

冰川型海平面变化控制下的台地碳酸盐岩成岩作用： 以陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面为例

张海军^{1,2}, 王训练¹, 丁林², 夏国英³, 王雷¹, 王清山¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

摘要: 以陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面为具体实例, 探讨了冰川型海平面变化控制下的台地碳酸盐岩成岩作用规律。描述了陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面碳酸盐岩的各种成岩作用类型。根据成岩组构将研究区碳酸盐岩的成岩环境分为海水、大气淡水和埋藏环境。综合分析了各种成岩作用及其成岩环境的纵向分布特征。研究表明, 剖面上碳酸盐岩成岩作用和成岩环境的特征与岩石在高频旋回中的相对位置存在明显的对应关系, 受大振幅、高频率的冰川型海平面变化控制。早期海平面相对上升, 形成旋回的下部单元, 岩石首先经历海底成岩作用, 随着上覆沉积物的增加, 逐渐进入浅埋藏环境, 成岩作用表现为以压溶、重结晶作用发育为主要特征。晚期形成旋回的上部单元, 由于海平面相对下降, 沉积物逐渐抬升, 早期海底成岩作用尚未充分发育就脱离海水环境, 进入大气淡水成岩环境, 以强烈的大气淡水成岩作用为特征。

关键词: 碳酸盐岩; 成岩作用; 高频旋回; 冰川型海平面变化; 石炭—二叠系界线; 陕西镇安。

中图分类号: P588.245; P534.4

文章编号: 1000-2383(2007)03-0329-10

收稿日期: 2006-05-29

Carbonate Diagenesis Controlled by Glacioeustatic Sea-Level Changes: A Case Study of the Carboniferous-Permian Boundary Section at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province, China

ZHANG Hai-jun^{1,2}, WANG Xun-lian¹, DING Lin², XIA Guo-ying³, WANG Lei¹, WANG Qing-shan¹

1. School of the Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

Abstract: Based on the case study on the platform-facies carbonate rocks of the Carboniferous-Permian boundary section being well developed and outcropped in Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province, China, this paper probes into the carbonate diagenesis controlled by glacioeustatic sea-level changes and its different patterns. In terms of mineralogical composition and microfabrics, diagenetic environments in the study area are divided into marine, near surface meteoric and burial environments. Comprehensive analysis is made on all patterns of carbonate diagenesis and the vertical distribution features of diagenetic environments. The analytical results reveal that carbonate diagenesis in the Carboniferous-Permian boundary section is related to the relative stratigraphic position of the rocks in the depositional cyclothem and is controlled by the glacioeustatic sea-level changes. There are distinctive differences in diagenetic patterns between lower transgressive sequence and upper regressive sequence in a cyclothem. The former is mainly characterized by pressure solution and recrystallization of mudstone and wackstone in burial environments, while the latter by cementation and leaching of fresh water in meteoric environments.

Key words: carbonate; diagenesis; cyclothem; glacioeustatic sea-level changes; Carboniferous-Permian boundary; Zhen'an of Shaanxi.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40172014, 40602007); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. kzcx3-sw-143); 国家重点基础发展规划项目(No. 2002CB412602)。

作者简介: 张海军(1975-), 男, 博士后, 主要从事碳酸盐岩沉积学及地层学科研工作。E-mail: zhj@itpcas.ac.cn

0 引言

20 世纪 60 年代以来, 各国学者对现代和古代碳酸盐沉积物的成岩作用进行了广泛研究和系统总结, 如 Bathurst (1975)、Longman (1980)、Schneidermann and Harris (1985)、Moore (1989, 2001)、McIlreath and Morrow (1990)、Tucker and Bathurst (1990) 和王英华等 (1994)。层序地层学理论兴起后, 探讨成岩作用与层序地层及海平面变化的关系, 利用层序地层预测成岩作用和储层孔隙的分布成为碳酸盐沉积学研究的一个重要方向 (Tucker, 1993; Budd *et al.*, 1995; Montanez *et al.*, 1997; Moore, 2001; Csoma *et al.*, 2004)。Tucker (1993) 和 Moore (2001) 对碳酸盐岩成岩作用与海平面变化的关系进行了模式化的总结, 并指出碳酸盐沉积物的成岩作用可在层序地层框架内加以论述。其他学者 (Xiong and Heckel, 1996; 贾振远和蔡忠贤, 1997; 陈方鸿等, 1999; Saller *et al.*, 1999) 分别从各自的研究对象出发涉及了碳酸盐岩成岩作用与层序地层或海平面变化的具体关系。上述学者在论述碳酸盐岩成岩作用与层序地层及海平面变化关系时, 通常注意区分干旱气候和湿润气候条件, 而较少考虑冰室气候和温室气候背景, 有关冰室气候背景下台地碳酸盐岩成岩作用与层序地层及海平面变化关系的具体实例更是鲜见报道。

石炭—二叠纪之交是地质历史上的冰室时期之一, 高频率、大振幅的冰川型全球海平面变化显著。陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面台地碳酸盐岩极为发育, 冰川型海平面变化控制的潮下型高频旋回明显 (张海军, 2004)。镇安西口剖面台地碳酸盐岩成岩作用的研究, 将为探讨在地球冰室气候背景下碳酸盐岩成岩作用与层序地层及冰川型海平面变化关系提供一个重要实例。

1 地层及沉积背景

陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面 (包括三里冲剖面及石门垭东、西侧剖面) 是我国海相石炭—二叠系界线典型剖面之一。剖面厚 259 ~ 342 m, 由巨厚层或块状碳酸盐岩组成, 沉积连续, 化石丰富, 出露极佳。以前的学者对这一地区的研究 (王国莲和孙秀芳, 1973; 丁培榛等, 1983, 1987, 1989; 丁蕴杰

等, 1991, 1992; 夏国英等, 1996; 夏国英和丁蕴杰, 2002) 多集中在生物地层学方面, 剖面生物地层研究程度很高。最近, 张海军等 (2003, 2004) 对该剖面的碳酸盐岩微相及沉积环境、层序地层及海平面变化进行了详细研究, 但镇安西口地区石炭—二叠系界线剖面的碳酸盐岩成岩作用至今无人涉及。

野外工作中沿用前人 (夏国英等, 1996; 夏国英和丁蕴杰, 2002) 的生物地层研究成果, 系统测制剖面图, 并进行全剖面采样。按最新的年代地层划分方案 (夏国英和丁蕴杰, 2002), 三里冲剖面由下而上划分出上石炭统逍遥阶、下杨家河阶和下二叠统上杨家河阶、范家河阶、垭口阶及隆林阶。其中, 下杨家河阶、上杨家河阶、范家河阶和垭口阶相当于中国区域年代地层表 (全国地层委员, 2001) 中的紫松阶 (图 1)。

