

# 基于空间句法和分形理论的寒地城市滨水区域天际线量化评估与优化路径研究--以牡丹江市为例

吴梓溶<sup>1</sup>, 刘羿伯<sup>2</sup>, 王作为<sup>3\*</sup>

**摘要:** 城市天际线作为视觉感知最直观识别的城市形象之一, 不仅彰显城市历史发展的足迹, 而且体现城市空间发展的可持续性与包容性。在高质量发展阶段, 滨水空间等重点公共空间的天际线精细化管控日益成为城市形态主要控制标准之一, 而寒地城市因其季节特殊性, 其天际线设计还需进一步考虑气候影响。因此, 本文基于分形理论建立天际线定量评估体系, 并以典型寒地滨水城市牡丹江市为例, 构建滨水天际线仿真模型, 基于城市现状与需求特征, 利用空间句法分析确定天际线观测点和视廊体系, 结合城市微气候特征和天际线分形维数对滨江区域天际线进行量化评估和优化模拟, 从而挖掘寒地城市滨水区域天际线的优化路径。经实证, 寒地城市的滨水天际线优化路径以实现用地的气候韧性与活力跃升为导向, 可将自然要素与城市景观较好地融入城市天际线, 塑造兼具特色与经济性的天际线, 为精细化空间治理提供参考。

**关键词:** 分形理论; 空间句法; 寒地城市; 滨水城市; 城市天际线

**Keywords:** Fractal theory; Spatial syntax; Winter cities; Waterfront cities; City skylines

**资助项目情况:** 国家自然科学基金青年基金“基于形态特征量化分析的寒地城市街区空间健康性能影响机理及优化设计方法研究”(项目编号: 52308018); 黑龙江省重点研发计划项目“东北地区收缩城市空间问题诊断与应对的关键技术及应用研究”(项目编号: JD2023SJ17)

## 1 引言

天际线作为城市空间意象的重要体现, 是城市空间历史发展与传承更新的立面脉络。城市化和工业化推进下大量涌现的高层建筑丰富了城市的立面景观, 并成为城市天际线视觉印象的主要组成部分, 提升了城市天际线的可识别性<sup>[1]</sup>, 但与此同时, 城市快速建设过程中所推崇的超高层大体量建筑和大面积使用玻璃材质等建筑设计手法对传统天际线的层次感、整体性以及与自然协调性造成了部分破坏。随着城市进入高发展阶段, 如何通过城市天际线助推城市规划实现友好型设计, 成为当前国内外天际线相关理论和实践研究的重点。

我国关于天际线的早期相关研究主要是基于欧美城市天际线意象与美学价值研究而发展的, 并根据我国城市规划和设计工作需要提出了城市天际线控制元素体系<sup>[2]</sup>和核心特征<sup>[3]</sup>, 对总体城市设计具有一定理论指导作用。随着城市化发展进程中社会主要矛盾的转化, 城市天际线相关研究转向以广泛存在的城市空间与建筑问题为导向, 从总体层面谋求城市人居环境和谐发

---

<sup>1</sup> 吴梓溶, 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 在读学生

<sup>2</sup> 刘羿伯, 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 副教授

<sup>3</sup> 王作为, 哈尔滨工业大学城市规划设计研究院有限公司, 高级城市规划师, wzw\_hit@163.com

展，例如围绕城市形象与特色的营造与保护需求，探讨天际线的设计价值导向、感知视角倾向和空间组织原则<sup>[4-9]</sup>；围绕城市山水景观格局保护需求，探讨实现人地关系和谐共融的城市天际线设计策略<sup>[10-12]</sup>；围绕城市空间建设布局与管理需求，探讨高层建筑和城市重要景观的评价模型和分层分区控制机制<sup>[8,13-14]</sup>。其中，滨水空间作为城市的水陆过渡空间，因其天际线通过直观展现岸线空间及其周边区域的保护、管控和利用情况，在空间上体现自然和人文生态的交融，在时间上体现历史和现实发展的承续，因此而成为天际线研究的重点公共空间。

当前，由于天际线较之街道景观能更直观凸显城市整体形象和鲜明特色<sup>[15]</sup>，其能够指引总体城市设计从而突显城市历史文脉、人文环境和特色建筑的作用已达成共识。但这并不意味着天际线是城市意象简单叠加下的宏观展示，恰恰相反，作为可感知的城市轮廓，天际线将城市物质空间和人的空间审美与生活感受相联系，对城市人居环境品质与韧性的精细化管控潜力具有较大的挖掘空间。但由于天际线的美学价值、生态价值、对城市建设形态及其发展评估的价值等方面难以量化，其评估指标和数值量化标准尚未形成，这导致城市天际线的定量设计和管控存在实践难和推广难等问题。而今，定量分析工具的推广为挖掘、实现和监测城市特异性发展需求提供了技术可能性，国外已有研究开始在人工智能辅助下探讨天际线与城市户外环境的关联性<sup>[16]</sup>。此外，城市的季节性特征作为城市的景观形态、生活方式与空间使用需求的决定性因素，直接影响天际线的图底关系和社会价值<sup>[17]</sup>，特别是寒地城市，其漫长的冬季对营造天际线进一步提出了经济适用性、生理舒适性和长期稳定性的要求，因此探讨寒地气候与天际线的发展联系和以其为出发点的设计引导路径具有重要意义。

综上，本文基于分形理论建立天际线定量评估体系，并以典型寒地城市牡丹江市为例，定量分析并提取城市现状与需求特征；选取其滨水区域构建天际线仿真模型，借助空间句法分析其街区形态和视域特征，以此确定天际线观测点和视廊体系；通过 Grasshopper 获取滨江区域微气候特征，并使用分形维数对滨江区域天际线进行量化评估和优化模拟，从而挖掘寒地城市滨水区域天际线的优化路径。

## 2 研究概况

### 2.1 研究区域

本文以典型寒地城市牡丹江市为例进行天际线量化评估与优化实证研究。从自然气候环境层面来看，牡丹江市兼具寒地气候和山水格局特征：一方面受高纬度和海陆热力差异影响，冬夏温差较大，近五年最低温曾达 $-32^{\circ}\text{C}$ <sup>[18]</sup>，一方面全域山势连绵起伏，牡丹江作为松花江重要支流横跨市域，并在市中心形成宜居宜业的河谷盆地<sup>[19]</sup>（图 1）。两者促使牡丹江市的城市空间格局始终呈现向山水聚合灵活发展的演进趋势，滨江区域成为城市风貌核心空间和公共活动中心地带。这既为牡丹江市滨江天际线的塑造提供了丰富的物质意象和文化内涵，也使得气候环境成为其优化的重点考虑要素。

本文根据城市干路网络与用地功能，结合《牡丹江市国土空间总体规划（2021-2035 年）》中心城区单元规划，选取牡丹江市滨江两岸约  $16.87\text{km}^2$  的陆域地段为研究区域，北岸东起富江路牡绥铁路跨线桥，西至规划西环路、新安街，南岸东起铁岭河南山和大湾地块，西至海浪机场滨江区域（图 2）。

