

弗吉尼亚州芬卡苏地区中奥陶统 重力流及其伴生沉积

高振中

(江汉石油学院地质系, 湖北沙市 434102)

K. A. Eriksson

(美国弗吉尼亚州立大学地质系)

周家尧

(石油工业出版社, 北京 100724)

过去视为浅水沉积的“芬卡苏砾岩”, 实为深水海底水道中的重力流及其伴生沉积。识别出5种重力流沉积相: (1) 含砾泥岩相, (2) 富基质砾岩相, (3) 贫基质砾岩相, (4) 块状砂岩相, (5) 递变砂岩相。其中(1)和(2)为碎屑流沉积, (3)和(4)属颗粒流沉积, (5)为浊积岩, 包括高密度和低密度浊流沉积。与其伴生的相有: (6) 暗色泥质岩相: 悬浮沉积, (7) 扭曲层相: 滑塌沉积, (8) 双向交错纹理砂岩相: 内潮汐沉积, (9) 单向交错层-交错纹理砂岩相: 叠加有内波作用的内潮汐沉积。上述九种相构成了5个有规律的组合, 反映海平面持续上升, 物源区不断远离沉积区的过程。

关键词 重力流 海底水道 沉积相 相组合 奥陶纪 弗吉尼亚

第一作者简介 高振中 男 56岁 教授 沉积学

美国弗吉尼亚州芬卡苏(Fincastle)地区的中奥陶纪贝斯组(Bays Formation)中发育一套以砾岩为主的粗碎屑沉积, 前人曾解释为近岸浅水沉积^[1]。笔者最近通过详细的剖面实测(比例尺为1/50)和横向观察, 发现与粗碎屑岩共生的泥质岩具深水沉积特征, 粗碎屑沉积本身显示各种重力流沉积层序, 尤其是鲍马序列相当典型。伴生沉积中有特征的滑塌沉积, 且存在由深水内波和内潮汐作用形成的沉积。通过研究鉴别出了5种重力流沉积和4种伴生相。本文将在介绍地质背景的基础上, 着重描述各相的特征并进行成因解释, 最后讨论相组合、相层序及其控制因素。

一、地质背景

研究区位于弗吉尼亚州罗阿诺克(Roanoke)之北的芬卡苏地区(图1), 属阿巴拉契亚山脉中南段的谷岭地区(Valley and Ridge province)。在中奥陶世, 该区的大地构造性质属前陆盆地^[2,3]。根据薄片资料所作的砂岩成分三角图表明, 该地中奥陶统贝斯组的砂岩均属再旋回的

石英质砂岩 (图 2), 也显示前陆盆地的特征。

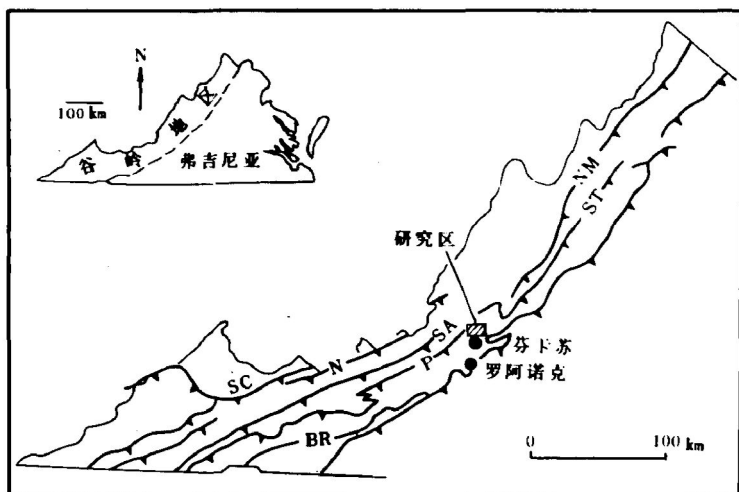


图1 研究区位置图 (图中字母为断层代号)

