

骨骼肌指数与学龄期儿童矮小风险的关联研究

赵慧娟, 赵璐, 李晨怡, 周亦, 王艳, 蔡世忠

苏州大学附属儿童医院儿童保健科, 江苏 苏州 215123

摘要: **目的** 探讨骨骼肌指数(SMI)对学龄期儿童矮小风险的独立影响,并分析年龄与性别的调节作用。**方法** 基于苏州市儿童医院 2016—2022 年健康体检数据,纳入 6~12 岁儿童 1 324 例(矮小 331 例,对照组 993 例)。采用生物电阻抗分析(BIA)测定体成分,计算 SMI(骨骼肌质量/身高²)。通过多因素 logistic 回归分析 SMI 与矮小风险的关联,并调整年龄、性别、体脂百分比(PBF)及年龄别 BMI 的 Z 分数(BAZ)。敏感性分析采用四分位数分组及限制性立方样条(RCS)验证剂量反应关系,通过亚组分析检验年龄与性别的交互效应。**结果** SMI 每增加 1 单位,矮小风险降低 78% ($OR=0.22, 95\%CI: 0.14 \sim 0.35$);完全调整后最高四分位组(Q4)的矮小风险较最低四分位组(Q1)降低 87% ($OR=0.13, 95\%CI: 0.08 \sim 0.21$),且剂量反应趋势显著($P_{趋势} < 0.001$)。RCS 显示 SMI 与矮小风险呈线性负相关(非线性 P 值=0.307)。亚组分析显示,SMI 的保护作用男性中显著强于女性($P_{交互} < 0.01$),而年龄无显著调节效应($P_{交互} > 0.05$)。**结论** SMI 是儿童矮小风险的独立保护因子,其效应具有性别异质性,提示男性儿童骨骼肌质量对身高生长的关键作用。本研究支持将 SMI 纳入儿童生长评估体系,为早期识别矮小高危人群及实施性别差异化干预提供依据。

关键词: 矮小症; 骨骼肌指数; 体成分分析; 儿童健康

中图分类号: R179.1 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2026)01-0053-06 doi: 10.11852/zgetbjzz2025-0375

Association between skeletal muscle index and the risk of short stature in school-age children

ZHAO Huijuan, ZHAO Lu, LI Chenyi, ZHOU Yi, WANG Yan, CAI Shizhong

Department of Child and Adolescent Health Care, Children's Hospital of Soochow University,
Suzhou 215123, Jiangsu, China

Corresponding author: CAI Shizhong, E-mail: szcai@suda.edu.cn

Abstract: **Objective** To investigate the independent effect of skeletal muscle index (SMI) on the risk of short stature in school-age children, and to analyze the moderating effects of age and sex. **Methods** Based on health check-up data from the Children's Hospital of Soochow University (2016—2022), 1 324 children aged 6 - 12 years were included (331 with short stature and 993 controls). Body composition was measured using bioelectrical impedance analysis (BIA), and SMI was calculated as skeletal muscle mass/height². Multivariable logistic regression analysis was performed to assess the association between SMI and short stature risk, adjusting for age, sex, percentage of body fat (PBF), and BMI-for-age Z-score (BAZ). Sensitivity analysis was conducted using quartile grouping and restricted cubic splines (RCS) to examine the dose-response relationship. Subgroup analysis was performed to test the interaction effects of age and sex. **Results** For every 1-unit increase in SMI, the risk of short stature decreased by 78% ($OR=0.22, 95\%CI: 0.14 - 0.35$). After full adjustment, the risk in the highest quartile (Q4) was 87% lower than that in the lowest quartile (Q1) ($OR=0.13, 95\%CI: 0.08 - 0.21$), with a significant dose-response trend ($P_{for trend} < 0.001$). RCS analysis revealed a linear negative correlation between SMI and short stature risk ($P_{nonlinear} = 0.307$). Subgroup analysis indicated that the protective effect of SMI was significantly stronger in boys than in girls ($P_{for interaction} < 0.01$), while no significant moderating effect of age was observed ($P_{for interaction} > 0.05$). **Conclusions** SMI is an independent protective factor against the risk of short stature in children, with its effect showing sex heterogeneity, suggesting the critical role of skeletal muscle mass in height growth, particularly in boys. This study supports the inclusion of SMI in the child growth assessment system, providing a basis for the early identification of high-risk populations and the implementation of sex-specific interventions.

