

文章编号: 0253-9985(2011)01-0017-12

燕山地区冀北坳陷雾迷山组地球化学特征

罗顺社¹, 陈小军², 李任远³, 张建坤¹

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 荆州 434023 2. 中国石化 胜利油田分公司 海洋采油厂, 山东 东营 257237;

3. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 燕山地区冀北坳陷雾迷山组为碳酸盐岩潮坪沉积, 进一步分为潮上带、潮下带、潮间带 3 个亚相和上潮间带、下潮间带、潮下高能带、潮下低能带 4 个微相。利用因子分析法对微量元素和氧化物的富集规律及其环境意义进行了探讨。研究表明, 该区碳酸盐岩受陆源浑水沉积的影响, 而且地球化学特征与沉积环境有着极为密切的关系。无论是微量元素还是氧化物, 其含量大多数都由潮上带—潮间带—潮下带呈明显增大的趋势。随着水体加深, 对碳酸盐岩沉积环境较敏感的 Sr/B 含量及 Sr/Ba、Sr/Ca、Mn/Fe 值也由潮上带至潮下带逐渐增大。上述特征不仅表明该区地球化学特征可作为相分析的重要标志, 也说明野外地层和沉积相划分的准确度较高。

关键词: 碳酸盐岩; 地球化学; 因子分析; 雾迷山组; 冀北坳陷; 燕山地区

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Geochemical behaviors of the Wumishan Formation in the Jibei Depression of Yanshan region

Luo Shunshè¹, Chen Xiaojun², Li Renyuan³ and Zhang Jiankun¹

(1. College of Geosciences, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 2. Offshore Oil Production Plant of SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong 257237, China; 3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The Wumishan Formation in Jibei Depression is of carbonate tide-flat sedimentary, and can be divided into three subfacies (supralittoral zone, subtidal zone, intertidal zone) and four microfacies (upper and lower intertidal zones as well as high-energy and low-energy subtidal zones). An analysis of trace element and oxide enrichment pattern is carried out by using factor analysis method. The result shows that the carbonates in the area are affected by terrigenous muddy water sedimentation and that there is a close relationship between its geochemical behaviors and sedimentary environment. Contents of both trace elements and oxide significantly increase from supralittoral zone to intertidal zone and to subtidal zone. As the water depth increases, the content of Sr and B, which are sensitive to carbonate sedimentary environment, and Sr/Ba, Sr/Ca and Mn/Fe ratios, rise from the supralittoral zone to subtidal zone. These features indicate that the geochemical characteristics of the area can be used as important marks for facies analysis and that the accuracy of field division of stratum and sedimentary facies is relatively high.

Key words carbonate rock; geochemical behavior; factor analysis; Wumishan Formation; Jibei Depression; Yanshan region

许多国家在中元古界地层中发现了油气藏^[1], 表明这一古老地层的含油性与油气勘探前景较好。我国中元古界地层分布广泛、发育良好,

尤其是燕山地区雾迷山组(雾), 地层沉积厚度大、出露良好。早在 20 世纪 70 年代我国就对燕山地区进行了地质勘查会战^[2-3], 但均未获取工业油

收稿日期: 2010-12-23

第一作者简介: 罗顺社(1961—), 男, 博士、教授, 沉积学。

基金项目: 中国石化股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(YPH08025)。

流。此外,前人对雾迷山组沉积特征进行过大量的研究,周书欣^[4]、吴梦源^[5]、赵澄林等^[6]均认为雾迷山组碳酸盐岩为潮汐沉积,梅冥相等^[7]认为该组为潮坪相-湖相沉积,李磊^[8]等则认为雾迷山组为一套潮坪-潟湖-浅海相沉积。

笔者在实测燕山地区冀北拗陷中新元古界地层基干剖面过程中发现,雾三段-雾六段发育大量叠层石,表明沉积时期藻类繁盛,有机质大量富集,可作为生油岩;雾七段和雾八段孔、洞、缝等储集空间发育,可作为良好的储层。上覆洪水庄组致密的泥页岩可成为较好的盖层。两组可形成一个良好的生储盖组合,因此加深对雾迷山组沉积特征的研究,对我国中元古界油气勘探具有重要的意义。

1 区域地质概况

燕山地区冀北拗陷位于燕山沉积隆带中段的最北部,北面紧临内蒙地轴,南面以山海关隆起和铁门关大断裂为界,东面是辽西拗陷的凌源-喜峰

口大断裂,西面与密怀隆起的古北口一带相连,面积达 8 250 km²。研究区位于辽宁凌源大河北魏杖子村,构造背景属于冀北拗陷(图 1)。该剖面地层出露良好、层段界限清晰,实测组厚达 2 947.15 m,是研究雾迷山组碳酸盐岩地层的理想剖面之一。

据王铁冠等研究表明,研究区构造运动较为活跃,冀北拗陷及其次一级构造单元的形成与演化均受到区域性深断裂带或大断层块断活动的制约^①。研究区地层早期是以块断升降活动为主,区域性差异,断块活动造成了古隆起与古拗陷正负向单元的基础;中期以褶皱上升变动(受印支-燕山运动影响)为主,形成了数量较多的连续褶皱,为次一级构造的基础;晚期则以全面上升隆起构造为主,造成地层缺失和风化剥蚀,使得地层断裂明显。高于庄组之后崮山运动波及范围较广,海侵是中、新元古代规模最大的海侵,沉积了雾迷山组藻镁质碳酸盐岩,含有机质和叠层石,属安静环境饱和状态条件下浅海相沉积^[9-10]。

