

夜间户外环境暴露对女性睡眠质量的影响

The Effect of Nighttime Outdoor Environment Exposure on Women’s Sleep Quality

陈崇贤* 华雨茹
CHEN Chongxian* HUA Yuru

(华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong, China, 510642)

文章编号: 1000-0283(2025)12-0048-08
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 12. 0048. 006
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-08-06
修回日期: 2025-09-07

摘 要
已有大量研究表明, 夜间环境暴露与个体的睡眠质量密切相关。然而, 现有研究多基于遥感数据且聚焦于宏观尺度视角, 而个体夜间户外日常活动的环境暴露与其睡眠质量的关系还未深入探究。聚焦女性群体, 结合穿戴设备连续动态追踪一周的夜间户外环境暴露和睡眠质量数据变化, 并采用线性混合效应模型与滞后效应模型, 探究夜间户外环境特征对睡眠质量的即时与累积影响。结果表明: (1) 绿视率与公共设施可视性在 19:00–23:00 多个时段内对睡眠得分、静息心率等指标具有稳定正向作用; (2) 22:00 后, 光照强度与色温的过度暴露则显著干扰生理节律, 降低睡眠质量; (3) 部分环境特征如干扰指数与建筑视野指数等在长时暴露后易激活交感神经, 使静息心率升高; (4) 绿视率、干扰指数、色温等环境因素在滞后 1 ~ 3 天仍表现出显著效应, 即累积暴露对睡眠质量具有持续影响特征。研究结果可为营造女性友好夜间户外环境, 提升女性健康福祉提供实证支持与性别维度的理论依据。

关键词
风景园林; 健康城市; 环境暴露; 动态追踪; 女性健康

Abstract
Numerous studies have demonstrated that exposure to the nocturnal environment is significantly associated with individuals’ sleep quality. Nonetheless, existing research predominantly focuses on macro-scale analyses using remote sensing data. Whereas relationship between individuals’ environmental exposure during outdoor activities at night and their sleep quality remains insufficiently examined. This study focuses on the female group, combines data on nighttime outdoor environmental exposure with continuously and dynamically tracked changes in sleep quality over a week using wearable devices, and uses linear mixed-effects models and lag-effect models to explore the immediate and cumulative impacts of nighttime outdoor environmental characteristics on sleep quality. The findings indicate that: (1) Green View Index and visibility of public facilities consistently exert a positive influence on sleep scores, resting heart rate, and other indicators across multiple time periods from 19:00 to 23:00; (2) After 22:00, excessive exposure to light intensity and color temperature significantly disturbs circadian rhythms and reduces sleep quality; (3) Long-term exposure to some environmental characteristics, such as the disturbance index and building view index, tends to activate the sympathetic nervous system, leading to an increase in resting heart rate; (4) Environmental factors, including the green view index, disturbance index, and color temperature, continue to exhibit significant effects with a lag period of one to three days. This suggests the persistent influence of cumulative exposure on sleep quality. The findings offer empirical support and a gender-based theoretical foundation for the development of female-friendly nighttime outdoor environments and the enhancement of women’s health and well-being.

Keywords
landscape architecture; healthy city; environmental exposure; dynamic tracking; women’s health

陈崇贤
1984 年生/男/福建福州人/博士/副教授/研
究方向为健康景观、风景园林规划设计与理论

华雨茹
2001 年生/女/湖南永州人/在读硕士研究生/
研究方向为健康景观

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 597947853@qq.com

基金项目:
国家自然科学基金项目“昼夜情境下社区绿地适老休闲服务效能影响机制及增效途径研究”(编号: 32471934)

睡眠质量是衡量个体健康状态的重要指标之一，长期睡眠不足或质量差会影响个体认知、情绪、代谢与心血管健康。睡眠质量不佳引起的学习和工作效率下降，以及身体和精神健康问题，正逐渐引起社会的广泛关注^[1-2]。调查显示约 15% ~ 35% 的成人存在睡眠问题^[3]，并且女性比男性更容易发生入睡困难、睡眠中断、睡眠浅等问题，严重影响女性的身心健康与生活质量^[4]。

大量研究表明，环境因素与个体的睡眠状况密切相关，涉及睡眠的持续时间、入睡潜伏期、睡眠效率以及睡眠障碍等多个方面。例如城市绿色空间可通过改善空气质量、降低噪音污染、增加氧气含量等机制，营造更宜居、更有助于恢复的睡眠环境^[5-7]。环境心理学中的注意力恢复理论和压力恢复理论指出，自然环境具备缓解生理压力与恢复认知能力的作用，是支持身心修复的重要媒介^[8]。近年来，已有研究采用基于居住地的静态环境暴露评估方法，如利用归一化植被指数 (NDVI) 或谷歌街景图像量化居住环境特征，并结合匹兹堡睡眠质量指数 (PSQI) 等主观睡眠问卷，探讨环境因素（如噪音、空气污染、绿地率、社区可步行性）对睡眠质量的影响^[9-10]。这些研究发现居住于绿地覆盖率较高区域的居民通常具有更佳的主观睡眠体验^[11]。然而，过度人工照明与夜间光污染可能干扰褪黑素分泌，延迟个体入睡节律，进而影响睡眠的深度与质量^[12]。

随着“24 小时城市”理念的兴起和城市居民夜间生活的不断丰富，夜间户外环境逐渐成为健康人居研究的重要议题^[13-14]。尤为值得关注的是，女性群体对夜间环境具有更高的敏感性，更易在夜间户外情境中产生不安情绪，并对睡眠质量造成潜在影响。研究显示，女性在夜间步行时的视觉注意力更集中于路径边缘、昏暗区域以及植被阴影等潜在威胁区域，而男性则多聚焦于路径中央及前方目标方向。这种行为体现出女性具有更强的安全警觉性，但也伴随着更高的心理负荷^[15]。已有访谈研究进一步指出，通常具有积极感知价值的绿色植被，在照明缺失时常被女性视为可能隐藏危险的遮蔽物，从而激发环境焦虑与不安感^[16]。尤其在光线不足、视野受限、行人稀少的夜间环境中，更易诱发女性的心理紧张与生理警觉反应，干扰其睡前的身心放松状态。研究表明这类心理负担与女性睡眠质量下降存在显著关联^[17]。

