

铂族元素的地球化学行为及全球主要铂族金属矿床类型

苏尚国¹, 沈存利^{1,2}, 邓晋福¹, 汤中立³, 耿科¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 内蒙古自治区 区域地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 长安大学 国土资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 全球铂族金属矿床主要有 6 种类型, 分别为: (1) 镁铁质—超镁铁质层状岩体铂族金属矿床; (2) 镁铁质—超镁铁质 Cu-Ni 硫化物矿床伴生的铂族金属矿床; (3) Ural 杂岩体铂族金属矿床; (4) 蛇绿岩型铂族金属矿床; (5) 与热液相关的铂族金属矿床; (6) 外生型铂族金属矿床。除第 4 类型外其他类型的铂族矿床都具有经济意义。铂族金属矿床的形成主要与幔源岩浆性质及岩浆演化过程密切相关。大规模的幔源岩浆活动及在岩浆演化过程中具有产生硫饱和的条件是形成铂族金属矿床的有利条件, 同时岩浆期后的热液作用能使铂族元素迁移并在特定条件下富集, 对铂族金属矿床的形成有利。镁铁质—超镁铁质层状侵入体形成铂族金属矿床的有利条件是岩浆分异作用强, 并且具有能产生高 R 因子的环境; 镁铁质—超镁铁质 Cu-Ni 硫化物矿床中形成铂族金属矿床的有利条件是硫化物熔体的结晶分异作用; Ural 杂岩体中, 由于岩浆在早期演化过程中硫的不饱和, 形成的主要铂族矿物为 Pt-Fe、Pt-Ir 合金, 且主要与铬铁矿共生, 在岩浆演化硫饱和阶段可形成富 Pd 的铂族矿物, 且与 Cu-Fe-V-Ti-P 金属共生; 蛇绿岩型杂岩体中, 主要形成的铂族矿物为含 Ir、Os、Pt 的合金或少量硫化物矿物, 且主要赋存于铬铁矿中。

关键词: 铂族元素; 地球化学行为; 铂族金属矿床类型; Ural 杂岩体

中图分类号: P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-8527(2007)02-0361-10

Geochemistry Behavior of Platinum Group Elements (PGE) and Main Types of PGE Deposits in the World

SU Shang-guo¹, SHEN Cun-li^{1,2}, DENG Jin-fu¹, TANG Zhong-li³, GENG Ke¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Huhehaote, Inner Mongolia 010020, China;

3. College of Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Platinum group elements (PGE) deposits in the world can be divided into six types: (1) those associated with mafic-ultramafic layered intrusions; (2) those hosted in Cu-Ni sulfide deposits; (3) those associated with Ural complexes; (4) those associated with ophiolites; (5) those related to hydrothermal activity and (6) Placer PGE deposits. Except for the fourth type, all other types are economic. The genesis of PGE deposits are chiefly related to the nature of mantle-derived magmas and the processes of magmatic evolution. Large scale activities of mantle-derived magma and sulfur-saturation in the magmatic evolution processes provide favour conditions for the generation of PGE deposits. The magmatism-related hydrothermal fluid can cause PGE transport and deposit under some special environments, thus sometimes it is good for the formation of PGE deposits. The good conditions for PGE concentrations are that the magmas are well differentiated, and that there is a condition for a high R factor in the mafic-ultramafic layered intrusions. The crystal differentiation of sulfide melt provides a good condition for the formation of PGE deposits for Cu-Ni sulfide deposits. For the PGE deposits associated Ural complexes, the platinum group metals (PGM) of Pt-Fe and Pt-Ir alloys formed because of sulfur-undersatu-

收稿日期: 2007-01-08; 改回日期: 2007-03-19; 责任编辑: 孙义梅。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40472051, 40534020); 高等学校学科创新引智计划 (B0701); 国土资源部计划项目 (1212010633902, 1212010633903)。

作者简介: 苏尚国, 男, 教授, 博士生导师, 1965 年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩浆作用与成矿、岩石大地构造及变质地质学的教学和研究工作。Email: susg@cugb.edu.cn

ration in the early stage of magmatism, and they are mainly associated with chromitites. In contrast, Pd-rich PGM formed in the later stage of magmatism, and they are associated with Cu-Fe-V-Ti-P metals. In the ophiolite complexes, the major PGMs are Ir-, Os-, Pt alloys, and minor sulfides, and most of them are hosted in chromitites.

Key words: platinum group elements; geochemistry behavior; types of PGE deposits; Urals complex

0 引言

PGE (铂族元素) 是钌 (Ru)、铑 (Rh)、钯 (Pd) 和锇 (Os)、铱 (Ir)、铂 (Pt) 6 元素的总称。根据密度分为两组: 锇、铱、铂的密度约为 22 g/cm^3 , 为重铂族组; 钌、铑、钯的密度约为 12 g/cm^3 , 为轻铂族组。根据元素共生特征, 可将它们划分为 Ir 族 (Os, Ir, Ru, Rh) 和 Pd 族 (Pd, Pt)^[1]。由于铂族金属具有高熔点、高沸点、低蒸气压及优越的抗腐蚀性、抗风化的能力等, 已被广泛应用于国民经济各部门。

铂族元素在不同的地质过程中具有不同的地球化学行为。因此, 通过对铂族元素地球化学行为的了解, 将有助于了解铂族金属矿床的成因; 通过对铂族金属矿床的成因分析及成因分类将有助于铂族金属矿床的勘探和开发。

1 铂族元素的地球化学行为

1.1 铂族元素在硫化物熔体—硅酸盐熔体中的地球化学行为

平衡系统中铂族元素在硫化物熔体与硅酸盐熔体中的可用公式表示为: $D_{(PGE)} = C_{(PGE)}^{硫化物} / C_{(PGE)}^{硅酸盐}$ 。根据现有的实验结果^[2-5], 分配系数 D 多在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ 之间; 因此, 铂族元素在硫化物熔体与硅酸盐熔体的平衡系统中存在在硫化物熔体中强烈富集的趋势, 各铂族元素分配系数大小的排序为: $Pd > Rh > Pt > Ru \sim Os \sim Ir$ 。且随着系统中氧逸度增高, 分配系数有降低的趋势^[6-7]。

Keays 等^[8]、Malitch 等^[9]认为铂族矿物可以直接从硅酸盐岩浆中结晶, 或者以微粒形式通过幔源岩浆而迁移。当岩浆结晶时, 橄榄石和铬铁矿等结晶矿物中有铂族金属矿物包体。

Tredoux 等^[10]、Cawthorn^[11]认为 10^{-9} 量级的金属要在岩浆中饱和是十分困难的, 他认为 PGE 在熔体中趋向于形成原子束 “clusters”, 原子束由 $3 \sim 1\,000$ 个原子组成, 所有原子通过金属—金属键相连。原子束通过与 S、As、Sb、Te 和 CO 等阴离子结合形成配合物 (ligands)。在富 S 的环境中,

原子束和相关的配合物存在于硫化物熔体中; 在贫硫环境中, 原子束保留在熔体中, 直至形成 PGE 合金。在岩浆结晶过程中, 这些 PGE 以原子束形式而不是铂族金属矿物包裹于结晶矿物中。

