doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.02.07

引用格式: 王国强,张凤鸣,王博,等. 苏北燕子埠地区张夏组鲕粒灰岩地球化学特征及成因[J]. 中国地质调查,2023, 10(2): 54-63. (Wang G Q, Zhang F M, Wang B, et al. Geochemical characteristics and genesis of oolitic limestones of Zhangxia Formation in Yanzibu area of Northern Jiangsu Province [J]. Geological Survey of China. 2023. 10(2): 54-63.)

苏北燕子埠地区张夏组鲕粒灰岩地球 化学特征及成因

王国强,张凤鸣,王博,单雨阳,周琦忠,黄友波

(江苏省地质矿产局第五地质大队,江苏徐州 221004)

摘要: 燕子埠地区大规模出露张夏组厚层状鲕粒灰岩,为苏北地区的古海洋环境研究提供了材料。采用野外观 察、镜下鉴定、化学测试等方法,对研究区张夏组下段鲕粒灰岩的岩石学及地球化学特征开展了研究。结果表明: 研究区鲕粒灰岩主要由鲕粒和亮晶方解石胶结物组成; 微量元素与稀土元素分布特征具有一致性,表明张夏组 沉积期海洋环境保持相对稳定; 鲕粒灰岩的地球化学特征受陆源物质混染及成岩作用的影响较弱,可用于古环 境恢复; 综合地球化学和岩石学判别指标,认为研究区张夏组下段鲕粒灰岩形成于炎热干旱、蒸发量大、氧化高 能的陆表海边缘沉积环境。以上研究成果可为苏北地区寒武纪古环境恢复提供重要依据。 关键词: 鲕粒灰岩; 张夏组; 地球化学特征; 沉积环境; 燕子埠地区

中图分类号: P532; P534.4; P595 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 8706(2023)02 - 0054 - 10

0 引言

鲕粒灰岩是一种常见的碳酸盐岩,在我国多个 地区均有分布,其中以华北地区中寒武统张夏组的 鲕粒灰岩最为典型^[1]。鲕粒的形成机制有2种主流 观点,即微生物成因说和机械及化学作用成因 说^[2-9]。Tucker等^[4]提出不能将鲕粒形成完全归为 物理成因; Brehm等^[5]在实验室中利用球状微生物 群落人工合成了鲕粒,认为鲕粒的形成与叠层石类 似,论证了微生物作用机制; Plée等^[6-7]通过野外原 位培养发现在鲕粒形成早期,低镁方解石的沉淀与 光合自养型微生物密切相关; Davies等^[8]在过饱和 碳酸钙水体和动荡的水动力条件下实验合成了似鲕 粒结构,并提出了悬浮、静止与埋藏3个阶段的鲕粒 生长与沉淀无机模型; Duguid等^[9]结合地球化学分 析和扫描电镜观察等手段,发现巴哈马湾现代鲕粒 的形成与微生物活动之间没有必然联系,认为鲕粒 形成于较动荡的水体环境,强调了化学作用的主导 地位。对鲕粒灰岩的研究方法主要有沉积相划分、微 相分析、古生物鉴定、人工培养等^[2-11],地球化学手段 的应用较少。前人研究认为华北地区张夏组的鲕粒灰 岩形成于温暖的浅海环境,但缺少明确的量化依 据^[1-2,10-11]。由于碳酸盐岩中某些特征元素的含量对 沉积环境较为敏感,能够定量指示其古环境特征,因此 被广泛应用于碳酸盐岩沉积相的研究中^[12-14]。

江苏省北部的燕子埠地区发育了较完整的寒武 纪碳酸盐岩 - 碎屑岩沉积序列,并大面积出露张夏 组下段厚层状鲕粒灰岩^[15-16],这为苏北地区寒武纪 海洋的古环境研究提供了重要材料。本文采用野外 观察、镜下微相鉴定、地球化学测试等方法,综合分析 了张夏组鲕粒灰岩的岩石学及地球化学判别指标,探 讨了沉积要素特征,进而提出了鲕粒灰岩的沉积成岩 模式,可为区域地质研究和矿产勘查开发提供参考。

收稿日期: 2021-08-31;修订日期: 2023-03-17。

基金项目: 江苏省地质勘查专项资金项目"江苏省邳州市花山子锆(铪)矿普查(编号: 苏财建[2017]160 号)"、江苏省地质矿产勘查局科 技创新项目"苏北地区灵璧石地质特征及资源潜力研究(编号: 2021KY09)"和江苏省省外、国外矿产资源风险勘查专项资金 项目"江苏省徐州市车辐山地区中深部铁矿普查(编号: 苏地质发[2022]83 号)"联合资助。

