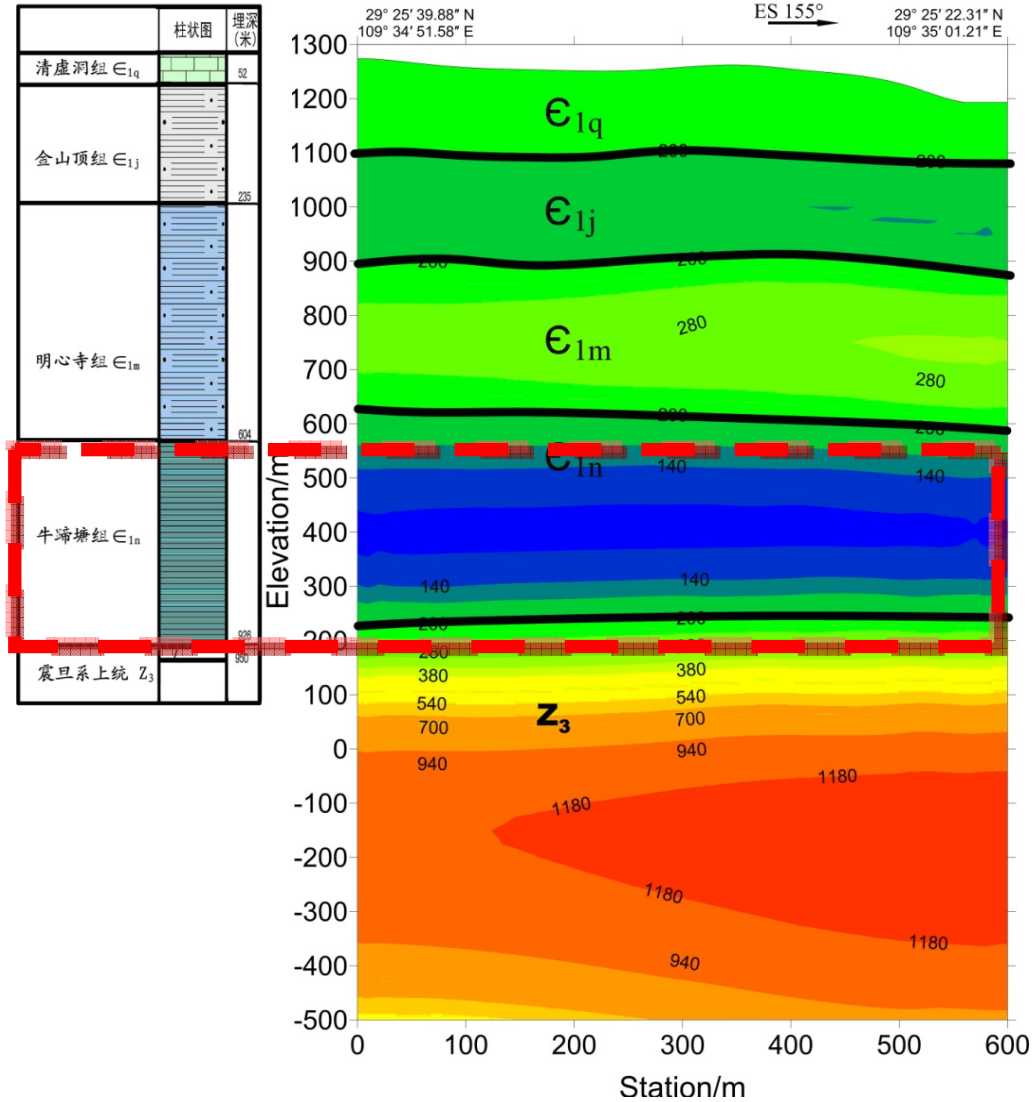


案例3：页岩气勘探

地层	主要岩性	电阻率范围($\Omega \cdot m$)	电性特征
清虚洞组 (ϵ_{1q})	灰岩和白云岩	$N \times 10^2 \sim r \times 10^3$	次低阻
金山顶组 (ϵ_{1j})	砂质页岩、细砂岩、粉砂岩	60~150 (100)	低阻
明心寺组 (ϵ_{1m})	砂质页岩、细砂岩	120~350(200)	次高阻
牛蹄塘组 (ϵ_{1n})	灰黑-黑色炭质页岩 夹少量粉砂岩、细砂岩, 底部夹炭质灰岩	50~150 (90)	低阻
震旦系上统 (Z_3)	灰岩、白云岩	1050~6080 (1500)	高阻

