

知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒蕤, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟

庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒蕤, 孔祥如, 潘峰, 杨宏*

(兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

摘要: 基于 LEAP 模型, 构建了 2015~2040 年兰州市道路交通发展“零措施”的基准 (BAU) 情景以及低碳 (LC) 和强化低碳 (ELC) 这 2 个节能减排情景, 模拟评估各项政策和措施下能源消耗情况和温室气体与大气污染物协同减排效果。结果表明, LC 情景能源消耗和 CO₂ 排放将于 2026 年达峰, ELC 情景能源消耗和 CO₂ 排放将于 2020 年达峰; 两种情景下, NO_x、CO、HC、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等污染物排放量于 2015~2017 年间开始出现大幅下降, 下降趋势于 2023 年前后逐渐减缓。结合措施可行性和减排成本, LC 情景可作为兰州市道路交通碳达峰减排情景; 到 2040 年能源消耗量、CO₂、NO_x、CO、HC、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放相对于 BAU 情景的削减率分别达到 -24.17%、-26.57%、-55.38%、-65.91%、-72.87%、-76.66% 和 -77.18%。兰州市道路交通当前应以公共交通能源清洁化、小型客车电动化和老旧车淘汰等结构优化措施为重点并优先实施, 大力宣传提倡低碳出行, 加之汽车技术发展伴随的能效提升, 道路交通 CO₂ 和污染物排放将得到有效控制并尽早实现碳达峰。此外, 需关注措施实施过程中 CO₂ 和各污染物主要贡献车型的变化, 以期从不同排放物重点控制车型的数量或新能源市场份额入手, 实现针对性防控。

关键词: LEAP 模型; 道路交通; 二氧化碳 (CO₂); 协同减排; 碳达峰; 兰州市

中图分类号: X16; X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3386-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202109119

Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model

PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, ZHU Lu-qi, CHEN Heng-rui, KONG Xiang-ru, PAN Feng, YANG Hong*

(College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the continuous increase in transportation activities, the transportation sector has become an important source of global greenhouse gases. In 2019, road vehicles accounted for nearly three-quarters of the CO₂ emissions of the entire transportation sector and will be the key to achieving carbon peaks in the transportation sector. At the same time, air pollutants emitted by road vehicles are also one of the threats to the environment and human health. Based on the long-range energy alternatives planning system (LEAP) model, we constructed the baseline (BAU) scenario, low-carbon (LC) scenario, and enhanced low-carbon (ELC) scenario for the development of the road transport sector in Lanzhou from 2015 to 2040 and simulated energy consumption and emission co-reduction of greenhouse gases and pollutants under policies and measures. The results showed that the energy consumption and CO₂ emissions of the LC scenario will peak in 2026, whereas those in the ELC scenario will peak in 2020. In these two scenarios, pollutant emissions such as NO_x, CO, HC, PM_{2.5}, and PM₁₀ began to decline sharply between 2015 and 2017, and the downward trend will slow down gradually around 2023. Based on the feasibility of measures and the cost of abatement, the LC scenario can be used as a road vehicle carbon peak scenario in Lanzhou. In this scenario, the reduction rates of energy consumption, CO₂, NO_x, CO, HC, PM_{2.5}, and PM₁₀ emissions will reach -24.17%, -26.57%, -55.38%, -65.91%, -72.87%, -76.66%, and -77.18% compared with those under the BAU scenario by 2040. At present, the road vehicles in Lanzhou City should focus on structural optimization measures such as clean-energy use of public transportation, electrification of small passenger cars, and phasing out old cars, as well as vigorously promoting low-carbon travel and improving energy efficiency accompanying the development of automotive technology. These efforts will effectively control CO₂ and pollutant emissions by road vehicles, and carbon peaks will be achieved as soon as possible. In addition, it is necessary to pay attention to the changes in vehicle types during the implementation of these measures, which most contribute CO₂ and various pollutants, in order to make the measures more targeted by changing the number or the market share of new energy of focused vehicle types.

Key words: LEAP model; road transportation; carbon dioxide (CO₂); coordinated emission reduction; carbon peak; Lanzhou City

为控制全球气候变化, 避免极端灾害, “碳达峰”和“碳中和”已成为国际热点问题, 习近平总书记在第 75 届联合国大会一般性辩论中承诺: 中国 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。随着运输活动的持续增加, 交通部门已成为全球温室气体的重要来源, 2019 年交通部门占燃料燃烧直接 CO₂ 排放量的 24%, 其中道路交通占整个交通部门 CO₂ 排放量的近四分之三^[1]。道路交通将成为交通部门碳达峰的关键所在, 同时其

排放的大气污染物也是环境和人类健康的威胁之一^[2~4]。

LEAP (long-range energy alternatives planning system) 模型是交通领域能源政策、温室气体和大气污染物减排规划等研究的重要工具, 国内外学者利

收稿日期: 2021-09-13; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2017-65)

作者简介: 庞可 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治和机动车节能减排, E-mail: pangk19@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yanghongyh@lzu.edu.cn

用该模型对中国、韩国、马来西亚和厄瓜多尔等不同国家交通部门的能源碳及污染物排放进行了预测分析^[5~10]。近年来,国内学者对于我国不同省市交通部门的能源消耗、污染物和碳排放也做了较多研究^[11~16],而对于道路相关研究仅聚焦于京津冀和南京等地区^[17~20]。归纳来看,现有研究多集中于国家层面或者较发达区域的整个交通领域,对于西北地区道路交通温室气体与污染物协同减排的研究仍有空缺。此外,根据 2017 年最新 MEIC 清单数据,兰州市道路交通 CO₂ 排放量仅次于工业和电力部门,占兰州市总排放量 8.01%^[21,22]。因此,本文构建了 2015~2040 年兰州市道路交通低碳发展情景,基于 LEAP 模型模拟评估各项政策和措施下能源消耗和温室气体与大气污染物的协同减排成效,以期为兰州市及相似地区在道路交通领域减缓气候变化和节能减排绿色发展提供思路和参考。

1 材料与方法

1.1 LEAP 模型

LEAP 模型是斯德哥尔摩环境研究所(SEI)开发的一种围绕长期情景分析设计的集成建模工具,该模型特点在于:①初始数据要求低,输入灵活且透明;②预测时间长:时间范围可无限延长,大多研究使用 20~50 年的预测期;③适用于污染物和温室气体的协同减排:可跟踪所有经济部门的温室气体排放源和汇,还可用于分析当地和区域空气污染物的排放;④适用于描述多种政策情景:可同时评估单个政策的影响以及多项措施和政策结合时发生的相互作用。因此,LEAP 模型已被全球多个国家和地区用于多部门或单个部门的能源政策、气候变化减缓和空气污染减排规划等方面的研究^[23~33]。

