·临床与预防·

24 h 身体活动与代谢综合征患病风险的关联研究

司鑫雨[1,2]，高倩[1,2]，祝贵明[1,2]，王菊平[1,2,3]，王彤[1,2]

1.山西医科大学公共卫生学院卫生统计学教研室，山西 晋中 030619；

2.煤炭环境致病与防治教育部重点实验室，山西 晋中 030619；3.山西医科大学基础医学院数学教研室，山西 晋中 030619

摘要：目的　基于函数型数据分析探讨 24 h 身体活动与代谢综合征风险的关联。**方法**　基于美国国家健康与营养调查（National Health and Nutrition Examination Survey，NHANES）（2011—2014 年）数据，共纳入 1 110 名符合条件的研究对象。采用基于函数型暴露因素的参数与非参数协变量均衡的广义倾向性评分方法对年龄、性别等潜在混杂因素进行调整，结合逆概率加权与函数型线性模型探究 24 h 身体活动与代谢综合征患病风险的关联，并比较不同性别群体的效应差异。**结果**　10:15—11:15 和 16:35—19:45 时段（参数法：F=4.969，P<0.001；非参数法：F=6.313，P<0.001）的身体活动与代谢综合征风险的降低相关。进一步分析不同性别群体发现，男性在下午 16:45—19:40 时段（参数法：F=3.573，P<0.001；非参数法：F=4.816，P<0.001）、女性在上午 09:05—10:15 时段（参数法：F=3.076，P=0.003；非参数法：F=3.008，P=0.004）的身体活动与代谢综合征风险呈负相关。**结论**　24 h 身体活动与代谢综合征患病风险呈时间特异性和性别差异，提示在防控策略中应考虑运动时间窗，并为不同人群推荐与其生理节律匹配的运动时机，以精准优化健康效益。

关键词：身体活动；代谢综合征；函数型数据分析；协变量均衡广义倾向性评分

中图分类号：R589　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8507（2026）07-1337-08

DOI：10.20043/j.cnki.MPM.202510362

Association between 24-hour physical activity and risk of metabolic syndrome

SI Xin-yu*, GAO Qian, ZHU Gui-ming, WANG Ju-ping, WANG Tong

Department of Health Statistics, School of Public Health, Shanxi Medical University, Jinzhong, Shanxi 030619, China

Abstract: Objective To investigate the association between 24-hour physical activity and the risk of metabolic syndrome using functional data analysis. **Methods** Data were obtained from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2011—2014. A total of 1 110 eligible participants were included in the analysis. Parametric and nonparametric generalized propensity score methods with functional exposures were used to adjust for potential confounders, including age and sex. Inverse probability weighting in conjunction with a functional linear model was employed to estimate the association between 24-hour physical activity and the risk of metabolic syndrome and to examine sex-specific differences. **Results** Physical activity during the periods of 10:15-11:15 and 16:35-19:45 (parametric method: F=4.969, P<0.001; nonparametric method: F=6.313, P<0.001) was associated with a reduced risk of metabolic syndrome. Sex-stratified analyses indicated that, among males, physical activity between 16:45 and 19:40 (parametric method: F=3.573, P<0.001; nonparametric method: F=4.816, P<0.001) was negatively associated with metabolic syndrome risk, whereas among females, a significant negative association was observed during 09:05-10:15 (parametric method: F=3.076, P=0.003; nonparametric method: F=3.008, P=0.004). **Conclusion** The association between 24-hour physical activity and the risk of metabolic syndrome exhibits both time-specific patterns and sex differences, suggesting that prevention strategies should incorporate activity timing and recommend exercise periods aligned with individuals' circadian rhythms to optimize health benefits.

Keywords: Physical activity; Metabolic syndrome; Functional data analysis; Covariate balancing generalized propensity score

代谢综合征（metabolic syndrome，MetS）是一组与代谢紊乱有关的复杂症候群，包括高血压、血脂异常、空腹血糖升高及中心性肥胖，是心血管疾病和 2 型糖尿病的危险因素[1]。近年来，MetS 的全球患病率持续上升，预计 2035 年将达到 53%[2]；我国 20 岁及以上成人患病率为 31.1%[3]，老年人合并患病率达 23.9%[4]。MetS 与营养过剩、久坐等生活方式密切相关[5]，运动干预被视为经济有效的防控手段[6-7]。值得注意的是，运动的健康效益可能受运动时间影响。昼夜节律是遵循 24 h 周期的生物节律，影响食欲、睡眠 - 觉醒周期

基金项目：国家自然科学基金（82073674,82373692,82204163）；山西省基础研究计划（202203021212382）

作者简介：司鑫雨（2000—），女，硕士在读，研究方向：因果推断

通信作者：王彤，E-mail:tongwang@sxmu.edu.cn；王菊平，E-mail:wangjuping@sxmu.edu.cn；王彤与王菊平为共同通信作者

和运动表现[8],其紊乱已被认为是 MetS 的危险因素[9]。因此,探索与个体昼夜节律相协调的运动时间,可能是优化运动干预效果、最大化其代谢益处的关键切入点。

随着可穿戴设备的发展,研究者可获取个体全天连续的身体活动数据,形成以时间为自变量、活动强度为因变量的函数型数据。函数型数据是指每个观测对象由定义在连续域(如时间或空间)上的平滑函数表示,能够全面捕捉个体行为或生理状态随时间的动态变化特征[10]。与传统分段汇总方法相比,函数型数据分析(functional data analysis,FDA)能在 24 h 连续时间尺度上揭示身体活动与健康结局的动态关联,更契合生理节律的连续性特征。

