矿 床 地 质
2002 年 MINERAL DEPOSITS 第 21 卷 增刊

碱交代岩研究的重大成因意义

The Important Significance of Alkali-Metasomatic Rock Studies

杜乐天

（核工业北京地质研究院，北京 100029）

Du Letian

(Beijing Geological Institute of Nuclear Industry, Beijing 100029, China)

摘 要 碱交代岩是碱金属（主要是 Na、K，其次是稀碱金属 Li、Rb、Cs）带入的热液蚀变岩。它可以发生在任何岩类之上，基本上分三大类：① 钠交代岩；② 钾交代岩；③ 钠钾混合交代岩（实际上 Na、K 并非同时带入而是先 Na 后 K 或先 K 后 Na 前后两期的叠加，因为 Na-K 总是不相容）。碱交代岩存在于世界各地区热液矿床的根部（如果是平卧矿床，则处于热液来方的头部）。热液作用成矿过程和其基本规律可以概括为：酸碱分离—先碱后酸—下碱上酸（或前碱后酸）—下碱上硅—下碱上矿（或前碱后矿）—矿酸同步迁移—同步定位—同场共聚。正是碱交代岩的研究才使我们发现地球上各时代、各类型、各矿种的热液矿床具有一个基本的同一的成矿机理。令人惊奇的是我国北方，前苏联中亚及美国西部砂岩型铀矿实际上也是表生环境下的碱交代成矿作用。

关键词 碱交代作用 幔汁（HACONS 流体）

恕笔者直言，从上世纪开始一直到今天，世界上各国的热液矿床研究存在着一种奇怪的思维定势，形象地可称之为两个“偏顾”：

（1）只局限于注意矿床本身的研究而忽视矿床之外之下的研究。积累的材料虽然汗牛充栋，但至今成因问题是众说不一，结论多限于一般推理，缺乏扎实的证据。看来，只孤立偏爱矿床本身的精雕细刻，尽管把现代化的种种分析、测试、实验技术都用上，也很难得出成矿全过程的完整信息和规律。因为矿床只是矿质最后的富集场和保存场，至于矿源和迁移这两个成矿前的两大过程恰恰都是在矿床之外之下（矿根相）。由于后二者都不是矿，不是矿就不去研究，这已经形成一种定势。在成矿学的认识论方法论上出现了头重脚轻的不协调畸态，矿身相的研究结果琳琅满目，但矿根相的状况却语焉不详。笔者根据粗浅的实践经验发现，此矿根相就是碱交代体。它从矿床下部向下延深至少是断断续续几千米甚至十几千米。它不仅存在于世界各地的热液铀矿床之下，而且也广泛见于世界各地的其它元素热液矿床之下。问题是不注意、不重视就没有；一注意于是到处皆是。人们之所以对碱交代岩感到陌生，主要是学术观念上的束缚限制，对它不关注、不理解、更不去研究而已。现在对蚀变岩研究多满足于矿物命名，例如钠长石化、云母化（金云母、铬云母、钒云母、白云母、黑云母、锂云母、黑鳞云母、绢云母、水云母、云英岩、黄铁绢英岩，等等），实际上钠长石化就是钠交代，而云母化就是钾交代。

属于周期表第一族的常量强碱金属如 Na、K 是控制热液中所有酸性矿化剂（如 SiO_3^{2-},F^-，Cl^-,S^{2-}，CO_3^{2-}等）存在的主导因素（中和法则）。碱交代作用绝非只是热液蚀变的一般普通一员，而是所有热液蚀变（如按矿物命名来分，有上百种之多）中最具有决定意义的始祖性蚀变及主控性蚀变。所有的氢交代（即酸蚀变）、二价碱土族元素交代（诸如绿泥石化、方解石化等）以及三价、四价、五价、六价、七价成矿元素的活化、迁移、富集和成矿都受其控制并由它派生。碱交代作用是整个热液过程的主体。

