

中枢神经系统术后颅内感染的影响因素的研究

张燕, 宋术鹏, 李用国*

重庆医科大学附属第一医院感染科, 重庆

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月14日

摘要

本文主要是要把中枢神经系统术后颅内感染的影响因素和预防办法梳理一下, 术后颅内感染是神经外科比较严重的并发症, 会大大提高患者的致残率和死亡率。本研究先剖析了病原学特征, 指出革兰氏阴性菌占比上升以及多重耐药菌(鲍曼不动杆菌、肺炎克雷伯菌等)流行的严峻现状, 接着从患者自身因素(高龄、糖尿病、营养不良等)、手术相关因素(手术时长、植入物使用、脑脊液漏)、术后管理(引流管维护、ICU停留时间)三个方面探究感染的发生机制。在此基础上, 本文主要总结了围手术期预防性抗菌药物的合理使用以及集束化护理干预的临床价值, 本研究认为, 构建一个包含术前、术中、术后的全流程个性化防控体系是降低感染率的关键, 未来可以利用人工智能风险预测模型和新型抗菌材料, 实现从被动治疗到精准干预的转变, 从而为临床实践提供坚实的理论依据。

关键词

中枢神经系统, 颅内感染, 影响因素, 预防策略, 集束化护理

Research on the Influencing Factors of Intracranial Infection after Central Nervous System Surgery

Yan Zhang, Shupeng Song, Yongguo Li*

Department of Infectious Diseases, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 13, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 14, 2026

Abstract

This study aims to systematically review the influencing factors and prevention strategies for postoperative intracranial infection of the central nervous system (CNS). As a severe complication in neurosurgery, postoperative intracranial infection significantly increases patient morbidity and mortality.

*通讯作者。

文章引用: 张燕, 宋术鹏, 李用国. 中枢神经系统术后颅内感染的影响因素的研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 2710-2720. DOI: 10.12677/acm.2026.1641525

We first analyze the etiological characteristics, highlighting the rising proportion of Gram-negative bacteria and the severe challenge posed by multidrug-resistant organisms (e.g., *Acinetobacter baumannii* and *Klebsiella pneumoniae*). Subsequently, the mechanisms of infection are explored across three dimensions: patient-specific factors (e.g., advanced age, diabetes, malnutrition), surgical variables (e.g., operation duration, use of implants, cerebrospinal fluid leaks), and postoperative management (e.g., drainage tube maintenance, ICU stay). Based on this, the clinical value of rational perioperative prophylactic antibiotic use and bundle care interventions is summarized. This research suggests that establishing a comprehensive, individualized prevention and control system covering the preoperative, intraoperative, and postoperative phases is key to reducing infection rates. Future efforts should leverage AI-based risk prediction models and novel antibacterial materials to transition from reactive treatment to precision intervention, providing a solid theoretical basis for clinical practice.

Keywords

Central Nervous System, Intracranial Infection, Influencing Factors, Prevention Strategies, Bundle Care

Copyright © 2026 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. 引言

中枢神经系统术后颅内感染是神经外科领域一种非常严重的并发症，它是指在神经外科手术后，病原微生物侵入颅腔，引起脑膜、脑实质或者脑室的炎症反应，这种感染会大大提高患者的病残率和死亡率，对患者的长期神经功能预后造成极大的破坏，而且还会大大延长患者的平均住院日，造成医疗费用的急剧增加，给患者家庭和社会带来沉重的经济负担。颅内感染的表现形式比较多，而且不典型，早期诊断比较难，一旦感染形成，治疗过程就会变得很复杂，时间也比较长，常常需要二次甚至多次手术，长期大量使用广谱抗生素，还可能会有很多难以逆转的后遗症，比如脑积水、癫痫、认知功能障碍等。要想有效防止术后颅内感染的发生，这是提高神经外科手术安全性、改善患者预后的关键环节，近年来的临床数据表明，虽然外科技术、无菌观念以及围手术期管理水平都有了很大的进步，但是中枢神经系统术后颅内感染的发生率仍然不容忽视。Stienen MN 等人的研究显示，不同类型的神经外科手术感染发生率不同，总体上保持在一定水平，一些高危手术的感染率甚至更高[1]，Fang C 等人做的一个系统性回顾和荟萃分析也指出，开颅手术后的感染风险被很多因素共同影响，它的复杂性要求临床工作者必须有系统的认知[2]。本综述要做的就是将把中枢神经系统术后颅内感染的各种影响因素梳理清楚，从病原学特点、患者自身情况、手术相关因素、术后管理这些方面来分析，找出它们的表现和作用机制。通过整合和分析现有的研究成果，本文希望能为临床实践中制定更加精确、有效的个体化预防策略和控制措施提供有力的理论支持，最终目的是减少神经外科手术后颅内感染的发生率，确保患者的生命安全和健康。

2. 病原学特征综述

2.1. 主要致病菌分布

中枢神经系统术后颅内感染的致病菌谱比较广，但也有一定的分布规律，临床研究发现，致病菌主要分为革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌两大类，二者在不同地区、不同医疗机构以及不同手术类型中的构成比例有所不同。夏开来等人的研究对神经外科术后颅内感染的脑脊液样本进行分析，发现革兰氏阴性

菌的检出率略高于革兰氏阳性菌，鲍曼不动杆菌和肺炎克雷伯菌是主要的革兰氏阴性致病菌[3]。刘岩和李清元的研究也得到了类似的结论，他们所分析的病原菌中，革兰氏阴性杆菌占主导地位，这或许与近年来侵入性操作增多以及广谱抗生素的筛选压力有关，在革兰氏阳性菌当中，金黄色葡萄球菌和凝固酶阴性葡萄球菌是传统的优势菌种，它们一般是皮肤和黏膜的正常定植菌，在手术的时候可以通过切口直接侵入[4]。