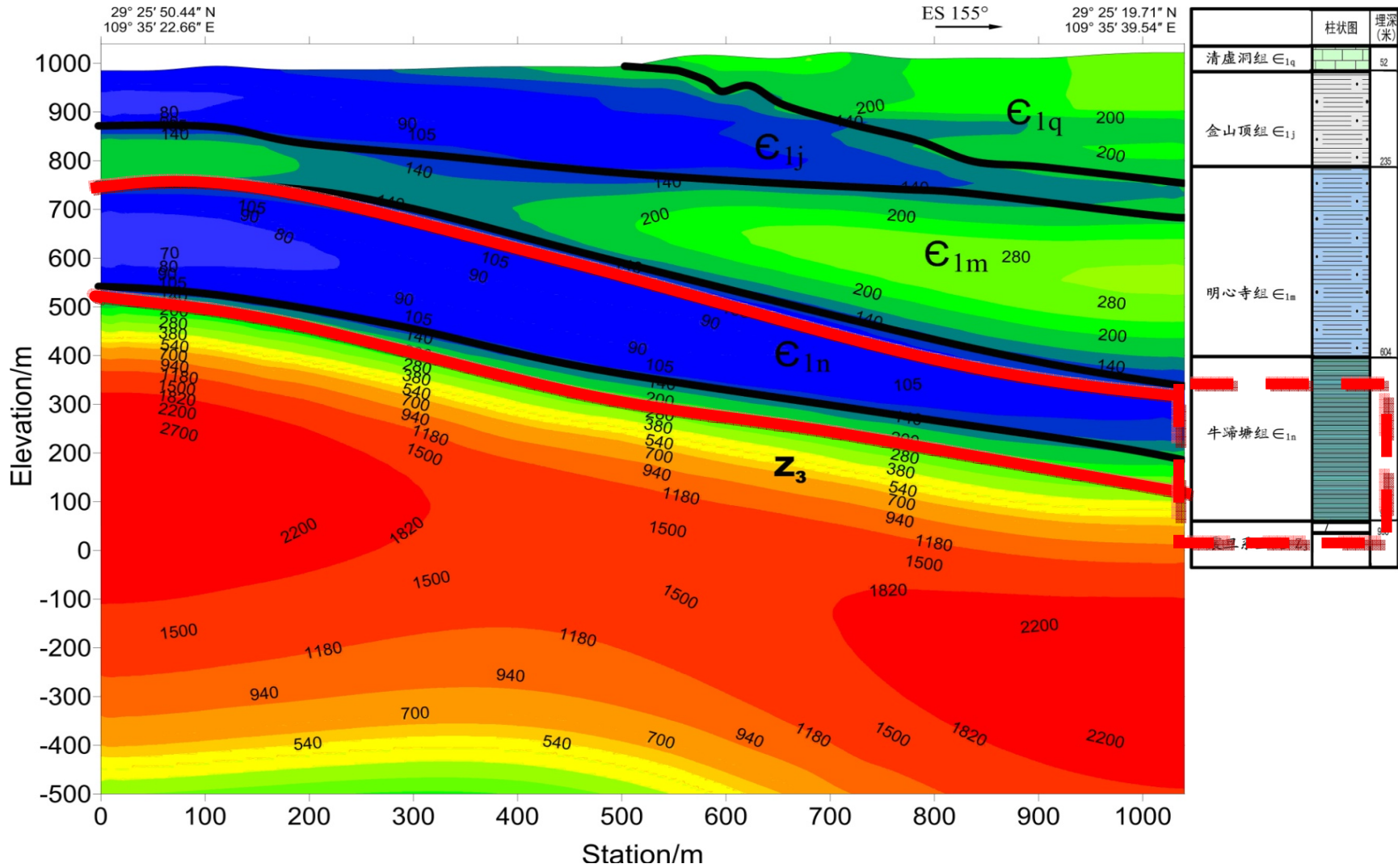


案例3: 页岩气勘探





案例3: 页岩气勘探





案例4：页岩气勘探

时间：2013

