云南文山官房钨矿床团山矿段围岩蚀变与矿化规律研究

张亚辉，张世涛，冯明刚，刘小波，孙琦森，张 博

（昆明理工大学 国土资源工程学院，云南 昆明 650093）

摘要：云南省文山县官房白钨矿床属于中—大型矽卡岩型白钨矿床。矿区内围岩蚀变强烈，蚀变分带明显，依据蚀变岩岩相学及岩石化学测试结果，并结合钻孔编录资料，将团山矿段围岩蚀变划分为3个蚀变带，自花岗岩体向外依次为金云母－绿帘石化带→透辉石－透闪石化带→镁橄榄石化带。通过对各蚀变带中岩石组分迁移量分析认为：在团山矿段热液蚀变及白钨矿化过程中，来自花岗质岩浆热液的Al_2O_3、SiO_2、TFe、K_2O、Na_2O迁入，灰岩（白云质灰岩）中MgO、CaO迁出，团山矿段白钨矿化主要发生在透辉石－透闪石化带中，矿体产状与透辉石－透闪石带产状基本一致，橄榄石化带中钨矿化相对较弱，金云母－绿帘石化带中仅可见零星钨矿化。这一研究成果将对文山官房钨矿床成矿规律研究以及矿区进一步找矿提供重要的理论依据。

关键词：钨矿床；矿化蚀变；成矿规律；文山官房；云南

中图分类号：P618.67 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8527(2011)04－0740－10

Regularity of Wall Rock Alteration and Mineralization in the Tuanshan Ore Section, Guanfang Scheelite Ore Deposit, Wenshan, Yunnan

ZHANG Ya-hui, ZHANG Shi-tao, FENG Ming-gang, LIU Xiao-bo, SUN Qi-sen, ZHANG bo

(*Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Sciences and Technology, Kunming, Yunnan* 650093, *China*)

Abstract: The Wenshan scheelite ore deposit is a medium-large skarn-type scheelite deposit, which has an intense wall rock alteration and zoning evidently. According to petrography and petrochemistry of alterated rocks, combining with the data of drill hole, three alteration zones are classified from the internal to external zoning of the rock body in the Tuanshan section: phlogopition-epidotization zone→dipsidization-hopfneritation zone→forsteritation zone. Based on transfer amounts of rocks components in all kinds of alteration zones, this paper regards that Al_2O_3, SiO_2, TFe, K_2O, Na_2O coming from granitic thermal water of magma immigrate and MgO, CaO coming from limestone emigrate in the process of thermal water alteration and scheelite mineralization; therefore, we could draw conclusions: scheelite mineralization mainly occurs in dipsidization and hopfneritation zone; ore body attitude is consistent with dipsidization-hopfneritation zone; scheelitee mineralization is relatively weak inforsteritation zone; mineralization can be only found scattered in the phlogopition-epidotization zone. This research would provide important theory basis for ore deposit metallogenic rule and further searching for mine in Guanfang ore field in Wenshan.

Key words: scheelite deposit; mineralization alteration; metallogenic regularity; Guanfang, Wenshan; Yunnan Province

收稿日期：2010－03－19；**改回日期**：2011－06－20；**责任编辑**：戚开静。

基金项目：国家自然科学基金项目(619220090006)。

作者简介：张亚辉，女，博士研究生，1979年出生，矿产普查与勘探专业，主要从事区域成矿研究。Email：yahuizh@126.com。

通信作者：张世涛，男，教授，博士生导师，1965年出生，矿床学专业，主要从事区域地质找矿与研究工作。Email：taogezhang@hotmail.com。

万方数据

0 引　言

滇东南地区是我国重要的锡、银、铅、锌、钨等矿产基地，自西向东分布着个旧、白牛厂和都龙 3 个超大型、大型银锡多金属矿床[1-3]。官房钨矿床团山矿段位于云南省文山县，地处滇东南褶皱带文山—富宁褶皱束薄竹山穹窿南翼。2009 年 8 月以来，昆明理工大学承担了该矿区的详查找矿工作，通过深入研究和工程验证，在团山矿段发现多个钨矿(化)体，见矿厚度为 4 ~ 10 m，钨的品位为 0.11% ~ 1.27%，矿床规模为中型，表明官房矿区找矿潜力巨大。区内围岩蚀变强烈，由花岗岩中心向外，蚀变分带明显。迄今对矿区与花岗岩成矿有关的围岩蚀变研究几乎空白。因此，对矿区蚀变分带特征开展研究将有利于了解蚀变与成矿的关系，并对进一步指导找矿工作具有重要意义。

1 区域地质背景

官房矿区大地构造位置位于滇东南褶皱带文山—富宁褶皱束薄竹山穹窿南翼[4-6]。区域内出露最老地层为震旦系屏边群，为冒地槽型复理石建造；寒武系假整合覆于屏边群之上，下部为浅海相石英砂岩建造，向上渐变为浅海相及滨海相碳酸盐建造和砂泥质建造；奥陶系亦为浅海相碳酸盐建造及砂泥质建造；上古生界及三叠系为一套较厚的碳酸盐建造和砂泥质建造。本区构造变形形成一个环绕越北古陆的呈同心环状展布的弧形构造，并有 NW 向断裂穿插其间，它们主要为晚印支运动的产物。区内的构造隆起部位及 NW 向断裂两侧发育有华力西期与燕山期的酸性侵入岩，主要有文山的薄竹山岩体、马关的都龙岩体及南温河岩体等。在上述岩体的边缘及外围地区发现有多处钨、锡、铅、锌、银等矿床(点)及矿化点[7-10]。

2 矿区地质

官房矿区地层主要出露寒武系、第四系，寒武系出露于矿区的南西部和北西部，自下而上分别为冲庄组、大丫口组和田蓬组(图 1)；其中，大丫口组和田蓬组为主要含矿层位，大丫口组以灰岩、粉砂质泥、粉砂岩为主，田蓬组由粉砂岩、泥质砂岩及少量大理岩组成。地层由北向南逐渐变新，总体倾向为 SE，因受薄竹山花岗岩体的侵入接触变质作用影响，区内形成了广泛的角岩、大理岩和矽卡岩。

