

# 矿产资源：需求、发现与探索

毛景文

中国地质科学院矿产资源研究所



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

矿床学与社会经济发展和人们生活休戚相关，因此寻找矿产资源始终是一个**重要的科学问题**。

人类历史发展表明：对于矿产资源的需求强度呈波浪式，重大需求引领找矿实现重大突破。欧美工业化过程、“一战”、“二战”和中国和平崛起是近代史上对资源需求的旺盛期，也促进了矿床学的快速发展。

自从上一世纪末到2012年是矿产资源研究与勘查的黄金时期，找矿成果斐然，发现和探明了一批矿产（西方矿业公司主要目标是铜矿和金矿），并且提出了IOCG（氧化铁铜金矿）新概念。

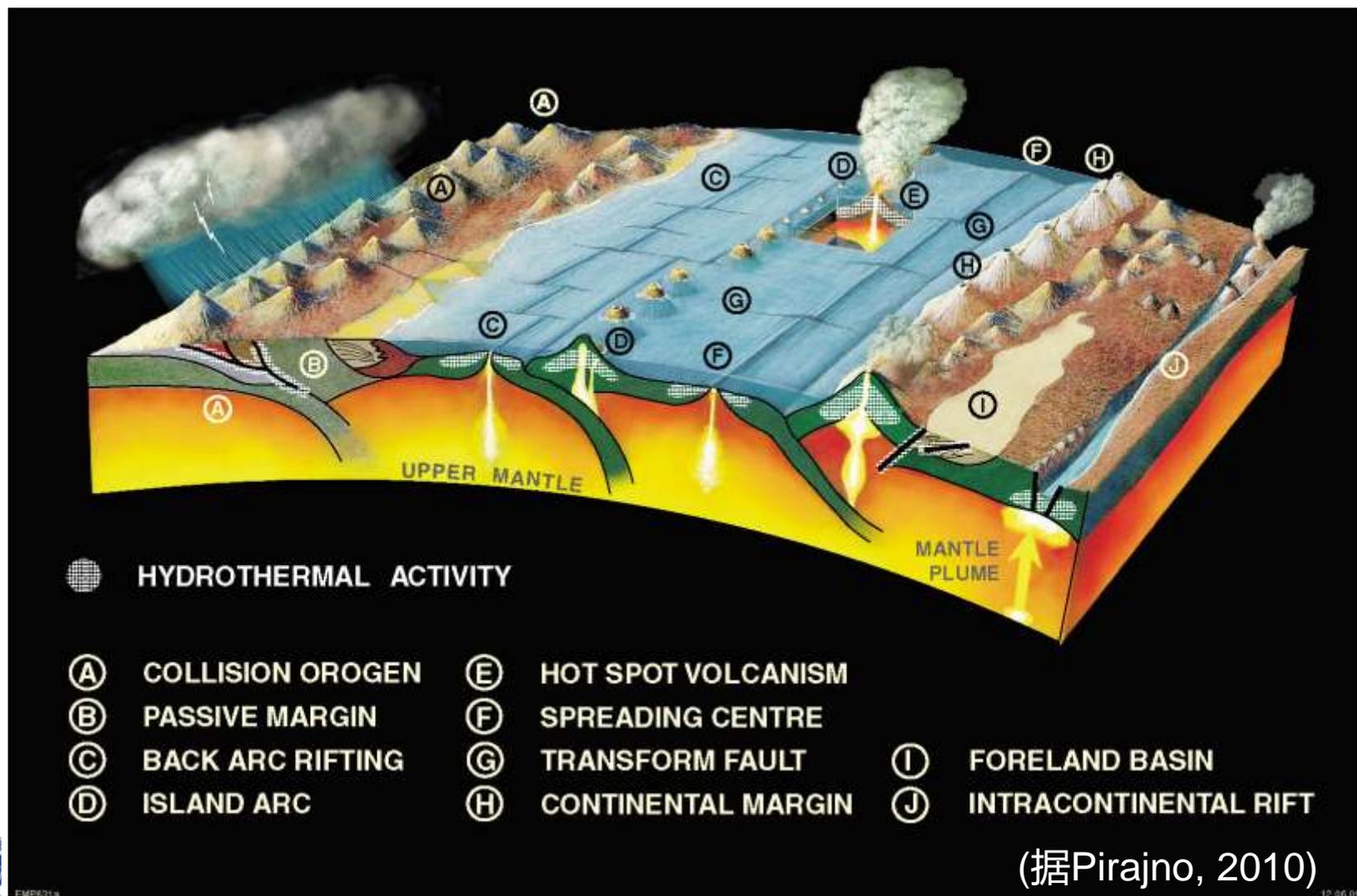


找矿是以先进地质理论为指导，技术方法为辅助，工程验证为准绳，高强度投资是关键。找矿勘查的核心是**获得重大经济效益**，矿越大越好，越富越好，越浅越好，大规模露天开采最好。

找矿分两种类型：**其一：草根找矿（Green field）**，主要寻找浅表矿床（深度不大于1000米）；**其二：老矿山深部和外围找矿（Brown field）**，由于已经有基础设施，开展探边摸底，按照经济规律决定开采深度。

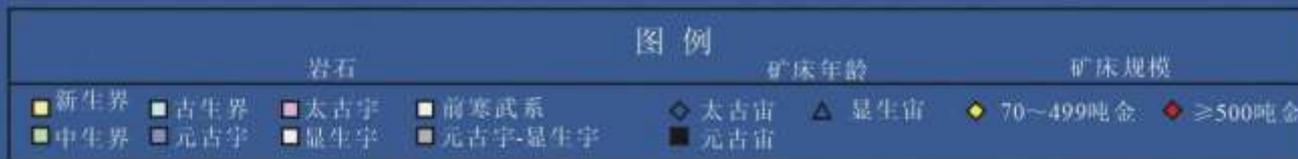


# 一、区域构造与大规模成矿：发现规律、部署找矿



# 1. 造山型金矿：与地球块体聚合事件密切相关

## 大型造山型金矿分布图

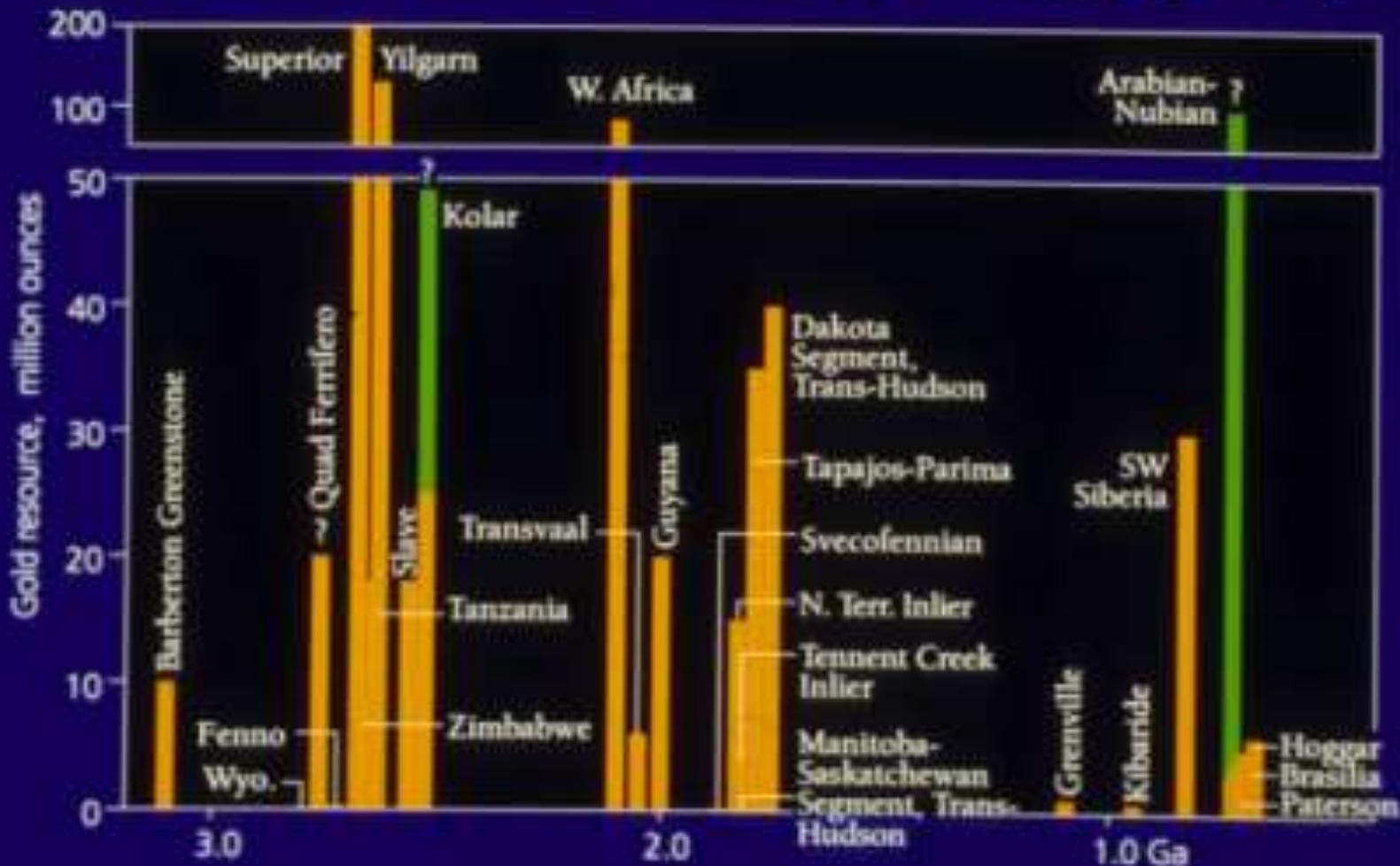


中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

(Gosselin et al., 2004)

# Million Oz. Gold

Gold Resource: ■ Pre-modern total ■ Modern only

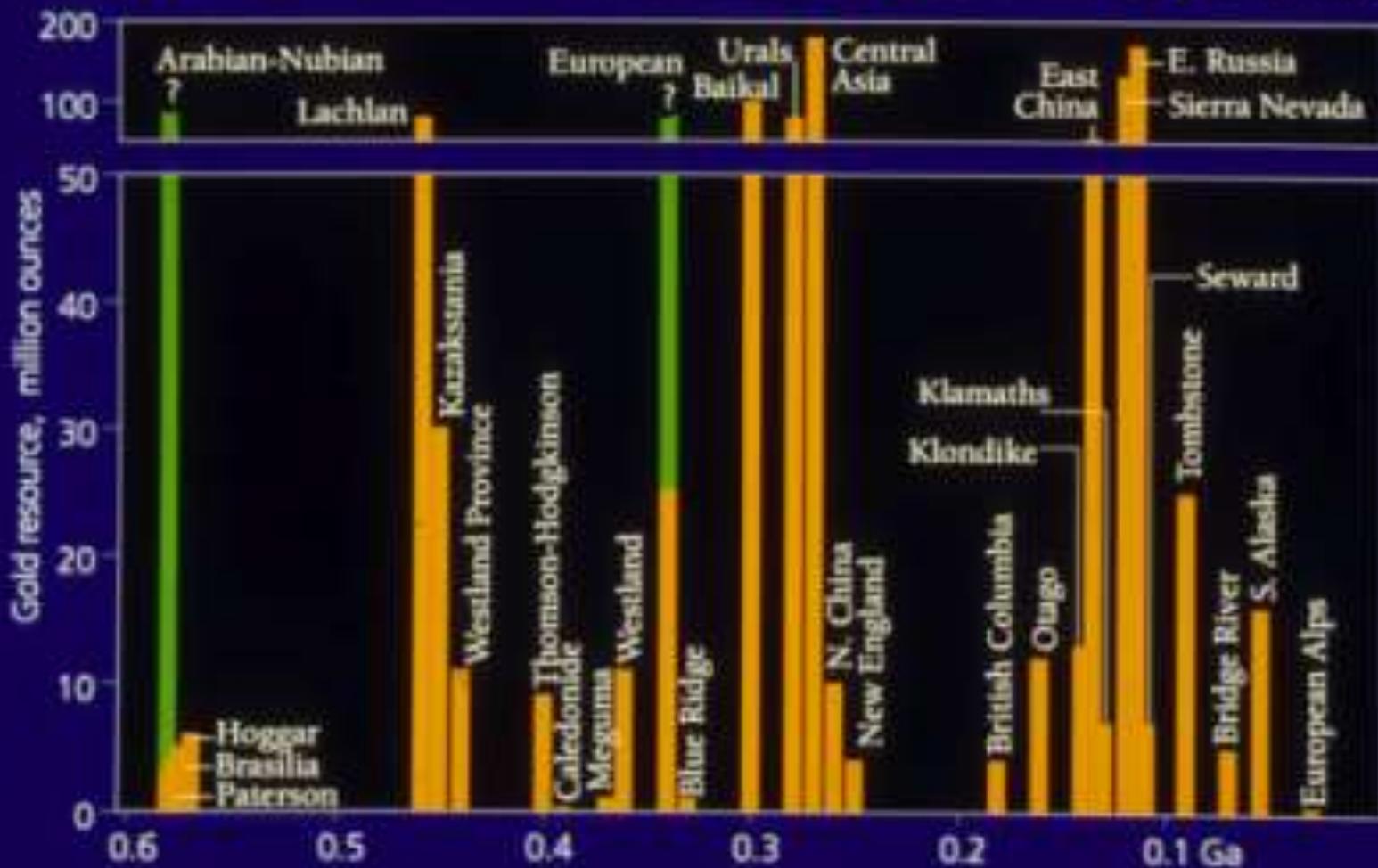


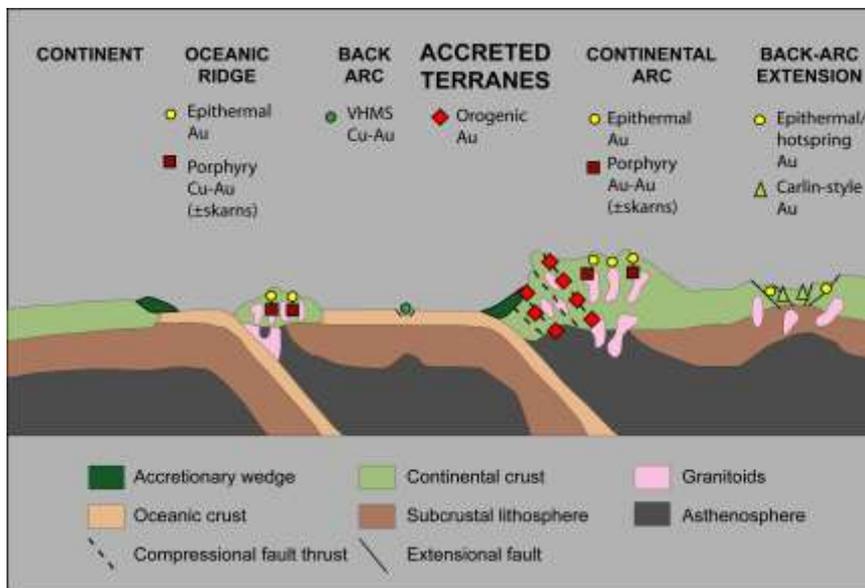
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

Goldfarb et al., 2001

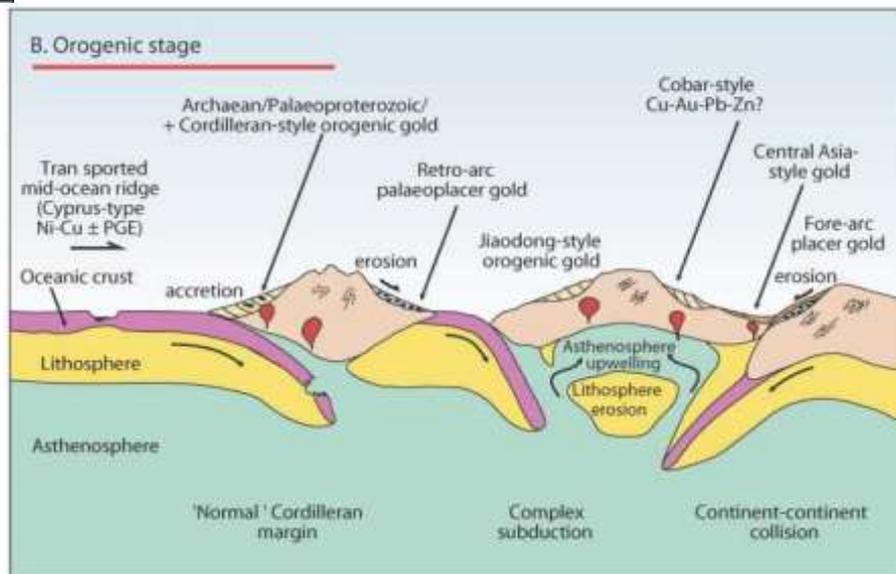
# Million Oz. Gold

Gold Resource: ■ Pre-modern total ■ Modern only





(Groves et al., 1998)



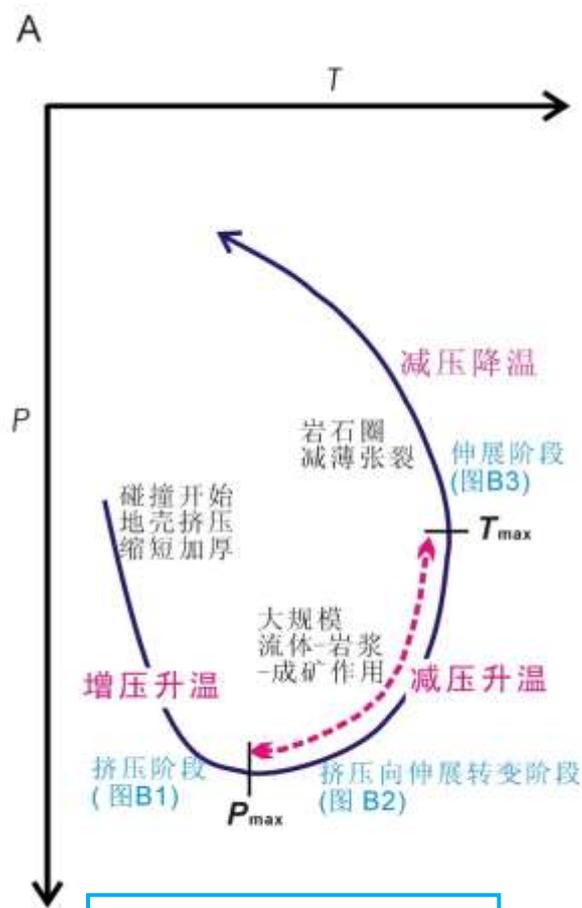
(Groves and Bierlein, 2007)

## 俯冲造山和碰撞造山阶段的金矿成矿模型

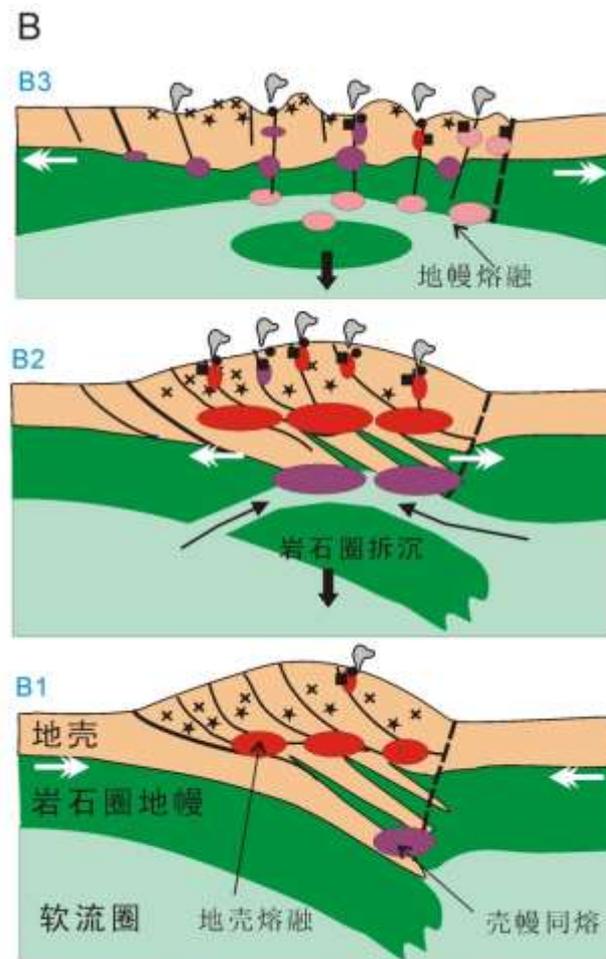


# 碰撞造山成矿 CMF 模型：增压升温造山、减压升温碰撞后成矿和减压降温伸展成矿

(Chen et al., 2005, 陈衍景等, 2008)



(造山 P-T-t 轨迹, Jamieson, 1991)



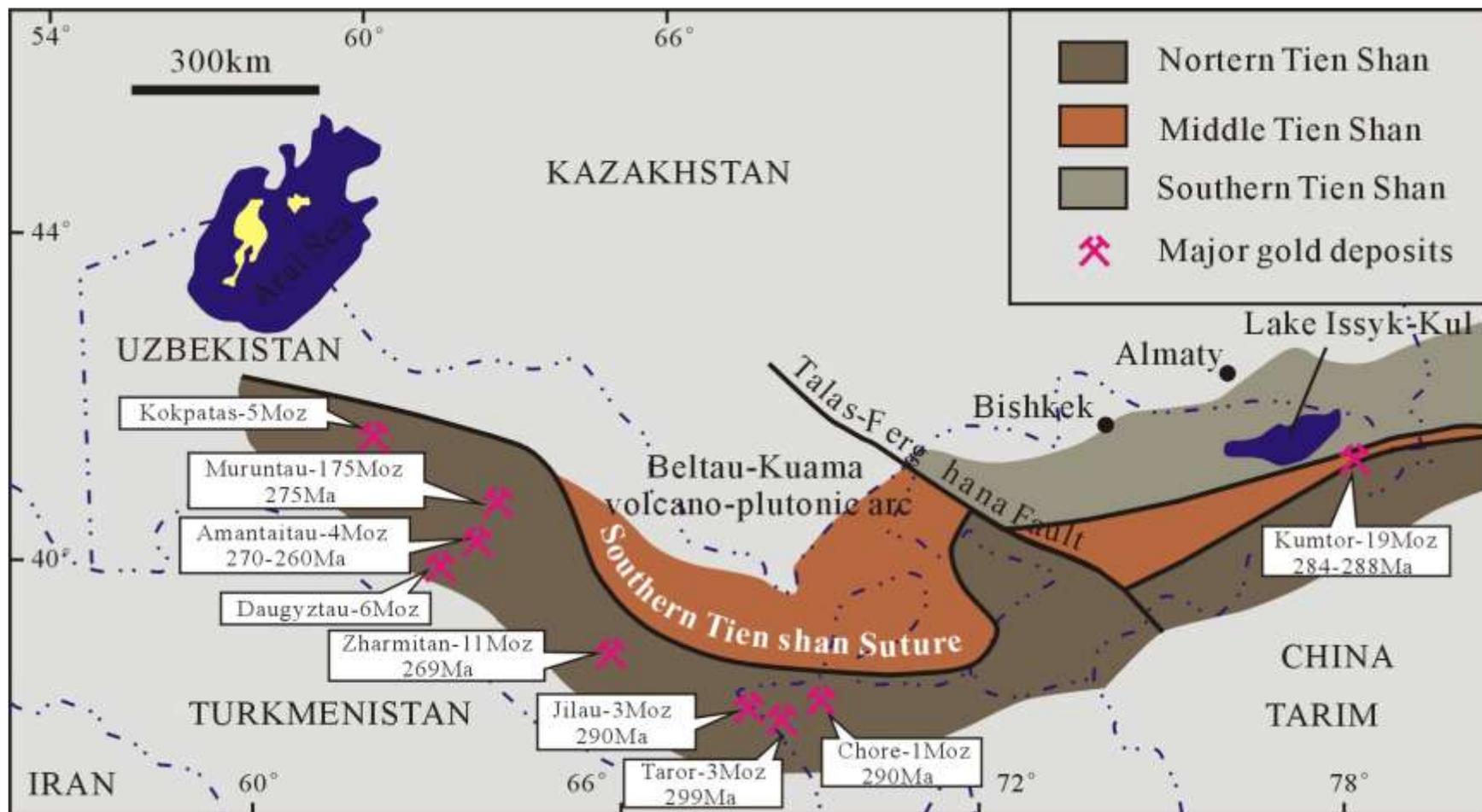
\* 造山带中的浅成热液矿床 • 火山岩中的浅成热液矿床 \* 沉积岩中的浅成热液矿床



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



# 后碰撞伸展环境成矿作用

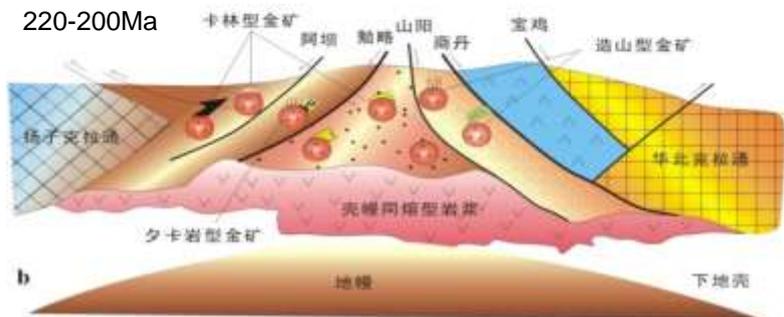
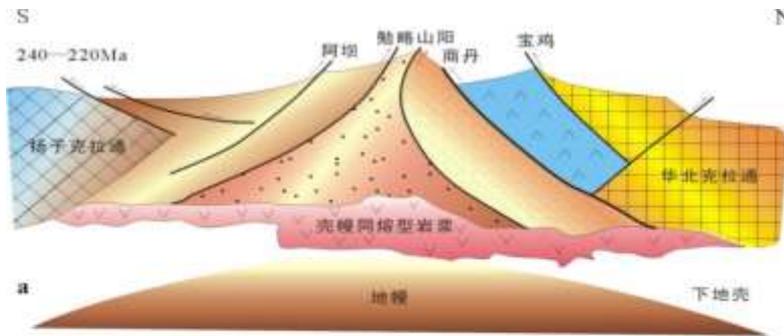


后造山形成的南天山世界巨型金矿带

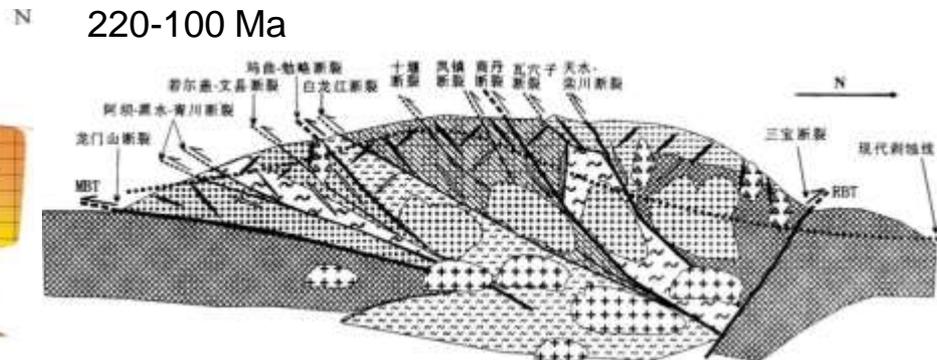
(据Yakubchuk, 2002)



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



西秦岭碰撞后伸展走滑构造与造山型-类卡林型金矿 (Mao et al., 2002; 毛景文等, 2005)



- |   |  |   |
|---|--|---|
| 扬子板块海西-印支构造层<br>Late Paleozoic-Triassic strata in the Yangtze plate | 秦岭微板块海西-印支构造层<br>Late Paleozoic-Triassic strata in the Qinling micro-plate | 华北板块中元古-早古生代构造层<br>Mesoproterozoic-Early Paleozoic strata in the North China plate  |
| 阿坝-山阳和中秦岭地体基底<br>Basement of the Aomen and Central Qinling terranes | 秦岭微板块基底<br>Basement of the Qinling micro-plate                             | 扬子克拉通和华北克拉通基底<br>Basements of the Yangtze and North China cratons                   |
| 碰撞体制的花岗岩类岩浆房<br>Collisional magma chamber of granitoids             | 碰撞体制的深成花岗岩类<br>Collisional deep-seated granitoids                          | 碰撞体制的浅成位斑岩类<br>Collisional shallow-seated porphyry and related stocks               |
| 重要断裂构造<br>Main fault  | 造山型金矿床<br>Orogenic type gold lodes   | 卡林-类卡林型和岩浆系列的金矿床<br>Carlin-type and Carlin-like and intrusion-related gold deposits |

