

西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组深水碎屑流沉积特征和沉积模式

李奋其¹, 郑荣才², 张士贞¹, 李俊¹, 刘函¹, 秦雅东¹

(1.中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 2.成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059)

摘要:【研究目的】拉萨地块北缘中晚侏罗世拉贡塘组深水碎屑流沉积的研究, 对于恢复青藏高原南部中生代构造—古地理具有重要的意义。【研究方法】作者对出露于那曲地区的拉贡塘组碎屑流沉积进行了实地调研和显微构造分析, 同时结合区域地质资料, 探讨了控制因素和搬运过程, 建立了沉积模式。【研究结果】结果表明, 该组的碎屑流沉积下部由砾质碎屑流组成, 上部以砂质碎屑流与泥质碎屑流沉积交替产出为特点, 其内含有丰富的滑塌、滑动体, 具有典型的软沉积双重构造, 其中的软沉积变形褶皱、布丁构造指示碎屑流向南流动。【结论】研究表明, 拉贡塘组碎屑流的形成受班公湖-怒江结合带控制, 不同类型碎屑流沉积的“源-渠-汇”具有一定程度的耦合关系, 对重建青藏高原南部中生代构造—古地理提供了依据。

关键词: 班公湖-怒江结合带; 碎屑流; 滑塌; 中晚侏罗世; 拉贡塘组; 油气勘查工程

创新点: (1)提出了拉萨地块北缘中晚侏罗世碎屑流向南流动、沉积物主要来自木嘎岗日岩群的观点。(2)建立了大陆初始碰撞背景下具备“源-渠-汇”耦合关系的深水碎屑流沉积模式。

Depositional characteristics and model of the deep-water debris flow of the Mid-Late Jurassic Lagongtang Formation in the Nagqu area, Tibet

LI Fenqi¹, ZHENG Rongcai², ZHANG Shizhen¹, LI Jun¹, LIU Han¹, QIN Yadong¹

(1.Chengdu center of China Geological Survey, 610081; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: 【Objective】The research of deep-water debris flow deposition of the Mid-Late Jurassic Lagongtang Formation on the northern margin of the Lhasa Block is important for the reconstruction on the Mesozoic tectonics-palaeogeography in the southern Qinghai-Tibetan Plateau. 【Methods】This study conducted field investigations and microstructural analyses on the debris flow deposition of the Lagongtang Formation in the Nagqu area, and discussed its controlling factors and transport processes with previous regional geological data, and further established its depositional model. 【Results】The results show that the lower part of the debris flow deposition consists mainly of gravelly debris flow deposits, while its upper part is characterized by sandy debris flow deposits alternating with muddy debris flow deposits, containing abundant slip collapse and sliding bodies and have a typical double structure of soft deposition. The soft depositional deformation folds and pudding structure indicate the southward flow of the debris flow. 【Conclusions】This study indicates that the formation of the Lagongtang Formation is controlled by the Bangonghu-Nujiang suture zone, and the "source-drain-sink" of different kinds of debris flow deposition shows coupling relationships to a certain extent. The study also provides new information on the reconstruction on the structure-paleogeography of the southern Qinghai-Tibetan Plateau in Mesozoic.

Key words: Debris flow; Slump deposits; Mid-Late Jurassic; Lagongtang Formation; Oil-gas exploration engineering; Bangonghu-Nujiang suture zone; Tibet

Highlights: 1) The idea that the debris flow of the Mid-Late Jurassic Lagongtang Formation flowed southwards and its sediments were derived from the Mugangri Group is proposed. 2) A deep-water debris flow deposition model with a

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972113, 42002032)、科技部第二次青藏科考项目(2019QZKK0706)资助
作者简介: 李奋其, 男, 1966年生, 博士, 教授级高级工程师, 从事青藏高原南部基础地质研究。E-mail: lifenqi2012@163.com

coupled "source-drain-sink" relationship in the context of initial continental collision is established.

About the first author: LI Fenqi, male, born in 1966, doctor, Professor-level senior engineer, engaged in basic geological research on Southern Qinghai-Tibet plateau. E-mail: lifenqi2012@163.com.

Fund support: Supported by National natural science foundation of China (41972113, 42002032) and the Second Qinghai-Tibet Scientific Research Project of the Ministry of Science and Technology of China (2019QZKK0706)

1 引言

自 20 世纪 50 年代提出“浊积岩”概念以来(Kuenen 和 Migliorini, 1950), 深水重力流一直是沉积学的研究热点之一。近年来, 随着深水沉积理论和深水油气勘探的不断发展, “砂质碎屑流”、“泥质碎屑流”(Shanmugam, 1996)以及“砾质碎屑流”(孟庆任等, 2007)、“颗粒流”(郑荣才等, 2013)、“混合事

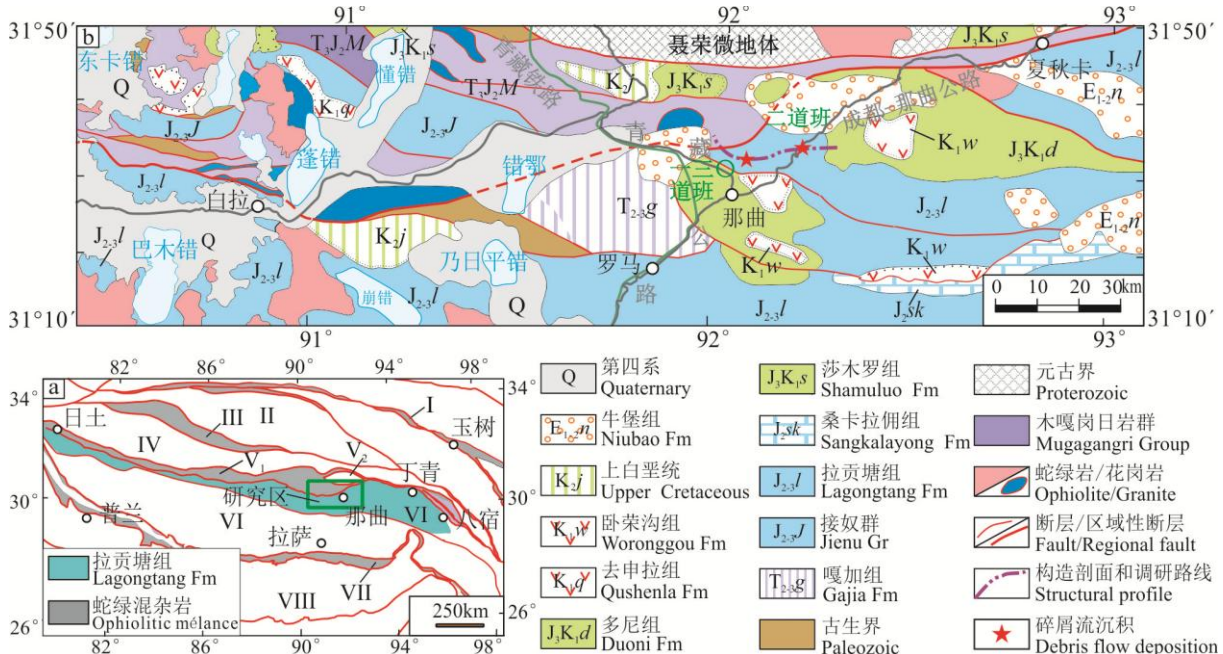


图1 青藏高原南部大地构造图(a)和那曲地区地质简图(b)

(a图据王立全等, 2013; b图据尼玛次仁等(2013)以及陈玉禄等(2015))

I—金沙江结合带; II—北羌塘地块; III—龙木错—双湖结合带; IV—南羌塘—左贡地块; V₁—班公湖—怒江蛇绿混杂岩带; V₂—聂荣微地体; VI—拉萨地块; VII—雅鲁藏布江结合带; VIII—喜马拉雅地块

Fig.1 The Geotectonic map of the Southern Qinghai-Tibet Plateau(a), the Geological Schematic Diagram of Nagqu Region(b)(Fig.a revised from Wang et al., 2013; Fig.b from Nima et al.(2013) and Chen et al.(2015))

I—Jinshajiang suture zone; II—Northern Qiangtang block; III—Longmucuo—Shuanghu suture zone; IV—Southern Qiangtang—Zogong block; V₁—Bangonghu—Nujiang ophiolitic mélange belt; V₂—Nierong microterrain; VI—Lhasa block; VII—Yarlung Zangbo River suture zone; VIII—Himalaya block

件层”(Haughton et al., 2009)、“异重流”(Mulder et al., 2003)和“超临界流”(操应长等, 2017)等概念的建立、推广或重新认识, 揭示了深水沉积过程的多样性和复杂性, 掀起了新的重力流研究热潮。

碎屑流沉积在世界深水盆地中被广泛报道(Shanmugam, 2000; Talling et al., 2007; Clare et al., 2014)。在我国, 深水碎屑流的报道主要集中在渤海湾(刘建平, 2021)、鄂尔多斯(李相博等, 2009)、济阳拗陷(强昆生等, 2018)和珠江口凹陷(郑荣才等, 2013)等含油气盆地中。近年来, 随着区域地质

调查工作的深入开展，在造山带沉积建造中相继也有碎屑流沉积的报道，如西秦岭—松潘地体的三叠系(孟庆仁等, 2007)、内蒙古满都拉的古生界(梁超等, 2018)和喜马拉雅带的古近系(陈曦等, 2008)。但是，深水碎屑流的研究以上述含油气盆地明显较高，对其成因、沉积结构和沉积过程有了较深入的认识(赵澄林等, 2001; 李相博等, 2013; 金杰华等, 2019a); 相比之下，造山带或者碰撞带内的碎屑流研究显得非常薄弱。此种情况对丰富深水碎屑流理论造成了一定的影响。拉萨地块北缘被认为是国家油气资源重要的战略选区和铜多金属矿产资源的后备基地(王剑等, 2008; Tang et al., 2021)，也被誉为是研究班公湖—怒江新特提斯构造—古地理演变的重要窗口(王立全等, 2013); 拉贡塘组是该区重要的层位，为东西绵延达1500km、厚度逾2000m的海相陆源碎屑岩建造(图1a)，蕴含着丰富的地质信息; 其内浊流沉积非常发育(程顶胜等, 2001; 王先美等, 2011)，碎屑流沉积也有报道(喻安光, 1996)，但对重力流发育的构造-古地理环境、控制因素和沉积过程的认识依然不清。