2.2. 多重耐药菌的流行现状

多重耐药菌(MDR)感染是神经外科目前面临的最严峻挑战之一，它极大地限制了临床有效抗生素的选择，导致治疗失败率和死亡率显著升高，多重耐药菌一般是指对三类或三类以上常用抗生素同时耐药的细菌，而广泛耐药菌(XDR)乃至全耐药菌(PDR)的出现，更是让临床抗感染治疗陷入“无药可用”的困境。赵楠等人的研究系统阐述了颅内多重耐药和广泛耐药鲍曼不动杆菌的治疗进展，指出该菌已经成为神经外科ICU中最常见的MDR之一，它对碳青霉烯类药物的耐药率逐年上升，治疗选择非常有限，在革兰氏阳性菌方面，耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)的流行同样令人担忧[5]。针对这类耐药菌，临床常需要依靠万古霉素或者利奈唑胺这类二线药物，游广辉等人的研究对比了利奈唑胺和万古霉素在治疗颅内感染方面的效果，给临床用药给予了参考[6]，孙健等人的工作着重指出了要通过监测血清药物浓度来指导利奈唑胺的个体化用药，希望在保证疗效的同时减少毒副作用和耐药的发生[7]。

MRSA的检出率虽然在某些年份有波动，但整体上仍然保持在较高水平，多重耐药菌的流行不仅直接造成感染更难治愈，也促使了临床抗菌药物管理的变革，周帆等人的研究探讨了神经外科术后颅内感染合理使用抗菌药物的进展，强调了根据药敏结果及时降阶梯治疗的重要性，以减少不必要的广谱抗生素暴露，延缓耐药性的发展[8]。面对MDR的巨大挑战，除了合理使用现有药物外，开发新型抗菌药物、探索噬菌体疗法等非传统治疗手段，以及加强医院感染控制措施以阻断其传播，已成为未来研究和实践的重点方向。

3. 患者自身相关影响因素综述

3.1. 年龄与基础疾病

年龄是影响术后颅内感染的一个重要生理因素，新生儿和婴幼儿由于免疫系统尚未发育成熟，其血脑屏障功能相对薄弱，细胞免疫和体液免疫应答能力均有限，是颅内感染的高危人群，高龄患者同样面临着更高的感染风险。随着年龄的增长，身体会出现免疫衰老的情况，T细胞功能下降，抗体产生能力也变弱，整体抗感染的能力明显降低，老年患者常常合并有多种基础疾病，又进一步削弱了身体的防御功能，巩泽远在对重型颅脑损伤术后颅内感染因素的回顾性分析中提到，高龄是独立的危险因素之一[9]。基础疾病的存在，特别是那些能系统性影响机体代谢和免疫功能的慢性病，与术后颅内感染的发生密切相关，糖尿病就是其中最典型的例子，长期高血糖状态不仅损害微血管功能，影响伤口愈合，而且还能直接抑制中性粒细胞的趋化、吞噬和杀菌能力，为细菌的滋生和繁殖创造了有利条件。多项研究表明，围手术期血糖水平控制不佳是术后切口感染甚至颅内感染的强预测因子，Kourbeti IS等人的研究也发现，术前存在合并症是预测开颅术后脑膜炎的重要风险因素[10]，高血压会使脑血管长期处于高压状态，血管壁结构受损，通透性增加，可能会增加感染的风险。慢性阻塞性肺疾病(COPD)这类慢性呼吸系统疾病，也许会因为长期缺氧和炎症状态影响全身免疫功能，而且在术后需要机械通气的时候，就会增加呼吸道病原体定植和继发感染的机会，郑家涛在对开颅术后颅内感染高危因素的分析中，也把多种基础疾病列为关键影响因素[11]。

3.2. 营养状况与免疫状态

营养状况是机体免疫功能的物质基础,营养不良的患者其术后感染风险显著升高,低蛋白血症是评估营养状况不良的常用指标,血清白蛋白不仅维持血浆胶体渗透压,也是机体合成免疫球蛋白、补体、细胞因子等免疫活性物质的重要原料。当血清白蛋白水平低于正常范围时,患者的体液免疫和细胞免疫功能都会受到很大影响,使得他们对病原体的清除能力降低,临床研究也多次证明,术前血清白蛋白水平和术后颅内感染的发生率有明显的负相关,贫血,尤其是缺铁性贫血,会损伤免疫功能,因为铁是很多免疫细胞功能所需要的微量元素。除了营养不良,患者的免疫状态也直接决定其感染易感性,长期或者大剂量使用糖皮质激素在神经外科临床中是常见的情况,尤其是在治疗脑肿瘤周围水肿的时候,糖皮质激素有很强的抗炎和免疫抑制作用,它可以抑制淋巴细胞的增殖和活化,减少抗体生成,还能削弱吞噬细胞的功能,这样就会让机体处于容易感染的状态。接受过器官移植、患有自身免疫性疾病或者恶性肿瘤放化疗的患者,他们的免疫系统本身就处于被抑制或者功能紊乱的状态,这部分人在接受神经外科手术后,发生机会性感染甚至严重颅内感染的风险非常高,卞毅等人的研究对重症颅内感染患者的炎症和免疫功能进行了深入的评估,发现免疫功能紊乱与患者的不良预后密切相关[12]。方春艳等人的研究关注了颅内感染患儿的免疫球蛋白水平变化,从一个侧面反映了免疫应答在感染过程中的重要作用[13]。

