

· 综述 ·

S₂骶骨翼螺钉技术进展[△]

康宇翔^{1,2}, 李国望², 徐宝山^{1*}

(1. 天津市天津医院微创脊柱外科, 天津 300211; 2. 天津医科大学研究生院, 天津 300070)

摘要: 很多脊柱疾病的手术治疗须将活动的腰椎部分固定融合至稳定的骶骨结构上, 而腰骶区特殊的生理解剖结构决定了骶骨侧为内固定系统的应力集中区, 因此, 内固定松动、断裂常先出现于骶骨侧, 最终导致融合失败, 严重影响临床疗效。随着影像学技术的进展及骶骨生物力学研究的深入, S₂骶骨翼螺钉技术因其是在不跨越骶髂关节的基础上增加骶骨侧固定点和固定强度, 可避免固定骶髂关节带来的相关并发症, 越来越受到脊柱外科医师的关注, 本文就国内外近年来该技术的应用解剖学、生物力学、技术要点及临床应用的相关研究做一综述, 以期临床医师和研究者提供参考。

关键词: S₂骶骨翼螺钉, 内固定, 腰骶融合

中图分类号: R681.57

文献标志码: A

文章编号: 1005-8478 (2023) 17-1585-05

Progress of second sacral alar screw technique // KANG Yu-xiang^{1,2}, LI Guo-wang², XU Bao-shan¹. 1. Department of Minimally Invasive Spinal Surgery, Tianjin Hospital, Tianjin, 300211, China; 2. Graduate School, Tianjin Medical University, Tianjin, 300070, China

Abstract: In the surgical treatment of some spinal diseases, the active lumbar must be partially fixed and fused to stabilize the lumbosacral structure. The special physiological and anatomical structure of the lumbosacral region determines that the sacrum is the stress concentration area of the internal fixation system. Therefore, the failure of internal fixation often occurs on the sacral side first, and eventually leads to fusion failure, which seriously affects the clinical efficacy. With the development of imaging technology and the deepening of sacral biomechanics research, the second sacral alar screw (S₂AIS) has attracted more and more attention of spine surgeons because it increases fixation points and strengthens in the sacrum fixation without crossing the sacroiliac joint to avoid the related complications of sacroiliac fixation. This paper reviews the researches at home and abroad on the anatomy, biomechanics, technical points and clinical applications of S₂AIS technique in recent years, providing a reference for orthopedic surgeons and researchers.

Key words: second sacral alar screw, internal fixation, lumbosacral fusion

很多脊柱疾病的手术治疗须将具有高度活动能力的腰椎固定融合于刚性的骶骨区, 导致骶骨侧承受较大的平移剪切力, 而骶骨的骨质量又相对较差, 所以, 内固定失败常见于骶骨侧^[1, 2]。因此, 常需增加骶骨侧固定点, 加长力臂, 以增加骶骨侧固定强度^[1, 3]。目前, 临床上常用的骶骨侧加强固定技术是髂骨螺钉 (iliac screws, IS) 技术和经第2骶椎骶髂螺钉 (second sacral alar-iliac screws, S₂AIS) 技术, 这两种技术均属于骶盆固定, 均跨越了微动的骶髂关节, 然而, 并不是所有的骶骨侧加强固定均须延伸至髂骨^[4-6]。近年来, S₂骶骨翼螺钉 (second sacral alar screw, S₂AS) 技术因其是在不跨越骶髂关节的基础上增加骶骨侧固定强度, 越来越受到脊柱外科医师的关

注^[2]。但国内外关于该技术的相关文献报道较少, 笔者就该技术的研究进展做一综述。

1 S₂AS 固定技术的应用解剖学基础

骶骨翼是骶骨侧块的上半部分, 由 S₁~S₃ 的侧块融合而成, 形似翅膀状, 与冠状面成角约 30°, 是骶骨两侧最宽大的部分, 也是骶骨骨密度相对较高的区域, 尤其是骶岬与髂耻线的移行区^[7-9]。孙贺等^[10]通过对 60 块成人的骶骨标本测量研究发现, 骶骨翼有足够的空间能通过直径 4.5~6.5 mm、长 30~40 mm 的螺钉, 达到固定作用。尽管骶骨的腹面有很多重要的解剖结构, 如髂内动静脉、腰骶干、直肠和乙