我们对发育于西藏那曲县城北部、拉萨地块与班公湖—怒江结合带过渡部位的中上侏罗统拉贡塘组进行了实地调研(图1a)，在成都—那曲公路二道班、青藏公路一三〇道班等地识别出深水碎屑流沉积(图1b)，其内普遍发育滑塌体，可见滑动体。本文基于这些重力流沉积特征的分析，同时结合前人研究成果，研究其控制因素和沉积过程，进而建立了拉贡塘组深水碎屑流的沉积模式，其成果将对丰富重力流沉积理论、恢复青藏高原南部中生代构造-古地理和含油气盆地评价具有一定的意义。

2 地质背景

研究区位于拉萨地块北缘(图 1b)，随着中侏罗世拉萨地块与南羌塘—左贡地块对接，开始进入陆内演化阶段(李奋其等, 2014; Ma et al., 2017; Li et al., 2017; Sun et al., 2019)。区内中新元古界为出露于聂荣微地体的聂荣岩群，是一套中深变质岩系(表 1); 古生界在拉萨地块北缘、班公湖—怒江结合带均可见到，分别为浅变质的陆源碎屑岩系和碳酸盐岩建造(王立全等, 2013)。研究区中生界相对发育，木嘎岗日岩群(T_3J_2M)和嘎加组(T_2-3g)劈理化较为强烈，前者长期被认为是一套深海—次深海复理石建造，代表着班公湖—怒江洋的洋盆沉积(Pan et al., 2012; 王立全等, 2013); 后者出露于那曲县城西部，为一套大陆边缘环境下形成的陆源碎屑岩—碳酸盐岩建造，其内放射虫硅质岩极其发育(尼玛次仁等, 2013)。本区侏罗系以拉萨地块北缘最为发育(表 1)，希湖群($J_{1-2}X$)出露于比如—丁青一带，为一套厚逾 3000m 的复理石建造; 马里组(J_2m)、桑卡拉侓组(J_2sk)出露于南部地带，分别为滨浅海—混积陆棚和碳酸盐岩台地沉积。上侏罗—下白垩统包括莎木罗组(J_3K_1s)和多尼组(J_3K_1d)，前者角度不整合于木嘎岗日岩群和蛇绿岩之上，下部为河流相沉积，向上灰岩逐渐增多，含腕足类、珊瑚和双壳类化石(陈国荣等, 2004; 陈玉禄等, 2015; 邓金火等, 2017); 后者平行不整合于拉贡塘组之上，下部为三角洲平原沉积，中上部为潮坪—陆棚沉积，产小颌针海绵、绵型螭、锥叶蕨等化石，植物碎片发育(张士贞等, 2010; 尼玛次仁等, 2013)。早白垩世火山岩系在拉萨地块北缘、班公湖—怒江结合带均较发育(图 1b)，角度不整合于拉贡塘组等下伏古老岩系之上，底部年龄为 116Ma±(李奋其等, 2009; 陈玉禄等, 2015; Yu et al., 2021)。

表 1 研究区中生代地层格架

Table 1 The Mesozoic stratigraphic in study area

年代地层(Ma)	构造单元	拉萨地块北缘 → N	班公湖-怒江结合带
白垩系	上统	99.6	竟柱山组
	下统	145	卧荣沟组 去申拉组
侏罗系	上统	163.5±1	多尼组 155±2Ma 拉贡塘组
		174.0±1	桑卡拉侓组 马里组 接奴群
	中统	199.6	希湖群 木嘎岗日岩群
	下统	199.6	蛇绿岩
三叠系	上统	235	嘎加组
	中统	247.2	
	下统	252.17	

中—上侏罗统在拉萨地块北缘、班公湖—怒江结合带不同程度的发育。那曲地区拉贡塘组(J₂₋₃)下部总体以灰黑色泥岩、粉砂岩为主,向上深灰色细砂岩逐渐占主导地位(图 2a)。该组沿南北走向,沉积特点存在一定的差异。南部地带,拉贡塘组超覆于桑卡拉侖组碳酸盐岩建造(J₂)之上(图 1b)(尼玛次仁等, 2013),为滨浅海—陆棚沉积^{①②③}。北部地带,总体下部以前三角洲相灰黑色泥岩—粉砂岩为主,产硅质岩夹层,普遍可见锰质—铁质结核以及菱铁矿、黄铁矿晶粒,水平层理发育;上部以灰黑色泥(板)岩与灰色中细粒岩屑石英砂岩构成的韵律互层为特点,且砂岩层具有向上厚度变大的特征,可见粒序层理、底冲刷、水平层理、包卷层理、槽模和滑塌构造(李光明等, 2000; 王先美等, 2011; 王立全等, 2013; 胡敬仁等, 2014; 尼玛次仁等, 2014; 陈玉禄等, 2015; 谢国刚等, 2015)。另外,拉贡塘组向东延至丁青一带,于靠近班公湖—怒江结合带的部位,整合于希湖群复理石建造之上。由上可见,北部地带的拉贡塘组具有次深水—深水沉积的特点。在班公湖—怒江结合带内,该层位目前仅在研究区西北角可以见到,称为接奴群(图 1b),主体为厚逾 1000m 的陆源碎屑岩建造,产珊瑚、海绵和双壳类化石。

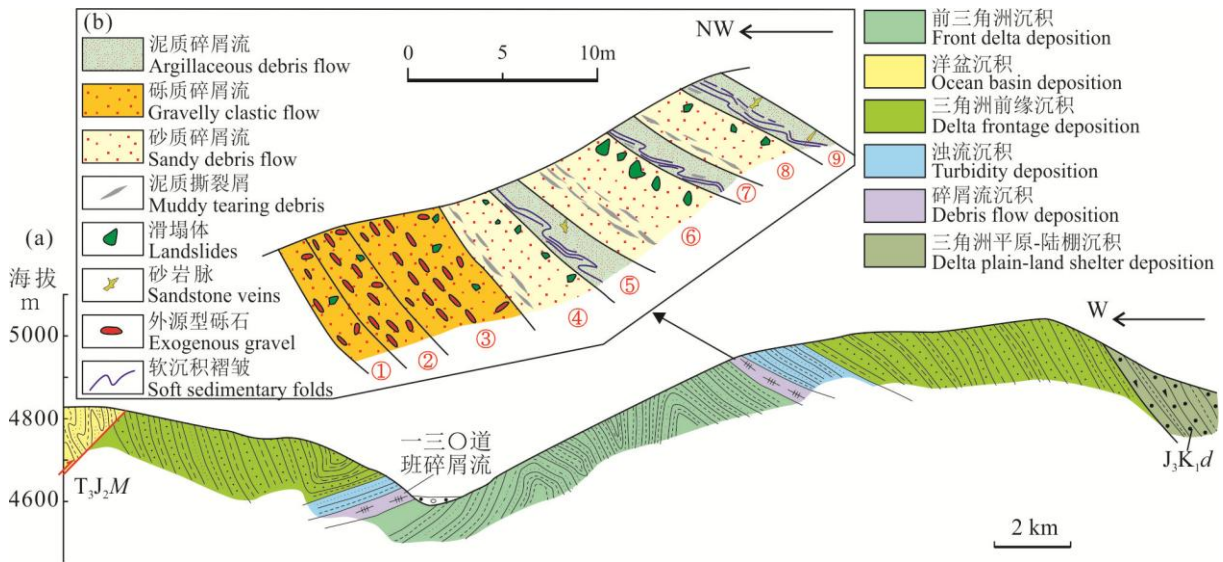


图 2 拉贡塘组构造剖面(a)和二道班碎屑流沉积剖面(b)
T₃J₂M—木嘎岗日岩群; J₃K₁d—多尼组

Fig.2 The structural profile of the Lagongtang Fm.(a) and the section of the Erdaoban debris flow deposition(b)
T₃J₂M—Mugagangri Group; J₃K₁d—Duoni Formation

研究区拉贡塘组化石贫乏。长期以来,前人通过地层对比将其厘定为中—上侏罗统(西藏地质矿产局, 1997; 王立全等, 2013)。近年来, Chen et al.(2020)在丁青地区的拉贡塘组内获得最年轻的碎屑锆石为 174Ma±, 表明形成于 174Ma 之后; 张士贞等(2010)对出露于那曲县城西部的多尼组进行了碎屑锆石 U—Pb 同位素定年, 在其底部的岩屑石英砂岩中获得最年轻的锆石为 155±2Ma(张士贞等, 2010), 反映拉贡塘组形成于 155Ma 之前。近年来, 拉贡塘组的物源陆续引起人们的关注。尼玛次仁等(2013)、胡敬仁等(2014)和陈玉禄等(2015)通过对那曲、比如和班戈地区的拉贡塘组进行了碎屑组分特征研究, 认为沉积物来自班公湖—怒江结合带。我们的研究表明, 研究区拉贡塘组碎屑流沉积的碎屑锆石 U—Pb 年龄集中在 611~2300Ma、2000~1700Ma、1000~800Ma、700~360Ma 和 279~216Ma 等 5 个时间段内, 与具有 350~200Ma、700~400Ma、2000~750Ma、1950~1750Ma 和 2500~2300Ma 年龄段的木嘎岗日岩群(Zeng et al., 2016; Huang et al., 2017; Li et al., 2017)非常相似, 显著区别于具有 600~500Ma、1300~1000Ma 年龄段的拉萨地块前侏罗系(Sun et al., 2017)和具有 1186~509Ma 年龄

