

道路货运电动化之路： 陕西省榆林市49吨纯电动牵引车案例

作者：牛天林、朱格仪

介绍

发展新能源汽车是加速各个行业向更绿色可持续货运转型的重要举措。近年来，中国已针对钢铁、水泥和焦化三大重点行业出台了超低排放标准要求，这些标准中均纳入了使用新能源货车进行货物运输的目标要求（生态环境部，2024a, 2024b, 2019）。

如图1所示，陕西省是中国第三大产煤省份，其煤炭产量约占全国总产量的17%（中国煤炭工业协会，2022）。2022年，陕西省的细颗粒物($PM_{2.5}$)年平均浓度为 $39\mu g/m^3$ ，较全国平均水平高出 $10\mu g/m^3$ （生态环境部，2022）。陕西省的煤炭运输主要依托于道路货车，道路货运在煤炭运输总量中的占比为70.2%（陕西省能源局，2019）。这些货车中大多数是柴油货车，例如在省会城市西安，这些柴油货车贡献了西安市90%的颗粒物($PM_{2.5}$)和80%的氮氧化物(NO_x)排放源（史俊斌、关颖，2021）。

www.theicct.org

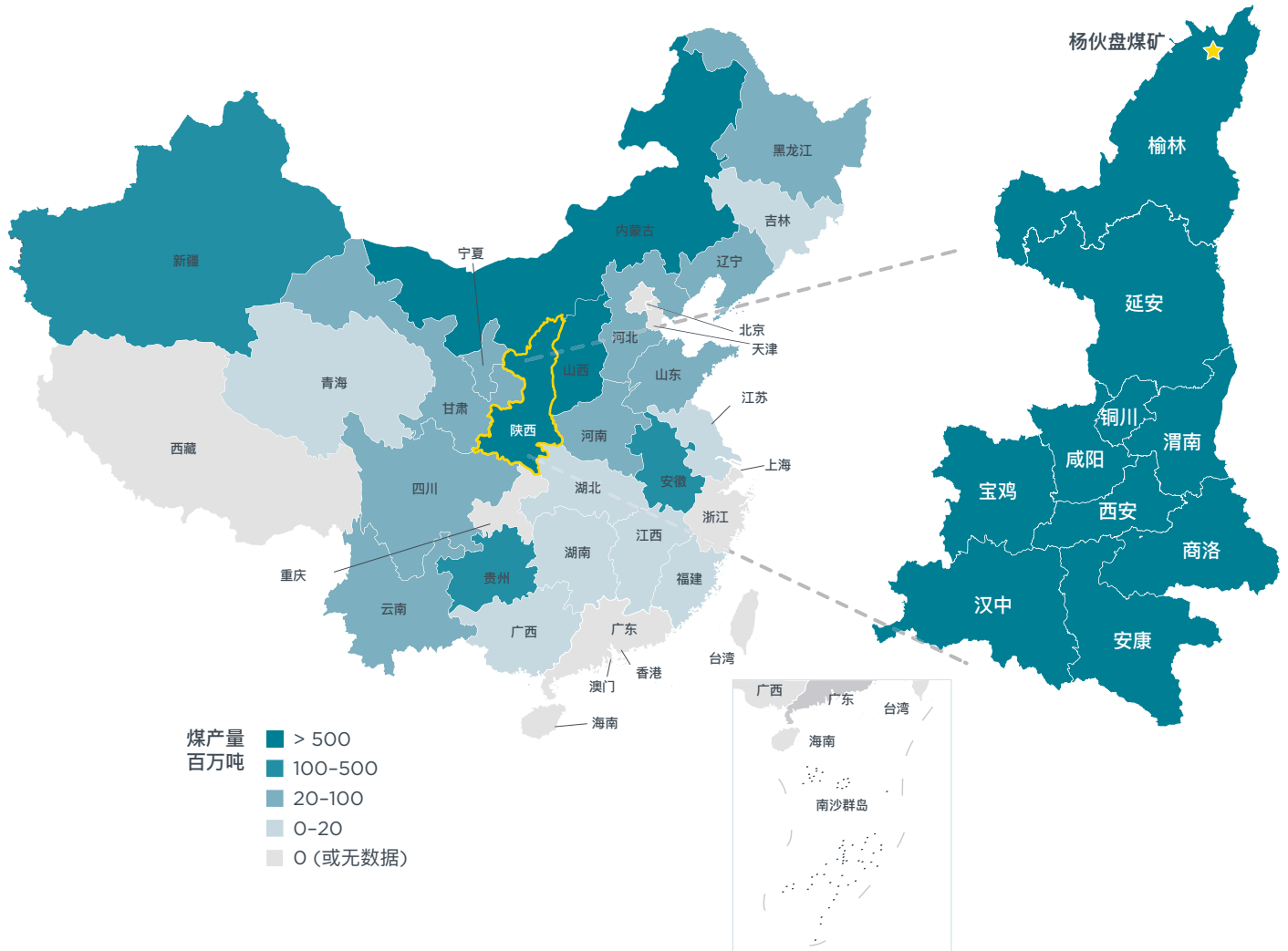
communications@theicct.org

[@theicct.org](https://www.instagram.com/theicct.org)

