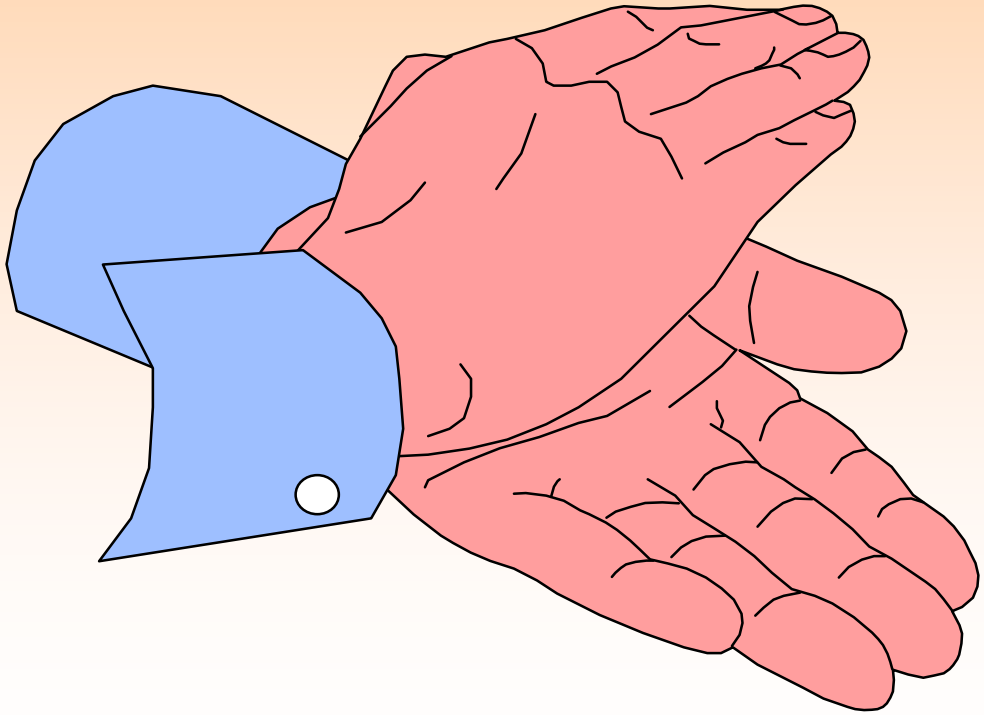
# 热烈祝贺
# “中浅层电磁探测技术应用研讨会”
# 胜利召开！

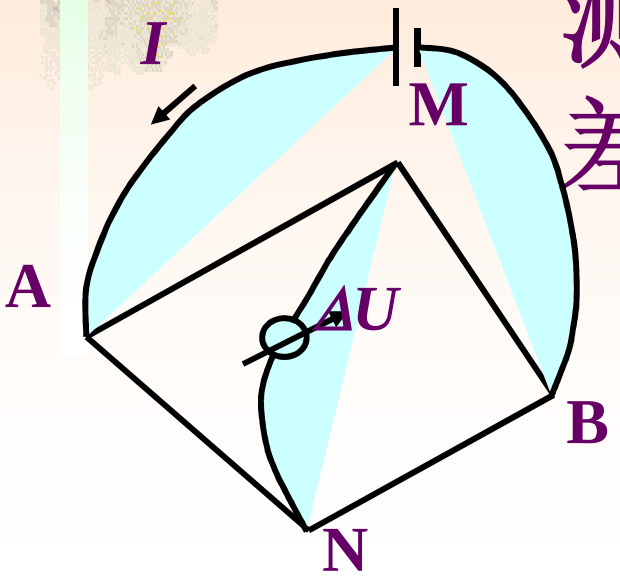


# 时间域激电法TDIP和频谱激电法SIP

中国地质大学电法科研组
罗延钟

# 时间域激电法TDIP（1）

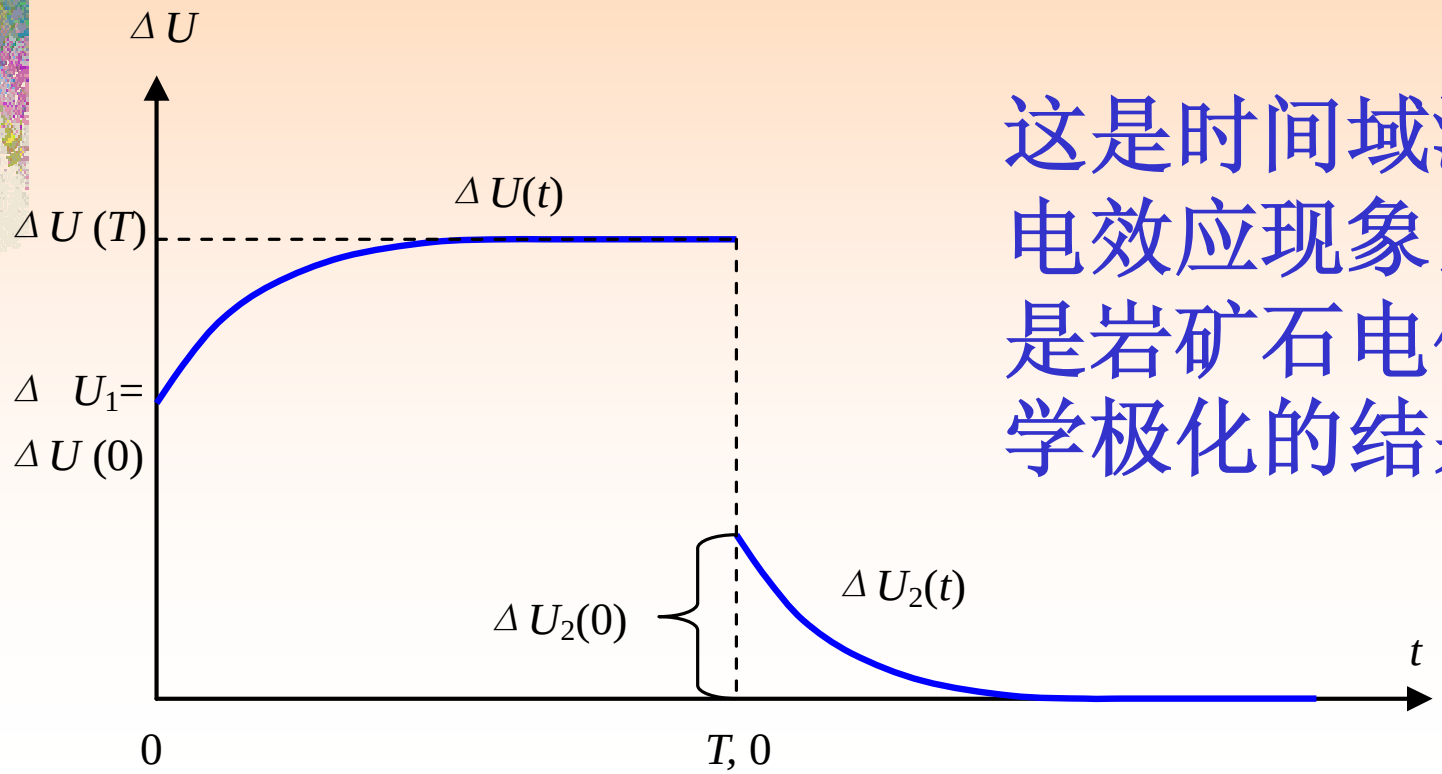
- 时间域激电法是1950年代在电阻率法基础上发展起来的
- 电阻率法通过供电电极A,B向地下供入稳定电流$I$，同时观测测量电极M,N之间的电位差$\Delta U$；然后计算视电阻率




$$\rho_s = K\frac{\Delta U}{I}$$

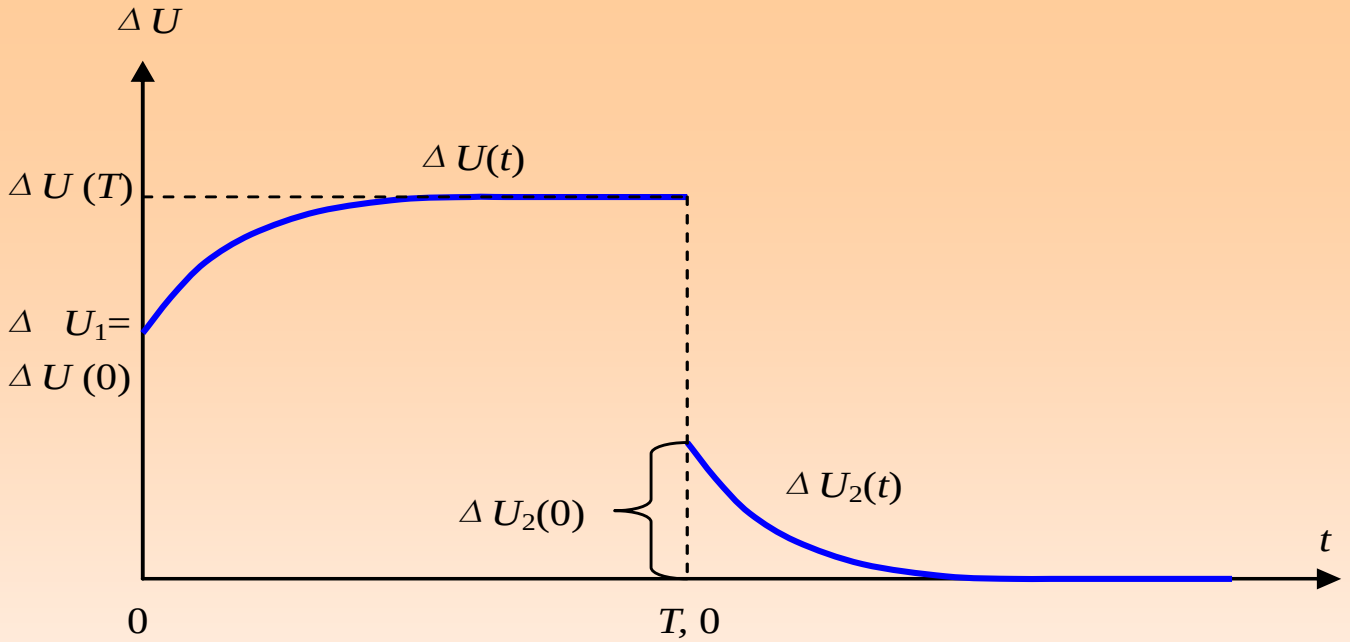
# 时间域激电法TDIP（2）

- 按欧姆定律，$\Delta U$与$I$成正比；当$I$保持稳定时，$\Delta U$ 不随时间变化。
- 实际上，观测到$\Delta U$ 随时间变化：




