工程研究——跨学科视野中的工程
JOURNAL OF ENGINEERING STUDIES http://jes.ucas.ac.cn 跨学科视野中的工程
工程管理
DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250145
CSTR: 32282.14.JES.20250145

# 多场景-多信度下省域高速公路光伏发电潜力区间测算研究

朱文喜*，唐钰发

长沙理工大学 交通学院，长沙 410114

**摘要：**为有效促进高速公路与能源的深度融合，以实现能源自洽的愿景，本文基于广义路权理论，对高速公路路域内（包括服务区、养护基地、边坡等多场景）的光伏发电潜力进行了深入分析，并构建了多信度下的光伏发电潜力区间测算模型。对湖南省高速公路在近期、中期、远期内的光伏发电潜力区间及其运维年能耗量进行了测算与评估。分析发现，湖南省高速公路在近期内，其光伏发电潜力尚不足以满足年度能耗需求，因此仍需借助清洁能源作为补充。中期来看，光伏发电潜力显著提升，有望实现能源的基本自给自足。而在远期规划中，通过充分挖掘光伏发电潜力，不仅能实现能源自给自足，还能实现余电上网，为能源结构的优化贡献力量。在高速公路光伏发电的场景中，边坡的发电潜力最为突出，服务区次之，而收费站与养护基地的发电潜力相对较低。因此，对高速公路路域内光伏发电潜力的精准测算与有效挖掘，将有助于推动交通领域的减碳、零碳目标实现，为交通行业的绿色发展注入新的动力。

**关键词：**高速公路；光伏发电潜力；区间测算模型；多场景-多信度；太阳能资源

**中图分类号：**U491.8；TM615 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-4969(XXXX)XX-0001-13

## 引言

随着“双碳”政策的深入实施，风能、太阳能等清洁能源的利用成为多个领域推动碳减排的关键着力点之一。交通领域的碳排放占全球碳排放的22%~24%[1]，而我国公路交通的碳排放量更是占据了交通领域总排放的约80%[2]。《绿色交通“十四五”发展规划》[3]着重强调了深化绿色公路建设的重要性，以干线公路为重点，推动资源集约利用与清洁能源的应用，加速清洁能源装备的普及。因此，实现公路交通

**收稿日期：**2025-10-20； **修回日期：**2025-11-26
**基金项目：**长沙市自然科学基金项目（kq2208237）；长沙理工大学研究生科研创新项目（CLKYCX24109）
**作者简介：***朱文喜（1973—），男，副教授，研究方向为工程项目管理。E-mail:Juwency@csust.edu.cn（通讯作者）
唐钰发（2001—），女，硕士研究生，研究方向为工程项目管理。E-mail:18223641703@163.com
**引用格式：**朱文喜,唐钰发.多场景-多信度下省域高速公路光伏发电潜力区间测算研究[J].工程研究——跨学科视野中的工程,DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250145.
ZHU Wenxi, TANG Yufa. Research on the Interval Calculation of Photovoltaic Power Generation Potential of Provincial Expressways under Multi-Scenario and Multi-Credibility Conditions[J].Journal of Engineering Studies,DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250145.

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

的绿色化转型，不仅是交通领域节能减排、增加碳汇的必然选择，也为探索高速公路路域光伏发电的潜力以及促进交能融合提供了坚实的基础和有利的条件。

光伏发电的潜力受限于太阳能资源的禀赋条件。作为可再生清洁能源的一种，我国年太阳辐射度大于5000 MJ/m$^2$的地区约占中国总面积的2/3[4]。国内学者对太阳能资源的获取与分布进行了深入研究。Shen等[5]利用SMARTS模型的空间校正功能，获取了西藏地区1 km分辨率的太阳能资源网格数据，并细致地评估了该地区近30年来太阳能资源在时空上的分布特征。Sun等[6]则针对全国太阳能资源利用效率低下的情况，采用强度-面积-持续时间(IDA)分析法来分析其空间和时间特征，并提出了综合指数体系以评估太阳能资源开发的可持续性。Jing等[7]通过引入纬度和高度两个因素，建立了基于纬度和高度的最佳倾斜角度简化计算方法，从而计算了中国全年的光伏发电量，进而获得了中国太阳能资源利用潜力空间分配的结论。

光伏发电技术在多个高耗电领域如建筑用电[8-9]及水厂大坝[10-12]中得到了广泛应用，并常常与人工智能技术[13-14]相结合。在交通领域，该技术亦在城市轨道交通[15-17]、高速铁路[18-21]、车站[22-23]、公路[24-26]及道路沿线设施[27-28]中有所应用。随着交能融合和零碳政策的推进，为有效推动高速公路能源自给自足，光伏发电技术已在高速公路服务区、收费站、边坡及隧道等多处得到应用。光伏发电潜力，即在现有技术条件下，所能利用的太阳能光伏的规模，同时需综合考虑太阳能资源的长期能源可用性、地形地貌的适宜性、土地使用的限制条件、系统配置的合理性与阴影及污染对发电效率的影响[29]。在边坡方面，张燕明[30]依托全国首个高速公路路堑边坡治理及光伏发电一体化科研试验段进行探索，对光伏面板在路堑边坡安装中存在的边坡+光伏稳定与钢支架稳定进行了安全性验证并提出了相应边坡治理的处置措施。姚磊等[31]研究了高速公路边坡光伏组件表面灰尘的黏附机理，为设计特殊光伏组件表面涂层以减少表面灰尘的黏附力提供了研究基础。在道路方面，Liu等[32]以波士顿作为案例研究，通过街景图像测量道路的天空遮挡情况，并与太阳辐射模型相结合来估计辐射接收能力，同时考虑了交通状况和天气情况的影响预测计算其道路光伏发电量与分布特征，该预测模型证实利用太阳能板铺设路面是对城市电网的重要补充，可为电动汽车行驶提供充足电力供应。Jiang等[33]提出以最大限度利用太阳能资源和计算光伏可用道路面积相结合的规划策略以实现高速公路太阳能的全域利用，并利用三个典型场景进行验证，结果表明增加路段长度会导致太阳能资源评估精度下降，采用一定的分级标准能有效表征各路段的太阳能捕获能力。针对沿线设施，彭余华等[34]考虑风光能源自洽探究高速公路沿线照明系统供电的可靠性与经济性，以昆明市长龙高速公路照明工程为例完成风光能源自洽照明的功能配置，结果表明该系统可有效减少用电并降低成本。李兆博等[35]通过提取遥感影像中建筑物屋顶、高速公路沿线等分布式光伏数据结合地理探测器探究分布式光伏的驱动作用机制，研究表明不同类型的分布式光伏分布受地形、气候和社会经济等多方面相互作用且其主导驱动因素存在明显差异，并以此为光伏铺设选址提供依据。针对服务区，李艳波等[36]提出一种IWOA-LSSVM光伏功率短期预测，并对河北某高速公路服务区光伏电站的实际数据进行仿真模拟验证了该模型的预测精度，有效提升了高速公路自洽能源系统光伏发电的经济效益。俄广迅等[37]在提取服务区光伏出力、负荷典型场景基础上，考虑成本构建了光-储-充多设备联合的协同调度模型，通过实例仿真验证了系统设计和方法的有效性，以提高其用电自洽率与投资规划的经济性。我国高速公路路域内太阳能资源收集前景广阔，可以有效促进道路交通的可持续发展[38-39]。

