

华北奥陶系两个不整合面的成因 与相关区域性储层预测^①

刘 波 王英华 钱祥麟

(北京大学地质系,北京 100871)

提 要 发育于下奥陶统亮甲山组顶部 (U_{F1})和中奥陶统马家沟组或峰峰组顶部 (U_{F2})的两个不整合面是控制华北早古生代与古岩溶有关的区域性储层形成及展布的关键性界面。 U_{F1} 、 U_{F2} 原被认为分别代表了短期或长期的基底构造隆升,但是,基于新的证据,我们认为二者受控于不同成因机制,因而与之相关的储层预测也应有所不同。 U_{F1} 原被解释为是板块南部基底上翘的结果,但层序地层分析却支持其海平面变动成因解释。海面下降会通过切蚀水平岩层产生一个倾向盆地的喀斯特侵蚀斜面。 U_{F1} 从西北仅蚀亮甲山组到东南下切至下寒武统顶部。因此,与之相关的储层亦从西北至东南发育于相应层位内。在空间上,有利区域性储层主要分布于强烈混合带白去化并有随后轻度淡水淋滤的华北地区中心地带。 U_{F2} 由全球性构造事件形成。这一构造运动导致板块内部下弯及相应的边缘上凸,在下凹的华北中心地带保存了较新的地层(峰峰组),而在凸起区这些新地层却被天水侵蚀殆尽。与 U_{F2} 有关的潜在区域性储层趋于分布在边缘抬升区,特别是峰峰组分布的周边地区。

关键词 不整合 海面变化 岩溶作用 储层

分类号 P 542/P588·2

第一作者简介 刘 波 男 32岁 博士 石油地质学

1 引 言

对不整合的认识与研究自十八世纪末以来已经历了二百年的历史,但仅是在二十世纪三十年代才因其与油气圈闭有关而受到广泛关注。在总结以往研究成果基础上,Bates和 Jackson^[9](1980)在美国地质词汇中对不整合作了这样的定义:它是相接触岩层的构造关系,以沉积间断、风化作用或特别是新岩层沉积前的陆上或水下侵蚀作用为特点,常常(但不总是)表现为地层间的非平行接触关系。该定义强调了构造作用成因机制,也是多年来为地质学家所广泛理解的不整合成因定义。本文中不整合面指具有明显地层间断的侵蚀界面。据不整合面上下地层构造关系,可将不整合分为三类:平行不整合、角度不整合及沉积不整合^[11,13]。在不涉及基底变质岩或岩浆岩的情况下,地层间的不整合关系不外乎为平行不整合或角度不整合。一般将区域性不整合解释为全球性构造事件的产物。然而,70年代以来,随着地震地层学及层序地层学的发展,地层不整合面被

赋予新的成因内涵。

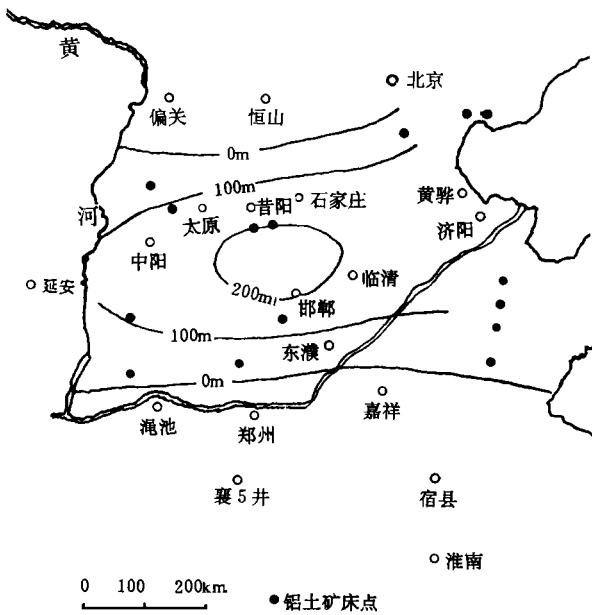
在层序地层学中,不整合面更主要的是在成因上与海面相对变动联系起来,并被作为划分层序级别及类型的关键界面。Vail等^[9]将作为层序界面的不整合面划分为代表陆架暴露的第一类层序界面和陆架未暴露的第二类层序界面,以分别反映海面的相对下降幅度。但是,并非所有不整合面都可归为低海面成因,因为多数全球性构造事件在时间上与海面上升期相对应^[14]。海平面变化可能仅是部分平行不整合的成因解释,另一部分平行不整合可直接由构造抬升及其后的侵蚀作用形成^[18]。至于角度不整合则通常是全球性地壳运动的产物。基于对构造运动及地层层序级次的研究,李思田等^[5]认为不同级别的层序界面受控于相应级次的地质作用,高级别的层序界面往往是全球性气候变化导致海面变动或区域性构造运动的结果。许效松^[4]则从Vail等^[20]的两类层序界面划分中独立出第三类层序界面,专指发育于碳酸盐岩层序之上的溶蚀型喀斯特界面,以区别于碎屑海岸由河流回春作用形成的侵蚀界

