

渤海湾盆地济阳拗陷渤南洼陷 沙四下亚段红层有利储层成因机制

孟 涛

(中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:渤海湾盆地济阳拗陷渤南洼陷沙四下亚段红层经历了较长时期的沉积和成岩改造作用, 原生孔隙保留机制、次生孔隙演化规律不清, 制约着勘探进展。运用岩心观察、铸体薄片鉴定及扫描电镜分析等技术手段, 在储层特征分析基础上, 开展了红层有利储层受控因素分析, 总结了有利储层成因机制, 预测了有利储层分布。该区沙四下亚段红层沉积存在冲积扇—辫状河—辫状河三角洲—湖泊和扇三角洲—湖泊 2 大沉积体系; 砂岩类型以岩屑长石砂岩为主, 储集空间由残留原生孔隙、次生溶蚀孔隙及裂缝构成, 储层物性较差, 属于特低孔特低渗储层。储层在机械压实作用以及碱、酸流体的交替影响下, 储集空间经历了原生孔隙保留、次生孔隙形成及储层致密化 3 个阶段; 埋深与有利相带决定原生孔隙保存程度, 有机酸、上覆地层异常高压与断裂展布决定次生孔隙发育程度。原生孔隙发育的有利储层类型为 3 000 m 以浅的冲积扇扇端储集体, 分布于南部盆缘, 呈裙带状展布; 次生孔隙发育的有利储层类型为沙四上亚段压力系数大于 1.2 且沙四下亚段断裂体系发育的辫状河和辫状河三角洲储集体, 分布在洼陷带, 呈带状、叠合连片状展布。

关键词:有利储层; 成因机制; 红层; 沙四下亚段; 渤南洼陷; 济阳拗陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Formation mechanism of favorable reservoirs in red beds in lower submember of fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

MENG Tao

(Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The red beds in the lower submember of the fourth member of Shahejie Formation (E_{s4}) in the Bonan Subsag of the Jiyang Depression of the Bohai Bay Basin have undergone a long period of sedimentation and diagenesis. The mechanism of primary pore retention and the evolution constraints of secondary pores are not clear, which restricts exploration progress. The controlling factors of favorable reservoirs in the red beds were analyzed by means of core observation, casting thin section identification and scanning electron microscopy and combined with reservoir characteristics analysis. The formation mechanism of the favorable reservoirs was summarized, and their distribution was also predicted. There are two major sedimentary systems in the red bed sediments of the lower E_{s4} submember of Bonan Subsag, including alluvial fan—braided river—braided river delta—lake and fan delta—lake. Sandstones are mainly lithic feldspars. Reservoir porosity is composed of residual primary pores, secondary dissolution pores and fractures. Reservoir physical properties are poor. The reservoir belongs to the category of ultra-low porosity and ultra-low permeability. Under the influence of mechanical compaction and the alternation of alkali and acid fluids, the reservoir porosity in the study area experienced three stages: primary pore retention, secondary pore formation and reservoir densification. Burial depth and favorable facies zones determine the preservation degree of primary pores, while organic acid, abnormally high pressure in overlying strata and fracture distribution determine the degree of secondary pore development. The favorable reservoirs with primary pore development are fan-terminal reservoirs of alluvial fan buried less than 3 000 m, which are distributed as belts on the southern basin margin. The favorable reservoirs with secondary pore development

收稿日期: 2019-07-10; 修订日期: 2019-12-20。

作者简介: 孟涛(1979—), 男, 博士, 副研究员, 从事油气勘探及相关地质研究。E-mail: mengtao7988t@163.com。

基金项目: 中国石化胜利油田分公司科技攻关项目“渤南洼陷缓坡带沉积—成藏再认识及勘探潜力评价”(YKK1911)资助。

are braided river and braided river delta reservoirs with pressure coefficient greater than 1.2 in the upper sub-member of Es_4 and fault system develop in the lower submember of Es_4 , which are distributed in sag zones and show strip-like and overlapping sheet distribution.

Key words: favorable reservoir; formation mechanism; red bed; lower Es_4 submember; Bonan Sub sag; Jiyang Depression; Bohai Bay Basin

“红层”是指在陆相沉积环境中形成的偏红色调的碎屑沉积^[1-2],红层作为断陷盆地早期充填的碎屑岩,有利储层分布规律复杂^[3-7]。济阳拗陷渤南洼陷沙四下亚段广泛分布一套红层沉积,由于埋藏深、钻探成本高,一直未引起足够重视。随着近年来中浅层勘探程度的逐步提高^[8-9],中浅层优质储量发现难度增大,红层作为接替层系逐渐成为勘探重点^[10]。近几年的勘探实践表明,济阳拗陷沙四下亚段红层中蕴藏着丰富的油气资源,特别是渤南洼陷 L68 井区获得高产工业油流后,推动了整个济阳拗陷红层的勘探开发进程。但随着后续钻探的跟进,钻遇红层的大部分探井都难以获得工业油流,造成探井失利的关键因素之一便是有利储层发育规律认识不清。由于红层储层经历了较长时期的沉积和成岩改造作用,原生孔隙保留机制、次生孔隙演化规律等不清,致使缺乏红层有利储层分布规律的系统认识,制约了红层的勘探。本文以渤南洼陷沙四下亚段红层为研究对象,从储层特征分析入手,开展红层储集空间演化规律研究,指出有利储层成因类型并预测有利储层分布,以期为该红层油气勘探指明方向。

