

改良牵拉成骨技术促进胫骨延长区骨质矿化 41 例

谭新欢¹ 王凯君¹ 初海滨¹ 毕宏政¹ 杨庆民¹ 聂伟志¹ 宫大伟¹ 于满秋^{1△}

[摘要] **目的:**观察改良牵拉成骨技术在促进胫骨延长区骨质矿化方面的临床疗效及安全性。**方法:**回顾性分析 2018 年 1 月至 2023 年 2 月收治的 41 例开放性胫骨大段骨缺损患者的病例资料,均采用改良牵拉成骨技术治疗,骨搬运开始后每 4 周测量并记录延长骨段骨密度(BMD)及骨痂直径率(CDR),统计骨愈合指数及相关并发症情况,末次随访按 Ilizarov 技术研究与应用学会(ASAMI)骨与下肢功能评价标准进行评价。**结果:**41 例患者均获随访,随访时间为 12~18 个月,平均为 15.8 个月;骨搬运均顺利完成,术后 6 例外固定支架螺钉孔周围出现少许红肿及渗出,牵拉成骨过程中出现 1 例轴向偏移;创面一期愈合 32 例,伤口愈合时间为 14~24 d,平均为 (18.27 ± 4.43) d;骨愈合指数为 (1.208 ± 0.124) 个月/cm;术后 4,8,12,16 周骨密度持续增加,骨痂直径率随着骨密度的逐步增加呈现相对减小的趋势,但在固化期其逐步增大;末次随访按 ASAMI 骨评价,优良率为 90.24%;按 ASAMI 下肢功能评价,优良率为 85.37%。**结论:**改良牵拉成骨技术能加快胫骨延长骨段矿化成骨速度,提高矿化成骨的质量,减少相关并发症,有利于肢体功能的恢复。

[关键词] 骨折;骨搬运;胫骨骨缺损;骨密度

[中图分类号] R683.42 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1005-0205(2024)08-0055-05

DOI:10.20085/j.cnki.issn1005-0205.240811

41 Cases Observation on the Effect of Modified Traction
Osteogenesis Technique on Promoting Bone
Mineralization in the Tibial Elongation RegionTAN Xinhuan¹ WANG Kaijun¹ CHU Haibin¹ BI Hongzheng¹
YANG Qingmin¹ NIE Weizhi¹ GONG Dawei¹ YU Manqiu^{1△}

¹ Wendeng Hospital of Traditional Chinese Orthopedics and Traumatology of Shandong Province, Weihai 264400, Shandong China.

Abstract Objective: To observe the clinical efficacy and safety of improved distraction osteogenesis technique in promoting bone mineralization in tibia lengthening area. **Methods:** From January 2018 to February 2023, 41 patients with open tibial defects were selected. All patients were treated with modified distraction osteogenesis, bone mineral density (BMD) and callus diameter rate (CDR) were measured and recorded every 4 weeks after bone transport. Bone healing index and related complications were recorded. **Results:** All the 41 patients were followed up for 12–18 months (mean 15.8 months). The bone transfer was completed successfully. After operation, there were a little swelling and exudation around the screw

holes of the external fixator in 6 cases, the average healing time was (18.27 ± 4.43) d, the bone healing index was (1.208 ± 0.124) month/cm at 4, 8, 12 and 16 weeks after operation, the BMD increased continuously, and the CDR decreased with the increase of BMD, but increased gradually in the solidified stage, the excellent and good rate was 90.24% and 85.37% according to Asami's evaluation of lower extremity function. **Conclusion:** The modified distraction osteogenesis technique can accelerate the speed of bone mineralization, improve the quality of bone mineralization, reduce the

基金项目:威海市中医药科技项目(2023N-39)

山东省中医药科技项目(2021M062)

中国中医药信息学会科研项目(CACMS-KY-2023017)

杨茂清全国名老中医药专家传承工作室项目(国中医药人教函[2022]75号)

2023 年国家中医药管理局科技司-山东省卫生健康

委员会共建中医药科技项目(GZY-KJS-SD-2023-030)

¹ 山东省文登整骨医院(山东 威海, 264400)

[△]通信作者 E-mail:seraph200909@163.com

related complications and benefit the recovery of limb function.