段的那曲县城南部的中—上侏罗统(张士贞等, 2010)。可见, 研究区拉贡塘组沉积物很可能来自北部, 是木嘎岗日岩群沉积物再循环的产物。

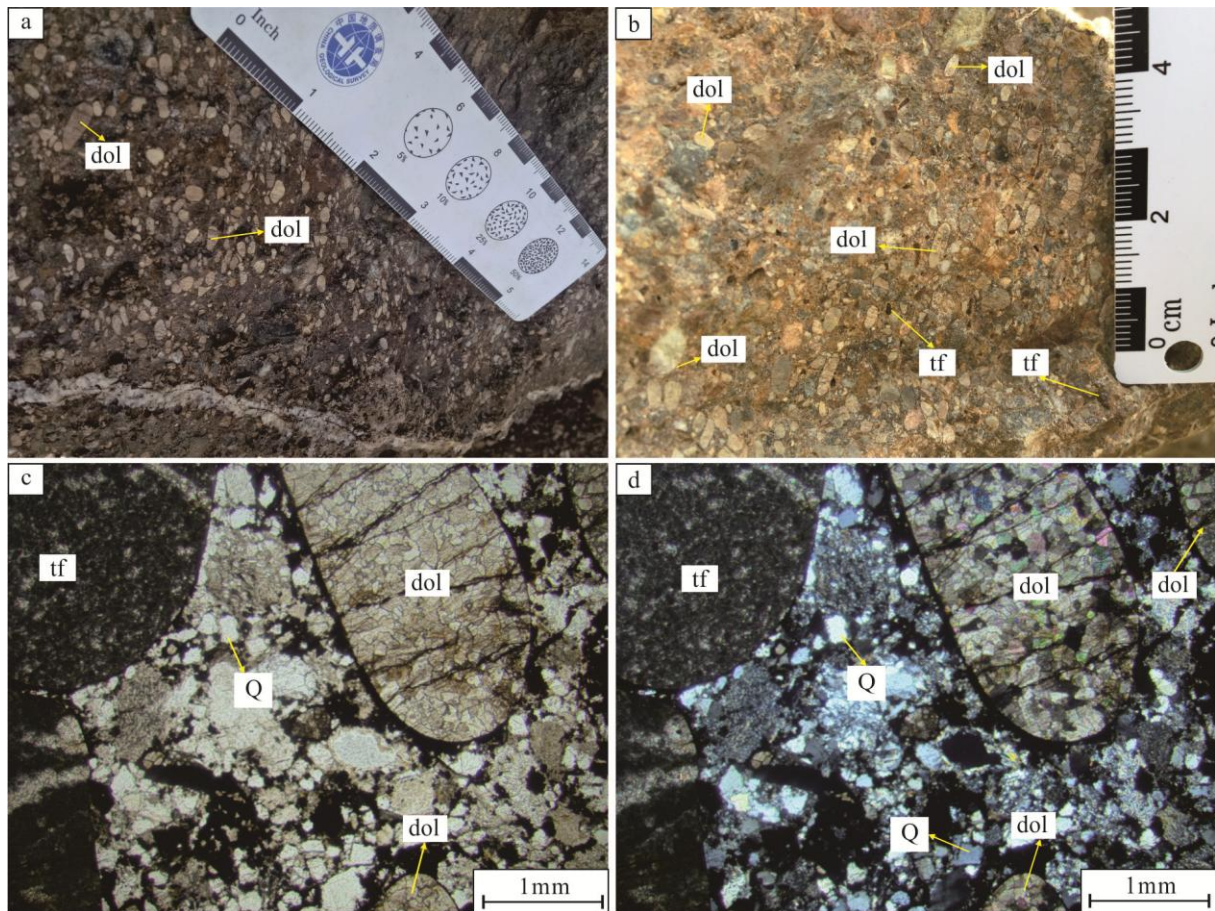


图3 砾质碎屑流沉积的野外露头特征(a)及其单偏光(c)、正交偏光(d)显微构造图像

dol—白云质砾石; tf—凝灰质砾石; Q—石英

Fig.3 Output characteristics(a,b), plainlight images (c) and crossed nicols images (d)of gravel debris flow deposition

dol—dolomitic gravel; tf—tuffaceous gravel; Q—Quartz

3 沉积特征

碎屑流沉积不仅形成于陆上冲积扇环境(Iverson et al, 1997), 而且也广泛发育于深水沉积体系中(Shanmugam, 2012; 操应长等, 2017), 与未固结沉积层的沙崩活动密切相关(郑荣才等, 2013)。此种重力流是一种具塑性流变性质和层流状态的沉积物重力流, 其沉积物支撑机制主要是基质强度和颗粒间的摩擦强度(高红灿等, 2012), 一般具上、下两层的韵律结构, 即下部发育具平行碎屑结构的层流段, 上部则为具块状层理的“刚性”筏流段(高红灿等, 2012)。在内部结构上, 以发育“漂浮状”的大石英颗粒或者砾石, 以及漂浮状的泥质撕裂屑为典型特征(Shanmugam, 2012; 李相博等, 2013; 金杰华等, 2019a)。依据粒度大小, 可进一步分为砾质碎屑流、砂质碎屑流和泥质碎屑流, 其中以后2者较为常见(Shanmugam, 2012; 杨田等, 2015); 砾质碎屑流在松潘地体的三叠系、高邮凹陷的古近系中有报道, 研究程度也相对较高(孟庆任等, 2007; 袁静等, 2016)。研究区的二道班、一三〇道班碎屑流沉积整合于盆地相泥岩之上, 上部被浊流沉积覆盖(图 2a)。前者厚度逾 26m, 下部为砾质碎屑流, 上部以砂质碎屑流与泥质碎屑流沉积间互产出为特点(图 2b); 一三〇道班的碎屑流沉积未见底, 出

露出露厚度约 17m，以砂质碎屑流沉积为主，间夹泥质碎屑流沉积薄层(图 4a)。

3.1 砾质碎屑流沉积

此种碎屑流沉积发育于二道班碎屑流沉积体的下部，岩性为复成分砾岩，相当于图 2b 所示的 1~3 层。各单层厚度变化于 1.4~5.0m 的范围内。其中，层①与下伏灰黑色泥岩界面平直，未见底冲刷；界面附近流动面理相对较密集且与层面平行，反映经历了较为强烈的层流活动。岩石主要由基质(约 55~90%)和砾石(10~45%)两部分构成，块状构造。前者风化面呈褐色，新鲜面呈深灰色(图 3a)，岩性为含砾粉-细砂岩，主要由次圆状一次棱角状石英(55~70%)、岩屑(5~20%)(以灰色凝灰岩、浅灰白色白云岩为主)以及少量铁质和硅泥质物组成(图 3c, d)，不等粒结构，块状构造。砾石“漂浮”于基质中，具有向上含量逐渐增高、颗粒变大的趋势，表明流体刚性程度较高(图 3a, b)。砾石进一步可分为外源型、内源型 2 类，前者以浅灰白色的白云岩为主，其次为凝灰岩，具有较高的磨圆度(次圆状—园状)，是盆地内未固结砾石层崩落再循环的产物。各单层下部层位的砾石大小一般为 3~4mm(少量达 3~4cm)，中部层位砾石多介于 5~20cm 之间，定向性非常明显，最大扁平面与层面一致，具有明显的层流特征(图 3b)；上部层位的砾石相对较大，定向性较差(图 2b, 图 3b)。后一类砾石主要集中于各单层的上部层位，漂浮于深灰色基质中；主体上由深灰—灰黑色泥质、粉砂质沉积物构成，是盆内未固结的泥质—粉砂质层滑塌于碎屑流中而成；此类砾石形状均不规则，磨圆度极低，杂乱排列，无定向性，大小多在 2~10cm 之间，反映流体的托举力较大。