目前关于最佳运动时间的研究结论尚不一致。有研究指出下午运动对血糖控制和代谢更有利[11-12];另有研究发现晨练更助于体重控制和降低心血管风险[13-14];还有研究未发现差异[15-16]。这些不一致可能与身体活动评估方法不同有关,多数研究将活动按固定时段划分,难以精确刻画身体活动的时间模式;此外,部分研究在统计分析中未能充分控制混杂因素,可能导致结果偏倚。

本研究基于 FDA 框架,将 24 h 身体活动数据建模为连续函数,结合广义倾向性评分(generalized propensity score,GPS)方法均衡混杂因素,旨在更准确地估计其与 MetS 的关联。以期为制定针对性的身体活动指导与慢性病防控策略提供科学依据,对推进“健康中国”建设具有积极意义。

1 资料与方法

1.1 资料来源 研究采用美国国家健康与营养调查(National Health and Nutrition Examination Survey,NHANES)数据库 2011—2012 年和 2013—2014 年两个周期共计 19 931 名参与者的数据。纳入标准:年龄≥20 岁、非妊娠者、具有完整有效的 24 h 加速度计身体活动数据,符合条件者共 9 008 人。排除标准:(1)缺失教育程度、婚姻状况等协变量信息;(2)当前正在服用降压药、降脂药或降糖药等代谢相关处方药;(3)缺失 MetS Z 评分。最终纳入 1 110 个研究对象进行后续分析。

1.2 暴露变量 NHANES 2011—2014 年的身体活动监测方案详见官方网站[17]。≥3 岁的参与者需在非优势手腕连续佩戴三轴加速度计 7 d、以 80 Hz 采样频率记录 24 h 活动。Koffma 和 Muschell[18]基于开源算法对原始数据进行处理,生成与设备无关的运动指标。本研究将无效测量和未佩戴时段视为缺失值,将每位参与者的身体活动数据在所有有效记录日内取平均,生成每 5 min 一个时间点(288 个时间点 /d)的平均活动曲线。

1.3 因变量 MetS Z 评分是一种将 MetS 的五个组分整合为连续变量的指标,相较于传统的二分类标准,能更全面地反映代谢异常的严重程度并量化个体的代谢健康状态[19]。评分越高,代表个体在多个代谢指标上异常越明显,提示其 MetS 风险较高。本研究采用性别特异性评分公式,并参考 NCEP-ATPIII 建议的腰围切点(男性≥102 cm,女性≥88 cm)[20]。具体计算公式如下:

$$\text{Women's MetS Z Score}=[(50-\text{HDL})/SD_{HDL}]+[(TG-150)/SD_{TG}]+[(\text{Glucose}-100)/SD_{GLU}]+[(\text{Waist Circumference}-88)/SD_{WC}]+[(\text{Mean Arterial Pressure}-100)/SD_{MAP}] \quad \text{公式(1)}$$

$$\text{Men's MetS Z Score}=[(40-\text{HDL})/SD_{HDL}]+[(TG-150)/SD_{TG}]+[(\text{Glucose}-100)/SD_{GLU}]+[(\text{Waist Circumference}-102)/SD_{WC}]+[(\text{Mean Arterial Pressure}-100)/SD_{MAP}] \quad \text{公式(2)}$$

其中 HDL 为高密度脂蛋白胆固醇(mg/dl);TG 为甘油三酯(mg/dl);Glucose 为空腹血糖(mg/dl);Waist Circumference 为腰围(cm);Mean Arterial Pressure 为平均动脉压(mm Hg);SD 为标准差。

1.4 协变量 研究纳入的协变量包括年龄、性别、种族、受教育程度、家庭收入贫困比、婚姻状况、吸烟状况、饮酒状况、总能量摄入(基于 NHANES 两次 24 h 膳食回顾数据,取两次测量的平均值)[21]。

1.5 统计分析 数据分析采用 R 4.4.3。按性别描述一般特征,连续变量采用 t 检验进行比较,以(均数 ± 标准差)描述;分类变量采用 χ^2 检验,以频数(%)描述。传统研究通常将全天活动按预设时间段(如上午、下午)分割汇总,并采用分段 logistic 回归进行分析,其局限性在于:主观分段破坏了活动的时序动态性与连续性,难以捕捉精细时间模式;同时,logistic 回归难以处理暴露与混杂因素间复杂的非线性关系,易导致残余混杂。为克服这些不足,本研究采用 Zhang 等[10]提出的参数与非参数函数型协变量均衡 GPS 方法。在 FDA 框架下,将 24 h 身体活动建模为连续平滑函数,通过函数主成分分析提取能够表征个体全天活动模式的主成分得分,作为暴露变量。在协变量均衡约束下估计 GPS,或直接构建协变量均衡权重,并结合逆概率加权的函数型暴露 - 标量结局模型,对混杂因素进行有效控制,从而估计因果效应。该方法能保留全天活动完整时序信息且有效控制混杂因素。

根据 Karhunen-Loève 定理,24 h 身体活动数据 $X(t)\approx\sum_{k=1}^{L}A_k\phi_k(t)$,$\phi_k(t)$是特征函数,$A_k$ 是函数主成分(functional principal component,FPC)得分,$A_k=\int_0^1 X$