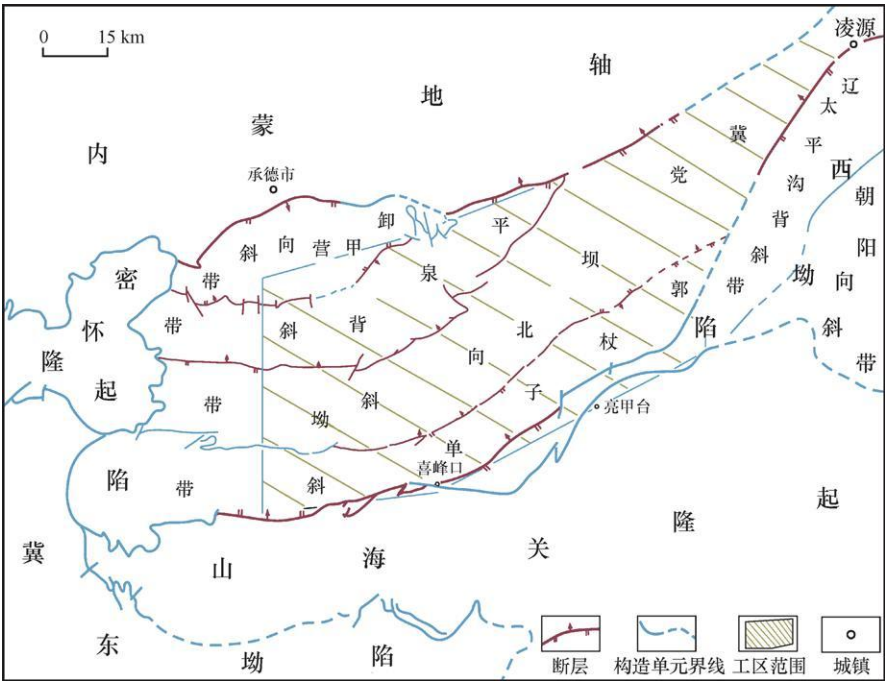


图 1 燕山地区冀北拗陷区域构造^①

Fig. 1 Regional structure map of the Jibei Depression in Yanshan region

① 王铁冠, 刘怀波, 高振中, 等. 燕山地区中段冀北拗陷石油地质基本特征. 江汉石油学院燕山地区地质勘查三大队, 1978.

2 沉积相特征

通过野外剖面观察, 根据岩石组合特征、结构及沉积构造特征, 利用沉积学知识, 并结合区域地质背景, 笔者认为燕山地区冀北拗陷雾迷山组地层为碳酸盐岩潮坪沉积环境, 进一步分为潮上带、潮下带、潮间带 3 个亚相和上潮间带、下潮间带、潮下高能带、潮下低能带 4 个微相(表 1)。研究区内潮间带最为发育(图 2)。

表 1 燕山地区冀北拗陷雾迷山组沉积相类型
Table 1 Sedimentary facies types of the Wumishan Formation in the Jbei Depression of Yanshan region

相	亚相	微相
碳酸盐岩潮坪相	潮上带	泥云岩
	潮间带	上潮间带
		下潮间带
	潮下带	潮下高能带
		潮下低能带

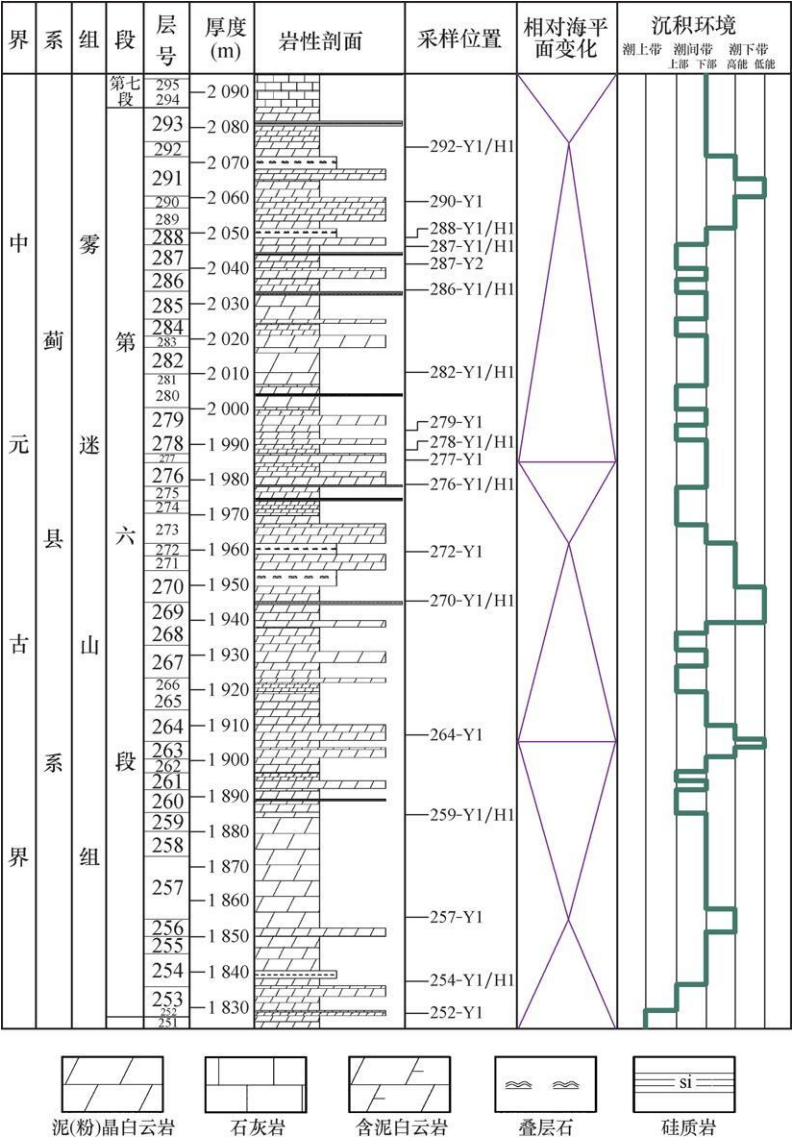


图 2 辽宁凌源魏杖子剖面雾迷山组第六段沉积相柱状图
Fig. 2 Sedimentary facies column of the sixth member of the Wumishan Formation on Weizhangzi section, Lingyuan, Liaoning Province

