

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

叶茂松¹⁾, 解习农¹⁾, 徐长贵²⁾, 杜晓峰²⁾, 宋章强²⁾, 杜学斌¹⁾

1) 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉, 430074;

2) 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院, 天津塘沽, 300452

内容提要: 混积岩是一种普遍而重要的岩石组合类型。然而长期以来,对混积岩的岩石学分类与命名一直存在诸多争议,且尚未有统一的分类体系与命名规则。本文结合渤海海域混积岩岩石薄片组分鉴定、岩石储层物性分析等最新研究成果,并与相关文献结合,最终确立以陆源碎屑物、生物成因碳酸盐颗粒、化学沉淀碳酸盐为三组分端元的一套新的混积岩岩性分类体系,并将混积岩分为4大类、16亚类。通过讨论混积岩混积层系及混积岩组构界定的问题,进一步完善了混积岩定义。利用新的岩石学分类方案,可为储层评价研究提供指导。以渤海海域为例,建立起研究区不同岩性相与储层物性的对应关系,并在岩性分类体系中划分出差储层、中等储层及优质储层三个储层区。

关键词: 混积岩;分类命名;混积层系;陆源碎屑下限值;岩性相;储层物性

传统沉积学观点认为碳酸盐生产率会因为陆源碎屑物质的流入而减少,因此两类沉积物不会产生混合,从而导致长期以来人们习惯于将陆源碎屑与碳酸盐岩区分为两个系统进行研究,两者之间的混积现象没有得到充分的重视。实际上,混积现象是具有普遍性的。国外学者在20世纪50年代开始注意到这一现象(Bruckner, 1953; Carozzi, 1955),然而直到80年代中期,Mount(1984)才首次对混积岩的概念、沉积环境、成因等问题展开研究和讨论,随后一些学者开始对混积岩的岩石学分类、层序地层学、沉积环境、成岩作用等问题的探索,从而推动这一特殊体系的研究(Yose and Heller, 1989; Sanders and Pons, 1999; Garcia-Hidalgo et al., 2007; 李祥辉, 2008; Dix et al., 2013; 梁薇等, 2016)。纵观目前所发表的国内外文献,相比于陆源碎屑岩及碳酸盐岩体系,混积岩的分类、命名规则,甚至是概念,存在着较大的差异性(Mount, 1985; 王国忠等, 1987; 杨朝青和沙庆安, 1990; 张雄华, 2000)。笔者认为,混积岩是特殊的岩石组合,由多种岩石类型按照一定的规律组合而成(郭福生, 2004),因此,岩石学

的分类及命名规则是一切工作的基础,没有统一的划分标准,不仅不利于探讨混积岩沉积背景、动力学形成过程等问题,同时很可能造成诸多的理解的偏差。例如,张雄华(2000)以陆源碎屑含量5%~95%,碳酸盐含量5%~95%的岩石组分作为混积岩的范围。然而,这会使得某些轻度发生混积的岩石类型被归入“不纯”的碎屑岩或碳酸盐岩之中。因此,为了更加深入开展对混积岩的研究工作,首要应该解决其岩石分类与命名的问题。

渤海海域位于渤海湾盆地东侧,是渤海湾盆地海域领域,发现了渤中坳陷、辽东湾坳陷等重要的富油气区带(图1),同时也是至今为止在我国报道混积岩研究最为活跃的区域,在其多个构造带发现了独特的混积岩沉积(罗顺社等, 2004; 董桂玉等, 2008, 2014; 董艳蕾等, 2011; 宋章强等, 2013; 王金友等, 2013),这为研究混积岩这一特殊沉积体系(或岩石学体系)提供了很好的研究场所。笔者根据对渤海海域混积岩的最新研究成果,结合国内外对混积岩岩石学体系实例分析,提出新的混积岩分类体系、命名规则,并在此基础上对混积岩的概念进

注:本文为国家自然科学基金面上资助项目(编号:41772111)的成果。

收稿日期:2018-03-25;改回日期:2018-06-07;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.006

作者简介:叶茂松,男,1988年生。博士研究生,学习方向为沉积学和石油地质学研究。Email: yeyegood3344@163.com。通讯作者:解习农,男,1963年生。教授,博士生导师。从事研究盆地分析、石油地质、海洋地质等研究。Email: xnjie@cug.edu.cn。

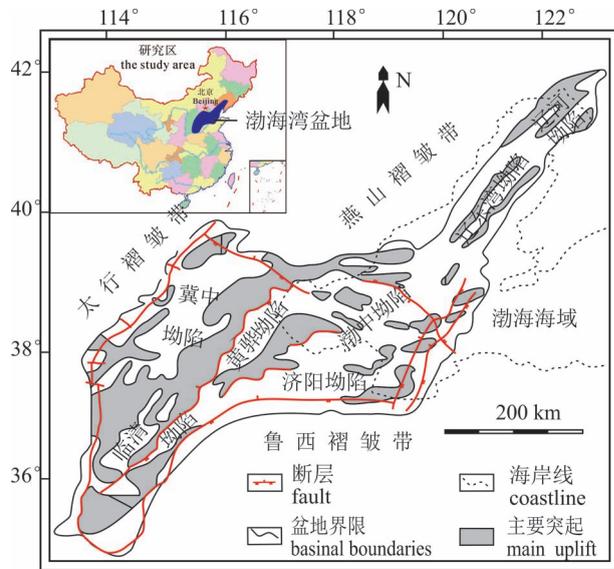


图1 渤海湾盆地及渤海海域大地构造单元图

Fig. 1 Tectonic unit of Bohai basin and Baohai sea area

行修订及完善,并结合新的岩石学分类体系对储层物性预测提供案例分析,希望为系统认识混积岩的岩石学特征提供借鉴意义。

1 混积岩岩石学特征

1.1 矿物组成及岩石组构

混积岩主要的矿物类型包括原生矿物及次生矿物。原生碳酸盐矿物多为文石、方解石等,以生物壳体、鲕粒或泥晶基质等形式产出;原生陆源碎屑矿物主要为硅质碎屑矿物(石英、长石类等)及岩屑等(Brooks et al., 2003; Madden and Wilson, 2012; 丁一等, 2013)。粘土矿物多以杂基形式产出,如伊利石、蒙脱石、绿泥石及高岭石等(Dix and Parras, 2014)。除了原生矿物外,次生或者后生成岩矿物也可能成为主要的混积岩矿物组分,其中主要的后生成岩矿物包括白云石、钠长石、硬石膏、沸石等,多以胶结物的形式出现,如渤海海域 QHD29-2A 构造带白云岩胶结物含量可高达20%以上。

混积岩的岩石构成大致可以归纳为以下几类:

① 陆源碎屑颗粒。母岩机械风化继承性产物,如不同粒级的碎屑(Brandano and Civitelli, 2007);② 生物成因的碳酸盐颗粒。包括生物碎屑颗粒、内碎屑颗粒、鲕粒、团藻等,其形成机制或与生物碎屑沉积或生物化学作用有关(Chiarella et al., 2012; Gomez and Astini, 2015);③ 化学沉淀作用碳酸盐。盆地内原生沉积的细粒碳酸盐泥屑,多具有泥晶或微晶

结构(徐伟等, 2014)。

此外,还应该指出,胶结物也是重要的混积岩岩石组构之一(Feng Jinlai et al., 2013),主要为成岩阶段早期或中晚期所形成的填隙物,包括碳酸盐胶结物及碎屑自生矿物等。

1.2 岩石类别

结合渤海海域宏、微观岩性相研究及国内外文献调研,将混积岩依据岩石组构类别差异可划分为以下岩石类别:

(1) 以陆源碎屑为主的混积岩。宏观岩性以陆源碎屑组分为主,多见粉砂质、砂质或者砾质结构。碎屑颗粒之间可零散分布生物碎屑颗粒,完整壳体多难见,仅见生物体铸模孔(图2a)。镜下可观察大量碎屑颗粒,如石英、长石或岩屑等,粒级由粉砂级至砾级不等(El-Azabi and El-Araby, 2007),化石碎片则多不完整,呈破碎状分布于颗粒之间(图2b, c)。

(2) 以化学沉淀碳酸盐为主的混积岩。宏观岩性多为含砂质的泥晶灰岩或白云岩,见少量陆源碎屑或生物碎屑溶蚀孔等(图2d)。其微观岩石组构特征为以泥晶为基底,生物碎屑或者陆源碎屑颗粒均埋置于灰泥基底之上(Navarrete et al., 2013)(图2e, f)。

(3) 以生物成因碳酸盐颗粒为主的混积岩。宏观岩性相以大量生物介壳密集分布为特征,生物壳体大小均一,多被大量溶蚀(图2g)。微观岩性相主要为生物碎屑结构,陆源碎屑颗粒零散分布于生物碎屑体之间,成分多为长英质矿物或沉积岩、火山岩岩屑等(图2h, i)。

(4) 碳酸盐与陆源碎屑互(夹)层型混积岩。宏观岩性可观察两类不同的岩性交替产出。碳酸盐岩层岩性主要为颗粒灰岩、泥晶灰岩等,陆源碎屑岩层多见泥岩、粉砂岩等,两类层系的单层厚度既可能为厘米级(图2j),也可能达到米以上。微观岩性相见明显定向性,互层的岩性成分较为复杂,如完整生物贝壳与石英碎屑颗粒互层(图2k)碳酸盐微晶与泥岩之间的互层(图2l)等。

