

阿尔金山南缘长沙沟—清水泉一带镁铁—超镁质杂岩体 Cu-Ni-PGE 含矿性讨论

马中平, 孙吉明, 唐卓, 李向民, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星

(中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 尽管阿尔金山南缘长沙沟—清水泉一带在空间上彼此分隔的 4 个镁铁—超镁质岩体 (或岩体群) 在岩石学、岩相学、地球化学上存在着差异, 但它们的形成时代均为中奥陶世 (~465 Ma 左右)。其中, 分布于阿尔金山南缘主断裂南侧的清水泉南—长沙沟中段—黄土泉的岩体, 超镁铁岩 (包括纯橄岩—橄榄岩—辉橄岩—橄辉岩) 中的橄榄石 F_o 值较高 (变化于 95~85), 且自东向西呈现非常有规律的递减; 而北侧的清水泉北岩体辉橄岩中橄榄石的 F_o 值较低 (变化于 81~79)。结合各岩体的岩石地球化学特征和岩浆演化过程及橄榄石中 Ni 的含量变化规律, 对这些杂岩体形成的地质背景和 Cu-Ni-PGE 含矿可能性作简要讨论。

关键词: 镁铁—超镁铁质杂岩; Cu-Ni-PGE; 成矿作用; 长沙沟; 阿尔金山

中图分类号: P588, P618 **文献标识码:** A

在塔里木板块东南缘的阿尔金山南坡, 沿阿尔金山南缘主断裂西起新疆于田县南, 东至新疆—青海交界的茫崖一带 (图 1a) 长约 700 km 的范围内, 已知断续分布着 70 余个 (最新的区域调查认为有 300 多个) 规模不等的镁铁—超镁铁质岩体。多数学者认为这条构造—岩浆岩带具有蛇绿岩带的性质, 称之为阿帕—茫崖蛇绿岩 (混杂) 岩带 (董显扬等, 1995; 刘良等, 1998; 张旗和周国庆, 2001), 但是受该地区自然条件制约, 对于该带内的相当一部分镁铁—超镁铁质岩体的研究程度还很低。笔者在承担国家 305 项目专题及中国地质调查局相关综合研究工作中, 在位于该带中部的新疆若羌县清水泉—长沙沟一带识别出了若干非蛇绿岩组成单元的镁铁—超镁铁质层状侵入岩 (马中平等, 2009)。鉴于镁铁—超镁铁质层状侵入体是世界上 Cu-Ni-PGE 硫化物、V-Ti-Fe 氧化物等矿床以及 Cr—铁矿矿床的重要来源 (Lee,

1996; Naldrett, 2004; 唐冬梅等, 2008), 因此, 一个新的地区若干层状岩体的发现往往意味着这个地区将有可能成为寻找岩浆 PGE-Cu-Ni 硫化物矿床的一个“诱人”靶区 (Ferreira et al., 2002; Lima et al., 2008)。但这些新厘定的层状侵入体是否具有形成岩浆 PGE-Cu-Ni 硫化物矿床的前景, 可否作为靶区则尚需要作更多的工作。

岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成过程是镁铁—超镁铁质岩浆形成—演化—侵位—固结等过程中的一个环节。作为亲铜及亲硫元素, Cu-Ni (-PGE) 在镁铁—超镁铁质岩中聚集成矿的必要条件 (并非充分条件) 是发生硫化物的熔离。硫化物的熔离是否发生受温度、压力、 $FeO + TiO_2$ 含量和氧/硫逸度等制约 (Naldrett, 2004), 但发生硫化物熔离后的岩浆在相应岩体中是否能形成 Cu-Ni-PGE 矿床、形成何种优势矿种 (是 Ni-Cu 为主、还是 PGE 为

收稿日期: 2010-06-12; 修回日期: 2010-11-15

基金项目: 国家十一五科技支撑计划新疆 305 项目 (2006BAB07B03-02)、中国地质调查局项目 (11212010786006)

