

• 科研论著 •

基于生物电阻抗与决策树模型的学龄前儿童超重肥胖筛查与亚型识别研究

马瑞, 沈张逸霏, 陆乐, 唐锦阳

上海师范大学体育学院, 上海 201400

摘要: **目的** 基于生物电阻抗技术(BIA)与决策树模型,构建肥胖亚型分类规则,旨在识别学龄前儿童超重肥胖的敏感指标及其亚型特征,为精准干预提供依据。**方法** 于2024年3—12月采用方便抽样选取上海市550名3~6岁学龄前儿童,通过INBODY J30测定身体成分指标,对比BMI与体脂百分比(PBF)的肥胖检出差异;通过共线性分析筛选出关键变量,采用CRT决策树构建亚型分类规则,并借助XGboost评估特征重要性,通过10折交叉验证模型的稳健性。**结果** BMI标准超重肥胖检出率为26.5%,而PBF标准为21.78%。体成分分析显示,超重肥胖儿童与正常体重儿童有29项指标存在显著差异,通过逐步回归分析解决变量间的共线性问题,保留10项变量进入决策树模型构建。基于CRT算法生成的决策树包含17个节点(9个终端节点),将超重肥胖分为三型:下肢脂肪主导型(节点10)、骨骼肌质量低下型(节点16)和高肌肉量型(节点11),模型总体准确率达97.5%。**结论** 基于BIA与决策树的多维筛查模型可精准识别学龄前儿童超重肥胖亚型,研究提出的亚型分类框架为制定差异化干预策略提供参考和依据,对优化儿童肥胖早期防控措施具有重要实践价值。

关键词: 决策树; 学龄前儿童; 超重; 肥胖; 预测模型

中图分类号: R179

文献标识码: A

文章编号: 1008-6579(2025)10-1114-07

doi: 10.11852/zgetbjzz2025-0336

Screening and subtype identification of overweight and obesity in preschool children based on bioelectrical impedance analysis and decision tree modeling

MA Rui, SHEN Zhangyifei, LU Le, TANG Jinyang

College of Physical Education, Shanghai Normal University, Shanghai 201400, China

Corresponding author: SHEN Zhangyifei, E-mail: 1634530372@qq.com

Abstract: **Objective** To develop a classification framework for overweight/obesity subtypes based on bioelectrical impedance analysis (BIA) and decision tree modeling, with the goal of identifying sensitive indicators and characteristic features of overweight/obesity subtypes among preschool children, so as to provide a basis for targeted interventions.

Methods A convenience sample of 550 preschool children aged 3 - 6 years was recruited in Shanghai from March to December 2024. Body composition was measured using the INBODY J30 device. Differences in obesity detection between body mass index (BMI) and percent body fat (PBF) were compared. Key variables were selected through collinearity analysis. A classification and regression tree (CRT) algorithm was applied to construct subtype classification rules. Feature importance was evaluated using XGBoost, and model robustness was assessed via 10-fold cross-validation. **Results** The detection rate of overweight/obesity was 26.5% based on BMI criteria and 21.78% based on PBF criteria. Body composition analysis revealed 29 indicators that significantly differed between overweight/obese and normal-weight children. Stepwise regression was used to address multicollinearity, resulting in 10 variables being included in the decision tree model. The CRT-generated tree contained 17 nodes (9 terminal nodes) and classified obesity into three subtypes: lower-body fat-dominant (Node 10), low skeletal muscle mass (Node 16), and high muscle mass (Node 11). The overall accuracy of the model reached 97.5%. **Conclusions** A multidimensional screening model integrating BIA and decision tree analysis can accurately identify overweight/obesity subtypes in preschool children. The proposed subtype classification framework offers valuable insights for developing differentiated intervention strategies and has practical significance for optimizing early prevention and control measures for childhood obesity.

Keywords: decision tree; preschool children; overweight; obesity; prediction model**基金项目:**上海市教育科学研究项目(C2022113)**作者简介:**马瑞(1973—),女,博士,主要研究方向为学校体育、幼儿体育。**通信作者:**沈张逸霏, E-mail: 1634530372@qq.com

儿童超重肥胖已成为威胁我国儿童青少年身心健康的重要公共卫生问题。据《中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)》显示,6 岁以下儿童的肥胖率呈现指数级增长态势,从 1986 年 0.91% 跃升至 2020 年的 10.4%,预计 2030 年将突破 15.6%^[1]。为此国家卫生健康委员会 2024 年启动“体重管理年”行动,强调肥胖防控应覆盖全人群和全生命周期^[2]。学龄前期是继胎儿期之后,全生命周期中的第二个脂肪重聚关键时期^[3],此时期幼儿的脂肪细胞处于活跃的增殖和分化阶段^[4],一旦发生肥胖,不仅难以逆转,还会显著增加成年后肥胖及相关代谢性疾病风险^[5]。纵向队列研究表明,脂肪重聚早于 5.5 岁的个体成年后肥胖的风险将增加至 4 倍^[6],进而增加罹患慢性非传染性疾病的风险^[7]。因此,学龄前期是早期预防与控制肥胖发生的关键窗口期。

