DOI: 10.16835/j.cnki.1000-9817.2025222

· 环境暴露与儿童青少年健康专栏 ·

校园周边中长期 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖的关联

罗月梅[1],张登城[2,3],秦阳[2],陆武韬[1],蒋家诺[2],陈力[2],郭桐君[2],马军[2],董彦会[2],李艳[1]

1.广西壮族自治区疾病预防控制中心学校卫生所,南宁 530028;
2.北京大学公共卫生学院/儿童青少年卫生研究所;3.西藏自治区疾病预防控制中心公共卫生监测所

【摘要】 目的 探讨校园周边中长期 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖之间的关联性,为科学防控中小学生超重肥胖提供数据支撑和理论依据。**方法** 2023 年 9—11 月,采用分层整群随机抽样方法从广西全区 14 个设区市 111 个区县,抽取 251 183名小学一年级至高中三年级学生(7~18 岁)作为研究对象。$PM_{2.5}$ 质量体积浓度数据源自中国大气成分近实时追踪数据集。运用 Mann-Whitney *U* 检验比较是否超重肥胖儿童青少年 $PM_{2.5}$ 暴露水平,采用二元 Logistic 回归模型探究校园周边 $PM_{2.5}$ 水平与中小学生超重肥胖之间的量化关系,并进一步利用限制性立方样条分析 $PM_{2.5}$ 质量体积浓度与中小学生超重肥胖风险之间的非线性关联特征。**结果** 广西中小学生超重肥胖检出率为 19.5%,监测项目开始前一年的 $PM_{2.5}$ 质量体积浓度中位数超重肥胖组(23.22 μg/m^3)高于非超重肥胖组(22.63 μg/m^3)($Z=-15.66$, $P<0.01$),在性别(男、女)、学段(小学、初中、高中)亚组分析中也呈现出一致的结果(P 值均<0.01)。二元 Logistic 回归分析结果显示,最近一年 $PM_{2.5}$ 月平均质量体积浓度每增加 10 μg/m^3,中小学生超重肥胖的风险为原来的 1.12 倍($OR=1.12$, 95%$CI=1.09\sim1.15$, $P<0.01$)。限制性立方样条分析结果显示,$PM_{2.5}$ 的月均水平与中小学生超重肥胖发生风险之间存在非线性关联($P_{趋势}<0.01$);当 $PM_{2.5}$ 暴露水平<22.68 μg/m^3 时,超重肥胖发生风险与 $PM_{2.5}$ 关联无统计学意义;当 $PM_{2.5}$ 暴露水平≥22.68 μg/m^3 时,超重肥胖的风险随着 $PM_{2.5}$ 暴露水平的增加而上升。**结论** 校园周边中长期 $PM_{2.5}$ 暴露与儿童青少年超重肥胖之间存在关联。

【关键词】 颗粒物;超重;肥胖症;回归分析;学生
【中图分类号】 R 179　R 723.14　R 122.2　**【文献标识码】** A　**【文章编号】** 1000-9817(2025)07-0937-05

Association between medium- to long-term ambient $PM_{2.5}$ exposure and overweight/obesity among primary and secondary school students

LUO Yuemei*, ZHANG Dengcheng, QIN Yang, LU Wutao, JIANG Jianuo, CHEN Li, GUO Tongjun, MA Jun, DONG Yanhui, LI Yan

** School Health Department, Guangxi Zhuang Autonomous Region Center for Disease Control and Prevention, Nanning 530028, China*

