

DOI:10.13350/j.cjpb.250527

· 综述 ·

# 肠道菌群在脊髓损伤后神经功能损害中的研究进展

房星辰, 王宇红\*

(中国医科大学附属盛京医院 第二急诊科, 辽宁沈阳 110000)

**【摘要】** 脊髓损伤为一种严重的身体损伤,可导致患者出现运动、感觉等脑功能损伤,从而使生存质量受到极大影响。近年来,研究发现,脊髓损伤的发生可破坏肠道稳态,致使肠道菌群结构变化及代谢物失调。上述改变可经由微生物-肠-脑轴和中枢神经产生联系,引起神经功能障碍。故本文对肠道菌群和脊髓损伤后神经功能损害的研究现状进行了综述,旨在详细了解两者间的关系。

**【关键词】** 肠道菌群;脊髓损伤;神经功能损害;综述

**【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-5234(2025)05-0674-03

[*Journal of Pathogen Biology*. 2025 May;20(05):674-676,682.]

## Research progress on gut microbiota in neurological dysfunction after spinal cord injury

FANG Xingchen, WANG Yuhong (*The Second Emergency Department, Shengjing Hospital Affiliated to China Medical University, Shenyang 110000, China*)

**【Abstract】** Spinal cord injury is a serious physical injury, it can cause brain function damage such as movement and sensation in patients, and greatly affects their quality of life. In recent years, studies have found that spinal cord injury can disrupt gut homeostasis, leading to changes in gut microbiota structure and metabolic imbalances. The above changes can be linked to the central nervous system through the microbiota-gut-brain axis, thereby causing neurological dysfunction. Therefore, this article reviews the current research status of gut microbiota and neurological dysfunction after spinal cord injury, aiming to gain a detailed understanding of the relationship between the two.

**【Keywords】** gut microbiota; spinal cord injury; neurological dysfunction; review

\* 脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)为致残率较高的疾病,在近30年间,其在全球的发病率已由每百万人口236例升至1298例,每年SCI新发病例在25~50万之间,给家庭乃至社会造成极大负担<sup>[1]</sup>。SCI发生后患者常存在脊髓缺血、氧化应激、髓鞘脱失等病理改变,最终造成神经元凋亡或坏死,表现为损伤平面以下四肢瘫<sup>[2]</sup>。肠道菌群为寄居于肠道内的微生物群,其于健康人中处于动态平衡状态。而对于SCI患者而言,多因肠道功能紊乱而致肠道菌群失衡。菌群失衡亦会影响肠屏障的完整及功能修复,经微生物-肠-脑轴对患者脑功能产生影响<sup>[3]</sup>。故SCI后神经功能损害及恢复和肠道菌群存在一定关联,了解SCI患者神经功能和肠道菌群间的关系对减轻其神经功能损害具有重要意义。

### 1 微生物-肠-脑轴

人的一生仅在胎儿期处于完全无菌状态,因为母亲子宫内是无菌的,胎盘可滤去母体血液内的有害物质。出生后因和母亲产道、皮肤接触,使得细菌开始定植于婴儿肠道内,继而建立早期的肠道菌群<sup>[4]</sup>。在人体成长过程中,肠道菌群特征因受到饮食、外界因素影响而发生变化,并最终趋于稳定。人体肠道内寄居着数量庞大且种类繁杂的微生物,其中细菌居多,涉及1000多种,连同宿主共同构成了稳定的微生态系统。目前,按自然属性分类,可将肠道菌群分成9大门类,其中厚壁菌门、拟杆菌门在肠道菌群内的占比较高<sup>[5]</sup>。这两大门类作为优势门类,和人体健康状况紧密相关。生理状态下,人菌和谐共生,人体为菌群提供生存的场所及必要营养物质,菌群维持人体必要的

