

基于行为模拟的城市滨水全民健身公共空间品质测度 与优化预判——以上海市黄浦江为例

Quality Measurement and Optimization Prediction of Urban Waterfront National Fitness Public Space Based on Behavior Simulation——Taking Shanghai Huangpu River as an Example

摘要: 【目的】全民健身已上升为国家战略，滨水公共空间由于舒适的健身环境和随时随地免费健身的优势，可以成为全民健身新载体，但目前滨水健身资源尚未充分开发，需要建立品质测度和优化预判的系统策略。【方法】以上海市黄浦江9个典型滨水分段为测度样本，民生码头为优化样本，架构滨水健身品质测度指标体系，借助多代理行为模拟进行品质测度和优化预判。【结果】通过评测获知1) 烟囱广场Y1、Y2分段综合品质最佳；2) 康体环境支撑维度对品质贡献度最大；3) 人均开放型健身空间面积、健身设施利用率、临水人群线密度三个指标贡献度最大。采用正态分布法计算获得指标参考值。【应用】通过民生码头的现状品质测度和比较，获知问题维度、问题指标和问题要素，提出8种优化方案，模拟后再次评测，明显优于现状，并据此提供多向度方案推荐。【结论】品质测度指标体系的架构为滨水健身品质的现状和方案评价提供了量化测度依据；模型建构和优化预演方法的建立为滨水健身空间优化和未来预判提供了科学路径；9个分段的品质测度结果为黄浦江其他滨水分段的现状和优化后品质测度评级提供基准。

关键词: 滨水公共空间；全民健身；多代理行为模拟；测度指标体系

Abstract:

[Objective]: "National Fitness" is the national strategy, promoting the development of green and convenient "new fitness carrier". Waterfront public spaces can offer comfortable environments for exercise, providing the free, anytime, anywhere fitness opportunities. Therefore, they have the potential to serve as the excellent "new fitness carrier". However, the fitness resources available in many waterfronts have not been fully exploited. Based on the multi-agent behavior simulation technology and waterfront fitness quality assessment system, this study conducts a quality measurement of nine typical waterfront public spaces along the Huangpu River and further optimizing of the Minsheng Wharf area, aiming to provide a systematic method for quality assessment and optimization forecasting. Two key aspects are highlighted, one is the simulation of waterfront fitness behavior, including model selection, operating mechanisms, and fitting methods, the other is the measurement indicators related to blue-green fitness, which are derived from

measurement of blue-green exercise space, blue-green exercise behavior, and public services for fitness.

[Methods]: The first is the development of an indicator system. Based on existing literatures, waterfront fitness indicators are categorized into three areas: fitness venues, facilities, and environment. Reorganized from the perspective of fitness needs, these became three measurement dimensions: venue characteristics, facility service levels, and environmental support for physical well-being. To address fitness demands and waterfront space issues, eight primary indicators were identified, including accessibility, openness, diversity, completeness, adaptability, efficiency, water proximity, and comfort. Additionally, 21 secondary indicators were selected based on waterfront space characteristics, fitness behavior, and simulation outputs. Their calculation formulas and weights were determined using expert questionnaires and the analytic hierarchy process. The second is the simulation. On-site surveys collected spatial and pedestrian activity data, while eye-tracking and perceived restoration data were obtained through recovery experiments. The initial and corrected recovery weights for different age groups and exercise types were calculated, forming the operational mechanism of the simulation model. The agent-based and social force models were then developed. After qualitative and quantitative adjustments, the model was validated, and the final results were produced through data analysis and indicator output.

[Results]: The comprehensive quality assessment indicated that Y1 and Y2 ranked in the top tier, with X1, X2, and C2 following in the second tier. The alignment between the dimension-specific and overall measurement results showed that the environmental support for physical well-being was greater than characteristics of fitness venues, which were approximately equal to the service levels of facilities. The highest-performing individual indicators included the average open hours of fitness spaces, proximity to sanitary facilities, shoreline openness, and perceived restoration. Among three measurement dimensions, the most significant contributing indicators were the per capita open fitness space area, fitness facility utilization rate and density of people near the water. Based on the quality measurements of the nine sections, reference values for the 21 secondary indicators were derived using the normal distribution method, serving as a benchmark for the quality assessment of other waterfront fitness spaces.

[Application]: These reference values were then applied to the quality assessment and optimization forecast for Minsheng Wharf. Initially, the current quality was measured, showing that its overall quality was only superior to Y2 among nine sections. The primary issues were found in the service levels of facilities and environmental support for physical well-being. It identified specific problematic indicators within each dimension and analyzed the related issues. Following this, eight optimization elements and 19 detailed improving points were proposed. Simulations were run for different detailed levels of individual elements, and the optimization plans were streamlined.

Finally, taking into account crowd flow and pre-established conditions, various optimization scenarios were rehearsed and compared, resulting in the identification of optimal and suboptimal plans under all conditions. The results demonstrated that the comprehensive quality scores of all eight optimization plans were significantly higher than the current condition.

[Conclusion]: The quality assessment system for public fitness spaces in urban waterfronts should be based on fitness demands, taking into account the characteristics of waterfront environments and outputs from behavior simulations. This research integrates spatial, behavioral, and psychological dimensions, combining static and dynamic indicators. Three key measurement dimensions were identified: characteristics of fitness venues, service levels of facilities, and environmental support for physical well-being, along with eight primary and 21 secondary indicators. Formulas, weights, and reference values were established to provide a quantitative basis for evaluating both the current status and potential optimization of waterfront fitness spaces. Improvement requires identifying problematic dimensions, indicators, and elements, as well as making accurate forecasts for future usage of optimized plans. Leveraging full-time dynamic simulation, multi-plan comparison, and virtual scenario rehearsals, this study developed methods for fitness preference analysis, model construction, and simulation fitting. The optimization forecast process involved assessing current quality, simulating single-element optimizations, simplifying plans, and generating multidimensional recommendations. These methods were applied to assess the quality of nine typical waterfront sections along the Huangpu River, producing results that serve as benchmarks for other areas.

