

多尺度地球化学勘查聚焦找矿靶区 ——以滇东 Pt 地球化学省勘查研究为例

陈永清^{①*}, 黄静宁^①, Xiaoming Zhai^②, 赵彬彬^①

① 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

② College of Lake County, 19351 W. Washington St, Grayslake IL 60030, USA

* E-mail: yqchen@cugb.edu.cn

收稿日期: 2008-08-05; 接受日期: 2009-04-18

国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA06Z113)和国家自然科学基金(批准号: 40772197)资助

摘要 铂矿资源一直是中国紧缺而急需的矿产资源. 以滇东 Pt 地球化学勘查为例, 在极低密度泛滥平原沉积物勘查数据圈定的滇东 Pt 地球化学省的基础上, 首先按不同的勘查尺度对研究区内国家地球化学填图计划采集的水系沉积物样品进行重组形成组合样品, 然后应用化学预富集光谱法(C-OES)分析组合样的 Pt 含量, 并应用变差函数定量描述不同勘查尺度数据圈定的 Pt 异常的变化性及控制其变化性的地质因素, 最后基于不同勘查尺度 Pt 数据分别圈定区域和局部 Pt 异常块体, 按地球化学块体方法估算各异常块体内的 Pt 资源潜力. 结论表明: (1) 从区域 Pt 异常块体到局部 Pt 异常块体, 控制因素由一级裂控-岩控向二级岩控-裂控转化, 表明变差函数有效揭示了控制不同勘查尺度 Pt 异常块体变化性的主要地质因素. (2) 存在两类 Pt 异常: 一类是在两个观测尺度下都具有 Pt 异常显示, 且异常含量随观测尺度的变小(取样密度的增加)而显著增强; 另一类是随勘查尺度的变小 Pt 异常弱化甚至消失. 表明多尺度地球化学聚焦找矿具有逐步排除非矿异常, 筛选矿异常的功能. (3) 小尺度勘查数据圈出的局部 Pt 异常块体的 Pt 平均含量是大尺度勘查数据圈出的区域 Pt 异常块体的 2 倍, 局部 Pt 异常块体 Pt 资源量占区域 Pt 异常块体的 60%, 而前者面积仅占后者的 35%. 表明 Pt 资源量主要集中在局部异常区域, 聚焦找矿具有高效浓缩靶区的勘查效果.

关键词

Pt 地球化学块体
多尺度地球化学勘
查聚焦找矿
变差函数
滇东
西南中国

虽然自 20 世纪 90 年代以来, 勘查地球化学由原来的以找矿为中心, 向环境和农业等多目标地球化学填图拓展^[1,2], 但矿产勘查依然是勘查地球化学研究的主题^[3], 并相继开发了以寻找深部矿和隐伏矿为目标的深穿透地球化学技术^[4-6].

国家地球化学填图的结果表明, 区域地球化学信息能够从宏观上揭示大型、超大型矿床或其矿集区

形成的印迹. 例如, 华南的一些钨和铋矿床位于由较高含量成矿组分构成的局部异常地段, 局部异常又被区域异常包围, 性质相同或相近的区域异常构成地球化学省, 在矿床或矿集区周围形成套合的地球化学谱系模式^[7,8]. 这种谱系模式是地球形成时物质的初始非均一性和后期地球演化过程中各种地质事件叠加的结果, 并在三维空间构成为大型-超大型矿

引用格式: Chen Y Q, Huang J N, Zhai X M, et al. Telescoping ore targets by geochemical exploration at multiple scales in Eastern Yunnan Pt geochemical province, southwestern China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52(5): 627—637, doi: 10.1007/s11430-009-0051-x

床形成提供巨量矿质的地球化学块体^[7]. 这种模式反映了一系列由高到低成矿元素异常组成的多层套合地球化学分布, 从而为地球化学聚焦找矿提供了科学依据. 即, 从应用极低密度样品数据圈定成矿元素地球化学省入手, 通过逐步提高取样密度依次在其地球化学省内圈定其区域地球化学异常、在区域地球化学异常内圈定局部地球化学异常, 直至发现矿床. 这就是谢学锦^[9]提出的“迅速掌握全局, 逐步缩小靶区”的聚焦找矿战略, 同时为实现这一战略, 发展了一套从战略到战术、从极低密度(1 采样点/1000~10000 km²)、超低密度(1 采样点/100~1000 km²)、甚低密度(1 采样点/10~100 km²)到低密度(1 采样点/1~10 km²)的采样系统.

本次研究不仅为在地球化学省内系统实施这种多尺度聚焦找矿战略提供了一个成功的案例, 更重要的是为该区进一步寻找铂矿床提供了新的靶区.

铂一直是中国急缺的矿产资源, 本次研究正是遵循上述思路, 选择应用泛滥平原沉积物地球化学数据(1 采样点/(160 km×160 km))圈定的滇东Pt地球化学省^[10], 作为实施多尺度地球化学聚焦找矿的研究区域(图 1).

1 区域地质概况

滇东 Pt 地球化学省, 位于东经 102°~104°30', 北

纬 22°40'~26°40'云南省东部地区(图 2), 是应用超低密度泛滥平原沉积物数据圈定的中国最大规模的Pt地球化学省, 同时亦是Cu和Pd地球化学省^[7]. 区内成矿地质条件复杂, 由三个一级大地构造单元构成. 以红河断裂为界, 其南西侧为印支地块, 含有与印支期基性-超基性侵入岩有关的铜镍硫化物矿床(白马寨), 与喜马拉雅期构造岩浆活动有关的金矿床(长安), 金-铜-铅-锌多金属矿床(大坪)和斑岩型铜-钼矿床(铜厂街)等. 红河断裂以北, 以小江断裂连接弥勒-师宗断裂为界, 其北西侧为扬子地块, 主要矿床有产于中元古-新元古界昆阳群与黑色岩系有关的东川超大型层控型铜矿床和产于古元古界大红山群大红山式火山岩型铁-铜矿床等. 南东侧为华南地块, 产有与燕山晚期花岗岩有关的个旧超大型锡多金属矿床 等^[11~16].

