

• 科研论著 •

膳食支链氨基酸对儿童青少年血脂异常的影响

陈焱¹, 刘长青², 朱谦让³, 刘怡娅⁴, 田美娜², 王宏伟⁵, 于连龙⁶

1. 日照市人民医院临床营养科, 山东 日照 276827; 2. 河北省疾病预防控制中心营养与食品安全所;
3. 江苏省疾病预防控制中心营养与食品安全所; 4. 贵州省疾病预防控制中心公共卫生监测评价所;
5. 日照市人民医院保健/老年医学科; 6. 山东省疾病预防控制中心公共卫生监测评价所

摘要: **目的** 分析 6~18 岁儿童青少年群体中膳食支链氨基酸(BCAAs)摄入与血脂异常的关系, 为血脂异常防治提供新的思路。**方法** 选取“中国儿童与乳母营养健康监测”四省份 11 019 例 6~18 岁儿童青少年膳食调查与血生化数据。采用食物频率表法获得膳食调查数据, 结合《中国食物成分表》计算儿童青少年人群膳食 BCAAs 摄入量。比较不同 BCAAs 摄入水平组间各血脂异常亚组的患病差异, 利用 logistic 回归模型评估 BCAAs 与血脂异常的关联并利用乘法模型来评估年龄、性别和体质指数(BMI)分别与 BCAAs 的交互作用对血脂异常的影响。**结果** 正常对照组 9 389 例, 血脂异常组 1 630 例, 其中高胆固醇(TC)血症 470 例。总 BCAAs、BCAAs 密度高水平组的高 TC 血症患病率显著高于低水平组($\chi^2=9.554, 18.109, P<0.01$)。分层分析表明, 与低水平组比较, 正常体重组 BCAAs 高水平组($OR=1.781, 95\%CI: 1.326\sim2.391$)和 BCAAs 密度高水平组($OR=2.011, 95\%CI: 1.493\sim2.708$)高 TC 血症发病风险均升高($P<0.05$), 女性中 BCAAs 高水平组($OR=1.721, 95\%CI: 1.243\sim2.384$)、BCAAs 密度高水平组($OR=1.899, 95\%CI: 1.361\sim2.651$)高 TC 血症发病风险升高($P<0.05$), 6~12 岁组 BCAAs 高水平组高 TC 血症发病风险升高($OR=1.447, 95\%CI: 1.100\sim1.905$), 各年龄组 BCAAs 密度高水平组高 TC 血症发病风险升高(6~12 岁 $OR=1.636, 95\%CI: 1.242\sim2.155$; $OR=1.881, 95\%CI: 1.170\sim3.024$)($P<0.05$)。BCAAs 密度与 BMI 对高 TC 血症的影响存在显著交互效应($P=0.027$)。中介效应分析显示 BMI 在总 BCAAs 摄入量、BCAAs 密度与高 TC 血症之间表现出异质性中介效应。**结论** BCAAs 摄入增加是高 TC 血症的独立危险因素, 通过调整膳食结构, 减少红肉及其制品的摄入来限制饮食中 BCAAs 可降低高 TC 血症发病风险。

关键词: 支链氨基酸; 血脂异常; 胆固醇; 高胆固醇血症; 代谢性疾病; 儿童青少年

中图分类号: R179 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2025)10-1101-07 doi:10.11852/zgetbjzz2025-0236

Effect of dietary branched-chain amino acids on dyslipidemia in children and adolescents

CHEN Yao¹, LIU Changqing², ZHU Qianrang³, LIU Yiyi⁴, TIAN Meina², WANG Hongwei⁵, YU Lianlong⁶

1. Clinical Nutrition Department, Rizhao People's Hospital, Rizhao, Shandong 276827, China; 2. Institute for Nutrition and Food Safety, Hebei Province Center for Disease Control and Prevention; 3. Institute of Nutrition and Food Safety, Jiangsu Provincial Center for Disease Control and Prevention; 4. Institute of Public Health Surveillance and Evaluation, Guizhou Center for Disease Control and Prevention; 5. Department of Health Care and Geriatrics, Rizhao People's Hospital; 6. Institute of Public Health Surveillance and Evaluation, Shandong Center for Disease Control and Prevention

Corresponding author: YU Lianlong, E-mail: lianlong00a@163.com

Abstract: **Objective** To analyze the relationship between dietary branched-chain amino acids (BCAAs) intake and the risk of dyslipidemia in children and adolescents aged 6 - 18 years, in order to provide new insights for the prevention and treatment of dyslipidemia. **Methods** Dietary survey and blood biochemical data of 11 019 children and adolescents aged 6 - 18 years in four provinces of the China Children and Lactating Women Nutrition and Health Surveillance (CCLWNHS) project were analyzed. Dietary BCAAs intake was calculated using food frequency questionnaires combined with the *China Food Composition Table*. Differences in the prevalence of dyslipidemia subtypes across different BCAAs intake levels were compared. Logistic regression models were used to assess the association between BCAAs and dyslipidemia, and multiplicative interaction models were employed to evaluate the effects of interactions between BCAAs and age, sex, or

