

新疆克拉玛依红山湖剖面白垩系清水河组 结核成因及其意义*

纪友亮^{1,2,3} 李易伦¹ 周 勇^{2,3} 祁利琪^{1,3} 高崇龙^{1,3}
任 影^{1,3} 张 阳¹ 孙廷彬¹ 于景维¹

1 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 以新疆克拉玛依红山湖剖面白垩系清水河组中的砂岩“结核”为研究对象, 系统研究了含砂岩“结核”地层的岩性特征、砂岩“结核”的外表形态、内部结构、物质组成、形成环境和成因。红山湖剖面白垩系清水河组主要发育一套滨岸浅水三角洲相大型交错层理砂岩, 在不同期次的分流河道底部砂岩中广泛发育有球状、半球状、椭球状及其他形状的砂岩“结核”。关于这种结核的成因, 目前有 3 种观点: (1) 球形风化成因说; (2) 成岩成因说; (3) 内碎屑成因说。为了搞清楚砂岩“结核”的成因, 通过野外地质剖面实测、岩石学薄片观察, 系统研究了该类“结核”的宏观产状、微观结构、物质组成及与宿主砂岩的成因关联。研究结果表明: 该“结核”并非内碎屑, 而是在同生—成岩阶段, 砂岩经历了“结核状”成岩胶结, 后期抬升到地表后, 又经历差异风化后的产物; “结核”中心普遍发育有炭化的植物碎屑, 围绕植物碎屑向外依次形成含铁方解石和铁方解石胶结物环带, “结核”的层理构造与宿主砂岩的层理构造具有连续性, 未受后期构造扰动; 砂岩“结核”因胶结致密, 抗风化能力显著强于周围未胶结或弱胶结砂岩, 经表生风化作用后呈现球形、半球形、椭球形及其他不规则形态。结合区域沉积背景与成岩环境分析, 认为该类成岩“结核”的形成指示清水河组浅水三角洲沉积时分流河道水动力强、有机质输入充沛、早期成岩阶段孔隙水介质呈弱碱性—中性等特征, 为胶结物沉淀提供了有利化学条件。研究成果不仅厘清了清水河组砂岩“结核”的成因争议, 更为准噶尔盆地白垩系滨岸浅水三角洲沉积环境恢复与成岩作用演化研究提供了关键地质依据, 对油气储集层的非均质研究和油气开发也具有参考价值。

关键词 新疆 红山湖剖面 白垩系 清水河组 砂岩“结核” 差异成岩 浅水三角洲 环境意义

第一作者简介 纪友亮, 男, 1962 年生, 1983 年获华东石油学院学士学位, 1991 年获石油大学(北京)博士学位, 现为中国石油大学(北京)地学院教授和中国石油大学(北京)克拉玛依校区特聘教授、博士生导师, 主要从事石油地质学、沉积学和层序地层学方面的研究。E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Genesis and significance of concretions in the Cretaceous Qingshuihe Formation at Hongshanhu section, Karamay, Xinjiang

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

* 国家自然科学基金项目(编号: 42072115)和新疆维吾尔自治区“天池英才”计划资助项目共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072115), and “Tianchi Talent” Program of the Xinjiang Uygur Autonomous Region]

收稿日期: 2025-11-04 改回日期: 2025-11-28

JI Youliang^{1,2,3} LI Yilun¹ ZHOU Yong^{2,3} QI Liqi^{1,3} GAO Chonglong^{1,3}
REN Ying^{1,3} ZHANG Yang¹ SUN Tingbin¹ YU Jingwei¹

1 *China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Xinjiang Karamay 834000, China*

2 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

3 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

Abstract This study focuses on sandstone “concretions” in the Cretaceous Qingshuihe Formation at the Hongshanhu Section. It systematically investigates the lithological characteristics of concretion-bearing strata, as well as the external morphology, internal structure, material composition, formation environment and genesis of the concretions. The Cretaceous Qingshuihe Formation at the Hongshanhu Section mainly develops a set of shallow-water delta facies sandstones with large-scale cross-bedding. Spherical, hemispherical, ellipsoidal, and other shaped sandstone “concretions” are widely distributed in the bottom sandstones of distributary channels of different stages. Currently, there are three viewpoints on the genesis of these concretions: (1) spherical weathering genesis; (2) diagenetic genesis; (3) intraclast genesis. To clarify their genesis, this paper systematically studies the macro occurrence, microtexture, material composition of the concretions, and their genetic relationship with host sandstones through field geological section measurement and petrographic thin section observation. The results show that the concretions are not intraclasts, but products of “concretionary” diagenetic cementation of sandstones during the syngenetic-diagenetic stage, followed by differential weathering after uplift to the surface. Carbonized plant detritus is commonly developed in the center of the “concretions”, with ferruginous calcite and calcite cement zonations sequentially formed outward around the plant detritus. The bedding structure of the “concretions” is consistent with that of the host sandstones without later tectonic disturbance. Due to dense cementation, the sandstone “concretions” have significantly stronger weathering resistance than the surrounding uncemented or weakly cemented sandstones, presenting spherical, hemispherical, ellipsoidal, and other irregular shapes after epigenetic weathering. Combined with the analysis of regional sedimentary background and diagenetic environment, it is believed that the formation of such diagenetic “concretions” indicates strong hydrodynamic forces in distributary channels, abundant organic matter input during the shallow-water delta deposition of the Qingshuihe Formation, and weakly alkaline-neutral pore water medium during the early diagenetic stage, which provided favorable chemical conditions for cement precipitation. The research results not only clarify the controversy over the genesis of sandstone “concretions” in the Qingshuihe Formation, but also provide key geological evidence for the restoration of the Cretaceous shoreline shallow-water delta sedimentary environment and the study of diagenetic evolution in the Junggar Basin, and have reference value for the heterogeneity research of oil and gas reservoirs and oil and gas development.

Key words Xinjiang, Hongshanhu section, Cretaceous, Qingshuihe Formation, sandstone concretions, differential diagenesis, shallow-water delta, environmental significance

About the first author JI Youliang, born in 1962. He obtained a bachelor's degree from East China Petroleum Institute in 1983 and a Ph.D. degree from University of Petroleum (Beijing) in 1991. Currently, he is a professor at the College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), a specially-appointed professor at China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, and a supervisor of doctoral students. His main research areas include petroleum geology, sedimentology, and sequence stratigraphy. E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn.

0 引言

结核构造作为沉积岩中常见的特殊岩石构造，其形成与沉积环境、成岩作用及后期改造过程密切相关，不同成因类型的结核记录了不同的地质历史信息。在陆相地层中，结核的发育特征不仅能够反映沉积物的沉积速率、水动力条件，还能为恢复古气候、古水文及古生态环境提供重要线索（Sellés-Martínez, 1996；梁斌等, 2007；董进等, 2009；张娜娜等, 2019）。

位于新疆克拉玛依的红山湖剖面出露的白垩系清水河组为一套滨岸浅水三角洲相大型交错层理砂岩（图 1）（高崇龙等, 2015；邵龙义等, 2025），在不同期次的分流河道底部砂岩中广泛发育球状、半球状、椭球状及其他形状的砂岩“结核”构造。这些特殊的“结核”构造，引起了众多地质学者的关注。目前，关于该地区清水河组砂岩“结核”构造的成因存在 3 种不同的观点：（1）该类“结核”是岩石经球形风化作用形成的；（2）该“结核”为沉积过程中形成的内碎屑，是早期半固结的砂岩沉积物，在水动力条件较强环境下，经破碎、搬运、磨圆、再沉积形成的；（3）该“结核”的形成与成岩期砂岩的差异胶结作用相关。