滇东Pt地球化学省存在两类Pt含矿建造, 一类是发育于扬子地台西南缘与二叠纪峨眉山玄武岩有关的Pt-Pd-Cu-Au含矿建造, 另一类是与形成于不同地质时期大陆裂谷黑色岩系(中元古-新元古界昆阳群, 上震旦-下寒武系等)有关的Pt-Pd-Mo-Cu含矿建造(图 2). 二叠纪峨眉山玄武岩是峨眉山大火成岩省的重要组成部分^[17], 其平均含量Cu 196 μg·g⁻¹, Pt 5.48~7.71 ng·g⁻¹, Pd 5.48~6.19 ng·g⁻¹^[11,18], 分别是中国玄武岩相应元素含量的 3.8, 10~14 和 12~13.5 倍. 据

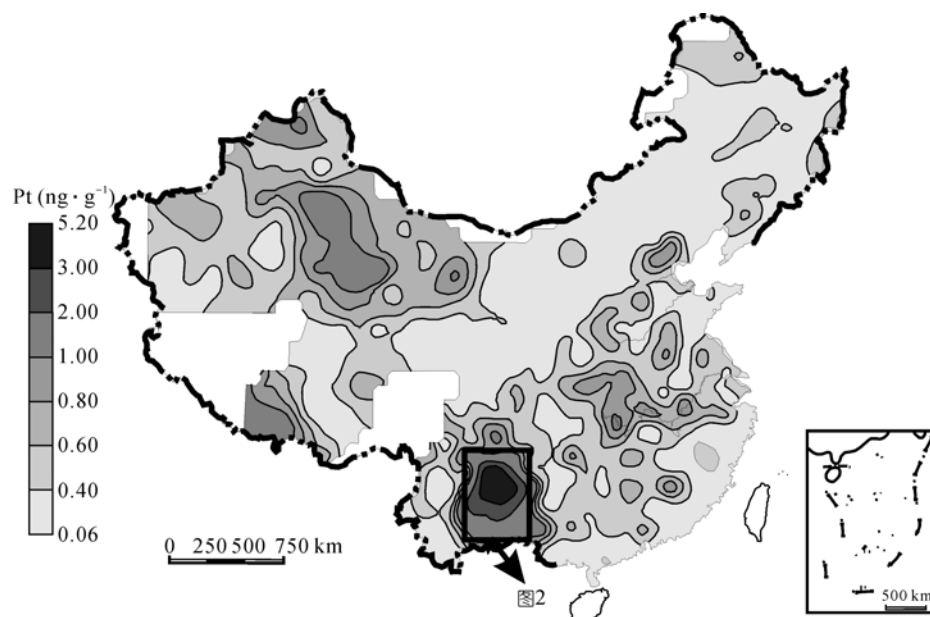


图 1 中国Pt地球化学图(据Cheng等^[10])

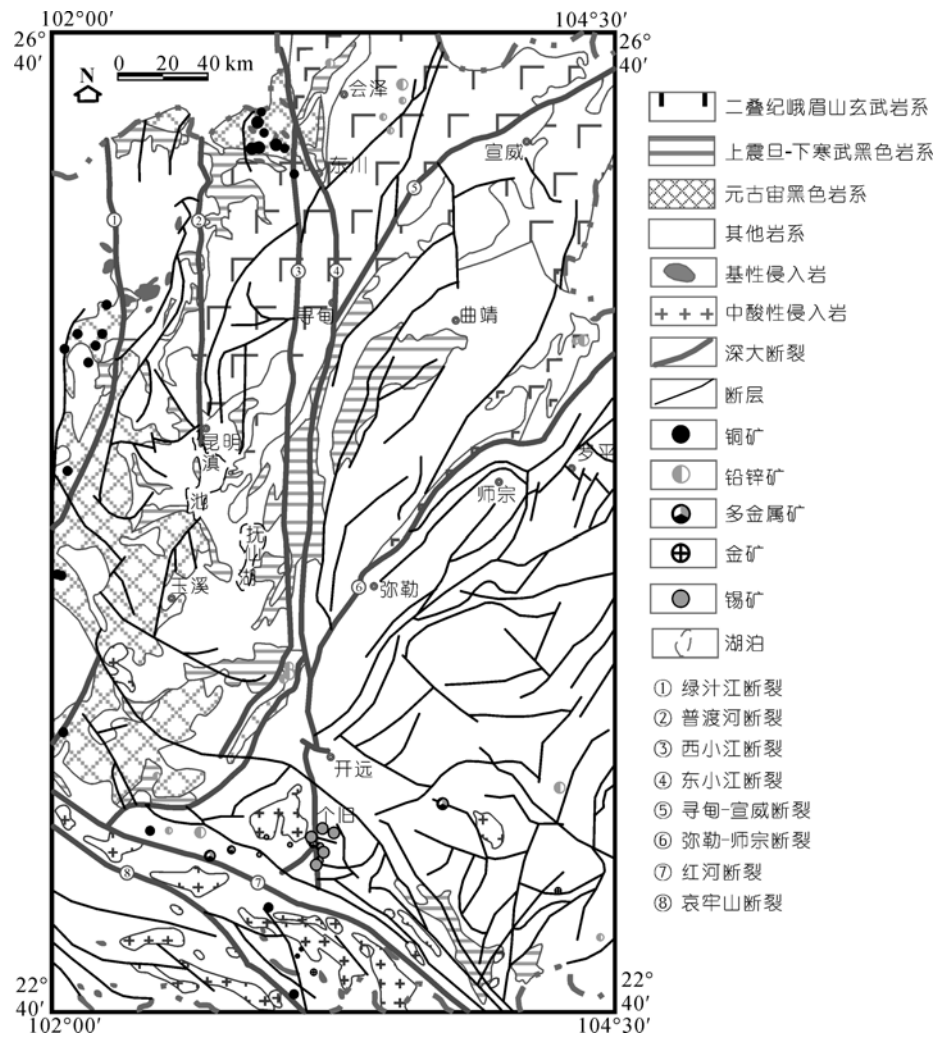


图2 滇东 Pt 地球化学省地质矿产简图
据陈永清等^[11]

