

# 基于LEAP模型的城市客运交通减污降碳路径 ——以呼和浩特市为例\*

郝耀阳<sup>1</sup>,王浩宇<sup>1</sup>,刘少飞<sup>2</sup>,杜俊霞<sup>3</sup>,霍月英<sup>1</sup>

(1. 内蒙古大学交通学院,呼和浩特 010070;

2. 呼和浩特城市交通投资建设集团有限公司,呼和浩特 010010;

3. 内蒙古金融投资集团有限公司,呼和浩特 010011)

**摘要:**为推动城市客运系统的减污降碳,提出一种城市客运交通减污降碳的方法,并以呼和浩特市为例进行实证研究。首先,构建城市长期能源替代规划系统(LEAP)模型,设置基准情景(BAU)、低碳政策情景(LC)和加强低碳政策情景(SLC)3种情景,实施提升终端能效(A1)、促进公交发展(A2)、淘汰高排放车辆(A3)、推广新能源汽车(A4)和综合措施(A5)5种减排措施,依托所构建的LEAP模型,模拟城市2015年至2035年在这3种情景下实施5种减排措施时客运交通的CO<sub>2</sub>和污染气体的排放量;然后,采用协同效应评估法,评估各措施的减污降碳协同效应。实证研究结果表明,当前的政策措施减污降碳效果明显,具有协同控制效应;加强实施低碳政策措施的力度,可使呼和浩特市客运交通于2027年实现碳达峰目标,碳达峰年碳减排率为53.92%;建议加强实施低碳政策措施的力度,提升终端能效和加强新能源汽车推广力度以实现呼和浩特市客运减污降碳的目标。

**关键词:**长期能源替代规划系统(LEAP)模型;情景分析法;协同效应评估法;减污降碳路径

中图分类号:U491.1 文献标志码:A

随着城市化水平的提高和居民出行需求的增长,城市客运系统的碳排放和污染问题日益突出。探究城市客运系统减污降碳路径对于实现城市交通可持续发展具有重要意义,可助力我国城市交通实现绿色低碳转型。因此,本文以呼和浩特市为例,开展城市客运交通的减污降碳研究,为该市提供减污降碳建议,同时也为其他同类城市提供有益的借鉴和参考范例。关于城市交通如何减污降碳的问题,国内外学者从不同方面进行了研究。国外学者从经济、技术和政策等多个方面研究了城市的交通污染和温室气体排放问题,如巴基斯坦的公共交通社会经济成本效益分析<sup>[1]</sup>、意大利的车辆尾气GPS跟踪系统<sup>[2]</sup>、英国的可持续转型政策对城市交通碳排放的影响研究<sup>[3]</sup>和美国电力的交通减排效果评估<sup>[4]</sup>。国内有学者从交通经济政策的减排效果<sup>[5]</sup>、城市公共交通碳管理体系<sup>[6]</sup>、中心城市交通碳排放效率的空间网络结构及动因<sup>[7]</sup>、基于系统动力模型的交通减排效果<sup>[8]</sup>等视角深入研究了城市交通实现减污降碳的方法,指明了城市交通减污降碳的研究方向,对促进城市交通可持续发展具有积极作用。

目前关于城市客运减污降碳的研究主要集中于一线及新一线城市,如北京市和成都市<sup>[9-10]</sup>。关

\* 收稿日期:2024-10-17; 修回日期:2025-03-27

基金项目:内蒙古自治区高等学校青年科技人才发展项目(NJYT23061)

作者简介:郝耀阳(2000—),男,河北邯郸人,2022级硕士研究生。E-mail: 32224057@mail.imu.edu.cn

通信作者:霍月英(1985—),女,内蒙古乌兰察布人,教授,博士。主要从事交通运输规划与管理研究。E-mail: hyy@imu.edu.cn

于呼和浩特市减污降碳问题的研究主要从大气污染过程模拟<sup>[11]</sup>和秸秆露天焚烧<sup>[12]</sup>方面展开,尚缺乏专门针对该市客运系统减污降碳的研究。同时,现有研究鲜有关注客运系统消耗电力所间接产生的污染物及碳排放,导致难以有效地分析某种减排措施的实际效果。本研究在考虑电力消耗所间接排放的CO<sub>2</sub>和污染气体的基础上,构建呼和浩特市客运系统环境排放模型,预测采取不同政策措施时客运系统的CO<sub>2</sub>和污染气体排放量,并结合协同效应评估法,探索能够助力呼和浩特市客运系统绿色转型和实现碳达峰目标的路径。

## 1 模型和方法

长期能源替代规划系统模型(Long-term energy alternatives planning system model, LEAP)是由瑞典斯德哥尔摩国际环境研究院(SEI)开发的用于能源需求预测、温室气体和污染物排放及其经济效益分析的软件,可分析不同能源政策对能源需求和环境排放等方面的影响,帮助决策者制定可持续发展的能源发展战略和环境政策,以实现节能减排、能源安全和可持续发展等目标<sup>[13]</sup>。