为了明确红山湖剖面清水河组砂岩“结核”构造的成因，为准确恢复该地区白垩纪早期沉积环境和成岩环境提供证据，通过系统的野外地质调查、样品采集及室内分析测试，从地层特征、“结核”宏观形态、微观结构、物质组成等方面入手，深入剖析砂岩“结核”构造的形成过程，确定了“结核”的成因类型，并探讨了其对古沉积环境和成岩环境恢复的指示意义。

1 区域构造、沉积背景和地层发育特征

克拉玛依红山湖剖面位于准噶尔盆地西部隆起与腹部的过渡带，在石炭纪结晶基底的基础上，经历了二叠纪、三叠纪的断陷期和侏罗纪、白垩纪的拗陷期以及古近纪和新近纪早期的前陆期后，在新近纪末期和第四纪喜马拉雅运动，冲断抬升，遭受剥蚀。研究区周边出露了石炭系、三叠系、侏罗系的八道湾组、三工河组、西山窑组、齐古组和白垩系的清水河组、呼图壁河组，以及古近系和新近

系的乌伦古河组和沙湾组（图 1-C）（王维一, 2021）。其中白垩系清水河组在区域上为一套陆相河流、三角洲和湖泊相地层（高崇龙等, 2015）。

红山湖剖面白垩系清水河组出露总长度约 500 m，厚度约 15 m，根据岩性组合及沉积构造特征，自下而上可将其划分为 3 个岩性段（图 1-D）：

1) 下段：厚度约 7 m，主要由灰白色、灰绿色粗砂岩、含砾粗砂岩组成，夹少量红色泥岩和灰绿色粉砂岩薄层。砂岩中发育大型板状交错层理、楔状交错层理、板状斜层理和槽状交错层理，层理系厚度一般为 0.3~1.5 m，部分层理系可达 2 m 以上，底部常见冲刷面构造，冲刷面之上可见棱角状泥砾、火山岩砾等滞留沉积。该段地层中砂岩“结核”构造最为发育，主要分布于浅水三角洲分流河道底部的粗砂岩中，“结核”含量约占岩石体积的 5%~10%。

2) 中段：厚度约 5 m，岩性以浅灰色中砂岩、细砂岩为主，夹多层灰黄色粉砂岩与泥岩互层。砂岩中发育中小型交错层理、平行层理及波状层理，粉砂岩与泥岩中可见水平层理及生物扰动构造。该段砂岩“结核”相对不发育，仅在局部砂岩夹层中可见少量小型球状“结核”。

3) 上段：厚度约 3 m，主要为灰黄色细砂岩、粉砂岩和紫红色泥岩互层。砂岩沉积构造以小型交错层理、波状层理为主，泥岩中可见钙质结核（姜结核）。该段地层可见少量小型球状砂岩“结核”。

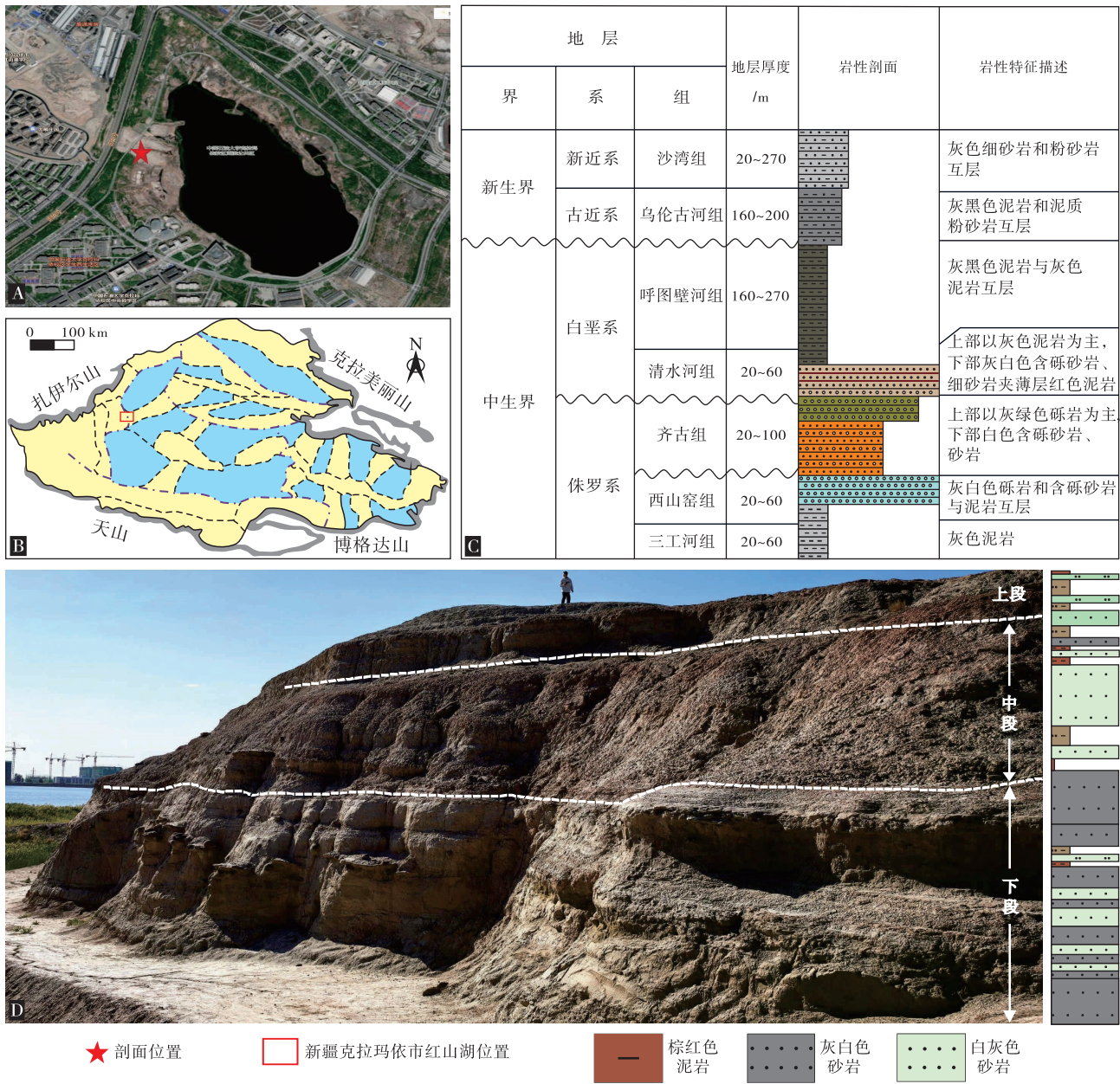
整体来看，红山湖剖面白垩系清水河组呈现出由下至上粒度逐渐变细、沉积构造规模逐渐减小的变化趋势，反映了白垩纪早期准噶尔盆地西北部从强水动力河道环境向弱水动力三角洲前缘及滨浅湖环境的演化过程，与区域上清水河组的河湖相沉积演化规律一致（陈林等, 2014；董艳蕾等, 2015）。

