

• 慢病专题: 呼吸系统相关疾病 •

舒更葡糖钠对术后肺部并发症影响的研究进展

黄洁怡, 丁登峰[△]

(暨南大学第二临床医学院/深圳市人民医院麻醉科, 广东 深圳 518020)

[摘要] 术后肺部并发症(PPCs)是围手术期常见的一种并发症。肌松药导致的术后残余肌松作为 PPCs 重要危险因素,通过上呼吸道功能障碍、保护性功能障碍、低通气量等机制影响患者预后。舒更葡糖钠作为一种新型选择性肌松拮抗剂,通过特异性结合氨基甾体类肌松药可快速逆转术后残余肌松,降低 PPCs 风险。该文综述了舒更葡糖钠对 PPCs 影响的作用机制及研究进展。

[关键词] 舒更葡糖钠; 术后肺部并发症; 术后残余肌松; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2025.12.011 **中图法分类号:**R614

文章编号:1009-5519(2025)12-2788-05 **文献标识码:**A

**Research progress on the effect of sugammadex sodium on
postoperative pulmonary complications**

HUANG Jieyi, DING Dengfeng[△]

(Department of Anesthesiology, the Second Clinical School of Jinan University/
Shenzhen People's Hospital, Shenzhen, Guangdong 518020, China)

[Abstract] Postoperative pulmonary complications(PPCs) are a common complication during the perioperative period. Postoperative residual muscle relaxation caused by muscle relaxants is an important risk factor for PPCs, which affects patient prognosis through mechanisms such as upper respiratory dysfunction, protective dysfunction, and low ventilation. Sugammadex sodium, as a novel selective muscle relaxation antagonist, can rapidly reverse residual muscle relaxation after surgery and reduce the risk of PPCs by specifically binding to amino steroidal muscle relaxants. The article reviews the mechanism and research progress of the effect of sugammadex sodium on PPCs.

[Key words] Sugammadex sodium; Postoperative pulmonary complications; Postoperative residual muscle relaxation; Review

术后肺部并发症(PPCs)是围手术期常见的一种并发症,包含呼吸道感染、呼吸衰竭、胸腔积液、肺不张、气胸、支气管痉挛及吸入性肺炎等多种临床症状,发生率在 $<1\% \sim 23\%$ 之间,高于围手术期心脏并发症^[1]。研究显示,术后发生 PPCs 的患者 30 d 和 1 年死亡率分别为 22.0% 和 45.9%,显著高于未发生 PPCs 患者的 2.0% 和 8.7%^[2]。PPCs 的危险因素分为可变因素与不可变因素,其中年龄、手术类型、术前低血氧饱和度等不可变因素难以人为干预,因而临床上常针对可变危险因素进行优化管理。肌松药导致的术后残余肌松(PRNB)是 PPCs 可变危险因素之一,避免围手术期 PRNB 在 PPCs 的防治中发挥着重要作用^[1]。相较传统肌松拮抗剂,舒更葡糖钠可以更

快速、安全地避免 PRNB,这为减少 PPCs 提供了新方向。本文综述了舒更葡糖钠对 PPCs 影响的作用机制及研究进展,以期在未来在麻醉实践中应用舒更葡糖钠提供临床思路。

1 PRNB 与 PPCs

肌松药完善的肌肉松弛给气管插管与手术开展创造了有利条件,是现代手术高速发展的坚实基础。4 个成串刺激比率(TOFR)是肌松监测的重要客观标准, <0.9 即可考虑存在 PRNB^[3]。研究表明,麻醉医生根据临床经验判断患者达到拔除气管导管指征时,仍有约三分之一的患者 $\text{TOFR} < 0.6$ ^[4]。BUCH-EERY 等^[5]研究表明,36.6% 的患者在麻醉恢复室中出现 PRNB,其中 46.7% 至少出现 1 种 PPCs,提示围

作者简介:黄洁怡(2000—),硕士研究生在读,住院医师,主要从事麻醉学肺部并发症方面相关研究。 [△] **通信作者,** E-mail: df_ding@sina.com。

