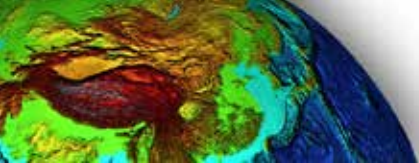


勘探地球物理新方法、新技术

吕庆田

中国地质科学院
地球物理地球化学勘查研究所





提 纲

一、引言—两个模型

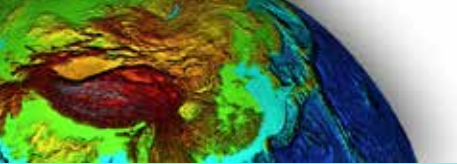
二、硬件技术与装备

- 1、航空重力梯度与电磁技术
- 2、分布式张量电法及电磁技术

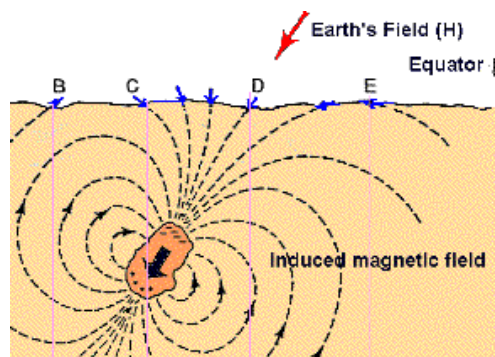
三、处理解释技术

- 1、三维反演技术
- 2、岩性填图与地质填图
- 3、其它解释方法

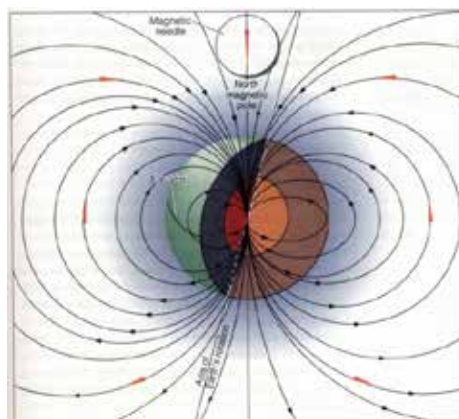




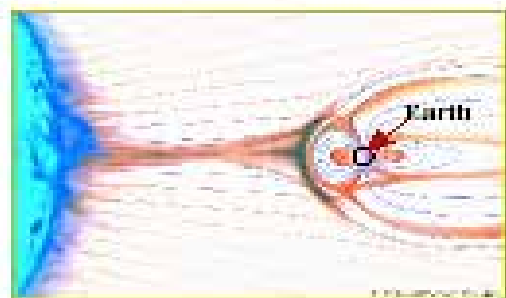
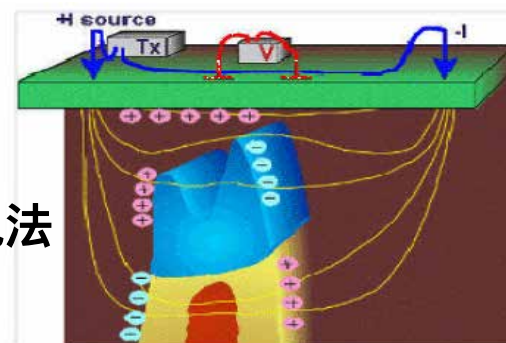
一、引言-两个模型



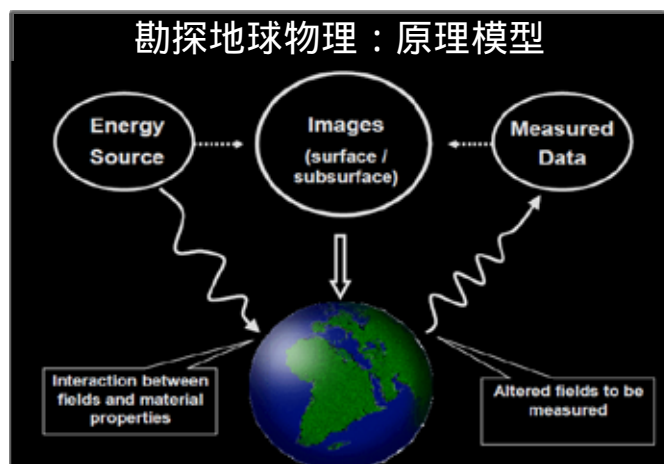
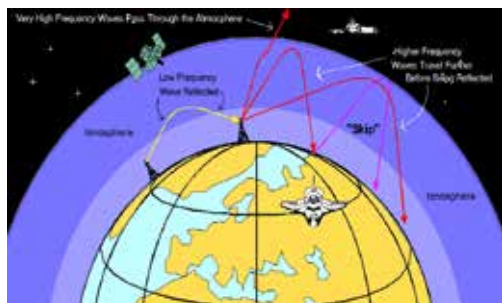
磁法



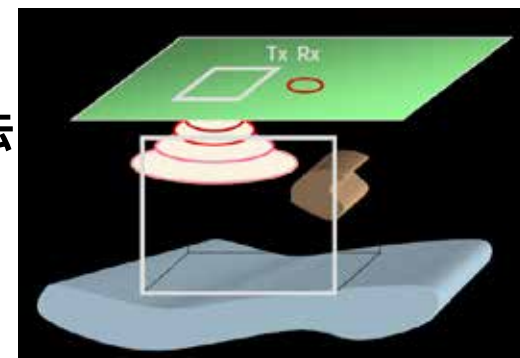
直流电法



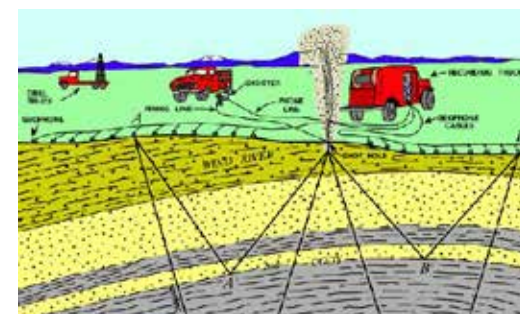
天然场电法法

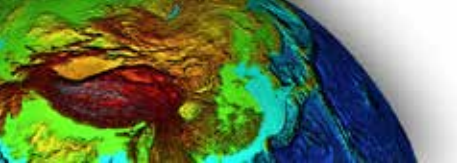


电法法



反射地震





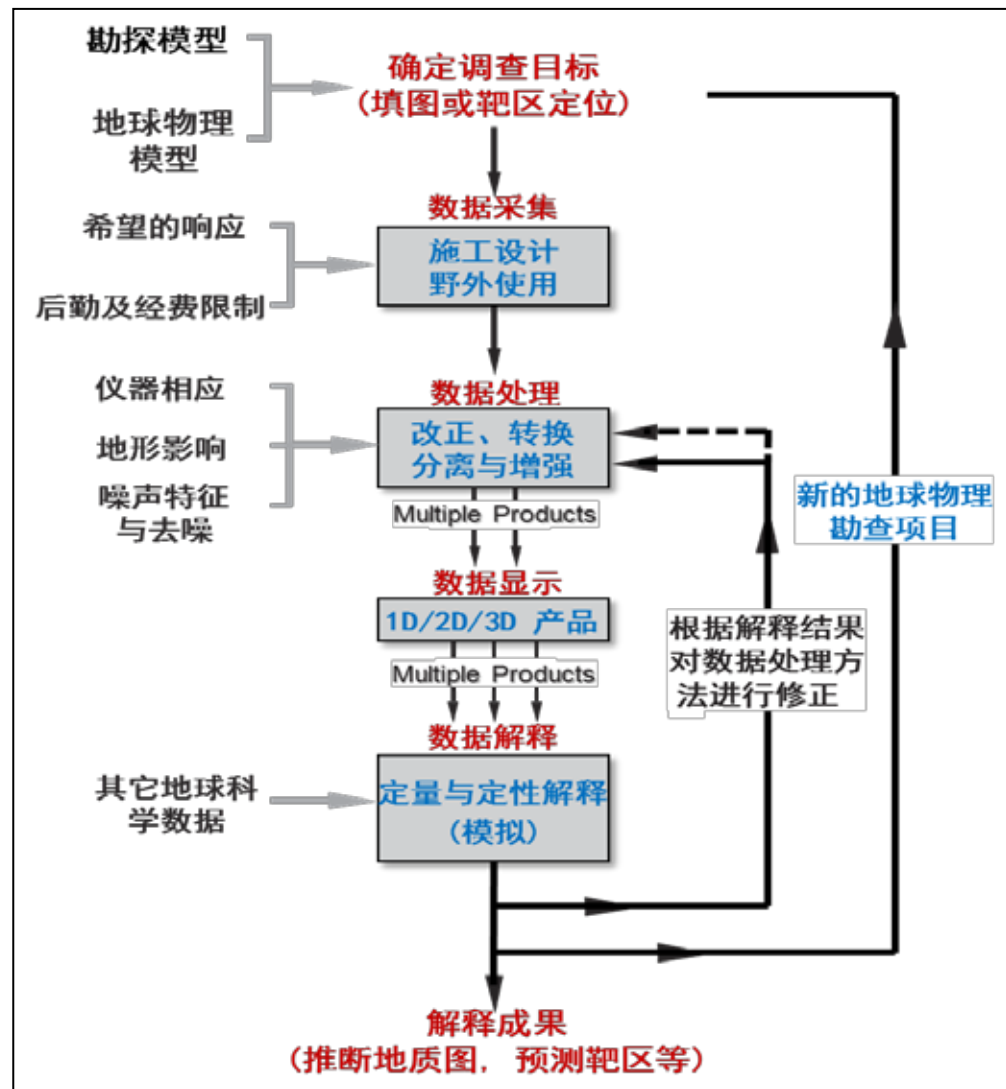
一、引言-两个模型

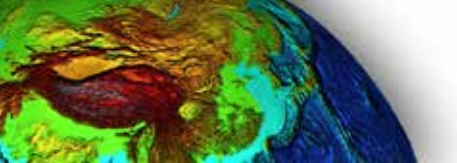


勘探地球物理：工作模型

几个值得注意的关键环节（贯穿整个模型）：

- u 施工设计：采样间隔与网格化
- u 异常分离：经验与判断
- u 数据解释：2D与3D反演



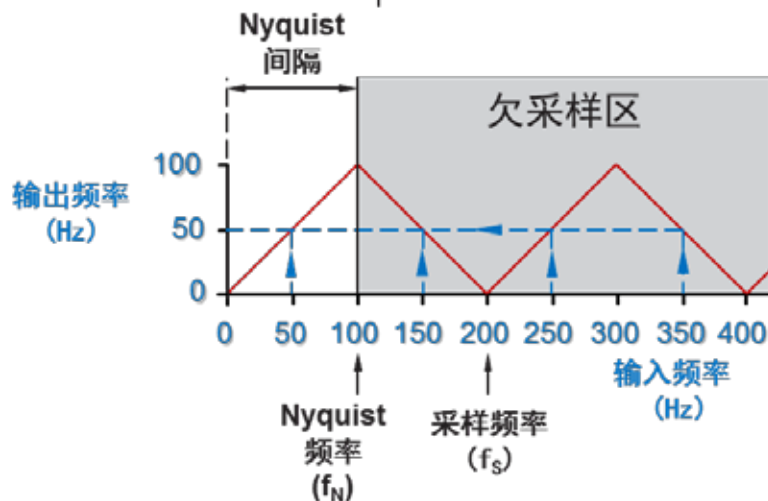
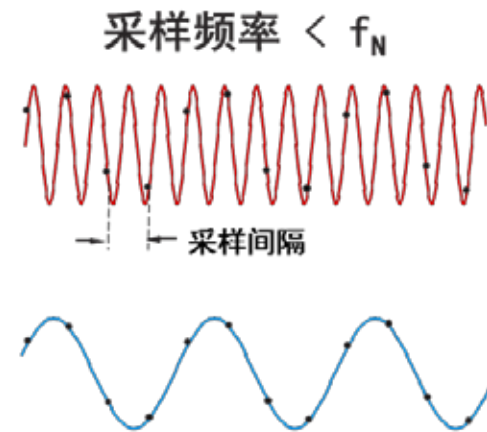
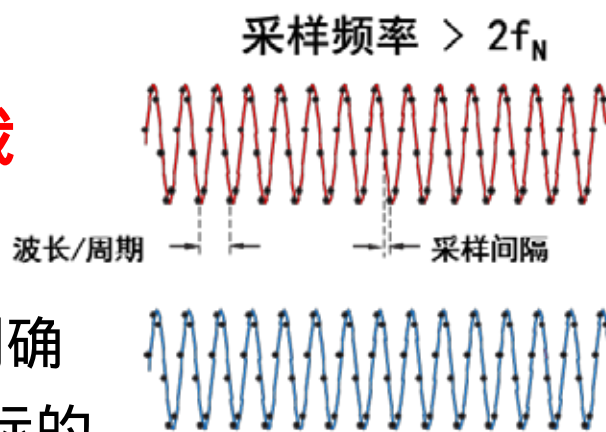


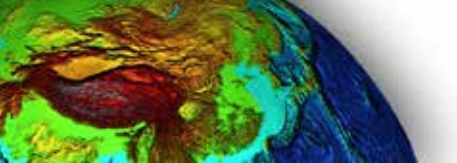
一、引言-两个模型

1、施工设计

采样定律告诉我们什么？

- 1、目标导向：明确地球物理调查目标的空间尺寸；
- 2、合理设计地球物理测量的点线距
- 3、点线距离都要小于调查目标空间尺寸的2倍



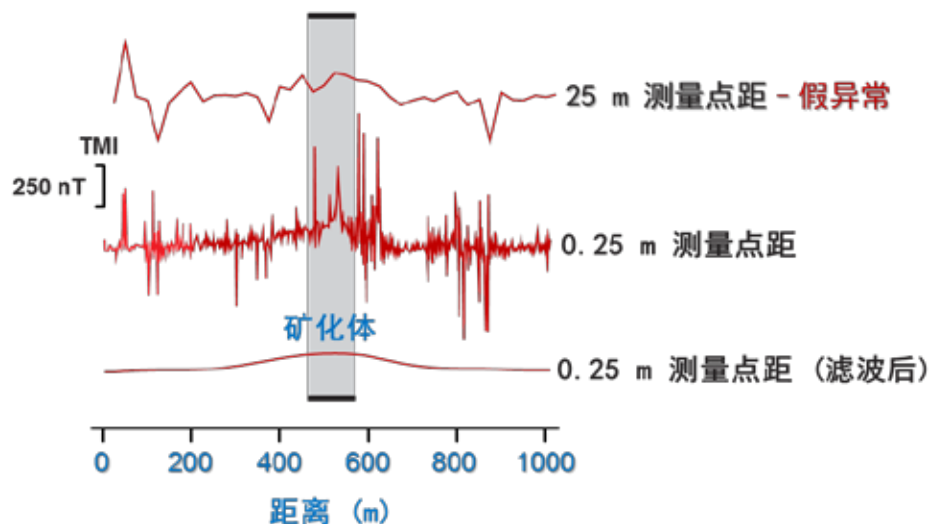


一、引言-两个模型

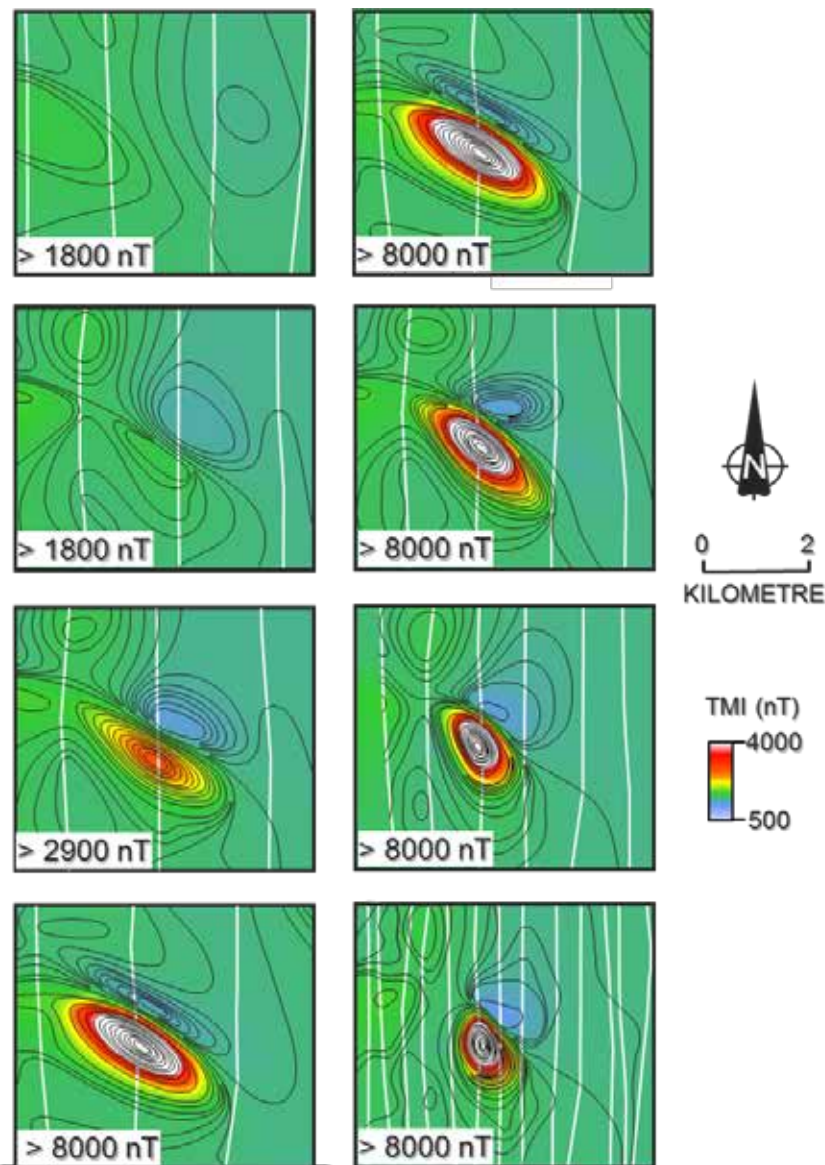
两个实例：

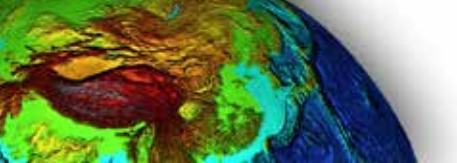
点线距离设计对能否发现异常和确定异常的真实形态直观重要

Elura 矿床勘查项目



Dentith , 2013





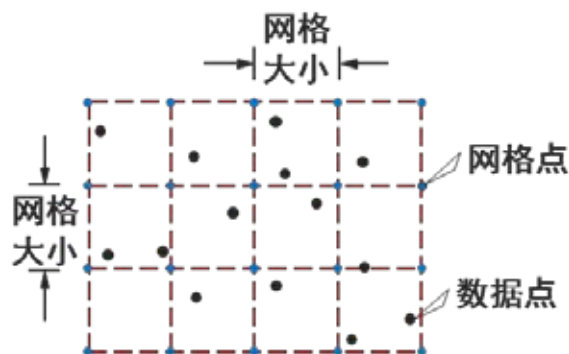
一、引言-两个模型

网格化间距大小的选择：

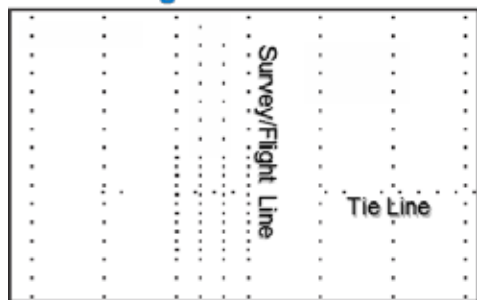
太小：引起串珠状或豆荚状异常

太大：引起低频假异常

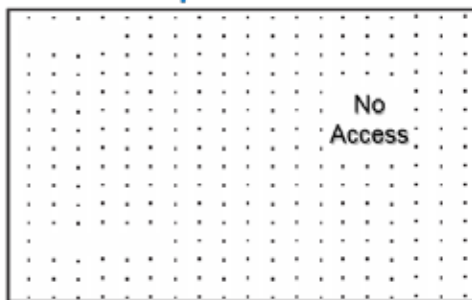
原则：数据平均点距的1/2



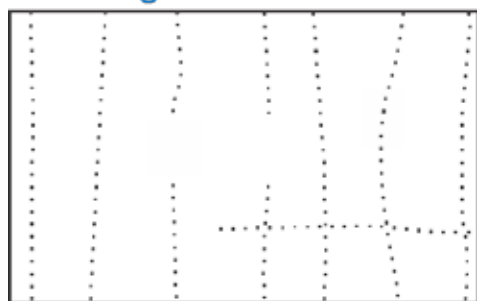
'Straight' Traverses



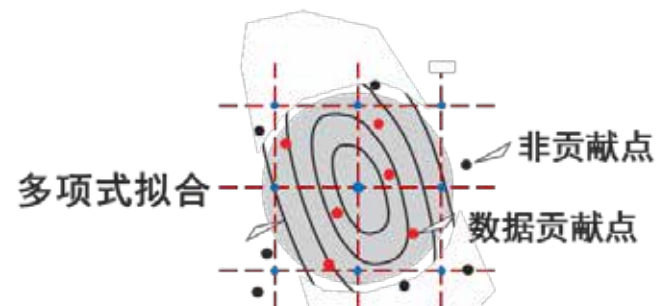
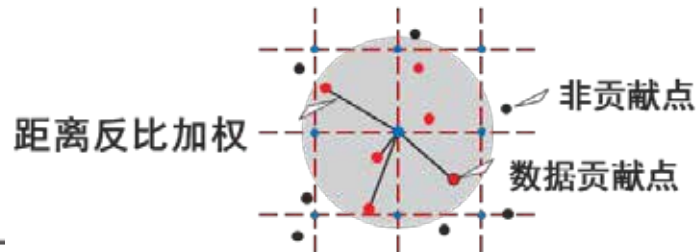
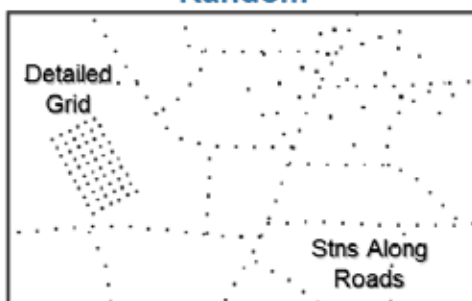
Square Grid



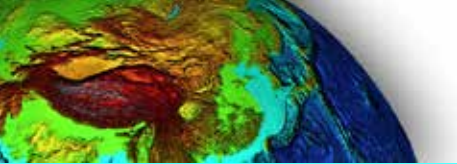
Irregular Traverses



'Random'

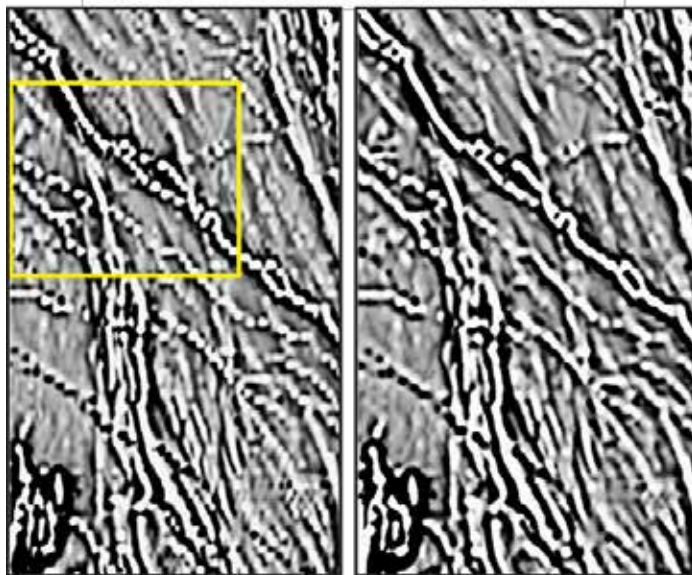
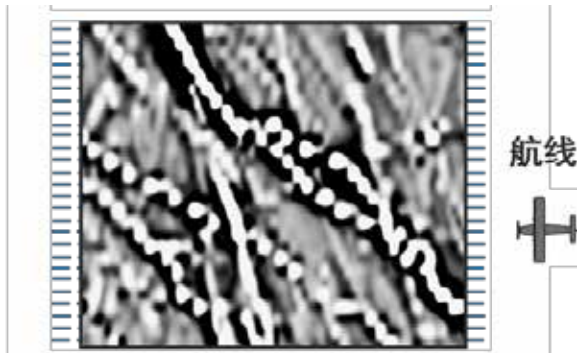


测点太稀易产生“牛眼”异常

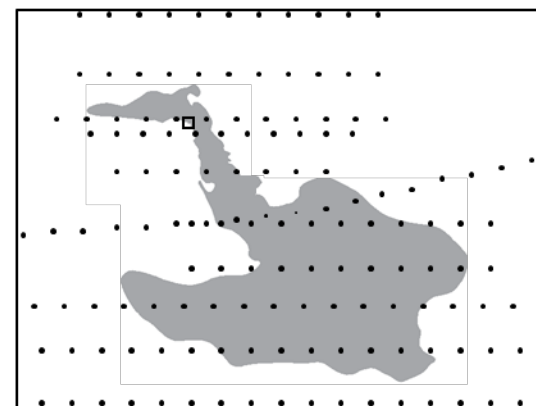
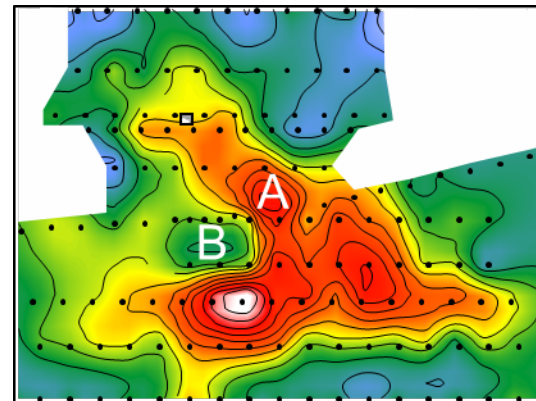


一、引言-两个模型

点线距不匹配造成的串珠、香肠状异常、台阶、梯状异常



点线距不匹配造成假异常A和B



■ Olympic奥林匹克坝角砾杂岩

• 数据点

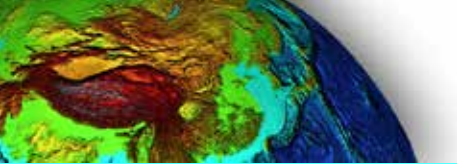
当线距与点距
相差较多时
(1:10或
1:20), 网格
化方法的选择
极为重要, 一
般以1/5或1/3
线距为网格化
间距

Dentith, 2013

0 10
KILOMETRES



0 2
KILOMETRE



一、引言-两个模型

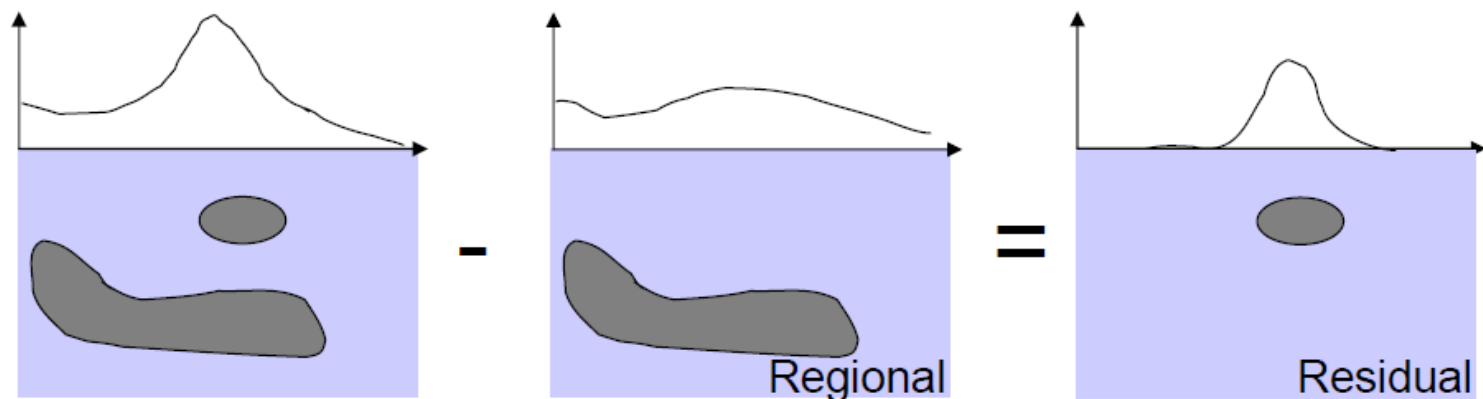


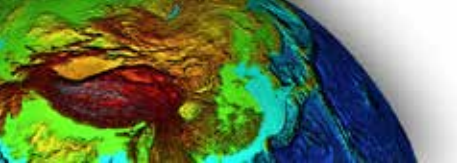
2、位场分离（区域-局部场分离）

u 位场是一个三维体积效应，由上地幔和地壳所有物性差异产生场的总和

u 异常通常淹没在由下列场源形成的“区域异常”中：

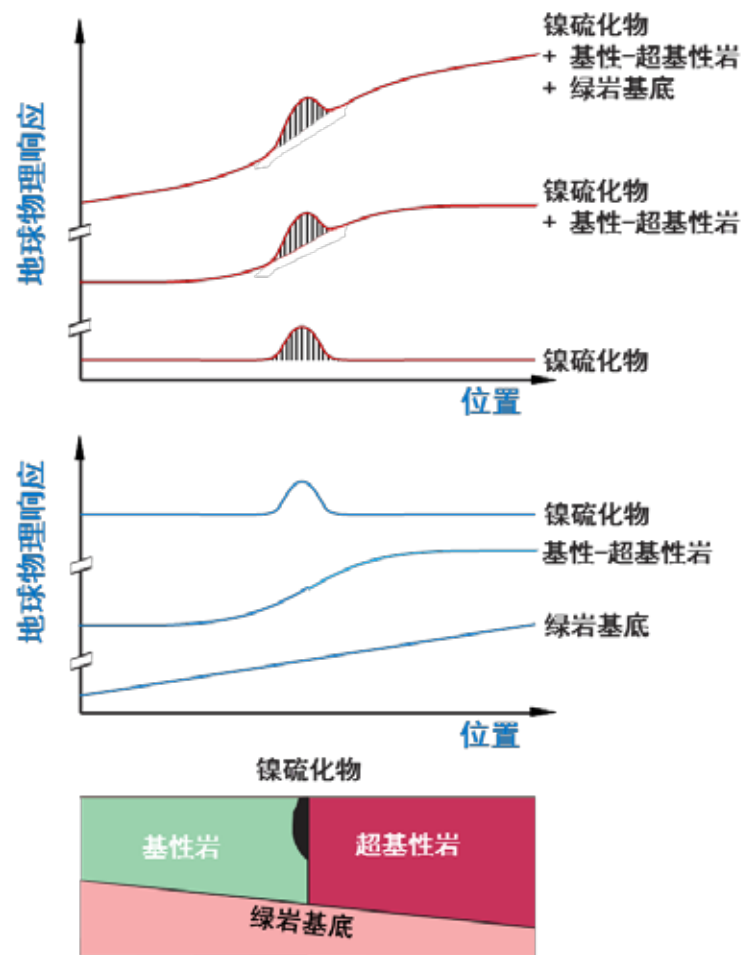
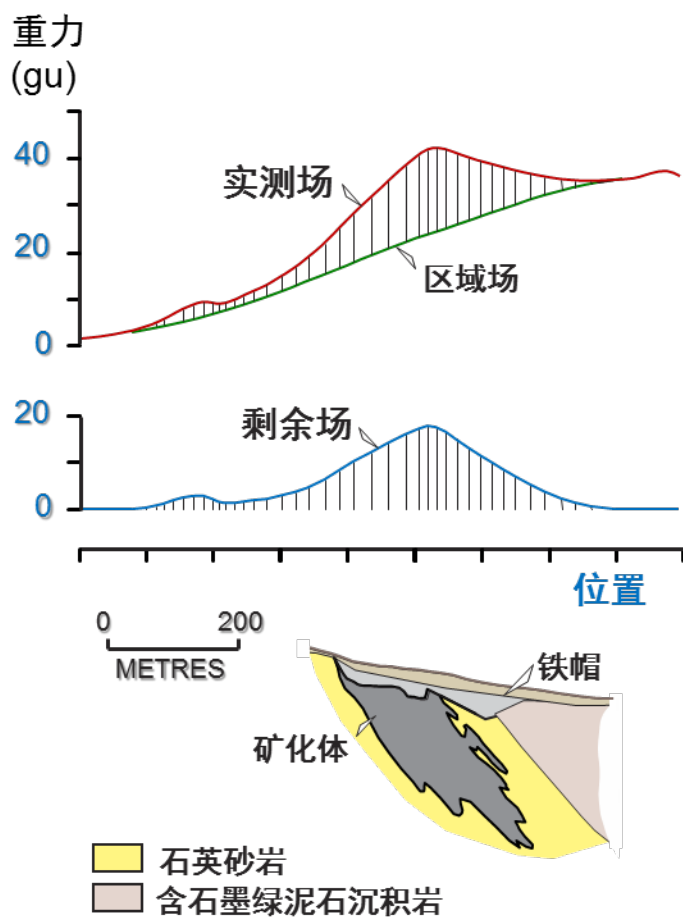
(i) 更大的场源； (ii) 更深的场源； (iii) 或更远的场源

