

滇中地区大龙口组微亮晶(白齿)碳酸盐岩研究

刘贺娟¹, 孟祥化², 葛 铭²

(1. Technology University of Clausthal, Germany, Clausthal-Zellerfeld, 38678;
2. 中国地质大学 沉积盆地研究所, 北京 100083)

摘要: 运用多种技术方法,如电子探针、扫描电镜、电子显微镜等,对滇中地区大龙口组中的微亮晶碳酸盐岩进行了宏观、微观、成岩作用和成因分析。研究表明,大龙口组中的微亮晶以3种形式存在于底基质中:呈散乱的微亮晶颗粒分散于底基质中,呈等粒微亮晶集合体分布于白齿构造条带内,或呈鲕粒、内碎屑或藻团块的胶结物形式存在。白齿构造内部的微亮晶并不是完全致密状排列的,晶间有石膏充填,电子探针分析结果表明其含有Ca、Si、Al、Ti,为晚期成岩阶段晶间水中析出的产物。藻叠层石与白齿构造出现共生的现象表明,白齿构造可能与藻类存在某种成因联系,微亮晶集合体作为藻屑或鲕粒的胶结物出现,显示高能动荡水体中生物化学作用和水动力化学作用的结果。文中同时解释了中间宽、两端尖细的白齿构造的成因,分叉的次级白齿构造是应力降低的结果,受岩石的非均质性和各向异性的影响。对白齿构造的成因分析表明,母岩中的有机质被埋藏后经细菌分解产生生物气造成局部高压环境,当超过临界压力时岩石就破裂产生裂隙,而后裂隙中充填的溶液快速结晶成岩,使压力转移而在另一部位聚集高压,然后重复上一过程,从而使岩石中出现密集的微亮晶构造,直到与围岩压力平衡为止。

关键词: 白齿构造;微亮晶;大龙口组;生物气

中图分类号: P588.24⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)02-0181-10

A study of microsparite (molar-tooth) carbonates of Dalongkou Formation in central Yunnan

LIU He-juan¹, MENG Xiang-hua² and GE Ming²

(1. Technology University of Clausthal, Germany, Clausthal-Zellerfeld, 38678, Germany; 2. Institute of Sedimentary Basin, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the macroscopic and microscopic features, diagenesis and origin of microsparite (molar-tooth) carbonates of Dalongkou Formation have been analyzed based on various kinds of technical methods, such as EMPA, SEM and EM. The results demonstrate that microsparite calcite can exist in the substrate in three forms: it can be distributed disorderly in the micrite, or it serves as the equal-grained microsparite assemblage filling in the general molar-tooth structure belt, or it can act as the cement between the ooids, intraclast, and algae aggregate composed of microcrystal calcite. The microsparite calcite crystals in the molar tooth structure are not wholly arranged in the dense form, and there are some gypsums infilling the intercrystal pores. It can be seen from the result of EMPA that it contains Ca, Si, Al and Ti, which precipitated from the intercrystal pore at the late diagenetic stage. The algal stromatolite can exist with molar tooth structures, suggesting that the formation of molar tooth structure had some relationship with algal; the assemblage of microsparite can serve as the cement of algae aggregates and oolite, exhibiting biochemical acting and hydrodynamic sorting in high energy water, which couldn't be caused directly by the algae. This paper has also interpreted the reason why the molar-

收稿日期: 2011-06-29; 修订日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772078), 国际地质对比计划 447 项目(IGCP447 X SC/GEO/546/447)

作者简介: 刘贺娟(1983-), 女, 博士研究生, 从事碳酸盐岩沉积地质学、储层建模、油藏模拟研究, E-mail: liuhejuan19831230@yahoo.com.cn

tooth structures with wide middle part and tip end point appeared. The branched secondary molar tooth structures were induced by the reduction of stress which was affected by the heterogeneity and anisotropy of the rocks. It is shown from the genetic analysis that the formation processes of molar-tooth structure were as follows: the partly high pressure environment in the rock was caused by the decomposition of organic matter in the substrate induced by the bacteria. When the pressure exceeded the breakdown pressure, the rock failed and all kinds of cracks came into being. After that, the liquid filled up the cracks and crystallized quickly, causing the transference of high pressure to other places, resulting in the continuation of the same process and the appearance of condensed molar-tooth structures until the equilibrium of the pressure in the rock.

Key words: molar tooth structure; microsparite; Dalongkou Formation; biogas

臼齿构造(molar-tooth structure,简称 MT),最早由 Bauerman(1885)命名,是前寒武纪,特别是中-新元古代一种由均一、等粒的约为 5~20 μm 的微亮晶方解石组成的特殊矿物集合体(Bauerman, 1885)。宏观上有各种形态,如条带状、蝌蚪状、丝状、豆荚状等,历来因为形态复杂被冠以多种命名,如泥晶脉、微亮晶脉、纺锤状构造、蠕条状构造等。这里,臼齿构造为一个宏观概念,微亮晶(microsparite)为一个微观概念,微亮晶可以呈集合体构成臼齿构造,也可以以晶粒形式分散于底基质中。

微亮晶碳酸盐岩(臼齿构造碳酸盐岩)的出现不是偶然事件,而具有全球性分布的特征。如北美洲的美国、加拿大,南美洲,欧洲的挪威,亚洲的西伯利亚、中国,大洋洲的澳大利亚,南极洲等近 40 多个地区的地层中都有发现。在我国微亮晶碳酸盐岩(MT)广泛分布,在吉林浑江地区,辽宁本溪、金州、复州,北京燕山,山东,河南,安徽,苏北,内蒙凌源,四川会理,云南峨山县,石屏县等地都有出现。

因其特定的时限性(只局限于中-新元古代),自 1885 年被发现以后,对臼齿构造的研究始终没有间断,已发现的微亮晶碳酸盐岩(MT)都出现在 1900~750 Ma 这一特定地质时期,而最古老的 MT 出现在 >2500 Ma 的太古代末期,不能用“将今论古”的方法进行比较分析。因特定的时限性和全球广泛的特征,所以将其作为中-新元古代地层对比的标志层,对研究古大陆的分布有重要意义。