官房矿区内褶皱及断裂发育，由薄竹山穹窿和 NW、NE、EW 向 3 组主要断裂组成(图 1)。矿

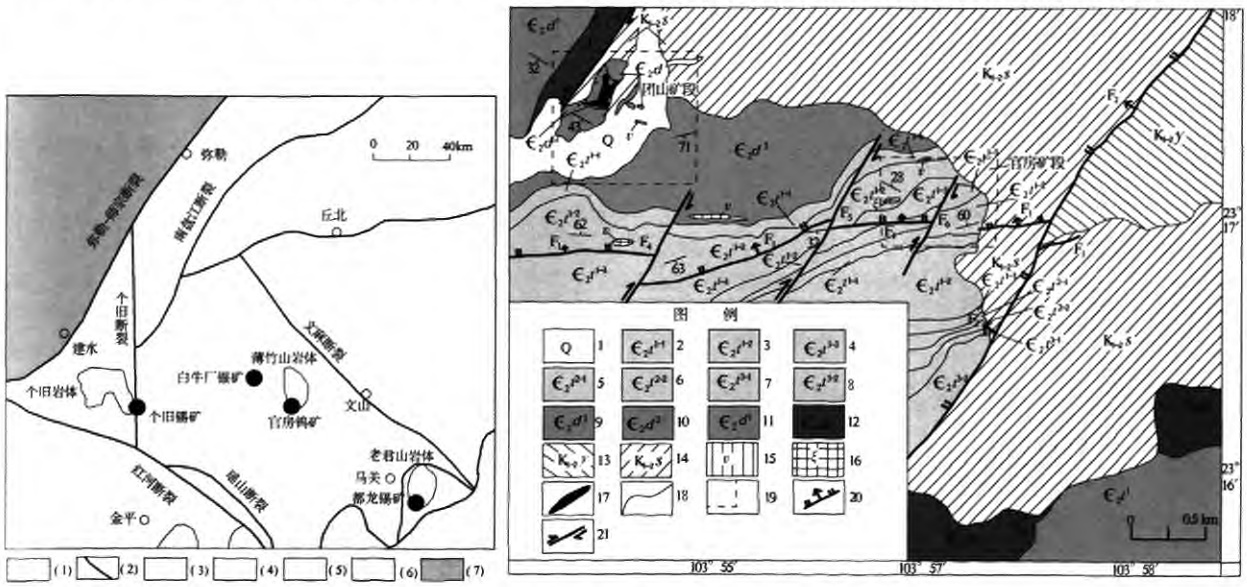


图 1　滇东南地区大地构造位置图和文山官房钨矿区地质简图[5]

Fig. 1　Tectonic setting of southeast Yunnan and geological sketch map of Guanfang scheelite ore deposit in Wenshan [5]

(1)燕山期花岗岩；(2)深大断裂；(3)元古宇地层；(4)南岭褶皱系；(5)哀牢山地块；(6)越北古陆；(7)扬子地台；1. 第四系；2. 田蓬组第一段第一亚段；3. 田蓬组第一段第二亚段；4. 田蓬组第一段第三亚段；5. 田蓬组第二段第一亚段；6. 田蓬组第二段第二亚段；7. 田蓬组第三段第一亚段；8. 田蓬组第三段第二亚段；9. 大丫口组第三段；10. 大丫口组第二段；11. 大丫口组第一段；12. 冲庄组；13. 洋芋树单元；14. 所作底单元；15. 辉长岩；16. 正长岩；17. 钨矿体及编号；18. 地质界线；19. 详查区范围；20. 正断层；21. 平移断层

万方数据

区褶皱位于薄竹山穹窿的南翼，总体属单斜构造，倾向为 SSE。区内主要断裂为正断层(F_1)，位于矿区中部，走向近 EW，倾向 0°～8°，倾角 45°～75°，破碎带宽 1～5 m。断层上盘地层为 $\epsilon_2 t^{1-2}$、$\epsilon_2 t^{1-3}$，下盘地层为 $\epsilon_2 t^{1-3}$，向东延入所作底单元花岗岩中。断层受岩体多次侵位及断裂构造长期活动的影响，呈破碎带产出，在成岩成矿期后形成。

官房矿区位于燕山期薄竹山花岗岩体西南缘。薄竹山岩体呈粗纺锤状沿北西向展布，长轴约 18 km，短轴约 10 km，出露面积近 120 km^2，侵入于寒武系和奥陶系之中，是花岗质岩浆多次涌动侵入形成的复式岩体，受 NE 向背斜和 NW 向断裂构造控制，是滇东南最大的复式岩体之一[11-16]。官房矿区主要出露薄竹山复式岩体所作底和洋芋树单元，位于矿区北东部(图 1)，其岩性为黑云二长花岗岩，呈浅灰白色，似斑状－不等粒结构，块状构造，矿物成分主要为钾长石、斜长石、石英、黑云母，副矿物有锆石、榍石、磷灰石、电气石、堇青石等。岩石化学分析数据表明，矿区花岗岩属于铝过饱和类型，属 S 型花岗岩，是地壳物质重熔岩浆的产物，花岗岩的 Rb-Sr 同位素年龄为(114.09±0.23) Ma[17]，^{206}Pb-^{238}U 加权平均年龄为(87.54 ±0.65) Ma[2]，为燕山晚期侵入岩。

3 矿床地质特征

目前，团山矿段已发现 12 个矿体，其中 3 个主矿体之间近于平行排列，矿体走向为 NNE(图 1)，倾向 SW，倾角约 30°，矿体产状与矿区岩层产状基本一致。矿区内岩体与围岩呈侵入接触关系，界限清楚，接触面大致与地层平行，倾角较缓。团山矿段 3 个主矿体位于矿段中部，赋存于黑云二长花岗岩与大丫口组灰岩接触带上，次要矿体和小矿体多分布于离主矿体 20～100 m 的大理岩、矽卡岩及角岩中。矿体呈不规则透镜状或似层状，总体向 SE 倾伏，倾角 30°～40°。矿体厚度 1.50～18.31 m，平均厚 7.58 m。矿体中钨的品位为 0.11%～1.27%，矿体厚度比较稳定，矿体主要组分分布比较均匀。

矿石矿物成分复杂，主要金属矿物有白钨矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿。矿石中非金属矿物除长石、石英等造岩矿物外，另含不等量的石榴子石、透闪石、金云母、绿帘石、绿泥石、方解石等热液蚀变矿物。

矿石结构主要有粒状变晶结构、交代熔蚀结构、胶状结构等。白钨矿和伴生的主要金属硫化物多呈它形粒状，少数为半自形、自形粒状晶体；矿石构造主要表现为浸染状、块状构造，其次为细脉状构造。

原生矿石的光、薄片中，钨矿物以白钨矿为主，体积分数一般为 2%～3%，主要呈自形—它形粒状浸染于透辉石、透闪石、绿帘石等矿物颗粒间(图 2 中 e 和 f)，部分与石榴子石、电气石、方解石伴生，少量呈细脉分布，粒径为 0.1～0.9 mm。光片中常见镍黄铁矿、黄铜矿沿岩石中微裂隙贯入，以固熔体形式存在，两者互相无交代现象，同时结晶析出(图 2g)；还可见镍黄铁矿交代闪锌矿现象(图 2h)，表明本矿区矿石中金属矿物的生成顺序为白钨矿→磁黄铁矿→闪锌矿→镍黄铁矿。