基金项目: 齐鲁卫生与健康杰出青年人才项目(2021.01-2025.12); 山东省医药卫生科技发展计划项目(2019WS436); 山东省自然科学基金项目(ZR2023QH157); 国家卫生健康委公共营养与健康重点实验室开放课题(WLKZF202505); 日照市自然科学基金(RZ2024ZR64)

作者简介: 陈焱(1989—), 男, 副主任医师, 主要研究为营养与疾病。

通信作者: 于连龙, E-mail: lianlong00a@163.com

body mass index (BMI) on dyslipidemia. **Results** Among the participants, 9,389 were in the normal control group, while 1 630 had dyslipidemia, including 470 cases of hypercholesterolemia. The hypercholesterolemia prevalence was significantly higher in the high total BCAAs and high BCAAs density groups compared to the low-intake groups ($\chi^2=9.554$, 18.109, $P<0.01$). Stratified analysis showed that, compared to the low-intake group, the high BCAAs intake group ($OR=1.781$, 95% CI : 1.326 - 2.391) and high BCAAs density group ($OR=2.011$, 95% CI : 1.493 - 2.708) had increased hypercholesterolemia risk in the normal-weight subgroup ($P<0.05$). Compared to the low-intake group, females in the high BCAAs intake group ($OR=1.721$, 95% CI : 1.243 - 2.384) and high BCAAs density group ($OR=1.899$, 95% CI : 1.361 - 2.651) also exhibited elevated hypercholesterolemia risk ($P<0.05$). In the 6 - 12 age group, high BCAAs intake was associated with increased hypercholesterolemia risk ($OR=1.447$, 95% CI : 1.100 - 1.905) compared to the low-intake group, while high BCAAs density elevated hypercholesterolemia risk across all age groups (6 - 12 years old $OR=1.636$, 95% CI : 1.242 - 2.155; 13-18 years old $OR=1.881$, 95% CI : 1.170 - 3.024) ($P<0.05$). A significant interaction effect was observed between BCAAs density and BMI on hypercholesterolemia risk ($P=0.027$). Mediation analysis revealed heterogeneous mediating effects of BMI on the relationship among total BCAAs intake, BCAAs density, and hypercholesterolemia risk. **Conclusions** Increased BCAAs intake is an independent risk factor for hypercholesterolemia. Adjusting dietary patterns by reducing red meat and processed meat consumption to limit BCAAs intake may lower the risk of hypercholesterolemia.

Keywords: branched-chain amino acids; dyslipidemia; cholesterol; hypercholesterolemia; metabolic diseases; children and adolescents

血脂水平受饮食环境因素和机体代谢因素影响,血液中脂质成分的含量和/或结构出现异常即为血脂异常。调查显示中国儿童青少年脂质代谢异常发生率逐年升高,血脂紊乱或异常危害显著,这不仅会影响儿童青少年的生长发育和心理健康,也会因其“轨迹”现象增加心血管系统疾病以及神经系统疾病、内分泌代谢性疾病的患病风险^[1-2]。

支链氨基酸(branched chain amino acids, BCAAs)包括亮氨酸(leucine, Leu)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)和缬氨酸(valine, Val),均为人体必需氨基酸,这些支链氨基酸是日常饮食中蛋白质的关键组成部分,需占必需氨基酸每日摄入量的一半以上。已有大量研究表明血清 BCAAs 与肝脏疾病、心血管疾病、恶性肿瘤、神经系统疾病及代谢性疾病的发病风险有关。同时越来越多的研究显示,血清 BCAAs 水平的升高可对机体脂质代谢产生影响^[3-4]。但是膳食 BCAA 摄入情况与血脂异常的关系尚不明确,尤其是大规模儿童青少年人群的相关研究未见报道。因此,本研究调查四省份儿童青少年人群研究膳食支链氨基酸摄入情况与血脂代谢情况的关系,为血脂异常防治提供新的思路。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究是 2016—2018 年在中国山东省、河北省、江苏省、贵州省开展的“中国儿童与乳母营养健康监测”项目。根据项目工作手册抽样选取 6~18 岁儿童青少年,考虑地域和城乡等分层因素的分布均衡性确定监测点,每个监测点从小学、初中(不包括初三)、高中(不包括高三)分别抽取 280 名,

男女各半。本研究共调查 12 810 例儿童青少年,剔除能量摄入值不合理的男性($<700\text{kCal}$ 或 $>4\,200\text{kCal}$)819 例,女性($<500\text{kCal}$ 或 $>3\,500\text{kCal}$)944 例,缺乏人体测量指标的参与者 12 例,年龄 >18 岁者 16 例,最终共纳入 11 019 例进入研究。本监测项目由中国疾病预防控制中心伦理委员会审查通过(No:201614)。12 岁以上调查对象由本人签署知情同意书,所有监护人均签署知情同意书。