生理功能,如帮助消化及营养吸收、维护肠道免疫功能、调节代谢等。当受到某些致病因素影响致使正常肠道菌群结构被破坏时,将会导致生理功能受到影响,从而造成诸多疾病发生。近年来,临床提出“微生物群-肠-脑轴(microbiota-gut-brain axis, MGBA)轴”,即肠道菌群可经神经内分泌、免疫、代谢产物等诸方式对大脑功能予以调节。Metta等<sup>[6]</sup>研究显示,肠道菌群失调后,可能通过肠道-迷走神经-脑信号传导或血脑屏障破坏引起神经炎症、神经变性,从而发生帕金森病。Wan等<sup>[7]</sup>研究发现,和正常发育儿童相比,自闭症谱系障碍儿童粪便微生物组组成发生显著变化,微生物组中多种神经递质生物合成相关途径耗尽。

### 2 SCI后肠道菌群变化

早期动物实验发现,SCI发生后肠道蠕动节律会被打乱,导致肠道菌群紊乱,使运动功能严重障碍<sup>[8]</sup>。目前,诸多研究证实SCI患者通常伴有菌群失调,但关于具体菌群的变化未达成一致观点。Jing等<sup>[9]</sup>招募了59例SCI患者和27例健康对照者,采用16S rDNA测序技术对两者粪便中的菌群予以检测,发现放线杆菌属丰度明显增高,厚壁菌门丰度明显降低。尤其和健康对照者相比,SCI患者短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFA)产生属如粪杆菌、巨单胞菌及阿加索杆菌属显著降低。

\* **【通信作者】** 王宇红, E-mail: 1057952281@qq.com

**【作者简介】** 房星辰(1993-),女,辽宁锦西人,本科,从事脊髓损伤方面研究。E-mail: fxc5927@126.com

Kong等<sup>[10]</sup>研究显示,SCI患者厌氧菌属、埃格菌属及肠球菌属的丰度明显增加,而粪杆菌属、志贺氏埃希菌属、阿加索杆菌属、多雷亚菌属、梭卡特尼杆菌属及真杆菌属的丰度明显降低。且肠道菌群失调和SCI后运动功能障碍程度有关。汪俊宇等<sup>[11]</sup>研究发现,和健康人相比,SCI患者瘤胃球菌、消化链球菌属、志贺菌属的丰度显著增高,肠道内有益菌(产丁酸盐菌、抗炎性菌属)的丰度明显下降。Kang等<sup>[12]</sup>研究显示,SCI患者肠道菌群失调情况较为明显,其中志贺菌、拟杆菌属、葡萄球菌属及毛螺菌等促炎菌数量明显增多,乳酸菌、异担菇属及萨特氏菌等抗炎菌数量明显下降。

### 3 SCI后肠道菌群通过多途径影响神经功能损害的发生发展

SCI后神经功能损害引起的肢体障碍可使患者生存质量受到极大影响。目前,愈来愈多研究证实,SCI后神经功能损害和MGBA轴有一定关系,但有关机制尚不明了,可能和神经内分泌、免疫、代谢产物等因素有关。

**3.1 神经递质** 肠道菌群能通过诱导宿主释放神经递质,继而影响内外在信号在肠脑轴的传导。研究发现,肠道菌群在谷氨酸、 $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)、乙酰胆碱等神经递质合成中发挥着关键作用,而上述递质参与大脑功能的调节<sup>[13]</sup>。谷氨酸为酸性氨基酸,对神经元间的信息传递具有增强作用。但其含量过高可促使大量钙离子流入神经元,导致神经功能受损<sup>[14]</sup>。有学者研究发现,拟杆菌丰度降低可致谷氨酸含量增高,而通过恢复谷氨酸稳态,有助于减轻神经毒性,促进SCI后功能恢复<sup>[15]</sup>。GABA对大脑神经传递具有抑制性,Conn等<sup>[16]</sup>研究显示,拟杆菌、乳酸菌为GABA的生产者,其丰度下降可导致GABA的合成减少,引起脑代偿性改变及兴奋性中毒,从而导致神经功能障碍。乙酰胆碱是位于神经肌肉接头的一种递质,吴倩等<sup>[17]</sup>研究发现,梭状芽孢杆菌丰度降低、链球菌丰度增加可导致肌无力患者乙酰胆碱功能无法正常发挥。而SCI患者中亦观察到上述肠道菌群失衡现象。可见SCI后肠道菌群失衡可能通过损害乙酰胆碱功能而引起或加重神经功能障碍。