报道, 在贵州遵义寒武系底部发现 Mo-Pt-Pd 矿化^[19-22], 四川古元古界河口群下段碳质板岩中发现 Cu-Pt-Pd 矿化, 四川丹巴鱼海子地区大石包组峨眉山玄武岩中发现 Au-Pt-Pd 矿化^[19-22]. 目前, 世界上与黑色岩系有关的贵金属矿床, 据其成矿元素组合可大致分为 2 类: 一类是 Au-Pt 矿床, 以产于俄罗斯的干谷 (Сухойпорт) 矿床为代表, 厚度从数十米至数百米, 长达数千米, 品位较贫, 但储量巨大, 平均品位 Au $2.79\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$, Pt $0.1\sim1\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$, 最高可达 $3\sim5\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$; 储量 Au 1350~1630 t, Pt 240~400 t. 第二类是以波兰 Kupferschiefer 矿床为代表的 Cu-Ag 矿床 (伴生 Pt, Pd 和 Au), 其特征是厚度小 ($n\times\text{cm}\sim50\text{ cm}$), 长度大 ($n\times10$

km), 品位高, (平均品位 Au $86.6\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$, Pt $55.6\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$, Pd $48.4\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$)^[23,24]. 由此可见, 该类型矿化不仅是有色金属矿床的重要矿化类型, 而且蕴藏着巨大的贵金属 (PGE-Au) 资源潜力.

2 方法

虽然自 20 世纪 70 年代末以来实施的国家地球化学填图计划分析的 39 种元素^[25], 受当时分析技术的限制, 没能分析 Pt 等元素, 但至今存放在各省地勘局实验室数以万计的水系沉积物样品为我们实施多尺度 Pt 地球化学聚焦找矿提供了宝贵的分析介质. 本次研究的基本方法程序如下: (1) 首先以 $8\text{ km}\times8\text{ km}$ 为

单元, 将单元内分别提取的所有原始水系沉积物地球化学样品(其取样密度为 1~2 样品/ km^2)重组成一个组合样品, 结果获取 1625 组合样品, 覆盖整个滇东 Pt 地球化学省近 104000 km^2 的面积. (2) 依次将每个组合样品均匀混合后粉碎至 200 目, 送实验室用化学预富集光谱法(C-OES)^[26,27]分析 Pt 的含量(由云南省岩矿测试中心完成), 检出限为 $0.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 合格率为 99.69%. 根据该分析数据圈定的 Pt 地球化学异常被定义为其区域 Pt 地球化学异常. (3) 在其区域异常内, 以 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 为单元采集原始水系沉积物样品, 并将它们重组为一个样品, 结果获取 1159 组合样品, 覆盖整个滇东 Pt 地球化学省内近 18544 km^2 区域 Pt 异常. (4) 依次将每个组合样品均匀混合后粉碎到 200 目, 送实验室用化学预富集光谱法(C-OES)分析 Pt 的含量(由武汉岩矿测试中心完成), 检出限为 $0.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 合格率为 100%. 根据该分析数据圈定的 Pt 地球化学异常被定义为局部 Pt 地球化学异常. (5) 用变差函数分

别研究 Pt 区域异常和局部异常的变化性, 以及控制其变化性的地质因素. (6) 最后, 根据地球化学块体概念和方法^[27]分别估算区域和局部异常块体的 Pt 和 Pd 资源潜力.

3 结果与讨论

3.1 Pt 含量的统计特征

Pt 异常主要分布于二叠纪峨眉山玄武岩区域. 两个取样密度 Pt 含量的统计参数列于表 1. 业已表明, 相对中国大陆玄武岩, 二叠纪峨眉山玄武岩显著富集 Pt. 从滇东 Pt 地球化学省到省内区域 Pt 异常, Pt 平均含量从 $2.50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $6.48 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其浓集系数从 4.63 增加到 11.91.

元素含量直方图能被用于鉴定其统计分布形式, Q-Q 图能被用于检验元素含量偏离标准正态分布的程度. 含量数据点距拟合的直线越近表明越接近于正态分布^[29]. 在直方图和 Q-Q 图上, 滇东 Pt 地球化

