

华北地台下中寒武统碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以山东张夏地区为例^①

江茂生 沙庆安 刘 敏

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

提 要 华北地台下中寒武统馒头组—徐庄组为碳酸盐岩与陆源碎屑岩的互层沉积或同一岩层中碳酸盐组分与陆源碎屑组合混合沉积。通过对山东张夏地区地层沉积特点、地球化学特征以及沉积环境演化分析。表明混合沉积的主要控制因素是海平面变化。不同级次的海平面变化以及它们之间的相互叠加造成了类型多样的混合沉积。

关键词 混合沉积 环境分析 海平面变化 海进—海退旋回 下中寒武统 华北地台

第一作者简介 江茂生 男 32岁 博士 助理研究员 沉积学

1 引 言

寒武系是华北地台平稳发展阶段时形成的沉积盖层。在山东张夏地区下寒武统馒头组角度不整合超覆于太古代泰山群混合花岗岩基底之上,是太古代以来长期遭受剥蚀、准平原化之后首次海平面上升接受沉积的产物,经过长期的准平原化作用,地台发展已趋成熟,形成了广泛平缓的陆表海潮坪沉积^[1,2,3]。岩石主要为紫红色泥岩、泥质及灰质白云岩、叠层石白云岩、颗粒灰岩、核形石灰岩等。前人的研究奠定了该地区地层学及岩石学研究基础,而对这种碳酸盐与陆源碎屑以较高频率互层沉积及同一岩层中碳酸盐与陆源碎屑组分混合产出的形成机制研究较少。本文的目的是对下中寒武统馒头组、毛庄组、徐庄组混合沉积的地层特点、地球化学特征及环境演化进行详细分析,进而说明其形成机制、控制因素。

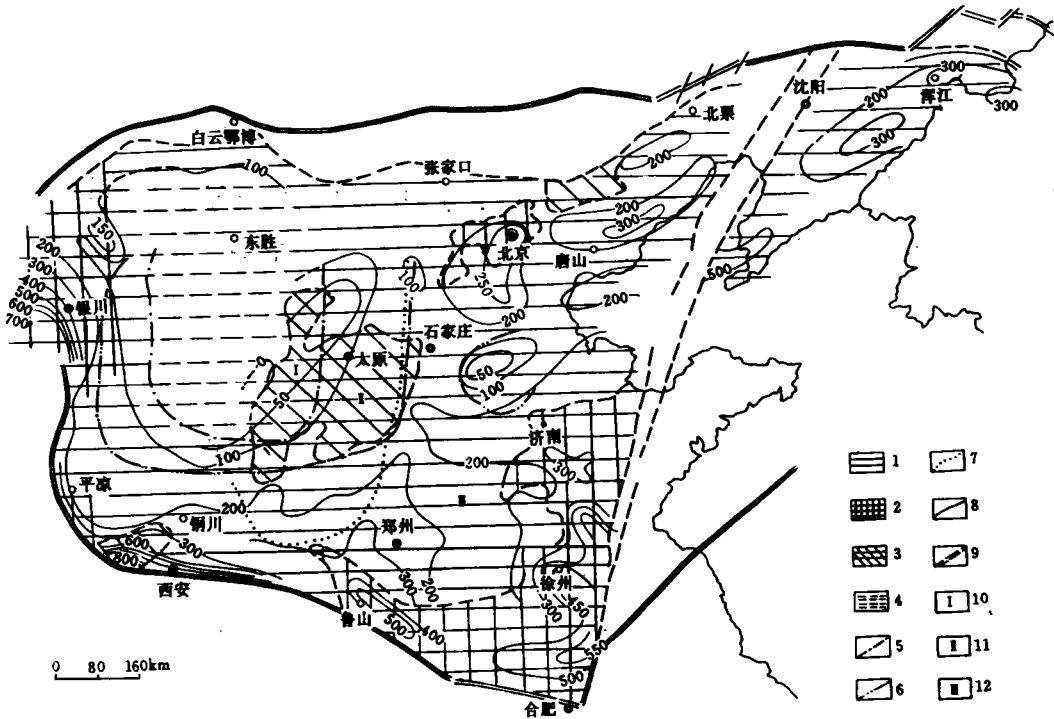
2 混合沉积特征

华北地台下、中寒武统馒头组、毛庄组、徐庄组是连续超覆沉积,三个组由东南向西北呈阶梯状分布,东南部自馒头组至徐庄组都有沉积,向西北至太行山以西缺失馒头组沉积,再向西北则只有徐庄组沉积^[5](图1)。

说明在馒头组—徐庄组沉积期间,华北地台海水是由东南向西北逐渐推进的,海侵规模也是逐渐扩大的。混合沉积岩石主要特征是碳酸盐岩与陆源碎屑岩以较高频率交互沉积及同一岩层中陆源碎屑组分与碳酸盐组分混合沉积(图2)。

^① 国家自然科学基金资助项目(编号:49402029)

收稿日期:1995-03-20



- 1. 紫红色砂、页岩夹碳酸盐区
- 2. 夹较多灰岩 (>40%) 区
- 3. 夹较多白云岩区
- 4. 情况不明
- 5. 毛庄组分布边界
- 6. 馒头组分布边界
- 7. 霍山砂岩分布边界
- 8. 等厚线
- 9. 断层
- 10. 只有徐庄组分布区
- 11. 只有徐庄组和毛庄组分布区
- 12. 徐庄组、毛庄组和馒头组分布区

图1 华北地台早—中寒武世馒头—徐庄期沉积岩类展布图⁽⁵⁾

Fig. 1 Sketch map showing the types of sedimentary rocks from the Mandouian to Xuzhuangian during the Early—Middle Cambrian in the North China Platform (after Pan Zhengpu, 1983)