### 1.1 呼和浩特市客运碳排放和污染气体排放测算模型

从模型结构、模型计算方法、模型数据和模型情景4个方面构建呼和浩特市LEAP模型。

#### 1.1.1 模型结构

将呼和浩特市客运结构分为部门(整个客运系统)、子部门(公共客运和私人客运)、运载工具和能源种类4个层次。公共客运的车辆类型包括公交车和地铁。其中,公交车使用的燃料类型分为柴油、压缩天然气(CNG)和电能,地铁使用的燃料类型为电能。私人客运的车辆类型包括私人小汽车、电动自行车、摩托车、出租车。其中,私人小汽车和出租车使用的燃料类型分为电能、汽油和CNG,电动自行车使用的燃料类型为电能,摩托车使用的燃料类型为汽油。

#### 1.1.2 模型计算方法

基于“排放量=活动水平×能源强度×排放系数”测算城市客运CO<sub>2</sub>和污染气体排放量,活动水平是指各种运输工具完成的客运周转量;能源强度是指各种运输工具完成单位客运周转量消耗能源时产生的热量;排放系数是指能源燃烧产生单位热量时排放的气体量(CO<sub>2</sub>和污染气体)。具体公式为

$$C = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (D_{ij} \cdot EI_{ij} \cdot \alpha_{ij}), M = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (D_{ij} \cdot EI_{ij} \cdot \beta_{ij}),$$

式中, $C$ 、 $M$ 分别为CO<sub>2</sub>排放量(t)和污染气体排放量(t); $D_{ij}$ 为第 $t$ 年第 $i$ 种交通方式采用第 $j$ 种燃料类型的客运周转量(人·km); $EI_{ij}$ 、 $\alpha_{ij}$ 和 $\beta_{ij}$ 分别为第 $i$ 种交通方式采用第 $j$ 种燃料类型的能源强度(tce/人·km)、CO<sub>2</sub>排放因子(t/tce)和污染气体排放因子(t/tce);tce为吨标准煤当量。 $D_{ij}$ 公式为

$$D_{ij} = N_t \cdot P_t \cdot n_t \cdot d_t \cdot m_{ij},$$

式中, $N_t$ 为第 $t$ 年的总天数(d); $P_t$ 为第 $t$ 年呼和浩特市辖区(新城区、回民区、玉泉区和赛罕区)的人口总数; $n_t$ 为第 $t$ 年每位城市居民每天的平均出行次数; $d_t$ 为第 $t$ 年平均每次出行距离(km); $m_{ij}$ 为第 $i$ 种交通方式采用第 $j$ 种燃料类型的比例。 $EI_{ij}$ 公式为

$$EI_{ij} = FC_{ij} \cdot \rho_{ij} \cdot EC_{ij} \cdot (1/PQ_i) \cdot 0.01,$$

式中, $FC_{ij}$ 、 $\rho_{ij}$ 和 $EC_{ij}$ 分别为第 $i$ 种交通方式采用第 $j$ 种燃料类型的百公里能耗(L/100 km、m<sup>3</sup>/100 km、kWh/100 km)、燃料密度(kg/L、kg/m<sup>3</sup>)和燃料含能量(tce/kg); $PQ_i$ 为第 $i$ 种交通方式载客量。

#### 1.1.3 模型数据

以2015年为基准年,2016—2035年为预测年,预测呼和浩特市客运系统在基准情景(Business-as-usual scenario, BAU)、低碳政策情景(Low-carbon policy scenario, LC)和加强低碳政策情景(Strengthened low-carbon policy scenario, SLC)这3种情景下,采取5种减排措施即提升终端能效(A1)、促进公交发展(A2)、淘汰高排放车辆(A3)、推广新能源汽车(A4)和综合措施(A5)时的污染气体和CO<sub>2</sub>排放量。

## (1) 呼和浩特市客运基准年的数据设定及其数据来源

表1显示了基准年客运周转量、车辆类别及分担率、能源类型等相关数据及数据来源。表2显示了排放因子数据及其来源。

表1 基准年数据及数据来源  
Table 1 Base year data and data sources

客运类别及比例	车辆类别及分担率	能源类型	终端能源比例/%	百公里能耗	燃料密度	含能量/( $\times 10^{-6}$ )	平均载客量/人
公共交通: 22.7%	公交车:100%	柴油	14.5	29 L	0.875 kg/L	1457.14 tce/kg	22
		CNG	62	38 m <sup>3</sup>	0.654 kg/m <sup>3</sup>	1130 tce/m <sup>3</sup>	22
		电能	23.5	66 kWh	—	122.86 tce/kWh	22
	地铁:0	电能	100	—	—	—	—
私人交通: 77.3%	出租车:10.5%	汽油	8.6	7.5 L	0.74 kg/L	1471.43 tce/kg	1.5
		CNG	91.4	8 m <sup>3</sup>	0.654 kg/m <sup>3</sup>	1130 tce/m <sup>3</sup>	1.5
		电能	—	11 kWh	—	122.86 tce/kWh	1.5
	私家车:70.5%	汽油	98.5	10 L	0.74 kg/L	1471.43 tce/kg	2.3
		CNG	1.5	9 m <sup>3</sup>	0.654 kg/m <sup>3</sup>	1130 tce/m <sup>3</sup>	2.3
		电能	—	11 kWh	—	122.86 tce/kWh	2.3
		摩托车:1.2%	汽油	100	2.5 L	0.74 kg/L	1471.43 tce/kg
电动自行车:17.8%	电能	100	1.25 kWh	—	122.86 tce/kWh	1.2	