2 砂岩“结核”的特征

2.1 砂岩“结核”的宏观特征

2.1.1 砂岩“结核”多分布在不同期次分流河道的底部

红山湖剖面白垩系清水河组砂岩“结核”在宿主砂岩中局部富集分布，局部富集区域的砂岩



A—新疆克拉玛依红山湖位置图；B—红山湖剖面位置；C—准噶尔盆地西部隆起与腹部过渡带地层综合柱状图；
D—新疆克拉玛依红山湖剖面白垩系清水河组露头宏观特征

图 1 新疆克拉玛依红山湖剖面基本地质概况

Fig. 1 Geological background of Hongshanhu section, Karamay, Xinjiang

“结核”的含量可达 10% 以上，形成“结核层”（图 2）。“结核”的分布与砂岩的粒度具有一定的相关性，在粗砂岩中结核发育最为密集，中砂岩中次之，细砂岩及粉砂岩中相对较少，表明结核的形成与沉积物的粒度及渗透性密切相关。

最重要的一点是，砂岩“结核”的分布还与分流河道冲刷面和大型层理系界面具有密切的联系，在冲刷面之上的砾石滞留沉积物和大型层理系

界面附近，砂岩“结核”的发育密度明显高于其他部位，约占 70%，而其他部位约占 30%。

2.1.2 “结核”的外表形态各异、大小不一

砂岩“结核”的形态多样，以球状、椭球状、半球状及半椭球状为主（图 3-A 至 3-G），还有少部分呈“蘑菇状”、“地雷状”、“圆盘状”、“龟头状”、片状及不规则状等（图 3-H 至 3-N），其中半球状和半椭球状砂岩“结核”“趴”在或“吊”

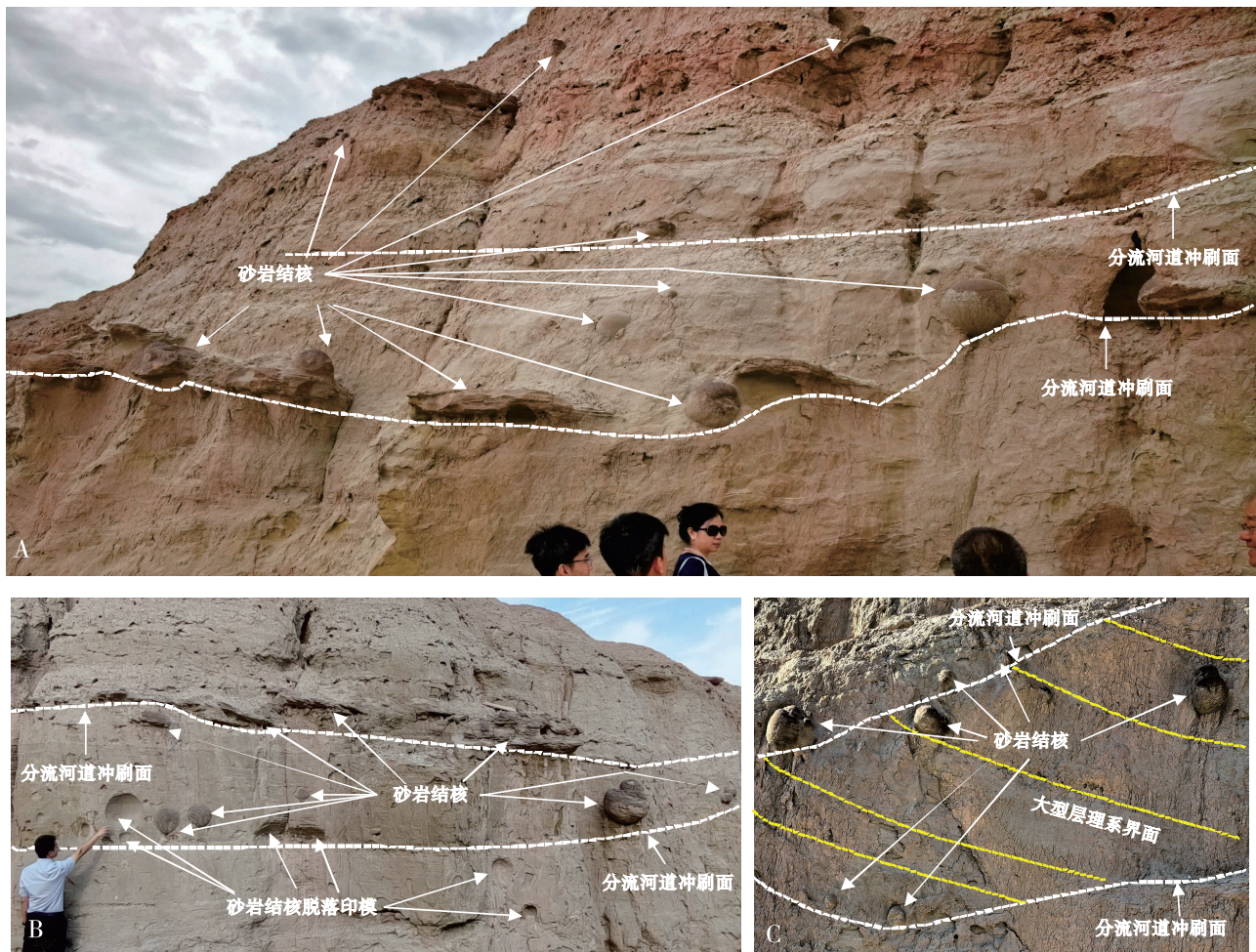


图 2 红山湖剖面清水河组砂岩“结核”的宏观分布特征

Fig. 2 Macroscopic distribution characteristics of “concretions” in sandstones of the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section

在浅水三角洲分流河道的底砾岩或滞留沉积之上(图 3-C, 3-D, 3-E), “蘑菇状”结核的“颈部”或“根部”连接在“片状”结核或“圆盘状”结核之上。不规则状结核的形态差别很大, 有的像重荷构造(图 3-I), 有些则呈形态各异的“瘤状”(图 3-J)。

球状“结核”的直径一般为 10~40 cm, 最小的直径 2 cm, 最大的直径可达 70 cm; 椭球状“结核”的长轴长度多为 20~50 cm, 短轴长度多为 5~15 cm; 圆盘状、片状结核的长度较大, 最长可达 50~150 cm, 厚度可达 20~30 cm。

2.1.3 “结核”表面的颜色多为铁锈色

几乎所有早期出露的砂岩“结核”表面的颜色为铁锈色, 而砂岩“结核”的新鲜面和新挖出的砂岩“结核”表面的颜色与宿主砂岩的颜色一致, 为灰绿色或灰白色。表明“结核”内部的胶

结物富含 Fe 离子, 经一定时间的风化, Fe 离子变成氧化铁, 使得“结核”表面的颜色为铁锈色(图 2; 图 3)。

2.1.4 “球形”的风化特征

由于出露地表, 砂岩“结核”及宿主砂岩均经历了不同程度的风化作用。宿主砂岩经风化后呈现疏松状, 颗粒间胶结物大量流失, 而砂岩“结核”则表现出较强的抗风化能力, 风化程度明显低于宿主砂岩(图 2)。在风化作用较强的区域, 宿主砂岩被大量侵蚀, 结核则突出于岩石表面, 形成“球链状”地貌(图 2), 进一步表明结核的胶结程度高于宿主砂岩, 这也是“结核”能够在风化过程中得以保留的关键原因。有些“结核”从宿主砂岩的表面脱落, 在剖面上留下半球状印模构造(图 2-B)。

2.1.5 砂岩“结核”与宿主砂岩的层理连续一致

多数砂岩“结核”的表面相对光滑, 其表面



A—球状“结核”；B—大球状与小球状“结核”叠在一起；C—半球状“结核”“趴”在细砾岩上；D—2个半球状“结核”“吊”在细砾岩上；E—半球状“结核”“吊”在细砾岩上；F—椭球状或葫芦状“结核”；G—椭球状“结核”；H—“龟头”状“结核”；I、J—瘤状“结核”；K—蘑菇状“结核”；L—“地雷状”“结核”；M—层状“结核”；N—不规则状“结核”

