

doi:10.3799/dqkx.2014.015

华南栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层的成因

刘喜停^{1,2}, 颜佳新^{1*}, 马志鑫³, 薛武强¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 不来梅大学海洋环境中心, 德国不来梅 28359
3. 成都地质矿产研究所, 四川成都 610081

摘要: 华南中二叠统栖霞组沉积了一套特殊的碳酸盐岩地层, 该套地层富含有机质和硅质结核, 是中国南方四套区域性海相烃源岩之一。在野外露头上, 灰岩—泥灰岩韵律层因为其抗风化能力不同而受到广泛关注, 其在整个华南栖霞组分布广泛。其中, 灰岩层富含各种生物碎屑, 主要包括钙藻、有孔虫和腹足, 其次还有腕足, 棘皮类和介形虫, 偶尔见苔藓虫和三叶虫。灰岩层中较好的保存了易碎的钙质藻类, 说明灰岩的胶结作用发生在成岩早期, 没有明显压实作用的痕迹。泥灰岩以粒泥生物碎屑灰岩和黑色钙质泥岩为主, 主要的生物碎屑以腕足和介形虫为主。生物碎屑都非常破碎, 壳体大都平行层面, 颗粒之间发育大量压溶缝, 说明泥灰岩层经历过强烈的成岩压实作用。基于对灰岩—泥灰岩韵律层的生屑类型和成岩现象的分析, 提出差异成岩作用来解释该套地层的形成过程: 泥灰岩层中不稳定的文石在早期成岩过程中溶蚀, 然后迁移到灰岩层中形成方解石胶结灰岩层; 随后机械压实作用和化学压实作用主要发生在泥灰岩层中; 最终灰岩—泥灰岩层由于差异成岩作用导致其抗风化能力不同而形成不同的露头特征。其中文石溶蚀发生在海水埋藏环境, 有机质的分解为其提供了动力来源, 这与栖霞期较高的原始生产力相符合。

关键词: 灰岩—泥灰岩韵律层; 文石; 方解石; 沉积岩; 栖霞组; 华南。

中图分类号: P588.2 **文章编号:** 1000-2383(2014)02-0155-10 **收稿日期:** 2013-09-02

Origination of Limestone-Marl Alternations from Qixia Formation of South China

Liu Xiting^{1,2}, Yan Jiaxin^{1*}, Ma Zhixin³, Xue Wuqiang¹

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. MARUM-Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen, Bremen 28359, Germany
3. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China

Abstract: The Middle Permian of South China is a unique carbonate succession, which is rich in organic matter and chert nodule, and is one set of the most important marine source rocks. Limestone-marl alternations are widely distributed in this area. The limestones are rich in skeletal detritus, dominated by algae, foraminifera, and mollusks with subordinate amounts of brachiopods, echinoderms, and ostracods, and minor bryozoans and trilobites. Fragile skeletons such as calcareous algae were well preserved, indicating that cementation took place during early diagenesis with little diagenetic compaction. Marls are bioclastic wackestone or dark mudstone. Bioclasts are diverse, including remnants of brachiopods, ostracods and rare trilobites. Bioclastic flakes are oriented parallel to bedding planes, and thin-shelled fragments, e.g., ostracods, are broken due to compaction of the unlithified sediment. Between the particles are micrite and a large number of dissolution seams. As to the particular features of the limestone-marl alternations, it is inferred that differential diagenesis occurred between limestones and marls. Aragonite in marl layers was dissolved to cement limestone, which took place in shallow-burial realm. Mechanical compaction and then pressure dissolution were concentrated in the less cemented strata. The dissolution of aragonite in the shallow marine burial realm is thought to have been initiated by modification of the pore-water chemistry by bacterial oxidation of organic matter.

Key words: limestone-marl alternations; aragonite; calcite; sedimentary rocks; Qixia Formation; South China.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41072078); 国家重点基础研究发展计划(No.2011CB808800)。

作者简介: 刘喜停(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事碳酸盐岩沉积学研究。E-mail: liu1999@126.com

* 通讯作者: 颜佳新, E-mail: jxyan@cug.edu.cn

华南中二叠统栖霞组沉积了一套特殊的碳酸盐岩地层,是中国南方四套区域性烃源岩之一(梁狄刚等,2009)。该套地层富含有机质,发育特殊的成岩矿物天青石和海泡石(Yan et al.,2005)。在露头上,灰岩与泥灰岩因为抗风化能力的差异表现出不同的特征,灰岩颜色较浅,没有明显的压实作用,泥灰岩颜色较暗,常常呈破碎状,并且发育大量压溶缝(颜佳新,2004)。因为对其成因的不同解释,对其描述也有了不同的名词,包括瘤状灰岩(金振奎和冯增昭,1994)、眼球状灰岩(罗进雄和何幼斌,2010)、砾状灰岩(杜叶龙等,2012)和灰岩—泥灰岩韵律层(刘喜停等,2012)。该套地层的成因一直是华南栖霞组的研究热点,对其成因研究不仅有益于解决灰岩—泥灰岩韵律层形成过程的沉积学问题(Westphal et al.,2010),对中国南方海相油气勘探也有重要意义。本文以四川广元栖霞组为例,对于该套地层的成因进行了探讨。

1 地质背景

栖霞早期海水仅局限在“江南水下降起”以南的海域,中早期受冈瓦纳大陆冰川最终消融的影响,本区发生了晚古生代以来最大规模的海侵(王成善等,1999),形成了最广泛的海相碳酸盐沉积(杨玉卿和

冯增昭,2000)。整个华南区域内几乎全为碳酸盐岩沉积,岩性、岩相和生物群落比较均一,厚度比较稳定。栖霞期的华南是一个没有古陆存在的,盐度正常,生物繁盛的统一陆表海,大部分区域属于浅水碳酸盐岩台地环境(冯增昭等,1996)。

本文结合前人的研究成果,对区内中二叠世的沉积环境和灰岩—泥灰岩韵律层的发育特征进行了重新的统计和解释,描绘了灰岩—泥灰岩韵律层在华南中二叠世的分布特征(图1)。图1中可以看出,灰岩—泥灰岩韵律层主要分布在台地内较深水的部位,大体相当于威尔逊相模式中的浅海陆棚上部或者开阔台地环境。