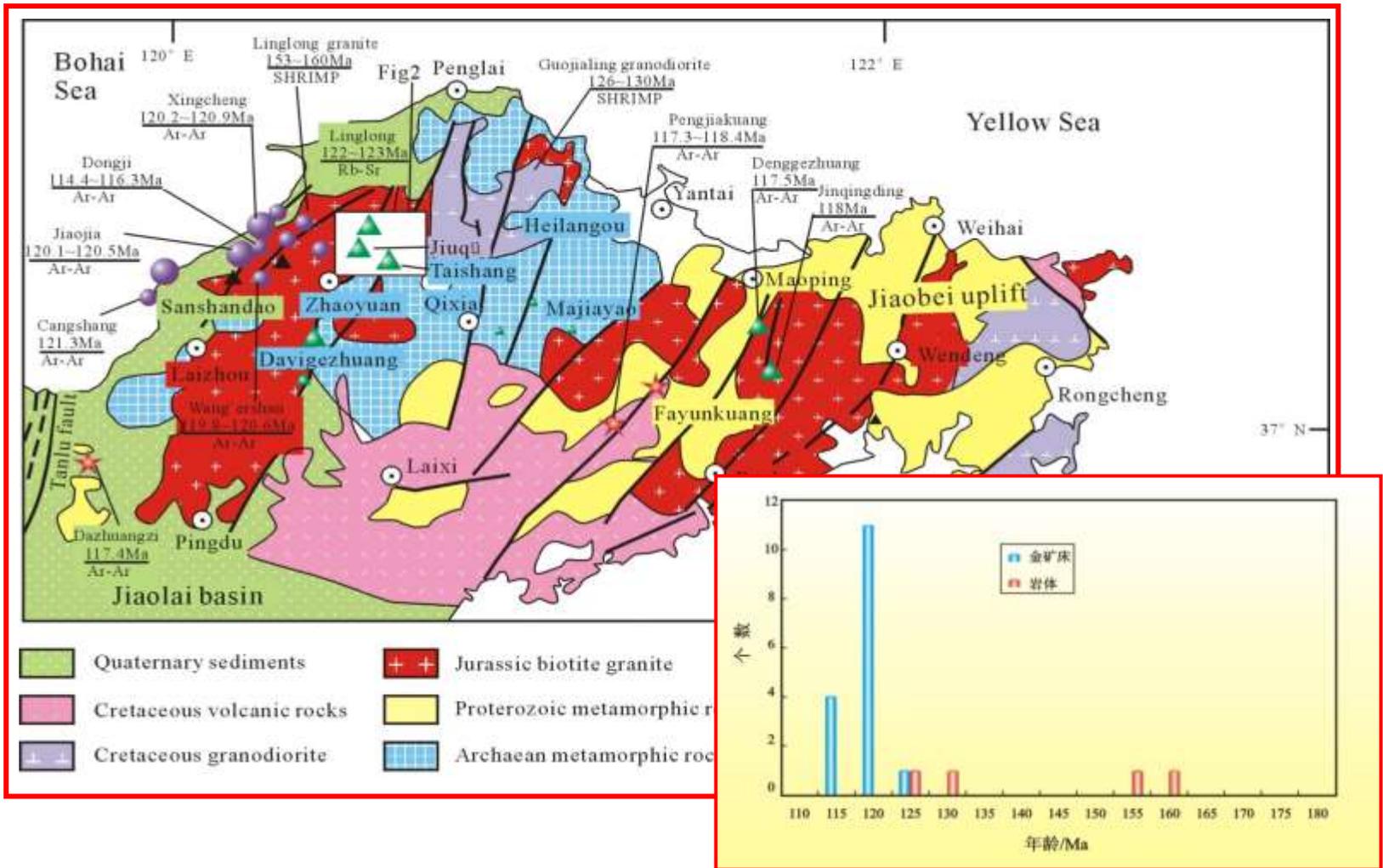
图 5 西秦岭卡林-类卡林型金矿成矿构造模式

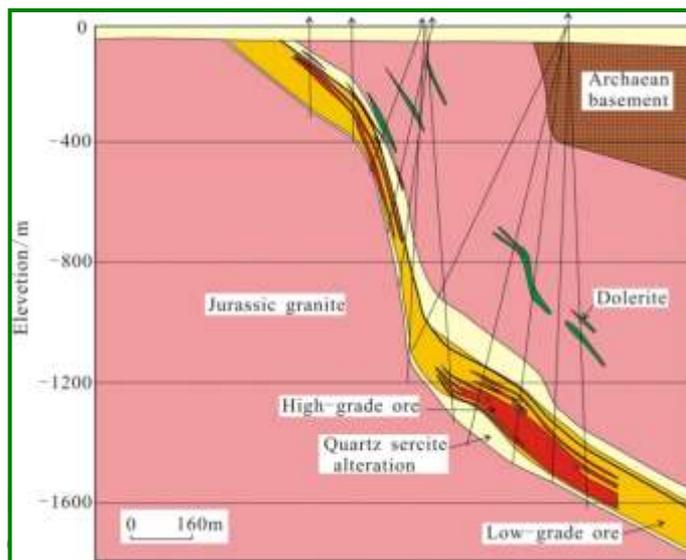
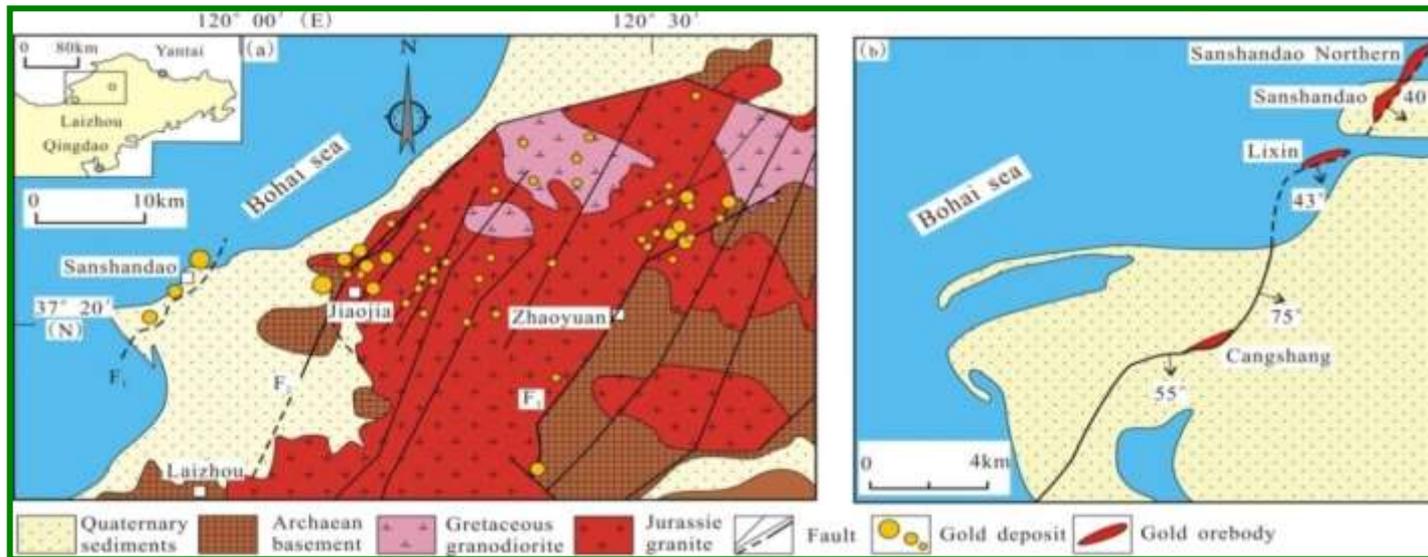
西秦岭地区造山环境形成的卡林型-类卡林型金矿 (陈衍景等, 2004) : 在陆内陆陆碰撞过程, 陆内俯冲不仅导致地壳缩短隆升增厚, 而且使俯冲板片变质脱水、熔融, 派生出流体, 上升到次级构造带, 形成卡林型-类卡林型和造山型金矿。



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

# 伸展环境脉状金矿床



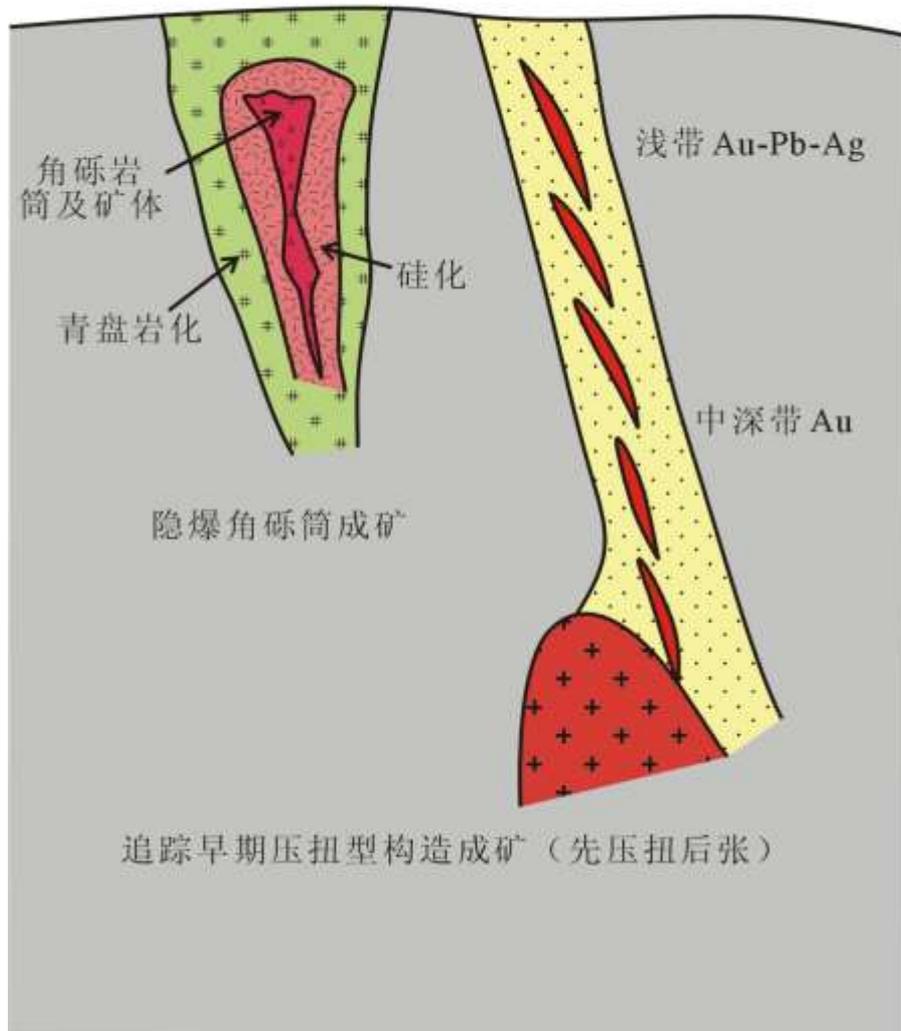


120-110 Ma金矿化出现在一组北东向张扭构造内，明显姻袭了160 – 135 Ma的压扭构造

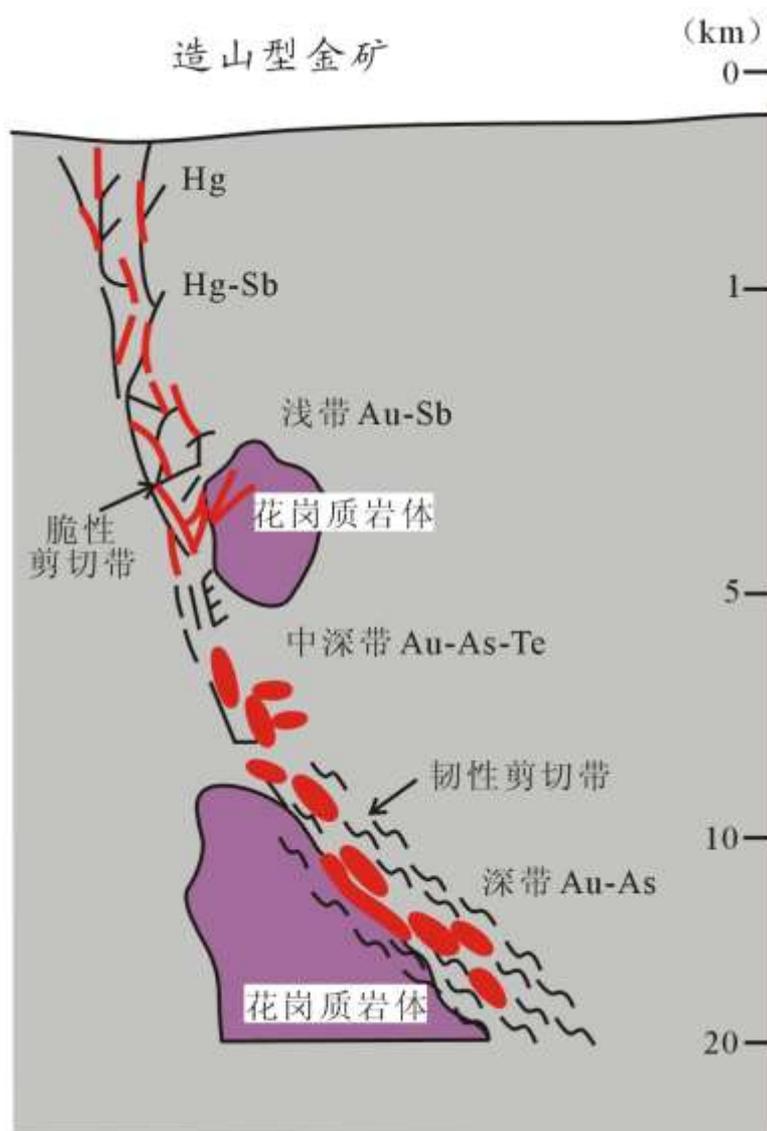
(据宋春明等, 2014)



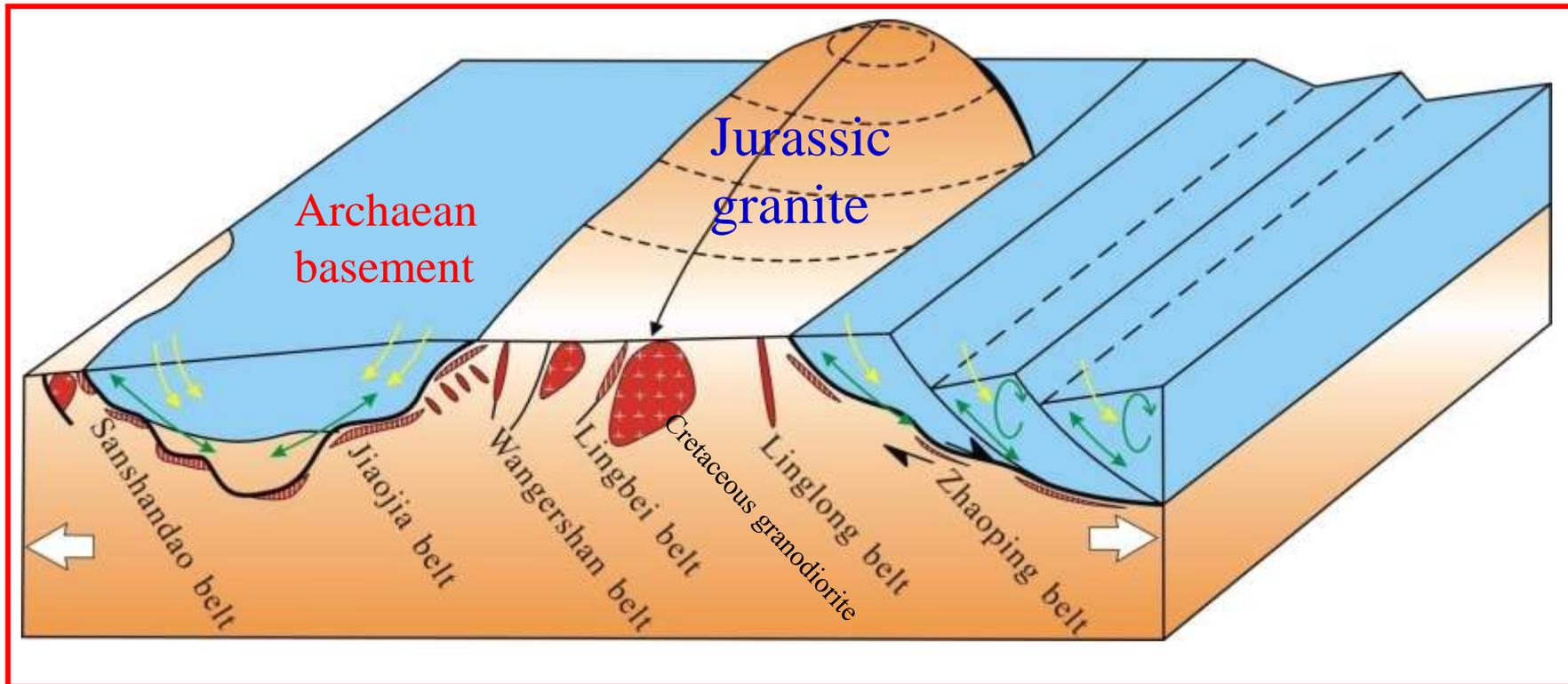
伸展型金矿



造山型金矿



## 模型2 伸展型两类金矿成矿模型

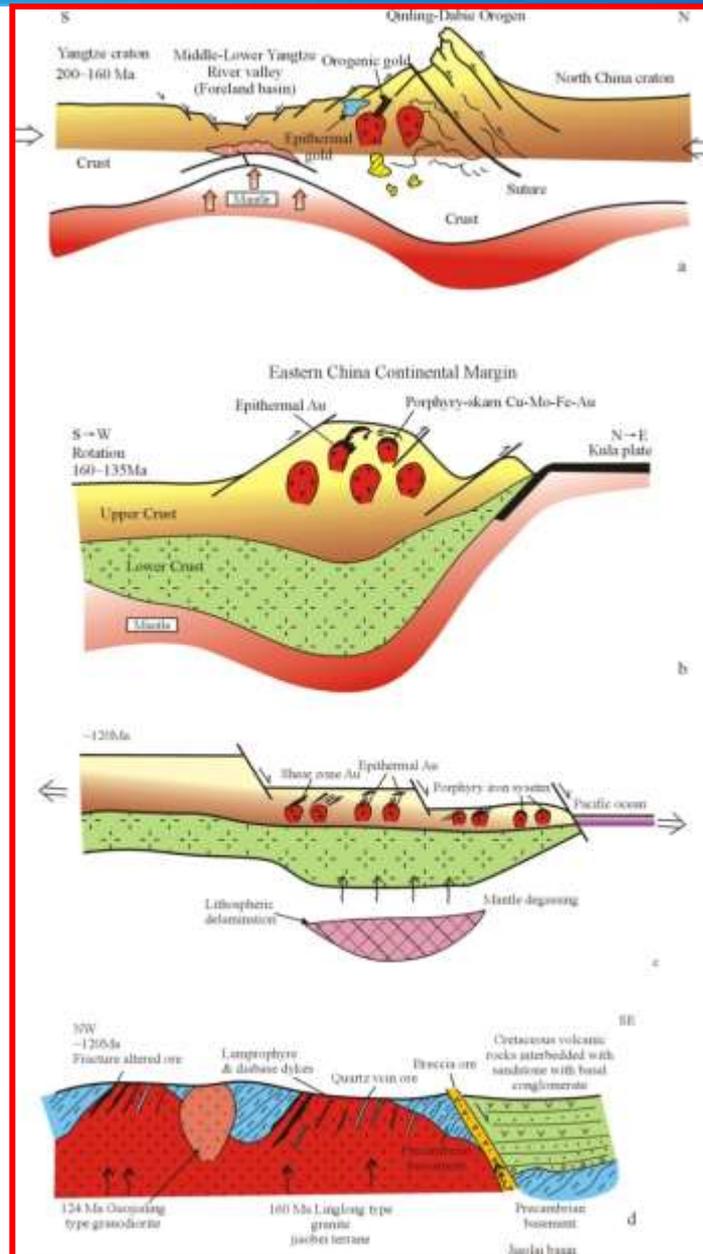


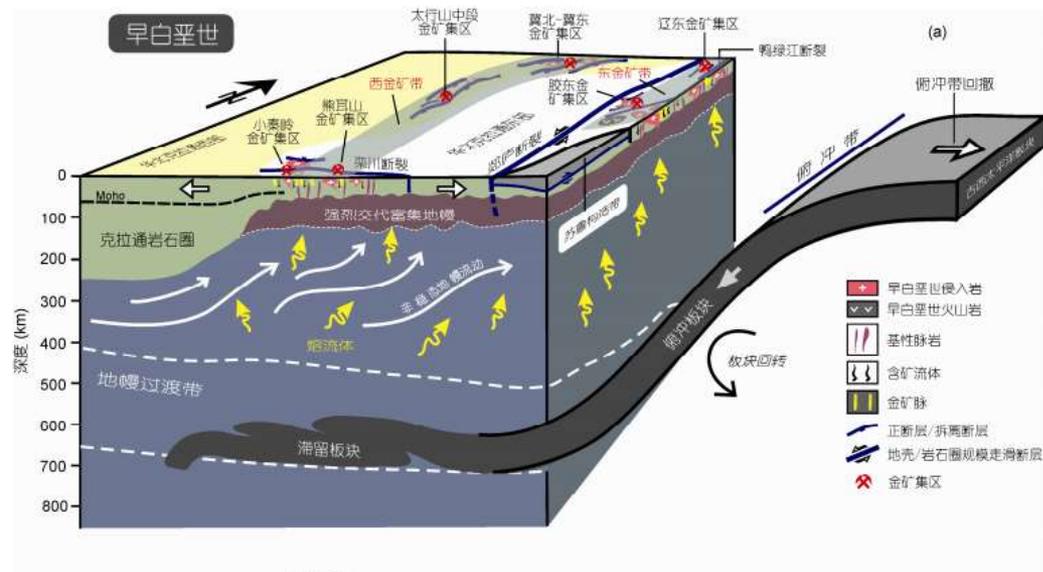
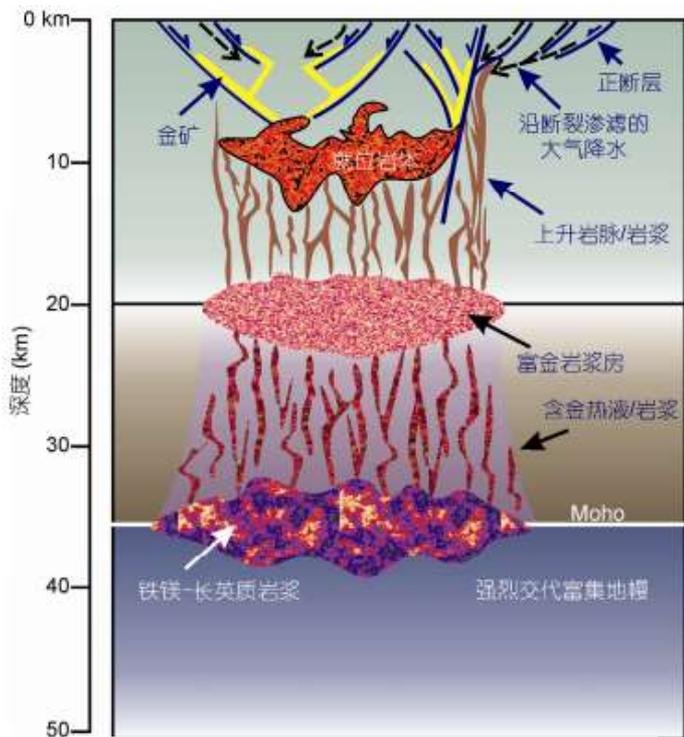
**New model showing the gold ores are controlled by detachment fractures and genetically associated with Cretaceous granodiorite plutons (after Song et al., 2014)**



# 胶东金矿成矿动力学模型和矿床模型

(after Mao et al, 2006, 2008)



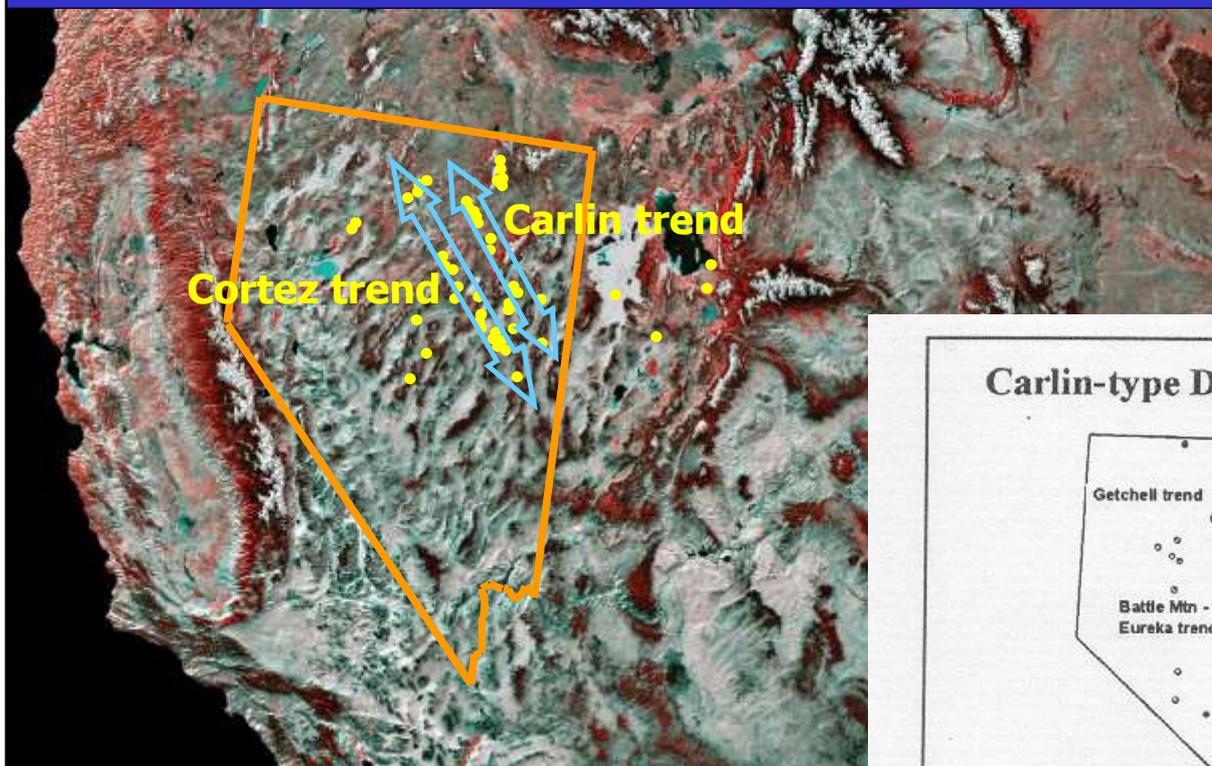


## 华北克拉通破坏与伸展型金矿成矿模型 (据朱日祥等, 2015)



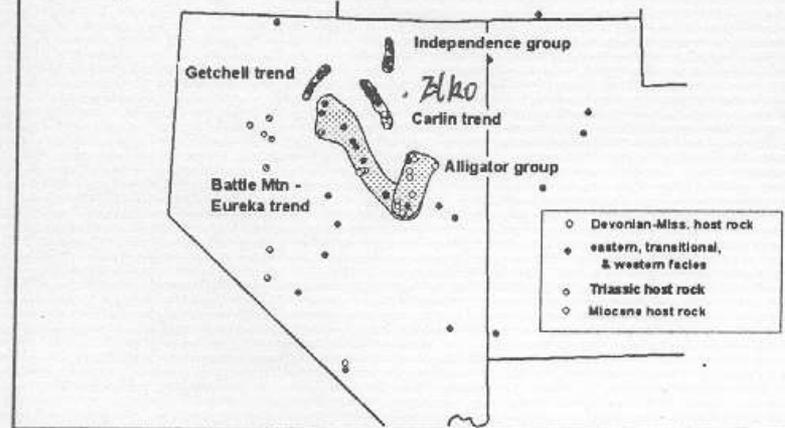
## 2. 卡林型金矿：与岩浆活动密切相关

Clusters of Carlin-type deposits occur as linear trends in the Great Basin province of the U.S.