图 3 红山湖剖面清水河组砂岩“结核”的形状

Fig. 3 Shapes of “concretions” in sandstones of the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section

可见清晰的层理纹路(图 3; 图 4), 其层理纹路与宿主砂岩的层理纹路连续一致(图 4-A, 4-B), 有

些砂岩“结核”横跨岩层界面, 即岩层界面横穿砂岩“结核”(图 4-A)。

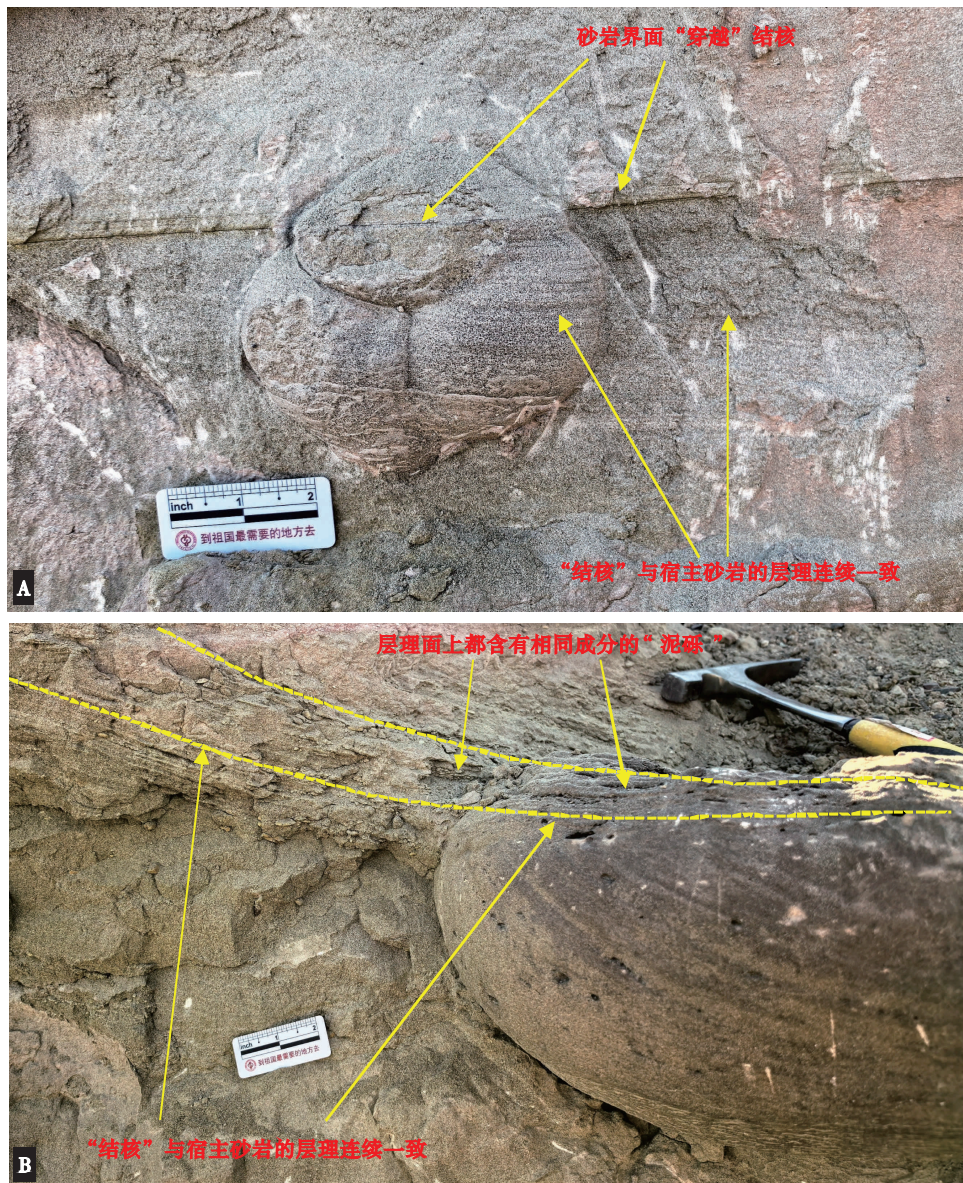


图 4 红山湖剖面清水河组砂岩“结核”与宿主砂岩的层理连续一致

Fig. 4 Bedding continuity and consistency between sandstone “concretions” and host sandstones of the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section

2.1.6 砂岩“结核”的内部结构

该区几乎所有砂岩“结核”核心部位存在炭化植物碎屑。当砂岩“结核”被敲开成两半之后，在其核心部位可发现有炭化的植物碎屑，从形态上看，这些植物碎屑可以是树皮、树叶或植物茎残片，其颜色为黑色，已明显炭化。沿着有机质核心向外，发育浅褐色和灰白色相间的同心环状的晕带（图 5-B）。