广元上寺剖面位于广元市剑阁县上寺镇上寺村(图1),二叠系剖面出露良好,自下而上发育梁山组、栖霞组、茅口组、吴家坪组和大隆组,剖面的总厚度415 m,其中栖霞组上部广泛发育灰岩—泥灰岩韵律层。

2 栖霞期沉积环境演化

中二叠世,华南经历了古生代中最大的海侵,本区变为海陆交互相,早期剥蚀的碎屑岩沉积形成了梁山组,为一套黄褐色的铝土矿、硅质泥岩、根土岩及黑色煤层为特征的沼泽相沉积。

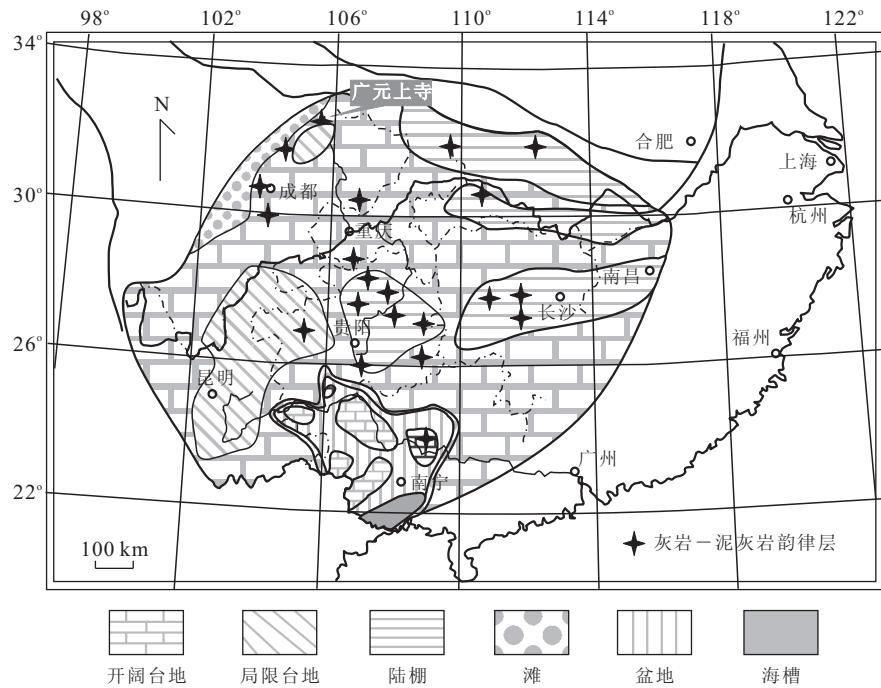


图1 华南栖霞期古地理和灰岩—泥灰岩韵律层分布

Fig.1 The paleogeography of South China in Qixia stage and the distribution of limestone-marl alternations

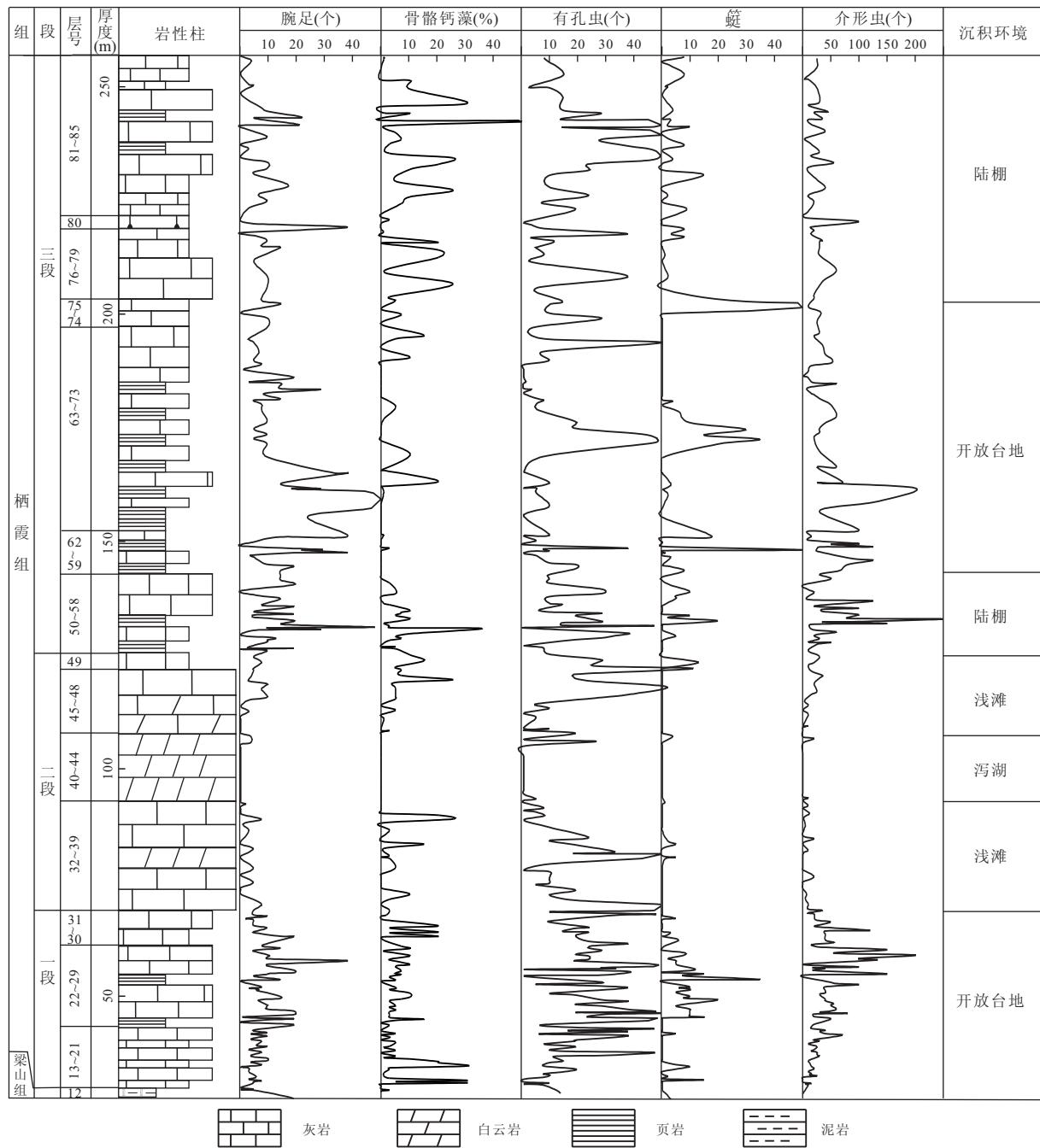


图2 四川广元上寺剖面栖霞组沉积环境

Fig.2 The sedimentary environment of Qixia Formation at Shangsi section, Guangyuan, Sichuan