1.2 方法 对选定的 6~18 岁儿童青少年进行个人营养健康状况现状问询,调查人员参照医学体检标准方法(WS/T424-2013)测量身高、体重、腰围、血压等项目并计算体质量指数(body mass index, BMI)。对所有研究对象都采集空腹静脉血液样品,检测血糖(fasting blood glucose, FBG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)等常规指标。采用食物频率调查法统一收集研究对象过去一个月内各种食物消费情况、频率及消费量。按照食物频率膳食调查问卷给出的食物顺序依次进行询问,对于每种食物,采用分阶段回忆法依次进行食物筛查、频率确认、量化校准,以获得所有食物的摄入量。使用中国食物成分表来计算总 BCAAs、Ile、Leu、Val、能量、蛋白质、脂肪、碳水化合物等营养素的每日摄入量。

1.3 质量控制 构建“国家-省-县”三级质控网络,中国疾控中心、各省疾病中心和县(区)级疾控中心分别对技术方案、抽样选定、人员培训、实验室检测、

现场调查、资料收集、数据整理等方面进行质量控制,发现问题及时反馈纠正。膳食调查是关键环节,调查人员充分利用 3D 食物模型、标准化膳食调查图谱等可视化工具,监护人协同访谈帮助研究对象准确回忆食物体积。同时,调查人员熟悉研究对象常用容器容量、常用食物重量大小和生熟比,以便按照食物体积准确估算食物重量,以减少回忆偏倚和测量偏倚。国家级和省级质控组分别至少抽查 5% 膳食调查问卷进行复核,以提高数据的可靠性和准确性。

1.4 判定标准 根据性别年龄别 BMI 界值标准方法(WS/T586—2018)^[6]判断儿童青少年是否超重或肥胖。根据儿童青少年血脂异常防治专家共识^[7]和中国血脂管理指南(2023 年)^[2],将血脂异常分为高 TC 血症(TC≥5.18mmol/L)、高 TG 血症(TG≥1.70mmol/L)、低 HDL-C 血症(HDL-C≤1.04mmol/L)和混合型高脂血症(TC≥5.18mmol/L、TG≥1.70mmol/L)四种类型。

1.5 统计学方法 BCAAs 作为总氨基酸的一类,其摄入量与总蛋白质摄入量高度相关。因此,除去研究 BCAAs 摄入量,本文也研究了 BCAAs 占总蛋白的比例(即 BCAAs 密度)对血脂异常的影响。

本研究采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析。本研究数据样本量较大,根据中心极限定理,数据倾向于正态分布,故本研究测量数据用 $\bar{x} \pm s$ 表示。BCAAs 摄入量及 BCAAs 密度根据三分位水平分为低、中、高 3 组,比较不同组别的人口统计学特征和生化指标,计量资料组间比较采用方差分析,计数资料采用频数(%)表示,组间比较采用 χ^2 检

验。通过 logistic 回归模型估计相关变量的比值比(ORs)和 95% 置信区间(CIs),并分析 BCAAs 和性别、年龄、BMI 与血脂异常的相乘交互作用。使用 Hayes 编制的 SPSS 宏程序 Process 4.1 进行中介效应分析。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结 果

2.1 研究对象的人口学特征及不同 BCAAs 组别各指标的差异分析 本研究共纳入 11 019 例儿童青少年,其中正常对照组 9 389 例,血脂异常组 1 630 例。进一步将血脂异常组分为低 HDL-C 血症(835 例)、高 TC 血症(470 例)、高 TG 血症(534 例)、混合型高脂血症(64 例)。

根据正常对照组 BCAAs 水平按照三分位数法将研究对象分为低水平、中水平和高水平三组。不同组别在年龄、性别、BMI、腰围、血糖、收缩压、舒张压、高 TC 血症、能量、蛋白质、脂肪、碳水化合物摄入等指标上差异有统计学意义($P<0.05$),无论是基于总 BCAA 摄入量还是密度分组,高水平组的高 TC 血症患病率均高于低水平组,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 1、2。

2.2 BCAAs 水平与高 TC 血症的分层分析和交互作用 调整混杂因素后采用 logistic 回归模型分析,结果显示,与低水平组比较,BCAAs 和 BCAAs 密度高水平组高 TC 血症的发病风险均升高($OR=1.434, 95\%CI:1.132\sim1.818; OR=1.718, 95\%CI:1.354\sim2.182$)。对混杂因素分层后分析,BCAAs 及 BCAAs 密度与高 TC 血症的关联性存在差异。与低水平组比较,正常体重组 BCAAs 密度高水平组

表 1 BCAAs 三分位数水平分层的相关变量基线特征 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 1 Characteristics on baseline of related variables according to the tertile distribution of BCAAs ($\bar{x} \pm s$)

