

孕期绿地暴露与低出生体重风险的队列研究

吴玥霏¹, 耿巧玲², 刘小礼³, 步瑜婷², 冯彦成⁴, 张建国⁵, 张晓琳^{2*}

(1. 河北医科大学公共卫生学院2023级食品卫生与营养学班, 河北石家庄 050017; 2. 河北医科大学公共卫生学院流行病学与卫生统计学教研室, 河北省环境与健康重点实验室, 河北石家庄 050017; 3. 河北医科大学口腔医院儿童口腔科, 河北医科大学口腔医院重点实验室, 河北石家庄 050017; 4. 西安医学院公共卫生学院, 陕西西安 710021; 5. 华大基因智慧研究院, 广东深圳 518083)

[摘要] **目的** 评估孕期居住地周边绿地暴露与低出生体重(low birth weight, LBW, 出生体重 $<2\ 500\text{ g}$)风险的关联。**方法** 本研究为回顾性队列研究, 基于既有多中心母婴队列数据库(重庆、贵阳、成都、连云港)开展二次分析。回顾性纳入2023年12月—2024年12月在四中心分娩并符合纳排标准的单胎妊娠孕妇, 提取其孕期及分娩相关资料, 并采用MODIS MOD13Q1估计居住地500 m缓冲区归一化植被指数均值(normalized difference vegetation index mean within 500 m buffer, NDVI_{mean-500 m})与增强型植被指数均值(enhanced vegetation index mean within 500 m buffer, EVI_{mean-500 m})。以LBW为二分类结局, 采用Logistic回归评估NDVI/EVI(每增加0.1单位)与LBW风险的关联, 并构建限制性立方样条(restricted cubic spline, RCS)评估剂量—反应关系。多因素模型(Model 2)调整高龄(≥ 35 岁)、受教育程度、孕前体重指数(body mass index, BMI)分组与产次。另在Model 2基础上开展“附加调整孕周(<37 周)”及“足月限制(≥ 37 周)”敏感性分析。**结果** 共纳入单胎孕妇5 397例, 其中LBW 147例, 发生率为2.72%(95%CI: 2.32%~3.19%)。在完全调整模型中, EVI_{mean-500 m}每增加0.1单位与LBW风险降低相关(OR=0.488, 95%CI: 0.405~0.587, $P<0.001$), NDVI_{mean-500 m}结果一致(OR=0.690, 95%CI: 0.587~0.810, $P<0.001$)。RCS分析显示, 2个指标总体关联均显著($P<0.001$); EVI提示非线性($P<0.001$), NDVI未见显著非线性($P=0.095$)。附加调整孕周及足月限制后, 关联方向与主分析一致。**结论** 在单胎妊娠样本中, 孕期居住地周边绿地暴露水平与LBW风险降低相关, 并呈现剂量—反应特征。鉴于观察性研究可能存在残余混杂与暴露错分, 结果应谨慎解释为相关性发现, 尚需进一步研究验证其因果关系与作用路径。

[关键词] 婴儿, 出生时低体重; 绿地暴露; 队列研究 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2026.04.012

[中图分类号] R723.19 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2026)04-0455-11

Cohort study of exposure to residential greenness during pregnancy and risk of low birth weight

WU Yue-fei¹, GENG Qiao-ling², LIU Xiao-li³, BU Yu-ting², FENG Yan-cheng⁴,
ZHANG Jian-guo⁵, ZHANG Xiao-lin^{2*}

(1. Class 2023 of Food Hygiene and Nutrition, School of Public Health, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, China; 2. Department of Epidemiology and Health Statistics, School of Public Health, Hebei Medical University, Hebei Province Key Laboratory of Environment and Human Health, Shijiazhuang 050017, China; 3. Department of Pediatric Dentistry, Stomatological Hospital of Hebei Medical University, Key Laboratory of Stomatological Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, China; 4. School of Public Health, Xi'an Medical University, Shanxi Province, Xi'an 710021, China; 5. BGI Smart Research Institute, Guangdong Province, Shenzhen 518083, China)

[Abstract] **Objective** To examine the association between exposure to residential greenness during pregnancy and the risk of LBW. **Methods** This retrospective cohort study conducted a secondary analysis based on existing multicenter maternal-infant cohort databases (Chongqing, Guiyang, Chengdu, and Lianyungang). The study

[收稿日期] 2026-02-06

[基金项目] 河北医科大学大学生创新性实验计划项目(USIP2025050); 陕西省教育厅重点科研项目(21JZ051)

[作者简介] 吴玥霏(2005—), 女, 福建永定人, 河北医科大学公共卫生学院学生, 从事公共卫生学学习研究。

*通信作者。E-mail: 17700862@hebmu.edu.cn



retrospectively included singleton pregnancies that delivered at these four centers between December 2023 and December 2024 and met the inclusion/exclusion criteria. Pregnancy and delivery-related data were extracted, and MODIS MOD13Q1 was used to estimate the normalized difference vegetation index mean within 500-m buffer (NDVImean-500 m) and the enhanced vegetation index mean within 500-m buffer (EVIImean-500 m). Using low birth weight (LBW) as a binary outcome, logistic regression was used to assess the association between NDVI/EVI (for every 0.1 unit increase) and LBW risk, and a restricted cubic spline (RCS) model was constructed to assess the dose-response relationship. In the multivariate model (Model 2), adjustments were made for advanced maternal age (≥ 35 years), educational level, pre-pregnancy body mass index (BMI) category, and parity. Sensitivity analyses were also conducted on Model 2 for "additionally adjusted gestational age (< 37 weeks)" and "term restriction (≥ 37 weeks)". **Results** Among 5 397 singleton pregnancies, 147 infants were born with LBW (2.72%; 95%CI: 2.32%–3.19%). In the fully adjusted model, higher EVIImean-500m was associated with a lower risk of LBW (OR=0.488, 95%CI: 0.405–0.587; $P < 0.001$) per 0.1-unit increase; similar results were observed for NDVImean-500m (OR=0.690, 95%CI: 0.587–0.810; $P < 0.001$). RCS analyses indicated significant overall associations for both indices ($P < 0.001$). Evidence of nonlinearity was observed for EVI ($P < 0.001$) but not for NDVI ($P = 0.095$). After additional adjustment for gestational age and restriction to term births, the direction of association remained consistent with that in the main analysis. **Conclusion** Exposure to residential greenness during pregnancy is associated with a lower risk of LBW in singleton pregnancies in a dose-response manner. However, given potential residual confounding and exposure misclassification in observational studies, the findings should be interpreted as correlational, and further studies are needed to confirm causality and explore the mechanisms.