尽管当前已有研究探究环境对睡眠质量的影响，但多数研究采用主观睡眠问卷，其结果易受到记忆偏差或情绪状态的干扰。同时，环境暴露的测量多基于横断面研究方法，依赖固定居住地的静态环境指标推测环境暴露情况，忽略了个体在日常活动中因时因地的动态暴露特征，因此，难以准确反映其真实的环境接触过程及影响。

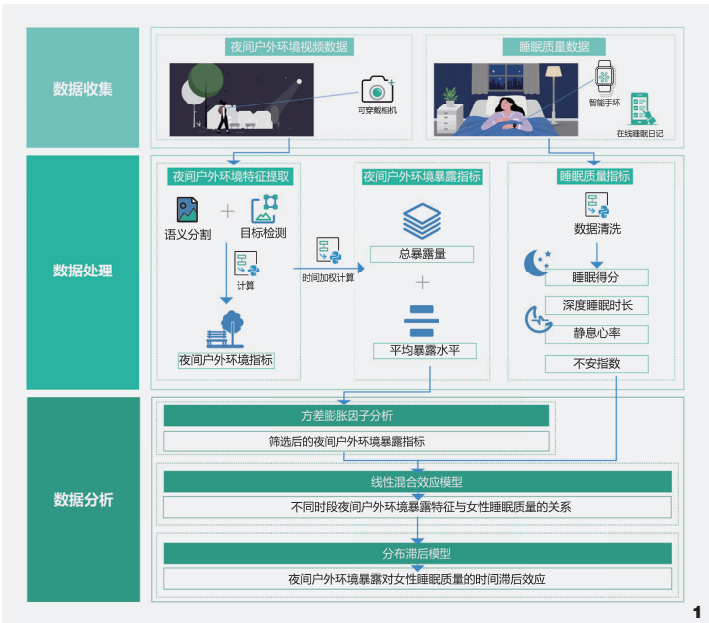


图1 研究框架
Fig. 1 Research framework

相比之下，智能手环作为一种可穿戴生理监测设备，能够实现睡眠状态的客观记录，减少主观偏差，提升数据精度。已有研究表明，消费级可穿戴设备（如 Fitbit）能够较准确地监测睡眠参数，捕捉睡眠质量的动态变化^[18]。基于此，本研究结合可穿戴相机与智能手环，通过一周动态追踪式个体暴露测量，深入探讨女性夜间户外环境暴露特征与其睡眠质量之间的关系；（1）不同时段下夜间户外环境暴露特征与其睡眠质量之间的关系；（2）夜间户外环境暴露对睡眠质量影响的时间滞后效应。

1 研究设计

1.1 研究框架

本研究框架如图1所示，主要包括三个阶段：（1）数据收集，通过可穿戴相机和智能手环连续动态捕捉女性受试者一周的夜间户外环境暴露和睡眠质量数据，并且通过睡眠日记，记录潜在干扰因素；（2）数据处理，将收集到的环境视频进行语义分割和目标检测，构建夜间户外环境特征指标，并结合暴露时长计算不同指标暴露总量和平均值。同时，对夜间睡眠质量数据进行清洗与匹配，剔除不完整或异常记录；（3）数据分析，首先采用方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 筛选夜间户外环境暴露指标，其次，利用线性混合效应模

型 (Linear Mixed-Effects Model, LMM) 与分布滞后模型 (Distributed Lag Model, DLM), 探讨夜间户外环境暴露对女性睡眠质量的即时和滞后效应。

1.2 指标选取

1.2.1 夜间户外环境暴露指标

夜间户外环境暴露影响个体情绪、安全感及生理节律, 进而干扰或调节睡眠过程。针对女性群体对夜间户外环境的敏感性, 为评估其对女性睡眠质量的潜在影响, 本研究从环境感知和空间形态两个维度构建夜间户外环境指标体系^[19-20], 各指标的定义与计算方法详见表1。环境感知维度包括绿视率、拥挤度、干扰指数、感官多样性、色彩复杂度、色温、亮度、公共设施可视性。已有研究证实, 自然元素的视觉呈现能够缓解个体的心理压力、降低不安感, 从而有助于睡前的身心放松; 高复杂度环境可能增加心理负荷和警觉性, 从而影响入睡和睡眠深度; 光环境直接影响褪黑素分泌与睡眠节律, 调节入睡时间与睡眠质量。空间形态维度包括围合度、开敞度、天空开阔度、建筑视野指数、空间分割度。此类指标反映环境的结构布局, 影响个体的安全感和舒适度, 从而间接调节睡眠状态^[21]。

1.2.2 睡眠质量指标

为全面评估睡眠质量, 本研究选取了睡眠得分、深度睡眠时长、不安指数、静息心率4个反映睡眠质量的指标(表2)进行测量与分析, 其能够分别体现睡眠的整体状态、结构特征、连续性及自主神经调节功能。

1.3 实验流程

本研究在2025年2月23日-4月29日进行受试者招募并开展正式实验。受试者入选标

准为: 年龄18 ~ 35岁的女性, 身体素质良好, 无重大疾病、心理疾病及视觉障碍等; 在广州市居住三个月以上, 并确保实验前不会受到较大心理负担的干扰。最终, 本实验共召集受试者42人。

实验流程如图2所示。正式实验启动前, 设置为期三天的基线数据采集, 旨在获取受试者常态下的睡眠质量基础数据, 作为后续分析的对照。正式实验阶段采用为期一周的连续追踪观察。为聚焦夜间暴露特征, 本研究限定数据采集时间为19:00-24:00。受试者

