

拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症之间的关联：基于 NHANES 数据库的横断面研究



李洪宇¹, 黄维奇¹, 尹 龙¹, 吴群红¹, 廉 维², 刘 欢¹

1. 哈尔滨医科大学卫生管理学院社会医学教研室 (哈尔滨 150081)

2. 哈尔滨医科大学附属第二医院物资中心 (哈尔滨 150081)

【摘要】目的 探讨拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症之间的关系。**方法** 采用横断面研究设计, 基于 2011—2016 年美国国家健康与营养调查数据, 筛选 18~59 岁成年人, 通过双能 X 射线吸收测量法扫描技术计算四肢骨骼肌质量与体重指数 (BMI) 的比值判定肌肉减少症的患病情况, 采用尿液中 3-苯氧基苯甲酸 (3-PBA) 水平评估拟除虫菊酯暴露水平, 通过加权 Logistic 回归和限制性立方样条 (RCS) 模型分析其与肌肉减少症的关联及其剂量-反应关系, 并采用亚组分析和交互作用检验探讨结果的稳定性及 BMI 的修饰效应。**结果** 共纳入 2 867 名研究对象, 肌肉减少症占比为 7.57%。加权 Logistic 回归结果显示, 调整协变量后, 3-PBA 暴露水平每增加 1 个对数单位, 肌肉减少症风险增加 21% [OR=1.21, 95%CI (1.02, 1.44), $P=0.032$]; 按 ln (3-PBA) 的四分位数分组, 与 Q1 组相比, Q4 组的肌肉减少症风险增加 112% [OR=2.12, 95%CI (1.22, 3.69), $P=0.009$]。RCS 模型分析显示, 尿 3-PBA 水平与肌肉减少症风险之间呈正向线性关联 (总体 $P<0.001$, 非线性 $P=0.595$), 且当尿 3-PBA 水平超过 0.57 $\mu\text{g/L}$ 后, 风险上升趋势更为明显。亚组与交互作用分析显示, 该关联在 BMI $\geq 30 \text{ kg/m}^2$ 的肥胖个体中更强 [OR=1.43, 95%CI (1.19, 1.71), 趋势 $P<0.001$], 且 BMI 与 3-PBA 在肌肉减少症风险上具有交互作用 [OR=1.59, 95%CI (1.18, 2.14), 交互 $P=0.003$]。**结论** 拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症风险之间呈正向关联, 在肥胖人群中尤为明显。建议采取多层次防控措施, 并需进一步研究以完善预防策略。

【关键词】 拟除虫菊酯; 肌肉减少症; 3-苯氧基苯甲酸; 体重指数; 交互作用

【中图分类号】 R685 **【文献标识码】** A

Association between pyrethroid exposure and sarcopenia: a cross-sectional study based on the NHANES database

LI Hongyu¹, HUANG Weiqi¹, YIN Long¹, WU Qunhong¹, LIAN Wei², LIU Huan¹

1. Department of Social Medicine, School of Health Management, Harbin Medical University, Harbin 150081, China

2. Materials Center, The Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin 150081, China

Corresponding author: LIU Huan, Email: liuhuan00813@163.com

【Abstract】Objective To explore the relationship between pyrethroid exposure and sarcopenia. **Methods** Using a cross-sectional study design, the data were sourced from the U.S. National Health and Nutrition Examination Survey conducted from 2011 to 2016. Adults aged 18-59 years were selected as research subjects. Sarcopenia was assessed by calculating the ratio of

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202603126

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (72304079)

通信作者: 刘欢, 博士, 副教授, 博士研究生导师, Email: liuhuan00813@163.com

skeletal muscle mass to body mass index (BMI) using dual-energy X-ray absorptiometry scanning technology. Pyrethroid exposure levels were evaluated based on urinary 3-phenoxybenzoic acid (3-PBA) concentrations. The association between these factors and the risk of sarcopenia, as well as their dose-response relationships, were analyzed using weighted Logistic regression and restricted cubic spline (RCS) models. Subgroup analyses and interaction tests were employed to examine the stability of the findings and the moderating effect of BMI. **Results** A total of 2,867 participants were included, with a prevalence of sarcopenia at 7.57%. Weighted Logistic regression analysis showed that, after adjusting for covariates, for every one-unit increase in log-transformed 3-PBA exposure level, the risk of sarcopenia increased by 21% [OR=1.21, 95%CI (1.02, 1.44), $P=0.032$]; Group by quartile of $\ln(3\text{-PBA})$, compared with the Q1 group, the Q4 group exhibited a 112% increased risk of sarcopenia [OR=2.12, 95%CI (1.22, 3.69), $P=0.009$]. RCS analysis revealed a linear positive correlation between 3-PBA and the risk of sarcopenia ($P_{\text{overall}} < 0.001$, $P_{\text{nonlinearity}}=0.595$), with the risk increase becoming more pronounced when urinary 3-PBA levels exceeded $0.57 \mu\text{g/L}$. Subgroup and interaction analyses indicated that this association was stronger in obese individuals with a BMI $\geq 30 \text{ kg/m}^2$ [OR=1.43, 95%CI (1.19, 1.71), $P_{\text{trend}} < 0.001$], and there was an interaction between BMI and 3-PBA on the risk of sarcopenia [OR=1.59, 95%CI (1.18, 2.14), $P_{\text{interaction}}=0.003$]. **Conclusion** There is a positive association between pyrethroid exposure and the risk of sarcopenia, which is particularly evident in obese populations. It is recommended to take multi-level prevention and control measures and further research is needed to improve prevention strategies.