第一作者简介:王国强(1990一),男,工程师,主要从事地质矿产勘查工作。Email: 984655276@qq.com。

1 研究区概况

研究区位于苏鲁两省交界处,属华北陆块区东 南缘的徐淮陆表海盆地区,地层隶属华北地层大区 一徐淮地层分区一徐宿地层小区[16-17]。研究区地 层为一套寒武系海相碳酸盐岩沉积建造,由北西向 南东方向地层呈由老到新分布(图1)。北部下 寒武统馒头组为一套碳酸盐岩夹紫色泥页岩建 造,由边缘海相向陆表海相过渡;中寒武统毛庄 组自下而上为生物碎屑灰岩和粉砂质页岩: 随 着海侵的持续进行,徐庄组以含海绿石灰岩为界 分为下部的砂质灰岩、粉砂质页岩、粉砂岩,以及 上部的中厚层状粉砂岩夹页岩、砂屑灰岩。张夏 组沉积期海侵范围最大,下段形成厚层状鲕粒灰 岩,上段以豹皮状灰岩、鲕粒灰岩为主,夹薄板状 灰岩、生物碎屑灰岩。张夏组沉积末期海退开 始,上寒武统发育一套潮坪相沉积,研究区南部 出露崮山组,岩性为泥质条带状灰岩夹竹叶状灰 岩、鲕粒灰岩。各地层单元之间均为整合接触。



 下寒武统馒头组上段; 2. 中寒武统毛庄组; 3. 中寒武统徐庄 组; 4. 中寒武统张夏组下段; 5. 中寒武统张夏组上段; 6. 上寒 武统崮山组; 7. 第四系; 8. 整合地质界线; 9. 不整合地质界线;
 10. 逆断层及编号; 11. 平移逆断层; 12. 产状; 13. 钻孔; 14. 省 界; 15. 山峰及海拔

图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

研究区处于徐宿弧形断褶带北端,燕子埠向

斜的北西翼,总体表现为缓倾斜的 NE 向单斜构造,倾向南东,倾角 5°~15°。区内发育 NE 向及近 SN 向 2 组断裂,对地层展布具有一定的影响。

2 岩石学特征

根据野外地质调查结果,张夏组下段分布于 花山子山一燕北小学以南(图1),向西南延伸至 鲁山北部,钻孔控制厚度为26.17 m(图2)。受 F₆断层右行错动影响,断层以西地层呈 NE 向, 倾向130°~150°,倾角8°~12°;断层以东地层 呈 NEE 向,倾向160°~180°,倾角15°~22°。 岩性以深灰色厚层状亮晶鲕粒灰岩为主,夹豆粒 灰岩、核形石灰岩、块状灰岩,与上覆张夏组上段 豹皮状灰岩和下伏徐庄组粉砂岩呈整合接触。

	地层单元		厚度/ m	地层柱状图	岩性描述
	第四	系	3.58		棕褐色亚黏土
		张夏组上段	14.16		灰色厚层状泥晶豹皮状灰 岩、深灰色厚层状亮晶鲕 粒灰岩夹灰色泥晶薄板状 灰岩
	中寒武统	张夏组下段	26.17		以深灰色厚层状亮晶鲕粒 灰岩为主,夹深灰色中厚 层状豆粒灰岩、厚层状核 形石灰岩、块状灰岩
		徐庄组	30.58		以灰色中厚层状石英长石粉 砂岩为主,夹青灰色薄层状 页岩、深灰色中厚层状含鲕 粒砂屑灰岩、厚层状含海绿 石生物碎屑灰岩
[1	0 0 0	2	
		6	i i i		8

 亚黏土; 2. 鲕粒灰岩; 3. 豹皮状灰岩; 4. 核形石灰岩; 5. 块状 灰岩; 6. 薄板状灰岩; 7. 砂屑灰岩; 8. 含海绿石生物碎屑灰岩;
 9. 粉砂岩; 10. 页岩

图 2 研究区钻孔柱状图

Fig. 2 Borehole column diagram of the study area

通过观察钻孔岩心发现,张夏组下段的鲕粒 粒径自下而上呈增大的趋势(表1,图3(a)),分 选性变差,上部可见大量粒径>2 mm的巨鲕(豆 粒,图3(b))^[11],24.55~24.96 m 处夹0.41 m 厚的 核形石灰岩(图3(c)),核形石粒径一般5~12 mm, 个别可达15 mm(图2)。

表1 研究区鲕粒灰岩不同深度鲕粒粒径统计

Tab.1 Statistics of oolitic particle sizes at different depths of oolitic limestone in the study area

孔深/m	厚度/m	占比/%	鲕粒粒径/mm
17.74 ~19.66	1.92	7.34	1.0~1.5
19.66 ~22.34	2.68	10.24	1.5~2.0
22.34 ~24.55	2.21	8.44	1.5~3.0
24.55~24.96	0.41	1.57	5.0~15.0
24.96~31.78	6.82	26.06	1.5~2.0
31.78 ~ 36.23	4.45	17.00	1.0~1.5
36.23~43.91	7.68	29.35	0.5~1.0

镜下鉴定结果显示岩石由鲕粒(80%~85%) 和胶结物(20%~15%)组成(图3(d))。鲕粒呈圆 形、椭圆状,主要为同心鲕(图3(e))和同心-放射 鲕,粒径0.3~1.5 mm,分布杂乱,核心偶见生物碎 屑,由于压溶作用大部分鲕粒缺失或变形呈啄形、 链状、条带状产出,组成矿物为方解石。胶结物的 组成矿物为亮晶方解石,它形粒状,粒径一般 0.05~0.35 mm, 少数 0.02~0.05 mm, 主要呈栉壳 状分布于鲕粒边缘,少数呈填隙状分布。岩石受成 岩后白云石化作用影响,白云石呈半自形--菱形, 粒径一般 0.03~0.1 mm, 少数 0.1~0.3 mm, 不均 匀分布并交代岩石(图3(f))。



