

• 综 述 •

硫酸镁在围手术期麻醉实践中的研究进展*

徐海¹综述,刘莺歌²,王雨欣²,王馨馨³,张小宝^{3,4△}审校

(1. 锦州医科大学,辽宁 锦州 121001;2. 南京医科大学连云港临床医学院,江苏 连云港 222000;
3. 徐州医科大学附属连云港医院麻醉科,江苏 连云港 222000;4. 南京医科大学康达学院第一
附属医院麻醉科,江苏 连云港 222000)

[摘 要] 镁是人体中第二丰富的阳离子,在机体的多种生理过程中都发挥着重要作用,硫酸镁作为镁的药理形式,是一种天然的 N-甲基-D-天冬氨酸受体阻滞剂及钙通道阻滞剂。早先研究发现它可以用于防治子痫前期患者癫痫发作,还被用于治疗心律失常和哮喘等疾病。随着研究不断深入,其在围手术期麻醉过程中的作用也愈益突出。它能够对麻醉药物产生协同作用,减少麻醉药物的使用,还具有抗炎、抑制应激反应、维持循环稳定及神经保护的作用。应用硫酸镁的方式不同可能产生不同的效果,本文就硫酸镁在围手术期麻醉过程中的不同实践进行综述。

[关键词] 硫酸镁; 麻醉; 围手术期; 镇痛; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2024.12.023

中图法分类号:R614

文章编号:1009-5519(2024)12-2087-07

文献标识码:A

Research progress of magnesium sulfate in perioperative anesthesia practice*

XU Hai¹, LIU Yingge², WANG Yuxin², WANG Xinxin³, ZHANG Xiaobao^{3,4△}

(1. Jinzhou Medical University, Jinzhou, Liaoning 121001, China; 2. Lianyungang Clinical Medical College, Nanjing Medical University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China; 3. Department of Anesthesiology, Lianyungang Hospital Affiliated to Xuzhou Medical University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China; 4. Department of Anesthesiology, First Affiliated Hospital of Kangda College, Nanjing Medical University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China)

[Abstract] Magnesium is the second most abundant cation in the human body and plays an important role in various physiological processes of the body. Magnesium sulfate, as a pharmacological form of magnesium, is a natural N-methyl-D-aspartate receptor blocker and calcium channel blocker. Previous studies have found that it can be used to prevent seizures in patients with preeclampsia, and is also used to treat diseases such as arrhythmias and asthma. With the deepening of research, its role in perioperative anesthesia is becoming more and more prominent. It can have a synergistic effect on anesthetic drugs, reduce the use of anesthetic drugs, and also has anti-inflammatory, inhibiting stress response, maintaining circulatory stabilizing and neuroprotective effects. Different ways of applying magnesium sulfate may produce different effects. This article reviews the different practices of magnesium sulfate in the perioperative anesthesia process.

[Key words] Magnesium sulfate; Anesthesia; Perioperative; Analgesia; Review

镁在多种细胞功能中扮演重要角色,能够辅助激活并调节 300 多种酶促反应,参与能量代谢、核酸结构稳定性、蛋白质合成及神经肌肉功能等多种生理过程^[1]。研究发现,镁在各种疾病状态下都有积极作用,尤其在围手术期多模式镇痛管理和治疗哮喘方面的作用引起了人们的广泛关注^[2-3]。大量证据表明,硫酸镁在治疗指数及成本效益方面处于优势地位,合理使用可以提高手术效果和患者满意度。本文主要介绍了硫酸镁在围手术期麻醉过程中的实践和新进

展,探讨其在临床中的潜在价值。

1 镁的生理及作用机制

镁是生物体中第 4 种常见的矿物盐,位列细胞内阳离子的第 2 位,仅次于钾。镁具有调节多种离子通道的功能,当细胞内镁离子不足时,会促使钾离开细胞,影响膜电位,改变传导和细胞代谢^[4]。镁还作用于肌浆网钙通道及膜内电位依赖性 L 型钙通道,通过抑制依赖于肌浆通道的钙激活,限制了钙从肌浆网流出^[1,4]。虽然镁没有直接的抗伤害作用,但其可以通

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81970348);江苏省六大人才高峰项目(WSW-329);连云港市第一人民医院临床研究基金项目(LC13)。

△ 通信作者, E-mail: hotdog100@163.com。

过阻断 NMDA 受体来抑制钙离子进入细胞,从而产生镇痛作用,这种镇痛作用与防止外周组织损伤引起的中枢敏化有关^[1,3]。同时,镁作为 N-甲基-D-天冬氨酸受体拮抗剂和儿茶酚胺释放抑制剂,还具有抑制中枢神经系统的作用^[5]。