本研究基于 LEAP 模型内部算法,将道路机动车分为:微小型客车、中型客车、大型客车、微轻型货车、中型货车、重型货车、出租车、公交车、摩托车、低速货车和三轮汽车等 11 类,分别设置相关参数,完成不同情景道路交通能源消耗量、CO₂ 排放量、NO_x、CO、HC、PM_{2.5}和 PM₁₀等大气污染物排放量的计算,具体方法如下。

(1) 能源消耗量计算方法

道路机动车能源消耗量可以根据保有量、年均行驶里程和燃油经济性等活动水平计算得到,公式如下:

$$EC = \sum P_{i,j,k} \times VKT_i \times FE_{i,j} \quad (1)$$

式中,EC 为道路机动车能源消耗量; $P_{i,j,k}$ 为 i 类机动车 j 类燃料 k 类排放标准的保有量; VKT_i 为 i 车型的年均行驶里程; $FE_{i,j}$ 为 i 类机动车 j 类燃料的

百公里能耗。

(2) CO₂ 排放量计算方法

道路机动车 CO₂ 排放量可以根据能源消耗量和 CO₂ 排放因子计算得到,公式如下:

$$CE = \sum EC_j \times EF_j \quad (2)$$

式中,CE 为道路机动车 CO₂ 排放量; EC_j 为 j 类燃料的能源消耗量; EF_j 为 j 类燃料的 CO₂ 排放因子。

(3) 大气污染物排放量计算方法

道路机动车 NO_x、CO、HC、PM_{2.5}和 PM₁₀等大气污染物排放量可以根据保有量、年均行驶里程和排放因子计算得到,公式如下:

$$AP_n = \sum P_{i,j,k} \times VKT_i \times EF_{i,j,k,n} \quad (3)$$

式中, AP_n 为道路机动车 n 污染物的排放量; $P_{i,j,k}$ 为 i 类机动车 j 类燃料 k 类排放标准的保有量; VKT_i 为 i 车型的年均行驶里程; $EF_{i,j,k,n}$ 为 i 类机动车 j 类燃料 k 类排放标准的 n 污染物的排放因子。

1.2 数据来源

机动车保有量:由于考虑到未来一定时期增长趋势变缓的特性,刘云^[34]的研究利用国际上广泛使用的 Gompertz 模型对于兰州市 2017~2032 年机动车保有量进行预测,其 2017~2020 年 4a 保有量预测值和实际值的误差百分比在 -0.09%~1.29% 范围内,因此本文参考该方法预测机动车保有量,结果见图 1,可见兰州市机动车保有量呈现先快速增长再增速减缓的趋势,年均增长 3.35%,到 2040 年保有量达到 148 万辆。

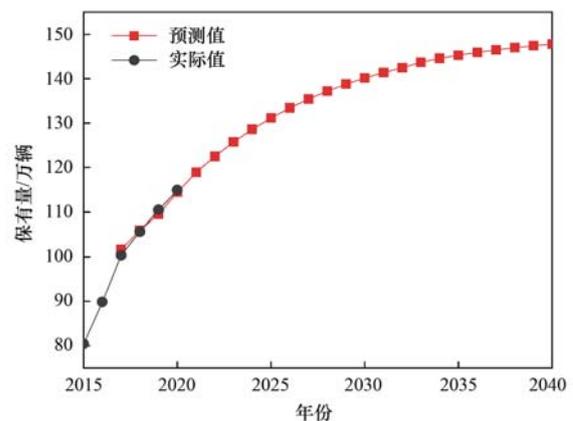


图 1 兰州市 2015~2040 年机动车保有量变化

Fig. 1 Changes in the number of vehicles in Lanzhou from 2015 to 2040

燃油经济性:燃油经济性数据主要基于相关研究,汽油、柴油和天然气机动车燃油经济性引用 Ou 等^[35]的研究结果,由于其基础数据为每年新售车辆的燃油经济性,而研究基准年的机动车车龄实际分布于多个年份,考虑到高龄机动车占比较少本研究将取 2008~2015 年均值作为 2015 年机动车百公里能耗;

电动汽车百公里能耗参考文献[20,36],其中新能源货车因数据缺失且目前对其市场渗透率多为鼓励引导而非量化的政策控制,本研究暂不考虑.目前燃油

经济性数据本地化研究缺乏,因此本研究未考虑道路交通状况和车辆的满载率等影响因素,均使用全国平均数据.不同车型燃油经济性数据见表1.

表1 不同车型燃油经济性¹⁾

Table 1 Fuel economy of different vehicle types

不同车型	能源类型			
	柴油 /MJ·(100 km) ⁻¹	汽油 /MJ·(100 km) ⁻¹	天然气 /MJ·(100 km) ⁻¹	电力 /kW·h·(100 km) ⁻¹
微小型客车	202.87	241.86	/	16.42
中型客车	316.22	326.15	/	/
大型客车	898.54	988.57	/	/
微轻型货车	427.47	415.58	/	/
中型货车	651.22	821.48	/	/
重型货车	841.09	/	/	/
三轮汽车	427.47	/	/	/
低速货车	427.47	/	/	/
摩托车	/	66.72	/	/
公交客运	898.54	/	1197.32	66.00
出租客运	/	241.86	245.64	16.42

1)“/”表示对应车型不考虑该能源类型

排放因子:机动车 NO_x、CO、HC、PM_{2.5}和 PM₁₀等污染物的排放因子来源于文献[37],并通过温度、湿度和海拔等参数进行本地化修正,其中 HC 排放因子未包含蒸发排放,仅为尾气排放部分;CO₂的排放因子来源于 LEAP 模型 TED 数据库,仅考虑机动车燃料燃烧产生的直接 CO₂ 排放,因电力消耗产生的间接排放不予核算.

活动水平:年均行驶里程来源于文献[37],分车型比例来自兰州市交管部门,不同类型燃油比例和排放标准比例均参考文献[38].

