

相对脂肪量与肺功能之间的关系：基于 2009-2012 年全国健康和营养调查的分析

刘宇佳 李玉英 (通讯作者)

西南医科大学附属医院呼吸与危重医学科 四川 泸州 646000

【摘要】目的：明确相对脂肪量 (Relative Fat Mass, RFM) 与成人肺功能指标之间的关联。方法：采用美国国家健康与营养调查 (NHANES) 2007-2012 年的横断面数据，纳入 5615 名 20-64 岁符合标准的参与者。通过多变量线性回归模型分析 RFM 与用力肺活量 (FVC)、一秒用力呼气容积 (FEV1)、峰值呼气流速 (PEF)、25%-75%用力呼气流速 (FEF25%-75%) 及 FEV1/FVC 比值的相关性；运用平滑曲线拟合和阈值效应分析探索潜在非线性关系。结果：完全校正模型显示，RFM 每增加 1 个单位，FVC、FEV1、PEF 分别显著下降 0.17 L (95%CI: -0.21~-0.13)、0.11 L (95%CI: -0.14~-0.08) 和 0.20 L/s (95%CI: -0.29~-0.11) (均 $P < 0.001$)，而 RFM 与 FEF25%-75% 无显著相关性 ($P = 0.645$)。阈值效应分析发现，RFM 与 FEV1/FVC 存在非线性关联 (P 非线性 = 0.9738)，拐点为 22.1043；当 $RFM < 22.1043$ 时，FEV1/FVC 随 RFM 增加显著下降 ($\beta = -0.0046$, 95%CI: -0.0064~-0.0028)， $RFM > 22.1043$ 时呈微弱正相关但无统计学意义 ($\beta = 0.0009$, 95%CI: 0.0001~0.0017)。结论：较高的 RFM 与成人肺功能 (FVC、FEV1、PEF) 下降风险呈正相关，且存在阈值效应。

【关键词】相对脂肪量；肺功能；肥胖症

DOI:10.12417/2705-098X.26.05.055

肥胖是全球健康领域的一大挑战，目前全球约有 26 亿人被归类为超重或肥胖。如果当前趋势持续下去，预计到 2050 年，全球将有一半的成年人面临超重相关的问题^[1]。肥胖被认为是各种代谢性疾病的关键危险因素^[2]，同时也与成人肺功能下降有关，这种状况与腹部脂肪组织的积累密切相关，腹部区域的脂肪堆积对肺部力学的影响比皮下脂肪的积累更为显著^[3]。Woolcott 等人提出的相对脂肪量 (RFM) 是一种评估全身脂肪的创新指标^[4]。研究显示，RFM 可作为代谢综合征背景下评估腹部肥胖的参考指标^[5]。

肥胖与肺功能的慢性恶化有关，腹部肥胖被认为是导致亚洲裔中年人肺功能下降的主要因素^[6]。胸腔和腹膜区域脂肪组织的积聚对胸壁施加压力，导致残余肺容量减少，进而增加气流受限和气道闭合的风险^[7]。虽然代谢健康可能在缓解肥胖对肺功能的一些负面影响方面发挥作用，但肥胖本身仍然是肺功能下降的一个重要危险因素^[8]。此外，证据表明肥胖和肺功能受损之间的相互作用可能会增加对 SARS-CoV-2 感染的易感性^[9]。

最近的研究表明相对脂肪量 (RFM) 与多种健康状况相关，包括抑郁症^[10]，胆结石^[11]，以及不孕症^[12]。然而，RFM 与肺功能之间的关系尚未被充分研究。在本研究中，我们利用了 2007-2012 年 NHANES 数据，探讨了 RFM 与多个肺功能指标之间的关联。