随着海平面的进一步上升,海水迅速淹没了整个扬子台地,到了栖霞早期,本区已经没有了陆源碎屑物质的供应,海水变清,发育了碳酸盐台地,整个栖霞期,水体的总趋势变深,海水深度整体不深,在台地与陆棚之间波动。生物种类多样,粗枝藻、裸海松藻、有孔虫、腕足、海百合和介形虫等在本区都常常见到。根据栖霞组岩石类型和微相特征可以将其分为开阔台地、浅滩、滩后泻湖和陆棚等沉积环境(图2)。

开阔台地:水深处于正常浪基面附近,化石种类非常丰富,包括藻类、海百合、有孔虫、腕足、介形虫、苔藓虫、腹足、双壳、钙质海绵等,岩石类型主要为藻屑泥粒岩和生屑泥粒岩,生屑含量可高达50%~70%。

浅滩:主要岩性为似球粒一生屑泥粒岩和似球粒一生屑颗粒岩,主要颗粒类型是似球粒,其次为藻类。生屑大都已经泥晶化,颗粒之间以亮晶胶结为主,是相对高能沉积环境的产物(马志鑫等,2011)。

滩后泻湖:水体比开阔台地稍浅一些,主要的岩石类型是普遍白云岩化的生物碎屑粒泥岩,生屑含量在 20% 左右.生物碎屑相对单一,主要有介形虫、腕足、有孔虫等.

浅海陆棚:主要发育生屑泥粒岩、生屑粒泥岩和灰泥灰岩,灰岩—泥灰岩韵律层主要发生在这种环境,浅海陆棚上部与开阔台地类似,下部生物种类很少,并且非常单调.

3 灰岩—泥灰岩韵律层特征

3.1 野外露头特征

在野外露头上,灰岩和泥灰岩在颜色、压实程度等方面都有明显的差异.以泥灰岩为主的组合,灰岩以透镜体的形态分布于泥灰岩之中,透镜体大小不一,长轴长度从数厘米到数十厘米,无层理,无压实

现象(图 3a 和 3b).泥灰岩常具有纹层,经常绕过先前固结的灰岩团块后收敛到一起,呈马尾状,沿层面发育大量腕足(图 3c)灰岩透镜体,可以被泥灰岩分割,也可以几个连在一起形成灰岩和泥灰岩的互层(图 3d 和 3e).在灰岩层中有菊花石(天青石)发育(图 3f).

3.2 微相特征

在偏光显微镜下观察,灰岩和泥灰岩在颗粒类型、完整程度和压实程度等方面表现出明显不同的特征.灰岩主要的生屑颗粒类型为藻类(主要为粗枝藻),有孔虫,其次有海百合、介形虫、腹足等,颗粒保存完好,没有被压实的迹象,甚至易碎的藻类也保存完好.颗粒之间充填灰泥,有孔虫壳体内部也充填和周围基质一样的灰泥(图 4a~4c).文石质的藻类因为发生重结晶作用,而呈现多晶粒状结构(图 4b),方解石质的有孔虫、腕足等保存了原来的结构

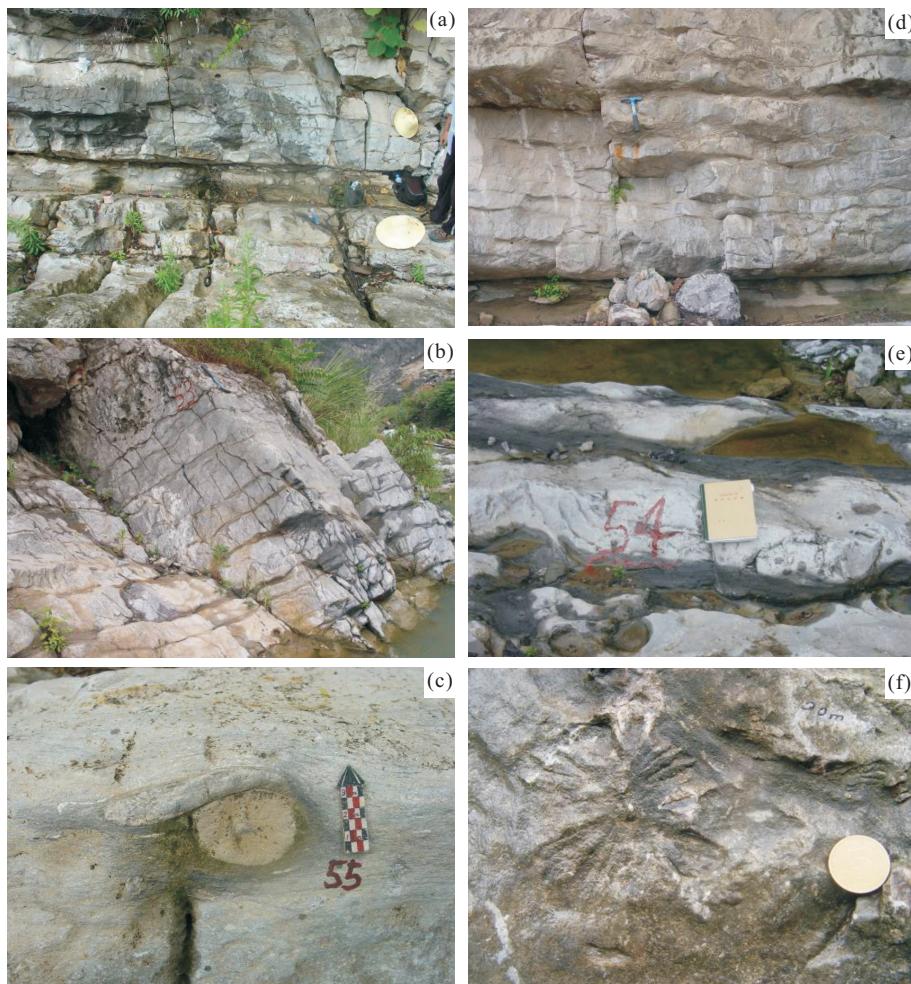


图 3 广元上寺剖面灰岩—泥灰岩韵律层特征

Fig.3 Characteristics of limestone-marl alternations (LMA) from Shangsi section, Guangyuan, Sichuan