Keywords: waterfront public space; national fitness; multi-agent behavior simulation; measurement index system

全民健身已上升为国家战略，并提出打造绿色便捷的全民健身新载体，拓展河湖沿岸等全民健身新空间^[1]。另一方面，后疫情时代居民对健康和健身的需求更加迫切^[2]，并倾向于户外健身，从传统的室内场馆拓展至室外蓝绿生态空间。城市滨水公共空间恰好契合全民健身的国家政策和个体需求，能够提供舒适的健身环境，促进更高的体力活动水平^[3]，具备随时随地免费健身的优势，可以成为良好的全民健身新载体。然而，滨水公共空间健身设施配置模式单一，常为局限在沿河的步行和跑步道，缺乏适合不同人群、容纳多种运动、覆盖整个滨水空间的运动系统；由于受到水务部门的管制，水上运动更为匮乏。因此，滨水公共空间作为健身载体的资源优势未被充分开发。

健身品质测度是滨水健身载体质量检测的依据。现有研究常以“全民健身公共服务”作为评价对象，国内研究多归属于体育学，且以主观评价指标为主，包括设施质量、活动组织、健身指导、志愿服务、信息服务等，缺乏系统客观的评价标准^[4]。针对滨水全民健身

新载体，需要建立科学量化的品质测度指标体系，可以从三个方面对已有指标进行梳理。蓝绿运动空间测度指标方面，可归纳为康体要素、健身要素、辅助要素三个测度层次。康体要素由水体、岸线、绿化等自然景观要素和微气候、声环境等物理环境要素组成，从人群亲水、岸线开敞、景观丰富、视觉吸引、环境舒适等方面测度^[5-7]；健身要素由健身场地、路径和设施组成，从空间适宜、路径通畅、需求适配等方面测度^[8-9]；辅助要素由服务和交通设施组成，从服务完善、交通可达等方面测度^[10-11]。蓝绿运动行为测度指标方面，国内研究局限于散步、骑行、跑步等常见运动，而国外研究运动类型更加多元，并对运动者的行为、生理和心理特征进行测度。行为特征包括运动水平、人群分布、设施使用指标，通过问卷调查、实地调研、仪器设备等测量^[12-14]；生理特征包括运动消耗和身体机能指标，通过仪器设备测量^[15-16]；心理特征包含认同态度和情绪状态指标，通过主观评价量表、生理传感器等测量^[17-19]。全民健身公共服务测度指标方面，国外研究注重学科交叉，包括管理、公共卫生、生态环境等。根据是否影响微观健身空间与健身行为以及是否可以被量化，提炼出包括健身人群、场地设施、赛事活动、环境资源、管理维护等在内的测度视角，以及参与广泛、类型多样、交通可达、需求适配、供给高效、服务完善、环境舒适、对外开放等指标^[20-22]。

满足多样健身需求是滨水健身载体提升的方向。多代理行为模拟可以通过全时动态仿真、多方案比较和虚拟情境预演呈现场地现状或未来“空间-行为”的互动关系。如果能够从健身需求出发，探寻滨水空间与健身行为之间的互动机制，在此基础上建立空间与行为交互的仿真模型，就可能为健身行为的仿真呈现和滨水载体的品质评价提供支持，从而更加精细地探寻滨水载体是否契合不同人群的健身需求。包括三个关键环节。首先，模型选择是基础。滨水空间中的健身活动是一个自组织过程，行为既受外在要素的吸引或排斥，表现出规则性；又遵循个体的自主选择，表现出随机性。社会力模型是依循一定运行规则的最佳动力学模型^[23]，智能体模型以数据驱动捕捉智能体的个性^[24]，两者结合可以兼顾滨水健身活动的规则性和随机性。其次，运行机制是核心。滨水随机行为背后隐含了空间要素与使用者行为之间长期稳定的规律性关系，表现为人群对空间要素的偏好。对不同年龄人群、不同运动类型进行偏好分析，可以作为模型运行机制。这种稳定的偏好规律也可以支持模型优化后对未来使用状况的模拟和预判^[25]。再次，拟合方法是关键。已有研究常采用定性拟合，直观对比实测与模拟图形，模型可靠性不足。近年来量化拟合逐渐受到重视，但多关注整体空间，缺乏针对局部空间的拟合^[26]，致使节点部分拟合度较差。也有研究关注重要滨水空间要素，将其周边分布人数的实测与模拟数据进行数理分析，提高了模型可信度^[27]。

多代理行为模拟的输出结果可作为行人特征识别依据和空间使用效率评价依据^[28]，结合品质测度指标体系的架构，可以更加量化、精准地评价场地现状或优化方案未来使用状况^[29]。基于此，研究将行为仿真模拟与指标体系架构相结合，对黄浦江沿岸典型滨水公共空间东昌绿地、烟囱广场、徐汇滨江、船厂滨江的9个分段进行品质测度，并对民生码头

进行优化和测度结果比较，提供品质测度和优化预判的方法（图1）。首先，融合跨学科的测度方法和指标，构建滨水公共空间品质测度指标体系；然后，结合健身行为偏好构建多代理行为模拟模型，运行拟合并输出测度结果；其次，分析综合与分项品质的测度结果，计算指标参考值；最后，进行优化预判应用，依次进行单类要素优化模拟、组合方案精简比选，最终提出多向度的优选方案推荐（图2）。