1 区域地质概况

渤南洼陷位于济阳拗陷东北部,是沾化凹陷面积最大的次级洼陷,具有北断南超、东西双断的特点^[8];北以埕南断层与埕东凸起相隔,西以义东断层与义和庄凸起相连,西南、东南与邵家洼陷和三合村洼陷相邻,向南以缓坡过渡到陈家庄凸起,面积约 800 km²(图 1)。渤南洼陷自下而上主要发育古生界、中生界、新生界。新生界发育齐全,分布广泛,是油气勘探的主力层系,自下而上包括古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。研究层段沙四下亚段隶属于沙河街组四段,为二级层序的高位域沉积(图 2),与沙四上亚段之间为不整合接触,总体上属于干旱气候条件下的氧化到半氧化—半还原沉积环境。沙四下亚段泥岩主要为红色,受剥蚀区母岩性质影响,由洼陷边缘到洼陷依次发育灰色砂砾岩、中—细砂岩、粉砂岩夹杂红色砂质泥岩、泥岩等;砂砾岩单层厚度一般 3~10 m,以细砾岩为主,砂岩主要分

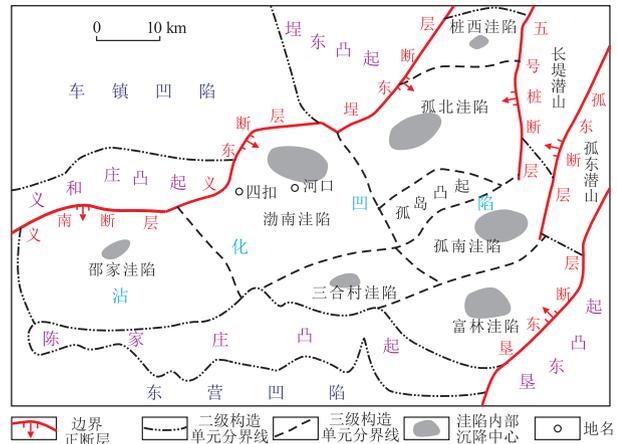


图 1 渤海湾盆地济阳拗陷渤南洼陷区域位置

Fig.1 Regional location of Bonan Sub sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

布在斜坡带和洼陷带,单层厚度 1~5 m^[8]。

2 红层储层特征

2.1 沉积特征

渤南洼陷沙四下亚段沉积期,南部的陈家庄凸起、北部的埕东凸起、东部的孤岛凸起皆为洼陷提供物源,西部的义和庄凸起输入物源相对较少^[10-13]。沉积期古气候干热^[14],只在北部洼陷带发育小范围湖盆,其余地区均为水上暴露环境。研究区南部在陈家庄凸起物源区影响下,主要形成冲积扇—辫状河道—辫状河三角洲及湖泊沉积体系;东部、西部及北部分别在孤岛凸起、义和庄凸起及埕东凸起物源区控制下,形成扇三角洲—湖泊沉积体系(图 2)。

2.2 储层岩石学特征

岩心观察和薄片鉴定结果表明,渤南洼陷沙四下亚段储层岩性主要为中细砂岩,盆缘有砂砾岩发育。砂岩类型以岩屑长石砂岩为主,次为长石岩屑砂岩和岩屑砂岩。随着距物源区距离增加,在经历了较长距离搬运后,沉积物成分成熟度逐渐升高。近物源的冲积扇、扇三角洲以岩屑砂岩为主,石英体积分数一般小于 50%,长石体积分数小于 20%,而岩屑体积分数普遍大于 50%;远物源的辫状河沉积则以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,石英、长石体积分数分别为 40%~60%和 20%~50%,