贝斯组属中奥陶统上部, 为深水环境沉积的暗色陆源碎屑岩系。在大部分地方, 贝斯组由页岩、砂岩和粉砂岩组成; 但局部地带粗碎屑岩集中, 以重力流成因的砾岩和杂砂岩为主, 夹少量页岩和粉砂岩。这套以砾岩为主的沉积叫做“芬卡苏砾岩”。砾岩及杂砂岩在剖面上呈透镜状 (图 3A); 在平面上呈 NW-SE 向的带状延伸, 这从粗碎屑岩 (砾岩+砂岩) 等厚图 (图 3B) 上可以清楚看出。这些特征说明芬卡苏砾岩是海

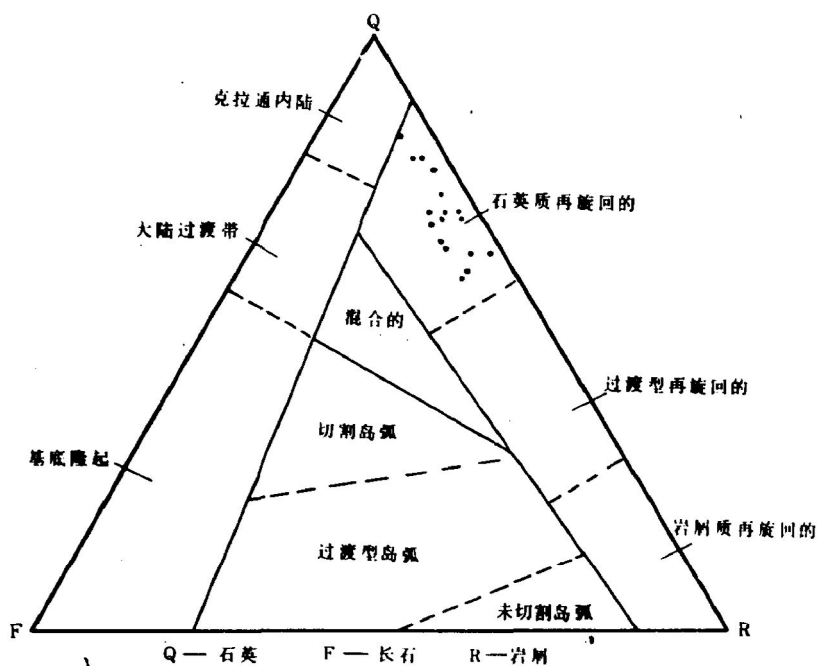


图2 中奥陶统贝斯组砂岩成分三角图

底水道充填沉积, 水道的方向为 NW-SE 向。浊积岩的槽模及鲍马序列 C 段沙纹层理指示的古流向为 NW 向 (见后述), 说明在中奥陶世晚期研究区位于该前陆盆地的东南斜坡带。

实测剖面位于芬卡苏市狄克森建筑公司的采石场, 露头良好。该地的芬卡苏砾岩可分为 5 个岩性段 (图 4)。第 I—III 段以粗屑重力流沉积为主, 显示向上变细的特征; 第 IV 段为细粒的内潮汐沉积; 第 V 段为滑塌沉积。