作者简介: 马中平 (1970-), 男, 博士, 副研究员, 从事岩浆岩及相关矿产研究。E-mail: mzhongping70@163.com

主?)、以及在发生硫化物熔离作用后的岩体中找到相应矿体的希望有多大等,则需要进一步考察镁铁-超镁铁质岩的源区部分熔融程度、岩浆结晶分异、地壳混染和岩浆混合,以及硫化物熔离作用发生的“时机”等。对这些岩浆作用过程的综合考察是针对镁铁-超镁铁质岩开展 Cu-Ni-PGE 硫化物成矿潜力评价、找矿靶区优选等工作的基础。

基于上述考虑,在前期工作基础上,笔者重点

对阿尔金山南缘清水泉—长沙沟一带若干镁铁-超镁铁岩体或岩体群(清水泉北、清水泉南、长沙沟中段、黄土泉等岩体)(图1) Cu-Ni-PGE 成矿潜力及含矿性作简要讨论。

关于这些岩体属镁铁、超镁铁质侵入岩而非与大洋过程相关的蛇绿岩的相关证据,以及岩体的岩石学、岩相学特征和地球化学特征等笔者不再赘述,详见马中平等(2009)。

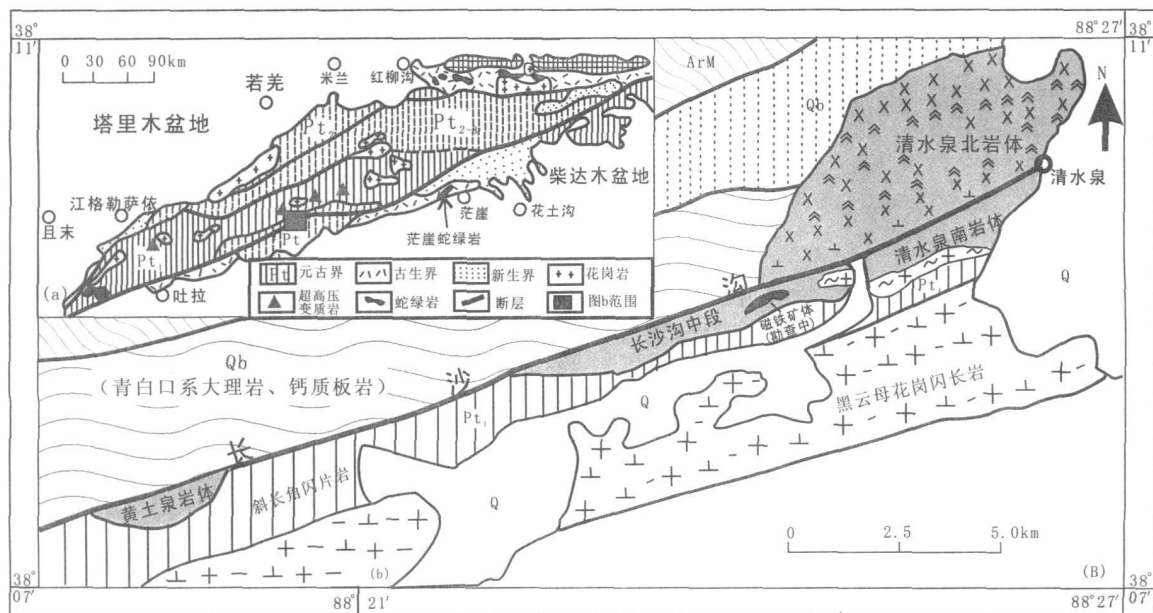


图1 阿尔金山南缘清水泉—长沙沟一带地质图

(据广西地调院 1:25 万瓦石峡幅, 略修改)

Fig. 1 Geological map of Changshagou area on the south margin of Altyn Tagh

1 形成时代

笔者采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素原位测年方法,对清水泉—长沙沟一带分布的几个镁铁-超镁铁质岩体形成年龄的测年结果(作者等未发表数据)分别如下:清水泉北岩体含石英角闪辉长岩 467.0 ± 1.4 Ma (MSWD=2.5)、苏长辉长岩 462.1 ± 1.3 Ma (MSWD=1.4);清水泉南蚀变辉石岩 469.9 ± 2.4 Ma (MSWD=0.92);长沙沟中段岩体具韵律纹层的辉长岩为 464.4 ± 1.8 Ma (MSWD=1.9)。测年结果表明,尽管这些岩体空间上彼此分隔,并且它们在岩石学、岩相学和地球化学上差异也很大(马中平等,2009),但它们的形成年龄在误差范围内完全一致,均形成于中奥陶世的 465 Ma

