

文章编号:0258-7106(2003)02-0166-11

辽东早元古代富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿和滑石矿床成矿条件^{*}

陈从喜^{1,2} 蒋少涌³ 蔡克勤⁴ 马冰⁴

(1 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2 国土资源部信息中心, 北京 100812; 3 南京大学内生金属成矿作用机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 4 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 辽东地区早元古代大石桥组赋存有富镁质的碳酸盐岩建造, 其中产有大型或超大型菱镁矿、滑石矿床。文章在前人工作的基础上, 结合近年来的野外调查和研究工作, 从大地构造背景、含矿建造、岩相古地理、成矿构造、成矿流体等几方面讨论了辽东菱镁矿和滑石矿床的成矿条件。研究结果表明, 该地区菱镁矿矿床是元古代海相蒸发沉积条件下形成的, 而滑石矿床则是由埋藏海水演化而来的富硅质高盐度的变质流体对镁质碳酸盐岩交代的产物。

关键词 地质学 菱镁矿 滑石 成矿条件 辽东 早元古代

中图分类号: P619.23⁺7; P619.25⁺3

文献标识码: A

辽东地区早元古代变质岩系富镁质碳酸盐岩建造中产出有大量的菱镁矿、滑石矿床。已知有大型、超大型菱镁矿矿床 6 处, 中型矿床 2 处, 矿点 30 余处, 储量占全国总储量的 80% 及世界总储量的约 30%; 大型、超大型滑石矿床 4 处, 中型矿床 5 处, 矿点 40 余处, 储量占全国总储量(不含黑滑石)的 50% 及世界总储量的近 20%。辽东已成为世界级菱镁矿、滑石矿床的大规模聚集区。辽东菱镁矿和滑石的资源及产量引起了国内外研究者的瞩目, 目前已将辽东列入国际地质对比计划 IGCP443 项目(菱镁矿与滑石的国际地质与环境对比)的重要研究地区(Jiang et al., 2000)。笔者曾著文讨论过富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿、滑石等镁质非金属矿床成矿系列的特征(陈从喜等, 2002), 本文结合近年来在辽东地区的工作, 从大地构造、含矿建造、岩相古地理、成矿物质来源、成矿构造、成矿流体等方面进一步讨论这些矿床的成矿条件。

1 大地构造背景

辽东地区早元古代变质岩系位于华北地台北缘

东段。在营口—宽甸地区太古宙基底上, 早元古代形成了近 EW 向的凹陷, 接受了一套火山-沉积建造, 这套建造习惯上称之为辽河群(曹国权等, 1994; 吴昌华等, 1996)。尽管过去对辽河群形成的构造背景有不同的认识(张秋生, 1984; 姜春潮, 1987; Wang et al., 1995; 白瑾等, 1996; 倪培, 1991), 但辽河群沉积盆地的主体是一个大陆型-陆间型裂谷, 即“辽东裂谷”的观点已为多数地质工作者所接受(陈荣度, 1984; 陈荣度等, 1994; Chen et al., 2000)。辽东裂谷位于北纬 40°20′~41°20′之间, 宽约 60~70 km, 西自盖县向东经宽甸、桓仁进入吉南的集安、临江, 然后跨江入朝鲜, 全长 300 km 以上。辽东部分(东经 122°20′~125°20′)总体为 NEE 向。其基底为太古宇鞍山群构成的古陆。裂谷北缘断裂位于大石桥—隆昌—草河口—桓仁一线, 南缘断裂为永宁至丹东北部一线(图 1)。辽河群的同位素年龄 2.3~1.9 Ga, 为早元古代沉积变质岩系(张秋生, 1984; 1988; 陈荣度等, 1994; 白瑾等, 1996; 陈从喜等, 1998)。

前人研究(Condie, 1992; 孙敏等, 1996)表明, 太古宙末至早元古代, 地球曾发生过较为明显的拉张和裂陷。同样, 早元古代辽东地区也处于拉张裂陷。

^{*} 本文为国际地质对比计划 IGCP443 项目和国土资源大调查项目(K1.41-5)研究的部分成果

第一作者简介 陈从喜, 男, 1963 年生, 博士后, 研究员, 主要从事矿床地质与矿物材料研究。e-mail: cxchen@infomail.mlr.gov.cn

收稿日期 2002-11-21; 改回日期 2003-02-11。张绮玲编辑。

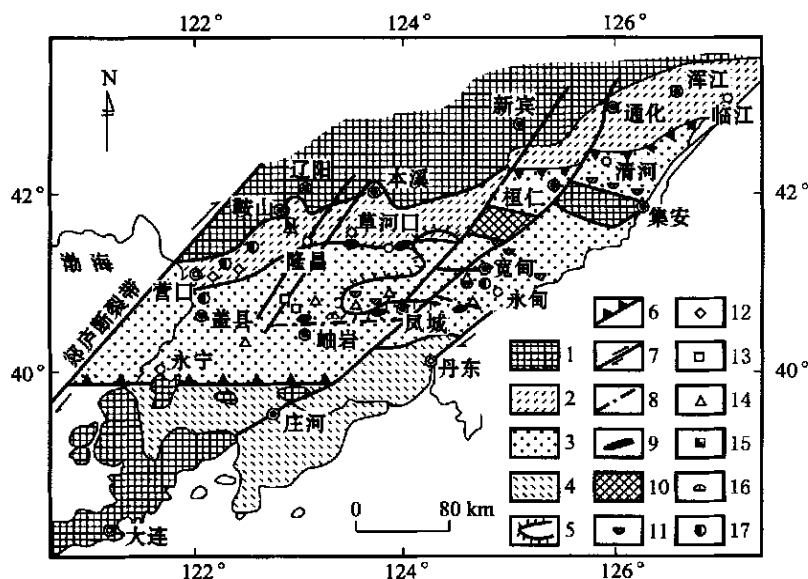


图1 辽东早元古代裂谷构造分带及主要镁质非金属矿床分布略图

1—太古宙古陆;裂谷区:2—北缘斜坡区,3—中央凹陷区,4—南缘浅台区;5—地幔隆起;6—构造带分界线(深断裂带);7—剪切断裂;8—拉张断裂;9—基性岩;10—推断的隆起;矿床:11—硼矿;12—滑石及菱镁矿;13—蛇纹石(岫岩玉);14—水镁石;15—透辉石和透闪石;16—斜绿泥石;17—纤维状海泡石

Fig. 1 Simplified geological map showing tectonic division of the Early Proterozoic rift system and major magnesite non-metallic deposits as well as magnesite and talc deposits

1—Archaean craton; Rift Areas: 2—Northernmost slope zone; 3—Central depression zone; 4—Southernmost shallow zone; 5—Mantle uplift; 6—Boundary (deep fault) of tectonic zones; 7—Shear fault; 8—Extensional fault; 9—Basic rocks; 10—Inferred uplift; Mineral Deposits: 11—Boron; 12—Talc and magnesite; 13—Serpentine (Xuyan jade); 14—Brucite; 15—Diopside and tremolite; 16—Clinoclhorite; 17—Fibrous sepiolite