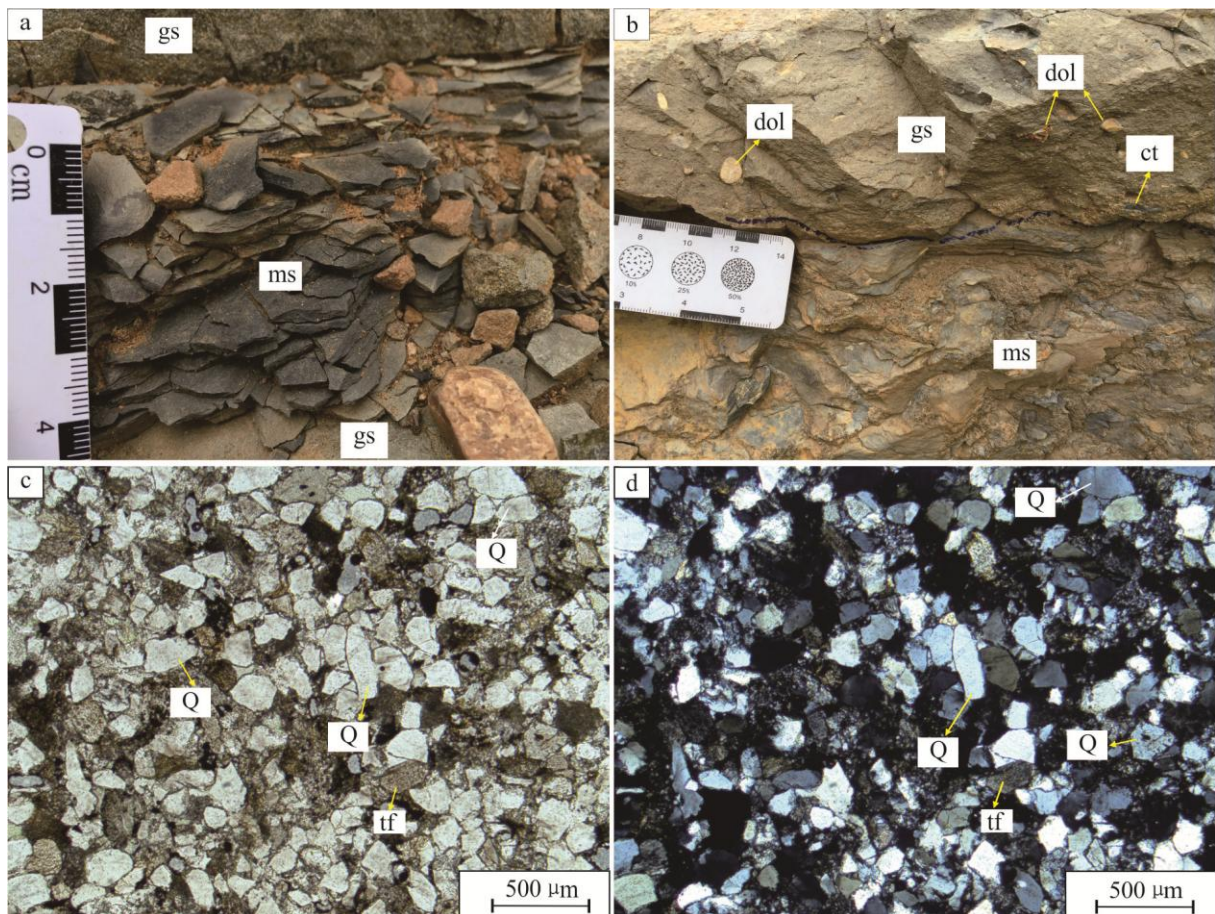


图 4 砂质碎屑流沉积野外露头特征(a,b)和单偏光(c)、正交偏光(d)显微构造图像

gs—含砾石英砂岩；ms—泥质杂砂岩；Q—石英；tf—岩屑；dol—白云质砾石；ct—泥质撕裂屑

Fig.4 Output characteristics(a,b), plainlight images (c) and crossed nicols images(d) of sandy debris flow deposition
gs—Gravelly quartz sandstone; ms—Muddy greywacke; Q—Quartz; tf—lithiclast; dol—Dolomitic gravel; ct—Muddy tearing chips

3.2 砂质碎屑流沉积

此种碎屑流沉积在一三〇道班、二道班碎屑流沉积中均较发育。单层厚度一般变化于 3~6m 的范围内，其内发育随机分布的、形态多样的泥质撕裂块；它与泥质碎屑流沉积呈突变接触关系(图 4a, b)，反映具有整体冻结式沉积的特点。另外，不论在二道班，还是一三〇道班，均可见到具有“砂”、“泥”混杂的岩石外貌(图 5a)；此种现象反映崩落区未固结沉积层成分复杂，在崩落—搬运过程中，具有不同成分特点的崩落物均一化不彻底。研究区砂质碎屑流成因的岩石以风化面土黄色、新鲜面灰色的中细粒岩屑石英砂岩为主，颗粒、杂基分布不均匀；岩石中颗粒含量一般在 45~55%之间，多呈次圆状—园状，少数为棱角—次棱角状，成分以石英为主(图 4c, d)；但是，局部地带可见岩石颗粒以凝灰质岩屑为主(图 5c, 图 5d)，此种特征在木嘎岗日群中可以见到^④。除了上述特征外，此种碎屑流沉积还显示出如下特点：(1)含外源型砾石和漂浮状石英大颗粒：前者主要见于二道班碎屑流沉积中，砾石以磨圆度较好的、“漂浮状”产出的白云质(图 4b)、凝灰质砾石为主，后者在一三〇道班可以见到，这些特点反映流体刚性程度高。(2)具有“双层结构”：下部层位不同程度地发育灰黑色泥质—粉砂质撕裂屑，呈漂浮状、长条状密集产出，最大扁平面与层面一致，构成典型的平行碎屑结构(Shanmugam, 2012; 李相博等, 2013; 金杰华等, 2019a)；这些撕裂屑呈现出软沉积“S”型构造、布丁体的特点(图 2b, 图 4b, 图 5d)，指示砂质碎屑流朝南东方向流动；上部层位以块状层理为主，普遍可见一系列大小不等的(多在 2~20cm 之间)、“漂浮状”产出的、杂乱分布的灰黑色泥质—粉砂质滑塌体(图 2b, 图 6a, 图 6b)，具有筏运段的特征(高红灿等, 2012; 杨田等, 2015)；另外，滑塌体内部可见砂质注入脉体等变形构造(图 6b)。(3)发育滑动体：见于二道班碎屑流沉积层^⑧的上部(图 2b)，岩性主要为风化面黄褐色、新鲜面灰色的中粒岩屑石英砂岩(图 6c)和深灰色细砂岩(图 6d)，典型的

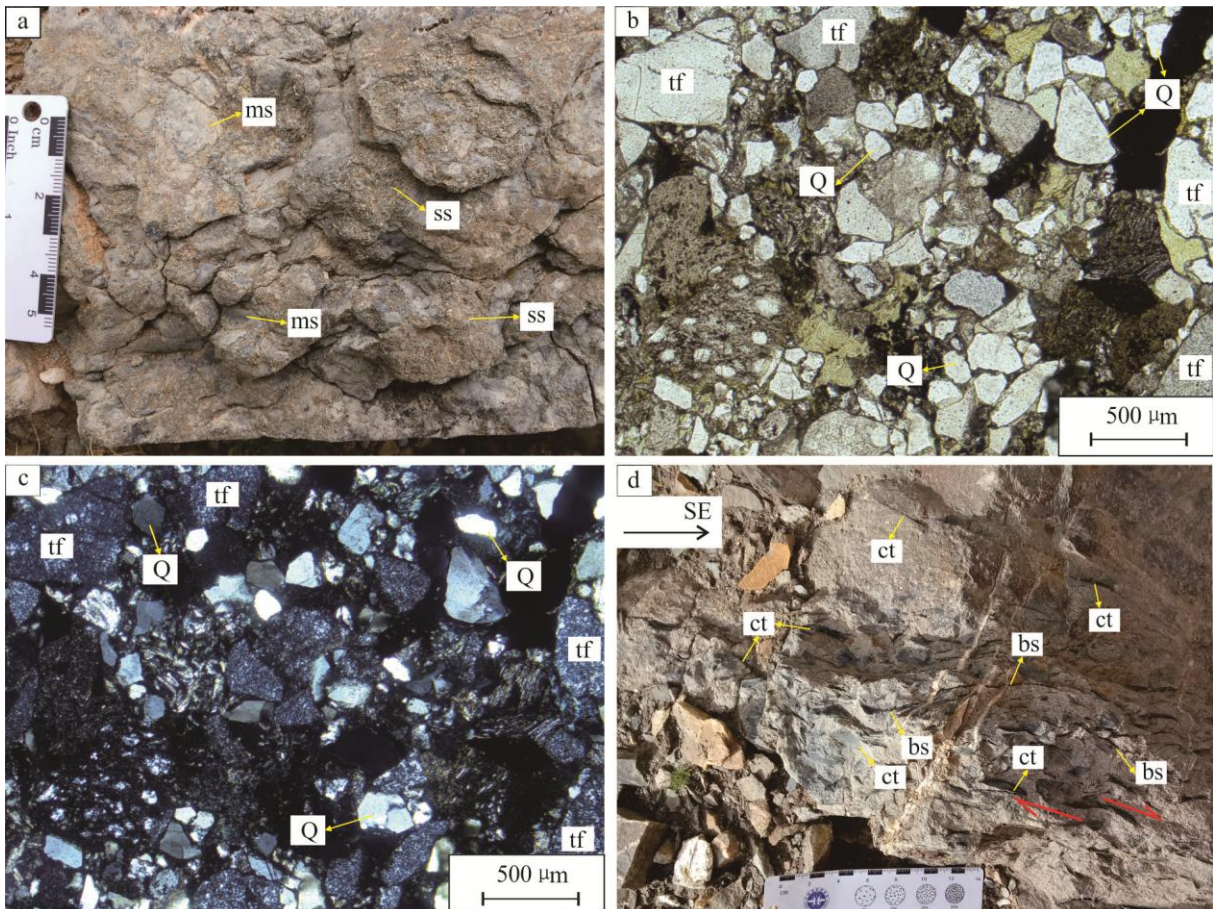


图 5 砂质碎屑流沉积的露头特征(a, d)和单偏光(b)、正交偏光(c)显微构造图像
ms—泥岩; ss—砂岩; Q—石英; tf—凝灰质岩屑; ct—泥质撕裂屑; bs—布丁构造

Fig.5 Output characteristics(a,d), plainlight images (b) and crossed nicols images (c)of sandy debris flow deposition

Ms—Mudstone; ss—Sandstone; Q—quartz; tf—tufface cuttings; ct—Muddy tearing chips; bs—Pudding structure

沉积构造包括: i. 滑动体底部滑动剪切变形相对较强, 内部存在二次滑动面(图 6c, d); ii. 同沉积滑动面与二次滑动面呈一定角度, 内部伴生出现许多砂岩脉; iii. 滑动体内部保留平行层理等原生构造, 反映滑动距离较近, 内部基本不发生形变; 但由于二次滑动的影响, 往往造成层理产状不一致。

3.3 泥质碎屑流沉积

泥质碎屑流是一种介质黏度大、杂基含量高、具塑性流变学特征的深水重力流(包含泥石流和泥流), 沉积物主要依靠基质强度支撑, 分选差, 粒度变化范围大, 纵向上不显粒序, 以厚层块状杂基支撑砾石或含碎屑砂泥质沉积等为代表。研究认为, 洪水和滑塌作用都能形成泥质碎屑流沉积, 洪水作用下在陡坡带近岸水下扇、洼陷带湖底扇中易于形成杂基支撑砾石型泥质碎屑流沉积; 各类三角洲前缘滑塌作用易于形成含碎屑砂泥质型泥质碎屑流沉积, 其形成及分布主要受物源条件和地形坡度控制(杨田等, 2015)。研究区泥质碎屑流沉积以二道班较为发育(图 2b), 单层厚度为 0.8~1.4m, 与顶、底的含砾岩屑石英砂岩为突变接触, 反映沉积物块状冻结的塑性流变特征。岩石主要为灰黑色泥质粉砂岩和粉砂质泥岩, 内部砂质碎屑随机不均匀发育(图 7), 分选差, 粒度变化范围大, 纵向上不显粒序, 有别于正常沉积的泥岩。在各单层的下部层位, 深灰色泥质、粉砂质条带以及浅灰白色砂质条带较为发育, 并构成软沉积塑性流动变形褶皱、脉状层理, 其形态特点指示碎屑流朝南东