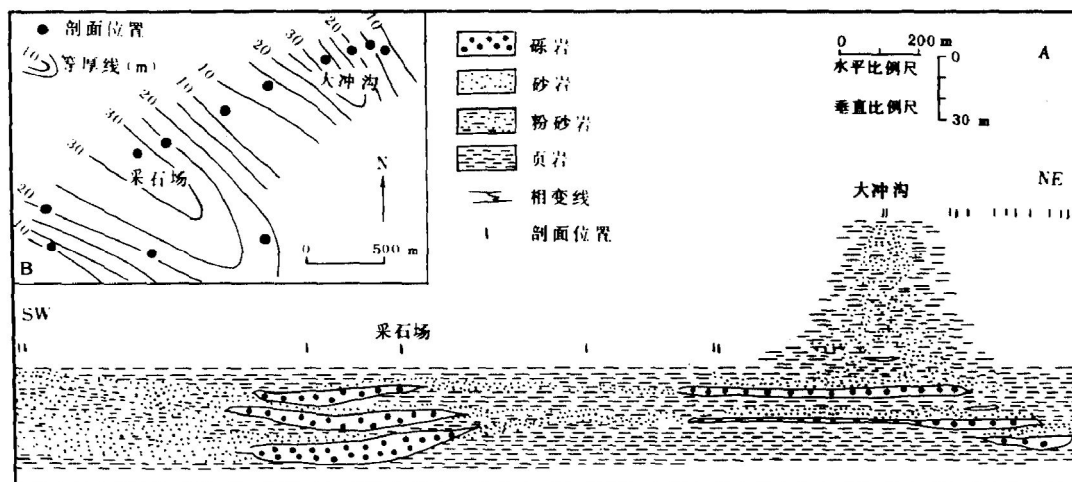


图3 芬卡苏砾岩的水道充填沉积特征

(A) 岩性横剖面图; (B) 粗碎屑岩等厚图

(据 Karpa, 1974 资料修改和编绘)

二、重力流沉积相

(一) 含砾泥岩相 (相1)

深灰色含砾泥岩, 砾石含量 10%—25%, 大致均匀地散布于基质中。砾径以 1—5 cm 为主, 多为次圆形, 主要由灰岩及砂岩砾石组成, 二者含量接近。基质以含粉砂质泥为主, 并随机分布有砂级颗粒及砂质不规则块体。岩石不显层理, 底面多起伏不平, 常侵蚀下伏砂岩及页岩, 含砾泥岩单层厚 0.3—1.1 m。

砾石与泥这种水力学特性截然不同的混合堆积, 显然为再沉积作用的产物。属于典型的基质支撑的碎屑流沉积^[4]。基质中不规则砂质块体的存在, 说明未经充分混合, 其搬运距离不远。其底界起伏及切割下伏层, 说明具有一定的侵蚀能力, 可能坡度较大。

(二) 富基质砾岩相 (相2)

这是水道沉积中一种非常重要的相类型。这种砾岩以富含泥砂基质为特征。基质含量变化在 25% 至 55% 之间。按照支撑性质, 又可分为两个亚相: 基质支撑砾岩亚相和碎屑支撑砾岩亚相。两亚相间呈连续过渡, 无截然界线。

1. 基质支撑砾岩亚相 (亚相 2A)

深灰色块状复成分砾岩, 以典型的杂基支撑为特征 (图版 I-1)。杂基含量一般大于 35%, 最高可达 55%, 由砂、粉砂及泥质 (已绢云母化) 组成, 可见少量三叶虫及腕足类碎屑。陆源砾石含量为 35%—45%, 平均粒径变化于 2.5—5.5 cm 之间, 最大砾径 15 cm。砾石圆-次圆形, 分选差。主要由砂岩、灰岩砾石组成, 含脉石英及变质岩砾石。内源砾石含量一般小于 10%, 主要为巨大深灰色页岩碎块 (大者可超过 1 m), 次为砂岩碎块, 并见有具完整鲍马序列的砂岩块体 (30 cm×80 cm, 图 4 第 I 段下部素描)。内源碎屑多呈棱角状, 并常见弯曲