2.1 潮上带

潮上带位于平均高潮面和最大高潮面之间,常暴露于大气中,与潮间带上部常呈过渡关系,只有在大风暴和大潮汐时才被海水淹没。岩石类型以灰、深灰、棕灰色薄-厚层状或纹层状泥-粉晶白云岩、泥晶灰岩为主,藻叠层石沉积不太发育,有时掺杂少量的铁质,常有碎屑物质的混入形成黄灰、黄绿色、紫红色页岩以及碳酸盐岩与碎屑岩的过渡类型如含泥云岩,含砂云岩等。由于在研究区地层内蒸发岩、干裂、石膏及石盐假晶较少见,笔者认为该区应以潮湿型潮上带为主。在雾迷山组各沉积旋回的下部、韵律底部多见潮上带与潮间带上部的过渡沉积。

2.2 潮间带

潮间带位于平均高潮面与平均低潮面之间,以间歇能沉积为特点,为潮坪环境中最宽的地带。沉积物主要为含砾(砂)屑泥质(晶)白云岩、泥晶灰岩、鲕粒白云岩、锥柱状叠层石和少量波状、层状叠层石,夹黑灰色硅质云岩、硅质页岩或硅质团块(条带),局部含少量锰质,有时有少量陆源粉砂质和泥质混入而形成泥质(粉砂质)云岩或灰岩。根据实际情况将潮间带细分为上潮间带和下潮间带。研究区潮间带最为发育。

2.2.1 上潮间带

出露水面时间多,属低-中间歇能沉积环境,砂质云岩和砂屑云岩不甚发育,以发育纹层状藻叠层云岩为主要特征,常具斑点及小凝块结构,在纹层状藻叠层云岩中也常见似竹叶状砾(藻)屑云(硅)岩发育,有时还有具藻迹纹层状硅岩,低幅度不对称波痕为该带标志性产物^[10]。

2.2.2 下潮间带

该段沉积比较复杂,有时与潮下高能带沉积是混生的。大波纹状藻叠层云岩、凝块石以及中小型锥(柱)状藻叠层云岩是下潮间带重要的沉积标志,此外还常发育有亮晶粒屑云岩、尤其是内碎屑、鲕粒、藻鲕及团粒等多种粒屑混生的云岩。可见单向水流交错层理、交错层理、波痕,准同生角砾等沉积构造。

2.3 潮下带

潮下带位于平均低潮面之下,水动力较潮间带强,岩石类型主要为灰白、浅灰色薄-中层状砾屑灰岩,泥晶灰岩、含砂、粉砂泥质白云岩、泥晶白云岩、大型锥或柱状藻叠层白云岩,局部含锰质和硅质条带,常组成砾屑灰岩与薄板状泥晶灰岩和紫红色页岩组成不等厚互层,砾屑长轴 0.3~10 cm不等,宽 0.1~1 cm,以 7 cm×1 cm 的砾屑居多,略显竹叶状或成倒小字结构,部分呈透镜状,可能为风暴角砾,含有少量硅质结核,薄板状显示交错层理。考虑到雾迷山组的韵律性较强,根据水体能量细分为潮下高能带和潮下低能带。

2.3.1 潮下高能带

位于平均低潮面以下,波基面之上。相带较为开阔,具有持续高能的特点,有大量的藻团(凝块状、葡萄状)沉积。在底质稳定的条件下,形成以藻团为基本层的大型锥或柱状藻叠层白云岩以及藻礁等。该带可见各种交错层理、波痕和巨波痕,除了藻叠层石白云岩类外,还可能有鲕粒白云岩和砂屑白云岩。

2.3.2 潮下低能带

位于波基面之上的低能环境,位置相当于潟湖。由于水体较深,光线微弱,藻类活动少,因此主要为贫藻迹的、化学沉淀为主的泥晶白云岩类,泥质含量高时可成为含泥泥晶白云岩和泥云岩,若夹部分风暴回流所携带的异地风暴沉积而形成风暴岩。该带无明显的沉积构造,以厚层状为主,在沉积作用微弱期间可能形成海底硬地。

3 地球化学特征

3.1 样品采集及测试

样品采自辽宁省凌源县大河北乡魏杖子剖面(图 3),岩性主要为泥(粉)晶云岩、藻纹层泥(粉)晶云岩、硅质云岩、叠层石云岩等 20 种,覆盖了研究区发育的 4 种微相类型及不同的层段,样品新鲜。共采集微量元素(符号 Y)样品 308 块,氧化物分析(符号 H)样品 147 块(表 2)。

表 2 燕山地区冀北拗陷雾迷山组各段采样统计

Table 2 Sample statistics of each member of the Wumishan Formation in the Jibei Depression of Yanshan region

段	分层	实测厚度 / m	微量元素 样品 /块	氧化物分析 样品 /块
第一段	1~ 50	334.09	49	22
第二段	51~ 119	452.65	51	22
第三段	120~ 170	462.48	50	24
第四段	171~ 181	93.63	5	2
第五段	182~ 251	482.98	53	30
第六段	252~ 293	260.18	18	10
第七段	294~ 328	313.56	17	12
第八段	329~ 411	547.58	65	25

沉积岩中的元素分布特征,尤其是微量元素的分布特征常具有环境意义,是沉积相分析的一

个重要标志。在本次研究中选取部分元素 (V, Rb, Sr, Ba, Be, B) 和部分氧化物 (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , MnO , P_2O_5 , TiO_2) 进行测试、分析探讨,旨在查明不同沉积环境下形成的碳酸盐岩的地球化学背景或标志^[11],用以探寻岩石化学组分的共生组合关系,为地层和沉积相的划分提供重要依据。所采样品由天津地质矿产研究所依据 GR/T14506.28—1993和 DZG20.2—1991标准采用 PW4400 X射线荧光光谱仪、X Series II 等离子体谱仪测定。由于样品数量较多,列举部分样品 (选取雾六段) 测试结果 (表 3 表 4)。从表 5 和表 6 可看出,随着沉积水体的加深,各亚相微量元素和氧化物含量总体上由潮上带—潮间带—潮下带逐渐增大,仅 MgO 和 CaO 含量减小。

表 3 燕山地区冀北拗陷雾迷山组第六段微量元素含量

Table 3 Content of trace elements in the 6th member of the Wumishan Formation in the Jibei Depression of Yanshan region