(据John Manteau, 2003)

Carlin-type Deposits in Nevada & Utah





- disseminated replacement bodies,
- adjacent to high-angle faults, and are
- amenable to bulk mining techniques

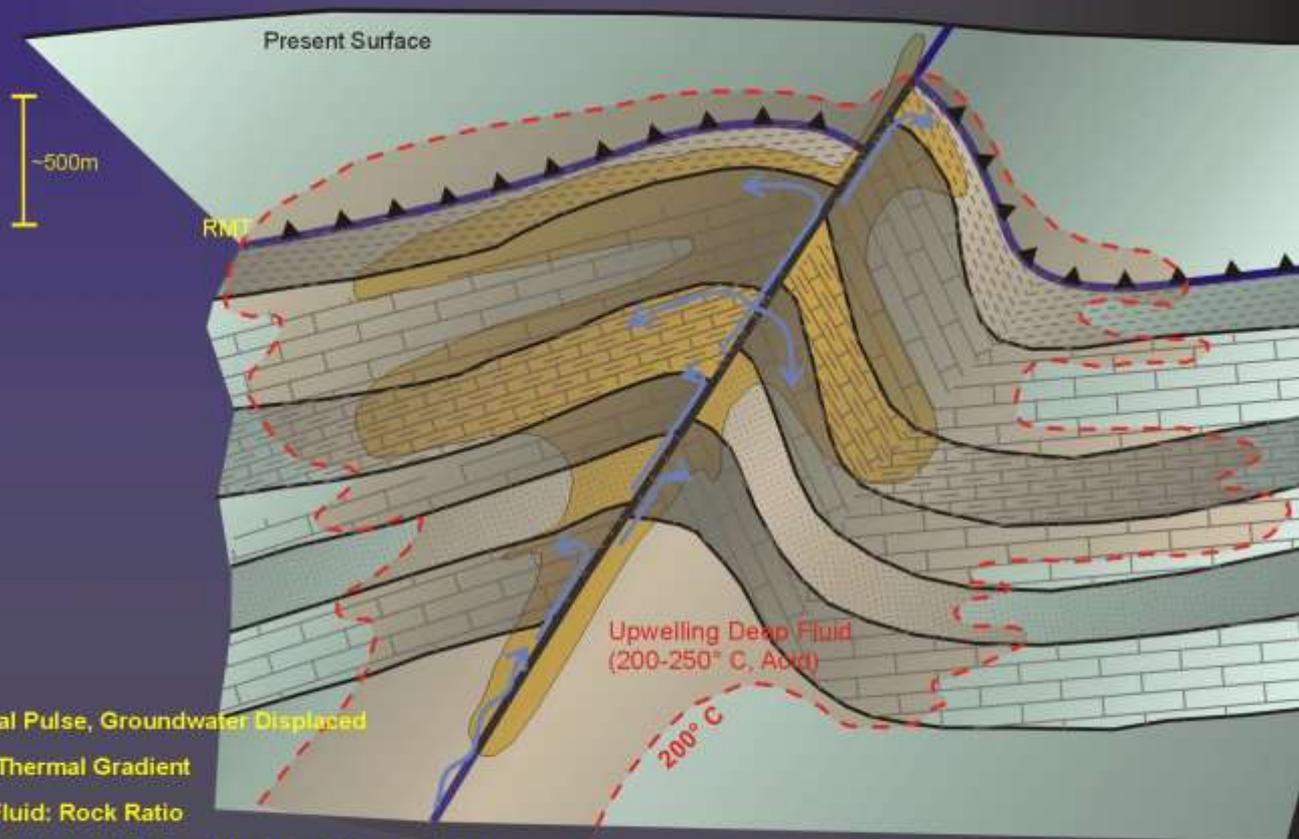


**The open pit at Post-Betze – large-tonnage, open-pittable deposits – ~40 Moz of gold at a grade of ~5 g/t.**



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

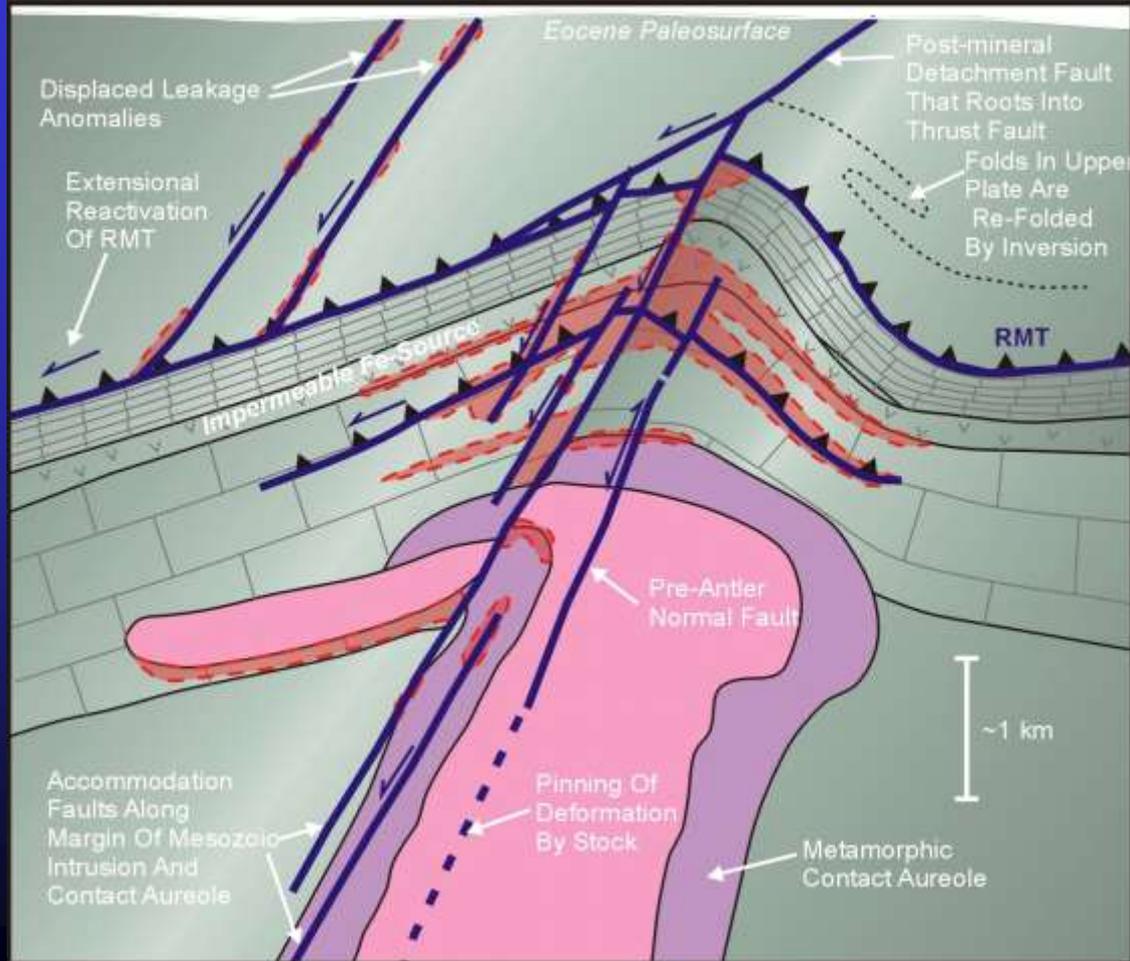
## Main Gold Ore Stage

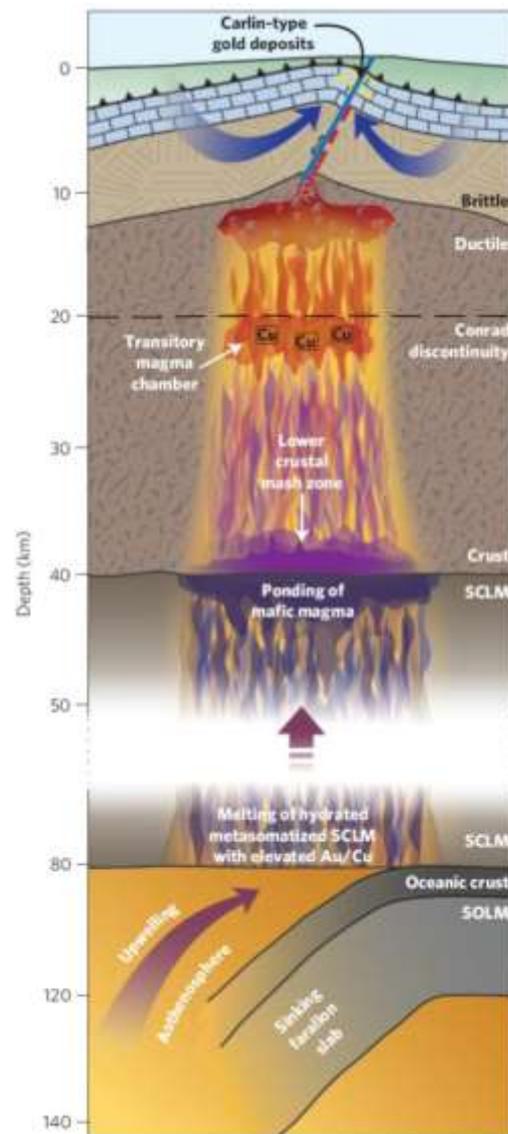
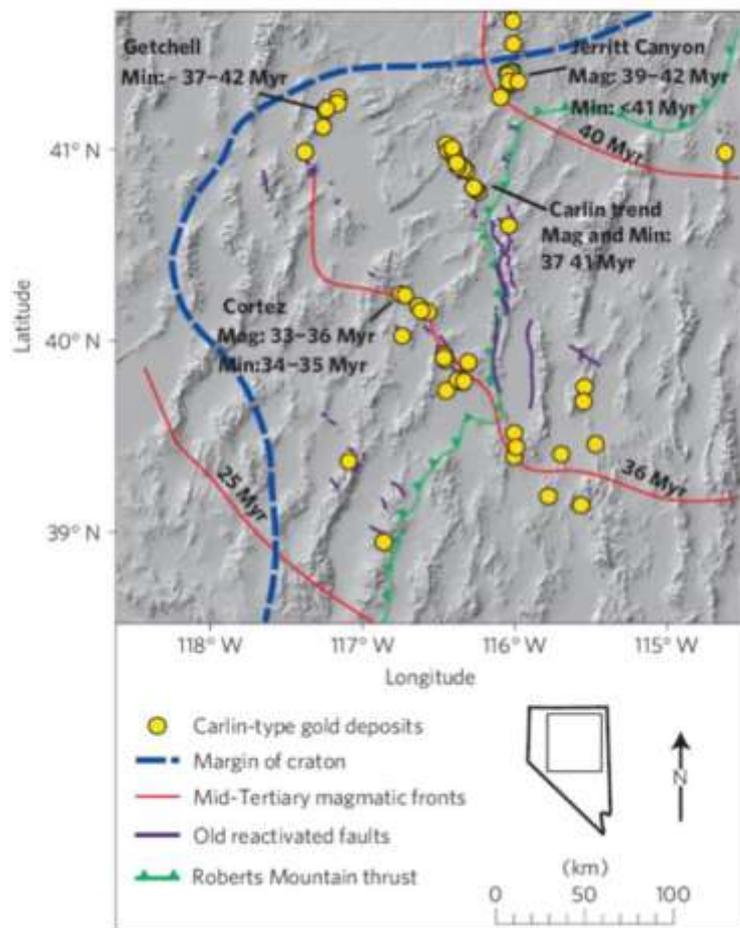


- 1) Main Thermal Pulse, Groundwater Displaced
- 2) Only Minor Thermal Gradient
- 3) High Deep Fluid: Rock Ratio
- 4) Decarbonatization, Sulfidation, Major Gold Deposition
- 5) Minor to Moderate Silicification Accompanying Minor Cooling



# Drill Targets

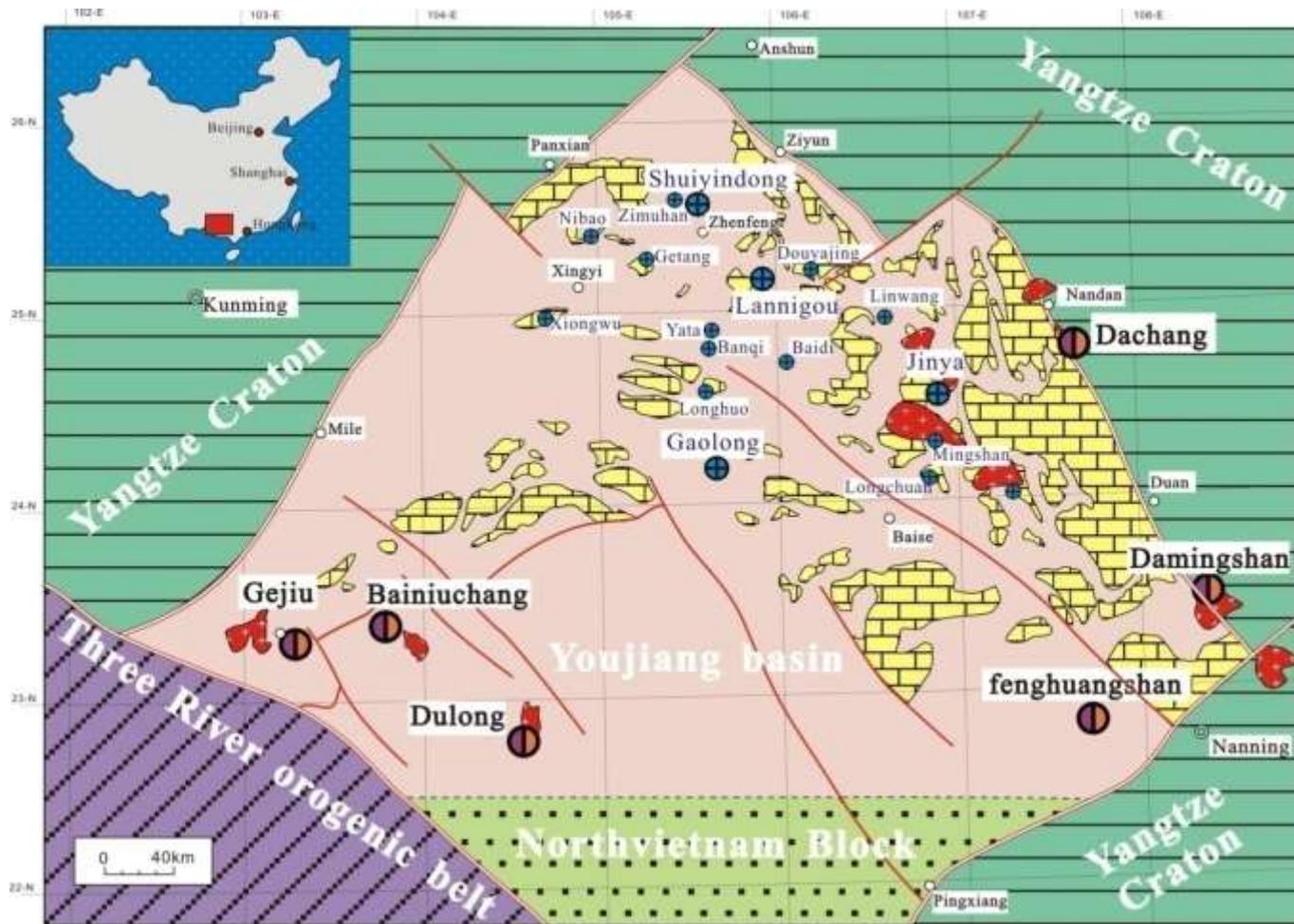




(据John Muntean, 2011)



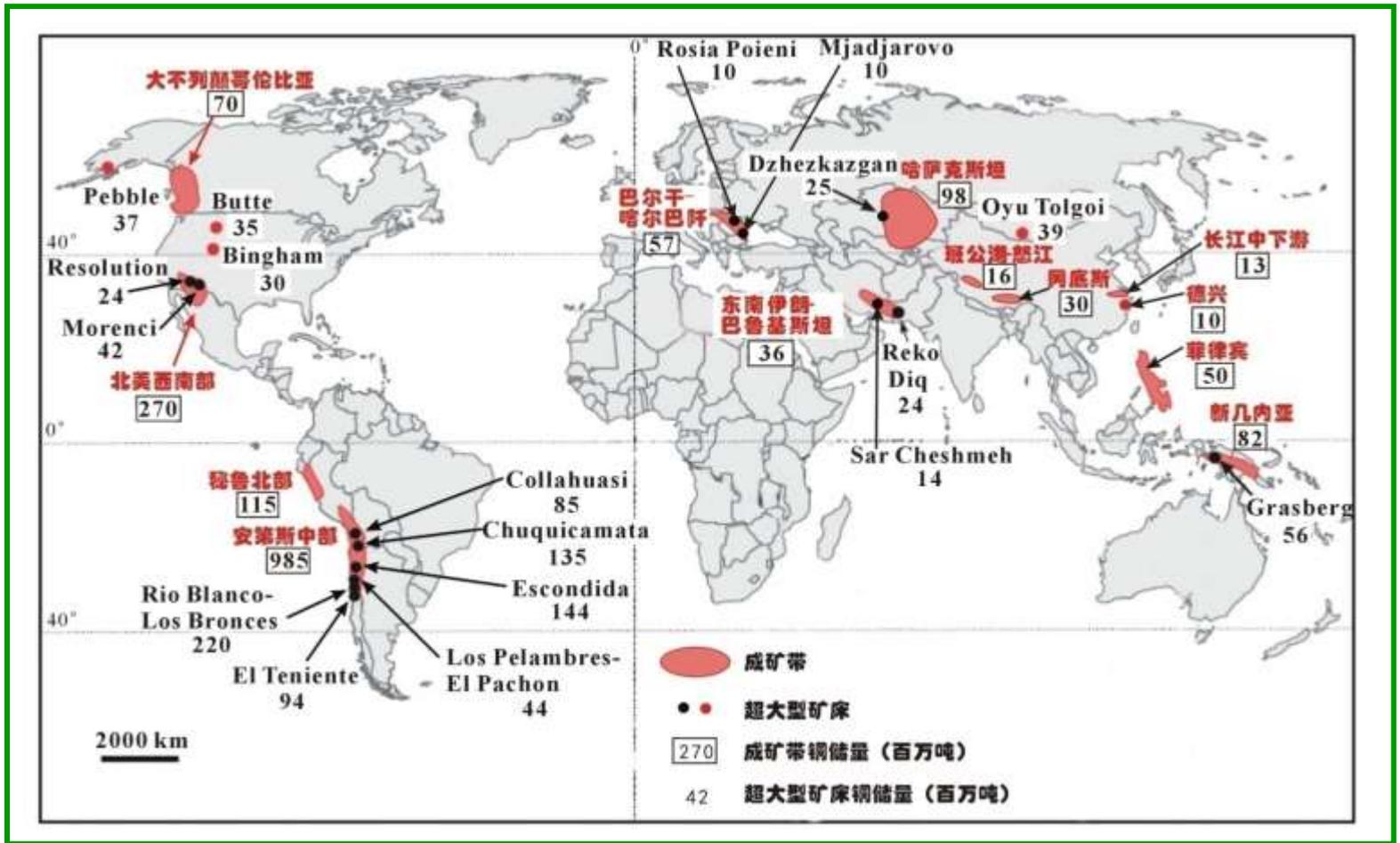
中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



右江盆地钨锡矿床与卡林型金矿

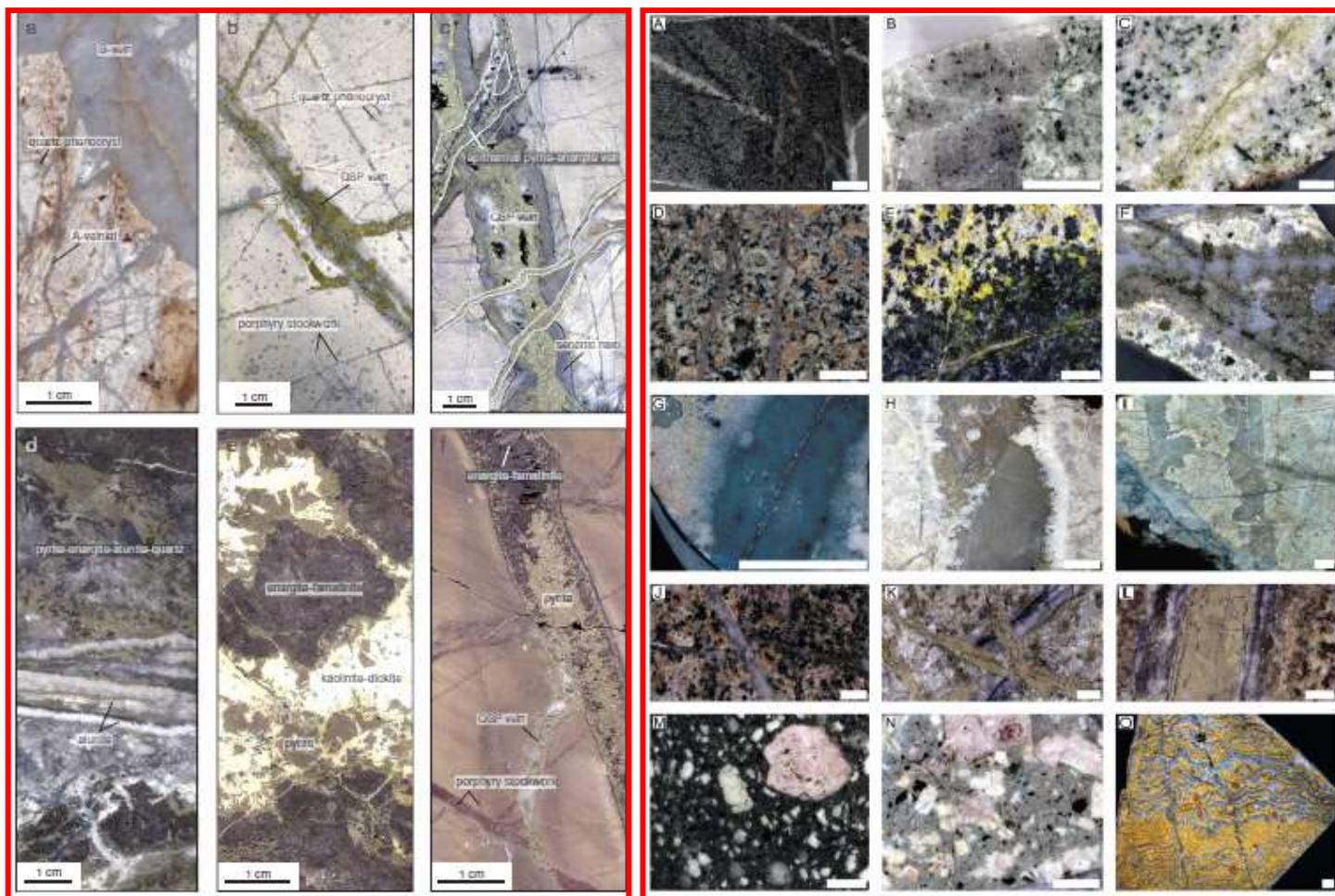
# 3. 斑岩铜矿：俯冲成矿持续深化，碰撞成矿在争议中发展

斑岩铜矿在全球资源中占70%，而超大型斑岩铜矿占全球资源的90%



全球超大型斑岩铜矿分布图 (Sillitoe, 2013)





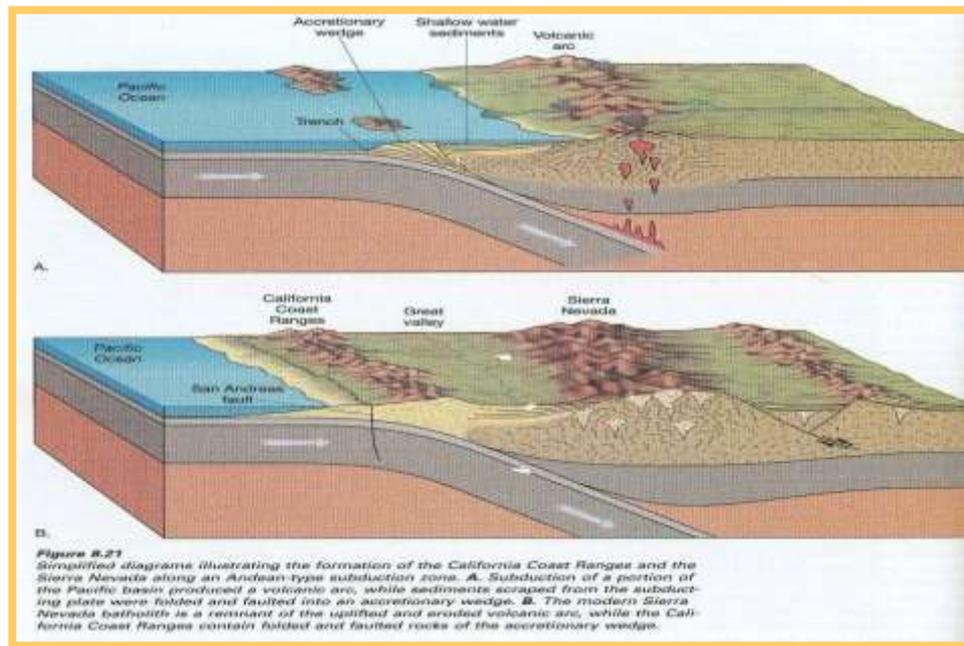
斑岩铜矿的结构和构造特点  
(据杨志明等, 2014)



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

## 板片俯冲与成矿

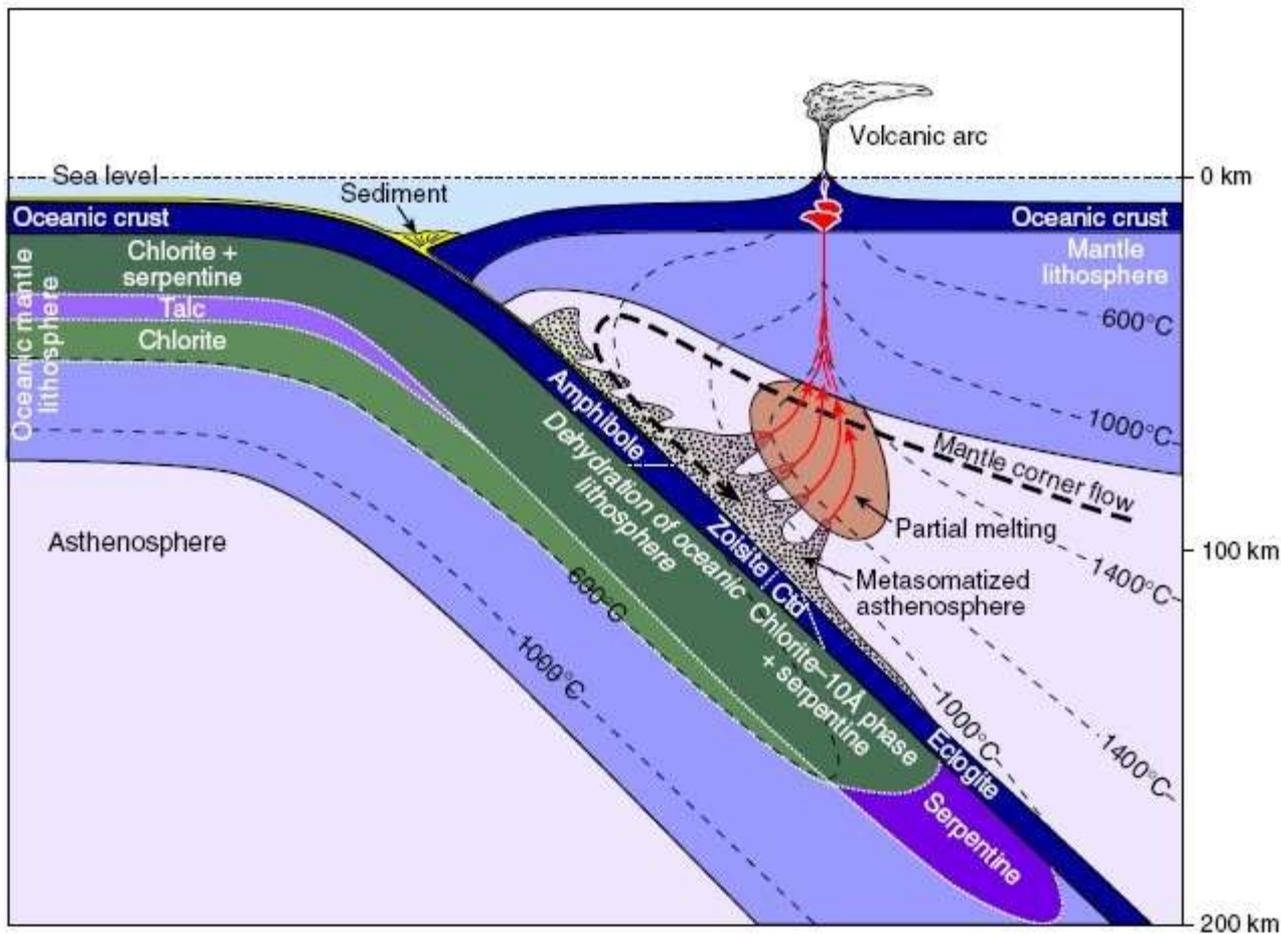
地球物质分布具有明显的不均一性，铜主要来自地幔，钼来自下地壳，钨锡来自上地壳。形成内生铜矿的最基本要素是：**地幔物质+水**



