

文章编号: 0258-7106(2012)02-0359-10

新疆且干布拉克超大型蛭石矿床的成因与成矿模式*

黄建华^{1,2}, 吴昌志^{2*}, 雷如雄², 陈刚³, 熊黎明³, 秦切¹, 顾连兴²

(1 新疆大学地质与勘查工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 3 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要 新疆尉犁县且干布拉克超基性杂岩体位于塔里木北缘隆起带库鲁克塔格前寒武纪地块中西段, 兴地塔格断裂带附近。该蛭石矿床是继南非 Palabora、美国 Libby 和俄罗斯 Kovdorsk 蛭石矿之后的第 4 个超大型蛭石矿床。根据野外地质观察和室内薄片鉴定结果, 结合该区已有的岩石地球化学和矿床学资料, 并通过与国外同类型矿床进行详细对比, 从含矿杂岩体的岩石组合、矿体发育特征和矿物共生组合等不同层面探讨了该杂岩体的演化过程和矿床成因, 并建立了相关成岩成矿模型。结果表明, 且干布拉克杂岩体是裂谷背景下, 富集岩石圈地幔低程度部分熔融岩浆经岩浆分异和不混熔作用并以橄辉岩-黑云母透辉岩-碳酸岩等岩相依次侵入的产物, 蛭石矿床中的金云母是岩浆晚期高温富碱质热液交代超基性岩的产物, 云母类矿物在剥蚀到近地表后, 在大气降水作用下发生表生风化最终形成蛭石矿床。矿床的形成过程复杂, 经历了从地幔交代、超大陆裂解、岩浆分异、热液蚀变到表生风化作用等五大地质过程。这一模式的建立将为进一步寻找和深入研究该类矿床提供理论依据和实践指导。

关键词 地质学; 蛭石矿床; 碱性超基性杂岩体; 成矿模式; 且干布拉克; 新疆

中图分类号: P619.24⁺9

文献标志码: A

Genesis and ore-forming model of Qieganbulak superlarge vermiculite deposit in Xinjiang

HUANG JianHua^{1,2}, WU ChangZhi², LEI RuXiong², CHEN Gang³, XIONG LiMing³,
QIN Qie¹ and GU LianXing²

(1 School of Geology and Exploration Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract

The Qieganbulak vermiculite ore deposit lies in Yuli Country of Xinjiang. The ore-bearing pluton is an alkaline ultramafic-carbonitite complex located along the Xindi fault in western Quruqtagh block, a Precambrian uplift unit of North Tarim craton. The deposit is the fourth superlarge vermiculite deposit discovered in the world after Palabora of South Africa, Libby of the USA and Kovdorsk of Russia. Based on field geological survey, thin section identification and previous petrological, geochemical and ore mineral data, the authors compared the Qieganbulak deposit with other three superlarge vermiculite ore deposits in the world and discussed the genesis and ore-forming evolution in the aspects of petrographic association, ore body characteristics and mineral paragenesis, and established the formation mechanism model for its petrogenesis and metallogeny. Five major geological processes, i. e., mantle metamorphism, supercontinental breakup, mantle-derived magma differentiation, hy-

* 本文为国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411301)和中国地调局环塔里木前寒武纪成矿作用及大型找矿靶区优选研究项目(1212011140056)联合资助

第一作者简介 黄建华, 男, 1955年生, 博士, 副教授, 主要从事矿床学的教学与科研工作。

** 通讯作者 吴昌志, 男, 1975年生, 博士, 副教授, 主要从事岩体及矿床成因研究。Email: wucz@nju.edu.cn

收稿日期 2011-04-12; 改回日期 2011-11-13。张绮玲编辑。

hydrothermal alteration and supergene weathering, have been proposed for the formation of the Qieganbulak super-large vermiculite ore deposit.

Key words: geology, vermiculite deposit, alkaline ultramafic-carbonatite complex, metallogenic model, Qieganbulak, Xinjiang

蛭石是全球稀缺资源。迄今为止,世界上已开采的蛭石矿床不过十余个,超大型蛭石矿床仅有4个,即美国利比(Libby, Boettcher, 1966)、南非的Palabola(Evans, 1993)、俄罗斯的Kovdorsk(Vorovikov, 1973)和中国新疆的且干布拉克,其中美国利比蛭石矿已于1990年关闭(Frank et al., 2001)。且干布拉克矿床主要原岩为蛇纹石化纯橄榄岩、黑云母透辉岩和碳酸岩,矿床中的碳酸岩还具有明显的磷灰石和稀土元素矿化。它是中国唯一的超大型蛭石矿床。美国每年进口的蛭石中有35%来自新疆且干布拉克蛭石矿(Frank et al., 2001)。因此,该矿床具有巨大的经济价值,对其开展深入研究具有理论和现实意义。

国内学者对且干布拉克矿床含矿超基性岩-碳酸岩进行了较为详细的岩石地球化学研究(姜常义等, 2005; 孙宝生等, 2007; Zhang et al., 2007),少数地质工作者对该矿床的成因开展了研究(陈国耀, 1989; 殷宝祥, 1992; 黄建华等, 2001),其中陈国耀(1989)认为且干布拉克蛭石矿是由金云母岩和含金云母透辉岩经风化作用形成,金云母形成于岩浆晚期阶段,而殷宝祥(1992)则认为云母是与超基性岩有关的气化-高温热液交代的产物。

本文在前人研究的基础上,通过野外和室内观察和详细描述,并与国外同类矿床对比,试图探讨该岩体各岩相的侵入次序及金云母形成过程,进而确定该含矿岩体的演化过程、矿石成因和成岩成矿模式。

1 区域地质背景

且干布拉克超大型蛭石矿床位于新疆维吾尔自治区库尔勒市东南约200 km的尉犁县境内。大地构造位置处于塔里木板块东北缘库鲁克塔格断隆之西南部(图1)。该断隆北邻南天山古生代造山带,南接塔里木地块,东接北山裂陷槽(图1, Huang et al., 2005; Xu et al., 2005)。区内出露地层由基底和盖层两部分组成。基底由新太古界托格杂岩、古元古界兴地塔格群、中元古界波瓦姆和爱斯基干群以及