鸣谢：作者在此特别向ICCT内部同事Hussein Basma、褚一丹、周圆融、Chelsea Baldino、Felipe Rodríguez和杨柳含子以及来自中国汽车技术研究中心的专家冯乾隆、朱青和吴松致以诚挚谢意，感谢他们为本文提供的建设性建议。上述专家同仁的审阅并不代表完全认同本报告内容，任何错误疏漏皆由作者承担。

图1

中国各省煤产量概况及榆林市杨伙盘煤矿地理位置



数据来源: 中国煤炭工业协会 (2022)

国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

2019年, 陕西省政府发布了《陕西省柴油货车污染治理攻坚战实施方案》, 以促进新能源汽车在货运活动中的应用 (陕西省人民政府, 2020)。同时, 推广重型零排放货车也被陕西省作为减少温室气体排放, 实现碳达峰及碳中和目标的关键措施 (陕西省人民政府, 2022c, 2022b, 2022a; 陕西省发展和改革委员会, 2021)。

近年来, 陕西省开始在煤炭行业发展推动纯电动重型货车, 同时还在考虑推广应用燃料电池货车。由于煤炭是焦化行业生产过程中的重要原材料之一, 因此煤炭运输在部分情况下也属于焦化行业超低排放标准要求范畴。

为了更好地了解零排放货车在煤炭运输中的实际表现, 本文对2019至2022年期间陕西省的重型零排放货车市场以及榆林市杨伙盘煤矿中零排放货车的使用情况进行了评估。我们通过走访煤矿车队运营商, 了解到零排放货车的日常运行状况和实际使用性能。在此基础上, 我们还对车辆总拥有成本 (TCO总成本) 进行了

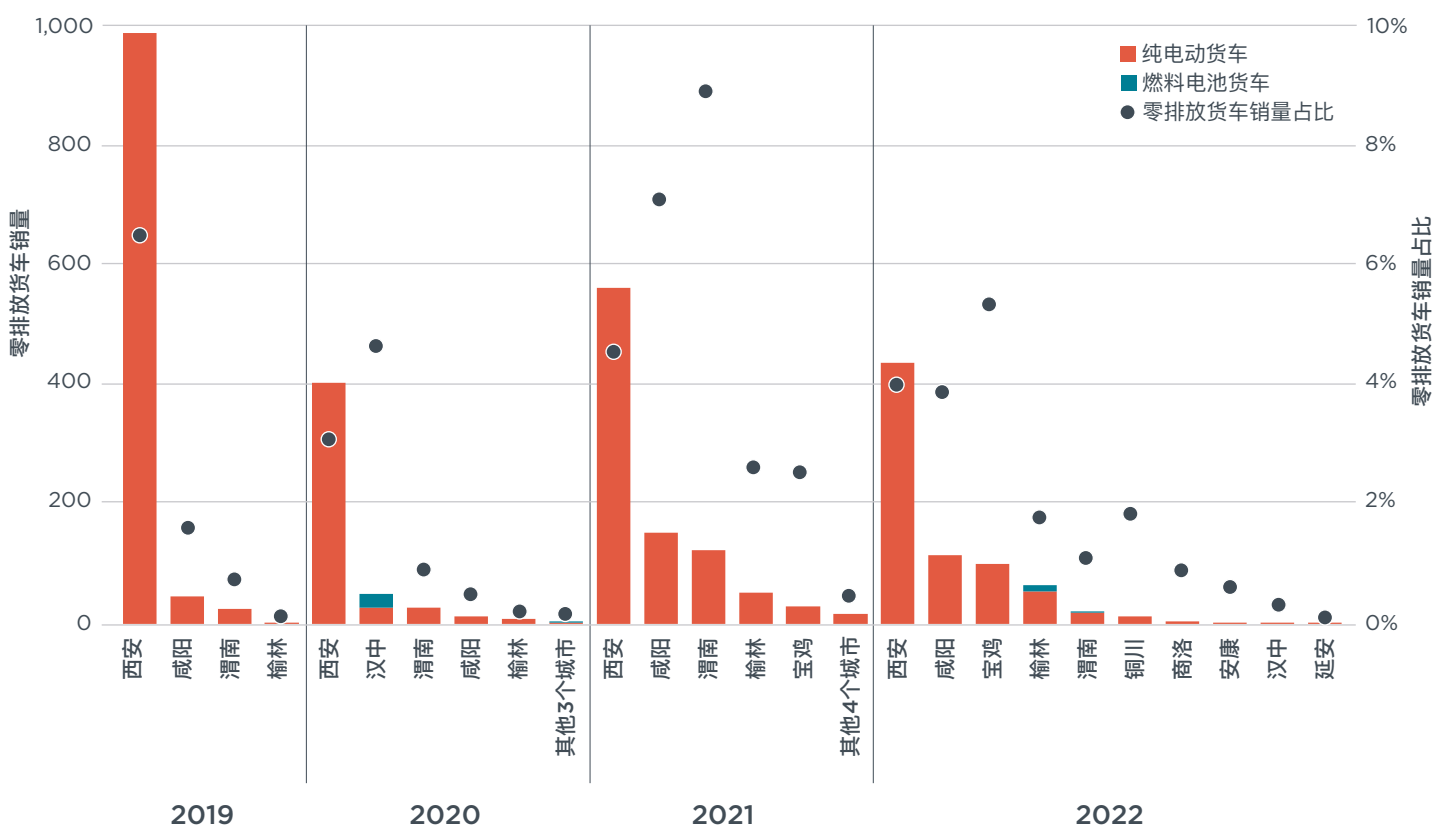
分析, 比较了换电货车与柴油货车的性能表现, 另外还对比了含电池整车购买模式与“电池即服务”(BaaS模式) 购买模式的成本差异¹。