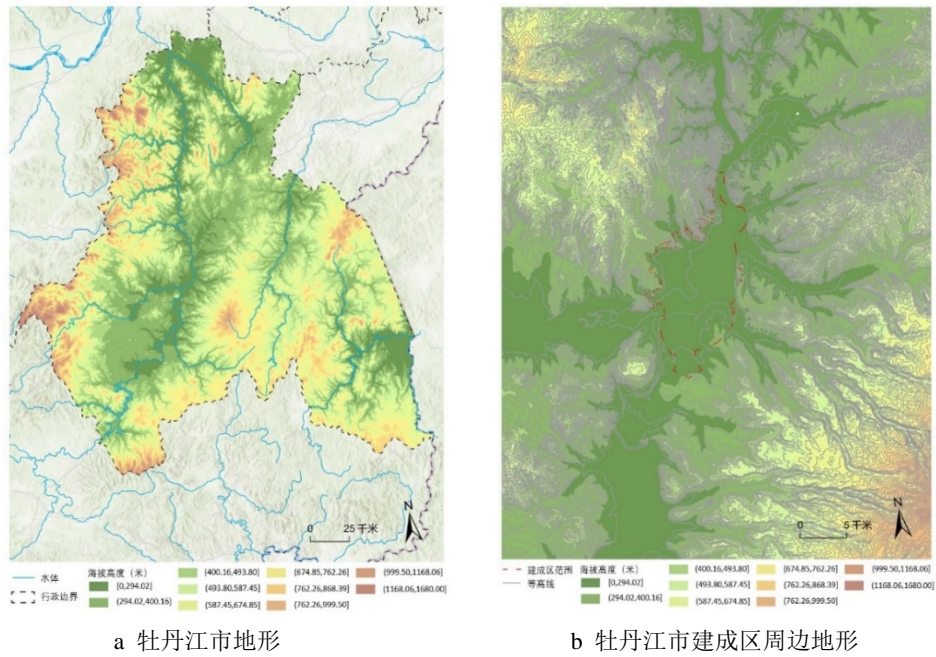


图1 牡丹江市现状<sup>1)</sup> (图片来源: 作者自绘)



图2 研究区域<sup>1)</sup> (图片来源: 作者自绘)

## 2.2 研究框架

本文基于天际线的分形维数特征和牡丹江市的自然历史特征, 提出涵盖“天际线评估体系建立-天际线评估分析-天际线优化模拟-天际线优化路径构建”一系列过程的研究框架(图3)。

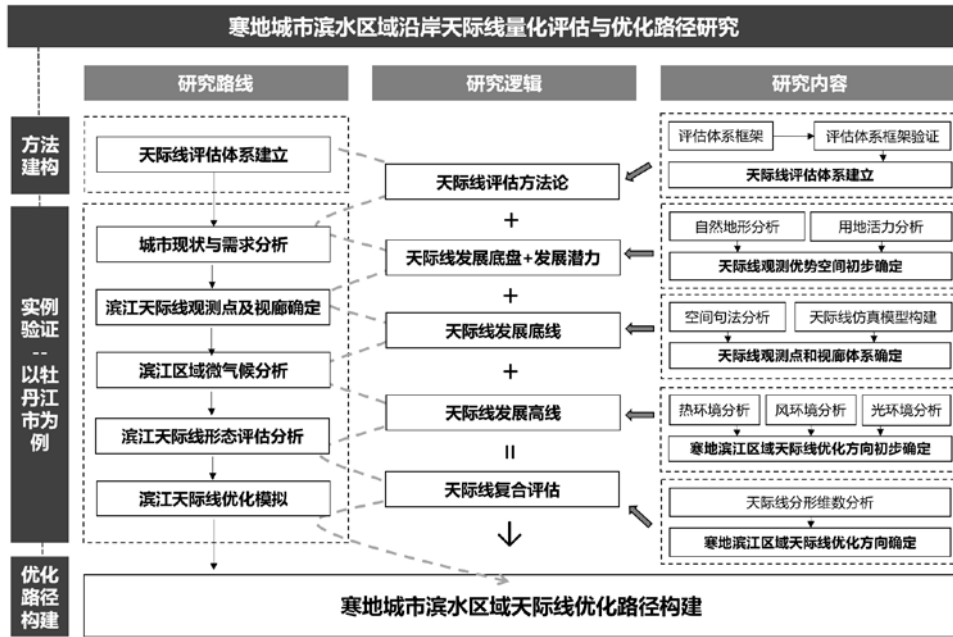


图3 研究框架（图片来源：作者自绘）

### 2.3 数据来源

本文所用数据主要包括 2023 年牡丹江市相关的规划文本数据和地理空间数据。其中，牡丹江市前期分析所涉及的上位规划和发展战略数据主要来源于《牡丹江市国土空间总体规划（2021-2035 年）》；牡丹江市滨江区域三维模型构建主要涉及牡丹江市 dem30 米精度高程数据、百度地图 2023 年 8 月 6 日至 12 日人流密度数据、开放街道地图（OpenStreetMap, OSM）建成区建筑、绿地及路网数据；牡丹江市天际线优化分析主要涉及气候统计数据。

本文所构建的天际线观测点和视廊体系主要以基于 DepthmapX 空间句法的街区形态和平面视域分析为依据。空间句法是基于城市空间的整体性、有序性和联系性特征，以数学拓扑关系对城市空间进行尺度划分和空间分割，通过轴线、凸空间和视域空间抽象表达其形态结构特征<sup>[20]</sup>，以此解读城市空间形态与人类空间行为的联系与影响<sup>[21]</sup>。DepthmapX 作为常用的开源空间分析软件，适用于从建筑物、小城市及地区到城市等不同尺度的空间网络句法分析，其分析原理是生成空间网络并进行拓扑分析<sup>[22]</sup>。本文主要选用空间句法的整合度（Integration）、选择度（Choice）和全局深度（Depth）指标作为天际线街区形态分析指标。整合度体现了空间的可达性和中心性，选择度体现了空间的开放性和穿行吸引力，深度值则体现了出行到达的复杂性。

## 3 方法建构

### 3.1 天际线评估体系框架

本文主要以分形理论为基础构建天际线评估体系。分形理论原用于量化物质的几何形态结构来分析其自相似性<sup>[23]</sup>，已有研究将其用于规划和设计领域进行城市线性空间规模和天际线轮廓的整体复杂性评估<sup>[24-27]</sup>。测度分形特征的主要参数包括全局参数和局部参数<sup>[28]</sup>，其中，全局参数中的广义关联维数（Generalized Correlation Dimension） $D_q$ 是最基本的测度参数（公式（1）<sup>[29]</sup>）。

$$D_q = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{I_q(r)}{\log r} = \frac{1}{q-1} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(r)} P_i(r)^q}{\log r} \quad (1)$$

式中,  $D_q$  为广义关联维数,  $q$  为矩次,  $P_i(r)$  为线性尺度为  $r$  的第  $i$  个分形元的生长概率;  $N(r)$  为线性尺度为  $r$  的分形元的数目。

本文选用 Fraclab 将天际线轮廓通过网格分割提取, 从而尽可能获取精细化的天际线的轮廓线性结构。Fraclab 是 MATLAB 数值计算及可视化平台下的分形分析软件, 多用于分析图像、信号和时间序列等数据, 其分形维数计算方法原理是计盒维数法(公式(2)), 即将矩次  $q$  设为 0, 此时  $D_q = D_0$ , 广义关联维数为容量维数(Capacity Dimension), 可测度二维及以下的物质的分形维数。

$$D_0 = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log r} \quad (2)$$














式中,  $D_0$  为分形维数值, 选取边长为  $r$  的网格覆盖天际线轮廓图形,  $N(r)$  为非空盒子数, 以  $\log N(r)$ 、 $\log r$  分别为量化天际线轮廓的坐标系的横轴和纵轴,  $\log N(r)$  对  $\log r$  的曲线斜率即为天际线轮廓的分形维数。