【Abstract】 Objective To investigate the association between medium- to long-term $PM_{2.5}$ exposure around school areas and overweight/obesity among primary and secondary school students in Guangxi, providing data support and theoretical foundations for scientifically addressing overweight and obesity in primary and secondary school students. **Methods** From September to November 2023, a stratified cluster random sampling method was employed to select 251 183 students aged 7-18 years (grade 1 to grade 12) from 14 prefecture level cities (111 districts and counties) in Guangxi. $PM_{2.5}$ mass concentration data were obtained from the Tracking Air Pollution in China (TAP) dataset. Preliminary comparative analysis was conducted using the Mann-Whitney *U* test, while binary Logistic regression models were applied to quantify the relationship between $PM_{2.5}$ exposure and overweight/obesity. Restricted cubic spline analysis was further utilized to examine the nonlinear association between $PM_{2.5}$ concentration and overweight/obesity risk. **Results** The detection rate of overweight/obesity among Guangxi students in 2023 was 19.5%. The median $PM_{2.5}$ concentration in the year prior to the study was higher in the overweight/obesity group (23.22 μg/m^3) compared to the non-overweight/obesity group (22.63 μg/m^3) ($Z=-15.66$, $P<0.01$), and consistent trends were observed across gender (male/female) and educational stage (primary/junior/senior high school) subgroups (all $P<0.01$). Binary Logistic regression revealed that for every 10 μg/m^3 increase in the annual average $PM_{2.5}$ concentration, the risk of overweight/obesity increased by 12% ($OR=1.12$, 95%$CI=1.09$-1.15, $P<0.01$). Restricted cubic spline analysis indicated a nonlinear relationship between monthly $PM_{2.5}$ levels and overweight/obesity risk ($P_{trend}<0.01$). Below 22.68 μg/m^3, $PM_{2.5}$ exposure showed no significant association with obesity risk; above the threshold, the risk increased with rising $PM_{2.5}$ levels. **Conclusion** Medium- to long-term $PM_{2.5}$ exposure around school environments is significantly associated with overweight/obesity among primary and secondary school students.

【Keywords】 Particulate matter; Overweight; Obesity; Regression analysis; Students

【基金项目】 广西壮族自治区卫生健康委自筹经费科研课题项目(Z-A20230422);广西医疗卫生适宜技术开发与推广应用项目(S2021065)
【作者简介】 罗月梅(1992-　),女,广西平南人,硕士,主管医师,主要从事儿童青少年卫生与健康工作。
【通信作者】 李艳,E-mail:36889069@qq.com

在生活方式转变的背景下，儿童青少年肥胖已成为全球性的公共卫生问题。2019 年世界肥胖联合会估计，到 2025 年全球将有 2.06 亿名 5~19 岁儿童青少年患有肥胖症，预计到 2030 年，儿童青少年肥胖人数将达 2.54 亿[1]。中国儿童青少年的超重肥胖率自 20 世纪 90 年代开始上升，目前正处于迅速上升期，一些大城市的儿童肥胖流行程度已接近发达国家水平[2]。儿童肥胖可能带来一系列严重后果，包括儿童青少年时期的心理健康问题以及慢性非传染性疾病的风险增加，如心脑血管疾病、2 型糖尿病等[3-4]。儿童青少年肥胖的影响因素众多，包括遗传[5]、饮食[6-7]、运动习惯[8]、社会经济状态[9]等。近年来，有研究表明环境因素尤其是空气污染物，可能是影响超重肥胖的潜在因素[10-11]。然而，$PM_{2.5}$ 暴露时间与超重肥胖的关联仍有待进一步研究。为此，本文旨在分析中长期 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖的关联，为预防和干预措施的制定提供科学依据。

1 对象与方法

1.1 对象 调查依托广西“学生常见病和健康影响因素监测”项目，研究对象覆盖广西全区 14 个设区市 111 个区县，于 2023 年 9—11 月采用分层整群随机抽样方法，按照小学、初中、高中进行分层，用抽签法在城区监测点选取 7 所学校（2 所小学、2 所初中、2 所高中，1 所中等职业高中），郊县监测点选取 5 所学校（2 所小学、2 所初中、1 所高中），在被选取小学、初中和高中学校，利用抽签法，每个年级抽取 2 个及以上班级，被抽取班级全体学生参加监测，确保每个年级至少 80 人。按照国家监测方案的要求，年龄范围<5 或>27 岁的样本均剔除，共筛查 251 526 人，剔除 343 人。最终调查 251 183 名小学一年级至高中三年级学生。其中男生 128 570 名，女生 122 613 名；城区学生 103 901 名，郊县学生 147 282 名；小学生 133 025 名，初中生 65 809 名，高中生 52 349 名（普通高中学生 44 034 名，中等职业高中学生 8 315 名）。研究已通过广西壮族自治区疾病预防控制中心医学伦理委员会批准（审批号：GXCDCIRB2023-0010），并取得监测对象及家长的知情同意。

