

文章编号: 1003-1421(2026)10-0085-11

引用格式: 胡乔植, 罗昊, 袁振洲, 等. 基于线路参数的高速铁路列车运行碳排放分段测算[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(10): 85-95.
HU Qiaozhi, LUO Hao, YUAN Zhenzhou, et al. Segmented Estimation of Carbon Emissions from High Speed Train Operation Based on Railway Alignment Parameters[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 85-95.

基于线路参数的高速铁路列车运行碳排放分段测算

胡乔植, 罗昊, 袁振洲, 杨洋

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为测算高速铁路列车运行碳排放并识别区段差异, 以京沪高速铁路部分上、下行正线为案例, 构建基于线路参数的分段测算方法。依据坡道表和曲线表建立统一线路段, 综合基本阻力、坡道阻力和曲线附加阻力计算分段牵引能耗, 并采用电力碳排放因子折算碳排放。结果显示: 基准工况下, 上、下行总碳排放分别为 1 381.69 kg 和 1 364.89 kg, 总体水平接近; 坡度与单位里程碳排放相关系数为 0.831, 说明坡度是影响区段碳排放差异的重要因素; 前 30 个高排放区段累计贡献率为 24.38%, 表明列车运行碳排放具有一定局部集中性。基于线路参数的分段测算方法可反映列车运行碳排放空间差异, 为高排放区段识别和节能运行优化提供依据。

关键词: 高速铁路列车; 碳排放; 牵引能耗; 线路参数; 京沪高速铁路

中图分类号: U292.43 文献标识码: A DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260509003

Segmented Estimation of Carbon Emissions from High Speed Train Operation Based on Railway Alignment Parameters

HU Qiaozhi, LUO Hao, YUAN Zhenzhou, YANG Yang

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To estimate the carbon emissions generated during high speed train operation and identify differences among line sections, this paper proposed a segmented estimation method based on railway alignment parameters by employing selected sections of the up and down main lines of the Beijing-Shanghai High Speed Railway as a case study. A unified set of line sections was established according to gradient and curve tables. Segmented traction energy consumption was calculated by integrating basic resistance, gradient resistance, and additional curve resistance, and the resulting energy consumption was converted into carbon emissions by adopting an electricity carbon emission factor. The results show that in the baseline conditions, total carbon emissions in the up and down directions are 1 381.69 and 1 364.89 kg, respectively, indicating similar overall levels. The correlation coefficient between gradient and per-kilometer carbon emission intensity is 0.831, indicating that the gradient is an important factor influencing differences in section-level carbon emissions. The top 30 high-emission sections account for 24.38% of total carbon emissions, indicating a certain degree of local concentration in carbon emissions of train operation. The segmented estimation method based on railway alignment parameters can reflect spatial variations in train operation carbon emissions and provide a basis for identifying high-emission sections and optimizing energy-efficient train operation.

收稿日期: 2026-05-09

通信作者: 杨洋(1988—), 男, 河北邢台人, 北京交通大学交通运输学院副教授。

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2024JBRC009); 北京市自然科学基金项目(J210001)

Keywords: High Speed Train; Carbon Emissions; Traction Energy Consumption; Railway Alignment Parameter; Beijing-Shanghai High Speed Railway

0 引言

在“双碳”目标背景下,交通运输绿色低碳转型已成为交通强国建设的重要内容。铁路运输具有大运量、低能耗和低排放等特点,是综合交通运输体系中推进结构性减排的重要方式之一。然而,电力牵引列车运行过程中仍会通过牵引用电形成间接碳排放,其运行能耗和碳排放测算仍需进一步细化^[1]。

高速铁路列车运行碳排放主要来源于牵引用电消耗^[2],而牵引能耗不仅受列车质量、运行速度和牵引控制方式影响,也与列车所经过线路的几何条件密切相关。列车在运行过程中需要根据坡度、曲线半径、超高和限速条件不断调整牵引状态,其中正坡区段会增加列车需克服的重力分力,小半径曲线会引入附加运行阻力,二者均可能提高局部牵引能耗^[3]。若仅依据全线平均能耗或总里程折算列车运行碳排放,容易掩盖不同线路区段之间的排放强度差异,也难以识别少数高牵引需求区段对总碳排放的贡献。

现有研究已从多个角度探讨铁路和城市轨道交通能耗及碳排放问题^[4]。部分研究基于生命周期评价方法,对高速铁路、城际铁路或城市轨道交通建设、运营和维护全过程的能耗与碳排放进行核算,能够从系统边界角度揭示轨道交通运输的减排效应^[5-7];也有研究关注运输装备节能、城市轨道交通碳排放量化和碳排放影响因素分析,为轨道交通低碳评价提供了方法参考^[8]。在列车运行节能方面,相关研究主要围绕列车节能操纵、运行曲线优化、时刻表协同、再生制动利用和能耗优化算法展开,形成了较为丰富的运行控制模型和优化方法^[9-11]。总体来看,既有成果为铁路运输碳排放核算和列车节能运行优化奠定了基础,但仍存在两方面不足:一是部分研究更关注线路或系统层面的总量碳排放,对线路参数引起的区段差异揭示不足;二是列车节能运行研究多以速度曲线、牵引控制或运行图优化为核心,对坡度、曲线半径等线路几何参数与分段碳排放之间关系的刻画仍有进一步深化空间。

基于上述问题,以京沪高速铁路(北京南—上

海虹桥)部分上、下行正线为研究对象,利用坡道表和曲线表构建统一线路段数据库,将坡度、坡长、曲线半径、曲线长度和超高等线路参数纳入列车运行阻力与牵引能耗计算过程,建立考虑基本阻力、坡道阻力和曲线附加阻力的列车运行能耗-碳排放分段测算模型。在此基础上,对上、下行线路开展基准工况测算,分析累计碳排放、单位里程碳排放、坡度-碳排放关系、曲线半径-附加阻力关系及高排放区段分布,进而揭示线路参数对高速铁路列车运行碳排放的影响规律,为列车运行碳排放测算和高排放敏感区段识别提供方法支撑。