1.3 情景设置

“十二五”规划以来,国家和地方均制定了一系列节能减排措施,交通运输部还提出了综合运输、道路运输、水路运输和民用航空单位能耗下降的目标.同时,文献[39]指出兰州市目标 2025 年实现整体碳达峰,2029 年实现交通碳达峰.因此,本研究以该方案基准年(2015 年)为研究基准年,从影响 CO₂ 和污染物排放的燃油经济性、行驶里程和能源结构等主要因素出发,构建了一级和二级情景来评估兰州市道路机动车的能源消耗和相关排放,其中一级情景为多个二级情景的集成情景.机动车总保有量均按图 1 所示增长,具体情景设置情况见表 2.

1.3.1 基准情景

基准(BAU)情景即“零方案”情景,在该情景中,运输模式、用能结构和燃油经济性均保持在基准年水平,到 2040 年为止未采取任何节能减排措施.

1.3.2 低碳情景

低碳(LC)情景为能效提升(EEI)、低碳出行

(LCT)和结构优化(SOP)这 3 个二级情景的集成情景,设置依据主要参考文献[39~43]中对甘肃省和兰州市道路交通节能减排提出的目标和要求.

1.3.3 强化低碳情景

强化低碳(ELC)情景在 LC 情景各项二级情景的基础上加以强化,设置依据主要参考文献[44~46]中对全国道路交通节能减排与新能源汽车技术提出的目标和要求.

2 结果与讨论

2.1 不同情景下能源消耗

不同情景下能源消耗变化情况见图 2.一级情景下,基准年消耗 166.62 万 t 标煤,2015~2040 年,BAU 情景道路交通能耗总量持续上升,于 2040 年达 308.62 万 t 标煤;LC 情景于 2026 年达能耗峰值 245.82 万 t 标煤,随后缓慢下降,于 2040 年减少至 234.02 万 t 标煤,相对 BAU 情景的削减率为 -24.17%;ELC 情景于 2020 年达能耗峰值 212.42 万 t 标煤,随后快速下降,于 2040 年减少至 154.45 万 t 标煤,相对 BAU 情景的削减率为 -49.95%.

二级情景中,结构优化所对应的 LC-SOP 和 ELC-SOP 情景表现出最大的节能潜力,分别于 2037 年和 2030 年达到能耗峰值 280.87 万 t 标煤和 270.23 万 t 标煤,2040 年相对于 BAU 情景的削减率分别为 -9.09% 和 -17.49%.

一级情景不同能源类型消耗情况见图 3. BAU 情景下无电力渗透,汽油、柴油和天然气消耗均呈持续上升态势,到 2040 年分别占总能耗的 56.06%、43.49% 和 0.45%. LC 和 ELC 两种情景下,汽油消

表 2 不同情景设置

Table 2 Settings of different scenarios

一级情景	二级情景	情景描述	情景支撑	
基准(BAU)	无	到 2040 年为止车队结构、用能结构和燃油经济性均冻结在 2015 年	未采取任何节能减排措施	
低碳(LC)	能效提升(EEI)	柴油客车年均增长率为 1.5%, 汽油和天然气客车年均增长率为 1.3%, 其他车型年均增长率均为 0.3%	参考 Ou 等 ^[35] 的研究结果	
	低碳出行(LCT)	除公共交通外每年新增车辆年均行驶里程每年减少 1%	打造慢行交通系统, 强化绿色交通文化宣传, 将绿色出行比例显著提升 ^[40]	
	老旧车淘汰	黄标车、国三及以下和国四车分别在 2017、2023 和 2030 年完成淘汰, 每年淘汰的车辆用同年更高排放标准的机动车补充, 保持各车型保有量不变	文献[41]明确量化黄标车淘汰时间; 国三及以下和国四车的淘汰时间参考冯相昭等 ^[7] 的研究并结合国六标准的实施时间设置	
	货车保有量冻结	2030 年以后, 货车保有量不再增加, 由此减少的保有量用小型客车替换以保持总保有量不变	将兰州打造成国家铁路运输网一级中转城市 ^[42]	
	结构优化(SOP)	到 2020 年, 公共交通全面实现新能源化; 电动公交和出租比例达到 20% 和 30%, 天然气公交和出租达到 80% 和 70%; 到 2030 年, 电动公交和出租比例达到 60% 和 70%, 天然气公交和出租比例达到 40% 和 30%	文献[39, 40]明确量化, 措施实施末年(2020 年)之后仍然延续其增速	
	家庭用车电动化	2016 年小型电动汽车数量占新增及更新汽车总量的 1%, 随后年均增长率为 0.5%	文献[43]明确量化, 措施实施末年(2020 年)之后仍然延续其增速	
	能效提升(EEI)	2020、2025、2030 和 2035 年乘用车的新车平均油耗分别为 5、4、3.2 和 2 L·(100 km) ⁻¹ , 2025 年电动乘用车新车平均电耗降至 12 kW·h·(100 km) ⁻¹ , 2020、2025 和 2030 年商用车平均油耗相比 2015 年分别降低 10%、20% 和 30%	文献[44, 45]明确量化	
	低碳出行(LCT)	除公共交通外每年新增车辆年均行驶里程每年减少 2%	在低碳情景基础上加强, 参考吕晨等 ^[19] 的研究	
	强化低碳(ELC)	老旧车淘汰	黄标车、国三及以下和国四车分别在 2017、2023 和 2030 年完成淘汰, 每年淘汰的车辆用同年更高排放标准的机动车补充, 保持各车型保有量不变	老旧车淘汰为大势所趋, 与低碳情景保持一致
		货车保有量冻结	2030 年以后, 货车保有量不再增加, 由此减少的保有量用小型客车替换以保持总保有量不变	发展以铁路、水路为骨干的多式联运, 加快货物运输“公转铁”、“公转水” ^[46]
公共交通清洁化		在 LC 情景的基础上, 公共交通全面实现电动化; 2040 年城市公交和出租电动车辆比例达到 100%	公共领域用车全面电动化 ^[45]	
家庭用车电动化		2025、2030 和 2035 年小型电动汽车数量占新增及更新汽车总量的 20%、40% 和 50%	文献[44]明确量化	

耗先增后减, 柴油消耗缓慢增加, 电力消耗不断增加, 本研究仅涉及公共交通使用天然气燃料, 因此天然气消耗随公共交通天然气比例变化呈先增后减趋势. 到 2040 年, LC 情景下汽油、柴油、电力和天然气消耗占比分别为 46.90%、46.13%、2.71% 和 4.26%, ELC 情景下汽油、柴油和电力消耗占比分别为 34.70%、57.70% 和 7.60% (2040 年公共交通完全电力化使得天然气消耗减少为零). LC 和 ELC

情景下, 柴油消耗占比最终均将超过汽油, 这与对应情景下货运交通未考虑清洁能源渗透有关.