（2）矿床学研究的再一个偏顾是研究什么元素矿床就把几乎所有的观测量、信息量都集中给了它，至于其它共生产物

和现象却出奇地加以忽略。致使研究成果出现第二个畸态。笔者曾多年呼吁，成矿元素的重要性是人们硬加给它们的，其实在自然界热液系统的物质流里它们都是一些微量、从属、被动成员，很不重要。铀矿中的 U 只是 10^{-4} 级，金矿中的 Au 更低，ppm 级（10^{-6}）。它们的热液主流成分是石英（SiO_2）和长石（对于基性岩更多是云母化）。研究一个矿床的成因只揭示微量成矿元素的存在、迁移、沉淀、富集而不管石英、长石、云母主流物质的成因是不可能给出深刻结论的——尽管现代化的种种测试数据应有尽有。

石英、长石、云母的成因既复杂又简单。SiO_2是碱交代热液（主成分是 Na^+或 K^+的 HCO_3^-、CO_3^{2-}溶液）中最易溶解迁移的标志性成分（石英脉及硅化）。硅沉淀或硅化几乎就是碱交代的同义语。成矿的种种元素和 Si 质一起被此碱交代热液从原岩萃取、浸出而到上部沉淀、富集和成矿。有时矿脉中共生的脉石除石英外，还有大量方解石、白云石等碳酸盐或碳酸盐化，实际上它们是深源烃类上升到浅部氧化为 CO_2 的沉淀物。蚀变作用中长石、云母是一大批尚未被完全揭示的众多成矿奥秘的信息记录器，二者皆是碱金属的固定产物。石英、长石、云母的超微结构和热液岩中几十种纳米级零价自然元素微粒断键产物以及非矿物形式的薄膜喷镀储藏着许多有待发掘的地幔超临界态流体的宝贵信息。我们只要一做就是世界水平。笔者在此再次呼吁，我们今后再也不要花费那有限的经费去做低水平的重复工作。科研能否创新，最关键的是选题。要做别人没做过的，不要做人家已经做过的。在此有必要提及，多年来矿床研究老是论证成矿温度是 210℃还是 185℃，压力 500×10^5 Pa 还是×10^5 Pa，稀土模式左倾右倾或铕是否亏损，$\delta^{18}O$ 是-5‰还是-12‰，δD 是-150‰还是-120‰，是大气降水还是深成水，是中温热液还是低温热液等等，这类测试数据罗列在二三十年前就开始流于公式化，直到现在还在重复。更何况许多矿床这类太过一般化的参数又都差不多，很难给予什么深刻启示。另外，这些参数全部是成矿的外在条件，无法揭示成因中更重要的内涵——成矿过程和机理。对矿床研究的这种老套路的确有加以认真调整的必要。

一旦把研究重心从单纯注意成矿元素转到与其共生的石英、长石、云母并重之后就会出现一个奇迹，原来地球上各时代各种金属、非金属热液矿床之间并不像现有习惯认识的那样彼此间的成因机制差别如何之大。尽管每一个矿床外表特征没有一个样的，但成矿机制则是相似甚至相同的。

碱交代作用是靠碱交代岩（包括种种隐爆角砾岩）深入解剖建立的。据笔者粗浅理解，碱交代岩的研究在矿床成因上至少有以下四大含义（详细论证请见最近拙著《中国热液铀矿基本成矿规律及一般热液成矿学》，2001）。

1 碱交代岩是热液所以能够成矿的第一大前提

过去在许多热液矿床的热液活动阶段划分上最早的蚀变往往名之为“硅酸盐化蚀变”。实际上这就是长石化或云母化的碱交代。过去对此阶段热液活动没有给予足够的重视，只是把它定为矿前蚀变完事。有很多论文，连这一矿前热液活动都没有划出来，好像成矿过程是一下子从成矿期热液活动就开始似的。

经过研究（特别是热液铀矿研究的大量实践）我们发现这一被人长期忽视的矿前蚀变恰恰是最重要的始祖性蚀变，其它热液蚀变都是由它派生或演化出来的。热液作用不是像传统理论认为的是由酸性热液开始而是由碱性甚至强碱性热液碱交代作用开始的。此时从热液中有大量的 Na^+、K^+通过交代蚀变作用带入到被碱交代的岩石（可以是任何岩类）之中。当热液中 Na^+、K^+进入固相蚀变岩石后，热液的碱性必然降低，酸性（H^+浓度）增强。这才过渡到硅化、氯化、氟化、碳酸化、磷酸化、硫化、砷化、硒化、碲化、硼化等蚀变。没有前期的碱交代，就不可能有以后的这些酸交代（笔者称之为酸脱和酸尾）。而成矿恰恰是发生在碱性热液被酸化之后的酸尾演化阶段。碱交代作用总是可分为两大阶段：前期碱带入，后期酸迁移。硅和矿质均在酸迁移之中。