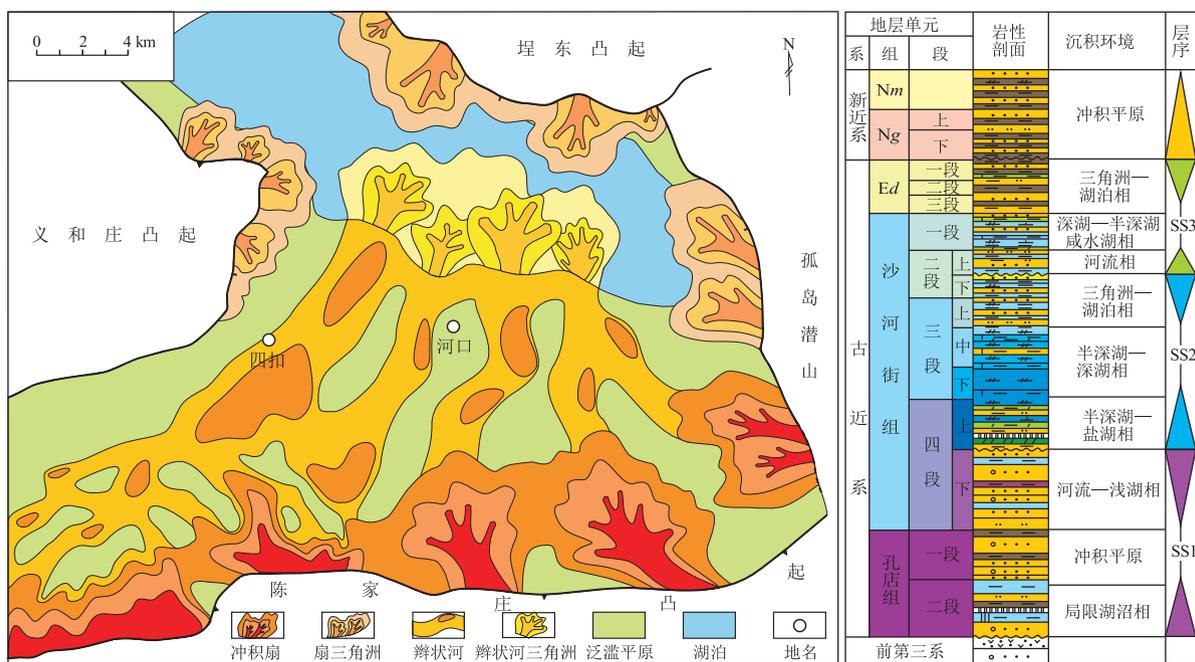


图 2 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段沉积相与综合柱状图

Fig.2 Sedimentary facies and comprehensive column of lower Es₄ submember in Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

岩屑体积分数普遍小于 50%；距物源最近的辫状河三角洲则以岩屑长石砂岩为主，石英体积分数为 40%~60%，长石体积分数普遍在 50%左右，岩屑体积分数小于 50% (图 3)。总体上，渤南洼陷沙四下亚段不同沉积相类型的成分成熟度差异较大，辫状河三角洲成分成熟度最好，辫状河沉积次之，冲积扇和扇三角洲沉积最差。

2.3 储集空间类型及物性特征

岩石铸体薄片观察表明，渤南洼陷沙四下亚段储层储集空间主要包括残留原生孔隙、次生溶蚀孔隙及少量裂缝。原生孔隙主要为刚性颗粒支撑下

的残留粒间孔隙 (图 4a, b)，还存在石英次生加大边后的残余孔隙 (图 4c, d) 以及绿泥石环边胶结后的残余孔隙 (图 4e)；次生孔隙主要由酸性流体溶蚀碳酸盐岩胶结物、长石、岩屑形成的粒间和粒内溶蚀孔隙 (图 4f-i)；此外还有少量的粒缘缝和破裂缝存在 (图 4f, j)。研究区冲积扇成因储集体是原生孔隙最为发育的储集类型，平均孔隙度和渗透率分别为 11.81% 和 $9.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；辫状河成因储集体主要以次生孔隙为主，存在部分原生孔隙，平均孔隙度和渗透率分别为 8.16% 和 $7.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；辫状河三角洲成因储集体则以次生孔隙为主，平均孔隙度和渗透率分别为 7.94% 和 $2.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；扇三角洲成因储集体整体较为致密，存在少量次生孔隙，平均孔隙度和渗透率分别为 3.55% 和 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 1)。总体上，渤南洼陷沙四下亚段储层孔隙度主要介于 5%~10%，此外存在较多 10%~15% 样品点 (图 5a)，渗透率主要介于 $(0.1 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，存在部分渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品点 (图 5b)；储层较为致密，属特低孔特低渗储层，也存在部分低孔低渗储层。

综上所述，研究区储层物性较好的 3 种沉积相类型分别为冲积扇、辫状河及辫状河三角洲。冲积扇储集体位于南部洼陷边缘，埋深较浅，储集空间主要为原生孔隙；辫状河及辫状河三角洲储集体主要位于缓坡带和洼陷带，埋深中等至偏深，原生孔隙在压实作用下衰减较快，储集空间以次生孔隙为

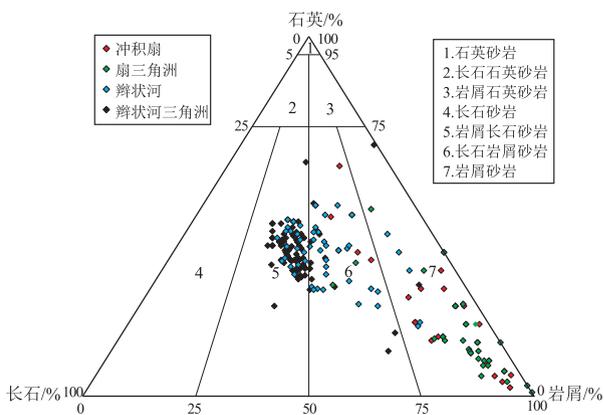


图 3 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段砂岩储层分类三角图

Fig.3 Classification triangle map of sandstone reservoir in lower Es₄ submember in Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

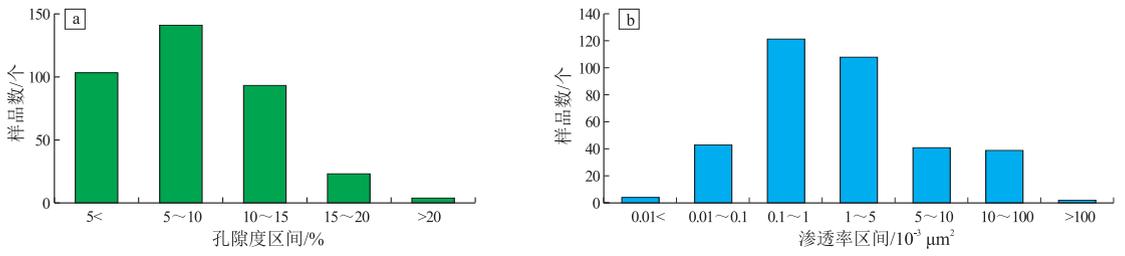


图 5 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段储层物性分布直方图

Fig.5 Histogram of reservoir physical property distribution in lower Es₄ submember in Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

