

文章编号: 1671-1505(2025)04-0985-12 DOI: 10.7605/gdxb.2025.088

高邮—金湖凹陷古近系阜宁组 细粒混积岩沉积环境*

朱筱敏¹ 李 维² 王晓琳¹ 叶 蕾¹ 董艳蕾¹ 张 琴¹

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏扬州 225009

摘要 苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组二段(阜二段)不仅是主力烃源岩层,而且发育成分复杂的细粒混积岩,现已成为陆相湖盆非常规油气勘探重点层段。细粒混积岩沉积环境研究对于其形成过程、岩相特征及甜点区段预测均有重要作用。基于全岩 X 衍射、黏土 X 衍射、微量元素和 TOC 分析成果恢复确认阜二段整体处于非硫化缺氧水体环境;5 个特殊岩性层段依次表现为:“山字形层段”沉积时期气候整体干旱,“四尖峰—七尖峰层段”沉积时期气候变得相对湿润,“王八盖层段”沉积时期气候相对湿润且稳定,“泥脖子层段”沉积时期气候较其他层段明显湿润;“山字形至王八盖层段”沉积时期湖平面整体较低、波动强烈、逐渐上升,“泥脖子层段”沉积时期发生了大规模湖侵;阜二段水体咸化,古盐度均大于 10‰,垂向可分 2 段:“山字形—四尖峰层段”形成于咸水至超咸水环境,“七尖峰—王八盖—泥脖子层段”形成于半咸水至咸水环境。受古气候控制的半咸水环境是形成细粒混积岩的基本环境要素,进而建立了早期偏干旱和晚期偏湿润气候的混积模式。

关键词 细粒混积岩 沉积环境 混合沉积模式 阜宁组二段 古近系 高邮—金湖凹陷

第一作者简介 朱筱敏,男,1960 年生,教授,主要从事沉积地质学教学科研工作。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

Sedimentary environment of fine-grained mixed rocks from the Paleogene Funing Formation in Gaoyou and Jinhu sags

ZHU Xiaomin¹ LI Wei² WANG Xiaolin¹ YE Lei¹ DONG Yanlei¹ ZHANG Qin¹

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 Exploration & Development Research Institute, Jiangsu Oilfield Company, Sinopec, Jiangsu Yangzhou 225009, China

Abstract The Member 2 of the Paleogene Funing Formation in the Gaoyou and Jinhu sags of the Subei Basin is not only the primary hydrocarbon source rocks, but also develops complex fine-grained mixed rocks. It has now become a key target for unconventional oil-gas exploration in continental lacustrine basins. Research on sedimentary environments of these facies plays a crucial role in both understanding their depositional processes and lithofacies characteristics, and predicting sweet spot intervals. Based on integrated analyses including whole-rock X-ray diffraction (XRD) analysis, X-ray clay mineral diffraction analysis, trace element geochemistry, and total organic carbon (TOC) content, this study

* 国家自然科学基金项目(编号: 42272110)资助。[Financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China(No. 42272110)]

收稿日期: 2025-04-03 改回日期: 2025-05-26

reveals that the Member 2 of the Funing Formation was deposited in a non-sulfidic, anoxic water environment. The climate was generally arid and unstable during deposition of the “Shanzixing Unit”. The “Four-Seven Peaks Units” depositional period witnessed a more humid and still unstable climate. The climate during deposition of the “Wangbagai Unit” exhibited relative humidity and stability. In contrast, the “Nibozi Unit” depositional period experienced significantly more humid climatic conditions compared to other units. During the deposition of the “Shanzixing-Wangbagai units”, the lake level remained generally low but gradually rising with strong fluctuations. The “Nibozi Unit” depositional period experienced a major lacustrine transgression event. The Member 2 of the Funing Formation was deposited under saline water, with palaeosalinity consistently exceeding 10‰, which can be vertically subdivided into two intervals: the “Shanzixing-Four Peaks Units” formed in saline to hypersaline environments, and the “Seven Peaks-Wangbagai-Nibozi Units” developed in brackish to saline environments. This study proposes that the brackish water environment controlled by palaeoclimate constitutes the fundamental prerequisite for fine-grained mixed facies, thereby establishing mixed sedimentary models dominated by arid conditions in the early stage and humid conditions in the late stage.

Key words fine mixed rocks, sedimentary environment, mixed sedimentation model, Member 2 of Funing Formation, Paleogene, Gaoyou and Jinhu sags

About the first author ZHU Xiaomin, born in 1960, is a professor working at China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in teaching and research of sedimentology. E-mail: xmzhu@cup.edu.cn.

0 引言

传统沉积学理论认为,碳酸盐岩与碎屑岩的沉积环境截然不同。前者常是生物化学作用的产物,多沉积于水浅水咸的温暖清澈环境;后者沉积常受控于物源供给,沉积环境多变、陆源碎屑物质会抑制生物化学作用,二者此消彼长。随着沉积研究深入,20世纪人们逐渐发现除了纯的碳酸盐岩和碎屑岩沉积外,二者的混合沉积现象普遍存在。混合沉积被定义为“硅质碎屑与碳酸盐颗粒在结构上的相互掺杂,或者成分上纯的硅质碎屑岩与碳酸盐岩旋回性互层及侧向彼此交叉”(Mount, 1985)。20世纪80年代以后,国内外学者进一步探讨了混合沉积定义、混积岩分类、混合沉积岩相和混合沉积微相特征(Mount, 1985; 张锦泉和叶红专, 1989; 李祥辉等, 1997; 沙庆安, 2001; 张金亮和司学强, 2007; Li *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2023; Habulashenmu *et al.*, 2024),分析了不同沉积环境中的混合沉积机制、混积沉积相模式和油气地质意义等(冯进来等, 2011; Mata and Bottjer, 2011; Braga *et al.*, 2012; 杜晓峰等, 2020; Zeng *et al.*, 2023)。

关于混合沉积的类型划分,不同学者提出了多

种方案(Mount, 1985; 董桂玉等, 2007; 杜晓峰等, 2020)。实际上,混合沉积类型的变化归根到底反映了沉积环境的变化,混合沉积作为一种特殊的沉积现象对沉积环境的恢复具有特殊意义(Dou *et al.*, 2022; Hou *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2024; 朱筱敏等, 2024)。在大多数情况下,混合沉积环境可能是均匀变化(相混合)、短暂性突变(间断混合)或长期性突变(原地混合)的,其对应的3种混合沉积类型最为常见(Mount, 1985)。总体而言,混合沉积最常出现在海陆过渡带—浅海和陆相半咸水—咸水湖盆中,此外斜坡—深海平原的深水重力流亦能形成混合沉积(王国忠, 2001; 嵯喜准等, 2013; Gomez and Astini, 2015; 梁薇等, 2016)。海相混合沉积主要发育于深水陆棚环境以及斜坡环境,物质来源以陆源物质和热水沉积为主,其岩石类型主要受水体氧化还原性、古生产力、水深等因素控制;陆相混合沉积主要发育于三角洲前缘及较深湖环境,物质来源以陆源物质、内源细粒沉积物和火山碎屑为主,其沉积类型主要受控于湖盆生物活动、气候变化、陆源输入以及火山—热液活动等引起的流体性质改变(聂银兰等, 2021)。