根据西北大学大陆动力学国家重点实验室测试分析，矿石化学成分为：SiO_2，43.1%；TiO_2，0.35%；Al_2O_3，6.41%；TFe_2O_3，6.41%；MgO，0.59%；MnO，8.45%；CaO，30.36%；K_2O，0.09%；Na_2O，0.14%；P_2O_5，0.13%。主要成矿组分 WO_3 含量平均为 0.69%，矿石中伴生的有益组分为 Cu、Zn 、Ag 等。这些伴生组分主要赋存在镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等矿物中。该矿段矽卡岩中主要特征矿物化学成分见表 1。

表 1 团山矿段矽卡岩特征矿物化学成分(w_B/%)

Table 1 Characteristic mineral chemical compositions of skarn rock in the Tuanshan scheelite section(%)

氧化物	透辉石	镁橄榄石	金云母
SiO_2	54.12	41.64	35.52
TiO_2	0	0.05	0.05
Al_2O_3	0.18	–	14.16
FeO	5.23	4.52	1.80
MnO	2.75	0.18	0.50
MgO	15.18	54.62	30.12
CaO	22.25	0.05	0.85
Na_2O	0	–	0.21
K_2O	0	–	8.93

注：样品分析单位为云南省新材料制备与加工重点实验室。

根据矿物共生组合及交切关系、矿石组构和围岩蚀变特征，本文将该矿床划分为干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段和石英－硫化物阶段 3 个阶段。

万方数据

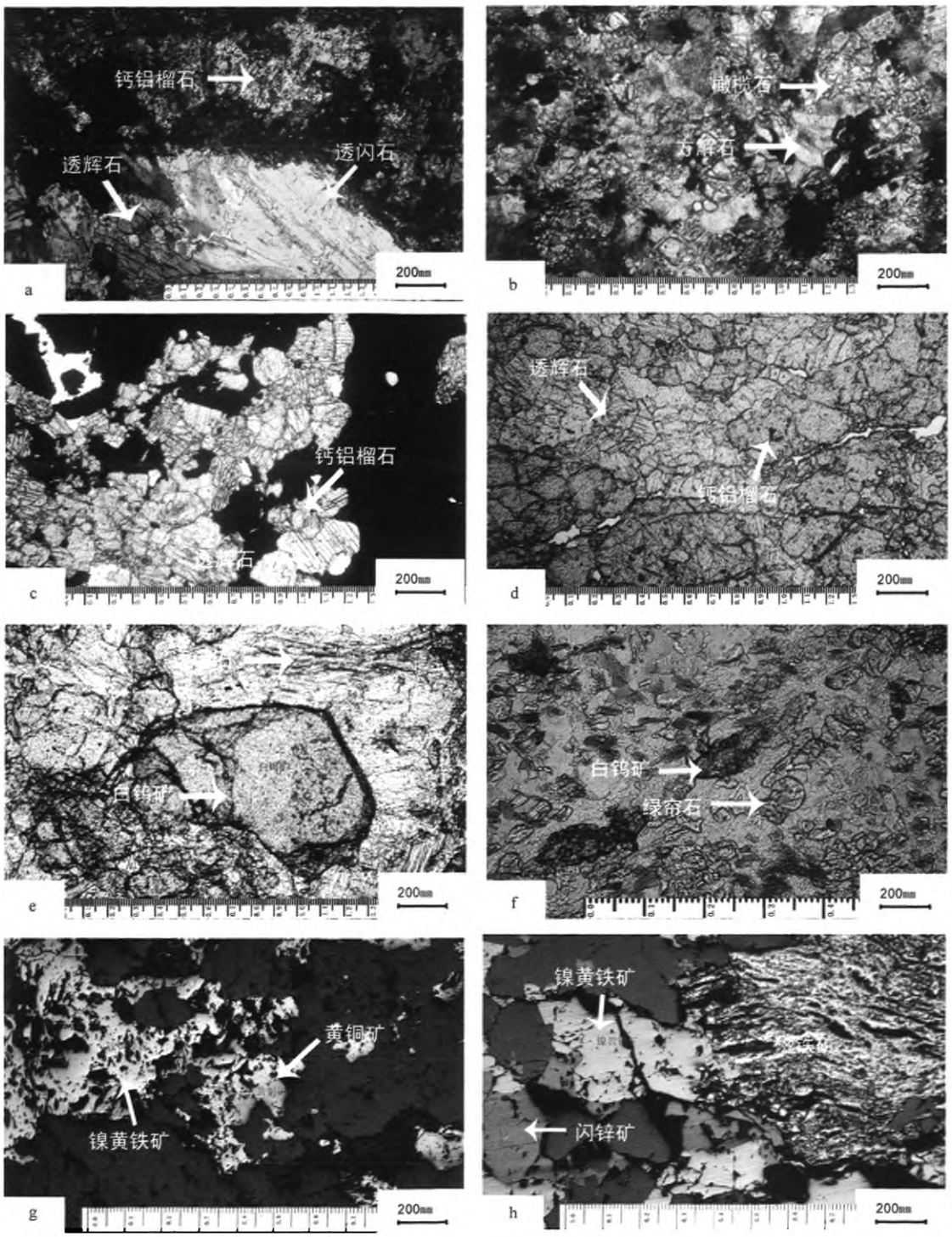


图 2　各种蚀变岩石光薄片镜下照片

Fig. 2　Photographs of rock polished or slice section of different alteration under the microscope

a. 透闪石化，矽卡岩中透闪石呈长柱、纤维状集合体贯入透辉石、钙铝榴石中并交代这两种矿物(薄片)；b. 镁橄榄石化，大理岩中镁橄榄石呈脉状贯入方解石中(薄片)；c. 钙铝榴石化，矽卡岩中钙铝榴石沿裂隙贯入透辉石中交代透辉石(薄片)；d. 透辉石化，矽卡岩中透辉石呈脉状贯入并交代钙铝榴石，使其呈残块状(薄片)；e. 白钨矿与透闪石密切共生，为透闪石化作用所形成(薄片)；f. 绿帘石呈浸染状分布于长英质中，并含有少量白钨矿微粒(薄片)；g. 矽卡岩中黄铜矿与镍黄铁矿呈固溶体方式存在，两者互相无交代现象(光片)；h. 镍黄铁矿交代磁黄铁矿现象(光片)

其中，湿矽卡岩阶段为主矿化阶段，此阶段的交代作用主要在高温热液条件下进行，是矽卡岩的主要含矿带，形成的矿石主要有钙钨矿、磁铁矿和锡石。干矽卡岩阶段以生成各种钙镁、铝的岛