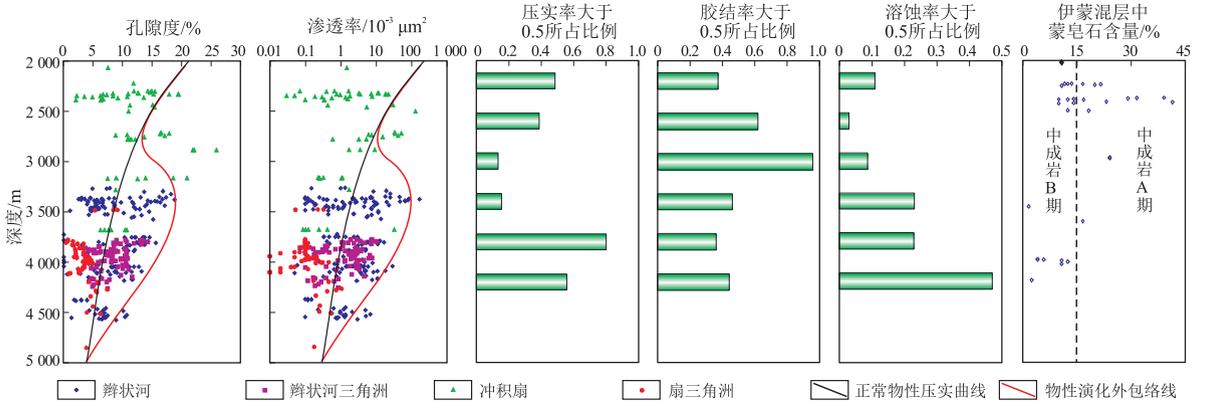


图 6 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段储层物性与成岩作用特征

Fig.6 Longitudinal distribution characteristics of reservoir physical properties and diagenetic parameters in lower Es₄ submember in Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

普遍认识到红层储集体在早期主要受碱性流体改造,中后期主要受酸性流体影响,晚期又演变为碱性流体环境^[3-4,8]。早期碱性流体主要来自于红层较为干旱的沉积环境衍生的碱性同沉积水体,以及来自于沙四上亚段膏盐岩体系中石膏向硬石膏转化过程中排出的碱性流体,碱性流体发育是碳酸盐岩胶结物产生的根源。中期酸性流体认为主要来自于烃源岩生排烃过程中伴生的有机酸,而渤南洼陷尚未发现沙四下亚段及其下伏孔店组的有效烃源岩,沙四下亚段红层中已发现的油气经油源对比表明均来自于沙四上亚段烃源岩,表明沙四上、下亚段之间应存在较为顺畅的流体交换现象,因此沙四下亚段红层中发生酸性溶蚀的有机酸应主要来自于沙四上亚段烃源岩。晚期碱性流体环境的形成是由于有机酸随埋深增大、地温升高而逐渐分解^[3-4,8],在黏土矿物转化过程中产生的碱性流体作用下,地层水又逐渐转变为弱碱性地层流体。

3.2 红层储集空间演化

3.2.1 早期碱性流体胶结阶段

沙四下亚段红层在沉积之后首先经历了碱性流体作用阶段,这一阶段以机械压实和碱性胶结作用为特征,压实和胶结减孔主导储集空间演化。当

埋深 2 000 m 时压实率大于 0.5 的样品所占比例接近 50% (图 6), 压实作用较为强烈, 同时受同沉积碱性水体影响, 胶结率大于 0.5 的样品所占比例接近 40%; 随着埋深增大, 上覆沙四上亚段膏盐岩脱水产生的大量碱性流体波及至此, 发生了更为强烈的碱性胶结作用 (图 4f, k, 1); 埋深 2 000~3 000 m 处胶结率大于 0.5 的样品所占比例逐渐升高 (图 6), 大量胶结物充填原生孔隙, 一定程度上抑制了压实作用发生, 因此该深度段压实率大于 0.5 的样品所占比例呈逐渐降低趋势 (图 6)。

总体上, 这一阶段属于碱性流体主导、以压实减孔和胶结减孔为主的储集空间递减阶段, 研究区各类型储集体都经历了碱性流体作用阶段, 这一阶段之后红层储集体中矿物颗粒呈点—线接触 (图 7), 储集空间还是以原生粒间孔隙为主。目前, 正经历这一阶段的红层储层主要集中在埋深浅于 3 000 m 的洼陷边缘带, 所对应的沉积相类型主要为冲积扇 (图 2, 6)。