目前,国内学龄前儿童超重肥胖筛查主要依赖体质质量指数(body mass index, BMI),其操作便捷性适用于大规模人群评估,但本质上是体重与身高的简单函数,无法区分脂肪与非脂肪组织。国家卫生健康委办公厅发布的《肥胖症诊疗指南(2024 版)》中也提到 BMI 在预测肥胖及相关健康风险方面具有局限性^[8]。学龄前儿童群体的身体成分随年龄增长而动态变化,单纯依据 BMI 易导致误判——部分 BMI 偏高者可能源于肌肉发达或骨密度较高而非脂肪过量,而某些 BMI 正常者却可能存在脂肪过度积聚的“隐性肥胖”问题。当前研究中缺乏基于学龄前儿童身体成分特征的肥胖判定标准,难以满足肥胖早期识别与干预需求。生物电阻抗法(bio-impedance analysis, BIA)虽能精准量化脂肪分布与肌肉量等指标,但现有研究多基于线性模型,缺乏对高风险人群的直观分类规则。

鉴于此,本研究提出基于决策树模型的超重肥胖亚型分类框架,旨在 1) 系统比较 BMI 和体脂百分比(percentage of body fat, PBF)标准在学龄前儿童超重肥胖筛查中的效度差异;2) 采用逐步回归消除共线性干扰,筛选出影响超重肥胖判定的关键体成分指标;3) 构建基于决策树模型的超重肥胖亚型分类规则,以推动肥胖防控从“一刀切”向“精准分型”转变,助力完善我国学龄前儿童肥胖防控体系,推动全生命周期健康管理的深入发展。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究于 2024 年 3—12 月 in 上海市 4 所幼儿园的常规健康体检队列中选取的 3~6 岁学龄前儿童为研究对象。纳入标准:1) 无先天性代谢

疾病且近 3 个月内未经历重大手术或感染;2) 年龄在 3~6 岁;3) 监护人签署知情同意书。研究通过伦理委员会批准(上海师大伦理[2024]84 号)。最终 550 人纳入本研究。

1.2 数据采集 身体成分数据采用 INBODY J30 生物电阻抗分析仪进行标准化测量。测量前要求受试者空腹 4h、排空膀胱并避免剧烈运动,穿着轻便衣物站立于设备电极板上,通过多频段电流(5kHz-50kHz-250kHz)测定细胞水分、蛋白质、无机盐、脂肪重量、肌肉量及各节段脂肪等指标。

1.3 超重肥胖判定标准 研究中 BMI 依据“中国 0~18 岁儿童、青少年体块指数的生长曲线”制定的中国 3~6 岁儿童超重和肥胖的 BMI 参考界值点标准作为筛查指标^[9]。具体标准为:男童 BMI>16.4~16.8 kg/m² 可判定为超重肥胖,女童 BMI>16.6~16.8 kg/m² 可判定为超重肥胖,且该年龄段 BMI 界值均表现出随年龄增长先降后升的动态特点。PBF 依据拜斯倍斯公司标准,该标准基于其 InBody 仪器多频 BIA 技术,与金标准双能 X 射线吸收法(DEXA)高度相关^[10],其儿科算法整合了全球超 10 万例儿童数据,被 WHO 合作项目及多国公共卫生机构采用^[11]。在该标准下,4~6 岁儿童的超重/肥胖判定临界值为 PBF>21%~22%,即体脂肪占实际体重的比例超过该范围即判定为超重/肥胖。

1.4 质量控制 身体成分测量的人员均接受统一培训,操作考核后上岗,测试仪器每日测量前进行校准,以确保测评结果的准确性。

1.5 统计学方法 数据分析采用 SPSS 24.0 统计软件处理数据。正态分布计量数据采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用独立样本 t 检验;计数资料以例数(%)表示,两组之间比较采用 χ^2 检验。通过逐步回归法对显著变量的共线性进行检验并剔除容差<0.2 的变量。以“是否超重肥胖”为目标变量构建决策树模型,采用 10 层交叉验证模型识别准确率。最后采用 XGboost(eXtreme Gradient Boosting)对特征重要性进行排序。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 样本基本特征 共纳入 550 名 3~6 岁学龄前儿童,性别分布均衡(男童 277 名,占 50.3%;女童 273 人,占 49.7%)。男童平均年龄为(4.89±0.79)岁、女童(4.85±0.83)岁。BMI 标准判定超重肥胖总检出率为 26.50%,而 PBF 为标准的检出率 21.78%,二者相差 4.72%。在不同年龄段中,仅 4 岁男童的 BMI 与 PBF 判定结果差异有统计学意义($P<0.05$),其余年龄段儿童的一致性较高。BMI

与 PBF 在总样本的判定结果未达统计学差异,但其 P 值接近检验水准,揭示在总人群中二者关联呈临界趋势,潜在差异仍需更大样本量进一步验证。因此,为进一步明确两类指标在生物学特征上的区别,需进一步分层解析。见表 1。