关于道路交通光伏发电的研究虽多，但大部分是对某一路段进行实例分析，鲜有学者从省域范围出发，对高速公路路域进行光伏发电潜力的区间测算研究。本研究基于广义路权理论，以省域高速公路光伏可利用不同场景（服务区、收费站等基础设施）为依据，构建其光伏发电潜力区间测算及年能耗测算模型，以湖南省为例，测算近期、中期、远期的光伏发电潜力区间，分析了3个时期能源自洽可实现情景，为湖南省高速公路与能源深度融合等制定相关政策提供依据。

## 1 高速公路路域光伏发电潜力区间测算模型构建

### 1.1 多场景下高速公路光伏发电潜力测算模型

在道路交通领域，《中华人民共和国公路法》[40]中明确了多项条例，赋予了道路交通拥有者——通常为国家和政府——对道路及其周边区域和相关基础设施的开发、管理、使用及维护的权利，这便是广义的路权。具体而言，高速公路路权用地不仅涵盖了行车道、收费站、服务区、停车区、养护工区等主要基础设施用地，还扩展至道路两侧边坡、中央分隔带、桥梁隧道周边区域以及基础设施邻近的闲置土地。在高速公路路域内开发太阳能资源，可以通过在收费站与服务区的建筑屋顶、养护基地、道路两侧边坡、中央分隔带、隧道出入口处以及行车道路面上铺设光伏板来测算其路域发电潜力。

光伏的实际发电效率与太阳辐射强度和环境温度有关，设$t$时刻的输出功率[41]为：

$$P(t)=\frac{f_{\mathrm{pv}}C_{\mathrm{pv}}I(t)\left[1+\beta\left(H-H_{\mathrm{s}}\right)\right]}{T_{\mathrm{s}}} \tag{1}$$

其中，

$$H=T_{\mathrm{amb}}+\frac{I(t)}{800}(\mathrm{NOCT}-20) \tag{2}$$

式中，$f_{\mathrm{pv}}$为光伏系统的降额因数，取0.9；$C_{\mathrm{pv}}$为光伏阵列额定容量，本文设置为600W；$I(t)$为$t$时刻光照强度；$\beta$为功率温度系数，取−0.40%/℃；$H$为光伏电池温度；$H_{\mathrm{s}}$为标准测试条件下的光伏电池温度，取25℃；$T_{\mathrm{s}}$为标准测试条件下的光照强度，取1 kW/m$^2$；$T_{\mathrm{amb}}$为环境温度；NOCT为额定电池工作温度，取45℃。气象数据选取小时级数据，来源于NASA数据库。

为评估该模型对关键输入变量的稳健性，进行了单因素敏感性分析，针对太阳辐射强度、光伏系统的降额因数和功率温度系数3个变量。结果显示，模型输出变量——单位组件的典型年发电量，对这三个参数的变化响应方向均与预期相符，且其变化范围均在合理预期内。

当太阳辐射强度增加10%时，环境温度会相应上升约2%，光伏发电量也随之增长8.94%，呈现近似的线性关系。值得注意的是，当太阳辐射强度增减幅度相同时，发电量的增长幅度会略小于减少幅度，这主要是由于光伏组件在温度过高时效率会下降，导致其输出功率出现一定幅度的下滑。此外，降额因数与功率温度系数的变化也会引起发电量的相应变化，具体参见图1。

高速公路路域内的光伏发电潜力模型为：

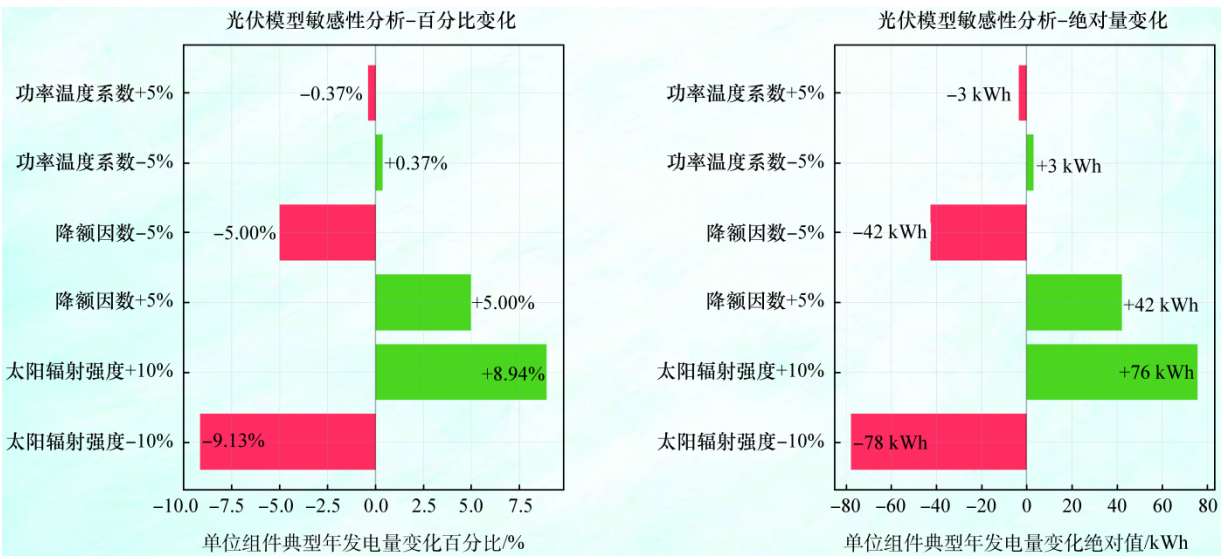



**图1** 光伏模型敏感性分析
**Figure 1** Photovoltaic model sensitivity analysis

$$E = E_{\text{day}} S_{\text{pv}} \times 365 \tag{3}$$

其中，

$$E_{\text{day}} = \sum_{i=1}^{N} P(t) \times \Delta t \tag{4}$$

$$S_{\text{pv}} = \sum_{j=1} S_{\text{pv}j} \tag{5}$$

$$S_{\text{pv}j} = S_j n_j / A \tag{6}$$

式中，$E$为年发电量；$E_{\text{day}}$为单位光伏组件1 d的总发电量，kWh；$S_{\text{pv}}$为可用于铺设光伏的面积有效数；$N$为1 d内的数据采样点数，取24；$\Delta t$为采样间隔，取1 h；$S_{\text{pv}j}$表示相应设施可用于铺设光伏的面积有效数；$S_j$表示某个相应场景可用于铺设光伏的面积；$n_j$为相应场景数量，可根据规范规定估算出高速公路路域内各类基础设施的数量；$A$为单位光伏组件用面积。下角$j$表示服务区、主线收费站、匝道收费站、养护工区、综合性养护基地、高速边坡等不同场景类型。