(t) ϕ_k(t)dt，一般认为前 L 项的和可以很好地代表 X(t)，L 的选择是为了使前 L 个 A_k 的和可以解释 X(t)的大部分变异。本研究保留解释 95%总变异性的前 L 个 FPC 得分。由于 A_k 能捕捉 X(t)中的大部分信息，因此在估计 GPS 时将 A_k 作为 X (t) 的替代变量。在估计 GPS 时，参数法假设暴露变量的边际分布和给定协变量的条件分布服从正态分布，并据此计算 GPS 稳定权值。非参数方法通过将协变量均衡条件作为约束，最大化经验似然函数来估计 GPS 权重。最后，基于逆概率加权，拟合函数－标量回归模型 $Y=\alpha+\int_T \beta(t)X(t)dt+\varepsilon$，其中系数函数 β(t)与 X(t)使用相同的特征函数基展开，$\beta(t)=\sum_{k=1}^{L} b_k \phi_k(t)$。将此展开式代入回归模型进行简化，效应值函数可表示为：$\hat{\beta}(t)=\sum_{k=1}^{L} \hat{b}_k \phi_k(t)$，这里$\hat{b}_k$用加权最小二乘法估计。95%逐点置信区间基于 1 000 个 bootstrap 样本构建。采用 naïve 全局 *F* 检验来检验总体平均效应是否具有统计学意义，检验水准 α=0.05。

通过 3 个函数－标量回归模型逐步调整协变量，模型 1 未调整混杂因素，模型 2 加入人口学特征，模型 3 在模型 2 基础上进一步调整了生活方式和社会经济。此外，有研究表明女性晨练更利于腹部脂肪下降和血压改善，而男性晚练更利于血压下降[22]，提示性别对运动时间的健康效应可能存在效应修饰。为此，本研究除报告全人群结果外，还拟合了男、女两个群体的函数型回归模型。

2　结　果

2.1　研究对象的基本情况　共纳入 1 110 名研究对象，平均年龄为(38.83 ± 14.35)岁；男性占 51.26%。男女分组在教育程度、婚姻状况、每日饮酒量、当前是否吸烟、每日总能量摄入方面差异有统计学意义(*P*<0.05)。在年龄、种族、家庭收入贫困比、MetS Z 评分方面差异无统计学意义。见表 1。

表 1　研究对象的一般特征描述[*n*(%),($\bar{x} \pm s$)]

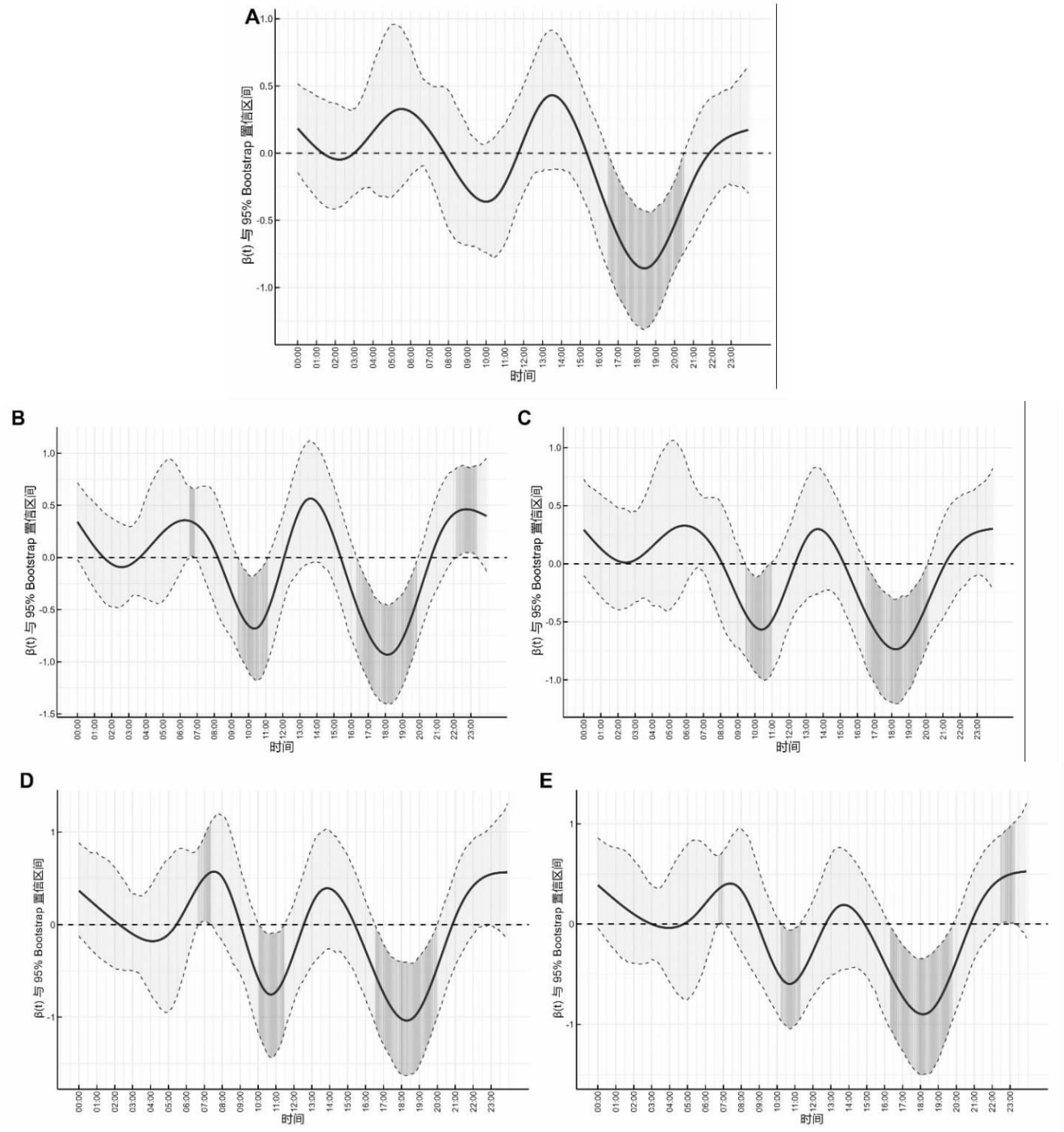
Table 1　Characteristics of the study participants [*n*(%), ($\bar{x} \pm s$)]