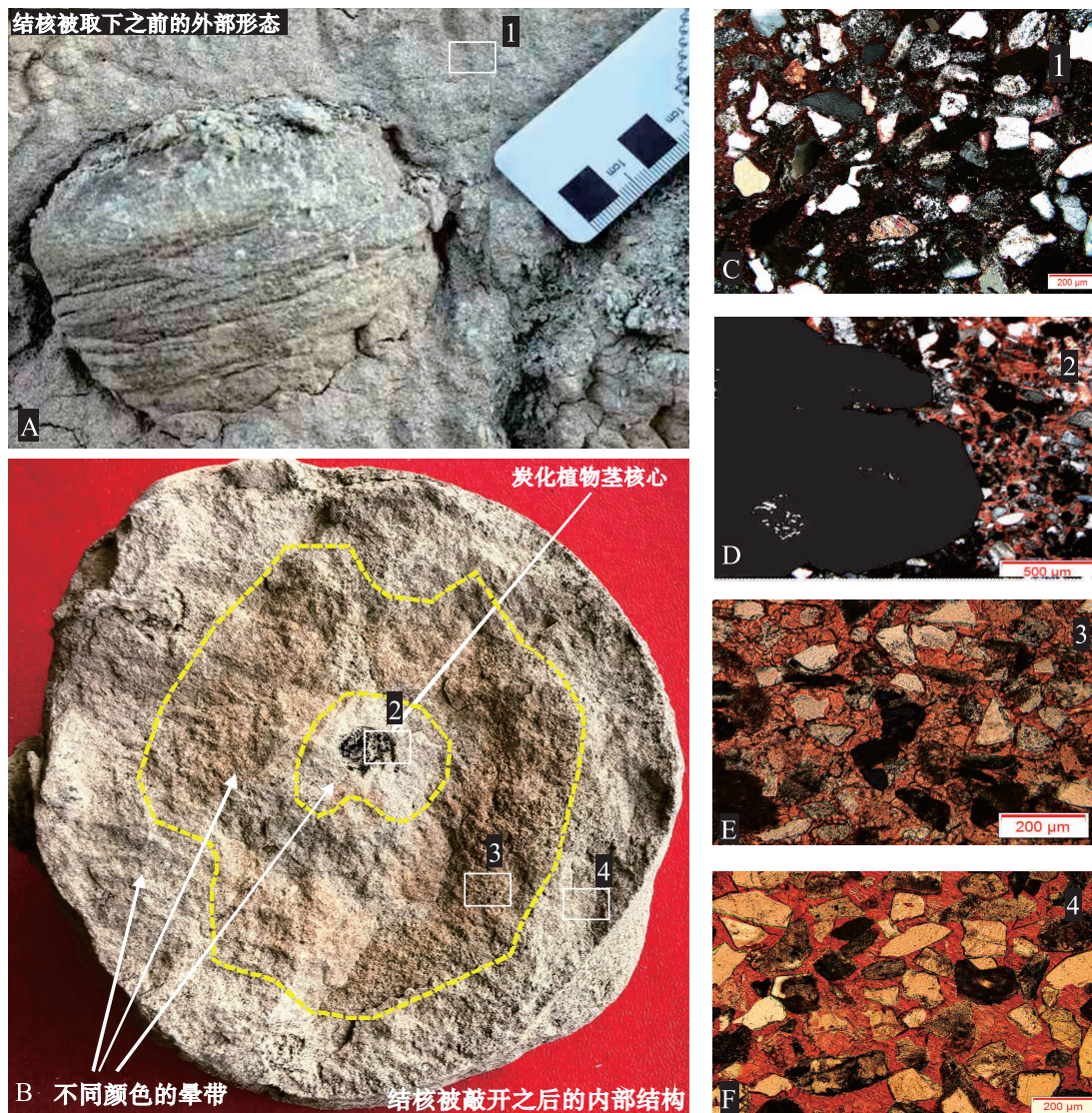
2.2 “结核”的微观特征及物质组成特征

通过偏光显微镜观察发现，红山湖剖面清水河

组砂岩“结核”的微观结构具有明显的分带性，从中心到边缘可分为 2 个主要部分：有机质核心、不同期次的胶结物层（图 5），胶结物层物质组成是碎屑颗粒及铁方解石和含铁方解石胶结物，各部分的微观特征如下。

2.2.1 “结核”的矿物成分

通过偏光显微镜观察，砂岩“结核”及宿主砂岩的矿物组成是相同的，主要为细砂岩与含砾中、粗砂岩，细砂岩的粒径范围为 0.125 ~ 0.25 mm，中砂岩的粒径范围为 0.25 ~ 0.5 mm，分



A—砂岩“结核”的层理特征及与宿主砂岩的关系；B—砂岩“结核”被取下敲开后，见到的有机质核心及胶结晕带；C—宿主砂岩弱胶结，正交光（位置：A-1）；D—有机质核心，正交光（位置：B-2）；E—砂岩“结核”暗色晕带，铁方解石，正交光（位置：B-3）；F—砂岩“结核”外带，含铁方解石胶结，正交光（位置B-4）

图 5 红山湖剖面清水河组砂岩“结核”的有机质核心及胶结晕带特征

Fig. 5 Characteristics of organic matter cores and cementation halos of sandstone “concretions” of the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section

选性好—较好，磨圆度为次棱角—次圆状(图 5-C 至 5-F)。砂岩碎屑的矿物组成主要是石英、长石和岩屑，其详细特征见表 1 和表 2。

2.2.2 有机质核心

从敲开的 3 个砂岩“结核”内部结构看，结核的中心都存在一个有机质核心，核心的形态多为不规则状，大小为 0.5~10 cm 不等，主要由树枝、树叶等植物残体等有机质碎屑组成(图 5-B)。在偏光显微镜下，有机质核心呈暗褐色或黑色

(图 5-D)，不透明，表明有机质来源于陆生高等植物。

2.2.3 胶结物层

围绕有机质核心向外发育连续的胶结物层，染色片呈红色，从内到外胶结物的类型及晶体形态发生逐渐变化。靠近有机质核心的内侧砂岩胶结物主要为含铁方解石，晶体大小为 50~100 μm (图 5-D)；中部砂岩的胶结物为细晶铁方解石(图 5-E)；外侧胶结物为中晶铁方解石(图 5-F)。

表 1 红山湖剖面清水河组砂岩矿物组成 (偏光显微镜下统计, 样品数 $n=7$)Table 1 Mineral composition of sandstones from the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section (Polarizing microscope statistics, number of samples $n=7$)

组分	含量/%	特征描述
石英	55~65	单晶石英为主,少量多晶石英,具波状消光,粒径 0.1~1.0 mm
长石	15~20	钾长石(正长石、微斜长石)与斜长石(钠长石)为主,钾长石具格子双晶,斜长石具聚片双晶,部分长石发生高岭土化
岩屑	20~25	主要为火山岩岩屑(安山岩、玄武岩岩屑),岩屑具有一定磨圆度
结核内的胶结物	10~35	主要为铁方解石,胶结类型以孔隙胶结为主
宿主砂岩内胶结物和杂基	2~5	方解石、伊利石黏土矿物,少量高岭石,分布于颗粒间隙

表 2 红山湖剖面清水河组砂岩“结核”与宿主砂岩的矿物组成、胶结物特征与物性特征的对比 (偏光显微镜下统计, 样品数 $n=7$)Table 2 Comparison of mineral composition, cement characteristics, and physical properties between “concretions” and host sandstones of the Qingshuihe Formation in Hongshanhu section (Polarizing microscope statistics, number of samples $n=7$)

样品编号	颗粒含量			颗粒粒径/mm	胶结物含量/%,成分	杂基含量/%	孔隙度/%
	石英/%	长石/%	岩屑/%				
1 [#] 结核	55	20	25	0.5~1	35,(含)铁方解石	1	5
1 [#] 宿主砂岩	55	20	25	0.5~1	5,(含)铁方解石	1	35
2 [#] 结核	65	15	20	0.4~0.8	30,铁方解石	4	7(面孔率)
2 [#] 宿主砂岩	65	15	20	0.4~0.8	2,铁方解石	4	30(面孔率)
3 [#] 结核	60	20	20	0.2~0.5	30,含铁方解石	3	6(面孔率)
3 [#] 宿主砂岩	60	20	20	0.2~0.5	2,含铁方解石	3	30(面孔率)
4 [#] 结核砂岩	65	15	20	0.1~0.4	30,铁方解石	2	1(面孔率)

出露地表时间长的结核, 表层的胶结物被氧化为赤铁矿, 呈棕褐色或铁锈色。

2.3 “结核”的成因分析

根据前述砂岩“结核”的宏观特征、微观特征、矿物成分及结核层理与宿主砂岩层理的连续一致性, 认为红山湖剖面白垩系清水河组砂岩“结核”为成岩结核, 其形成过程可划分为 3 个阶段: 沉积阶段、成岩阶段(核心形成与胶结带发育)、表生风化阶段(形态改造)(图 6)。

2.3.1 沉积阶段

清水河组沉积期, 克拉玛依红山湖地区处于准噶尔盆地西北缘的浅水三角洲平原环境, 气候温暖湿润, 水动力条件较强, 形成了大范围的分流河道砂体(图 2; 图 6-A)(谷云飞等, 2003; 高雷等, 2004)。在分流河道砂体沉积过程中, 河道水动力的周期性变化导致砂岩与泥岩交替沉积: 当水动力较强时, 搬运大量的砂质沉积物, 形成细砂岩、中砂岩, 发育大型交错层理; 当水动力减弱时, 沉积泥质沉积物, 形成红色泥岩, 发育水平层理