2.1 碳酸盐岩与陆源碎屑岩交互混合沉积

2.1.1 泥岩与白云岩交互沉积

此类混合沉积主要见于馒头组,在山东张夏地区馒头组角度不整合超覆于太古代混合花岗岩之上,下部为灰色薄—中层灰质白云岩与紫红色含粉砂白云质泥岩互层,泥质白云岩与灰绿色泥岩互层,下部白云岩中含较多的硅质团块、条带。中上部则以泥质白云岩为主夹少量灰绿色或紫红色泥岩。这套岩石以发育水平层理为主,也有少量微波状层理,在紫红色白云质泥岩或泥质白云岩中常见石盐假晶、鸟眼、干裂等构造。

2.1.2 灰岩与粉砂质泥岩交互沉积

此类混合沉积见于毛庄组、徐庄组,出现较频繁的颗粒灰岩与紫红色粉砂质泥岩交互沉积,在毛庄组下部尤为明显。颗粒灰岩包括生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、砂屑鲕粒灰岩、核形石灰岩。生物化石较丰富,以三叶虫碎片为主,也含少量的软舌螺、海百合茎,并构成生物碎屑灰岩或鲕粒的核部。紫红色泥岩中含较多的粉砂级石英、长石、云母等,其成分成熟度较低,以水平层理为主,常见干裂、冲刷面、波痕等构造。

2.2 同一岩层中陆源碎屑组分与碳酸盐组分混合沉积

2.2.1 泥质白云岩—白云质泥岩

出现于馒头组的大多数层段,有的层段白云石含量较高为泥质白云岩,有的层段则陆

源泥质含量较高为白云质泥岩。白云岩多呈隐晶至微晶状分布,在泥质含量较高的岩石中白云石可达细晶至中晶级。陆源泥主要由粘土矿物组成,偶见粉砂质石英颗粒。大多数岩石呈紫红色、水平及微波状层理发育,多数薄片见后期硅质充填交代现象。

2.2.2 泥质灰岩

仅见于馒头组中上部少数层段,方解石多为隐晶—微晶结构,陆源泥由粘土矿物组成,偶见粉砂质石英颗粒,岩石多为灰绿色至黄褐色,水平层理。

2.2.3 石英砂屑灰岩

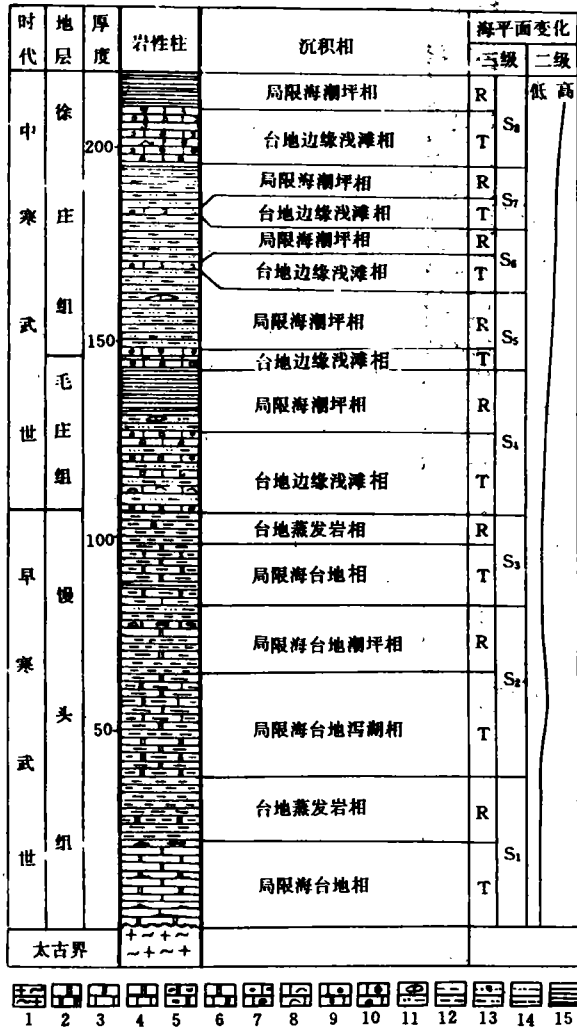
自毛庄组开始,上文已提到岩石多由粉砂质页岩与颗粒灰岩交互沉积。在颗粒灰岩中含有粉砂级石英(主要分布于毛庄组)及细砂级石英(主要分布于徐庄组),石英颗粒分选差,呈棱角—次棱角状。还可见少量的正长石及较多的斜长石以及磷质碎片。陆源颗粒含量为5%—30%。其矿物成熟度与结构成熟度均较低,为近源沉积的产物。

3 混合沉积地球化学特征

3.1 元素地球化学特征

华北地台各常见混合沉积岩石类型的化学组成具有明显的差异(表1),作者选择了各类岩石的典型代表。用光谱定量分析测定了主元素Ca、Mg、Al、Fe、K、Na及微量元素Mn、Sr、Ba、V、Ni、Ti、Cr、Zr等含量。反映了一定的规律性(图3,表1)。

钙的含量在馒头组较低,其值多在5%—15%之间,仅见个别灰岩夹层有较高的含量,至毛庄组较频繁地出现灰岩沉积之后,钙的含量明显增加,多在29%—39%之间。这与随海水的逐渐加深,灰岩沉积逐渐增加的趋势是一致的。Mg的含量则相反,表现为以白云岩及白云质泥岩为主的馒头组相对富集,多在4%—10%之间。至毛庄组以上的地层中则明显地减小。Mg/Ca值反映了馒头期较高,斜



