综述 DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.003724

天然多糖介导免疫调控作用研究进展

周雨萱，韩　冷，柏丁源，景凌洁，郭　澄，杨全军
（上海交通大学医学院附属第六人民医院，上海　200000）

【摘　要】天然多糖在免疫调控方面有重要的生理影响，其中对固有免疫和获得性免疫的作用值得深入讨论。天然多糖可通过调节巨噬细胞、自然杀伤（natural killer，NK）细胞、炎症反应、生理屏障、补体系统以及机体的氧化作用进而调节固有免疫体系，也可通过调节体液免疫和细胞免疫进而调节获得性免疫体系。故本文就天然多糖之于固有免疫和获得性免疫方面研究进展进行综述，为深入开展相关研究提供新思路。

【关键词】多糖；免疫调节；固有免疫；获得性免疫
【中图分类号】R9　　【文献标志码】A　　【收稿日期】2024-05-12

Research advances in immune regulation mediated by natural polysaccharides

Zhou Yuxuan，Han Leng，Bai Dingyuan，Jing Lingjie，Guo Cheng，Yang Quanjun
（*The Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine*）

【**Abstract**】Natural polysaccharides have important physiological effects on immune regulation，and their effects on natural and acquired immunity are worthy of further discussion. Natural polysaccharides can regulate the innate immune system by regulating macrophages，natural killer cells，inflammatory response，physiological barrier，complement system，and oxidation of the body，and they can also regulate the adaptive immune system by regulating humoral immunity and cellular immunity. Therefore，this article reviews the research advances in the role of natural polysaccharides in innate immunity and adaptive immunity，in order to provide new ideas for further research.

【**Key words**】polysaccharides；immune regulation；innate immunity；adaptive immunity

天然多糖来源广泛，可以从海洋、植物、微生物等不同生物体中提取、挖掘和利用，具有良好的生物活性、生物相容性、生物降解性，因而成为医药领域极具有应用前景的医用物质和生物材料[1]。

免疫调控是指通过各种机制来调节机体免疫系统的活性和功能，以保持免疫系统的平衡和稳定。天然多糖对免疫系统的调控作用表现在其能够直接或间接参与生理生化活动，例如，天然多糖可直接刺激巨噬细胞使其活化，活化后产生细胞因子等又间接影响免疫调节[2]。其中，天然多糖对免疫系统的调控可分为固有免疫和获得性免疫两方面，因此对这两方面进行研究有助于免疫药物和免疫制剂的开发。

1　调节固有免疫

固有免疫系统是人体最早、最原始的免疫防御系统之一，主要通过非特异性的方式对抗病原微生物和其他外来物质，它起着保护机体免受感染和维持内环境稳态的作用，与获得性免疫系统相辅相成。固有免疫组成部分包括巨噬细胞、NK细胞、炎症反应、生理屏障、补体系统。天然多糖可以从固有免疫的各个组成部分影响固有免疫，并且提高机体的抗氧化能力。

1.1　多糖对巨噬细胞的作用

巨噬细胞具有吞噬作用、抗菌作用、抗炎作用等，是机体抵御感染、维持免疫平衡的重要细胞。天然多糖可以有效激活巨噬细胞的吞噬功能，促进一氧化氮（Nitric Oxide，NO）等免疫因子的分泌，发挥免疫调节功能。以当归多糖（angelica polysaccharide，AP）为例，Yang XB 等[3]从当归中分离纯化得到 3 个 AP 组分，分别命名为 APF1、APF2 和 APF3，并在 0.2 mmol/L 叔丁基过氧化氢（tert-butyl hydroperoxide，t-BHP）作用前用 APFs 预处理小鼠腹腔巨噬细胞，研究发现低至 10 μg/mL 的 APF 预处理巨噬细胞可明显提高 t-BHP 降低的细胞存活率、细胞内谷胱甘肽（glutathione，GSH）含量和超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）活性，并抑制 t-BHP 升高的乳酸脱氢酶（lactic dehydrogenase，LDH）漏出和丙二醛（malondialdehyde，MDA）生成，首次发现 APF3 中的结合蛋白与保护作用密切相关，多糖通过抑制 t-BHP 活化巨噬细胞释放过量 NO 来保护宿主细胞。在此基础上，Ge YF 等[4]对 AP 进行纯化并描述了一种新的水溶性多糖（F2），研究发现

作者介绍：周雨萱，Email：1295257001@qq.com，研究方向：药学。
通信作者：杨全军，Email：myotime@sjtu.edu.cn。
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目（编号：82272925）。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20250115.1359.006（2025-01-15）