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.17.09

[△]基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 82072491; 31900967)

作者简介: 康宇翔, 博士研究生, 主治医师, 研究方向: 骨科, (电话) 18822335792, (电子信箱) kangyuxiang1986@163.com

* 通信作者: 徐宝山, (电子信箱) xubaoshan99@126.com

状结肠等,但解剖学研究表明,骶骨翼腹侧外上方存在一个安全区,其内侧界为腰骶干、外侧界为骶髂关节、下界为髂骨弓状线的延长线、上界为髂骨弓状线的延长线上方20 mm,面积约15 mm×25 mm^[2, 11, 12]。另外,由骶骨的腹侧皮质和骶髂关节面骶骨骨皮质交汇形成的骶骨翼前外侧角的骨皮质很厚,为S₂AS螺钉的远端皮质固定提供了解剖学基础。骶骨翼的这些解剖学特点决定了S₂AS螺钉的安全坚强固定是可行的。

2 S₂AS 固定技术的生物力学特征

McCord等^[13]于1992年提出了“腰骶生物力学支点”的概念,其位于L₅/S₁椎间盘后角,腰骶固定时,在矢状面上,骶骨侧螺钉的钉头延伸至此点的腹侧越多,其固定强度就越大。当S₂AS经其最优钉道置入时,其钉头可延伸至此点的腹侧,然而S₂椎弓根钉的钉头位于此点背侧,所以其生物力学强度明显优于S₂椎弓根钉^[2, 9]。尤传飞等^[14]的包括8具成人骶骨标本的生物力学研究显示,S₂AS固定的最大拔出力低于S₁椎弓根螺钉固定,但高于S₁骶骨翼螺钉固定。另外,在矢状面上呈锐角的S₂AS与S₁椎弓根螺钉在骶骨侧形成了立体三角形结构,明显增强了其生物力学稳定性^[9]。

3 S₂AS 置入的注意事项及技术要点

3.1 术前影像学检查

正位X线片评估L₅椎体与髂嵴最高点的关系,如果是深坐骨盆,则术中可能操作空间狭小,S₂AS置钉难度加大。侧位X线片观察是否有腰骶移行椎,Becker等^[15]的研究发现,腰骶移行椎可增加置入S₂AS损伤骶前血管的风险。三维CT检查评估骶骨翼的骨质情况,并测量预估S₂AS最大长度、最优钉道的上倾角及外展角度;MRI检查评估神经血管结构及变异程度,测量骶前神经血管与安全区的距离,为术中安全置入S₂AS提供参考。

3.2 S₂AS 入钉点的定位方法

与S₂AI入钉点基本相同,其定位方法有:第2骶后孔向外向上1 mm、第1骶后孔和第2骶后孔外缘连线中点、第1骶后孔外下2 mm、第1骶后孔向外1 mm、向下1 mm等^[16-20]。但是无论用那种方法定位,其范围应在第1、2骶后孔连线中点与骶外侧棘之间,尽可能协调其进钉点与S₁及各腰椎椎弓根

螺钉的进钉点排列在同一直线上^[2]。

3.3 S₂AS 的最优钉道

有学者认为^[21],骶骨翼呈蝴蝶状,S₂AS螺钉的轨迹在翼区内是相对灵活的,既可以向外上,也可以向外下,但是其解剖形态学特征决定了螺钉方向只有向前、向外、向头侧才能获得足够的骨量和长度,才能获得最优钉道。Zhao等^[17]对我国100例汉族正常成人骶骨CT影像学资料模拟S₂AS螺钉轨迹研究发现,其最优钉道的长度平均为45.3 mm,而且男性明显比女性长。总之,S₂AS的最优钉道应为:(1)钉头深入但不突破骶骨翼前外侧骨皮质形成的三角形区域;(2)不侵入骶髂关节,不突破前方骨皮质。如果外展角过小,螺钉突破前方骨皮质,有损伤髂内动脉、L₅神经根的风险^[2, 21-23]。