[Key words] infant, low birth weight; exposure to residential greenness; cohort study

低出生体重儿 (low birth weight, LBW) 出生体重 $< 2\ 500\text{ g}$ ^[1], 发病率和病死率较高^[2], 其发生与早产、母体及胎儿健康状况以及社会经济因素等密切相关^[3-4]。LBW 儿更易出现喂养困难及多种并发症, 并可能带来长期的生长发育与认知功能受损风险^[5-7]。城市绿地是重要的环境暴露因素之一, 近年来我国总体绿化水平持续提升^[8-10]。既往研究提示, 绿地可能通过多种途径改善母体健康^[11-13], 从而降低不良妊娠结局的发生风险。目前, 多数研究采用归一化差值植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 评估绿地暴露^[14-15]。部分研究发现 NDVI 与胎儿生长及出生体重相关^[11], 但研究结论尚不一致; 而关于增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 的证据仍相对有限^[16-18]。因此, 本研究拟基于孕期居住地周边 500 m 缓冲区的绿地暴露水平, 评估 NDVI 与 EVI 与低出生体重发生风险之间的关联。

1 资料与方法

1.1 一般资料

1.1.1 研究对象 本研究为回顾性队列研究, 基于既有多中心母婴队列数据库开展二次分析。研究对象来源于分娩时间为 2023 年 12 月—2024 年 12 月的重庆市妇幼保健院、贵阳市妇幼保健院、连

云港市妇幼保健院及成都市妇女儿童中心医院四地的产科/孕产保健门诊 (四中心), 涵盖当地妇幼保健机构及综合医院产科门诊。各中心主要服务于城市居民及周边城乡混合人群。四地分别位于我国西南与东部沿海地区, 城市规模、气候条件与城市化水平存在差异, 有助于提高研究结果在不同地区背景下的适用性与可比较性。

原多中心母婴队列按统一方案完成问卷与临床资料的前瞻性收集并形成数据库。本研究为二次分析, 研究数据来自四中心既有母婴队列数据库/电子病历系统。研究团队依据统一的变量字典与数据抽取流程, 回顾性提取孕妇一般资料、孕前体重指数 (body mass index, BMI)、孕产史、分娩孕周及新生儿出生体重等信息, 并进行一致性核对与缺失值处理。

结局定义: 本研究将新生儿出生体重分为 LBW 与非 LBW 两类。LBW 定义为出生体重 $< 2\ 500\text{ g}$ 。非低出生体重儿定义为出生体重 $\geq 2\ 500\text{ g}$, 其中包括正常出生体重儿 ($2\ 500\sim 4\ 000\text{ g}$) 及巨大儿 ($> 4\ 000\text{ g}$)。

鉴于本研究主要关注绿地暴露与 LBW 发生风险之间的关联, 主分析采用二分类结局 (LBW $\geq 2\ 500\text{ g}$)。为评估巨大儿纳入对结果的潜在影响, 进一步进行了敏感性分析, 在排除出生体重 $> 4\ 000\text{ g}$ 的新生儿后重新构建模型, 以检验结果的

稳健性。

1.1.2 问卷内容 上述信息来源于原母婴队列在产检/建档阶段已完成的标准化问卷,本研究回顾性调用该数据库字段。基线问卷主要收集:民族、户口所在地与现居住地址;身高、体重等体格信息;是否采用辅助生殖;生活行为习惯(如吸烟、饮酒、饮茶、睡眠)与体力活动(日常活动/运动锻炼的类型、频率、单次时长及自评强度);环境暴露与营养膳食;既往疾病史与家族史;月经婚育史;以及孕期疾病与并发症等信息。

1.1.3 纳入标准与排除标准 纳入标准:①年龄18~50岁;②分娩日期在2023—2024年;③分娩结局为活产;④胎龄24~41周。排除标准:①缺少绿地暴露估计所需的关键变量;②孕妇体重或新生儿性别、出生体重、身长等核心结局信息缺失;③社会人口学特征(民族、户口所在地与现居住地址等)、末次月经等重要协变量信息不完整;④多胎妊娠。

1.1.4 伦理审查 本研究为回顾性队列研究,使用既有多中心母婴队列数据库/病历数据进行二次分析。研究方案经各参与中心伦理委员会批准,鉴于研究使用既往收集的去标识化数据且不涉及对受试者的额外干预,伦理委员会同意豁免受试者再次签署知情同意书。

1.1.5 样本量计算 本研究主要结局为LBW(二分类结局),主要分析采用多因素Logistic回归模型评估绿地暴露与LBW风险的关联。为保证回归模型估计稳定性,样本量以Logistic回归“事件数/自变量参数数(events per variable, EPV)”原则进行估计:一般要求每个模型参数至少10个结局事件($EPV \geq 10$)。本研究完全调整模型(Model 2)拟纳入暴露指标及主要混杂因素(高龄、受教育程度、孕前BMI分组、产次等),参数数约为9个,因此至少需要90例LBW事件。结合本研究单胎样本LBW发生率为2.72%(147/5 397),推算所需最小样本量为 $90/0.0272 \approx 3\ 309$ 例。实际纳入单胎孕妇5 397例、LBW 147例,满足上述样本量要求,可为多因素分析提供足够的统计效能与模型稳定性。

1.2 暴露估计(绿地) 本研究采用MOD13Q1数据集提取NDVI与EVI,该数据集的空间分辨率为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$,可用于表征地表植被覆盖状况。NDVI与EVI的取值范围为-1~1,它们的数值越高代表植被越茂密,而数值接近0时通常提示裸地或者稀疏植被,负值则多见于水体或积雪等区域。

暴露指标解释与适用范围: 本研究采用居住地500 m缓冲区平均NDVI/EVI表征孕期“居住地周边绿量”,作为绿地暴露的客观代理指标。该指标能够在队列尺度上提供可比的暴露度量,但不能区分绿地类型与质量,也不反映个体对绿地的可达性、实际使用行为及活动轨迹暴露;因此本研究将NDVI/EVI解释为周边植被覆盖水平,而非个体真实使用暴露。