(d) 亮晶鲕粒灰岩

500 µm (e) 同心鲕

研究区灰岩手标本及镜下照片

(f) 白云岩化鲕粒

500 µm

Hand specimens and microscopic photos of limestone in the study area Fig. 3

地球化学特征 3

地球化学测试样品采自不同深度的钻孔岩 心,基本覆盖了张夏组下段的鲕粒灰岩。测试工

000 µn

图 3

作由河北省区域地质调查研究所实验室完成,主 量元素测试采用 Axios^{max} X 射线荧光光谱仪,测试 误差 < 2%, 微量元素及稀土元素测试采用电感耦 合等离子质谱仪(ICP-MS),分析误差 < 5%。测 试结果见表2。

方解石

表2 研究区鲕粒灰岩主量元素、微量元素与稀土元素含量及特征参数

Tab.2 Content and characteristic parameters of major element, trace element and REE of oolitic limestone in

the study area

主量元素含量/% 微量元素含量/10-6 样号 SiO₂ Al_2O_3 Fe₂O₃ CaO MgO Rb Ba Th U Та NbPb \mathbf{Sr} H1 51.47 2.65 1.04 0.40 0.69 15.10 29.76 16.75 2.30 0.57 5.14 19.35 443.87 1.04 0.50 14.36 22.20 H2 51.60 2.75 0.37 28.72 3.45 0.38 5.41 30.85 461.43

绩表

	主量元素含量/%					微量元素含量/10 ⁻⁶						
样号	CaO	MgO	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	Rb	Ba	Th	U	Ta Nb	Pb	Sr
H3	52.58	2.41	1.49	0.46	0.64	7.85	22.45	11.93	1.56 (). 14 2. 85	14.34	465.28
H4	53.30	1.31	0.91	0.18	0.15	7.91	17.91	9.41	2.10 0	0.07 2.48	13.59	519.29
Н5	52.70	1.72	1.53	0.51	0.33	17.30	35.44	25.52	4.63 (). 61 9. 81	21.21	472.09
平均	52.33	2.17	1.20	0.38	0.46	12.50	26.86	17.16	2.81 (). 35 5. 14	19.87	472.39
世日	微量元素含量/10-6								稀土元素含量/10-6			
件亏	Zr	Hf	Y	V	Ni	Cr	Cu	Zn	La	Ce Pr	Nd	Sm
H1	44.33	0.83	4.49	19.13	20.97	24.14	21.49	14.62	5.21 8	3.90 0.72	2.81	0.56
H2	51.22	0.94	3.57	15.74	18.75	25.42	38.94	11.40	5.81 10	0.70 0.95	3.60	0.65
H3	47.24	0.91	3.51	9.30	19.86	14.08	36.10	7.74	5.27 9	9.28 0.82	3.15	0.58
H4	41.71	0.80	3.89	8.59	21.71	12.07	15.53	8.22	5.82 11	0.98	4.04	0.74
H5	55.68	0.86	3.62	16.58	19.11	32.83	27.71	8.45	4.91 8	3.94 0.76	2.94	0.58
平均	48.03	0.87	3.81	13.87	20.08	21.71	27.95	10.09	5.40 9	0.76 0.85	3.31	0.62
母日	稀土元素含量/10-6											
件与	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tn	n Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE
H1	0.10	0.57	0.10	0.59	0.14	0.40	0.0	9 0.41	0.06	20.66	18.29	2.37
H2	0.11	0.62	0.10	0.51	0.10	0.29	0.0	7 0.26	0.04	23.81	21.82	1.99
H3	0.11	0.56	0.09	0.48	0.10	0.27	0.0	7 0.26	0.04	21.07	19.20	1.87
H4	0.12	0.68	0.11	0.56	0.11	0.35	0.0	7 0.29	0.04	24.92	22.71	2.21
H5	0.10	0.54	0.08	0.44	0.09	0.23	0.0	6 0.23	0.03	19.95	18.25	1.70
平均	0.11	0.59	0.10	0.52	0.11	0.31	0.0	7 0.29	0.04	22.08	20.05	2.03
						5	特征参数					
样号	MgO/	MgO/	Th/II	S. /P.	• S,	·/Cu	V/	V/C.	LREE/	(La/Yh),	δEu	δCe
	CaO	Al_2O_3	111/ U	517 D	a Si	(V + Ni)	v/ ci	HREE	(10/15) _N		
H1	0.05	6.63	7.28	14.9	1 20). 65	0.48	0.79	7.73	8.52	0.59	1.10
H2	0.05	7.43	6.44	16.0	7 11	1.85	0.46	0.62	10.98	14.90	0.58	1.09
H3	0.05	5.24	7.66	20.7	2 12	2.89	0.32	0.66	10.28	13.55	0.61	1.06
H4	0.02	7.28	4.48	28.9	9 33	3.45	0.28	0.71	10.26	13.74	0.56	1.09
Н5	0.03	3.37	5.51	13.3	2 17	7.03	0.46	0.51	10.71	14.50	0.58	1.10
平均	0.04	5.65	6.11	17.5	9 16	5.90	0.41	0.64	9.89	12.55	0.58	1.09