Keywords: fracture; bone displacement; tibial bone defect; bone mineral density (BMD)

目前由高能量损伤导致的开放性胫骨骨缺损病例呈现逐年增多的趋势,此类骨折治疗周期长、并发症多、截肢率高,给患者带来了极大的心理、经济及社会压力^[1]。临床上当骨缺损长度超过长骨直径的1.5倍时即认为是大段骨缺损,大多数研究者建议行骨重建手术治疗^[2],开放性胫骨骨缺损创区周围软组织条件较差,骨折端血运欠佳,传统的植骨手术治疗不但取“材”受限,而且容易出现骨缺损区周围皮肤坏死、骨外露、植骨不愈合及感染等,所以减少对创区血运的二次损伤至关重要。张-压应力法则系统所阐述的牵拉成骨(Distract Osteogenesis, DO)技术具有避免伤口暴露、免植骨、微创有效等特点,在治疗大段骨缺损方面疗效显著,已成为目前主要治疗方案之一,但其最大的弊端在于延长骨段骨痂矿化不良,拆除外固定支架后易出现新生骨变形或二次骨折^[3]。如何提高延长骨段矿化成骨的质量、缩短治疗周期,也是目前临床研究的重点。本研究通过回顾性分析本院自2018年1月至2023年2月采用改良牵拉成骨技术治疗外伤性胫骨骨缺损,现报告如下。

1 临床资料

1.1 一般资料

回顾性分析自2018年1月至2023年2月本院收治住院的符合纳入标准的开放性胫骨骨缺损患者的病例资料,共41例。其中男32例,女9例;年龄为35~60岁,平均为49.5岁;高处坠落伤6例,道路交通伤7例,机器绞伤8例,压砸伤20例;右侧23例,左侧18例;将胫骨长度三等份分段,其中近段8例,中段12例,远段21例;骨缺损长度为5.5~9.6 cm,平均为7.5 cm;合并腓骨骨折者22例。本研究已获得医院医学伦理委员会审核批准(批准文号为LL-2018-0103)。

1.2 诊断标准

参照《实用骨科学》^[4]中开放性胫骨骨缺损诊断标准:1)有小腿高能量损伤病史,出现活动障碍;2)小腿患处流血、肿胀疼痛、骨质外露或见肢体短缩,局部有明显的骨擦感或骨异常活动;3)X线片或CT检查示胫骨骨折伴有局部骨缺损。

1.3 纳入标准

1)伤口周围皮肤覆盖条件良好,可一期缝合,重要的血管神经束未受损,损伤时间为8 h内;2)单侧开放性胫骨骨折,骨缺损长度为5~10 cm;3)无其他相关脏器严重并发伤,生命体征平稳;4)依从性好,保肢意

愿强烈,主动配合治疗;5)随访资料完整。

1.4 排除标准

1)伤前合并下肢关节炎或其他原因导致的下肢活动不利者;2)伴有骨折端周围重要的血管、神经损伤者;3)治疗过程中出现伤口感染或骨质外露者;4)伴有双下肢其他部位骨折或脱位者;5)软组织覆盖条件差,皮肤缺损或挫伤严重者;6)长期使用激素或合并严重的糖尿病、骨质疏松等影响骨折愈合的慢性疾病者。