NDVI与EVI的选用策略: 本研究同时采用NDVI与EVI评估孕期居住地周边绿地暴露,以提高暴露测量的稳健性。两者均可反映植被覆盖水平,但NDVI在高植被覆盖区域可能出现饱和;EVI通过引入蓝光波段信息并进行背景校正,对高植被覆盖区域差异更敏感。因此,本研究在设计阶段预先设定以EVI作为主指标,并以NDVI作为对照指标用于一致性验证。

指标选择与不同分析中的使用原则: 鉴于NDVI与EVI均表征植被覆盖水平且两者通常高度相关,为避免在同一模型中同时纳入导致共线性并影响参数稳定性,本研究在分析方案中预先设定以EVI_{mean-500 m}作为主暴露指标(用于主要模型与核心结论呈现),并将NDVI_{mean-500 m}作为对照/一致性验证指标用于敏感性分析。具体而言:①主分析(主要回归模型及正文主要表格/图)采用EVI_{mean-500 m};②敏感性分析使用NDVI_{mean-500 m}在相同协变量调整策略下重复拟合模型,以评估结论稳健性与一致性;③除非另有说明,本研究不在同一模型中同时纳入NDVI与EVI,以减少共线性带来的解释偏差。

依据孕妇预产期与实际分娩日期,计算其居住地周边500 m缓冲区内NDVI、EVI的平均值,以反映孕期日常活动范围内的绿地暴露水平。为便于效应量解释,模型中以NDVI或EVI每增加0.1单位作为暴露变化的基本分析单位,暴露指标定义为:NDVI_{mean-500 m}、EVI_{mean-500 m}。

NDVI与EVI的计算公式如下:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

$$\text{EVI} = 2.5 \times \frac{(\rho\text{NIR} + 6\text{Red} - 7.5\rho\text{Blue} + 1)}{(\rho\text{NIR} + 6\text{Red} + 7.5\rho\text{Blue} + 1)} \times \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{Red})}{(\rho\text{NIR} + \rho\text{Red} + 0.2)}$$

注: NIR、RED与BLUE均指MODIS传感器对应波段的地表反射率(无量纲),并非现场仪器实测。植被指数来源于MODIS的MOD13Q1植被

指数产品（空间分辨率 250 m，16 d 合成），其中 NIR 为近红外波段反射率、RED 为红光波段反射率、BLUE 为蓝光波段反射率（由 MODIS 多光谱观测经大气校正等处理得到）。为提高数据质量，依据 MOD13Q1 的质量控制信息剔除云、云影及积雪等低质量像元后，在孕妇居住地周边 500 m 缓冲区内计算 NDVI 与 EVI 的均值，作为孕期绿地暴露指标。

1.3 统计学方法 应用 R 4.2.2 统计软件分析数据。对研究对象社会人口学特征及新生儿基本情况描述性分析。计量资料经正态性检验后，不符合正态分布者以 $[M(QR)]$ 表示，组间比较采用秩和检验。计数资料以例数 (%) 表示，组间比较采用 χ^2 检验，等级资料比较采用秩和检验。以 LBW 为二分类结局变量，采用 Logistic 回归模型评估孕期居住地周边绿地暴露与 LBW 风险的关联。绿地暴露指标包括 NDVImean-500 m 与 EVImean-500 m，按每增加 0.1 单位进行效应估计，结果以 OR 及其 95% CI 表示。主分析限定为单胎妊娠样本，并逐步调整潜在混杂因素：Model 0 为粗模型；Model 1 调整高龄 (≥ 35 岁) 及受教育程度；Model 2 在 Model 1 基础上进一步调整孕前 BMI 分组与产次。为探讨连续绿地暴露与 LBW 风险的剂量-反应关系，分别对 NDVImean-500 m 与 EVImean-500 m 构建限制性立方样条 (restricted cubic splines, RCS) 模型，以暴露中位数为参照 (OR=1)，检验整体关联及非线性趋势。考虑到分位分组分析可能受切点选择影响，本研究主要推断依据为连续变量回归及 RCS 分析；分位分组结果用于描述性对照参考。关于孕周变量的处理：鉴于 LBW 既可能由早产导致，也可能由胎儿宫内生长受限导致，分娩孕周 (< 37 周) 可能位于“绿地暴露→早产→LBW”的因果通路上。若在主模型中直接调整孕周，将使模型转为比较“相同孕周下的体重差异”，可能低估绿地通过减少早产而降低 LBW 的间接效应。因此，主分析模型不将分娩孕周作为常规混杂因素纳入；在稳健性分析中进一步进行 (1) 在主模型基础上附加调整分娩孕周；(2) 限制足月分娩 (≥ 37 周) 样本重复分析，以检验结果稳健性。另在中介效应分析中，以早产 (< 37 周) 作为潜在中介变量对效应进行分解 (如适用)。为更直接反映胎儿宫内生长状况并尽量降低孕周对 LBW 指标的影响，进一步以小于胎龄儿 (small for gestational age, SGA) 作为补充结局指标。SGA 定义为在同性

别与胎龄 (孕周) 分层下出生体重低于第 10 百分位数 (P_{10})。考虑到部分胎龄层样本量较少，本研究采用 $\pm 0\sim 3$ 周邻近胎龄合并窗口，保证每个性别一胎龄层用于计算 P_{10} 的样本量不少于 30 例；随后采用与 LBW 一致的协变量调整策略，评估绿地暴露与 SGA 的关联，结果同样以 OR 及其 95% CI 表示。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 LBW 发生情况及基线特征 本研究主分析按纳排标准排除多胎妊娠后，共纳入单胎孕妇 5 397 例，其中 LBW 147 例 (LBW 组)，发生率为 2.72% (95% CI: 2.32%~3.19%)；其余 5 250 例为非 LBW (非 LBW 组)，占 97.28%。LBW 组年龄 ≥ 35 岁比例更高、民族构成汉族比例更高、孕前 BMI 较低者比例更高、产次 < 3 次比例更高、辅助生殖使用比例更高、分娩孕周 < 37 周比例更高，差异统计学意义 ($P < 0.05$)。2 组文化程度、吸烟、饮酒、新生儿性别、分娩方式及新生儿身长等差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 1。