在早元古代里尔峪期,在火山沉积岩系沉积有硼矿(张秋生,1984;Peng et al.,1995)。大石桥期,在裂谷内发育的晚期堆积的潮坪-泻湖相镁质碳酸盐岩建造(主要是大石桥组三段)中含有巨厚的菱镁矿。早元古代晚期至中元古代,裂谷闭合,发生后期变质、变形作用,在构造-流体成矿作用下交代成滑石矿床,后期的中生代构造、岩浆活动对已形成的菱镁矿和滑石矿床进行了改造(陈从喜等,1998;Chen et al.,2000)。

总之,辽东裂谷这一特定的构造环境控制了辽河群的沉积和区域变质作用,由此控制了与裂谷沉积有关的菱镁矿和与区域变质热液交代有关的滑石矿床的成矿作用。

2 含矿建造

早元古代早期,辽东裂谷盆地沉积的辽河群沉积岩中,富集了一些碳酸盐矿物如菱镁矿、白云石、高镁方解石等,这些物质为后期镁质矿物的进一步

富集提供了物质条件。有些菱镁矿岩层可能本身就是矿层,只不过在后期变质过程中岩石结构和构造发生了较大变化。镁质碳酸盐岩建造的厚度、岩石类型以及 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 比和 $w(\text{SiO}_2)$ 等对菱镁矿和滑石的成矿起着重要的控制作用。

2.1 含矿建造厚度

菱镁矿矿床的厚度和规模与富镁质碳酸盐岩的发育程度有关。一般地,大石桥组三段厚度大时,富镁质碳酸盐岩建造厚度也大,菱镁矿和滑石矿体的厚度也增大;反之,则减小。大石桥组三段及其中碳酸盐岩厚度变化较大。据区测资料,英洛-草河口-太平哨复向斜北翼平均地层厚度 1676.2 m,最大厚度 3569.2 m,最大厚度分布区集中于海城-营口一带,与圣水寺、青山怀、铍子峪、下房身等地产出的大型菱镁矿矿床相吻合。虎皮峪-红石砬子复背斜北翼平均地层厚度 423.6 m,碳酸盐岩厚度 279.2 m,最大厚度位于岫岩王家堡子一带。滑石的矿化范围和矿床规模同样受富镁质碳酸盐岩建造的控制,滑石矿床与菱镁矿矿床同处一成矿带,主要集中于辽东

裂谷的北缘。

2.2 岩石类型

大石桥组三段岩石类型主要有镁质碳酸盐岩(菱镁矿、菱镁矿大理岩、白云石大理岩)、钙质碳酸盐岩、泥砂质岩石和泥灰质岩石(片岩、变粒岩、透闪岩为主)。根据岩石组合和分布特点,大石桥组三段可划分出4个岩石类型自然组合:①白云石大理岩、菱镁矿大理岩、菱镁矿夹大理岩、千枚岩薄层;②大理岩夹白云石质大理岩及片岩;③透闪岩夹大理岩、片岩;④片岩、变粒岩夹大理岩。各岩石类型的自然组合在区域分布上有一定的规律性,与古岩相(见下文)相一致,并互为过渡关系。菱镁矿的直接围岩均为菱镁矿大理岩、白云石大理岩,菱镁矿矿床严格受岩石组合①的控制,菱镁矿大理岩和白云石大理岩是菱镁矿的宏观标志。滑石矿床也同样受岩石组合①的控制,其空间分布与菱镁矿大理岩和白云石大理岩具有相依关系,也与菱镁矿处于同一含矿层位中。

2.3 矿物组合

菱镁矿矿石矿物主要为菱镁矿,有时还有少量水镁石;脉石矿物为白云石、滑石、蛋白石、石英、斜绿泥石、黄铁矿、黄铜矿和赤铁矿等。滑石矿石矿物为滑石;脉石矿物多为菱镁矿和白云石,此外还有少量石英、磷灰石、黄铁矿等,偶含微量透闪石、金红石、电气石、金云母、海泡石、石墨和斜绿泥石等。可以看出,滑石矿石及夹石或顶底板围岩中很少见方解石,说明滑石成矿并没有明显的脱钙作用。

3 岩相古地理

菱镁矿沉积成矿作用受岩相古地理控制。早元古代时,辽东裂谷盆地东西长300 km,南北宽100 km(陈荣度,1984;陈荣度等,1994)。古地磁研究(姜春潮,1987),表明大石桥组处于古纬度较低(北纬 $17^{\circ} \sim 28^{\circ}$)的干旱的热带或亚热带环境。盆地沉降中心分布于主断裂北侧的虎皮峪—红石砬子一带。其北侧为斜坡带,向南逐渐加深。前人根据岩石类型、矿物组合、CaO、MgO等地球化学指标,将大石桥组含矿建造沉积相由北而南分为滨岸碎屑岩相→闭塞台地相(泻湖相)→沿岸滩坝相→半闭塞台地相→开阔台地相(董清水等,1996)。其中,菱镁矿产于闭塞台地相或泻湖相,其沉积环境可能代表古陆边缘的泻湖蒸发环境。

前人工作已发现菱镁矿矿层中有大量变余的沉积结构,如变余的层理、层纹、斜层理、豆状、结核状、波痕、雹痕、滑坡等构造(冯本智等,1995)。笔者最近在野外工作中,除观察到上述地质现象外,还在大石桥附近的大岭菱镁矿采场菱镁矿矿层附近的灰黄绿色泥质碳酸盐岩中发现有40~50 cm厚的透镜状石膏夹层。其中石膏或硬石膏均为结晶矿物,含量可达60%以上。石膏矿石裂隙中还有2~5 cm厚的白色纤维石膏(图2)。采样后分析,石膏硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为23.9‰~26.5‰。这些证据说明该石膏不是火山热液成因的石膏,而是海相沉积蒸发岩系