经过对臼齿构造碳酸盐岩的研究,前人已经在某些方面达成了共识,如臼齿构造成分、性质、与围岩(底基质)关系等。但也在很多地方存在争议:①臼齿构造与叠层石的共生问题,高林志等(2007)认为臼齿构造和叠层石可以出现在同一层位,礁顶部和叠层石之间均可发育臼齿构造,而也有学者认为,叠层石和臼齿构造基本不出现在同一层位,叠层石

在沉积环境水体较浅的环境中出现,通常为浅的潮下带(柱状)-潮间带(波状)-潮上带(纹层状),而臼齿构造产于潮下带深缓坡-浅缓坡环境,并常与风暴岩共生(Smith, 1968; James *et al.*, 1998; 葛铭等, 2003; 孟祥化等, 2006);②微亮晶脉中有有机质含量问题,一般来讲,底基质中有机质含量较高,而臼齿构造脉中几乎不含有机质,而在大龙口组中的臼齿构造脉中出现残留沥青质的成分,因此臼齿构造碳酸盐岩是否可作为烃源岩还需要进行深入研究;③臼齿构造的成因机制,几种典型的成因论包括地震液化成因论、藻类直接生长的有机论、有机地球化学论。对于臼齿构造的成因问题还应有进一步的研究。

滇中地区大龙口组臼齿构造极其发育,在所测的 270 层米级旋回层中出现了 150 多层的臼齿构造,类型繁多,形态多样,是研究臼齿构造特征、成因的理想剖面。且本区出现臼齿构造与叠层石共生的现象,对其进行深入研究有利于解释臼齿构造与叠层石的沉积环境关系。本文对滇中地区大龙口组臼齿构造碳酸盐岩进行了宏观(臼齿构造与围岩关系、发育的地层位置等)和微观(微亮晶在底基质中的赋存状态、微亮晶的成分、微亮晶的微观形态)研究,同时解释了臼齿构造的成因机制。此外,还探讨了臼齿构造碳酸盐岩中的生烃迹象,以期为今后探讨臼齿构造碳酸盐岩的生烃潜力研究打下基础。

1 地层学特征

大龙口组源于黄懿“大龙泉灰岩”(1939),第一届全国地层会议(1959)沿用易门勘探队的昆阳群划分方案(云南区域地质志,1990),改称为大龙口组。滇中地区大龙口组出露范围很大,广泛分布于易门-玉溪-峨山-石屏一带,本文研究范围为石屏县城北

部落水洞-坡头甸-哨冲-龙朋地区。

滇中地区大龙口组地层以发育白齿构造为典型特征，白齿构造丰度较高、类型繁多。大龙口组归属于昆阳群地层层序，由于认识不同，滇中地区中元古界昆阳群地层层序有多种划分方案，如正八组、倒置八组、正十二组、倒置十二组（李希劼等，1984；戴恒贵，1997；李希劼，1999）。随着最新锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄的获得，对地层划分和年代有了全新的认识。如在黑山头组富良棚段的凝灰质玄武岩中获得了 1 031~1 047 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄，在塔甸村黑山头组富良棚段的熔结凝灰岩中获得了 1 032 ± 9 Ma 的锆石 SHRIMP 年龄（张传恒等，2007）。这些新的同位素年龄数据为解决昆阳群的层序问题提供了重要的基础资料。

本文参照前人的地层划分方案以及前人所测的同位素资料（吴懋德等，1990；杜远生等，1999），采用倒置八组的地层划分方案，即将滇中地区中元古代昆阳群划分为下亚群和上亚群，下亚群自下而上为因民组、落雪组、鹅头厂组和绿汁江组；上亚群自下而上出露黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组（图 1）。

2 岩石学特征和微相研究

根据岩石组合、岩相、沉积构造等特征，将研究区大龙口组划分为 5 个岩性段（表 1），白齿构造主要出露于第四段中。白齿构造产于泥晶灰岩、泥质灰岩、粉屑灰岩等底基质母岩中，同时也以一种特殊

杜远生 (1990)	本文所采用划分方案		相对海平面变化	地质事件	沉积环境	构造背景
震旦系	震旦系		深 ← 浅			夭折裂谷盆地
青白口系	青白口系	晋宁运动(850 Ma)			滨海-浅海陆棚 浅海陆棚 潮下-潮间-潮上 开阔台地 台盆相 浅海陆棚 浅海陆棚 临滨 前滨	残余盆地
华家箐组	华家箐组	933、948、992、1 002 Ma(Rb-Sr)				
柳坝塘组	柳坝塘组	唐房运动(1 050 Ma)				
美党组	美党组	980 Ma(Pb)				
大龙口组	大龙口组	1 059 Ma(K-Ar)				
黑山头组	富良棚组	1 032 Ma(U-Pb) 1 032~1 047 Ma				
	黑山头组					
	黄草岭组					
	绿汁江组	东川运动				
	绿汁江组	1 330、1 376 Ma(Pb) 1 270 ± 95 Ma(U-Pb)				
	鹅头厂组	1 503 Ma(U-Pb)				
	落雪组	1 749 Ma(Pb)				
	因民组	1 765、1 676、1 805(U-Pb) 龙川运动(1 800 Ma)				
龙川群	龙川群					大陆边缘-小洋盆

注：★ 火山岩；▲▲ 冰积岩；▼▼ 裂谷角砾岩；☉ 叠层石
 （同位素测年数据引自吴懋德等，1990；李希劼，1999；杜远生等，1999；张传恒等，2007）

图 1 滇中地区地层划分和事件、沉积、构造背景（沉积、构造分析据杜远生等，1999）

Fig. 1 Stratigraphic division and events, sedimentary and tectonic setting of central Yunnan (sedimentary and tectonic analyses after Du Yuansheng *et al.*, 1999)

的微亮晶胶结物方式存在于藻鲕和砂屑颗粒间。

与泥晶相比,微亮晶的成分更加纯净,在中国地质大学(北京)进行了电子探针测试,并通过与天津蓟县中元古代高于庄组样品、新元古代营城子组和兴民村组样品电子探针分析结果对比(表 2)表明中元古代和新元古代的微亮晶组成具有相似的特征,即都以 Ca 为主,仅含微量的其他元素。大龙口组微亮晶以 Ca 为主,仅含微量的 Mg、Mn、Fe,说明微亮

