

文章编号: 1009-3850(2010)01-0040-04

鲍玛序列的多解性

冉波¹, 王成善², 李祥辉³

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059; 2. 中国地质大学(北京)青藏高原研究中心, 北京 10083; 3. 南京大学地球科学系, 南京江苏 210093)

摘要: 鲍玛序列作为浊积岩的识别标志被广泛认可, 但随着对深水沉积过程认识的深入, 鲍玛序列逐渐被重新认识。近年来对深水沉积物重力流的研究发现: 鲍玛序列不是浊流的唯一产物, 深水环境中其它沉积过程也可形成鲍玛序列。因此, 在野外识别浊积岩的过程中, 要慎重使用鲍玛序列进行判别。

关键词: 鲍玛序列; 深水沉积; 浊流

中图分类号: P512.2 文献标识码: A

自 1950 年 Kuener 首次提出粒序层理以来, 地质界对深海沉积的研究就进入了一个全新的时期。1962 年, Bouma 通过对法国南部的 Maritime Alps 的 1061 个层位的研究, 建立了浊流沉积的标准沉积构造层序, 并总结出一次浊流事件沉积的垂向结构构造特征, 即鲍玛序列。后来, 鲍玛序列逐渐为大多数学者所认同并即作为鉴别经典浊积岩的标准层序。Sharmugan^[1] 等沉积学家对浊积岩和深水沉积物重力流进行更为精细的研究后认为, 鲍玛序列与浊积岩并不相匹配, 国内学者在对深水牵引流的研究中也发现了鲍玛序列的多解性^[4]。因此, 有必要从成因机制上重新审视鲍玛序列各段的成因, 进而推动深水沉积研究的发展。

1 鲍玛序列多解性疑问

Bouma 发现浊流沉积形成的浊积岩具有独特的层序, 即鲍玛序列。一个鲍玛序列是一次浊流事件的记录, Middleton 等^[3] 对鲍玛序列的沉积动力学进行了详细的解释。一个完整的鲍玛序列分为五段, 自下而上为: Ta 为块状递变段, Tb 为平坦的平

行纹层段, Tc 为波纹、波状或包卷层理段, Td 为平行纹层段, Te 为页岩或泥岩段。

随着研究的深入, 沉积学界就鲍玛序列各段的成因出现了不同的看法。Tc 段除浊流沉积外, 还被解释为砂质碎屑流沉积、颗粒流沉积等重力流沉积^[2, 4~7]; Tb、Tc、Td 段除浊流沉积外, 还被解释为深海底流沉积及底负荷的牵引产物等, 显示出下部沉积物重力流沉积与上部牵引流沉积的组合特征。对于鲍玛序列的 Te 段, Stow^[8] 提出的垂向相模式有九段 (T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8); 对于 Ta 段 (如高密度浊流沉积物), Lowe^[4] 引入的垂向相模式有六段 (R1, R2, R3, S1, S2, S3)。面对鲍玛序列这么多的解释, 需要对鲍玛序列的各段进行更详细的研究和解释。

2 鲍玛序列的多解性

2.1 Ta 层 (块状层或递变层理段)

Ta 层的其成因机制主要有以下解释: (1) 基于 Kuener 的层理递变原理, Bouma 在大量野外证据的基础上认为 Ta 层是块状层理或者递变层理, 但是

收稿日期: 2009-03-15 改回日期: 2010-02-07

作者简介: 冉波 (1980-), 男, 讲师

资助项目: 成都理工大学高层次人才科研项目 (HL0054)