最近的研究 (张海军等, 2003, 2004) 表明, 陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面碳酸盐岩可划分出含生物碎屑泥灰岩、生物碎屑泥灰岩、生物碎屑泥粒灰岩、生物碎屑颗粒灰岩、团块颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩等 6 种主要的微相类型。它们主要形成于开阔台地浅滩、滩间、台地边缘浅滩及藻丘等沉积环境, 基本上相当于 Wilson (1975) 沉积模式的 6 ~ 7 相带。通过详细的微相特征分析, 确定碳酸盐岩沉积过程中的水动力状况和相对水深变化趋势, 识别出低能潮下型碳酸盐岩旋回 A1、A2 及高能浅滩型碳酸盐岩旋回 B1、B2 两类 4 种高频旋回 31 个。根据这些高频旋回在剖面上的有序叠置型式, 将镇安西口地区的上石炭统逍遥阶至下二叠统隆林阶划分出 12 个四级层序和 5 个 II 型三级层序地层单元 (图 1)。

2 成岩作用类型及成岩组构

2.1 泥晶化作用

由于微生物的反复钻孔及其后的泥晶充填 (Bathurst, 1975) 或早期的矿物重结晶作用 (Reid and Macintyre, 1998, 2000), 在偏光显微镜下常可见到部分颗粒发育参差不齐的黑边和黑孔 (图 2a), 有的颗粒甚至全部被泥晶交代, 形成很“脏”的黑色泥晶铸模 (图 2b)。由于泥晶化边富含有机质和粘土, 不易溶解, 一些泥晶化颗粒受到大气淡水作用后, 常形成内亮外黑的泥晶套 (图 2b)。从成岩顺序来看, 黑边、黑孔和泥晶铸模均为早期成岩产物, 而泥晶套则是后期淡水成岩作用叠加的结果。

泥晶化作用是研究区较为发育的一种成岩作

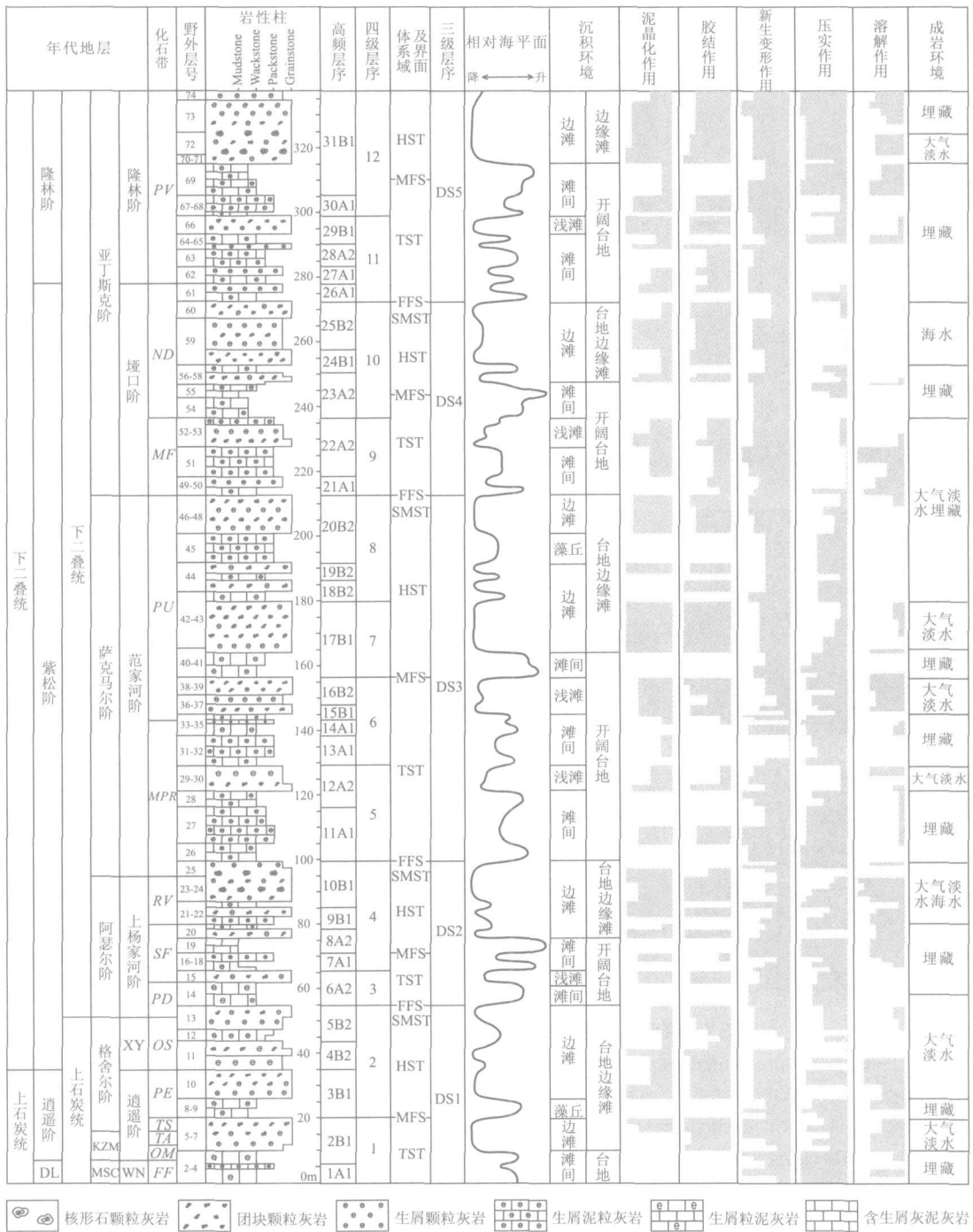


图1 陕西省镇安西口三里冲剖面沉积成岩作用综合柱状图

Fig. 1 Deposition-diagenesis column of the Sanlichong Section in Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province