3.4 S₂AS 技术的操作要点

寻找解剖标志:术中需要探及的解剖标记包括第1、2骶后孔,骶外侧棘,骶髂关节,将钝头探针临时插入骶髂关节,以确定入钉点的外侧界限及螺钉的大致外展角度。双皮质固定:开口锥突破骶骨后侧骨皮质20 mm后,沿着预定方向缓慢插入钝头开路探针,直至骶骨翼外上角骨皮质,用锤子轻敲钝头开路探针尾部,直至其尖端进入骨皮质约2 mm,测深,一般为40~50 mm,使用直径6.5 mm的万向螺钉。术中需透视骨盆正侧位、入口位和出口位。在正位片上,定位针位于骶孔外侧,远端紧贴骶髂关节面;侧位片上,定位针与S₁椎体上终板成角约15°~25°,远端超过S₂椎体前皮质;入口位片上,入钉点应位于第1、2骶孔之间,并在其外缘连线的外侧;出口位片上,定位针应位于骶髂关节线的内侧,其尖端与弓状线的距离不超过5 mm^[2, 18]。

4 S₂AS 的适应证及临床应用

目前文献报道的S₂AS的适应证主要集中在以下几个方面:

4.1 与S₁椎弓根螺钉联合使用,增加骶骨侧的固定强度

很多腰骶部疾病,如L₅椎板切除及肿瘤切除术后的腰骶区不稳定、腰骶区在矢状面上的失衡等,均需要腰骶区的坚强固定。骶骨侧仅靠S₁椎弓根螺钉固定,术后易出现螺钉松动、假关节形成,最终导致融合失败。Chung等^[24]通过对包括63例患者的回顾性研究发现,骶骨侧应用S₁椎弓根螺钉+S₂AS固定,可明显减少术后S₁椎弓根螺钉松动的发生率,提高

腰骶融合率。Koller等^[2]对80例患者的长期随访研究也发现,骶骨侧应用 S_1 椎弓根螺钉+ S_2 AS固定, L_5/S_1 融合率高达90%以上。Baek等^[25]通过对包括70例患者的回顾性病例对照研究显示,在对腰椎退行性畸形进行长节段融合时,骶骨侧增加 S_2 AS和IS均能有效增强远端固定的强度,二者的差异无统计学意义。Park等^[26]对13例患者术后平均长达26.6个月的随访研究发现,对于退行性腰椎畸形须行包括腰骶区的长节段融合手术时,骶骨侧可应用 S_2 AS替代IS加强固定,但是对于重度骨质疏松、矢状面严重畸形的患者,髂骨螺钉更有优势^[2]。

在腰骶融合失败和邻椎病的翻修手术中,常常需要向头侧和尾侧延长固定节段,增加固定强度。另外,翻修手术中常常会发现 S_1 椎弓根部分骨质缺损及入钉点的破坏,无法置入 S_1 椎弓根螺钉或者螺钉把持力不足,常需增加骶骨侧固定点。林飞跃等^[18]运用 S_2 AS辅助增强固定技术翻修7例腰骶区内固定失败患者,平均18个月的随访研究发现,均达到骨性融合,无内固定再失败发生。Nottmeier等^[16]报道了5例腰骶假关节形成和4例邻椎病患者翻修术中 S_2 AS作为 S_1 椎弓根螺钉的加强固定方法,均获得了良好疗效。

中重度 L_5 椎体滑脱矫形复位融合内固定手术治疗时,骶骨侧运用 S_1 椎弓根螺钉+ S_2 AS可增加内固定的力臂,增强远端固定的强度^[27]。Xu等^[21]报道了将 S_2 AS应用于III度 L_5 椎体滑脱手术治疗的病例,其固定节段为 $L_4\sim S_2$,取得了良好的临床效果。