**3.2 免疫系统** 肠道内含有大量免疫细胞,可提供一道防御病原菌的免疫屏障。肠道菌群参与大脑中常驻免疫细胞发育成熟过程的调节,继而影响神经信号的传导。小胶质细胞为脑内重要的常驻免疫细胞,具有神经免疫调控、诱导神经修复等作用<sup>[18]</sup>。Erny等<sup>[19]</sup>研究发现,无菌小鼠的小胶质细胞有缺陷,具有未成熟表型,致使免疫功能不全。提示肠道菌群缺乏可影响小胶质细胞发育。而通过进行小胶质细胞移植,有利于小鼠SCI的修复。此外,SCI后的肠道菌群失调可致免疫系统低下,表现为CD4<sup>+</sup>T淋巴细胞减少,且白介素-1 $\beta$ 等炎症因子水平升高,加重神经功能损害<sup>[20]</sup>。

**3.3 神经内分泌** 神经内分泌系统为调控人体生理功能的一个重要内环境系统,而下丘脑-垂体-肾上腺轴(hypothalamic-pituitary-adrenal axis, HPA)轴是其构成部分之一,在应激反应调控中发挥着关键作用,并调节消化、免疫系统等诸多生理活动。研究发现,肠道菌群可经HPA轴影响神经系统<sup>[21]</sup>。SCI发生后,机体可因应激反应增强而促使儿茶酚胺大量释放。上述活性物质会作用于肠道,致使肠道通透性异常,继而引起菌群紊乱。菌群紊乱可导致HPA轴异常激活,促使皮质醇表达

水平升高,继而降低脑源性营养因子活性,引起神经功能损伤<sup>[22]</sup>。

**3.4 迷走神经** SCI会对自主神经系统构成影响,致使副交感神经活性异常。迷走神经为副交感神经系统的重要构成,亦是连接肠脑的重要通路。Munawar等<sup>[23]</sup>研究表明,迷走神经可经肠道菌群产生的神经活性物质而促进肠脑双向交流。研究显示,迷走神经在抑制炎症和调节免疫反应方面发挥着重要作用,上述作用机制的正常运行主要依赖于胆碱能反射。在上述反射中,迷走神经会对外周炎症信号进行感知,将肠道信息传导至背侧运动核,使迷走神经受到激活,并促进乙酰胆碱释放,以影响细胞因子的表达。将迷走神经切断后,SCI患者炎症因子会大量产生<sup>[24]</sup>。Chen等<sup>[25]</sup>研究发现,迷走神经刺激能抑制TNF- $\alpha$ 诱导的内皮凋亡,减轻SCI后血液-脊髓屏障破坏,利于功能恢复。

**3.5 代谢产物** 肠道菌群会产生一些活性代谢物,如SCFA、色氨酸等。上述代谢物进入循环后,可对生理功能产生影响。SCFA为一种短链脂肪酸,主要包含醋酸、丙酸及丁酸,由拟杆菌代谢膳食纤维过程中所生成。Generoso等<sup>[26]</sup>将产丁酸、丙酸的细菌定植于无菌小鼠肠道内,观察到额叶皮层及下丘脑中的紧密连接蛋白水平升高,这和菌群代谢物可能对脑神经元产生直接影响有关。此外,SCFA能通过调节核因子信号传递而减轻血脑屏障的氧化损伤,并能抑制炎症,对神经元起到保护作用。色氨酸属于芳香族氨基酸,可在罗伊氏乳杆菌作用下转化成诸多芳香烃受体(Aryl hydrocarbon receptor, AhR)配体,如吡啶-3-醛、吡啶丙烯酸等。上述AhR配体可使脑内和脊髓内常驻巨噬细胞中的AhR受到激活,继而干扰促炎核因子- $\kappa$ B的信号传递,影响募集炎症单核细胞有关的转录因子的生成,从而对神经功能予以保护<sup>[27]</sup>。

