

术中FLOW800在脊髓动静脉畸形手术切除中的应用，病例汇报和文献复习

沈恪诚^{*}，翟伟伟，虞正权[#]

苏州大学附属第一医院神经外科，江苏 苏州

收稿日期：2023年7月18日；录用日期：2023年8月11日；发布日期：2023年8月18日

摘要

脊髓动静脉畸形(spinal cord arteriovenous malformation, SAVM)是一种罕见的脊髓血管疾病，手术方式很多。本文系统复习了SAVM的发病机制和分类，并介绍了FLOW800在脊髓动静脉畸形手术中的应用。汇报了1例显微手术联合FLOW800技术，完整切除脊髓内动静脉畸形的病例。

关键词

脊髓动静脉畸形，FLOW800，显微手术

Intraoperative Application of FLOW800 in Surgical Resection of Spinal Cord Arteriovenous Malformations, Case Report and Literature Review

Kecheng Shen^{*}, Weiwei Zhai, Zhengquan Yu[#]

Department of Neurosurgery, The First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou Jiangsu

Received: Jul. 18th, 2023; accepted: Aug. 11th, 2023; published: Aug. 18th, 2023

Abstract

Spinal cord arteriovenous malformation (SAVM) is a rare vascular disease of the spinal cord, and

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用：沈恪诚，翟伟伟，虞正权. 术中 FLOW800 在脊髓动静脉畸形手术切除中的应用，病例汇报和文献复习[J]. 临床医学进展, 2023, 13(8): 13154-13161. DOI: 10.12677/acm.2023.1381838

there are many surgical methods. This paper reviews the pathogenesis and classification of SAVM, and introduces the application of FLOW800 in spinal cord arteriovenous malformation surgery. A case of complete resection of spinal arteriovenous malformation by microsurgery combined with FLOW800 technique was reported.

Keywords

SAVM, FLOW800, Microsurgery

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

脊髓动静脉畸形(spinal cord arteriovenous malformation, SAVM)是一种由脊髓动脉供血, 位于脊髓髓内的畸形血管团[1], 是一种罕见的脊髓血管疾病, 在脊髓疾病中相对少见。SAVM 的治疗方式有很多, 主要为血管内介入栓塞和显微手术切除, 但是这些治疗方法的实施受限于某些特定条件, 例如畸形血管团的位置、大小以及相应的血管解剖结构[2]。在不太复杂的 AVM 中, 液体栓塞剂的闭塞率在 33%~100% 之间, 这取决于位置和病灶大小[3]。其他的治疗方式如立体定向放射外科(SRS)/立体定向放射治疗(SRT), 近年来有很多文献报道其对脑 AVM 的治疗有效, 但是 SRS/SRT 对脊髓髓内 AVM 的疗效却很少有明确的文献报告[4]。不同位置的 SAVM 适合不同的治疗方式, 在对传统显微手术切除 AVM 的探索中, 我们发现了 FLOW800 技术能极大地帮助术者进行畸形血管团的完整切除, 且目前少有文献报道。

在使用显微手术切除 AVM 时, 除了术前常规的 CT 及 MR 等影像资料, 还常需要在术前、术中、术后通过各种手段来显现血管情况, 常用的手段包括: 减影血管造影术(DSA)、经颅多普勒超声(transcranial doppler, TCD)以及吲哚菁绿荧光造影(indocyanine green video angiography, ICGVA)等[5]。与常规血管造影相比, ICGVA 被认为是一种微创、简单、实时、可重复的技术[6]。在 ICGVA 的基础上, 进一步发展出了 FLOW800 技术。FLOW800 是一个可视化分析工具, 是在 ICGVA 造影结果的基础上, 通过收集术中目标区域血管造影剂荧光强度及血管中造影剂的通过时间等参数, 快速解读由 INFRARED 800 生成的荧光视频信息, 将 INFRARED 800 视频信息编译成彩色地图、图表或对比图像, 实时地直观地显示术中血管结构以及血流情况。在术野影像中对荧光视频进行深入解读并对血管的血流动力学进行可视化分析, 这项技术对判断手术视野的血管及组织血流情况起到巨大帮助。