2.2 不同情景下 CO₂ 排放

不同情景下 CO₂ 排放量变化见图 4, MEIC 清单 2015 年兰州市交通部分(移动源) CO₂ 排放量为 309.91 × 10⁴ t^[21, 22], 本研究基准年 CO₂ 排放总量为 344.51 × 10⁴ t, 两者相比差别不大. 一级情景下, BAU 情景 CO₂ 排放总量呈持续上升趋势, LC 和

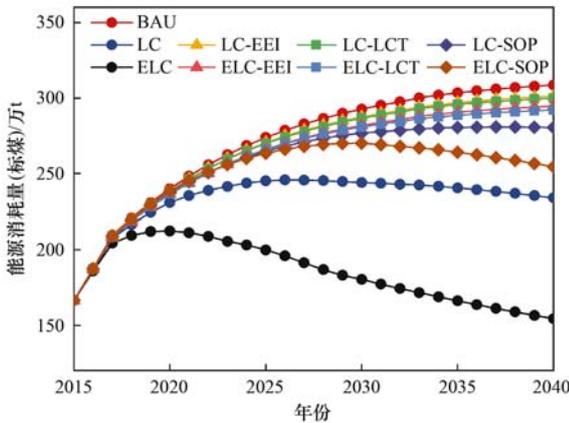


图 2 不同情景能源消耗变化

Fig. 2 Energy consumption in different scenarios

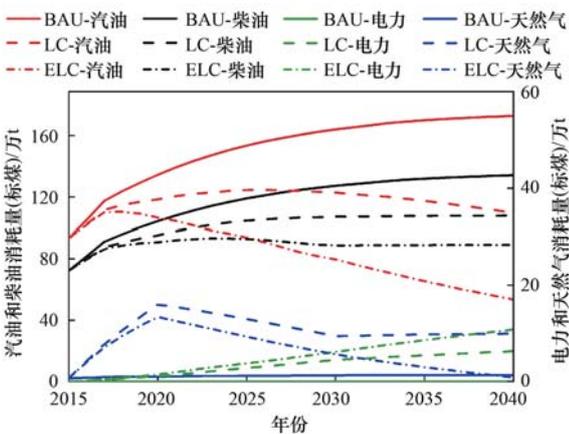


图 3 一级情景不同能源消耗变化

Fig. 3 Different energy consumptions in first-level scenarios

ELC 情景分别于 2026 年和 2020 年达到峰值 497.44×10^4 t 和 435.33×10^4 t, 到 2040 年, BAU、LC 和 ELC 情景 CO_2 排放总量分别变化至 638.13×10^4 t、

468.59×10^4 t 和 306.35×10^4 t. 不同情景 CO_2 削减情况见表 3. 不同情景的 CO_2 削减率均随时间增加, 到 2040 年, LC 情景及其二次情景 LC-SOP、LC-LCT 和 LC-EEI 的削减率分别为 -26.57%、-11.85%、-2.81% 和 -2.32%, ELC 情景及其二次情景 ELC-SOP、ELC-LCT 和 ELC-EEI 的削减率分别为 -51.99%、-21.86%、-5.37% 和 -4.51%, 一级情景及其二级情景下的减排潜力, ELC 情景均比 LC 情景大. 值得注意的是, 二级情景中, EEI 和 LCT 情景所带来的减排效果不如 SOP 情景显著, 这是因为 EEI 和 LCT 情景仅包含新增车量, 而与结构优化中的老旧车淘汰措施共同实施时, 因淘汰而更新的车辆也将纳入考虑, 减排效果将会更加显著, 这种二级情景间的相互作用带来的隐藏减排潜力也是表 3 中一级情景削减率大于二级情景削减率之和的主要原因.

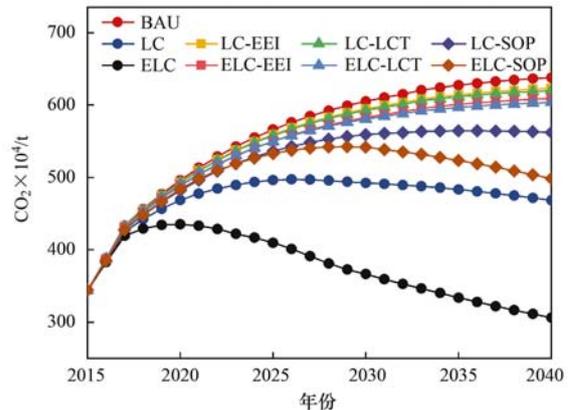


图 4 不同情景 CO_2 排放变化

Fig. 4 CO_2 emissions in different scenarios

表 3 不同情景 CO_2 排放量的削减率/%

Table 3 Reduction rate of CO_2 emissions in different scenarios/%

不同情景	2020 年	2025 年	2030 年	3035 年	2040 年
LC	-5.55	-13.67	-18.62	-22.95	-26.57
LC-EEI	-0.58	-1.33	-1.73	-2.10	-2.32
LC-LCT	-0.68	-3.13	-2.08	-2.54	-2.81
LC-SOP	-2.82	-5.74	-7.60	-10.03	-11.85
ELC	-12.29	-30.36	-39.43	-46.76	-51.99
ELC-EEI	-1.53	-3.04	-3.68	-4.23	-4.51
ELC-LCT	-1.39	-4.53	-4.05	-4.89	-5.37
ELC-SOP	-2.44	-6.69	-10.48	-16.56	-21.86

CO_2 边际减排成本是区域减排潜力和成本的重要指标, 其与经济发展程度成正比, 因此西部地区经济滞后于东、中部地区, 碳排放量较小, 减排成本较低. 根据甘肃省 CO_2 边际减排成本^[47], 估算 LC 和 ELC 情景的减排成本分别为 17.80 亿和 34.79 亿. 因此, ELC 情景的碳减排率和达峰时间虽优于 LC 情景, 但同时对标更严格的措施和更高的成本. 结合

措施实施可行性和减排成本, 道路交通 CO_2 排放于 2026 年实现达峰的 LC 情景作为兰州市的达峰情景更具合理性和实际意义.