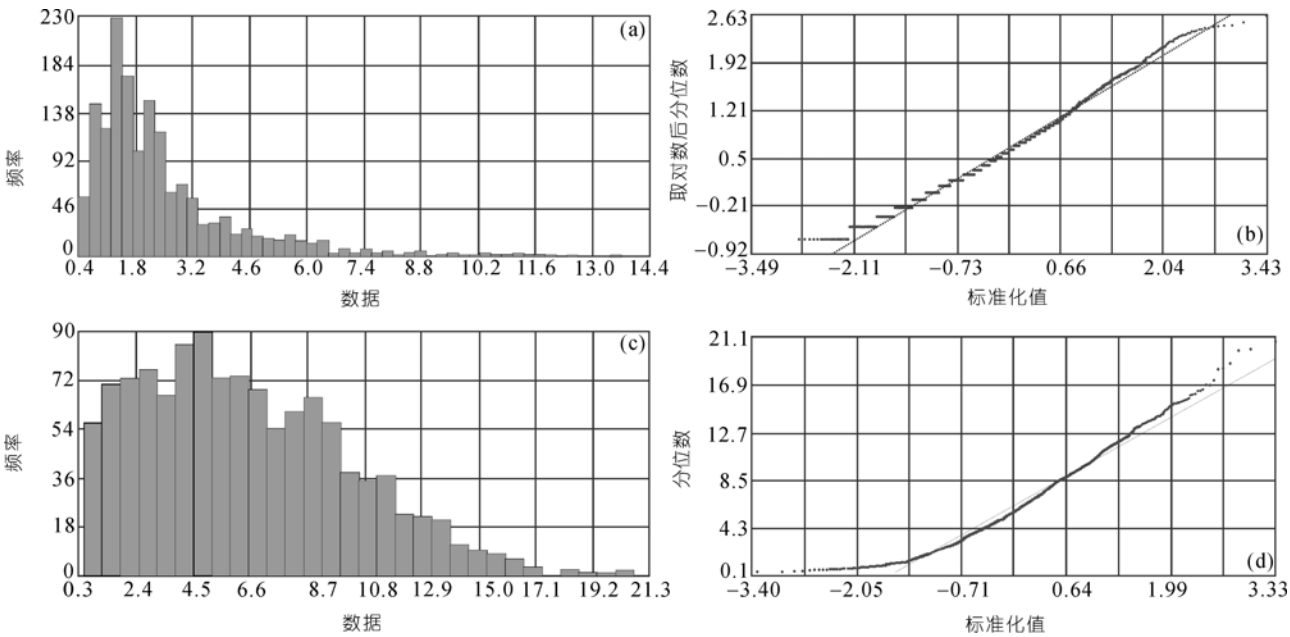


图 3 滇东 Pt 含量数据分布与 Q-Q 分布检验
(a) Pt 地球化学省; (b) 区域 Pt 地球化学异常

表 1 滇东 Pt 地球化学省和区域 Pt 异常 Pt 含量数据统计参数^{a)}

Pt 地球化学异常类型	样品数/件	最小值/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	最大值/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	均值/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	标准差/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	K
Pt 地球化学省	1625	0.4	13.7	2.50	1.94	4.63
Pt 区域地球化学异常	1159	0.47	20.7	6.43	3.83	11.91

a) $K(\text{富集系数}) = \text{Pt 均值} / \text{中国大陆玄武岩 Pt 平均含量} (\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$ ^[28]

学省及其区域地球化学异常中的Pt 含量数据分别近于服从对数正态分布和正态分布(图 3), 偏离拟合直线的主要是Pt的高含量数据. 这些高含量数据服从 Pareto分布或分形分布, 可能代表了后期成矿事件产生的矿化异常组分^[30,31].

3.2 Pt 含量的空间分布趋势

将 Pt 含量在空间分布上的数值点分别投影到 XZ(EW)和 YZ(SN)平面上可以再现 Pt 在整个滇东 Pt 地球化学省内的空间分布特征和总体变化趋势(图 4). 由图 4(a)可知, 对于整个滇东 Pt 地球化学省, Pt 总体样品点投影曲线弯曲较明显, 从南向北, Pt 含量总体变化由低到高, 而东西方向上, 变化不明显. 对于区域 Pt 异常区的 Pt 数据, 由南向北逐渐升高然后再降低, 从西向东具有类似的变化趋势(图 4(a)). 上述 Pt 趋势的变化与富 Pt 玄武岩的空间分布具有密切关系.

3.3 变差函数的拟合

基于它们的统计特征和空间分布特征分析, 对滇东Pt地球化学省采用Pt含量的原始数据取对数计算实验变差函数, 对Pt区域地球化学异常采用Pt原始含量数据计算实验变差函数^[29,32]. 在计算过程中分别采用取样间距 8 km, 4 km作为步长, 角度容差 22.5°, 带宽为 4 km, 2 km, 用球状模型拟合变差函数. 首先计算其在 0°, 45°, 90°, 135°四个方向上的实验变差函数计算值点图, 最后给出拟合后的变差函数参数(表 2). 对滇东Pt地球化学省以及区域Pt异常, 其Pt含量变化呈现明显的各向异性. 从应用 1 组合样品/(8 km×8 km)密度数据圈定的区域Pt异常到应用 1 组合样品/(4 km×4 km)密度数据圈定的局部Pt异常, Pt含

量连续性最佳方向(最小变化方向)从 18.6°变化到 30.2°, 在变差函数中表现为影响Pt元素含量连续性变化的最大变程从 98 km变化到 60 km, 表明控制区域Pt异常的地质因素(断裂), 其走向为NNE向, 控制局部Pt异常的断裂为NE向(图 5, 6). 此外, 基台值呈递减趋势, 从 25.1 变化为 15.27, 表明Pt含量变化幅度的减小; 块金值亦随之呈递减趋势: 从 15.10 到 10.12, 表明 Pt含量变化的随机性减小. 通常在大观测尺度下(区域异常)部分以随机形式表现出来的变化特征(表现为块金值)在小观测尺度下(局部异常)以结构性特征(表现为基台值)表现出来, 这亦是大尺度(区域异常)变化信息包含小尺度(局部异常)变化信息的佐证^[33,34].

表 2 滇东 Pt 地球化学省和区域 Pt 地球化学异常 Pt 含量数据拟合变差函数参数

取样密度	地球化学省	区域地球化学异常
参与计算数据点	1625	1159
数据转换方法	对数变换	无
最大变程方向	18.6°	30.2°
最大变程/km	98	60
最小变程/km	62	42
块金值	15.10	10.12
基台值	25.10	15.27

3.4 Pt 异常块体和 Pt 资源量估算

3.4.1 Pt 异常圈定

根据观测数据的变化性, 对于大尺度(1 样品/(8 km×8 km))观测数据圈定的区域 Pt 异常, 采用 $\bar{X} + 2S$ 作为异常下限(Ca), 分别采用 $Ca \sim Ca + 2S$, $Ca + 2S \sim Ca + 4S$ 和 $> Ca + 4S$ 作为划分 Pt 异常浓度分带(外带、中带和内带)的指标; 对于小尺度(1 样品/(4 km×4 km))

