

基于“气化理论”探讨生物能量代谢的系统调节机制及其临床意义

满逸迪¹, 冯梓芸², 姜恒坤³, 李军^{4, Δ}

(1. 山东中医药大学康复医学院, 山东 济南, 250355; 2. 山东中医药大学第二附属医院, 山东 济南, 250001;
3. 龙口市中医医院, 山东 烟台, 265701; 4. 中国康复研究中心, 北京 丰台, 100068)

摘要: 生物能量代谢紊乱与多种疾病密切相关, 而现代医学在系统整体性调节方面存在认识局限。本综述旨在从中医气化理论视角探讨生物能量代谢的系统调节机制及其临床应用价值。通过文献研究方法, 系统分析气化理论与现代生物能量代谢的关联机制。运用多组学技术和系统生物学方法, 探讨气化理论在分子、细胞和系统层面的科学内涵。重点分析三焦分层调节在能量代谢平衡中的作用机制。研究发现气化过程与线粒体功能密切相关, 气虚状态往往伴随 ATP 含量显著下降和 AMP 升高。创新性地提出“气化分层调节”理论, 构建了气虚、气滞、气陷、气逆四型的分层调节方案。补气中药可通过调节 AMPK/mTOR 信号通路改善能量代谢, 显著提高胰岛素敏感性。气化理论与现代生物能量代谢具有深层科学联系。基于三焦分层调节的治疗策略为代谢性疾病的防治提供了新思路, 具有重要的临床指导意义。

关键词: 气化理论; 生物能量代谢; 系统调节; 代谢性疾病; 分层调节

中图分类号: R229 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3649(2025)08-0027-06

Investigation of systemic regulatory mechanisms and clinical significance of biological energy metabolism based on Qi-transformation theory

MAN Yidi¹, FENG Ziyun², JIANG Hengkun³, LI Jun^{4, Δ}

(1. School of Rehabilitation Medicine, Shandong University of Chinese Medicine, Jinan 250355, China; 2. The Second Affiliated Hospital of Shandong University of Chinese Medicine, Jinan 250001, China; 3. Longkou Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yantai 265701, China; 4. China Rehabilitation Research Center, Fengtai 100068, China)

Abstract: Biological energy metabolism disorders are closely associated with various diseases, while modern medicine has limitations in systemic regulation. This review aims to explore the systemic regulatory mechanisms of biological energy metabolism and its clinical significance from the perspective of traditional Chinese medicine's Qi-transformation theory. Through literature research, we systematically analyzed the correlation between Qi-transformation theory and modern biological energy metabolism. Multi-omics technologies and systems biology approaches were employed to investigate the scientific connotation of Qi-transformation theory at molecular, cellular, and systemic levels, focusing on the regulatory mechanism of triple energizer layered regulation in energy metabolism balance. The review revealed a close correlation between Qi-transformation processes and mitochondrial function, with Qi deficiency typically accompanied by significantly decreased ATP levels and elevated AMP levels. We innovatively proposed the "layered regulation of Qi-transformation" theory and established a layered regulation scheme for four patterns: Qi deficiency, stagnation, sinking, and rebellion. Qi-tonifying herbs improved energy metabolism by regulating the AMPK/mTOR signaling pathway, significantly enhancing insulin sensitivity. Qi-transformation theory demonstrates profound scientific connections with modern biological energy metabolism. The treatment strategy based on triple energizer layered regulation provides new insights for preventing and treating metabolic diseases, offering significant clinical guidance.

Keywords: Qi-transformation theory; Biological energy metabolism; Systemic regulation; Metabolic diseases; Layered regulation

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (82374556); 国家重点研发计划中医药现代化研究重点专项课题 (2018YFC1706005)。

第一作者: 满逸迪, 硕士研究生在读, 研究方向: 中西医结合康复, E-mail: 15318080212@163.com。

Δ通讯作者: 李军, 博士, 副主任医师, 研究方向: 中西医结合康复, E-mail: 3143457184@qq.com。

引用格式: 满逸迪, 冯梓芸, 姜恒坤, 等. 基于“气化理论”探讨生物能量代谢的系统调节机制及其临床意义[J]. 四川中医, 2025, 43(8): 27-32.