左右。因此,它们应当为同期(可能不同源)地质事件形成的岩浆侵入于阿尔金山南缘地壳中的不同位置所形成的镁铁-超镁铁质岩体群,它们之间可能存在着某种岩石成因及岩浆演化方面的互为关联。

2 岩石成因与岩浆演化

2.1 清水泉南—长沙沟中段—黄土泉岩体

清水泉南—长沙沟中段—黄土泉镁铁-超超镁铁岩及岩体群分布于阿尔金山南缘主断裂(即清水泉—长沙沟断裂)的南侧(图1)。其中,笔者在清水泉南超镁铁岩中所获得了最大 Fo 值的橄榄石 (Fo 最大值为 95.2),并且依各岩体分布位置自东向西(即自清水泉南,经长沙沟中段到黄土泉),不同地段的

超镁铁岩(纯橄岩-橄榄岩-辉橄岩-橄辉岩)中橄榄石 F_o 值(变化于 95~85)呈现非常有规律的递减,经反演计算的各岩体母岩浆 MgO 及 $TFeO$ 含量也依次降低,表明形成清水泉岩体的母岩浆较为原始,而黄土泉岩体的母岩浆演化程度较高,初步认为岩浆结晶分异演化的方向是从原始的清水泉南经过渡性的长沙沟中段至演化程度较高的黄土泉岩体。其中经初步反演计算的清水泉南母岩浆主元素成分为: $MgO > 25\%$, $TFeO \approx 10\%$, $TiO_2 < 1\%$, $Mg^\#$ 约为 85,表明其母岩浆应为科马提质岩浆,相关指标完全符合 IUGS 目前对科马提岩的定义(Le Bas, 2001),且属高镁铬铁矿不饱和的科马提质岩浆(Lesher and Barnes, 2009)。利用不同的橄榄石-熔体平衡温度计所计算的橄榄石-熔体平衡温度均大于 1 600 $^{\circ}C$ 。结合岩体的地球化学特征(马中平等, 2009),从上述数据不难看出清水泉镁铁-超镁铁岩的地幔源区至少应为上升的热的软流圈地幔(甚或地幔柱/羽),而不可能是岩石圈地幔,并且源区部分熔融所产生的原生科马提质岩浆上升侵位到清水泉南岩体所在的岩浆房时并没有经过显著的结晶分离过程(而黄土泉岩体则相反)。

2.2 清水泉北岩体

清水泉北岩体的辉橄岩-辉长岩以 LREE 强烈富集、极高的 La/Yb 值,明显的 Nb-Ti 负异常(马中平, 2009),且含有大量原生含水矿物等不同于上述清水泉南、长沙沟中段和黄土泉岩体,其源区应为受先期俯冲板片变质脱水交代的岩石圈地幔(类似于岛弧或火山弧岩浆作用的地幔源区)且可能位于石榴子石稳定区。据橄榄石成分(图 2),清水泉北辉橄岩中橄榄石 F_o 变化于 79.6~81.0,反演计算的母岩浆 $Mg^\#$ 仅为 56,远低于与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆相应值(大于 68)。这些数据表明清水泉北层状岩体是由原生岩浆经历深部富镁矿物相结晶分离作用后,残余岩浆以脉动式、周期性向上注入浅部高位岩浆房而形成层状岩体,也就意味着更深部位或阿尔金南缘区域上可能存在与之相应的富含富镁矿物相(橄榄石、斜方辉石)的低位岩浆房或岩浆通道。值得说明的是,清水泉北岩体与前述清水泉南岩体在岩相学及地球化学特征(马中平, 2009)上的显著差异,表明强烈富镁的清水泉南