新元古界帕尔岗群和库鲁克塔格群构成(高振家等, 1993)。托格杂岩主要由角闪岩、片麻岩及片麻状花岗岩组成,其Sm-Nd同位素等时线年龄为3 263~3 040 Ma(胡霏琴等, 1997);兴地塔格群以巨厚的陆相碎屑岩和碳酸盐岩沉积为主,仅局部出现火山碎屑岩,其Sm-Nd全岩-矿物等时线年龄为2 453 Ma(胡霏琴等, 1997);波瓦姆和爱斯基干群下部为石英岩、片岩和大理岩,上部为石英岩、黏土岩、厚层碳酸盐岩和粗碎屑岩;帕尔岗群和库鲁克塔格群下部为绿泥石英片岩、厚层石英岩,上部为富含叠层石、核形石的硅质碳酸盐岩,并出露有黑云斜长片麻岩,其Sm-Nd同位素等时线年龄为1 281~1 283 Ma(郭召杰等, 1998)。盖层主要为新元古界上部震旦系冰碛岩、滨海-浅海相碎屑岩夹基性火山岩和下古生界寒武系—奥陶系浅-滨海相、半深海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积,总厚度约13 000 m(高振家等, 1993)。

2 杂岩体地质特征

且干布拉克杂岩体隶属于塔里木北缘超基性岩带(邹天人等, 1998; 2002)的一部分,受北西西向兴地深断裂带次级断裂所控制。兴地断裂以规模大、长期活动为特征,断裂破碎带宽数米至数十米,带内有挤压破碎、劈理化、糜棱岩化,还有大量蛇纹石化纯橄榄岩角砾及透镜状岩块。另外,沿后期活动断裂有辉绿岩脉穿插。且干布拉克杂岩体由蛇纹石化纯橄榄岩、黑云母透辉岩和碳酸岩组成,其长4 km,宽一般为200~600 m,最宽处约1 km,平面上呈透镜状(图1),近东西向延伸,产状与断裂产状一致,总体倾向NNE(约10°),北界倾角60~70°,南界倾角变化较大(38~71°,图2)。岩体具有明显的岩性分带特征,内带为蛇纹石化金云母化纯橄榄岩,被黑云母透辉岩所包围,形成环状的黑云母透辉岩外带,碳酸岩分布于内外带之中。由于风化作用强烈,岩石中金云母和橄榄石等均发生次生蚀变,因此岩体内部各岩相之间相互接触关系不清晰。杂岩体外部含磷

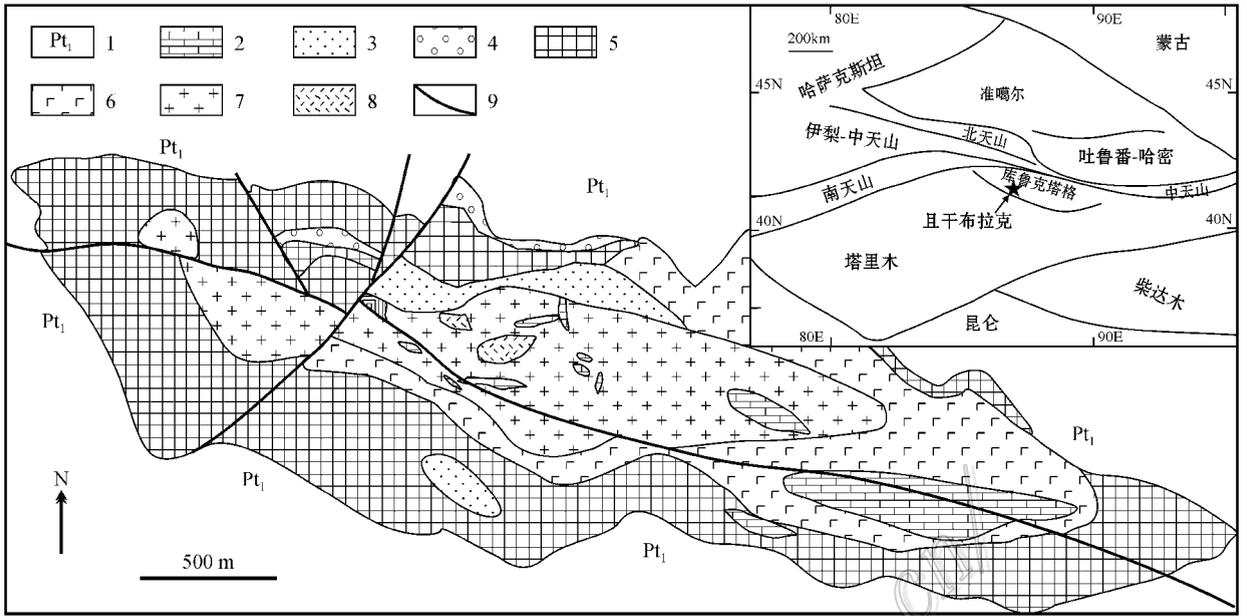


图 1 且干布拉克蛭石矿大地构造位置和矿区地质图(据 Lei et al., 2011 和资料^① 修编)

- 1—古元古界兴地塔格群变质岩；2—含磷灰石碳酸岩；3—蛭石化金云母岩；4—磁铁矿化透辉岩；5—蛭石化含磷灰石黑云母透辉岩；6—蛭石化蛇纹石化金云母透辉岩；7—蛭石化蛇纹石化金云母橄辉岩；8—蛇纹岩残留体；9—断层

Fig. 1 Stretch map of tectonic units and geological map of the Qiganbulake vermiculite deposit (modified after Lei et al., 2011 and Xinjiang BGM, 1988)

- 1—Paleoproterozoic Xiditage Group metamorphic rocks ; 2—Apatite-bearing carbonatite ; 3—Vermiculitized phlogopite ; 4—Magnetized diopside ; 5—Vermiculitized apatite-bearing biotite diopside ; 6—Vermiculitized serpentinized phlogopite diopside ; 7—Vermiculitized serpentinized phlogopite peridotite ; 8—Relic body of rsepentite ; 9—Fault