生物能量代谢是维持生命活动的基础，其紊乱与多种疾病的发生、发展密切相关。现代医学从分子、细胞和器官系统等多个层面阐明了能量代谢的调节机制^[1]，但在系统整体性调节方面仍存在认识局限。中医学“气化理论”从整体观角度阐释人体生命活动的本质，为理解和调节生物能量代谢提供了独特视角。

气化理论源于《黄帝内经》，是中医学对人体生命活动本质的重要认识。《素问·六微旨大论》云：“气之升降，天地之更用也”，《素问·阴阳应象大论》曰：“阴阳者，天地之道也，万物之纲纪，变化之父母”。这些论述体现了气化作为生命活动基本特征的核心地位。近年来，随着系统生物学研究方法的发展，气化理论与现代生物能量代谢研究的结合逐渐成为学术界关注的焦点^[2]。

目前，国内外学者对气化理论的研究主要集中在以下几个方面：首先，在理论阐释层面，通过多组学技术探讨了气化与线粒体能量代谢的关系，为气化理论的科学内涵提供了新的解释^[3]。研究表明^[4]，昼夜节律时钟基因通过调控烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（Nicotinamide adenine dinucleotide, NAD⁺）依赖的代谢通路影响线粒体功能，印证了气化活动的节律性特征。其次，在临床应用研究方面，系统总结了基于气化理论的代谢性疾病治疗经验，证实了其在临床实践中的指导价值^[5]。此外，现代研究发现^[6]，当细胞面临能量压力时，AMP活化蛋白激酶/雷帕霉素靶蛋白（AMP-activated protein kinase/mammalian target of rapamycin, AMPK/mTOR）信号通路能够快速响应并调节三磷酸腺苷（Adenosine triphosphate, ATP）的产生和利用，这种动态平衡机制与中医“阴阳互根”理论高度吻合。

然而，现有研究仍存在一些不足：对气化理论不同学术流派观点的系统梳理不足，影响了理论认识的深度；气化理论现代转化过程中的争议问题尚未得到充分讨论；临床研究的证据等级有待提高；缺乏多层次、多维度的系统研究。这些问题的存在限制了气化理论在现代医学中的应用价值。

基于此，本文旨在通过梳理气化理论的不同学术观点，探讨其在现代转化过程中的争议问题，结合系统生物学研究方法，分析气化理论与生物能量代谢的关联机制，并探讨其临床应用价值，以期为中医理论的现代转化和临床实践提供新的思路。本

研究将重点关注以下几个方面：一是深入探讨气化理论与现代生物能量代谢的分子机制联系；二是运用系统生物学方法对气化调节网络进行多维度分析；三是通过临床研究验证气化理论在代谢性疾病防治中的应用价值。本研究创新性地提出“气化分层调节”理论，从三焦分层角度重新诠释气化理论的系统调节机制。

1 气化理论的科学内涵与现代转化

1.1 气化理论的基本内涵

《素问·六微旨大论》指出：“气之升降，天地之更用也”。气机运行是气化过程的基础，体现为一种动态平衡的过程。气的升降出入运动不仅维持着人体各个系统的正常运转，更是推动物质转化与能量转换的核心动力。阴阳交感作为推动气化的基本动力，其实质是通过阴阳两种属性的相互作用，维持人体内环境的动态平衡。

《素问·灵兰秘典论》云：“三焦者，决渎之官，水道出焉”，说明三焦在气化过程中具有分层调节作用。上焦主司呼吸，助心肺宣发肃降；中焦主司运化，助脾胃转输精微；下焦主司气化，助肾脏蒸腾水液。这种分层调节特点为理解气化理论提供了重要思路。与此同时，中医理论认为，五脏在气化过程中具有不同的功能特点。具体而言，脾主运化，主要负责水谷精微的转化和输布；肺主宣发肃降，调节全身气机升降；肾主蒸腾气化，与水液代谢密切相关；肝主疏泄，调节气机升降；心主血脉，推动气血运行。这种对五脏功能的认识，实际上反映了人体不同系统在物质能量代谢中的分工协作关系。

1.2 气化理论与现代能量代谢的对应关系

现代研究表明，气化过程与细胞能量代谢存在密切联系。研究发现^[7]，气虚的状态往往伴随着细胞ATP含量的显著下降和单磷酸腺苷（Adenosine monophosphate, AMP）的升高，这种现象在线粒体功能障碍性疾病中尤为明显。气活化类中药（如人参、黄芪等）能够显著增强线粒体ATP的生成能力，这为气化理论与现代能量代谢的关联提供了实验证据^[8]。且气机的畅通与否直接影响到氧气的摄取和利用效率，现代研究证实，氧的摄取和利用是能量代谢的关键环节^[9]，这与“通则不痛，痛则不通”的理念相吻合。气机失调可导致组织细胞的供氧不足，进而影响能量代谢的正常进行。而细胞自噬作为一种重要的细胞代谢过程，可以被视为气化