F2作为有效的多糖，显著刺激RAW264.7细胞释放NO并表达多种细胞因子，同时增加NK-92细胞中肿瘤坏死因子α（tumor necrosis factor alpha，TNF-α）、α-干扰素（alpha Interferon，IFN-α）、自然杀伤细胞毒性受体和颗粒酶-b的表达，增强对HCT-116细胞的细胞毒性，并且发现F2通过丝裂原活化蛋白激酶（mitogen-activated protein kinase，MAPK）信号通路和核因子κB（nuclear factor kappaB，NF-κB）信号通路刺激RAW264.7细胞和NK-92细胞，借此深入研究了AP对巨噬细胞的信号调节途径。富硒灰树花硒多糖（selenium-enriched Polysaccharides from hypsizygus marmoreus 22，Se-GFP-22）无细胞毒性，具有较高的促进巨噬细胞吞噬、上调白细胞介素-2（interleukin-2，IL-2）、TNF-α、IFN-γ和NO产生及相关mRNA表达的能力。在Se-GFP-22诱导的巨噬细胞中，细胞内SOD活性明显增加，以保护细胞免受氧化损伤。然而，当Toll样受体4（Toll-like receptor 4，TLR4）信号通路被特异性TLR4抑制剂阻断时，Se-GFP-22诱导的巨噬细胞活化被抑制。使用针对MAPK信号通路的特异性抑制剂，推测Se-GFP-22通过TLR4介导的丝裂原活化蛋白激酶信号通路激活RAW264.7巨噬细胞。

1.2 多糖对NK细胞的作用

NK细胞是一类重要的淋巴细胞，属于机体固有免疫系统的一部分，与T细胞不同，无需预先致敏就能识别和杀伤异常细胞。天然多糖可通过增强NK细胞活性、促进NK细胞增殖、促进细胞因子产生进而调节免疫。以裸圆梭菌卵多糖（strong male eggs，SEP）为例，Ke MY等[5]研究了SEP对Lewis肺癌小鼠C57/BL6J和裸鼠的抗肺癌作用及其潜在机制。SEP能明显刺激裸小鼠和C57/BL6J小鼠脾脏中$CD3^-NK1.1^+$细胞百分比和NK细胞的细胞毒性。SEP不仅抑制肿瘤生长，还促进NK细胞介导的细胞毒性、$NK1.1^+$细胞群以及IL-2和（interferon-gamma，IFN-γ）的分泌。Xie X等[6]在此基础上研究发现了天然多糖影响NK细胞的其他信号通路，其从SEP中分离的一种多糖在体内显示免疫活性，SEP通过TLR4/MAPKs/NF-κB信号通路激活NK细胞，使其在体内外明显抑制胰腺癌细胞生长，同时SEP通过上调自然杀伤性细胞激活受体2D，明显增强了吉西他滨（Gemcitabine，GEM）的抗肿瘤作用，提高了NK细胞靶向其配体类身体抗原的敏感性，此外，SEP通过抑制体内活性氧化物质的分泌逆转了GEM诱导的脾脏和骨髓的凋亡和萎缩。这些结果表明，SEP成为了胰腺癌的免疫治疗候选。

1.3 多糖对炎症反应的作用

炎症反应是免疫系统对于外界刺激或内部损伤做出的1种生理性反应，旨在清除病原体、修复组织，并维持身体内部的稳态平衡，炎症反应包括感染细菌或病毒、组织损伤、自身免疫病等。

天然多糖可通过抑制炎症介质的释放，例如白细胞介素-1β（Interleukin-1 beta，IL-1β）、TNF-α等；促进抗炎因子的产生，如白细胞介素-10（interleukin-10，IL-10）、IL-4、IL-6等抗炎因子；调节TLR4/NF-kB通路等缓解炎症反应。Li T等[7]探讨了口服鱼腥草多糖（houttuynia cordata polysaccharide，HCP）对尾静脉注射脂多糖（lipopolysaccharide，LPS）建立的大鼠血管慢性炎症的影响，发现HCP的血管保护作用与降低马岱酸含量、降低促炎细胞因子IL-1β和TNF-α、提高抗氧化酶超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性有关。此外，HCP通过降低TLR4和NF-κBP65的表达而表现出抗炎反应。因此，HCP通过TLR4/NF-kB通路抑制LPS诱导的大鼠慢性血管炎症。Jing XQ等[8]从月季花中分离纯化得到一种新型RG-I型果胶类多糖YJ3A1，发现口服50mg/kg剂量的YJ3A1明显改善非酒精性脂肪性肝炎相关的炎症、氧化应激和纤维化，并且不影响正常小鼠的肝脏形态。机制研究提示其生物活性可能与抑制高迁移率族蛋白B1（high mobility group protein B1，HMGB1）的表达和释放，使HMGB1/TLR4/NF-κB和Akt信号通路失活，从而阻碍非酒精性脂肪性肝炎的作用。Zhang Z等[9]研究黄芪多糖（astragalus polysaccharide，APS），并通过免疫组织化学、酶联免疫吸附、免疫印迹、免疫荧光染色和流式细胞术等方法对糖尿病大鼠的创面愈合进行了研究，研究表明黄芪多糖可促进β-连环蛋白和重复结构蛋白3的表达、抑制NF-κB和糖原合成酶激酶-3β的表达、促进巨噬细胞向M2型极化，从而减轻了创面愈合后期的过度炎症。