古沉积环境研究主要包括古生物环境、古化学环境以及古地理环境，在混积沉积形成环境研究中，人们常常关注古气候、古水深、古盐度和氧化还原环境等研究，进而分析混合沉积发育的主控因素和烃源岩发育分布特征。古沉积环境恢复方法较多，包括有机碳含量、常量元素、微量元素、古生物类型与生态习性、碳氧同位素和特殊岩石矿物法等，例如 Ca/Mg 值随气候会产生不同变化，气候越干燥炎热比值越低；Sr/Ba 值会随着盐度的增加而逐渐增高，干旱气候背景下蒸发作用较强的环境中容易沉淀石膏，还原环境往往会形成由等粒度的亚微米级黄铁矿或微晶体紧密堆积而成的草莓状黄铁矿，它们均是恢复古环境、古气候、古沉积介质的有效指示 (Loucks and Ruppel, 2007; 张美洲等, 2023)。

苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组发育碎屑岩与碳酸盐岩混合沉积的烃源岩和非常规油气储集层，2021 年江苏油田在高邮凹陷花庄地区部署风险探井取得页岩油勘探重要突破 (朱相羽等, 2023)。研究发现，这类储集层具有较强的非均质性，严重影响了油气高效勘探开发，而储集层非均质性主要受控于沉积环境、岩相类型和成岩作用，因此开展沉积环境研究对于分析储集层非均质性形成机制、预测有利储集层 (岩相) 分布均有重要作用。在了解高邮—金湖凹陷古近系地质背景和阜宁组混合沉积特征的基础上，系统观察描述 13 口井岩心 (心长 343.2 m)，采集 474 块混合沉积样品并开展 TOC、全岩 X 衍射、黏土 X 衍射和微量元素分析，进而研究了阜宁组古气候、古盐度、古水深以及氧化还原特征，建立了受气候控制的混合沉积模式，为指导高效非常规油气勘探开发提供了地质基础。

1 地质背景

高邮凹陷和金湖凹陷位于苏北盆地东台拗陷，北起建湖隆起，南至通扬隆起，西接张八岭隆起，东临吴堡低凸起，2 个凹陷现今被柳堡—菱塘桥低凸起分隔 (图 1-a)。高邮凹陷位于东台拗陷中部，面积 4160 km²，南部以北倾真武断层为界，北部为菱塘桥低凸起—临泽凹陷—柘垛低凸起，现今构造格局自南向北依次为南部断阶带、中央深洼带、北部斜坡带；凹陷内断裂系统以 NEE 向为基本展布

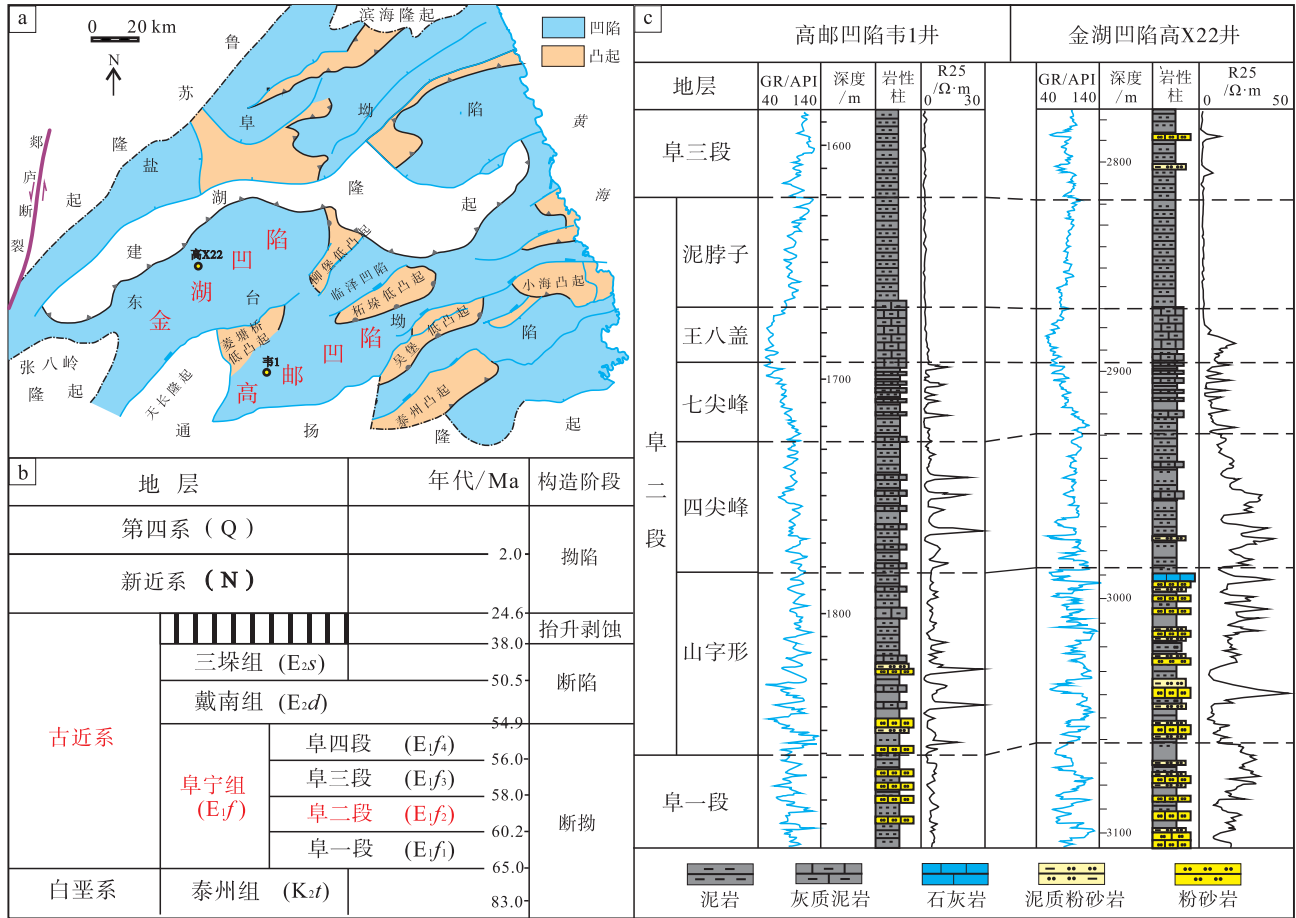
方向。金湖凹陷位于东台拗陷西部，面积约 5000 km²，北起建湖隆起，南至天长凸起，西邻张八岭隆起，东与菱塘桥—柳堡低凸起相连；凹陷构造复杂，整体呈东断西超盆地结构特征。

苏北盆地自下而上依次充填白垩系泰州组，古近系阜宁组、戴南组和三垛组，新近系，第四系 (图 1-b)，岩性以河流—三角洲—湖泊成因的砂泥岩为主，最大沉积厚度达 7000 m。

阜宁组沉积于苏北盆地断拗构造演化阶段，该套地层与下伏泰州组呈假整合—整合接触，与上覆戴南组呈假整合接触。根据阜宁组岩性组合，自下而上分为阜一段、阜二段、阜三段和阜四段 (E_{1f_1} 、 E_{1f_2} 、 E_{1f_3} 和 E_{1f_4}) (图 1-b)。阜二段整体发育细粒沉积，是本区最主要的烃源岩层系。依据电阻率曲线形态可将阜宁组二段 (E_{1f_2}) 分为 5 个特殊岩性层段 (或 5 个亚段)，自下而上分别为山字形、四尖峰、七尖峰、王八盖和泥脖子层段 (图 1-c)。山字形层段在高邮凹陷整体为细粒混积岩，因电阻率曲线形态整体形似翻转“山”字而得名，是重要的烃源岩层段，在金湖凹陷为泥岩、砂岩、灰岩的互层，是重要的常规油气储集层；四尖峰、七尖峰层段发育细粒混积岩，因物质组成的纵向差异在电阻率曲线上表现出多个高值尖峰，是苏北盆地主要烃源岩层系；王八盖层段细粒混积岩因自然伽马曲线形似龟背得名；泥脖子层段是阜二段黏土含量较高的泥岩段。