Ballhaus C 等^[12]发现在南非 Merensky 层中橄榄石、铬铁矿及金属硫化物中均含有 PGE 的微粒包体, 其直径 $< 100 \text{ nm}$ 。在橄榄石、铬铁矿中微粒包体成分为 Pt-Pd \pm Au, 并认为这些微粒包体以铂族离子簇 (clusters of PGE ions) 的形式在堆晶早期阶段 PGE 过饱和时形成, 后来被岩浆中结晶相所包裹。铂族微粒包裹体在硫化物中的成分为 Os-Ir-Pt 和 Pt-Pd-Au。这一观点与 Tredoux 等^[10]、Cawthorn^[11]等人观点基本一致。

Borisov 等^[13-14]认为在一定的温度及氧逸度条件下, 重铂族 (Os, Ir, Pt) 比轻铂族 (Ru, Rh, Pd) 更少溶解。因此, 在 PGE 过饱和的熔体中难溶的重铂族易形成微粒包体。当 PGE 过饱和的硅酸盐熔体有不混溶的硫化物熔体出溶时, PGE 微粒包体将会立即进入硫化物熔体, 这主要是取决于 PGE 包体在硫化物中比在硅酸盐岩浆中具有更低的表面能。通过硫化物熔体与硅酸盐熔体平衡的化学交换, 所有 PGE 包体转移至硫化物熔体中。

1.2 铂族元素在硫化物熔体结晶过程中的地球化学行为

硫化物熔体在结晶过程中固相组分为单硫化物固溶体 (monosulfide solid solution), 液相为残留硫化物熔体 (residual sulfide liquid)。

在硫饱和条件下, 铂族元素在单硫化物固溶体与残留硫化物熔体中的分配系数^[2-4, 15]: $D_{(Ir)} = 3.4 \sim 11$; $D_{(Os)} = 4.3$; $D_{(Ru)} = 4.2$; $D_{(Rh)} = 1.17 \sim 3.03$; $D_{(Pt)} = 0.05 \sim 0.2$; $D_{(Pd)} = 0.09 \sim 0.2$ 。各铂族元素分配系数大小的顺序为: $Ir > Os > Ru > Rh \gg Pt > Pd$ 。因此, 在硫饱和条件下 Os, Ir, Ru, Rh 优先进入单硫化物固溶体, Pt, Pd 优先保留于残留硫化物熔体中。

硫化物熔体中硫成分对分配系数的影响主要表现在: 在贫硫条件下分配系数比硫饱和条件下略低; 在硫过饱和条件下, 分配系数略增加^[16]。Rh

在不同硫浓度的硫化物熔体中地球化学行为有较大变化^[17]：在低硫情况下 ($\lg f_{S_2} < -6.5$)，Rh 形成金属互化物 (intermetallic phases) FeRh，Rh 在 FeRh 与硫化物熔体中分配，优先进入金属互化物；随着硫活度的增加 ($\lg f_{S_2} > 5$)，Rh 在 Fe 单硫化物固溶体和硫化物熔体中分配，优先进入硫化物熔体。

硫化物熔体中 Ni/(Ni+Fe) 比值也控制铂族元素的地球化学行为^[17]，如 Rh 在高温阶段富 Fe 熔体中，Rh 优先保持在熔体中，但在富 Ni 熔体中，在 f_{S_2} 很大的条件下，Rh 优先进入单硫化物固溶体相，当温度下降的时候，Rh 趋向于按比例分配于单硫化物固溶体、镍黄铁矿中，在单硫化物固溶体与硫化物熔体、镍黄铁矿平衡条件下，Ru 富集于单硫化物固溶体中。

1.3 铂族元素在流体作用下的地球化学行为

PGE 在热液乃至表生条件下与金一样也表现出地质意义的活动性。Amosse 等^[18]报道由于受 d 轨道影响 PGE 可以形成络合物，如与 Cl⁻ 形成 [Pt-Sn₄Cl₄]⁴⁺ 存在于熔体中，这可能是 PGE 在岩浆热液中迁移、富集的一种机制。

实验表明 PGE 和金一样，无论是氧化性的热卤水还是还原性的富硫及有机质热液，当它们流经含贵金属的原岩时，PGE 和金可以溶解进入溶液，并以配合物的形式迁移^[19-20]。

铂族元素的配合物主要有氯络合物、硫氢络合物、氨络合物、氰络合物、氢氧络合物及硫代硫酸盐络合物等^[21]。世界著名的热液 PGE 矿床，有美国怀俄明州的 New Rambler 和加拿大安大略 Rathbun 湖 Pt-Pd-Au 型矿床。此外，在我国湘黔川鄂、俄罗斯、美国、加拿大等地黑色页岩建造中均发育了与低温热液作用有关的 PGE 异常与富集^[22-23]。

2 世界主要的铂族元素矿床类型

根据铂族金属赋存的岩体特征、地球化学及铂族金属矿物特征，将铂族金属矿床划分为：(1) 镁铁质—超镁铁质层状岩体铂族金属矿床；(2) 镁铁质—超镁铁质 Cu-Ni 硫化物矿床伴生的铂族金属矿床；(3) Ural 杂岩体型铂族金属矿床；(4) 与蛇绿岩相关的铂族金属矿床；(5) 与热液相关的铂族金属矿床；(6) 外生型铂族金属矿床。

2.1 与镁铁质—超镁铁质层状杂岩体相关的 PGE 矿床

目前，该类矿床为全球最主要 PGE 矿床。镁铁质—超镁铁质层状杂岩体产于克拉通地区，岩

体中主要岩石类型为镁铁质岩石，各岩性层状构造发育。典型的矿床有南非的 Bushveld 矿床、美国的 Stillwater 矿床以及波兰 Penikat PGE 矿床。

2.1.1 南非 Bushveld PGE 矿床

在南非 Bushveld 地区有超过 60 000 km² 的火成岩出露，火成岩活动时间为 2 054 ~ 2 057 Ma^[24-25]。整个火成岩组合从早到晚包括：早期 Rooiberg 群 (包括流纹岩、英安岩、玄武岩、安山岩和 Rashoop 花岗斑岩)，该酸性熔岩流厚达 5 km，分布范围可达 1 000 km；中期 Rustenburg 镁铁质—超镁铁质层状侵入体岩套，该层状侵入体最厚可达 7 000 m；晚期 Lebowa 花岗岩套，该花岗岩为 A 型花岗岩。