大洋板片在俯冲过程，部分熔融，并有大量水加入，而形成含矿岩浆。岩浆高侵定位，因而在大陆边缘发育大规模斑岩铜（钼金）矿带

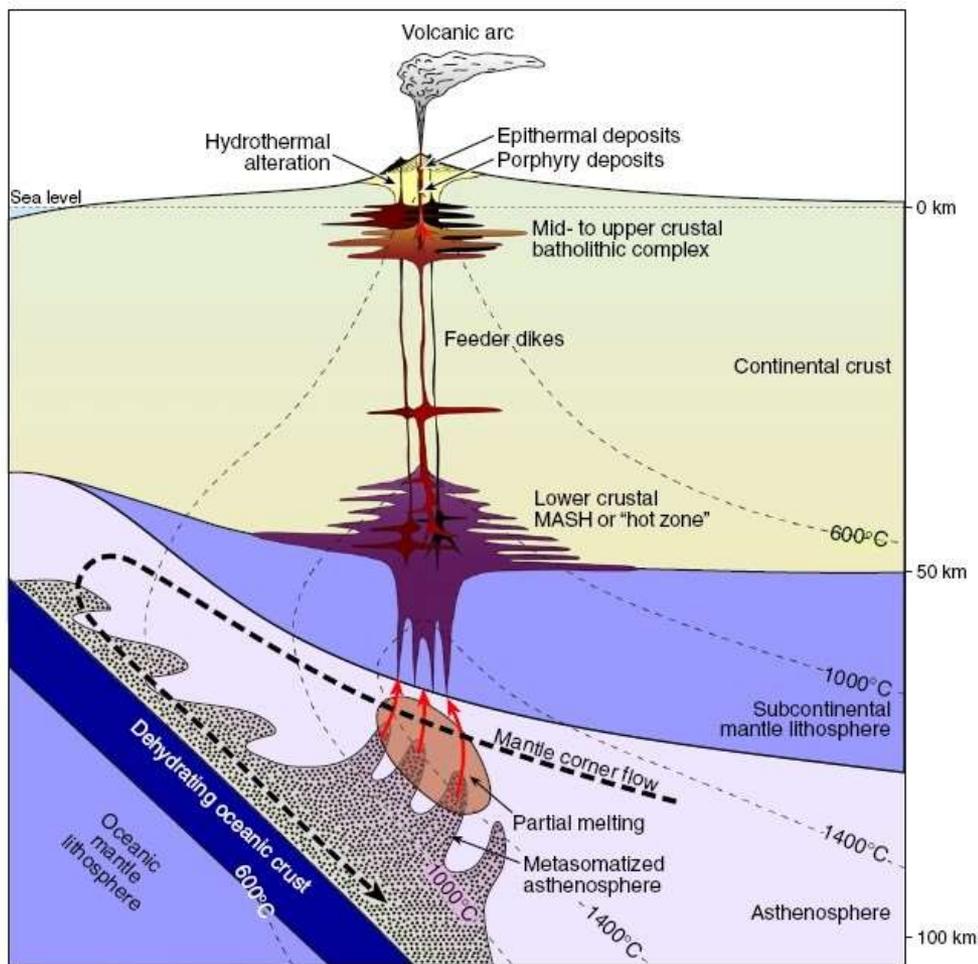


# 岛弧环境 岩浆起源 模型



斑岩铜矿有关岩浆起源模型 Richards, 2011

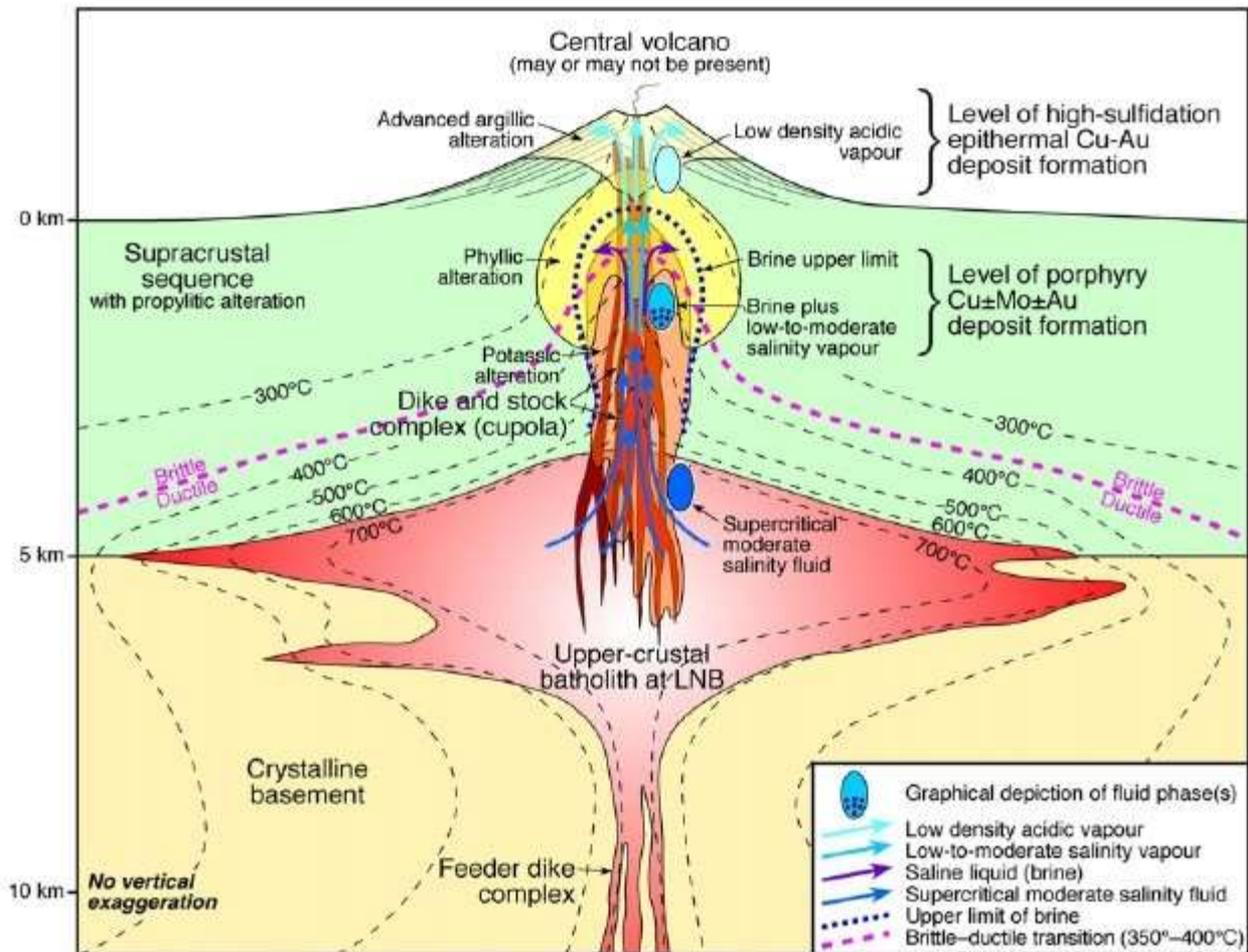




活动大陆边缘斑  
岩铜矿：  
下地壳MASH过  
程  
(MASH, Melting-  
Assimilation-  
Storage-  
Homogenization)  
(熔融-混染-储集  
-均一化)

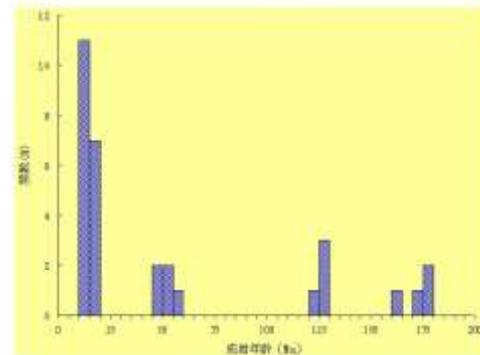
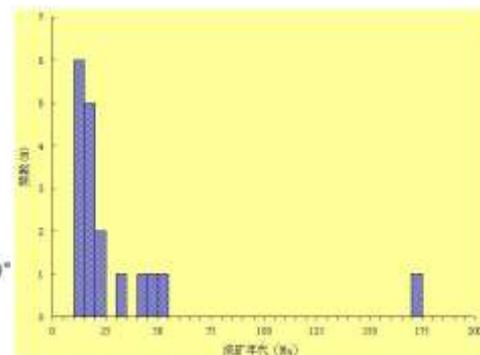
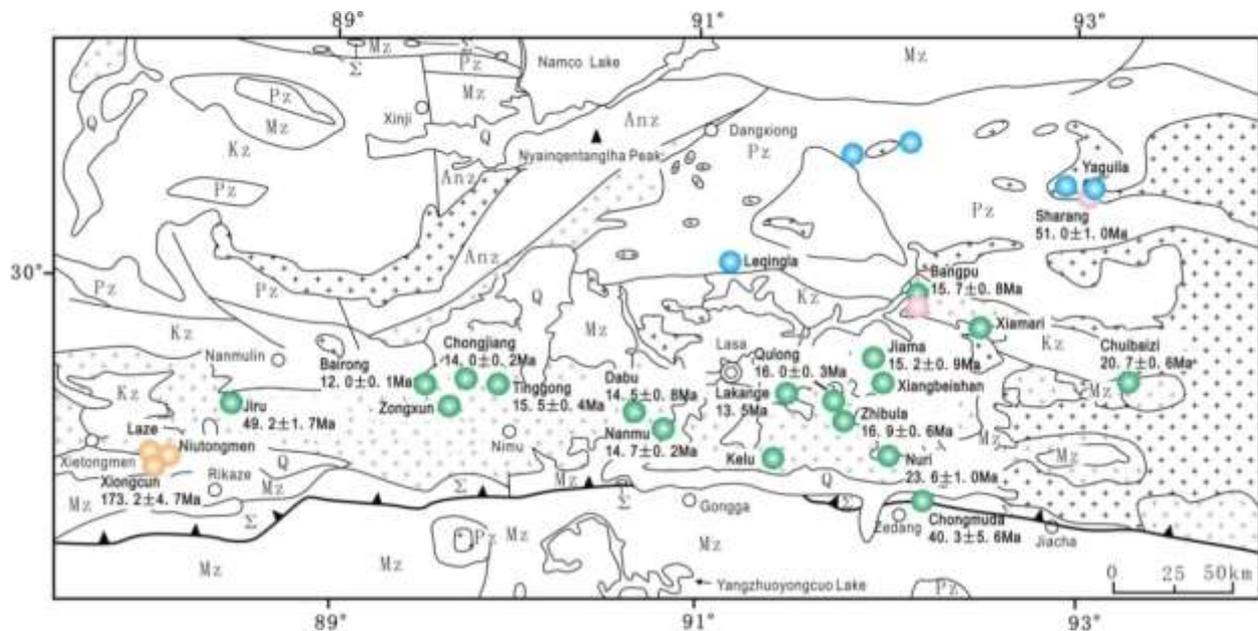
(after Richards, 2011)





中国地质调查局 斑岩铜矿形成过程卡通图 (after Richards, 2011)  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

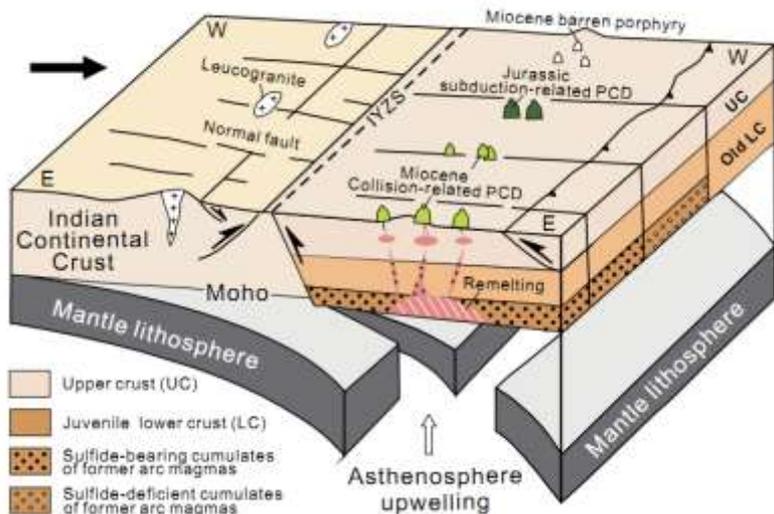
# 后碰撞与成矿



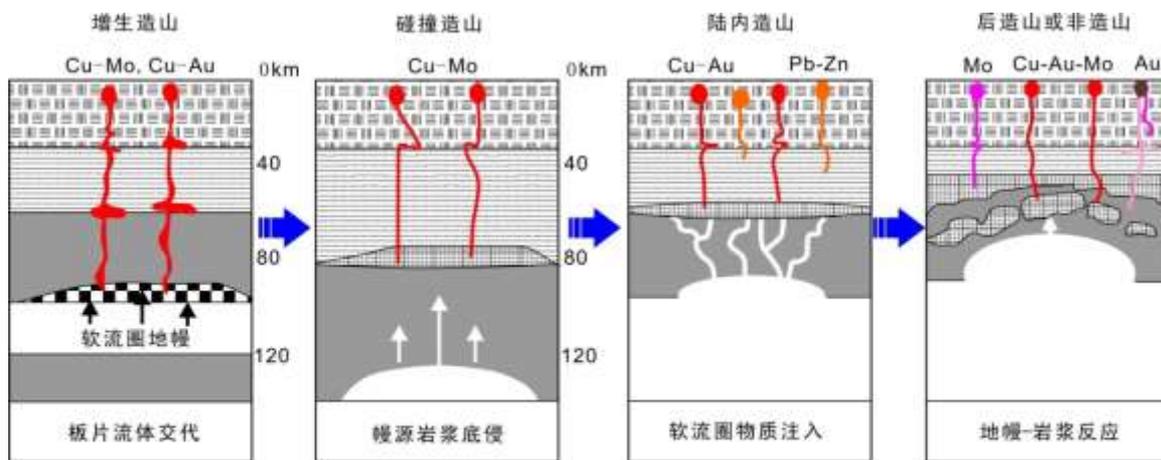
## 冈底斯斑岩铜矿带--- 目前我国最大铜矿带



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



冈底斯后碰撞斑岩铜矿构造模型(Hou et al., 2015)



不同类型非俯冲构造环境斑岩铜矿 (候增谦等, 2009)



板片流体交代的楔形地幔  
Wedge mantle replaced by plate fluids

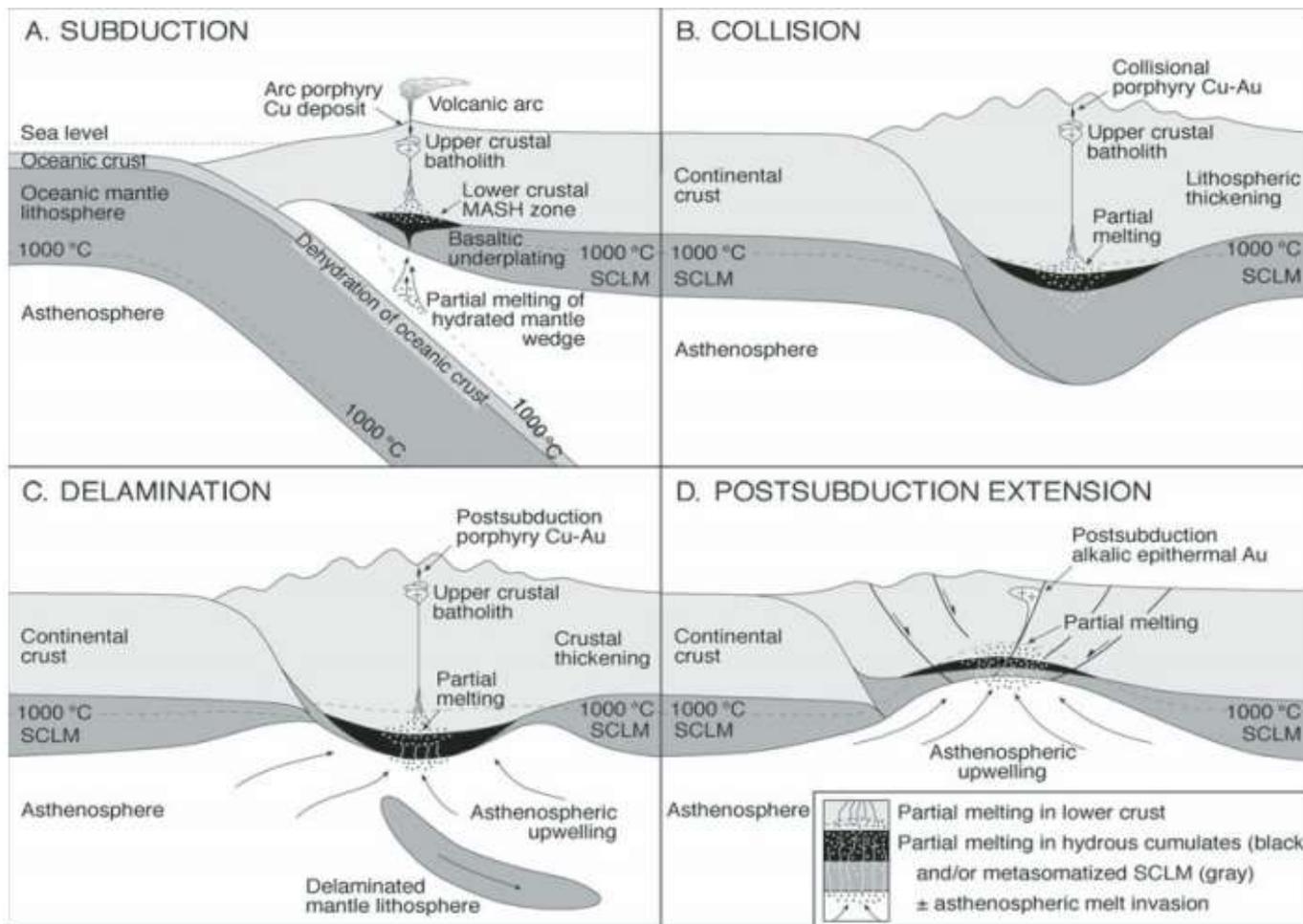
软流圈物质交代的下地壳  
Lower crust replaced by asthenosphere

新生底侵的下地壳  
Newly formed lower crust underplate

拆沉的下地壳  
Delaminating lower crust

软流圈物质固结脉  
Veins from asthenosphere

软流圈热流  
Upwelling flow

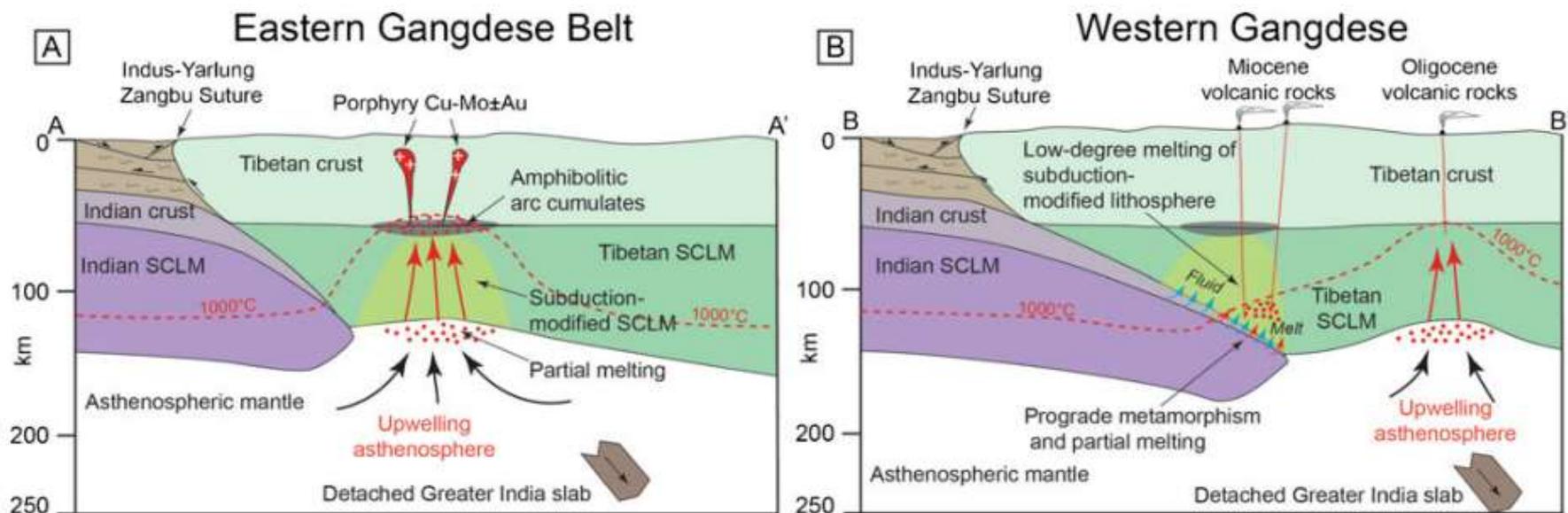


碰撞、拆沉和后俯冲斑岩铜矿均来自富水的堆积物部分熔融或交代岩石圈地幔 (Richards, 2009)



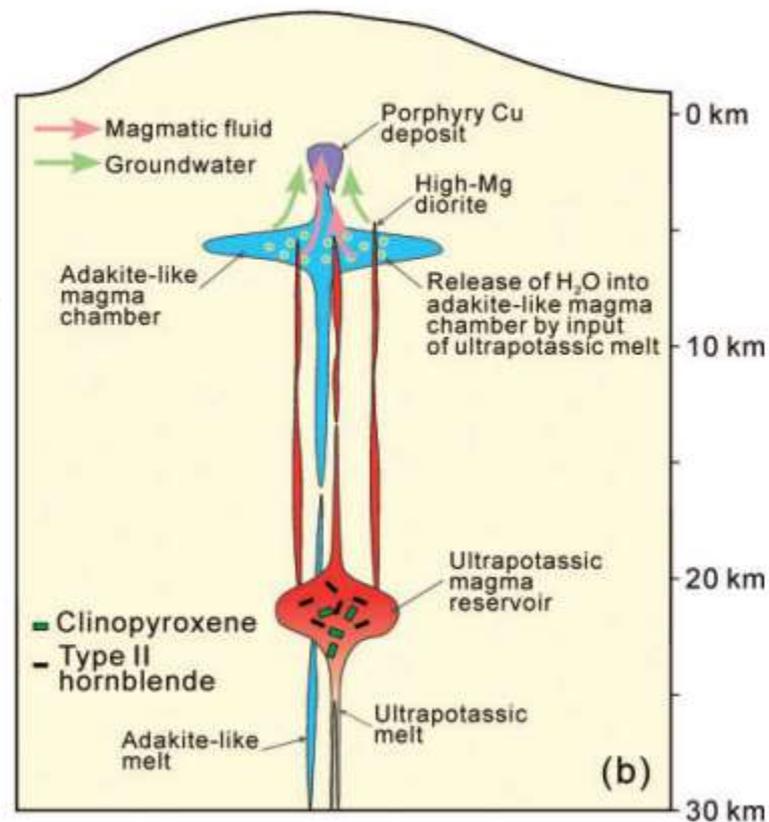
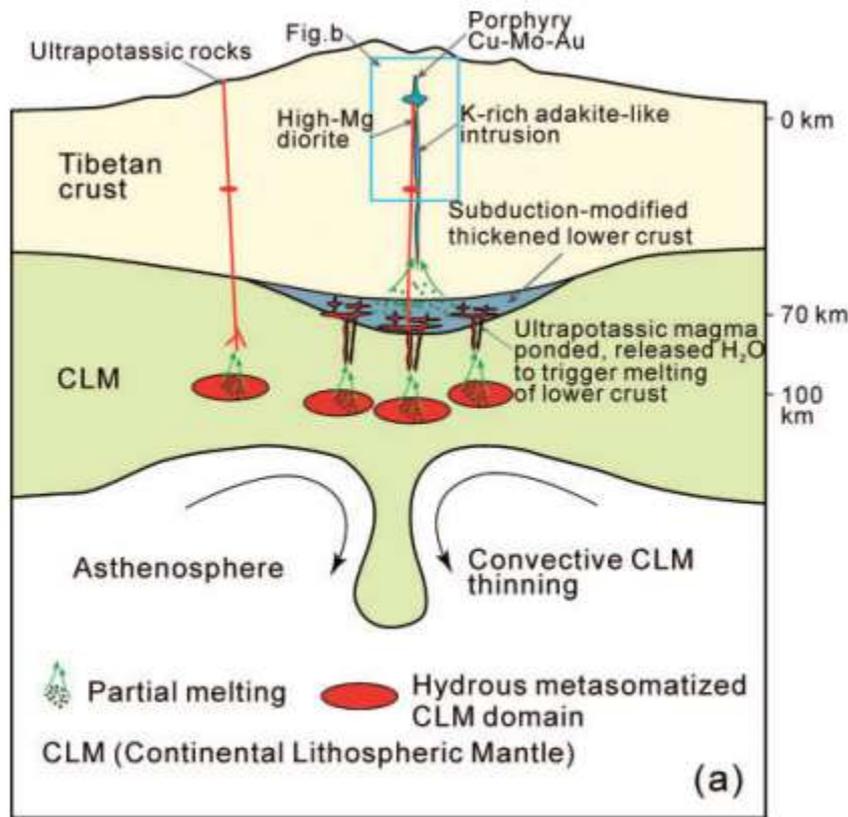
中国地

CHINA GEOLOGICAL SURVEY



冈底斯后碰撞斑岩铜矿床来自交代岩石圈地幔 (Wang, R., Jeremy, 2014); Lv et al (2015) 在Geology发表论文及在Hobart举行的2015年SEG年会报告, 强调成矿物质来自残留俯冲板片而不是加厚下地壳。