1.2 方法

1.2.1 体格检查 对学生身高、体重进行测量，身高采用机械式身高计测量，精确到 0.1 cm；体重采用电子体重计测量，精确到 0.1 kg。年龄的计算方法为实足年龄，以半岁为单位。计算体质量指数（body mass index，BMI）= 体重（kg）/［身高（m）］^{2}，根据《学龄儿童青少年超重与肥胖筛查》（WS/T 586—2018）[12]，判定学生超重肥胖情况。

1.2.2 $PM_{2.5}$ 数据来源 $PM_{2.5}$ 质量体积浓度（μg/m^3）数据来源于中国大气成分近实时追踪数据集（tracking air pollution in China，TAP）[13]。研究采用 1 km 分辨率的 $PM_{2.5}$ 月均数据，数据收集时间为 2022 年 9 月 1 日到 2023 年 8 月 31 日。

1.2.3 $PM_{2.5}$ 数据与个体数据匹配 从学生常见病监测数据库中提取每名学生的学校地址信息，利用高德地图应用程序编程接口批量获取这些学校地址的经纬度数据。将 TAP 数据中的含经纬度信息的 $PM_{2.5}$ 数据与个体健康数据匹配。

1.3 质量控制 所有检查均由经过严格培训并考核合格的专业技术人员执行，确保检查的专业性。数据统一利用“广西学生常见病监测信息管理系统”小程序端录入，设置数据录入校验逻辑，并于体检当天抽取 5%的学生进行身高、体重的复测，复测错误率不超过 5%，以保证数据的准确性。

1.4 统计学分析 使用 R 软件（4.4.1 版本）进行统计分析，对 $PM_{2.5}$ 数据进行正态性检验（K-S 检验），D = 0.08，P<0.01，不服从正态分布，因此采用中位数和四分位数间距描述。计数资料用频数或百分率描述，组间比较采用 χ^2 检验。使用 Mann-Whitney U 检验、比较不同性别、监测点、学段亚组间 $PM_{2.5}$ 水平在肥胖与非肥胖组间的差异。采用二元 Logistic 回归模型评估 $PM_{2.5}$ 对中小学生超重和肥胖发生风险的影响，并在不同性别、监测点、学段亚组内进行分析。使用限制性立方样条图（restricted cubic spline，RCS）进行可视化，展示 $PM_{2.5}$ 与肥胖风险之间的非线性关系。双侧检验水准 α = 0.05。

2 结果

2.1 中小学生超重肥胖情况 中小学生超重肥胖率为 19.5%（49 029 名）。城区学生超重肥胖率高于郊县学生，男生高于女生，小学生高于高中生和初中生，差异均有统计学意义（P 值均<0.05）。见表 1。

表 1 不同组别中小学生超重肥胖率比较

Table 1 Comparison of prevalence of overweight/obesity among different groups of primary and secondary school students

组别	选项	人数	超重肥胖人数	χ^2 值	P 值
地区	城区	103 901	22 491（21.6）	510.48	<0.01
	郊县	147 282	26 538（18.0）		
性别	男	128 570	30 198（23.5）	2 640.34	<0.01
	女	122 613	18 831（15.4）		
学段	小学	133 025	28 100（21.1）	468.38	<0.01
	初中	65 809	11 507（17.5）		
	高中	52 349	9 422（18.0）		

