

doi: 10.12029/gc20210315

汤家辉, 董国臣. 2021. 内蒙古清水河木纹石特征及其形成机制[J]. 中国地质, 48(3): 872–882.

Tang Jiahui, Dong Guochen. 2021. The feature of wood-like stone and its forming mechanism in Qingshuihe of Inner Mongolia, China[J]. Geology in China, 48(3): 872–882(in Chinese with English abstract).

内蒙古清水河木纹石特征及其形成机制

汤家辉, 董国臣

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 内蒙古呼和浩特南部的“木纹石”为碳酸盐岩, 其质地细腻致密, 具有木纹般纹饰, 由红色环带及黄色环带构成。本文在野外调研的基础上, 针对岩石及其红色和黄色环带进行了矿物学、岩石地球化学分析, 并利用扫描电镜对元素的分布进行测试。研究表明, 木纹石由中—细晶白云石组成, 胶结物以泥质绢云母、钾长石和黏土矿物为主, 含少量稀土矿物、钛铁矿、黄铁矿和褐铁矿等金属矿物。岩石化学和地球化学分析发现, 红色环带较黄色环带富 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、Sr, 特别是 Fe 元素, 以线扫描中 Fe 的计数频率(cps)350 作为标准可以很好的区分红黄条带。据 Yb/(Ca+Mg)–Yb/La 图解分析显示出岩石受热水活动迹象, 表明海相碳酸盐岩在成岩后期演化过程中, 地下(热)水沿裂隙进行渗透淋滤, 由于温度差异, Fe 氧化程度差异, 致色因素三价 Fe 含量不同, 使得岩石具有红–黄相间条纹特征, 形成以裂隙为边界状如树木纹饰的环形环带。

关键词: 木纹石; 白云石; 环带; 成因; 地质调查工程; 内蒙古

中图分类号: P578.6¹; P588.24⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)03–0872–11

The feature of wood-like stone and its forming mechanism in Qingshuihe of Inner Mongolia, China

TANG Jiahui, DONG Guochen

(School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083)

Abstract: Wood grown rings, named as wood-like stone, are developed in carbonatites in Hohhot, Inner Mongolia. The wood-like stone, looking like wood grown rings, is very fine grained, smooth surface with red and pale yellow ring surroundings. Based on field investigation, the mineralogy and petro-geochemistry of the wood-like stone were studied for colorful rings, and the distribution of elements was tested by SEM. The results indicate that the wood-like stone consists of mediate to fine grained dolomite with argillaceous cement. The cement is mainly composed of sericite, K-feldspar, clay minerals and a few ilmenite, pyrite, limonite and REE minerals. Chemically, Al_2O_3 , K_2O and Fe_2O_3 are richer in red ring than that in pale yellow one. Especially for the Fe element, the cps of Fe about 350 in the line scan can be used as the standard to distinguish the stripes of different colors. According to the graphical analysis of Yb/(Ca+Mg)–Yb/La, the rocks show signs of hot water activity. It is indicated that the marine

收稿日期: 2018–04–10; 改回日期: 2021–05–20

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201711415011)资助。

作者简介: 汤家辉, 1996年生, 男, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 15650766367@163.com。

通讯作者: 董国臣, 1962年生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿物学、岩石学和矿床学研究; E-mail: donggc@cugb.edu.cn。

carbonatite was infiltrated by hot fluids flowing through fractures after deposition. Due to the difference of temperature, Fe oxidation difference and the different content of trivalent Fe resulted in red-yellow stripe, forming the ring belt with cracks as the boundary like the tree ornamentation.

Key words: Wood-like stone; dolomite; rings; origin; geological survey engineering; Inner Mongolia

About the first author: TANG Jiahui, male, born in 1996, Master candidate, majoring in mineralogy, petrology and mineral Deposit; E-mail: 15650766367@163.com.

About the corresponding author: DONG Guochen, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates, engaged in the research of minerals, rocks and deposits; E-mail: donggc@cugb.edu.cn.

Fund support: Funded by the College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.201711415011).

1 引言

木纹石是指具有天然木质纹理的石材的统称,是一种装饰效果非常出色的天然石材,以其古朴自然、端庄典雅备受设计师的青睐。木纹石具有鲜明、流畅、均匀的条纹。从不同的方向切割,会呈现不同的花纹图案,平行层理方向,像树木的年轮;垂直层理方向,状如云霞,彤云飘渺,甚至还会出现山水、人物等奇异的图案。内蒙古清水河木纹石因黄河而展露于世,具有深刻的黄河历史文化内涵,是艺术家发挥艺术想象,体现作品艺术魅力及展示艺术手法的空间和载体。

木纹石通常被分为砂岩和大理岩两类,砂岩型在中国云南、山东和澳洲有所产出;大理岩型,产于中国贵州和法国。不同地区木纹石的颜色会有区别,有白木纹、灰木纹、红木纹等。目前木纹石更多被认为是沉积或者由沉积岩天然改造而成的,并作为上等石材用于建筑装饰和工艺品领域。

内蒙古“木纹石”产于黄河畔的呼和浩特市南部,其石质细腻、致密,具有红色的木纹般纹饰而因此得名。若从不同的方向切割,便会呈现不同的花纹图案,平行层理方向,像树木的年轮,一圈套一圈;垂直层理方向,则状如云霞,彤云飘渺;横切纹理方向,似剧场幕布,百折如裙;斜切纹理方向,则出现虎皮纹,甚至还会出现山水、人物等奇异的图案。而且条纹鲜明、流畅、均匀,古朴自然、端庄典雅(李海负,1995;苏立社,2017)。

前人对该木纹石的产出位置和岩石成分进行了阐述,但对木纹石的特征论述相对较少,对其矿物成分和形成原因研究更是匮乏。本论文在详细野外调研和纹饰测量的基础上,进行了岩石学、矿物学和地球化学研究,研究木纹石的成分及其特有

的木纹状的构造的形成原因,有助于我们对木纹石进行更多更深入的了解,对它的价值进行更大程度的开发,可以根据所形成原因去寻找更多可以产生木纹石的地区甚至可根据其形成原因人造出这样特殊结构的岩石。

2 地质背景及测试方法

华北地台是中国最大的克拉通平台,形状类似于一个倒三角形,北到祁连和阴山山脉,南达秦岭和大别山,西至贺兰和六盘山以及东部是大海(林玉祥,2015;Wang Zhaopeng,2020)。研究区位于内蒙古清水河县西部(图1a),地处内蒙古高原和黄土高原交接地带,位于黄河东岸,大地构造位置上属于华北地台(I)山西台隆(II)清水河隆起(III),区内主要出露寒武系凤山组、奥陶系冶里组—亮甲山组、石炭系本溪组和太原组、新近系黄土夹钙质结核层和松散沉积物(图1b)。从太古宙以后构造运动以升降为主,褶皱微弱,地层近水平产出。区内岩浆岩不发育,仅有少量前寒武纪岩体零星出现在清水河一带(赵国柱等,2015)。