达峰(LC)情景下不同车型的 CO_2 排放量变化见图 5. 基准年 CO_2 排放主要贡献车型为微小型客车(41.65%)、重型货车(22.39%)和微轻型货车(18.16%). 随着 LC 情景各项减排措施的实施, 微

小型客车排放量先增加后减小,到 2040 年,微小型客车(37.02%)仍然是 CO_2 排放的主要贡献者;重型货车和微轻型货车排放量先快速增加后因货车保有量冻结保持不变,到 2040 年,重型货车(25.99%)和微轻型货车(21.07%)排放总贡献已接近二分之一。可见 LC 情景减排措施对微小型客车 CO_2 减排有显著作用,而货车方面排放贡献率持续增长,因此仅考虑老旧车淘汰、燃油经济性的提升和“公转水”“公转铁”的影响是不够的,必须实现货车用能的清洁化、电动化,因此充分利用我国在电动货车领域已取得的先行优势^[48],提高电动货车的市场覆盖率将对道路交通 CO_2 减排具有重要意义。

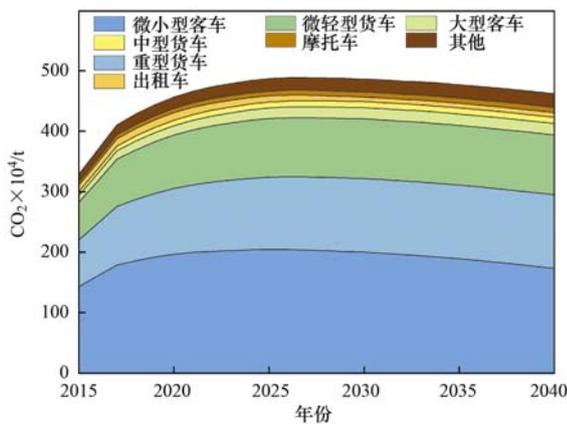


图 5 LC 情景不同车型 CO_2 排放变化

Fig. 5 CO_2 emissions of different vehicle types in LC scenario

2.3 不同情景下污染物排放

各情景措施不仅对于 CO_2 有相对明显的减排效果,其对机动车排放的大气污染物也具有协同减

排效应。不同情景下 2015~2040 年兰州市道路机动车各污染物排放量变化见图 6,对应的削减率见表 4。一级情景下, NO_x 、 CO 、 HC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 等污染物基准年的排放总量分别为 2.19×10^4 、 5.49×10^4 、 8.96×10^3 、 4.81×10^2 和 5.32×10^2 t; LC 和 ELC 情景下,各污染物排放量于 2015~2017 年开始出现大幅下降,下降趋势于 2023 年前后逐渐减缓,到 2040 年,LC 情景 NO_x 、 CO 、 HC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放总量分别为 1.81×10^4 、 3.46×10^4 、 4.51×10^3 、 2.08×10^2 和 2.25×10^2 t,相对于 BAU 情景削减率分别为 -55.38%、-65.91%、-72.87%、-76.66% 和 -77.18%; ELC 情景 NO_x 、 CO 、 HC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放总量分别为 1.65×10^4 、 2.84×10^4 、 3.53×10^3 、 1.91×10^2 和 2.06×10^2 t,相对于 BAU 情景削减率分别为 -59.41%、-72.02%、-78.73%、-78.61% 和 -79.09%。达峰(LC)情景对应二级情景中,由于污染物排放量计算方法与燃油经济性无关,因此 LC-EEI 情景排放无变化; LC-LCT 情景下各污染物的削减率较小,到 2040 年均不超过 3%; LC-SOP 情景 2040 年各污染物削减率在 50%~80% 之间,其中老旧车淘汰措施的削减率在 40%~70% 之间,因此 LC-SOP 情景成为各污染物减排潜力最大的二级情景主要归因于国四及以下老旧车淘汰所带来的巨大减排效益,同时这也是各污染物排放量出现大幅下降的原因。