研究表明, 分形维数值往往小于 2.000; 大于 2.000 既可能表明物质结构复杂程度较高, 也可能表明算法有误, 需进行分形维数验算或算法检查; 当其大于或等于 2.500 时, 往往算法存在问题或系统结构存在缺陷<sup>[28]</sup>。在(0,2.500)的数值区间内, 根据分形理论可初步推断, 分形维数越大, 表示城市物质空间的自相似性越强、结构复杂性越强; 反之则结构越简单。已有研究进一步表明, 分形维数通过数值量化可以科学地反映城市与建筑的客观几何形态和城市空间赋予的美观舒适等直观感受<sup>[30-31]</sup>。从城市层面来看, 天际线分形维数受高层建筑数量和密度、城市建筑风格和形态特征等因素影响: 天际线层次感可通过增加高层建筑来提升分形维数, 相应地, 相似高度建筑的高密度布局会使天际线趋于平缓; 圈层式城市结构相比于线性结构更能提升天际线的要素丰富度; 新兴城市和特大城市比中心城市和历史城市及街区的分形维数要高<sup>[32]</sup>。若将天际线标度放大到街区层面, 分形维数较高的街道边界线具有较多的凹凸变化、较大的建筑间隙率和较少的局部重复<sup>[33]</sup>。但是由于各研究对天际线获取路径和处理方法不同, 且不同城市的各类意象重要性迥异, 所以目前尚无可概括天际线要素及其组合特征与分形维数的数理规律和评估模型, 天际线评估研究尚停留在特定地域, 不具有普适性。

为了进一步探讨天际线分形维数所体现的天际线轮廓形态特征, 基于城市天际线轮廓的主要构成要素为建筑立面的考量<sup>[13]</sup>, 本文使用 MATLAB 随机生成建筑群天际线轮廓并多次迭代, 将模拟的天际线轮廓进行分形维数计算并按迭代顺序排序, 以此探究天际线分形维数优劣区间及其对应的天际线轮廓特征, 所得天际线轮廓模拟和分形维数计算结果如表 1 所示。

天际线模拟轮廓的分形维数结果表明: (1) 一般情况下, 建筑密度及高度和分形维数成正比, 如 01~03 号、05 和 06 号天际线模拟轮廓; 但即使满足该条件, 如果建筑立面形态重复性较大, 或凹凸变化较少, 分形维数反而会有所降低, 如 14 号和 15 号天际线模拟轮廓; (2) 04 号和 05 号、07 号和 08 号天际线模拟轮廓表明, 地标建筑和高层建筑可较大程度提升天际线分形维数, 有相对高层建筑的天际线分形维数往往能高于 1.300; (3) 07~10 号天际线模拟轮廓表明, 适当的建筑间隙率可小幅度提升天际线分形维数; (4) 分形维数高值主要在 1.700~1.800 之间浮动, 高于 1.700 的天际线轮廓因为要素密度和立面曲折度已较大, 其起伏变化反而不如 1.300~1.700 的分形维数对应的天际线轮廓明显。

表 1 天际线模拟轮廓的分形维数（图片来源：作者自绘）

| 天际线迭代生成顺序 | 模拟天际线轮廓  | 天际线分形维数 |
|-----------|--|---------|
| 01        |    | 0.946   |
| 02        |    | 0.972   |
| 03        |    | 1.092   |
| 04        |    | 1.335   |
| 05        |    | 1.445   |
| 06        |   | 1.551   |
| 07        |  | 1.652   |
| 08        |  | 1.625   |
| 09        |  | 1.665   |
| 10        |  | 1.671   |
| 11        |  | 1.685   |
| 12        |  | 1.699   |
| 13        |  | 1.707   |

|    |  |       |
|----|--|-------|
| 14 |  | 1.724 |
| 15 |  | 1.566 |

整体看来，天际线分形维数值有以下三个分界点：1.300，1.650 和 1.700。低于 1.300 的分形维数对应的天际线具有建筑立面稀疏、形态变化较少、高度较低的特征；高于 1.300 的分形维数对应的天际线已涵盖相对高层建筑，但往往分形维数高于 1.650 的天际线才达到高层建筑较多、建筑密度和建筑间隙率均较好的水平；高于 1.700 的天际线已较好地实现建筑高度、建筑密度、建筑间隙率、建筑形态变化的高度平衡。

### 3.2 天际线评估体系验证








前文所建立的天际线评估体系框架是以计算机模拟的天际线轮廓为基础，该类天际线轮廓未考虑现实天际线可能具有的建筑立面不规则、富有自然景观要素、实际天际线的观测点是否合理或不存在等问题，因此仅是理想状态下的评估体系。为了进一步提升天际线评估体系的实用性，本文进一步对国内外优秀天际线案例及其分形维数加以分析，以此验证和完善基于分形维数的天际线评估体系。

本文采集国内外普遍认可的优秀天际线案例城市的立面图片进行对比研究，已有研究指出图像长宽比对计盒维数法的数值影响可以忽略<sup>[34]</sup>，但图像分辨率越高，分形维数计算精度越高<sup>[35]</sup>；此外，阳光和阴霾天气、玻璃材质的建筑立面可能导致天际线细节融于天空。因此，本文在谷歌地图以人视角获取 8 个城市晴朗天气下的天际线图片从中进行筛选，将其二进制化处理以进一步排除天气和建筑材质对天际线轮廓获取的影响，所计算的分形维数值如表 2 所示。

经分析，案例城市的天际线分形维数表明：(1)较为优秀的天际线分形维数值通常可达 1.600 以上甚至 1.700；(2)常用的天际线营造思路包括山景与建筑的协调、高层建筑群的冲击与协调、建筑高度凭借地势协调等方法，其中高层建筑对于提升天际线分形维数更有效果；(3)电线杆、路灯、交通指示牌等市政公共设施和广告牌、城市照明设计、城市绿化、城市小品等城市景观要素由于丰富了天际线的细节，对天际线分形维数也有一定的提升作用，但是需考虑这些要素和城市建筑与山水要素的协调度；(4)现有优秀天际线往往位于非寒地城市和特大城市，寒地城市和中小城市的天际线参考案例较少。

表 2 国内外优秀案例城市天际线分形维数（图片来源：作者自绘）

| 天际线案例   | 天际线简化轮廓  | 天际线分形维数 |
|---|--|---------|
| <p><b>香港天际线：</b>以山体为背景，建筑群作为前景，其轮廓起伏与山脊线协调，形成了与山体相得益彰的天际线</p> |  | 1.713   |

|  |  |        |
|--|--|--------|
| <p><b>旧金山天际线：</b>通过地形凸显地标建筑，从而强化天际线张力</p>                      |    | 1.635  |
| <p><b>曼哈顿天际线：</b>通过各类立面风格丰富的高层建筑营造开放包容的城市形象</p>                |    | 1.623  |
| <p><b>墨尔本天际线：</b>通过中心区建筑的高低组合形成以三个地标建筑为主体的高层簇群</p>             |    | 1.663  |
| <p><b>西雅图天际线：</b>太空针塔与右侧中心区建筑簇群形成对峙效果，背景山脉与宏伟的天际线景观互相衬托</p>    |    | 1.607  |
| <p><b>温哥华天际线：</b>以海面为背景衬托沿海建筑群轮廓，北部的山脉进一步增加天际线的层次感</p>         |   | 1.7032 |
| <p><b>巴黎拉德芳斯天际线：</b>以浅色低矮建筑为前景，以深色水面为背景，高层建筑通过玻璃材质提升天际线丰富度</p> |  | 1.597  |
| <p><b>法兰克福天际线：</b>以高层建筑作为背景，使用玻璃幕墙提升天际线层次感</p>                 |  | 1.587  |

### 3.3 天际线评估体系构建

基于天际线理想评估体系框架的建立和验证，本文构建天际线评估体系如表 3 所示。一般情况下，天际线优化以良好甚至优秀方向为目标，但其具体实践需考虑城市气候和活动特征。

表 3 基于分形维数的天际线评估体系

| 天际线分形维数区间     | 天际线等级       | 天际线特征                    |
|---------------|-------------|--------------------------|
| (0,1.300)     | 较差          | 建筑立面稀疏、形态变化较少、高度较低       |
| [1.300,1.650) | 合格          | 有相对高层建筑，但建筑密度和建筑间隙率仍有待提升 |
| [1.650,1.700) | 良好          | 高层建筑较多，建筑密度和建筑间隙率较高      |
| [1.700,2.000] | 优秀          | 已较好地实现建筑高度、建筑密度、建筑间      |
| (2.000,2.500) | 可能优秀或算法有误，需 | 隙率、建筑形态变化的高水平稳态          |