木纹石产出在清水河县一带奥陶纪冶里组和亮甲山组的白云岩和白云质灰岩中,岩层厚度不等,薄层常集中出露,构成带状,呈缓倾斜产出。岩层倾向 130° ,倾角近于水平,一般不大于 5° 。岩层中断裂发育,以北东向为主,北西向及近东西向次之。木纹石样品采于清水河县侯家圪洞村边冶里组地层中。

全岩主、微量元素及稀土元素测试在中国冶金地质总局第一地质勘查院测试中心完成。将岩石捣碎后挑选红色和黄色环带样品区分,选取有代表性的岩石样品,经过粗碎—清洗—烘干细碎后放入球磨机中粉碎至200目以下,用X射线荧光光谱法

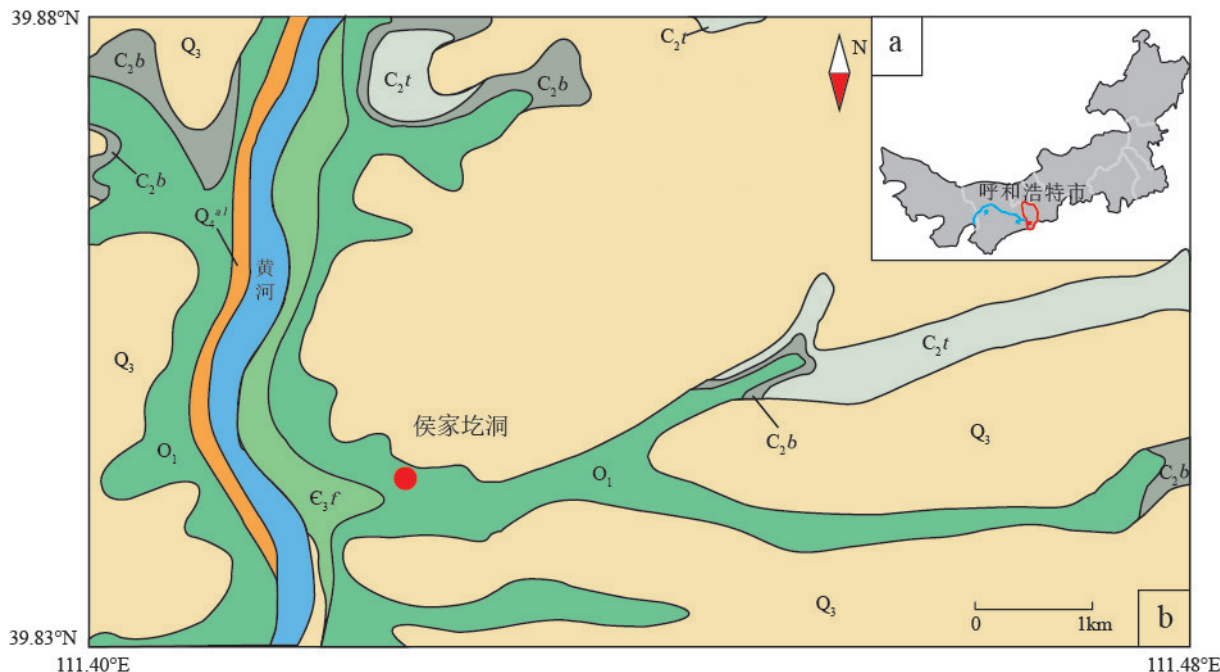


图1 研究区位置(a)及内蒙古清水河县侯家圪洞一带地质图(b)

Q_4^a —冲击沙土, 沙砾石层; Q_3 —淡黄色黄土夹钙质结核层; C_2t —太原组; C_2b —本溪组; O_1 —冶里组和亮甲山组并层; E_3f —凤山组; 红点为采样位置

Fig.1 Location of the study area (a) and geological map of Houjiadedong, Qingshuihe County of Inner Mongolia (b)

Q_4^a —Shock sand, gravel layer; Q_3 —Light yellow loess with calcareous nodules; C_2t —Taiyuan Formation; C_2b —Benxi Formation; O_1 —Yeli Formation and Liangjiashan Formation; E_3f —Fengshan Formation; Red dot—Sampling locations

进行主量元素测试,误差小于5%。微量元素和稀土元素的测试使用电感耦合等离子质谱法进行,误差小于5%。为了更好地研究,岩石磨片及探针片制作也充分考虑了环带发育特点。面扫描和线扫描在核工业北京地质研究院场发射扫描电子显微分析实验室完成。

3 木纹石岩石学及矿物学特征

3.1 木纹石形态特征

木纹石有红黄相间条带组成,构成条纹状(图2a)。木纹石产状与地层产状相同,近水平产出,木纹纹饰的发育受地层和断裂控制。在单一岩层内木纹石表现出一致的特点,红-黄色条纹在层理面上呈环带状(图2b),从纵向上看,环带向下延伸与层理方向近于垂直相交或大角度斜交;受断裂控制,木纹石的环带受构造运动形成的裂隙约束,其形状及外圈大小受到严格的控制(图2b)。个别后期断裂对木纹石岩层有不同程度错动。

具有木纹石特征的岩石主体为浅黄色、黄色或灰白色,细粒结构,呈条纹状、木纹状构造,条纹一般为红色、红褐色,单条纹宽度1~5 mm不等,个别能够达

到10 mm(图2c、d、e),呈红黄相间产出。滴盐酸无明显反应,成分主要为白云石,但是颗粒细小。

3.2 木纹石中矿物特征

按照岩石成分定名为木纹状粉砂质细晶白云岩(图2f)。具有明显的沙粒状特征,白云石晶粒粒径在0.05~0.2 mm,自形一半自形菱形粒状,用茜素红试剂不着色,可见闪突起,表面粗糙,含量约占整体的80%左右。部分晶粒中间较污浊,边缘干净,呈雾心亮边特征,后期具有一定的重结晶和次生加大生长过程。红色条带区域中的白云石颗粒更小,溶蚀现象更明显。

通过显微镜和扫描电镜鉴别表明,红色条带矿物组合为白云石50%、硅酸盐矿物(绢云母、钾长石)45%、石英1%和铁质成分2%;黄色条带矿物组合为白云石80%、硅酸盐矿物(绢云母、钾长石)15%、石英1%和铁质1%。