注:客运周转量指标中2015年市内人口为130.1万人,人均日出行次数为2.85次,日均每次出行距离为5.55 km,城市年总客运周转量为75.11亿人·km。客运周转量指标、车辆类别及分担率和终端能源比例的数据来源于《呼和浩特市城市交通综合调查报告(2016年)》和《呼和浩特市统计年鉴(2016年)》,百公里能耗和含能量的数据来源于文献[14],燃料密度和平均载客量的数据来源于文献[15]。

## (2) 预测期模型参数计算

人口增长和经济增长等驱动因子是影响客运周转量的量化指标<sup>[18]</sup>,设定人均GDP为驱动因子,采用SPSS软件对2012—2015年呼和浩特市的人均客运周转量和人均GDP进行回归分析,预测呼和浩特市的人均客运周转量。回归结果为

$$PTD = -8910.002 + 0.16 \times PGDP,$$

$$R^2 = 0.882,$$

式中,PTD为人均客运周转量(人公里);PGDP为人均GDP;PGDP对PTD的驱动系数为0.16。由回归分析结果可知,人均客运周转量和人均GDP存在正相关关系,根据世界银行对我国经济和人口数量发展变化的研究报告,2012—2020年我国的PGDP增长率和人口增长率分别为6.12%和1.43%。假设呼和浩特市在预测期(2016—2035年)的PGDP增长率和人口增长率与我国对应的指标数据保持一致,分别为6.12%和1.43%。

## 1.1.4 模型情景

通过设置3种情景,对5种定性政策措施进行量化处理,研究实施不同政策措施时,呼和浩特市客运CO<sub>2</sub>和污染气体排放情况。LEAP模型的情景结构如图1所示。

如图1所示,设置基准情景(BAU)、低碳政策情景(LC)和加强低碳政策情景(SLC)3种不同情景,LC和SLC情景下各采取A1—A5 5种政策措施。基准情景(BAU)是指假设交通部门按照2015年呼和浩特市现有的交通运输管理政策发展,且不考虑2015年之后出台的任何新政策或措施的一种情

景。低碳政策情景(LC)是指呼和浩特市按照目前出台的交通政策措施来实施交通运输节能减排的一种情景。加强低碳政策情景(SLC)是指呼和浩特市按照目前出台的交通政策措施来实施交通运输节能减排的一种情景。具体的情景描述如表3所示。

表2 排放因子数据及数据来源  
Table 2 Emission factor data and data sources

车辆类别	能源类型	排放因子					能源强度/ ( $10^{-6}$ tce/p·k)
		二氧化碳	一氧化碳	碳氢化合物	二氧化硫	氮氧化物	
公交车	柴油	2187.907 kg/tce	18.993 kg/tce	3.687 kg/tce	0.069 kg/tce	13.993 kg/tce	16.80
	CNG	1257.364 kg/tce	1.5134 kg/tce	4.842 kg/tce	0.052 kg/tce	3.934 kg/tce	19.52
	电能	0.7025 kg/kWh	—	—	0.00154 kg/kWh	0.00129 kg/kWh	3.69
地铁	电能	0.7025 kg/kWh	—	—	0.00154 kg/kWh	0.00129 kg/kWh	0.21
出租车	汽油	2020.382 kg/tce	26.396 kg/tce	2.296 kg/tce	0.191 kg/tce	1.722 kg/tce	54.44
	CNG	1367.925 kg/tce	2.621 kg/tce	0.415 kg/tce	0.052 kg/tce	1.088 kg/tce	60.27
	电能	0.7025 kg/kWh	—	—	0.00154 kg/kWh	0.00129 kg/kWh	9.01
私家车	汽油	2020.382 kg/tce	19.797 kg/tce	1.722 kg/tce	0.191 kg/tce	1.318 kg/tce	47.342
	CNG	1367.925 kg/tce	1.966 kg/tce	0.311 kg/tce	0.052 kg/tce	0.833 kg/tce	44.217
	电能	0.7025 kg/kWh	—	—	0.00154 kg/kWh	0.00129 kg/kWh	5.876
摩托车	汽油	2020.382 kg/tce	19.797 kg/tce	1.722 kg/tce	0.191 kg/tce	1.318 kg/tce	22.685
电动自行车	电能	0.7025 kg/kWh	—	—	0.00154 kg/kWh	0.00129 kg/kWh	1.28

注:数据来源于文献[15-17]。其中,地铁的排放因子数据采用一般情况下的标准值。鉴于2015年呼和浩特市尚未开通地铁线路,因此表中的地铁排放因子数据在模型中不参与计算,实际未产生影响。