## 4 肠道菌群失调的治疗

**4.1 益生菌** 益生菌为调节肠道菌群的可靠方法,其可通过提高肠道内有益菌的占比,妨碍致病菌的生长繁殖,促使肠道微生态恢复正常。Wong等<sup>[28]</sup>研究显示,补充益生菌可促进神经递质合成,提高生物活性代谢物水平,有助于改善神经功能。Mirzaei等<sup>[29]</sup>研究发现,益生菌可通过发挥抗炎、抗氧化应激、神经保护等作用改善神经系统疾病患者运动和非运动症状。Shi等<sup>[30]</sup>研究发现,补充含双歧杆菌的益生菌能降低拟拟杆菌属、吡啶单胞菌属及颗粒菌属的丰度,增加毛螺菌属等有益菌的丰度,并通过调节HPA轴而抑制皮质醇的产生,从而提高神经功能。

**4.2 中医疗法** 中医疗法如口服中药、艾灸、针灸等可对肠道菌群起到调理作用,目前已被用于肠道菌群紊乱患者治疗中。杨光露等<sup>[31]</sup>研究显示,脊髓康可增加因SCI降低的肠道菌群数量,优化肠道微生态环境,提高SCI小鼠运动功能。王天雨等<sup>[32]</sup>研究发现,艾灸神阙、命门、阳陵泉及阴陵泉可改善SCI大鼠肠道菌群构成,诱导脊髓组织修复,增强运动能力。崔振华等<sup>[33]</sup>研究发现,辅助应用针灸疗法可纠正肠道菌群失调状态,抑制机体氧化应激及炎症反应,改善受损的神经功能。可见通过中医疗法调理SCI患者肠道菌群,对于减轻神经功能障碍有一定益处。

**4.3 粪菌移植** 粪菌移植为一种新颖的治疗手段,是从健康人粪便内分离出功能菌群,并将其以一定方式(如喷洒、灌肠

等)移入受者肠道内,以达到纠正失衡的微生态、恢复原有功能的目的。刘明富等<sup>[34]</sup>研究发现,SCI大鼠粪菌移植后肠道菌群得到改善,脊髓组织内炎症因子水平明显降低,功能障碍有效减轻。Jing等<sup>[35]</sup>研究显示,粪菌移植可增强SCI小鼠肠道屏障完整性及胃肠道运动,提高SCFA水平,诱导神经元轴突再生,促进功能恢复。

## 5 总结及展望

SCI患者常因机体高应激而致肠道屏障受到破坏,引起肠道菌群紊乱。肠道菌群紊乱可通过MGBA轴活动影响神经功能,可能和神经递质、迷走神经、神经内分泌、免疫系统、代谢产物等途径有关。益生菌、中医疗法、粪菌移植等方法有助于恢复肠道菌群平衡,对于改善SCI患者神经功能有一定益处。但目前关于采取何种疗法能使SCI患者获得理想疗效尚不清楚,有待日后设计科学的临床研究加以分析,以期对SCI的有效治疗提供指导。