3.1 主量元素特征

研究区鲕粒灰岩的 MgO/CaO 值为 0.02 ~ 0.05, MgO 与 CaO 之间呈强负相关(图 4),反映鲕粒灰岩 中的白云石可能为后期交代成因^[18]。在灰岩的沉积 过程中,陆源组分会抑制方解石的沉淀,从而造成 SiO₂与 CaO 呈一定程度的负相关^[19]。研究区样品 中 SiO₂与 CaO 相关性弱(图 4),表明样品成岩过程 中受陆源碎屑的影响较小。



图 4 研究区鲕粒灰岩 CaO – MgO 图解(左)和 CaO – SiO₂ 图解(右) Fig. 4 CaO – MgO (left) and CaO – SiO₂ (right) diagrams of oolitic limestone in the study area

3.2 微量元素特征

在微量元素上地壳标准化蛛网图(图5)^[20]上, 研究区样品表现出较好的一致性,元素变化趋势基 本一致,大体呈"三峰三谷"分布,表明整个张夏组 沉积期海洋环境相对稳定,海水中元素组成未发生 较大变化。与上地壳丰度相比,本区样品具有明显的Th、Pb、Sr、Cu富集及Rb、Ba、Ta、Nb、V、Cr、Zn亏损的特征,且相对富集的元素均高于或接近上地壳平均值,亏损元素明显低于上地壳中均值,指示鲕粒灰岩较少受到陆源物质的混染。



图 5 研究区鲕粒灰岩微量元素上地壳标准化蛛网图(左)和北美页岩稀土元素配分图(右) Fig. 5 Upper crust normalized spider diagram of trace elements (left) and North America shale narmalized REE partition diagram(right) in oolitic limestones in the study area

3.3 稀土元素特征

研究区鲕粒灰岩的 Σ REE 平均值为 22.08 × 10⁻⁶,与海相碳酸盐岩平均值(22.24 × 10⁻⁶)相 当^[21],远低于北美页岩平均值(173.21 × 10⁻⁶)^[22], 指示本区鲕粒灰岩沉积时受陆源物质影响弱。样 品的 LREE/HREE 平均值为 9.89,(La/Yb)_N 平均 值为12.55,反映了样品轻稀土相对重稀土富集的 分异特征。在北美页岩标准化稀土元素配分图 (图5)^[22]中,5件样品的配分模式基本一致,整体 呈轻稀土略富集、重稀土略亏损的特征。样品均表 现出明显的 Eu 负异常,La、Tm 正异常。

4 沉积环境判别

4.1 元素来源

用地球化学数据判别沉积岩古环境的前提是 岩石的元素组成基本不受其他物源(如陆源碎屑、 热液流体等)混染及后期成岩作用的影响。研究区 无岩浆及热液流体活动痕迹,鲕粒灰岩中 SiO₂ 含 量低,且与 CaO 相关性弱,表明鲕粒灰岩受陆源影 响弱。

沉积物中的 Zr 通常来自于陆源碎屑,因此陆 源碎屑的混入常会造成碳酸盐岩中 Zr 与 REE 的正 相关^[23]。研究区样品的 Zr 含量平均值为 48.03 × 10⁻⁶,远低于上地壳(190 × 10⁻⁶)^[20]和北美页岩平 均值(210 × 10⁻⁶)^[22]。样品中 Zr 含量与 \sum REE、 δ Ce 的相关性较弱,反映其稀土元素组成基本来源 于海水,未受陆源碎屑混染的影响(图6(a),(b))。

成岩作用常引起沉积岩中 δ Ce的改变,并导致 δ Ce和 δ Eu呈正相关^[24]。研究区样品的 δ Ce和 δ Eu均不存在明显的相关关系(图6(c)),说明样 品的稀土元素组成不受后期成岩作用的影响。一 般海相灰岩的 δ Eu表现为明显的负异常,而热液活 动会导致海水温度升高, δ Eu呈正异常^[19]。样品 δ Eu为0.56~0.61,与海相碳酸盐岩平均值(0.50) 接近,低于现代海水平均值(1.00),表明样品未受 热液活动影响。

由于Y和Ho的离子半径接近,因此在陆地沉积环境中一般不发生明显的分异,Y/Ho值通常为27。海水中Y和Ho往往发生分异,Y/Ho值可达57~80,因此海相碳酸盐岩的Y/Ho值通常高于碎屑岩^[20,25]。研究区样品的Y/Ho值为33.14~ 42.21,平均值35.66,介于海相碳酸盐岩平均值(44)^[26]和北美页岩平均值(26)^[21]之间。样品的Y/Ho值与Y/Dy值具有显著的线性关系,*R*²达到0.90(图6(d)),也证实了本区鲕粒灰岩中稀土元 素没有受到其他物质混染^[19]。以上证据表明,研 究区鲕粒灰岩的元素组成受陆源物质混染及后期 成岩作用的影响较小,基本能够反映古海水的元素 特征,可用于古沉积环境的判别。