2.2 绿地暴露与低出生体重的关联 (连续变量, 主结果) 以 LBW 为因变量，以年龄、分娩孕周、产次、BMI、受教育程度为自变量，变量赋值见表 2，进行 Logistic 回归分析。单因素 Logistic 回归结果显示，EVImean-500 m 每增加 0.1 单位，LBW 风险降低 (OR=0.551, 95% CI: 0.466~0.650, $P < 0.001$)；NDVImean-500 m 每增加 0.1 单位，LBW 风险降低 (OR=0.660, 95% CI: 0.559~0.778, $P < 0.001$)。进一步调整高龄 (≥ 35 岁) 及受教育程度后 (Model 1)，关联仍存在 (EVI: OR=0.534, 95% CI: 0.448~0.636；NDVI: OR=0.666, 95% CI: 0.565~0.786, 均 $P < 0.001$)。在 Model 1 基础上进一步调整孕前 BMI 分组与产次后 (Model 2)，EVImean-500 m 与 LBW 风险降低相关 (OR=0.488, 95% CI: 0.405~0.587, $P < 0.001$)，NDVImean-500m 结果一致 (OR=0.690, 95% CI: 0.587~0.810, $P < 0.001$)，见表 3。

鉴于分位分组结果可能受切点选择影响，本文主要推断依据为连续变量与 RCS 分析。EVImean-500 m 四分位分组的样本分布及 LBW 发生情况见表 4；NDVI 四分位回归结果见表 5。

2.3 绿地暴露与 LBW 的剂量-反应关系 采用 RCS 模型分别评估 NDVImean-500 m 与 EVImean-500 m 与 LBW 风险之间的连续剂量-反应关系。在

表1 2组基线特征比较

Table 1 Comparison of baseline characteristics between the two groups

组别	例数	年龄(例数,%)		民族(例数,%)		文化程度(例数,%)			
		<35岁	≥35岁	汉族	少数民族	小学	初中	高中	大学及以上
LBW组	147	123(83.7)	24(16.3)	136(92.5)	11(7.5)	25(17.0)	25(17.0)	33(22.4)	64(43.5)
非LBW组	5 250	4 767(90.8)	483(9.2)	4 538(86.4)	712(13.6)	1 237(23.6)	983(18.7)	1 049(20.0)	1 981(37.7)
χ^2/Z 值		7.716		4.046		4.559			
P值		0.005		0.044		0.207			
组别	例数	孕前BMI指数(例数,%)				产次(例数,%)		吸烟(例数,%)	饮酒(例数,%)
		≤18.5	18.5~23.9	24.0~27.9	≥28.0	<3次	≥3次		
LBW组	147	28(19.0)	82(55.8)	24(16.3)	13(8.8)	144(98.0)	3(2.0)	2(1.4)	3(2.0)
非LBW组	5 250	512(9.8)	3 189(60.7)	1 119(21.3)	430(8.2)	4 622(88.0)	628(12.0)	30(0.6)	162(3.1)
χ^2/Z 值		14.683				12.688		0.469	0.233
P值		0.002				<0.001		0.216	0.629
组别	例数	辅助生殖(例数,%)	新生儿性别(例数,%)		分娩方式(例数,%)		分娩孕周(例数,%)		新生儿身长[M(QR),cm]
			男性	女性	阴道分娩	剖腹产	<37周	≥37周	
LBW组	147	13(8.8)	71(48.3)	76(51.7)	78(53.1)	69(46.9)	34(23.1)	113(76.9)	48.00(4.00)
非LBW组	5 250	247(4.7)	2 698(51.4)	2 552(48.6)	3 038(57.9)	2 212(42.1)	201(3.8)	5 049(96.2)	48.00(5.00)
χ^2/Z 值		4.477	0.430		1.163		123.313		0.316
P值		0.034	0.512		0.281		<0.001		0.748

表2 变量赋值表

Table 2 Variable assignment table

因素	变量类型	赋值情况
年龄	X1	<35岁=0, ≥35岁=1
分娩孕周	X3	≥37周=0, <37周=1
产次	X4	<3次=0, ≥3次=1
BMI	X5	18.5~23.9=0, <18.5=1, 24~27.9=2, ≥28=3
受教育程度	X6	大学及以上=0, 高中、初中、小学及以下=1
低出生体重儿	Y	否=0, 是=1

表3 绿地暴露和低出生体重发生率的多因素Logistic回归分析

Table 3 Multivariate Logistic regression analysis of exposure to residential greenness and incidence of low birth weight

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P值	OR值	95%CI
Model 0						
EVImean-500m	-0.596	0.085	49.0	<0.001	0.551	0.466~0.650
NDVImean-500m	-0.416	0.084	24.4	<0.001	0.660	0.559~0.778
Model 1						
EVImean-500m	-0.627	0.089	49.9	<0.001	0.534	0.448~0.636
NDVImean-500m	-0.406	0.084	23.5	<0.001	0.666	0.565~0.786
Model 2						
EVImean-500m	-0.717	0.095	57.1	<0.001	0.488	0.405~0.587
NDVImean-500m	-0.371	0.082	20.3	<0.001	0.690	0.587~0.810

表4 EVI四分位分组的描述性分布

Table 4 Descriptive distribution of EVI by quartile groups

EVI四分位	例数	LBW例数	LBW发生率(%)	EVI中位数	EVI均值
Q1	2 102	32	1.52	0.155	0.155
Q2	637	96	15.07	0.229	0.224
Q3	1 353	25	1.85	0.425	0.418
Q4	1 364	12	0.88	0.681	0.688

表5 (单胎样本)NDVI四分位与LBW风险的Logistic回归分析
Table 5 Logistic regression analysis of NDVI quartiles and LBW risk (singleton samples)

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P值	OR值	95% CI
Model 0						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	-0.641	0.216	8.807	0.003	0.527	0.345~0.804
Q3	-0.478	0.337	2.013	0.156	0.620	0.319~1.204
Q4	-0.531	0.228	5.412	0.020	0.588	0.376~0.920
Model 1						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	-0.654	0.212	9.550	0.002	0.520	0.340~0.796
Q3	-0.514	0.340	2.293	0.130	0.598	0.307~1.167
Q4	-0.557	0.231	5.803	0.016	0.573	0.365~0.900
Model 2						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	-0.612	0.218	7.879	0.005	0.542	0.352~0.834
Q3	-0.498	0.350	2.022	0.155	0.608	0.306~1.207
Q4	-0.583	0.232	6.311	0.012	0.558	0.354~0.880