样品编号	岩性	采样位置 / m	微量元素含量, 10 ⁻⁶						Sr/Ba	沉积环境
			V	Rb	Sr	Ba	Be	B		
LW - 252- Y1	硅质岩	距底 0.5	3.88	0.81	2.28	8.45	0.08	9.50	0.27	潮上带
LW - 254- Y1	细晶白云岩	距底 2.0	8.42	0.46	18.07	2.19	0.10	6.10	8.25	潮间带
LW - 257- Y1	泥晶白云岩	距底 0.1	11.54	2.59	36.33	10.30	0.21	8.71	3.53	潮间带
LW - 259- Y1	泥晶白云岩	距顶 0.2	8.01	0.98	31.88	5.09	0.18	10.40	6.26	潮间带
LW - 264- Y1	藻纹层粉晶白云岩	距底 2.0	9.22	0.48	22.20	5.90	0.18	13.80	3.76	潮下带
LW - 270- Y1	含砾泥晶白云岩	距底 0.1	7.33	1.15	31.06	6.89	0.15	18.20	4.51	潮下带
LW - 272- Y1	含砾泥晶白云岩	距底 0.1	9.13	3.05	23.40	9.18	0.28	18.20	2.55	潮下带
LW - 276- Y1	粉晶白云岩	距底 0.4	7.04	0.65	21.19	1.66	0.13	8.71	12.80	潮间带
LW - 277- Y1	藻纹层粉晶白云岩	距底 0.5	7.22	1.08	19.30	4.74	0.12	6.75	4.07	潮间带
LW - 278- Y1	粉晶白云岩	距底 1.5	7.35	0.42	20.89	1.94	0.11	8.21	10.75	潮间带
LW - 279- Y1	含砾泥晶白云岩	距底 0.1	8.54	1.26	53.91	13.84	0.20	15.70	3.90	潮下带
LW - 282- Y1	含砾泥晶白云岩	距底 0.2	7.93	2.01	26.63	9.35	0.25	14.90	2.85	潮间带
LW - 286- Y1	粉晶白云岩	距底 0.1	7.39	0.95	27.48	4.78	0.06	19.60	5.75	潮间带
LW - 287- Y1	粉晶白云岩	距底 0.3	6.72	0.45	34.22	5.13	0.06	33.40	6.67	潮间带
LW - 287- Y2	泥晶白云岩	距底 1.0	7.27	0.37	20.54	2.23	0.05	15.40	9.21	潮间带
LW - 288- Y1	粉晶白云岩	距底 1.2	6.94	0.48	23.79	3.39	0.03	15.00	7.02	潮间带
LW - 290- Y1	泥晶白云岩	距顶 2.0	7.08	1.73	28.87	5.67	0.18	34.20	5.09	潮下带
LW - 292- Y1	泥晶白云岩	距顶 1.1	9.43	10.00	32.92	22.20	0.39	22.80	1.48	潮间带

表 4 燕山地区冀北拗陷雾迷山组第六段氧化物含量

Table 4 Oxide content in the 6th member of theWumishan Formation in the Jbei Depression of Yanshan region														
样品编号	岩性	取样 位置 /m	氧化物含量, 10 ⁻²											沉积 环境
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	
LW - 254-H 1	细晶白云岩	距底 2.0	0.105	1.261	0.014	0.030	22.040	30.360	0.012	0.020	0.008	0.011	0.003	潮下带
LW - 259-H 1	泥晶白云岩	距顶 0.2	0.199	2.435	0.006	0.080	21.040	30.250	0.039	0.030	0.006	0.008	0.009	潮间带
LW - 270-H 1	含砾泥晶白云岩	距底 0.1	0.276	25.580	0.016	0.290	16.130	22.640	0.055	0.030	0.027	0.009	0.011	潮下带
LW - 276-H 1	粉晶白云岩	距底 0.4	0.191	0.582	0.003	0.040	22.020	30.390	0.072	0.020	0.007	0.006	0.007	潮间带
LW - 278-H 1	粉晶白云岩	距底 1.5	0.125	0.546	0.018	0.031	22.050	30.500	0.022	0.020	0.008	0.007	0.005	潮间带
LW - 282-H 1	含砾泥晶白云岩	距底 0.1	0.391	3.782	0.003	0.120	20.938	29.290	0.160	0.020	0.008	0.010	0.015	潮间带
LW - 286-H 1	粉晶白云岩	距底 0.1	0.180	0.852	0.008	0.041	21.815	30.540	0.070	0.030	0.008	0.011	0.005	潮间带
LW - 287-H 1	粉晶白云岩	距底 0.3	0.132	7.413	0.002	0.099	20.021	28.800	0.019	0.030	0.012	0.009	0.007	潮间带
LW - 288-H 1	粉晶白云岩	距底 1.2	0.086	0.527	0.013	0.038	21.990	30.530	0.012	0.020	0.008	0.008	0.005	潮间带
LW - 292-H 1	泥晶白云岩	距顶 1.1	0.823	5.272	0.089	0.130	20.308	28.880	0.303	0.030	0.014	0.018	0.033	潮下带

3.2 因子分析

为了更多地提取样品所反映的地质信息和规律,笔者运用因子分析法对其测试结果进行相关处理。因子分析是用数学中降维方法来研究地质指标或样品间的相互关系,研究指标的分析称为 R 型因子分析,研究样品的分析称为 Q 型因子分析^[12]。在因子平面图上邻近的一些指标点表示它们密切相关,或者说它们具有成因上的联系,往往指示某一特定的地质作用或过程。图形上邻近的一些样品点则说明它们同属一种类型,常代表的是同一地质作用或过程的产物。

3.2.1 微量元素含量因子分析

1) R 型因子分析

对 308 块样品的微量元素含量数据进行 R 型因子分析,经计算作出 7 个指标在 F1 和 F2 上的因子载荷图(图 4)。图中 F1 主要反映的是 V, Rb, Be, Ba 的沉积作用。可以看出 Rb 与 Be 含量呈明显的正相关,与 V 含量的正相关性稍差。Rb 和 V 含量