细粒沉积岩被定义为粒径小于 0.0625 mm、含量大于 50% 的沉积岩 (Mount, 1985)。细粒沉积岩中常常发育混积岩。金湖—高邮凹陷阜二段整体发育一套灰黑色层状—纹层状细粒混积岩，具体包括以泥晶碳酸盐岩为主的细粒混积岩 (碳酸盐组分含量 50%~90%，各段均有分布，但不发育)，混合型细粒沉积岩 (各组分含量均不超过 50%，多出现在四尖峰—山字形层段)，以陆源碎屑 (陆屑) 为主的细粒混积岩 (长石—石英含量 50%~90% 或黏土矿物含量 50%~90%，且碳酸盐含量大于 10%，发育在七尖峰层段) 以及生物介壳富集的细粒混积岩 (多在王八盖层段)，其中黏土质长英细粒岩和长英质—黏土质混积岩具有最好的生烃潜力 (朱相羽等, 2023)。

阜二段混积岩 (特别是黏土矿物含量相对较高的岩相具有较好的生烃潜力) 连续分布在高邮



a—苏北盆地高邮—金湖凹陷构造区划（蓝色为沉积充填区域）；b—苏北盆地金湖—高邮凹陷年代地层及构造演化特征；
c—苏北盆地高邮—金湖凹陷关键井阜宁组二段地层细分方案

图 1 苏北盆地高邮—金湖凹陷古近系阜宁组二段地质背景

Fig. 1 Geological background of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

凹陷、金湖凹陷、临泽凹陷以及菱塘桥低凸起、柳堡低凸起和柘垛低凸起等处，厚度变化较大（80~440 m），整体上高邮凹陷阜二段厚度大于金湖凹陷。自下而上，阜二段各层段的地层厚度平面分布差异逐渐减小，反映了逐渐填平补齐的沉积过程。

2 沉积环境综合分析

2.1 古气候分析

苏北盆地阜二段孢粉化石以被子植物花粉为主，总体指示下部偏干旱、上部偏湿润的热带—亚热带气候，其中阜二段下部基本未见裸子植物花粉及蕨类孢子，常见耐盐碱的半干旱植物藜科花粉 (*Chenopollenites*)；阜二段上部见罗汉松粉 (*Podocarpidites*, 湿生环境) 等裸子植物花粉，偶见蕨类

孢子。除孢粉化石以外，有机碳含量变化也可用于古气候的定性恢复。通常认为气候温暖湿润时，藻类相对繁盛，致使有机质含量增加，有利于 TOC 的保存；而干燥气候则不利于有机质生产，保存差。因而有机质含量的变化可在一定程度上反映气候的变化，与沉积环境恢复结果具有较好的耦合性 (段宏亮等, 2020; Hakimi *et al.*, 2025)。通过阜宁组二段分层段统计 303 块 TOC 样品分析数据发现，阜二段有机碳含量分布在垂向上具有很强的规律性和差异性 (图 2)。

阜二段山字形层段沉积时期，TOC 分布主要集中在 0%~0.5% 及 0.5%~1% 的区间内，反映了当时气候极为干旱。其中山字形上部和下部 TOC 分布略有差别，山字形下部的 TOC 均值约 0.88%，且具有一定的波动性，在 1.5%~2% 的区间内亦有

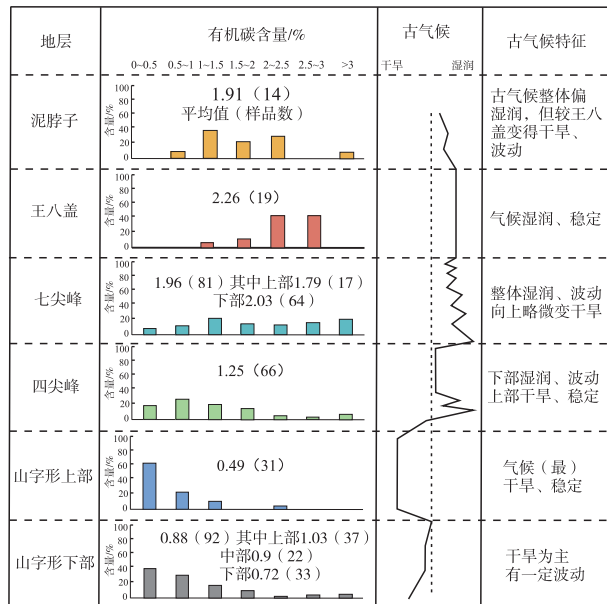


图 2 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段 TOC 含量与古气候变化分析

Fig. 2 TOC and palaeoclimate analysis of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

相当分布, 且存在少量 TOC 大于 3% 的样品, 表明阜二段沉积早期气候整体干旱但仍存在短暂湿润时期; 而山字形上部 TOC 均值只有 0.49%, 且基本未见高有机碳样点, 表明该阶段气候稳定干旱。

阜二段四尖峰—七尖峰层段沉积时期 TOC 均值较高, 一般在 1.25%~1.96% 之间, 但波动大, 反映了相对湿润但波动较大的气候条件。此外进一步统计发现, 四尖峰段下部气候湿润而波动, 上部则相对稳定和干旱; 七尖峰层段气候条件自下而上略微变得干旱。

阜二段王八盖层段沉积时期, 气候变得更加湿润且十分稳定, 该段 TOC 均值达到阜二段峰值, 约 2.26%, 且 TOC 分布区间相对集中。到了泥脖子层段沉积时期, TOC 均值与七尖峰层段相近, 约 1.91%, 表明气候相对湿润(图 2)。

总之, 阜二段整体处于缺氧多变水体环境, 自下而上, 气候由干旱向相对湿润转变; “山字形层段”沉积时期气候整体干旱但不稳定, “四尖峰—七尖峰层段”沉积时期气候变得相对湿润、但仍不稳定, “王八盖层段”沉积时期气候相对湿润且稳定, “泥脖子层段”沉积时期气候较其他层段明显湿润(图 2)。

2.2 古水深或湖平面升降分析

通常认为在远离陆源供给的细粒沉积区域, 当湖平面降低时, 碳酸盐沉积含量会相对增多; 当湖平面上升时, 碳酸盐沉积含量会相对减少(杜晓峰等, 2020; 朱筱敏, 2023)。故碳酸盐含量变化可以反映古水深/湖平面的相对变化。金湖—高邮凹陷阜二段发育细粒沉积岩, 碳酸盐含量与湖平面升降有关。基于 458 块样品的全岩分析数据, 分段统计了碳酸盐含量平面分布, 进而恢复古水深。

阜二段下部山字形层段样品的全岩分析数据主要来自高邮凹陷中西部和金湖凹陷中北部。在靠近物源区的金湖凹陷西部, 细粒沉积岩与砂岩互层分布, 碳酸盐含量基本不超过 15%, 应当受到陆源供给和淡水注入的影响, 本次研究未纳入统计。在远离物源区的高邮凹陷, 碳酸盐含量高且相对稳定, 大多集中在 30% 左右, 高者可达 50%, 反映古水深较浅或湖平面较低且稳定(图 3)。

阜二段四尖峰层段样品分布较为均匀, 主要覆盖高邮凹陷和金湖凹陷中部。该阶段碳酸盐含量整体较高, 约 30%, 反映古水深较浅或湖平面较低, 但整体波动较大(图 3)。例如在远离物源区的高邮凹陷, 四尖峰层段碳酸盐含量在 25%~50% 之间波动。

