

# 城市道路照明系统低碳改造路径分型与工程决策研究 ——基于南京案例

郭菲

(奕斐环境规划设计(上海)有限公司, 上海 200433)

**摘要:** 在“双碳”背景下, 城市道路照明系统低碳改造逐步由单一能耗控制转向精细化工程决策。现有研究多聚焦运行阶段节能优化, 对不同道路在功率密度、布灯结构及运行管理方式等方面的差异性关注不足, 统一改造路径难以满足多样化工程条件。本文基于南京市六条典型道路的运行参数与结构特征, 构建道路照明低碳改造分型方法, 将道路划分为高功率密度型、高单灯负荷型、运行冗余型及结构合理型, 并分析各类型道路的技术适配路径与实施优先级。结果表明, 结构优化适用于功率密度偏高路段, 光源替换适用于单灯负荷较大的道路, 智能控制在运行冗余型道路中具有较强适配性。差异化分型框架有助于提升改造针对性与资源配置效率, 为城市道路照明系统精细化低碳更新提供决策依据。研究成果可为道路照明低碳改造路径选择提供方法依据, 并为道路照明系统层面的减碳策略制定与优化提供实证支撑。

**关键词:** 城市道路照明; 低碳改造; 路径分型; 工程决策; 技术适配

中图分类号: U491.5+3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2026.03.000

## Classification of Low-Carbon Retrofit Pathways and Engineering Decision-Making for Urban Road Lighting Systems: A Case Study of Nanjing

GUO Fei

(Innovision Environmental Planning & Design (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Under the “dual-carbon” policy framework, the low-carbon retrofit of urban road lighting systems is evolving from single-objective energy consumption control toward refined engineering decision-making. Existing studies primarily focus on operational energy-saving measures, while insufficient attention has been paid to the heterogeneity among roads in terms of power density, lighting layout configuration, and operational management patterns. As a result, uniform retrofit strategies may fail to accommodate diverse engineering conditions. Based on the operational parameters and structural characteristics of six representative urban roads in Nanjing, this study develops a classification approach for low-carbon retrofit pathways. Roads are categorized into high power-density, high single-lamp load, operational redundancy, and structurally optimized types. The technical suitability and implementation priority of retrofit strategies are analyzed for each category. The findings indicate that structural optimization is more suitable for roads with excessive power density, light source replacement is appropriate for roads with high single-lamp load, and intelligent control strategies demonstrate strong applicability in operational redundancy scenarios. The proposed differentiated classification framework enhances retrofit precision and resource allocation efficiency, providing a decision-making basis for the refined low-carbon upgrading of urban road lighting systems.

**作者简介:** 郭菲, 高级工程师, 注册照明设计师(NCQLP)。主要从事城市与建筑照明、光环境评价、光污染治理及可持续照明研究。

**Keywords:** urban road lighting; low-carbon retrofit; pathway classification; engineering decision-making; technical suitability

## 0 引言

“双碳”目标的持续推进,使城市基础设施运行效率提升与能源结构优化成为城市治理的重要议题<sup>[1]</sup>。在城乡建设碳达峰实施框架中,城市照明被纳入绿色低碳运行体系,强调运行能效提升与全过程管理能力<sup>[2]</sup>。作为重要的公共服务型能源设施,城市道路照明系统在保障夜间交通安全与城市运行秩序的同时,形成稳定且规模可观的电力消耗。国际能源署数据显示,照明用电约占全球电力消费的15%,公共照明在城市能源结构中占有重要比例<sup>[3]</sup>。在此背景下,如何在满足照度与安全标准的前提下优化系统结构与运行方式,成为城市更新进程中的关键技术问题。

既有研究主要聚焦运行阶段能耗优化与碳排特征识别,通过高光效灯具替换、智能调控系统部署及功率密度优化等方式提升系统效率<sup>[4][5]</sup>。这类研究为识别照明系统节能潜力提供了重要基础。然而,在具体工程实践中,不同道路在建设年代、布灯结构、单灯功率、功率密度及运行管理模式等方面存在明显差异,照明系统呈现出显著的结构异质性。统一改造路径难以兼顾多样化工程条件,技术选择与资源配置效率之间的矛盾逐步显现。