1. 混合花岗岩 2. 白云岩 3. 叠层石白云岩 4. 硅质条带白云岩 5. 硅质团块白云岩 6. 灰质白云岩 7. 鲕粒灰岩 8. 生物碎屑灰岩 9. 砂屑鲕粒灰岩 10. 核形石灰岩 11. 含灰岩透镜体粉砂质泥岩 12. 泥岩 13. 含石盐假晶泥岩 14. 粉砂质页岩 15. 页岩 T. 海进旋回 R. 海退旋回 S. 层序

图2 山东张夏地区早中寒武世混合沉积地层特点、沉积相演化与海平面变化关系
Fig. 2 Sketch map showing relationship between characters of stratigraphy and facies in mixed siliciclastic-carbonate sediments and sea level changes

率较陡，而毛庄期以后地层则很低，斜率也较平缓（图3）。

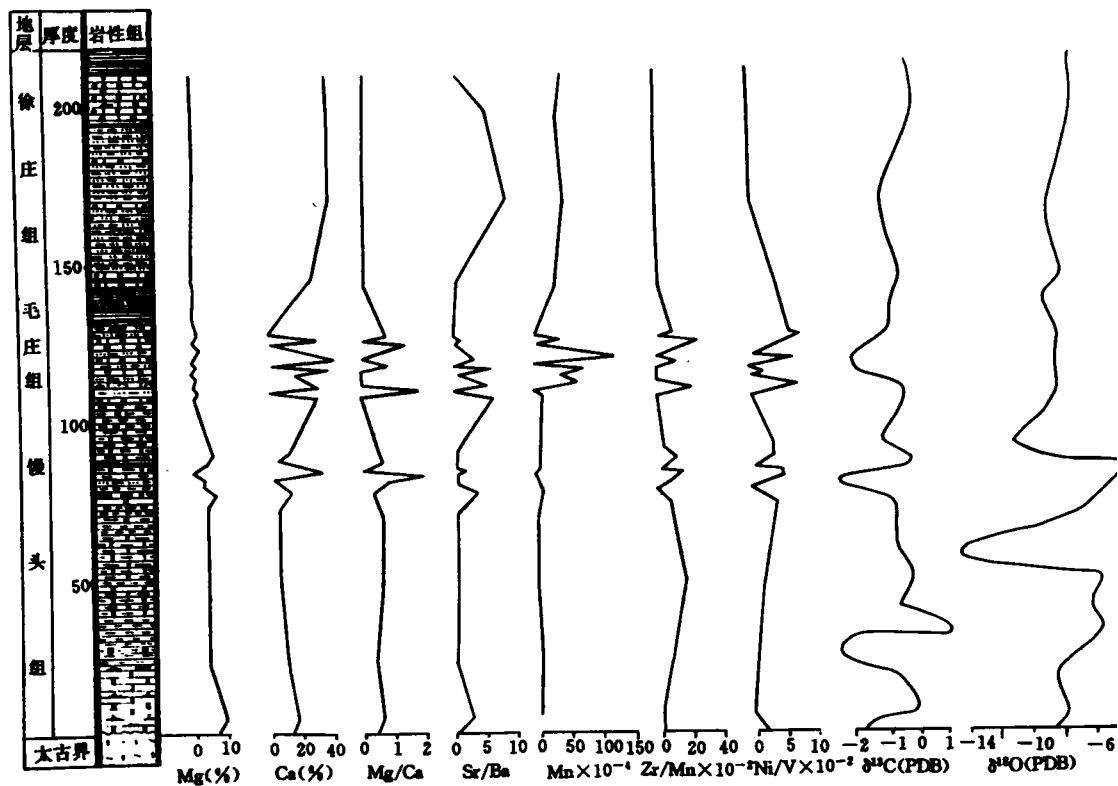


图3 混合沉积体系元素及其比值碳氧同位素组成的纵向分布图（图例同图2）

Fig. 3 Vertical distribution graph of the contents of elements, their ratios and carbon and oxygen isotopic compositions in mixed siliciclastic-carbonate sediments in Zhangxia, Shandong Province

能较好地反映陆源供给的 Al₂O₃、K₂O 的含量在泥质岩中较丰富，在灰岩及较纯的白云岩中则剧减，泥质岩则以馒头组中含量最高，毛庄组以上地层含量相应减小。馒头期是寒武纪海侵的开始阶段，陆源物质供应较多，往后随着海洋作用的增强，陆源元素随之减少。Fe₂O₃ 含量在整个沉积序列都表现为高值，最高者可达 10% 以上。说明自始至终环境处于强氧化状态。

微量元素的垂向分布及其演化也具有重要的环境意义，每一岩系的底部多代表新沉积旋回的开始，在接受较多陆源碎屑、粘土矿物沉积的岩层中，由于其对微量元素的吸附性，相关的微量元素相对富集，在富含陆源泥及砂质的泥质白云岩及砂屑灰岩中次之，而岩性较纯的灰岩或白云岩中含量最低（见表1）。

Sr 的含量在灰岩中较高，多在 150—300 × 10⁻⁶，在泥质灰岩中次之，为 100 × 10⁻⁶ 左右，而在白云岩、泥质白云岩及泥页岩中都小于 100 × 10⁻⁶。Ba 则在泥岩及泥质较丰富的白云岩中含量较高，但 Ba 的分布、富集及赋存形式规律性不如 Sr 明显，有待进一步研究。值得注意的 Sr/Ba 在灰岩中多大于 1，最高值可达 8.15，而在碎屑岩及泥质较高的白云岩地层