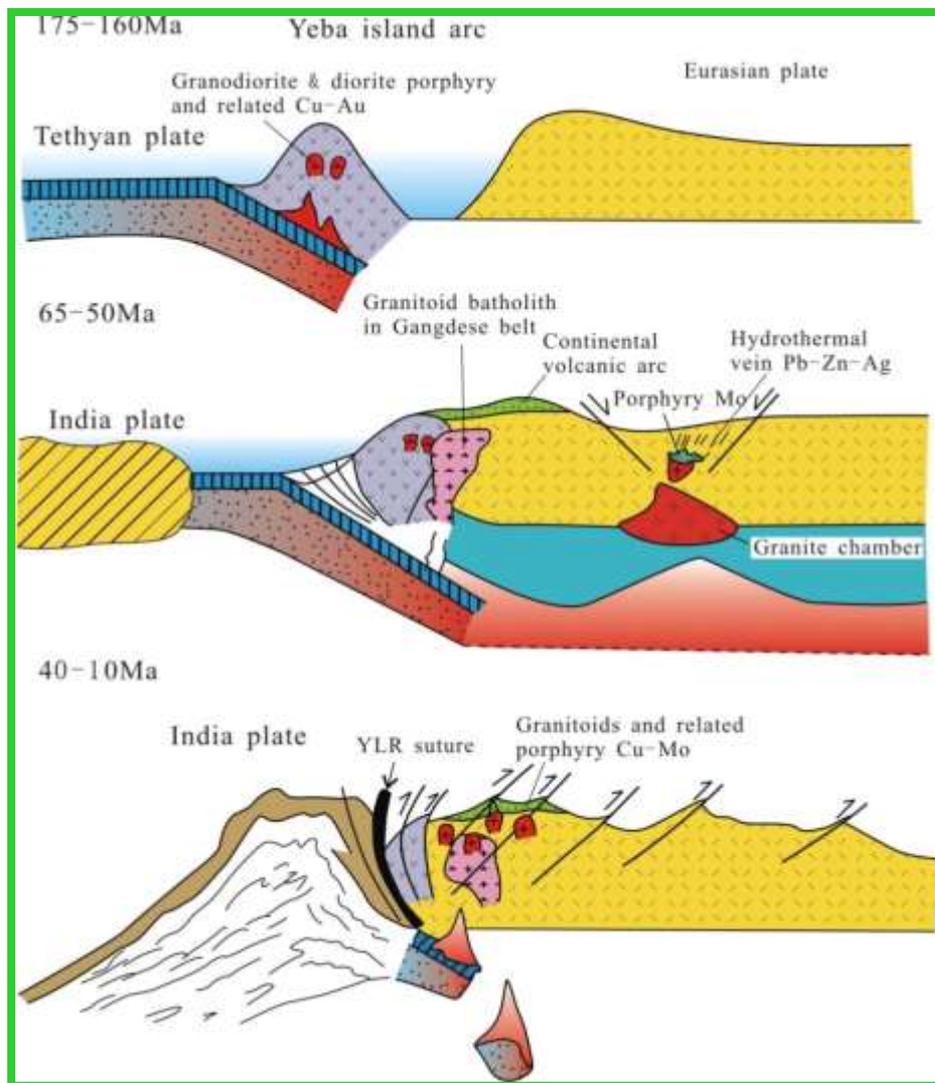


冈底斯斑岩铜矿带成矿物质主要来自被交代的岩石圈地幔  
(Yang et al., 2015)

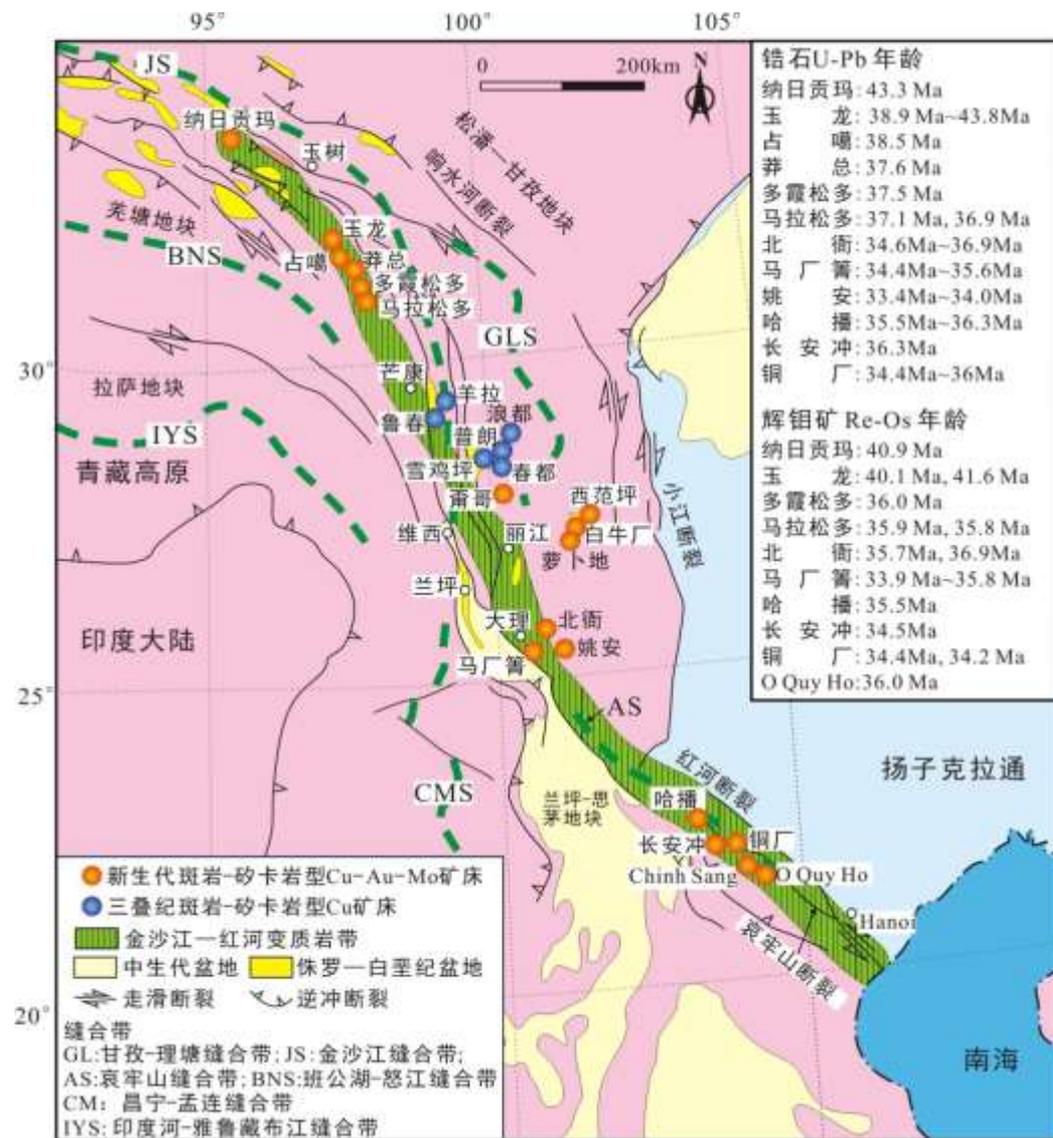
**冈底斯后碰撞岩浆弧与斑岩铜矿来自残留俯冲板片的最早认识  
由Qu et al. (2004) 提出**

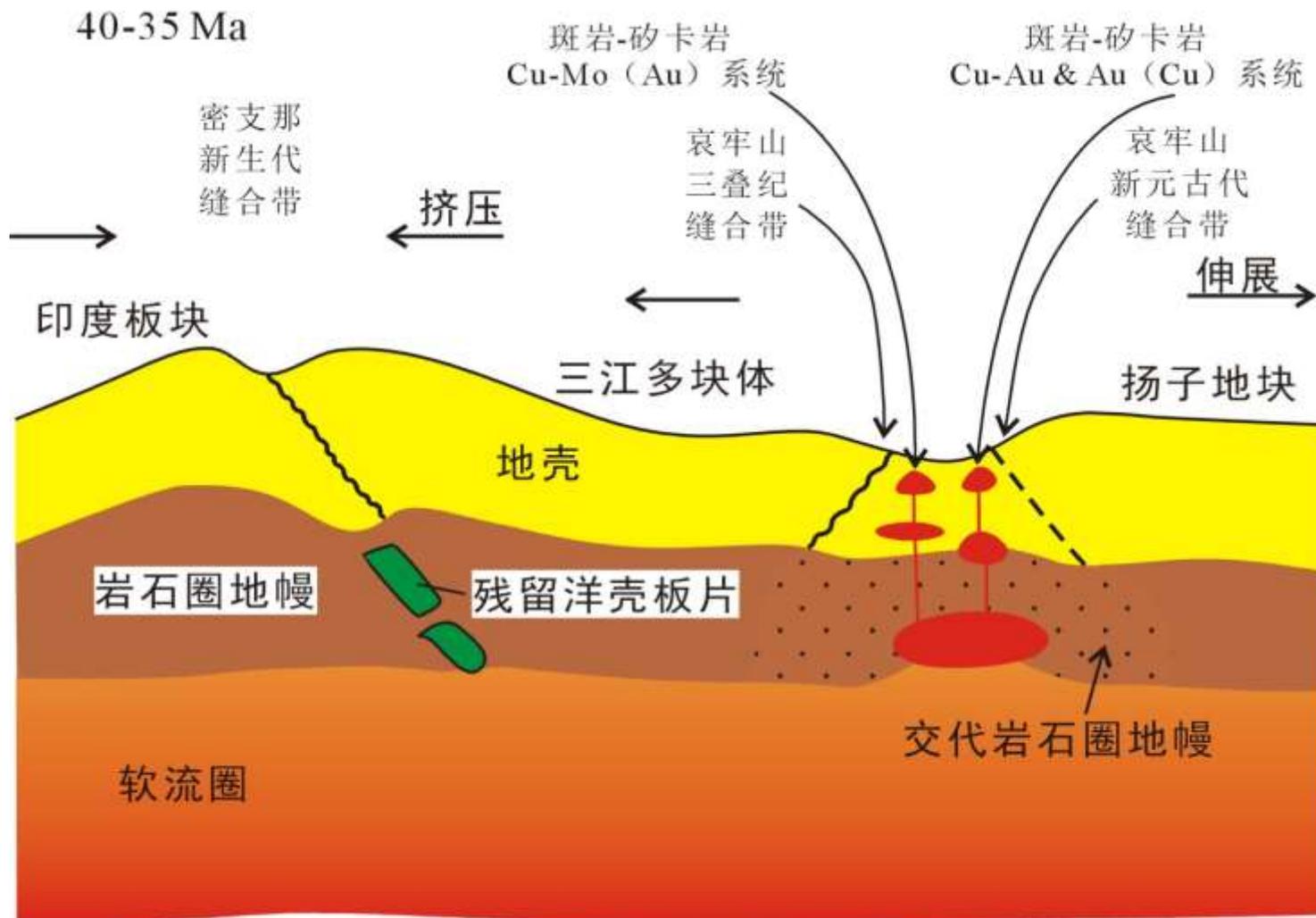


冈底斯成矿带斑岩铜矿 & 斑岩钼矿三期成矿的地球动力学背景模型图 (Mao et al., 2014)



# 哀牢山-金沙江新生代与富碱斑岩有关的斑岩-矽卡岩型Cu-Au-Mo系统





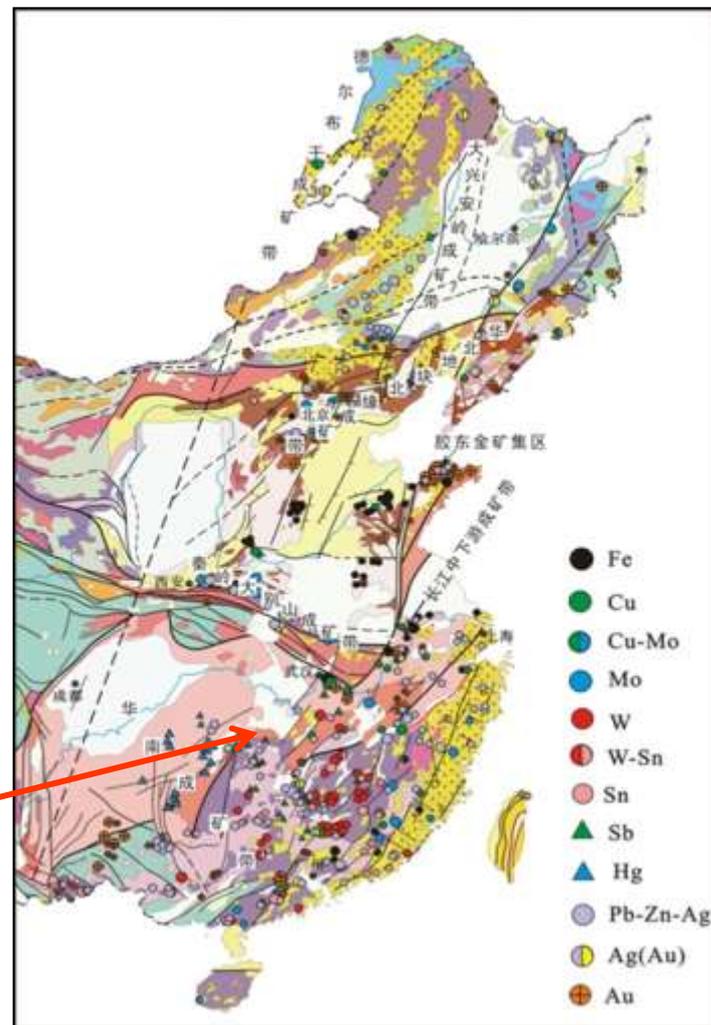
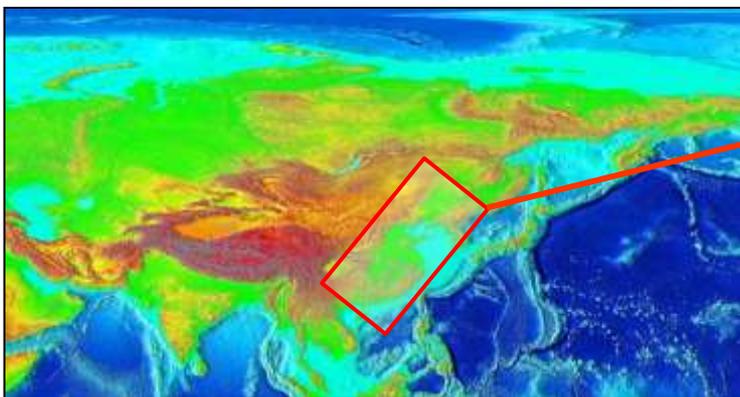
中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

**哀牢山-金沙江富碱斑岩成矿带的斑岩Cu-Au-Mo模型** (毛景文等, 2015)

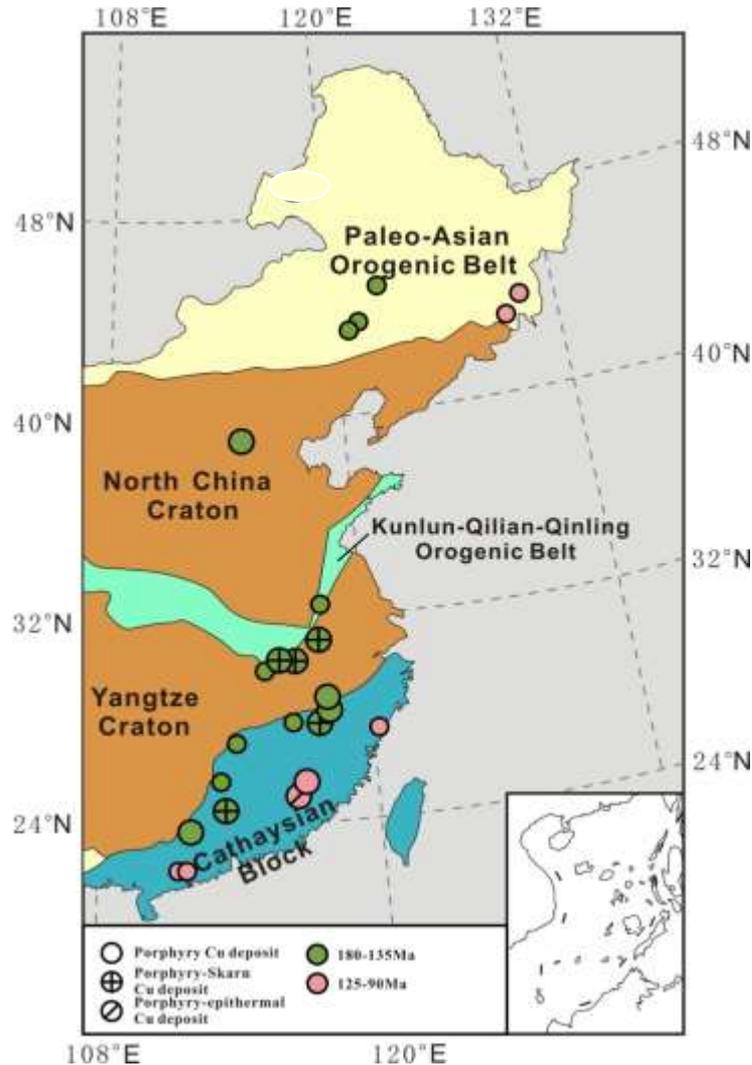
## 板内斑岩铜矿床

我国东部是全球板内成矿的典型地区，长约4000公里，宽1000多公里，燕山期（170-80Ma）出现大规模成矿。

在东部已探明的燕山期钨、锡、钼、铋、锑、重稀土储量居全球第一，金、银、铜、铅、锌、汞和铀在全国名列前茅，**最近国情调查表明进一步找矿潜力很大**，但经过60多年的大规模开发，找矿难度日益增大，亟待科技创新。



# 我国东部侏罗纪-白垩纪斑岩-矽卡岩型铜矿床



中国东部斑岩-矽卡岩 Cu-Mo或  
Cu-Mo-Au 矿床广泛分布特点

**大陆内部175-137Ma:**

钦杭带,

长江中下游带,

太行山东北缘-大兴安岭西南缘。

**大陆边缘 125-80 Ma:**

东北边缘,

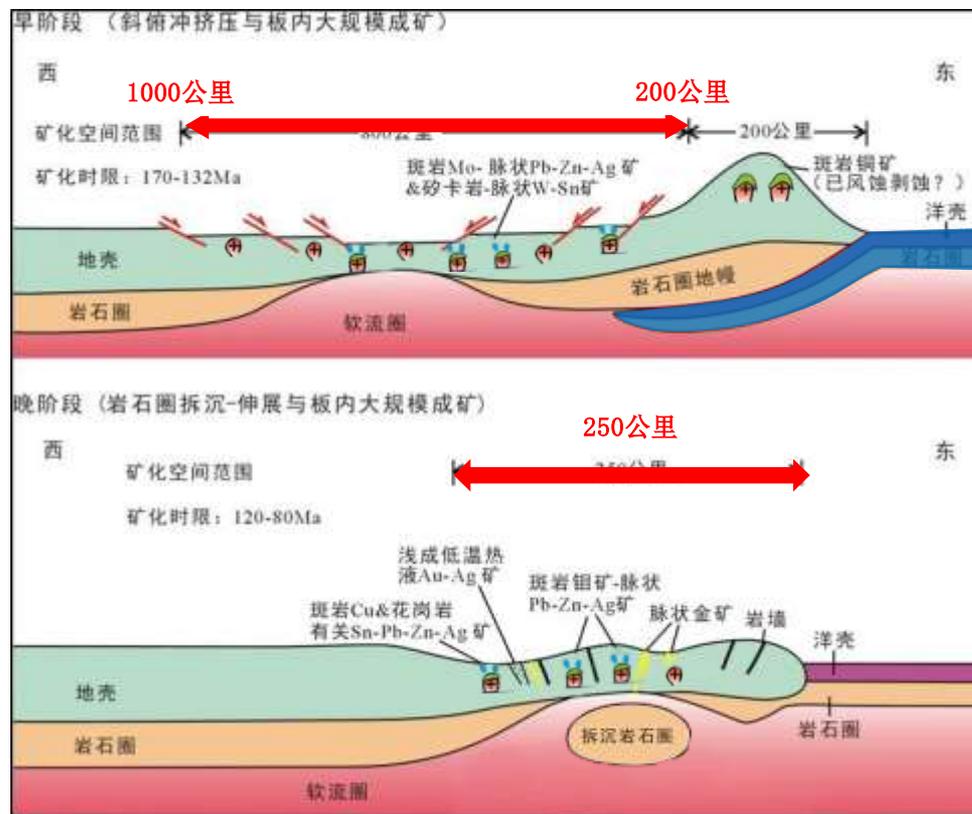
东南边缘。

## 早阶段

由古太平洋板块低角度向大陆北西斜俯冲，导致在大陆边缘弧后地带大规模成矿

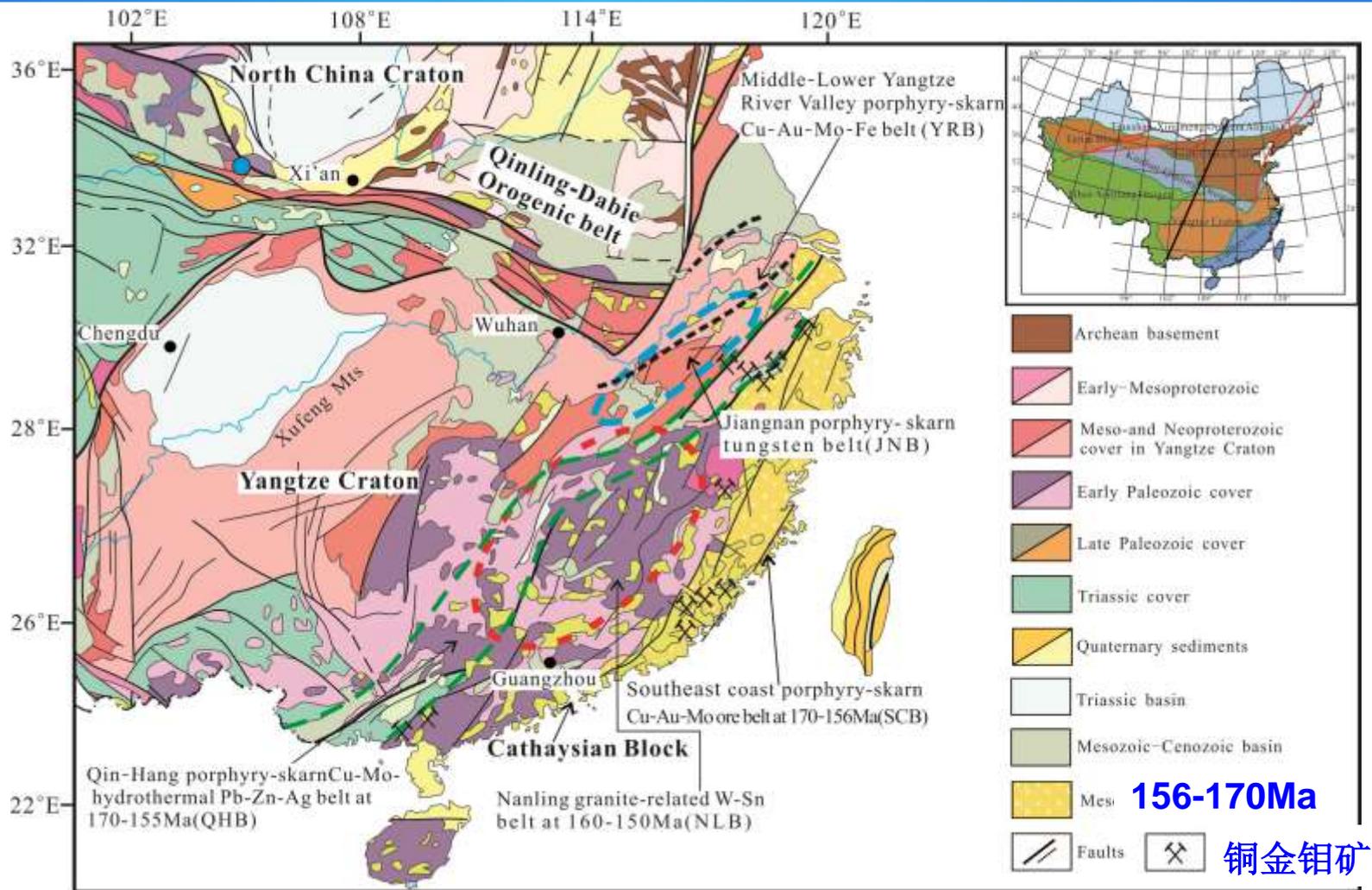
## 晚阶段

古太平洋板块运动发生转向，平行大陆NNE向走滑，引发岩石圈拆沉及不同源物质同时大规模成矿

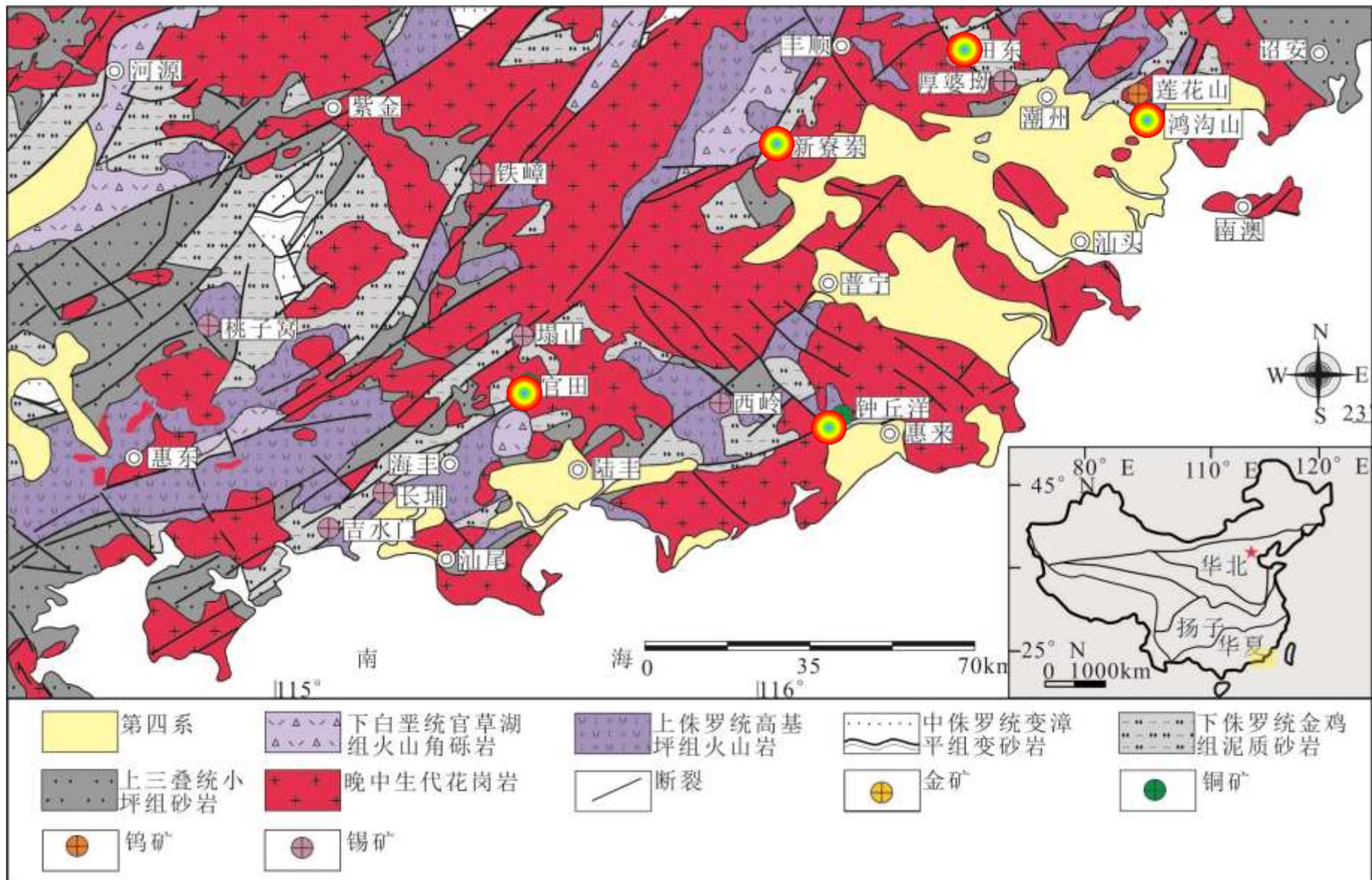


(Mao et al., 2002; 2003; 2005; 2011)