岩体不可能是对应于形成清水泉北岩体的低位岩浆房。

3 地质背景讨论

依据上述测年结果及各镁铁-超镁铁质岩体岩石成因-岩浆演化的讨论,地幔源区的不同导致了清水泉—长沙沟一带两类镁铁-超镁铁质岩具有不同的岩石学、岩相学及地球化学特征。那么,465 Ma 时的南阿尔金山地区地幔深处既有代表伸展机制的软流圈(甚或地幔柱/羽或热点)上涌,同时又有挤压碰撞机制下类似于岛弧或火山弧岩浆源区的部分熔融,从造山带形成演化角度来看,符合这一条件的地质作用过程(或阶段)的可能选择,其一可能为后碰撞裂谷伸展,其二可能为弧后伸展。如果结合各镁铁-超镁铁岩的围岩情况(马中平等, 2009),再联系到空间上与之共存(直距不足 20 km)、时间上略早(509~487 Ma)(张安达等, 2004; Zhang JX et al., 2005; 刘良等, 2007; Liu et al., 2007)的南阿尔金山代表大陆深俯冲作用的高压-超高压变质岩的存在,笔者认为,年龄约 465 Ma 的阿尔金山南缘清水泉—长沙沟镁铁-超镁铁岩形成的地质背景应是后碰撞裂谷伸展背景(图 3)。

4 含矿性讨论

4.1 清水泉北岩体

清水泉北岩体的成因研究表明存在明显的地壳混染、以及难以用结晶分异作用解释的橄榄石 Ni 的强烈亏损等特征,高的 Cu/Pd 值(高于 6 500)(内部资料)表明岩浆在清水泉北岩体橄榄石结晶,前岩浆中 S 可能到了过饱和,发生过硫化物熔离作用;若依据 Makkonen et al. (2008)初步计算的 R 因子(硅酸盐熔浆与硫化物熔浆质量比)小于 400(图 2),以及岩石高的 $(Cu+Ni)/(Pt+Pd)$ 值等(作者等未发表资料)利于形成以 Ni-Cu 为主、PGE 为次的岩浆熔离型硫化物矿床。据此,从表象上看,该岩体极具 Cu-Ni-PGE 成矿潜力。但是,由于形成清水泉北层状岩体的岩浆房属“高位岩浆房”,岩浆在注入高位岩浆房之前已经发生了显著的 Ni 亏损,那

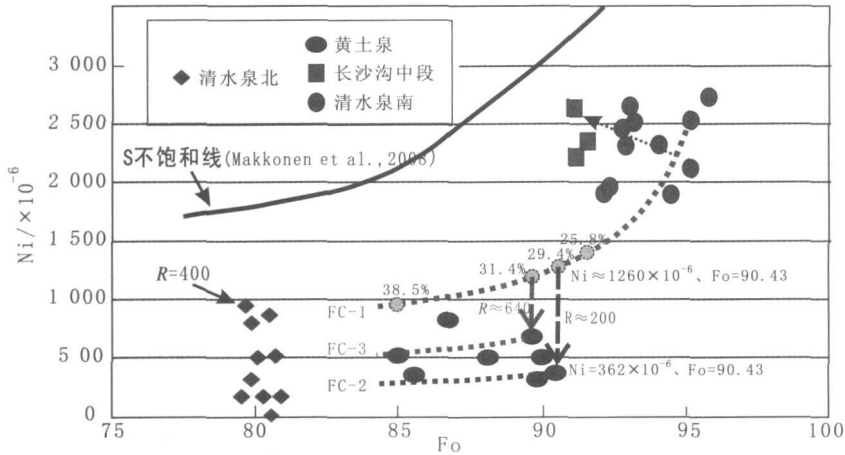


图 2 清水泉—长沙沟一带超镁铁质岩橄榄石 Fo-Ni 关系图

Fig. 2 Plot of nickel content of olivine versus forsterite content (Fo) in the mafic-ultramafic intrusions
FC-1. 无硫化物分离的结晶分异曲线; FC-2. $R = 200$ 时的结晶分异曲线; FC-3. $R = 640$ 时的结晶分异曲线