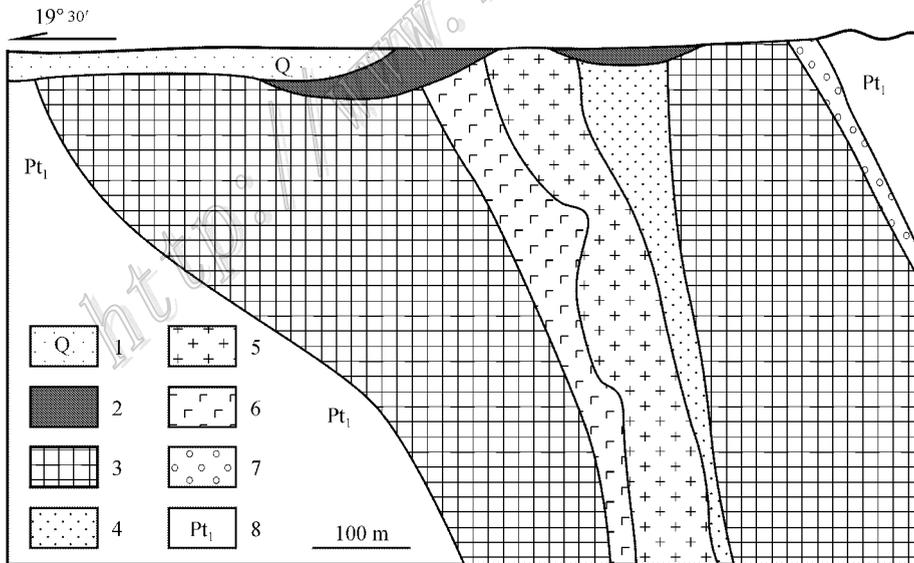


图 2 且干布拉克蛭石矿体地质剖面图(据资料^① 修编)

- 1—第四系；2—蛭石矿体；3—含磷灰石黑云母透辉岩；4—金云母岩；5—蛇纹石化金云母橄辉岩；6—蛇纹石化金云母透辉岩；7—磁铁矿化透辉岩；8—古元古界兴地塔格群变质岩

Fig. 2 Geological and ore body profile of the Qieganbulak vermiculite deposit

- 1—Quaternary ; 2—Vermiculite ore body ; 3—Apatite-bearing biotite diopside ; 4—Phlogopite ; 5—Serpentinized phlogopite peridotite ; 6—Serpentinized phlogopite diopside ; 7—Magnetized diopside ; 8—Paleoproterozoic Xiditage Group metamorphic rocks

① 新疆地质矿产局三大队. 1988. 新疆尉犁县且干布拉克蛭石-磷灰石矿床详勘报告. 1-120.

灰石黑云母透辉岩相侵入于古元古界混合片麻岩和斜长角闪岩中,接触界线清晰,呈波状或港湾状,局部呈脉状插入围岩。

橄榄岩相:该岩相由蛇纹石化纯橄岩和蛇纹石化金云母橄榄岩组成,分布于杂岩体中部,约占杂岩体出露面积的35%。因金云母化和蛇纹石化作用强烈,蛇纹石化纯橄岩大多变为蛇纹岩残留体,呈卵粒状、团块状、角砾状和港湾状悬垂于蛭石化金云母橄榄岩中(图3a),在蛭石化金云母化透辉岩相的内侧也偶尔成群成带出现,分布极不均匀。蛇纹岩残留体小者为0.5~20 cm,大者为40~200 cm,最大者可达200 m。蚀变作用使橄榄岩团块产生蚀变分带,从中心向外依次为胶蛇纹石、纤蛇纹石(叶蛇纹石)和金云母(蛭石)(图3b)。岩石新鲜面呈褐紫色,矿物成分和结构构造均列于表1。地表所见金云母均发生强烈蛭石化。根据镜下以蛇纹石为主和少量橄榄石残晶推断,原岩类型应为纯橄岩及金云母橄榄岩。橄榄岩总体被包裹于透辉岩相之中,两者的界线因强烈风化作用而不清晰。

蛇纹石化金云母橄榄岩的边部,金云母化十分强烈,形成一条相对独立的金云母岩带(图2)。据钻孔资料^①,该岩带由浅至深逐渐变窄,金云母岩中的蛇纹石及橄榄石含量逐渐增加,最后逐渐过度为橄榄岩相。

透辉岩相:该岩相是杂岩体的主体,由含磷灰石黑云母透辉岩、蛇纹石化金云母化透辉岩和磁铁矿化透辉岩组成,约占岩体总面积的60%,其长度即杂岩体的长度(图1)。岩石组合主要为细-粗粒浅灰绿色黑云母透辉岩、伟晶透辉岩及少量深灰绿色磁铁矿透辉岩,与地层呈侵入接触关系并包裹橄榄岩。岩石特征见表1,其中主要矿物透辉石与黑云母均呈

自形-半自形粒状,表明它们为同世代生成。

碳酸岩相:主要由方解石碳酸岩、含磷灰石方解石碳酸岩及伟晶碳酸岩组成,岩体多呈透镜状、脉状分布于上述两岩相带之中(图1)约占杂岩体面积的5%。碳酸岩的主要矿物为方解石,另含不等量的磷灰石自形晶(图3f)和少量金云母(表1),局部可见石墨和磁铁矿条带。碳酸岩相总体较新鲜,受后期风化作用影响较弱,常以正地形分布于橄榄岩相和透辉岩相之中,局部可见其呈侵入于橄榄岩相和透辉岩相。

将且干布拉克杂岩体与世界上典型超大型蛭石矿床含矿杂岩体对比(表2),可以看出,世界上其他地区这类杂岩体均以含有弱碱性-碱性岩石为特征。然而,笔者等的详细野外和室内研究(表1)表明,且干布拉克杂岩体中未见相关碱性岩类(如霓霞岩和霞石正长岩等),仅伴生岩浆碳酸岩。

世界上典型的成矿杂岩体在平面上多具环带构造,其不同岩石类型的侵入顺序一般为橄榄岩→透辉岩→碳酸岩(碱性岩)(Kulp et al., 1954; Bassett, 1959; Boettcher, 1966; PMCLGMS, 1976)。且干布拉克岩体强烈蛇纹石化的纯橄岩被黑云母透辉岩包裹,碳酸岩穿插其中并可见其包裹蛇纹石化纯橄岩和黑云母透辉岩。在与黑云母透辉岩的接触处,纯橄岩转变为金云母岩,并可常见到蛇纹石化橄榄岩呈团块状残留于金云母岩中,且蚀变分带明显(图3c),进一步表明纯橄岩相受到过来自外带黑云母透辉岩的高温蚀变作用。因此,不同岩石类型(表1)的侵入顺序由早至晚应为纯橄岩→黑云母透辉岩→碳酸岩。从纯橄岩到黑云母透辉岩再到碳酸岩,稀土元素含量也系统增加(孙宝生等, 2008),这也与岩浆分异演化规律相一致。

