

唐山市运输模式公转铁的环境影响

作者：邵臻颖

关键词：运输模式转换、公转铁、空气污染、全生命周期排放、柴油消耗量

综述

为了应对京津冀地区严重的空气污染，国务院要求加大推广铁路货运，其中重点工业城市唐山要求所有唐山港进口的铁矿石必须通过铁路运输。而之所以出台这项运输模式公转铁的规定，主要是为了帮助唐山市以及京津冀地区实现唐山市政府设定的50-54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的2020年颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度目标，并最终达到35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的国家标准。

尽管铁路运输在大宗货运方面具有很明显的能效优势，但其对气候和空气质量的影响却取决于铁路系统的污染物排放情况。因此，我们在本次分析中模拟了燃料全生命周期环境影响和能源消耗，并对比了当前利用卡车将铁矿石从唐山港运送至钢铁厂和转换至其他铁路或公路替代运输方案之间的差异。2018年唐山港共计运输铁矿石2.2亿吨，如果都转换为铁路运输，约可减少3万次卡车日常运输车次，这将会显著减少唐山港周边的道路交通拥堵。转换运输模式同时还能大幅节省柴油燃料并减少空气污染。但是，我们发现，要想实现这些污染物减排收益，除了单纯转换运输模式，还需要采用严格的排放控制技术，包括使用更清洁的柴油发动机以及采用清洁或可再生能源发电，从而为铁路运输提供更清洁的电力能源。

政策背景

2012年，中国首次 in 环境空气质量标准中将年均颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度限值设定为35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 并要求主要城市监测和报告空气质量数据（生态环境部，2012）。众所周知，中国面临着严重的空气污染问题，特别是河北省自2013年起已经成为中国污染最严重的省份，全国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的10个城市中有6个地处河北境内。如图1所示，这些城市的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是国家限值的3-4倍，这些污染物严重影响到整个京津冀地区的空气质量。

www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

鸣谢：本次研究由能源基金会中国支持。作者在此感谢所有帮助审阅本作并提供指导和建设性意见的内外部专家，特别感谢交通部规划研究院的徐洪磊、清华大学的张少君和张敬然、机动车排污监控中心的王军方、能源基金会中国的龚慧明、CALSTART的Cristiano Façanha以及国际清洁交通委员会内部的同事崔洪阳、Kate Blumberg、Josh Miller、Dale Hall及何卉。

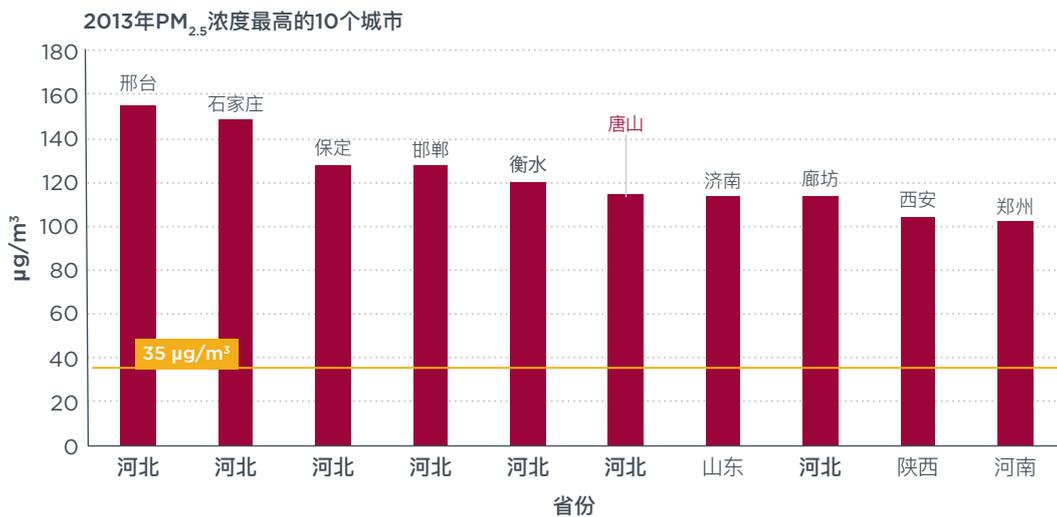


图1. 2013年PM_{2.5}浓度最高的10个城市。来源：绿色和平（2014）

PM_{2.5}浓度升高会引发多种疾病，包括肺癌、肺心病、急性呼吸道感染以及其他许多急慢性健康影响，从而导致提早死亡。2013年，国务院发布了《大气污染防治行动计划》，其中提出了减少煤炭能源依赖的多项强力措施，包括提高可再生能源比例、降低机动车尾气排放、加强机动车监管和构建机动车监控体系，所有这些措施都是为了改善空气质量，大幅减少重污染天数（国务院，2013）。在确定京津冀为中国污染最严重的区域后，《行动计划》明确提出了2017年京津冀地区的PM_{2.5}浓度应比2012年水平降低25%的目标，这一目标比为另外两个重点经济区设定的空气污染战略目标更加严格（长三角地区的目标为2017年PM_{2.5}浓度比2012年降低20%，珠三角地区的目标为2017年PM_{2.5}浓度比2012年降低15%）。事实证明，上述行动计划是行之有效的，2017年京津冀地区的年均PM_{2.5}浓度约比2013年水平低三分之一（图2）。不过，监测结果显示，京津冀地区的平均PM_{2.5}浓度依然高于35 µg/m³的国家标准，更是远远高于世界卫生组织（WHO）推荐的10 µg/m³限值。这表明，我们依然需要开展进一步行动来解决京津冀地区的空气污染问题。