变量	BCAAs 水平			F/χ^2 值	P 值
	低(<12.737g)	中(12.737~19.054g)	高(>19.054g)		
年龄(岁)	10.57±3.05	11.19±3.26	11.60±3.20	97.592 ^a	<0.001
BMI(kg/m ²)	18.10±3.70	18.89±3.94	19.43±4.10	106.652 ^a	<0.001
男性(n, %)	1 686 (46.00)	1 763 (48.00)	2 112 (57.00)	52.935 ^b	<0.001
腰围(cm)	61.74±11.08	64.08±11.40	66.09±11.86	132.873 ^a	<0.001
收缩压(mmHg)	110.34±12.55	112.25±12.50	114.58±12.66	104.836 ^a	<0.001
舒张压(mmHg)	66.46±9.53	66.84±9.08	67.47±8.96	11.285 ^a	0.046
血糖(mmol/L)	4.94±0.58	5.09±0.57	5.16±0.56	148.033 ^a	<0.001
高 TG 血症(n, %)	173 (4.72)	159(4.35)	202(5.47)	5.091 ^b	0.078
高 TC 血症(n, %)	128 (3.49)	158(4.32)	184(4.99)	9.554 ^b	0.008
低 HDL-C 血症(n, %)	299 (8.15)	268 (7.32)	268 (7.26)	2.101 ^b	0.350
混合型高脂血症(n, %)	16(0.51)	20 (0.63)	28 (0.89)	3.473 ^b	0.176
血脂异常(n, %)	539 (14.69)	530 (14.48)	561 (15.20)	0.789 ^b	0.674
蛋白质(g/d)	56.79±14.99	97.57±12.35	156.95±35.61	1 696.945 ^a	<0.001
脂肪(g/d)	19.67±12.93	34.42±17.79	55.59±26.92	2 973.459 ^a	<0.001
碳水化合物(g/d)	210.99±77.66	302.5±95.52	400.96±114.48	3 523.486 ^a	<0.001
能量(kCal/d)	1 248.17±384.37	1 910.06±439.51	2 731.96±590.91	8 830.764 ^a	<0.001

注:^aF 值, ^b χ^2 值。

表 2 BCAAs 密度三分位数水平分层的相关变量基线特征 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 2 Characteristics on baseline of related variables according to the tertile distribution of BCAAs intensity ($\bar{x} \pm s$)

变量	BCAAs 密度(mg/g protein)			F/χ^2 值	P 值
	低(<176.528)	中(176.528~183.238)	高(>183.238)		
年龄(岁)	11.33±3.14	11.00±3.23	11.02±3.21	12.431 ^a	<0.001
BMI(kg/m ²)	19.03±3.97	18.78±4.01	18.6±3.87	11.010 ^a	<0.001
男性($n, \%$)	1 927 (52.00)	1 789 (49.00)	1 845 (50.00)	4.787 ^b	0.008
腰围(cm)	64.51±11.51	63.81±11.7	63.61±11.54	6.146 ^a	0.002
收缩压(mmHg)	113.15±12.58	111.93±13.19	112.1±12.24	10.076 ^a	<0.001
舒张压(mmHg)	67.77±9.15	66.44±9.44	66.56±8.95	23.842 ^a	<0.001
血糖(mmol/L)	5.1±0.54	5.03±0.55	5.05±0.63	12.054 ^a	0.001
高 TG 血症($n, \%$)	187 (5.08)	179 (4.87)	168 (4.59)	0.968 ^b	0.616
高 TC 血症($n, \%$)	115 (3.12)	164 (4.47)	191 (5.21)	18.109 ^b	<0.001
低 HDL-C 血症($n, \%$)	318 (8.63)	278 (7.57)	239 (6.52)	10.295 ^b	0.006
混合型高脂血症($n, \%$)	14 (0.45)	25 (0.79)	25 (0.79)	3.762 ^b	0.152
血脂异常($n, \%$)	553 (15.01)	543 (14.79)	534 (14.57)	0.283 ^b	0.868
蛋白质(g/d)	96.4±41.35	103.33±45.41	111.95±53.35	100.976 ^a	<0.001
脂肪(g/d)	33.36±22.52	37.15±24.41	39.31±27.27	54.040 ^a	<0.001
碳水化合物(g/d)	301.91±129.45	297.04±119.25	316.12±123.28	23.440 ^a	<0.001
能量(kCal/d)	1 893.51±780.60	1 935.84±754.37	2 066.03±777.17	49.940 ^a	<0.001

注:^a F 值,^b χ^2 值。

高 TC 血症的发病风险升高($OR=2.011, 95\%CI: 1.493 \sim 2.708$), BCAAs 高水平组高 TC 血症的发病风险也升高($OR=1.781, 95\%CI: 1.326 \sim 2.391$)。与低水平组比较, 女性 BCAAs 高水平组高 TC 血症发病风险升高($OR=1.721, 95\%CI: 1.243 \sim 2.384$), BCAAs 密度高水平组高 TC 血症发病风险也升高($OR=1.899, 95\%CI: 1.361 \sim 2.651$)。与低水平组比较, 6~12 岁组 BCAAs 高水平组高 TC 血症发病风险升高($OR=1.447, 95\%CI: 1.100 \sim 1.905$), 各年龄组 BCAAs 密度高水平组高 TC 血症发病风险均升高(6~12 岁 $OR=1.636, 95\%CI: 1.242 \sim 2.155$; 13~18 岁 $OR=1.881, 95\%CI: 1.170 \sim 3.024$), 差异均有统计学意义($P<$