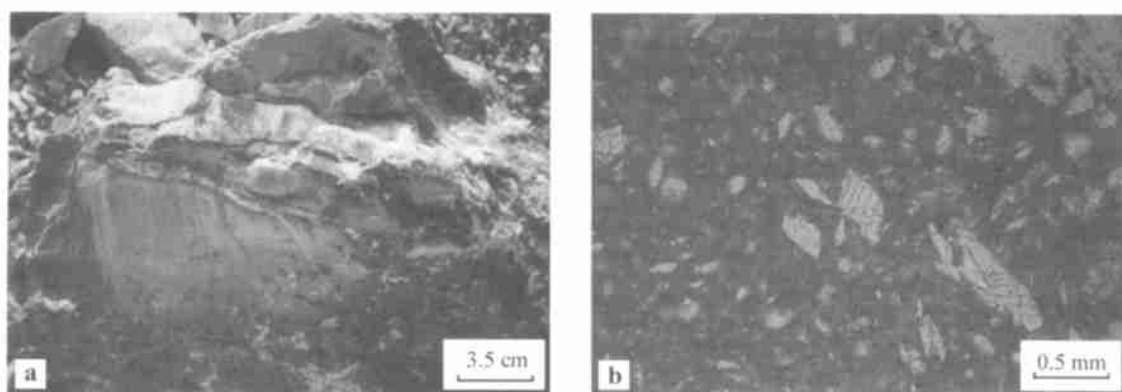


图2 辽东早元古代大石桥组菱镁矿共生石膏标本及显微镜下矿物组合特征

a—含石膏白云岩,并有纤维状石膏穿插;b—显微镜下原生板状石膏与微晶白云石共生

Fig.2 Characteristics of gypsum associated with magnesite from Paleoproterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province

a—Gypsum-bearing dolomites with penetrating fibrous gypsum veins; b—Tabular gypsum minerals associated with microcrystalline dolomites under microscope

的标志。

大石桥菱镁矿大理岩中发现有大量叠层石,这说明菱镁矿沉积时有生物的参与。另一方面也说明当时气候温暖,海水干净。现代叠层石研究认为,藻类一般形成方解石和白云石,很难形成菱镁矿;但是古今对比研究表明现代沉积环境与古代是有差别的。早元古代全球海水富镁、大气缺氧并富集 CO_2 (涂光炽,1996),有利于形成菱镁矿。蒸发环境下,当初海水中 Mg^{2+} 普遍较高,起初叠层石吸收 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 形成白云石,海水中 Ca^{2+} 减少,而 Mg^{2+} 相对增高,这时叠层石也可吸收 Mg^{2+} ,形成菱镁矿。

4 成矿构造

辽东菱镁矿滑石成矿区总体构造为一局部倒转的单斜层。区内 NEE 向逆断层及层间滑动带发育,并伴有 NW 向和 NE 向的平移断层或平移正断层。菱镁矿层呈层状、似层状,与地层产状基本一致,仅小圣水寺例外,其矿层产状较陡,局部倒转,可能与后期断裂和改造有关。滑石矿体通常产在上述构造交叉部位的附近。滑石矿床的空间分布主要受 3 条构造含矿带控制。下部构造含矿带一般距大石桥组三段底界 50 ~ 450 m,含矿带厚 170 ~ 360 m;中部构造含矿带位于大石桥组三段中部,含矿带厚 200 ~ 300 m 至 10 ~ 20 m;上部构造含矿带位于大石桥组三段顶部,含矿带厚一般 10 ~ 20 m,最厚达 200 ~ 300 m。滑石矿体主要赋存在菱镁矿大理岩或菱镁矿层间挤压滑动带内,其次在菱镁矿大理岩与白云石大理岩层接触部位和白云石大理岩层间构造带中,近矿围岩中构造角砾岩化明显。矿体产状与地层一致,通常呈层状和似层状,少量透镜状和不规则状。在褶皱轴部,矿体加厚。以上迹象表明,滑脱破碎带和褶皱虚脱部位是滑石成矿构造的有利条件。

5 成矿地球化学

5.1 常量元素地球化学

据有关地质勘探资料,大石桥三段岩石化学成分以高镁高钙为特征,并富集一定的硅, $w(\text{SiO}_2)$ 与 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 呈反比关系,而 $w(\text{MgO})$ 含量与地层厚度为正相关关系。

从岩石化学成分等值线图(图 3)上可以看出,大石桥—黑峪—二户来一线及岫岩王家堡子、宽甸甸甸、丹东汤池地区等地 $w(\text{MgO}) > 20\%$,其中营口—辽阳地区为高镁区, $w(\text{MgO})$ 平均为 27.08%。一般 $w(\text{MgO}) > 20\%$ 时就有菱镁矿矿层出现,但高镁区有大规模菱镁矿聚集。营口虎皮峪、本溪通远堡、宽甸杨木川、南发磨子为高硅区, $w(\text{SiO}_2)$ 平均大于 50%。高钙区一般分布于上述两种成分富集区的过渡部位。

碳酸盐的 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值是衡量镁富集程度的一项指标,它与岩石中矿物成分有密切关系。以方解石为主的碳酸盐(方解石 $> 95\%$,白云石 $< 5\%$) $w(\text{CaO})/w(\text{MgO}) > 50$, $w(\text{MgO})$ 为 1.085%;当白云石与方解石含量相等时, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 为 4.0, $w(\text{MgO})$ 为 10.85%;以白云石为主的碳酸盐(白云石 $> 95\%$) $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 接近 1.4, $w(\text{MgO})$ 为 21.7%。当碳酸盐矿物以白云石和菱镁矿为主要矿物时, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值将大大降低, $w(\text{MgO})$ 则大幅度提高。如以白云石为主(白云石 75%,菱镁矿 25%)时, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值为 0.84, $w(\text{MgO})$ 为 28.18%;菱镁矿为主(白云石 5%,菱镁矿 95%)时, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值为 0.03, $w(\text{MgO})$ 为 43.943%。

根据碳酸盐的 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值可将本区碳酸盐岩分为 4 类:钙碳酸盐岩、镁钙碳酸盐岩、钙镁碳酸盐岩和镁碳酸盐岩。从 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值等值线图(图 3b)可以看出:①等值线平行于古陆边缘分布,由大陆边缘向内侧比值逐渐增大;②高镁区集中分布于营口—辽阳地区,与含矿建造岩石组合富镁质矿物相吻合;③菱镁矿层出现在 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值 2.2 附近;④碳酸盐的 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值对菱镁矿滑石的控制作用与地层厚度、岩石组合及矿物成分相一致。

5.2 稀土元素及微量元素地球化学

据前人资料,辽东菱镁矿与围岩的稀土元素含量相近(表 1)^①,稀土元素球粒陨石分配模式基本相似(图 4),其中菱镁矿矿石稀土元素总量(ΣREE)为 17.29×10^{-6} ,与白云石大理岩接近(20.76×10^{-6});菱镁矿矿石的 LREE/HREE 为 2.53,与白云石大理岩接近(3.27),说明在沉积作用过程中稀土元素强烈均一化,在相同的地质作用中,使它们的稀土元素