2 围手术期镁血清浓度变化的影响

人体内的镁含量与饮食摄入量密切相关,成人每天所需的镁量为 250~350 mg,而儿童、孕妇或哺乳期妇女需要额外增加 100~150 mg^[6]。机体内的镁稳态主要由肠道吸收和肾脏排泄调节^[7]。在围手术期,血液中的镁浓度可能发生各种变化。研究显示,在麻醉期间患者的血镁浓度通常会下降,并且在手术后 3 d 左右会趋于恢复正常^[8]。低镁血症和高镁血症的发病率分别为 8.43% 和 1.78%,女性低镁血症的发生率高于男性,65 岁以上的患者低镁血症的发病率较高,且在老年病科、肿瘤科和重症监护室中的患者低镁血症的发病率最高^[9]。在临床实践中,镁紊乱和明显的低镁血症很常见,特别是在老年住院患者中。因此,需要了解镁的生理作用,密切监测患者的镁状态,以避免因镁紊乱而引发的不良后果。

2.1 低镁血症 低镁血症是一种由饮食摄入不足和(或)胃肠道及肾脏损失引起的疾病。其定义为血浆镁浓度低于 0.7 mmol/L,并且当浓度低于 0.5 mmol/L 时则属于重度低镁。尽管体内镁耗竭是重度低镁的主要原因,但在血浆浓度正常的情况下,也可能存在缺乏镁的情况^[10-11]。研究表明,绝大多数老年人的镁摄入量未达到膳食所需的平均水平^[12],并且由于各种并发症和增加利尿镁排泄药物等原因,老年人患低镁血症的风险也较高^[13]。

TOHME 等^[14]观察了 200 例接受冠状动脉旁路移植术的患者,并发现在术前 3 d 应用镁可降低术后心房颤动的发生率。另一项回顾性研究中也指出,低镁血症患者心电图参数异常,如 P 波持续时间、QT 间期、T 波峰末间期及 T 波峰末间期/QT 间期比值,这可能是心房去极化和心室复极化间不均衡的表现,与心源性猝死的风险相关^[15]。此外,一项研究指出,低镁血症与老年人的过度嗜睡之间存在关联^[16]。因此,在全身麻醉苏醒期间应该谨慎考虑患者是否存在低镁血症而导致嗜睡苏醒延迟。临床实践表明,补充镁可能有助于预防心血管疾病,尤其是对于镁摄入不足或低镁血症风险较高的患者。在麻醉手术前,应注意监测和干预镁水平,并针对特定患者群体采取预防措施,以降低发生低镁血症和相关并发症的风险。

2.2 高镁血症 高镁血症(血浆浓度超过 1.6 mmol/L)在临床中相当少见,主要发生在肾功能衰竭的患者中。一般而言,当血浆中镁的浓度达到 4~5 mmol/L 时,会出现深部肌腱反射丧失、头晕等中毒症状,当浓度进一步增高时,可出现呼吸暂停(>6 mmol/L)或心搏骤停(>8 mmol/L)^[17]。

STEVENS 等^[18]针对新型冠状病毒(新冠)感染

入院患者中高镁血症的发生率及其与预后的关系进行了调查,结果发现在收集的 1 685 例新冠感染患者中有 355 例(21%)患有高镁血症。与无高镁血症患者相比,高镁血症患者的休克发生率(35% vs. 27%)、呼吸衰竭需行机械通气的发生率(28% vs. 21%)、急性肾损伤的发生率(65% vs. 50%)和急性肾损伤严重到需要肾脏替代治疗的发生率(18% vs. 5%)均更高。另外,高镁血症患者 30 d 的生存率为 34%,而无高镁血症的患者为 65%。尽管这种关系的确切机制尚不清楚,但高镁血症可能意味着细胞更新率更快,疾病严重程度更高,这往往与严重的急性肾损伤相关。对于已经存在其他电解质失衡和多器官功能障碍的危重病患者,同时使用乳果糖、芬太尼和血管加压素等离子促进剂可能会进一步加重高镁血症,使临床处理复杂化^[19]。ISHIDA 等^[20]提到,当患者肾功能正常时,可通过应用利尿剂来增加镁的肾脏排泄。对于高镁血症合并肾功能不全的患者,血液透析是一个有价值的选择。此外,研究发现,血清镁水平异常偏低或偏高均可导致创伤性脑损伤(TBI)患者死亡率升高,且较高的初始血清镁水平与 TBI 患者的死亡率独立相关^[21]。因此,在临床管理中应注意对高镁血症的监测和干预,对于肾功能衰竭患者或使用含镁药物治疗的患者,应谨慎监测血浆镁水平,以避免高镁血症的发生,并针对不同的患者群体采取个体化的治疗措施。

