

前陆盆地形成与演化砂箱物理模拟启示

——以四川盆地西部龙门山为例

邓宾¹,何宇¹,黄家强²,罗强¹,杨荣军²,于豪²,张静²,刘树根¹

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059;

2. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:通过砂箱物理模拟实验揭示冲断带-前陆盆地系统形成演化过程中,单一构造剥蚀、沉积作用和剥蚀-沉积耦合过程对其盆-山系统形成演化的控制影响作用,尤其聚焦于龙门山-川西前陆盆-山系统沿走向变化的构造剥蚀-沉积作用对其盆-山系统的控制作用。单一构造剥蚀作用过程模拟揭示浅表剥蚀作用强度与冲断带楔形体楔长、楔高呈负相关性;构造剥蚀作用使冲断带后缘逆冲断层更加易于发生断层再活化与无序冲断,制约着冲断带前陆向扩展。浅表沉积作用导致楔形体前缘冲断层上覆物质加载、更易于发生断层闭锁,促使冲断带楔形体前陆向/前展式扩展生长。沿走向变化的剥蚀-沉积作用过程导致冲断带楔形体后缘深部层系剥蚀走向变化、断层产状变陡,前陆盆地中前陆向断层明显减小、其倾角减缓,且反向冲断作用加强(乃至导致主断层反向冲断),尤其走向差异性导致前陆盆地发育斜向断层。受控于龙门山冲断带-川西前陆盆地系统晚三叠世以来走向差异性剥蚀-沉积作用,川西前陆盆地中南段发育晚白垩世-新生代再生前陆盆地,可能形成前陆盆地前缘斜向断层-龙泉山断层。

关键词:剥蚀-沉积;楔形体;前陆盆地;砂箱模型;龙门山;四川盆地西部

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Analogue modeling insights to foreland basin growth:

A case study on the Longmenshan thrust belt in western Sichuan Basin

Deng Bin¹, He Yu¹, Huang Jiaqiang², Luo Qiang¹, Yang Rongjun², Yu Hao², Zhang Jing², Liu Shugen¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Analogue modeling of the formation and evolution of Longmenshan belt and foreland basin system in western Sichuan Basin reveals a strong impact of tectonics, erosion, and sedimentation as well as of the interactions between the later two processes, especially those changing along the strike of the system. The modeling shows a negative relationship between wedge geometry (i. e., length and height) and surface erosion magnitude. Heavier erosion makes it easier for faults at the back of the wedge to thrust in a random sequence and be reactivated, thus stopping the wedge from further forelandward propagating. While surface sedimentation, that adds to the layers overlying the thrusts and increases the possibility of fault locking, serves to facilitate the forelandward propagation of the wedge. Changing (e. g., increasing) erosion-sedimentation process along the strike of the wedge results in a direction shift of the strike of deep strata and steeper faults at the back of the wedge, some evidently shrinking forelandward faults with smaller dips and increasing backthrusting and the formation of oblique ramps in the foreland basin. We therefore conclude that it is this changing or differential erosion-sedimentation process in the Longmenshan belt and foreland basin system since the Late Triassic that controls the development of a rejuvenated foreland basin with a possible oblique ramp (Longquanshan fault) from the Late Cretaceous to Cenozoic.

Key words: erosion-sedimentation, wedge, foreland basin, analogue modelling, Longmenshan, western Sichuan Basin

收稿日期:2020-11-16;修订日期:2021-01-28。

第一作者简介:邓宾(1980—),男,教授、博士生导师,含油气盆地分析与成藏规律。E-mail:dengbin13@mail.cdut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U19B6003);四川省自然科学基金项目(2018JZ0078)。

地壳浅表构造作用过程,即剥蚀-沉积作用过程,在不同时间和空间尺度上控制影响着褶皱冲断带-前陆盆地系统的应力-应变机制,对其盆-山系统中物质-能量传输运移过程具有重要控制作用,通常导致岩石构造变形、抬升剥蚀与沉积过程等处于动态平衡状态^[1-2]。尤其是20世纪80年代Davis, Dahlen 和 Suppe 等奠基性诠释冲断带-前陆盆地系统基础模型^[3-4],揭示冲断带-前陆盆地系统受控于浅表构造作用,其构造变形与地貌建造过程可分为临界稳态平衡状态、亚稳态状态和超稳态状态,即(遵循库伦临界楔理论)自相似性生长过程^[3-5]。基于构造(数值和物理)模拟实验表明,加强的浅表构造作用将会使冲断带-前陆盆地系统从稳态平衡状态向非稳态平衡状态转化,导致盆-山系统楔形体抬升剥蚀、(楔顶角)几何形态变化、断层多期活化、热对流和非稳态地貌建造过程等^[6-9]。但当前大量模型模拟实验缺少对构造剥蚀-沉积作用及其耦合过程中物质通量的定量化研究,因而缺少对褶皱冲断带-前陆盆地系统稳态和非稳态浅表作用过程的定量化对比^[5,10]。

川西龙门山冲断带-川西前陆盆地系统是整个高原周缘乃至世界上地形梯度最大的地区,受控于龙门山冲断带多期冲断卸载作用发育典型的晚三叠世和新生代前陆盆地复合结构^[11-14],晚中生代-新生代快速抬升剥蚀作用导致其前陆盆地多期演化明显受控于浅表构造剥蚀-沉积耦合作用过程,受到国内外高度关注^[15-16]。因此,本文主要基于砂箱物理模型模拟实验,以典型剥蚀、沉积及其剥蚀-沉积耦合作用过程开展模拟实验,系统阐述褶皱冲断带-前陆盆地系统中浅表作用过程(即剥蚀-沉积作用),进一步与龙门山冲断带-川西前陆盆地系统对比,揭示构造剥蚀-沉积耦合过程对其冲断带-前陆盆地系统演化过程的控制影响作用。

1 浅表构造剥蚀-沉积作用过程砂箱物理模拟边界条件

库伦临界楔理论强调,构造缩短变形导致褶皱冲断带-前陆盆地系统形成典型楔形体结构,其内部变形与缩短作用导致楔形体楔高和楔长增大、楔顶角也逐渐增大(图1a,b),使其从亚稳态状态逐渐过渡为动态平衡状态生长过程。浅表构造剥蚀-沉积作用导致冲断带-前陆盆地系统物质通量和楔顶角几何形态等改变,冲断带发生构造剥蚀作用不仅导致大量剥蚀物

质沉积充填于前陆盆地系统内,同时也使挤压变形楔形体系统构造几何形态发生重要变化^[17-19]。尤其是浅表构造剥蚀-沉积作用具有典型的互馈机制,即剥蚀时空范围和强度与构造变形、物质输导和沉积模式等具有瞬时动态响应性,它们共同控制着挤压楔形体前缘叠瓦冲断、后缘构造缩短加积与双重构造等动态演化过程。因此,把自然界原型中浅部构造剥蚀-沉积作用作为2种典型的独立机制进行模拟对比,分别设置剥蚀标准模型(图1c)和沉积标准模型(图1d)。在此基础上进行第三组剥蚀-沉积耦合过程模拟实验进一步揭示构造缩短过程中剥蚀-沉积作用耦合过程及其在走向空间上变化所导致的楔形体结构-构造差异性特征。

当挤压导致其缩短量(D)为100 mm(缩短率12%),砂箱物质形成稳态楔形体后,开始针对楔形体物质进行同剥蚀作用(E1组-E3组)、沉积作用(S1组-S3组)或剥蚀-沉积耦合作用。所有剥蚀标准模型中,为进行稳态剥蚀和非稳态剥蚀作用过程对比,分别采用 4° 、 8° 和 12° 剥蚀包络线进行剥蚀(基于楔顶角和 4° 、 8° 和 12° 包络线阈值大小判定,图1c),每缩短20 mm(缩短率2.5%)进行不同强度的剥蚀作用(楔顶角越大、剥蚀作用越强)。需要指出的是 12° 楔顶角剥蚀面与本次使用石英砂临界楔顶角角度大致相当,因此能够有效代表稳态剥蚀作用过程。构造沉积标准模型中,为进行可容纳空间变化即差异性沉积充填作用对比,每缩短20 mm分别采用饥饿性、过渡性和饱和性沉积作用开展模拟实验,总计进行10次同构造沉积作用。饥饿性沉积作用模型中(被剥蚀)物质主要充填于楔形体前渊带(约10 cm空间带),过渡性沉积作用模型中物质主要充填于楔形体部分楔顶盆地和楔形体前渊带,它们都以楔顶角趋势面限定其最大可容纳空间;饱和性沉积作用模型与过渡性沉积作用模型相似,但采用临界楔顶角代表楔形体前陆盆地最大可容纳沉积空间(图1d)。同构造剥蚀-沉积耦合过程中(剥蚀和沉积物质通量守恒),当楔形体挤压形成稳态楔顶角后,每次剥蚀高度为15 mm,每间隔挤压缩短50 mm,进行同构造剥蚀-沉积作用1次,总计剥蚀-沉积3次(图1e)。为对比构造剥蚀-沉积作用对砂箱物质变形的控制影响作用,实验过程中把砂箱平面上等分为两部分,一部分作为标准对比实验未进行相关剥蚀-沉积作用模拟,另外一部分进行相关剥蚀-沉积耦合作用模拟(后述详见)。