① 池文仲,1985. 辽宁省大石桥至塔子岭一带菱镁矿地质特征及成矿预测科研报告。

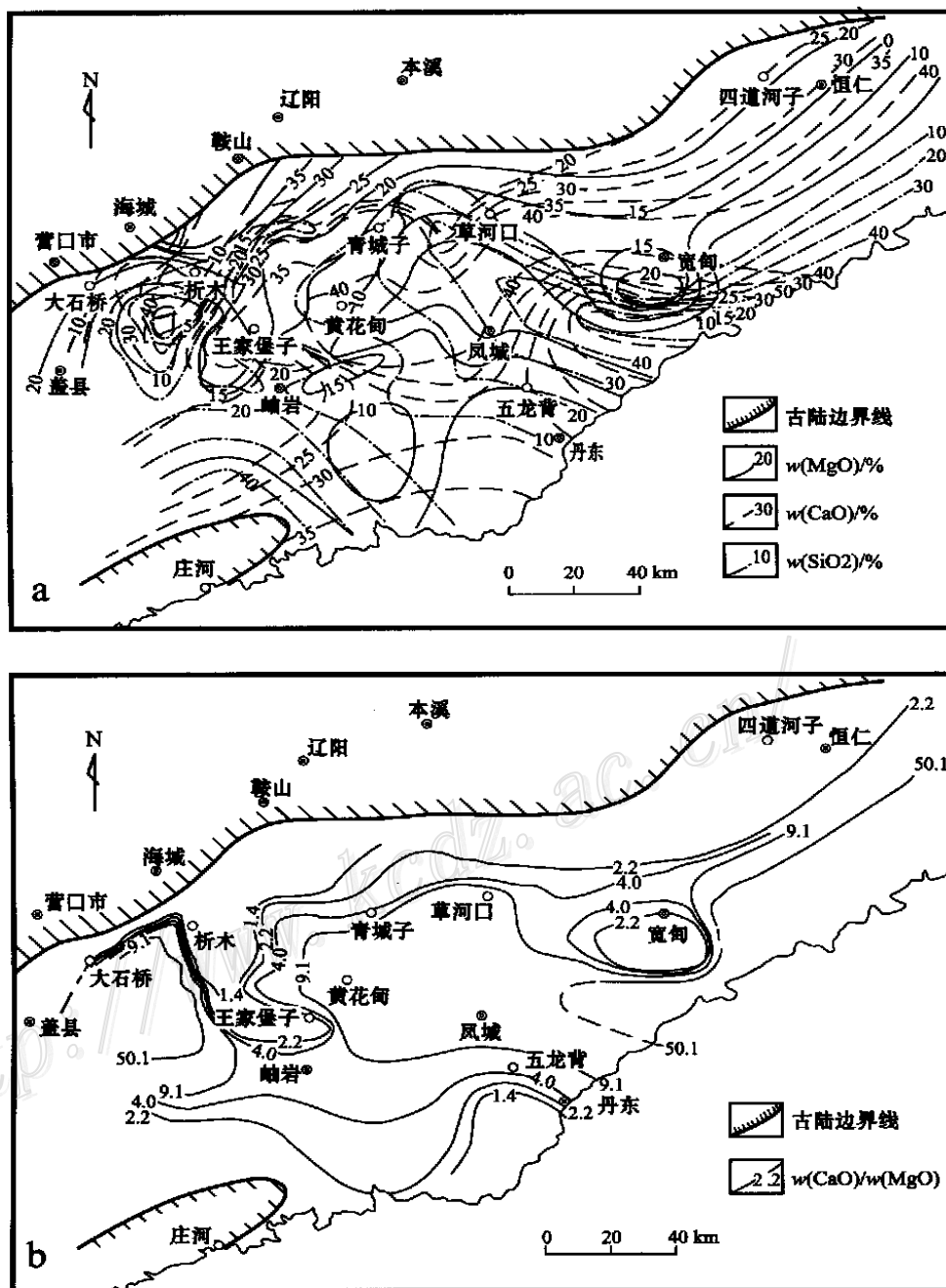


图 3 辽东大石桥三段主要岩石化学成分等值线图

a — $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 等值线图; b — $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 等值线图

Fig. 3 Contour map of major element compositions of rocks in 3rd Member of Early Proterozoic Dashiqiao Formation

a — Contour map of MgO , CaO and SiO_2 contents; b — Contour map of CaO/MgO ratios

相对丰度差别小,因此具有同生成因特点。辽东滑石矿石的 $w_{\text{Sr}}/w_{\text{Ba}}$ 比值为 35.7,与大石桥组三段含石英脉菱镁矿大理岩($\text{Pt}_1 d^3$)的 $w_{\text{Sr}}/w_{\text{Ba}}$ 比值(38)接近,而与混合岩的(M_2)0.5 和二长花岗岩(η_1^5)中的 0.4 相差甚远,表明滑石成矿的主要物质来源于沉积成因的镁质碳酸盐岩建造,而与其他岩石无关

(表 2)。

5.3 稳定同位素地球化学

在辽东菱镁矿不同矿区和大石桥组不同层位的碳酸盐岩采取了碳、氧稳定同位素样品,其分析结果见表 3。可以看出,方解石大理岩和白云石大理岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 变化范围为 $-4.5\% \sim +4.4\%$,平均值接近

表 1 辽东菱镁矿矿石及围岩白云石大理岩稀土元素含量及有关参数^①

Table 1 REE compositions and related parameters of magnesite ores and dolomitic marbles from 3rd Member of Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province

样品	$w_B/10^{-6}$													LREE/HREE
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Y	Σ REE	
菱镁矿矿石	10.05	6.59	9.28	5.84	4.52	2.20	2.12	2.24	3.42	2.13	1.36	3.11	20.76	3.27
白云石大理岩	8.08	5.08	7.14	4.16	3.52	1.83	2.18	2.33	3.29	2.13	1.38	3.03	17.29	2.53

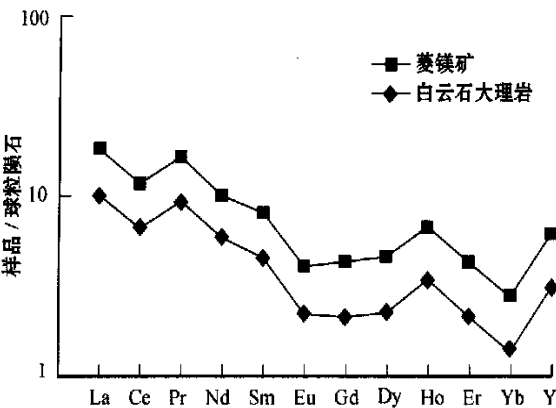


图 4 辽东菱镁矿矿石及围岩白云石大理岩稀土元素球粒陨石标准化图谱

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of magnesite ores and dolomitic marbles from 3rd Member of Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning

表 2 辽东早元古代大石桥组菱镁矿和滑石矿石与围岩 w_B/w_B 比值^{*}

Table 2 w_B/w_B ratios of magnesian and talc ores and their surrounding rocks from Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province

矿石或岩石类型	层位 时代	样品数	$w_B/10^{-6}$	$w_B/10^{-6}$	w_B/w_B
滑石	Pt ₁ d ³	12	10.7	0.3	35.7
菱镁矿大理岩	Pt ₁ d ³	6	12.4	0.2	62
含石英脉菱镁矿大理岩	Pt ₁ d ³	2	11.4	0.3	38
白云石大理岩	Pt ₁ d ³	2	34.9	4.5	7.8
黑云片岩	Pt ₁ d ³	2	72.5	282.2	0.3
均质混合岩	M ₂	2	85.5	182.7	0.5
二长花岗岩	η ₁ γ ₁	2	190.8	429.2	0.4

