

文章编号:0253-9985(2010)05-0656-08

济阳坳陷古近系深层自生矿物及其与孔隙发育的关系

马国刚^{1,2,3},袁静³

(1. 中国科学院 研究生院,北京 100049; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所,广东 广州 510640;

3. 中国石油大学,山东 东营 257061)

摘要:通过岩石薄片鉴定、粘土矿物X-衍射分析、镜质体反射率和油层物性分析等手段,结合区域油气地质研究成果,对济阳坳陷古近系沙河街组三段—四段深部碎屑岩储层自生矿物演化特征与次生孔隙发育带的关系进行了研究。结果表明,沙三段深部储层埋深3 150~3 600 m处次生孔隙主要与碳酸盐类等酸溶性组分的溶蚀有关,埋深4 250~4 500 m处的次生孔隙主要成因于碱性溶蚀作用。沙四段次生孔隙发育带(埋深3 350~3 600,3 950~4 200和4 500~4 900 m)主要与还原条件下酸溶性矿物的溶蚀有关;埋深5 600~5 700 m处次生孔隙的发育主要与碱溶性组分的溶蚀有关。车镇凹陷埋深4 400~4 700 m处的高岭石低值带、伊利石含量高值带与次生孔隙发育带对应。东营凹陷北带和渤南洼陷深层绿泥石高值带与孔隙带发育有较好的一致性,且与伊利石含量呈消长关系。渤南洼陷在埋深3 500~4 800 m处存在明显的粘土矿物转化异常带,且伊/蒙混层比高值带与绿泥石激增带及次生孔隙带具有较好的一致性。

关键词:自生矿物;孔隙;深层;沙河街组;古近系;济阳坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Relationship between authigenic minerals and porosity in the deep Paleogene formations of the Jiyang Depression

Ma Guogang^{1,2,3} and Yuan Jing²

(1. CAS Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. CAS Graduate School, Beijing 100049, China; 3. China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: Measures as thin-section analysis, clay mineral X-ray diffraction, vitrinite reflection and physical property analysis of oil layer, combined with the results of a regional petroleum geological study, were applied to the research of the relationship between authigenic minerals and secondary porosity of the deep clastic reservoirs in the 3rd and 4th members of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang Depression. The result shows that, for the 3rd member, the secondary porosity of the depth interval within 3 150–3 600 m are related to the dissolution of acid-soluble components such as carbonate minerals, while that within 4 250–4 500 m are formed by dissolution of alkali-soluble components. In contrast, for the 4th member, the secondary porosity of the depth intervals within 3 350–3 600, 3 950–4 200 and 4 500–4 900 m are formed mainly by dissolution of acid-soluble minerals, and those within 5 600–5 700 m are connected with dissolution of alkali-soluble components. For the depth interval of 4 400–4 700 m in Chezhen sag, the low content of kaolinite and high content of ledikite coincide well with high secondary porosity. For the deep layers in northern Dongying sag and Bonan sag, high content of chlorite coincide relatively well with high secondary porosity and present a mutual waning and waxing relationship with the ledikite content. For the depth interval of 3 500–4 800 m in the Bonan sag, there is an abnormal clay mineral transforming zone, and high I/S ratios coincide relatively well with an abrupt increasing of chlorite and high sec-

收稿日期:2010-07-01。

第一作者简介:马国刚(1967—),男,副研究员,石油地质。

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX05009-002);山东省自然科学基金项目(2009ZRA05059)。

ondary porosity.

Keywords: authigenic mineral, porosity, deep layer, Shahejie Formation, Paleogene, Jiyang Depression

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南缘、郯庐大断裂西侧,呈北东走向,东西长 230 km,南北宽 120 km,面积 29 000 km²,是晚白垩世末期在伸展裂陷作用下发育起来的断陷盆地(图 1)。

济阳拗陷第三系沉积厚度逾 6 000 m,主要由湖相成因的砂岩与泥岩组成,油气资源极其丰富。随着勘探程度不断加深,济阳拗陷古近系深层成为新的重要勘探目标,在成岩演化、次生孔隙和物性特征等方面取得了丰硕的研究成果^[1~13],并讨论了深层地层压力形成机制以及异常地层压力与流体性质对深部储层成岩改造的影响与控制作用^[14~17],但较少关注深部储层成岩演化过程中自生矿物与成岩环境的关系。已有的研究表明,济