万方数据

状、链状、带状和环状等硅酸盐矿物及无游离石英形成为特征；石英－硫化物阶段以铁、铜、铅、锌硫化物及独立形成的石英为特征。

总体来看，团山矿段钨矿化强烈，矿石中钨的品位较高，钨矿化与矽卡岩关系密切，矿体受断裂和接触带共同控制。

4 围岩蚀变

矿体的形成主要与侵入岩、围岩化学性质和物理性质、成矿作用发展及成矿溶液演化等因素有关。该矿区白钨矿体主要赋存于镁质矽卡岩中，其次在黑云二长花岗岩和大理岩、黑云母长英质角岩中也有零星分布。各种蚀变以花岗岩与碳酸盐岩接触带为中心，沿接触带两侧不对称分布，蚀变在空间上界线明显，互相重复出现。

4.1 主要蚀变类型

官房团山矿段围岩蚀变强烈，分布也很广泛，主要蚀变类型有透辉石化、钙铝榴石化、透闪石化、镁橄榄石化、金云母化，各蚀变类型特征如下：

(1)透辉石化是矿区内发生最广泛、最强烈的蚀变类型之一，主要发生于花岗岩与碳酸盐岩接触带中。根据岩石薄片镜下观察，矽卡岩中的透辉石呈脉状贯入并交代钙铝榴石(图 2d)，其为早期矽卡岩化阶段产物，为无矿阶段。

(2)钙铝榴石化主要发生在花岗岩与碳酸盐岩接触带中。其主要表现形式为：透辉石化期后形成的钙铝榴石沿裂隙贯入透辉石、透闪石并交代透辉石(图 2c)。该蚀变类型主要发生在早期矽卡岩化阶段，也是无矿阶段，没有任何金属矿石矿物形成。值得注意的是，在同一矽卡岩化作用过程中，钙铝榴石为最早形成的矽卡岩矿物，透闪石为湿矽卡岩阶段的产物，形成时间较晚，形成温度明显降低。因此，同一矽卡岩化作用过程中钙铝榴石应早于透辉石、透闪石形成。而本区的钙铝榴石化蚀变作用发生时已经有透辉石、透闪石存在。可见区内可能至少发生过两期岩浆事件，矽卡岩形成具有多期多阶段性。

(3)透闪石化是矿区重要的蚀变类型之一，与矿体关系最为密切，其主要表现为晚期形成的透闪石呈长柱状、纤维状集合体贯入透辉石及钙铝榴石中并交代这两种矿物(图 2a)，通常在透闪石中镶嵌有晶体粗大的白钨矿微粒，其为透闪石化作用所形成(图 2e)。该蚀变类型主要发生在晚期矽卡岩化阶段，表现为晚期矿物对早期矿物的交代作用。

(4)铁橄榄石化蚀变发生于透辉石化、透闪石化带外围(接触带上靠岩体外侧)，离岩体几十米至上百米，主要表现为：方柱石呈星点状分布，镁橄榄石呈浑圆状，总体呈脉状贯入方解石中，铁质与镁橄榄石紧密共生(图 2b)，其为热接触交代作用所形成。该蚀变与矿化关系不密切。

(5)由于围岩化学成分和物理性质的不同，金云母化主要分布于矿体顶底板局部地段，该地段有致密状角岩形成。该蚀变类型主要呈雏晶片状杂乱分布于长石、石英间的黑云母部分已蚀变成金云母，该蚀变的形成受热液流失所致，与矿化关系不密切。

(6)钠长石化主要发生在透辉石化、透闪石化后期，主要表现为钠长石呈脉状贯入透辉石、钙铝榴石中并交代这两种矿物，使它们成为残斑、残块状。该蚀变与矿化关系不密切。

(7)绿帘石化蚀变强烈，区内普遍发育，主要表现为：透辉石、斜长石呈残斑、残块状分布于绿帘石及透闪石间，被绿帘石、透闪石及少量白钨矿交代；绿帘石呈脉状贯入方解石中交代方解石；中粒黑云二长花岗岩中黑云母局部发生绿帘石化；绿帘石混杂少量白钨矿呈脉状贯入透辉石中交代透辉石，透辉石呈粒状，大小不一(图 2f)。绿帘石化发生于湿矽卡岩化阶段，与矿化关系密切。

(8)蛇纹石化发生在镁橄榄石化带中，镁橄榄石在地表和浅部很不稳定，常被蛇纹石交代，团山矿段主要表现为镁橄榄石呈浑圆状，裂隙发育，少部分已经蚀变成为蛇纹石但假像尚存。该区蛇纹石化与矿化关系不密切。

4.2 围岩蚀变分带与矿化

矿区围岩蚀变强烈，种类繁多，多期次和多类型蚀变叠加现象较为普遍。根据围岩蚀变组合及矿物组合特征(表 1)，文山官房矿床属于一个较典型的镁矽卡岩矿床。在镁矽卡岩矿床中，交代外带白云岩的常是镁矽卡岩，而交代内带花岗岩的往往是钙矽卡岩[8,18-19]。团山矿段围岩蚀变分带自花岗岩体向外，划分为 3 个带，各蚀变带的空间分布以及蚀变和矿化特征分述如下(图 3)。