^① 国家自然科学基金项目(A49372114)资助

收稿日期:1995-11-27

面。这一划分是非成因的。综上所述,除那些局部沉积间断外,区域性不整合的成因主要有两种:一是全球性构造事件造成的盆地性质转换界面,在地层中多表现为角度不整合关系;另一是与由局部构造因素或非构造因素导致的相对海面变化产生的层序结构转换面,在地层中主要表现为平行不整合关系。

不整合面不仅是构造运动或海面变动事件的记录者,而且还代表了后期地质作用对前期沉积岩(物)的不同性质和程度的改造。这一改造作用通常具有明显的经济价值。风化作用除能直接形成残坡积风化矿床外,与风化面相关的岩溶型油气藏已在碳酸盐岩油气勘探中占据了重要地位^[17,18,19]。与不整合面发育相伴的岩溶作用强度及其分带性是控制碳酸盐岩次生储集空间形成与展布的关键因素。而不同成因的不整合面以不同方式控制着储层的产出,因此对各不整合面进行成因区分在油气勘探中具有重要意义。



图中示出峰峰组等厚线及中石炭统底部铝土矿出露点^{〔6〕}

图 1 华北地区地理位置图

Fig. 1 Geographical position of North China, in which thickness contours of Fengfeng formation and allite ore outcrops are shown (The locations of allite ores are after Meng Xianghua, 1978)

我国古生代碳酸盐岩型油气藏因鄂尔多斯大气田及塔里木油田的发现而引起普遍关注。已有的勘探成果证实,华北地区(图 1)奥陶系亮甲山组顶部

(U_{F1})及马家沟组或峰峰组顶部(U_E)的两个不整合面是本区油气储层的两个重要控制性界面。区域对比研究表明二者在成因机制上有所不同,因而以不同方式控制着相关储层的分布层位及空间展布规律。本文试图通过成因分析揭示这种规律性,以期对本区区域性储层展布提供预测框架。

2 下奥陶统亮甲山组顶部不整合面(U_{F1})

该不整合面为一平行不整合界面,即原以指代“怀远运动”(山西区调队,1980;冯增昭等,1990)存在的地层不连续界面。它在岩性上表现为不明显的突变关系:界面之下为含燧石条带或结核的细中晶白云岩,发育不同程度的岩溶作用;上部则为钙质砂岩、含陆屑灰岩或泥质灰岩。该界面在大区域内为平坦状,小范围(露头尺度)内表现出侵蚀关系,但界面上下两套地层彼此平行(图 2)。