本研究为国际清洁交通委员会 (ICCT) “零排放货车实际应用案例”系列报告之一, 该系列研究旨在分析评估纯电动货车和燃料电池货车在不同行业的实际使用情况²。

重型零排放货车市场

图2展示了2019至2022年陕西省重型零排放货车 (包括纯电动货车和燃料电池货车) 的年销量及市场份额情况。在这四年中, 陕西省共销售了3241辆重型零排放货车, 其中99%为纯电动货车。从城市销量分布来看, 省会西安市的零排放货车销量约占全省总销量的56%, 咸阳市、渭南市和榆林市的销量占比分别为10%、8%和4%。2022年, 陕西全省零排放货车在市场中的销量份额占比为7%, 较全国平均水平高出一个百分点, 在全国所有省份中列居第11位。

图2
陕西省各城市的纯电动重型货车销量及市场份额情况



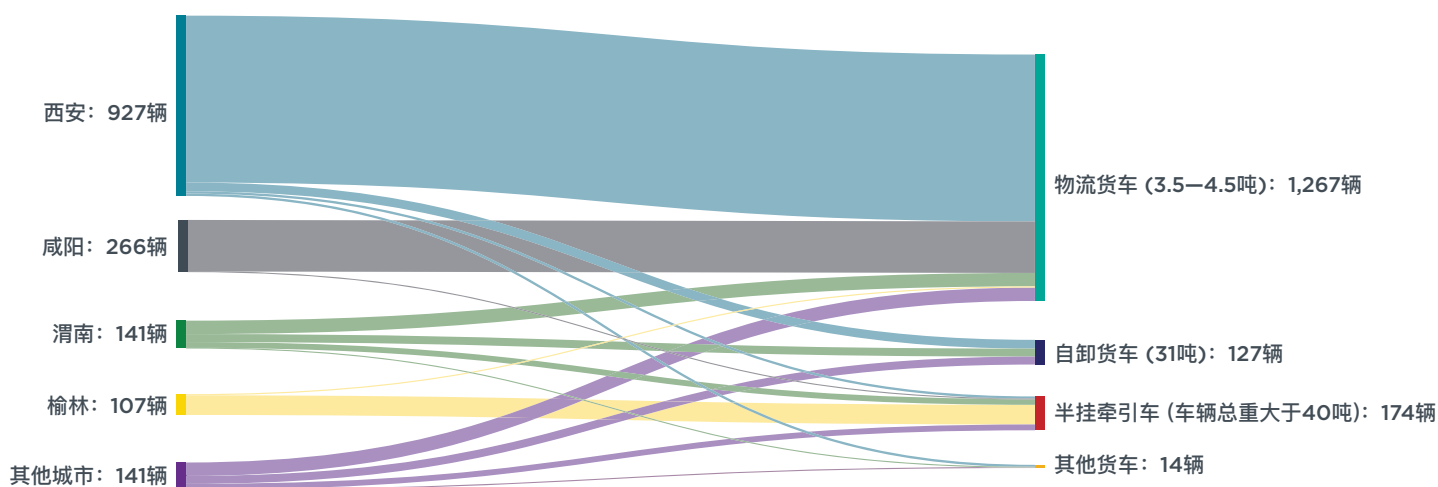
国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG

¹ BaaS购买模式, 也称电池租赁模式。车队购买的电动货车是不包含电池的, 而是以租赁电池的方式来替代购买。租赁费用也有不同的支付渠道, 例如通过补能费用支付。车队运营商也可以选择整车购买模式, 购买包含有电池的纯电动货车。

² 详见毛世越等 (2023) 和牛天林等 (2024)。

虽然陕西省在零排放货车整体应用方面仍处于早期阶段，但已经取得了一些不俗的成绩。图3展示了不同类型电动货车在陕西省各个城市的销量分布情况。西安市在总销售量方面位居全省第一，但所销售的零排放货车大多数是车辆总质量相对较小的物流配送货车。榆林市的煤炭产量占陕西全省总产量的64%（陕西日报，2023），煤炭运输需求使其电动半挂牵引车销量在全省排名第一。在2021至2022年期间，榆林市纯电动半挂牵引车的销量实现了零的突破，合并车辆总质量超过40吨的纯电动半挂牵引车达到101辆。另外，虽然图中并未展示，榆林市还在2022年新增了10辆燃料电池半挂牵引车。在燃料电池汽车发展规划方面，陕西省已设定了到2024年力争推广示范燃料电池汽车累计超5000辆的宏伟目标（陕西省发展和改革委员会，2022）。

图3
不同类型电动货车在陕西省各个城市的销量分布情况（2021-2022年）



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

上述这些成绩突显了陕西省零排放货车市场的发展及其对中国可持续交通的广泛影响。尽管目前零排放货车市场仍处于早期发展阶段，但零排放货车的销量和市场渗透率都在持续增长，特别是零排放重型半挂牵引车的发展尤为突出。