3.2.2 中期酸性流体溶蚀阶段

随着红层储层埋深逐渐增大, 其上覆沙四上亚段烃源岩逐渐到达生烃门限并开始生排烃, 烃源岩生烃演化过程中产生的有机酸在异常高压驱动下,

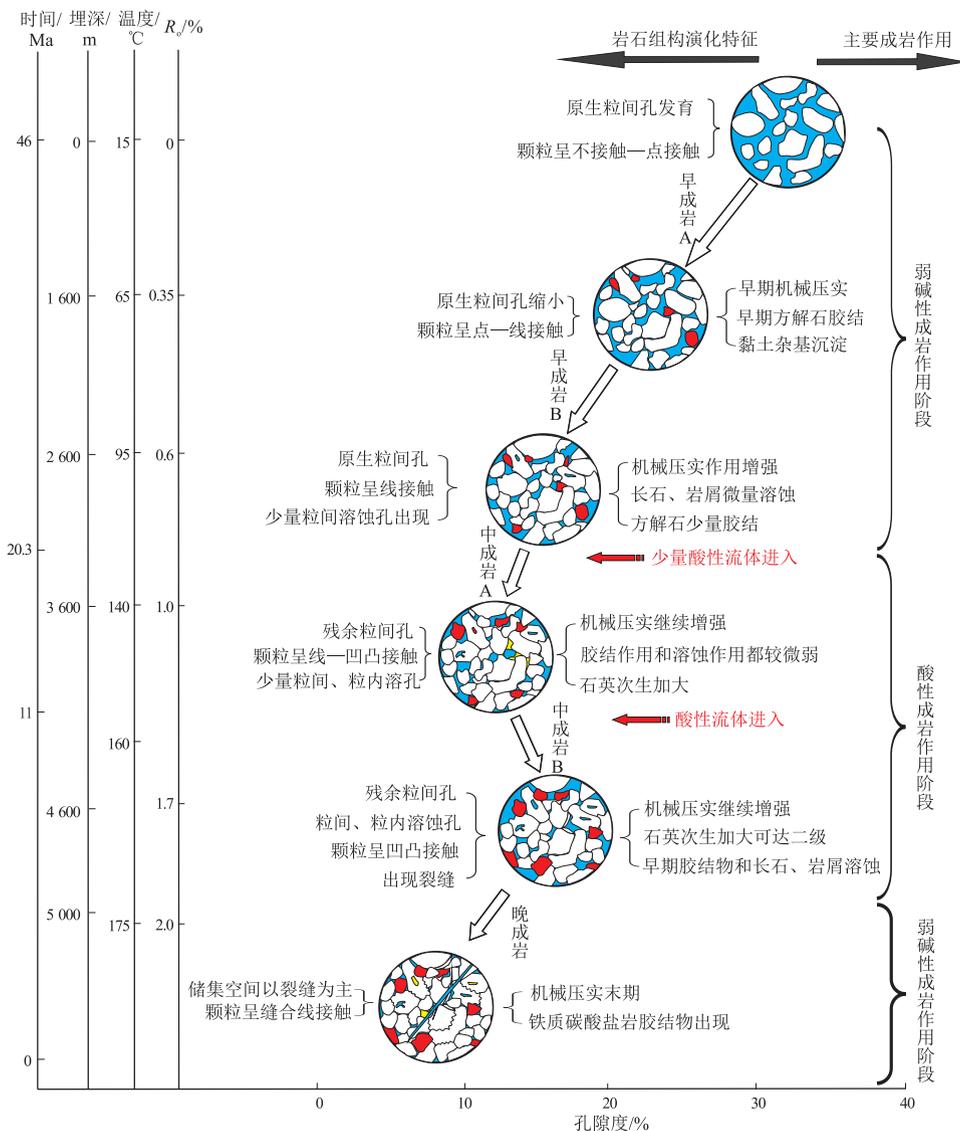


图 7 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段红层成岩模式与孔隙演化关系

Fig.7 Diagenetic pattern and pore evolution of red beds in lower Es₄ submember in Bonan Subsag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

通过断裂与沙四下亚段侧向对接并进入红层储层中,造成红层储层成岩环境由弱碱性向弱酸性过渡,产生酸性溶蚀作用^[9];随着埋深进一步增大,上覆沙四上亚段烃源岩开始大规模生排烃,所产生的有机酸大量注入沙四下亚段红层储层中,成岩环境演化为酸性^[18]。研究区红层储层在埋深超过 3 000 m 可见明显的酸性溶蚀作用,并随着深度的增加酸性溶蚀作用逐渐增强,埋深 3 000~4 500 m 储层溶蚀率大于 0.5 的样品所占比例逐步升高,同时胶结率降低(图 6);酸性溶蚀下长石和岩屑的溶蚀作用明显,次生溶蚀孔隙大量发育,形成次生孔隙带;次生孔隙的发育给机械压实作用提供了可压实空间,因此压实率有升高趋势(图 6)。

总体上,这一阶段属于酸性流体主导、以溶蚀增孔和压实减孔为主的储集空间保持阶段,经历这

一阶段后红层储集体原生孔隙减少,粒间、粒内溶蚀孔隙增多(图 4m, n),石英次生加大明显(图 4o),颗粒呈线乃至凹凸接触(图 7)。目前,正经历这一阶段的红层储层主要集中在埋深 3 000~4 500 m 的南部斜坡带、北部洼陷带和陡坡带,对应的沉积相类型为辫状河、辫状河三角洲以及扇三角洲。但扇三角洲储集体成分和结构成熟度都较差,经历了早期碱性流体作用阶段后,在胶结和压实双重减孔机制下,原生孔隙所剩无几,储层内部缺少可沟通有机酸的通道,同时扇三角洲主要位于洼陷边缘,距沙四上亚段生烃中心相对较远,本身受有机酸的波及也较弱,造成扇三角洲虽经历了酸性流体波及,但形成的次生孔隙甚少,储层致密。因此,中期酸性流体溶蚀主要作用于辫状河及辫状河三角洲储集体,形成次生孔隙发育带(图 6)。

3.2.3 晚期碱性流体胶结阶段

随着埋深增大、地温升高,有机酸逐渐被分解,酸性流体消耗殆尽,地层水又转变为弱碱性。这一阶段岩石逐渐达到压实极限,压实减孔主导储集空间演化,同时在晚期弱碱性流体环境影响下铁方解石胶结物出现并充填储集空间(图4p),储集空间逐渐被压实、胶结殆尽。总体上这一阶段红层储层已非常致密,矿物颗粒在强烈的压实作用下发育部分破裂缝,岩石基本到达不可再压实程度^[20-21],颗粒呈缝合线接触,存在少量铁质碳酸盐岩胶结物(图7)。