主要与浮游和固着的藻类有关,离岸越远含量相对增高,可反映水体深浅的变化; Be 为碱土金属元素,性质与 Sr 相似,离岸越远水体盐度越高,沉积中的 Be 含量也越高; Ba 属分散元素,在碳酸盐岩中含量较低(表 6)。因此, F1 主要反映了沉积物成分的变化。F2 正向主要代表了 Sr 的沉积作用,负向反映 B 的沉积作用。从图中可以看出 Sr 与 B 呈负相关关系,对碳酸盐岩沉积物来说,反映的是盐度和水体深度的变化,此时期海平面暴露,时而被水淹没。

2) Q 型因子分析

经 Q 型因子分析计算,得到 308 块样品在 F1 和 F2 因子载荷图(图 5)。图中全部样品在图中明显的分为 3 个区域。区域 I 包括了 10 块样品均来自潮上带;区域 II 包括了 44 块样品,这些样品大部分来自潮下带;区域 III 包括了其余的大部分样品,这些样品基本上都来自潮间带。样品明显的分区说明了该沉积时期主要受海平面升降的控制,也有陆源物质的影响。从 Q 型因子分析的结果还可以看出,微量元素的共生组合关系没有明显的分带性,充分说明区内地层沉积连续及相带划分的准确性。

表 5 燕山地区冀北坳陷雾迷山组各亚相微量元素含量
Table 5 Content of trace elements of each subfacies in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

沉积环境	微量元素含量,10 ⁻⁶					
	V	Rb	Sr	Ba	Be	B
潮上带 (22)	3.06~11.90 (8.29)	0.31~1.68 (0.70)	2.20~49.08 (25.73)	1.62~24.79 (11.38)	0.04~0.24 (0.10)	1.44~23.20 (7.84)
潮间带 (224)	0.10~25.84 (8.56)	0.16~49.79 (1.60)	2.22~154.20 (30.46)	1.66~118.90 (14.99)	0.02~0.64 (0.12)	1.33~49.90 (8.83)
潮下带 (62)	0.52~85.23 (11.43)	0.24~55.72 (3.21)	2.41~86.14 (36.26)	2.57~61.85 (14.70)	0.07~2.02 (0.19)	3.40~34.20 (13.53)

注:表中沉积环境括号内数值为样品块数;元素含量括号内数值为各沉积环境中所有样品的平均值。

表 6 燕山地区冀北坳陷雾迷山组各亚相氧化物含量
Table 6 Oxide content of each subfacies in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

沉积环境	氧化物含量,10 ⁻²									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
潮上带 (13)	0.063~0.227 (0.140)	0.220~97.750 (17.462)	0.001~0.196 (0.040)	0.025~0.840 (0.185)	0.259~22.330 (18.240)	0.310~30.730 (25.384)	0.007~0.117 (0.028)	0.018~0.030 (0.024)	0.004~0.099 (0.019)	0.007~0.013 (0.009)
潮间带 (111)	0.050~1.736 (0.241)	0.042~96.660 (16.079)	0.001~0.754 (0.060)	0.019~0.880 (0.164)	0.263~22.510 (16.936)	0.769~52.180 (27.432)	0.003~2.259 (0.093)	0.020~0.070 (0.031)	0.004~0.106 (0.023)	0.009~0.088 (0.011)
潮下带 (23)	0.074~1.697 (0.318)	0.761~92.740 (32.636)	0.002~0.285 (0.053)	0.043~0.82 (0.247)	1.027~22.150 (13.073)	0.891~34.610 (21.794)	0.007~0.818 (0.137)	0.020~0.120 (0.041)	0.005~0.242 (0.036)	0.007~0.146 (0.018)

注:表中沉积环境括号内数值为样品块数;氧化物含量括号内数值为各沉积环境中所有样品的平均值。

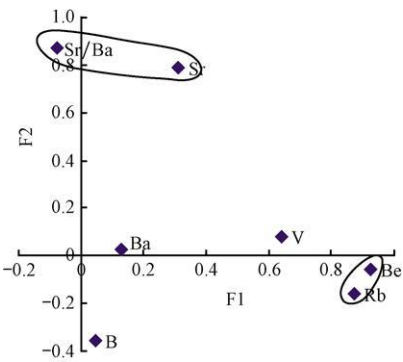


图 4 燕山地区冀北拗陷雾迷山组微量元素含量
R型因子载荷图
Fig 4 R-factor loading graph of trace element content in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

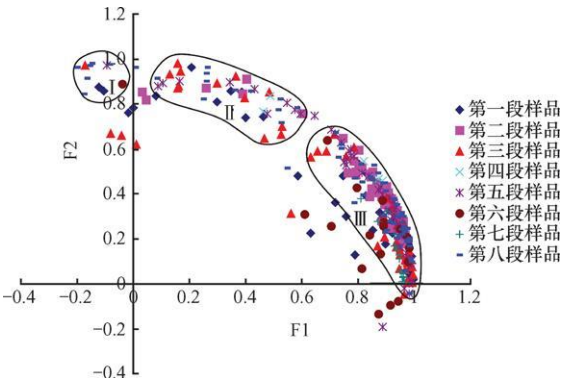


图 5 燕山地区冀北拗陷雾迷山组微量元素含量
Q型因子载荷图
Fig 5 Q-factor loading graph of trace element content in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

3.2.2 氧化物含量因子分析

1) R型因子分析

对 147块岩样的氧化物分析数据进行 R 型因子分析, 经计算作出主因子 F1和 F2的因子载荷图(图 6)。

从图中可以看出: ①F1主要为 MgO, CaO, MnO 及 FeO, 反映了海源碳酸盐岩的沉积作用; F2主要为 Al₂O₃, P₂O₅, TiO₂, Fe₂O₃, K₂O 它们呈明显的正相关, 反映陆源物质的沉积作用。说明本剖面的沉积不仅与海源物质有关, 而且受陆源浑水沉积物质的影响。②F1正向反映 MnO 和 FeO 的沉积作用, 负向反映 CaO, MgO 的沉积作用。MnO, FeO 与 CaO, MgO 整体呈负相关关系, 表明两组的变化规律相反。其中 MgO 与 CaO 呈明显