表1 且干布拉克杂岩体不同岩石类型的矿物成分、结构构造和围岩蚀变特征

Table 1 Characteristics of mineral components, texture and wall rock alteration for different types of rocks in Qieganbulak complex body

岩石特征	橄榄岩(纯橄岩)	黑云母透辉岩	碳酸岩
矿物成分及含量	叶(纤)蛇纹石70%~80%,胶蛇纹石15%,金云母15%,少量磁铁矿、透闪石	透辉石65%~90%,黑云母3%~25%,磷灰石3%~28%,磁铁矿2%~3%,少量榴石等	方解石60%~90%,磷灰石28%~5%,金云母3%~5%,少量磁铁矿、蛇纹石,有<20%先成岩石的角砾
结构构造	纤维状变晶、交代假象,网环状结构,块状构造	中粗粒结构、块状构造	中-粗粒,不等粒花岗岩结构及交代蚕食结构,块状、角砾状和带状构造
围岩蚀变	蛇纹石化、滑石化、金云母化	黑云母化、石棉化、透闪石、阳起石化、蛇纹石化	普遍磁铁矿化(原生磁铁矿和橄榄石蛇纹石化金云母化析出的磁铁矿)

① 新疆地质矿产局三大队, 1988. 新疆尉犁县且干布拉克蛭石-磷灰石矿床详勘报告, 1-120.

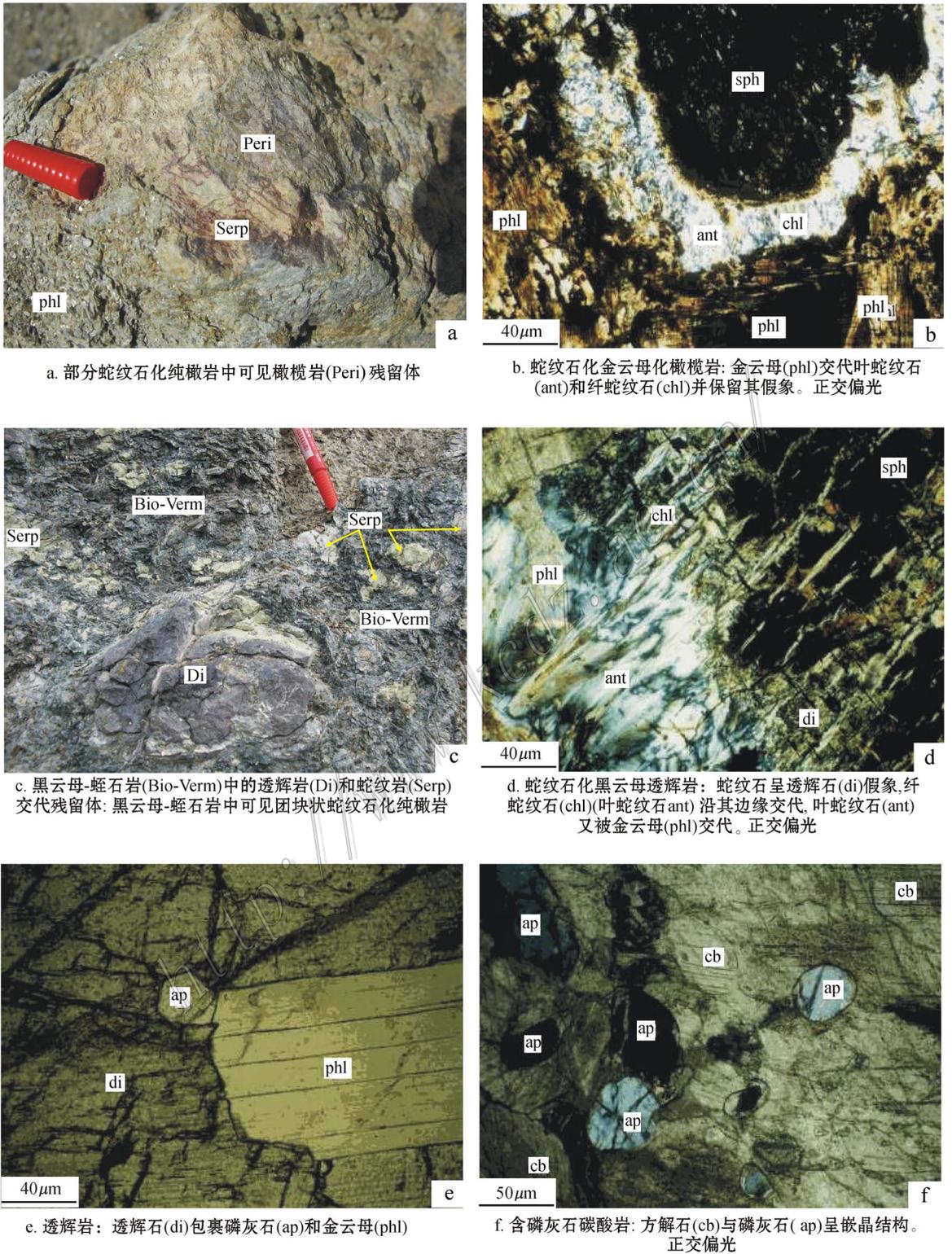


图 3 且干布拉克蛭石矿床野外及显微照片

Fig. 3 Photograph and microphotograph of the Qieganbulak vermiculite deposit

表2 世界典型蛭石矿床含矿杂岩体主要特征对比

Table 2 Petrology and ore composition for typical vermiculite deposits in the world

产地	主要岩石类型	围岩	矿石组合	构造背景
中国且干布拉克	纯橄岩、透辉岩、碳酸岩	古元古代, 兴地塔格群混合片麻岩和斜长角闪岩	透辉石、磷灰石、金云母、黑云母、蛭石	陆内裂谷
南非 Palabora	纯橄岩、辉石岩、正长岩、碳酸岩	太古代, 片麻岩	黄铜矿、黑铜矿、钛铁矿、磷灰石、金云母、蛭石	陆内裂谷
美国 Libby	辉石岩、正长岩、碳酸岩	元古代, 泥岩、片岩	蛭石	陆内活动带
俄罗斯 Kovdorsk	橄榄岩、辉石岩、碱性岩、碳酸岩	古元古代—古生代, 火山-沉积变质杂岩	磷灰石、磁铁矿、金云母、蛭石	陆内裂谷