a.泥灰岩为主的韵律层;b.灰岩为主的韵律层;c.泥灰岩的压实现象;d.灰岩和泥灰岩互层;e.灰岩和泥灰岩互层;f.天青石(菊花石)

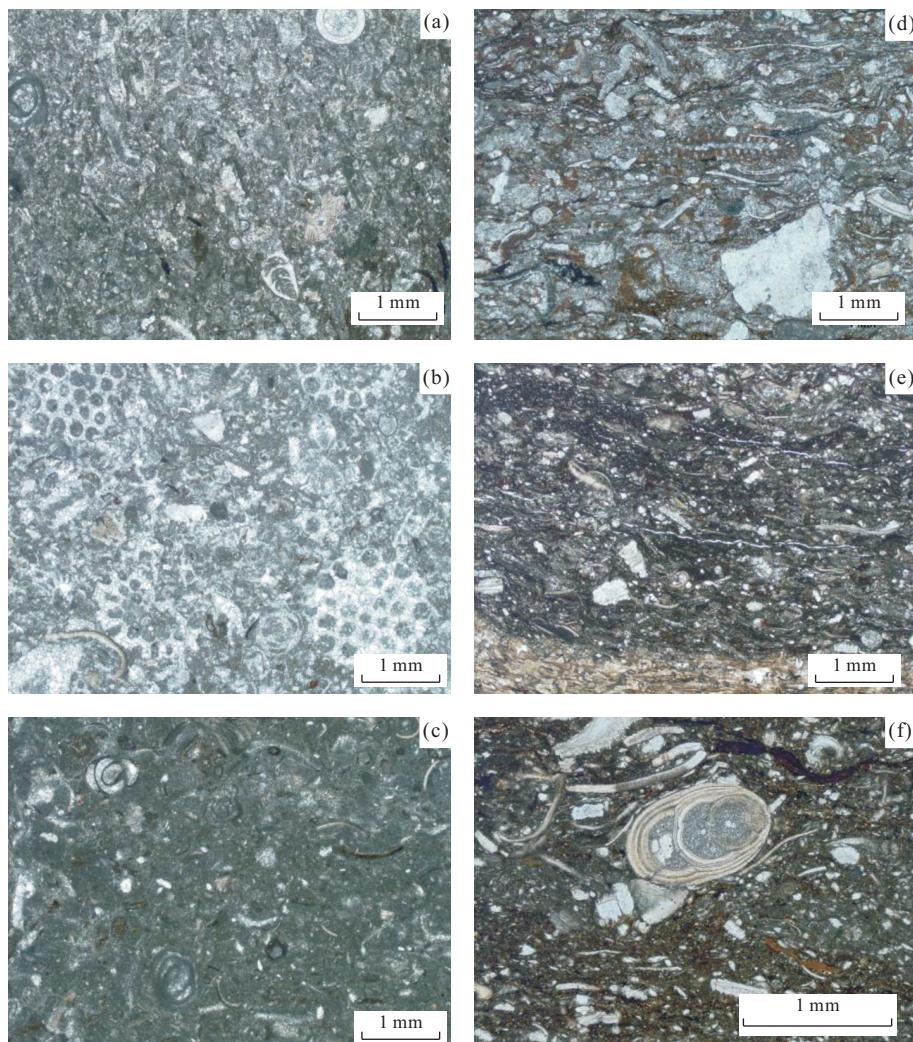


图4 灰岩—泥灰岩韵律层的微相特征

Fig.4 Sedimentary microfacies of limestone-marl alterations

a.灰岩,生屑很好的保存,52层;b.灰岩,易碎的米齐藻保存完好,54层;c.灰岩,生屑方向任意,54层;d.泥灰岩,注意生物碎屑的定向性,52层;e.泥灰岩,生屑破碎,有机质富集,54层;f.泥灰岩,壳体内充填会内而没有被压扁,54层

(图4c).

泥灰岩中主要的生屑颗粒有介形虫,腕足、海百合和有孔虫,少见藻类(图4d~4f).生屑保存非常不完整,很少发现成对的介形虫壳体,具有一定的定向性.颗粒之间同样是灰泥充填,但是灰泥中有大量粘土和有机质等不溶物质,并且发育丰富的微缝合线(图4e).颗粒的长轴方向和微缝合线基本都与层面平行.有孔虫内部充填灰泥,并且发生了部分重结晶作用,明显与周围的基质不同(图4f).

3.3 生屑矿物类型组合特征

碳酸盐岩中生物骨屑颗粒的矿物组成主要包括文石、低镁方解石和高镁方解石,并且在不同的地质历史时期有波动(刘喜停和颜佳新,2009).为了对灰岩和泥灰岩中的颗粒类型进行定量分析,本文按照

生屑颗粒的原始矿物类型分为文石质颗粒、低镁方解石质颗粒和高镁方解石质颗粒(Zhuravlev and Wood, 2009; Ries, 2010).并对薄片内的颗粒数量进行了统计,其中藻类没有区分红藻和绿藻,按照百分含量进行统计(表1).从表1中不难看出灰岩中文石质的生屑明显高于泥灰岩中的含量,例如灰岩中的藻类可以高达35%,而泥灰岩中的藻类只有百分之几,甚至是零.相反的,泥灰岩中的方解石质生屑含量明显高于灰岩中的,特别是介形虫,在泥灰岩中可达一百多个,而灰岩中只有十个到几十个.这种颗粒含量的差异除了受沉积环境影响外,差异成岩作用起到了很重要的作用,特别是方解石质的壳体,由于泥灰岩强烈的压实作用而变的富集.

