

УДК 553.98

Ян Я¹, e-mail: 1725742703@qq.com¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Москва, Россия).

Диagenетические и катагенетические преобразования песчаников базальных отложений нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цзиян (бассейн Бохайвань, Китайская Народная Республика)

В статье представлены результаты анализа изменений коллекторских свойств базальных красноцветных песчаников нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цзиян (бассейн Бохайвань, Китайская Народная Республика), обусловленных основными процессами, протекающими на разных этапах диагенеза и катагенеза, в т. ч. изменением кислотно-щелочных (pH) условий осадконакопления. Анализ проводился на основе микроописаний большого количества кернового материала. Отмечено, что из числа процессов диагенеза и катагенеза, проявившихся в ходе исследования отложений, основную роль играют уплотнение осадка и образующих коллектор пород, частичное (коррозия) растворение минералов и метасоматическое замещение. Сделано заключение, что на стадиях диагенеза и протокатагенеза в более щелочных условиях среды образовалось значительное количество карбонатного цемента, а в дальнейшем на стадиях мезокатагенеза и апокатагенеза разрушение органического вещества привело к повышению кислотности среды, в результате чего полевые шпаты и ранее образовавшиеся карбонатные цементы растворились, способствуя увеличению вторичной пористости. Установлено, что кислотно-щелочные (pH) условия осадконакопления в разных районах впадины отличаются, как и интенсивность процессов, происходивших на стадиях диагенеза и катагенеза, что позволяет выделить три зоны: периферию впадины со слабощелочными-слабокислыми условиями среды, зону внутри пологого склона впадины с сильнощелочными-сильнокислыми условиями среды и зону в центре впадины с сильнощелочными-слабокислыми условиями. В этих зонах в различной степени проявляются уменьшение первичной и увеличение вторичной пористости, что, в свою очередь, позволяет сделать заключение о наличии различных типов пустотных пространств в базальных красноцветных песчаниках со значительно различающимися коллекторскими свойствами.

Ключевые слова: диагенез, катагенез, условие среды, песчаный коллектор, впадина Цзиян, пористость.

.....

Yang Ya¹, e-mail: 1725742703@qq.com¹ Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "M.V. Lomonosov Moscow State University" (Moscow, Russia).

Diagenetic and Catagenetic Transformations of Lower Eocene Basal Sandstones of the Southeastern Jiyang Depression (Bohaiwan Basin, People's Republic of China)

The paper presents the results of the analysis of changes in the reservoir properties of basal red-colored sandstones of the Lower Eocene in the southeastern part of the Jiyang Depression (Bohaiwan Basin, People's Republic of China) due to the main processes during different stages of diagenesis and catagenesis, including changes in the acid-alkaline (pH) sedimentation conditions. The analysis was based on microdescriptions of a large quantity of core material. It is noted that of the diagenesis and catagenesis processes that have emerged during the sedimentation study, the main role is played by compaction of sediment and reservoir-forming rocks, partial (corrosion) dissolution of minerals and metasomatic substitution. It is concluded that during the stages of diagenesis and protocatagenesis a significant amount of carbonate cement was formed under more alkaline environmental conditions, while later during the stages of mesocatagenesis and apocatagenesis the destruction of organic matter led to an increase in the acidity of the environment, resulting in the dissolution of feldspars and previously formed carbonate cements, contributing to the increase in secondary porosity.

Acid-alkaline (pH) conditions of sedimentation were found to differ in different areas of the depression, as well as the intensity of processes that occurred during diagenesis and catagenesis, which allows to identify three zones: periphery of the depression with slightly alkaline and weakly acidic conditions, zone inside the gentle slope of the depression with strongly alkaline and slightly acidic conditions and zone in the centre of the depression with strongly alkaline and weakly acidic conditions. These zones exhibit decreasing primary porosity and increasing secondary porosity to varying degrees, which, in turn, suggests the presence of different types of void spaces in basal red-coloured sandstones with significantly different reservoir properties.

Keywords: diagenesis, catagenesis, medium condition, sandstone reservoir, Jiyang Depression, porosity.