这是时间域激电效应现象，是岩矿石电化学极化的结果

# 时间域激电法TDIP（3）




观测供电时间$T$和断电后$t$时刻的电位差$\Delta U(T)$和$\Delta U_2(t)$，计算其比值——视极化率：

$$\eta_s(T,t)=\frac{\Delta U_2(t)}{\Delta U(T)}\cdot 100\%$$

根据视极化率的变化来推断地下极化体——时间域激电法

# 我国激电法发展历史

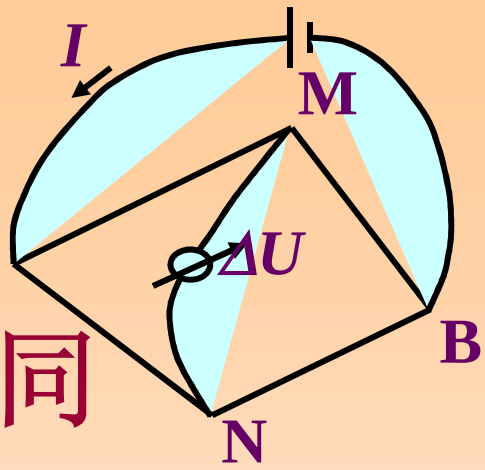
- 时间域激电法试验研究结论“有矿就有异常”因而成为金属矿勘查的最重要方法之一。
- 时间域激电法的主要问题是：

  **1.** 装置笨重； **2.** 存在大量非矿异常。
- 为解决装置笨重问题，发展了频率域激电法但又产生新问题：**3.** 电磁耦合干扰。
- 为解决激电法两大问题

  **1.** 电磁耦合； **2.** 激电异常区分

  发展了一种新的激电法——频谱激电法。

# 频谱激电法SIP（复电阻率法CR）的基本原理




什么是SIP(复电阻率法CR)?

电极装置：与常规电阻率法相同

供电电流：超低频交流电（f = $10^{-2}$ - n $10^{2}$ Hz）

观测内容：交变供电电流强度 $\tilde{I}$

MN极间交变电位差 $\Delta\tilde{U}(i\omega)$

计算参数：$\rho_s(i\omega) = K\dfrac{\Delta\tilde{U}}{\tilde{I}}$ $\begin{cases} A_s(\omega) \\ \varphi_s(\omega) \end{cases}$

复电阻率频谱

角 频 率 $\omega = 2\pi f$

# 频谱激电法SIP

- 用常规电阻率法的电极装置作观测
- 工作在超低频段上（f = $10^{-2}$ - n $10^{2}$ Hz）
- 观测视复电阻率频谱

$$\rho_s(i\omega) = K\frac{\Delta\tilde{U}}{\tilde{I}} \qquad \begin{cases} A_S(\omega) \\ \varphi_S(\omega) \end{cases}$$

频谱激电法SIP也称为复电阻率法CR

# 视复电阻率频谱的性质

## 只存在激电效应（IP）时

复电阻率频谱$\rho(i\omega)$，满足Cole-Cole模型：

$$\rho(i\omega)=\rho_0\{1-m[1-\frac{1}{1+(i\omega\tau)^c}]\}$$

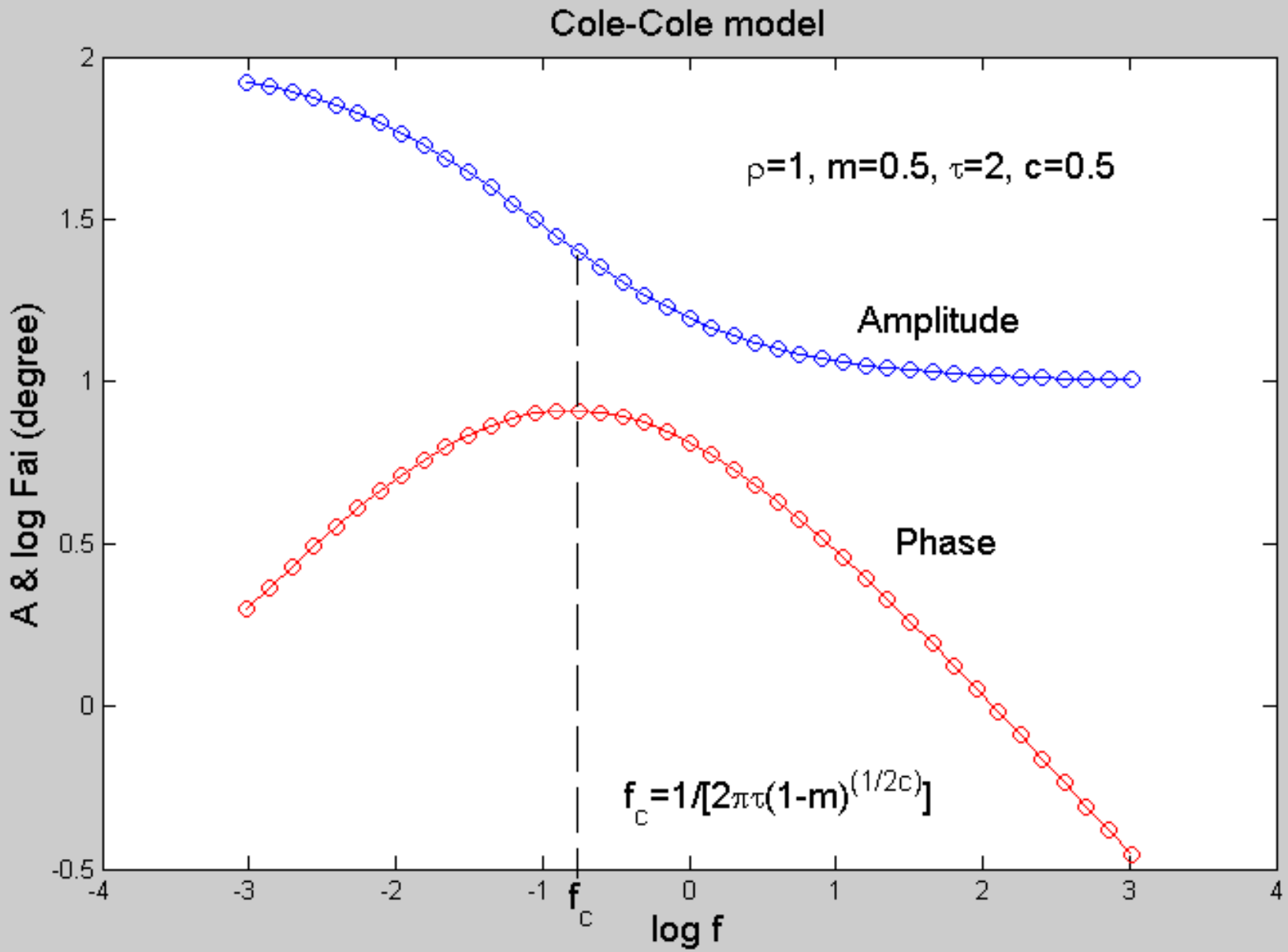
$$=\frac{\rho}{1-m}\{1-m[1-\frac{1}{1+(i\omega\tau)^c}]\}$$