为排除自然界中不同岩性地层对于浅表剥蚀作用抗风化能力和构造沉积作用即“从源到汇”过程输导

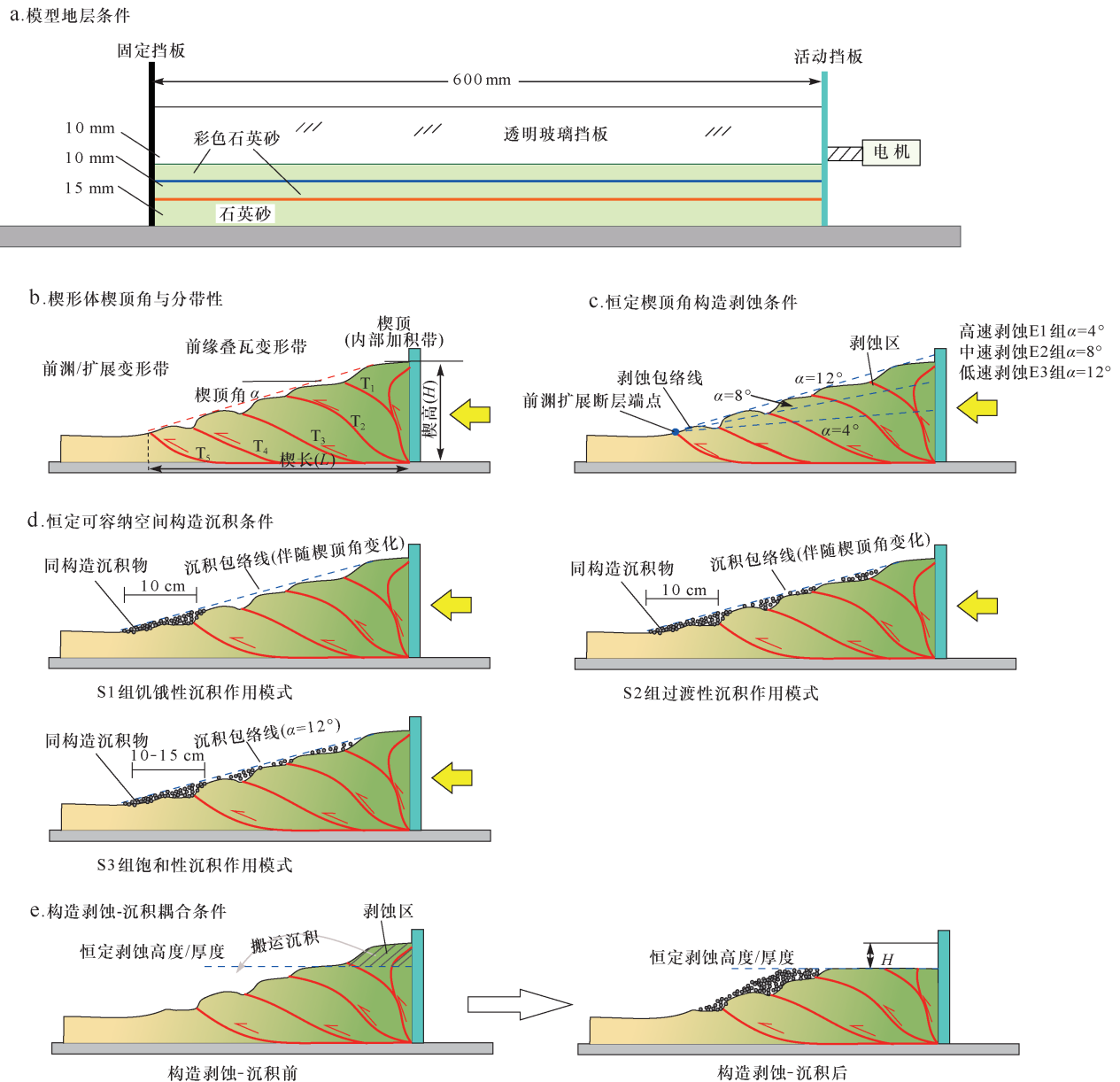


图1 四川盆地西部龙门山砂箱物理模型构造剥蚀-沉积作用边界条件设计

Fig. 1 Diagrams showing the analogue modelling design of the Longmenshan thrust belt under the tectonic erosion-sedimentation process

能力差异性,本次所有物理模型模拟实验中均采用均值石英砂进行实验对比。实验中使用石英砂具有中等磨圆、较好分选性,平均粒度和密度分别为0.2~0.3 mm和1.35g/cm³,石英砂内摩擦角和摩擦系数分别为29°~31°和0.58,其临界楔顶角大致为10°~12°^[19]。均值石英砂物质通过匀速筛网自动铺设成长宽高为800 mm×400 mm×35 mm的均值体,每7 mm厚度石英砂铺设约1 mm厚彩色石英砂作为标志层以便于构造变形过程监测和量化对比等。

石英砂普遍具有近似线性的库伦-摩尔破裂变形行为和近似为零的内聚力值,能够基于相似比属性有效模拟0~10 km浅表地壳构造变形过程^[7,20-24]条件

下应变的比例系数能够通过物理模型与自然界模型比例系数来表达:

$$\sigma^* = \rho^* l^* g^* \quad (1)$$

式中: σ^* 为应变比例系数,无量纲; ρ^* , l^* 和 g^* 分别为物理模型和自然模型的密度、长度和重力间比例系数,均为无量纲。

因此计算得到 $\sigma^* = 0.74 \times 10^{-6}$ 。若自然界岩石剪切强度为1~20 Ma,则物理模型内聚力强度约为0~100 Pa,它们普遍适用于正常重力条件下砂箱物理模型。本次实验模型中采用挤压速率为0.003 mm/s,总挤压缩短量为300 mm,缩短率为38%,进行相关模型模拟对比实验。

2 实验结果

2.1 剥蚀标准实验模拟结果

剥蚀标准实验模拟过程以中等剥蚀速率 E2 组 (8° 楔顶角剥蚀包络线) 为例说明。伴随持续挤压缩短变形, 砂箱物质持续发生前陆向断层扩展冲断, 当缩短率达到 12% (或缩短量 $D = 100$ mm) 时, 依次形成 4 条前陆向断层, 楔长和楔高同时快速增长到 125 mm 和 70 mm, 且楔顶角约为 $13^\circ \sim 15^\circ$ (大于 8° 楔顶角剥蚀包络线), 因此以前缘扩展断层端点的 8° 楔顶角剥蚀包络线进行第一次构造剥蚀作用 (图 2a, 图 3; 表 1)。随后继续挤压变形, 当缩短率为 15% 时, 形成前陆向断层 T_5 , 但楔顶角为 8° , 因此未对砂箱物质进行剥蚀; 但挤压缩短伴随楔形体后缘断层 T_2-T_4 发生明显旋转与冲断变形, 楔形体增高显著。当缩短率为 18% 时, 形成 T_6 前陆向断层, 楔顶角大于 8° 剥蚀包络线, 进行第二次构造剥蚀作用, 导致楔形体中深部黑色标志层物质剥蚀 (图 2b, 图 3)。随后的持续挤压缩短过程中, 楔形体后缘断层发生挤压再活化冲断作用, 因此其楔长微弱变化, 但楔高持续冲断变形增大。当缩短率为 25% 时, 楔形体扩展变形形成第二个冲起构造及其 T_7 冲断层, 楔长发生

跳跃式增大, 但其楔顶角明显小于 8° 剥蚀楔顶角阈值而未进行剥蚀。当缩短率为 28% 时, 进行第三次构造剥蚀作用, 导致楔形体中底部红色标志层物质剥蚀, 其楔高发生明显减小 (图 2c, 图 3)。随后至最终缩短率为 38% 时, 楔形体楔顶角持续小于 8° 剥蚀楔顶角阈值, 因而未再发生构造剥蚀, 但楔形体后缘断层 T_4-T_7 冲断与旋转变形作用显著, 形成高角度一直立断层体系, 其楔高和楔长分别为 80 和 200 mm。

E1 组高速剥蚀作用实验过程中, 砂箱物质受到后缘挤压作用形成稳定的楔形体后, 随后持续挤压过程中由于 4° 剥蚀角近似水平, 每挤压缩短 2.5% ($D = 20$ mm) 楔形体轻微升高都会达到剥蚀条件从而发生 10 次构造剥蚀作用, 导致楔长和楔高分别在 100 和 60 mm 波动变化, 但总体保持恒定 (图 3), 显示出强构造剥蚀作用导致冲断带断层显著多期活动, 对前陆盆地系统扩展生长过程具明显抑制作用。伴随持续挤压缩短变形, 砂箱物质仅形成一个冲起构造, 楔形体前缘断层呈叠瓦状, 形成总数达到 10 条逆冲断层。E3 组低速剥蚀作用以 12° 临界楔顶角为剥蚀角度阈值, 由于砂箱楔形体伴随挤压缩短过程普遍遵循临界楔理论及其自相似性生长原理, 因此本组实验中剥蚀次数相对于前两组明显减小 (总计 3 次剥蚀), 剥蚀量微乎其微。

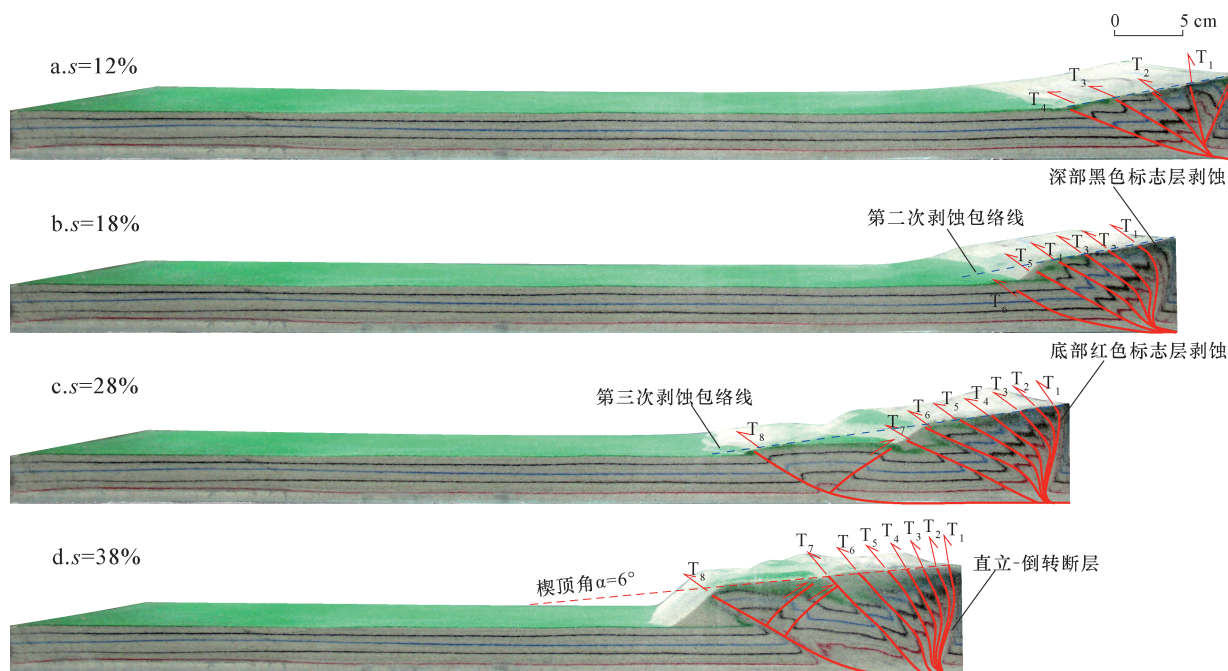


图2 四川盆地西部龙门山中等速率构造剥蚀作用(E2组)砂箱物理实验过程

Fig. 2 Diagrams showing the structural evolution of an accretionary wedge under medium-rate erosion (E2)