变量	总体(*n*=1 110)	男性(*n*=569)	女性(*n*=541)	*t*/χ^2 值	*P* 值
人口学特征					
年龄(岁)	38.83 ± 14.35	39.28 ± 14.80	38.35 ± 13.86	1.077[b]	0.282
种族				6.293	0.279
墨西哥裔美国人	139(12.52)	80(14.06)	59(10.91)		
其他西班牙裔	103(9.28)	55(9.67)	48(8.87)		
非西班牙裔白人	494(44.50)	255(44.82)	239(44.18)		
非西班牙裔黑人	209(18.83)	93(16.34)	116(21.44)		
非西班牙裔亚洲人	138(12.43)	72(12.65)	66(12.20)		
其他	27(2.43)	14(2.46)	13(2.40)		
生活方式和社会经济					
教育程度				20.556	<0.001
高中未毕业及高中以下	186(16.76)	114(20.04)	72(13.31)		
高中毕业或等同学历	208(18.74)	124(21.79)	84(15.53)		
大学未毕业、副学士学位	357(32.16)	165(29.00)	192(35.49)		
大学及以上学历	359(32.34)	166(29.17)	193(35.67)		
婚姻状况				9.272	0.002
已婚或同居	620(55.86)	343(60.28)	277(51.20)		
其他	490(44.14)	226(39.72)	264(48.80)		
家庭收入贫困比	2.49 ± 1.70	2.46 ± 1.67	2.52 ± 1.73	−0.593[b]	0.553
每日饮酒量(标准杯/d[a])	4.13 ± 7.42	5.34 ± 8.80	2.84 ± 5.34	5.759[b]	<0.001
当前吸烟者				38.218	<0.001
是	317(28.56)	209(36.73)	108(19.96)		
否	793(71.44)	360(63.27)	433(80.04)		
总能量摄入(kcal)	2 165.34 ± 832.44	2 444.78 ± 889.67	1 871.43 ± 649.42	12.306[b]	<0.001
因变量					
MetS Z 评分	−2.20 ± 3.04	−2.10 ± 2.95	−2.30 ± 3.14	0.491[b]	0.283

注：[a] 处饮酒量以标准杯/天表示(1 标准杯 =14 克纯酒精，约等于一罐 355mL 啤酒)；[b] 表示该处数值为 *t* 检验统计量，其余为 χ^2 值。

2.2　24 h 身体活动与 MetS 的关联　不同模型均显示 24 h 身体活动曲线与 MetS 风险显著关联[模型 1：*F*=4.401，*P*<0.001；模型 2：(参数法)*F*=5.000，*P*<0.001；(非参数法)*F*=5.781，*P*<0.001；模型 3：(参数法)*F*=4.969，*P*<0.001；(非参数法)*F*=6.313，*P*<0.001]。模型 1(未调整混杂因素)提示 16:30—20:30

身体活动与 MetS 风险呈负相关，见图 1A。在调整人口学特征后（模型 2），参数法显示 06:35—06:50、09: 25—11:05、16:20—19:50、22:10—23:20 为相关时段，见图 1B；非参数法显示 09:30—10:55 和 16:30—20:05 为相关时段，见图 1C。两种方法结果的一致区间为 09:30—10:55 和 16:30—19:50，该时段身体活动与MetS 风险呈负相关。进一步调整生活方式及社会经济因素后（模型 3），参数法相关时间段为 06:40—07:20、10:05—11:25 及 16:35—19:55，见图 1D；非参数法为 06:45—06:55、10:15—11:15、16:20—19:45及 22:30—23:15，见图 1E。两种方法均提示 06:45—06:55 时段身体活动与 MetS 风险呈正相关，而在 10:15—11:15 和 16:35—19:45 时段呈负相关。



注：图 A 为模型 1，未调整混杂因素；图 B 为模型 2，调整了人口学特征，采用参数协变量均衡法；图 C 为模型 2，调整了人口学特征，采用非参数协变量均衡法；图 D 为模型 3，调整了人口学特征、生活方式和社会经济，采用参数协变量均衡法；图 E 为模型 3，调整了人口学特征、生活方式和社会经济，采用非参数协变量均衡法；虚线区域表示基于 1 000 次 bootstrap 得到的 95%逐点置信区间；水平黑色虚线表示零效应参考线，水平黑色虚线下方阴影区域表示负相关，水平黑色虚线上方阴影区域表示正相关。

图 1　24 h 身体活动与 MetS 之间的关联

Figure 1　Association between 24-hour physical activity and MetS

2.3　均衡性评价　本研究使用协变量与前 L 个 FPC 得分之间的加权 Pearson 相关系数绝对值评价协变量均衡性，绝对值小于 0.1 表明均衡性可接受[23]。本研究共提取 7 个主成分，累积解释方差达 95%。两种 GPS 方法都有效改善 FPC 与协变量间的不平衡性。未加权时，大多数相关系数绝对值>0.1，加权后相关系数接近 0，表明协变量在不同暴露水平间达到可接受的均衡性。见图 2。

