第 27 卷　第 5 期
2025 年　10 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 5
Oct.　2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1244-14　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.073

断陷湖盆细粒沉积特征研究：以南阳凹陷古近系核桃园组为例*

朱　颜

中国石油化工股份有限公司河南油田分公司，河南南阳 473132

摘　要　南阳凹陷是中国东部典型的陆相断陷淡水湖盆，牛三门次凹为南阳凹陷东南部的一个次级凹陷，在古近系核桃园组发育厚层细粒沉积岩。核桃园组自上而下可以分为核一段（H_1）、核二段（H_2）、核三段（H_3），通过对岩心样品开展薄片、扫描电镜、矿物组分以及地球化学参数等实验分析，明确了细粒沉积岩相类型，揭示了核桃园组沉积环境，划分了 A、B、C、D 这 4 个演化阶段。结果表明：(1) 核二段Ⅲ亚段—核三段Ⅰ亚段沉积环境以半深湖至深湖为主，古盐度整体偏低，呈现出淡水的特征，气候条件相对稳定，为湿润古气候。(2) 依据矿物成分、沉积构造及粒度特征可将核二段Ⅲ亚段—核三段Ⅰ亚段细粒沉积岩划分为 9 种岩相，其中纹层状混合质页岩和纹层状长石石英页岩最为发育。(3) 陆源输入和古生产力对岩相的垂向变化具有重要影响，云灰质含量主要受水体盐度影响，稳定的气候条件、较深的水体环境以及丰富的陆源输入有利于混合质纹层状细粒沉积岩发育。平面上牛三门次凹周缘为页岩油勘探有利区，纵向上阶段 A 和阶段 C 沉积地层是页岩油勘探有利层系。

关键词　细粒沉积岩　纹层状混合质页岩　核桃园组　古近系　南阳凹陷

作者简介　朱颜，男，1984 年生，高级工程师，主要从事油气勘探研究工作。E-mail：zhu007yan@163.com。

中图分类号：P512.2　　**文献标志码**：A

Study on the characteristics of fine-grained sedimentation in fault-bounded lake basins: a case study of the Paleogene Hetaoyuan Formation in Nanyang sag

ZHU Yan

Henan Oilfield Branch, Sinopec, Henan Nanyang 473132, *China*

Abstract　The Nanyang sag, a typical continental rift freshwater lake basin in eastern China, encompasses the Niusanmen sub-sag as its southeastern secondary sag, where thick-layered fine-grained sedimentary rocks developed within the Paleogene Hetaoyuan Formation. The Hetaoyuan Formation is stratigraphically divided into three members from top to bottom: Member 1 (H_1), Member 2 (H_2), and Member 3 (H_3). Through integrated experimental analyses including thin-section petrography, scanning electron microscopy, mineral composition characterization, and geochemical parameter determination of core samples, this study systematically identifies lithofacies types of fine-grained sedimentary rocks,

* 中国石油化工股份有限公司科技部项目(编号：P23035)资助。[Financially supported by the Sinopec Technology Department Project(No. P23035)]
收稿日期：2024-12-24　　改回日期：2025-02-11

reconstructs the sedimentary environment of the Hetaoyuan Formation, and establishes four distinct evolutionary stages (A, B, C, D). The investigation provides critical insights into the depositional evolution and environmental dynamics of this lacustrine succession within the rift basin setting. The results indicate: (1) The depositional environment of the He Member 2 Submember Ⅲ to He Member 3 Submember Ⅰ was primarily semi-deep to deep lake, with overall low paleosalinity, exhibiting characteristics of freshwater to brackish water, and relatively stable climatic conditions indicative of a humid paleoclimate. (2) Based on mineral composition, sedimentary structures, and grain size characteristics, the fine-grained sedimentary rocks of the He Member 2 Submember Ⅲ to He Member 3 Submember Ⅰ can be classified into nine lithofacies, among which laminated mixed shale and laminated feldspathic shale are the most developed. (3) Terrestrial input and paleoproductivity have a significant impact on the vertical variation of lithofacies, with the content of dolomite primarily influenced by water salinity. Stable climatic conditions, deeper water environments, and abundant terrestrial input are conducive to the development of mixed laminated fine-grained sedimentary rocks. Spatially, the semi-deep to deep lake areas are mainly developed around the periphery of the central depression belt's Niusanmen sub-depression, with mixed shale being the predominant lithofacies; vertically, mixed shale is developed in all stages, with stage A and stage C paleoenvironments being favorable for the enrichment of organic matter in source rocks, making them promising areas for shale oil exploration.

Key words　fine-grained sedimentary rocks, laminated mixed shale, Hetaoyuan Formation, Paleogene, Nanyang sag

About the author　ZHU Yan, born in 1984, is a senior engineer. He is mainly engaged in the research of oil and gas exploration. E-mail: zhu007yan@163.com.

1　概述

近年来，油气勘探逐渐向“源内进军”，细粒沉积岩作为非常规油气烃源岩的重要类型（李维等，2020），逐渐成为研究的重点，明确细粒沉积岩的沉积环境及岩相特征，对于页岩油气的勘探开发具有重要的理论意义和现实意义（朱筱敏等，2024）。国内学者近年来重点针对渤海湾盆地古近系沙河街组、鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、玛湖凹陷二叠系风城组、松辽盆地白垩系青一段的沉积环境、岩相组合、有机质富集机理及其时空分布开展研究，如刘惠民等（2020）研究了东营凹陷沙四段细粒沉积岩，针对其岩相组合建立了岩相划分方案，明确了沉积环境的纵向演化规律；段宏亮和杨保良（2024）对比国内陆相细粒沉积岩岩相类型划分方案的差异性，梳理了岩相组合的划分依据，总结了岩相组合划分新方法及其研究的油气地质意义；金芸芸等（2024）探讨了泌阳凹陷核桃园组 H_3Ⅲ亚段细粒沉积岩的岩相特征，明确了沉积环境对岩相分布的影响。

南阳凹陷古近系核桃园组细粒沉积岩发育，核桃园组自上而下可以分为核一段（H_1）、核二段（H_2）、核三段（H_3），近年取得了核桃园组夹层型页岩油勘探的重要突破，在张店地区部署的 ZD3 井、Z56 井及 ZY1 井针对核二段、核三段试油均获工业油流，其中 ZY1 井峰值日产油 19.02 m^3，Z56 井峰值日产油 22.55 m^3，落实了南阳凹陷页岩油资源量 2.01×10^8 t。南阳凹陷页岩油具有常压（压力系数 1.0 ~ 1.2）、中—低成熟度（R_o = 0.6% ~ 1.0%）、原油密度高（0.8347 ~ 0.8639 g/cm^3）、含蜡量较高（39.7% ~ 49.7%）、气油比低（10 ~ 95 m^3/t）的特点，这种类型页岩油地质特征与目前已经突破的济阳坳陷、苏北盆地及四川盆地等具有较大的差异，对于南阳凹陷这种淡水湖盆页岩油是否具有勘探开发潜力仍存在一直存争议，因此有必要按照“逐盆逐建”的方式对这种陆相淡水湖盆细粒沉积岩沉积特征及沉积古环境开展攻关研究。本次研究依据研究区 2023 年部署的风险探井 ZY1 井近 280 m 连续取心及相关分析化验资料（全岩 X 衍射、薄片、扫描电镜、地球化学与主微量

元素等 1580 样次），系统分析了南阳凹陷细粒沉积岩的岩相类型，明确了核桃园组古沉积环境及演化特征，探索了岩相与沉积环境之间的关系，为中国陆相断陷盆地细粒沉积理论的丰富及南阳凹陷页岩油高质量勘探提供重要理论支撑。

南阳凹陷属于南襄盆地北部的一个次级构造单元（图 1），为燕山晚期在东秦岭褶皱带上发育的新生代箕状凹陷，具有南深北浅的特点，有效勘探面积约 900 km^2。凹陷主体沿南部边界大断裂呈北东向展布，可分为 3 个构造带（曹高社等，2011），即北部的缓坡带、中部的凹陷带及南部的断超带（图 1）。凹陷钻遇地层自下而上依次为古近系玉皇顶组+大仓房组、核桃园组、廖庄组，新近系凤凰镇组及第四系，基底以元古界为主。核桃园组为南阳凹陷主要的勘探目的层系，自上而下又可以分为核一段、核二段、核三段（图 2），核桃园组沉积主要发育三角洲—湖泊沉积体系，其中核三段末至核二段中期湖盆最为发育，在凹陷主体部位沉积了一套以暗色泥岩为主的地层，厚度可达上千米，本次研究的样品主要来自 ZY1 井核二段Ⅲ亚段（以下简称 H_2Ⅲ）及核三段Ⅰ亚段（以下简称 H_3Ⅰ）。