in the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

s. 缩短率; T_1-T_8 . 分别为序次形成断层

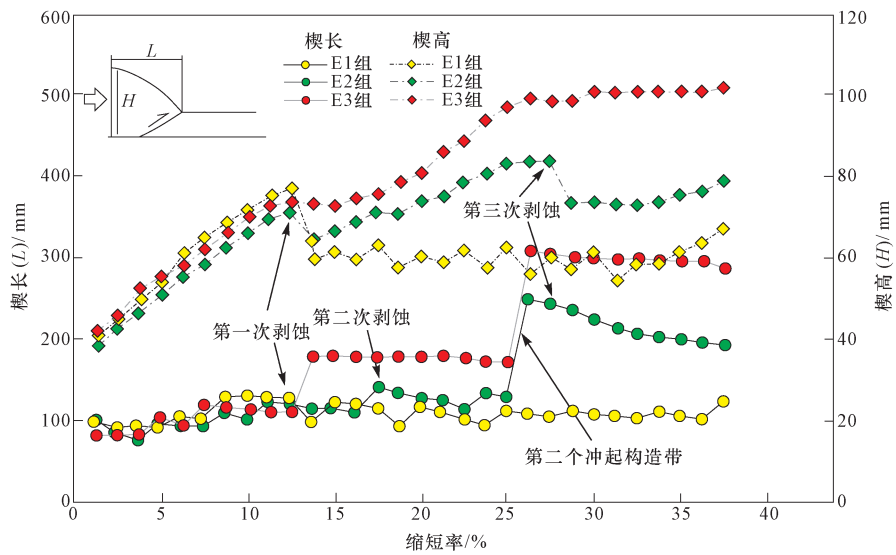


图 3 四川盆地西部龙门山不同强度构造剥蚀实验过程楔形体楔高/楔长与缩短率关系

Fig. 3 Accretionary wedge geometry vs. shortening rate of the Longmenshan thrust belt in western Sichuan Basin under different erosion intensity scenarios

表 1 四川盆地西部龙门山构造剥蚀作用实验剥蚀/新生断层与缩短率变化综合对比特征

Table 1 Summary of erosion/new fault and shortening rates in tectonic erosion modelling of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

组别	挤压缩短率%										
	12	15	18	20	23	25	28	30	33	35	38
E1	E/T ₄	E/T ₅	E	E/T ₆	E	E/T ₇	E	E/T ₈	E	T ₉	E/T ₁₀
E2	E/T ₄	T ₅	E/T ₆	—	—	T ₇	E/T ₈	—	—	—	—
E3	E/T ₄	—	—	—	E	E	T ₅	—	—	—	—

E. 代表剥蚀;T_n. 代表新生的第几条断层;—. 代表实无剥蚀和新生断层形成。

受控于楔形体楔顶角和剥蚀角阈值变化,总体上构造剥蚀次数随着浅表剥蚀强度减小(即剥蚀角阈值增大)而减小,楔形体楔长、楔高与剥蚀强度呈负相关性(图3;表1),虽然楔形体普遍具前陆向冲断扩展特征,形成典型叠瓦冲断层,但强构造剥蚀作用明显增强楔形体冲断扩展变形作用,形成多条叠瓦冲断层,如:E1组到E3组伴随构造剥蚀作用减弱其冲断层数量明显减小。对于低速剥蚀作用(E3组12°剥蚀角)结果,进一步与无剥蚀作用的实验结果对比表明,二者几何学以及断层展布样式上总体相似,揭示出低速剥蚀作用对于楔形体演化过程及其特征影响作用及其微弱。

2.2 沉积标准实验模拟结果

构造沉积标准实验模拟过程以饱和性沉积模拟实验S3组为例说明(图4)。当12%缩短率时形成稳定的楔形体后(图4a),在楔形体前缘叠瓦变形带-扩展变形带初次进行石英砂物质的同沉积,沉积端点在前缘断点处10~15 cm,保持楔形体楔顶角为12°。随后挤压过程中,伴随持续在楔形体前缘添加同沉积石英

砂,楔形体后缘持续缩短变形导致楔形体高度逐渐增大。通过断层与同沉积地层交切关系,能够发现早期后缘断层未发生明显的断层冲断活动(如:T₁—T₃),因此楔形体高度变化主要归因于前缘断层冲断活动(如:T₄—T₆),导致后缘断层发生被动旋转变形和楔形体增高(图4b,c)。当30%缩短率时,楔形体前缘发生扩展变形形成第二个冲起构造和T₇冲断层,以T₇冲断层为标志点在其前缘和楔顶沉积石英砂物质(第七次沉积)、并保持恒定楔顶角(图4d)。由于实验过程中我们持续在楔形体前缘沉积石英砂物质,因此楔形体长度呈持续缓慢式增长,不同于同构造剥蚀实验中发生显著的“跃迁式”增长。随后挤压缩短变形过程中,由于楔顶角普遍较大,沉积石英砂物质主要发生在T₇断层前缘区域,保持恒定楔顶角度,但持续挤压缩短变形导致楔形体扩展变形带同构造沉积地层逆冲牵引变形特征显著(图4e,f),其背负盆地反向冲断缩短等变形明显;至38%缩短率时,楔形体长度和高度逐渐生长为500 mm和100 mm(图5)。

通过对于同沉积地层的识别,能够明显发现楔形

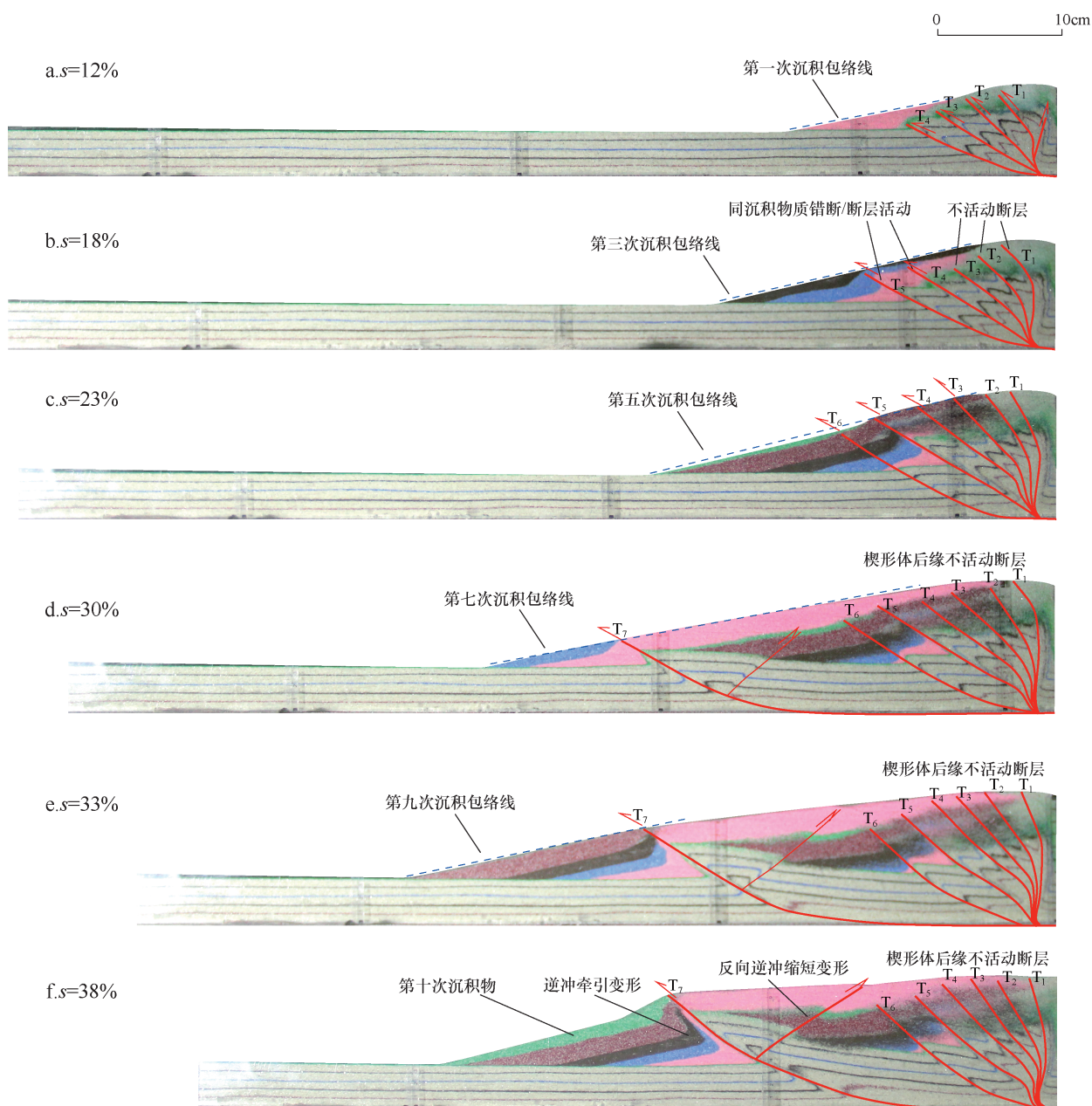


图4 四川盆地西部龙门山饱和性沉积作用(S3组)砂箱物理实验过程

Fig.4 Diagrams showing the structural evolution of an accretionary wedge in a sedimentation model (S3) of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

s. 缩短率; T₁—T₈. 分别为序次形成断层

体后缘断层普遍未切割上覆同沉积地层,揭示出同构造沉积导致楔形体后缘断层活动明显停滞,从而导致持续的楔形体前缘扩展生长过程。进一步对比饥饿性、过渡性同沉积实验(即S1组,S2组)楔高和楔长,明显揭示出饱和性沉积实验对于楔形体楔高、楔长增加量显著较高(图5)。需要指出的是,通过与同构造剥蚀模拟实验中楔长(100~300 mm)、楔高(60~100 mm)对比,能够进一步发现同构造沉积实验中普遍楔长(300~500 mm)、楔高(80~100 mm)较大、但其发育断层数量明显相对较小。