3.3. 术前往院时间

术前往院时间的长短也是和医院内交叉感染风险紧密相关的一个重要因素,患者在入院之后,皮肤、鼻咽部、肠道等部位的正常菌群会慢慢被医院环境里的优势菌株取代,这个过程就叫“定植”,医院环境里的细菌,尤其是重症监护室(ICU)的细菌,往往有更强的毒力和更广泛的耐药性。术前往院时间越长,患者鼻腔携带耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)或肠道定植耐万古霉素肠球菌(VRE)、耐碳青霉烯类肠杆菌(CRE)的风险就越高,这些定植的耐药菌在手术创伤和机体应激的状态下,可能通过内源性途径(如血行播散)或在手术过程中直接污染切口,从而导致严重的术后颅内感染。多项研究已经探讨了术前往院时间与术后感染风险的量化关系,有研究发现,当术前往院时间超过3天或7天时,术后感染的发生率会呈阶梯式上升,郑家涛在其研究中也把较长的术前往院时间列为开颅术后感染的高危因素之一[11]。这种关联背后的机制是很清楚的:一方面,住院时间变长,患者就会有更多机会接触到医院里复杂的微生物环境,另一方面,术前等待手术的患者往往病情比较重,或者需要做很多检查和准备,他们自己的身体状况也可能随着时间的推移而变差,这样就会让他们更容易感染。优化诊疗流程,尽量减少不必要的术前等待时间,对预防医院获得性颅内感染有重要的现实意义,对于那些必须长期住院等待手术的患者,加强对其重点部位(如鼻腔)定植菌的筛查,必要时进行去定植处理,可能是降低术后感染风险的一个有效策略。

4. 手术相关影响因素综述

4.1. 手术时机与手术类型

手术时机的选择,也就是急诊手术和择期手术,对术后感染率有很大的影响,急诊手术一般是指病人在入院后很快就要做手术,术前准备往往不够充分,像重型颅脑创伤的病人,可能没办法做充分的皮肤准备,比如备皮、洗头,胃内容物没排空,术中就容易发生误吸,之后肺部感染的风险就增加了,休克或者凝血功能障碍这些不稳定的生命体征,也会让机体对应激和感染的抵抗力下降。巩泽远在对重型颅脑损伤术后颅内感染的分析中,把急诊手术列为高危因素,择期手术的患者有足够的时间做全面的术前评估和准备,能够改善营养状况,控制基础疾病,做好皮肤准备,这样就可以把感染的风险降到最低,

手术的类型和部位也是影响感染风险的重要因素[9]。不同手术的复杂程度、对正常组织结构的破坏程度以及手术区域的血供情况都不一样，幕下手术因为位置深在，解剖结构复杂，靠近鼻咽部等非无菌区域，所以感染风险通常比幕上手术高，经鼻蝶入路切除垂体瘤等鞍区病变的手术，因为手术路径必须经过充满细菌的鼻腔和鼻窦，所以术后脑膜炎的发生率相对较高，需要特殊的预防措施。创伤性手术，尤其是开放性颅脑损伤以及颅底骨折伴有脑脊液漏的病例，因为颅腔和外界直接相通，污染的风险很大，是颅内感染最高发的类型之一，而单纯的肿瘤切除术或者血管手术，在严格无菌操作下，它的原发感染率相对较低，郑家涛的研究也证实，手术的复杂性和部位是影响术后感染的重要因素[11]。

4.2. 手术持续时间

手术持续时间是临床研究中被反复验证的一个独立的、强有力的术后颅内感染预测因子，几乎所有关于神经外科感染风险因素的分析都将手术时间过长列为关键危险因素，手术时间的延长通过多种机制增加感染风险，它直接延长了手术切口暴露在空气中的时间。手术室空气中有一定量的沉降菌，暴露时间越长，切口处的细菌负荷就越高，当细菌数量超过机体局部的防御能力或者达到某个阈值时，就会发生感染，长时间的手术会造成组织创伤的累积效应，局部组织因为长时间的牵拉、电凝等操作而缺血、坏死，给细菌的生长提供了“土壤”。术者以及手术团队的精力和体力会随着手术时间的延长而下降，这就有可能使操作的精准度降低或者无菌观念松懈，从而增加技术失误和污染的机会，而且长时间的麻醉和手术应激本身也会对患者的全身免疫功能产生抑制作用。

4.3. 植入物的使用

在当下神经外科手术里，各种医用植入物的使用变得越来越普遍，它们在修复组织缺损、重建功能、监测或者治疗疾病的时候起着非常重要的作用，任何植入到人体的非自体材料都会被免疫系统当作“异物”，并且会引起异物反应，而且还会给细菌的定植和感染创造出很好的附着点。植入物相关的感染是神经外科感染里一个比较麻烦的问题，常用的人工硬脑膜、钛网或者 PEEK 材料来修补颅骨缺损，这些材料的表面给细菌提供了粘附的平台，细菌一旦附着上去，就会分泌胞外多糖之类的东西，形成一层叫“生物膜”的保护结构。生物膜里的细菌代谢慢，能抵抗宿主免疫细胞的攻击和高浓度抗生素的渗透，造成感染一直不好，唯一能根治的办法常常是把植入物去掉，脑室-腹腔分流管是治疗脑积水的常用装置，不过它的感染率也比较高，Li G 等人的研究专门讲了分流手术中的抗生素预防策略，这就显示出分流管感染问题的严重性[14]。分流管感染有可能会造成脑室炎，还可能会沿着管路播散到腹腔，引发腹膜炎，用于颅内压监测的探头、治疗癫痫的深部脑电极(DBS)或者皮层电极，还有用于脑室引流的脑室外引流管(EVD)，都属于侵入性植入物。Brown J 等人的研究详细地讨论了脑室外引流相关的脑室炎的管理，引流管是细菌进入脑室系统的直接通道[15]，植入物的生物相容性在一定程度上影响感染风险，表面更光滑、化学性质更稳定的材料可能更不易于细菌附着。异物的存在打破了局部的免疫平衡，使得在正常情况下不足以致病的少量细菌也能引发严重的感染。