Keywords: short stature; skeletal muscle index; body composition analysis; child health

基金项目: 苏州市科技发展计划项目(SKY2023188)

作者简介: 赵慧娟(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为儿童保健学。

通信作者: 蔡世忠, E-mail: szcai@suda.edu.cn

矮小症是以生长障碍表现为主的疾病,指个体身高低于同年龄、同性别正常人群平均身高 2 个标准差,或低于第 3 个百分位数。矮小症除了是成年期肥胖、高血压、冠心病的危险因素^[1-2],还与儿童心理障碍有关^[3]。传统研究多关注营养、遗传及激素对身高的影响,但近年来体成分相关指标在生长调控中的作用逐渐受到重视。

骨骼肌指数(skeletal muscle mass index, SMI)是骨骼肌质量(skeletal muscle mass, SMM)经身高平方校正后的比值,其核心优势在于消除了身高对骨骼肌量的影响,使得不同身高个体的肌肉状态更具有可比性。目前常规身高测量无法预测矮小风险,具有滞后性, BMI 和骨龄仅能评估营养状态及预测生长潜力,且它们无法区分肌肉与脂肪对生长的贡献,可能掩盖因骨骼肌质量不足而导致的矮小的早期发现^[4-5]。近年来,生物电阻抗分析(bio-impedance analysis, BIA)日益成熟且被广泛应用于儿童群体^[6-7],可以无创便捷地获取包括骨骼肌质量在内的体成分数据。基于此,本研究旨在研究 SMI 对学龄期儿童矮小风险的独立影响,并探讨年龄与性别的调节作用,以期为儿童生长监测提供补充测量指标及为矮小高风险儿童的早期精准科学干预提供理论依据。

1 对象和方法

1.1 对象 选取 2016 年 9 月—2022 年 8 月于苏州市儿童医院儿童保健科接受健康体检并行体成分分析的儿童($n=19\,343$),排除骨骼/代谢性全身疾病($n=130$)、数据缺失($n=317$)、年龄 <6 岁($n=2\,936$)或 >12 岁($n=1\,791$)者后,最终纳入 14 169 人。见图 1。为解决矮小组($n=331$)与正常身高儿童($n=13\,838$)样本量失衡问题,本研究从正常身高儿童中随机抽取 993 例作为研究非矮小组进行分析(矮小组与非矮小组比例 1:3),流程见图 1。抽样后的非矮小组与原正常身高儿童在年龄、性别、身高及 SMI 等指标上均无显著差异($P>0.05$)。见附表(<https://github.com/hjzhaozhao/-1/blob/master/补充表1.docx>)。本研究已通过苏州大学附属儿童医院伦理委员会审批(NO. 2021CS092),并获得儿童监护人知情同意。