表1 广元上寺剖面灰岩—泥灰岩韵律层生屑颗粒含量

Table 1 The content of bioclastic grains of limestone-marl alternations from Shangsi section

标本号	岩性	低镁方解石			文石		高镁方解石
		介形虫	腕足	有孔虫	软体动物	钙藻(%)	棘皮动物
Pgy-R-51-1'	L	10	3	0	0	0	0
Pgy-R-51-1	M	50	20	0	0	5	0
Pgy-R-54-1	L	15	6	0	5	35	5
Pgy-R-54-1'	M	150	30	10	0	3	0
Pgy-R-54-2	L	35	10	50	10	3	0
Pgy-R-54-2'	M	100	50	15	0	3	0
Pgy-R-54-3'	L	80	15	30	0	3	0
Pgy-R-54-3	M	250	20	15	5	1	3
Pgy-R-55-3	L	35	5	40	10	7	3
Pgy-R-55-3'	M	100	20	10	0	7	5
Pgy-R-60-2	L	30	20	3	0	0	0
Pgy-R-60-2'	M	125	40	11	0	0	0
Pgy-R-61-1	L	50	23	8	0	3	0
Pgy-R-61-1'	M	100	30	90	0	0	0
Pgy-R-62-2	L	10	15	0	0	1	0
Pgy-R-62-2'	M	100	40	28	0	0	0
Pgy-R-65-1	L	25	40	0	0	1	1
Pgy-R-65-1'	M	60	35	0	0	0	0
Pgy-R-70-1	L	20	5	12	0	0	0
Pgy-R-70-1'	M	15	15	6	0	0	0
Pgy-R-70-3	L	60	30	3	0	0	0
Pgy-R-70-3'	M	20	15	0	0	0	0

注:L代表灰岩;M代表泥灰岩。

4 灰岩—泥灰岩层的成因

4.1 二叠纪古海洋条件

海水化学在显生宙经历过显著的变化,这已经被流体包裹体、棘皮类骨骼矿物和碳酸盐矿物类型等所证实(Hardie, 1996; Stanley and Hardie, 1998; Lowenstein *et al.*, 2001; Dickson, 2002; 颜佳新和伍明, 2006),这验证了文石海与方解石海的波动。二叠纪处于文石海时期,海水以富含 SO_4^{2-} 、贫 Ca^{2+} ,与现代海水非常类似,海水中 Mg/Ca 摩尔比大于 2 而小于现代海水的 5.2(表 2),古生物和实验证据表明当海水中 Mg/Ca 摩尔比增加的时候有利于文石质的碳酸盐矿物的生成(Sandberg, 1983; Ries *et al.*, 2008; Stanley, 2008),因此二叠纪的海相碳酸盐沉积物中文石含量应该是很丰富的,这为灰岩—泥灰岩韵律层的生成提供了很好的先驱物质,因为文石比方解石更容易受到成岩作用的改造。

二叠纪中期是一个生物成因硅质沉积的高峰时期,北美西部二叠纪磷矿组沉积也形成于这个时期,被称为二叠纪硅质沉积事件(Permian Chert Event-PCE)(Murphy and Jones, 1992);栖霞期也是一个化石硅化(硅质为生物成因)的高峰时期;联合古大

表2 二叠纪海水主要离子浓度($\text{mol}/\text{kg H}_2\text{O}$)

Table 2 The main ion concentration of Permian seawater

年龄(Ma)	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$
0	485	11	11	55	565	29	5.2
258~251	469	10	14	52	565	23	3.7
283~274	439	10	17	60	565	19	3.5
296~283	461	10	15	52	565	20	3.5
245	478	13	14	47	565	25	3.5
255	477	15	15	43	565	23	2.8
265	477	15	15	43	565	23	2.8
275	481	12	12	52	565	27	4.3
285	476	16	17	40	565	21	2.4
296~251	460	11	20	54	550	20~45	2.7

注:据 Hardie, 1996; Horita *et al.*, 1991; Lowenstein *et al.*, 2005。

陆西北部地层综合研究也表明,该区 Sakmarian-Artinskian 期至二叠纪末期是一个硅质沉积和保存的高峰期,栖霞组广泛发育的燧石结核也证明了这一点(刘新宇和颜佳新, 2007)。

上述二叠纪海水化学条件对研究区内灰岩—泥灰岩韵律层的形成具有重要意义,首先提供了不稳定碳酸盐矿物文石生成的有力条件,其次为泥灰岩

中存在的粘土矿物海泡石提供了硅和镁。

4.2 灰岩—泥灰岩层的形成过程

对于栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层的成因主要包括:差异压实作用,主要强调化学压实作用加强了原始的沉积差异(金振奎和冯增昭,1994),这种解释与成岩层理的解释类似(Ricken,1987),但是不能解释灰岩层中没有明显压实的现象;生产力的差异,主要强调生产力的不同导致岩石类型的不同,但是对生产力差异的成因不是很明确(包汉勇等,2009;罗进雄和何幼斌,2010);异地砾石成因,因为这种韵律层中的灰岩是砾石经过搬运沉积在台地斜坡上的,并且有不同的砾石类型(李双应等,2008).上述成因对认识栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层都有启示作用,但又不能完全解释其成因.本文认为灰岩—泥灰岩韵律层的差异成岩作用对该套岩层的形成起了关键作用。

差异成岩作用是在解释上新世巴哈马碳酸盐韵律层时提出的(Westphal *et al.*,2000),胶结层中化石保存完好,没有被压实,未胶结层中化石被压实,碳酸盐沉积物中陆源碎屑很少,同样的现象在古生代碳酸盐岩中也有发现(Bathurst,1987;Munnecke *et al.*,1997,2008;Wheeler *et al.*,2008).华南中二叠世灰岩—泥灰岩韵律层中的陆源也非常少,属于同样的类型,灰岩中微亮晶大量发育,泥灰岩中大部分为泥晶,说明其成岩路径不同.泥灰岩中的文石在早期成岩阶段溶蚀,为灰岩部分提供胶结物.具体过程如图5.