1 列车运行碳排放分段测算模型

为实现高速铁路列车运行碳排放分段测算,从列车运行阻力、区段牵引能耗和碳排放核算3个层面构建测算模型。模型以统一线路段为基本计算单元,将坡度、曲线半径、超高、区段长度等线路参数与列车运行参数相结合,计算各区段牵引能耗,并进一步折算列车运行碳排放^[12]。该模型用于刻画不同线路区段碳排放强度差异,并为后续案例测算和高排放区段识别提供方法基础。

1.1 参数说明与建模假设

为保证模型具有较好的可操作性和计算一致性,在开展分段能耗与碳排放测算前,对模型中涉及的主要参数进行统一定义。相关参数包括列车运行参数、线路几何参数、阻力计算参数以及碳排放核算参数等。其中,列车质量和运行速度用于确定列车基本阻力及牵引需求;坡度、曲线半径和超高等线路参数用于表征不同区段的纵断面和平面线形条件;区段长度用于计算分段牵引能耗;电力碳排放因子则用于将牵引用电量折算为碳排放量。模型主要参数说明如表1所示。

需要说明的是,原始坡道表和曲线表不包含列车编组质量、实际速度曲线和牵引功率等运行数据。列车质量、运行速度和电力碳排放因子均作为基准工况参数使用,主要用于比较不同线路参数条件下碳排放的相对差异,不代表具体车次的实测运行数据。

表1 模型主要参数说明
Tab.1 Definitions of main model parameters

变量	说明
m	基准工况假设的列车总质量, kg
v	区段运行速度, m/s
a	恒定阻力, N
b	线性速度阻力, N·s/m
c	空气阻力, N·s ² /m ²
θ	区段坡道坡角, rad
R	曲线半径, m
h	曲线超高, m
$h_{\max}$	设计允许最大超高, m
α	考虑离心力作用, N·s ² /m ²
L	单个分析单元长度, km
ΔE_k	区段加减速能量, kW·h
ϵ	电力换算二氧化碳排放量, kgCO ₂ /(kW·h)

建模假设包括：忽略风阻变化及环境扰动；假设列车满载且牵引功率连续可控；区段内坡度与曲线参数均为均匀近似；能耗与碳排放线性相关。

1.2 列车运行阻力模型

列车在运行过程中所受阻力主要由3部分构成：基本阻力、坡道阻力以及曲线附加阻力^[13]。基本阻力 R_b 主要由列车自身机械阻力(滚动阻力)和空气阻力组成，反映了列车在平直轨道上无坡度和曲线作用时所需克服的阻力，计算公式为

$$R_b = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (1)$$

式中： R_b 为基本阻力, N； v 为列车速度, m/s； a 为恒定机械阻力系数, N； b 为与速度成线性关系的阻力系数, N·s/m； c 为空气阻力系数, N·s²/m²，系数数值根据列车类型和车辆总重量确定。

坡道阻力 R_s 反映列车在纵断面坡度条件下的重力分力作用，坡道阻力公式能够量化纵断面特征对列车牵引需求的直接影响^[14]，可表示为

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2)$$

式中： R_s 为坡道阻力, N； m 为列车总质量, kg； g 为重力加速度, 9.81 m/s²； θ 为坡道坡度, rad。

在正坡段，坡道阻力为正值，增加牵引需求；在下坡段，坡道阻力为负值，可产生助力，降低牵引消耗。

曲线附加阻力 R_c 主要考虑列车在曲线行驶时因离心力、曲线半径 R 与超高 h 引起的附加阻力，该公式考虑了曲线半径越小、速度越高附加阻力越大，同时超高补偿可以部分抵消离心力作用^[15]，计

算公式为

$$R_c = \alpha \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \left(1 - \frac{h}{h_{\max}}\right) \quad (3)$$

式中： R_c 为曲线附加阻力, N； α 为曲线附加阻力系数, N·s²/m²； $h_{\max}$ 为设计最大超高, m。

综合上述3部分阻力，列车在每一区段的总阻力用于表示列车在当前区段维持运行状态所需克服的总阻力。

$$R_i = R_b + R_s + R_c \quad (4)$$

式中： R_i 为第 i 个线路段的综合运行阻力, N； R_b 为基本阻力, N； R_s 为坡道阻力, N； R_c 为曲线附加阻力, N。

1.3 分段牵引能耗测算模型

基于列车运行阻力模型，以统一线路段为基本计算单元进行分段牵引能耗测算。由于不同区段的坡度、曲线半径、超高和区段长度存在差异，列车在各区段所需克服的运行阻力并不相同，因此采用分段计算方式能够更好地反映线路参数变化对牵引能耗的影响。对于第 i 个线路段，综合运行阻力由基本阻力、坡道阻力和曲线附加阻力共同决定，并进一步与区段长度结合计算该区段牵引能耗。

考虑到列车在下坡区段或阻力抵消区段可能出现综合阻力小于0的情况，主要测算列车牵引能耗，不将负阻力区段计为负能耗，也不单独核算再生制动回收收益^[16]。该处理方式与基准工况下仅测算牵引能耗的计算口径保持一致。据此，将第 i 个区段的净牵引阻力定义为

$$R_i^+ = \max(R_i, 0) \quad (5)$$

式中： R_i^+ 为第 i 个区段的净牵引阻力, N； R_i 为第 i 个区段的综合运行阻力, N，当 $R_i < 0$ 时，取 $R_i^+ = 0$ ，当 $R_i \geq 0$ 时，取 $R_i^+ = R_i$ 。