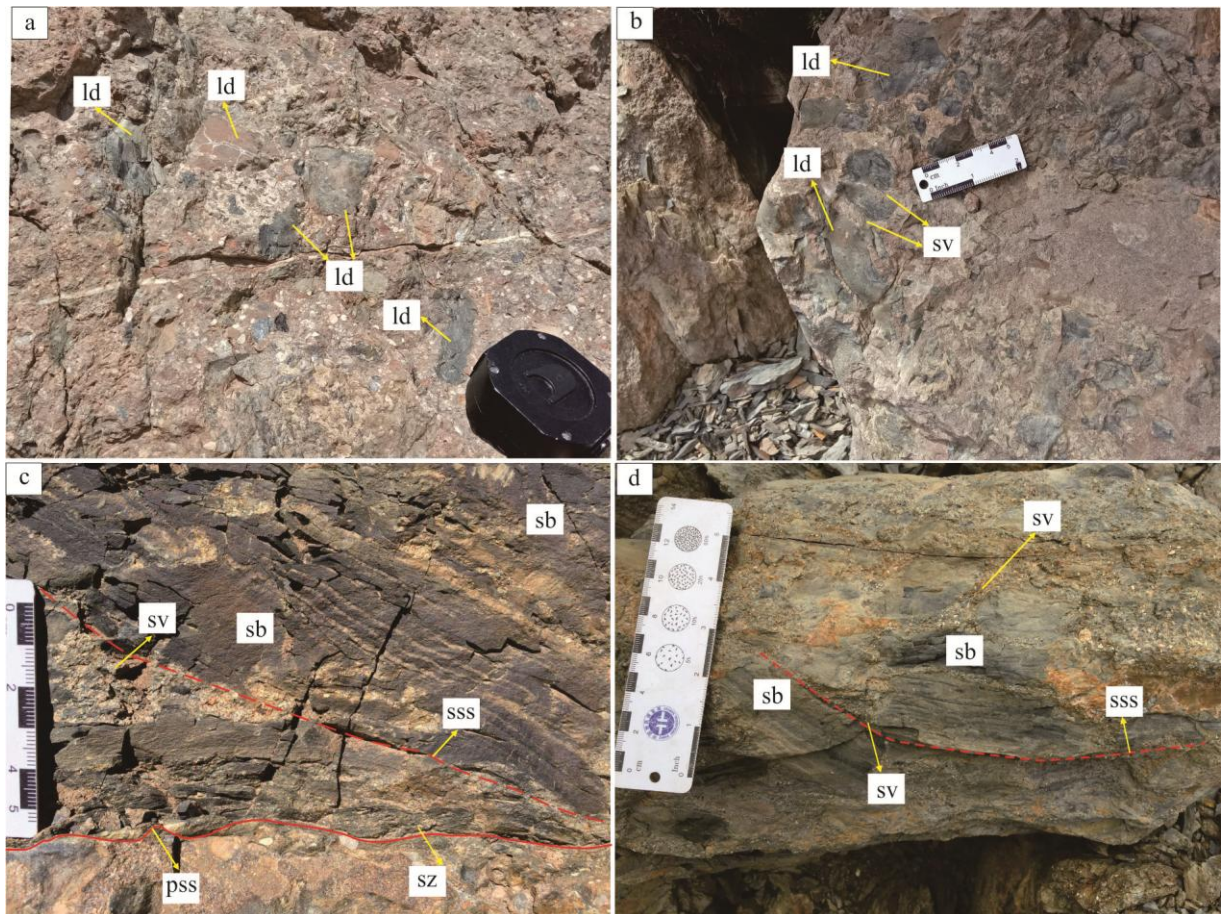


图 6 二道班砂质碎屑流沉积中的滑塌体(a,b)和滑动体(c,d)露头特征

ld-滑塌体; sv-砂岩脉; sb-滑动体; pss-原始滑动面; sss-二次滑动面; sz-剪切带

Fig.6 Output characteristics of the landslide(a,b) and Sliders(c,d) of the Erdaoban sandy debris flow deposits

ld-Landslides; sv-Sandstone veins; sb-Sliders; pss-Original sliding surface; sss-Secondary sliding surface; sz-Shear zone

方向流动(图 7a); 另外,“漂浮状”泥质撕裂屑、布丁构造较为发育,多呈平行排列,反映层流段的流动特征。上部层位的岩石与层流段具有明显的区别,以块状构造为主,沿裂隙可见砂质脉体注入(图 7b),反映流速明显较小,被称为塞流段(Johnson, 1970)。值得指出的是,一三〇道班一带的此种碎屑流厚度仅在 3~20cm 之间,且层流特征并不明显,此种特点很可能与该区地势相对较高,泥质碎屑流较难到达且流速小有关。

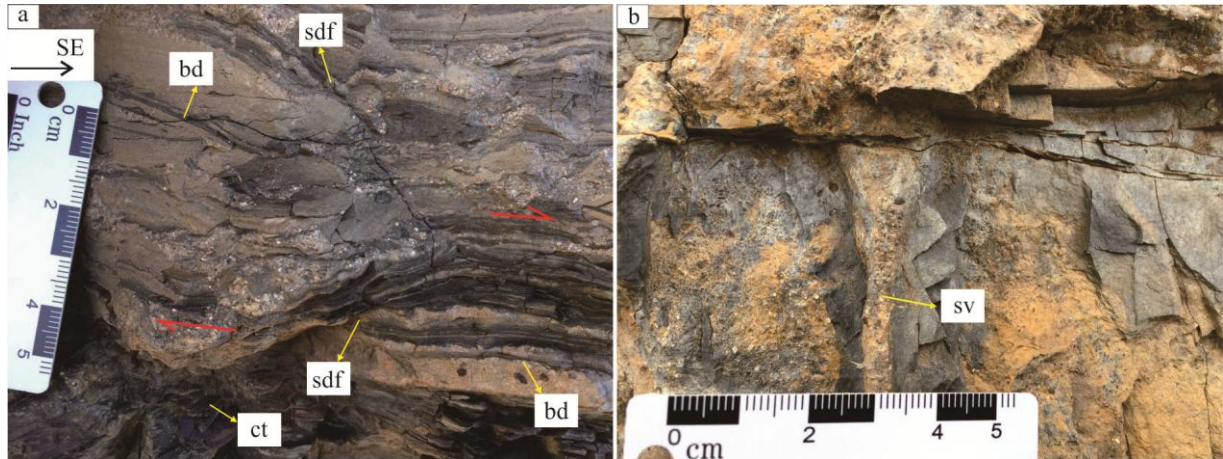


图 7 二道班泥质碎屑流沉积的层流(a)和筏流(b)沉积露头特征

sdf-软沉积变形褶皱; bd-布丁构造; ct-泥质撕裂屑; sv-砂岩脉

Fig.7 Output characteristics of Laminar flow(a) and raft flow(b) of the Erdaoban argillaceous debris flow deposition

sdf-Soft-deposited deformation folds; bd-Pudding structure; ct-Muddy tearing chips; sv-Sandstone veins

4 沉积过程

4.1 控制因素分析

深水重力流沉积是对原生未固结沉积物进行再次搬运的产物(赵澄林等, 2001; 操应长等, 2017), 受“源-渠-汇”系统的控制(郑荣才等, 2013)。

研究区深水碎屑流具有典型的下部“层流段”、上部“筏运段”的双重构造特点, 滑塌、滑动构造较为发育, 这些特点与具有交错层理、平行层理、层内微侵蚀接触面的洪水性异重流明显不同(金杰华等, 2019b), 属于典型的滑塌型重力流。此类重力流的形成需要具备两个前提条件: 首先是充足的原始沉积物, 其次需要存在导致原始沉积物产生失稳滑塌的因素(赵澄林等, 2001; 郑荣才等, 2013; 刘建平等, 2021)。前已述及, 锆石U-Pb年龄示踪等相关研究成果指示拉贡塘组碎屑流沉积是木嘎岗日岩群再循环的产物。本文于砾质碎屑流、砂质碎屑流沉积体内发现的白云质、凝灰质等外源型砾石虽然在拉萨地块北缘的相关层位未见报道, 但最新的地质调查工作表明, 这些砾石在发育于班公湖-怒江结合带的木嘎岗日岩群中可以见到^④。这些特点表明, 拉贡塘组碎屑流活动发生于班公湖-怒江洋闭合之后, 木嘎岗日岩群开始暴露地表, 遭受剥蚀, 碎屑物朝盆地方向搬运。该地质调查工作还发现, 那曲地区拉贡塘组下部的盆地相或前三角洲相灰黑色泥岩+粉砂岩组合在靠近班公湖-怒江结合带的部位过渡成一套厚逾1000m的三角洲前缘沉积组合, 其内可见浊流沉积组合, 此种沉积特征预示着木嘎岗日岩群暴露地表后, 风化剥蚀, 碎屑物向南搬运, 并在其前(南侧)形成陡坡型三角

洲, 为碎屑流的形成奠定了丰富的物质基础。另从该三角洲前缘地带岩石普遍具有颗粒—杂基支撑结构、颗粒呈棱角状—园状和杂基含量高(25%~35%)等特点来看, 该区沉积速率较高。此种较高的堆积速率被认为不利于沉积物的充分压实, 且增加了沉积物失稳的可能(刘建平等, 2021)。构造活动也是导致沉积物失稳的重要因素(赵澄林等, 2001; 郑荣才等, 2013; 操应长等, 2017)。中—晚侏罗世期间, 拉萨地块与南羌塘—左贡地块碰撞作用强烈, 班公湖—怒江结合带向南逆冲(尼玛次仁等, 2013; 李奋其等, 2014; 胡敬仁等, 2014; 陈玉禄等, 2015), 此种较高的地壳活动性很可能造成未固结沉积物失稳, 进而沙崩、滑塌和滑动。