注：（）内数字为检出率/%。

2.2 不同组别中小学生调查前一年月均 $PM_{2.5}$ 暴露水平 非超重肥胖学生所在校园周边的 $PM_{2.5}$ 浓度中位数为 22.63（5.86）μg/m^3，超重肥胖学生的 $PM_{2.5}$ 浓度

中位数为 23.22(6.47) μg/m³，差异有统计学意义（Z = −15.66，P<0.01）。在不同性别、学段和监测点为城区的调查对象中，超重肥胖组的 $PM_{2.5}$ 暴露水平均高于非超重肥胖组（P 值均<0.01），但这一差异在郊县组间无统计学意义（P>0.05）。见表 2。

表 2　是否超重肥胖中小学生调查前一年月均 $PM_{2.5}$ 暴露水平比较[M(IQR), μg/m³]

Table 2　Comparison of monthly average $PM_{2.5}$ exposure levels among overweight and obese primary and secondary school students in the previous year[M(IQR), μg/m³]

超重肥胖	人数	监测点		性别		学段			合计
		城区	郊县	男	女	小学	初中	高中	
否	202 154	25.24(6.63)	21.54(4.91)	22.60(5.82)	22.68(5.87)	22.43(5.94)	22.23(5.50)	23.59(6.46)	22.63(5.86)
是	49 029	25.85(7.03)	21.73(4.82)	23.32(6.47)	23.19(6.48)	22.68(6.47)	22.88(6.17)	24.18(6.43)	23.22(6.47)
Z 值		−11.98	−1.69	−13.10	−8.98	−9.93	−9.06	−9.79	−15.66
P 值		<0.01	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2.3　中小学生 $PM_{2.5}$ 暴露与超重肥胖关联的 Logistic 回归分析　以中小学生是否超重肥胖为因变量（以否为参照），以调查前一年的月平均 $PM_{2.5}$ 质量体积浓度为自变量，在全部调查对象和不同性别、监测点、学段亚组中进行二元 Logistic 回归分析，结果显示，$PM_{2.5}$ 月平均质量体积浓度每增加 10 μg/m³，学生超重肥胖的风险为原来的 1.21 倍（OR = 1.21, 95% CI = 1.18 ~ 1.24），这一关联在男生（OR = 1.23, 95% CI = 1.19 ~ 1.27）、女生（OR = 1.19, 95% CI = 1.14 ~ 1.24）、城区（OR = 1.26, 95% CI = 1.21 ~ 1.31），小学生（OR = 1.15, 95% CI = 1.12 ~ 1.19）、初中生（OR = 1.31, 95% CI = 1.24 ~ 1.38）和高中生中（OR = 1.33, 95% CI = 1.25 ~ 1.41）均有统计学意义（P 值均<0.05）。

进一步调整监测点、性别、学段后，二元 Logistic 回归分析结果显示，调查前一年的 $PM_{2.5}$ 月平均质量体积浓度每增加 10 μg/m³，学生超重肥胖的风险为原来的 1.12 倍（OR = 1.12, 95% CI = 1.09 ~ 1.15, P<0.01）。

2.4　中小学生中长期 $PM_{2.5}$ 暴露与超重肥胖发生风险预测　见图 1。

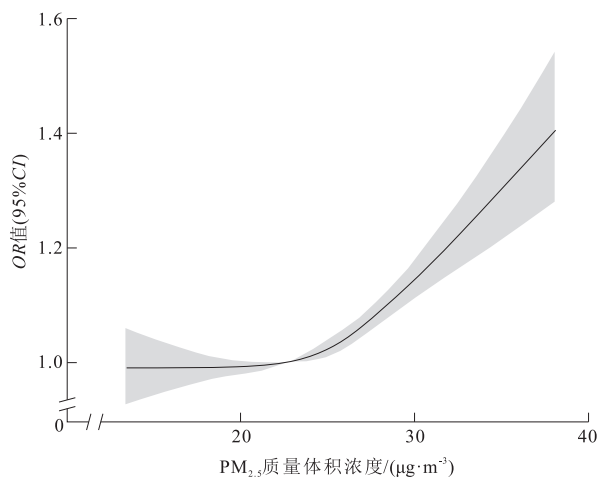


图 1　$PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖发生风险的关系

Figure 1　Relationship between $PM_{2.5}$ exposure levels and the risk of overweight and obesity among primary and secondary school students