根据贾利民[42]的研究，基于高速公路路域服务区、收费站、沿线设施等不同场景，高速公路运营年能耗量测算如下：

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \tag{7}$$

$$E_1 = (14.63 + 15.8 + 108.43) \times S_1 \tag{8}$$

$$E_2 = 14.438 L_2 - 438 \tag{9}$$

$$E_3 = 351 L_3 + 210782.8 n_3 \tag{10}$$

$$E_4 = 328 n_4 \tag{11}$$

$$E_5 = 0.438 L_5 - 438 \tag{12}$$

其中，$E_0$、$E_1$、$E_2$、$E_3$、$E_4$、$E_5$分别为高速公路运营期、服务区、桥梁、隧道、收费站和沿线设备年能耗，kWh；$S_1$为服务区总面积；$L_2$、$L_3$、$L_5$分别为桥梁、隧道和高速公路总长度；$n_3$为隧道总条数；$n_4$为收费站个数。

具体流程如图2所示。

## 1.2 基于多信度的高速公路光伏发电潜力区间测算模型

光伏发电功率具有不确定性，因此评估其发电潜力的可信范围是必要的。置信区间法（confidence interval, CI）是统计学中用于描述数据估计值的不确定范围的一种方法。在气象数据处理中，它被用来量化气象参数（如太阳辐照度）观测值的可信区间，从而反映数据的波动性和可靠性。这种方法直接基于历史数据分位数来计算置信区间，无须对数据分布做出假设。以典型年365×24组历史气象数据为基础，通过统计方法可以计算出不同置信度下的发电潜力。其具体原理如下：




**图2** 多场景高速公路光伏发电潜力测算流程图

**Figure 2** Calculation process for photovoltaic power generation potential in multi-scenario expressways

将气象数据转换为功率值，对每个时刻$t$，将365 d的功率值按从小到大排序，得到有序序列：

$$P(t)_1 \leqslant P(t)_2 \leqslant \cdots \leqslant P(t)_{365} \tag{13}$$

序列范围：$[0,\theta_m]$，其中$\theta_m = P(t)_{365}$，并确定分位点，对于置信度1－α，选择双侧分位点，下分位点$\theta_1 = P(t)_k$，上分位点$\theta_2 = P(t)_{365-k+1}$，其中$k = \frac{1}{2}\alpha \times 365$。对每个时刻$t$，得到区间$[\theta_1(t), \theta_2(t)]$，表示该时刻功率以1－α概率落在此范围内，1－α为该区间的置信度，α称为显著性水平，并以P.U.值（标幺值）形式呈现各时刻的发电潜力曲线，P.U.值是一种无量纲的相对值表示方法，用于电力系统、气象数据标准化等领域。其核心思想是目标值与基准值的比值，便于不同规模系统的比较和分析：

$$\theta_{\text{P.U.}} = \frac{P(t)}{P_{\text{base}}} \tag{14}$$

式中，$\theta_{\text{P.U.}}$表示输出功率的P.U.值；$P(t)$表示$t$时刻实际输出功率；$P_{\text{base}}$表示额定输出功率。$\theta_{\text{P.U.}}$值越大，表示光伏实际输出功率越大。对于光伏发电输出

功率而言，置信度$1-\alpha$越高，意味着当前功率输出越大，但达到此功率输出的概率可信度降低，过高的置信度表示当前发电效率不可靠；相反，置信度$1-\alpha$越低，意味着当前功率输出越小，达到此功率输出的概率可信度较高，过低的置信度表示当前发电效率更可能达到，而过低的输出功率值会显著降低光伏系统的经济效益。故应同时考虑光伏发电潜力的多信度。

本文选取50%~90%置信度[43]分别估算了高速公路路域内分布式光伏年发电潜力的范围，即年光伏发电量的可能区间为$[E_{min}, E_{max}]$。假设高速公路的年运营能耗量为$E_0$，若$E_0>E_{max}$，则表示其年光伏发电量无法满足年能耗量，即无法实现能源自给自足；若$E_{min}<E_0<E_{max}$，则表示其年光伏发电量能基本满足年能耗量，并可实现能源自给自足；若$E_0<E_{min}$，则表示其光伏发电量不仅能实现能源自给自足，还可进行储电或余电上网。

## 2 湖南省高速公路光伏发电潜力区间测算分析

### 2.1 湖南省高速公路情况

湖南省高速公路网络历经多年建设，已构建起较为完备的体系。截至2023年底，通车总里程已突破7530 km，其路网密度约3.5 km/100 km$^2$，连接了省内所有地级市及90%以上的县市区。湖南省地处我国中南部，太阳能资源总体上属于中等偏下水平（Ⅲ~Ⅳ类资源区），全省年均太阳辐射量在1050~1300 kWh/m$^2$之间。然而，受地形和气候的影响，省内太阳能资源的分布表现出一定的空间分异性。大部分地区的年均太阳辐射量约为1000~1200 kWh/m$^2$，而在高值区则可达到约1300 kWh/m$^2$。尽管湖南省的太阳能资源禀赋为一般水平，但其仍蕴藏着可观的分布式光伏开发潜力，非常适合建设分布式光伏项目。湖南省出台《“十四五”可再生能源发展规划》[44]，提出到2025年光伏发电装机达到10 GW以上，重点推动分布式光伏，并鼓励“光伏+储能”模式，提升新能源消纳能力。由于湖南省太阳能资源总体呈现“北高南低、西弱东平”的特点，其高速公路不同路段的辐射强度也存在一定差异。

高速公路路域内光伏发电潜力挖掘，可利用边坡、服务区屋顶、停车场等场景铺设分布式光伏组件，清洁能源的有效利用能有效促进高速公路能源自洽。湖南省高速公路典型年太阳能资源禀赋情况如图3所示。

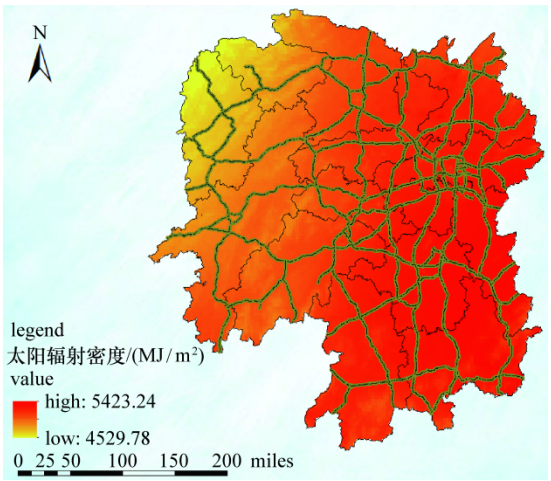



**图3** 湖南省高速公路太阳资源禀赋分布

**Figure 3** Distribution of solar resource endowments on expressways in hunan province

### 2.2 湖南省高速公路光伏发电潜力区间测算

湖南省高速公路路域光伏发电潜力的区间测算，可细分为近期、中期及远期三个阶段进行规划：

近期规划至2025年，着重发展“绿色服务区”，通过在服务区屋顶、停车棚顶及收费站安装分布式光伏系统，实现50%的覆盖率，并完成3个养护基地及至少40个养护工区的建设。

