

基于贝叶斯网络的宜跑城市绿道景观特征研究——以福州环南台岛为例

Research on Landscape Characteristics of Jogging-Supportive Greenway Based on Bayesian Network: The Case of Fuzhou Nantai Island

陈如琪 胡雯琦 刘雨晗 刘畅*

CHEN Ruqi, HU Wenqi, LIU Yuhan, LIU Chang*

基金项目: 福建省社会科学基金基础研究项目“基于计算机视觉的城市绿道宜跑品质评价方法研究”(编号: FJ2021C069)

摘要

为探明绿道景观的感知和物质特征对宜跑性的影响,以第一视角拍摄福州环南台岛绿道视频并截取 100 张图片样本,运用语义分割计算景观物质特征,使用主观问卷评价景观感知特征和总体宜跑性,构建“物质特征-感知特征-宜跑性”贝叶斯网络。结果表明:自然、安全、美感感知特征可直接正向解释绿道宜跑性,吸引感知特征通过影响美感间接影响宜跑性;过多的建筑有碍自然感知,过高的天空可视率会降低环境美感,过多的墙体和围栏有损环境的吸引力,从而降低宜跑性;植被与自然、安全、美感和吸引感知特征显著相关,还对宜跑性有直接解释作用。基于研究发现,绿道跑步环境设计应着重营造植物景观,提高植被覆盖率以提升自然性与美感,利用植物美化人工设施并适度遮挡建筑,同时通过植物围合安全空间,优化跑步体验。

Abstract

In order to explore the influence of greenway landscape features on runnability at the level of perception and material elements, this study captured first-person perspective videos of the greenway around Nantai Island in Fuzhou and intercepted 100 image samples. Semantic segmentation was employed to calculate the material features of the landscape, while a subjective questionnaire was utilized to evaluate perceptual features and overall runnability. A Bayesian network model integrating 'material features-perceptual features-runability' was subsequently constructed. The results showed that nature, safety, and aesthetics can directly and positively explain the runnability of greenways, whereas attraction indirectly influenced runnability by influencing aesthetics. At the level of material elements, excessive buildings negatively impacted naturalness perception, high sky visibility reduced environmental aesthetics, and redundant walls and fences diminished environmental attractiveness, which in turn reduces the runnability. Vegetation not only significantly explains the potency of nature, safety, aesthetics, and attraction, but also directly explains the runnability. Based on the research findings, the design of greenway running environment should focus on plantscape creation, improving the coverage to enhance naturalness and aesthetics, utilizing plants to beautify the artificial structures and moderately shade the buildings, and enclosing the safe spaces through plants to improve the running experience.

文章亮点

1) 结合语义分割与贝叶斯网络方法,从物质与感知层面剖析绿道景观对跑步适宜性的影响;2) 研究发现植被是关键物质特征,能显著正向解释自然、安全、美感感知特征和宜跑性;3) 研究为绿道景观设计提供科学依据,强调植物景观的多重作用。

关键词

城市绿道;慢跑;视觉感知;景观特征;语义分割;贝叶斯网络

Keywords

Urban greenway; Jogging; Visual perception; Landscape character; Semantic segmentation; Bayesian network

收稿日期: 2024-09-27

修回日期: 2024-12-07

跑步是一种技术门槛低^[1]、健康效益高^[2]、全民参与度高^[3-4]的体育锻炼项目。绿道是一种线性绿色开敞空间, 被许多国家和地区列为促进身体活动和主动交通的途径^[5], 为城市居民提供了户外跑步的理想场所^[3]。相关研究^[6-8]证实绿道的引入与周边居民身体活动量的增加和心理健康水平的提升有关。虽然已有众多研究关注绿道环境与步行^[9]、骑行^[6,10]活动的关系, 但绿道与跑步活动的关系尚未揭示, 如何设计绿道内部环境以更好地服务于跑者的科学依据尚不充分。

当前有关建成环境特征对跑步影响的研究偏宏观尺度, 因数据获取便利, 多数研究采用开源地理信息数据来刻画宏观环境特征, 并基于志愿者提供的地理信息分析跑步活动的强度^[11]。但人的行为受不同时空尺度特征的调节, 如跑步可行性主要受宏观尺度特征调节, 而跑步体验则受可感知到的具体环境即微观环境特征影响。将不同尺度的约束条件放在同一框架下统计时, 下一级的影响机制将被上一级掩盖^[12]。因此在探讨微观尺度问题时有必要进行尺度剥离。根据概率知觉论^[13], 环境的物质特征通过认知加工形成感知特征, 进而影响人的情感和行为反应。因此, 揭示微观环境特征对跑步的影响, 需要建立“物质-感知-反应”的层级结构。

相比于其他建成环境, 绿道有更高的潜力提供更安全、更连续、更自然和更有吸引力的跑步环境, 其宜跑性营造应受到更多关注。为揭示微观尺度上绿道景观特征对跑步的影响, 研究以福州环南台岛滨江休闲道为对象采集绿道图像, 采用语义分割技术识别并计算了不同景观在图像中的占比, 以此量化绿道的物质构成, 使用主观问卷评价景观感知特征和总体宜跑性, 运用高斯贝叶斯网络 (Gaussian Bayesian Network, GBN) 构建“物质特征-感知特征-宜跑性”的层级结构。研究聚焦绿道和微观尺度, 细化了宜跑建成环境研究的粒度, 对加大绿道在公共卫生领域的贡献、推动绿色基础设施高质量发展具有积极意义。

1 建成环境特征对宜跑性的影响

以“建成环境”和“跑步”为主题词, 检索于 2019 年 11 月至 2024 年 10 月发表在 Web of Science^① 和中国知网^② 中的核心期刊论文 448 篇。根据文献题目、摘要、正文, 筛选出 20 篇以“建成环境特征对跑步活动影响”为主题的文献 (中文 8 篇, 英文 12 篇), 并提取文献涉及的身体活动类型、宜跑性的测度和数据来源、环境类型、环境特征等信息 (表 1)^[12,14-32]。

1.1 宜跑性的测度

在宜跑性测度方面, 大部分研究使用客观方法监测路线的跑步流量, 如使用智能运动应用 (如 Strava、Keep) 用户志愿上传的地理信息^[13]、行为标注^[14]等; 少量研究以跑

步者对环境的主观评价来测度宜跑性, 例如使用公众参与地理信息系统^[20,22,27]、网络问卷^[17,31]、网络文本分析^[17]等方法收集跑者的环境反馈。

1.2 宏观环境特征的影响

宏观环境特征指在区域范围内以鸟瞰视角观测到的跑步路线和周边环境特征, 以及两者的关系, 通常以卫星遥感影像为基础。当前大部分研究使用地理信息数据定义环境宏观特征, 涉及空间拓扑结构^[14]、外部交通可达性^[17]、建筑密度^[18]、道路密度^[13]、土地利用混合度^[16]、归一化植被指数^[16]等方面, 这些特征通过影响环境的吸引力, 进而影响跑步流量与强度。

1.3 微观环境特征的影响

微观环境指人眼可感知到的跑步行为发生的具体环境。根据概率知觉论, 微观环境特征包含物质和感知 2 个层次。环境的物质特征是客观存在的, 由实体要素的配置和布局所决定, 可通过客观手段测量。当前研究大多数以街景图像为数据来源, 再利用语义分割等计算机视觉技术提取环境物质要素的比例, 如绿视率^[13]、路径尺度与材质^[14]、天空可视率^[15]等; 亦有少部分研究通过实地测绘计算道路宽度^[14]、坡度和材质^[31]等。感知特征是物质特征被认知加工的结果, 对跑步体验的形成有更直接影响。当前研究对感知特征的关注相当匮乏, 李敏稚等^[17]通过问卷收集了跑者对道路适宜性、环境宜人性、公共服务便利性、文化丰富性、安全性、舒适性、开放性的主观评价; Dong Lin 等^[24]使用计算机视觉代码直接输出了环境的安全、活力、美丽、无聊、压抑、富裕等感知特征效价。