在得到净牵引阻力后，第 i 个区段的牵引能耗可表示为

$$E_i = \frac{R_i^+ L_i}{3.6 \times 10^6} \quad (6)$$

式中： E_i 为第 i 个区段的牵引能耗, kW·h； L_i 为区段长度, m； 3.6×10^6 为焦耳(J)与千瓦时(kW·h)之间的换算系数。

若进一步考虑列车在区段内的加速或制动过程，则可在上述牵引能耗基础上加入动能变化项 $\Delta E_k^{[17]}$ 。第 i 个区段的动能变化量可表示为

$$\Delta E_{k,i} = \frac{1}{2} m (v_{i+1}^2 - v_i^2) \quad (7)$$

式中： $\Delta E_{k,i}$ 为第*i*个区段的动能变化量，J； m 为列车总质量，kg； v_i 和 v_{i+1} 分别为第*i*个区段起点和终点速度，m/s。

本研究基准工况下主要采用固定速度进行分段测算，动能变化项用于说明模型在考虑速度变化时的扩展形式。整条线路的牵引能耗为各区段牵引能耗之和，可表示为

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (8)$$

式中： E 为线路列车运行总牵引能耗，kW·h； E_i 为第*i*个区段的牵引能耗，kW·h； n 为线路分段数量。

通过上述分段测算方法，可以将不同坡度、曲线条件及区段长度对牵引能耗的影响落实到具体线路段中，为后续碳排放核算提供基础^[18]。

1.4 能耗-碳排放转换方法

在分段牵引能耗基础上，采用电力碳排放因子将牵引用电量折算为间接碳排放量^[19]。由于研究对象为电力牵引列车，列车运行碳排放主要指列车运行过程中牵引用电折算得到的间接碳排放。对于第*i*个线路段，其碳排放量可表示为

$$C_i = E_i \cdot \epsilon \quad (9)$$

式中： C_i 为第*i*个区段牵引用电间接碳排放量，kg； E_i 为第*i*个区段的牵引能耗，kW·h； ϵ 为电力碳排放因子，kgCO₂/(kW·h)。

全线路段碳排放量为

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (10)$$

式中： C 为线路列车运行总碳排放量，kg； C_i 为第*i*个区段列车运行碳排放量，kg； n 为线路分段数量。

为进一步比较不同长度区段之间的碳排放强度，引入单位里程碳排放指标。第*i*个区段单位里程碳排放可表示为

$$c_i = \frac{C_i}{l_i} \quad (11)$$

式中： c_i 为第*i*个区段单位里程碳排放，kg/km； l_i 为第*i*个区段长度，km。

该指标能够消除区段长度差异对分段碳排放量的影响，便于比较不同线路条件下的碳排放强度。同时，为反映列车运行碳排放沿里程方向的累积变化，第*k*个区段末端的累计碳排放量可表示为

$$C_k^{\text{cum}} = \sum_{i=1}^k C_i \quad (12)$$

式中： C_k^{cum} 为第*k*个区段末端的累计碳排放量，kg； C_i 为第*i*个区段列车运行碳排放量，kg； k 为累计计算至第*k*个区段的序号。

采用统一电力碳排放因子进行基准工况测算，重点分析不同线路几何条件下列车运行碳排放的相对差异。由于电力碳排放因子会受到区域电源结构、统计年份和用电时段等因素影响，若直接用于具体车次或特定时段的绝对排放核算，还需结合实际供电区域和电网排放因子进一步修正。该处理方式有助于突出线路几何条件对列车运行碳排放的影响规律，并为后续高排放敏感区段识别提供统一的计算口径。

2 京沪高速铁路部分上下行正线列车运行碳排放测算案例分析

为开展列车运行碳排放分段测算案例分析，选取原始坡道表和曲线表覆盖的京沪高速铁路部分上、下行正线作为研究对象。测算过程中，以统一线路段为基本计算单元，将坡度、曲线半径、超高等线路参数映射到各区段，进一步计算基本阻力、坡道阻力、曲线附加阻力、分段牵引能耗及碳排放量。通过对测算结果进行统计和比较，分析线路参数对列车运行碳排放的影响，并识别高排放敏感区段。

2.1 线路参数统计分析

以京沪高速铁路部分上、下行正线为案例对象，基于原始坡道表和曲线表对线路几何条件进行整理。其中，上行正线包含 7 978 条坡道记录和 2 978 条曲线记录，下行正线包含 8 089 条坡道记录和 2 804 条曲线记录，是列车运行碳排放分段测算的主要对象。整体来看，原始坡道数据所覆盖的里程范围为-5.256~591.00 km，曲线数据覆盖里程范围为-5.151~590.803 km。数据中存在少量负里程，主要为原始线路资料中里程起算点前的区段记录。为保持坡道表和曲线表之间的里程对应关系，保留原始里程标识，不对里程进行平移处理。

为说明案例线路的基本构成，对上、下行正线坡道与曲线数据进行汇总，京沪高速铁路部分上下行正线基础统计如表 2 所示。由表 2 可知，上、下行正线在坡度范围、曲线半径范围和超高条件上均

表2 京沪高速铁路部分上下行正线基础统计

Tab.2 Basic statistics of selected sections of the up and down main lines of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

线别	坡道段数	坡道里程范围/km	坡度范围/‰	曲线段数	曲线里程范围/km	曲线半径范围/m	超高范围/mm
上	7 978	[-5.26, 591.0]	[-29.93, 36.80]	2 978	[-5.15, 590.80]	[156, 12 000]	(0, 175]
下	8 089	[-1.84, 591.0]	[-29.93, 35.50]	2 804	[-1.79, 590.80]	[200, 12 000]	(0, 175]

注：负里程为原始线路资料中里程起算点前的区段记录，保留原始里程标识。原始曲线表中少量曲线半径大于12 000 m的记录按近似直线处理，不纳入曲线半径范围统计。

存在差异，说明样本具有较强的线形变化特征，可为列车运行碳排放分段测算提供数据基础。

结合表2，京沪高速铁路部分上、下行正线各线别坡道段数与曲线段数统计如图1所示。可以看出，上、下行正线均包含大量坡道段和曲线段，说明研究区线路纵断面和平面线形条件变化较为丰富。从坡道段数看，上、下行正线规模接近，列车运行过程中均需要适应不同坡度条件下的牵引需求变化；从曲线段数看，上、下行正线同样具有较多曲线单元，曲线附加阻力对运行能耗和碳排放的影响具有分析必要。基于数据规模和线路功能，后续测算分析以上、下行正线为对象。