1 资料与方法

1.1 研究对象

研究数据来源于美国国家健康与营养检查调查 (NHA-

NES) 2007-2008、2009-2010、2011-2012 三个连续周期的横断面数据，该数据由美国疾病控制与预防中心 (CDC) 公开发布，详细信息可通过官网 (<http://www.cdc.gov/nchs/nhanes.htm>) 查询。本研究仅使用公开数据，无需伦理审批。纳入标准：年龄 20-64 岁，且具有完整的身高、体重、腰围测量数据及肺功能检测数据。

排除标准：(1) 缺失身高、体重、腰围等人体测量数据；(2) 缺乏肺功能测试核心指标数据；(3) 协变量信息不全。最终纳入 5615 名参与者进行统计分析。流程图具体见图 1

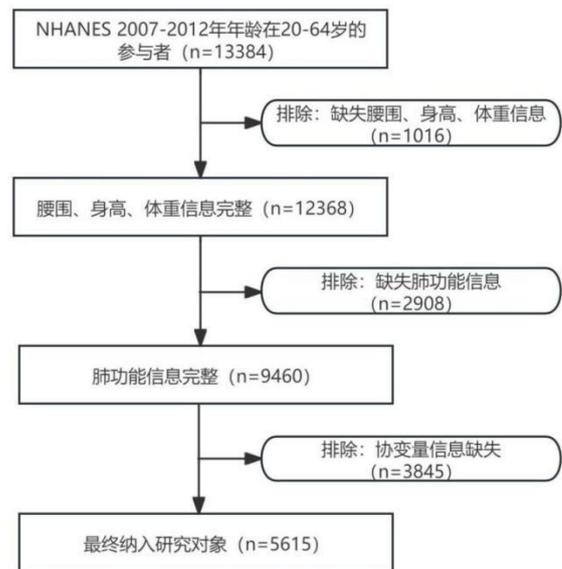


图 1 流程图

1.2 相对脂肪量 (RFM)

采用标准化公式计算： $RFM=64-(20 \times \text{身高}/\text{腰围})+(12 \times \text{性别})$ ，其中女性赋值为1，男性赋值为0。身高、体重及腰围测量由经过标准化培训的社区健康工作者完成；参与者脱鞋后穿轻便衣物测量身高(精确至0.1cm)和体重(精确至0.1kg)；腰围测量于最低肋骨与髂嵴中点水平，呼气末吸气前完成，精确至0.1cm。

1.3 肺功能评估

采用 NHANES 标准化肺功能检测数据，包括5个核心指标：(1)用力肺活量(FVC)：最大吸气后用力呼出的气体总量(L)；(2)一秒用力呼气容积(FEV1)：用力呼气第一秒呼出的气体容积(L)；(3)FEV1/FVC比值：反映气道阻塞程度的关键指标；(4)峰值呼气流速(PEF)：呼气过程中的最大气流速度(L/s)；(5)25%-75%用力呼气流速(FEF25%-75%)：反映小气道功能的重要指标(L/s)。所有检测均严格遵循美国胸科学会(ATS)标准操作流程。

1.4 协变量

参考既往研究^[8,22]，纳入以下潜在混杂变量：(1)人口统计学变量：年龄(连续变量)、性别(男/女)、种族(非西班牙裔白人/西班牙裔美国人/非西班牙裔黑人/其他种族)、教育水平(高中及以下/高中以上)、贫困收入比(连续变量，反映社会经济地位)；(2)生活行为因素：吸烟状态(当前吸烟/既往吸烟/从未吸烟)、饮酒情况(每年饮酒>12杯/≤12杯)、睡眠时间(连续变量，小时)；(3)临床指标：BMI(连续变量，kg/m²)、高血压(是/否，定义为未服药状态下收缩压≥140mmHg或舒张压≥90mmHg)、高脂血症(是/否)、糖尿病(是/否)、慢性呼吸系统疾病(是/否，包括慢性支气管炎、肺气肿、哮喘)。