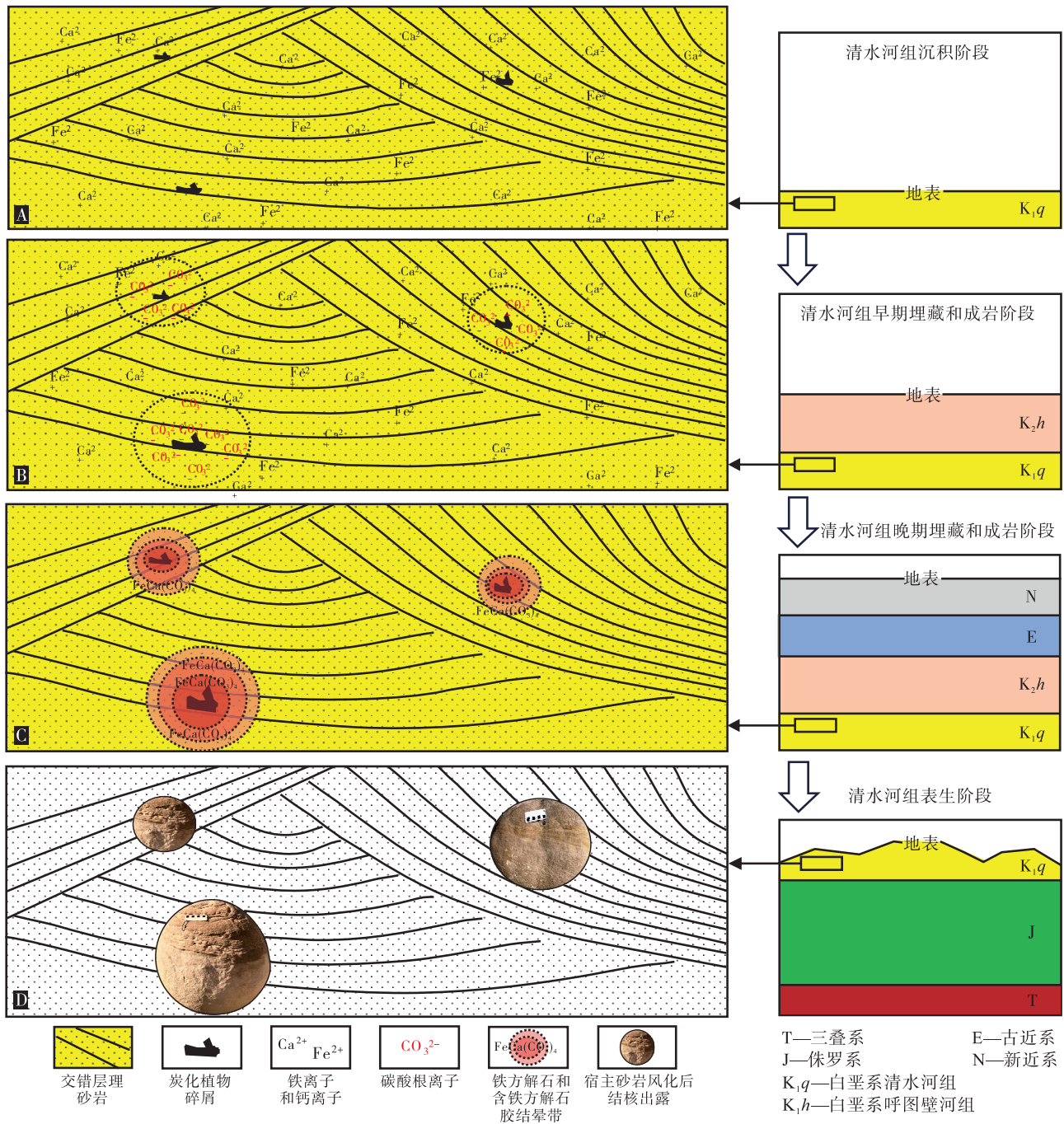
(图 2)。

在分流河道砂体底部的冲刷作用过程中, 下伏泥岩被冲刷, 形成大量棱角状的同生泥砾, 同陆源砾一起形成河床滞留沉积。由于水流的冲刷, 河道下部形成原始渗透性很好的厚层砂岩(高崇龙等, 2015), 同时大量的植物遗体(如根系、茎干)被冲刷搬运至河道底部, 与砂质沉积物一同沉积(图 5-B, 5-D; 图 6-A)(饶政等, 2008)。这些植物遗体即为结核的初始核心物质, 其分布主要受冲刷面的形态控制, 因此在冲刷面的低洼处, 植物遗体富集, 为后续结核的形成提供了核心条件。同时, 砂体的高孔隙度(30%~40%)与渗透性为孔隙水的流动提供了空间, 为胶结物的沉淀奠定了基础。

2.3.2 成岩阶段

沉积物沉积后, 随着埋藏深度的增加, 进入成岩阶段, 该阶段的主要地质作用为有机质分解、含铁方解石与铁方解石胶结物沉淀, 形成结核的核心区与胶结带(图 5-B, 5-E, 5-F; 图 6-B, 6-C)。

1) 核心区形成。埋藏环境下, 沉积物中的植



A—清水河组砂岩刚刚沉积后，砂岩中含有有机质碎屑；B—清水河组砂岩早期埋藏阶段，有机质碎屑周围 CO₂ 与碳酸根离子浓度增加；C—清水河组砂岩后期埋藏阶段，有机质碎屑周围形成铁方解石胶结物；D—清水河组砂岩抬升进入表生阶段，差异风化形成砂岩“结核”

图 6 红山湖剖面白垩系砂岩“结核”成因模式

Fig. 6 Genetic model of “concretions” in the Cretaceous sandstones of Hongshanhu section

物遗体在微生物的作用下发生初步分解，形成腐殖质有机质(图 6-B)。有机质的分解过程产生大量的有机酸与 CO₂，有机酸为弱酸，导致孔隙水的 pH 值降低，并使溶液的 pH 值维持在 5.5~6.5 之间(纪友亮等，1995；张立强，2011；宋磊等，

2025)，同时 CO₂ 浓度的增加，使得化学平衡，向着生成碳酸盐胶结物的方向移动。同时有机质的分解过程还消耗氧气，使周围环境为还原环境，使得溶液中 Fe、Mg 离子呈低价态，生成的碳酸盐胶结物可能为菱铁矿，后期在埋藏过程中，随着温度的

增加和 Ca 离子浓度的增加，菱铁矿逐渐发生重结晶作用转变为铁方解石（纪友亮等，1995）。

2) 胶结带发育。有机质分解产生的 CO_2 与孔隙水中的 Ca^{2+} （主要来自长石的风化溶解）结合，形成 CaCO_3 过饱和溶液（唐勇等，2003；王彤等，2021）。由于有机质核心的表面能较高， CaCO_3 优先在有机质核心的周围沉淀，同时 Fe^{2+} 大量存在，形成细晶含铁方解石和铁方解石胶结物（纪友亮等，1995；杨晓萍和顾家裕，2007）。铁方解石胶结物逐渐充填粒间的孔隙，将分散的砂粒胶结在一起，形成致密的胶结带（图 5-B，5-E，5-F；图 6-C）。该阶段的铁方解石和含铁方解石胶结物结晶度较好，晶粒大小均匀（0.05~0.1 mm），反映沉淀环境稳定。

3) 砂岩胶结“结核”形成的充分必要条件。充沛的有机质碎屑的输入及有机质碎屑埋藏演化过程中产生的局部“弱酸性—中性孔隙水和还原环境”为砂岩“结核”的胶结核心的形成提供了必要条件。但要形成砂岩“结核”状胶结还需满足如下充分条件：（1）即地层成岩流体中的 Ca、Mg、Fe 离子和碳酸根离子浓度达到饱和或过饱和状态，否则不可能在砂岩中沉淀胶结物；（2）强水动力的三角洲分流河道环境沉积的砂岩，尤其是分流河道冲刷面附近的含砾砂岩，原始物性好，孔隙喉道粗，为地层中成岩流体的流动和 Ca、Mg、Fe 离子和碳酸根离子的输送提供了良好的条件；（3）适合碳酸盐胶结物沉淀的 pH 值环境不能持续时间太长，否则，整套砂岩层会有足够的时间形成大面积连片胶结，不会形成“结核”状的局部胶结体。