本文介绍了 1 例显微手术联合 FLOW800 技术, 完整切除脊髓内动静脉畸形的病例。

2. SAVM 的发病机制

SAVM 的发展机制尚不完全清楚, 大多数发生在出生时[7]。多数 SAVM 可通过血管造影明确其供血动脉血管团或瘘口以及引流静脉的形态。SAVM 的发病机制主要有 5 种, 包括: 1) “盗血”: SAVM 使动静脉间形成短路, 动脉血不经毛细血管直接进入静脉, 使正常脊髓组织供血减少; 2) 由于小动脉血液在没有毛细血管通路和阻力的情况下分流到静脉系统, 超过 70% 的动脉压被传递到静脉系统, 静脉压升高使脊髓静脉回流减少、瘀血, 易形成血栓; 3) 畸形血管团破裂出血致血肿压迫脊髓影响正常脊髓功能, 或血管痉挛致脊髓血供障碍; 4) 畸形血管团或扩张之静脉形成占位效应, 压迫脊髓导致功能障碍; 5) 少数 SAVM 有血栓形成, 致周围脊髓组织供血障碍或静脉回流受阻[8]。

3. SAVM 的分类

临床中对 SAVM 的分类方法有很多,通常是基于病灶在椎管内解剖层次分类、供血动脉分类以及手术所见分类等。目前较为常用的是 1992 年 Anson 和 Spetzler 提出的分类系统[2]。Anson 和 Spetzler 将脊髓动静脉畸形分为以下 4 种:

1) 硬脊膜动静脉瘘(Spinal Dural Arteriovenous Fistula, SADVF)是最常见的脊髓血管畸形类型,通常影响男性,男女比例为 5:1 [2]。病人的平均年龄为 40~50 岁,病变多发于胸腰段。没有明显的家族发病倾向。人口统计资料显示:脊髓硬脊膜动静脉畸形可能为获得性疾病,这些病变可能与创伤性因素有关。这种类型的 SAVM 在患者中表现为缓慢进展的腿部无力及疼痛,疼痛是脊髓动静脉畸形病人最常见的症状。胸腰段背部或臀部的疼痛可能为其主要症状,有时病人可出现神经根性痛[9]。

2) 髓内脊髓动静脉畸形(Intramedullary Arteriovenous Malformation)是一种先天性畸形,最常发生在胸腰椎区域,特别是 T4 和 L3 水平[10]。病人常发生髓内和蛛网膜下腔出血,可同时伴有或没有急性神经功能障碍。临床上,该类型的 SAVM 通常发现于年轻人中。患者可出现继发于占位效应、缺血或出血的脊髓病。这种类型的畸形血管团通常有多个血管供体,它们起源于脊髓前动脉和/或后动脉。先前的一项研究对多项研究进行了 II 型 SAVM 出血概率的汇总分析,确定了 4%年出血率,对于先前有出血的 SAVM,其年出血率增加至约 10% [11]。

3) 硬膜外-硬膜内动静脉畸形/青少年血管畸形(Extradural-Intradural Arteriovenous Malformations/Juvenile vascular malformations),这是一种罕见的、复杂的、局部侵袭性病变,可累及骨骼、肌肉、硬脑膜、脊髓和神经根,平均发病年龄为 15 岁。虽然 III 型 SAVM 的表现与 II 型相似,常表现为急性出血和脊髓病,但可以通过局部组织受累的迹象等区别加以区分。

4) 硬膜内髓周动静脉瘘(Intradural Perimedullary Arteriovenous Fistula)是一种罕见的瘘管,是由根动脉和硬膜内静脉之间的分流导致这些静脉充血而引起[12]。大多数病人表现为进行性发展的脊髓病并伴有疼痛、无力等感觉和括约肌功能障碍,或伴蛛网膜下腔出血。其分布无性别差别。IV 型病人的脊髓功能障碍与 I 型病变相似。

4. FLOW800

4.1. FLOW800 介绍

FLOW800 是一个可视化分析工具,用于快速解读由 INFRARED 800 生成的荧光视频信息。将视频信息编译成彩色地图,图表或对比图像。它可以对荧光视频进行深入解读并对血管的血流动力学进行可视化分析。