晶结晶时的水体环境比较纯净, Mg、Mn、Fe 可能为成岩后期混入物,形成少量的菱镁矿、菱铁矿、绿泥石等,而底基质母岩中除 Ca 以外,还含有 Mg、Na、Al、K、Si,这说明母岩泥晶形成时的原始海水成分复杂,泥晶组成中的粘土含量高,从这一点来看,母岩基质与微亮晶的形成应是不同的海水环境,即微亮晶的结晶需要更加纯净的水体环境。

在中国石油勘探开发研究院对白齿构造碳酸盐

表 1 滇中地区大龙口组岩性特征

Table 1 Lithology of Dalongkou Formation in central Yunnan area

分段	岩性特征
五段	浅灰-灰黄色中-厚层状泥质条带状泥晶灰岩。 第三亚段 浅-深灰色、青灰色中层状叠层石微晶灰岩、微晶灰岩。
四段	第二亚段 浅-深灰、灰白、青灰色薄-厚层状藻屑灰岩、含藻颗粒、藻团块、藻凝块灰岩、MT 灰岩、粉-微晶灰岩,少量藻鲕白云岩、藻鲕灰岩和钙泥质板岩。 第一亚段 主要为大型条带状 MT 灰岩,少量含藻屑 MT 灰岩与泥晶灰岩、泥质板岩。
三段	浅-深灰色中-厚层状含碳质微-粉晶灰岩、白云质灰岩与紫红色、灰黄色薄层状钙质板岩或泥灰岩。
二段	浅-深灰色中-厚层状粉微晶灰岩、粉晶灰岩与微泥晶灰岩、泥晶灰岩。
一段	浅-深灰色薄-中层状含粉砂质粉微晶灰岩、泥晶-粉晶灰岩、深灰色、灰黑色薄-中层状含炭泥质微晶灰岩、中-厚层状微晶含白云质灰岩。

表 2 微亮晶和底基质电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of microsparite and matrix

时代	地层	样品	Si	Ca	S	Sr	Ti	Fe	Mn	Mg	Na	Al	K	Total
中元古代	天津蓟县 高于庄组	微亮晶 1	0.05	39.65	-	-	0.13	0.37	-	-	-	-	-	40.2
		微亮晶 2	0.05	39.92	-	-	0.02	0.07	0.18	-	-	-	-	40.24
	云南落 水洞地区 大龙口组	微亮晶 1	-	56.09	-	-	-	0.15	0.33	0.21	-	-	-	56.78
		微亮晶 2	0.01	55.89	-	-	-	0.11	0.30	0.25	-	-	-	56.56
		微亮晶 3	0.04	57.25	-	-	-	0.18	0.34	0.20	-	-	-	58.01
		底基质 1	0.18	25	-	-	-	0.12	-	12.5	0.2	0.2	0.1	38.3
		底基质 2	0.10	22.5	-	-	-	0.18	-	10.3	0.5	0.15	0.18	33.91
	底基质中菱铁矿	7.59	1.66	-	-	0.14	79.23	-	-	-	-	2.12	90.74	
新元古代	营城子组	微亮晶	0.34	48.82	0.06	-	-	0.06	0.02	0.19	-	0.19	0.04	49.72
	兴民村组	微亮晶	0.76	47.70	0.02	0.02	-	0.12	-	0.65	-	0.25	-	49.5

注:新元古代样品数据引自孟祥化等(2006),-表示含量低,未分析出,微亮晶和底基质之所以总量偏低,是因为其中的 C 元素没有算在内,因为电子探针不能分析出其中的 C 元素含量。

岩进行了扫描电镜观察(仪器型号:TESCAN-VEGA \ LMU)表明白齿构造内部并不是完全致密的微亮晶集合体,晶间有少量石膏、有机质残余、粘土矿物或呈漂浮状的颗粒集合体存在(图 2),成分中含有 Ca、Si、Al、Ti,为微亮晶形成后成岩作用期间晶间溶液结晶出的产物,表明微亮晶后期成岩过程中晶间孔溶液进一步发生了结晶作用。

对大龙口组白齿构造的研究表明,微亮晶在底基质母岩中有 3 种存在形式:一种是呈散乱微亮晶颗粒分布于底基质中;一种是组成常见的白齿构造的微亮晶等粒晶体集合体(图 3a、c;图 4b);另一种

是呈鲕粒或内碎屑、藻团块的胶结物形式存在,显示其为高能条件下沉积物-水界面沉积产物(图 4c)。

此外,在大龙口组四段顶部可见白齿构造与叠层石共生的现象(图 3f),叠层石的纹层构造十分明显,暗层富含有机质,亮层中含较多的微亮晶颗粒,外形为一种椭球状藻叠层石,因含铁质而微显红色,叠层石中含较多的鲕粒,显示藻类生物化学沉积作用和动力化学沉积作用的结果,为一种强烈动荡的水体环境,椭球体之间藻屑破碎并被微亮晶胶结,藻屑局部溶解,而后微亮晶在溶蚀孔隙中沉淀,局部也有孤立存在的白齿构造。这可能表明微亮晶有“流