图中生物地层资料据夏国英和丁蕴杰(2002), 年代地层资料据夏国英和丁蕴杰(2002)及全国地层委员会(2001), 旋回层序资料据张海军等(2004), 沉积环境和相对海平面变化资料据张海军等(2003); 阴影部分从右至左表示由弱到强; DL. 达拉阶, KZM. 卡西莫夫阶, MSC. 莫斯科阶, XY. 下杨家河阶, WN. 威宁阶; A1、A2、B1、B2 均为旋回类型; FF=*Fusulina-Fusulina*, OM=*Obsoletes Montipavus*, TA=*Triticites acutus*, TS=*Triticites mogutovensis-T. stuckenbergi*, PE=*Pseudofusulina foecunda-Eoparafusulina ferganensis*, OS=*Occidentoschwagerina alpina-O. postgalloway*, PD=*Pseudofusulina krotowi sphaeroidea-Dunbarinella*, SF=*Sphaeroschwagerina moelleri-Pseudofusulina foecunda*, RV=*Robustoschwagerina vesplicata-Sphaeroschwagerina sphaerica*, MPR=*Mcclouidia regularis-Paraschwagerina fragosa-Robustoschwagerina xiaodushanica*, PU=*Pseudofusulina urdalensis*, MF=*Mcclouidia certa-Pamirina firma*, ND=*Nagatoella-Darvasites*, PV=*Parmirina darvasica*

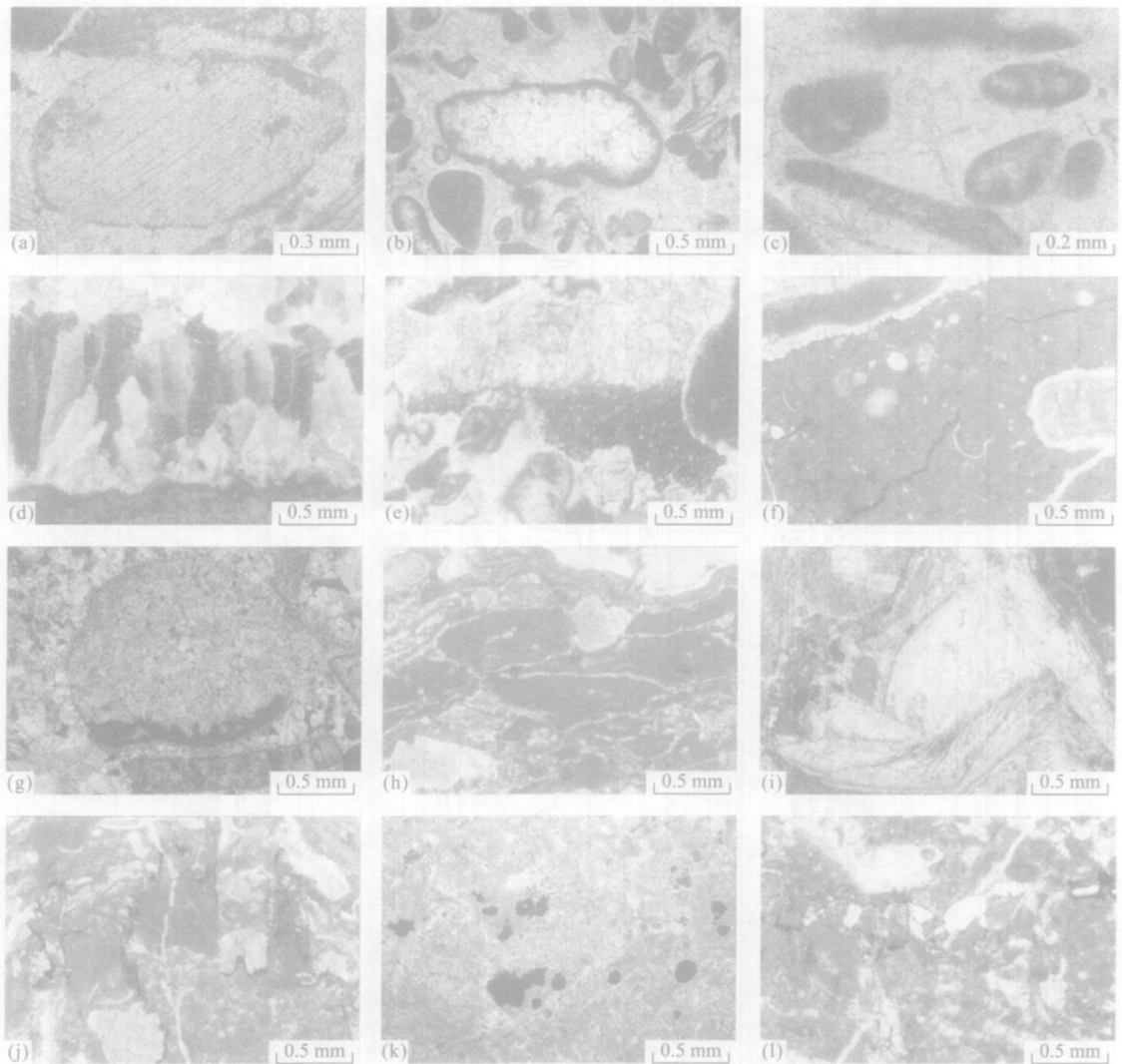


图 2 陕溪镇安西口剖面碳酸盐岩成岩作用的显微照片

Fig. 2 Thin section photomicrographs of carbonate diagenesis in Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province

(h)和(g)的标本采自石门垭剖面,其余标本采自三里冲剖面。除特别注明外均为单偏光下照片;a为泥晶化作用。海百合碎屑发育参差不齐的泥晶化黑边和黑孔,标本号 SLC71R-2 隆林阶;b为泥晶化作用。生屑颗粒(黑色)被完全泥晶交代形成很“脏”的泥晶铸模。生屑颗粒(亮)受到大气淡水的溶解外圈残留难溶的暗色泥晶套,标本号 SLC24R-3,上杨家河阶;c为纤状方解石。丛纤状方解石垂直于颗粒表面生长,在孔隙中心直线状相交。呈多边形结构,标本号 SLC11R-3,下杨家河阶;d为放射轴状方解石。棱柱状方解石垂直于基底发育,在正交偏光下具波状消光,标本号 SLC52R-1b,垭口阶;e为顶底构造胶结物和渗流粉砂。下部为机械充填的渗流粉砂,上部为亮晶方解石。两者之间的接触面可能代表原始水平面,标本号 SLC30R-2,范家河阶;f为渗流粉砂。颗粒边缘被短柱状的亮晶方解石环绕。在其内的粒间孔隙中充填大量机械沉积物,且内含少量个体微小的化石碎屑,暗示强烈的大气淡水作用,标本编号 SLC49R-1,下二叠统范家河阶;g为重结晶作用。完整的蕨化石,经重结晶作用改造。仅残留边缘一小部分壳壁。正交偏光镜下,标本号 SLC7R-1,逍遥阶;h为机械压实作用。未完全固结的颗粒被压扁,呈紧密堆积,半定向排列。颗粒外面发育一圈未变形亮晶胶结物。暗示机械压实作用很可能开始于胶结作用之前,标本号 SMY28R-2,范家河阶;i为机械压实作用。由于机械压实较为完整的腕足壳被压裂折断,标本号 SMY28R-2,范家河阶;j为压溶缝合线。平行层面的缝合线起伏剧烈,切割基质和颗粒,标本号 SLC32R-1,范家河阶;k为大气淡水溶解作用。在粒泥灰岩中发育孤立的不规则的溶孔(黑色),正交偏光镜下,标本号 SLC51R-2b,垭口阶;l为埋藏溶解作用。在粒泥灰岩中沿着缝合线发育一系列不规则的溶孔,标本号 SLC69R-1,隆林阶