此外,野外常常见混积层系剖面,厚度常常为米以上。宏观肉眼可识别出几类剖面:如互层型,即厚度相近的两类岩性垂向叠置产出(图2m)(Vigorito et al., 2006);又如夹层型,剖面可以厚层状岩层内夹一个或多个相对较薄的地层单元产出(图2n)(Dix and Nehza et al., 2013)。另外,亦可在剖面上观察到互层与夹层反复出现的情况,如上部

为夹层型,下部为互层型的剖面组合(图 2o) (Mata and Bottjer, 2011)。混积层系的成分往往差别很大,常见的碳酸盐岩包括颗粒灰岩、生物碎屑灰岩、泥晶灰岩等,陆源碎屑岩岩层则多见黑色泥岩、页岩、粉砂岩,甚至可见砾岩层等 (Myrow et al., 2004)。

2 混积岩分类方案及命名准则

2.1 岩石分类端元确定

国内外学者普遍将混积岩划分为狭义及广义的两大类分类体系。其中狭义的混积岩是指岩石组构上的混合,而广义混积岩被定义为互层型的混积,并

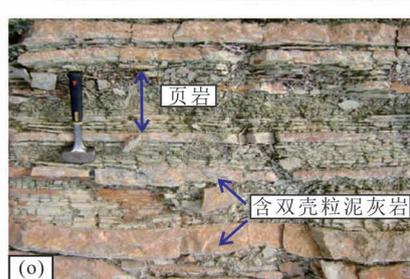
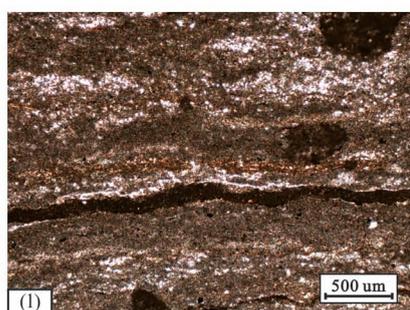
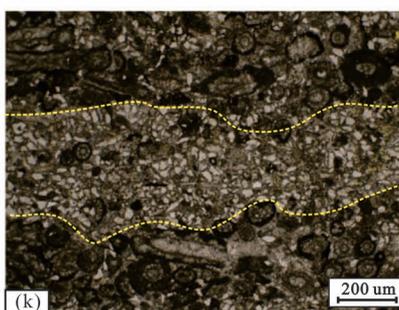
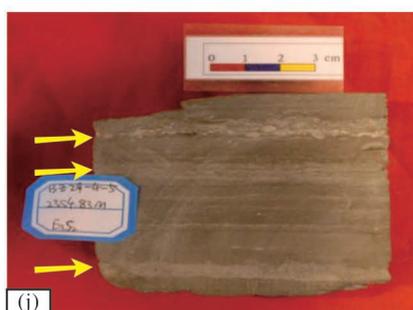
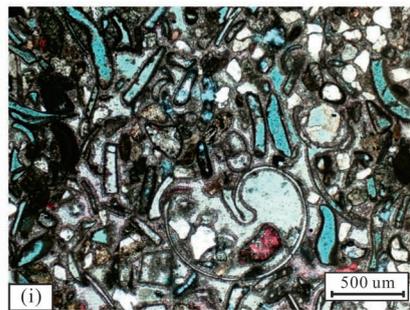
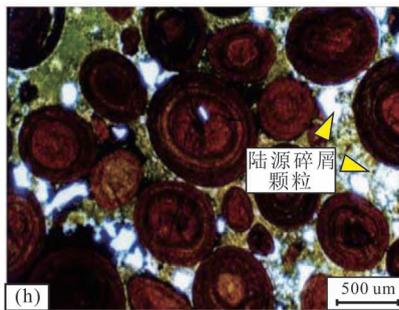
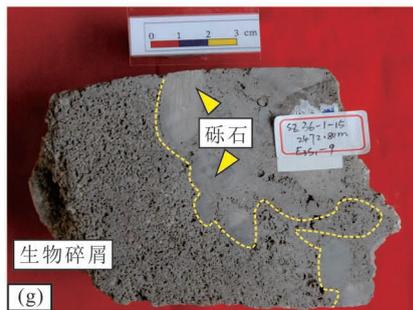
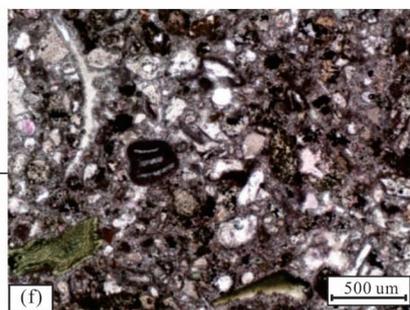
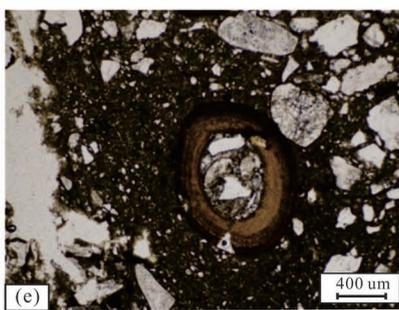
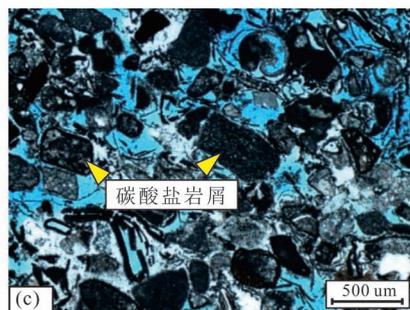
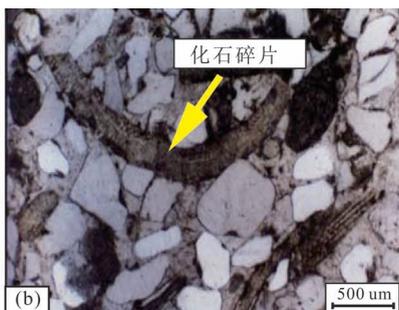
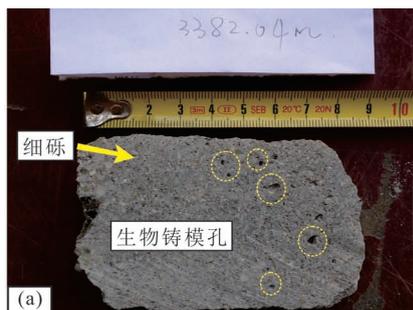


图2 宏观及微观混积岩岩石类别

Fig. 2 Macroscopic and microscopic lithofacies of mixed sediments

- (a) 渤海海域 QHD-A 构造带含生屑细砾岩; (b) 苏伊士湾生屑砂岩 (El-Azabi and El-Araby, 2007); (c) 渤海海域 BZ-A 构造带生屑砂岩; (d) 渤海海域 JZ-A 构造带砂质含生屑泥晶云岩; (e) 西班牙伊比利亚盆地砂质泥晶云岩 (Navarrete et al., 2013); (f) 渤海海域 JZ20-2 构造带含生物砂质泥晶云岩; (g) 渤海海域 SZ36-A 构造带含砾生物云岩; (h) 苏伊士湾含砂质鲕粒灰岩 (El-Azabi and El-Araby, 2007); (i) 渤海海域 QHD36-A 构造带砂质生物碎屑云岩; (j) 渤海海域 QHD29-A 构造带碳酸盐颗粒层与泥岩层交替产出; (k) 西班牙伊比利亚盆地轮藻与砂质层互层型混积岩 (Navarrete et al., 2013); (l) 渤海海域 JZ20-A 纹层状泥灰岩; (m) 意大利撒丁岛 Porto Torres 盆地互层型混积岩剖面 (Vigorito et al., 2006); (n) 加拿大魁北克湾夹层型混积岩剖面。剖面(两白色箭头之间)见厚层状粉砂质泥岩夹薄层生物碎屑灰岩(黑色箭头)、云质灰岩 (Dix and Nehza et al., 2013); (o) 美国犹他州西南部混积岩剖面 (Mata and Bottjer, 2011)
- (a) Bioclastic conglomerate in QHD-A structure of Bohai Sea area, China; (b) Bioclastic sandstone in Gulf of Suez, Egypt (El-Azabi and El-Araby, 2007); (c) Bioclastic sandstone in BZ-A structure of Bohai Sea area, China respectively; (d) Sandy bioclastic micritic dolostone in JZ-A structure of Bohai Sea area, China; (e) Sandy micritic dolostone in Barremian Iberian Basin, Spain (Navarrete et al., 2013); (f) Bioclastic sandy—micritic dolostone in JZ20-2 structure of Bohai Sea area, China; (g) Biogenic carbonate-dominated mixed lithofacies. Gravelly bioclastic dolostone in SZ36-A structure of Bohai Sea area, China; (h) Sandy oolitic limestone in Gulf of Suez, Egypt (El-Azabi and El-Araby, 2007); (i) Sandy bioclastic dolostone in QHD36-A structure of Bohai Sea area, China; (j) Marly beds alternate interbedded carbonate layer in QHD29-A structure of Bohai Sea area, China; (k) Interbedded laminae of charophytes with sand laminae in Barremian Iberian Basin, Spain (Navarrete et al., 2013); (l) Lamellar mudstone and limestone in JZ20-A structure of Bohai Sea area, China; (m) Multistorey mixed sediments in Porto Torres Basin, Miocene, Sardinia, Italy (Vigorito et al., 2006); (n) The outcrop of mixed sediments in the ancient Quebec Embayment, Canada. Succession (between two white arrows) of silty mudstone, and two intervals (black arrows) of thin beds of skeletal rich limestones (Dix and Nehza et al., 2013); (o) The outcrop of mixed sediments in the western of Utah, United States (Mata and Bottjer, 2011)