2 岩石学特征

2.1 矿物特征

ZY1 井 220 个岩石薄片鉴定和 XRD（X 射线衍射）分析结果（图 3）表明，南阳凹陷 H_2Ⅲ-H_3Ⅰ亚段矿物主要由黏土矿物、长石、石英、白云石、方解石及黄铁矿组成，包含少量的菱铁矿和方沸石等。长石及石英矿物含量在 7.8%~75.1%之间，平均 41.3%，其中石英主要为陆源输入，多为粒状，长石包括钾长石和斜长石，以斜长石为主，镜下主要呈长条状或柱状（图 4-a，4-b）。碳酸盐矿物含量在 1.4%~86.1%之间，平均 22.9%；白云石以泥晶白云石为主，部分样品黏土纹层和泥晶白云石呈纹层状互层状（图 4-c），局部自形程度较高，呈菱形粒状（图 4-e）；方解石以泥晶或粉晶方解石为主，多呈纹层状分布或充填在微裂缝中（图 4-d），少量呈粒状分布（图 4-f）。黏土矿物平均含量在 5.3%~56%之间，平均 32.9%；以伊蒙混层及和伊利石为主（图 4-f，4-g），伊蒙混层占比在 19%~70%之间，均值 45.5%；伊利石含量在 21%~52%之间，均值 38.2%；高岭石含量在

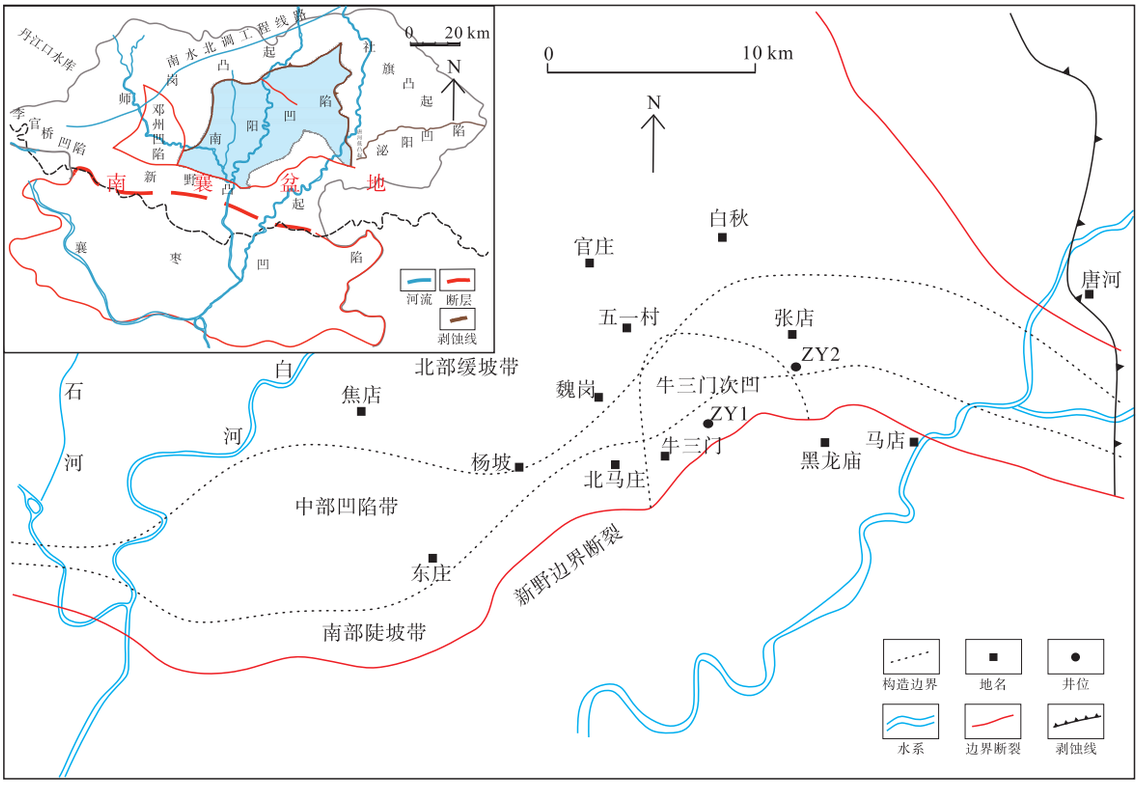


图 1 南襄盆地区域构造及南阳凹陷位置

Fig. 1 Geological structure of Nanxiang Basin and location of Nanyang sag

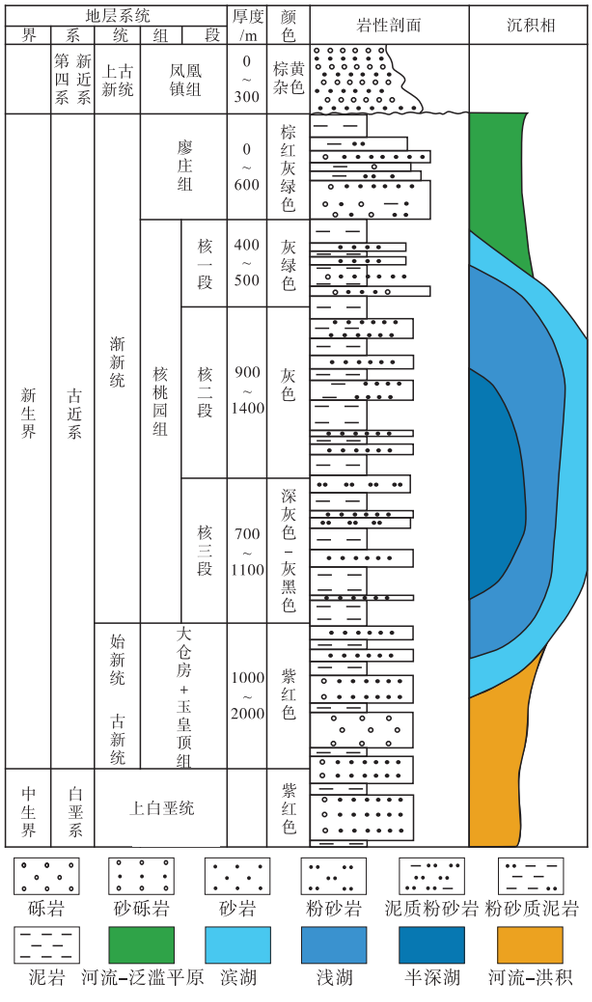


图 2　南阳凹陷古近系地层柱状图

Fig. 2　Stratigraphic column of the Paleogene of Nanyang sag

1%~10%之间，均值 3.9%；绿泥石含量在 5%~37%之间，均值 12.3%。局部可见黄铁矿，主要呈粒状或微粒状，局部可见草莓状分布(图 4-h)。

2.2　沉积构造

南阳凹陷 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段的细粒沉积岩纹层状—层状—块状构造均有发育。统计结果表明纹层状构造占取心段总长度的 42.7%，块状构造占取心段总长度的 36.3%，层状构造占取心段总长度的 21%。根据矿物的组分及含量可以把 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段分为云灰质、长石石英质、黏土质及混合质纹层 4 种纹层类型(图 5)，纹层数量最多可达 1500 条/m，发育程度高，主要为长石石英质纹层、黏土质纹层及混合质纹层，偶见云灰质纹层发育。

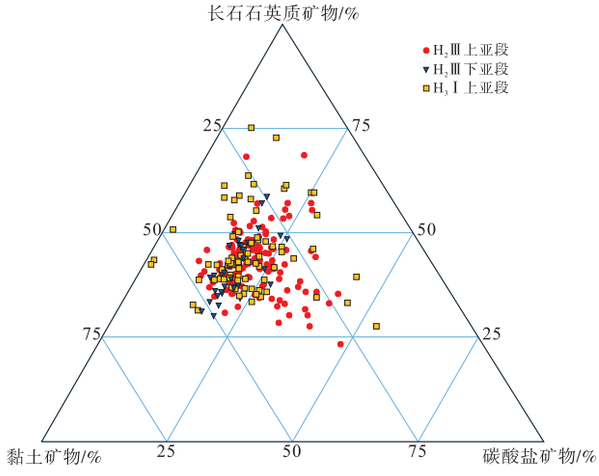


图 3　南阳凹陷 ZY1 井古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段岩心主要矿物含量

Fig. 3　Main mineral content of core samples of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ of Well ZY1 in Nanyang sag