2 方法

2.1 治疗方法

患者入院后在确保生命体征平稳可耐受手术治疗的前提下,连续硬膜外麻醉进行手术治疗。麻醉成功后,患者取仰卧位,用无菌皂液反复洗刷伤口周围皮肤3遍,用双氧水、生理盐水、三型安尔碘、生理盐水依次交替冲洗创面3次,此过程注意保护骨折端周围的血管、神经束,生理盐水用量3 L以上(必要时予以脉冲方式冲洗创面),将患侧大腿束气囊止血带加压止血,常规消毒、铺无菌单,由浅至深地毯式清除伤口周围的污物及失活肌肉组织,根据伤口位置及损伤程度,必要时适当延长切口,分离显露骨缺损区周围骨质,清除游离碎骨块,根据骨折端形态及骨质的污染情况用低速摆锯或咬钳适当去除部分骨质,使断端在骨搬移会师后能够尽可能对合良好,伴有腓骨骨折者可行闭合复位弹性髓内钉内固定治疗,恢复胫骨骨折端的对位对线关系及长度后,取外固定支架将其固定,透视见复位满意后缝合伤口,留置引流条,根据骨缺损的部位于胫骨近端或远端行小切口切开截骨,确定截骨平面后注意保护骨膜,用低速电钻带动直径为2 mm的克氏针行前侧半环形排状截骨,最后用骨刀切断剩余骨皮质,安装延长杆及固定螺钉,再次透视确保截骨断端对位对线良好,缝合切口,必要时予以负压引流覆盖创面。

2.2 术后处理

所有患者术后进行预防感染治疗2 d,监测生命体征,观察肢端血运,勤换药,根据伤口愈合情况,必要时可延长抗生素的使用时间,麻醉消退后即鼓励患者行患肢肌肉等长收缩功能锻炼。术后7~14 d根据伤口愈合情况开始进行改良牵拉成骨技术治疗,即按照每牵拉7 d(7 mm)后回缩2 d(2 mm)的交替循环牵压方式治疗,速度仍为1 mm/d,分4~6次进行。术后12~16周骨搬移完成后视延长区骨矿化程度及骨折端的对合情况,在双腋拐保护下进行逐步增量的负重功能锻炼。

2.3 疗效观察

骨搬移开始后每 4 周测量延长骨段骨密度及骨痂直径率(CDR),统计骨愈合指数及相关并发症情况。末次随访时进行 Ilizarov 技术研究与应用学会^[5](Association for the Study and Application of Methods of Ilizarov,ASAMI)骨与下肢功能评价(骨评价及下肢功能评价)。骨评价包括四个方面,即骨愈合、感染、骨成角及双下肢不等长的差值,评估结果分为优、良、可、差四个等级。下肢功能评价包括五个方面,即膝关节伸直及踝关节背伸活动是否超过最低限度(丢失<15°)、反射性交感神经营养不良发生情况、自主行走情况、跛行、疼痛情况,评估结果分为优、良、可、差、失败五个等级。