Впадина Цзиян, расположенная на юго-востоке бассейна Бохайвань, является одним из наиболее изученных объектов бассейна, обладающих доказанной нефтегазоносностью. Залежи углеводородов в основном сосредоточены в палеогеновых отложениях – формациях Кундянь, Шахэцзе и Дунин, причем представленные преимущественно песчаниками свиты Кундянь-1 и Нижняя Шахэцзе – 4 обладают наилучшими коллекторскими свойствами среди базальных красноцветных отложений.

В данной статье анализируются условия диагенетических и катагенетических преобразований базальных красноцветных песчаников в разных зонах впадины Цзиян на основе микроописаний большого количества кернового материала, а также влияние диагенеза и катагенеза на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) песчаных коллекторов в различных кислотно-щелочных условиях.

ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ДИАГЕНЕТИЧЕСКИХ И КАТАГЕНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Микроописания шлифов горных пород показывают, что основными диагенетическими и катагенетическими процессами, протекавшими в изученных песчаных коллекторах, являются уплотнение осадка и образующих коллектор пород под давлением вышележащих слоев, цементация, частичное (коррозия) и полное растворение минералов, метасоматическое замещение и перекристаллизация обломочных зерен.

Уплотнение осадка и осадочных пород

Эти явления хорошо прослеживаются при изучении песчаников, распространенных главным образом в свитах Нижняя Шахэцзе – 4 и Кундянь-1. Глубина залегания песчаников в данных свитах варьирует в широких пределах, и по мере ее увеличения контакты обломочных зерен с точки зрения морфологии меняются с точечных на линейные и неровные (вогнуто-выпуклые): на стадиях диагенеза и протокатагенеза при глубине залегания менее 2500 м обломочные зерна, как правило, находятся в точечном или линейном контакте; на подстадиях мезокатагенеза и апокатагенеза при глубине залегания более 3500 м – в линейном либо неровном (вогнуто-выпуклом) контакте. В целом для процесса уплотнения большее значение имеют такие характеристики, как химический, минералогический и гранулометрический составы пород [1].

Цементация

В базальных красноцветных отложениях присутствуют следующие типы цементов [2]:

- карбонатный – самый распространенный (с содержанием 0,5–30,0%), причем содержание кальцита и доломита имеет тенденцию к уменьшению с увеличением глубины. При преобразовании смектита в иллит выделяется большое количество ионов железа [3], поэтому карбонатный цемент в глубоких песчаных коллекторах состоит в основном из феррокальцита и анкерита;

- кремнистый – как правило, регенерационный кварцевый;
- скрытокристаллический гематитовый – именно этот тип цемента придает красную окраску исследуемым отложениям;
- гипсовый и ангидритовый – большое содержание этих типов цемента в отложениях объясняется дегидратацией эвапоритов в условиях аридного климата.

Частичное (коррозия) растворение минералов

В большом количестве изученных образцов наблюдается развитие процессов растворения полевых шпатов и карбонатных цементов. Так, растворением полевых шпатов обусловлено более 50% случаев формирования вторичной пористости, растворением карбонатных цементов – менее 20%.

Метасоматоз

Метасоматоз в песчаных коллекторах выражен в замещении кварца и полевых шпатов кальцитом и доломитом, кварца – феррокальцитом и анкеритом [4]. Кроме того, наблюдается метасоматическое замещение карбонатных минералов. Так, кальцит замещается феррокальцитом, доломит и кальцит – анкеритом.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНЫХ УСЛОВИЙ НА СТАДИЯХ ДИАГЕНЕЗА И КАТАГЕНЕЗА

Осадконакопление изучаемых красноцветных отложений происходило

Ссылка для цитирования (for citation):

Ян Я. Диагенетические и катагенетические преобразования песчаников базальных отложений нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цзиян (бассейн Бохайвань, Китайская Народная Республика) // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2021. № 9–10. С. 38–42.

Yang Ya. Diagenetic and Catagenetic Transformations of Lower Eocene Basal Sandstones of the Southeastern Jiyang Depression (Bohaiwan Basin, People's Republic of China). Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2021;(9–10):38–42. (In Russ.)

в условиях аридного климата в бассейне с относительно высоким уровнем минерализации, в щелочной среде [5]. В процессе погружения органическое вещество нефтематеринских пород, расположенных над песчаными коллекторами, разлагалось с выделением большого количества кислот, в результате чего обстановка осадконакопления постепенно изменялась со щелочной на слабокислую и кислую.