完全调整模型 (Model 2) 中, NDVI_{mean-500 m} 与 LBW 风险总体呈显著负向关联 ($P < 0.001$), 未观察到统计学显著的非线性关联 ($P = 0.095$); EVI_{mean-500 m} 与 LBW 风险总体亦呈显著负向关

联 ($P < 0.001$), 且提示存在非线性关系 ($P < 0.001$), 见表 6。剂量—反应曲线提示, 随 NDVI_{mean-500 m} 及 EVI_{mean-500 m} 水平升高, LBW 风险整体下降 (图 1、图 2)。

表6 RCS检验结果

Table 6 RCS test results

暴露指标(500 m)	总体 χ^2 值	总体 P 值	非线性 χ^2 值	非线性 P 值
NDVI _{mean-500 m} (连续)	31.06	< 0.001	4.77	0.095
EVI _{mean-500 m} (连续)	86.43	< 0.001	20.88	< 0.001

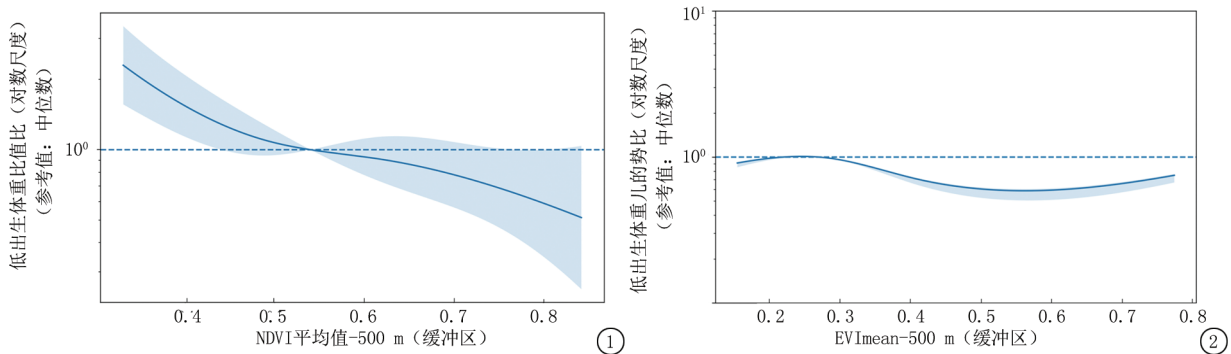


图1 孕期居住地 500 m 缓冲区 NDVI_{mean-500 m} 与 LBW 风险的剂量—反应关系

Figure 1 Dose-response relationship between NDVI_{mean-500m} and LBW risk during pregnancy

图2 孕期居住地 500 m 缓冲区 EVI_{mean-500 m} 与 LBW 风险的剂量—反应关系

Figure 2 Dose-response relationship between EVI_{mean-500 m} and LBW risk during pregnancy

2.4 敏感性分析 考虑到分娩孕周可能处于“绿地暴露→早产→LBW”的因果通路, 本研究在单胎样本中开展两项敏感性分析: ①在主模型 (Model 2) 基础上附加调整分娩孕周 (< 37 周); ②在足月人群 (孕周 ≥ 37 周) 中进行限制分析 (模型中不再纳入分娩孕周变量)。结果显示,

两项敏感性分析下 NDVI_{mean-500 m} 与 EVI_{mean-500 m} (每增加 0.1 单位) 与 LBW 风险降低的关联方向与主分析一致, 提示主结论对孕周处理设定具有稳健性, 见表 7。

2.5 不同出生体重分型的补充分析 为进一步区分绿地暴露与不同出生体重分型的关联, 本研究

表7 敏感性分析
Table 7 Sensitivity analysis

分析设定	暴露指标 (每增加0.1单位)	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P值	OR值	95%CI
主分析(Model 2, 不调孕周)	NDVImean-500 m	-0.371	0.082	20.405	<0.001	0.690	0.587~0.810
主分析(Model 2, 不调孕周)	EVIImean-500 m	-0.717	0.095	57.421	<0.001	0.488	0.405~0.587
敏感性1: Model 2+附加调整孕周(<37周)	NDVImean-500 m	-0.317	0.079	16.087	<0.001	0.728	0.624~0.851
敏感性1: Model 2+附加调整孕周(<37周)	EVIImean-500 m	-0.709	0.094	56.531	<0.001	0.492	0.409~0.592
敏感性2: 足月限制(孕周 \geq 37周)	NDVImean-500 m	-0.414	0.098	17.932	<0.001	0.661	0.546~0.801
敏感性2: 足月限制(孕周 \geq 37周)	EVIImean-500 m	-0.65	0.098	43.958	<0.001	0.522	0.431~0.633

以正常出生体重儿为参照, 采用多项 Logistic 回归模型进行补充分析。结果显示, EVI 每增加 0.1 单位与 LBW 发生风险降低相关 (OR=0.748, 95%CI: 0.708~0.792, $P<0.001$), 但与巨大儿发生风险无显著关联 (OR=1.041, 95%CI: 0.958~1.132, $P=0.341$); NDVI 结果相似, 即每

增加 0.1 单位与 LBW 发生风险降低相关 (OR=0.847, 95%CI: 0.776~0.925, $P<0.001$), 而与巨大儿发生风险无显著关联 (OR=1.028, 95%CI: 0.952~1.111, $P=0.473$)。提示孕期绿地暴露与出生体重的关联主要体现在 LBW 风险降低, 而非巨大儿风险变化, 见表 8。

表8 多项 Logistic 回归分析: 绿地暴露与不同出生体重分型

Table 8 Multinomial Logistic regression analysis of exposure to greenness and different birth weight classifications

暴露变量	结局类型	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P值	OR值	95%CI
EVI(每增加0.1)	LBW vs. 正常	-0.290	0.028	107.143	<0.001	0.748	0.708~0.792
EVI(每增加0.1)	巨大儿 vs. 正常	0.040	0.042	0.901	0.341	1.041	0.958~1.132
NDVI(每增加0.1)	LBW vs. 正常	-0.166	0.030	30.778	<0.001	0.847	0.776~0.925
NDVI(每增加0.1)	巨大儿 vs. 正常	0.028	0.039	0.515	0.473	1.028	0.952~1.111