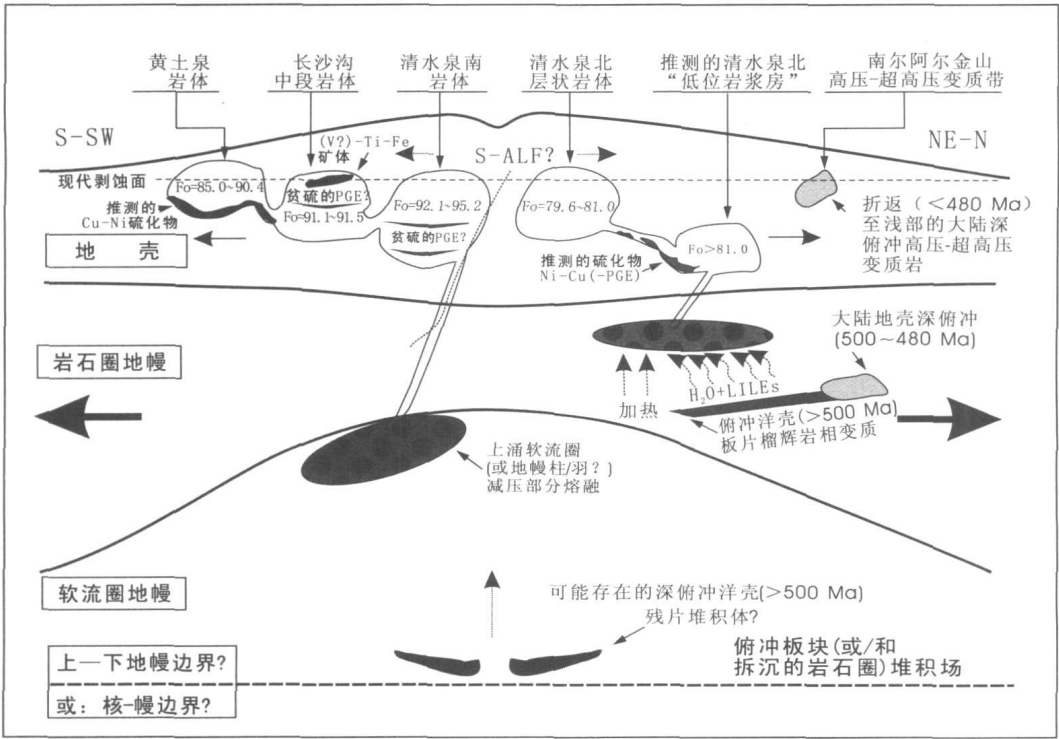


图 3 ~ 465 Ma 时阿尔金山南缘清水泉—长沙沟一带镁铁-超镁铁质岩地质背景及可能的 Ni-Cu-PGE 硫化物成矿模式图 (任意比例尺)

Fig. 3 Schematic diagram of the geological background (~ 465 Ma) and potential magmatic sulfide mineralization in the mafic-ultramafic intrusions, southern Altyn Tagh
(S-ALF 示阿尔金山南缘主断裂)

么硫化物的熔离作用应发生在相应的“低位岩浆房”或岩浆通道中(可能应在更大区域范围或更深部位寻找),因此,除非相应的通道相及低位岩浆房直接位于现存的清水泉北岩体下部较浅位置,或发生熔离后的硫化物熔浆由于某种原因向上贯入到浅部岩浆房中,否则,直接在现存的清水泉北岩体中寻找高品质 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床的可能性不大(不排除在与围岩接触部位的岩体边部发生硫化物二次熔离,形成低品位 Ni-Cu-PGE 硫化物的可能性)。