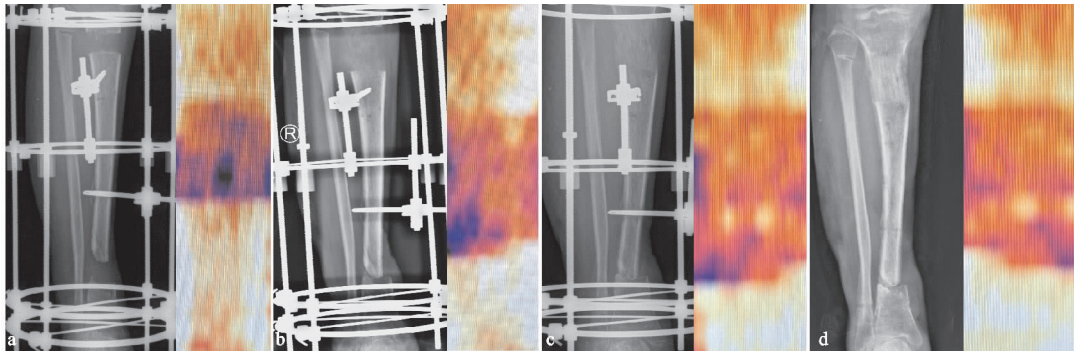
3 结果

41 例患者骨搬移均顺利完成,骨折端最终愈合,均获随访,随访时间为 12~18 个月,平均为 15.8 个月。

术后 6 例外固定支架螺钉孔周围出现少许红肿及渗出,经酒精滴注治疗 1 周左右好转;牵拉成骨过程中出现 1 例轴向偏移,经及时调整外固定支架后予以纠正。创面一期愈合 32 例,术后出现 9 例伤口周围部分皮肤坏死,予以清创缝合或局部皮瓣转移修复治疗,于 4 周内全部愈合。延长完成后出现 5 例骨折会师端骨愈合不良,予以切开植骨手术治疗后最终愈合,伤口愈合时间为 14~24 d,平均为(18.27±4.43)d,骨愈合指数为(1.208±0.124)个月/cm。术后 4,8,12,16 周骨密度持续增加,骨痂直径率随着骨密度的逐步增加呈现相对减小的趋势,但在固化期其数值逐步增大(见表 1)。末次随访按 ASAMI 骨评价结果显示:优 17 例,良 20 例,可 4 例,差 0 例,优良率为 90.24%。按 ASAMI 下肢功能评价结果显示:优 14 例,良 21 例,可 5 例,差 1 例,失败 0 例,优良率为 85.37%。典型病例 X 线片及各时段相对应的骨密度测量图像见图 1 和图 2。

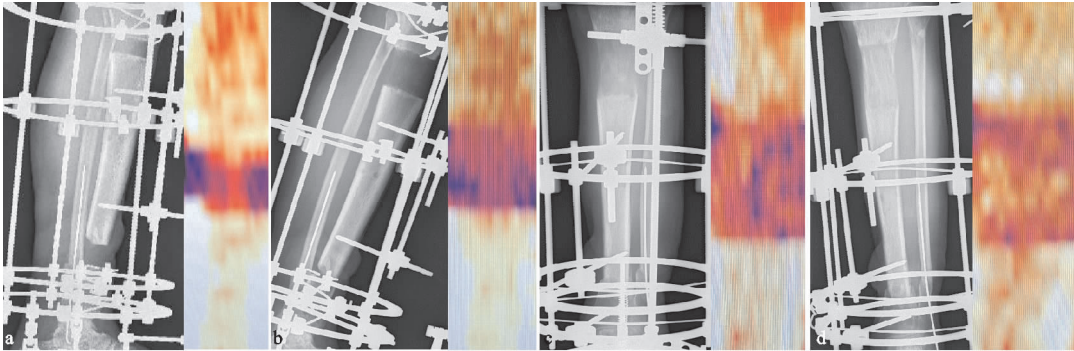
表 1 术后各时间段骨密度及骨痂直径率(±s)

观察指标	术后 4 周	术后 8 周	术后 12 周	术后 16 周
骨密度/(g·cm ⁻²)	0.305±0.052	0.503±0.053	0.642±0.059	0.757±0.058
骨痂直径率/%	0.894±0.032	0.874±0.028	0.867±0.034	0.855±0.027



(a) 骨搬移4周,见延长骨段矿化区骨密度尚可(蓝色区域代表骨痂尚未形成;红色区域为新生骨痂区,范围越大说明矿化越好);(b) 骨搬移8周,见延长骨段矿化区新生骨痂范围逐渐增加,骨段骨密度增加,骨痂直径率满意;(c) 骨搬移12周,见骨延长完成,延长骨段矿化区骨密度显著增加,骨痂直径率尚可;(d) 骨搬移20周,外固定支架拆除,见延长骨段骨痂矿化良好(蓝色区域基本消失),骨皮质清晰可见,骨痂直径率接近正常

图 1 患者 1,男,46 岁,右开放性胫骨骨折伴骨缺损,采用改良牵拉成骨技术治疗,DR 图及 DEXA 测量扫描图



(a) 骨搬移4周,见延长骨段矿化区占比约为1/2;(b) 骨搬移8周,见延长骨段新生骨痂范围显著增加,延长骨段对位对线满意;(c) 骨搬移12周,见骨延长已完成,骨延长会师端对位对线良好,延长骨段矿化区骨密度显著增加,骨痂直径率略变小;(d) 骨搬移16周,见延长骨段骨痂矿化良好,骨皮质清晰,骨密度及骨痂直径率接近正常