在自然状态下活动, 无需遵循特定的出行时间或路线, 以最大程度反映其真实的夜间户外活动模式。每日活动前, 受试者需规范佩戴可穿戴相机于衣领稳定位置, 确保相机镜头无遮挡、垂直, 实现连续拍摄。同时, 试验期间需全天佩戴智能手环, 确保对夜间睡眠质量的连续追踪。此外, 受试者需于每日晨起后1h内填写在线主观睡眠评价问卷, 该问卷数据主要用于实验期间的受试者状态监测, 并根据问卷剔除因服用影响睡眠药物或过晚饮用含咖啡因类饮品等干扰因素导致的

表1 夜间户外环境暴露指标
Tab. 1 Nighttime outdoor environmental exposure indicators

| 指标 Indicator | 定义及计算方法 Definition and calculation method |
|-----------------|--|
| 绿视率 | 视野中绿色植被元素所占面积比例, 反映绿化的密度 |
| 拥挤度 | 画面中人的占比, 用于反映人群密度 |
| 干扰指数 | 夜间交通元素(车辆、信号灯)像素占比(%), 反映干扰程度 |
| 感官多样性 | 基于 Shannon 指数计算景观元素(植被、水体、建筑、天空)丰富度与均匀度 |
| 色彩复杂度 | 画面中各种颜色像素数占总像素数比例(%), 反映图像中颜色的丰富程度与分布复杂性 |
| 色温 | 光源色温(K), RGB 转化而来的颜色空间值 |
| 亮度 | 环境光照强度(Lux), RGB 的归一化亮度值 |
| 公共设施可视性 | 围栏、信号灯、路灯、墙体在图像中所占的比例, 反映公共设施的密度 |
| 围合度 | 视野中建筑物、墙体等构成元素的总和, 表征空间封闭感 |
| 开敞度 | 非墙体、围栏、建筑物在图像中的占比, 表示街道空间的开放程 |
| 天空开阔度 | 画面中天空的占比, 反映空间开阔程度 |
| 建筑视野指数 | 建筑元素像素占比(%), 反映建筑密集度 |
| 空间分割度 | 小径、墙壁、楼梯和柱子在图像中所占的比例, 反映破坏活动空间的连贯性和统一性的元素 |

表2 睡眠质量指标
Tab. 2 Sleep quality indicators

| 指标 Indicator | 定义 Definition | 含义 Meaning |
|-----------------|--|--|
| 睡眠得分 | 由以下三项分数组成: 睡眠时间(最高 50 分)、深度+快速眼动(REM)睡眠时间(最高 25 分)、睡眠恢复状态(最高 25 分) | 反映总体睡眠质量, 考虑时长、结构及恢复情况, 是一个综合性评价指标 |
| 深度睡眠时长 | 夜间睡眠被划分为浅睡、深睡和快速眼动阶段, 该指标表示深睡时间总长 | 深度睡眠与身体恢复和记忆整合密切相关, 是评价睡眠结构的重要组成 |
| 不安指数 | 夜间睡眠期间发生翻身、微醒等辗转反侧的频率或时间百分比 | 不安指数反映夜间觉醒频繁程度, 高表示睡眠中断较多、连续性差 |
| 静息心率 | 睡眠期间的平均心率水平, 反映自主神经系统状态 | 较低的睡眠心率通常表示更好的恢复状态, 睡眠期间心率升高可暗示睡眠质量下降或交感神经兴奋 |

无效样本数据。最终共纳入37名受试者，年龄范围为18~30岁。

1.4 数据处理与分析

数据处理方面，对于户外环境数据，基于可穿戴相机采集的第一视角视频数据，本研究按每5s提取一帧图像，用于夜间户外环境指标的提取。图像处理采用Night City数据集训练的全卷积神经网络 (FCN) 进行语义分割，提取夜间环境要素的像素比例，该模型的平均交并比 (mIoU) 达到62.2%^[22]；同时，使用PP-YOLOE对图像中的行人、自行车、汽车等进行目标检测，类别平均像素准确率为49.1%^[23]。最终计算出所选取的16个夜间户外环境指标 (表1)。基于这些指标，构建两类个体夜间户外环境暴露指标：(1) 总暴露量，通过将夜间外出期间环境特征值按持续时间加权累计求和，反映个体所承受的环境负荷累积效应；(2) 平均暴露水平，计算外出期间所有采样帧的指标均值，刻画个体所处环境的平均状态。上述方法基于每张采样图像对应的5s持续时长，并通过Python脚本实现自动化计算，以确保数据处理的一致性。睡眠数据方面，研究从Fitbit官方网站导出受试者的客观睡眠记录，并结合在线睡眠日记进行交叉核验，剔除了睡前摄入影响睡眠质量的食物、药品等异常样本，确保所保留的数据更真实地反映自然状态下的睡眠质量。

数据分析方面，采用方差膨胀因子 (VIF) 分别对两组户外环境暴露指标变量进行多重共线性诊断，仅保留VIF值<10的变量进入建模分析。最终纳入分析的指标包括：总暴露量指标 (开敞度、绿视率、色温、干扰指数)；平均暴露水平指标 (建筑视野指数、公共设施可视化、开敞度、绿视率、拥挤度、色温、亮度)。接着，采用线性混合效应模型