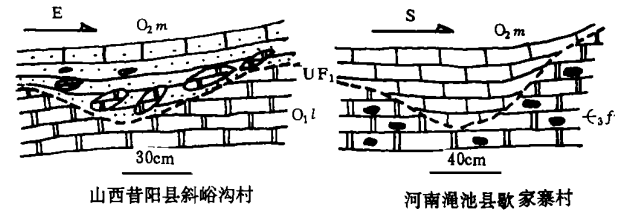


图 2 U_{F1} 界面的局部特征

注意上下地层在产状上的一致, U_{F1} 在不同地点切蚀不同地层, U_{F1} 之上覆地层在空间上的相变

Fig. 2 Local features of U_{F1} boundary

Note the concordance of upper and lower strata, U_{F1} cutting different strata in different localities and spatial facies change of strata above the U_{F1}

从区域对比来看,从北西向南东, U_{F1} 切蚀不同层位地层,如偏关、中阳等地亮甲山组保存较全,往东南至徐淮地区下切至上寒武统凤山组(图 3)

对于冶里组和亮甲山组的分布以及切蚀情况,以“怀远运动”的确已能解释,即 U_{F1} 是构造运动导致华北地台(东)南部基底隆升遭受强烈剥蚀,而东北部剥蚀最弱,并保持北低南高的地势(图 4a)^{〔3,7〕}。但是,这一解释仅是对不整合下部地层目前所处状态的解释,它没有涉及不整合面的形成过程及不整合面之上地层所记录的古地形状态。 U_{F1} 除前述下切不同层之外,古地理分析及地层对比研究表明,马家沟期开始时,海水是由东南向西北侵进的^{〔2,3〕}。马