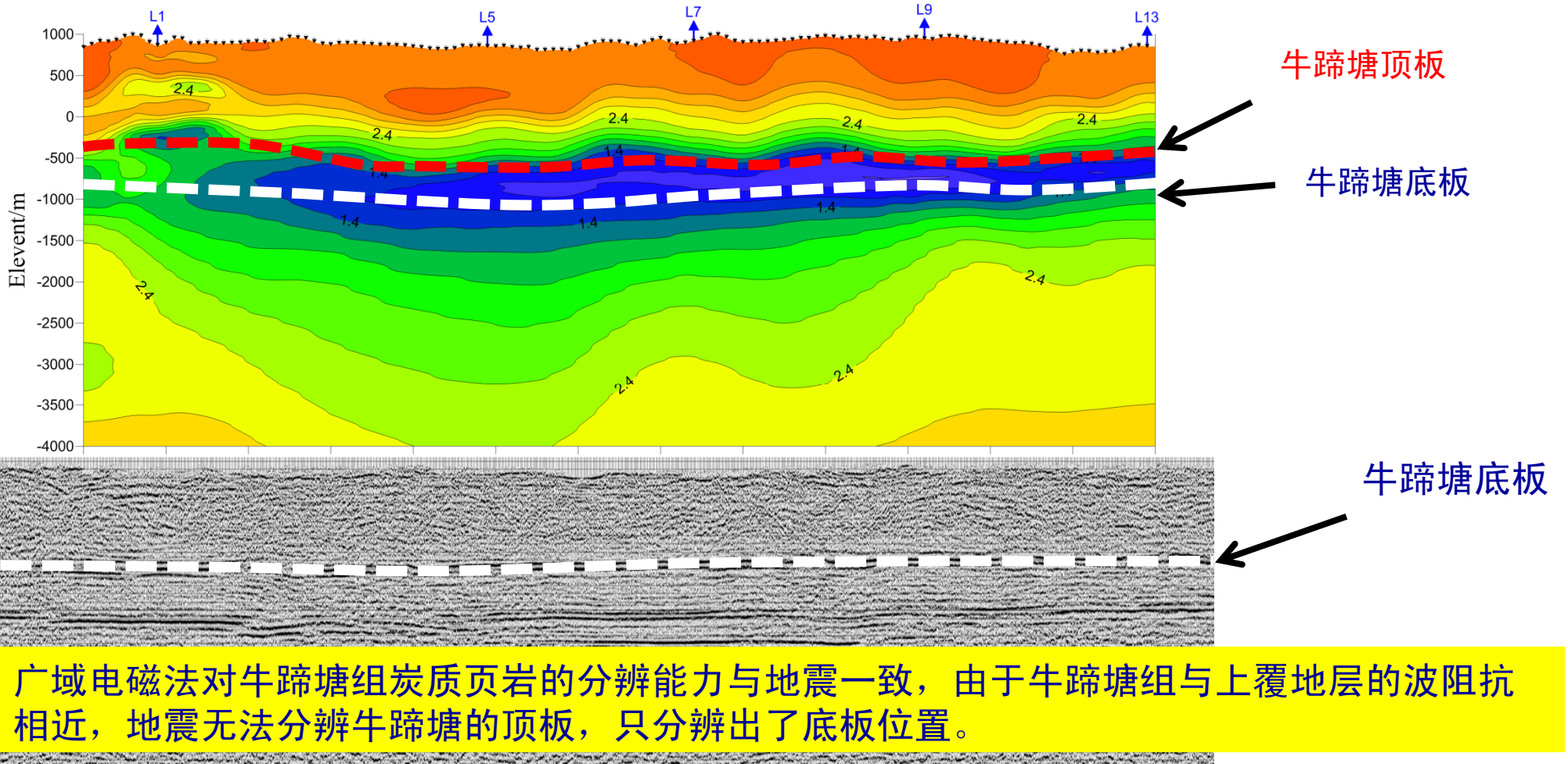
工区：湘西

难点：地形复杂，石灰岩发育，地震效果不佳

方法：广域电磁法