$\rho_0$—零频电阻率（包含IP），

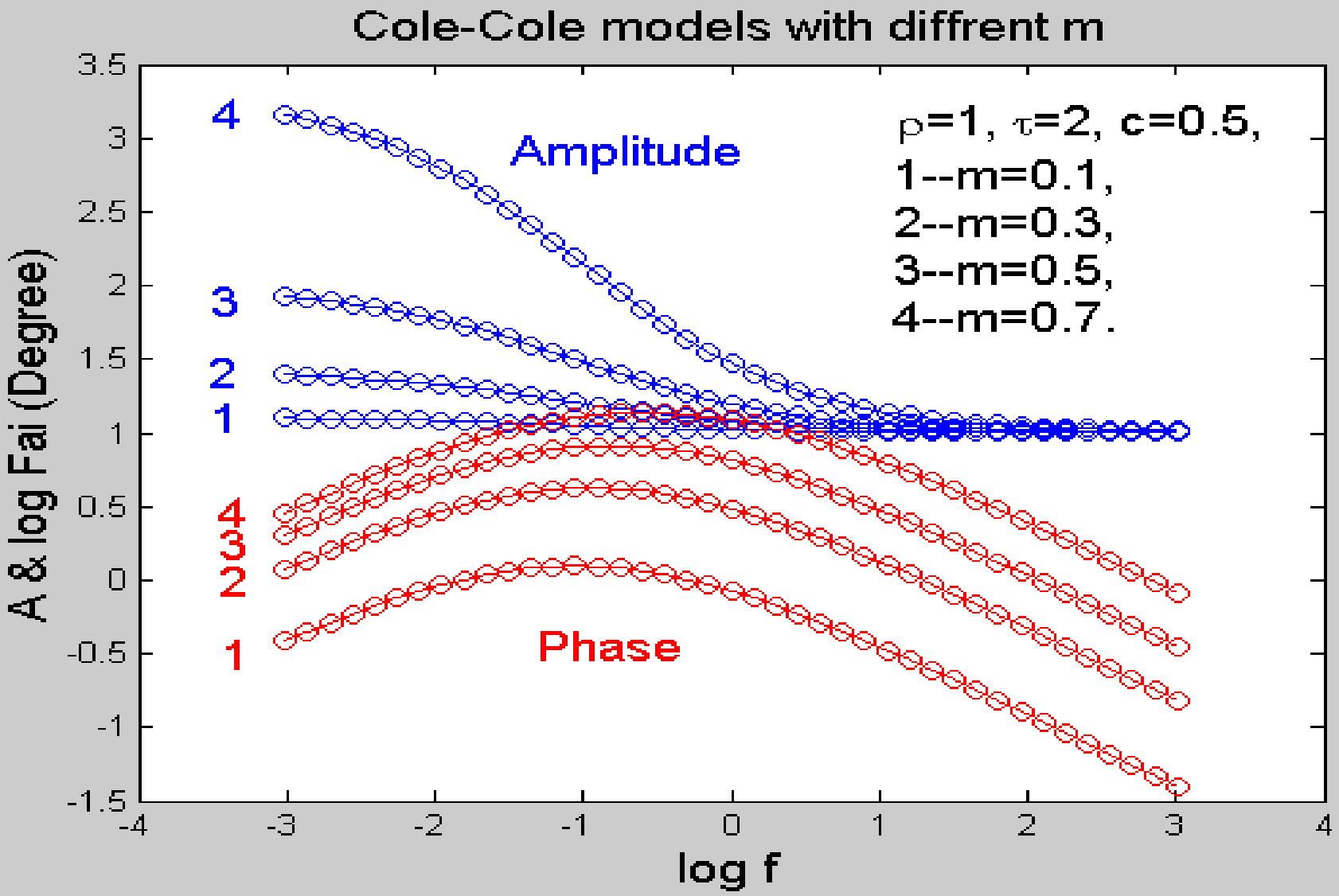
$\rho$—电阻率（不包含IP），$m$—充电率（极化率）

$\tau$—时间常数（单位 s），$c$—频率相关系数。

# Cole-Cole模型的振幅和相位频谱曲线

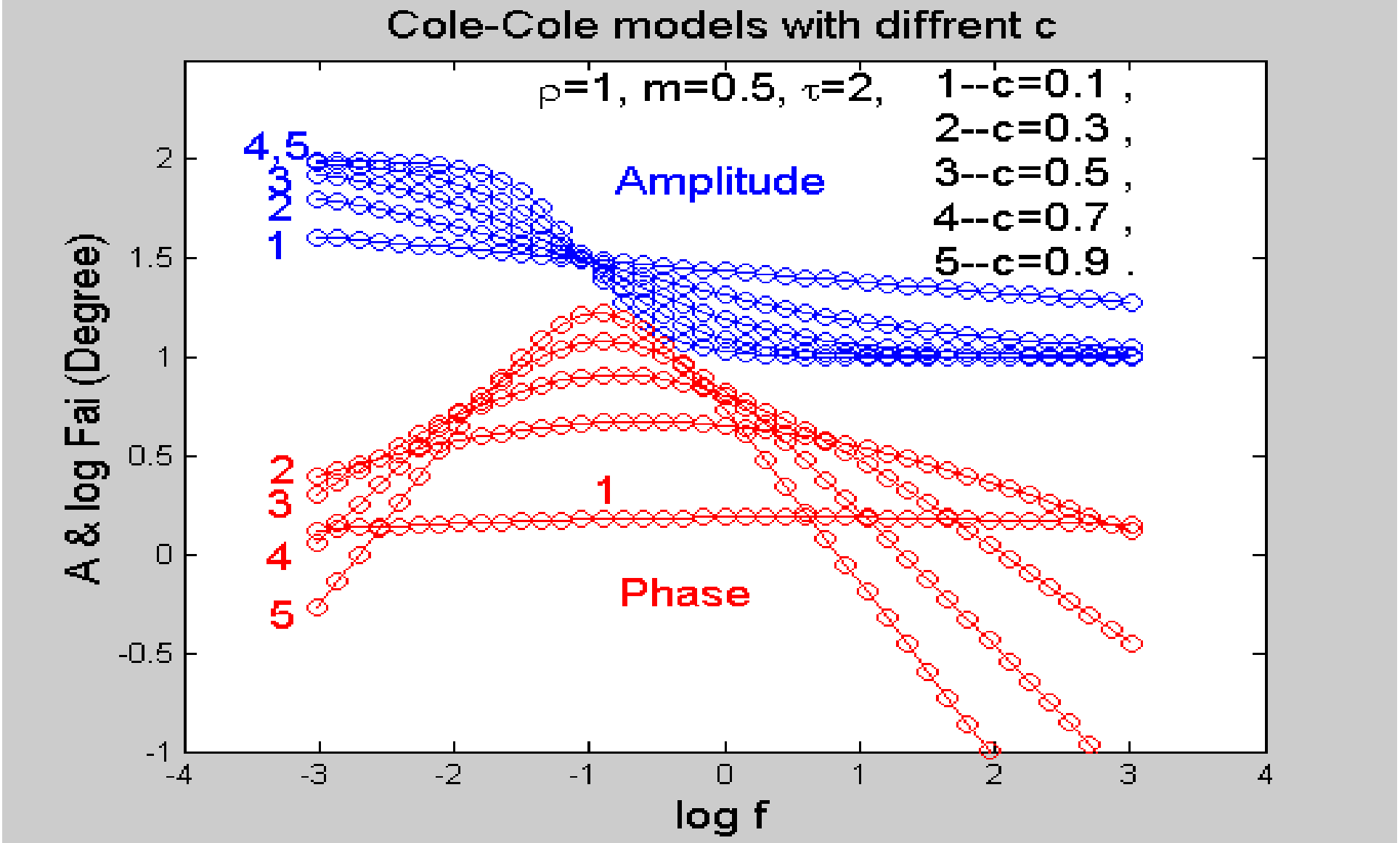


# 频谱曲线随充电率*m*的变化



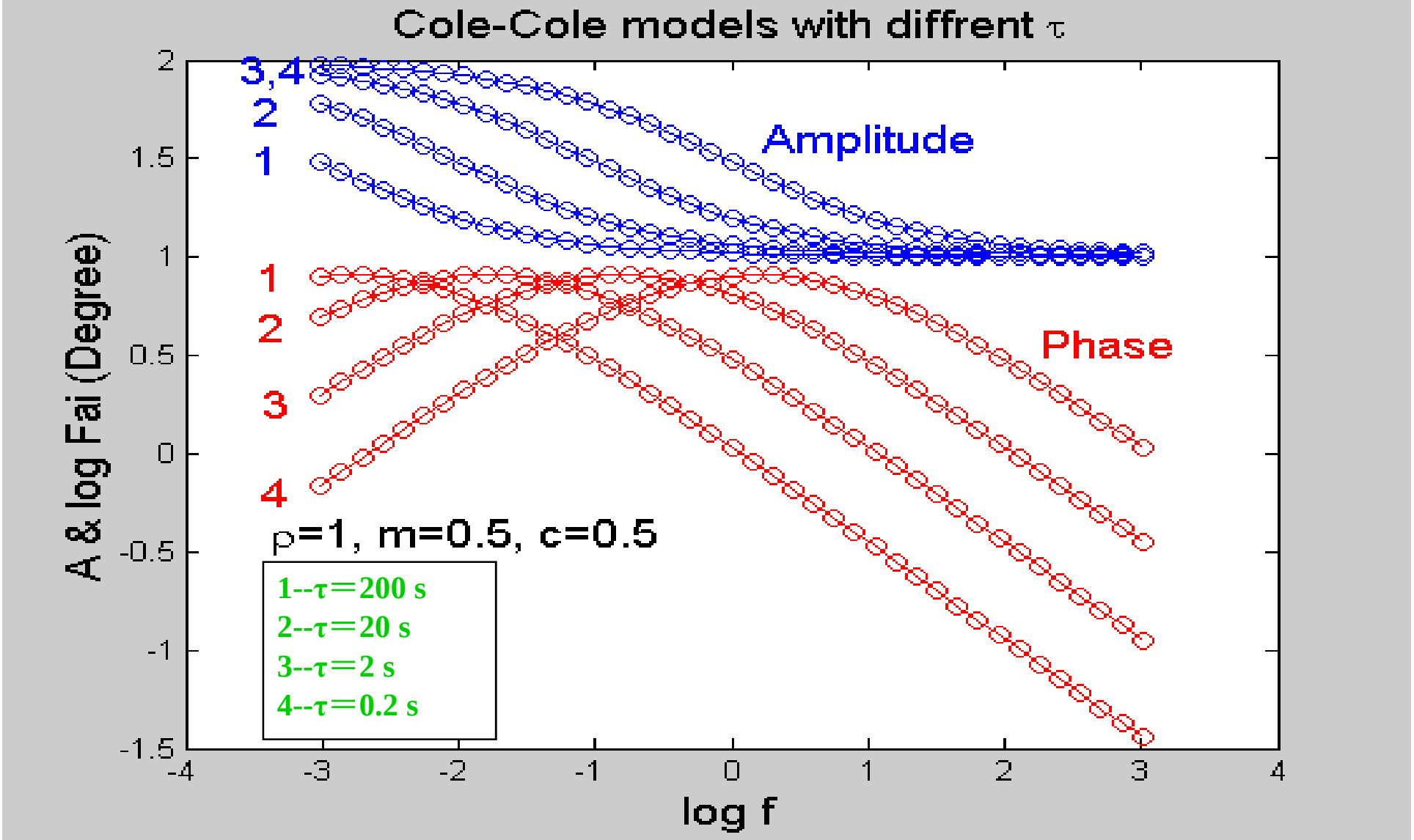

充电率m是决定频谱变化幅度的强度参数