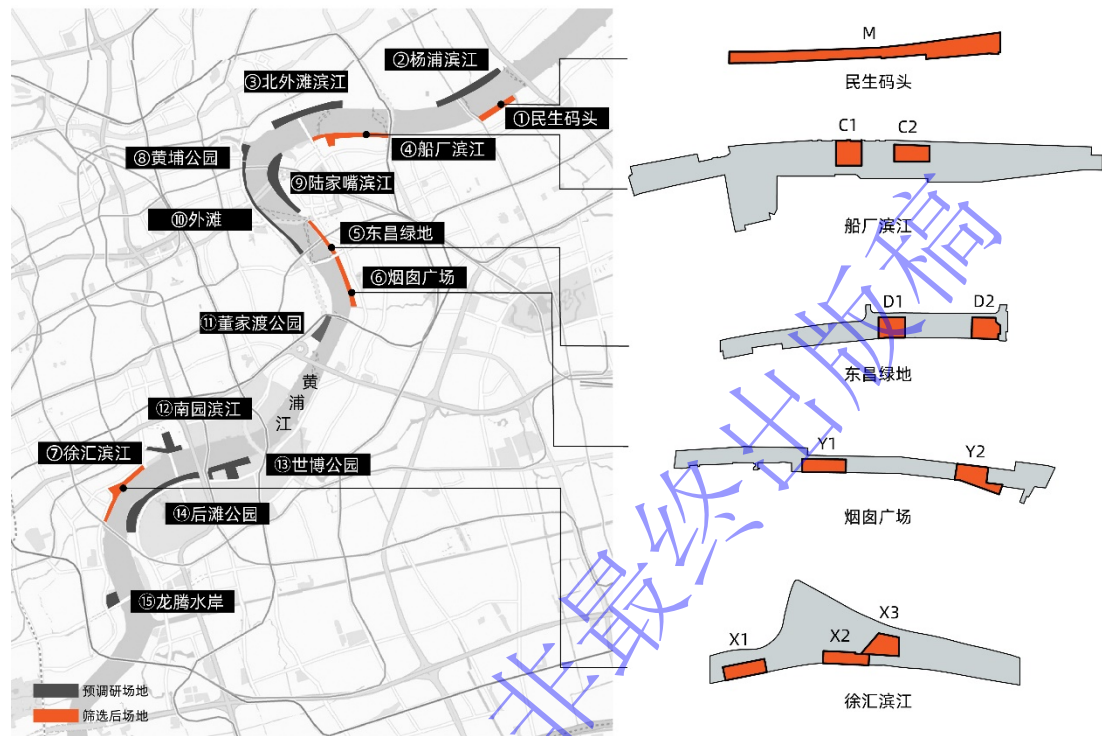


图1 研究样本

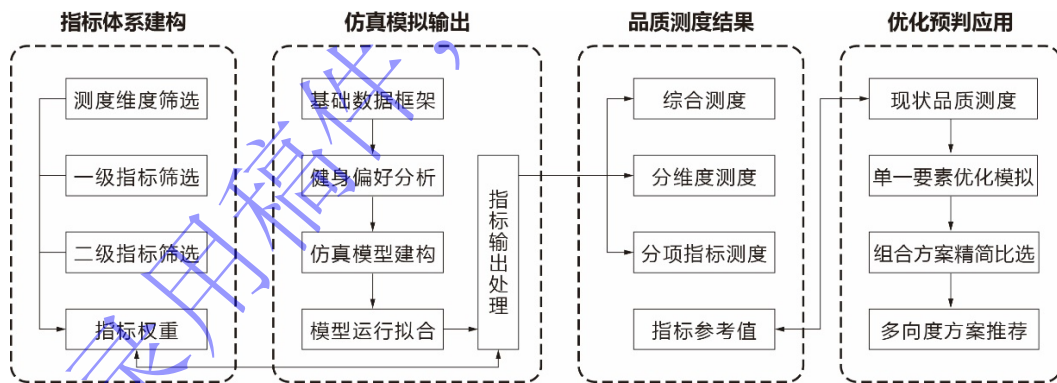


图2 研究框架

1 研究方法

1.1 指标体系架构

1.1.1 测度维度筛选

从健身人群需求出发，可以将上述蓝绿运动空间和行为、全民健身公共服务的相关指标归纳为滨水健身场地、设施和环境3类指标。滨水健身场地的交通越可达、路径越通畅、空间越适宜、对外越开放、类型越多样，越容易吸引健身人群；滨水健身设施与需求越适

配、服务越完善，越能增进设施使用率、供给越高效、参与越广泛；滨水健身环境景观越丰富、岸线越开敞、环境越舒适，越能吸引视觉、引导人群亲水、提升情绪状态。由此，归纳出健身场地特征、设施服务水平、康体环境支撑三个测度维度。

1.1.2 一级指标筛选

一级指标的筛选一方面要体现滨水空间特征和全民健身需求，如滨水空间亲水性特征明显，健身行为对环境舒适性、需求适配性、服务完善性、场地开放性和可达性有一定的要求；另一方面，要结合滨水健身空间现状问题，如目前缺乏适合各年龄段人群、容纳多样活动的健身空间，也因设施配置不充足和布局不合理而影响空间使用效率和健身体验。由此在三个测度维度下，梳理出通达、开放、多样、完善、适配、高效、亲水、舒适 8 个一级指标。

1.1.3 二级指标筛选

从已有研究成果归纳出一级指标包含的二级指标，然后依据滨水公共空间特征、滨水健身现状问题、全民健身行为需求，并结合仿真模型输出特征筛选出 21 个二级指标。例如，“通达”主要包含外部可达视角和内部通畅视角，因此分别提炼为外部区域可达性和内部路径通畅性指标，同时结合滨水多层基面需要转换衔接的特点，增加基面衔接便捷性指标；“亲水”涉及总体和沿岸亲水程度，提炼出与水体的距离和岸线开敞度 2 个总体亲水指标、临水人群占比和临水人群线密度 2 个沿岸亲水指标。

1.1.4 指标计算与权重

结合面积、长度、宽度等场地特征和人群数量、步行速度、访问次数等行为特征，定义指标的计算公式。最终形成的城市滨水全民健身公共空间品质测度指标体系采用了空间、行为、心理的多方位测度视角；通过调研、实验、模型等多种手段获取数据；融合了静态和动态指标；并分为正向、逆向、适中型 3 类指标倾向，正向与逆向型指标对滨水健身空间品质分别具有正、负向影响，适中型指标对品质影响视具体情况而定。

邀请 22 名建筑、规划、景观领域专业人员，对同一层次测度维度和指标的重要性进行两两比较，采用层次分析法获取测度维度和指标权重，即指标在同一级所有指标中的重要程度占比。结果显示：3 个测度维度的权重值相近，构成了三个覆盖全面又相对独立的评价视角；8 个一级指标中权重值最高的是舒适（0.23）；3 个测度维度下权重值最高的二级指标分别是外部区域可达性（0.06）、健身设施利用率（0.07）、感知恢复性（0.11）（表 1）。指标权重用于对模型输出的指标原始值进行加权处理以获得最终的指标测度结果。

表 1 城市滨水全民健身公共空间品质测度指标体系（健身场地特征维度）

测度维度	一级指标	二级指标	计算公式	测度视角	指标获取	指标状态	倾向性
健身场地特征 (0.31300)	通达 (0.12535)	外部区域可达性● (0.05919)	$A = \frac{L_0}{L} = \frac{t_0 * v}{L}$	行为	模型输出	动态	↓
		内部路径通畅性● (0.03604)	$P = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_t} * P_i$	行为	模型输出	动态	—