PGE 矿床主要分布于中期 Rustenburg 镁铁质—超镁铁质层状侵入体岩套中，层状杂岩体自下至上可分为下带、关键带、主带及上带 (图 1)。

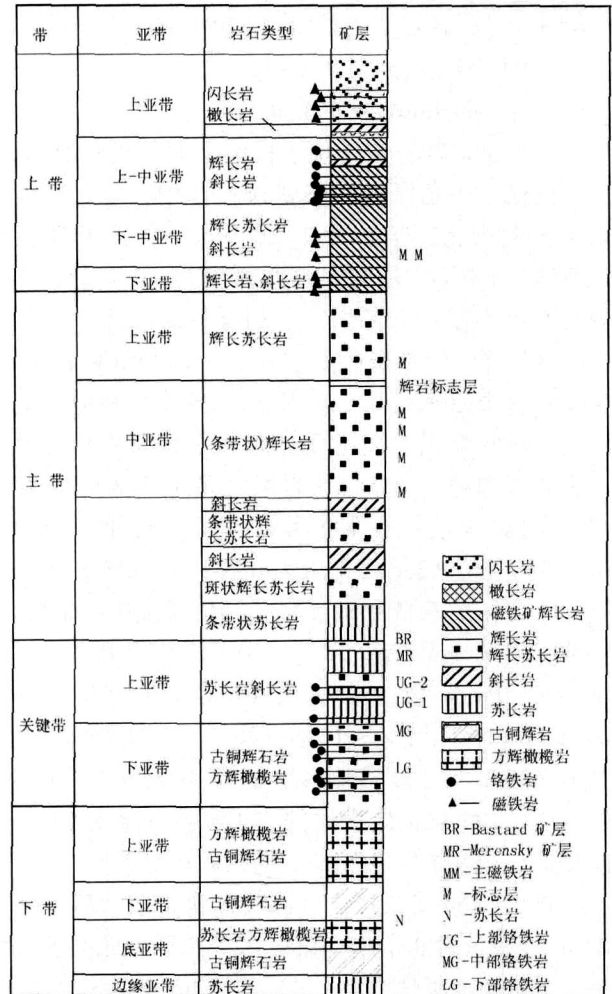


图 1 南非 Bushveld Rustenburg 层状岩体柱状剖面图^[25] (据赫伯特, 1990)

Fig. 1 Bushveld Rustenburg layered suite section in South Africa

下带由单斜辉石橄榄岩、古铜辉石岩和纯橄岩组成；关键带由古铜辉石岩、苏长岩、斜长岩和含铂铬铁矿层组成；主带由辉长岩、苏长岩和斜长岩组成；上带由含磁铁矿辉长岩、橄榄岩、橄榄辉长岩和磁铁矿层组成。其中关键带内 U_2 铬铁矿层 PGE 含量为 $4 \times 10^{-6} \sim 19 \times 10^{-6}$ ，Merensky Reef 矿层的为 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。 U_2 矿层和 Merensky Reef 矿层中铂族矿物常与硫化物及硅酸盐矿物共生。 U_2 矿层中铂族矿物还与铬铁矿共生。

布什维尔德矿床是全球最主要的铂族金属矿床，其中含有全球 75% 的 Pt 全球 52% 的 Pd 以及全球 82% 的 Rh。矿床中主要的铂族矿物有 Pt-Pd 硫化物、Pt-Fe 合金、RuRh 硫化物、PtPd 锑化物、 $PtAs_2$ 等，硫锑矿主要在铬铁矿中呈包体产出。铂族矿物分别可以与硫化物、硅酸盐、铬铁矿或氧化物共生。

布什维尔德矿床中铂族金属的平均含量为 5.44×10^{-6} ，铂族金属储量为 $62\,816.0\ t^{[26]}$ ，主要富 Pt，Pd/Pt 比值约为 $0.2 \sim 0.6^{[27]}$ 。

2.1.2 美国 Stillwater PGE 矿床

Stillwater PGE 矿床位于美国蒙大拿州西南部，产于镁铁质—超镁铁质层状杂岩体中。该杂岩体系太古代产物，年龄为 $2\,701\ Ma^{[28]}$ ，长 48 km，最厚达 7 400 m，层理平均倾角为 65° ；该杂岩划分为 5 个岩系：底部岩系、超镁铁质岩系、下部条带状岩系、中部条带状岩系、上部条带状岩系。条带状岩系由辉长岩、苏长岩、斜长岩和橄长岩组成。铂族金属矿层主要分布于下部条带状岩系的 JM 层和中上部条带状岩系之间的 Picket Pin 矿层中。JM 矿层一般厚度为 $1 \sim 3\ m$ ，延伸 40 km，矿石中浸染状硫化物含量为 $0.5\% \sim 1.0\%$ ，该矿层产于含橄榄石带和橄长岩—斜长岩带中（图 2），铂族元素平均品位达 22.3×10^{-6} ，其中 Pt 为 4.2×10^{-6} 、Pd 为 14.8×10^{-6} 、Rh 为 1.7×10^{-6} 、Ir 为 0.53×10^{-6} 、Ru 为 0.89×10^{-6} ，铂族金属含量达 $6\,628.0\ t$ ，金属 Ni 含量为 0.24% 、Cu 为 0.14% 。JM 层铂族金属的主要矿物有硫铂钨矿、硫钨矿、硫铂矿、锑铂矿、铁铂矿和锑钨矿。

Picket Pin 矿层产于中部条带状岩系顶部 $10 \sim 20\ m$ 处斜长岩带中，该矿床中铂族元素含量较贫。JM 矿层所含的 Pt、Pd、Ir 含量分别为 Picket Pin 矿层的 44、155 和 4 倍^[28]。

2.1.3 芬兰 Penikat PGE 矿床

芬兰 Panikat 层状杂岩体长 23 km，宽 2 500 m，可划分出 5 期巨型旋回 (MCU)。岩体形成年

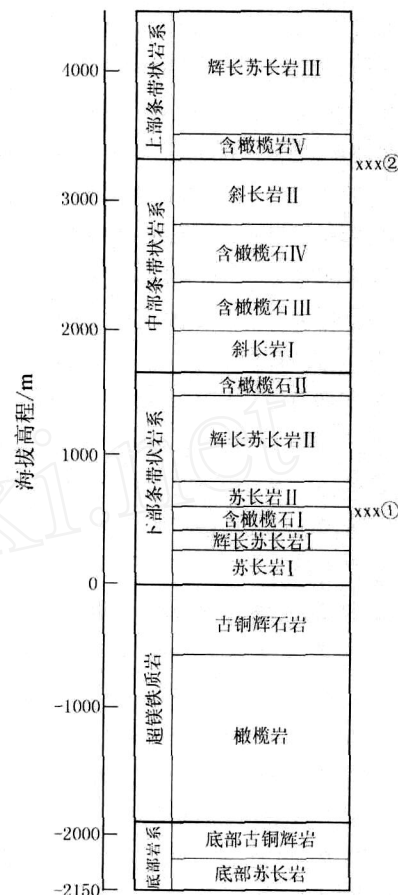


图 2 美国 Stillwater 杂岩体柱状剖面图^[28]

(据 Campbell 和 Naldrett A J, 1983)

Fig. 2 Stratigraphic section of the Stillwater igneous complex in USA

J-M PGE 矿层； Picket Pin 矿层

龄为 $2\,450\ Ma$ ，主要岩性有橄长岩、古铜辉石岩、二辉石岩、辉长岩、斜长岩等。岩体中共有 3 个层位可见 PGE 矿化（图 3），其中 Sompujarvi PGE 矿床分布在第 3 与第 4 巨旋回接触带上，矿体厚度为 $1 \sim 2.3\ m$ ，铂族金属含量为 $8.0 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6}$ ；Ala-Penikka PGE 矿体分布在第 4 巨旋回侵入体中，矿体位于第 4 巨旋回 $250 \sim 450\ m$ 之上，API PGE 矿床通常只有 $20 \sim 40\ cm$ 厚；Paasivaara PGE 矿体分布于第 4 旋回与第 5 旋回分界线上，厚度 $1\ m$ 左右，铂族金属含量小于 $< 10 \times 10^{-6}$ 。3 个矿化层位 Pd/Pt 比基本固定，约为 $3.5^{[29-30]}$ 。