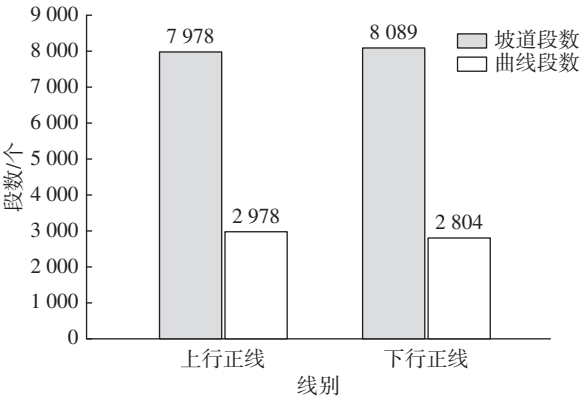


图1 京沪高速铁路部分上下行正线各线别坡道段数与曲线段数统计

Fig.1 Statistics of gradient and curve sections on selected portions of the up and down main lines of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

从纵断面条件看，坡度是影响列车牵引能耗的重要因素。京沪高速铁路部分上下行正线坡度沿程分布如图2所示，图2显示上、下行正线坡度沿程变化较为频繁，线路纵断面并非由少数连续长坡构成，而是表现为多坡段交替分布的特征，列车在运行过程中需要不断适应不同坡度条件下的牵引需求变化。其中，上行坡度范围为-29.93‰~36.80‰，下行坡度范围为-29.93‰~35.50‰，说明研究区既包含下坡、平缓坡段，也存在较大正坡区段。对于列车运行而言，正坡区段会增加列车需克服的重力

分力，从而提高牵引力需求和能耗水平；负坡区段则可能降低牵引需求，使能耗水平下降。由此可见，坡度沿程变化会直接影响列车运行阻力的空间分布，并进一步影响分段能耗和牵引用电间接碳排放。尤其在局部坡度变化较大的区段，列车牵引工况可能发生明显变化，因此在后续能耗与碳排放测算中，有必要将坡度作为关键线路参数纳入模型分析。

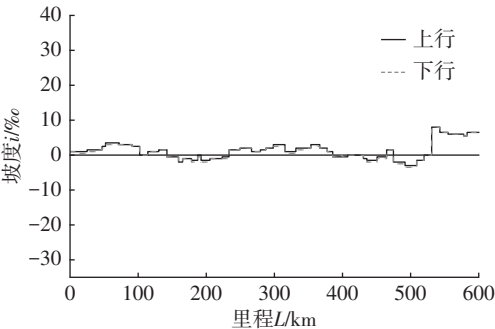


图2 京沪高速铁路部分上下行正线坡度沿程分布

Fig.2 Gradient distribution along selected portions of the up and down main lines of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

除纵断面之外，平面线形同样会通过曲线附加阻力影响列车运行状态。为刻画研究对象的平面线形特征，根据各曲线段里程中点与对应曲线半径，绘制京沪高速铁路部分上下行正线曲线半径沿程分布如图3所示。需要说明的是，原始曲线表中少量曲线半径大于12 000 m的记录对曲线附加阻力影响较小，按近似直线处理，不纳入图3展示。由图3可知，研究对象中多数曲线半径较大，但仍包含部分小半径曲线区段。其中，上行最小曲线半径为156 m，下行最小曲线半径为200 m。小半径曲线会增加曲线附加阻力，并可能影响局部牵引需求，因此后续分析主要关注曲线半径变化对附加阻力及碳排放测算结果的相对影响。

2.2 上下行总体测算结果分析

基于分段测算结果，上下行列车运行测算结果统计如表3所示。总体来看，上、下行线路总能耗和总碳排放水平较为接近，但单位里程碳排放强度

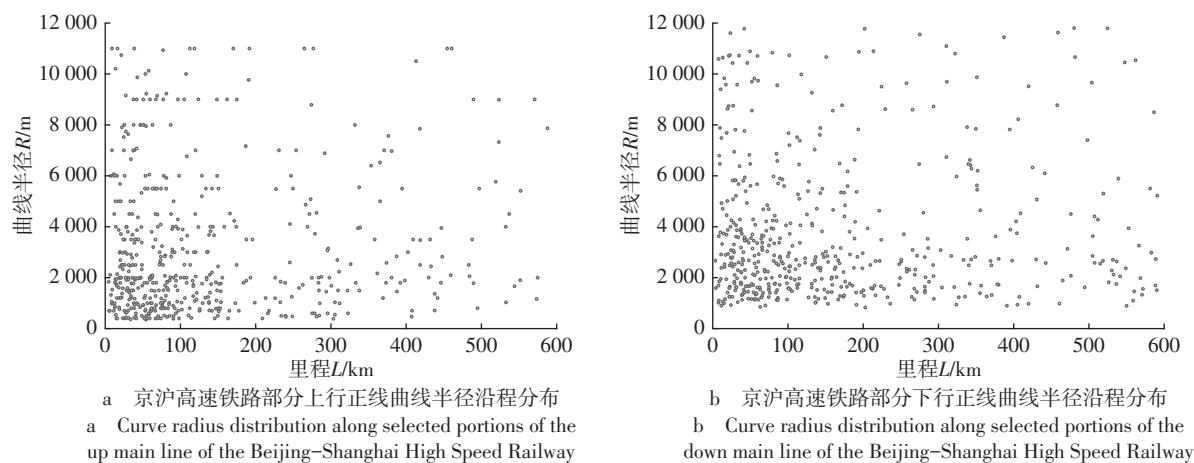


图3 京沪高速铁路部分上下行正线曲线半径沿程分布

Fig.3 Curve radius distribution along selected portions of the up and down main lines of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