4.4. 脑脊液漏

脑脊液漏是神经外科术后一种灾难性的并发症，它被公认为是导致术后颅内感染最直接、最危险因素，脑脊液(CSF)是循环于脑室系统、蛛网膜下腔和脊髓中央管内的无色透明液体，它在无菌的颅内环境中起到物理缓冲和维持内环境稳态的作用。正常情况下，坚韧的硬脑膜和致密的颅骨、皮肤共同构成了保护中枢神经系统的坚固屏障，当手术、创伤或先天性因素导致这道屏障出现缺口，使得脑脊液从切口、鼻腔、耳道等部位流出时，就形成了脑脊液漏。脑脊液漏给外界的细菌提供了一条畅通无阻的逆行

通道,能让细菌直接侵入无菌的蛛网膜下腔,引发化脓性脑膜炎、脑室炎甚至脑脓肿,发生脑脊液漏的患者,颅内感染的风险会成倍增加,有研究数据表明其感染率可高达 20% 以上,比未发生漏的患者要高很多。

如图 1 所示用简洁的方式说明了脑脊液漏引发逆行性感染的物理原理,从图中可以看出,硬脑膜的缺损破坏了颅腔的密闭性,在重力或者体位变化的影响下,脑脊液会从缺损处向外流出,外界环境(如鼻咽部、外耳道或者皮肤表面)中存在的大量细菌,会沿着脑脊液流出的路径逆行,就好像沿着一条“高速公路”直接进入颅内。血脑屏障(BBB)是维持中枢神经系统免疫豁免状态的重要结构,它由致密的紧密连接蛋白组成,形成了阻止病原体和有害物质进入大脑的物理屏障,黄晓雯和畅君雷的研究进展总结了外周炎症对血脑屏障功能的影响[16],宋梓赫和张燕也指出了血脑屏障机制在诊疗中的重要性[17]。脑脊液漏在宏观层面绕过了这道微观屏障,让细菌得以长驱直入, Tenenbaum T 等人的研究显示,某些病原体或者它们的毒素会破坏血脑屏障的紧密连接蛋白,从而加重感染[18],彭灿辉等人的研究探讨了腰椎脑脊液引流的应用,这种操作本身如果处理不好也可能造成医源性脑脊液漏和感染[19]。术中要严密、准确地缝合硬脑膜,对高危区域要加强修补,这是预防脑脊液漏和继发感染的首要原则,一旦术后出现脑脊液漏,就要采取积极的措施,包括加压包扎、腰大池引流转流脑脊液,甚至二次手术修补漏口,以尽快封闭感染通道。

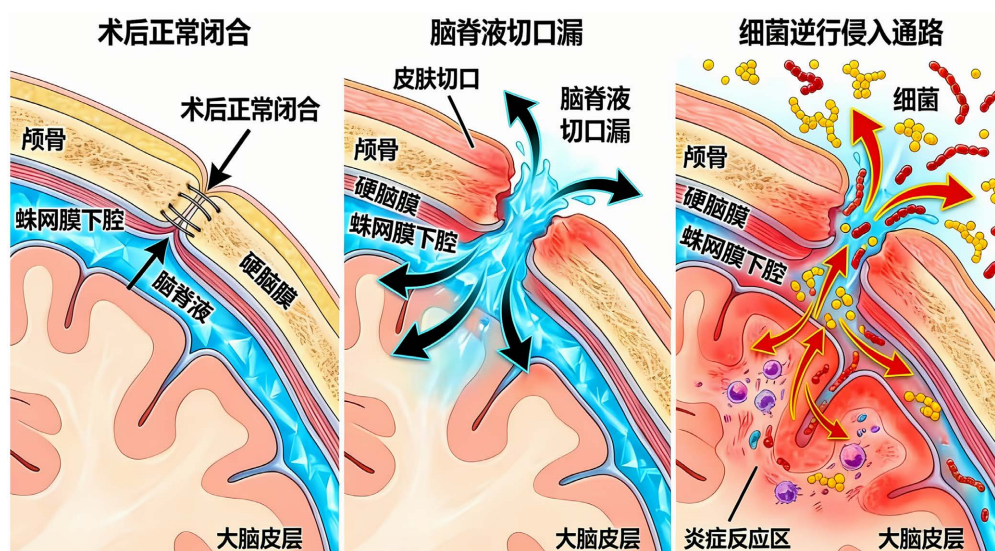


Figure 1. Schematic diagram of the mechanism of retrograde infection caused by cerebrospinal fluid leakage
图 1. 脑脊液漏导致逆行性感染机制原理图