【Keywords】Pyrethroid; Sarcopenia; 3-phenoxybenzoic acid; Body mass index; Interaction

肌肉减少症是一种以全身性骨骼肌质量减少、肌肉力量下降及躯体功能减退为特征的疾病^[1]。目前,全球肌肉减少症的患病率约为5%~10%,且呈逐年上升趋势^[1-2],该疾病已成为重要的公共卫生问题之一^[3]。现有研究主要聚焦于衰老、遗传、慢性病等内在因素与肌肉减少症的关联^[4-7]。值得注意的是,有研究指出肥胖可能与肌肉减少症存在密切关联^[7]。但关于环境因素与其关联的探讨仍较为有限。

拟除虫菊酯是一类基于除虫菊素合成的化合物,因其高效杀虫活性,不仅广泛应用于农业领域,也常见于宠物洗发水、花园杀虫剂等用品中,占全球农药使用总量的30%以上^[8-12]。然而,随着其广泛使用,环境污染问题日益突出。研究显示,拟除虫菊酯残留物在多数河流和家庭环境中被普遍检出^[13-14]。职业暴露与饮食摄入等因素也使其代谢物频繁在尿液样本中被检测到^[9, 15-16]。尽管该类物质在体内经尿液代谢较快,但仍可在细胞内蓄积^[17-18],长期暴露可引起恶心、呕吐、腹痛等中毒症状,对健康构成潜在威胁^[8]。既往关于拟除虫菊酯暴露与人体健康关系的研究多聚焦于探讨其神经毒性效应^[19],以及其所诱发的代谢性疾病^[20]、生殖功能损害^[21]和多器官毒性损伤^[22]。虽有少量研究探讨了拟除虫菊酯暴露与肌肉力量、肌肉质量的关系^[23],但鲜

有研究深入揭示其与肌肉减少症之间的关联,也缺少对其暴露浓度阈值的系统探索。此外,既往研究提示,拟除虫菊酯暴露可能导致体重增加,而超重与肥胖人群可能对该类物质更为敏感^[24-25]。因此,本研究旨在探讨拟除虫菊酯暴露水平与肌肉减少症之间的关联及其剂量-反应关系,并分析体重指数(body mass index, BMI)的潜在影响,为理解环境毒素对肌肉健康的慢性影响提供重要流行病学证据,也为公共卫生部门制定肌肉减少症的预防策略提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究为横断面研究,采用美国国家健康与营养调查(National Health and Nutrition Examination Survey, NHANES) 2011—2016年(包含2011—2012年、2013—2014年和2015—2016年3个连续周期) 18~59岁成年人数据作为研究对象。NHANES由美国国家卫生统计中心(National Center for Health Statistics, NCHS)开展,该调查经美国NCHS伦理审查委员会批准,参与者均签署知情同意书^[26]。

本研究纳入2011—2016年NHANES的参与者(29 902例)。排除标准:①年龄 < 18 岁或 > 59 岁者(11 933例);②缺少肌肉减少症的相关数据者

(8 619 例); ③缺少拟除虫菊酯的相关数据者(6 356 例); ④协变量数据如年龄、性别、种族、受教育程度、家庭年收入及 BMI 任一项指标缺失者(127 例)。

1.2 肌肉减少症诊断标准

肌肉减少症的诊断主要采用双能 X 射线吸收测量法扫描技术。自 2011 年之后的调查周期中, 该测量法仅适用于 60 岁以下的研究对象。肌肉减少症的评估主要通过计算四肢骨骼肌质量 (appendicular skeletal muscle mass, ASM) 之和实现^[27]。依据相关指南, 本研究采用肌肉减少症指数进行评估, 其计算公式为 $ASM (kg) / BMI (kg/m^2)$ ^[28]。男性肌肉减少症指数 ≥ 0.789 、女性肌肉减少症指数 ≥ 0.512 视为正常; 若男性和女性相关指数分别低于上述阈值, 则判定患有肌肉减少症^[29-30]。根据是否患肌肉减少症分为肌肉减少症组、未患肌肉减少症组。