用,通常在较浅水中高能的颗粒支撑灰岩中泥晶化现象很普遍,而在较深水低能的灰泥支撑灰岩中极少见到,最强烈的泥晶化作用只发育在浅滩的亮晶颗粒灰岩中(图1)。泥晶化是一种较弱的海底成岩作用,一般形成于扰动或间隙扰动的浅水条件下,且要求颗粒在水底长期停留或徘徊而不被迅速

掩埋(韦龙明, 1995; Kabanov, 2000)。

2.2 胶结作用

胶结作用是研究区最主要的成岩作用, 重要的胶结组构主要发育在颗粒支撑的泥粒灰岩和颗粒灰岩微相中。不同的胶结物具有不同的化学成分和矿物组成、晶体形态(包括晶体终止晶形)和大小、光轴性质和消光特征、包裹体含量、底质选择性及阴极发光等特征(Schneidermann and Harris, 1985)。通过对岩石薄片详细的微相分析, 可以确定不同类型的胶结物。研究区主要胶结物的类型及特征如下。

2.2.1 纤状方解石 纤状方解石常呈极细的丛纤状垂直于底质排列, 附着于颗粒周围或生物碎屑内部, 构成等厚环边的栉壳状结构或多边形结构(图2c)。由于富含包裹体, 在薄片为浅黄色或略深。在正交偏光下, 晶体束状排列, 整体呈波状或不均匀消光。重结晶后可呈刃状、短柱状、马牙状或叶片状。在现代礁环境, 相似的组构由文石或高镁方解石形成(Shinn, 1971; Ginsburg and Schroeder, 1973)。古代岩石中相似的组构形成于海相环境。纤状方解石在剖面分布较为少见, 常出现在部分颗粒灰岩中的颗粒间孔隙及其他岩石的生物壳内。它是第一世代胶结物, 作为一种早期胶结物, 形成于海底成岩环境。

2.2.2 粒状方解石 粒状方解石是研究区内最普遍的胶结物类型。粒状方解石在薄片下无色透明、干净明亮、解理平直、晶体间为镶嵌状, 一般为粉晶到细晶, 少数为中晶, 亦可称镶嵌粒状亮晶方解石。它们既见于溶孔、铸模孔和泥晶套中, 也见于颗粒间。常围绕第一世代胶结物生长, 或直接沉淀于颗粒之上, 且向孔隙中心逐渐增大。粒状方解石胶结在成岩过程中是较晚的一期, 常形成于大气淡水环境。

2.2.3 共轴增生胶结 研究区共轴增生胶结绝大部分见于亮晶方解石胶结的颗粒灰岩中, 常以棘皮动物碎片作为核心形成方解石单晶, 形成的增生方解石晶体多洁净明亮。也有少量见于泥晶胶结的粒泥灰岩和泥粒灰岩中, 这种环境中增生的方解石晶体较昏暗。

2.2.4 放射轴状方解石 这是一种很奇特的亮晶方解石, 在研究区偶尔可见。单个方解石晶体呈棱柱状, 棱柱垂直于基底构成孔洞的衬里, 向上略变粗, 可发育为束状, 棱柱宽0.1~0.3 mm, 长1~2 mm, 棱柱顶端呈三角形, 也可呈不规则形, 在正交偏光下具波状消光、收敛的光轴和弯曲的双晶(图2d)。晶体由浑浊的低镁方解石组成, 其中含有大量的微白

云石包体。放射轴状之外是粒状方解石。这类方解石是原生方解石而非文石新生变形所致(Kendall, 1985; Saller, 1986)。根据放射轴状方解石的产状, 及其与其他类型亮晶方解石的关系分析, 此类方解石应出现在纤状方解石之后, 粒状方解石之前, 直接沉淀于浅埋藏条件下的海水中(Saller, 1986; Kaufmann, 1997)。

2.2.5 示顶底构造和渗流粉砂 在部分碳酸盐岩孔隙中发育示顶底构造。其下部充填的是机械沉积物, 上部覆盖的是粒状亮晶方解石, 两者之间界面平直, 代表原始沉积界面, 具有明显的指示顶、底的特征(图2e)。有时这一界面与层面呈低角度相交, 反映机械沉积物(渗流粉砂)是由固定的方向进入, 具有淡水渗流带的特征。此外, 在某些高频旋回顶部的颗粒灰岩中, 颗粒边缘被短柱状的亮晶方解石环绕, 而颗粒间的孔隙几乎完全被渗流粉砂基质充填(图2f), 指示更强烈的大气淡水作用。

2.3 新生变形作用

新生变形作用是研究区较为常见的一种成岩作用, 包括矿物转化作用和重结晶作用。

矿物转化作用主要指文石、高镁方解石等向低镁方解石的转变。石炭-二叠纪时期, 形成的碳酸钙沉积物是由文石、高镁方解石和低镁方解石组成的, 但在形成灰岩后都由低镁方解石组成(Tucker, 1993)。剖面岩石中的绿藻、软体动物碎屑及鲕粒等新生变形作用非常明显, 形成时它们主要由文石组成, 而现在镜下看到的均为晶粒方解石结构。