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250825.1923.014\(2025-08-26\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250825.1923.014(2025-08-26))

手术期 PRNB 的发生非常普遍,而且与 PPCs 的发生密切相关。

2 PRNB 影响 PPCs 的机制

2.1 上呼吸道功能障碍 TOFr ≥ 0.7 时,大多数呼吸变量如潮气量、肺活量、吸气与呼气驱动力基本恢复基线水平,因而临床上将这个数值视为气管拔管的指征。但研究表明,维持上呼吸道功能的特定肌群如颏舌肌对 PRNB 表现出更高的敏感性^[6]。颏舌肌在吸气过程中通过对抗气道内压力和气道塌陷力,从而维持上呼吸道功能,其肌力下降使患者容易发生上气道塌陷风险,从而增加 PPCs 发生率^[7]。

2.2 保护性功能障碍 研究表明,极小程度的 PRNB 即可影响咽部肌群功能,这会导致吞咽反射的启动延迟、咽部协调性损伤,从而损伤吞咽过程中的气道保护性反射,使误吸风险增加^[8],而误吸是吸入性肺炎的主要原因。此外,PRNB 还影响膈肌、胸壁肌肉的力量,减弱机体通过咳嗽清除分泌物的保护性功能,使患者更容易发生呼吸道感染和吸入性肺炎^[9-10]。

2.3 低通气量 PRNB 所致的呼吸肌功能障碍可引起用力肺活量减少,导致肺泡有效通气量不足^[11]。TOFr < 0.7 时,低氧通气反应(HVR)显著受损,这可能是由于肌松药影响颈动脉体化学敏感性,减少缺氧时的神经放电,降低颈动脉体的神经传递反应,从而干扰机体对缺氧的通气反应,加重低氧血症^[6]。呼吸肌功能障碍和 HVR 功能受损是 PRNB 引起低通气量的主要原因^[12]。这种低通气量可导致低氧血症、高碳酸血症及肺不张,进而使患者易出现术后肺炎^[6,11]。

3 舒更葡糖钠对 PPCs 的影响

舒更葡糖钠是由葡萄糖结构和环糊精结构组成的 γ -环糊精衍生物,可特异性结合血浆中游离的罗库溴铵和维库溴铵,形成紧密、稳定的复合物后从肾脏排出^[13]。与传统肌松拮抗剂抗胆碱酯酶药物相比,舒更葡糖钠逆转 PRNB 的效果快速且彻底,不易复发,无须使用胆碱能药物,且不良反应少^[14]。但舒更葡糖钠高昂的费用限制了其临床应用,据统计欧洲只有 12% 的患者接受其治疗^[9],目前常用于有 PPCs 危险因素如肥胖、老年、小儿、某些特殊手术类型、深度肌松、呼吸系统高风险等患者。

3.1 肥胖患者 肥胖患者形态功能上的改变使其接受全身麻醉和大手术后容易出现上呼吸道阻塞、通气不足、肺不张和低氧血症,导致 PPCs 发生,并且肌松药在肥胖患者中的作用时间较体重正常患者长,使得 PRNB 高发^[15],从而进一步增加 PPCs 发生率。CARRON 等^[16]研究发现,与新斯的明相比,舒更葡糖钠可降低 PRNB 发生率,因而建议在降低肥胖患者

PPCs 发生率的措施中优先考虑舒更葡糖钠。此外,肥胖患者通常并存阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征(OSAHS)。研究发现,术中应用肌松药的 OSAHS 患者发生 PRNB、低氧血症和呼吸衰竭的风险高,与新斯的明相比,使用舒更葡糖钠作为肌松拮抗剂在降低 PPCs 风险方面更占优势^[15]。