零排放货车在榆林市的实际应用案例

为了更好地了解榆林市零排放半挂牵引车的实际使用情况，我们于2023年5月对榆林市杨伙盘煤矿开展了调研。如图4所示，该煤矿每年煤炭货运需求量约600万吨，是榆林首个使用电动半挂牵引车进行煤炭运输的矿场。煤矿有两类主要运输路线：一类路线是将煤从矿场运送至附近山上的发电厂，运输长度为4km；另一类路线是将煤从矿场运送至货站，运输长度为50km。

杨伙盘煤矿于2021年购买了50辆换电款纯电动半挂牵引车，并选择与车辆制造商吉利签订了电池服务（BaaS）合同，吉利为其安装了两个换电站。目前煤矿另有18辆柴油半挂牵引车在运营使用。根据我们的了解，煤矿在2022年还购买了10辆燃料电池半挂牵引车，但尚未正式投入使用，政府部门正在计划对这些车辆进行试点应用。

图4
杨伙盘煤矿运营的纯电动货车



图片拍摄：牛天林

实际使用性能

通过采访车队运营商，我们了解到杨伙盘煤矿柴油货车和零排放货车的一些实际使用性能。表1显示了目前杨伙盘煤矿所使用的柴油货车和纯电动货车的技术规格，另外还列出了有可能用于煤炭运输的燃料电池货车的对应技术规格。从表中可以看出，不同动力类型货车的零售价格差异很大，柴油货车的价格低至30万人民币，而燃料电池货车价格高达150万人民币。纯电动货车方面，包含电池的换电货车总价格为80.6万人民币，BaaS模式下的价格则为43.6万人民币。在使用同款挂车的情况下，纯电动货车和燃料电池货车的最大有效负载都要比柴油货车低3吨左右。

表1
杨伙盘煤矿所使用的柴油货车和纯电动货车的技术规格，以及陕汽最畅销同级燃料电池货车的技术规格

动力类型	柴油	纯电动	燃料电池
			
车型	CA4256P2K15T1E5A80	HN4253H36C8BEV	SX4257MJ4XFCEV
制造企业	一汽	吉利	陕汽
品牌	天威	华菱	轩德翼
合并总质量	48,800 kg	48,870 kg	48,870 kg
牵引质量 ^a	40,000 kg	37,370 kg	37,370 kg
发动机功率	276 kW	额定: 250 kW; 最大: 360 kW	额定: 220 kW; 最大: 410 kW
发动机扭矩	2,060 N·m	额定: 1,600 N·m; 最大: 2,800 N·m	额定: 1,300 N·m; 最大: 2,800 N·m
发动机排量	11.6 L	-	-
储能量	柴油油箱, 600 L	电池, 282 kWh	电池, 120 kWh; 氢罐, 49.4 kg ^b
认证续驶里程	1,500 km	170 km	氢系统不工作: 95 km 氢系统工作: 650 km
2023年牵引车零售价格	¥300,000	含电池: ¥806,000 不含电池: ¥436,000	¥1,500,000

图片拍摄: 柴油及纯电动货车 (牛天林摄); 燃料电池货车 (中国汽车技术研究中心摄)。

^a 牵引质量为挂车与总负载之和。

^b 氢燃料储量基于车辆使用的13个165升350巴燃料罐评估。

表2展示了煤矿中不同用途货车的运行信息。在第一种应用情景下，货车需要往返行驶7.5km，将煤炭运送至位于附近小山坡上的电厂，单日行驶次数最多可达30次。在第二种应用情景下，货车需要往返95km，将煤炭运送至货运场站，单日行驶次数最多6次。由于货车的运输行驶路线是随机分配的，要量化车辆的实际行驶活动存在一些困难。因此，在本次研究中，我们假设每辆货车固定用于一种应用情景。负载方面，从杨伙盘煤矿出发至目的地时是满载状态，返回时空载状态。

表2
货车应用情况汇总

应用场景	往返电厂	往返货运场站
应用详情	从煤矿至电厂	从煤矿运输至铁路货运场站或其他煤炭购买方
往返行程距离	7.5 km	95 km
单日行程次数	25-30次	4-6次
年行驶里程	68,000 km	180,000 km
车辆最高服务年限	8年	6年
运费	~ ¥0.8/tkm	¥0.4/tkm
满载负载	<ul style="list-style-type: none"> 柴油货车: 16 吨 纯电动货车: 13 吨 	<ul style="list-style-type: none"> 柴油货车: 16 吨 纯电动货车: 13 吨
实际使用能耗	<ul style="list-style-type: none"> 柴油货车: 空车: 17 L/100 km 满载: 48 L/100 km 纯电动货车: 空车: 120 kWh/100 km 满载: 250 kWh/100 km 	<ul style="list-style-type: none"> 柴油货车: 空车: 16 L/100 km 满载: 42 L/100 km 纯电动货车: 空车: 115 kWh/100 km 满载: 210 kWh/100 km