达峰(LC)情景下,各污染物的主要贡献车型也发生了变化,LC 情景下各污染物主要车型的排放贡献率变化情况见图 7。从不同污染物来看,对于

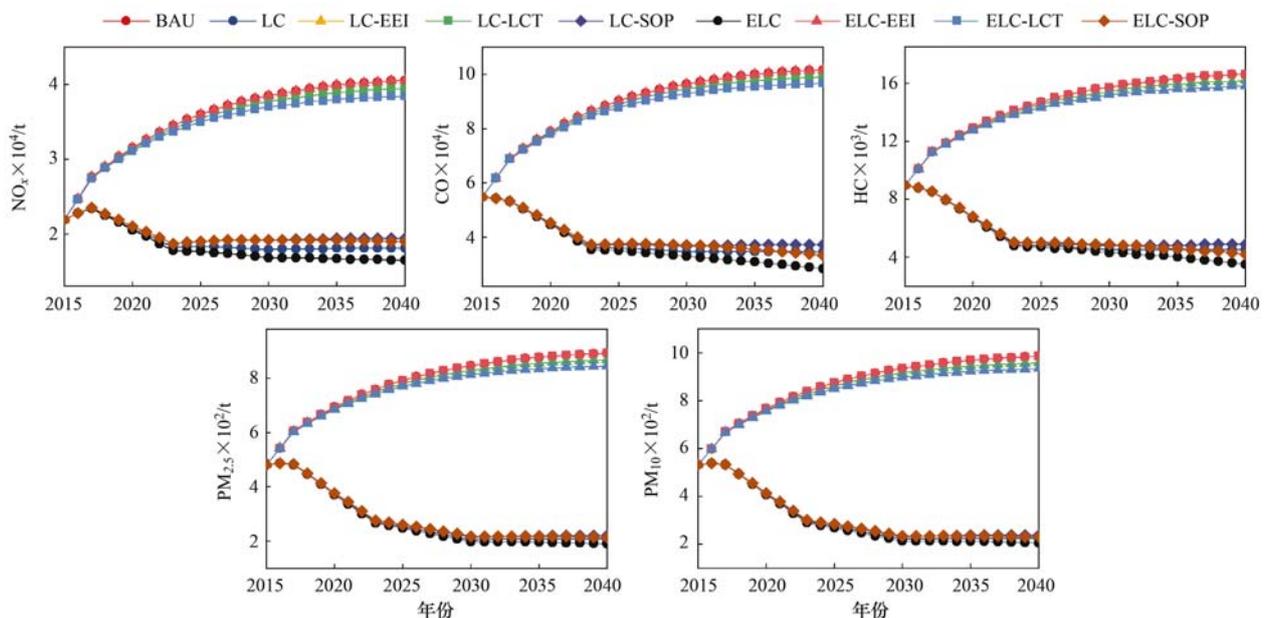


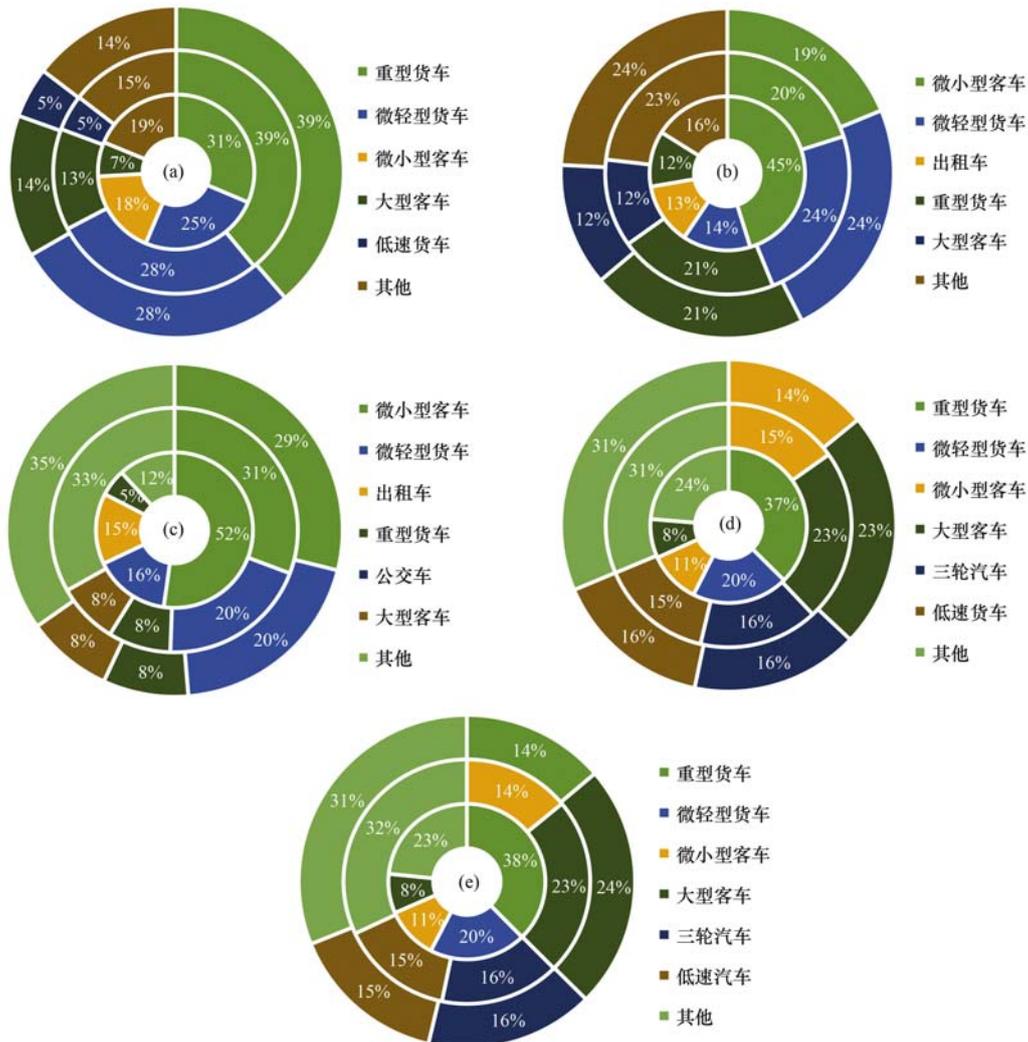
图 6 不同情景污染物排放变化

Fig. 6 Pollutant emissions in different scenarios

表 4 不同情景污染物排放量的削减率/%

Table 4 Reduction rate of pollutant emissions in different scenarios/%

污染物	LC			ELC		
	2020 年	2030 年	2040 年	2020 年	2030 年	2040 年
NO _x	-34.23	-53.38	-55.38	-34.97	-56.28	-59.41
CO	-43.14	-64.12	-65.91	-43.60	-65.78	-72.02
HC	-47.82	-71.38	-72.87	-48.16	-72.39	-78.73
PM _{2.5}	-46.16	-75.70	-76.66	-46.58	-76.57	-78.61
PM ₁₀	-46.56	-76.27	-77.18	-46.97	-77.12	-79.09



(a)NO_x, (b)CO, (c)HC, (d)PM_{2.5}, (e)PM₁₀; 圆环从内到外表示的年份,分别为 2015、2030 和 2040 年

图 7 LC 情景主要车型污染物排放贡献率变化

Fig. 7 Contribution rate of pollutant emissions from major vehicle types in the LC scenario

NO_x, 基准年排放前三的重型货车(31%)、微轻型货车(25%)和微型客车(18%)在 2040 年转变为重型货车(39%)、微轻型货车(28%)和大型客车(14%),期间重型货车、微轻型货车和大型客车排放贡献不断增加,微型客车贡献大幅减少;对于 CO,基准年排放前三的微型客车(45%)、微轻型货车(14%)和出租车(13%)在 2040 年转变为微轻型货车(24%)、重型货车(21%)和微型客车(19%),期间微轻型货车和重型货车排放贡献不断

增加,微型客车和出租车贡献大幅减少;对于 HC,基准年排放前三的微型客车(52%)、微轻型货车(16%)和出租车(15%)在 2040 年转变为微型客车(29%)、微轻型货车(20%)和大型客车(8%),期间微轻型货车和大型客车排放贡献不断增加,微型客车和出租车贡献大幅减少;对于 PM_{2.5}和 PM₁₀,基准年排放前三的重型货车(37%和 38%)、微轻型货车(20%和 20%)、微型客车(11%和 11%)在 2040 年转变为大型客车(23%和

24%)、三轮汽车(16%和16%)、低速汽车(16%和15%),期间大型客车、三轮汽车和低速货车排放贡献不断增加,重型货车和微轻型货车贡献大幅减少。因此,伴随各项措施的综合实施,各污染物主要贡献车型会发生变化,基于该变化及时调整不同污染物的重点控制车型,从其数量或者新能源市场份额入手,可以更具针对性地减少某一污染物的排放。