**板内大规模成矿与大陆边缘块体之间相互作用关系密切，  
成矿动力学模型可用于指导找矿勘查部署**

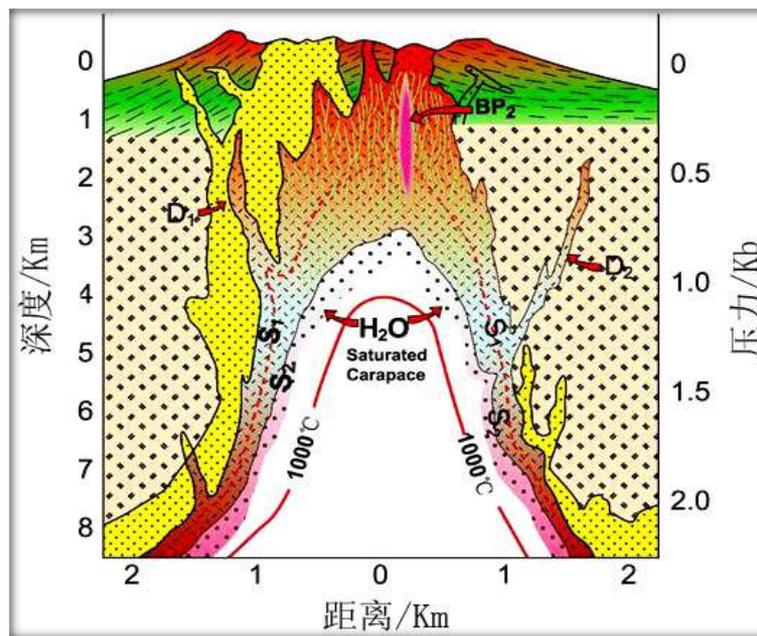
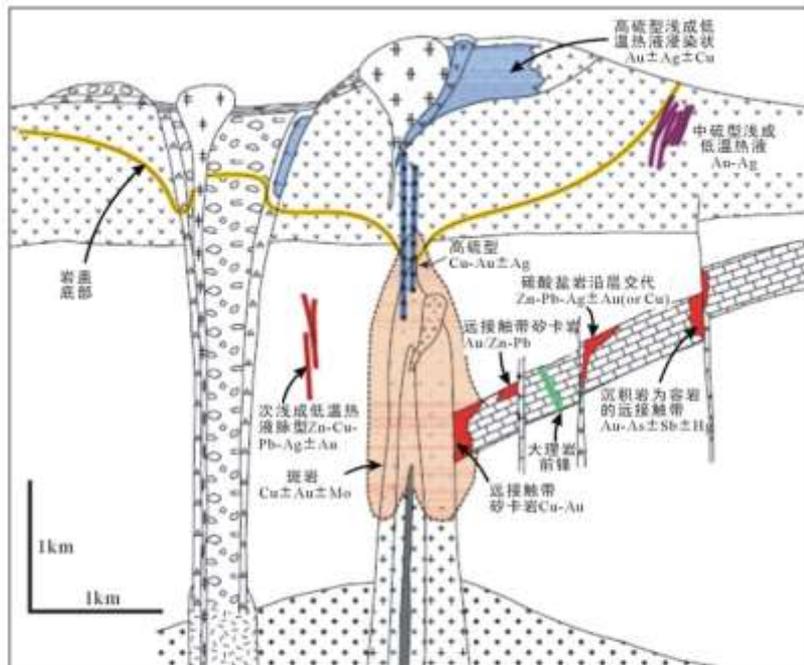


科学部署，新发现了一个侏罗纪斑岩铜金钼矿带





## 二、建立和提升矿床模型：指导找矿勘查

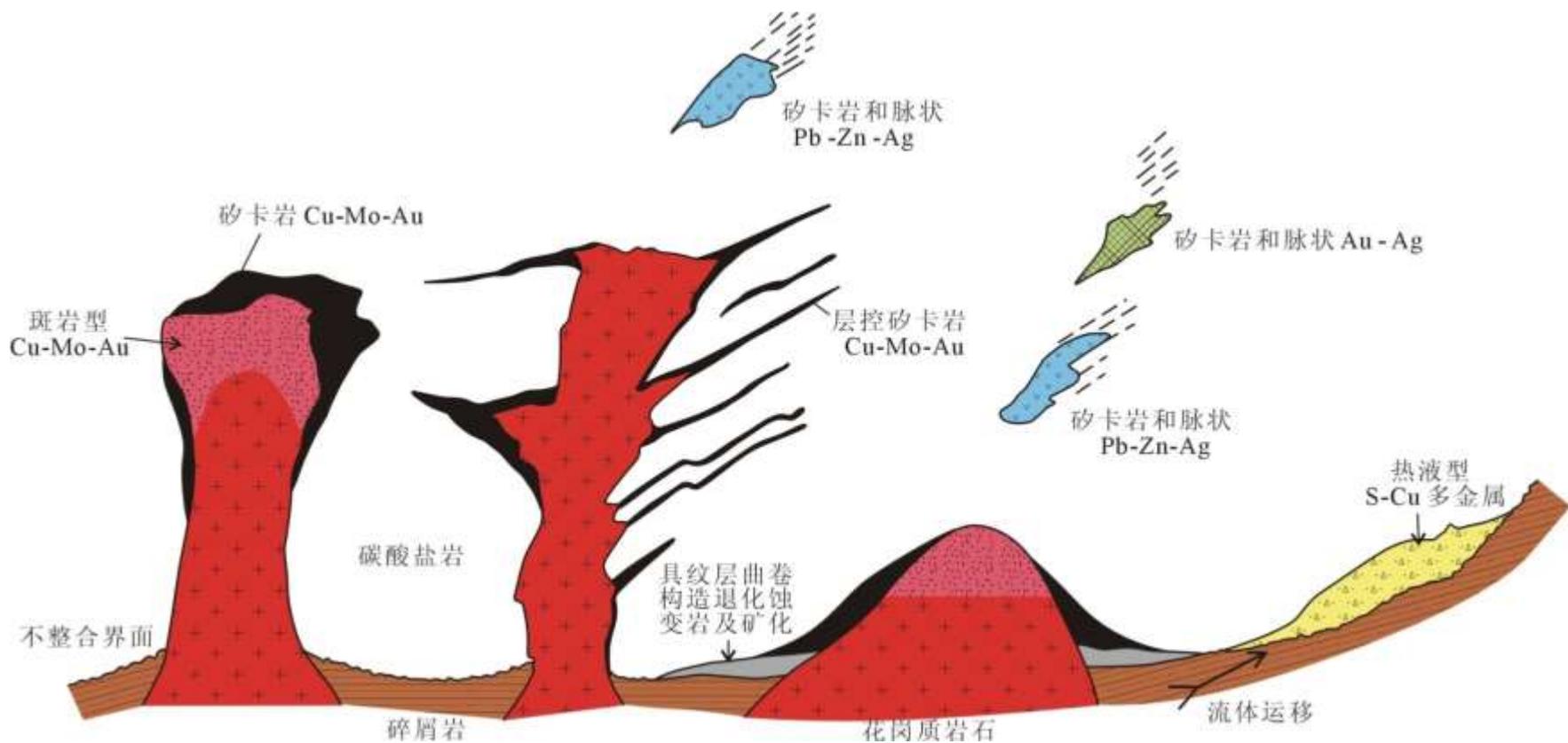


斑岩铜矿模型 (1980)

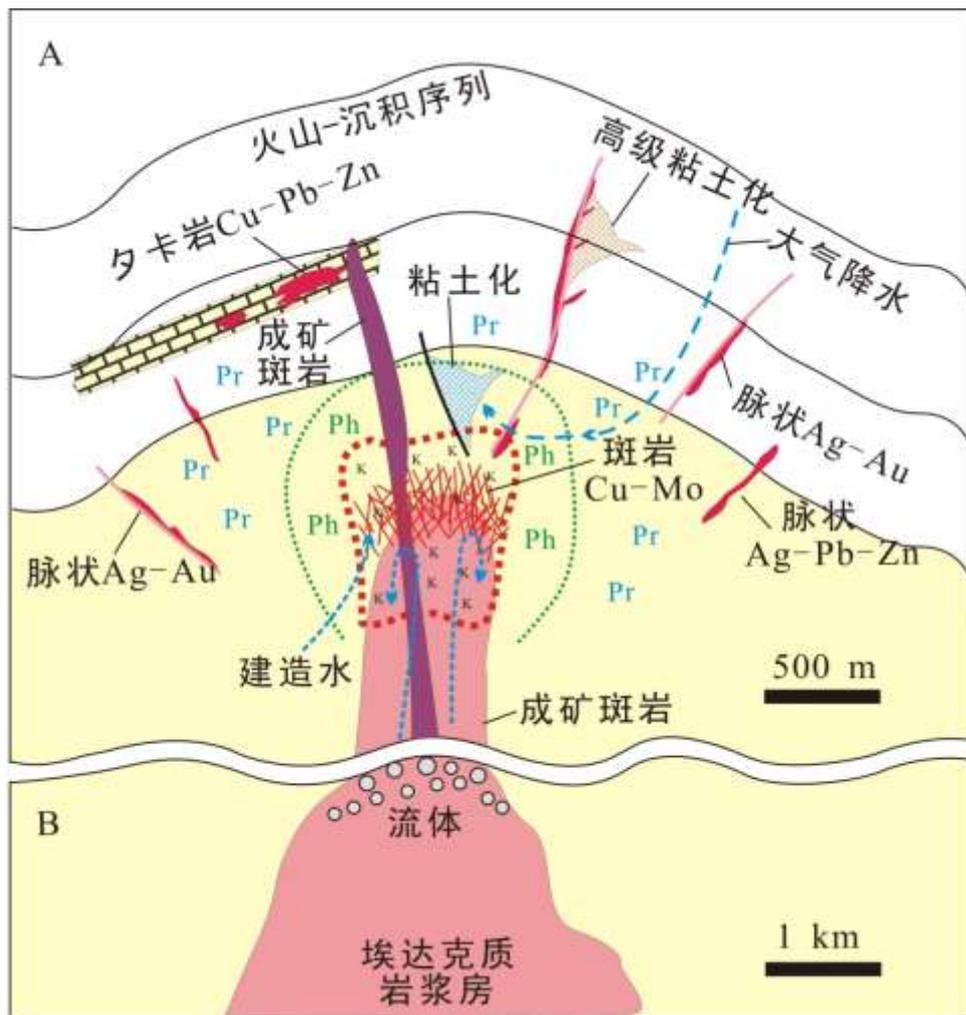
斑岩铜矿矿床模型 (Sillitoe, 2010) (左图)





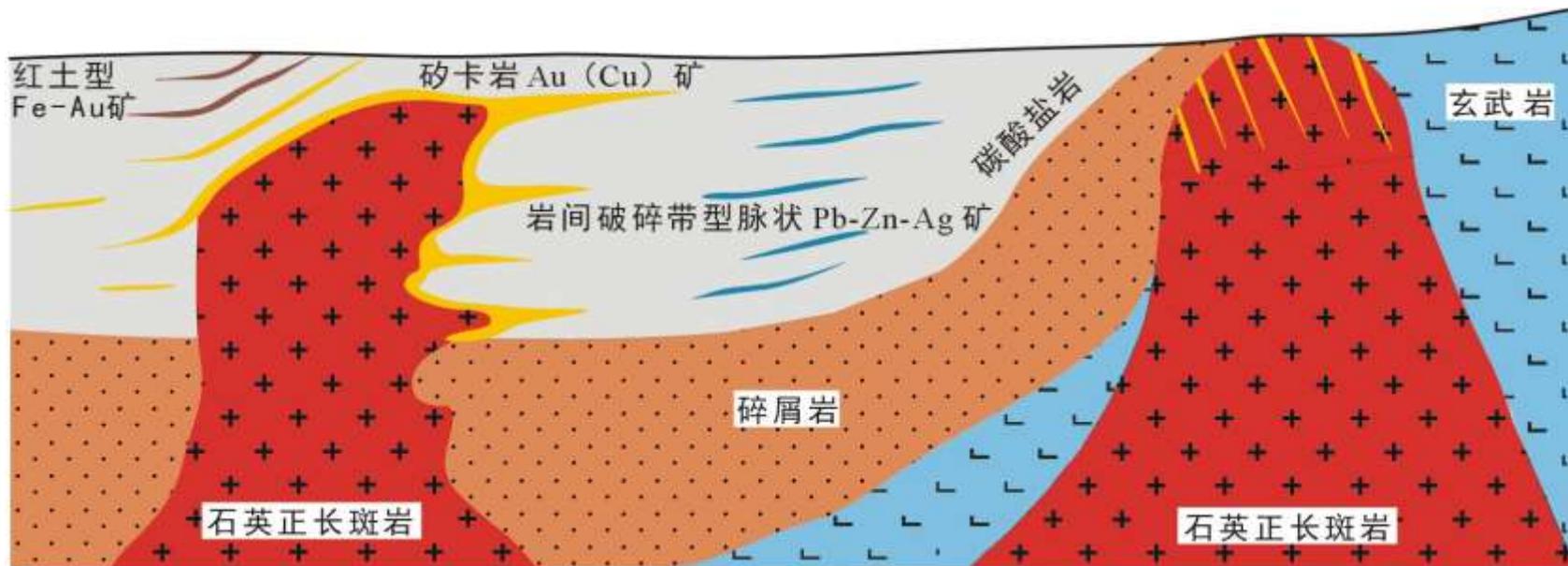


长江中下游地区斑岩-矽卡岩铜金钼矿床的成矿模型



冈底斯后碰撞环境斑岩铜矿矿床模型 (杨志明和候增谦, 2009)

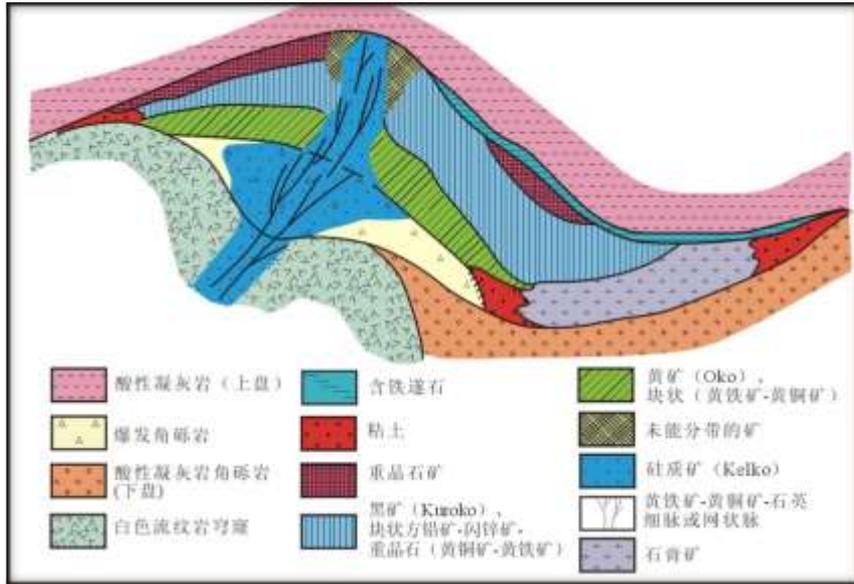




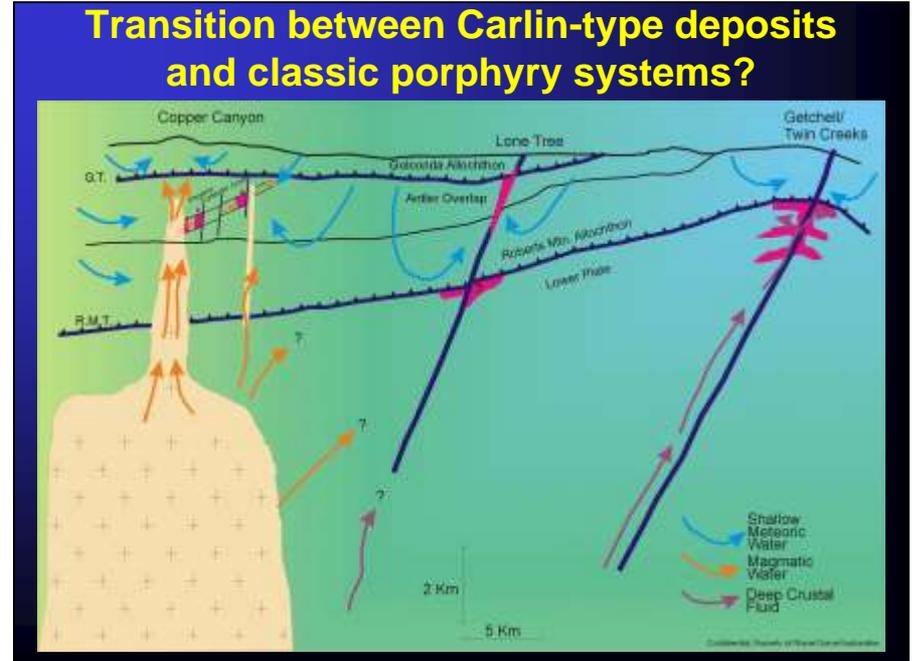
哀牢山-金沙江与富碱斑岩有关斑岩矽卡岩Au-Cu-Mo成矿系统的  
矿床模型——以北衙为例（毛景文等，2015）



# 矿床模型是找矿勘查理论的具体表述：

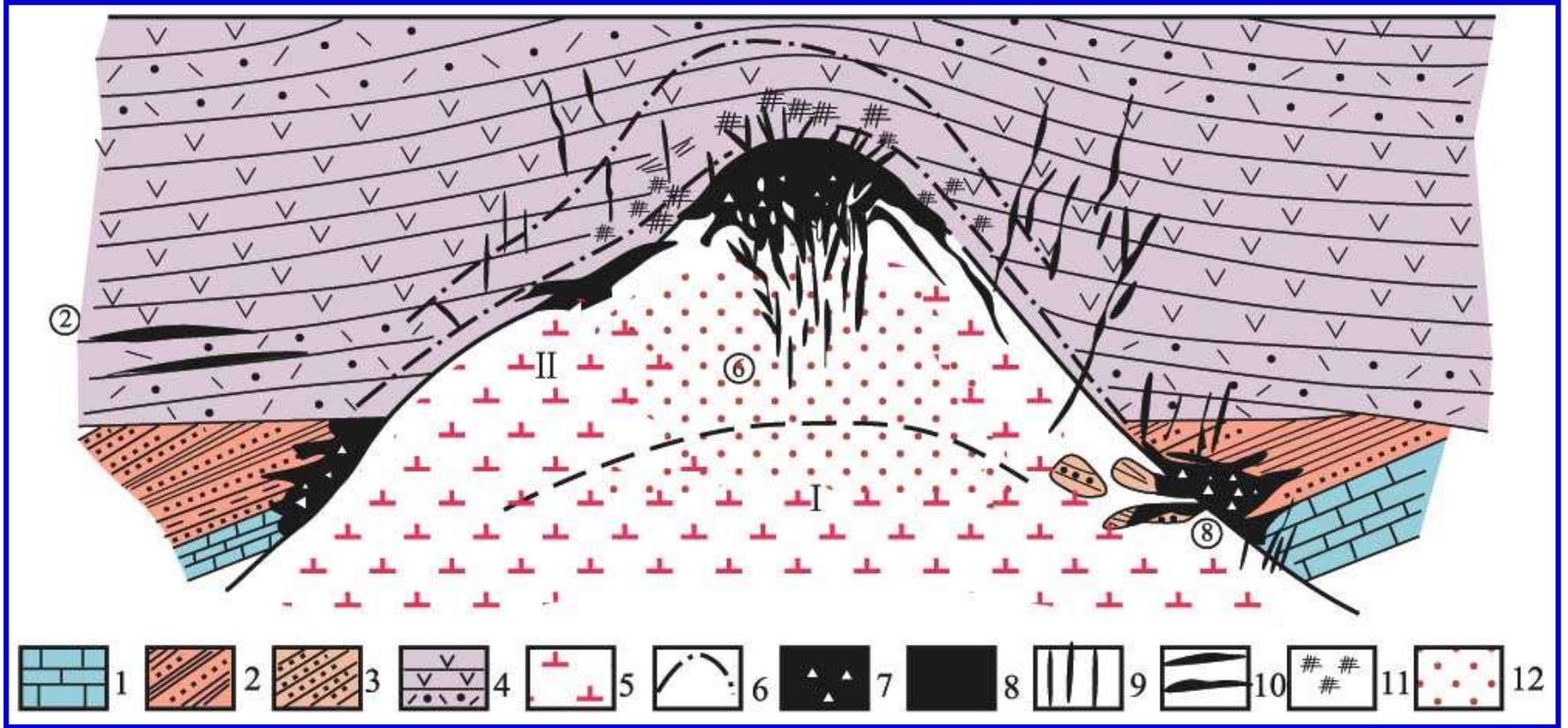


**黑矿模型**

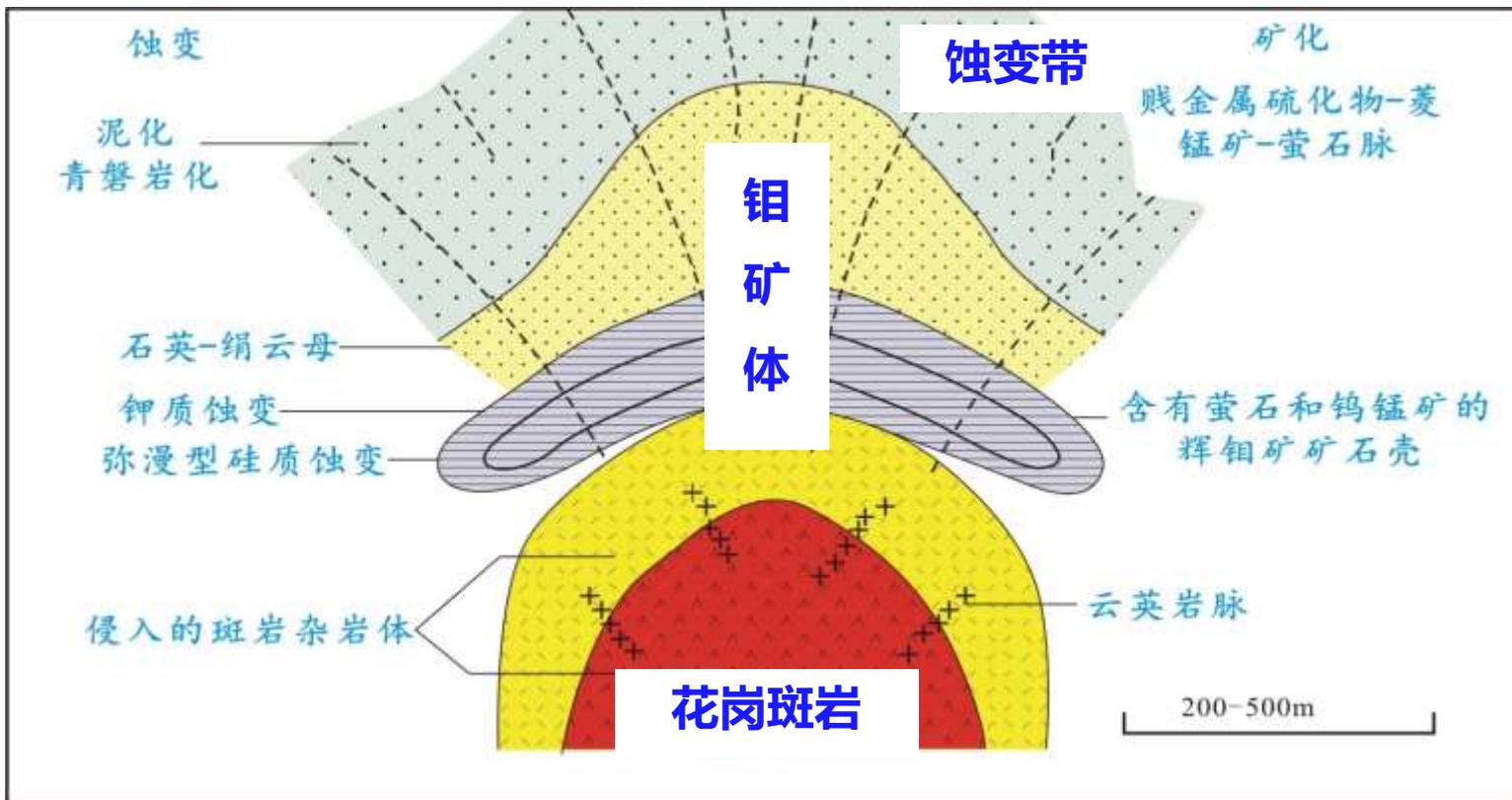


卡林型金矿的成矿模型

上一世纪80-90年代，国际上提出黑矿模型卡林型金矿模型  
推动在全球找矿勘查不断取得新进展

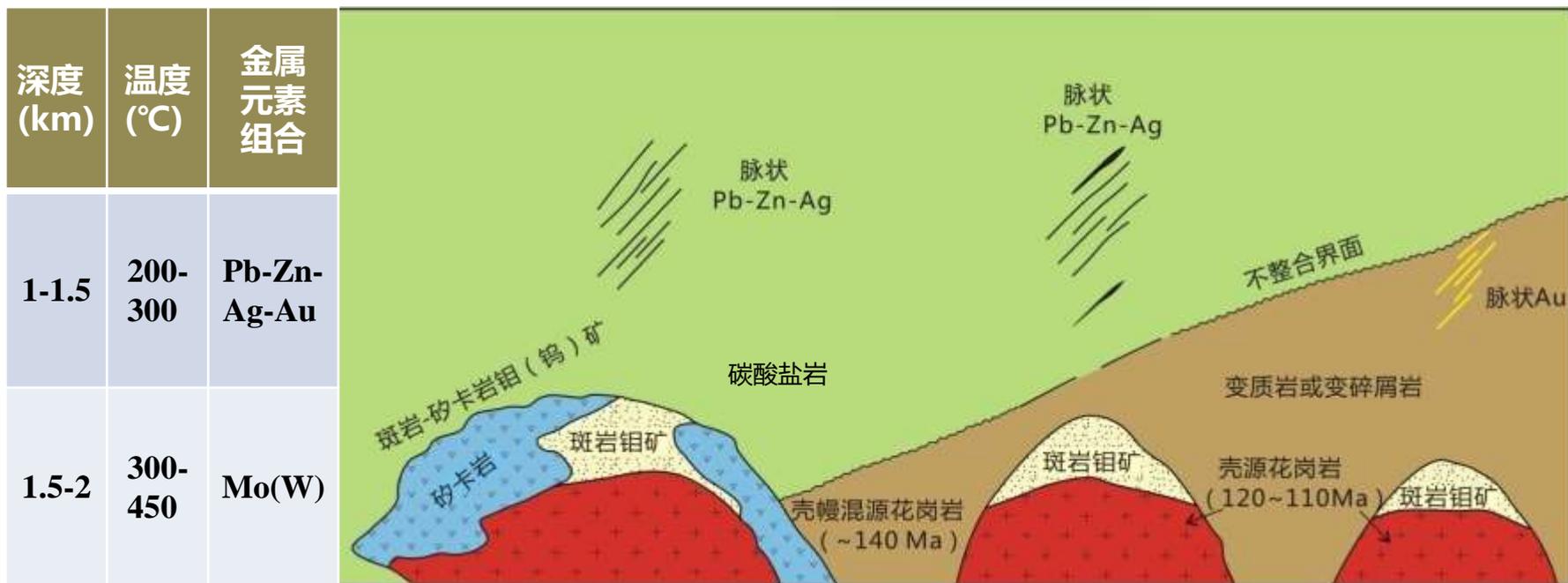


陆相火山岩地区玢岩铁矿成矿模式 (陈毓川和李文达, 1978)