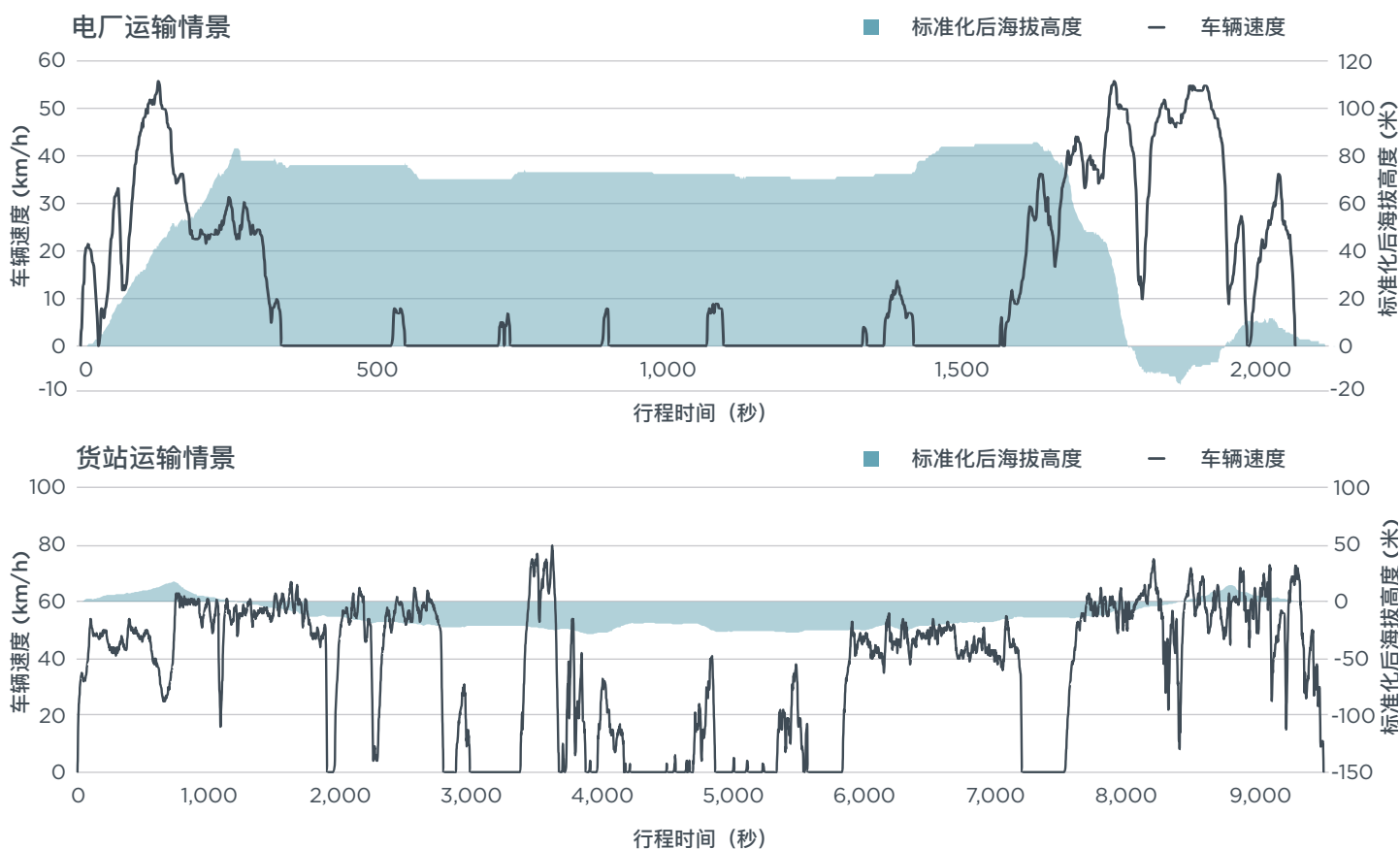
如表3所示, 我们将柴油货车和纯电动货车的实际使用成本分解为资本支出和运营成本两部分。目前, 针对柴油货车需要征收购置税和车船税, 对纯电动货车免征上述两项税种。杨伙盘煤矿使用的所有纯电动货车均通过换电模式进行补能, 电力价格固定为¥0.6/kWh, 换电服务费为¥0.2/kWh, 电池租赁费为¥0.6/kWh, 合计¥1.4/kWh。

表3
杨伙盘煤矿柴油货车和纯电动货车的实际使用成本 (2023年)

2023年	柴油货车	纯电动货车-BaaS模式	纯电动货车
资本支出			
车辆零售价格	¥300,000	¥436,000	¥800,000
购置税	车辆零售价格的10%	免征	免征
首付款	30%	30%	30%
贷款期限	3年	3年	3年
利率	10%	10%	10%
残值	¥100,000	¥125,000	¥200,000
运营成本			
平均补能成本	¥8.4/L	¥1.4/kWh	¥0.8/kWh
车船税	车辆整备质量*¥60/吨/年	免征	免征
维修保养成本	¥0.30/km	¥0.22/km	¥0.22/km
车辆保险	¥24,000/年	¥40,000/年	¥62,000/年
人员薪资及其他成本	¥200,000/年	¥200,000/年	¥200,000/年