3.3 木纹石胶结物特征

岩石中白云石晶粒间存在泥质胶结物。通过电镜面扫描分析直观地显示出胶结物与白云石矿物的分布状态(图3),Si、K与Al的分布特点相同,

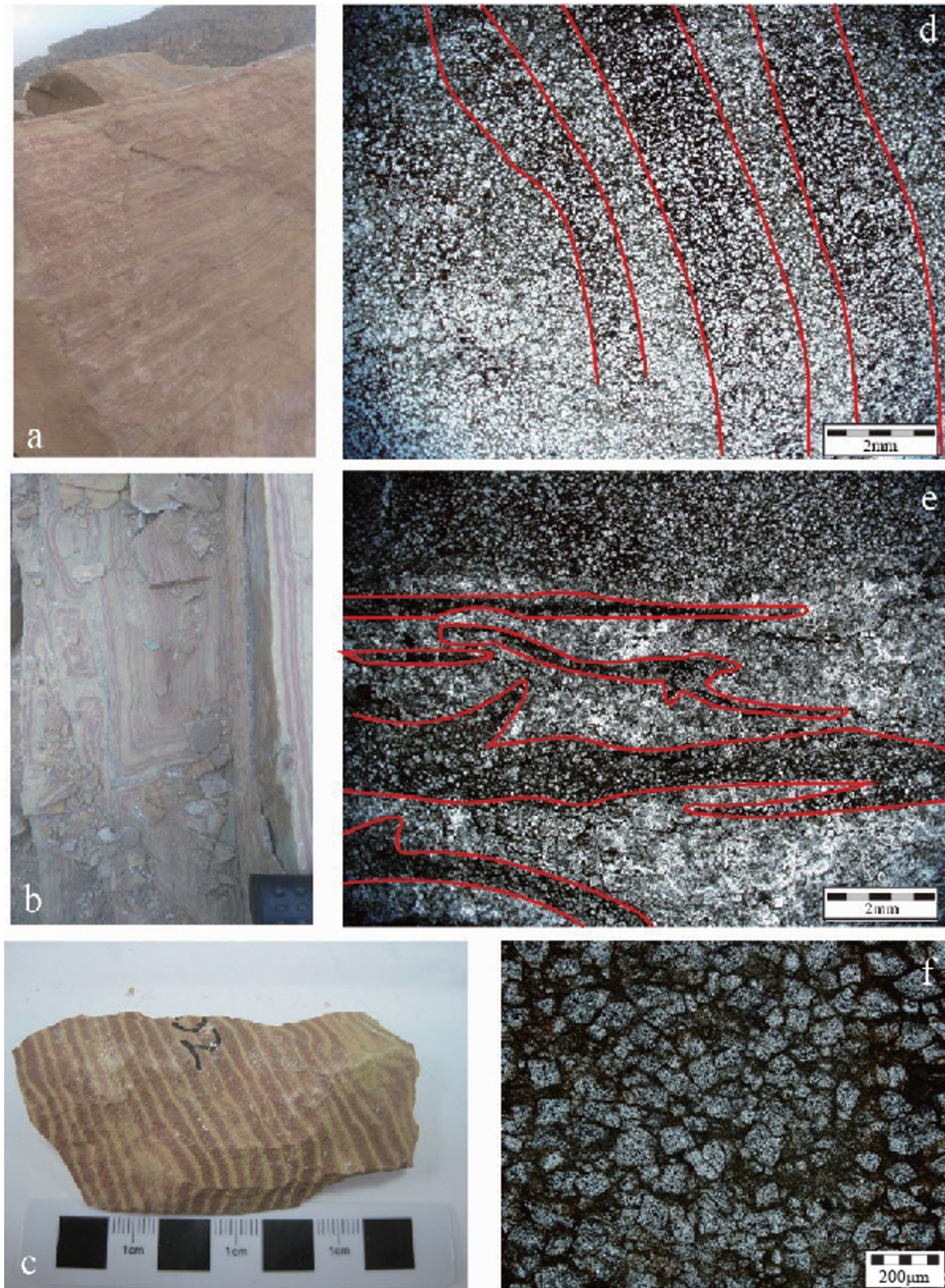


图2 内蒙古清水河木纹石宏观及显微镜下特征

a、b—木纹石野外照片,木纹形态受裂隙限制;c、d、e—木纹纹理在手标本和显微镜下特征;f—中-细晶自形白云石

Fig.2 Macroscopic and microscopic characteristics of wood-like stone from Qingshuihe, Inner Mongolia

a,b— Wood-like stone outdoor photos: Wood grain form is limited by cracks; c,d,e—Wood texture under hand specimen and microscope;f—Photo of medium-fine crystal self-formed dolomite

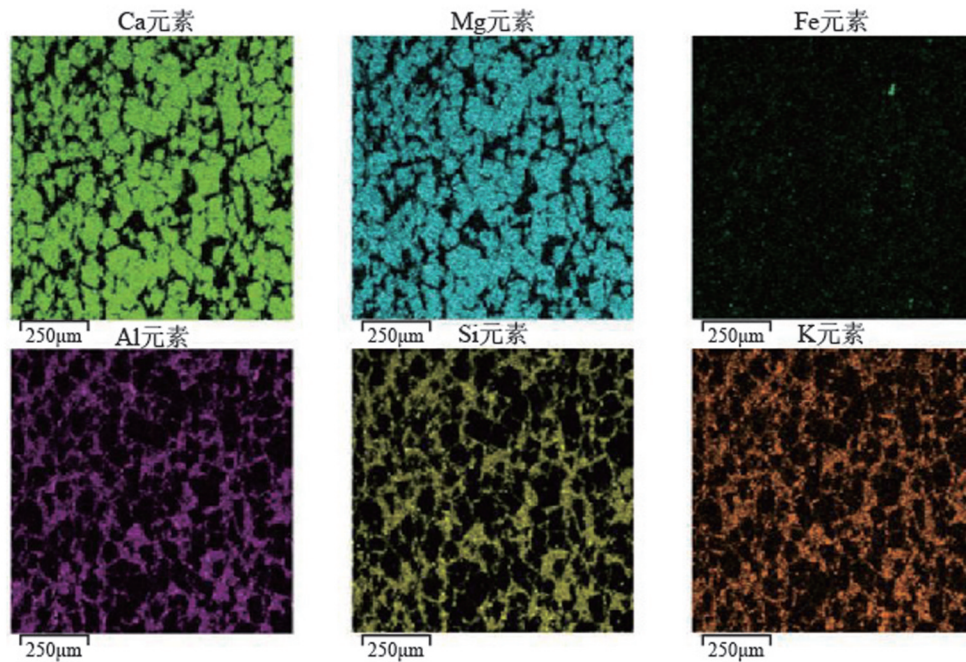


图3 内蒙古清水河木纹石电镜面扫描图
Fig.3 Electron microscope scan of wood-like stone

Ca与Mg的分布方式一致。电子探针和能谱分析发现,其泥质物质主要为含钾铝硅酸盐矿物,主要是绢云母、钾长石及黏土矿物,含有微粒黄铁矿和褐铁矿及少量微小的稀土矿物颗粒。在显微镜下观察不同纹饰环带中泥质成分含量明显不同,红色条带泥质胶结物分布几乎占到了40%~45%,黄色条带泥质胶结物为10%~15%,红色条带相对黄色条带中泥质胶结物的成分明显更多(图4)。