3 镁在围手术期麻醉中的作用

近年来,镁已被建议用于减少术中麻醉药的消耗、减轻喉镜和插管对心血管的影响、发挥肌肉松弛作用,以及减轻术后疼痛和减少镇痛药物的使用^[22-24]。下面针对硫酸镁在围手术期麻醉各阶段的作用及研究进展进行详细阐述。

3.1 麻醉诱导

3.1.1 预防气管插管时的心血管反应 气管插管是全身麻醉过程中不可或缺的关键步骤,在全身麻醉诱导过程中起着至关重要的作用。插管过程会刺激躯体和内脏伤害性传入纤维,引起反射性的心血管不良反应,例如左心衰竭、肾功能衰竭、外科出血、脑出血和心肌缺血等^[25]。目前,已有多种方法可以减轻气管插管引起的不良反应,包括口咽部表面麻醉、静脉注射利多卡因及加深麻醉等。而硫酸镁作为一种钙离子通道阻滞剂,具有减少儿茶酚胺类神经递质释放、抑制应激反应的效果。因此,使用硫酸镁可以帮助维持血流动力学的稳定,提供更平稳的全身麻醉诱导过程^[3,23,26]。

MISGANAW 等^[23]发现,与利多卡因组相比,镁组插管后即刻、2 min、5 min 的平均动脉压显著降低。镁组收缩压仅在插管后即刻显著升高,插管后 2 min 恢复至基线水平;而利多卡因组收缩压在插管后即刻和插管后 2 min 都显著升高,且在插管后 5 min 才恢复到基线水平。对此,作者认为,镁组应激反应时间

的缩短可能与其减少儿茶酚胺类神经递质的释放有关,麻醉诱导前给予镁剂可以有效控制插管期间的肾上腺素能反应。MAHAJAN 等^[27]的研究也证实,在双频指数控制麻醉下,静脉注射硫酸镁显著降低了喉镜检查 and 气管插管时的基线心率和血压^[28]。此外,研究发现雾化吸入形式的硫酸镁在减弱喉镜检查 and 气管插管的应激反应方面似乎优于芬太尼。硫酸镁通过直接阻断儿茶酚胺的释放和间接进行心率和血压调节的负反馈机制,对心血管反应有良好的控制作用。因此,硫酸镁是预防气管插管时心血管反应的良好选择。

3.1.2 肌肉松弛剂的相互作用 镁对神经肌肉传递也有一定的影响,通过降低突触前电压依赖性钙通道的钙电导,来减少运动神经末梢释放的乙酰胆碱量,从而影响神经肌肉功能^[29]。此外,镁还能降低突触后乙酰胆碱的兴奋性,或者直接影响肌肉细胞的膜电位。因此,硫酸镁可延长神经肌肉阻滞的作用时间,并且缩短其起效时间^[24,30]。

一项随机对照试验结果显示,相较于生理盐水组,镁组神经肌肉阻滞(NMB)的出现频率更高,并且镁组阻断 NMB 的持续时间也更长^[31]。WANG 等^[24]研究显示,在 3 种不同浓度的硫酸镁(1、3、6 mmol/L)和维库溴铵之间的相互作用方面,硫酸镁显著增强了维库溴铵的效力。尽管在用硫酸镁预处理的患者中镁血浆浓度会增加,但作者认为这些剂量的给药被认为是临床安全的,因为患者没有报告药物相关的不良反应症状。但是,在 CZARNETZKI 等^[32]的研究中,用硫酸镁静脉预处理,然后使用标准剂量的罗库溴铵,不能提供优于琥珀酰胆碱的插管条件,但不良反应较少。同时 BARBOSA 等^[33]指出,在 50 mg/kg 剂量下,硫酸镁不能提供足够的临床状态用于成人患者的快速序贯插管,与罗库溴铵相比不占优势。目前,尚无明确证据支持硫酸镁能够单独作为神经肌肉阻滞药。然而,硫酸镁可在延长神经肌肉阻滞的持续时间、缩短肌松药起效时间方面带来显著益处。其可减少插管时间,同时降低肌松药使用量,减少药物残留和蓄积,为麻醉复苏提供方便。

3.2 麻醉维持 在 20 世纪初,由于硫酸镁对中枢神经系统的抑制作用,其被提议作为一种全身麻醉剂。然而,这一点从未得到证实。20 世纪 60 年代的研究证据表明,高剂量镁确实会引起中枢抑制作用,但所有这些作用都可以归因于镁以外的其他麻醉不良反应,如:外周瘫痪、异常通气引起的麻醉、缺氧、高碳酸血症或循环衰竭等^[34-35]。20 世纪 80 年代末,THOMPSON 等^[36]在大鼠实验中研究了氟烷麻醉与镁的联合应用,证明在不受心血管、呼吸或神经肌肉抑制等影响的情况下,镁能够将氟烷的最低有效浓度降低 60%。