本区灰岩的重结晶现象较为复杂, 可分为均匀重结晶和斑状重结晶2种端元组构。均匀重结晶表现为灰泥灰岩或生屑粒泥灰岩的泥晶方解石填隙物和部分生屑颗粒常均匀重结晶为粉细晶方解石(图2g), 其晶粒基本等大, 半自形-他形, 有时易与亮晶方解石混淆。但重结晶粉细晶方解石可嵌入生屑或其他颗粒组分内部, 使颗粒边界模糊, 两者间无截然界线。斑状重结晶是指分布于灰岩中的亮晶方解石集合体斑块, 这些“亮晶”斑块与围岩关系有清晰和模糊2种。斑状重结晶除了组构选择重结晶成因外, 多叠加有不同程度的溶解作用, 局部可有晶间溶孔形成, 但其连通性较差。重结晶作用属于埋藏环境下的产物, 发生于成岩作用的中晚期。

2.4 压实-压溶作用

压实-压溶作用见于研究区各类岩石组合中, 从压实到压溶, 其成岩组构表现为渐进系列。研究区

的压实作用分布不均匀,在颗粒灰岩、泥粒灰岩中,由于岩石具有颗粒支撑结构和较强的胶结作用,使得整个沉积岩层的强度增大,从而导致后期压实作用减弱甚至不明显,但也不排除部分岩石发育胶结前的压实作用(图 2h);在泥粒灰岩、粒泥灰岩和灰泥灰岩中,由于灰泥含量高,缺少抗压的颗粒结构。因此,压实作用强烈,岩石孔隙度显著降低。

压溶作用是非常重要的埋藏成岩作用。它除了产生许多压溶结构外,也导致颗粒和沉积物的溶解,而后者是埋藏胶结物碳酸钙的重要来源。Buxton and Sibley (1981)和 Bathurst (1987)把压溶分为 3 类:拟合结构、溶解缝和缝合线。拟合结构是颗粒相互嵌入的渗透性结构,在研究区的颗粒质灰岩中最为明显。长条状的颗粒常被上覆的生物碎屑如有孔虫等颗粒压折(图 2i),或 2 颗粒之间相互嵌入而变形(图 2h),但周围的亮晶方解石胶结物并没有碎裂。这一特征说明生物灰岩的压溶作用较早,持续时间也较长。估计在泥晶化作用之后就广泛发生了压溶作用,并且为后来的胶结作用提供了碳酸盐成分。溶解缝是不溶残余的平缓的波状缝,缺乏缝合线的显著缝合,在本区发育不多,偶见于泥粒灰岩、粒泥灰岩和灰泥灰岩中。缝合线在研究区广泛发育,沿缝合线是褐红色铁质粘土类,基本上平行于层面分布。薄片中的缝合线常切割颗粒、胶结物和基质,并且振幅多数大于颗粒的直径。形态多为尖棱高峰、波状、箱状等(图 2j)。大多数缝合线沿着不同岩性的边界发育,这导致不溶组分粘土、铁质、有机物等沿着缝合线分布。

2.5 溶解作用

研究区的溶解作用(刘再华等, 2006)通常叠加并改造其他成岩作用结构,可分为大气淡水溶解、岩溶溶解和埋藏溶解 3 种。早期的溶解作用发生于大气淡水成岩环境,由于沉积物还未完全固结,溶解作用广泛且具选择性(图 2k)。泥粒灰岩、颗粒灰岩中发育的溶孔,孔径变化较大,分布广泛,这种溶解作用与潮下生屑滩、颗粒滩等沉积相带有关。灰泥灰岩、粒泥灰岩中则发育一些孤立的不规则的溶孔,孔径小,分布有限。早期的大气淡水溶解作用分布广泛,但其形成的孔隙多被后期胶结作用充填。晚期的岩溶溶解作用发生于表生成岩环境,常见于野外露头,且受古地形和古构造控制,这种溶解作用在本区较为少见。埋藏溶解多见于压溶作用发育的岩石中,常表现为各类溶孔和溶缝沿着缝合线发育(图 2l),这类溶解作用在本区也不多见。

3 成岩环境及其演化

区内碳酸盐岩的成岩环境可分大气淡水、海水及埋藏 3 种成岩环境,前两者属近地表成岩环境,后者则为深埋藏成岩环境。岩石学特征是成岩环境的基本标志(Longman, 1980; Tucker and Bathurst, 1990)。淡水胶结作用、淡水溶解作用、矿物转化作用反映大气淡水成岩环境,其岩石学特征为等轴粒状亮晶方解石胶结,渗流粉砂充填,粒内溶孔、粒间溶孔及线状溶洞等。泥晶化作用、海水胶结作用、早期压实作用则指示海水成岩环境,其岩石学特征是纤状亮晶方解石胶结、颗粒泥晶化、颗粒变形及定向排列等。重结晶作用、压溶作用指示埋藏成岩环境,其岩石学特征是具有波状消光的晶粒方解石,缝合线构造,颗粒局部嵌入、破碎,裂隙及缝合线边缘的次生溶孔等。

随着时间的推移,可以使已经形成的沉积物处于不同的成岩环境中。研究区碳酸盐岩的成岩环境不仅与沉积(微)相关关系密切,而且也同沉积旋回有重要关系。通常,旋回下部的海进序列由海水成岩环境直接进入埋藏环境,而旋回上部的海退序列则由海水成岩环境经大气淡水环境再逐渐进入埋藏环境,最后由于构造抬升两者都进入表生环境,成为现在所见到的露头岩石(图 3)。

4 成岩作用与相对海平面关系探讨

将上述观察描述的成岩作用置于层序地层格架(张海军等, 2004)中,研究发现,成岩作用与岩石在高频旋回中的相对位置对应关系明显(图 1)。旋回的下部单元多为较深水中低能的灰泥支撑灰岩,岩石中颗粒较少,也未见泥晶化作用,但可见部分生屑粒内发育栉壳状亮晶方解石胶结物,岩石中重结晶作用、压实作用、缝合线构造极为发育,未见明显的淋滤作用。这些成岩组构反映了岩石很可能是从成岩变化不明显的浅海环境直接进入逐渐压实的埋藏环境。旋回的上部单元多为较浅水中高能颗粒支撑灰岩,颗粒泥晶化强烈,粒状方解石胶结、共轴增生胶结、渗流粉砂极为发育,可见大气淡水溶解、矿物转化等成岩作用,压实作用不明显,也未见缝合线构造。这表明了沉积物从沉积后迅速进入大气淡水成岩环境,遭受强烈的大气淡水成岩作用,然后再进入埋藏成岩环境(图 4)。