阳拗陷深层在成岩改造过程中受介质性质的影响,存在酸性和碱性两种成岩模式,形成酸溶性和碱溶性两类次生孔隙^[7];同时,深层的异常高地层压力和特殊的流体运动方式对储层储集空间的发育造成特殊影响^[9]。本次选取济阳拗陷内钻井揭示较多的东营凹陷北部陡坡带(以下简称东营北带)、沾化凹陷渤南洼陷和车镇凹陷埋藏深度大于 3 500m 或层位属沙(沙河街组)四段和孔店组的 40 余口井的岩心,进行了薄片鉴定、扫描电镜观察、镜质体反射率、X-衍射和油层物性等分析测试(表 1),并结合区域油气地质研究成果,针对碎屑岩自生矿物及其成岩环境意义开展了研究工作。

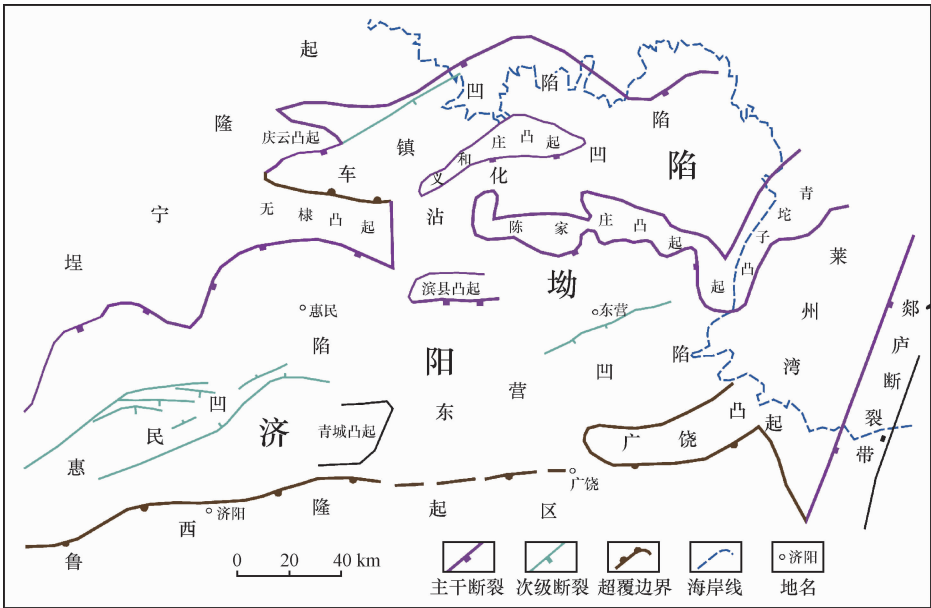


图 1 济阳拗陷构造略图

Fig. 1 Structure outline map of the Jiyang Depression

表 1 济阳拗陷深层各凹陷分析测试工作量统计

Table 1 Statistics of analysis and testing workloads for the deep layers in three sags of the Jiyang Depression						
序号	类目	单位	数量			
			东营凹陷	渤南洼陷	车镇凹陷	总计
1	薄片鉴定	片	478	226	176	870
2	扫描电镜观察	块	107	82	20	209
3	镜质体反射率分析	块	85	62	33	180
4	X-衍射分析	块	157	93	55	305
5	油层物性分析	块	1 725	1 765	515	4 005

1 主要成岩事件与成岩阶段划分

1.1 岩石学特征

研究区沙三一沙四段岩石成分成熟度低,砂岩储层主要为岩屑质长石砂岩,石英/(长石+岩屑)平均值为 0.57。石英平均含量为 36.3%;长石平均含量为 33.4%,以斜长石为主;岩屑含量平均为 29.8%。胜坨地区以沉积岩岩屑为主,渤南洼陷以变质岩和岩浆岩岩屑为主,沉积岩岩屑较少。

沙三段杂基含量以埕南断裂带最低,平均为 2%;胶结物含量在各区块中最高,平均达 20%。杂基含量最高者为车镇陡坡带,平均为 11.7%;该区块胶结物含量也较高,仅次于埕南断裂带,平均为 11.6%。其他区块杂基含量一般为 2.7%~8.0%,胶结物平均含量为 3.1%~11.0%。沙四段储层杂基含量以埕南断裂带为最高,平均为 13.5%;其胶结物含量以车镇陡坡带在各区块中最高,平均达 10.6%。其他各区块杂基平均含量为 4.1%~10.1%,胶结物含量为 5.8%~10.1%。

1.2 主要成岩事件

1.2.1 压实作用

1) 沙三段

对研究区部分区块沙三段储层遭受的压实作用进行量化计算,结果表明各区块遭受压实作用的程度差异较大。车镇陡坡带视压实率为 24%,储层遭受弱压实;埕南断裂带、车镇缓坡带和渤南断裂带视压实率 32.4%~46.9%,遭受中等压实;孤西断裂带、胜坨地区和渤南深洼陷视压实率为 54.4%~66.2%,遭受了较强压实。受其影响,原始孔隙度差异不大(31.20%~35.94%)的储层在压实之后孔隙度产生了较大差异(11.43%~23.70%)。