2.6 机制路径的中介效应验证 按照 1.2.3 所述方法, 以早产 (<37 周) 作为中介变量, 对绿地暴露 (EVIImean-500 m、NDVImean-500 m) 与 LBW 的关联进行因果中介分析。结果显示, 绿地暴露与 LBW 风险的关联可部分通过早产风险降低

来解释。以早产为中介时, EVIImean-500 m 每增加 0.1 单位的中介比例为 2.49% (95%CI: 0.63%~4.96%); NDVImean-500 m 每增加 0.1 单位的中介比例为 10.31% (95%CI: 4.58%~19.06%)。见表 9。

表9 早产(<37周)在绿地暴露与低出生体重关联中的中介效应分析

Table 9 Mediation analysis of preterm birth (<37 weeks) in the association between exposure to greenness during pregnancy and LBW

暴露指标 (每增加0.1单位)	中介变量	自然间接效应	自然直接效应	总效应	中介比例(%)
EVIImean-500 m	早产(<37周)	-0.0003(-0.0007~-0.0001)	-0.0134(-0.0159~-0.0113)	-0.0138(-0.0163~-0.0117)	2.49(0.63~4.96)
NDVImean-500 m	早产(<37周)	-0.0008(-0.0014~-0.0003)	-0.0070(-0.0094~-0.0047)	-0.0078(-0.0101~-0.0055)	10.31(4.58~19.06)

2.7 绿地暴露水平与 LBW 发生风险的关联分析 为直观展示不同绿地暴露分组与 LBW 风险的分布特征, 本文补充报告分位分组分析结果见表 10~12。考虑到该分析易受切点选择及样本分布影响, 相关结果主要用于描述性和辅助性解释, 本文的主要推断仍以连续变量回归与限制性立方样条结果为主。

但不同地区的绿化水平、暴露评估方法 (NDVI/EVI、缓冲区尺度、时间窗设定) 以及协变量控制程度存在差异, 导致效应量并不完全一致。系统综述与 Meta 分析普遍认为, 基于 NDVI 的绿地暴露增加通常与出生体重增加、LBW 风险降低相关^[19, 21]; 而对早产与 SGA 的证据在不同研究之间仍存在一定异质性^[22-23]。部分大样本出生登记或队列研究同时使用 NDVI 与 EVI 评估孕期绿地暴露, 也观察到 LBW 风险降低, 并提示可能存在非线性剂量-反应特征^[24], 与本研究 RCS 结果中 EVI 存在非线性证据的发现相吻合。此外, 部分研

3 讨 论

3.1 与既往研究的比较 既往研究总体提示, 孕期居住地周边绿地暴露与较优出生结局相关^[19-20],

表 10 绿地暴露连续变量与 LBW 发生风险的关联分析

Table 10 Associations of continuous exposure to greenness with the risk of low birth weight

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值	95% CI
Model 0						
EVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.252	0.027	85.900	<0.001	0.777	0.737~0.820
NDVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.186	0.045	17.278	<0.001	0.830	0.760~0.906
Model 1						
EVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.278	0.028	96.778	<0.001	0.757	0.716~0.800
NDVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.167	0.045	13.898	<0.001	0.846	0.775~0.924
Model 2						
EVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.285	0.029	97.887	<0.001	0.752	0.711~0.796
NDVI _{mean-500 m} (每增加 0.1)	-0.166	0.045	13.735	<0.001	0.847	0.776~0.925

表 11 NDVI 四分位分组与 LBW 发生风险的关联分析

Table 11 Associations of NDVI quartiles with the risk of low birth weight

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值	95% CI
Model 0						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.194	0.118	2.722	0.099	1.214	0.964~1.527
Q3	-0.412	0.227	3.307	0.069	0.662	0.424~1.033
Q4	-0.358	0.147	5.916	0.015	0.699	0.524~0.932
Model 1						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.316	0.122	6.635	0.010	1.371	1.078~1.743
Q3	-0.419	0.233	3.214	0.073	0.658	0.416~1.039
Q4	-0.341	0.151	5.095	0.024	0.711	0.529~0.956
Model 2						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.343	0.125	7.550	0.006	1.409	1.104~1.799
Q3	-0.411	0.234	3.085	0.079	0.663	0.420~1.048
Q4	-0.335	0.151	4.956	0.026	0.715	0.532~0.961

表 12 EVI 四分位分组与 LBW 发生风险的关联分析

Table 12 Associations of EVI quartiles with the risk of low birth weight

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值	95% CI
Model 0						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.546	0.126	18.856	<0.001	1.726	1.349~2.208
Q3	-0.705	0.137	26.610	<0.001	0.494	0.378~0.646
Q4	-1.050	0.154	46.690	<0.001	0.350	0.259~0.473
Model 1						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.416	0.136	9.353	0.002	1.516	1.161~1.979
Q3	-0.711	0.139	26.028	<0.001	0.491	0.374~0.646
Q4	-1.207	0.161	56.573	<0.001	0.299	0.218~0.409
Model 2						
Q1	—	—	—	—	1.000	—
Q2	0.385	0.137	7.853	0.005	1.470	1.123~1.925
Q3	-0.742	0.141	27.624	<0.001	0.476	0.361~0.628
Q4	-1.234	0.161	58.554	<0.001	0.291	0.212~0.399

究将结局扩展至早产与SGA,提示绿地暴露可能与较低的早产/SGA风险相关^[25-26],并可能与空气污染等共暴露存在交互或缓冲效应^[27]。

总体而言,本研究在单胎样本中观察到EVI与NDVI升高与LBW风险降低相关(EVI每0.1单位OR \approx 0.49,NDVI每0.1单位OR \approx 0.69)。不同研究间效应差异可能与研究地区整体绿化水平、居住地缓冲区尺度、暴露时间窗(全孕期平均 vs. 分孕期窗口)、社会经济状况与空气污染等未测量混杂/共暴露控制程度差异有关。需要指出的是,本研究使用遥感植被指数作为暴露代理指标,未直接测量污染、噪声、热环境或个体活动,因此机制部分为基于既往证据的解释性讨论,仍需结合更精细暴露与因果推断设计进一步验证。因此,本文主要推断依据以连续变量回归与RCS结果为主,分位结果仅作参考。