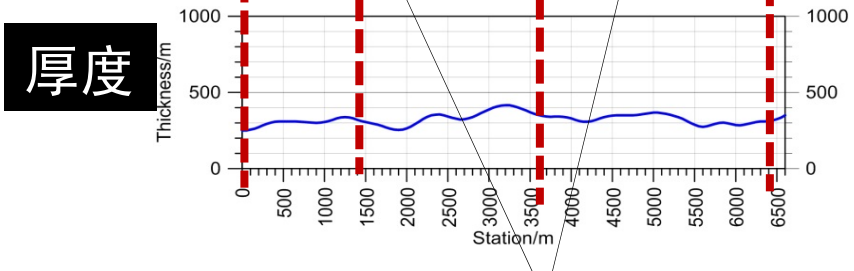
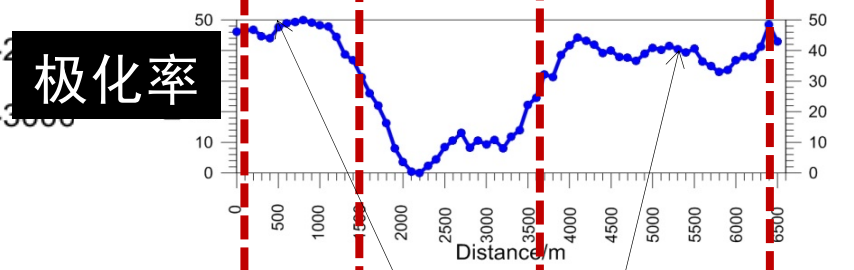
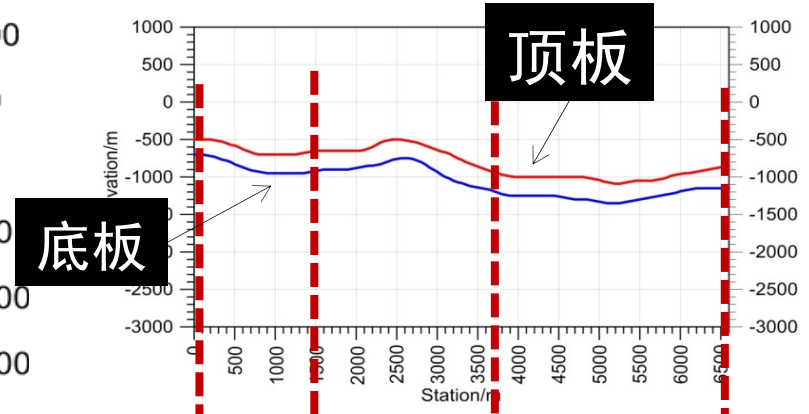