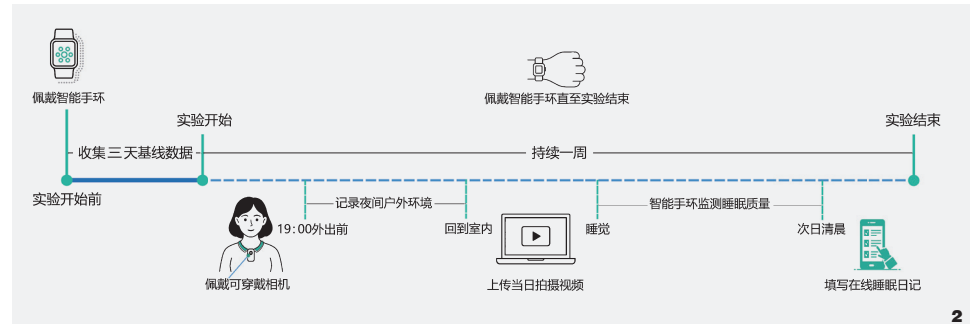


图2 实验流程图
Fig. 2 Experimental procedure

(LMM) 与分布滞后模型 (DLM) 探讨夜间户外环境暴露与睡眠质量的即时与累积影响。本研究重复测量了多个受试者在连续一周内的夜间户外暴露及睡眠质量，线性混合效应模型克服了一般线性模型对因变量独立性和等方差的要求。模型以睡眠质量指标作为因变量，以VIF值小于10的环境暴露变量作为自变量，并将受试者ID设为随机效应以控制个体差异，以探讨不同时间窗口内 (19:00–20:00, 20:00–21:00, 22:00–23:00, 23:00–24:00) 的户外环境暴露对睡眠质量的影响。此外，考虑到夜间环境对睡眠质量的影响可能存在滞后反应，进一步引入分布滞后模型 (DLM) 通过自然样条函数对观测日进行平滑控制，以控制随时间变化的趋势，同时从时间维度动态刻画环境暴露指标的滞后效应，识别出不同环境因素的关键滞后时间窗。所有统计分析均在R语言环境下完成。

2 结果与讨论

2.1 不同时段环境暴露特征对女性睡眠质量的影响

表3展示了不同时段内环境暴露特征与女性睡眠质量的时段内关联分析结果。结果显示，每个时段内的环境暴露与睡眠质量存在即时关联，体现出户外暴露与睡眠调

节过程中的时段敏感性与多维特征关联性。19:00–20:00时间段，公共设施可视性平均暴露水平显著负向影响静息心率 ($\beta = -3.50$, $p = 0.016$)，可能在该时段内较高的视觉秩序感提供了清晰的环境，增强了女性对空间的可预测性与可控感，从而降低了其对潜在威胁的生理警觉性^[24]；开敞度平均暴露水平 ($\beta = -0.005$, $p = 0.039$) 和绿视率平均暴露水平 ($\beta = -0.009$, $p = 0.024$) 均与不安指数负相关，说明自然要素和开放空间可在傍晚时段对个体睡眠的不安感产生缓冲作用。

20:00–21:00阶段，开敞度平均暴露水平 ($\beta = -1.13$, $p = 0.006$) 和干扰指数总暴露量 ($\beta = -0.80$, $p = 0.014$) 均对静息心率产生负向影响。干扰指数主要反映夜间交通要素 (如车辆与信号灯) 在视觉场景中的占比，这说明其带来的光亮与动态节奏在开敞环境中能消解女性对夜间空间的不确定感，增强女性个体对周边环境的掌控感与安全感，进而缓解生理层面的神经紧张^[25]。

22:00–23:00时段，公共设施可视性平均暴露水平 ($\beta = -1.44$, $p = 0.044$) 和绿视率总暴露量 ($\beta = -2.12$, $p = 0.020$) 依旧显著降低静息心率，说明自然与公共设施可视性在睡前有助于稳定女性生理节律。相较之下，光照强度的平均暴露水平在此阶段与静息心率呈显

表3 不同时段环境暴露特征对睡眠质量的线性混合效应分析结果

Tab. 3 Results of linear mixed-effects models for sleep quality across exposure time windows

| 时间段 Time window | 夜间户外环境暴露指标 Nighttime outdoor environmental exposure indicator | 睡眠质量指标 Sleep quality indicator | 回归系数 (β) Regression coefficient (β) | 显著性 (p 值) Significance (p -value) |
|--------------------|--|-----------------------------------|--|--|
| 19:00–20:00 | 公共设施可视性平均暴露水平 | 静息心率 | -3.50* | 0.016* |
| | 开敞度平均暴露水平 | 不安指数 | -0.005* | 0.039* |
| | 绿视率平均暴露水平 | 不安指数 | -0.009* | 0.024* |
| 20:00–21:00 | 开敞度平均暴露水平 | 静息心率 | -1.13* | 0.006* |
| | 干扰指数总暴露量 | 静息心率 | -0.80* | 0.014* |
| 22:00–23:00 | 公共设施可视性平均暴露水平 | 静息心率 | -1.44* | 0.044* |
| | 光照强度平均暴露水平 | 静息心率 | 1.75* | 0.005* |
| | 绿视率总暴露量 | 静息心率 | -2.12* | 0.02* |
| 23:00–24:00 | 建筑视野指数平均暴露水平 | 睡眠得分 | -10.61** | <0.001** |
| | 公共设施可视性平均暴露水平 | 睡眠得分 | 47.04** | <0.001** |
| | 色温总暴露量 | 睡眠得分 | -3921.79* | 0.004* |

注：*表示相关性在0.05水平上显著；**表示相关性在0.01水平上显著。

著正相关关系 ($\beta=1.75, p=0.005$)，夜间强光环境可能扰乱人体褪黑素分泌节律，打破昼夜节律，从而激活交感神经，提升生理警觉水平，造成入睡前生理状态的激活^[26]。

23:00–24:00时段，建筑视野指数平均暴露水平显著负向影响整体睡眠得分 ($\beta=-10.61, p<0.001$)，表明夜间较强的建筑围合感或空间压迫感可能干扰女性的睡眠质量；同时，色温总暴露量亦负向影响整体睡眠得分 ($\beta=-3921.79, p=0.004$)，说明偏冷光源的夜间照明可能抑制个体褪黑素分泌，而公共设施可视性平均暴露水平则正向影响整体睡眠得分 ($\beta=47.04, p<0.001$)，再次印证环境公共设施的可见性对于女性心理安全感及睡眠的促进作用。

2.2 不同环境暴露特征对女性睡眠质量的影响

研究结果显示，部分环境特征在多个时段内对女性睡眠指标持续产生显著影响，呈现一致性与累积性。其中，公共设施可视性在19:00–20:00、22:00–23:00以及23:00–24:00三