0.05)。BCAAs、BCAAs 密度作为连续性变量在各分层组中也有类似的正向趋势($P<0.05$)。

BCAAs 及 BCAAs 密度与性别、年龄的交互作用无统计学意义($P>0.05$), 但 BCAAs 密度与 BMI 的交互作用具有统计学意义($P<0.05$)。见表 3。

2.3 BMI 在 BCAAs 摄入对高 TC 血症影响的中介作用 为探讨 BCAAs 对高 TC 血症影响的内在机制, 研究进一步引入 BMI 作为中介变量进行中介效应分析, BCAAs 作为自变量, 高 TC 血症为因变量绘制中介效应路径图。结果显示 BMI 在 BCAAs 与高 TC 血症间存在部分中介效应, 间接效应占比为 10.98%, 在 BCAAs 密度与高 TC 血症间存在遮掩效应, 间接效应占比为 3.12%。见图 1。

表 3 按照不同性别、年龄、BMI 对 BCAAs 与高 TC 血症之间关系的分层分析

Tab. 3 Stratified analysis of the relationship between BCAAs and hypercholesterolemia by sex, age, and BMI

变量		分类变量				连续性变量			
		低	中	高	趋势 P 值	交互作用 P 值	每增加 1 个标准差	P 值	交互作用 P 值
BCAAs	总体	1	1.222(0.960~1.555)	1.434(1.132~1.818)	0.012		1.022(1.010~1.034)	<0.001	
	女	1	1.400(1.013~1.935)	1.721(1.243~2.384)	0.005	0.327	1.029(1.012~1.047)	0.001	0.388
	男	1	1.027(0.715~1.475)	1.143(0.810~1.612)	0.706		1.015(0.998~1.032)	0.075	
	6~12 岁	1	1.337(1.018~1.756)	1.447(1.100~1.905)	0.026	0.314	1.020(1.007~1.034)	0.004	0.748
	13~18 岁	1	0.879(0.524~1.473)	1.378(0.854~2.223)	0.110		1.024(1.001~1.048)	0.044	
	正常体重	1	1.401(1.040~1.888)	1.781(1.326~2.391)	0.001	0.285	1.034(1.019~1.049)	<0.001	0.091
	超重肥胖	1	0.976(0.650~1.467)	0.989(0.664~1.475)	0.993		1.001(0.981~1.022)	0.907	
BCAAs 密度	总体	1	1.447(1.132~1.850)	1.718(1.354~2.182)	<0.001		1.030(1.018~1.042)	<0.001	
	女	1	1.563(1.110~2.200)	1.899(1.361~2.651)	0.001	0.373	1.037(1.020~1.053)	<0.001	0.257
	男	1	1.325(0.930~1.888)	1.533(1.088~2.161)	0.050		1.023(1.007~1.040)	0.005	
	6~12 岁	1	1.372(1.032~1.824)	1.636(1.242~2.155)	0.002	0.709	1.028(1.015~1.042)	<0.001	0.724
	13~18 岁	1	1.555(0.958~2.524)	1.881(1.170~3.024)	0.032		1.031(1.009~1.054)	0.005	
	正常体重	1	1.428(1.040~1.959)	2.011(1.493~2.708)	<0.001	0.027	1.039(1.025~1.054)	<0.001	0.018
	超重肥胖	1	1.433(0.972~2.113)	1.169(0.777~1.757)	0.069		1.011(0.991~1.030)	0.232	

注:调整年龄、性别、BMI、收缩压、舒张压、血糖。

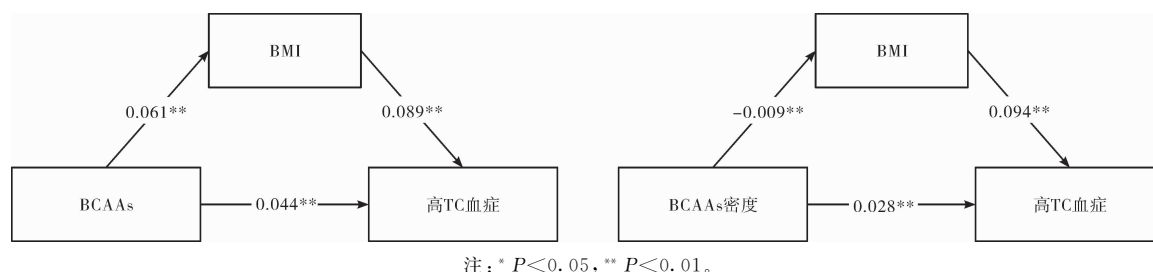


图1 BMI在BCAAs与高TC血症的中介效应路径

Fig. 1 Pathway of the mediating role of BMI in the relationship between BCAAs and hypercholesterolemia