如图5所示，我们采用了一套独立的设备来采集与运输行程相关的额外信息，包括车辆速度和海拔。在电厂运输情景下，电厂海拔高度约较煤矿高80米，货车在电厂卸煤时会有一段怠速运行时间。在货站运输情景下，行驶路线包含高速公路，货车行驶速度会超过40km/h，但起止地之间的海拔基本一致。

图5
电厂运输和货站运输的运行工况采样



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

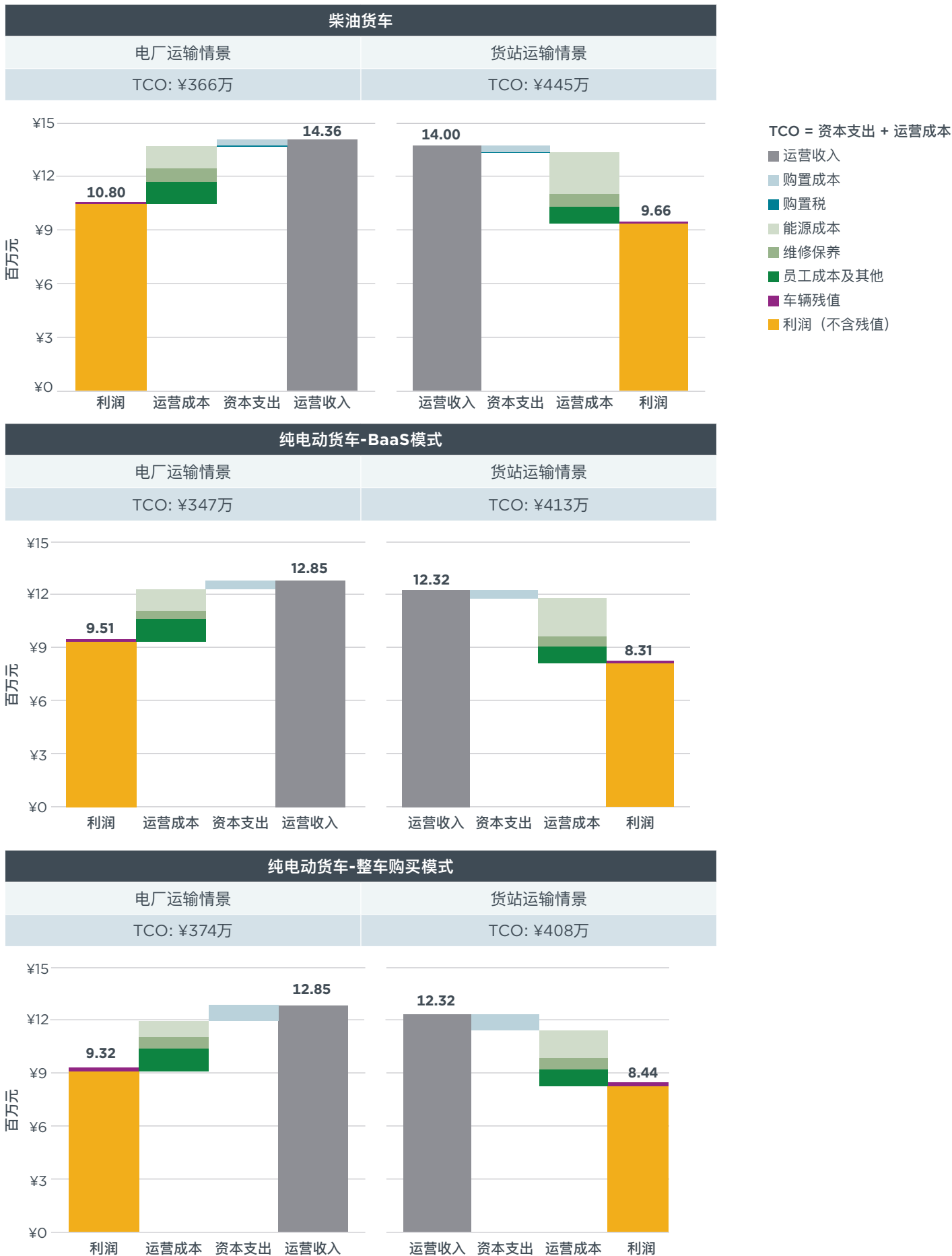
我们通过采访车队运营商了解到，零排放货车在能源成本方面具有显著优势，但使用的挑战在于车辆携带的电池重量会减少有效负载，造成“亏吨”。实际运费是和货重相关的，因此零排放货车产生的运营收入相对较少。

车辆总拥有成本及运营利润

图6展示了杨伙盘煤矿所使用的柴油货车和纯电动货车目前的车辆总拥有成本（下文简称：TCO总成本）、运营收入以及由此产生的利润。我们假设货车固定用于其中一种应用情景，在评估TCO总成本时，假设货车在电厂运输情景下可运行使用8年，在货站运输情景下可运行使用6年。为了体现“电池服务（BaaS）”模式所能带来的收益，我们还评估了购买含电池电动货车的成本、收入及利润情况。