3.2 老年患者 老年患者肌松药代谢时间延长,其发生 PRNB 的风险显著增高。研究显示,老年患者 PRNB 发生率是年轻人的近 2 倍^[17]。且老年患者肺顺应性和肺功能严重减退,使得围手术期老年患者 PPCs 高发^[18]。1 项针对 ASA 分级 III~IV 级且年龄大于或等于 75 岁高龄患者的研究表明,相较新斯的明,舒更葡糖钠可显著降低术后肺炎发生率^[19]。另一项研究发现,接受长时间择期手术的老年患者应用舒更葡糖钠,可降低肺炎或呼吸衰竭风险,且效果优于新斯的明^[20]。此外,与新斯的明相比,老年患者使用舒更葡糖钠能更快拮抗肌松药所致的 PRNB,降低早期 PPCs 发生率^[21]。但有学者持不同意见,其以接受长时间手术的老年患者为研究对象,结果显示,舒更葡糖钠与新斯的明对 PPCs 的影响无显著差异^[22]。造成研究结果差异的原因可能是老年患者各项脏器功能退化且合并其他系统疾病,使得影响 PPCs 发生率的因素众多,掩盖了舒更葡糖钠的保护作用。此外,PPCs 是各项肺部临床症状的统称,临床症状的诊断标准及观察时间点不一也是造成差异的重要原因之一。

3.3 小儿患者 小儿由于神经肌肉传递结构不成熟,细胞内外肌松药分布与成人不同,使其对 PRNB 更敏感、PPCs 发生率更高^[23]。研究证实,早期拔管可以降低接受心脏手术小儿患者 PPCs 发生率,舒更葡糖钠较新斯的明可以缩短此类患者拔管时间,降低术后肺不张发生率^[24]。另一研究表明,心脏手术小儿患者使用舒更葡糖钠,不仅可缩短术后拔管时间,还能通过减少 C 反应蛋白、降钙素原等炎症因子释放,降低肺部炎症发生风险^[25]。但另有研究发现,与新斯的明相比,尽管舒更葡糖钠能更快速地拮抗非心脏手术小儿患者 PRNB,但并未降低 PPCs 发生率^[26]。舒更葡糖钠不影响小儿患者 PPCs 发生率的原因可能与小儿患者合并其他疾病、手术类型、舒更葡糖钠剂量等因素有关。

3.4 特殊手术类型 机器人辅助腹腔镜前列腺切除术(RALP)需要建立二氧化碳气腹和 Trendelenburg 体位。二氧化碳气腹可致患者高碳酸血症,而 Trendelenburg 体位可使患者肺容量、肺顺应性、功能残气量和肺活量下降、通气-血流比值失衡、气道压力峰值升高,且 RALP 患者多高龄,更容易发生 PPCs。研究

表明,对比新斯的明,舒更葡萄糖钠可改善 RALP 患者膈肌肌电活动,增加潮气量,增强气道分泌物清除能力,抑制肺不张进展,降低 PPCs 发生率^[27]。

主动脉置换术患者常合并心力衰竭、房颤、外周血管疾病或继发于心力衰竭的肺功能障碍,增加 PPCs 发生风险。研究表明,舒更葡萄糖钠较新斯的明能更有效降低主动脉置换术患者 PPCs 尤其是胸腔积液发生率^[28]。肺叶切除术不仅对肺部组织造成创伤,而且肺叶减少后患者呼吸储备下降,对 PRNB 耐受性差,使得 PPCs 高发^[24]。研究表明,与新斯的明相比,舒更葡萄糖钠可减少胸腔镜辅助肺叶切除术患者 PRNB,降低 PPCs 发生率,缩短住院时间^[29]。此外,舒更葡萄糖钠还可降低开放性肺叶切除术患者 PPCs 发生率^[30]。但也有研究显示,舒更葡萄糖钠与新斯的明在降低胸腔镜辅助肺叶切除术患者 PPCs 风险上无差异^[31]。肺叶切除范围大小、手术时间长短、开胸手术与胸腔镜辅助手术的区别、是否使用肺保护性通气策略均影响 PPCs 的发生^[32],这些因素的不一致可能导致不同研究结果。