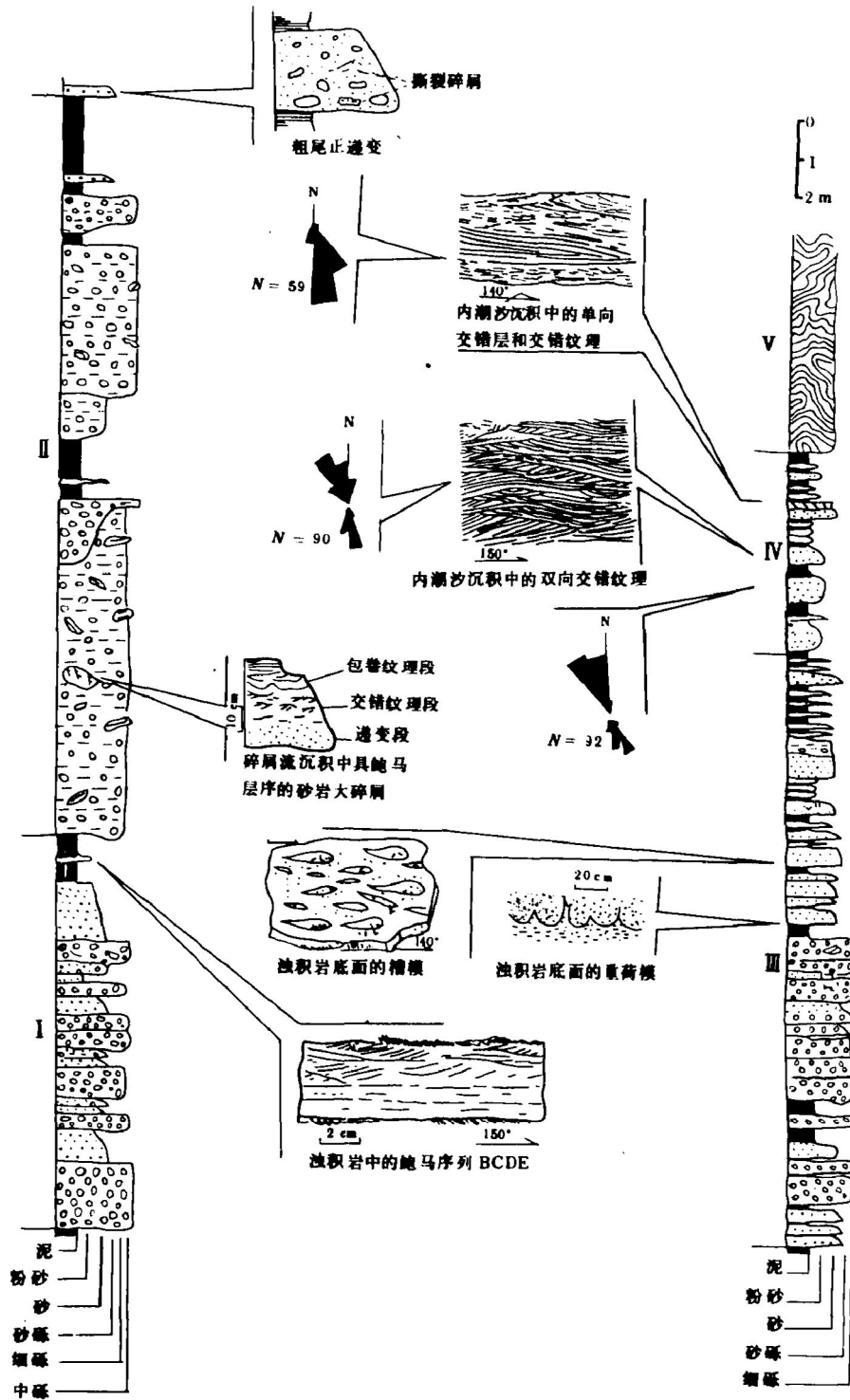


图4 芬卡苏砾岩柱状剖面图

变形。该相砾岩呈块状外貌(图版 I-1), 无层理, 单层厚度大, 可达 6.5 m。呈透镜状延伸, 常切割下伏层, 下切深度可达 3.3 m。

2. 碎屑支撑砾岩亚相(亚相 2B)

深灰色块状复成分砾岩。平均粒径 2—9 cm, 最大粒径 25 cm, 次棱角-次圆形, 分选差。以陆源砾石为主, 偶见巨大的内源页岩碎块(达 90 cm)。陆源砾石主要由灰岩、砂岩、石英岩及脉石英组成。碎屑支撑, 基质含量 25%—35%, 由砂、粉砂及粘土组成, 粘土含量约占 2/5, 但大部分粘土已为方解石交代。岩石呈块状(图版 I-2), 无层理, 无递变, 常切割下伏层, 有的则明显的水道状产出。单层厚 0.3—1.6 m。

亚相 2A 为典型的杂基支撑砾岩, 含巨大的内源页岩及砂岩块体, 块状无层理, 无递变及其它沉积构造, 夹于深水页岩之中, 显然属碎屑流沉积。亚相 2B 与 2A 的不同之处仅在于基质含量略少, 为碎屑支撑; 但基质含量仍达 25%—35%, 且富含粘土基质。可以设想, 在其沉积时的含水状态下, 可能仍为基质支撑。其特征又与亚相 2A 相似, 二者连续过渡, 故仍应为碎屑流沉积的产物。此外, 亚相 2B 的砾岩砾径较大, 且含巨大的内源碎屑块体, 基质支撑以外的其它支撑机制很难有此能力。