2.3 构造剥蚀—沉积耦合作用实验模拟结果

构造剥蚀—沉积耦合作用模拟实验中砂箱空间上分为两部分:无剥蚀—沉积作用区和剥蚀—沉积耦合作用区,为便于作为标准对比二者间差异性和揭示沿构造走向上差异性的剥蚀—沉积作用特征,其模拟演化过程图和楔形体几何特征(图6,图7)。伴随持续缩短,砂箱物质逐渐前陆向扩展变形,形成T₁至T₃叠瓦式逆冲断层及其稳态楔形体;当12%缩短率时,楔形体发生前陆向扩展形成第一个宽缓冲起构造及其T₄

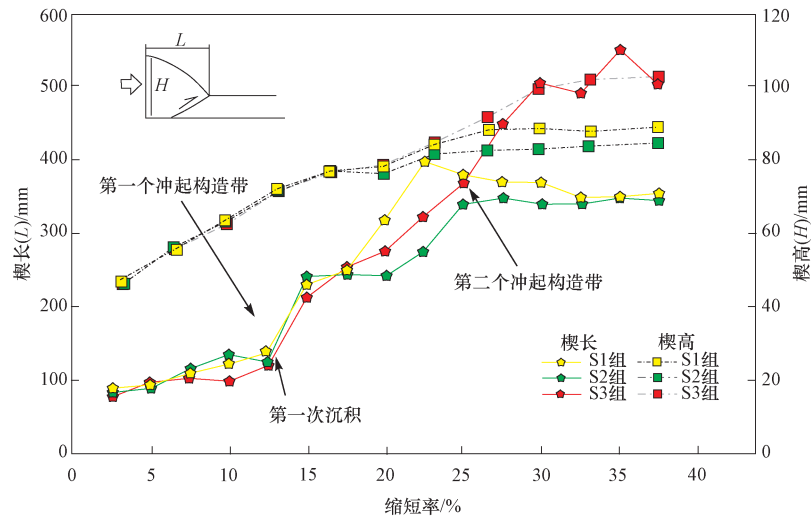


图5 四川盆地西部龙门山不同强度沉积实验过程楔形体楔高/楔长与缩短率关系

Fig.5 Accretionary wedge vs. shortening rate in different sedimentation scenarios of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

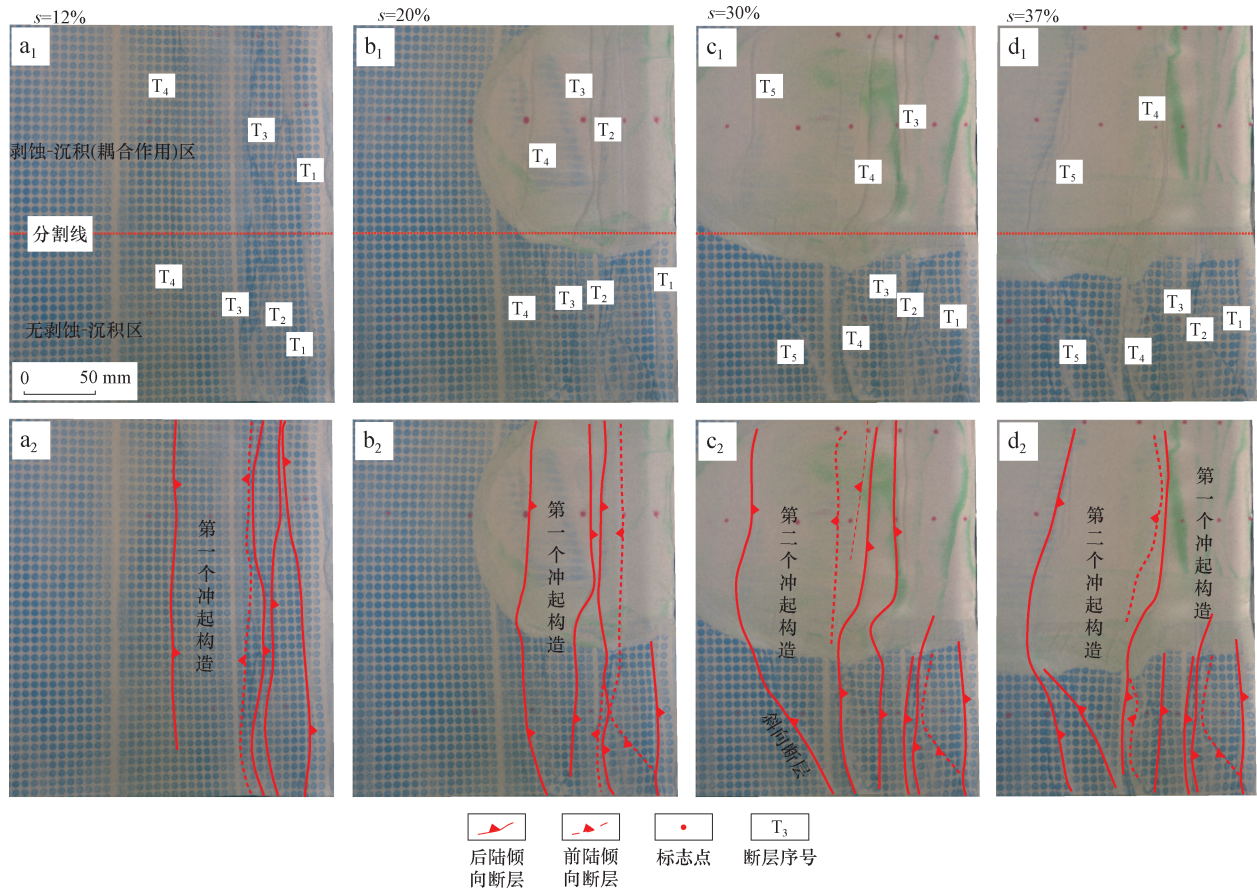


图6 四川盆地西部龙门山构造缩短-剥蚀-沉积耦合作用演化过程特征

Fig.6 Diagrams showing modelled structural evolution of an accretionary wedge under the interactions among tectonic shortening, erosion and sedimentation in the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

s. 缩短率; T_1-T_8 . 分别为序次形成断层; a_1-d_1 . 为原始实验照片; a_2-d_2 为对应的构造解释

逆断层(图6 a_1, a_2), 楔长“跳跃式”增大至235 mm, 楔高约50 mm(图7)。随后在砂箱(沿挤压缩短方向)右侧进行第一次构造剥蚀-沉积耦合作用模拟, 楔顶高

度剥蚀约10 mm, 楔形体高度减小至40 mm。随后挤压缩短过程中, 在剥蚀-沉积作用区域内楔形体后缘 T_2, T_3 断层依次再活化(此时 T_4 断层未活动); 当18%

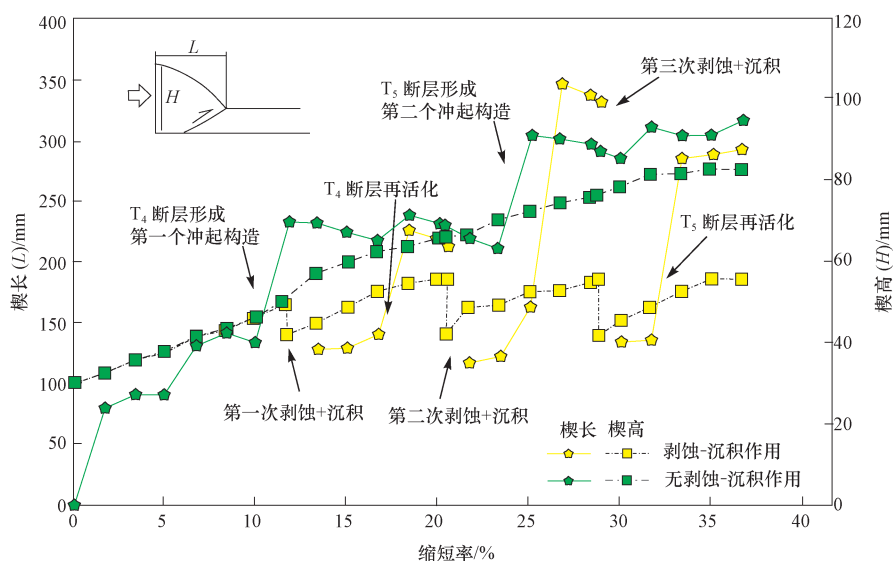


图7 四川盆地西部龙门山构造缩短-剥蚀-沉积耦合作用楔形体楔高/楔长与缩短率关系

Fig. 7 Accretionary wedge geometry vs. shortening rate under modelled interaction among tectonic shortening, erosion and sedimentation in the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