4.2.1 透辉石－透闪石化带

该蚀变带位于金云母－绿帘石化带外围，是矿区内最强烈的蚀变带，但分布有限，以透辉石

万方数据

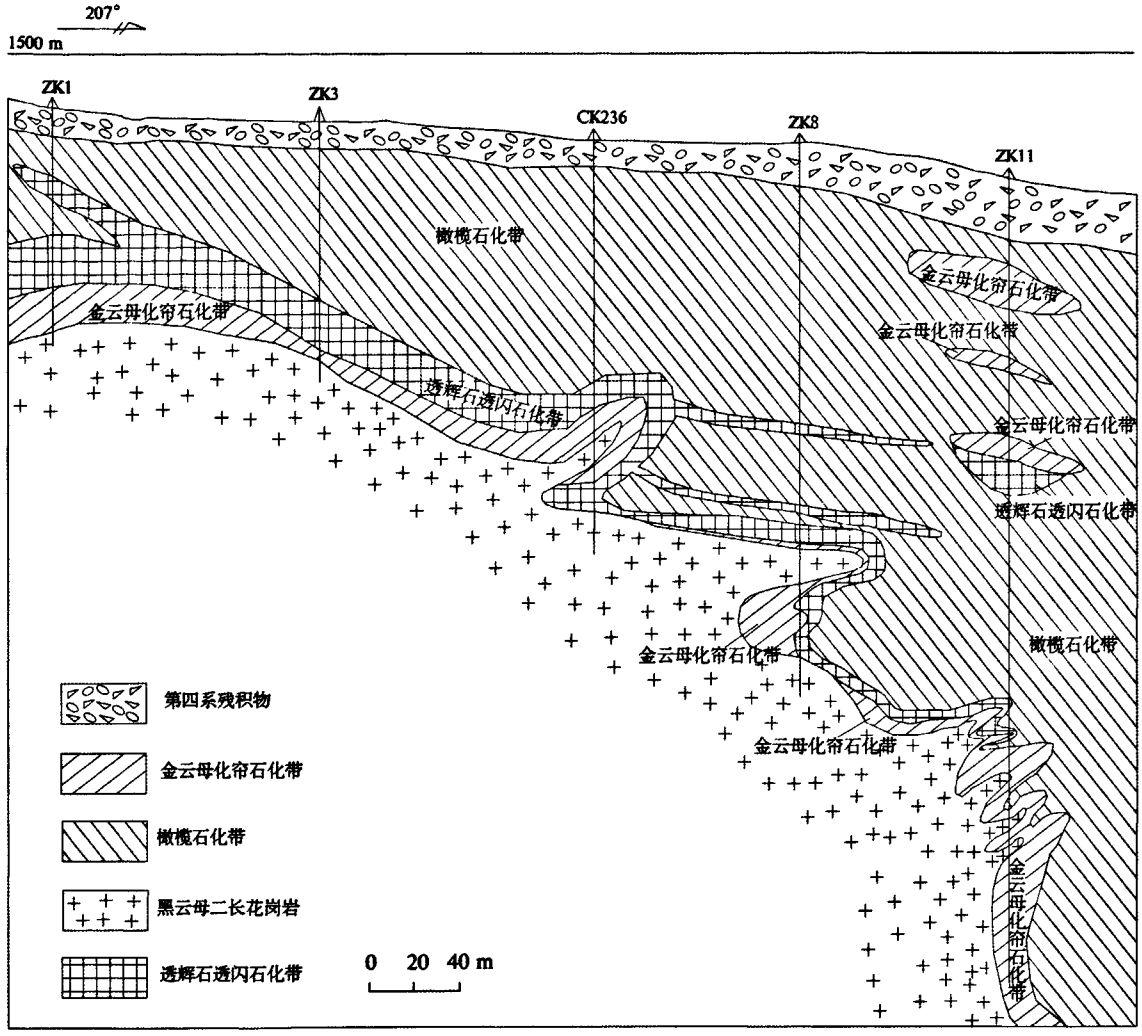


图 3　团山钨矿段围岩蚀变分带纵剖面示意图(据钻孔编录资料)

Fig. 3　Profile of alteration zoning of the Tuanshan scheelite section (after the drilling data)

化和透闪石化为特征，主要矿物有透辉石、透闪石、钙铝榴石、白钨矿、黄铁矿等。

本蚀变带总体呈带状，与岩层倾向相近，是矿区最重要的含矿蚀变带之一。蚀变带内以白钨矿化为主，含少量镍黄铁矿化、黄铜矿化。主要表现为：在矽卡岩中，镍黄铁矿、少量黄铜矿呈稠密浸染状分布，两者呈固溶体方式存在，互相无交代现象，并同时结晶析出。晚期见白钨矿沿岩石中微裂隙贯入透辉石和钙铝榴石中交代这 2 种矿物。在透辉石 - 透闪石化带中，白钨矿化强烈，钨的品位较高，最高可达 3.37%。该带矿物的形成过程分为 3 个阶段：

(1)干矽卡岩阶段：形成围岩与岩体之间靠岩体一侧接触带的干矽卡岩矿物——岛状和链状的无水硅酸盐矿物钙铝榴石、透辉石、硅灰石等。当岩浆侵入到围岩中时，由于接触变质作用产生了热晕圈，生成干矽卡岩；该阶段中，除 H_2O、CO_2 等挥发性组分外，没有非挥发性组分的带入带出，也基本不含矿。

(2)湿矽卡岩阶段：主要以形成湿矽卡岩矿物为主，即透闪石、绿帘石等含水的硅酸盐矿物，该阶段随着岩浆的结晶作用，水热流体逐步析出，此流体与天水混合，沿接触带上升，并在围岩中渗滤，导致早期的无水矽卡岩矿物的带状分布。由碳酸盐岩中引入钙，在侵入体及互层的角岩中形成内矽卡岩(靠岩体一侧)，在碳酸盐岩中加入铁、硅、铝等，形成外矽卡岩(靠岩体外侧)，当与灰岩作用时即产生钙矽卡岩 [7,20-22]。在 OH^- 和 H_2S 等参与和作用下原有矽卡岩矿物透辉石、钙铝榴石形成含水硅酸盐阳起石、透闪石、绿帘石等，溶液中铁以镍黄铁矿形式出现(图 2f)。此阶段的交代作用主要是在高温热液条件下进行，形成

万方数据

主要含矿带，有钙钨矿、锡石、磁铁矿等金属矿物形成。此阶段形成的复杂矽卡岩是成矿的重要标志，也是找矿的重要依据。

(3)石英－硫化物阶段即硫化物沉淀和退化蚀变阶段：矽卡岩形成作用基本结束后，在中温热液条件下，硫化物开始大量沉淀，退化蚀变矿物为含水硅酸盐[2]。该阶段石英和金属硫化物呈细脉浸染状充填、交代早期矽卡岩形成复杂矽卡岩，其次，由于温度的降低，热液带来的二氧化硅开始独立形成石英。此阶段硫化物堆积点产于矽卡岩中以及延伸至矽卡岩体以外的大理岩及角岩中。生成的矿物主要有绿泥石、绿帘石、金云母、长石、碳酸盐、石英和蛇纹石等；金属矿物有镍黄铁矿、磁铁矿、黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿。在矽卡岩化后期，矿段内主要表现为钠长石及石英呈脉状、浸染状贯入透辉石、透闪石中交代矽卡岩矿物，处于矽卡岩内带靠外侧，硅质呈直径 <0.1 mm 的微粒—隐晶状，大部分硅质已结晶成直径 < 0.5 mm 的石英，部分石英呈柱状，并见岩石中包裹石榴透辉石矽卡岩角砾及斑状残留体，说明其原岩为透辉石矽卡岩，后经强烈硅化作用，使得原岩呈残留体状，形成于石英－硫化物阶段；镁橄榄石呈浑圆状，部分蚀变成为蛇纹石且假像尚存。