2) 沙四段

同沙三段相比,研究区主要区块沙四段储层遭受的压实程度普遍较强,仅胜坨地区和车镇陡坡带视压实率在 45.2%~47.1%,为中等压实;其余区块均遭受较强-强压实,特别是车镇缓坡带,视压实率达 72%,表明储层遭受到强压实。受压实作用影响,沙四段储层原始孔隙度从 32.59%~36.60%骤降为 9.70%~18.60%,储层物性差异性增强。

1.2.2 溶解作用

东营凹陷深部砂岩、砂砾岩储层中最常见的溶解作用是斜长石沿其解理缝形成粒内溶孔或溶缝,或颗粒边缘被溶解成阶梯状、港湾状外,其次是钾长石和长石质岩屑。深部储层中胶结物或粘土杂基的溶解现象也较为常见,可以形成沿颗粒边缘的贴粒缝或扩大的粒间溶孔。细粒碎屑岩可能由于选择性溶解而形成断续的溶缝。

渤南洼陷和车镇凹陷深层砂岩、砂砾岩储层中最常见斜长石、碳酸盐胶结物、钾长石、不稳定岩屑(如中性喷出岩岩屑、砂泥岩岩屑和低级变质岩岩屑等)的溶解作用。

本次在研究区各区块均发现了不同程度的石英质颗粒及石英加大边的溶蚀现象,尤其以胜坨地区沙三段下部和沙四段石英、石英加大边和石英质岩屑的溶解作用最为发育,形成了大量的粒间和粒内孔隙,为济阳拗陷深层储集空间增添了一种新的类型:碱溶性孔隙。

1.2.3 胶结作用

济阳拗陷深层常见的胶结物主要有方解石类、白云石类、石英、黄铁矿等。

1.3 成岩阶段划分

由图 2 可知,济阳拗陷各重点区块镜质组生油

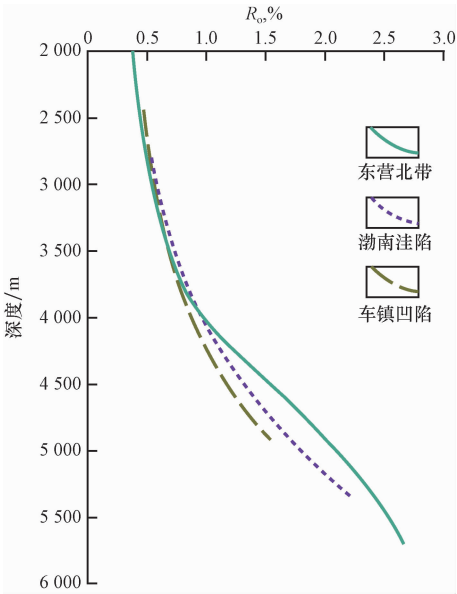


图 2 济阳拗陷各重点区块镜质体反射率(R_o)垂向演化特征
Fig. 2 R_o vs. depth of the three key sags in the Jiyang Depression

开始门限(镜质体反射率 $R_o=0.45\%$)深度差异不大,基本在2 500~2 700 m附近;各区块有机质进入高成熟阶段($R_o=0.70\%$)的深度基本一致,在3 500~3 550 m附近;生油终止门限($R_o=1.30\%$)深度平均为4 500 m左右,其中以东营凹陷最浅、平均为4 300 m,车镇凹陷最深、平均为4 700 m。考虑到研究区古近系深层盐湖普遍发育,沉积水体多为咸水-半咸水,主要根据有机质演化特征和自生矿物演化特征,依据碱性水介质碎屑岩成岩阶段划分规范^[18],将济阳坳陷古近系埋深3 500~5 000 m以下的碎屑岩储层划分为中成岩 A_2 ,中成岩B和晚成岩3个阶段,埋深分别为3 500~4 500,4 500~5 000 m和5 000 m以上。

2 各层段自生矿物及与孔隙发育的关系

2.1 沙三段

济阳坳陷沙三段储层埋深集中于3 150~3 600 m(图3),取样分析也集中在该深度段。在该深度段自生石英含量较埋深3 800~3 950 m深度段明显富集,且黄铁矿较发育,方解石和白云石含量变化趋势与其相反。埋深4 250~4 500 m深度处,主要胶结物为方解石,含量可超过10%,未能统计自生石英含量,反映此时成岩环境有利于碳酸盐的沉淀。