Na^+、K^+是自然界最强的碱金属，它有破坏、改造、交代其它所有矿物的强大能力。凡是二价金属元素（例如 Fe^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Sr^{2+}、Ba^{2+}、Co^{2+}、Ni^{2+}、Pb^{2+}、Zn^{2+}、Cd^{2+}、Mn^{2+}、Cu^{2+}等）基本上都是碱土弱碱性反应，在强碱溶液中凡是含上述二价金属的矿物和岩石都不稳定被交代，其中的二价元素即转入溶液迁移带出。这才有下一步的众多二价元素的热液蚀变及脉充填或成矿（例如绿泥石化，碳酸盐化，萤石化，硫化物等等）。另外，诸如三价离子（如 Fe^{3+}、Cr^{3+}、Al^{3+}、REE^{3+}

等），四价离子（如 C^{4+}、U^{4+}、Th^{4+}、Ti^{4+}、Sn^{4+}、Zr^{4+}、Hf^{4+}等），五价离子（如 Nb^{5+}、Ta^{5+}、P^{5+}等），六价离子（如 U^{6+}、Mo^{6+}、Re^{6+}等）以及一价的 Tl^{+}、Au^{+}、Ag^{+}等只有在碱性热液中才能从被碱交代的原岩中萃取浸出、迁移。不错，酸浸出、酸交代作用同样也可以活化、释放许多成矿元素和提供矿源。但其范围、规模远不能和碱交代作用相比。火山作用的酸浸出酸蚀变脱离不开深部的大规模长石化、云母化碱交代。

由于碱交代热液 pH 都远大于 7（8~10），故 SiO_2（石英、玉髓等）极易溶解而从原岩中带出（排硅），这才有热液的硅化蚀变及大量石英脉石矿物。无机化学早已揭示，SiO_2 在酸性强酸性溶液中并不溶解（HF 例外）。酸性热液是不可能迁移出大量 SiO_2 形成石英脉的。在自然界凡是有大量石英脉或沉积硅岩层产生，总可证实是碱交代碱性热液的硅迁移产物。这是一个确凿的规律。

碱交代岩的形成意味着热液中大量强碱金属离子 Na^{+}、K^{+}的消耗转入固定于蚀变岩石之中。这一过程的后果会导致热液中的酸性增大，迁移成矿元素的络合物由此开始变得不稳定要分解。稳定络合物一旦破坏和分解，必然要演变为成矿组分的沉淀和固定，这才有元素富集甚至成矿的可能。文献中对成矿元素的络合迁移形式只给出$[UO_2(CO_3)_3]^{2-}$ $[REE(CO_3)_2]^{1-}$、$[Au(SH)_4]^{1-}$等单纯络阴离子而忽略把 Na^{+}或 K^{+}标出是不合适的。这些络阴离子的稳定存在的大前提是一定要求存在 Na^{+}或 K^{+}的高浓度来保证络合阴离子的稳定。正是碱交代岩的形成和耗碱导致了络合阴离子不稳定，成矿元素（络合阴离子的中心阳离子）就必然要沉淀。过去在成矿实验中前人做了大量精深研究，但注意的多是压力、温度降低、矿质还原、氧化、水解或脱气等直接沉淀因素。实际上更高一层次的成矿控制因素是矿床下面的碱交代岩的事先形成。热液过程大体是沿断裂带、岩体接触带、不整合面等高度易渗透介质先形成碱交代岩，然后热液继续向上（或向前）迁移矿质沉淀富集在上部或外部成矿。没有碱交代岩在前形成以耗碱，热液将一直为碱性对矿质老是稳定络合迁移下去，是不可能成矿的。