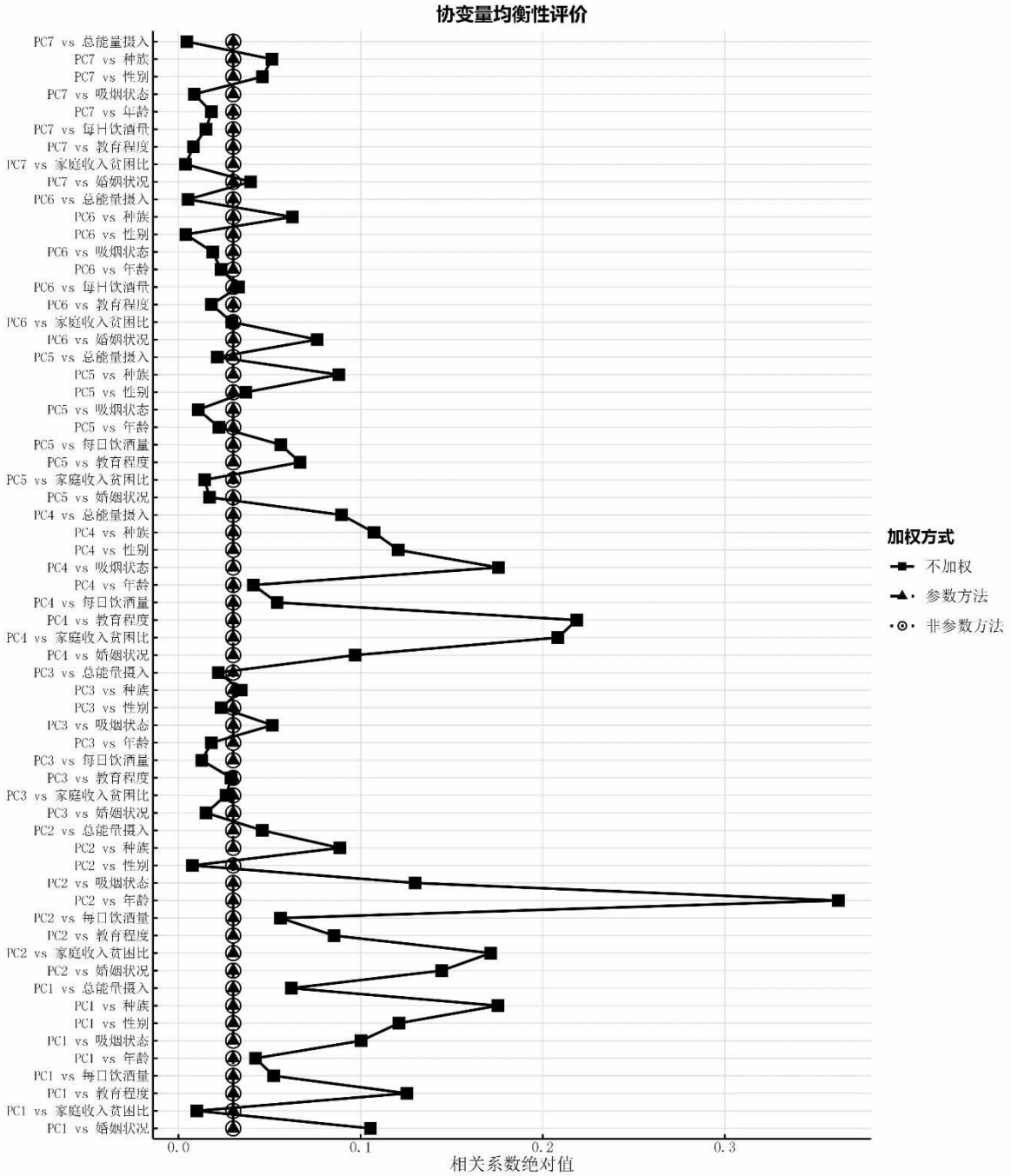
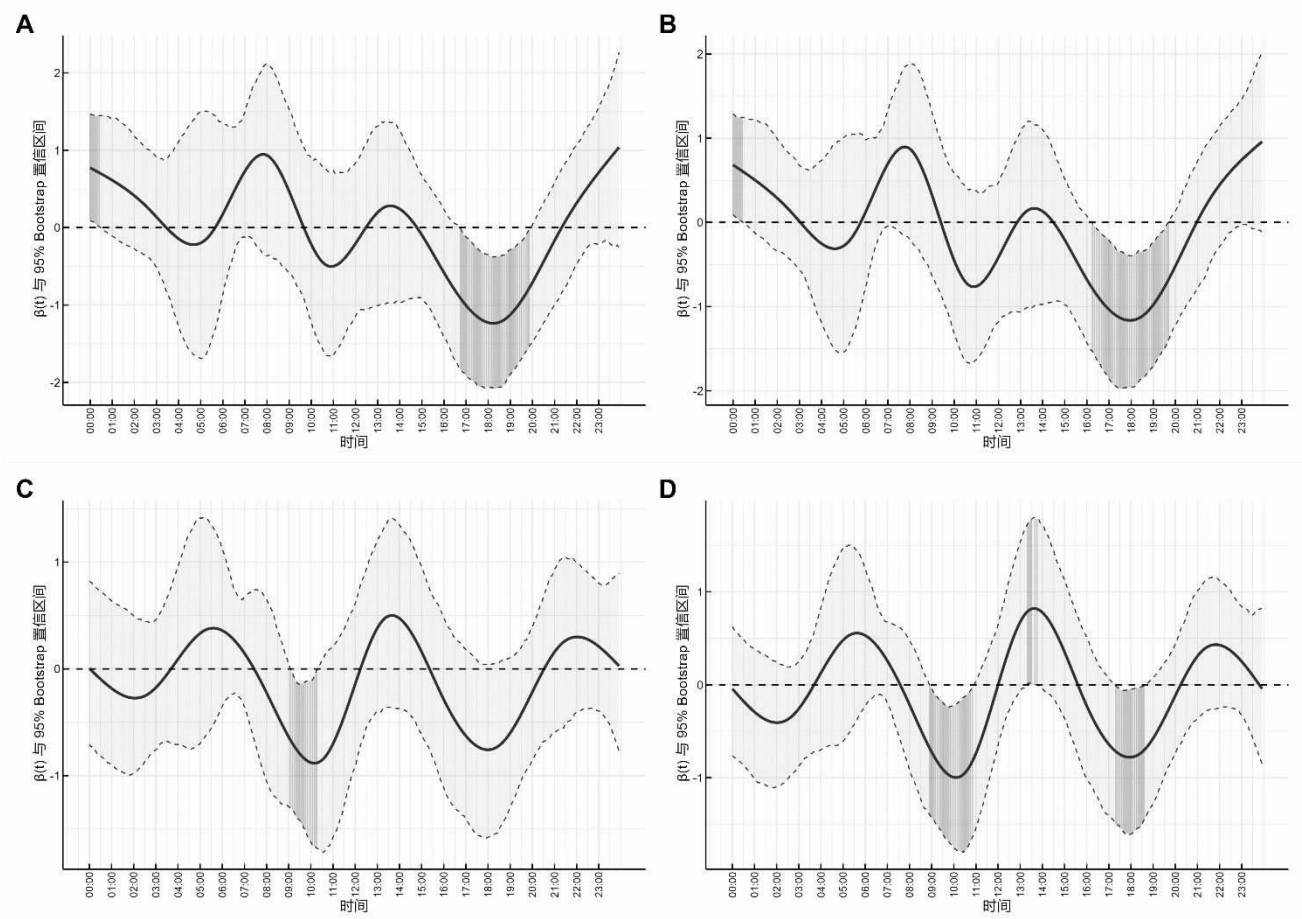