缩短率时,早期 T_4 逆断层再活化,导致楔形体前缘构造沉积物质发生缩短变形,同时形成新生断层破裂变形与楔形体楔长“跳跃式”生长(从 140 mm 增长至 230 mm,图 7)。需要指出的是,当 T_4 断层再活化时,楔形体后缘形成一条典型的反向冲断层,它应该为早期 T_4 断层的反向冲断层再活化作用形成(即第一个冲起构造完全再活化作用)。在 20% 和 30% 缩短率时楔高挤压生长至约 55 mm 高度,并分别进行第二次和第三次构造剥蚀-沉积作用模拟(图 6b₁, b₂, c₁, c₂),楔形体高度都循环式地剥蚀减小至 40 mm。

第二次构造剥蚀-沉积作用后,楔形体物质剥蚀-沉积区和非剥蚀-沉积区砂箱物质变形作用截然不同。非剥蚀-沉积区主要为 T_4 逆断层受后缘挤压缩短发生持续逆冲变形,但剥蚀-沉积区则主要为楔形体后缘 T_3 和 T_4 断层依次再活化发生逆冲变形。至 24% 缩短率时,楔形体物质前缘形成 T_5 逆断层,楔形体长度“跳跃式”扩展生长形成第二个宽缓冲起构造,且剥蚀-沉积区和非剥蚀-沉积区楔长分别为 350 mm 和 300 mm,同时后者区域可能受控于楔形体前缘沉积物质影响形成典型的(与挤压缩短方向斜交的)斜向逆断层(图 6c₂)。当 30% 缩短率时第三次剥蚀-沉积作用后,伴随楔形体后缘挤压缩短,楔形体前缘 T_4 逆断层再活化;当 32% 缩短率时,楔形体前缘 T_5 断层再活化,楔形体再次“跳跃式”生长,但需要指出的是,非剥蚀-沉积区早期斜向断层未再发生活动,而形成新生的 T_5 断层。至最终 37% 缩短率(图 6d₁, d₂),砂箱(沿挤压缩短方向)左侧无剥蚀-沉积耦合

作用区域与右侧剥蚀-沉积作用区域的楔形体高度和楔长演化模式形成鲜明对比。尤其是,伴随挤压缩短变形过程无剥蚀-沉积作用区域楔形体高度具有持续生长增高特征(最终 $H = 80$ mm),而区别于构造剥蚀-沉积作用区域楔高循环式增高特征(最终 $H = 55$ mm)。

3 讨论

3.1 褶皱冲断带-前陆盆地系统中浅表剥蚀与沉积物质通量

褶皱冲断带-前陆盆地系统浅表构造剥蚀与沉积作用对其挤压楔形体扩展变形和断层构造样式等具有明显的影响作用。因此基于本次实验模拟中剥蚀包络线和沉积包络线分别与楔形体楔顶面的面积,定量计算构造剥蚀和沉积作用过程中剥蚀通量和沉积通量的大小,进一步通过单次剥蚀通量和沉积通量的累积之和与砂箱物质体积之比,量化揭示盆-山系统浅表剥蚀和沉积特征(图 8)。

构造剥蚀总量伴随缩短变形量大小和剥蚀作用次数的增大呈明显增大趋势(图 8a),且 E1 组高速构造剥蚀作用累计剥蚀比率最大,约 20%~25%,E2 组和 E3 组中低速构造剥蚀作用导致的累积剥蚀比率明显较小,约 5%~10%。不同强度剥蚀作用的单次剥蚀体积上没有显著的差别,其单次剥蚀体积主要为 300 cm³,因此差异性构造剥蚀作用主要体现在(受控于剥蚀楔顶角阈值大小)剥蚀次数的多少,从而决定着

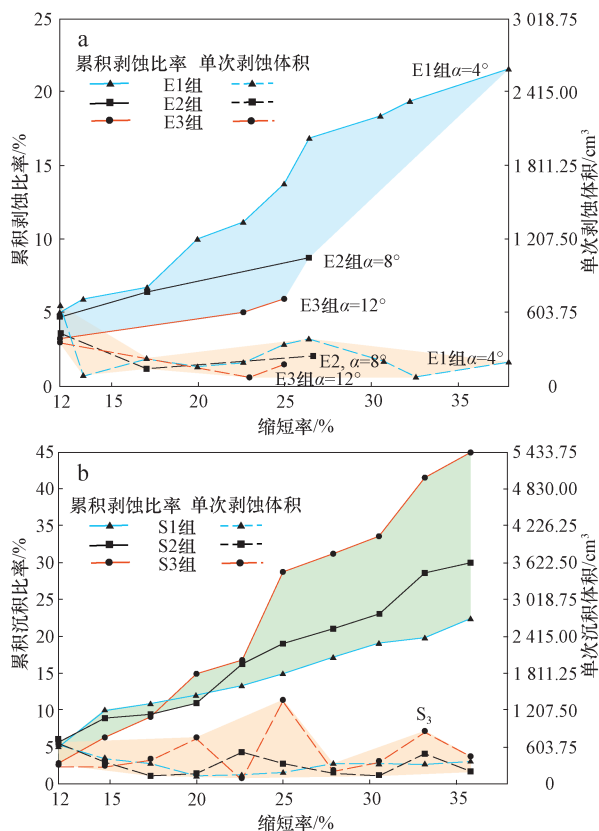


图8 四川盆地西部龙门山构造剥蚀通量(a)和沉积量(b)与挤压缩短率关系对比

Fig. 8 Tectonic erosion (a) and sedimentation flux (b) vs. shortening rate of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

强弱构造剥蚀作用。伴随挤压缩短量增加,差异性剥蚀作用导致的累积剥蚀比率呈现出明显不同的发展趋势,即E1组高速构造剥蚀作用导致的累积剥蚀比率(与缩短率)成明显的两阶段性,而区别于E2组和E3组中低速构造剥蚀作用导致的累积比率(与缩短率)成线性关系逐渐增大。E1组高速剥蚀作用在挤压缩短变形过程早期发生多次,而后期受控于楔形体自相似性生长过程,其剥蚀作用次数明显减弱,因此晚期累积剥蚀比率增加明显减小。

沉积总量伴随缩短变形量大小和沉积作用次数的增大呈明显线性增大趋势(图8b),S3组饱和性沉积作用沉积总量最大,约45%,S1组饥饿性沉积作用和S2组过渡性沉积作用沉积总量相对较小,约20%~30%。不同强度沉积作用的单次沉积体积量/通量(600~800 cm³)明显大于S1组饥饿性沉积作用和S2组过渡性沉积作用中单次构造沉积通量(300~500 cm³),且S1和S2组单次沉积通量动态变化较小。伴随多次沉积作用过程,不同沉积作用形成的累积构造沉积总

量具有明显不同的特征,S1组和S2组沉积作用中沉积总量与构造缩短率具有明显的线性增大关系,而S3组饱和性沉积作用中沉积总量伴随缩短率增大呈现出两阶段性,主要取决于25%缩短率后单次沉积通量变化。

冲断带-前陆盆地系统中浅表剥蚀-沉积方式与物质通量间具有明显的差异性,高速浅表剥蚀作用其剥蚀物质可以达到中低速剥蚀物质通量两倍,与之相似的是,饱和沉积作用沉积物质通量也能够达到饥饿性和过渡性沉积物质通量的两倍。临界楔理论强调挤压冲断带-前陆盆地系统稳态平衡状态的剥蚀与沉积作用过程,即浅表剥蚀作用(以临界楔顶角为参考阈值的剥蚀作用/E3组)与沉积作用(以饱和性同构造沉积充填作用/S3组)之间物质-能量交换稳态状态变化^[7]。需要指出的是,以12°临界楔顶角角度为剥蚀包络线的E3组低速剥蚀中,单次浅表剥蚀物质通量和总剥蚀量都明显小于S3组饱和性沉积作用,其中前者约为后者的50%(图8),因此冲断带-前陆盆地系统间物质-能量交换守恒还需要大规模深部岩石圈作用参与^[21,25-26]。浅表剥蚀作用越强,盆-山系统间浅表剥蚀与沉积作用物质通量差值越小,为达到系统间物质-能量交换守恒,深部(岩石圈)物质俯冲消减作用相对较弱,反之亦然。

3.2 浅表构造剥蚀-沉积(耦合)作用过程典型互馈机制作用

通过浅表剥蚀E1组-E3组和沉积作用S1组-S3组砂箱物理模拟实验过程,揭示出褶皱冲断变形过程中同构造剥蚀和沉积作用对楔形体几何学和运动学特征具有重要的控制作用(图9)。浅表剥蚀作用导致楔形体后缘物质显著减小,伴随剥蚀强度增大,楔形体后缘(内部加积带)逆断层冲断活动和深部物质抬升剥蚀程度明显增强,从而有效地阻止楔形体(叠瓦变形带)前陆向扩展生长、楔形体长度明显较小(图3,图9a,图9b),如:E3组低速构造剥蚀作用模拟中最底部红色标志层仅抬升剥蚀至模型中部,而E1组高速剥蚀作用中底部红色标志层已抬升剥露至模型地表,尤其是E1高速构造剥蚀作用明显导致楔形体后缘断层多期无序活动,形成T₁-T₈密集叠瓦冲断层(相对于E2组和E3组中低速剥蚀作用其断层间距明显较小),且早期断层T₁-T₄推测被完全剥蚀,仅剩下深部与T₅断层形成T₁-T₅断层带(图9b)。前人研究也揭示出浅表剥蚀作用导致楔形体后缘断层多期再活化和无序冲断过程^[22-23,26-27]。总体而言,浅表剥蚀作用越大、