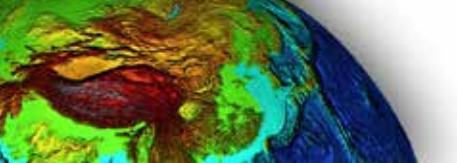




一、引言-两个模型

两个典型例子





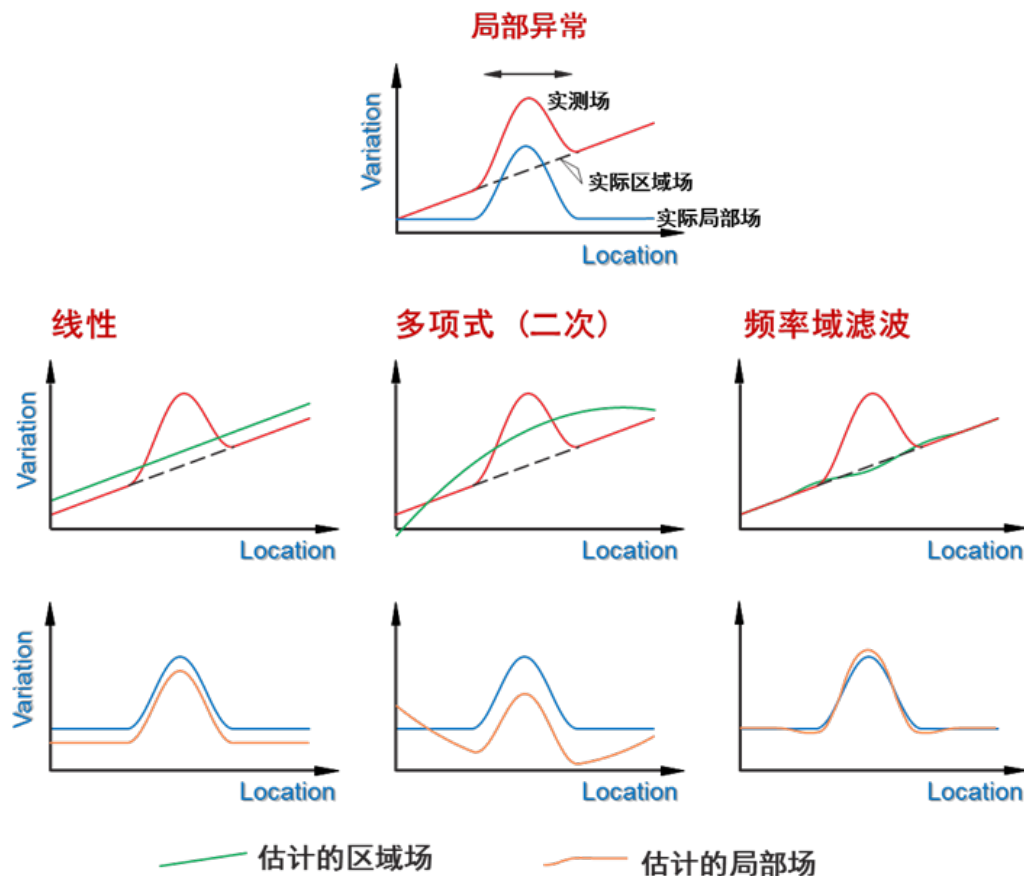
一、引言-两个模型

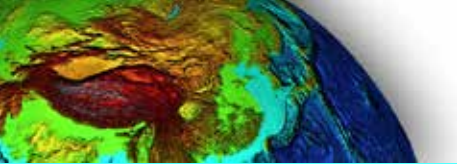
位场分离方法：

u **最小平方拟合**:使用简单多项式（二阶、三阶趋势）拟合区域场

u **滤波法**：把长波场分量当做区域场；在空间域和频率域都有效

u **“剥皮（Stripping）法”**：通过对区域场源的正演模拟，去掉区域场



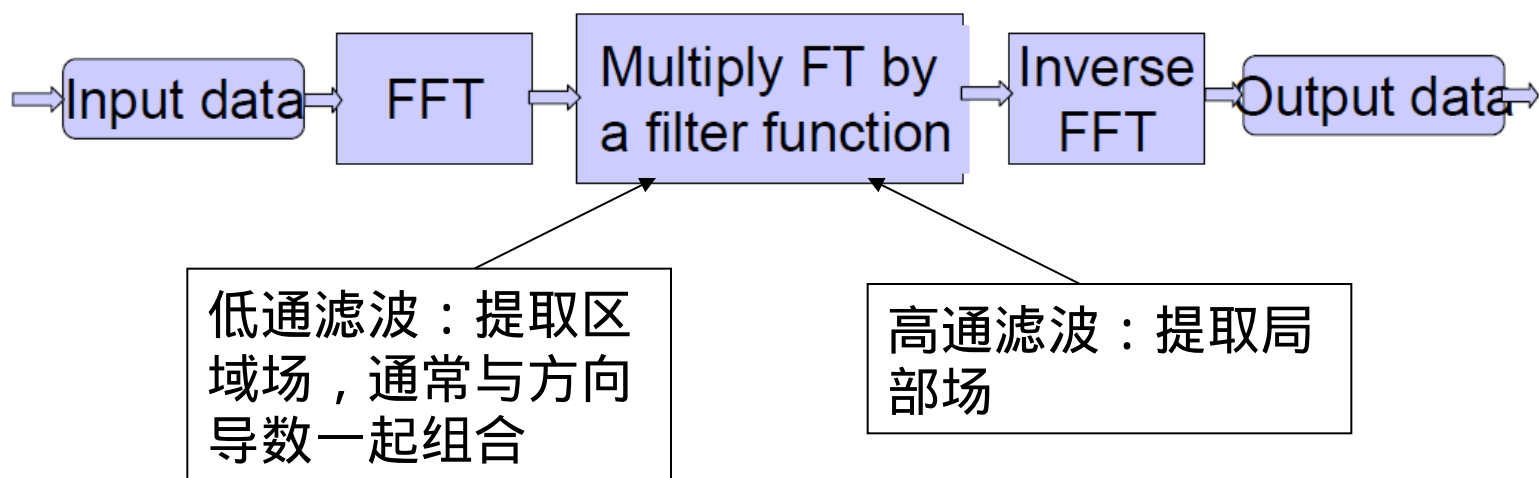


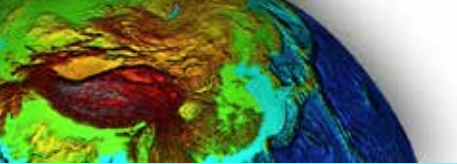
一、引言-两个模型



(2) 频率域滤波法：

在频率域将能谱的高频部分与低频部分分开。基本假定：长波长的能量代表区域异常，短波长能量代表局部异常，具体计算流程如下：





一、引言-两个模型



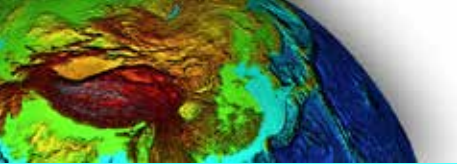
滤波法的基本要求：

- ∅数据必须是网格化数据
- ∅平面数据观测假设，数据是平面数据
- ∅在能谱上，区域异常和局部异常不能重叠过多
- ∅数据范围要远大于拟提取的局部异常范围

滤波法的优缺点：

- ∅使用FFT，快速易行
- ∅快速处理大区域数据
- ∅高度依赖于频谱特性
- ∅经常使提取异常畸变

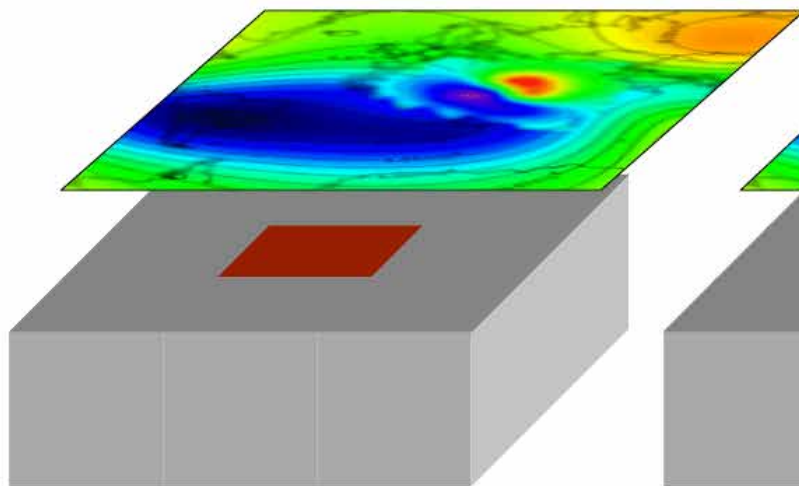




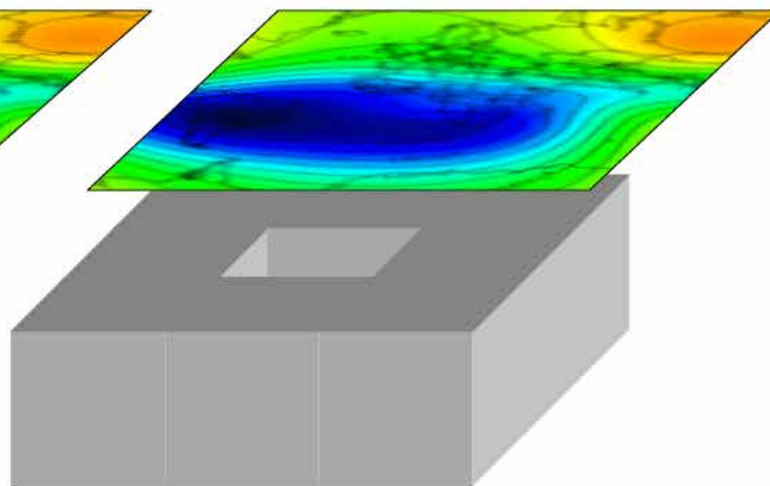
一、引言-两个模型

(3) 基于反演的“剥皮”法（基于反演的位场分离）

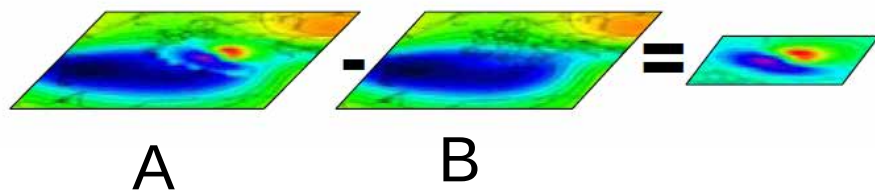
A：大尺度反演



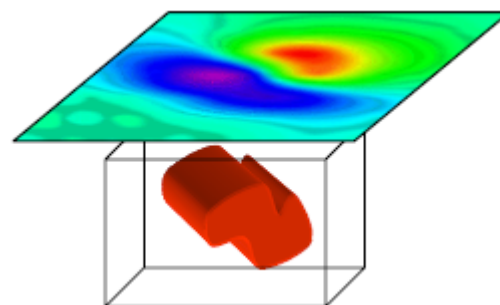
B：扣除局部异常区域，进行正演

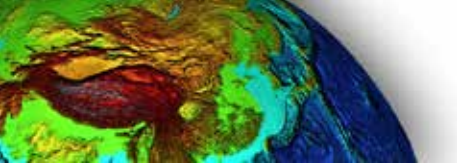


$C=A-B$ ：异常数据



D、反演解释





一、引言-两个模型



3、地球物理反演：

为什么要开展反演解释？

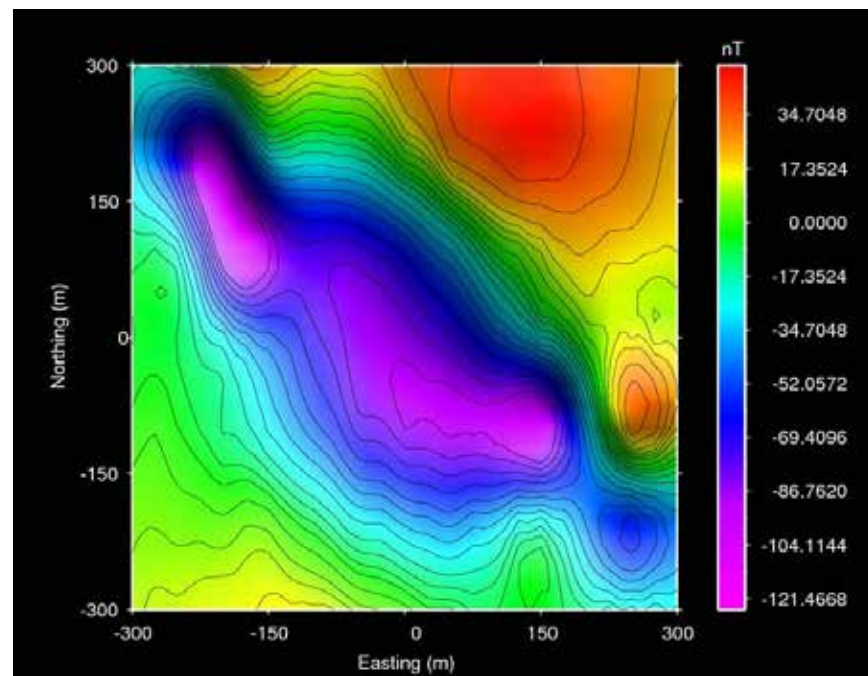
u 由于重磁、直流电场为静态、弥散场，每个数据受地下所有物质影响

u 数据中的关于场源的信息是混乱，不清楚的

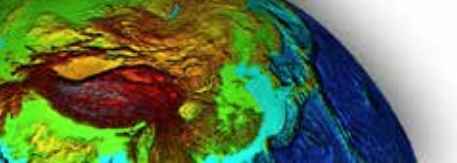
u “模型域”的地质解释比“数据域”容易很多

u 了解深度信息

这是一个测区的磁法数据，地下有几个磁性体？



Li Yaoguo , 2012



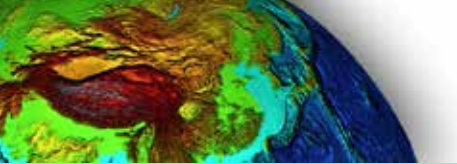
一、引言-两个模型



反演的几点重要认识：

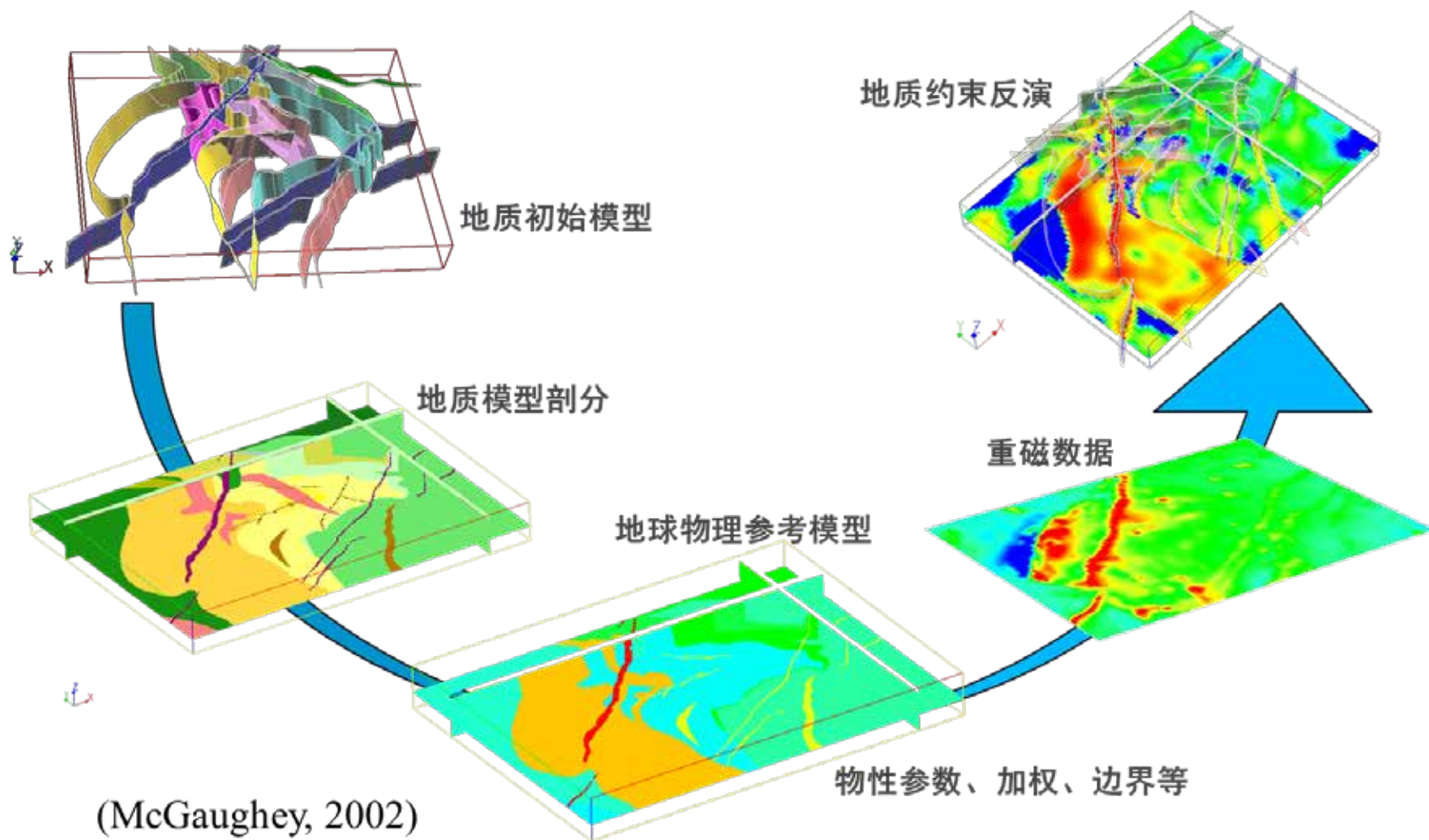
- 1、反演是一种重要地质解释手段；
- 2、反演不是数字游戏，随着地质约束的不断增加，多数据联合反演解释技术的进步，反演逐渐演变成为一种综合地质解释方法；
- 3、反演的多解性将随着地质约束的增加、多数据的联合反演，将逐渐消失。

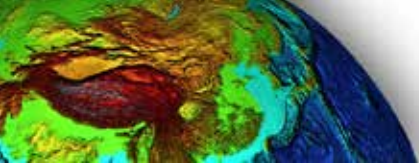




一、引言-两个模型

地质约束反演：正确方向的跨越





提 纲

一、引言—两个模型

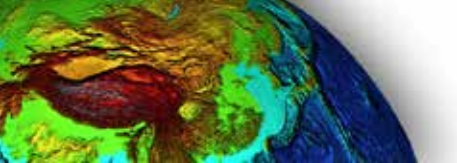
二、数据采集技术与装备

- 1、航空重力梯度与电磁技术
- 2、分布式张量电法及电磁技术

三、处理解释技术

- 1、三维反演技术
- 2、岩性填图与地质填图
- 3、其它解释方法





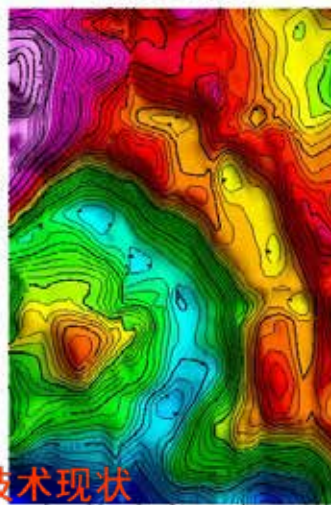
二、数据采集技术—航空重力



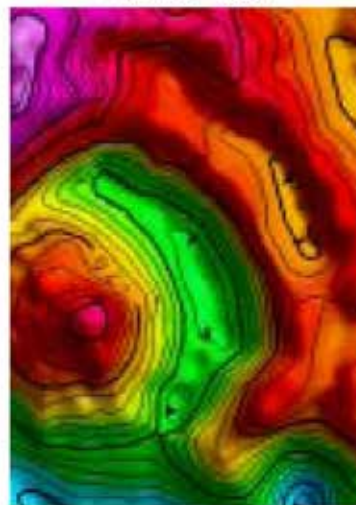
1、航空重力及梯度梯度测量系统

u 航空重力测量技术逐渐成熟，开始应用于矿产、油气勘查，目前的精度更适合区域地质调查

TAGS data



Ground data



TAGS 和地面重力比较



美国TAGS



俄罗斯CHEKAN-AP

航空重力测量技术现状

重复线精度：~1mGal

半波分辨率：~5km



美国AIR-Grav系统



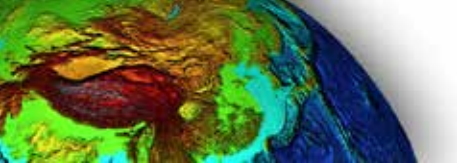
俄罗斯GT-1A

重复线精度：~0.5mGal

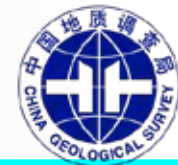
半波分辨率：~3km

从重力仪或加速度计测量的比力信息中扣除载体的运动加速度，得到重力值。

$$-g^n = f^n - \ddot{\mathbf{v}}^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)' \mathbf{v}^n$$



二、数据采集技术—航空重力



TAGS Installation into Aires Navajo



TAGS System

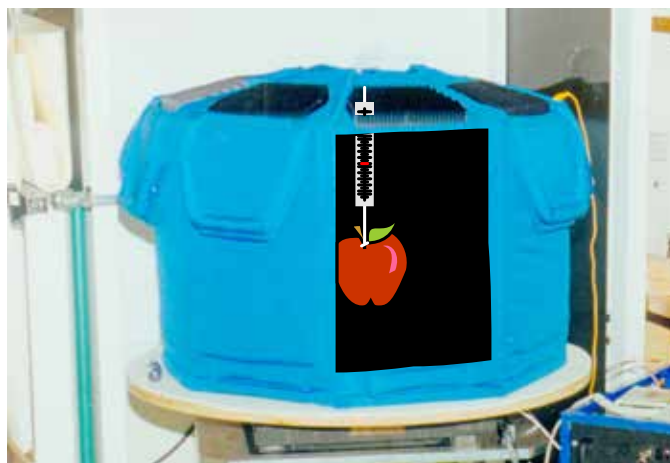
MICROg
LACOSTE
A DIVISION OF LRS

SCINTREX
A DIVISION OF LRS

Turnkey
Airborne
Gravity
System
(TAGS)



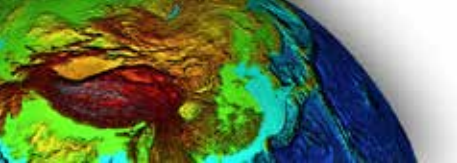
搭载AIRGrav System的
飞机



AIRGrav System



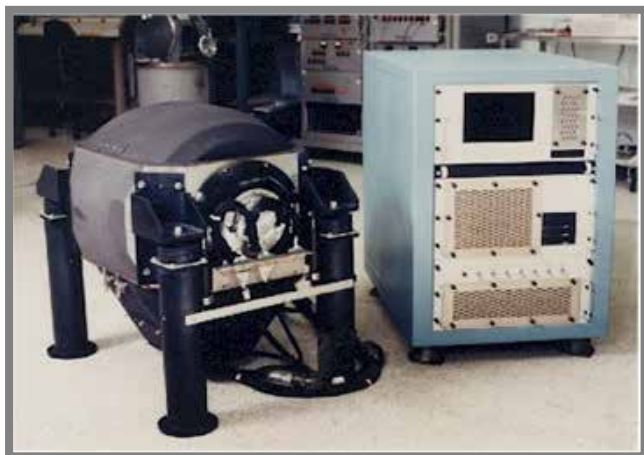
GT-1A型航空重力仪



二、数据采集技术—航空重力



重力梯度测量系统:美国Bell Aerospace公司的**Air-FTG**（全张量梯度）系统，澳大利亚BHP公司的**Falcon**航重梯度综合勘查系统，英国ARKeX公司的超导重力梯度仪EGG 等



Bell Geospace acquires FTG data in GOM 1st commercial 3D-FTG system available

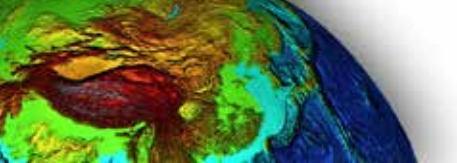
Air-FTG 重力梯度测量系统



ARKeX commences build of next generation super conducting gradiometer the 'EGG'



FUGRO (FALCON)



二、数据采集技术—航空重力



航空重力梯度技术的总体现状：

Ø 旋转加速度计重力梯度仪——商业应用，成熟技术

Ø 超导重力梯度仪——研究热点，准实用技术

Ø 原子干涉型重力梯度仪——探索阶段，前沿研究



EGG系统

ARKeX公司自行研制



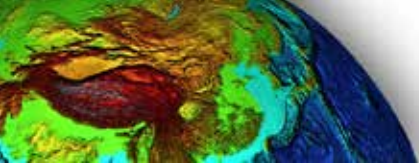
HD-AGG™系统

Gedex公司和马里
兰大学联合研制

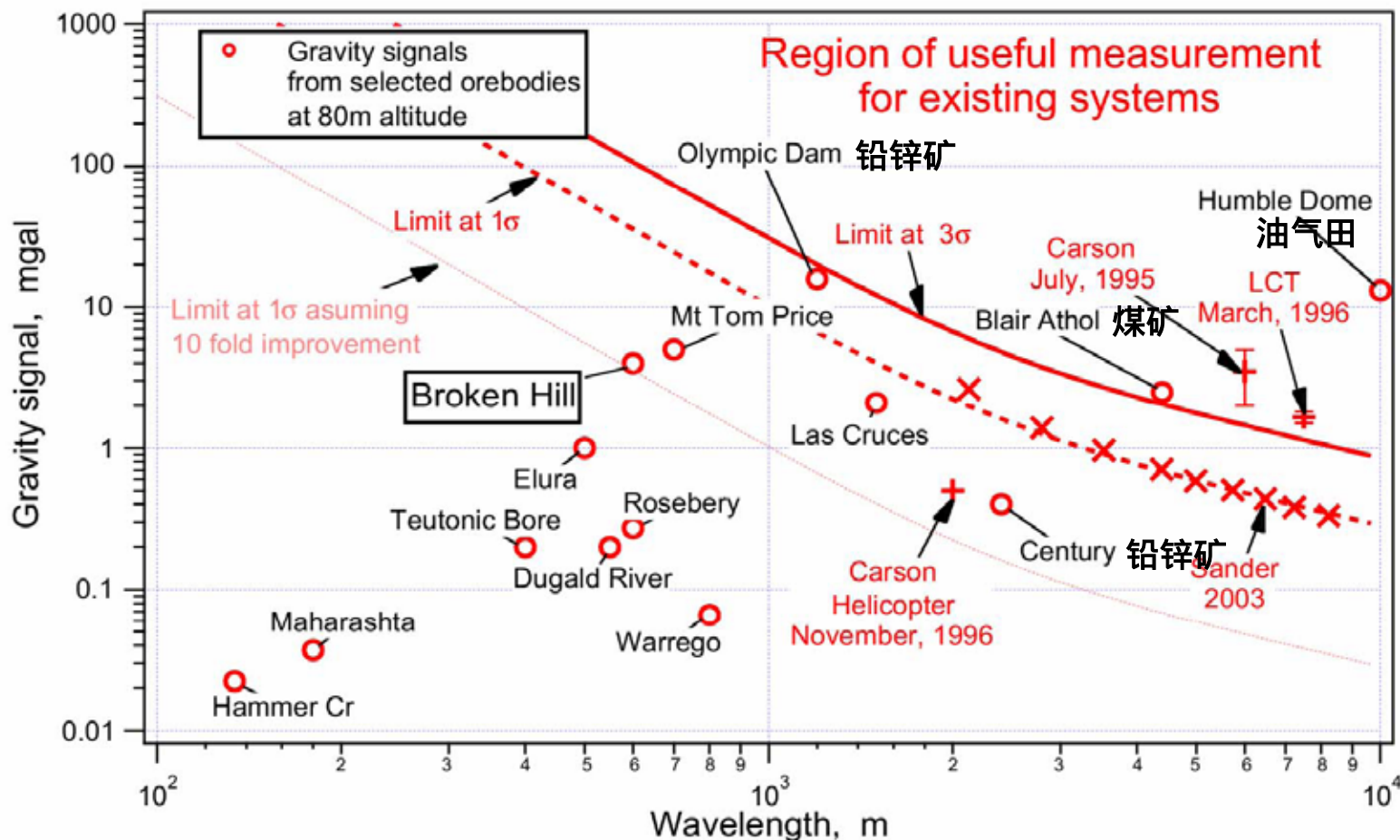


VK-1系统

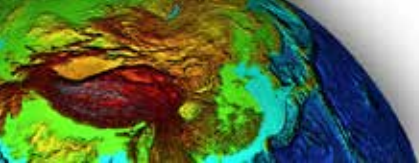
力拓公司和西澳
大学联合研制



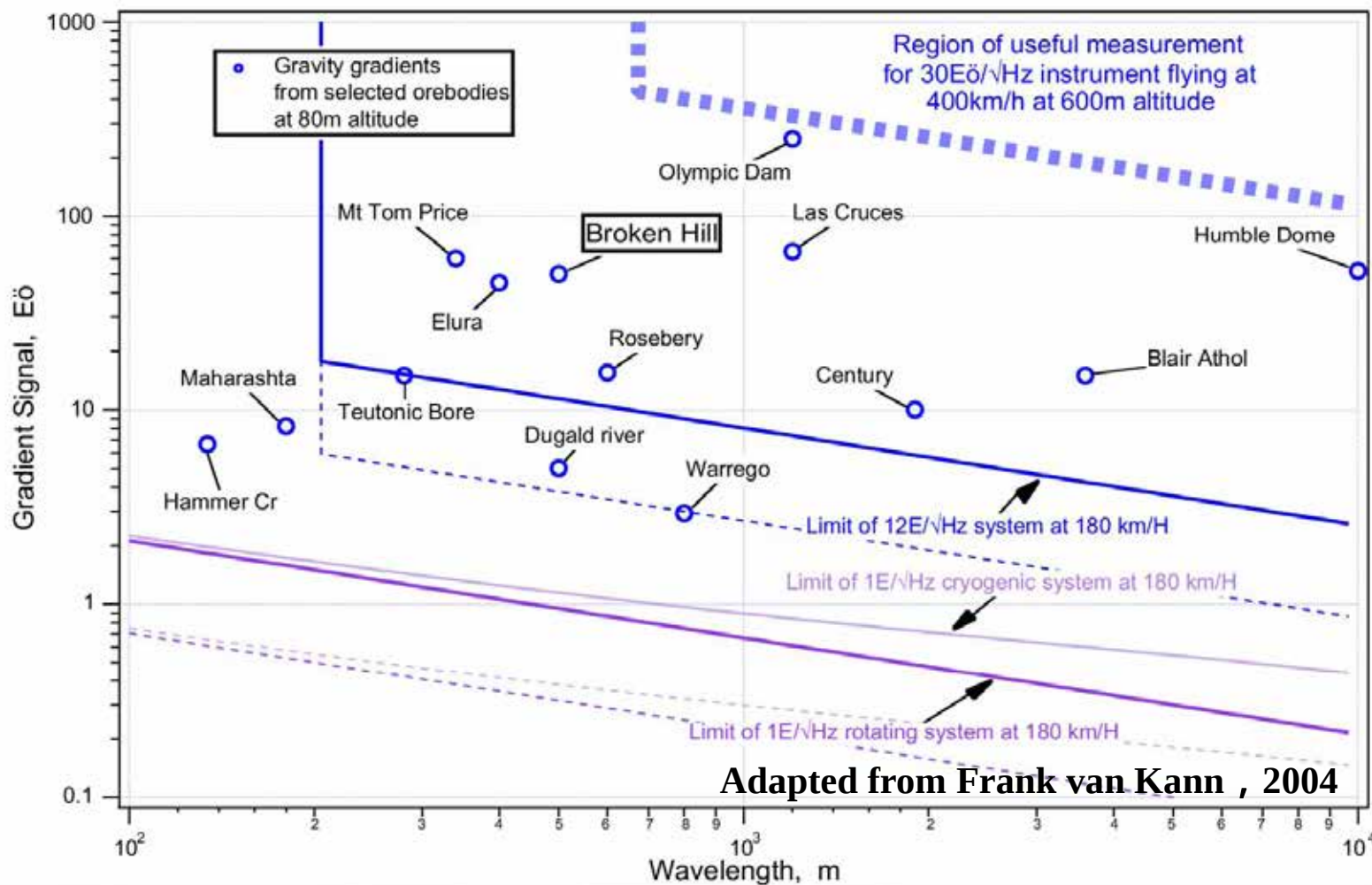
二、数据采集技术—航空重力



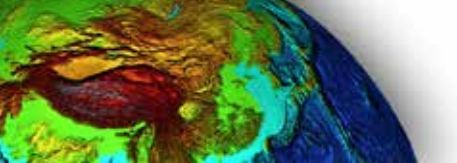
世界典型矿床（煤田和盐丘型油藏）重力异常与信号波长关系图；几个航空重力系统的噪声水平 (i.e., Carson 直升机系统 1996, Carson 1995, LCT 1996和 Sander 2003固定翼系统) 以及基于GPS的加速度测量噪声水平



二、数据采集技术—航空重力

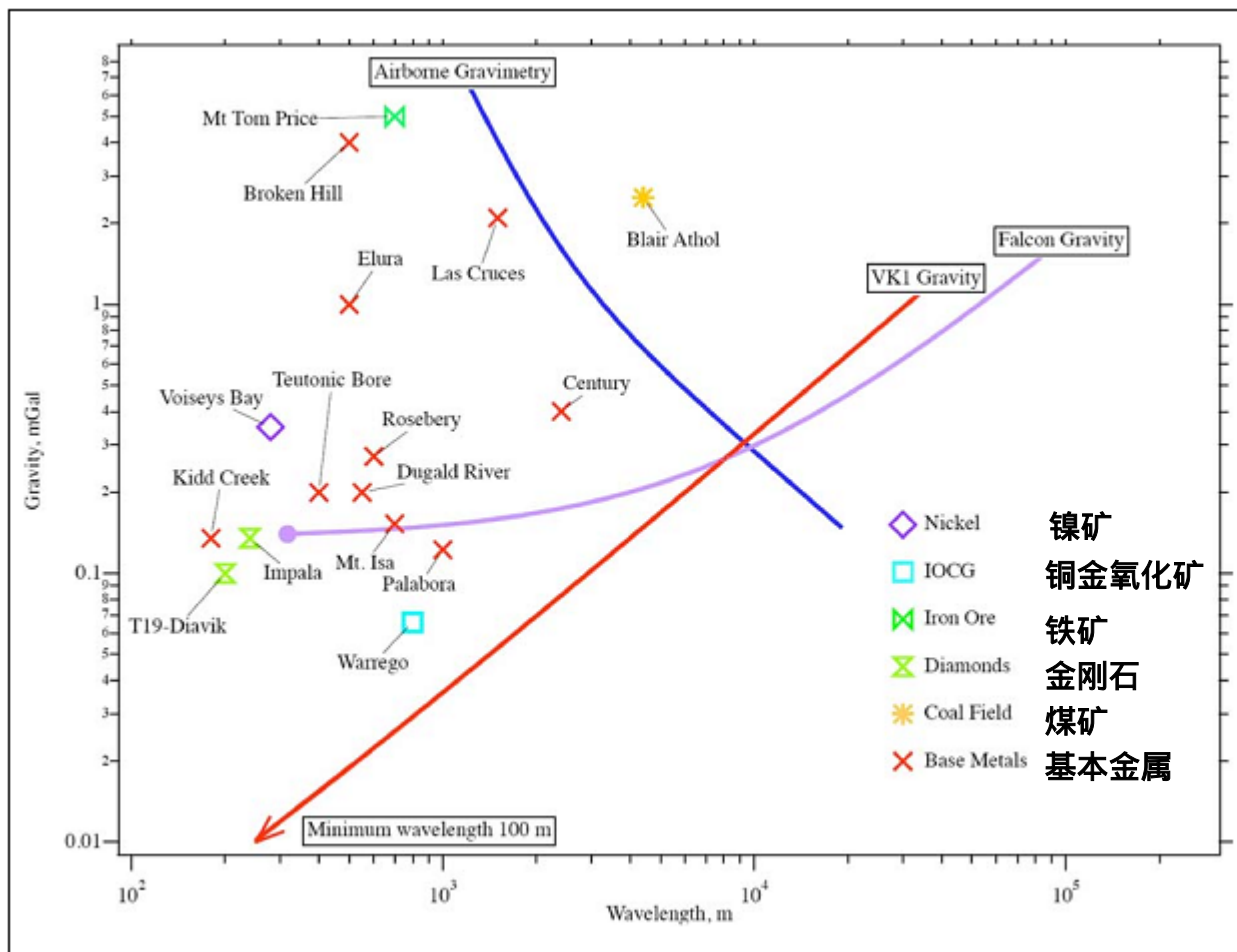


世界典型矿床的重力梯度与波长关系图。同图显示对应梯度测量系统的噪声水平



二、数据采集技术—航空重力

目前的主要系统对世界典型矿床的探测能力

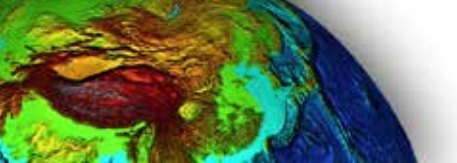


Airborne Gravimetry :
代表当前航空重力的探测能力

Falcon Gravity :
代表当前5E精度旋转加速度计航空重力梯度系统的探测能力

VK-1 Gravity :
代表下一代1E精度超导航空重力梯度系统的探测能力

Adapted from Airborne Gravity 2010

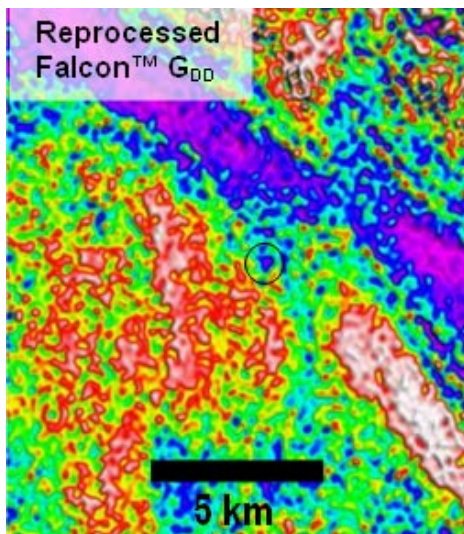


二、数据采集技术—航空重力

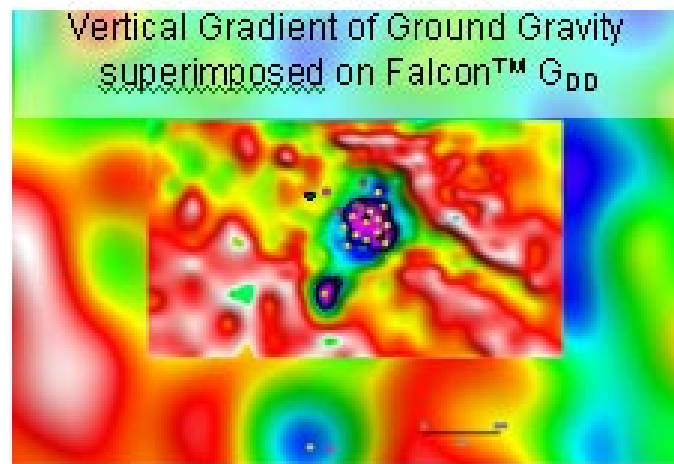
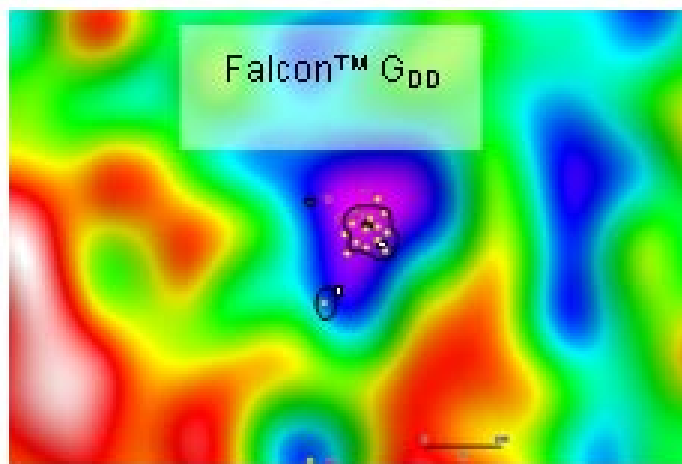


Kimberlite, Abner region, Northern Territory, Australia

找矿实例二：寻找金伯利岩脉



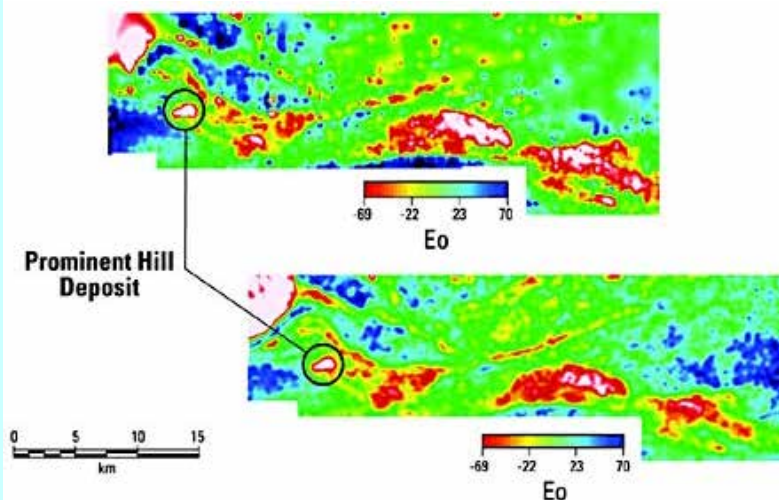
从 G_{DD} 数据中圈出了一个20E的异常，钻孔证实在地下10m发现了一个1.3公顷的主管状岩脉，旁侧发现了一个0.3公顷的次级岩脉。2005年打钻发现了一个金刚石矿。



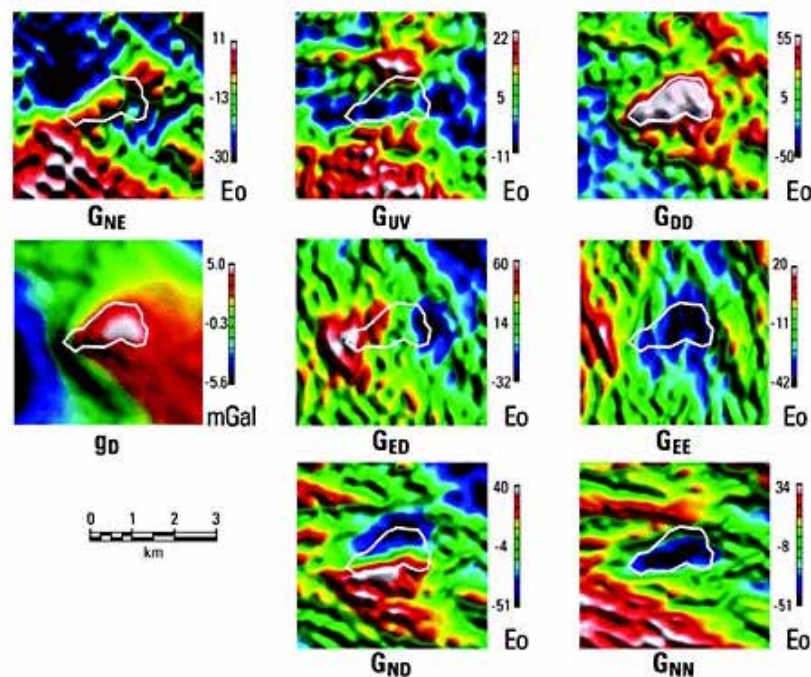
二、数据采集技术—航空重力

实例三：铁氧化物铜金型矿床勘探

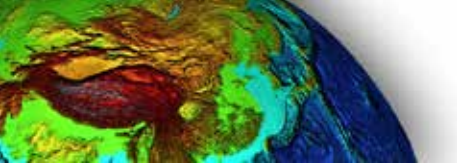
IOCG, Prominent Hill, Australia



上图是花了几年做的地面重力垂向一阶导数，下图是FALCON™ AGG系统两周测量结果



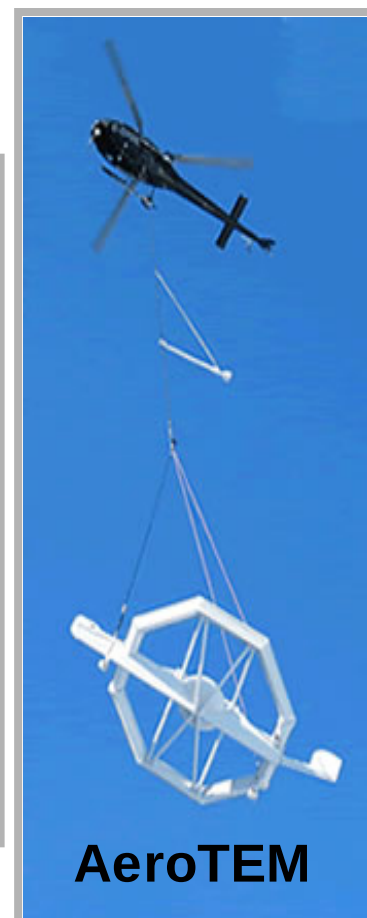
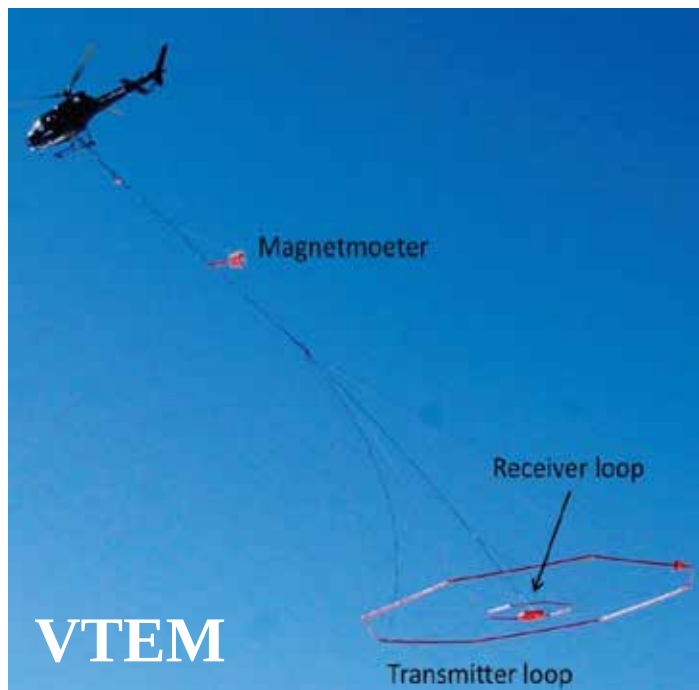
The above images demonstrate that the ability to deliver the full gravity gradient tensor is not limited to FTG systems.