1.4 多糖对生理屏障的作用

生理屏障系统也是人体免疫系统的一部分，包括呼吸道、消化道和生殖道。此免疫系统可以防御病原菌的侵入，促进免疫细胞增殖，加快机体的免疫反应。

天然多糖可增强肠道黏膜屏障功能，促进免疫调节细胞的活性。例如焦志强等[10]研究了绞股蓝内生真菌JY25胞外多糖对肉鸡肠黏膜免疫功能的影响，发现了鸡每日的粮食中添加0.4%~0.6%的JY25可以通过改善肠道绒毛和隐窝结构来促进营养物质快速吸收从而促进肉鸡的生长，这个过程中肉鸡的机体特异性免疫和非特异性免疫都得到提升，促进T、B细胞的快速增殖，通过调整淋巴细胞的分泌进而调整肠黏膜的免疫状态。曲瑞莲等[11]研究了岩藻多糖对高尿酸血症模型小鼠肠黏膜屏障功能的保护作用及机制，通过建立高尿酸血症模型，分为对照组、高尿酸血症模型组、岩藻多糖干预组、别嘌呤醇阳性对照组进行实验，结论为岩藻多糖降低高尿酸血症小鼠血清尿酸水平，并通过上调p38MAPK/mTOR通路增强小肠黏膜细胞自噬水平，减轻肠黏膜屏障损伤。

1.5 多糖对补体系统的作用

补体系统是一组存在于人体液及细胞表面，经活化后具有生物活性，可介导免疫和炎症反应的蛋白系统，主要由肝脏产生的血浆蛋白或细胞受体表达的膜蛋白组成，补体C3和C4在血清中的含量较高是补体系统中的核心蛋白，这些蛋白质共同作用形成复杂补体系统，对抗病原体和维持免疫平衡起着重要作用。

补体激活途径目前有3种[12]，分别为经典途径（Classical Pathway）、替代途径（Alternative Pathway）和适应性途径（Lectin Pathway）。Huo JY等[13]揭示黄花蒿多糖与抗补体活性之间的关系，通过溶血实验对其抗补体活性和补体激活级联中的靶向成分进行了评价，从黄花楸中分离得到3种均质多糖（AAP01-1、AAP01-2和AAP01-3）。AAP01-1、AAP01-2和AAP01-3的半乳糖醛酸含量分别为8%、28%和15%，均为支链酸性杂多糖。AAP01-2表现出较强的抗补体活性，经典

途径的CH50值为（0.360 ± 0.020）mg/mL，替代途径的AP50值为（0.547 ± 0.033）mg/mL。AAP01-3活性稍弱[CH50：（1.120 ± 0.052）mg/mL，AP50：（1.283 ± 0.061）mg/mL]，AAP01-1无活性。AAP01-2作用于补体系统的C1q、C3、C4、C5和C9组分，AAP01-3作用于补体系统的C3、C4和C5组分，说明高含量的半乳糖醛酸对黄芪多糖的抗补体活性起重要作用。汤笛等[14]探究红豆杉多糖对环磷酰胺诱导的免疫抑制小鼠免疫功能的影响，试验设置了多个对照组，模型组、阳性药物组和红豆杉多糖低、中、高剂量组小鼠每日腹腔注射环磷酰胺溶液，阴性对照组小鼠腹腔注射生理盐水。模型建立后，阳性药物组小鼠灌胃盐酸左旋咪唑溶液，红豆杉多糖低、中、高剂量组分别按不同体重灌胃红豆杉多糖溶液，阴性对照组与模型组灌胃生理盐水，最后采用酶联免疫吸附测定法检测后发现模型组小鼠C3、C4、CD3、CD4、免疫球蛋白A（Immunoglobulin A，IgA）、IgG、IgM、IL-2、IL-4含量显著降低，而红豆杉多糖组都明显增高，说明红豆杉多糖可以促进补体分子、抗体分子、以及细胞因子的产生，进而增强免疫。