图 2　不同加权方式下暴露因素与协变量的 Pearson 相关性

Figure 2　Pearson correlations between exposure and covariates under different weighting methods

2.4　24 h 身体活动与 MetS 关联的性别差异　研究结果显示，24 h 身体活动与 MetS 风险的关联在男性和女性中均具有统计学意义［男性：（参数法）F=3.573，P<0.001；（非参数法）F=4.816，P<0.001；女性：（参数法）F=3.076，P=0.003；（非参数法）F=3.008，P=0.004］。但时间模式存在差异：男性参数法的相关时间段为 00:00—00:25 和 16:45—19:50，见图 3A；非参数法为 00:00—00:25 和 16:15—19:40，见图 3B。两种方法均提示在下午时段（16:45—19:40）的身体活动可降低 MetS 风险，而凌晨（00:00—00:25）可能增加风险。女性参数法的相关时间段为 09:05—10:15，见图 3C；非参数法为 08:55—10:50、13:20—13:30、13:40—13:45 及 17:20—18:35，见图 3D。两种方法均提示上午时段（09:05—10:15）的身体活动可降低 MetS 风险。



注：图 A 和 B 分别显示男性样本中参数协变量均衡法与非参数协变量均衡法的结果；图 C 和 D 分别显示女性样本中参数协变量均衡法与非参数协变量均衡法的结果；虚线区域表示基于 1 000 次 bootstrap 得到的 95%逐点置信区间；水平黑色虚线表示零效应参考线，水平黑色虚线下方阴影区域表示负相关，水平黑色虚线上方阴影区域表示正相关。

图 3　男性和女性群体 24 h 身体活动与 MetS 之间的关联

Figure 3　The association between 24-hour physical activity and MetS in male and female populations

3　讨　论

本研究首次从分钟级分辨率上揭示身体活动与 MetS 风险的关联，06:45—06:55 时段身体活动与 MetS 风险呈正相关，10:15—11:15 及 16:35—19:45 时段呈负相关。该发现突破了按上午、下午等宽泛划分的局限，为“最佳运动时间”提供了来自高维动态数据的直接证据。

既往研究已提示运动时间对代谢健康的重要性。Morales-Palomo 等[24]和 Shen 等[25]均发现，上午与下午运动在改善 MetS 评分、血脂及血管功能等方面各有优势，与本研究结论总体一致，但具体时间窗口存在差异。可能源于既往干预研究多将活动固定于特定时段，难以反映昼夜节律的连续影响；而本研究采用 FDA 方法，可揭示 24 h 活动轨迹中的局部效应，从而对“最佳运动时间”的界定提供更精细证据[21]。

本研究发现，上午与下午身体活动均与 MetS 风险降低相关。可能机制包括：皮下脂肪组织胰岛素敏感性具有明显昼夜节律，在中午左右达到峰值[26]；下午运动能通过激活骨骼肌 AMPK 信号通路、促进 GLUT-4 转位[27]及 IL-6 介导的葡萄糖摄取[28]，提高骨骼肌的胰岛素敏感性；同时下午运动还能降低血管阻力与交感神经活性，改善血压调控[29]。清晨（06:45—06:55）身体活动与 MetS 风险呈正相关，可能与该时间段活跃人群的生活方式或职业特征（如夜班、高强度工作等）相关，此类活动本身未必具有代谢保护作用。

男、女群体分析显示，身体活动与 MetS 风险的时间模式存在差异，该结果支持既往关于运动时间效益存在性别异质性的观点[22]。这种差异可能源于男女在代谢底物利用和激素调控方面的生理差异。女性在运动过程中更倾向于脂肪氧化作为主要能量来源，该特征部分受雌激素调控，有助于肝糖原储备[30]；同时，骨骼肌更多利用循环中的脂肪酸[30]，因此在上午较低碳水可利用状态下仍能维持较高的代谢效率。男性则更依赖碳水化合物代谢，而该代谢效率在傍晚更高，因此傍晚运动代谢效应更明显[31-32]。此外，男性凌晨（00:00—00:25）活动与 MetS 风险升高相关，可能与