Sharmugam对 Bouma最初研究的原始露头重新进行了更为精细的研究后发现,在绝大部分 T_c 层中发现了漂砾,这种漂砾的突然出现是砂质碎屑流的产物^[9],当然还有些露头具有很好的没有漂砾的正序层理,这种沉积构造符合浊积岩的标准^[10-11]; (2) Allen^[12]通过实验发现浊流中形成的逆行沙丘,但是直到现在都没有野外露头支持; (3) Stauffer^[4]认为 T_c 层是颗粒流的产物,但在其研究过程中忽略了浊流的原始定义^[17],其研究过程中沉积物重力流分类不是通过流体的流变学来区分,仅从颗粒的分布来进行研究; (4) Lowe^[5]则认为颗粒流是塑性流的表现,因此认定 T_a 层不是鲍玛序列的一部分, T_c 层是高密度浊流的沉积物,上覆的 T_b T_c T_d 层是低密度浊流的沉积;但这些研究的基础是高密度浊流,所以其本身就是不准确的^[10-11, 13-15],在流体流变中高密度浊流被认为是塑性流体^[9],且该研究是在高密度浊流中进行的; (5) Middleton^[7]认为 T_a 层能够从高密度浊流中产生,并且深水层序的块状砂岩被认为是高密度浊流的沉积物^[4, 15, 16],同时 Middleton^[3]还认为如果 T_a 层是块状,那么 T_c 层则不是浊流的沉积产物,可能有自己的转换来源,包括颗粒流、液化流和碎屑流。Mutt和 Nilsen认为 T_a 层中的漂砾是浊流中密度较大的部分冷却碎屑沉积,但冷却块状沉积是塑性流体的特点, Sharmugam将这些漂砾归因于砂质碎屑流^[9]。

因此,实际的鲍玛序列 T_a 层可能是浊流,也可能是砂质碎屑流。区别这两种作用源应综合野外露头的沉积构造、沉积物支撑机制、沉积机制及流体流变学等因素,才有可能区别 T_c 层是砂质碎屑流还是浊流沉积。

2.2 T_b T_c 和 T_d 层的底层流改造

沙纹层理 (T_c)和平行纹层 (T_b 和 T_d)的产生机制是解释深水砂时一个常见问题。Walker将这些沙纹层理划分为薄层浊积岩时,没有仔细考虑其成因(浊流还是底流?)。真正的浊流中,沉积物颗粒受到湍流的紊流支撑,这种悬浮沉积且只能在牛顿流中产生,只要沉积物沉降后不再继续搬运,沉积产物应该呈正递变^[10-11]。如果沉积物继续以床沙载荷进行搬运,不仅会失去特有的正递变粒序特征,还会发育新的(等深流或者底层流再改造)与浊流无关的波状纹层^[13-17]。在这种情况下,很难从沉积记录中发现是否平行纹层理或沙纹层理中的砂原来是通过浊流的悬浮载荷搬运的,还是底流的床沙载荷作用。底层流是深海里与浊流不相关的流体,底层

流的沉积以牵引构造为特征^[17]。Natland^[18]从浊积岩中区别了牵引构造的沉积物。Bouma^[19]也注意到浊流中发育的牵引流沉积单元(T_b T_c T_d 段)与浊流的最初定义是不一致的。Allen^[20]通过研究认为 T_d 和 T_c 段是在一个悬浮水流太微弱而不能产生牵引的环境下的沉积。所以,从 T_b T_c T_d 段的沉积特征上唯一能得出的结论是组成这些单元的颗粒在沉积前或搬运的最后阶段是被底层流搬运的。

可以看出,鲍玛序列的多解认识是研究者对于深水沉积物重力流理解的不同造成的。

3 流体流变学

深水中主要的沉积物重力流包括滑动、滑塌、碎屑流和浊流^[21],另外非重力沉积的底层流(等深流)在对深水沉积物的改造中也有重要作用。沉积物重力流主要是通过沉积物浓度、沉积支撑机制、流体状态、流变学四个参数进行综合分类。但除流变学以外的三个参数均是随着时空而转变的,因此通过流变学来对沉积物重力流进行分类是最直接、最没有争议的分类^[22],这是深水沉积物重力流的基础^[10-11, 22],对于理解深海中沉积物的运输和鲍玛序列本质相当重要。针对这些深水沉积物重力流,沉积学家对其进行过很多分类,综合这些分类方案,作者认为基于流变学原理把深水沉积物重力流分为牛顿流和塑性流两个大类比较合理^{[10] [23]}。