济阳坳陷深层沙三段高岭石含量高于伊利石和绿泥石含量(图4),在埋深2 900~3 150 m和3 300~3 500 m有两个高值段,但总体呈减少趋势,

伊/蒙混层比在15%~30%间震荡,反映该深度段储层进入中成岩阶段,成岩环境总体为酸性。埋深4 250~4 500 m粘土矿物组合以伊利石和绿泥石为主,表明该深度段成岩介质碱性较明显。

综上所述,济阳坳陷沙三段深部储层埋深3 150~3 600 m处次生孔隙的发育主要与碳酸盐类等酸溶性组分的溶蚀有关,埋深4 250~4 500 m处次生孔隙主要成因于碱性溶蚀作用,不利于自生石英和高岭石的沉淀。

2.2 沙四段

济阳坳陷沙四段自生石英在垂向上有2个较明显的高值带(图5),即埋深3 350~3 600 m和3 950~4 200 m处,黄铁矿含量变化与其类似,但第二个高值带明显降低。方解石类含量变化趋势与自生石英相反,且在埋深5 550~5 700 m处呈现第三个高值带。白云石类具有两个高值带,略深于方解石前两个高值带。石膏类在埋深4 250~4 500 m深度段相对富集,与白云石第二个含量高值带深度一致。

沙四段高岭石在埋深3 000~5 650 m深度段有3个高含量带(图6),即3 200~3 600,3 950~4 200和4 500~4 900 m,伊利石含量变化总体与之相反;绿泥石含量由浅至深总体上呈增加趋势,伊/蒙混层含量变化与其相反。可以认为,埋深3 200~3 600,3 950~4 200,4 500~4 900和5 600~5 650 m处为较为明显的酸性成岩环境;埋深5 600~5 700 m处伊利石含量出现明显峰值,最高可达75%,反映较强的碱性成岩介质条件。

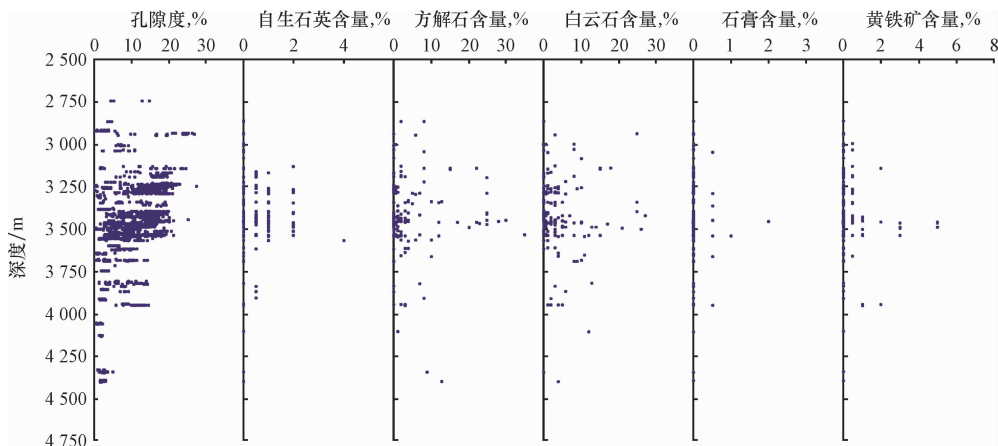


图3 济阳坳陷深层古近系沙三段主要胶结物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 3 Main cement content and porosity vs. depth for the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the deep layers of the Jiyang Depression

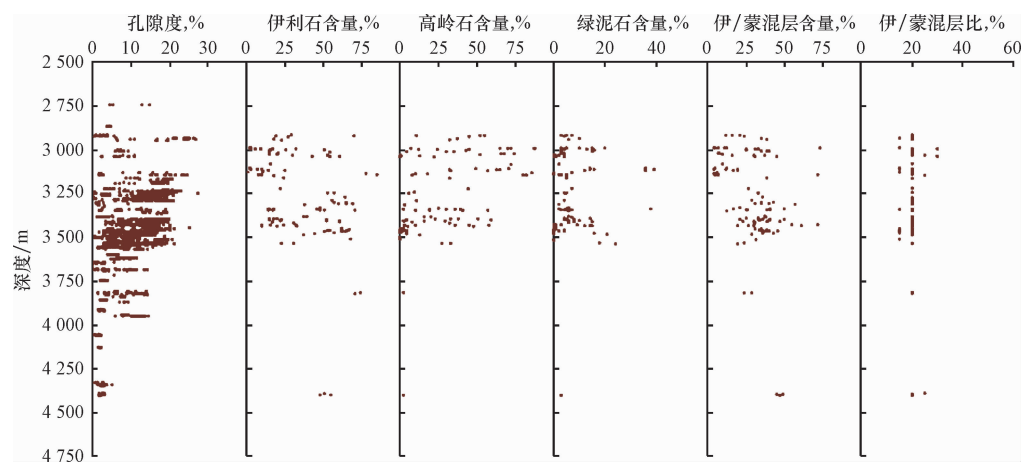


图4 济阳坳陷深层古近系沙三段粘土矿物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 4 Clay mineral content and porosity vs. depth for the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the deep layers of the Jiyang Depression