4 岩石地球化学特征

4.1 岩石主量元素特征

根据内蒙古清水河木纹石中的条纹发育特征,笔者选择了1件红色条带、1件黄色条带和2件含红-黄混合条带的岩石样品进行了分析。结果(表1)显示木纹石CaO含量为20.67%~25.79%,MgO为14.93%~17.44%,SiO₂为10.85%~22.69%,Al₂O₃为

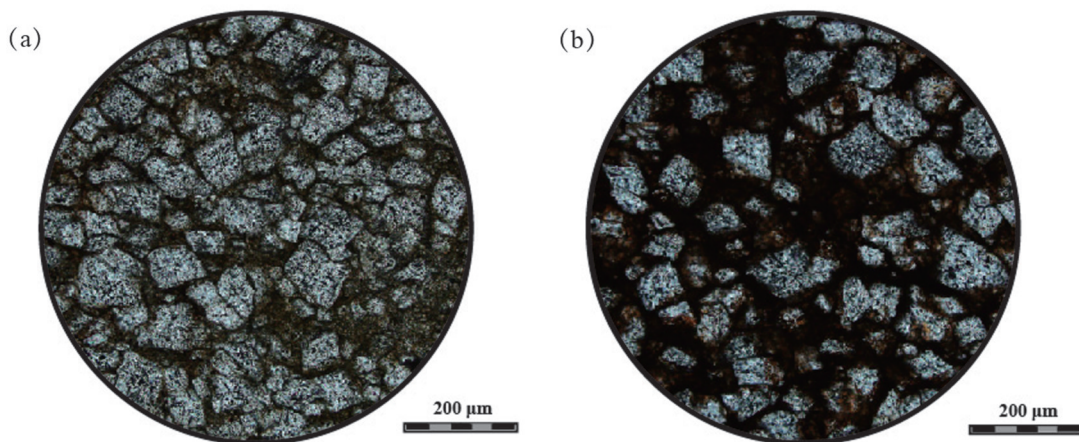


图4 内蒙古清水河木纹石红-黄条带显微镜下胶结物特征(a为黄色条带, b为红色条带)
Fig.4 Red-yellow band cements of wood-like stone under microscope (a-yellow band, b-red band)

表1 内蒙古清水河木纹石主量元素含量(%)与微量元素(10^{-6})分析结果Table1 Analysis results of main element content (%) and trace element (10^{-6}) of Qingshuihe wood-like stone in Inner Mongolia

样品编号	16QS10	16QS11	16QS131	16QS132	混合平均
岩石	黄色条纹	红色条纹	混合	混合	混合平均
SiO ₂	10.85	13.69	20.69	22.25	21.47
Al ₂ O ₃	2.76	4.02	5.29	5.06	5.175
Fe ₂ O ₃	1.16	1.55	1.66	1.63	1.643
FeO	0.35	0.31	0.32	0.32	0.32
CaO	25.79	24.49	21.32	20.67	20.995
MgO	17.44	16.96	15.01	14.93	14.97
K ₂ O	1.07	1.82	2.52	2.65	2.585
Na ₂ O	1.55	0.07	0.07	0.26	0.165
TiO ₂	0.15	0.19	0.29	0.3	0.291
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.06	0.07	0.065
MnO	0.027	0.028	0.025	0.024	0.0241
灼失	40.46	37.93	33.45	32.08	32.765
Total	101.67	101.12	100.70	100.24	100.46
Li	6.75	3.89	9.17	10.7	9.935
Be	0.66	0.36	0.93	0.89	0.91
V	25.4	20.8	30.8	46.8	38.8
Cr	8.91	11.3	13.2	27.4	20.3
Co	1.84	1.37	1.83	2.07	1.95
Ni	6.01	4.65	6.29	6.86	6.575
Cu	4.78	4.48	9.03	10.5	9.765
Zn	13.2	28.4	49.4	31.9	40.65
Ga	2.9	4.25	7.4	8.3	7.85
Rb	22.7	31.8	48.2	52.5	50.35
Sr	129	465	203	232	217.5
Y	6.75	7.19	6.21	5.8	6.005
Zr	30.1	42.6	67.1	72.3	69.7
Nb	5.96	7	10.2	11.6	10.9
Mo	0.23	0.19	0.19	0.31	0.25
Sn	0.64	1.22	1.7	1.74	1.72
Cs	1.53	1.5	1.91	1.73	1.82
Ba	53.6	63.5	90.7	112	101.35
La	11.32	9.4	10.89	13.93	12.41
Ce	19.58	16.66	19.46	23.49	21.475
Pr	2.71	2.28	2.6	2.67	2.635
Nd	9.46	8.21	9.35	8.69	9.02
Sm	2.04	1.74	1.85	1.45	1.65
Eu	0.47	0.38	0.39	0.3	0.345
Gd	2.07	1.66	1.83	1.42	1.625
Tb	0.28	0.26	0.27	0.18	0.225
Dy	1.51	1.4	1.56	0.95	1.255
Ho	0.31	0.28	0.31	0.2	0.255
Er	0.84	0.86	0.94	0.58	0.76
Tm	0.12	0.14	0.14	0.1	0.12
Yb	0.8	0.81	0.95	0.65	0.8
Lu	0.11	0.12	0.14	0.11	0.125
Hf	2.58	3.27	3.29	3.28	3.285
Ta	0.56	0.43	0.66	1.02	0.84
Tl	0.12	0.22	0.23	0.22	0.225
Pb	8.82	15	13	15.4	14.2
Th	4.88	5.48	7.63	8.65	8.14
U	1.28	1.14	1.54	1.5	1.52
ΣREE	51.64	44.2	50.68	54.74	52.71
LREE	45.58	38.67	44.55	50.54	47.545
HREE	6.054	5.53	6.14	4.2	5.17
LREE/HREE	7.53	6.99	7.26	12.04	9.65
HREE/LREE	0.133	0.143	0.137	0.083	0.104
La _N /Yb _N	10.11	8.33	8.21	15.32	11.765
δEu	0.7	0.69	0.64	0.63	0.635
δCe	0.87	0.88	0.9	0.94	0.92

2.76%~5.29%, K₂O为1.07%~2.65%,其中SiO₂、K₂O的含量远大于沉积白云岩, CaO和MgO的含量小于沉积白云岩(沉积白云石标准引自周振玲等, 1980), 与前人对木纹石的化学分析结果相比较, SiO₂和Al₂O₃的含量差距较大(侯占和等, 2013)。黄色条带样品的主量元素含量: CaO为25.79%, MgO为17.44%, SiO₂为10.85%, Al₂O₃为2.76%, K₂O为1.07%。红色条带样品的主量元素含量: CaO为24.49%, MgO为16.96%, SiO₂为13.69%, Al₂O₃为4.02%, K₂O为1.82%。黄色条带岩石样品与红色条带的CaO、MgO成分相差不大, 但SiO₂、Al₂O₃、K₂O相差较多。并且单个条带中CaO、MgO成分均为Ca、Mg、CO₃²⁻的含量高于混合条带, Si、Al、Fe³⁺、K含量则低于混合条带。