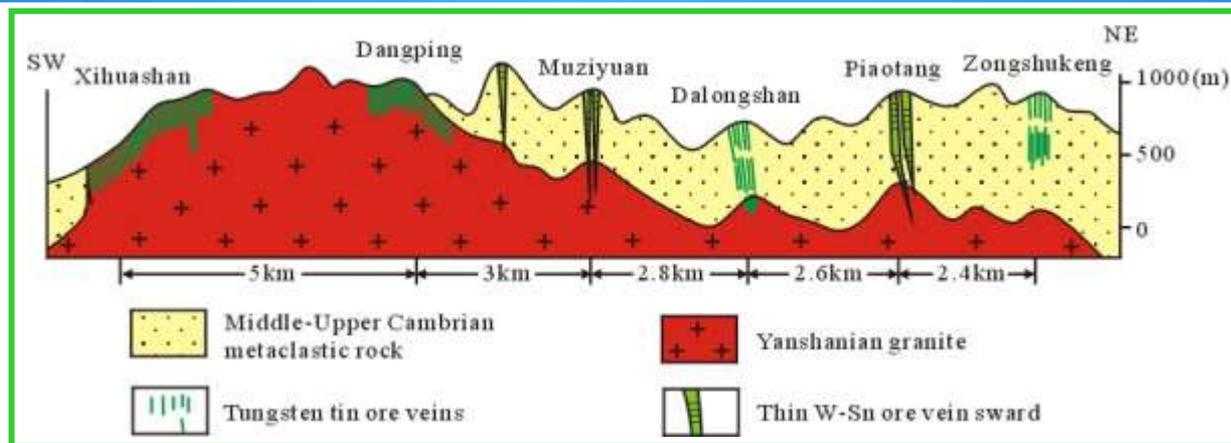
经典斑岩钼矿床模型(Mutachler , 1989)

模型核心：通过蚀变带寻找距地表5-50m埋深的钼矿体

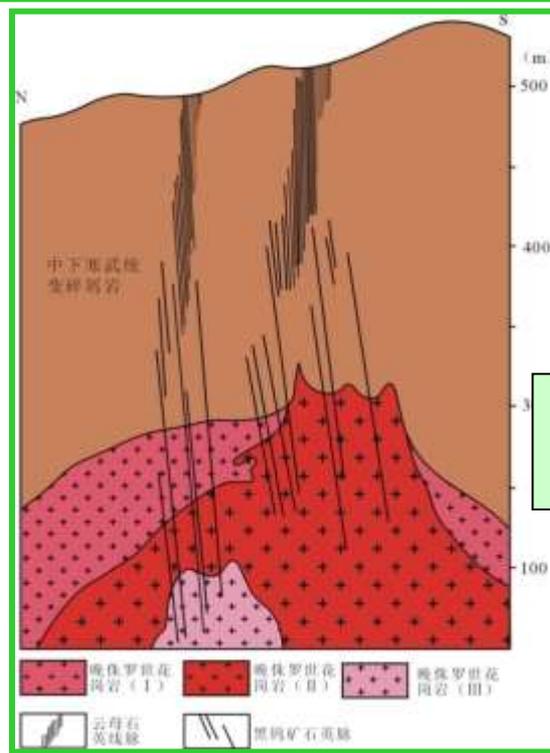


(据毛景文等, 2009略有修改)

## 斑岩-矽卡岩型钼-脉状铅锌银金矿床模型



江西西华山  
- 棕树坑花  
岗岩体隆起  
部位黑钨矿  
(锡石) -  
石英脉矿床,  
围岩为寒武  
纪浅变质岩  
及花岗岩体。



木梓园两阶段成  
岩成矿

西华山矿床



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



黑钨矿 - 石英脉分别以花岗岩（左图和左下图）和浅变质岩为主岩，黑钨矿沿脉壁向内生长，并与白云母密切共生





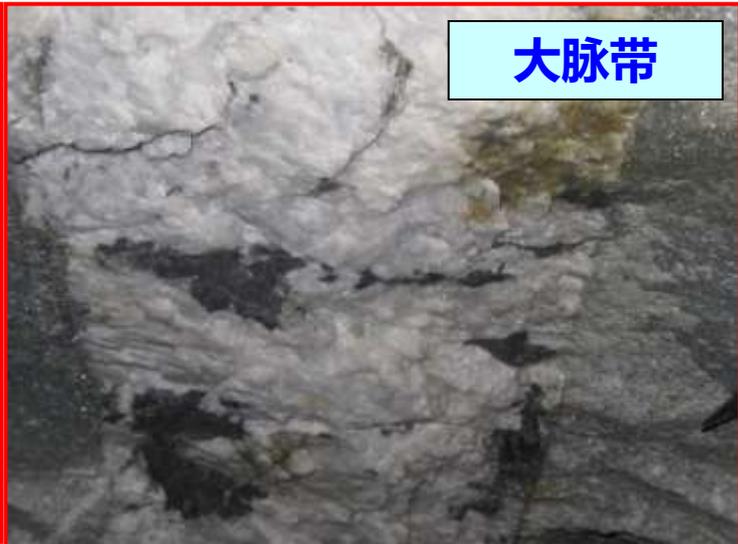
线脉带



赣南黑钨矿 - 石英脉从地表向深部脉宽度变化图



细脉带



大脉带



经济价值	高度 (m)	垂向分带图	分带名称
找矿标志, 不具工业价值	200-400		线脉带
有一定工业价值	100-300		细脉带
具有重要工业价值	200-400		薄脉带
			大脉带
局部具有重要工业价值	50-150		稀疏矿脉带或细脉带
一般不具工业价值	50-100		浸染状(板状)矿带

 寒武-奥陶纪变碎屑岩
  W-Sn 矿脉
  侏罗纪花岗岩

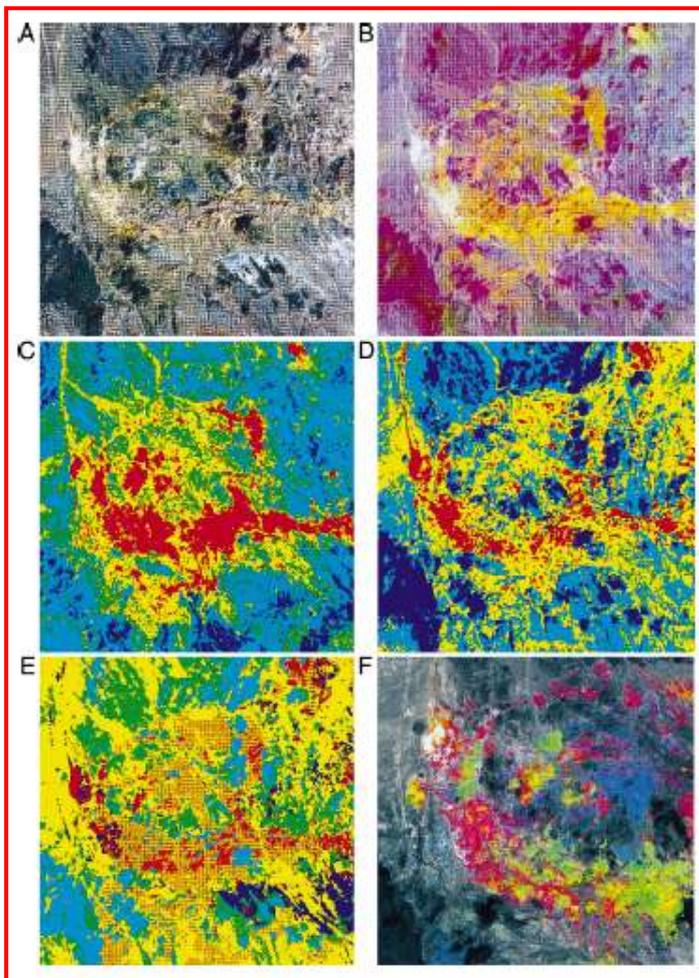
由广东932地质队和江西908地质队于60年代在找矿过程中不约而同总结提出“**五层楼**”石英脉型钨矿成矿模式，推动了南岭地区，乃至全国和全球钨矿的找矿勘查。迄今，仍然具有实用性。



中国地质调查局  
 CHINA GEOLOGICAL SURVEY

### 三、技术创新与整合：开展覆盖区和深部找矿

遥感技术广泛应用



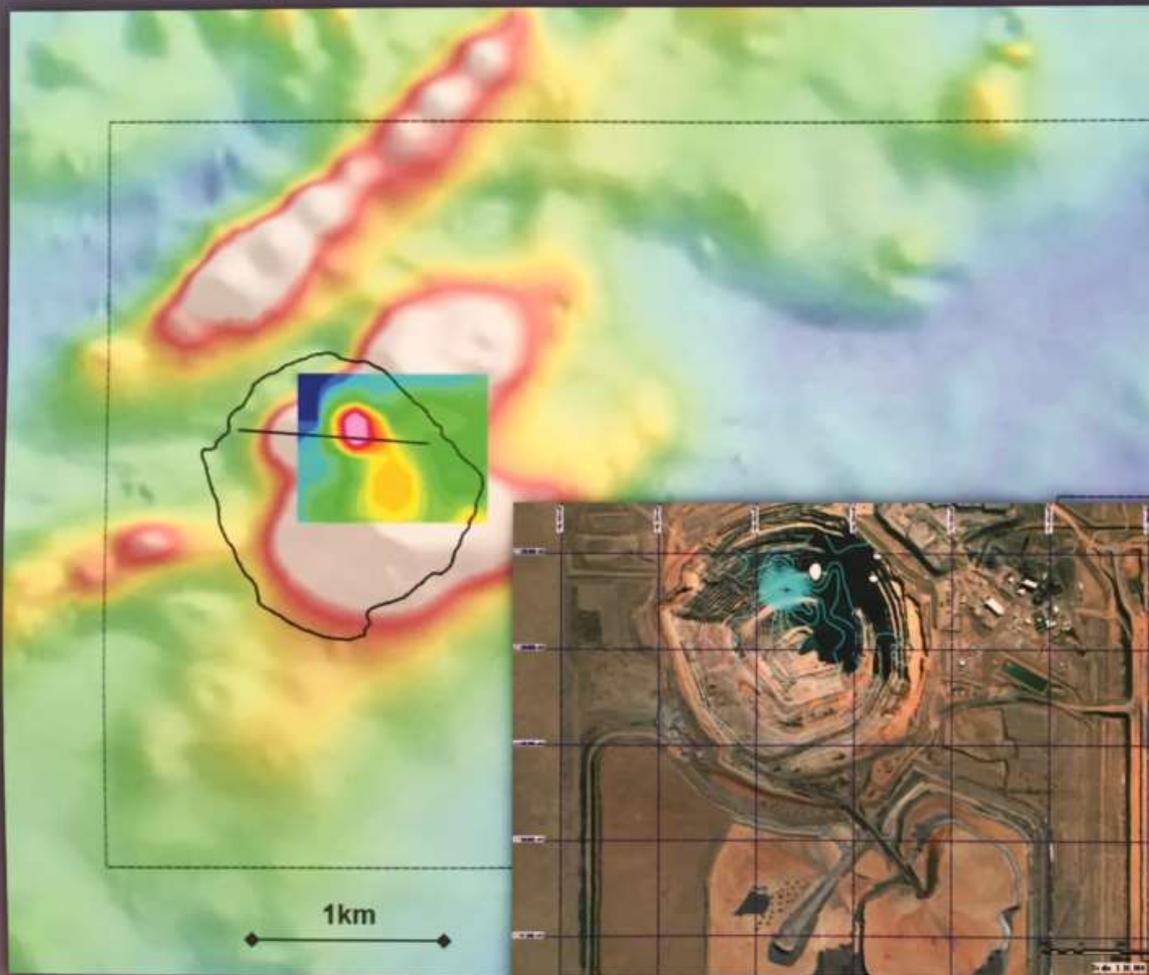
美国内华达州Goldfield 矿区遥感影像填图：红色-伊利石；绿色-明矾石；蓝色-高岭石；黄色-围岩（Sabins, 1999）



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

Henry大型IOCG矿床  
航磁与遥感结合发现 Ernest

Ernest Henry Discovery TEM over 1992 RTP magnetics



Original Ground MLEM data overlain on 2010 open pit image

• TEM - Identified supergene cap (chalcocite)

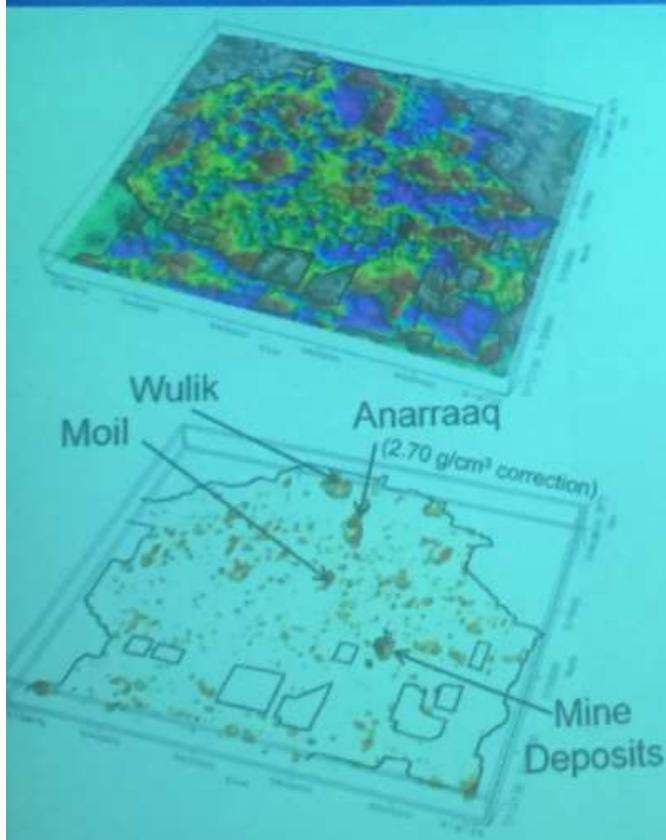


中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

激电 + 加重力针对阿拉斯加红狗矿集区富黄铁矿和重晶石矿床开展深部和外围调查, 找矿取得新突破

## Geophysics

Screening True Positive Responses



### Gravity, HeliTEM, IP

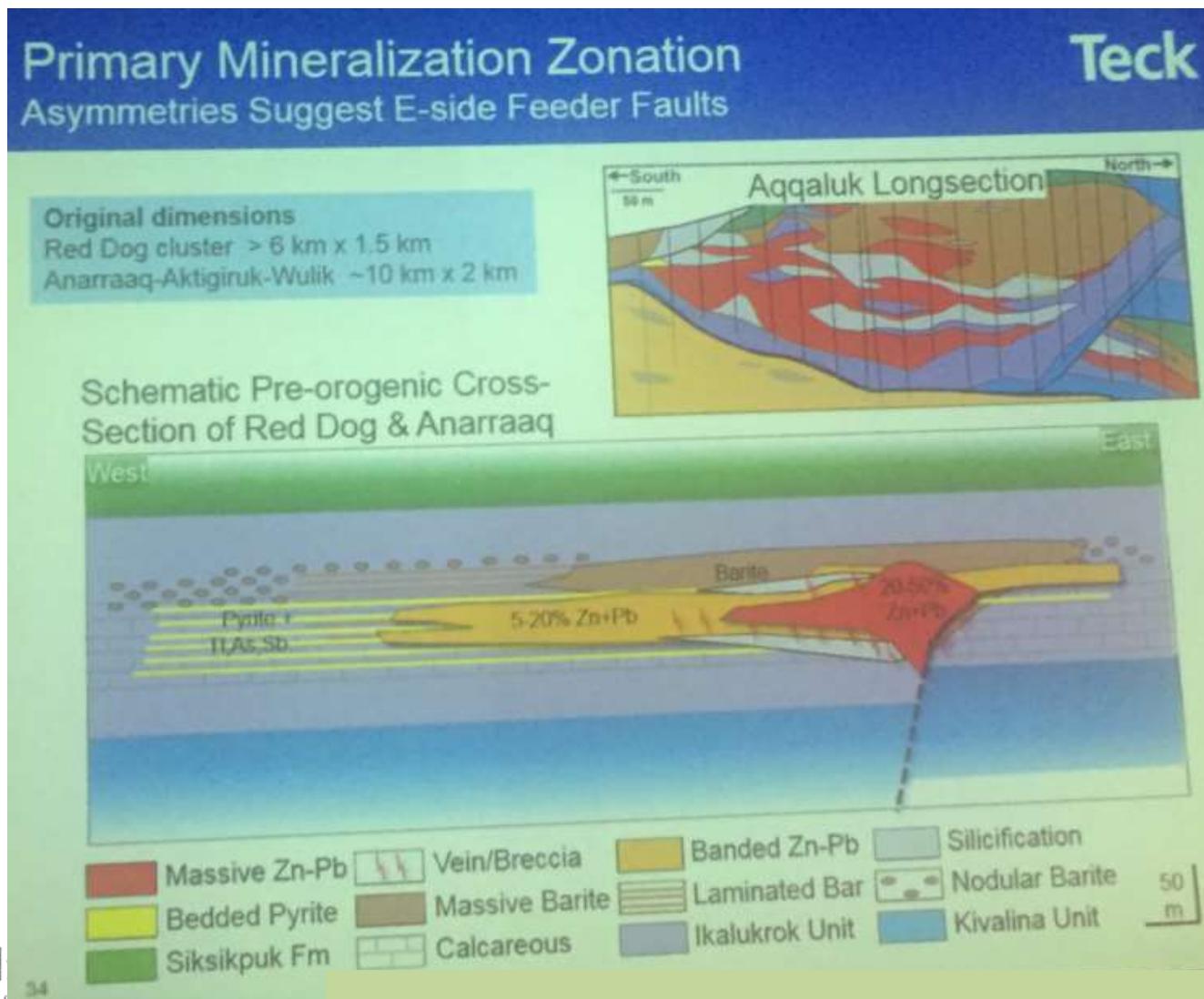
- Detects associated Pyrite and Barite systems – non unique
- Rock property characterization (in situ and discrete sample testing)
- Historical DH Radial IP
- Geologically-constrained inversion and forward models to screen anomalies

岩石类型	重力梯度 (g/cm)
围岩	2.5 – 2.9
矿石	3.1 - 4.0
重晶石	4.0 – 4.4



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

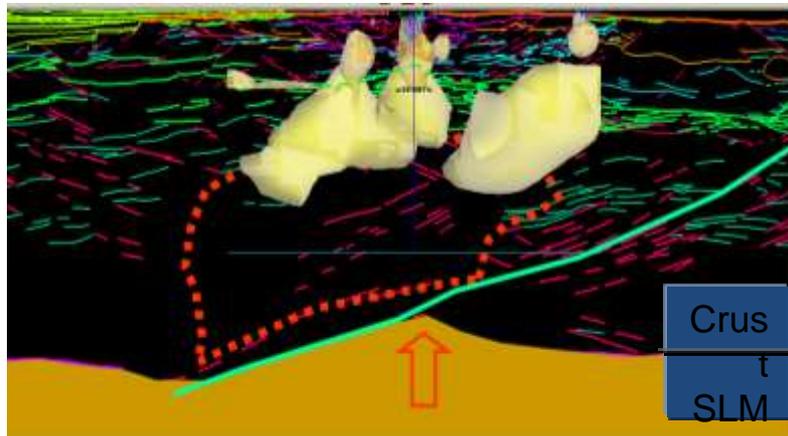
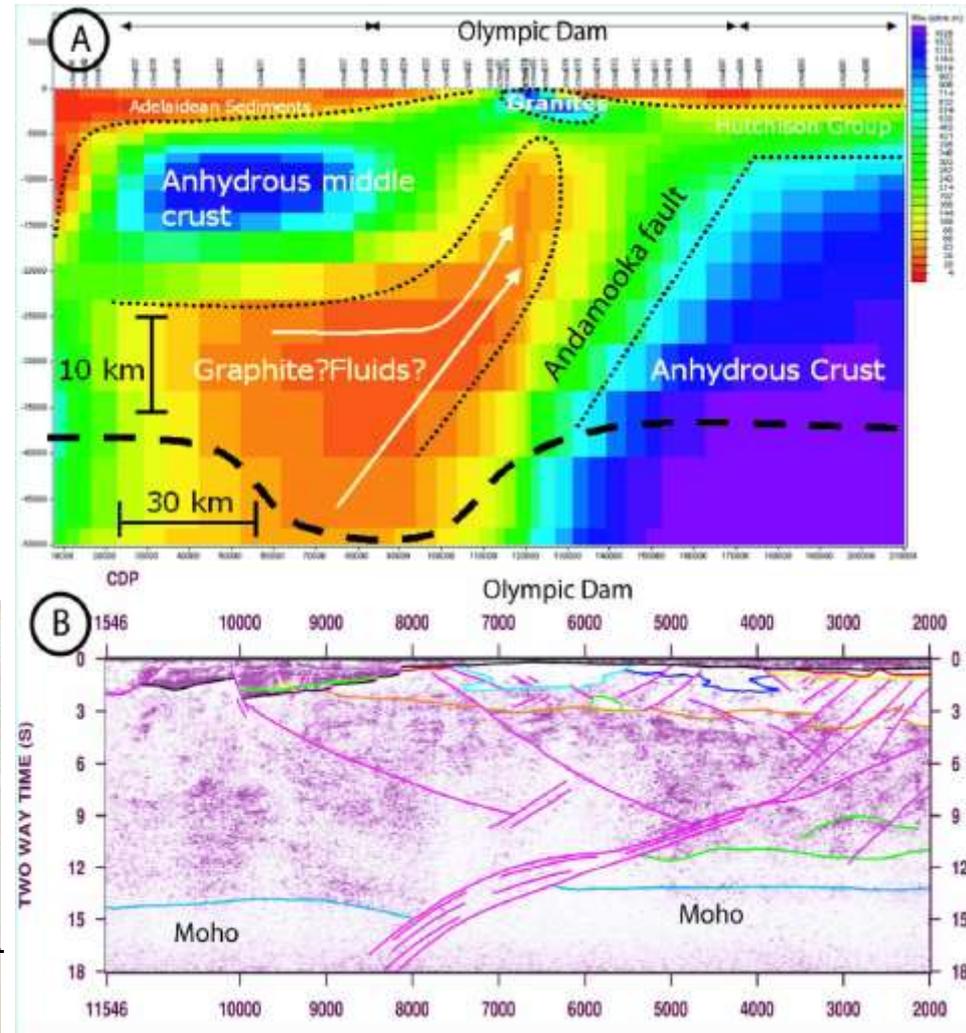
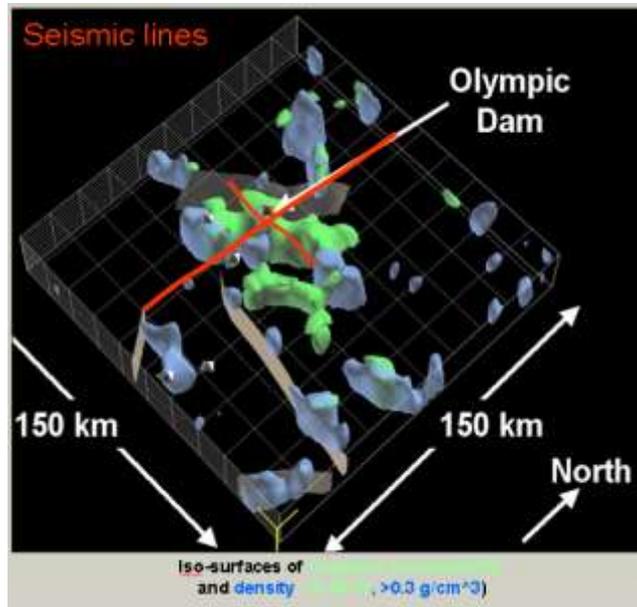
重力 + 加  
激电两种  
地球物理  
方法有效  
结合，在  
红狗 Pb-  
Zn矿区找  
矿取得大  
突破



中国地质调

CHINA GEOLOGICAL SURVEY

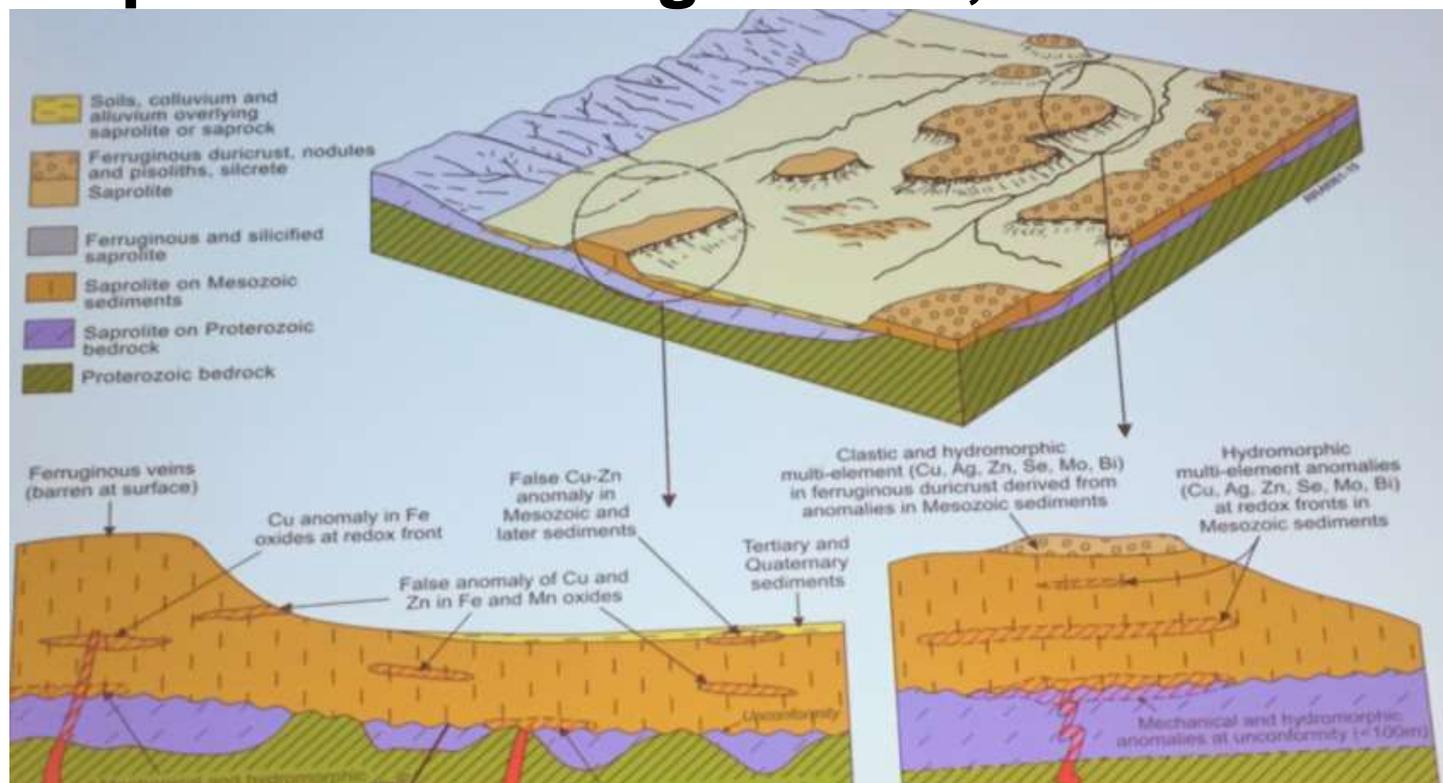
# Seismic/Magnetotelluric Lines show? Alkaline Body at depth



(据BHPBILLITON, 2013)