赋予“混积层系”的概念。这里首先讨论狭义的岩石学分类,混积层系在后面的讨论部分再详细进行说明。

岩石分类主要包括成因分类及结构分类两种类型。受限于成因机制研究,目前国内外学者多基于露头尺度或者显微镜下微观岩石结构的研究,对混积岩进行分类及命名工作。本次研究将岩石组构(陆源碎屑颗粒、碳酸盐颗粒、灰泥、胶结物等)作为混积岩岩石分类端元的选择。在组构的选择上考虑以下几个方面的因素。

首先,粘土常常在混积岩分类中作为单独组分列出(张雄华, 2000; 王杰琼等, 2014),但也有学者主张将其归入陆源碎屑组分(董桂玉等, 2007)。实际上,笔者认为,母岩风化形成的粘土矿物从成因机理而言,应归属于陆源碎屑岩范畴。同时笔者在有关混积岩岩性描述的文章中发现,国内外报道混积岩组分中能以粘土矿物为主,同时还能同时出现碳酸盐组分(含量达10%以上)的实例较少,能出现上述组分的混合,主要取决于较为特殊的沉积环境。例如季节性变化导致的泥质条纹与碳酸盐互层产出(张宁生等, 2006; 薛晶晶等, 2012);又如,在斜坡边缘的浊流事件,会将陆坡沉积的碳酸盐颗粒或者灰泥带入盆地内远洋沉积的泥质沉积中造成粘土与碳酸盐组分的混合(Braga et al., 2012; Komatsu et al., 2014)。因此,粘土矿物若作为单独的组分出现,其混积岩类型较为局限。岩石学的分类应该涵盖大部

分成因机制下形成的岩性类型,而非仅包含较为特殊成因机理下形成的岩石类型。综上所述,本次研究将粘土矿物归入到陆源碎屑体系中,而不主张粘土矿物单独作为分类的一端元。

其次,碳酸盐组分是混积岩的另一类主要组成。碳酸盐主要由生物成因的碳酸盐颗粒、化学成因的碳酸盐及碳酸盐胶结物等形式出现。成岩阶段所形成的胶结物无法反映原生沉积环境,虽然占据了一定的岩石组构含量,但是在实际操作中,都主张不包括胶结物的含量,如桤节状方解石或白云石胶结物、早期泥晶经重结晶后的白云石等。统计表明,生物成因的碳酸盐颗粒与化学成因的碳酸盐不仅在混积岩的结构组成中占据较高比例(王冠民等, 2009; Gomez and Astini, 2015),同时这两类碳酸盐更可能代表不同沉积条件(Longhitano, 2010; Zecchin and Caffau, 2011; Komatsu et al., 2014),将其区分开,对于解释混积岩的沉积成因、受控因素是具有重要意义的。

综合上述考虑,本文建立了由陆源碎屑、生物成因碳酸盐颗粒及化学沉淀碳酸盐三端元构成的一种新的混积岩岩石学分类系统(图3)。其中陆源碎屑包括一切由机械成因形成的砾质、砂质、粉砂质及粘土质沉积物,成分既可以包括长英质矿物、粘土矿物、由源区剥蚀的碳酸盐岩屑等;生物成因碳酸盐颗粒包括生物碎屑及生物化学作用形成的碳酸盐颗粒,如团粒、藻粒等;化学沉淀碳酸盐则包括一切碳

酸盐饱和析出,具有化学成因的碳酸盐,如灰泥、碳酸盐粒屑等。

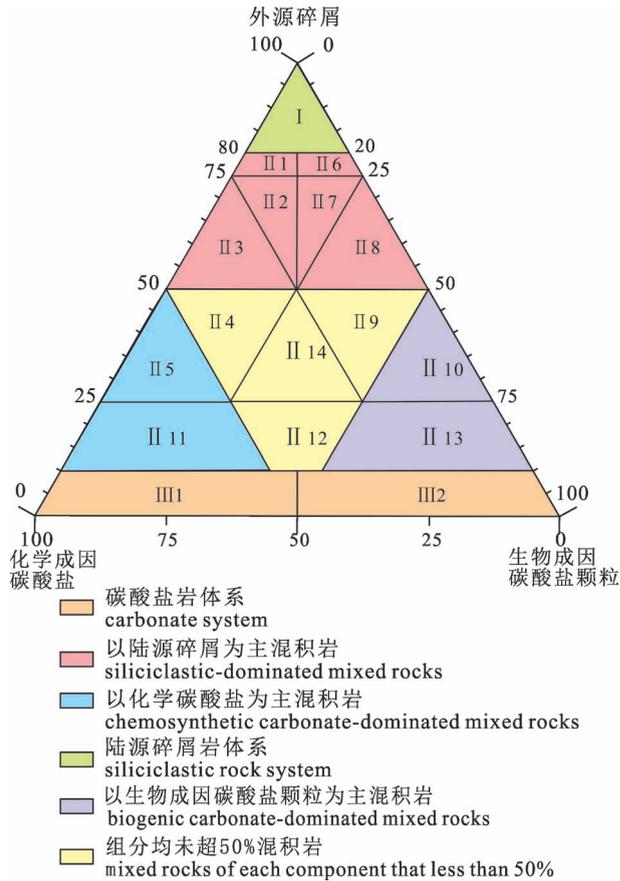


图 3 混积岩岩性三角分类图

Fig. 3 Triangular petrological classification of mixed siliciclastic—carbonate sediments

2.2 岩石命名准则

在确定了三端元组分之后,应该对命名的准则加以限定,使得岩石命名更具有科学性。本文综合考虑现有的命名实例,本着突出岩石结构特征且在实际工作中能简单易操作的原则,制定了以下命名准则:

(1) 确定主名及基本岩石名称。在岩石薄片或 X 衍射等定量统计基础上,根据三组分含量,计算三者之间的相对含量(即每一种组分在三组分之和中所占比例),并在图 3 岩性分类三角图中进行投影。当陆源碎屑含量大于 50% 时,主名为“碎屑岩”(如砾岩、砂岩、粉砂岩等);当碳酸盐含量大于 50% (生物或化学沉淀碳酸盐颗粒),主名为“碳酸盐岩”。当每一类组分均不超过 50%,根据组分的相对含量确定主名。在确定主名的基础上,其他含量相对较少的组分,以“少前多后”的原则依次加入到主名之

前,构成基本名词。例如含粉砂泥晶生物碎屑灰岩,其主名为“生物碎屑灰岩”,生物碎屑含量超过 50%,其他组分包括陆源碎屑粉砂及碳酸盐岩灰泥,且灰泥相对含量较高,命名顺序相对靠后。

(2) 含量限制。根据岩石分类的习惯性含量准则对组分命名进行筛选:含量小于 10% 的组分不参与定名;含量 10%~25% 的组分命名为“含 XX”;含量在 25%~50% 的组分命名为“XX 质”。

(3) 修饰结构及完整定名。对宏观岩性相建议采用“颜色+沉积构造+胶结物(白云质、灰质或泥晶、亮晶)+基本名称”进行完整命名。例如红褐色鸟眼状结构砾屑云岩;对微观岩性相建议采用“胶结物(白云质、灰质或泥晶、亮晶)+基本名称”进行完整命名。例如亮晶粉砂质鲕粒灰岩。

2.3 混积岩岩石类型及命名

根据上述混积岩岩石学分类系统及命名准则,可以对混积岩体系进行分类。本文建议以陆源碎屑 80% 的含量作为陆源碎屑岩体系与混积岩体系分界(下文详细论述含量的确定问题)。其中,当陆源碎屑组分含量大于 80%,即使岩石组构中依然含有少量的碳酸盐成分,这一区间内岩石依然归为传统意义上的陆源碎屑岩(S);以陆源碎屑含量 10% 的含量作为碳酸盐岩体系与混积岩体系分界(讨论部分进行说明)。其中,陆源碎屑含量低于 10%,即使里面含有少量的陆源碎屑物,依然归为碳酸盐岩,其中以生物碳酸盐颗粒和化学沉淀碳酸盐颗粒的相对比例(50% 为界)可分为泥晶碳酸盐岩(M)及颗粒碳酸盐岩(P)两大类。而当陆源碎屑含量大于 10%,且小于 80%,并同时含有生物成因碳酸盐岩颗粒或化学成因碳酸盐的岩石类型被定义为混积岩(图 3),并根据组构含量准则将其划分出 4 大类、16 亚类(表 1),各类型岩性特征描述如下:

(1) 陆源碎屑含量在 50%~80% 区间的混积岩命名为以陆源碎屑为主混积岩(CL1、CL2、CL3、CL4、CL5、CL6)。这类混积岩以陆源碎屑为主,含量超过 50%,其主名以陆源碎屑结构决定,包括砂岩、粉砂岩、砾岩等,岩性相 CL1、CL2 及 CL3 岩石组构化学沉淀碳酸盐含量多大于碳酸盐颗粒含量,岩性相命名包括含生屑含泥晶碎屑岩(砂岩、砾岩等)、泥晶质碎屑岩等;岩性相 CL4、CL5、CL6 组构中碳酸盐颗粒含量相对岩性相 CL1、CL2 及 CL3 岩石类型较多,主要岩性相命名为含生物碳酸盐颗粒碎屑岩、含泥晶生物碎屑质碎屑岩等。

(2) 化学成因碳酸盐含量在 50%~90% 区间的

混积岩命名为以化学沉淀碳酸盐为主混积岩混积岩 (CA1、CA2、CA3)。这类混积岩主要组构为碳酸盐灰泥、化学沉淀碳酸盐粒屑等,因此主名为泥晶灰(云)岩、粒屑灰岩等,根据陆源碎屑颗粒与碳酸盐颗粒相对含量确定基本名词。主要岩性相包括含生屑陆屑质泥晶灰(云)岩、含陆屑碳酸盐颗粒质粒屑灰(云)岩等。

(3)生物成因碳酸盐颗粒含量在 50%~90% 区间的混积岩命名为以生物碎屑为主混积岩 (BI1、BI2、BI3)。这类混积岩主要组构为生物成因的碳酸盐颗粒,因此主名为颗粒灰(云)岩,根据陆源碎屑颗粒与化学沉淀碳酸盐相对含量确定基本名词。主要岩性相包括含泥晶陆屑质碳酸盐颗粒(生物碎屑、团粒、鲕粒等)灰(云)岩、含陆屑泥晶质碳酸盐颗粒(生物碎屑、团粒、鲕粒等)灰(云)岩等。

(4)当三类组构含量均不超过 50%,该类岩石被定义为多组分混积岩(C—C—B1、C—C—B2、C—C—B3、C—C—B4)。根据三组构的相对含量关系对岩性相进行命名,因此,该类岩性相名称较多,如含生物碎屑—泥晶—碎屑岩、含陆屑—泥晶—碳酸盐颗粒灰(云)岩等。

3 讨论

3.1 混积层系

沙庆安(2001)最早提出广义的混积岩除了组构上的混积岩之外,还应该包括陆源碎屑岩与碳酸盐岩以互层或夹层形式产出的混合,即混合层系的概念。事实上,无论从镜下到标本,以及野外露

头,都能见到很多类似混积层序的例子。然而,就目前的概念而言,混积层系的概念显得较为笼统,例如互层的概念指的是两个厚度大致相当岩层在垂向的反复叠置。笔者在调研了世界范围内对混积岩系相关报道发现,混积层系的厚度变化很大:如中国渤海地区发现很多毫米级别的纹层状混合层系的实例(王冠民, 2005, 2012; 张金亮和司学强, 2013);然而,野外常常可见混积层系剖面,厚度常常为米级以上的不同组合样式(Tcherepanov et al., 2010; Mata and Bottjer, 2011),这说明我们很难通过限定地层的厚度去给出混积层系的明确定义。但是,实际上,混合层系是一个地层单元的概念,不同厚度往往代表的是不同层序级别的沉积记录,诸多学者也针对混积层段做过大量的层序地层学研究,将混积层段可以划分出不同级别的层序单元(Yang Wan and Kominz, 2003; Yilmaz and Altiner, 2007)。因此,笔者建议从旋回地层学与层序地层学的原理去限定混积层系的概念。梅冥相等(2000)在米级旋回层序类型研究中,对碎屑岩与碳酸盐岩交互类型的米级旋回进行过讨论。他们认为在河流作用及沉积营力(波浪、潮汐、回流等)两种不同地质作用下能形成两类不同的米级旋回层序,而这种层系是一种厚度约 1~2 m 的混合层序。但实际情况中,米级旋回作为基本单元的混合层系相对较少,因此,笔者建议在使用混积层序的概念时候,应该以五级层序(准层序)及更低层序单元(如六级层序等)做为一个基本单元进行讨论。如当讨论高于五级层序的垂向序列(如四级层序单元或者更高级别时),以五级层序为

表 1 混积岩分类、命名及相应的组构含量

Table 1 Classification, designation and corresponding textural content of mixed siliciclastic—carbonate sediments

结构分类	岩性命名	三角图分区	相对组构百分含量(%)		
			陆源碎屑	生物颗粒碳酸盐	化学沉淀碳酸盐
以陆源碎屑为主的混积岩	(含生屑)(含/质)(泥晶)碎屑岩	CL1、CL2、CL3	50~80	<25	10~50
	(无或含泥晶)(含/质)碳酸盐颗粒碎屑岩	CL4、CL5、CL6	50~80	10~50	<25
以化学碳酸盐为主的混积岩	(无或含生屑)陆屑质(泥晶)灰(云)岩	CA1	25~50	<25	50~75
	含陆屑(无/含/质)碳酸盐颗粒泥晶灰(云)岩	CA2	10~25	<25	50~90
	含陆屑(无/含/质)碳酸盐颗粒质泥晶灰(云)岩	CA3	10~25	25~40	50~65
以生物碳酸盐颗粒为主的混积岩	(无或含泥晶)陆屑质碳酸盐颗粒灰(云)岩	BI1	25~50	50~75	<25
	含陆屑((无/含/质)泥晶)碳酸盐颗粒灰(云)岩	BI2	10~25	50~90	0~40
	含陆屑((无/含/质)泥晶)泥晶质灰(云)岩	BI3	10~25	50~65	25~40
三组分不超过 50%混积岩	(无/含生物碎屑)—泥晶—碎屑岩	C—C—B1	25~50	<25	25~50
	无/含泥晶—碳酸盐颗粒—碎屑岩	C—C—B2	25~50	25~50	<25
	含陆屑(泥晶)—碳酸盐颗粒灰(云)岩	C—C—B3	10~25	25~50	25~50
	陆屑—泥晶—碳酸盐颗粒灰(云)岩	C—C—B4	25~50	25~50	25~50

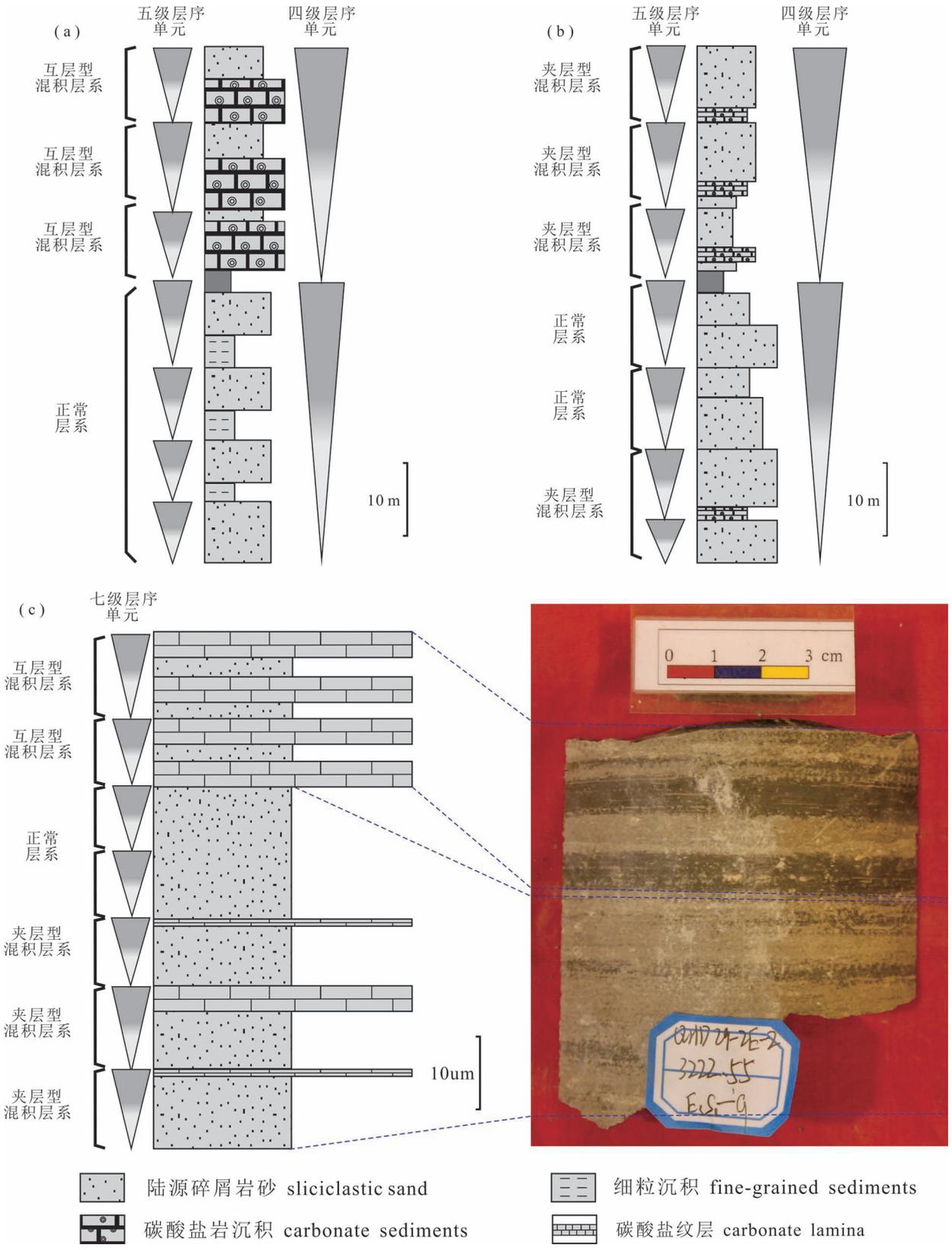


图 4 不同层序级别垂向剖面混积层系与正常层系叠置：(a)、(b) 五级层序格架下的混积层系；
 (c) 七级层序格架下的混积层序

Fig. 4 Vertical stacking pattern of mixture strata and regular strata in different sequence units; (a) (b) Mixed bed series under the fifth-order sequence framework; (c) Mixed bed series under the seventh-order sequence framework