Изменения кислотно-щелочных (pH) условий на стадиях диагенеза и протокатагенеза

Сделать определенные заключения об изменениях обстановки осадконакопления на стадиях диагенеза и протокатагенеза позволяют типы цементов. Так, карбонатный и ангидритовый цементы, а также растворение кварца могут свидетельствовать о наличии щелочной среды [6]. Изучение микроописания шлифов горных пород, отобранных в пяти скважинах, расположенных начиная от центра к периферии впадины Цзиян, позволило установить, что значение pH составляло: в скв. Хао 1 – 9,09; в скв. Ван 46 – 8,81; в скв. Ван 135 – 8,69; в скв. Ван 100 – 8,67; в скв. Ван 130 – 8,64; в скв. Ван 112 – 8,45. В целом значения параметра pH вписываются в диапазон 8,1–9,1. Таким образом, распределение уровня pH демонстрирует четкую закономерность изменения кислотно-щелочных условий осадконакопления – от сильнощелочных в центре впадины Цзиян до слабощелочных к ее периферии.

Изменения кислотно-щелочных (pH) условий на стадиях мезокатагенеза и апокатагенеза

Повышение кислотности среды привело к растворению полевых шпатов и карбонатных минералов цемента, что обусловило появление вторичной пористости коллекторов. Положение нефтематеринских пород в разрезе над коллекторами затрудняет поступление кислых флюидов в коллектор, следовательно, необходимым условием для свободного протекания процесса окисления среды является наличие крупных разломов [7–8]. Однако

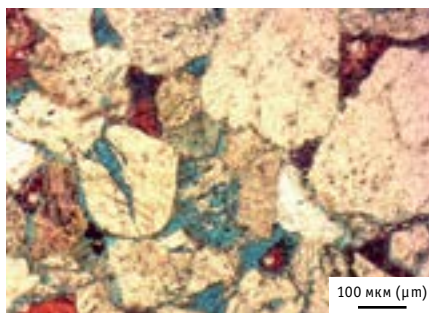


Рис. 1. Разрушение кварца (скв. Гао 51, глубина 1075,35 м), фото со 100-кратным увеличением

Fig. 1. Quartz fracture (well Gao 51, depth 1075.35 m), 100x magnification photo

основная область распространения нефтематеринских пород приурочена к центру впадины, где такие разломы отсутствуют, что затрудняет проникновение кислот в коллектор и создает условия для формирования лишь слабокислой среды. В то же время в районе веерообразной дельты внутри пологого склона близко к нефтематеринской породе наличие крупных разломов обусловило формирование кислой обстановки. При увеличении протяженности путей миграции кислот их концентрация во флюидах уменьшалась, а условия осадконакопления в районах пролювиальных конусов выноса на периферии впадины Цзиян становились слабокислыми.

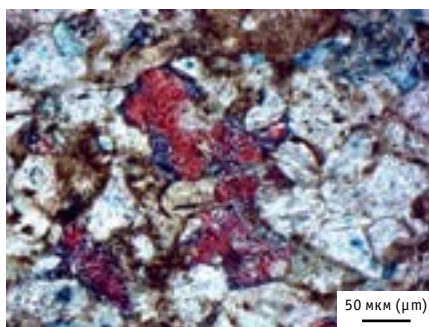
Таким образом, в пределах распространения базальных красноцветных отложений в юго-восточной части впадины Цзиян с точки зрения кислотно-

щелочных условий осадконакопления могут быть выделены три зоны: слабощелочные-слабокислые на периферии впадины, сильнощелочные-сильнокислые внутри пологого склона впадины и сильнощелочные-слабокислые в центре впадины.