矿床中铂族矿物有 30 余种，最主要矿物为 Pd-Te-(Bi)、Pd-As-Sb、 $PtAs_2$ 等。

2.2 铜镍硫化物型铂族金属矿床

铜镍硫化物是铂族金属矿床主要的矿石类型，铂族元素往往作为副产品。最典型实例有：中国金川的 Cu-Ni-PGE 矿床；俄罗斯西伯利亚地台 No-

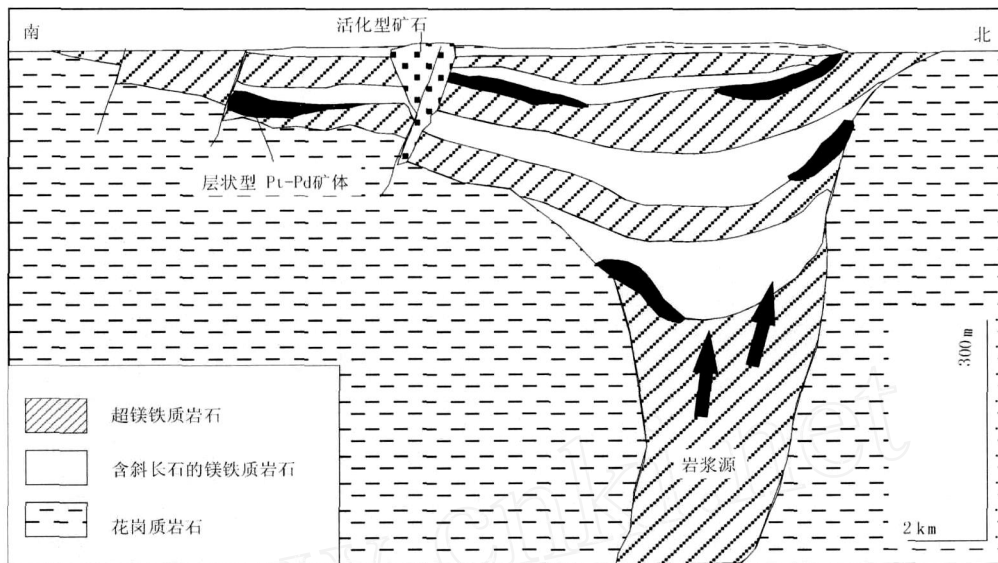


图 3 芬兰 Panikat 层状杂岩体纵剖面图

Fig. 3 The section of Panikat igneous complex, Finland

rilsk-Talnakh 的 Cu-Ni-Co-PGE 矿床；加拿大 Sudbury 的 Cu-Ni-PGE 矿床。

2.2.1 金川 Cu-Ni-PGE 矿床

金川镁铁质—超镁铁质岩体长约 6 500 m，宽为 20~527 m，延伸为 $n \times 100 \sim 1\ 000$ m，围岩主要为元古代片麻岩、大理岩及混合岩。岩体岩性主要为二辉橄榄岩、纯橄岩、斜长二辉橄榄岩及辉石岩等。

金川 PGE 金属主要富集于 24 号矿体和 1 号矿体的铂钯富集体中^[31]。矿床主要的铂族矿物是砷铂矿和铋铈铂矿。砷铂矿 (PtAs₂)：砷铂矿是主要的含铂矿物，全岩中 70% 以上的铂含量来自砷铂矿，砷铂矿粒度一般为 2~100 μm，晶形完整 (图 4 中 (a))，常与各种硫化物共生分布于橄榄石晶间 (图 4 中 (b)) 或分布于角闪石、金云母边部 (图 4 中 (c))，24 号矿体中砷铂矿的电子探针分析成分为 Pt_{83.816}Fe_{0.2668}Ni_{0.0332}As_{85.4462}S_{0.3905}Te_{0.0474}。其他的含铂矿物还包括铂的自然元素及金属互化物、铋化物、碲化物等，如自然铂、铋铂矿、铋铈铂矿、碲铂矿、铋铈镍铂矿等矿物和含铂金银矿、含铂铋碲镍矿等含铂矿物。

铋铈铂矿 (PdBiTe)：铋铈铂矿常常呈它形晶，与铋化物、碲化物共生成群产出，常常与斜铋铂矿 (floodite) 及 BiNi 矿等交生 (图 4 中 (d))。其常常分布在硫化物及硅酸盐的边部，有时亦分布于黄铜矿及紫硫镍矿 (violetite) 矿物颗粒中，据电子探针分析，铋铈铂矿成分为 Pd_{31.6785}Fe_{0.9418}Ni_{0.4374}Te_{35.8678}Bi_{27.3548}S_{2.8216}As_{0.8982}。

钯元素 78% 以上呈独立矿物产出，钯金属的其

他矿物还包括铋碲镍钯矿、铋碲银钯矿，以及微量的铂金钯矿、铋钯矿、铋铂钯矿、斜铋钯矿等。

矿石中钼、铈、钨、铼含量均很低，其赋存状态主要呈类质同象存在。

金川矿区铂钯富集体中铂族金属含量最高可达 10×10^{-6} ，一般为 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ ，但对于一般的岩石或矿石铂族金属含量较低，一般小于 100×10^{-9} 。从铂钯富集体中，Ir 与 S, Cu, Rh, Ru, Pt 及 Pd 等元素的协变图可知，随着 Ir 的增加，S, Rh, Ru 含量亦增加，其中 Ir 与 Rh, Ru 呈很好的线性关系；但 Ir 与 Cu, Pt 及 Pd 总体上呈负相关关系。

从前面的论述可知，在硫饱和条件下，在硫化物熔体结晶分异过程中，Os, Ir, Ru, Rh 优先进入单硫化物固溶体 (固相) 中，Pt, Pd 优先保留于残余硫化物熔体中。如果单硫化物固溶体从硫化物熔体的结晶分异作用控制 PGE 的富集，那么，在残留的硫化物熔体中具有高的 PPGE 和低的 IPGE。24 号矿体及 1 号矿体中铂钯富集体具有这一特征。Cu 在硫化物结晶分异过程中也是不相容的。因此，铂钯富集体中黄铜矿及方黄铜矿含量明显增加，是一般矿石含量的 2 倍以上。

因此，我们认为金川矿床 24 号矿体及 1 号矿体中铂钯富集体的成因是单硫化物固溶体从硫化物熔体结晶分异后，残余熔浆结晶而成。

2.2.2 Norilsk-Talnakh 的 Cu-Ni-Co-PGE 矿床

在晚二叠世—早三叠世期间 (251 Ma ±) 西伯利亚地台西缘发生广泛的幔源岩浆活动，产生厚

达 3 500 m 的溢流玄武岩及其相关的侵入岩。喷发的溢流玄武岩覆盖面积至少有 $3.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，体积估计为 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6 \text{ km}^3$ [32]。