* 据辽宁省地质矿产局第五地质大队资料综合。

于零;菱镁矿的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 变化范围为 - 1.4‰ ~ +1.2‰,平均值也接近于零,说明菱镁矿与白云石大理岩在相同环境下形成,均属海相沉积成因。

表 3 辽东早元古代大石桥组菱镁矿、滑石及其围岩碳、氧稳定同位素分析结果

Table 3 $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ data of magnesian and talc ores and their surrounding rocks from Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province

采样号	样品名称	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
L01035	滑石化菱镁矿	- 1.4	11.1
L01022	菱镁矿	1.2	12.6
L01015	方解石大理岩	- 1.8	22.8
L01025	方解石大理岩	- 4.5	19.6
L01017	叠层石大理岩	- 0.5	20.2
L01020	条带状白云石大理岩	4.4	18.2
L01023	变余条状白云石大理岩	- 0.8	12.1
L01021	条带状白云石大理岩	0.8	11.2

中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分析。采用 MAT251 EM 质谱计 100 %磷酸法分析,精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

方解石大理岩和白云石大理岩的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 变化范围为 +11.2‰ ~ +22.8‰,其平均值为 17.35‰;菱镁矿的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 变化范围为 +11.1‰ ~ +12.6‰,其平均值为 11.85‰。氧同位素偏低的现象可能与成岩交代作用或区域变质作用中地表水轻同位素的加入影响有关。

一般认为,海相成因的灰岩和白云岩具有接近于零的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值,而淡水成因的碳酸盐具有较低的负值。辽东的菱镁矿和白云石大理岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ - $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值相关图解上位于受变质海相碳酸盐岩区,个别投影点虽然超出该范围,但也都在其附近(图 5),反映菱镁矿和白云石大理岩具有相同的成因,具变质海相碳酸盐岩的特点。

6 成矿流体

辽东地区滑石成矿作用表现在成矿流体交代含硅镁质碳酸盐岩和部分热液充填形成滑石矿床

① 池文仲, 1985. 辽宁省大石桥至塔子岭一带菱镁矿地质特征及成矿预测科研报告。

(Chen et al, 2002)。成矿流体的成分和特征是滑石矿床成矿的重要条件。滑石矿床的包裹体特征及化学成分见表 3、表 5。对菱镁矿和滑石矿床围岩进行包裹体分析,菱镁矿和石英中的流体包裹体一般 5 ~ 20 μm,气相百分数一般为 10 % ~ 15 %,滑石矿石中石英及菱镁矿的流体包裹体普遍含有 NaCl 子晶,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 29 % ~ 37 % (表 4)。包裹体中普遍含有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 及大量的 CO_2 和少量的 CH_4 ,含量 $c(\text{B})$ 分别为 K^+ 25.9 mg/l; Na^+ 平均 158.1 mg/l,最高可达 575 mg/l; Ca^{2+} 127.5 mg/l; Mg^{2+} 146.5 mg/l; HCO_3^- 626.5 mg/l; CO_2 高达 144.3 mg/l; $\text{CH}_4 < 0.3$ mg/l。流体平均 pH 值为 9.14,呈碱性(表 5)。滑石矿体顶底板还可见到含氯矿物方柱石,它可能是石盐或卤水演变而来。菱镁矿和石英均一温度有 150 ~ 210 ℃ 和 285 ~ 305 ℃ 两个区间,分别是菱镁矿重结晶和石英析出的温度,推

测滑石成矿温度约 200 ~ 300 ℃。通过对比,认为它与美国的 Ruby Mountains 元古代滑石矿床的成矿温度接近,成矿流体都具埋藏海水演化而来的热卤水性(Brady et al., 1998)。

辽东滑石含矿围岩中 $w(\text{SiO}_2)$ 含量一般在 1.09 % ~ 33.28 %,平均为 7.97 %。同时发现围岩中的硅质在区域变质、动力变质过程中有逐渐向挤压断裂带集中的现象。由菱镁矿大理岩中存在的石英脉可知,成矿流体是富硅的。这表明分布在含石英菱镁矿大理岩中的原生硅质,在长期的区域变质和动力热变质中,朝着断裂带方向迁移、集中,造成了滑石成矿前的硅化作用。这种硅化是碱性变质热液淋滤围岩中的硅质,并向挤压断裂带附近运移硅质的结果。而断裂构造和褶皱构造满足形成滑石过程中体积增加(一般情况下增加 60 %)的需要,同时还降低了流体与镁质碳酸盐岩反应生成的 CO_2 的分

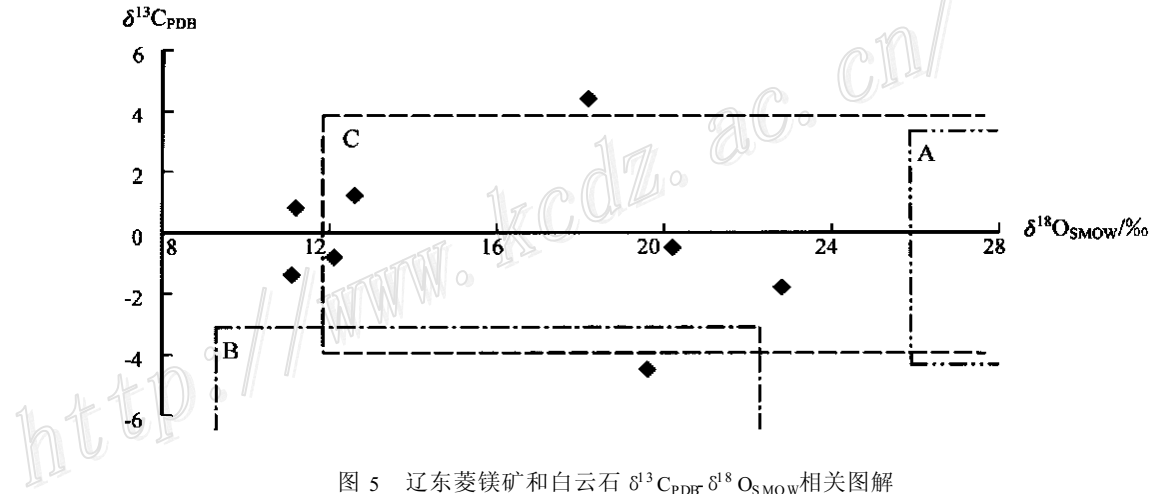


图 5 辽东菱镁矿和白云石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 相关图解
A—正常海相区; B—淡水区; C—受变质海相碳酸盐区