4.2 S_1 椎弓根螺钉的替代方法

S_1 椎弓根螺钉是腰骶部短节段固定手术骶骨侧的首选固定点,但当遇到 S_1 椎体和椎弓根病变、畸形或缺损、感染、髂骨翼过度内聚等情况时, S_1 椎弓根螺钉将无法置入^[16, 28]。丁红涛等^[29]和潘爱星等^[30]将 S_1 AS替代 S_1 椎弓根螺钉应用于腰骶部退变性疾病及腰椎邻椎病的翻修手术中,取得了良好的临床疗效。尤传飞等^[14]的生物力学及影像学研究表明, S_2 AS螺钉固定的最大拔出力低于 S_1 椎弓根螺钉,但高于 S_1 AS,而且最优钉道要长于 S_1 AS。Nottmeier等^[16]报道7例应用 S_2 AS螺钉替代 S_1 椎弓根螺钉的病例,均未发生内固定失效、椎间融合失败,并建议将 S_2 AS螺钉作为 S_1 椎弓根螺钉无法置入时的替代技术。

5 S_2 AS技术与 S_2 AIS技术的比较

S_2 AIS与 S_2 AS的入钉点相似,但其外倾角更大,斜向外下方穿透骶髂关节延伸至髂骨,其理想钉道是经过骶髂关节下缘的无软骨区,以减小对骶髂关节的影响。有研究显示,有60%的 S_2 AIS实际是穿透骶髂关节软骨面置入的,这可能与术后骶髂关节慢性疼痛直接相关,另外,骶髂关节属于微动关节,长期固定必然会导致关节退变、螺钉松动,甚至断裂,发生率高达35%^[31-35]。然而, S_2 AS可避免骶髂关节固定后带来的这些并发症。另外, S_2 AS不影响取髂骨自体植骨。 S_2 AIS穿透骶髂关节走行于狭窄的髂骨翼内,置钉难度高,而 S_2 AS螺钉的轨迹在翼区内是相对灵活的,置钉相对容易^[36, 37]。

然后,即使 S_2 AS经其最优钉道置入,其钉头可延伸腰骶生物力学支点的腹侧,其长度还是明显短于 S_2 AIS,而且, S_2 AIS是穿透三层骨皮质固定, S_2 AS为两层骨皮质,因此, S_2 AS的把持力明显小于 S_2 AIS^[2]。所以, S_2 AS是否适用于特发性脊柱侧凸畸形矫正、平背畸形矫正、脊柱三柱截骨等骶骨侧需要坚强固定的手术中,需要进一步生物力学及临床对照研究探讨,目前这方面的研究很少。另外,对于骶骨翼局部重度骨质疏松、骶骨骨折及骶骨肿瘤的患者不宜应用 S_2 AS固定,须应用 S_2 AIS、甚至IS,以确保远端固定强度^[1, 2, 12, 38, 39]。

6 小结与展望

S_2 AS不跨越骶髂关节,在不需要骶盆固定时,是骶骨侧加强固定的最优选择,但是要徒手经其最优钉道置入,对术者技术要求很高,随着计算机导航技术的发展,可能为准确置入 S_2 AS提供一定的辅助作用^[40]。目前,关于 S_2 AS技术的临床应用研究多为个案报道和病例组研究,样本量较小,不能精确评估 S_2 AS的远期临床效果,在以后的研究中应尽量采用前瞻性随机对照研究,扩大样本量,以准确评估 S_2 AS的安全性和有效性。

参考文献

- [1] El Dafrawy MH, Raad M, Okafor L, et al. Sacropelvic fixation: a comprehensive review [J]. Spine Deform, 2019, 7 (4): 509-516.
- [2] Koller H, Zenner J, Hempfing A, et al. Reinforcement of lumbosacral instrumentation using S_1 -pedicle screws combined with S_2 -alar screws [J]. Oper Orthop Traumatol, 2013, 25 (3): 294-314.
- [3] Zhang T, Bao H, Shu S, et al. Different distal fixation anchors in lumbosacral spinal deformities associated with sacral agenesis: Which one is better [J]. J Neurosurg Spine, 2021, 2021: 1-6.