# 频谱曲线随频率相关系数c的变化




频率相关系数c是决定频谱变化陡度的形状参数

# 频谱曲线随时间常数τ的变化




时间常数τ是决定频谱变化频段的位置参数

# 同时存在IP和EM效应时

**SIP法实测的视复电阻率频谱$\rho_a(i\omega)$可表示为两个Cole-Cole模型之和：**

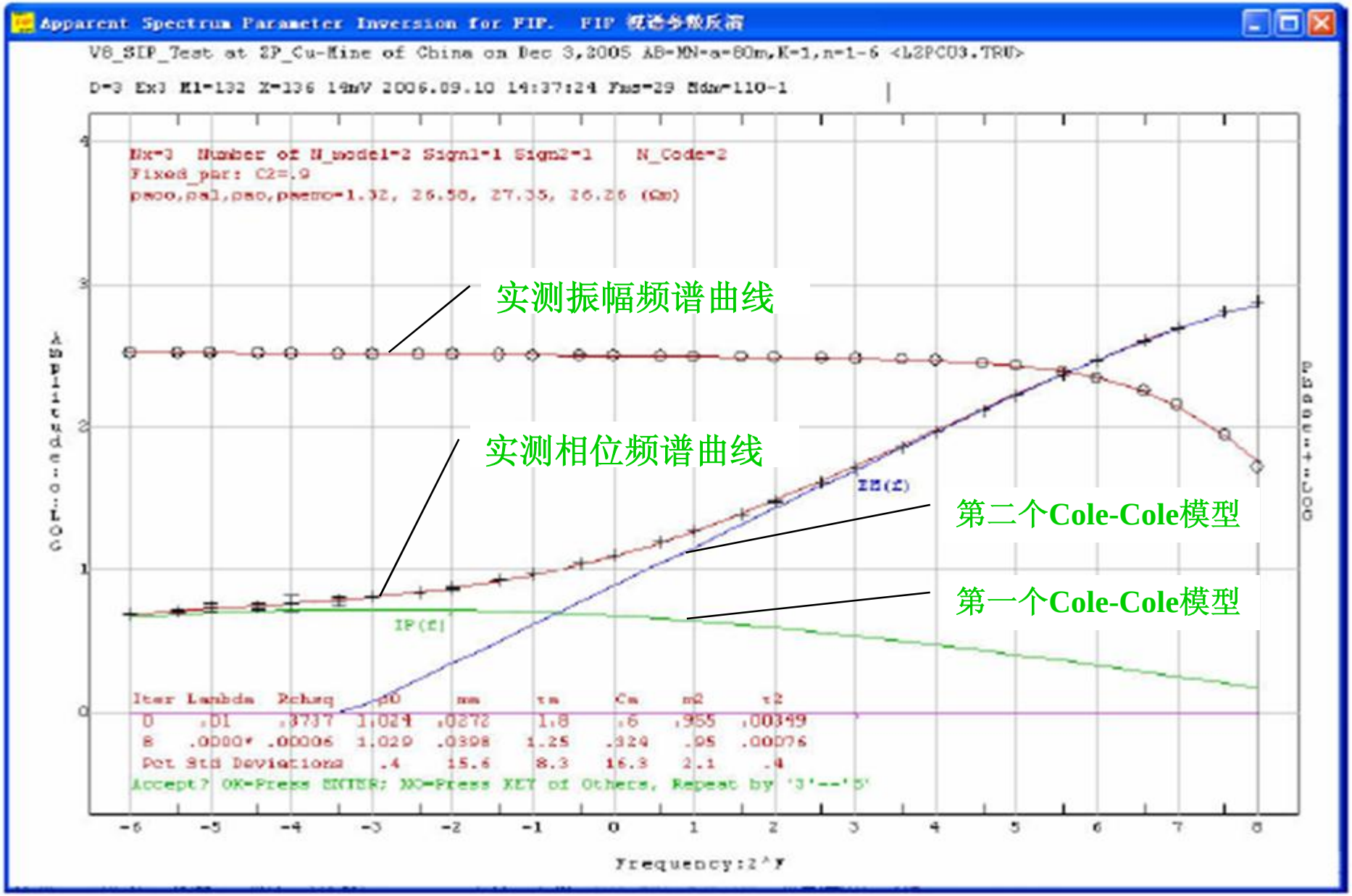
$$\rho_a(i\omega)=\rho_{a0}\{1-m_1[1-\frac{1}{1+(i\omega\tau_1)^{c1}}]\pm m_2[1-\frac{1}{1+(i\omega\tau_2)^{c2}}]\}$$