在细胞水平的具体表现。研究发现,当细胞面临能量压力时,AMPK/mTOR信号通路能够快速响应并调节ATP的产生和利用,这种动态平衡机制与“阴阳互根”理论高度吻合^[10]。细胞自噬的稳态调节需要以气机的正常运行为前提,这为理解气化理论的微观机制提供了新的视角。

2 气化调节的分子生物学基础

2.1 线粒体功能与气化活动

线粒体作为细胞能量代谢的核心场所,其功能与中医气化活动有着密切联系。线粒体通过DRP1、MFN1/2和OPA1等关键调控蛋白的协同作用,维持其融合与分裂的动态平衡,正如《素问·阴阳应象大论》所言:“阴平阳秘,精神乃治”,这种动态平衡过程与中医气化理论强调的“阴阳平衡”理念高度契合。研究发现^[4],昼夜节律时钟基因通过调控NAD⁺依赖的代谢通路影响线粒体功能,正如《素问·金匱真言论》所言:“春生夏长,秋收冬藏,是气之常也”,这一发现印证了气化活动具有时空节律性的特点。线粒体不仅通过复杂的代谢网络与细胞其他器官相互联系,还通过PINK1/Parkin和SIRT1/PGC-1 α 等信号通路维持其功能稳态,这种整体性调控特征与气化理论的整体观念相符。研究表明,线粒体氧化磷酸化过程中的能量转化效率与气化活动密切相关,补气中药可显著提高线粒体ATP产生和抗氧化能力^[11],这为理解气化理论提供了现代生物学基础。

2.2 能量代谢的多系统协同网络

三焦功能中,上焦心肺系统主要通过呼吸调节氧气利用,中焦消化系统主要负责营养物质转化,下焦泌尿系统主要调节水液代谢,这种功能分层与传统三焦气化理论相互印证。细胞能量代谢的运转依赖于多个系统的协同配合。在消化系统中,肠道上皮细胞的能量转运系统与传统脾胃气化功能密切相关,其中葡萄糖转运体家族在能量物质转运过程中起关键作用,受到PI3K/AKT、AMPK等多个信号通路的精密调控^[12]。同时,肠道微生物群通过参与营养物质的分解和转化,影响宿主的能量代谢状态,这与中医“脾胃为后天之本”的理论不谋而合。

血液循环系统承担着能量物质的分配功能,这与中医“气血同源”的理论高度契合。现代研究发现,血液中的能量底物通过复杂的转运系统到达各个组织器官,这一过程受到血管内皮细胞能量代谢状态^[13]、组织血流灌注程度^[14]以及血液中能量底

物浓度梯度等多个因素的调控^[15]。

更重要的是,现代研究揭示了一个复杂的免疫—内分泌—神经网络调节系统,该网络通过神经系统的交感和副交感调节、内分泌系统的激素分泌以及免疫系统的炎症因子参与,实现对能量代谢的精确调控。例如,交感神经通过释放去甲肾上腺素促进糖原和脂肪分解,而副交感神经则通过促进胰岛素分泌增加葡萄糖的利用^[16,17]。在疾病状态下,这种复杂的调节网络往往会出现紊乱,导致能量代谢异常,进而引发各种代谢性疾病。

通过对气化理论分子机制的深入分析可见,传统气化理论所描述的生命现象在分子水平上具有确切的物质基础,这不仅验证了传统理论的科学性,也为其现代转化和临床应用提供了新的研究思路。

3 现代科技手段在气化理论研究中的应用

3.1 检测手段的运用

目前代谢物检测中主要有质谱技术与核磁共振技术。其中质谱技术因其高灵敏度和同时检测多种代谢物的能力,已成为研究气化理论的重要工具^[18]。现代质谱技术主要通过空气压力化学电离、电喷雾电离和基质辅助激光解吸电离飞行时间(Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time of Flight, MALDI-TOF)等离子化技术,可以准确检测细胞内ATP、AMP等能量代谢相关物质的含量变化。在气虚状态研究中,质谱技术能够全面监测能量代谢产物的动态变化,为气化理论的科学内涵提供实验证据^[19]。核磁共振技术在气化研究中具有独特优势^[20,21],尤其是在识别配体物理性质、蛋白质结合位点以及检测蛋白质—配体复合结构方面。然而,核磁共振也存在样本需求量大和灵敏度较低的局限性。在实际应用中,需要结合质谱等其他技术,以获得更全面的代谢信息。

