

城市道路照明系统的低碳化路径研究 ——基于生命周期评价方法的南京实证分析

郭菲¹, 臧锋², 徐湑³, 陈康伟³

(1. 奕斐环境规划设计(上海)有限公司, 上海 200433; 2. 南京市城市照明建设运营集团有限公司, 江苏南京 210010; 3. 上海博续明观科技有限公司, 上海 201203)

摘要: 城市道路照明系统在“双碳”背景下成为低碳基础设施转型的重要对象。现研究多聚焦于运行阶段能耗碳排放, 忽视材料制造、施工建设与运行维护等生命周期其他环节, 导致碳足迹评估偏差。本文基于 ISO 14067 标准与生命周期评价方法, 构建覆盖原材料获取、制造安装至运行维护的碳排放核算模型, 结合南京六条典型道路的实地数据与工程参数, 系统识别城市道路照明的主要碳源构成与影响因子。在此基础上, 提出智能控制优化、灯具参数调整与照明布设重构等分型低碳化策略, 构建“一路一策”协同减排路径体系并开展模拟验证。研究成果可为城市道路照明系统绿色更新提供方法框架与技术支撑, 也为政策制定、招评标机制优化及低碳城市道路照明建设提供实证依据。

关键词: 道路照明系统; 生命周期评价 (LCA); 碳足迹; 碳减排策略; 碳达峰碳中和目标

中图分类号: U491.5+3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-440X.2025.04.001

Low-Carbon Transition Pathways for Urban Road Lighting Systems: An Empirical Study in Nanjing Based on Life Cycle Assessment

GUO Fei¹, ZANG Feng², XU Tian³, CHEN Kangwei³

(1. *Innovision Environmental Planning & Design (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200433, China;*
2. *Nanjing City Lighting Construction and Operation Group Co., Ltd., Nanjing 210010, China;*
3. *Shanghai Boxu Mingguan Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China*)

Abstract: Urban road lighting systems have emerged as key targets for low-carbon infrastructure transition under the dual-carbon policy framework. Current research predominantly focuses on carbon emissions during the operational phase, while neglecting emissions associated with material manufacturing, construction, and maintenance phases, thereby leading to incomplete carbon footprint assessments. This study, grounded in ISO 14067 and Life Cycle Assessment (LCA) methodology, establishes a carbon emission accounting model encompassing raw material acquisition, product manufacturing, installation, and operational maintenance stages. Based on empirical data from six representative roads in Nanjing, the study identifies major carbon sources and influencing factors in urban lighting systems. A set of differentiated low-carbon strategies, such as intelligent control optimization, lamp parameter adjustment, and lighting layout redesign, is proposed and integrated into a “road-specific” emission reduction framework. Simulation results validate the effectiveness of the proposed approach. The findings provide a methodological foundation and technical support for the green upgrade of urban lighting systems, while also offering empirical evidence for policy-making, bidding evaluation reform, and sustainable lighting infrastructure development.

Key words: road lighting systems; LCA; carbon footprint; carbon reduction strategies; dual-carbon targets

引言

随着城市化进程加快,城市道路照明系统作为保障夜间出行安全与城市景观品质的重要基础设施,其能源消耗和碳排放问题日益受到广泛关注。根据国际能源署(International Energy Agency,简称IEA)发布的数据,照明用电约占全球总电力消耗约15%^[1],其中城市道路照明在城市公共用电中占比高达30%~50%^[2,3],构成显著的间接碳排放源。在我国“碳达峰、碳中和”战略目标指引下^[4],推动道路照明系统向低碳化转型,已成为构建绿色城市体系的重要组成部分。

然而,当前研究大多集中于运行阶段(B6)电力消耗所导致的碳排放^[5,6],而对材料获取(A1-A2)、生产制造(A3)、安装施工(A5)及运行期非能耗相关活动(B2-B5)等生命周期其他阶段的关注明显不足,进而造成对城市道路照明系统整体碳足迹评估的偏差^[7]。例如,多数研究仅依据年耗电量进行碳排放估算,忽视了设备制造、运输、维护与更换等环节的间接排放,限制了系统性识别减排潜力与制定精准化策略的能力。