中则大多小于 1, 最低值仅为 0.1 (图 3), 说明 Sr/Ba 值随海洋作用的增强而增高。这是因为 Ba^{2+} 离子半径比 Sr^{2+} 大, Ba^{2+} 进入海洋时, 绝大多数被近岸的粘土吸附所至^[4]。

Mn 的分布与沉积环境有密切关系, 在泥质岩及泥质白云岩中其值普遍低于 1000×10^{-6} , 而在白云岩中其值也不超过 2500×10^{-6} , 毛庄组及徐庄组鲕粒灰岩及生物碎屑灰岩中则含 Mn 高达 $4000-13000 \times 10^{-6}$ 。Mn 的含量与 Ca/Mg 值呈正比关系 (图 3)。总的看来, Mn 含量与水深也成正比关系, 水体愈深, Mn 含量越高。Zr 是陆源元素, 只能赋存于碎屑中固态迁移, 在陆源泥质岩及含陆源物质较多的白云岩中含量较高, 多在 $60-150 \times 10^{-6}$ 之间, 而在灰岩及较纯白云岩中含量剧减, 在灰岩中多为 $9-15 \times 10^{-6}$, 在纯白云岩中最低值仅为 0.7×10^{-6} 。Zr/Mn 值相对大小能够反映海洋作用的相对强弱, 其值越小说明海洋作用越强, 其值愈大说明大陆影响愈强。从图 3 可知灰岩中比值普遍较小, 而陆源泥质岩及泥质白云岩其比值则普遍较大。

相对于陆源碎屑岩而言, Ti 在碳酸盐岩中含量较低, 在灰岩中多在 $100-320 \times 10^{-6}$ 之间, 个别可达 770×10^{-6} , 而在较纯的白云岩中其值仅为 40×10^{-6} 。在泥岩或页岩中则可高达 $1600-7500 \times 10^{-6}$ 。由此而知 Ti 的丰度值与陆源泥的含量有关。因此 Ti 的指相意义是较为明显的。

Cr、Ni、V 等的含量也表现为在碎屑岩中含量普遍较高, 在泥质白云岩及白云岩中次之, 而在灰岩中较小 (表 1), 这与粘土易于吸附这些元素而使其富集有关。另外这些元素本身在陆源碎屑中含量较高, 具有一定的继承性。Ni/V、Ni/Cr 均随陆源物质的减少而减小 (图 3)。

3.2 碳、氧稳定同位素特征

碳酸盐中 C、O 同位素组成对环境的反映是敏感的。对混合沉积体系中碳酸盐岩的 C、O 稳定同位素系统分析, 可以建立古海洋系统碳、氧同位素演化曲线, 讨论沉积水体深度、海平面变化及古环境变迁。

作者对山东张夏地区馒头组—徐庄组碳酸盐岩 C、O 同位素进行系统分析, 其结果见表 2、图 3。从图 3 可知, 在馒头组与毛庄组下段碳酸盐 C、O 同位素的波动范围较大。其 $\delta^{13}C$ 值为 $-2.59\% \sim +1.14\%$ (PDB), $\delta^{18}O$ 为 $-14.89\% \sim -4.71\%$ (PDB)。说明海侵初期环境水体较浅, 轻微的海平面变化可引起环境的盐度及氧化-还原条件及水体循环程度的变化。自毛庄组上段至徐庄组灰岩 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值变化范围较小, 其 $\delta^{13}C$ 值为 $-2.25\% \sim -0.37\%$ (PDB), $\delta^{18}O$ 值为 $-10.07\% \sim -0.37\%$ (PDB)。说明从毛庄组上段开始, 环境相对稳定, 水体达较深度, 较小的海平面变化不至于引起环境的巨变, 因而致使 C、O 同位素值比较接近。

$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 值都与盐度有关, 其变化趋势是盐度越高, δ 值越大。Keith and Weber (1964)^[9] 把 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 二者结合得出经验公式: $Z = 2.08 \times (\delta^{13}C + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}O + 50)$ 用以判别海相和淡水石灰岩, Z 值 > 120 时为海相, 反之则为淡水相。将张夏地区碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 代入此经验公式得到 Z 值 (见表 2) 表明, 其值在 118.14—126.82 之间, 县馒头组的波动范围比毛庄组和徐庄组大。虽然寒武系岩石经历了漫长的成岩表生历史, $\delta^{18}O$ 值普遍减小, 相应地 Z 值也变化, 但作者认为 Z 值的相对大小在某种意义上也是沉积环境的反映。Z 值大说明当时环境的含盐度大, 馒头组中 Z 值较大的层位也是在较高盐度下沉积的白云岩地层中石盐假晶的分布层位, 也说明了 Z 值的大小与环境标志是相吻合的。

表1 山东张夏地区下中寒武统混合沉积不同类别岩石元素含量及比值表

Table 1 Contents of elements and their ratios in different kinds of mixed siliciclastic-carbonate sediments in Zhangxia, Shandong Province