3.1 牛顿流

流体流变是流体中是否存在剪切力及剪切力大小的表述。牛顿流会随着剪切力的存在呈线形变化;当自然界流体的雷诺数(Re)大于2000时,就开始产生完全的紊流。深水环境中浊流的牛顿流变已被众多学者研究^[4, 9, 23, 24]。最初Lowe(1979)和Nardi等(1979)将沉积物重力流分为块体流和流体流,把浊流划入流体流。这种分类很混乱,因为浊流本身就是属于沉积物重力流中的一种^{[1, 10, 11, 23, 24] [37]}。这种划分造成了主次的混乱,而将浊流划入牛顿流体能消除这一混乱^[1, 10]。

3.2 塑性流(或宾汉流体)

和牛顿流相比,一些天然存在的物质在一定的应力范围内不会变形,一旦超过这一应力范围,其变形是随线形变化的,这种流体被称为宾汉流体。宾汉流体具有塑性流变特征,也可称为塑性流体。

3.3 紊流

区别牛顿流和塑性流的一个重要特征是紊流^[2],其是牛顿流的特征, Middleton^[25]认为“浊流

是沉积物重力流的一种,其中沉积物悬浮于紊乱的流体中。如果流体为层流或不紊乱,那么这个流体就不能看作是浊流”。因此,浊流是一种有牛顿流和紊乱状态的沉积物重力流,其沉积物为悬浮沉积^[10, 11, 25]。对宾汉流体而言,紊乱的定义由雷诺数 R 和宾汉数 B 来衡量的,虽然一些碎屑流能产生紊乱^[26],但是这些现象并不典型。大多数的碎屑流都是层流^[2, 15, 16]或者牵引流^[27]。在 Johnson^[28] 针对碎屑流提出的宾汉塑性流变模式中,其流变量虽然是一个复杂的参数很难算精确计算,但对于将浊流从其它沉积物重力流中区分开来却很有用。因此,碎屑流是一种有塑性流变和分层流动状态的沉积物重力流,其沉积物通过冷凝作用沉淀。

综合上述,深水环境不仅存在沉积物重力流,还发育等深流、碎屑流、及风暴、海啸等作用引起的底层流^[29]。各种深水沉积均可部分改造早期的重力流沉积形成鲍玛序列或者类似鲍玛序列的沉积组合^[3, 17, 29, 30]。

4 结 论

(1) 鲍玛序列不仅仅是浊流沉积,还可能是其它沉积物重力流及牵引流的沉积产物。

(2) 不能仅仅从沉积构造上简单理解鲍玛序列,必须了解沉积物重力流的流变学,才能更好地理解深水沉积物重力流和鲍玛序列的沉积本质。

(3) 在对深水砂的野外露头进行研究的时候,要对露头进行精细描述,尤其是要区别鲍玛序列与类似鲍玛序列的不同特征。

参考文献:

- [1] SHANMUGAM G. The Bouma Sequence and the turbidite mindset [J]. *Earth Science Reviews* 1997, 42(4): 201—229
- [2] 张兴阳, 罗顺社, 何幼斌. 沉积物重力流—深水牵引流沉积组合—鲍玛序列多解性探讨 [J]. *江汉石油学院学报*, 2001, 23(1): 1—5.
- [3] MIDDLETON G V., HAMPTON M A. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows [A]. D J Stanley, D J P Swift. *Marine Sediment Transport and Environmental Management* [C]. New York: Wiley, 1976. 197—218.
- [4] LOWE D R. Sediment gravity flows II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity current [J]. *Journal of Sedimentary Petrology* 1982, 52(1): 279—297
- [5] WALKER R G. Turbidite sedimentary structures and their relationships to proximal and distal environments [J]. *Journal of*