针对上述研究空白,本研究构建了基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法的城市道路照明系统碳足迹核算模型,全面覆盖生产制造、施工建设、运行使用及维护管理等关键生命周期阶段,系统考察包括直接排放与电力消费相关的间接排放路径。研究以南京市六条具有现实代表性的城市道路为实证对象,识别系统中碳排放的关键阶段与主控因子,并据此设计“一路一策”式的差异化低碳改造路径,通过情景模拟量化减排效益,旨在为城市道路照明系统的低碳转型提供科学支撑与政策建议依据。

1 研究方法

本研究依据国际标准化组织(International Organization for Standardization,简称ISO)发布的《温室气体-产品碳足迹-量化要求和指南》(ISO 14067:2018)建立碳足迹核算框架^[8],并结合生命周期评价方法,对城市道路照明系统各生命周期

阶段的碳排放进行系统量化分析,旨在全面识别碳排放特征及其减排潜力。

1.1 数据来源与功能单位

本研究所采集数据涵盖生产阶段(A1-A3)、施工阶段(A5)与使用阶段(B2-B6),其中以运行期电力消耗所引致的间接碳排放为重点。运行阶段的能耗数据来自于项目供应商提供的实测数据,碳排放因子采用2023年中国电网平均排放因子^[9]。背景数据来源包括中国产品碳足迹因子数据库(CPCD 2.0)与国际通用数据库coinvent v3.11,数据处理与计算分析在Microsoft Excel环境下进行。

为提升研究结果的通用性与跨项目可比性,碳排放强度采用以下两个功能单位进行表达:

(1) 单位公里碳排放强度:表示每公里道路照明系统在全生命周期内的年均碳排放,单位为千克二氧化碳当量每公里每年(kgCO₂e/km/a);

(2) 单位基灯碳排放强度:表示每基路灯在全生命周期内的年均碳排放,单位为千克二氧化碳当量每基灯每年(kgCO₂e/unit/a)。

1.2 系统边界设定

系统边界的设定遵循生命周期评价方法中“相关性优先”与“适度简化”的原则。鉴于城市道路照明系统退役阶段碳排放贡献较低,且相关活动数据获取难度较大,故本研究核算边界限定于生产制造、施工安装与使用运行阶段,不包括退役与废弃物处理阶段。排放路径涵盖直接碳排放(如施工设备燃料消耗)与运行期间因电力使用所引致的间接碳排放。本研究定义的城市道路照明系统生命周期系统边界如图1所示。

1.3 评价基准设定

本研究以《城市道路照明设计标准》(CJJ 45—2015)^[10]中的功率密度限值为运行阶段(B6)的碳排放评价基准,具体方法为:通过将标准中规定的功率密度与年运行时间和国家统一电网排放因子相乘,推导出单位公里和单位基灯的理论碳排放基准值,以此作为判断实际运行数据减排潜力的依据。需要说明的是,该基准值仅适用于B6阶段,其他生命周期阶段(如A1-A2、A5、B2-B5)未设统一基准,而是基于碳排构成比例和实测数据进行相对差异分析与减排识别。