Fig. 5 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of magnesite ores and dolomites from 3rd Member of Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning
A—Normal marine carbonate; B—Fresh water carbonate; C—Metamorphosed marine carbonate

表 4 辽东早元古代大石桥组菱镁矿矿床流体包裹体特征

Table 4 Fluid inclusion data of magnesite deposits in Early Proterozoic Dashiqiao Formation, eastern Liaoning Province

样号	矿物	包体形态	大小/μm	$\varphi_{\text{气}}/\%$	盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	子晶消失温度/℃
1	菱镁矿	负晶形	5 ~ 15	10 ~ 30	37	280 ~ 300
2	菱镁矿	负晶形	5 ~ 20	15	34	250
3	石英	负晶形,管状,筒状	4 ~ 18	10	31	167 ~ 209
4	石英	滴状	5 ~ 15	10 ~ 15	31	185
5	石英	滴状,管状	5 ~ 15	10 ~ 15	30	135 ~ 150
6	石英	立方体,筒状,管状	5 ~ 15	10 ~ 15	29	130

中国地质科学院矿产资源研究所实验室分析,采用法国产 CHAIXMECA 显微冷台,温度范围: - 180 ~ + 600 ℃,精度 ± 0.1 ℃。

表 5 辽东大石桥组滑石矿床液相包裹体分析结果

Table 5 Chemical compositions of fluid inclusions in talc deposits of Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province

样号	c(B)/(mg·l ⁻¹)							pH 值
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₂	CH ₄	
1	25.94	185.48	401.79	235.62	522.15	112.20	<0.03	9.34
2	25.94	139.11	111.61	84.82	658.28	125.40	<0.03	9.23
3	25.94	56.65	55.81	179.07	837.50	214.50	<0.03	9.00
4	25.94	64.92	78.13	122.52	496.29	198.00	<0.03	9.16
5	25.94	575.00	111.61	7.54	130.97	102.30	6.30	8.71
6	25.94	39.07	89.29	131.94	534.21	66.00	<0.03	9.24
7	25.94	46.37	44.64	263.89	1206.28	191.40	<0.03	9.30
平均	25.94	158.09	127.55	146.49	626.53	144.26	<0.03	9.14

中国地质科学院矿产资源研究实验室分析,采用气相和液相色谱法,精度±0.01 mg/l。

压,有利于形成厚大的滑石矿体。

在研究矿物流体包裹体时,发现石英的液态包裹体里,因有氯化物和重碳酸盐而使 SiO₂ 浓度升高。这说明含氯化物和重碳酸盐的热液可以提高溶液中 SiO₂ 的溶解度和活度,有利于溶解和运移 SiO₂ 到成矿有利部位,与围岩中镁质碳酸盐等成矿物质发生反应生成滑石。滑石矿体及围岩存在的许多硅质团块和岩石中高 w(SiO₂),佐证了盐类矿物促进了 SiO₂ 在成矿流体中的活动能力。

以上研究表明,滑石成矿流体是一种源于海水的富镁含硅的高盐度的变质流体。

7 讨论与结论

关于辽东菱镁矿滑石矿床的成因问题,一直存在争议(李驭亚等,1994)。而辽东菱镁矿的成因,历来就有沉积变质和热液交代之争。菱镁矿沉积变质成因的证据主要是菱镁矿呈层状分布,并见有大量的变余沉积组构。对于菱镁矿沉积变质成因的观点,笔者通过理论计算和古代与现代成矿环境对比认为,从海水直接沉积形成如此巨厚的辽东菱镁矿几乎不可能,必然要通过其他特殊的形式完成菱镁矿的富集和脱钙化过程。

持菱镁矿热液交代成因观点的学者认为,菱镁矿是经热液交代白云岩或白云石大理岩形成的,主要证据有:①菱镁矿分布局限,而菱镁矿围岩白云岩或白云石大理岩分布广泛;②菱镁矿矿体中有菱镁矿交代白云岩现象;③菱镁矿和白云岩在化学成分、微量元素、稀土元素和结构构造上有差异;④菱镁矿受区域构造控制明显。笔者认为,若是菱镁矿属热

液交代白云岩成因,必然发生区域上大规模的去钙化作用,根据物质不灭定律,菱镁矿矿床或矿区附近应有大规模的方解石化现象,这与辽东地区的镁质碳酸盐岩的矿物组合和区域分布是矛盾的,而区域上白云岩或白云石大理岩分布广泛,而菱镁矿分布局限正是沉积型矿产分布的普遍规律。另外,菱镁矿优级品矿石为中心向外过渡为一般矿石到贫矿石的分带现象,不仅存在于热液交代矿床中,沉积矿床和蒸发岩同样存在,在蒸发岩矿床中表现更为明显。菱镁矿和围岩白云石大理岩在化学成分、微量元素、稀土元素和结构构造存在一定的差异,但它们分布的总体规律是一致的。菱镁矿和白云石大理岩均受构造控制,这正是裂谷构造控矿作用的表现。

罗耀星等(1989;1990)早就注意到辽东地区富镁质碳酸盐岩建造中存在蒸发岩,在营口大石桥一带微含沉积菱镁矿的变质白云岩常见有方柱石,他推测可能沉积于蒸发环境。白云岩沉积时有少量水菱镁矿或三水菱镁矿,成岩时变为菱镁矿。由于当时证据较少,并没有确认辽东地区菱镁矿大规模成矿作用与蒸发岩有关。通过对它们成矿条件的研究,尤其是找到了大量蒸发岩相的证据,并佐以同位素地球化学分析结果,笔者认为菱镁矿不是简单沉积变质的,而是蒸发沉积形成。虽然后来菱镁矿经过了变质改造,但这种改造主要是结构构造和少量矿物形态上的变化,总体物质成分并无大的变化。

笔者推测,早元古代辽东裂谷发育早期,因当时气候干热,泻湖内海水蒸发量较大,海水盐度不断提高,部分地段沉积有石膏和石盐。蒸发环境下,泻湖中白云石首先沉淀,当泻湖中 Mg²⁺ 富集到足够程度,并有足够的 CO₃²⁻ 时,发生菱镁矿沉淀。叠层石

吸收 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 首先形成白云石,随着海水中 Ca^{2+} 减少, Mg^{2+} 相对增高。通过蒸发作用也可直接沉积或交代白云石形成菱镁矿。这种菱镁矿蒸发成矿作用与西藏班戈湖蒸发环境下水菱镁矿的成因类似(郑绵平等,1989;郑绵平,2001)。

以前的学者在研究滑石矿床的成因时,对热液主要交代菱镁矿还是主要交代白云石有不同的意见。对于成矿热液,往往推测与区域变质作用有关,认为是变质流体。新的研究表明,滑石矿床成矿流体来自于埋藏的海水,由它演化形成的富硅质高盐度的变质流体交代含硅质镁质碳酸盐岩,形成了滑石矿床。由于辽东地区滑石矿床本身方解石化作用不明显,推测成矿流体主要交代菱镁矿,大量的硅质来源也是滑石成矿的必要条件。