在大火成岩省中有 14 种不同类型的包含浸染状硫化物的侵入体。但仅有 4 种侵入体与该区成

矿作用相关。含硫化物的侵入体岩石化学成分具有如下特征：MgO 含量为 8.0% ~ 12.0%；FeO 为 10% ~ 12.5%。

基性侵入岩体呈岩盆状，岩体分层明显，具有水平—次水平的层理（倾角 $5^\circ \pm$ ）（图 5），长几公里

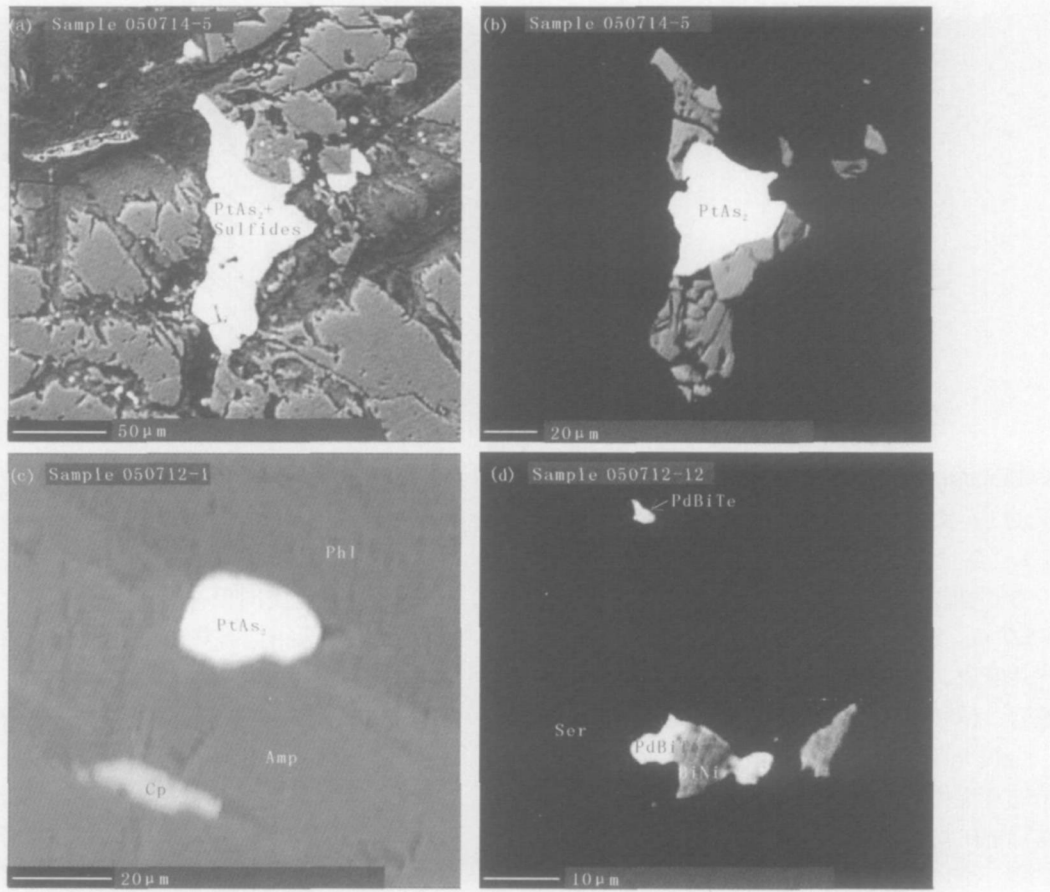


图 4 金川 Cu-Ni PGE 矿床铂族金属矿物背散射电子图像

Fig. 4 Back-scattered electron images of PGM from the Jinchuan deposits

(a) 砷铂矿与硫化物共生，分布于橄榄石晶隙之间；(b) 为 (a) 中砷铂矿与硫化物共生体放大图像；(c) 砷铂矿与第二期角闪石共生；(d) 碲铋铂矿与 BNi 交生并与蛇纹石共存

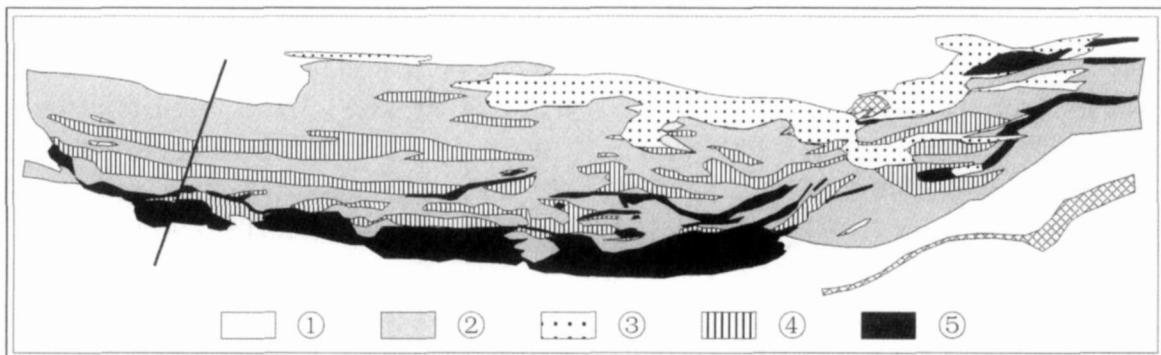


图 5 俄罗斯 Talnakh 地区十月矿地质剖面示意图

Fig. 5 The schematic section of Oktyabr'sky Cu-Ni-PGE deposits, Talnakh area, Russia
 泥盆—石炭纪沉积岩； 基性—超基性侵入岩； 浸染状矿石； 稠密浸染状矿石； 块状硫化物矿石

到几十公里，厚度一般为 100 ~ 200 m，主要侵位于泥盆纪和二叠纪—三叠纪地层之中。岩体自上而下由浅色辉长岩、石英闪长岩、磁铁辉长岩、含橄榄石辉长岩、橄榄石辉长岩、苦橄岩、斑杂岩组成。铂族金属矿床主要分布于苦橄岩及斑杂岩之中。主要由块状矿石及少量浸染状矿石组成。主要铂族矿物为硫铂矿、铁铂矿、硫钼矿、砷铂矿、硫镍钼矿、铋铅钼矿等铋化物及铋锑化物。

铂族元素在不同类型的矿石中含量变化较大，以富黄铜矿、方黄铜矿及硫铜铁矿的矿石中最高，矿石中铂族金属平均品位约 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ ，一些脉状矿石高达 $40 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$ 。Talnakh 矿区十月矿块状硫化物矿石中铂族金属平均含量为 Pt 5×10^{-6} ；Pd: 20×10^{-6} ，属富 Pd 型矿床^[2]。俄罗斯 Norilsk-Talnakh 矿床铂族金属储量为 20 255.2 t。

2.2.3 Sudbury Cu-Ni-PGE 矿床

Sudbury 层状杂岩体呈椭圆状 (长约 60 km，宽约 24 km) 分布于加拿大地盾^[33]，杂岩体主要由花岗斑岩、石英辉长岩、长英质苏长岩、镁铁质苏长岩、富斜方辉石苏长岩组成，金属硫化物主要分布于层状侵入体底部 (图 6)。主要铂族金属矿物有碲铋钼矿、碲铂矿、砷铂矿、铋铂矿、锑钼矿、碲钼矿等。矿床中金属元素平均品位 Ni 为 1.2%，Cu 为 1.1%，Pt 为 0.4×10^{-6} ，Pd 为 0.4×10^{-6} 。铂族金属储量为 763.9 t，Pd/Pt 比值变化大，为 0.2 ~ 5.2^[35]。