5. 术后管理与侵入性操作影响因素综述

5.1. 引流管留置与维护

神经外科术后,为了把积血、积液引流出来,降低颅内压或者转流脑脊液,就需要留置各种引流管,像硬膜外引流、脑室外引流(EVD)或者腰大池引流,这些引流管一端放在颅内或者蛛网膜下腔,另一端连接体外的引流袋,这样就形成了颅内和外界环境的直接连接,是术后颅内感染发生的重要源头。引流管留置时间是与感染风险最直接相关的因素,多项研究显示,引流管留置时间与感染率呈正相关,留置时间越长,感染风险越高,一般认为,引流管留置超过 5~7 天,感染率会明显上升,这是因为随着时间的推移,细菌有机会沿着管壁外表面爬行进入颅内,或者在引流管连接处污染后逆行进入。杨丽丰在讨论

持续腰大池引流的应用时,也提到了严格无菌操作和控制留置时间的重要性[20],赵乾的临床观察也探讨了脑室外引流联合早期腰大池引流的治疗策略,这种联合应用在带来治疗获益的同时,也可能叠加了感染风险,引流系统的维护操作是另一个关键控制点[21]。引流系统的开放次数会影响感染的机会,经常打开系统来采集脑脊液样本、冲洗管道或者更换引流袋,这样就会增加系统被污染的可能性,保持引流系统的“闭环”状态很重要,引流管接口的护理、换药时无菌操作规范执行不规范,也是造成感染的常见因素。引流袋的放置高度也得严格控制,引流袋位置太低会造成过度引流,位置太高或者反流的话就会增加逆行感染的风险,对引流管进行精细化、规范化的管理,包括制定严格的操作流程,加强医护人员的培训,尽量缩短不必要的留置时间,这是预防引流相关性颅内感染的关键措施。

5.2. 术后再手术与 ICU 停留时间

术后短期内因为水肿、脑水肿、脑积水或者植入物问题等原因再次开颅手术,会大大增加颅内感染的可能性,每一次再手术都是对初次愈合的头皮、颅骨和硬脑膜的二次打击,破坏了局部组织刚刚建立起来的血运和防御屏障,感染的机会就大大增加了。再手术还会增加患者的卧床时间和在院暴露时间,麻醉和手术创伤的叠加效应也会抑制患者的全身免疫功能,二次手术的患者颅内感染率比只做一次手术的患者高很多,重症监护室(ICU)是救治危重神经外科患者的重要地方,但也是医院内感染的高发地。ICU环境比较复杂,里面收治的都是危重患者,空气、设备表面还有医护人员的手上都可能有很多的多重耐药菌,患者在ICU待的时间越长,发生交叉感染的风险就越大,在ICU里,患者经常要接受很多侵入性操作,这些操作虽然是维持生命所必需的,但都可能成为颅内感染的间接或者直接诱因[10]。例如气管切开或者长时间气管插管做机械通气,会使呼吸道定植菌的负荷增加,这些细菌有可能通过血行播散进入颅内,中心静脉置管(CVC)是输液和用药的生命线,但是也是造成血流感染的常见原因,菌血症可以很容易地突破受损的血脑屏障,从而引发继发性颅内感染。在ICU重症患者中,因为病情比较复杂,颅内感染的早期诊断比较困难而且很重要,王蕾等人的研究探讨了降钙素原(PCT)联合乳酸检测在术后细菌性颅内感染诊断中的应用价值,这些生物标志物给ICU环境下的快速诊断提供了有力的工具[22]。付敏等人的研究则进一步探究了降钙素原、C反应蛋白、肿瘤坏死因子- α 等多种炎症因子联合检测在病原鉴别中的作用,而对于疑难感染病例,宏基因组二代测序(mNGS)等新型诊断技术的应用,为快速、精准地确定病原体提供了可能[23]。黄玲等人与徐跃峇等人的研究都表明mNGS在诊断开颅术后中枢神经系统感染方面有应用潜力[24][25]。

6. 预防策略研究综述

6.1. 围手术期预防性抗菌药物应用

围手术期预防性使用抗菌药物是预防神经外科手术部位感染(包括颅内感染)的基石性措施,其基本原理是在手术切口关闭前,使组织和血液中的药物浓度达到足以杀灭或抑制术中可能污染的常见病原菌的水平,国内外大量的临床实践和指南均推荐,在神经外科清洁或清洁-污染手术中应常规预防性使用抗生素。预防性用药的关键在于遵循“三R”原则:正确的时机(Right Timing)、正确的药物(Right Drug)和正确的疗程(Right Duration)。给药时机至关重要,理想的给药时间应在切皮前30~60分钟内完成静脉输注,以确保在手术开始时,切口组织的药物浓度已达到有效峰值。过早给药也许会使切口关闭时药物浓度已经降到无效水平,而切皮之后再给药就没有预防的意义了,药物的选择要主要覆盖皮肤表面的常见定植菌,像金黄色葡萄球菌和表皮葡萄球菌,第一代或者第二代头孢菌素(比如头孢唑林、头孢呋辛)就是标准的选择。Dimovska-Gavrilovska A等人的研究比较了头孢呋辛和头孢曲松在神经外科手术中预防感染的效果,为临床药物选择提供了证据,对于青霉素过敏的患者,可选用万古霉素或克林霉素,疗程的

控制是防止抗生素滥用和耐药菌产生的关键[26]。指南普遍推荐,清洁手术的预防性用药仅限于单次给药,手术时间超过4小时或术中失血量大的情况,可以在术中追加一次,总的预防性用药时间不应超过24小时,过度延长预防性用药时间并不能带来额外的益处,反而会增加药物毒副作用、破坏正常菌群、施加选择压力,催生多重耐药菌的出现,形成恶性循环。