4.2 地球化学指标

4.2.1 古盐度

沉积岩中镁铝含量比 m 是古沉积环境判别的 一项重要指标,镁铝含量比 m = 100 × MgO/Al₂O₃。 在淡水沉积环境 m <1;海陆过渡环境1 < m <10;海 水沉积环境(水体盐度 > 30%)100 < m < 500;陆表 海或泻湖碳酸盐沉积环境m > 500^[27]。研究区鲕粒 灰岩 m 值为 523.91 ~ 743.24,指示了陆表海沉积 环境。

与 Sr 相比, Ba 的化合物溶解度更低, Sr 的迁移 能力更高, 故海相沉积一般更富集 Sr, 在淡水沉积 物中 Sr/Ba <1, 海相沉积物中 Sr/Ba >1^[28]。研究 区鲕粒灰岩 Sr/Ba 值为 13.32~28.99, 指示了典型 的海相沉积环境。

4.2.2 氧化还原条件

沉积环境的氧化还原条件控制了 V、U、Cr、Ni

等敏感微量元素在沉积物中的富集程度。V在还 原条件下易于富集,Cr、Ni 在氧化条件下易于富集, 因此常用 V/Cr、V/(V + Ni)等指标反映水体的氧 化还原环境^[12]。V/Cr < 2 指示氧化环境, V/Cr > 2 指示贫氧--缺氧环境^[29],研究区鲕粒灰岩的 V/Cr 值为0.51~0.79,说明鲕粒灰岩形成于氧化环境。 根据 V/(V+Ni) 值可将水体环境划分为4种类型, 即氧化环境(<0.45)、贫氧环境(0.45~0.60)、缺 氧环境(0.60~0.85)及硫化环境(>0.85)^[29]。样 品的 V/(V+Ni) 值为 0.28~0.48,反映了氧化环 境。Th/U 值在缺氧环境中为0~2,氧化环境中可 到达8^[13]。研究区鲕粒灰岩中的Th明显富集,Th/ U 值为 4.48~7.66,指示张夏组沉积期间为富氧的 沉积环境。氧化环境中 Ce 常以难溶的 +4 价离子 存在,因此 δ Ce在海水中呈负异常,而在沉积物中 呈正异常或无明显异常;缺氧环境中 Ce 以+3 价

离子释放到水体中,造成海水中 δCe 呈正异常,而 在沉积物中呈负异常^[30]。由于海水底层水体的溶 解氧浓度受深度控制,因此在边缘海、陆表海及被 陆地封闭的海水环境中 Ce 浓度基本正常,而在开 阔海水环境中 Ce 严重亏损^[31]。研究区样品中 δCe 为1.06~1.10,呈弱正异常,表明沉积环境为氧化 的陆表海环境。

4.2.3 古气候

在潮湿气候条件下,沉积岩中 Fe、Al、V、Ba、Zn 等元素含量较高,在干燥气候条件下由于水分的蒸 发,水介质的碱性增强,Na、Ca、Mg、Cu、Sr、Mn等元 素被大量析出沉积在水底,含量相对增高^[12]。研 究区相对富集 Ca、Mg、Cu、Sr、Mn,亏损 Fe、Al、V、 Ba、Zn,表明研究区鲕粒灰岩沉积时期古气候条件 相对干燥、蒸发较强、海水盐度较高。通常 Sr/Cu 值为1~10 指示温湿气候,大于 10 指示干热气 候^[28]。研究区样品的 Sr/Cu 值为11.85~33.45,反 映鲕粒灰岩形成于干热气候条件下。

综上所述,研究区张夏组下段鲕粒灰岩形成于 干热、富氧的高盐度陆表海沉积环境。

4.3 岩石学指标

自然界中沉积岩的元素组成受到多种因素综合影响,沉积环境特征判别需要多种指标相互印证^[14]。鲕粒的微结构、矿物组成、粒度等特征是沉积环境演化的产物,是沉积环境判别的重要依据。

一般认为鲕粒的形成需要满足以下条件:① 具有核心;②有序更新并频繁释放 CO₂,钙碳酸盐 超饱和的海水;③释放 CO₂的动荡环境^[2-3]。研 究区鲕粒灰岩中鲕粒含量高达 80%,表明其长期处 于高温、蒸发量大且水动力较强的浅海环境。

研究表明,亮晶鲕粒灰岩形成于正常浪基面之 上的高能环境,泥晶鲕粒灰岩形成于正常浪基面之 下的低能环境^[1]。研究区鲕粒间胶结物以亮晶方 解石为主,晶粒较大,纯度较高,指示高能浅海的沉 积环境。此外,放射鲕主要形成于低能环境,同心 鲕或同心 - 放射鲕主要形成于高能环境。研究区 鲕粒多为同心鲕和同心 - 放射鲕,同心纹层平滑, 包壳层总厚度一般大于核心,颗粒间局部发育鲕粒 内碎屑也反映了高能动荡环境^[15]。研究区鲕粒具 有较明显的粒序层理,自下而上粒径逐渐变大,形 态多样性增加,分选性相对变差,特别是鲕粒滩上 部核形石与豆粒杂乱分布,相互之间界线不明显, 反映了张夏组沉积期间从间歇高能环境向高能动 荡环境演化的过程^[32]。