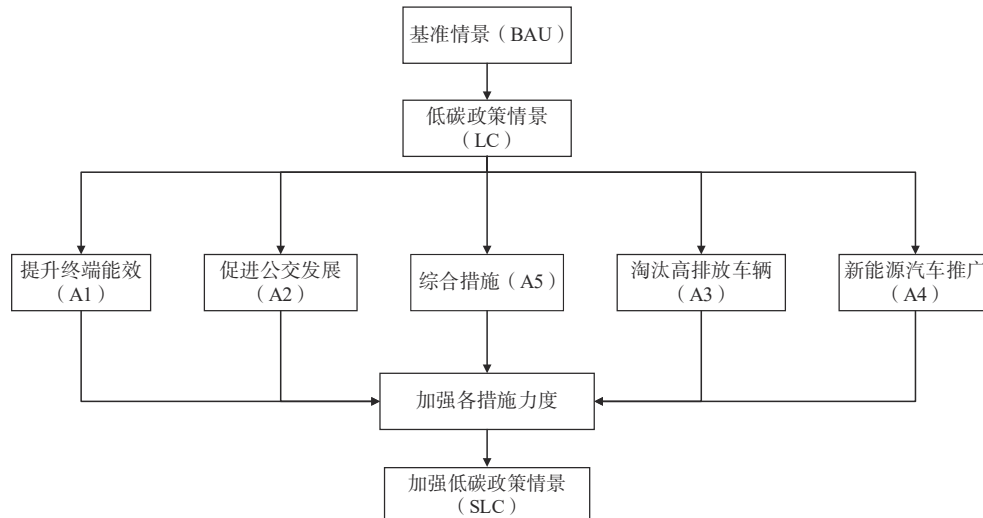


图1 LEAP模型的情景结构

Fig. 1 Scenario structure diagram of the LEAP model

“提升终端能效(A1)”来源于《呼和浩特市能耗总量和强度双控管理实施细则(试行)》和《呼和浩特市大力推进交通领域低碳化三年行动计划(2021—2023年)》;“促进公交发展(A2)”来源于《呼和浩特市“十四五”节能减排综合工作实施方案》;“淘汰高排放车辆(A3)”来源于《呼和浩特市交通运输局能耗双控应急响应方案(2021版)》;“推广新能源汽车(A4)”来源于《呼和浩特市“十四五”新能源

巡游出租汽车推广及换电站建设规划》《呼和浩特市新能源汽车推广应用和产业高质量发展实施方案(2023—2025年)》(征求意见稿)和《关于党政机关加强开展执勤执法车用车新能源汽车推广应用的通知》。

表3 情景描述

Table 3 Descriptions for different scenarios

情景	措施	情景量化指标
基准情景(BAU)		预测期2016—2035年,呼和浩特市人口增长率为1.43%,人均客运周转量增长率为6.12%
低碳政策情景(LC)	提升终端能效(A1)	各运输工具的能源强度年增长率为-1%
	促进公交发展(A2)	(1)公共交通总周转量占总客运周转量的比例在2020年、2025—2035年分别为30%、40% (2)地铁客运周转量占公共交通比重在2019年、2020年、2025年和2035年分别为0、20%、30%和40%
	淘汰高排放车辆(A3)	2021年,淘汰柴油公交车
	推广新能源汽车(A4)	(1)公交车:2020年,电能50%,CNG 50%;2025年,电能100% (2)出租车:2020年,电能20%,CNG 80%;2025年,电能50%,CNG 50%;2030年,电能100% (3)私家车:2025年,电能3%,CNG 5%,汽油92%;2030年,电能7%,CNG 5%,汽油88%;2035年,电能12%,CNG 8%,汽油80%
	综合措施(A5)	综合采取以上措施
加强低碳政策情景(SLC)	提升终端能效(A1)	各运输工具的能源强度年增长率为-2.5%
	促进公交发展(A2)	(1)公共交通总周转量占总客运周转量的比例在2020年、2025年、2030年和2035年分别为30%、40%、50%和60% (2)地铁客运周转量占公共交通比重在2019年、2020年、2025年、2030年和2035年分别为0、20%、40%、45%和50%
	淘汰高排放车辆(A3)	2016年,淘汰柴油公交车
	推广新能源汽车(A4)	(1)公交车:2020年,电能100% (2)出租车:2020年,电能40%,CNG 60%;2025年,电能70%,CNG 30%;2030年,电能100% (3)私家车:2020年,汽油93%,电能3%,CNG 4%;2025年,电能10%,CNG 5%,汽油85%;2030年,电能18%,CNG 7%,汽油75%;2035年,电能32%,CNG 8%,汽油60%
	综合措施(A5)	综合采取以上措施