操作视野由显微镜上的光源照亮。该光源可通过一个过滤器以产生荧光并同时提供 UV 和热保护。近红外波长的光通过该过滤器,落在注射的 ICG 吸收谱带范围内(700~850 nm)。显微镜的观察光道内装有一个分光器允许肉眼不可见的反射的 ICG 荧光通过,通过红外线的摄相呈现出黑白图像,过滤周围杂光和激光,特异性收集由 ICG 染剂发出的荧光。

4.2. 应用优势

1) 动脉瘤(Aneurysm): 在常规荧光只能判断动脉瘤夹闭是否完全的情况下,进一步判断判断夹闭是否造成其他血管狭窄等并发症,术中调整动脉瘤夹位置以降低其发生概率。

2) 脑或脊髓动静脉畸形(arteriovenous malformation, AVM)及硬脑脊膜动静脉瘘(arteriovenous fistula, AVF): FLOW800 技术术前能够帮助辨别病灶主要供血动脉、动脉化静脉,引流静脉及周围未参与病变

循环地正常组织血管信息,判断病灶范围,制定手术计划[13]。在高灌注 AVM 中,可以判断主动脉分支与回流静脉之间的区别。目标参数表明,手术探查时可显示病变处血流量降低,AVM 中通过观察血流的速度及方向可了解到血管逐步狭窄的影响。

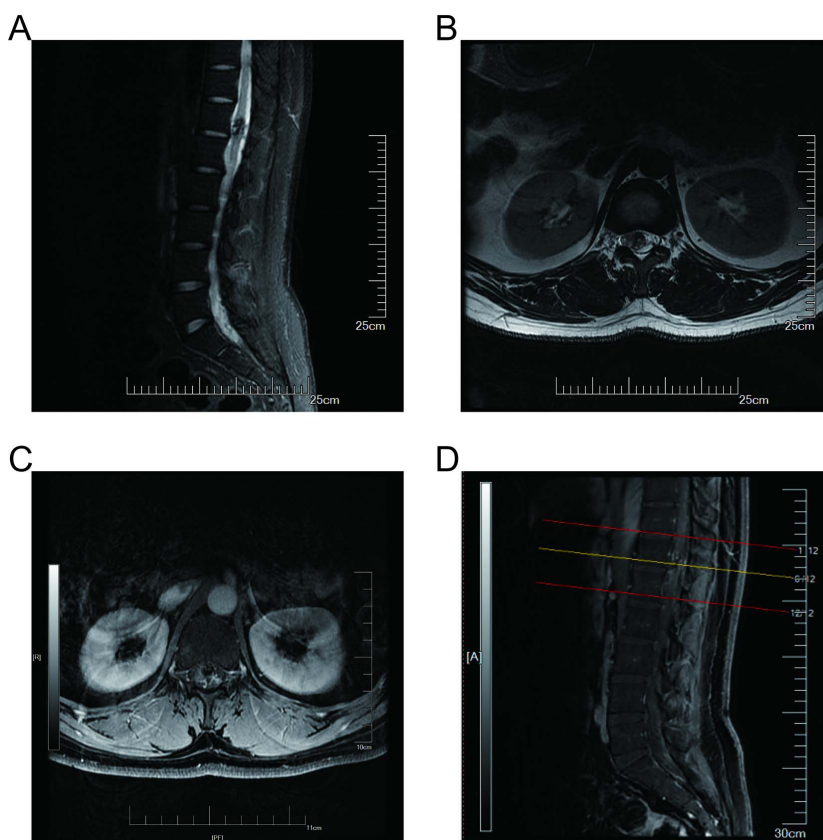
3) 搭桥(Bypass): FLOW800 技术可以实时评估皮层血流情况,提供搭桥血管的选择。

4) 静脉牺牲(venous sacrifice): FLOW800 技术可以证实在不同血管中流速的差异确认血流的改变,帮助主刀医生做出正确的判断,选择保护或者牺牲该血管。

5) 灌注(perfusion): FLOW800 可评估持续经过时间。如:非缺血组织与疑似缺血组织之间的对比,强度地图与延迟地图揭示受损灌注情况,通过分析荧光强度可证实医生推断。