1.5 统计分析

采用R 4.2.2版本和SPSS 20.0软件进行数据分析。采用多变量线性回归模型分析RFM与肺功能指标的关联，构建两个模型：模型1(调整年龄、性别、种族)；模型2(完全调整模型，纳入所有协变量)。通过平滑曲线拟合探索RFM与肺功能指标的非线性关系，若存在非线性趋势，则采用阈值效应分析确定拐点。双侧P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 RFM与肺功能的线性关联

多变量线性回归分析结果显示(表1)：在完全调整模型(模型2)中，RFM与FVC、FEV1、PEF仍呈显著负相关，回归系数分别为 $\beta=-0.17(95\%CI: -0.21 \sim -0.13, P<0.001)$ 、 $\beta=-0.11(95\%CI: -0.14 \sim -0.08, P<0.001)$ 、 $\beta=-0.20(95\%CI: -0.29 \sim -0.11, P<0.001)$ ；以Q1为参考组，Q2-Q4的FVC、FEV1、PEF均呈逐步下降趋势(均P趋势<0.001)。而RFM与FEF25%-75%

的关联在完全调整后无统计学意义($\beta=-0.01, 95\%CI: -0.07 \sim 0.04, P=0.645$)。RFM与FEV1/FVC比值的关联在模型2中接近显著水平($\beta=0.00, 95\%CI: -0.00 \sim 0.01, P=0.056$)。

表1 RFM与肺功能之间的关联

变量	模型 1		模型 2	
	$\beta(95\%CI)$	P 值	$\beta(95\%CI)$	P 值
FVC				
RFM	-0.17(-0.19~-0.14)	<.001	-0.17(-0.21~-0.13)	<.001
RFM 四分位数				
Q1	0.00(Reference)		0.00(Reference)	
Q2	-0.21(-0.26~-0.16)	<.001	-0.22(-0.28~-0.16)	<.001
Q3	-0.32(-0.38~-0.26)	<.001	-0.33(-0.41~-0.25)	<.001
Q4	-0.51(-0.58~-0.43)	<.001	-0.50(-0.62~-0.39)	<.001
P for trend	<.001		<.001	
FEV1				
RFM	-0.10(-0.12~-0.08)	<.001	-0.11(-0.14~-0.08)	<.001
RFM 四分位数				
Q1	0.00(Reference)		0.00(Reference)	
Q2	-0.11(-0.15~-0.07)	<.001	-0.13(-0.18~-0.08)	<.001
Q3	-0.21(-0.26~-0.16)	<.001	-0.23(-0.30~-0.16)	<.001
Q4	-0.30(-0.37~-0.24)	<.001	-0.32(-0.41~-0.22)	<.001
P for trend	<.001		<.001	
PEF				
RFM	-0.11(-0.17~-0.05)	<.001	-0.20(-0.29~-0.11)	<.001
RFM 四分位数				
Q1	0.00(Reference)		0.00(Reference)	
Q2	-0.07(-0.19~-0.05)	0.259	-0.20(-0.33~-0.07)	0.003
Q3	-0.21(-0.36~-0.05)	0.009	-0.42(-0.61~-0.22)	<.001
Q4	-0.32(-0.50~-0.14)	<.001	-0.60(-0.87~-0.32)	<.001
P for trend	<.001		<.001	
FEV1/FVC				
RFM	0.01(0.01~0.01)	<.001	0.00(-0.00~0.01)	0.056
RFM 四分位数				

1	0.00(Reference)		0.00(Reference)	
2	0.01(0.01~0.02)	<.001	0.01(0.01~0.01)	0.002
3	0.01(0.01~0.01)	0.03	0.00(-0.01~0.01)	0.593
4	0.02(0.01~0.03)	<.001	0.01(0.01~0.03)	0.013
P for trend	<.001		0.055	
FEF25%-75%				
RFM	0.05(0.01~0.09)	0.012	-0.01(-0.07~0.04)	0.645
RFM 四分位数				
Q1	0.00(Reference)		0.00(Reference)	
Q2	0.10(0.02~0.18)	0.012	0.03(-0.06~0.11)	0.527
Q3	0.04(-0.06~0.14)	0.45	-0.08(-0.20~0.05)	0.225
Q4	0.16(0.04~0.27)	0.007	-0.01(-0.19~0.17)	0.932
P for trend	<.012		0.626	