的正相关关系, 二者都是碳酸盐岩沉积所必需的物质, 随水体的加深碳酸盐化作用越强, 且高 Mg/Ca 有利于白云岩的沉积。研究区 MgO 含量随水体加深逐渐减少, 以及 CaO 在潮间带含量激增, 主要原因是雾迷山组后期 (雾七段) 发育较多的灰岩。MnO 与 FeO 也成正相关关系, 对于 Mn 和 Fe 的赋存规律还不确定, 有人认为 Mn 和 Fe 多赋存于白云石晶体中^[13], 因为 Mn²⁺ 和 Fe²⁺ 容易进入离子半径相近的 Mg²⁺ 的位置。还有学者强调 E_h 和 pH 对 Mn 和 Fe 分布的控制作用, 主要表现为陆地上淋滤出的 Mn 和 Fe 在近岸地带遇到碱性海水会马上沉淀下来^[14]。此外, 含 H₂S 的还原环境也有利于 Mn 和 Fe 的沉淀^[15]。③F2 正向反映的是 Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅, TiO₂ 及 K₂O 等陆源物质的沉积作用, 进一步说明了本剖面碳酸盐岩受浑水沉积的影响。

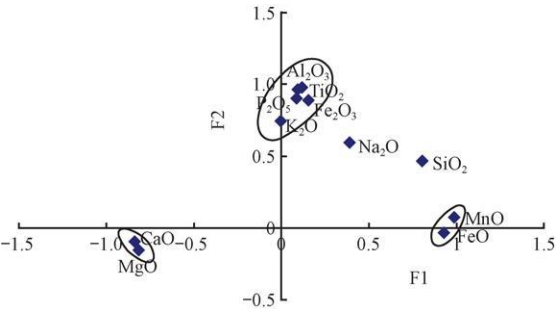


图 6 燕山地区冀北拗陷雾迷山组氧化物含量
R型因子载荷图
Fig 6 R-factor loading graph of oxide content in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

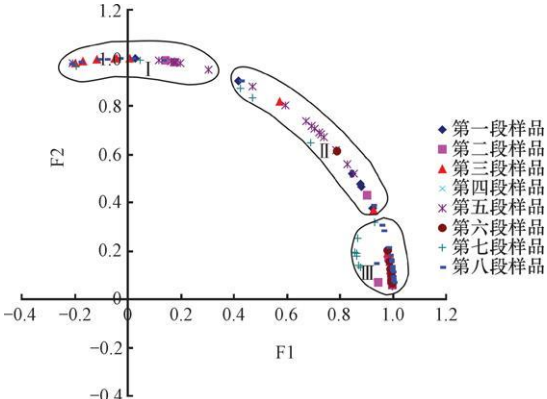


图 7 燕山地区冀北拗陷雾迷山组氧化物含量
Q型因子载荷图
Fig 7 Q-factor loading graph of oxide content in the Wumishan Formation of the Jibei Depression in Yanshan region

2) Q 型因子分析

据 147 块样品的 Q 型因子分析结果,作出 F1 和 F2 的因子载荷图(图 7)。从图中可以看出,147 块样品在 F1 和 F2 的因子平面图上明显的分为 3 个区域。区域 I 大部分为第一段、第二段和第三段的样品,区域 II 大部分为第五段的样品,区域 III 则大部分为第六段、第七段和第八段的样品。样品这种明显的分区性绝非偶然,是沉积物化学元素组合的不同表现。虽然成岩后生变化可以改变元素的原组合关系,但所取样品按不同的层位分区,说明本剖面的原生沉积地球化学信息部分得以保留,也从岩石地球化学角度证明了本剖面地层时代划分的准确性。

3.3 其他元素分析

3.3.1 Sr 含量与 Sr/Ba 和 Sr/Ca 含量比

Sr 是碳酸盐岩中重要的微量元素之一,许多学者把它作为碳酸盐沉积和成岩作用过程中的重要元素,认为从浅水碳酸盐岩到深水碳酸盐岩, Sr 的绝对含量有增加的趋势^[16-22]。根据 Sr/Ba 的地球化学性能,由淡水进入海水时,淡水中的 Ba^{2+} 与海水中的 SO_4^{2-} 结合生成 $BaSO_4$ 沉淀;而 $CaSO_4$ 溶解度较大,可以继续迁移到远海,也就是说随着远离海岸, Sr 的相对含量依次升高。J Veizer 曾多次指出, Sr 是沉积相分析的有力工具,认为碳酸盐岩的 Sr/Ca 是沉积环境的函数。由于研究区发育在水体较浅的潮坪位置, Sr 含量总体上相对深水区较低,而且 Sr 与 Ca 同时受到陆源浑水泥质含量的影响,因此采用 10 000 Sr/Ca 和 Sr/Ba 进行研究,其对应关系见图 8。由图可看出, Sr/Ba 值均大于 1,表明研究区为明显的海相沉积环境。Sr 对沉积环境的反映十分敏感,从潮上带向水体加深的潮下带方向明显递增, 10 000 Sr/Ca 和 Sr/Ba 值依次升高,这与 Veizer 的结论是基本一致的。三者与沉积环境密切相关,用其变化可以来划分沉积相。

3.3.2 Mn 含量与 Mn/Fe 含量比

Mn 含量(除局限海湾环境外)是从浅水区至深水依次增高。本区 MnO 的质量分数,从潮上带的 0.019%,上升至潮间带的 0.023%,到潮下带增至 0.036%,与上述规律相吻合。据表 5 数据计算得出, Mn/Fe 值在浅水区的潮上带为 0.133 到

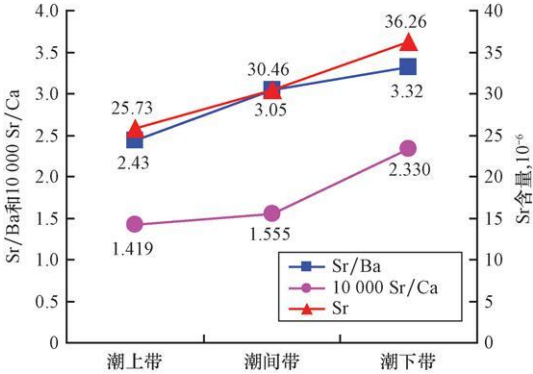


图 8 燕山地区冀北坳陷雾迷山组不同相带 Sr 含量与 Sr/Ba 和 Sr/Ca 含量比
Fig 8 Sr content and the content ratios of Sr/Ba and Sr/Ca in different facies belts of the Wumishan Formation in the Jibeid Depression of Yanshan region