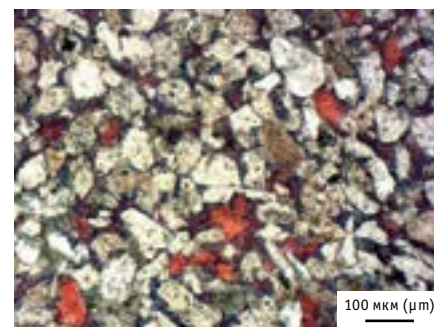
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНЫХ (pH) УСЛОВИЯХ СРЕДЫ

Слабощелочные-слабокислые условия осадконакопления на периферии впадины

На периферии пологого склона юго-восточной части впадины Цзиян в основном распространены пролювиальные конусы выноса [9]. Из-за неглубокого залегания песчаных коллекторов процессы уплотнения осадочных пород на периферии выражены относительно слабо, контакты обломочных зерен в основном относятся к категориям точечных и линейных. Процесс цементации в слабощелочных условиях ослаблен. За счет уплотнения и цементации пористость в коллекторах на периферии впадины уменьшилась до 13,2 %, однако в глубине разреза по мере изменения условий среды до слабокислых за счет растворения полевых шпатов и карбонатного цемента вторичная пористость увеличилась до 2,5 %. Таким образом, в данных условиях среды в песчаных коллекторах преобладает первичная пористость, вторичная пористость проявлена слабо.



а) а)



б) б)

Рис. 2. Образовавшийся в сильнощелочной среде цемент: а) кальцита и феррокальцита (скв. Гао 41, глубина 2291,64 м), фото с 200-кратным увеличением; б) кальцита (скв. Ван 130, глубина 1900,35 м), фото со 100-кратным увеличением

Fig. 2. Cement formed in a strongly alkaline environment: a) calcite and ferrocalcite (well Gao 41, depth 2291.64 m), photo at 200x magnification; b) calcite (well Wang 130, depth 1900.35 m), photo at 100x magnification

Сильнощелочные-сильнокислые условия осадконакопления пологого склона впадины

Внутри пологого склона впадины распространяются отложения веерообразной дельты. С увеличением глубины залегания в этой зоне возрастает содержание минералов магматического происхождения, таких как кварц и полевые шпаты, и наблюдается процесс уплотнения пород: с точки зрения морфологии здесь преобладают линейные и неровные (вогнуто-выпуклые) контакты зерен. В некоторых областях хрупкие обломки пород могут быть разрушены и раздроблены в процессе уплотнения (рис. 1). В сильнощелочной среде процессы цементации проходили более активно с образованием значительного количества карбонатного и ангидритового цемента (рис. 2). С течением времени условия осадконакопления изменились на сильнокислые, что привело к растворению полевых шпатов и карбонатного цемента и, как следствие, к формированию вторичной пористости (рис. 3). И если в результате уплотнения и цементации первичная пористость уменьшилась до 9,8 %, то вторичная пористость вследствие растворения минералов в кислой среде возросла до 10,7 %. Таким образом, в данных условиях в песчаных коллекторах представлены в равной степени как первичные, так и вторичные пустоты.

Сильнощелочные-слабокислые условия осадконакопления в центре впадины

Изолированные отложения песчаных баров развиты в мелководных озерах. Изначально условия осадконакопления были здесь сильнощелочными, уменьшение первичной пористости за счет цементации составляет 10,8 %. Кроме того, на данный процесс повлияли выраженные процессы уплотнения (рис. 4), обусловленные глубиной залегания пород, что привело к снижению пористости еще на 21 %. Таким образом, первичные пустоты практически полностью исчезли, первичная пористость снизилась до 3,2 %. В то же время из-за отсутствия разломов, сообщаемых с нефтематеринскими породами, доступ кислых флюидов к песча-

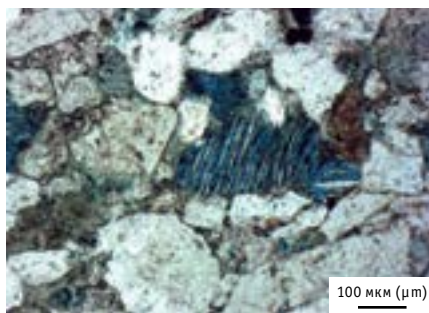


Рис. 3. Растворение полевых шпатов (скв. Гуан 4, глубина 2749,7 м), фото со 100-кратным увеличением

Fig. 3. Feldspar dissolution (well Guan 4, depth 2749.7 m), 100x magnification photo

ным коллекторам затруднен, поэтому процесс растворения полевых шпатов и карбонатных цемента шел неактивно, вследствие чего увеличение вторичной пористости за счет растворения минералов составило лишь 2,3 % (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из числа процессов, проявившихся в песчаных коллекторах базальных красцветных отложений юго-восточной части впадины Цзиян на стадии диагенеза и катагенеза, в основном выделяются уплотнение осадка и осадочных пород, цементация, частичное (коррозия) растворение минералов и метасоматоз.