2.3 Urals 型杂岩铂族金属矿床

俄罗斯中乌拉尔山有一南北向延伸 920 km，主要由纯橄岩、辉长岩及斜长花岗岩杂岩体组成的铂族金属富集带，杂岩体主要形成于岛弧环境^[35]。其中 Nizhny Tagil 杂岩体是最主要的铂族金属成矿岩体，杂岩体通常呈同心环状，中心部分为纯橄岩，向外依次为橄辉岩、橄辉石岩、富磁铁单斜辉石岩及角闪石岩，且常具有花岗质岩壳。杂岩体中缺少斜方辉石和斜长石 (角闪石岩带中除外，An 摩尔含量可达 90% ~ 98%)，以含高镁橄榄石、角闪石、富铁铬铁矿以及磁铁矿为特征。需要注意的是，橄榄石在纯橄岩中富镁 ($Fe_{0.3}$)，但在橄辉石岩中镁值降低 ($Fe_{0.75}$)；铬铁矿只分布于纯橄岩中，磁铁矿和钛铁矿是单斜辉石岩及角闪石岩中仅有的含铁氧化物。该类矿床的铂族金属主要产于铬铁矿块状矿石或纯橄岩铬铁矿脉中，且主要富含 Pt，含量可达 7%^[36]。

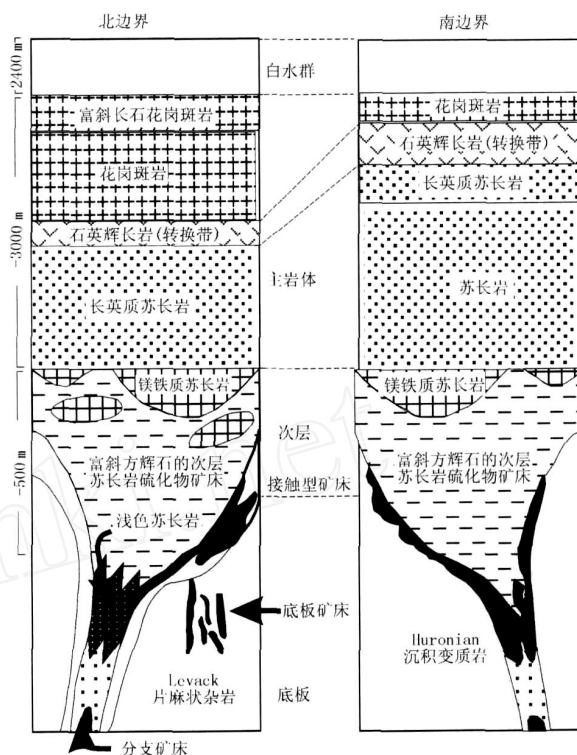


图 6 萨德伯里层状杂岩体北缘与南缘柱状剖面图^[34]

Fig. 6 Stratigraphic section of the north and south ranges of the main mass of the Sudbury igneous complex

Nizhny Tagil 侵入体中铂族金属矿物主要为 Pt-Fe 及 Pt-Ir 合金，且铂族金属不与金属硫化物共生。杂岩体中心部分常见有块状铬铁矿，在纯橄岩中半自形—自形铬铁矿与橄榄石共生。铬铁矿层高度富集 Pt，与其他铂族元素相比，不同程度地富集 Ir。富集铂族金属的铬铁矿层具有高的 (Pt + Pd) / (Ru + Os + Ir) 比值，同时 Pt/Pd 比值也很高，后一特征与硫化物熔体同时富集 Pt 和 Pd 不相符；因此，Tagil 型杂岩体富集铂族金属的最好解释是富 Pt 合金在杂岩体演化的早期阶段开始结晶，并从熔体中分离、堆积^[37]。

Volkovsky 和 Baron 型铂族矿床是乌拉尔铂族成矿带的另一种类型。Pd 矿化与 Cu-Fe-V-Ti-P 矿化共生。铂钼异常带宽一般为 0.3 ~ 2 km，具强的磁异常，Pd、Pt 的平均丰度分别为 $5 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ 、 $0.3 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ 。在辉石岩中铜硫化物富集带 (Cu > 1%) 中钼的含量可达 $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 。铂族金属矿物主要是 PdTe、Pd(TeBi)₂、PdSb₆。

2.4 与蛇绿岩相关的 PGE 矿床

蛇绿岩是大洋板块的碎片，具有“三位一体”的岩石组合特征。其中，橄辉岩是洋中脊岩浆房

之下的亏损地幔，层状辉长岩是岩浆房岩浆结晶的产物，岩脉及火山岩是岩浆喷发至地表及近地表的产物。与蛇绿岩相关的 PGE 矿床具有如下特征：(1) 铂族矿床主要富集于橄榄岩—纯橄岩系列岩石中且与铬铁矿矿床共生；(2) 铂族矿物在铬铁矿中主要以包体形式分布，亦有少量在硅酸盐矿物中呈包体产出。

世界上该类矿床主要有阿尔巴尼亚 Tropoja 铂族矿床。我国与蛇绿岩带相关的铂族金属矿床分布于祁连褶皱带中间地块南部蛇绿岩带、贺兰山台褶带北缘蛇绿岩带、雅鲁藏布江—象泉河蛇绿岩带、藏北班公湖—怒江蛇绿岩带、西准噶尔蛇绿岩带等。

与蛇绿岩相关的铂族矿物主要是 Ru、Ir 及 Os 的矿物，Pt、Pd 及 Rh 仅少量的进入到矿物中。铂族矿物主要有 4 组：(1) 合金，Os-Ru-Ir、Os-Ir、Ir-Os、Pt-Pd-Fe、Pd-Sb-Pt；(2) 硫化物，RuS₂、OsS₂、IrCuS₂；(3) 硫砷化物，OsAsS、IrAsS、PtAsS、RhAsS；(4) 砷化物，PtAs₂^[37]。澳大利亚 Kraubath 蛇绿岩中铬尖晶石可见有两群铂族矿物包体：一群存在于铬尖晶石的中心部分，主要是 Ru、Os、Ir 硫化物，与硅酸盐矿物橄榄石、斜方辉石、角闪石及硫化物共生；另一群是 Pt-Pd-Rh 硫砷化物及砷铂矿，与蛇纹石化及变质作用相关，且与铬尖晶石交代变成铬铁矿密切相关。

蛇绿岩型豆荚状铬铁矿床中含较多的 PGE。大道尔吉铬铁矿床铂族元素平均含量为 0.05×10^{-6} ，而富矿石中平均含量为 0.31×10^{-6} ；小松山铬铁矿床中铬铁矿富矿石铂族元素含量可达 0.60×10^{-6} ，一般为 0.20×10^{-6} ；罗布莎矿床 PGE 含量为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 0.62 \times 10^{-6}$ ^[38]。

2.5 热液型铂族矿床

岩浆期后热液作用甚至在热水溶液中亦可使铂族元素迁移和富集。如发现洋底锰结核中铂族元素含量高达 $6 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ ；海底铁锰结壳中的铂(钯)含量达 1.0×10^{-6} ；大陆架磷块岩中钨含量达 0.01×10^{-6} ；在含硫和有机质的煤矿中铂含量达 0.20×10^{-6} ，最高达 10×10^{-6} ，钯含量达 6.1×10^{-6} ，铱含量为 0.22×10^{-6} ，这表明铂族元素富集具有广泛的地质环境。该类矿床多在金矿床、铜矿床及其相关矿床附近富集。