4.2 岩石微量元素特征

微量元素对沉积岩的形成机制有着重大意义。它不仅可以反演地质体内部的地球化学状态, 而且在判断沉积岩的形成环境和条件, 示踪沉积岩的成岩物质的来源方面, 也具有好的指示作用(Murray et al., 1990; Munksgaard et al., 2003; Zhou et al., 2008)。木纹石微量元素经上地壳成分标准化后显示, 微量元素含量绝大部分低于上地壳中的含量, 微量元素之间存在着明显差异, 富集Rb、Sr、Nb、Ta等大离子亲石元素, 亏损亲铁元素Co、Ni、Mo, 不同颜色条带样品中的微量元素含量趋势大致相同, 与黄色条带相比, 红色条带中Li、Be、Co、Ni、Ta含量偏低, Zn、Ga、Rb、Sr、Tl、Pb、Sn、Zr、Hf、Y含量偏高(图5)。

木纹石样品中稀土元素总量(ΣREE)在44.20×10⁻⁶~54.74×10⁻⁶, 轻稀土(LREE)含量38.67×10⁻⁶~50.54×10⁻⁶, 重稀土(HREE)含量4.20×10⁻⁶~6.054×10⁻⁶, 轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为6.99~12.04。La_N/Yb_N变化于8.21~15.32, 表现出研究区样本富集轻稀土亏损重稀土的特征, δEu的范围在0.63~0.70, 为负异常。δCe数值为0.87~0.94, 整体表现出弱的负异常。用球粒陨石与北美页岩数据分别进行标准化对比可以解释沉积物源区特征, 并反映样品对地球原始物质的分异程度和混合均化影响。图解中稀土元素整体都小于北美页岩, 稍微呈右倾趋势(图5b); 球粒陨石标准化图解看出样品REE的富集和亏损基本一致, 总体看来轻稀土相对

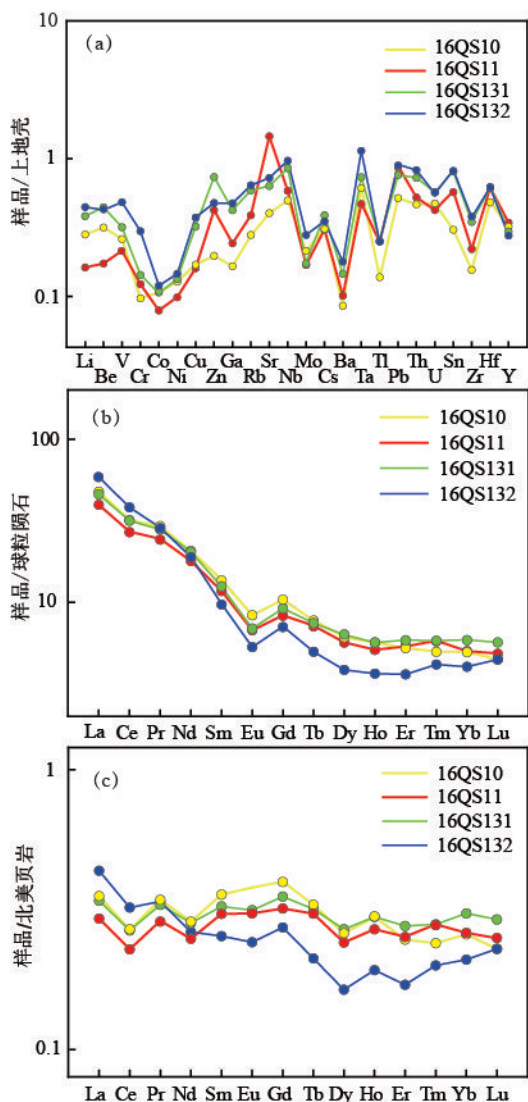


图5 清水河地区木纹石微量元素蛛网图(a)、球粒陨石标准化稀土分布模式(b)及北美页岩标准化蛛网图(c)

Fig.5 Spider diagram of trace elements of wood-like stone from Qingshuihe area (a), normalized REE distribution pattern of chondrite (b) and normalized REE distribution pattern of North American shale (c)

富集、重稀土元素相对亏损,分馏程度较高(图5c)。

5 讨论

5.1 条带成分差别

宏微观矿物鉴别表明,红色条带矿物为白云石 50%+绢云母及钾长石 45%+石英 1%+铁质 2%,而黄色条带矿物是白云石 80%+绢云母及钾长石 15%+石英 1%+铁质 1%。可以看出,红色条带相对黄白色条带硅酸盐成分明显偏多,特别体现在矿

物含量方面。

在化学成分方面,黄色条带中Ca、Mg的含量高于混合条带,Si、Al、 Fe^{3+} 、K低于混合条带。红色条纹与黄色条纹成分也有明显区别,红色条带中Si、Al、 Fe^{3+} 、K元素的成分相比黄色条带中高出50%左右,Ca、Mg、Na、 CO_3^{2-} 的含量相对的就少。总体上,红色条带中Si、Al、 Fe^{3+} 、K、Zn、Ga、Rb、Sr、Pb、Th等元素含量高,而Ca、Mg、Na、Li、Be、Co、Ta、U、Ni含量相对较低(图6)。其中从黄色、红黄相间到红色为主、红色条带成分中Sr元素含量依次增加,显示了Sr元素变化与条带颜色变化有明显的正相关关系(图7)。Sr元素在在碳酸盐岩成岩和白云岩化的过程中是十分容易流失的(Warren, 2000; Brand, 2010; 胡作维等, 2011),但Sr和K的离子半径相差不大, Sr^{2+} 能被捕获在含钾矿物中 K^+ 的位置上,红色条带部分有较多含K的绢云母和钾长石,有利于Sr的富集,导致Sr含量与颜色呈正相关。

元素线扫描横坐标是选择的样品位置,纵坐标代表元素的特征X射线计数强度,每种元素用一种颜色的曲线表示在样品这条线上的浓度变化,强度越高的位置,元素含量越高。尽管此方法只能够做到半定量,但结果却体现一些明显的差异。通过一条穿过木纹石红黄区域的线扫描图发现,Fe元素的分布规律与Si的分布具有相似性,并且红色条带区域在扫描电镜线扫描中显示出Fe元素的计数频率(cps)多大于350,而黄色条带中Fe的计数频率(cps)普遍小于350,这体现了两者之间Fe元素含量的差别。用Fe元素计数频率350为标准对区域进行划分有很好的相关性(图8)。