		基面衔接便捷性★ (0.03012)	$C = \frac{L_c}{L} = \frac{t_c *}{L}$	行为	模型输出	动态	↓
开放 (0.11097)		健身空间平均开放时长■ (0.04723)	$T = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_i} * T_i$	空间	模型输出	静态	↑
		人均开放型健身空间面积■ (0.06374)	$0 = \sum_{i=1}^n \frac{S_i * C_i}{N}$	空间	模型输出	动态	—
多样 (0.07668)		健身类型丰富性■ (0.04659)	$H_1 = - \sum_{i=1}^{\beta} \frac{n_i}{(\sum_{i=1}^{\beta} n_i)}$	行为	模型输出	动态	↑
		参与人群多样性■ (0.03009)	$H_2 = - \sum_{i=1}^{\beta} \frac{N_i}{(\sum_{i=1}^{\beta} N_i)}$	行为	模型输出	动态	↑

注：1. ■继承型；●改进型；★新增型；↑正向型；↓逆向型；—适中型。

2. S 面积，L 长，d 宽，N、M 人群数量，K 设施数量，v 步行速度，n 访问次数，T、t 时间，x、y 坐标

1.2 行为仿真模拟

1.2.1 基础数据采集

数据采集在 2023 年 4 至 8 月的休息日开展。一是选取运动最多的 15:00-17:00 进行场地调研，通过现场勘察记录空间要素的位置、尺寸、开放时间等数据，通过行人计数法记录出入口人流量、行人分布等活动数据，为仿真环境建构和模型运行拟合提供基础。二是选取气温适宜的 6:00-10:00 和 16:00-18:00，招募被试进行恢复效益实验，4 个场地有老年、中年、青少年各 10 名被试，每名被试按照规划路径与范围进行通过型运动（散步、跑步、骑行）和驻留型运动（做操），利用眼动追踪技术采集被试的眼动数据，包括要素注视时长、注视次数、注视顺序等，并让被试在运动后恢复阶段填写感知恢复性量表，为智能体建构和要素恢复权重设定提供基础。

1.2.2 健身偏好分析

健身者一般倾向于在对运动恢复有益的空间中运动，因此健身偏好用空间要素恢复权重来表达，即要素对健身运动恢复的影响程度，并作为仿真模型的运行机制。要素恢复权重是要素与健身者之间长期稳定的规律性关系，因此也可以用于对要素改进后形成的优化方案的模拟，辅助对优化方案的预判。要素恢复权重分初始值和修正值两部分，首先，通过被试的感知恢复性量表计算要素的初始恢复权重，然后，对不同年龄人群在不同健身类型下生理恢复与空间要素注视时长进行相关性分析，获得影响程度特征值 F，以 F 作为修正系数对初始恢复权重进行修正。如水体对老年人的初始恢复权重为 0.23，在散步行为方式下修正系数为 0.08，修正恢复权重即为 0.31。由此得到各类要素对不同年龄人群、不同运动类型的修正恢复权重（表 2）。

表 2 空间要素的修正恢复权重（以蓝绿要素和中年人为例）

中年	通过型运动					驻留型运动				
	散步	跑步	骑行	轮滑	滑板	广场舞	太极	球类运动	特色活动	器械运动
水体	0.25	0.23	0.29	0.25	0.25	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
天空	0.10	0.06	0.05	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

草地	0.25	0.21	0.17	0.25	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
花池	0.22	0.21	0.35	0.23	0.23	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
树阵	0.21	0.22	0.23	0.21	0.21	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26

1.2.3 仿真模型建构

AnyLogic 软件具有支持多方法组合建模的优势，因此作为社会力和智能体组合模型建构的平台。首先，建构仿真环境。将空间要素归为蓝色、绿色、运动、服务和外部要素，利用 AnyLogic 平台的行人库绘制环境底图，根据场地调研数据把要素转化为可编译的空间变量，设定服务范围、最大承载能力、吸引停留时长等参数。其次，建构行人智能体，将粒子分为老年、中年和青少年，运动类型归为通过型、驻留型和非运动型，根据恢复效益实验数据，在智能体库中设定不同粒子的视野感知半径、视角、运动速度、停留时间等。最后，建立“空间-行为”运行机制，即赋予要素恢复权重。由此，架构智能体和社会力组合模型。