### 【参考文献】

- 魏娟芳,庞日朝,杨娅,等. 调控肠道微生物在治疗脊髓损伤中潜在作用的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2023, 33(2): 163-168.
- 曹安军,牟朋林,刘志奎. 血清GFAP和NfL水平与创伤性脊髓损伤后的神经功能损害和脊髓水肿的关系[J]. 颈腰痛杂志, 2023, 44(6): 1051-1054.
- 孙瑾,徐睿,张云峰,等. 微生物-肠-脑轴研究进展[J]. 中国综合临床, 2021, 37(5): 466-470.
- 王颖佳,王凌霄,邵宏元. 肠道菌群与脑卒中后抑郁潜在机制的研究进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2022, 39(11): 1046-1048.
- 邱惠萍,姚水洪,卢伟力,等. 基于高通量测序的老年人肠道菌群多样性分析[J]. 中华微生物学和免疫学杂志, 2020, 40(4): 262-268.
- Metta V, Leta V, Mrudula KR, et al. Gastrointestinal dysfunction in Parkinson's disease: molecular pathology and implications of gut microbiome, probiotics, and fecal microbiota transplantation[J]. J Neurol, 2022, 269(3): 1154-1163.
- Wan Y, Zuo T, Xu Z, et al. Underdevelopment of the gut microbiota and bacteria species as non-invasive markers of prediction in children with autism spectrum disorder[J]. Gu, 2022, 71(5): 910-918.
- Kigerl K A, Hall J C E, Wang L, et al. Gut dysbiosis impairs recovery after spinal cord injury [J]. J Exp Med, 2016, 213(12): 2603-2620.
- Jing Y, Yang D, Bai F, et al. Spinal cord injury-induced gut dysbiosis influences neurological recovery partly through short-chain fatty acids[J]. NPJ Biofilms Microbiomes. 2023, 9(1): 99-106.
- Kong G, Zhang W, Zhang S, et al. The gut microbiota and metabolite profiles are altered in patients with spinal cord injury [J]. Mol Brain. 2023, 16(1): 26-34.
- 汪俊宇,庞日朝,王文春,等. 脊髓损伤患者肠道菌群属水平的特征及意义[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(4): 393-399.
- Kang JN, Sun ZF, Li XY, et al. Alterations in gut microbiota are related to metabolite profiles in spinal cord injury[J]. Neural Regen Res, 2023, 18(5): 1076-1083.
- 谢雅静,时晓敏,颜世敢,等. 肠道菌群与精神类疾病相关性研究进展[J]. 中国药理学通报, 2022, 38(11): 1617-1622.
- Chang CH, Lin CH, Lane HY. D-glutamate and gut microbiota in alzheimer's disease[J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(8): 2676-2693.
- Cao J, Yu X, Liu J, et al. Ruxolitinib improves the inflammatory microenvironment, restores glutamate homeostasis, and promotes functional recovery after spinal cord injury[J]. Neural Regen Res, 2024, 19(11): 2499-2512.
- Conn KA, Borsom EM, Cope EK. Implications of microbe-derived  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) in gut and brain barrier integrity and GABAergic signaling in Alzheimer's disease[J]. Gut Microbes, 2024, 16(1): 237-259.
- 吴倩,李君莲,李海燕,等. 重症肌无力患者肠道菌群及其代谢产物的变化[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2024, 50(6): 325-331.
- 魏晓佟,郭瑞,张启春. 小胶质细胞表型和功能研究进展[J]. 中国药理学通报, 2024, 40(3): 410-415.
- Erny D, Hrabé de Angelis AL, Jaitin D, et al. Host microbiota constantly control maturation and function of microglia in the CNS[J]. Nat Neurosci, 2015, 18(7): 965-977.
- 田春平,王青燕,高慧,等. 肠道菌群在脊髓损伤后认知功能障碍中的研究进展[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4383-4393.
- Cui Y, Liu J, Lei X, et al. Dual-directional regulation of spinal cord injury and the gut microbiota[J]. Neural Regen Res, 2024, 19(3): 548-556.
- Zeng H, Cheng L, Lu DZ, et al. Unbiased multitissue transcriptomic analysis reveals complex neuroendocrine regulatory networks mediated by spinal cord injury-induced immunodeficiency[J]. J Neuroinflammation, 2023, 20(1): 219-226.
- Munawar N, Ahsan K, Muhammad K, et al. Hidden role of gut microbiome dysbiosis in schizophrenia: Antipsychotics or psychobiotics as therapeutics? [J]. Internat J Mol Sci, 2021, 22(14): 7671-7702.
- Liu Y, Forsythe P. Vagotomy and insights into the microbiota-gut-brain axis. Neurosci Res[J]. 2021, 168(7): 20-27.
- Chen H, Feng Z, Min L, et al. Vagus nerve stimulation prevents endothelial necroptosis to alleviate blood-spinal cord barrier disruption after spinal cord injury[J]. Mol Neurobiol, 2023, 60(11): 6466-6475.
- Generoso JS, Giridharan VV, Lee J, et al. The role of the microbiota-gut-brain axis in neuropsychiatric disorders [J]. Braz J Psychiatry, 2021, 43(3): 293-305.
- 魏娟芳,庞日朝,杨娅,刘捷,张安仁. 调控肠道微生物在治疗脊髓损伤中潜在作用的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2023, 33(2): 163-168.
- Wong LC, Hsu CJ, Wu YT, et al. Investigating the impact of probiotic on neurological outcomes in Rett syndrome: A randomized, double-blind, and placebo-controlled pilot study[J]. Autism, 2024, 28(9): 2267-2281.
- Mirzaei H, Sedighi S, Kouchaki E, et al. Probiotics and the Treatment of Parkinson's Disease: An Update [J]. Cell Mol Neurobiol, 2022, 42(8): 2449-2457.