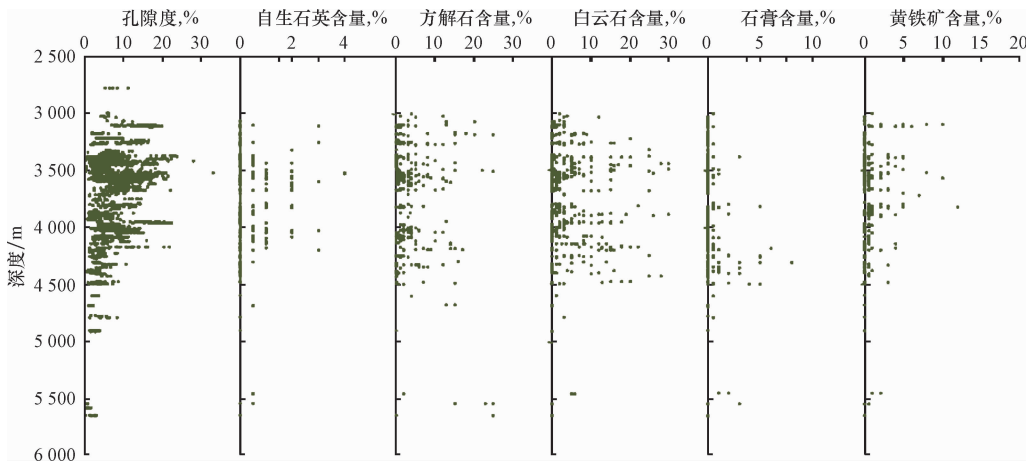


图5 济阳坳陷深层古近系沙四段主要胶结物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 5 Main cement content and porosity vs. depth for the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation in the deep layers of the Jiyang Depression

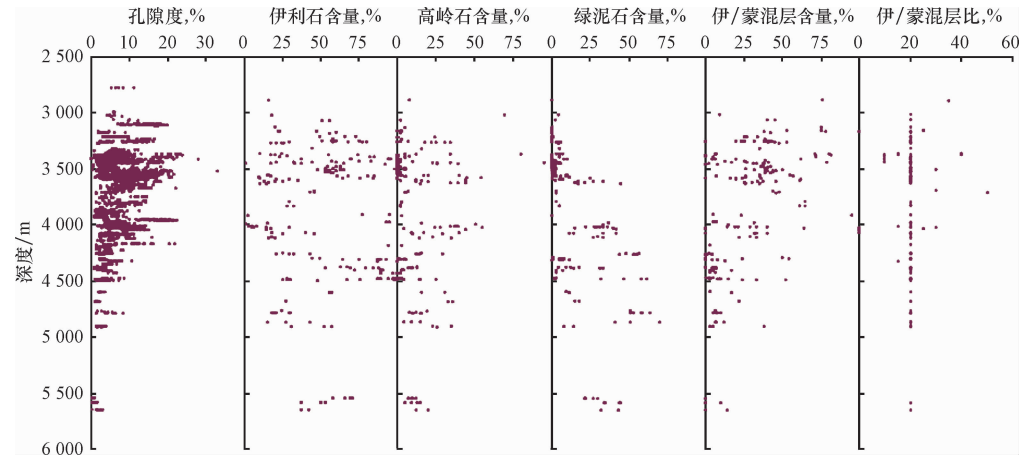


图6 济阳坳陷深层古近系沙四段粘土矿物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 6 Clay mineral content and porosity vs. depth for the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation in the deep layers of the Jiyang Depression

结合孔隙度垂向演化趋势,可以认为济阳凹陷沙四段深层前3个次生孔隙发育带(埋深3 350~3 600,3 950~4 200和4 500~4 900 m)主要与还原条件下酸溶性矿物的溶蚀有关;埋深5 600~5 700 m处次生孔隙的发育则主要与碱性溶蚀有关。