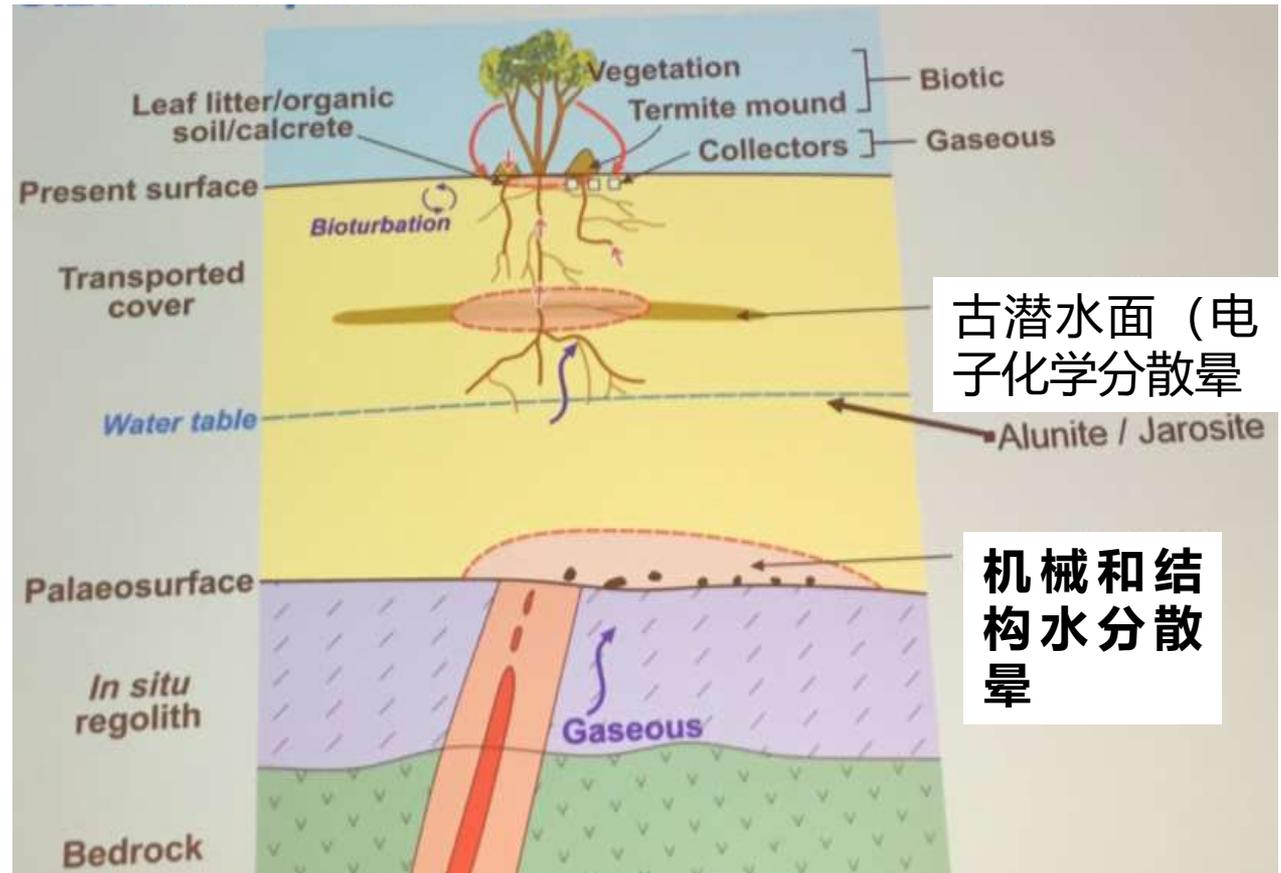
# Exploration through cover, Mt Isa

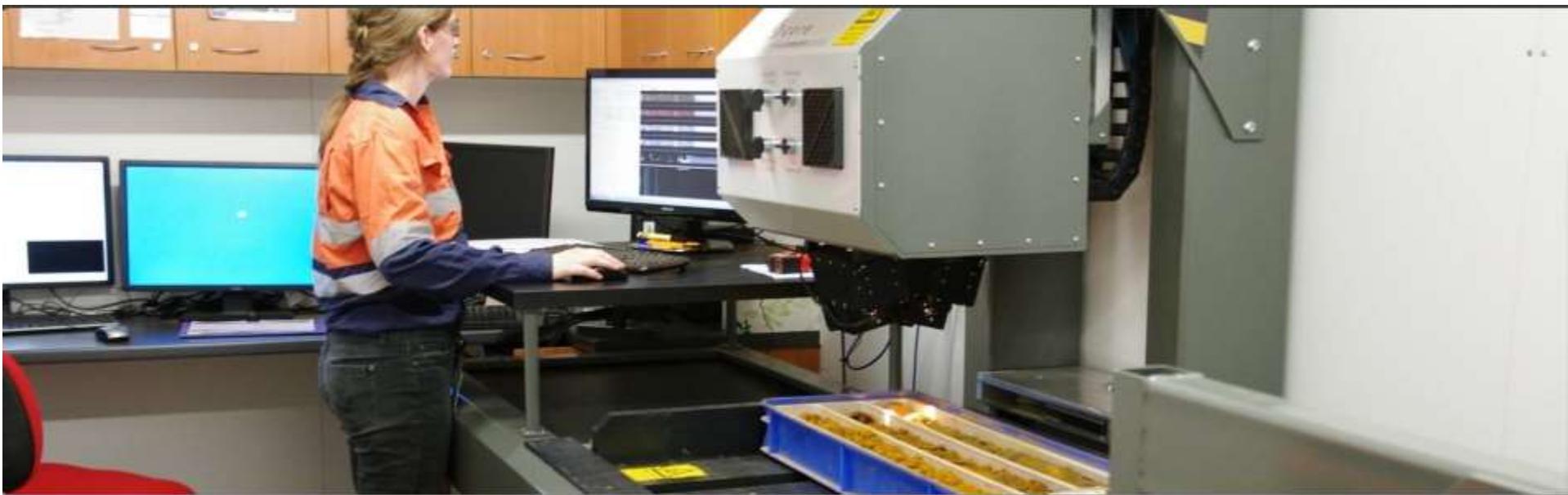
澳大利亚  
北昆士兰  
芒特艾萨  
地区有几  
十米厚的  
沙土-戈壁  
覆盖



## Size of dispersion halo in various sample media

运用浅钻、  
植物和地  
气探测覆  
盖区隐伏  
矿体





HYPERSPECTRAL  
CORE  
SCANNING



CORE  
IMAGING  
SYSTEM



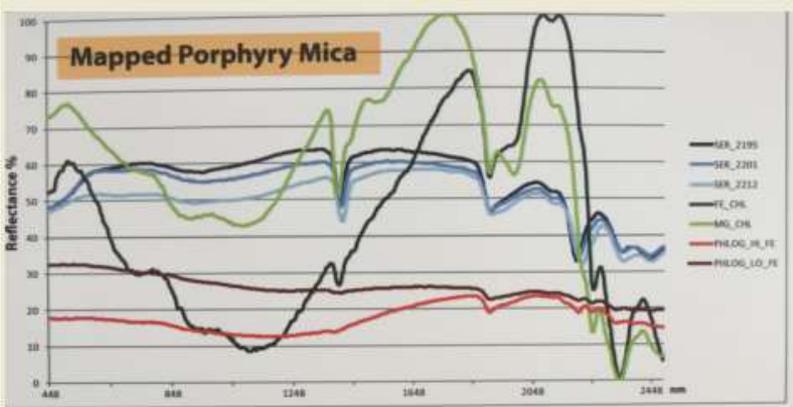
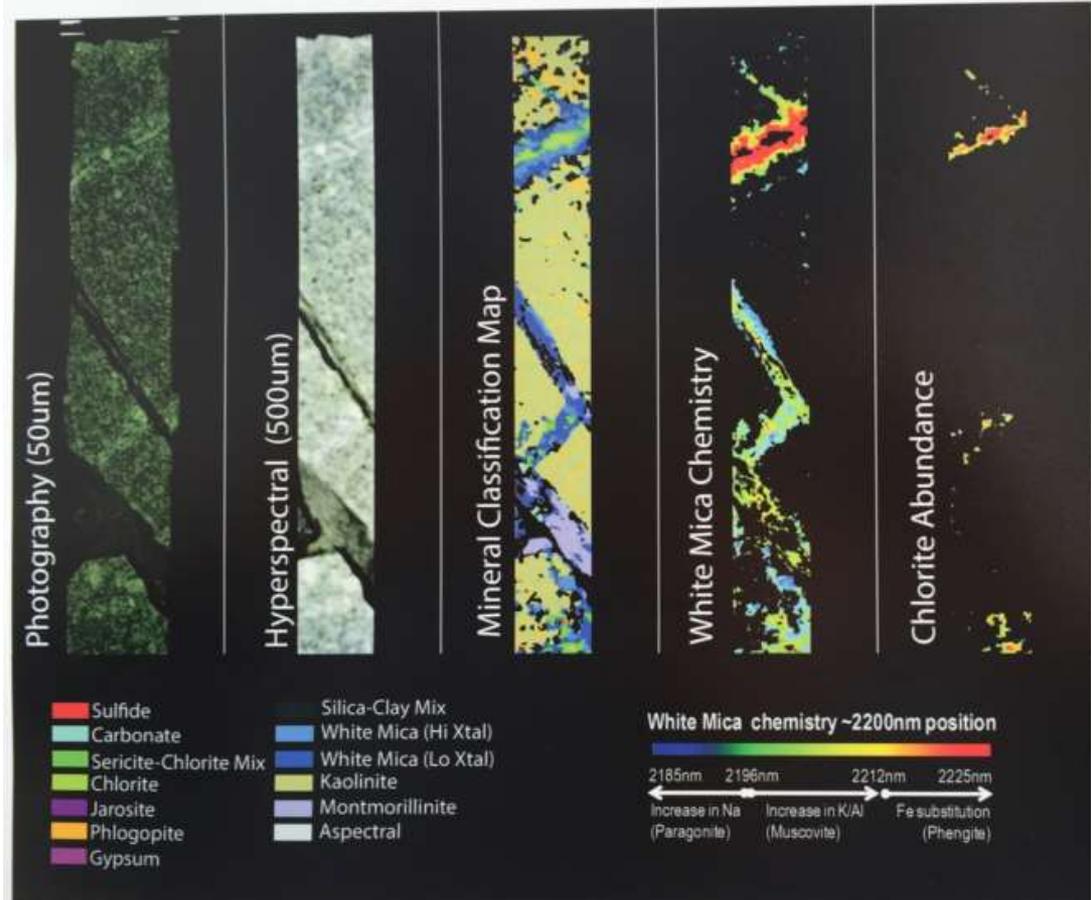
ONSITE &  
BUREAU  
FACILITIES



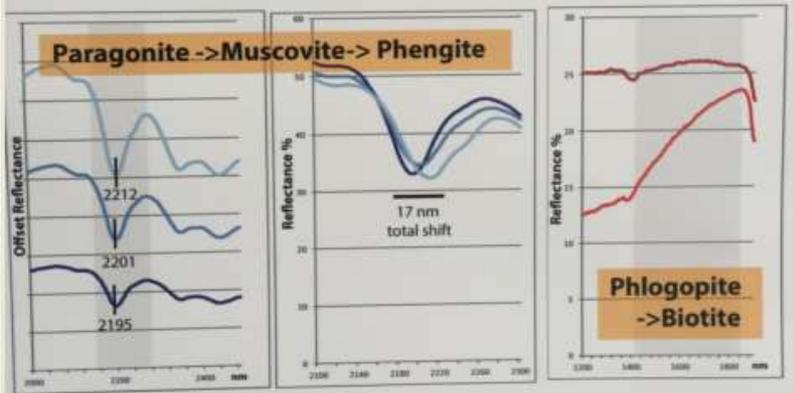
运用红外和紫外光谱开展岩心和野外蚀变矿物填图，发现矿化蚀变规律

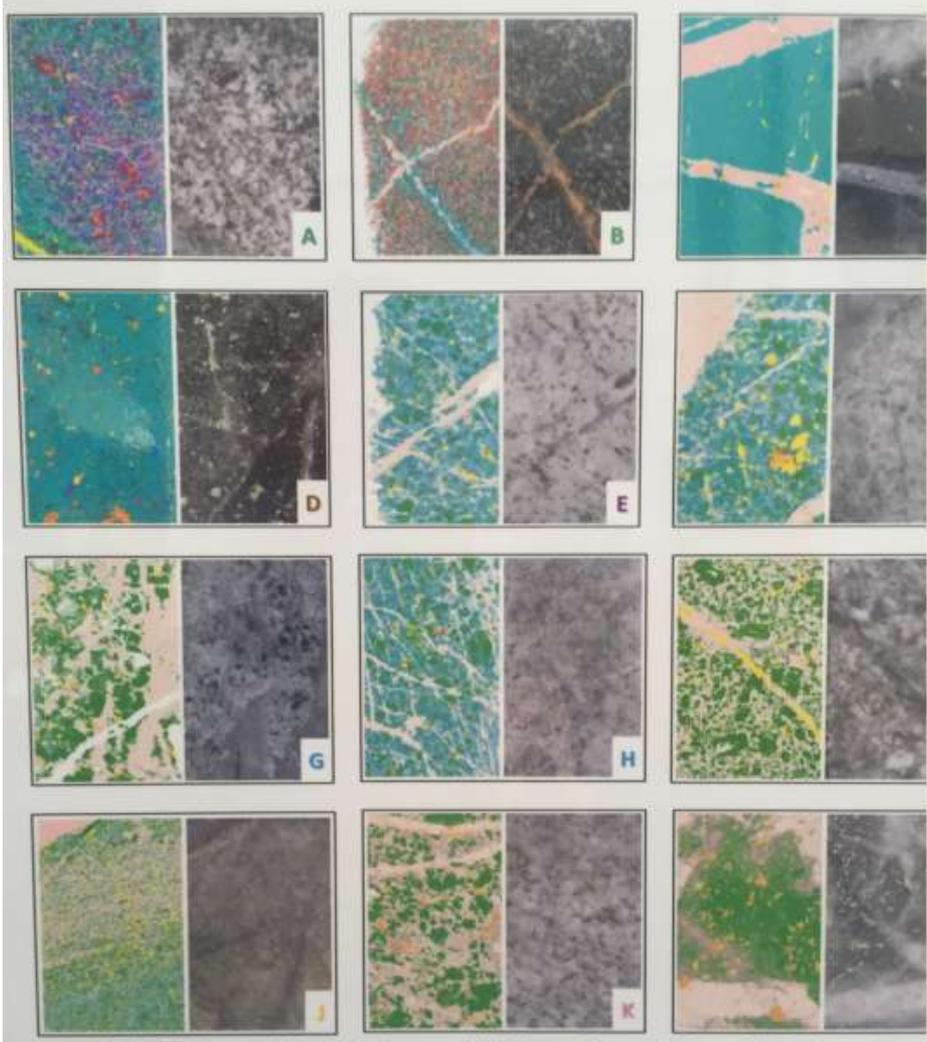


中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY



Mica Spectroscopy: Quantitative measurement, tracking and identification of absorption minima, maxima and slopes

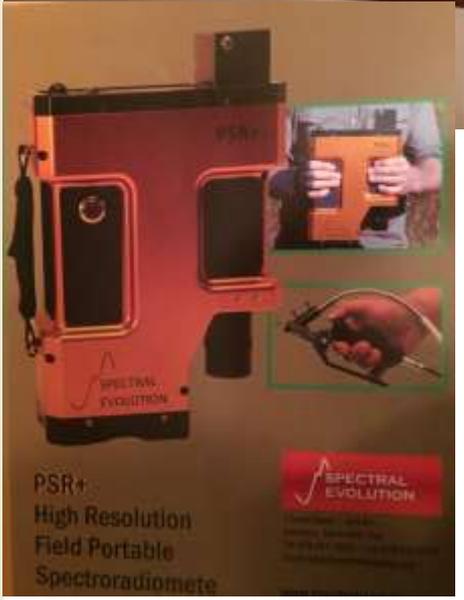
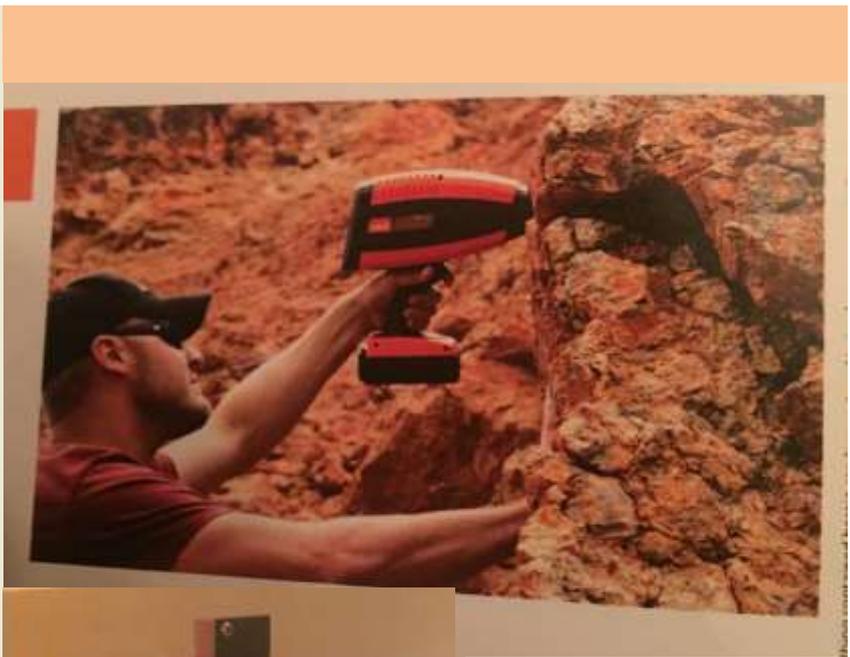




QEMSCAN image on left, sample image on right. 14mm x 22mm and 20mm x 30mm thin sections.

**QEMSCAN Colour Key**

K-Feldspar	Quartz	Biotite/Phlogopite	Calcite	Chalcopyrite
Plagioclase	Illite/sericite	Chlorite	Ankerite	Molybdenite
Albite	Kaolinite	Siderite	Pyrite	Apatite

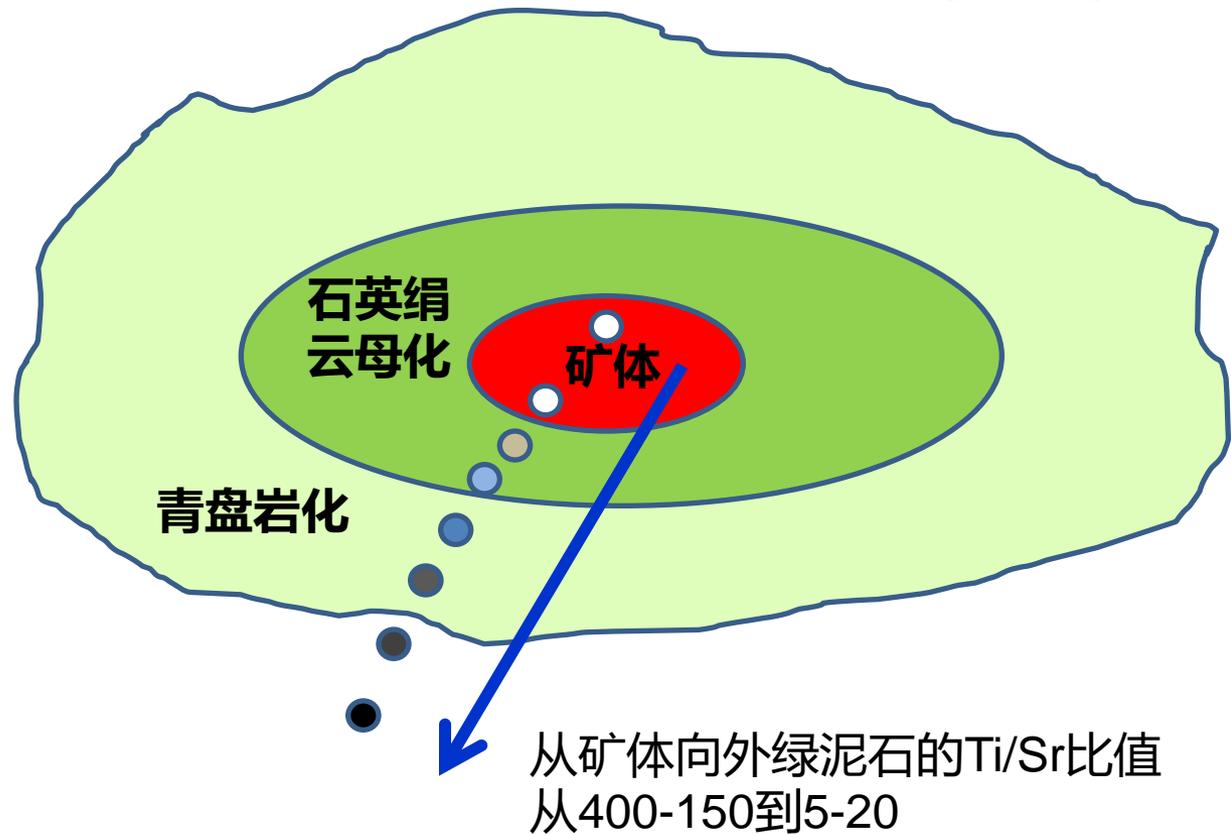


两类红外装置  
及其野外工作

Footprint  
minerals( 印  
痕矿物)

蚀变矿物 (绿  
泥石、绿帘石、  
黄铁矿、电气  
石和萤石等)  
填图, 发现矿  
化蚀变空间分  
布规律, 示踪  
发现隐伏矿体

蚀变安山质火山岩



## 钻探技术创新

快速-低成本钻探，有效地检验靶区；

一垫多孔多方向钻探；

各类新型钻探研发：激光、等离子、化学及热散裂钻探方法，目标是大于4000米深度。



DET CRC,  
Australia



Multi-Power Products

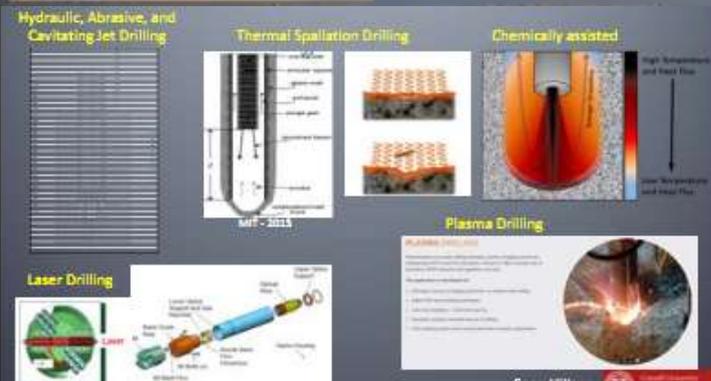
Hydraulic, Abrasive, and Cavitating Jet Drilling

Thermal Spallation Drilling

Chemically assisted

Plasma Drilling

Laser Drilling



中国

CHINA GEOLOGICAL SURVEY

## 四、深地开采

考虑到经济效益，金属矿开采在世界上没有一处是直接开采1000米以下的矿产，目前在开采的深部矿产全部是地表矿或近地表矿逐步向深部开采，只要能够有足够的利润就向下采掘，否则立即关闭。目前，对于全球开采1000米以下的矿山数据统计不一致，有110多个，80多个，如果不考虑露天采矿和平峒采矿转化到坑道开采，从最低风口向下，深部大于1000米的矿山有50多个，而且部分已经关闭。



## 1. 世界深部开采现状

**世界十大坑采深部矿山：**主要分布于南非和加拿大，其中南非南德盆地有8个金矿，均属于英美公司，Mponeng金矿（开采深度为2.4-3.9km），TauTona金矿（主开采工作面 1.85-3.45km，局部到 3.9km），Savuka 金矿（3.7km），Driefontein（3.4km），Kusasaletu金矿（3.276km），Moab Khotsong金矿（2.6-3.054km），South Deep金矿（2.995km），Great Nologwa金矿（2.4 - 2.6km），加拿大安大略省Xstrata公司的Kidd Creek铜锌矿（2.927km）和淡水河谷公司在肖德贝里地区的Creighton铜镍矿（2.5km）。



**世界十大露天开采的矿山：**犹他州Bingham Canyon斑岩型铜矿（开采深度为1.2km），智利Chuquibambilla斑岩铜矿（850m），智利的Escondida斑岩铜矿（525m），俄罗斯东西伯利亚Udachny金刚石矿（属于非金属矿，630m），乌兹别克斯坦的穆龙套金矿（600m），西澳大利亚的Fimiston金矿（600m，位于卡尔古利金矿东南边缘），印度尼西亚Grasberg斑岩金铜矿（550m），美国内华达州的Betze-post斑岩铜矿（500m），本钢的南芬铁矿（500m），瑞典北部Aitik银金矿（430m）。



中  
CH

## 2. 深部金属矿（包括金刚石矿）开采面临着诸多挑战

### a. 地热增温是深部采矿的首要难题

地热增温 $1.7 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，高硫化物和富挥发组分的矿石增温更快，地热活动带最高；

### b. 企业经济效益的杠杆

深部开采：成本高，环保要求高，人体损伤严重，技术难度大；

### c. 地应力变化和静岩压力对深部采矿造成明显难度

工程技术难度增大

### d. 社会发展和人类进步对于生活环境需求的提升成为深部采矿的屏障——人们对生活环境要求日益增强，代价过大。



### 3. 自动化控制和无人采掘——深部采矿的曙光

a. 露天开采智能化和无人化日益广泛，前提是大吨位的矿山



中国  
CHINA

An Atlas Copco autonomous drill at BHP Billiton's Yandi mine.

## b. 深部无人机开采和运输矿石——已经开始试验，取得初步效果：前提是巨大型矿体



The Volvo FMX self-driving truck

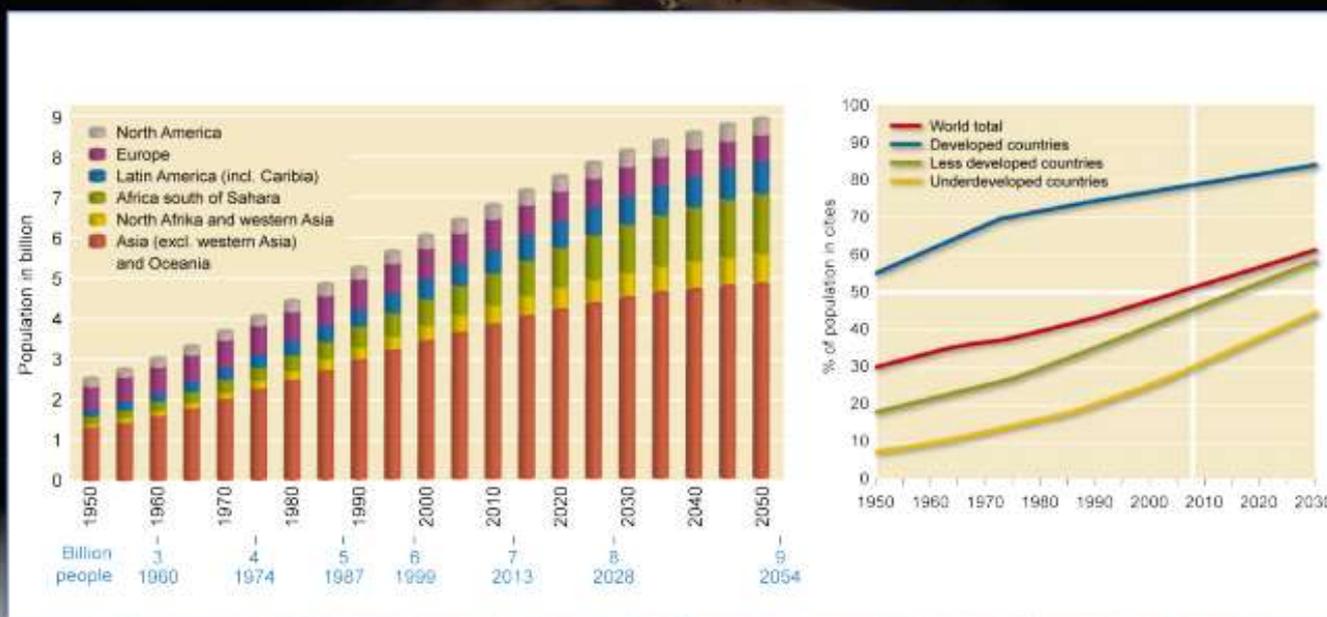
The Volvo Group has put its first fully autonomous truck to the test at underground operations at the Kristineberg mine, 100 km from



# 五、矿产资源：世界在发展，需求是硬道理

L The northernmost University of Technology in Scandinavia  
World-class research and education

## Why metal consumption will continue to increase over the foreseeable future!



BETTER BELOW ZERO

据Par Weihed, 2015 SGA



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

# 结束语

自从2012年以来，全球矿业进入了低迷期，这是由于我国经济在转型，正在打造升级版。

我国的城镇化和工业化尚没有完成，世界大多数不发达和欠发达国家需要发展，此起彼伏，蓬勃向前，发展对于矿产资源是刚性需求，进一步找矿亟待科技创新。

各位专家、同行们：目前矿业处在数九寒天，地勘费投入年持续减少，今年矿业整体开始回暖，寒冬过去就是春天，美好的春天就在明天。



# 谢谢

## 东天山岩墙群



中国地质调查局  
CHINA GEOLOGICAL SURVEY