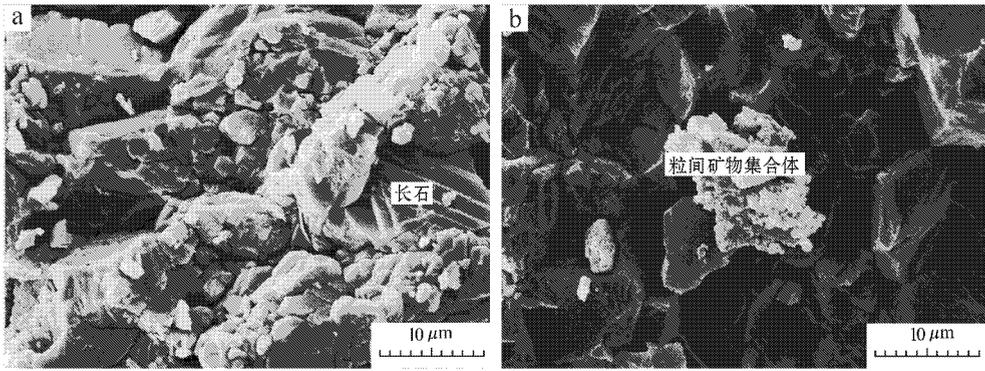


图2 微亮晶扫描电镜照片

Fig. 2 SEM of microsparite

- a—藻屑泥晶灰岩,矿物成分为方解石和少量长石,显示藻屑间被微亮晶方解石充填(大颗粒的方解石为藻屑重结晶的结果),晶粒度较小,为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$; b—显示微亮晶晶间粒状集合体,为石膏晶体,微亮晶晶体为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 大小
- a—algal debris micrite limestone, composed of calcite and small amounts of feldspar, showing microsparite calcite filling between algal debris grains (the bigger calcite grains are the recrystallization results of the algal debris), the diameter is small, about $1\sim 5\ \mu\text{m}$; b—granular aggregate gypsum between the microsparite calcite crystals with a diameter about $8\sim 14\ \mu\text{m}$

砂”一样的特征,即它可以在任何孔隙中存在,有无孔不入的性质,进一步证实微亮晶是孔隙水溶液晶出的结果。

3 白齿构造成因探讨

总结大量的文献资料对白齿构造成因解释,归纳起来,分为三类:

一种是无机论,认为白齿构造为外力作用的结果(Daly, 1912; Eby, 1975; Knoll, 1984),其中具有代表性的是Pratt的地震成因观点,解释白齿构造是地震产生裂缝,而后由均匀等粒灰泥充填的结果(Pratt, 1998),或是由地震作用形成裂缝,而后基质中灰泥脱水液化作用形成(乔秀夫等, 1994, 1999; 杜远生等, 1998, 2000, 2001)。但这种观点面临一个很大的挑战,即纹层状泥晶灰岩中白齿构造成因解释,白齿构造通常是穿越围岩纹层面的,根据现代碳酸盐沉积速率为 $0.01\sim 2.5\ \text{m/ka}$,那么 $1\ \text{mm}$ 厚单个纹层的形成时间大约为 $1\sim 2\ \text{a}$,而一个MT通常穿越几十个纹层,也就意味着形成白齿构造的时间跨度为几万年甚至十几万年,而地震是一个瞬时事件,可以在几秒钟内完成,因此用一个瞬时因素解释一个时间跨度很长的地质事件有不妥之处,或许地震事件只能用来解释一些微裂缝的产生,但白齿构造的形成是一个复杂的物理化学过程,不能单纯用地震观点概括;另外,地震事件通常对环境造成严重

的破坏,并伴随典型的构造特征,如枕状构造、张性或压性断层、膝折褶皱及不协调的软沉积物变形褶皱,大龙口组白齿构造发育层段并未发现典型的地震作用证据。而且,大龙口组270个米级旋回层序中发育150多层白齿构造的现象,说明白齿构造的形成是有其特定的韵律和周期性的,更倾向于一种正常的沉积现象。

第二种观点是有机论,即由藻类直接作用产生,认为是藻丝体生长的结果(Gillson, 1929; Plfug, 1968; Smith, 1968; O'Connor, 1972)。其中的典型代表是Smith和James, Smith认为白齿构造最初是由藻类沉淀于含水的粉砂和粉砂质灰、泥岩中,在海底沉积物表面以下由于准同生压实作用引起弯曲而形成,James认为白齿构造是潮下环境微生物群落作用产生(Smith, 1968; James *et al.*, 1998)。但是藻类直接生长的结果未解释白齿构造两端尖细,中间略粗的原因,同时作为砂屑、藻球粒、鲕粒颗粒之间微亮晶胶结物的形成用藻类生长理论来解释也很困难。

第三种观点是有机地球化学论,认为白齿构造是在水-沉积物界面之下的沉积物中形成的,先是有有机质腐烂产生气体裂缝,然后在裂缝中发生微亮晶的沉淀作用,微亮晶快速聚集成岩形成白齿构造(Horodyski, 1983; Furniss *et al.*, 1998; Frank and Lyons-Timothy-W, 1998)。关于生物气作用产生气体裂缝,已具有可行性,Winston等(1999)利用生物