在存量基础设施更新阶段,低碳改造已成为结构参数、运行特征与实施约束等多因素耦合的工程决策问题。建立面向道路差异特征的分型方法与路径选择逻辑,有助于提高改造针对性与实施效率。本文基于南京市六条典型城市道路的样本数据,结合照明系统运行参数与结构特征,构建差异化分型方法与技术路径选择框架,并对不同道路类型的适配策略与实施优先级进行系统分析,为城市道路照明系统精细化低碳更新提供决策依据。

## 1 南京道路照明系统特征差异分析

城市道路照明系统的结构参数与运行方式直接影响系统负荷水平与能效表现<sup>[6]</sup>。基于样本道路的结构与运行数据,本研究从结构参数、功率配置、碳排表现与运行管理等维度展开分析,系统识别不同道路在

工程实施层面的差异特征,为路径分型与技术适配提供依据。

### 1.1 样本道路基本信息

研究选取南京市六条具有代表性的城市道路作为研究样本。样本道路涵盖支路与次干道类型,建成年代分布于2002年至2020年。不同道路在道路等级、单灯功率、功率密度及车道规模等方面存在明显差异,其基本特征与核心结构参数汇总见表1。

表1 样本道路基本特征与照明结构关键参数  
Table 1 Basic characteristics and structural parameters of sample road lighting systems

道路名称	道路类型	建成时间	道路长度 (km)	杆高范围 (m)	单灯平均功率 (W)	LPD (W/m <sup>2</sup> )	估算布灯间距 (m)
山庄路	支路	2019	0.44	10	120	0.62	55
方家营路	次干道	2020	0.82	9	200	0.70	41
石头城路	支路	2002	0.70	10	90	0.27	48
公共路	次干道	2019	0.52	9~15	162.67	1.01	23
和悦街	次干道	2018	1.16	9~13	176.92	0.38	45
后宰门路	次干道	2017	0.45	8~15	204	0.97	30

从道路类型与建设时间分布看,样本道路涵盖早期建设与近年更新项目,反映不同阶段技术标准与设计策略的演进。支路与次干道在照明等级与交通功能定位方面的差异,直接影响灯具功率配置与布设方式。从单灯功率与功率密度指标分析,道路间差异更加突出。石头城路单灯功率与LPD均处于低位区间,而公共路与后宰门路的功率密度明显偏高,表现出较强的单位面积负荷集中特征。布灯间距与杆高配置的差异,进一步强化了结构参数对负荷水平的影响。样本道路在结构参数与负荷配置方面具有代表性,为后续分型判定提供基础数据支持。需要说明的是,支路与次干道在照明设计规范中对应不同的照度与功率密度控制要求<sup>[7]</sup>。本文在比较不同道路功率结构与碳排差异时,均以满足相应道路等级照明规范为前提,对结构配置与运行特征进行相对分析,而非简单优劣排序。需要说明的是,本研究所选样本以支路与次干道为主,未涵盖快速路与主干道,后续研究将扩展道路类型以验证分型方法的普适性。

### 1.2 道路与照明系统结构特征

不同道路在布灯结构、灯杆高度配置及灯具布设

密度等方面存在明显差异。设计阶段安全裕度的设定、道路交通等级要求以及建设时期所采用的技术标准，共同影响照明系统的结构参数配置。不同道路等级在照明设计规范中对应不同的照度与功率密度控制要求，因此结构参数差异具有规范背景基础。

结构参数对比显示，道路间差异主要体现在布灯间距与杆高范围上。公共路与后宰门路布灯间距分别约为 23 m 和 30 m，布设密度相对较高；石头城路布灯间距约为 48 m，布设密度较低。布灯间距与杆高配置决定单位面积灯具分布特征，是影响系统结构属性的重要因素。结构参数差异为后续功率配置与碳排表现差异提供物理条件基础。

### 1.3 功率结构与负荷配置差异

在结构差异基础上，样本道路在单灯功率与功率密度 (LPD) 方面呈现出分层特征。后宰门路与公共路单灯功率处于高值区间，石头城路单灯功率相对较低，体现出设备配置强度差异。