## 1.2 协同效应评估法

采用减排量弹性系数法分析政策措施的协同效应程度,减排量弹性系数能够反映各项减排措施对大气污染物和CO<sub>2</sub>是否具有协同控制效应及其协同程度<sup>[19]</sup>。减排量弹性系数的计算公式为

$$ELS_{(a/b)} = \frac{\Delta\rho_a/\rho_a}{\Delta\rho_b/\rho_b}$$

式中, $ELS_{(a/b)}$ 表示CO<sub>2</sub>对污染气体变化的敏感度; $a$ 和 $b$ 分别代表CO<sub>2</sub>和污染气体; $\rho_a$ 和 $\rho_b$ 分别表示CO<sub>2</sub>和污染气体的总量; $\Delta\rho_a$ 和 $\Delta\rho_b$ 分别表示采取某项政策措施后CO<sub>2</sub>和污染气体的减排量; $\Delta\rho_a/\rho_a$ 和 $\Delta\rho_b/\rho_b$ 分别为CO<sub>2</sub>和污染气体的排放量变化率。 $ELS_{(a/b)} \leq 0$ 、 $ELS_{(a/b)} > 0$ 、 $0 < ELS_{(a/b)} < 1$ 、 $ELS_{(a/b)} =$

1和 $ELS_{(a/b)} > 1$ 分别表示此项政策措施不具有协同控制效应、对污染气体和CO<sub>2</sub>均有减排效果、对CO<sub>2</sub>的减排程度低于污染气体的减排程度、对CO<sub>2</sub>的减排程度等于污染气体的减排程度和对CO<sub>2</sub>的减排程度高于污染气体的减排程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub>排放量

在图2(a)中,基准情景(BAU)的CO<sub>2</sub>排放量年均增长率为16.47%,这表明无减排政策时,碳排放量增长迅速,需要及时采取措施以减少碳排放。低碳政策情景(LC)的CO<sub>2</sub>排放量年均增长率相较于BAU降低了9.97%,表明LC采取的减排措施减碳效果明显。加强低碳政策情景(SLC)的CO<sub>2</sub>排放量于2027年达到碳达峰,碳达峰年碳排放量为83.227万t,为2027年BAU排放量的44.6%,且累计减排量为2072.734万t,减排率为53.92%,说明加强低碳政策措施力度后,碳减排效果更显著。因此,为达成碳达峰的目标,需在现有减排政策的基础上,加大政策的实施力度,如增强提升终端能效、促进公交发展、推广新能源车辆。

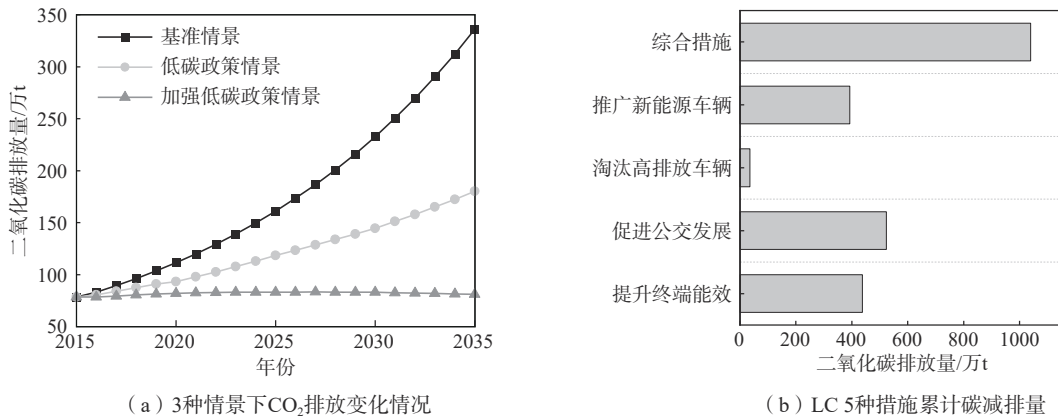


图2 不同情境下CO<sub>2</sub>排放量

Fig. 2 CO<sub>2</sub> emissions under different scenarios

图2(b)呈现了LC采取5种措施的累计碳减排量。其中,提升终端能效、促进公交发展、淘汰高排放车辆、推广新能源车辆和综合措施的碳减排比例分别为18%、21.6%、1.4%、16.2%和42.8%。这表明综合措施的减排效果明显优于单一措施。在单个措施中,促进公交发展的减排效果最为显著,累计碳减排量高达523.743万t,这主要归因于公交车在完成单位客运周转量的能耗较低,因此,促进公交发展能够切实有效地减少能源消耗,进而降低碳排放总量;相比之下,淘汰高排放车辆的碳减排量比例仅为1.4%,减排效果最差,其原因在于2015年的柴油公交车占公交车总数的比例仅为14.5%,柴油公交车排放的CO<sub>2</sub>总量相对较少。在制定政策措施时,建议优先采用综合措施;若采取单个措施,则建议优先发展公共交通,其次是提升终端能效和推广新能源车辆。

在图3(a)中,私家车占各种交通工具总的碳排放量比例高达78%以上,说明在城市客运系统中,私家车对城市客运的碳排放量贡献最大,这是因为目前呼和浩特市私家车通常以化石燃料为动力源,且行驶里程和使用频率相对较高,加之数量庞大,所以其碳排放量在城市客运系统中占据主导地位。因此,为实现碳达峰的目标,要引导城市私家车的发展,如通过提高燃油车购车成本、限制燃油车的车牌发放、实行交通拥堵收费和推行车位限制等措施来控制城市私家车的数量。