原始沉积物(A)中包括文石针、方解石壳、有孔虫等各种组分,在早期成岩过程中,泥灰岩中的文石因为孔隙水化学梯度的改变而被溶蚀,产生的钙离子运移到灰岩层中,为其形成微亮晶胶结物提供物质基础(B和F);在灰岩中形成的微亮晶包围灰岩中本来存在的文石针(C),当灰岩中的文石针被溶蚀后形成溶孔(D),随后的次生加大作用使得溶孔消失,形成微亮晶胶结物(E);泥灰岩中因为文石的溶蚀而没有被胶结,受到机械压实作用的影响比较大,壳体破碎,并出现一定的定向(G、H和I);最终在化学压实作用阶段,泥灰岩受到强烈的影响,不容易抗风化,形成现在野外露头的特征。

该模式解决了胶结物的来源问题,灰岩中的胶结物来自相邻层位泥灰岩中不稳定碳酸盐矿物的溶蚀,不稳定碳酸盐矿物文石的溶蚀发生在早期成岩阶段的海水埋藏成岩环境,这很好地解释了灰岩在被压实之前已经被胶结的现象(Westphal and Mun-

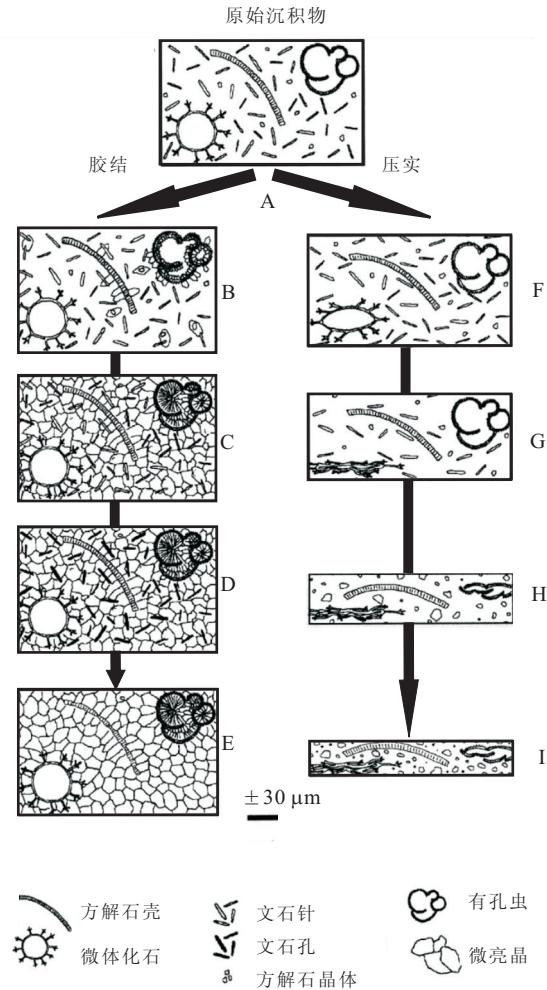


图5 灰岩—泥灰岩韵律层的形成过程(据 Westphal *et al.*,2000)
Fig.5 The formation process of limestone-marl alternations

necke,1997;Westphal,2006).文石在海水埋藏环境中的溶蚀与有机质分解作用中的硫酸盐还原过程有关,这与栖霞期华南地区较高的原始生产力相吻合(陈慧等,2010;Yin *et al.*,2011).同时该模式对微亮晶的形成机制进行了新的解释.传统观点认为微亮晶是微晶次生加大的产物,在该模式中,微亮晶是泥灰岩中溶蚀的文石直接沉淀的产物,这与方解石形成的条件也比较符合.实验证据表明孔隙水中镁离子和钙离子比值的降低有利于方解石的形成(Folk,1974;Milliman *et al.*,1993;Sanders,2003),文石的溶蚀导致孔隙水中钙离子浓度增加,因而有利于方解石沉淀,形成微亮晶。

5 结论

(1)栖霞组灰岩—泥灰岩韵律层形成过程中,早期成岩阶段文石的溶蚀与再分配起了关键的作用.

灰岩和泥灰岩表现出的岩性差异,不一定能够反映其沉积环境的不同。(2)栖霞组处于文石海时期,碳酸盐矿物以文石为主,为泥灰岩层在早期成岩过程中不稳定矿物的溶蚀与迁移提供了物质基础。(3)灰岩层中胶结物来自泥灰岩层中文石的溶蚀,其动力来自有机质的分解,这与栖霞期具有较高的原始生产力相吻合。