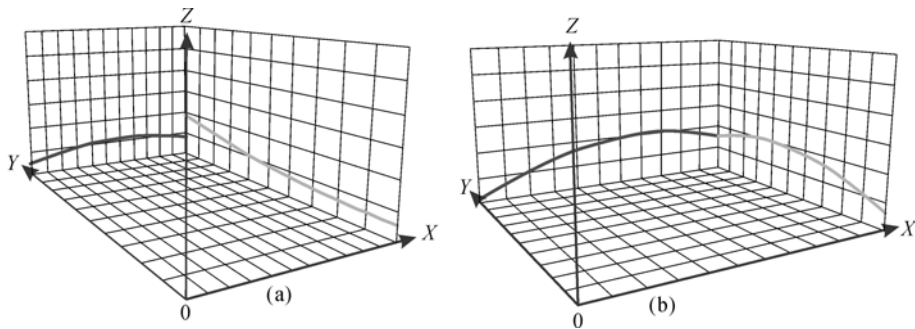


图 4 滇东 Pt 含量数据总体空间分布趋势
(a) Pt 地球化学省; (b) Pt 区域地球化学异常

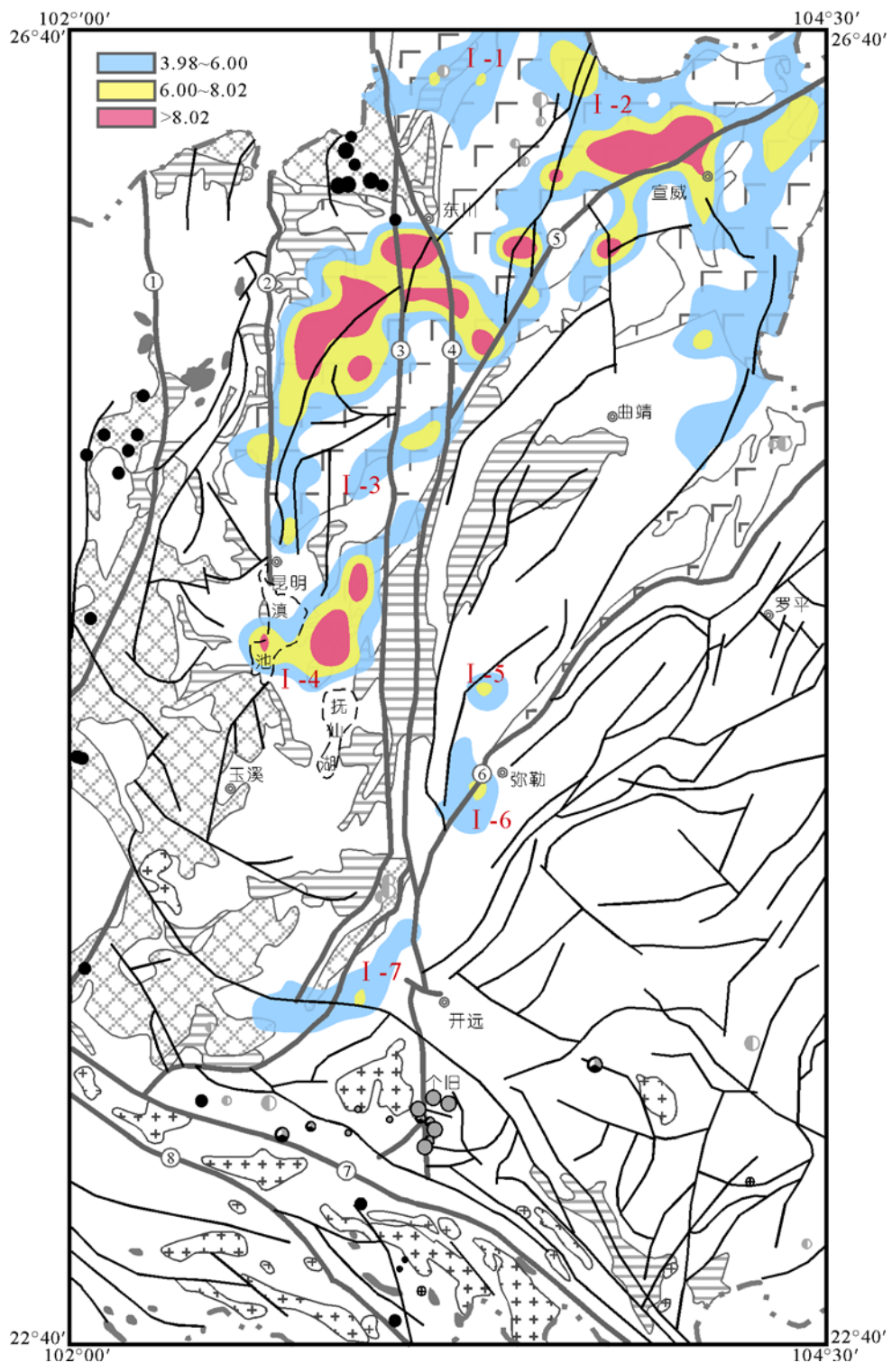


图 5 大尺度勘查圈定的区域 Pt 异常
图例见图 2; 单位: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 1 样品/(8 km $\times$ 8 km)

观测数据圈定的局部 Pt 异常采用 $\bar{X} + 2S$ 作为异常下限(Ca), 分别采用 $Ca \sim Ca+S$, $Ca+S \sim Ca+2S$ 和 $>Ca+2S$ 作为划分 Pt 异常浓度分带(外带、中带和内带)的指标(表 3)。根据上述指标圈定的不同尺度的 Pt 地球化学异常块体见图 5 和图 6。