功率密度差异进一步强化了这种分层趋势。公共路与后宰门路的 LPD 分别为  $1.01 \text{ W/m}^2$  和  $0.97 \text{ W/m}^2$ ，而石头城路仅为  $0.27 \text{ W/m}^2$ ，呈现明显梯度分布。单灯功率与布灯密度的组合关系决定单位面积负荷水平，从而影响运行阶段能耗表现。

功率结构的差异不仅影响运行负荷水平，也构成道路类型划分的重要判定依据，为后续技术路径匹配提供参数支撑。

### 1.4 碳排放表现差异

基于全生命周期核算结果，不同道路在单位长度与单位基灯两个维度下呈现出差异特征。全生命周期核算边界涵盖灯具生产、运输、运行 (B6)、维护及处置阶段，其中运行阶段电力碳排放因子采用华东区域电网平均值 ( $0.7703 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ )<sup>[8]</sup>。数据来源包括道路照明设计图纸、运行记录及设备铭牌参数。相关碳排结果汇总见表 2。

根据核算结果，公共路与后宰门路单位公里碳排强度处于样本高位区间，而石头城路明显偏低，呈现出较为清晰的梯度分布。单位公里碳排强度最高为公共路的  $50,909.90 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{km}\cdot\text{a})$ ，最低为石头城路的  $13,073.06 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{km}\cdot\text{a})$ ，最大值约为最小值的 3.9 倍。这一差距反映出不同道路在功率密度与布灯结构配置

方面的差异对整体碳排水平具有直接影响。

表 2 样本道路碳排表现对比

Table 2 Carbon emission performance of sample road lighting systems

道路名称	单位公里碳排 ( $\text{kg CO}_2\text{e}/(\text{km}\cdot\text{a})$ )	单位基灯碳排 ( $\text{kg CO}_2\text{e}/(\text{unit}\cdot\text{a})$ )	B6 占比 (%)
山庄路	16 664.17	448.18	87.4
方家营路	28 612.98	586.57	87.7
石头城路	13 073.06	315.56	72.9
公共路	50 909.90	588.29	88.9
和悦街	23 046.23	541.30	87.3
后宰门路	39 273.11	589.10	89.2

注：B6 为运行阶段，参照产品碳足迹相关标准中的生命周期阶段划分方法<sup>[9]</sup>。

分阶段结果进一步表明，运行阶段 (B6) 为主要碳排放来源，占比普遍超过 70%，在部分道路中接近 90%。因此，道路间碳排差异主要由运行阶段负荷结构决定，而结构参数差异通过影响功率密度与单灯负荷水平，进一步放大运行阶段排放差距。

从单位基灯维度看，后宰门路与公共路的单灯碳排分别为  $589.10 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{unit}\cdot\text{a})$  和  $588.29 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{unit}\cdot\text{a})$ ，处于样本中的高位区间；石头城路为  $315.56 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{unit}\cdot\text{a})$ ，显著低于前两者。单位长度与单位基灯两个维度下排序并不完全一致，说明碳排表现受到布灯密度与单灯功率双重因素影响，单一指标难以全面刻画系统特征。

综合来看，功率密度、单灯功率与布灯间距的组合关系构成道路间碳排强度差异的核心机制。上述差异为后续分型判定与路径匹配提供量化依据。

### 1.5 运行管理与控制特征

分阶段分析结果表明，运行阶段在系统负荷结构中占据主导地位。在统一运行时长条件下，单灯功率与功率密度成为决定运行阶段负荷水平的核心变量，结构差异通过运行阶段得到集中体现。

从运行管理方式看，各道路目前普遍采用固定时长开灯模式，未部署分时调控或交通响应型动态控制系统，运行模式相对单一，使系统负荷主要受结构参数约束，具有一定的优化空间。在结构参数保持不变的前提下，通过优化调光策略或实施精细化运行管理，仍具备一定节能潜力。