2.2 体成分异质性分析与共线性诊断

2.2.1 体成分异质性分析 为深入剖析 BMI 和 PBF 在超重肥胖儿童与正常体重儿童身体成分指标上的差异,对两组儿童的各项指标进行对比分析。结果显示,超重肥胖儿童呈现以下肢-臀部脂肪沉积、体型扩张为代偿表现的特征。1)脂肪相关指标:

超重肥胖组全身脂肪含量高于正常组($t=30.378$),但腰臀比低于正常组($t=5.721$),差异有统计学意义($P<0.01$)。2)体型扩张为代偿表现:超重肥胖组的肌肉量($t=2.910$)、蛋白质含量($t=3.836$)、身体细胞量($t=3.832$)以及胸围($t=11.735$)、颈围($t=7.080$)、臀围($t=15.513$)、左臂围($t=2.741$)、左右大腿围均高于正常体重组($t=13.945, 8.985$),同时细胞内水分($t=2.684$)、细胞外水分($t=2.378$)、身体细胞总水分($t=2.560$)和基础代谢率($t=2.075$)均高于正常组,差异均有统计学意义($P<0.05$)。见表 2。

表 1 学龄前儿童超重肥胖筛查情况($n=550$)
Tab. 1 Overweight and obesity screening of preschool children ($n=550$)

年龄组(岁)	标准	得分	正常($n, \%$)	超重肥胖($n, \%$)	χ^2 值	P 值
3 岁	BMI(男)	15.98 $\pm$ 1.20	27(4.90)	6(1.09)	0.471	0.492
	PBF(男)	18.30 $\pm$ 8.71	29(5.26)	4(0.73)		
	BMI(女)	15.64 $\pm$ 1.29	31(5.63)	8(1.45)	0.075	0.784
	PBF(女)	19.01 $\pm$ 5.33	30(5.44)	9(1.63)		
4 岁	BMI(男)	15.91 $\pm$ 1.77	85(15.45)	33(5.99)	5.628	0.018
	PBF(男)	16.57 $\pm$ 6.05	100(18.33)	18(3.27)		
	BMI(女)	15.65 $\pm$ 1.61	87(15.79)	25(4.54)	0.026	0.872
	PBF(女)	17.69 $\pm$ 5.87	88(15.97)	24(4.36)		
5 岁	BMI(男)	15.93 $\pm$ 1.70	71(12.89)	24(4.36)	0.473	0.492
	PBF(男)	16.21 $\pm$ 5.68	75(13.61)	20(3.63)		
	BMI(女)	15.63 $\pm$ 1.85	67(12.16)	24(4.36)	0.431	0.512
	PBF(女)	17.30 $\pm$ 6.45	63(11.43)	28(5.08)		
6 岁	BMI(男)	17.03 $\pm$ 3.37	16(2.90)	15(2.72)	0.590	0.442
	PBF(男)	19.38 $\pm$ 9.51	19(3.45)	12(2.18)		
	BMI(女)	15.96 $\pm$ 1.61	20(3.63)	11(1.20)	3.033	0.082
	PBF(女)	16.94 $\pm$ 5.64	26(4.72)	5(0.91)		
总计	BMI(总)	15.87 $\pm$ 1.82	404(73.50)	146(26.50)	3.352	0.067
	PBF(总)	17.31 $\pm$ 6.41	430(78.22)	120(21.78)		

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

2.2.2 多重共线性处理 为验证模型变量的独立性,采用容差对 29 项显著差异指标进行多重共线性诊断。结果显示,29 项指标中,肌肉量(瘦组织)、去脂体重指数、细胞总水分等变量存在高度相关性(容差 <0.2)。采用逐步回归法剔除冗余变量后,保留 10 项核心指标(容差 >0.2),满足建模要求^[12]。

2.3 决策树分析

2.3.1 决策树模型构建 为进一步筛选肥胖筛查的核心预测因子并量化其判别效力,研究采用分类回归树算法(CRT)构建决策树模型,将“是否超重肥胖”设为二分类因变量(超重肥胖=1,正常体重=0),自变量为经共线性诊断(容差 >0.2)筛选的 10 项核心变量,纳入变量均为连续型变量。模型参数设定为:最大树深度 5 层以防止过拟合,节点分裂阈值采用基尼系数最小变化值 0.000 1,父节点与子节点最小样本量分别限制为 10 和 5,并通过 10 折交叉

验证评估模型泛化性,其他使用默认参数。最终构建出一个包含 17 个节点(其中 9 个为终端节点)且树的深度为 5 层的决策树模型。为确保模型的可靠性和有效性,采用重新代入法和交叉验证法对模型风险进行评估,模型总体准确率高达 97.5%,其中正常体重组灵敏度 99.8%(429/430),超重肥胖组特异度 89.2%(13/107),能够较为有效地对个体是否肥胖进行分类预测。见图 1。

第一层(根节点,节点 0),首次分裂以全身脂肪含量为关键变量,分裂阈值 4.15kg。左侧(≤ 4.15 kg,节点 1)仅 12 例超重肥胖(2.9%);右侧(> 4.15 kg,节点 2)超重肥胖检出率从总体 21.8%激增至 76.1%,说明全身脂肪含量作为首要判别变量,直接区分肥胖高风险群体,体现其在亚型识别中的核心地位。