注：续表1。

2.2 RFM 与肺功能指标的非线性关系及阈值效应

平滑曲线拟合结果显示，RFM 与 FVC、FEV1、PEF 呈线性负相关(图 2a-c)，而与 FEV1/FVC 比值存在非线性关联(图 2d)。阈值效应分析显示(表 2)，RFM 与 FEV1/FVC 的拐点为 22.1043 (P 似然比检验<0.001)：当 RFM<22.1043 时，FEV1/FVC 随 RFM 增加显著下降($\beta=-0.0046$, 95%CI: -0.0064~-0.0028, P<0.0001)；当 RFM>22.1043 时，FEV1/FVC 随 RFM 增加呈微弱正相关，但仅边缘显著($\beta=0.0009$, 95%CI: 0.0001~0.0017, P=0.0227)。

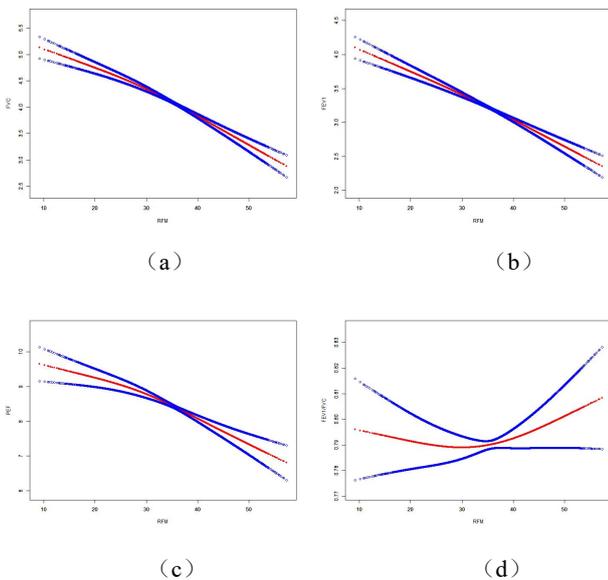


图 2 RFM 与肺功能的关系

(a) FVC 与 RFM。(b) FEV1 与 RFM。(c) PEF 与 RFM。
(d) FEV1/FVC 与 RFM。

表 2 阈值效应分析

结果	β (95%CI)P 值
模型 I	
通过标准线性回归拟合模型	0.0000(-0.0007,0.0007)0.9738
模型 II	
拐点	22.1043
RFM<22.1043	-0.0046(-0.0064,-0.0028)<0.0001
RFM>22.1043	0.0009(0.0001,0.0017)0.0227
P 值似然检验	<0.001

结果变量：FEV1/FVC

暴露变量：RFM

调整：性别、年龄、种族、PIR、饮酒情况、吸烟状态、睡眠时间、BMI、高血压、高血脂症、糖尿病、慢性肺病

3 讨论

本研究结果与先前有关肥胖与肺功能之间关联的研究基本一致。大量研究已证实肥胖与肺功能下降之间存在关联。例如，孟德尔随机化研究提供了因果证据，表明遗传决定的内脏脂肪组织体积与多种呼吸系统疾病风险增加呈正相关^[13]。此外，涉及儿科受试者的队列研究显示，随着 BMI 的增加，FEV1/FVC 比值降低，这表明儿童肥胖与通气和气道流量失衡相关^[4]。一项系统性综述强调了肥胖对呼吸系统的多方面影响，包括脂肪沉积、胸壁、腹部和上呼吸道引起的直接机械改变以及全身炎症等机制^[15]。