个时段内均表现为降低静息心率或提高睡眠得分的正向因素，有助于提升空间掌控感与生理放松。绿视率亦在傍晚与临睡前阶段反复出现显著正向作用，表明自然元素的视觉呈现可能在调节情绪、降低紧张状态方面发挥积极作用^[27]。相反，光照强度与色温在临近深夜(22:00后)对睡眠质量构成干扰，这与现有的研究结果也保持一致，强光与冷色调照明可能干扰女性褪黑素节律，诱发生理激活，进而降低睡眠质量^[28]。此外，建筑视野指数、开敞度等空间结构因素在不同阶段亦呈现对睡眠质量的显著影响，说明女性对夜间空间形态也具有一定的敏感性。整体而言，具备自然属性、公共设施可识别性与适宜空间结构的夜间户外环境体验更有利于女性获得更佳的睡前生理状态与整体睡眠质量。

2.3 环境暴露特征对女性睡眠质量的时间滞后影响

考虑到夜间户外环境暴露对睡眠质量的影响具有一定滞后性，即当日的感知不一定立即反映于当夜的睡眠表现，可能在随后的

数日内持续影响个体生理状态，故本研究进一步采用分布滞后模型(DLM)以评估不同时段暴露的动态影响。模型中纳入了三种单日滞后变量(Lag1、Lag2、Lag3)与三种累积滞后变量(CumLag1、CumLag2、CumLag3)评估其对睡眠的影响，详细定义见表4。

图3和图4滞后效应结果显示，公共设施可视性平均暴露水平在Lag1时对女性的睡眠得分和深度睡眠时长均产生显著正向作用 ($\beta=0.348; \beta=0.285$)，对静息心率表现为负向影响 ($\beta=-0.416$)，且该作用在Lag3时进一步加强 ($\beta=-0.473$)，这一趋势反映出夜间空间中公共设施的视觉可见性，不仅有助于提升女性的心理安全感与环境掌控感，更可能在短期累积暴露下，通过稳定情绪状态、缓解警觉性激活等路径，间接促进生理节律的调节，利于睡眠节律的恢复和深度睡眠的延长。

绿视率总暴露量在Lag3时与静息心率呈正相关 ($\beta=0.270$)，可能反映在连续暴露或达到一定强度阈值时，绿色景观元素可能因植物形态密度或空间围合感的增强，激发女性个体的警觉与生理激活反应，尤其是在夜间或光照不足环境中，绿视率可能引发女性对夜间户外环境的不确定性与警惕性，进而影响心率调节。相较之下，绿视率平均暴露水平在多个滞后时段与不安指数表现为显著负相关，CumLag1至CumLag3的累积效应尤为突出，说明日常接触自然环境对情绪调节具有稳定且累积的缓冲作用，利于睡眠质量的提升^[29]。

干扰指数总暴露量在Lag3及其累积窗口对静息心率均表现出显著正相关，说明夜间环境中动态、复杂或闪动的元素可能持续激发女性的警觉水平，诱发交感神经系统的持续兴奋，进而影响心率的稳态调节；建筑视野指数平均暴露水平在累积暴露下与静息心率呈现显著正相关 ($\beta=0.307$)，说明持续性

表4 滞后变量的定义与说明
Tab. 4 Definitions and descriptions of lag variables

| 滞后变量 Lag variable | 定义 Definition | 含义 Meaning |
|----------------------|------------------|-----------------------|
| Lag1 | 单日滞后 1 天 | 表示前 1 日的环境暴露水平 |
| Lag2 | 单日滞后 2 天 | 表示前 2 日的环境暴露水平 |
| Lag3 | 单日滞后 3 天 | 表示前 3 日的环境暴露水平 |
| CumLag1 | 累积滞后至前 1 日 | 表示当前日与前 1 日内环境暴露的平均水平 |
| CumLag2 | 累积滞后至前 2 日 | 表示当前日至前 2 日内环境暴露的平均水平 |
| CumLag3 | 累积滞后至前 3 日 | 表示当前日至前 3 日内环境暴露的平均水平 |

的空间围闭或视线受限可能带来压迫感，引发生理紧张反应，影响睡眠的恢复性。色温总暴露量在Lag1阶段对睡眠得分呈正相关($\beta=1.032$)，短时暖色光照在夜间可营造出较为柔和与亲和的光环境，从而对情绪产生安抚作用。然而，色温暴露在不同强度与时长组合下的调节方向与临界阈值，需要进一步探讨其对睡眠节律的潜在干预机制。

此外，如图5所示，虽然开敞度总暴露量、视觉拥挤度平均暴露水平及光照强度平均暴露水平等指标在部分时段中未表现出显

著结果，但从效应趋势来看，单日滞后阶段表现出更大的回归系数，说明这些环境特征对睡眠质量的影响更倾向于短期的滞后效应。

3 结论与展望

本研究聚焦女性群体，考虑了在夜间户外环境中的个体连续动态暴露特征，并探究其对女性群体睡眠质量的即时和滞后效应。研究发现，不同类型的环境暴露特征在不同时间窗内对睡眠产生了显著作用，且作用路径具有时段敏感性和指标差异性。这表明环

境暴露通过短期生理节律调整和情绪稳定机制，显著影响睡眠状态的恢复与质量提升。基于此，夜间户外环境的设计不仅应关注当下视觉和光照条件的舒适与安全，还需综合考虑环境影响的时间维度，促进持续的睡眠健康改善。

具体来看，不同环境要素在睡眠调节中表现出多维度且差异化的作用机制。公共设施可视性的持续暴露有助于增强环境掌控感，稳定情绪并促进深度睡眠，体现出环境结构性支持对睡眠恢复的积极作用^[30]。绿视率作为自然元素指标，展现出对情绪焦虑的缓解潜力，但其强烈的视觉密度可能在一定条件下激发生理警觉，说明自然景观设计需平衡视觉舒适度与空间开敞度。相较之下，建筑视野指数和干扰指数等空间结构性及动态元素在累积暴露后对生理激活呈现负向影响，强调了视觉干扰和空间封闭感对睡眠安全感的潜在威胁。此外，光环境因素，尤其是夜晚光照强度与色温的变化，对生物节律