5.2 条带形成条件分析

前述分析表明,木纹石木纹状构造的形成与层中 Fe^{3+} 元素含量直接相关。木纹石中白云石间隙中填充着许多非碳酸盐矿物,以泥质为主,含少量顺层分布的黄铁矿、褐铁矿,黄铁矿形状为小圆球状。木纹石中含相对较高的Th,Th/U、V/Cr比值可作为判别沉积环境中氧化还原条件的影响(颜佳新等, 1998; Kimura et al., 2001; 袁颖等, 2017),Th和U元素均属极不相容元素,Th不受氧化还原条件的影响,在强氧化条件下,铀易于氧化流失,导致Th/U值偏高,红色条带中Th/U的数值大于黄色条带,V/Cr小于黄色条带意味着条带之间存在着不同的氧化

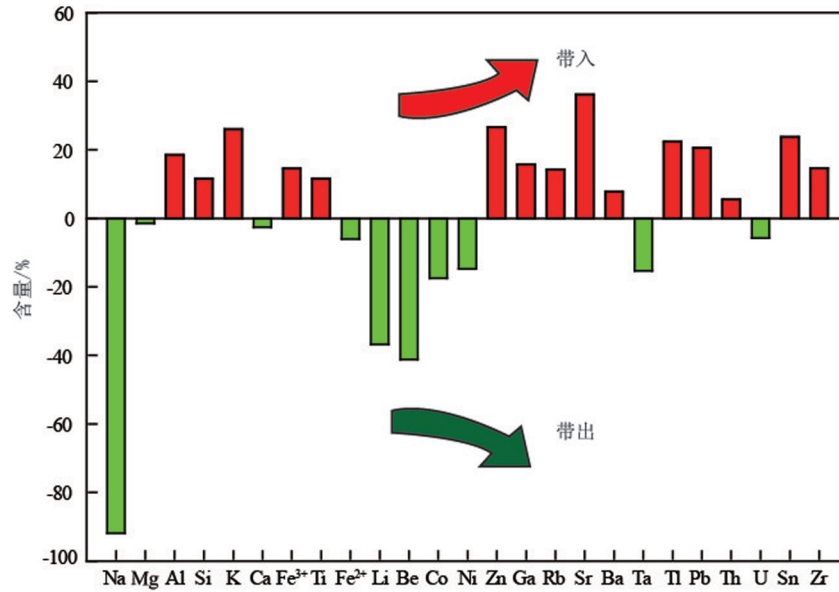


图6 红色条带成分带出带入图
Fig.6 Changes in the chemical composition of the red bands

条件。 Fe^{2+} 在黄色条纹中含量0.35%，较红色条纹高，而 Fe^{3+} 在红色条纹中含量为1.55%，较黄色条纹高，红色和黄色条纹的氧化程度($Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$)分别为76.8%和82.3%。 Fe^{3+} 不溶于水，而 Fe^{2+} 溶解度较高。这就意味着Fe元素在溶体内运动过程中受规律性的条件影响，Fe通常以二价态形式活动，受到氧化时Fe离子成为三价态，则不在跟随溶液运动而沉积下来，在胶结物成分相对较多的区域富集下来，形成红色条纹。

目前研究按成因类型，可以将白云岩分成同沉积白云岩和沉积后白云岩(Budd, 1997)。热液白云

岩属于典型的后生白云岩。为了区别于沉积成岩阶段形成的白云岩，将所有与热水溶液有关的白云岩称为热液白云岩(李群等, 2018)。根据区分岩浆碳酸岩与沉积碳酸盐岩的 $Yb/(Ca+Mg)-Yb/La$ 图解分析，大部分样品投在热液成因的区域(图9)，体现出

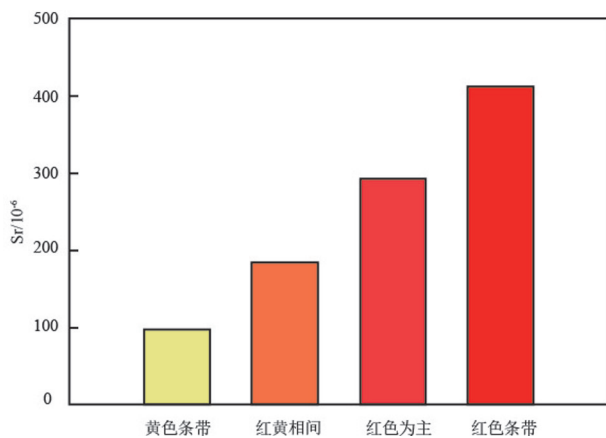


图7 木纹石不同条带中Sr元素含量图
Fig.7 Sr element content in different bands of wood-like stone

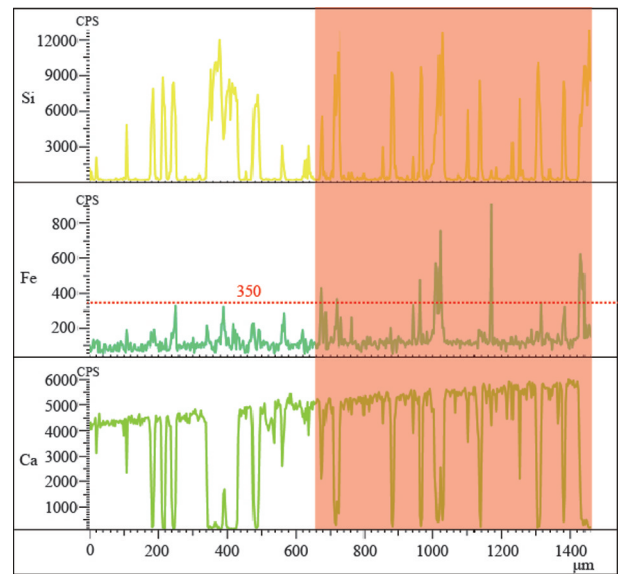


图8 木纹石红-黄带线扫描数据
Si、Fe、Ca线扫描结果，红色区域为红色条带，红线为划定的标准线
Fig.8 Si, Fe, Ca line scan data of wood-like stone red-yellow band
red area-red band, red line-demarcated standard line

岩石整体受到热液的影响。红黄条带中白云石不同的溶蚀程度也表明不同的条带受到热液温度的影响程度不同,白云石对 Pb^{2+} 的吸附受pH与温度影响,在正常pH中, Pb^{2+} 在低温下为物理吸附,随温度增加物理化学吸附同时增加(倪浩等,2016),红带中 Pb^{2+} 的明显大于黄带中的值,说明红带所经历的温度应该比黄带高,导致环带之间存在着不同的氧化环境,也有可能是硅酸盐吸附的 Pb^{2+} 造成的。因此不同氧化程度交替出现则形成红色-黄色环带。