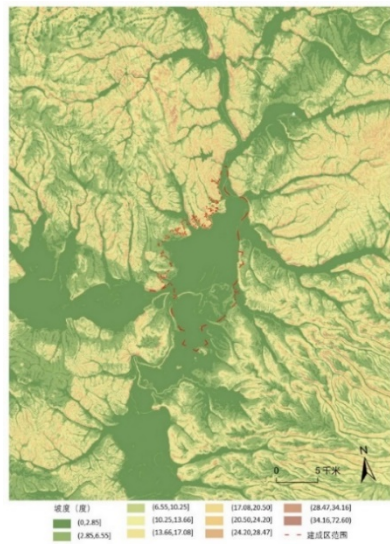


## 4 牡丹江市滨江区域天际线评估与优化

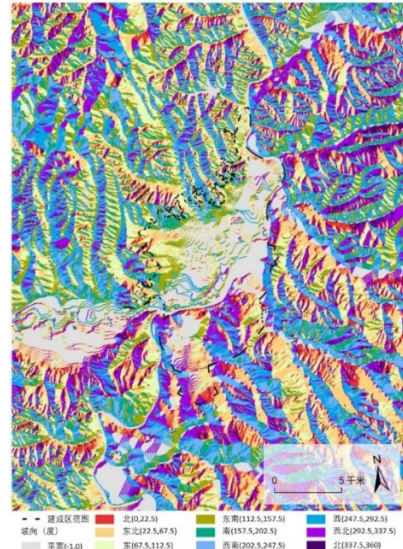
### 4.1 城市现状与需求分析

#### 4.1.1 自然地形分析

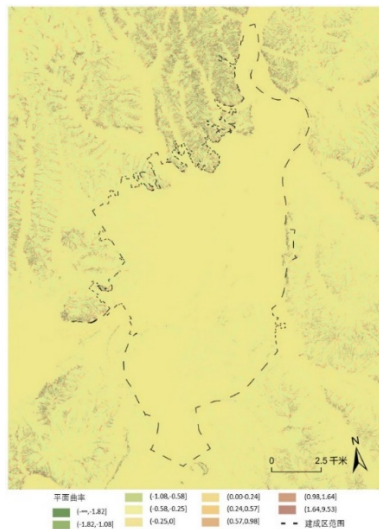
牡丹江市建成区总体地形平坦，工程地质良好。东部地形以北坡为主，适宜发展生态、旅游功能；西部地形以南坡、西坡为主，适宜发展商业和休憩功能。滨江区域主要沿低海拔平坦地带分布，主要通过道路加强与周边区域的联系。该地段总体坡向变化缓慢，适宜发展观测点视廊，城市北部尤其是西北部地形较陡，可结合街道形成重点观测点和视廊（图4）。



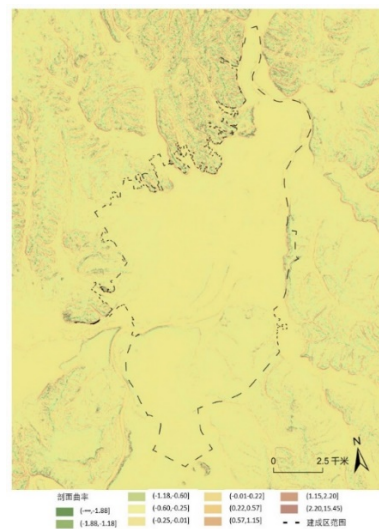
a 建成区周边坡度



b 建成区周边坡向



c 建成区平面曲率



d 建成区剖面曲率

图4 牡丹江市自然地形分析<sup>1)</sup> (图片来源: 作者自绘)

## 4.1.2 城市用地活力分析

### (1) 工作日人群活动特征

工作日期间建成区的人群分布如图 5a 所示，人群活动区域主要呈圈层式分布，与街道等级无明显联系，这表明城市建设用地功能分区较分明，利于形成突出功能特征的天际线景观。人群主要集中在滨江以北的规划区域，中轴街道节点处是人群密度最大的公共空间节点。人群活动区外围部分区域呈现活力热点沿街道分布的特征，因此相应地段有发展小规模视廊的潜力。滨江东侧有街道节点为人群相对密集区，结合半夜时间的人群热力图和工作日高峰期的路况，这些相对密集区以居住和小规模商业为主，建筑形态和功能可能较稳定。大部分人群相对密集区集中在地块内部，可以相应发展适合停留且丰富天际线的建筑小品。

### (2) 休息日人群活动特征

休息日期间建成区的人群分布如图 5b 所示，人群活动区域依然主要呈圈层式分布，但是活动区域外围沿街道向外延伸，人群主要集中在滨江以北的规划区域，中轴街道节点一带是人群密度最大的公共空间节点。滨江以南因为机场限高，建筑高度和形态稳定，用地以居住功能为主。需要考虑江边至住宅之间的建筑功能和高度过渡。

总体来看，城市公共空间与人流活力分布空间大体吻合。周末市民活动意愿明显高于工作日活动意愿，工作日和休息日的人群活动区域有较大重合，涉及商业、教育、体育休闲、市民办公、公共交通等城市公共活动，因此可联系周边区域地形形成从江边到丘陵，建筑高度逐渐升高的天际线，形成高度过渡良好的景观效果。

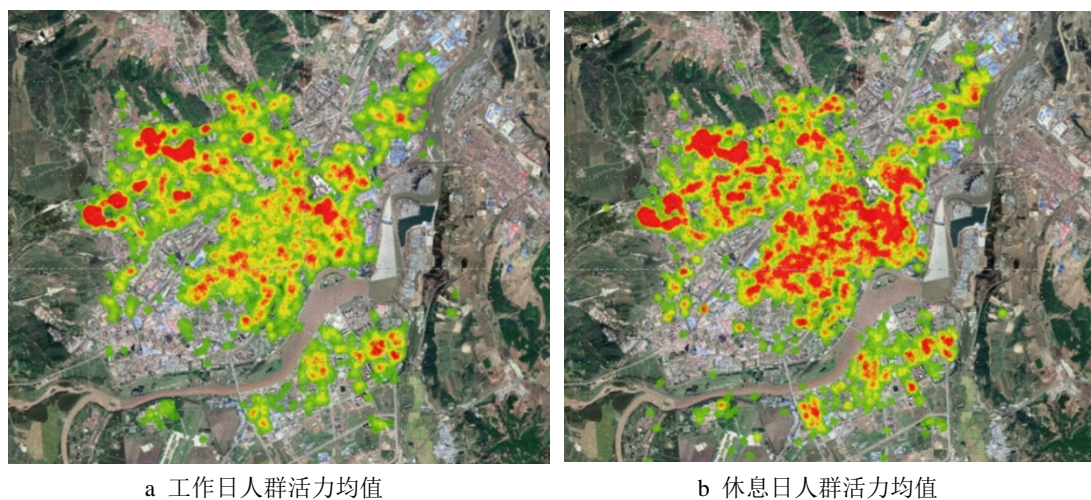


图 5 牡丹江市建成区活力分析（图片来源：作者自绘）

## 4.2 天际线观测点和视廊体系确定

### 4.2.1 街区形态和平面视域分析

牡丹江市建成区的街道整合度、选择度和全局深度和研究区域的视域可从高到低分为六级，最高值为一级（图 6）。总体来看，建成区街道可达性差距较大且不连贯，整体选择度和全局深度较低，其中滨江用地可达性相对较高，滨江西段北岸和建成区外围道路的选择度和全局深度较高，因此可结合重要建筑和景观节点设置滨江的观测点和视廊。