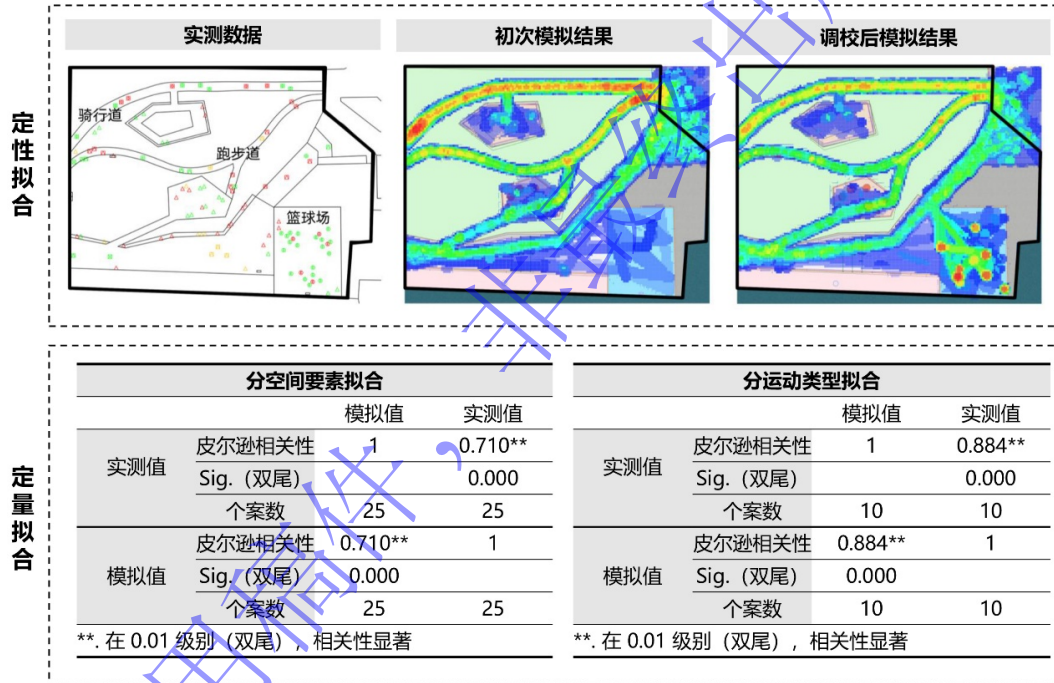


图 3 仿真模型拟合——以东昌绿地 D2 分段为例

1.2.4 模型运行拟合

运行模型并进行定性和定量拟合直至模型有效。以东昌绿地 D2 分段为例，定性拟合以人群密度、行为分布、行为轨迹等比较实测和模拟图示，发现有明显差异，通过适当降低骑行道出入口的每分钟发射粒子数 (7.4→4.0)，在行为活动链中增加适用于球类运动的组队活动模式，再次运行后两者较为接近。定量拟合从不同空间要素周围分布人数和不同运动类型分布人数方面对实测与模拟数据进行 SPSS 相关性分析，初次结果并不显著，发现座椅和售卖机周围模拟粒子数明显少于实测值，通过适当增加座椅 (0.12→0.23) 和售卖机 (0.01→0.10) 的权重，再次运行模型，皮尔逊系数均大于 0.600，显著性水平均小于 0.010，证明模拟结果贴合实测结果 (图 3)。其余分段模型均按照上述方法拟合。

1.3 基于行为模拟的指标测度

1.3.1 借助仿真模型输出测度原始值

根据指标计算公式，在 AnyLogic 平台上完成指标的参数定义、变量定义、指标计算，通过模型运行后输出指标数据。另有小部分指标数据通过场地调研和恢复效益实验获得。汇总获得测度数据原始值。

1.3.2 归一化和加权获得最终测度结果

对原始值依次进行归一化和加权处理。归一化处理将原始数据通过线性变换的方式映射到[0,1]区间，并按照 0-100 赋分，将正向与适中型指标进行正向化处理、逆向型指标进行逆向化处理，前者让数据越大越好而后者越小越好，由此去除不同数据量纲和数量级的影响，便于比较测度结果。在此基础上，进行数据加权处理，计算单个指标数据与相应指标权重的乘积之和，获得各指标的最终测度结果（表 3）。

表 3 船厂滨江 C2 分段健身场地特征维度指标处理

二级指标	原始值	处理值	权重值	结果值		结果值
外部区域可达性	1.18	100.0	0.05919	通达	11.7	健身 场地 特征 27.3
内部路径通畅性	56.85	90.0	0.03604			
基面衔接便捷性	1.684	81.3	0.03012			
健身空间平均开放时长	24.0	100.0	0.04723	开放	11.0	
人均开放型健身空间面积	34.216	98.5	0.06374			
健身类型丰富性	0.794	35.3	0.04659	多样	4.6	
参与人群多样性	2.382	100.0	0.03009			
测度数据原始值		归一化处理		加权化处理		

1.3.3 现状场地品质测度和优化方案品质预判

首先，基于上述指标输出和处理方法，从综合、分维度、分项指标对现状场地进行品质测度。然后，筛选出具有问题的维度、指标、要素，对问题要素改进，形成优化方案。接着，基于稳定的健身偏好规律，保持要素恢复权重基本不变，开展优化方案的模拟和测度。最后，比较优化方案与现状场地、多个优化方案之间的品质测度结果，提供未来不同场地前置条件下的方案推荐。

2 品质测度结果

2.1 综合与分维度测度

根据测度总分将样本划分为优（>60 分）、良（50-60 分）、中（<50 分）三个等级。第一梯队包括烟囱广场 Y1 和 Y2 分段，各维度品质均较好；第二梯队包括徐汇滨江 X1、X2 和船厂滨江 C2 分段，部分维度可继续提升；第三梯队包括东昌绿地 D1 和 D2、徐汇滨江 X3、船厂滨江 C1 分段，在多个维度和其他样本有差距。

对比综合与分维度测度结果排序，识别出综合测度结果排序与康体环境支撑维度的排序整体一致，与健身场地特征维度、设施服务水平维度的排序差异较大，一定程度上表明分维度贡献度为：康体环境支撑维度>健身场地特征维度~设施服务水平维度。

2.2 分项指标测度

根据指标数值划分为优 (>70 分)、良 (40-70 分)、中 (<40 分) 三个等级 (表 4)。表现优异的指标是健身空间平均开放时长、卫生设施距离、岸线开敞度、感知恢复性，它们在各分段水平均较高，样本间差异较小。三个维度中贡献度最大的为人均开放型健身空间面积、健身设施利用率和临水人群线密度，是最需关注的指标。

结合场地调研对指标具体分析。以“亲水”一级指标为例，表征总体亲水程度的与水体距离指标越高并不意味着表征沿岸亲水程度的临水人群占比和临水人群线密度指标一定更高，因为运动要素布局也会对沿岸亲水程度有影响。如东昌绿地 D1、D2 分段与水距离相近，但 D2 临水人群占比和线密度远高于 D1，主要是因为 D2 分段篮球场临水而建，运动人群多。

表 4 各样本健身场地特征维度分项指标测度结果

二级指标	权重值	加权后数值								
		D1	D2	X1	X2	X3	C1	C2	Y1	Y2
外部区域可达性	0.05919	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	5.9	5.9	3.1	3.1
内部路径通畅性	0.03604	1.1	1.5	0.8	1.7	2.1	2.7	3.2	0.0	3.6
基面衔接便捷性	0.03012	0.0	1.7	1.5	0.7	3.0	1.2	2.4	1.4	1.0
健身空间平均开放时长	0.04723	0.0	0.7	4.7	1.3	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
人均开放型健身空间面积	0.06374	1.2	3.5	6.3	0.0	5.1	0.0	6.3	0.4	6.4
健身类型丰富性	0.04659	4.7	4.4	3.6	3.1	4.6	3.2	1.6	0.0	4.0
参与人群多样性	0.03009	0.0	3.0	1.5	1.3	0.5	0.7	3.0	1.1	2.6