(i) 区域 Pt 异常。应用组样密度为 1 组合样/(8 km×8 km)获取的 Pt 数据共圈定 7 处区域 Pt 异常(图 5)。两类 Pt 异常被识别。一类是可能与二叠纪峨眉山玄武岩有关的异常, 其特点是规模大, 强度高, 主要分布于研究区中北部的玄武岩区。另一类是与不同地质时期黑色岩系有关的异常, 规模较小, 强度较弱, 主要分布于研究区中南部的黑色岩系分布区。其中

位于玄武岩区沿 SN 向小江断裂和 NE 向寻甸-宣威断裂分布的 I-2 和 I-4 Pt 异常, 具有内、中和外三级浓度分带, 是 Pt 重要资源潜力区。这些异常受区域深断裂和玄武岩的控制, 表现为裂控-岩控的特点。

(ii) 局部 Pt 异常。应用组样密度为 1 组合样/(4 km×4 km)获取的 Pt 数据共圈定 17 处局部 Pt 异常(图 6)。这 17 处 Pt 异常几乎都位于玄武岩内。其中 II-4, II-7, II-8, II-9, II-13, II-15, II-16 和 II-17 等 8 处异常, 具有内、中和外三级浓度分带和多个浓集中心, 是重要的找矿靶区。这些 Pt 异常主要受玄武岩区与深断裂相关的 NE 向分支断裂控制, 主要表现为岩控-裂控的特征。

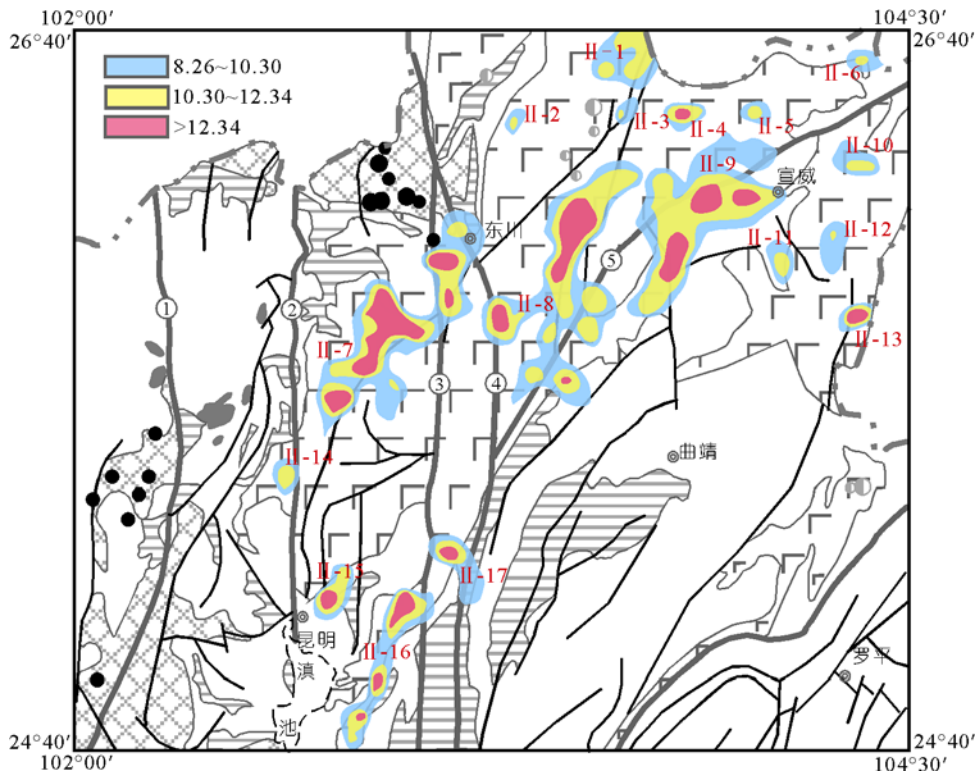


图 6 小尺度勘查圈定的局部 Pt 异常

图例见图 2; 单位: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 1 样品/(4 km×4 km)

表 3 区域和局部 Pt 异常地球化学参数

取样密度	块体规模	样品数 /件	均值 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	标准差 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	异常分带参数/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$		
					外带	中带	内带
1 组合样/(8 km×8 km)	区域异常块体	1448	1.96	1.01	3.98~6.00	6.00~8.02	>8.02
1 组合样/(4 km×4 km)	局部异常块体	768	4.18	2.04	8.26~10.30	10.30~12.34	>12.34

3.4.2 区域 Pt 异常块体和局部 Pt 异常块体的 Pt 资源量估算

(i) 地球化学块体概念及其资源量估算方式. 地球化学块体系指具有一定厚度的地球化学异常, 块体内通常具有一种或多种金属的高含量, 并最终为金属矿床的形成提供主要的矿源^[35]. 与 Au 在玄武岩中的分布类似^[36,37], Pt 在峨眉山玄武岩中的分布通常具有 3 种状态: 硫化物或金属互化物、粒间吸附态和与硅酸盐矿物类质同象存在, 且以前两种赋存状态为主^[38]. 这里用 Pt 的剩余异常含量乘以块体的质量作为块体的 Pt 资源量, 这是因为剩余异常含量是总异常含量减去其背景值(与硅酸盐矿物类质同象值)后的异常值, 通常包括硫化物、金属互化物、粒间吸附态 Pt 含量和后期构造热液矿化活动叠加于背景含量之上的 Pt 含量. 计算公式如下:

$$Q = \Delta C \times S \times H \times \rho, \tag{1}$$

其中, ΔC 代表 Pt 块体剩余异常含量, S 代表 Pt 异常块体

面积, H 代表块体厚度, 即玄武岩厚度, 根据张湘云等^[39]的研究结果, 研究区平均取 1 km, ρ 为玄武岩密度 ($3.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)^[40].

(ii) 计算结果. 区域和局部 Pt 块体数据集和相关参数列于表 3, 根据表 3 和公式(1)计算的不同勘查尺度的 Pt 地球化学块体的资源量列于表 4.