中期规划至2030年，服务区屋顶、停车棚顶及收费站将全面铺设分布式光伏，覆盖率达100%，同时，将建成7个养护基地及至少90个养护工区，且全省高速公路适宜边坡光伏覆盖率将超过30%。

远期规划至2035年，服务区屋顶、停车棚顶及收费站将继续采用分布式光伏，确保100%的覆盖率，并完成所有剩余养护基地与养护工区的建设工作。此外，全省高速公路适宜边坡的光伏覆盖率将超过50%。

#### 2.2.1 湖南省高速公路路域光伏发电可利用情况

（1）服务区光伏可利用面积估测。本文将停车区也纳入服

务区的考量范畴。截至2024年8月，湖南省高速公路路域内共有173.5对服务区。利用Google Earth Pro工具，测量了服务区内建筑屋顶、车棚等可用于铺设分布式光伏的面积，并排除了测量误差及建筑顶部边缘遮挡物等因素的影响。最终，取测量结果的90%作为服务区内建筑顶部可铺设光伏的面积，并计算单个服务区内光伏可铺设面积的均值。

（2）养护基地及工区光伏可利用面积估测。根据湖南省“十四五”路网规划，共规划设置了13处综合性养护基地，其中每处养护基地均对应一个管理中心或管养中心。整个规划共涉及108处养护工区基地。基于该规划方案，各区域可用于光伏发电的可利用面积详见表1。

**表1** 养护区光伏发电可利用面积

**Table 1** Utilizable area for photovoltaic power generation in the maintenance zone

| 养护区 | 综合性养护基地 | 养护工区 |
|---|---|---|
| 生活区/$m^2$ | 600 | 500 |
| 办公区/$m^2$ | 500 | 220 |
| 生产区/$m^2$ | 4200 | 500 |
| 预留生产区/$m^2$ | 3600 | — |

（3）收费站光伏可利用面积估测。据统计，湖南省高速公路收费站总数为480座，其中主线收费站25座，匝道收费站455座，用于铺设分布式光伏组件的光伏可利用面积[45]见表2。

（4）边坡光伏可利用面积估测。湖南省高速公路适宜开发分布式光伏比例按总里程30%[25]估算，高速公路两侧设有缓冲区各30 m。

**表2** 高速公路收费站光伏发电可利用面积

**Table 2** Utilizable area for photovoltaic power generation at expressway Toll Stations

| 基础设施 | 用地面积/($hm^2$/处) | 建筑面积/($m^2$/处) |
|---|---|---|
| 主线收费站 | 0.8667~1.0000 | 1500~1700 |
| 匝道收费站 | 0.3333~0.4667 | 800~1000 |

根据近、中、远三个时期高速公路规划，确定不同场景下光伏发电可利用场景数量，见表3。

2.2.2 湖南省太阳资源禀赋情况 通过置信区间法与光伏发电模型得出不同信度下单位光伏组件的各时刻光伏输出功率P.U.值，如图4所示。

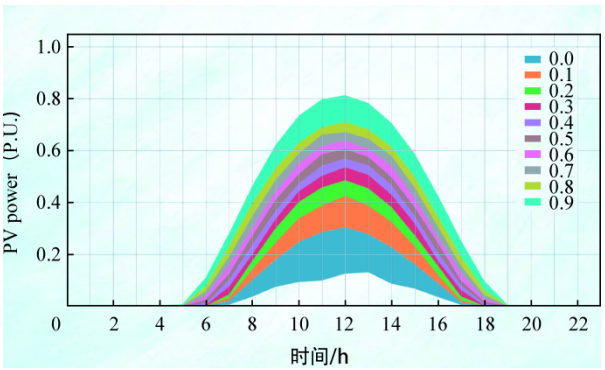



**图4** 单位光伏组件实际输出功率P.U.值

**Figure 4** Actual output power P.U. value of a single photovoltaic module

如图4可知，光伏组件在夜间由于并无太阳光照故无功率输出。在90%的置信度下，光伏组件在4 h至20 h均有功率输出，然而其在4 h与20 h的输出极小，故认为其主要输出时间在5 h至19 h；在置信度50%及以上的情况下，光伏组件输出时间集中在5 h

**表3** 高速公路基础设施数量

**Table 3** Number of expressway infrastructure

| 基础服务设施 | 光伏铺设区域 | 数量/处 | | | 数据来源 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 近期 | 中期 | 远期 | |
| 服务区 | 建筑顶部、车棚 | 394 | 417 | 439 | Google Earth |
| 主线收费站 | 建筑顶部 | 30 | 32 | 33 | 设计规范 |
| 匝道收费站 | | 544 | 574 | 605 | |
| 养护工区 | | 40 | 90 | 108 | 养护基地及工区建设规划方案 |
| 综合性养护基地 | | 3 | 7 | 13 | |
| 高速边坡 | 边坡 | 2700 | 2850 | 3000 | — |

至19 h；在置信度小于50%时，光伏组件输出时间集中在6 h至18 h。在午间时刻太阳光照强度较强，此时在60%置信度及以上，P.U.值大于0.6，即光伏输出功率可达额定功率60%以上。在午间太阳光照最强，即12 h至14 h，此时由于光伏组件温度过高，光伏组件效率下降，其输出功率会有一定幅度的下滑。

2.2.3 湖南省高速公路光伏发电潜力区间测算 选取50%~90%置信度分别测算高速公路路域内分布式光伏年发电潜力。

（1）多信度下单位光伏组件的时刻功率估测。本文选取2.182 m×1.029 m尺寸的光伏面板，其光伏组件面积为2.245 $m^2$。在屋顶平铺分布式光伏系统中，单块组件之间的间距需综合考虑散热、维护及发电效率等多种因素，依据住房城乡建设部发布的光伏系统相关技术规范，单块组件间的间距宜在20 ~50 mm。考虑研究区域地理位置与建筑因素，本文设置单块组件短边间距为30 mm，长边间距为40 mm，故单位光伏组件用面积为2.353 $m^2$。

经计算，多信度下单位光伏组件在一天中每时刻的实际输出功率见图5。

（2）多场景-多信度下高速公路光伏发电潜力区间测算。根据估测的高速公路不同场景光伏可利用面积与数量，利用光伏发电潜力区间测算模型可测算出3个时期高速公路各设施分布式光伏的日均发电区间