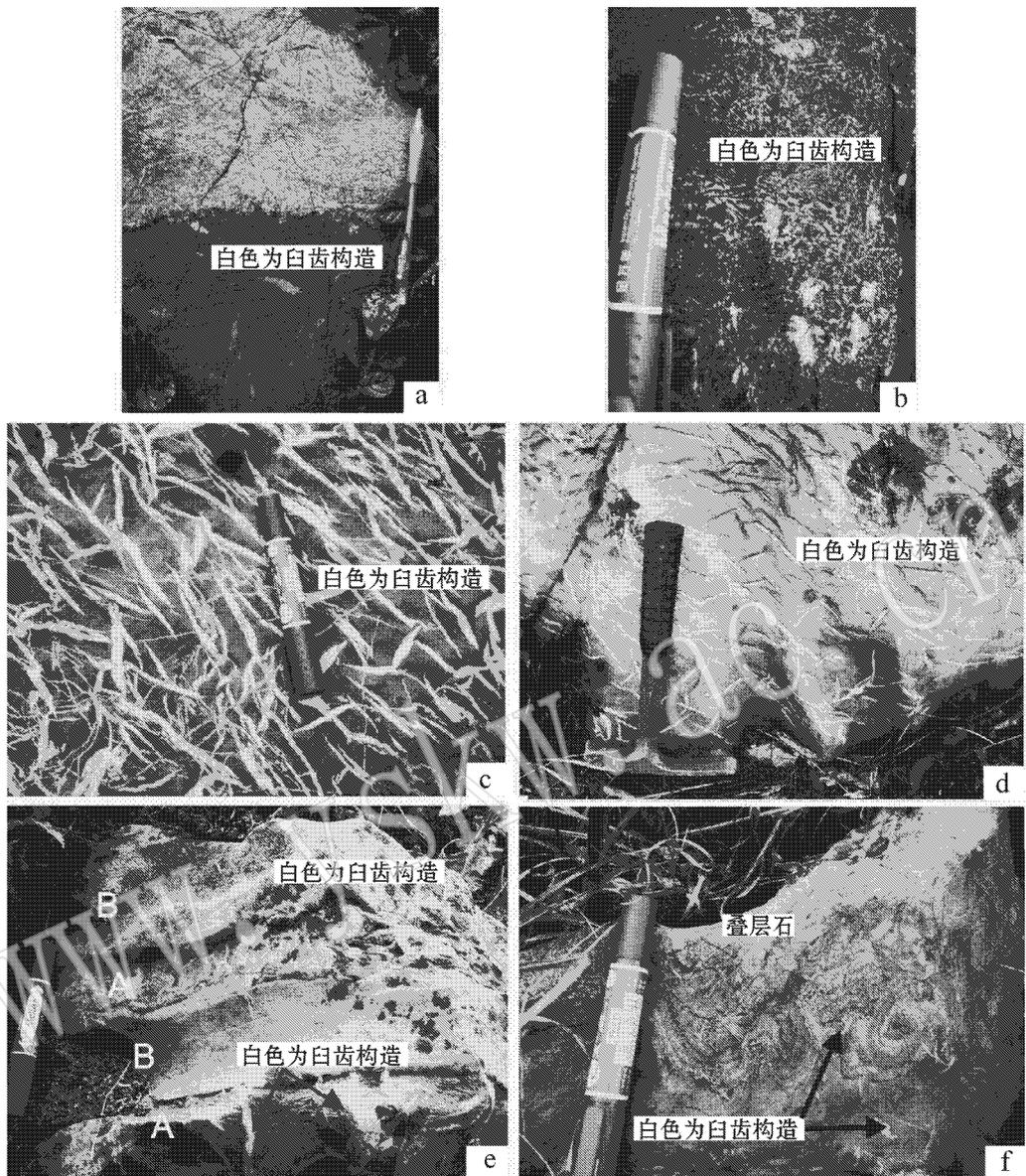


图 3 臼齿构造的宏观特征

Fig. 3 Macroscopic features of molar tooth structure

a—米级旋回底部纹层状泥晶灰岩中臼齿构造,顶部为藻屑灰岩,微亮晶呈藻屑的胶结物; b—藻屑泥晶灰岩中臼齿构造呈藻屑的胶结物存在; c—高密度臼齿构造,臼齿构造呈条带状或丝状,有分叉和彼此穿插现象; d—臼齿构造较均一的出现在泥晶灰岩中,穿插现象不明显,臼齿之间孤立存在; e—显示臼齿构造灰岩与中厚层泥晶灰岩构成向上变浅的米级旋回特征(A-B),A为臼齿构造泥质灰岩,B为中厚层泥晶灰岩,底部泥质含量较多的泥质灰岩中臼齿构造的个体很大,垂直和斜交层面为主,层面清晰,臼齿在上层中厚层泥晶灰岩处终止; f—罕见的臼齿构造(箭头所指)与叠层石共生的现象

a—molar tooth structures appear in the laminar micrite limestone, constituting the bottom sequence of meter-scale cycle, the upper part is algal limestone, microsparite grains act as the cement of algae debris; b—molar tooth structures are preserved as the cement of algae debris in algae micrite limestone; c—highly dense molar tooth structures, which are in banded or filamentous shape, and they are branched and interspersed with each other; d—molar tooth structures appear at the micrite limestone, the interspersed phenomenon is not obvious, usually isolated in the substrate; e—the molar tooth structure limestone and middle-thick micrite limestone constitute the shallow upward meter-scale cyclic sequence (A-B), A is molar tooth structure argillaceous limestone, B is the middle-thick micrite limestone, the individual body of the MT is large at the bottom of argillaceous limestone which is rich in mud, mainly perpendicular and oblique with the lamination, and molar tooth structures disappear at the upper layer of middle-thick layered micrite limestone; f—the seldom phenomenon that the molar tooth structures (indicated by arrow) can co-exist with the stromatolites