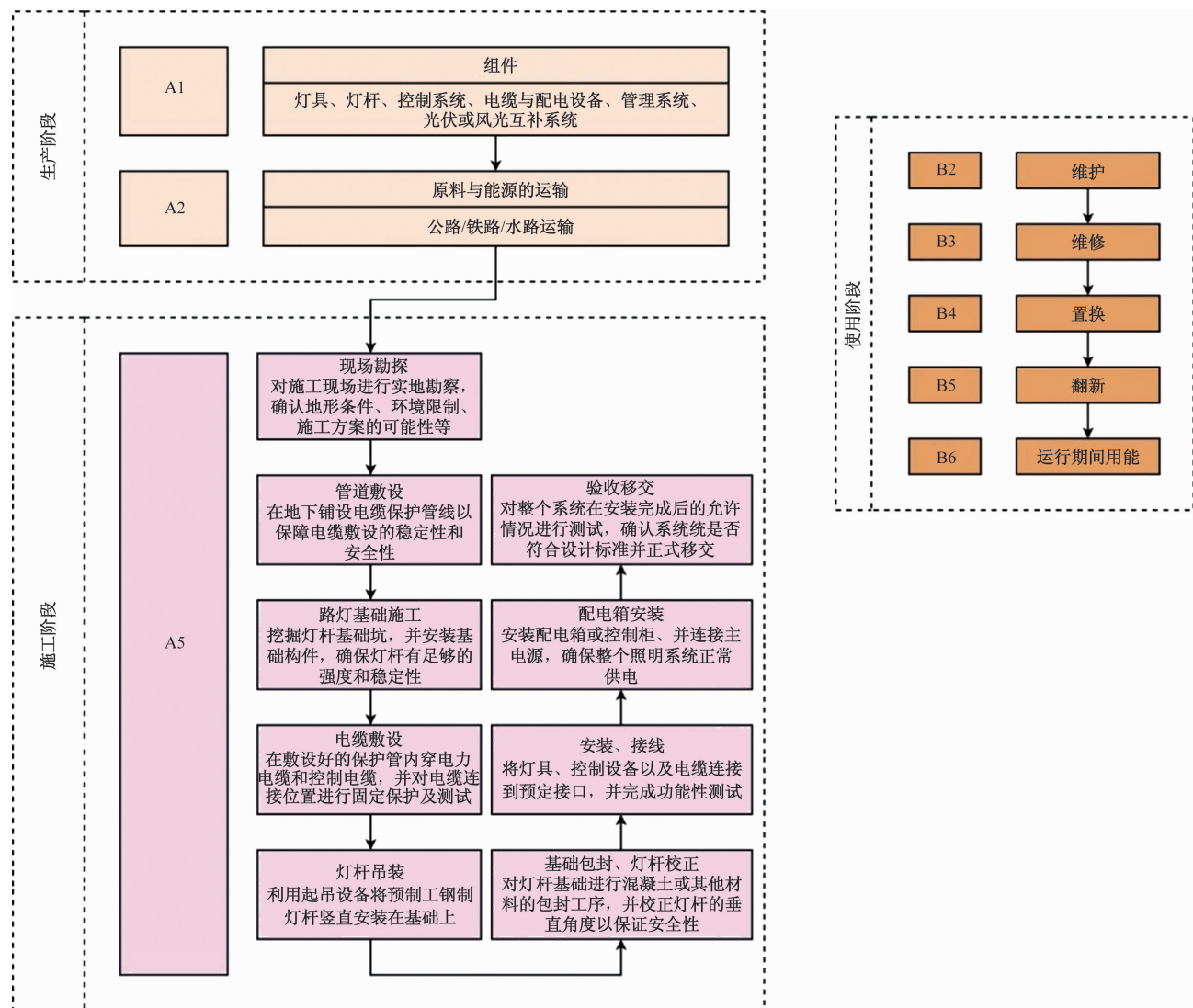


图 1 城市道路照明系统生命周期系统边界

Fig. 1 System boundary for LCA of urban road lighting

2 道路样本选择与碳排放核算

2.1 样本道路基本信息

为验证所构建碳足迹核算模型的适用性与实际可操作性，研究选取南京市六条具有不同道路等级、功能属性及交通特征的典型城市道路，涵盖干道及支路类型。样本道路兼顾代表性与数据获取的可行性，具备良好的通用性与推广价值。所选道路长度介于为 0.44 ~ 1.16 km，较为全面地反映城市道路照明系统的主要类型与运行特征。

为系统刻画道路照明系统的运行结构与性能差异，研究采集了三类关键基础数据：一是道路属性

数据，包括名称、长度、建设年份、道路等级、人行道布设形式与车道数量等；二是照明设施数据，涵盖灯具数量、单灯功率与系统总功率等核心技术参数；三是运行数据，即年均照明时长。为提升不同道路间碳排放强度的可比性，研究统一设定年开灯时长为 4 222 h，依据为南京地区全年日照特征与照明时段统计（表 1）。

本研究采用了项目原始工程设计资料与灯具配置参数作为评价基础。样本道路均由专业照明设计公司完成设计，设计图纸已通过主管部门审核并实施，相关布灯功率、间距、道路等级与设计标准对应，符合《城市道路照明设计标准》（CJJ 45—2015）等规范要求，其已达到功能性照明的基本合