1.6 多糖对抗氧化能力的作用

氧化对人体产生的影响多样，通过氧化应激、细胞损伤、衰老加速、免疫抑制、慢性疾病、炎症反应等多方面对人体造成危害。天然多糖能够清除自由基、增强抗氧化酶活性、与金属离子络合、调控凋亡基因，具有较好的抗氧化活性，逐渐成为抗氧化研究的重要方向之一。

人体组织细胞受到辐射或供氧不足有可能产生过多的自由基。过量自由基的存在不仅会对人体健康造成潜在危害，其本身也会带动一系列连锁反应，因此自由基是人类衰老和各种疾病发生的根源。通过体外抗氧化研究[15-18]，发现绿豆多糖能够有效清除1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（1，1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH）自由基、羟基自由基（Hydroxyl Radical，·OH）、2，2′-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（2，2′-azino-bis（3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid），ABTS）自由基、超氧阴离子自由基（superoxide radical，O_2^-·），薄树芝多糖能够有效清除·OH及DPPH·，阿魏菇多糖具有较好的DPPH·、ABTS·、·OH清除能力，藤椒籽冷榨油饼多糖能够显著清除ABTS·、DPPH·及O_2^-·。天然多糖可抑制物质的合成进而抑制此物质对应的氧化酶活性，天然多糖还可对抗氧化酶的活性进行重塑，进而达到理想的免疫调控效果。李晓花等[19-22]研究发现党参多糖可以抑制氧化酶活性并提高抗氧化酶活性，石仙桃黄酮和多糖抑制酚类物质合成进而抑制多酚氧化酶的活性，猴头菇多糖组分通过对细胞内源性抗氧化酶活性重塑来对H_2O_2胁迫损伤的PC12神经内分泌细胞进行保护。

构成多糖的多数单糖本身含有供电子团（羟基、羧基及氨基），因此天然多糖容易和金属离子形成络合物。由于天然多糖本身就有清除自由基和抗氧化的作用，与金属离子络合后，其相应的金属络合物也会体现相应的抗氧化作用，并且还会体现出协同作用，使得多糖和金属离子络合物体现出更强的抗氧化作用[23]。景永帅等[24-25]研究发现多糖与铁络合之后自由基清除能力增强以及α-葡萄糖苷酶抑制作用加强，螺旋藻多糖铁（Ⅲ）配合物[SP-Fe（Ⅲ）]采用了5轴蛛网图对其的抗氧化活性进行综合评价后表示其对淋巴细胞的增殖有显著作用，杏鲍菇多糖锌螯合物（Polysaccharide-Zinc Chelate from Pleurotus eryngii，PEP-Zn）的抗氧化活性结果表明了PEP-Zn对·OH和O_2^-·的清除作用显著增强。天然多糖还可以通过影响细胞信号通路、调节线粒体动力学以及调节抗氧化酶活性来调节凋亡基因的表达和细胞凋亡的发生。

综上所述，天然多糖在固有免疫方面效果良好，可以使免疫细胞活化、抑制炎症介质的释放、避免机体氧化损伤等等，但是调节固有免疫仍存在调节机制复杂、免疫过度激活风险、免疫耐受性破坏、剂量和时间效应、个体差异等问题，需要进一步的研究和探索以解决这些挑战，实现其在免疫调节领域的有效应用。

2 调节获得性免疫

获得性免疫调节主要由细胞免疫和体液免疫组成，T淋巴细胞主要参与细胞免疫反应，B淋巴细胞和其抗体分子参与体液免疫反应，天然多糖对淋巴细胞的免疫调节作用主要体现在促进淋巴细胞增殖进而促进抗体分子和细胞因子等分泌，达到调节免疫的效果。

2.1 多糖对细胞免疫的作用

细胞免疫主要依靠T细胞和辅助性T细胞以及抗原呈递细胞等，T淋巴细胞按照表面分子的类型可以分为$CD4^+$T细胞和$CD8^+$T细胞，其中，$CD4^+$T细胞又叫做辅助性T细胞（Helper t cells，Th细胞）。Th细胞又可分化为Th1细胞和Th2细胞。其中Th1细胞分泌IL-2、TNF-α等细胞因子促进固有细胞活化，并且可直接杀伤肿瘤细胞。Th2细胞分泌IL-4、IL-6、IL-10等免疫抑制因子，抑制效应T细胞的功能。

