

• 综述 •

间接能量测定在重症患者营养支持治疗中指导能量及营养应用的研究进展

范银强¹ 严峻¹ 魏宁¹ 阳建平¹ 潘红媚¹ 邵义明¹ 石俊¹ 席修明²

¹ 广东医科大学附属东莞第一医院重症医学科, 东莞 523000; ² 首都医科大学附属复兴医院重症医学科, 北京 100000

通信作者: 邵义明, Email: sym@gdmu.edu.cn

【摘要】 营养支持治疗是重症监护病房患者极其重要的治疗方法之一, 及时有效的营养治疗方案可以改善患者的自身免疫力, 减少并发症, 优化临床结局。能量消耗受多种因素的影响, 包括患者的基础特征(如身体基础状况、性别、年龄)以及指标的动态变化(如体温、营养支持治疗方案和治疗干预措施等)。目前临床上公认的精确评估能量代谢的“金标准”是间接能量测定系统, 即代谢车。该设备通过实时监测二氧化碳排出量和氧气消耗量, 结合特定算法推算出能量消耗中三大营养素(糖类、脂肪和蛋白质)的代谢比例, 恰当的营养素配比有助于保持机体内营养代谢的供需平衡。在重症患者管理中, 代谢车的应用能够实现个体化营养治疗, 避免能量供给过剩或不足, 优化医疗资源利用。此外, 基于能量代谢监测系统的实时、定量化数据支持, 临床医师可制定更精准的营养干预策略, 进而改善患者预后。本文系统综述代谢车的技术特点及其在不同危重症场景中的应用价值, 旨在为临床实践中的间接能量测定提供参考依据。

【关键词】 代谢车; 静息能量消耗; Harris-Benedict 公式; 重症患者; 营养支持疗法

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250506-00431

Research progress on indirect energy measurement in guiding energy and nutritional application in nutritional support therapy for critically ill patients

Fan Yinqiang¹, Yan Jun¹, Wei Ning¹, Yang Jianping¹, Pan Hongmei¹, Shao Yiming¹, Shi Jun¹, Xi Xiuming²

¹Department of Intensive Care Unit, the First Dongguan Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Dongguan 523000, China; ²Department of Intensive Care Unit, Fu Xing Hospital, Capital Medical University, Beijing 100000, China
Corresponding author: Shao Yiming, Email: sym@gdmu.edu.cn

【Abstract】 Nutritional support therapy is one of the extremely important treatment methods for patients in the intensive care unit. Timely and effective nutritional support regimens can improve patients' immune function, reduce complications, and optimize clinical outcomes. Energy expenditure is influenced by multiple factors, including patients' baseline characteristics (such as physical condition, gender, age) and dynamic changes in indicators (such as body temperature, nutritional support regimens, and therapeutic interventions). The currently recognized "gold standard" for accurately assessing energy metabolism in clinical practice is the indirect calorimetry system, also known as the metabolic cart. This device monitors carbon dioxide production and oxygen consumption in real time and uses specific algorithms to estimate the metabolic proportions of the three major nutrients (carbohydrates, fats, and proteins) in energy expenditure. An appropriate nutrient ratio helps maintain the balance between supply and demand in the body's nutritional metabolism. In the management of critically ill patients, the application of the metabolic cart enables personalized nutritional therapy, avoiding over- or under-supply of energy and optimizing the use of medical resources. Furthermore, with real-time, quantitative data support from the energy metabolism monitoring system, clinicians can develop more precise nutritional intervention strategies, thereby improving patient prognosis. This article provides a systematic review of the technical features of the metabolic cart and its application value in various critical care scenarios, aiming to offer a reference for indirect calorimetry in clinical practice.