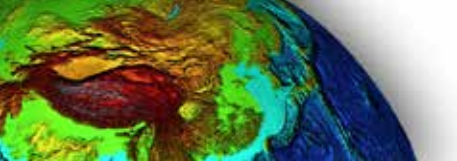


二、数据采集技术—航空电磁

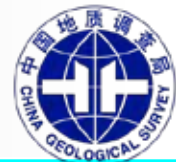


§ **航空电磁法技术**：降低发射频率、增大发射磁矩、采用直升机平台；高温SQUID磁传感器提高测量精度；全波场反演提高反演可靠性



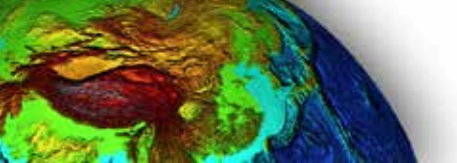


二、数据采集技术—航空电磁

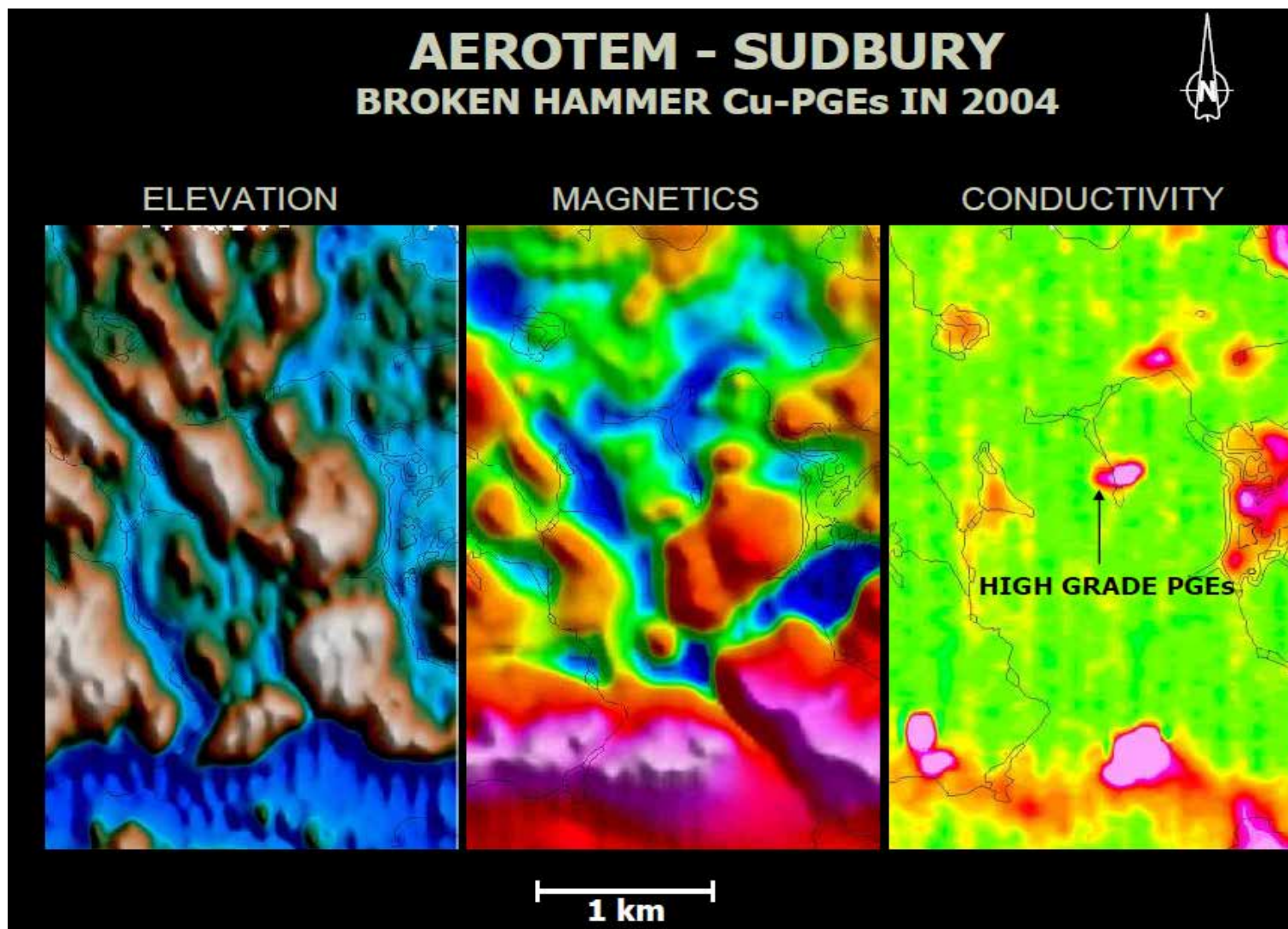


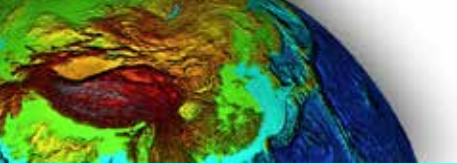
现行航空电法比较

名称	AeroTEM	VTEM	HeliGeoTEM
直径	12 m	26 m	14 m
偶极子冲量峰值	340,000	640,000	500,000
实际冲量峰值	340,000	400,000	500,000
发射同步接收	有	没有	没有
早关断时间数据	有	没有	没有
关断时间接收通道	34	26	14
发射同步接收通道	16	0	0
波形	三角波	锯齿波	半正弦波
波形稳定性	控制	??	??
接收高度	30 m	30 m	80 m
原始数据列	有	没有	特殊要求下才有
飞行摄像	有	无	有
B-场	要求配置	要求配置	要求配置
采样率（原始数据）	36,000		
连接和运行放射性测量	有	无	有
配套处理软件	有	无	有
异常解释	标配	要求配置	要求配置
困难地形测量	可以	不行	不行

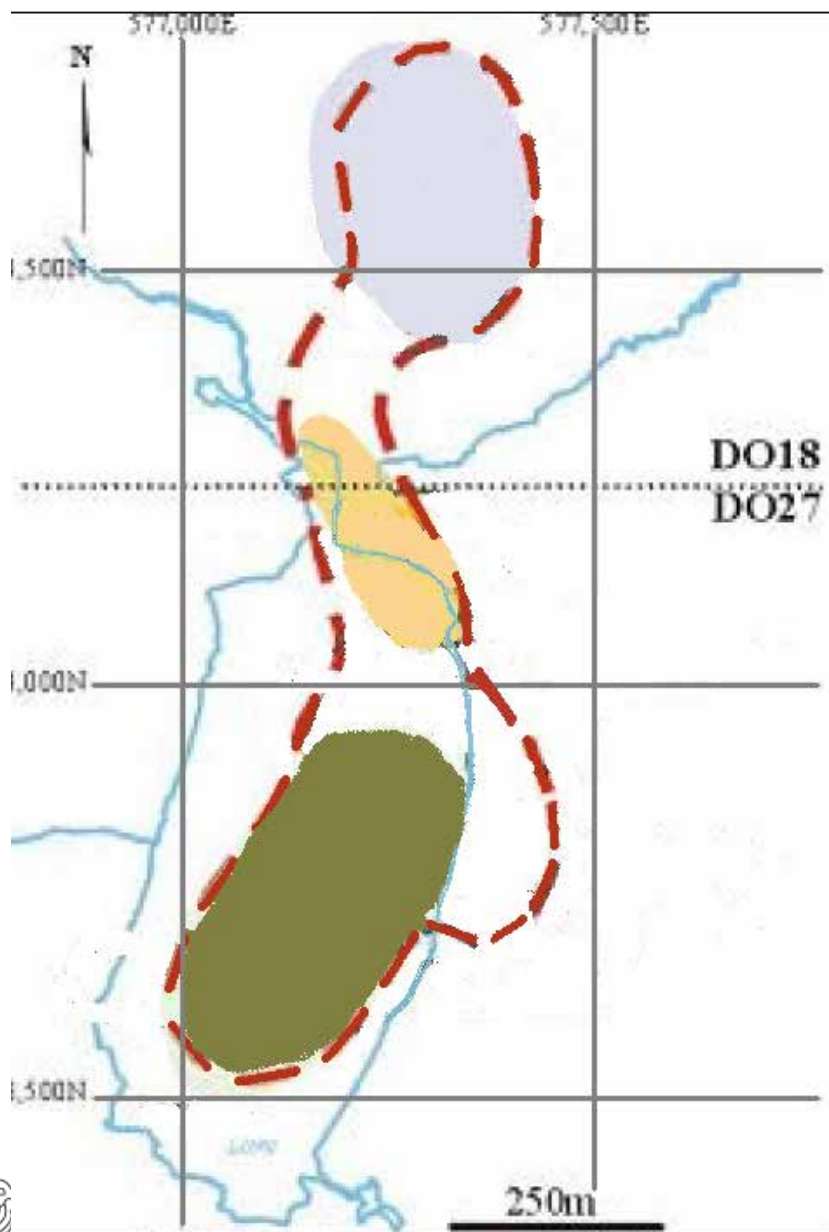


二、数据采集技术—航空电磁





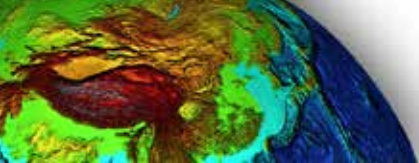
二、数据采集技术—航空电磁



TLI KWI CHO COMPLEX

- Multiple vents
- DO18 Pipe – single vent
- DO27 Pipe – two vents
- Hypabyssal Sills

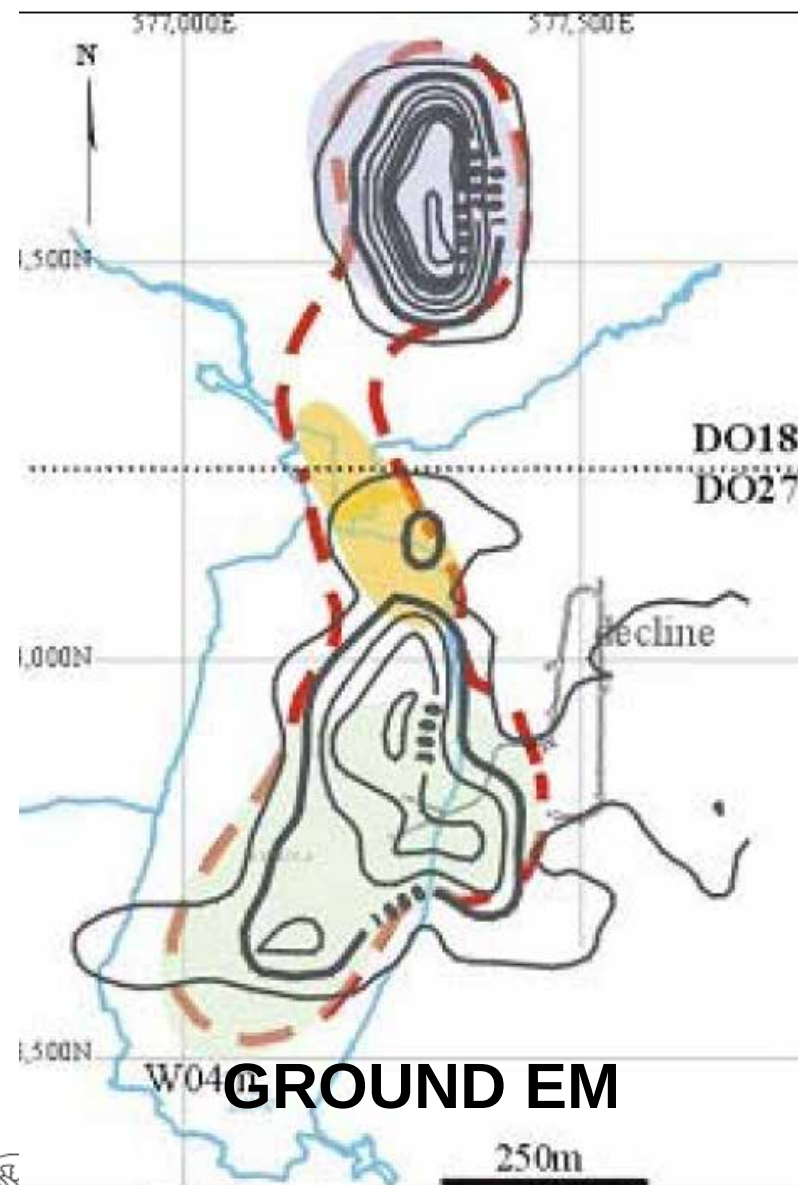
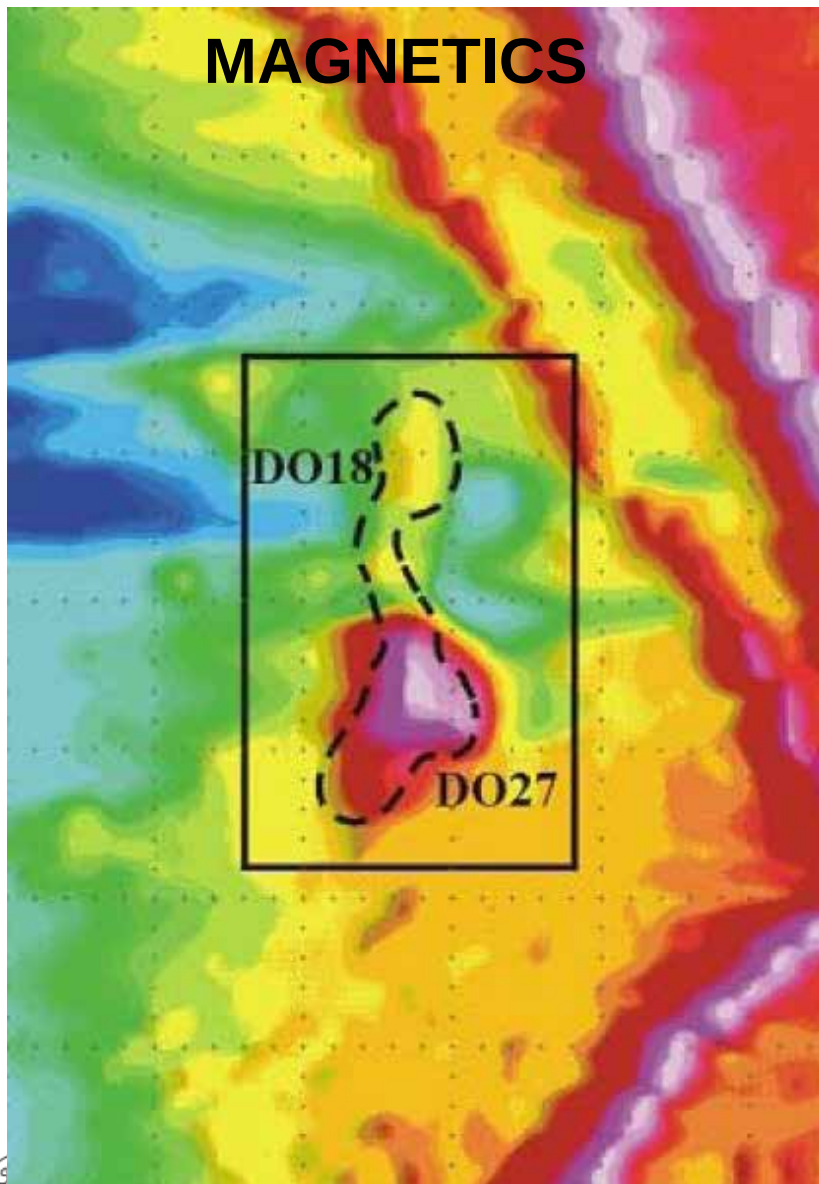


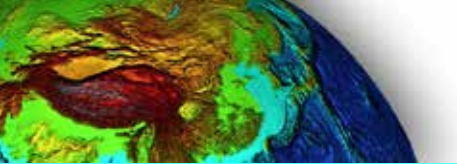


二、数据采集技术—航空电磁



MAGNETICS





二、数据采集技术—航空电磁

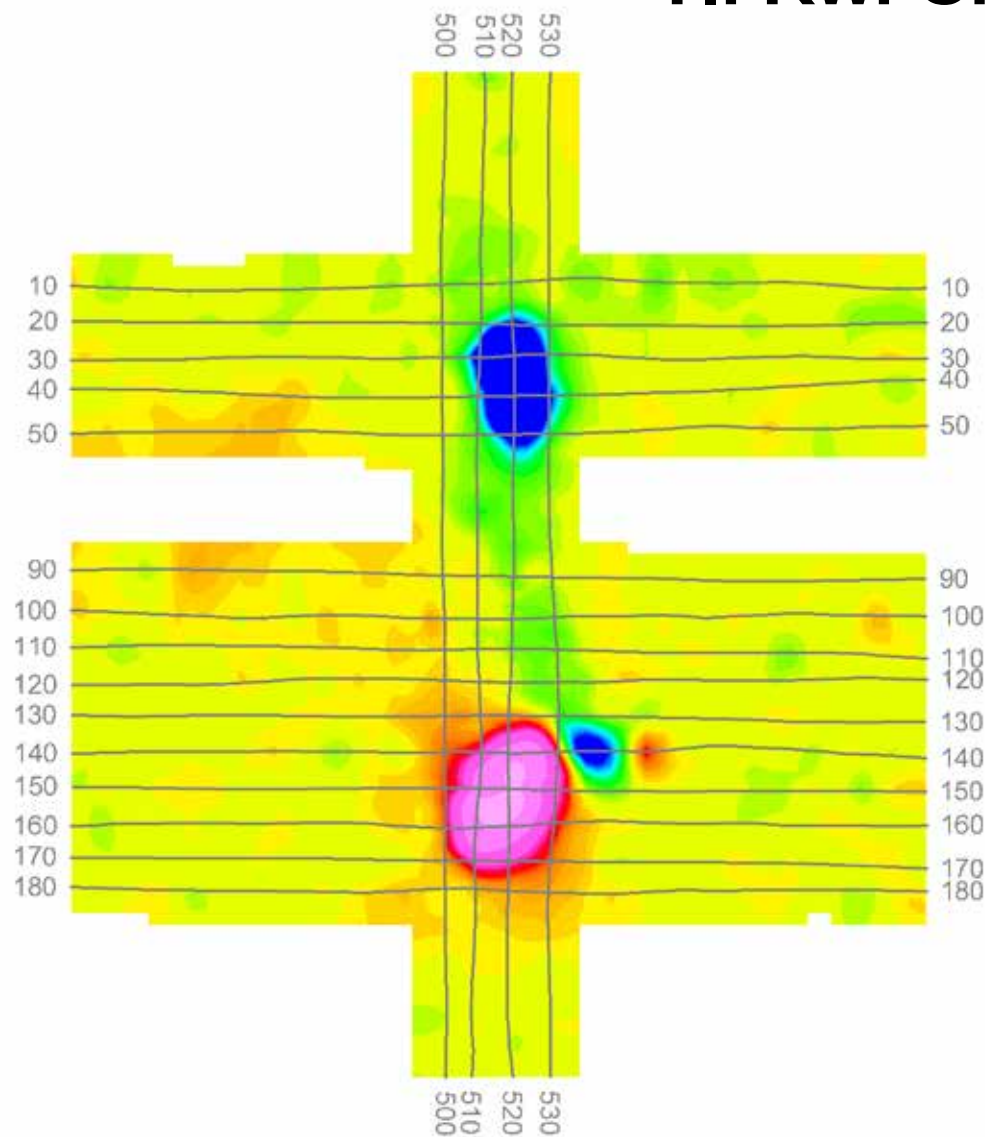


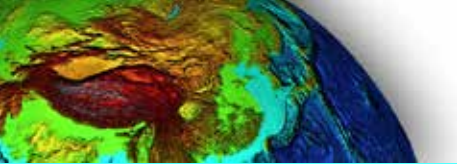
Tli Kwi Cho

AEROTEM SURVEY

Off-Time Channel 5
(~0.150ms)

Identifies 2 main
pipes and
northeastern vent
in DO27

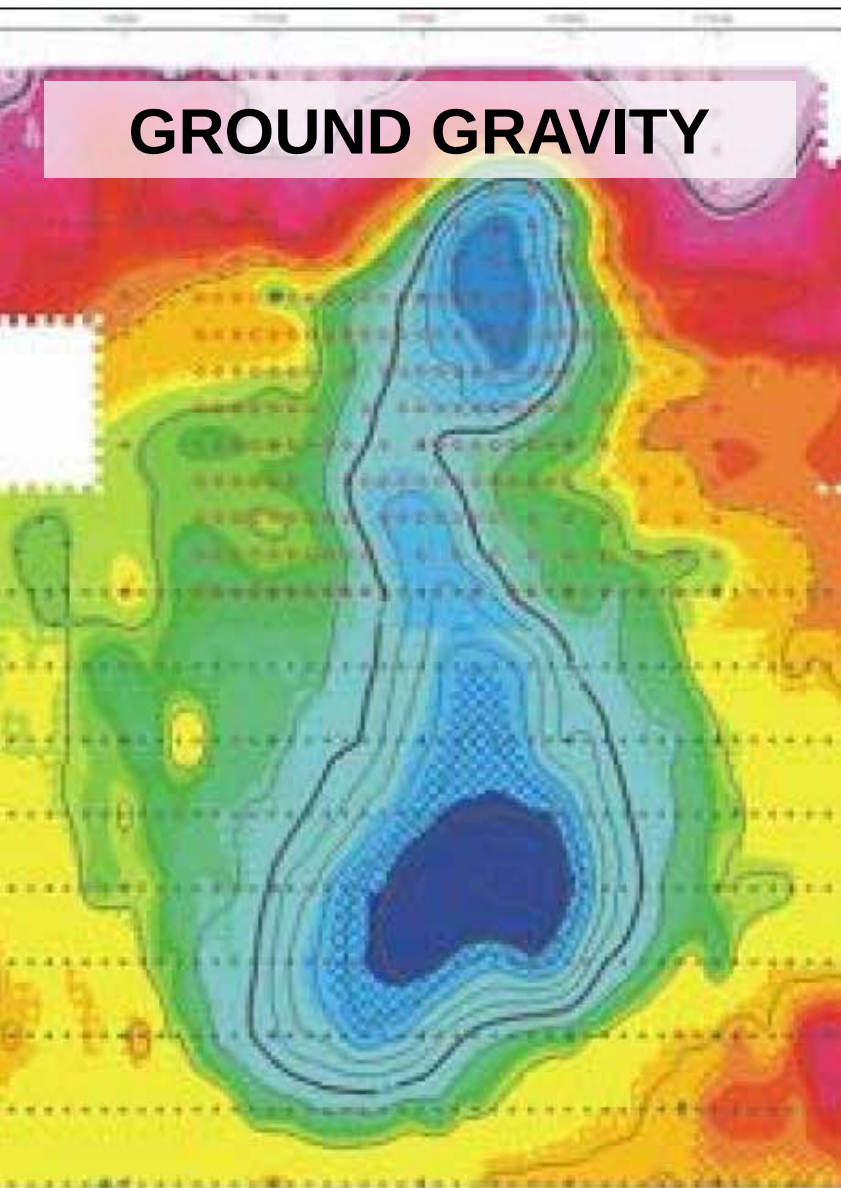




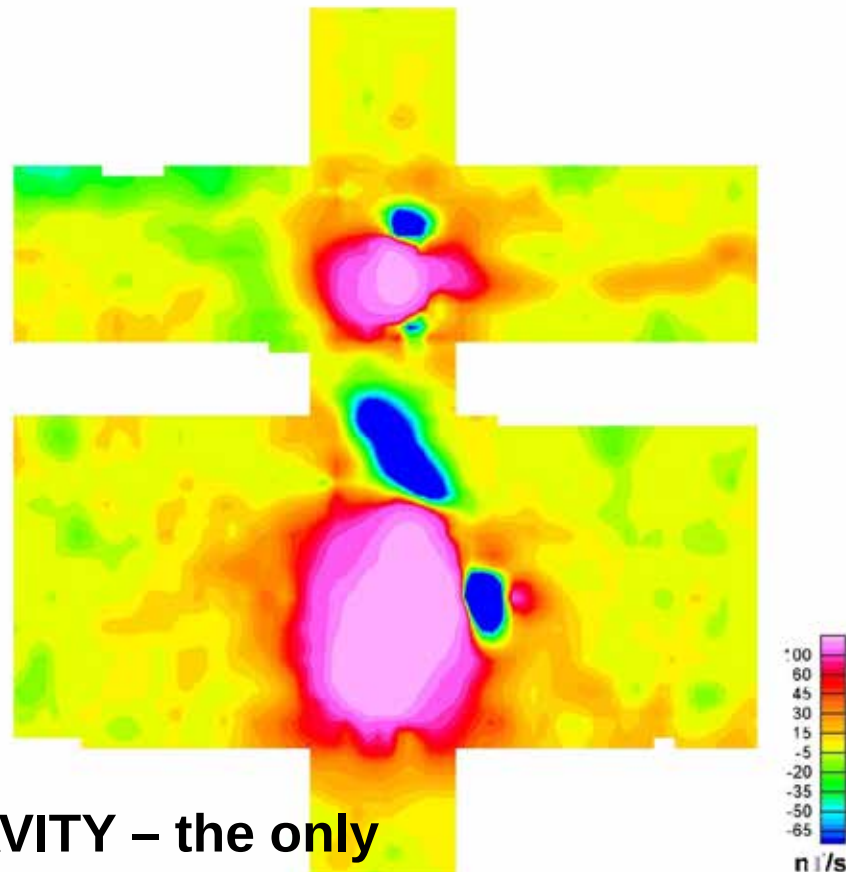
二、数据采集技术—航空电磁



GROUND GRAVITY

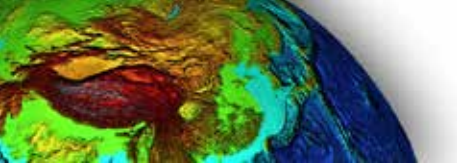


The AeroTEM system also detects the sill ...but from a helicopter



GRAVITY – the only geophysical method to identify all vents and the sill?



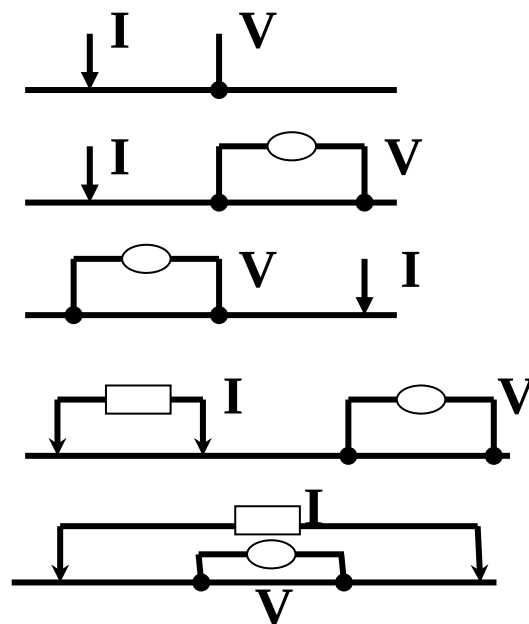


二、数据采集技术—3D DCIP



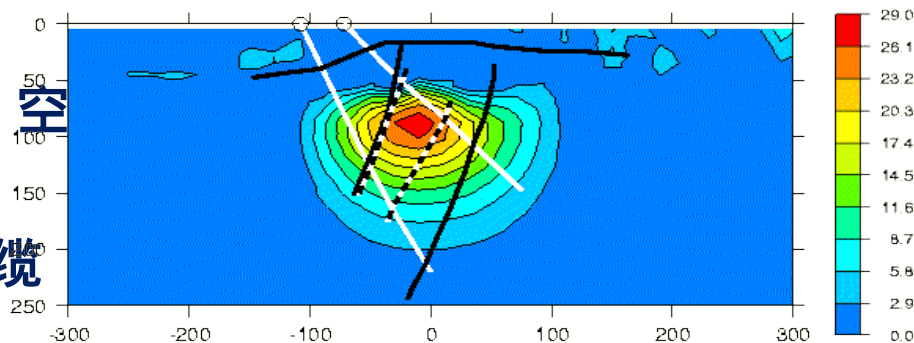
u 传统同剖面二维DC/IP观测 装置

- 单极-单极 (pole – pole)
- 单极-偶极 (pole - dipole (PDR))
- 单极-偶极 (pole - dipole (PDL))
- 偶极-偶极 (dipole – dipole)
- 中梯 (温纳, Wenner)

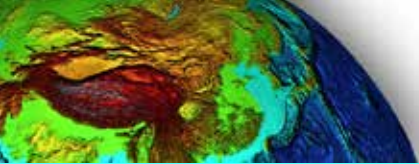


缺点：

- u 天然或人为噪声
- u AB与MN严格同剖面，空间分辨率差
- u 深度浅 ($n < 6$ ，受电缆长度限制)



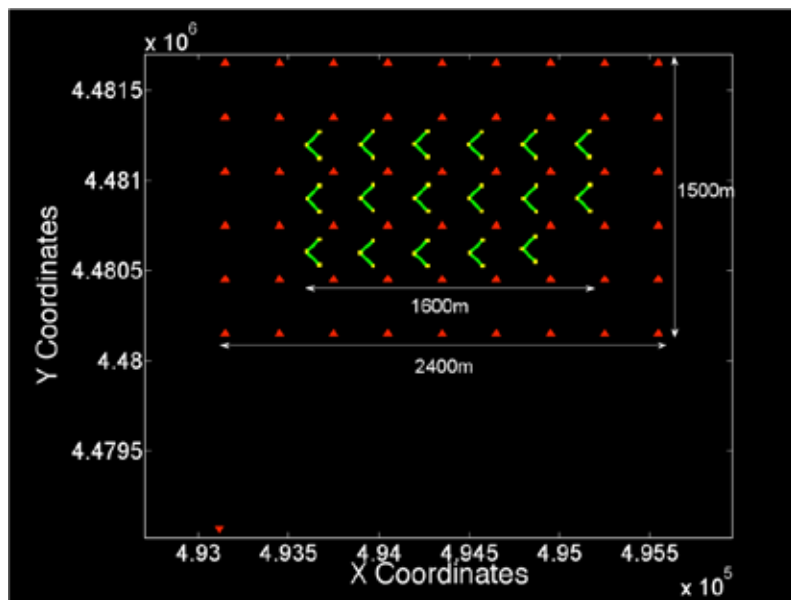
McDermott
矿床IP反演
剖面
据Li Y G等，
2012



二、数据采集技术—3D DCIP



Newmont的NEWDAS 3D IP 采集系统

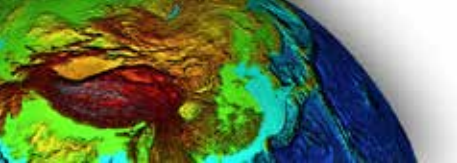


关键技术：

- U 无线采集与现代电子技术（现场监控和分析、噪声压制）
- U GPS时间同步
- U 3D DC/IP 反演模拟技术（UBC-GIF，DCIP3D）

NEWDAS系统特点：

- U 4-通道，无线或有线，高密度采样（实时数据监控和分析）
- U 分布式数据存储与回放，GPS控制所有时间，并提供观测位置信息
- U 使用远参考噪声压制，新型便携5kW 高压发射
- U 使用电流监控和反褶积策略
- U 可以使用3D规则或随机网络观测和任意位置发射



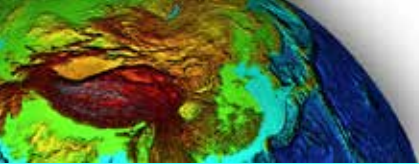
二、数据采集技术—3D DCIP



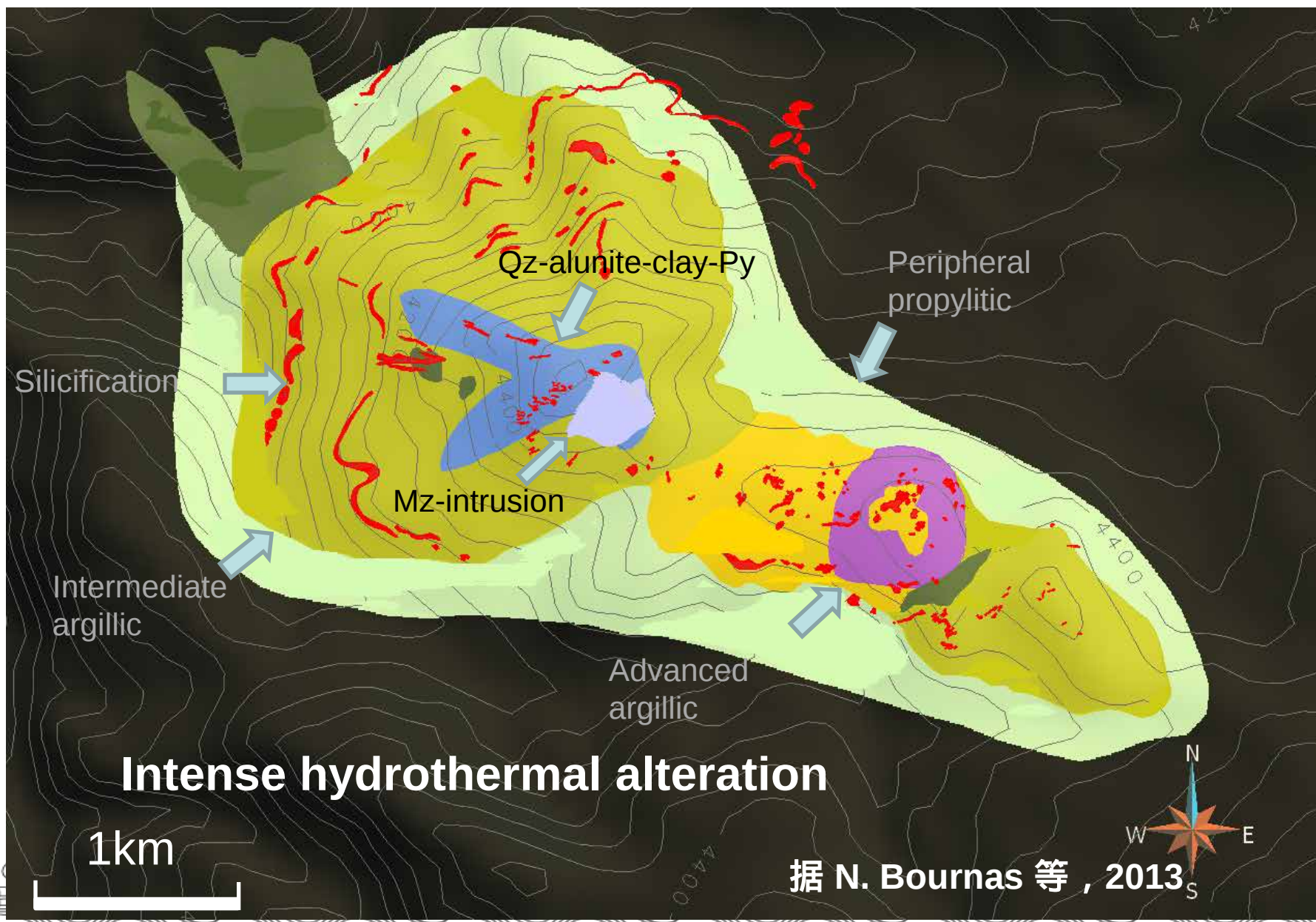
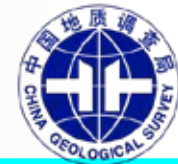
智利Santa Cecilia 斑岩铜金矿床 3D DCIP- MT探测实例

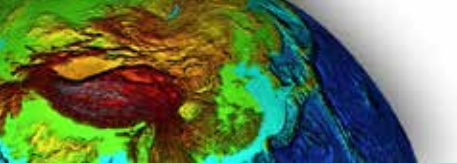
- § 位于Western Cordillera, Maricunga 成矿带
- § 强烈热液蚀变
- § 地面磁测, CSAMT 和 ORION 3D DCIP/MT





二、数据采集技术—3D DCIP





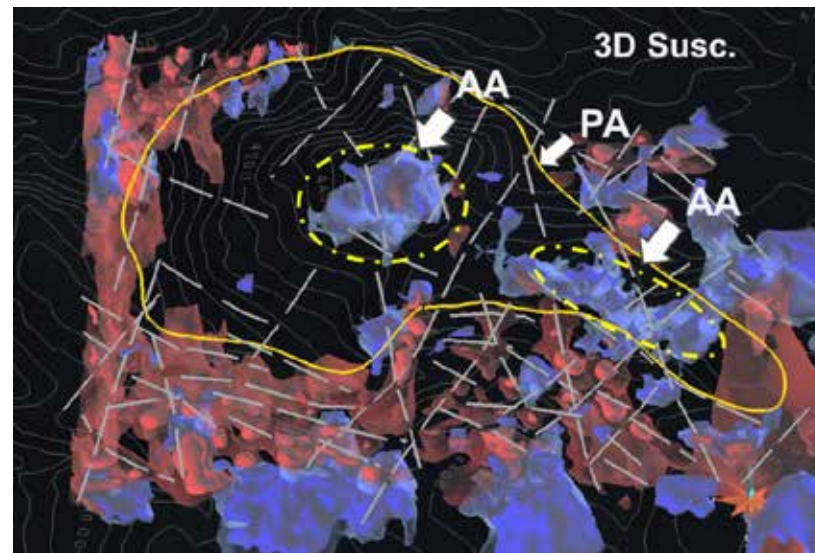
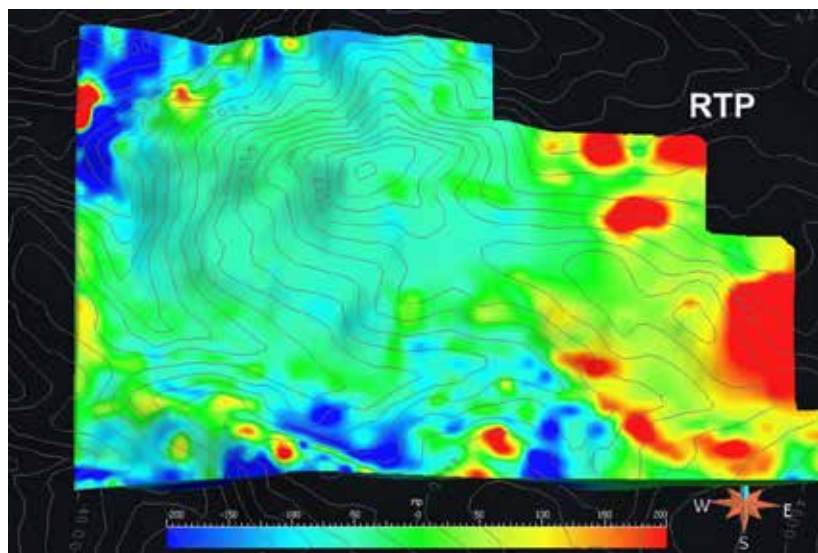
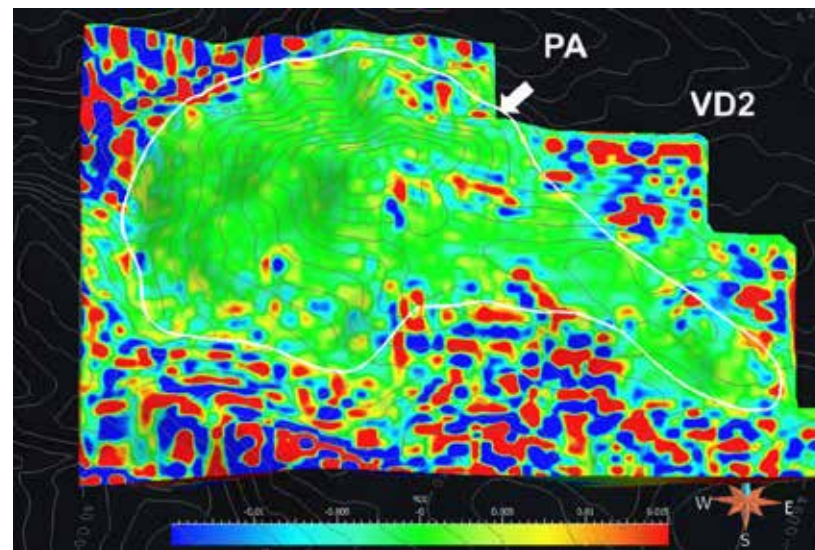
二、数据采集技术—3D DCIP



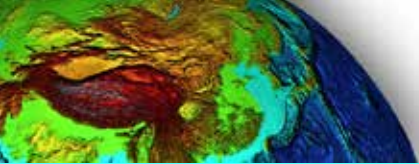
地面磁测，线距：100米，显示环状结构

垂向二阶倒数：高低梯度带大致圈出蚀变范围

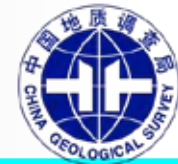
磁化率反演：蓝色区域指示因蚀变而降低的磁化率



据 N. Bournas 等，2013



二、数据采集技术—3D DCIP



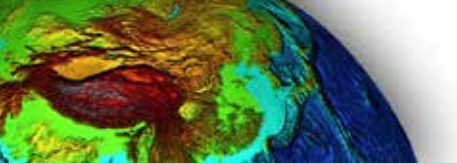
ORION 3D Survey (Fall 2012)

- 539 Current injections (Transmits)
- 300 (^ ∞) receiver dipoles (150m)
- 50 DAUs (loggers)