式中，$\rho_{a0}$—频率为零时（包含IP效应）的视电阻率；

$m_1$，$\tau_1$和$c_1$分别为IP效应的充电率，时间常数和频率相关系数；

$m_2$，$\tau_2$和$c_2$分别为EM效应的充电率，时间常数和频率相关系数。

# • 用两个Cole-Cole模型拟和实测视复电阻率频谱的实例

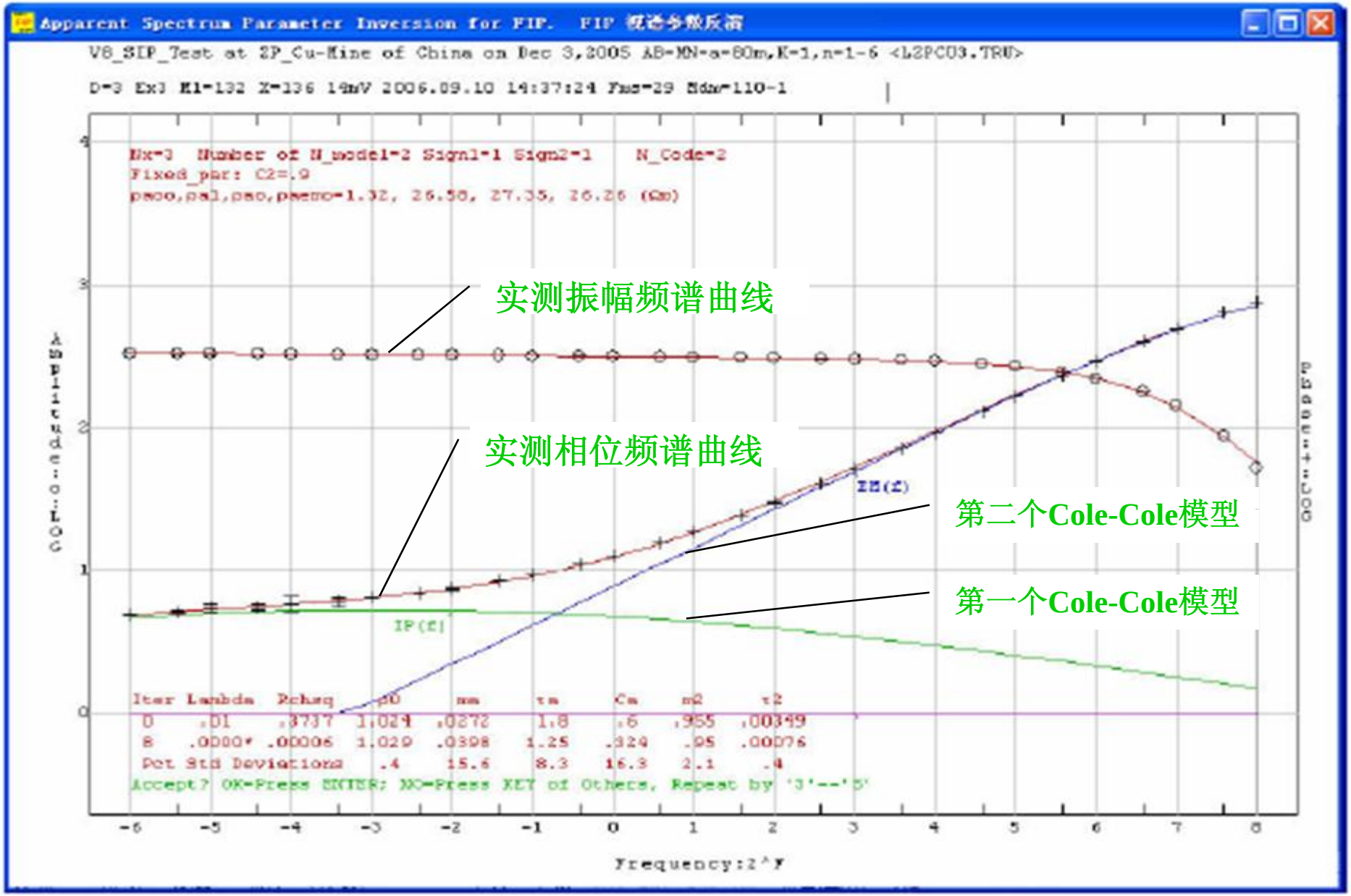


# 频谱参数的数值变化规律（1）

$C_1$= 0.1-0.6，$C_2$=0.9-1.0；

$\tau_1 >> \tau_2$。

据此，可区分和分离IP和EM。




- 用两个**Cole-Cole**模型拟和实测视复电阻率频谱的实例

# 频谱参数的数值变化规律（2）

$\tau_1$>100 s, 极化体为高含量石墨或石墨化岩石，

>10 s,极化体为高含量致密硫化物或石墨化岩石

>1 s，极化体为密集浸染状金属矿化或石墨化

>0.1 s，极化体为稀疏浸染状金属矿化或石墨化

<0.1 s，极化体为离子极化体；

$C_1$ >0.4，极化体内极化颗粒较均匀，

<0.4，极化体内极化颗粒较不均匀。

据此，可按结构区分极化体。

# 频谱参数的数值变化规律（3）

1.$\tau_s/\tau_1$（视时间常数与真时间常数之比）随极化体深度增大衰减较慢；

2.不同岩矿石之间$\tau$的差别较大。

故利用$\tau_s$找深部矿较有利。

# 频谱参数的数值变化规律（4）

可利用分离出的EM频谱计算

- 剩余电磁效应（REM）参数$\varphi_m/\varphi_m^0$
- 电磁视电阻率$\rho_\omega$

它们比常规视电阻率$\rho_s$更灵敏地反应地下导电性异常。

通过反演视复电阻率频谱，可获得激电视谱参数：

零频视电阻率$\rho_{s0}$

激电视充电率$m_s$，激电极化率$\eta_s$

视时间常数$\tau_s$

视频率相关系数$c_s$

可为识别异常提供补充信息

研究电磁效应可获得两个新参数：

①剩余电磁效应（REM）参数

$\varphi_m/\varphi_m^0$

②电磁视电阻率$\rho_\omega$

更灵敏地反应地下导电性异常

由此可见，反演每一条复电阻率频谱可获得六个参数：四个导电,激电参数两个电磁参数。

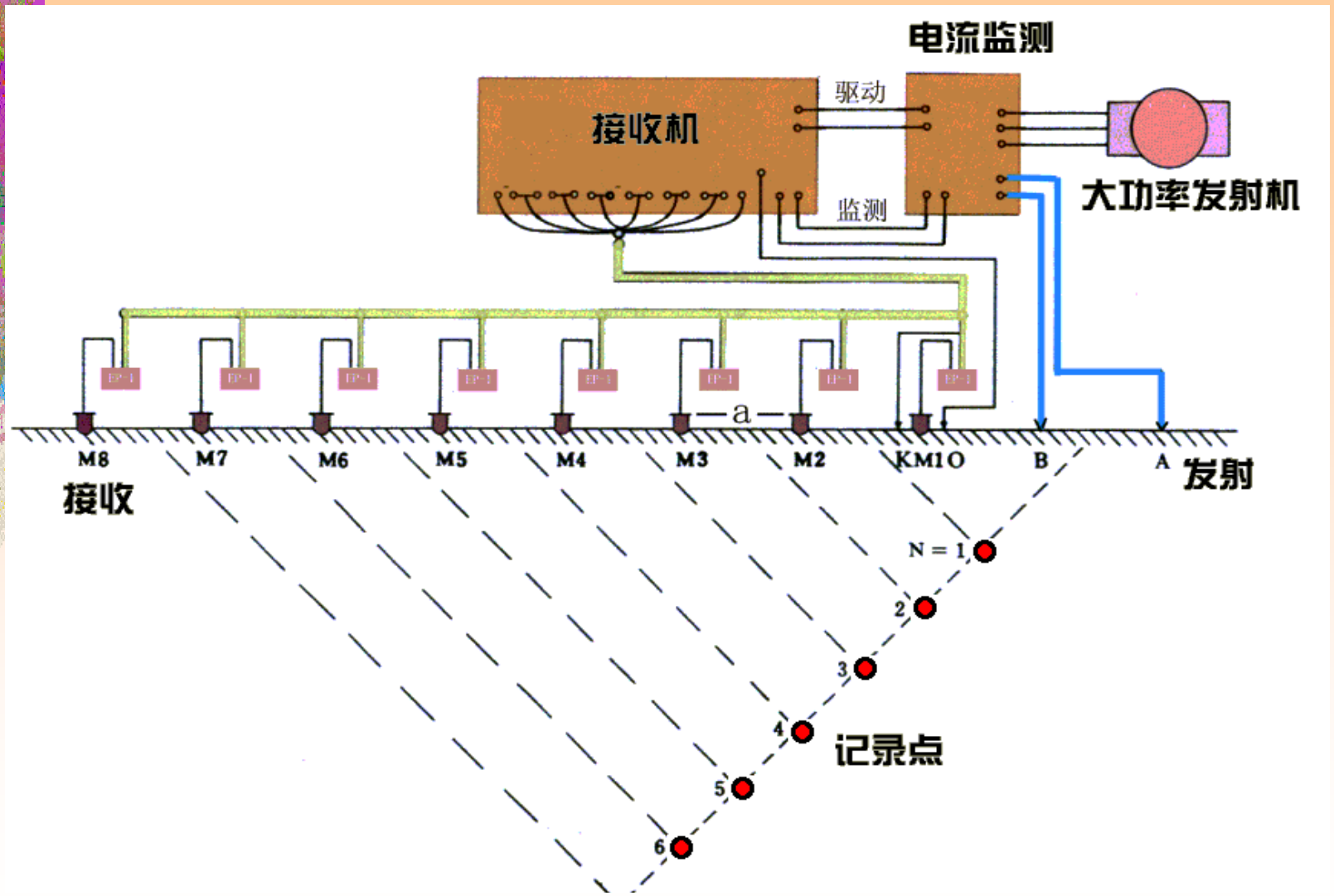
# SIP的工作方法

SIP通常采用多极距的偶极—偶极装置。

以偶极距为点距，

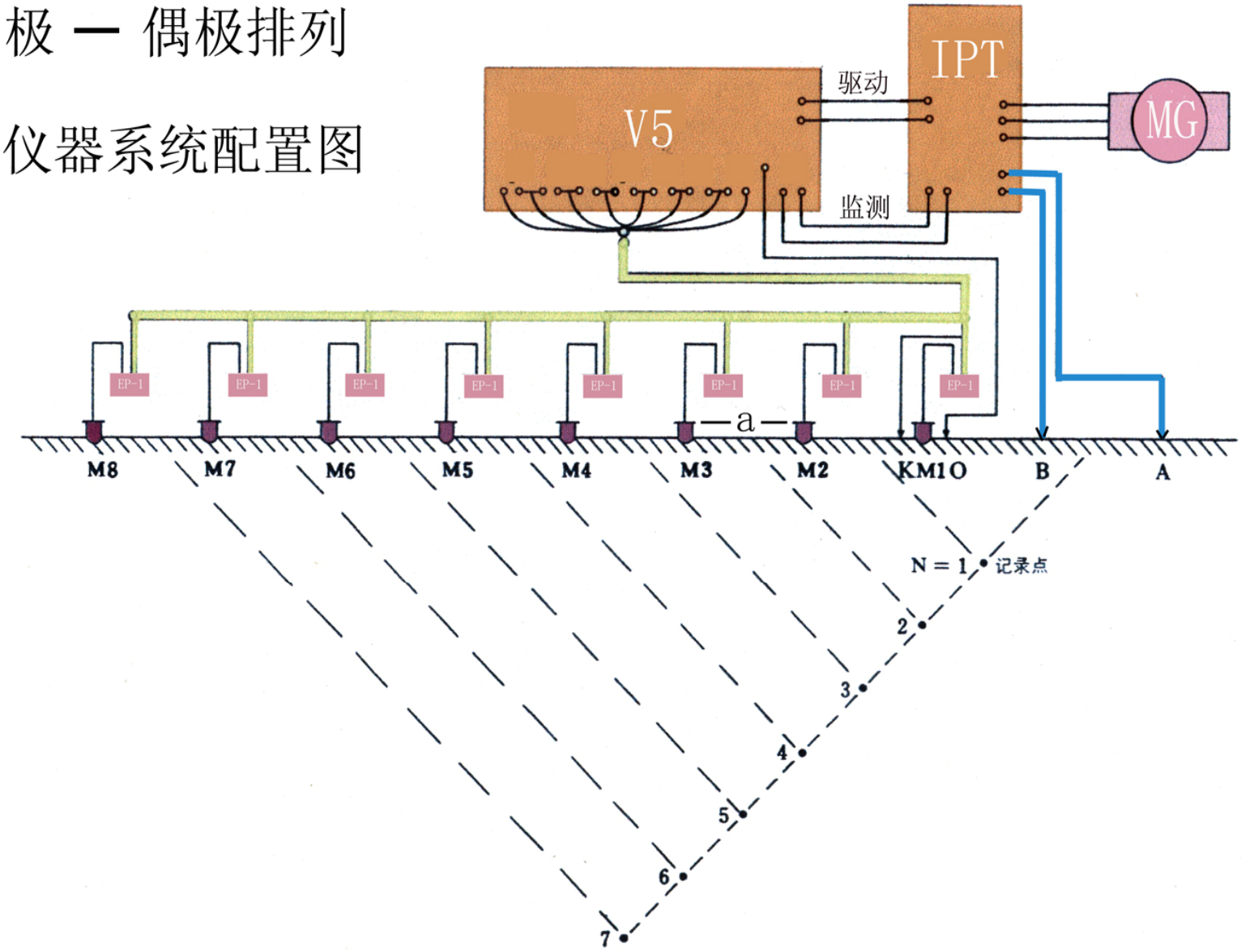
沿测线作剖面观测。

# 频谱激电法法野外观测示意图



# 偶极 — 偶极排列

## V5仪器系统配置图



观测结果用六个参数的拟断面图表示，反映地电构造沿剖面和随深度的变化