4 红层有利储层分布预测

红层储层成岩演化规律研究表明,研究区存在3 000 m以浅原生孔隙发育的冲积扇成因储集体及3 000 m以深次生孔隙发育的辫状河、辫状河三角洲成因储集体2种有利储层类型。

4.1 原生孔隙发育的有利储层分布

对于原生孔隙发育的冲积扇成因储集体而言,其不同亚相之间的颗粒成分和结构成熟度存在一定差异,决定着抗压实能力的差异及原生孔隙的保存程度。一般而言,扇根亚相沉积物成分和结构成熟度最差,抗压实能力最低;扇端亚相在经历较长

搬运距离后,沉积物成分和结构成熟度相对较好,抗压实能力相对较强;扇中亚相介于扇根与扇端之间,不同亚相沉积物抗压实能力存在差异,最终造成不同亚相储层物性也具有一定差异。渤南洼陷沙四下亚段冲积扇扇根、扇中、扇端平均孔隙度分别为9.35%、12.71%和17.01%,因此冲积扇储集体中原生孔隙保留程度较高的有利亚相类型主要为扇端。原生孔隙发育的有利储层类型主要位于南部盆缘,由陈家庄凸起物源区提供物源形成的冲积扇前端,呈裙带状展布(图8)。

4.2 次生孔隙发育的有利储层分布

研究区辫状河、辫状河三角洲成因储集体中次生孔隙的发育得益于上覆沙四上亚段烃源岩所生成有机酸的溶蚀,沙四上亚段的有机酸在洼陷中部异常高压的驱动下,通过断裂输导或直接对接沙四下亚段而进入到红层储层中。沙四上亚段烃源岩集中在洼陷中心部位,故沙四下亚段受有机酸强烈溶蚀发育次生孔隙的井也集中于洼陷中心部位(图8),这一区域正为辫状河和辫状河三角洲储集体发育区(图2);而洼陷边缘的冲积扇和扇三角洲远离沙四上亚段烃源岩发育区和上覆地层异常高压中心,加之缺少断裂输导而没有受到有机酸影响,为正常压实区^[22-26]。因此,处于洼陷中心受有

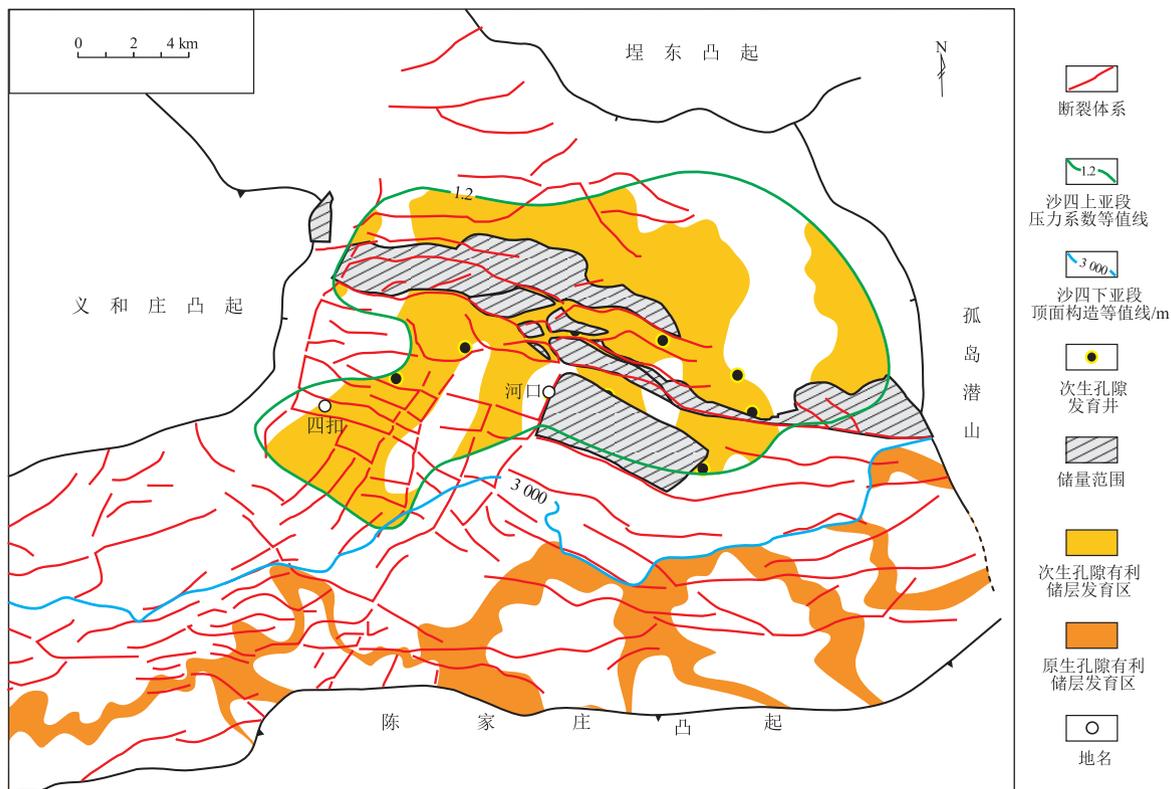


图8 渤海湾盆地济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段有利储层分布

Fig.8 Distribution of favorable reservoirs in lower Es₄ submember in Bonan Subbasin, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