目前多糖调节细胞免疫可通过调节T细胞和依靠性T细胞的比例以及通过刺激树突状细胞（dendritic cell，DC）、巨噬细胞和B细胞进而刺激T细胞来进行细胞免疫，起到加强免疫或减弱免疫的作用。刘海朝等[27]对黄芪多糖和PD-L1阻断剂的联合作用对抗肺腺癌机制的探究，发现黄芪多糖与PD-L1阻断剂联合实验组可显著增加荷瘤小鼠体重，减轻肿瘤的重量，上调脾指数和胸腺指数，可显著上调小鼠外周血中$CD4^+$T细胞（$CD3^+CD4^+$）比率及$CD4^+/CD8^+$T细胞（$CD3^+CD4^+/CD3^+CD8^+$）比值，增加肿瘤组织中$CD4^+$和$CD8^+$T细胞的浸润，促进小鼠肿瘤组织中促炎细胞因子IL-1β、IL-6及TNF-α的分泌，降低免疫抑制因子IL-10及转化生长因子-β的表达，黄芪多糖和PD-L1阻断剂联合作用可通过促进T细胞介导的免疫应答和调节细胞因子来调节肿瘤免疫微环境，进而达到抗肺腺癌的作用。闵翼等[28]研究了芡茎多糖通过诱导$CD4^+$T、$CD8^+$T和NK细胞的浸润促进小鼠肺癌LLC细胞凋亡的作用，芡茎多糖可以抑制LLC细胞的体内增殖，增加$CD3^+CD4^+$T、$CD3^+CD8^+$T和$CD3^-NK1.1^+$细胞水平。同时，芡茎多糖上调活化的半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶3、B细胞白血病-淋巴瘤-2相关X蛋白表达，下调β细胞淋巴瘤/白血病基因2的表达。从而通过T淋巴细胞对免疫过程进行调节。沈维亚和吴朝文[29]研究了芦荟多糖对自身免疫性甲状腺炎的小鼠辅助型T细胞亚群的影响，研究发现通过高、中、低剂量组、AT组、对照组的实验，分析促甲状腺激素水平、游离三碘甲状腺原氨酸水平、游离四碘甲状腺素水平，得

出芦荟多糖在有效改善了AT小鼠的甲状腺功能的同时，降低了辅助型T细胞亚群的表达。

2.2 多糖对体液免疫的作用

体液免疫由B细胞执行，能够识别抗原分化为浆细胞，浆细胞能够产生和分泌抗体。抗体是一种免疫球蛋白，包括IgG、IgM、IgA、IgE等，其能够特异识别和结合抗原，激活补体系统，使得病原体溶解和破坏。多糖对体液免疫的作用主要体现在促进B细胞增殖，进而提高相关的抗体分子和细胞因子等达到免疫效果。

骨髓抑制中的B淋巴细胞减少症是化疗最棘手的副作用，Xiao H等[30]连续7 d腹腔注射当归多糖（angelica sinensis polysaccharide，ASP）[100 mg/（kg·d）]，可显著恢复小鼠骨髓祖B细胞和前体B细胞，逆转CFU-PreB集落形成能力，从而减轻脾脏和外周血中B细胞的减少，改善脾脏和血清中的免疫球蛋白。其机制与ASP对白细胞介素-7（interleukin-7，IL-7）产生细胞，包括血管周围Leptin$^+$和CXCL12$^+$间充质干细胞和祖细胞的保护作用有关，从而促进IL-7的产生，激活IL-7介导的STAT5、PI3K-AKT信号通路，包括生存信号和EBF1、PAX5转录因子的表达。得到ASP通过改善Nrf2信号，促进祖细胞中IL-7的产生，并随后维持B细胞祖细胞的存活、增殖和分化，从而逆转应激B淋巴细胞减少症。陈秀红等[31]研究灵芝孢子多糖对流感疫苗免疫小鼠的机制，设置雌性BALB/c小鼠实验组后，经过实验，得到结果为多糖可以促进脾脏T、B淋巴细胞增殖，提高CD4$^+$T细胞含量，降低CD8$^+$T细胞含量，明显提高CD25$^+$T细胞含量（P<0.01）；明显增加小鼠骨髓树突细胞表面MHC Ⅱ分子水平（P<0.001）、CD86$^+$分子水平（P<0.05）和CD80$^+$分子水平；促进血清中IL-4、TNF-α等细胞因子表达（P<0.01），说明灵芝孢子多糖可以通过诱导Th1/Th2型免疫应答来提高T、B细胞增殖活性，提高抗原呈递能力进而提高体液免疫。