总体来说, 当前宜跑建成环境研究总体粒度较粗, 缺乏对环境对象的细分, 通常基于智能运动应用中用户上传的轨迹数据, 计算路线跑步活动的客观水平。然而这些研究的环境特征偏宏观尺度, 缺少对微观尺度特征的独立研究, 对跑者主观评价的感知特征调查数据也不足。

2 研究方法

2.1 研究范围与样本

环南台岛滨江休闲道位于福州市仓山区, 总长 60 km。研究以其建设最成熟的芦花飞渡景观带 (橘园洲大桥-湾边大桥, 长 6.7 km, 以秋天芦苇 *Phragmites australis* 为主要特色景观)、艺术滨江景观带 (尤溪洲大桥-洪山大桥, 长 5.5 km, 内部有艺术雕塑)、金山古渡景观带 (三环快速路入口-橘园洲大桥, 长 5.2 km, 保留古渡口)、仓前烟树景观带 (鳌峰大桥-尤溪洲大桥, 长 5.4 km, 经过仓前历史风貌区) 4 个段落为取样范围 (图 1)。所有段落均铺设塑胶慢行道, 一侧面向滨江, 一侧面向城市道路。研究选择 2021 年 6 月一个晴朗、无风的早晨, 使用 GoPro 运动相机以第一视角拍摄绿道视频。随后, 使用 DVD

① 检索式: TS= (greenway OR park OR street OR road OR “built environment”) AND TS= (run* OR jog*) AND TS= (“physical activity” OR exercise OR sport)。

② 检索式: SU= “绿道” + “公园” + “街道” + “道路” + “建成环境” AND SU= “跑步” + “慢跑”。

表 1 宜跑环境研究信息提取结果
Tab.1 Jogging-supportive environment research information extraction

文献来源	活动	宜跑性		范围	环境特征	
		测度	数据来源		宏观尺度	微观尺度
Chen Junqi ^[14]	步行、跑步	行为密度与强度	行为注记	公园	空间拓扑、可达性	客观物质：路径宽度、路径长度－宽度比、路径类型、植被结构、植被覆盖率、水体接近度、设施、铺装类型、座位密度、天空视野比例、绿色视野比例、路灯密度、安全设施密度
Yang Wei ^[12]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	建筑密度、交叉口密度、道路密度、土地利用混合度、公园数量、跑道数量、水体数量、到地铁站 / 公交站 / 公园 / 跑道 / 水体的最近距离、归一化植被指数	客观物质：绿视率、天空视野指数、视觉机动车化指数、视觉人性化指数、辛普森多样性指数
Zhang Shuyang ^[15]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	步道连续性、功能混合度、功能密度	客观物质：蓝色空间、视觉渗透性、天空开放度、街道围合度
杨伟 ^[16]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	归一化植被指数、土地利用混合度、道路交叉口密度、兴趣点密度、公交站密度	客观物质：绿视率
李敏稚 ^[17]	跑步	环境偏好 / 轨迹特征 / 环境评价	问卷 / 志愿者地理信息 / 网络评论文本	建成环境	交通设施便利性、居住区可达性、跑步空间连通性、跑步空间可达性	主观感知：道路适宜性、环境宜人性、公共服务便利性、文化丰富性、安全性、舒适性、开放性
祝朝阳 ^[18]	跑步、散步、骑行	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	整合度、选择度、交叉口数量、红绿灯数量、地块建筑密度、地块容积率、水系和绿地等矢量数据	客观物质：绿视率、开敞度
崔喆 ^[19]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	不同路径类型比例、无跑步路径绿地占比、无跑步路径水系岸线缓冲区面积占比、绿地面积、水系岸线缓冲区面积、人均绿地面积、人均水系岸线缓冲区面积	—
黄邓楷 ^[20]	跑步	跑步频率	公众参与地理信息系统	街道	绿地空间密度、归一化植被指数、道路交叉口密度、公交站点密度、红绿灯密度、区域坡度、土地利用混合程度、亲水空间密度	客观物质：绿视率
许翔 ^[21]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	公园、户外体育场等	跑步路径长度、水面覆盖率、林木覆盖率和跑步线路形状指数	—
Huang Dengkai ^[22]	跑步	愉悦感	公众参与地理信息系统	建成环境	归一化植被指数、蓝色空间可用性、交叉口密度	客观物质：绿视率
Huang Dengkai ^[23]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	归一化植被指数、蓝色空间密度、城市密度、连通性、人口密度	客观物质：绿视率
Dong Lin ^[24]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	建筑密度、兴趣点密度、土地利用类型、树密度、开放空间面积、街道段长度、街道光照密度、街道坡度、交通信号密度、目的地可达性、交通节点密度	客观物质：建筑、天空、树木、道路、人行道；主观感知：安全、活力、美丽、无聊、压抑、富裕
Liu Yong ^[25]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	公园	公园面积、归一化植被指数、景观形状指数、步道密度、环路存在性、水体存在性、到中央商务区的距离、道路交叉口数量、公交站点数量、服务设施点兴趣密度	—

表 1 宜跑环境研究信息提取结果 (续)

Tab.1 Jogging-supportive environment research information extraction (Continued)

文献来源	活动	宜跑性		范围	环境特征	
		测度	数据来源		宏观尺度	微观尺度
Aateka Shashank ^[26]	跑步	自编可跑步指数	城市开放数据目录	建成环境	坡度、街道树木密度、交通基础设施、到交叉口距离、到公园距离、路灯密度、到主要道路和货运路线的距离	-
Huang Dengkai ^[27]	跑步	满意度	公众参与地理信息系统	建成环境	归一化植被指数、蓝色空间密度、交叉口密度、公共交通节点密度、交通灯密度、街道密度、地形坡度、土地利用混合度	客观物质: 绿视率
Yang Linchuan ^[28]	跑步、骑行	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	住宅建筑密度、容积率、土地利用混合度、水面积、河流长度、绿地面积、光照指数、道路密度、公交和地铁站点数量、体育场馆数量、企业数量、学校数量	-
Zhong Qikang ^[29]	跑步	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	居住用地密度、绿地密度、夜间光照、干道密度、次干道密度、支路密度、设施和兴趣点密度、地铁线密度、公交站密度、公交站距离、归一化植被指数、坡度密度	-
Luo Pinyang ^[30]	跑步、骑行	轨迹特征	志愿地理信息	建成环境	-	客观物质: 绿视率、天空可视指数、道路可视指数
王南 ^[31]	步行、慢跑	环境吸引力 / 活动水平	问卷 / 行为主机 (航拍)	公园步道	-	客观物质: 连续性 (无转折路段长度、无交叉路段长度)、缓弹度 (铺装缓冲力、铺装弹性指数)、平整度 (坡度)、美感度 (绿视率、水景面积)
高原 ^[32]	步行、跑步、骑行	轨迹特征	志愿地理信息	绿道	绿道密度、沿线绿化环境、绿道网络连通性、绿道等级、居住建筑密度、土地利用多样性、路网连通程度、公交站点密度、蓝绿资源富集程度	-