图3(b)展示了2015—2035年SLC采取5种措施相较于LC的累计碳减排量,其中,综合措施碳减排量最多,达970.9万t,其次是提升终端能效、促进公交发展和推广新能源车辆,而淘汰高排放车

辆的碳减排量最少,为 2.73 万 t。这说明在现有的 LC 中,若要在 2030 年前实现碳达峰,首先要采取措施重点提升终端能效,如制定更高的燃油标准;其次要加强措施实施力度,促进公交的发展,如优化公交站点布局,大力推广智能公交系统;最后要加大推广新能源车辆的力度,如采取政策支持与激励居民购买新能源车辆、完善充换电基础设施。

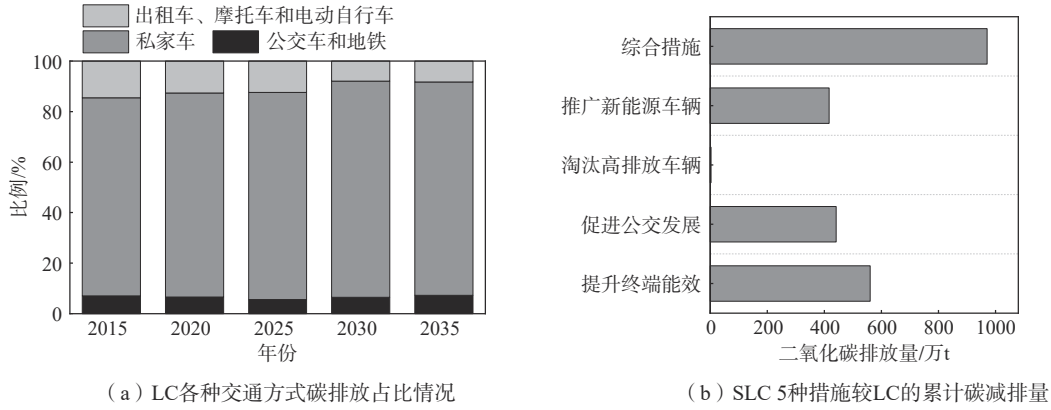


图 3 不同交通方式及措施下 CO<sub>2</sub> 排放量

Fig. 3 CO<sub>2</sub> emissions under different modes and measures

## 2.2 污染气体排放量

图 4(a)显示 BAU、LC 和 SLC 的污染气体排放总量所占比例的变化情况。BAU 的污染气体排放总量所占比例逐年递增,而 SLC 逐年递减。据结果分析,BAU 和 LC 的污染气体排放量年均增长率分别为 15.94%、5.77%;BAU 和 LC 累计排污量分别为 40.69 万 t 和 26.98 万 t。这表明,在 LC 下,减排措施对减少污染气体的排放成效显著。SLC 排污量自 2015 年的 0.884 万 t 下降至 2035 年的 0.799 万 t,累计排污量下降至 17.97 万 t。SLC 与 BAU、LC 相比,分别实现高达 22.72 万 t 和 9.01 万 t 的减污量,表明 SLC 的减污效果优于 LC,能够有效地降低污染气体排放量,为改善环境质量发挥重要作用。因此,为了减少客运系统污染气体的排放量,需要提升终端能效、促进公交发展和推广新能源车辆的力度。

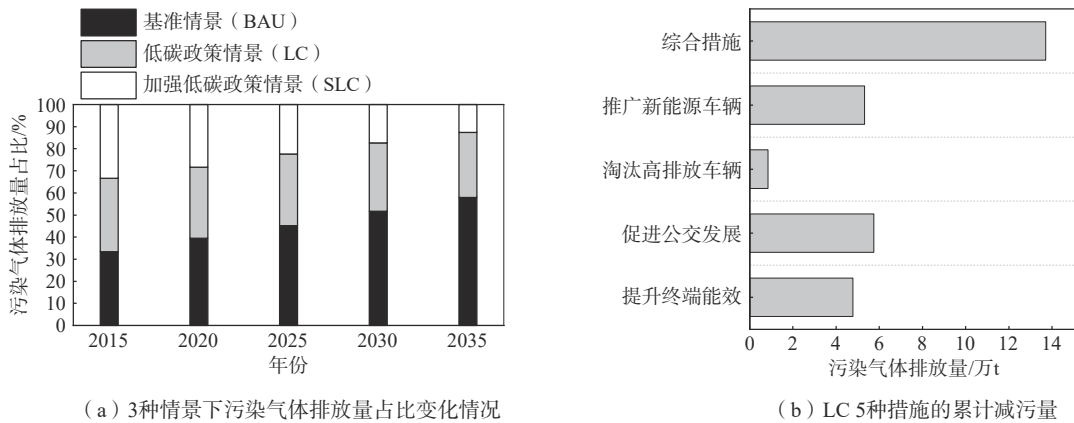


图 4 污染气体排放量综合分析

Fig. 4 Comprehensive analysis for pollutant gas emissions

图 4(b)显示提升终端能效、促进公交发展、淘汰高排放车辆、推广新能源车辆和综合措施累计减污量比重分别为 15.72%、18.91%、2.76%、17.5% 和 45.11%,表明在 LC 情景下,采取综合措施在减污方面所呈现出的效果要显著优于单个减排措施。从整体减污策略的角度出发,在制定客运交通减污政策时,应综合考虑多种措施的协同作用。通过采用综合措施,充分发挥不同措施之间的互补