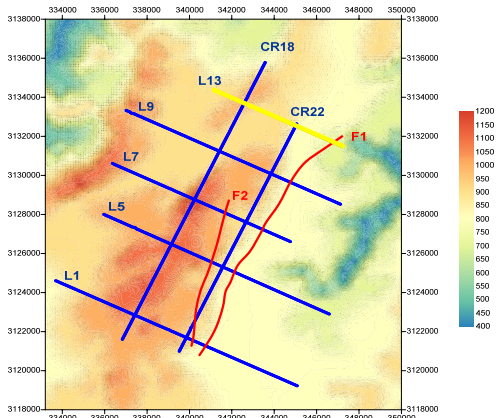
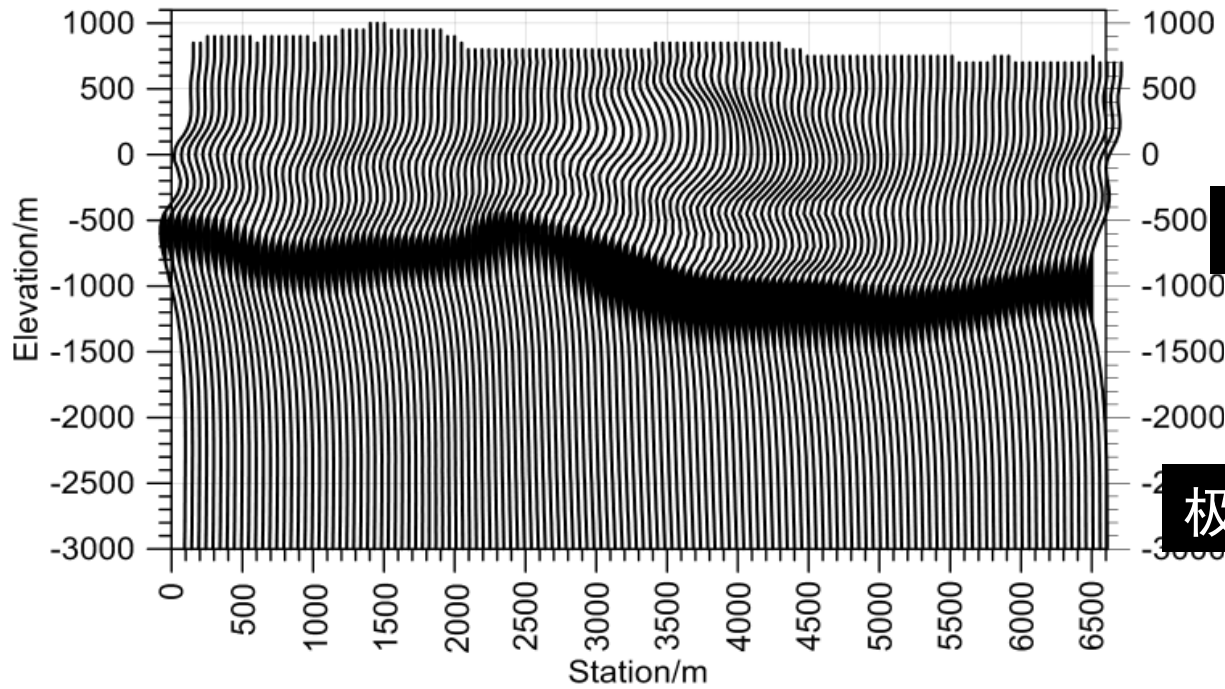