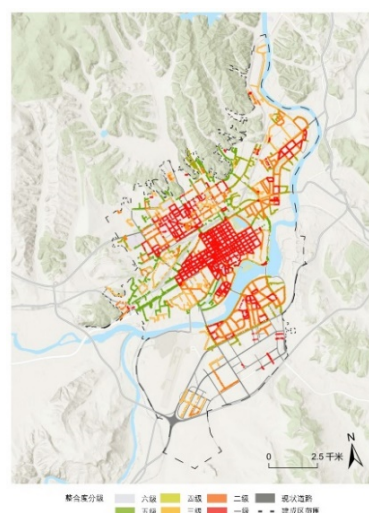
在江北，西海林街以北的教育用地（区域 1）、海浪路和新安街以南的滨江中段的商业用地

和西七条路南段两侧的用地（区域 2）可达性相对最高，但选择度和全局深度均较低，这表明江北滨江中段用地的中心性和交通复杂性较强，结合城市活力分析结果来看，海浪路、中轴街道具有发展为视廊的潜力，但是中轴街道东侧的东四条路（区域 3）周边可达性、选择度和全局深度均较低，结合周边用地功能来看，东安区政府的行政办公用地（区域 4）一定程度上影响了滨江街道的完整度、中心性和通行性。江南受居住区的相对封闭性影响，其通行吸引力远低于江北，但在兴隆街以北的滨江中段（区域 5）有相对高值，因此可以考虑将江北的纵向视廊延伸至江南。西部片区的选择度和全局深度较高，该片区的道路主要用于穿越交通，人群停留较少，而道路交通主要目的地是滨江两岸内部地块，说明人流较多的观测点可能集中在地块内部街道。

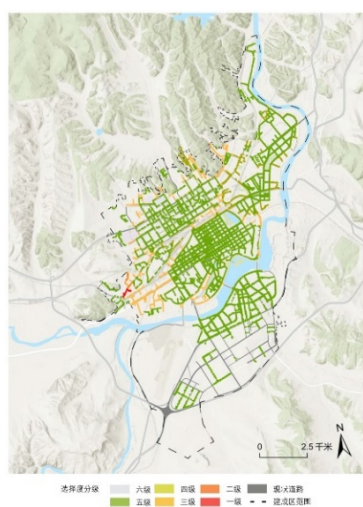
从空间可见性来看，富江路以西的临江区域（区域 6）和城市外环路没有建筑遮挡，视域广阔，适宜发展观测点。西海林街以南（区域 2）、牡丹江大街以西（区域 7）的用地建筑密度相对较大，但仍具有一定视域，具有构建视廊的潜力。



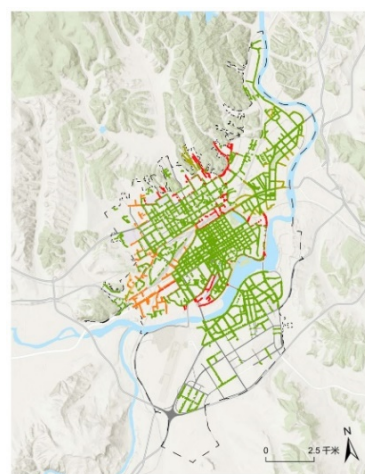
a 空间句法分析区域示意图



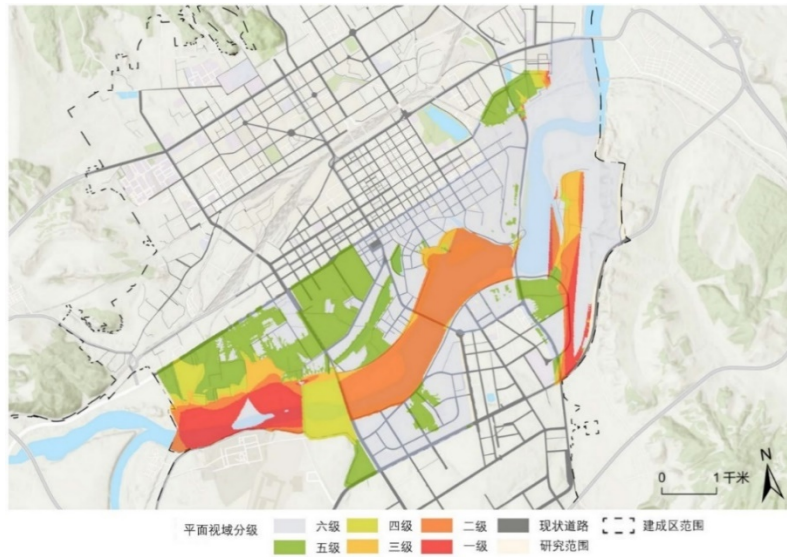
b 建成区街道整合度



c 建成区街道选择度



d 建成区街道全局深度



e 研究区域街道视域分析

图6 牡丹江市空间句法分析结果（图片来源：作者自绘）

#### 4.2.2 观测点和视廊体系的确定

为了保证研究区域天际线分形维数的高效获取和高度还原现实场景，本文首先使用高程、路网、建筑和绿地数据在 Rhino 构建牡丹江市滨江区域三维天际线基础模型（图 7a），并以此为基础在 City Engine 进一步构建三维天际线仿真模型（图 7b），后者主要丰富了符合牡丹江市城市风貌的城市建筑和道路纹理，补充了行道树、交通岛、路灯等城市景观要素，并且将模型的场景环境调为牡丹江市所处区位的 6 月 21 日的太阳高度角的晴朗天气，以保证天际线要素尽可能被全面提取。



a 三维天际线初始模型

b 三维天际线仿真模型

图7 牡丹江市滨江区域三维天际线模型（图片来源：作者自绘）

考虑到人视角会对空间开敞度的视觉感受造成影响，研究按一般观测者的正常平视视野范围和人眼感光特征，取人观测者的水平视角为  $120^\circ$ 、向上视角  $30^\circ$ 、向下视角  $40^\circ$  为人眼正常视野范围，形成垂直于地面的虚拟视野面<sup>[36]</sup>。选取研究区域周边山体山脊线未超过限高的区域作为山体观测点，选取高度符合限高要求的高层公共建筑作为城市高层观测点，将公园等具有开敞空间的公共空间设为娱乐设施观测点，根据虚拟视野面的水平视角划定三种观测点的视廊，并结合前期分析和空间句法分析确定滨水景观观测点和视廊。最终确定的观测点和视廊体

系如图 8 所示。

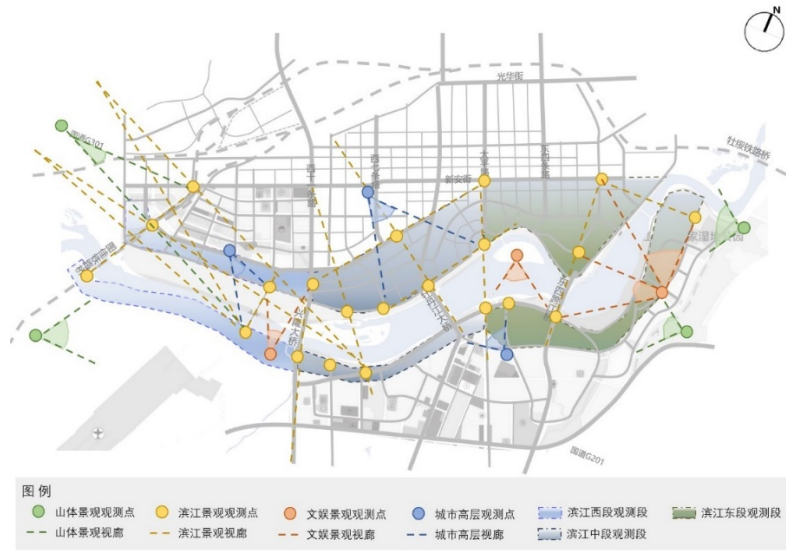


图 8 滨江区域观测点和视廊体系（图片来源：作者自绘）

### 4.3 滨江区域微气候特征分析

由于牡丹江市的地域气候特殊性，滨江天际线还需从微气候优化层面进行控制管理。图 9b 表明，牡丹江市夏季室外温度为 15.28℃~33.4℃，多数情况下 16:00~18:00 时温度达到全日最高值，7、8 月的高温持续时间最长，需考虑增加绿化来提升室外舒适度；冬季室外温度为-27.00℃~9.24℃，且在 18:00~10:00 期间平均温度最低。由此可得，寒地城市的热环境以街区减少热量流失、减少建筑保温能耗为主要发展方向，次要考虑甚至不考虑街道通风，且室外温度与日照环境直接相关，需充分保证建筑的日照时长。