综上所述，天然多糖可以促进免疫细胞增殖活化，调节T、B细胞的数量和分布、调节Th1/Th2细胞比例、调节免疫信号及介质的释放等，但天然多糖调节获得性免疫存在免疫抑制效应不确定性、免疫耐受性破坏、剂量和时间效应、个体差异和异质性等问题，需要进一步的研究和探索以解决这些挑战。

3 总结与展望

天然多糖介导免疫调控具有一些显著的优势。首先，天然多糖来源广泛，容易获取，待开发前景广阔。其次，已有大量实验数据证明天然多糖的免疫效果。此外，天然多糖具有免疫耐受性，使其在长期使用和大剂量应用时更为安全，同时也降低了其在临床应用中的毒副作用风险。最后，天然多糖的生产通常依赖于可再生的自然资源，如植物、海洋生物，相比于传统制剂对环境十分友好。

天然多糖作为新型的免疫制剂目前也面临一些问题和挑战。首先，天然多糖的提取工艺相对落后，提取的纯度和质量难以保证，影响临床用药结果的稳定性和一致性。其次，天然多糖的研究停留在基础部分，大多数实验只证明了天然多糖具有免疫效果，已知天然多糖可能通过细胞信号传导、细胞因子释放、免疫细胞代谢等多种途径来调节免疫反应，但是其确切的调节机制仍不清楚。此外，已知天然多糖在体外和动物模型中显示出良好的免疫调节效果，但临床表现尚不清楚，且临床转化面临挑战，剂量给药方案方面并未形成系统标准。最后，天然多糖具有来源广，毒性低的特点，但其本身仍有一定的毒副作用，其在体内可能引起过敏反应、免疫反应和其他不良反应，因此，确保天然多糖的安全性和毒副作用的评估是免疫调控研究和临床应用中的重要问题之一。

参 考 文 献

[1] 占少琴. 天然植物多糖提取工艺及研究进展[J]. 中国食品工业，2023(21)：111-113.

Zhan SQ. Extraction technology and research progress of *Natural plant* polysaccharides[J]. Food Ind.（Shanghai，China），2023(21)：111-113.

[2] 张 森，欧 婧，豆晓霞，等. 太子参及提取物对动物免疫调节作用研究进展[J]. 动物医学进展，2024，45(5)：97-102.

Zhang S，Ou J，Dou XX，et al. Progress on the immune regulation of *Radix pseudostellariae* and its extract in animals[J]. Prog Vet Med，2024，45(5)：97-102.

[3] Yang XB，Zhao Y，Lv Y，et al. Protective effect of polysaccharide fractions from *Radix* A. sinensis against tert-butylhydroperoxide induced oxidative injury in murine peritoneal macrophages[J]. J Biochem Mol Biol，2007，40(6)：928-935.

[4] Ge YF，Palanisamy S，Kwon MH，et al. *Angelica gigas* polysaccharide induces CR3-mediated macrophage activation and the cytotoxicity of natural killer cells against HCT-116 cells via NF-κB and MAPK signaling pathways[J]. Int J Biol Macromol，2024，263(Pt 2)：130320.

[5] Ke MY，Wang H，Zhang M，et al. The anti-lung cancer activity of SEP is mediated by the activation and cytotoxicity of NK cells via TLR2/4 *in vivo*[J]. Biochem Pharmacol，2014，89(1)：119-130.

[6] Xie X，Ma LM，Zhou YR，et al. Polysaccharide enhanced NK cell cytotoxicity against pancreatic cancer via TLR4/MAPKs/NF-κB pathway in vitro/vivo[J]. Carbohydr Polym，2019，225：115223.

[7] Li T，Sang T，Song YH，et al. *Houttuynia cordata* polysaccharide alleviates chronic vascular inflammation by suppressing calcium-sensing receptor in rats[J]. J Funct Foods，2022，95：105172.

[8] Jing XQ，Zhou GQ，Zhu AM，et al. RG-I pectin-like polysaccharide from *Rosa chinensis* inhibits inflammation and fibrosis associated to HMGB1/TLR4/NF-κB signaling pathway to improve non-alcoholic steatohepatitis[J]. Carbohydr Polym，2024，337：122139.

[9] Zhang Z，Shan W，Wang YF，et al. *Astragalus* polysaccharide improves diabetic ulcers by promoting M2-polarization of macrophages to reduce excessive inflammation via the β-catenin/NF-κB axis at the late phase of wound-healing[J]. Heliyon，2024，10(4)：e24644.