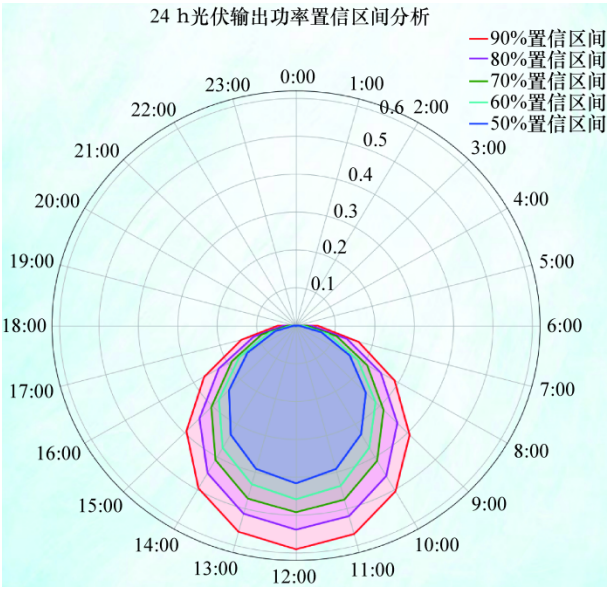



**图5** 单位光伏组件各时刻输出功率

**Figure 5** Output power of a single photovoltaic module at each moment

见表4。

图6(a)~(c)分别展示了近期规划、中期规划、远期规划不同场景的光伏发电潜力占比。得出其年发电潜力区间见表5。

2.2.4 湖南省高速公路年能耗测算 通过公开历史统计数据，采用ARIMA预测各阶段高速公路总长度、收费站个数等相关数据，依据式(7)~式(12)，测算3个时期年能耗量。近期规划、中期规划、远期规划湖

**表4** 不同场景的日均光伏发电区间

**Table 4** Daily mean photovoltaic power generation intervals of different scenarios

| 基础服务设施 | 分布式光伏发电区间/kWh | | |
|---|---|---|---|
| | 近期规划 | 中期规划 | 远期规划 |
| 服务区 | [1.335×10$^6$,2.152×10$^6$] | [2.825×10$^6$,4.556×10$^6$] | [2.974×10$^6$,4.796×10$^6$] |
| 主线收费站 | [2.844×10$^4$,4.586×10$^4$] | [6.067×10$^4$,9.783×10$^4$] | [6.256×10$^4$,1.009×10$^5$] |
| 匝道收费站 | [2.901×10$^5$,4.678×10$^5$] | [6.121×10$^5$,9.871×10$^5$] | [6.452×10$^5$,1.040×10$^6$] |
| 养护工区 | [5.782×10$^4$,9.325×10$^4$] | [1.301×10$^5$,2.098×10$^5$] | [1.561×10$^5$,2.518×10$^5$] |
| 综合性养护基地 | [3.164×10$^4$,5.102×10$^4$] | [7.382×10$^4$,1.190×10$^5$] | [1.371×10$^5$,2.211×10$^5$] |
| 高速边坡 | — | [6.079×10$^7$,9.802×10$^7$] | [1.066×10$^8$,1.720×10$^8$] |

**表5** 高速公路路域年光伏发电潜力区间/kWh

**Table 5** Annual photovoltaic power generation potential intervals of expressway corridors/kWh

| 近期规划 | 中期规划 | 远期规划 |
|---|---|---|
| [6.360×10$^8$，1.026×10$^9$] | [2.354×10$^{10}$，3.796×10$^{10}$] | [4.038×10$^{10}$，6.511×10$^{10}$] |

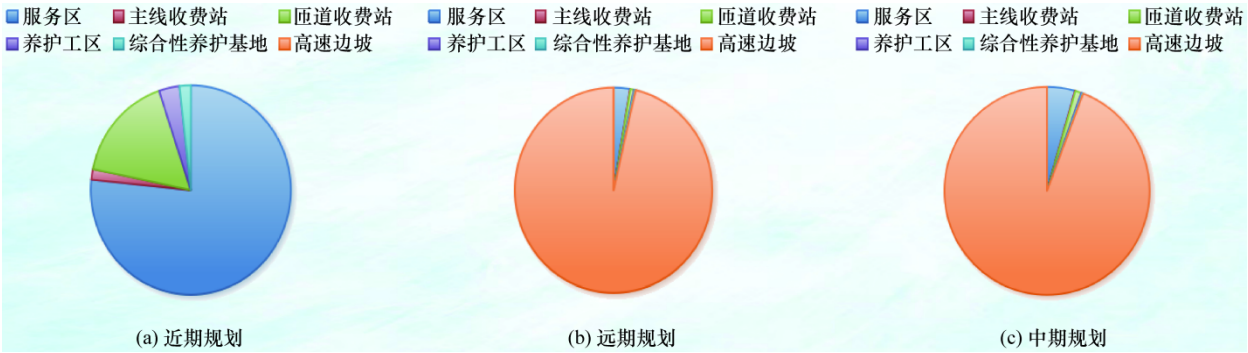



**图6** 不同场景的光伏发电潜力占比
**Figure 6** Proportion of photovoltaic power generation potential in different scenarios

南省高速公路年能耗量分别为$2.821\times10^9$、$2.989\times10^9$、$3.151\times10^9$ kWh。

### 2.3 结果分析

表4~表5分别列出了多信度下3个时期湖南省分布式光伏发电的潜力区间，并将其与高速公路运营期的年能耗进行了对比。（1）近期规划。湖南省高速公路年能耗量大于光伏发电量，说明这个时期湖南省高速公路尚不能实现能源自洽，光伏发电潜力挖掘并不全面，宜充分利用服务区、收费站等建筑顶部铺设分布式光伏，适当开发边坡光伏以提高能源供给，还可利用部分空置区域用于建设小型光伏发电站或风力发电站，可进一步增加其发电量。（2）中期规划。高速公路最小光伏发电量大于其能耗量，但两者差距较小，说明此时湖南省高速公路已基本能够实现能源自洽，在政策导向与技术支持下高速公路光伏潜力开发逐步完善，服务区、收费站等用电负荷集中的区域光伏潜力挖掘充分，宜进一步开发边坡等大面积路域资源。（3）远期规划。高速公路光伏发电量远大于其能耗量，说明湖南省高速公路不仅实现能源自洽，且具有余电可作储备或并入外网。

在高速公路的光伏发电领域，边坡的光伏发电潜力最为显著，服务区次之，紧随其后的是收费站与养护区。因此，应优先开发边坡与服务区的光伏发电项目。当前，湖南省对绿色服务区的改造提供了30%~50%的补贴政策，对服务区、养护区的光伏项目给予0.2 RMB/kWh的省级电价补贴，并可申报国家可再生能源补贴。此外，边坡光伏项目享受0.15RMB/kWh的省级绿电补贴，电网企业确保全额消纳，推动“光伏边坡标准化”的进程，并有望被纳入新建高速工程设计规范。这些多元化的政策补贴能有效促进高速公路光伏发电的发展与能源自给自足。因此，在高速公路路域内合理利用各类场景与土地资源，其光伏发电潜力巨大，不仅能够有效助力交通领域的减碳、零碳目标，还能推动交通与能源的深度融合发展。

## 3 结论与建议

本文为充分挖掘高速公路路域光伏发电潜力，基于广义路权理论，构建了多场景-多信度下高速公路光伏发电潜力区间测算模型，并以湖南省为例，分3个时期测算高速公路路域内光伏发电潜力区间，结论如下：