致谢:匿名审稿专家提出了宝贵的建议,样品采集工作得到实验室同学的帮助,再次一并表示感谢。

References

- Bao, H.Y., Ma, Z.W., Hu, C.Y., et al., 2009. Productivity of Limestone-Marl Rhythms of Permian Chihsia Formation in Wuhan. *Geological Science and Technology Information*, 28(2): 60—65 (in Chinese with English abstract).
- Bathurst, R.G.C., 1987. Diagenetically Enhanced Bedding in Argillaceous Platform Limestones: Stratified Cementation and Selective Compaction. *Sedimentology*, 34(5): 749—778.
- Chen, H., Xie, X.N., Li, H.J., et al., 2010. Evaluation of the Permian Marine Hydrocarbon Source Rocks at Shangsi Section in Sichuan Province Using Multi-proxies of Paleoproductivity and Paleoredox. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 324—333 (in Chinese with English abstract).
- Dickson, J.A.D., 2002. Fossil Echinoderms as Monitor of the Mg/Ca Ratio of Phanerozoic Oceans. *Science*, 298(5596): 1222—1224. doi: 10.1126/science.1075882
- Du, Y.L., Li, S.Y., Jia, Z.H., et al., 2012. Re-discussion on the Origin of the Rudstone in Middle Permian Qixia Formation along Lower Yangtze River of Anhui Province. *Geological Review*, 58(3): 426—433 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z.Z., Yan, Y.Q., Jin, Z.K., et al., 1996. Lithofacies Paleogeography of the Permian of South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(2): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Folk, R.L., 1974. The Natural History of Crystalline Calcium Carbonate: Effect of Magnesium Content and Salinity. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1): 40—53. doi: 10.1306/74D72973—2B21—11D7—8648000102C1865D
- Hardie, L.A., 1996. Secular Variation in Seawater Chemistry: An Explanation for the Coupled Secular Variation in the Mineralogies of Marine Limestones and Potash Evaporites over the Past 600 M.y. *Geology*, 24(3): 279—283. doi: 10.1130/0091—7613(1996)024<0279:Svisca>2.
- 3.Co;2
- Horita, J., Friedman, T.J., Lazar, B., et al., 1991. The Composition of Permian Seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(2): 417—432. doi: 10.1016/0016—7037(91)90001—L
- Jin, Z.K., Feng, Z.Z., 1994. The Origin of the Permian Nodular Limestones in Yunnan-Guizhou Region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(2): 133—137 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Y., Meng, Q.R., Wan, Q., et al., 2008. Deposition of Carbonate Slope and Ore-Forming in Permian Strata in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, East China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1733—1744 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D.G., Guo, T.L., Bian, L.Z., et al., 2009. Some Progresses on Studies of Hydrocarbon Generation and Accumulation in Marine Sedimentary Regions, Southern China (Part 3): Controlling Factors on the Sedimentary Facies and Development of Palaeozoic Marine Source Rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(2): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.T., Yan, J.X., 2009. A Review of Influences of Seawater Chemical Evolution on Biomineralization. *Journal of Palaeogeography*, 11(4): 446—454 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.T., Yan, J.X., Xue, W.Q., 2011. Differential Diagenesis of Limestone-Marl Alternations. *Geological Review*, 58(4): 627—635 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.Y., Yan, J.X., 2007. Nodular Chert of the Permian Chihsia Formation from South China and Its Geological Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(5): 730—736 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein, T.K., Timofeeff, M.N., Brennan, S.T., et al., 2001. Oscillations in Phanerozoic Seawater Chemistry: Evidence from Fluid Inclusions. *Science*, 294(5544): 1086—1088. doi: 10.1126/science.1064280
- Lowenstein, T.K., Timofeeff, M.N., Kovalevych, V.M., et al., 2005. The Major-Ion Composition of Permian Seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(7): 1701—1719. doi: 10.1016/j.gca.2004.09.015
- Luo, J.X., He, Y.B., 2010. Origin and Characteristics of Permian Eyeball-Shaped Limestones in Middle-Upper Yangtze Region. *Geological Review*, 56(5): 629—637 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z.X., Li, B., Yan, J.X., et al., 2011. Microfacies of Peloidal Limestone of Middle Permian Chihsia Formation at Guangyuan, Sichuan Province and Its Sedimentary Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3): 449—

- 457(in Chinese with English abstract).
- Milliman, J. D., Freile, D., Steinen, R. P., et al., 1993. Great Bahama Bank Aragonitic Muds, Mostly Inorganically Precipitated, Mostly Exported. *Journal of Sedimentary Research*, 63(4): 589—595. doi: 10.1306/D4267B81—2B26—11D7—8648000102C1865D
- Munnecke, A., Westphal, H., Kolbl-Ebert, M., 2008. Diagenesis of Plattenkalk: Examples from the Solnhofen Area (Upper Jurassic, Southern Germany). *Sedimentology*, 55(6): 1931—1946. doi: 10.1111/j.1365—3091.2008.00975.x
- Munnecke, A., Westphal, H., Reijmer, J.J.G., et al., 1997. Microspar Development during Early Marine Burial Diagenesis: A Comparison of Pliocene Carbonates from the Bahamas with Silurian Limestones from Gotland (Sweden). *Sedimentology*, 44(6): 977—990. doi: 10.1111/j.1365—3091.1997.tb02173.x
- Murchey, B. L., Jones, D. L., 1992. A Mid-Permian Chert Event: Widespread Deposition of Biogenic Siliceous Sediments in Coastal, Island Arc and Oceanic Basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 96(1—2): 161—174. doi: 10.1016/0031—0182(92)90066—E
- Ricken, W., 1987. The Carbonate Compaction Law: A New Tool. *Sedimentology*, 34(4): 571—584. doi: 10.1111/j.1365—3091.1987.tb00787.x
- Ries, J. B., 2010. Review: Geological and Experimental Evidence for Secular Variation in Seawater Mg/Ca (Calcite-Aragonite Seas) and Its Effects on Marine Biological Calcification. *Biogeosciences*, 7(9): 2795—2849. doi: 10.5194/bg—7—2795—2010
- Ries, J. B., Anderson, M. A., Hill, R. T., 2008. Seawater Mg/Ca Controls Polymorph Mineralogy of Microbial CaCO₃: A Potential Proxy for Calcite-Aragonite Seas in Precambrian Time. *Geobiology*, 6(2): 106—119. doi: 10.1111/j.1472—4669.2007.00134.x
- Sandberg, P. A., 1983. An Oscillating Trend in Phanerozoic Non-Skeletal Carbonate Mineralogy. *Nature*, 305(5929): 19—22. doi: 10.1038/305019a0
- Sanders, D., 2003. Syndepositional Dissolution of Calcium Carbonate in Neritic Carbonate Environments: Geological Recognition, Processes, Potential Significance. *Journal of African Earth Sciences*, 36(3): 99—134. doi: 10.1016/S0899—5362(03)00027—7
- Stanley, S. M., 2008. Effects of Global Seawater Chemistry on Biominerization: Past, Present, and Future. *Chemical Reviews*, 108(11): 4483—4498. doi: 10.1021/cr800233u
- Stanley, S. M., Hardie, L. A., 1998. Secular Oscillations in the Carbonate Mineralogy of Reef-Building and Sediment-Producing Organisms Driven by Tectonically Forced Shifts in Seawater Chemistry. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144(1): 3—19. doi: 10.1016/S0031—0182(98)00109—6
- Wang, C. S., Li, X. H., Chen, H. D., et al., 1999. Permian Sea-Level Changes and Rising-Falling Events in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 536—541 (in Chinese with English abstract).
- Westphal, H., 2006. Limestone-Marl Alternations as Environmental Archives and the Role of Early Diagenesis: A Critical Review. *International Journal of Earth Sciences*, 95(6): 947—961. doi: 10.1007/s00531—006—0084—8
- Westphal, H., Head, M. J., Munnecke, A., 2000. Differential Diagenesis of Rhythmic Limestone Alternations Supported by Palyntological Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3): 715—725. doi: 10.1306/2DC40932—0E47—11D7—8643000102C1865D
- Westphal, H., Hilgen, F., Munnecke, A., 2010. An Assessment of the Suitability of Individual Rhythmic Carbonate Successions for Astrochronological Application. *Earth-Science Reviews*, 99(1): 19—30. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.02.001
- Westphal, H., Munnecke, A., 1997. Mechanical Compaction versus Early Cementation in Fine-Grained Limestones: Differentiation by the Preservation of Organic Microfossils. *Sedimentary Geology*, 112(1—2): 33—42. doi: 10.1016/S0037—0738(97)00033—X
- Wheeler, J. R., Cherns, L., Wright, P., 2008. Provenance of Microcrystalline Carbonate Cement in Limestone-Marl Alternations (LMA): Aragonite Mud or Molluscs? *Journal of the Geological Society*, 165: 395—403. doi: 10.1144/0016—76492006—160
- Yan, J. X., 2004. Origin of Permian Chihsian Carbonates from South China and Its Geological Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 579—587 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Munnecke, A., Steuber, T., et al., 2005. Marine Sepiolite in Middle Permian Carbonates of South China: Implications for Secular Variation of Phanerozoic Seawater Chemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 75(3): 328—338. doi: 10.2110/Jsr.2005.026
- Yan, J. X., Wu, M., 2006. Synchronized Oscillations in Phanerozoic Chemical Composition of Seawater, Carbonate Sedimentation and Biotic Evolution: Progresses and Prospects. *Geological Science and Technology Information*, 25(3): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. Q., Feng, Z. Z., 2000. Permian Depositional Systems