5. 病例汇报

30 岁男性患者,因腰部疼痛伴有下肢麻木、乏力半年余入院。患者半年前无明显诱因下出现腰部疼痛,呈阵发性绞痛,休息后缓解,伴右下肢麻木、乏力,无其他明显不适。入院后完善 MRI 增强检查,结果考虑为:T12-L1 层面脊髓内占位及 L4-S1 马尾神经丛内异常信号,考虑海绵状血管瘤伴陈旧性出血可能,室管膜瘤伴转移不完全除外(图 1)。查体提示右下肢大腿外侧及膝关节以下皮肤感觉减退,右下肢肌力 4 级,其余肢体正常。



(A), (B): MRI 平扫可见 T12-L1 占位,偏向右侧。L4-S1 异常信号。(C), (D): MRI 增强可见 T12-L1 占位不均匀强化,考虑脊髓动静脉畸形, L4-S1 异常信号考虑陈旧性出血。轴位可见畸形血管团右侧有两支供血动脉,一支在浅表,一支在深部,引流静脉在同侧。

Figure 1. Spinal cord MRI after admission

图 1. 患者入院后脊髓 MRI

完善相关术前准备，根据患者的症状、体征及术前相关辅助检查，考虑诊断为脊髓动静脉畸形，分型为第 II 型，即髓内动静脉畸形。患者症状与疾病相关。向家属及患者详细告知手术风险及相关注意事项后，择期行“脊髓病损切除术 + 硬脊膜修补术”。术中联合使用 FLOW800 技术。

6. 手术过程

患者平卧位，全麻插管后改俯卧位，术前 C 臂机定位脊柱节段。取 T12 部后正中切口，悬吊硬脊膜后，剪开硬脊膜，沿脊髓后正中沟轻柔划开脊髓，即可看到一团迂曲的畸形血管团(图 2(A))，与周围蛛网膜粘连。

注射吲哚菁绿，结合 FLOW800 可以观察到血管走向(图 2(B))。

术中使用吲哚菁绿造影明确血管团与正常脊髓的界限，明确血管团供血动脉及引流静脉。畸形血管团由 2 支动脉供血，一支在画面上方，一支在深部，画面下方有一支动脉化静脉引流(图 2(C))。