（1）近期、中期、远期高速公路路域光伏发电潜力区间分别为$[6.360\times10^8, 1.026\times10^9]$、$[2.354\times10^{10}, 3.796\times10^{10}]$、$[4.038\times10^{10}, 6.511\times10^{10}]$(kWh)，年能耗分别为$2.821\times10^9$、$2.989\times10^9$、$3.151\times10^9$ kWh。

（2）近期湖南省高速公路尚不能实现能源自洽，须进一步充分利用服务区、收费站等场景进行光伏发电潜力挖掘；中期湖南省高速公路基本能够实现能源自洽；远期高速公路路域的光伏发电能够实现能源自洽且有余量可并入外网或作储备。

（3）可利用光伏发电潜力最大的场景是边坡，其次是服务区、收费站与养护区。目前充分挖掘边坡光伏发电潜力亟需技术支持，重点在于打造“充电桩+

光伏+储能”绿色服务区，再进一步推广边坡、路面等大面积路域光伏潜力开发，探索“光伏+公路”新模式。政府也将通过各项政策大力推动高速公路实现能源自洽。

我国高速公路光伏开发蕴藏着巨大潜力，未来有望通过技术创新与政策引导，蜕变为助力交通行业碳中和的“移动绿色能源走廊”。本文基于广义路权理论，创新构建了多场景、多信度下的高速公路光伏发电潜力区间测算模型。该模型不仅能精准评估不同基础设施的发电潜能，更充分纳入了光伏发电功率的不确定性因素，显著提升了预测结果的可信度，为路域光伏资源的科学评估提供了全新的方法论支持。

然而，当前研究仍存在一定局限：一方面，模型对局部阴影遮挡、组件积灰及性能效率等影响分布式光伏的因素，仅以降额因数综合考量，尚未深入剖析其对系统可靠性的独立影响；另一方面，由于未计及储能系统，导致日间富余辐射资源流失且夜间无法供电。未来研究将聚焦于光储一体化系统，结合关键参数优化及设备运维等多维因素进行深化探索，旨在克服现有短板，为高速公路光伏的高效开发提供更为坚实的理论依据与技术支撑。

## 参考文献


[1] Heidari E, Bikdeli S, Mansouri Daneshvar M R. A dynamic model for $CO_2$ emissions induced by urban transportation during 2005—2030, a case study of Mashhad, Iran[J]. Environment, Development and Sustainability, 2023, 25(5): 4217-4236.

[2] 生态环境部宣传教育中心, 中国人民大学应用经济学院. 数字出行助力碳中和——践行绿色交通引领低碳出行[R]. 北京,2021.
Publicity and Education Center of the Ministry of Ecology and Environment, School of Applied Economics, Renmin University of China. Digital mobility supports carbon neutrality: Practicing green transportation and leading low-carbon travel[R]. Beijing, 2021.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 绿色交通"十四五"发展规划[EB/OL]. (2022-01-21)[2025-03-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. "Green Transportation Development Plan during the 14th Five-Year Plan Period". Ministry of Transport of the People's Republic of China[EB/OL]. (2022-01-21) [2025-03-21]. https://xxgk. mot. gov. cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.

[4] Liu L Q, Wang Z X, Zhang H Q, et al. Solar energy development in China: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 301-311.

[5] Shen Y B, Gao Y, Hu Y M, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of solar energy resources in Xizang[J]. Energy Engineering, 2024, 121(1): 43-57.

[6] Sun J B, Wang Y, He Y, et al. The energy security risk assessment of inefficient wind and solar resources under carbon neutrality in China [J]. Applied Energy, 2024, 360: 122889.

[7] Jing J X, Zhou Y, Wang L Y, et al. The spatial distribution of China's solar energy resources and the optimum tilt angle and power generation potential of PV systems[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 283: 116912.

[8] 李建林, 方知进, 谭宇良, 等. 电化学储能系统在整县制屋顶光伏中应用前景分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 1-12.
Li J L, Fang Z J, Tan Y L, et al. Application prospect analysis of electrochemical energy storage technology in county-wide rooftop photovoltaic system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(4): 1-12.

[9] 李辰. 太阳能光伏发电系统在体育中心的应用[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(10): 3281-3282.
Li C. Application of solar photovoltaic power generation system in sports center[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(10): 3281-3282.

[10] 董威. 光伏发电系统在大型水厂中的设计与实践[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 59-64.
Dong W. Design and practice of photovoltaic power generation system in large water plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 59-64.

[11] 何明, 郑恩文, 张仁贡. 基于水电站大坝的太阳能融合型并网发电系统研究与应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 203-206.
He M, Zheng E W, Zhang R G. Research and application of solar energy integrated grid connected power generation system based on

hydropower dam[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 203-206.

[12] 钱媛媛, 王永杰, 杨雪晶. 光伏与"光伏+水务"在污水处理厂的应用现状[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 40-50.
Qian Y Y, Wang Y J, Yang X J. Application status of photovoltaic technology and "photovoltaic +water" in wastewater treatment plant[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(6): 40-50.

[13] 任苗苗, 舒晓斌. 人工智能在中国新能源领域中的应用与前景分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3619-3621.
Ren M M, Shu X B. Application and prospect analysis of artificial intelligence in the field of new energy in China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3619-3621.

[14] 朱琼锋, 李家腾, 乔骥, 等. 人工智能技术在新能源功率预测的应用及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3027-3048.
Zhu Q F, Li J T, Qiao J, et al. Application and prospect of artificial intelligence technology in renewable energy forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3027-3048.

[15] 陈维荣, 王璇, 李奇, 等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663-3670.
Chen W R, Wang X, Li Q, et al. Review on the development status of PV power station accessing to traction power supply system for rail transit[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3663-3670.

[16] 崔霆锐, 李莉, 李明. 城市轨道交通新能源技术应用研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(6): 19-24.
Cui T R, Li L, Li M. Application of a new energy technology in the urban rail transit system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(6): 19-24.

[17] 刘海东, 王琳, 潘雷. 济南绿色地铁技术探索与应用[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(5): 26-30.
Liu H D, Wang L, Pan L. Exploration and application of green subway technologies in line 1 of Jinan rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(5): 26-30.

[18] 徐春梅, 张逸飞, 刘苏瑶, 等. 轨道交通能源自洽系统方案设计与配置优化[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(4): 43-55.
Xu C M, Zhang Y F, Liu S Y, et al. Scheme design and configuration optimization of rail transit energy self-consistent system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(4): 43-55.

[19] 于鑫. 太阳能光伏发电在铁路中的发展路径研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 1-7.
Yu X. Development path of solar photovoltaic power generation in railway[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 1-7.

[20] 陈凯, 雷琪, 李豆萌. 基于改进K-means聚类的轨道交通基础设施分布式光伏发电典型场景生成及出力特性分析[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 364-372.
Chen K, Lei Q, Li D M. Typical scenario generation and output characteristics analysis of distributed photovoltaic power generation for railway transportation infrastructure based on improved K-means clustering[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 364-372.

[21] 王永泽, 曹宇静, 李凌志. 基于光伏发电系统的新能源微电网技术在铁路站段的应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 18-24, 111.
Wang Y Z, Cao Y J, Li L Z. Application of new energy microgrid technology in railway stations and sections based on photovoltaic power generation system[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 18-24, 111.