3 各凹陷自生矿物及与孔隙发育的关系

3.1 方解石类

济阳凹陷各凹陷分别发育3~4个方解石胶结物高值带。前3个高值带深度分布具有统一性,分别位于3 200,3 500和4 200 m附近。其中,渤南洼陷第一个方解石高含量带深度比东营北带和车镇凹陷略深,最高值位于埋深3 300 m附近。车镇凹陷第二个方解石高值带深度比另两个凹陷略浅,最高值位于埋深3 450 m附近;该凹陷第三个方解石高值带从埋深4 200 m持续延伸至4 700 m(图7)。东营凹陷发育4个方解石高值带,第4个高值带深度在4 900~5 100 m,为中央隆起带孔一段间歇性盐湖粉细砂岩地层。

在图3中还可看出3 700~4 000 m深度段各凹陷均存在一方解石低值带,该深度带孔隙发育较差。车镇凹陷方解石类胶结物含量在埋深4 000 m以上比渤南洼陷和东营北带略高,应与其物源多为古生界碳酸盐岩有关。

3.2 白云石

各凹陷白云石胶结物含量以东营北带最高,渤南洼陷白云石类胶结物含量相对最低(图7)。各凹陷白云石类胶结物演化趋势总体上与方解石胶结物负相关,一般发育3~4个高值带,深度分布差别较大,其中3 300~3 600 m的高值带与孔隙度发育带在深度上具有一致性。东营凹陷和渤南洼陷在埋深大于4 400 m以及车镇凹陷在埋深大于3 800 m处存在较为明显的去白云化作用。研究区深层白云石类自生矿物靠近蚀变云母片产出或顺解理交代云母片产出的现象很普遍,并且在云母含量较高的深度段白云石类自生矿物含量也较高(图8),表明云母、岩浆岩岩屑等富铁镁颗粒的蚀变可能为自生白云石的产出提供可观数量的铁、镁离子。

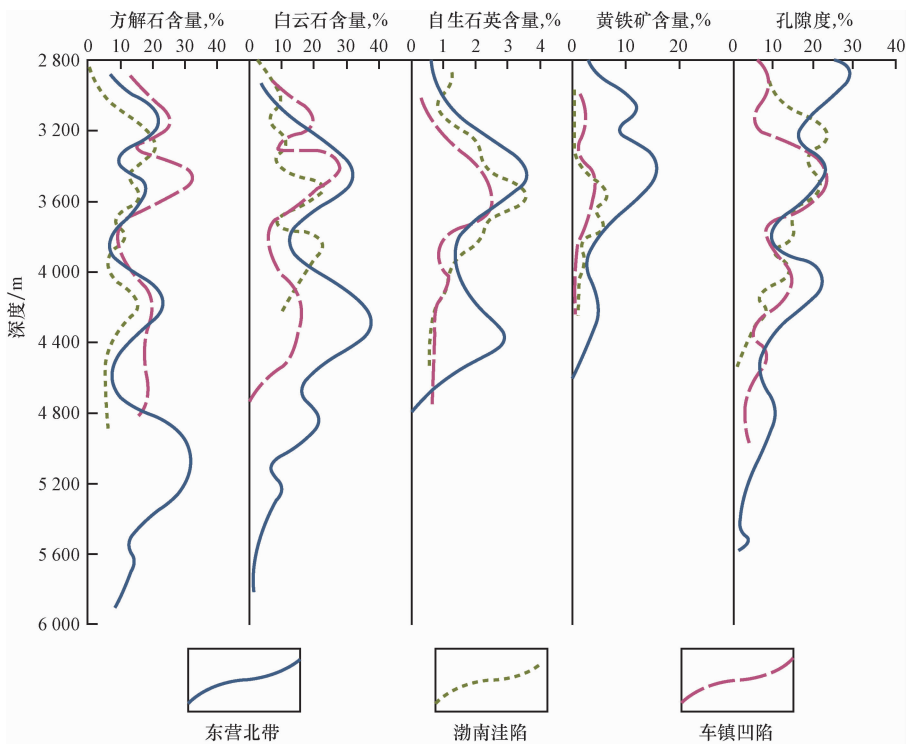


图7 济阳凹陷深层古近系常见胶结物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 7 Common cement content and porosity vs. depth for the Paleogene in the deep layers of the Jiyang Depression

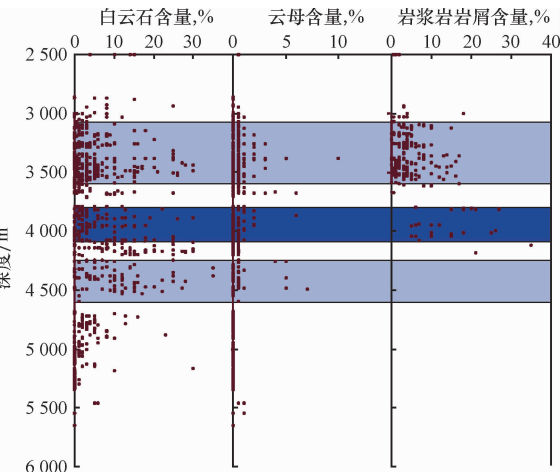


图 8 济阳坳陷深层古近系白云石与富铁镁碎屑含量垂向分布及关系

Fig. 8 Contents of dolomite, mica and magmatic rock detritus vs. depth for the Paleogene in the deep layers of the Jiyang Depression