不同级别和各种类型的沉积旋回都是沉积作用

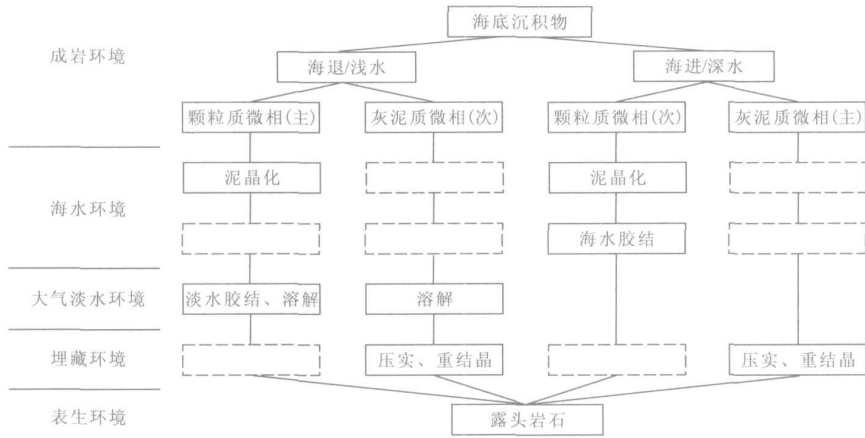


图 3 陕西镇安西口剖面碳酸盐岩成岩作用和成岩环境的演化

Fig. 3 Simplified diagram showing the diagenetic history of carbonate rocks in Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province
图中“主”表示主要微相类型;“次”表示次要微相类型;实框表示相应成岩环境下显著的成岩作用;虚框表示虽然经历了该成岩环境但未见明显的成岩作用

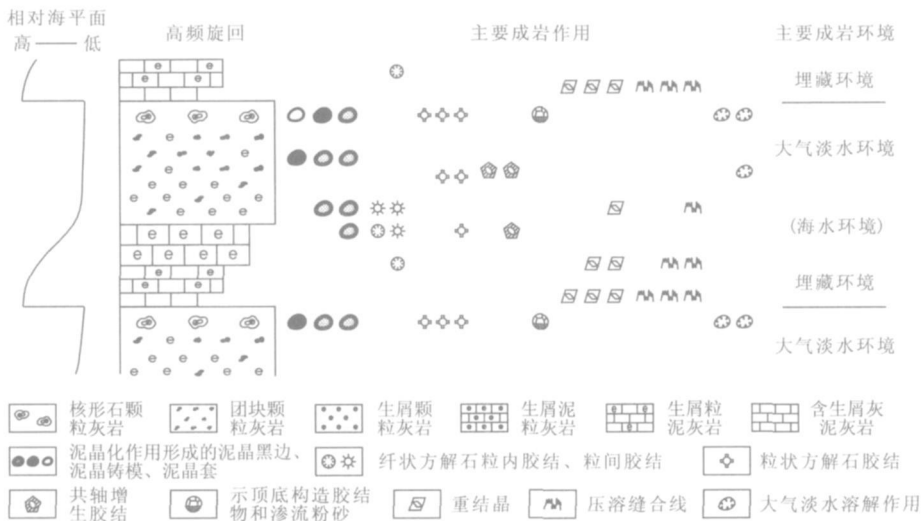


图 4 完整的高频旋回及其成岩模式

Fig. 4 Diagenetic pattern of carbonate rocks in a complete cyclothem

随着相对海平面变化的产物, 各种成岩作用在剖面上的分布与岩石在沉积旋回中的相对位置之间存在明显的对应关系, 实质上表明工作区碳酸盐岩的成岩环境受相对海平面变化控制. 相对海平面的变化可以使已经形成的沉积物处于不同的成岩环境中. 通常, 在早期的海进序列(即旋回下部单元)中, 海平面相对上升, 岩石首先经历海底成岩作用, 如生屑粒内发育栉壳状亮晶方解石胶结. 随着上覆沉积物的增加, 逐渐进入浅埋藏环境, 以压溶、重结晶作用发育为主要特征. 在晚期的海退序列(即旋回上部单元)中, 海平面相对下降, 沉积物逐渐抬升, 早期海底

作用尚未充分发育就脱离海水环境, 进入大气淡水成岩环境, 以强烈的大气淡水成岩作用为特征. 最后, 随着下一个旋回的发育, 逐渐进入了埋藏环境, 但此时沉积物已固结, 因此压实作用表现不明显.

值得指出的是, 图 4 中所示的是从三里冲剖面上抽象出的成岩作用与沉积旋回及相对海平面变化关系的一般形式, 而图 1 中所示为三里冲剖面岩相与成岩作用关系的具体表现形式, 两者之间可能有一定的差别. 之所以很少见到完整的标准旋回序列, 很可能是由于在横向上的区域古地理(沉积环境)分异和纵向上的相对海平面升降幅度不同导致实际旋

回在标准序列中的起止位置不完全一样所致。

与 Tucker(1993)和 Moore(2001)提出的模式相比, 陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面碳酸盐岩的成岩作用具有自身的特点, 主要表现为成岩作用的纵向分布特征与高频旋回的相互关系明显, 而与低频旋回层序的相互关系不很明显。也就是说, 研究区成岩作用受高频海平面变化控制比受低频复合海平面变化更明显。这一特点很可能与石炭、二叠纪之交特殊的地质背景有关。石炭、二叠纪是地质历史上的冰室期时期, 冰川型海平面变化极为发育。与地球温室时期的海平面变化不同的是, 冰川型海平面变化具有幅度大、频率高的特点, 由其叠加而成的复合海平面反而不很明显, 特别是在像研究区这样的碳酸盐地上更是如此(Tucker and Wright, 1990; Wright and Vanstone, 2001)。

高频海平面变化直接控制了碳酸盐岩的沉积和早期成岩作用, 这两者又进一步限定了碳酸盐岩的后期成岩作用特征。可以说高频海平面变化间接控制了碳酸盐岩的后期成岩作用, 正是在这个意义上说, 高频海平面变化控制了碳酸盐岩的成岩作用。相对海平面的变化控制了碳酸盐岩成岩作用的垂向分布; 反过来, 成岩作用也记录了相对海平面升降变化的信息。据此, 一方面可以通过层序地层及相对海平面变化的研究来预测碳酸盐地层中成岩作用和孔隙的分布。另一方面也可以根据碳酸盐地层序列中成岩作用的特征及其分布等微观标志来识别旋回层序界面、反演相对海平面变化。