综合结构参数、功率配置、碳排表现与运行方式等因素可以发现，样本道路之间的差异具有系统性特征。这种结构—负荷—运行的耦合关系，为后续差异

化分型与技术路径匹配提供了现实基础，也构成工程决策判定的重要依据。

## 2 城市道路照明系统低碳改造路径分型方法

道路间在功率结构、负荷水平与运行方式方面呈现出系统性差异，这些差异直接影响能源消耗表现及改造路径选择。结构参数与运行特征的不同，使技术措施在不同道路场景中的适配性存在分化。基于前述差异分析，有必要构建面向结构与负荷特征的分型框架，对道路照明系统进行类别划分，从而明确各类型道路的改造重点与技术路径匹配方向。

### 2.1 分型逻辑与判定维度

在存量道路照明系统低碳改造实践中，仅依据单一负荷指标排序难以充分反映不同道路在结构参数与运行方式方面的差异，技术路径选择需要结合多维特征进行综合判定。基于识别的结构与负荷差异，构建道路照明系统低碳改造分型框架，以增强路径匹配的针对性与工程实施的合理性。

分型判定围绕功率结构特征、单灯负荷水平与运行管理方式三个维度展开。功率结构特征反映单位面积负荷水平及布灯密度差异，是判断结构参数的重要依据；单灯负荷水平体现设备配置强度，直接影响单位基灯负荷表现；运行管理方式则反映系统调控能力与运行模式特征。三个维度分别对应结构、设备与运行三个层面，构成技术路径匹配的判定逻辑。在存在多重特征交叉的情况下，分型判定以主导负荷特征为依据。分型阈值综合参考《城市道路照明设计标准》（CJJ 45—2015）中功率密度控制要求以及样本参数分布特征进行确定。其中，LPD 高于  $0.8 \text{ W/m}^2$  的道路划入高功率密度型；单灯功率高于  $180 \text{ W}$  且对应单位基灯碳排处于样本高位区间的道路划入高单灯负荷型；布灯间距小于  $35 \text{ m}$ 、LPD 处于合理区间（ $<0.6 \text{ W/m}^2$ ）且运行模式固定的道路划入运行冗余型。分型标准以对整体碳排与运行阶段负荷影响程度更为显著的因素为主导，以增强类别判定的清晰性与一致性。

### 2.2 高功率密度型道路

高功率密度型道路主要表现为单位面积功率密度（LPD）处于较高区间，布灯间距相对较小或布设密度偏高，单位长度负荷水平集中度较强。在样本道路

中，公共路与后宰门路呈现出上述特征。该类型道路多形成于设计阶段安全裕度较高或历史配置标准偏高的背景下，结构配置叠加单灯功率水平，使单位面积负荷水平处于高位区间。

对于此类道路，仅通过光源替换降低单灯功率难以显著改善功率密度水平。由于其负荷问题具有明显的结构属性，改造路径更侧重于布设结构优化，包括调整布灯间距、优化灯杆高度与配光方式，以及控制冗余装灯数量等措施。通过降低单位面积灯具密度，可从源头上改善系统负荷结构。

在结构优化基础上叠加智能控制策略，有助于进一步降低运行阶段负荷水平，实现结构调整与运行优化的协同效果，从而提高整体改造效率。

### 2.3 高单灯负荷型道路

高单灯负荷型道路的典型特征为单灯功率处于较高区间，单位基灯负荷水平相对集中，而功率密度未必显著超出合理范围。在样本道路中，后宰门路与方家营路体现出较为明显的单灯负荷特征。此类道路在布灯结构上相对合理，但由于单灯输出水平偏高，整体运行阶段负荷随之增加，其碳排强度更多体现为设备配置强度问题，而非结构密度问题。

针对该类型道路，改造路径更侧重于单灯功率优化。在不调整布灯结构的前提下，通过采用高光效光源或优化驱动参数降低单灯功率输出，可有效降低单位基灯负荷水平。该路径对原有结构影响较小，施工干扰相对有限，实施成本具有可控性，适用于以设备更新为主要改造手段的道路类型。

### 2.4 运行冗余型道路

运行冗余型道路的特征主要表现为单灯功率与功率密度处于合理区间，但运行时长相对固定，缺乏分时调控或动态响应机制。部分支路与次干道在结构与功率配置方面已达到较为合理水平，但由于运行模式较为单一，照明系统在低流量时段仍保持稳定输出，形成一定程度的冗余运行。