根据地球化学块体的概念, 前述 7 处区域 Pt 异常乘上特定的厚度就变成 7 处区域 Pt 异常块体. 与区域 Pt 异常相同, 其中 I-2 和 I-4 Pt 异常块体是 Pt 资源潜力较大的块体. 两处块体总面积为 11698 km^2 , 占有区域 Pt 异常块体总面积的 81%. 两个块体潜在 Pt 资源量为 162319 t (表 4), 占有区域 Pt 异常块体总资源量的 86%.

与区域 Pt 异常块体类似, 前述的 17 处局部 Pt 异常乘上特定的厚度就变成 17 处局部 Pt 异常块体. 其中 II-4, II-7, II-8, II-9, II-13, II-15, II-16 和 II-17 等 8 处块体是 Pt 资源潜力较大的块体. 其块体总面

表 4 滇东区域和局部 Pt 地球化学块体 Pt 资源量估算

Pt 地球化学异常块体类型	块体编号	块体面积/ km^2	异常平均含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	剩余异常平均含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	块体质量/ 10^9 t	估算资源量/t
区域 Pt 地球化学异常块体	I-2	10230	6.56	4.56	30690	139946
	I-4	1468	7.08	5.08	4404	22372
	I-1	928	5.09	3.09	2784	8603
	I-3	536	5.67	3.67	1608	5901
	I-5	135	6.05	4.05	405	1640
	I-6	403	5.64	3.64	1209	4401
	I-7	748	5.08	3.08	2244	6912
	合计(平均)	14448	(5.88)	(3.88)	43344	189775
局部 Pt 地球化学异常块体	II-4	74	12.22	8.22	222	1825
	II-7	1128	11.58	7.58	3384	25651
	II-8	1268	11.4	7.40	3804	28150
	II-9	1164	11.04	7.04	3492	24584
	II-13	64	15.44	11.44	192	2196
	II-15	128	14.49	10.49	384	4028
	II-16	360	11.78	7.78	1080	8402
	II-17	172	13.12	9.12	516	4706
	II-1	242	10.73	6.73	726	4886
	II-2	31	10.53	6.53	93	607
	II-3	36	10.39	6.39	108	690
	II-5	47	10.36	6.36	141	897
	II-6	54	10.72	6.72	162	1089
	II-10	95	10.58	6.58	285	1875
	II-11	75	10.43	6.43	225	1447
	II-12	98	9.99	5.99	294	1761
	II-14	64	10.45	6.45	192	1238
	合计(平均)	5100	(11.49)	(7.49)	15300	114032

积为 4358 km², 潜在 Pt 资源量为 99542 t, 分别约占 17 个块体总资源量的 87%和总面积的 85%。上述块体是进一步地球化学勘查首选的靶区。

4 结论

(1) 从 Pt 的区域异常块体到局部异常块体, Pt 异常的最大变程从 98 km 变化到 60 km, 最大变程方向从 NNE 向(18.6°)变化为 NE 向(30.2°), 表明区域 Pt 异常受沿 NS-NNE 向深断裂(小江断裂、寻甸-宣威断裂和弥勒-师宗断裂)分布的二叠纪峨眉山玄武岩控制, Pt 的局部异常块体主要受分布于二叠纪峨眉山玄武岩内与上述深断裂有关的 NE 向分支断裂控制。控制因素由一级裂控-岩控向二级岩控-裂控转变, 表明变差函数有效揭示了控制不同勘查尺度 Pt 异常块体变化性的主要地质因素。

(2) 存在两类 Pt 异常: 一类是在两个观测尺度下都具有 Pt 异常显示, 且异常含量随取样密度的增加(观测尺度的变小)而显著增强; 另一类是随取样密度

的增加, Pt 异常弱化甚至消失。这表明多尺度地球化学聚焦找矿具有逐步排除非矿异常, 筛选矿异常的功能。事实上, 由 1 件组合样品数据/(8 km×8 km)圈定的区域 Pt 异常块体是在更高分辨率上对由超低密度样品数据圈定的 Pt 地球化学省的进一步筛分, 而由 1 件组合样品数据/(4 km×4 km)圈定的局部 Pt 异常块体, 是对 Pt 区域异常块体在更高分辨率上的进一步筛分, 这样能够逐步筛去非矿异常, 保留矿异常, 达到聚焦找矿目的。

(3) 局部 Pt 异常块体的 Pt 异常平均含量是区域 Pt 异常块体的 2 倍, 表明从区域 Pt 异常块体到局部 Pt 异常块体, Pt 异常含量显著浓集。区域 Pt 异常块体的面积和 Pt 资源量分别是 14448 km² 和 189775 t, 而局部 Pt 异常块体面积和 Pt 资源量分别是 5100 km² 和 114032 t。后者 Pt 资源量占前者的 60%, 而异常面积仅占其 35%, 表明 Pt 资源量主要集中在局部异常区域, 多尺度地球化学聚焦找矿具有高效浓缩靶区的勘查功能。

致谢 云南省地质调查局提供水系沉积物地球化学样品, 组样工作得到云南省地质调查局李开壁、王宝禄等专家的指导和帮助, Pt 分析由云南省岩矿测试中心和武汉岩矿测试中心完成, 王学求博士等 4 名专家审阅论文初稿, 并提出诸多有益的改进意见, 在此深表感谢。