【Key words】 Metabolic vehicle; Resting energy expenditure; Harris-Benedict formula; Critically ill patients; Nutritional supportive therapy

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250506-00431

营养状况的动态监测评估及个体化营养支持方案的制定是重症患者治疗不可或缺的一部分。科学合理的营养干预可以提高患者的免疫功能, 降低并发症的发生风险; 相反, 如果处理不当可能会加重营养不良, 引发代谢紊乱, 从而影响患者的预后^[1]。需要特别关注的是: 高级生命支持仪器(呼吸机、主动脉搏囊反搏、体外膜肺氧合)的使用以及镇静镇痛药物等干预手段可能会对患者的气体交换、能量代谢和

生理代谢过程造成干扰。2009 年, 美国肠外肠内营养学会及欧洲临床营养和代谢学会发布的指南建议: 应以静息能量消耗(resting energy expenditure, REE)作为危重症患者营养目标的客观定量依据, 而不是依赖于预测公式的估算值。在早期的临床实践中, REE 通常是通过 Harris-Benedict 公式结合应激系数来推算的^[2]。然而现在间接能量测定法(即代谢车)已经成为评估 REE 的首选方法。因此, 为了确保患

者得到适当的营养支持,医护人员应根据患者的具体情况,确定最合适的营养支持方案,并在治疗过程中不断地动态调整和监测。

1 重症患者的能量代谢监测

在既往临床应用中,广泛使用 Harris-Benedict 公式结合应激系数来估机体能量消耗。然而该公式是建立在欧美人口数据基础上的,对于亚洲人群的适用性存在明显的局限性。目前采用代谢车测定患者能量消耗已被认为是能量测定的“金标准”^[3]。对于急性生理学及慢性健康状况评分 II (acute physiology and chronic health evaluation II, APACHE II) > 15 分的重症患者进行早期营养支持治疗,首先需要测算出患者所需实际能量消耗量,才可能进行有效的营养支持治疗,而重症患者救治方法日新月异,如多种模式的机械通气、主动脉球囊反搏、体外膜肺氧合技术、心脏起搏器、连续性肾脏替代治疗等,使用 Harris-Benedict 公式计算基础能量消耗(单位为 kJ/d 或 kcal/d)再乘以相应的应激系数来确定营养供给量存在一定弊端,因此其结果并不准确,而用代谢车监测 REE 为我们提供了一种科学、可行的替代方案。

2 代谢车与 Harris-Benedict 公式计算能量消耗的对比

代谢车作为目前常用且准确的机体间接热量测量工具,用其动态监测重症监护病房内常见疾病如重型颅脑损伤患者伤后能量代谢水平,不但可以指导营养治疗配比,还可以深入研究机体病理状态下代谢变化规律和疾病转归。用代谢车与 Harris-Benedict 公式评估能量代谢水平,代谢车可呈现动态变化趋势,准确反映创伤后机体的代谢特征变化;而 Harris-Benedict 公式则只提供静态线性评估,无法反映创伤后代谢的动态变化。对于病情急剧恶化最终死亡的患者,代谢车监测数据显示其临终前数天的 REE 值出现显著下降趋势,这一发现证实代谢车监测在临床病情评估中的重要性。通过代谢车监测患者营养物质需求变化的研究表明,发病 3 d 内 REE 值呈上升趋势,其中最主要的是碳水化合物占比升至约 77%,而脂肪占比降至约 21%,蛋白质的分解代谢比例超过合成代谢,表明机体在疾病早期呈代谢增高趋势,碳水化合物供能比例显著升高,反映出机体对葡萄糖的氧化利用增加,但由于应激状态下儿茶酚胺、皮质醇等升糖激素大量释放,导致胰岛素信号通路受损、外周组织对葡萄糖的摄取和利用效率下降,同时伴随胰岛素抵抗的病理状态;在发病后第 11 天时碳水化合物和脂肪的配比逐步平衡,分别占 56% 和 44%^[4]。严重烧伤患者的能量与物质代谢特点为高分解代谢状态,导致机体迅速进入负氮平衡和营养消耗加剧,严重影响患者结局^[5]。机体代谢紊乱程度加重及持续时间延长可增加能量消耗。烧伤患者 1 周左右机体的能量消耗到达峰值,即为休克期过后血流动力学稳定时,需立即给予营养支持,即“早期滋养性营养”(41.8 kJ/kg)^[6-7]。这种低热量供应使患者更容易接受,更容易控制血糖。研究数据显示,烧伤患者需要 100 ~ 250 d 才能将能量代谢恢复至正常水平,且恢复时间与烧伤面积呈正相关;在创面愈合或部分愈合时,能量消耗水平通常无法恢复到受伤前的水平^[8]。

