

陆相湖盆陆源碎屑与碳酸盐岩混合沉积研究进展

连旭欢*, 李俊宇#, 姜瑞海, 张 晨, 崔云峰

华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

收稿日期: 2023年8月7日; 录用日期: 2023年9月11日; 发布日期: 2023年9月18日

摘 要

随着陆相湖盆非常规油气勘探取得重大突破, 陆相湖盆陆源碎屑与碳酸盐岩混合沉积的产物作为致密油和页岩油重要的微观源储组合类型, 逐渐引起了石油地质领域的高度重视。在前人研究的基础上, 系统梳理、总结了国内外关于陆相湖盆陆源碎屑与碳酸盐岩混合沉积研究所取得的进展, 详述了陆相混积的概念、成因机理、类型特征、混积模式、控制因素、油气地质意义等内容, 旨在为陆相混积油气勘探开发提供地质依据。

关键词

陆相湖盆, 混合沉积, 成因机理, 混积模式, 油气地质意义

Research Progress in Mixed Sedimentation of Terrigenous Clastic and Carbonate Rocks in Continental Lake Basins

Xuhuan Lian*, Junyu Li#, Ruihai Jiang, Chen Zhang, Yunfeng Cui

College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: Aug. 7th, 2023; accepted: Sep. 11th, 2023; published: Sep. 18th, 2023

Abstract

With significant breakthroughs in unconventional oil and gas exploration in continental lake basins, the products of mixed sedimentation of terrigenous debris and carbonate rocks in continen-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 连旭欢, 李俊宇, 姜瑞海, 张晨, 崔云峰. 陆相湖盆陆源碎屑与碳酸盐岩混合沉积研究进展[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(9): 1040-1050. DOI: 10.12677/ag.2023.139100

tal lake basins, as important micro source and reservoir combinations of tight oil and shale oil, have gradually attracted high attention in the field of petroleum geology. On the basis of previous research, this paper systematically reviews and summarizes the progress made in the study of mixed sedimentation of terrigenous debris and carbonate rocks in continental lake basins at home and abroad. It elaborates on the concept, genetic mechanism, type characteristics, mixing mode, control factors, and geological significance of terrigenous mixing, aiming to provide geological basis for the exploration and development of terrigenous mixing oil and gas.

Keywords

Continental Lake Basin, Mixed Deposition, Genetic Mechanism, Mixing Mode, Geological Significance of Oil and Gas

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统沉积学理论认为,陆源碎屑与碳酸盐岩的形成环境完全不同,且两者的形成过程相互抑制,不会出现混合沉积现象。然而自上世纪 50 年代起,随着沉积剖面中大量混积现象的发现,混合沉积逐渐引起了地质学家的关注。经过 70 年的探索,关于混合沉积的研究已经由最初的产状性描述发展到从岩石分类、成因机理、控制因素等多个方面探索研究,并逐渐将其引入层序地层学领域。其中主要是海相混积研究,对陆相混积的探索较少,同时主要研究对象多是国外的海相生油盆地。实际上,对于我国而言,陆相湖盆混积分布范围更为广泛、机理更复杂且存在多因素共同影响控制沉积过程的问题,与致密油、页岩油等非常规油气勘探开发密切相关。明确陆相湖盆混积机理及研究方法并应用其合理指导非常规油气的勘探开发是急需解决的关键问题。

2. 陆相混积及相关概念

早在 20 世纪 50 年代,国外学者 Bruckner [1]和 Carozzi [2]就对混合沉积这一现象进行了初步探索,他们在沉积剖面中发现了大量混积现象。遗憾的是,此后的 30 年间,关于混合沉积的研究虽从未止步,但始终停留在对混合沉积的产状描述性上,直至 80 年代,Mount [3]在研究浅水陆棚环境的混合沉积现象时才首次明确提出了“混合沉积物”这一概念,用来表征陆源碎屑与碳酸盐岩在结构上混合的沉积物,混合沉积的理论学研究开始逐步发展。在此基础上,杨朝青等[4]强调了陆源碎屑与碳酸盐的混积具有特殊意义,并主张将组分中碳酸盐 > 25%、陆源碎屑 > 10%的岩石称为“混积岩”。至此,被认为最能反映混合沉积过程的概念才被真正定义。需要注意的是,混积岩与浊积岩、风暴岩的命名方法不同,上述二者是一套能够体现成因含义的岩石组合,而混积岩则是成因复杂、结构混杂的一类岩石。然而沙庆安[5]则认为混积岩只是混合沉积的特例,混积作用应更加全面地涵盖在同一沉积环境下,陆源碎屑和碳酸盐的相互混杂和交替。这与郭福生[6]的观点一致,为此他提出了“混积层系”的概念。“混积岩”和“混积层系”两个概念分别描述的是狭义混合沉积和广义混合沉积。所谓狭义,即陆源碎屑与碳酸盐组分在同一岩层内的混合,而广义则包含了狭义和陆源碎屑与碳酸盐交互沉积,二者可以交替互层、夹层及横向相变。此后,董桂玉等[7]在实际工作中发现了区别于上述混积层系的特殊现象,一些