3.2 多组学数据分析在气化理论研究中的应用

近年来,随着生物信息学技术的快速发展,多组学数据分析为气化理论研究提供了新的研究视角。研究表明,通过整合代谢组学、转录组学等多维度数据,可以从分子水平深入理解气化理论的科学内涵^[22]。如利用代谢组学分析技术,在2型糖尿病患者中发现了与气虚证相关的特征代谢物谱,为中医证候的客观化研究提供了新思路^[17]。有研究揭示了补气中药的作用机制,发现其可通过调节能量代谢相关通路改善气虚状态^[23]。

系统生物学技术在气化理论研究中的应用,不

仅验证了传统理论的科学性，还为其现代转化提供了新的思路。通过多组学数据的整合分析，可以从分子水平深入理解气化过程的调节机制，为临床治疗提供更精准的指导。同时，这种研究方法也为中医理论的现代化转化提供了新的范式。

4 气化理论在代谢性疾病防治中的应用价值

4.1 代谢性疾病的气化病机特点

代谢性疾病是一类以能量代谢紊乱为主要特征的慢性疾病，其发病机制与气化功能失调密切相关。本研究通过系统分析发现，代谢性疾病的气化病机具有以下特点：

首先，能量代谢通路呈现显著异常。研究表明，气化功能失调会导致线粒体氧化磷酸化效率降低，进而引起 ATP/AMP 比值失衡^[24]。这种能量代谢异常不仅影响细胞能量供给，还会引发一系列代谢底物利用障碍。实验数据显示，在代谢性疾病患者的外周血单个核细胞中，ATP 含量较健康对照组明显下降，提示气化功能障碍与能量代谢紊乱之间存在显著相关性^[25]。其次，气化功能失调会触发代谢网络的级联反应。气化功能障碍可激活 AMPK 信号通路，同时抑制 mTOR 信号通路，导致细胞能量感知系统紊乱。此外，气化功能失调还会诱导氧化应激反应增强，促进炎症因子的表达上调，形成恶性循环。这种复杂的代谢网络紊乱不仅加重了原有的代谢异常，还会诱发新的病理改变。最后，气化功能与代谢性疾病的发生发展呈现明显的时空相关性。以 2 型糖尿病为例，胰岛 β 细胞的线粒体功能障碍是疾病早期的重要特征，而这种功能障碍与气化失调表现出高度一致性。临床研究发现^[22]，通过改善气化功能可显著提高胰岛素敏感性，降低空腹血糖水平 ($P<0.05$)。这一发现为从气化理论角度理解代谢性疾病的发病机制提供了新的思路。

综上所述，代谢性疾病的气化病机特点主要表现为能量代谢通路异常、代谢网络级联反应失调以及与疾病进展的时空相关性。深入理解这些特点，对于指导临床治疗具有重要意义。

4.2 基于气化理论的治疗策略

本研究在深入分析代谢性疾病气化病机特点的基础上，创新性地提出“气化分层调节”治疗原则。该原则突破了传统单一调节气化的思路，建立了系统、动态的治疗体系。

三焦气化的分层调节：

上焦气化调节以心肺为要，通过调节宣发肃降功能，改善机体氧气利用效率。现代研究证实，心

肺功能与线粒体氧化磷酸化密切相关，线粒体功能障碍是代谢性疾病的重要病理基础^[26]。活血化瘀类药物通过改善线粒体功能，提高 ATP 产生效率，从能量转化层面调节代谢^[27]。

中焦气化调节以脾胃为中心，主要调节水谷精微的消化吸收与转输。研究发现，肠道菌群与代谢稳态关系密切，传统健脾和胃法可通过调节肠道菌群结构，改善胰岛素敏感性^[28]。以参苓白术散类方剂为代表，通过调节 AMPK 信号通路改善糖脂代谢，体现了中焦气化调节的关键作用^[29]。

下焦气化调节着眼于肾气蒸腾，调节水液代谢与能量储存。现代药理研究证实，补肾类中药能够激活褐色脂肪组织，促进能量消耗，这一发现与肾主闭藏、司水液代谢的传统认识高度契合，揭示了下焦气化调节在代谢平衡中的重要地位^[30]。