1.3 拟除虫菊酯暴露评估

拟除虫菊酯的代谢产物主要通过尿液排出。为评估其暴露水平, 本研究基于 NHANES 数据库中经高效液相色谱-串联质谱法测定的尿液代谢产物检测数据进行分析^[31]。NHANES 数据库主要包含 4 种拟除虫菊酯代谢产物类型。综合考虑代表性和检出率, 本研究选取其主要尿液代谢产物 3-苯氧基苯甲酸 (3-phenoxybenzoic acid, 3-PBA) 作为暴露水平的评估指标^[9]。参照既往研究, 若检测结果低于检测限, 以替代值进行赋值校正, 替代值计算公式为 $(\text{检测限}/2)^{1/2}$ ^[12]。为校正尿液稀释对检测结果的影响, 本研究对尿肌酐水平 (mg/dL) 和尿 3-PBA ($\mu g/L$) 的单位进行统一标准化处理, 统一换算为 $\mu g/L$, 并以尿肌酐水平对尿 3-PBA 代谢产物浓度进行校正^[26, 32]。鉴于 3-PBA 浓度数据呈高度偏态分布且不具线性特征, 本研究对其进行对数转换处理, 以确保数据符合正态分布要求。

1.4 协变量

参考既往相关研究^[26, 33], 本研究纳入的协变量包括年龄、性别、种族 (墨西哥裔美国人、其他拉美裔、非西班牙裔白人、非西班牙裔黑人、其他种族)、受教育程度 (高中以下、高中毕业、高中以上)、BMI (< 30 、 $\geq 30 kg/m^2$) 以及家庭年收入 ($< 20\ 000$ 、 $20\ 000 \sim 44\ 999$ 、 $\geq 45\ 000$ 美元)。

1.5 统计学分析

使用 R 4.4.1 软件进行数据分析。根据分析指

南, 对于 NHANES 2011—2016 年数据进行权重计算, 分别将 2011—2012 年和 2013—2014 年调查周期的环境子样本 C 权重 (WTSC2YR) 及 2015—2016 年调查周期的环境子样本 B 权重 (WTSB2YR) 除以 3 后进行合并使用^[26]。符合正态分布的计量资料以均数和标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 不符合正态分布的计量资料以中位数和四分位数 [$M (P_{25}, P_{75})$] 表示, 计数资料以频数和百分数 ($n, \%$) 表示。采用加权二元 Logistic 回归分析尿 3-PBA 水平与肌肉减少症之间的相关性。将尿 3-PBA 水平分别以连续型变量 (每增加 1 个对数单位) 和按 $\ln (3-PBA)$ 的四分位数分为 4 组 (Q1 组 < -10.37 , $-10.37 \leq$ Q2 组 < -9.77 , $-9.77 \leq$ Q3 组 ≤ -8.97 , Q4 组 > -8.97) 的分类变量纳入模型。关联强度以比值比 (odds ratio, OR) 及其 95% 置信区间 (confidence interval, CI) 表示。建立 2 个模型: 模型 1 未调整任何变量; 模型 2 在模型 1 的基础上, 调整年龄、性别、种族、受教育程度、家庭年收入及 BMI。采用限制性立方样条 (restricted cubic spline, RCS) 模型分析未调整组和调整组中尿 3-PBA 水平与肌肉减少症之间的剂量-反应关系。基于相关协变量进行亚组分析与交互作用检验, 探究不同人群特征对拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症之间关联的稳定性及潜在效应修饰作用; 在分析过程中, 经线性关系检验后, 将对数转换后的连续型 3-PBA 作为主要自变量纳入模型, 既能保留更多生物学信息、提高统计效能, 也能更灵敏地检测剂量-反应关系及亚组间潜在交互作用。

2 结果

2.1 一般情况

共纳入 2 867 名研究对象, 肌肉减少症占比为 7.57%。研究对象的年龄范围为 18~59 岁, 平均年龄 (37.70 ± 12.3) 岁, 性别比例分布均衡。其中, 非西班牙裔白人占比最高 (35.68%), 58.07% 的研究对象具有高中以上学历, 49.35% 的研究对象年收入为 45 000 美元及以上。63.93% 的研究对象 BMI $< 30 kg/m^2$, 见表 1。