1.2 SMI 的定义 SMI 是基于体成分分析技术建立的骨骼肌质量标准化指标,在本研究中由生物电阻抗分析法体成分分析仪检测获取 SMM 数据,采用公式 $SMI=SMM(kg)/身高^2(m^2)$ 计算得出。

1.3 协变量 本研究中的核心协变量包括人口统

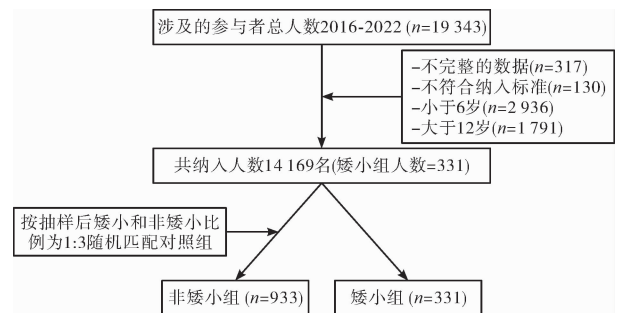


图 1 研究对象纳入流程图

Fig. 1 Flow chart of study inclusion

计学特征及体成分指标。所有参与者均通过生物电阻抗分析仪获取基础数据。人口统计学特征涵盖年龄与性别,其中年龄作为生长发育阶段的核心指标,性别用于校正生理差异对 SMM 的影响。体成分指标包含体脂百分比(percentage body fat, PBF)及年龄别 BMI 的 Z 分数(BMI-for-age Z score, BAZ),依据中国 0~18 岁 BMI 生长标准值计算^[8],用于评估体重状态的年龄—性别标准化水平。关于其他体成分参数(如总水分、蛋白质质量等),因其与 SMM 存在共线性或潜在中介效应,为避免过度调整未被纳入模型。

1.4 人体成分的测量 人体测量:儿童穿薄衣站立,身高体重由专业人员使用校准设备测量,精度精确到 0.1cm 和 0.1kg 并记录。体成分测量:应用人体成分分析仪(Inbody J 20, 韩国 Inbody 公司)测量儿童体成分,测量环境温度控制在 22℃~25℃,测量前空腹 12h,排空膀胱,脱去鞋袜,穿轻便衣物,按正确姿势站立,由专业操作人员操作仪器进行测量。记录测量结果总水分、蛋白质、矿物质、腰臀比、基础代谢率、SMM、PBF。

1.5 统计学方法 统计分析使用 R 语言(v4.3.1)完成,连续变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示,分类变量以频数(%)描述,组间比较采用 t 检验及 χ^2 检验。采用 logistic 回归模型分析 SMI 与矮小的关联,计算 OR 值及 95%CI。敏感性分析部分将 SMI 按四分位数分组,以验证结果的稳健性。采用限制性立方样条(restricted cubic splines, RCS)检验 SMI 与矮小风险的剂量-反应关系。亚组分析中按年龄和性别分层检验效应异质性。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 参与者的基线特征 研究对象共 1 324 名儿童,其中矮小儿童 331 例(25.0%),非矮小儿童 993 例(75.0%)。两组儿童在年龄上差异无统计学意义($P>0.05$)。矮小组男性比例显著高于非矮小组

(56.2% vs. 43.8%, $P<0.001$),矮小组除了身高体重低于非矮小组儿童外,总水分、蛋白质、矿物质、腰臀比、基础代谢率均低于正常身高儿童($P<0.001$)。此外,矮小组儿童体成分特征指标上 BAZ、PBF、脂肪质量指数、非脂肪质量指数及 SMI 低于非矮小组儿童,差异有统计学意义($P<0.001$)。见表 1。

表 1 研究对象的基本特征($\bar{x}\pm s$)
Tab. 1 General characteristics of participants($\bar{x}\pm s$)

指标	非矮小组 ($n=993$)	矮小组 ($n=331$)	t/χ^2 值	P 值
年龄(岁)	8.78±1.65	8.68±1.68	0.951 ^a	0.347
性别(例,%)			44.746 ^b	<0.001
男性	351 (35.3)	186 (56.2)		
女性	642 (64.7)	145 (43.8)		
身高(cm)	132.47±10.80	118.04±8.82	21.916 ^a	<0.001
体重(kg)	32.15±10.90	22.21±5.63	15.879 ^a	<0.001
BAZ	0.68±1.41	-0.31±1.07	11.630 ^a	<0.001
腰臀比	0.74±0.07	0.70±0.04	10.629 ^a	<0.001
基础代谢率	887.58±124.00	753.31±72.60	18.695 ^a	<0.001
总水分	17.59±4.21	13.04±2.45	18.648 ^a	<0.001
蛋白质	4.68±1.12	3.47±0.67	18.604 ^a	<0.001
矿物质	1.69±0.41	1.23±0.26	19.004 ^a	<0.001
PBF	20.71±3.82	19.58±2.48	5.042 ^a	<0.001
脂肪质量指数	4.45±2.83	3.11±1.69	8.171 ^a	<0.001
非脂肪质量指数	13.45±1.28	12.62±0.86	10.985 ^a	<0.001
SMI	6.76±0.88	6.00±0.64	14.517 ^a	<0.001