[22] 郑林涛, 李晓歌, 白雪, 等. 光伏发电系统在地铁高架车站的应用研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(8): 131-136.
Zheng L T, Li X G, Bai X, et al. Application of photovoltaic power generation system in elevated subway station[J]. Building Science, 2019, 35(8): 131-136.

[23] 田璞, 鲁垠涛, 邱圣明, 等. 京津冀地区铁路运输碳排放特征和减排潜力研究[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(4): 8-16, 33.
Tian P, Lu Y T, Qiu S M, et al. Research on carbon emission characteristics and emission reduction potential of railway transport in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(4): 8-16, 33.

[24] 陆旭东, 江山, 张晓峰, 等. 分布式光伏-公路交通多场景融合发展潜力研究与展望[J]. 公路, 2024, 69(6): 204-211.
Lu X D, Jiang S, Zhang X F, et al. Research and prospects on the integration potential of distributed photovoltaics and multi-scenario development in highway transportation[J]. Highway, 2024, 69(6): 204-211.

[25] 胡恒武, 查旭东, 吕瑞东, 等. 基于光伏发电的道路能量收集技术研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(20): 133-144.
Hu H W, Zha X D, Lyu R D, et al. Recent advances of energy harvesting technologies in road based on photovoltaic power generation[J]. Materials Reports, 2022, 36(20): 133-144.

[26] 王冠, 陆旭东, 张越, 等. 山东临滕高速公路光伏廊道应用技术研究[J]. 公路, 2024, 69(1): 250-254.
Wang G, Lu X D, Zhang Y, et al. Research on the application technology of photovoltaic corridors on Shandong Lin-Teng expressway[J]. Highway, 2024, 69(1): 250-254.

[27] 王宇, 耿庆桥, 张路凯, 等. 基于改进DEMO算法的高速公路分布式光伏设施布局优化[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 264-279.
Wang Y, Geng Q Q, Zhang L K, et al. Layout optimization of distributed photovoltaic facilities on expressway based on improved differential evolution for multi-objective optimization algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 264-279.

[28] 夏鹏曦, 段儒禹, 汪主洪, 等. 公路隧道光伏薄膜遮阳棚的透光率选型及光伏效益估算[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 711-716.
Xia P X, Duan R Y, Wang Z H, et al. Light transmittance selection and photovoltaic benefit estimation of thin film photovoltaics awning for highway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(5): 711-716.

[29] ESMAP. Global Photovoltaic Power Potential by Country[M]. Washington, DC: World Bank Group, 2020.

[30] 张燕明. 高速公路路堑边坡治理与光伏发电一体化研究[J]. 公路, 2024, 69(10): 267-271.
Zhang Y M. Study on the integration of highway cutting slope treatment and photovoltaic power generation[J]. Highway, 2024, 69(10): 267-271.

[31] 姚磊, 付豪, 马科飞, 等. 高速公路边坡光伏组件表面灰尘黏附性能研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 460-467.
Yao L, Fu H, Ma K F, et al. Performance study of dust adhesion of PV module surfaces on highway slope[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(4): 460-467.

[32] Liu Z Y, Yang A Q, Gao M Y, et al. Towards feasibility of photovoltaic road for urban traffic-solar energy estimation using street view image[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 303-318.

[33] Jiang W, Wang T, Yuan D D, et al. Available solar resources and photovoltaic system planning strategy for highway[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114765.

[34] 彭余华, 唐娜, 朱鑫维. 高速公路风光能源自洽照明的功能配置方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 120-128.
Peng Y H, Tang N, Zhu X W. Functional configuration method of expressway wind-solar energy self-consistent lighting[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 120-128.

[35] 李兆博, 蔡丹路, 周锋, 等. 浙江省分布式光伏空间分布驱动因素研究[J]. 测绘科学, 2024, 49(9): 92-103.
Li Z B, Cai D L, Zhou F, et al. Research on driving factors of distributed photovoltaic spatial distribution in Zhejiang Province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(9): 92-103.

[36] 李艳波, 刘妙阳, 李林宜, 等. 高速公路服务区自洽能源系统的IWOA-LSSVM光伏功率短期预测[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 47-56.
Li Y B, Liu M Y, Li L Y, et al. Short-term prediction of photovoltaic power by IWOA-LSSVM for self-consistent energy system in highway service areas[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(5): 47-56.

[37] 俄广迅, 辛公锋, 陆由付, 等. 高速公路零碳服务区光-储-充直流系统设计与多能互补协调控制方法[J]. 公路, 2023, 68(12): 232-239.
E G X, Xin G F, Lu Y F, et al. Design of solar-storage-charging DC system and multi-energy complementary coordinated control in zero carbon service area of expressway[J]. Highway, 2023, 68(12): 232-239.

[38] Farzan H, Zaim E H, Ameri M. Study on effect of glazing on performance and heat dynamics of asphalt solar collectors: An experimental study[J]. Solar Energy, 2020, 202: 429-437.

[39] Hwang W, Kim K B, Cho J Y, et al. Watts-level road-compatible piezoelectric energy harvester for a self-powered temperature monitoring system on an actual roadway[J]. Applied Energy, 2019, 243: 313-320.

[40] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国公路法[Z]. 2017年修正版.
Standing Committee of the National People's Congress. Highway Law of the People's Republic of China[Z]. 2017 Revised Edition.

[41] Xu C B, Ke Y M, Li Y B, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-Ⅱ and CRITIC-TOPSIS[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 215: 112892.

[42] 贾利民, 师瑞峰, 吉莉, 等. 我国道路交通与能源融合发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 163-172.
Jia L M, Shi R F, Ji L, et al. Road transportation and energy integration strategy in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 163-172.

[43] 甘爽. 基于高速公路交能融合的风光储系统供能潜力与规划研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
Gan S. Research on the energy supply potential and configuration optimization of wind-solar-storage combined system based on highway transportation and energy integration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

[44] 湖南省发展和改革委员会. 湖南省"十四五"可再生能源发展规划[EB/OL]. (2022-05-31)[2025-03-21]. http://hunan.gov.cn/hnszf/xxgk/wjk/szbm/szfzcbm_19689/sfzhggwyh_19690/gfxwj_19691/202206/t20220627_26526958.html.
Hunan Provincial Development and Reform Commission. "The 14th Five-Year Plan for Renewable Energy D evelopment in Hunan

Province". Hunan Provincial People's Government[EB/OL]. (2022-05-31)[2025-03-21]. http://hunan.gov.cn/hnszf/xxgk/wjk/szbm/szfzcbm_19689/sfzhggwyh_19690/gfxwj_19691/202206/t20220627_26526958.html.

[45] 中华人民共和国交通部. 高速公路交通工程及沿线设施设计通用规范: JTG D80—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specification of freeway traffic engineering and roadside facilities (JTG D80—2006)[S]. Beijing: People's Communications Press. 2006.