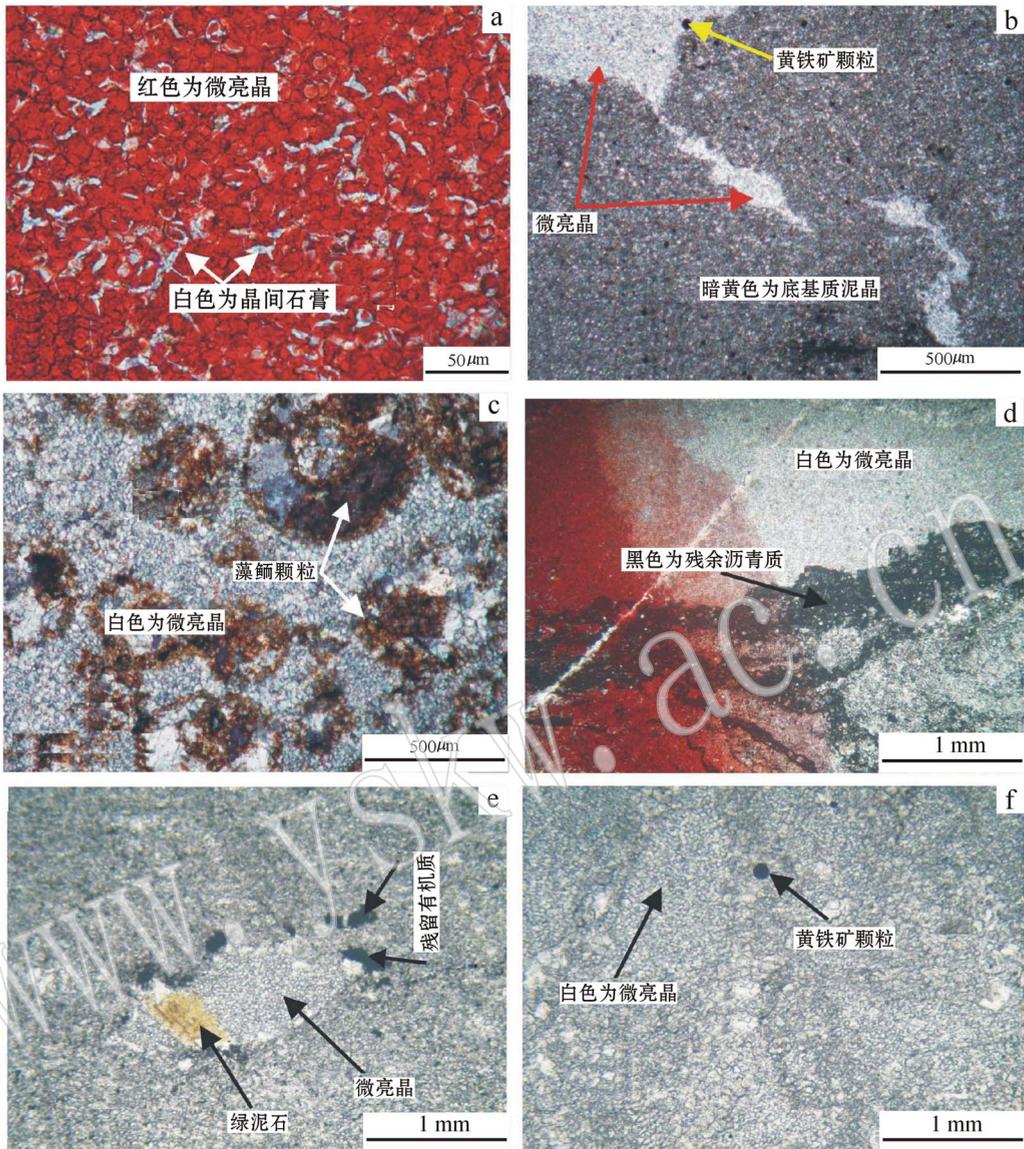


图 4 微亮晶碳酸盐岩的微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of microsparite carbonates

a—微亮晶晶体(红色),晶间为石膏(白色部分),单偏光; b—泥晶灰岩母岩中的白齿构造,白齿呈弯曲揉皱状,越往白齿的末端,白齿越细,泥晶灰岩中含较多的黄铁矿颗粒,显示还原环境特点; c—藻鲕亮晶灰岩,含较多的藻屑,藻鲕大多已被溶蚀破坏,有较多的残留孔隙或者孔隙已被后期方解石充填,鲕粒之间为亮晶胶结,亮晶为微亮晶晶粒,均一、等粒结构特点; d—微亮晶灰岩中含残余沥青质的排烃通道,泥晶母岩中的有机质呈散点状分布,显示微亮晶集合体的孔隙性较好,孔隙主要为晶间孔; e—粉屑泥晶灰岩中的白齿构造,这种白齿构造以潜穴形式存在,显示原始为一个不平坦的凹坑,在其中微亮晶晶形成,周围富含有机质残留组分,微亮晶内部有绿泥石存在; f—藻屑泥晶灰岩中微亮晶,微亮晶在藻屑之间存在,也有藻屑溶蚀后孔隙中存在,显示微亮晶的结晶特点

a—microsparite calcite crystal (red), intergranular space is gypsum (white), plainlight; b—folded molar tooth in micrite limestone, the molar tooth structures become more and more finer at the tip parts, and there are many pyrite crystals showing the reduced environment; c—algal oolitic limestone, there are much algae debris, and most of the algal oolites have been dissolved, there are many residual pores or the pores have been filled by epigenetic calcite, uniform and the same granular microsparite grains are regarded as the cements of oolitics; d—the expulsion channel containing residual asphaltenes in microsparite limestone, and the organic in micrite limestone is distributed as scatter points, showing the good porosity of the microsparite collection, mainly regard as intergranular pores; e—molar tooth structures deposited in an uneven pit in micrite limestone, at the boundary there exists some organic residue, and there is chlorite in the inner part of the microsparite collection; f—microsparite calcite in algal micrite limestone existent between the spaces of algal debris, and they can also be deposited in the inner pores caused by the dissolution of algal debris, showing the crystallization characteristics of microsparite calcite

气形成了近似于 MT 斑点状和条带状裂隙,裂隙在压实作用发生之前部分的被细粒的钙质亮晶充填形成臼齿构造,臼齿构造应形成于成岩早期,其形成条件必须有利于方解石迅速沉淀,Furniss 等(1998)的气泡迁移理论可能是近年来很值得关注的臼齿构造成因解释的理论,他已经通过实验证明了条带状和斑点状臼齿构造的成因。Frank 等(1998)通过研究 MT 条带中的 C 同位素的组成,也支持 Furniss 等的观点。

通过对大龙口组臼齿构造的研究,笔者认为臼齿构造是一种有机-地球化学过程,生物气-流体共同作用控制了臼齿裂隙的形成。臼齿构造为早期固结成岩作用阶段的产物,即富含有机质的沉积物沉积后不久,当沉积物还处于软泥状态时,由于上覆沉积物继续沉积使纹层状泥晶灰岩被埋藏,藻屑等有机质在厌氧细菌或硫酸盐还原菌的作用下分解释放出生物气(微亮晶中残余沥青有机质的存在说明曾经有生物气的产生),当气体累积到一定阶段时使沉积层内的压力增大,当这一压力超过岩石的破裂极限后,未完全固结的岩石发生破裂而形成大量的微裂缝,随后由于上覆沉积物中水体的渗滤作用或纹层沉积物本身孔隙水的聚集,使未完全固结的软泥内的孔隙流体在异常高压的驱动作用下,以气、水混相的方式通过微裂缝,而后微缝隙中饱和溶液快速晶出生成等粒状的微亮晶晶体,流体排出,压力降低,微裂缝闭合。由于局部压力的释放,会使溶液和气体沿压力降低的方向继续发生迁移,生物气的不断产生又会在局部形成新的高压聚集带而发生微亮晶的沉淀,如此反复,直到不平衡压力释放,并与周围地层压力平衡为止,而对于宏观上臼齿构造形态上的复杂性,一方面是受形成时的孔隙空间形态的制约,另一方面是受后期的压实作用的改造影响。