3.2.1 麻醉药物用量的影响 目前,围手术期麻醉镇痛主要依赖于阿片类药物的使用,然而这些药物常

常伴随着不良反应^[37]。随着医学技术的发展,已经提出了多种减少术中阿片类药物使用的方法,例如联合局部浸润麻醉、神经阻滞麻醉及多模式镇痛方法,其中多模式镇痛是一种较流行的方法^[38]。硫酸镁已被证明是一种有价值的镇痛辅助用药,与麻醉药物同时使用可以提高镇痛效果,并减少术中药物用量^[39]。

YUE 等^[26]的一项回顾性研究显示,术中静脉注射镁可以显著减少术后镇痛药物的使用量,且有高质量的证据表明硫酸镁降低了术后恶心和呕吐的风险。另外一项 meta 分析也证实了硫酸镁可以减少麻醉诱导和维持所需的药物用量^[39]。一项关于老年患者内镜逆行胰胆管造影(ERCP)手术的研究显示,单次推注 40 mg/kg 静脉注射镁可显著减少 ERCP 期间丙泊酚的消耗,提高镇静成功率,且不良事件发生率更低^[40]。硫酸镁在减少围手术期麻醉用药方面的作用日益被人们肯定,尤其对有药物过敏史、恶心恶吐病史及老年病人而言,围手术期应用硫酸镁可以减少药物相关不良反应,提高患者恢复质量。

3.2.2 血流动力学影响 随着医疗技术和理念的不断更迭,外科手术的环境也在不断变化。腹腔镜手术的气腹和反 Trendelenburg 体位引起的血流动力学改变变成了手术中麻醉管理的一大挑战^[41]。此外,止血带已普遍应用于部分骨科手术,而止血带相关反应可能导致动脉血压升高和相关疼痛。这些外科技术的应用会对患者的血流动力学产生变化,尤其对于有心血管疾病的老年患者而言,严重的血流动力学变化可能对围手术期状态产生重大影响。因此,使用安全有效的药物维持此类患者手术时的血流动力学稳定至关重要。

RAJABI 等^[42]的研究显示,静脉输注硫酸镁或可乐定可以稳定血流动力学参数。此外,YOLDAS 等^[43]进行的一项结肠镜治疗研究发现,丙泊酚与硫酸镁联合使用可以改善呼吸状况,维持血流动力学的稳定。另一项宫腔镜检查的研究表明,辅助给镁剂有利于减少术中芬太尼需求和术后疼痛,而不会产生心血管不良反应^[44]。NYGARD 等^[45]发现,静脉注射硫酸镁也可以减弱气腹引起的血流动力学波动,这一作用在腹腔镜手术中的血流动力学稳定方面与多个研究的结果一致。硫酸镁在维持血流动力学稳定方面有着独特优势,对于术前有心律失常病史的患者或者接受特殊体位手术患者,可以考虑应用硫酸镁以提高围手术期安全性。

3.3 术后疼痛及镇痛药消耗量的影响 有证据表明,一些佐剂可以增强镇痛效果,减少阿片类药物的使用,从而减轻阿片类药物相关的不良反应,硫酸镁已被证明是一种有价值的镇痛辅助用药^[39]。

CAVALCANTI 等^[46]收集了 945 名麻醉医师使用硫酸镁的情况,其中 331 名使用过硫酸镁,并对其临床效果进行了报道。结果表明,73.11%的麻醉医师认为硫酸镁具有术后镇痛的效果,71.60%的麻醉

医师则认为硫酸镁可以减少麻醉药物的使用。另一项由 SILVA 等^[47]进行的前瞻性双盲试验,将 50 例择期在静脉全身麻醉下进行减肥后腹壁成形术的患者分为 2 组,分别使用瑞芬太尼或硫酸镁作为术中镇痛药。结果发现,在硫酸镁组的患者中,64% 的患者不需要补救镇痛。此外,OH 等^[48]的一项回顾性研究发现,围手术期应用硫酸镁可使 TKA 后 1 年的慢性持续疼痛发生率降低。围手术期给予硫酸镁可有效缓解术后急慢性疼痛。对于因过度使用阿片类药物而产生依赖或滥用的患者,使用硫酸镁可作为一种有效的辅助药物。特别是在目前阿片类药物危机和不良反应不断加剧的情况下,硫酸镁的应用可以减少或避免患者对阿片类药物的依赖性和滥用行为。因此,作者建议需要减少或避免使用阿片类药物的患者尝试使用硫酸镁辅助治疗。

3.4 局部麻醉、椎管内麻醉及神经阻滞麻醉中的应用 阿片类药物常被用作局部麻醉(局麻)药的辅助剂,以延长蛛网膜下腔阻滞及神经阻滞的持续时间并增强其效果。然而,阿片类药物的严重不良反应限制了其使用。因此,寻找新方法以延长蛛网膜下腔阻滞及神经阻滞的持续时间、减少术后镇痛需求,在重大手术中有着重要意义。