RCS 曲线图显示，$PM_{2.5}$ 的月均水平与中小学生超重肥胖发生风险间存在非线性关联（P<0.01）。在 $PM_{2.5}$ 暴露水平较低时（<22.68 μg/m³），其与中小学生超重肥胖发生风险的关联无统计学意义；随着 $PM_{2.5}$ 暴露水平的增加，尤其是≥22.68 μg/m³ 后，中小学生超重肥胖发生风险上升。

2.5　基于预测模型阈值的 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖关联的 Logistic 回归分析　根据 $PM_{2.5}$ 暴露与超重肥胖发生风险预测模型，将 $PM_{2.5}$ 暴露水平>22.68 μg/m³ 的观察对象进行亚组回归分析，结果显示，在调整监测点、性别、学段等协变量的影响后，$PM_{2.5}$ 质量体积浓度每增加 1 μg/m³，学生超重肥胖的发生风险为原来的 1.03 倍（OR = 1.03, 95% CI = 1.02 ~ 1.03, P<0.01）。

3　讨论

本研究结果显示，广西中小学生超重肥胖的检出情况与 $PM_{2.5}$ 质量体积浓度密切相关，在不同性别、学段中亦观察到此关联性。这一结果不仅揭示了空气污染物 $PM_{2.5}$ 与中小学生超重肥胖的关联，也为后续研究提供了重要线索，为制定科学合理的预防干预策略奠定了坚实的理论基础。

本研究探究了 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖之间的内在联系，其成果对于理解环境因素在肥胖流行中的作用具有重大意义。研究发现，在监测项目启动前一年，超重肥胖个体所处环境的月均 $PM_{2.5}$ 暴露浓度高于非超重肥胖人群，这一现象在城区学生中尤为突出，而郊县学生中二者相关性无统计学意义。这一差异可能源于城区交通密度大[14-15]，工业排放量以及人口密集度均高于郊区，导致 $PM_{2.5}$ 污染更为严重，而郊县地区自然环境优越、空气质量良好，饮食习惯、运动量、社会经济状况等其他因素对中小学生超重肥胖的影响力相对更强，可能在一定程度上掩盖了 $PM_{2.5}$ 对肥胖的潜在作用。进一步分析不同性别和学段的学生群体，结果显示超重肥胖人群在各亚组中的 $PM_{2.5}$ 暴露

浓度均高于非超重肥胖人群，表明高质量体积浓度 $PM_{2.5}$ 暴露对不同性别、学段中小学生超重肥胖的促进效应具有一致性。

现有研究表明，$PM_{2.5}$ 暴露可能通过多种机制影响超重与肥胖发生。一方面，在动物研究中发现幼年小鼠暴露于真实环境空气污染下，$PM_{2.5}$ 可通过扰乱线粒体的功能引起脂质代谢异常和肥胖的发生[16]。另一方面，有研究表明，$PM_{2.5}$ 进入体内后会激活免疫系统，导致体内的炎症因子（如肿瘤坏死因子 α、白介素-6 等）水平升高，这些炎症因子引起慢性炎症，可干扰脂肪代谢，最终导致体重增加[17-18]。因此，$PM_{2.5}$ 诱发的炎症反应，可能是超重肥胖风险增加的一个关键机制。其次，$PM_{2.5}$ 可能通过内分泌干扰机制影响体重调节。一些学者发现 $PM_{2.5}$ 暴露可能影响胰岛素、瘦素、脂联素等激素的水平，进而干扰脂肪的存储和代谢[19-20]，从而增加超重肥胖的发生率。此外，$PM_{2.5}$ 的暴露可能通过氧化应激机制促进脂肪的积累[21]。另外 $PM_{2.5}$ 暴露还可能通过影响肠道微生物群的结构，导致肠道屏障功能受损，进而引发系统性炎症、改变能量的吸收和代谢，导致超重肥胖的发生[22]。