3 讨论

3.1 BCAAs摄入与高胆固醇血症有关 BCAAs在能量代谢、蛋白合成和肌肉复健中发挥着重要作用。本研究发现 BCAAs 总摄入量高水平组血压、BMI、腰围和血糖显著高于低水平组,且这些指标随着 BCAAs 摄入量的增加呈现出显著的梯度差异,这与诸多研究结果相符^[8-10],这可能是由于较高的 BCAAs 总摄入量往往伴随着高蛋白、高能量的摄入。而 BCAAs 密度却呈一定程度的相反趋势,这与某些研究结果一致,如在日本的一项研究中,较高支链氨基酸比例与女性患糖尿病的风险呈负相关^[11],中国北方年轻人调查显示饮食中的 BCAAs 摄入率与超重肥胖呈逆向反比关系^[12]。这表明在东方膳食模式中,适度提高 BCAAs 摄入比有利于血糖、血压、BMI 的控制。但在 BCAAs 与血脂异常的分析中,调整混杂因素后 BCAAs 绝对摄入量与密度增加均显著升高高 TC 血症的发病风险,表明 BCAAs 摄入增加是高 TC 血症的独立危险因素,这与本研究组之前开展的首次中国大规模膳食 BCAAs 与成人血脂异常调查研究的结果一致^[13]。此外,BMI 在 BCAAs 摄入与高 TC 血症间存在不同强度、方向的中介作用,表明 BCAAs 可通过调节 BMI 水平,以差异化路径影响机体血脂代谢。

3.2 膳食 BCAAs 可调节血清 BCAAs 水平影响血脂异常的发生 血清 BCAAs 与脂质代谢之间关系的研究相对较多。但膳食 BCAAs 摄入与血清 BCAAs 水平的关系是复杂的。芬兰一项儿童体力活动与营养调查显示饮食与血清 BCAAs 水平之间无显著关联^[14]。我国一项研究显示在男性群体中观察到亮氨酸摄入和血清 BCAAs 水平之间存在较弱的正相关关系^[15],饮食 BCAAs 摄入量可能不是血清 BCAAs 水平的主要决定因素。然而也有更多的研究指出,膳食 BCAAs 摄入量与血清 BCAAs 水平之间存在正向关联^[16-18]。此外,有研究表明短期高蛋白饮食或补充外源性 BCAAs,能够显著提高血

清 BCAAs 水平^[19],限制 BCAAs 摄入会降低受试者空腹血清 BCAAs 水平^[20-21]。所以在正常代谢情况下血清 BCAAs 水平与 BCAAs 摄入存在正向关联,而血清 BCAAs 已被证明是许多代谢性疾病的生物标志物,其水平升高能预测某些代谢指标的变化^[22]。在诸多血清 BCAAs 与血脂水平的研究中,BCAAs 更多的是与 TG 正向相关,如两项针对中国和德国中老年人人群的研究均显示血清 BCAAs 与高 TG 血症患病风险的增加有关^[23-24],在高加索中年女性调查中发现 BCAAs 与 HDL-C、TG 呈正相关,却与 TC 和 LDL-C 呈弱负相关^[25]。来自墨西哥、芬兰的研究显示儿童血清 BCAAs 水平升高与未来的高 TG 血症的发生风险有关^[26-27]。造成 BCAAs 对血脂指标影响不一致的原因可能与不同地区、不同年龄饮食差异导致的 3 种 BCAAs 比例不同有关,不同比例的 BCAAs 可能通过 mTOR 信号通路对脂质代谢产生不同的调控效果^[3]。

动物实验表明小鼠血清 BCAAs 水平与 TC、TG 等血清脂代谢指标呈正相关^[28],额外补充 BCAAs 可致肥胖小鼠的皮下脂肪含量增加,限制饲料中 BCAAs 含量可促进脂肪动员、加速脂肪分解、抑制肝脏脂质合成,降低小鼠体重、脂肪组织重量,减少脂肪聚集、浸润^[29-30]。也有研究发现限制 BCAAs 摄入可减少小鼠心脏中 TG 的储存量^[31]。

3.3 BCAAs 影响胆固醇代谢的作用机制 在本研究中,BCAAs 仅与高 TC 血症有较强的相关性,这可能是因为相较于 TG,胆固醇更易受体内代谢的影响。有研究显示,摄入过量的 BCAAs 会在脂肪组织中脂质蓄积,BCAAs 可被脂肪细胞分解代谢转化为新的脂肪酸,这为胆固醇的合成代谢提供了必要的物质基础^[32]。同时,BCAAs 还可以激活 mTOR-SREBP1 通路和调节成纤维细胞生长因子 21 的表达诱导,促进胆固醇合成^[33-34]。此外,高水平的 BCAAs 可引发非酒精性脂肪性肝病 (NAFLD) 和胰岛素抵抗,扰乱脂质代谢,影响胆固醇的代谢,增加胆固醇合成^[35-36]。BCAAs 的代谢产

物支链酮酸、BCKA 还可抑制能量代谢的三羧酸循环(TCA 循环),减少脂肪酸的 β -氧化,破坏脂质稳态,进一步加重胆固醇代谢紊乱^[37-38]。这都是导致高 TC 血症的潜在因素。