研究表明^[16,17]传统的衡量指标，例如体质指数 (BMI)，不足以准确评估体脂，因为它们无法区分脂肪组织和肌肉组织。这种不足限制了它们在诊断个体肥胖或病态肥胖方面的有效性^[18]。大多数流行病学研究在探讨肥胖与肺功能之间的关系时，主要使用 BMI 作为肥胖的通用指标，但这些研究往往发现关联较弱或统计上不显著^[9]。一项特定研究发现，用力肺活量 (FVC) 与体重或 BMI 无显著关系；然而，它与体脂百分比呈负相关，与瘦体质量呈正相关^[20]。这种差异可能与体脂分布和脂肪组织功能障碍有关，这两者都是肥胖相关疾病发病的关键因素，并可能作为个体水平上更准确的疾病风险预测因子^[21]。关于相对脂肪量 (RFM) 如何影响肺功能的具体机制，有以下几种假设。首先，肥胖对肺功能的负面影响被认为源于纵隔和腹膜腔内脂肪组织的积累，这直接改变了肺部和胸壁的机械特性^[22]。这种蓄积会阻碍膈肌运动，降低胸腔顺应性，并最终降低呼吸能力，特别是在中心脂肪沉积的情况下^[23,24]。其次，

代谢紊乱会显著加剧与肥胖相关的多种并发症。例如，高血糖和高胰岛素血症可能导致上皮损伤和气道平滑肌增生，进而引发气道高反应性（AHR）和结构重塑^[25]。此外，肥胖可能通过脂肪组织分泌的脂肪因子-如血清瘦素和脂联素-调节全身和气道炎症^[26]。这些可能部分解释了本研究中观察到的肺功能损害与 RFM 之间的关联。

本研究分析了来自全国健康与营养检查调查（NHANES）的数据。由于样本量大且数据质量高，增强了研究结果的可靠性。我们的研究特别关注了中年和年轻成年人，因为他们是社会的主要劳动力。一项队列研究表明，在成年早期，肺功能峰值下降在普通人群中较为常见^[27]，强调了识别早期肺功能障碍个体的社会重要性。据我们所知，这是首次同时考察相对脂肪量（RFM）和肺功能的研究。同时，我们的研究存在一些局限

性。首先，横断面设计无法确定因果关系，因此需要通过大型前瞻性研究来验证这些发现。其次，我们没有关于支气管扩张剂后肺功能测试的相关数据，这可能限制了我们的全面性。此外，尽管纳入了多种变量，我们仍无法完全排除所有潜在的混杂因素。未来的研究应考虑引入更多协变量，并采用中介分析或倾向评分匹配等高级方法，以进一步明确混杂变量的影响，从而增强该领域的因果推断。

4 结论

本研究结果表明较高 RFM 与肺功能损伤间存在正相关，监测 RFM 和实施主动体重管理策略可能对改善肺功能、预防慢性肺病发生有着重要意义。未来需要通过大型前瞻性研究来验证这些发现。