规要求。

为支持生命周期前期阶段（A1-A2）和施工阶段（A5）的碳排分析，表2汇总了样本道路照明系统核心组件的主要参数，包括灯杆类型、灯

杆重量、灯具单件重量、光源功率、与运输方式等。数据来源于项目实施单位提供的设备采购清单与物料台账，具体用于后续生命周期碳排分项估算。

表1 样本道路基本信息

Table 1 Key attributes of selected road segments

道路名称	功率/kW	年开灯时长/h	道路长度/km	基灯数量/(unit)	道路建造时间	道路类型	人行道	车道数量
山庄路	1.92	4 222	0.44	16	2019年	支路	双侧	2
方家营路	8.00	4 222	0.82	40	2020年	次干道	双侧	4
石头城路	2.61	4 222	0.7	29	2002年	支路	双侧	4
公共路	7.32	4 222	0.52	45	2019年	次干道	双侧	4
和悦街	9.20	4 222	1.16	52	2018年	次干道	双侧	6
后宰门路	6.12	4 222	0.45	30	2017年	次干道	双侧	4

表2 样本道路照明系统核心组件主要参数

Table 2 Key components' parameters of sample road lighting systems

道路名称	灯杆类型	灯杆重量/(kg/unit)	灯具重量/(kg/unit)	光源功率/W	运输方式
山庄路	10 m 单叉灯杆 + 综合杆	180/1 000	7.5	120	道路运输
方家营路	9 m 单叉灯杆	160	10	200	道路运输
石头城路	10 m 单叉灯杆 + 综合杆	180/1 000	7	90	道路运输
公共路	9 ~ 15 m 多规格灯杆 + 综合杆	160/490/180	7.5/10	120/200	道路运输
和悦街	9 ~ 13 m 多规格灯杆	160/420	10	160/200	道路运输
后宰门路	8 ~ 15 m 多规格灯杆 + 综合杆	140/490/1 200	10	160/200	道路运输

2.2 碳排放核算方法与计算模型

本研究采用生命周期评价（LCA）方法，对城市道路照明系统在材料制造、运输、安装、运行及维护等阶段的碳排放进行系统核算。核算以碳排放因子法为基础，即通过将活动数据（如电耗、材料用量、运输里程）与相应碳因子相乘，计算各阶段碳排放总量。基本计算见式（1）：

$$CF = AD \times EF \quad (1)$$

式中，CF为碳排放量（kgCO₂e）；AD为活动数据；EF为相应单位活动数据的碳排放因子。

为提高碳足迹估算的精度，研究构建了以下五个子模型：

（1）A1阶段（材料制造）：涵盖灯杆、灯具、配电设施等部件的原材料获取与加工环节，根据设备寿命周期进行折算；

（2）A2阶段（材料运输）：依据材料重量、运输距离与运输方式，结合相关排放因子估算运输碳排；

（3）A5阶段（建设安装）：包括施工设备运行、现场作业与安装过程中的能源消耗；

（4）B2-B5阶段（维护运维）：涉及日常巡检、故障维修、设备更换及小规模改造，碳排强度受维护频率和作业内容影响显著；

（5）B6阶段（运行用电）：为主要碳源，通过灯具功率、年开灯时长与节能系数计算年用电量，再乘以适配的电网排放因子得到运行期碳排放。

2.3 控制系统碳排核算边界说明

本研究对控制系统类设备（如单灯控制器等）的生命周期碳排进行了边界设定与合理简化。与灯具、灯杆等主要构件相比，控制设备质量较轻、材料用量较少、运行功耗极低，其在制造、运输和运行阶段的碳排占比处于较低水平。

参考典型单灯控制器的生命周期碳足迹数据，其制造与运输阶段合计碳排通常占整个照明系统生命周期碳排总量的比例不足1%；运行功耗一般低于1W/盏，运行阶段碳排贡献亦可忽略。因此，结合生命周期评价中的“显著性原则”（cut-off criteria）与当前数据库的完备性情况，本研究在系统边界设定中不将控制系统的碳排作为独立子系统进行量化核算，而是通过整体功能性路径评估其间接影响。

此外，研究样本道路多数已部署控制系统，后续减排分析中所涉及的控制策略优化，均基于现有系统结构进行能效提升模拟，不涉及新增控制器设备的制造与安装环节。此举有助于保持不同模拟路径下估算逻辑与边界的一致性，避免高估减排潜力或引入偏差。未来研究可在控制系统碳排数据库进一步完善的基础上，扩展对控制设备制造、集成与系统升级全过程的碳足迹建模，以支持更全面的系统优化评估。

2.4 核算结果与碳足迹构成分析

基于上述模型与南京六条样本道路的实测数据，研究系统评估了其全生命周期碳排放水平，并从单位长度与单位基灯两个维度进行对比分析。结果显示，各道路碳排放强度存在显著差异，反映出在系统设计、照明配置与运行管理方面的显著性差异（表 3）。