阜二段七尖峰层段稳定分布于苏北盆地, 受陆源供给影响很小, 碳酸盐含量主要受古水深或湖平面升降影响(可能存在海侵影响), 其均值基本稳定在 30%~40% 之间(图 3), 反映了较大和较频繁的湖平面波动。

阜二段王八盖层段在整个苏北盆地稳定分布。该阶段碳酸盐含量均值与七尖峰层段相似, 亦稳定在 30%~40% 之间, 但其碳酸盐含量相当稳定(图 3), 反映了稳定的古水深或湖平面。

阜二段上部泥脖子层段碳酸盐含量分析数据仅来自 4 口井。该阶段碳酸盐含量相较于阜二段其他层段出现了明显下降: 高邮凹陷均值约 15%, 应当指示了相对较大古水深或较高的湖平面; 金湖凹陷碳酸盐含量均值仅为 3%, 可能是受到了西部淡水注入的影响(图 3)。

根据阜二段碳酸盐含量均值的垂向变化可发现, 除泥脖子段均值不足 10% 以外, 其他层段均值位于 30% 上下, 反映了阜二段中下部湖平面整

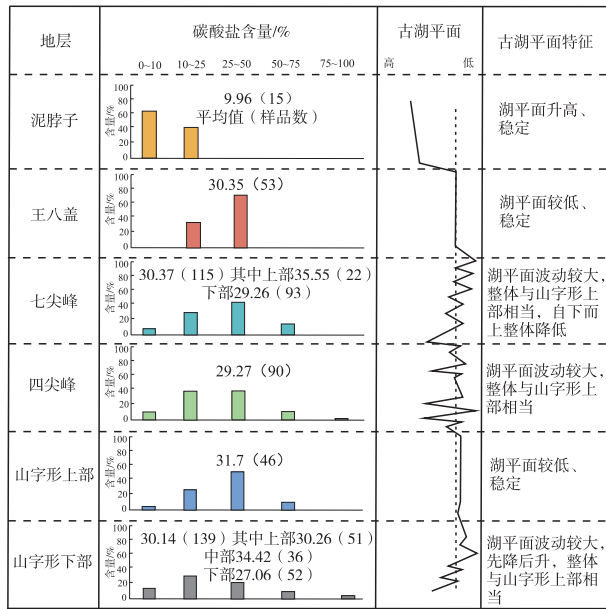


图 3 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段碳酸盐含量与湖平面（古水深）变化

Fig. 3 Carbonate content and the variation of palaeowater depth of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

体相对较低或水体较浅的特征。基于不同层段碳酸盐含量的分布区间可知，山字形—七尖峰层段沉积时期湖平面仍有不同程度的波动：山字形下部、四尖峰和七尖峰段沉积时期，碳酸盐含量波动均相对较大，在各个区间均有分布，反映了较大的湖平面波动；而山字形上部和王八盖层段碳酸盐含量相对稳定，主要集中在 25%~50% 区间内，反映了相对稳定的湖平面；泥脖子层段碳酸盐含量明显偏低，反映了较大规模的湖平面升高(图 3)。

总之，“山字形至王八盖层段”沉积时期湖平面整体较低、波动强烈并逐渐上升，“泥脖子层段”沉积时期发生了大规模湖侵(图 3)。

2.3 古盐度分析

一般来说，淡水沉积物中 Sr/Ba 值小于 0.5，半咸水沉积物中 Sr/Ba 值介于 0.5~1 之间，而盐湖（海相）沉积物中 Sr/Ba 值大于 1（朱筱敏等，2024）。统计可知，研究区阜二段 Sr/Ba 值基本大于 1，表明水体具有较大的盐度(图 4)。

为了更准确地分析古盐度，本次研究采用了定量计算的方法。由于研究区阜二段细粒混积岩岩性复杂，故采用了适用于复杂岩性的 Couch 法实现古

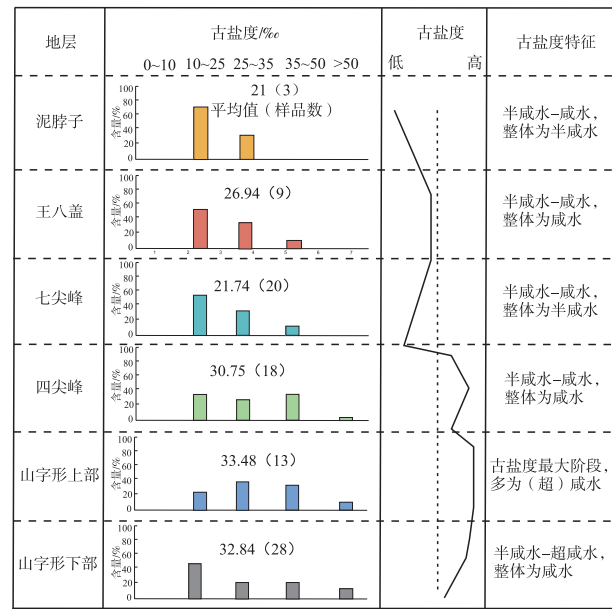


图 4 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段古盐度变化

Fig. 4 Palaeosalinity variation of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

盐度定量分析（马茗茗等，2019）。该方法基本原理是利用沉积物中硼元素的浓度与沉积水体盐度之间的线性关系来计算古盐度。由于细粒沉积岩中的黏土矿物含量以及不同黏土矿物对硼元素的吸收能力不同，首先需要对硼元素进行数据校正，然后根据区域地质背景调整经验常数并带入 Couch 方程。该方法要求完成样品硼元素含量、全岩 X 衍射和黏土 X 衍射测试，从而实现矿物组分定量分析基础上的古盐度准确计算。

通过 91 个样品的古盐度定量分析(图 4)，整个阜二段，即便是碳酸盐含量相对较低的泥脖子段，水体盐度都在 10‰ 以上。根据水体盐度的划分标准：大于 35‰ 为超咸水，25‰~35‰ 为咸水，10‰~25‰ 为半咸水，小于 10‰ 为微咸水—淡水，故阜二段水体主体为半咸水，并且在垂向上具有明显差异性。具体而言，山字形—四尖峰层段古盐度较大，均值超过 30‰，古盐度分布集中在 25‰~35‰ 和 35‰~50‰ 的区间内，甚至存在不少古盐度大于 50‰ 的样品，主要为咸水—超咸水；而阜二段上部七尖峰—泥脖子层段古盐度相对降低，均值在 20‰~25‰，且古盐度分布区间集中在 10‰~25‰ 和 25‰~35‰，主要为半咸水—咸水，很少有古盐度超过 35‰ 的样品出现(图 4)。因此，阜二段水体整体咸化，古盐度均大于 10‰，垂向可分 2 段：

“山字形—四尖峰层段”沉积处于咸水至超咸水环境，“七尖峰—王八盖—泥脖子层段”形成于半咸水至咸水环境。

2.4 氧化还原特征分析

元素 V、Ni 以及 V/Ni 值或 V/(V+Ni) 值可用来表示沉积环境的氧化还原性。通常认为 V/(V+Ni) 值大于 0.84 时对应硫化缺氧水体，在 0.54~0.72 之间时对应非硫化缺氧水体；在 0.46~0.6 之间时对应贫氧水体（朱筱敏等，2024；林兴悦等，2025）。