5 沉积成岩模式

徐淮地区在寒武纪处于海侵活动期,形成了开 阔的陆表海碳酸盐台地,发育了一套典型的潮坪 相一 局限台地相一台地浅滩相序列的碳酸盐岩 -碎屑岩沉积建造(图7)^[17,33]。张夏组沉积时期海 侵范围达到最大,海平面上升速率减慢,此时苏北 地区处于碳酸盐台地边缘,远离海岸线,受陆源物 质影响弱,海水清洁透光。台地边缘多为浅滩地 貌,目处于浪基面之上的高能带,潮汐作用较强,海 水起伏、动荡。加之气候干热,海水蒸发较强,海水 中的 CO, 不断逸出, CaCO, 趋于饱和而形成晶粒沉 积。此外,该区域海水中溶解氧浓度较高,生物较 为繁盛,藻类的光合作用从海水中吸收了大量 CO,,进一步加大了钙碳酸盐过饱和度。在海水悬 流机械作用和微生物活动的共同影响下,过饱和的 CaCO₃围绕悬浮的核心(生物骨骼颗粒、矿物颗粒 等)沉积,形成同心包壳层,之后成长为鲕粒^[2-3]。 在浪基面以下的低能带形成放射鲕,向上逐渐过渡 为同心 - 放射鲕和同心鲕,鲕粒直径逐渐增大,在 台地边缘堆积形成较稳定的鲕粒滩。鲕粒间的泥 质被海水带走,再被亮晶方解石充填、胶结,经过深 埋、压实,最终形成鲕粒灰岩。



1. 同心鲕; 2. 放射性鲕; 3. 同心 - 放射性鲕; 4. 砾; 5. 砂; 6. 泥 质; 7. 碳酸盐矿物

图 7 苏北地区寒武纪碳酸盐岩 – 碎屑岩沉积模式

Fig. 7 Cambrian carbonate – clastic sedimentary model in northern Jiangsu Province

6 结论

(1) 苏北燕子埠地区中寒武统张夏组下段岩性 以深灰色厚层状亮晶鲕粒灰岩为主,夹豆粒灰岩与 核形石灰岩。鲕粒灰岩组成矿物主要为方解石, CaO 含量超过 50%, 微量元素 Pb、Sr、Mn 强烈富 集, Rb、Ba、Ta、Nb、V、Cr、Zn 等亏损, 与海相碳酸盐 岩相似, 反映受陆源物质影响弱。微量元素及稀土 元素分布特征具有一致性, 表明张夏组沉积期海洋 环境保持了相对稳定。

(2)研究区张夏组下段鲕粒灰岩的元素组成受 陆源物质混染及后期成岩作用的影响较弱。鲕粒 灰岩的 MgO/Al₂O₃ 值反映了陆表海沉积环境,Sr/ Ba 值指示典型的海相沉积; Ca、Mg、Cu、Sr、Mn 相 对富集,Fe、Al、V、Ba、Zn 亏埙,且 Sr/Cu > 10 反映 研究区为蒸发作用较强的干热古气候条件; V/Cr、 V/(V+Ni)、Th/U、δCe 等指标则指示了氧化的沉 积环境。

(3) 鲕粒灰岩中鲕粒含量高达 80%, 多为同心 鲕、同心 - 放射鲕, 胶结物为亮晶方解石, 纵向上具 有明显的粒序层理, 反映鲕粒灰岩形成于水动力较 强的高能浅海环境。根据地球化学与岩石学指标, 综合判别燕子埠地区张夏组下段鲕粒灰岩的沉积 环境为炎热干旱、蒸发量大的氧化高能陆表海边缘 相沉积环境。

致谢:本研究野外考察及采样工作得到了江苏省地质调查研究院厉建华教授级高级工程师的 悉心指导,在此致以诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1] 狄明信,管守锐,黄醒汉.华北地区中寒武世张夏期沉积相及 古地理[J].华东石油学院学报,1986,10(1):1-14.
 Di M X,Guan S R,Huang X H. The sedimentary facies and palaeography of middle Carmbrian Previod Zhang Xia Epoch in North China[J].J East China Pet Inst,1986,10(1):1-14.
- [2] 梅冥相. 鲕粒成因研究的新进展[J]. 沉积学报,2012,30(1): 20-32.

Mei M X. Brief introduction on new advances on the origin of ooids[J]. Acta Sedimentol Sin,2012,30(1):20-32.

- [3] Simone L. Ooids: A review [J]. Earth Sci Rev, 1980, 16:319 -355.
- [4] Tucker M E, Wright V P. Carbonate Sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Science, 1990.