3 矿床地质

且干布拉克杂岩体本身构成了一个超大型综合性的非金属矿床, 包括有蛭石、磷灰石、金云母和透辉石等矿种, 另外矿床中还伴生有磁铁矿。从综合利用的角度, 它几乎很少有废石。实际上岩体即是矿体, 蛭石矿为且干布拉克杂岩体表生风化作用的产物, 本文重点探讨蛭石及其原生矿物金云母的矿床地质特征和成因。

且干布拉克蛭石矿体总体呈盖状产于岩体上方, 在金云母岩、蛇纹石化金云母化橄榄岩、蛇纹石化金云母化透辉岩矿体最厚, 纯度最高, 而从中心向岩体外侧, 矿体厚度有逐渐变薄的趋势。根据蛭石矿的原岩类型将其分为蛇纹石化纯橄岩型金云母-蛭石矿石和透辉岩型蛭石矿石。

3.1 矿石类型

根据不同矿种所赋存的主岩不同, 可将其分为不同自然类型矿石。

蛇纹化纯橄岩型金云母-蛭石矿石: 该类矿石分布于蛇纹化金云母橄榄岩中及金云母化含磷灰石黑云母透辉岩的接触部位。近地表为蛭石矿体, 向下过渡为金云母矿体。矿体形态受岩体内原生裂隙系统所制约。底板的层节理数量每平方米内可达5~12条, 层节理产状 $350\sim 20^\circ \angle 50\sim 80^\circ$, 其次还受冷缩网纹裂隙控制, 形成细脉状、网环状矿体。矿体走向约 100° , 长约3000 m, 平均宽410 m, 平均厚度20~40 m, 局部出露于地表, 大部分被第四系所覆盖。该类型矿石占蛭石矿体总量的80%~85%。

蛭石矿石呈金黄色、浅棕色, 片状变晶结构, 砾状构造、块状构造和浸染状构造。主要矿物蛭石含量为68%~97%, 还有浑圆状和不规则状蛇纹石化纯橄岩残块, 含量为0~30%不等, 另外, 在矿体边缘可见少量透辉石晶体或晶团, 透辉石含量一般为1%~

5%。

蛭石化深度从地表向下20~40 m, 矿体底界与基岩侵蚀面同步变化(殷宝祥, 1992), 与下部的金云母岩、黑云母岩或黑云母透辉岩呈连续过渡关系, 两者都有相同的矿物组合(磁铁矿、磷灰石)和残留的蛇纹石化纯橄岩块, 见有蛭石交代金云母或黑云母的现象。殷宝祥(1992)对蛭石和金云母的化学成分进行了大量分析, 结果表明, 该矿床中的蛭石的 Fe_2O_3 含量明显高于其 FeO 含量, 平均氧化系数为10.02, 而金云母的 Fe_2O_3 含量明显低于其 FeO 含量, 平均氧化系数为0.72, 显示出金云母蛭石化过程中氧化系数逐渐升高。孙宝生等(2008)发现, 该蛭石中Ca和Na含量高于其原生矿物金云母, 说明金云母的蛭石化过程中有大气降水加入。

相对于蛭石, 本矿床中的金云母储量、规模更大, 在空间上与蛇纹化纯橄岩体分布一致(图1、2), 出露长度约2000 m, 平均宽度410 m左右, 已控制深度260 m(未见底)。金云母矿石呈棕褐色, 块状构造, 中粗粒鳞片变晶结构, 交代残留结构, 主要矿物为金云母, 体积分数50%~90%, 次要矿物为磁铁矿(1%~2%), 少量斜锆石和磷灰石等副矿物。矿石内有大小不等的蛇纹石化橄榄岩残留体(图3a)。

透辉岩型蛭石矿石: 该矿石占蛭石矿床储量的20%~15%, 主要分布在透辉岩和蛇纹石化纯橄岩的接触带上, 与二者呈过渡关系。出露宽度约20~30 m, 长100~300 m, 隐伏长约2000 m。部分矿体呈脉状、囊状和不规则状赋存于透辉岩体内。

矿石呈黄绿色, 中粗粒, 他形-半自形结构, 稀疏浸染状-稠密浸染状构造、块状构造, 含量30%~50%。主要矿物蛭石呈金黄色、棕褐色, 油脂光泽, 2~4 mm。伴生矿物有透辉石、磷灰石和磁铁矿, 其中透辉石呈灰绿色, 中粒、半自形-自形, 短柱状, 含量为5%~10%, 磷灰石和磁铁矿分布在透辉石晶粒之间, 磷灰石含量高时可直接构成磷灰石矿石。

除蛭石矿石外,本岩体中还伴生有磷灰石矿石,此类矿石主要赋存于黑云母透辉岩和碳酸岩体(脉)内(图 2)。目前已圈定的矿体有 20 个,最大矿体 900 m×54 m,最小矿体 100 m×20 m,延深大于 400 m。

3.2 矿物共生关系

杂岩体主体岩石蛇纹石化纯橄岩(金云母橄榄岩)和黑云母透辉岩经自变质作用和后期岩浆热液叠加作用先后发生了强烈的岩石化学成分的变化,进而形成了不同的矿物组合。镜下鉴定可将其分为 2 个原岩系列:

纯橄岩(橄榄岩)序列:纯橄岩(橄榄岩)经强烈的蛇纹石化形成蛇纹石化纯橄岩,而后蛇纹石化纯橄岩又被强烈的金云母化,使原岩中的橄榄石(蛇纹石)从 85%~95% 减至 3%~10%,金云母从小于 15% 增至 60%~90%,进而蚀变成金云母岩。蚀变顺序为:橄榄石→胶蛇纹石→纤蛇纹石(叶蛇纹石)→金云母(图 3b)→蛭石(由金云母风化而成)。本区主要为叶蛇纹石经后期蚀变作用形成金云母,而未见橄榄石直接反应生成金云母。