3.4.1 镁在局部麻醉中的应用 迄今为止,硫酸镁用于区域麻醉的数据非常有限。有研究表明镁作为局麻药的辅助剂,可增强局麻药的药效^[49]。在一项关于关节镜术后单次关节内应用镁的镇痛效果和安全性^[50]的系统回顾和荟萃分析中,ZENG 等^[50]也指出,单次关节内注射镁在关节镜手术结束时能有效缓解疼痛,同时不增加不良反应,并且可以增强布比卡因的镇痛效果,此外,还具有对软骨或软骨细胞的保护作用,这项研究发现对于关节镜术后的镇痛管理具有十分重要的意义。一项 meta 分析中也指出,镁加布比卡因能有效地缓解膝关节镜术后疼痛,且不会增加短期不良反应^[51]。此外,一项研究显示,腹腔注射镁可能有助于减少术后对镇痛抢救的需求,但仍需进一步研究证实其有效性,因为镁腹腔内给药仍被认为是实验性的^[52]。就目前研究来看,硫酸镁在区域麻醉中的应用具有一定的潜力,但仍需要更多的研究来进一步确定其效果和安全性。

3.4.2 镁在椎管内麻醉中的应用 目前,在椎管内麻醉中,镁的应用还相对较少。一项研究发现,在行双侧择期腹股沟疝手术的患者中,通过静脉输注硫酸镁可以有效提高脊髓麻醉的质量,延长术后的镇痛效果,同时减少术后 24 h 的吗啡消耗量。此外,在该研究中还发现,硫酸镁的使用还能维持患者血流动力学的稳定性^[53]。此外,WANG 等^[54]的研究显示,右美托咪定是在脊髓麻醉中作为局部麻醉剂的一个较好的辅助选择。其比硫酸镁起效更快,脊髓麻醉的效果也可以持续更长时间,且没有明显的不良反应。但需要注意的是,这并不意味着硫酸镁在椎管内没有益

处。在另一项研究中,研究者调查了静脉推注镁对先兆子痫女性脊髓麻醉效果的影响。研究结果表明,静脉注射硫酸镁可以对感觉阻滞的发生起到加速的作用,并且还可延长感觉阻滞、运动阻滞和脊髓麻醉的持续时间,进而减轻术后疼痛。此外,在研究过程中没有发现其他不良反应。需要注意的是,静脉推注镁无法加速先兆子痫妇女的运动阻滞^[55]。虽然这些研究都是针对特定病例的,但均证明了镁在椎管内麻醉中的应用具有一定的前景。镁可以延长椎管内麻醉的镇痛时间,提高麻醉质量,减轻患者术后疼痛,为患者术中、术后的管理提供更多的益处,有利于早期康复。

3.4.3 镁在神经阻滞麻醉中的应用 在 ZENG 等^[56]的一篇荟萃分析和系统评价中发现,将硫酸镁作为神经阻滞中局麻药的辅助剂能够增强局麻药对神经和躯干阻滞的镇痛作用,改善神经周围阻滞术后镇痛效果。相比单独使用局麻药,加入硫酸镁可以延长感觉阻滞的持续时间,为术后提供长达 12 h 的疼痛缓解。在 ELYAZED 等^[49]的研究中发现,硫酸镁是罗哌卡因治疗锁骨下臂丛神经阻滞延长镇痛持续时间的有效辅助剂,且较右美托咪定而言,减少了术中低血压和心动过缓的发生率。此外,一项研究中发现,在布比卡因中加入硫酸镁可以有效改善腹横肌平面阻滞的质量和持续时间^[57]。硫酸镁作为一种有效的局麻药辅助剂,已被证实可以提高神经阻滞的效果,并显著减少术中不良反应的发生。然而,对于硫酸镁在神经阻滞麻醉中的具体使用方式和效果,仍需要更广泛的研究来进一步探索。在未来的神经阻滞麻醉领域中,持续加强对镁的研究和应用,对于提升麻醉质量和丰富麻醉手段,具有非常重要的现实意义和长期价值。

4 小 结

硫酸镁在围手术期麻醉过程的各个阶段都有着重要作用,本文就硫酸镁在麻醉实践中的积极作用进行了系统阐述。其中,硫酸镁在围手术期的镇痛作用备受关注。硫酸镁可以减少麻醉药物的使用,缓解术后疼痛并减轻术后并发症,这对于患者术后早期恢复有着重要的意义。通过研究的不断深入,可以发现硫酸镁在临床中有着广泛的应用前景,因此需要更多的研究来更好地完善对何时及如何使用镁治疗的理解,在严格掌握硫酸镁的适应证和禁忌证的前提下,不断探索发现其在各种疾病的预防及治疗中的作用,以更好地为临床实践提供指导意义。

参考文献

[1] SOAVE P M, CONTI G, COSTA R, et al. Magnesium and anaesthesia[J]. Curr Drug Targets, 2009, 10(8): 734-743.