注:^a t 值,^b χ^2 值。

2.2 SMI 与身材矮小之间的关联 通过多因素 logistic 回归分析探讨 SMI 与儿童矮小风险的关联性。在未调整模型中,SMI 每增加 1 单位,矮小风险降低 76%($OR=0.24,95\%CI: 0.18\sim0.32$)。在完全调整的模型中,SMI 每增加 1 单位,矮小风险显著降低 78%($OR=0.22,95\%CI: 0.14\sim0.35$),脂肪质量指数与非脂肪质量指数同样与矮小风险呈负相关,但效应较弱(脂肪质量指数 $OR=0.59,95\%CI: 0.42\sim0.82$;非脂肪质量指数 $OR=0.67,95\%CI: 0.53\sim0.84$)。见表 2。

敏感性分析中,以 SMI 最低四分位数(Q1)为参

照组,未调整模型下 Q2、Q3、Q4 组的 OR 值与 95% CI 分别为 0.43(0.31~0.59)、0.19(0.13~0.27)、0.17(0.10~0.29),调整年龄和性别后分别为 0.39(0.28~0.55)、0.14(0.09~0.21)、0.05(0.03~0.08),完全调整模型中则分别为 0.48(0.34~0.67)、0.38(0.21~0.66)、0.13(0.08~0.21),其中最高四分位组(Q4)在完全调整后风险较 Q1 组降低 87%;所有模型中均观察到显著的剂量反应趋势(趋势 P 值<0.001),表明 SMI 水平升高与儿童矮小风险降低存在稳健的负向关联,且独立于人口学及 BAZ、PBF 等体成分因素。见表 2。

表 2 SMI 与矮小风险关联的多因素 Logistic 回归分析 [OR 值(95% CI)]

Tab. 2 Multivariate logistic regression analysis of the association between SMI and the risk of short stature [OR (95% CI)]

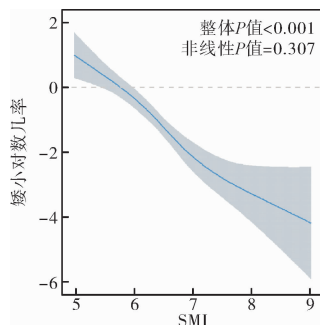
	模型 1	模型 2	模型 3
SMI	0.24(0.18~0.32)	0.18(0.14~0.24)	0.22(0.14~0.35)
脂肪质量指数	0.78(0.72~0.83)	0.75(0.70~0.81)	0.59(0.42~0.82)
非脂肪质量指数	0.50(0.43~0.58)	0.48(0.41~0.56)	0.67(0.53~0.84)
SMI 四分位数			
Q1	1	1	1
Q2	0.43(0.31~0.59)	0.39(0.28~0.55)	0.48(0.34~0.67)
Q3	0.19(0.13~0.27)	0.14(0.09~0.21)	0.38(0.21~0.66)
Q4	0.17(0.10~0.29)	0.05(0.03~0.08)	0.13(0.08~0.21)
趋势 P 值	<0.001	<0.001	<0.001

注:模型 1 未调整变量;模型 2 按年龄、性别调整协变量;模型 3 按年龄、性别、PBF、BAZ 调整协变量。

进一步嵌套模型似然比检验结果显示,在调整年龄、性别、BAZ 和 PBF 的模型上加入脂肪质量指

数、非脂肪质量指数后,模型拟合显著改善($\chi^2 = 12.58$, $P=0.006$)。继续加入 SMI 后,模型拟合幅度进一步改善($\chi^2 = 406.21$, $P<0.001$),其增量贡献显著大于脂肪质量指数/非脂肪质量指数的 32 倍,表明 SMI 对矮小风险的预测能力显著优于脂肪质量指数和非脂肪质量指数。