臼齿构造赋存的母岩(碳质泥晶灰岩)中通常有机质含量较高,并且在臼齿构造内部有明显的排烃通道的存在(图 4d),表明臼齿构造碳酸盐岩可作为良好的烃源岩。烃源岩中有机质分解产生生物气是产生臼齿裂隙的主要原因,成岩作用早期,各种细菌(厌氧细菌、硫酸盐还原细菌)对有机质分解起着关键的作用,它们对成岩作用的影响较大,它们的生存和死亡可造成介质物理化学条件的改变,可以引起某些矿物溶解,以及新生矿物的沉淀。泥晶灰岩底基质中分散的微亮晶颗粒可能正是在这一作用过程中形成,底基质中富集的黄铁矿也间接说明还原环

境中细菌的分解作用。

除高压孔隙流体作用产生臼齿孔隙,而后微亮晶在臼齿孔隙中聚集晶出外,微亮晶也可以在正常压力条件下产生,鲕粒或藻屑、砂屑亮晶灰岩中微亮晶胶结物的存在就说明这一点,即微亮晶可以在正常高能条件下以化学沉淀的方式形成,可能是受碳酸钙饱和度的影响,藻屑分解后在形成有机质的同时,也造成了局部碱性环境和碳酸钙的过饱和,使得方解石的结晶速度加快,胶结物近于同时结晶,因此使得粒度比较均一。

宏观上,臼齿构造通常垂直或斜交层面分布,中间略宽,两端尖细(图 3c、3d;图 4b),由于岩石的非均质性和各向异性的影响,微亮晶在臼齿孔隙水中快速结晶成岩过程中,伴随脱水脱气作用,沿臼齿孔隙长轴方向压力降低最快,因此脱气、脱水更易沿着这一方向上进行,由于压力最后集中到长轴端点,因此两端应力较中间部位应力大,而使两端变得尖细。对于臼齿构造中出现的分叉的次级臼齿构造,可看成是高压孔隙流体压力沿不同方向降低的结果,主方向是应力降低最快的方向,也是岩石非均质性和各向异性作用的结果。

4 结论

(1) 微亮晶集合体并不是完全致密的结构,晶间孔中充填有后生的石膏,而且微亮晶在底基质母岩中的存在形式主要有 3 种:呈散乱的微亮晶颗粒分布于底基质中;组成常见的臼齿构造的微亮晶等粒晶体集合体;呈鲕粒或内碎屑、藻团块的胶结物形式存在。

(2) 臼齿构造和叠层石可以同时出现,大龙口组臼齿构造作为叠层石的内碎屑存在,而且出现了大量的微亮晶集合体以藻屑胶结物形式存在。同时根据臼齿构造在地层中的出现频率,表明其更倾向于一种正常沉积产物,具有周期性特点。

(3) 微亮晶和底基质颗粒的形成水体环境有很大差异,不论是中元古代,还是新元古代的微亮晶样品,元素组成都具有相似的性质,即 Ca 为主元素,含微量的 Mg、Mn、Fe、K、S 等元素,而底基质中除 Ca 外, Mg 含量也很高。

(4) 臼齿构造成因是一种有机-地球化学过程,生物气-流体共同作用控制了臼齿裂隙形成。微亮晶中残余沥青有机质的存在说明曾经有生物气的产

生,生物气产生的压力聚集和孔隙流体压力不断聚集共同作用产生白齿孔隙,当孔隙流体快速结晶沉淀后,流体排出,压力降低,这一过程反复进行,直到与地层压力平衡为止。

(5)白齿孔隙中伴随微亮晶的结晶固结,出现应力的转移,一般沿主方向降低最快,也就是白齿构造长轴方向,应力在长轴端部的集中使得端部变得更尖细,白齿构造中分叉的次级白齿也是应力降低的结果,受岩石的非均质性和各向异性的影响。