3.5 接受深度肌松患者 腹腔镜手术为了获得更好的手术视野和操作空间,对肌松提出更高要求。近年来,随着腹腔镜手术数量急剧增加,深度肌松已被广泛应用^[33]。然而研究表明,PPCs 与肌松药的使用呈剂量依赖性,与肌松药的种类和使用方法无关^[34]。深度肌松无疑会增加 PPCs 风险。研究表明,腹腔镜结直肠手术患者使用舒更葡萄糖钠拮抗深度肌松,可以降低术后自主呼吸恢复延迟风险,改善围手术期氧合,降低 PPCs 发生率^[35]。腹腔镜妇科手术使用舒更葡萄糖钠,能充分拮抗深肌松状态所致 PRNB,促进自主呼吸早期恢复,降低 PPCs 发生率^[36]。此外,达芬奇机器人手术精细的操作同样要求深度肌松以避免患者体动。研究显示,达芬奇机器人手术中持续输注罗库溴铵维持深度肌松后,使用舒更葡萄糖钠能减少患者呼吸道感染及肺炎发生率^[37]。

3.6 呼吸系统高风险患者 加泰罗尼亚外科患者呼吸系统风险评估系统(ARISCAT)量化了 PPCs 风险,能够有效地早期识别具有临床意义的 PPCs 高危人群^[38]。研究发现,在降低符合 ARISCAT 风险指数患者的 PPCs 发生率方面,舒更葡萄糖钠效果优于新斯的明^[39]。另有研究表明,术前通过肺功能检查而诊断为呼吸功能障碍的患者,在围手术期使用舒更葡萄糖钠较新斯的明能降低 PRNB 发生率,缩短自主呼吸恢复时间与拔管时间,减少 PPCs 发生率^[40]。

4 小结与展望

舒更葡萄糖钠作为新型肌松拮抗剂,具有快速、彻底拮抗 PRNB 的特性,从而使其降低围手术期 PPCs

发生率成为可能,然而高昂的成本和现有研究对 PPCs 影响的争议限制了其广泛应用。影响 PPCs 发生率的因素众多,且诊断标准及观察时间也不一致,这使得关于舒更葡萄糖钠对 PPCs 影响的研究得出不同结论,未来的研究应着眼于以下几方面:第一,高风险 PPCs 患者术后 PPCs 发生率更高,以此类患者为研究对象更有临床意义,但需要尽量控制各项混杂因素;第二,不同手术类型和人群 PPCs 发生率不一,可以对特定的手术类型和人群进行细化研究;第三,统一 PPCs 评估工具和观察时间,并开展多中心、大样本的前瞻性研究,可以为舒更葡萄糖钠临床应用提供更具说服力的证据;第四,使用舒更葡萄糖钠的最佳时机和剂量,尤其是对于老年和小儿患者,仍需进一步研究。舒更葡萄糖钠对 PPCs 的保护作用若被证实,其临床应用不仅可改善患者预后,还可降低 PPCs 所致的高昂住院费用,使其更能发挥临床价值。

参考文献

[1] LUSQUINHOS J,TAVARES M,ABELHA F. Postoperative pulmonary complications and perioperative strategies: A systematic review [J]. *Cureus*, 2023, 15 (5): e38786.

[2] ELEFTERION B,CIRENEI C,KIPNIS E, et al. Intraoperative mechanical power and postoperative pulmonary complications in noncardiothoracic elective surgery patients: A 10-year retrospective cohort study[J]. *Anesthesiology*, 2024, 140(3): 399-408.

[3] FUCHS-BUDER T,ROMERO C S,LEWALD H, et al. Peri-operative management of neuromuscular blockade: A guideline from the European society of anaesthesiology and intensive care[J]. *Eur J Anaesthesiol*, 2023, 40 (2): 82-94.

[4] SAAGER L,MAIESE E M,BASH L D, et al. Incidence, risk factors, and consequences of residual neuromuscular block in the United States: The prospective, observational, multicenter RECITE-US study[J]. *J Clin Anesth*, 2019, 55: 33-41.

[5] BUCHEERY B A,ISA H M,RAFIQ O, et al. Residual neuromuscular blockade and postoperative pulmonary complications in the post-anesthesia care unit: A prospective observational study [J]. *Cureus*, 2023, 15 (12): e51013.