2.2 尿 3-PBA 水平与肌肉减少症的关系

加权二元 Logistic 回归分析结果显示, 在模型 1 和模型 2 中, 每增加 1 个对数单位的 3-PBA 水平, 肌肉减少症风险分别增加约 19%

[OR=1.19, 95%CI (1.02, 1.39), $P=0.032$]、21% [OR=1.21, 95%CI (1.02, 1.44), $P=0.032$]; 与 Q1 组相比, Q4 组的肌肉减少症风险分别增加 107% [OR=2.07, 95%CI(1.19, 3.60), $P=0.011$]、112% [OR=2.12, 95%CI(1.22, 3.69), $P=0.009$], 表明尿 3-PBA 水平与肌肉减少症风险独立相关, 见表 2。

RCS 模型分析结果显示, 随着尿 3-PBA

水平升高, 肌肉减少症风险呈线性上升趋势 (总体 $P=0.009$, 非线性 $P=0.959$), 见图 1-A; 调整性别、年龄、种族、BMI、受教育程度以及家庭年收入后, 该正向线性关联仍存在 (总体 $P<0.001$, 非线性 $P=0.595$), 见图 1-B, 值得注意的是, 当尿 3-PBA 水平超过 0.57 $\mu\text{g/L}$ 后, 风险上升的趋势更为明显。

表 1 不同分组参与者基本情况 (n, %)

Table 1. Basic information of participants in different groups (n, %)

变量	总体 (n=2 867)	肌肉减少症组 (n=217)	未患肌肉减少症组 (n=2 650)
性别			
男	1 427 (49.77)	102 (47.00)	1 325 (50.00)
女	1 440 (50.23)	115 (53.00)	1 325 (50.00)
年龄 (岁) *	37.70 $\pm$ 12.25	42.37 $\pm$ 12.25	37.32 $\pm$ 12.18
种族			
墨西哥裔美国人	406 (14.16)	69 (31.80)	337 (12.72)
其他拉美裔	295 (10.29)	36 (16.59)	259 (9.76)
非西班牙裔白人	1 023 (35.68)	72 (33.18)	951 (35.89)
非西班牙裔黑人	655 (22.85)	9 (4.14)	646 (24.38)
其他种族	488 (17.02)	31 (14.29)	457 (17.25)
受教育程度			
高中以下	532 (18.56)	71 (32.72)	461 (17.39)
高中毕业	670 (23.37)	54 (24.88)	616 (23.25)
高中以上	1 665 (58.07)	92 (42.40)	1 573 (59.36)
家庭年收入 (美元)			
< 20 000	625 (21.80)	68 (31.34)	557 (21.02)
20 000~44 999	827 (28.85)	63 (29.03)	764 (28.83)
$\geq$ 45 000	1 415 (49.35)	86 (39.63)	1 329 (50.15)
BMI (kg/m^2)			
< 30	1 833 (63.93)	71 (32.72)	1 762 (66.49)
$\geq$ 30	1 034 (36.07)	146 (67.28)	888 (33.51)
3-PBA 水平 ^a	-9.66 $\pm$ 1.22	-9.41 $\pm$ 1.20	-9.68 $\pm$ 1.22
3-PBA 分组 ^b			
Q1 组	735 (25.64)	40 (18.43)	695 (26.24)
Q2 组	739 (25.78)	51 (23.50)	688 (25.96)
Q3 组	701 (24.45)	60 (27.65)	641 (24.18)
Q4 组	692 (24.13)	66 (30.42)	626 (23.62)

注: ^a符合正态分布的计量资料以均数和标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示; ^a3-PBA 水平为自然对数转换值 (ln 转换); ^bQ1~Q4 组为 ln (3-PBA) 的四分位数分组。

表 2 尿 3-PBA 水平与肌肉减少症的关系

Table 2. Relationship between urinary 3-PBA levels and sarcopenia

变量	模型 1			模型 2		
	β 值	OR 值 (95%CI)	P 值	β 值	OR 值 (95%CI)	P 值
3-PBA 水平 ^a	0.17	1.19 (1.02, 1.39)	0.032	0.19	1.21 (1.02, 1.44)	0.032
3-PBA 分组 ^b	0.24	1.27 (1.08, 1.51)	0.006	0.26	1.30 (1.08, 1.55)	0.005
Q1 组		Ref.			Ref.	
Q2 组	0.20	1.22 (0.65, 2.30)	0.527	0.06	1.06 (0.57, 1.99)	0.844
Q3 组	0.38	1.47 (0.77, 2.79)	0.234	0.24	1.27 (0.67, 2.40)	0.456
Q4 组	0.73	2.07 (1.19, 3.60)	0.011	0.75	2.12 (1.22, 3.69)	0.009