无论是数量还是规模上均不能构成层系，一类岩石零星分布于另一类岩石中的现象。据此，他们提出了“零星混积”的概念。至此，混合沉积的概念得到进一步完善，涵盖了混积岩、混积层系和零星混积 3 类地质现象。

3. 陆相混积成因机理

自混合沉积研究起步，关于其成因机理的探讨就成为了国内外学者关注的重点。首先 Mount [3] 在研究浅水陆棚环境下的混积类型，提出了四种混积成因机理，具体如下：

- 1) 间断混合：通过某些突发性事件如风暴、泥石流等，将沉积物从某一沉积环境搬运至另一沉积环境；
- 2) 原地混合：由堆积在硅质碎屑基底之内或之上的原地死亡的钙质生物与原地、近原地残留的陆源碎屑所组成；
- 3) 相混合：沉积物沿不同相之间的扩散边界发生混合；
- 4) 源地混合：由邻近已石化的碳酸盐源区经侵蚀而提供的碳酸盐碎屑与硅质碎屑混合而成。

此 4 类成因已被大量实例证实，均有据可依，遗憾的是仅描述的是狭义混合沉积成因机理。故国内外学者又做了大量的研究考证，提出了不同的成因方案(如表 1 所示)。

Table 1. Mechanism scheme for the formation of mixed deposits

表 1. 混积成因机理方案

时间	学者	混积成因机理分类
1984	Mount [3]	间断混合、原地混合、相混合和源地混合。
2000	张雄华[8]	事件突变沉积混合、相缘渐变沉积混合、原地沉积混合、侵蚀再沉积混合和岩溶穿插再沉积混合。
2001	王国忠等[9]	随机式混合、相变式混合和随机 - 相变式混合。
2007	董桂玉等[7]	渐变式混合沉积、突变式混合沉积和复合式混合沉积。
2013	王金友等[10]	渐变式混合沉积、突变式混合沉积及原地混合沉积。
2022	彭军等[11]	相缘混合、生物 - 化学混合、事件性混合和原地混合。

其中董桂玉等[7]在商河地区沙一中的研究中，以“沉积事件 + 剖面结构”为原则提出的三种经典的陆相混积成因机理是笔者调研的重点，具体内容如下：

- 1) 渐变式混合沉积：指没有突变标志、由正常沉积事件形成的一类岩石。这类岩石在成分、结构、构造方面，与其上下的岩石之间是渐变过渡的关系。Mount [3]之前所提出的相混合中，相邻相之间必然存在一个过渡环境，所以可将其归为渐变式混合沉积；
- 2) 突变式混合沉积：指由突发性沉积事件形成的、与其上下岩石之间为突变接触的一类岩石。风暴成因中所形成的混积岩与上下岩石的接触关系是突变的，由此可将间断混合中所涉及的风暴成因归为突变式混合沉积；
- 3) 复合式混合沉积：复合式混合沉积分为复合式混合沉积 I 和复合式混合沉积 II 两类。复合式混合沉积 I 是指与上下岩石之间为突变式接触，且由正常沉积时间形成的一类岩石。原地混合是通过正常沉积事件形成的，且形成的碳酸盐岩与上下的接触关系为突变接触，因此可将其归为复合式混合沉积 I；复合式混合沉积 II 指与上下岩石在成分、结构、构造方面为渐变过渡关系，且由突发沉积事件形成的一类岩石。

4. 陆相混积类型及特征

4.1. 混积岩

关于混积岩的类型,众说纷纭,目前尚未形成一套成熟的定义标准,笔者梳理了国内外广泛使用的几种方案。Mount [3]率先采用微晶四端元构造四面体结构的方法,根据其组分含量划分出8种混积岩类型,然而该法方案复杂,存在难以直接引用的弊端。随后杨朝青等[4]在Mount研究基础上创新性地提出利用三端元法对混积岩进行分类。将岩石组分中碳酸盐含量 > 25%,陆源碎屑含量 > 10%的岩石定义为混积岩(如图1所示)。该法较四端元法更为简洁,已获得业内学者广泛认可。然而,张雄华[8]却在进行湖南沅陵上石炭统地层研究时发现了陆源碎屑含量小于10%的混积岩,似乎杨朝青等[4]定义的混积岩范围仍然存在局限,故其重新利用三端元法定义了混积岩,他的理论认为混积岩中碳酸盐或陆源碎屑含量均在5%~95%之间,同时根据成分含量将混积岩划分为含陆源碎屑-碳酸盐混积岩、陆源碎屑质-碳酸盐混积岩、碳酸盐质-陆源碎屑混积岩、含碳酸盐-陆源碎屑混积岩4种(如图2所示)。