[6] MURPHY G S,BRULL S J. Residual neuromuscular block: Lessons unlearned. Part I: Definitions, incidence, and adverse physiologic effects of residual neuromuscular block[J]. *Anesth Analg*, 2010, 111(1): 120-128.

[7] HERBSTREIT F, PETERS J, EIKERMANN M. Impaired upper airway integrity by residual neuromuscular

- blockade; Increased airway collapsibility and blunted genioglossus muscle activity in response to negative pharyngeal pressure[J]. *Anesthesiology*, 2009, 110(6):1253-1260.
- [8] BATTAGLINI D, DE ROSA S. Aspiration after anesthesia: Chemical versus bacterial, differential diagnosis, management, and prevention[J]. *Semin Respir Crit Care Med*, 2024, 45(6):659-668.
- [9] KHETERPAL S, VAUGHN M T, DUBOVOY T Z, et al. Sugammadex versus neostigmine for reversal of neuromuscular blockade and postoperative pulmonary complications (STRONGER): A multicenter matched cohort analysis[J]. *Anesthesiology*, 2020, 132(6):1371-1381.
- [10] SEEHOLZER L F, JULIUS D. Neuroendocrine cells initiate protective upper airway reflexes[J]. *Science*, 2024, 384(6693):295-301.
- [11] FARHAN H, MORENO-DUARTE I, MCLEAN D, et al. Residual paralysis: Does it influence outcome after ambulatory surgery? [J]. *Curr Anesthesiol Rep*, 2014, 4(4):290-302.
- [12] FUCHS-BUDER T, NEMES R, SCHMARTZ D. Residual neuromuscular blockade: Management and impact on postoperative pulmonary outcome[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2016, 29(6):662-667.
- [13] HAWKINS J, KHANNA S, ARGALIOUS M. Sugammadex for reversal of neuromuscular blockade: Uses and limitations[J]. *Curr Pharm Des*, 2019, 25(19):2140-2148.
- [14] HRISTOVSKA A M, DUCH P, ALLINGSTRUP M, et al. The comparative efficacy and safety of sugammadex and neostigmine in reversing neuromuscular blockade in adults. A Cochrane systematic review with meta-analysis and trial sequential analysis [J]. *Anaesthesia*, 2018, 73(5):631-641.
- [15] HAFEEZ K R, TUTEJA A, SINGH M, et al. Postoperative complications with neuromuscular blocking drugs and/or reversal agents in obstructive sleep apnea patients: A systematic review[J]. *BMC Anesthesiol*, 2018, 18(1):91.
- [16] CARRON M, TAMBURINI E, IEPPARIELLO G, et al. Reversal of neuromuscular block with sugammadex compared with neostigmine and postoperative pulmonary complications in obese patients: meta-analysis and trial sequential analysis[J]. *Br J Anaesth*, 2023, 130(6):e461-e463.
- [17] CARRON M, BERTONCELLO F, IEPPARIELLO G. Profile of sugammadex for reversal of neuromuscular blockade in the elderly: Current perspectives[J]. *Clin Interv Aging*, 2018, 13:13-24.
- [18] TRAN D, RAJWANI K, BERLIN D A. Pulmonary effects of aging[J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2018, 31(1):19-23.
- [19] LEDOWSKI T, SZABÓ-MAÁK Z, LOH P S, et al. Reversal of residual neuromuscular block with neostigmine or sugammadex and postoperative pulmonary complications: A prospective, randomised, double-blind trial in high-risk older patients[J]. *Br J Anaesth*, 2021, 127(2):316-323.
- [20] COLQUHOUN D A, VAUGHN M T, BASH L D, et al. Association between choice of reversal agent for neuromuscular block and postoperative pulmonary complications in patients at increased risk undergoing non-emergency surgery; STIL-STRONGER, a multicentre matched cohort study[J]. *Br J Anaesth*, 2023, 130(1):e148-e159.
- [21] CARRON M, TESSARI I, LINASSI F. Sugammadex compared with neostigmine in reducing postoperative pulmonary complications in older patients: A meta-analysis[J]. *Br J Anaesth*, 2022, 128(4):e259-e262.
- [22] TOGIOKA B M, YANEZ D, AZIZ M F, et al. Randomised controlled trial of sugammadex or neostigmine for reversal of neuromuscular block on the incidence of pulmonary complications in older adults undergoing prolonged surgery[J]. *Br J Anaesth*, 2020, 124(5):553-561.
- [23] SCHEFFENBICHLER F T, RUDOLPH M I, FRIEDRICH S, et al. Effects of high neuromuscular blocking agent dose on post-operative respiratory complications in infants and children[J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2020, 64(2):156-167.
- [24] LI L, JIANG Y, ZHANG W. Sugammadex for fast-track surgery in children undergoing cardiac surgery: A randomized controlled study [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2021, 35(5):1388-1392.
- [25] XIAOBING L, YAN J, WANGPING Z, et al. Effects of sugammadex on postoperative respiratory management in children with congenital heart disease: A randomized controlled study [J]. *Biomed Pharmacother*, 2020, 127:110180.
- [26] BELTRAN R J, MPODY C, NAFIU O O, et al. Association of sugammadex or neostigmine with major postoperative pulmonary complications in children [J]. *Anesth Analg*, 2022, 135(5):1041-1047.
- [27] YU J, PARK J Y, LEE Y, et al. Sugammadex versus neostigmine on postoperative pulmonary complications after robot-assisted laparoscopic prostatectomy: A propensity score-matched analysis [J]. *J Anesth*, 2021, 35(2):262-269.
- [28] YU H, ZUO Y, XU Z, et al. Comparison effects of two muscle relaxant strategies on postoperative pulmonary complications in transapical transcatheter aortic valve implantation: A propensity score-matched analysis [J]. *J Cardiothorac Surg*, 2023, 18(1):50.