这种富基质砾岩相普遍具水道充填形态(图 3A), 其砾径又较大, 显然应为深水斜坡环境的产物。而砾岩中包含具鲍马序列之内源砂岩碎屑, 说明其沉积环境应为斜坡之下部, 否则无机会侵蚀这些先成浊积岩, 并使其加入碎屑流之中。

(三) 贫基质砾岩相(相 3)

深灰色块状砾岩。平均砾径 0.8—1.5 cm, 最大粒径 5 cm, 次圆-圆形, 分选中等。砾石含量均在 75% 以上, 以陆源砾石为主, 但层的上部可含内源页岩撕裂碎屑。砾石成分包括脉石英、燧石、灰岩、砂岩、泥质岩及火山岩。基质含量小于 25%, 其特征是贫泥质, 而以砂质及粉砂质为主(图版 I-3), 并含铁质及方解石。如果方解石主要为交代泥质的产物, 那么泥质的原始含量亦小于 8%。这种砾岩多成层不规则, 单层厚 0.2—0.4 m, 较厚的砾岩中均夹有透镜状页岩, 故可能为并层的产物。

这种砾岩单层较薄, 砾径较小, 以缺乏泥基质为特征, 故在其搬运沉积过程中, 可能主要不是基质强度支撑, 而是靠颗粒碰撞产生的分散压力支撑, 或者分散压力与基质联合支撑, 故应为颗粒流^[5]或次颗粒流^[6]沉积。

(四) 块状砂岩相(相 4)

灰色块状岩屑砂岩或含砾岩屑砂岩。无层理, 一般无递变, 但底部可见逆递变。以细粒至极粗粒砂为主, 部分层含砾(直径 1 cm 左右)可达 25%。砾石及撕裂碎屑常见于层的上部。颗粒次圆-次棱角状, 分选中-差, 颗粒填集紧密, 线接触及点接触并存。填隙物甚少, 一般小于 10%, 且缺乏粘土基质, 填隙物多为次生黄铁矿(多已氧化为赤铁矿)、绿泥石及少量粉砂。单层厚一般 0.25—0.6 m, 成层不规则。

无递变, 特别是无正递变, 并缺乏泥基质, 排除了其为浊流沉积的可能性, 也不可能为砂级碎屑流。底部逆递变的存在, 粒度较细, 以及基质缺乏, 表明其可能为靠分散压力支撑的颗粒流沉积。当然也不能完全排除超孔隙压力支撑的可能性, 但没有发现泄水构造。

(五) 递变砂岩相(相 5)

该相以发育正递变为特征, 岩性为岩屑杂砂岩, 富含变质岩屑(图版 I-2), 泥质含量较丰, 从 15% 至 45% 不等。按其层序特征, 又可分为两个亚相: 单一递变砂岩亚相和鲍马层序

砂岩亚相。

1. 单一递变砂岩亚相 (亚相 5A)

该亚相具有块状外貌, 仅发育正递变或粗尾正递变 (图4第Ⅱ段上部素描图), 单层厚0.2—1.4 m, 一般底部为含砾的极粗砂或粗砂, 向上砾石减少。颗粒变细、泥质增多, 顶部常变为极细粒杂砂岩, 上与页岩渐变过渡, 无截然界线。下部常含页岩撕裂碎屑 (图版Ⅰ-3), 底面平整或略有起伏, 见槽模及重荷模 (图4第Ⅲ段素描图)。槽模所指示的古流向为 $320^{\circ}\pm$ 。

2. 鲍马层序砂岩亚相 (亚相 5B)

该亚相以具完整或不完整的鲍马层序为特征 (图版Ⅰ-4, Ⅰ-1), 常见 ABE、ABCE、ABCDE 及 BCDE 组合。单层厚度从1—50 cm不等。相应的其粒度范围变化也很大, A段的粒度从含砾极粗砂至细砂均有, A段或B段常含页岩撕裂碎屑, C段则常为极细砂或粉砂。C段交错纹层之层系厚度0.5—3 cm, 常为多层系 (图4第Ⅰ段上部素描图), 方向为 $NW310^{\circ}$ 至 $NE10^{\circ}$, 但大部集中在 330° 左右, 与沿斜坡向下的方向基本一致。