案例4：页岩气勘探





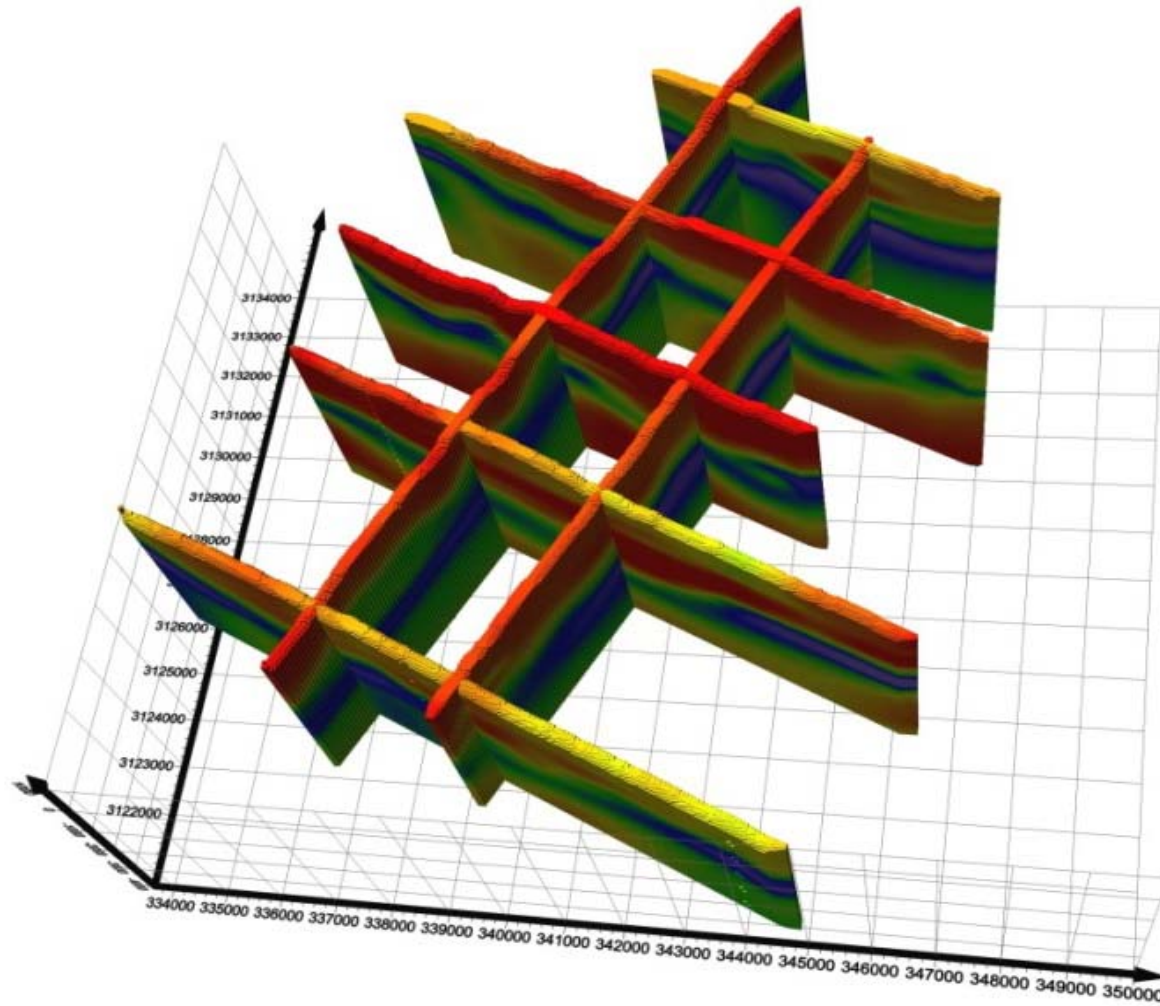
案例4: 页岩气勘探



有利区



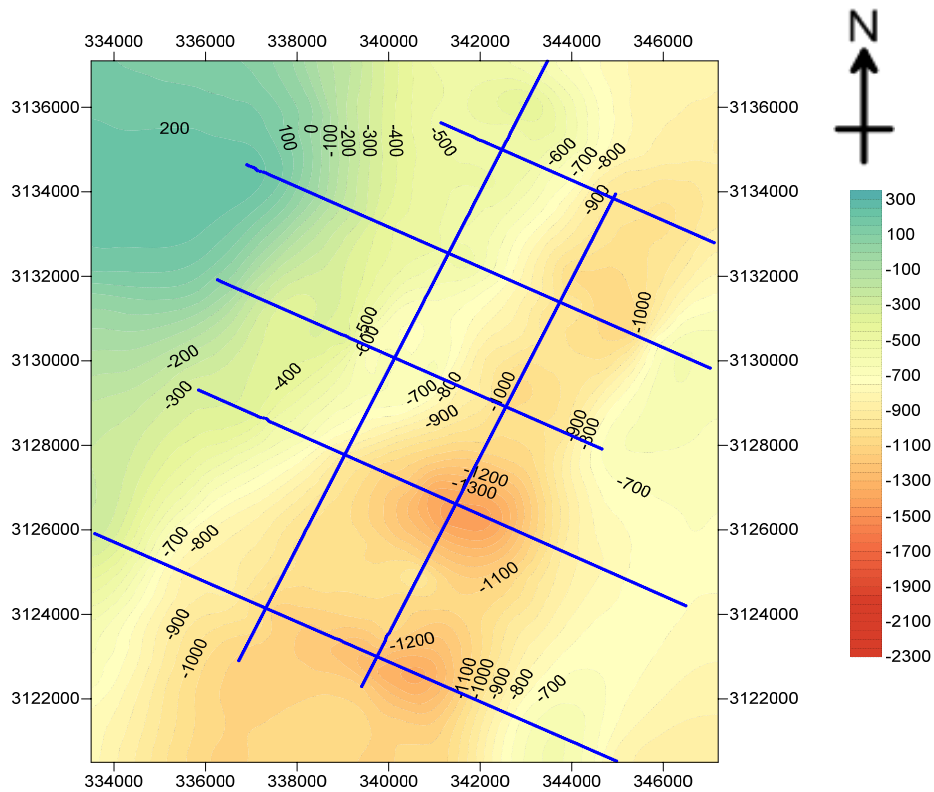