5.3 木纹石形成环境及过程探讨

木纹石产于内蒙古地区的黄河中游冶里组灰岩中,构造上属于鄂尔多斯盆地东北边缘,在冶里组形成的早奥陶世属于依然处于海相沉积环境,木纹石的 MgO/CaO 、 $(MgO)/(Al_2O_3)$ (王亚男,2012)、 Sr/Ba (郑荣才,1999;李敏等,2010)也显示反映出原岩沉积环境是浅海陆棚相沉积特征。作为古陆边缘局限台地白云岩相,包括木纹石的整套岩系应该为相对还原的环境(包洪平等,1999;冯增昭等,1999;宋到福,2009), δCe 通常可以作为判断流体环境和性质的重要指标,利用 $\delta Ce = 0.78$ 作为划分氧化还原环境参考的界限值(徐晓春等,2009)。木纹石 δCe 均大于界限值,显示当时古海洋为还原环境,与前人研究结果一致。晚寒武世末期和早奥陶世冶里期整体上升,岩石产生裂隙(冯增昭等,2003;董兆雄,2010;刘丽红,2020)。

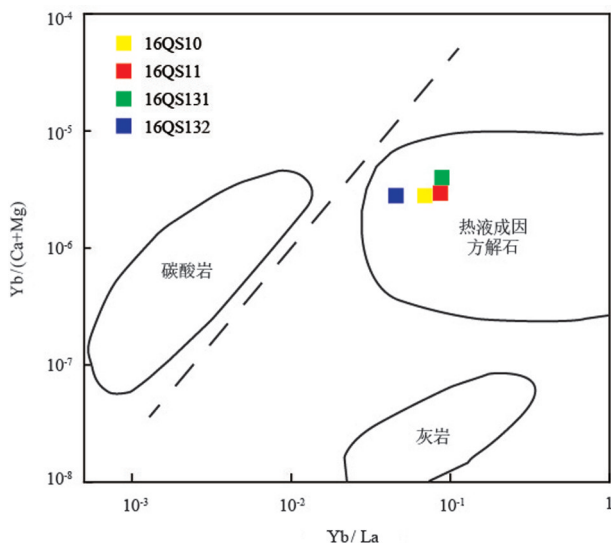


图9 Yb/La-Yb/(Ca+Mg)图解(底图引自肖荣阁等,2003)
Fig.9 Yb/La-Yb/(Ca+Mg) diagram (base map after Xiao Rongge et al., 2003)

在后期演化过程中,地下(热)水沿裂隙对木纹石原岩进行渗透淋滤,导致胶结物成分含量发生变化,热水向岩石内部渗透过程中受到规律性温度变化(如季节温差)的影响, Fe^{2+} 离子在温度较高时,相对较多的离子氧化为 Fe^{3+} 沉积下来,沉积下来的 Fe^{3+} 被胶结物吸附,形成红色条纹;而温度相对较低时,相对较少的 Fe^{2+} 变为 Fe^{3+} ,大部分 Fe 离子依然以二价态向前渗透,形成黄色条带,温度交替如季节轮环往复形成独特的环带状构造。

6 结 论

(1)木纹石岩性为细晶白云岩,白云石呈自形一半自形菱形粒状,胶结物为泥质,泥质主要以绢云母、钾长石和黏土矿物为主,含少量稀土矿物、钛铁矿、黄铁矿和褐铁矿等金属矿物。

(2)岩石中红色环带相对黄色环带富 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 Sr ,线扫描结果显示红色环带中 Fe 元素的含量稍大于黄色环带,以计数频率(cps)350作为标准可以很好地区分红黄条带。

(3)海相碳酸盐在后期演化过程中,地下(热)水沿裂隙对岩石进行渗透淋滤,导致胶结物中矿物及三价铁离子含量相对变化,形成以裂隙为边界的环形环带,状如树木纹饰。

致谢:本论文在野外调研过程中得到了清河县国土资源局的帮助和指导,测试分析过程中得到了中国地质大学地质研究院电子探针室、天津地质矿产研究所、核工业研究所有关老师的帮助,测试分析和数据处理过程中得到了董朋生、孙转荣、李华伟等的帮助和指导,匿名审稿老师的审稿意见也使作者受益匪浅,在此一并表示感谢。

Reference

- Bao Hongping, Yang Chengyun, 1999. Carbonate microfacies analysis and its significance in the study of lithofacies palaeogeography[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(6):59-64(in Chinese).
- Brand Uwe, Azmy Karem, Tazawa Jun ichi, Sano Hiroyoshi, Buhl Dieter. 2010. Hydrothermal diagenesis of Paleozoic seamount carbonate components[J]. *Chemical Geology*, 278(3/4):173-185.
- Budd D A. 1997. Cenozoic dolomites of carbonate islands: Their attributes and origin[J]. *Earth-Science Reviews*, 42(1): 1-47.
- Couch E L. 1971. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. *AAPG Bull*, 55(10):1829-1837.
- Dong Zhaoxiong, Yao Jingli, Sun Liuyi, Bao Hongping, Wang