# Research on the Interval Calculation of Photovoltaic Power Generation Potential of Provincial Expressways under Multi-Scenario and Multi-Credibility Conditions

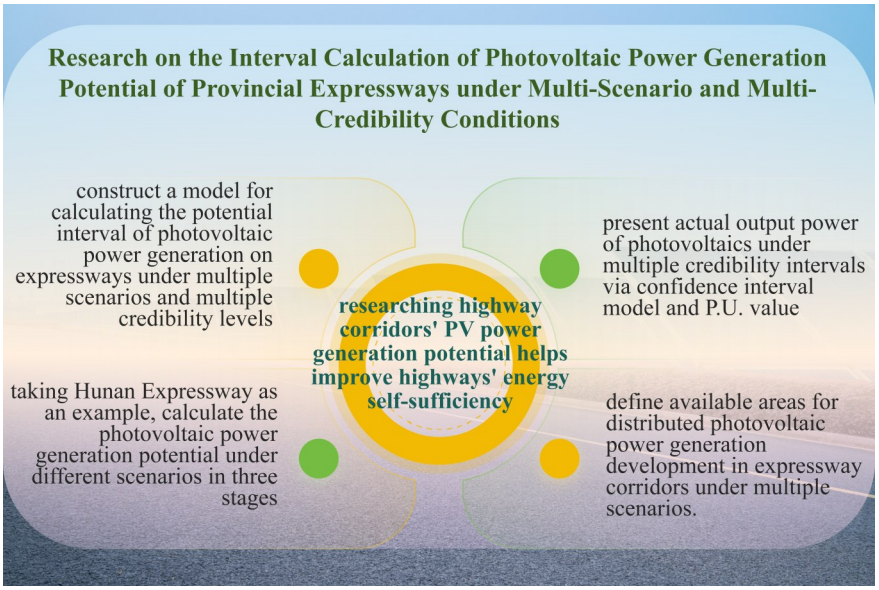
ZHU Wenxi*, TANG Yufa

*School of Transportation , Changsha University of Science & Technology, Changsha* 410114*, China*

## Highlights

- A calculation study on the photovoltaic power generation potential of different scenarios within the highway corridor was conducted.
- Multiple credibility intervals were adopted to account for the uncertainty of photovoltaic power generation efficiency.
- The future photovoltaic power generation of expressways in Hunan Province was predicted.

## Graphical Abstract




**Abstract:** Achieving the green transformation of highway transportation has become a fundamental strategy for advancing energy conservation and emission reduction in the transportation sector, as well as for enhancing carbon sink capacity. The effective utilization of clean energy sources such as wind and solar power constitutes a critical breakthrough point for achieving carbon emission reduction targets. Against this backdrop, the deep integration of expressway infrastructure with energy systems has emerged as a core pathway toward achieving operational energy self-sufficiency. To accelerate this integration process and realize the goal of energy self-sufficiency at the earliest opportunity, it is imperative to establish a reliable methodology for quantifying the photovoltaic power generation potential within expressway rights-of-way. This study aims to develop a comprehensive assessment model that systematically addresses the inherent uncertainties associated with photovoltaic power generation potential in linear infrastructure environments.

This study develops a calculation model for estimating the interval capacity of photovoltaic power generation potential within expressway rights-of-way, grounded in the theory of generalized road rights. The proposed model is characterized by its dual integration of multi-scenario spatial analysis and multi-credibility data processing. First, the model incorporates the principal infrastructure scenarios within expressway rights-of-way suitable for photovoltaic installations, including service areas, maintenance bases, toll stations, and roadside slopes. Each scenario presents distinct spatial characteristics, orientation conditions, and available land areas, all of which are systematically incorporated into the potential estimation framework. Second, to address the inherent uncertainties associated with photovoltaic power generation systems—primarily arising from stochastic meteorological variables such as solar irradiance and ambient temperature, as well as their impact on photovoltaic module output—the model employs a multi-credibility analytical approach. Specifically, confidence interval methods are applied to process historical meteorological data and output power, enabling the quantification of uncertainty bounds around photovoltaic generation predictions. This approach yields interval estimates rather than single-point values, thereby providing a more realistic and reliable assessment of generation capacity. Utilizing this integrated multi-scenario and multi-credibility analytical framework, this study conducts a phased calculation and analysis of photovoltaic power generation potential and annual energy consumption for expressways in Hunan Province. The analytical framework encompasses three planning horizons—short-term, medium-term, and long-term—allowing for a dynamic assessment of the evolutionary trajectory of photovoltaic generation potential as infrastructure progressively improves and technological applications advance.

The analytical results reveal significant differences across the three planning horizons. In the short term, the estimated photovoltaic power generation potential within the expressway rights-of-way in Hunan Province remains insufficient to meet annual energy consumption demands. Under this circumstance, the goal of energy self-sufficiency has yet to be achieved, and continued reliance on external clean energy sources is required. There is an urgent need to further develop photovoltaic power generation potential—particularly in scenarios with relatively low utilization rates, such as service areas and toll stations—to bridge this supply-demand gap. In the medium term, the photovoltaic power generation potential is expected to increase substantially, reflecting the gradual deployment of photovoltaic systems across a broader range of infrastructure assets. During this phase, the estimated generation capacity is projected to be sufficient to meet the majority of annual energy consumption, thereby enabling the realization of basic energy self-sufficiency within the expressway network. In the long term, with the full utilization of renewable energy photovoltaic resources across all applicable scenarios, the generation potential will be maximized. At this stage, the expressway system will achieve complete energy self-sufficiency and possess the capacity to deliver surplus electricity to the public grid. A comparative analysis of different photovoltaic scenarios reveals significantly differentiated generation potentials. Roadside slopes, owing to their extensive continuous areas and favorable solar exposure conditions, exhibit the highest power generation potential. Service areas rank second in terms of potential, followed by toll stations and maintenance bases.

This study proposes an innovative methodological framework for assessing photovoltaic power generation potential within expressway rights-of-way by integrating multi-scenario infrastructure characteristics with multi-credibility uncertainty quantification techniques. The model enables precise evaluation of the power generation potential across various types of infrastructure while explicitly accounting for the stochastic nature of solar power output, thereby significantly enhancing the reliability and robustness of prediction outcomes and providing a more compelling basis for planning and decision-making. The phased analysis conducted for Hunan Province demonstrates the value of this approach in identifying temporal pathways toward energy self-sufficiency and prioritizing photovoltaic deployment scenarios. Although reliance on external clean energy remains necessary in the short term, the medium- and long-term trajectories support the progressive realization of energy self-sufficiency and ultimately grid-connected power supply. The dominant role of roadside slopes in the overall potential underscores the need for focused technological innovation in slope-mounted photovoltaic systems. The proposed methodology provides a replicable framework for the scientific assessment of photovoltaic resources within expressway rights-of-way, contributing to broader efforts aimed at reducing transportation-related carbon emissions and achieving carbon neutrality goals. Future research will extend this framework by incorporating energy storage facilities into the assessment system, thereby enabling the construction of a more comprehensive evaluation framework.

**Keywords:** expressway; photovoltaic power generation potential; interval calculation model; multi-scenario and multi-credibility; solar resources