此外，牡丹江市风向以西风和西南风为主导风向（图 9a），由于牡丹江是面积较大的开敞空间，滨江区域受风环境影响较大，因此滨江区域应避免地块在西方和西南方开口，并且提倡在相应方向布置相对高层建筑或半封闭式的周边式建筑集群，使地块内部形成风阴影空间；为了尽可能减少建筑能耗，总体建筑排布减少大面积的行列式布局，地块内部适当布置错列式建筑，街道两侧布置部分周边式建筑，从而构建气候防护单元，提升建筑节能效率；滨江西段需避免建设鹤立鸡群的超高层建筑，并且需相对均质布置建筑，以缓解大风对该地段建筑的气流压力冲击。

选取牡丹江市滨江区域冬至日日照时长量化城市日照环境，可将日照条件根据日照时长分为日照条件严重不良（0~2h）、日照条件不良（2~4h）、日照条件一般（4~6h）、日照条件良好（6~8h）和日照条件优秀（8~12h）五个层级（图 9c）。日照条件严重不良区域分布在江北的西南市街以东、西三条路西南方向的纵向街道和地块内部空间，和江北的兴隆大桥、穆棱河路、共和街、兴隆街、威虎山路一带，主要建筑为行列式住宅；日照条件优秀区域分布在江北的海浪路和环江北街一带，江南的环江南街、海浪河路一带，主要布置周边式住宅、点式住宅和错列式商业设施。对此，前一类区域需根据日照间距要求适当降低建筑高度和密度，条件允许下

可将非南北向的行列式住宅改为错列式布局；由于后一类区域具有较大的建筑布局和立面丰富可行性，可根据天际线分形维数进一步优化用地布局。

总体看来，提升牡丹江市滨江区域冬季微气候的适应性和宜居度的最优解有以下两个路径：其一，鼓励用地的混合式功能布局以促进城市街区节能减耗；其二，总体建筑布局以周边式和错列式布局为主，规避行列式布局；局部地段可通过在住区内部及其周边穿插生活服务设施和社区活动场地来打破大面积单一布局，从而优化居住空间的微气候。前者可提升建筑群的材质、高度、立面的变化丰富度，从而优化天际线的轮廓曲折度；后者则通过布置可优化居民生活质量和体验的设施来打破单一建筑布局模式，提升天际线的层次感。

从用地具体布置视角来看，滨江区域的西方和西南方若布置相对高层建筑或周边式建筑集群，可使地块内部形成风阴影空间；滨江西段受大风影响程度最大，需提倡建筑从平面到立面均趋向均质布局；江北非滨江地段的东、西、最北部及其周边区域提倡错列式布局，且需首先考虑为住宅提供日照空间。

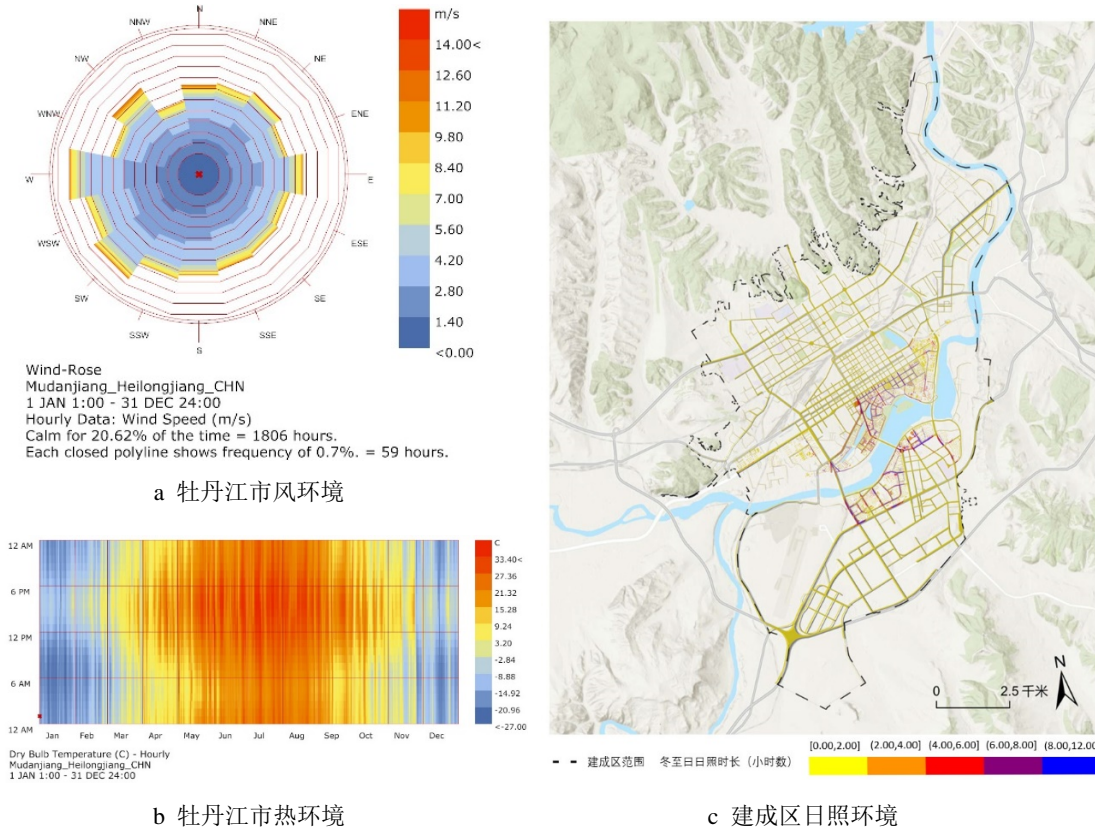


图9 牡丹江市微气候（图片来源：作者自绘）

#### 4.4 滨江区域天际线评估分析及优化策略

在天际线的分析过程中，本文将研究区域划分为滨江西段、中段和东段三段观测段（图9），以保证城市空间的微气候特征和天际线特征较好地结合。基于虚拟视野面获取人视角下三维天际线模型的天际线，可获取观测段的天际线分形维数区间和分形维数较高的天际线轮廓如表4中现状部分所示。

##### (1) 滨江北岸

滨江北岸天际线的分形维数相对较低，大部分已达到合格水平，但均未达到良好及以上的水平，且滨江中段的街区布局与微气候特征略不契合，因此北岸天际线具有较大的优化需求。

滨江中段天际线分形维数已达到合格水平，但距离良好天际线尚有一定距离。总体看来，该段天际线整体曲折度和建筑间隙率较低。结合用地活力分析结果可知，该地段有人群密度最大的中轴街道，用地的公共功能也较为丰富，但由于建筑立面走势平缓，这一重要的城市区域其公共活力在天际线层面并不凸显。该地段风环境和日照环境相对宜居，因此可考虑提高中轴街道及其周边的沿街建筑的平均高度，从而形成良好的观景视廊，并从城市立面形态层面营造城市活力片区形象。此外，可充分利用山景作为背景，借鉴香港为保护维多利亚港两岸山脊线景观设立的20%~30%山景不受建筑物遮挡地带的原则，将建筑立面起伏与山体起伏联系起来，以此控制建筑高度，使山脊线景观较好地融入滨江天际线。