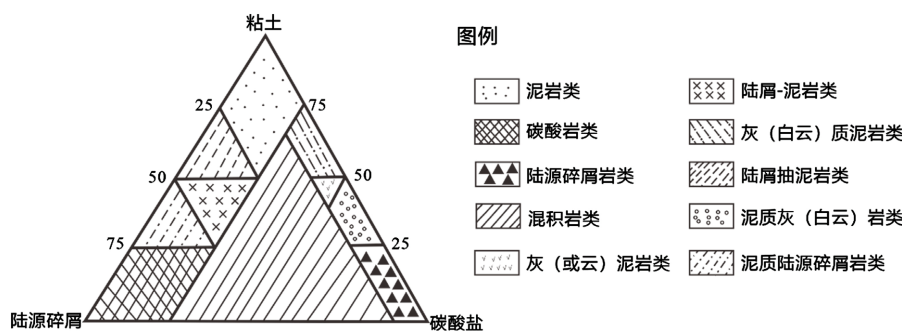


Figure 1. Classification of mixed rock [4]

图1. 混积岩分类[4]

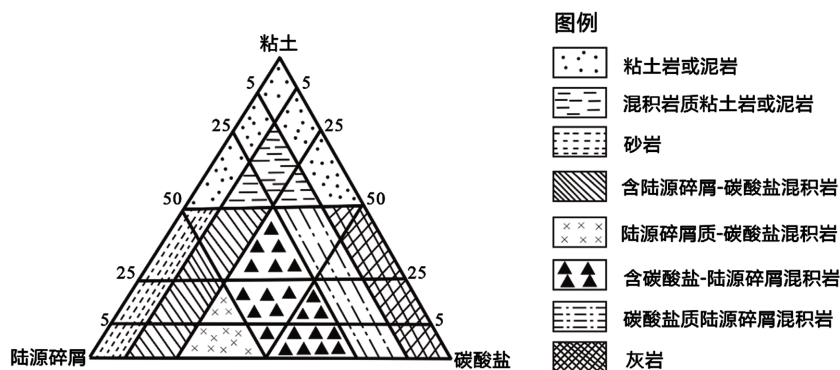


Figure 2. Classification of mixed rock [5]

图2. 混积岩分类[5]

张雄华的分类方案详细具体,但是将粘土设置为独立端元,且在命名中以混积岩为中心词的分类略显复杂。对此,郭福生等[6]指出混积岩分类方案需简明扼要。董桂玉等[7]持有相同观点,他们从形成机理方面考虑,认为该将粘土岩归入到陆源碎屑岩中,对混积岩在陆源碎屑和碳酸盐两端元上进行分类,据此将混积岩分为含陆源碎屑-碳酸盐岩、陆源碎屑质-碳酸盐岩、含碳酸盐-陆源碎屑岩、碳酸盐质-陆源碎屑岩4种。叶茂松等[12]也主张将粘土矿物归纳到陆源碎屑中,但将碳酸盐分为了两类组分,选取陆源碎屑、生物成因碳酸盐颗粒及化学沉淀碳酸盐作为岩石分类三端元,构成一种新的混积岩岩石学

分类系统, 并将混积岩体系区分为以陆源碎屑为主的混积岩、以化学碳酸盐为主的混积岩、以生物碳颗粒为主的混积岩、三组分不超过 50% 的混积岩 4 大类。

4.2. 混积层系

沙庆安[5]最早指出广义的混积岩除了结构上的混积岩之外, 还应包括陆源碎屑与碳酸盐岩以互层或夹层形式产出的混合。郭福生等[6]持相同观点, 随之提出代表广义混合沉积含义的“混积层系”概念。董桂玉等[7]以剖面上岩性组合特征为依据将混积层系分为陆源碎屑岩-碳酸盐岩层系、陆源碎屑岩-混积岩层系、碳酸盐岩-混积岩层系和混积岩层系 4 类(如图 3 所示)。同时指出陆源碎屑岩-碳酸盐岩层系多数情况下表示环境突变; 而陆源碎屑岩-混积岩层系、碳酸盐岩-混积岩层系和混积岩层系则均表示环境逐渐变化。梅冥相等[13]利用米兰柯维奇旋回理论, 探讨了陆源碎屑与碳酸盐岩的交互沉积类型, 并根据海平面变化和陆源碎屑、碳酸盐沉积物进入沉积区的机制不同将混积层系分为碎屑岩-碳酸盐岩型、碳酸盐岩-碎屑岩型 2 种米级旋回层序类型。对此, 叶茂松等[12]指出实际情况中, 米级旋回作为基本单元的混合层系相对较少, 提出了以五级层序及更低层序单元做为一个基本单元来划分混积层系的建议。