参考文献

- 1 Burenkov E K, Golovin A A, Morozova I A. Multi-purpose geochemical mapping (1:1000000) as basis for the integrated assessment of natural resources and ecological problems. *J Geochem Explor*, 1999, 66(1-2): 159—172[DOI]
- 2 Xie X J, Cheng H X. Global geochemical mapping and its implementation in the Asia-Pacific region. *Appl Geochem*, 2001, 16: 1309—1321[DOI]
- 3 Cohen D R, Kelley D L, Anand R. Major advances in exploration geochemistry, 1999—2007. In: Milkereit B, ed. *Exploration in the New Millennium: Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, Toronto. Toronto: Decennial Mineral Exploration Conference Publisher, 2007. 3—18
- 4 Wang M Q, Gao Y Y, Liu Y H. Progress in the collection of Geogas in China. *Geochem: Explor Environ Anal*, 2008, 8(1): 183—190[DOI]
- 5 Wang X Q, Xie X J. Delineation of regional geochemical anomalies penetrating through thick cover in concealed terrains: case history from the Olympic dam deposit, Australia. *J Geochem Explor*, 1999, 66(1-2): 85—97[DOI]
- 6 Xie X J, Wang X Q. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan. *J Geochem Explor*, 1999, 66(1-2): 135—143[DOI]
- 7 Xie X J, Liu D W, Xiang Y C. Geochemical blocks for predicting large ore deposits—concept and methodology. *J Geochem Explor*, 2004, 84: 77—91[DOI]
- 8 王学求, 申伍军, 张必敏, 等. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例. *地学前缘*, 2007, 14(5): 116—123
- 9 谢学锦. 矿产勘查的新战略. *物探与化探*, 1997, 21(6): 402—410
- 10 Cheng H X, Shen X C, Xie X J. Wide-spaced floodplain sediment sampling covering the whole of China: pilot survey for International

- Geochemical Mappin. In: Xie X J, ed. Proceedings of the 30th International Geological Congress, 1Vol. 19: Geochemistry, 1997. 89—109
- 11 陈永清, 夏庆霖, 刘红光. 滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造特征和成矿潜力分析. 中国地质, 2003, 30(3): 225—234
 - 12 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论. 地质学报, 2008, 82(11): 1455—1467
 - 13 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等. 扬子地块西南缘滇中元古宇特征及赋存超大型矿床的可能性. 见: 涂光炽, 等, 著. 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 2000. 95—116
 - 14 范德廉, 张涛, 叶杰, 等. 与黑色页岩有关的超大型矿床. 见: 涂光炽, 等, 著. 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 2000. 204—219
 - 15 范德廉, 张涛, 叶杰, 等. 中国的黑色岩系及其有关矿床. 北京: 科学出版社, 2004. 1—449
 - 16 熊德信, 孙晓明, 石贵勇. 云南哀牢山喜马拉雅期造山型金矿带矿床地球化学及成矿模式. 北京: 地质出版社, 2007. 1—190
 - 17 陶琰, 胡瑞忠, 王兴阵, 等. 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿作用几个典型矿床岩石地球化学特征的分析. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(3): 236—244
 - 18 张成江, 李晓林. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 岩石学报, 1998, 14(3): 299—304
 - 19 Coveney R M, Nansheng C. Ni-Mo-PGE-Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States. Miner Depos, 1991, 26: 83—88
 - 20 Coveney R M, Murowchick J B, Grauch R I, et al. Field relation, origins, and resource implications for platiniferous molybdenum-nickel ores in black shales of South China. Explor Min Geol, 1992, 1(1): 21—28
 - 21 王敏, 孙晓明. 华南黑色岩系铂多金属矿床地质地球化学及成因. 北京: 地质出版社, 2007. 1—136
 - 22 王登红, 骆耀南, 屈文俊, 等. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿. 北京: 地质出版社, 2007. 1—335
 - 23 陈永清, 夏庆霖, 刘红光. 黑色页岩建造中的贵金属矿产评价研究. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 261—268
 - 24 Starostin V I, Yapaskurt Q V. Au-Cu black shale formations. Earth Sci Front, 2007, 14(6): 245—256 [\[DOI\]](#)
 - 25 Xie X J, Mu X Z, Ren T X. Geochemical mapping in China. J Geochem Explor, 1997, 60: 99—113 [\[DOI\]](#)
 - 26 赵平. 泡塑富集发射光谱法连测化探样品中超痕量金、铂、钯. 光谱学与光谱分析, 2001, 21(2): 235—236
 - 27 张洪, 刘宏云, 陈方伦. 铂-钯区域地球化学勘查, 地球化学, 2002, 31(1): 55—65
 - 28 Yan M C, Chi Q H. The Chemical Compositions of the Continental Crust and Rocks in the Eastern Part of China. Beijing: Science Press, 2005. 1—171
 - 29 Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. GIS by ESRI, 2001. 1—300
 - 30 Agterberg F. New applications of the model of de Wijs in regional geochemistry. Math Geol, 2007, 39(1): 1—25 [\[DOI\]](#)
 - 31 成秋明. 成矿过程奇异性与矿产预测定量化的新理论与新方法. 地学前缘, 2007, 14(5): 42—53
 - 32 Deutsch CV, Journel A G. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford: Oxford University Press, 1998. 1—369
 - 33 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学. 北京: 地质出版社, 1988. 1—260
 - 34 Guo C P. Introduction to Fundamental Geostatistical Techniques for Resources Estimation. Beijing: Short Course Presented for Chinese Academy of Geosciences, 2001. 1—77
 - 35 Doe B R. Source rocks and the genesis of metallic mineral deposits. Glob Tecton Metallog, 1991, 4: 13—19
 - 36 Keays R R, Scott R B. Precious metals in ocean-ridge basalts: implications for basalts as source rocks for gold mineralization. Econ Geol, 1976, 71(4): 705—720 [\[DOI\]](#)
 - 37 Sharara N A, Wilson G C, Rucklidge J C. Platinum-group elements and gold in Cu-Ni-mineralized peridotite at Gabbro Akarem, Eastern desert, Egypt. Can Mineral, 1999, 37(5): 1081—1097
 - 38 来雅文, 甘树才, 戚长谋, 等. 峨眉山玄武岩铂钯赋存状态分析. 岩矿测试, 2003, 22(2): 121—123
 - 39 张湘云, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社, 1988. 1—325
 - 40 张胜业, 潘玉玲. 应用地球物理学原理. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004. 1—439