基本单元来划分混积层系与正常层系。例如在五级层序格架内,既可以见互层型混积岩层系(图 4a),也可以看到只有夹层型混积层系(以单薄层碳酸盐层系产出,图 4b)。而当讨论五级层序以下单元(如由毫米级别的碎屑岩和碳酸盐岩岩层组成混积层序),则可以考虑以六级层系,甚至更低的层序单元进行讨论(图 4c)。

3.2 混积岩岩石分类组分含量范围确定

(1)陆源碎屑含量大于 50%的混积岩称为以陆源碎屑为主的混积岩,当碎屑含量达到 80%以上,本文认为将由混积岩过渡为传统的陆源碎屑岩。渤海海域混积岩陆源碎屑含量与孔隙度关系表明,随着陆源碎屑含量的增加,孔隙度迅速减少,两者呈二次函数关系(图 5a)。当碎屑成分含量大于 80%之后,孔隙度多在 5%以下;当碎屑成分介于 50%~80%之间时,可以形成 10%~20%孔隙度的较好储层,而造成如此良好物性的原因,与混积岩结构有关:当碎屑岩含量较高,由于混积岩中同时含有一定量生物碎屑时,会减少杂基的含量,同时增加岩石抗压性,使原生孔隙得以保存(图 5b)。

笔者又结合渤海海域以陆源碎屑为主混积岩产能与陆源碎屑含量关系认为,油气产能与陆源碎屑基本呈线性关系(图 5c)。当陆源碎屑含量增加时,油气产能会降低。以渤海海域 30 方/日的最低工业产能标准,所对应的陆源碎屑含量大致为 78.76%。笔者综合地域、数据点等因素认为,当混积岩中碎屑岩含量近似超过 80%之后,产能较低,这部分储层对应于无效储层;反之当碎屑含量在 50%~80%的区间,因为混积岩内部混有一定量的碳酸盐成分,增加了一定的原生孔隙,这部分区间储层具有一定产能。因此本文从岩石组构差异所导致的这种产能差异角度出发,建议以 80%作为两种岩性的分界。这一数据的科学含义是:当陆源碎屑含量达到 80%以上且胶结物含量几乎为 0,即使岩石组构中含有一定的碳酸盐成分,但其储层产能可能多半不会达到工业标准;当岩石中碳酸盐颗粒组分(特别是生物成因碳酸盐颗粒)增加,可能具有好的油气产能。因此从油气储层角度而言,将陆源碎屑含量 50%~80%的混积区间划分为以陆源碎屑为主的混积岩。

Palermo(2008)对荷兰 De Wijk 气田下三叠统湖相混积岩储层研究表明储层平均孔隙度为 8.0%~22.3%;嵯喜准(2013)对柴达木盆地北缘下干柴沟组下段南八仙构造带的混积岩研究结果显示,该构造带保留大量的原生孔隙,缺少后生胶结物影响,

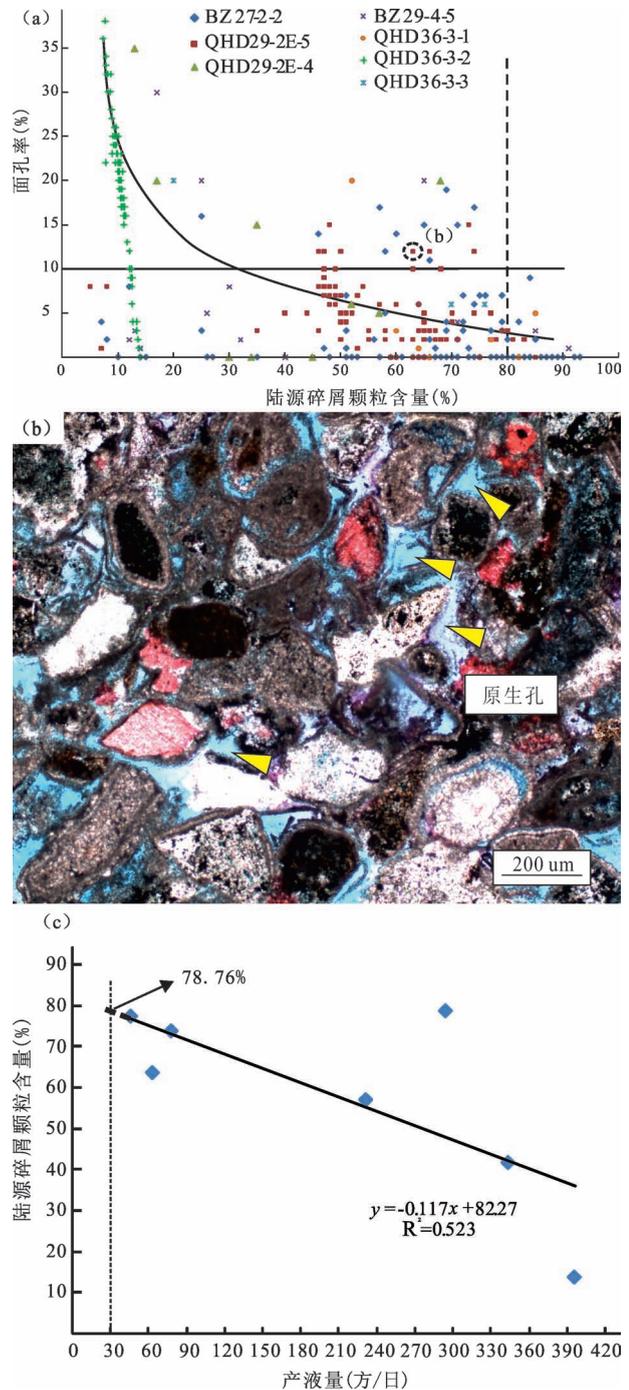


图 5 陆源碎屑颗粒含量与孔隙率、产能关系
Fig. 5 Relation of Content of terrigenous grains with porosity and oil—gas potential

(a) 混积岩陆源碎屑含量与孔隙度相关关系; (b) 较好混积岩储层显微照片; (c) 混积岩陆源碎屑含量与油气产能相关关系
(a) Related relationship between content of terrigenous grains and porosity; (b) Primary pore micrograph of excellent reservoir; (c) Related relationship between content of terrigenous grains and oil—gas potential

其孔隙度在 10%~15%左右。其他学者对常规储层的研究(王成等, 2007; 滕建彬, 2012)认为, 6%~18%左右的孔隙度普遍被认为是好储层下限。因此, 综合这些实例研究认为, 有效储层所对应的碎屑含量接近 80%左右(将孔隙、填隙物等含量均去除), 即使各个盆地的实际地质情况差异性可能较大, 但是 80%可能为较好储层(混积岩或者碎屑岩储层)的上限值并具有一定的普遍意义, 可以考虑作为混积岩与碎屑岩的分界加以推广。

(2)以碳酸盐岩为主混积岩储层(化学成因或生物成因碳酸盐含量 50%以上), 本文建议当碳酸盐含量达 90%由混积岩过渡为碳酸盐岩。本文获取的渤海海域以碳酸盐岩为主混积岩储层(化学成因或生物成因碳酸盐含量 50%以上)往往能有较高的产量。例如 QHD36-A 井, 仅含 5%的碎屑与含 15%的碎屑的储层, 其他岩石组构以生物碎屑为主, 其储层物性及产能都相对较高。因此, 从产能角度上去划分混积岩与碳酸盐岩界限相对较难, 本文主张由含量原则出发, 以碳酸盐为主混积岩以碳酸盐含量 90%作为最大值; 碳酸盐组分大于 90%, 则归为碳酸盐岩; 反之碳酸盐不超过 90%, 与陆源碎屑物的混合沉积为混积岩范围。