水稍深的潮间带升至 0.147,到水体较深的潮下带为 0.191,也呈增大的趋势。这种变化与锰和铁的地球化学性质有关,铁极易氧化成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 在 pH 值大于 3 时就形成 $Fe(OH)_3$ 沉淀,被搬运到海洋中的铁大多以胶体溶液呈悬浮状态出现,所以铁的化合物易在浅海地区发生聚集。而锰能在海水中以 Mn^{2+} 比较稳定的存在,因此锰能在水体较深的地方出现,甚至聚集在大洋的洋底^[23]。所以,不仅可以用 Mn 含量的变化来判断海相沉积环境,而且可用 Mn 及 Mn/Fe 值划分沉积相。

3.3.3 B 含量

沉积物中的 B 除来自陆源碎屑(电气石)外,主要从海水中吸取。现代海水中 B 含量约为 4.7×10^{-6} ,而淡水中一般不含 B。沉积物中 B 的含量与水体中 B 的含量有关,因而也和水体的盐度存在着函数关系,这表明 B 含量可以作为古沉积环境指标的依据。一般认为,湖相沉积物中 B 含量最低,海相沉积物中约为 100×10^{-6} 或更高,成岩潟湖中含盐粘土 B 含量达 $1\,000 \times 10^{-6}$ ^[24]。据沃克等研究, B 含量大于 400×10^{-6} 为超盐度环境, $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 为正常海相, $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 为半咸水沉积, B 含量小于 200×10^{-6} 为低盐度环境。在各类岩石中 B 含量不等,以泥岩中为最高,因此,泥岩中的 B 含量较能反映古盐度情况^[23]。表 6 中 B 的平均含量均小于 200×10^{-6} ,整体表现为低盐度环境,但由潮上带到潮下带逐渐增高,反映出沉积区为盐度随水深依次升高的环境。

表 7 燕山地区冀北拗陷雾迷山组不同相带
K₂O 和 P₂O₅ 含量

Table 7 Contents of K₂O and P₂O₅ in different facies
belts of the Wumishan Formation in the Jibei Depression

of Yanshan region		
相带	K ₂ O 含量, 10 ⁻²	P ₂ O ₅ 含量, 10 ⁻²
潮上带	0.007~0.040	0.007~0.011
潮间带	0.040~0.100	0.012~0.015
潮下带	>0.100	>0.015

3.314 K₂O 与 P₂O₅ 含量

K 主要赋存在陆源泥质中, 其含量增大表明陆源泥质增多。本区从潮上带至潮下带 K₂O 含量随水体加深而增大, 原因可能是在较高能环境下如潮间带, 受波浪和水流淘洗强烈, 形成柱状、锥状叠层石, 泥质被带走, 反而使潮下带泥质更多; 此外在海解作用下形成的含 K 的自生矿物海绿石, 也会导致较深水环境下 K 含量增多^[25]。P₂O₅ 是海水深度的指示标志, 其含量高低代表了海水深浅的变化, 区内其含量在潮上带最小, 潮下带最大, 原因可能为海相有机物对磷酸盐吸收的结果。不同相带 K₂O、P₂O₅ 的含量变化范围如表 7 所示。根据上述特征, 利用 K₂O、P₂O₅ 含量变化可以划分沉积相。

4 结论

- 1) 冀北拗陷雾迷山组以碳酸盐沉积为主, 该区为低盐度碳酸盐岩潮坪相, 进一步分为潮上带、潮下带、潮间带 3 个亚相和上潮间带、下潮间带、潮下高能带、潮下低能带 4 个微相。
- 2) 区内地球化学特征与沉积环境密切相关, 不同相带的碳酸盐岩其地化特征明显不同, 不论是微量元素 V、Rb、Ba、Be、B 还是氧化物 Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃、FeO、K₂O、Na₂O、MnO、P₂O₅、TiO₂ 等, 由潮上带至潮下带其含量明显增加。
- 3) 通过微量元素和氧化物含量的因子分析表明, 雾迷山组碳酸盐岩受陆源浑水沉积的影响, 也说明了地层沉积连续及野外地层、沉积相划分的准确性。
- 4) 随着水体加深, 从潮上带到潮下带, Sr、K₂O 与 P₂O₅ 含量及 Sr/Ba、10 000Sr/Ca、Mn/Fe 值

均呈增大的趋势, 与沉积环境密切相关, 可以用其变化范围来划分沉积相。

参 考 文 献

[1] 高耀斌, 郝石生, 卢学军, 等. 燕山地区中 2 元古界油苗及其油源研究 [J]. 石油大学学报, 1991, 15(1): 1-7
Gao Yaobin, Hao Shisheng, Lu Xuejun, et al. Study on oil source of the Middle Upper proterozoic layer in Yanshan area [J]. Journal of the University of Petroleum, 1991, 15(1): 1-7.

[2] 郝石生, 高耀斌, 张有成. 华北北部中 2 元古界石油地质学 [M]. 山东 东营: 石油大学出版社, 1990: 54-61.
Hao Shisheng, Gao Yaobin, Zhang Youcheng. Study on petroleum geology of Mesoproterozoic in the north China [M]. Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 1990: 54-61.

[3] 刘宝泉, 梁狄刚, 方杰, 等. 华北地区中上元古界、下古生界碳酸盐岩有机质成熟度与找油远景 [J]. 地球化学, 1986, 6(2): 150-162
Liu Baoquan, Liang Digang, Fang Jie, et al. Organic matter maturity and oil-gas prospect in Middle Upper proterozoic and lower paleozoic carbonate rocks in northern China [J]. Geochemistry, 1986, 6(2): 150-162

[4] 周书欣. 辽西高于庄组和雾迷山组沉积特征及其相分析 [J]. 大庆石油学院学报, 1979, 1(2): 13-26
Zhou Shuxin. Gaoyuzhuang and Wumishan formations sediment characteristics and sedimentary facies analysis in western Liaoning province [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1979, 1(2): 13-26.