此类道路的负荷问题主要源于运行管理方式，而非结构配置本身。因此，其改造路径更侧重于运行策略优化。在不调整布灯结构与设备配置的前提下，通过分时调光、低流量时段降功率运行及集中管理与远程控制等措施，可降低运行阶段负荷水平。该路径对

既有结构影响较小，实施干扰有限，适用于规模化推广与存量道路的渐进式优化。

## 2.5 结构合理型道路

结构合理型道路表现为功率密度处于较低区间，单灯负荷水平适中，单位长度与单位基灯负荷均处于样本中的低位水平。石头城路可视为典型代表。此类道路在结构配置与功率匹配方面已达到较为平衡状态，负荷结构相对稳定，整体优化空间有限。

由于其负荷问题不具有明显的结构或设备偏差特征，改造策略更侧重于运行精细化管理与维护效率提升。通过优化运行参数设置、完善巡检机制及提高设备维护质量，可在维持现有结构参数的基础上保持能效稳定水平。过度的结构性改造或设备替换可能带来边际收益下降与资源浪费，因此在该类型道路中更强调管理优化与运行稳定性维护。

## 2.6 分型结果汇总与路径优先级

综合上述结构、功率与运行特征分析，可将样本道路低碳改造路径匹配关系归纳为表3所示。

表3 道路分型与技术路径适配框架

Table 3 Framework of road classification and technology pathway adaptation

道路类型	主要特征	适配路径
高功率密度型	LPD 较高、单位公里碳排放处于高位区间	结构优化 + 智能控制
高单灯负荷型	单灯功率较高、单位基灯碳排放处于高位区间	光源替换 + 运行调控
运行冗余型	功率密度处于合理区间、运行模式固定	智能控制优化
结构合理型	功率与碳排放指标处于低位区间	精细化运行管理

分型结果表明，不同道路类型在结构属性与负荷构成上的差异，影响技术路径选择的侧重点。高功率密度型道路的优化重点在于结构调整，高单灯负荷型道路更适合设备层面的功率优化，运行冗余型道路则主要通过运行管理改善负荷水平，而结构合理型道路以稳定运行与维护提升为主。该分型框架将单一指标排序转化为多维特征判定，使路径选择建立在结构参数与运行属性综合分析基础之上，为后续技术适配性分析与实施优先级安排提供逻辑起点。

## 3 低碳改造技术路径适配性与实施优先级分析

基于前述道路分型结果，不同类型道路在结构参

数与运行特征方面的差异，构成技术路径选择的判定基础。结构属性、负荷构成与运行模式的差异，使改造策略在不同道路场景中的适配程度存在明显分化。围绕技术路径与道路类型之间的匹配关系，结合工程实施约束与负荷特征，对各类改造策略的适用范围与实施优先级进行系统分析，以明确不同道路类型的优化重点与实施顺序。

### 3.1 技术路径适配性的判定逻辑

在道路分型完成之后，低碳改造问题转化为技术路径与道路类型之间的匹配判定。不同分型道路在结构参数、负荷配置与运行管理方式方面的差异，影响改造措施的适用边界与实施效果。技术路径的选择应建立在结构属性与运行特征综合分析的基础之上。

从工程实施视角看，技术路径适配性主要受三个因素约束：其一，结构调整空间，即布灯结构与杆高配置是否具备优化条件；其二，负荷替换可行性，即单灯功率水平是否存在下降空间；其三，运行调控基础，即是否具备智能控制系统部署与精细化管理条件。上述因素分别对应结构改造、设备优化与运行管理三个层面，共同构成技术路径匹配的判定逻辑。

在此逻辑框架下，不同类型道路的技术适配重点呈现出差异化特征，为后续具体路径分析与优先级排序提供判定基础。

### 3.2 结构优化路径的适配分析

结构优化路径通过调整布灯间距、灯杆高度及配光方式等结构性参数，降低单位面积功率密度，从而改善系统整体负荷水平。该路径适用于功率密度偏高或布灯密度较大的道路类型，其负荷问题主要源于结构配置，而非单灯设备效率。结构调整能够直接改变单位面积负荷结构，对运行阶段能耗表现产生持续影响，并可与智能控制策略形成协同效果。在结构优化基础上实施调光控制，有助于进一步释放节能潜力。