机酸波及强烈、上覆地层发育异常高压及具有可沟通有机酸的断裂,是决定红层储层次生孔隙发育的关键要素。

综合洼陷带区域展布、沙四上亚段压力系数 1.2 等值线、沙四下亚段断裂及辫状河、辫状河三角洲储集体分布,研究区次生孔隙发育的有利储层主要位于洼陷带的辫状河道和辫状河三角洲储集体中,呈带状、叠合连片状分布(图 8)。实际上,发育次生孔隙的探井以及目前已发现的沙四下亚段油气储量也主要集中在这一区域(图 8)。

5 结论

(1) 渤南洼陷沙四下亚段红层沉积存在冲积扇—辫状河—辫状河三角洲—湖泊以及扇三角洲—湖泊 2 种沉积体系类型。冲积扇、扇三角洲沉积以岩屑砂岩为主;辫状河沉积以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主;辫状河三角洲以岩屑长石砂岩为主。冲积扇储集体储集空间主要为原生孔隙,物性较好;辫状河及辫状河三角洲储集体储集空间以次生孔隙为主,物性中等;扇三角洲储集体储层致密,物性偏低。

(2) 渤南洼陷沙四下亚段红层储层主要处于中成岩 B 期,少部分处于中成岩 A 期。红层储层经历了早期碱性胶结、中期酸性溶蚀及晚期碱性胶结 3 个成岩演化过程。早期碱性胶结作用后残留有一定数量原生孔隙;中期酸性溶蚀作用后形成大量次生孔隙;受晚期碱性胶结作用影响的储层储集空间消耗殆尽,储层致密。

(3) 原生孔隙发育的有利储层主要受埋深与有利相带决定,研究区这一有利储层类型发育在 3 000 m 以浅的南部洼陷边缘带,位于冲积扇前端呈裙带状展布;次生孔隙发育的有利储层主要受有机酸、上覆地层异常高压及断裂体系控制,研究区这一有利储层类型位于洼陷带辫状河、辫状河三角洲储集体发育区,呈带状、叠合连片状分布。

参考文献:

- [1] 李廷勇,王建立.中国的红层及发育的地貌类型[J].四川师范大学学报(自然科学版),2002,25(4):427-431.
LI Tingyong, WANG Jianli. Chinese red beds and developing landforms[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2002, 25(4): 427-431.
- [2] 谭先锋,蒋艳霞,田景春,等.济阳坳陷古近系孔店组层序界面特征及时空属性[J].石油实验地质,2014,36(2):136-143.
TAN Xianfeng, JIANG Yanxia, TIAN Jingchun, et al. Sequence

interface characteristics and spatial and temporal properties of Kongdian Formation of Paleogene in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 136-143.

- [3] 李继岩.渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境时空演化及成岩孔隙演化[J].石油与天然气地质,2017,38(1):90-97.
LI Jiyang. Temporal-spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 90-97.
- [4] 董大伟,李继岩,王晓蕾,等.渤海湾盆地东营凹陷东部孔店组红层储层特征及控制因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):20-29.
DONG Dawei, LI Jiyang, WANG Xiaolei, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of red bed of Kongdian Formation in eastern Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2017, 41(5): 20-29.
- [5] 牛栓文,李继岩.东营凹陷东段始新统红层储层多重成岩环境及演化模式[J].石油与天然气地质,2014,35(5):661-669.
NIU Shuanwen, LI Jiyang. Multiple diagenetic environments and evolutionary patterns of the Eocene red beds in the eastern Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 661-669.
- [6] 李继岩,宋国奇,王晓蕾,等.不同沉积环境形成的储层成岩差异性研究:以东营凹陷王家岗地区红层与博兴洼陷灰层滩坝为例[J].天然气地球科学,2015,26(2):269-276.
LI Jiyang, SONG Guoqi, WANG Xiaolei, et al. Study on the differences of diagenetic evolution under different sedimentary environment: take an example of the red-beds of Wangjiagang, Dongying Sag and Oligocene gray-beds beach-bar of Boxing Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 269-276.
- [7] 余义川,德勒恰提·加娜塔依,陈春勇,等.济阳坳陷博兴洼陷南部孔店组储层特征[J].煤炭技术,2017,36(11):114-115.
YU Yichuan, JANNEY D, CHEN Chunyong, et al. Reservoir characteristics of Kongdian Formation in southern Boxing Sag of Jiyang Depression [J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 114-115.
- [8] 刘鹏.渤南洼陷沙四上亚段沉积储层特征及其对油气成藏的影响[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
LIU Peng. The characteristics of depositional reservoirs and their effects on hydrocarbon accumulation in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation in Bonan Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [9] 宋国奇,刘华,蒋有录,等.沾化凹陷渤南洼陷沙河街组原油成因类型及分布特征[J].石油实验地质,2014,36(1):33-38,45.
SONG Guoqi, LIU Hua, JIANG Youlu, et al. Genetic types and distribution characteristics of crude oils from Shahejie Formation in Bonan Subbasin, Zhanhua Sag, Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 33-38, 45.
- [10] 刘军镠.济阳坳陷渤南洼陷沙四下亚段红层沉积特征及其油气富集规律[D].武汉:中国地质大学(武汉),2014.
LIU Jun. Petroleum accumulation and sediment features of red