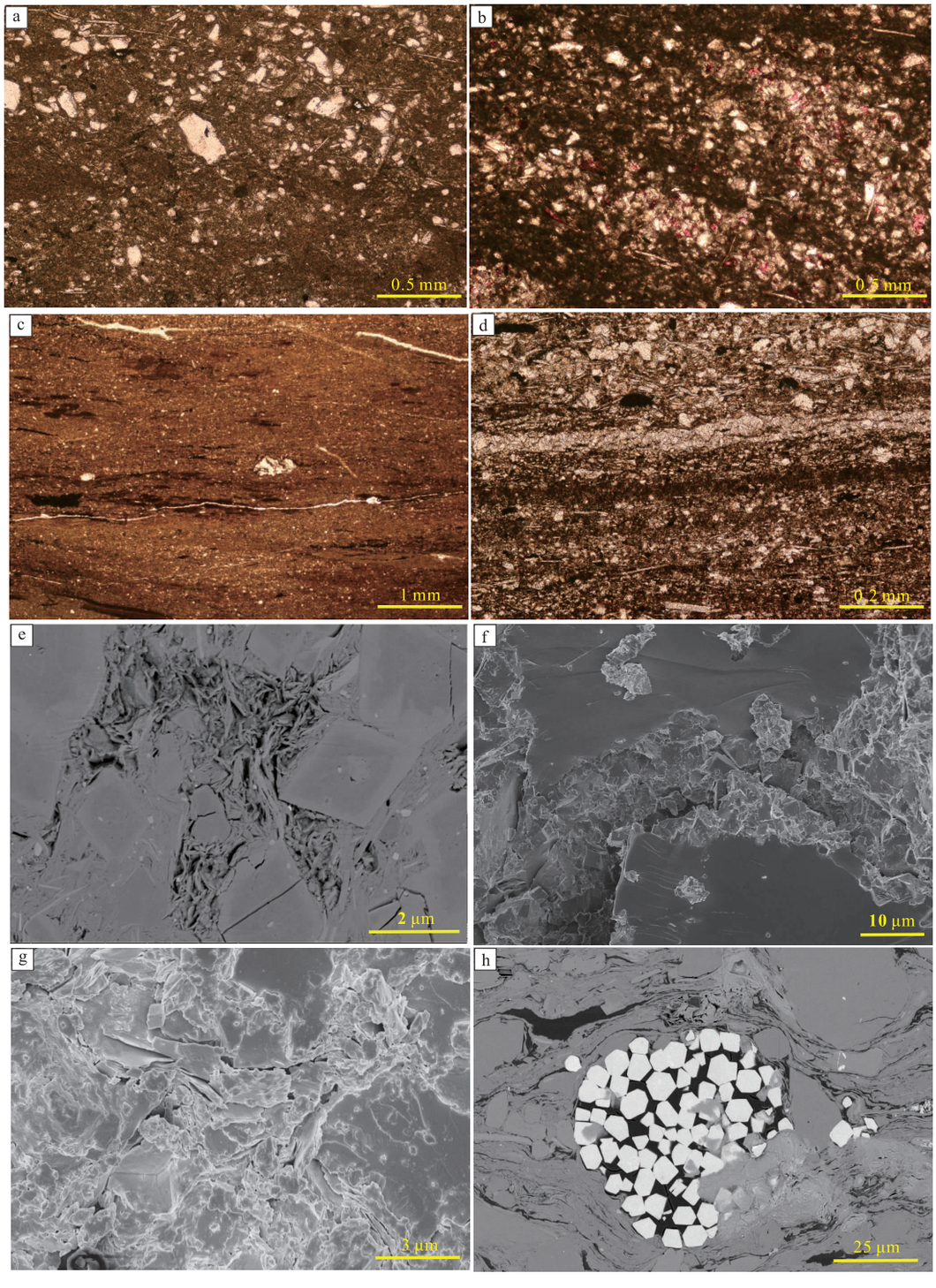
2.3　岩相类型划分

国内通常以颜色、矿物组分、沉积构造、有机质含量和粒度等多种参数作为划分依据来对细粒沉积岩进行岩相划分（吴靖等，2016，2017；刘姝君等，2019；张逊，2020；孟庆涛等，2024），为实现南襄盆地岩相类型划分的统一，本次研究中根据南阳凹陷岩相特点，以矿物组分、粒度和沉积构造作为岩相划分的主要依据（张远等，2013；彭冰璨，2014）。

本次研究以长石石英矿物、黏土矿物及碳酸盐矿物分别作为三端元，以 50%界限将核桃园组页岩划分为 4 种一级岩相，在此基础上结合粒度及沉积构造进行进一步细分，将单纹层厚度在 1 mm 以下的页岩定义为纹层状页岩，这种纹层基本平直，指示了相对安静的沉积水体；将单纹层厚度在 1~10 mm 的页岩定义为层状页岩，这种纹层整体平直，局部呈波状，偶见交错层理，反映了整体稳定但存在局部动荡的沉积水体（Liang *et al.*，2016），按以上原则将南阳凹陷泥页岩共划分出 9 种不同岩相类型(图 6；表 1)，其中纹层状—层状混合质页岩、纹层状—层状长石石英质页岩、纹层状云灰质页岩及块状粉砂岩为南阳凹陷细粒沉积岩主要的 4 种主要岩相类型。

2.3.1　纹层状混合质页岩

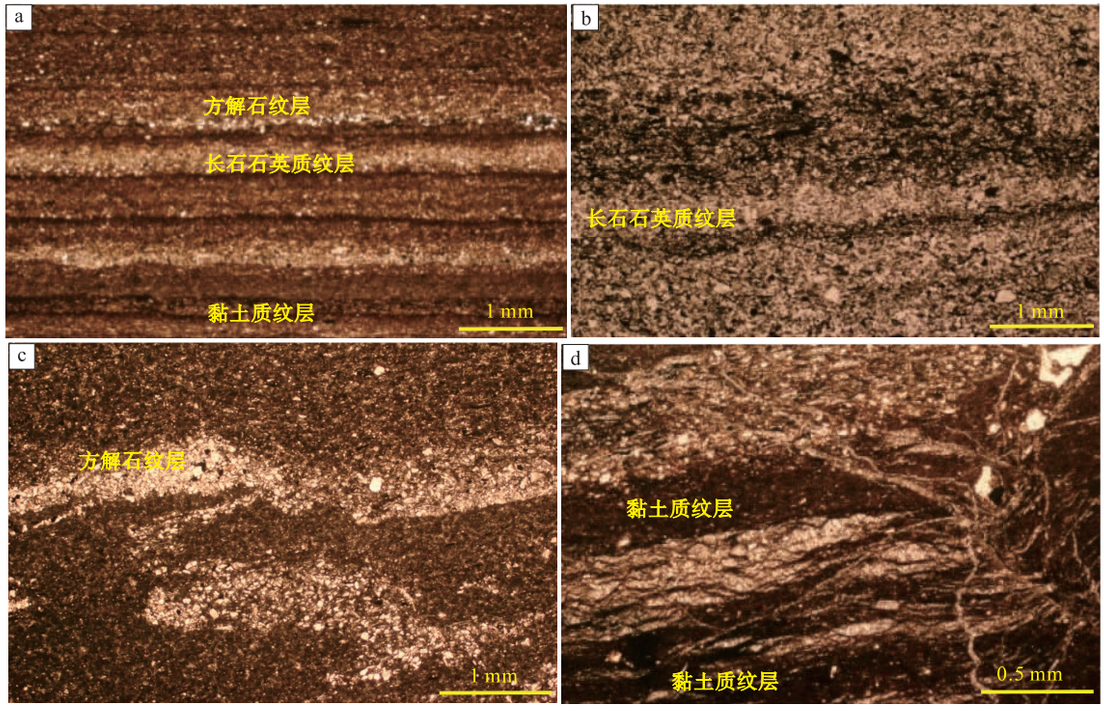
纹层状混合质页岩的矿物组分呈现出明显的相对均一的特征(图 7-a1，7-a2)，长石石英矿物含量



a—ZY1 井，井深 3033.41 m，灰色层状长石石英质泥岩（-），陆源碎屑颗粒欠均匀杂乱分布，石英、长石呈粒状；b—ZY1 井，井深 2872.4 m，深灰色纹层状混合质页岩（-），长石石英矿物呈弱定向性分布，与泥质纹层互层或团块状富集；c—ZY1 井，井深 2888.03 m，含粉砂含云泥岩（-），泥晶白云石纹层/条带状集中。黄铁矿斑点状、微粒状；d—ZY1 井，井深 3102.57 m，深灰色纹层状混合质页岩（-），见方解石纹层与泥质纹层互层；e—ZY1 井，井深 2956.3 m，扫描电镜，白云石自形程度较高，普遍发育含铁环形亮边；f—ZY1 井，井深 2930 m，扫描电镜，陆源伊利石、方解石半充填粒间孔；g—ZY1 井，井深 2907.48 m，扫描电镜，陆源伊利石在粒间紧密充填；h—ZY1 井，井深 2954.38 m，扫描电镜，发育草莓状黄铁矿

图 4 南阳凹陷古近系核桃园组岩相与矿物类型微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of mineral types of the Paleogene Hetaoyuan Formation in Nanyang sag



a—ZY1 井，井深 3022.27 m，纹层状混合质页岩，长石石英质纹层与黏土质、云灰质纹层互层；b—ZY1 井，井深 2957.38 m，纹层状长石石英质页岩，长石石英质纹层发育；c—ZY1 井，井深 2958.23 m，纹层状混合质页岩，方解石纹层发育；d—ZY1 井，井深 2891.83 m，纹层状混合质页岩，黏土质纹层为主，发育少量方解石纹层

图 5　南阳凹陷古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段纹层镜下照片

Fig. 5　Microscopic photos of laminates of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ in Nanyang sag