- in South China. *Journal of Palaeogeography*, 2(1): 11—18(in Chinese with English abstract).
- Yin, H.F., Xie, S.C., Yan, J.X., et al., 2011. Geobiological Approach to Evaluating Marine Carbonate Source Rocks of Hydrocarbon. *Sci. China : Earth Sci.*, 54(8): 1121—1135. doi:10.1007/s11430-011-4236-8
- Zhuravlev, A.Y., Wood, R.A., 2009. Controls on Carbonate Skeletal Mineralogy: Global CO₂ Evolution and Mass Extinctions. *Geology*, 37(12): 1123—1126. doi:10.1130/G30204A.1
- ### 附中文参考文献
- 包汉勇,马仲武,胡超涌,等,2009.武汉地区二叠系栖霞组灰岩—含泥灰岩韵律层生物产率.地质科技情报,28(2): 60—65.
- 陈慧,解习农,李红敬,等,2010.利用古氧相和古生产力替代指标评价四川上寺剖面二叠系海相烃源岩.古地理学报,12(3): 324—333.
- 杜叶龙,李双应,贾志海,等,2012.再论安徽沿江地区中二叠统栖霞组砾屑灰岩的成因.地质论评,58(3): 426—433.
- 冯增昭,杨玉卿,金振奎,等,1996.中国南方二叠纪岩相古地理.沉积学报,14(2): 1—11.
- 金振奎,冯增昭,1994.云贵地区二叠系瘤灰岩的成因.岩石矿物学杂志,13(2): 133—137.
- 李双应,孟庆任,万秋,等,2008.长江中下游地区二叠纪碳酸盐沉积特征.沉积学报,26(5): 730—736.
- 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等,2009.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三):南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素.海相油气地质,14(2): 1—19.
- 刘喜停,颜佳新,2009.海水化学演化对生物矿化的影响综述.古地理学报,11(4): 446—454.
- 刘喜停,颜佳新,薛武强,2012.灰岩—泥灰岩韵律层的差异成岩作用.地质论评,58(4): 627—635.
- 刘新宇,颜佳新,2007.华南地区二叠纪栖霞组燧石结核成因研究及其地质意义.沉积学报,25(5): 730—736.
- 罗进雄,何幼斌,2010.中—上扬子地区二叠系眼球状石灰岩特征及成因研究.地质论评,56(5): 629—637.
- 马志鑫,李波,颜佳新,等,2011.四川广元中二叠统栖霞组似球粒灰岩微相特征及沉积学意义.沉积学报,29(3): 449—457.
- 王成善,李祥辉,陈洪德,等,1999.中国南方二叠纪海平面变化及升降事件.沉积学报,17(4): 536—541.
- 颜佳新,2004.华南地区二叠纪栖霞组碳酸盐岩成因研究及其地质意义.沉积学报,22(4): 579—587.
- 颜佳新,伍明,2006.显生宙海水成分、碳酸盐沉积和生物演化系统研究进展.地质科技情报,25(3): 1—7.
- 杨玉卿,冯增昭,2000.中国南方二叠纪沉积体系.古地理学报,2(1): 11—18.

* * * * *

《地球科学——中国地质大学学报》

2014年3月 第39卷 第3期 要目预告

- | | |
|----------------------------------|------|
| 湘西寒武系黑色岩系中干酪根的稀土元素地球化学特征 | 邓义楠等 |
| 鄂尔多斯盆地中生界低压油藏特征与形成机制 | 段毅等 |
| 罗河铁矿水文地球化学特征及成因 | 龚星等 |
| 混沌序列 WA-VOLTERRA 耦合模型在月降水量预测中的应用 | 黄发明等 |
| 小秦岭金矿田典型矿脉矿化趋势面分析与深部预测 | 谭满堂等 |
| 钱塘江河口涌潮河段滩槽演替与沉积层序 | 涂俊彪等 |
| 大别—苏鲁超高压变质岩研究新思路:偏光显微镜阴极发光技术的应用 | 王淑杰等 |
| 新疆拜城波孜果尔东矿区侵入岩矿物学特征 | 尹京武等 |