目前临床上常采用 Harris-Benedict 公式乘以应激系数的估算值来评估 REE,但应激系数的主观性导致对能量代谢的真实反映存在争议^[9]。仅用恒定的公式进行估算,其误差通常较为明显。APACHE 评分作为评估危重症患者病情严重程度及临床死亡风险的“金标准”被广泛接受^[10]。尽管如此,其作为评估价值的应用工具仍存在部分争议,有研究表明,在感染、创伤等应激状态下,疾病的严重程度与 REE 的升高程度呈正相关^[11-12]。Jeon 等^[13]比较了使用间接测热法与常用公式估算法计算严重烧伤患者 REE 的可靠性,表明两者得出的 REE 值有显著差异,与间接测热法相比, Harris-Benedict、Curreri 公式显著高估了 REE。因此,制定临床营养方案应以实际监测的 REE 值为依据。在没有代谢车监测的情况下,需综合考虑疾病严重程度、手术创伤等影响能量代谢的因素。值得注意的是,恶性肿瘤患者的营养不良发生率高达 71%^[14],而营养不良与治疗反应不佳和预后不良显著相关。部分研究者对比了不同肿瘤类型的肺癌患者的代谢及炎症特征,结果显示,与年龄、性别、无脂肪质量(fat free mass, FFM)匹配的非小细胞肺癌患者对比,小细胞肺癌患者经 FFM 校正后的 REE 增加。由于脂肪组织占人体能量储备的 90%,所以当机体的代谢需求增加,脂肪就会优先被消耗^[15]。在肿瘤患者的综合治疗中,营养治疗作为辅助治疗手段占据重要位置。基于代谢车的精准化营养干预,可积极改善恶性肿瘤患者的体质,优化营养状态,并提高短期生存获益。

3 新型冠状病毒感染患者的能量代谢监测

免疫功能不全的人群,尤其是老年人、存在某些合并症或营养状态不良的患者,疾病转归通常较差,病死率较高,临床研究提示,新型冠状病毒感染可导致肝脏功能不全,进而可能影响三大营养物质的代谢及转化过程^[16-20]。根据欧洲临床营养和代谢学会发布的专家共识,对于同时具备高龄和多系统疾病的新型冠状病毒感染患者来说,这些因素不仅单独影响其营养状况,还会对其生存率产生不利影响,采用代谢车可以准确评估新型冠状病毒感染患者的实际能量需求,并确定三大营养物质的合理搭配^[21]。临床观察表明,入住重症监护病房的患者受多种因素影响,如高龄、炎症反应、进食困难等导致营养不良的风险明显增加^[22]。对于并发急性呼吸衰竭和多器官功能衰竭的新型冠状病毒感染重症患者,严密监测代谢变化,补充免疫营养素、维持液体平衡以及优化宏量营养素摄入,对促进疾病康复至关重要。

4 体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)患者代谢车监测研究

代谢车监测对 ECMO 患者的个体化营养支持具有不可替代的价值。应用代谢车实时监测 ECMO 患者的 REE、呼吸商、氧耗量和二氧化碳产生量等参数,评估各时期患者对营养物质的需求,给予合理的营养物质配比可改善患者预后。在一项前瞻性观察性研究中,对 42% 的患者进行了间接测热法,其中 85% 是有效的,尽管只有不到一半的患者进行了间接热量测量,但该方法仍被证明在指导营养治疗方

面具有价值^[23]。另有一项系统回顾和 Meta 分析表明,依据间接测热法指导的营养治疗方案可显著降低危重症患者的短期病死率^[24]。因此,间接测热法应该取代传统公式计算的方法。我们在严格掌握适应证的同时,将代谢车监测应用到静脉-动脉(veno-arterial, V-A)ECMO+CRRT+呼吸机等有创监测及治疗的重症患者,治疗全程注重代谢变化、营养配比,并应用代谢车监测 REE 值给我们提供了实时、精准的营养、热量支持依据,有利改善患者营养状况,调节能量代谢紊乱。有报道,ECMO 可以提供“心肺休息”,但是我们对 100 余例 ECMO 患者监测 REE 值总结认为,ECMO 并不促进“代谢休息”。我们研究其对营养支持治疗的规范:

- ① VA-ECMO 支持治疗期间,虽然代谢车监测值只有之前监测的 1/2,但是营养支持治疗应用要充分考虑机体自主代谢;
- ② 体内循环和体外循环如何协调,代谢车监测 REE 值没有包括 VA-ECMO 替代支持呼吸(氧合+二氧化碳)和血流,这部分的呼吸+血流是维系患者生命的一部分;
- ③ VA-ECMO 模式下监测的 REE 是部分机体能量消耗,显著低于实际总 REE,如果患者心肺功能有所恢复,VA-ECMO 支持逐渐降低(如 Sweep Gas 流量减少),此时代谢车监测的肺氧耗量/二氧化碳产生量可能会逐渐增加,观察此趋势也可判断心肺功能恢复情况。重症患者能量代谢由多种因素共同影响,营养支持治疗也要因综合治疗及机体多系统联动而调整,根据代谢车监测 REE 实时、定量、精准的临床指导,有利于改善 ECMO 患者营养状况,调节能量代谢紊乱,改善患者预后。

综上所述,利用代谢车进行能量代谢监测可以有效实施个体化营养治疗,既可以避免喂养不足或过度,又可以合理控制医疗成本。重症患者的能量代谢调控是一个涉及多系统协同作用的复杂过程,通过实时动态的能量代谢监测来指导临床营养支持,一方面可以优化患者的营养水平,另一方面可以调整代谢失衡,降低并发症发生率,最终改善疾病转归。这种个体化的治疗模式有助于患者更好地恢复,对提高危重症患者的治疗效果及改善患者预后具有重大意义。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Bistran BR. Comment on "Guidelines for the provision and assessment of nutrition support therapy in the adult critically ill patient" [J]. JPEN J Parenter Enteral Nutr, 2010, 34 (3): 348-349; author reply 350-352. DOI: 10.1177/0148607110361902.
- [2] A.S.P.E.N. Board of Directors, American College of Critical Care Medicine, Society of Critical Care Medicine. Guidelines for the provision and assessment of nutrition support therapy in the adult critically ill patient: Society of Critical Care Medicine (SCCM) and American Society for Parenteral and Enteral Nutrition (A.S.P.E.N.) [J]. JPEN J Parenter Enteral Nutr, 2009, 33 (3): 277-316. DOI: 10.1177/0148607109335234.
- [3] 饶志勇, 伍晓汀, 胡雯. 健康成人公式预测法与间接测热法测定静息能量消耗的差异 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14 (46): 8707-8711. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8225.2010.46.038.
- [4] 石俊, 席力罡, 迟天航, 等. 静息能量监测在机械通气患者营养支持治疗中的应用价值 [J]. 中华危重病急救医学, 2019, 31 (1): 98-101. DOI: 10.3760/ema.j.issn.2095-4352.2019.01.019.
- [5] Wischmeyer PE, Molinger J, Haines K. Point-counterpoint: indirect calorimetry is essential for optimal nutrition therapy in the intensive care unit [J]. Nutr Clin Pract, 2021, 36 (2): 275-281. DOI: 10.1002/ncp.10643.
- [6] Nienow MK, Susterich CE, Peterson SJ. Prioritizing nutrition during recovery from critical illness [J]. Curr Opin Clin Nutr Metab Care, 2021, 24 (2): 199-205. DOI: 10.1097/MCO.0000000000000728.
- [7] Gonzalez-Grandia A, Seethaler B, Haap M, et al. Effect of an intensified individual nutrition therapy on serum metabolites in critically ill patients. A targeted metabolomics analysis of the ONCA study [J]. Clin Nutr ESPEN, 2021, 43: 267-275. DOI: 10.1016/j.clnesp.2021.04.002.
- [8] Heyland DK, Day A, Clarke GJ, et al. Nutrition and Exercise in Critical Illness Trial (NEXIS Trial): a protocol of a multicentred, randomised controlled trial of combined cycle ergometry and amino acid supplementation commenced early during critical illness [J]. BMJ Open, 2019, 9 (7): e027893. DOI: 10.1136/bmjopen-2018-027893.
- [9] Viana MV, Becce F, Pantet O, et al. Impact of β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) on muscle loss and protein metabolism in critically ill patients: a RCT [J]. Clin Nutr, 2021, 40 (8): 4878-4887. DOI: 10.1016/j.clnu.2021.07.018.
- [10] Eckert I, Kumbier MCC, Silva FM, et al. Association of specialized enteral nutrition with glycemic control and clinical outcomes in critically ill patients: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Clin Nutr, 2021, 40 (6): 3940-3949. DOI: 10.1016/j.clnu.2021.04.030.