2　碱交代岩是释放矿质提供矿源的重要地质体

多年来在成矿学研究上一提到矿源就感到相当神秘深奥莫测。这是忽视对矿根相碱交代岩研究的必然结果。热液铀矿研究在这方面早已得到确凿的证明，在上世纪七八十年代就已了解，富铀花岗岩体乃是热液铀矿的矿源之一，富铀花岗岩中的 U（80%～90%）主要存在于晶质铀矿副矿物之中。经过碱交代（长石化）花岗岩中的这些晶质铀矿几乎全部消失（排铀），同时又排硅（靠石英的溶解），U-Si 沿断裂同步迁移向上共同沉淀形成含 U 硅质脉矿床。这一重大矿源问题真象，我们的科研群体用了一二十年才揭示出来，但道理并不复杂。实际上热液 W、Sn、Mo、Bi、Fe、Cu、Pb、Zn、REE、Au、Ag、Zr、Ti、Nb、Ta 等等成矿也都是这一碱交代排矿机制（胡受奚，1981；Барсуов В Д，1962；沈保丰等，1977；陈毓川，1980；杨敏之等，1989）。如果重视，这方面研究做起来并不难。只要详细对比原岩和被碱交代后的碱交代岩中该等元素存在形式及含量之差，即可大体得晓。碱交代岩总是矿质亏损，向外提供矿源。不过要注意有时此碱交代岩中的矿质含量不仅不减少反而增加，这是后期构造和矿液渗入的增量干扰假象，取样时要尽可能躲开它。

3　碱交代岩是幔汁（HACONS）的化石

在中外热液成矿学的文献中近来经常看到地幔流体参与热液成矿的新结论。这一认识转变好像没有引起人们多大注意。但笔者认为这是相当重要的概念更新，是热液成矿学认识上的重大变革，人们已经不再相信热液全都是岩浆分异成因。在自然界的确存在和岩浆分异无关的热液。即使是紧靠岩体的接触带矿床，也存在着较大的矿岩时差，成矿和成岩是两个相互独立的地质事件。成岩是挤压环境；成矿是拉张环境。斑岩型、爆破角砾岩型、接触带夕卡岩型等热液矿床也都全是在花岗岩类岩浆作用已经结束固结成岩体之后才产生的热液成矿。

笔者近期研究发现有不少所谓的补充侵入小岩体、脉岩系、斑岩系并非是岩浆侵入产物而是亚固相线下的高温热液碱交代体。过去把热液成矿和此等晚期小补体、脉岩挂钩好像和岩浆阶段在时间上更靠近。但现在看这些补体、脉岩并不是岩浆体而是热液交代体。近来其他研究者也有这方面深刻的揭示（陈文明，2001）这样热液岩浆分异论更加渺茫。另外，现在

在各大洋底发现众多的黑白烟囱热液成矿，那里是玄武岩洋壳，不存在硅铝质地壳，更谈不上花岗岩岩浆发育。

现在不少研究者都已重视地幔流体对热液矿床形成的重要作用。随着工作的深化，进一步还得做工作，在自然界要找到幔汁在什么地方转化为热液的记录。有没有实物证明？如果找不到这些实物，那还只是一般性推理。经过二三十年的摸索到上世纪 90 年代笔者终于发现，碱交代岩正是幔汁向热液相变转化的确凿记录（化石）。

世界上热液铀矿在产出部位深浅上可分为 3 个构造层：

（1）下部构造层（前寒武纪古老变质岩基底）中的热液铀矿床，实例有我国的辽宁连山关铀矿，乌克兰地盾，西伯利亚阿尔丹地盾，澳大利亚北部元古界地槽，加拿大元古代砂岩盆地不整合面及基底，巴西一些元古界地体等铀矿床。它们的铀矿期都是前寒武纪，6～18 亿年前。

（2）中部构造层（古生界褶皱系及岩体）中的热液铀矿床，实例有法国、西班牙、葡萄牙花岗岩型铀矿；哈萨克斯坦火山岩型热液铀矿，捷克、德国海西褶皱带的热液铀矿床，等等；它们的成矿期多为海西期。

（3）上部构造层中的热液铀矿床，突出的是以中国最发育，研究也最深入。中国的热液铀矿成矿最晚，主要在燕山期。在构造上，它们是大陆拆离（或伸展）构造成矿。

我们已经从下部构造层经过中部构造层直到上部构造层连续追索，认识到其中碱交代岩的分布规律（总的说，时代越老、深度越大，碱交代特别是长石化规模越大越强），建立了碱交代岩从深向浅发育的连续轨迹。从下地壳到上地壳，热液铀矿如此，其它元素热液矿床也完全类似。碱交代岩的形成和分布极为广泛，是不分什么元素和矿种的。