吕梁运动使辽东裂谷闭合,辽河群褶皱变质。不可否认,个别地区沉积的菱镁矿在区域变质-混合岩化过程中可能发生了第二次富集,但就总体而言,因缺乏脱钙化证据,如此巨量的菱镁矿不可能通过交代白云岩而来;相反,许多证据表明,菱镁矿在区域变质过程中,只是物质的结构构造上发生变化,菱镁岩改造为粗粒状菱镁矿石,物质成分并无明显改变;同时,在构造-流体成矿系统中,富 SiO_2 热液在构造有利部位交代富镁质碳酸盐岩,形成滑石矿床。

总之,辽东裂谷的发生、发展与闭合控制了菱镁矿的蒸发沉积、改造和滑石矿床的交代成矿,滑石矿床与菱镁矿矿床同处于同一成矿带,主要集中于辽东裂谷的北缘。富镁质碳酸盐岩是菱镁矿和滑石矿床的含矿建造和成矿母岩。辽东裂谷北缘形成的泻湖蒸发环境是菱镁矿蒸发沉积的有利环境。

值得指出的是,关于辽东早元古代辽河群的早期沉积中蒸发岩相的问题,彭齐鸣和 Palmer M. R. 以及蒋少涌等在研究硼矿中已经发现了硼矿最早的沉积是蒸发岩系(Peng et al., 1995; Jiang et al., 1997; 2001),王安建等在研究辽东裂谷北缘的 Fe-Cu 硫化物矿床时,也认为属于盐丘控矿(Wang et al., 1995)。本次工作在大石桥组三段发现的石膏及其有关岩相特征,证明辽东菱镁矿也是在蒸发环境下形成的,这些研究成果对于理解辽东裂谷形成和演化以及研究菱镁矿、滑石和硼矿等大型矿集区的成因机理均具有重要的意义。

致 谢 研究工作得到了陈毓川院士、翟裕生院士的指导,野外地质调查中得到辽宁省国土资源

厅、地勘局及第五地质大队、中国建材工业地质勘查中心辽宁总队和辽宁化工矿产地质勘查院和有关矿山的领导和地质技术人员的帮助和支持。成文后承蒙陶维屏教授和郝梓国研究员审阅并提出修改意见,特此一并致谢。

References

- Bai J, Huang X G, Wang H C, et al. 1996. The Precambrian crustal evolution of China[M]. 2nd edition. Beijing: Geol. Pub. House. 61 ~ 165(in Chinese).
- Brady J B, Cheney J T, Rhodes A L, et al. 1998. Isotopic geochemistry of Proterozoic talc occurrences in Archean marbles of the Ruby Mountains, southwest Montana, USA[J]. Geol. Matls. Res., 1 (2): 1 ~ 41.
- Cao G Q, Zhang R C, Yang Z J, et al. 1994. Regional geology of Tarim- Nouth China[A]. In: Cheng Y Q ed. An outline of regional geology in China[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 99 ~ 100 (in Chinese).
- Chen C X and Cai K Q. 1998. A study of magnesian nonmetallic deposits and minerogenesis in early Proterozoic magnesian carbonate formations in Eastern Liaoning Province, China[J]. Mineral Deposits, 17 (supp): 465 ~ 468 (in Chinese).
- Chen C X and Cai K Q. 2000. Minerogenic system of magnesian non-metallic deposits in early Proterozoic Mg-rich carbonate formations in eastern Liaoning Province[J]. Acta Geologica Sinica, 74(3): 623 ~ 631.
- Chen C X, Cai K Q and Zhang S H. 2002. Characteristics of nonmetallic minerogenetic series related to magnesium-rich carbonate formation [J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(6): 521 ~ 526(in Chinese with English abstract).
- Chen C X, Lu A H, Cai K Q, et al. 2002. Sedimentary characteristics of Mg-rich carbonate formations and minerogenic fluids of magnesite and talc occurrences in early Proterozoic in eastern Liaoning Province, China[J]. Science in China(Series B), 45(supp): 84 ~ 92.
- Chen R D. 1984. A rift basin of the early Proterozoic in the eastern Liaoning[J]. Liaoning Geology, 2: 125 ~ 133(in Chinese).
- Chen R D and Wang Y J. 1994. The evolution and metallogesis of early Proterozoic paleorift in eastern Liaoning and south Jilin provinces [A]. In: Zhang Y X and Liu L D eds. Precambrian mineral geology and tectonics[C]. Beijing: Seismological Pub. House. 186 ~ 200 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1992. Proterozoic crustal evolution, development in precambrian geology[M]. Amsterdam, New York, Tokyo: Elsevier 10.
- Dong Q S, Feng B Z, Li X J, et al. 1996. The lithofacies and paleogeographical setting of Haicheng-Dashiqiao superlarge magnesite deposits, Liaoning Province[J]. J. Changchun Univ. Earth Sciences, 26(supp): 69 ~ 73(in Chinese with English abstract).