图 2 患者 2,男,56 岁,左开放性胫骨骨折伴骨缺损,采用改良牵拉成骨技术治疗,DR 图及 DEXA 测量扫描图

4 讨论

开放性胫骨骨缺损损伤暴力大、病情复杂,治疗过程中容易出现节段性骨丢失,尤其是大段骨缺损临床

治疗较为棘手。目前多数研究者认为牵拉成骨技术治疗骨缺损在促进骨再生方面具有优异疗效,已成为修复治疗大段骨缺损的金标准^[6]。虽然传统的牵拉成骨

技术操作简单、安全有效、创伤小、费用低,在胫骨重建方面已取得较好的临床疗效,但是牵拉过程中容易出现轴线偏移、延长区成骨不全、新生骨段再骨折等相关并发症,所以寻找一种能够提高矿化成骨质量和成骨能力、加速矿化成骨的牵拉成骨技术优化方案显得尤为重要。

4.1 牵拉成骨技术原理

牵拉成骨过程主要是模拟微骨折的机体自我修复机理^[7],主要分为三个时段:1)潜伏期,此阶段是自截骨术后至骨搬移期开始前的阶段,一般为7~10 d。主要表现为血肿激化,诱发截骨端的骨细胞、骨膜组织活性,并释放多种成骨生长因子^[8],如骨形态发生蛋白(Bone Morphogenetic Protein, BMP)等,新生的微小毛细血管通过交通支形成与周围的血管联系的血液通路。2)搬移期,利用外固定支架提供的牵张力使搬移骨段产生持续微动刺激,骨牵拉再生区域中心出现类纤维母细胞并堆积产生软骨样组织,逐步形成原始骨小梁^[9]。在牵拉成骨期间骨形态发生蛋白多种基因自牵拉作用开始至结束持续升高,骨形态发生蛋白受体表达也显著上升^[10],在持续牵拉成骨诱导下,骨髓来源促进间质干细胞(Mesen-chymal Stem Cell, MSC)和内皮祖细胞(Endothelial Progenitor Cell, EPC)激发募集作用对新骨形成极为关键^[11]。牵拉期循环间质干细胞与内皮祖细胞数量持续增加,机械牵拉转化为生物学效应,最终促进了骨质的再生与重建。3)固化期,此过程为搬移期结束后至骨骼重塑完成,骨搬移区的类生骨质处于静止状态并逐步矿化成成熟的松质骨及皮质骨,而间质干细胞与内皮祖细胞、骨形态发生蛋白等促进骨质再生的生长因子浓度逐步降至正常水平,直至完全矿化结束^[12]。

4.2 改良牵拉成骨技术的理论依据

牵拉成骨技术治疗的优点是有助于感染控制,缩短手术时间、降低手术风险,避免因复杂手术时间过长、次数过多而诱发伤口感染及机体不耐受等,而截骨区远离骨折端周围能最大程度保护损伤部位周围的血运,有利于创面的修复及骨折端的愈合^[13]。实验研究表明^[14],搬移期交替牵压力会对间质干细胞的分化产生不同的影响,并决定负荷再生区的内皮祖细胞分化结局(成骨性与成软骨性)。牵引力可导致软骨及软骨内骨形成,而压缩力可导致纤维组织生成,从而激发成骨和膜内骨形成;牵张力有利于软骨化骨,而压缩力有利于膜内成骨,因此,将这两种不同类型的力学应力刺激组合在一起,比单一使用机械应力更能刺激骨骼形成^[15]。大量的临床实践也表明,对骨不连患者进行张-压应力刺激能显著激发骨骼重塑能力,促进骨折愈合^[16]。有研究者在胫骨骨折实验模型中发现,在受力

端骨膜骨细胞形成数量方面压缩力比牵张力高25倍^[17]。Ilizarov技术受控环境中的牵张力是成骨的核心,也是牵拉成骨技术成功的关键;而Wolff定律指出牵拉成骨的形成表现在骨重塑和再生方面,骨骼所承受的动态机械压缩力对骨骼合成代谢具有积极作用^[18]。研究表明在延长方向上产生轴向的分离间隙有利于软骨内骨形成,而延长7~10 mm后采用及时加压刺激可抑制IL-1及COX-2表达的形成^[19],激发骨形态发生蛋白、间质干细胞及内皮祖细胞浓度的提升,加快膜内成骨的速度,而且交替间歇期不宜过长。