- [5] Brehm U, Krumbein W E, Palinska K A. Biomicrospheres generate ooids in the laboratory[J]. Geomicrobiol J, 2006, 23 (7):545 – 550.
- [6] Plée K, Ariztegui D, Martini R, et al. Unravelling the microbial role in ooid formation – results of an in situ experiment in modern freshwater Lake Geneva in Switzerland [J]. Geobiology, 2008, 6(4):341-350.
- [7] Plée K, Pacton M, Ariztegui D. Discriminating the role of photosynthetic and heterotrophic microbes triggering low – Mg calcite precipitation in freshwater biofilms (Lake Geneva, Switzerland) [J]. Geomicrobiol J, 2010, 27 (5):391 – 399.
- [8] Davies P J, Bubela B, Ferguson J. The formation of ooids[J]. Sedimentology, 1978, 25(5):703-730.
- [9] Duguid S M A,Kyser T K,James N P,et al. Microbes and ooids[J]. J Sediment Res,2010,80(3):236-251.
- [10] 吕钊炜,张宁,夏文臣.山东省长清县中寒武统张夏组的微相 组分、微相类型及沉积相分析[J].地质科技情报,2009, 28(5):47-52.
 Lv Z W,Zhang N,Xia W C. Types and composition of carbonate microfacies and analysis on sedimentary facies of middle Cambrian Zhangxia Formation in Changqing, Shandong Province [J]. Geol Sci Technol Inf,2009,28(5):47-52.
- [11] 代明月,齐永安,陈尧,等. 豫西渑池地区寒武系第三统张夏组的巨鲕及其成因[J]. 古地理学报,2014,16(5):726-734.
 Dai M Y, Qi Y A, Chen Y, et al. Giant ooids and their genetic analysis from the Zhangxia Formation of Cambrian Series 3 in Mianchi area, western Henan Province [J]. J Palaeogeogr, 2014, 16(5):726-734.
- [12] 熊小辉,肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011,39(3):405-414.
 Xiong X H,Xiao J F. Geochemical indicators of sedimentary environments - a summary[J]. Earth Environ, 2011, 39(3):405 - 414.
- [13] 解兴伟,袁华茂,宋金明,等.海洋沉积物中氧化还原敏感元素对水体环境缺氧状况的指示作用[J].地质论评,2019,65(3):671-688.
 Xie X W, Yuan H M, Song J M, et al. Indication of redox sensitive

elements in marine sediments on anoxic condition of vater environment[J]. Geol Rev, 2019, 65(3):671 – 688.

- [14] 陈波,程鑫,谈笑哲,等. 元素地球化学分析法在沉积环境判别中的应用——以冷湖地区上干柴沟组为例[J]. 西安石油 大学学报:自然科学版,2019,34(2):31-38.
 Chen B, Cheng X, Tan X Z, et al. Application of elemental geochemical analysis in determination of sedimentary environment: A case study of Shangganchaigou Formation in Lenghu region[J]. J Xi'an Shiyou Univ: Nat Sci Ed,2019,34(2):31-38.
- [15] 金瞰昆. 江苏徐州大北望寒武系鲕粒及鲕粒灰岩特征[J]. 岩相古地理,1998,18(5):21-27.
 Jin K K. The Cambrian ooides and oolitic limestones in the Dabeiwang section in Xuzhou, Jiangsu [J]. Sediment Facies Palaeo-

geogr, 1998, 18(5):21-27.

[16] 冯学知. 江苏邳州花山子古铅砂矿地质特征及找矿方向[J].
 华东地质,2020,41(3):256-264.

Feng X Z. Geological characteristics and prospecting direction of the Huashanzi ancient zircon placer in Pizhou, Jiangsu Province [J]. East China Geol, 2020, 41(3):256 – 264.

[17] 王琳. 徐州地区早古生代层序地层和沉积相研究[J]. 西部探 矿工程,2009,21(10):142-144.

Wang L. A Study on sequence stratigraphy and sedimentary facies of Early Paleozoic in Xuzhou area[J]. West – China Explor Eng, 2009,21(10):142 – 144.

[18] 吴灿灿,陈松,李俊,等.皖北宿州地区寒武系豹皮灰岩地球 化学特征及其地质意义[J].地质与勘探,2018,54(1):90-101.

Wu C C, Chen S, Li J, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian leopard limestone in the Suzhou Area, Northern Anhui Province and its geological implications [J]. Geol Explor, 2018, 54(1):90-101.

- [19] 陈松,傅雪海,桂和荣,等. 皖北新元古界望山组灰岩微量元素地球化学特征[J]. 古地理学报,2012,14(6):813-820.
 Chen S, Fu X H, Gui H R, et al. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui Province [J]. J Palaeogeogr, 2012, 14(6):813-820.
- [20] 陈骏,王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,2004.
 Chen J, Wang H N. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust[J]. GSA Bull, 1961, 72(2): 175 - 192.
- [22] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48 (12): 2469 – 2482.
- [23] Nothdurft L D, Webb G E, Kamber B S. Rare earth element geochemistry of late Devonian reefal carbonates, Canning basin, Western Australia: Confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestone [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2004, 68 (2): 263 – 283.
- [24] 陈炳辉,韦慧晓,黄志国,等.表生地质体的 Ce 异常及其影响因素综述[J].稀土,2007,28(4):79-83.
 Chen B H, Wei H X, Huang Z G, et al. Cerium anomalies in supergene geological bodies and its effecting factors[J]. Chin Rare

Earths, 2007, 28(4): 79 - 83.