- Sedimentary Petrology* 1967, 37(1): 25—43
- [6] STAUFFER P H. Grain flow deposits and their implications Santa Ynez Mountains, California [J]. *Journal of Sedimentary Petrology* 1967, 37(2): 487—508
- [7] MIDDLETON G V. Experiments on density and turbidity currents. III. Deposition of sediment [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences* 1967, 4: 475—505
- [8] SLOW D A V., SHANMUGAM G. Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments [J]. *Sedimentary Geology* 1980, 25(1—2): 23—42
- [9] SHANMUGAM G., SPALDING T D., ROFHEART D H. Deep-marine bottom-current reworked sand (Pliocene and Pleistocene, Ewing Bank 826 Field, Gulf of Mexico) [A]. R D Wynn, J M Amentout. *Turbidites and Associated Deepwater Facies* [C]. Tulsa: SEIM Special Publications, 1995, 20: 25—54.
- [10] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite Paradigm (1950s—1990s): deepwater processes and facies models— a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology* 2000, 17(2): 285—342
- [11] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths [J]. *Earth Science Reviews* 2002, 58(3—4): 311—341.
- [12] ALLEN J R L. The Bouma division A and the possible duration of turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Petrology* 1991, 61(2): 291—295
- [13] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents are they sandy debris flows [J]? *Journal of Sedimentary Research* 1996, 66(1): 2—10
- [14] HALLWORTH M A., HUPPERT H E. Abrupt transitions in high-concentration particle-driven gravity currents [J]. *Physics of Fluids* 1998, 10: 1083—1087
- [15] PICKERING K T., HISCOTT R N., HEN F J. Deep-Marine Environments. *Loudon, Unwin Hyman*, 1989.
- [16] MUTTI F., RICCI LUCCHI F. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis [J]. *International Geology Review* 1972, 20: 125—166
- [17] SHANMUGAM G., SPALDING T D., ROFHEART D H. Traction structures in deep-marine bottom-current reworked sands in the Pliocene and Pleistocene, Gulf of Mexico [J]. *Geology* 1993, 21(10): 929—932
- [18] NATLAND M L., KUENEN P H. Sedimentary history of the Ventura Basin, California and the action of turbidity currents [A]. J L Howell. *Turbidity currents and the transportation of coarse sediments to deep water* [C]. Tulsa: SEIM Special Publications, 1967, 2: 76—107.
- [19] BOUMA A H., DEVRES M B., SIONÈ C G. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma: discussion [J]. *AAGU Bulletin* 1997, 81(3): 470—472
- [20] ALLEN J R L. *Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis* [M]. New York: Elsevier, 1982
- [21] SHANMUGAM G., ZMIRLIK-GRANT. Sandy slump and sandy

- debris flow facies in the Pliocene and Pleistocene of the Gulf of Mexico: implications for submarine fan models [J]. AAPG Bulletin 1996, 80(8): 1335—1336.
- [22] GANI R. From turbid to lucid: A straightforward approach to sediment gravity flows and their deposits [J]. The Sedimentary Record 2004, 3(1): 4—8.
- [23] DOTT JR R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes [J]. AAPG Bulletin 1963, 47: 104—128.
- [24] LOWE D R. Sediment gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits [A]. L J Doyle, O H Pilkey. Geology of Continental Slopes [C]. Tulsa: SEIM Special Publications 1979, 27: 75—82.
- [25] SANDERS J E. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms [A]. G V Middleton. Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation [C]. Tulsa: SEIM Special Publications 1965, 12: 192—219.
- [26] ENOS P. Flow regimes in debris flow [J]. Sedimentology 1977, 24: 133—142.
- [27] GAO ZHENZHONG ERKSSON K Å HE YOUBN et al. Deep-Water Traction Current Deposits—A Study of Internal Tides, Internal Waves, Contour Currents and Their Deposits [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [28] JOHNSON A M. Physical Processes in Geology [J]. Freeman 1970, 577.
- [29] SHANMUGAM G SPALDING T D ROFHEART D H. Process sedimentology and reservoir quality of deep marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): An example from the Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin 1993, 77(7): 1241—1259.
- [30] STANLEY D J. Model for turbidite-to contourite continuum and multiple process transport in deep marine settings: examples in the rock record [J]. Sedimentary Geology 1993, (82): 241—255.

New knowledge of the Bouma sequences

RAN Bo, WANG Cheng-shan, LIXiang-hui

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Center for the Qinghai-Xizang Plateau Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Faculty of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract The Bouma sequences have long been selected as the criteria for the recognition of classical turbidite sequences. The improvement of the research of the turbidites and deep-water gravity flow deposits in recent years has disclosed that the Bouma sequences are created not only by turbidity currents but also by other depositional processes such as the sediment gravity flows and tractional currents in the deep-water environments. Therefore, caution should be exercised in the application of the Bouma sequences as an indicator for the recognition of turbidites in the field.

Key words Bouma sequence; deep-water deposit; turbidity current