第二层(节点 1 分裂路径),在首次分裂的左子节点(节点 1,全身脂肪含量 ≤ 4.15 kg)中,仅 2.9%

表 2 正常体重与超重肥胖幼儿体成分分析 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 2 Body composition analysis of normal weight and overweight and obese children ($\bar{x} \pm s$)

指标	正常体重($n=430$)	超重肥胖($n=120$)	t 值	P 值
细胞内水分	7.43±1.10	7.92±1.72	2.684	0.007
细胞外水分	4.62±0.66	4.68±2.54	2.378	0.018
身体总水分	12.05±1.76	12.60±3.02	2.560	0.011
腰臀比	0.76±0.28	0.70±0.18	5.721	<0.001
全身蛋白质含量	3.21±0.49	3.43±0.74	3.836	<0.001
全身脂肪含量	2.85±0.92	6.77±3.84	30.378	<0.001
肌肉量(瘦组织)	15.46±2.26	16.23±3.53	2.910	0.004
去脂体重指数	16.35±3.53	17.00±4.82	2.073	0.039
体重百分比	98.57±6.86	116.63±13.32	20.270	<0.001
骨骼肌含量	7.69±1.43	8.337±2.24	3.831	<0.001
骨骼肌百分比	98.26±6.76	100.99±22.32	2.208	0.028
脂肪含量百分比	92.70±26.31	211.74±123.75	18.571	<0.001
蛋白质含量百分比	99.42±5.95	101.46±16.69	2.109	0.035
右腿节段脂肪	104.47±14.89	74.38±249.68	2.490	0.013
左腿节段脂肪	104.43±14.89	60.45±416.27	2.191	0.029
基础代谢率	723.05±51.97	737.29±104.13	2.075	0.038
身体细胞量	10.64±1.57	11.35±2.46	3.832	<0.001
胸围	57.34±4.84	66.02±12.41	11.735	<0.001
左臂围	18.57±1.32	28.39±74.39	2.741	0.006
右大腿围	37.11±0.89	39.23±2.67	13.945	<0.001
左大腿围	37.11±0.88	38.91±3.81	8.985	<0.001
颈围	21.06±2.81	24.53±8.69	7.080	<0.001
臀围	70.03±1.98	75.03±4.36	15.513	<0.001
胸部脂肪厚度	0.64±0.10	1.30±4.93	2.812	0.005
腹部脂肪厚度	0.78±0.11	1.54±5.61	2.801	0.005
右臂脂肪厚度	0.55±0.07	0.77±0.85	5.212	<0.001
左臂脂肪厚度	0.55±0.68	3.27±27.76	2.036	0.042
右大腿脂肪厚度	1.14±0.11	3.49±23.87	2.039	0.042
左大腿脂肪厚度	1.14±0.11	4.15±23.17	2.695	0.007

为超重肥胖。该节点进一步按腹部脂肪厚度(阈值 0.95mm)分裂:腹部脂肪 $\leq 0.95\text{mm}$ 的群体(节点 3 375 例)中超重肥胖仅 0.8%,而腹部脂肪 $> 0.95\text{mm}$ 的群体(节点 4, 33 例)超重肥胖率升至 27.3%,需结合全身脂肪含量二次细分(阈值 3.40kg)。当全身脂肪 $\leq 3.40\text{kg}$ 时(节点 7, 18 例),全为正常体重;而全身脂肪 $> 3.40\text{kg}$ 时(节点 8),超重肥胖率达 60.0%,结合颈围 $\leq 24.85\text{cm}$ 判断 9 人均均为超重肥胖。

第三层(节点 2 的细化分型),首次分裂的右子节点(节点 2, 全身脂肪含量 $> 4.15\text{kg}$)中,超重肥胖占 76.1%(108 例),进一步按右大腿脂肪厚度(阈值 1.15mm)分裂:右大腿脂肪 $\leq 1.15\text{mm}$ 的群体(节点 5)超重肥胖率为 18.5%,而右大腿脂肪 $> 1.15\text{mm}$ 的群体(节点 6)超重肥胖率高达 89.6%,后者继续按腹部脂肪厚度细分,腹部脂肪 $> 0.95\text{mm}$ 的群体(节点 10)全部判定为超重肥胖,提示内脏脂肪堆积的高危特征。腹部脂肪 $\leq 0.95\text{mm}$ 的群体仍有 72.7%(节点 9)的超重肥胖率,进一步结合骨骼肌质量百分比分裂,当骨骼肌含量百分比 $> 110.80\%$ 时全部为正常体重,但当其 $\leq 110.80\%$ 时,则超重肥胖率激增至 82.1%,体现出肌肉的保护作用。进一步结合全身脂肪含量进行判定,当全身脂肪含量 $> 4.55\text{kg}$ 时,有 96.4%的个体被判定为超重肥胖;即