Objective: 3D imaging of mineralization and alteration

据 N. Bournas 等 , 2013



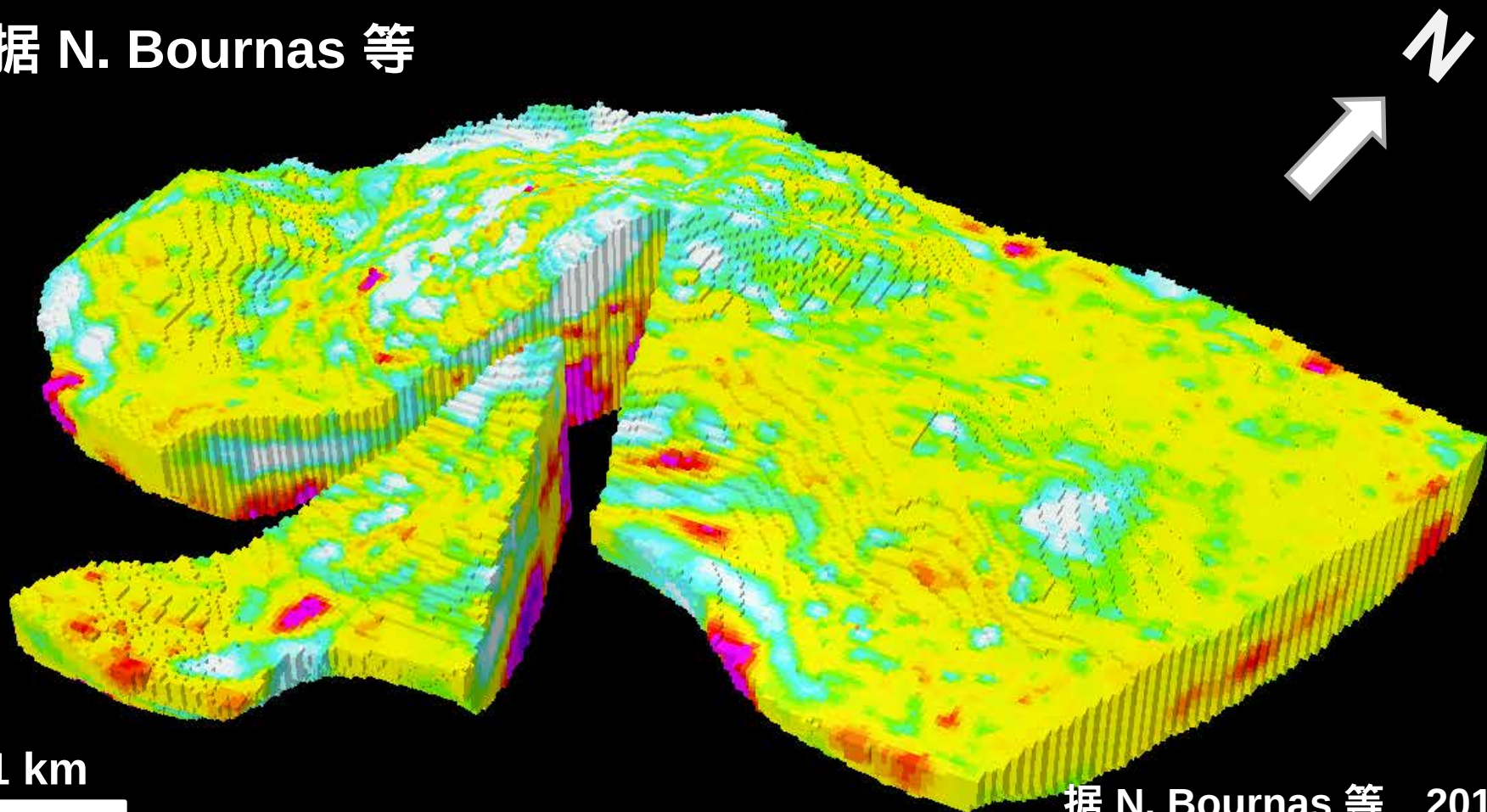


二、数据采集技术—3D DCIP

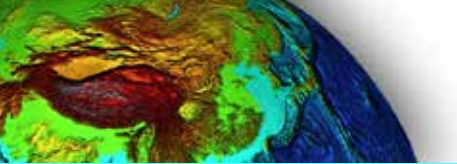


3D 电阻率模型

据 N. Bournas 等



据 N. Bournas 等, 2013

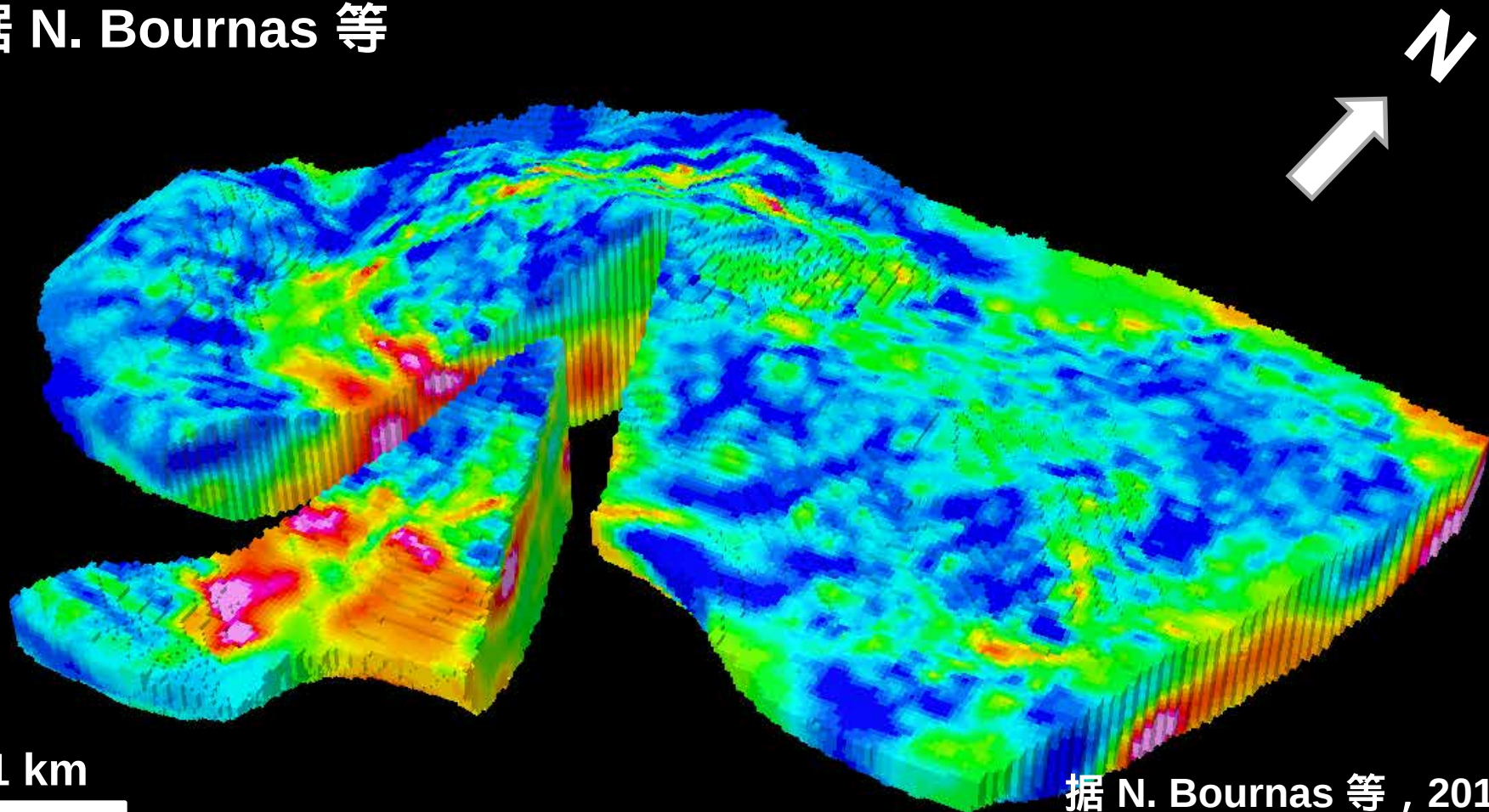


二、数据采集技术—3D DCIP



3D 激发极化模型

据 N. Bournas 等



二、数据采集技术—3D DCIP



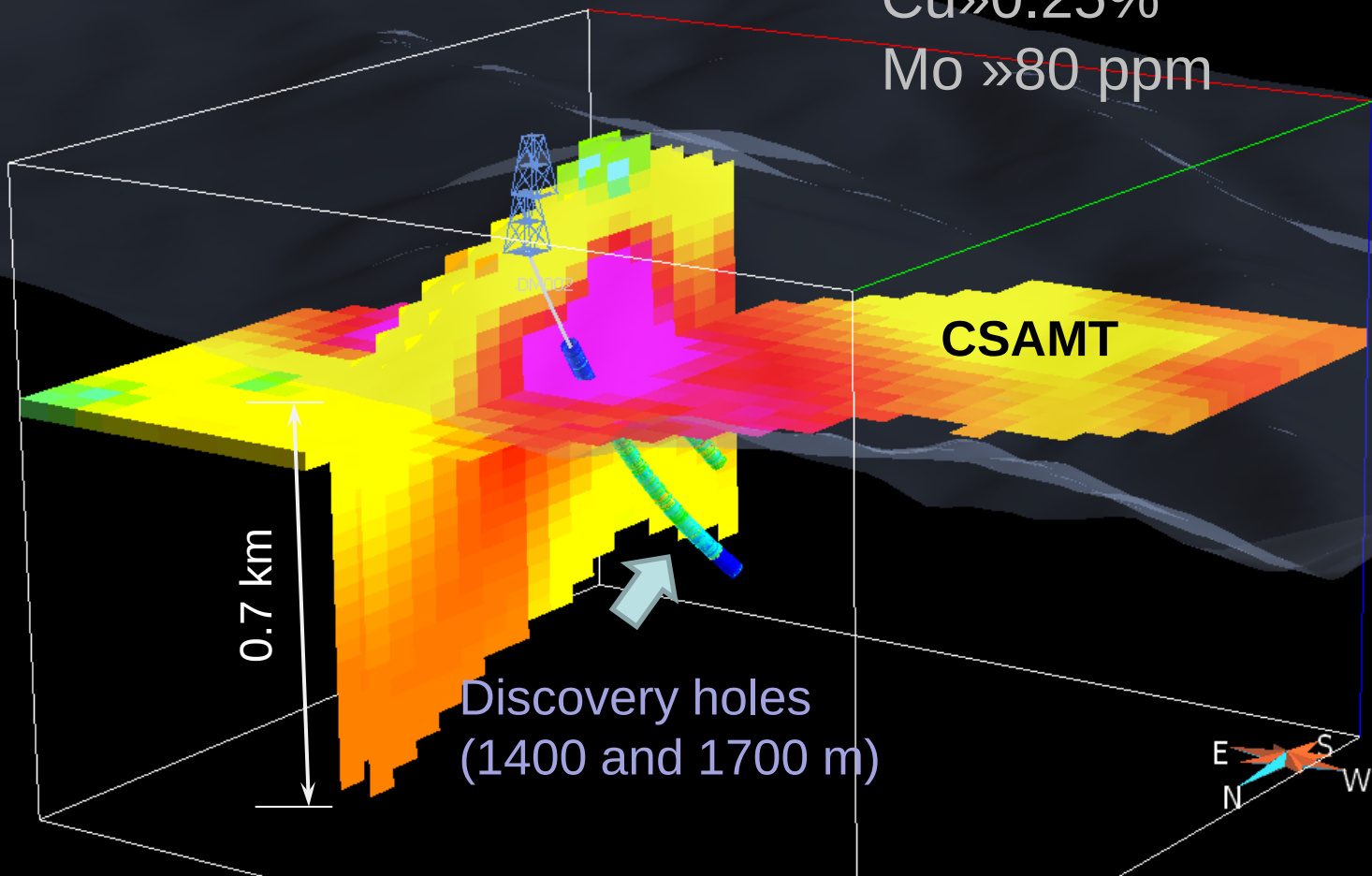
据 N. Bournas 等, 2013

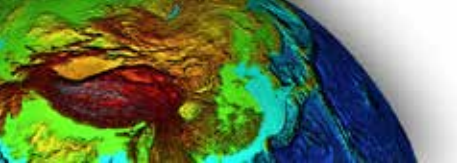
Mineralization over
1000m

Au $\gg 0.2$ g/t

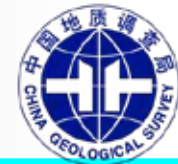
Cu $\gg 0.25\%$

Mo $\gg 80$ ppm

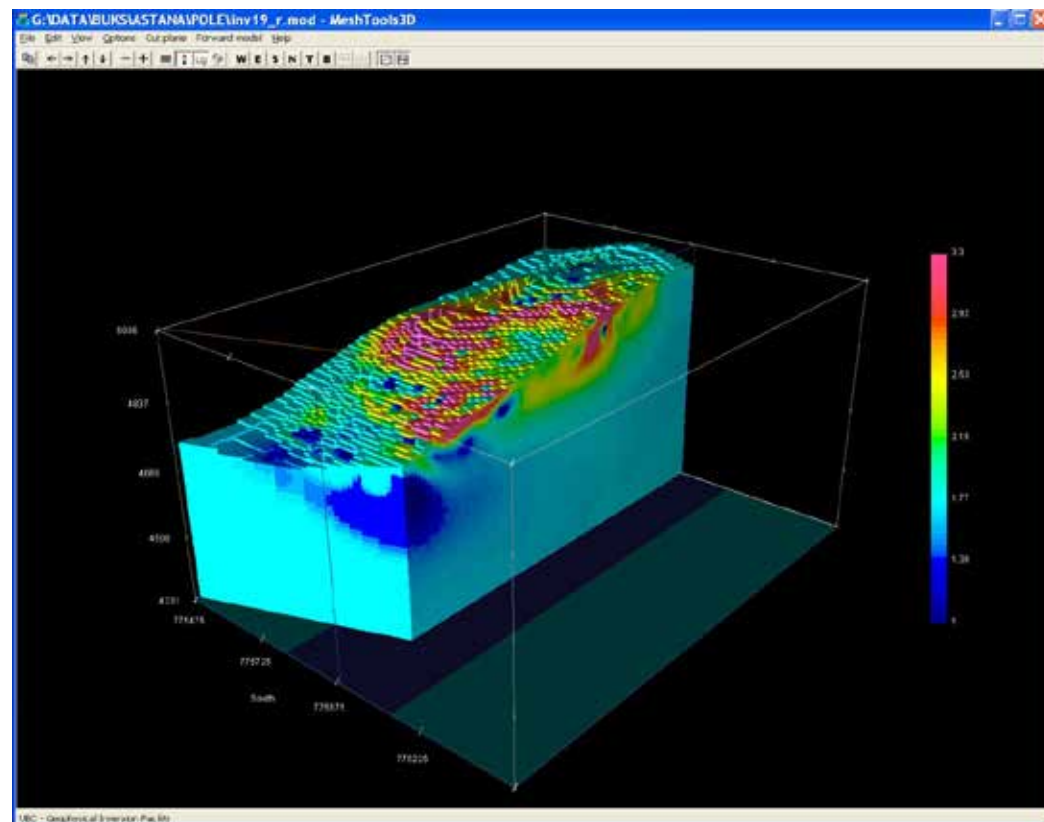
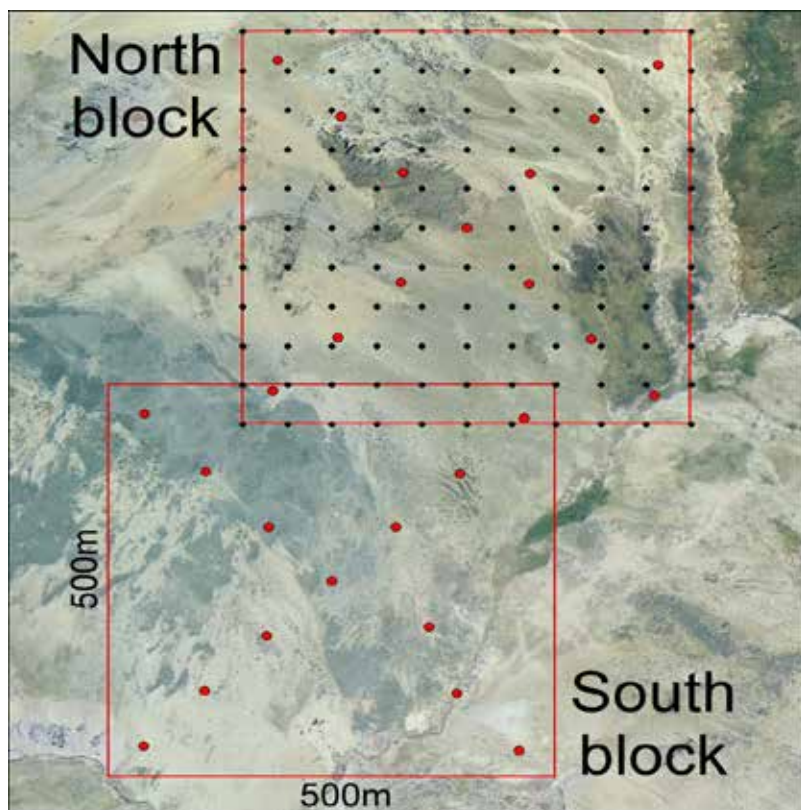




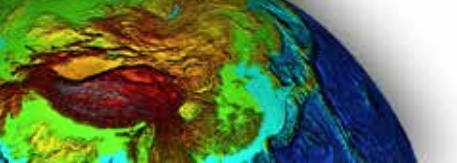
二、数据采集技术—3D DCIP



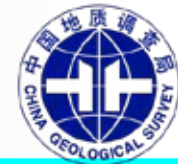
Astana 3-D IP 测量



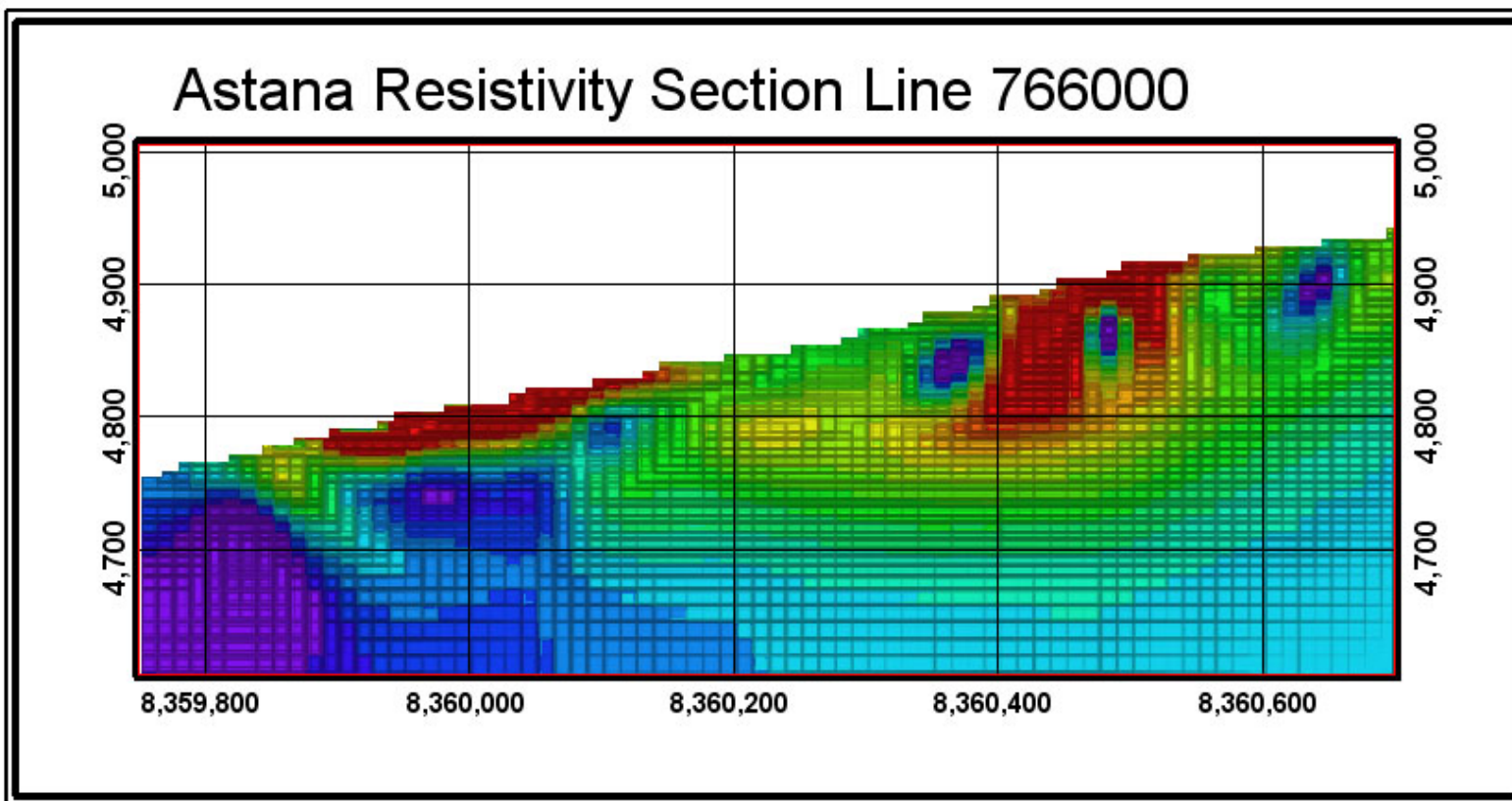
据 Li Y G 等, 2013



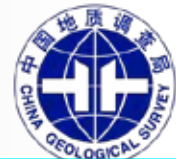
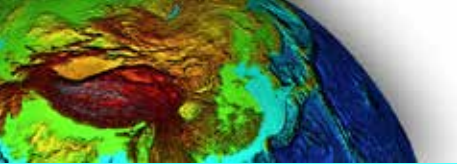
二、数据采集技术—3D DCIP



Astana DCIP 3D 结果

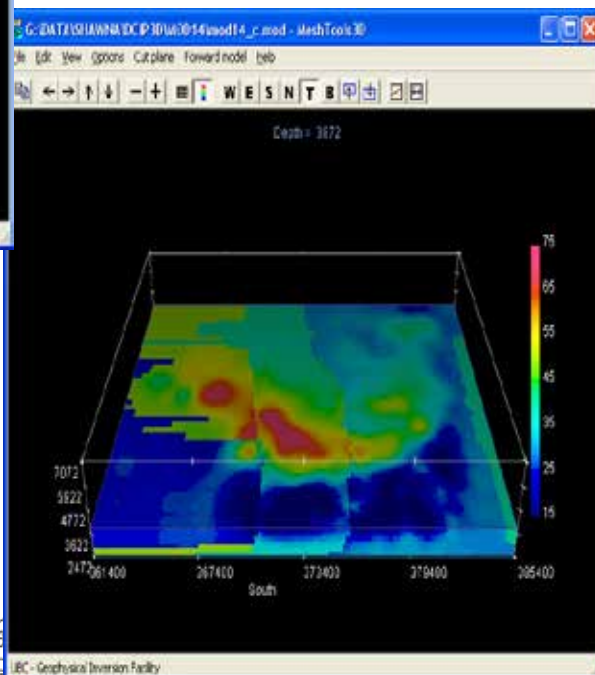
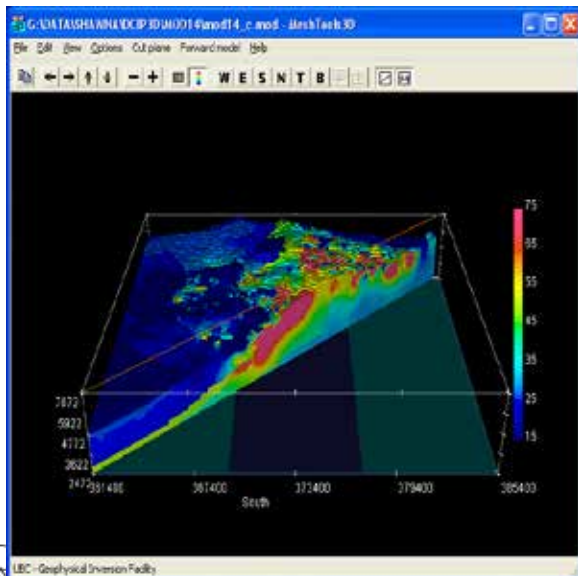
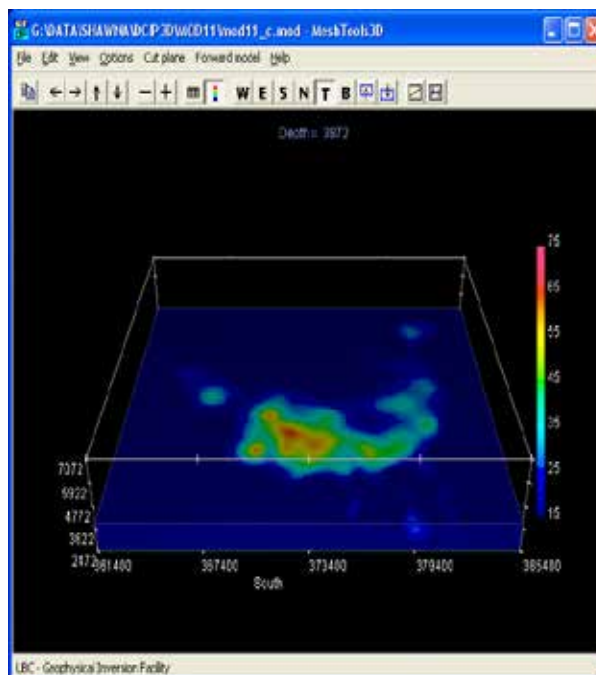
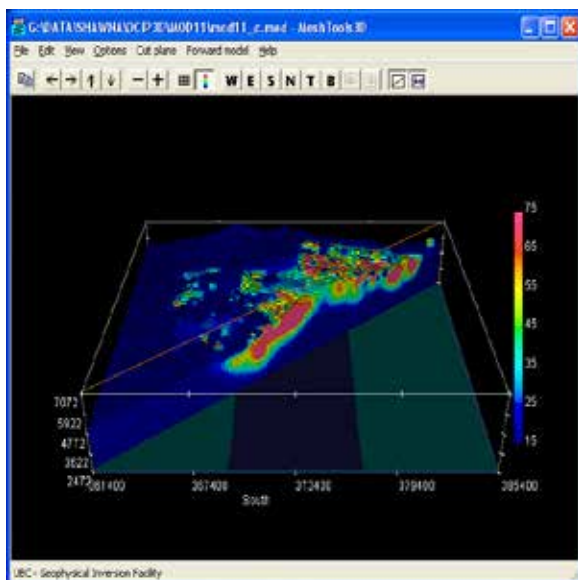


据 Li Y G 等, 2013

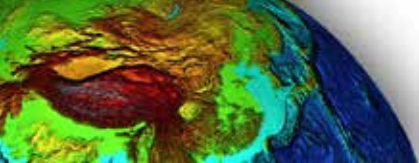


二、数据采集技术—3D DCIP

DCIP 3D 反演模拟结果

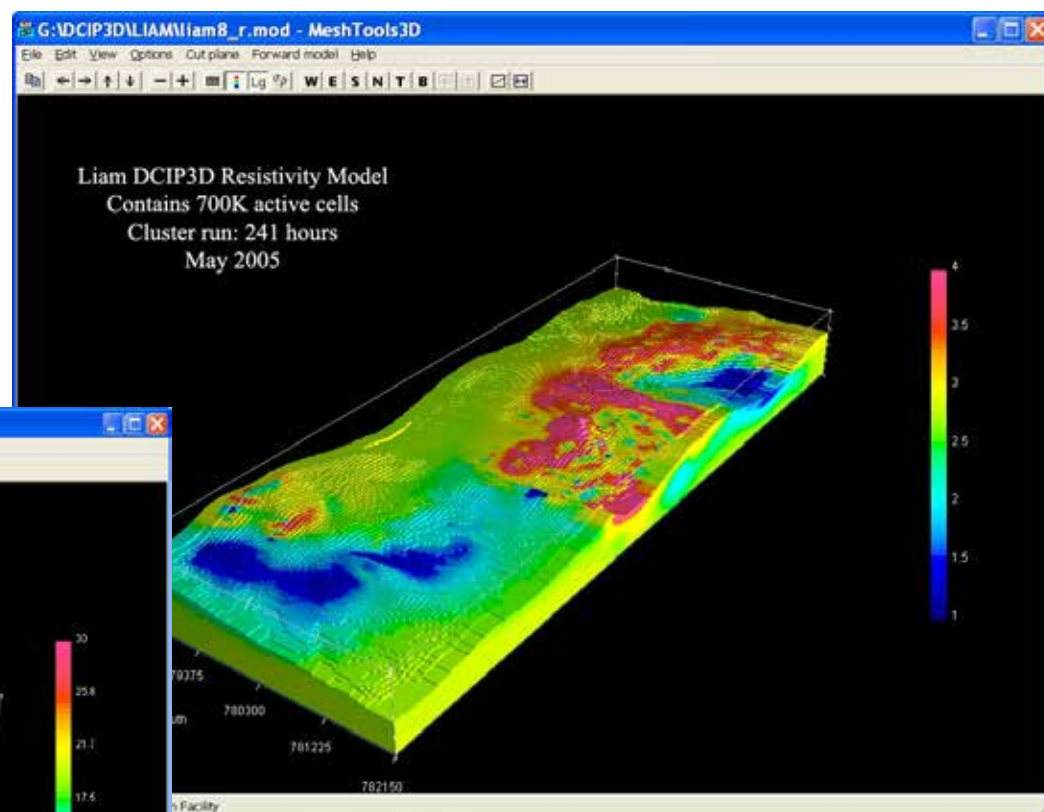
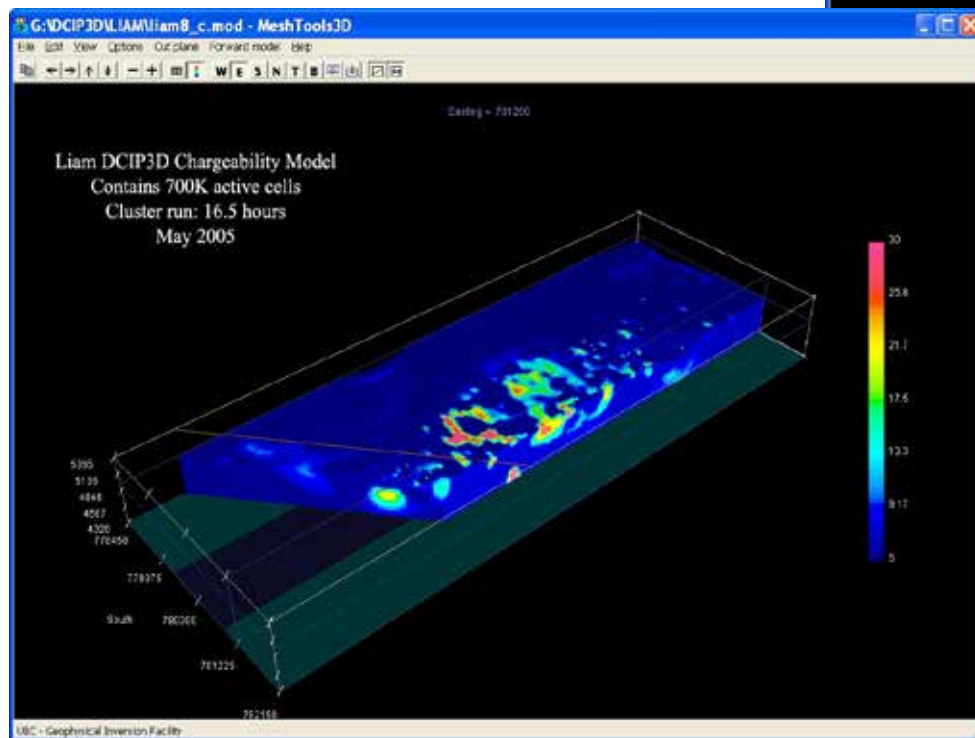


据 Li Y G 等, 2013



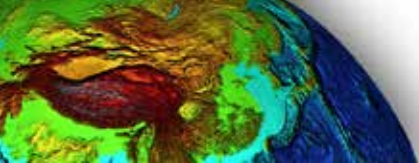
二、数据采集技术—3D DCIP

DCIP 3D 极化率模型



DCIP 3D 电阻率模型

据 Li Y G 等 , 2013



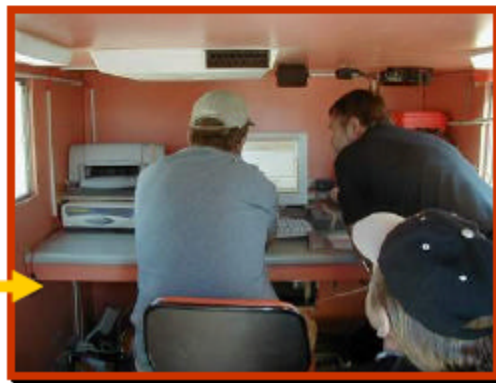
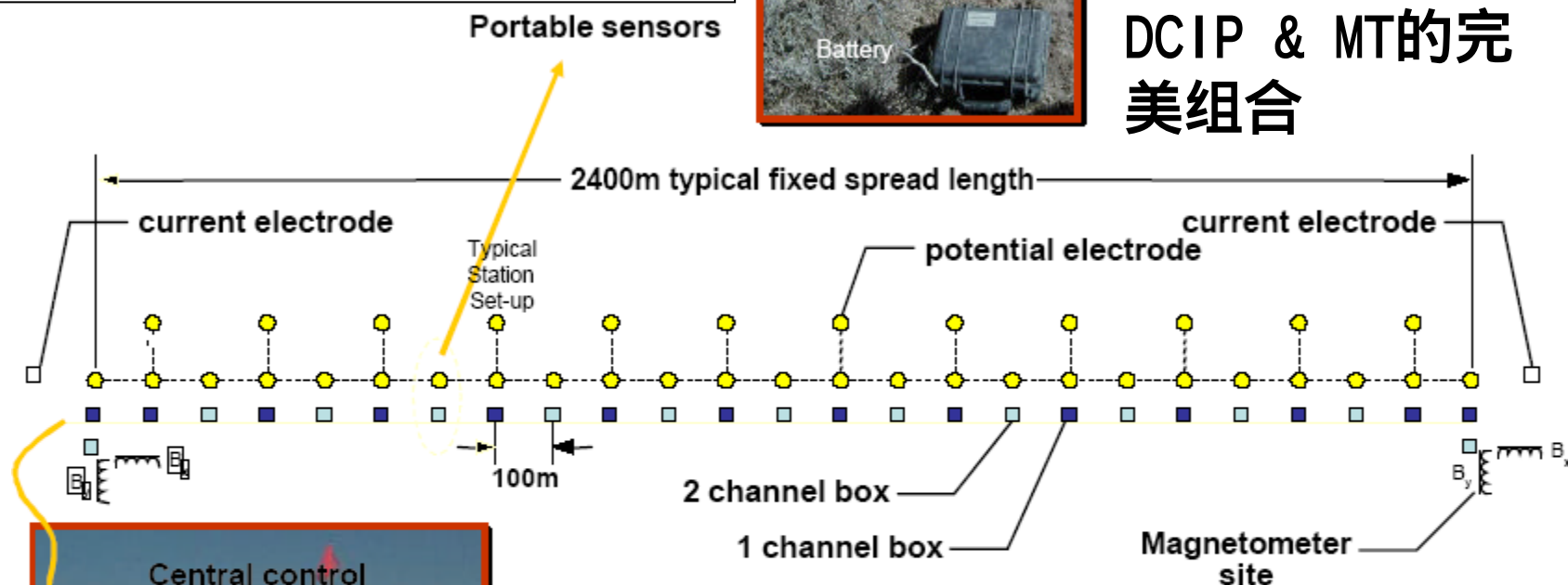
二、数据采集技术—3D DCIP+MT



加拿大Quantec公司Titan分布式
电磁系统：3DIP+MT

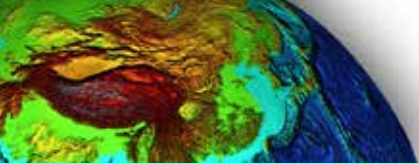


DCIP & MT的完美组合



Line Length - 2400 m
24 E_x 100m dipoles
12 E_y 100m dipoles
2 current stations
2 B_x/B_y

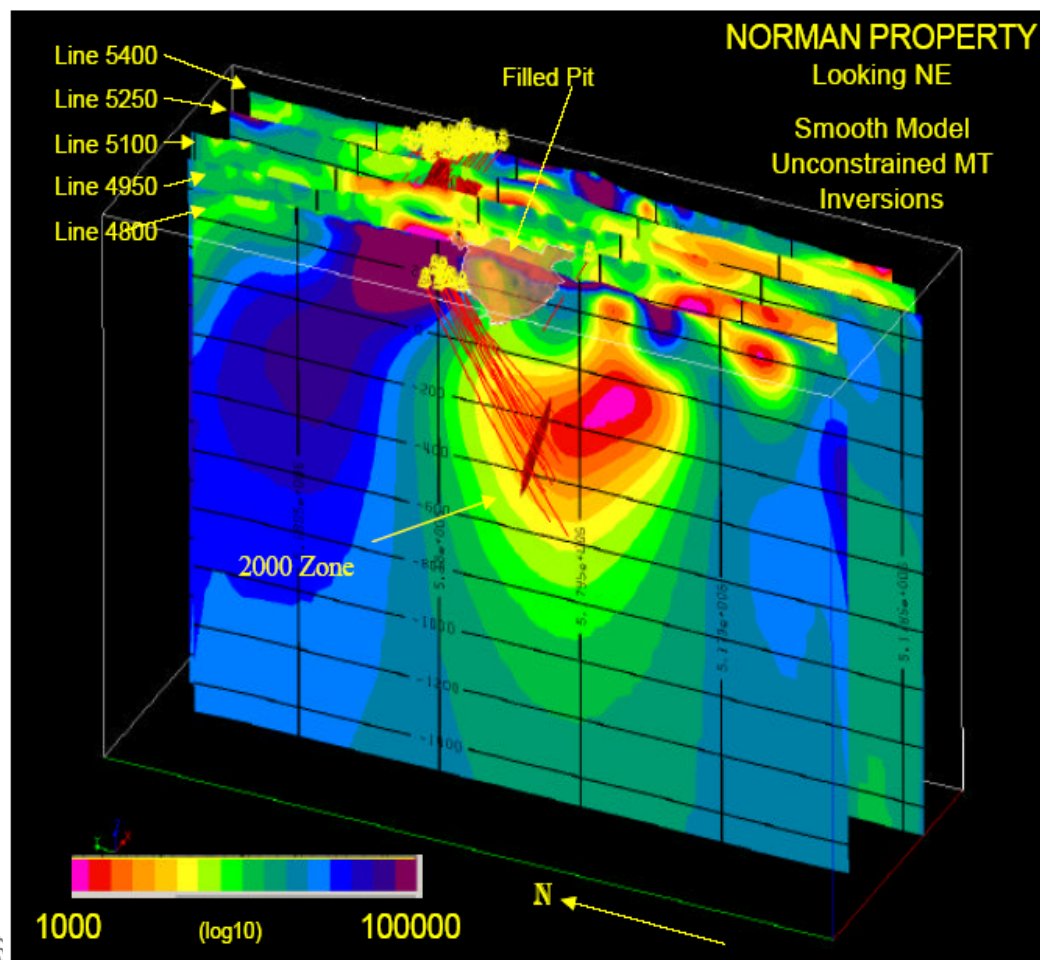
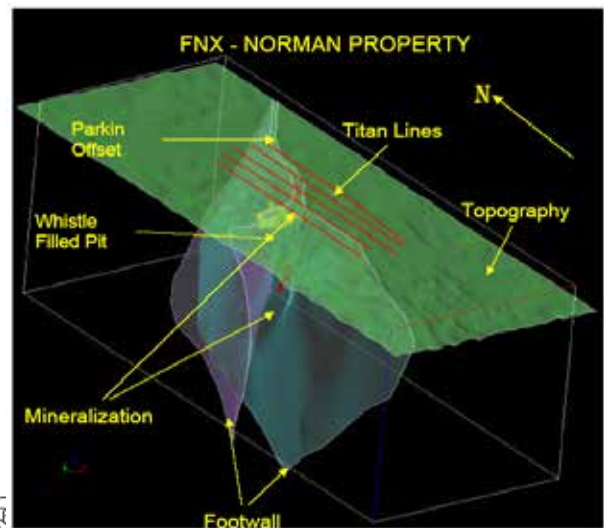
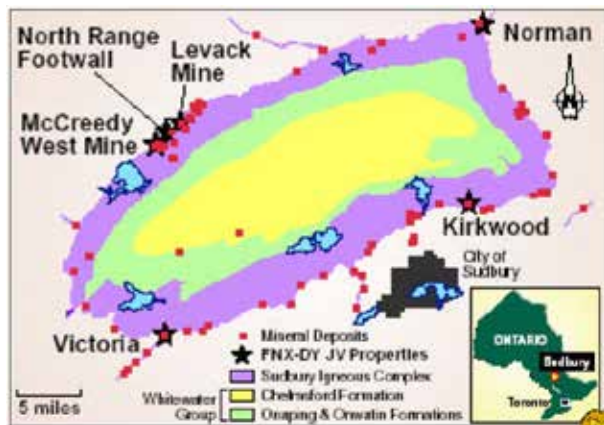


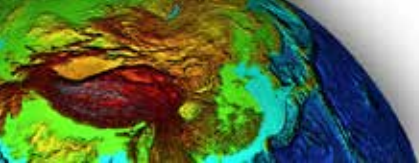


二、数据采集技术—3D DCIP+MT



Titan24在萨德贝里Norman矿区试验结果，验证该技术有能力发现1000 - 2000米深的矿层（Norman2000矿层）





提 纲

一、引言—两个模型

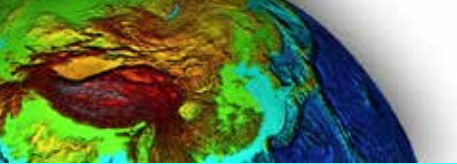
二、硬件技术与装备

- 1、航空重力梯度与电磁技术
- 2、分布式张量电法及电磁技术

三、处理解释技术

- 1、三维反演技术
- 2、岩性填图与地质填图
- 3、其它解释方法

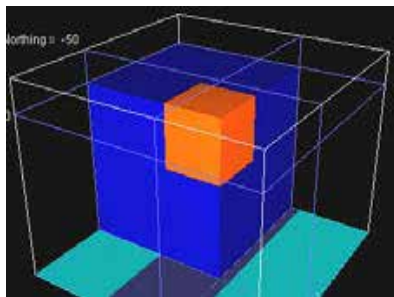




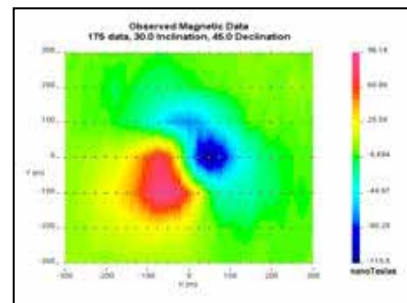
三、处理解释技术—反演技术

地球物理数据的正、反演

正问题： 给定磁化率的分布 $k_j \ j = 1, M$; 计算位场值 $b_i \ i=1, N$

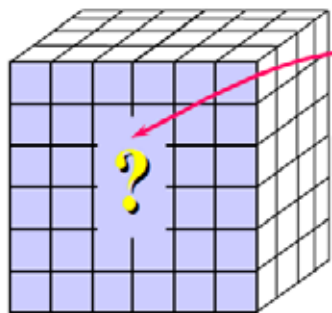


正演计算



$$b_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} \kappa_j$$

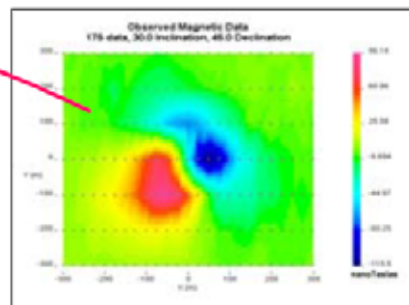
反问题： 给定观测值 $b_i \ i=1, N$; 寻求磁化率的分布 $k_j \ j = 1, M$



$\kappa_j \ j = 1, M$

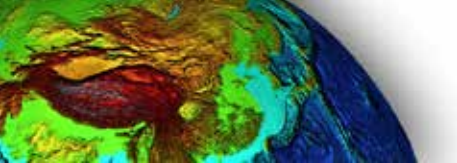
Invert

反演计算



$b_i \ i=1, N$

$$b_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} \kappa_j$$



三、处理解释技术—反演技术



反演过程的2个核心部分：

(1) 数据拟合 (Data misfit)：拟合多大程度为最佳？

Ø 定义拟合方程

$$\psi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i - d_i^p}{\varepsilon_i} \right)^2$$

d_i : i'th observed datum
 d_i^p : i'th predicted datum
 ε_i : standard deviation of i'th datum

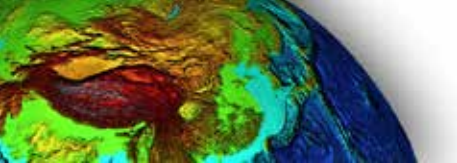
Ø 由于数据中总是有误差，如果精确拟合观测数据，保证是错误的

Ø 最佳的拟合精度介于0和最大值N之间

(2) 模型范数：什么样的模型是最好的？

Ø 需要有一个度量，从众多模型中选出符合地质的模型。希望模型符合地质特征，可解释且包含先验信息

Ø 定义模型范数最小时，获得简单模型



三、处理解释技术—反演技术



定义模型目标函数为：
$$\phi_m(m) = \alpha_s \int [\rho(\vec{r})]^2 dv + \alpha_x \int \left[\frac{\partial \rho(\vec{r})}{\partial x} \right]^2 dv + \dots$$

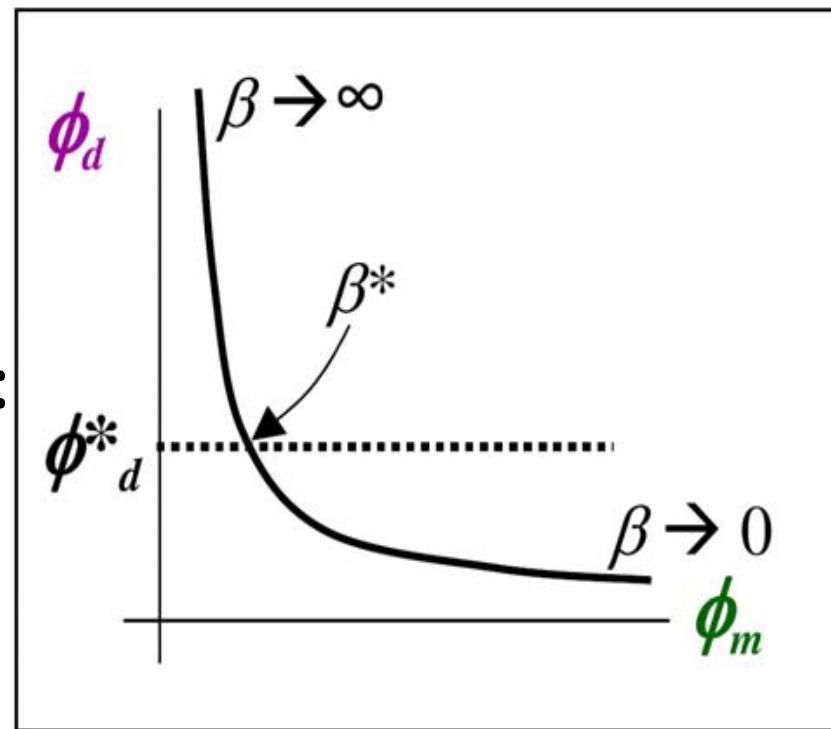
↑ Energy/Amplitude ↑ Complexity

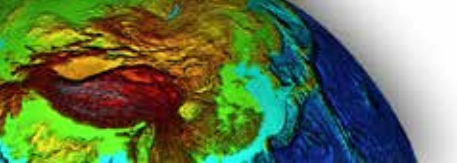
当模型范数最小、拟合误差在可接受范围时的解，认为是反问题的解。

整个反演问题实际上是一个最优化问题，定义总体目标函数：

$$\phi(m) = \phi_d(m) + \beta \phi_m(m)$$

β 为折中系数，即Tikhonov 参数





三、处理解释技术—反演技术



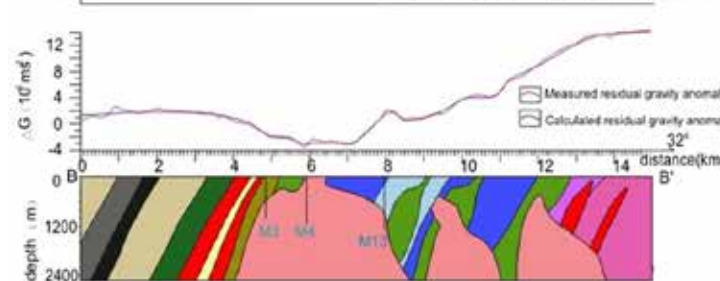
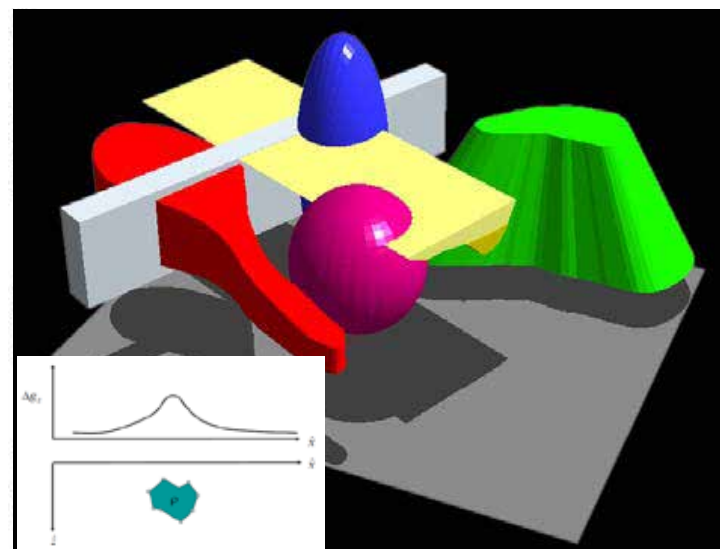
反演方法及区别:

u 离散反演 (Discrete body, or Parametric inversion):