注：深灰为优，中灰为良，浅灰为中

2.3 指标参考值计算

通过 9 个分段测度结果计算二级指标的参考值。以绿视绿为例，第一步，检验正态分布，绿视率的直方图呈钟形曲线，数据点在 Q-Q 图上近似一条直线，且由于样本数量 $N < 5000$ ，采用夏皮洛-威尔克检验法得出显著性 $P = 0.069 > 0.05$ ，说明符合正态分布。第二步，根据正态分布法计算参考值， \bar{X} 为所有分段的某个指标平均值， S 为标准差，当置信区间为 95% 时，单侧与双侧参考值上下限分别为 $\bar{X} \pm 1.64S$ ， $\bar{X} \pm 1.96S$ 。绿视率的 $\bar{X} = 32.25\%$ ， $S = 3.38\%$ ，由 95% 置信区间上下限得出参考值为 25.31%~39.20%。计算所有指标参考值，为其他滨水健身空间提供品质测度的参考依据。

3 优化预判应用

结合指标参考值，对民生码头进行品质测度，获知问题维度、问题指标和问题要素，提供优化方向，再利用行为模拟预判未来空间使用状况的优势，开展多个优化方案模拟和品质测度预判，比选后提供多向度的优选方案推荐。

3.1 现状品质测度

综合品质测度方面，在 9 个分段中民生码头仅优于 Y2，评级为“中”。从动态模拟结果来看，虽然能够提供基本健身场所，但是粒子分布不均、沿岸和尽端空间活力不足，这与场地出入口数量少、滨水公共建筑不常开放有关。

分项品质测度方面，健身场地特征维度表现较好，评级为“优”。其中，通达为“中”，开放和多样为“优”。评分较低的问题指标是外部区域可达性、基面衔接便捷性、健身类型丰富性，相应问题要素包括外部要素，运动要素中骑行道、跑步道、滨水漫步道，服务要素中公共建筑。设施服务水平维度表现最差，评级为“中”，属于问题维度。其中，完善和高效评级为“中”，适配为“良”。问题指标是零售设施配备率、健身设施平均访问次数、健身设施利用率，相应问题要素包括外部要素，运动要素中骑行道、跑步道等，服务要素中售卖机。康体环境支撑维度表现较差，评级为“中”，属于问题维度。其中，亲水和舒适评级为“中”。问题指标是临水人群占比、临水人群线密度、绿视率、感知恢复性，相应问题要素包括蓝色要素中水体岸线，绿色要素中树池、草地（表 5）。

表 5 民生码头健身场地特征维度品质测度

测度维度	评分 (排序)	一级指标	评分 (排序)	二级指标	测度结果	对比参考值	评分 (排序)
健身场地特征维度	21.0(3)	通达	4.6(5)	外部区域可达性	1.32	—	1.0(5)
				内部路径通畅性	49.07	↑	3.6(2)
				基面衔接便捷性	4.816	↓	0.0(10)
		开放	10.2(4)	健身空间平均开放时长	24.00	—	4.7(1)
				人均开放型健身空间面积	32.692	↑	5.5(4)
		多样	6.2(3)	健身类型丰富性	1.124	—	3.4(6)
				参与人群多样性	2.366	—	2.8(3)

注：深灰为优，中灰为良，浅灰为中。—表示在参考值范围内，↑ 优于参考值，↓ 劣于参考值

3.2 单一要素优化模拟

根据上述问题维度、指标、要素，针对 5 类空间要素提出 8 种优化方案，包含 19 个细分水平（图 4）。先对单个要素的不同细分水平开展优化模拟，其他要素的参数设定保持不变，从而排除其他要素干扰，更精准地对比同一要素不同方案的优化效果。



图 4 要素优化方案

结果显示,大部分要素优化后品质评分得到提升,如新增草地、树池、零售设施,增加骑行跑步道与滨水漫步道的不同基面衔接。但是,综合品质并不随细分水平中数量增加而持续提升,如分别增加1处、2处、3处、4处运动设施后,评分依次为48.0、50.6、49.2、50.1,增加2处或4处运动设施更优(图5)。这印证了行为模拟技术的优势,当主观判断无法抉择时,可以借助仿真模拟获取的量化测度结果辅助方案比选。