表3 上下行列车运行测算结果统计

Tab.3 Summary of estimated train operation results for the up and down lines

行别	区段数/个	总长度/km	总能耗/(kW·h)	总碳排放/kg	平均单位里程 能耗/(kW·h/km)	平均单位里程 碳排放/(kg/km)	单位里程 碳排放 P90/(kg/km)	最大分段 碳排放/kg
上行	13 209	596.256	1 625.52	1 381.69	1.900	1.615	4.971	75.37
下行	13 034	592.838	1 605.76	1 364.89	1.927	1.638	5.318	75.37

和高值区段分布仍存在差异,说明列车运行碳排放不仅具有总量特征,也具有明显的区段差异特征^[20]。

由表3可知,上行总能耗和总碳排放分别为1 625.52 kW·h和1 381.69 kg,下行分别为1 605.76 kW·h和1 364.89 kg,上行总碳排放较下行高约1.23%。但从平均单位里程碳排放和90%分位值看,下行均略高于上行,说明总量差异与局部排放强度差异并不完全一致,下行局部区段更易出现较高碳排放强度。

为了更直观展示上、下行线路碳排放随里程累积的变化过程,京沪高速铁路上下行累计碳排放对比如图4所示^[21]。

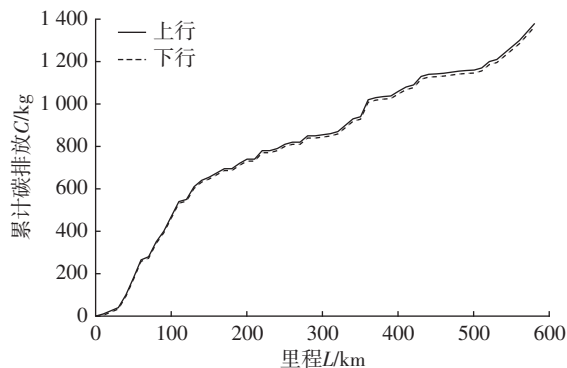


图4 京沪高速铁路上下行累计碳排放对比

Fig.4 Comparison of cumulative carbon emissions between the up and down directions of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

由图4可知,上、下行累计碳排放均随里程持续增加,但不同区段增长斜率存在差异^[22]。537 km以后曲线斜率增大,561 km附近出现明显跃升,说明该范围内存在较高牵引需求区段,与后文识别的高排放区段相对应。

为了进一步比较上、下行线路单位里程碳排放分布的离散程度和异常值特征,绘制了京沪高速铁路上下行单位里程碳排放分布箱线如图5所示。

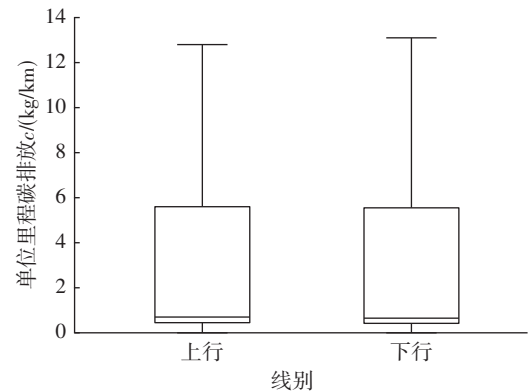


图5 京沪高速铁路上下行单位里程碳排放分布箱线

Fig.5 Box plot of per-kilometer carbon emission distribution for the up and down directions of the Beijing-Shanghai High Speed Railway

图5表明,上、下行单位里程碳排放均呈现明显的右偏分布特征,即大部分区段的单位里程碳排放处于较低水平,而少数区段表现出较高的排放强

度。这说明列车运行碳排放并不是沿线路均匀产生的,而是受到局部线路条件影响,集中表现为少数高值区段。从箱线图分布看,上、下行线路的主体分布范围较为接近,说明两者整体碳排放水平差异有限;但下行线路的高分位值略高,与表3中下行单位里程碳排放90%分位值高于上行的结果一致,表明下行线路在局部区段更容易出现较高排放强度。由此可见,上、下行碳排放差异并不主要体现在全线平均水平上,而更多体现在局部高值区段的分布和离散程度上。对于列车运行碳排放测算而言,仅比较总能耗或总碳排放难以充分揭示线路区段差异,还需要结合单位里程碳排放分布、高分位值和异常高值区段进行综合分析。因此,局部高值区段是解释上、下行碳排放差异的重要依据,也是后续识别高排放敏感区段和开展节能运行优化时应重点关注的对象。

2.3 纵断面条件对碳排放的影响

坡度是影响列车运行牵引需求和区段碳排放强度的重要线路因素^[23]。为分析坡度变化对单位里程碳排放的影响,绘制坡度与单位里程碳排放关系如图6所示。

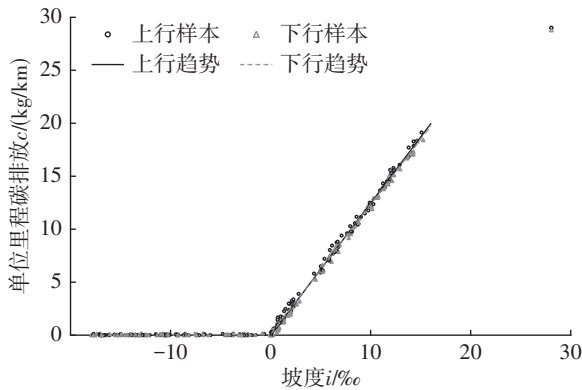


图6 坡度与单位里程碳排放关系

Fig.6 Relationship between gradient and per-kilometer carbon emissions

由图6可知,坡度与单位里程碳排放总体呈正相关趋势,但二者并非严格线性关系。对于坡度小于0的区段,坡道重力分力可在一定程度上抵消列车牵引需求,且本研究不将负阻力区段计为负能耗,因此多数负坡区段单位里程碳排放处于较低水平;当坡度由负值或平缓区段逐步转入正值区间后,坡道阻力随之增大,单位里程碳排放明显上