[10] 焦志强，王雪琴，张慧茹，等. 绞股蓝内生真菌JY25胞外多糖对蛋雏鸡生长性能和肠黏膜免疫功能的影响[J]. 动物营养学报，2016，28(4)：1193-1198.

Jiao ZQ，Wang XQ，Zhang HR，et al. Effects of extracellular polysaccharide extracted from *Gynostemma pentaphyllum* endophytic fungi JY25 on growth performance and intestinal mucosa immune function of laying chicks[J]. Chin J Anim Nutr，2016，28(4)：1193-1198.

[11] 曲瑞莲，李 婧，张亚斌，等. 岩藻多糖对高尿酸血症小鼠肠粘膜屏障功能保护作用[J]. 中国公共卫生，2023，39(9)：1165-1170.

Qu RL, Li J, Zhang YB, et al. *Fucoidan* protects intestinal mucosal barrier function in hyperuricemic mice[J]. Chin J Public Health, 2023, 39(9): 1165-1170.

[12] 陈秋宇，赵 然，孟美杉，等. 海洋硫酸多糖的免疫调节活性研究进展[J]. 食品工业科技，2023，46(1)：413-423.

Chen QY, Zhao R, Meng MS, et al. Research progress on immunomodulatory activity of *Marine sulfate* polysaccharides[J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 46(1): 413-423.

[13] Huo JY, Lu Y, Xia L, et al. Structural characterization and anticomplement activities of three acidic homogeneous polysaccharides from *Artemisia annua*[J]. J Ethnopharmacol, 2020, 247: 112281.

[14] 汤 笛，孙召君，王 蕊，等. 红豆杉多糖对免疫抑制小鼠血清免疫因子的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医，2024(1)：10-16.

Tang D, Sun ZJ, Wang R, et al. Effects of *Taxus* polysaccharide on serum immune factors in immunosuppressed mice[J]. Heilongjiang Anim. Sci. Vet. Med., 2024(1): 10-16.

[15] Tarannum N, Ali F, Khan MS, et al. Bioactive exopolysaccharide from *Limosilactobacillus fermentum* LAB-1: Antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial and antibiofilm properties[J]. Bioact Carbohydr Diet Fibre, 2024, 31: 100409.

[16] Kwun SY, Yoon JA, Kim GY, et al. Isolation of a potential probiotic *Levilactobacillus brevis* and evaluation of its exopolysaccharide for antioxidant and α-glucosidase inhibitory activities[J]. J Microbiol Biotechnol, 2024, 34(1): 167-175.

[17] Yu QT, Li WZ, Liang M, et al. Preparation, characterization, and antioxidant activities of extracts from *Amygdalus persica* L. flowers[J]. Molecules, 2024, 29(3): 633.

[18] 王文韬. 绿豆多糖分离纯化、结构表征、功能特性及体外抗氧化活性研究[D]. 河北农业大学，2022.

Wang WT. Isolation, Purification, Structural Characterization, Functional Properties and Antioxidant Activity of *Mung bean* polysaccharide [D]. Agric. Univ. Hebei, 2022.

[19] 李晓花，任昱光，胡本祥. 党参多糖的提取分离及其抗氧化性研究进展[J]. 农产品质量与安全，2024(1)：75-78.

Li XH, Ren YG, Hu BX. Research progress on extraction, separation and antioxidant activity of *Codonopsis pilosula* polysaccharide[J]. Qual Saf Agro Prod, 2024(1): 75-78.

[20] 李卓颖，郑圣乐，曾俊轩，等. 石仙桃黄酮-多糖抑制鲜切苹果褐变的研究[J]. 现代食品，2024，30(1)：163-166，172.

Li ZY, Zheng SL/Y), Zeng JX, et al. Inhibition of browning of fresh-cut apples by flavonoids-polysaccharides from *Pholidota chinensi*[J]. Mod Food, 2024, 30(1): 163-166, 172.

[21]]晋 雅，彭国庆，李 萍，等. 猴头菇多糖的理化性质及其神经保护活性[J]. 现代食品科技，2024，40(9)：178-187.

Jin Y, Peng GQ, Li P, et al. Physicochemical properties and neuroprotective activity of polysaccharides from Hericium erinaceus[J]. Mod Food Sci Technol, 2024, 40(9): 178-187.

[22] 贺 双，段琴琴，李 婷. 香菇多糖联合TX方案对蒽环类耐药晚期三阴性乳腺癌患者毒副反应程度、免疫功能、COX-2及TOPOⅡα的影响[J]. 临床医学研究与实践，2023，9(22)：85-88.