编号	岩性	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ti	Mn
94M-1	白云岩	1.58	11.24	20.02	0.67	0.02	4.47	815	2470
94M-5	白云岩	0.13	17.66	23.79	0.03	0.02	0.65	40	3819
94M-14	泥质白云岩	7.12	7.46	16.05	5.05	0.28	2.92	2927	789
94M-32	泥质白云岩	11.25	6.97	8.68	7.04	0.64	9.09	5110	455
94M-48	白云质泥岩	10.91	6.67	8.63	6.98	0.59	6.44	4121	636
94M-53	灰质白云岩	0.35	13.16	33.00	0.16	0.45	0.76	39	1101
94M-55	紫红色泥岩	11.74	6.73	7.18	5.78	0.35	7.73	3724	690
94M-56	灰绿色泥岩	14.59	5.78	2.46	6.75	0.42	5.92	5512	327
94M-58	微晶灰岩	0.79	1.30	51.78	0.40	0.09	0.62	184	634
94M-62	紫红色泥岩	13.33	6.96	8.42	6.33	0.78	5.56	4399	808
94M-67	白云岩	7.30	11.17	15.70	3.68	0.51	4.58	2405	952
94M-82	鲕粒灰岩	0.92	0.73	41.91	0.31	0.18	0.61	252	1425
94M-83	粉砂质页岩	15.48	2.72	1.25	4.77	1.19	7.07	4787	390
94M-85	生物碎屑灰岩	1.34	0.80	41.55	0.26	0.44	1.13	320	7077
94M-86	粉砂质页岩	6.46	1.12	22.04	1.03	1.78	3.05	1631	4402
94M-87	鲕粒灰岩	0.62	0.73	54.96	0.19	0.16	1.13	223	8490
94M-88	粉砂质页岩	10.55	2.19	2.44	2.15	1.75	5.20	3005	461
94M-89	生物碎屑灰岩	0.46	0.55	55.25	0.04	0.23	0.58	157	13138
94M-96	粉砂质页岩	14.58	3.71	2.14	3.20	2.02	10.76	7578	482
94M-99	鲕粒灰岩	2.02	0.63	40.63	0.35	0.37	6.26	320	4231
94M-100	粉砂质页岩	12.49	2.57	2.85	2.56	2.09	6.13	3565	541
94M-115	核形石灰岩	2.68	0.68	38.50	0.57	0.62	1.84	777	4031
94M-130	砂屑鲕粒灰岩	0.58	0.61	54.95	0.15	0.16	0.96	139	5426
94M-141	生物碎屑灰岩	0.67	0.67	51.55	0.20	0.13	1.15	103	4522
94M-151	鲕粒灰岩	0.98	0.77	51.05	0.38	0.08	1.64	144	5126

编号	岩性	Zr	P	Sr	Ba	V	Ni	Cr	Sr/Ba	Mg/Ca	Zr/Mn ($\times 10^{-6}$)	Ni/V ($\times 10^{-6}$)
94M-1	白云岩	17	252	57	359	54	3	24	0.16	0.47	0.52	0.05
94M-5	白云岩	0.7	196	51	19	22	—	19	2.74	0.62	0.14	0
94M-14	泥质白云岩	67	484	62	171	89	2	76	0.36	0.39	6.55	0.02
94M-32	泥质白云岩	111	573	50	320	143	13	107	0.16	0.67	18.93	0.09
94M-48	白云质泥岩	89	620	43	247	118	20	85	0.18	0.65	10.84	0.17
94M-53	灰质白云岩	10	250	108	34	21	—	39	3.21	0.34	0.69	0
94M-55	紫红色泥岩	90	547	108	291	118	24	93	0.37	0.79	10.15	0.20

编号	岩性	Zr	P	Sr	Ba	V	Ni	Cr	Sr/Ba	Mg/Ca	Zr/Mn ($\times 10^{-6}$)	Ni/V ($\times 10^{-6}$)
94M-56	灰绿色泥岩	154	690	29	316	148	31	104	0.09	1.97	36.58	0.21
94M-58	微晶灰岩	11	115	156	105	60	—	37	1.40	0.02	1.36	0
94M-62	紫红色泥岩	118	526	42	284	136	20	117	0.15	0.69	11.33	0.15
94M-67	白云岩	67	540	65	202	72	11	72	0.32	0.60	5.43	0.15
94M-82	鲕粒灰岩	11	184	200	31	45	—	40	6.41	0.01	0.61	0
94M-83	粉砂质页岩	124	790	36	337	138	44	138	0.11	1.83	24.75	0.32
94M-85	生物碎屑灰岩	11	203	199	39	19	—	64	5.15	0.02	0.12	0
94M-86	粉砂质页岩	42	281	89	131	49	5	70	0.68	0.04	0.74	0.10
94M-87	鲕粒灰岩	11	265	187	32	19	—	43	5.78	0.01	0.10	0
94M-88	粉砂质页岩	78	579	29	168	95	27	97	0.17	0.75	13.09	0.29
94M-89	生物碎屑灰岩	11	225	196	65	17	—	220	3.02	0.01	0.08	0
94M-96	粉砂质页岩	139	830	35	253	171	48	166	0.14	1.46	28.76	0.28
94M-99	鲕粒灰岩	14	252	106	99	33	10	45	1.08	0.01	0.34	0.31
94M-100	粉砂质页岩	89	687	34	198	111	30	110	0.17	0.76	12.74	0.27
94M-115	核形石灰岩	29	353	258	377	41	7	54	0.68	0.01	0.56	0.17
94M-130	砂屑鲕粒灰岩	11	321	243	30	15	—	41	8.15	0.01	0.16	0
94M-141	生物碎屑灰岩	11	309	297	61	14	—	54	4.90	0.01	0.19	0
94M-151	鲕粒灰岩	10	906	324	642	16	—	41	0.50	0.01	0.15	0

注:表中 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 为百分 1, Ti、Mn、Zr、P、Sr、Ba、V、Ni、Cr 为 $\times 10^{-6}$ 值。

表 2 山东张夏地区下中寒武统碳酸盐 C、O 同位素组成与 Z 值

Table 1 Carbon and oxygen isotopic compositions and Z values of the Mondouian—
Xuzhuangian (Early—Middle Cambrian) carbonate rocks in Zhangxia, Shandong Province