便全身脂肪含量 $\leq 4.55\text{kg}$,仍有 45.5%的群体属于超重肥胖范畴。

2.3.2 关键变量排序 本研究采用 XGBoost 算法进行特征重要性评估,导入决策树模型中 10 项核心变量的特征重要性排序,得出以下排序:全身脂肪含量(22.80%)、右臂脂肪(16.20%)、左臂脂肪厚度(15.90%)、腹部脂肪厚度(14.90%)、胸部脂肪厚度(14.20%)、左大腿围(12.40%)、右腿脂肪厚度(12.20%)、左腿脂肪厚度(12.00%)、颈围(10.10%)和骨骼肌质量百分比(3.8%)。见图 2。

3 讨 论

3.1 学龄前儿童肥胖的生物学代偿机制 本研究证实 BMI 与 PBF 标准在学龄前儿童超重肥胖判定上存在分歧。超重肥胖幼儿呈现以脂肪堆积为核心、体型扩张为代偿表现的特征。BIA 结果显示,超重肥胖组的总体脂肪含量远高于正常组,其中下肢脂肪厚度差异尤为显著,说明学龄前肥胖的病理机制以脂肪细胞增生而非单纯肥大为主导。当能量摄入持续过剩时,机体优先通过下肢脂肪新生细胞储脂^[13],此代偿机制直接影响儿童位移性技能的执行效率^[14],形成“体重-运动能力”的负向循环,降低参与身体活动的积极性。

3.2 决策树模型驱动的肥胖亚型分类规则 本研

究通过 CRT 决策树模型,以全身脂肪含量、腹部脂肪厚度、右大腿脂肪厚度等体成分指标为分类依据,采用多层级阈值分裂策略,将学龄前儿童超重肥胖细化为以下亚型,并进一步讨论其生物学机制及干预策略。

3.2.1 下肢脂肪主导型 该亚型对应决策树节点 10,其分类路径为节点 0→全身脂肪含量 $>4.15\text{kg}$ (节点 2)→右大腿脂肪厚度 $>1.15\text{mm}$ (节点 6)→腹部脂肪厚度 $>0.95\text{mm}$ (节点 10)。下肢脂肪主导型

儿童以高皮下脂肪堆积为特征,脂肪在全身匀称分布^[15],与本研究结果一致,肥胖组儿童的胸腹、四肢皮下脂肪厚度均显著高于正常体重组幼儿。3~6 岁幼儿正处于体脂分布逐渐形成的关键时期,身体各部位脂肪分布相对较为匀称,这是由于青春期前儿童对腹部内脏脂肪的积累具有抵抗性,而脂肪组织扩张的“饱和”(即发生异位沉积)发生在青春期发育后期^[16]。皮下脂肪的增加可能与进食速度较快、