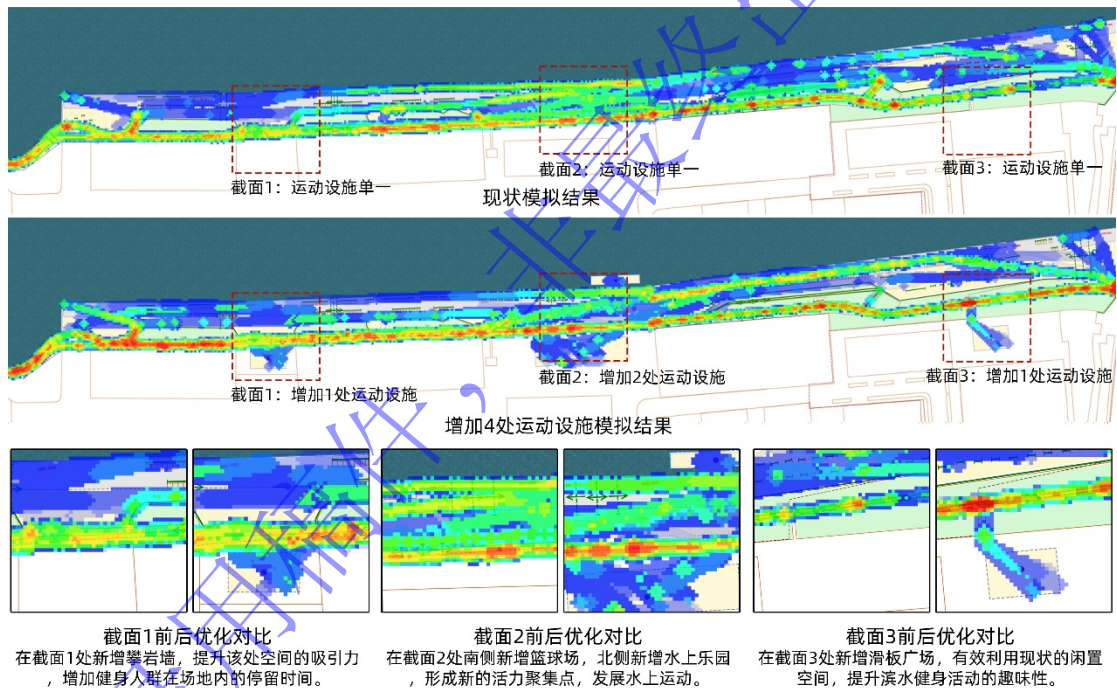


图 5 运动设施优化模拟结果

3.3 组合方案精简

5类要素下19个细分水平的优化方案正交后可以获得 $3 \times 2 \times 2 \times 1 \times 2 \times 4 \times 3 \times 2 = 576$ 种组合方案,数量众多;而由于要素对方案的贡献可能相互抵消或增进,简单地把模拟效果最优的各个要素细分水平相组合不一定获得最优结果,所以需要对方数量进行精简:由于增加的零售设施和运动设施位置相互匹配,因此F和G合并为4处;保留每个要素评分最高的细分水平,因此A、B、C、D、E细分水平分别采用新增3个出入口、凸岸线、新增2处草地树池、扩大草地树池、增加2处基面衔接的方案;要素细分水平如果评分近似则都保

留，因此 F/G、H 分别保留 4 种和 2 种细分水平。由此，正交获得 8 种组合方案并建立模型。

同时，设定模拟人流量和前置条件。为了应对未来不同的人群使用状况，设定 3 种人流量，低人流量与现状场地相同，高人流量依据黄浦江滨水人流量较多的徐汇滨江设定，中人流量为两者中值；同时，基于未来建设情况，预估 3 种场地前置条件，包括无法开放水上乐园、无法开放沿线公共建筑底层功能、无法增加骑行跑步道与滨水漫步道间的基面衔接。

3.4 多向度方案推荐

依据上述条件设定，模拟运行 8 种组合方案并进行品质测度，综合定性比较和定量评分预判最优组合方案。先将评分最高、次高的列为最优、次优组合方案，再借助模拟图和指标参考值检验优化效果，如低人流量条件下，品质最优组合方案为 F2G2H1（54.6 分，增加 2 处运动和零售设施+ 1 处公共建筑底层功能），次优组合方案为 F3G3H1（53.7 分，增加 3 处运动和零售设施+ 1 处公共建筑底层功能）。动态模拟图显示，两个方案的粒子分布都较均匀，新增运动设施周围活力明显提升。进一步的，借助指标参考值和评级检验提升效果，如方案 F2G2H1 的外部区域可达性（1.0→4.5）、基面衔接便捷性（0.0→1.4）、健身类型丰富性（3.4→4.7）、零售设施配备率（0.4→0.7）、绿视率（1.0→2.2）等问题指标评分均得到明显提升。

由此，预判所有前置条件下的最优和次优组合方案（表 6）。总体来看，8 个组合方案的综合品质均高于现状的 46.5 分；除无法增加基面衔接外，其余前置条件下所有方案均高于 50.0 分，表明优化方向和改进策略正确。由此形成的多向度推荐方案既精准预判了优化后使用状况，也为决策提供了更全面的参考。

表 6 最优和次优组合方案推荐

场地人流条件	F1G1H1	F1G1H2	F2G2H1	F2G2H2	F3G3H1	F3G3H2	F4G3H1	F4G3H2
低人流量	50.8	52.1	54.6	53.5	53.7	53.3	53.3	53.4
中人流量	50.4	50.9	53.5	54.6	52.9	53.4	54.0	53.8
高人流量	51.3	51.2	51.8	51.4	54.8	53.0	50.6	54.5
场地前置条件	F1G1H1	F1G1H2	F2G2H1	F2G2H2	F3G3H1	F3G3H2		
无法开放水上乐园	50.9	51.6	53.5	53.2	54.0	53.2		
场地前置条件	F1G1		F2G2		F3G3		F4G3	
无法开放公共建筑	52.3		53.3		52.7		53.5	
场地前置条件	F1G1H1	F1G1H2	F2G2H1	F2G2H2	F3G3H1	F3G3H2	F4G3H1	F4G3H2
无法增加基面衔接	48.7	48.2	49.6	49.5	51.9	51.5	51.8	51.2

注：中灰和浅灰分别为最优与次优组合方案

4 结论

研究结合指标体系架构和行为模拟技术,为城市滨水全民健身公共空间的品质测度提供量化依据;也为优化方案的未来空间使用状况提供精准预判。结论包括:(1)城市滨水全民健身公共空间品质测度指标体系需要从健身需求出发,依据滨水环境特征和行为模拟输出特征来架构,融合空间、行为、心理等多种测度视角,兼具静态和动态指标,研究筛选出健身场地特征、设施服务水平、康体环境支撑3个全面又相对独立的测度维度,以及通达、开放、多样、完善、适配、高效、亲水、舒适8个一级指标和21个二级指标,建立了指标计算公式、权重和参考值,为滨水健身品质的现状和方案评价提供了量化测度依据;(2)城市滨水全民健身公共空间品质提升需要精细地找到问题维度、问题指标和问题要素,并对优化方案未来使用状况有精准的预判,研究借助行为模拟在全时动态仿真、多方案比较和虚拟情境预演方面的优势,建立了健身偏好分析、仿真模型建构、模型运行拟合的模型建构方法,以及现状品质测度、单一要素优化模拟、组合方案精简、多向度方案推荐的优化预演方法,为滨水健身空间优化和未来预判提供了科学路径;(3)研究用上述方法对黄浦江沿岸9个典型滨水分段进行品质测度,获得了各分段指标的品质测度结果,可以为黄浦江其他滨水分段的现状和优化后品质测度评级提供基准。

参考文献

- [1] 中办国办印发《关于构建更高水平的全民健身公共服务体系的意见》[N]. 人民日报,2022-03-24(001).
Opinions on Building a Higher Level Public Service System for National Fitness Issued by the General Office of the Communist Party of China and the State Council [N]. People's Daily,2022-03-24(001). (该英文标题由作者自行翻译)
- [2] 国家国民体质监测中心.2020 年全国全民健身活动状况调查公报[R].北京:国家体育总局.2022. National National Physical Fitness Monitoring Center. 2020 National Fitness Activity Survey Bulletin [R]. Beijing: General Administration of Sport of China.2022. (该英文标题由作者自行翻译)
- [3] Georgiou Michail et al. Mechanisms of Impact of Blue Spaces on Human Health: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(5) : 2486-2496.
- [4] 樊炳有,潘辰鸥,高静. 新时代我国公共体育服务供给治理转型研究[J].体育科学,2021(2): 23-38.
Fan Bingyou, Pan Chenou, Gao Jing. Research on the Governance Transformation of Public Sports Service Supply Mode in the New Era[J]. China Sport Science,2021(2): 23-38.
- [5] Marcel C ,A M B ,Arjan T V , et al.The relation between proximity to and characteristics of

green spaces to physical activity and health: A multi-dimensional sensitivity analysis in four European cities.[J].Environmental research,2023,241117605-117605.