- Feng B Z, Zhu G L, Dong Q S, et al. 1995. Geological characteristics and genesis of Haicheng-Dashiqiao superlarge magnesite deposits, eastern Liaoning Province[J]. J. Changchun Univ. Earth Sciences, 25(2): 121 ~ 124(in Chinese with English abstract).
- Jiang C C. 1987. The early Precambrian geology of eastern Liaoning Province and Jilin Province[M]. Shenyang: Liaoning Sci. & Tech. Pub. House. 1 ~ 321(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Palmer M R, Peng Q M, et al. 1997. Chemical and stable isotope (B, Si, and O) compositions of Proterozoic metamorphosed evaporite and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China[J]. Chem. Geol., 135: 189 ~ 211.
- Jiang S Y and Jiang Y H. 2000. Talc and magnesite deposits in China [A]. In: Martin R, Walter P and Zoltan N, eds. IGCP443 Introductory Newsletter[C]. Mineralia Slovaca, 32: 559 ~ 560.
- Jiang S Y, Ni P, Ling H F, et al. 2001. Boron isotope geochemistry of borate and magnesite deposits in eastern Liaoning and Jilin Provinces of China[A]. In: Piastzynski, et al. eds. Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century[C]. Swets & Zeitlinger Publishers Lisse. 987 ~ 991.
- Li Y Y, Liu G C and Zheng B D. 1994. Talc and magnesite deposits in China[A]. In: Editorial committee of eds. Ore Deposits in China(B) [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 497 ~ 538(in Chinese).
- Liu J L, Liu Y J, Chen H, et al. 1997. The inner zone of the Liaoji Paleorift: its early structural styles and structural evolution [J]. J. Asian Earth Sciences, Elsevier Science Ltd., 15(1): 19 ~ 31.
- Luo Y X, Zhu J R and Wang Y K. 1989. A preliminary study on the genesis of the Dashiqiao sparry magnesite deposits in the light of some geological features[J]. Mineral Deposits, 8(1): 71 ~ 84(in Chinese with English abstract).
- Luo Y X. 1990. The REE during magnesitization and the material source of the deposits in Dashiqiao[J]. Geological Review, 36(1): 31 ~ 40(in Chinese with English abstract).
- Ni P. 1991. The geological evolution and gold metallogeny in Eastern Liaoning Peninsula[D]. PhD thesis. Nanjing: Nanjing University. 170p(in Chinese with English abstract).
- Peng Q M and Palmer M R. 1995. The Palaeoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: a metamorphosed evaporite[J]. Precambrian Research, 72: 185 ~ 197.
- Sun M, Zhang L F and Wu J H. 1996. The origin of the early Proterozoic Kuandian complex: evidence from geochemistry [J]. Acta Geologica Sinica, 70(3): 207 ~ 222(in Chinese with English abstract).
- Tu G Z. 1996. The discussion on some CO₂ problems[J]. Earth Science Frontiers, 3(3): 53 ~ 62(in Chinese with English abstract).
- Wang A J, Peng Q M and Palmer M R. 1995. Salt dome-controlled sulfide precipitation of Paleoproterozoic Fe-Cu sulfide deposits, eastern Liaoning, Northeastern China[J]. Econ. Geol., 1: 1 ~ 14.
- Wu C H and Jiang C C. 1996. Liaohe Group[A]. In: Editorial committee of Guidebook of strata in China, eds. Guidebook of strata in China, Division of early Proterozoic[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 34 ~ 35.
- Zhang Q S. 1984. The early Precambrian geology and metallogeny[M]. Changchun: Jilin People's Pub. House. 1 ~ 329(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q S. 1988. The early crust and mineral deposits in eastern Liaoning peninsula[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 218 ~ 450(in Chinese with English abstract).
- Zheng M P and Xiang J. 1989. Salt lake in Tabit[M]. Beijing: Beijing Sci. & Tech. Pub. House. 1 ~ 431(in Chinese with English abstract).
- Zheng M P. 2001. On saline lakes of China[J]. Mineral Deposits, 20(2): 181 ~ 189(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 1996. 中国早前寒武纪地质及成矿作用 [M]. 第二版. 北京: 地质出版社. 61 ~ 165.
- 曹国权, 张瑞成, 杨忠杰, 等. 1994. 塔里木—华北地区区域地质特征 [A]. 见: 程裕淇主编. 中国区域地质概论 [C]. 北京: 地质出版社. 99 ~ 100.
- 陈从喜, 蔡克勤. 1998. 辽东镁质碳酸盐岩建造沉积变质镁质非金属矿床及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 17(增刊): 465 ~ 468.
- 陈从喜, 蔡克勤, 章少华. 2002. 辽东镁质碳酸盐岩建造沉积变质镁质非金属矿床成矿系列[J]. 地球学报, 23(6): 521 ~ 526.
- 陈荣度. 1984. 一个早元古代裂谷盆地——辽东裂谷[J]. 辽宁地质, 2: 125 ~ 133.
- 陈荣度, 王有爵. 1994. 辽东—吉南地区早元古代裂谷演化与成矿. 见: 张帆侠, 刘连登主编. 中国前寒武纪矿床和构造[M]. 北京: 地震出版社. 186 ~ 200.
- 董清水, 冯本智, 李绪俊, 等. 1996. 辽宁海城一大石桥超大型菱镁矿矿床形成的岩相古地理背景[J]. 长春地质学院学报, 26(第三十届国际地质大会专集): 69 ~ 73.
- 冯本智, 朱国林, 董清水, 等. 1995. 辽东海城一大石桥超大型菱镁矿矿床的地质特点及成因[J]. 长春地质学院学报, 25(2): 121 ~ 124.
- 姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 1 ~ 321.
- 李驭亚, 刘国春, 郑宝鼎. 1994. 中国滑石菱镁矿矿床[A]. 见: 《中国矿床》编委会编. 中国矿床[C]. 下册. 北京: 地质出版社. 497 ~ 538.
- 罗耀星, 朱钧瑞, 王耀坤. 1989. 从几个地质特征初步探讨大石桥晶质菱镁矿矿床成因[J]. 矿床地质, 8(1): 71 ~ 84.
- 罗耀星. 1990. 大石桥菱镁矿矿化时稀土元素活动和物质来源[J]. 地质论评, 36(1): 31 ~ 40.
- 倪培. 1991. 辽东半岛地质演化及金矿床的成因 [D]. 博士学位论文. 南京: 南京大学. 170 页.
- 孙敏, 张立飞, 吴家弘. 1996. 早元古代宽甸杂岩的成因: 地球化学证据[J]. 地质学报, 70(3): 207 ~ 222.
- 涂光炽. 1996. 关于 CO₂ 若干问题的讨论[J]. 地学前缘, 3(3): 53 ~ 62.
- 吴昌华, 姜春潮. 1996. 辽河群[A]. 见: 《中国地层典》编委会编著. 中国地层典·古元古界[M]. 北京: 地质出版社. 34 ~ 35.

- 张秋生. 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用[M]. 长春: 吉林人民出版社. 1 ~ 329 .
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社. 218 ~ 450 .
- 郑绵平, 向 军. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 1 ~ 431 .
- 郑绵平. 2001. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 20(2): 182 ~ 189 .

Metallogenic Conditions of Magnesite and Talc Deposits in Early Proterozoic Mg-rich Carbonate Formations, Eastern Liaoning Province

Chen Congxi^{1,2}, Jiang Shaoyong³, Cai Keqin⁴ and Ma Bing⁴

(1 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2 Information Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China; 3 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 4 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

A number of large and superlarge magnesite and talc deposits occur in Mg-rich carbonate strata of Early Proterozoic Dashiqiao Formation in eastern Liaoning Province. The existence of sedimentary gypsum and the $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ isotopic geochemistry as well as Sr/Ba ratios of carbonate, talc, quartz and gypsums in combination with field investigation and laboratory sample analysis demonstrate that the formation of magnesite and talc deposits was closely related to marine evaporates, which underwent reformation as a result of regional metamorphism and hydrothermal metasomatism. Metasomatic fluids derived from paleoseawater played a controlling role in the formation of talc deposits. In this paper, the authors deal with the ore-forming conditions of magnesite and talc deposits, such as their tectonic setting, the ore-bearing formation, the lithological and palaeo-geographic features, the ore-forming structures, and the origin and evolution of the ore-forming fluids. It is held that the magnesite deposits were mainly formed by evaporation and sedimentation in a marine environment, whereas the talc deposits resulted from the metasomatism of the Mg-rich carbonates by the action of SiO_2 -rich saline hydrothermal fluids during regional metamorphism.

Key words: geology, magnesite, talc, ore-forming condition, Eastern Liaoning Province, Early Proterozoic