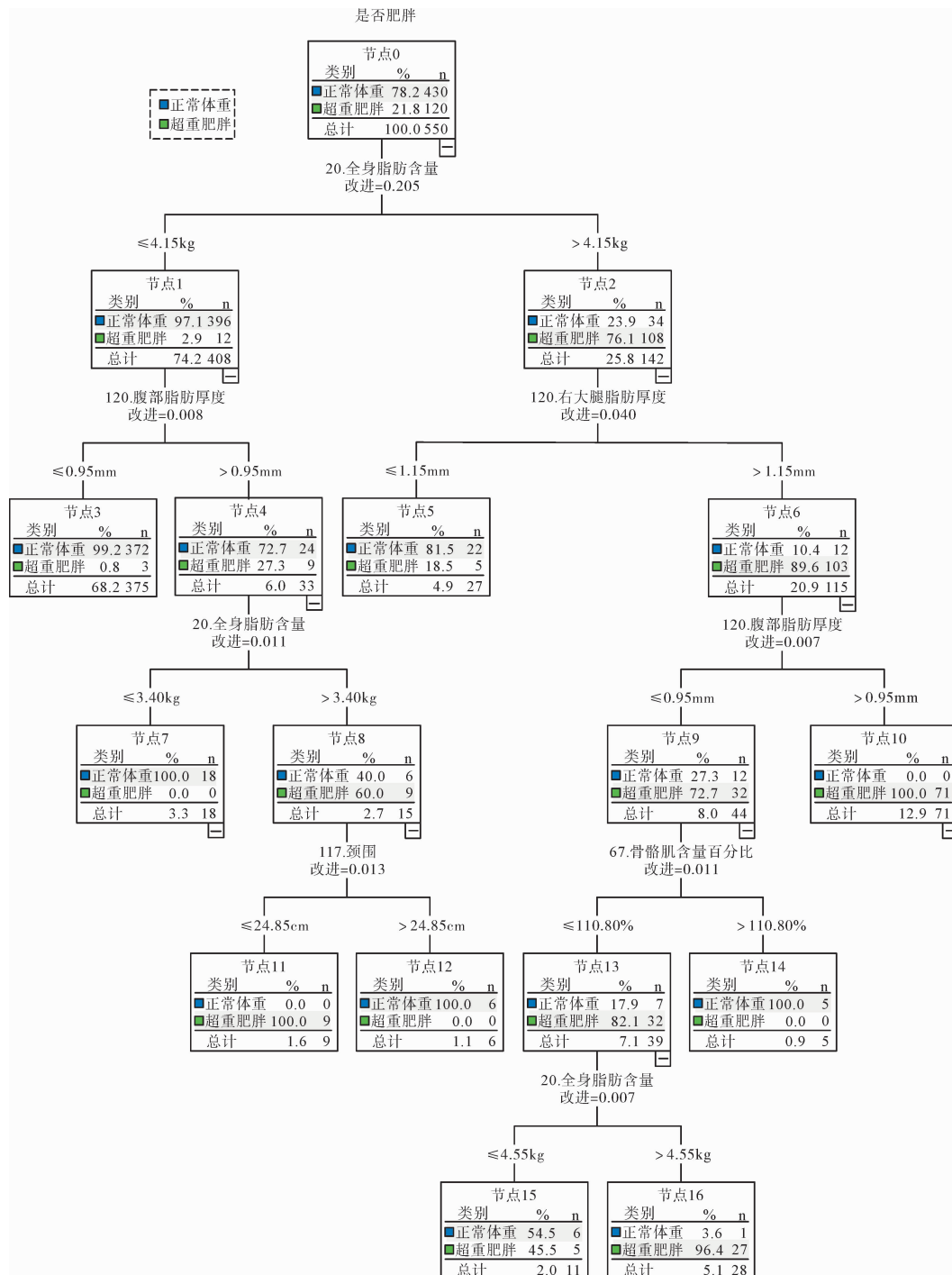


图1 学龄前儿童超重肥胖影响因素的决策树模型

Fig. 1 Decision tree model of influencing factors of overweight and obesity in preschool children

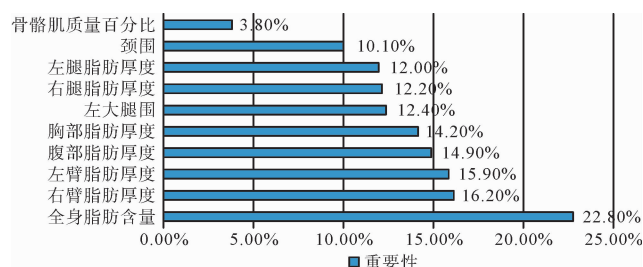


图 2 特征值重要性排序

Fig. 2 Ranking of the importance of eigenvalues

生长激素水平低^[17]等因素有关,干预上需设计以中小强度有氧训练为主的运动方案,干预周期在 14 周以上,每周 ≥ 5 d,每天 ≥ 40 min^[18],配合饮食注意降低进食速度、增加咀嚼次数等措施^[19]。同时,以家庭为基础的干预对降低学龄前超重肥胖儿童的肥胖指标、饮食模式和久坐行为是持久有效且可行的,鼓励每周家长陪同参与运动至少 2 次^[20],并建立家校社三位一体的干预措施^[21]。

3.2.2 骨骼肌质量低下型 该亚型由节点 16 界定,分类路径为:节点 0 $\rightarrow$ 全身脂肪含量 >4.15 kg(节点 2) $\rightarrow$ 右大腿脂肪厚度 >1.15 mm(节点 6) $\rightarrow$ 腹部脂肪厚度 ≤ 0.95 mm(节点 9) $\rightarrow$ 骨骼肌质量百分比 $\leq 110.80\%$ (节点 16)。判定规则为全身脂肪超标但腹部脂肪未显著升高,同时骨骼肌质量百分比不足,呈现“高脂-低肌”的代谢危险组合,肌肉功能代偿不足,形成“脂肪积累-代谢减缓”恶性循环。其与老年肌肉减少性肥胖(以肌力和功能进行性衰减为主)存在本质差异^[22],其发生机制呈现多因素交互作用,主要表现为胰岛素抵抗或炎症、活动不足、久坐等因素导致骨骼肌质量下降^[23-24]。此类肥胖可以通过增加体力活动^[25]、抗阻训练^[26]或低脂肪成分饮食^[27]加以改善,对于学龄前儿童可采用投掷、悬垂、搬举、抛接、骑行、跳越、攀爬等基本动作技能促进肢体肌肉发育,同时增加优质蛋白质摄入及维生素 A、D 补充^[28],通过抗氧化饮食和减少精制糖降低炎症负荷。

3.2.3 高肌肉量型 该亚型对应节点 11,分类规则为全身脂肪含量 ≤ 4.15 kg(节点 1) $\rightarrow$ 腹部脂肪厚度 >0.95 mm(节点 4) $\rightarrow$ 全身脂肪含量 >3.40 kg(节点 8) $\rightarrow$ 颈围 ≤ 24.85 cm(节点 11)。以往研究证实的男女童颈围与骨骼肌百分比呈负相关的结论一致^[29],说明当儿童全身脂肪含量处于 3.40~4.15kg 区间且腹部脂肪厚度 ≥ 0.95 mm 时,可能由于骨骼肌百分高导致被错判为超重肥胖。此类儿童 BMI 偏高主要由肌肉量或骨骼发育驱动,体脂率处于正常范围,属“假性肥胖”。学龄前儿童高骨骼肌占比升高可能与生长激素活跃、体脂率低、高蛋白质摄入、高活动量等生理特性相关。此类儿童虽 BMI 超标但体脂率正常,临床需结合体成分分析避免过度