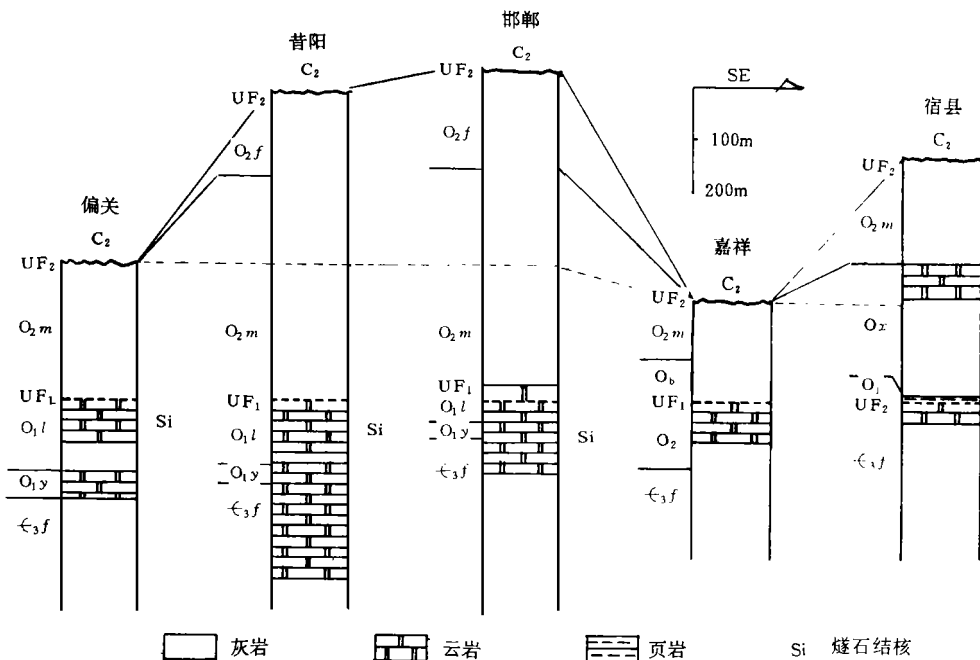


Fig. 3 Columnar correlation of Ordovician strata in North China

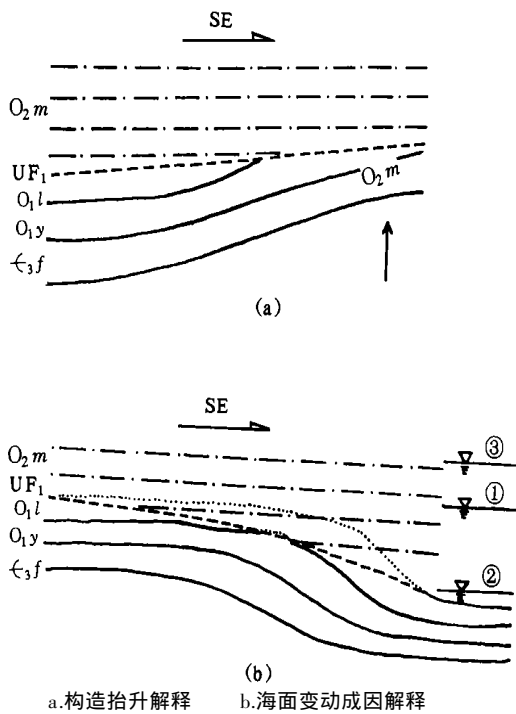


Fig. 4 Schematic genetic interpretation of UF1

UF1上下地层联系起来,就不难发现 UF1在当时是一个切蚀水平岩层并向海退(即后来的海侵反方向)方向倾斜的界面,在该界面之上又一次海进形成了一套新的地层 UF2形成过程是:随着全球性海面下降(可能与冰期有关),先期碳酸盐沉积物首先经历混合带白云石化形成白云岩,进一步的淡水作用在该白云岩上形成淋滤侵蚀面,即 UF1(图 4b)。由于 UF1的海面变动成因,它在层序地层分析中被作为第二类层序界面^[2]。

3 下奥陶统马家沟组或中奥陶统峰峰组顶部不整合(UF2)

与 UF1不同,UF2是盆地性质转换界面,它使华北板块早古生代台地或缓坡盆地相的碳酸盐岩建(ε-O2)转化为晚古生代的海陆交互含煤建造(C2-3),其间经历了至少 1.3 亿年的地层间断。UF2上下地层在区域填图尺度上表现为小角度不整合关系,这种角度不整合在华北地区具有南北两侧对称性(图 3)。造成这种接触关系的原因是与全球性地壳运动有关的区域性基底形变,这一形变在华北地区表现为中心部位的下弯及相应边缘的突起。在边缘上凸区遭受最强烈的后期剥蚀,如北缘的偏关、恒山等地缺失峰峰组至上马家沟组不同层位;南缘的

家沟组最低层位为徐淮地区的贾旺页岩,从而表明在马家沟期沉积开始时古地势明显为东南低而北西高。这一结论显然与南部构造抬升的假设相矛盾。把

襄 5井及徐淮等地也缺失峰峰组及上马家沟组。另外,峰峰组残余岩层厚度分布表明(图 1),最厚的峰峰组分布于华北中部及东北角。将 U_{F2} 作为夷平面来看,产生如此地层保存方式只能由下伏地层变形来实现,即在中部下凹区保存了较新地层,而边缘抬升区新地层被侵蚀(图 5)。

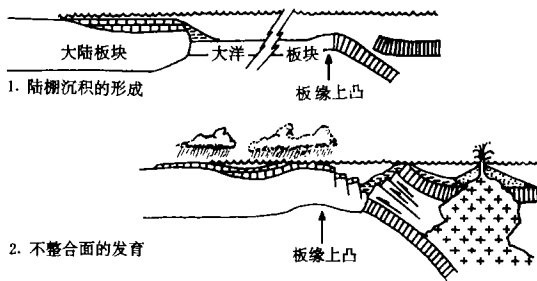


图 5 与俯冲有关的板缘上凸导致的不整合面的形成过程(据 Jacobi, 1981 简化)

Fig. 5 Diagram showing the formation process of unconformity resulted from subduction related to peripheral bulging (simplified after Jacobi, 1981)

中部为古地势低地的另一证据来自风化壳铝土矿及山西式铁矿的空间分布。据巴多西(1990)^[8],铝土矿最发育地区是岩溶洼地,而 U_{F2} 面上铝土矿正是分布于华北中心地带(图 1)。中石炭世来自东部的海侵方向(王德发, 1995, 会议报告),也是南北两缘(可能包括西缘)地势高的反映。