注: ^a以连续型变量 (每增加 1 个对数单位) 纳入模型; ^b以分类变量 [ln (3-PBA) 的四分位数分组] 纳入模型; 模型 1 未调整任何变量; 模型 2 在模型 1 的基础上调整性别、年龄、种族、BMI、受教育程度以及家庭年收入。

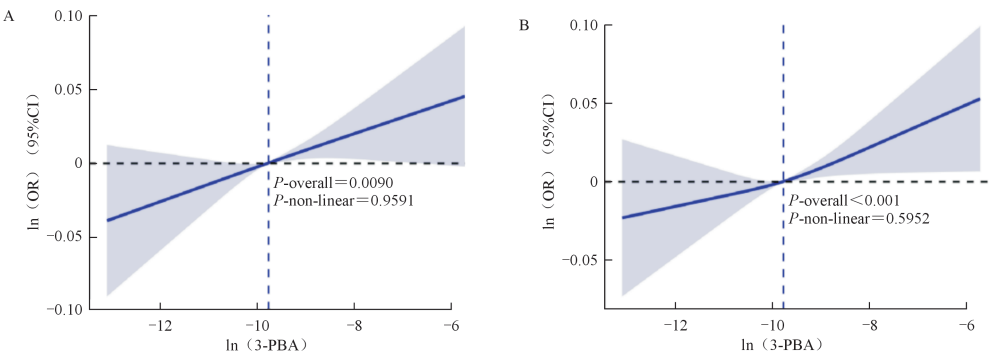


图1 尿3-PBA水平与肌肉减少症之间的剂量-反应关系

Figure 1. The dose-response relationship between urinary 3-PBA levels and sarcopenia

注：A. 模型未调整任何变量；B. 模型调整性别、年龄、种族、BMI、受教育程度以及家庭年收入；阴影区域表示95%CI。

2.3 亚组分析

根据相关协变量进行亚组分析，结果显示，在家庭年收入 20 000~44 999 美元 [OR=1.61, 95%CI (1.14, 2.27), 趋势 $P=0.008$,]、女性群体 [OR=1.36, 95%CI (1.15, 1.69), 趋势 $P<0.001$] 及 BMI ≥ 30 kg/m² 的人群 [OR=1.43, 95%CI

(1.19, 1.71), 趋势 $P<0.001$] 亚组中，尿 3-PBA 水平与肌肉减少症风险之间存在正向关联。然而，除 BMI 与尿 3-PBA 在肌肉减少症风险上具有交互作用（交互 $P=0.003$ ）外，性别、种族、教育程度、家庭年收入与尿 3-PBA 水平之间未发现交互作用，见表 3。

表3 尿3-PBA水平与肌肉减少症关联的亚组分析

Table 3. Subgroup analysis of the association between urinary 3-PBA levels and sarcopenia

变量	OR 值 (95%CI)	趋势 P 值	交互 P 值
性别	1.23 (0.91, 1.66)		0.175
男	1.10 (0.85, 1.42)	0.454	
女	1.36 (1.15, 1.69)	< 0.001	
种族	1.10 (0.92, 1.30)		0.271
墨西哥裔美国人	1.03 (0.80, 1.32)	0.838	
其他拉美裔	1.27 (0.80, 2.02)	0.290	
非西班牙裔白人	1.20 (0.94, 1.54)	0.137	
非西班牙裔黑人	1.31 (0.95, 1.80)	0.096	
其他种族	1.52 (0.90, 2.55)	0.113	
受教育程度	1.18 (0.95, 1.46)		0.130
高中以下	0.94 (0.72, 1.22)	0.636	
高中毕业	1.21 (0.88, 1.65)	0.240	
高中以上	1.32 (0.99, 1.76)	0.060	
家庭年收入 (美元)	1.00 (0.87, 1.14)		0.855
< 20 000	1.09 (0.87, 1.36)	0.450	
20 000~44 999	1.61 (1.14, 2.27)	0.008	
$\geq 45 000$	1.12 (0.91, 1.38)	0.261	
BMI (kg/m ²)	1.59 (1.18, 2.14)		0.003
< 30	0.84 (0.62, 1.16)	0.289	
≥ 30	1.43 (1.19, 1.71)	< 0.001	

注：所有模型均调整了性别、年龄、种族、受教育程度、家庭年收入和 BMI，并将经对数转换后的连续型 3-PBA 作为主要自变量纳入模型。

3 讨论

本研究中，7.57% 的研究对象患有肌肉减少症，尿 3-PBA 水平与肌肉减少症风险呈正向关联。RCS 模型分析显示，当尿 3-PBA 水平超过特定阈值时，肌肉减少症风险开始明显上升。亚组