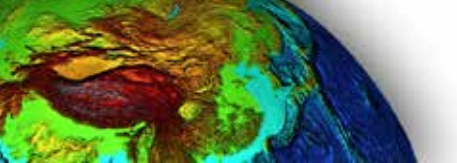
- ∅ 计算有限个物性参数或几何参数
- ∅ 通常是混合参数
- ∅ 非线性最小二乘

优势:

- ∅ 快速, 可以解释单个异常;
- ∅ 可以方便加入地质约束和地质学家的知识
- ∅ 构造刻画清楚



Oldenburg, D.W., Pratt, D.A. 2007



三、处理解释技术—反演技术



反演方法及区别:

u 广义反演

(Generalized, or Voxel inversion):

Ø 获得地下空间的密度或磁化率分布

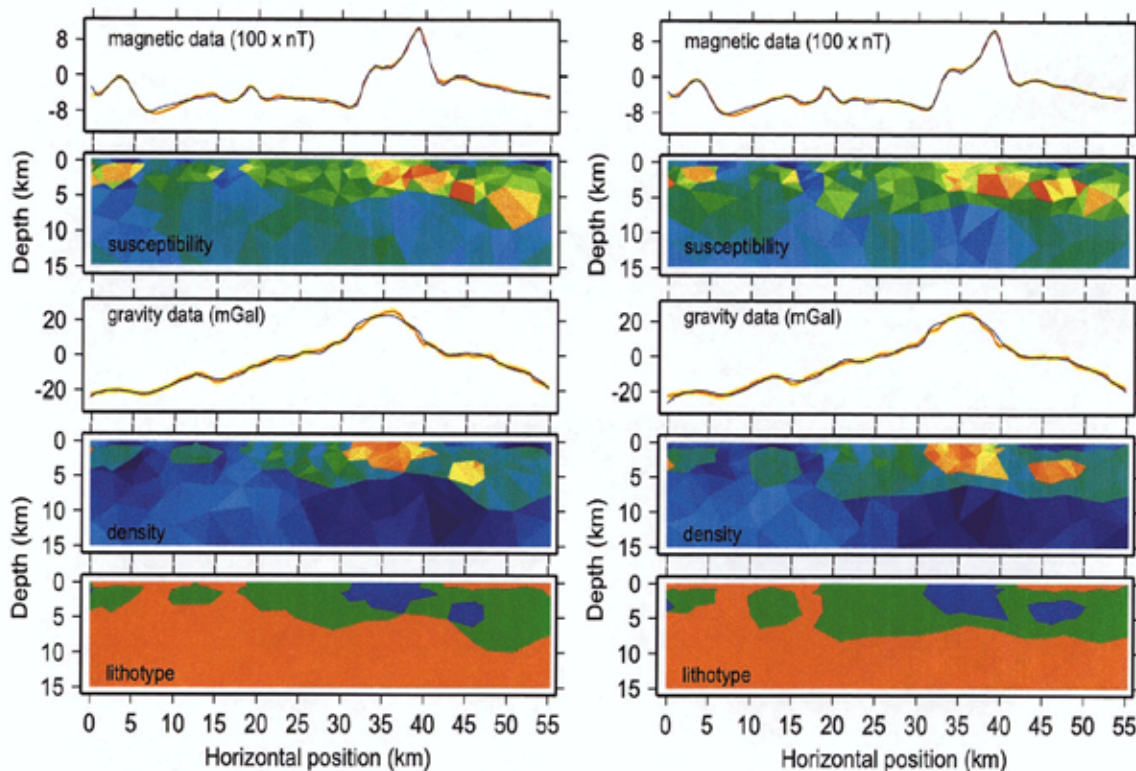
Ø 反演结果通常为单一物性参数

Ø 求解正则化反演问题

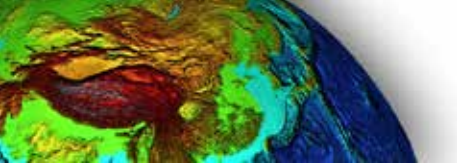
优势:

Ø 快速获得全空间物性分布

Ø 便于开展岩性填图



加拿大Kiglapait 地区2个独立进行的
岩石填图实例. M Bosch et al.,2001



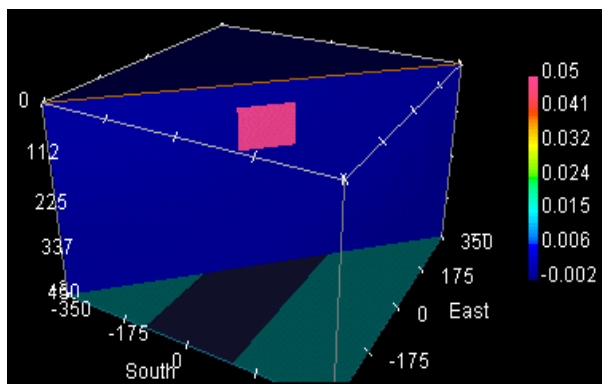
三、处理解释技术—反演技术



反演的可靠性问题：

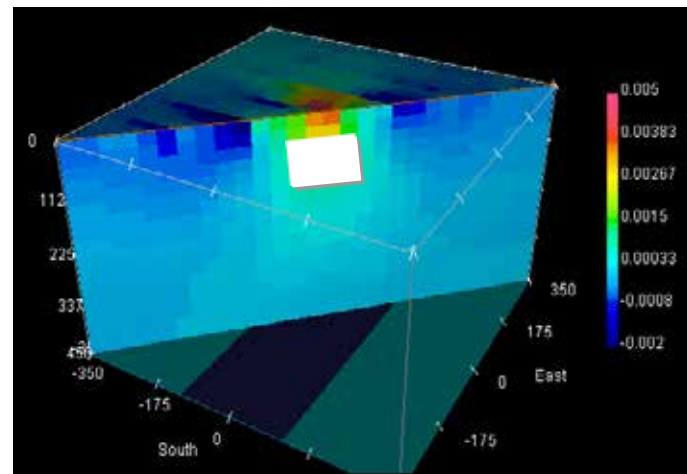
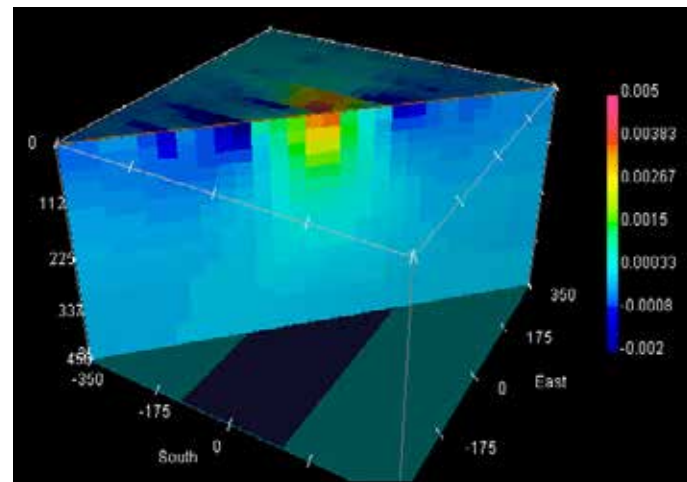
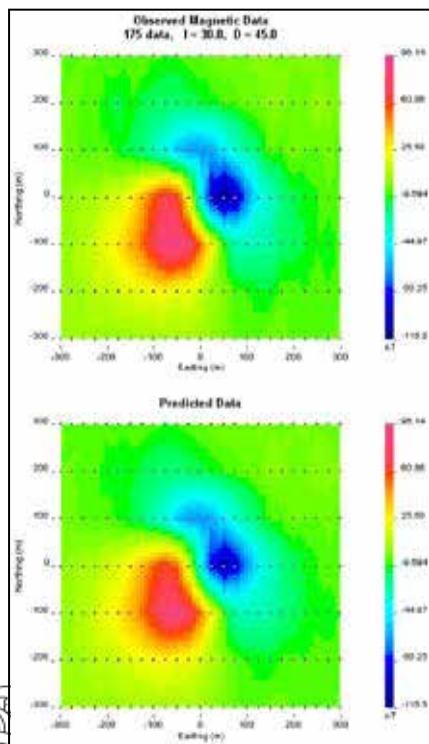
反演存在的问题：

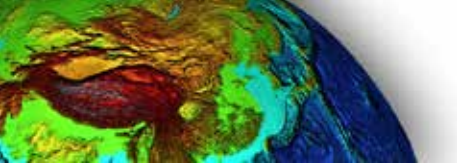
∅严重多解性。磁化率趋于地表；
出现大量负磁化率值，不合理



理论模型

Li Yaoguo et al., 2011





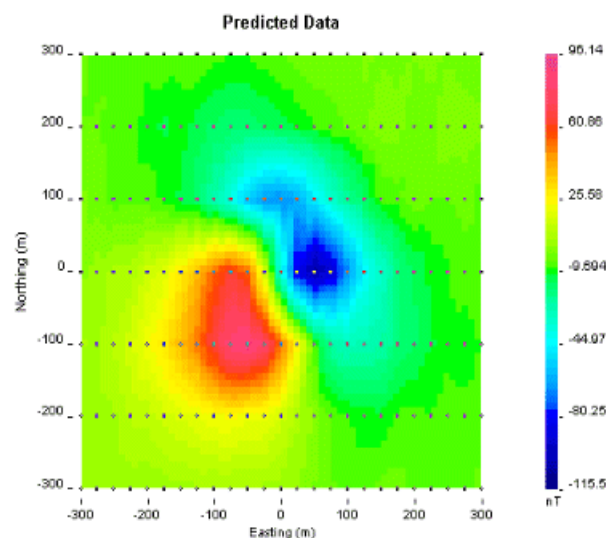
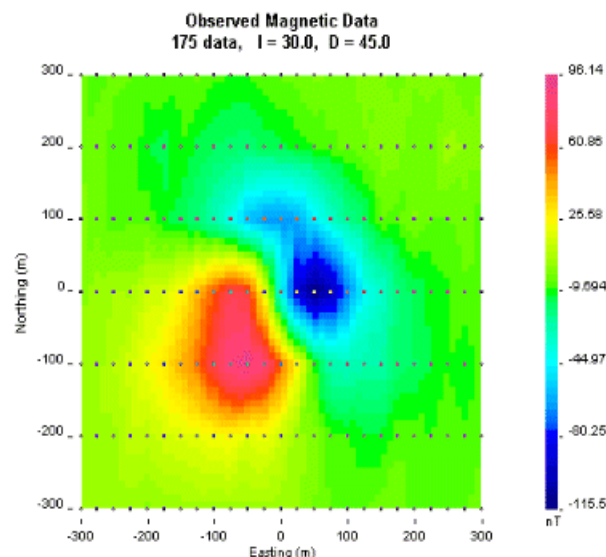
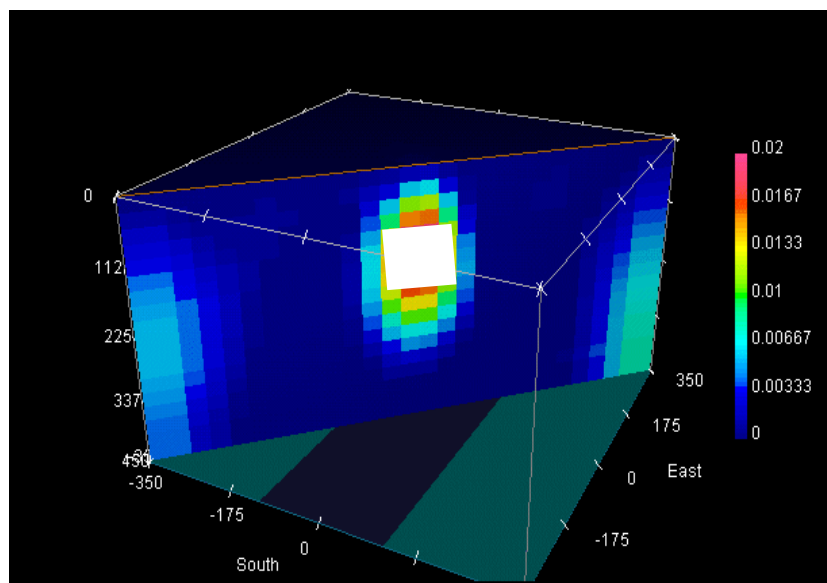
三、处理解释技术—反演技术

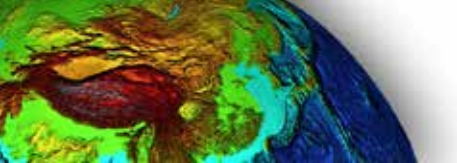


解决多解性的措施：

∅深度加权 (depth weighting)

∅地质先验约束 (比如磁化率为正值, 即 ≥ 0)





三、处理解释技术—反演技术



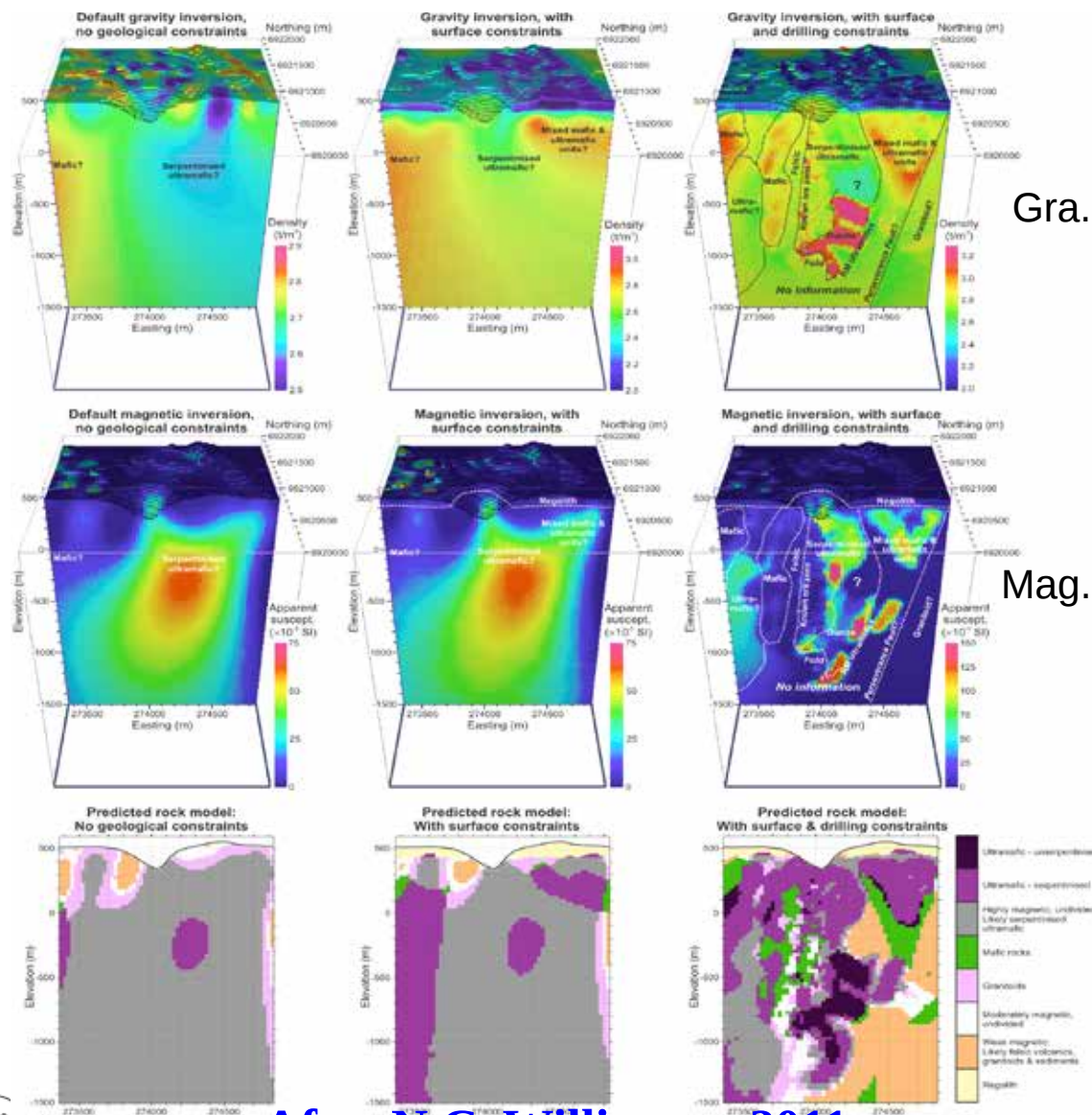
西澳大利亚Perseverance 镍矿反演实例：

第1列：没有任何约束的
岩性填图及地质解释

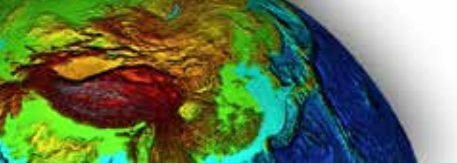
第2列：只加地表约束的
岩性填图及地质解释

第3列：加了所有地质
约束的岩性填图及地质
解释

地质约束已经成为反
演解释的一部分！！



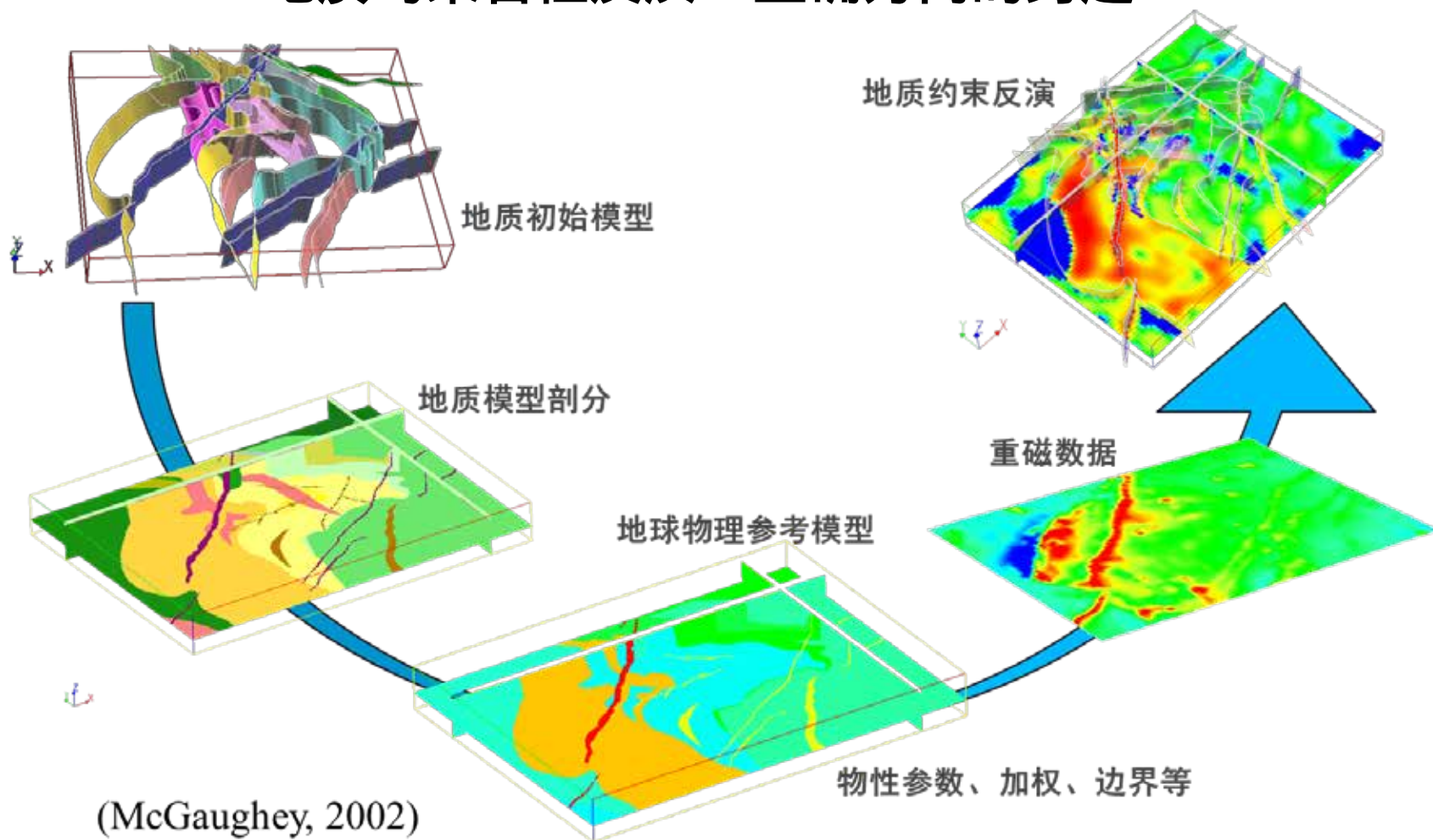
After N.C. Williams, 2011

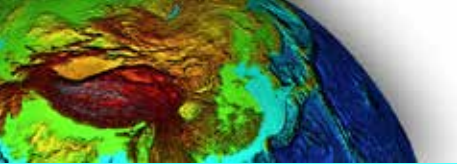


三、处理解释技术—岩性填图



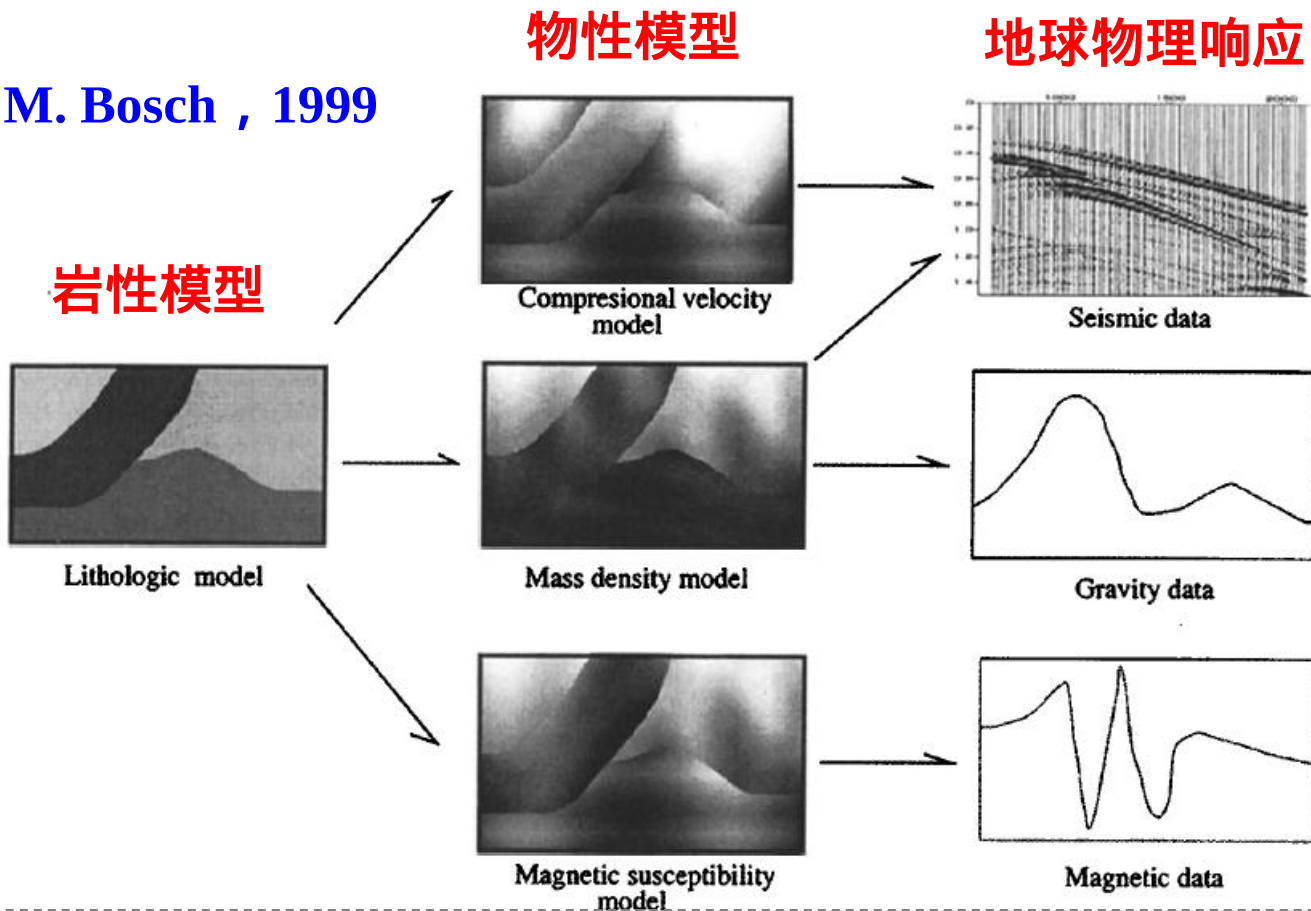
地质约束岩性反演：正确方向的跨越



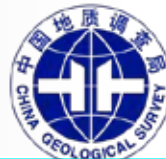
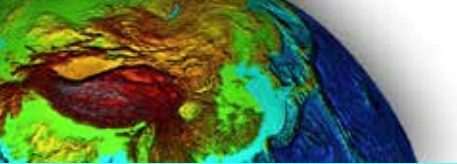


三、处理解释技术—岩性填图

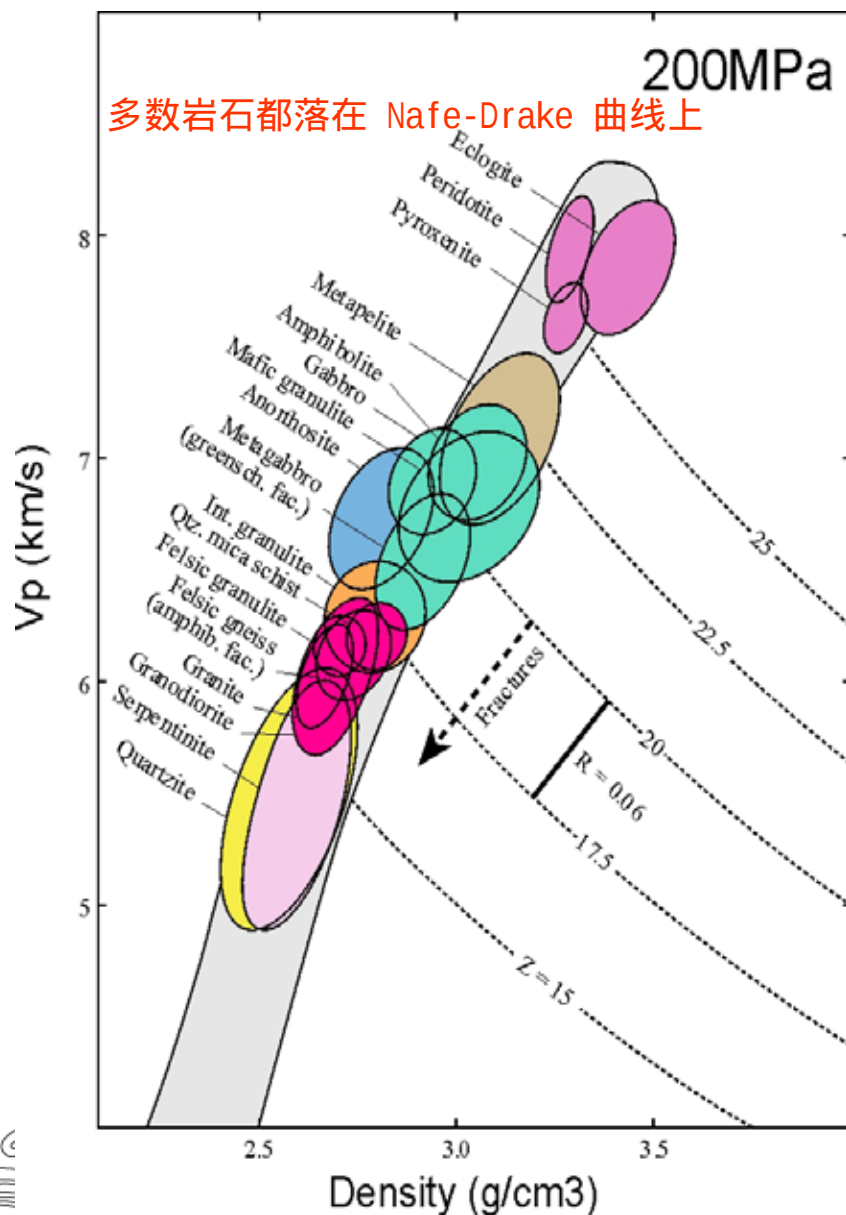
After M. Bosch , 1999



- u 由岩性模型确定物性模型：**物性值**；反之：**地质统计规律**
- u 由物性模型计算地球物理相应：**正演**（唯一，且成熟）；反之：**反演**（不唯一，成熟；需要加约束）



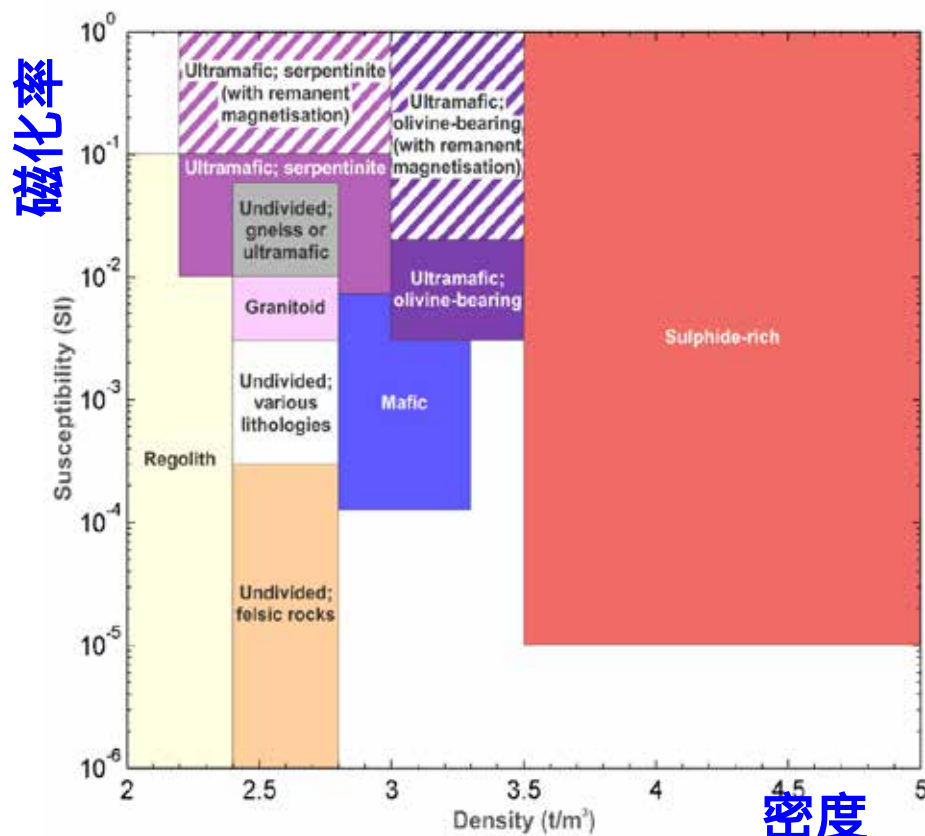
三、处理解释技术—岩性填图



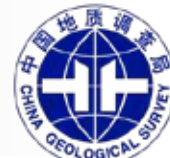
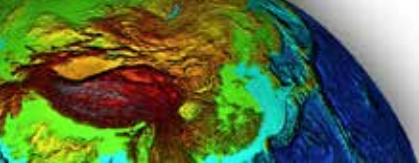
物性与岩性之间的一般规律：

∅速度、密度与岩性符合统计规律

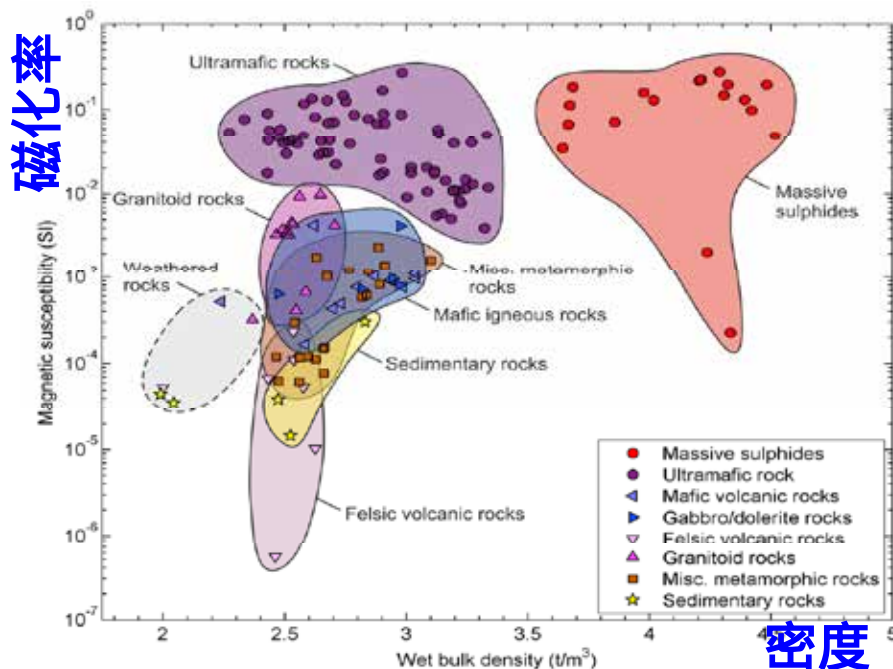
∅磁化率、密度与岩性符合统计规律



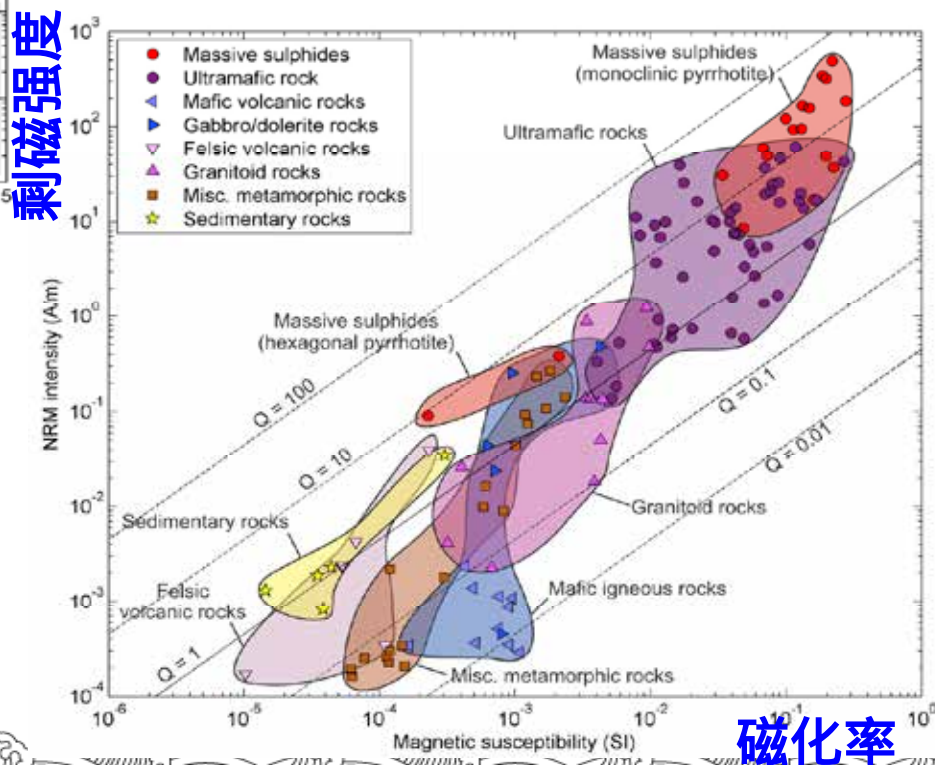
After N.C. Williams, 2011



三、处理解释技术—岩性填图



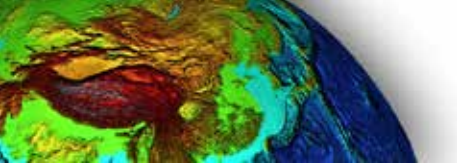
对一个局部地区，密度和磁化率的统计模型（均值）与岩性有很好的对应关系



西澳达利亚Agnew-Wiluna
greenstone belt 岩石物性测
量与统计结果

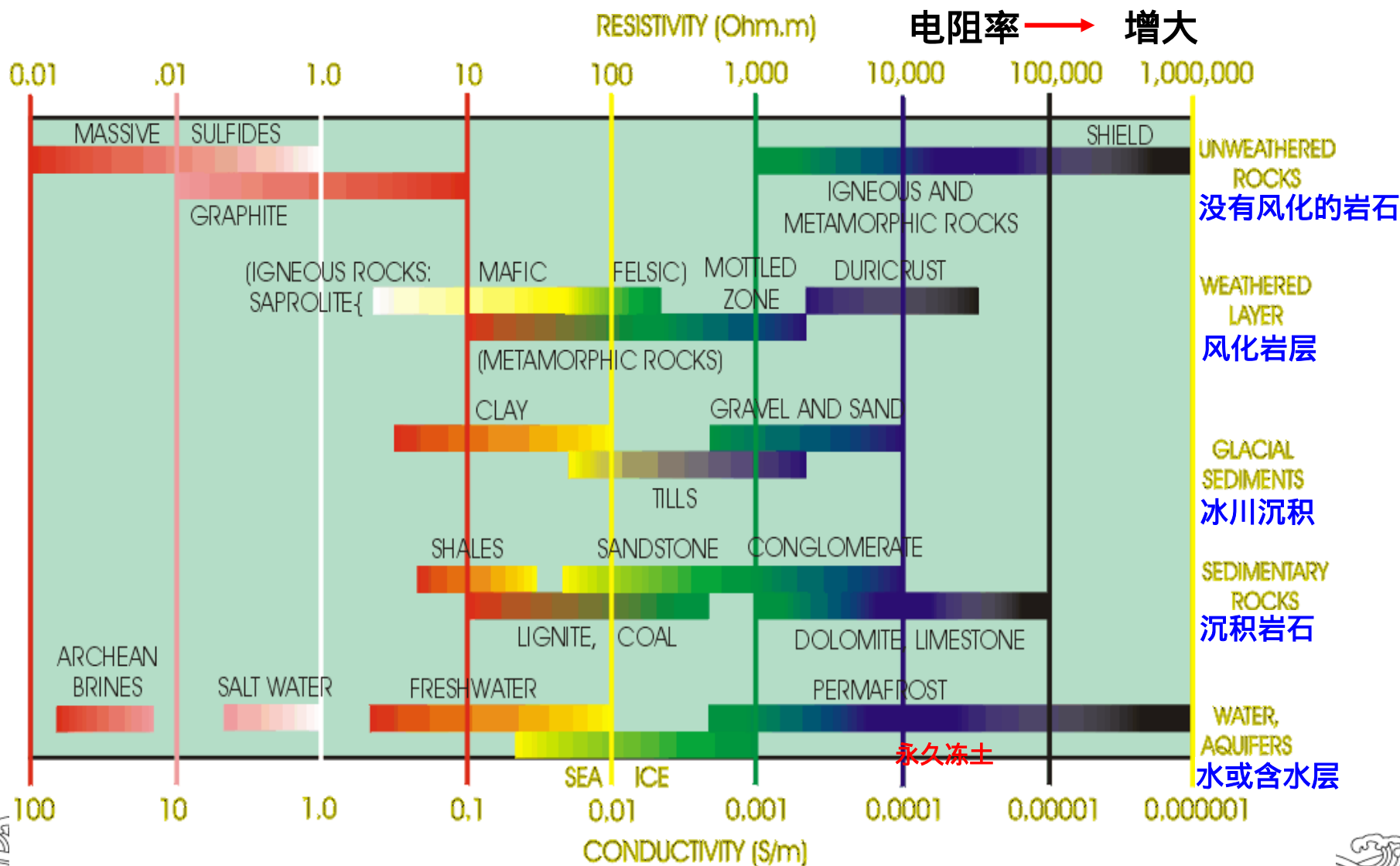
After N.C. Williams, 2011

磁化率

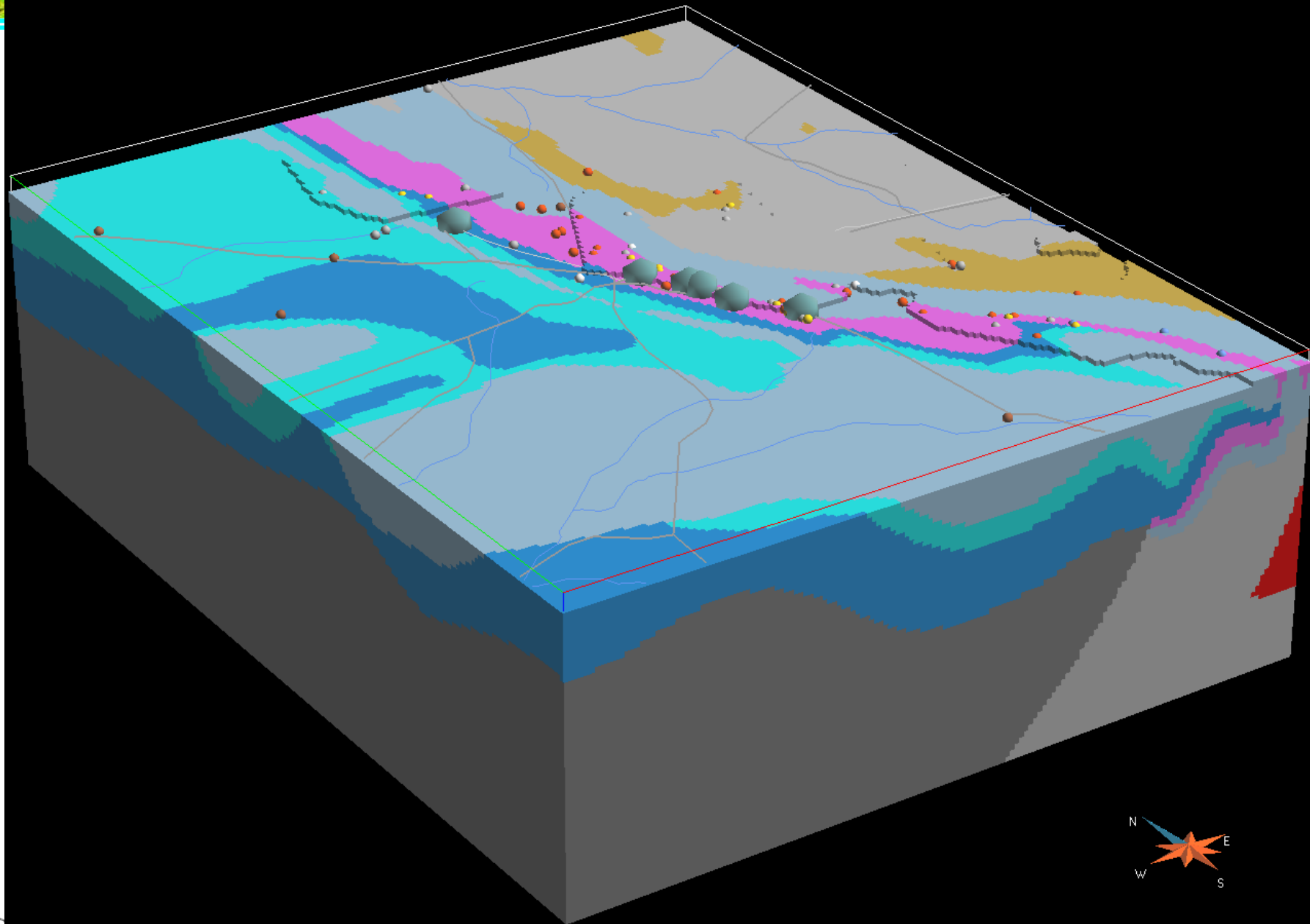


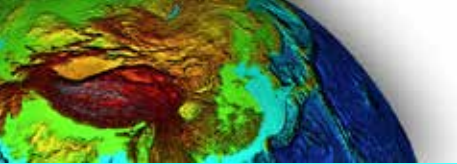
三、处理解释技术—岩性填图

岩石的电阻率



实例：三维岩性填图与成矿预测





三、处理解释技术—岩性填图



区域地质模型与成矿潜力评价

地质模型

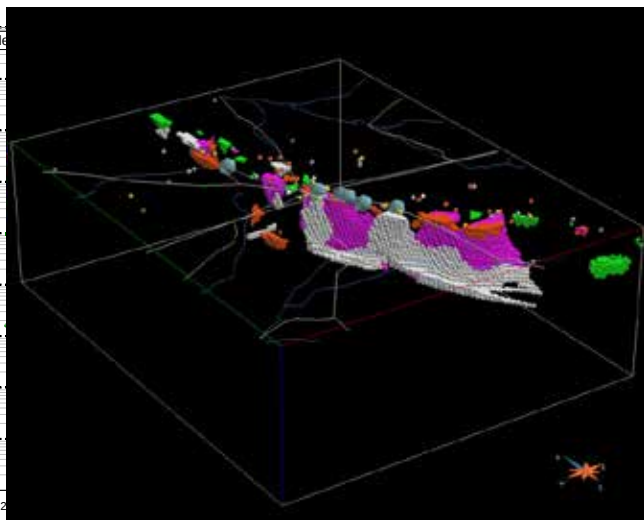
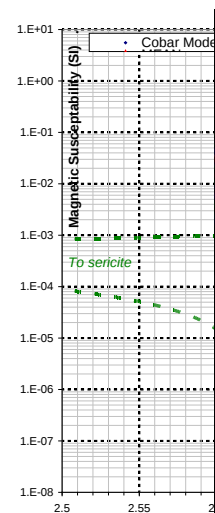
密度反演