干预,鼓励力量型运动(如跳箱子、网球投掷、仰面起身等^[30])维持肌肉功能,每 3 个月监测体成分,并向家长科普 BMI 局限性以避免不当干预。

本研究通过整合 BIA 与决策树模型,构建了学龄前儿童肥胖亚型分类规则,突破了传统 BMI 标准在体成分异质性识别中的局限性。研究发现,基于 BMI 标准的超重肥胖检出率(26.5%)显著高于 PBF 标准检出的 21.78%。通过共线性诊断筛选的 10 项核心体成分指标,结合 CRT 决策树模型成功识别 3 种肥胖亚型:下肢脂肪主导型、骨骼肌质量低下型及高肌肉量型,模型总体准确率达 97.5%。该模型通过量化体成分分布与肌肉量差异,为肥胖分型和个性化干预提供参考和依据。

本研究样本采集限于上海市学龄前儿童,地域代表性有限,且未通过影像学技术直接评估内脏脂肪分布,可能影响亚型机制解析的准确性。未来研究可以结合动态监测数据建立跨年龄段的预警模型,开发基于亚型特征的可操作性干预方案,推动儿童肥胖防控从“筛查分型”向“精准干预-动态评估”的闭环管理升级。

参考文献

- [1] 中国居民营养与慢性病状况报告(2020 年)[J]. 营养学报, 2020,42(6):521.
Report on the status of nutrition and chronic diseases in Chinese residents[J]. Acta Nutritional Sinica, 2020, 42(6): 521. (in Chinese)
- [2] 国家卫生健康委. 关于印发“体重管理年”活动实施方案的通知[EB/OL]. (2024-06-06) [2025-03-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6959543.htm.
- [3] Dietz WH. Critical periods in childhood for the development of obesity[J]. Am J Clin Nutr, 1994, 59: 955-959.
- [4] 马冠生, 米杰, 马军. 中国儿童肥胖报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2021.
- [5] Gardner DS, Hosking J, Metcalf BS, et al. Contribution of early weight gain to childhood overweight and metabolic health: A longitudinal study (EarlyBird 36)[J]. Pediatrics, 2009, 123, e67-e73.
- [6] Cunningham SA, Kramer MR, Narayan KM. Incidence of childhood obesity in the United States[J]. N. Engl. J. Med. 2014, 370, 403-411.
- [7] Geserick M, Vogel M, Gausche R, et al. Acceleration of BMI in early childhood and risk of sustained obesity[J]. N Engl J Med, 2018, 379(14), 1303-1312.
- [8] 国家卫生健康委办公厅. 肥胖症诊疗指南(2024 版)[EB/OL]. (2024-10-12) [2025-3-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6981734.htm.
- [9] 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. Growth curve of body mass index in Chinese children and adolescents aged 0-18 years[J]. Chin J Pediatr, 2009, 47(7): 493-498. (in Chinese)
- [10] Kyle UG, Bosaeus I, De Lorenzo AD, et al. Bioelectrical