综上所述, U_{F2} 反映了华北板块的长期构造隆升,它与加里东运动有关。这种隆升并非基底整体一致的抬升,也非中凸的穹隆式抬升,而表现为中凹边凸的凹面式抬升(图 5)。Jacobi^[12]将这种不整合面的成因归于板块俯冲带的边缘上凸,并用以解释西阿巴拉契亚地区中下奥陶统中切蚀不同地层的不整合面。华北古板块由于西部贺兰-祁连、北部兴蒙、南部秦岭等海槽在不同时期的封闭,其情况比北美要复杂得多,但其边缘凸起、中部凹陷的板内应变总趋势仍很明显。

4 与 U_{F1} 及 U_{F2} 相关的区域性储层展布

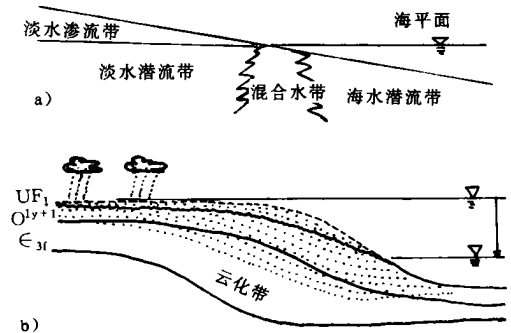
华北下古生界油气藏,无论古生古储还是新生古储都往往与古暴露面(不整合面)有关。对碳酸盐沉积物(岩)而言,伴随不整合面的形成是发生于暴

露面之下岩层的成岩作用和风化淋滤作用,这一过程是形成碳酸盐岩次生孔隙的重要过程。

岩溶型次生孔隙的发育受多种因素控制,其中最主要者是气候、暴露时间、矿物组成及大地构造背景^[17]。由前述分析可知,控制 U_{F1} 及 U_{F2} 形成的这几个主要因素均存在很大差别,从而造成与之相关的碳酸盐岩储层在时空分布上有着各自的特点。

U_{F1} 形成于稳定大地构造背景下的海面下降及相对低水位时期,以较干旱气候条件下的短期暴露为特点,其形成过程表现为淡水或混合水介质对未固结或弱固结碳酸盐沉积物(纹石质或方解石质)的成岩改造。 U_{F2} 形成于全球性构造活动晚期阶段,以长期潮湿气候条件下的风化剥蚀为特点,其形成过程表现为大气淡水对微细晶灰岩或白云质灰岩的淋滤和溶蚀。

Saller 等^[17]认为短期暴露(1~40万年)常能产生比长期暴露(1~20百万年)大得多的孔隙度。作为组间界面的 U_{F1} 可能属于中短期暴露(<1百万年),而且 U_{F1} 在不同地点暴露时间长短不同,其时间差异主要决定于海退速度及低水位持续时间。由于华北地区中部亮甲山组由北西方向向南东方向依次暴露,因此具有向南东方向孔隙度变好趋势。



a. 地下水带,混合带将随海面变动而迁移
b. 与 U_{F1} 有关的白云岩形成过程及其后的顶部侵蚀
图 6 伴随海面下降而发生的混合带云化和硅化以及其后淋滤作用形成的平行不整合面 (U_{F1})

Fig. 6 Development of the disconformity (U_{F1}) caused by mixing zone dolomitization and chertification and following leaching during sealevel fall

另外,伴随 U_{F1} 的形成而发生的成岩作用主要表现为白云石化作用,它是海水与淡水混合的产物^[16]或由轻微蒸发海水回流的结果^[19]。王英华等^[1]认为下奥陶统白云岩是渗透回流作用形成,而冯增