磁性反演

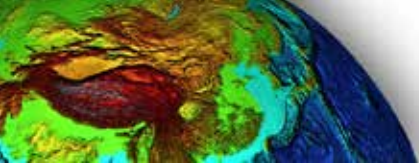
数据集成 到gocad
剖分网格点 (3D
block model)

地区物理
蚀变模型

Visualisation
of results

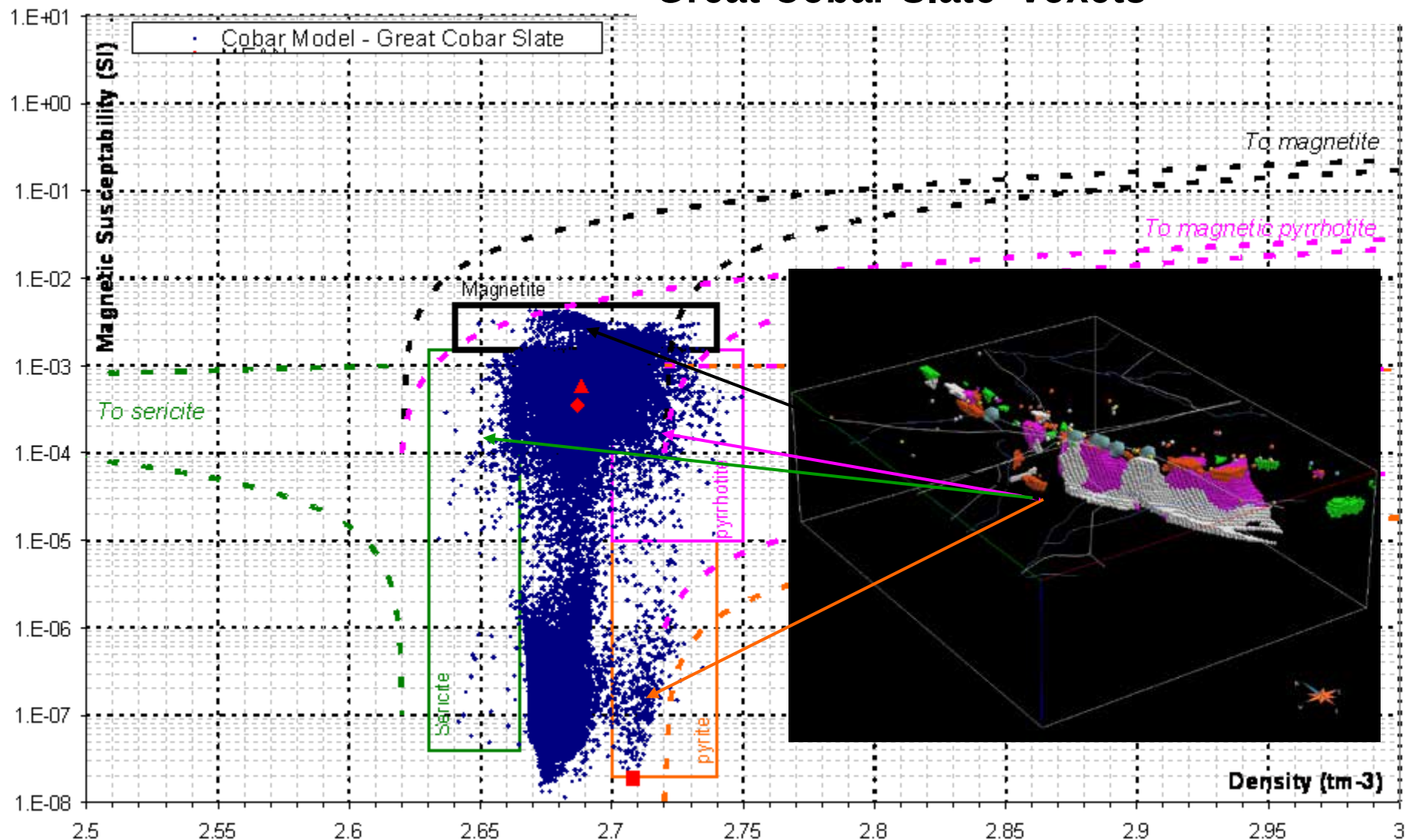


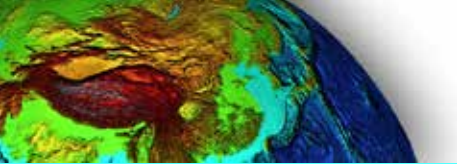
Simon van der Wielen & Richard Chopping,
2011



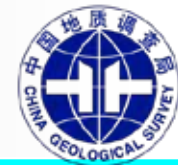
三、处理解释技术—岩性填图

Great Cobar Slate voxets



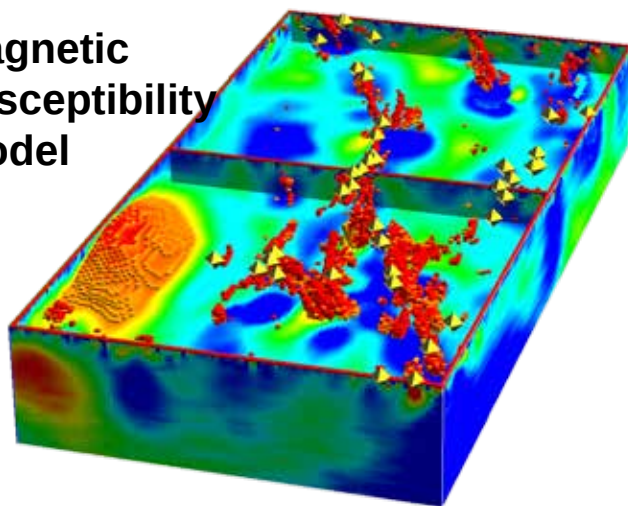


三、处理解释技术—岩性填图

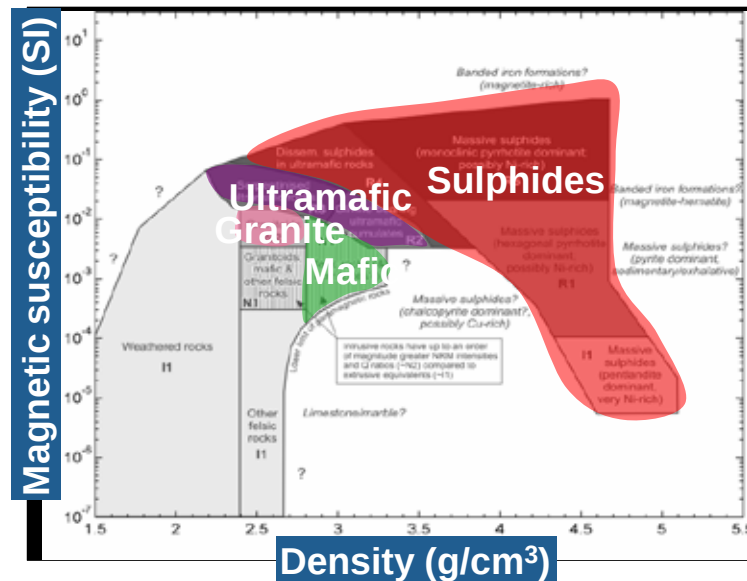
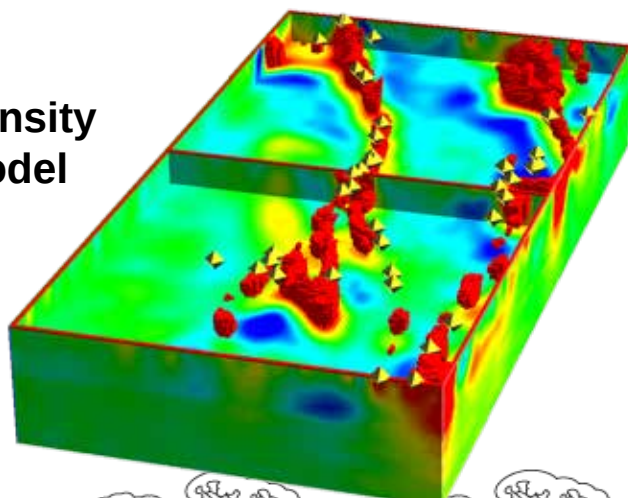


Predictive rock maps

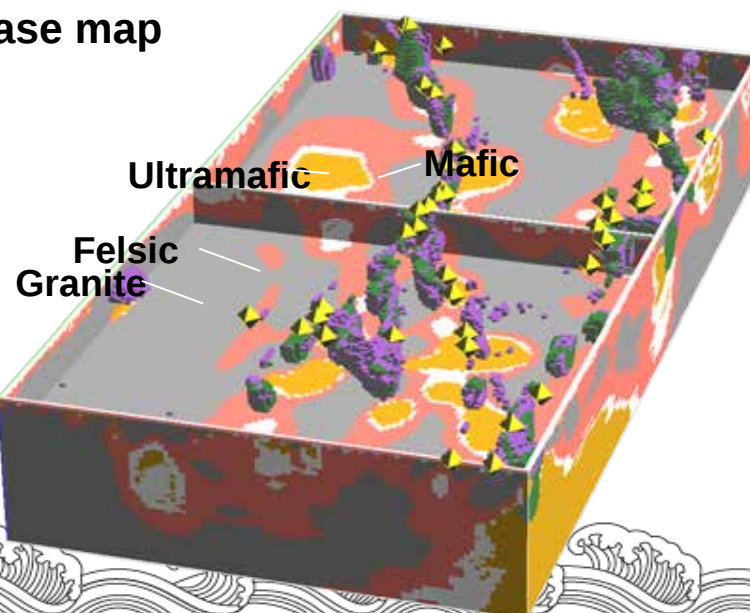
Magnetic susceptibility model

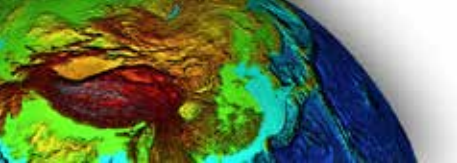


Density model



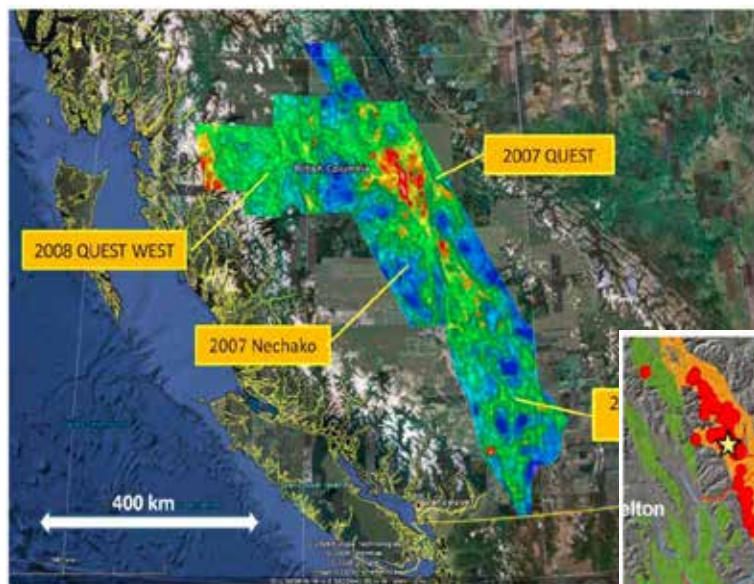
Predicted rock base map





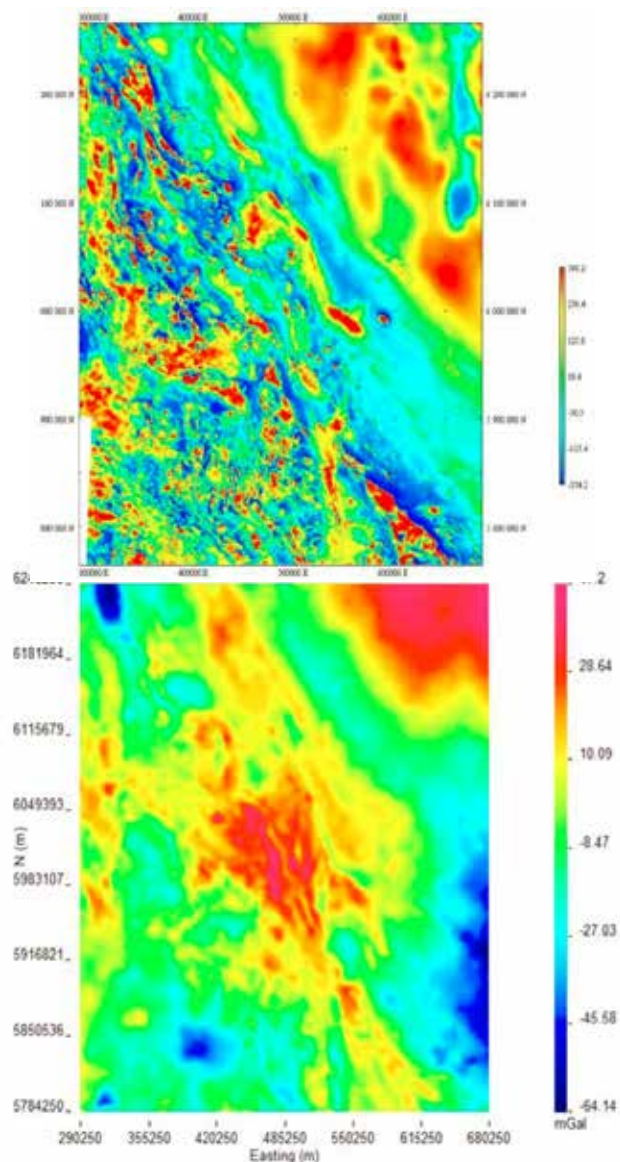
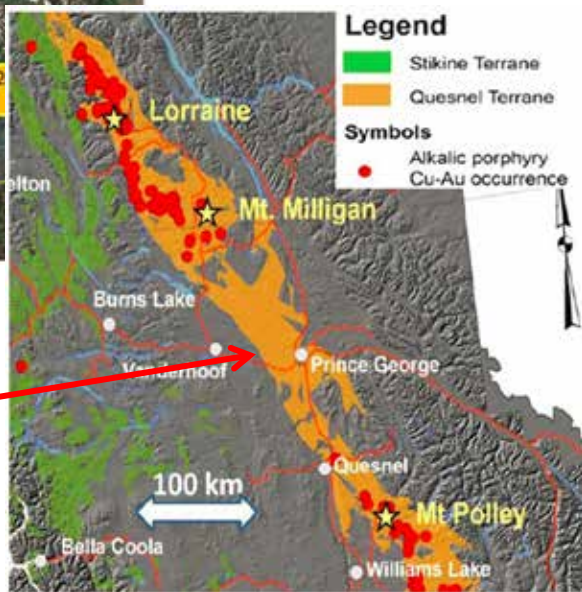
三、处理解释技术—岩性填图

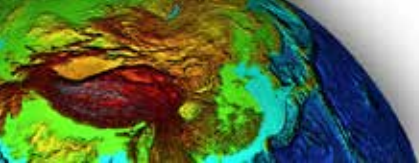
勘查实例一、加拿大哥伦比亚中部 Quesnel 地区综合航空地球物理调查与覆盖区资源评价



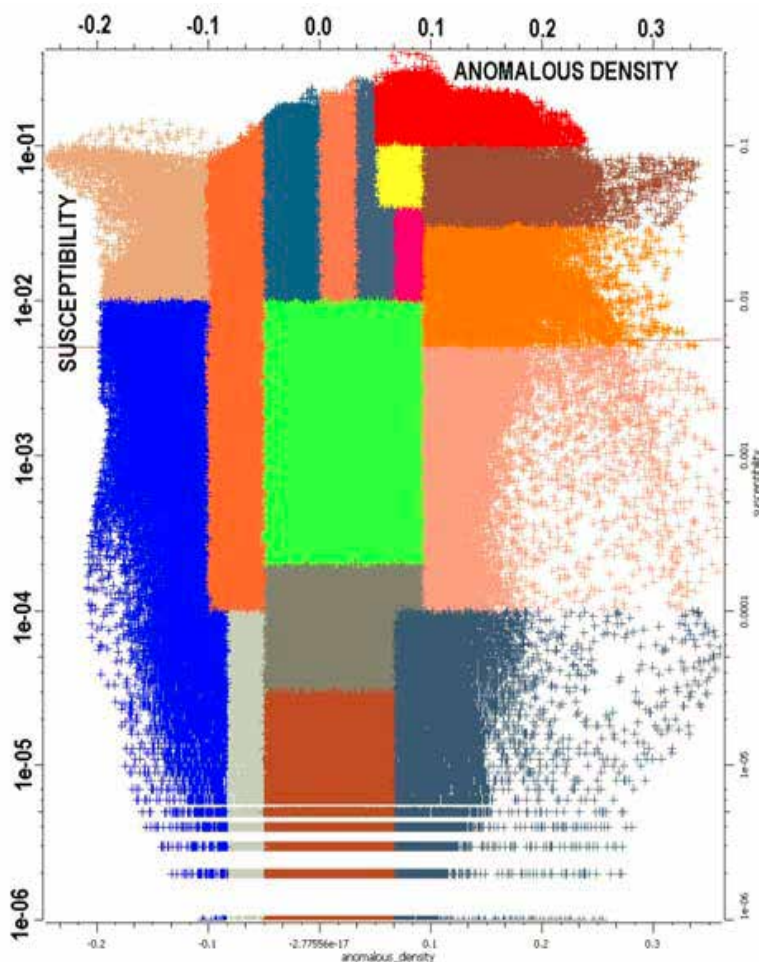
使用Sander公司的
AIRGrav系统
三次飞行完成

目标：覆盖区的Cu-Au斑岩型矿床。南北两侧发现大量斑岩型矿床



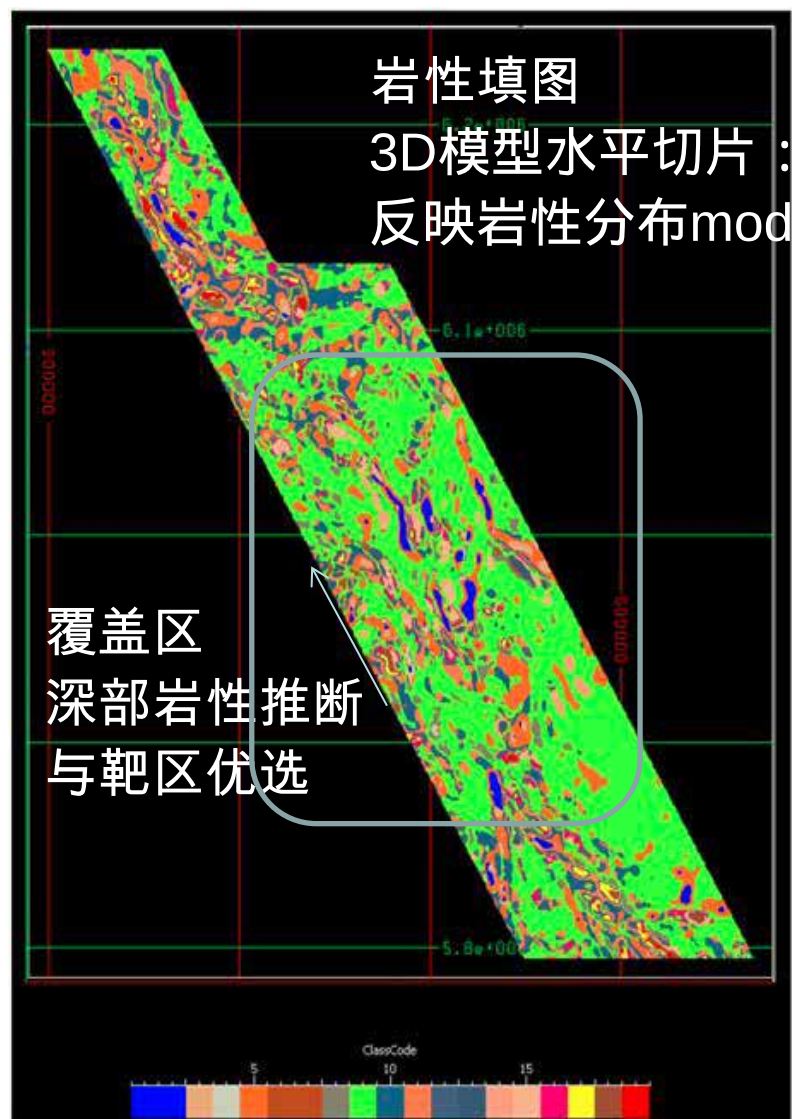


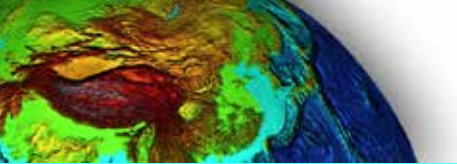
三、处理解释技术—岩性填图



磁化率与密度关系图（识别19种岩性），据此进行岩性识别

(Kowalczyk et al., 2010)



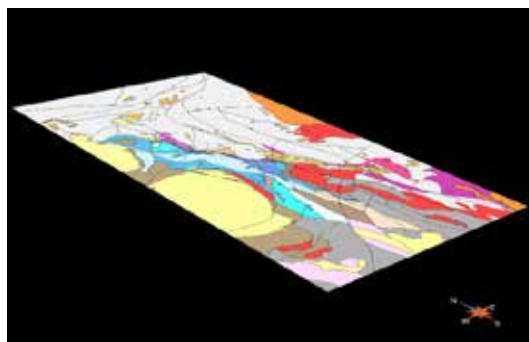


三、处理解释技术—地质填图

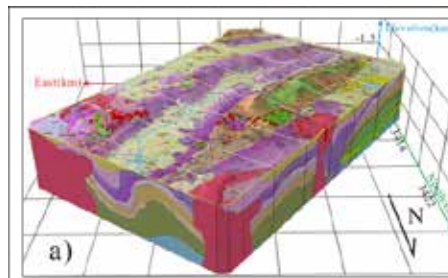
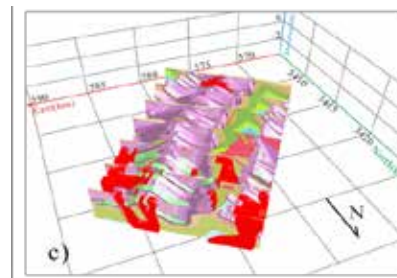


地质约束交互反演：地质填图

3D可视化与解释

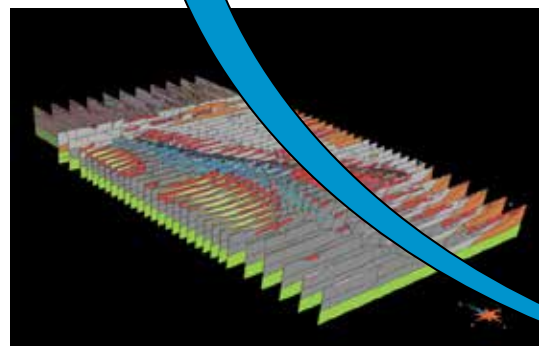


地表地质图

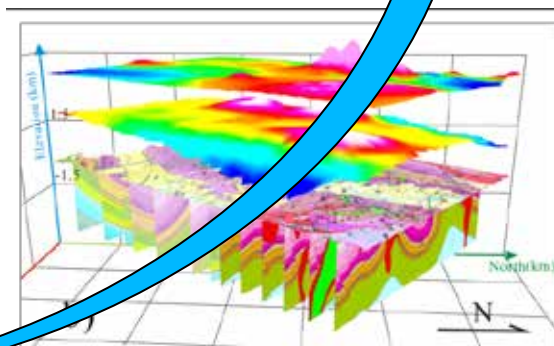
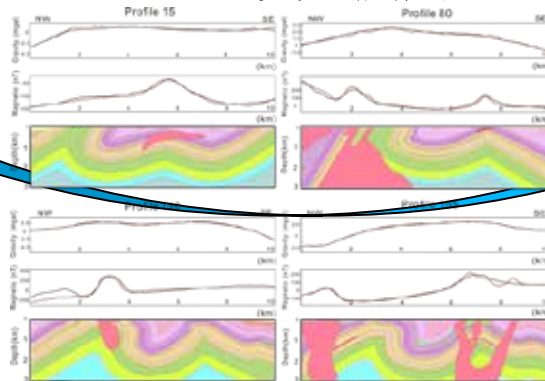


剖面地质图
(综合信息)

3D 交互反演

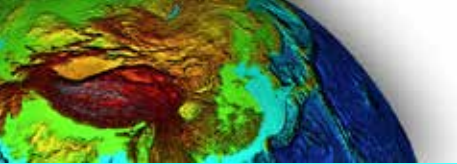


2.5D 交互反演



physical rock properties,
weights, bounds, etc

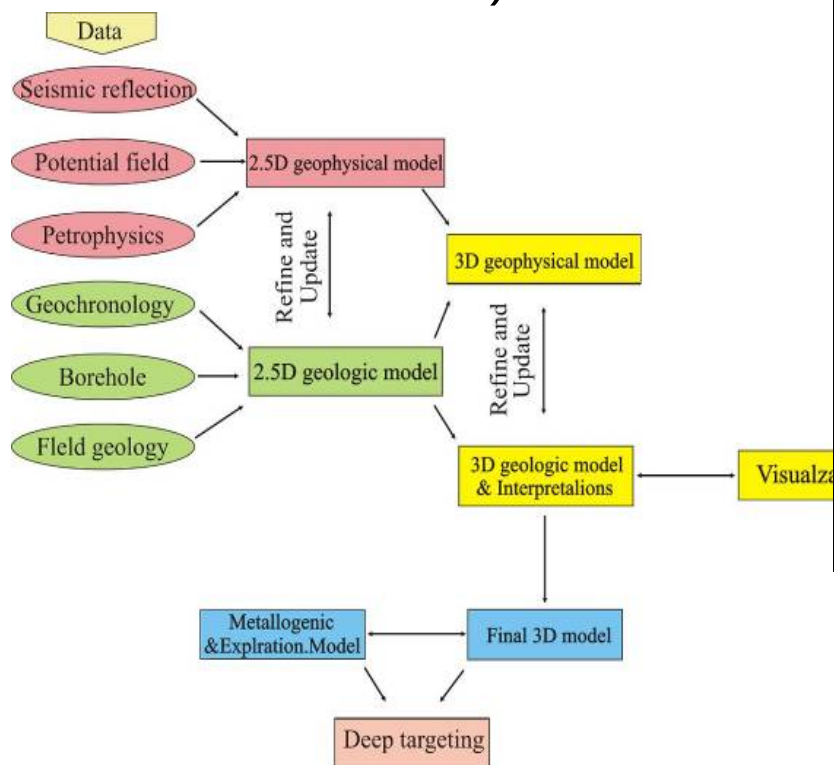
(McGaughey, 2002)



三、处理解释技术—地质填图

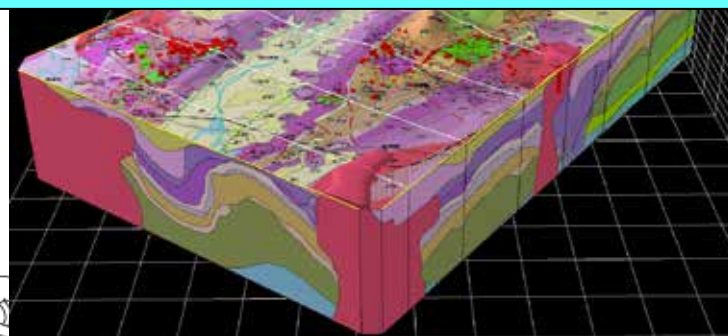


Working scheme for 3D modelling and deep targeting (**block building method**)

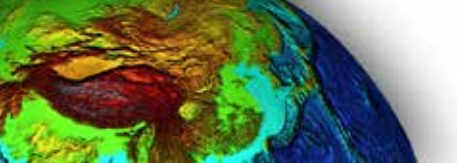


Key steps:

- u Model area definition
- u Prior geologic and geophysical data handling (*Integrated profiles*)
- u 2D initial model construction
- u 2.5D and 3D gravity and magnetic modeling
- u 3D visualization and interpretation



Modified from Lü et al., 2013, Geophysics



三、处理解释技术—地质填图



实例一：铜陵狮子山矿田3D地质填图

主要步骤：

(1) 定义填图区域：包括平面及深度（狮子山为3km），确定2D剖面线距（500m）；

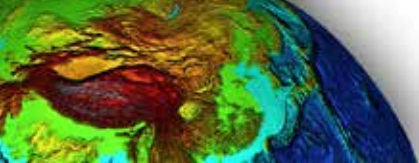
(2) 先验地质、地球物理信息提取：包括：

Ø地质单元合并与地质图简化

Ø钻孔资料收集与主要地层单元深度数据提取

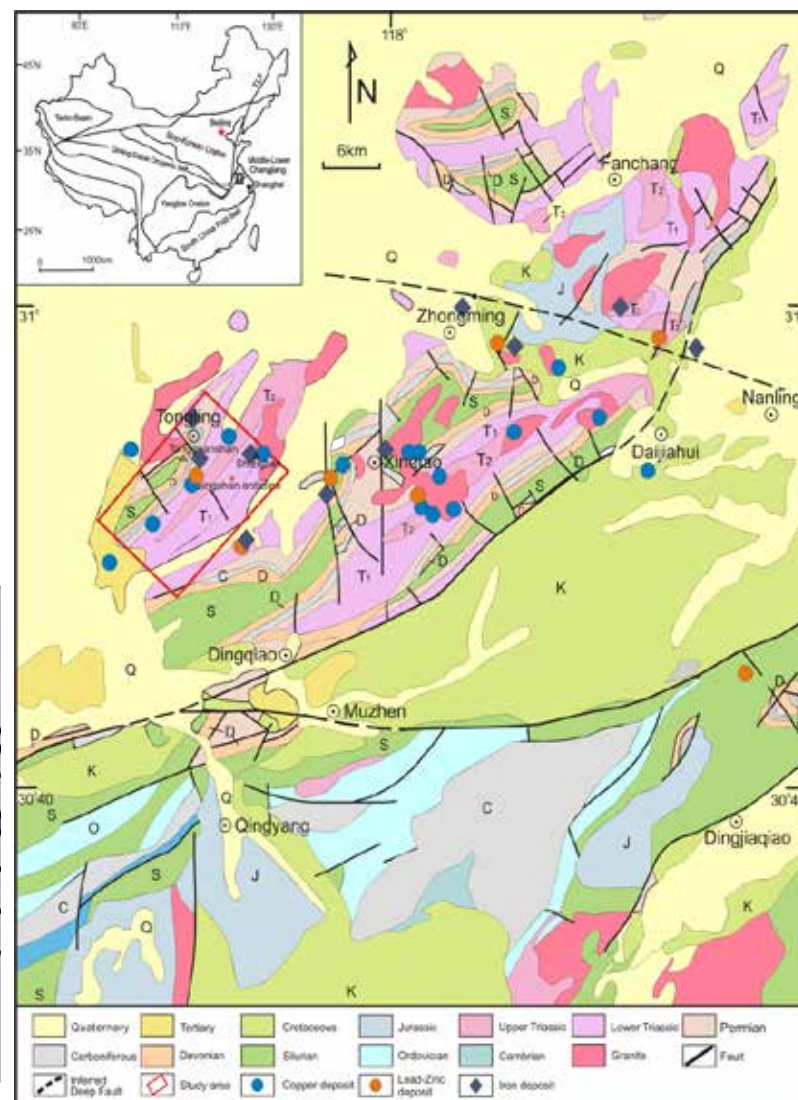
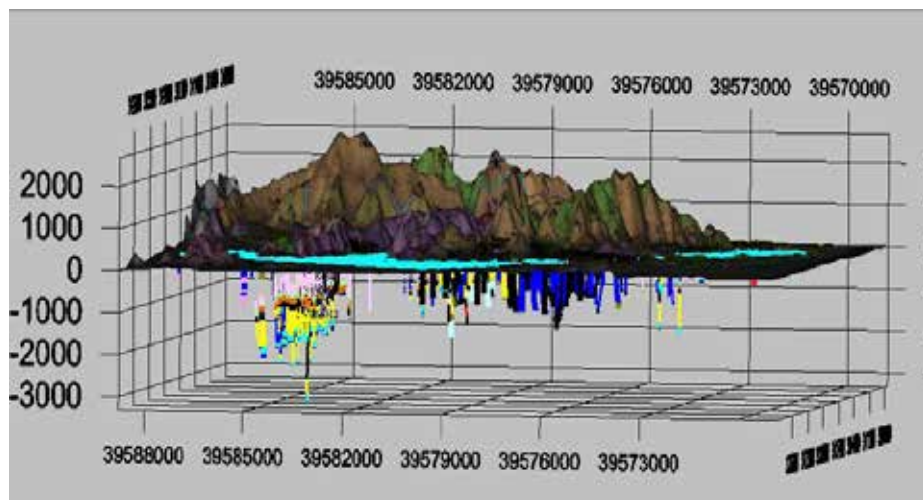
Lü et al., 2013, Geophysics





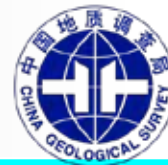
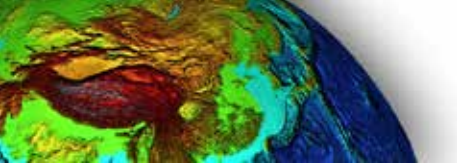
三、处理解释技术—地质填图

- Ø 岩体年龄数据, 分析交叉关系
- Ø 岩矿石物性测定及分析, 建立物性与岩性关系
- Ø 重磁数据预处理及位场分离
- Ø 其它地球物理数据, 如地震剖面等, 约束信息提取



1600口钻孔收集与信息提取

铜陵地区地质图及填图位置及范围

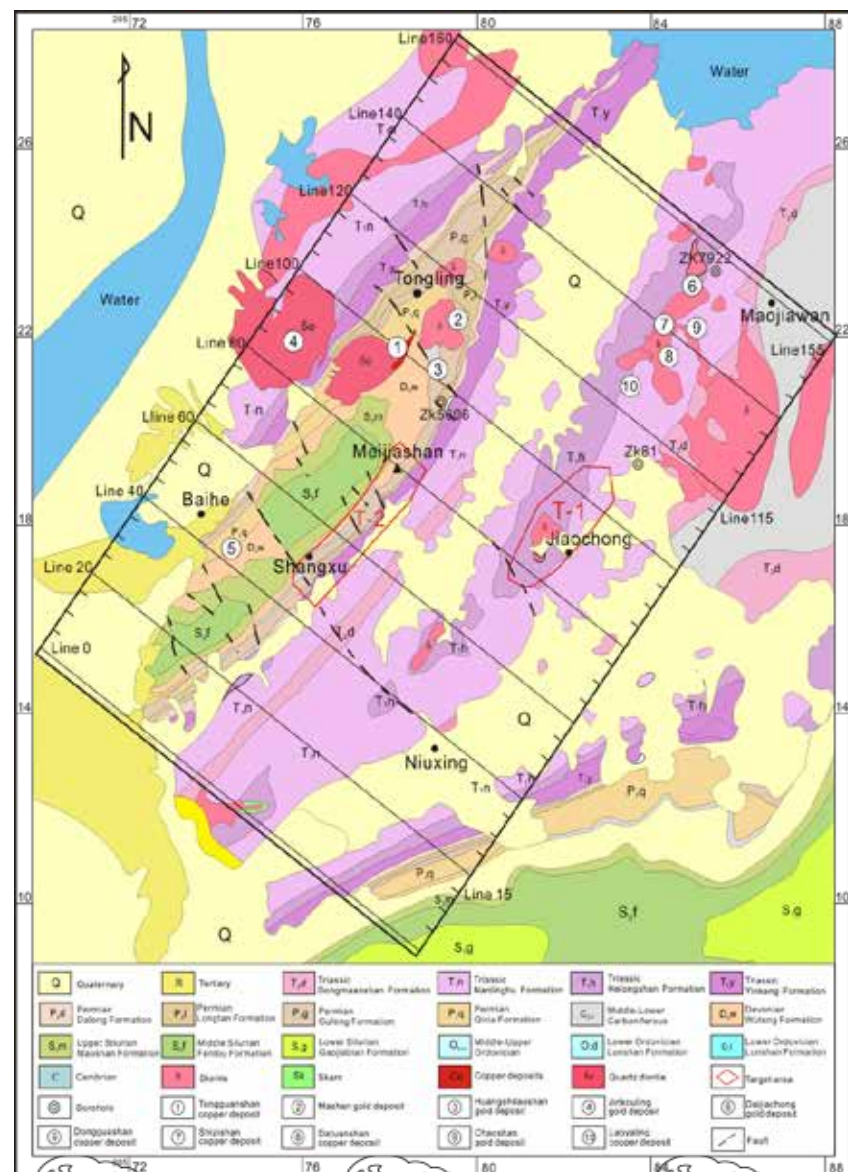
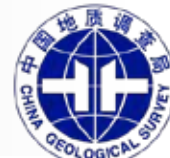