本研究以 Logistic 回归分析，精准量化了 $PM_{2.5}$ 暴露与中小学生超重肥胖风险之间的关系。在深入的亚组分析中，除了郊县地区，城区、不同性别以及不同学段的学生群体中，$PM_{2.5}$ 水平增加均提高学生超重肥胖风险，凸显出 $PM_{2.5}$ 对中小学生体重管理的广泛影响。即便在控制了城乡、性别与学段等关键变量后，$PM_{2.5}$ 的暴露效应依然有统计学意义，进一步凸显了减少 $PM_{2.5}$ 污染在预防中小学生超重肥胖问题上的紧迫性与重要性，为制定针对性的环境干预政策和健康促进策略提供了科学依据。研究进一步揭示了 $PM_{2.5}$ 暴露水平与儿童青少年超重肥胖发生风险之间的非线性关联。在 $PM_{2.5}$ 暴露水平较低时，与中小学生超重肥胖发生风险的关联无统计学意义，但随着 $PM_{2.5}$ 暴露水平的增加，尤其是在超过 22.68 $\mu g/m^3$ 后，肥胖发生风险上升。

本研究存在一定的局限性：首先，研究为横断面设计，无法做出因果推断。其次，以学生所在学校地址作为 $PM_{2.5}$ 的暴露地，未考虑室内空气污染物的暴露等问题，可能存在一定的偏倚。本研究未考虑行为生活方式的影响及交互效应，未来仍需更为深入的研究验证 $PM_{2.5}$ 与儿童青少年超重肥胖的关联。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

[1] JEBEILE H, KELLY A S, O'MALLEY G, et al. Obesity in children and adolescents: epidemiology, causes, assessment, and management [J]. Lancet Diabetes Endocrinol, 2022, 10(5): 351-365.

[2] LI H, XIANG X, YI Y, et al. Epidemiology of obesity and influential factors in China: a multicenter cross-sectional study of children and adolescents[J]. BMC Pediatr, 2024, 24(1): 498.

[3] CESARE D M, SORIC M, BOVET P, et al. The epidemiological burden of obesity in childhood: a worldwide epidemic requiring urgent action[J]. BMC Med, 2019, 17(1): 212.

[4] HUANG C, LI C, ZHAO F, et al. The association between childhood exposure to ambient air pollution and obesity: a systematic review and Meta-analysis[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(8): 4491-4506.

[5] LITTLETON S H, BERKOWITZ R I, GRANT S F A. Genetic determinants of childhood obesity[J]. Mol Diagn Ther, 2020, 24(6): 653-663.

[6] ZHENG X, WANG H, WU H. Association between diet quality scores and risk of overweight and obesity in children and adolescents[J]. BMC Pediatr, 2023, 23(1): 169.

[7] ZHEN S, MA Y, ZHAO Z, et al. Dietary pattern is associated with obesity in Chinese children and adolescents: data from China Health and Nutrition Survey (CHNS)[J]. Nutr J, 2018, 17(1): 68.

[8] MO Z, WANG H, ZHANG B, et al. The effects of physical activity and sedentary behaviors on overweight and obesity among boys may differ from those among girls in China: an open cohort study[J]. J Nutr, 2022, 152(5): 1274-1282.

[9] WILLIAMS A S, GE B, PETROSKI G, et al. Socioeconomic status and other factors associated with childhood obesity[J]. J Am Board Fam Med, 2018, 31(4): 514-521.

[10] BOWE B, GIBSON A K, XIE Y, et al. Ambient fine particulate matter air pollution and risk of weight gain and obesity in United States veterans: an observational cohort study[J]. Environ Health Perspect, 2021, 129(4): 47003.