升,且在较大正坡区段表现得更为突出。上、下行线路的散点分布和趋势线总体较为接近,说明坡度对两方向分段碳排放强度的影响规律基本一致。根据测算结果,坡度与单位里程碳排放的相关系数为0.831,表明在设定的基准工况下,坡度是影响区段碳排放差异的重要因素。

2.4 平面线形条件对碳排放的影响

除纵断面条件外,平面线形亦会通过曲线附加阻力对列车能耗与碳排放产生影响^[24]。为考察曲线半径与曲线附加阻力之间的关系,绘制曲线半径与曲线附加阻力关系如图7所示。

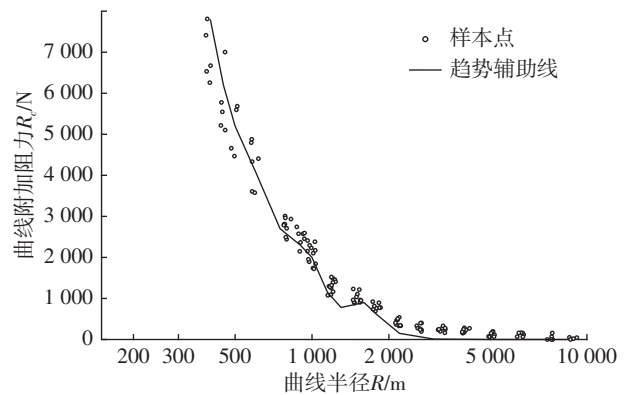


图7 曲线半径与曲线附加阻力关系

Fig.7 Relationship between curve radius and additional curve resistance

由图7可知,曲线半径与曲线附加阻力总体呈负相关关系,即曲线半径较小时,曲线附加阻力通常较大;随着曲线半径增大,曲线附加阻力整体下降,并逐渐趋于平缓。尤其在小半径曲线区段,附加阻力对曲线半径变化较为敏感;当曲线半径增大到较高水平后,其边际影响明显减弱。根据测算结果,曲线半径与曲线附加阻力的相关系数为-0.547,说明二者具有较明显的负相关关系。图7中散点存在一定离散性,表明除曲线半径外,超高等线路条件也会对曲线附加阻力产生影响。总体而言,曲线条件对碳排放的影响主要表现为附加作用,尤其在小半径曲线与较大正坡叠加时,可能进一步提高局部区段牵引需求和碳排放水平。

2.5 高排放区段识别与特征分析

为更充分识别对总碳排放贡献较大的关键区段,按照分段碳排放量由高到低进行排序,并绘制前30个高排放区段帕累托图如图8所示。

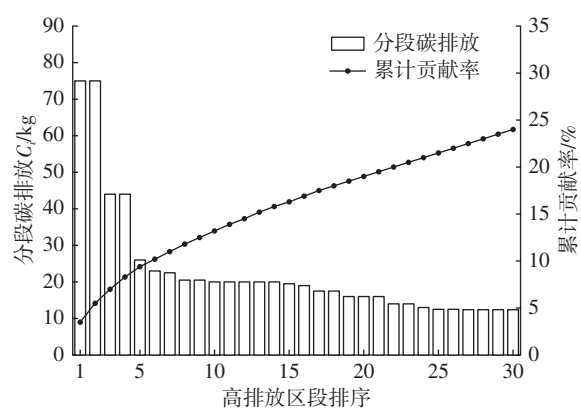


图8 前30个高排放区段帕累托图
Fig.8 Pareto chart of the top 30 high-emission sections

图8表明，少数高排放区段对总碳排放贡献较大，列车运行碳排放并非沿线路均匀分布，而是表现出较明显的局部集中性^[25]。为更充分展示高排放区段的累积贡献特征，图8中给出了前30个高排放区段的分段碳排放及其累计贡献率。测算结果表明，前30个高排放区段累计贡献率为24.38%，而其数量仅占全部分析区段的0.114%，说明少量关键区段对全线总碳排放具有较为突出的影响。其中，前15个高排放区段累计贡献率为16.46%，同样体现出较强的集中分布特征。结合前文分析可知，高排放区段通常与较大正坡度、较长区段长度以及坡曲叠加等不利线路条件有关，这些因素共同作用会抬升列车局部牵引需求^[26]。因此，在运行节能与减排优化中，应重点围绕高排放敏感区段开展速度曲线优化、牵引控制优化和运行组织调整，以提高减排措施的针对性和实施效率。

结合分段结果，进一步筛选出部分典型高排放

区段，典型高排放区段识别结果如表4所示。由表4可见，典型高排放区段主要集中在537 km~569 km和588 km~591 km，其中561.111 km~569.361 km区段分段碳排放最高，上、下行均为75.37 kg。上述区段普遍具有较大坡度、较长区段长度或坡曲叠加等特征，说明高排放区段主要由不利纵断面、平面线形和区段长度共同作用形成。需要说明的是，表4中坡度值采用原始坡道表中的里程方向记录，用于表征线路资料中的纵断面条件；若从列车实际运行方向分析，上、下行坡度符号需结合列车行进方向进行转换。

2.6 测算结果综合分析

综合上述测算结果可以看出，京沪高速铁路部分上、下行正线列车运行碳排放具有明显的区段差异。上、下行线路总碳排放水平较为接近，但单位里程碳排放分布、高分位值和局部高值区段存在差异，说明仅从总量角度评价列车运行碳排放并不充分，还需要结合区段排放强度、沿程变化特征和高排放区段分布进行综合判断。

从线路参数影响看，坡度对单位里程碳排放的影响更为直接。图6表明，坡度与单位里程碳排放总体呈正相关趋势，相关系数为0.831；当坡度由负值或平缓区段转向正坡区段时，坡道阻力增加，列车牵引需求随之提高。曲线半径主要通过曲线附加阻力影响列车运行能耗。图7表明，曲线半径与曲线附加阻力总体呈负相关关系，相关系数为-0.547；小半径曲线对附加阻力的影响更加明显，若与较大正坡或较长区段叠加，可能进一步提高局部牵引需求。