需要说明的是, 在碳酸盐岩成岩过程中, 特别是早期成岩过程中, 气候条件常起着重要作用(Hird and Tucker, 1988)。从沉积物及其中的生物特征分析, 研究区沉积环境为正常浅海环境, 不存在局限蒸发条件。从早期成岩作用看, 岩石中未见白云石矿物, 没有发生任何同生或准同生白云岩化作用(通常认为, 这种白云岩化作用常形成于干旱气候条件下的环湖坪环境)(Sibley, 1991)。因此, 在研究区沉积成岩早期, 很可能是以湿润气候为主, 主要表现为广泛发育的大气淡水成岩作用。

碳酸盐岩成岩作用和成岩环境的分布与岩石在高频旋回中的相对位置存在明显的对应关系, 受高频的冰川型海平面变化控制。这不会是陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面的特有现象, 很可能体现了水圈和岩石圈的某种耦合关系, 在地球冰室期相对湿润气候条件下具有一定的普遍性。

5 结论

陕西镇安西口石炭、二叠纪之交的台地碳酸盐岩是地球冰室期相对湿润气候条件下高频率、大振幅的冰川型海平面变化控制下形成的沉积产物, 其成岩作用主要有颗粒泥晶化作用、胶结作用、压实压溶作用、新生变形作用及溶解作用, 未见明显的白云岩化作用。根据成岩组构可将研究区碳酸盐岩的成岩环境分为海水、大气淡水和埋藏成岩环境。

以工作区三里冲剖面为具体实例, 研究表明, 在地球冰室期相对湿润气候条件下, 碳酸盐岩的成岩作用和成岩环境的分布与岩石在沉积旋回中的相对位置对应关系明显, 受大振幅高频率的冰川型海平面变化控制。在早期的海进序列(即旋回下部单元)中, 海平面相对上升, 岩石首先经历海底成岩作用, 随着上覆沉积物的增加, 逐渐进入浅埋藏环境, 以压溶、重结晶作用发育为主要特征。在晚期的海退序列(即旋回上部单元)中, 海平面相对下降, 沉积物逐渐抬升, 早期海底作用尚未充分发育就脱离海水环境, 进入大气淡水成岩环境, 以强烈的大气淡水成岩作用为特征。

致谢: 在室内薄片鉴定过程中, 得到北京大学张秀莲、中国地质大学(北京)田成、于炳松等老师的热情指导和帮助, 在此表示衷心感谢!

References

- Bathurst, R. G. C., 1975. Carbonates sediments and their diagenesis (second edition). Elsevier, Amsterdam.
- Bathurst, R. G. C., 1987. Diagenetic enhanced bedding in argillaceous platform limestones; Stratified cementation and selective compaction. *Sedimentology*, 34: 749—778.
- Budd, D. A., Saller, A. H., Harris, P. M., 1995. Unconformities and porosity in carbonate strata. AAPG Memoir, Tulsa Oklahoma, 1—313.
- Buxton, T. M., Sibley, D. F., 1981. Pressure solution features in a shallow buried limestone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51: 19—26.
- Chen, F. H., Xie, Q. B., Wang, G. W., 1999. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: An example from the Cambrian strata in the Ordos basin. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(1): 20—24 (in Chinese with English abstract).
- Csoma, A. É., Goldstein, R. H., Mindszenty, A., et al., 2004. Diagenetic salinity cycles and sea level along a

- major unconformity, Monte Composauro, Italy. *Journal of Sedimentary Research*, 74: 889—903.
- Ding P. Z., Jin, T. A., Sun, X. F., 1983. The Permian in Xikou area of Zhen'an County, southern Shaanxi, East Qinling range. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 6: 99—103 (in Chinese with English abstract).
- Ding P. Z., Jin, T. A., Sun, X. F., 1987. An excursion guide to Permian geology of Xikou area, Zhen'an County, Shaanxi. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 15: 113—138 (in Chinese with English abstract).
- Ding P. Z., Jin, T. A., Sun, X. F., 1989. The marine Permian strata and their faunal assemblages in Xikou area of Zhen'an County, southern Shaanxi, East Qinling range. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 25: 1—68 (in Chinese with English abstract).
- Ding Y. J., Xia G. Y., Li L., et al., 1991. The Carboniferous-Permian boundary and faunas from Xikou area, Zhen'an County, Shaanxi in eastern Qinling Mountains. *Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 24: 1—202 (in Chinese with English abstract).
- Ding Y. J., Xia G. Y., Xu, S. Y., et al., 1992. The Carboniferous-Permian boundary in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ginsburg R. N., Schroeder, J. H., 1973. Growth and submarine fossilization of algal cup reefs, Bermuda. *Sedimentology*, 20: 575—614.
- Hird, K., Tucker, M. E., 1988. Contrasting diagenesis of two Carboniferous oolites from south Wales; A tale of climatic influence. *Sedimentology*, 35: 587—602.
- Jia, Z. Y., Cai, Z. X., 1997. Diagenesis stratigraphy and sequence stratigraphy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(5): 538—543 (in Chinese with English abstract).
- Kabanov, P. B., 2000. Grain micritization as facial indicator in shallow-water marine carbonate rocks. *Byulleten' Moskovskogo Obshchestva Ispytateley Prirody, Otdel Geologicheskii*, 75(4): 39—48 (in Russian with English abstract).
- Kaufmann, B., 1997. Diagenesis of Middle Devonian carbonate mounds of the Mader basin (eastern AntiAtlas Morocco). *Journal of Sedimentary Research*, 69(5): 945—956.
- Kendall, C. G. S. C., 1985. Radial fibrous calcite: A reappraisal. In: Schneidermann, N., Harris P. M., eds., Carbonate cements. SEPM Special Publication, Tulsa, Oklahoma, 36: 59—77.
- Liu, Z. H., Dreybrodt, W., Li, H. J., 2006. Comparison of dissolution rate—Determining mechanisms between limestone and dolomite. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 411—416 (in Chinese with English abstract).
- Longman, M. W., 1980. Carbonate diagenetic textures from near surface diagenetic environment. *AAPG Bulletin*, 64(4): 461—487.
- McIlreath, I. A., Morrow, D. W., 1990. Diagenesis, geoscience Canada reprint series 4. Geological Association of Canada, Waterloo.
- Montanez, I. P., Gregg, J. M., Shelton, K. L., 1997. Basin-wide diagenetic patterns: Integrated petrologic, geochemical, and hydrologic considerations. SEPM Special Publication, Tulsa, Oklahoma, 57.
- Moore, C. H., 1989. Carbonate diagenesis and porosity. Elsevier, Amsterdam.
- Moore, C. H., 2001. Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Elsevier, Amsterdam.
- National Stratigraphic Committee, 2001. China regional chronostratigraphic (geochronologic) scale. *Journal of Stratigraphy*, 25(Suppl.): 359—360 (in Chinese with English abstract).
- Reid, R. P., Macintyre, I. G., 1998. Carbonate recrystallization in shallow marine environments: A widespread diagenetic process forming micritized grains. *Journal of Sedimentary Research*, 68(5): 928—946.
- Reid, R. P., Macintyre, I. G., 2000. Microboring versus recrystallization: Further insight into the micritization process. *Journal of Sedimentary Research*, 70(1): 24—28.
- Saller, A. H., 1986. Radial calcite in Lower Miocene strata, subsurface Enewetak Atoll. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 743—762.
- Saller, A. H., Dickson, J. A. D., Matsuda, F., 1999. Evolution and distribution of porosity associated with subaerial exposure in Upper Paleozoic platform limestones, West Texas. *AAPG Bulletin*, 83: 1835—1854.
- Schneidermann, N., Harris, P. M., 1985. Carbonate cements. SEPM Special Publication, Tulsa, Oklahoma, 36.
- Shinn, E. A., 1971. Aspects of diagenesis of algal cup reefs in Bermuda. *Gulf Coast Assoc., Geol. Soc. Trans.*, 21: 387—394.
- Sibley, D. F., 1991. Secular changes in the amount and texture of dolomite. *Geology*, 19: 151—154.
- Tucker, M. E., 1993. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy. In: Wright, V. P., ed., *Sedimentology review 1*. Black-