[2] SCHUH S, FREEDMAN S B, ZEMEK R, et al. Association between intravenous magnesium

- therapy in the emergency department and subsequent hospitalization among pediatric patients with refractory acute asthma; secondary analysis of a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4(7): e2117542.
- [3] SHIN H J, NA H S, DO S H. Magnesium and pain[J]. *Nutrients*, 2020, 12(8): 2184.
- [4] SARIS N E, MERVAALA E, KARPPANEN H, et al. Magnesium, an update on physiological, clinical and analytical aspects [J]. *Clin Chim Acta*, 2000, 294(1/2): 1-26.
- [5] SHIMOSAWA T, TAKANO K, ANDO K, et al. Magnesium inhibits norepinephrine release by blocking N-type Calcium channels at peripheral sympathetic nerve endings[J]. *Hypertension*, 2004, 44(6): 897-902.
- [6] DOMINGUEZ L J, GEA A, RUIZ-ESTIGARRIBIA L, et al. Low dietary magnesium and overweight/obesity in a mediterranean population; a detrimental synergy for the development of hypertension. the SUN project [J]. *Nutrients*, 2020, 13(1): 125.
- [7] BARBAGALLO M, VERONESE N, DOMINGUEZ L J. Magnesium in aging, health and diseases [J]. *Nutrients*, 2021, 13(2): 463.
- [8] LIU R H, RAZAVI C R, CHANG H Y, et al. Association of hypocalcemia and magnesium disorders with thyroidectomy in commercially insured patients[J]. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*, 2020, 146(3): 237-246.
- [9] CATALANO A, BELLONE F, CHILÀ D, et al. Rates of hypomagnesemia and hypermagnesemia in medical settings[J]. *Magn Res*, 2021, 34(1): 1-8.
- [10] DACEY M J. Hypomagnesemic disorders[J]. *Crit Care Clin*, 2001, 17(1): 155-173.
- [11] FINE K D, SANTA ANA C A, PORTER J L, et al. Intestinal absorption of Magnesium from food and supplements[J]. *J Clin Invest*, 1991, 88(2): 396-402.
- [12] DEL GOBBO L C, IMAMURA F, WU J H Y, et al. Circulating and dietary Magnesium and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis of prospective studies [J]. *Am J Clin Nutr*, 2013, 98(1): 160-173.
- [13] DE B J H. HOENDEROP J G, BINDELS R J. Magnesium in man: implications for health and disease[J]. *Physiol Rev*, 2015, 95(1): 1-46.
- [14] TOHME J, SLEILATY G, JABBOUR K, et al. Preoperative oral Magnesium loading to prevent postoperative atrial fibrillation following coronary surgery: a prospective randomized controlled trial [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2022, 62(5): eac269.
- [15] YANG Y H, CHEN C, DUAN P H, et al. The ECG characteristics of patients with isolated hypomagnesemia[J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 617374.
- [16] TUNC M, SOYSAL P, PASIN O, et al. Hypomagnesemia is associated with excessive daytime sleepiness, but not insomnia, in older adults[J]. *Nutrients*, 2023, 15(11): 2467.
- [17] PREMKUMAR C R, PARTHASARATHY R, KUMAR S, et al. Postoperative respiratory depression caused by iatrogenic hypermagnesemia[J]. *Anaesth Rep*, 2022, 10(1): e12154.
- [18] STEVENS J S, MOSES A A, NICKOLAS T L, et al. Increased mortality associated with hypermagnesemia in severe COVID-19 illness [J]. *Kidney360*, 2021, 2(7): 1087-1094.
- [19] KRUPESH V R, VARAYATHU H, SARATHY V, et al. Hypermagnesemia in critically ill patients with cancer: a case report [J]. *Mol Clin Oncol*, 2021, 14(6): 123.
- [20] ISHIDA Y, TABUCHI A. Severe hypermagnesemia with normal renal function can improve with symptomatic treatment [J]. *Case Rep Emerg Med*, 2020, 2020: 2918249.
- [21] WANG R R, HE M, XU J G. Initial serum magnesium level is associated with mortality risk in traumatic brain injury patients [J]. *Nutrients*, 2022, 14(19): 4174.
- [22] TAVANAEE R, REZAEI-NASERABAD S S, ALIZADEH S, et al. Analgesic effects of preoperative combination of oral pregabalin and intravenous magnesium sulfate on postoperative pain in patients undergoing posterolateral spinal fusion surgery: a 4-arm, randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2024, 36(2): 134-141.
- [23] MISGANAW A, SITOTE M, JEMAL S, et al. Comparison of intravenous magnesium sulphate and lidocaine for attenuation of cardiovascular response to laryngoscopy and endotracheal intubation in elective surgical patients at Zewditu Memorial Hospital Addis Ababa, Ethiopia [J]. *PLoS One*, 2021, 16(6): e0252465.
- [24] WANG H, LIANG Q S, CHENG L R, et al. Magnesium sulfate enhances non-depolarizing muscle relaxant vecuronium action at adult