3.3 石英

自生石英在各凹陷 3 400 ~ 3 600 m 深度段普遍较发育,含量可达 4%,与各凹陷均较发育的孔隙带在深度上一致(图 7),反映该孔隙发育带的形成与酸性介质下不稳定组分的溶解有关。同时可以看出车镇凹陷自生石英高值带发育深度最

大,其次是渤南洼陷,东营北带自生石英高值带埋深最浅,这种现象应与济阳坳陷沉降中心由南至北的迁移过程有关。

3.4 黄铁矿

黄铁矿在各凹陷 3 400 ~ 3 600 m 深度段相对较发育,在东营凹陷含量可达 10% 以上,与各凹陷均较发育的孔隙带在深度上也有一致性,反映该孔隙发育带的形成与还原条件下的溶解作用有关。另外,从图 7 中可以看出,东营凹陷在埋深 4 200 m 附近有一幅度较小的高值带,与孔隙发育带深度分布较一致,可能与硫酸盐热化学还原反应有关。

3.5 粘土矿物

3.5.1 伊/蒙混层

东营北带与渤南洼陷深层伊/蒙混层含量在垂向上时有起伏(图 9),但总体随埋深增大呈含量降低趋势。渤南洼陷伊/蒙混层含量高值带与孔隙发育带在深度上具有一致性。车镇凹陷埋深 4 500 m 附近伊/蒙混层含量出现一高值带,明显高于浅部含量;同时高值带在深度上与伊利石含量和孔隙度高值带一致。

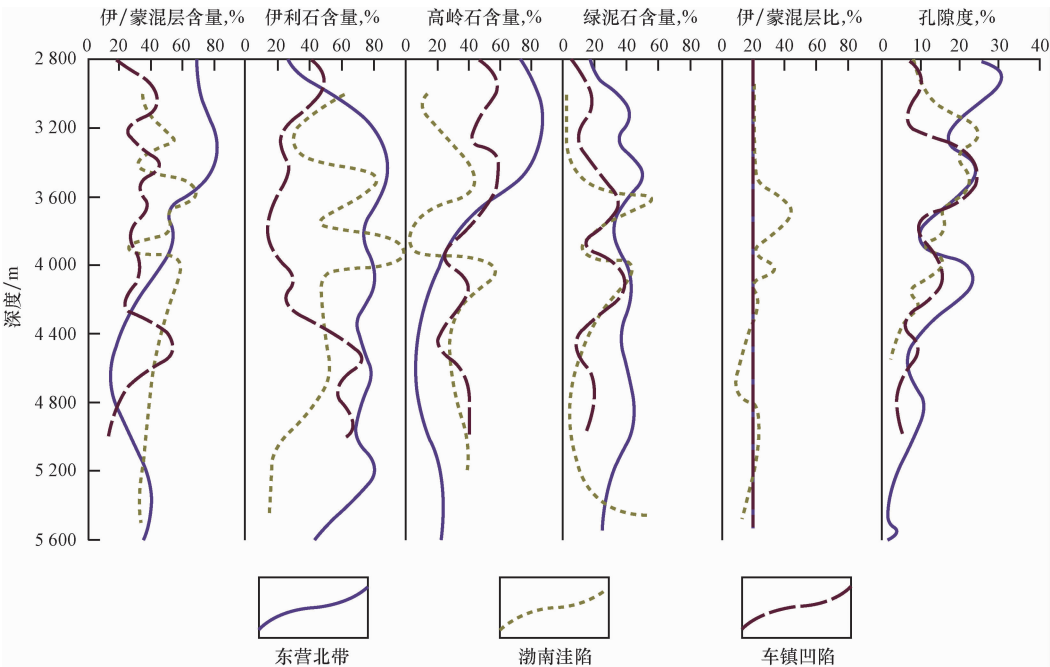


图 9 济阳坳陷深层古近系粘土矿物含量与孔隙度垂向演化特征

Fig. 9 Clay mineral content and porosity vs. depth for the Paleogene in the deep layers of the Jiyang Depression