表 3 样本道路照明系统全生命周期碳排放

Table 3 Life cycle carbon emissions of sample road lighting systems

道路	单灯平均功率/W	LPD/(W/m ²)	每年每公里道路碳排放/(kgCO ₂ e/km/a)	每年每基灯碳排放/(kgCO ₂ e/unit/a)
山庄路	120.00	0.62	16 664.17	458.26
方家营路	200.00	0.70	28 612.98	586.57
石头城路	90.00	0.27	13 073.06	315.56
公共路	162.67	1.01	50 909.90	588.29
和悦街	176.92	0.38	23 046.23	514.11
后宰门路	204.00	0.97	39 273.11	589.10

从单位长度分析，公共路的碳排放强度最高，为石头城路的 3.89 倍，主要由于其照明功率密度

(LPD) 高达 1.01 W/m²，显著超过国家推荐值。后宰门街亦存在类似问题，表明照明系统能效存在优化空间。

从单位基灯分析，后宰门街与公共路的单灯碳排放强度最高，分别达到 589.10 kgCO₂e/unit/a 与 588.29 kgCO₂e/unit/a，显示出其布灯间距大、单灯负荷重。相对而言，石头城路的单灯碳排最优，LPD 仅 0.27 W/m²，表明其照明布局与功率控制效果良好。

分阶段碳排构成分析显示，运行阶段（B6）为绝对主导，占比普遍超过 95%。以公共路为例，其 B6 阶段排放占比高达 72.4%。原材料制造阶段（A1-A2）为次要排放源，如石头城路该阶段碳排占比超过 20%。施工（A5）与运维（B2-B5）阶段占比较小，但在精细管理与绿色招标中仍具参考价值（表 4、表 5）。

尽管设备重量、光源功率与灯杆构型为早期碳排放强度提供了关键参考，但在单位公里与单位基灯两个维度下的排序并不一致。这种差异主要源于以下几点：其一，布设密度差异显著，导致单位长度碳排水平出现“摊薄效应”；其二，道路系统中轻重设备混合使用，不同构件占比差异对平均碳排水平影响较大；其三，运输路径、方式与批次组织对 A2 阶段碳排影响不可忽视；其四，施工阶段目前使用统一碳排因子，未细化至具体作业流程，存在一定模型通用性偏差。这也提示后续研究应进一步提升模型颗粒度与工艺边界设定能力。

表 4 样本道路照明系统每年每公里各阶段碳排放

Table 4 Carbon emissions per kilometer per year by stage

生命周期阶段	山庄路/(kgCO ₂ e)	方家营路/(kgCO ₂ e)	石头城路/(kgCO ₂ e)	公共路/(kgCO ₂ e)	和悦街/(kgCO ₂ e)	后宰门街/(kgCO ₂ e)
A1-A2	4 994.16	2 710.65	3 174.03	13 942.38	2 115.60	3 561.89
A5	20.06	24.94	3.86	38.81	2.50	5.36
B2-B5	218.31	318.85	127.24	50.67	150.79	77.24
B6	11 431.64	25 558.55	9 767.93	36 878.04	20 777.34	35 628.62
合计	16 664.17	28 612.98	13 073.06	50 909.90	23 046.23	39 273.11

表 5 样本道路照明系统每年每基灯各阶段碳排放

Table 5 Carbon Emissions per Pole per Year by Stage

生命周期阶段	山庄路/(kgCO ₂ e)	方家营路/(kgCO ₂ e)	石头城路/(kgCO ₂ e)	公共路/(kgCO ₂ e)	和悦街/(kgCO ₂ e)	后宰门街/(kgCO ₂ e)
A1-A2	137.34	55.57	76.61	161.11	47.19	53.43
A5	0.55	0.51	0.09	0.45	0.06	0.08
B2-B5	6.00	6.54	3.07	0.59	3.36	1.16
B6	314.37	523.95	235.78	426.15	463.49	534.43
合计	458.26	586.57	315.56	588.29	514.11	589.10

综上,道路照明系统碳足迹受运行功率密度、布灯策略与设备材质等多因子综合影响。此类差异化排放特征为后续制定精准化减排路径与分类干预策略提供了坚实数据基础与决策支持。