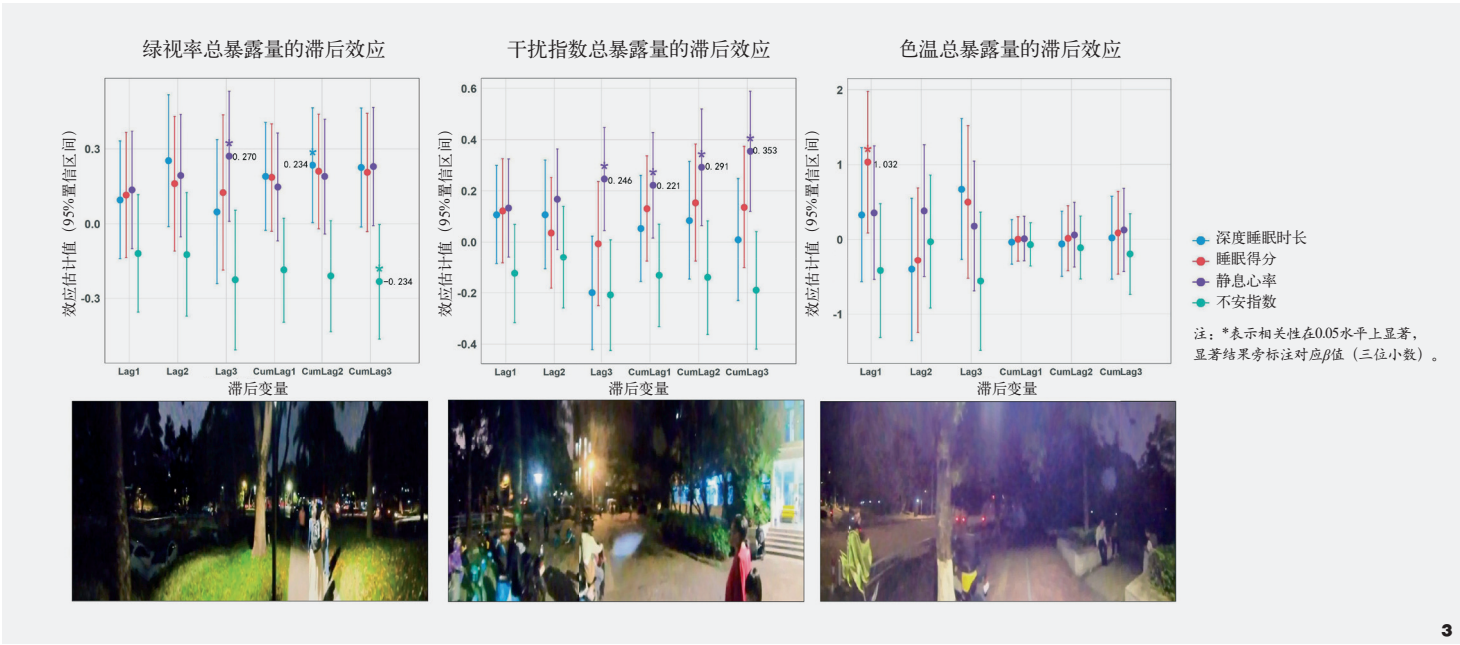


图3 环境总暴露量滞后效应
Fig. 3 Lag effect of cumulative exposure to key environmental features