表4 典型高排放区段识别结果
Tab.4 Identification results for typical high-emission sections

序号	行别	起点里程/km	终点里程/km	区段长度/km	坡度/‰	曲线半径/m	分段碳排放/kg	单位里程碳排放/(kg/km)
1	上行	561.111	569.361	8.250	7.6	—	75.37	9.14
2	下行	561.111	569.361	8.250	7.6	—	75.37	9.14
3	上行	541.400	545.400	4.000	9.0	—	43.03	10.76
4	下行	541.400	545.400	4.000	9.0	—	43.03	10.76
5	下行	537.119	539.520	2.401	9.0	—	25.83	10.76
6	下行	552.009	554.141	2.131	8.8	3 500	22.48	10.55
7	上行	552.024	554.126	2.101	8.8	3 505	22.17	10.55
8	下行	588.447	590.803	2.355	7.2	4 000	20.48	8.69
9	上行	588.447	590.802	2.355	7.2	4 005	20.47	8.69
10	上行	554.161	556.061	1.900	9.0	—	20.44	10.76

从空间分布看,高排放区段具有一定集中性。图8表明,前30个高排放区段累计贡献率为24.38%,而其数量仅占全部分析区段的0.114%,说明少量不利线路条件区段对总碳排放具有较高贡献。结合典型高排放区段识别结果可知,高排放区段主要集中于较大正坡、较长区段或坡曲叠加区段。因此,后续列车运行节能优化不宜仅采用全线平均化控制思路,而应重点关注高排放敏感区段,并结合线路纵断面和平面线形条件开展差异化运行优化。

从方法合理性看,测算结果与列车运行阻力和牵引能耗的基本机理相一致。坡度较大的区段通常对应较高单位里程碳排放,小半径曲线会增加曲线附加阻力,高排放区段也主要集中于较大正坡、较长区段或坡曲叠加区段,说明线路参数变化能够较好解释分段碳排放差异。需要说明的是,基于线路参数的列车运行碳排放分段测算方法主要用于基准工况下不同线路区段碳排放相对差异分析;若用于具体车次绝对碳排放核算,还需进一步引入实测速度曲线、牵引功率和供电计量数据进行校核。

3 结论及建议

以京沪高速铁路部分上、下行正线为案例对象,基于坡道表和曲线表构建统一线路段数据库,建立列车运行能耗-碳排放分段测算模型,并在基准工况下对上、下行线路碳排放进行测算分析。研究表明,列车运行碳排放具有明显的区段差异和空间非均衡性,线路坡度、曲线半径和区段长度共同影响分段牵引能耗和碳排放水平。主要结论及建议如下。

(1) 基于线路参数的分段测算方法能够反映列车运行碳排放的区段差异。通过里程匹配将坡度、坡长、曲线半径、曲线长度和超高等参数统一到线路段中,可形成从线路参数到运行能耗再到碳排放的测算流程。建议在高速铁路列车运行碳排放核算中加强线路参数的精细化利用,避免仅采用平均能耗或总里程折算方法。

(2) 上、下行线路碳排放总量总体接近,但局部排放强度存在差异。测算结果表明,仅从总量角

度评价列车运行碳排放并不充分,还应结合单位里程碳排放、高分位值、沿程累计变化和高排放区段分布进行综合判断。建议在运行能耗管理中建立区段化碳排放评价指标,重点关注局部高值区段及其形成原因。

(3) 坡度是影响区段碳排放强度的重要线路因素。较大正坡区段会增加列车需克服的坡道阻力,提高牵引需求和能耗水平,是形成局部高排放的重要原因。建议在列车运行组织和速度曲线优化中,将较大正坡区段作为重点控制对象,减少坡段内不必要的加速和高牵引输出。

(4) 曲线半径和区段长度会进一步影响局部牵引需求,高排放区段呈现一定空间集中性。小半径曲线会增加曲线附加阻力,较长区段会放大不利线路条件对分段碳排放的影响,坡曲叠加区段更容易形成较高排放水平。建议在高排放敏感区段识别中综合考虑坡度、曲线半径、超高和区段长度等因素,并针对关键区段开展差异化节能控制和运行优化。

本研究构建的分段测算方法能够刻画线路参数对列车运行碳排放的影响,并识别高排放敏感区段。后续研究可进一步引入实测速度曲线、牵引功率数据、再生制动利用和区域电网排放因子,完善列车运行净能耗与净碳排放测算方法。

参考文献:

- [1] 杨 洋,杨晓彤,黄守刚,等.道口群约束下铁路内燃机车牵引节能运行综合建模[J].铁道运输与经济,2025,47(5):16-26.
YANG Yang, YANG Xiaotong, HUANG Shougang, et al. Comprehensive Modeling for Energy-Saving Operation of Railway Diesel Locomotive Traction under Constraint of Crossing Group[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(5): 16-26.
- [2] 毛保华,赵义馨,李宁海,等.我国高速铁路与民航客运碳排放因子及其影响因素研究[J].北京交通大学学报,2024,48(4):11-21.
MAO Baohua, ZHAO Yixin, LI Ninghai, et al. Study on Carbon Emission Factors and Their Influencing Factors in High Speed Railway and Civil Aviation Passenger Transport in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(4):