3.3 混积岩概念修订

本文认为, 混积岩是由机械搬运的陆源碎屑物与生物或化学成因碳酸盐组分同时沉积并以组构或层系混积的方式产出, 且陆源碎屑组分含量为 10%~80%的沉积岩类型。

结合混积层系与组构范围界定的讨论, 与先前混积岩概念相比, 本文所提出的概念具有以下几点完善: ①更强调了沉积物的来源, 不仅肯定了陆源碎屑与碳酸盐岩在结构上发生混合的客观事实, 同

时在这个基础上明确了两类物质的来源及成因(机械成因及生物、化学作用等); ②将混积岩的两种产出方式(结构混积与层系混积)在概念中区分开来, 有利于对混积岩在宏观及微观工作中的识别与区分; ③量化了混积岩的组构含量范围。利用岩性与产能关系, 以碎屑岩含量量化了混积岩的范围, 使混积岩的概念更加明确, 操作性更强。

4 混积岩分类体系对混积岩储层评价的启示

岩石学三角图分类不仅能帮助识别岩石的结构或成分特征, 结合储层物性资料可以判别不同岩性相类型与储层物性的关系(图 6a)。以渤海海域为例, 主要混积岩岩性相储集类型包括以下三类:

(1)低孔、特低渗为特征的储层。其主要包括 CL3、CA1、CA2 等岩性相。这些岩性相的主要岩石组构以碳酸盐泥晶—陆源碎屑为主, 特别随着泥晶含量的增加, 孔渗条件越差(图 6a)。如 CA1 岩性相的孔渗平均值分别为 11.2%及 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而泥晶含量更高的 CA2 岩性相, 孔渗平均值分别为 8.3%及 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 2)。结合统计结果推断, 以泥晶—陆源碎屑含量为主的 CL3、CA1、CA2、CA3、C—C—B1 岩性相区间为差储层区。

(2)中—高孔隙、低渗为特征的储层。其岩性相类型包括 CL1、CL4、CL6。这些岩性相均以陆源碎屑组分为主且含量均在 50%以上。其对应的储层物性变化相对较大, 如 CL1 类岩性相, 储层物性由中孔低渗到高孔中渗等变化, 这可能与控制储层发育的因素较多, 如碎屑岩颗粒骨架抗压实保存了大量原生孔、生物碎屑的后期溶蚀产生次生孔隙, 但胶结物的发育会导致大量孔隙的堵塞等(图 6b)。

表 2 不同岩性相类型储层特征及评价统计表

Table 2 Reservoir characteristic and evaluation with different lithofacies

岩性相区间	孔隙度区间 (%)	孔隙度平均值 (%)	渗透率区间 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	渗透率平均值 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	储层特征	储层评价
CL3	5~7.6	5.9	0.024~0.072	0.054	低孔特低渗为主	差储层
CA1	4.7~17.9	11.2	0.067~0.251	0.34	低孔特低渗为主	
CA2	4.6~13.3	8.3	0.01~0.29	0.11	低孔特低渗	
CL1	19.3~32.9	26.6	0.762~80.41	35.67	中—高孔、低渗为主	中等储层
CL4	11.5~28.7	19	0.3~340.1	49.04		
CL6	14.3~30	19.7	0.32~3.1	1.68		
C—C—B2	24.9~33.2	28.1	24.1~615.7	383.41	高孔为主、中—高渗	最优储层
BI1	8.7~38.2	30.8	23.2~196.1	608.6		
BI2	22.2~37.5	32.2	22.8~1577.3	749.1		

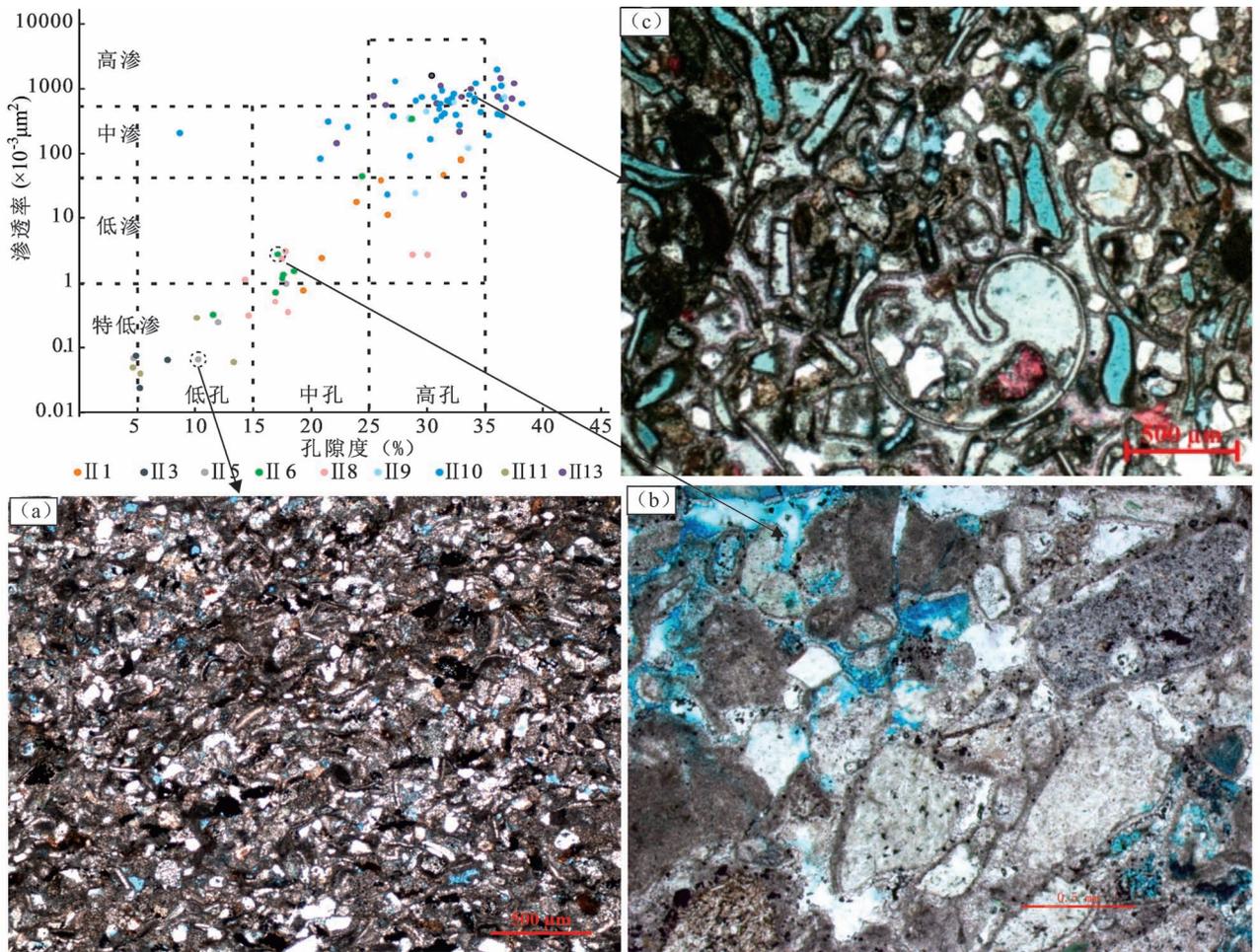


图 6 不同岩性相储层物性分布 (a) 含生物碎屑泥晶细砂岩; (b) 含生物碎屑砂岩; (c) 含砂质生物碎屑云岩

Fig. 6 Distribution of reservoir physical properties of different lithofacies

(a) Bioclastic—micrite fine sandstone; (b) Bioclastic sandstone; (c) Sandy bioclastic dolostone

整体而言,与差储层区相比,这些岩性相区间具相对较好的孔渗物性,结合统计数据,将 CL1、CL2、CL4、CL5、CL6 岩性相区间定义为中储层区(表 2)。

(3) 高孔隙、中—高渗为特征的储层。其岩性相类型集中于 C—C—B2、BI1、BI2 等岩性相。这类岩性相的特征为以生物碎屑含量为主,亮晶胶结(图 6c)。平均孔隙度在 30% 左右,平均渗透率均远远高于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,C—C—B2、BI1、BI2、BI3 区间定义为优质储层区(表 2)。

C—C—B3、C—C—B4 由于缺少孔渗资料而未做讨论。但从其岩石组构推断,C—C—B3 以碳酸盐为主,但孔渗条件可能取决于灰泥含量;C—C—B4 三类组分相对接近,因此,这两类区间岩性相的储层物性可能较为复杂多变,在实际操作中建议这类区间岩性相的储层物性要综合进行判识。

5 结论

(1) 本文选取陆源碎屑、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出 4 大类及 16 亚类。

(2) 在对混积层序及组构范围界定讨论基础上,进一步阐述了混积岩的基本含义:混积岩由机械搬运的陆源碎屑物与生物成因碳酸盐颗粒或化学沉淀碳酸盐同时沉积并以组构混积的方式产出,且陆源碎屑组分为含量为 10%~80% 的沉积岩类型。

(3) 以渤海海域为例,建立不同岩性相对应的储层物性分区,在岩性分类图中划分出差储层、中等储层及优势储层三个区。利用新的岩石学分类方案,一定程度上可帮助我们对混积岩的储层物性进行判别,对储层特征及控制因素进行大致的评价。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院李建平、黄晓波、王清斌及相关领导、专家的建设性意见与支持!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

丁一, 李智武, 冯逢, 翟中华, 孙玮, 汤聪, 张葳, 张长俊, 刘树根. 2013. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义. 地质论评, 59(2): 389~400.