2. Анализ исходных обстановок осадконакопления и их изменения в процессе диагенеза и катагенеза позволил сделать выводы о преобладании щелочных условий на стадии диагенеза и протокатагенеза и формировании более кислой среды по мере погружения толщ пород, что обусловлено процессами разложения органического вещества нефтематеринских пород с выделением кислых продуктов разложения, изменивших pH среды в коллекторских интервалах.

3. От центра к периферии впадины выделяются три зоны, характеризующиеся различными сценариями изменения кислотно-щелочных (pH) условий среды и, как следствие, различным соотношением первичной и вторичной пористости коллекторов:

- слабощелочные-слабокислые условия среды на периферии впадины: под воздействием данных условий первичная пористость уменьшилась до 13,2 %, вто-

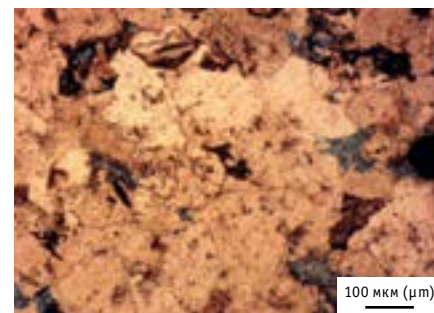


Рис. 4. Сильное уплотнение пород, обусловившее уменьшение первичной пористости (скв. Фан 1, глубина 3372,15 м), фото со 100-кратным увеличением

Fig. 4. Severe compaction of rocks resulting in reduced primary porosity (well Fan 1, depth 3372.15 m), 100x magnification photo

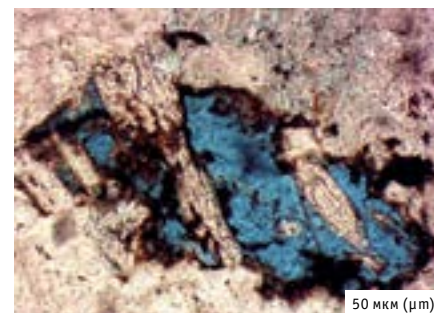


Рис. 5. Растворение доломита, обусловившее небольшое увеличение вторичной пористости (скв. Фан 1, глубина 3512,38 м), фото с 200-кратным увеличением

Fig. 5. Dolomite dissolution resulting in a slight increase in secondary porosity (well Fan 1, depth 3512.38 m), photo at 200x magnification

ричная увеличилась до 2,5 %, что говорит о главенствующей роли первичной пористости в формировании пустотного пространства коллекторов;

- сильнощелочные-сильнокислые условия среды внутри пологого склона впадины: в этих условиях первичная пористость уменьшилась до 9,8 %, а вторичная увеличилась до 10,7 %, что определяет равную значимость как первичной, так и вторичной пористости;

- сильнощелочные-слабокислые условия среды в центре впадины: для таких обстановок характерно сильное уменьшение первичной пористости (до 3,2 %) и минимальное увеличение вторичной пористости (до 2,3 %), что определяет наименьшую практическую значимость коллекторов данного типа для дальнейшего изучения.

Литература:

1. Цзоу Цайнэн, Тао Шичжэн, Чжоу Хуй. Цзьянь сянь дэ синчэн, фэнлэй юй динлян пинцзя фанфа [Генезис диагенетических фаций, классификация и методы количественной оценки] // Шию кантан кайфа [Разведка и разработка нефтяных месторождений]. 2008. № 35 (5). С. 526–540 (на китайском языке; 邹才能, 陶士振 周慧. 成岩相的形成, 分类与定量价方法. 石油勘探与开发, 2008;35(5):526–540).
2. Ван Яньчжун. Дунин аосьянь бэйдай гуцзиньси цышэн кунси фаюйдаи чэнин цзичжи ди яньхуа моши [Диагенетические механизмы и эволюционные закономерности развития палеогеновых отложений северной части впадины Дунин] // Шию дасюе сюебао [Вестник нефтяного университета]. 2010. С. 81–89 (на китайском языке; 王忠. 东凹陷北古近系次生孔隙发育成因机制及演化模式. 石油大学学报, 2010:81–89).
3. Чжоу Яоци, Чжоу Чжэньчжу, Чэн Юн. Дунин аосьянь минфэн дицюй шэньбу чуцэн цзьянь хуанцзин бианхуа яньцзю [Исследование диагенетических преобразований окружающей среды нижних отложений в районе Минфэн, впадина Дунин] // Ди сюе цьяньюань [Историческая геофизика]. 2011. № 18 (2). С. 268–276 (на китайском языке; 周瑶琪, 周振柱, 勇. 东凹陷民丰地区深部成岩环境变化研究. 地学前, 2011;18(2):268–276).
4. Сянь Бэн чжун, Ву Чжаныгуо, Цзян Цзайхин. Цзаоци цзьянь цзоюн яньцзю динчжань ди фачжань фансян [Эволюция и направление развития процессов раннего диагенеза] // Шию дасюе сюебао: цзыжан кэсюебан [Вестник нефтяного университета: издание по естествознанию]. 2004. № 28 (6). С. 133–139 (на китайском языке; 本忠, 吴战, 姜在兴. 早期成岩作用研究展及发展方向. 石油大学学报: 自然科学版, 2004;28(6):133–139).
5. Ню Шуаньвэн, Лидиянь. Дунин аосьянь дундуань шисиньтун хунцэн чуцэн дуочун цзьянь хуанцзин ди яньхуан моши [Множественные диагенетические условия и модель развития эоценовых красноцветных отложений восточной части впадины Дунин] // Шию тяньжяньци дичжи [Геология нефти и газа]. 2014. № 35 (5). С. 661–669 (на китайском языке; 牛栓文, 李岩. 东凹陷东段始新统多重成岩环境及演化模式. 石油与天然气地, 2014;35(5):661–669).
6. Чжан Шаньвэн, Юань Цзин, Суй Фэнгуи. Дунин аосьянь бэйбу шахэдие сыцзу шэньбу дуочун цзьянь хуанцзин ди яньхуан моши [Множественные диагенетические условия и модель развития нижних отложений яруса Шахэцзе-4 северной части впадины Дунин] // Дичжи кэсюе [Геологические науки]. 2008. № 43 (3). С. 576–587 (на китайском языке; 善文, 袁静, 隋凤. 东凹陷北部沙河街四段深部多重成岩环境及演化模式. 地科学, 2008;43(3):576–587).
7. Тан Сяньфэн, Тянь Динчунь, Ли Жчубин. Дунин аосьянь гуцзиньси кундяньчжу цзьянь тэчжэн ди дуй чуцэн дэ кунчжи [Диагенетические характеристики палеогеновых отложений формации Кундянь впадины Дунин и их влияние на коллектор] // Мэнтянь дичжи ю Кантан [Геология и разведка угольных месторождений]. 2010. № 17 (6). С. 33–40 (на китайском языке; 先, 田景春, 李祖兵. 东凹陷古近系孔店成岩特征及对的控制. 煤田地与勘探, 2010;17(6):33–40).
8. Ван Цзянь, Цао Инчан, Гао Юнцзинь. Дунин аосьянь гуцзиньси хунцэн чуцэн цзьянь цзоюн тэчжэн цзи синцэн цзичжи [Характеристики диагенеза и механизм формирования палеогеновых красноцветных отложений во впадине Дунин] // Сиан шию сюебао [Вестник нефтяного университета Сиан]. 2013. № 34 (2). С. 283–292 (на китайском языке; 王健, 操长, 高永. 东凹陷古近系成岩作用特征及形成机制. 西安石油学报, 2013; 34(2):283–292).
9. Конюхов А.И., Чэнь Сюэцзюнь. Литология и условия формирования палеогеновых отложений во впадине Дунин (бассейн Бохайского залива, КНР) // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 6. С. 613–636.