3 结论

(1)从能源消耗看,LC 和 ELC 情景分别于 2026 年和 2020 年达到峰值 245.82 万 t 标煤和 212.42 万 t 标煤,2 种情景中电力消耗份额虽有不同程度增加,但兰州市机动车的主要依赖能源仍为汽油和柴油等化石燃料,且柴油消耗占比将超过汽油,汽油和柴油的消耗将是能源结构调整的长期控制重点。

(2)从 CO₂ 排放看,LC 和 ELC 情景分别于 2026 年和 2020 年达到峰值 497.44 × 10⁴ t 和 435.33 × 10⁴ t,二级情景中 SOP 情景表现出最大的减排潜力。结合研究区域实际情况并考虑减排成本,LC 情景作为兰州市的达峰情景更具合理性,该情景下 CO₂ 排放的主要贡献车型分别为微小型客车和重轻型货车,模拟期间前者 CO₂ 排放贡献不断减少,后者则持续增长。

(3)污染物和温室气体的协同减排效果显著,ELC 情景的污染物减排潜力略大于 LC 情景。LC 情景下,部分污染物的最大贡献车型发生变化,CO 由微小型客车变为微轻型货车,PM_{2.5} 和 PM₁₀ 由重型货车变为大型客车,基于该变化及时调整某一污染物重点控制车型的数量或者新能源市场份额可实现针对性的污染防控。

(4)综上所述,LC 情景可优先作为兰州市道路交通碳达峰情景,其中的结构优化将成为 CO₂ 减排的有效措施重点考虑并优先实施,低碳出行和能效提升次之,三者间的相互作用也将发挥重要减排作用,到 2026 年可实现碳达峰。因此,应以公共交通能源清洁化、小型客车电动化和老旧车淘汰等结构优化措施为重点控制措施,撬动当前兰州市道路交通以燃油为主的能源结构,这将需要新能源车购置补贴与置换奖励等财政支出政策的支持,其次大力宣传绿色出行文化,再加上汽车技术发展伴随的能效提升,兰州市道路交通 CO₂ 和污染物的排放均会得到有效控制,同时结合整个交通部门运输结构的调整和优化,可推动兰州市交通领域尽早实现 CO₂ 排放达峰。

参考文献:

[1] IEA. Tracking transport 2020[EB/OL]. <https://www.iea.org/>

- reports/tracking-transport-2020, 2021-09-01.
- [2] 秦耀辰,谢志祥,李阳. 大气污染对居民健康影响研究进展[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1512-1520.
- Qin Y C, Xie Z X, Li Y. Review of research on the impacts of atmospheric pollution on the health of residents [J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1512-1520.
- [3] 刘小宇,盛萍,马晓凤,等. 城市高密集人群区域机动车污染物时空分布及健康影响[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(1): 119-128.
- Liu X Y, Sheng P, Ma X F, et al. Temporal and spatial distribution and health risks of vehicle pollution in high-populated urban areas[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(1): 119-128.
- [4] 单丽,江飞,贺晓婧,等. 中国道路交通源大气污染的健康影响评估[J]. 中国环境管理, 2018, 10(5): 59-64.
- Shan L, Jiang F, He X J, et al. Health impact assessment of air pollution from road traffic sources in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(5): 59-64.
- [5] Liu L, Wang K, Wang S S, et al. Assessing energy consumption, CO₂ and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050[J]. Energy Policy, 2018, 116: 382-396.
- [6] He L Y, Chen Y. Thou shalt drive electric and hybrid vehicles: scenario analysis on energy saving and emission mitigation for road transportation sector in China[J]. Transport Policy, 2013, 25: 30-40.
- [7] 冯相昭,赵梦雪,王敏,等. 中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 279-288.
- Feng X Z, Zhao M X, Wang M, et al. Simulation research on co-controlling pollutants and greenhouse gases emission in China's transportation sector[J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 279-288.
- [8] Hong S J, Chung Y, Kim J, et al. Analysis on the level of contribution to the national greenhouse gas reduction target in Korean transportation sector using LEAP model[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 549-559.
- [9] Azam M, Othman J, Begum R A, et al. Energy consumption and emission projection for the road transport sector in Malaysia: an application of the LEAP model[J]. Environment, Development and Sustainability, 2016, 18(4): 1027-1047.
- [10] Rivera-González L, Bolonio D, Mazadiego L F, et al. Long-term forecast of energy and fuels demand towards a sustainable road transport sector in Ecuador (2016-2035): A LEAP model application[J]. Sustainability, 2020, 12(2), doi: 10.3390/su12020472.
- [11] 黄莹,郭洪旭,廖翠萍,等. 基于 LEAP 模型的城市交通低碳发展路径研究——以广州市为例[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 670-683.
- Huang Y, Guo H X, Liao C P, et al. Study on low-carbon development path of urban transportation sector based on LEAP model—take Guangzhou as an example [J]. Climate Change Research, 2019, 15(6): 670-683.
- [12] 罗薇. 基于 LEAP 模型的云南省交通运输业能源消费及环境排放趋势研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [13] 王逸欣,王姗姗,王克,等. 河南省交通部门能源需求与污染物排放预测[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 514-519.
- Wang Y X, Wang S S, Wang K, et al. Prediction of energy saving potential and pollutant emissions for the transport sector in Henan Province [J]. Environmental Science & Technology,