透辉岩序列:透辉岩在黑云母化(金云母化)过程中,主要矿物成分透辉石从黑云母透辉岩的 65%~90% 减至黑云母岩的 5%~10%,黑云母从 3%~25% 增至 80%~90%。透辉石蚀变顺序为:透辉石→蛇纹石化(纤闪石化)→黑云母化(金云母化)(图 3d)→蛭石化。新鲜透辉石巨晶中可见透辉石包裹自形磷灰石和金云母晶体,从而表明岩浆热液过渡期也可形成部分磷灰石和金云母(图 3e)。孙宝生等(2008)研究表明,从蛇纹石化橄榄岩到金云母岩,其 $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 由 0.52% 增至 12%, $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 从 0.82% 增至 13.14%, $\omega(\text{SiO}_2)$ 从 35.53% 增至 39.97%,而从透辉岩至黑云母岩,其 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 从 4.13% 增至 15.20%, $\omega(\text{SiO}_2)$ 从 43.6% 减至 42.9%,这与透辉岩黑云母化(金云母化)过程中 K_2O 和 Al_2O_3 带入以及 CaO 和 SiO_2 的带出有关。

Kulp 等(1954)研究认为,美国 Day Book 蛭石矿床的矿物蚀变顺序为橄榄石→滑石(纤闪石)→黑云母→蛭石,而 Bassett(1959)认为美国 Libby 蛭石矿床的矿物蚀变顺序为辉石→石棉(透闪石-阳起石)→黑云母→蛭石。本文得出的且干布拉克蛭石矿床蚀变产生的矿物组合与生成顺序与上述 2 个矿床蚀变产生的矿物组合不完全相同,可能是由于形成两类矿床的流体组分或原矿物成分不同所致。

4 讨论

4.1 岩石成因

根据杂岩体中不同岩石类型的接触关系,即黑云母透辉岩包裹橄榄岩,而碳酸岩侵入二者之中,表明从早到晚岩浆侵入顺序为橄榄岩-黑云母透辉岩-碳酸岩。从纯橄岩到黑云母透辉岩再到碳酸岩,稀土元素含量增加(孙宝生等,2008),指示这 3 个岩相是同源岩浆演化的产物,并在侵入过程中发生分异和脉动侵入(同期多阶段侵入)。杂岩体中大离子亲石元素的富集(Zhang et al., 2007; 孙宝生等, 2008)说明岩浆的形成与地幔交代作用有关。蛇纹石化纯橄岩(金云母岩)蚀变黑云母透辉岩和碳酸岩的 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 初始比为 0.704 4~0.704 6(孙宝生等, 2007),属幔源超基性岩岩浆系列范畴,透辉岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为 +1.3‰~+2.86‰(陈国耀, 1989),属地幔硫范畴(-1‰~+3‰)。这些同位素特征值均说明该杂岩体岩浆源于上地幔。

一般认为该类型杂岩体就位机制与裂谷作用有关,如南非 Palabora 含矿杂岩体就产在东非裂谷系相关的热点区之中,而科拉半岛的 Kovdorsk 矿床产在陆内裂谷内(Mitchell et al., 1981)。且干布拉克含矿杂岩体位于库鲁克塔格南缘活动带,即塔北裂谷带的一部分。根据杂岩体 Sm-Nd、Rb-Sr 全岩-矿物获得的等时线年龄为 802~803 Ma(孙宝生等, 2007)和盖层沉积建造,笔者认为该区伸展或裂陷可能始于 800 Ma 左右,相当于塔里木运动时期,与全球 Rodinia 超大陆裂解时间一致(Li et al., 1996; 陆松年, 1998; Zhang et al., 2007)。因此,且干布拉克杂岩体是塔北裂谷岩浆活动的产物,也是对新元古代全球 Rodinia 超大陆裂解的响应。

4.2 成矿流体特征

根据蚀变岩(蛇纹石化纯橄岩、金云母岩、黑云母岩)和蛭石矿石的矿物共生组合特征,可将且干布拉克蛭石矿床形成过程中的成矿流体分为 2 类:与超基性岩浆作用有关的高温热液和与大气降水有关的流体。

与超基性岩浆作用有关的高温热液以富钾和钠为特征(陈国耀, 1989; 殷宝祥, 1992),富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)(Zhang et al., 2007),与初始裂解背景下富集岩石圈地幔部分熔融

所产生的熔体组分有一定的亲源性(Dalton et al., 1993; 1998; Hilary et al., 2005; Brassinnes et al., 2005)。陈国耀(1989)通过金云母的氧同位素组成的分析认为,且干布拉克杂岩体中的金云母中羟基的 $\delta^{18}\text{O}$ 与杂岩体中岩浆碳酸岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 均与超基性岩浆岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 相一致,而明显不同于变质水和大气水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Hoefs, 1987)。此外,金母云岩的Ar-Ar等时年龄及透辉岩中锆石的SHRIMP U-Pb年龄及碳酸岩中斜锆石的TIMS U-Pb年龄在误差范围内一致,均为800 Ma左右(Zhang et al., 2007),与孙宝生等(2007)利用纯橄岩、透辉岩、碳酸岩和其中副矿物分析获得的Rb-Sr及Sm-Nd等时线年龄为802 Ma也相吻合,从同位素年代学的角度证明形成金云母的蚀变流体与杂岩体岩浆活动大体同期。

与金云母及黑云母蛭石化有关的流体主要与大

气降水有关,接近地表和渗透性好的地段,云母的蛭石化程度高。陈国耀(1989)分析了蛭石的氢同位素,结果表明其 δD 值为 -60‰ 左右,与新疆现代荒漠区大气水 δD 值 -40‰ 基本一致,表明导致云母蚀变成蛭石的流体主要为大气降水。

4.3 矿床成因

根据岩相学的观察结果和对前人在该区的岩石地球化学研究结果,可将且干布拉克蛭石矿床分为2个成矿期,即岩浆-热液成矿期和风化成矿期。

岩浆-热液成矿期:幔源超基性岩浆随地幔上隆,并沿裂谷作用产生的深断裂侵入而冷凝成橄榄岩岩体,深部岩浆房发生岩浆分异作用产生透辉岩岩浆,并沿先期橄榄岩岩体的构造脆弱带侵入(图4)。碳酸岩岩浆是岩浆演化(不混熔作用)晚期的产物。由于碳酸岩富含挥发分而使其固相线低于橄榄