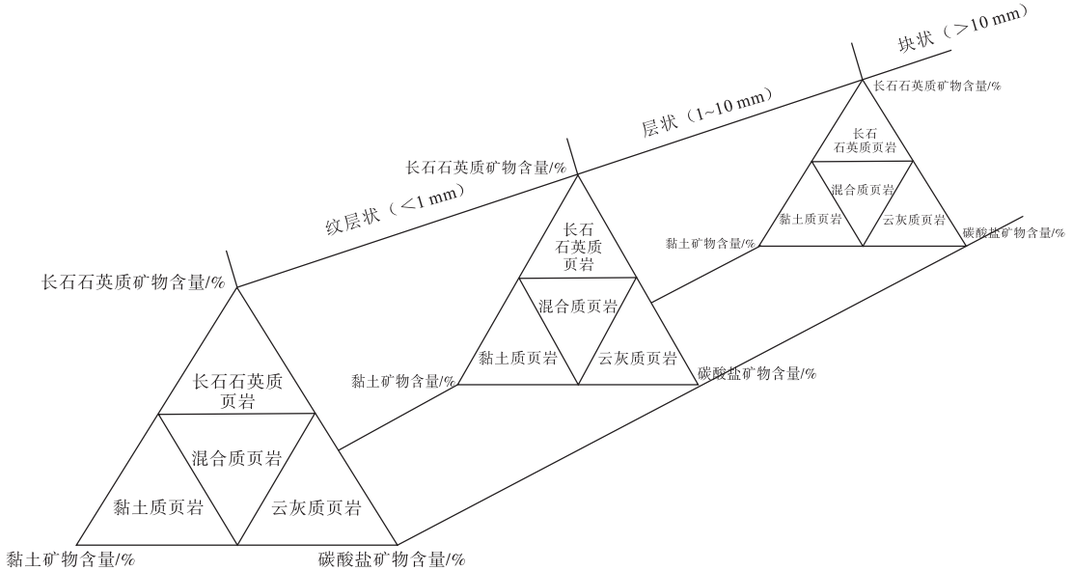


图 6　南阳凹陷古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段岩相划分方案

Fig. 6　Lithofacies division scheme of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ in Nanyang sag

在 23.4%~49.9%之间，平均稳定在 41.2%左右；碳酸盐矿物含量在 10.5%~48.2%之间，均值 22.1%；黏土矿物含量在 16.7%~49%之间，均值 36.7%；岩心颜色为深灰色—灰黑色，纹层较为发育，镜下可以看到长石石英矿物、黏土矿物、碳酸盐矿物纹层呈现互层特征，局部可见黄铁矿呈条带状或草霉状分布。

表 1 南阳凹陷古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段岩相分类

Table 1 Lithofacies classification of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ in Nanyang sag

三端元分类	粒度+沉积构造	TOC/%	S_1/mg·g^{-1}	OSI/mg·g^{-1}	孔隙度/%	发育厚度/m	占比/%
长石石英细粒沉积岩	块状粉砂岩	/	/	/	4.5~6.5/5.4	41.87	9.7
	层状长石石英质页岩	0.51~1.52/0.96	0.3~0.43/0.37	38.0	0.5~4.9/2.4	18.17	4.2
	纹层状长石石英质页岩	0.48~2.01/0.97	0.42~1.37/0.66	70.6	0.6~5.6/3.4	93.60	20.8
云灰质细粒沉积岩	层状云灰质页岩	0.22~0.51/0.41	0.45~2.41/0.97	87.9	0.3~5.5/3.1	3.17	0.7
	纹层状云灰质页岩	0.37~1.91/0.9	0.34~1.91/0.9	97.0	0.4~6.3/3.2	25.30	6.2
黏土质细粒沉积岩	纹层状黏土质页岩	0.2~1.56/0.6	0.27~1.15/0.55	58.0	0.2~4.5/2.2	9.38	2.2
混合质细粒沉积岩	层状混合质页岩	0.2~1.79/0.73	0.27~0.96/0.47	60.5	1.3~5.1/3.1	13.24	3.1
	纹层状混合质页岩	0.51~2.3/0.89	0.45~1.7/0.71	78.8	0.2~5.7/3.8	231.05	53.5

注：0.51~1.52/0.96 代表数值范围/平均值。

该类岩相 TOC、S1 及 OSI 值均较高；基质孔隙度分布在 0.2%~5.7%之间，均值 3.8%。

2.3.2 纹层状长石石英质页岩

纹层状长石石英质页岩（图 7-b1，7-b2），长石石英矿物含量分布在 50.2%~75.3%之间，平均含量约 57.3%；黏土矿物含量分布在 12%~47.4%之间，平均含量 26.4%；碳酸盐矿物含量分布在 1.7%~28.7%之间，平均含量 16.3%；岩心呈灰色—深灰色，镜下可以看出长石石英质纹层常与夹杂有少量泥晶白云石的黏土质纹层互层，此类岩相 TOC 值较高，S1 及 OSI 值相对较低；基质孔隙度分布在 0.6%~5.6%之间，平均达 3.4%。

2.3.3 纹层状云灰质页岩

该类岩相类型碳酸盐矿物含量分布在 53.3%~86.4%之间，平均含量 67.3%；长石石英矿物含量分布在 7.8%~27.8%之间，平均含量 19.9%；黏土矿物含量分布在 5.3%~21.9%之间，平均含量 12.7%；岩心呈深灰色—灰黑色（图 7-c1，7-c2），局部可见方解石呈透镜状条带或层状分布，镜下偶见浅色层成分多为泥晶或微晶方解石，深色层以富有机质的黏土矿物为主，TOC、S1 及 OSI 值最高；基质孔隙度分布在 0.4%~6.3%之间，均值 3.2%。

2.3.4 块状粉砂岩

在 $H_2Ⅲ$ 及 $H_3Ⅰ$ 亚段大量出现，多以薄砂条夹层的形式在厚层泥岩中出现，呈现浅灰色—灰色—灰白色，整体以块状构造为主，成分以长石、石英为主（图 7-d1，7-d2）。

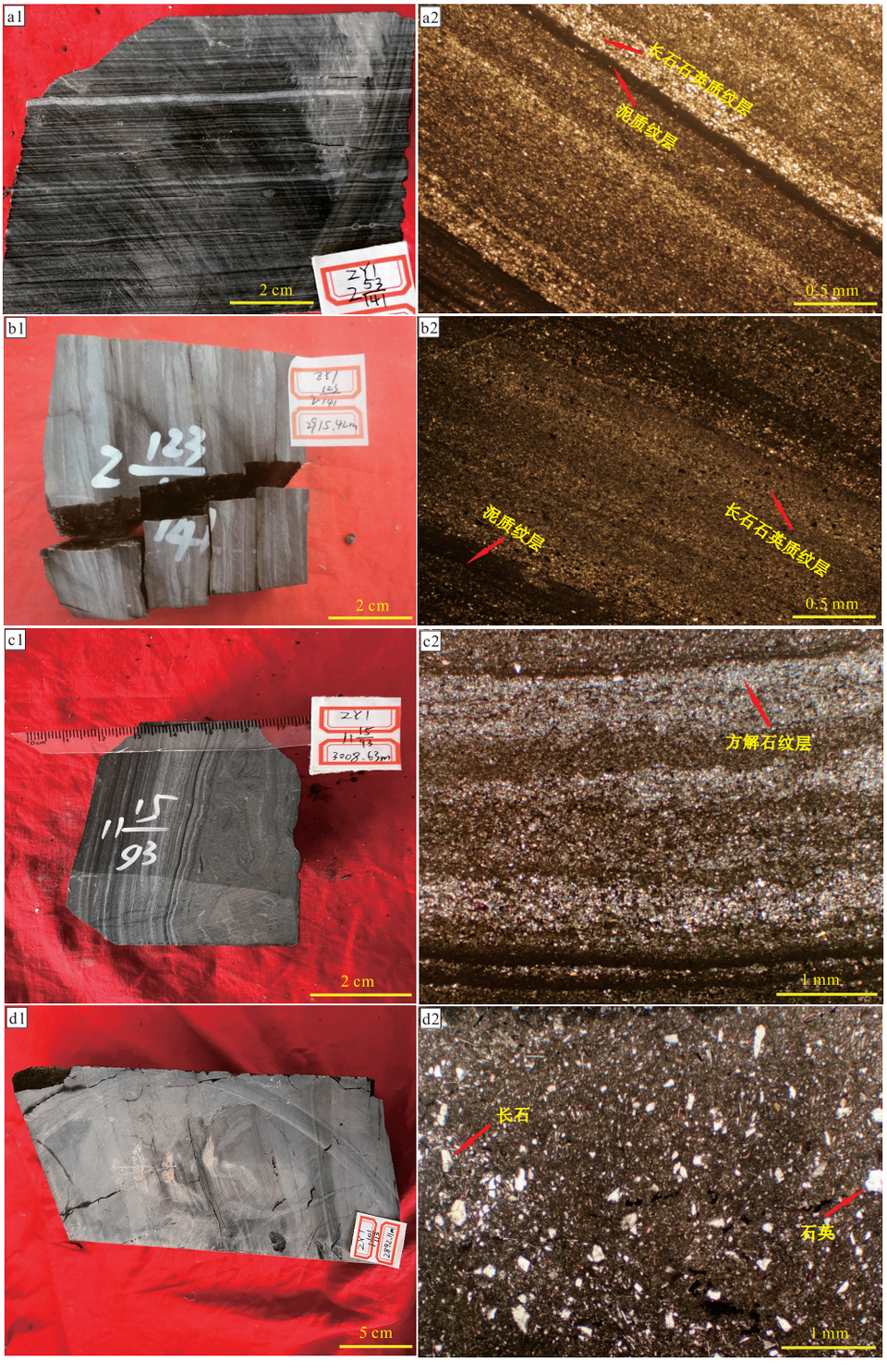
3 沉积环境分析

3.1 古气候

不同气候条件下，沉积物中元素的保存能力不同。一般而言，在潮湿气候条件下，Ca 比 Mg 更容易沉积，Ca/Mg 值随干旱程度增加而减小，高 Ca/Mg 值指示温湿气候，低 Ca/Mg 值指示干旱气候（李浩等，2023）。$H_2Ⅲ$ 亚段的 Ca/Mg 值为 0.75~7.27，平均值 3.11；$H_3Ⅰ$ 亚段的 Ca/Mg 值为 0.51~9.85，平均值为 3.77；Ca/Mg 值整体较高，绝大多数比值大于 1，表明气候处于湿润气候。