样品编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	Z 值	样品编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	Z 值
94M-1	白云岩	-1.31	-8.31	120.47	94M-67	白云岩	-1.20	-11.15	119.29
94M-5	白云岩	0.11	-7.63	123.72	94M-82	鲕粒灰岩	-0.68	-9.11	121.37
94M-9	白云岩	-0.92	-8.40	121.23	94M-85	生物碎屑灰岩	-1.98	-9.11	118.70
94M-14	泥质白云岩	-2.44	-7.32	118.26	94M-87	鲕粒灰岩	-2.25	-9.14	118.14
94M-18	泥质白云岩	1.14	-5.66	126.82	94M-89	生物碎屑灰岩	-1.98	-9.07	118.73
94M-24	泥质白云岩	-0.56	-6.44	122.95	94M-99	鲕粒灰岩	-1.10	-7.95	121.09
94M-32	泥质白云岩	-0.51	-5.90	124.05	94M-107	鲕粒灰岩	-0.95	-10.07	120.34
94M-37	灰质白云岩	-0.61	-14.89	118.63	94M-115	核形石灰岩	-0.75	-8.90	121.33
94M-48	白云质泥岩	-0.85	-6.40	121.98	94M-130	砂屑鲕粒灰岩	-1.40	-9.94	119.48
94M-53	灰质白云岩	-2.59	-5.49	119.26	94M-141	生物碎屑灰岩	-0.37	-8.67	122.22
94M-58	微晶灰岩	-0.26	-4.71	124.42	94M-151	鲕粒灰岩	-0.54	-8.57	121.93

4 混合沉积环境特点与演化

4.1 馒头期

综合以上地层及地球化学特征,对混合沉积环境有了比较明确的认识。早寒武世馒头期是山东张夏地区自太古代以来准平原化后的最早沉积,为成熟碳酸盐台上的陆表海潮坪沉积。潮汐带海水浅,经常暴露于水面,气候比较炎热干旱,蒸发作用强,形成潮间带上部及潮上带呈纹层状,具微粒结构,石盐假晶及干裂、鸟眼等构造的准同生白云岩沉积,这种环境不适宜于骨屑生物生存,因此极少见化石碎屑。仅见由蓝绿藻组成的叠层石。这种白云岩的形成模式在波斯湾萨布哈地区曾被很好地研究过^[6],并证实高盐度(45%—55%),高pH值(8—10),高 Mg^{2+}/Ca^{2+} (10:1)的环境中,白云石可直接从咸水中沉淀出来或引起底部早期沉积的石灰岩白云岩化^[7]。

由于馒头组是长期剥蚀准平原化后海侵开始的沉积产物,必须受到原先周围古陆的影响,这些古陆地形相对平坦,可以提供丰富的泥及粉砂,通常在白云岩中可达15%左右,陆源泥及粉砂含量高者形成泥质、粉砂质白云岩,并可过渡为白云质泥岩、甚至泥岩,使 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 含量显著增高,但这些组分的绝对含量随陆源物的大幅度变化而极不稳定(见表1)。由于水体浅,处于氧化界面之上,岩石均以氧化色滩主。

从整个华北地台来看由东南向西北馒头期沉积厚度逐渐减小,陆源泥及粉砂含量逐渐增加,氧化色逐渐增强^[2],正好说明了馒头组是海侵初期海水由东南向西北推进形成的产物。由于馒头期前经历了长时期的准平原化,砂级沉积物极少,只能提供细粒的泥及粉砂。另外,馒头期经常出现白云岩与泥岩或介于它们之间过渡类型岩石的频繁交替沉积反映了馒头期地壳升降或海平面变化频繁,沉降幅度较小,沉积速率缓慢等特征。

4.2 毛庄期—徐庄期

毛庄期开始的海侵范围比馒头期进一步扩大,环境分异比馒头期小。表现在自毛庄组开始中、薄层灰岩与陆源细粒泥岩及粉砂岩交互沉积。粉砂岩主要成分为棱角一半棱角状石英,其次为云母,钙质胶结或铁质胶结。灰岩有生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、核形石灰岩、海绿石灰岩等,并以鲕粒灰岩最为发育,自毛庄组到徐庄组其灰岩的层数、厚度逐渐增加,在上述灰岩中往往含相当数量的陆源粉砂级或砂级石英及云母。

鲕粒灰岩其鲕核以直径较小的生物碎屑、团粒内碎屑为主,陆源碎屑较少见,而生物碎片多为三叶虫碎屑,当碎片较大时,鲕粒的形态受鲕核的生物碎片形态的影响,鲕粒外圈具同心结构,也可具放射结构,但以放射结构为主,鲕粒直径较小,大多小于0.7 mm,这种鲕粒形成于 $CaCO_3$ 供应丰富且达到饱和,有足够的成核物质(大量三叶虫碎片的出现)环境中。放射鲕形成于弱动荡水条件下,绕成核物质加积生长的文石针呈径向排列而成,而少数具同心结构的鲕粒则是在介质能量相对较强、径向文石难以生长,而沿切线方向加积形成。因此,毛庄组及徐庄组的鲕粒灰岩为潮下能量较低浅滩环境的产物。在鲕粒灰岩及生物碎屑灰岩中大多含有细—粉砂级石英、长石、云母及磷质碎屑,石英长石分选磨圆差,说明是近物源沉积的产物。

毛庄组与徐庄组的紫红色粉砂质页岩,主要由粘土矿物、陆源粉砂级石英及云母碎片组成, Fe_2O_3 含量高,可见干裂等构造,是潮间带低能环境的沉积。这种碳酸盐岩与陆源碎