滨江西段由于建筑密度相对较低，分形维数值相比于滨江中段和东段天际线较低，且未达到天际线分形维数合格水平。由于该地段易受大风影响但日照环境良好，因此天际线的优化可主要从提升整体的建筑密度和建筑高度入手。其中建筑高度的调整主要是在工程地质允许下将新建建筑规划为中高层建筑以提升地段平均建筑高度，基于气候适用性和建设经济性的考虑，减少或不建设超高层建筑。

滨江东段的分形维数已相对接近良好水平。结合用地功能和活力现状来看，虽然地块内部有较为浓厚的城市夜生活氛围，但是由于前景用地以居住功能为主，背景大多被住宅建筑遮蔽，天际线形态丰富度和可优化程度受限。对此，一方面可凭借社区生活圈的构建，在前景的居住用地增加住宅建筑的间隙率；另一方面，可充分利用此处的街道活力，采取增加街道建筑小品，丰富前景植被设计、社区服务设施及其立面、居住建筑立面和屋顶设计等措施，丰富天际线前后景，发展富有活力的独特型天际线。

## **(2) 滨江南岸**

滨江南岸西段为牡丹江市海浪机场，空间开阔平坦，因此不展开天际线形态分析。但由于机场的特殊地理和经济区位条件，该地段所看到的北岸天际线连贯性较强，观测天际线的人群较多，因此可以考虑重点营造周边观测点和视廊下的北岸天际线。

中段和东段天际线分形维数均达到合格甚至部分优秀的水平，其中中段的的分形维数大多为合格接近良好水平。该地段的建筑以周边式和错列式布局为主，建筑密度和建筑间隙率较高，且中景和背景的高度和形态区分度较大。此外，背景补充了前景天际线变化的过渡，增强了整体天际线的连续性。若想进一步提高天际线的曲折度，可在机场限高范围内建设地标建筑或构筑物，以丰富该地段建筑的高度值。此外，可结合公共服务设施的建设和公园等开敞空间的建设，适当提升建筑间隙率。

滨江东段的天际线已达到良好甚至优秀水平，能较好体现城市整体风貌、树立城市滨水形象。该地段背景的高层建筑较多，但保持了较好的建筑间隙率，使建筑群在高度上富有韵律感。

总体来看，滨江天际线分形维数大多达到合格水平，滨江北岸全地段和南岸中段具有天际线优化的必要性和可行性。

## **4.5 滨江区域天际线优化模拟**

根据牡丹江市滨江区域的天际线评估及优化策略和相应地段的微气候特征进行优化模拟，根据优化策略设计后的天际线分析结果如表4优化部分所示。此时滨江北岸中段天际线可达到

分形维数优秀水平，符合中轴街道的城市重要公共活力空间的定位；滨江北岸东段和滨江南岸中段天际线也可达到良好水平，有利于树立城市滨水界面的良好形象；滨江北岸西段天际线虽仍处于合格水平，但较之现状水平已明显提升，且满足寒地气候下的风环境和日照环境需求。

表4 牡丹江市滨江区域天际线评估与优化模拟结果（图片来源：作者自绘）

| 天际线所处地段 | 观测点所处范围 | 天际线轮廓 | 是否符合微气候特征 | 天际线分形维数区间 | 天际线等级       |    |
|---------|---------|-------|-----------|-----------|-------------|----|
| 滨江北岸中段  |         | 现状    |           | 否         | 1.366~1.499 | 合格 |
|         |         | 优化    |           | 是         | 1.669~1.718 | 良好 |
| 滨江北岸西段  |         | 现状    |           | 是         | 1.041~1.290 | 较差 |
|         |         | 优化    |           | 是         | 1.379~1.513 | 合格 |
| 滨江北岸东段  |         | 现状    |           | 是         | 1.519~1.576 | 合格 |
|         |         | 优化    |           | 是         | 1.6244~1.66 | 良好 |
| 滨江南岸中段  |         | 现状    |           | 是         | 1.649~1.664 | 良好 |
|         |         | 优化    |           | 是         | 1.689~1.696 | 良好 |
| 滨江南岸东段  |         | 现状    |           | 是         | 1.664~1.706 | 优秀 |

## 5 寒地城市滨水区域天际线优化路径

既有国内外天际线设计研究和实践对天际线的评估指标虽未达成统一，但评估逻辑多数集中在天际线的城市形体轮廓客观评估、人群视觉主观感知评估、城市形象营造评估三方面：城市形体轮廓层面宏观上涉及对城市天际线前景、中景和后景的分级评估<sup>[37]</sup>，中微观包括建筑材料、建筑立面、建筑造型、屋顶轮廓等空间形体评估<sup>[38-40]</sup>；人群视觉主观感知主要通过轮廓曲折度、建筑起伏度、天际线节奏指数等指标进行量化<sup>[13]</sup>；城市形象营造主要以地标首位度和人群满意度等指标为依据<sup>[30]</sup>。虽然相关经验对天际线评估指标维度已达成一定共识，但是如何深度挖掘天际线涵盖的空间信息，将天际线设计、管控与优化和城市宜居性与发展需求联系起来，仍需进一步探讨。

寒地城市由于寒冷季节漫长、寒冷气候严酷、户外活动空间环境受恶劣天气影响程度较大等特征，其宜居性的影响机制具有更高的社会-生态耦合性，尤其需考虑微气候对城市活动效率和经济性的影响。对此，本文结合以牡丹江市为代表的寒地城市的气候和滨水格局特征，在建立基于分形维数的天际线评估体系并评估和优化滨水区域天际线的基础上，借助决策树模型，进一步建构基于分形维数的寒地城市滨水区域天际线优化路径（图 10）。具体来说，以分形维



数为量化标准的寒地城市滨水天际线优化主要有四种路径：其一，充分利用自然要素，通过公园、水体等开敞空间和山体起伏丰富天际线形态，并借助植被绿化隔开前景、中景和背景，提升建筑间隙率和天际线轮廓曲折度；其二，基于城市微气候特征和限高要求确定地块开口、建筑布局模式、建筑高度和建筑密度；其三，公共活力较强区域可丰富建筑高度、外立面、屋顶、整体材质等方面的变化，将活力街道打造为良好景观视廊，居住活力较强区域可增加街道建筑小品和丰富社区服务设施，打破建筑集群的单一立面形态，提升前景和中景的区分度；其四，天际线分形维数已达到良好水平且前三个路径优化效果不显著时，可建设地标建筑或构筑物以提升天际线的分形维数和视觉识别度。