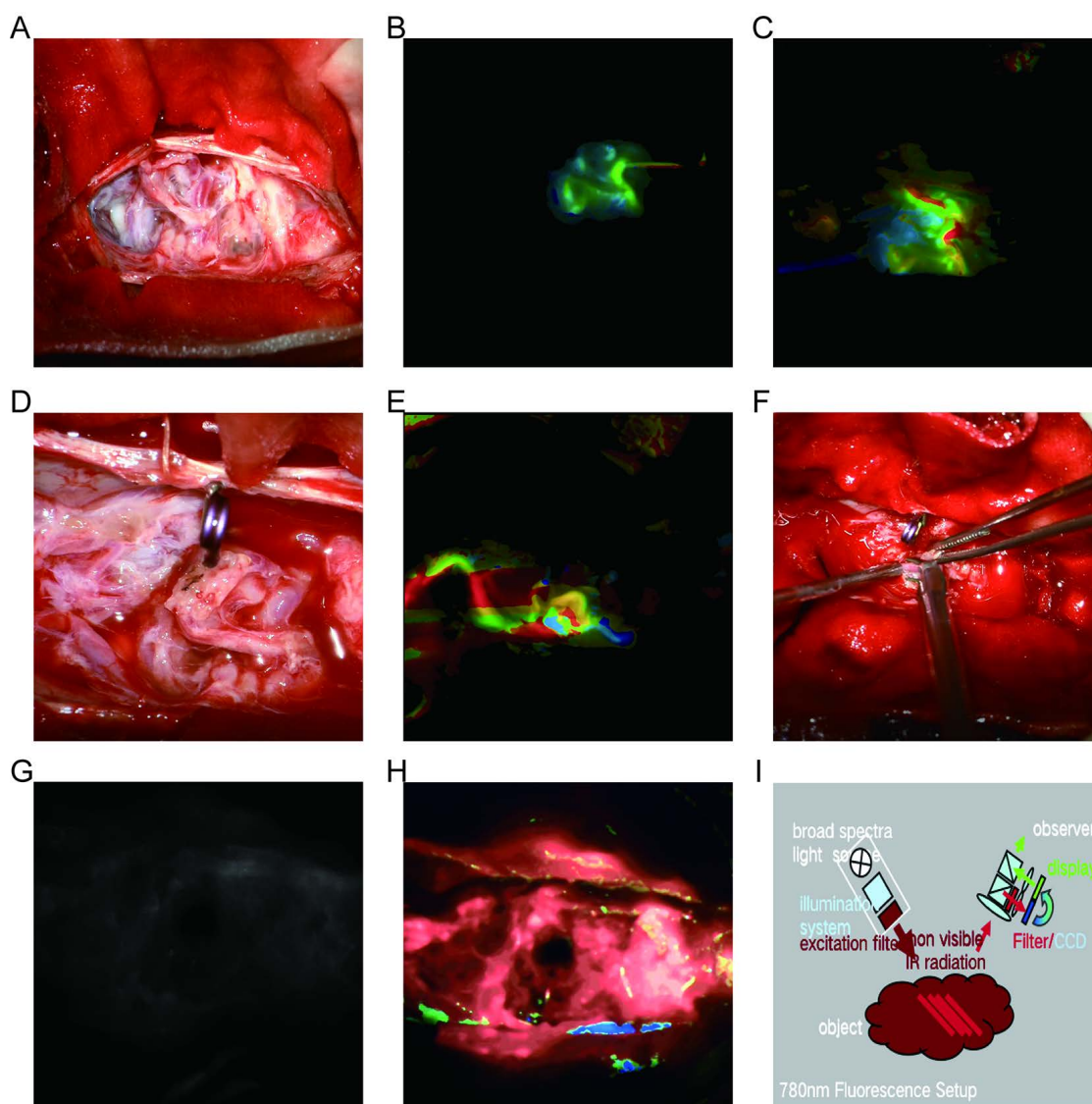


Figure 2. The operation process and the image and principle of FLOW800 are introduced

图 2. 手术过程及 FLOW800 图像和原理介绍

明确供血动脉位置后使用临时阻断夹夹闭一支供血动脉(图 2(D)), 再次行吲哚菁绿造影明确深部第二支供血动脉(图 2(E))。

在畸形血管团深部, 使用第二只临时阻断夹, 夹闭第二支供血动脉, 见畸形血管团明显减小(图 2(F))。

于畸形血管团基底电凝分离畸形血管团, 电凝离断供血动脉, 沿边缘切除畸形血管团, 电凝引流静脉, 完全切除畸形血管团并送组织病理(图 2(G))。

再次注射吲哚菁绿(图 2(H)), 术区无显影。使用 FLOW800 确认畸形血管团完全切除。FLOW800 原理见图 2(I)。

术后患者神志清, 精神正常, 下肢遵嘱活动, 肌力同术前。鞍区感觉正常, 拔除导尿管后小便自解, 大便正常。

7. 讨论

本文介绍了 SAVM 的发病机制和分类, 在传统显微手术切除脊髓动静脉畸形的基础上, 引入 FLOW800 荧光技术, 为术中分辨畸形团血供和完整切除畸形血管团提供了帮助。汇报了 1 例显微手术联合 FLOW800 技术, 完整切除脊髓内动静脉畸形的病例。

SAVM 是一种异质的血管病变, 其临床表现取决于受影响的脊髓节段以及畸形的广泛程度。脊髓血管畸形很少见, 如不及时治疗, 预后可能非常差。SAVM 的患者通常会出现进行性脊髓病的体征和症状, 病程从缓慢进展到急性恶化不等。脊髓 AVM 的治愈目标是在保留脊髓的正常动脉供应和静脉引流的同时中断动静脉交通, 切除畸形团, 预防畸形团再出血。治疗策略通常由脊髓血管畸形的亚型决定, 需要显微外科医生和介入医生在术前进行详细讨论, 制定手术方案。治疗选择包括显微手术治疗、血管内栓塞、立体定向放射或这些手术方式的组合, 比如 Igor Pagiola [14]等人报告了一种联合神经外科和血管内治疗方法来治疗脊髓圆锥动静脉畸形, 是联合了显微手术和血管内栓塞的一种治疗方式。他们在显微镜下暴露畸形血管团后, 使用注射器针尖直接穿刺髓后静脉进行 SAVM 的血管内栓塞, 取得了良好的结果。复合手术室在脊髓动静脉畸形的治疗中也是不可或缺的。