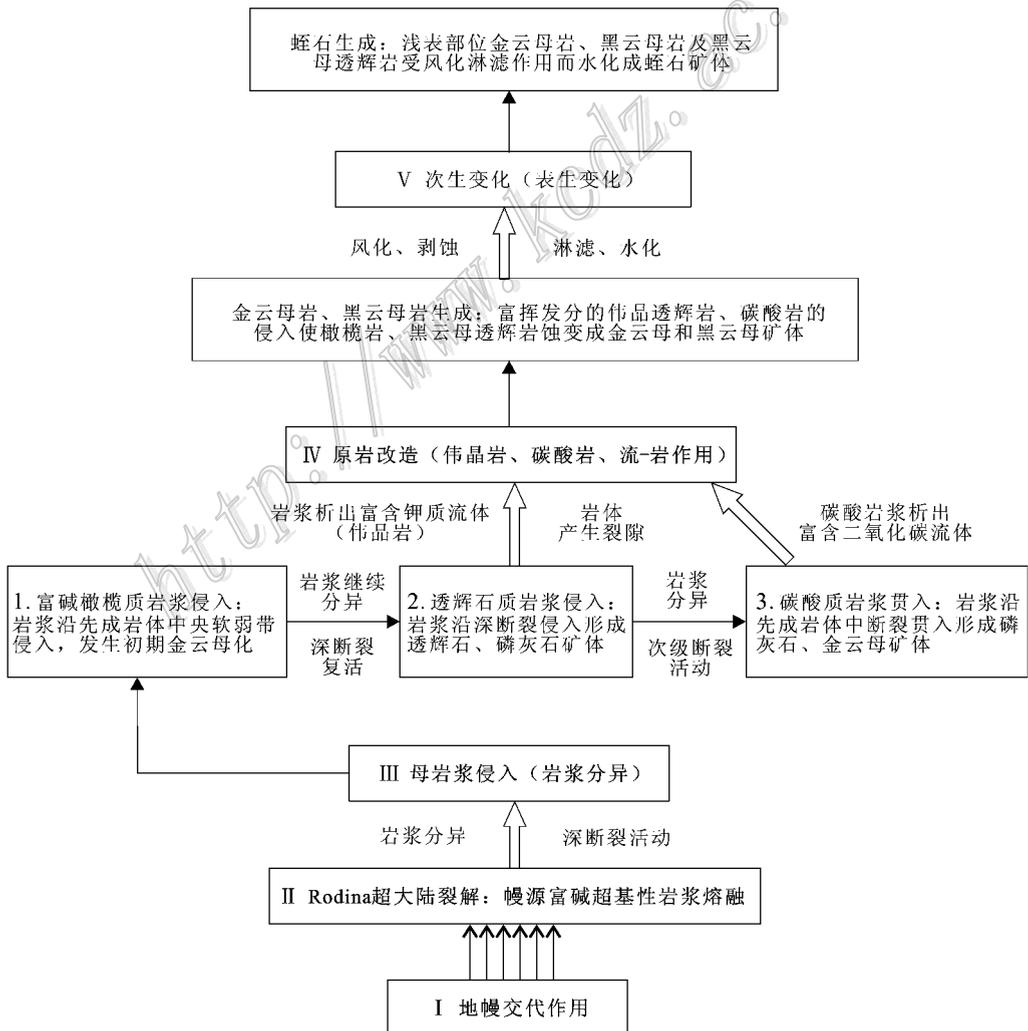


图4 且干布拉克蛭石矿成岩、成矿模式

Fig. 4 Rock-forming and ore-forming model of the Qieganbulak vermiculite deposit

岩和透辉岩,故在两者之后冷凝成碳酸岩体(脉)。透辉岩中的透辉石、磷灰石和碳酸岩中的磷灰石等均可构成岩浆型矿床。金云母岩则主要是由后期多次侵入的黑云母透辉岩提供的热流体交代蛇纹石化纯橄岩而成,最后侵入的富含挥发分的碳酸岩浆及富钾热液交代早阶段形成的蛇纹石化纯橄岩,产生大量的金云母,而且富钾热液可进一步交代黑云母透辉岩,使其发生金云母化。

风化成矿期:蛭石矿石产出特征和前人研究结果均表明,蛭石主要是金云母和黑云母在浅部发生水化作用(地表水的渗透淋滤作用)的产物(Farmer et al., 1970; Reichenbach et al., 1994)。且干布拉克矿床处于板内剥蚀区-堆积准平原带,其地貌和气候有利于风化作用的进行。地表附近的金云母岩、黑云母岩及部分黑云母透辉岩,在长期风化作用和渗透淋滤下,在中-弱碱性环境中,金云母和黑云母中的 Fe^{2+} 大部分被氧化成 Fe^{3+} ,而被Na、Ca、Mg置换出的 K^+ 则随水流失,晶体结构中加入水,从而使它们转变为蛭石而构成风化矿床。

4.4 成岩成矿模式

由上述各项分析可知,该矿床是经岩浆作用、热液蚀变和风化作用形成的一个超大型复合型矿床,可以将且干布拉克杂岩体形成和成矿过程归纳为:地幔交代-裂谷作用-岩浆活动-热液蚀变-表生风化等5个阶段,相关成岩、成矿模式示于图4。

5 结论

且干布拉克杂岩体是产生于裂谷背景下,富集岩石圈地幔低程度部分熔融岩浆经岩浆分异和不混熔作用并以橄辉岩-黑云母透辉岩-碳酸岩等岩相依次侵入的产物。且干布拉克蛭石矿床中的金云母是岩浆晚期高温富碱质热液交代超基性岩的产物,云母类矿物在剥蚀到近地表后,在大气降水的作用下发生表生风化最终形成蛭石矿床。矿床的形成过程复杂,经历了从地幔交代、超大陆裂解、岩浆分异、热液蚀变到表生风化作用的五大地质过程。