[60] Oliveira MLS, Areas APM, Campos IB, et al. Induction of systemic and mucosal immune response and decrease in *Streptococcus pneumoniae* colonization by nasal inoculation of mice with recombinant lactic acid bacteria expressing pneumococcal surface antigen A [J]. *Microbes Infect*, 2006, 8 (6):1016-1024.

[61] Hanniffy SB, Carter AT, Hitchin E, et al. Mucosal delivery of a pneumococcal vaccine using *Lactococcus lactis* affords protection against respiratory infection [J]. *J Infect Dis*, 2007, 195(2):185-193.

[62] Medina M, Villena J, Vintini E, et al. Nasal immunization with *Lactococcus lactis* expressing the pneumococcal protective protein A induces protective immunity in mice [J]. *Infect Immun*, 2008, 76(6):2696-2705.

[63] Villena J, Medina M, Raya R, et al. Oral immunization with recombinant *Lactococcus lactis* confers protection against respiratory pneumococcal infection [J]. *Can J Microbiol*, 2008, 54 (5):845-853.

[64] Villena J, Medina M, Racedo S, et al. Resistance of young mice to pneumococcal infection can be improved by oral vaccination with recombinant *Lactococcus lactis* [J]. *J Microbiol Immunol Infect*, 2010, 43(1):1-10.

[65] Oliveira MLS, Monedero V, Miyaji EN, et al. Expression of *Streptococcus pneumoniae* antigens, PsaA (Pneumococcal surface antigen A) and PspA (pneumococcal surface protein A) by *Lactobacillus casei* [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2003, 227(1):25-31.

[66] Oliveira MLS, Areas APM, Campos IB, et al. Induction of systemic and mucosal immune response and decrease in *Streptococcus pneumoniae* colonization by nasal inoculation of mice with recombinant lactic acid bacteria expressing pneumococcal surface antigen A [J]. *Microbes Infect*, 2006, 8 (6):1016-1024.

[67] Campos IB, Darrieux M, Ferrieux M, et al. Nasal immunization of mice with *Lactobacillus casei* expressing the pneumococcal surface protein A: induction of antibodies, complement deposition and partial protection against *Streptococcus pneumoniae* challenge [J]. *Microbes Infect*, 2008, 10(3):481-488.