- beds in the lower Es₄ of Bonan Sag, the Jiyang Depression [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [11] 张志全. 渤南洼陷沙四段下亚段沉积相识别 [J]. 河南石油, 2003, 17(4): 22-25.
ZHANG Zhiquan. Identification of sedimentary facies of the lower IV interval of the Shahejie Formation in Bonan Sag [J]. Henan Petroleum, 2003, 17(4): 22-25.
- [12] 王真. 渤南洼陷沙四下亚段沉积体系研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
WANG Zhen. The sedimentary system study in the Lower Fourth Member of Shahejie Formation in the Bonan Sub Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [13] 陈阳, 张扬, 朱正杰, 等. 济阳拗陷渤南洼陷沙四下亚段沉积序列及石油地质意义 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(3): 313-322.
CHEN Yang, ZHANG Yang, ZHU Zhengjie, et al. Early sedimentary sequence and petroleum geological significance of faulted basins: a case study on the lower Es₄ in Bonan Sag, Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 313-322.
- [14] 李文浩, 张枝焕, 咎灵, 等. 渤南洼陷北部陡坡带沙河街组砂砾岩有效储层物性下限及其主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 766-777.
LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, ZAN Ling, et al. Lower limits of physical properties and their controlling factors of effective coarse-grained elastic reservoirs in the Shahejie Formation on northern steep slope of Bonan Sub Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 766-777.
- [15] 邱桂强. 东营凹陷古近系成岩层序特征与储集差异性分析 [J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 915-922.
QIU Guiqiang. Analysis on Lower Tertiary diagenetic sequence characteristics and their differences of reservoirs in Dongying Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 915-922.
- [16] 吴富强, 李后蜀, 胡雪, 等. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段成岩史恢复及成岩模式建立 [J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 1-4.
WU Fuqiang, LI Houshu, HU Xue, et al. Diagenetic history of Es₄ in Bonan Sub Sag of Zhanhua Sag and establishment of diagenetic model [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(6): 1-4.
- [17] 陈永峤, 于兴河, 周新桂, 等. 东营凹陷各构造区带下第三系成岩演化与次生孔隙发育规律研究 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 68-74.
CHEN Yongqiao, YU Xinghe, ZHOU Xingui, et al. Research on diagenetic evolution succession and occurrence of secondary porosity of Lower Tertiary in different structural belt of Dongying Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 68-74.
- [18] 宋国奇, 刘鹏, 刘雅利. 渤南洼陷沙河街组四段下亚段成岩作用与储层孔隙演化 [J]. 沉积学报, 2014, 32(5): 941-948.
SONG Guoqi, LIU Peng, LIU Yali. Diagenesis and reservoir porosity evolution of the lower section of the 4th member of Shahejie Formation in Bonan Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(5): 941-948.
- [19] 蕙克来, 操应长, 赵贤正, 等. 霸县凹陷古近系中深层有效储层成因机制 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1144-1155.
XI Kelai, CAO Yingchang, ZHAO Xianzheng, et al. Genetic mechanism of Paleogene middle-deep effective reservoirs in Baxian Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1144-1155.
- [20] 宋磊, 宁正福, 孙一丹, 等. 联合压汞法表征致密油储层孔隙结构 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 700-705.
SONG Lei, NING Zhengfu, SUN Yidan, et al. Pore structure characterization of tight oil reservoirs by a combined mercury method [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 700-705.
- [21] 曹忠祥, 张宇, 蔡攀, 等. 济阳拗陷精细勘探新成果与启示 [J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 14-23.
CAO Zhongxiang, ZHANG Yu, CAI Pan, et al. New achievements and recognitions of fine exploration in Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 14-23.
- [22] 梁金萍, 国景星, 于洪洲. 冲积—河流相层序地层模式探讨及其在济阳拗陷的应用 [J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 15-17.
LIANG Jinping, GUO Jingxing, YU Hongzhou. Discussion on the stratigraphic model in alluvial-fluvial facies sequence and its application in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(1): 15-17.
- [23] 姜超. 断陷湖盆斜坡带重力流砂体沉积特征及沉积模式: 以沾化凹陷渤南洼陷南部斜坡带沙三段为例 [J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(1): 6-13.
JIANG Chao. Characteristics and model of gravity flow sand body deposition in the slope zone of rifted lacustrine basin: a case study from the Sha3 member in the south slope zone of Bonan Sag, Zhanhua Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 6-13.
- [24] 朱筱敏, 米立军, 钟大康, 等. 济阳拗陷古近系成岩作用及其对储层质量的影响 [J]. 古地志学报, 2006, 8(3): 295-305.
ZHU Xiaomin, MI Lijun, ZHONG Dakang, et al. Paleogene diagenesis and its control on reservoir quality in Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 295-305.
- [25] 孟昱璋, 刘鹏. 济阳拗陷渤南洼陷沙四上亚段碎屑岩成岩作用及其孔隙演化 [J]. 中国石油勘探, 2015, 20(6): 14-21.
MENG Yuzhang, LIU Peng. Diagenesis and porous development of clastic rock in upper part of 4th member of Shahejie Formation in Bonan Sag of Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(6): 14-21.
- [26] 吕明才, 张立强, 史文东, 等. 东营凹陷南斜坡孔店组冲积体系碎屑岩储层特征及评价 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(6): 5-9.
LV Mingcai, ZHANG Liqiang, SHI Wendong, et al. Characteristics and evaluation of the clastic reservoirs in Kongdian Member in the southern slope belt of Dongying Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2004, 19(6): 5-9.