2.6 外生型铂族矿床

铂族矿物(PGM)的砂矿在 19 世纪是铂的第一来源。虽然，其中包含有各种不同的铂族矿物，

但是 90% 以上的 PGM 为成分变化较大的 Pt-Fe 和 Os-Ir-Ru-Pt 合金。最重要的 PGM 矿物有等铁铂矿(Pt₅Fe)或亚铁铂矿(PtFe)、铂铱矿、自然铱和自然钨。Pt-Fe 合金通常含有自然铱、铂铱矿、硫钨矿、硫铱矿(OsS₂)以及铬铁矿包体。不常见的包体有各种 PGE 硫化物、硫砷化物、砷化物、锑化物以及碲化物和橄榄石。在已知的 108 种 PGM 中，有 41 种(38%)是在砂岩矿床及其相关的超铁镁质岩中首先发现的。

产量最大的砂铂矿与 Alaskan 型超铁镁质杂岩相关，分布在南北美的科迪勒拉山脉、乌拉尔山等构造带。最大的 10 个这类矿床中，每个都含有 20~60 t 的 PGE 金属量，其中 85% 为 Pt。1997 年，俄罗斯生产的 20 t Pt 中有一半来自砂铂矿床^[36]。

近年来，在沉积变质岩石内一些新的地质环境中发现了铂族元素的异常和矿化，甚至形成有工业意义的铂族金属矿床。黑色岩系中可以赋存重要的大型—超大型矿床，如乌兹别克斯坦的穆龙套金矿、德国与波兰接壤地带的砂(页)岩型铜银矿床等^[39]。

在扬子准地台的湘黔川鄂古拗陷区东南侧、江南古陆西缘和东部、扬子准地台的滇东台褶带、四川盆地边缘和昆仑—秦岭地槽过渡带等处，下寒武统黑色页岩建造发育，为含有机碳较高(一般为 5%，高达 20%)的硅、泥质岩石，是磷块岩矿床和镍、钼、钒、硒、REE、PGE 共生矿床成矿的有利沉积环境^[40]。赣东北断裂与乐安河深断裂之间的中元古界双桥山群，发现含碳质千枚岩中铂和钯含量分别为 0.056×10^{-6} 和 0.016×10^{-6} ，碳质千糜岩中铂和钯含量分别为 0.016×10^{-6} 和 0.007×10^{-6} ，表明该地区含碳质的浅变质岩系，具有寻找热液型 Au-U-PGE 共生矿床和石英脉型金、铂(族)矿床的地质条件和沉积环境。

3 结论和讨论

铂族元素在地壳，甚至地幔岩石中含量都较低，只有在地核中才有较高的丰度。铂族金属主要赋存在地球深部的铁镍金属或硫化物中，大规模的幔源岩浆活动(特别是地幔柱的岩浆活动)有利于将地球深部 PGE 金属带入地表或近地表；因此，大规模的幔源岩浆活动是形成铂族矿床的必要条件。

法国科学家 Nick A^[41]认为镁铁质—超镁铁质

岩浆中亲铜元素的集中是由地幔源矿物和部分熔融条件所控制的。铂族元素在硫化物—硅酸盐熔体中具有非常高的分配系数；因此，岩浆母岩残留物中硫化物的多少控制着部分熔融过程中岩浆的铂族元素的含量。硫化物如果只有 15% ~ 25% 的熔融，则铂族元素在硅酸盐熔体中含量很低。随着熔融程度的增加，硫化物熔融程度增加，铂族元素含量就变高。科马提岩和拉斑质苦橄岩都形成于熔融程度高的条件下，在残留物中消耗了所有硫化物；因此，这些岩浆中铂族元素含量就高。大洋中脊玄武岩和碱性玄武岩中铂族元素含量低，可能与这些岩浆形成时低度熔融，残留物中剩有硫化物有关。

由于铂族元素具有强烈的亲 S 性，幔源岩浆在上侵和演化过程中，具有硫饱和及形成硫化物熔体的条件，对铂族金属的富集也是非常重要的。

镁铁质—超镁铁质层状杂岩体中，岩浆分异作用彻底。岩浆结晶早期阶段，由于硫不饱和，主要形成含 Os-Ir-Ru 的铂族矿物，且和铬铁矿共生。在岩浆演化过程中，由于硫饱和，导致硫化物熔体的形成。硫化物熔体和上新侵岩浆充分混合，具有高 R 因子环境，导致大量铂族金属在硫化物熔体中富集，形成富集 Pt、Pd、Rh、Ru、Ir、Os 的铂族金属矿床。

Cu-Ni 硫化物型镁铁质—超镁铁质岩体中，在岩浆演化的某一阶段，由于地壳硫的加入或其他原因使硫饱和，形成较大规模的硫化物熔体，并使大部分铂族金属都富集于硫化物熔体中。硫化物熔体冷却过程中的结晶分异作用，是形成 Pt-Pd 富集体的必要条件。金川、Norilsk、Sudbury 等 Cu-Ni 硫化物矿床都具有这一特点。铂族矿物主要形成含 Pt-Pd 矿物，由于这类矿床在岩浆期后的热液活动强，多形成含 As、Se、Te、Bi 的铂族矿物。

Urals 型镁铁质—超镁铁质杂岩体，产于造山环境，岩体主要呈环带状。该类岩体在岩浆演化的早期阶段由于硫处于不饱和状态，铂族矿物可能直接从硅酸盐岩浆中结晶，形成的铂族矿物主要为 Pt-Ir 和 Pt-Fe 合金，主要赋存于含铬铁矿的岩石中。在岩浆演化后期，硫饱和作用可以形成 Pd-Pt 与 Cu-Fe-Ti-V-P-S 共生的铂族矿床。

在蛇绿岩型铂族矿床中，岩浆在硫未饱和时，Ru-Ir-Os 铂族合金和铬铁矿已先结晶，由铬铁矿及 PGE 微粒组成的集合体散布于岩浆之中，然后由于重力分异作用，它们在岩浆房底部定位。因此，

在蛇绿岩中铂族矿物主要是含 Ru-Ir-Os 的矿物。

岩浆期后的热液活动，使铂族金属重新活化迁移，并在有利部位富集。在 Stillwater 和 Bushveld 杂岩中的富含 PGE 岩层的岩石学和地球化学特征清楚地反映了原始岩石在流体或富含挥发分的熔体作用下发生的改变。例如，Merensky 和 JM 矿层的伟晶状结构；铁镁质伟晶岩也和 UG-2 有关，而与许多其他的块状铬铁岩层关系不是很大；Merensky 岩脉中组分高度富集不相容的和亲石的微量元素等等。铂族矿床中 As、Se、Te、Bi 铂族矿物是常见的，特别是在镁铁质—超镁铁质层状杂岩体中以及 Cu-Ni 硫化物型铂族矿床中。