另外，地幔交代作用（Mantle metasomatism）经笔者研究发现同样也是碱交代作用（杜乐天，1996），这就更加牢靠地证实了地壳碱交代岩是幔汁造成的。所不同的是地壳碱交代造成的是热液作用，形成的是热液矿床（另外是形成花岗岩类岩浆，在此不赘），而地幔碱交代则是形成玄武岩或碱性岩岩浆。

再一点需强调的是，我们多次强调地幔流体除酸性成分 C、H、O、F、Cl、S、N，外主要含碱（Na、K），这已被地幔岩捕虏体（我们自己以及中外许多研究）的结果所证实（杜乐天，1987～1996 年）。我们对碱交代岩的研究是在二三十年前开始的（杜乐天，1972～1986）。当时一直存在着一个悬案，如此普遍发育的各地区碱交代岩所需要的大量 Na、K 带入恐怕是地壳物质无法供应的；岩浆是否能分异如此之多的 Na、K 更有怀疑。一直推测在上地幔中一定存在着巨大的碱库。20 年过去，当 1992～1995 开展地幔流体研究深入解剖了地幔捕虏体后终于发现地幔流体特别富碱。全球众多的研究结果也在证实这一点。这才真相大白，碱交代作用所需的大量 Na、K 正是幔汁（HACONS）提供和保障的。

一旦幔汁→热液的规律被确认之后，于是就不得不认为岩浆作用在热液的产生上，并不像多年来传统理论强调的那样重要。热液主要是从幔汁转化来的。岩浆和热液不是父子先后，只不过是兄弟共生，二者都来自幔汁。这决定于地区是挤压还是拉张环境。在挤压环境中幔汁和围岩有充分时间反应可以造成地壳 SiAl 质地层或岩体全部重熔成岩浆（幔汁温度高达 1000℃，而花岗岩熔点远低于此，700～800℃）。如环境为拉张，幔汁上升很快来不及和途中地层、岩体充分反应就直接在地壳中形成碱交代岩（热液蚀变岩）。热液作用及成矿就从此开始。笔者在强调热液可以不经过岩浆分异直接来自幔汁的同时并未忽视岩浆体中的确也存在有热液。特别是当沉积岩经过熔融事件转化为岩浆体后必然会有大量地层水的加入。在华南及世界各地广泛分布的花岗岩体内部（顶盖相）钠长石、花岗岩中的 W、Sn、Nb、Ta、Li、Be（诸如江西 414、大吉山 69 号小岩体、广西栗木、湖南香花岭等）是和岩浆热液有密切成因关系的。不过这仍然不能排除幔汁从深部沿岩浆柱更易渗入（透）岩浆流体。

碱交代岩具有独特的地下爆破碎裂结构，镜下裂隙纵横交错，微角砾特别发育。俄罗斯学者认为和地下核爆类似。有很多碱交代体是膨大的块状，不见明显的断裂沟通。多年来我们就怀疑它不是应力断裂构造破碎。早期高温碱交代的形成温度大于 375℃，有时可到 500℃以上的超临界温度，压力达数百到上千大气压，发育的是高能气体爆破。众所周知，热液既不能压缩，热膨胀也没多大意义。只有气体才会导致巨大的爆炸。乃至后来考察隐爆角砾岩后更确切地发现气体爆炸的威力，远不是像 C.W.Burnham（1979）所描绘的仅仅是水蒸气的逆向沸腾这类低能量爆破所可形成。最近又看到有专门研究碱交代

岩的微爆破特征的研究结果报导（徐兴旺和蔡新平等，2001）。

4　碱交代岩是今后重要的新类型矿化的找矿对象

在我国的热液铀矿研究中曾经有一个重大的矿化类型发现——细脉浸染蚀变岩型矿床，简称黄峰岭型（最初在湖南汝城鹿井花岗岩体的黄峰岭矿床上突破，时间是 1964 年）。这是我国花岗岩型铀矿相当发育的一个新类型，研究得很详细。在找矿史上经常有这样一个演变规律：先找的是脉型，铀矿是硅化带型或微晶石英脉、紫色萤石脉型，后来逐渐认识到肉眼看不到矿脉（是显微脉），既是蚀变岩，也是重要的铀矿体、铀矿床、甚至铀矿田（例如江西宁都桃山花岗岩岩体内部发育 7～8 个此类型铀矿床组成了大矿田）。在金矿开发上也有类似过程，从古代就知道找含 Au 石英脉，后来发现还有不是石英脉的蚀变岩型细脉浸染型金矿床（即著名的焦家型）。