昭等^[3]则将下奥陶统及上寒武统的白云岩上部归为毛细管浓缩白云石化作用或混合白云石化作用的产物,下部归为回流渗透白云石化作用的产物。鉴于这套白云岩中普遍含燧石结核或条带,它更可能是由混合带成岩作用所产生。与此相似的例子见于帕克曼油田的密西西比系白云岩^[15]和土耳其东南的中白垩统马丁群白云岩^[10]。正是由于白云岩化作用及随后的进一步淋滤产生了能抵抗深埋压实作用的孔隙体系(特别是晶间孔),从而增强了与 UF_1 相关的储层潜力。

如图 6 所示,与 UF_1 相关的白云岩储层在层位上具有穿时性,在空间上分布于产生混合水带的海岸附近,并随海面变化而迁移。海面持续下降往往导致先期混合水带转化为淡水渗流带,从而使白云岩遭受不同程度淋滤,并进一步增厚或白云岩体变薄。例如,凤山组白云岩分布于华北中南部地区,包括临清、东濮及南华北;冶里组白云岩主要分布于华北中部地区,包括临清、晋西、鲁西地区;亮甲山组白云岩主要分布于中北部,包括临清、济阳、黄骅、冀中等地。该套白云岩在区域上具有由南向北度变小,层位变高之趋势,较大的总厚度集中于华北中部地区,如晋中、临清等地白云岩总厚度大于 200 m。因此,华北中部地区是与 UF_1 有关的白云岩储层最发育地区,其层位跨度为上寒武统凤山组至下奥陶统亮甲山组。

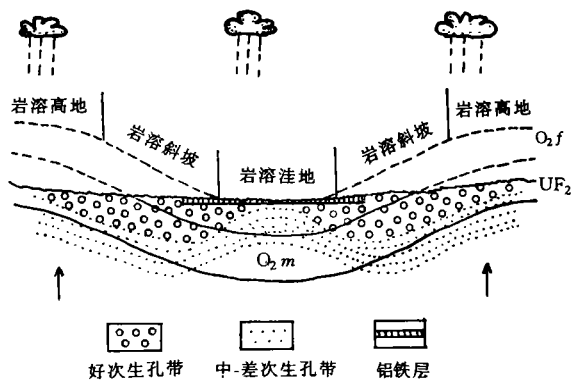


图 7 随地层变形而发育的岩溶系统及次生孔隙带的分布状况

Fig. 7 Karstification system and distribution of secondary pore zones developed with the deformation of strata

由于 UF_2 是长期风化剥蚀的结果,其暴露时间至少达 1.3 亿年。即使在海退期间存在与 UF_1 相似的成岩作用,其产物也已被后来长期的淡水作用完

全淋滤掉了。淡水对碳酸盐岩的淋溶作用可产生一个垂向分带的次生孔隙系统,越往深部孔隙率越低^[18]。但是古地形可能对次生孔隙带的发育起决定作用。岩溶地貌可简单分为岩溶高地、岩溶斜坡和岩溶洼地三个单元。岩溶高地和岩溶斜坡是淋溶作用最强烈地区,也是次生孔隙最发育地带。而岩溶洼地为汇水区,以岩溶型沉积作用为主,因而次生孔隙发育程度不高(图 7)。

华北地区 UF_2 形成于南北两则上凸过程,因此,相应的古岩溶高地即在南北两侧地层缺失最多的地区,而古岩溶斜坡则在过渡带上。向华北中心地带则是当时的古岩溶洼地。残余峰组分布的边缘地区不但是古岩溶斜坡区,而且是岩性差异及构造薄弱地带(图 7),因而是次生孔隙最发育地带。因此,华北地区与 UF_2 有关的岩溶型储层发育最好地带应是华北板块周边的内侧地区,特别是峰组分布的边缘地区。

5 结 论

不同类型不整合面形成于不同成因机制。对碳酸盐岩而言,不整合面的发育程度受气候、地形、时间、原沉积岩(物)性质、流体性质及大地构造背景等多种因素控制。这些因素决定着岩溶型次生孔隙的发育程度及其时空展布。对华北地区奥陶纪两个不整合面之成因分析,可得出以下几点认识:

1) 发育于亮甲山组顶部的不整合面(UF_1)形成于稳定大地构造背景下的海平面下降时期,其地质作用主要表现为淡水与海水混合带的白云石化和硅化成岩作用。这种成岩作用所影响的地层范围及空间分布主要决定于海面下降速度及低水位持续时间。

2) 奥陶系与石炭系之间不整合面(UF_2)反映了全球性构造事件的影响,属于长期风化剥蚀面,其地质作用主要表现为淡水对固结碳酸盐岩的淋滤溶蚀作用。淋溶作用强度与古地形有关,岩溶高地及斜坡淋溶作用最强,岩溶洼地弱。

3) 由 UF_1 及 UF_2 所控制的碳酸盐岩储层在时空展布上具有各自规律性。与 UF_1 相关的储层基本由相应的白云岩展布表现出来,其最发育地带是华北中部的临清—晋中一带。这些白云岩未被后期地质作用所破坏的地区即为目前具有储集潜力的预测区。与 UF_2 相关的储层为淋溶型次生孔隙发育带,以古岩溶斜坡及古岩溶高地发育最好,因而主要分

布于华北边缘凸起的内侧地区,尤以峰峰组分布的边缘地区最为有利。

参 考 文 献

- [1] 王英华,张秀莲,杨承运.华北地台早古生代碳酸盐岩岩石学.北京:地震出版社,1989,144.
- [2] 刘波,王英华.华北地区下古生界储层的层序地层学解释.见:王英华,鲍志东,朱筱敏编.沉积学及岩相古地理学新进展.北京:石油工业出版社,1995,366~368.
- [3] 冯增昭等.华北地台早古生代岩相古地理.北京:地质出版社,1990,270.
- [4] 许效松.层序不整合界面的综合标志与盆地性质.见:王英华,鲍志东,朱筱敏编.沉积学及岩相古地理学新进展.北京:石油工业出版社,1995,442~445.
- [5] 李思田,林畅松,杨士恭等.鄂尔多斯盆地中生代层序地层及构造—地层分析.见:王英华,鲍志东,朱筱敏编.沉积学及岩相古地理学新进展.北京:石油工业出版社,1995,390~392.
- [6] 孟祥化.沉积建造及其共生矿床分析.北京:地质出版社,1979.
- [7] 陈霞,徐辉.华北地台奥陶系碳酸盐岩储集岩成因类型与展布.沉积学报,1994,12(3):47~55.
- [8] G巴多西著,顶仁杰,吴振寰,史业新译.岩溶型铝土矿(碳酸盐岩上的铝土矿床).北京:冶金工业出版社.
- [9] Bates R L and Jackson J A(eds). Glossary of geology. Falls Church, Virginia American Geological Institute, 1980, 749.
- [10] Cater J M L and Gillcrist J R. Karstic reservoirs of the Mid-Cretaceous Mardin Group, SE Turkey: Tectonic and eustatic controls on their genesis, distribution and preservation. Journal of Petroleum Geology, 1994, 17(3): 253~278.
- [11] Dunbar C O and Rodgers J. Principles of stratigraphy. New York Wiley, 1957, 356.
- [12] Jacobi D R. Peripheral Bulge Causal Mechanism for the Lower/Middle Ordovician unconformity along the Western margin of the Northern Appalachians. Earth and Planetary Science Letters, 1981, 56 245~251.
- [13] Krumbein W C and Sloss L L. Stratigraphy and sedimentation. San Francisco W H Freeman and Company, 1963, 660.
- [14] Miall A D. Principles of Sedimentary Basin Analysis. New York Springer-Verlag, 1984, 490.
- [15] Miller E G and Parkman Field. Williston Basin, Saskatchewan. In: King R E (ed). Stratigraphic oil and gas fields—classification, exploration methods and case histories. AAPG Memoir, 1972, 16 502~510.
- [16] Nickel E. Alluvial-fan carbonate facies with evaporites, Eocene Guarga Formation, Southern Pyrenees, Spain. Sedimentology, 1982, 29 761~796.
- [17] Saller H A, Budd A D and Harris M P. Unconformities and porosity development in carbonate strata: Ideas from a Hedberg Conference. AAPG Bulletin, 1994, 78(6): 857~872.
- [18] Shanmugam G. Origin recognition and importance of erosional unconformities in sedimentary basins. In: Kleinspehn K L and Paola C (eds). New Perspectives in Basin Analysis. New York Springer-Verlag, 1988, 83~108.
- [19] Sun S Q. Dolomite Reservoirs Porosity Evolution and Reservoir Characteristics. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186~204.
- [20] Vail P R and Mitchum R M Jr. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part I Overview, In: Payton C E (ed). Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir, 1979, 26 51~52.