[29] YU Y, WANG H, BAO Q, et al. Sugammadex versus neostigmine for neuromuscular block reversal and post-operative pulmonary complications in patients undergoing resection of lung cancer[J]. J Cardiothorac Vasc Anesth, 2022, 36(9): 3626-3633.

[30] SONG S W, YOO K Y, RO Y S, et al. Sugammadex is associated with shorter hospital length of stay after open lobectomy for lung cancer: A retrospective observational study[J]. J Cardiothorac Surg, 2021, 16(1): 45.

[31] LEE T Y, JEONG S Y, JEONG J H, et al. Comparison of postoperative pulmonary complications between sugammadex and neostigmine in lung cancer patients undergoing video-assisted thoracoscopic lobectomy: A prospective double-blinded randomized trial[J]. Anesth Pain Med(Seoul), 2021, 16(1): 60-67.

[32] KAUFMANN K, HEINRICH S. Minimizing postoperative pulmonary complications in thoracic surgery patients[J]. Curr Opin Anaesthesiol, 2021, 34(1): 13-19.

[33] BRUINTJES M H, VAN HELDEN E V, BRAAT A E, et al. Deep neuromuscular block to optimize surgical space conditions during laparoscopic surgery: A systematic review and meta-analysis[J]. Br J Anaesth, 2017, 118(6): 834-842.

[34] SASAKI N, MEYER M J, MALVIYA S A, et al. Effects of neostigmine reversal of nondepolarizing neuromuscular blocking agents on postoperative respiratory outcomes: A prospective study[J]. Anesthesiology, 2014, 121(5): 959-968.

[35] 刘毅, 姜辉, 吴歆, et al. 不同神经肌肉阻滞(NMB)深度对腹腔镜结直肠手术条件、围手术期肺氧合功能及术后肺部并发症的影响[J]. 复旦学报(医学版), 2020, 47(3): 392-399.

[36] 陈昊, 焦博, 鲁佩, 等. 舒更葡糖钠逆转深度神经肌肉阻滞对腹腔镜术后肺部并发症的影响[J]. 中国医院药学杂志, 2021, 41(19): 1993-1997.