3 减排路径与策略成效

3.1 减排路径设计

为推动城市道路照明系统实现系统性减碳与精准化治理,本研究构建了以行业标准、当前技术能力与道路特征为基础的多层次策略体系。通过对比实测的道路运行阶段(B6)碳排数据与由功率密度限值推导出的理论基准值,可以明确判断各道路照明系统的运行能效水平和减排潜力,从而确定优化措施的必要性及实施效果。其他阶段的碳排识别与优化建议,则结合碳排构成差异与各阶段的关键影响因子进行分析。

相较于传统“一刀切”的改造方式,本策略体系依托《城市道路照明设计标准》(CJJ 45—2015),并结合实地调查数据与工程实践,遵循“标准约束、技术适配、分类施策”的原则展开路径设计。该路径体系包括三类核心减排技术手段,分别对应运行控制、照明设备配置与布设结构优化三个层面:

(1) 控制策略优化(普适型控制策略):适用于所有道路类型,通过分时调光、感应控制、照度反馈与集中管理等方式动态调节照明功率,提升能效与降低冗余运行时间。根据现有工程应用经验,保守估计节能率可达25%^[11,12]。

(2) 灯具功率优化(技术替代型策略):针对平均单灯功率偏高的路段(如采用高压钠灯或早期

LED设备),通过更换高光效、低功率LED灯具,实现系统能效提升与负荷降低。

(3) 灯杆结构优化(结构减量型策略):面向照明功率密度(LPD)超出CJJ 45—2015限值的道路,通过调整灯杆高度、布灯间距与配光模式,优化布设逻辑,控制灯具数量以削减系统负荷。

除运行阶段外,非B6阶段亦具备减碳优化空间。针对A1-A2阶段的设备制造过程,建议在照明产品选型中优先采用轻质、高强度、可回收的材料(如铝合金替代钢材)及模块化结构设计,以降低材料投入与初始碳排。对于A5施工阶段,优化施工组织与设备利用(如集成预制构件、集中作业)可减少机械燃料消耗与现场能源排放。运维阶段(B2-B5)则可通过建立基于状态感知的维修制度,减少非必要的定期检修行为;同时,借助智能监控手段,实现集中调度与维保效率提升,间接降低维保阶段的碳排频度。这些策略虽以定性为主,但在照明系统能效接近上限的背景下,具备一定的边际减排效益与工程操作价值。

3.2 策略实施成效

基于上述策略体系,本研究对六条样本道路分别制定“一路一策”的差异化减排路径,并进行模拟计算。本节所构建的减排路径模拟,均以样本道路当前照明系统的基础配置为前提,假设在不更换灯具、灯杆等主要物理构件的前提下,通过调整控制策略、布灯参数或灯具功率参数实现能效优化。因此,模拟结果所反映的减排量为在现有结构基础上可实现的潜力评估,未计入新增设备制造、运输与安装所带来的额外碳排影响。模拟结果表明,通过组合部署策略,可实现显著碳减排效益(表6)。

表6 样本道路照明系统减排策略实施成效

Table 6 Carbon reduction performance by strategy for sample road lighting systems

道路名称	原始碳排放/ (kgCO ₂ e)	碳减排策略	灯具功率优化 减排/(kgCO ₂ e)	灯杆结构优化 减排/(kgCO ₂ e)	控制策略优化 减排/(kgCO ₂ e)	总减排量/ (kgCO ₂ e)	减排后碳排放/ (kgCO ₂ e)
山庄路	7 332.23	灯杆结构优化+智能控制	—	1 714.75	2 857.91	4 572.66	2 759.57
方家营路	23 462.65	智能控制	—	—	6 389.64	6 389.64	17 073.01
石头城路	9 151.14	智能控制	—	—	2 441.98	2 441.98	6 709.16
公共路	26 473.15	灯具功率优化+智能控制	9 660.15	—	9 219.51	18 879.66	7 593.49
和悦街	26 733.63	灯杆结构优化+智能控制	—	3 116.60	5 194.34	8 310.94	18 422.69
后宰门街	17 672.90	灯具功率优化+智能控制	6 934.15	—	8 907.16	15 841.31	1 831.59

值得说明的是,“控制策略优化”路径未涉及新增控制器等硬件设施,仅在现有系统中通过调光逻辑与运行时段调整模拟节能效果。相关控制器设备在制造与运输环节的碳排占比极低(通常<