参考文献：

- [1] Sørensen TIA. Forecasting the global obesity epidemic through 2050. *Lancet*. 2025;405(10481):756-757.
- [2] Zhang X, Ha S, Lau HC, Yu J. Excess body weight: Novel insights into its roles in obesity comorbidities. *Semin Cancer Biol*. 2023;92:16-27.
- [3] Dixon AE, Peters U. The effect of obesity on lung function. *Expert Rev Respir Med*. 2018;12(9):755-767.
- [4] Woolcott OO, Bergman RN. Relative fat mass (RFM) as a new estimator of whole-body fat percentage—A cross-sectional study in American adult individuals. *Sci Rep*. 2018;8(1):10980.
- [5] Kobo O, Leiba R, Avizohar O, Karban A. Relative fat mass (RFM) as abdominal obesity criterion for metabolic syndrome. *Eur J Intern Med*. 2019;63:e9-e11.
- [6] Park Y, Kim J, Kim YS, et al. Longitudinal association between adiposity changes and lung function deterioration. *Respir Res*. 2023;24(1):44. Published 2023 Feb 7.
- [7] Salome CM, King GG, Berend N. Physiology of obesity and effects on lung function. *J Appl Physiol* (1985). 2010;108(1):206-211.
- [8] Opio J, Wynne K, Attia J, Hancock S, McEvoy M. Metabolic Health, Overweight or Obesity, and Lung Function in Older Australian Adults. *Nutrients*. 2024;16(24):4256.
- [9] Bui DS, Cassim R, Russell MA, et al. Lung Function Levels Influence the Association between Obesity and Risk of COVID-19. *Am J Respir Crit Care Med*. 2021;204(9):1106-1108.
- [10] Zhu X, Yue Y, Li L, Zhu L, Cai Y, Shu Y. The relationship between depression and relative fat mass (RFM): A population-based study. *J Affect Disord*. 2024;356:323-328.
- [11] Gao C, Li Y, Ren X, Han W. Association between relative fat mass and gallstones: a cross-sectional study based on NHANES 2017-2020. *Front Nutr*. 2025;12:1554659.
- [12] Sun M, Lu Y, Yang X, Mao X. Association between relative fat mass and sterility in women of reproductive age in the United States: results from the 2013-2018 NHANES. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2025;16:1521247.
- [13] Chen XX, Lu FY, Wang Y, et al. Causal effect of life-course adiposity on the risk of respiratory diseases: a Mendelian randomization study. *Nutr Metab (Lond)*. 2025;22(1):25.
- [14] öchli S, Endes K, Bartenstein T, et al. Lung function, obesity and physical fitness in young children: The EXAMIN YOUTH study. *Respir Med*. 2019;159:105813.
- [15] Brazzale DJ, Pretto JJ, Schachter LM. Optimizing respiratory function assessments to elucidate the impact of obesity on respiratory health. *Respirology*. 2015;20(5):715-721.

- [16] Lazarus R,Gore CJ,Booth M,Owen N.Effects of body composition and fat distribution on ventilatory function in adults.Am J Clin Nutr.1998;68(1):35-41.
- [17] Lee G,Choi S,Park SM.Association of waist circumference with muscle and fat mass in adults with a normal body mass index.Nutr Res Pract.2021;15(5):604-612.
- [18] Bray GA.Beyond BMI.Nutrients.2023;15(10):2254.Published 2023 May 10.
- [19] Maiolo C,Mohamed EI,Carbonelli MG.Body composition and respiratory function.Acta Diabetol.2003;40 Suppl 1:S32-S38.
- [20] Lazarus R,Gore CJ,Booth M,Owen N.Effects of body composition and fat distribution on ventilatory function in adults.Am J Clin Nutr.1998;68(1):35-41.
- [21] Goossens GH.The Metabolic Phenotype in Obesity:Fat Mass,Body Fat Distribution,and Adipose Tissue Function.Obes Facts. 2017;10(3):207-215.
- [22] Peters U,Suratt BT,Bates JHT,Dixon AE.Beyond BMI:Obesity and Lung Disease.Chest.2018;153(3):702-709.
- [23] Behazin N,Jones SB,Cohen RI,Loring SH.Respiratory restriction and elevated pleural and esophageal pressures in morbid obesity.J Appl Physiol(1985).2010;108(1):212-218.
- [24] Poulain M,Doucet M,Major GC,et al.The effect of obesity on chronic respiratory diseases:pathophysiology and therapeutic strategies. CMAJ.2006;174(9):1293-1299.
- [25] Peters U,Dixon AE,Forno E.Obesity and asthma.J Allergy Clin Immunol.2018;141(4):1169-1179.
- [26] Sood A.Obesity,adipokines,and lung disease.J Appl Physiol(1985).2010;108(3):744-753.
- [27] AgustíA,Noell G,Brugada J,Faner R.Lung function in early adulthood and health in later life:a transgenerational cohort analysis.Lancet Respir Med.2017;5(12):935-945.