- muscle-type nicotinic acetylcholine receptor in vitro[J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2011, 32(12): 1454-1459.
- [25] SINGH S, LAING E F, OWIREDU W K B A, et al. Comparison of esmolol and lidocaine for attenuation of cardiovascular stress response to laryngoscopy and endotracheal intubation in a Ghanaian population[J]. *Anesth Essays Res*, 2013, 7(1): 83-88.
- [26] YUE L, LIN Z M, MU G Z, et al. Impact of intraoperative intravenous magnesium on spine surgery: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *EClinicalMedicine*, 2022, 43: 101246.
- [27] MAHAJAN L, KAUR M, GUPTA R, et al. Attenuation of the pressor responses to laryngoscopy and endotracheal intubation with intravenous dexmedetomidine versus Magnesium sulphate under bispectral index-controlled anaesthesia: a placebo-controlled prospective randomised trial [J]. *Indian J Anaesth*, 2018, 62(5): 337-343.
- [28] GROVER N, TANEJA R, RASHID Y, et al. Nebulised fentanyl, dexmedetomidine and Magnesium sulphate for attenuation of haemodynamic response to laryngoscopy and tracheal intubation: a double-blinded, randomised comparative study [J]. *Indian J Anaesth*, 2023, 67(8): 730-735.
- [29] HERROEDER S, SCHÖNHERR M E, DE HERT S G, et al. Magnesium-essentials for anesthesiologists[J]. *Anesthesiology*, 2011, 114(4): 971-993.
- [30] KUSSMAN B, SHORTEN G, UPPINGTON J, et al. Administration of magnesium sulphate before rocuronium: effects on speed of onset and duration of neuromuscular block[J]. *Br J Anaesth*, 1997, 79(1): 122-124.
- [31] QUEIROZ RANGEL MICUCI A J, VERÇOSA N, FILHO P A G, et al. Effect of pretreatment with magnesium sulphate on the duration of intense and deep neuromuscular blockade with rocuronium: a randomised controlled trial[J]. *Eur J Anaesthesiol*, 2019, 36(7): 502-508.
- [32] CZARNETZKI C, ALBRECHT E, MASOUYÉ P, et al. Rapid sequence induction with a standard intubation dose of rocuronium after magnesium pretreatment compared with succinylcholine: a randomized clinical trial [J]. *Anesth Analg*, 2021, 133(6): 1540-1549.
- [33] BARBOSA F T, NETO O, BARBOSA L T, et al. Effectiveness of magnesium sulfate compared to rocuronium for rapid sequence tracheal intubation in adults: clinical randomized trial [J]. *Braz J Anesthesiol*, 2020, 70(1): 42-47.
- [34] ALDRETE J A, BARNES D R, AIKAWA J K. Does Magnesium produce anesthesia? Evaluation of its effects on the cardiovascular and neurologic systems[J]. *Anesth Analg*, 1968, 47(4): 428-433.
- [35] SOMJEN G, HILMY M, STEPHEN C R. Failure to anesthetize human subjects by intravenous administration of Magnesium sulfate[J]. *J Pharmacol Exp Ther*, 1966, 154(3): 652-659.
- [36] THOMPSON S W, MOSCICKI J C, DIFAZIO C A. The anesthetic contribution of magnesium sulfate and ritodrine hydrochloride in rats[J]. *Anesth Analg*, 1988, 67(1): 31-34.
- [37] IMAM M Z, KUO A, GHASSABIAN S, et al. Progress in understanding mechanisms of opioid-induced gastrointestinal adverse effects and respiratory depression [J]. *Neuropharmacology*, 2018, 131: 238-255.
- [38] COLVIN L A, BULL F, HALES T G. Perioperative opioid analgesia-when is enough too much? A review of opioid-induced tolerance and hyperalgesia[J]. *Lancet*, 2019, 393(10180): 1558-1568.
- [39] RODRÍGUEZ-RUBIO L, NAVA E, DEL POZO J S G, et al. Influence of the perioperative administration of Magnesium sulfate on the total dose of anesthetics during general anesthesia. A systematic review and meta-analysis[J]. *J Clin Anesth*, 2017, 39: 129-138.
- [40] CHEN J, QIAN K, LIU C H, et al. Effects of intravenous administration of Magnesium sulfate in propofol-based sedation for ERCP in elderly patients: a randomized, double-blind, placebo-controlled study [J]. *BMC Geriatr*, 2023, 23(1): 413.
- [41] TAN W, QIAN D C, ZHENG M M, et al. Effects of different doses of Magnesium sulfate on pneumoperitoneum-related hemodynamic changes in patients undergoing gastrointestinal laparoscopy: a randomized, double-blind, controlled trial [J]. *BMC Anesthesiol*, 2019, 19(1): 237.
- [42] RAJABI M, RAZAVIZADE M R, HAMIDI-SHAD M, et al. Magnesium sulfate and clonidine; effects on hemodynamic factors and