水道是深水碎屑流沉积物搬运的重要场所, 一般分为限制性、弱限制性和非限制性等类型(赵澄林等, 2001; 操应长等, 2017; 黄文奥等, 2020; 刘建平等, 2021)。由于后期构造抬升、河流下蚀和剥蚀作用等因素的影响, 它们之间可以相互转化。从研究区砾质碎屑流、砂质碎屑流沉积体普遍发育滑塌体等特点来看, 它们的搬运通道为一条限制性水道; 从其内的软沉积“S”型构造来看, 碎屑流朝南东方向流动(图 4b, 图 5d, 图 7a), 暗示着中晚侏罗世时期北部海拔高、南部低; 从它们的空间叠置、成分组成等特点来看, 所有碎屑流很可能在同一条水道内搬运, 北部地区经历了脉动性抬升, 南部地带相应地沉降; 从强定向排列的白云质—凝灰质等外源型砾石以及平行排列的板条状泥质撕裂屑非常发育等特点来看, 河床坡降大, 碎屑流流动快。结合碎屑流的产出位置、拉贡塘组沉积相分布(图 2b)和班公湖—怒江结合带在中晚侏罗世向南逆冲推覆等特点来看(李奋其等, 2014; 尼玛次仁等, 2013; 陈玉禄等, 2015), 该限制性水道很可能是在主控性三角洲水道基础上发育起来的深切河道。

4.2 沉积搬运过程

综上分析可知, 研究区拉贡塘组碎屑流沉积记录了一系列从三角洲水道陡岸带未固结沉积物沙崩、相继的向南固态塑性流动, 到最终在斜坡/盆地转换部位“冻结式”沉积的搬运过程。在搬运过程中, 由于河床坡降大, 崩落物自身重力沿其底面方向向下的分力(剪切力)也相应较大, 下部层流速度较快, 上部以筏运为主。同时, 陡岸带常有不同程度的滑塌、滑动事件的发生。

早期以 3 次砾质碎屑流相继发生为特点。从岩石均由深灰色细—粉砂质沉积物和“漂浮”于其中的白云质、凝灰质等高磨圆度砾石组成这一特点来看(图 3), 这些碎屑流沉积物很可能源于三角洲平原带未固结砾石层、粉—细砂层的崩落。下部为层流段, 流速大, 以强定向排列的白云质、凝灰质等外源型砾石为标志; 上部沉积物整体以同一速度作固态塑性运动, 造成外源型高磨圆度砾石保持原有的排列特征(杂乱排列); 同时, 在流经三角洲前缘带的区段, 水道陡岸带先期的未固结灰黑色泥质、粉砂质沉积层由于自身重力或者构造活动的影响, 发生失稳, 坠入于碎屑流中。

本区碎屑流活动中晚期表现为 3 次以含砾岩屑石英砂岩为代表的砂质碎屑流和以深灰色含砂泥岩、粉砂岩(杂砂岩)为代表的泥质碎屑流的交替发生。前者呈杂基—颗粒支撑结构, 杂基为细砂—泥质沉积物, 表明砂质碎屑流沉积物主要来自三角洲平原带未固结沙石层的沙崩, 其中有细砂—泥质层的参与; 下部由于层流速度大, 将其中的未固结细砂—泥质块体剪切成平行排列的、密集发育的板条状撕裂屑或者布丁体; 上部为筏运段, 在流经三角洲前缘的区段, 陡岸带未固结细砂—泥质层失稳, 坠入碎屑流中, 强大的冲击力造成砂质脉体注入。后者主要源于三角洲前缘地带未固结灰黑色泥质—粉砂质沉积层及少量中细粒沙层的崩落, 并于河床内形成砂泥混杂体; 此种砂泥混杂体下部层流作用较强, 以滑动变形构造为典型标志; 上部层位所受到的剪切力小于其屈服力, 沉积物整体以同一速度呈固态筏运。同时, 由于上举力的影响, 层流段砂质物向上聚集, 并沿筏运段的次

级裂隙注入，形成砂岩脉(图 7b)。

5 沉积模式

依据研究区碎屑流沉积特征、控制因素和沉积过程分析，结合区域地质资料 and 前人相关研究成果，建立了拉贡塘组碎屑流的沉积模式(图 8)。该模式指出：(1)中侏罗世期间，拉萨地块、羌南—左贡地块拼贴(李奋其等, 2014; Ma et al., 2017; Sun et al., 2019)，班公湖—怒江结合带俯冲增生杂岩逐步暴露地表并遭受剥蚀，在盆地北缘(班公湖—怒江结合带内)形成了三角洲沉积，为拉贡塘组碎屑流沉积的形成奠定了物质基础。(2)随着陆—陆碰撞作用的持续，班公湖—怒江结合带全面向南逆冲(尼玛次仁等, 2013; 李奋其等, 2014; 胡敬仁等, 2014; 陈玉禄等, 2015)，拉萨地块北缘挠曲沉降；此种地球背景不仅造成盆地北缘以俯冲增生杂岩为基底的三角洲沉积建造强烈抬升，还导致其内的水道下蚀活动加强，并转化成向南陡倾的深切沟谷，为沉积物的搬运创造了良好的通道。(3)水道陡岸带不同地带未固结沉积物在构造活动、地貌和自身重力等因素联合作用下，发生频繁的沙崩，先后形成一系列砾质、砂质和泥质崩落物。这些崩落物在自身重力作用下沿水道向南(盆地方向)作固态塑性流动，自早而晚总体表现为砾质碎屑流以及砂质碎屑流与泥质碎屑流的交替发生；在此过程中，陡岸带未固结沉积层发生不同程度的滑塌、滑动，滑塌体、滑动体沿碎屑流一起“筏运”，最终在斜坡/盆地的转换部位(水道口)整体“冻结式”沉积下来。(4)碎屑流依靠自身重力搬运，出山后优先选择坡降大的区域流动。在一定条件下，流体自身重力大、坡降大，则流速快、流量大和搬运距离大，自身重力小、坡降小，则流速慢、流量小和搬运距离短。二道班距水道口较远(图 8)，但坡降陡、流速快，流动构造发育，泥质碎屑流容易到达；一三〇道班虽然距水道口较近，但坡降小、流速慢，流动构造相对不发育，泥质碎屑流也较难到达。

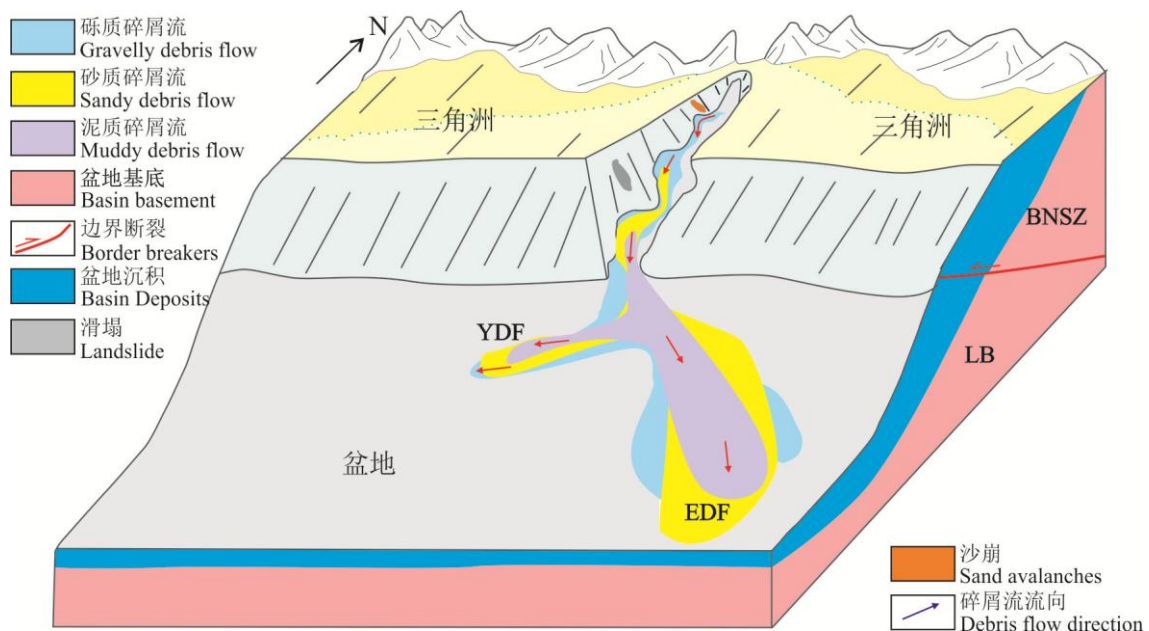


图 8 拉贡塘组碎屑流的沉积模式

BNSZ—班公湖—怒江结合带; LB—拉萨地块; EDF—二道班碎屑流; YDF—一三〇道班碎屑流

Fig.8 Depositional model of debris flow of the Lagongtang Formation

BNSZ—Bangonghu—Nujiang suture zone; LB—Lhasa block; EDF—Erdaoban debris flow; YDF—Yisanlingdaoban debris flow

6 结论

(1)那曲地区中一晚侏罗世拉贡塘组碎屑流包括砾质碎屑流、砂质碎屑流和泥质碎屑流三种类型,其内滑塌、滑动体较为发育,碎屑流沉积体普遍具有下部层流段、上部筏运段的特点。

(2)拉贡塘组的不同阶段、不同类型的碎屑流受共同的“源—渠—汇”系统控制,碎屑流沉积与水道陡岸带未固结三角洲沉积物的沙崩活动有关,早期为砾质碎屑流,晚期表现为砂质碎屑流与泥质碎屑流的交替发生。碎屑流沉积体内的滑塌、滑动体是砾质、砂质碎屑流向盆地方向(南)搬运过程中,陡岸带未固结沉积物失稳,坠(滑)入碎屑流中,并被“筏运”,最终“冻结”式沉积的产物。