[68] Shekhar S, Amdal H, Petersen FC, et al. Vaccination with the commensal *Streptococcus mitis* expressing pneumococcal serotype 5 capsule elicits IgG/IgA and Th17 responses against *Streptococcus pneumoniae* [J]. *Front Immunol*, 2021, 12: 676488.

[69] 李文桂, 陈雅棠. 载体介导的结核分枝杆菌 ESAT-6 疫苗的研制现状 [J]. *热带医学杂志*, 2024, 24(2):299-304.

【收稿日期】 2024-12-04 【修回日期】 2025-02-28

~~~~~  
(上接 669 页)

[22] Sobel JD, Sobel R. Current treatment options for vulvovaginal candidiasis caused by azole-resistant *Candida* species [J]. *Expert Opin Pharmacother*, 2018, 19(9):971-977.

[23] Cousens C, Alleaume C, Bijmans E, et al. Jaagsiekte sheep retrovirus infection of lung slice cultures [J]. *Retrovirology*, 2015, 12(1):31.

[24] Baxter CG, Marshall A, Roberts M, et al. Peripheral neuropathy in patients on long-term triazole antifungal therapy [J]. *J Antimicrob Chemother*, 2021, 66(9):2136-2139.

[25] Marr KA, Leisenring W, Crippa F, et al. Cyclophosphamide metabolism is affected by azole antifungals [J]. *Blood*, 2022, 103 (4):1557-1559.

【收稿日期】 2024-12-23 【修回日期】 2025-03-15

~~~~~  
(上接 673 页)

[22] Waheed G, Soliman MAR, Ali AM, et al. Spontaneous spondylodiscitis: review incidence, management, and clinical outcome in 44 patients [J]. *Neurosurgical Focus*, 2019, 46(1): 10.

[23] Ma CY, Wu HB, Chen G, et al. The potential of metagenomic next-generation sequencing in diagnosis of spinal infection: a retrospective study [J]. *Eur Spine J*, 2022, 31(2):442-447.

[24] Gu W, Miller S, Chiu CY. Clinical metagenomic next-generation sequencing for pathogen detection [J]. *Ann Rev Pathol*, 2019, 14(9):319-338.

[25] 颜金祥, 刘家明, 熊绪, 等. 宏基因组二代测序在脊柱感染性疾病诊断中的应用效果 [J]. *南昌大学学报(医学版)*, 2024, 64(3):89-93.

【收稿日期】 2024-12-25 【修回日期】 2025-03-09

~~~~~  
(上接 676 页)

[30] Shi S, Zhang Q, Sang Y, et al. Probiotic bifidobacterium longum BB68S improves cognitive functions in healthy older adults: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *Nutrients*, 2022, 15(1):51-59.

[31] 杨光露, 马勇, 郭杨, 等. 基于 16S rDNA 分析脊髓康对脊髓损伤小鼠肠道菌群的影响 [J]. *中华中医药杂志*, 2023, 38(3):1009-1014.

[32] 王天雨, 魏炜, 杨志新, 等. 艾灸"相对穴"对脊髓损伤大鼠运动能力和其肠道菌群的影响 [J]. *中国微生态学杂志*, 2022, 34(11):1283-1288.

[33] 崔振华, 林夏妃, 陈永敏, 等. 针灸与康复疗法干预脑缺血模型大鼠神经功能及肠道菌群的变化 [J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27 (17):2692-2698.

[34] 刘明富, 刘槲, 宁宇, 等. 粪菌移植疗法对大鼠脊髓损伤后的作用研究 [J]. *广西医科大学学报*, 2021, 38(12):2240-2245.

[35] Jing Y, Yu Y, Bai F, et al. Effect of fecal microbiota transplantation on neurological restoration in a spinal cord injury mouse model: involvement of brain-gut axis [J]. *Microbiome*, 2021, 9(1):59-79.

【收稿日期】 2025-01-22 【修回日期】 2025-04-03