2.3 SMI 与矮小风险的线性关系 RCS 分析显示,SMI 与矮小风险之间存在线性剂量反应关系(非线性 P 值=0.307)。见图 2。



注:该模型调整年龄、性别、PBF、BAZ 协变量。

图 2 SMI 与矮小风险对数几率的剂量反应关系

Fig. 2 Restricted cubic spline of SMI and the logistic odds of short stature

2.4 SMI 与矮小相关性的亚组分析 通过亚组分析探讨 SMI 和矮小之间的关联是否因年龄和性别的差异而不同。调整协变量后,结果显示 SMI 与年龄无显著交互效应($P=0.5490$),且在各个年龄亚组中 SMI 均与矮小风险呈显著负相关。然而,在性别亚组的结果中显示 SMI 与性别存在交互作用($P<0.01$),SMI 在男性中对身高的保护效应显著强于女性。见图 3。

3 讨论

3.1 SMI 水平与矮小风险的独立关联 本研究系统阐明了学龄期儿童 SMI 与矮小风险的关联性 & 异质性特征。具体来说,SMI 每增加 1 单位,矮小风险降低 78% ($OR=0.22$, 95% $CI:0.14\sim0.35$),且这一结果独立于 PBF、BAZ 等肥胖相关指标。尽管在既往研究中有结果表明 SMM 的增加与身高呈现正相关关系^[9],但这一结果无法阐明身高本身对骨骼肌量增加的固有影响,对比之下,本研究创新性地采用骨骼肌质量与身高标准化后的指数 SMI,从而更精准地揭示骨骼肌的质量与身材矮小之间的关系并进一步量化风险结果。结果还表明 SMI 对矮小风险的预测能力明显高于其他体成分指标如脂肪质量指数、非脂肪质量指数。从机制上解释,本结果与

GH/IGF-1 轴调控理论一致:IGF-I 通过激活 Akt/mTOR 通路促进骨骼肌蛋白质合成,而 SMI 低下可能反映 GH 分泌不足或 IGF 系统紊乱,进而抑制骨骼纵向生长^[10-11]。此外,骨骼肌通过调节钙稳态(如 RyR1 活性)及线粒体功能维持代谢活力^[12],其质量下降可能导致能量代谢失衡,加剧生长迟滞。值得注意的是,既往有研究指出身材矮小可能与体脂成分有关^[13],但在本研究结果中,校正了 PBF、BAZ 后,SMI 的独立效应依然显著,提示骨骼肌的保护作用可能超越单纯的体成分平衡。