3.2 陆源输入

湖盆中的长石石英矿物与黏土矿物主要来源于陆源输入，因此陆源输入的高低决定了长石石英质页岩与黏土质页岩的发育。在沉积物中，Al 和 Ti 主要来源于陆源碎屑，且在成岩作用和风化过程中相对稳定，因此，通过分析沉积物中 Al 和 Ti 的含量，可以间接推断出陆源物质的输入情况，Al 和 Ti 的浓度较高表明该地区受到了较多陆源物质的沉积（赵建华等，2016）。选取 Al、Ti 含量作为陆源输入的地球化学指标，$H_2Ⅲ$ 亚段的 Al 元素含量在 2.30%~9.71%之间，平均值为 6.79%；Ti 元素含量在 0.13%~0.99%之间，平均值为 0.43%。$H_3Ⅰ$ 亚段的 Al 元素含量在 2.50%~10.83%之间，平均值为 6.44%；Ti 元素含量在 0.12%~0.84%之间，平均值为 0.43%；Al、Ti 元素含量整体较高，Al 元素含量绝大部分大于 3%，Ti 元素含量绝大部分大于 0.4%，表明陆源输入程度较高。



a1、a2—ZY1 井，井深 2902.56 m，纹层状混合质页岩，长石石英质纹层与泥质纹层互层，粉砂富集区域常见白云石胶结物，另见少量泥级绢云母、泥晶碳酸盐、黑色炭屑等组分；b1、b2—ZY1 井，井深 2915.42 m，灰白色纹层状长石石英质页岩，陆源长石石英质细粉砂呈纹层状、条带状或漂浮状产出，与泥质互层分布；c1、c2—ZY1 井，井深 3008.63 m，灰黑色纹层状云灰质页岩，方解石纹层发育；d1、d2—ZY1 井，井深 2892.11 m，浅灰色块状粉砂岩

图 7　南阳凹陷古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段不同岩相岩心及镜下照片

Fig. 7　Core and microscopic photos of different lithofacies of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ in Nanyang sag

3.3 古水深

距岸距离的远近可以侧面反映古水深，通常陆源碎屑中 Fe 和 Al 的含量相对较高，碳酸盐岩中 Ca 和 Mg 的含量较高，因此(Fe+Al)/(Ca+Mg) 值可作为距岸远近或水体深度的标志。由于 Mn 元素稳定性很强，可以经过较长距离的运移在盆地中心富集，其含量越高表明水体越深，Fe/Mn 值可用以指示离岸的远近(陈中红等，2008)。当(Fe+Al)/(Ca+Mg)值小于 1.3 时，该水体属于深湖环境，比值在 1.3~2.0 之间时属于半深湖，比值大于 2.0 就属于浅湖沉积（王鑫锐等，2023)。Fe/Mn 值小于 100 为深湖环境，在 100~150 为半深湖环境，大于 150 为浅湖环境。ZY1 井 H_2Ⅲ亚段的 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值主要分布在在 0.66~2.15 之间，平均值为 1.30；Fe/Mn 值在 13.69~102.66 之间，平均值为 49.94，主要为深湖环境。H_3Ⅰ亚段的 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值主要分布在在 0.68~1.86 之间，平均值为 1.08；Fe/Mn 值在 14.50~98.48 之间，平均值为 46.53，主要为深湖环境。

3.4 古盐度

湖盆中的碳酸盐矿物主要来源于内部金属阳离子的沉淀，因此云灰质页岩受古盐度的影响较大。Sr/Ba 值通常用来反映水体古盐度，这是因为 Sr 元素比 Ba 元素迁移能力强，其化合物溶解度较低，随着盐度不断增大，Ba 元素更易于沉淀析出，所以水体盐度越高，Sr/Ba 值越大。现在一般认为 Sr/Ba 值小于 0.6 为淡水—微咸水，在 0.6~1.0 之间为半咸水，大于 1 为咸水（姚红生等，2021；林兴悦等，2025)。H_2Ⅲ亚段的 Sr/Ba 值主要分布在 0.16~0.89，且多数在 0.6 以下，平均值为 0.43，表明主要为淡水环境；H_3Ⅰ亚段的 Sr/Ba 值主要分布在在 0.16~0.78 之间，且多数在 0.6 以下，平均值为 0.35，表明主要为淡水环境。

3.5 古生产力

细粒沉积岩中有机质的富集受古生产力的影响较大，古生产力越高，浮游生物越旺盛，有机质越富集。P 是生物必需的营养元素，其在沉积物中的含量可以反映生物生产力的水平，但 P 的含量易受陆源输入影响，因此 P 的绝对含量并不足以直接评价古生产力。相比之下，Ti 在沉积物中相对稳定，P/Ti 值能够更准确地反映古生产力的大小(杨万芹等，2015；邓远等，2020；王濡岳等，2021)。H_2Ⅲ亚段的 P/Ti 值主要分布在 0.26~0.98 之间，且多数在 0.5 以上，平均值为 0.52，表明处于较强生产力水平；H_3Ⅰ亚段的 P/Ti 值主要分布在 0.11~0.62 之间，且多数在 0.5 以下，平均值为 0.29，表明古生产力水平较一般。

3.6 古氧化还原性

还原环境下，湖水分层，水体氧气含量甚微，底栖生物的活动受到限制，纹层能够良好地保存下来而不被破坏。沉积物中有一些元素对环境的氧化还原性十分敏感，可以用这些特殊的元素含量比值来推测沉积时期的氧化还原条件（马义权等，2017；彭治超等，2018；王濡岳等，2022)。V、Ni 元素的相对含量能敏感地反映水体氧化还原性。水体还原性强，V 元素迁移能力下降，相对于 Ni 元素更容易发生吸附沉降，所以 V/(V+Ni) 值可以较为准确地指示沉积水体的氧化还原条件。根据前人研究，该比值小于 0.46 表明水体为氧化环境，大于 0.46 时为还原条件，且比值越大反映水体还原性越强（梁超，2015；张斌等，2021)。H_2Ⅲ亚段的 V/(V+Ni) 值在 0.51~0.99 之间，平均值为 0.91，处于较强的还原环境下；H_3Ⅰ亚段的 V/(V+Ni)值在 0.74~0.99 之间，平均值为 0.90，处于较强还原环境下。

4 沉积环境演化与岩相发育模式

4.1 沉积环境与岩相组合特征

根据岩相与特征元素含量比值的变化规律，南阳凹陷 ZY1 井细粒沉积岩环境演化可划分为 4 个阶段(图 8)。

3286~3210 m 为阶段 A，Sr/Ba 值主体介于 0.7~1.0 之间，V/(V+Ni) 值较高，水体处于微咸水还原环境。Ca/Mg 值较为稳定，为湿润气候。Fe/Mn 值和 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值有增大的趋势，水体深度相对变浅。P/Ti 值和 TOC 值先增加后减少，TOC 大部分大于 2，整体古生产力较高。Al 和 Ti 含量有一定波动性，但整体陆源输入程度保持较高水平。此阶段环境下影响岩相发育的因素有水体深度、古盐度和陆源输入。主要发育纹层状混合质页岩，另外受陆源输入增多，块状粉细砂岩夹层