4.2 清水泉南岩体

清水泉南岩体原生岩浆为科马提质岩浆,这就意味着源区的熔融程度较高,有利于源区难熔金属(PGE 尤其是 IPGE, 以及 Ni) 释放到岩浆中。岩体组成部分的辉石岩段中具有极高的 Cu/Pd 值(远高于 6 500),表明其形成—演化中有硫化物的熔离,而与之相连的辉橄岩—纯橄岩的 Cu/Pd 值低于 6 500,表明辉橄岩—纯橄岩是 PGE 元素的受体。此外,辉橄岩—纯橄岩具有低的 $(\text{Cu} + \text{Ni}) / (\text{Pt} + \text{Pd})$ 值,表明该岩体最有利的成矿作用应为 PGE 成矿,其次才为 Ni 成矿(这与清水泉北岩体不同)。辉橄岩—纯橄岩中橄榄石测试结果表明,橄榄石存在一定程度的 Ni 亏损(图 2),但不显著;初步计算(尚需对源区组成及熔融程度做进一步限定)的 R 因子也较大(约 600~2 000),与野外及镜下岩石观察所见硫化物含量较少相一致,也表明岩体有利于 PGE 成矿,而对于 Ni 硫化物成矿不甚有利。槽探工程刻槽样品 PGE-Ni-Cu 测试分析表明,清水泉南岩体局部地段刻槽样品中 $(\text{Pt} + \text{Pd})$ 最高可达 116×10^{-9} 也是一证。地表槽探揭露的超镁铁岩中存在的少量硫化物(小于 1%)的探针测试(内部资料)表明,镍黄铁矿、磁黄铁矿及黄铁矿中 $\text{Pt} + \text{Pd}$ 普遍含量较高。因此,全岩样品中高的 $\text{Pt} + \text{Pd}$ 含量应主要由这些硫化物(尽管岩石中硫化物含量较低,与 R 因子有关)所引起。笔者认为,清水泉南岩体 Ni 硫化物成矿潜力略显不足,而 PGE 成矿潜力较好。

综上所述,由于清水泉南岩体是软流圈地幔部分熔融产生的岩浆未经明显的结晶分离作用而直接上侵于现存岩体所在的岩浆房中(可称为“原位岩浆房”),经堆晶—分异—固结而形成,意味着如果存在 PGE-Ni-Cu 硫化物的熔离作用,则其应发生于现存岩体中下部,而非更深的岩浆房或通道。需要

说明的是,由于清水泉南岩体岩浆演化中 R 因子较大,熔离的硫化物质量分数较少,野外现场对于含矿与不含矿的岩石或岩石组合之间的差别不易区分,同时低的硫化物含量也限制了物探方法(电法)的选择,又给针对该岩体的找矿工作带来困难。岩体中下层位是否存在更为富集而达到工业品位的贫硫型 PGE 成矿,要依赖于更为详细的岩体各种地化参数的获得和大量岩石样品的 PGE-Ni-Cu 测试。

4.3 长沙沟中段岩体

长沙沟中段镁铁超—超镁铁岩中发现有目前可供小规模开采的块状—浸染状含 Ti 磁铁矿矿体,矿体周边镁铁—超镁铁质围岩中物探显示仍有较高的磁异常强度,显示较好的 Ti-Fe 氧化物找矿前景。而对于该含钛磁铁矿的成因,笔者认为它应当是 $\text{Mg}^\# = 84.5$ 的清水泉南母岩浆经 Fenner 结晶分异趋势演化后,从稍晚时期形成的富 Fe-Ti 而贫 Si 的残余岩浆相中,由于氧逸度的升高(可能与清水泉南岩体强烈富镁及含少量硫化物熔离相关)而结晶形成(马中等, 2009)。最近笔者在磁铁矿体的直接围岩(橄榄岩)中获得了橄榄石的 F_0 最大值为 91(低于清水泉南,但仍为镁橄榄石)进一步表明,演化至长沙沟中段时的岩浆仍相对较为原始,橄榄石 Ni 含量为 $2\ 600 \times 10^{-6} \sim 2\ 300 \times 10^{-6}$,接近于清水泉南橄榄石 Ni 含量平均值。由于磁铁矿、钛铁矿的结晶使岩浆中的 FeO 及 TiO_2 显著降低,可以促使岩浆中 S 达到饱和,从此意义上讲,磁铁矿结晶后的岩浆若再进一步发生结晶分异,在即便是没有明显地壳混染及外来硫加入的情况下,其上部层位的残余岩浆则有可能达到 S 饱和而再次发生硫化物熔离。至于该岩体中下部 Cu-Ni-PGE 的含矿性,总体类似于(或略低于)清水泉南,即 Ni 成矿潜力不足, PGE 成矿值得关注。