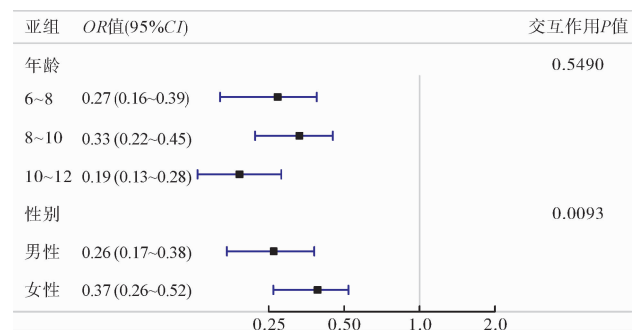


图 3 SMI 与矮小相关性的亚组分析

Fig. 3 Subgroup analysis of the association between SMI and short stature

3.2 SMI 保护效应的性别异质性 本研究中性别交互作用表明,与女童相比,男童中 SMI 的保护效应更强。这一差异可能与性激素调控的肌肉合成代谢差异相关^[14]。研究表明,雄激素可通过激活蛋白质合成通路中 mTOR 信号,促进肌蛋白合成,同时增强生长激素的脉冲式分泌^[15-16]。此外,在基础状态下,男性骨骼肌会表现出更高的蛋白合成速率,且由于男性对睾酮的高敏感性,雄激素受体(AR)介导的肌肉肥大效应可能进一步放大 SMI 的保护效应^[17]。相反,女性雌激素除了可以通过 mTOR 通路促进蛋白质合成外,还可以抑制肌肉炎症反应保护肌肉损伤^[18]和通过调控脂肪代谢^[19]间接影响与生长的关联。但是不同的雌激素浓度会对骨骼产生不同的影响,高水平的雌激素反而会加速骨骼的闭合,终止长骨生长^[20]。值得注意的是,尽管 5~6 岁儿童的睾酮、雌二醇等性激素水平较低,但是性激素的昼夜节律在儿童早期即已建立,且已呈现夜间升高的节律,并在青春期启动前逐渐升高^[21]。对此,未来可以结合青春期内分泌动态监测,以进一步明确睾酮/雌激素比值对 SMI-身高轴的调控作用,为性别特异性干预的必要性提供新的证据。

3.3 降低矮小风险的新思路:从治疗转向预防 尽管目前发现导致矮小的病因众多,包括营养、遗传、

生长激素缺乏等,但是仍有约 60%~80% 患儿属于无明显病因的特发性矮小^[22],这给矮小的针对性治疗带来了挑战。有报道表明在青春期结束前用芳香酶抑制剂与生长激素联用,可以抑制雄激素转化为雌激素,在推迟骨骺闭合时间的同时增加儿童的身高生长潜力^[23]。但是生长激素补充治疗的风险是多方面的,有队列研究显示,在接受生长激素治疗的儿童中,平均年龄约 10 岁,虽然总体数据显示了激素治疗的有效及安全性,但仍有大约 3.7% 的严重不良事件发生,包括肿瘤、癌症、脊柱侧弯等疾病^[24],所以提早预测矮小风险显得尤为重要。相较于依赖遗传风险评估或营养摄入问卷的传统方法,体成分数据通过生物电阻抗法直接量化肌肉质量,可减少因主观报告或回忆偏倚导致的误差。根据 SMI 水平的不同,可以早期识别出矮小高风险人群,并进行运动或饮食干预进一步提高骨骼肌的质量^[25-26],从而促进身高生长,这对降低矮小风险或许是更安全有效的方法之一。根据 Ito 等^[27]对 340 名儿童的调查研究,达到每周至少 5d,每天至少进行 60min 中度至剧烈体育活动标准的儿童,SMI 显著高于未达标儿童 0.39 个单位,结合本研究,这将降低儿童 30% 的矮小风险。此外,在饮食上建议采用传统饮食模式,增加多样化天然食物的摄入,包括红肉、白肉、非加工鱼类、全谷物(如燕麦、糙米)、坚果、新鲜蔬菜水果及适量乳制品,这些食物提供优质蛋白质促进肌肉合成,其中的抗炎营养素(如 omega-3 脂肪酸、纤维)及多种微量营养素(如镁、锌)则有助于降低身体炎症,并支持健康的代谢功能。同时减少西方饮食模式食物,如高度加工食品、披萨、香肠/培根等加工肉类、薯片、含糖酱料(番茄酱)及精制碳水(白面包)等,此类食物的促炎成分(如饱和脂肪、添加糖),可能加剧全身炎症,干扰肌肉代谢信号通路,并导致营养单一化,不利于肌肉质量的维持和增加^[28-29]。

3.4 本研究优势与局限性评估 本研究具有多方面优势:基于大规模儿童体成分数据,及采用了标准化测量流程确保了数据的可靠性;利用限制性立方样条揭示了 SMI 与矮小风险的线性剂量反应关系(非线性检验 $P=0.307$),并通过亚组分析发现 SMI 的保护效应存在性别异质性(交互作用 $P=0.0093$),为儿童生长障碍的性别差异化干预提供了新依据。然而,本研究仍存在一定的局限性:首先,横断面设计中的剂量反应关系结果无法明确 SMI 与矮小症的因果关系,需纵向研究或实验性研究验证时序关联;其次,尽管 SMI 通过标准化测量减少