SIP法在空间域和频率域的高密度测量，使之具有较常规方法丰富得多的信息量

# SIP法在我国的发展

我国从1983年开始引进SIP法。

中国地质大学（武汉）和地矿部第一物探大队进行十多年研究和开发，达到国际领先水平。

# 国际领先水平的标志之一

1. 发表了两部重要著作：

- 频率域激电法原理，地质出版社，1988
- **Theory and Application of SIP，SEG，1998**

# 国际领先水平的标志之二

**2.** 研制了**SIP**法的数据处理和解释软件系统**SFIPX-SW**——国际上唯一的实用系统，广泛用于国内外**SIP**法生产和科研实践（国内已有**30**余套）。

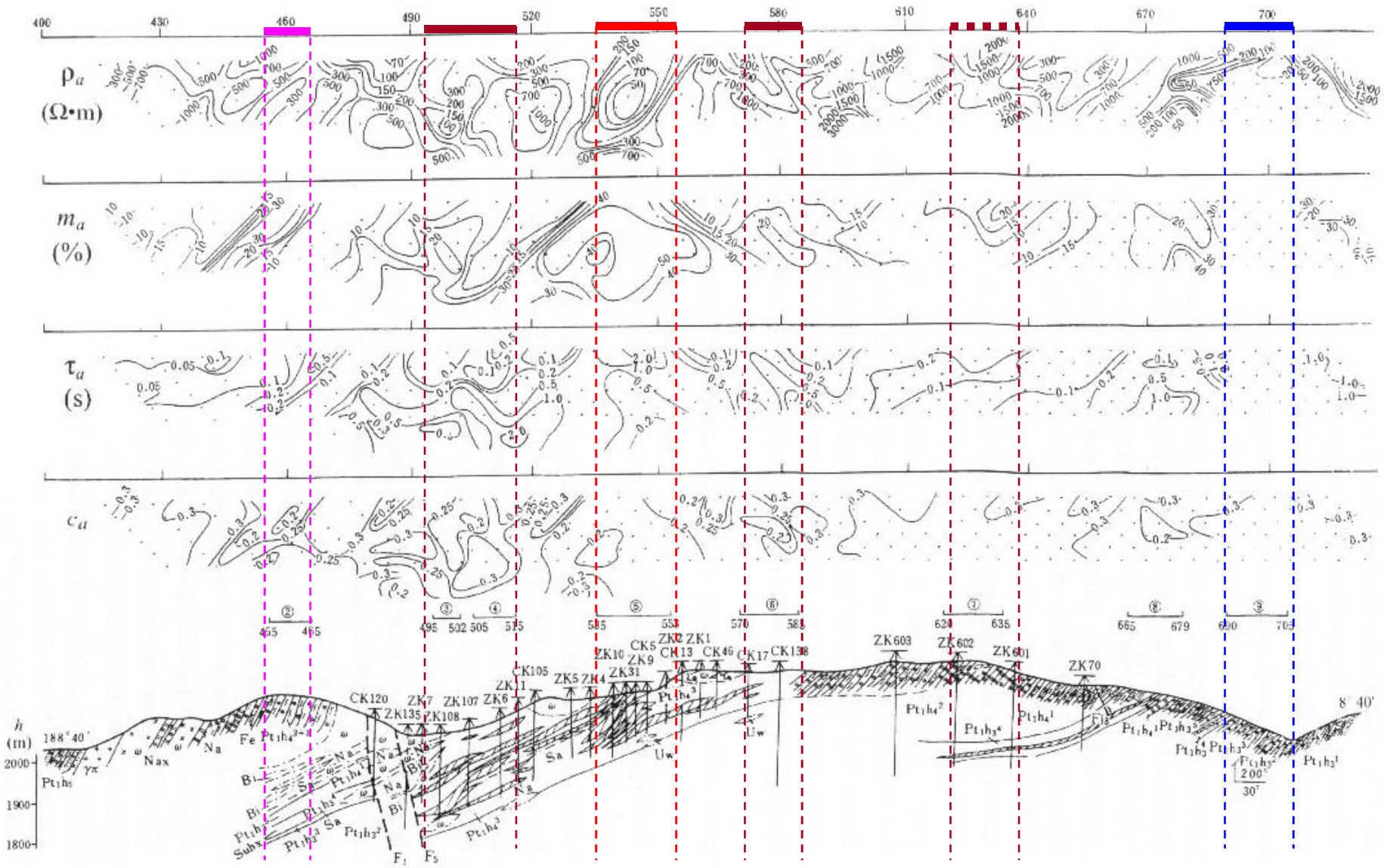
# SIP法在金属矿勘查中的应用实例

- 已知区的试验结果；
- 实际找矿效果。

# 四川拉拉厂铜矿外围找矿

- 拉拉厂铜矿是伴有钼、钴和金等矿产的大型铜矿。开展SIP法试验找矿工作的任务是：

1. 在已知矿上进行试验，研究利用激电谱参数$\rho_s$、$m_s$、$\tau_s$和$c_s$解决下述问题的可能性：
   - 在铜矿化地层中划分铜矿化富集带；
   - 区分和剔除与铜矿化无关的干扰异常。
2. 在矿区外围有找矿远景地段找矿，要求探测深度达到150—200米。



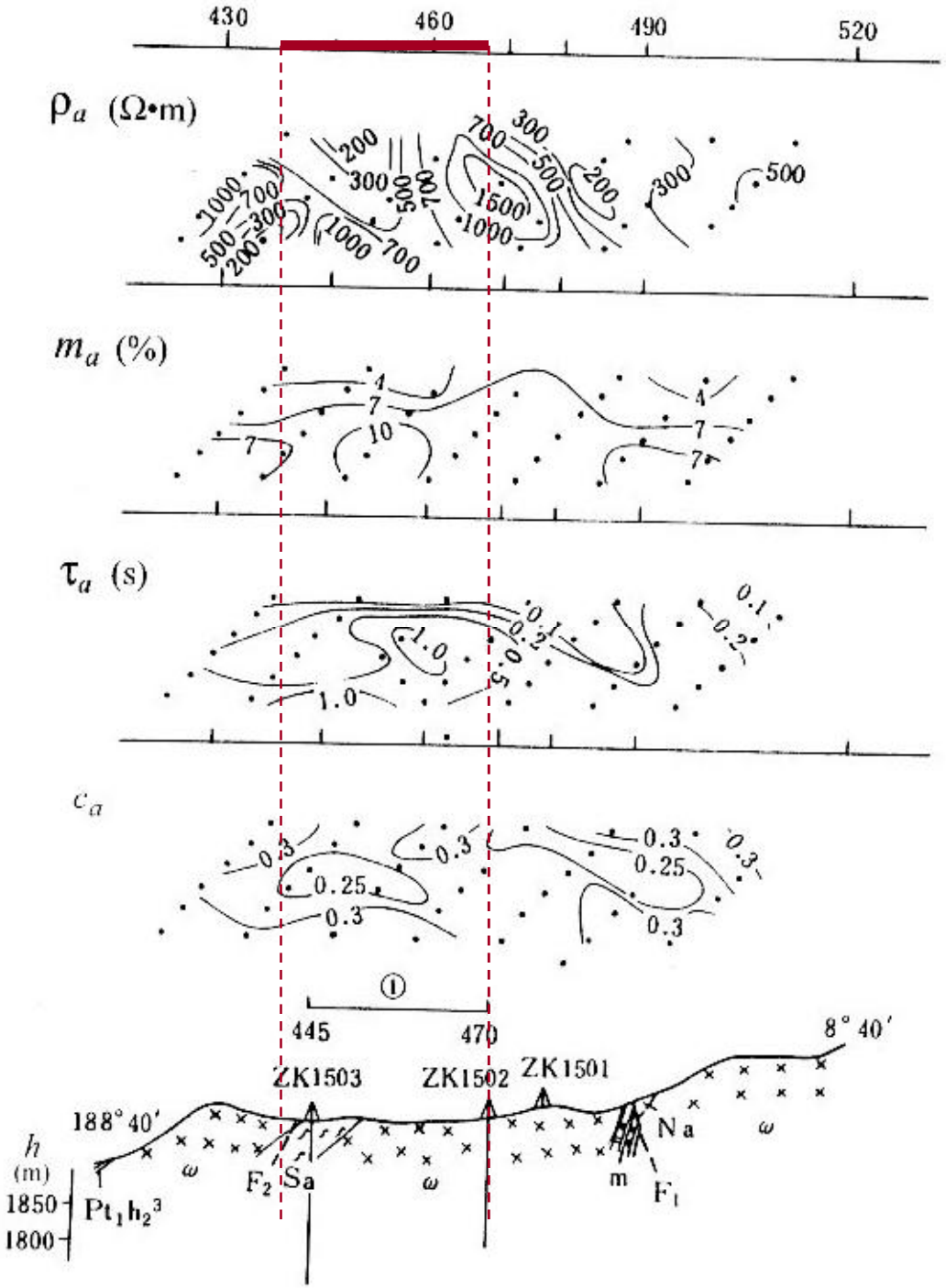

# 横穿已知矿的Ⅵ号测线综合剖面图

# 试验观测剖面表明

- 在富而浅的主矿体上，呈现为典型的低阻（$\rho_s^{min}$ = 50 Ωm），高极化（$m_s^{max}$ =50％），中偏大的时间常数（$\tau_s$ =0.5－2 s）和小频率相关系数（$c_s$=0.2）异常。
- 在埋藏较深的矿尾和规模较小的单矿层上，具有中等电阻率（$\rho_s^{min}$ = 100 Ωm），中等极化率（$m_s$ =20－30％），中等时间常数（$\tau_s$ =0.5－1 s）和中等频率相关系数（$c_s$=0.25－0.3）。
- 剖面左端异常具有中等偏高的视电阻率（n·102 Ωm）和极化率（$m_s$ =30％），及小的时间常数（$\tau_s$ =0.05－0.2 s）和频率相关系数（$c_s$<0.25），伴随高强度的正负急剧变化的ΔZ磁异常。这是磁赤铁矿化引起的异常。
- 剖面最右端异常（具有低阻（$\rho_s^{min}$ < 20 Ωm），高极化（$m_s^{max}$ >40％），大时间常数（$\tau_s$ >2 s）和中等偏大的频率相关系数（$c_s$>0.3），这是石墨化炭质板岩的反映