The Two Ordovician Unconformities in N. China Their Origins and Related Regional Reservoirs' Prediction

Liu Bo Wang Yinghua and Qian Xianglin

(Geology Department, Beijing University, Beijing 100871)

Abstract

The two unconformities developed on the tops of Lower Ordovician Liangjashan Fm(U_{F1}) and Majagou or the Middle Ordovician Fengfeng Fm(U_{F2}) are essential boundaries that controlled the formation and distribution of the Early Paleozoic karstification related reservoirs. U_{F1} and U_{F2} have been interpreted to represent short and long terms of tectonic uplift, respectively, but the new evidence led us to conclude that they were created by different original mechanisms and therefore the related reservoirs should be predicted in different ways. U_{F1} was commonly interpreted as the result of southern upwarping of basement, but sequence stratigraphic analysis supports its origin of eustatic sealevel changes. Sealevel fall can produce a tilted karst denudation plane dipping basinward by truncating horizontal strata. The U_{F1} cut Liangjashan Fm. in the NW and gradually went down to the top of Upper Cambrian Series in the SE,

(Continued on page 36)

High-resolution Coal-bearing Sequence of Late Paleozoic Strata in Datong Region, North Shanxi

Zhao Xingmin and Zheng Junmao

(China University of Geosciences, Beijing, 100083)

Abstract

The paper introduces the theory and method of high-resolution sequence stratigraphy based on the control of baselevel rise and fall. On the basis of facies analysis the method is used to deduce a single direction of accommodation migration, stacking patterns of strata, baselevel rise, and fall and surface location of sequences by volumetric partition of sediment and facies differentiation, and to divide various orders of baselevel cycles (i. e. sequences) and to correlate the cycles order by order from long-term cycles to short-term ones. After that, the authors apply the method for detail division and correlation of Late Paleozoic coal-bearing series mainly composed of continental sediments in the Datong region, North Shanxi, and clarify some vague conclusions and searches for the relationship between coal accumulation and high-resolution sequence. The result of the study indicates that the method can be widely used to improve the precision of division and correlation of strata, and that it is an effective way to research into continental sequence stratigraphy. In addition, this approach is also very useful in correlation and prediction of reservoirs.

Key Words Datong in Shanxi late paleozoic era high-resolution sequence coal-bearing strata stratigraphic correlation coal accumulation

(Continued from page 30)

therefore, the related reservoirs correspondingly developed in these different strata from NW to SE. Spatially, the most favorable regional reservoirs should be located in the central area of N. China, where the carbonate sediments experienced dolomitization with the following light leaching. U₂ was created by global event that resulted in the intraplate downward flexure, and subsequent peripheral bulge. The younger strata (Fengfeng Fm.) were protected in the concave belt of central N. China and eroded away by the meteoric water along the bulge. As a result, the potential regional reservoirs related rocks of Fengfeng Fm. and the potential regional reservoirs related to U₂ are likely to distribute along the peripheral uplift belts, especially around the remnant Fengfeng Fm.

Key Words unconformity sealevel change karstification reservoir