图6

货车在不同应用情景下的TCO总成本、运营收入及利润

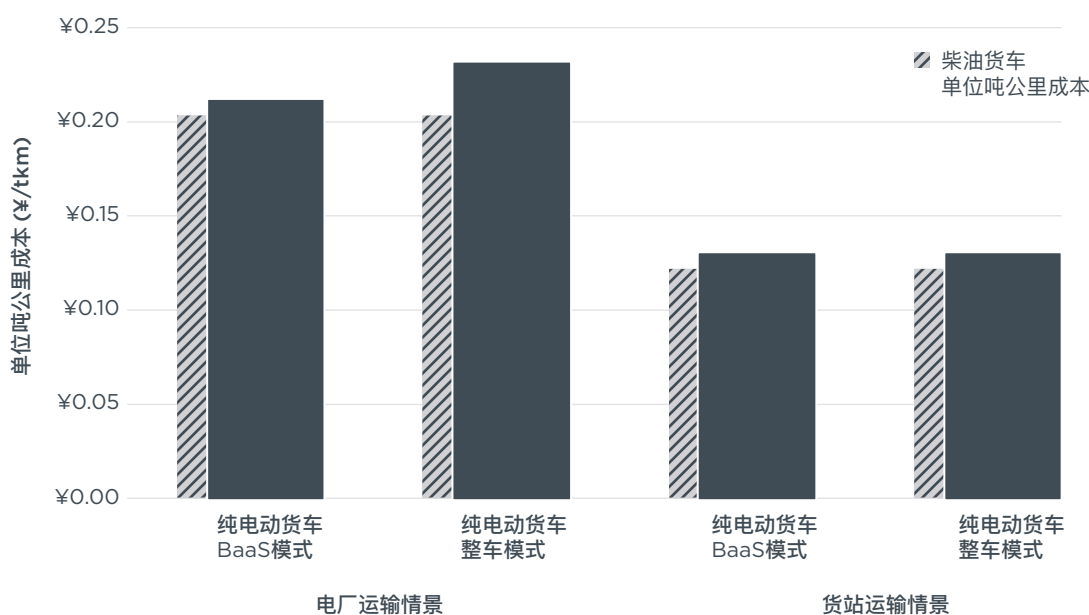


从TCO总成本分析结果可以看出：

- » 与柴油货车相比，杨伙盘煤矿车队中应用的纯电动换电货车在TCO总成本方面更具优势。
- » 在电厂运输情景下，换电货车的TCO总成本要比柴油货车低5%，但在含电池整车模式下，纯电动货车的TCO总成本则要比柴油货车高出2%。
- » 在货站运输情景下，无论是换电货车还是含电池整车，纯电动货车的TCO总成本均可实现较柴油货车低8%。
- » 通过“电池即服务 (BaaS)”模式购买纯电动货车可以降低前期购车成本，我们通过走访车主了解到，较低的前期购置成本在很大程度上可以促成车主做出购买决定，即便后期可能会另外支付相对购买含电池的整车高一些的能源成本。

如图7所示，纯电动货车在实际使用过程中也会给车主带来一些挑战。纯电动货车由于需要装载电池而牺牲了一些有效负载，在相同的使用寿命周期内，纯电动货车的单位里程载重总吨数会低于柴油货车。因此，无论在电厂运输还是货站运输情景下，使用柴油货车的总收入和总利润均高于使用纯电动货车。从单位货运周转量 (tkm) TCO总成本来看，电厂运输应用情景下使用柴油货车的成本为¥0.20/tkm，货站运输情景下为¥0.12/tkm；使用BaaS模式纯电动货车在电厂运输情景下的成本较柴油货车高出5% (¥0.21/tkm)，在货站运输情景下的成本高出8% (¥0.13/tkm)；而在含电池整车购买模式下，纯电动货车在电厂运输情景下的成本较柴油货车高出15% (¥0.23/tkm)，在货站运输情景下的成本高出8% (¥0.13/tkm)。

图7
纯电动货车与柴油货车的单位货运周转量 (tkm) 总成本对比



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

值得注意的是，目前纯电动货车的单位货运周转量成本与柴油货车是非常接近的，如果未来能够对零排放货车做出改进，使其具备与柴油货车同等水平的载重能力或实现更长的续驶里程，则零排放货车的单位货运周转量成本和收入都将能达到与柴油货车相同的水平。由于纯电动货车的TCO总成本低于柴油货车，在不同购置模式和应用情景下，纯电动货车都有潜力实现比柴油货车更高的利润（最高可比柴油车高出12%）。

目前，纯电动货车和柴油货车在榆林杨伙盘煤矿运行的是完全相同的路线，但纯电动货车的TCO总成本相对更低。从电动货车在榆林的实际使用表现可以看出，电动货车具备在煤炭运输和其他行业运输活动中广泛应用的潜力。

结论与展望

为了配合陕西省促进煤炭运输电动化的目标，本文分析了陕西省重型零排放货车的市场现状，并对榆林市杨伙盘煤矿换电货车的实际使用情况进行了评估。

我们发现，2021年和2022年，榆林市电动半挂牵引车（合并车辆总质量超过40吨）新车销量占陕西全省总销量的58%（包括10辆燃料电池半挂牵引车），榆林市在煤炭运输领域推广零排放货车的政策措施或是推高电动半挂牵引车销量的驱动力。