References:

1. Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui. Chenggyanxiang de xingcheng, fenlei yu dingliang pingjia fangfa [Genesis of Diagenetic Facies, Classification and Quantification Methods]. Shiyou kantan kaifa [Petroleum Exploration and Development]. 2008. No. 35 (5). P. 526–540 (邹才能, 陶士振 周慧. 成岩相的形成, 分类与定量价方法. 石油勘探与开发, 2008;35(5):526–540). (In Chinese)
2. Wang Yanzhong. Dongying aoxian beidai gujinx cisheng kongxi fayudai chengyin jizhi ji yanhua moshi [Diagenetic Mechanisms and Evolutionary Model for Paleogene Deposits in the Northern Part of the Dongying Depression]. Shiyou daxue xuebao [Bulletin of the Petroleum University]. 2010. P. 81–89 (王忠. 东凹陷北古近系次生孔隙发育成因机制及演化模式. 石油大学学报, 2010:81–89). (In Chinese)
3. Zhou Yaoqi, Zhou Zhenzhu, Chen Yong. Dongying aoxian minfeng diqu shenbu chuceng chengyan huanjing bianhua yanjiu [Research on Diagenetic Environmental Changes of Lower Deposit in the Minfeng Area, Dongying Depression]. Dixueqianyan [Historical Geophysics]. 2011. No. 18 (2). P. 268–276 (周瑶琪, 周振柱, 勇. 东凹陷民丰地区深部成岩环境变化研究. 地学前, 2011;18(2):268–276). (In Chinese)
4. Xian Benzong, Wu Zhanguo, Jiang Zaixing. Zaoqi chengyan zuoy yanjiu jinzhan ji fazhan fangxiang [Research Evolution and Development Direction in Early Diagenesis]. Shiyou daxue xuebao [Bulletin of Petroleum University: Natural Sciences Edition]. 2004. No. 28 (6). P. 133–139 (本忠, 吴战, 姜在兴. 早期成岩作用研究展及发展方向. 石油大学学报: 自然科学版, 2004;28(6):133–139). (In Chinese)
5. Niu Suanwen, Li Jiyan. Dongying aoxian dongduan shixintong hongceng chuceng duochong chengyan huanjing ji yanhua moshi [Multiple Diagenetic Environments and Evolutionary Model of Eocene Red Beds the Eastern Part of the Dongying Depression] Shiyou tianranqi dizhi [Oil and Gas Geology]. 2014. No. 35 (5). P. 661–669 (牛栓文, 李岩. 东凹陷东段始新统多重成岩环境及演化模式. 石油与天然气地, 2014;35(5):661–669). (In Chinese)
6. Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui. Dongying aoxian beibu shahejiezu siduan shenbu chuceng duochong chengyan huanjing ji yanhua moshi [Multiple Diagenetic Environments and Evolutionary Model in the Lower Shahejie – 4 Formations in the Northern Part of the Dongying Depression]. Dizhi kexue [Geological Sciences]. 2008. No. 43 (3). P. 576–587. (善文, 袁静, 隋凤. 东凹陷北部沙河街四段深部多重成岩环境及演化模式. 地科学, 2008;43(3):576–587). (In Chinese)
7. Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing. Dongying aoxian gujinx kongdianzu chengyantezheng ji dui chuceng de kongzhi [Diagenetic Characteristics of the Paleoproterozoic Kongdian Constituent Rocks in the Dongying Depression and Their Control of the Reservoir]. Meitian dizhi yu kantan [Coalfield Geology and Exploration]. 2010. No. 17 (6). P. 33–40 (先, 田景春, 李祖兵. 东凹陷古近系孔店成岩特征及对的控制. 煤田地与勘探, 2010;17(6):33–40). (In Chinese)
8. Wang Jian, Cao Yingchang, Gao Yongjin. Dongying aoxian gujinx hongceng chuceng chengyan zuoyong tezheng ji xingcheng jizhi [Characteristics and Formation Mechanism of Paleoproterozoic Red Reservoir Diagenesis in the Dongying Depression]. Xian shiyou xuebao [Bulletin of Xi'an Petroleum University]. 2013. No. 34 (2). P. 283–292 (王健, 操长, 高永. 东凹陷古近系成岩作用特征及形成机制. 西安石油学报, 2013;34(2):283–292). (In Chinese)
9. Konyukhov A.I., Xiaojun Ch. Lithology and Formation Conditions of Paleogene Rocks in the Dongying Depression (Bohai Bay Basin, China). Lithology and Mineral Resources. 2007;42(6):551–571.