夜间活动干扰褪黑激素分泌、昼夜节律及葡萄糖稳态有关[33]。综上，本研究从连续身体活动模式角度为相关生理机制提供了流行病学层面的支持。

综上所述，24 h 身体活动与 MetS 风险呈现时间特异性和性别差异，提示在制定个性化运动建议时，运动“时间窗”与“强度”“频率”同等重要。实践中，可将身体活动有意识地安排于特定时段，如女性优先上午（如 9:00—10:00），男性优先傍晚（如 17:00—19:00），以更好地契合生理节律。

本文也存在一定局限性。首先，研究基于横断面数据，尽管采用参数与非参数 GPS 方法控制混杂，仍可能存在未测量因素（如遗传背景、早期生活因素）导致残余混杂。其次，受加速度计佩戴依从性影响，最终样本存在较高流失率，可能引入选择偏倚。此外，结果难以直接推广至作息模式明显不同的人群（如夜班工作者）。最后，函数型暴露 – 标量结局模型用于刻画身体活动效应随时间变化的整体模式，而非可直接比较的单一效应值。未来研究需在大型前瞻性队列中，针对不同作息模式人群开展验证，以更精细量化各时间段身体活动的效应强度并明确其时间顺序及因果关系。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] Hamooya BM, Siame L, Muchaili L, et al. Metabolic syndrome: epidemiology, mechanisms, and current therapeutic approaches [J]. Frontiers in nutrition, 2025, 12: 1661603.

[2] Kim JE, Kim JS, Jo MJ, et al. The roles and associated mechanisms of adipokines in development of metabolic syndrome [J]. Molecules, 2022, 27(2): 334.

[3] 张娅荣，安冬青. 中西医治疗代谢综合征的研究进展[J]. 中国现代医生，2025，63（36）：112–114, 118.
Zhang YR, An DQ. Research progress in the treatment of metabolic syndrome with integrated traditional Chinese and Western medicine [J]. China Modern Doctor, 2025, 63(36): 112–114, 118.(In Chinese)

[4] 李燕萍，周裕婧，朱士胜，等. 中国老年人代谢综合征患病率 META 分析[J]. 现代预防医学，2022，49（5）：913–917.
Li YP, Zhou YJ, Zhu SS, et al. Prevalence of metabolic syndrome in Chinese elderly: a META–analysis [J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(5): 913–917.(In Chinese)

[5] Chalotra R, Gupta A, Singh TG, et al. Metabolic syndrome: risk factors and molecular drug targets [J]. EXCLI Journal, 2025, 24: 1193–1223.

[6] 吴佩芸，林诚. 代谢综合征运动干预作用机制的研究进展[J]. 中华高血压杂志:中英文，2024，32（2）：133–139.
Wu PY, Lin C. Research progress on the mechanism of exercise intervention in metabolic syndrome [J]. Chinese Journal of Hypertension, 2024, 32(2): 133–139.(In Chinese)

[7] 夏君玫，郝宏骏，梁计陵，等. 不同身体活动模式与代谢综合征患病风险的横断面分析——基于 NHANES 2011–2020 [J]. 现代预防医学，2025，52（19）：3464–3470, 3477.
Xia JM, Hao HT, Liang JL, et al. Associations of different physical activity patterns with prevalence of metabolic syndrome:a cross–sectional analysis of NHANES 2011–2020 [J]. Modern Preventive Medicine, 2025, 52(19): 3464–3470, 3477.(In Chinese)

[8] Chaput JP, McHill AW, Cox RC, et al. The role of insufficient sleep and circadian misalignment in obesity [J]. Nature Reviews Endocrinology, 2023, 19(2): 82–97.

[9] Zečević K, Popović N, Vuksanović Bočarić A, et al. Timing is Important–Management of metabolic syndrome according to the circadian rhythm[J]. Biomedicines, 2023, 11(4): 1171.

[10] Zhang XK, Xue W, Wang QY. Covariate balancing functional propensity score for functional treatments in cross–sectional observational studies [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2021, 163: 107303.

[11] Savikj M, Gabriel BM, Alm PS, et al. Afternoon exercise is more efficacious than morning exercise at improving blood glucose levels in individuals with type 2 diabetes: a randomised crossover trial[J]. Diabetologia, 2019, 62(2): 233–237.

[12] Mancilla R, Brouwers B, Schrauwen–Hinderling VB, et al. Exercise training elicits superior metabolic effects when performed in the afternoon compared to morning in metabolically compromised humans[J]. Physiological Reports, 2021, 8(24): e14669.

[13] Albalak G, Stijntjes M, van Bodegom D, et al. Setting your clock: associations between timing of objective physical activity and cardiovascular disease risk in the general population [J]. European Journal of Preventive Cardiology, 2023, 30(3): 232–240.

[14] Morales–Palomo F, Moreno–Cabañas A, Alvarez–Jimenez L, et al. Efficacy of morning versus afternoon aerobic exercise training on reducing metabolic syndrome components: A randomized controlled trial[J]. The Journal of Physiology, 2024, 602(23): 6463–6477.

[15] Teo SYM, Kanaley JA, Guelfi KJ, et al. The effect of exercise timing on glycemic control: a randomized clinical trial [J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2020, 52(2): 323–334.

[16] Brooker PG, Gomersall SR, King NA, et al. The efficacy of morning versus evening exercise for weight loss: A randomized controlled trial [J]. Obesity (Silver Spring, Md.), 2023, 31(1): 83–95.