优势,更有效地实现减污目标。而当选择单个措施时,基于减污效果的考量,优先采用促进公交发展、推广新能源车辆和提升车辆能效这3项措施。

### 2.3 协同效应分析

低碳政策情景下采取综合措施、促进公交发展、推广新能源汽车、提升终端能效和淘汰高排放车辆措施时, $ELS_{(a/b)}$ 的数值分别为0.939、0.994、0.806、0.9997和0.455, $ELS_{(a/b)}$ 数值均大于0,表明这5项措施对 $CO_2$ 和污染气体均有减排效果,具有减污降碳协同控制效应;并且 $ELS_{(a/b)}$ 数值在0~1之间,表明这5种措施在减少污染气体排放方面的效果优于对 $CO_2$ 的减排效果。

### 2.4 政策建议

根据上述碳排放量及污染气体排放量的分析,提出促进客运交通可持续发展的政策建议:

(1) 深化实施公交优先发展战略。在低碳政策情景下,采取促进公交发展措施,累计碳减排量为523.74万t,减污量为5.75万t;而在加强低碳政策情景下,碳减排量为1027.13万t,减污量为10.6万t,分别比基准情景降低了27.1%和26.05%,减污降碳效果显著。因此,通过继续深化实施公共优先发展战略,能够实现碳达峰的目标。建议优化公交站点布局,大力推广智能公交系统,合理规划建设公交专用道,积极鼓励市民使用公交出行。同时,应注重公交与地铁的接驳,在地铁站周边合理设置公交站点,实现无缝换乘,进一步优化公交线路,方便市民出行,提高公共交通的吸引力和出行效率。

(2) 提升客运交通工具的能源使用效率。在加强低碳政策情景下,采取提升客车终端能效的措施,使得2015—2035年碳排放量和污染气体排放量分别减少了1060.6万t和10.92万t,比基准情景分别降低了27.97%和26.84%。因此,提升客车终端能效能够助力减污降碳目标的实现。建议优化交通工具设计,如采用轻量化设计和采用节能发动机等方法,同时可以对客运车辆进行定期的能效检测,对于能效不达标的车辆进行整改或淘汰。

(3) 加强推广新能源车辆的力度。在加强低碳政策情景下,采取推广新能源车辆的措施,使得2015—2035年碳排放量和污染气体排放量分别降低了871.53万t和10.24万t,年均减少率为1.09%和1.2%。建议完善充换电基础设施、加大对新能源车辆的购置补贴力度、设立新能源车辆优先行政策、提升消费者认知与接受度及建立完善电池回收体系。

(4) 优先采取多种减排措施组合的方法。在低碳政策情景之下,采取综合措施所实现的累计碳减排量为1039.65万t,减污量为30.4万t。在5种减排措施中,采取综合措施在减污降碳方面呈现出的效果最为显著,建议进一步强化目前已出台的减排措施的实施力度,采用多种减污降碳政策措施相组合的方式。例如,构建绿色交通积分制度,强化对交通污染的监测与治理力度,设立新能源车辆优先行政策以及推广智能交通系统等一系列组合措施。

## 3 结论

(1) 当前的减排政策措施对客运系统减污降碳效果明显。低碳政策情景下,呼和浩特市客运累计碳减排量为1039.65万t,碳减排率为27.4%;累计减污量为13.71万t,减污率为33.69%。

(2) 5项减排措施对减污降碳都具有协同控制效应。低碳政策情景下,根据减排量的弹性系数,发现推广新能源汽车、提升终端能效、淘汰高排放量车辆、促进公交发展和综合措施对大气污染物和 $CO_2$ 均有减排效果,并且对减少污染气体排放的效果优于 $CO_2$ 。

(3) 加强当前低碳政策措施的力度可实现碳达峰的目标。加强低碳政策情景下,呼和浩特市客运交通的碳排放量在2027年达到最大值83.22万t,且累计减排量为2072.734万t,减排率为53.92%,碳减排率较低碳政策情景增加27%,碳减排效果更为明显。

(4) 采用LEAP模型及协同效应评估法,以呼和浩特市为案例,收集公交、地铁、出租车、私家车等客运交通能耗、周转量及客运交通结构等多源数据,模拟城市在基准情景、低碳政策情景和加强低