2.3.3 表生风化阶段

晚白垩世以来，受燕山运动晚期—喜马拉雅运动的影响，克拉玛依红山湖地区发生抬升，清水河组地层出露地表，进入表生风化阶段（图 6-D）。

在表生环境下，大气降水、温度变化共同作用于清水河组砂岩，使其形成差异风化。

1) 物理风化作用：温度变化导致岩石颗粒间的黏结力减弱，导致砂岩沿层理面或裂隙发生崩解；温度变化还会引起岩石内部矿物的热胀冷缩，形成微裂隙，为化学风化提供通道（王来贵等，2018），宿主砂岩的胶结物含量低，更容易风化崩解。

2) 化学风化作用：大气降水中的 CO_2 与 H_2O 结合形成碳酸，对砂岩中的方解石胶结物产生溶解

作用，导致未胶结或弱胶结的宿主砂岩（胶结物含量 2%~5%）优先被溶蚀剥蚀，而“结核”因胶结物含量高（胶结带方解石含量 20%~30%），结构致密，抗溶解能力强，得以保留（图 6-D）。

在物理风化与化学风化的共同作用下，“结核”周围的宿主砂岩逐渐被剥蚀（方云等，2014），砂岩“结核”从砂岩中暴露出来，形成球形、半球形或椭球形等形态（图 2 至图 5；图 6-D），此外，表生环境中的 Fe^{2+} 在结核表面发生氧化，形成褐色或铁锈色铁质氧化物薄膜（图 2 至图 5；图 6-D）。

3 “结核”形成的环境意义

克拉玛依红山湖剖面清水河组砂岩“结核”的形成过程涉及沉积、成岩与表生 3 个阶段，其宏观产状、微观结构与物质组成蕴含了丰富的古环境信息，可为重建清水河组沉积—成岩—表生环境提供关键依据，同时对储集层非均质性研究和油气开发具有实际参考价值。

3.1 对沉积环境的指示意义

砂岩“结核”的分布特征指示了强水动力的分流河道环境。结核均集中发育于清水河组下段的不同期次的分流河道砂体底部，且靠近冲刷面分布（图 2），这一产状特征与分流河道的水动力条件密切相关。分流河道作为浅水三角洲平原的主要水动力通道，存在周期性强水动力事件（如洪水），洪水期的冲刷作用可剥蚀下伏泥岩，将泥岩中的植物遗体搬运至砂体底部沉积，形成结核的有机质核心（图 5；图 6）；同时，强水动力条件导致砂体分选性好、磨圆度高（次棱角—次圆状）（表 1）、渗透性好，为后续成岩流体的流动和胶结物的沉淀提供了良好的通道和场所。

3.2 对成岩环境的指示意义

成岩结核的微观分带结构（核心区—胶结带）记录了清水河组沉积—成岩阶段的环境参数，为重建区域成岩演化过程提供了直接证据。

3.2.1 指示成岩阶段的成岩环境为还原环境

砂岩“结核”核心区发育有机质，且靠近有机质核心的内侧砂岩胶结物有少量微晶菱铁矿，菱铁矿内的铁离子为低价铁，反映其成岩环境为还原

环境。

3.2.2 指示成岩阶段孔隙水为弱酸性—中性

成岩阶段,有机质分解产生的有机酸($\text{pH}=5.5\sim 6.5$)溶解长石颗粒,释放 Ca^{2+} 进入孔隙水;随着有机酸的消耗与 CO_2 的释放,孔隙水 pH 值逐渐升高至中性($\text{pH}=7.0\sim 7.5$), Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 结合形成 CaCO_3 过饱和溶液,在有机质核心周围均匀沉淀,形成细晶铁方解石胶结带(Chowdhury and Noble, 1996)。

3.2.3 对表生环境的指示意义

砂岩成岩“结核”的形态(球形、半球形、椭球形)与表面特征(铁质氧化物薄膜)记录了晚白垩世以来的表生风化过程,指示晚白垩世以来的古气候变迁,为重建区域古气候与古地形变迁提供了重要线索(Rossi *et al.*, 2001)。

砂岩“结核”表面的铁质氧化物薄膜的发育程度,可间接反映晚白垩世以来的古气候变迁。自晚白垩世至古近纪,准噶尔盆地西北缘处于温暖湿润和干旱交替期(陈林等, 2014),化学风化和物理风化作用强,结核表面形成厚层铁质氧化物薄膜;新近纪以来,气候逐渐向干旱—半干旱过渡,物理风化作用增强,宿主砂岩被强烈风化,但未完全破坏结核内部的胶结物。

3.3 对油气储集层开发的参考价值

砂岩成岩“结核”作为清水河组砂岩中的特殊胶结体,其分布与发育特征对油气储集层的孔隙结构与渗透性具有重要影响,可为油气的注水开发和提高采收率提供地质参考依据。

砂岩“结核”的胶结物含量高(胶结带30%~35%)、孔隙度低(<5%),而宿主砂岩胶结物含量低(2%~5%)、孔隙度高(25%~30%),导致砂岩储集层存在明显的非均质性,结核发育区为低孔低渗段,宿主砂岩区为相对高孔高渗段。这种非均质性分布规律,可为油气的注水开发效果和提供采收率提供依据。

4 结论

通过野外地质剖面实测、岩石学薄片观察分析,系统研究了克拉玛依红山湖剖面白垩系清水河组砂岩“结核”的特征、成因及环境意义,得出以下主要结论:

1) 砂岩“结核”的宏观和微观分布特征表明,其形成明显受控于沉积环境。砂岩“结核”集中发育于清水河组下段滨岸浅水三角洲分流河道砂体底部,靠近冲刷面分布;形态以球形、半球形、椭球形为主,结核的核心区发育有机质残片,结核与宿主砂岩层理连续性一致。

2) 砂岩“结核”的微观结构和胶结物成分表明,结核的形成也受控于局部成岩环境。通过对比球形风化、内碎屑与成岩结核3种成因观点,发现球形风化成因说无法解释“结核”胶结物的微观分带性,内碎屑成因说无法解释“结核”与宿主砂岩层理的连续一致性,而“有机质核心控制的局部非均匀成岩胶结和差异风化成因说”可全面合理解释这些特征。

3) 砂岩“结核”的形成过程可重建为3阶段模式:沉积阶段(有机质核心沉积)、成岩阶段(围绕有机质核心发育环带状胶结)和表生风化阶段(形态改造)。

参考文献 (References)

- 陈林,孙怡,许涛,张新见,程长领. 2014. 准噶尔盆地中部4区块白垩系清水河组沉积特征研究. 石油天然气学报, 36(2): 50-55, 6. [Chen L, Sun Y, Xu T, Zhang X J, Cheng C L. 2014. Sedimentary characteristics of Cretaceous Qingshuihe Formation in block 4 of central Junggar Basin. Journal of Oil and Gas Technology, 36(2): 50-55, 6]
- 董进,张世红, Ganqing Jiang, 赵庆乐, 李海燕, 史晓颖, 刘俊来. 2009. 华南宜昌陡山沱组四段碳酸盐结核形成环境研究及其烃源岩评价意义. 中国科学(D辑), 39(3): 317-326. [Dong J, Zhang S H, Jiang G Q, Zhao Q L, Li H Y, Shi X Y, Liu J L. 2009. Formation environment of carbonate concretions in Member 4 of the Doushantuo Formation, Yichang, South China and its significance for source rock evaluation. Science in China(Series D), 39(3): 317-326]
- 董艳蕾,朱筱敏,赵东娜. 2015. 准噶尔盆地车排子地区下白垩统沉积体系分布及油气成藏模式. 现代地质, 29(1): 71-79. [Dong Y L, Zhu X M, Zhao D N. 2015. Sedimentary system and reservoir models of the Lower Cretaceous in chepaizi area, Junggar Basin. Geoscience, 29(1): 71-79]
- 方云,乔梁,陈星,严绍军,翟国林,梁亚武. 2014. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究. 岩土力学, 35(9): 2433-2442. [Fang Y, Qiao L, Chen X, Yan S J, Zhai G L, Liang Y W. 2014. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottos. Rock and Soil Mechanics, 35(9): 2433-2442]
- 高雷,朱筱敏,吕雪雁. 2004. 准噶尔盆地3个泉地区下白垩统沉积相特征. 石油大学学报(自然科学版), 28(1): 5-9. [Gao L, Zhu X M, Lü X Y. 2004. Sedimentary facies of Lower Cretaceous in