- [4] 张楠威, 于滨生. 经 S₂ 骶髂螺钉技术在脊柱骨盆稳定性重建中应用的研究进展 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32 (6): 764-768.
- [5] de Andrada Pereira B, Lehrman JN, Sawa AGU, et al. Biomechanical effects of a novel posteriorly placed sacroiliac joint fusion device integrated with traditional lumbopelvic long-construct instrumentation [J]. Neurosurg Spine, 2021, 2021: 1-10.
- [6] Lombardi JM, Shillingford JN, et al. Sacropelvic fixation: when, why, how [J]. Neurosurg Clin N Am, 2018, 29 (3): 389-397.
- [7] Radley JM, Hill BW, Nicolaou DA, et al. Bone density of first and second segments of normal and dysmorphic sacra [J]. J Orthop-Traumatol, 2020, 21 (1): 6.
- [8] 张攀柱. 骶骨临床解剖学新进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2012, 20 (19): 1768-1770.
- [9] Kim JH, Horton W, Hamasaki T, et al. Spinal instrumentation for sacral-pelvic fixation: a biomechanical comparison between constructs ending with either S₂ bicortical, bitriangulated screws or iliac screws [J]. J Spinal Disord Tech, 2010, 23 (8): 506-512.
- [10] 孙贺, 徐达传, 仇恒志, 等. 经后路第 2 骶椎螺钉进钉方法的应用解剖 [J]. 中国临床解剖学杂志, 2002, 20 (3): 181-183.
- [11] Mirkovic S, Abitol J, Steinmann J, et al. Anatomic consideration for sacral screw placement [J]. Spine, 1991, 16: 289-294.
- [12] 孙兆忠, 任佳彬, 程艳, 等. 腰骶椎侧前方内固定术的应用解剖学研究 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24 (22): 2089-2092.
- [13] McCord DH, Cunningham BW, Shono Y, et al. Biomechanical analysis of lumbosacral fixation [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1992, 17 (8 Suppl): S235-S243.
- [14] 尤传飞, 袁峰, 葛保健, 等. 经骶 1-2 侧块螺钉固定的最大拔出力度测定 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23 (2): 166-169.
- [15] Becker L, Schömig F, Haffer H, et al. Safe zones for spinopelvic screws in patients with lumbosacral transitional vertebra [J]. Global Spine J, 2021, 2021: 21925682211019354.
- [16] Nottmeier EW, Pirris SM, Balseiro S, et al. Three-dimensional image-guided placement of S₂ alar screws to adjunct or salvage lumbosacral fixation [J]. Spine J, 2010, 10 (7): 595-601.
- [17] Zhao Y, Yuan B, Han Y, et al. Radiographic analysis of the sacral-2-alar screw trajectory [J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16 (1): 522.
- [18] 林飞跃, 徐杨, 尹晓明, 等. S₂ 骶髂螺钉技术辅助增强固定在腰骶椎翻修术中的应用 [J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14 (1): 1-4.
- [19] Matsukawa K, Kato T, Mobbs R, et al. Combination of sacral-alar-iliac screw and cortical bone trajectory screw techniques for lumbosacral fixation: technical note [J]. J Neurosurg Spine, 2020, 2020: 1-6.
- [20] Zhu F, Bao HD, Yuan S, et al. Posterior second sacral alar iliac screw insertion: anatomic study in a Chinese population [J]. Eur Spine J, 2013, 22 (7): 1683-1689.
- [21] Xu Y, Lin FY, Lin X, et al. Second sacral alar screw fixation: anatomic study of three-dimensional computed tomography and case report [J]. World Neurosurg, 2019, 126: e1542-e1548.