Videosoft Free Studio 软件, 基于时间帧的平均分布, 从每个景观带中截取 25 张静态画面图像, 共获得 100 张图像, 图片较好地反映了样本的景观特征。因各景观带的拍摄长度不同, 取样间距在 216 m~280 m。

2.2 问卷调查

研究使用网络问卷评估绿道感知特征与宜跑性。将 100 张图片随机分为 5 组, 每 20 张图片编入一个问卷, 即形成 5 个被评图片不同但题项相同的平行问卷。问卷设置 8 个题目, 包含 5 项感知特征评价、1 项总体宜跑性评价和 2 项人口学特征。

人口学特征包含年龄和性别 2 个题目。宜跑性在本研究中被解释为“环境适宜人们跑步的程度”, 答题者需要在 20 张图片中选择 5 张最符合题目要求的图片, 图片被选次数与有效问卷数量的比值作为宜跑性的评分。在感知特征方面, 综合分析表 1 中的环境特征, 可归纳出安全、连续、自然、吸引和美感 5 个感知维度。1) 安全: 户外体育锻炼者面临更高的安全风险。安全感与照明设施^[24,33]、交通管制设施的密度^[26]有关, 更高的土地利用混合度^[33]和环境密度^[23,34]

也代表环境中更多的自然监视。2) 连续: 跑步连续性与交叉口密度^[25]、距离路径^[31]有关。在足够长的时间内保持稳定的运动速度能确保良好的运动体验, 避免运动风险。3) 自然: 接触自然是户外体育锻炼的主要动机之一, 常用绿视率^[28]作为其量化指标。4) 吸引: 环境的吸引力是评价跑步环境的主要指标^[35], 也与恢复性感知息息相关^[36]。5) 美感: 美是形成愉悦环境体验的基本条件^[37], 也是宜跑性评价的控制性因素^[24]。答题者需要在 20 张图片中选择 5 张最符合感知特征定义的图片, 图片被选次数与有效问卷数量的比值计为感知特征的评分。

问卷通过微信平台转发, 发放时间为 2023 年 11 月—12 月, 共回收 427 份问卷。在删除有明显数据缺失的答卷后, 为使平行问卷的计算基数一致, 每个平行问卷保留 80 份有效问卷, 共计 400 份。有效问卷的答题者中男性 197 人, 女性 203 人, 平均年龄 47.78 (±8.16) 岁。

2.3 物质特征计算

研究使用以 Mobilenetv2 为主干特征提取网络的 PSPnet 模型^①进行语义分割, 并采用包含 8 个类别、

① 来自 <https://github.com/hszhao/PSPNet>。

34 个标签、5 000 张城市街道图片的 Cityscapes 数据集对模型进行训练，最后使用 pspnet 101 cityscapes. Caffemode^① 检验分割的精度。模型平均交并比 (mIoU)^② 为 79.70/96.38，像素级准确率 (pAcc)^③ 为 80.91/96.59，这说明模型精度较高。

2.4 数据分析方法

研究首先使用随机森林模型 (Random Forest) 评估物质特征对感知特征、宜跑性的重要性，筛选关键物质要素特征。再计算变量间的皮尔逊相关系数，初步构建贝叶斯网络。最后，使用高斯贝叶斯网络进行结构学习和参数学习，优化网络结构，确定影响参数，构建“物质特征-感知特征-宜跑性”层级模型 (图 2)。

3 结果

3.1 物质特征语义分割结果

研究共识别出 14 类景观物质要素，识别率为 99.87% (图

3)。由于环南台岛休闲道部分段落没有区分道路和人行道，研究将“人行道”与“道路”合并，命名为“道路”；为方便分析计算，将“骑行者”与“人”合并，命名“人”；将“绿化带”和“植被”合并，命名为“植被”。合并后共保留道路、建筑物、围栏、墙体、标志杆、植被、天空、人、摩托车、小汽车 10 类景观物质要素。

3.2 重要性评估

研究使用 randomForest 包建立 12 个变量的随机森林模型，评估各物质特征对感知特征和宜跑性的重要性。研究通过交叉验证法计算模型误差拐点对应的变量数来评估随机森林模型的精度，即使用 K-fold 法分别筛选不同的训练集和验证集进行训练，并与原模型进行交叉验证。结果显示，使用 4~6 个变量进行数据训练时，模型的整体误差不再显著变化，即 %IncMSE^④ 值不再显著变化，模型达到较好精度。因此，研究保留 IncNodePurity^⑤ 分析结果中排名前五的自变量。由于不同因变量 (自然、连续、安全、吸引、美感、