三、处理解释技术—地质填图

梳理了地层单元：

系统研究了填图区内晚古生代至第四系各时代地层的产出特征，对同时期地层划分方案进行了整合和归并，对各时期地层进行了统一计算机编码。

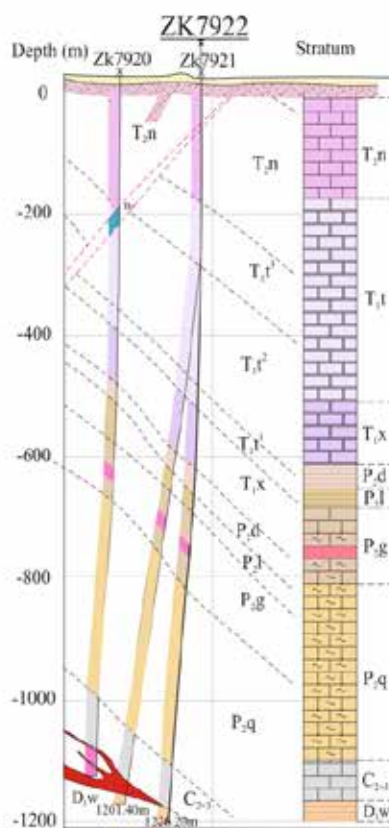
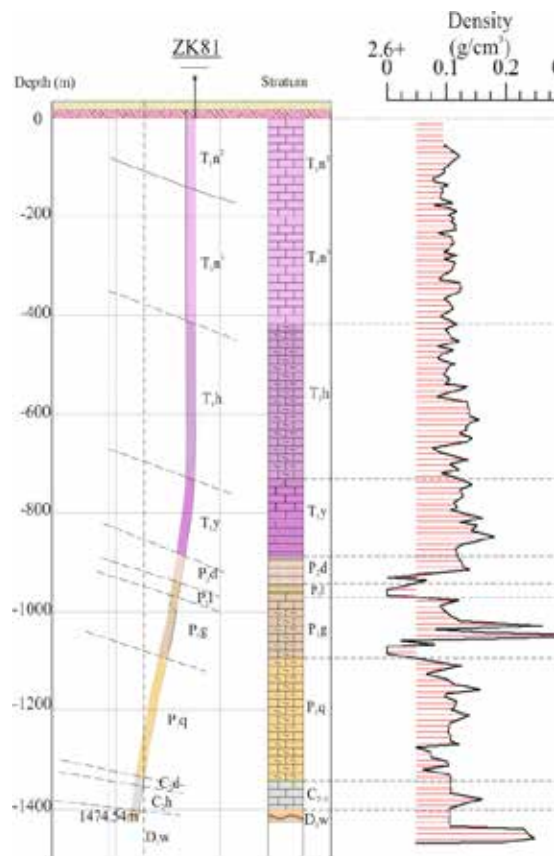
纪	组	地质代号	计算机编码	备注
第四纪		Q	QQQ	
三叠纪	范家塘组	T ₃ f	T3F	
	黄马青组	T ₂ h	T2H	将铜头尖组T ₂ t归到此组
	周冲村组	T ₁ z	T1Z	将龙头山组T ₂ l和分水岭组T ₂ f归到此组
	南陵湖组	T ₁ n	T1N	
	和龙山组	T ₁ h	T1H	将塔山组T ₁ t归到此组
	殷坑组	T ₁ y	T1Y	将小凉亭组T ₁ x归到此组
二叠纪	大隆组	P ₂ d	P2D	
	龙潭组	P ₂ l	P2L	
	孤峰组	P ₁ g	P1G	
	栖霞组	P ₁ q	P1Q	
石炭纪	船山组	C ₃ c	C3C	
	黄龙组	C ₂ h	C2H	
泥盆纪	五通组上段	D ₃ w2	D2W	将孤峰组C ₁ g合并到此组
	五通组下段	D ₃ w1	D1W	
志留纪	茅山组	S ₃ m	S3M	
	坟头组	S ₂ f	S2F	
	高家边组	S ₁ g	S1G	
奥陶纪	五峰组	O ₃ w	O3W	
	汤头组	O ₃ t	O3T	
	宝塔组	O ₂ b	O2B	



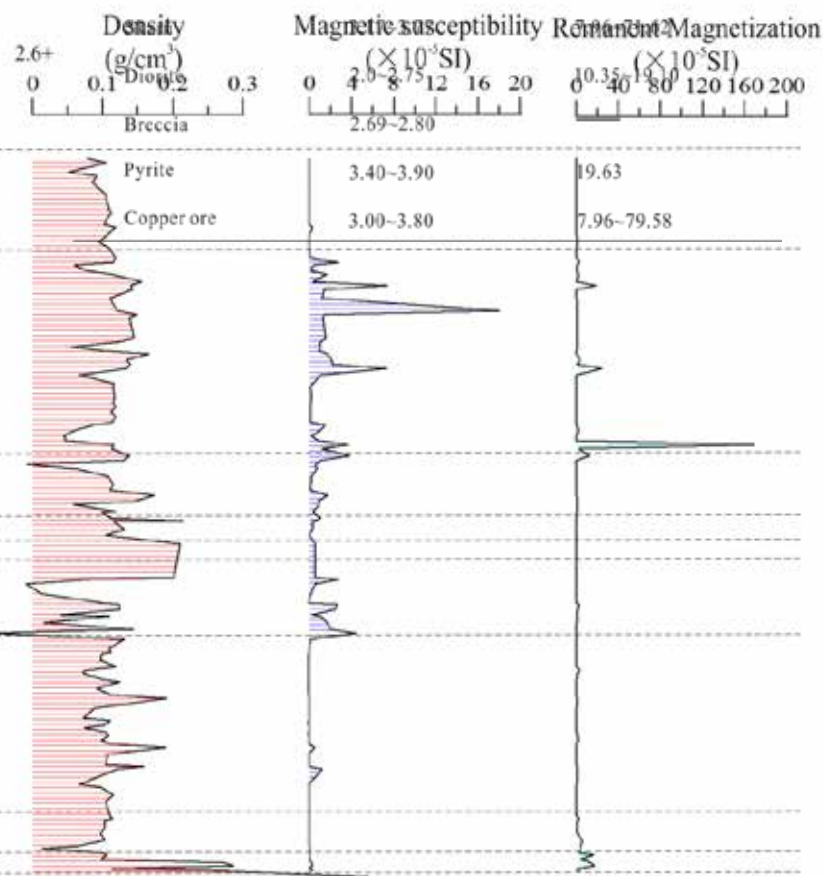


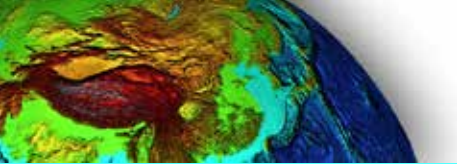
岩矿石物性的测量与研究

(注意到五通、栖霞等层间界面物性的变化，反映热液蚀变或矿化)



Name	Density (g/cm ³)	Magnetic susceptibility ($\times 10^5$ SI)
Pyroxene diorite	2.72~2.81	2.44~59.68
Dioritic porphyry	2.61~2.74	0.43~19.85
Quartz diorite	2.40~2.90	7.96~46.16
Granite	2.70~2.71	180.08~418.13





三、处理解释技术—地质填图



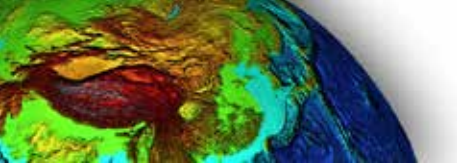
(3) 2D初始模型的建立：

- Ø 根据剖面经过的地表位置，由浅到深，在所有模型区域大致给出地质体的数量、深度、倾角和物性
- Ø 初始模型的建立只要基于先验信息；熟悉当地地质情况的专家在初始模型建立时非常重要，他们的知识和对区域地质的理解往往起到关键作用。

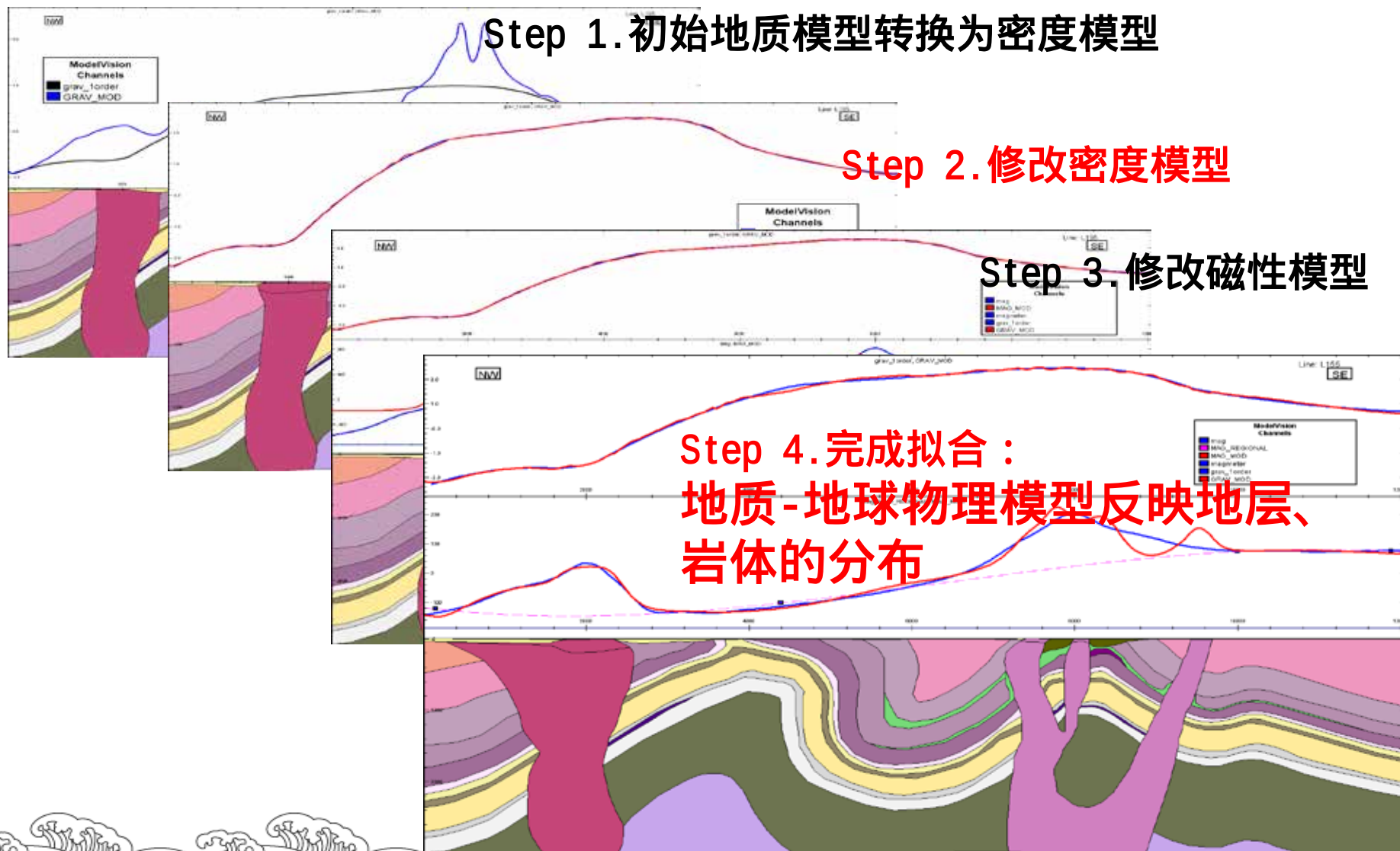
(4) 2.5D和3D重磁反演模拟。包括：

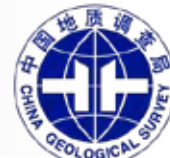
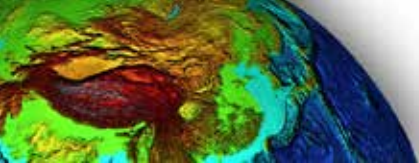
- Ø 使用Model Vision ProTM平台进行。首先 2.5D重磁模拟，在2D模型的基础上，走向方向(y_1 和 y_2)有一定的延伸；
- Ø 调整 y_1 和 y_2 使其等于1/2线距，按照模型所处位置集成到3D环境，计算模型3D相应，并与实测数据进行对比，发现误差大的地方，返回2.5D剖面进行修改，重复上述步骤，直到满意位置。





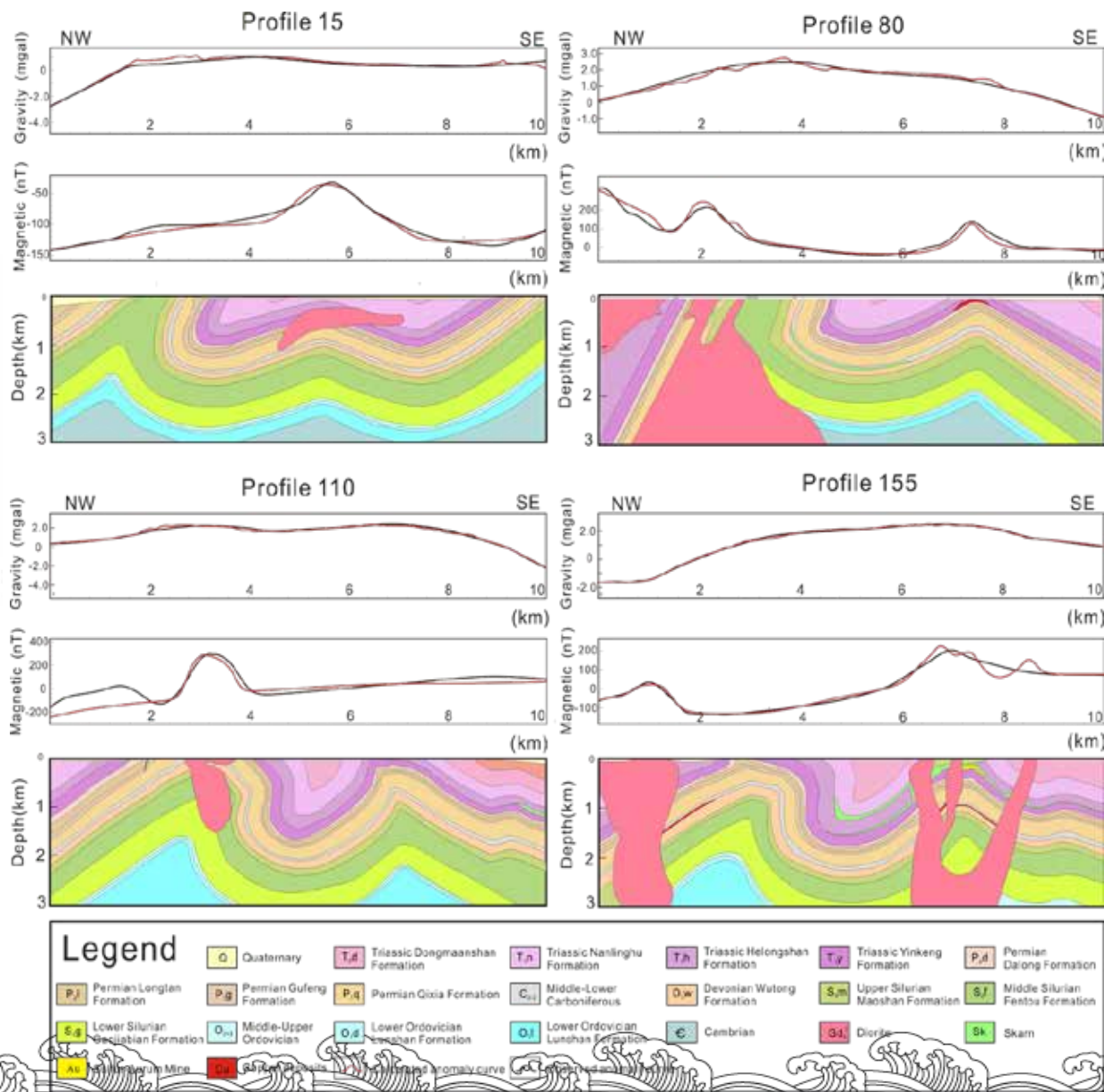
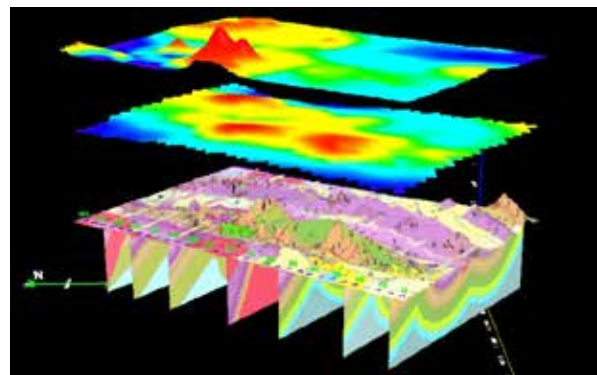
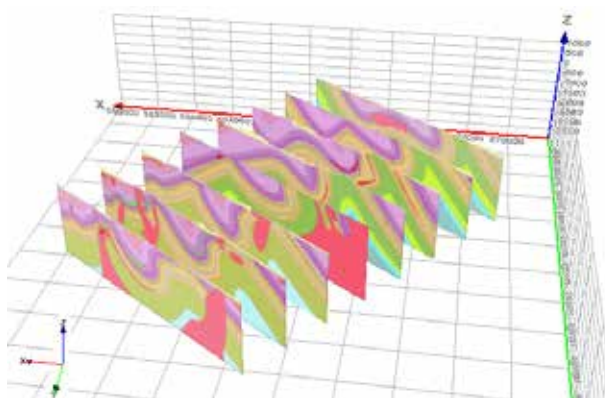
三、处理解释技术—地质填图

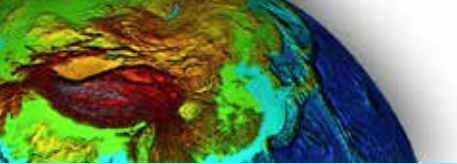




三、处理解释技术—地质填图

2D/3D 剖面交互编辑与修改





三、处理解释技术—地质填图

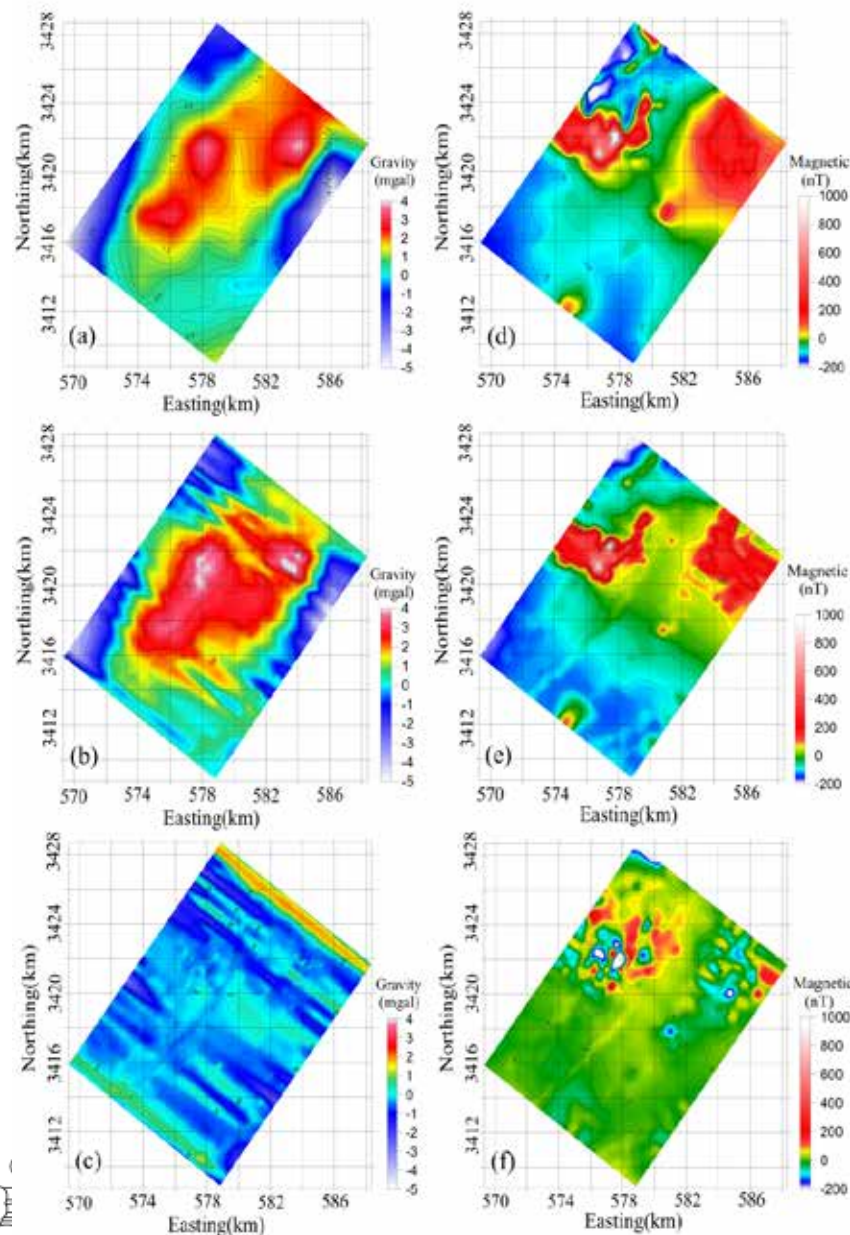


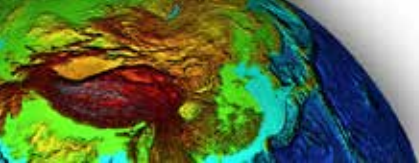
最终反演模型异常与实测异常对比图：

∅重力拟合误差的平均值为 0.28 mgal，稍高于平均测量误差0.21 mgal；磁力拟合误差为2.17 nT，在测量误差之内；

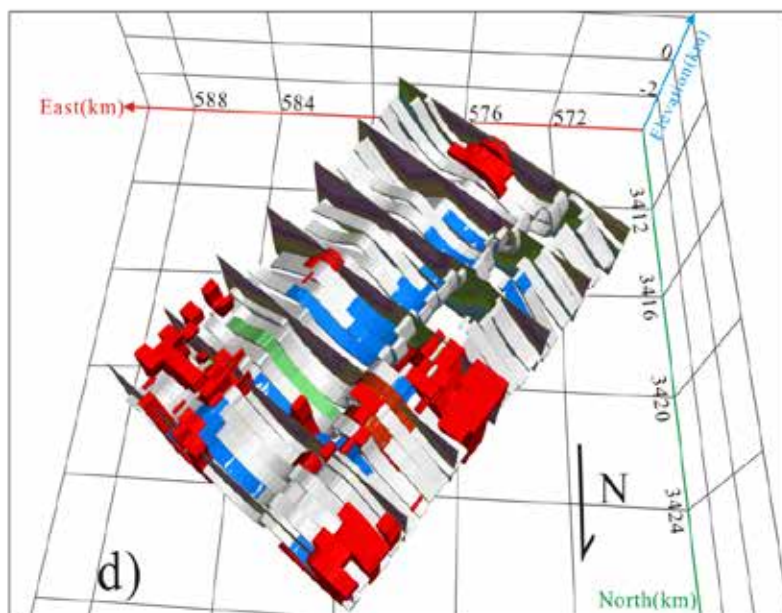
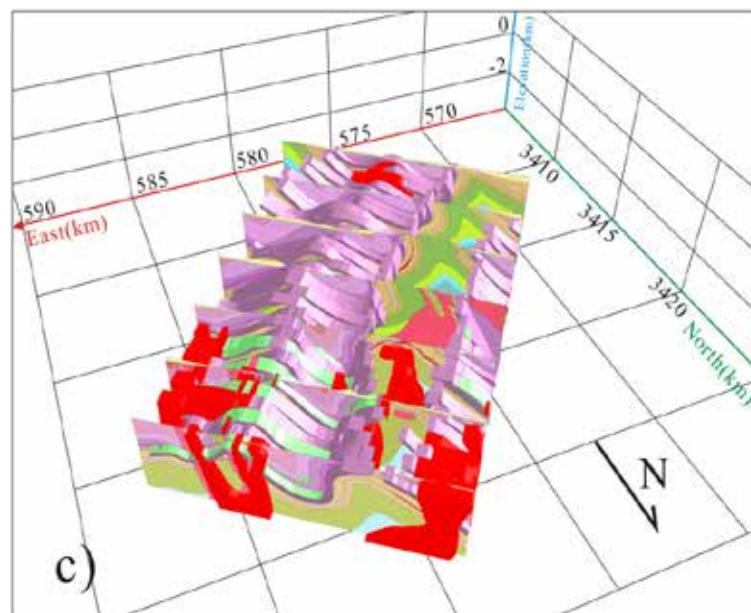
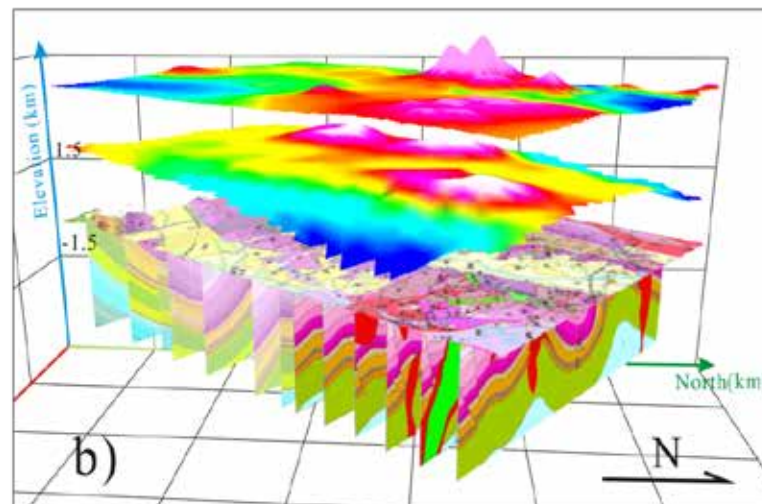
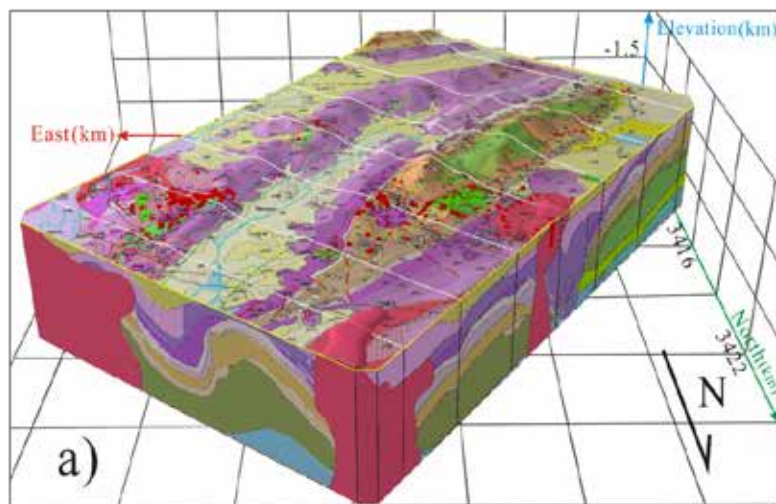
∅局部磁场拟合欠佳，主要由于局部热液蚀变引起的磁性不均匀造成的；

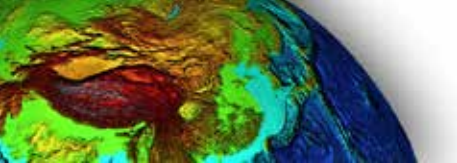
∅重力出现NW向条带噪声，主要由于2D模型拼贴为3D模型时，相邻2D模型之间的台阶造成。





三、处理解释技术—地质填图



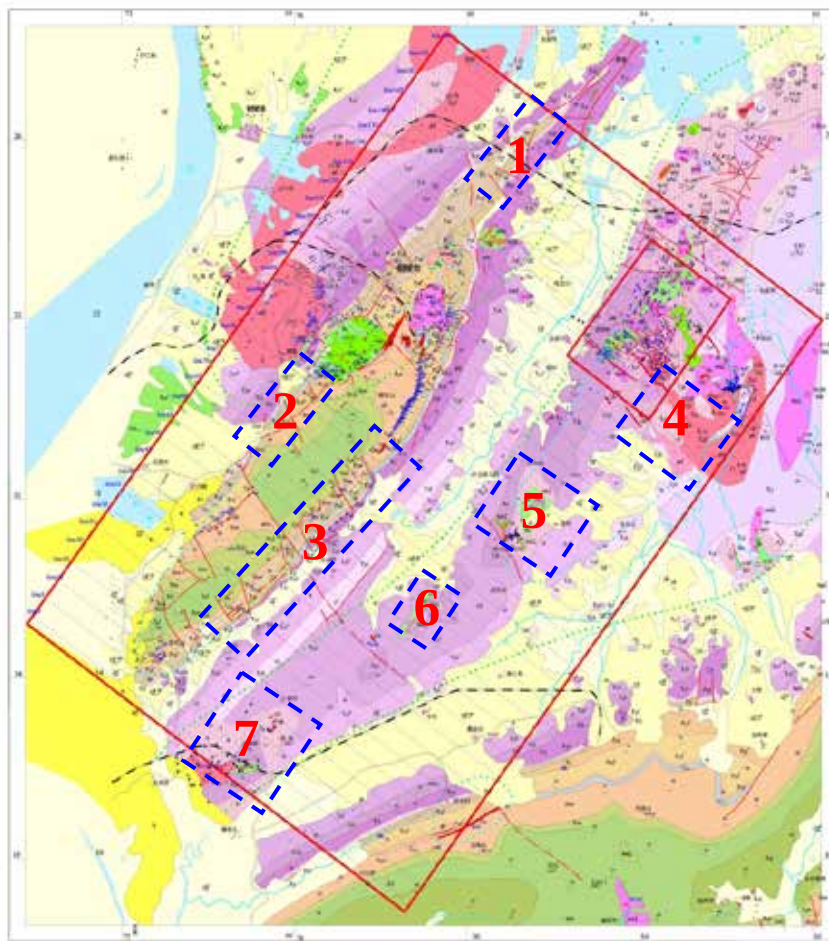


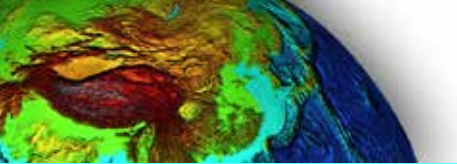
三、处理解释技术—地质填图



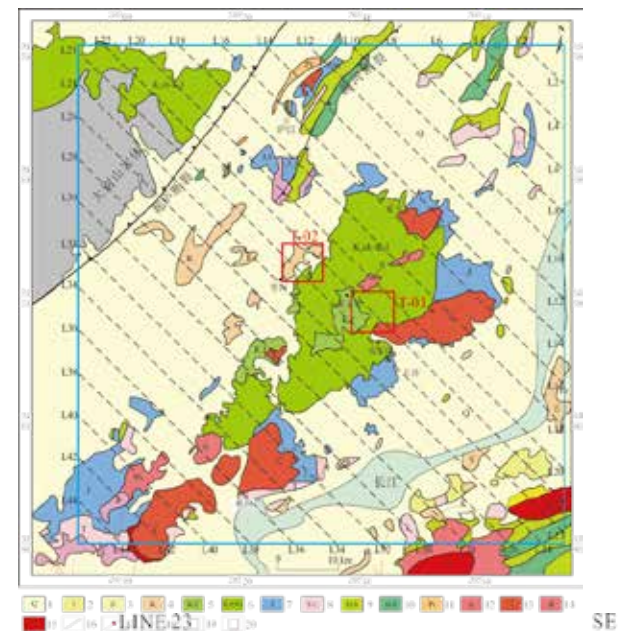
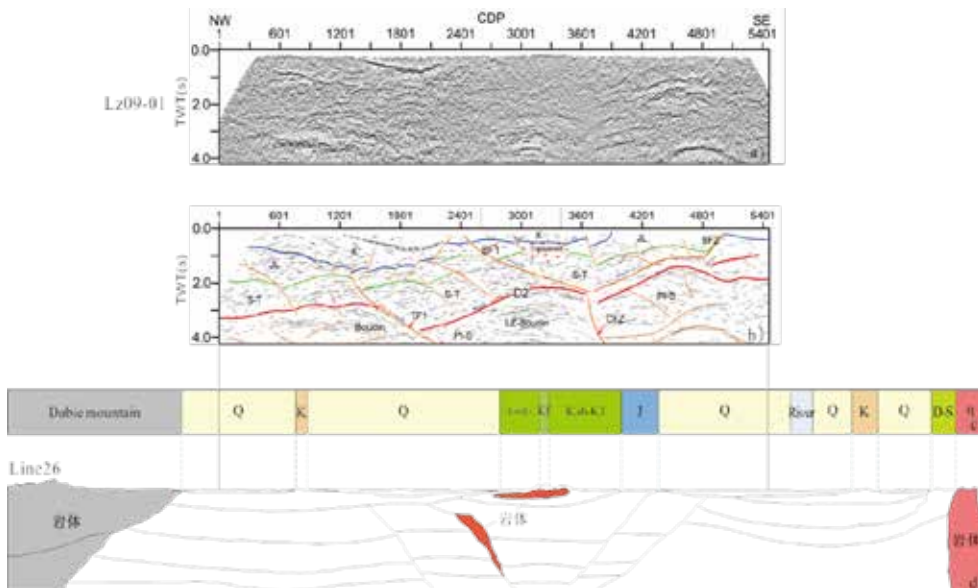
(5) 3D可视化与地质解释。 输出反演结果到3D可视化平台（ e.g., Encom PATM ），进行空间分析。重点研究控矿地层的空间分布、出露岩体和隐伏岩体的空间展布，结合成矿模型，开展深部靶区优选。

按照“岩体+层位”的成矿规律，对填图区深部找矿远景进行了分析。预测了西湖、焦冲、严冲、五贵桥、天马山-章木山、观音冲-朱村-团山7个深部成矿靶区

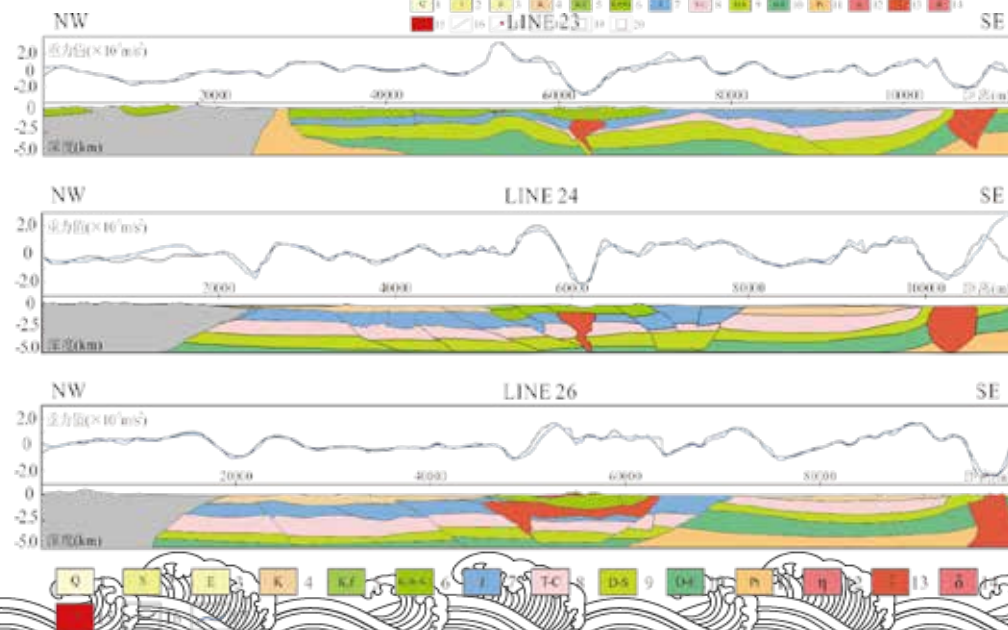


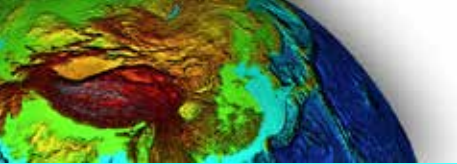


三、处理解释技术—地质填图



Integrated geophysical profiles help define the structure framework of the model region, and provide information for 2.5D initial model construction

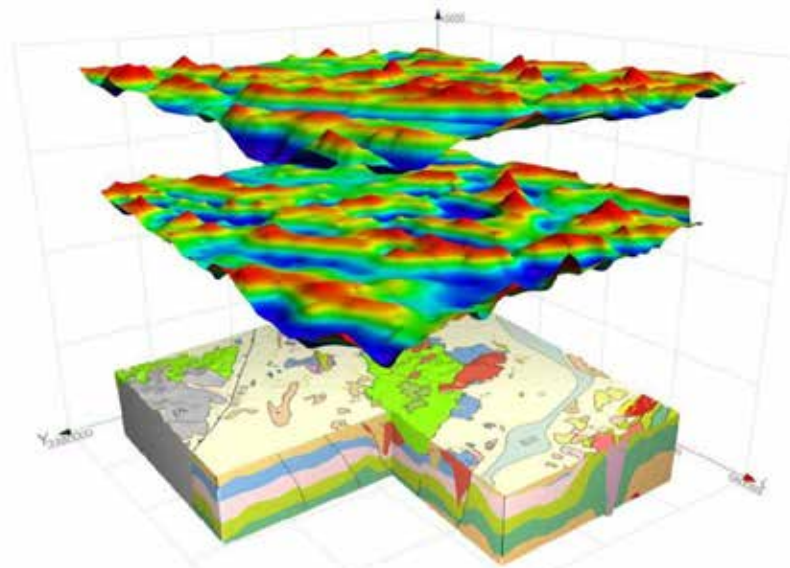
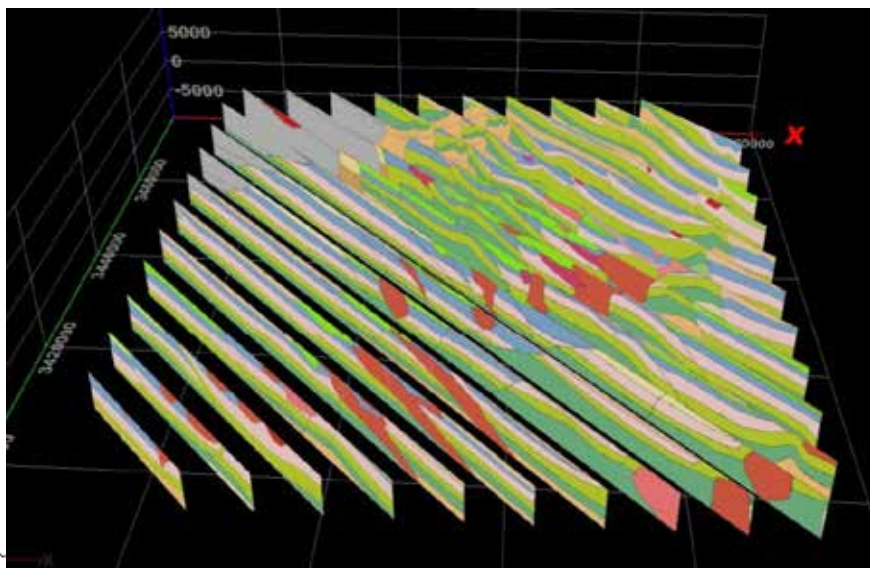
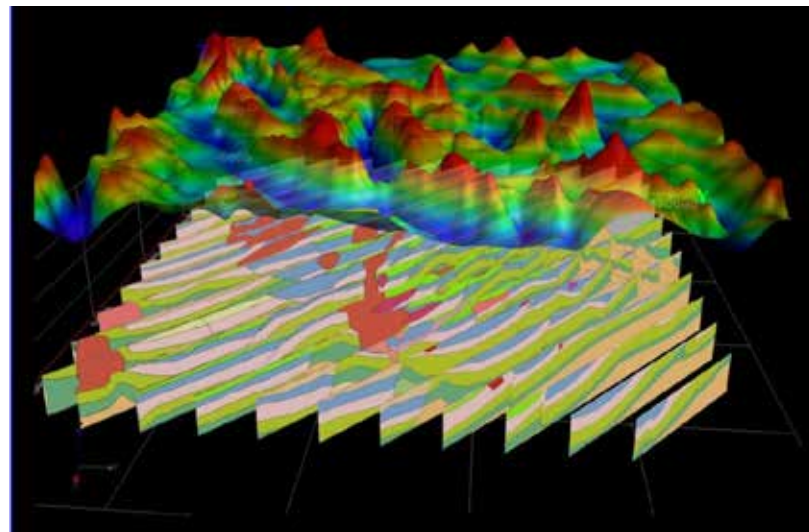


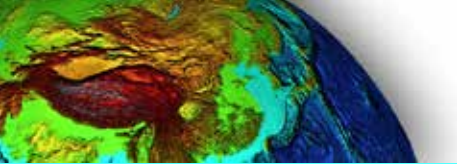


三、处理解释技术—地质填图

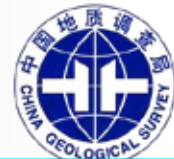


The 3D model consists of a series of 2.5D model, with the $Y_1=Y_2= \dots /2$, called Block Building Methods