上述特征表明相5为典型的浊流沉积。亚相5A厚度较大, 粒度粗, 具粗尾粒序, 属高密度浊流的产物, 代表未经充分分异的悬浮流的快速沉积。亚相5B发育完整或不完整的鲍马层序, 说明分异作用较强, 在沉积阶段晚期有牵引作用存在。亚相5B大多为低密度浊流沉积, 但粒度粗、厚度大者可能亦为高密度浊流的产物, 其沉积速度较亚相5A略慢, 经过了一定分异作用。高密度浊流沉积均为水道充填沉积, 低密度浊流则在水道中及水道间均有分布。

三、伴生沉积相

(一) 暗色泥质岩相 (相6)

该相由深灰色泥质岩构成。按层理发育情况, 又可分为两个亚相: 暗色页岩亚相 (6A) 和暗色泥岩亚相 (6B)。页岩较纯, 泥岩中含数量不等的粉砂。二者均缺乏生物遗体及遗迹化石, 而含细分散的黄铁矿, 富有机质。

在页岩及泥岩中, 常夹厚度1—10 cm不等的细碎屑沉积物。其粒度自粉砂直至粗砂不等, 普遍具正粒序, 常具不完整的鲍马序列, 应属亚相5B, 已如前述。

这种暗色泥质岩缺乏底栖生物而富含细分散黄铁矿, 并与重力流沉积共生, 应为深水原地沉积, 即垂直降落沉积。亚相6B与亚相6A的区别为无层理而粉砂含量较高, 可能因沉积速度较6A快所致。此外, 也不能排除部分泥岩为浊流末稍沉积的可能性。

(二) 扭曲层相 (相7)

主要由灰色、浅灰色页岩、泥岩及粉砂质页岩组成, 夹少量灰岩薄层 ($<5\%$) 及粉砂岩薄层 ($<3\%$)。页岩、粉砂质页岩及泥岩均强烈揉皱变形, 呈现各式各样的旋圈变形形态 (图版Ⅰ-4)。灰岩及砂岩薄层或参与这种柔性变形, 或断裂成小的板状碎屑 (长1—3 cm, 厚0.3—0.5 cm) 散布于层中, 形成各种不协调揉皱。

该相的一个显著特征是富含底栖生物化石。主要有: 腕足类: *Sowerbyella*; 双壳类: *Praenucula*, *Tancrediopsis*, *Ambonychia*?; 腹足类: *Bellerophon*, cf. *Ectomaria*, cf. *Liospira* 及古腹足类; 头足类: 直壳鹦鹉螺; 共生的还有钙质海绵、苔藓虫、海百合茎和三叶虫碎屑。化石保存程度中

等^{*}。

该相的特征,特别是典型的不规则塑性-断裂变形,表明为滑塌作用的产物。这种滑塌是在页岩、泥岩未固结,所夹灰岩及粉砂岩弱固结的情况下进行的。已硬结的灰岩、粉砂岩薄层在滑塌中断裂成碎片,而固结差尚具可塑性的粉砂层及灰质层则可参与柔性变形。

与前述各相不同,扭曲层相富含底栖生物。类似的生物组合已被确定为“深陆棚”环境^[7]。此外,该相的颜色较前述各相均浅,而灰质含量较高,也说明其原始沉积物形成于深度较浅之处,最大可能是陆棚坡折带,因为这里的沉积物易于向下滑塌。古生物所反映的水深(100—200 m)也与此吻合^[8]。故该滑塌沉积可能为陆棚边缘的细粒沉积物滑向深水斜坡和水道中堆积而成的。

(三) 双向交错纹理砂岩相(相8)