6.2. 集束化护理干预

集束化护理干预(Bundle Care)就是把一系列依据循证医学证据、被证实有效的独立干预措施捆绑起来,当作一个整体来执行的质量改进策略,它的核心思想是保证每一个简单但关键的步骤都能落实,从而实现“1+1>2”的协同效应,明显改善患者的临床结局。在预防神经外科术后颅内感染方面,集束化护理的应用表现出很大的潜力,它把预防措施从单一环节扩展到整个围手术期,涉及医疗、护理、麻醉等多个团队的协作。

神经外科预防感染的集束化护理干预具体内容可见表1,这些措施单独看好像都是常规操作,但是集束化干预强调的是对这些措施的“依从性”,就是要保证每一项都在每一位患者身上不折不扣地执行。集束化护理干预的有效性依赖于其执行过程中的高依从性与多学科协同。谭细兰等人的研究显示,实施集束化措施后,神经外科术后手术部位感染率从9.68%显著下降至4.80% ($P < 0.05$),术前住院时间、总住院时间及手术时长均明显缩短,神经外科专科护士参与度显著提升[27]。这一结果证实了将缩短术前住院时间、术前皮肤清洁、规范皮肤消毒、专项感控培训、培养专科护士等多项循证措施整合执行的临床价值。然而,该策略在临床实施中仍面临多重挑战:首先,依从性监控困难,传统的人工核查方式效率低且易流于形式,近年来基于电子病历系统的实时预警与闭环管理正在成为新的质量改进手段;其次,关键措施的执行存在短板,例如术中无菌操作规范、引流管维护流程等环节在不同医疗中心执行差异显著;再次,集束化措施对护理人力资源配置提出更高要求,频繁的评估与记录可能加剧工作负荷,从而影响措施的持续性。因此,单纯制定清单不足以实现预期目标,未来应借助信息化手段强化过程质控,并通过定期反馈与多学科质控会议形成持续改进的闭环。

Table 1. Bundle care preventive measures for postoperative intracranial infection in neurosurgery

表 1. 神经外科术后颅内感染集束化预防措施

阶段	措施项目	具体内容
术前准备	皮肤准备	术前 1~2 天使用抗菌洗剂(如氯己定)洗头,减少头皮定植菌。
	营养支持	评估并改善营养状况,纠正低蛋白血症和贫血。
	血糖控制	对糖尿病患者,严格控制围手术期血糖在目标范围内。
	缩短住院日	优化流程,减少不必要的术前等待时间。
术中管理	预防性抗生素	严格遵循指南,在切皮前 30~60 分钟给予正确的抗生素。
	无菌操作	严格遵守无菌原则,减少手术室人员流动。
	恒温保护	维持患者核心体温正常,避免低体温对免疫功能的抑制。
	严密缝合	精细操作,确保硬脑膜水密缝合,预防脑脊液漏。
术后护理	引流管管理	维持引流系统闭环,严格无菌操作,尽早拔除。
	切口护理	保持切口敷料干燥清洁,定期观察。
	环境控制	加强病房特别是 ICU 的环境消毒和手卫生执行。
	早期康复	鼓励患者早期下床活动,促进肺功能恢复。

如图 2 所示用流程图的形式把集束化护理干预在整个围手术期的实施路径表现出来, 从患者入院评估开始, 到术前准备, 术中关键环节控制, 术后监护与康复, 形成一个完整的闭环管理系统, 每个节点都有具体的、可量化的操作标准。比如术前洗头的时间和方式, 术中抗生素给药的准确时间点, 术后引流管的每日评估记录等等, 用清单化、流程化的方式来管理, 就可以最大程度地减少因为疏忽或者个人习惯不同而造成的关键预防措施被遗漏, 对于特殊人群的考虑也应该被包含在集束化策略里。比如何芳和尹飞的研究提到重症儿童中枢神经系统真菌感染的特殊性, 对于免疫功能低下或者长期用广谱抗生素的患儿, 集束化策略里可能要考虑加入对真菌感染的监控和预防, 实施这样一套标准化的综合预防方案, 并且持续做质量监控和反馈, 就可以系统地减少术后颅内感染的发生率, 提高神经外科的整体医疗质量 [28]。