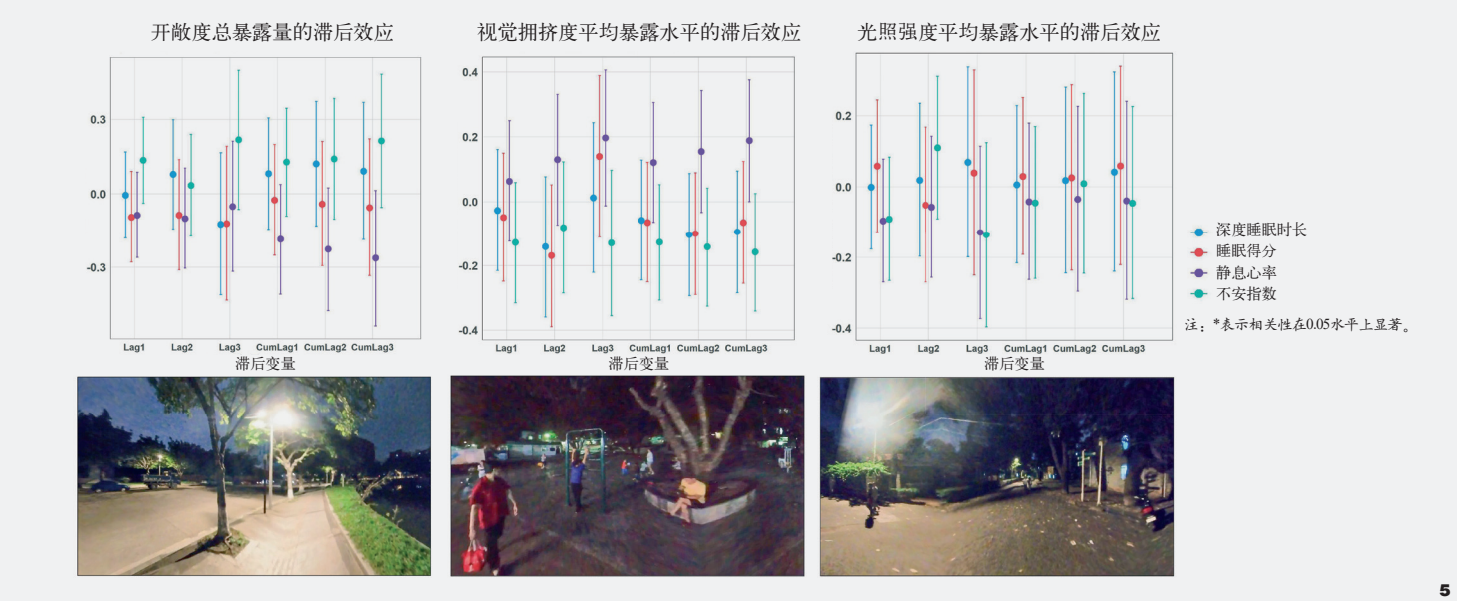
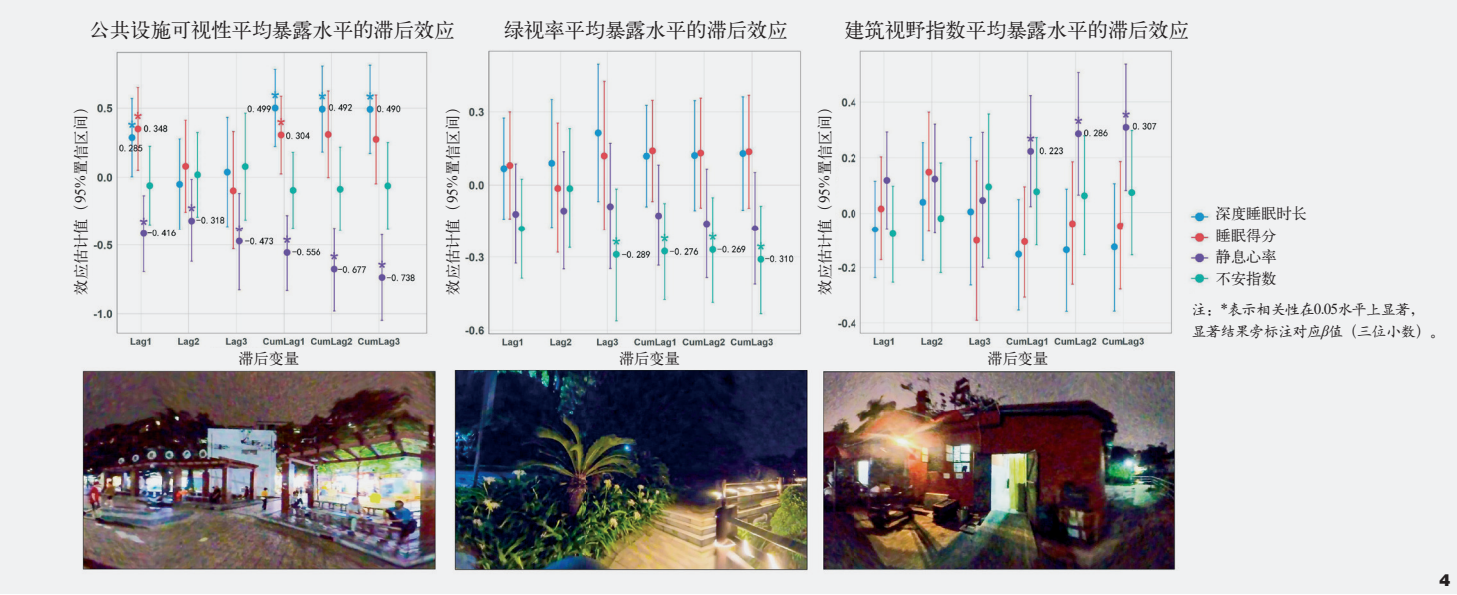


图4 环境平均暴露水平滞后效应
Fig. 4 Lag effect of average exposure level to key environmental features

图5 其他环境暴露滞后效应
Fig. 5 Lagged effects of other environmental exposure characteristics

调节具有复杂作用，合理控制光照质量和节律对夜间睡眠优化具有重要意义。

总体而言，本研究发现夜间环境对睡眠的影响并非孤立的即时反应，而是具有阶段性时间窗口和累积特征。户外环境要素的空间结构、视觉清晰度、照明属性与自然呈现

的暴露共同作用于女性的睡眠质量。因此，夜间户外环境的规划与设计，需从提升自然接触频率、强化公共设施识别性、优化光环境节律性、减少视觉干扰和空间封闭感等方面，构建更具恢复性与安全性的夜间户外环境，从而真正服务于睡眠健康与性别友好型

城市空间的营造。

本研究采用纵向追踪的实验设计，与以往的横断面研究相比，更加精准且全面地获取了个体环境暴露与睡眠质量之间的动态关系。同时，利用线性混合效应模型（LMM）与分布滞后模型（DLM）量化环境暴露的即时

与滞后效应, 揭示多时段、多维指标对女性睡眠的潜在作用及关键滞后时间窗, 为夜间城市环境规划与性别友好型空间设计提供了分时段启示与参考。

但本研究仍存在一定局限, 未来可从以下几方面进一步拓展和深化。首先, 室内环境因素的干扰控制与协同分析尚不充分。睡眠过程多发生于室内, 光照、色温、遮光条件、通风、噪声等因素均可能对睡眠质量产生关键影响, 未来研究应尝试同步采集室内环境数据, 以更准确界定户外暴露的独立效应及其交互作用。其次, 心理认知与主观感知因素在夜间环境感受中扮演着重要中介角色。视觉刺激如何影响睡前情绪、警觉水平、安全感等心理状态, 尚缺乏充分的量化分析。后续研究可引入个体化心理评估工具或情绪追踪机制, 探索视觉环境通过心理机制影响睡眠的可能路径。最后, 样本结构与人群差异性仍有待扩展。由于实验条件限制, 当前研究聚焦于年轻女性群体, 尽管揭示了其在夜间环境中的敏感性特征, 但不同年龄阶段的女性在夜间活动中的空间认知与生理反应是否存在显著差异, 以及在环境感知与睡眠节律上的影响程度和调节机制如何, 仍需要进一步探讨。