[11] ZHENG J, ZHANG H, SHI J, et al. Association of air pollution exposure with overweight or obesity in children and adolescents: a systematic review and Meta-analysis[J]. Sci Total Environ, 2024, 910: 168589.

[12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 学龄儿童青少年超重与肥胖筛查：WS/T 586—2018[S]. 2018-08-01.
National Health and Family Planning Commission of the PRC. Screening for overweight and obesity among school-age children and adolescents: WS/T 586-2018[S]. 2018-08-01. (In Chinese)

[13] GENG G, XIAO Q, LIU S, et al. Tracking air pollution in China: near real-time PM(2.5) retrievals from multisource data fusion[J]. Environ Sci Technol, 2021, 55(17): 12106-12115.

[14] JERRETT M, MCCONNELL R, CHANG C C, et al. Automobile traffic around the home and attained body mass index: a longitudinal cohort study of children aged 10-18 years[J]. Prev Med, 2010, 50 (Suppl 1): S50-S58.

[15] JERRETT M, MCCONNELL R, WOLCH J, et al. Traffic-related air pollution and obesity formation in children: a longitudinal, multilevel analysis[J]. Environ Health, 2014, 13: 49.

[16] SI H, GAO T, YANG J, et al. Multi-omics reveals hypertrophy of adipose tissue and lipid metabolism disorder via mitochondria in young mice under real-ambient exposure to air pollution[J]. Front Pharmacol, 2023, 14: 1122615.

（下转第 945 页）

[J]. 武汉体育学院学报, 2024,58(3):90-96.
DONG P, CHENG C Y. On the procedure of learning knowledge through interdisciplinary themes in physical education and health courses[J]. J Wuhan Sports Univ, 2024, 58(3):90-96.(in Chinese)

[5] 马明兵, 蒲毕文, 吴开霖, 等. 同伴运动友谊对青少年体育锻炼行为的影响:锻炼自我效能与运动承诺的遮掩效应[J]. 广州体育学院学报, 2023,43(6):60-71.
MA M B, PU B W, WU K L, et al. Influence of peer sport friendships on adolescents' physical activity behaviour:the masking effect of exercise self-efficacy and sport commitment[J]. J Guangzhou Sport Univ, 2023,43(6):60-71.(in Chinese)

[6] FREDERICK D A, GARCIA J R, GESSELMAN A N, et al. The happy American body 2.0:predictors of affective body satisfaction in two U.S. national internet panel surveys[J]. Body Image, 2020,32:70-84.

[7] SUN H, DU C R, WEI Z F. Physical education and student well-being:promoting health and fitness in schools[J]. PLoS One, 2024,19(1):296-313.

[8] 李娇. 中学生体育学科核心素养测评工具的建构[D]. 哈尔滨:哈尔滨体育学院, 2022.
LI J. The construction of the assessment tool for the core qualities of secondary school students in physical education[D]. Harbin:Harbin Sport University, 2022.(in Chinese)

[9] MAULEY E, COURNEYA K S.The Subjective Exercise Experiences Scale (SEES):development and preliminary evaluation[J].J Sport Exerc Psychol, 1994,16(2):163-177.

[10] KROLL T, KEHN M, HO P S, et al. The SCI Exercise Self-efficacy Scale (ESES):development and psychometric properties[J]. Inter J Behav Nutr Phys Act, 2007,4(1):34.

[11] MENDELSON B K, MENDELSON M J, WHITE D R. Body-esteem Scale for adolescents and adults[J]. J Person Assess, 2001,76(1):90-106.

[12] 徐霞, 姚家新. 大学生身体自尊量表的修订与检验[J]. 体育科学, 2001(2):78-81.
XU X, YAO J X. Revision and testing of the Physical Self-esteem Scale for college students[J].China Sport Sci, 2001(2):78-81.(in Chinese)

[13] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析:方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014,22(5):731-745.
WEN Z L, YE B J. Mediation effects analysis:methods and model development[J]. Adv Psychol Sci, 2014,22(5):731-745.(in Chinese)

[14] BANDURA A. Social cognitive theory:an agentic perspective[J]. Ann Rev Psychol, 2001,52(1):1-26.