黄峰岭型的铀矿床在 60 年代中期突破（当时未公开），后来在不少地区均有发现。当时鉴于品位较低（矿石 U 含量一般小于 0.1%），成本高，不能开采。前些年矿石堆浸和地下溶浸工艺技术已经过关或即将过关，远景就大为改观。现在已有成功的实例，例如黄峰岭万吨级矿石的堆浸，在北方有陕西兰田，均已投产。

值得强调，之所以发育黄峰岭型铀矿关键条件是碱交代花岗岩（W、Sn 石英脉矿床的矿根相）成为最理想的赋矿围岩。前已述及，碱交代岩是爆裂岩，微裂隙发育，蚀变（主要是水云母化、绢云母化、云英岩化、黄铁矿化）很强，岩石极其松散，这对溶浸甚为有利。黄铁矿在地表一经氧化即变成硫酸，会节约硫酸投放量。

焦家型 Au 矿的重要形成条件也是后期成矿热液沿韧性剪切带活动利用了前期含 Au 石英脉的矿根相——钠钾混合碱交代岩为理想的赋矿围岩。广东的河台金矿也是利用了前期奥长石化、绢云母化混合岩带中的糜棱岩为赋矿围岩。

在华南广大花岗岩体分布 区钨矿和铀矿分布有紧密的空间关系，经常是彼此共处于同一个大岩基之中，相距几到十几千米。但二者间又有以下区别：

（1）成矿时代有严格的先后，W 矿化总在前（大约是 140～160 Ma），U 矿化总在 W 之后（大约是 90～65 Ma）（最近发现也有 U-W 同时代成矿的新例）。

（2）W 矿体总是分布于相对高山之上（海拔>700 m），U 矿体分布低，多在海拔 700 m 以下，（海拔 200～400 m 或再低）。显然表明 U 矿是在该区不断隆升一些 W 矿床已经受到剥蚀后形成的。经粗略估算，从 160 Ma 到 80 Ma 期间华南大约剥蚀掉 400 m，华南在此时期剥蚀速度大约是 5 m/Ma。

(3)W 矿多定位于花岗岩体与沉积变质岩外带的接触面顶盖相附近，U 矿定位要深一些，总居于岩体的内部相、深部相。

我们在研究铀矿的多年中曾广泛考察了许多附近的钨矿，发现二者在矿床埋藏深度上很有规律，都存在“ 成矿壳层 ”（杜乐天，1982），见图 1。

在钨矿山深层坑道或岩心中发现其矿根相是大片的钾钠长石化碱交代的花岗岩，其中的 W 及石英被交代萃取浸出向上迁移即形成含 W、Sn 石英脉钨矿床。这种钨矿山深部的碱交代岩就成了后期热液铀矿形成时非常理想的赋矿围岩。之所以广泛发育黄峰岭型蚀变岩铀矿关键是成矿热液渗入和叠加在 WSn 矿根的碱交代花岗岩之上。华南钨锡石英脉矿床的矿根相恰恰是该区热液铀矿研究者了解的最详细。

总之，碱交代是多期的，在华南，在 180～65 Ma 期间至少有 4 次（也是四层）碱交代者。越早越浅；越晚越深（地区不断上隆）（杜乐天，1982）。

碱交代岩在时代上并不只限于中新生代和古生代，从太古宙就有记录，到元古宙发育就特别强烈（和裂谷事件有密切联系）。在元古宙的许多深大断裂上，如果注意就会发现几乎到处都有强烈的碱交代作用。