需要指出的是，结构优化通常涉及灯杆重布设或间距调整，可能带来一定施工干扰与投资成本，同时需重新校核照度与均匀度指标。因而，其适配性取决于道路是否具备结构调整空间以及改造成本与收益之间的匹配程度。结构优化路径适用于功率密度偏高且具备结构调整空间的道路类型，而在结构已相对合理的道路中，其边际改造收益有限。

### 3.3 光源替换路径的适配分析

光源替换路径主要针对单灯功率偏高的道路类型，通过采用高光效光源或优化驱动参数降低单灯功率输出，从而实现单位基灯负荷水平的下降。该路径所解决的问题主要集中于设备配置强度，而非结构密度。

与结构优化相比，光源替换对原有布灯结构影响较小，施工周期较短，工程干扰相对有限，实施过程具有较高的可操作性。在单灯功率显著偏高的情况下，通过设备更新即可取得较为稳定的负荷下降效果。

然而，该路径的优化空间受原始单灯功率水平限制。当单灯负荷已处于合理区间时，进一步替换带来的节能增益相对有限。因此，光源替换路径更适用于高单灯负荷型道路，在运行冗余型或结构合理型道路中，其适配性相对较弱。

### 3.4 智能控制路径的适配分析

智能控制路径主要通过分时调光、交通响应调节及集中管理等方式优化运行阶段负荷水平，在不改变结构参数的前提下降低运行阶段能耗。该路径所针对的问题集中于运行模式与调控机制，而非结构或设备配置本身。

与结构优化和光源替换相比，智能控制对既有物理结构依赖性较低，施工干扰相对有限，具备较好的推广适应性。对于运行模式单一、存在一定冗余运行特征的道路类型，通过引入分时调节与动态响应机制，可实现较为稳定的负荷优化效果。

然而，智能控制的节能潜力受原始负荷结构约束。当功率密度或单灯负荷水平本身偏高时，仅依赖运行调控难以实现深度优化。在此情况下，运行策略优化更适合作为结构或设备调整的补充措施。

总体来看，智能控制路径具有基础性与普适性特征，在运行冗余型道路中适配性较强，同时可与结构优化或光源替换形成组合应用，以实现多层次协同优化。

### 3.5 分型道路的实施优先级分析

基于技术适配分析结果，可对不同分型道路的改造优先级进行综合判定。优先级排序不以单一指标为依据，而是综合考虑结构调整空间、负荷优化潜力、工程可行性及实施影响等多重因素。

高功率密度型道路由于结构负荷水平较高且具备一定调整空间，结构优化与智能控制的组合路径具有

较高改造价值；高单灯负荷型道路的主要问题集中于设备配置强度，光源替换结合运行调控可形成较为直接的负荷改善效果；运行冗余型道路的负荷问题主要来源于运行模式，智能控制策略在此类道路中的适配程度相对更高；结构合理型道路整体负荷水平较为稳定，改造重点更多体现在运行管理优化与维护效率提升方面。

上述优先级逻辑体现了结构属性、设备配置与运行模式之间的差异化影响，有助于避免单一指标排序带来的决策偏差，使技术路径选择更加契合工程实施条件。

### 3.6 差异化闭环决策流程框架

在分型判定与技术适配分析基础上，可构建结构化的闭环决策流程框架。该框架以道路特征识别为起点，以技术路径匹配与优先级排序为核心，并引入实施效果评估与反馈修正环节，形成动态优化的决策体系（见图1）。

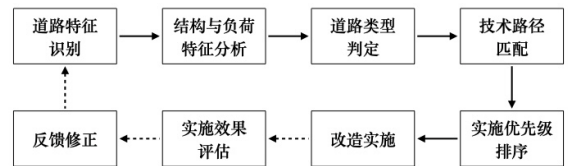


图1 城市道路照明低碳改造闭环决策流程

Fig. 1 Closed-loop decision process for low-carbon retrofit of urban road lighting systems

决策流程首先对道路关键参数进行识别，包括功率密度、单灯功率及运行时长等指标；随后结合结构与负荷特征完成类型判定；在此基础上匹配相应技术路径，并结合工程实施条件确定改造优先级。改造实施后，通过运行数据与碳排监测结果开展实施效果评估，分析节能与减碳目标达成情况，并根据评估结果对路径选择与参数设置进行反馈修正，从而形成持续优化的动态决策闭环。