分析与交互作用检验显示，该关联在肥胖人群中更为明显，且 BMI 与尿 3-PBA 在肌肉减少症风险上存在交互效应。本研究结果有助于为易感人群及医务工作者制定拟除虫菊酯所致肌肉减少症的预防和控制方案提供依据。

研究表明，拟除虫菊酯的主要尿液代谢

产物 3-PBA 水平与肌肉减少症风险呈正向关联, 该关联可能由多重机制共同介导。既往研究显示, 拟除虫菊酯可促进活性氧生成并降低抗氧化酶活性, 导致机体氧化应激状态, 从而打破肌肉蛋白质降解与合成的平衡, 导致肌肉流失^[34-35]。此外, 有研究显示, 拟除虫菊酯可与雄激素受体及性激素结合球蛋白结合, 改变性激素在体内的转运和分布, 干扰性激素的生理功能, 进而增加肌肉减少症风险^[21, 36]。人类主要通过吸入、摄入或皮肤接触等途径暴露于拟除虫菊酯^[10, 16]。鉴于拟除虫菊酯暴露所致的肌肉减少症发病率持续上升, 有必要实施多层面的防控措施。家庭应避免使用高浓度拟除虫菊酯产品, 对于不可避免的职业暴露, 应严格执行佩戴护目镜、呼吸面罩和橡胶手套等个人防护措施^[37], 同时定期补充抗坏血酸与 α -生育酚, 有助于减轻拟除虫菊酯引起的氧化应激损伤^[22]。

考虑到 BMI 与拟除虫菊酯的交互作用, 肥胖个体可能更易受拟除虫菊酯影响, 从而增加肌肉减少症的发病风险。研究发现, 肥胖个体尿 3-PBA 水平每增加 1 倍, 其肌肉减少症风险将升高 1.43 倍^[38]。一方面, 拟除虫菊酯具有亲脂性, 暴露后易在脂肪组织中分布蓄积, 形成长期慢性暴露。另一方面, 研究表明肥胖个体更易出现胰岛素抵抗, 此时肌细胞对胰岛素敏感性降低, 胰岛素信号转导通路受损, 而该通路在调控肌蛋白合成与分解中发挥关键作用, 其功能障碍直接影响肌蛋白代谢平衡^[20]。拟除虫菊酯可能加剧胰岛素抵抗状态, 进一步加速肌肉流失进程^[39]。在全球肥胖率持续攀升的背景下, 肥胖人群尤需警惕拟除虫菊酯暴露可能诱发的肌肉减少症^[40]。建议肥胖或超重人群在科学减重的同时, 尽量避免接触拟除虫菊酯。此外, 公共卫生部门应重视对肥胖人群开展拟除虫菊酯暴露所致肌肉减少症的筛查与监测工作。

本研究仍存在一定的局限性。首先, 横断面研究设计无法明确因果时序关系, 拟除虫菊酯暴露可能导致肌肉减少症风险上升, 但肌肉减少症患者也可能因基础代谢率下降, 使 3-PBA 在体内滞留时间延长, 从而导致尿液中 3-PBA 检出浓度升高。其次, 所选取的研究对象年龄范围为 18~59 岁, 结果无法外推至老年群体及其他年龄段人群。再次, 本研究所纳入控制的混杂因素较为有

限, 可能对结果造成一定干扰。最后, 尽管尿 3-PBA 的检测敏感性高于其他几种生物标志物, 但其代谢半衰期较短, 可能导致检测率存在偏差^[9]。未来研究应采用纵向设计, 纳入更广泛年龄范围的人群, 控制更多混杂因素, 探索其他能有效反映拟除虫菊酯暴露的变量, 并深入探究拟除虫菊酯与肌肉减少症之间的因果关联及作用机制。

综上所述, 拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症风险呈正向关联, 在肥胖人群中该关联更明显。建议通过降低拟除虫菊酯使用浓度、加强暴露防护措施, 并结合运动与营养补充进行综合干预。未来研究应采用纵向设计, 纳入更广泛年龄范围的人群并控制更多混杂因素, 以明确肌肉减少症与拟除虫菊酯暴露之间的因果关系。

伦理声明: 本研究数据来源于美国国家健康与营养调查 (NHANES), 该研究经美国国家卫生统计中心伦理审查委员会批准, 所有参与者均签署书面知情同意书

作者贡献: 研究设计、数据分析与论文撰写: 李洪宇、黄维奇、刘欢; 资料整理: 尹龙、廉维; 基金支持、论文选题、指导与修订: 刘欢、吴群红

数据获取: 本研究中使用和 (或) 分析的数据可在 NHANES 官网公开数据库 (<https://www.cdc.gov/nchs/nhanes/default.aspx>) 获取