- depth of general anesthesia in cesarean section [J]. *Anesth Pain Med*, 2020, 10(5): e100563.
- [43] YOLDAS H, YILDIZ I, KARAGOZ I, et al. Effects of bispectral index-controlled use of magnesium on propofol consumption and sedation level in patients undergoing colonoscopy [J]. *Medeni Med J*, 2019, 34(4): 380-386.
- [44] GAO P F, LIN J Y, WANG S, et al. Antinociceptive effects of Magnesium sulfate for monitored anesthesia care during hysteroscopy: a randomized controlled study [J]. *BMC Anesthesiol*, 2020, 20(1): 240.
- [45] NYGARD B, BRICKEY D, GREENWOOD J. Intravenous magnesium sulfate to attenuate hemodynamic changes in laparoscopic surgery: a systematic review protocol [J]. *JB I Database System Rev Implement Rep*, 2019, 17(10): 2152-2158.
- [46] CAVALCANTI I L, DE LIMA F L T, DA SILVA M J S, et al. Use profile of magnesium sulfate in anesthesia in Brazil [J]. *Front Pharmacol*, 2019, 10: 429.
- [47] SILVA FILHO S E, SANDES C S, VIEIRA J E, et al. Analgesic effect of magnesium sulfate during total intravenous anesthesia: randomized clinical study [J]. *Brazilian Journal of Anesthesiology (English Edition)*, 2021, 71(5): 550-557.
- [48] OH T K, CHUNG S H, PARK J, et al. Effects of perioperative magnesium sulfate administration on postoperative chronic knee pain in patients undergoing total knee arthroplasty: a retrospective evaluation [J]. *J Clin Med*, 2019, 8(12): 2231.
- [49] ELYAZED M M A, MOGAHED M M. Comparison of magnesium sulfate and dexmedetomidine as an adjuvant to 0.5% ropivacaine in infraclavicular brachial plexus block [J]. *Anesth Essays Res*, 2018, 12(1): 109-115.
- [50] ZENG C, LI Y S, WEI J, et al. Analgesic effect and safety of single-dose intra-articular magnesium after arthroscopic surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 38024.
- [51] HE Y C, HE H Y, LI X X, et al. Intra-Articular magnesium plus bupivacaine is the most effective and safe postoperative analgesic option following knee arthroscopy: a network meta-analysis [J]. *Arthroscopy*, 2022, 38(10): 2897-2908. e18.
- [52] KAWAKAMI H, MIHARA T, NAKAMURA N, et al. Effect of magnesium added to local anesthetics for caudal anesthesia on postoperative pain in pediatric surgical patients: a systematic review and meta-analysis with Trial Sequential Analysis [J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0190354.
- [53] FAROUK I, HASSAN M M, FETOUH A M, et al. Analgesic and hemodynamic effects of intravenous infusion of magnesium sulphate versus dexmedetomidine in patients undergoing bilateral inguinal hernial surgeries under spinal anesthesia: a randomized controlled study [J]. *Brazilian Journal of Anesthesiology*, 2021, 71(5): 489-497.
- [54] WANG J G, WANG Z T, SONG X S, et al. Dexmedetomidine versus magnesium sulfate as an adjuvant to local anesthetics in spinal anesthesia: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Int Med Res*, 2020, 48(8): 300060520946171.
- [55] ZHONG H Y, ZHANG W P. Effect of intravenous magnesium sulfate on bupivacaine spinal anesthesia in preeclamptic patients [J]. *Biomed Pharmacother*, 2018, 108: 1289-1293.
- [56] ZENG J, CHEN Q, YU C, et al. The use of magnesium sulfate and peripheral nerve blocks: an updated meta-analysis and systematic review [J]. *Clin J Pain*, 2021, 37(8): 629-637.
- [57] AMMAR A S, MAHMOUD K M, KASEMY Z A. Comparison between adenosine and magnesium sulphate as adjuvants for transversus abdominis plane block: a prospective randomized controlled trial [J]. *Minerva Anesthesiol*, 2018, 84(3): 304-310.

(收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2024-02-18)