近年来 FLOW800 技术在神经外科手术中广泛应用, 取得了良好的效果。Arceb [15]等人分析了一系列患有血管或肿瘤实体的患者, 使用吲哚菁绿视频血管造影(ICG-VA)和 FLOW800 分析来研究患者特定的静脉血流特征。分析定义了不同的表现模式: 动脉化静脉、血栓静脉、顺行血流快速引流静脉、顺行血流缓慢引流静脉和逆行血流缓慢引流静脉。ICG-VA 和 FLOW800 分析可以提供有关患者特定静脉引流模式的完整、实时的术中信息, 并可以指导有关静脉牺牲的决策过程, 减少手术并发症。但是, Jhawa [16]等人研究认为荧光造影存在穿透性差、深部显影不佳等缺陷。Kato Y [17]等人也得出了相似的结论, 他们认为 FLOW800 是显微镜集成彩色 ICG 视频血管造影的可靠且有用的补充。尽管它在深层 AVM 中的作用有限, 但如果正确剖析和暴露, 它可以提供易于解释和重现的有用信息。因此, ICGVA 在脑 AVM 中的应用更多局限于表浅性的病灶或者局部脑组织灌注情况, 而对于深部病变, 术中需清晰完整暴露病变后进行荧光分析。血管中的血栓或斑块以及术野中的水肿均会对 FLOW800 的分析产生一定的影响。在应用 FLOW800 的时候可能需要更好地暴露病变以及采用其他技术方法进行辅助。比如, 术中可以将 FLOW800 技术与 TCD 技术结合, 在清晰显示脑表面供血动脉、引流静脉的同时, 良好地分辨深部血管的供血情况, 能有效弥补 ICGVA 的缺陷, 有利于提高手术的成功率和疗效。

除了在脑和脊髓动静脉畸形切除中的良好应用, FLOW800 在颅内动脉瘤夹闭、颅内外血管分流术、颈内动脉内膜斑块剥脱术以及在脑及脊髓肿瘤切除术均有较好的应用。同样的, FLOW800 也有其短板。我们在临床使用中发现, 由于病人具有个体差异性, 病变的位置、血管条件均不相同。在单一病例中, 我们确实能通过使用 FLOW800 技术使患者获得更好的疗效和预后, 但是我们很难在不同病例中建立相

关联系。此外，术中注射吲哚菁绿的时间、速度、剂量、显影时间也尚且没有一个明确的标准。而且在 SAVM 治疗中，与 DSA 相比，ICGVA 无法明确 Adamkiewicz 动脉(AKA)的位置。Adamkiewicz 动脉是来自于从主动脉发出的椎间动脉或腰动脉的前根动脉的任意一支，它为脊髓腰段供血[18]。术前 DSA 能明确 Adamkiewicz 动脉的位置，在术中夹闭供血动脉时，需要避开 AKA，以避免影响正常脊髓供血，这就需要联合使用 DSA 和 FLOW800 来治疗 SAVM。

总之，FLOW800 技术的出现，极大的提高了显微手术切除脊髓动静脉畸形的成功率和可行性。FLOW800 技术作为一种简便、经济、安全、有效的术中实时血流动力学及脑组织灌注评价工具，拥有良好的应用前景。未来在临床使用中，将 FLOW800 与经颅多普勒超声、神经电生理、神经导航及其他辅助技术的结合应用，相信会对神经外科的显微手术产生极大的帮助。

8. 总结

本文介绍了一例 30 岁青年男性脊髓内动静脉畸形患者，术前患者右下肢乏力麻木，肌力 4 级。排除相关禁忌后，采用显微手术方案进行髓内动静脉畸形切除，术中应用吲哚菁绿造影以及 FLOW800 技术判断畸形血管团的供血动脉以及引流静脉，术后造影显示畸形血管团完全切除，患者下肢功能以及鞍区感觉正常，术后恢复良好。