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.

董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 罗进雄, 秦志勇. 2008. 湖南石门杨家坪下寒武统榔榔组三段混合沉积研究. 地质论评, 54(5): 593~601

董桂玉, 李君文, 马亚杰, 姚纪明, 副永涛, 张振国. 2014. 环渤海湾盆地地下古生界混合沉积: 特征、类型及环境. 石油工业出版社.

董艳蕾, 朱筱敏, 滑双君, 成克男, 于学敏, 李德江, 李桂芝. 2011. 黄骅拗陷沙河街组一段下亚段混合沉积成因类型及演化模式. 石油与天然气地质, 32(1): 98~107.

郭福生. 2004. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义. 沉积学报, 33(1): 136~141.

李祥辉. 2008. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素. 高校地质学报, 14(3): 395~404.

梁薇, 牟传龙, 周恩息, 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): 881~896.

罗顺社, 刘魁元, 何幼斌, 高振中, 淡卫东. 2004. 渤南洼陷沙四段陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征与模式. 江汉石油学院学报, 26(4): 19~21.

梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞. 2000. 米级旋回层序的成因类型及其相序组构特征. 沉积学报, 18(1): 43~49.

沙庆安. 2001. 混合沉积和混积岩的讨论. 古地理学报, 3(3): 63~66.

宋章强, 陈延芳, 杜晓峰, 王清斌, 王雪莲. 2013. 渤海海域 A 构造区沙二段混合沉积特征及储层研究. 海洋石油, 33(4): 13~18.

滕建彬. 2012. 基于低渗透成因分析的储层分类方法——以临南洼陷带沙三段下亚段碎屑岩储层为例. 油气地质与采收率, 19(5): 6~9.

王成, 邵红梅, 洪淑新, 官艳华, 滕宏达, 贾朋涛, 薛云飞. 2007. 松辽盆地北部深层碎屑岩储层物性下限及与微观特征的关系. 大庆石油地质与开发, 26(5): 18~20.

王冠民. 2012. 济阳拗陷古近系页岩的纹层组合及成因分类. 吉林大学学报(地球科学版), 42(3): 666~671.

王冠民, 廖黔渝, 高亮. 2009. 孤北洼陷西部陡坡带沙一段混积螺滩沉积特征. 石油天然气学报, 31(4): 28~30.

王冠民, 任拥军, 钟建华, 马在平, 姜在兴. 2005. 济阳拗陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨. 地质学报, 79(6): 834~838.

王国忠, 吕炳全, 全松青. 1987. 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. 石油与天然气地质, 8(1): 15~25.

王杰琼, 刘波, 罗平, 石开波, 张学丰, 刘建强, 王洋. 2014. 塔里木盆地西北缘震旦系混积岩类型及成因. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(3): 339~346.

王金友, 张立强, 张世奇, 林会喜. 2013. 济阳拗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. 地质论评, 59(6): 1085~1096.

徐伟, 陈开远, 曹正林, 薛建勤, 肖鹏, 王文涛. 2014. 咸化湖盆混积岩成因机理研究. 岩石学报, 30(6): 1804~1816.

薛晶晶, 孙靖, 朱筱敏, 刘巍, 朱世发. 2012. 准噶尔盆地二叠系风城组白云岩储层特征及成因机理分析. 现代地质, 26(4): 755~761.

杨朝青, 沙庆安. 1990. 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. 沉积学报, 8(2): 59~66.

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): 731~737.

张宁生, 任晓娟, 魏金星, 康有新, 张存厚. 2006. 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. 石油学报, 27(1): 42~46.

张雄华. 2000. 混积岩的分类和成因. 地质科技情报, 19(4): 31~34.

崔喜准, 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.

Braga J C, Diaz De Neira A, Lasseur E, Mediato J, Aguirre J, Abad M, Hernaiz-Huerta P P, Montheil J, Perez-Valera F and 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.

Brandano M and Civitelli G. 2007. Non-seagrass meadow sedimentary facies of the Pontinian Islands, Tyrrhenian sea; a modern example of mixed carbonate—siliciclastic sedimentation. *Sedimentary Geology*, 201(3~4): 286~301.

Brooks G R, Doyle L J, Suthard B C, Locker S D and Hine A C. 2003. Facies architecture of the mixed carbonate—siliciclastic inner continental shelf of west—central Florida: implications for Holocene barrier development. *Marine Geology*, 200(1~4): 325~349.

Bruckner. 1953. Cyclic calcareous sedimentation as an index of climatic variations in the past. *Journal of Sedimentary Research*, 23(4): 235~237.

Carozzi. 1955. Some remarks on cyclic calcareous sedimentation as an Index of climatic variations. *Journal of Sedimentary Research*, 25(1): 78~79.

Chiarella D, Longhitano S G, Sabato L and Tropeano M. 2012. Sedimentology and hydrodynamics of mixed (siliciclastic—bioclastic) shallow-marine deposits of Acerenza (Pliocene, Southern Apennines, Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 131(1): 136~151.

Ding Yi, Li Zhiwu, Feng Feng, Zhai Zhonghua, Sun Wei, Tang Cong, Zhang Wei, Zhang Changjun and Liu Shugen. 2013&. Mixing of lacustrine siliciclastic—carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Daanzhai member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang Area, Central Sichuan Basin. *Geological Review*, 59(2): 389~400.

Dix G R and Parras A. 2014. Integrated diagenetic and sequence stratigraphy of a late Oligocene—early Miocene, mixed-sediment platform (Austral Basin, southern Patagonia): Resolving base-level and paleoceanographic changes, and paleoquifer characteristics. *Sedimentary Geology*, 307: 17~33.

Dix G R, Nehza O and Okon I. 2013. Tectonostratigraphy of the Chazyan (late Middle—early Late Ordovician) mixed siliciclastic—carbonate

- platform, Quebec embayment. *Journal of Sedimentary Research*, 83 (5~6): 451~474.
- Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, Qin Zhiyong, Luo Jinxiong and Xin Changjin. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic—carbonate sediments. *Advance in Earth Sciences*, 22 (9): 931~939.
- Dong Guiyu, He Youbin, Chen Hongde, Luo Jinxiong, Qin Zhiyong. 2008. A study on mixed sedimentation in the Third Member of the Lower Cambrian Balang Formation at Yangjiaping, Shimen, Hunan Province. *Geological Review*, 54(5): 593~601.
- Name Dong Guiyu, Li Junwen, Ma Yajie, Yao Jiming, Ju Yongtao, Zhang Zhenguo. 2014#. The mixed sedimentation of the lower Paleozoic around Baohai Sea area: characteristic, classification and sedimentary environment. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Hua Shuangjun, Cheng Kenan, Yu Xuemin, Li Dejiang and Li Guizhi. 2011. Genetic types and evolutionary model of mixed clastic—carbonate deposits in the lower part of the Sha1 Formation, the Huanghua Depression. *Oil & Gas Geology*, 32(1): 98~107.
- El-Azabi M H and El-Araby A. 2007. Depositional framework and sequence stratigraphic aspects of the Comacian ~ Santonian mixed siliciclastic/carbonate Matulla sediments in Nezzazat and Ekma blocks, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 47 (4~5): 179~202.
- Feng Jinlai, Cao Jian, Hu Kai, Peng Xiaoqun, Chen Yan, Wang Yanfei and Wang Mu. 2013. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic—carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 124~137.
- Garcia-Hidalgo J, Gil J, Segura M and Dominguez C. 2007. Internal anatomy of a mixed siliciclastic—carbonate platform: the Late Cenomanian—Mid Turonian at the southern margin of the Spanish Central System. *Sedimentology*, 54(6): 1245~1271.
- Gomez F J and 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.
- Guo Fusheng. 2004. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and carbonate of Outangdi Formation in Jiangshan, Zhejiang Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22 (1): 136~141.
- Komatsu T, Naruse H, Shigeta Y, Takashima R, Maekawa T, Dang H T, Dinh T C, Nguyen P D, Nguyen H H, Tanaka G and Sone M. 2014. Lower Triassic mixed carbonate and siliciclastic setting with Smithian—Spathian anoxic to dysoxic facies, An Chau basin, northeastern Vietnam. *Sedimentary Geology*, 300: 28~48.
- Li Xianghui. 2008. Mixing of siliciclastic—carbonate sediments within systems tracts of depositional sequences and its controlling factors. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 395~404.
- Liang Wei, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Wang Ruihua, Ge Xiangying, Xu Penghui, Zheng Binsong, Tan Zhiyuan. 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): 881~896.
- Longhitano S G. 2011. The record of tidal cycles in mixed silici-bioclastic deposits: examples from small Plio-Pleistocene peripheral basins of the microtidal Central Mediterranean Sea. *Sedimentology*, 58(3): 691~719.
- Luo Shunshu, Liu Kuiyuan, He Youbin, Gao Zhenzhong and Dan Weidong. 2004. Study on sedimentary facies of Jialingjiang Formation of Early Triassic at Changyuanba structure. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 26(4): 19~21.
- Madden R H C and Wilson M E J. 2012. Diagenesis of Neogene delta-front patch reefs: alteration of coastal, siliciclastic-influenced carbonates from humid equatorial regions. *Journal of Sedimentary Research*, 82(11~12): 871~888.
- Mata S A and 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(1~4): 158~178.
- Mei Minxiang, Xu Debin and Zhou Hongrui. 2000. Genetic types of meter-scale cyclic sequence and their fabric features of facies-succession. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 43~49.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. *Geology*, 12(7): 432~435.
- Mount J F. 1985. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification. *Sedimentology*, 32(3): 435~442.
- Myrow P M, Tice L, Archuleta B, Clark B, Taylor J F and Ripperdan R L. 2004. Flat-pebble conglomerate: its multiple origins and relationship to metre-scale depositional cycles. *Sedimentology*, 51 (5): 973~996.
- Navarrete R, Rodriguez-Lopez J P, Liesa C L, Soria A R and Veloso F D M L. 2013. Changing physiography of rift basins as a control on the evolution of mixed siliciclastic—carbonate back-barrier systems (Barremian Iberian Basin, Spain). *Sedimentary Geology*, 289: 40~61.
- Palermo D, Aigner T, Geluk M, Poepfelreiter M and Pipping K. 2008. Reservoir potential of a lacustrine mixed carbonate/siliciclastic gas reservoir: The Lower Triassic Rogenstein in the Netherlands. *Journal of Petroleum Geology*, 31(1): 61~95.
- Sanders D and Pons J. 1999. Rudist formations in mixed siliciclastic—carbonate depositional environments, Upper Cretaceous, Austria: stratigraphy, sedimentology, and models of development. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 148(4): 249~284.
- Sha Qing, an. 2001. Discussion on mixing deposit and hunji rock. *Journal of Palaeogeography*, 3(3): 63~66.
- Song Zhangqiang, Chen Yanfang, Du Xiaofeng, Wang Qinbin and Wang Xuelian. 2013. Study on sedimentary characteristics and reservoir of second member of Shahejie Formation, a structural area, Bohai Sea. *Offshore Oil*, 33(4): 13~18.
- Tcherepanov E N, Droxler A W, Lapointe P, Mohn K and Larsen O A. 2010. Siliciclastic influx and burial of the Cenozoic carbonate system in the Gulf of Papua. *Marine and Petroleum Geology*, 27(2): 533~554.
- Teng Jianbin. 2012. Classification and guiding significance based on primary micro-factors of lower-permeability reservoir—case study on lower Sha3 reservoir in LinNan Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 19(5): 6~9.
- Vigorito M, Murru M and Simone L. 2006. Architectural patterns in a multistorey mixed carbonate—siliciclastic submarine channel, Porto Torres Basin, Miocene, Sardinia, Italy. *Sedimentary Geology*, 186 (3~4): 213~236.
- Wang Cheng, Shao Hongmei, Hong Shuxin, Guan Yanhua, Teng Hongda, Jia Pengtao and Xue Yunfei. 2007. The lower limits of