利益冲突声明: 无

致谢: 不适用

参考文献

- 1 Sayer AA, Cooper R, Arai H, et al. Sarcopenia[J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2024, 10(1): 68.
- 2 Santilli V, Bernetti A, Mangone M, et al. Clinical definition of sarcopenia[J]. *Clin Cases Miner Bone Metab*, 2014, 11(3): 177-180.
- 3 Sayer AA, Cruz-Jentoft A. Sarcopenia definition, diagnosis and treatment: consensus is growing[J]. *Age Ageing*, 2022, 51(10): afac220.
- 4 Nunes-Pinto M, de Mello RGB, Pinto MN, et al. Sarcopenia and the biological determinants of aging: a narrative review from a geroscience perspective[J]. *Ageing Res Rev*, 2025, 103: 102587.
- 5 Jin H, Yoo HJ, Kim YA, et al. Unveiling genetic variants for age-related sarcopenia by conducting a genome-wide association study on Korean cohorts[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 3501.
- 6 Chen S, Han H, Jin J, et al. Osteoarthritis and sarcopenia-related traits: the cross-sectional study from NHANES 2011-2014 and Mendelian randomization study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 502.
- 7 Li C, Yu K, Shyh-Chang N, et al. Pathogenesis of sarcopenia and the relationship with fat mass: descriptive review[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2022, 13(2): 781-794.
- 8 Bradberry SM, Cage SA, Proudfoot AT, et al. Poisoning due to pyrethroids[J]. *Toxicol Rev*, 2005, 24(2): 93-106.
- 9 Barr DB, Olsson AO, Wong LY, et al. Urinary concentrations of metabolites of pyrethroid insecticides in the general US population: National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2002[J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118(6): 742-748.