运用气化分层调节理论分析四种证型的发生机制及其治疗原则：气虚证表现为疲劳乏力、食欲减退、自汗，其机制为上焦心肺之气虚弱，宣发肃降功能减退，清阳不升，卫气不固；中焦脾胃之气亏虚，运化功能减退，水谷精微生成不足；下焦肾气亏虚，蒸腾气化不足，水液代谢失常，故见诸症。治疗上以补气健运，调理三焦为原则。气滞证表现为胸胁胀满、脘腹痞闷、情志抑郁，因上焦心肺之气郁滞，中焦肝胃气机不畅，下焦气机郁滞所致，治以理气调达，通畅三焦。气陷证见声音低怯、便溏久泻、子宫脱垂，源于上焦心肺之气下陷，中焦脾气下陷，下焦肾气不固，治当升举固摄，调理三焦。气逆证以咳嗽气喘、呃逆呕吐、气短胸闷为主，因上焦心肺之气上逆，中焦胃气上逆，下焦气化失调所致，治疗以降逆归元，调理三焦为要。通过三焦分层调节，各证型均可获得相应改善。

4.3 气化理论指导下的预防策略

基于气化分层调节理论，代谢性疾病的预防应当遵循治未病的理念，从三焦气化功能的整体调节入手。上焦重在调畅心肺气机，通过合理运动促进宣发肃降功能，改善氧气利用；中焦着重调理脾胃运化，通过规律饮食维护水谷精微的正常转化；下焦则注重肾气蒸腾，通过规律作息维持昼夜节律，促进能量代谢。早期识别三焦气化功能异常的临床表现尤为重要，如上焦气机失调可见气短乏力，中焦气化不足可见食欲减退，下焦气化失常可见腰膝酸软等。通过结合传统四诊与现代检测指标，可及早发现气化功能异常的风险信号。在生活方式干预方面，应当注重三焦同调：适量运动以促进心肺气

机升降,规律饮食以助脾胃运化生成,充足睡眠以养肾气蒸腾。这种基于气化分层调节的预防策略,既符合中医整体观念,又能有效预防代谢性疾病的发生发展。

5 小 结

本文从气化理论与现代生物能量代谢的关联入手,创新性地提出“气化分层调节”理论,系统阐述了气化理论在代谢性疾病防治中的科学内涵与应用价值。在理论创新方面,提出“气化分层调节”理论,从三焦分层角度重新诠释气化理论的系统调节机制,阐明了上焦主司呼吸、中焦主司运化、下焦主司气化的现代生理学基础,为传统理论注入新的科学内涵。在机制研究方面,运用多组学技术和系统生物学方法,揭示了气化理论与线粒体功能、能量代谢网络的关联机制,证实了三焦分层调节在能量代谢平衡中的重要作用,为气化理论提供了分子生物学依据。在临床应用方面,基于气化分层调节理论,创新性地提出代谢性疾病的辨证分型和治疗策略,建立了气虚、气滞、气陷、气逆四型的分层调节方案,为临床治疗提供了新思路。在预防策略方面,构建了基于三焦分层调节的预防体系,强调早期干预的重要性,提出了从生活方式入手的整体调节方案。本研究不仅深化了对气化理论的认识,也为代谢性疾病的防治提供了新的理论指导和实践方法。未来研究将进一步探索气化分层调节的精确干预技术,为中医理论的现代转化提供新的范式。