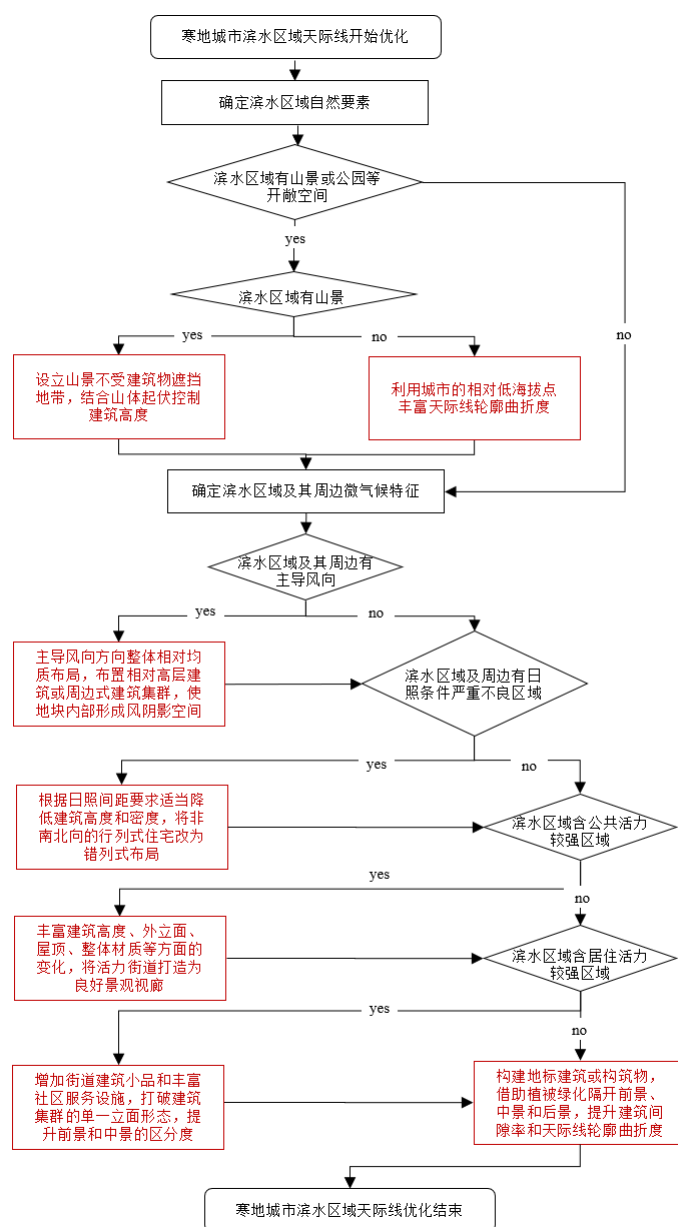


图 10 基于分形维数的寒地城市滨水区域天际线优化路径（图片来源：作者自绘）

## 结论与展望

本文基于分形理论建立天际线量化评估体系,并以典型寒地滨水城市牡丹江市为例,完成从评估分析到优化模拟的天际线优化实证分析,并经实证构建基于分形维数的寒地城市滨水区域天际线优化路径。该优化路径将山水等自然要素较好地融入城市天际线景观,通过塑造天际线提升寒地气候下城市热、风、光环境的宜居性和经济效益,从城市立面形态促进城市布局的精细化管控,为天际线的空间价值量化评估与城市多维度治理提供参考。

由于建立天际线评估体系环节所确定的分形维数评估分界点以基于计算机迭代模拟的天际线为分析基础,本文提出的天际线分级的数值标准不可避免地具有随机误差。此外,本文构建的城市仿真模型与城市实景依然具有一定差距。以上局限可在相关研究与实践中进一步校正和丰富。

## 注释

1) 市域矢量数据来源:国家基础地理信息中心全国 1:100 万公众版基础地理信息数据(2021),审图号 GS(2016)2556 号。<https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W>

## 参考文献

- [1] 科斯托夫. 城市的形成: 历史进程中的城市模式和城市意义[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 王笑凯. 天际线形态解读[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [3] 廖维, 徐燊. CBD 天际线之新视野[J]. 华中建筑, 2011, 29(9): 31 - 33.
- [4] 黄艾. 城市滨水区线形景观规划设计探讨[J]. 北方园艺, 2010(12): 128 - 131.
- [5] 张弛. 现象与本质路易斯·康与安藤忠雄建筑的空间形式分析与比较[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [6] 田宝江. 如何认识城市天际线[J]. 人类居住, 2017(1): 47 - 49.
- [7] 庞峰, 路世豹, 晁潇潇. 历史城市天际线对当今城市建设制约性研究——以新疆维吾尔自治区喀什市为例[J]. 城市规划, 2018, 42(2): 115 - 121.
- [8] 张曦, 齐童, 吴明霞. 以西山为背景的北京城市天际线模拟优化研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 39 - 45.
- [9] 周俊汝, 高源, 刘迪. 基于城市风貌彰显的天际线设计——以南京老城为例 [A]. 规划 60 年: 成就与挑战——2016 中国城市规划年会论文集(06 城市设计与详细规划) [C]. 中国城市规划学会、沈阳市人民政府, 2016: 10.
- [10] 饶映雪, 戴德艺. 自然环境约束下的城市天际线景观组织研究——以南安市为例[J]. 城市问题, 2012(12): 12 - 16.
- [11] 王倩华. 基于分形理论的城市天际线量化分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [12] 叶雷, 韦柯筠. 存量时代山水型城市的景观修补与秩序修复——杭州总体城市设计中的建筑高度管控探索[A]. 活力城乡 美好人居——2019 中国城市规划年会论文集(07 城市设计) [C]. 中国城市规划学会、重庆市人民政府, 2019: 11.
- [13] 钮心毅, 李凯克. 基于视觉影响的城市天际线定量分析方法[J]. 城市规划学刊, 2013(3): 99 - 105.
- [14] 许焯. 城市天际线评价与控制研究初探[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
- [15] Lynch K. The Image of the City[J]. MIT Press, 1962.
- [16] Eastman C M. Automated space planning[J]. Artificial Intelligence, 1973, 4(1): 41 - 64.

- [17] 王笑凯.天际线解读[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004:1-101
- [18] 牡丹江气温 牡丹江市全年各月气温统计[EB/OL]. <https://www.tianqi24.com/mudanjiang/history.html>
- [19] 牡丹江市志编审委员会. 牡丹江市志[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1993.04:71.
- [20] 比尔·希列尔, 盛强. 空间句法的发展现状与未来[J]. 建筑学报, 2014,(08):60-65.
- [21] 江斌, 黄波, 陆锋. GIS 环境下的空间分析和地学视觉化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] depthmapX. [EB/OL].<https://spacegroupucl.github.io/depthmapX/>
- [23] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [24] 严军, 王飞, 蔡安哲. 基于分形理论的城市滨水景观天际线量化分析——以南京玄武湖东岸为例[J]. 现代城市研究, 2017(11):45-50.
- [25] 戴德艺.基于景观生态分析的城市绿色天际线规划研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [26] 侯伟. 北京城市副中心大运河两岸滨河天际线探究——基于分形理论[J]. 新型城镇化, 2023,(05):92-95.
- [27] 袁敬洋, 陈萍. 基于分形理论与幂律分布的微观天际线量化分析[J]. 绿色建筑, 2024,(01):69-74.
- [28] 陈彦光. 城市地理研究中的单分形、多分形和自仿射分形[J]. 地理科学进展, 2019,38(01):38-49.
- [29] Feder J. 1988. Fractals [M]. New York: Plenum Press, 1988.
- [30] Hagerhall C M, Purcell T, Taylor R. Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference[J]. Journal of environmental psychology, 2004, 24(2): 247-255.
- [31] El-Darwish I I. Fractal design in streetscape: Rethinking the visual aesthetics of building elevation composition[J]. Alexandria Engineering Journal, 2019, 58(3): 957-966.
- [32] 曹迎春, 张玉坤. 基于分形理论的城市天际线量化分析[J]. 城市问题, 2013,(12):32-36.DOI:10.13239/j.bjsshkxy.cswt.2013.12.004.
- [33] Cooper J. Assessing urban character: the use of fractal analysis of street edges[J]. Urban Morphology, 2005, 9(2): 95-107.
- [34] 王俊. 城市街道建筑天际线分形分析[D]. 江苏: 南京大学,2010.
- [35] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 19-24.
- [36] 钮心毅, 徐方. 基于视觉影响的建成环境空间开敞度定量评价方法[J]. 城市规划学刊, 2011,(01):91-97.
- [37] 张建华, 潘蕾. 滨海环山城市天际线景观的组织与塑造——以烟台滨海天际线景观特色为例[J]. 城市发展研究, 2010,17(09):77-84.
- [38] 史宜, 曹俊, 朱晓. 基于评价模型的城市天际线景观美学解析[J]. 现代城市研究, 2018, 10: 67-74.
- [39] STAMPS A,JACK L N,HANYU K.Using Pre-construction Validation to Regulate Urban Skylines [J].Journal of the American Planning Association,2005(1):73-91.
- [40] 吕圣东, 严婷婷, 李蓝. 城市天际线美感定量指标评价研究比较[J]. 住宅科技, 2019, 39(8): 27-31.