志谢 新疆大学地勘学院孙宝生教授参与了早期工作,郭瑞清博士、展新中硕士、王威硕士和郭寅硕士参与了部分野外考察与采样工作,作者等谨致谢忱。

参考文献/References

- 陈国耀. 1989. 尉犁蛭石矿床的地质特征及成因探讨[J]. 新疆地质, 7(1): 1-14.
- 高振家, 陈晋镛, 陆松年. 1993. 新疆北部前寒武纪[A]. 见: 地质矿产部《前寒武纪地质》编辑委员会编. 中国前寒武纪地质(第6号)[M]. 北京: 地质出版社. 18-26.
- 郭召杰, 刘树文, 张志诚. 1998. 库鲁克塔格-星星峡是古生代末天山最高地区[J]. 新疆地质, 16(4): 381-387.
- 胡霏琴, 王中刚, 涂光炽等. 1997. 新疆北部同位素地质演化及成岩成矿规律[M]. 北京: 科学出版社. 1-246.
- 黄建华, 孙宝生, 顾连兴, 王新, 曹辉兰. 2001. 超大型蛭石矿床成矿系列及矿床成因模式——以新疆尉犁碱性超基性碳酸岩建造为例[J]. 新疆地质, 19(2): 111-114.
- 姜常义, 卢登蓉, 白开寅, 张蓬勃, 叶书锋, 冯金星, 陈文革. 2005. 大陆岩石圈地幔交代作用的产物——且干布拉克蛭石矿床[J]. 岩石学报, 21(1): 201-210.
- 陆松年. 1998. 前寒武纪成矿作用研究进展评述[A]. 陈毓川, 主编. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京: 地震出版社. 162-167.
- 孙宝生, 黄建华. 2007. 新疆且干布拉克超基性岩-碳酸岩杂岩体Sm-Nd同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(7): 1611-1616.
- 孙宝生, 周可法. 2008. 新疆且干布拉克超基性岩-碳酸岩杂岩体地质特征和地球化学研究[J]. 干旱区地理, 31(5): 633-642.
- 殷宝祥. 1992. 新疆尉犁县且干布拉克蛭石矿床成因及矿床成因模式探讨[J]. 新疆地质, 10(1): 6-22.
- 邹天人, 徐钰, 杨岳清. 1998. 新疆塔里木盆地北缘碱性岩及其成矿作用[J]. 矿床地质, (增刊): 71-72.
- 邹天人, 徐钰, 陈伟十. 2002. 塔里木北缘碱性岩型稀有稀土矿床[J]. 地质论评, (增刊): 845-848.
- Bassett W A. 1959. The origin of the vermiculite deposit at Libby, Montana[J]. The American Mineralogist, 44: 282-299.
- Boettcher A L. 1966. The rainy Creek alkaline-ultramafic igneous complex near Libby, Montana. I: ultramafic rocks and fensit[J]. Econ. Geol., 61: 526-553.
- Brassines S, Balaganskaya E and Demaiffe D. 2005. Magmatic evolution of the differentiated ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion of Vuoriyarvi (Kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS study of apatite[J]. Lithos, 85: 76-92.
- Dalton J A and Wood B J. 1993. The composition of primary carbonate melts and their evolution through wall-rock reaction in the mantle[J]. Earth Planetary Science Letter, 199: 511-525.
- Dalton J A and Presnall D C. 1998. The continuum of primary carbonatitic-kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: data from the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂ at 6 GPa[J]. Journal of Petrology, 39: 1953-1964.
- Evans A M. 1993. Ore geology and industrial minerals[M]. An introduction, third ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 1-389.
- Farmer V C and Wilson M J. 1970. Experimental conversion of Biotite

- to hydrobiotite [J]. *Nature* , 226 : 841-842.
- Frank D and Edmond L. 2001. Feasibility for identifying mineralogical and geochemical tracers for vermiculite ore deposits [J]. United States Environmental Protection Agency , 910-R-01-002.
- Hilary D , Elena B , Andrew B , Ruslan L and Daniel D. 2005. Petrogenetic processes in the ultramafic , alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola alkaline province : A review [J]. *Lithos* 85 , 48-75.
- Hoefs J. 1987. *Stable isotope geochemistry* [M]. Berlin : Springer. 30-90.
- Huang B C , Xu B , Zhang C X , Li Y A and Zhu R X. 2005. Paleomagnetism of the Baiyisi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim , Northwest China : A continental fragment of Neoproterozoic Western Australia [J]. *Precambrian Research* , 142 : 83-92.
- Kulp J L and Brobst D A. 1954. Notes on the dunite and the geochemistry of vermiculite at the Day book dunite deposit , Yancey Country , North Carolina [J]. *Econ. Geol.* , 49 (2) : 1-14.
- Lei R X , Wu C Z , Gu L X , Zhang Z Z , Chi G X and Jiang Y H. 2011. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the Xingxingxia granodiorite from the Central Tianshan zone (NW China) : Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids [J]. *Gondwana Research* , 20 : 582-593.
- Li Z X and Powell C. 1996. Breakup of Rodinia and Gondwanaland and assembly of Asia and Austral [J]. *Journal of Earth Sciences* , 43 : 591-592.
- Mitchell A H G and Garson M S. 1981. Mineral deposit and global tectonic settings [M]. London : Academic Press. 28-86.
- PMCLGMS. 1976. The geology and the economic deposits of copper , iron and vermiculite in Palabora Igneous Complex : A brief review [J]. *Econ. Geol.* , 71 : 177-192.
- Reichenbach H G V and Beyer J. 1994. Dehydration and rehydration of vermiculites : I. Phlogopitic Mg-vermiculite [J]. *Clay Minerals* , 29 : 327-340.
- Vorovikov P P. 1973. Genetic types , conditions of formation and economic evaluation of vermiculite deposits [A]. In : Daragan V K , ed. *Perlite and vermiculite (Geology , exploration and production technology)* [C]. Translated from Russian and published for the U. S. Department of the Interior , Geological Survey and the National Science Foundation , Washington D. C. by the Indian National Scientific Documentation Centre. New Delhi. 139-176.
- Xu B , Jian P , Zheng H F , Zou H B , Zhang L F and Liu D Y. 2005. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China : Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations [J]. *Precambrian Research* , 136 : 107-123.
- Zhang C L , Li X H , Li Z X , Lu S L , Ye H M and Li H M. 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Qurruqtagh of northeastern Tarim Block , western China : Geochronology , geochemistry and tectonic implications [J]. *Precambrian Research* , 152 : 149-169.

<http://www.kcglw.com>