该相主要由极细粒岩屑石英杂砂岩组成,以普遍发育双向交错纹理为特征(图版 I-5)。单层厚 0.4—0.75 cm,呈双向递变或正递变。前者层的中部最粗,向上下变细,泥质含量增加,并与上覆及下伏页岩渐变过渡;后者底部突变,向上变细,与上覆页岩渐变过渡。交错纹理发育良好,贯穿全层,多见上叠沙纹层理。层系厚度 0.5—2 cm,向层的顶底方向,随粒度变细,细层厚度也相应减小。交错纹理的倾向在纵向上反复交替,NNW 和 SSE 方向频繁变换(图 4 第 IV 段中下部素描图和玫瑰图),平均每厚 10 cm 变换 17 次。上述方向恰与海底水道的向下和向上方向相吻合。该相的分选程度明显较互层的浊积岩好。

该相成因特殊,为深水潮汐作用改造先期形成的细粒浊流沉积的产物,叫做“内潮汐沉积”。笔者已在另一篇论文中进行了专门讨论^[8]。

(四) 单向交错层-交错纹理砂岩相(相9)

该相仅见一层,厚 10—13 cm,由细一中粒岩屑杂砂岩组成。全层由两种规模及形态均不相同的交错层-交错纹理组成(图 4 第 IV 段上部素描图)。一为板状交错层,层系厚 2—5 cm,倾角 < 8°,主要由中粒砂岩组成;另一种为上叠沙纹交错纹理,层系厚 1—2 cm,前积层倾角 15—20°,主要由细粒至极细粒砂岩组成,位于板状交错层之上下,构成细—粗—细组合。该层由两个这种双向递变组合构成,各厚 4—9 cm。交错层与交错纹理的倾向均为 SSE(图 4 第 IV 段上部玫瑰图和素描图),即古流向指向海底水道的上方。本层下伏层为一厚 0.3 m 的粗—中粒岩屑杂砂岩,具正递变;上覆层为页岩呈渐变过渡。

该相的成因也已由另文进行了讨论^[8],属于叠加有内波的内潮汐作用的产物。据其与下伏浊积砂岩的关系,应为改造该浊积层顶部的结果。

四、相组合和相层序

上述九种沉积相及其亚相在剖面上呈有规律组合。已鉴别出 5 种组合型式,它们分别构成了芬卡苏砾岩的 5 个段。

(一) 组合 I (亚相 2B+5A 组合)

主要由富基质的碎屑支撑砾岩亚相(2B)和单一递变的砂岩亚相(5A)组成,单层厚 0.3—1.6 m,互层产出。偶夹薄层具鲍马层序的递变砂岩(5B),顶部以深灰色页岩(6A)与第二

* B. Bennington 私人通信。

组合之砾岩接触。该组合为一明显地向上变细层序,构成了芬卡苏砾岩的第Ⅰ段(图4)。

该组合以粗碎屑占绝对优势,碎屑流和高密度浊流沉积频繁间互出现,浊积岩未经充分分异(一般仅具粒序层),以及碎屑流沉积所含基质相对少,均说明为近源沉积,可能为低海平面时期物源紧邻深水盆地的产物。其向上变细层序则反映水道充填性质^[9]。

(二) 组合Ⅰ(亚相2A+6A组合)

主要由基质支撑砾岩亚相(2A)及暗色页岩亚相(6A)构成,夹含砾泥岩相(相1)、碎屑支撑砾岩亚相(2B),以及极少量浊积岩。基质支撑砾岩发育并含大量页岩撕裂碎屑,表明此时物源区距沉积区较远,碎屑物质搬运到本区要经过长距离的泥质沉积区,混入大量泥基质及页岩撕裂碎屑,可能系海平面升高所致。碎屑流沉积的单层厚度大、层数少,则可能是由于物源区远离沉积区,斜坡坡度较为平缓,碎屑流的引发条件要求较高之故。该组合构成了芬卡苏砾岩的第Ⅰ段(图4)。

(三) 组合Ⅱ(相3+相5组合)

主要由贫基质砾岩相(相3)和递变砂岩相(相5)组成,夹暗色页岩(6A)、块状砂岩(相4)和含砾泥岩(相1)。单层厚0.1—0.5 m,显示清楚地向上变细变薄层序。该组合之粒度明显地较前两个组合为细,可能系海平面进一步上升,物源区进一步远离沉积区之故。本组合中的浊积岩多具鲍马序列,代表其分异比较充分,也说明其搬运距离较远。该组合构成第Ⅱ段(图4)。