[6] Queiroz D A ,Inês P ,Carla M , et al.Green and blue spaces and lung function in the Generation XXI cohort: a life course approach.[J].The European respiratory journal,2022,60(6):

[7] Yan Z ,Liuqi Y ,Jianing Y , et al.Do seasons matter? Exploring the dynamic link between blue-green space and mental restoration[J].Urban Forestry Urban Greening,2022,73.

[8] 袁敬诚,董潇迪,曲天媛.健康导向的城市滨水空间研究进展与展望[J].规划师,2021,37(15):51-60.

[Yuan Jingcheng, Dong Xiaodi, Qu Tianyuan. Health Oriented Waterfront Space Research Progress and Prospects\[J\]. Planners,2021,37\(15\):51-60.](#)

[9] Mason E K ,Pearce N ,Cummins S .Do neighbourhood characteristics act together to influence BMI? A cross-sectional study of urban parks and takeaway/fast-food stores as modifiers of the effect of physical activity facilities[J]. Social Science Medicine,2020,261113242-113242.

[10] Zeinab A .Physical, mental, and physiological health benefits of green and blue outdoor spaces among elderly people.[J].International journal of environmental health research,2019,31(6):1-12.

[11] Dengkai H ,Marketta K ,Anna K , 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.

[12] Migle B ,Rasa J ,Viren S .Nature Exposure and Positive Body Image: A Cross-Sectional Study Examining the Mediating Roles of Physical Activity, Autonomous Motivation, Connectedness to Nature, and Perceived Restorativeness[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(22):12246-12246.

[13] Ketsunghan. Effects of three levels of green exercise, physical and social environments, personality traits, physical activity, and engagement with nature on emotions and attention[J].Sustainability, 2021, 13(5):2686.

[14] Tao Z ,Guo J ,Chen J , et al.Exploring the Relationship between Urban Park Greenery at Different Levels and Physical Activity: A Study Using the Hierarchical Linear Model[J].Land,2023,12(9):.

[15] Melo J ,Ribeiro I A ,Aznar S , et al.Urban Green Spaces, Greenness Exposure and Species Richness in Residential Environments and Relations with Physical Activity and BMI in Portuguese Adolescents[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(12): 6588-6588.

[16] Cristina Vert et al. Health Benefits of Physical Activity Related to an Urban Riverside Regeneration[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 462- 462.

[17] Cristina Vert et al. Physical and mental health effects of repeated short walks in a blue space environment: A randomised crossover study[J]. *Environmental Research*, 2020, 188(prepublish) : 109812.

[18] Abhery D ,Samantha G .Green exercise, mental health symptoms, and state lockdown policies: A longitudinal study[J].*Journal of Environmental Psychology*,2022,82101848-101848.

[19] Brito D N J ,Pope C Z ,Mitchell R N , et al.Changes in Psychological and Cognitive Outcomes after Green versus Suburban Walking: A Pilot Crossover Study[J].*International Journal of Environmental Research and Public Health*,2019,16(16):2894-2894.

[20] Olga P ,Girish R .Perceived service quality among regular users of gyms in public sports centres in the UK[J].*Managing Sport and Leisure*,2023,28(1):35-54.

[21] 章世梁.基于服务质量的宁波市全民健身基本公共服务质量评价体系构建与研究[J].*广州体育学院学报*,2021,41(02):32-36.

Zhang Shiliang. Construction of Evaluation System of Ningbo National Fitness Basic Public Service Quality Based on Service Quality[J]. *Journal of Guangzhou Sport University*,2021,41(02):32-36.

[22] 湛冰,李炳照,于文岩等.中国“居民健身指数”指标体系的构建研究[J].*首都体育学院学报*, 2022,34(03):283-293.

Zhan Bing, Li Bingzhao, Yu Wenyan, Zhou Zhixiong. Research on the Construction of Resident Fitness Index System in China[J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*,2022,34(03):283-293.

[23] DIAS C, NISHIUCHI H, HYOUUDO S, et al. Simulating Interactions Between Pedestrians, Segway Riders and Cyclists in Shared Spaces Using Social Force Model[J]. *International Symposium of Transport Simulation*, 2018, 34: 91-98.

[24] KEVIN M, MATTHIAS B, FELIX K, et al. Nearby Outdoor Recreation Modelling: An Agent-Based Approach[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019(40): 286-298.

[25] 詹鸣. 基于游憩机会谱的城市滨水区公共空间游憩行为模拟模型建构[D]. 同济大学硕士学位论文, 2022.

Zhan Ming. Construction of Urban Waterfront Public Space Recreational Behavior Simulation Model Based on Recreation Opportunity Spectrum——Taking Huangpu River in Shanghai as an Example[D]. *Tongji University*, 2022.

[26] 王硕. 基于 GIS 的景区游人游憩模型及可视化系统[D]. 北京建筑大学硕士学位论文, 2018.

Wang Shuo. Tourist Area Recreation Model and Visualization System Based on GIS[D]. *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2018.

[27] Liu, Mengxuan; Yang, Chunxia; Fan, Zhaoxiang; Yuan, Chao. Prediction approach on pedestrian outdoor activity preference under factors of public open space integrated

microclimate[J]. Building and Environment, 2023, 244.

[28] GHAVAMI S M, MALEKI J, ARENTZE T. A Multiagent Assisted Approach for Spatial Group Decision Support Systems: A Case Study of Disaster Management Practice[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: 101223 .

[29] 顾卓行. 基于多智能体行为模拟的城市滨水公共空间使用分析与优化研究[J].同济大学博士学位论文,2023.

Gu Zhuoxing. Analysis and Optimization of Urban Waterfront Public Space Based on Multi-agent Behavior Simulation[J]. Tongji University, 2023.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

文中图表均由作者绘制。

录用稿件，非最终出版稿