- 2016, **39**(S2): 514-519.
- [14] 张建珍, 王小琛, 台啟龙, 等. 海南省交通运输业能源需求与碳排放预测分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2017, **35**(2): 164-170.
Zhang J Z, Wang X C, Tai Q L, *et al.* Forecasting of energy demands and carbon emission of transportation in Hainan Province[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2017, **35**(2): 164-170.
- [15] 吴玉婷, 王晓荣, 何潇蓉. 基于 LEAP 模型的北京市交通能耗及环境污染排放预测[J]. 河北建筑工程学院学报, 2018, **36**(4): 85-90, 110.
Wu Y T, Wang X R, He X R. Forecast of traffic energy consumption and environmental pollution emission in Beijing based on LEAP model [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2018, **36**(4): 85-90, 110.
- [16] 董蕾. 基于 LEAP 模型的四川省交通运输业能源消费趋势研究[D]. 成都: 四川省社会科学院, 2016.
- [17] 郭秀锐, 刘芳熙, 符立伟, 等. 基于 LEAP 模型的京津冀地区道路交通节能减排情景预测[J]. 北京工业大学学报, 2017, **43**(11): 1743-1749.
Guo X R, Liu F X, Fu L W, *et al.* Scenarios prediction of energy saving and emission reduction in the road transport sector of Beijing-Tianjin-Heilbei region[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, **43**(11): 1743-1749.
- [18] 申娜. 北京市道路运输领域能源需求及污染物排放研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [19] 吕晨, 李艳霞, 杨楠, 等. 道路机动车温室气体排放评估与情景分析: 以北京市为例[J]. 环境工程, 2020, **38**(11): 25-32.
Lv C, Li Y X, Yang N, *et al.* Assessment and scenario analysis of on-road vehicle greenhouse gases emission: a case study of Beijing[J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(11): 25-32.
- [20] 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.
- [21] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. National Science Review, 2017, **4**(6): 834-866.
- [22] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [23] Nieves J A, Aristizábal A J, Dyer I, *et al.* Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: a LEAP model application[J]. Energy, 2019, **169**: 380-397.
- [24] Windarta J, Purwangono B, Hidayanto F. Application of LEAP model on long-term electricity demand forecasting in Indonesia, period 2010-2025 [J]. SHS Web of Conferences, 2018, **49**, doi: 10.1051/shsconf/20184902007.
- [25] Ataei A, Choi J K, Shamshiri S, *et al.* Evaluating of the energy consumption in Iran during 1980-2030 using the Leap model[J]. American Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, **1**(2): 72-85.
- [26] McPherson M, Karney B. Long-term scenario alternatives and their implications: LEAP model application of Panama's electricity sector[J]. Energy Policy, 2014, **68**: 146-157.
- [27] Cai L Y, Guo J F. Scenario analysis of CO₂ emission abatement effect based on LEAP[J]. Energy Procedia, 2018, **152**: 965-970.
- [28] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学, 2021, **43**(4): 639-651.
Hong J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model [J]. Resources Science, 2021, **43**(4): 639-651.
- [29] Verdezoto P L C, Vidoza J A, Gallo W L R. Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: energy efficiency policies in the transportation sector[J]. Energy Policy, 2019, **134**, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110948.
- [30] Wang P, Wang C S, Hu Y K, *et al.* Analysis of energy consumption in Hunan Province (China) using a LMDI method based LEAP model[J]. Energy Procedia, 2017, **142**: 3160-3169.
- [31] Nugrahanto C A, Windarta J, Aminata J. Analysis of causality relationship energy consumption and CO₂ emissions to economic growth based on the LEAP model case study of energy consumption in Indonesia 2010- 2025 [J]. E3S Web of Conferences, 2018, **73**, doi: 10.1051/e3sconf/20187301002.
- [32] 杨花, 杜斌, 吕锋骅, 等. 基于 IPCC 排放清单和 LEAP 模型的山西省 CO₂ 排放研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(3): 103-109.
Yang H, Du B, Lv F H, *et al.* Study on CO₂ emissions in Shanxi Province base on IPCC listing and LEAP model [J]. Environmental Pollution and Control, 2014, **36**(3): 103-109.
- [33] 吴唯, 张庭婷, 谢晓敏, 等. 基于 LEAP 模型的区域低碳发展路径研究——以浙江省为例[J]. 生态经济, 2019, **35**(12): 19-24.
Wu W, Zhang T T, Xie X M, *et al.* Research on regional low carbon development path based on LEAP model: taking Zhejiang Province as an example [J]. Ecological Economy, 2019, **35**(12): 19-24.
- [34] 刘云. 兰州市机动车限行的环境效应及政策再设计[D]. 兰州: 兰州财经大学, 2018.
- [35] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y. Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: life-cycle energy demand and GHG emissions [J]. Energy Policy, 2010, **38**(8): 3943-3956.
- [36] 中国汽车技术研究中心有限公司, 汽车标准化研究所. 电动汽车能量消耗率限值标准研究报告[EB/OL]. <https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-ctp-20190512-2/%E7%94%B5%E5%8A%A8%E6%B1%BD%E8%BD%A6%E8%83%BD%E9%87%8F%E6%B6%88%E8%80%97%E7%8E%87%E9%99%90%E5%80%BC%E6%A0%87%E5%87%86%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf>, 2021-09-01.
- [37] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [38] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywdt/tpwx/201606/W020160602535609145311.pdf>, 2021-09-01.
- [39] 兰州市人民政府办公厅. 兰州市人民政府办公厅关于印发兰州市 2025 年实现碳排放达峰实施方案的通知 [EB/OL]. http://www.lanzhou.gov.cn/art/2017/7/21/art_15334_904243.html, 2021-09-01.
- [40] 兰州市人民政府办公厅. 兰州市人民政府办公厅关于印发兰州市全面深入推进绿色交通发展的实施意见的通知 [EB/OL]. http://www.lanzhou.gov.cn/art/2019/2/15/art_3197_543642.html, 2021-09-01.
- [41] 甘肃省人民政府. 甘肃省人民政府关于印发甘肃省“十三五”节能减排综合工作方案的通知 [EB/OL]. <http://www.gansu.gov.cn/gsszf/c100054/201707/173323.shtml>, 2021-09-

- 01.
- [42] 兰州市人民政府. 兰州市人民政府关于印发兰州市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要的通知[EB/OL]. http://www.lanzhou.gov.cn/art/2021/4/15/art_15333_1028764.html, 2021-09-01.
- [43] 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省人民政府办公厅关于印发《甘肃省新能源汽车推广应用实施方案(2016—2020年)》的通知[EB/OL]. <http://www.gansu.gov.cn/art/c103795/c103895/c103909/201910/212408.shtml>, 2021-09-01.
- [44] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0[EB/OL]. <https://www.wnevc.org.cn/res/Home/2103/9dd6d2e255c698998bd50f15a866bdde.pdf?download=%E8%8A%82%E8%83%BD%E4%B8%8E%E6%96%B0%E8%83%BD%E6%BA%90%E6%B1%BD%E8%BD%A6%E6%8A%80%E6%9C%AF%E8%B7%AF%E7%BA%BF%E5%9B%BE.0.pdf>, 2021-09-01.
- [45] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm, 2021-09-01.
- [46] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm, 2021-10-24.
- [47] 杨子晖, 陈里璇, 罗彤. 边际减排成本与区域差异性研究[J]. 管理科学学报, 2019, 22(2): 1-21.
Yang Z H, Chen L X, Luo T. Marginal cost of emission reduction and regional differences[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(2): 1-21.
- [48] 孟庆阔, 戴森, 齐涛. 货车电动化发展现状及趋势分析[J]. 专用汽车, 2018, (11): 86-90.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)