- well Scientific Publications Oxford, 57—72.
- Tucker, M. E., Bathurst, R. G. C., 1990. Carbonate diagenesis. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Tucker, M. E., Wright, V. P., 1990. Carbonate sedimentology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Wang G. L., Sun X. F., 1973. Carboniferous and Permian foraminifera of the Qinling range and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 47(2): 137—178 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. H., Yang, C. Y., Zhang, X. L., et al., 1994. Carbonate diagenesis. In: Feng, Z. Z., Wang, Y. H., Liu, H. J., et al., eds., *Sedimentology of China*. Petroleum Industry Press Beijing, 199—237 (in Chinese).
- Wei L. M., 1995. Study on the micritization of carbonate grains by bacteria and algae. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(3): 89—97 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, J. L., 1975. Carbonate facies in geological history. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Wright, V. P., Vanstone, S. D., 2001. Onset of Late Palaeozoic glacio-eustasy and the evolving climates of low latitude areas: A synthesis of current understanding. *Journal of the Geological Society of London*, 158: 579—582.
- Xia, G. Y., Ding, Y. J., 2002. Stages of Upper Carboniferous and Lower Permian marine strata in China. *Geology in China*, 29(1): 20—29 (in Chinese with English abstract).
- Xia, G. Y., Ding, Y. J., Ding, H., et al., 1996. On the Carboniferous-Permian boundary stratotype in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xiong, B., Heckel, P. H., 1996. Cementation patterns and diagenesis in the Stanton limestone/ cyclothem (Missourian, upper Pennsylvanian) in the northern Midcontinent. In: Witzke, B. J., Ludvigson, G. A., Day, J., eds., *Paleozoic sequence stratigraphy: Views from the North American craton*. Geological Society of America Special Paper 306, Boulder, Colorado, 373—387.
- Zhang, H. J., 2004. A Study on the integrated stratigraphy of the Carboniferous-Permian boundary section at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province [Dissertation]. China University of Geosciences Beijing, 1—88 (in Chinese).
- Zhang, H. J., Wang, X. L., Xia, G. Y., et al., 2003. The Carbonate microfacies and sedimentary environments of the Carboniferous-Permian boundary section at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi Province, China. *Geoscience*, 17(4): 387—394 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. J., Wang, X. L., Xia, G. Y., et al., 2004. Sequence stratigraphy and sea-level change in the Carboniferous-Permian boundary section at Xikou, Zhen'an County, Shaanxi. *Geological Bulletin of China*, 23(4): 336—344 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈方鸿, 谢庆宾, 王贵文, 1999. 碳酸盐岩成岩作用与层序地层学关系研究——以鄂尔多斯盆地寒武系为例. *岩相古地理*, 19(1): 20—24.
- 丁培榛, 金同安, 孙秀芳, 1983. 东秦岭陕西镇安西口二叠系. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 6: 99—103.
- 丁培榛, 金同安, 孙秀芳, 1987. 陕西镇安西口二叠纪地质旅行指南. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 15: 113—138.
- 丁培榛, 金同安, 孙秀芳, 1989. 东秦岭陕西镇安西口地区二叠纪地层及动物群. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 25: 1—68.
- 丁蕴杰, 夏国英, 李莉, 等, 1991. 东秦岭陕西镇安西口地区石炭系—二叠系界线及生物群. *中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊*, 24: 1—202.
- 丁蕴杰, 夏国英, 许寿永, 等, 1992. 中国石炭—二叠系界线. 北京: 地质出版社.
- 贾振远, 蔡忠贤, 1997. 成岩地层学与层序地层学. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(5): 538—543.
- 刘再华, Dreybrodt, W., 李华举, 2006. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 411—416.
- 全国地层委员, 2001. 中国区域年代地层(地质年代)表. *地层学杂志*, 25(增刊): 359—360.
- 王国莲, 孙秀芳, 1973. 秦岭石炭二叠纪有孔虫及其地质意义. *地质学报*, 47(2): 137—178.
- 王英华, 杨承运, 张秀莲, 等, 1994. 碳酸盐岩的成岩作用. 见: 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等, *中国沉积学*. 北京: 石油工业出版社, 199—237.
- 韦龙明, 1995. 菌藻对碳酸盐颗粒的泥晶化作用研究. *沉积学报*, 13(3): 89—97.
- 夏国英, 丁蕴杰, 2002. 中国上石炭统上部及下二叠统海相地层中阶的划分. *中国地质*, 29(1): 20—29.
- 夏国英, 丁蕴杰, 丁惠, 等, 1996. 中国石炭—二叠系界线层型研究. 北京: 地质出版社.
- 张海军, 2004. 陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面综合地层学研究[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 1—88.
- 张海军, 王训练, 夏国英, 等, 2003. 陕西镇安西口石炭系/二叠系界线剖面碳酸盐岩微相特征与沉积环境的研究. *现代地质*, 17(4): 387—394.
- 张海军, 王训练, 夏国英, 等, 2004. 陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面层序地层和相对海平面变化研究. *地质通报*, 23(4): 336—344.