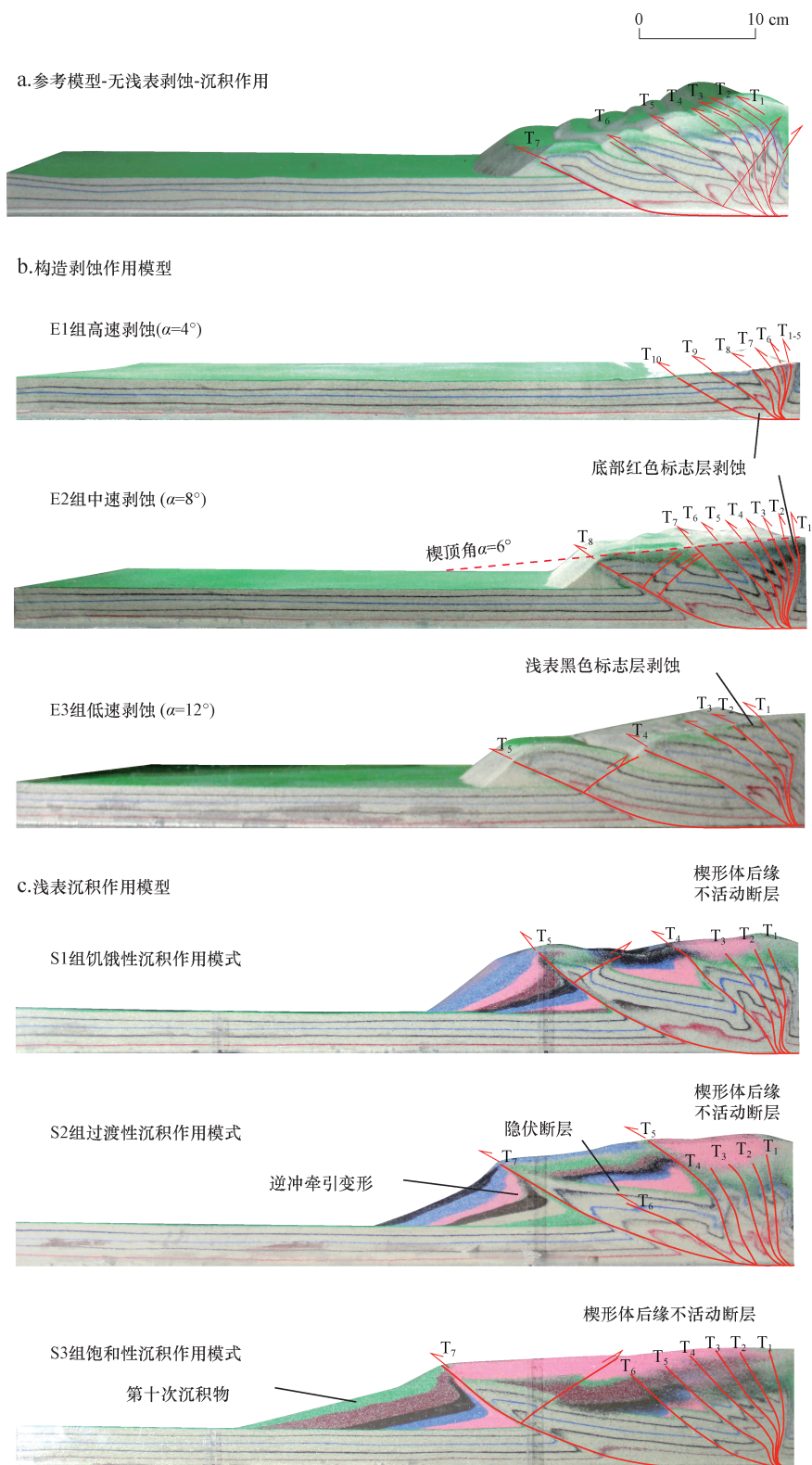


图9 四川盆地西部龙门山浅表构造剥蚀与沉积作用特征对比

Fig. 9 Characteristic comparison of erosion and sedimentation models of the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

楔形体后缘断层冲断活动和物质剥蚀作用越强、楔长越短和楔高越低。需要指出的是,自然界中构造剥蚀作用通常导致盆-山系统构造负荷减小、地壳均衡上升作用,从而影响盆-山系统的地貌形态和断层作用

等,由于砂箱物理模型方法学缺陷在其实验过程中难以兼顾地壳均衡作用。

浅表沉积导致楔形体前缘物质显著增加,伴随沉积物质通量增大,楔形体长度明显增长(图5,图9c)

(相对于未发生构造沉积作用模型图 9a),且有效阻止楔形体后缘断层后期挤压冲断活动,常形成不活动断层或隐伏断层(图 9c)。沉积充填作用以临界楔顶角为沉积包络线,常常会产生较低的楔顶角,楔形体前缘扩展断层及其相关冲起构造受同沉积物质影响,其埋深明显伴随沉积物质通量增大而加深,如:S1 组饥饿性沉积作用模拟实验结果中前缘冲起构造具有浅埋藏作用、断距较大特征,而 S3 组饱和性沉积作用实验中前缘冲起构造埋深较深但断距较小,尤其是其背负盆地同沉积地层厚度明显较大(图 9c),受后期反向冲断缩短变形特征明显。Wu 和 McClay 基于构造物理模型指出浅表构造沉积作用导致前缘结构带发生明显的地层旋转变形^[17],这与 S1 组—S3 组实验中同沉积地层厚度变化及其相关逆冲牵引变形特征具有相似性。需要指出的是,早期研究同时揭示加强的沉积作用导致楔形体冲断层倾角较陡^[23-25]。总体上沉积作用和剥蚀作用对于楔形体构造变形过程具有明显相反的控制影响意义,同构造剥蚀导致楔形体内部加积带和叠瓦变形带冲断层上覆物质卸载,使逆冲断层更加易于发生断层再活化;同构造沉积作用导致楔形体前渊冲断层上覆物质加载,使其更易于发生断层闭锁,导致冲断带楔形体前陆向扩展生长。同构造沉积对于楔形体断层冲断活动具有明显的抑制作用,沉积作用导致断层间距明显增大但断距减小、楔形体前缘(前陆向)扩展生长更远,且沉积速率对逆冲断层和反向冲断层发育程度/条数具有明显影响。

浅表构造剥蚀和沉积耦合作用过程模拟实验中,剥蚀与沉积通量物质守恒、且统一纳入物理模拟过程中时,二者对于楔形体构造变形过程的控制影响作用受到了明显的协调/或补充(图 10)。浅表剥蚀与沉积作用控制着楔形体①前缘叠瓦冲断作用和②后缘物质加积被动反冲作用间耦合过程,二者耦合作用过程导致楔形体逆冲断层多期再活化和无序冲断扩展生长过程。空间上沿走向变化的剥蚀和沉积作用导致其构造变形沿走向具有明显变化的特征:①剥蚀—沉积耦合作用地区早期楔形体冲断形成的冲起构造发生明显的构造剥蚀作用,剥蚀残存的冲起构造结构明显相对简单(图 10a,b),而未发生剥蚀—沉积耦合作用区域由于断层的多期叠加交切作用,形成明显复杂的结构样式(图 10c,d),如:图 10d 中 T_3 — T_4 断层与其反向冲断层形成明显的叠加冲起构造特征。②剥蚀—沉积作用地区深部层系由于浅表剥蚀作用发生明显的抬升剥蚀过程,导致最底部绿色标志层已剥蚀至浅表(图 10a,b),且剥蚀作用越强其抬升量越大(图 9b)。③前

陆盆地或山前带剥蚀—沉积作用导致其前陆向断层明显减少,山前带反向冲断作用增强导致发育多条反向冲断层,即同构造沉积对于楔形体冲断传播方向具有明显的抑制作用、乃至导致主断层反向冲断(图 10a),如:三维模型切片中(即切片 3,5,12 和 15)剥蚀—沉积作用区域前缘冲断层与冲起构造具有明显的构造挤压方向的转变。④由于剥蚀—沉积耦合作用导致其深部层系抬升,尤其是楔形体后缘带伴随深部地层抬升剥蚀其相关断层产状具有明显变陡、乃至反转等现象。三维断层模型中能够清晰观察沿构造走向 T_1 — T_3 (向剥蚀—沉积作用区)倾角变陡的现象(图 10c);同时在楔形体前缘,由于同沉积加载作用导致前缘断层沿构造走向断层倾角变缓(图 10d)。总体上,沿褶皱冲断带走向上变化的剥蚀—沉积耦合作用显著导致其冲起构造沿走向发生变化与复合,同时在楔形体前缘形成典型的斜向断层。

3.3 龙门山—川西前陆盆地系统构造剥蚀—沉积耦合作用特征

川西龙门山冲断带—川西前陆盆地系统,受控于龙门山冲断带印支期和喜马拉雅期挤压冲断作用形成晚三叠世—早侏罗世和晚白垩世—新生代再生前陆盆地复合结构^[15-18]。晚三叠世—早侏罗世松潘—甘孜褶皱带 SE 向逆冲推覆于扬子板块西缘,强挤压变形作用过程导致形成龙门山冲断带并发育茂汶—汶川韧性剪切带、北川—映秀断裂带和安县—灌县断裂(图 11a),且龙门山冲断带剥蚀过程导致川西前陆盆地形成 1~2 km 厚楔状磨拉石沉积,如:上三叠统须家河组和下侏罗统白田坝组,尤其是大量灰质、石英质同造山期砾岩揭示出龙门山冲断带大规模早期剥蚀去顶作用^[14,28]。晚白垩世—新生代受控于青藏高原东向扩展挤出过程,龙门山冲断带发生晚期复活与冲断变形作用,龙门山冲断带中南段发生大规模新生代抬升剥蚀作用^[16,29-30],导致前寒武系基底剥蚀去顶,如:彭灌和宝兴杂岩体等,揭示出龙门山中南段明显较强的抬升剥蚀作用过程。川西前陆盆地中南段受控于龙门山挤压冲断相关的挠曲负载作用形成晚白垩世—新生代再生前陆盆地(图 11a),它发育于晚三叠世前陆盆地之上并形成区域性不整合界面(即上白垩统夹关组之间与下覆层系间不整合面)。川西坳陷中南段形成约 1~2 km 厚度的同构造磨拉石沉积建造(图 11a),上白垩统夹关组—灌口组、新生代名山群等楔状体砾岩周期性沉积,它们与龙门山冲断带剥蚀去顶密切相关^[31-33]。