作者分层段完成了阜二段 99 块样品的元素 V、Ni 元素测试(图 5)，发现阜二段各层段 V/(V+Ni) 均值都大于 0.6，指示了相对还原缺氧的水体环境。详细分析发现，七尖峰层段上部和山字形层段中部的 V/(V+Ni) 值相对较低，分别为 0.51 和 0.59，指示了贫氧水体。综上，研究区阜二段整体处于非硫化缺氧水体环境，仅在七尖峰层段上部和山字形层段中部沉积时期转变为贫氧水体(图 5)。

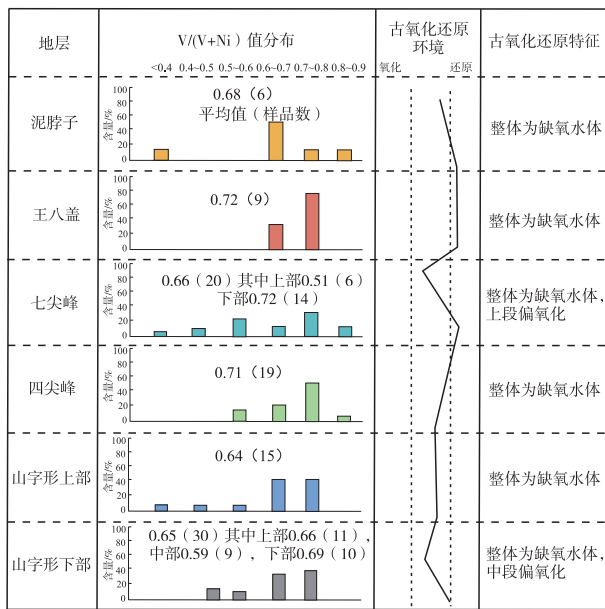


图 5 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段 V/(V+Ni) 值和氧化还原性变化

Fig. 5 V/(V+Ni) ratio and oxidation-reduction of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

2.5 沉积环境综合分析

综合对比阜宁组二段沉积环境单一指标分析结果，认为阜二段沉积环境演化可分为 2 个阶段，沉积环境垂向演化表现出明显的阶段性(图 6)，这为

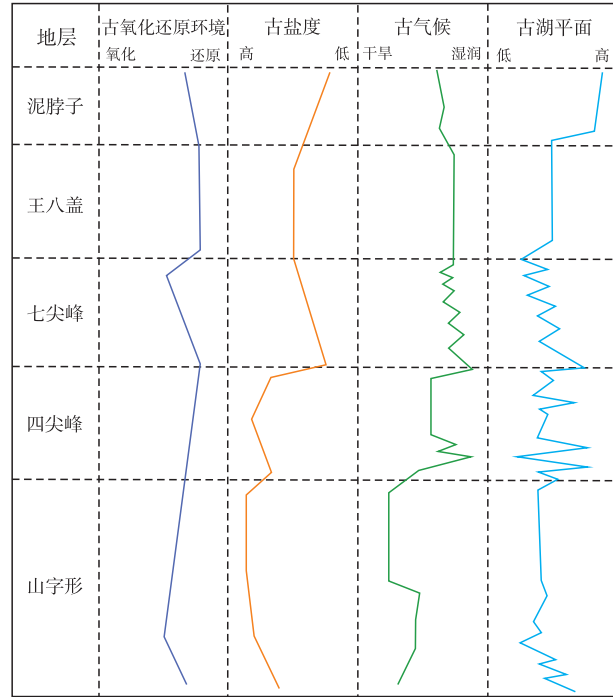


图 6 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段沉积环境演化综合曲线

Fig. 6 Comprehensive sedimentary environment evolution curve of the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

混合沉积模式研究奠定了沉积环境基础。

2.5.1 阜二段沉积早期环境分析

高邮—金湖凹陷阜二段沉积早期，即“山字形—四尖峰层段”沉积阶段的典型环境特征是气候波动大，总体偏干旱，整体为咸水—超咸水环境，为相对封闭的内陆湖盆。其中山字形层段沉积时期气候干旱且该阶段晚期应当是阜二段沉积时期最为干旱的阶段，湖平面低且波动较大。干热气候是水体咸化甚至大于正常海水盐度的主因，金湖凹陷西侧的洪泽凹陷（受建湖隆起阻隔的内陆湖盆），阜二段沉积时期甚至出现了蒸发盐湖（刘兆成等，2021）。

2.5.2 阜二段沉积晚期环境分析

高邮—金湖凹陷阜二段沉积晚期，即“七尖峰—王八盖和泥脖子层段”沉积时期，气候进一步变得相对湿润，沉积水体盐度开始降低，整体为半咸水。七尖峰层段沉积时期气候存在波动，湖平面波动较大；王八盖层段气候相对湿润，湖平面相对稳定；泥脖子层段沉积时期气候与七尖峰段类似，大规模的湖侵使湖平面明显升高，古盐度也亦

显著降低，主体小于 10‰，属于半咸水。

高邮—金湖凹陷阜二段整体为咸化湖盆，高盐度的水体造成水体密度增加和分层的加剧，有利于碳酸盐等内生矿物的沉淀，同时不同层段和地区有不同规模陆源碎屑的注入，淡水注入咸化湖盆以及海水和咸化湖水的混合对细粒混合沉积产生积极影响(图 6)。

3 气候控制的混积模式

细粒混积岩的形成受构造背景、物源供给、水体盐度、水动力条件以及湖平面升降等因素控制(朱筱敏等, 2024)。高邮—金湖凹陷细粒岩的混合沉积作用包括成分混合和结构混合，这些混合过程归根到底受控于古环境变化。因此，根据气候变化，可以建立 2 种受气候控制的高邮—金湖凹陷阜二段混积成因模式。

3.1 偏干旱气候混积模式

高邮—金湖凹陷阜二段沉积早期，即“山字形—四尖峰层段”沉积时期，气候整体干旱且波动较大，湖平面整体较低，湖盆相对封闭，水体咸化。该时期湖盆断裂活动相对发育，古地貌差异大：整体上金湖凹陷水体浅于高邮凹陷，低凸起水体浅于凹陷地区，边界断层及凹陷内部活动性断层的上升盘水体明显浅于下降盘，进而造成差异混合沉积作用(图 7)。

阜二段沉积早期，气候干旱是高邮—金湖凹陷

阜二段水体咸化的主要原因，是内生碳酸盐组分大量生产的物质基础；金湖凹陷西部、南部及高邮凹陷西部等方向的淡水注入(陆源碎屑)为混合沉积提供了碎屑物质基础。因此，在干旱气候背景下，物源供给、古地貌差异和水深在宏观上决定细粒混积岩差异分布。金湖凹陷西部和西南部发育三角洲沉积，存在大量陆源供给；高邮—金湖凹陷之间柳堡低凸起—闵桥火山—菱塘桥低凸起—天长隆起限制了 2 个凹陷间的物质和流体交换，金湖凹陷西部主要发育了以陆屑为主的混积岩，细粒混积岩碳酸盐含量高值区及颗粒/生物碳酸盐岩发育区也因此集中在受外来淡水注入影响较小的金湖凹陷北部和高邮凹陷西部，其他地区主要发育其他类型混合型细粒沉积岩。在高邮凹陷，由北往南随着水体深度的增加，碳酸盐含量逐渐降低、纹层构造发育，气候环境明显控制了混合沉积区带差异发育。

除此之外，闵桥地区的火山活动(阜二段山字形—四尖峰时期，玄武岩喷发)也可能对细粒混积岩的物质组成造成影响。在阜二段细粒混积岩的碳酸盐组分中，白云石含量占比波动较大，通常为 5%~60%，并在阜二段中下部最高达 97% (如韦 1 井, 1710 m)，上述现象除了可能与气候(水体古盐度)波动有关外，也可能与火山喷发间接性地提供了大量 Mg^{2+} 有关。