4.2.2 金云母－绿帘石化带

该带分布于岩体与围岩接触带附近的角岩中，为岩浆上侵过程中，泥质粉砂岩受岩浆热烘烤作用而发生的重结晶作用形成。同时，在岩石中零星可见绿帘石及白钨矿，其白钨矿为绿帘石化作用所形成，该带矿化最弱。

4.2.3 镁橄榄石化带

镁橄榄石化带分布于离接触带几十至上百米的大理岩中，为热接触交代作用所形成。该蚀变带是由于岩浆期后气水热液中的 SiO_2 带入到大理岩中，与大理岩中的镁发生反应形成镁橄榄石。本蚀变带中可见少量白钨矿化，主要为小矿体，推测其为岩浆期后热液与围岩发生接触交代作用所形成。

总体来看，官房矿段围岩蚀变分带性比较明显，自花岗岩体与围岩接触带向外依次为金云母－绿帘石化带→透辉石－透闪石化带→镁橄榄石化带。围岩蚀变主要围绕花岗岩与围岩的接触带分布，并在接触带的外围与碳酸盐岩中选择性成矿，透辉石－透闪石化带中白钨矿化最强烈，镁橄榄石化带中白钨矿化较弱，金云母－绿帘石化带仅有零星白钨矿化现象。矿化与蚀变类型密切相关，蚀变范围远大于矿化范围。

5 围岩蚀变化学元素变化特征

矿区围岩蚀变是热流体活动的结果，对蚀变围岩进行物质组成变化分析有助于了解官房团山白钨矿床成矿流体系统特征及其成矿作用过程。本文运用 Grant(1986) 的计算方法来确定各蚀变岩石物质成分的迁移情况，其计算公式如下：

$$\Delta C = (C_i^F / C_i^A) \times (C^A - C^F)$$

式中：C_i^F 和 C_i^A 分别为未蚀变岩石和蚀变岩石的惰性组分的含量；C^F 和 C^A 分别为未蚀变岩石与蚀变岩石某组分的含量值；ΔC 为蚀变岩石相对于未蚀变岩石某组分的迁移量。选择 TiO_2 作为不活泼组分，计算了各蚀变带内蚀变岩石组分迁移量(表2，表3)。由团山矿段各蚀变带之间的元素迁移关系(图4，图5)可知：

镁橄榄石化带内 SiO_2、TFe、K_2O、Cu 明显富集，而 MgO、CaO、Pb 和 Zn 亏损明显，其余氧化物及 W 元素迁移不明显(图4)。其中，SiO_2 富集表明该带内的热液与花岗质岩浆关系密切；其次，TFe、K_2O、Cu 一定程度的富集也与花岗质岩浆热液的交代有关；MgO、CaO 的亏损表明原岩中的镁离子、钙离子取代岩浆热液中的铁离子、钾离子进入热液中。Cu、Zn 等中低温成矿元素组分亏损，表明成矿流体温度偏高，不利于中低温成矿元素富集；W 迁移量为 0，表明此带中没有钨富

表2 团山钨矿段蚀变岩石元素含量测试结果统计

Table 2 Statistics of element contents in altered rocks in the Tuanshan scheelite section

样品位置	样品数	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	W	Cu	Zn	Pb
金云母－绿帘石化带(Ⅰ)	8	59.99	0.91	15.75	7.71	0.07	4.04	0.9	1.76	7.19	0.21	200	31.4	98.7	31.0
透辉石－透闪石化带(Ⅱ)	8	43.10	0.35	5.82	6.41	0.59	8.45	30.36	0.14	0.09	0.13	12 000	3.0	163.8	10.7
镁橄榄石化带(Ⅲ)	7	24.32	0.36	5.91	1.88	0.06	18.5	24.15	0.23	3.30	0.10	100	11.8	44.6	23.9
白云石大理岩	9	3.20	0.03	0.77	0.80	0.08	21.26	30.17	0.09	0.36	0.02	100	5.6	75.1	103.0

注：样品分析单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室；主要元素含量的单位为%，微量元素含量的单位为 10^{-6}，下同。

万方数据

表 3　团山钨矿段各蚀变带内蚀变岩石组分迁移量

Table 3　Migration of major and trace elements of the different alteration zones in the Tuanshan scheelite section

样品位置	样品数	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	W	Cu	Zn	Pb
金云母－绿帘石化带(Ⅰ)	8	1.872	0.03	0.494	0.23	0	−0.57	−0.96	0.06	0.23	0.01	9E−04	0.85	0.779	−2.37
透辉石－透闪石化带(Ⅱ)	8	3.42	0.03	0.433	0.48	0.04	−1.1	0.016	0	0	0.01	1020	−0.2	7.599	−7.91
镁橄榄石化带(Ⅲ)	7	1.76	0.03	0.028	0.09	0	−0.23	−0.5	0.01	0.25	0.01	0	0.52	−2.54	−6.59