- [25] Tanaka K, Miura N, Asahara Y, et al. Rare earth element and strontium isotopic study of seamount – type limestones in Mesozoic accretionary complex of southern Chichibu Terrane, central Japan: Implication for incorporation process of seawater REE into limestones [J]. Geochem J,2003,37(2):163–180.
- [26] Nagarajan R, Madhavaraju J, Armstrong Altrin J S, et al. Geochemistry of neoproterozoic limestones of the Shahabad formation,

Bhima Basin, Karnataka, southern India [J]. Geosci J, 2011, 15(1):9-25.

[27] 刘建清,赵瞻,林家善,等.四川盆地东南缘中上寒武统白云 岩地球化学特征及成因机制[J].中国地质,2014,41(5): 1682-1692.

Liu J Q, Zhao Z, Lin J S, et al. The characteristics and genetic mechanism of middle – upper Cambrian dolomite on the southeast margin of Sichuan Basin [J]. Geol China, 2014, 41(5):1682 – 1692.

- [28] 倪善芹,侯泉林,王安建,等. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特 征及其指示意义——以北京下古生界碳酸盐岩为例[J]. 地 质学报,2010,84(10):1510-1516.
 Ni S Q,Hou Q L, Wang A J, et al. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications: Taking the Lower Palaeozoic carbonate rock of Beijing Area as an example[J]. Acta Geol Sin,2010,84(10):1510-1516.
- [29] 屈李华,周晓颖,赵芳,等. 羌北三叠系康南组灰岩地球化学 特征及对古海水的制约[J]. 新疆地质,2019,37(4):479-487.

Qu L H,Zhou X Y,Zhao F, et al. Geochemical characteristics of limestone from the Triassic Kangnan Formation, north Qiangtang Basin (Tibet) and their constraint on the seawater [J]. Xinjiang Geol,2019,37(4):479-487.

[30] 冯洪真, Erdtmann B D, 王海峰. 上扬子区早古生代全岩 Ce 异常与海平面长缓变化[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(1):
 66-72.

Feng H Z, Erdtmann B D, Wang H F. Early Paleozoic whole – rock Ce anomalies and secular eustatic changes in the Upper Yangtze region[J]. Sci China Ser D: Earth Sci, 2000, 43(3): 328 – 336.

[31] 陈松,桂和荣,孙林华,等.皖北九顶山组灰岩稀土元素地球 化学特征及对古海水的制约[J].中国地质,2011,38(3): 664-672.

Chen S, Gui H R, Sun L H, et al. Geochemical characteristics of REE in limestone of Jiudingshan Formation, northern Anhui Province and their constraint on the seawater[J]. Geol China, 2011, 38(3):664-672.

[32] 郭芪恒,金振奎,史书婷,等. 鲕粒粒度特征及其指示意 义——以北京西山下苇甸寒武系张夏组剖面为例[J]. 沉积 学报,2020,38(4):737-746.

Guo Q H, Jin Z K, Shi S T, et al. Characteristics of ooid size and its environmental significance: A case study from the Cambrian Zhangxia formation at Xiaweidian outcrop, Beijing[J]. Acta Sedimentol Sin, 2020, 38(4):737 – 746.

[33] 栾守亮,陈世悦,马玉新,等. 徐州大北望地区寒武系陆表 海沉积特征及其演化[J]. 特种油气藏,2010,17(6): 50-53.

Luan S L, Chen S Y, Ma Y X, et al. Cambrian epicontinental deposit characteristics and evolution in the Dabeiwang of Xuzhou [J]. Spec Oil Gas Reservoirs,2010,17(6):50 – 53.

Geochemical characteristics and genesis of oolitic limestones of Zhangxia Formation in Yanzibu area of Northern Jiangsu Province

WANG Guoqiang, ZHANG Fengming, WANG Bo, SHAN Yuyang, ZHOU Qizhong, HUANG Youbo (NO. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Jiangsu Xuzhou 221004, China)

Abstract: A wide – range thick – bedded oolitic limestone of Zhangxia Formation is exposed in Yanzibu area, which provides material for the study of paleo – ocean environment in Northern Jiangsu Province. The petrological and geochemical characteristics of oolitic limestone in the Lower Zhangxia Formation were analyzed by field observation, microscopic identification and geochemical test. The results show that the oolitic limestone in the study area is mainly composed of oolitic and bright crystal calcite cements. The distribution characteristics of trace elements and REE are consistent, indicating that the marine environment remained relatively stable during the depositional period of Zhangxia Formation. The geochemical characteristics of oolitic limestone were weakly affected by terrigenous contamination and diagenesis, which can be used for paleoenvironmental restoration. Based on the discriminant indexes of geochemistry and petrology, the authors concluded that oolitic limestone in the Lower Zhangxia Formation in the study area was formed in high – energy epicontinental sedimentary environment, which is hot, dry, evaporative and oxidized, which could provide an important basis for the restoration of Cambrian paleoenvironment in Northern Jiangsu Province.

Keywords: oolitic limestone; Zhangxia Formation; geochemical characteristics; sedimentary environment; Yanzibu area

(责任编辑:魏昊明)