对榆林市杨伙盘煤矿零排放货车实际使用情况的分析表明，目前换电货车已具备与柴油货车相仿的车辆性能，且已实现了与柴油货车之间的TCO总成本平价。通过换电模式使用纯电动货车，能够减少前期购置资金压力，将部分资本支出转移为后期运营成本（换电费用），这样可以让更多消费者乐于选择纯电动货车。目前，使用零排放货车的主要挑战在于电池重量减低了电动货车的有效负载，从而影响运营收入和利润。

结合上述结论，我们探索整理出以下方案，或可推动绿色零排放技术与陕西省煤炭产业以及其他传统高排放产业的有机结合：

考虑“电池服务 (BaaS)”等具有创新性的融资和商业模式，以促进新能源货车的发展应用。可结合各地的具体情况研究探索适合的融资和商业模式。例如在榆林，车队运营商相对更在意购车成本和首付款，而不那么在意补能环节额外支出的电池租赁费用，并且在某些情况下，BaaS模式带来的前期成本降幅可完全覆盖乃至超出运营期间的补能成本增幅。推广创新型融资和商业模式可以提升消费群体购买零排放货车的意愿。

考虑增加有效负载，提升零排放货车的经济表现。电池和储氢罐的重量会减少用于货物运输的总有效负载，导致零排放货车的净收入下降，同时增加每吨公里货物运输成本。政策制定者可考虑通过一些创新型措施来支持零排放货车获得与柴油货车相同的有效负载能力，或者减少“亏吨”带来的损失。例如，管理部门可考虑对达到一定吨公里运营里程的零排放货车进行补贴，或以一种特殊的方法来认证零排放货车的最大载重。

参考文献

- 中国煤炭工业协会 (2022), 《2022年全国分地区原煤产量简析》, 详见: <https://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=145621>
- 毛世越、牛天林、Rodríguez, F.、郝春晓、王硕、张照生(2023), 《中国电动半挂牵引车的实际行驶性能: 唐山地区电动与后有牵引车使用情况对比》, 详见: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/Tangshen-case-study-report-A4-CN-v5.pdf>
- 中华人民共和国生态环境部 (2019), 《关于推进实施钢铁行业超低排放标准的意见》, 详见: https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html
- 中华人民共和国生态环境部 (2022), 生态环境部通报2022年12月和1-12月全国环境空气质量状况, 详见: https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202301/t20230128_1014006.shtml
- 中华人民共和国生态环境部 (2024a), 《关于推进实施水泥行业超低排放标准的意见》, 详见: <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202401/W020240119512650483366.pdf>
- 中华人民共和国生态环境部 (2024b), 《关于推进实施焦化行业超低排放标准的意见》, 详见: <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202401/W020240119512651019358.pdf>
- 《陕西日报》(2023年4月26日), 《2022年陕西发往外省的煤炭约4.63亿吨 占全省销量的64%》, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 详见: https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/jjyx/202303/t20230331_1366157.html
- 牛天林、崔洪阳、解奕豪 (2024), 《零排放货车实际应用案例: 中国海南省偏置码头牵引车和混凝土搅拌车》, 国际清洁交通委员会, 详见: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/04/ID-149-Hainan-concrete-Working-Paper-A4-50134_v5.pdf
- 牛天林、马云霄、张翌晨 (2023), 《零排放货车实际应用案例: 广东省市场概览及政策建议》, 国际清洁交通委员会, 详见: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-73-%E2%80%93CN-Guangdong_final.pdf
- 陕西省能源局 (2019), 《能源概况》, 详见: <http://sxsnyj.shaanxi.gov.cn/INSTITUTIONAL/nygk/eMjQru.htm>
- 陕西省发展和改革委员会 (2021), 关于印发《陕西省电动汽车充电基础设施“十四五”发展规划》的通知, 详见: https://sndrc.shaanxi.gov.cn/pub/sxfgywh/fgwj/sfzggwwj/2021/202304/t20230418_13532.html
- 陕西省发展和改革委员会 (2022), 《陕西省氢能产业发展三年行动方案(2022-2024年)》, 详见: <https://sndrc.shaanxi.gov.cn/pub/sxfgywh/fgwj/sfzggwwj/2022/202304/PO20230414488946585715.pdf>
- 陕西省人民政府 (2020), 《我省打响柴油货车污染治理攻坚战》, 详见: http://www.shaanxi.gov.cn/xw/ztl/lsgd/2020/dhzwfwgjz/yw/201906/t20190617_1481985.html
- 陕西省人民政府 (2022a), 《陕西省“十四五”生态环境保护规划》, 详见: <http://www.caep.org.cn/yclm/sewhbgh/sswsthjbhwb/202110/W020211027600550147902.pdf>
- 陕西省人民政府 (2022b), 《中共陕西省委 陕西省人民政府关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》, 详见: http://www.shaanxi.gov.cn/xw/sxyw/202208/t20220825_2248132_wap.html
- 陕西省人民政府 (2022c), 《陕西省人民政府关于印发碳达峰实施方案的通知》, 详见: http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgnr/zcwj/nszfwj/szf/202302/t20230217_2275234.html
- 史俊斌、关颖 (2021年5月27日), 《探索环境治理创新路径“西安方案”让超排柴油车切断“黑尾巴”》, 详见: http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2021-05/27/content_1140896.shtml



www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](https://www.instagram.com/theicct.org)

icct
国际清洁交通委员会