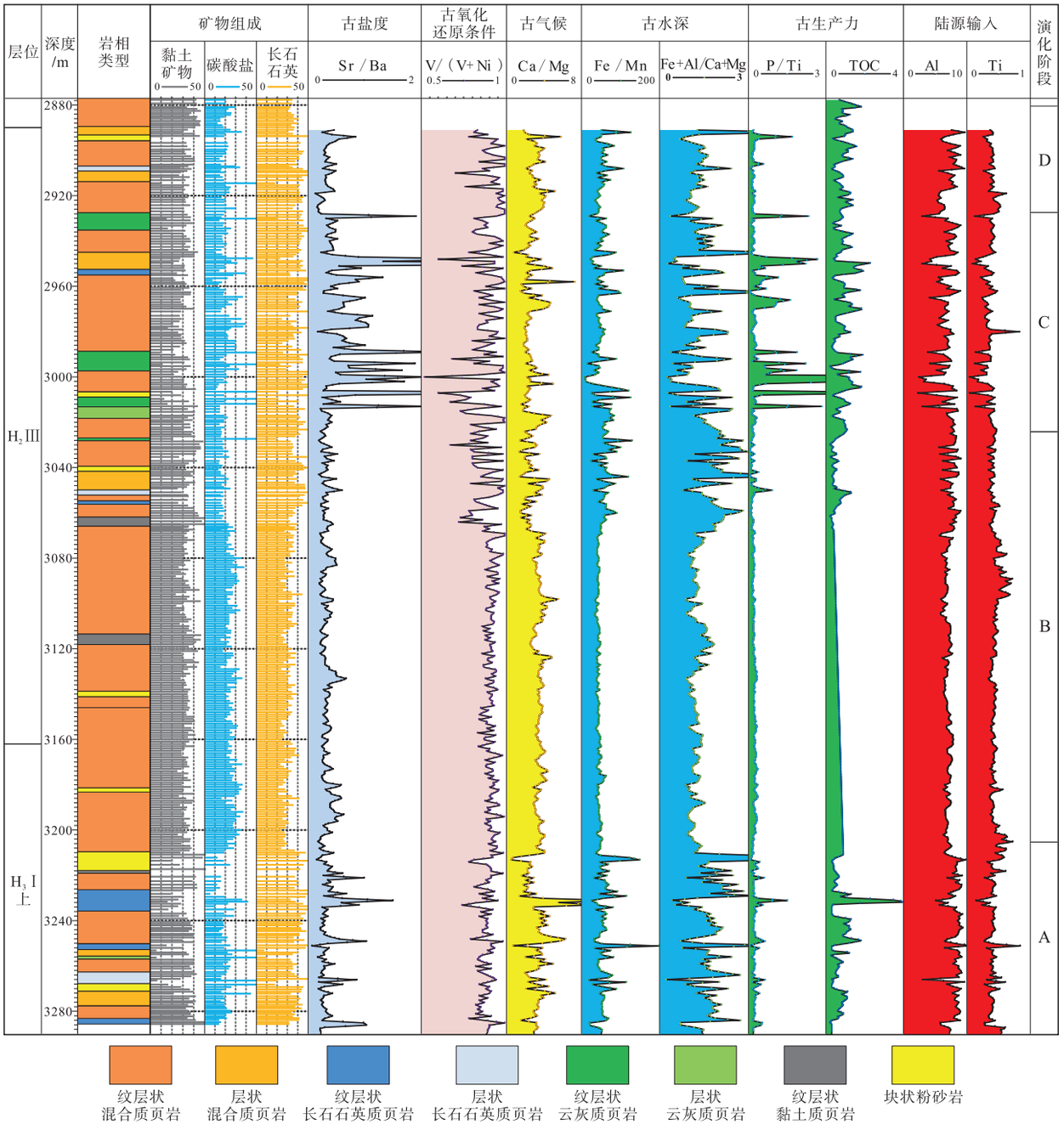


图 8　南阳凹陷 ZY1 井古近系 $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ 亚段沉积环境柱状图

Fig. 8　Stratigraphic column of depositional environment of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ-H_3Ⅰ$ in Well ZY1 in Nanyang sag

发育，盐度较低时期，黏土矿物通过絮凝作用得以沉淀，形成黏土质页岩。

3210 ~ 3015 m 为阶段 B，Sr/Ba 值较低，V/(V+Ni)值较高但有减小的趋势，表明处于淡水还原环境但还原性逐渐减弱。Ca/Mg 值较为稳定，为湿润气候。Fe/Mn 值和 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值有一定波动性，整体处于半深湖—浅湖。P/Ti 值和 TOC 较低，古生产力较弱。Al 和 Ti 含量稳定，陆源输入较高。此阶段主要发育纹层状混合质页岩、层状混合质页岩，在淡水低盐度环境下，黏土质页岩继续发育。

3015 ~ 2926 m 为阶段 C，Sr/Ba 值达到最高，大多大于 3，V/(V+Ni) 值较高，处于咸水还原环境。Ca/Mg 值稍有增大，为湿润气候。Fe/Mn 和

(Fe+Al)/(Ca+Mg) 值较为波动，其中 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值有先增大后减小的趋势，整体处于深湖—半深湖—深湖的环境。P/Ti 值和 TOC 值在此阶段值达到最大，古生产力最强。Al 含量有减小趋势，陆源输入强度逐渐减弱。此阶段盐度明显增大，水体分层明显，因气候湿润，水体携带营养元素注入湖盆，使得湖盆藻类等生物勃发，有机质得以大量保存，TOC 明显较其他阶段高(Hatch and Leventhal，1992；Rimmer *et al.*，2004)，此环境下岩相主要受古盐度和气候影响，大量发育纹层状混合质页岩夹薄层云灰质页岩的岩相组合。

2926～2890 m 为阶段 D，Sr/Ba 值大多降至 0.6 以下，处于淡水环境，云灰质因盐度降低逐渐消失。V/(V+Ni) 值比上阶段略微降低，处于还原环境，还原性比上一阶段稍弱。Ca/Mg 值较为稳定，为湿润气候。Fe/Mn 值和 (Fe+Al)/(Ca+Mg) 值和上一阶段比更加稳定，表明水体平静，整体处于深湖—半深湖环境。P/Ti 值和 TOC 值比上阶段低，古生产力减弱。Al 和 Ti 含量高，陆源输入加强。此阶段大量发育纹层状混合质页岩，受陆源输入影响，长石石英质页岩开始发育。

4.2 沉积环境与岩相发育模式

细粒沉积岩沉积过程中，古气候、古水体物理化学性质、物源及构造作用共同控制着岩相类型的发育(Bai *et al.*，2015；Zhang *et al.*，2019)。南阳凹陷为小型断陷盆地，核桃园组沉积时期受古气候影响湖平面升降频繁，湖盆水体较深，处于淡水还原环境下，区域气候湿润，有稳定的陆源输入，古生产力高。依据前文岩相划分方案，可以划分出长石石英质、云灰质、黏土质、混合质 4 类岩相。细粒沉积岩中长石石英质矿物和黏土质矿物依靠陆源输入，内源自生矿物主要为碳酸盐矿物。沉积环境对岩相分布的影响，即体现在矿物含量的纵向变化上，沉积环境演化控制了核桃园组岩相组合发育模式，长石+石英质矿物和黏土质矿物受气候、古盐度及陆源输入的影响，云灰质矿物主要受水体盐度影响(图 9)。

长石石英质矿物含量在阶段 A 较高，该阶段气候干湿交替，古水深变化较大，岩相发育主要受气候的影响。气候湿润时，陆源输入增多，长石石英质页岩与块状粉细砂岩发育；气候干旱时，陆源输入开始减少，混合质纹层状页岩开始发育。黏土矿物含量在阶段 B 较高，该时期气候湿润，陆源输入较强，同时水体盐度较低，导致内源矿物丰度下降，黏土矿物通过絮凝作用得以沉淀，黏土矿物含量受水体盐度和气候的控制。云灰质矿物含量在阶段 C 较高，该时期为半深湖—深湖环境，气候湿润，雨水携带营养物质注入湖泊，利于藻类繁衍，此阶段盐度最高，并且有大量的阳离子供给，有机质丰富，生物化学作用在此阶段起主导作用，内源碳酸盐矿物开始大量沉淀，易于石灰岩类岩相沉积，使得云灰质的含量增加。因此，云灰质矿物含量主要受水体盐度和气候影响，水体盐度大时有利于云灰质的化学沉淀，气候湿润则增加生物成因的云灰质沉积。

细粒沉积岩纹层状结构广泛发育，是因为该阶段处于还原环境下，湖水分层，水体氧气含量甚微，底栖生物的活动受到限制，纹层能够良好的保存下来而不被破坏。也有学者认为纹层状构造的形成主要受季节变化控制，在春夏季节，水体较深，气候多为暖湿，浮游生物勃发，光合作用的进行使得泥晶方解石以生化作用的方式沉淀形成浅色泥晶方解石层，在寒冷的冬季，大量浮游生物死亡，其遗体保存在水体之下，进而形成暗色有机质纹层，之后陆源物质沉淀加大，且缺乏生物作用，形成了黏土质纹层(陈中红等，2008；Hatem *et al.*，2016)。

总体而言，南阳凹陷 H_2Ⅲ与 H_3Ⅰ亚段整体属于湿润、还原环境，半深湖—深湖，淡水、局部半咸水特征，主要发育矿物成分相对均一的纹层状混合质页岩，伴有长石石英质、云灰质、黏土质夹层。其作为小型断陷湖盆，受古气候与古盐度的影响较大，湿润气候有利于陆源的长石石英质矿物和黏土矿物发育，盐度的增加有利于碳酸盐矿物沉积，此外气候湿润，能将大量营养物质输入湖盆，使古生产力更强，还原环境更有利于有机质的保存。前人在针对济阳坳陷研究时发现缓坡带受陆源碎屑输入影响小，碳酸盐矿物高，陡坡带陆源碎屑供给较多，长石石英质矿物、黏土矿物含量高(张奎华等，2024)，但在南阳凹陷页岩油勘探中，目前取心井相对较少只有 2 口，矿物含量以及岩相平面变化不是很明显，陡坡带和缓坡带差异不大(图 10)。

南阳凹陷古近系核桃园组沉积时期以滨浅湖亚相为主，半深湖亚相分布范围局限，主要位于牛三门次凹周缘，岩相以混合质页岩为主，同时夹有三角洲前缘外带的薄层砂，单层厚度介于 1～2 m 之间，薄