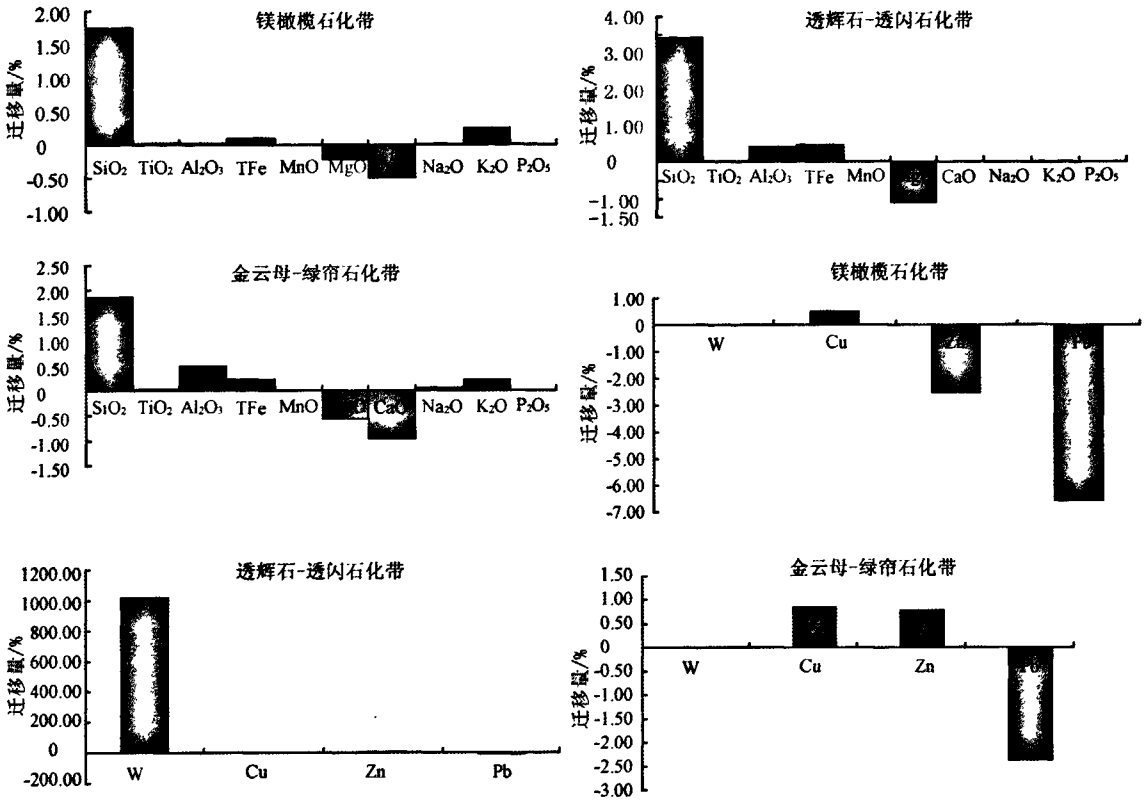


图 4　团山矿段不同蚀变带岩石组分迁移量图

Fig. 4　Migration of major and trace elements for the different alteration zones in the Tuanshan scheelite deposit

集现象，说明镁橄榄石化不利于钨富集成矿。

透辉石－透闪石化带内 SiO_2、TFe、Al_2O_3 明显富集，而 MgO 亏损明显。其中，SiO_2 富集强烈与花岗质岩浆热液的侵入有关；Al_2O_3 富集与钙铝榴石化有关；MgO 亏损表明在透辉石-透闪石化过程中，原岩中的镁离子与花岗质岩浆热液中的铁离子和铝离子发生交换；W 强烈富集与透辉石-透闪石化有关，透辉石－透闪石化利于钨富集成矿。

金云母－绿帘石化带内 SiO_2、TFe、Al_2O_3、K_2O、Na_2O、Cu、Zn 明显富集，而 MgO、CaO、Pb 亏损明显。其中，SiO_2 富集强烈与花岗质岩浆热液的侵入有关；Al_2O_3 迁入、MgO、CaO 迁出表明原岩中的镁离子和钙离子与花岗质岩浆热液中的铁离子和铝离子发生交换，与绿帘石化有关；Pb 迁出、K_2O 迁入表明在该蚀变过程中，原岩中的铅与热液中的钾交换，与金云母化有关；W 迁移量为 0，表明此带中没有钨富集现象，说明金云母-绿帘石化不利于钨富集成矿。

6　讨论与结论

(1)赵一鸣等[8]认为大部分矽卡岩矿床均具有比较明显的蚀变分带性，自侵入体向碳酸盐围岩方向呈现明显的水平或垂直分带，且矿化通常赋存于一定的矽卡岩带中。根据上文分析结果，团山矿段的主要蚀变矿物有透辉石、钙铝榴石、透闪石、钠长石、方柱石、蛇纹石、镁橄榄石、绿帘石、金云母。团山矿段的围岩蚀变呈渐变特点，围岩蚀变分带明显，自岩体向外为金云母化－绿帘石化带→透辉石－透闪石化带→镁橄榄石化带。由此可知，团山矿段的围岩蚀变总体属于镁矽卡岩型蚀变分带。

(2)矽卡岩的矿物成分在很大程度上取决于围

万方数据

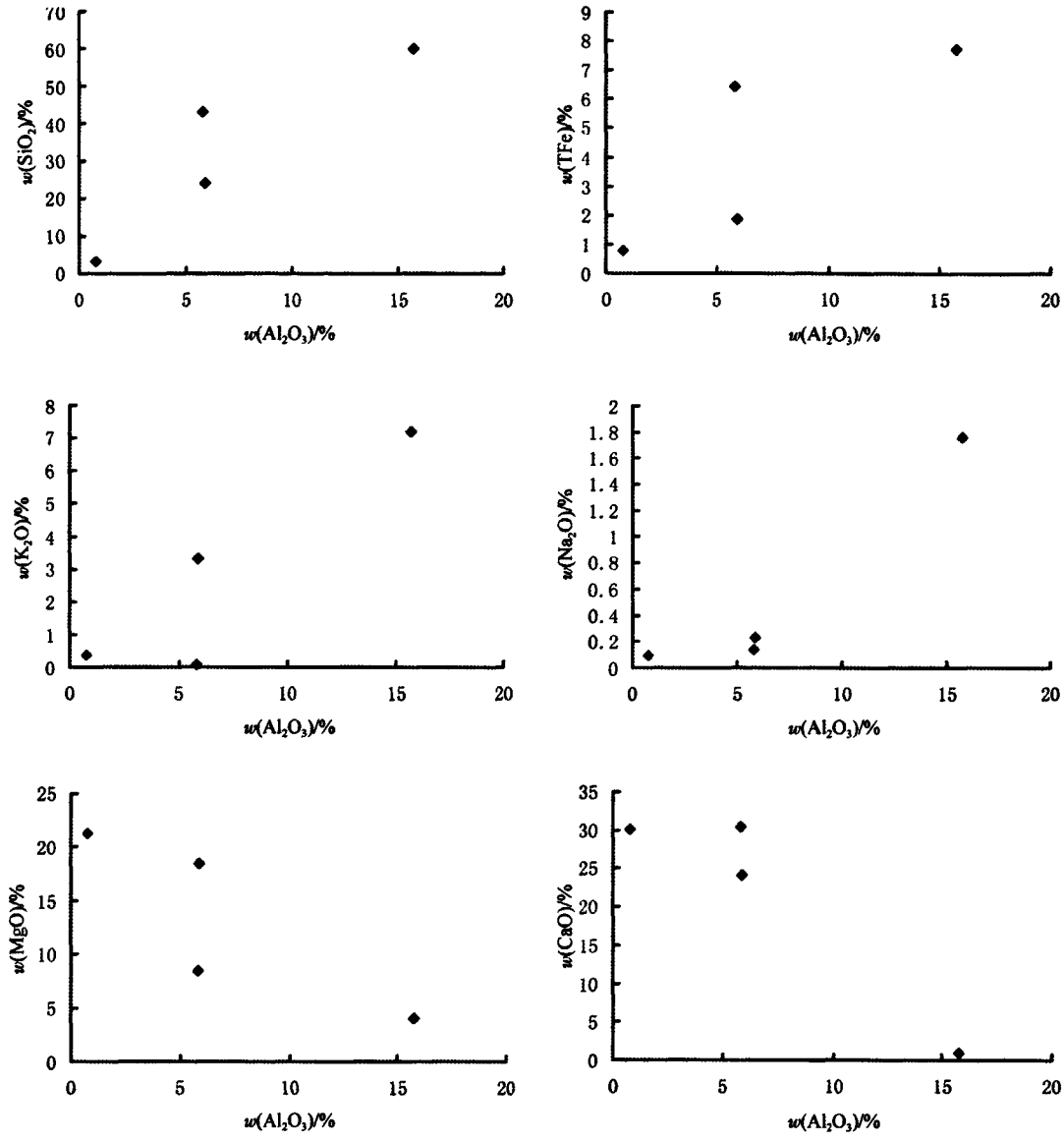


图 5 团山矿段不同蚀变带岩石 Al_2O_3 与其他氧化物含量关系图解

Fig. 5 Charts showing Al_2O_3-other oxides in the rocks for the different alteration zones in the Tuanshan scheelite deposit