[5] 吴梦源. 北京地区雾迷山组碳酸盐岩潮汐沉积模式 [J]. 河北地质学院学报, 1988, 11(4): 37-50.
Wu Mengyuan. A tidal sedimentation model for the carbonate of the Wumishan Formation in Beijing Area [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1988, 11(4): 37-50

[6] 赵澄林, 许元恺, 白光勇, 等. 太行山中北段高于庄组) 雾迷山组的沉积特征及其相分析 [J]. 华东石油学院学报, 1977, 19(3): 118-138.
Zhao Chenglin, Xu Yuankai, Bai Guangyong, et al. Gaoyuzhuang Wumishan Formation sediment characteristics and sedimentary facies analysis in the northern section of Taihang Mountains [J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1977, 19(3): 118-138.

[7] 梅冥相, 杜本明, 周洪瑞, 等. 天津蓟县中元古界雾迷山组复合海平面变化旋回层序的初步研究 [J]. 岩相古地理, 1999, 19(5): 12-22
Mei Mingxiang, Du Benming, Zhou Hongrui, et al. A preliminary study of the cyclic sequences of composite sea level changes in the Mesoproterozoic Wumishan Formation in Jixian, Tianjin [J]. Sedimentary Facies and Paleogeography, 1999, 19(5): 12-22

[8] 李磊, 郭友钊, 徐善法, 等. 冀北雾迷山组岩石密度特征及

- 沉积环境研究 [J]. 物探与化探, 2001, 25(5): 65–68.
- Li Lei, Guo Youzhao, Xu Shanfa, et al. A study on the density features and sedimentary environment of Wumshan Formation in Northern Hebei province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(5): 65–68.
- [9] 兰晓东, 朱炎铭, 冉启贵, 等. 塔东地区天然气地球化学特征及运聚探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 324–329.
- Lan Xiaodong, Zhu Yaming, Ran Qigui, et al. A discussion on the geochemical characteristics and migration and accumulation of natural gas in the eastern Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 324–329.
- [10] 赵澄林, 李儒峰, 周劲松. 华北中新元古界石油地质与沉积学 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 78–105.
- Zhao Chenglin, Li Rufeng, Zhou Jinsong. Sedimentology and petroleum geology of the Mesozoic and Neoproterozoic in North China [M]. Beijing Geological Publishing House, 1997: 78–105.
- [11] 赵震. 蓟县震旦亚界雾迷山组碳酸盐岩沉积 [C]. 天津地质矿产研究所编写组. 北京: 地质出版社, 1982: (1): 111–122.
- Zhao Zhen. On sedimentary carbonate of the Sinian suberathes in Jixian county [C]. M Journal of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources. Beijing Geological Publishing House, 1982: (1): 111–122.
- [12] 余金生, 李裕伟. 地质因子分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1985: 2–10.
- Yu Jinsheng, Li Yuwei. Factor analysis of geology [M]. Beijing Geological Publishing House, 1985: 2–10.
- [13] Parker R. L. Paleoenvironmental synthesis of the deschnhault limestone (lower Trenton) of southeastern Quebec as a model of a ramp [J]. The Green Mountain Geologist, 1986, 13(1): 13–14.
- [14] Krumhein W. C., Carrels R. M. Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials [J]. Journal of Geology, 1952, 60(1): 1–33.
- [15] 邵龙义. 湘中早石炭世沉积学及层序地层学 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1997: 79–96.
- Shao Longyi. Sedimentology and sequence stratigraphy of the lower carboniferous in central Hunan, South China [M]. Beijing China University of Mining and Technology Press, 1997: 79–96.
- [16] 贾振远. 碳酸盐沉积相和沉积环境 [M]. 湖北: 中国地质大学出版社, 1989: 40–43.
- Jia Zhenyuan. Sedimentary facies and environment of carbonate [M]. Hubei China University of Geosciences Press, 1989: 40–43.
- [17] 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 206–207.
- Liu Xiufeng. Laboratory research methods sedimentary [M]. Beijing Geological Publishing House, 1991: 206–207.
- [18] Veizer J., Dömöcs R. Environmental and climatic controlled fractionation of elements in Mesozoic carbonate sequences of the western Canadian [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1973, 43(1): 258–271.
- [19] Veizer J., Weller J. M. Strontium as a tool for facies analysis [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1974, 44(1): 93–115.
- [20] 邵志兵, 吕海涛, 耿锋. 塔里木盆地麦盖提地区石炭系油藏地球化学特征 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 84–90.
- Shao Zhibing, Lü Haitao, Geng Feng. Geochemical characteristics of the Carboniferous oil pools in Maigaiti area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 84–90.
- [21] 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚–麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 91–96.
- Lü Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the early Paleozoic paleo-uplifts in Bachu–Maigaiti area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 91–96.
- [22] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义) 以冀北拗陷长城系高于庄组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 343–349.
- Wang Kaoming, Luo Shunshu. Geochemical characters of carbonates and indicative significance of sedimentary environment: an example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the northern Hebei Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 343–349.
- [23] 郭成贤, 胡明毅. 中扬子台地边缘上震旦统沉积成岩作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 79–83.
- Guo Chengxian, Hu Mingyi. Study on sedimentary diagenesis of the upper Sinian in middle Yangtze platform edge [M]. Beijing Geological Publishing House, 1997: 79–83.
- [24] 冯增昭. 碳酸盐岩沉积环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1965: 10–24.
- Feng Zengzhao. The sedimentary environments of Cambrian carbonate [M]. Beijing Science Press, 1965: 10–24.
- [25] 旷红伟, 刘燕学, 孟祥华, 等. 吉辽地区震旦系碳酸盐岩地球化学特征及其环境意义 [J]. 天然气地球化学, 2005, 16(1): 54–58.
- Kuang Hongwei, Liu Yanxue, Meng Xianghua, et al. The geochemical features and its environmental significance of the Sinian carbonates in the Jilin–Liaoning area [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 54–58.

(编辑 高岩)