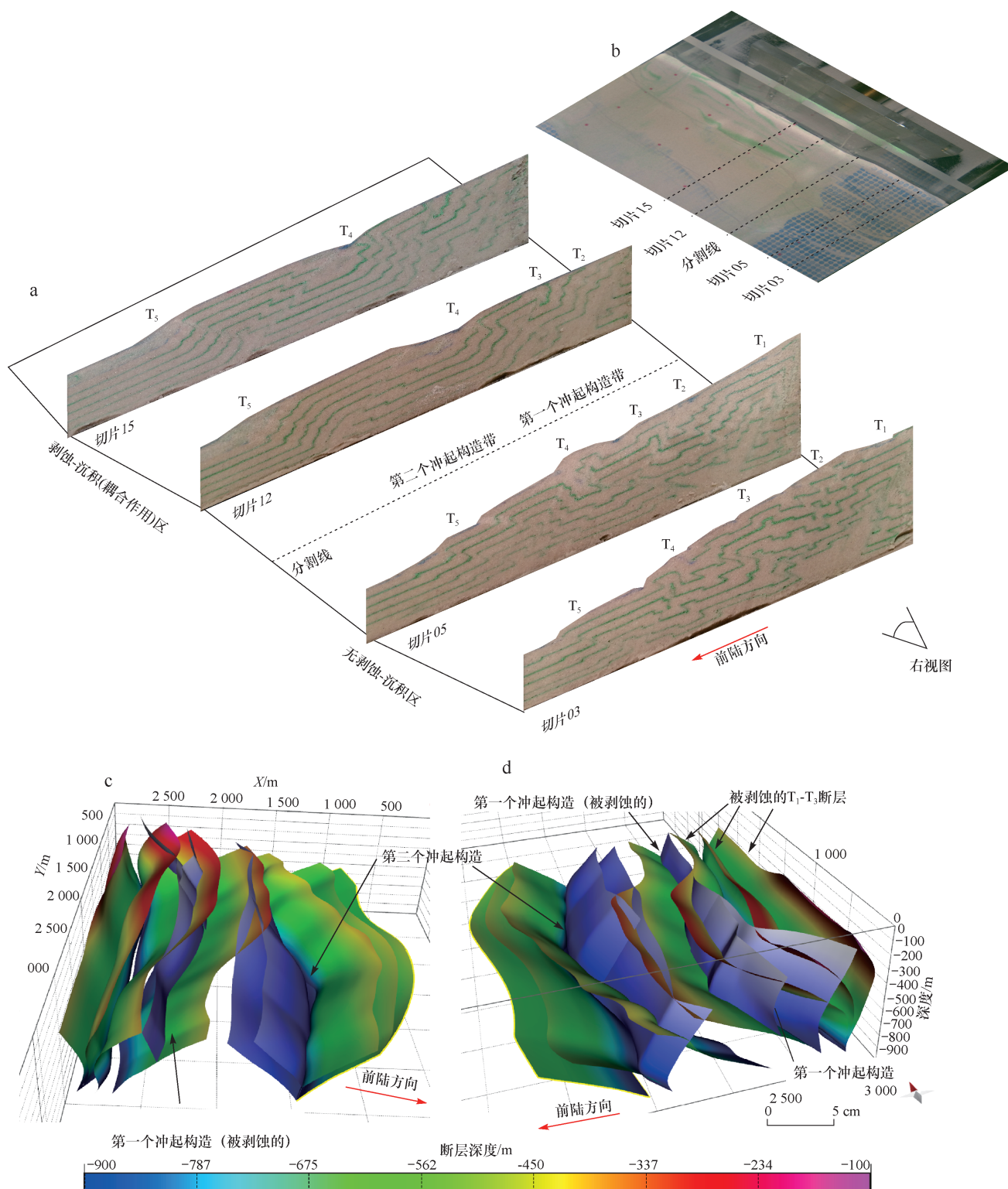


图10 四川盆地西部龙门山浅表构造-剥蚀-沉积耦合作用特征对比

Fig. 10 Model results of tectonics, erosion and sedimentation processes for the Longmenshan thrust belt, western Sichuan Basin

a, b. 构造物理模拟结果及其典型切片特征; c, d. 断层三维建模左、右视图, 揭示典型冲断层及其相关冲起构造沿构造走向变化特征

受控于龙门山冲断带-川西前陆盆地系统晚三叠世-新生代走向差异性剥蚀-沉积作用, 晚白垩世-新生代龙门山冲断带挤压冲断与剥蚀去顶作用主要发育于龙门山中南段, 因而导致其冲断带中南段剥蚀作

用显著大于冲断带北段, 即南段前寒武结晶基底剥蚀出露, 北段为下古生界剥蚀出露。这与砂箱物理模型实验中所揭示的增强的浅表剥蚀作用相一致(图9, 图10), 尤其新生代再生前陆盆地沉积建造主要发育

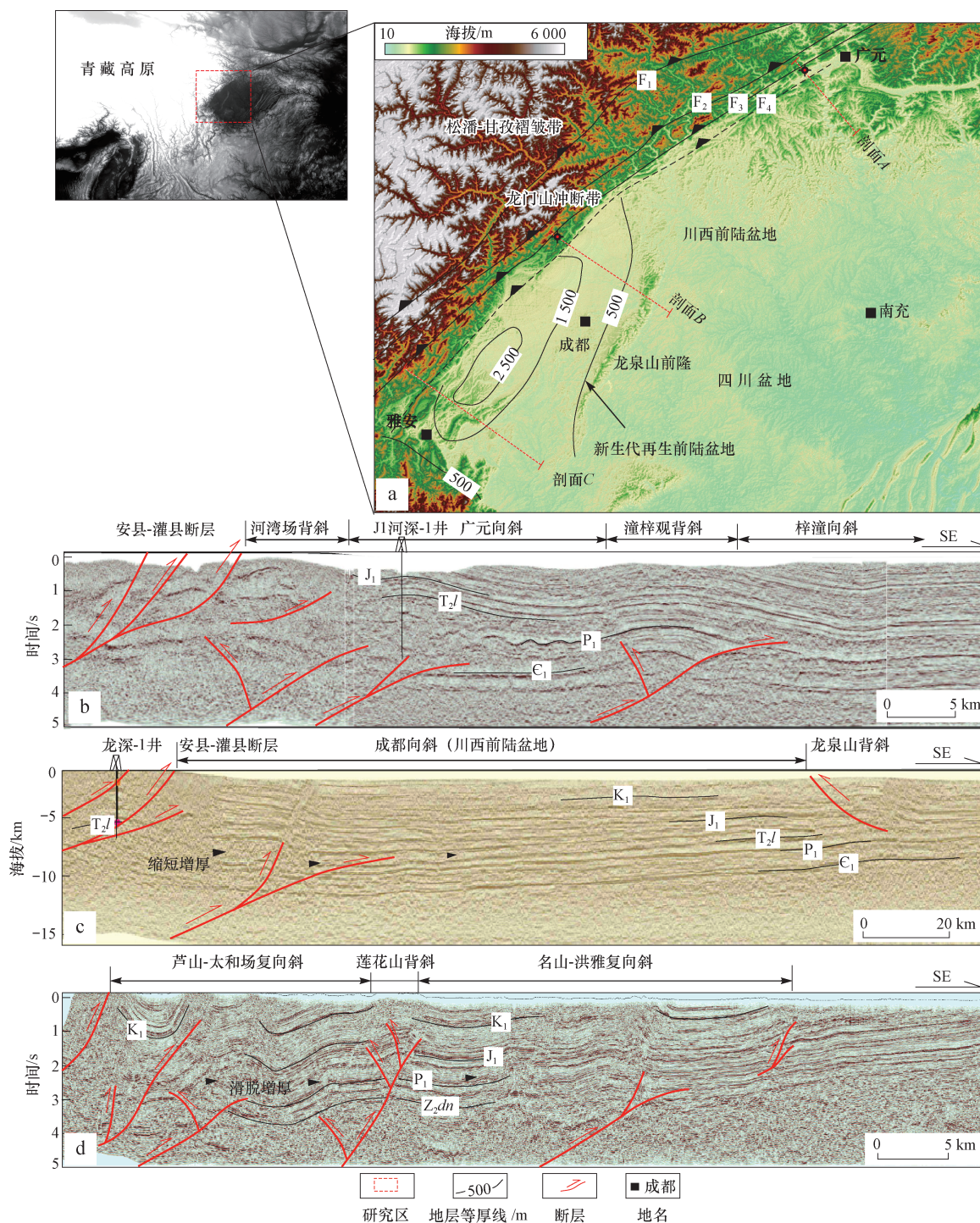


图 11 川西龙门山冲断层-川西前陆盆地系统构造剖面特征对比

Fig. 11 Regional geology and seismic sections of the Longmenshan thrust belt and foreland basin in western Sichuan Basin

a. 龙门山地区地貌高程与地质简图; b. 广元-梓潼剖面; c. 成都-龙泉山剖面; d. 雅安-洪雅剖面

F₁. 茂汶-汶川断裂; F₂. 北川-映秀断裂; F₃. 安县-灌县断裂; F₄. 广元-大邑断裂, 等厚线为上白垩统-新近系厚度,

剖面 A、剖面 B 和剖面 C 分别为图 b、图 c 和图 d

Z₁dn. 震旦系灯影组底界; C₁. 下寒武统底界; P₁. 下二叠统底界; T₂l. 中三叠统雷口坡组底界; J₁. 下侏罗统底界; K₁. 下白垩统底界

于川西坳陷南段。受新生代再生前陆盆地同构造沉积作用,晚白垩世-新生代沉积地层沉积充填于冲断层前渊,与砂箱物理模拟中楔形体前缘上覆物质加载作用相似,导致前陆盆地区前陆向扩展断层走向上产状

明显降低(图 11b—d),如:龙门山中南段熊坡背斜、太和场背斜下覆冲断层(图 11c,d)倾角明显小于前陆盆地北段河湾场背斜、梓潼观背斜下覆冲断层(图 11b)。同时,川西前陆中南段反向冲断变形作用相对于北段