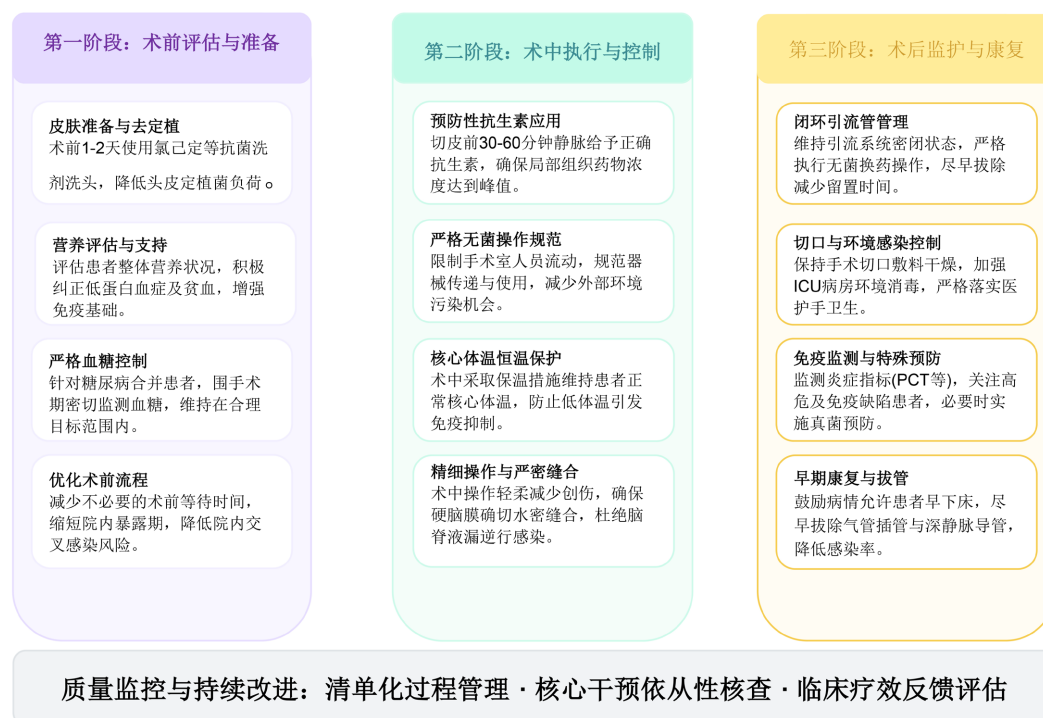


Figure 2. Flowchart of bundle care intervention for infection prevention in neurosurgery
图 2. 神经外科预防感染集束化护理干预流程图

7. 小结

中枢神经系统术后颅内感染是由多种因素共同作用造成的复杂临床问题, 本综述通过对现有研究的系统梳理, 从病原学、患者自身、手术过程以及术后管理等多个方面, 全面分析了影响其发生的主要风险因素, 研究发现, 感染的源头来自于病原微生物, 革兰氏阴性菌特别是多重耐药菌株的出现, 给传统的抗感染治疗带来了严峻的考验。患者的内在状态, 像高龄、基础疾病(尤其是糖尿病)、营养不良以及免疫抑制, 这些都构成了感染发生的“内在土壤”, 极大地削弱了机体抵御外来入侵的能力, 而手术本身就是最直接的干预环节, 手术的持续时间、操作的复杂程度、是否使用植入物以及是否发生脑脊液漏, 这些都是决定感染风险的关键变量, 任何一个环节的疏忽都可能造成灾难性后果。术后阶段, 各种侵入性引流管的留置与维护不当, 并且在ICU等高风险环境中长时间暴露, 就给感染的发生创造了持续的“机会窗口”。

要想预防术后颅内感染就必须采用“组合拳”式的综合策略，也就是根据本地流行病学数据来精准地使用抗生素进行预防，而且还要在整个围手术期都进行集束化护理干预，把术前准备、术中无菌控制、术后精细化管理等一系列循证措施有机地结合起来，用标准化的流程保证每一个关键的预防环节都能被有效执行，这样就能从整体上降低感染的风险。目前的研究还存在一些不足，多数研究都是单中心、回顾性的分析，样本量比较小，可能会有选择偏倚，需要做更多高质量、多中心、前瞻性的大样本队列研究来给出更高等级的证据，面对越来越严重的多重耐药菌感染，除了合理使用现有的药物之外，有效的预防和治疗手段还是很少，新型抗菌药物和非抗生素疗法的研发迫在眉睫。

降低中枢神经系统术后颅内感染率的研究方向正趋向多元化与精准化。在大数据与人工智能领域，基于多维度临床变量的风险预测模型已从概念走向初步验证。现有研究尝试纳入术前炎症标志物(中性粒细胞/淋巴细胞比值、白蛋白)、术中因素(手术时长、失血量、植入物类型)及术后动态指标(引流管留置天数、脑脊液生化参数)，利用逻辑回归、随机森林或 XGBoost 算法构建预测模型，部分模型在内部验证中表现出良好的区分能力。然而，当前模型普遍存在单中心回顾性设计、特征选择标准不统一、缺乏外部验证等局限，距离临床应用仍面临泛化能力不足与模型可解释性差的障碍。未来需依托多中心前瞻性数据库，开发结合时序数据与影像组学的深度学习模型，并通过外部验证评估其泛化能力。

在新材料领域，具有主动抗菌功能的新型植入物正成为研发热点。针对脑室-腹腔分流管、颅骨修补材料等，纳米银/铜涂层、表面接枝两性离子聚合物的抗粘附技术、载抗菌药物的可降解缓释涂层等策略已在体外及动物实验中展现出抑制生物膜形成的潜力。但此类材料进入临床仍面临长期生物相容性、抗菌活性持久性，以及避免诱导耐药性等核心挑战。此外，噬菌体疗法与抗生物膜酶作为针对多重耐药菌感染的非抗生素替代手段，在难治性颅内感染病例中已有个案报道，但其给药途径与安全性仍需系统研究。跨学科技术的深度融合，或将为这一传统难题提供新的解决范式。