案例4：页岩气勘探



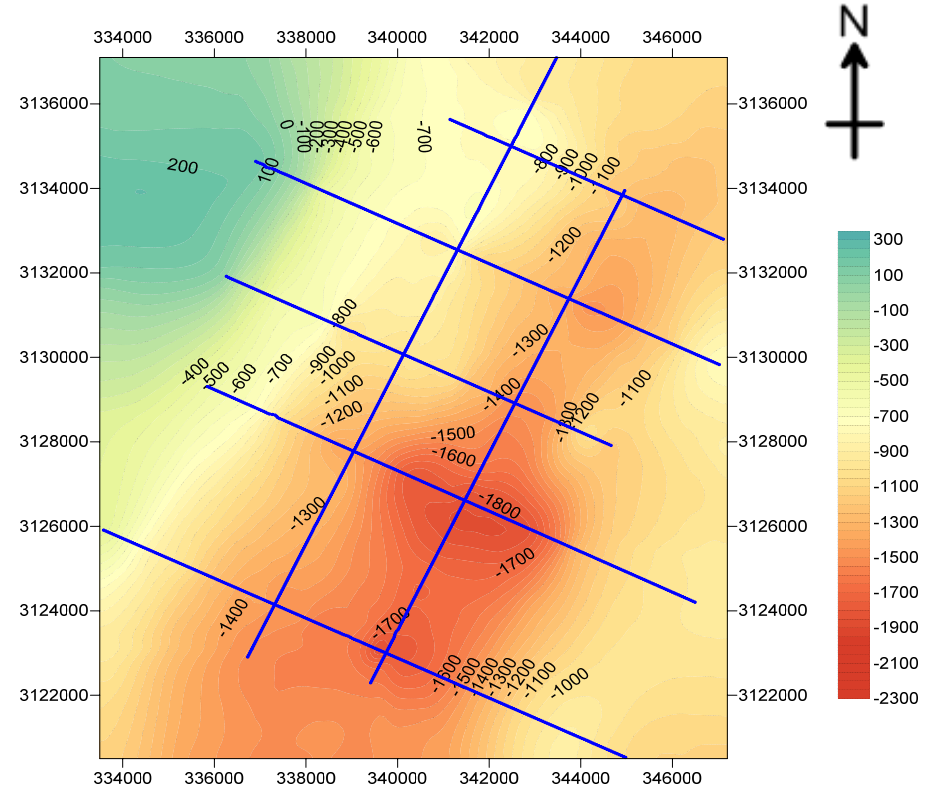
三维数据成图



案例4：页岩气勘探



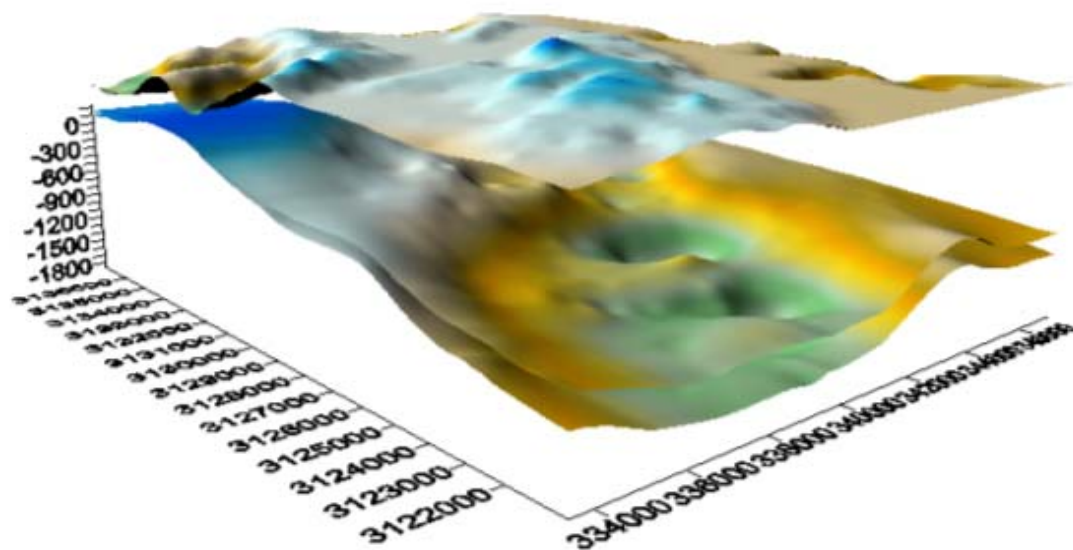