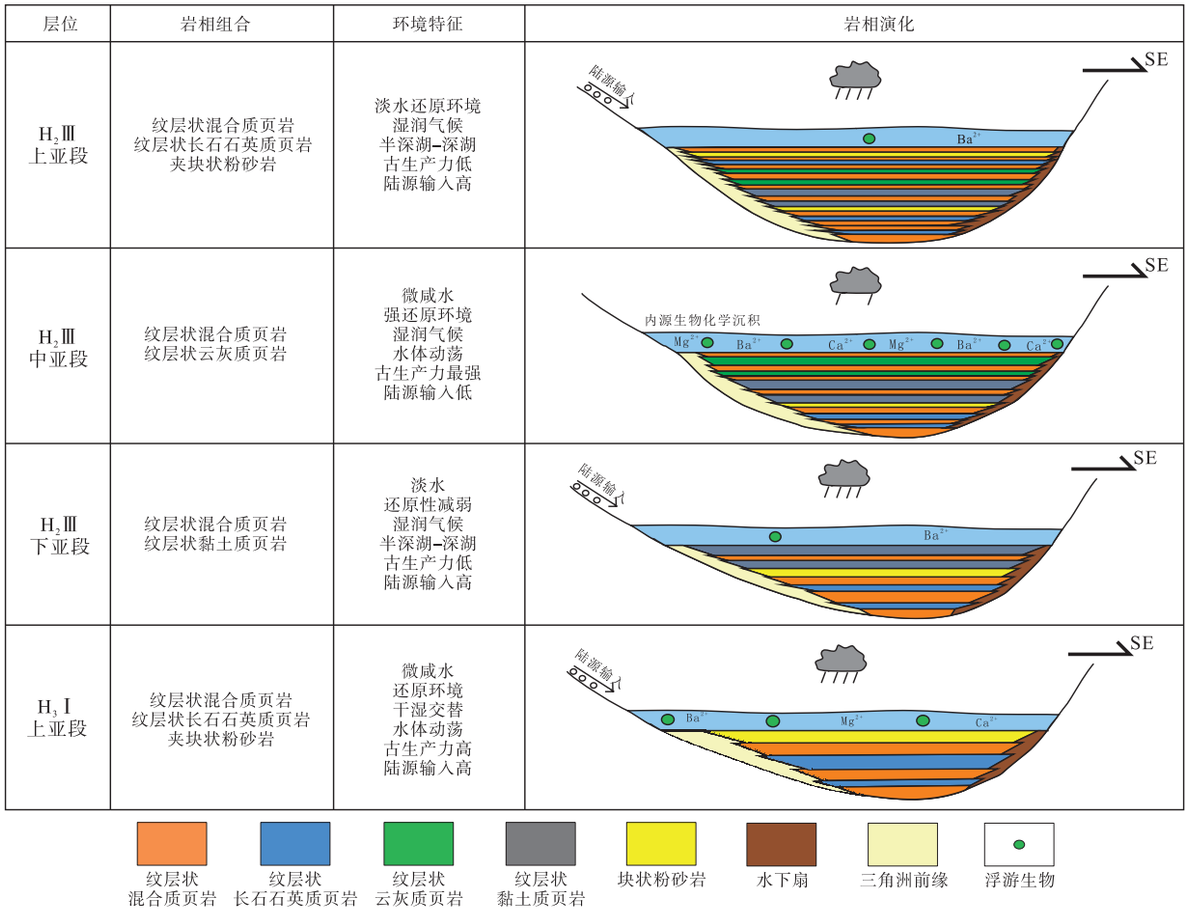


图 9　南阳凹陷 ZY1 井古近系 $H_2Ⅲ$–$H_3Ⅰ$ 亚段岩相演化

Fig. 9　Lithofacies evolution of the Paleogene Submember $H_2Ⅲ$–$H_3Ⅰ$ of Well ZY1 in Nanyang sag

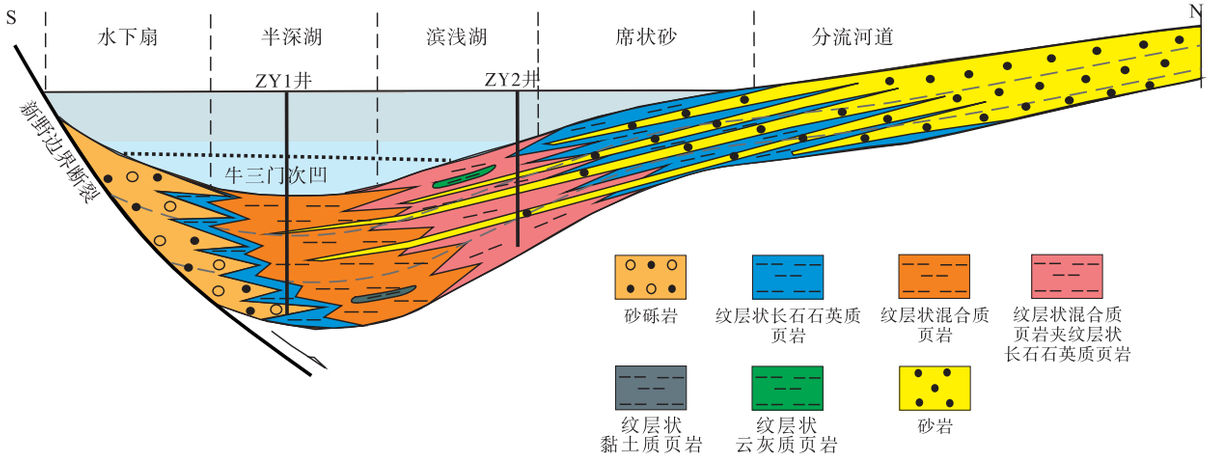


图 10　南阳凹陷古近系岩相模式剖面图

Fig. 10　Lithofacies model cross-section of the Paleogene in Nanyang sag

层砂岩与生烃页岩横向对接、纵向叠置，源—储耦合关系好，利于页岩油保存，因此牛三门次凹为有利区带；纵向上各阶段均发育混合质页岩，其中阶段 A 和阶段 C 具有古生产力较高，水体盐度较高，还原性强，陆源输入较低的特征，有利于烃源岩中有机质的生成与保存，为页岩油勘探有利层系。

5 结论

1）以矿物成分、沉积构造及粒度作为主要依据可将南阳凹陷古近系核桃园组 H_2Ⅲ-H_3Ⅰ亚段细粒沉积岩划分为 9 种岩相类型，其中纹层状混合质页岩和纹层状长石石英质页岩发育占比最高，矿物成分相对均一以及纹层构造发育是南阳凹陷细粒沉积岩的重要特点。

2）南阳凹陷古近系 H_2Ⅲ亚段和 H_3Ⅰ亚段主要为半深湖—深湖的还原环境；古盐度整体偏低，为淡水特征；气候较为稳定，为湿润气候；陆源输入和古生产力整体较强，主要发育混合质纹层状页岩。

3）沉积环境演化控制了核桃园组岩相组合发育模式，长石石英质矿物和黏土矿物受气候、古盐度及陆源输入的影响；云灰质矿物主要受水体盐度影响；湿润的气候、较深的水体和较高的陆源输入利于混合质纹层状细粒沉积岩的沉积，牛三门次凹周缘为页岩油勘探有利区，阶段 A 和阶段 C 沉积地层为页岩油勘探有利层系。

参考文献(References)

曹高社，王亚伟，陈书平，林玉祥，俎新许，徐光明，陈俊侠. 2011. 南阳凹陷西大岗露头区核桃园组沉积相及其构造控制因素分析. 河南理工大学学报(自然科学版)，30(5)：539-546.[Cao G S, Wang Y W, Chen S P, Lin Y X, Zu X X, Xu G M, Chen J X. 2011. Analysis on the sedimentary facies characteristics and its structure factors of Hetaoyuan Formation in Xidagang outcrop, Nanyang sag. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 30(5): 539-546]

陈中红，查明，金强. 2008. 东营凹陷古近系中深层湖盆演化中的无机元素响应. 沉积学报，26(6)：925-932.[Chen Z H, Zha M, Jin Q. 2008. Inorganic element response to the evolution of the middle and deep lacustrine basins of the Paleogene in the Dongying sag. Acta Sedimentologica Sinica, 26(6): 925-932]

邓远，陈世悦，蒲秀刚，鄢继华，陈佳. 2020. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化. 石油与天然气地质，41(4)：811-823，890.[Deng Y, Chen S Y, Pu X G, Yan J H, Chen J. 2020. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from the second member of Kongdian Formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 41(4): 811-823, 890]

段宏亮，杨保良. 2024. 陆相细粒沉积岩岩相组合类型划分研究现状及其油气地质意义. 复杂油气藏，17(1)：1-10.[Duan H L, Yang B L. 2024. Research status of lithofacies assemblage types classification of continental fine grained sedimentary rocks and their hydrocarbon geological significance. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 17(1): 1-10]

金芸芸，李艳然，李圯，黄帅博，罗曦，余梦丽，郑融. 2024. 陆相断陷咸化湖盆细粒沉积岩特征及沉积环境：以泌阳凹陷核桃园组 H_3Ⅲ亚段为例. 断块油气田，31(2)：289-298.[Jin Y Y, Li Y R, Li Y, Huang S B, Luo X, Yu M L, Zheng R. 2024. Characteristics and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks in continental fault-basin saline lake basins: a case study of the H_3Ⅲ sub-member of the Hetaoyuan Formation in the Biyang Depression. Fault-Block Oil and Gas Fields, 31(2): 289-298]

李浩，徐怀民，王千军，肖雄飞. 2023. 准东地区平地泉组微量元素地球化学特征及油气地质意义. 断块油气田，30(2)：277-285.[Li H, Xu H M, Wang Q J, Xiao X F. 2023. Geochemical characteristics and petroleum geological significance of trace elements of Pingdiquan Formation in eastern Junggar Basin. Fault-Block Oil & Gas Field, 30(2): 277-285]

李维，朱筱敏，段宏亮，李鹤永，刘世丽. 2020. 苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组细粒沉积岩纹层特征与成因. 古地理学报，22(3)：469-482.[Li W, Zhu X M, Duan H L, Li H Y, Liu S L. 2020. Characteristics and forming mechanism of laminae fine-grained sedimentary rock of the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu sags, Subei Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 22(3): 469-482]