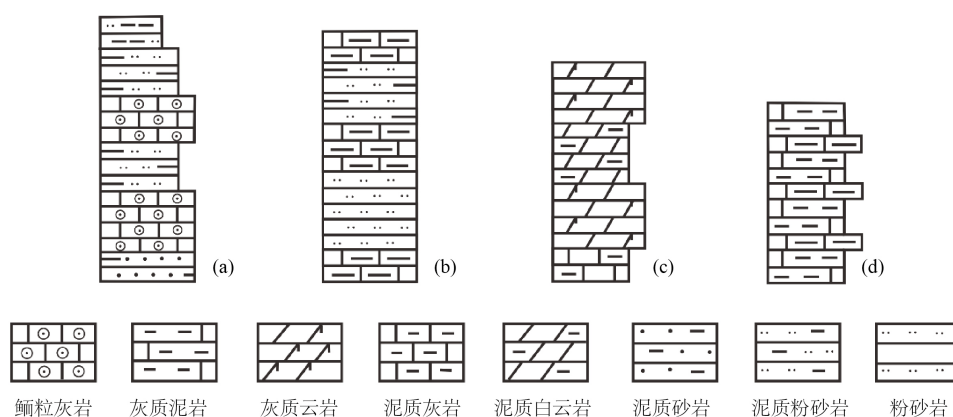


Figure 3. Classification of mixed layers [7] (a) Classification of mixed strata: terrigenous Clastic rock carbonate strata; (b) Terrestrial Clastic rock mixed rock series; (c) Carbonate rock mixed rock series; (d) Mixed rock strata system

图 3. 混积层系分类[7] (a) 陆源碎屑岩-碳酸盐岩层系; (b) 陆源碎屑岩-混积岩层系; (c) 碳酸盐岩-混积岩层系; (d) 混积岩层系

5. 陆相混积沉积模式

沉积模式是沉积学研究中表征沉积环境与沉积物的最直观模型, 在陆相混积的探索过程中, 国内外多位学者也基于实例提出了许多不同的混积模式。最早可追溯到上世纪 80 年代, Davies [14]在对澳大利亚白垩纪碳酸盐台地和佛罗里达海湾的潮汐三角洲研究过程中建立了适用于碳酸盐台地和潮汐三角洲的混积模式。李祥辉等[15]划分了扬子西缘龙门山前山滑脱拆离带混积层序, 并建立该区相应层序混积模式。何幼斌等[16]在研究湖南石门杨家坪下寒武统混积地层时发现地层剖面中发育有内波、内潮汐混积微相。在其研究基础上, 董桂玉等[17]经过研究指出湖南石门杨家坪下寒武统榔榔组三段为深水混积斜坡相。随后, 董桂玉等[18]建立了环渤海湾地区寒武系陆表海混积台地沉积模式, 指出该沉积模式主要由混积潮坪、混积局限台地和混积开阔台地 3 种沉积环境单元组成。其中混积潮坪主要与古陆相接, 以潮间带发育最好; 局限台地主要发育潮下混积泻湖微相; 开阔台地主要发育混积浅滩微相和混积滩间微相(如图 4 所示)。

近年来, 混积模式探索的仍在不断前进, 具有代表性的有伏美燕等[19]建立了塔里木盆地巴楚-麦盖

提地区石炭系的潮坪-泻湖-碳酸盐岩台地混积模式。孙娇鹏等[20]在研究柴北缘地区古生代混合沉积特征时划分了研究区早、晚古生代混积模式，指出该区不同沉积期相类型差异明显，早古生代主要发育混积潮坪、混积局限台地、混积陆棚相；晚古生代陆源碎屑供给较弱时期主要发育混积潮坪、混积局限台地相，陆源碎屑供给较强时期则主要发育混积碎屑滨岸、混积开阔台地相。付鑫等[21]在研究环渤中坳陷古近系沙河街组的混合沉积时，指出重力流驱动作用和扇三角洲周期性推进与废弃这两种沉积作用是导致陆源碎屑颗粒和生物碎屑颗粒能在扇三角洲体系中发生混合原因，同时总结出扇三角洲重力流驱动混合模式与扇三角洲建设-废弃互层型混合模式两类扇三角洲体系伴生混合沉积模式(如图5所示)。

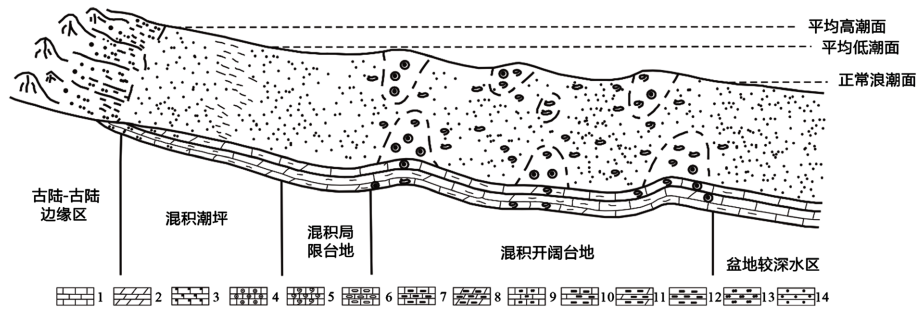


Figure 4. Cambrian mixed sedimentary model map of Circum Bohai Bay Basin [18]
图4. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积模式图[18]