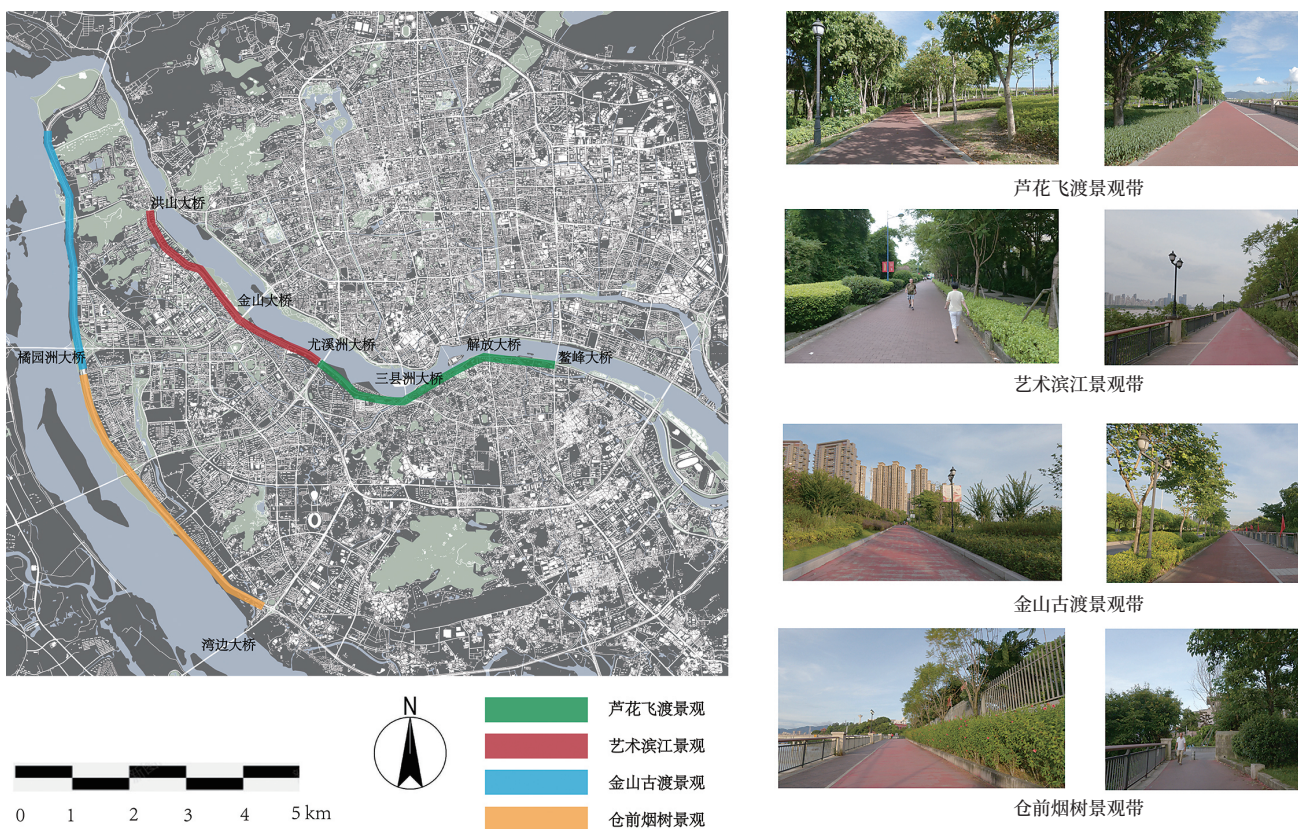


图 1 视频拍摄范围

Fig.1 Video sampling range

① 来自 <https://github.com/Vladkryvoruchko/PSPNet>。

② 平均交并比，是衡量语义分割精度的重要指标之一。交并比是预测结果与真实标签的交集与并集面积的比值，平均交并比则是所有类别交并比值的平均值。

③ 像素级准确率，是衡量语义分割精度的重要指标之一，指模型预测正确的像素点与总像素点的比值。

④ %IncMSE 是均方误差增加百分比，是随机森林算法中用于衡量变量重要性的指标。如果一个变量足够重要，那么当它的数值被随机置换后，模型的预测误差就会显著增加，即 %IncMSE 值会较大。

⑤ IncNodePurity 是随机森林模型中用于衡量变量重要性的指标。它表示在所有决策树中，使用某个变量进行分裂时，节点不纯度的减少量之和。具体来说，IncNodePurity 计算了每个变量对所有决策树节点不纯度的总贡献。

宜跑性)的前五位自变量不完全重叠,最终选取道路、建筑、围栏、墙体、植被、天空6个关键物质要素特征(图4)。

3.3 相关性分析

研究使用 pairs 函数绘制6个物质特征、5个感知特征和宜跑性的矩阵散点图(图5)。结果显示,除连续感知特征外,自然、安全、吸引、美感感知特征和宜跑性之间都有显著相关关系,相关系数在0.93~0.96。在物质特征与感知特征中,植被与除连续之外的其他4个感知特征具有显著相关性;天空与美感感知特征负相关;建筑物与5个感知特征为中等相关关系;围栏与美感、吸引感知特征呈中等相

关关系。在物质特征和宜跑性中,植被、天空与宜跑性具有显著相关性。

3.4 构建贝叶斯网络

3.4.1 连接变量

研究使用 bnlearn 及其扩展包构建贝叶斯网络结构,连接相关系数大于0.4的变量(相关性大于0.4视为中等相关)。在结构学习之前,需先在显著相关变量间搭建连接弧。Plot 函数绘图结果(图6)显示,初次构建的网络结构较复杂,连接弧过多,需要通过结构学习和参数学习进一步优化。

3.4.2 筛选连接弧

研究通过结构学习来筛选连接弧,简化模型结构。因为样本图片的总像

素大小一致,物质特征之间必然存在相关关系,但物质要素间的关系不是研究的重点,且会使模型结构变得复杂,故将物质要素间的连接弧列入“黑名单”。随后使用 bnlearn 函数包对初步构建的网络进行基于节点间依赖关系的结构学习,采用有放回的抽样方法对数据进行重采样,重新学习出多个贝叶斯网络,筛选其中出现频率较高的连接弧,最后形成共识网络。

在剔除与宜跑性无相关关系的道路、连续感知特征2个指标后,模型显示物质特征、感知特征以及宜跑性之间存在一个或多个相关关系(图7)。在感知特征中,自然、安全、美感均能显著解释绿道环境的宜跑性;吸引感知特征通过解释美感感知特征,间接解释宜跑性。在物质特征中,建筑可显著解释自然感知特征;墙体、围栏可显著解释吸引感知特征;植被与天空共同解释美感感知特征;植被能通过自然、安全、美感和吸引感知特征间接解释宜跑性。

3.4.3 确定节点回归方程

研究通过进一步的参数学习,将有父节点的变量(自然、安全、吸引、美感和宜跑性)作为因变量建立回归方程,以衡量其他变量对因变量的解释力。具体参数包括 R^2 、 P 值、 F 检验结果、回归截距,其中回归系数代表了自变量对因变量的重要性影响程

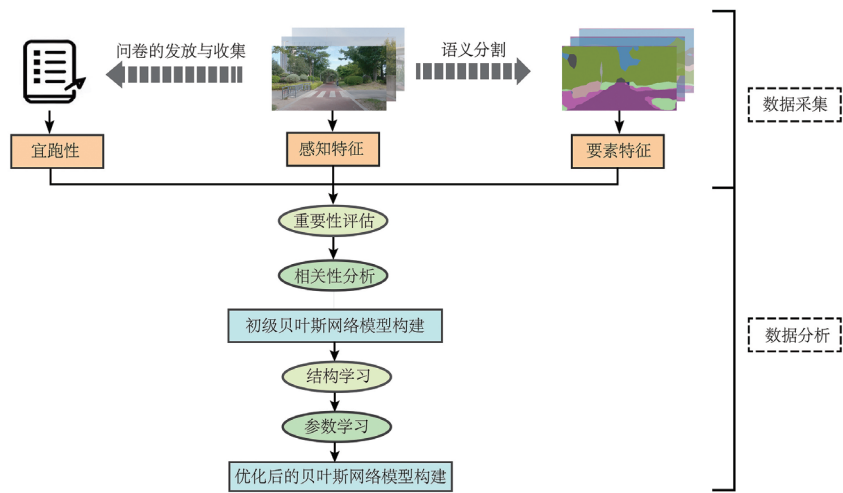


图2 技术路线

Fig.2 Technology roadmap

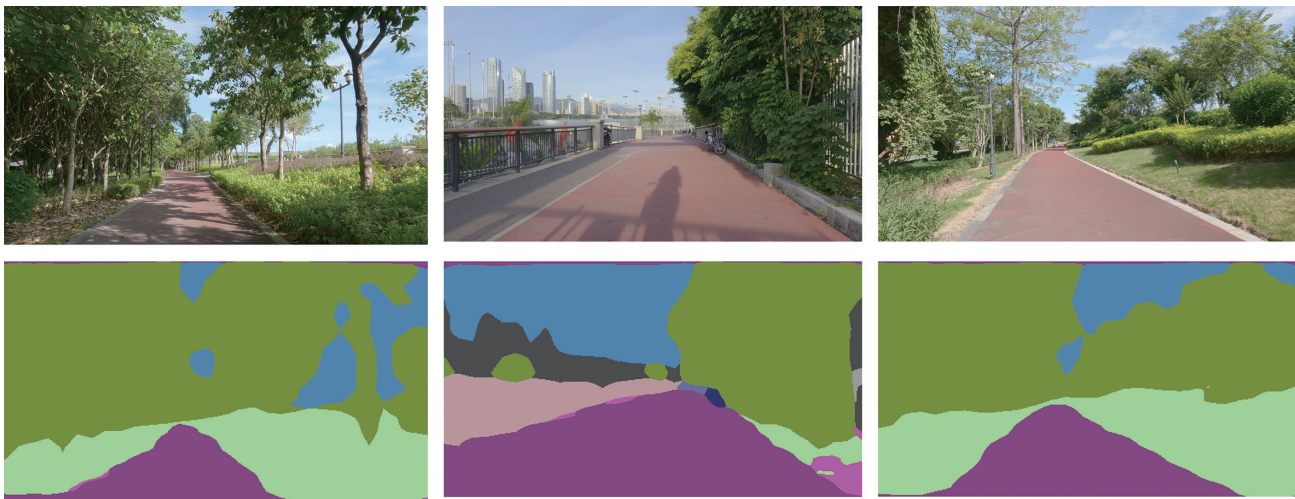


图3 语义分割输出结果示例

Fig.3 An example of the output result of semantic segmentation

度。Hist 函数^①结果显示 10 个变量（墙体、天空、植被、围栏、建筑物、自然、美感、吸引、安全、宜跑性）均呈离散型分布，因此建立高斯贝叶斯网络模型，并用最大似然估计方法拟合网络参数。参数学习结果显示，模型中的每个局部分布都是一个典型的线性回归，故研究使用 lm 函数构建宜跑性（Y）、感知特征（X）和物质特征（Z）的 5 个线性方程。