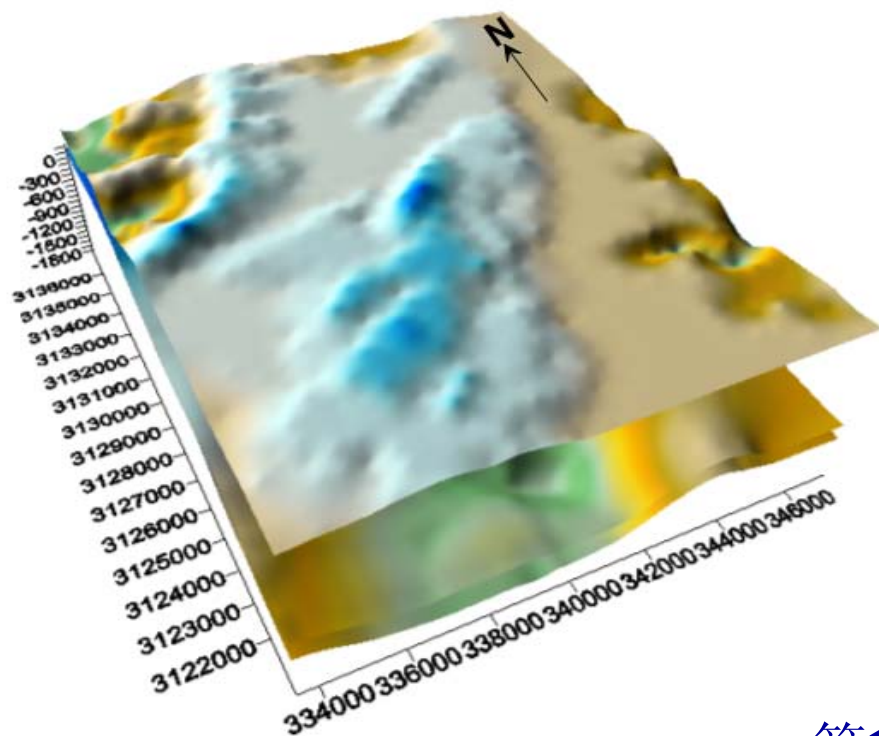
页岩层顶面海拔



页岩层底面海拔



案例4：页岩气勘探



第1层：地形

第2层：顶界面曲面

第3层：底界面曲面



谢谢!