本研究仍然存在一些局限性。首先,本调查采用食物频率表法获取饮食数据,回忆偏倚难以避免。其次,数据源于横断面研究,因此难以建立因果关系,有待于开展前瞻性研究进一步验证。此外,正常对照组与各血脂异常组样本量差距较大,会导致交互效应的估计值出现偏差,统计效能降低,可能混淆真实的交互效应和生物学实际关系。最后,本研究缺乏血清 BCAAs 的数据,无法获取饮食与血清 BCAAs 水平之间的相关性,今后将继续丰富相关研究,完善 BCAAs 与相关疾病的机制研究。

本研究组之前的研究发现,我国居民的膳食模式发生了显著变化,红肉及加工制品已逐渐成为 BCAAs 最重要的膳食来源^[39]。因此,通过优化蛋白来源,减少红肉摄入量,来限制 BCAAs 的摄入可以降低高胆固醇血症的发生风险,这对于防治代谢性疾病尤其是心血管疾病具有重要的公共卫生实践意义和临床应用价值。

参考文献

- [1] Zeljkovic A, Vekic J, Stefanovic A. Obesity and dyslipidemia in early life: Impact on cardiometabolic risk[J]. *Metabolism*, 2024, 156:155919.
- [2] 中国血脂管理指南修订联合专家委员会. 中国血脂管理指南(2023 年)[J]. *中华心血管病杂志*, 2023, 51(3):221-255. Joint Committee on the Chinese Guidelines for Lipid Management. Chinese guidelines for lipid management (2023) [J]. *Chin J Cardiol*, 2023, 51(3):221-255. (in Chinese)
- [3] Nie C, He T, Zhang W, et al. Branched chain amino acids: Beyond nutrition metabolism[J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(4):954.
- [4] Choi BH, Hyun S, Koo SH. The role of BCAA metabolism in metabolic health and disease[J]. *Exp Mol Med*, 2024, 56(7):1552-1559.
- [5] 中华人民共和国卫生部. 人群健康监测人体测量方法:WS/T 424-2013[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 学龄儿童青少年超重与肥胖筛查:WS/T 586—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [7] 《中华儿科杂志》编辑委员会,中华医学会儿科学分会儿童保健学组,中华医学会儿科学分会心血管学组,等. 儿童青少年血脂异常防治专家共识[J]. *中华儿科杂志*, 2009, 47(6):426-428. The Editorial Board of Chinese Journal of Pediatrics, The Subspecialty Group of Child Health Care, The Society of Pediatrics, Chinese Medical Association, The Subspecialty Group of Cardiovascular Disease, The Society of Pediatrics, Chinese Medical Association, et al. Experts consensus for prevention and treatment of dyslipidemia in children and adolescents[J]. *Chin J Pediatr*, 2009, 47(6):426-428. (in Chinese)
- [8] Yu L, Zhu Q, Song P, et al. Dietary branched-chain amino acids intake and new-onset hypertension: A nationwide prospective cohort study in China[J]. *Amino Acids*, 2024, 56(1):19.
- [9] Liu Y, Zhang C, Zhang Y, et al. Association between excessive dietary branched-chain amino acids intake and hypertension risk in Chinese population[J]. *Nutrients*, 2022, 14(13):2582.
- [10] Lu J, Gu Y, Liu H, et al. Daily branched-chain amino acid intake and risks of obesity and insulin resistance in children: A cross-sectional study[J]. *Obes (Silver Spring)*, 2020, 28(7):1310-1316.
- [11] Nagata C, Nakamura K, Wada K, et al. Branched-chain amino acid intake and the risk of diabetes in a Japanese community: the Takayama study[J]. *Am J Epidemiol*, 2013, 178(8):1226-1232.
- [12] Li YC, Li Y, Liu LY, et al. The ratio of dietary branched-chain amino acids is associated with a lower prevalence of obesity in young northern Chinese adults: An internet-based cross-sectional study [J]. *Nutrients*, 2015, 7(11):9573-9589.
- [13] Yu L, Zhu Q, Li Y, et al. Dietary branched-chain amino acids (BCAAs) and risk of dyslipidemia in a Chinese population[J]. *Nutrients*, 2022, 14(9):1824.
- [14] Laamanen SE, Eloranta AM, Haapala EA, et al. Associations of diet quality and food consumption with serum biomarkers for lipid and amino acid metabolism in Finnish children: The PANIC study[J]. *Eur J Nutr*, 2024, 63(2):623-637.
- [15] Shen QM, Wang J, Li ZY, et al. Sex-specific correlation analysis of branched-chain amino acids in dietary intakes and plasma among Chinese adults[J]. *J Nutr*, 2023, 153(9):2709-2716.
- [16] Hamaya R, Mora S, Lawler PR, et al. Association of modifiable lifestyle factors with plasma branched-chain amino acid metabolites in women[J]. *J Nutr*, 2022, 152(6):1515-1524.
- [17] Schmidt JA, Rinaldi S, Scalbert A, et al. Plasma concentrations and intakes of amino acids in male meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans: A cross-sectional analysis in the EPIC-Oxford cohort[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2016, 70(3):306-312.
- [18] Ding C, Egli L, Bosco N, et al. Plasma branched-chain amino acids are associated with greater fasting and postprandial insulin secretion in non-diabetic Chinese adults[J]. *Front Nutr*, 2021, 8:664939.
- [19] Jakobsen LH, Kondrup J, Zellner M, et al. Effect of a high protein meat diet on muscle and cognitive functions: A randomised controlled dietary intervention trial in healthy men [J]. *Clin Nutr*, 2011, 30(3):303-311.