# 矿区外围34线找矿效果

- 该测线位于辉长岩ω覆盖区，从周围出露岩性看，本区含矿层位（中火山变质岩段）应延伸至辉长岩下，属成矿有利部位。
- 403地质队于1988年曾在该处设计了三个钻孔，但因缺乏深部证据，一直未下决心施工。
- 34线的SIP测量正是在这种情况下，应403地质队要求布置的。




在445－470点范围内获得1号异常，其特点是:

中等偏高的$\rho_s$（n·102 Ωm）

中等偏弱的$m_s$（约10％）

中等$\tau_s$（0.5－1 s）

中等偏小的$c_s$（0.25）。

这与试验剖面上3、4、6、7和8号异常的特征相近。

异常出现在较深部位（$a$=60米，$n$=5-8），且向下未封闭，估计极化体埋藏较深（大于200米）。推断在200米以下可能有铜矿化体。

从反映深度能力较强的$\tau_s$异常在深部向西扩展，故推断此矿化体是向西倾斜的。

ZK1502和ZK1503钻探结果，在100-249米以下普遍黄铁矿化，并见到三层铜矿体，

# SIP（CR）找油气藏的机理

1、传统的提法——寻找油气藏上方的油气渗逸通道（地球化学烟囱）

2、我们近年的成果——探测油气水生成、运移、聚集和逸散所形成的复杂综合体

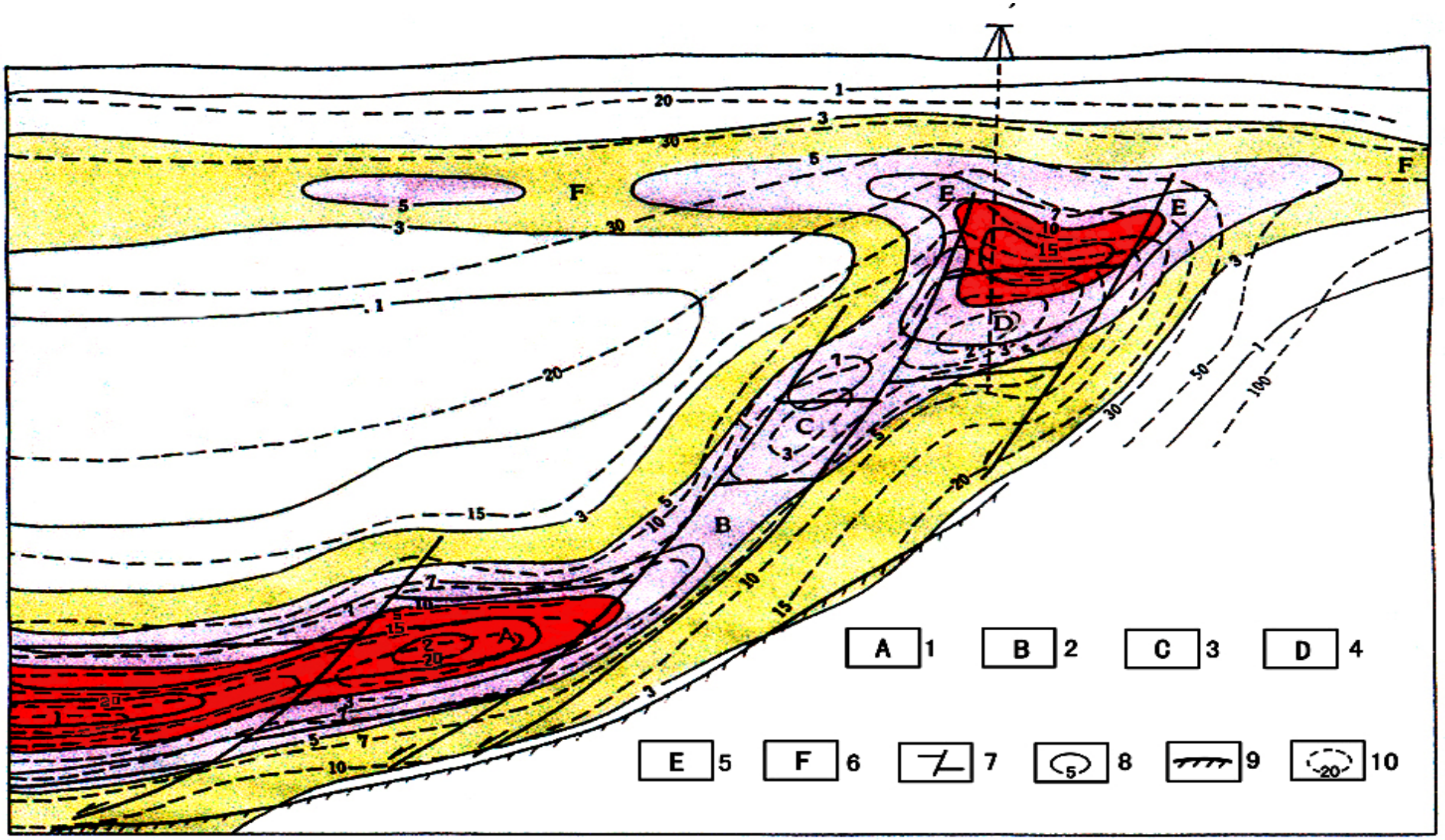



**图1 云南景谷第三系陆相沉积盆地油气藏的地质-电性模式断面图**

（引自地质矿产部第一综合物探大队，1993年）

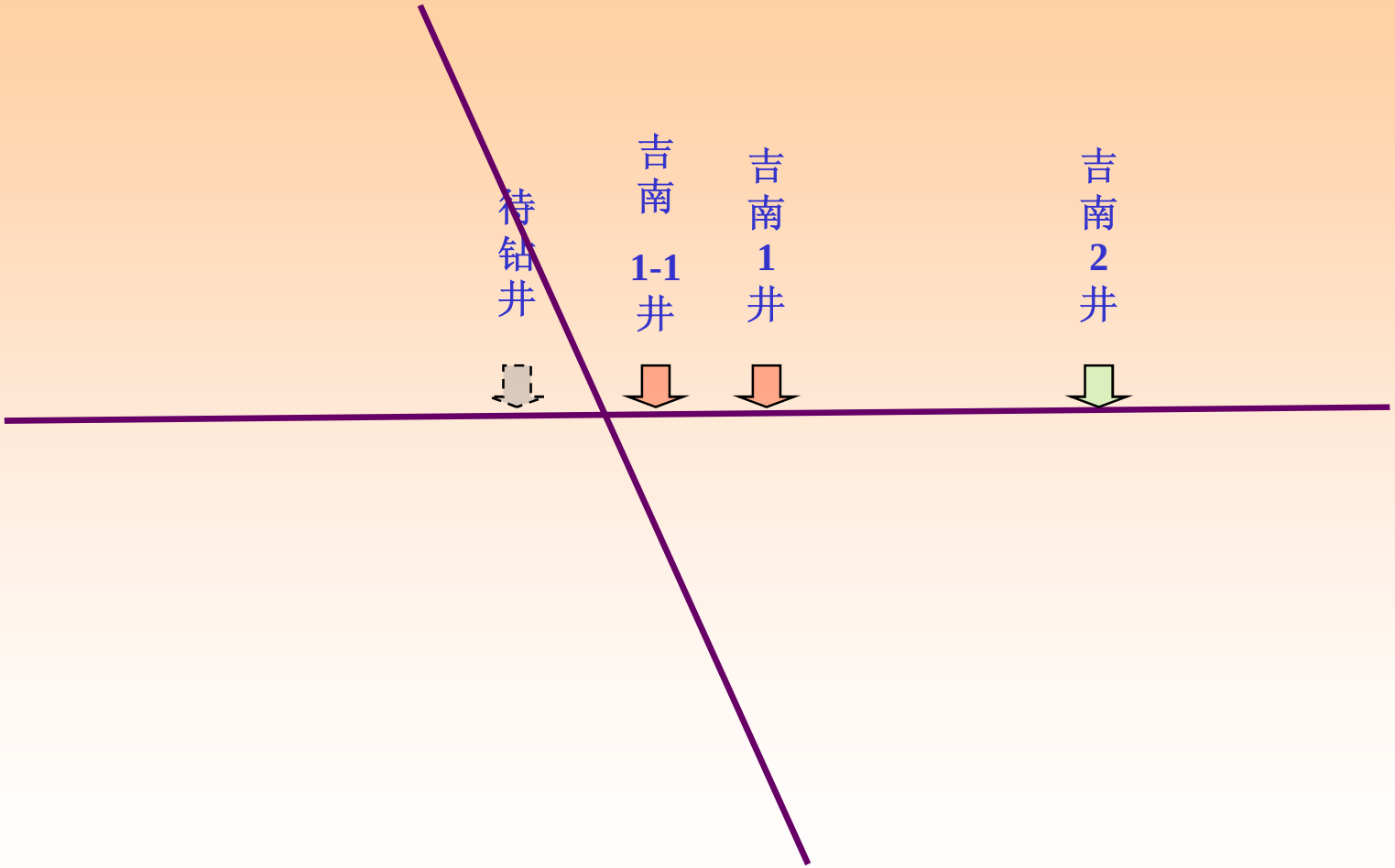
1、 生油岩 2、圈闭下部运移通道 3、无油藏圈闭 4、有油藏圈闭 5、圈闭上部逸散通