4.4 黄土泉岩体

黄土泉镁铁—超镁铁质岩位于长沙沟西段,成因分析初步表明它可能是原生科马提质岩浆先后经清水泉南岩体、长沙沟中段岩体阶段的结晶分异后,晚期残余岩浆固结—分异而形成。由于岩浆在经历前两个阶段大量镁铁质矿物的分离结晶后(尤其是长沙沟中段阶段大量磁铁矿的晶出所导致的残浆 FeO 的降低),使得残余岩浆中 MgO 及 FeO 含量明显降低,长英质组分相对增加,有利于岩浆中 S 达到饱和。进一步考查黄土泉超镁铁岩中橄榄石的 F_0

(90.4~85.0) 及 Ni 含量 ($825 \times 10^{-6} \sim 305 \times 10^{-6}$) 表明存在显著的 Ni 亏损, 并且两者之间也不呈现正相关关系, 与清水泉南及长沙沟中段超镁铁质岩中橄榄石也不能构成正常的结晶分异趋势, 笔者认为, 原生科马提质岩浆在演化至黄土泉阶段时, 可能发生了明显的硫化物熔离。若以清水泉原始岩浆经正常结晶分异作用演化至黄土泉岩体阶段时, 橄榄石中 Ni 含量 (约 1260×10^{-6}) 作为起始点计算岩浆再演化至黄土泉阶段的 R 值约为 640~200, 具有形成以 Cu-Ni 矿床为主的镁铁-超镁铁岩特征。而对于 PGE 成矿来说, 由于早期清水泉南及长沙沟阶段可能发生过少量硫化物的熔离, 可以带走大部分强烈亲硫的 PGE (PGE 在硫化物熔浆/硅酸质熔浆中的分配系数 $D_{\text{Sul-SIL}}$ 比 Cu-Ni 要高 1~3 个数量级) 使得残余的黄土泉岩浆可能产生强烈的 PGE 亏损而有利于形成 PGE 矿床。综上所述, 初步的成因及岩浆演化过程研究表明, 黄土泉岩体 PGE 成矿潜力不足, 而 Cu-Ni 硫化物成矿潜力较大。同时, 由于已排除了早期的清水泉南及长沙沟中段发生大量 Ni 亏损 (硫化物熔离) 的可能, 所以黄土泉岩体所显示的强烈 Ni 亏损则暗示着硫化物的熔离作用可能发生在黄土泉岩体本身的下部, 或与长沙沟中段岩体的过渡部分。

5 初步结论

(1) 年龄为 465 Ma 的阿尔金山南缘清水泉—长沙沟镁铁-超镁铁岩体或岩体群形成的地质背景为南阿尔金山后碰撞裂谷伸展背景。

(2) 清水泉北镁铁-超镁铁质层状岩体是高位岩浆房固结产物, 除非相应的通道相及低位岩浆房直接位于现存的清水泉岩体下部较浅位置, 或发生熔离后的硫化物熔浆向上贯入到浅部岩浆房中, 否则, 直接在现存的清水泉北岩体中寻找高品质 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床的可能性不大。

(3) 清水泉南及长沙沟中段镁铁-超镁铁岩体 Ni 硫化物成矿潜力可能不足, 而 PGE 成矿具有一定的潜力, 但由于硫化物含量较低使得可能的含矿岩体与围岩之间不易区分。

(4) 黄土泉镁铁-超镁铁质岩体具有良好的 Cu-Ni 硫化物成矿潜力和找矿前景, 可作为优先靶区。

参考文献 (References):