- 10 Saillenfait AM, Ndiaye D, Sabaté JP. Pyrethroids: exposure and health effects—an update[J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2015, 218(3): 281–292.
- 11 Burns CJ, Pastoor TP. Pyrethroid epidemiology: a quality-based review[J]. *Crit Rev Toxicol*, 2018, 48(4): 297–311.
- 12 Lehmler HJ, Simonsen D, Liu B, et al. Environmental exposure to pyrethroid pesticides in a nationally representative sample of US adults and children: the National Health and Nutrition Examination Survey 2007–2012[J]. *Environ Pollut*, 2020, 267: 115489.
- 13 López-Benítez A, Guevara-Lara A, Domínguez-Crespo MA, et al. Concentrations of organochlorine, organophosphorus, and pyrethroid pesticides in rivers worldwide (2014–2024): a review[J]. *Sustainability*, 2024, 16(18): 8066.
- 14 Stout DM, Bradham KD, Egeghy PP, et al. American Healthy Homes Survey: a national study of residential pesticides measured from floor wipes[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(12): 4294–4300.
- 15 Mueller W, Jones K, Fuhrmann S, et al. Factors influencing occupational exposure to pyrethroids and glyphosate: an analysis of urinary biomarkers in Malaysia, Uganda and the United Kingdom[J]. *Environ Res*, 2024, 242: 117651.
- 16 Koyraty N, Olson JR, Kawyn M, et al. Dietary predictors of urinary biomarkers of pyrethroids in the general population—a scoping review[J]. *J Nutr*, 2024, 154(2): 325–340.
- 17 Romero A, Ramos E, Ares I, et al. Oxidative stress and gene expression profiling of cell death pathways in alpha-cypermethrin-treated SH-SY5Y cells[J]. *Arch Toxicol*, 2017, 91(5): 2151–2164.
- 18 Želježić D, Mladinić M, Žunec S, et al. Cytotoxic, genotoxic and biochemical markers of insecticide toxicity evaluated in human peripheral blood lymphocytes and an HepG2 cell line[J]. *Food Chem Toxicol*, 2016, 96: 90–106.
- 19 Mohammadi H, Ghassemi-Barghi N, Malakshah O, et al. Pyrethroid exposure and neurotoxicity: a mechanistic approach[J]. *Arh Hig Rada Toksikol*, 2019, 70(2): 74–89.
- 20 Kahn SE, Hull RL, Utzschneider KM. Mechanisms linking obesity to insulin resistance and type 2 diabetes[J]. *Nature*, 2006, 444(7121): 840–846.
- 21 Sheikh IA, Beg MA, Macha MA. Pyrethroids and reproductive function: some endocrine disrupting perspectives from molecular simulations[J]. *Ecotoxicology*, 2024, 33(9): 1086–1095.
- 22 Al-Omar MS, Naz M, Mohammed SAA, et al. Pyrethroid-induced organ toxicity and anti-oxidant-supplemented amelioration of toxicity and organ damage: the protective roles of ascorbic acid and α -tocopherol[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(17): 6177.
- 23 Fang Z, Chen X, Liu M, et al. Associations of pyrethroid exposure with skeletal muscle strength and mass[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30(38): 89651–89660.
- 24 Kim B, Park B, Kim CH, et al. Association between endocrine-disrupting chemical mixture and metabolic indices among children, adolescents, and adults: a population-based study in Korea[J]. *Environ Pollut*, 2022, 315: 120399.
- 25 Gore AC, Chappell VA, Fenton SE, et al. EDC-2: the endocrine society's second scientific statement on endocrine-disrupting chemicals[J]. *Endocr Rev*, 2015, 36(6): E1–E150.
- 26 Xu H, Mao Y, Xu B. Association between pyrethroid pesticide exposure and hearing loss in adolescents[J]. *Environ Res*, 2020, 187: 109640.
- 27 Peng TC, Wu LW, Chen WL, et al. Nonalcoholic fatty liver disease and sarcopenia in a Western population (NHANES III): the importance of sarcopenia definition[J]. *Clin Nutr*, 2019, 38(1): 422–428.
- 28 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.
- 29 Yang J, Liu C, Zhao S, et al. The association between the triglyceride-glucose index and sarcopenia: data from the NHANES 2011–2018[J]. *Lipids Health Dis*, 2024, 23(1): 219.
- 30 Li M, Ji R, Liu X, et al. Associations of metabolic syndrome and its components with sarcopenia, and the mediating role of insulin resistance: findings from NHANES database[J]. *BMC Endocr Disord*, 2024, 24(1): 203.
- 31 Bravo R, Caltabiano LM, Weerasekera G, et al. Measurement of dialkyl phosphate metabolites of organophosphorus pesticides in human urine using lyophilization with gas chromatography–tandem mass spectrometry and isotope dilution quantification[J]. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 2004, 14(3): 249–259.
- 32 Olsson AO, Baker SE, Nguyen JV, et al. A liquid chromatography–tandem mass spectrometry multiresidue method for quantification of specific metabolites of organophosphorus pesticides, synthetic pyrethroids, selected herbicides, and DEET in human urine[J]. *Anal Chem*, 2004, 76(9): 2453–2461.
- 33 Zhou L, Li G, Chen X, et al. Sex difference in the association between pyrethroids exposure and sleep problems among adolescents: NHANES 2007–2014[J]. *Environ Sci Eur*, 2023, 35(1): 53.
- 34 El-Demerdash FM. Lipid peroxidation, oxidative stress and acetylcholinesterase in rat brain exposed to organophosphate and pyrethroid insecticides[J]. *Food Chem Toxicol*, 2011, 49(6): 1346–1352.
- 35 Lian D, Chen MM, Wu H, et al. The role of oxidative stress in skeletal muscle myogenesis and muscle disease[J]. *Antioxidants*(Basel), 2022, 11(4): 755.
- 36 Morley JE. Hormones and sarcopenia[J]. *Curr Pharm Des*, 2017, 23(30): 4484–4492.
- 37 Zaim M, Aitio A, Nakashima N. Safety of pyrethroid-treated mosquito nets[J]. *Med Vet Entomol*, 2000, 14(1): 1–5.
- 38 Gupta CR. Veterinary Toxicology. 4th Edition[M]. New York: Academic Press, 2018: 515–520.
- 39 Kim J, Park Y, Yoon KS, et al. Permethrin alters adipogenesis in 3T3-L1 adipocytes and causes insulin resistance in C2C12 myotubes[J]. *J Biochem Mol Toxicol*, 2014, 28(9): 418–424.
- 40 Fernandes JC, Shah SM, GBD 2021 Adult BMI Collaborators. Global, regional, and national prevalence of adult overweight and obesity, 1990–2021, with forecasts to 2050: a forecasting study for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. *Lancet*, 2025, 405(10481): 813–838.

收稿日期: 2026 年 03 月 19 日 修回日期: 2026 年 07 月 16 日
 本文编辑: 杨 燕 曹 越

引用本文: 李洪宇, 黄维奇, 尹龙, 等. 拟除虫菊酯暴露与肌肉减少症之间的关联: 基于 NHANES 数据库的横断面研究[J]. 医学新知, 2026, 36(7): 756–762. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202603126.

Li HY, Huang WQ, Yin L, et al. Association between pyrethroid exposure and sarcopenia: a cross-sectional study based on the NHANES database[J]. *Yixue Xinzhi Zazhi*, 2026, 36(7): 756–762. DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202603126.