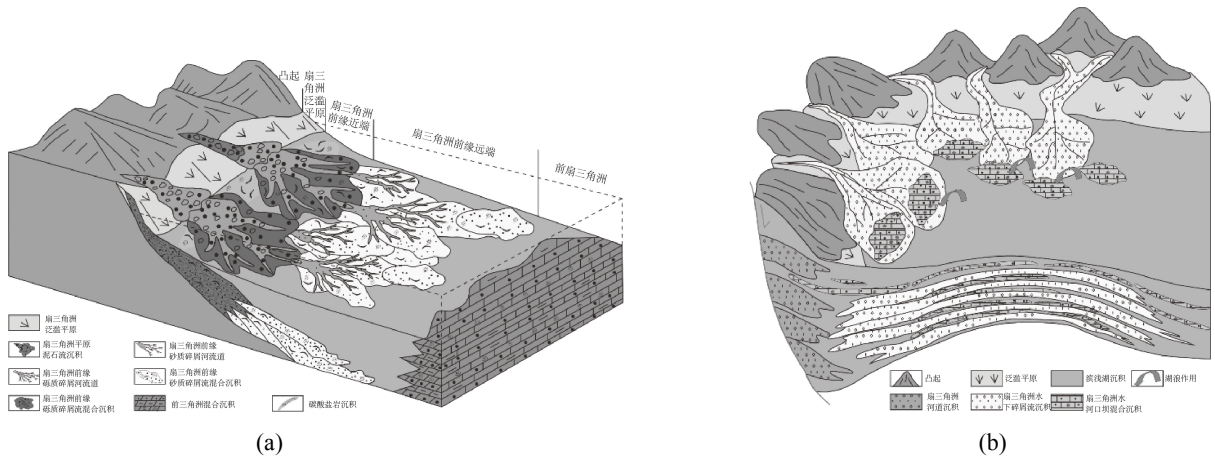


Figure 5. Cambrian Mixed Sedimentary Model Map of Circum Bohai Bay Basin [21] (a) Fan Delta Gravity Flow Driven Hybrid Model; (b) Fan Delta Construction-Abandoned Interlayer Mixed Model
图5. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积模式图[21] (a) 扇三角洲重力流驱动混合模式; (b) 扇三角洲建设-废弃互层型混合模式

建立混积模式是明确混积类型和特征后对研究区混合沉积的形象描述，对于研究区后续地质研究及油气勘探开发具有重要指导意义，也是学者们进行陆相混积研究不可或缺的重要手段。几十年的混积模式探索中，方法、模型均在不断优化，预测精确度不断提高，遗憾的是现有混积模式尚未成熟、已有模式存在局限性和片面性，对混合沉积的沉积微相进行深入研究，建立精细混积模式应是我们后续研究中所关注的重点。

6. 陆相混积主控因素

关于陆相混积的主控因素，领域内专家学者已进行了长达几十年的探索[22]-[28]，研究结果表明影响

陆相湖盆混合沉积的因素多而复杂, 主要包括构造作用、气候条件、物源供给、湖平面变化和动力学条件等, 且大多数情况下是多种因素相互影响, 共同作用[29]。

6.1. 构造作用

构造作用对于陆相湖盆混合沉积的形成过程既有直接影响, 又有间接控制作用[25]。直接影响体现在构造作用可以通过控制原型盆地的形态、类型和沉降速率以控制混积层系的类型及特征; 间接控制作用体现在构造作用可以通过控制物源供给、湖平面变化和动力学条件来间接影响混合沉积的形成。

国内外学者在做关于陆相混积的相关研究中已经对构造作用的控制机理进行了较为详细的阐述, 概括地说共有三点。首先是构造升降运动控制物源区和沉积区的分布和状态, 实际上也就已经在很大程度上控制了物源的供给量和供给方向。Dolan [30]、张锦泉[23]等都对此观点进行了说明。李泉泉等[31]在进行吉木萨尔凹陷芦苇沟组下甜点混积储层特征研究时也明确指出构造作用影响了储层沉积, 控制了甜点分布。其次是构造作用通过控制盆地结构、类型和形态来控制混合沉积。Dolan [30]率先指明构造作用在活动型大陆边缘对混合沉积的影响更为显著。董桂玉等[7]则分别以局限盆地和非局限盆地为例说明了盆地结构对陆相混积的影响, 水体循环不畅且含氧量低的局限盆地较水体循环良好、碳酸盐发育潜力大的非局限盆地更易形成混积层系。最后是盆地构造的沉降速率与沉积速率的配置也明显地影响混合沉积。构造沉降速率小而沉积速率大时形成的混积地层较薄[7], 构造沉降速率大而沉积速率小时形成的混积地层较厚。