3.2 偏湿润气候混积模式

高邮—金湖凹陷阜二段沉积后期，即“七尖峰—王八盖层段以及泥脖子层段”沉积时期，气

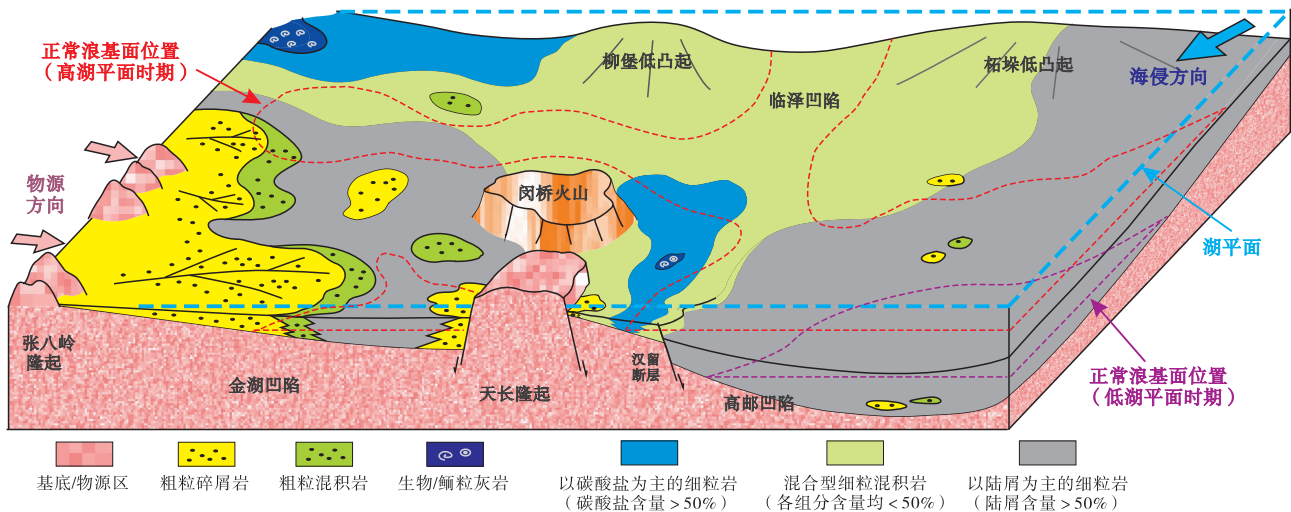


图 7 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段偏干旱气候条件下混合沉积模式

Fig. 7 Mixed sedimentary model of dry climate in the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

候开始变得相对湿润(图 6)。七尖峰层段气候相对湿润且波动较大,王八盖层段气候相对湿润且稳定,泥脖子层段气候相对湿润或与干旱交替。该阶段盆地构造活动减弱,古地貌差异逐渐消失,地层厚度总体稳定。由于王八盖及泥脖子层段岩相变化较小,故主要以七尖峰层段为例,建立了相对湿润气候背景下的混合沉积模式(图 8)。

随着阜二段“七尖峰—王八盖层段”气候变得湿润,水体盐度开始降低。七尖峰层段沉积时期水体盐度多为半咸水(古盐度 10‰~25‰),形成了不同成分组成的细粒混积岩:金湖凹陷多数地区主要发育富碳酸盐组分的细粒混积岩,高邮凹陷多数地区主要发育富陆屑的细粒混积岩。但在闵桥火山之上及其附近地区,由于火山喷发提供了丰富的营养物质,生物介壳的大量繁殖形成了细纹层状生物介壳富集的细粒混积岩。

该时期砂级陆源碎屑的供给基本消失,混合沉积平面分布很少受淡水注入的影响,金湖凹陷近物源区和远物源区的细粒混积岩发育情况未见明显差异。

综合地层厚度特征和细粒混积岩空间分布规律可知,该阶段古地貌逐渐平缓,有利于研究区与东海的连通。苏北盆地阜二段既产淡水鲢科和鲤科鱼类化石,又产与海水有关的鲱科鱼类化石及大型海鸟化石,证实了海侵的存在(管永明等, 2021),海侵影响从高邮凹陷向金湖凹陷逐渐减弱。该阶段金湖凹陷细粒岩的碳酸盐含量明显高于高邮凹陷。

在高邮凹陷南部深水区,较低的碳酸盐含量应当与水深有关。此外,该阶段金湖凹陷西斜坡南部仍有小规模陆源供给,淡水注入使得该区发育了以陆屑为主的混积岩。

该时期水下古隆起已基本消失,各地区间的古地貌差异已显著减小,仅在各凹陷边界断层,尤其是高邮凹陷南侧真武断层下降盘出现水体的明显加深,造成高邮凹陷南侧边界断层处发育富陆屑的细粒混积岩,整个高邮凹陷的大多数地区细粒混积岩碳酸盐含量均较低(图 8)。

4 讨论

高邮—金湖凹陷非常规油气勘探实践表明,沉积环境(硫化缺氧水体)不仅控制着细粒沉积岩的有机质富集和保存,而且还影响着沉积岩相类型和储集层质量优劣。细粒沉积岩岩相控制着“生油甜点”和“储集甜点”时空分布。阜二段黏土矿物含量相对较高的岩相具有较好的生烃潜力,长石—石英矿物、碳酸盐矿物含量较高的岩相表现出具有较好的物性和孔喉结构,可发育优质孔—缝体系,具有含油性好和流动性高的特点。阜二段相对干旱的气候背景,一方面有利于碳酸盐组分生产,另一方面阵发性的降水有利于碳酸盐和长石—石英矿物与富有机质的高黏土含量层段互层混合沉积,这对页岩油甜点发育非常有利,也是目前苏北盆地阜二段在其下部率先实现勘探突破的重要原因。因此,相对干旱气候背景下形成的高邮—金湖凹陷阜

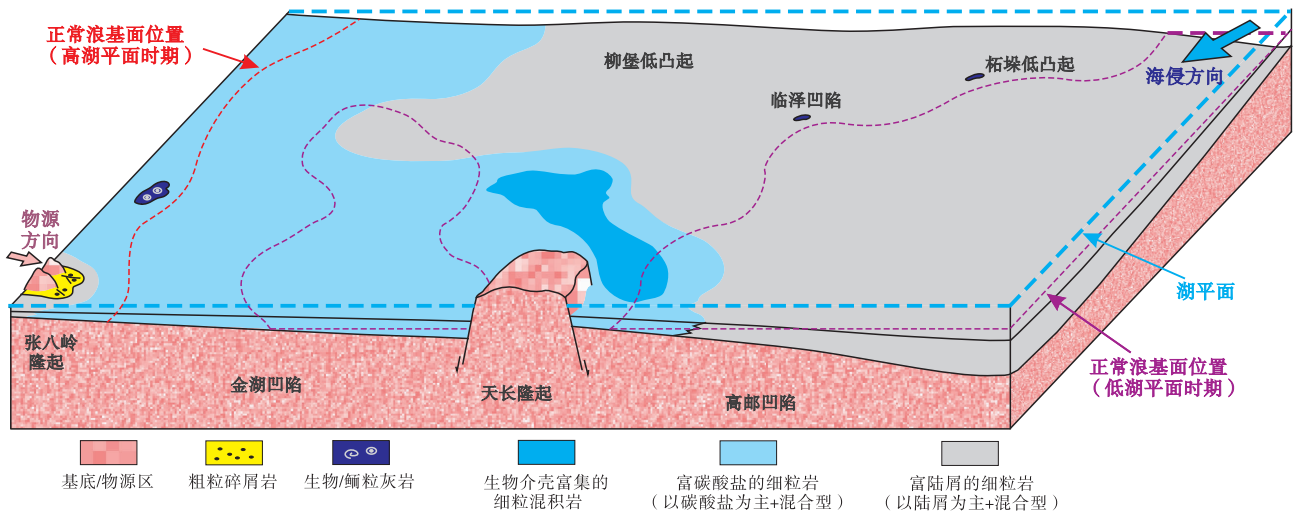


图 8 苏北盆地高邮—金湖凹陷阜二段偏湿润气候条件下混合沉积模式

Fig. 8 Mixed sedimentary model of humid climate in the Member 2 of Funing Formation at Gaoyou and Jinhu sags in Subei Basin