$$Y=0.119\ 14X_{\text{自然}}+0.304\ 54X_{\text{安全}}+0.369\ 89X_{\text{美感}}+0.146\ 29Z_{\text{植被}}+0.0016\ 61 \quad (1)$$

$$X_{\text{自然}}=0.601\ 33Z_{\text{植被}}-0.094\ 52Z_{\text{建筑物}}+0.033\ 66 \quad (2)$$

$$X_{\text{安全}}=1.008\ 234X_{\text{自然}}+0.009\ 364Z_{\text{植被}}-0.020\ 227 \quad (3)$$

$$X_{\text{美感}}=0.801\ 39X_{\text{吸引}}-0.094\ 52Z_{\text{植被}}-0.138\ 38Z_{\text{天空}}+0.039\ 97 \quad (4)$$

$$X_{\text{吸引}}=0.396\ 2Z_{\text{植被}}-1.046\ 1Z_{\text{墙体}}-1.236\ 0Z_{\text{围栏}}+0.161\ 9 \quad (5)$$

由宜跑性方程（1）可知感知特征中自然、美感、安全 3 个指标和物质特征中的植被均可正向解释宜跑性，但影响程度不高。由方程（2）可知自然感知特征能被植物正向解

释；而建筑负向解释自然感知特征，但影响程度较低。由方程（3）可知植被、自然感知特征都能正向解释安全感知特征，但自然的感知特征影响参数高，而植被的影响参数较低。由方程（4）可知美感感知特征被植被、天空负向解释，但影响参数较低；吸引感知特征能正向解释美感，且影响参数较高。由方程（5）可知墙体、围栏负向解释吸引感知特征，影响参数较高；植被能正向解释吸引感知特征，但影响程度较低。

5 个方程的 R^2 为 0.583~0.944， F 检验结果显示所有方程的 P 值均小于 0.001，整体拟合效果良好。研究使用 k-fold 交叉验证法衡量模型预测准确性，可知所有线性方程准确性均大于 0.85，总体准确性良好。

4 讨论

4.1 宜跑城市绿道景观特征

研究发现，除连续感知特征外，其余 4 个感知特征与宜跑性之间存在明显相关性。其中，自然、安全、美感感知特征直接作用于宜跑性，而吸引感知特征通过影响美感感知特征，间接对宜跑性产生影响。绿道宜跑性评价是多种感知特征共同作用的结果。

在自然感知方面，接触自然是选择绿色空间跑步的重要原因之一，相关理论认为自然暴露有助于缓解应激^[4]、恢复认知功能^[5]。在既往研究中，较高的归一化植被指数^[13]、绿视率^[22]、蓝色空间密度^[27]、公园密度^[13]等都被发现与区域内较高的跑步水平相关。在本研究中，一定范围内，更高的绿视率、更低的建筑占比与更高的自然感知相关。

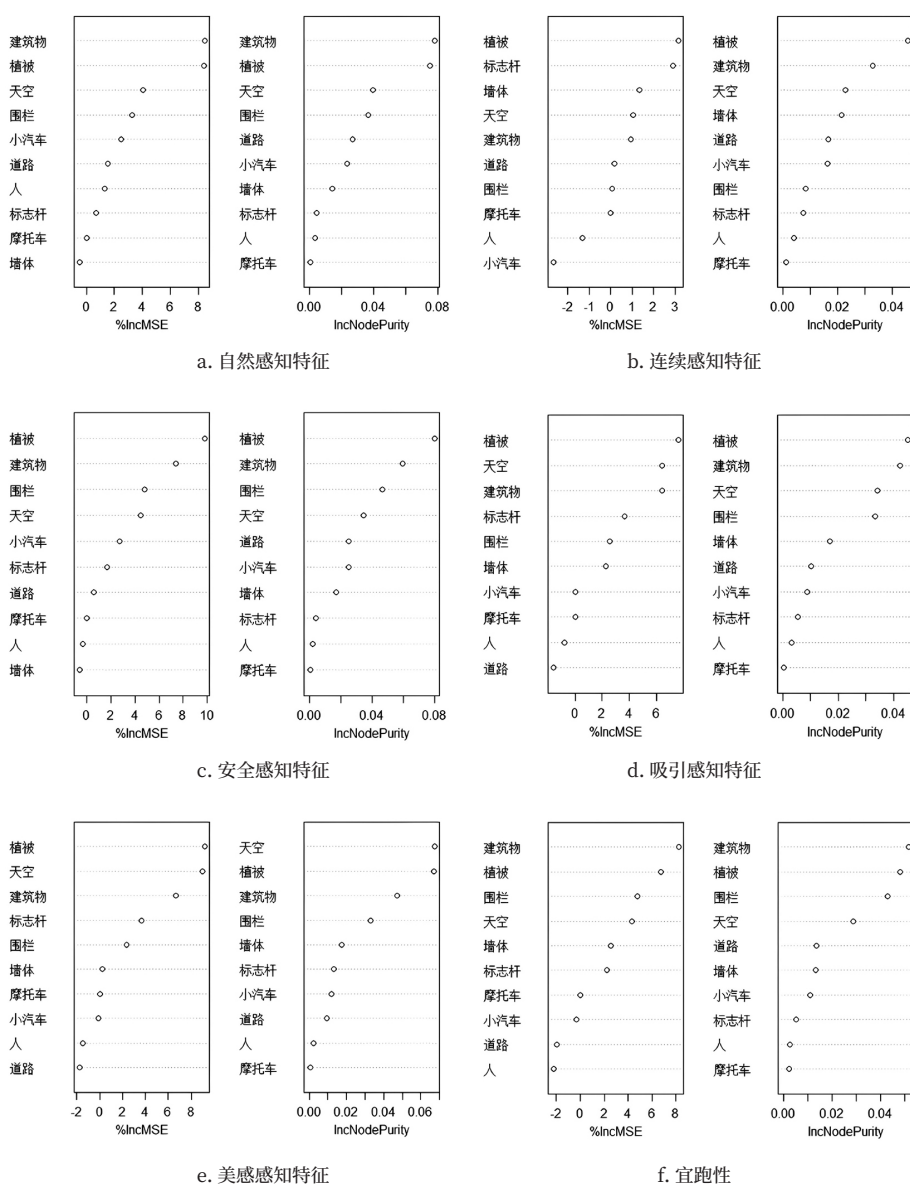


图 4 物质特征对感知特征和宜跑性的重要性评估结果

Fig.4 Assessment results of the importance of material characteristics for perceptual characteristics and runnability

① Hist函数会将变量的取值范围分成若干个区间（称为“箱”或“bin”），然后统计每个区间内数据点的数量，从而展示数据的频率分布。

例如，仓前烟树景观带的绿化程度高，植物配置方式较为丰富，内部少见高大建筑物，整体景观的自然性强；金山古渡景观带的建筑占比较高，沿线设有公交车站和过街天桥，部分路段景观处于交通高架桥下方，建筑物和植物频繁地交替出现，这在一定程度上降低了景观的自然性。