6.2. 气候条件

气候条件也是陆相混积的主控因素之一, 既可直接对混积过程产生影响也可间接控制冰期和间冰期来影响湖平面的变化, 从而影响混合沉积。其中因湖平面变化的控制机理将于后文详述, 此处主要关注其直接影响, 即气候条件通过影响碳酸盐岩的发育、陆源碎屑物的供应等来控制混合沉积的形成和分布[32] [33] [34] [35]。降雨量是关键的气候因子之一。对于陆相湖盆沉积来说, 降雨量较小时, 河流等携带入湖的陆源碎屑物很少, 此时主要为碳酸盐的生成和发育期; 降雨量较大甚至发生暴洪事件时, 大量陆源碎屑物被其带入碳酸盐沉积区, 从而形成混合沉积; 暴洪过后, 降雨量再次减小, 携带入湖的陆源碎屑物随之减少, 此时又恢复为碳酸盐的生成和发育期。长期这样循环, 陆相混积的形成条件便得以长期保存[23]。国内外多位学者[7] [36] [37] [38]在对各大盆地陆相混积的研究中阐述了气候条件对陆相混积的影响, 基本符合上述原理。

6.3. 物源供给

相较于上述两种来说, 物源供给对陆相混积的控制稍显微弱, 主要通过物源供给量、种类和供给方向等产生影响。物源供给量包括陆源碎屑和碳酸盐岩, 前者主要存在于浊水环境, 而后者却主要存在于清水环境[39], 二者间存在相互抑制作用。以陆源碎屑为例, 若源区较近, 供给量较大[7]的话会抑制碳酸盐发育, 不利形成大面积混积; 若源区较远则刚好相反。物源种类则主要以其成分相区别, 以陆源碎屑为例, 若物源本身含有碳酸盐岩碎屑, 则可在原地形成混积, 不需考虑与源区的距离。此外物源种类可能会影响源区水的酸碱度, 进而改变源区的碳酸盐岩碎屑浓度, 对源区混积产生影响[40]。供给方向则明显影响混积的平面展布特征, 如 Cristian 等[41]在对陆架边缘三角洲的研究中指出物源供给方向严重影响了三角洲前缘主体位置。

6.4. 湖平面变化

湖平面变化对陆相混积也有不可忽视的影响, 主要通过影响生物发育程度和陆源物质供应来控制陆

相混积[7] [38]。首先,湖平面升降会影响生物的发育程度,湖进现象发生时,若浅水生物生长可以跟上湖面涨速,则混积层序向后岸发育;反之,此类生物被湖面淹没,原地沉降,形成渐变式或复合式沉积。湖退现象发生时,若生物迁徙可以跟上湖面退速,则混积层序向湖推进;反之,此类生物被陆源物质覆盖,原地形成渐变式或复合式混合沉积[7]。其次,湖平面升降可以控制陆源物质供应[42] [43]。湖面上升时,补给减少,混积作用减弱,反之则会增加,同时,陆源碎屑供应可以抑制碳酸盐岩的形成。除此之外,湖平面升降本身也会影响碳酸盐岩的形成,其形成条件与水深有关,过深或过浅都会起到抑制作用,而湖平面变化就是水深变化的直接体现。

6.5. 水动力条件

水动力条件作为陆源碎屑与碳酸盐颗粒的重要载体,也是控制陆相混积重要因素之一。相较于海相混积的强水动力条件[44],陆相湖盆的水动力主要为风浪、河流等较弱的动力,只能间接影响到混合沉积作用,这也是近年来此类研究鲜有报道的重要原因。关于水动力条件对陆相混积的控制机理,董桂玉等[7] [38]进行了详细阐述,提出湖泊中如河流等较弱的水动力基本不可能广泛地搬运和再分配湖泊的生物遗体,主要通过搬运陆源碎屑物质到湖盆,从而抑制湖相碳酸盐岩的生成。

7. 陆相混积油气地质意义

几十年来,国内外学者仍主要以沉积学的角度研究陆相混积,而对其油气地质意义却鲜有报道[45]。然而随着各大盆地勘探开发进程,业内已逐渐认识到陆相混积对以致密油、页岩油为代表的非常规油气具有特殊意义。故对陆相混积的油气地质意义作进一步讨论是很有必要的。董桂玉等[7]指出陆相混积层系发育的地层具备良好的生储盖组合,有形成油气藏的巨大潜力。其中粗粒碎屑岩或颗粒碳酸盐岩储层物性好,是天然的油气储层;而泥、页岩或具粉晶结构以下的碳酸盐岩具备生油条件时可作为烃源岩,不具备生油条件时可作为盖层。张宁生等[46]则从层理构造学的角度考虑,将柴达木盆地南翼山某储层混积层系划分为变形层理混积岩岩层、水平层理混积岩岩层和块状层理混积岩岩层 3 种类型,并首先指出变形层理混积岩的储层物性更好。冯进来等[47]则通过绘制陆相混积的相模式图来阐明混合沉积发育规律及其与油气的相关性。马克等[48]根据混积类型和微相划分,以沉积环境为约束,建立了陆相咸化湖“多源同期、混合沉积”的相模式,该模式的建立便于致密油有利岩性识别及甜点区预测。在混积地层储集油气的相关理论指导下,吴因业等[49]以柴达木盆地古近系为例分析了湖盆混积储层的有利相带,并指出湖侵体系域-高位体系域的演化为致密油提供了有利储层。此后,印森林等[50]又提出陆相混积细粒储集岩岩相构型控制其甜点分布的观点,据此可针对不同岩相构型部署不同的开发方案,提高开发效率。