- [22] Kwan MK, Jeffry A, Chan CY, et al. A radiological evaluation of the morphometry and safety of S₁, S₂ and S₂-ilium screws in the Asian population using three dimensional computed tomography scan: an analysis of 180 pelvis [J]. Surg Radiol Anat, 2012, 34 (3): 217-227.
- [23] Tamagawa S, Okuda T, Nojiri H, et al. Anatomy of the L₅ nerve root in the pelvis for safe sacral screw placement: a cadaveric study [J]. J Neurosurg Spine, 2021, 2021: 1-6.
- [24] Chung JY, Seo HY, Yim JH, et al. The effect of sacral alar screw on long-level fusion including lumbosacral segment [J]. J Kor Soc Spine Surg, 2011, 18 (3): 146-152.
- [25] Baek SW, Park YS, Ha KY, et al. The analysis of spinopelvic parameters and stability following long fusions with S₁, S₂ or iliac fixation [J]. Int Orthop, 2013, 37 (10): 1973-1980.
- [26] Park YS, Kim HS, Baek SW, et al. Lumbosacral fixation using the diagonal S₂ screw for long fusion in degenerative lumbar deformity: technical note involving 13 cases [J]. Clin Orthop Surg, 2013, 5 (3): 225-229.
- [27] 沈宁江, 林明侠, 王先安, 等. 应用短节段与长节段椎弓根钉内固定治疗腰椎滑脱的疗效观察 [J]. 中国矫形外科杂志, 2011, 19 (17): 1483-1484.
- [28] Fang W, Liu W, Li Q, et al. Clinical evaluation of S₁ alar screws application in short-segment lumbosacral fixation and fusion for spine infection with severe S₁ vertebral body loss [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2022, 23 (1): 866.
- [29] 丁红涛, 刘玉增, 海涌, 等. 骶骨翼螺钉内固定在腰骶部退变疾病手术治疗中的临床应用 [J]. 中华医学杂志, 2021, 101 (45): 3718-3723.
- [30] 潘爱星, 刘玉增, 海涌, 等. 皮质骨轨迹螺钉及骶骨翼螺钉内固定在腰椎邻近节段退变疾病中的应用研究 [J]. 中华医学杂志, 2022, 102 (17): 1297-1302.
- [31] De la Garza Ramos R, Nakhla J, Sciubba DM, et al. Iliac screw versus S₂ alar-iliac screw fixation in adults: a meta-analysis [J]. J Neurosurg Spine, 2018, 30 (2): 253-258.
- [32] Guler UO, Cetin E, Yaman O, et al. Sacropelvic fixation in adult spinal deformity (ASD): a very high rate of mechanical failure [J]. Eur Spine J, 2015, 24 (5): 1085-1091.
- [33] Martin CT, Polly DW, Holton KJ, et al. Acute failure of S₂-alar-iliac screw pelvic fixation in adult spinal deformity: novel failure mechanism, case series, and review of the literature [J]. J Neurosurg Spine, 2021, 36 (1): 53-61.
- [34] Hyun SJ, Jung JM, Kim KJ, et al. Durability and failure types of S₂-alar-iliac screws: an analysis of 312 consecutive screws [J]. OperNeurosurg (Hagerstown), 2020, 20 (1): 91-97.
- [35] Nakashima H, Kanemura T, Satake K, et al. Sacroiliac joint degeneration after lumbopelvic fixation [J]. Global Spine J, 2022, 12 (6): 1158-1164.
- [36] Laratta JL, Shillingford JN, Meredith JS, et al. Robotic versus free-hand S₂ alar iliac fixation: in-depth technical considerations [J]. J Spine Surg, 2018, 4 (3): 638-644.
- [37] 郑礼鹏, 雷飞, 孙先润, 等. 3D 打印导板辅助骶 2 髂骨螺钉置 [J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27 (2): 176-180.