注: 文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] ZHANG H Q, LI Y Q, ZHAO X Y, et al. The Association Between PSQI Score and Hypertension in a Chinese Rural Population: The Henan Rural Cohort Study[J]. *Sleep Medicine*, 2019, 58: 27-34.
- [2] ZHOU T, YUAN Y, XUE Q C, et al. Adherence to a Healthy Sleep Pattern Is Associated with Lower Risks of All-cause, Cardiovascular and Cancer-specific Mortality[J]. *Journal of Internal Medicine*, 2022, 291(01): 64-71.
- [3] HARVEY A G. A Cognitive Model of Insomnia[J]. *Behaviour Research and Therapy*, 2002, 40(08): 869-893.
- [4] 谢晨, 杨文佳, 赵娜, 等. 女性睡眠的研究进展[J]. *生理科学进展*, 2015, 46(01): 57-60.
- [5] 张林浩, 金荷仙, 曾程程, 等. 绿色环境对睡眠健康的影响: 来自系统综述的证据[J]. *中国园林*, 2025, 41(01): 6-14.
- [6] ASTELL-BURT T, FENG X Q, KOLT G S. Does Access to Neighbourhood Green Space Promote a Healthy Duration of Sleep? Novel Findings From a Cross-sectional Study of 259 319 Australians[J]. *BMJ Open*, 2013, 3(08): e003094.
- [7] YANG L, HO J Y S, WONG F K Y, et al. Neighbourhood Green Space, Perceived Stress and Sleep Quality in an Urban Population[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126763.
- [8] KAPLAN S. The Restorative Benefits of Nature: Toward an Integrative Framework[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 1995, 15(03): 169-182.
- [9] JOHNSON D A, BILLINGS M E, HALE L. Environmental Determinants of Insufficient Sleep and Sleep Disorders: Implications for Population Health[J]. *Current Epidemiology Reports*, 2018, 5(02): 61-69.
- [10] LIU F F, ZHOU F, ZHANG K, et al. Effects of Air Pollution and Residential Greenness on Sleep Disorder: A 8-year Nationwide Cohort Study[J]. *Environmental Research*, 2023, 220: 115177.
- [11] XIE Y Y, XIANG H, DIN, et al. Association Between Residential Greenness and Sleep Quality in Chinese Rural Population[J]. *Environment International*, 2020, 145: 106100.
- [12] WEST K E, JABLONSKI M R, WARFIELD B, et al. Blue Light From Light-emitting Diodes Elicits a Dose-dependent Suppression of Melatonin in Humans[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2011, 110(03): 619-626.
- [13] 陈崇贤, 熊心蕊, 林广思, 等. 夜间户外环境对居民健康影响的研究进展[J]. *风景园林*, 2025, 32(07): 21-29.
- [14] 陈崇贤, 李海薇, 林晓玲, 等. 基于计算机视觉的夜间户外环境情绪感知特征研究[J]. *中国园林*, 2023, 39(02): 20-25.
- [15] CHANEY R A, BAER A, TOVAR L I. Gender-based Heat Map Images of Campus Walking Settings: A Reflection of Lived Experience[J]. *Violence and Gender*, 2024, 11(01): 35-42.
- [16] DUBEY S, BAILEY A, LEE J B. Women's Perceived Safety in Public Places and Public Transport: A Narrative Review of Contributing Factors and Measurement Methods[J]. *Cities*, 2025, 156: 105534.
- [17] CHEN C X, HOU Y Q, XIONG X R, et al. Assessing the Impact of Day and Night Urban Outdoor Environments on Women's Physiological and Psychological States Using Pedestrian-centric Street View Images[J]. *Social Science & Medicine*, 2025, 383: 118433.
- [18] HAGHAYEGH S, KHOSHNEVIS S, SMOLENSKY M H, et al. Performance Assessment of New-generation Fitbit Technology in Deriving Sleep Parameters and Stages[J]. *Chronobiology International*, 2020, 37(01): 47-59.
- [19] CHEN C X, FENG X Y, YAO J, et al. Perceived Leisure Service Benefits of Peri-urban Community Green Spaces: Impact of Visual Environment During Day and Night[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2025, 259: 105338.
- [20] CHO C H, YOON H K, KANG S G, et al. Impact of Exposure to Dim Light at Night on Sleep in Female and Comparison with Male Subjects[J]. *Psychiatry Investigation*, 2018, 15(05): 520-530.
- [21] 徐俊丽, 刘明智子, 高雨晴, 等. 要素与感知: 安全感及偏好评价下的大学校园夜间环境研究[J]. *南方建筑*, 2024(04): 81-88.
- [22] TAN X, XU K, CAO Y, et al. Night-time Scene Parsing with a Large Real Dataset[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2021, 30: 9085-9098.
- [23] XU S, WANG X, LV W, et al. PP-YOLOE: An evolved version of YOLO[J]. *arXiv Preprint*, 2022: arXiv: 2203.16250.
- [24] 王琳婷, 袁媛, 梁璐. 女性友好社区公共空间的场景感知与营造研究——基于性别视角的眼动实验[J]. *国际城市规划*, 2025, 40(02): 41-49.
- [25] 户钰洁, 吕飞, 魏晓芳, 等. 基于女性安全审计工具的住区公共空间安全感实证研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(06): 98-104.
- [26] REITER R J, ROSALES-CORRAL S, SHARMA R. Circadian Disruption, Melatonin Rhythm Perturbations and Their Contributions to Chaotic Physiology[J]. *Advances in medical sciences*, 2020, 65(02): 394-402.
- [27] YU C P, LEE H Y, LUO X Y. The Effect of Virtual Reality Forest and Urban Environments on Physiological and Psychological Responses[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35: 106-114.
- [28] KRANEBURG A, FRANKE S, METHLING R, et al. Effect of Color Temperature on Melatonin Production for Illumination of Working Environments[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 58: 446-453.
- [29] VITALE V, BONAIUTO M. The Role of Nature in Emotion Regulation Processes: An Evidence-based Rapid Review[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2024, 96: 102325.
- [30] VALENTINE G. Women's Fear and the Design of Public Space[J]. *Built Environment*, 1990, 16(04): 288-303.