[15] 李佑发, 石雨桐, 王思佳, 等. 基于核心素养的芬兰体育课程标准分析[J]. 体育学刊, 2018,25(4):122-128.
LI Y F, SHI Y T, WANG S J, et al. Analysis of Finnish physical education curriculum standards based on core literacy[J]. J Phys Educ, 2018,25(4):122-128.(in Chinese)

[16] 孟祥乐. 主观锻炼体验在体育锻炼与大学生身体自尊中的中介作用[J]. 中国学校卫生, 2015,36(11):1659-1661.
MENG X L. The mediating role of subjective exercise experience in physical activity and college students' physical self-esteem[J]. Chin J Sch Health,2015,36(11):1659-1661.(in Chinese)

[17] 李敏. 核心素养视域下体育课程有效教学的实践反思[J]. 中国教育学刊, 2023(S1):115-117.
LI M. Practical reflection on effective teaching in physical education courses under the perspective of core literacy[J]. J Chin Soc Educ, 2023(S1):115-117.(in Chinese)

[18] 董宝林, 李鹤, 刘如强. 角色认同、内部动机、主观锻炼体验与青少年锻炼行为的关系研究[J]. 天津体育学院学报, 2024,39(2):217-224.
DONG B L, LI H, LIU R Q. A study on the relationship between role identity, internal motivation, subjective exercise experience and adolescents' exercise behaviour[J]. J Tianjin Univ Sport, 2024,39(2):217-224.(in Chinese)

[19] MA Z W, ZENG W N, YE K Y. Gender differences in Chinese adolescents' subjective well-being:the mediating role of self-efficacy[J]. Psychol Rep,2015,116(1):311-321.

[20] 马嵘, 黄春梅. 不同体能锻炼方式对大学生身体自尊和自我效能的影响[J]. 中国学校卫生, 2013,34(7):832-834.
MA R, HUANG C M. Effects of different physical exercise modalities on college students' body esteem and self-efficacy[J]. Chin J Sch Health,2013,34(7):832-834.(in Chinese)

[21] FERRIBY A, SCHAEFER A F. The relationship between anatomical self-efficacy and feelings of burnout in first-year medical students[J]. Med Sci Educ, 2022,32(2):437-446.

收稿日期:2025-01-20　**修回日期**:2025-05-06　**本文编辑**:孙曼莉

(上接第 940 页)

[17] LI T, YU Y, SUN Z, et al. A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence[J]. Part Fibre Toxicol, 2022,19(1):67.

[18] LI W, LIN G, XIAO Z, et al. A review of respirable fine particulate matter PM(2.5)-induced brain damage[J]. Front Mol Neurosci, 2022,15:967174.

[19] HABERZETTL P, O'TOOLE T E, BHATNAGAR A, et al. Exposure to fine particulate air pollution causes vascular insulin resistance by inducing pulmonary oxidative stress[J]. Environ Health Perspect, 2016,124(12):1830-1839.

[20] MOLFINO A, AMABILE M I, MUSCARITOLI M, et al. Association between metabolic and hormonal derangements and professional exposure to urban pollution in a high intensity traffic area[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2020,11:509.

[21] DELLA G L, SHIN A C. White and brown adipose tissue functionality is impaired by fine particulate matter PM(2.5) exposure[J]. J Mol Med (Berl), 2022,100(5):665-676.

[22] BAILEY M J, NAIK N N, WILD L E, et al. Exposure to air pollutants and the gut microbiota:a potential link between exposure, obesity, and type 2 diabetes[J]. Gut Microbes, 2020,11(5):1188-1202.

收稿日期:2025-03-13　**修回日期**:2025-07-01　**本文编辑**:王苗苗