在安全感知方面，相比于室内锻炼者，户外锻炼者面临着更大的安全风险，例如交通冲撞、他人侵犯、动物伤害、意外跌落等。在既往研究中，安全感也被证实为影响跑步决策的重要因素^[6]，充足的照明^[13]和安全防护设施^[15]能保障安全感。立地环境较差和生长空间的缺失会导致植物偏斜、过度围合，可能提升人们对安全风险的感知^[38-39]。但缺少

围合可能导致人车混行，也会削弱安全感^[13]。本研究发现植被也与安全感存在关联，这可能是因为植物是绿道的主要造景元素，空间的围合主要依靠植物实现，适度增加植物有利于提高环境的围合程度，进而增强安全感。另外，建筑与安全感知之间存在中等程度的负相关性，这是因为当建筑与绿道之间的距离不足或缺少隔离措施时，建筑的可视范围越广，人们的安全感知反而会降低。随机森林重要性评估的结果显示，机动车和非机动车也会影响安全性。既往研究表明，视觉上过度接触外部建筑和交通会对跑步强度产生负面影响^[26]。4个样本景观带中，金山古渡景观带经过公交车站和过街天桥的部分没有绿化隔离，暴露于城市交通的风险感知

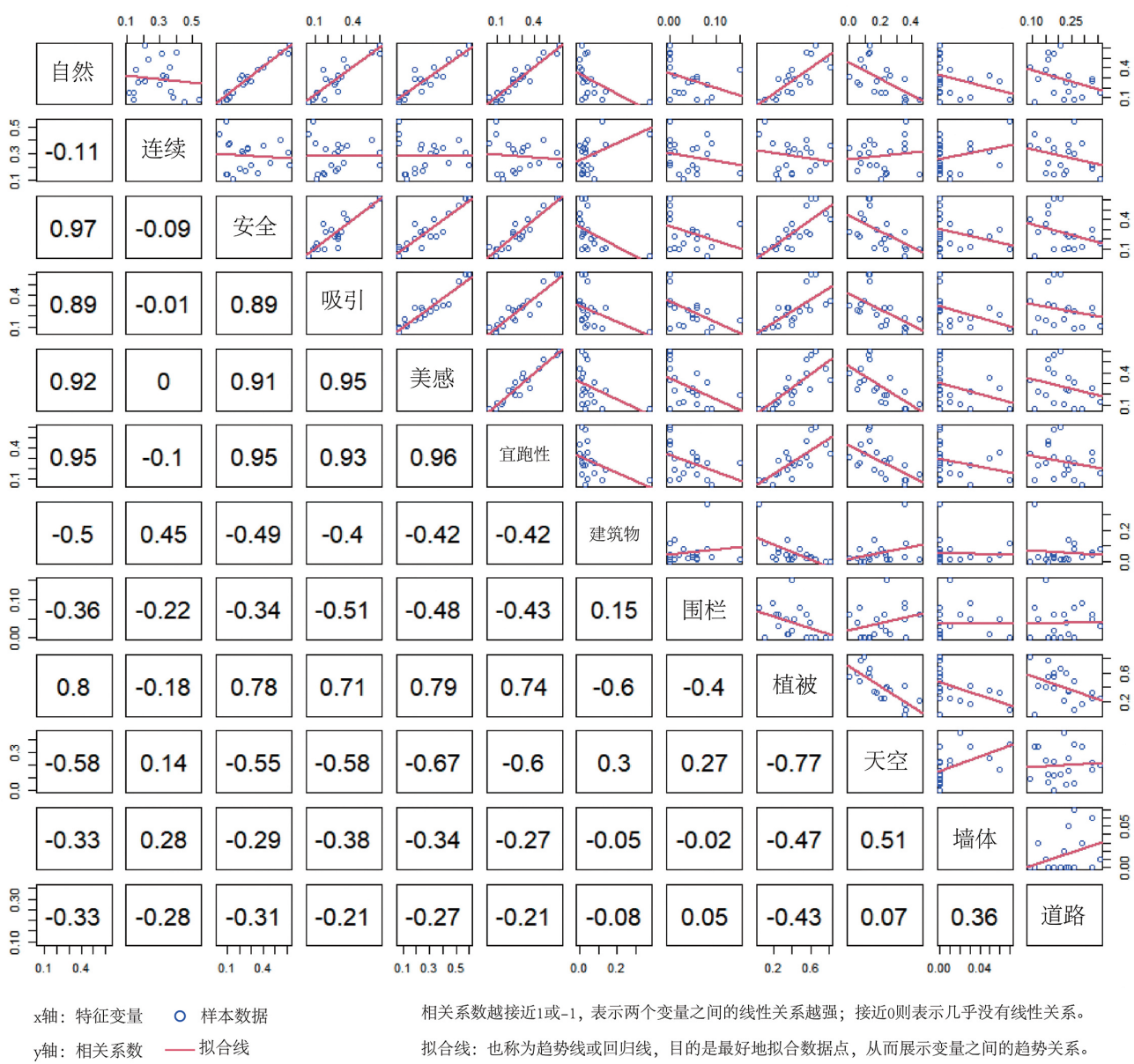


图 5 变量矩阵散点图
Fig.5 Variable matrix scatter plot

程度较高。艺术滨江、芦花飞渡、仓前烟树 3 个景观带与外界的道路环境有明显阻隔,植物已围合出相对独立的空间,增强了安全感。

在美感感知方面,过高的天空可视率会导致美感降低,既往研究也发现在天空可视率过高或过低的街道中跑步活动的强度都不高^[9]。研究发现,部分绿道经过高架桥或紧邻城市交通干道,无法种植高大树木,导致天空可视率较高。此外,部分绿道周边人口稀少、用地密度较低,天空可视率也较高,易形成荒凉、枯燥的景观感受。同时,由于缺乏视线隔离,构筑物、车辆的可视率较高,这降低了场景的整体美感。

在吸引感知方面,过多的墙体和围栏破坏了环境的整体性和自然美,并使人产生受限感。植物是吸引感知的正向解释因子,使用低矮灌木代替部分硬化围墙,有助于增强环境的吸引力。另外,提升人工围合设施本身的美学价值,如使用艺术浮雕和喷绘等,也能弱化围栏和围墙对环境吸引力的负面影响。金山古渡景观带的部分段落落在围栏和墙体前后种植植物,并使用藤本植物对围栏进行美化,增强了绿道的吸引力。在仓前烟树景观带中,部分段落通过设置围栏与外界分隔,并使用植物进行美化遮挡,降低了围栏对吸引力的负面影响。

尽管本研究没有在感知层面设立“围合感”,但贝叶斯网络学习结果显示,过高的天空可视率意味着场地过于空旷,或受到更多的阳光直晒;过多的围栏和围墙等设施又会使人感到局促、压抑。这说明跑者对环境围合度的感知存在上、下 2 层空间。另外,植被不仅能影响自然、安全、美感和吸引感知特征,还直接影响宜跑性,是最重要的景观物质要素。既往研究也强调应按一定尺度合理配置高、中、低层植物,注重水平空间的群落层次塑造^[40],并关注人眼高度上植被数量对环境跑步强度的正面意义^[41]。最后,相关研究表明

较少被交通路口中断的连续路径有更多的跑步活动^[31],但连续性的作用在本研究中未被充分证实,这可能是因为连续性是行进过程中随视点移动体验到的动态特征,而研究以静态图像为评价对象。