参考文献

- [1] 孙兴国. 人体功能一体化自主调控: 整体整合生理学医学理论体系指导运动康复, 实现慢病防治康养的有机整合[C]. 北京: 第八届北京国际康复论坛, 2013: 330-331.
- [2] 林寓淞, 张再良, 周里钢. 基于系统生物学探讨中医气化学说在糖尿病的应用[J]. 世界中医药, 2015, 10(5): 780-783.
- [3] 刘雪娇, 贾越博, 杨珂鸣, 等. 基于气学理论与线粒体能量学关系探讨胃肠动力障碍疾病的病理机制[J]. 上海中医药杂志, 2024, 58(5): 14-18, 32.
- [4] Peek CB, Affinati AH, Ramsey KM, *et al.* Circadian clock NAD⁺ cycle drives mitochondrial oxidative metabolism in mice[J]. *Science*, 2013(6158): 591.
- [5] 王培基, 郭逸文, 王钊, 等. 叶天士除陈气法述要[J]. 浙江中医药大学学报, 2024, 48(7): 828-833.
- [6] Garcia D, Shaw RJ. AMPK: mechanisms of cellular energy sensing and restoration of metabolic balance[J]. *Molecular Cell*, 2017, 66(6): 789-800.
- [7] 舒晴, 孙红丹, 王华, 等. 针刺与艾灸对气虚证心率变异性的不同影响: 随机对照研究[J]. 中国针灸, 2017, 37(1): 25-30.
- [8] 孙大伟, 张铎, 陈海鹏, 等. 益气活血法改善心肌细胞能量代谢作用机制的研究进展[J]. 中医药导报, 2020, 26(14): 111-114.
- [9] Wang R, Hussain A, Guo QQ, *et al.* Oxygen and iron availability shapes metabolic adaptations of cancer cells[J]. *World Journal of Oncology*, 2024, 15(1): 28-37.
- [10] Kimball SR. Interaction between the AMP-activated protein kinase and mTOR signaling pathways[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2006, 38(11): 1958-1964.
- [11] Luo J, Shen S, Xia J, *et al.* Mitochondria as the essence of Yang Qi in the human body[J]. *Phenomics*, 2022, 2(5): 336-348.
- [12] 薛国华, 叶紫梦玮, 徐冰蕊, 等. 基于AMPK信号通路探究脾主运化的科学内涵[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(10): 2484-2487.
- [13] 林桐, 罗文威, 张丽丽, 等. 血管内皮细胞脂肪酸代谢调控及其病理生理意义[J]. 生理科学进展, 2022, 53(3): 229-234.
- [14] 关天旺, 黎艳芳, 刘城. 微RNA-210在微血管功能/能量代谢稳态重建中的调控作用[J]. 中华生物医学工程杂志, 2019, 25(4): 504-508.
- [15] Butterfield DA, Favia M, Spera I, *et al.* Metabolic features of brain function with relevance to clinical features of alzheimer and parkinson diseases[J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 951.
- [16] 李利平, 丁明. 交感神经调节与糖代谢[J]. 国外医学(内分泌学分册), 2003, 23(3): 191-194.
- [17] Li J, Zhu N, Wang Y, *et al.* Application of metabolomics and traditional Chinese medicine for type 2 diabetes mellitus treatment[J]. *Diabetes Metabolic Syndrome and Obesity-targets and Therapy*, 2023, 16: 4269-4282.
- [18] 王国才, 贺玖明. 液相色谱质谱联用技术在临床检测和代谢研究中的应用进展[J]. 国际检验医学杂志, 2018, 39(22): 2750-2755.
- [19] 郭淑贞, 啜文静, 付帮泽, 等. 基于双向凝胶电泳-质谱技术的小型猪心肌缺血气虚血瘀证血浆特征蛋白质研究[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2013, 11(11): 1349-1351.
- [20] Renaud JP, Chung CW, Danielson UH, *et al.* Biophysics in drug discovery: impact, challenges and opportunities[J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2016, 15(10): 679-698.
- [21] 陈瑶. 人血清白蛋白与配体之间相互作用的核磁共振研究[D]. 北京: 中国科学院大学(武汉物理与数学研究所), 2016.
- [22] Zhang Y, Yang Y, Ding L, *et al.* Emerging applications of metabolomics to assess the efficacy of traditional Chinese medicines for treating type 2 diabetes mellitus[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 735410.
- [23] 金烨成. 黄芪一丹参药对治疗缺血性心脏病的补气活血机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] 王雪梅, 王怡婷, 曹莹, 等. 线粒体功能调控动脉粥样硬

- 化的研究进展[J]. 心血管病学进展, 2022, 43(11): 1016-1020, 1049.
- [25] 于晓晴, 钟根深, 叶建平. 生理病理状态下线粒体合成ATP的动态调控机制[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2020, 36(2): 127-134.
- [26] 王丽艳, 徐哲龙. 线粒体功能障碍在心血管疾病中作用机制的研究进展[J]. 天津医药, 2020, 48(2): 146-151.
- [27] 孙大伟, 马生飞, 陈海鹏, 等. 基于能量代谢探讨活血化瘀方药改善气虚症状的机制[J]. 辽宁中医杂志, 2023, 50(9): 54-56.
- [28] 曹振华, 苏润泽. 从胰岛素抵抗角度探讨脾与肠道菌群紊乱的相关性[J]. 河南中医, 2021, 41(4): 515-518.
- [29] 张栋婧. 基于肠道菌群探讨参苓白术散防治痰湿体质易感2型糖尿病的肠道糖异生机制研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2021.
- [30] 肖毅, 谭从娥. 补肾类中药通过线粒体途径干预衰老的研究进展[J]. 环球中医药, 2024, 17(5): 953-958.
- (收稿日期: 2025-02-05; 本文编辑: 叶世英)