- genesis, but is inadequate for osteogenesis as compared with the dual delivery of VEGFA and BMP2 in a subcutaneous mouse model [J]. *Stem Cell Res Ther*, 2018, 9 (1): 23.
- [30] Peng H, Wright V, Usas A, et al. Synergistic enhancement of bone formation and healing by stem cell-expressed VEGF and bone morphogenetic protein-4 [J]. *J Clin Invest*, 2002, 110 (6): 751-759.
- [31] Ren Q, Cai M, Zhang K, et al. Effects of bone morphogenetic protein-2(BMP-2) and vascular endothelial growth factor (VEGF) release from polylactide-poly (ethylene glycol)-polylactide (PELA) microcapsule-based scaffolds on bone [J]. *Braz J Med Biol Res*, 2017, 51 (2): 6520.
- [32] Bao XG, Zhu LJ, Huang XD, et al. 3D biomimetic artificial bone scaffolds with dual-cytokines spatiotemporal delivery for large weight-bearing bone defect repair [J]. *Sci Rep*, 2017, 7 (1): 7814.
- [33] Li X, Ye F, Li GL, et al. 3D printed hydroxyapatite/silk fibroin/polycaprolactone artificial bone scaffold and bone tissue engineering materials constructed with double-transfected bone morphogenetic protein-2 and vascular endothelial growth factor mesenchymal stem cells to repair rabbit radial bone defects [J]. *Nanosci Nanotechnol Lett*, 2020, 12 (3): 368-375.
- [34] Chen S, Shi Y, Zhang X, et al. Evaluation of BMP-2 and VEGF loaded 3D printed hydroxyapatite composite scaffolds with enhanced osteogenic capacity in vitro and in vivo [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2020, 112: 110893.
- [35] Wang Q, Zhang Y, Li B, et al. Controlled dual delivery of low doses of BMP-2 and VEGF in a silk fibroin-nanohydroxyapatite scaffold for vascularized bone regeneration [J]. *J Mater Chem B*, 2017, 5 (33): 6963-6972.
- [36] Godoy-Gallardo M, Portolés-Gil N, López-Periago AM, et al. Multi-layered polydopamine coatings for the immobilization of growth factors onto highly-interconnected and bimodal PCL/HA-based scaffolds [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2020, 117: 111245.
- [37] Godoy-Gallardo M, Portolés-Gil N, López-Periago AM, al. Immobilization of BMP-2 and VEGF within multilayered polydopamine-coated scaffolds and the resulting osteogenic and angiogenic synergy of co-cultured human mesenchymal stem cells and human endothelial progenitor cells [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21 (17): 6418.
- [38] Dou DD, Zhou G, Liu HW, et al. Sequential releasing of VEGF and BMP-2 in hydroxyapatite collagen scaffolds for bone tissue engineering: Design and characterization [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 123: 622-628.
- [39] 彭祥, 王文军. 纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 复合材料在脊柱修复重建中的研究与应用 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2016, 24 (10): 911-914.
- [40] 宋海涛, 张伟, 李民, 等. 纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 椎体支撑体在颈椎前路手术重建中的应用 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26 (17): 1560-1564.
- [41] Li A, Li J, Zhang Z, et al. Nanohydroxyapatite/polyamide 66 cross-linked with QK and BMP-2-derived peptide prevented femur non-union in rats [J]. *J Mater Chem B*, 2021, 9 (9): 2249-2265.
- (收稿:2022-06-09 修回:2022-12-27)
(同行评议专家:崔勇, 马俊杰)
(本文编辑:宁桦)

(上接 1588 页)

- [38] 王孝宾, 王冰, 李晶, 等. 经骶 2 髂骨螺钉内固定在腰骶段结核稳定性重建中的应用 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27 (5): 392-398.
- [39] Nanda A, Manghwani J, Kluger PJ. Sacropelvic fixation techniques - Current update [J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2020, 11 (5): 853-862.
- [40] Cirrincione P, Widmann RF, Heyer JH. Advances in robotics and pediatric spine surgery [J]. *Curr Opin Pediatr*, 2023, 35 (1): 102-109.
- (收稿:2022-11-23 修回:2023-04-11)
(同行评议专家:陈锋, 朱如森)
(本文编辑:宁桦)