[17] Centers for Disease Control, Prevention. About the National health and nutrition examination survey [EB/OL]. [2026–02–26]. https://www.cdc.gov/nchs/nhanes/.

[18] Koffman L, Muschelli J.Minute level step counts and physical activity data from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2011 – 2014 [EB/OL]. [2026–02–26]. https://www.physionet.org/content/minute–level–step–count–nhanes/1.0.0/files.

[19] Wang M, Wang C, Zhao MX, et al. BMI–based metabolic syndrome severity score and arterial stiffness in a cohort Chinese study [J]. Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases, 2024, 34 (7): 1761–1768.

[20] Grundy SM, Cleeman JI, Daniels SR,et al.Diagnosis and management of the metabolic syndrome: an American Heart Association/National Heart, Lung, and Blood Institute Scientific Statement[J]. Circulation, 2005, 112(17): 2735–2752.

[21] Xiao Q, Lu JC, Zeitzer JM, et al. Rest–activity profiles among U.S. adults in a nationally representative sample: a functional principal component analysis [J]. The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 2022, 19(1): 32.

[22] Arciero PJ, Ives SJ, Mohr AE, et al. Morning exercise reduces abdominal fat and blood pressure in women; evening exercise increases muscular performance in women and lowers blood pressure in men[J]. Frontiers in Physiology, 2022, 13: 893783.

[23] Wu X, Mealli F, Kioumourtzoglou MA, et al. Matching on generalized propensity scores with continuous exposures [J]. Journal of the American Statistical Association, 2024, 119(545): 757–772.

[24] Morales–Palomo F, Moreno–Cabañas A, Alvarez–Jimenez L, et al. Efficacy of morning versus afternoon aerobic exercise training on reducing metabolic syndrome components: A randomized controlled trial[J]. The Journal of Physiology, 2024, 602(23): 6463–6477.

[25] Shen BY, Zheng HW, Liu HB, et al. Differential benefits of 12–week morning vs. evening aerobic exercise on sleep and cardiometabolic health: a randomized controlled trial [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 18298.

[26] Carrasco–Benso MP, Rivero–Gutierrez B, Lopez–Minguez J, et al. Human adipose tissue expresses intrinsic circadian rhythm in insulin sensitivity[J]. FASEB Journal, 2016, 30(9): 3117–3123.

[27] Mancilla R, Krook A, Schrauwen P, et al. Diurnal regulation of peripheral glucose metabolism: potential effects of exercise timing[J]. Obesity (Silver Spring, Md.), 2020(Suppl 1): S38–S45.

[28] Kim HK, Radak Z, Takahashi M, et al. Chrono–exercise: Time–of–day–dependent physiological responses to exercise [J]. Sports Medicine and Health Science, 2023, 5(1): 50–58.

[29] Brito LC, Marin TC, Azev ê do L, et al. Chronobiology of exercise: evaluating the best time to exercise for greater cardiovascular and metabolic benefits [J]. Comprehensive Physiology, 2022, 12 (3): 3621–3639.

[30] Abo SMC, Casella E, Layton AT. Sexual dimorphism in substrate metabolism during exercise [J]. Bulletin of Mathematical Biology, 2024, 86(2): 17.

[31] Henderson GC. Sexual dimorphism in the effects of exercise on metabolism of lipids to support resting metabolism [J]. Frontiers in Endocrinology, 2014, 5: 162.

[32] Moholdt T, Parr EB, Devlin BL, et al. The effect of morning vs evening exercise training on glycaemic control and serum metabolites in overweight/obese men: a randomised trial [J]. Diabetologia, 2021, 64(9): 2061–2076.

[33] Zabuliene LN, Milionis C, Koukkou E, et al. Exposure to artificial lighting at night: from an ecological challenge to a risk factor for glucose dysmetabolism and gestational diabetes? Narrative review[J]. Annals of Medicine, 2025, 57(1): 2477304.

收稿日期:2025–10–26

(上接第 1303 页)

韧性评估 -- 以长春市为例 [J]. 灾害学,2023,38(1):213–219.
Zhang Z, Zhang YC, Zhang JQ, et al. Urban resilience assessment based on entropy weight method and TOPSIS model–take Changchun city as an example [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 213–219.(In Chinese)

[19] 周洁,胡凌娟,怀晴雨. 基于主成分分析和 TOPSIS 模型的我国各省份医疗水平评价研究 [J]. 中国全科医学,2023,26(34):4254–4260, 4268.
Zhou J, Hu LJ, Huai QY. Evaluation of medical level in China by provinces based on principal component analysis and TOPSIS Model [J]. Chinese General Practice, 2023, 26 (34): 4254–4260, 4268.(In Chinese)

[20] 张轲. 基于熵权法 –TOPSIS 的城市医疗系统韧性评价研究[D]. 北京:北京建筑大学,2022.
Zhang K. Research on resilience evaluation of urban medical system based on entropy weight method–TOPSIS [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.(In Chinese)

[21] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1962, 33(3): 1065–1076.

[22] Deng J, Song QW, Liu H, et al. The coupling coordination between health service supply and regional economy in China: spatio–temporal evolution and convergence [J]. Front Public Health, 2024, 12: 1352141.

[23] Moran PAP. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37(1/2): 17–23.

[24] 薛亮,任志远. 基于空间马尔科夫链的关中地区生态安全时空演变分析[J]. 生态环境学报,2011,20(1):114–118.
Xue L, Ren ZY. The spatial–temporal dynamics of Guanzhong eco–security based on spatial Malcov Chains [J]. Ecology and Environment, 2011, 20(1): 114–118.(In Chinese)

收稿日期:2025–10–02