- [11] Lee ZY, Yap CSL, Hasan MS, et al. The effect of higher versus lower protein delivery in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Crit Care, 2021, 25 (1): 260. DOI: 10.1186/s13054-021-03693-4.
- [12] Refeeding Syndrome Trial Investigators Group. Restricted versus continued standard caloric intake during the management of refeeding syndrome in critically ill adults: a randomised, parallel-group, multicentre, single-blind controlled trial [J]. Lancet Respir Med, 2015, 3 (12): 943-952. DOI: 10.1016/S2213-2600(15)00418-X.
- [13] Jeon J, Kym D, Cho YS, et al. Reliability of resting energy expenditure in major burns: comparison between measured and predictive equations [J]. Clin Nutr, 2019, 38 (6): 2763-2769. DOI: 10.1016/j.clnu.2018.12.003.
- [14] Tobert CM, Hamilton-Reeves JM, Norian LA, et al. Emerging impact of malnutrition on surgical patients: literature review and potential implications for cystectomy in bladder cancer [J]. J Urol, 2017, 198 (3): 511-519. DOI: 10.1016/j.juro.2017.01.087.
- [15] Wilms E, An R, Smolinska A, et al. Galacto-oligosaccharides supplementation in prefrail older and healthy adults increased faecal bifidobacteria, but did not impact immune function and oxidative stress [J]. Clinical nutrition (Edinburgh, Scotland), 2021, 40 (5): 3019-3031. DOI: 10.1016/j.clnu.2020.12.034.
- [16] Guo YQ, Qin WD, Wang ZY, et al. Factors influencing social distancing to prevent the community spread of COVID-19 among Chinese adults [J]. Prev Med, 2021, 143: 106385. DOI: 10.1016/j.jypmed.2020.106385.
- [17] Wang DW, Hu B, Hu C, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China [J]. JAMA, 2020, 323 (11): 1061-1069. DOI: 10.1001/jama.2020.1585. Erratum in: JAMA, 2021, 325 (11): 1113. DOI: 10.1001/jama.2021.2336.
- [18] Chen NS, Zhou M, Dong X, et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study [J]. Lancet, 2020, 395 (10223): 507-513. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30211-7.
- [19] Xiao F, Tang MW, Zheng XB, et al. Evidence for gastrointestinal infection of SARS-CoV-2 [J]. Gastroenterology, 2020, 158 (6): 1831-1833. e3. DOI: 10.1053/j.gastro.2020.02.055.
- [20] Gu JY, Han B, Wang J. COVID-19: gastrointestinal manifestations and potential fecal-oral transmission [J]. Gastroenterology, 2020, 158 (6): 1518-1519. DOI: 10.1053/j.gastro.2020.02.054.
- [21] ESPEN Council. ESPEN expert statements and practical guidance for nutritional management of individuals with SARS-CoV-2 infection [J]. Clin Nutr, 2020, 39 (6): 1631-1638. DOI: 10.1016/j.clnu.2020.03.022.
- [22] Singer P, Blaser AR, Berger MM, et al. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit [J]. Clin Nutr, 2019, 38 (1): 48-79. DOI: 10.1016/j.clnu.2018.08.037.
- [23] Lakenman PLM, van der Hoven B, van Bommel J, et al. The usefulness of a new indirect calorimeter in critically ill adult patients [J]. Clin Nutr, 2024, 43 (10): 2267-2272. DOI: 10.1016/j.clnu.2024.07.048.
- [24] Duan JY, Zheng WH, Zhou H, et al. Energy delivery guided by indirect calorimetry in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis [J]. Crit Care, 2021, 25 (1): 88. DOI: 10.1186/s13054-021-03508-6.

(收稿日期: 2025-05-06)

(本文编辑: 保健媛 马英)