3.2 剂量—反应及NDVI/EVI差异的可能解释

NDVI与EVI均为遥感植被指数,但其对高植被覆盖区域的响应特性不同^[28]:NDVI在高覆盖区域可能出现饱和,而EVI通过引入蓝光波段信息与背景校正,对高生物量区域差异更敏感。本研究RCS结果显示,EVI存在非线性证据,提示绿地暴露与LBW风险之间的关系可能并非严格线性;同时连续回归与RCS在2个指标下方向一致,支持总体负向关联结论。

3.3 可能机制 本研究观察到EVI_{mean-500 m}与LBW风险降低的关联强于NDVI_{mean-500 m},且RCS提示EVI存在非线性关系,而NDVI未见显著非线性。这一差异可能与两指数对植被结构与高覆盖区域的响应特性不同有关:NDVI在高植被覆盖区域更容易出现饱和,难以区分冠层结构与高生物量梯度;EVI通过引入蓝光波段与背景校正,对冠层结构差异更敏感,可能更能捕捉与生态调节功能相关的“有效绿量”(例如遮荫降温、污染沉降与噪声衰减等)变化,从而表现出更清晰的剂量—反应形态。

从作用路径看,本研究在孕周相关敏感性分析中结果方向一致,提示绿地暴露与LBW关联并非完全由孕周处理设定驱动^[24-25, 29-31];同时,早产作为中介的效应分解显示绿地暴露与LBW风险降低可能部分通过降低早产风险实现,支持“绿地→降低不利妊娠过程(如早产/胎盘功能受损)→降低LBW风险”的潜在链条。结合既往研究,绿地可能通过多环境与行为途径共同作用^[32-33]:一方面,较高绿量可能与更低的空气污

染/噪声暴露及更缓和的热环境相关,进而影响孕妇炎症反应、氧化应激与代谢状态,改善胎盘灌注与胎儿生长;另一方面,绿地可提高户外活动与心理压力缓冲的机会^[34],影响神经内分泌与睡眠,从而间接影响妊娠结局。

需要强调的是,本研究使用NDVI/EVI作为居住地周边植被覆盖的代理指标,未直接测量空气污染、噪声、热环境及孕妇实际绿地使用与活动轨迹,因此上述机制为结合本研究“效应强度差异与曲线形态”提出的解释性假设。未来研究可在相同空间尺度下同时整合PM_{2.5}/NO₂、噪声、热暴露与步行性指标,并结合个体活动与绿地类型/质量数据,以验证EVI所反映的冠层结构/生态服务是否更直接影响早产或胎儿宫内生长过程。

3.4 优势与局限性 本研究的优势在于依托既有多中心母婴队列数据库(原队列按统一方案前瞻性采集),使孕期绿地暴露与出生结局的时间顺序更加清晰;主分析限定为单胎妊娠以提高研究对象同质性;并通过逐步调整混杂因素、RCS剂量—反应分析以及与孕周相关的敏感性分析对结果稳健性进行检验。本研究基于多中心数据,覆盖重庆、贵阳、成都(西南地区)及连云港(东部沿海)四地,不同地理区位与气候背景带来更广泛的环境差异,为评估不同地区背景下结果的一致性与可比性提供参考依据。

本研究仍存在以下局限性:第一,社会经济状况指标有限,虽纳入教育水平,但仍可能存在收入、职业等未测量维度造成的残余混杂;此外,受数据可得性限制,本研究未能纳入孕期饮食结构、空气污染(如PM_{2.5}、NO₂)、噪声、社区步行性等与绿地高度相关且可能独立影响LBW的环境共暴露指标,亦未能系统获取或充分控制孕期并发症(如妊娠期高血压、妊娠期糖尿病)及产前检查次数与质量等临床过程变量。因此,NDVI/EVI可能在一定程度上反映更广泛的有利环境特征的综合代理,仍存在未测量混杂可能。第二,暴露评估以居住地500 m缓冲区平均NDVI/EVI作为“周边绿量”代理指标,未区分公园、林地、农田或街道绿化等类型与质量差异,亦未获取孕妇实际使用绿地的频率/时长与个体活动轨迹(工作地点、通勤等),同时采用全孕期平均暴露未能识别潜在关键窗口期,上述因素可能引入非差异性暴露错分并带来生态学推断风险,使效应估计趋于保守或掩盖真实异质性。第三,本研究采用MODIS植被指数(250 m分辨率)评估500 m缓

冲区暴露,可能存在混合像元影响;未来可结合更高分辨率遥感(如Landsat、Sentinel-2)或街景绿视率、土地利用与公园可达性、分孕期时变暴露及轨迹数据提高暴露评估精度。第四,观察性研究难以完全排除残余混杂,因果推断仍需更严格的研究设计与方法支持。

外推性方面,本研究主分析样本来自就诊于产科/孕保门诊的孕妇且限定单胎妊娠,结果更适用于类似医疗服务可及性与城市居住环境结构的人群;对绿化水平或城市形态显著不同地区以及多胎妊娠人群的外推仍需谨慎,未来可在更多省市开展重复研究与多中心验证。

3.5 结论 在单胎妊娠样本中,孕期居住地500 m缓冲区绿地暴露水平(NDVImean-500 m、EVIImean-500 m)与LBW风险降低相关,并呈现一定剂量-反应特征。鉴于本研究为观察性研究且仍可能存在残余混杂、环境共暴露未充分控制及暴露错分等偏倚,以上结果应谨慎解释为相关性发现,尚不能推断因果关系。未来研究需结合更精细的个体化暴露评估、空气污染/噪声等共暴露控制以及因果推断研究设计进一步验证其因果性并阐明机制。

[参考文献]