- Sangequan area of Junggar Basin. *Journal of the University of Petroleum, China* (Edition of Natural Science), 28(1): 5-9]
- 高崇龙, 纪友亮, 任影, 向宝力, 王剑, 李东旭, 刘大卫, 王天云, 段小兵. 2015. 准噶尔盆地莫索湾地区白垩系清水河组沉积演化与有利砂体展布. *古地理学报*, 17(6): 813-828. [Gao C L, Ji Y L, Ren Y, Xiang B L, Wang J, Li D X, Liu D W, Wang T Y, Duan X B. 2015. Sedimentary evolution and favorable sandbody distribution of the Cretaceous Qingshuihe Formation in Mosuowan area, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 17(6): 813-828]
- 谷云飞, 马明福, 苏世龙, 徐怀民, 胡斌, 姚卫江. 2003. 准噶尔盆地白垩系岩相古地理. *石油实验地质*, 25(4): 337-342, 347. [Gu Y F, Ma M F, Su S L, Xu H M, Hu B, Yao W J. 2003. Lithofacies paleogeography of the Cretaceous in the Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(4): 337-342, 347]
- 纪友亮, 赵澄林, 刘孟慧. 1995. 东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用与有机质演化的关系. *石油与天然气地质*, 16(2): 148-154. [Ji Y L, Zhao C L, Liu M H. 1995. Diagenesis of elastic rocks in shahejie formation, Dongpu depression and its relation to organic matter evolution. *Oil & Gas Geology*, 16(2): 148-154]
- 梁斌, 王全伟, 阚泽忠. 2007. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组钙质结核的碳、氧同位素特征. *矿物岩石*, 27(2): 54-58. [Liang B, Wang Q W, Kan Z Z. 2007. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate nodule in the Shaximiao formation of the Middle Jurassic, Sichuan Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(2): 54-58]
- 饶政, 姚鹏翔, 张春光, 刘静, 安志渊, 高振中. 2008. 准噶尔盆地石南31井区下白垩统清水河组一段辫状河三角洲相及沉积演化. *古地理学报*, 10(1): 43-52. [Rao Z, Yao P X, Zhang C G, Liu J, An Z Y, Gao Z Z. 2008. Braided fluvial delta facies and sedimentary evolution of the Member 1 of Qingshuihe Formation of Lower Cretaceous in Shinan 31 wellblock, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 10(1): 43-52]
- 邵龙义, 潘浩, 王学天, ZAVALA Carlos, 周凯, 杨仁超, 邵延文, 鲁静. 2025. 三角洲分类及浅水三角洲定义问题探讨. *沉积学报*, 43(5): 1592-1604. [Shao L Y, Pan H, Wang X T, Carlos Z, Zhou K, Yang R C, Shao Y W, Lu J. 2025. Discussion on classification of deltas and definition of shallow-water deltas. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(5): 1592-1604]
- 宋磊, 王淑萍, 赵妍菲, 孙沛沛, 盛凯. 2025. 煤系地层优质储层特征及成因模式: 以济阳坳陷大王庄地区石炭系太原组为例. *沉积学报*, 43(6): 2114-2134. [Song L, Wang S P, Zhao Y F, Sun P P, Sheng K. 2024. Characteristics and genetic model of high-quality reservoir of elastic rocks in coal-bearing strata: a case of the Carboniferous Taiyuan formation in the dawangzhuang area, Jiyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(6): 2114-2134]
- 唐勇, 黄文华, 郭晓燕, 斯春松, 朱国华. 2003. 准噶尔盆地白垩系储集层特征. *新疆石油地质*, 24(5): 403-406. [Tang Y, Huang W H, Guo X Y, Si C S, Zhu G H. 2003. Characteristics of Cretaceous reservoir rocks in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 24(5): 403-406]
- 王来贵, 丁盛鹏, 何慧娟, 杨建林. 2018. 冻融循环作用下含结核砂岩风化特征实验研究. *工程地质学报*, 26(3): 611-619. [Wang L G, Ding S P, He H J, Yang J L. 2018. Experimental study on cracking characteristics of concretion sandstone with freezing-thawing cycles. *Journal of Engineering Geology*, 26(3): 611-619]
- 王彤, 朱筱敏, 刘宇, 郭诚. 2021. 莱州湾凹陷北洼沙三段砂岩碳酸盐胶结物特征及地质意义. *高校地质学报*, 27(5): 526-535. [Wang T, Zhu X M, Liu Y, Guo C. 2021. Characteristics and significance of carbonate cements in Member 3 of Shahejie Formation in the northern subsag of Laizhouwan sag. *Geological Journal of China Universities*, 27(5): 526-535]
- 王维一. 2021. 准噶尔盆地红003井区清水河组沉积相与储层特征研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Wang W Y. 2021. A study on sedimentary facies and reservoir characteristics of the Qingshuihe Formation in the Hong 003 well area Junggar Basin. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 杨晓萍, 顾家裕. 2007. 煤系地层中储层基本特征与优质储层的形成与分布. *沉积学报*, 25(6): 891-895. [Yang X P, Gu J Y. 2007. General feature of reservoir in coal-bearing formation and distribution of the favorable reservoir. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(6): 891-895]
- 张立强. 2011. 准噶尔盆地南缘古近系超高压带砂岩铁方解石胶结物的分布及形成机制. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 38(6): 625-632. [Zhang L Q. 2011. Distribution and origin of ferrocalcite cements in Paleogene overpressure sandstones on the south margin of Junggar Basin, Xinjiang, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(6): 625-632]
- 张娜娜, 方泽鑫, 陈冲. 2019. 滇东地区下寒武统筇竹寺组细粒岩中结核类型与成因分析. *石油化工应用*, 38(1): 87-92, 103. [Zhang N N, Fang Z X, Chen C. 2019. Types and formation mechanism of concretion from the Qiongzhusi formation of lower Cambrian in eastern Yunnan. *Petrochemical Industry Application*, 38(1): 87-92, 103]
- Chowdhury A H, Noble J P A. 1996. Origin, distribution and significance of carbonate cements in the Albert Formation reservoir sandstones, New Brunswick, Canada. *Marine and Petroleum Geology*, 13(7): 837-846.
- Rossi C, Marfil R, Ramseyer K, Permanyer A. 2001. Facies-related diagenesis and multiphase siderite cementation and dissolution in the reservoir sandstones of the Khatatba Formation, Egypt's western desert. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3): 459-472.
- Sellés-Martínez J. 1996. Concretion morphology, classification and genesis. *Earth-Science Reviews*, 41(3-4): 177-210.

(责任编辑 李新坡)