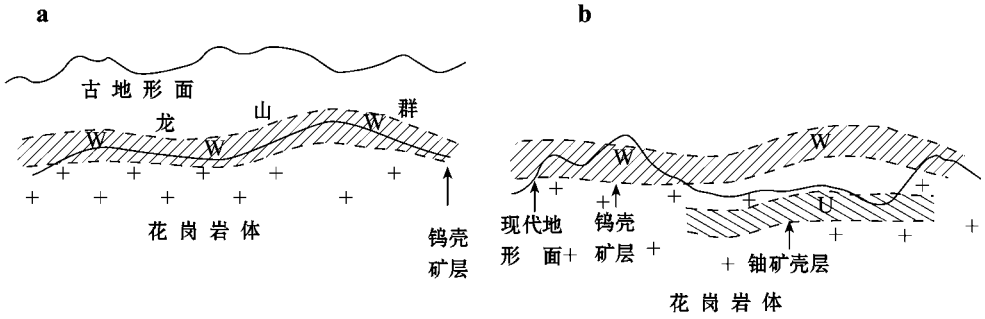


图 1 华南热液 WSn 石英脉成矿壳层和热液 U 矿壳层间的时空关系

a—侏罗纪;b—白垩纪

所谓的榴辉岩高压变质带就是一例。据笔者肤浅所知，挪威的 Bergen 以及我国的苏鲁—大别的榴辉岩带实质上是原来的元古界碳硅泥岩系（如果加以原岩恢复），在韧性剪切应变的同时有大规模幔汁渗入进行碱交代改造的产物。绿辉石是典型的高压高温热液钠交代；石榴石实乃碳酸盐地层的硅化；碱交代是硅、钛、锆等惰性难溶成分的最佳迁移介质，故形成许多柯石英、金红石、锆石；幔汁中的烷类（CH_4 等）会形成金刚石。柯石英也有可能是气相硅烷（SiH_4）高压下的固化产物，和石榴石的硅化可能是同一硅迁移和硅固定过程。

最后尚须指出，笔者近期的研究发现，碱交代作用不仅广泛见于内生热液矿床，而且还有外生环境下的碱交代成矿作用。我国北方、中亚（哈萨克斯坦、乌兹别克）及美国西部的砂岩型铀矿都可以用这个新成因机制加以解释。所谓层间氧化带看来不只是氧化，重要的还有碱化。该等地区成矿的地下水无一不是 pH>7 的 $Na^+K^+ \cdot HCO_3^-$或 CO_3^{2-}型碱性水，这和前述碱交代热液成分完全相似。使 U 活化、迁移不仅可以靠地表氧化，另外也可以靠提高溶液碱度。U 的沉淀成矿不仅可以靠还原作用，另外也可以通过酸化。外生碱交代和内生碱交代在机制上是类同的。二者不同的是前者酸（矿）—碱相对位置可以是上碱、下酸、下矿。

参 考 文 献

陈文明. 2001. 深源富碱硅流体与斑岩铜矿含矿斑岩的成因联系及流体包裹体、斑晶证据[J]. 地学前缘, 4:409～421.

陈毓川, 张荣华, 盛维福, 等. 1980. 玢岩铁矿化蚀变作用及成矿机理[A]. 26 届国际地质大会学术论文集[C]. 北京: 地质出版社. 3, 17～32.

杜乐天, 戎嘉树. 1996. 地幔流体中钠钾地球化学[M]. 见: 杜乐天主编. 地幔流体与软流层（体）地球化学. 北京: 地质出版社. 154～229.

杜乐天. 1982. 我国花岗岩型铀矿的主要地质规律及成矿模式[A]. 见: 花岗岩铀矿文集[C]. 北京: 原子能出版社. 1～99.

杜乐天. 1996. 烃碱流体地球化学原理——重论热液作用与岩浆作用[M]. 北京: 科学出版社. 140～229.

杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社. 234.

胡爱奚, 周顺之, 任启江, 等. 1978. 花岗岩和中基性岩类有关的热液矿床成矿的机制和模式[J]. 福建地质[J], 3: 76～89.

沈宝丰, 陆松年, 于恩泽, 等. 1977. 某区磁铁矿床中钠质交代作用的特征及其找矿意义[J]. 地质科学, 3:263～274.

杨敏之, 李治平. 1989. 胶东东部金青顶金矿床围岩蚀变岩带的地球化学、形成机理及找矿方向的研究[J].地质找矿论丛, 2: 1～16.

Burnham C W. 1985. 岩浆与热液流体[A]. 见: H.L.Barnes 主编. 1979. 热液矿床地球化学[C]. 北京: 地质出版社. 78～135.