参考文献

- [1] Boström, A., Krings, T., Hans, F.J., *et al.* (2009) Spinal Glomus-Type Arteriovenous Malformations: Microsurgical Treatment in 20 Cases. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **10**, 423-429. <https://doi.org/10.3171/2009.1.SPINE08355>
- [2] Flores, B.C., Klinger, D.R., White, J.A. and Batjer, H.H. (2017) Spinal Vascular Malformations: Treatment Strategies and Outcome. *Neurosurgical Review*, **40**, 15-28. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0713-z>
- [3] Ducruet, A.F., Crowley, R.W., McDougall, C.G. and Albuquerque, F.C. (2013) Endovascular Management of Spinal Arteriovenous Malformations. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, **5**, 605-611. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2012-010487>
- [4] Rashad, S., Endo, T., Ogawa, Y., *et al.* (2017) Stereotactic Radiosurgery as a Feasible Treatment for Intramedullary Spinal Arteriovenous Malformations: A Single-Center Observation. *Neurosurgical Review*, **40**, 259-266. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0758-z>
- [5] 钱明禹, 刘青林, 李刚. 吲哚菁绿荧光造影在神经外科手术中应用的研究进展[J]. 中华神经外科杂志, 2015, 31(9): 970-972.
- [6] 张翔, 楼美清, 陈先震, 等. 动脉瘤夹闭术中辅助应用吲哚菁绿荧光造影的临床研究[J]. 临床神经外科杂志, 2011, 8(5): 261-263.
- [7] Anson, J.A. and Spetzler, R.F. (1992) Classification of Spinal Arteriovenous Malformations and Implications for Treatment. *BNI Quarterly*, **8**, 2-8. (In Japanese)
- [8] 宋星志, 徐启武. 脊髓动静脉畸形[J]. 现代诊断与治疗, 1999, 10(4): 216-218.
- [9] Krings, T. and Geibprasert, S. (2009) Spinal Dural Arteriovenous Fistulas. *American Journal of Neuroradiology*, **30**, 639-648. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A1485>
- [10] Oldfield, E. (2002) Surgical Treatment of Spinal Dural Arteriovenous Fistulas. *Seminars in Cerebrovascular Diseases and Stroke*, **2**, 209-226. <https://doi.org/10.1053/scds.2002.127658>
- [11] Gross, B.A. and Du, R. (2013) Spinal Glomus (Type II) Arteriovenous Malformations: A Pooled Analysis of Hemorrhage Risk and Results of Intervention. *Neurosurgery*, **72**, 25-32. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318276b5d3>
- [12] Patchana, T., Savla, P., Taka, T.M., *et al.* (2020) Spinal Arteriovenous Malformation: Case Report and Review of the Literature. *Cureus*, **12**, e11614. <https://doi.org/10.7759/cureus.11614>
- [13] 王浩, 章剑剑. 基于吲哚菁绿荧光造影的 FLOW800 技术在神经外科手术中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2021, 26(1): 46-49.
- [14] Pagiola, I., Caroff, J., Mihalea, C., *et al.* (2020) Spinal Arteriovenous Malformation without Endovascular Arterial Access: Is a Combined Neurosurgical Approach and Direct Venous Puncture an Option? *BMJ Case Reports*, **13**, e015268. <https://doi.org/10.1136/bcr-2019-015268>

-
- [15] Acerbi, F., Vetrano, I.G., Sattin, T. and Falco, J. (2018) Use of ICG Videoangiography and FLOW 800 Analysis to Identify the Patient-Specific Venous Circulation and Predict the Effect of Venous Sacrifice: A Retrospective Study of 172 Patients. *Neurosurgical Focus*, **45**, E7. <https://doi.org/10.3171/2018.4.FOCUS18120>
- [16] Jhawar, S.S., Kato, Y., Oda, J., *et al.* (2011) FLOW 800-Assisted Surgery for Arteriovenous Malformation. *Journal of Clinical Neuroscience*, **18**, 1556-1557. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2011.01.041>
- [17] Kato, Y., Jhawar, S.S., Oda, J., *et al.* (2011) Preliminary Evaluation of the Role of Surgical Microscope-Integrated Intraoperative FLOW800 Colored Indocyanine Fluorescence Angiography in Arteriovenous Malformation Surgery. *Neurology India*, **59**, 829-832. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.91359>
- [18] Jahan, R. and Vinuela, F. (2002) Vascular Anatomy, Pathophysiology, and Classification of Vascular Malformations of the Spinal Cord. *Seminars in Cerebrovascular Diseases and Stroke*, **2**, 186-200. <https://doi.org/10.1053/scds.2002.127656>