References

- Bauerman H. 1885. Report on the geology of the country near the fortieth parallel of North latitude West of the Rocky Mountains [R]. Canada Geol. Survey Rept Prog. , B : 1~42.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan [M]. Geological Publishing House (in Chinese).
- Dai Henggui. 1997. The stratigraphy , tectonics of Kunyang Group and Huili Group and the study on prospecting target in Kang-Dian region [J]. Yunnan Geology , 16 (1) : 1~39 (in Chinese).
- Daly R A. 1912. Geology of the North American Cordillera at the fortieth Parallel [J]. Canada Geol. Survey. Mem. , 38 , pts. 1 , 2 , and 3.
- Du Yuansheng and Han Xin. 1999. The evolution of sedimentary basin of Proterozoic in Central Yunnan and the discussion on kinetics [J]. Modern Geology , 13 (2) : 232~234 (in Chinese).
- Du Yuansheng and Han Xin. 2000. The discussion on seismic deposition and seismites [J]. Earth Science , 15 (4) : 389~394 (in Chinese).
- Du Yuansheng , Sun Kexiang and Li Zhiwei. 1998. The sedimentary geology of subgroup of Kunyang Group of Mesoproterozoic in Yuanjiang area of Yunnan province and its effects of ore-controlling [J]. Journal of Earth Sciences , 23 (1) : 27~31 (in Chinese).
- Du Yuansheng , Zhang Chuanheng and Han Xin. 2001. The earthquake events deposition and its seismic significance of Kunyang Group of Mesoproterozoic in Central Yunnan [J]. Science China , 31 (4) : 284~289 (in Chinese).
- Eby D E. 1975. Carbonate sedimentation under elevated salinities and implications for the origin of " Molar-Tooth " structure in the Middle Belt Carbonate Interval (late Precambrian) , northwestern Montana [R]. Abstracts with Programs-Geological Society of America , 7 : 1063.
- Frank T D and Lyons-Timothy-W. 1998. " Molar-tooth " structures ; a geochemical perspective on a Proterozoic enigma [J]. Geology (Boulder) , 26 (8) : 683~686.
- Furniss G , Rittle J F and Winston D. 1998. Gas bubble and expansion crack origin of " molar tooth " calcite structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup Western Montana [J]. Journal of Sedimentary Research , 68 (1) : 104~114.
- Gao Linzhi , Ding Xiaozhong , Yin Chongyu , et al. 2007. Meso- and Neoproterozoic stratigraphic sequences in the Southern Ural area and discovery of molar-tooth structures in carbonate and clastic rocks of the sequences and their geological significance [J]. Geology in China , 34 (6) : 962~973 (in Chinese).
- Ge Ming and Meng Xianghua. 2003. Microspar (molar tooth) carbonates : the new hot spot of geological science in 21st century [J]. Acta Sedimentologica Sinica , 21 (1) : 82~90 (in Chinese).
- Gillson J L. 1929. Contact metamorphism of the rocks in the Pend Oreille district , northern Idaho U S [J]. Geol. Survey Prof. Paper , 158-F : 111~121.
- Horodyski R J. 1983. Sedimentary geology and stromatolites of the Middle Proterozoic Belt Supergroup , Glacier National Park , Montana [J]. Precambrian Research , 20 : 391~425.
- James N P , Narbonne G M and Sherman A G. 1998. Molar tooth carbonates : shallow subtidal facies of the Mid to late Proterozoic [J]. Journal of Sedimentary Research , 68 (5) : 716~722.
- Knoll A H. 1984. Microbiotas of the Late Precambrian Hunnberg Formation , Nordaustlandet Svalbard [J]. Journal of Paleontology , 58 : 131~162.
- Li Xizhe. 1999. Re-exploration the question about the production of stratotype section of Middle-Late Proterozoic in Kang-Dian axis area [J]. Yunnan Geology , 18 (1) : 89~91 (in Chinese).
- Li Xizhe , Wu Maode and Duan Jinxun. 1984. The stratigraphy of Kunyang group and the problem of top and bottom boundary [J]. Geological Review , 30 (5) : 399~408 (in Chinese).
- Meng Xianghua , Ge Ming and Kuang Hongwei. 2006. The genesis of microsparite (molar tooth) carbonates and its significance on the Earth evolution in Proterozoic [J]. Acta Petrologica Sinica , 22 (8) : 2133~2143 (in Chinese).
- O'Connor M P. 1972. Classification and environmental interpretation of the crypt algal organo sedimentary " molar-tooth " structure from the late Precambrian Belt-Purcell Super group [J]. Journal of Geology , 80 (5) : 592~610.
- Plflug H D. 1968. Gesteinbildende organismen aus Molar Tooth Limestone der Beltserie (Praekambrium) , Palaeontographica Abteilung [J]. Palaeophytologie , 121 : 134~141.
- Pratt B R. 1998. Molar-tooth structure in Proterozoic carbonates rock : Origin from synsedimentary earthquake and implications for the nature and evolution of basins and marine sedimentary [J]. GSA Bulletin , 110 (8) : 1028~1045.
- Qiao Xiufu and Gao Linzhi. 1999. Neoproterozoic and Early Paleozoic seismic disaster events in the North China Platform and their relationship with Rodinia [J]. Chinese Science Bulletin , 44 (16) : 1753~1757 (in Chinese).
- Qiao Xiufu , Song Tianrui , Gao Linzhi , et al. 1994. Seismic succession of oscillatory liquefaction in carbonate rocks [J]. Acta Geologica Sinica , 68 (1) : 16~34 (in Chinese).
- Smith A G. 1968. The origin and deformation of some " Molar-tooth " structure in the Precambrian Belt-purcell supergroup [J]. Journal of Geology , 76 : 426~433.

- Winston D, Rittel John F and Furniss George. 1999. Gas bubble and expansion on molar-tooth calcite structures in the Middle Proterozoic Belt Supergroup Western Montana-Reply[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69(5):1140~1145.
- Wu Maode, Duan Jinsun, Song Xueliang, *et al.* 1990. Kungyang Group Geology of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press (in Chinese).
- Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie, *et al.* 2007. The SHRIMP U-Pb age of zircon in tuff of Kungyang Group in Central Yunnan: evidence of Grenville age mountain building in South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(7):818~824 (in Chinese).
- 戴恒贵. 1997. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究 [J]. *云南地质*, 16(1):1~39.
- 杜远生 韩 欣. 1999. 滇中地区元古代沉积盆地演化及动力学初探 [J]. *现代地质*, 13(2):232~234.
- 杜远生 韩 欣. 2000. 论震积作用和震积岩 [J]. *地球科学进展*, 15(4):389~394.
- 杜远生 孙克祥 李志伟. 1998. 云南元江地区中元古代昆阳群下亚群的沉积地质及控矿作用 [J]. *地球科学*, 23(1):27~31.
- 杜远生 张传恒 韩 欣. 2001. 滇中中元古代昆阳群的地震事件沉积及其地震意义 [J]. *中国科学*, 31(4):284~289.
- 高林志, 丁孝忠, 尹崇玉, 等. 2007. 南乌拉尔地区中-新元古代地层序列及碳酸盐岩和碎屑岩发现白齿构造的地质意义 [J]. *中国地质*, 34(6):962~973.
- 葛 铭 孟祥化. 2003. 微亮晶(白齿)碳酸盐岩: 21 世纪全球地学研究的新热点 [J]. *沉积学报*, 21(1):82~90.
- 李希劼. 1999. 再论建立康滇地轴区中晚元古代层型剖面问题 [J]. *云南地质*, 18(1):89~91.
- 李希劼 吴懋德 段锦荪. 1984. 昆阳群层序及顶底问题 [J]. *地质论评*, 30(5):399~408.
- 孟祥化 葛 铭 旷红伟. 2006. 微亮晶(白齿)碳酸盐成因及其在元古宙地球演化中意义 [J]. *岩石学报*, 22(8):2133~2143.
- 乔秀夫 高林志. 1999. 华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系 [J]. *科学通报*, 44(16):1753~1757.
- 乔秀夫 宋天锐 高林志, 等. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列 [J]. *地质学报*, 68(1):16~34.
- 吴懋德 段锦荪 宋学良, 等. 1990. 云南昆阳群地质 [M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 张传恒 高林志 武振杰, 等. 2007. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据 [J]. *科学通报*, 52(7):818~824.

附中文参考文献

www.yskw.ac.cn