- [1] Luo P, Li Q, Yan B, et al. Prevalence, characteristics and risk factors of birth defects in central China livebirths, 2015–2022 [J]. *Front Public Health*, 2024, 12:1341378.
- [2] Tembo D, Abobo FDN, Kaonga P, et al. Risk factors associated with neonatal mortality among neonates admitted to neonatal intensive care unit of the university teaching hospital in Lusaka [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):5231.
- [3] Zhou R, Yu H, Qian N, et al. Secular trends of low birth weight, preterm birth, and small for gestational age in Shanghai from 2004 to 2020: An age-period-cohort analysis [J]. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2023, 23(1):540.
- [4] Arabzadeh H, Doosti-Irani A, Kamkari S, et al. The maternal factors associated with infant low birth weight: An umbrella review [J]. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2024, 24(1):316.
- [5] Harding JE, Alsweiler JM, Edwards TE, et al. Neonatal hypoglycaemia [J]. *BMJ Med*, 2024, 3(1):e000544.
- [6] Shahid S, Cabra-Bautista G, Florez ID, et al. Quality and credibility of clinical practice guidelines recommendations for the management of neonatal hypoglycemia: A protocol for a systematic review and recommendations' synthesis [J]. *PLoS One*, 2023, 18(1):e0280597.
- [7] Lavizzari A, Zannin E, Klotz D, et al. State of the art on neonatal noninvasive respiratory support: How physiological and technological principles explain the clinical outcomes [J]. *Pediatr Pulmonol*, 2023, 58(9):2442-2455.
- [8] Zhao Z, He Q, Zhang Y, et al. Assessing cross cultural urban park emotional wellbeing impact in Shanghai and London [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1):18892.
- [9] Li Y, Zhang L, Yang S, et al. Regional variations in physical fitness in children and adolescents in Shanxi Province [J]. *Healthcare (Basel)*, 2024, 12(18):1890.
- [10] Li Q, Liu Y, Yang L, et al. The impact of urban green space on the health of middle-aged and older adults [J]. *Front Public Health*, 2023, 11:1244477.
- [11] Yang Z, Liao J, Zhang Y, et al. Critical windows of greenness exposure during preconception and gestational periods in association with birthweight outcomes [J]. *Environ Res Health*, 2024, 2(1):15001.
- [12] Miron-Celis M, Talarico R, Villeneuve PJ, et al. Critical windows of exposure to air pollution and gestational diabetes: Assessing effect modification by maternal pre-existing conditions and environmental factors [J]. *Environ Health*, 2023, 22(1):26.
- [13] Sun Y, Molitor J, Benmarhnia T, et al. Association between urban green space and postpartum depression, and the role of physical activity: A retrospective cohort study in Southern California [J]. *Lancet Reg Health Am*, 2023, 21:100462.
- [14] Aguilar-Lacasana S, Cosin-Tomas M, Raimbault B, et al. Epigenome-wide association study of pregnancy exposure to green space and placental DNA methylation [J]. *Environ Res*, 2025, 274:121286.
- [15] Marques I, Santos S, Monasso GS, et al. Associations of green and blue space exposure in pregnancy with epigenetic gestational age acceleration [J]. *Epigenetics*, 2023, 18(1):2165321.
- [16] Deepa R, Mandal S, Van Schayck OCP, et al. Vitamin B6 levels and impaired folate status but not vitamin B12 associated with low birth weight: Results from the MAASTHI birth cohort in South India [J]. *Nutrients*, 2023, 15(7):1793.
- [17] Saaka M, Sulley I. Independent and joint contributions of inadequate antenatal care timing, contacts and content to adverse pregnancy outcomes [J]. *Ann Med*, 2023, 55(1):2197294.
- [18] Baylis A, Zhou W, Menkhorst E, et al. Prediction and prevention of late-onset pre-eclampsia: A systematic review [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2024, 11:1459289.
- [19] Zhan D, Deng B, Wang Y, et al. Prenatal greenness exposure and the decreased risk of low birthweight and small for gestational age: Modification and mediation effects of air pollution [J]. *BMC Public Health*, 2025, 25(1):4021.
- [20] Heo S, Afanasyeva Y, Liu M, et al. Prenatal exposure to residential greenness, fetal growth, and birth outcomes: A cohort study in New York City [J]. *Am J Epidemiol*, 2025, 194(9):2621-2630.
- [21] Wang X, Feng B, Wang J, et al. Green spaces, blue spaces and human health: An updated umbrella review of epidemiological

- meta-analyses[J]. *Front Public Health*, 2025, 13:1505292.
- [22] 宋贵双,王红,肖成汉,等. 绿色空间对低出生体重和早产的影响[J]. *现代预防医学*, 2024, 51(11):1988-1994.
- [23] Wang H, Huang X, Hao H, et al. Greenspace morphology and preterm birth: A state-wide study in Georgia, United States (2001-2016) [J]. *Environ Health Perspect*, 2024, 132(12):127001.
- [24] Heo S, Fong KC, Son J, et al. Critical window of gestational greenspace exposure for the risk of low birth weight [J]. *Environ Res Lett*, 2025, 20(9):094028.
- [25] Moreira TCL, Polizel JL, Réquia WJ, et al. Effects of land cover and air pollution on the risk of preterm births [J]. *Rev Saude Publica*, 2024, 58:8.
- [26] Schlein SM, Reno EM, Coffey CH, et al. Environmental exposures and risks during pregnancy [J]. *Wilderness Environ Med*, 2025, 36(4):501-513.
- [27] Nunes Candido HM, Endreny TA, Alvim Carvalho F, et al. With great ecosystem services comes great responsibility: Benefits provided by urban vegetation in Brazilian cities [J]. *Plants (Basel)*, 2025, 14(3):392.
- [28] Pan L, Xiao X, Yao Y, et al. Site-specific apparent optimum air temperature for vegetation photosynthesis across the globe [J]. *Sci Data*, 2024, 11(1):758.
- [29] Fottrell AK, Curtis MA, Weeks FH. Ambient air pollution, housing context, and birth outcomes among wisconsin mothers [J]. *Matern Child Health J*, 2024, 28(8):1386-1394.
- [30] Ruan X, Chen K, Li Z, et al. The impact of maternal health and lifestyle on low birth weight: A prospective cohort study [J]. *Ital J Pediatr*, 2025, 51(1):217.
- [31] Parasin N, Amnuaylojaroen T, Saokaew S. Prenatal PM(2.5) exposure and its association with low birth weight: A systematic review and meta-analysis [J]. *Toxics*, 2024, 12(7):446.
- [32] Xia Q, Qin G, Liu Q, et al. Green space exposure and Chinese residents' physical activity participation: Empirical evidence from a health geography perspective [J]. *Front Public Health*, 2024, 12:1430706.
- [33] Zuo W, Cheng B, Feng X, et al. Relationship between urban green space and mental health in older adults: Mediating role of relative deprivation, physical activity, and social trust [J]. *Front Public Health*, 2024, 12:1442560.
- [34] Dong T, Zhong Q, Yue B. How green space justice in urban built-up areas affects public mental health: A moderated chain mediation model [J]. *Front Public Health*, 2024, 12:1442182.

(本文编辑:赵丽洁)