1%),对总量评估与路径比较影响甚微,故在本研究模型边界中未予单列。其减排效果仅反映能耗降低对运行阶段碳排的影响。

具体而言,所有道路统一部署智能控制系统作

为基础策略；对于单灯功率较高或 LPD 超标的路段，则叠加采用灯具功率优化与结构重构方案。如，后宰门街与公共路原系统功率较高（208 W、230 W），在应用智能控制与灯具替代后，分别实现 89.6% 与 71.3% 的碳减排率；山庄路与和悦街虽单灯功率相对较低，但因布灯密度高或设计冗余，叠加结构优化策略后，实现 62.4% 与 31.1% 的减排率；方家营路与石头城路系统参数已基本达标，仅应用优化智能控制策略，仍实现约 26% 的减排，说明该策略具有广泛的适配性与基础效益。总体来看，六条道路的生命周期总减排量达 56 436.19 kgCO₂e，减排率平均为 50.9%，表明分类施策、系统减排路径设计具有良好的可实施性与工程成效。

4 结果与结论

4.1 全生命周期碳足迹特征识别

基于生命周期评价方法，本研究系统核算了南京市六条典型城市道路照明系统的碳排放。结果表明，运行阶段（B6）为绝对主导碳源，碳排占比普遍超过 68%，最高达 89.3%。该结论与既有研究成果高度一致，进一步验证了运行能效优化作为城市照明碳减排核心路径的科学合理性与紧迫性。

在非运行阶段中，材料制造环节（A1-A2）为关键碳排来源，其排放量显著高于安装施工（A5）与运维阶段（B2-B5）。以公共路为例，A1-A2 阶段的碳排放量是后续三个阶段总和的数倍，凸显在系统设计初期引入绿色材料与结构轻量化手段的战略价值。

施工阶段（A5）在所有样本道路中碳排占比极低，具备管理简化空间。运维阶段（B2-B5）虽排放占比有限，但其波动性强，受设施密度、使用频率与维护制度影响显著，具备开展绿色运维优化与智能管控的现实意义。

尽管 A1-A2、A5 及 B2-B5 阶段的碳排放占比相对较低，但在道路照明系统建设初期或长期运行后的累计影响不可忽视。特别是在运行效率已趋优化、B6 阶段减排潜力相对有限的前提下，非运行阶段的碳排控制将逐步成为未来系统优化与绿色设计的重要方向。

此外，不同道路样本在单位公里与单位基灯维度下的碳排强度排序不完全一致，反映出系统设计中的多因素交互影响。如，公共路与后宰门街因其布灯密度高、单位灯具功率大，在两个维度下均表现

为碳排强度最高；而石头城路则因采用功率较低的灯具及合理的布设结构，显著优于其他样本道路。差异性的形成与以下因素密切相关：其一，不同道路的照明配置密度与布局逻辑存在显著差异，直接影响单位长度的碳排水平；其二，灯具、灯杆等设备的质量与选型差异决定了 A1-A2 阶段的碳排贡献；其三，运输路径与批次组织方式不同，亦导致 A2 碳排结果具有较强波动性；其四，施工阶段仍采用统一排放因子，未细化到工艺路径，可能对道路间的微差异体现不足。该分析说明，基于 LPD 与设备参数等构型差异进行道路间碳排对比具有合理性，也为“差异化路径”提供了必要前提与依据。

4.2 策略适配性与减排效益差异

为匹配不同道路在照明设计、功率密度与设备构型方面的差异，本研究构建了“三类策略—三类边界”的路径匹配机制。核心策略包括智能控制系统、灯具功率优化与灯杆布设结构优化。

智能控制策略作为通用方案，具备部署成本低、响应灵敏与改造干扰小等优点，适用于存量道路改造项目，节能减排成效稳定可靠。

灯具功率优化方案则聚焦高能耗系统，适用于单灯功率超标路段，通过高效替换提升发光效率与系统经济性。

布设结构优化策略体现“前端设计减碳”思维，适用于 LPD 超限路段，通过重构布灯逻辑减少装灯总量。

4.3 综合路径优化与策略协同价值

模拟结果显示，采用“智能控制 + 技术替代 + 结构优化”的复合策略组合，可在单位项目中实现显著非线性减排效益。不同策略间存在协同强化效应，在高能耗系统中，联合部署策略可实现 70% 以上的减排率；而在能效已达标系统中，单一智能控制策略亦能稳定贡献 20% ~ 30% 的基础减排量。