参考文献

- [1] Stienen, M.N., Moser, N., Krauss, P., Regli, L. and Sarnthein, J. (2019) Incidence, Depth, and Severity of Surgical Site Infections after Neurosurgical Interventions. *Acta Neurochirurgica*, **161**, 17-24.
<https://doi.org/10.1007/s00701-018-3745-z>
- [2] Fang, C., Zhu, T., Zhang, P., Xia, L. and Sun, C. (2017) Risk Factors of Neurosurgical Site Infection after Craniotomy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Infection Control*, **45**, e123-e134.
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2017.06.009>
- [3] 夏开来, 陈少军, 刘燕, 等. 神经外科术后颅内感染的菌种分布及其耐药性分析[J]. 临床外科杂志, 2021, 29(2): 132-135.
- [4] 刘岩, 李清元. 神经外科术后颅内病原菌感染及耐药性分析[J]. 中国实验诊断学, 2020, 24(11): 1836-1837.
- [5] 赵楠, 邵东传, 王泽易, 等. 颅内多重耐药和广泛耐药鲍曼不动杆菌感染的治疗进展[J]. 华西医学, 2021, 36(8): 1115-1119.
- [6] 游广辉, 董娟, 戚志平, 等. 利奈唑胺与万古霉素治疗颅内感染的效果比较[J]. 中国实用医刊, 2019, 46(15): 94-97.
- [7] 孙健, 樊明超, 王念, 等. 脑脊液与血清利奈唑胺浓度监测指导颅内感染临床治疗的价值[J]. 中华重症医学电子杂志(网络版), 2020, 6(3): 292-295.
- [8] 周帆, 宋健, 余爱荣. 神经外科术后颅内感染合理应用抗菌药物进展[J]. 医药导报, 2021, 40(8): 1030-1035.
- [9] 巩泽远. 重型颅脑损伤术后颅内感染因素的回顾分析及干预建议[J]. 现代诊断与治疗, 2019, 30(9): 1487-1489.
- [10] Kourbeti, I.S., Vakis, A.F., Ziakas, P., Karabetsos, D., Potolidis, E., Christou, S., *et al.* (2015) Infections in Patients Undergoing Craniotomy: Risk Factors Associated with Post-Craniotomy Meningitis. *Journal of Neurosurgery*, **122**, 1113-1119.
<https://doi.org/10.3171/2014.8.jns132557>
- [11] 郑家涛. 神经外科开颅术后颅内感染高危因素分析[J]. 中国实用医药, 2020, 15(24): 45-47.
- [12] 卞毅, 黄姝, 许峰, 等. 重症颅内感染患者的炎症和免疫功能评估及与预后的相关性研究[J]. 神经损伤与功能重

- 建, 2020, 15(8): 446-448+460.
- [13] 方春艳, 吴菱, 屠友权, 等. 颅内感染患儿免疫球蛋白与烯醇化酶和降钙素原水平变化[J]. 中华医院感染学杂志, 2019, 29(18): 2869-2872.
- [14] Li, G., Pu, K., Cao, Y., Wang, J., Sun, Z. and Li, Q. (2017) The Role of Antibiotic Prophylaxis in Shunt Surgery. *World Neurosurgery*, **108**, 548-554. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.08.066>
- [15] Brown, J. de Louvois, R. Bayston, P, E.M. (2000) The Management of Neurosurgical Patients with Postoperative Bacterial or Aseptic Meningitis or External Ventricular Drain-Associated Ventriculitis. *British Journal of Neurosurgery*, **14**, 7-12. <https://doi.org/10.1080/02688690042834>
- [16] 黄晓雯, 畅君雷. 外周炎症对血脑屏障功能的影响及其机制研究进展[J]. 生命科学, 2021, 33(1): 7-14.
- [17] 宋梓赫, 张燕. 血脑屏障机制对中枢神经系统诊疗的意义[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(12): 51-55.
- [18] Tenenbaum, T., Matalon, D., Adam, R., Seibt, A., Wewer, C., Schwerk, C., *et al.* (2008) Dexamethasone Prevents Alteration of Tight Junction-Associated Proteins and Barrier Function in Porcine Choroid Plexus Epithelial Cells after Infection with *Streptococcus Suis* in Vitro. *Brain Research*, **1229**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.06.118>
- [19] 彭烜辉, 王汉字, 李力仙. 腰椎脑脊液引流在神经外科的应用[J]. 中国急救医学, 2021, 41(9): 808-811.
- [20] 杨丽丰. 持续腰大池引流在神经外科治疗中的应用[J]. 中国实用医药, 2021, 16(33): 105-107.
- [21] 赵乾. 脑室出血行脑室外引流联合早期腰大池引流治疗的观察[J]. 名医, 2020(2): 91-92.
- [22] 王蕾, 孔芝, 王凤娟, 等. 降钙素原联合乳酸检测在术后细菌性颅内感染诊断中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2021, 26(9): 708-710.
- [23] 付敏, 向少伟, 吴洪, 等. 降钙素原、C 反应蛋白、肿瘤坏死因子- α 、白介素-6 及肝素结合蛋白联合检测在颅内感染病原鉴别诊断中的作用[J]. 临床外科杂志, 2021, 29(9): 824-826.
- [24] 黄玲, 林天来, 蔡晓祯, 等. 宏基因组二代测序在开颅术后中枢神经系统感染诊断中的应用[J]. 创伤与急诊电子杂志, 2021, 9(3): 138-141.
- [25] 徐跃岍, 齐猛, 尚峰, 等. 宏基因组二代测序技术在神经外科颅内感染病原学诊断中的应用初探[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2020, 20(8): 682-687.
- [26] Dimovska-Gavrilovska, A., Chaparoski, A., Gavrilovski, A. and Milenkovic, Z. (2017) The Importance of Perioperative Prophylaxis with Cefuroxime or Ceftriaxone in the Surgical Site Infections Prevention after Cranial and Spinal Neurosurgical Procedures. *PRILOZI*, **38**, 85-97. <https://doi.org/10.1515/prilozi-2017-0026>
- [27] 谭细兰, 赖勇昌, 钟晓祝. 集束化措施降低神经外科手术部位感染率的效果[J]. 中华医院感染学杂志, 2022, 32(18): 2869-2872.
- [28] 何芳, 尹飞. 重症儿童中枢神经系统真菌感染[J]. 中国小儿急救医学, 2018, 25(12): 893-897.