8. 结论

经过对陆相湖盆陆源碎屑与碳酸盐岩混合沉积的系统研究,得到如下认识:陆相湖盆混积层是非常规油气的重要储集层,对其进行研究具有重要的科学意义和现实意义。经过国内外近 70 年的探索,相关理论已逐渐成熟,主要包括理论概念、成因机理、类型特征、沉积模式、主控因素和油气地质意义等方面。其中概念已由最初的狭义定义逐渐发展为广义定义;成因以“沉积事件+剖面结构”为原则提出的渐变式混合沉积、突变式混合沉积、复合式混合沉积机理最为经典;类型主要为混积岩和混积层系两类;混积模式以示例提出,方法、模型均在不断优化,预测精确度不断提高;主控因素为构造作用、气候条件、物源供给、湖平面变化和水动力条件,且相互影响,共同作用;油气地质意义主要体现在与致密油、页岩油等非常规油气开发息息相关。在前人研究基础上,进一步明确陆相湖盆混机理、因地制宜合理部署开发方案,尽可能提高混积层系油气采收率是我们此后应当关注的重点。

致 谢

本文得到了国家级大学生创新创业训练计划项目《古地貌要素与古气候耦合效应下湖盆细粒混合沉积研究——以南堡油田 2 号构造带为例》项目编号：202210081031 的资助，审稿专家对初稿的完善提出了建设性的修改意见，在此一并致以诚挚的感谢。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目《古地貌要素与古气候耦合效应下湖盆细粒混合沉积研究——以南堡油田 2 号构造带为例》项目编号：202210081031。

参考文献

- [1] Bruckner, W.D. (1953) Cyclic Calcareous Sedimentation as an Index of Climatic Variations in the Past. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, **23**, 235-237. <https://doi.org/10.1306/D4269620-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- [2] Carozzi, A. (1955) Some Remarks on Cyclic Calcareous Sedimentation as an Index of Climatic Variations. *Journal of Sedimentary Research*, **25**, 78-79. <https://doi.org/10.1306/D4269814-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- [3] Mount, J.F. (1984) Mixing of Siliciclastic and Carbonate Sediments in Shallow Shelf Environments. *Geology*, **12**, 432-435. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<432:MOSACS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<432:MOSACS>2.0.CO;2)
- [4] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-66.
- [5] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. 古地理学报, 2001, 3(3): 63-66.
- [6] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 68.
- [7] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931-939.
- [8] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
- [9] 王国忠, 吕炳全, 全松青. 现代碳酸盐和陆源碎屑的混合沉积作用——涠洲岛珊瑚岸礁实例[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(1): 15-25.
- [10] 王金友, 张立强, 张世奇, 等. 济阳坳陷沾化凹陷沙二段湖相混积岩沉积特征及成因分析——以罗家-邵家地区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1085-1096.
- [11] 彭军, 杨一茗, 刘惠民, 等. 陆相湖盆细粒混积岩的沉积特征与成因机理——以东营凹陷南坡陈庄地区沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1409-1426.
- [12] 叶茂松, 解习农, 徐长贵, 等. 混积岩分类命名体系探讨及对混积岩储层评价的启示——以渤海海域混积岩研究为例[J]. 地质论评, 2018, 64(5): 1118-1131.
- [13] 梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞. 米级旋回层序的成因类型及其相序组构特征[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 43-49.
- [14] Davies, H.R. (1989) Shelf Sandstones in the Mowry Shale: Evidence for Deposition during Cretaceous Sea Level Falls. *Journal of Sedimentary Petrology*, **59**, 548-560. <https://doi.org/10.1306/212F8FE4-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- [15] 李祥辉, 曾允孚. 扬子西缘泥盆纪碳酸盐与陆源碎屑的混积层序和层序混积模式[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 339-344.
- [16] 何幼斌, 高振中, 郭成贤, 等. 石门杨家坪下寒武统杷榔组三段内波和内潮汐沉积研究[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 62-69.
- [17] 董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 等. 湖南石门杨家坪下寒武统杷榔组三段混合沉积研究[J]. 地质论评, 2008, 54(5): 593-601.
- [18] 董桂玉, 陈洪德, 李君文, 等. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积研究[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 800-811.
- [19] 伏美燕, 张哨楠, 赵秀, 等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区石炭系混合沉积研究[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 155-164.
- [20] 孙娇鹏, 陈世悦, 胡忠亚, 等. 柴东北缘古生代碎屑岩-碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1586-1593.