(四) 组合Ⅳ(相8+相9组合)

主要由双向交错纹理砂岩相(相8)、单向交错层-交错纹理砂岩相(相9)和暗色泥质岩相(相6)组成,夹递变砂岩相(相5)。

该组合粒度较以上组合均细得多,反映海平面持续上升,物源区更加远离沉积区,重力流能量进一步减弱。在这种情况下,具有中-低速度的内潮汐和内波才得以改造细粒浊积岩而形成内潮汐沉积。该组合构成第Ⅳ段(图4)。

(五) 组合Ⅴ(相7)

该组合完全由扭曲层相(相7)组成。如前所述,它是陆棚边缘的页岩、泥岩及灰岩、粉砂岩夹层向下滑落而充填于深水水道的产物,水道因大量充填而消失。该组合构成第Ⅴ段(图4)。

参 考 文 献

- 1 Karpa J B. The Middle Ordovician Fincastle Conglomerate north of Roanoke, Virginia and its implications for Blue Ridge tectonism. M. S. thesis. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1974. 104.
- 2 Read J F. Carbonate ramp-to-basin transitions and foreland basin evolution, Middle Ordovician, Virginia Appalachians. *AAPG Bull.*, 1980, 64, 1575—1612.
- 3 Shanmugam G, Walker K R. Sedimentation, subsidence and evolution of a foredeep basin in the Middle Ordovician, southern Appalachians. *American Journal of Science*, 1980, 280, 479—496.
- 4 Stow DAV. Deep clastic seas. In: Reading HG, ed. *Sedimentary environments and facies*. second edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986. 399—444.
- 5 Middleton G V, Hampton M A. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: Stanley D J, Swift D J P, eds. *Marine sediment transport and environmental management*. New York: John Wiley, 1976. 197—218.
- 6 Mullins H T, Buren H M van. Modern modified carbonate grain flow deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 49, 747—

752.

- 7 Frey R C. The occurrence of pelecypods in early Paleozoic epeiric-sea environments, Late Ordovician of the Cincinnati, Ohio area. *Palaios*, 1987, 2: 3—23.
- 8 Gao Zhengzhong, Eriksson K A. Internal-tide deposits in an Ordovician submarine channel, Previously unrecognized facies? *Geology*, 1991, 19: 734—737.
- 9 Shanmugam G, Moiola R J. Submarine fan models: Problems and solutions. In: Bouma A H, Normark W R, Barnes N E, eds. Submarine fans and related turbidite systems. New York: Springer-Verlag, 1985. 29—34.

GRAVITY FLOW DEPOSITS AND ASSOCIATED SEDIMENTS FROM MIDDLE ORDOVICIAN, FINCASTLE, VIRGINIA

Gao Zhengzhong

(Department of Geology, Jiangnan College of Petroleum)

K. A. Eriksson

(Department of Geological Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University)

Zhou Jiarao

(Petroleum Industry Press)

Abstract

Fincastle Conglomerate which was considered as deposits in shallow water in the past is mainly gravity flow deposits and associated sediments in deep water submarine channels. Five gravity flow facies have been recognized: 1. pebbly mudstone facies; 2. matrix-rich conglomerate facies; 3. matrix-poor conglomerate facies; 4. massive sandstone facies; 5. graded sandstone facies. Among them 1 and 2 are debris flow deposits; 3 and 4 belong to grain flow deposits; and 5 is turbidite including high density and low density current deposits. The associated facies comprise: 6. dark shale and mudrock facies; suspension deposit; 7. contorted bed facies; slumping deposit; 8. bidirectional cross-laminated sandstone facies; internal-tide deposit; 9. unidirectional cross-bedded and cross-laminated sandstone facies; deposit of internal tide with superposing internal wave. The nine facies mentioned above constitute five facies assemblages that show regular patterns. To sum up, the Fincastle Conglomerate shows a clear upward-fining sequence, reflecting a process of that the sea level continued to rise and the source area was farther and farther to the sedimentary site.