4.2 设计启示

基于研究成果,提出 5 项提升绿道跑步环境品质的策略。1) 重视植物景观的营造,提高景观自然性。提升植被覆盖率,尤其是人眼高度上的植被,以提高自然性、安全性和增强环境美感。同时使用植物对墙体、围栏进行美化,适度遮挡沿街建筑,以提高景观带的整体自然性。2) 丰富景观种植类型与形式,提高景观的变化性。采取分段式种植方法,增加花卉等植物的种类,以丰富绿道景观的色彩和层次,并赋予空间变化节奏,提升景观的韵律美,形成舒适的视觉节奏,适时给予跑者新的视觉刺激,从而增强其愉悦感和持续跑步的意愿。3) 加强软性围合。使用植物景观围合和隔离出安全空间,在休闲道与城市街道之间设置绿化带,形成有效的视觉和物理屏障,减少外部不利环境的视觉暴露,并阻止摩托车、电动车等进入绿道,避免跑者和其他交通行为之间的摩擦冲撞,同时减少噪声和空气污染,提升环境的吸引力,以优化跑步体验。4) 降低人工设施的视觉影响。减少不必要的建筑和硬质结构,如墙体和围栏,它们会降低环境的自然性和吸引力。如果必须使用围栏和墙体,需考虑使用植物进行美化,或采用艺术化设计以减少对环境美感的负面影响。高美学价值的植物景观与和谐的环境可吸引更多跑者前往绿道进行跑步活动,提升绿道的使用率和活跃度。5) 控制天空可视率,避免过高的天空可视率造成的场地空旷或太阳直晒。建议使用更多分支点高、冠幅大的植物,以创造遮荫和提供庇护;同时不压缩下层的实际行为空间,提高跑者在跑步空间的舒适度。

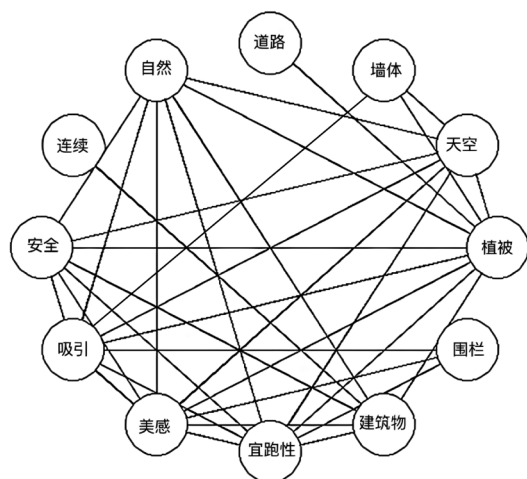


图 6 贝叶斯网络初次构建结果

Fig.6 The results of the initial construction of Bayesian networks

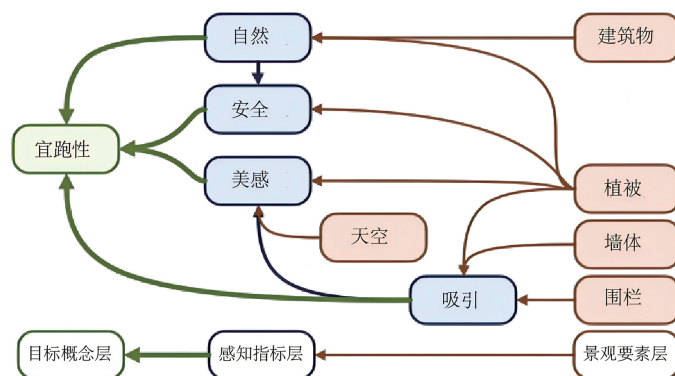


图 7 贝叶斯网络结构优化结果

Fig.7 Bayesian network structure optimization results

5 结语

从感知特征来看,在保障安全的前提下,较强的美学吸引力和较多的自然接触机会能有效激发人们在绿道参与跑步活动的意愿。在物质特征层面,合理配置植物景观可达到增强美学吸引力、提供自然接触机会和围合安全空间的多重作用;而过多的建筑、围墙、围栏等人工设施会破坏环境的整体美感,限制活动空间;同时过高的天空可视率会导致场地空旷或太阳直晒,不利于形成良好跑步体验。本研究为宜跑性绿道景观设计补充了更直接的证据,细化了建成环境的宜跑性研究的尺度,强化了绿道在促进身体活动和改善公共卫生方面的作用。

研究采用多维度评估方法,综合考量了物质特征与感知特征,构建了一个全面的“物质特征-感知特征-宜跑性”评估框架;利用语义分割技术对景观的物质特征进行客观分析,并通过问卷调查对景观的感知特征及宜跑性进行了主观评价。此外,研究引入了贝叶斯网络模型,它能够有效处理物质特征、感知特征与宜跑性之间的复杂依赖关系。本研究构建的模型不仅适用于本案例,还可扩展至其他城市绿道及类似城市空间的评估,具有较好的普适性和应用前景。

但研究仍存在局限性:1)研究以静态图片为评价对象,这可能是连续感知特征的影响未能被充分揭示的原因,后续研究宜采用动态视频作为研究对象。2)环南台岛休闲道是一项整体工程,虽然4个景观带各有特色,但整体的景观结构特征稳定,基本铺设了宽度相近的暗红色塑胶慢行道,且面向水系的一侧开敞,面向城市的一侧使用植物和围墙隔离。景观带的同质性导致研究中景观特征的多样性不足,后续研究宜扩大采样范围,例如增加山地型绿道、内河型绿道,提升样本的异质性。3)研究采用基于时间帧的平均截取法获取图片,在一定程度上增加了样本同质化的风险,后续研究可考虑人工筛选样本照片,提高照片间的差异性。4)研究采用的 Cityscapes 数据集不能标注水物质要素,后续研究需要寻找更适合的数据集训练模型,以识别更多的物质特征。

注:本文图表均为作者自摄自绘。

参考文献:

- [1]PEREIRA H V, PALMEIRA A L, ENCANTADO J, et al. Systematic Review of Psychological and Behavioral Correlates of Recreational Running[J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: 624783-624794.
- [2]MAO Y, HE Y, XIA T, et al. Examining the Dose-Response Relationship between Outdoor Jogging and Physical Health of Youths: A Long-Term Experimental Study in Campus Green Space[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19 (9) : 5648-5661.
- [3]MALCHROWICZ-MOŠKO E. Recreational Running Motivations among Breast Cancer Survivors[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19 (23) : 15500-15508.
- [4]PETERSON B, WITHERS B, HAWKE F, et al. Outcomes of participation in parkrun, and factors influencing why and how often individuals participate: A systematic review of quantitative studies[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2022, 40 (13) : 11-14.
- [5]DENG Y, LIANG J, CHEN Q. Greenway interventions effectively enhance physical activity levels-A systematic review with meta-analysis[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1268502-1268511.
- [6]ADLAKHA D, TULLY M A, MANSOUR P. Assessing the Impact of a New Urban Greenway Using Mobile, Wearable Technology-Elicited Walk- and Bike-Along Interviews[J]. *Sustainability*, 2022, 14 (3) : 1873-1890.
- [7]MCGAVOCK J, HOBIN E, PRIOR H J, et al. Multi-use physical activity trails in an urban setting and cardiovascular disease: a difference-in-differences analysis of a natural experiment in Winnipeg, Manitoba, Canada[J]. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2022, 19 (1) : 34-47.
- [8]HUNTER R F, ADLAKHA D, CARDWELL C, et al. Investigating the physical activity, health, wellbeing, social and environmental effects of a new urban greenway: a natural experiment (the PARC study)[J]. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2021, 18 (1) : 142-160.
- [9]谢波,王潇,伍蕾.基于自然实验的城市绿色空间对居民心理健康的影响研究——以武汉东湖绿道为例[J]. *地理科学进展*, 2021, 40 (7) : 1141-1153.
- [10]FRANK L D, HONG A, NGO V D. Build it and they will cycle: Causal evidence from the downtown Vancouver Comox Greenway[J]. *Transport Policy*, 2021, 105: 1-11.
- [11]黄邓楷,刘烨,周佩玲.自发地理信息支持下建成环境与移动型体力活动相关性荟萃分析[J]. *风景园林*, 2024, 31 (4) : 12-20.
- [12]YANG W, FEI J, LI Y, et al. Unraveling nonlinear and interaction effects of multilevel built environment features on outdoor jogging with explainable machine learning[J]. *Cities*, 2024, 147: 104813-104833.
- [13]琳达·斯特格,爱格尼斯·E·范登伯格,朱迪斯·I·M·迪格鲁特.环境心理学导论[M].高健,于亢亢,译.北京:中国环境出版社,2016: 1-253.
- [14]CHEN J, TAO Z, WU W, et al. Influence of Urban Park Pathway Features on the Density and Intensity of Walking and Running Activities: A Case Study of Shanghai City[J]. *Land*, 2024, 13 (2) : 1-24.
- [15]ZHANG S, LIU N, MA B, et al. The effects of street environment features on road running: An analysis using crowdsourced fitness tracker data and machine learning[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2024, 51 (2) : 529-545.
- [16]杨伟,胡洁,刘勇.众源地理信息支持下的建成环境与户外慢跑关联交互[J]. *风景园林*, 2024, 31 (4) : 44-52.
- [17]李敏稚,安振方,尉文婕.基于跑步者需求的广州中心区建成环境适跑性研究[J]. *现代城市研究*, 2023 (10) : 9-18.
- [18]祝朝阳,郑善文,甄冉,等.基于运动轨迹数据的健康街道环境优化研究——以北京核心区为例[J]. *规划师*, 2023, 39 (7) : 72-79.
- [19]崔喆,何莲娜,吴兰若,等.用脚投票:基于个体轨迹的北京市跑步空间绩效评估与诊断研究[J]. *规划师*, 2023, 39 (5) : 68-75.
- [20]黄邓楷,袁磊.跑步频率与街区环境特征关联研究——基于街景图片和公众参与地理信息系统视角[J]. *南方建筑*, 2023 (4) : 69-78.

- [21] 许翔, 黄鼎曦, 廖绮晶, 等. 基于多源数据的城市绿地开放空间体力活动与夏季热环境协同优化研究——以广州为例[J]. 城市发展研究, 2022, 29 (11) : 27-32, 41.
- [22] HUANG D, MARKETTA KYTTÄ, KAJOSAARI ANNA, et al. One approach does not fit all settings: Exploring the effects of natural and built environments on running pleasantness across places[J]. Building and Environment, 2023, 245: 110961-110978.
- [23] HUANG D, TIAN M, YUAN L. Sustainable design of running friendly streets: Environmental exposures predict runnability by Volunteered Geographic Information and multilevel model approaches[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 89: 104336-104344.
- [24] DONG L, JIANG H, LI W, et al. Assessing impacts of objective features and subjective perceptions of street environment on running amount: A case study of Boston[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 235: 104756-104791.
- [25] LIU Y, HU J, YANG W, et al. Effects of urban park environment on recreational jogging activity based on trajectory data: A case of Chongqing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 67: 127443-137453.
- [26] SHASHANK A, SCHUURMAN N, COPLEY R, et al. Creation of a rough runnability index using an affordance-based framework[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2022, 49 (1) : 321-334.
- [27] HUANG D, JIANG B, YUAN L. Analyzing the effects of nature exposure on perceived satisfaction with running routes: An activity path-based measure approach[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 68: 127480-127489.
- [28] YANG L, YU B, LIANG P, et al. Crowdsourced Data for Physical Activity-Built Environment Research: Applying Strava Data in Chengdu, China[J]. Frontiers in Public Health, 2022, 10: 883177-883189.
- [29] ZHONG Q, LI B, CHEN Y. How Do Different Urban Footpath Environments Affect the Jogging Preferences of Residents of Different Genders? Empirical Research Based on Trajectory Data[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (21) : 14372-14393.
- [30] LUO P, YU B, LI P, et al. Spatially varying impacts of the built environment on physical activity from a human-scale view: Using street view data[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1021081-1021099.
- [31] 王南, 魏维轩, 刘滨谊. 公园游步道设计提升健步功效的研究——以南京鱼嘴湿地公园游步道设计为例[J]. 中国园林, 2021, 37 (2) : 48-53.
- [32] 高原, 刘堃. 深圳市绿道对多样慢行活动的支持与规划策略[J]. 规划师, 2019, 35 (14) : 39-45.
- [33] SCHUURMAN N, ROSENKRANTZ L, LEAR S A. Environmental Preferences and Concerns of Recreational Road Runners[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18 (12) : 6268-6276.
- [34] YANG W, LI Y, LIU Y, et al. Environmental factors for outdoor jogging in Beijing: Insights from using explainable spatial machine learning and massive trajectory data[J]. Landscape and Urban Planning, 2024, 243: 104969-104984.
- [35] ETTEMA D. Runnable Cities: How Does the Running Environment Influence Perceived Attractiveness, Restorativeness, and Running Frequency?[J]. Environment and Behavior, 2016, 48 (9) : 1127-1147.
- [36] KAPLAN S. The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework[J]. Journal of Environmental Psychology, 1995, 15 (3) : 169-182.
- [37] DANIEL T C, BOSTER R S. Measuring Landscape Esthetics: The Scenic Beauty Estimation Method[J]. Fort Collins, Colo: Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1976: 1-66.
- [38] ALMEIDA D P, ALBERTO K C, MENDES L L. Neighborhood environment walkability scale: A scoping review[J]. Journal of Transport & Health, 2021, 23: 101261-101262.
- [39] 贾益兴, 雷杰, 黄颂谊. 广州市环市路行道树树木安全风险评估与管理探析[J]. 广东园林, 2021, 43 (4) : 93-96.
- [40] 马山水, 林世平, 杨超. 基于熵权 TOPSIS 法的丛植植物视觉观赏性量化研究[J]. 广东园林, 2021, 43 (3) : 55-60.
- [41] JIANG H, DONG L, QIU B. How Are Macro-Scale and Micro-Scale Built Environments Associated with Running Activity? The Application of Strava Data and Deep Learning in Inner London[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2022, 11 (10) : 504-533.

作者简介:

陈如琪 / 2001 年生 / 女 / 福建福安人 / 福建农林大学风景园林与艺术学院 (福州 350108) / 在读硕士研究生 / 专业方向为风景园林规划设计

胡雯琪 / 1998 年生 / 女 / 山西长治人 / 硕士 / 福建农林大学风景园林与艺术学院 (福州 350108) / 专业方向为风景园林规划设计

刘雨晗 / 2000 年生 / 女 / 内蒙古包头人 / 福建农林大学风景园林与艺术学院 (福州 350108) / 在读硕士研究生 / 专业方向为风景园林规划设计

刘畅 (* 通信作者) / 1990 年生 / 女 / 辽宁铁岭人 / 博士 / 福建农林大学风景园林与艺术学院 (福州 350108) / 副教授 / 研究方向为康养景观与绿色疗愈 / E-mail: 987040949@qq.com