- impedance analysis—part I: Review of principles and methods[J]. Clin Nutri, 2004, 23(5): 1226-1243.
- [11] Kim HS, Park SY, Kim HJ. Validation of InBody 770 for body composition analysis in children and adolescents[J]. J Pedia Endo and Meta, 2020, 33(5): 623-631.
- [12] 李子奈, 潘文卿. 计量统计学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [13] Tchoukalova YD, Votruba SB, Tchkonja T, et al. Regional differences in cellular mechanisms of adipose tissue gain with overfeeding[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 18226-18231.
- [14] 刘娟. 不同智力障碍程度儿童 BMI 水平与基本动作技能关系研究[J]. 石家庄学院学报, 2024, 26(6): 113-119.
Liu J. Research on the Relationship between BMI levels and basic motor skills in children with different degrees of intellectual disability[J]. Journal of Shijiazhuang University, 2024, 26(6): 113-119. (in Chinese)
- [15] 中华医学会儿科学分会内分泌遗传代谢学组, 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临床营养学组, 等. 中国儿童肥胖诊断评估与管理专家共识[J]. 中华儿科杂志, 2022, 60(6): 507-515.
Endocrinology, Genetics and Metabolism Group, Pediatrics Branch of Chinese Medical Association, Child Health Care Group, Pediatrics Branch of Chinese Medical Association, Clinical Nutrition Group, Pediatrics Branch of Chinese Medical Association, etc. Expert consensus on diagnosis, evaluation and management of childhood obesity in China[J]. Chin J Pediatr, 2022, 60(6): 507-515. (in Chinese)
- [16] Gyllenhammar LE, Alderete TL, Toledo-Corral CM, et al. Saturation of subcutaneous adipose tissue expansion and accumulation of ectopic fat associated with metabolic dysfunction during late and post-pubertal growth[J]. Int J Obes, 2016, 40(4): 601-606.
- [17] 曹荣, 米佳. 生长激素与脂肪组织及脂肪因子的关系研究[J]. 检验医学与临床, 2020, 17(13): 1939-1942, 1948.
Cao Q, Mi J. Study on the relationship between growth hormone and adipose tissue and adipokine[J]. Laboratory Medicine & Clinic, 2020, 17(13): 1939-1942, 1948. (in Chinese)
- [18] 范艳芝, 乔玉成. 运动辅助治疗幼儿肥胖减肥效果的系统分析[J]. 吉林体育学院学报, 2019, 35(2): 75-80.
Fan YZ, Qiao YC. Systematic analysis of the weight loss effect of exercise-assisted therapy for childhood obesity[J]. Journal of Jilin Institute of Physical Education, 2019, 35(2): 75-80. (in Chinese)
- [19] 方柯红, 吕焱, 张玲玲, 等. 学龄前儿童进食速度和咀嚼程度与超重肥胖关系的研究[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(8): 75-79.
Fang KH, Lu Y, Zhang LL, et al. Research on the relationship between eating speed, chewing degree and overweight and obesity in preschool children[J]. Chinese Food and Nutrition, 2025, 31(8): 75-79. (in Chinese)
- [20] 李望, 陈培友, 吴志建, 等. 以家庭为基础的运动干预对学龄前儿童超重肥胖影响的 Meta 分析[J]. 中国儿童保健杂志, 2025, 33(2): 214-220.
Li W, Chen PY, Wu ZJ, et al. Meta-analysis of the impact of family-based exercise intervention on overweight and obesity in preschool children[J]. Chin J Child Health Care, 2025, 33(2): 214-220. (in Chinese)
- [21] 张变子, 雷昱, 马雪文, 等. 学龄前肥胖儿童的影响因素及干预研究进展[J]. 全科护理, 2024, 22(15): 2810-2813.
Zhang BZ, Lei Y, Ma XW, et al. Research progress on influencing factors and intervention of obese preschool children[J]. General Practice Nursing, 2024, 22(15): 2810-2813. (in Chinese)
- [22] 刘妍慧, 陈树春. 2022 年欧洲临床营养与代谢学会和欧洲肥胖研究学会《肌肉减少性肥胖的定义和诊断标准共识》解读及启示[J]. 中国全科医学, 2023, 26(12): 1422-1428.
Liu YH, Chen SC. Interpretation and implications of the Consensus on the definition and diagnostic criteria of muscle-reducing obesity issued by the European Society for Clinical Nutrition and Metabolism and the European Society for Obesity Research in 2022[J]. Chinese Journal of General Medicine, 2023, 26(12): 1422-1428. (in Chinese)
- [23] Lurz E, Patel H, Lebovic G, et al. Paediatric reference values for total psoas muscle area[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2020, 11(2): 405-414.
- [24] Sack C, Ferrari N, Friesen D, et al. Health risks of sarcopenic obesity in overweight children and adolescents: Data from the CHILT III Programme(Cologne)[J]. J Clin Med, 2022, 11(1): 277.
- [25] 邹亦飞, 杨一卓, 郭建军. 儿童肌少症评估方法研究进展[J]. 中国儿童保健杂志, 2024, 32(8): 891-896.
Zou YF, Yang YZ, GUO JJ. Research progress of evaluation methods for sarcopenia in children[J]. Chin J Child Health Care, 2024, 32(8): 891-896. (in Chinese)
- [26] Gatjens I, Schmidt SCE, Plachta-Danielzik S, et al. Body composition characteristics of a load-capacity model: Age-dependent and sex-specific percentiles in 5-to 17-year-old children[J]. Obes Facts, 2021, 14(6): 593-603.
- [27] Yang B, Tang C, Shi Z, et al. Association of macronutrients intake with body composition and sarcopenic obesity in children and adolescents: A population-based analysis of the national health and nutrition examination survey (NHANES) 2011-2018[J]. Nutrition, 2023, 15(10): 2307.
- [28] 赵玮婷, 付欢欢, 戴慧敏. 3~6 岁超重肥胖儿童血清维生素 A、D 水平研究[J]. 中国初级卫生保健, 2025, 39(4): 44-47.
Zhao WT, Fu HH, Dai HM. Study on serum vitamin A and D levels in overweight and obese children aged 3-6 years[J]. Primary Health Care in China, 2025, 39(4): 44-47. (in Chinese)
- [29] 师亚楠, 燕武, 曹梦瑶, 等. 南京地区 3~16 岁儿童青少年颈围的参照标准值及其评估腹型肥胖准确性的横断面调查[J]. 中国循证儿科杂志, 2023, 18(5): 334-340.
Shi YN, Yan W, Cao MY, et al. A cross-sectional survey on the reference standard values of neck circumference and its Accuracy in evaluating abdominal obesity among children and adolescents aged 3 - 16 in Nanjing area[J]. Chin J Evid Based Pediatr, 2023, 18(5): 334-340. (in Chinese)
- [30] 冯建荣, 王凌娟. 体能训练联合寒冷刺激对幼儿免疫和肥胖的影响[J]. 中国学校卫生, 2020, 41(11): 1734-1736.
Feng JR, Wang LJ. The influence of physical training combined with cold stimulation on the immunity and obesity of young children[J]. Chin J Sch Health, 2020, 41(11): 1734-1736. (in Chinese)