屑岩的多次交替,说明毛庄期及徐庄期海平面变化的频繁性,致使地层出现多次旋回。

5 混合沉积的控制因素讨论

5.1 海平面变化

海平面变化使陆源碎屑沉积体系与碳酸盐沉积体系相邻地带因相带迁移而造成混合沉积,潮坪地带尤为明显。海平面变化也会影响碳酸盐的生产率,据研究,大量生成碳酸盐的海水深度小于50至100 m,因为在此环境下光合生物能大量繁殖,在水深10 m左右碳酸盐生产率最高,小于10—20 m又显著减小^[13],海水深度变化可以改变碳酸盐与陆源碎屑沉积的比率,造成沉积岩类的变化。海平面变化可有不同的级次,这些不同级次的海平面变化的形成机制及其产生的效应是不同的,它们之间的相互叠加控制了盆地的沉积特征,下面就几个级次的海平面变化对沉积地层的影响分别讨论。

5.1.1 二级海平面变化

早寒武世开始,全球范围的海侵在许多地方都留下了记录^[10,11],华北地台自早寒武世开始至中寒武世海侵是一个逐步扩大的过程,表现为时间上自馒头期至徐庄期陆源沉积逐渐减少,海相碳酸盐中白云岩含量逐渐减少,而灰岩的层数及厚度逐渐增加,海洋作用逐渐增强。空间上华北地台自东南向西北,下部地层逐渐缺失,沉积厚度逐渐变薄。

5.1.2 三级海平面变化

三级海平面曲线两相邻下降拐点处之间的一套地层序列是层序地层的研究对象,此拐点代表了最大海平面变化点^[16],因而容易造成地层的不整合现象,三级地层层序是指由不整合面或它们相对应的整合面所限定的地层序列。每个地层层序由陆架边缘体系域、低水位体系域、海侵体系域及高水位体系域组成。山东张夏地区所处位置为台地内部,离陆架边缘远,低水位体系域没有发育或发育不全,只表现为海进—海退旋回,这样的旋回在馒头期—徐庄期共发育8个(图2),从层序特点可以看出在毛庄组—徐庄组沉积中,碳酸盐岩厚度较小,一方面表明海平面变化的不对称性,表现为快速的海平面上升和缓慢的下降;另一方面也说明当时华北地台缓坡坡度极小,相对较大的海平面变化可以造成沉积相带的大规模迁移。海平面快速上升及高水位期滨线迅速后退,物源供应减少,整个台地被海水淹没,使碳酸盐的产率大大增加并远远超过陆源碎屑的供应量,因而形成碳酸盐沉积,而海平面下降可使碳酸盐的产率明显下降,加上海平面下降期陆源碎屑的供应显著增加抑制了碳酸盐的生产,从而以泥质及粉砂质陆源碎屑沉积为主。

在地势极为平坦的华北地台内部、沉积相的分布各地是比较均匀的,沉积作用常以垂向加积为主,海平面的波动对整个台地的影响都是相似的,这种不对称的海平面变化即快速的上升与缓慢的下降造成了地层旋回的不对称性,即较薄的碳酸盐岩与较厚的陆源碎屑岩相互交替的旋回。这种沉积旋回在华北地台具有普遍性。

5.2 构造控制

全球的构造作用控制了自晚前寒武纪—中奥陶世的二级海平面变化^[12],华北地台早中寒武世的海平面上升可能与全球晚元古代超大陆的解体及海底扩张系统的形成而使洋盆体积的缩小有关。华北地台下、中寒武统沉积厚度较小,这与华北碳酸盐台地已相对稳定,构造沉降速率小,海平面较低,在低水位期由于剥蚀作用缺乏沉积有关,在岩石中广泛存在

的食盐假晶、泥裂、广泛发育的红层沉积都说明水体浅，并遭受较长时期的暴露的产物。这说明构造升降运动控制着物源区和沉积区的分布状态，从而也就很大程度上控制了物源的供给量。构造下沉速率与沉积速率的配置也明显地影响混合沉积。在构造沉降小而沉积速率较大时，盆地水体变浅，不断充填，沉积空间随之减小，形成的地层较薄。反之，当基底沉降速率较大时，引起沉积空间的增大，而形成相对较厚的沉积旋回。

构造沉降对盆地水深的影响与全球海平面变化影响是累积生效应的，也就是说地层记录中的海平面变化历史，实际上是全球海平面变化与局部构造沉降累积效应的总和。在下降较快的沉积盆地，海平面上升将因盆地的沉降而得到加速，海平面上升的时间相对增长，相反，海平面下降速率被减速，下降时间被缩短，华北地台早、中寒武世构造沉降速度小，沉积记录中较大的海平面变化主要受控于全球海平面变化，构造的控制是次要的。

5.3 气候控制

气候可以通过冰时期、温时期的变化来影响局部乃至全球的海平面变化，早寒武世是晚前寒武纪以来比较明显的冰川消融期^[15]。据研究在冰时期由地球轨道参数引起的大陆冰席的增生和消融周期内，冰席的消融要比增生速度快得多^[8,14]，由此而引起相对快速的海平面上升（上升速率10—15 m/ka）和缓慢的海平面下降（下降速率1—1.5 m/ka）^[14]。这种非对称的海平面变化所产生的旋回及旋回组也具有不对称性。山东张夏地区三级及四、五级地层旋回分析表明，在一个沉积旋回中，相对海水较深环境下沉积的灰岩厚度往往远小于水体较浅条件下形成的泥质岩沉积厚度。这与冰席消融、增生引起的非对称性海平面变化所产生的旋回是一致的，并具有相关性。

气候条件也可通过影响物源供给来控制混合沉积，华北地台早、中寒武世缺乏粗碎屑沉积，普遍为氧化色，说明当时降水量较小，地形也平缓，未见有规模较大的河流带人的粗碎屑，而以粉砂级及泥级具水平及微波状纹层沉积构造为主。