4.3 改良牵拉成骨技术的治疗优势

本研究受到上述理论启发,在骨搬移期采用动态牵-压应力治疗方案,通过两种力学环境循环交替改变来提高成骨质量。同时,在临床治疗过程中发现,传统的牵拉成骨技术治疗中经常因为牵拉钢针或螺杆对皮肤的纵向切割,导致疼痛不适,需要减缓或停止牵拉1~2 d。本研究认为不得已的停止牵拉缺乏对牵拉区的持续动态力学刺激,进而改为采用2 d动态压缩应力刺激,不仅可让断端成骨性因子和成骨性细胞始终保持高活跃状态,机械力刺激转化为生物源改变,而且可避免钢针持续牵拉所形成切割力带来的疼痛不适感。所以本研究采用7 d牵拉力结合2 d压缩力治疗方案,即按照每牵拉7 d(7 mm)后回缩2 d(2 mm),相当于每9 d延长5 mm的动态循环牵压方式治疗。

在牵拉成骨过程中,骨密度及骨痂直径率作为衡量骨矿化区优良与否的重要指标^[20],本研究中重点监测术后4,8,12,16周时的牵拉成骨区延长骨段中点骨密度及最终的骨愈合指数,结果表明纳入研究的病例骨密度随着时间的延长逐步提升,通过统计对比发现骨愈合时间较传统牵拉成骨技术平均缩短20.7 d,说明改良牵拉成骨技术能显著提高矿化成骨质量,降低愈合指数。Nakamura等^[21]研究发现骨痂直径率是检测牵拉成骨区骨纤维形成排列期与膜内化骨成骨期优劣程度较为可靠的指标之一,当骨痂直径率小于0.8时,骨搬移区新生骨较易出现生长畸形、轴向偏移及发生骨折,而当骨痂直径率大于0.85时,则很少出现上述表现,所以临床也将骨痂直径率作为评价矿化成骨较为理想的检验指标^[22]。本研究结果显示,虽然在骨搬移过程中骨痂直径率随着骨密度的逐步增加呈现相对减小的趋势,但各时间段均大于0.85,而且在固化期逐步增大,直至接近1。本研究结果表明,采用改良牵拉成骨技术在骨搬移期对其进行牵-压应力交替循环地干预,更有助于矿化成骨的形成、塑形及提高矿化成骨的质量,虽然牵拉治疗时间有所增加,但在牵拉疼痛不适感、骨愈合指数、疗效评价标准方面却表现出明显的优势,随访中未出现延长区成骨不全、新生骨段再

骨折及有疼痛不适感的病例,患者依从性明显提高,并且随着牵拉速度的减缓,轴向偏移发生率也明显降低(仅为 2.44%)。最终从监测数据上表明骨密度、骨痂直径率等量化指标都取得了满意的疗效,末次随访按 ASAMI 骨评价及下肢功能评价结果,优良率均大于 85%,这也充分说明改良牵拉成骨技术对提高矿化成骨质量、降低相关并发症等方面疗效显著。

本研究不足之处在于纳入样本量较少,随访时间较短。如何在牵拉及压缩时间配比之间寻求一种最优组合,即在最短牵张周期内最大程度提高矿化成骨的质量,如何通过规范化机械刺激调控延长骨段矿化成骨的代谢及生物力学效应,下一步需进行大样本、深层次、多维度的长期研究。