- physical properties for deep clastic reservoirs in north Songliao basin and its relationship with microscopic features. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 26(5): 18~20.
- Wang Guanmin. 2012&. Laminae combination and genetic classification of Eocene shale in Jiyang Depression. *Journal of Jilin University. Earth Science Edition*, 42(3): 666~671.
- Wang Gunmin, Liao Qianyu and Gao Liang. 2009&. Sedimentary Characteristics of Mixed Snail-shell Beach of Es1 Formation in the West of Gubei Sag. *China University of Petroleum*, 31(4): 28~31.
- Wang Guozhong, Lv Binqun and Quan Songqing. 1987&. Mixed sedimentation of recent carbonates and terrigenous clastics—example of the coral reef of the Weizhou Island. *Oil and Gas Geology*, 8(1): 17~27.
- Wang Gunmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua, Ma Zaiping and Jiang Zaixing. 2005&. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang Depression. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 834~838.
- Wang Jieqiong, Liu Bo, Luo Ping, Shi Kaibo, Zhang Xuefeng, Liu Jianqiang and Wang Yang. 2014&. Classification and genesis of Sinian mixed-sedimentite from northwest margin of Tarim Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology. Science & Technology Edition*, 41(3): 339~346.
- Wang Jinyou, Zhang Liqing, Zhang shiqi, Lin huixi. 2013&. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine mixed rocks of the second Member of the Eocene Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression; taking Luojia—Shaojia Area for an example. *Geological Review*, 59(6): 1085~1096.
- Xu Wei, Chen Kaiyuan, Cao Zhenglin, Xue Jianqin, Xiao Peng and Wang Wentao. 2014&. Original mechanism of mixed sediments in the saline lacustrine basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1804~1816.
- Xue Jingjing, Sun Jin, Zhu Xiaomin, Liu Wei and Zhu Shifa. 2012&. Characteristics and formation mechanism for dolomite reservoir of Permian Fengcheng Formation in Junggar Basin. *Geoscience*, 26(4): 755~761.
- Yang Chaoping and Sha Qing, an. 1990&. Sedimentary environment of the middle Devonian, Qujing Formation, Qujing, Yunnan province: a kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(2): 59~66.
- Yang Wan and Kominz M A. 2003. Characteristics, stratigraphic architecture, and time framework of multi-order mixed siliciclastic and carbonate depositional sequences, outcropping Cisco Group (Late Pennsylvanian and Early Permian), Eastern Shelf, north—central Texas, USA. *Sedimentary Geology*, 154(3): 53~87.
- Yilmaz I O and Altiner D. 2007. Cyclostratigraphy and sequence boundaries of inner platform mixed carbonate—siliciclastic successions (Barremian—Aptian) (Zonguldak, NW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(2): 253~270.
- Yose L A and Heller P L. 1989. Sea-level control of mixed carbonate—siliciclastic, gravity-flow deposition: Lower part of the Keeler Canyon Formation (Pennsylvanian), southeastern California. *Geological Society of America Bulletin*, 101(3): 427~439.
- Zecchin M and Caffau M. 2011. Key features of mixed carbonate—siliciclastic shallow-marine systems; the case of the Capo Colonna terrace (southern Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 130(3): 370~379.
- Zhang Jinliang and Si Xueqiang. 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): 731~737.
- Zhang Ningsheng, Ren Xiaojun, Wei Jinxing, Kang Youxin and Zhang Cunhou. 2006&. Rock types of mixed-sedimentite reservoirs and oil—gas distribution in Nanyishan of Qaidam Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 42~46.
- Zhang Xionghua. 1990&. Classification and origin of mixed-sedimentite. *Geological Science and Technology Information*, 19(4): 31~34.
- Zhuo Xizhun, Wang Qi, Zhang Rui and Li Juan. 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.

Discussion for Classification—designation System of Mixed Siliciclastic —Carbonate Sediments and the Implication for Their Reservoir Prediction —A Case Study of Mixed Sediments from Bohai Sea Area

YE Maosong¹⁾, XIE Xinong¹⁾, XU Changgui²⁾, DU Xiaofeng²⁾, SONG Zhangqiang²⁾, DU Xuebin¹⁾

1) Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education,
China University of Geosciences, Wuhan, 430074;

2) Exploration and Development of Research Institute of Bohai Oil Field, Tianjin Branch, CNOOC Ltd, Tanggu, Tianjin, 300452

Abstract: Mixed siliciclastic—carbonate sediment is quite a common and significant type of petrological association. However, there are enormous controversies that have a long period in the classification and designation of mixed sediments and a standard devoted to petrological classification and naming rule has not been produced. Combined with relevant literatures as well as the latest achievements including component identification of thin section and petrophysics analysis of reservoir in Bohai Sea area, this paper establishes a new classification system of

mixed sediments whose endpoints consist of terrigenous grains, biogenic carbonate particles and chemical carbonate respectively and the classified results of the mixed sediments are grouped into 4 main categories and 14 subcategories. Furthermore, we renew the concept of mixed sediments through the discussion that contain alternated strata of mixtures and define of the textural content.

By means of the new petrological classification, it may offer the instruction for the study of reservoir assessment. Taking BoHai Sea area as example, the corresponding relation between the different reservoir properties and lithofacies has been established. We are likely to identify different types of reservoir including poor, moderate and excellent grade in this new classified system.

Keywords: mixed siliciclastic—carbonate sediments; petrological classification; naming rule; mixed bed series; lower limiting value of terrigenous grains; lithofacies; reservoir properties

Acknowledgements: This study was supported by the National Scientific Foundation of China (Grant No. 41772111). We appreciate the constructive suggestion and support from Li Jianping, Huang Xiaobo and Wang Qingbin who come from Tianjin branch, CNOOC Ltd.

First author: YE Maosong, born in 1988. Ph. D candidate. Mainly working on the study of sedimentology and petroleum geology. Address: No.388, Lumo road, Hongshan District, Wuhan, 430074. Email: yeyegood3344@163.com

Corresponding author: XIE Xinong, born in 1963. Professor. Mainly working on basin analysis, petroleum geological study and marine geological study. Address: No. 388, Lumo road, Hongshan District, Wuhan, 430074. Email: xnxie@cug.edu.cn

Manuscript received on: 2018-03-25; Accepted on: 2018-06-07; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.006