- 11-21.
- [3] 李 欣, 朱成琨. 碳视角下基于网-车-线耦合的高速列车节能运行优化[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7431-7448.
LI Xin, ZHU Chengkun. Energy-Efficient Operation Optimization of High Speed Trains Based on Network-Train-Line Coupling under Carbon Perspective[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7431-7448.
- [4] 杨立兴, 连得亨, 莫鹏里, 等. 城市轨道交通节能运行优化研究进展与综述[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(5): 109-122.
YANG Lixing, LIAN Deheng, MO Pengli, et al. Review on Energy-Saving Train Operation for Urban Rail Transit[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(5): 109-122.
- [5] 杨 洋, 初祺涵, 黄海博, 等. 轨道交通列车碳排放核算与低碳减排技术综述[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(3): 1-17.
YANG Yang, CHU Qihan, HUANG Haibo, et al. Review of Carbon Emission Accounting and Low-Carbon Emission Reduction Technologies for Rail Transit Trains[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(3): 1-17.
- [6] 陈进杰, 王国翠, 陈 龙, 等. 地铁建设阶段碳排放快速测算方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(10): 105-111, 140.
CHEN Jinjie, WANG Guocui, CHEN Long, et al. Study on Rapid Calculation Method of Carbon Emissions in Metro Construction Stage[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 105-111, 140.
- [7] 杨 洋, 袁振洲, 陈进杰, 等. 基于LCA的高速铁路节能减排效果评价研究[J]. 交通工程, 2021, 21(4): 89-96.
YANG Yang, YUAN Zhenzhou, CHEN Jinjie, et al. The Energy Consumption Conservation and Carbon Emission Reduction Evaluation for High Speed Railway Based on LCA[J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 21(4): 89-96.
- [8] 杨 洋, 王雪纯, 袁振洲, 等. 基于碳回收期理论的城市轨道交通碳减排效应测算[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 1-11, 23.
YANG Yang, WANG Xuechun, YUAN Zhenzhou, et al. Calculation for Carbon Emission Reduction Effect of Urban Rail Transit Based on Carbon Recovery Period Theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 1-11, 23.
- [9] 陈志杰, 毛保华, 柏 赞, 等. 城市轨道交通追踪列车定时节能操纵优化[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 10-17.
CHEN Zhijie, MAO Baohua, BAI Yun, et al. Optimization on Energy-Efficient Operations for Trailing Train in Urban Rail System with Fixed Run-Time[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 10-17.
- [10] 高 豪, 张亚东, 郭 进, 等. 基于动态规划的列车节能运行两阶段优化方法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 946-954.
GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Two-Stage Optimization Method of Train Energy-Efficient Operation Based on Dynamic Programming[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(5): 946-954.
- [11] 杨 辉, 张琼洁, 张坤鹏, 等. 动车组节能运行速度优化设定[J]. 信息与控制, 2014, 43(3): 334-338.
YANG Hui, ZHANG Qiongjie, ZHANG Kunpeng, et al. Speed Optimal-Setting of Electric Multiple Units Based on Energy-Efficient Operation[J]. Information and Control, 2014, 43(3): 334-338.
- [12] 李 诚, 王小敏. 基于粒子群优化的ATO控制策略[J]. 铁道学报, 2017, 39(3): 53-58.
LI Cheng, WANG Xiaomin. An ATO Control Strategy Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 53-58.
- [13] 余 进, 何正友, 钱清泉. 基于微粒群算法的多目标列车运行过程优化[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 70-75.
YU Jin, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Multi-Objective Train Operation Optimization Based on Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 70-75.
- [14] 刘 炜, 王 栋, 李群湛, 等. 基于时间逼近搜索算法的城轨列车运行节能优化研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 918-924.
LIU Wei, WANG Dong, LI Qunzhan, et al. A Novel Time-Approaching Search Algorithm for Energy-Saving Optimization of Urban Rail Train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 918-924.
- [15] 唐海川, 朱金陵, 王青元, 等. 一种可在线调整的列车正点运行节能操纵控制算法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 89-94.

- TANG Haichuan, ZHU Jinling, WANG Qingyuan, et al. An On-line Adjustable Control Algorithm for On-time and Energy Saving Operation of Trains[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 89-94.
- [16] 丁 勇, 刘海东, 柏 赞, 等. 地铁列车节能运行的两阶段优化模型算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1): 96-101.
- DING Yong, LIU Haidong, BAI Yun, et al. A Two-level Optimization Model and Algorithm for Energy-Efficient Urban Train Operation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(1): 96-101.
- [17] 张慧茹, 贾利民, 王 莉, 等. 面向列车节能控制的时刻表优化[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 8-15.
- ZHANG Huiru, JIA Limin, WANG Li, et al. Study of Timetable Optimization Based on Train Energy Saving Control[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 8-15.
- [18] 高仕斌, 罗嘉明, 陈维荣, 等. 轨道交通“网-源-储-车”协同供能技术体系[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 959-979, 989.
- GAO Shibin, LUO Jiaming, CHEN Weirong, et al. Rail Transit “Network-Source-Storage-Vehicle” Collaborative Energy Supply Technology System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 959-979, 989.
- [19] 黄友能, 宫少丰, 曹 源, 等. 基于粒子群算法的城轨列车节能驾驶优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 118-124.
- HUANG Youneng, GONG Shaofeng, CAO Yuan, et al. Optimization Model of Energy-Efficient Driving for Train in Urban Rail Transit Based on Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2): 118-124.
- [20] 陈荣武, 刘 莉, 郭 进. 基于遗传算法的列车运行能耗优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 108-114.
- CHEN Rongwu, LIU Li, GUO Jin. Optimization Algorithm of Train Operation Energy Consumption Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 108-114.
- [21] GONZÁLEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P, et al. A Systems Approach to Reduce Urban Rail Energy Consumption[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 509-524.
- [22] SCHEEPMAKER G M, GOVERDE R M P, KROON L G. Review of Energy-Efficient Train Control and Timetabling[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(2): 355-376.
- [23] XING Z, ZHANG Z, GUO J, et al. Rail Train Operation Energy-Saving Optimization Based on Improved Brute-Force Search[J]. Applied Energy, 2023, 330: 120345.
- [24] YUAN W, FREY H C. Potential for Metro Rail Energy Savings and Emissions Reduction via Eco-Driving[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114944.
- [25] CHESTER M V, HORVATH A, MADANAT S. Comparison of Life-Cycle Energy and Emissions Footprints of Passenger Transportation in Metropolitan Regions[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(8): 1071-1079.
- [26] PRITCHARD J A, PRESTON J. Understanding the Contribution of Tunnels to the Overall Energy Consumption of and Carbon Emissions from a Railway[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 551-563.

(责任编辑 金 晶)