He S, Duan QQ, Li T. Effects of lentinan combined with TX regimen on the degree of toxic side effects, immune function, COX-2 and TOPOⅡαin patients with anthracycline-resistant advanced triple-negative breast cancer[J]. Clin Res Pract, 2023, 9(22): 85-88.

[23] 罗付禹，王 宣，刘佳维. 多糖金属配合物的制备及其生物活性研究进展[J]. 食品工业，2023，44(12)：190-195.

Luo FY, Wang X, Liu JW. Advances in the synthesis and bioactivities of polysaccharide metal complexes[J]. Food Ind, 2023, 44(12): 190-195.

[24] 景永帅，张瑞娟，吴兰芳，等. 北沙参多糖铁配合物的制备、结构特征及生物活性[J]. 食品科学，2018，39(24)：65-70.

Jing YS, Zhang RJ, Wu LF, et al. Preparation, structural characteristics and bioactivity of polysaccharide-iron complex from *Radix* glehniae[J]. Food Sci, 2018, 39(24): 65-70.

[25] 张喜峰，崔 晶，王文琴，等. 螺旋藻多糖铁(Ⅲ)配合物的制备、抗氧化及淋巴细胞增殖活性[J]. 精细化工，2019，36(6)：1097-1103.

Zhang XF, Cui J, Wang WQ, et al. Preparation, antioxidant and lymphocyte proliferation activities of *Spirulina* polysaccharide iron(Ⅲ) complex[J]. Fine Chem, 2019, 36(6): 1097-1103.

[26] 顾冰飞，赵圆圆，陈义勇. 杏鲍菇多糖锌螯合物的制备工艺及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发，2019，40(4)：97-103.

Gu BF, Zhao YY, Chen YY. Preparation technology of *Pleurotus eryngii* polysaccharides-zinc(Ⅱ) chelate and its antioxidant activities[J]. Food Res Dev, 2019, 40(4): 97-103.

[27] 刘海朝，金昱彤，张睿瑄，等. 黄芪多糖通过调控T细胞增敏PD-L1阻断剂抗肺腺癌作用的机制初探[J]. 现代肿瘤医学，2024，10(9)：1573-1580.

Liu HZ, Jin YT, Zhang RX, et al. A preliminary investigation of the mechanism of the anti-lung adenocarcinoma effect of *Astragalus* polysaccharide by modulating T cell sensitization of PD-L1 blockers[J]. J Mod Oncol, 2024, 10(9): 1573-1580.

[28] 闵 翼，张曦尧，向东阳，等. 芡茎多糖通过诱导$CD4^+$T、$CD8^+$T和NK细胞的浸润促进小鼠肺癌LLC细胞凋亡[J]. 南京中医药大学学报，2023，9(7)：637-644.

Min Y, Zhang XY, Xiang DY, et al. *Euryale ferox* petioles and pedicels polysaccharide promoted cell apoptosis of murine lung cancer LLC cells by inducing cellular infiltration of $CD4^+$T, $CD8^+$T and NK cells[J]. J Nanjing Univ Tradit Chin Med, 2023, 9(7): 637-644.

[29] 沈维亚，吴朝文. 芦荟多糖对自身免疫性甲状腺炎小鼠辅助型T细胞亚群的影响[J]. 海军医学杂志，2023，44(8)：783-787.

Shen WY, Wu CW. Effects of aloe vera polysaccharide on helper T cell subsets in autoimmune thyroiditis mice[J]. J Navy Med, 2023, 44(8): 783-787.

[30] Xiao H, Wang YP, Wang ZL, et al. *Angelica sinensis* polysaccharides ameliorated 5-Fluorouracil-induced damage of early B cell progenitors by alleviating oxidative stress of IL-7 producing mesenchymal stem and progenitor cells[J]. Biomedecine Pharmacother, 2023, 167: 115599.

[31] 陈秀红，赵丹萍，李欣昱，等. 灵芝孢子多糖作为流感疫苗佐剂的免疫作用研究[J]. 吉林中医药，2023，43(12)：1442-1448.

Chen XH, Zhao DP, Li XY, et al. Study on immune effect of *Ganoderma lucidum* spore polysaccharide as adjuvant of influenza vaccine[J]. Jilin J Chin Med, 2023, 43(12): 1442-1448.

（责任编辑：李青颖）

本文引用格式：

周雨萱，韩 冷，柏丁源，等. 天然多糖介导免疫调控作用研究进展[J]. 重庆医科大学学报，2025，50(7)：940-944.