了主观报告偏倚,但骨骼肌质量的发育可能受遗传、饮食、出生情况、喂养、睡眠等影响,由于本研究基于健康体检数据库,此类数据未被常规收集,未能纳入这些潜在的混杂因素,未来可以纳入更全面的可能影响儿童矮小的相关因素深化研究;最后,本研究的单中心数据可能限制结论对农村或社会经济较差人群的普适性,这可能需通过多中心队列研究的进一步验证。

总之,本研究确定了 SMI 与矮小风险的负性关联,SMI 可作为儿童矮小风险筛查的重要生物标志物。在临床实践中,建议将 SMI 纳入儿童生长发育的常规评估体系,并且需尤其关注男童肌肉质量的提升。

参考文献

- [1] Korhonen PE, Kautiainen H, Eriksson JG. The shorter the person, the higher the blood pressure: A birth cohort study [J]. *J Hypertens*, 2017, 35(6):1170-1177.
- [2] Bosy-Westphal A, Plachta-Danielzik S, Dörhöfer RP, et al. Short stature and obesity: Positive association in adults but inverse association in children and adolescents [J]. *Br J Nutr*, 2009, 102(3):453-461.
- [3] Casaña-Granell S, Lacomba-Trejo L, Montoya-Castilla I, et al. Adolescence and short stature: Factors in adjustment to the diagnosis [J]. *Qual Life Res*, 2021, 30(8):2275-2286.
- [4] Weber DR, Leonard MB, Zemel BS. Body composition analysis in the pediatric population [J]. *Pediatr Endocrinol Rev*, 2012, 10(1):130-139.
- [5] Bufano A, Cartocci A, Benenati N, et al. New specific skeletal muscle mass index cut-offs for the assessment of sarcopenia in patients with severe obesity [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2024, 15:1369584.
- [6] Prins M, Hawkesworth S, Wright A, et al. Use of bioelectrical impedance analysis to assess body composition in rural Gambian children [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2008, 62(9):1065-1074.
- [7] Janssen I, Heymsfield SB, Baumgartner RN, et al. Estimation of skeletal muscle mass by bioelectrical impedance analysis [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2000, 89(2):465-471.
- [8] 李辉,季成叶,宗心南,等. 中国 0~18 岁儿童、青少年体块指数的生长曲线 [J]. *中华儿科杂志*, 2009, 47(7):493-498.
Li H, Ji CY, Zong XN, et al. Body mass index growth curves for Chinese children and adolescents aged 0 to 18 years [J]. *Chin J Pediatr*, 2009, 47(7):493-498. (in Chinese)
- [9] Wu D, Shi L, Xu Q, et al. The different effects of skeletal muscle and fat mass on height increment in children and adolescents aged 6-11 years: A cohort study from China [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13:915490.
- [10] Kraemer WJ, Ratamess NA, Hymer WC, et al. Growth hormone(s), testosterone, insulin-like growth factors, and cortisol: Roles and integration for cellular development and growth with exercise [J]. *Front Endocrinol (Lau-*