二段混积岩是页岩油勘探的重要方向（朱相羽等，2023）。

因资料所限，研究内容古气候、古水深或湖平面升降分析、古盐度分析及氧化还原特征分析均是单一指标，未来可增加同位素分析等，以加强认识结论的可靠性，提高文章的科学性。

细粒沉积岩（细粒混积岩）是沉积地质学领域的重要研究对象，其研究成果在能源高效勘探开发、古环境精细重建及地质甜点精准预测等领域具有不可替代的实践价值。未来细粒沉积岩（混积岩）研究应该关注：

1) 加强沉积古环境研究，基于细粒层序地层学和源汇系统完整动力学思想体系，夯实从物源剥蚀、搬运沉积到沉积成岩改造系统研究，恢复建立细粒混积岩形成演化路径和沉积动力学模式；

2) 揭示陆源碎屑、化学沉淀与生物成因物质混合沉积机制，充分考虑物质来源、有机碳含量、矿物组成和沉积构造以及生物化学作用特征，建立细粒混积岩岩相及其组合分类新体系，以指导地质甜点精准预测；

3) 确定不同类型沉积盆地、盆地中不同构造单元、不同水体环境有机质形成和保存以及转化作用机理及细粒沉积动力条件，考虑细粒物质埋藏成岩转化作用，建立受古气候、古物源、古地貌、古水深和古盐度等因素综合控制的细粒混合沉积模式；

4) 学科交叉融合，结合沉积动力学物理和数值模拟、机器学习和大数据分析，构建细粒混合沉积过程的可视化数值模型，充分利用伽马能谱测井和高分辨率地震资料，发展人工智能岩相识别技术，预测细粒混积岩不同组分/岩相时空配置规律；

5) 建立沉积古环境与细粒沉积岩岩相类型、油气甜点区段之间关系，明确页岩油气形成和富集机理，按沉积盆地不同区带预测评价有利烃源岩和有效储集层发育区段，助推非常规油气勘探开发深入发展（朱如凯等，2022）。

5 结论

高邮—金湖凹陷古近系阜宁组二段细粒混积岩整体沉积于缺氧水体；“山字形—王八盖—四尖峰层段”沉积时期古气候整体干旱，“七尖峰—泥脖子层段”沉积时期古气候相对湿润；阜二段沉积时

期湖平面整体较低、波动强烈、自下而上逐渐上升，“泥脖子层段”沉积时期发生大规模湖侵；阜二段水体古盐度主体大于 10‰，山字形—四尖峰层段发育咸水至超咸水，七尖峰—王八盖—泥脖子层段发育半咸水至咸水。

高邮—金湖凹陷阜二段水体咸化的主要原因是干旱古气候。咸化水体、古地貌和古水深控制了不同组别细粒混积岩的时空分布。在阜二段沉积早期干旱气候条件下，水深在宏观上决定细粒混积岩结构组成及其分布，古地貌差异通过控制水深和限制湖盆外部流体的影响范围，使细粒混合沉积出现区带差异性；在阜二段沉积晚期相对湿润的气候条件下，水深加大导致的碳酸盐组分减少是造成凹陷之间以及垂向上细粒混积岩分布差异性减少的主要原因。

致谢 在科研课题实施过程中，得到中国石化江苏油田勘探开发研究院和勘探室领导专家的指导支持，特别得到江苏油田勘探开发研究院段宏亮、李鹤永和刘世丽专家的指导与帮助，在此深表谢意！

参考文献 (References)

- 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 秦志勇, 罗进雄, 辛长静. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考. 地球科学进展, 22(9): 931-939. [Dong G Y, Chen H D, He Y B, Qing Z Y, Luo J X, Xin C J. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments. *Advances in Earth Science*, 22(9): 931-939]
- 杜晓峰, 徐长贵, 朱红涛, 解习农, 朱筱敏, 刘可禹, 姜在兴, 曾洪流. 2020. 陆相断陷盆地陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究进展. 地球科学, 45(10): 3509-3526. [Du X F, Xu C G, Zhu H T, Xie X N, Zhu X M, Liu K Y, Jiang Z X, Zeng H L. 2020. Research advances of mixed siliciclastic and carbonate sediments in continental rift basins. *Earth Science*, 45(10): 3509-3526]
- 段宏亮, 刘世丽, 付茜. 2020. 苏北盆地古近系阜宁组二段富有机质页岩特征与沉积环境. 石油实验地质, 42(4): 612-617. [Duan H L, Liu S L, Fu Q. 2020. Characteristics and sedimentary environment of organic-rich shale in the second member of Paleogene Funing Formation, Subei Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(4): 612-617]
- 冯进来, 胡凯, 曹剑, 陈琰, 王龙刚. 2011. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义. 高校地质学报, 17(2): 297-307. [Feng J L, Hu K, Cao J, Chen Y, Wang L G. 2011. A review on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 297-307]