该闭环流程实现了由单次判定向动态优化机制的转变，使低碳改造决策建立在结构参数、运行特征与实施反馈协同分析的基础之上，增强了路径选择的适应性与工程实施的长期稳定性。

## 4 结论与工程启示

### 4.1 研究结论

城市道路照明系统低碳改造涉及结构参数、负荷

配置与运行模式等多维因素，其路径选择应建立在综合判定基础之上。样本道路在功率密度、单灯负荷及运行管理方式方面呈现出系统性差异，这种差异影响技术措施在不同道路场景中的适配边界。基于结构与运行特征构建的分型框架，有助于明确不同道路在负荷属性与结构参数上的差别。结构优化、光源替换与智能控制三类技术路径分别对应结构负荷偏高、设备负荷集中与运行冗余等不同问题情形。技术路径的有效性取决于其与道路类型之间的匹配程度。分型驱动的决策逻辑突破了单一碳排或能耗排序的局限，将改造判定建立在结构属性与运行特征的协同分析基础之上，提高了路径选择的工程合理性。

#### 4.2 工程实施原则

在工程实施层面，低碳改造应遵循分阶段与分层级推进原则。改造决策需基于负荷形成机制的判定，在结构参数、设备配置与运行模式之间进行针对性分析，并结合施工组织条件与投资约束合理安排实施顺序。具备结构调整空间的道路可优先开展结构优化评估；设备负荷集中的道路宜统筹设备更新与运行调控；运行模式单一的道路则可通过智能控制与分时管理实现渐进式优化。在实施过程中，应兼顾照明安全标准、投资强度与运行稳定性，避免因过度结构调整或重复改造导致边际收益下降。基于分型判定构建的决策体系，有助于增强改造工作的针对性与资源配置效率。

#### 4.3 方法适用性与研究展望

本研究基于样本道路结构与运行参数开展分型与路径匹配分析，其决策框架适用于具有类似结构特征的城市道路场景。在推广应用时，应结合不同城市的道路等级体系、气候条件及建设阶段进行适配调整。

未来研究可在现有框架基础上引入动态交通流量与实时照度反馈数据，构建多源数据驱动的动态决策

模型，以进一步提升路径选择的精细化水平。同时，可结合数字化管理平台与智能感知技术，推动道路照明低碳改造由静态判定向动态优化转型。

### 参 考 文 献

- [1] 中共中央，国务院．关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[Z/OL]. (2021-09-22)[2026-02-21]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm).
- [2] 住房和城乡建设部，国家发展改革委．关于印发城乡建设领域碳达峰实施方案的通知：建标〔2022〕53号[A/OL]. (2022-06-30)[2026-02-21]. <https://app.www.gov.cn/govdata/gov/202207/14/487277/article.html>.
- [3] International Energy Agency. Lighting: Tracking clean energy progress 2023[R/OL]. (2023-07-11)[2026-02-21]. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/lighting>.
- [4] Balázs L, Braun F, Lengyel J. Energy saving potential of traffic-regulated street lighting[J]. Sustainability, 2023, 15: 6750.
- [5] Mazzei I, Saint R, Kay A, et al. Embodied carbon quantification of luminaires using life cycle assessment and CIBSE TM65 methodologies: A comparison case study[J]. Journal of Industrial Ecology, 2024, 28:59-73.
- [6] Skandali C, Zerefos S, Tsangrassoulis A, et al. Reviewing the parameters that affect sustainability and energy efficient concepts in road and urban lighting design[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 490:144607.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部．城市道路照明设计标准：CJJ 45—2015[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [8] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心．2023年减排项目中国区域电网基准线排放因子[R/OL]. (2024-07-08)[2026-02-23]. <https://ccer.cets.org.cn/notice/noticeDetail?bulletinInfoId=1259913708889575424>.
- [9] 全国照明电器标准化技术委员会和全国碳排放管理标准化技术委员会．温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 照明产品：GB/T 45818—2025[S]. 北京：中国标准出版社，2025.