(3)中一晚侏罗世班公湖—怒江结合带的向南逆冲推覆活动不仅控制了拉贡塘组碎屑流沉积的物源,还控制着搬运以及沉积过程;由于地理和地形条件等因素的限制,二道班、一三〇道班等地的碎屑流在结构上存在一定的差异。

注释

- ①张兆荣,胡小兵,徐敏,江明明,程军祥,张运香,席晓伟,刘德祥. 2013. 西藏那曲地区四幅 1:5 万区域地质调查报告[R]. 1-196
- ②孙肖,潘志龙,张建珍,吴洋,张辉,高通. 2014. 西藏班戈地区四幅 1:5 万区域地质调查报告[R]. 1-224
- ③赵玉鹏,李有波,谢晓文,孙勇,赵波,杨明文. 2015. 西藏班戈青龙乡地区四幅 1:5 万区域地质调查报告[R]. 1-182.
- ④刘朝强,袁丽伟,康鹏宇,姚超,路小平. 2017. 西藏那曲依拉山地区六幅 1:5 万区域地质调查报告[R]. 1-265

References

- Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong. 2017. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity flow[J]. *Acta Petroli Sinica*, 38(6): 607-621(in Chinese with English abstract).
- Cheng Dingsheng, Han Hui, Li Yongtie, Lei Zhenyu, Hu Zujun. 2001. Surface geochemical exploration of oil and gas in Biru Basin in northern Tibet[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 28(1): 45-47(in Chinese with English abstract).
- Chen Guorong, Liu Hongfei, Jiang Guangwu, Zeng Qinggao, Zhao Shouren, Zhang Xiangguo. 2004. Discovery of the Shamuluo Formation in the central segment of the Bangong Co-Nujiang River suture zone, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 193-202(in Chinese with English abstract).
- Chen Xi, Wang Chengshan, Hu Xiumian, Huang Yongjian, Wei Yushuai, Wang Pingkang. 2008. Petrology and evolution history from Late Jurassic to Paleogene of Gyangze Basin, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 616-624(in Chinese with English abstract).
- Chen Yulu, Chen Guorong, Zhang Kuangzhong. 2015. Geological survey report of Bangor County sheet at scale 1:250000. Wuhan: China University of Geosciences Press, 45-70(in Chinese).
- Clare M A, Talling P J, Challenor P, Malgensini G, Hunt J. 2014. Distal turbidites reveal a common distribution for large (>0.1 km³) submarine landslide recurrence[J]. *Geology*, 42(3): 263-266.
- Deng Jinhua, Yuan Zhenguo, Yu Jiang, Du Changfa, Tang Zongyuan, Sun Sheliang, Lu Xin, Zhong Wen, Wan Chuan, Zhong Junjing. 2017. New discovery of the basal conglomerate in the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Shamuluo Formation in western part of Bangong Lake-Nujiang River suture zone and its geological significance[J]. *Geological Review*, 63(2): 302-310(in Chinese with English abstract).
- Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Wei Qinlian, Chen Faliang, Chen Jun, Zhu Dengfeng, Liu Yun. 2012. Reviews on fluid properties and sedimentary characteristics of debris flows and turbidity currents[J]. *Advances in Earth Science*, 27(8): 815-827(in Chinese with English abstract).
- Haughton P, Davis C, Mccaffre Y W, Barker S. 2009. Hybrid sediment gravity flow deposits-classification, origin and significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 26(10): 1900-1918.
- Huang Wenao, Zhao Xiaoming, Tan Chengpeng, Ge Jiawang, Feng Shuangqi, Li Chenxi, Lu Wenming. 2020. Sedimentary model analysis of Triassic deep-water channels in Zhihelong, west Qinling mountains[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(5): 1061-1075 (in Chinese with English abstract).
- Huang Tongtong, Xu Jifeng, Chen Jianlin, Wu Jianbin, Zeng Yunchuan. 2017. Sedimentary record of Jurassic northward subduction of the

- Bangong–Nujiang ocean: Insights from detrital zircons[J]. *Int. Geol. Rev.*, 59, 166–184.
- Hu Jingren, Gao Tigang, Chen Guojie. 2014. Geological survey report of Biru County sheet at scale 1:250000[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 56–80(in Chinese).
- Iverson R M, Reid M E, LaHusen R G. 1997. Debris-flow mobilization from landslides[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 25: 85–138.
- Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, Yang Tian, Zhou Lei. 2019a. Deep-water sandy debris flow deposits: Concepts, sedimentary processes and characteristics[J]. *Geological Review*, 65(3): 689–701(in Chinese with English abstract).
- Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, Yang Tian, Liu Juan, Wang Xinyi, Wang Shuping. 2019b. New discovery of hyperpycnal flow deposits in the E_1^x section of the steep slope belt in the Weixinan Sag[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 250–258(in Chinese with English abstract).
- Johnson A M. 1970. *Physical Processes in geology*[M]. San Francisco: Freeman, 577.
- Kuenen P H, Migliorini C I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. *Journal of Geology*, 58(2): 91–127.
- Liang Chao, Xie Xinong, Shi Guanzhong. 2018. Depositional mechanisms and geological significances of sediment gravity flow deposits in the Upper Member of Middle Permian Zhesi Formation in Mandula area, Inner Mongolia[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(6): 54–64(in Chinese with English abstract).
- Li Fenqi, Liu Wei, Geng Quanru. 2009. Zircon LA–ICP–MS U–Pb ages of the Mesozoic volcanic rocks in the Nagqu area of Gangdise in Tibet and their Geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6): 781–790(in Chinese with English abstract).
- Li Fenqi, Liu Wei, Zhang Shizheng, Li Yong. 2014. The evidence of earth dynamic background conversion in the North–Central Gangdese and its adjacent regions during Middle Jurassic–Early Cretaceous[J]. *Geological Review*, 60(6): 1297–1308(in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Yong Yongyuan. 2000. Sedimentary characteristics and trace elements geochemistry of Middle–Upper Jurassic turbidite in Nagqu basin, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 373–790(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianping, Xian Benzong, Zhang Li, Su Ming, Li Yuzhi, Yan Haiqing, Wang Zhen, Chen Peng. 2021. Depositional process and model of debrite dominated deep-water system in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.2021.0302.1616.005.html>(in Chinese with English abstract).
- Li Shun, Ding Lin, Carl G, Fu Jiajun, Xu Qiang, Yue Yahui, Rennto Henrique–Pinto. 2017. The Subduction–accretion history of the Bangong–Nujiang ocean: Constraints from provenance and geochronology of the Mesozoic strata near Gaize, Central Tibet[J]. *Tectonophysics*, 702: 42–60.
- Li Xiangbo, Wei Pingsheng, Liu Huaqing, Wang Jing. 2013. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model[J]. *Geological Review*, 59(4): 607–614(in Chinese with English abstract).
- Ma Anlin, Hu Xiumian, Eduardo Garzanti, Zhong Han, Wen Lai. 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang Basin: implications for the Lhasa–Qiangtang collision timing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 506: 30–47.
- Meng Qingren, Qu Hongjie, Hu Jianmin. 2007. Triassic deep water deposits in west Qinling and Songpan Terranes[J]. *Science China Earth Sciences*, 37(Supplement): 209–223(in Chinese with English abstract).
- Mulder T, Syvitski J P, Migeon S, Faugeres J, Savoye B. 2003. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6–8): 861–882.
- Nima Ciren, Xie Yaowu, Sha Zhaoli. 2013. Geological survey report of Nagqu County sheet at scale 1:250000[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 35–90(in Chinese).
- Pan Guitang, Wang Liquan, Li Rongshe, Yuan Sihua, Ji Wenhua, Yin Fuguang, Zhang Wanping, Wang Baodi. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Qiang Kunsheng, Zhang Guangxue, Zhang Li, Lv Baofeng, Zhong Guangjian, Feng Changmao, Yi Hai, Zhao Zhongquan, Yang Zhen, Yan Wei. 2018. A study of depositional characteristics of the Jurassic strata in Chaoshan Sub–basin, northern South China Sea, and its control on reservoir beds[J]. *Geology in China*, 45(1): 48–58(in Chinese with English abstract).
- Shanmugam G. 1996. High–density turbidity currents: are they sandy debris flows? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 2–10.
- Shanmugam G. 2012. New perspectives on deep-water sandstones: Origin, recognition, initiation and reservoir quality[J]. Amsterdam: Elsevier, 1–86.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): Deep–water processes and facies models–a critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285–342.
- Sun Gaoyuan, Hu Xiumian, Xu Yiwei, Marcelle K. BouDagher–Fadel. 2019. Discovery of Middle Jurassic trench deposits in the Bangong–Nujiang