- sanne), 2020, 11:33.
- [11] Yang G, Yang Q, Li Y, et al. Association between the growth hormone/insulin-like growth factor-1 axis and muscle density in children and adolescents of short stature[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2022, 13:920200.
- [12] Bresciani E, Rizzi L, Coco S, et al. Growth hormone secretagogues and the regulation of calcium signaling in muscle[J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(18):4361.
- [13] López-Alvarenga JC, Montesinos-Cabrera RA, Velázquez-Alva C, et al. Short stature is related to high body fat composition despite body mass index in a Mexican population[J]. Arch Med Res, 2003, 34(2):137-140.
- [14] Pataky MW, Dasari S, Michie KL, et al. Impact of biological sex and sex hormones on molecular signatures of skeletal muscle at rest and in response to distinct exercise training modes[J]. Cell Metab, 2023, 35(11):1996-2010. e6.
- [15] Kraemer WJ, Ratamess NA, Nindl BC. Recovery responses of testosterone, growth hormone, and IGF-1 after resistance exercise[J]. J Appl Physiol, 2017, 122(3):549-558.
- [16] Urban RJ. Growth hormone and testosterone: Anabolic effects on muscle[J]. Horm Res Paediatr, 2011, 76 Suppl 1: 81-83.
- [17] Griggs RC, Kingston W, Jozefowicz RF, et al. Effect of testosterone on muscle mass and muscle protein synthesis[J]. J Appl Physiol (1985), 1989, 66(1):498-503.
- [18] Anderson LJ, Liu H, Garcia JM. Sex differences in muscle wasting[M]//Mauvais-Jarvis F. Sex and gender factors affecting metabolic homeostasis, diabetes and obesity. Cham: Springer International Publishing, 2017:153-197.
- [19] Mauvais-Jarvis F, Clegg DJ, Hevener AL. The role of estrogens in control of energy balance and glucose homeostasis[J]. Endocr Rev, 2013, 34(3):309-338.
- [20] Alonso LC, Rosenfield RL. Oestrogens and puberty[J]. Best Pract Res Clin Endocrinol Metab, 2002, 16(1): 13-30.
- [21] Mitamura R, Yano K, Suzuki N, et al. Diurnal rhythms of luteinizing hormone, follicle-stimulating hormone, testosterone, and estradiol secretion before the onset of female puberty in short children[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2000, 85(3):1074-1080.
- [22] 中华医学会儿科学分会内分泌遗传代谢学组. 矮身材儿童诊治指南[J]. 中华儿科杂志, 2008, 46(6): 428-430. Subspecialty Group of Endocrinologic, Hereditary and Metabolic Diseases, Society of Pediatrics, Chinese Medical Association. Guidelines for diagnosis and treatment of children with short stature[J]. Chin J Pediatr, 2008, 46(6):428-430. (in Chinese)
- [23] Mauras N, Ross J, Mericq V. Management of growth disorders in puberty: GH, GnRHa, and aromatase inhibitors: A clinical review[J]. Endocr Rev, 2023, 44(1):1-13.
- [24] Maghnie M, Ranke MB, Geffner ME, et al. Safety and efficacy of pediatric growth hormone therapy: Results from the full KIGS cohort[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2022, 107(12):3287-3301.
- [25] Zheng X, Liu X, Guo Y, et al. Physical exercise and epigenetic modifications in skeletal muscle, brain, and heart[J]. Epigenetics Chromatin, 2025, 18:12.
- [26] Deldicque L. Protein intake and exercise-induced skeletal muscle hypertrophy: An update[J]. Nutrients, 2020, 12(7):2023.
- [27] Ito T, Sugiura H, Ito Y, et al. Relationship between the skeletal muscle mass index and physical activity of Japanese children: A cross-sectional, observational study[J]. PLoS One, 2021, 16(5):e0251025.
- [28] Davis JA, Mohebbi M, Collier F, et al. Diet quality and a traditional dietary pattern predict lean mass in Australian women: Longitudinal data from the Geelong Osteoporosis Study[J]. Prev Med Rep, 2021, 21:101316.
- [29] Davis JA, Mohebbi M, Collier F, et al. The role of diet quality and dietary patterns in predicting muscle mass and function in men over a 15-year period[J]. Osteoporos Int, 2021, 32(11):2193-2203.

收稿日期:2025-04-18 修回日期:2025-08-28 本文编辑:王悦

声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被 CNKI 中国期刊全文数据库收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付(已经抵扣稿件处理费),不再另付。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《中国儿童保健杂志》编辑部