明显增强,如:莲花山背斜和龙泉山背斜等具典型反向冲断层特征。由于上覆物质加载导致中南段地区中-下三叠统膏盐层系、泥质岩层系新生代滑脱变形、地层缩短增厚作用明显(图11c,d),与沿走向变化的剥蚀-沉积作用相一致,本研究推测龙泉山断层可能为新生代再生前陆盆地前缘扩展断层,它可能为盆-山系统走向差异性作用形成的前陆盆地斜向断层(图6),协调川西前陆盆地南段与北段之间的晚白垩世-新生代沉积充填作用的走向变化性。需要指出的是,物理模拟实验中为均值石英砂物质(未添加硅胶滑脱层系),未能够模拟川西龙门山前陆盆地多层次滑脱冲断变形过程,因此龙门山前陆盆地系统沿走向变化的剥蚀-沉积耦合作用及其变形特征相对于实验结果更加复杂性。

4 结论

1) 不同剥蚀角包络线(即楔顶角 4° 、 8° 和 12°)的单一构造剥蚀作用过程模拟揭示,伴随不同剥蚀角阈值变化,构造剥蚀次数随着剥蚀强度减小(即剥蚀角阈值增大)而减小,楔形体楔长、楔高与剥蚀强度呈负相关性。构造剥蚀作用使冲断带后缘逆冲断层更加易于发生断层再活化与无序冲断,制约着冲断带盆地扩展。饥饿性、过渡性和饱和性单一沉积作用过程模拟揭示,同构造沉积作用使楔形体前缘冲断层上覆物质加载,更易于发生断层闭锁,促使冲断带楔形体盆地扩展生长。饱和性沉积作用导致楔形体楔高、楔长和断层间距显著增大。

2) 构造剥蚀通量和沉积通量的定量计算对比揭示,单次浅表剥蚀物质通量(300 cm^3)和总剥蚀量($5\%\sim 25\%$)都明显小于饱和性沉积作用(单次沉积通量为 $300\sim 800\text{ cm}^3$ 、总沉积量为 $20\%\sim 45\%$),约为后者 50% 。

3) 沿走向变化的剥蚀-沉积耦合作用过程模拟表明,无剥蚀-沉积作用区域与剥蚀-沉积作用区域的楔高和楔长演化模式形成鲜明对比,尤其走向差异性导致前陆盆地发育斜向断层。剥蚀-沉积耦合作用导致楔形体后缘深部层系剥蚀量增大,主断层产状具有明显变陡。前陆盆地系统前陆向断层明显减小,倾角减缓,且反向冲断作用加强。

4) 受控于川西龙门山盆-山系统走向差异性剥蚀-沉积作用,川西前陆盆地中南段(相对于川西北段)具有较低角度的盆地逆冲断层,较强的反向冲断变形特征,且形成前陆盆地前缘斜向断层-龙泉山

断层。

致谢:感谢瑞典 Uppsala 大学 Hemin Koyi 教授在砂箱物理模拟实验过程中的建议和帮助,感谢何登发老师和匿名审稿专家对论文进行评审并提供宝贵修改意见和建议。

参考文献

- [1] Kooi H, Beaumont C. Large-scale geomorphology: Classical concepts reconciled and integrated with contemporary ideas via a surface processes model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3361-3386.
- [2] 林畅松. 盆地沉积动力学: 研究现状与未来发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 685-700.
Lin Changsong. Sedimentary dynamics of basin: Status and trend[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 685-700.
- [3] Davis D, Suppe J, Dahlen F A. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(B2): 1153-1172.
- [4] Dahlen F A, Suppe J, Davis D. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: cohesive coulomb theory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B12): 10087-10101.
- [5] 邓宾, 赵高平, 万元博, 等. 褶皱冲断带构造砂箱物理模型研究进展[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(3): 446-464.
Deng Bin, Zhao Gaoping, Wan Yuanbo, et al. A review of tectonic sandbox modeling of fold-and-thrust belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(3): 446-464.
- [6] Cruz L, Teyssier C, Perg L, et al. Deformation, exhumation, and topography of experimental doubly-vergent orogenic wedges subjected to asymmetric erosion[J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(1): 98-115.
- [7] Konstantinovskaya E, Malavieille J. Thrust wedges with décollement levels and syntectonic erosion: A view from analog models[J]. *Tectonophysics*, 2011, 502: 336-350.
- [8] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 碎屑物理模拟研究的理论与方法[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(4): 300-303.
Zhang Chuansheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Theory and method of physical simulation in clastic sedimentation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(4): 200-303.
- [9] 罗强, 何宇, 黄家强, 等. 川西北前陆扩展砂箱物理模拟及其深部晚期扩展变形特征[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(6): 1031-1040.
Luo Qiang, He Yu, Huang Jiaqiang, et al. Analogue experiments on the piggyback propagation in northwestern Sichuan and latest propagation in its deeps[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(6): 1031-1040.
- [10] Malavieille J. Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies[J]. *GSA Today*, 2010, 20(1): 4-10.
- [11] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. *地质学报*, 1994, 68(2): 101-118.
Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguang, et al. Structural styles of the

- Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68 (2): 101–118.
- [12] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 试论中国西部陆内俯冲型前陆盆地的基本特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26 (1): 37–48, 56.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, et al. Discussion on essential characteristics of intracontinental-subduction type foreland basins in western China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26 (1): 37–48, 56.
- [13] Jia D, Wei G Q, Chen Z X, et al. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (9): 1425–1447.
- [14] Deng B, Liu S G, Jansa L, et al. Sedimentary record of Late Triassic transpressional tectonics of the Longmenshan thrust belt, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 48: 43–55.
- [15] Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M = 7.9$) earthquake [J]. *Nature*, 2009, 458 (7235): 194–197.
- [16] Wang E C, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (9): 640–645.
- [17] Wu J E, McClay K R. Two-dimensional analog modeling of fold and thrust belts: Dynamic interaction with syncontractional sedimentation and erosion [C]//McClay J, Shaw J, Suppe J. Thrust fault-related folding. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 2011: 301–333.
- [18] McClay K R, Whitehouse P S. Analog modelling of doubly vergent thrust wedges [C]//McClay K R. Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 2004: 184–206.
- [19] Deng B, Jiang L, Zhao G P, et al. Insights into the velocity-dependent geometry and internal strain in accretionary wedges from analogue models [J]. *Geological Magazine*, 2018, 155 (5): 1089–1104.
- [20] Konstantinovskaia E, Malavieille J. Erosion and exhumation in accretionary orogens: Experimental and geological approaches [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6 (2): Q02006.
- [21] Vanderhaeghe O. The thermal-mechanical evolution of crustal orogenic belts at convergent plate boundaries: A reappraisal of the orogenic cycle [J]. *Journal of Geodynamics*, 2011, 56–57: 124–145.
- [22] Persson K S, Sokoutis D. Analogue models of orogenic wedges controlled by erosion [J]. *Tectonophysics*, 2002, 356 (4): 323–336.
- [23] Storti F, McClay K. Influence of syntectonic sedimentation on thrust wedges in analogue models [J]. *Geology*, 1995, 23 (11): 999–1002.
- [24] Duerto L, McClay K. The role of syntectonic sedimentation in the evolution of doubly vergent thrust wedges and foreland folds [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (7): 1051–1069.
- [25] Bonnet C, Malavieille J, Mosar J. Interactions between tectonics, erosion, and sedimentation during the recent evolution of the Alpine orogen: Analogue modeling insights [J]. *Tectonics*, 2007, 26 (6): TC6016.
- [26] Persson K S, Garcia-Castellanos D, Sokoutis D. River transport effects on compressional belts: First results from an integrated analogue-numerical model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B01409.
- [27] Sieniawska I, Aleksandrowski P, Rauch M, et al. Control of synorogenic sedimentation on back and out-of-sequence thrusting: Insights from analog modeling of an orogenic front (Outer Carpathians, southern Poland) [J]. *Tectonics*, 2010, 29 (6): TC6012.
- [28] 崔秉荃, 龙学明, 李元林. 川西拗陷的沉积与龙门山的崛起 [J]. *成都地质学院学报*, 1991, 18 (1): 39–45.
- Cui Bingquan, Long Xueming, Li Yuanlin. The subsidence of western Sichuan Depression and the rise of Longmenshan Mountains [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1991, 18 (1): 39–45.
- [29] Tian Y T, Kohn B P, Gleadow A J, et al. Constructing the Longmen Shan eastern Tibetan Plateau margin: Insights from low-temperature thermochronology [J]. *Tectonics*, 2013, 32: 1–17.
- [30] 邓宾, 何宇, 黄家强, 等. 龙门山褶皱冲断带扩展生长过程——基于低温热年代学模型证据 [J]. *地质学报*, 2019, 93 (7): 1588–1600.
- Deng Bin, He Yu, Huang Jiaqiang, et al. Eastward growth of the Longmenshan fold-and-thrust belt: Evidence from the low-temperature thermochronometer model [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (7): 1588–1600.
- [31] 李元林, 纪相田. 芦山–天全地区大溪砾岩岩石学特征及物源区分析 [J]. *矿物岩石*, 1993, 13 (3): 68–73.
- Li Yuanlin, Ji Xiangtian. Petrological character of Daxi conglomerate in Lushan-Tianquan and its provenance [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1993, 13 (3): 68–73.
- [32] 苟宗海. 四川大邑–汶川地区侏罗–第三系砾岩特征及沉积环境 [J]. *中国区域地质*, 2001, 20 (1): 25–32.
- Gou Zonghai. Characteristics of Jurassic-Tertiary conglomerates and depositional environment in the Dayi-Wenchuan area, Sichuan [J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20 (1): 25–32.
- [33] 邓莉, 刘君龙, 钱玉贵, 等. 川西地区龙门山前带侏罗系物源与沉积体系演化 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40 (2): 380–391.
- Deng Li, Liu Junlong, Qian Yuguai, et al. Provenance and sedimentary system of the Jurassic successions in the front of Longmen Mountain in western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40 (2): 380–391.

(编辑 梁 慧)