- Hongwei, He Jiang, Fan Peng. 2010. The carbonate platform sedimentary model of southern Ordos basin[J]. *Geology in China*, 37(5):1327–1335(in Chinese with English abstract).
- Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Kang Qifa, Zhang Yongsheng, Tan Jian, Li Zhenya, Pang Fumin, Zhao Xueren, 1999. Paleogeography of Ordovician in Ordos[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1(3):83–94(in Chinese with English abstract).
- Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, Bao Zhidong. 2003. Lithofacies paleogeography of Early Ordovician in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 5(1):1–16 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zhanhe, Chen Jun, Wang Guangmei. 2013. Research on ornamental stone resources in Inner Mongolia[J]. *Western Resources*, (4): 103–108(in Chinese).
- Hu Zuowei, Huang Sijing, Zhang Chao, Lang Xianguo, Zhuo Ye. 2011. A review of dolomitization models of carbonates[J]. *Marine Geology Frontiers*, 27(10):1–13(in Chinese with English abstract).
- Kimura H, Watanabe Y. 2001. Oceanic anoxia at the Precambrian–Cambrian boundary[J]. *Geology*, 29(11): 995.
- Li Haifu. 1995. Ornamental stone resources in Inner Mongolia[J]. *Jewelry Technology*, (2): 56–59(in Chinese).
- Li Min, Jie Yongping. 2010. Sedimentary geochemistry characteristics and its sedimentary environment significance[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 36(16): 41–43(in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Wang Chunlian, Li Lixia, Du Zhili, Tang Yue, Hang Miao. 2020. The characteristics and formation mechanism of Ordovician dolomite in Member 6 of Majiagou Formation in South Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 47(3): 810–820(in Chinese with English abstract).
- Lin Yuxiang, Meng Cai, Han Jilei, Zhu Chuanzhen, Wang Yuwei, Zhao Hui, Cao Gaoshe. 2015. Characteristics of lithofacies paleogeography during Paleogene–Neogene in the area of North China platform[J]. *Geology in China*, 42(4): 1058–1067(in Chinese with English abstract).
- Li Qun, Bao Zhiwei. 2018. Hydrothermal dolomite: A review and perspective[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(4): 699–717(in Chinese with English abstract).
- Murray R W, Buchholtz t B M R, Jones D L, Gerlach D C, Russ III G P. 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 18(3): 268.
- Munksgaard N C, Lim K, Parry D L. 2003. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 57(3): 399–409.
- Ni Hao, Li Yilian, Cui Ruiping, Lu Yu, Yang Guodong. 2016. Kinetics and thermodynamics of Cu^{2+} and Pb^{2+} adsorption from aqueous solutions onto dolomite adsorbent[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 10(6): 3077–3083(in Chinese with English abstract).
- Song Daofu. 2009. Study on Lithofacies Palogeography of Ordovician of Ordos[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Su Lishe. 2017. Yellow River stone appreciation[J]. *Huabei Natural Resources*, (1): 81–85(in Chinese).
- Wang Yanan. 2012. Study on Stratigraphic Geochemistry and Ore–controlling Effect of Yuele Lead–zinc Deposit in Northeast Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Warren J. 2000. Dolomite: Occurrence evolution and economically important associations[J]. *Earth–Science Review*, 52(1/3):1–81.
- Wang Zhaopeng, Chen Jitao, Liang Taitao, Yuan Jinliang, Han Chao, Liu Jiaye, Zhu Chenlin, Zhu Decheng, Han Zuozhen. 2020. Spatial variation in carbonate carbon isotopes during the Cambrian SPICE event across the eastern North China Platform[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 546: 109669.
- Xiao Rongge, Fei Hongcai, An Guoying, Zhang Hancheng, Hou Wanrong. 2003. Lithology and genesis of dolomite in Baiyun Ebo Mine, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 17(3): 287–293(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Wang Wenjun, Xiong Yaping, Chu Pingli, Fang Haibo, Zhao Lili. 2009. REE geochemical characteristics of the Lower Cambrian black shale series in Shitai area, Anhui Province, and their geological significance[J]. *Journal of Rock Mineralogy*, 28(2): 118–128(in Chinese with English abstract).
- Yan Jiabin, Xu Siping, Li Fanglin. 1998. Geochemical of the dysaerobic sedimentary environment of the Qixia Formation in Badong, Hubei[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 18(6): 27–32(in Chinese with English abstract).
- Yuan Ying, Chen Zhiming. 2017. Application of trace elements in the research of sedimentary rock[J]. *Urban Geology*, (8): 75(in Chinese).
- Zhao Guozhu, Liu Mingjun, Yang Yuwen. 2015. Geological features and work suggestions of dolomite mine in Qingshuihe County[J]. *China Nonmetallic Minerals Industry*, (1):40–41(in Chinese).
- Zheng Rongcai. 1999. Study on paleosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 20(1): 20–25(in Chinese with English abstract).
- Zhou Houyun, Wang Qing, Zhao Jianxin, Zheng Lina, Guan Huazheng, Feng Yuexing, Alan Greig. 2008. Rare earth elements and yttrium in a stalagmite from Central China and potential paleoclimatic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 270(1/2): 128–138.
- Zhou Zhenling, Li Gongyuan, Song Tongyun, Liu Yuguang. 1980. On the geological characteristics and genesis of the dolomitic carbonates at Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 26(1):35–42.

附中文参考文献

- 包洪平, 杨承运. 1999. 碳酸盐岩微相分析及其在岩相古地理研究中的意义[J]. 岩相古地理, 19(6): 59-64.
- 董兆雄, 姚泾利, 孙六一, 包洪平, 王红伟, 何江, 范鹏. 2010. 重新认识鄂尔多斯南部早奥陶世马家沟期碳酸盐台地沉积模式[J]. 中国地质, 37(5): 1327-1335.
- 冯增昭, 鲍志东, 康祺发, 张永生, 谭健, 李振亚, 庞福民, 赵学仁. 1999. 鄂尔多斯奥陶纪古构造[J]. 古地理学报, 1(3): 83-94.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 鲍志东. 2003. 中国早奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 5(1): 1-16.
- 侯占和, 陈军, 王光梅. 2013. 内蒙古观赏石资源考[J]. 西部资源, (4): 103-108.
- 胡作维, 黄思静, 张超, 郎咸国, 周桦. 2011. 碳酸盐白云化作用模式研究进展[J]. 海洋地质前沿, 27(10): 1-13.
- 李海负. 1995. 内蒙古的观赏石资源[J]. 珠宝科技, (2): 56-59.
- 李敏, 颀永平. 2010. 不同沉积地球化学特征对沉积环境的指示意义[J]. 内蒙古石油化工, 36(16): 41-43.
- 李群, 包志伟. 2018. 热液白云岩的研究现状及展望[J]. 大地构造与成矿学, 42(4): 699-717.
- 林玉祥, 孟彩, 韩继雷, 朱传真, 王玉伟, 赵慧, 曹高社. 2015. 华北地台区古近纪一新近纪岩相古地理特征[J]. 中国地质, 42(4): 1058-1067.
- 刘丽红, 王春连, 李丽霞, 杜治利, 唐跃, 韩森. 2020. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系马六段白云岩特征及形成机制研究[J]. 中国地质, 47(3): 810-820.
- 倪浩, 李义连, 崔瑞萍, 逮雨, 杨国栋. 2016. 白云石矿物对水溶液中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附的动力学和热力学[J]. 环境工程学报, 10(6): 3077-3083.
- 宋到福. 2009. 鄂尔多斯地区奥陶纪岩相古地理研究[D]. 青岛: 山东科技大学.
- 苏立社. 2017. 黄河石欣赏[J]. 华北国土资源, (1): 81-85.
- 王亚男. 2012. 滇东北悦乐铅锌矿区地层地球化学及控矿作用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 肖荣阁, 费红彩, 安国英, 张汉成, 侯万荣. 2003. 内蒙古白云鄂博矿区白云岩岩石学及其成因研究[J]. 现代地质, 17(3): 287-293.
- 徐晓春, 王文俊, 熊亚平, 褚平利, 房海波, 赵丽丽. 2009. 安徽石台早寒武世黑色岩系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2): 118-128.
- 颜佳新, 徐四平, 李方林. 1998. 湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征[J]. 岩相古地理, 18(6): 27-32.
- 袁颖, 陈志铭. 2017. 微量元素在沉积岩研究中的应用[J]. 城市地理, (8): 75.
- 赵国柱, 刘明君, 杨玉文. 2015. 清水河县白云岩矿地质特征及工作建议[J]. 中国非金属矿工业导刊, (1): 40-41.
- 郑荣才. 1999. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 20(1): 20-25.
- 周振玲, 李功元, 宋同云, 刘宇光. 1980. 内蒙古白云鄂博白云石碳酸盐的地质特征及其成因探讨[J]. 地质论评, 26(1): 35-42.