- suture zone: Implications for the timing of Lhasa–Qiangtang initial collision[J]. *Tectonophysics*, 750: 344–358
- Talling P J, Wynn R B, Masson D G, Franz M, Cronin B T, Schiebel R, Akhmetzhanov A M, Dallmeier S, Benetti S, Weaver P P E, Georgiopoulou A, Zihlsdorff, Amy L A. 2007. Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide[J]. *Nature*, 450(7169): 541–544.
- Tang Juxing, Yang Huanhuan, Song Yang, Wang Liqiang, Liu Zhibo, Li Baolong, Lin Bin, Peng Bo, Wang Genhou, Zeng Qinggao, Wang Qin, Chen Wei, Wang Nan, Li Zhijun, Li Yubin, Li Yanbo, Li Haifeng, Lei Chuanyang. 2021. The copper polymetallic deposits and resource potential in the Tibet Plateau, *China Geology*, 4, 1-16. doi: 10.31035/cg2021016.
- Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, Tan Fuwen, Chen Ming, Hu Ping, Li Yalin, Gao Rui, Fang Hui, Zhu Lidong, Li Qiusheng, Zhang Minghua, Li Zhongxiong, Du baiwei, Fu Xiugen, Wan Fang, Zhang Jianlong, Chen Wenbin, Ling Xiaoming. 2009. Investigatin and evaluation of oil and gas resources strategic selection in the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 30–70(in Chinese).
- Wang Liquan, Pan Guitang, Ding Jun, Luo Jianning, Yan Yangji, Zheng Jiankang, Wang Peisheng, Chen Yongmin, Mo Xuanxue, Zhang Kexin, Wang Guocan, Wang Baodi, Li Rongshe, Zhu Dicheng, Xiang Shuyuan, Liu Hongfei, Jiang Xinsheng, Zhu Tongxing, Yuan Sihua, Zhang WanPin, Ji Wenhua, Geng Quanru, Dong Guochen, Yin Fuguang. 2013. Geotectonic map and instrucionts in Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions(1:1.5million). Beijing: Geological Publishing Houses,18–84(in Chinese with English abstract).
- Wang Xianmei, Wu Xinhe, Zheng Herong, Wang Yi. 2011. Source rock features of the Middle-Upper Jurassic Lagongtang Formation in Biru Basin, Tibet Plateau[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 41–47(in Chinese with English abstract).
- Xie Guogang, Xiao Zhijian, Zou Aijian, Ouyang Kegui, Cao Shenghua, Xiao Yebin, Liao Liugen, Deng Shiquan, Feng Guosheng, Xu Ping, Liu Qinghong, Chen Zhenhua. 2015. Geological survey report of Kala sheet and Ritu County Sheet at Scale 1 : 250000. Wuhan: China University of Geosciences Press, 45–54(in Chinese).
- Xizang Bureau of Geology and Mineral Resources, 1997. Tibet Lithostratigraphy[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 163–190(in Chinese).
- Yang Tian, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Zhang Shaomin. 2015. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flows: A case study of the Middle Submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1048–1059(in Chinese with English abstract).
- Yu Anguang. 1997. Gravity flow deposition in the Lagongtang Formation of the Kangyu region, Xizang[J]. *Palaeogeography*, 17(6): 39–44(in Chinese).
- Yuan Jing, Liang Huiyuan, Liang Bing, Dong Daotao, Min Wei, Song Fan, Li Heyong. 2016. Sedimentary characteristics and development model of lacustrine gravity flow: A case study of Dainan Formation in deep sag belt of Gaoyou Depression, Northern Jiangsu Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(3): 348–359(in Chinese with English abstract).
- Yu Shimian, Ma Xudong, Hu Yanchun, Chen Wei, Liu Qingping, Song Yang, Tang Juxing, 2021. Post-subduction evolution of the Northern Lhasa Terrane, Tibet: Constraints from geochemical anomalies, chronology and petrogeochemical characteristics[J]. *China Geology*, doi: 10.31035 /cg2021045.
- Zeng Min, Zhang Xiang, Cao Hui, Frank R. Etensohn, Chen Wenbin, Lang Xinghai. 2016. Late Triassic initial subduction of the Bangong–Nujiang ocean beneath Qiangtang revealed: Stratigraphic and geochronological evidence from Gaize, Tibet[J]. *Basin Research*, 28: 147–157.
- Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. 2001. Sedimentary Petrology (3rd Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 311–325 (in Chinese).
- Zhang Shizheng, Xiang Shuyuan, Wang Jun, Mao Xin. 2010. LA–ICP–Ms U–Pb geochronology of detrital zircons from Biru Basin of Tibet and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(5): 15–22(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Zheng Zhe, Gao Boyu, Hu Xiaoqing, Wang Changyong. 2013. Sedimentary features of the gravity flows in submarine fan of Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 25(2): 1–8(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 操应长, 杨田, 王艳忠. 2017. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. *石油学报*, 38(6): 607–621.
- 程顶胜, 韩慧, 李永铁, 雷振宇, 胡祖军. 2001. 藏北比如盆地油气地表地球化学勘探[J]. *石油勘探与开发*, 28(1): 45–47.
- 陈国荣, 刘鸿飞, 蒋光武, 曾庆高, 赵守仁, 张相国. 2004. 西藏班公湖–怒江结合带中段沙木罗组的发现[J]. *地质学报*, 23(2): 193–202.
- 陈曦, 王成善, 胡修棉, 黄永建, 魏玉帅, 王平康. 2008. 西藏南部江孜盆地上侏罗统至古近系沉积岩石学特征与盆地演化[J]. *岩石学报*,

616-624.

- 陈玉禄, 陈国荣, 张宽忠. 2015. 1:250000 班戈县幅区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 45-70.
- 邓金火, 袁振国, 余江, 杜昌法, 唐宗源, 孙社良, 吕鑫, 钟文, 万川, 钟俊靖. 2017. 班公湖—怒江结合带西段沙木罗组底砾岩的新发现及地质意义[J]. 地质论评, 63(2): 302-310.
- 高红灿, 郑荣才, 魏钦廉, 陈发亮, 陈君, 朱登锋, 刘云. 2012. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展[J]. 地球科学进展, 27(8): 815-827.
- 黄文奥, 赵晓明, 谭程鹏, 葛家旺, 冯双奇, 李晨曦, 陆文明. 2020. 西秦岭直合隆地区三叠系深水水道沉积模式分析[J]. 沉积学报, 38(5): 1061-1075.
- 胡敬仁, 高体岗, 陈国结. 2014. 1:250000 比如县幅区域地质调查报告[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-229.
- 金杰华, 操应长, 王健, 杨田, 周磊. 2019a. 深水砂质碎屑流沉积: 概念、沉积过程与沉积特征[J]. 地质论评, 65(3): 689-701.
- 金杰华, 操应长, 王健, 杨田, 刘娟, 王心悻, 王淑萍. 2019b. 湘西南凹陷陡坡带流一段上亚段异重流沉积新发现[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 26(4): 250-258.
- 梁超, 解习农, 史冠中. 2018. 内蒙古满都拉地区中二叠统哲斯组上段重力流堆积的沉积机制及地质意义[J]. 地质科技情报, 37(6): 54-64.
- 李奋其, 刘伟, 耿全如. 2009. 西藏冈底斯带那曲地区中生代火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地质意义[J]. 地球学报, 31(6): 781-790.
- 李奋其, 刘伟, 张士贞, 李勇. 2014. 冈底斯中北部及邻区中侏罗世—早白垩世地球动力背景转换的证据[J]. 地质论评, 60(6): 1297-1308.
- 李光明, 雍永源. 2000. 藏北那曲盆地中—上侏罗统拉贡塘组浊流沉积特征及微量元素地球化学[J]. 地球学报, 21(4): 373-378.
- 刘建平, 鲜本忠, 张莉, 苏明, 李宇志, 闫海清, 王震, 陈鹏. 2021. 渤海湾盆地东营凹陷碎屑流主控型深水体系沉积过程及模式[J]. 中国地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210302.1616.005.html>.
- 李相博, 卫平生, 刘化清, 王菁. 2013. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J]. 地质论评, 59(4): 607-614.
- 孟庆任, 渠洪杰, 胡健民. 2007. 西秦岭和松潘地体三叠系深水沉积[J]. 中国科学: 地球科学, 37(增刊): 209-223.
- 尼玛次仁, 谢尧武, 沙昭礼. 2013. 1:250000 那曲县幅区域地质调查报告[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 35-90.
- 强昆生, 张光学, 张莉, 吕宝凤, 钟广见, 冯常茂, 易海, 赵忠泉, 杨振, 鄢伟. 2018. 南海北部潮汕坳陷侏罗系沉积特征及对储层的控制作用研究[J]. 中国地质, 45(1): 48-58.
- 王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文, 陈明, 胡平, 李亚林, 高锐, 方慧, 朱利东, 李秋生, 张明华, 李忠雄, 杜佰伟, 付修根, 万方, 张建龙, 陈文彬, 凌小明. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 30-70.
- 王立全, 潘桂棠, 丁俊, 姚冬生, 罗建宁, 颜仰基, 郑建康, 王培生, 陈永民, 莫宣学, 张克信, 王国灿, 王保弟, 李荣社, 朱弟成, 向树元, 刘鸿飞, 江新胜, 朱同兴, 袁四化, 张万平, 计文化, 耿全如, 董国臣, 尹福光. 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:150 万)[M]. 北京: 地质出版社, 18-84.
- 王先美, 伍新和, 郑和荣, 王毅. 2011. 青藏高原比如盆地中—上侏罗统烃源岩[J]. 石油学报, 32(1): 41-47.
- 谢国刚, 肖志坚, 邹爱建, 欧阳克贵, 曹圣华, 肖业斌, 廖六根, 邓世权, 冯国胜, 徐平, 刘庆宏, 陈振华. 2015. 1:250000 日土县幅区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 45-54.
- 西藏自治区地质矿产局. 1997. 西藏岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 163-190.
- 杨田, 操应长, 王艳忠, 张少敏. 2015. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制—以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例[J]. 石油学报, 36(9): 1048-1059.
- 喻安光. 1997. 西藏康玉地区拉贡塘组的重力流沉积[J]. 岩相古地理, 17(6): 39-44.
- 袁静, 梁绘媛, 梁兵, 董道涛, 闵伟, 宋璠, 李鹤永. 2016. 湖相重力流沉积特征及发育模式—以苏北盆地高邮凹陷深凹带戴南组为例[J]. 石油学报, 37(3): 348-359.
- 赵澄林, 朱筱敏. 2001. 沉积岩石学(第三版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 311-325.
- 张士贞, 向树元, 万俊, 毛鑫. 2010. 西藏比如盆地碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质科技情报, 29(5): 15-22.
- 郑荣才, 郑哲, 高博禹, 胡晓庆, 王昌勇. 2013. 珠江口盆地白云凹陷珠江组海底扇深水重力流沉积特征[J]. 岩性油气藏, 25(2): 1-8.