岩的成分，一般由灰岩形成的矽卡岩主要由石榴石、透辉石等含钙的硅酸盐矿物组成，而由白云岩或白云质灰岩形成的矽卡岩主要特征矿物有镁橄榄石、金云母等含镁的各种硼酸盐[11]。团山矿段的透辉石－透闪石化带以透辉石、透闪石、钙铝榴石为特征矿物，表明该蚀变带是由岩浆期后含矿热液以渗透交代作用带入大量的 Si、Fe、Al 等元素形成。镁橄榄石化带则以镁橄榄石为主要特征，表明该蚀变带是由岩浆热液与白云质灰岩发生交代作用形成的。此外，位于透辉石－透闪石化带和花岗岩体之间的金云母－绿帘石化带是由花岗岩体和泥质岩经热烘烤作用而形成的。总体来说，蚀变分带受接触带构造和围岩岩性的控制。

(3)团山矿段在其成矿作用过程中始终伴随着组分的迁移，来自花岗质岩浆热液中的 Al_2O_3、SiO_2、TFe、K_2O、Na_2O 迁入，灰岩(白云质灰岩)中的 MgO、CaO 迁出，原岩中的镁离子和钙离子与花岗质岩浆热液中的铁离子和铝离子及钾离子发生交换；在透辉石－透闪石化带中则形成透辉石、透闪石等矿物，同时也使得 W 强烈富集，钨矿化也最为强烈，透辉石-透闪石化有利于钨富集成矿；在镁橄榄石化带形成镁橄榄石大理岩；在金云母－绿泥石化带形成长英质角岩，后两者均为花岗质岩浆热液活动的结果，且与钨矿富集关系不大，镁橄榄石化带中白钨矿化相对较弱，金

万方数据

云母－绿帘石化带中仅可见零星矿化。

(4)透辉石－透闪石化带产于岩体与围岩的接触带及层间裂隙中，距离岩体与围岩接触面以上几十米至一百多米，为矿区主要含矿蚀变带，矿体产状与透辉石－透闪石化带产状基本一致；橄榄石化带中钨矿化相对较弱；金云母－绿帘石化带中仅可见零星矿化。因此，区内的透辉石－透闪石化带空间分布规律是找矿的重要线索。

参考文献：

[1] 张汉成，王京彬，付水兴，等. 杨金沟白钨矿床围岩蚀变及组分迁移规律研究［J］. 地质与勘探，2006，42(5)：2－5.

[2] 程彦博，毛景文，陈小林，等. 滇东南薄竹山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义［J］. 吉林大学学报：地球科学版，2010，40(4)：869－878.

[3] 任云生，牛军平，雷恩，等. 吉林四平三家子钨矿床地质与地球化学特征及成因［J］. 吉林大学学报：地球科学版，2010，40(2)：314－320.

[4] 方月新，李建忠，南争路，等. 甘肃省文县阳山金矿带围岩蚀变地质特征［J］. 四川地质学报，2009，29(2)：136－139.

[5] 张洪培. 云南蒙自白牛厂银多金属矿床——与花岗质岩浆作用有关的超大型矿床［D］. 长沙：中南大学，2007：1－148.

[6] 翁纪昌，高胜淮，石聪，等. 栾山上房沟特大型钼矿床蚀变分带规律研究［J］. 中国钼业，2008，32(3)：16－24.

[7] 高斌，马东升，刘连文. 围岩蚀变过程中地球化学组分质量迁移计算——以湖南沃溪金锑钨矿床为例［J］. 地质找矿论丛，1999，14(2)：272－277.

[8] 赵一鸣，林文蔚. 中国矽卡岩矿床［M］. 北京. 地质出版社，1990：1－354.

[9] 袁见齐，朱上庆，翟裕生. 矿床学［M］. 北京：地质出版社，1985：100－201.

[10] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志［M］. 北京：地质出版社，1990：1－728.

[11] 胡受奚. 交代蚀变岩岩相学［M］. 北京：地质出版社，1980：1－214.

[12] 陈衍景，常兆山. 中国矽卡岩型金矿地质研究和勘查的进展与问题［J］. 有色金属矿产与勘探，1996，5(3)：129－139.

[13] 陈国达. 1:400 万中国大地构造图［M］. 北京：地图出版社，1977.

[14] 王庆飞，邓军，万丽，等. 山东大尹格庄金矿蚀变岩中矿体分布稳定性的动力学控制参量探讨［J］. 岩石学报，2007，23(7)：861－864.

[15] 李厚民，毛景文，张冠，等. 滇黔交界地区玄武岩铜矿蚀变分带和有机包裹体特征及其地质意义［J］. 地质学报，2006，80(7)：1026－1034.

[16] 王燕，陈梦熊，李明高，等. 广东摇铃钨矿矿化类型多样性及成矿规律研究［J］. 矿产与地质，2006，20(4/5)：334－339.

[17] 杨泽强. 河南省商城县汤家坪钼矿围岩蚀变与成矿［J］. 地质与勘探，2007，43(5)：17－22.

[18] 张世涛，陈国昌. 滇东南薄竹山复式岩体的地质特征及其演化规律［J］. 云南地质，1997，16(3)：222－231.

[19] 解洪晶，张乾，祝朝辉，等. 滇东南薄竹山花岗岩岩石学及其稀土－微量元素地球化学［J］. 矿物学报，2009，29(4)：481－490.

[20] 崔银亮. 云南省与富碱斑岩有关的金矿床围岩蚀变特征和找矿前景［J］. 矿产与地质，2003，17(增刊)：369－372.

[21] 郭欣，杜杨松，庞振山，等. 云南普朗斑岩铜矿蚀变带成矿流体特征及其成矿意义［J］. 现代地质，2009，23(3)：465－471.

[22] 李顺庭，王京彬，祝新友，等. 湖南瑶岗仙钨多金属矿床辉钼矿 Re－Os 同位素定年和硫同位素分析及其地质意义［J］. 现代地质，2011，25(2)：228－235.

万方数据