综上所述,本研究表明改良牵拉成骨技术能加快胫骨延长骨段矿化成骨速度,提高矿化成骨的质量,减少相关并发症,有利于肢体功能的恢复。

参考文献

- [1] NORRIS B L, VANDERKARR M, SPARKS C, et al. Treatments, cost and healthcare utilization of patients with segmental bone defects[J]. *Injury*, 2021, 52(10): 2935-2940.
- [2] MAUFFREY C, BARLOW BT, SMITH W. Management of segmental bone defects[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2015, 23(3): 143-153.
- [3] 秦泗河, 郭保逢, CATAGNI M A. Ilizarov 技术在欧洲的传播发展[J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31(11): 961-966.
- [4] 胥少汀, 葛宝丰, 徐印坎. 实用骨科学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2014.
- [5] OZTURKMEN Y, KARAMEHMETOGLU M, KARADENIZ H, et al. Acute treatment of segmental tibial fractures with the Ilizarov method[J]. *Injury*, 2009, 40(3): 321-326.
- [6] 位春巍, 陈嘉怡, 郑臣校. 伤科九味健骨片对家兔骨短缩延长后血清骨钙素及骨组织的影响[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2022, 30(2): 1-7.
- [7] 秦泗河, 臧建成, DROR • PALEY. 肢体延长的起源、理论突破与技术进展[J]. *中华骨科杂志*, 2020, 40(11): 749-753.
- [8] 熊伟, 袁灵梅, 钱国文, 等. 临界骨缺损动物模型评估骨组织工程支架成骨效能的价值[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(35): 5714-5720.
- [9] AWADEEN M A, AL-BELASY F A, AMEEN L E, et al. Early therapeutic effect of platelet-rich fibrin combined with allogeneic bone marrow-derived stem cells on rats critical-sized mandibular defects[J]. *World J Stem Cells*, 2020, 12(1): 55-69.
- [10] 李明, 刘建恒, 张里程, 等. 引导骨再生膜材料治疗骨缺损

- 的研究进展[J]. *解放军医学院学报*, 2017, 38(10): 993-995.
- [11] TAZAWA R, UCHIDA K, MINEHARA H, et al. Poly-(POG)n loaded with recombinant human bone morphogenetic protein-2 accelerates new bone formation in a critical-sized bone defect mouse model[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 471.
- [12] 谭新欢, 段来宝, 毕宏政, 等. 复方蜈蚣颗粒结合外固定骨搬移技术治疗开放性胫骨骨折术后感染的疗效观察[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2022, 30(12): 66-71.
- [13] 韩晓飞, 孙振中, 宋升, 等. 手风琴技术促进骨搬移延长骨段骨质矿化的临床观察[J]. *中国骨伤*, 2021, 39(5): 598-602.
- [14] FENG W. All-trans retinoic acid and vascular endothelial growth factor induced the directional osteogenic differentiation of mouse embryonic fibroblasts[J]. *Chin J Repar Reconstr Surg*, 2020, 34(2): 246-255.
- [15] MESELHY M A, KANDEEL M, HALAWA A S, et al. Infected tibial nonunion: assessment of compression distraction Ilizarov technique without debridement[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2021, 107(8): 102881.
- [16] CRABTREE R M, BERGIN P F, GRAVES M L, et al. Bicondylar tibial plateau fracture dislocations with an intact anterolateral cortical rim: a surgical technique[J]. *Injury*, 2023, 54(3): 1004-1010.
- [17] HENTE R, FÜCHTMEIER B, SCHLEGEL U, et al. The influence of cyclic compression and distraction on the healing of experimental tibial fractures[J]. *Orthop Res*, 2004, 22(4): 709-715.
- [18] GLATT V, EVANS C H, STODDART M J. Regenerative rehabilitation: the role of mechanotransduction in orthopaedic regenerative medicine[J]. *Orthop Res*, 2019, 37(6): 1263-1269.
- [19] BLAZQUEZ-CARMONA P, MORA-MACIAS J, SANZ-HERRERA J A, et al. Mechanical influence of surrounding soft tissue on bone regeneration processes: a bone lengthening study[J]. *Ann Biomed Eng*, 2021, 49(2): 642-652.
- [20] 杨跃, 任志勇, 刘增运, 等. 利用 Ilizarov 外固定架治疗单侧肢体短缩型下肢不等长的临床研究[J]. *实用手外科杂志*, 2020, 34(4): 411-418.
- [21] NAKAMURA K, MATSUSHITA T, MAMADA K, et al. Changes of callus diameter during axial loading and after fixator removal in leg lengthening[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 1998, 117(8): 464-467.
- [22] 王凯君, 王彩, 谭新欢. 牵拉成骨过程中新生骨痂的 X 线表现与骨愈合的关系[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2023, 34(6): 433-436.

(收稿日期: 2023-12-14)