- [20] Karusheva Y, Koessler T, Strassburger K, et al. Short-term dietary reduction of branched-chain amino acids reduces meal-induced insulin secretion and modifies microbiome composition in type 2 diabetes: A randomized controlled crossover trial[J]. *Am J Clin Nutr*, 2019, 110(5): 1098-1107.
- [21] Ramzan I, Taylor M, Phillips B, et al. A novel dietary intervention reduces circulatory branched-chain amino acids by 50%: A pilot study of relevance for obesity and diabetes [J]. *Nutrients*, 2020, 13(1):95.
- [22] Zheng Y, Li Y, Qi Q, et al. Cumulative consumption of branched-chain amino acids and incidence of type 2 diabetes [J]. *Int J Epidemiol*, 2016, 45(5):1482-1492.
- [23] Yang P, Hu W, Fu Z, et al. The positive association of branched-chain amino acids and metabolic dyslipidemia in Chinese Han population [J]. *Lipids Health Dis*, 2016, 15:120.
- [24] Mook-Kanamori DO, Römisch-Margl W, Kastenmüller G, et al. Increased amino acids levels and the risk of developing of hypertriglyceridemia in a 7-year follow-up[J]. *J Endocrinol Invest*, 2014, 37(4):369-374.
- [25] Kubacka J, Cembrowska P, Sypniewska G, et al. The Association between branched-chain amino acids(BCAAs) and cardiometabolic risk factors in middle-aged caucasian women stratified according to glycemic status[J]. *Nutrients*, 2021, 13(10):3307.
- [26] Moran-Ramos S, Ocampo-Medina E, Gutierrez-Aguilar R, et al. An amino acid signature associated with obesity predicts 2-year risk of hypertriglyceridemia in school-age children[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1):5607.
- [27] Wiklund P, Zhang X, Tan X, et al. Serum amino acid profiles in childhood predict triglyceride level in adulthood: A 7-year longitudinal study in girls [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2016, 101(5):2047-2055.
- [28] Lee JH, Cho YR, Kim JH, et al. Branched-chain amino acids sustain pancreaticcancer growth by regulating lipid metabolism[J]. *Exp Mol Med*, 2019, 51(11):1-11.
- [29] Cummings NE, Williams EM, Kasza I, et al. Restoration of metabolic health by decreased consumption of branched-chain amino acids[J]. *J Physiol*, 2018, 596(4):623-645.
- [30] Cuomo P, Capparelli R, Iannelli A, et al. Role of branched-chain amino acid metabolism in type 2 diabetes, obesity, cardiovascular disease and non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(8):4325.
- [31] McGarrah RW, Zhang GF, Christopher BA, et al. Dietary branched-chain amino acid restriction alters fuel selection and reduces triglyceride stores in hearts of Zucker fatty rats [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2020, 318(2): E216-E223.
- [32] Neinast M, Murashige D, Arany Z. Branched chain amino acids[J]. *Annu Rev Physiol*, 2019, 81:139-164.
- [33] Che L, Xu M, Gao K, et al. Valine increases milk fat synthesis in mammary gland of gilts through stimulating AKT/MTOR/SREBP1 pathway† [J]. *Biol Reprod*, 2019, 101(1):126-137.
- [34] Anderson JG, Hintze K, Marchant ED. Restricting branched-chain amino acids: An approach to improve metabolic health [J]. *J Physiol*, 2018, 596(13):2469-2470.
- [35] Polidori N, Grasso EA, Chiarelli F, et al. Amino acid-related metabolic signature in obese children and adolescents [J]. *Nutrients*, 2022, 14(7):1454.
- [36] Abdulkader AM, Karwi QG, Lopaschuk GD, et al. The role of branched-chain amino acids and their downstream metabolites in mediating insulin resistance [J]. *J Pharm Pharm Sci*, 2024, 27:13040.
- [37] Wang J, Liu Y, Lian K, et al. BCAA catabolic defect alters glucose metabolism in lean mice [J]. *Front Physiol*, 2019, 10:1140.
- [38] Solon-Biet SM, Cogger VC, Pulpitel T, et al. Branched chain amino acids impact health and lifespan indirectly via amino acid balance and appetite control [J]. *Nat Metab*, 2019, 1(5):532-545.
- [39] Yu L, Song P, Zhu Q, et al. The dietary branched-chain amino acids transition and risk of type 2 diabetes among chinese adults from 1997 to 2015: Based on seven cross-sectional studies and a prospective cohort study [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 881847.

收稿日期:2025-03-14 修回日期:2025-06-18 本文编辑:王悦

关爱儿童健康 促进全面发展