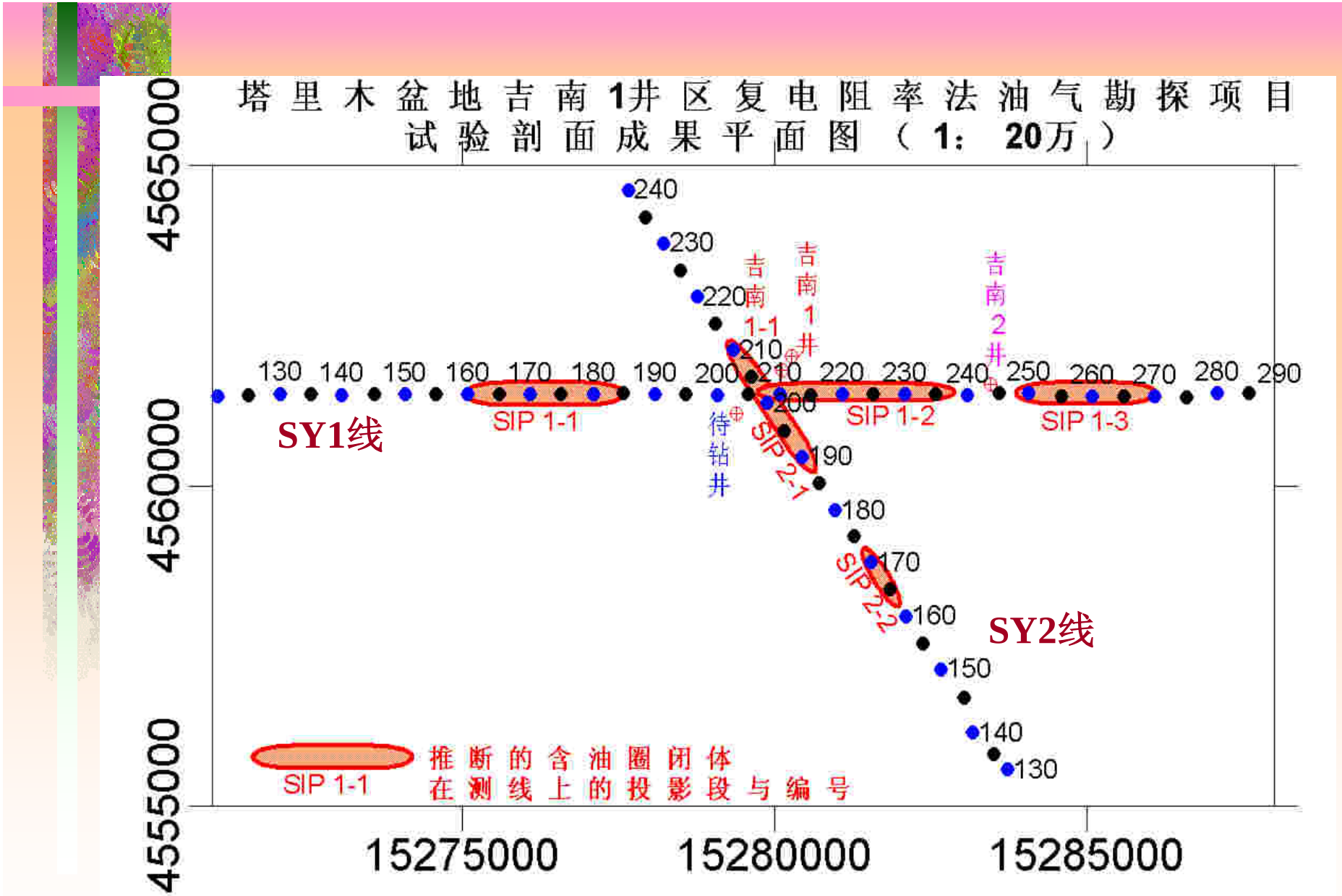
6、 极化扩散层 7、断层 8、视充电充等值线 9、盆地基底 10、电磁电阻率等值线

# 新疆吉南地区SIP法找油气

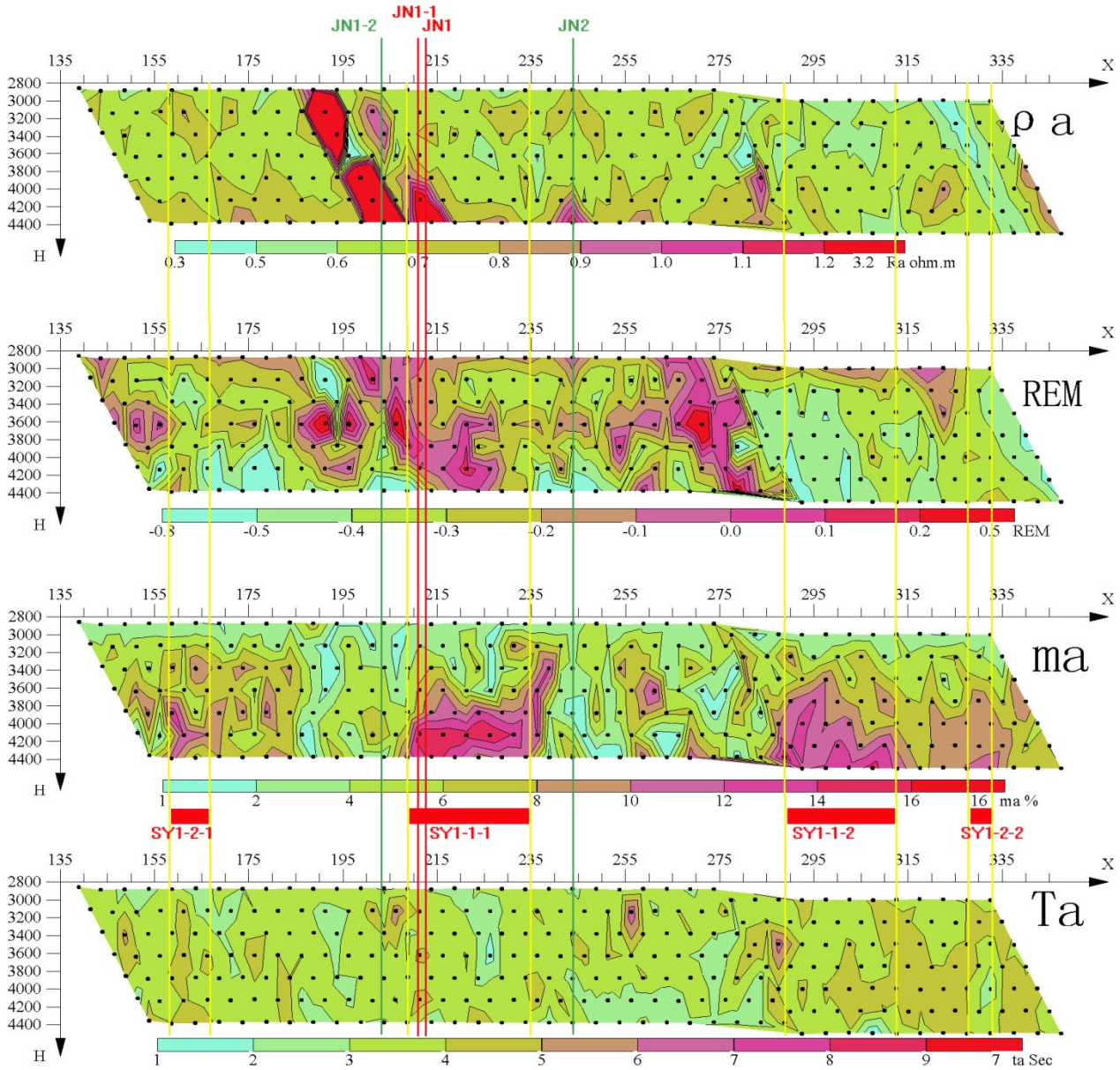
- 油气藏埋深达3000 m；
- 围岩电阻率仅几个Ωm；
- 测量电极距 $a$ =MN=500 m；
- 最大隔离系数$n$=14；
- 探测深度达3000 m；
- 供电点流超过100 A。

# 吉南地区SIP法工作布置




塔里木盆地吉南1井区复电阻率法油气勘探项目
试验剖面成果平面图（1：20万）
4565000
4560000
4555000
15275000
15280000
15285000
240
230
220
210
200
190
180
170
160
150
140
130
吉南1-1井
吉南1井
吉南2井
待钻井
SY1线
SY2线
SIP 1-1
SIP 1-2
SIP 1-3
SIP 2-1
SIP 2-2
130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290
SIP 1-1
推断的含油圈闭体在测线上的投影段与编号

# 塔里木吉南1井区SIP法 SY1 线剖面成果



# 试验剖面成果

1、探测到已知油藏的油气电性异常（SIP1-2和SIP2-1），并大致划定了已知油气藏范围；

2、新发现有3处类似吉南1井区的油气电性异常（SIP1-1，1-3，2-2）；

3、位于SY1线203号点 南约400米处的待钻井位于异常SIP1-2的西边外测。不在异常区内，推测该井所处部位油气藏量不及吉南1井甚至会是干井；建议移位或放弃施工该待钻井。油田按原设计施工，果然打到干井；后提钻杆向东打斜井，在CR法异常范围内，打到了油气藏。

# 结 论

SIP或CR目前存在的主要问题是：
生产效率低、成本高和勘探深度有限

生产效率：每天完成2-5个排列，
1-2公里剖面；

生产成本：每公里剖面约1万元；

探测深度有限：一般<3000m。

SIP或CR主要只作剖面性工作：

对于固体矿产勘探用于评价激电异常；

对于油气勘探用于评价圈闭的含油气性

# 希望加强合作！

# 谢谢！