碳政策情景3种情景下碳排放量和污染气体排放量,为我国西部城市深化实施公交优先发展战略、加强推广新能源车辆力度、构建绿色交通积分制度等减污降碳提出建议。

## 参考文献:

- [1] SIDDIQUI O, ISHAQ H, KHAN D A, et al. Social cost-benefit analysis of different types of buses for sustainable public transportation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 438:140656.
- [2] BÖHM M, NANNI M, PAPPALARDO L. Gross polluters and vehicle emissions reduction[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(8):699-707.
- [3] WINKLER L, PEARCE D, NELSON J, et al. The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):2357.
- [4] BISTLINE J, ABHYANKAR N, BLANFORD G, et al. Actions for reducing US emissions at least 50% by 2030 [J]. *Science*, 2022, 376(6596):922-924.
- [5] WANG H H, SHI W Y, HE W L, et al. Simulation of urban transport carbon dioxide emission reduction environment economic policy in China: An integrated approach using agent-based modelling and system dynamics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 392:136221.
- [6] 夏晓宇, 赵钧淇, 林伟华. 城市公共交通碳管理体系研究[J]. *可持续发展*, 2024, 14(6):1411-1417.
- [7] 杨青, 吴向荣, 刘洋, 等. 国家中心城市交通碳排放效率的空间网络结构及动因研究[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(4):1167-1177.
- [8] JIA S W, BI L Z, ZHU W M A, et al. System dynamics modeling for improving the policy effect of traffic energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90:104398.
- [9] HUANG R, ZHANG S, WANG P. Key areas and pathways for carbon emissions reduction in Beijing for the "dual carbon" targets[J]. *Energy Policy*, 2022, 164:112873.
- [10] JI S H, ZHANG Z X, MENG F Q, et al. Scenario simulation and synergistic effect analysis of CO<sub>2</sub> and atmospheric pollutant emission reduction in urban transport sector: A case study of Chengdu, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 438:140841.
- [11] 程英楠, 刘东伟, 王杰, 等. 基于WRF-Chem模式的呼和浩特市大气污染过程模拟及特征分析[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(4):371-380.
- [12] 吕金培, 张雪峰, 刘庆福, 等. 基于中分辨率遥感数据的秸秆露天焚烧碳排放估算:以呼和浩特市为例[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4):432-441.
- [13] MENG L, LI M, ASUKA J. A scenario analysis of the energy transition in Japan's road transportation sector based on the LEAP model[J]. *Environmental Research Letters*, 2024, 19(4):044059.
- [14] 杨宛钰. 城市道路交通能源消耗测算方法研究:以南京为例[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [15] 池莉. 基于LEAP模型的北京市未来客运交通能源需求和污染物排放预测[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [16] LIU P J, WU Y J, LI Z X, et al. Tailpipe volatile organic compounds (VOCs) emissions from Chinese gasoline vehicles under different vehicle standards, fuel types, and driving conditions[J]. *Atmospheric Environment*, 2024, 323:120348.
- [17] SOLOMON S, ALLEY R, GREGORY J, et al. A closer look at the IPCC report[J]. *Science*, 2008, 319(5862):409-410.
- [18] SHARIFI A. Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750:141642.

- [19] ZENG Q H, HE L Y. Study on the synergistic effect of air pollution prevention and carbon emission reduction in the context of "dual carbon": Evidence from China's transport sector[J]. *Energy Policy*, 2023, 173: 113370.

(责任编辑 李成兵)

## Pollution and Carbon Reduction Pathways of Urban Passenger Transport Based on LEAP Model: Taking Hohhot City as an Example

HAO Yaoyang<sup>1</sup>, WANG Haoyu<sup>1</sup>, LIU Shaofei<sup>2</sup>, DU Junxia<sup>3</sup>, HUO Yueying<sup>1</sup>

(1. *Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

2. *Hohhot Urban Transportation Investment and Construction Group Company, Hohhot 010010, China;*

3. *Inner Mongolia Financial Investment Group Company, Hohhot 010011, China*)

**Abstract:** To promote pollution and carbon mitigation in urban passenger transport systems, a method is proposed for pollution and carbon reduction pathways in urban passenger transport. An empirical study is conducted using Hohhot as a case. First, a long-term energy alternatives planning system (LEAP) model is constructed, incorporating three scenarios: business-as-usual scenario (BAU), low-carbon policy scenario (LC), and strengthened low-carbon policy scenario (SLC). Five mitigation measures are implemented: terminal energy efficiency improvement (A1), public transport development (A2), high-emission vehicle retirement (A3), new energy vehicle promotion (A4), and integrated measures (A5). Using the LEAP model, we simulate CO<sub>2</sub> and pollutant emissions in the urban passenger transport system from 2016 to 2035 under these scenarios and measures. Subsequently, a synergy assessment method is applied to evaluate the synergistic effects of pollution and carbon reduction for each measure. The results demonstrate that current policies exhibit obvious effectiveness in pollution and carbon reduction with synergistic control effects. Strengthening existing low-carbon policies could enable Hohhot's passenger transport to achieve carbon peaking by 2027, with a carbon reduction rate of 53.92% in the peak year. To achieve pollution and carbon mitigation targets in urban passenger transport, we recommend strengthening existing low-carbon policies, enhancing terminal energy efficiency, and accelerating the adoption of new energy vehicles.

**Key words:** long-term energy alternatives planning system (LEAP) model; scenario analysis methodology; synergy assessment methodology; pollution and carbon reduction pathways