- 董显扬, 李行, 叶良和, 等. 中国超镁铁质岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-329.
- Dong XY, Li H, Ye LH, et al. Ultramafic Rocks in China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1995: 1-329 (in Chinese with English abstract).
- 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据 [J]. 科学通报, 1998, 43 (8): 880-883.
- Liu L, Che ZC, Wang Y, et al. The Evidence of Sm-Nd Isochron Age for the Early Paleozoic Ophiolite in Mang'ai Area, Altun Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (8): 880-883 (in Chinese).
- 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江尔勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义 [J]. 地学前缘, 2007, 14 (1): 98-107.
- Liu L, Zhang AD, Chen DL, et al. Implications based on LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (1): 98-107 (in Chinese with English abstract).
- 马中平, 孙吉明, 李向民, 等. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究 [J]. 岩石学报, 2009, 25 (4): 793-804.
- Ma ZP, Li XM, Sun JM, et al. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusion in Changshagou, Altyn Tagh, and its geological implications: A pilot study on its petrological and geochemical characteristics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (4): 793-804 (in Chinese with English abstract).
- 唐冬梅, 秦克章, 刘秉光, 等. 铂族元素矿床的主要类型、富集规律、研究进展与展望 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (3): 569-588.
- Tang DM, Qin KZ, Liu BG, et al. The Major Types, Enrichment Regularity, Latest Progress of Platinum-Group Element Deposits and Some Prospects [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (3): 569-588.
- 张安达, 刘良, 孙勇, 等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 科学通报, 2004, 49 (22): 2335-2341.
- Zhang AD, Liu L, Sun Y, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons and its geological significance from UHP granitoid gneiss in Altyn Tagh [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (23): 2527-2532 (in Chinese).

- 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-182.
- Zhang Q, Zhou GQ. Ophiolites of China[M]. Science Press, Beijing, 2001: 1-182 (in Chinese with English abstract).
- Le Bas MJ. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 41: 1467-1470.
- Lee CA. A review of mineralization in the Bushveld Complex and some other layered intrusions [A]. In: Cawthorn RG (ed.). Layered intrusions [C]. Amsterdam: Elsevier Science, 1996: 103-145.
- Leshner CM, Barnes SJ. 2009. Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits [A]. In Li CS and Ripley EM (eds.), new developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits [C]. Geological Publishing House, Beijing, 2009: 27-120.
- Liu L, Zhang JF, Green II HW, et al. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to > 350 km. Earth. Planet [J]. Sci. Lett. doi: 10.1016/j.epsl, 2007.08.010
- Makkonen HV, Mäkinen J, Kontoniemi O. Geochemical discrimination between barren and mineralized intrusions in the Svecofennian (1.9 Ga) Kotalahti Nickel Belt, Finland[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33: 101-114.
- Murck BW, Campbell IH. The effects of temperature, oxygen fugacity and melt composition on the behaviour of chromium in basic and ultrabasic melts[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1986, 50: 1871-1888.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits, Geology, Geochemistry and Exploration [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2004: 1-724.
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC, et al. An Early Paleozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the South Altyn Tagh, NW China: P-T history and U-Pb geochronology [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2005, 23, 491-510.

Discussions on the Magmatic Cu-Ni-PGE Sulfides Mineralization Potential of the Changshagou-Qingshuiquan Layered Mafic-Ultramafic Intrusions, Altyn Tagh

MA Zhong-ping, SUN Ji-ming, TANG Zhuo, LI Xiang-min, XU Xue-yi,
LEI Yong-xiao, WANG Li-she, DUAN Xing-xing
(Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China)

Abstract: Although the four mafic-ultramafic intrusions in the Changshagou to Qingshuiquan area, Altyn Tagh, have the differences in petrology, petrography and geochemistry, they all formed in Middle-Ordovician, about 465Ma. Thereinto, the forsterite contents (Fo) in olivine of the Southern Qingshuiquan (SQ), Middle section of Changshagou (MC) and Huangtuquan (HT) intrusion, located in the south side of southern Altyn fault, vary from 95 to 85, and decrease progressively from east to west, that is higher than that (81-79) in olivine of the Northern Qingshuiquan (NQ) intrusion which is located in the north side of southern Altyn fault. According to the geochemical characteristics, magma evolution procedure and the relations between Nickel content and Fo in olivine, has been discussed in the geological background and potential magmatic Cu-Ni-PGE mineralization of these mafic-ultramafic intrusions.

Key words: mafic-ultramafic intrusion; Cu-Ni-PGE; mineralization potential; Changshagou; Altyn Tagh