- 管永明,张江永,刘成杰,段宏亮,王红伟,谢献德. 2021. 苏北盆地阜二、四段鱼化石及其沉积环境. 复杂油气藏, 14(1): 1-8. [Guan Y M, Zhang J Y, Liu C J, Duan H L, Wang H W, Xie X D. 2021. Fossil fishes of the second and fourth members of Funing Formation in Subei Basin and their sedimentary environment. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 14(1): 1-8]
- 李祥辉,刘文均,郑荣才. 1997. 龙门山地区泥盆纪碳酸盐与硅质碎屑的混积相与混积机理. 岩相古地理, 17(3): 1-9. [Li X H, Liu W J, Zheng R C. 1997. Mixed facies and mechanism of Devonian carbonate and siliceous detritus in Longmenshan area. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 17(3): 1-9]
- 梁薇,牟传龙,周恩恩,王瑞华,葛祥英,徐鹏辉,郑斌嵩,谭志远. 2016. 湖南寒武系第三统混积岩沉积特征与成因探讨. 地质论评, 62(4): 881-895. [Liang W, Mou C L, Zhou K K, Wang R H, Ge X Y, Xu P H, Zheng B S, Tan Z Y. 2016. Origin and sedimentary characteristics of mixed carbonate-siliciclastic sediments of the third series of Cambrian in Hunan Province, South China. *Geological Review*, 62(4): 881-895]
- 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]
- 刘兆成,孟凡巍,周绍荣,李小明. 2021. 苏北盆地洪泽凹陷古新世时期的古环境: 来自蒸发岩的证据. 盐湖研究, 29(4): 22-29. [Liu Z C, Meng F W, Zhou S R, Li X M. 2021. Paleoenvironment during Paleocene in Hongze depression, north Jiangsu Basin: evidence from evaporites. *Journal of Salt Lake Research*, 29(4): 22-29]
- 马茗茗,王昌勇,许兴斌,王小宇,费瑛,李雅楠. 2019. Adams 和 Couch 法古盐度恢复结果的可靠性检验: 以青海湖布哈河口区沉积物为例. 沉积学报, 37(6): 1224-1233. [Ma M M, Wang C Y, Xu X B, Wang X Y, Fei Y, Li Y N. 2019. Testing the reliability of Adams formula and Couch formula for estimating paleosalinity: Case study of the Buha river estuary, Qinghai Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(6): 1224-1233]
- 聂银兰,谢庆宾,朱筱敏,张美洲. 2021. 基于岩相表征的细粒沉积物沉积机制和研究展望. 断块油气田, 28(3): 305-310. [Nie Y L, Xie Q B, Zhu X M, Zhang M Z. 2021. The sedimentary mechanism and research prospect of fine grain sediments based on lithofacies characterization. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28(3): 305-310]
- 沙庆安. 2001. 混合沉积和混积岩的讨论. 古地理学报, 3(3): 63-66. [Sha Q A. 2001. Discussion on mixing deposit and Hunji rock. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 3(3): 63-66]
- 王国忠. 2001. 南海北部大陆架现代礁源碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积作用. 古地理学报, 3(2): 47-54. [Wang G Z. 2001. Mixed sedimentation of recent reefoid carbonates and terrigenous clastics in the north continental shelf of the South China Sea. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 3(2): 47-54]
- 张金亮,司学强. 2007. 断陷湖盆碳酸盐与陆源碎屑混合沉积: 以东营凹陷金家地区古近系沙河街组第四段上亚段为例. 地质论评, 53(4): 448-453. [Zhang J L, Si X Q. 2007. Mixed siliciclastic: carbonate sediment in rift lacustrine basin: a case on the upper part of the fourth member of the Eocene Shahejie Formation in Jinjia area, Dongying depression. *Geological Review*, 53(4): 448-453]
- 张锦泉,叶红专. 1989. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积. 成都地质学院学报, 16(2): 87-92. [Zhang J Q, Ye H Z. 1989. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 16(2): 87-92]
- 张美洲,朱筱敏,姜振学,朱德宇,叶蕾,湛志远. 2023. 陆相淡水湖盆页岩有机质富集主控因素研究: 以四川盆地东北部侏罗系自流井组为例. 古地理学报, 25(4): 806-822. [Zhang M Z, Zhu X M, Jiang Z X, Zhu D Y, Ye L, Chen Z Y. 2023. Main controlling factors of organic matter enrichment in continental freshwater lacustrine shale: a case study of the Jurassic Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 806-822]
- 朱如凯,李梦莹,杨静儒,张素荣,蔡毅,曹琰,康缘. 2022. 细粒沉积学研究进展与发展方向. 石油与天然气地质, 43(2): 251-264. [Zhu R K, Li M Y, Yang J R, Zhang S R, Cai Y, Cao Y, Kang Y. 2022. Advances and trends of fine-grained sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251-264]
- 朱筱敏. 2023. 层序地层学. 山东青岛: 中国石油大学出版社. [Zhu X M. 2023. *Sequence Stratigraphy*. Shandong Qingdao: Press of China University of Petroleum]
- 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]
- 朱相羽,段宏亮,孙雅雄. 2023. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义. 石油学报, 44(8): 1206-1221, 1257. [Zhu X Y, Duan H L, Sun Y X. 2023. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou sag, Subei Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(8): 1206-1221, 1257]
- 褚喜淮,王琪,张瑞,李娟. 2013. 柴达木盆地北缘下干柴沟组下段湖相混合沉积发育特征及其对储层的影响. 沉积学报, 31(4): 724-729. [Zhuo X Z, Wang Q, Zhang R, Li J. 2013. The characteristics of lacustrine mixed deposit in lower Xiaganchaigou Formation and its effect on reservoir property: a case in the central areas of northern Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(4): 724-729]
- Braga J C, Díaz de Neira A, Lasseur E, Mediato J, Aguirre J, Abad M, Hernaiz-Huerta P P, Montheil J, Pérez-Valera F, Lopera E. 2012.

- Pliocene-Lower Pleistocene shallow-water mixed siliciclastics and carbonates (Yanigua and Los Haitises formations) in eastern Hispaniola (Dominican Republic). *Sedimentary Geology*, 265: 182–194.
- Dou L R, Bai G S, Liu B, Zhai G H, Zhang X X, Zhang Y Y, Yan G W, Chen G H. 2022. Sedimentary environment of the Upper Cretaceous Yogou Formation in Termit Basin and its significance for high-quality source rocks and Trans-Saharan Seaway. *Marine and Petroleum Geology*, 142: 105732.
- Gomez F J, Astini R A. 2015. Sedimentology and sequence stratigraphy from a mixed (carbonate-siliciclastic) rift to passive margin transition: the Early to Middle Cambrian of the Argentine Precordillera. *Sedimentary Geology*, 316: 39–61.
- Habulashenmu Y, Wang X J, Qiu L W, Yang Y Q, Chen S Y, Khan D, Teng J Y, Hu Y L. 2024. Lithofacies characteristics and genetic mechanism of hybrid sedimentary rocks in Da'anzhai member, Sichuan Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 162: 106695.
- Hakimi M H, Saeed S A, Al-Muntaser A A, Morozov V P, Varfolomeev M A, Khayuzkin A S, Khamieva A N, Lashin A, Rahim A, Suwaid M A, Nurgaliev D K, Kadyrov R I, AL-Rubaye A H, Ognev I, Nazimov N A. 2025. Depositional environment characteristics and mechanisms of organic carbon accumulation in the organic-rich siliceous-carbonate of the Late Devonian Domanik Formation in the Volga-Ural Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 174: 107303.
- Hou M Q, Yang Z, Feng Y L, Wang X N, Long G H, Wu K Y, Zhang H, Fan Y C, Jiang W Q, Wei Q Z. 2024. Sedimentology, depositional processes, and sequence stratigraphy of deep lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the lower Oligocene Xiaganchaigou Formation, Qaidam Basin, Northwestern China. *Marine and Petroleum Geology*, 166: 106899.
- Li W, Zhu X M, Liu Q D, Zhu S F, Li H Y. 2021. Lacustrine mixed siliciclastic-carbonate sedimentary rocks in the Paleogene Funing Formation of the Subei Basin, eastern China: characteristics and origin. *Interpretation*, 9(2): 1–16.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 579–601.
- Mata S A, Bottjer D J. 2011. Origin of Lower Triassic microbialites in mixed carbonate-siliciclastic successions: ichnology, applied stratigraphy, and the end-Permian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300: 158–178.
- Mount J F. 1985. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification. *Sedimentology*, 32: 435–442.
- Sun N L, Chen T Y, Gao J B, Zhong J H, Huo Z P, Qu J L. 2023. Lithofacies and reservoir characteristics of saline lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the northern Dongpu Sag, Bohai Bay Basin: implications for shale oil exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 252: 105686.
- Wu Z C, Shi J Y, Fan T L, Jiang M. 2024. Sedimentary paleoenvironment and its control on organic matter enrichment in the Mesoproterozoic hydrocarbon source rocks in the Ordos Basin, southern margin of the North China Craton. *Petroleum Science*, 21: 2257–2272.
- Zeng W R, Zhang Z H, Wang B R, Chen X, Zheng R H, Fu G B, Jin Y. 2023. Formation mechanism of organic-rich mixed sedimentary rocks in saline lacustrine basin, Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin, northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 156: 106452.
- Zhu X M, Zhang M Z, Zhu S F, Dong Y L, Li C, Bi Y Q, Ma L C. 2022. Shale lithofacies and sedimentary environment of the third member in Shahejie Formation, Zhanhua sag, eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 96(3): 1024–1040.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)