[37] CHENG K I, TSE J, LI T Y. The strategy to use sugammadex to reduce postoperative pulmonary complications after da vinci surgery: A retrospective study[J]. J Pers Med, 2022, 12(1): 52.

[38] CANET J, GALLART L, GOMAR C, et al. Prediction of postoperative pulmonary complications in a population-based surgical cohort[J]. Anesthesiology, 2010, 113(6): 1338-1350.

[39] BAI Y X, HAN J J, LIU J, et al. Sugammadex reduced the incidence of postoperative pulmonary complications in susceptible patients identified by ARISCAT risk index: Systematic review and meta-analysis[J]. Adv Ther, 2023, 40(9): 3784-3803.

[40] JI Y, YUAN H, CHEN Y, et al. Sugammadex is associated with reduced pulmonary complications in patients with respiratory dysfunction[J]. J Surg Res, 2023, 290: 133-140.

(收稿日期: 2025-04-11 修回日期: 2025-08-28)

(上接第 2787 页)

[2] 李宏森, 梁疆莉, 杨净思. 百日咳流行病学特征及防控进展[J]. 中国生物制品学杂志, 2024, 37(3): 361-369.

[3] 宁桂军, 吴丹, 李军宏, 等. 全球 2010—2014 年白喉、破伤风和百日咳免疫预防和发病水平现况分析[J]. 中国疫苗和免疫, 2016, 22(2): 159-164.

[4] 王安娜, 贺晴, 陶霞, 等. 广州市 2019 年健康人群百日咳抗体水平调查[J]. 热带医学杂志, 2022, 22(12): 1734-1737.

[5] 蔡世轩, 李杰, 代函鹰, 等. 2021—2022 年浙江省义乌市和河南省永城市健康人群百日咳抗体水平调查[J]. 中国预防医学杂志, 2024, 25(3): 279-282.

[6] 张晓璐, 彭金华, 马莹莹, 等. 2020—2022 年许昌市 1~79 岁健康人群百日咳、白喉和破伤风 IgG 抗体水平的分析[J]. 微生物免疫学进展, 2024, 52(2): 66-71.

[7] 付思美, 王锦, 李春梅, 等. 吉林省 2017—2021 年 2-75 岁健康人群百日咳毒素抗体水平调查[J]. 中国疫苗和免疫, 2023, 29(4): 402-406.

[8] 李文豪, 彭远舟, 黄静, 等. 2021 年深圳市学龄期儿童百日咳 IgG 抗体水平调查[J]. 中国疫苗和免疫, 2021, 27(6): 639-642.

[9] 于金太, 段永翔, 胡鹏威, 等. 2021 年深圳市南山区 287 名大学新生百日咳和白喉及破伤风抗体水平调查[J]. 热带医学杂志, 2024, 24(2): 284-289.

[10] 国家卫生健康委员会. 国家免疫规划疫苗儿童免疫程序及说明(2021 年版)[J]. 中国病毒病杂志, 2021, 11(4): 241-245.

[11] 张梦, 吴丹, 李艺星, 等. 国外百日咳疫苗免疫原性与保护效果的关系研究进展[J]. 中国疫苗和免疫, 2022, 28(4): 481-485.

[12] 刘美真, 彭晓放, 张薇, 等. 2018 年广东省人群百日咳毒素 IgG 抗体水平调查[J]. 华南预防医学, 2022, 48(2): 210-213.

[13] 商婷婷. 百日咳疾病的经济负担分析[J]. 现代医药卫生, 2019, 35(23): 117-119.

[14] 朱瑶, 何寒青, 唐学雯, 等. 中国人群百日咳血清流行病学研究系统评价[J]. 中国疫苗和免疫, 2022, 28(1): 115-120.

[15] DE MELKER H E, VERSTEEGH F G A, SCHELLEKENS J F P, et al. The incidence of Bordetella pertussis infections estimated in the population from a combination of serological surveys[J]. Infect, 2006, 53(2): 106-113.

(收稿日期: 2025-03-19 修回日期: 2025-08-30)