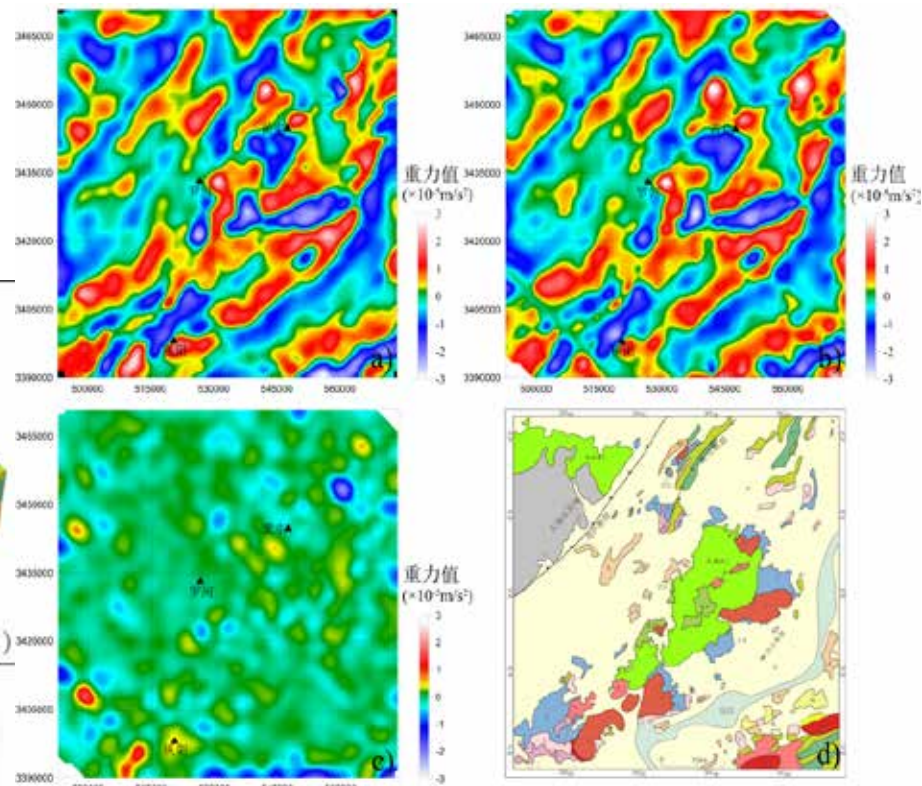
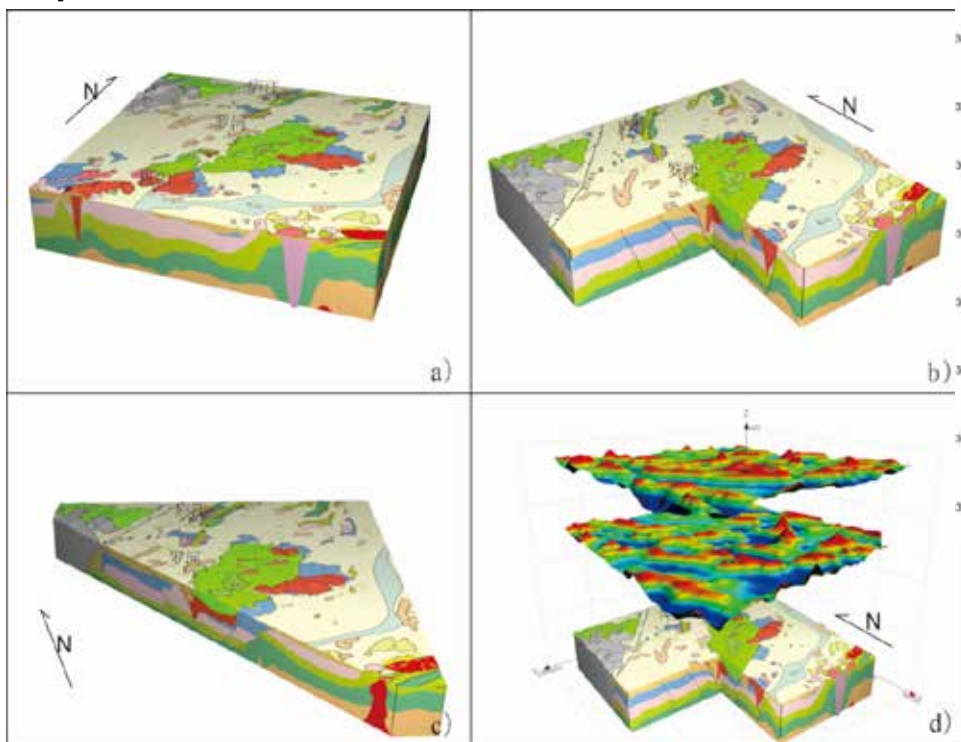




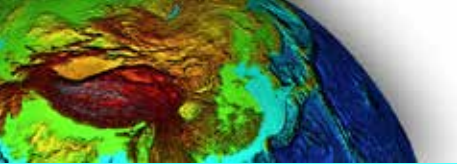
三、处理解释技术—地质填图



The 3D visualization of the geological model showing the spatial distribution of Mesozoic and volcanic sequences and plutons



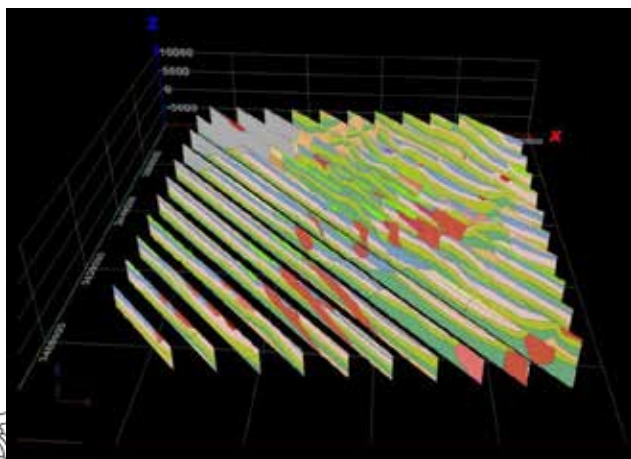
a)- observed gravity data ; b)- predicted data ; c)- difference between observed and predicated data ; d)- simplified geology



三、处理解释技术—地质填图



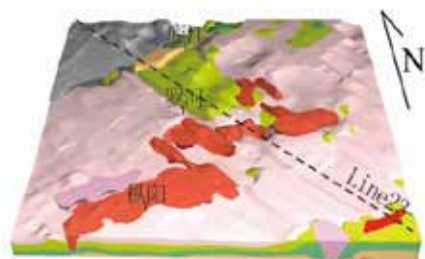
Using this first-order model, we can analyze the spatial relationship between the plutons and strata, predicting the deep targeting with the help of metallogenic model



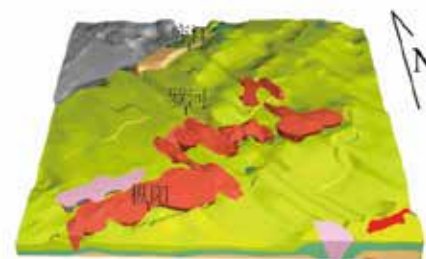
a)
Plutons and volc. and Jurassic



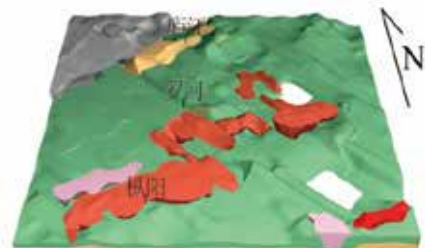
b)
Plutons and Jurassic and T-C



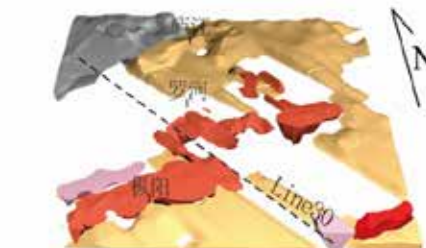
c)
Plutons and T-C、D-S



d)
Plutons and D-S

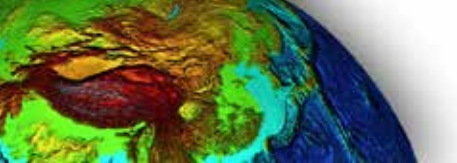


e)
Plutons and O-ε



f)
Plutons and Pt

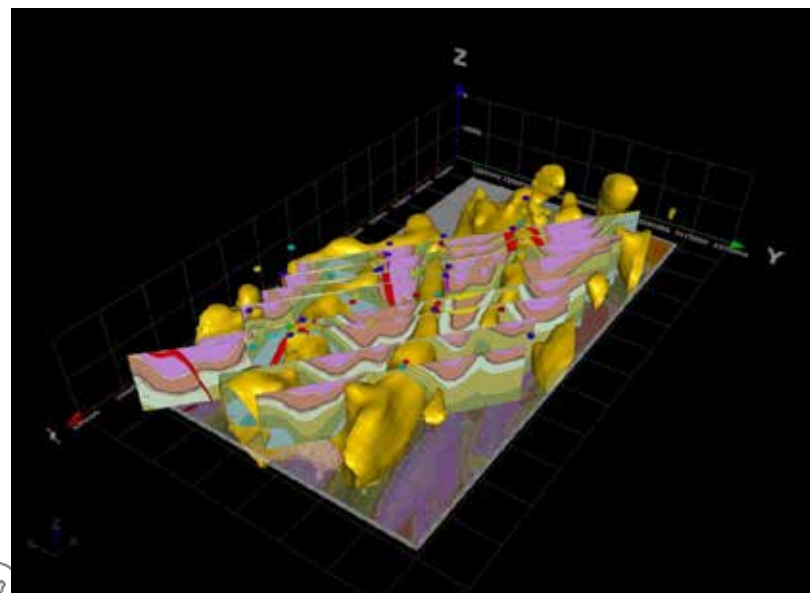
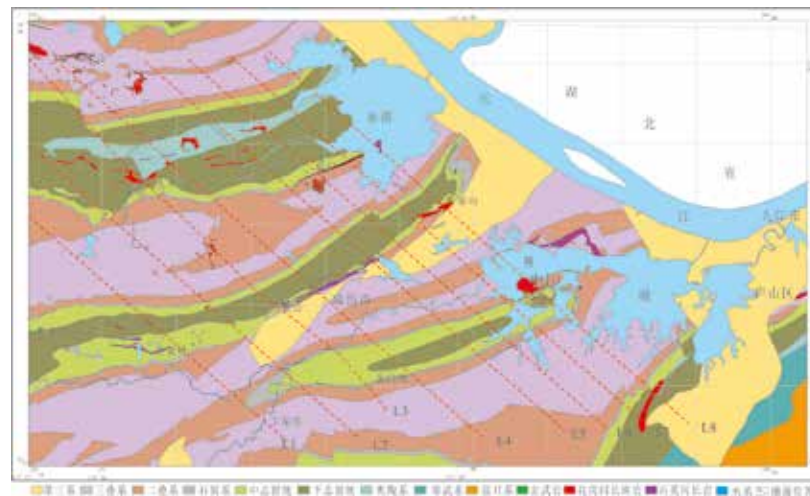
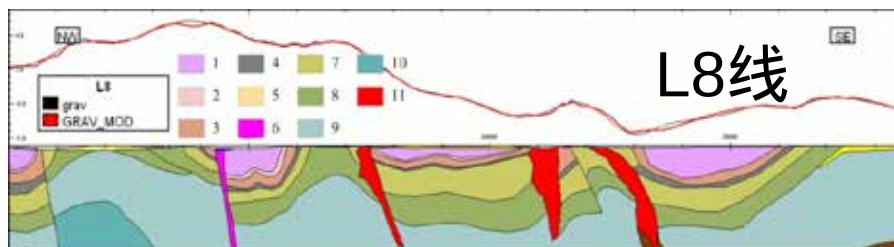
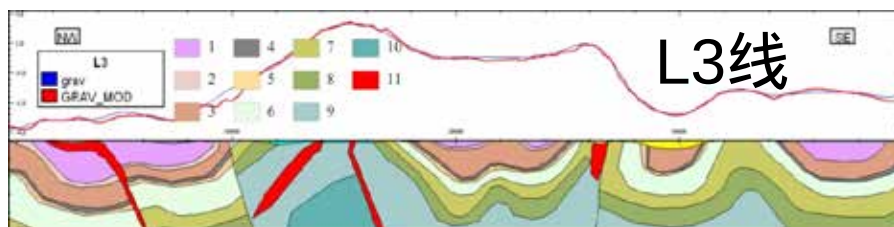
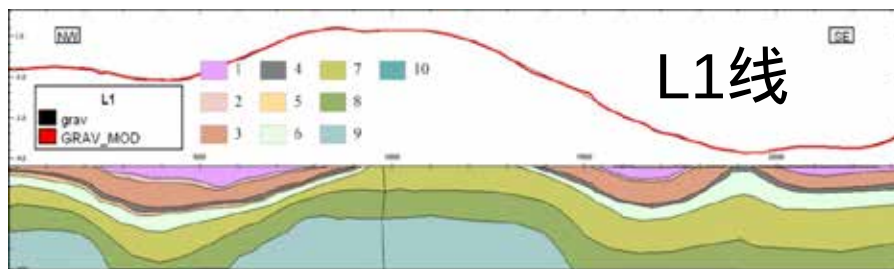




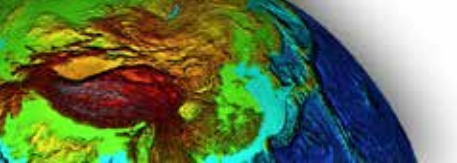
三、处理解释技术—地质填图



两种反演方法的有机结合—以九瑞矿集区为例的填图试验



1三叠系；2二叠上统；3二叠系下统；4石炭系；
5泥盆系；6石英闪长玢岩；7志留系中统；8志
留系下统；9奥陶系；10寒武系；11花岗闪长
斑岩



三、处理解释技术—其它技术

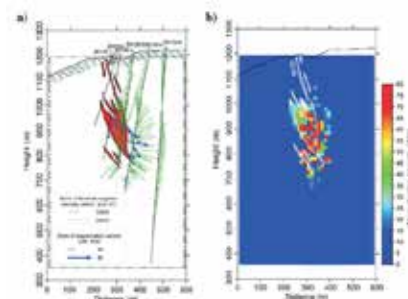


复杂条件的磁数据反演

剩磁情况

强自退磁

磁化方向估计方法；振幅反演；磁化矢量反演和参数反演；完全非线性反演



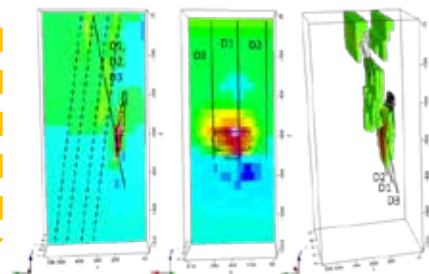
新类型数据

磁梯度

重力梯度

井中重力

磁场梯度与总场联合反演，重力梯度反演，井中与地面重力反演

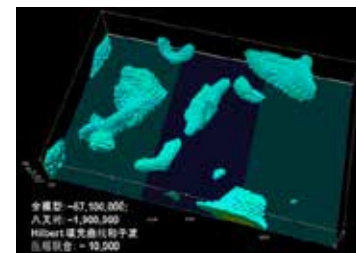


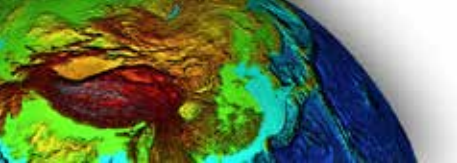
大尺度海量数据体

并行计算

算法创新

2D-3D FFT，3D子波压缩，自适应八叉树网络，Hilbert 空间填充曲线和子波压缩，数据自适应采样





三、处理解释技术—其它技术



重磁边缘检测技术--圈定构造和岩体等

边缘增强技术：

- u 总水平梯度法
- u 斜导数(TDR)
- u 总水平场垂直导数THDR
- u THETA法

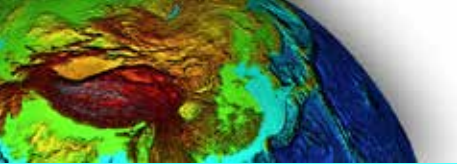
重磁多尺度边缘检测 (WORMS)：

由一系列上延到不同高度重磁数据的水平导数极大值点组成的，处理过程约束了位场梯度的位置和强度，其结果可以解释为地质构造的三维分布格局。

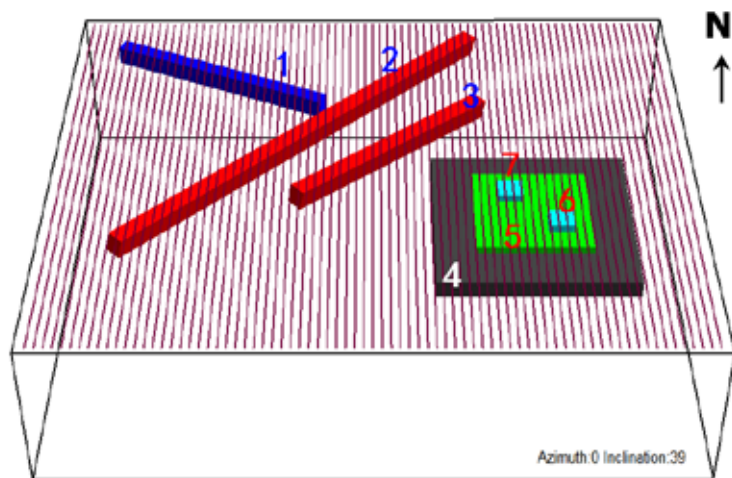
$$\text{TDR} \quad \text{Tilt} = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial g}{\partial x}}{\sqrt{\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}}}$$

$$\text{THDR} = \sqrt{\frac{\partial^2 \text{Tilt}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \text{Tilt}}{\partial y^2}}$$

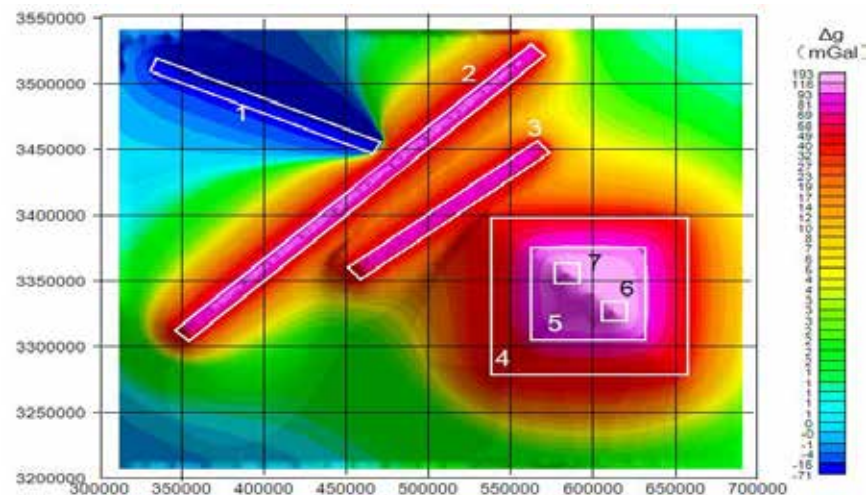
$$\text{Theta} \quad \cos q = \frac{\sqrt{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}}{\sqrt{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial z^2}}}$$



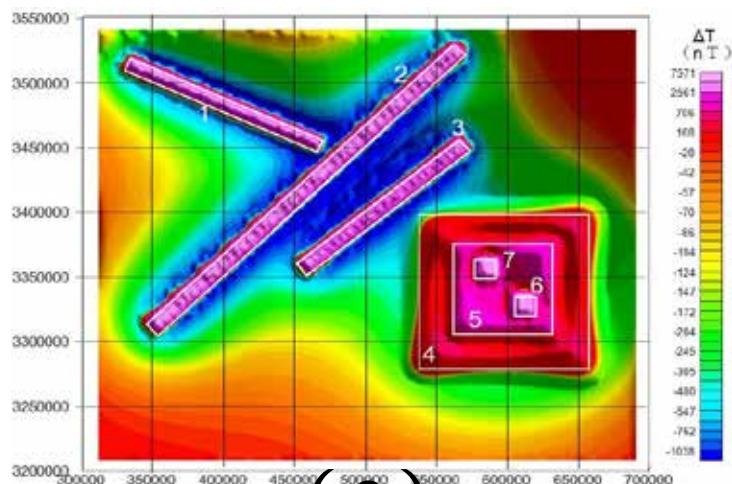
三、处理解释技术—其它技术



(a)



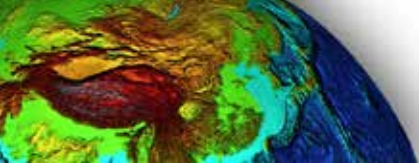
(b)



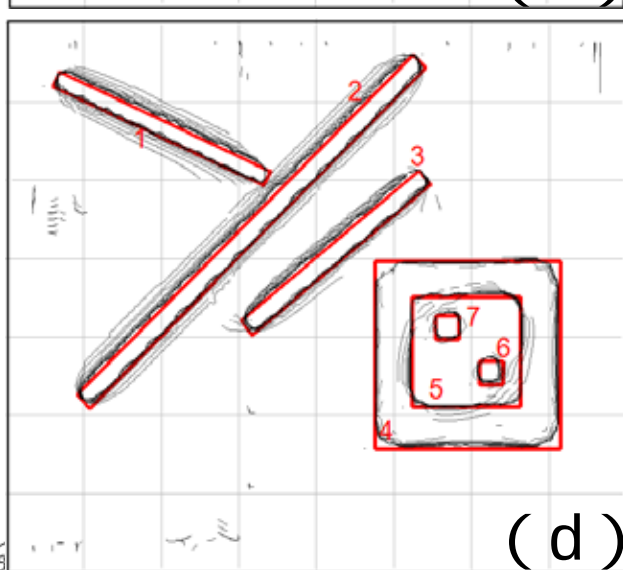
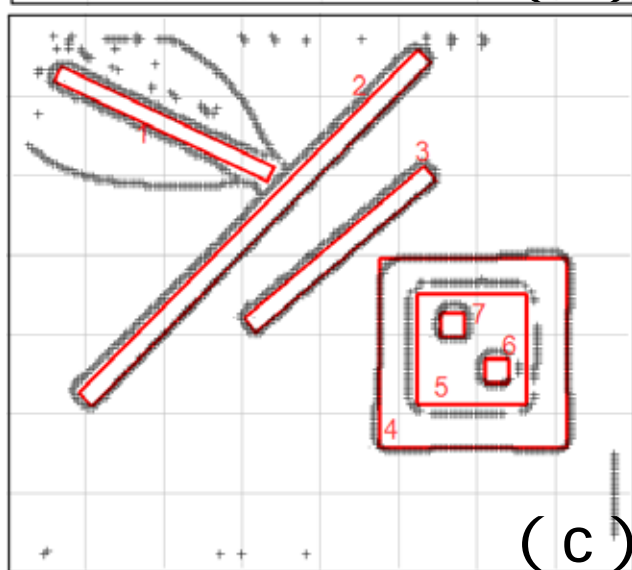
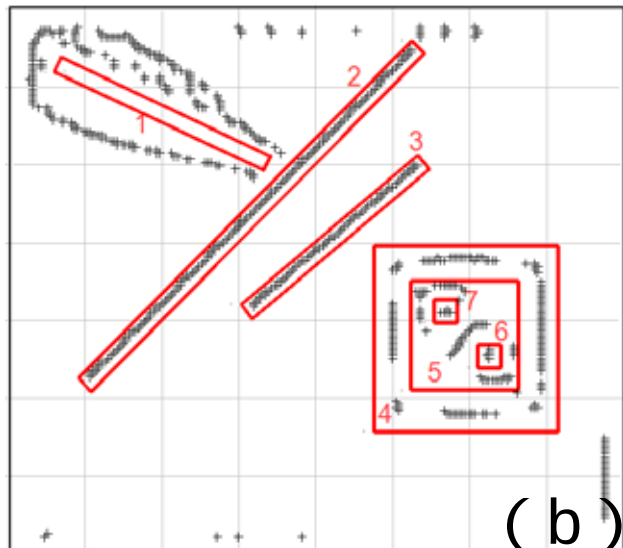
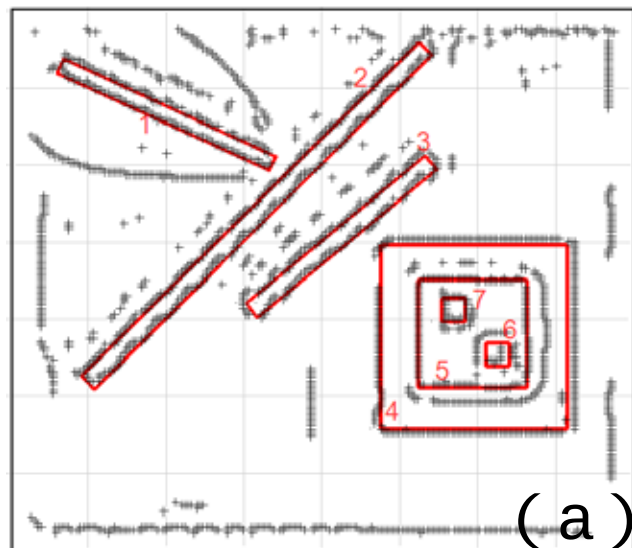
(c)

(a) 理论模型, (b) 重力异常
和 (c) 磁力异常

严加永等, 2015



三、处理解释技术—其它技术



重力异常边缘检测效果对比:

Ø HDTDR法 (a)

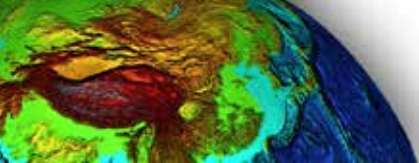
Ø TDR法 (b)

Ø THETA法 (c)

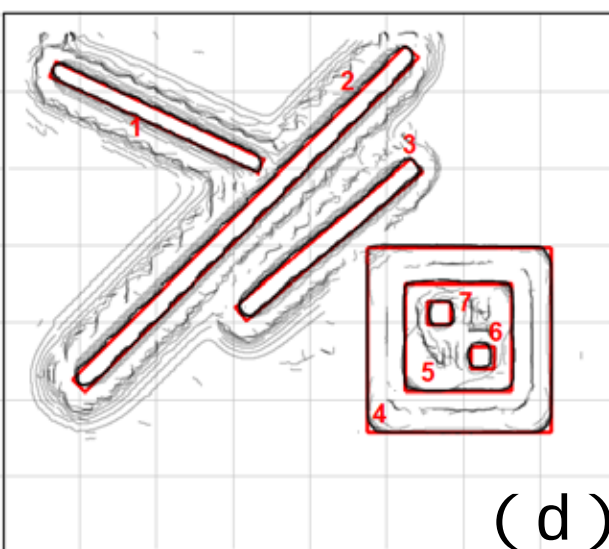
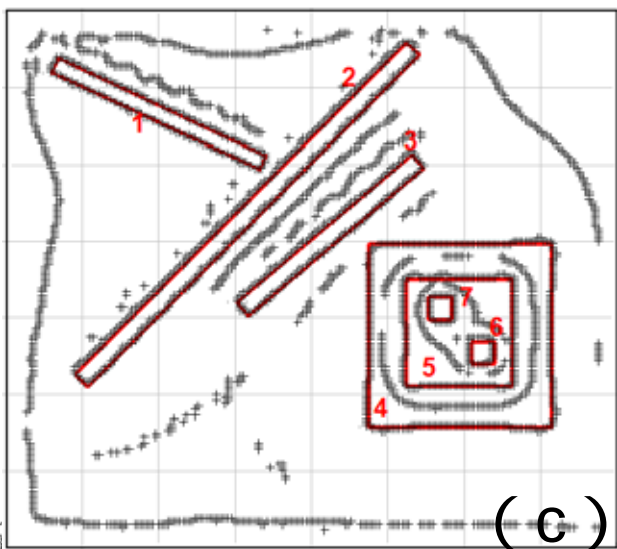
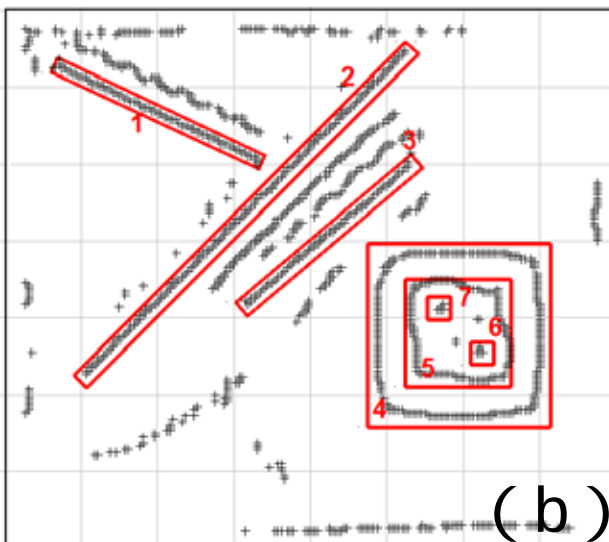
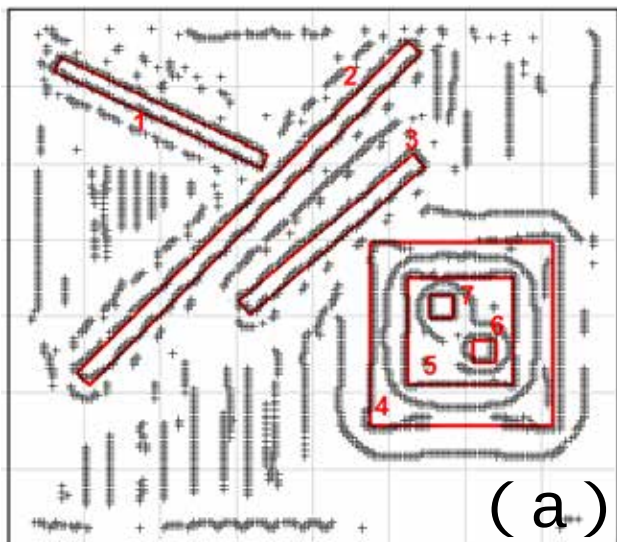
Ø WORMS法 (d)

(黑色点、线为检测结果, 红色为模型体顶部形态)

严加永等, 2015



三、处理解释技术—其它技术



磁力异常边缘检测效果对比:

Ø HDTDR法 (a)

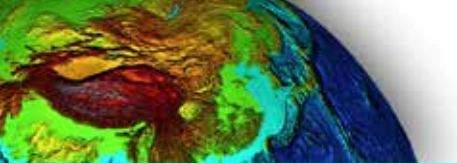
Ø TDR法 (b)

Ø THETA法 (c)

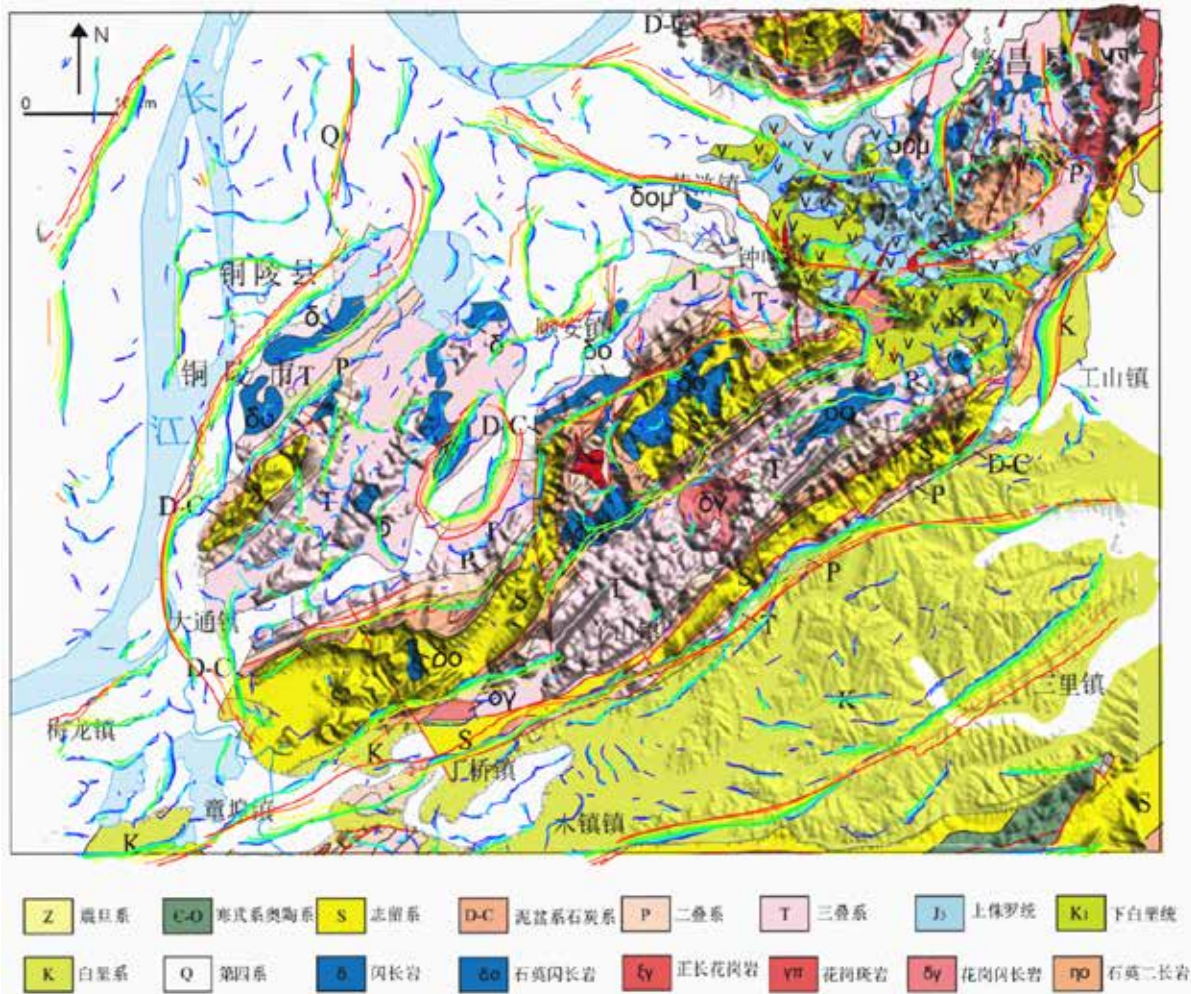
Ø WORMS法 (d)

(黑色点、线为检测结果, 红色为模型体顶部形态)

严加永等, 2015

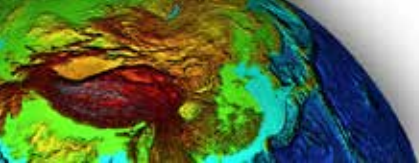


三、处理解释技术—其它技术

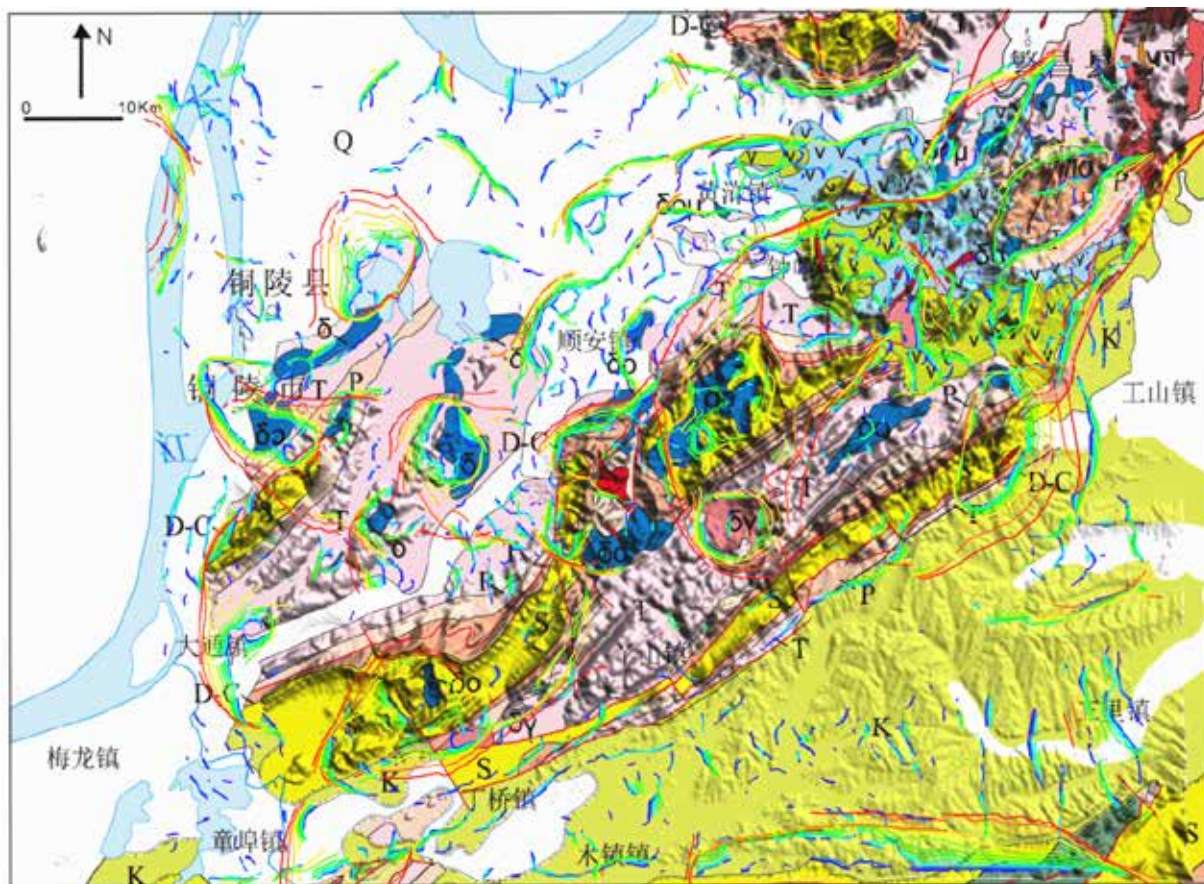


铜陵矿集区
重力多尺度边缘检测俯视图
(检测线束颜色从蓝色到红色表示延拓高度从小到大增加)

严加永等, 2015



三、处理解释技术—其它技术



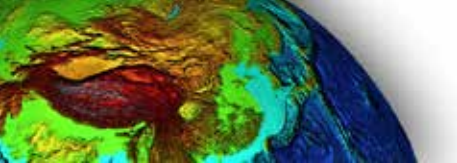
铜陵矿集区航磁
多尺度边缘检测
俯视图

(检测线束颜色
从蓝色到红色表
示延拓高度从小
到大增加)

Z 震旦系	C-O 寒武系奥陶系	S 志留系	D-C 泥盆系石炭系	P 二叠系	T 三叠系	J ₃ 上侏罗统	K ₁ 下白垩统
K 白垩系	Q 第四系	δ 闪长岩	δ _o 石英闪长岩	γ _g 正长花岗岩	γ _m 花岗岩	δ _γ 花岗闪长岩	η _o 石英二长岩

严加永等, 2015



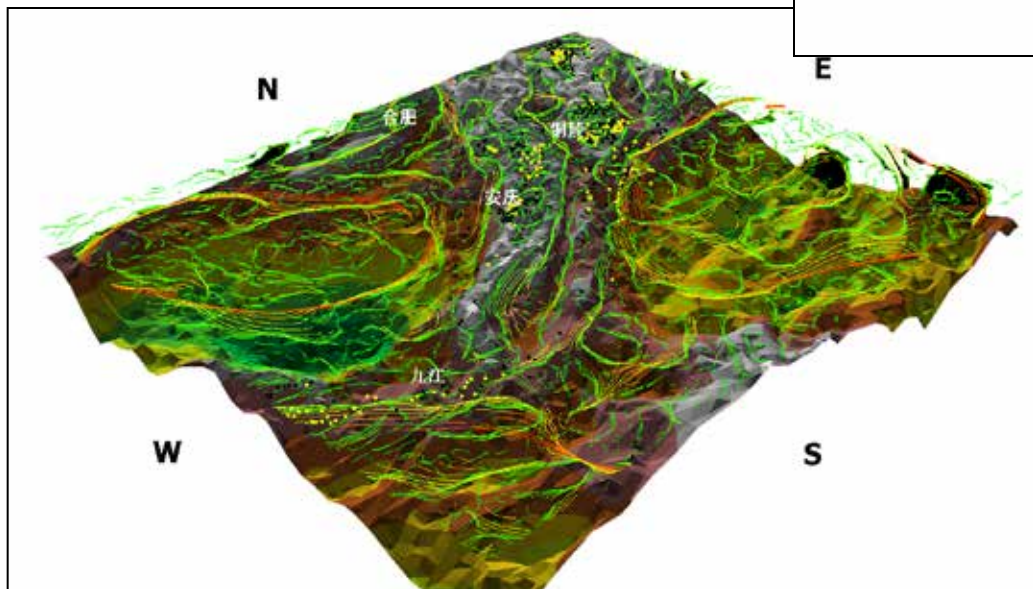
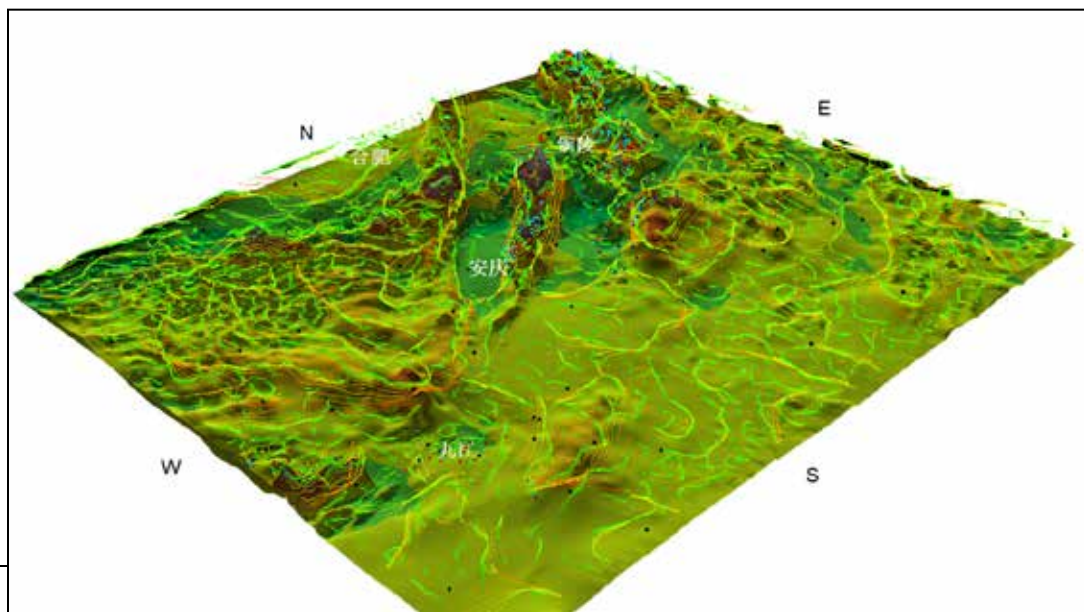


三、处理解释技术—其它技术



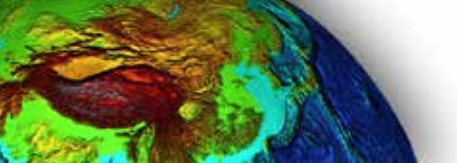
长江中下游成矿带 化极磁异常多尺度边缘 检测立体图

线颜色从绿色-红色变化表示延拓
高度从1km到45km检测结果



长江中下游成矿带布 格重力多尺度边缘检 测立体图

线颜色从绿色-红色变化表示延拓
高度从1km到55km检测结果



感谢以下专家，同意使用他们的资料

李耀国 教授，美国克罗拉多矿业学院

Misac N. Nabighian Professor , Colorado School of Mines,
Department of Geophysics

T. C. McCuaig , Professor , Centre for Exploration Targeting ,
The University of Western Australia

Richard Lane , Professor , Geoscience Australia

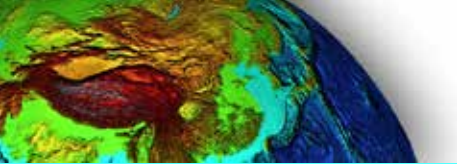
Dentith, Professor , The University of Western Australia

严加永，副研究员，中国地质科学院矿产资源研究所

祁光，博士，中国地质科学院矿产资源研究所

邓震，博士，中国地质科学院矿产资源研究所





谢谢

欢迎提出宝贵意见

吕庆田

中国地质科学院地球物理地球化学研究所

河北金光道84号, 065000

Lqt@cags.ac.cn

电话：13910406919 , 0316-2267686