3.5.2 伊利石

东营北带伊利石含量明显高于另两个区块,在埋深3 200~5 300 m虽深度变化略有起伏,但含量均在70%以上(图9)。渤南洼陷伊利石在埋深3 500和3 900 m附近发育两个明显高值带,含量高达80%以上,与绿泥石含量及孔隙度呈反比。车镇凹陷伊利石含量在3个凹陷中最低,一般不高于30%,但在埋深4 400~4 900 m出现高值带,含量可达70%,该高值带由两个次级高值带组成,前一个位于埋深4 400~4 700 m,与孔隙发育带在深度上一致,反映在该深度段碱性介质对孔隙发育的积极影响。

3.5.3 高岭石

东营凹陷北带高岭石含量变化较为简单,埋深2 800~3 550 m含量高达80%以上,埋深大于3 500 m迅速降低,至5 200 m略有增加,但含量一般不超过20%。埋深2 800~3 550 m高含量带在深度上与东营北带深层前2个次生孔隙带对应;在埋深5 200 m处开始的略高含量带在深度上与次生孔隙带也有较好的对应关系(图9)。渤南洼陷深层高岭石含量有两个高值带,第一个位于埋深3 300~3 600 m处,与该凹陷深层第二个次生孔隙带发育深度相对应。第二个位于埋深4 000~4 300 m处,与该凹陷第四、第五个次生孔隙带在深度大致对应。车镇凹陷深层高岭石前3个高含量带与孔隙度在深度上有较好的一致性,分别位于埋深2 800~3 100,3 300~3 700和4 100~4 250 m。埋深4 400~4 700 m的高岭石低值带与孔隙发育带在深度上对应。

3.5.4 绿泥石

东营凹陷深层绿泥石含量比其他两个凹陷略高,含量一般在30%~45%,大致有埋深3 000,3 300,4 000~4 200和4 600~5 000 m 4个相对高值带,与该凹陷深层孔隙带发育深度有较好的一致性(图9)。渤南洼陷古近系深层绿泥石普遍较低,一般不超过20%,但在埋深3 600,4 000 m和5 500 m 3个明显的含量高峰,含量可达50%以上,且与孔隙带发育深度明显对应。车镇凹陷深层绿泥石含量一般在10%~30%,有埋深2 900,3 600,4 100和4 700 m 4个相对高值带,与该凹陷深层伊利石含量呈消长关系,而与孔隙带发育深度有较好的一致性。

3.5.5 伊/蒙混层比

东营北带和车镇凹陷深层埋深2 800 m以下伊/蒙混层比大多为20%,异常点不多(图9)。渤南洼陷在埋深3 500~4 800 m存在明显的粘土矿物转化异常带,且伊/蒙混层比高值带在深度上与绿泥石激增带及次生孔隙带多有较好的一致性,可能与深部热液侵入引起地层压力异常^[6],抑制粘土矿物转化,从而利于保持较多粒间体积有关。

4 结论

济阳坳陷古近系埋深3 500~6 000 m碎屑岩储层处于中成岩A₂亚期至晚成岩期,在不同深度和区块分别发生酸性与碱性溶蚀作用主要受原始沉积物性质、地层压力和深部流体的影响,且在溶蚀过程中伴有相应自生矿物的产出。

济阳坳陷沙三段深部储层埋深3 150~3 600 m处次生孔隙的发育主要与碳酸盐类等酸溶性组分的溶蚀有关,埋深4 250~4 500 m处的次生孔隙主要成因于碱性溶蚀作用,不利于自生石英和高岭石的沉淀。沙四段深层前3个次生孔隙发育带(埋深3 350~3 600,3 950~4 200和4 500~4 900 m)主要与还原条件下酸溶性矿物的溶蚀有关;埋深5 600~5 700 m处次生孔隙的发育则主要与碱溶性组分的溶蚀有关。总体上看,随深度增加,碱性成岩环境对储层孔隙度演化和自生矿物产出的影响愈加明显。

各凹陷白云石类自生矿物演化趋势总体上与方解石类负相关,埋深3 300~3 600 m的高值带与孔隙度发育带在深度上具有一致性。自生石英、黄铁矿和高岭石在各凹陷3 400~3 600 m深度段较发育,与各凹陷均较发育的孔隙带在深度上一致。

渤南洼陷的伊蒙混层含量高值带与孔隙发育带在深度上具有一致性。车镇凹陷埋深4 400~4 700 m处高岭石低值带、伊利石含量高值带与孔隙发育带深度一致。东营凹陷北带和渤南洼陷深层绿泥石高值带与孔隙带发育在深度上有较好的一致性,且普遍与伊利石含量呈消长关系。渤南洼陷受异常高压和深部热流的影响,在埋深3 500~4 800 m存在明显的粘土矿物转化异常带,且伊/蒙混层比高值带在深度上与绿泥石激增带及次生孔隙带常具有较好的一致性。

(下转第670页)