- [21] 付鑫, 杜晓峰, 官大勇, 等. 渤海海域沙河街组一二段扇三角洲混合沉积特征、沉积模式及勘探意义[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3706-3720.
- [22] 张锦泉, 叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(2): 87-92.
- [23] 王国忠. 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[J]. 古地理学报, 2001, 3(2): 47-54.
- [24] 徐艺嘉. 混合沉积的研究进程及研究现状[J]. 四川有色金属, 2015(4): 5-8, 13.
- [25] 赵灿, 李旭兵, 郇金来, 于玉帅. 碳酸盐与硅质碎屑的混合沉积机理和控制因素探讨[J]. 地质论评, 2013, 59(4): 615-626.
- [26] 江茂生, 沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 551-554.
- [27] 李祥辉. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 395-404.
- [28] 郑德顺, 程涌, 李明龙, 等. 济源盆地中侏罗统马凹组上段混合沉积特征及其控制因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(1): 102-108.
- [29] 高远, 付修根, 万友利, 等. 北羌塘盆地雀莫错组三段混合沉积层系发育特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(3): 35-45, 106.
- [30] Dolan, J.F. (1989) Eustatic and Tectonic Controls on Deposition of Hybrid Siliciclastic/Carbonate Basinal Cycles: Discussion with Examples. *AAPG Bulletin*, **73**, 1233-1246. <https://doi.org/10.1306/44B4AA0F-170A-11D7-8645000102C1865D>
- [31] 李泉泉, 鲍志东, 肖毓祥, 等. 混合沉积研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 153-167.
- [32] Lee Wilson, J. (1967) Cyclic and Reciprocal Sedimentation in Virgilian Strata of Southern New Mexico. *GSA Bulletin*, **78**, 805-818. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1967\)78\[805:CARSIV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1967)78[805:CARSIV]2.0.CO;2)
- [33] Capozzi, R. and Picotti, V. (2003) Pliocene Sequence Stratigraphy, Climatic Trends and Sapropel Formation in the Northern Apennines (Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **190**, 349-371. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00614-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00614-4)
- [34] Roveri, M. and Taviani, M. (2003) Calcarenite and Sapropel Deposition in the Mediterranean Pliocene: Shallow- and Deep-Water Record of Astronomically Driven Climatic Events. *Terra Nova*, **15**, 279-286. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00492.x>
- [35] Garcia-Garcia, F., Soria, J.M., Viseras, C. and Fernandez, J. (2009) High-Frequency Rhythmicity in a Mixed Siliciclastic-Carbonate Shelf (Late Miocene, Guadix Basin, Spain): A Model of Interplay between Climatic Oscillations, Subsidence, and Sediment Dispersal. *Journal of Sedimentary Research*, **79**, 302-315. <https://doi.org/10.2110/jsr.2009.028>
- [36] Aqrabi, A.A.M. (1996) Carbonate-Siliciclastic Sediments of the Upper Cretaceous (Khasib, Tanuma and Sa'di Formations) Of the Mesopotamian Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **13**, 781-790. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(96\)00022-0](https://doi.org/10.1016/0264-8172(96)00022-0)
- [37] 张世铭, 张小军, 王建功, 等. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析——以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 160-173.
- [38] 董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 等. 惠民凹陷沙-中湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以山东商河地区为例[J]. 沉积学报, 2007, 25 (3): 343-350.
- [39] 韩睿. 塔西南地区阿尔塔什剖面石炭系混合沉积及层序地层研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [40] 李坤. 蠡县斜坡沙河街组沙一段混合沉积研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2016.
- [41] Cristian, C., Ron, S. and Andrew, P. (2009) Sediment Supply: The Main Driver of Shelf-Margin Growth. *Earth Science Reviews*, **96**, 221-248. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.06.008>
- [42] 徐伟, 杜晓峰, 黄晓波, 等. 混合沉积研究进展与关键问题[J]. 沉积学报, 2019, 37(2): 225-238.
- [43] 鄢继华, 邓远, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 98-109.
- [44] 杨永剑, 刘家铎, 田景春, 等. 塔里木盆地上奥陶统桑塔木组混合沉积特征及控制因素[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 185-192.
- [45] 尹柯惟, 刘颖, 赵文婷, 等. 混合沉积研究进展及其油气地质意义[J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(3): 15-18.
- [46] 张宁生, 任晓娟, 魏金星, 等. 柴达木盆地南翼山混积岩储层岩石类型及其与油气分布的关系[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 42-46.

- [47] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义[J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297-307.
- [48] 马克, 侯加根, 刘钰铭, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组咸化湖混合沉积模式[J]. 石油学报, 2017, 38(6): 636-648.
- [49] 吴因业, 吕佳蕾, 方向, 等. 湖相碳酸盐岩-混积岩储层有利相带分析——以柴达木盆地古近系为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1150-1157.
- [50] 印森林, 陈恭洋, 许长福, 等. 陆相混积细粒储集岩岩相构型及其对甜点的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1180-1193.