该结果验证了“基础普适 + 靶向优化”的梯度策略框架的科学性，有效提升了照明系统改造方案的适配性与资源配置效率，为城市道路照明系统的低碳转型提供了系统性、操作性的工程路径。

4.4 阶段碳排排序差异成因分析与模型改进建议

在 A1-A2 和 A5 阶段的碳排评估中，部分道路设备规格差异显著，但实际碳排结果排序与之不完全一致。这反映出生命周期评估需结合多维参数进

行系统建模,避免过度依赖单一物理变量外推。下一阶段研究建议引入构件占比权重、分级施工碳排放因子与基于工艺路径的动态模型,以增强碳排放估算的适应性与可推广性。

4.5 结论与启示

本研究通过构建并模拟“一路一策”的差异化策略体系,系统验证了智能控制、技术替代与结构优化三类路径的协同减排效应,明确展现出多策略联动在提升减碳效率与适配多样化道路场景中的综合优势。结果表明,该体系可为城市道路照明系统绿色转型提供科学可量化、技术可实施、管理可复制的改造路径与策略依据。

此外,本研究基于实地数据与本土应用场景,丰富并验证了城市道路照明系统生命周期评价模型的实践基础,为绿色基础设施领域的碳减排政策制定、绿色更新工程设计及绿色招投标评价体系建设,提供了具操作性的数据支撑与方法模板,体现出积极的研究价值与现实意义。

参考文献

- [1] International Energy Agency (IEA). Energy efficiency 2022 [R]. Paris: IEA, 2022.
- [2] Copenhagen Centre on Energy Efficiency. Public lighting toolbox for municipal energy efficiency implementation [EB/OL]. (2022-06-01) [2025-06-11]. <https://c2e2.unepccc.org/collection/public-lighting-toolbox-for-municipal-energy-efficiency-implementation/>
- [3] Cacciatore G, Fiandrino C, Kliazovich D, et al. Cost analysis of smart lighting solutions for smart cities [C] // IEEE. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris, France; IEEE, 2017: 1-6.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府网. 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[EB/OL]. (2021-10-24) [2025-06-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [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 (1): 59-73.
- [6] Cantisani G, Di Mascio P, Moretti L. Comparative life cycle assessment of lighting systems and road pavements in an Italian TwinTube Road Tunnel [J]. Sustainability, 2018, 10 (11): 4165.
- [7] Picardo A, Galván M J, Soltero V M, et al. A comparative life cycle assessment and costing of lighting systems for environmental design and construction of sustainable roads [J]. Buildings, 2023, 13 (4): 983.
- [8] Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification: ISO 14067: 2018 [S]. Geneva: ISO, 2018.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布 2023 年全国电力碳足迹因子的公告 [EB/OL]. (2025-01-23) [2024-06-13]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202501/t20250123_1101226.html
- [10] 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, 2016.
- [11] Shahzad G, Yang H, Ahmad A W, et al. Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (13): 5397-5405.
- [12] Balázs L, Braun F, Lengyel J. Energy saving potential of traffic-regulated street lighting [J]. Sustainability, 2023, 15 (8): 6750.

弘扬科学家精神 | 中国照明学会开展照明领域老科学家信息采集活动

为大力弘扬科学家精神,保存老一辈科学家学术成长资料和照明行业珍贵史料,中国照明学会组织开展了照明领域老科学家信息采集活动。

该活动目前已成功收集到数位 80 岁以上老一辈科学家的文字、图片、视频等资料。这些资料记录了老一辈科学家在照明领域的科研历程、学术贡献、科学精神及感人事迹。后续,中国照明学会将对收集到的资料史料进行整理与挖掘,计划通过学会官网和微信公众号进行系列宣传,让更多照明领域从业者和社会公众了解老科学家的事迹,感受他们的科学精神与家国情怀。

中国照明学会欢迎广大照明同行和社会各界人士,积极向学会提供照明领域老科学家学术成长过程相关的口述资料和音像资料等。让我们一起关注和重视老一辈科学家学术成果和科学思想的抢救性保存,共同推动照明领域老科学家信息采集活动深入开展,为照明领域传承科学精神、弘扬科学文化贡献力量。

有意愿参与老科学家信息采集活动的人员,请与中国照明学会秘书处联系。

电话: 010-65815905, 15931774549 邮箱: cics19870601@163.com