梁超. 2015. 含油气细粒沉积岩沉积作用与储层形成机理. 中国地质大学(北京)博士学位论文.[Liang C. 2015. The sedimentation and reservoir formation mechanism of hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]

林兴悦，朱筱敏，王晓琳，张美洲. 2025. 细粒沉积岩优质储集层发育主控因素分析：以渤海湾盆地沾化凹陷为例. 古地理学报，27(1)：55-71.[Lin X Y, Zhu X M, Wang X L, Zhang M Z. 2025. Reservoir characteristics and distribution of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: a case study from Zhanhua sag, Bohai Bay Basin, China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 27(1): 55-71]

刘惠民，王勇，杨永红，张顺. 2020. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合：以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例. 地球科学，45(10)：3543-3555.[Liu H M, Wang Y, Yang Y H, Zhang S. 2020. Development environment and lithofacies association of fine-grained mixtites in the Dongying depression: a case study of fine-grained sedimentation in the upper member of the Sha 4 shale. Earth Science, 45(10): 3543-3555]

刘姝君，操应长，梁超. 2019. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩特征及沉积环境. 古地理学报，21(3)：479-489.[Liu S J, Cao Y C, Liang C. 2019. Lithologic characteristics and sedimentary environment of fine-grained sedimentary rocks of the Paleogene in Dongying sag, Bohai Bay Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 21(3): 479-489]

马义权，杜学斌，刘惠民，陆永潮. 2017. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征、成因及演化. 地球科学，42(7)：1195-1208.[Ma Y Q, Du X B, Liu H M, Lu Y C. 2017. Characteristics, depositional processes, and evolution of shale lithofacies of the upper submember of Es4 in the Dongying Depression. Earth Science, 42(7): 1195-1208]

孟庆涛，胡菲，刘招君，孙平昌，柳蓉. 2024. 陆相坳陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及成因：以松辽盆地晚白垩世青山口组为例. 吉林大学学报(地球科学版)，54(1)：20-37.[Meng Q T, Hu F, Liu Z J, Sun P C, Liu R. 2024. Lithofacies types and genesis of fine-grained sediments in terrestrial depression lake basin: taking Upper Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin as an example. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 54(1): 20-37]

彭冰璨. 2014. 南阳凹陷魏岗油田北部地区核二中下段沉积相研究及储层评价. 长江大学硕士学位论文.[Peng B C. 2014. The study on the sedimentary facies and reservoir evaluation of middle and inferior of second Hetao in Northern Weigang oilfield of Nanyang sag. Masteral dissertation of Yangtze University]

彭治超，李亚男，张孙玄琦，付星辉. 2018. 主微量元素地球化学特征

在沉积环境中的应用. 西安文理学院学报(自然科学版),21(3):108-111.[Peng Z C,Li Y N,ZhangSun X Q,Fu X H. 2018. Application of geochemical characteristics of major and trace elements in sedimentary environment. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition),21(3):108-111]

王濡岳,胡宗全,周彤,包汉勇,吴靖,杜伟,何建华,王鹏威,陈前. 2021. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义. 石油与天然气地质,42(6):1295-1306.[Wang R Y,Hu Z Q,Zhou T,Bao H Y,Wu J,Du W,He J H,Wang P W,Chen Q. 2021. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale,Sichuan Basin and its periphery. Oil & Gas Geology,42(6):1295-1306]

王濡岳,胡宗全,龙胜祥,杜伟,吴靖,聂海宽,王鹏威,孙川翔,赵建华. 2022. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩储层特征与演化机制. 石油与天然气地质,43(2):353-364.[Wang R Y,Hu Z Q,Long S X,Du W,Wu J,Nie H K,Wang P W,Sun C X,Zhao J H. 2022. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale,Sichuan Basin. Oil & Gas Geology,43(2):353-364]

王鑫锐,孙雨,刘如昊,李钊. 2023. 陆相湖盆细粒沉积岩特征及形成机理研究进展. 沉积学报,41(2):349-377.[Wang X R,Sun Y,Liu R H,Li Z. 2023. Research progress into fine-grained sedimentary rock characteristics and formation in a continental lake basin. Acta Sedimentologica Sinica,41(2):349-377]

吴靖,姜在兴,梁超. 2017. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系. 石油学报,38(10):1110-1122.[Wu J,Jiang Z X,Liang C. 2017. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of member 4 of Shahejie Formation,Dongying sag and their relationship with sedimentary environment. Acta Petrolei Sinica,38(10):1110-1122]

吴靖,姜在兴,童金环,杨璐,李积,聂海宽. 2016. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素. 石油学报,37(4):464-473.[Wu J,Jiang Z X,Tong J H,Yang L,Li J,Nie H K. 2016. Depositional environment and controlling factors of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of the Shahejie Formation,fourth member,Paleogene,Dongying Depression. Acta Petrolei Sinica,37(4):464-473]

杨万芹,蒋有录,王勇. 2015. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析. 中国石油大学学报(自然科学版),39(4):19-26.[Yang W Q,Jiang Y L,Wang Y. 2015. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es_3-upper Es_4 in Dongying sag. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),39(4):19-26]

姚红生,咎灵,高玉巧,花彩霞,余文端,骆卫峰,马晓东. 2021. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破. 石油实验地质,43(5):776-783.[Yao H S,Zan L,Gao Y Q,Hua C X,Yu W D,Luo W F,Ma X D. 2021. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation,Qintong sag,Subei Basin. Petroleum Geology & Experiment,43(5):776-783]

张斌,毛治国,张忠义,袁懿琳,陈小亮,石雨昕,刘广林,邵晓州. 2021. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段黑色页岩形成环境及其对页岩油富集段的控制作用. 石油勘探与开发. 48(6):1127-1136.[Zhang B,Mao Z G,Zhang Z Y,Yuan Y L,Chen X L,Shi Y X,Liu G L,Shao X Z. 2021. Black shale formation environment and its control on shale oil enrichment in Triassic Chang 7 Member,Ordos Basin,NW China. Petroleum Exploration and Development,48(6):1127-1136]

张奎华,王越,于洪洲,周健,汪誉新,宋梅远,倪胜利. 2024. 中国东西部陆相页岩油地质特征差异性分析及其对富集规律影响：以胜利探区为例. 油气地质与采收率,31(4):42-59.[Zhang K H,Wang Y,Yu H Z,Zhou J,Wang Y X,Song M Y,Ni S L. 2024. Difference analysis of geological characteristics of continental shale oil in eastern and western China and its influence on enrichment law: a case study of exploration area of Shengli Oilfield. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,31(4):42-59]

张逊. 2020. 准噶尔盆地东南缘中—上二叠统沉积体系类型及芦草沟组页岩岩相学研究. 中国地质大学博士学位论文.[Zhang X. 2020. Sedimentary system types of middle-upper Permian and shale petrography of Lucaogou formation in the southeast margin of Junggar basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]

张远,彭冰璨,宋俊杰,王宇. 2013. 南阳凹陷魏岗油田北部地区小层划分与对比：以核桃园组三段二亚段为例. 石油天然气学报,35(9):15-17,1.[Zhang Y,Peng B C,Song J J,Wang Y. 2013. Division and correlation of substrata in the northern area of Weigang Oilfield in Nanyang Depression: by taking E$_2$h$_3$~2 of Hetaoyuan Formation for example. Journal of Oil and Gas Technology,35(9):15-17,1]

赵建华,金之钧,金振奎,温馨,耿一凯,颜彩娜,聂海宽. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境. 石油学报,37(5):572-586.[Zhao J H,Jin Z J,Jin Z K,Wen X,Geng Y K,Yan C N,Nie H K. 2016. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation,Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica,37(5):572-586]

朱筱敏,王晓琳,张美洲,林兴悦,张琴. 2024. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征. 石油与天然气地质,45(4):873-892.[Zhu X M,Wang X L,Zhang M Z,Lin X Y,Zhang Q. 2024. Sedimentary environments and lithofacies characteristics of fine-grained sediments in typical continental basins in China. Oil & Gas Geology,45(4):873-892]

Bai Y Y,Liu Z J,Sun P C. 2015. Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale-and coalbearing layers of the Meihe Basin,Northeast China. Journal of Asian Earth Sciences,97:89-101.

Hatch J R,Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian(Missourian)Stark shale member of the Dennis limestone,Wabaunsee County,Kansas,U. S. A. Chemical Geology,99(3):65-82.

Hatem B A,Abdullah W H,Hakimi M H. 2016. Origin of organic matter and paleoenvironment conditions of the Late Jurassic organicrich shales from Shabwah sub-basin(western Yemen): constraints from petrology and biological markers. Marine and Petroleum Geology,72:83-97.

Liang C,Jiang Z X,Cao Y C,Wu M H,Guo L,Zhang C M. 2016. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration: a case study from the Lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin. AAPG Bulletin,100(5):773-794.

Rimmer S M,Thompson J A,Goodnight S A. 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence. Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,215(1-2):125-154.

Zhang L C,Xiao D S,Lu S Fl. 2019. Effect of sedimentary environment on the Formation of organic-rich marine shale: insights from major/trace elements and shale composition. International Journal of Coal Geology,204:34-50.

(责任编辑　郑秀娟)