参 考 文 献

- [1] 王英华等. 华北地台早古生代碳酸盐岩石学. 北京: 地震出版社, 1989, 2—27.
- [2] 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, 28—40.
- [3] 叶连俊等. 华北地台沉积建造. 北京: 科学出版社, 1983, 1—7.
- [4] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 53—55.
- [5] 潘正藩. 华北地台寒武纪沉积建造. 叶连俊等著. 华北地台沉积建造. 北京: 科学出版社, 1983, 49—63.
- [6] 潘正藩, 李菊英. 白云岩化作用与中国东部白云岩地层. 中国科学院地质研究所集刊(第4号), 北京: 科学出版社, 1990, 1—98.
- [7] Folk R L & Land L S. Mg/Ca ratio and salinity: two controls over crystallization of dolomite. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 1975, 59 (1): 60—68.
- [8] Imbrie J and Imbrie J Z. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*, 1980, 207: 943—953.
- [9] Keith M L and Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1964, 28: 1787—1876.
- [10] Matthews S C and Cowie J W. Early Cambrian transgression. *Journal of the Geological Society*, 1979, 136: 133—135.
- [11] Mokie T. Relative sea level changes and the development of a Cambrian transgression. *Geol. Mag.*, 1993, 130 (2): 245—256.
- [12] Read J F. Controls on evolution of Cambrian—Ordovician Passive margin, U. S. Appalachians. In: Crevello P D

- et al. (eds), Controls on carbonate platforms. Geological Society America Bulletin, 92: 197—211.
- [13] Schlager J F. Carbonate sequence stratigraphy. In: wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, Posamentier H W, Ross C A and van wagoner J C eds. Sea—level changes: an intergrated approach. SEPM Spec. Publ., 42: 155—181.
- [14] Williams D F. Evidence for and against sea—level changes from the stable isotopic record of the cenozoic. In: Wilgus C K et al (eds), Sea—level changes: An integrated approach, SEPM. Spec. Publ, 1988, 42: 31—37.
- [15] Wright V P. Speculations on the controls on cyclic peritidal carbonates; ice—house versus green house eustatic controls. Sediment., Geol., 1992, 76: 1—5.
- [16] Vail P R, Mitchum R M, et al. Seismic stratigraphy and global changes in sea level, In: Payton C E (Eds) Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration, American Association of Petroleum Geologists Memoir 26: 99—212.

Mixed Siliciclastic—Carbonate Sediments during the Lower—Middle Cambrian in the North China Platform

Jiang Maosheng Sha Qing'an and Liu Min

(Institute of Geology, Academia Sinica, Beijing 100029)

Abstract

Mixed siliciclastic—carbonate deposits from the Mandouian Formation to the Xuzhuangian Formation during the Early—Middle Cambrian in the North China Platform were interbeds of siliciclastic and carbonate rocks with high frequency and mixed sediments with both siliciclastic and carbonate components. The former indicated interbeds of the mudstone and dolostone or the grainstone and silty shale, the latter formed the argillaceous dolostone, dolomitic mudstone, quartz calcarenite etc.

The study on geochemistry of elements indicated the content of calcium gradually increased from the Mandouian to Xuzhuangian Formation with the increasing of limestone. But the content of magnesium decreased gradually with the decreasing of dolostone. Mg/Ca ratios were higher in Mandouian Formation than in Maozhuangian and Xuzhuangian Formation. The content of trace element Sr was higher in limestone, $150—300 \times 10^{-6}$; medium in argillaceous limestone, $100 \times 10^{-6} \pm$; lower in argillaceous dolostone, mudstone and silty shale, $< 100 \times 10^{-6}$. Sr/Ba > 1 in limestone, < 1 in most mudstone and argillaceous dolostone. Mn = $4000—13000 \times 10^{-6}$ in limestone, $< 2500 \times 10^{-6}$ in dolostone, $< 1000 \times 10^{-6}$ in mudstone and argillaceous dolostone. The contents of Ti, Cr, Ni, V and etc. were higher in mudstone and silty shale, medium in argillaceous dolostone and dolostone, lower in limestone.

The stable carbon and oxygen isotopic data of carbonate rocks indicated that the variant scale of isotopic values was greater in the Mandouian and in the lower part of Maozhuangian Formation, $\delta^{13}\text{C}$: $-2.59\%—+1.14\%$ (PDB) and $\delta^{18}\text{O}$: $-14.89\%—-4.71\%$ (PDB); while they were smaller in the upper part of Maozhuangian and in the Xuzhuangian Formation, $-2.$

25‰—-0.37‰(PDB), -10.07‰—-7.95‰(PDB) respectively. It could be deduced that the sea water was relatively shallow during the Mandouian and the early Maozhuangian stage, thus minor scale sea level changes could cause the changes of salinity, reduction—oxidation conditions, temperature and circulation of sedimentary environment, till the late Maozhuangian and Xuzhuangian, the sea water became relatively deep and sedimentary environment was stable.

It was considered that transgression expanded gradually from the Early to Middle Cambrian in the North China Platform. The terrigenous deposits and dolostone decreased but limestone deposits increased from the Mandouian to Xuzhuangian. During Mandouian the transgressive cycles were deposits of parasyngenic dolostone and regressive cycles were mud deposits, from Maozhuangian to Xuzhuangian the transgressive cycles were grainstone and regressive cycles were silty shales. The third sea level changes showed a model of rapid transgression and slow regression.

Key words: mixed siliciclastic—carbonate sediment environment analysis sea level changes transgressive—regressive cycles the early and middle cambrian north china platform.