谨以此文纪念池际尚先生 90 诞辰，是她开创了我国岩浆作用与成矿学这一学科领域。

参考文献：

- [1] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994.
- [2] Fleet M E, Liu M, Crocket J H. Partitioning of trace amounts of highly siderophile elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63 (17): 2611 - 2622.
- [3] Fleet M E, Crocket J H, Liu M, et al. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits [J]. *Lithos*, 1999, 47 (1 - 2): 127 - 142.
- [4] Bezmen N S, Asif M, Brugmann G E, et al. Experimental determinations of sulfide-silicate partitioning of PGE and Au [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 1251 - 1260.
- [5] Sattari P, Brennan J M, Horn I. Experimental constraints on the sulfide- and chromite-silicate melt partitioning behavior of rhenium and platinum-group elements [J]. *Economic Geology*, 2002, 97 (2): 385 - 398.
- [6] Stone W E, Crocket J H, Fleet M E. Partitioning of palladium, iridium, platinum and gold between sulfide liquid and basalt melt at 1200 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2341 - 2344.
- [7] Fleet M E, Stone W E. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55: 245 - 253.
- [8] Keays R R, Campbell I H. Precious metals in the Jimberlana intrusion, Western Australia: Implications for the genesis of platinumiferous ores in layered intrusions [J]. *Economic Geology*, 1981, 76: 1118 - 1141.
- [9] Malitch K N, Thalhammer O A R. Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxene-dunite massifs, Russia: a structural, compositional and osmium-isotope study [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2002, 40 (2): 395 - 418.
- [10] Tredoux M, Lindsay N M, Davies G, et al. The fractionation of platinum-group elements in magmatic systems, with the suggestion

- of a novel causal mechanism [J]. South African Journal of Geology, 1995, 98: 157 - 167.
- [11] Cawthorn R G Geological models for platinum-group metal mineralization in the Bushveld complex [J]. South African Journal of Science, 1999, 95(11 - 12): 490 - 498.
- [12] Ballhaus C, Sylvester P. Noble metal enrichment processes in the Merensky Reef, Bushveld complex [J]. Journal of Petrology, 2000, 41(4): 545 - 561.
- [13] Borisov A, Palme H. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems [J]. American Mineralogist, 2000, 85(11 - 12): 1665 - 1673.
- [14] Borisov A, Palme H. Solubilities of highly siderophile elements in silicate melts: experimental results and geochemical implications [J]. Seventh Annual V M Goldschmidt Conference, LPI Contribution, 1997, 921: 33.
- [15] Bames S J, Van Acherbergh E, Makovicky E. Proton microprobe results for the partitioning of platinum-group elements between monosulphide solid solution and sulphide liquid [J]. South African Journal of Geology, 2001, 104(4): 275 - 286.
- [16] Bames S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids [J]. Geological Association of Canada, Short Course, 1999, 13: 69 - 106.
- [17] Sinyakova E F. Determination of partition coefficients of Pt and light PGE between the phases of the Fe-Ni-S system at 900, 800 and 600 [M] // Abstract for Workshop of Highly Siderophile Elements in Terrestrial and Meteoritic Samples: Implications for Planetary Differentiation and Igneous Processes Nancy, France: [S. n.], 2002.
- [18] Amosse J, Allibert M, Fischer W. Experimental study of the solubility of platinum and iridium in basic silicate melts: implications for the differentiation of platinum-group elements during magmatic processes [J]. Chemical Geology, 1990, 81(1 - 2): 45 - 53.
- [19] Vatin-Perignon N, Amosse J. Platinum-group element behaviour and thermochemical constraints in the ultrabasic-basic complex of the Vizcaino Peninsula, Baja California Sur, Mexico [J]. Lithos, 2000, 53(1): 59 - 80.
- [20] Molnar F, Watkinson D H, Jones P C. Multiple hydrothermal processes in footwall units of the North Range, Sudbury igneous complex, Canada, and implications for the genesis of vein-type Cu-Ni-PGE deposits [J]. Economic Geology, 2001, 96(7): 1645 - 1670.
- [21] 郑大中. 铂族元素迁移富集机理的新探 [J]. 四川地质学报, 1997, 17(2): 148 - 156.
- [22] Li Shengrong, Gao Zhenmin. Study of noble metal elements in lower Cambrian blackrocks series of Guizhou-Hunan Provinces, China [J]. Journal of China University of Geosciences, 1999, 10(1): 89 - 92.
- [23] Pasava J, Hladikova J, Dobes P. Origin of Proterozoic metal-rich black shales from the Bohemian Massif, Czech Republic [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1996, 91(1): 63 - 79.
- [24] Gruenwaldt G V. Platinum-group element-chromite association in the Bushveld complex [J]. Economic Geology, 1986, 81: 1067 - 1079.
- [25] 赫伯特 L J. 铂族元素的地质环境 [M]. 沈成珩, 刘道荣译. 北京: 地质出版社, 1991.
- [26] Naldrett A J. Magmatic Sulfide Deposit [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [27] Bames S J, Maier W D. Platinum-group element and microstructures of normal merensky reef from impala platinum mines, Bushveld complex [J]. Journal of Petrology, 2002, 43(1): 103 - 128.
- [28] Campbell I, Naldrett, A J, Bames S J. A model for the origin of the platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater complexes [J]. Journal of Petrology, 1983, 24: 133 - 165.
- [29] Halkoaho T A A, Alapieti T T, Lahtinen J J. The Ala-Penikka PGE Reefs in the Penikat layered intrusion, Northern Finland [J]. Mineralogy and Petrology, 1990, 42: 23 - 38.
- [30] Halkoaho T. The Sompjujärvi and Ala-Penikka PGE Reefs in the Penikat layered intrusion, Northern Finland [J]. Acta of University of Oulu, 1993, A249: 1 - 122.
- [31] 苏尚国, 周美夫, 漆亮, 等. 甘肃金川铜镍铂矿床铂钯富集体富集机理 [M] / 陈毓川, 毛景文, 薛春纪. 矿床学研究会面向国家重大需求新机遇与新挑战——第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 238 - 241.
- [32] Czamanske G K, Zenko T E, Fedorenko V A. Petrographic and geochemical characterization of ore-bearing intrusion of the Norilsk type, Siberia [J]. Resource Geology Special Issue, 1995, 18: 1 - 48.
- [33] Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration [J]. Geological Association of Canada, Short Course, 1999, 13: 1 - 477.
- [34] Lightfoot P C, Keays R R. Geochemical relationships in the Sudbury igneous complex: Origin of the main mass and offset dikes [J]. Economic Geology, 1997, 92: 289 - 307.
- [35] Ivanov O K. Zoned Ultramafic Complexes of the Urals (Mineralogy, Petrology, Genesis) [M]. Ekaterinburg: Uralsky University Publishing House, 1997: 488.
- [36] Naldrett A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration [M]. Berlin: Springer, 2004: 481 - 612.
- [37] Chen Yuan. Paragenesis of platinum group minerals [J]. 现代地质, 2001, 15(2): 131 - 142.
- [38] 梁有彬, 刘同有, 宋国仁. 中国铂族元素矿床 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [39] 张光弟, 毛景文, 熊群尧. 中国铂族金属资源现状与前景 [M]. 地球学报, 2001, 22(2): 107 - 112.
- [40] Li Shengrong, Gao Zhenmin. Study of noble metal elements in lower Cambrian blackrocks series of Guizhou-Hunan Provinces, China [J]. Journal of China University of Geosciences, 1999, 10(1): 89 - 92.
- [41] Amdt N. Mantle-derived magnas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits [M] // Abstract of the 32th International Geological Congress Italy: [S. n.], 2004.