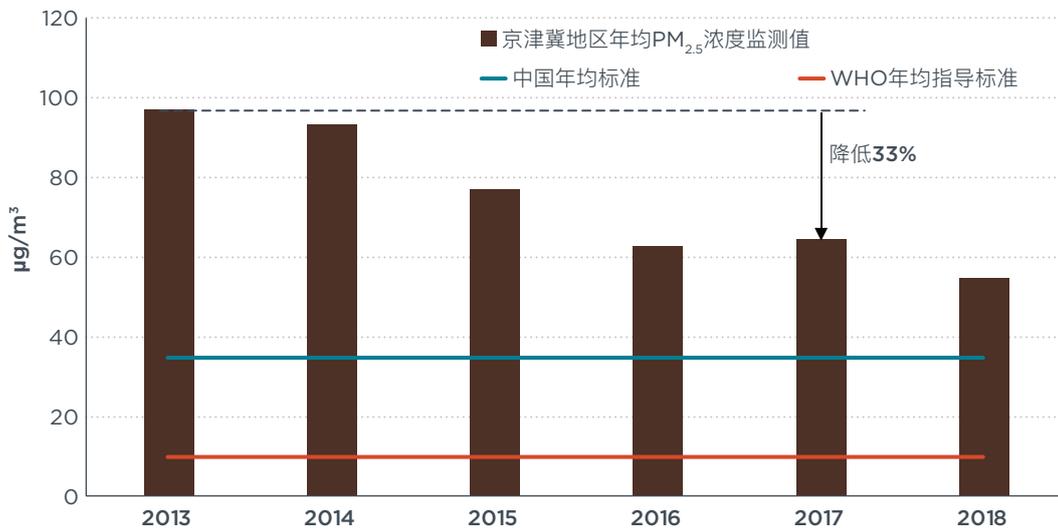


图2. 京津冀地区年均PM_{2.5}浓度监测值。来源：中国空气质量监测与分析平台（n.d.）

机动车，特别是重型车是导致城市空气污染、温室气体（GHG）排放和交通拥堵的主要源头之一。尽管从数量上重型车仅占中国车辆群体总数的10%，但却贡献了80%以上的颗粒物排放并消耗了近50%的道路燃油，同时重型车也是二氧化碳（CO₂）排放的主要排放源之一（Kodjak, 2015; Yang, Delgado, & Muncrief, 2019）。柴油车是京津冀地区第三大PM_{2.5}污染源（Xue, 2018），因此在《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中要求在京津冀地区提前实施国6/VI车辆排放标准并供应超低硫柴油燃料，并在2020年底以前淘汰超过100万辆国III及国III前老旧重型车（国务院，2018a）。根据预测，通过实施国VI排放标准，京津冀地区的PM和NO_x污染物可减排80%以上，并能降低2030年PM_{2.5}平均浓度达到1.46 µg/m³（Cui, Posada, Lv, Shao, Yang, & Liu, 2018）。

除了加强对重型柴油车的管理，国务院还要求优化调整货物运输结构。蓝天保卫战行动计划中明确提出了大宗货物应从道路卡车运输改为主要由铁路或水路运输的目标（国务院，2018a）。此外，《推进运输结构调整三年行动计划》中也提出了到2020年底实现全国铁路货运量较2017年增加11亿吨、增长30%的目标（国务院，2018b）。对于京津冀地区，铁路货运增量幅度预期会更大，可达40%；行动计划还要求加快大型工矿企业和物流园区铁路专用线建设以及推进集疏港铁路建设。国务院（2018a；2018b）和生态环境部（2019a）要求自2018年底，所有煤炭产品的疏港运输应由铁路和/或水路运输取代柴油卡车公路运输；同时还建议将这一运输模式转变战略扩大应用到所有大宗货物的运输。

唐山是京津冀地区污染最严重的城市之一，唐山目前已强制要求从唐山港进口的铁矿石必须通过铁路运输（机动车排污监控中心，2018；2019）。鉴于唐山采用铁路运输的决定，本次研究将主要评估从卡车运输转换至铁路运输的环境和能效影响，并将针对政策实施环节提供一些建议，从而帮助唐山市切实实现预期效益。我们对不同技术条件下的卡车和铁路运输（运输铁矿石）进行比较，尽管整体上铁路运输在大宗货运方面具有能效优势，但对气候和空气质量的影响却高度取决于铁路系统的污染物排放情况。事实上，由于新的排放标准能够大幅降低卡车排放，如果铁路机车发动机的污染物排放较高或者电气化铁路系统的上游排放过高，都会导致公转铁后的空气污染物排放反而有所增加。这一研究结果也同样适用于其他港口和相关政策制定者，并将为其在考虑运输模式转换时提供一些参考。

关于唐山市和唐山港

唐山是京津冀经济圈中的重要工业城市，京津冀经济圈环绕首都北京，是国家大规模经济区之一（图3）。尽管占地面积不到中国国土总面积的2.5%，人口不到中国人口总数的7.5%，京津冀地区的国民生产总值（GDP）贡献率却高达约10%，其中40%来自于河北省（国家统计局，2019）。钢铁制造是河北的支柱产业之一，河北的钢铁产量占中国钢铁总产量的20%以上，而河北的钢铁产能半数来自于唐山市（国家统计局，2019；中国产业信息网，2018）。唐山在中国钢铁工业中的主导地位，源于其独特的地理位置、丰富的矿产资源以及通过唐山港进口的大量铁矿石。

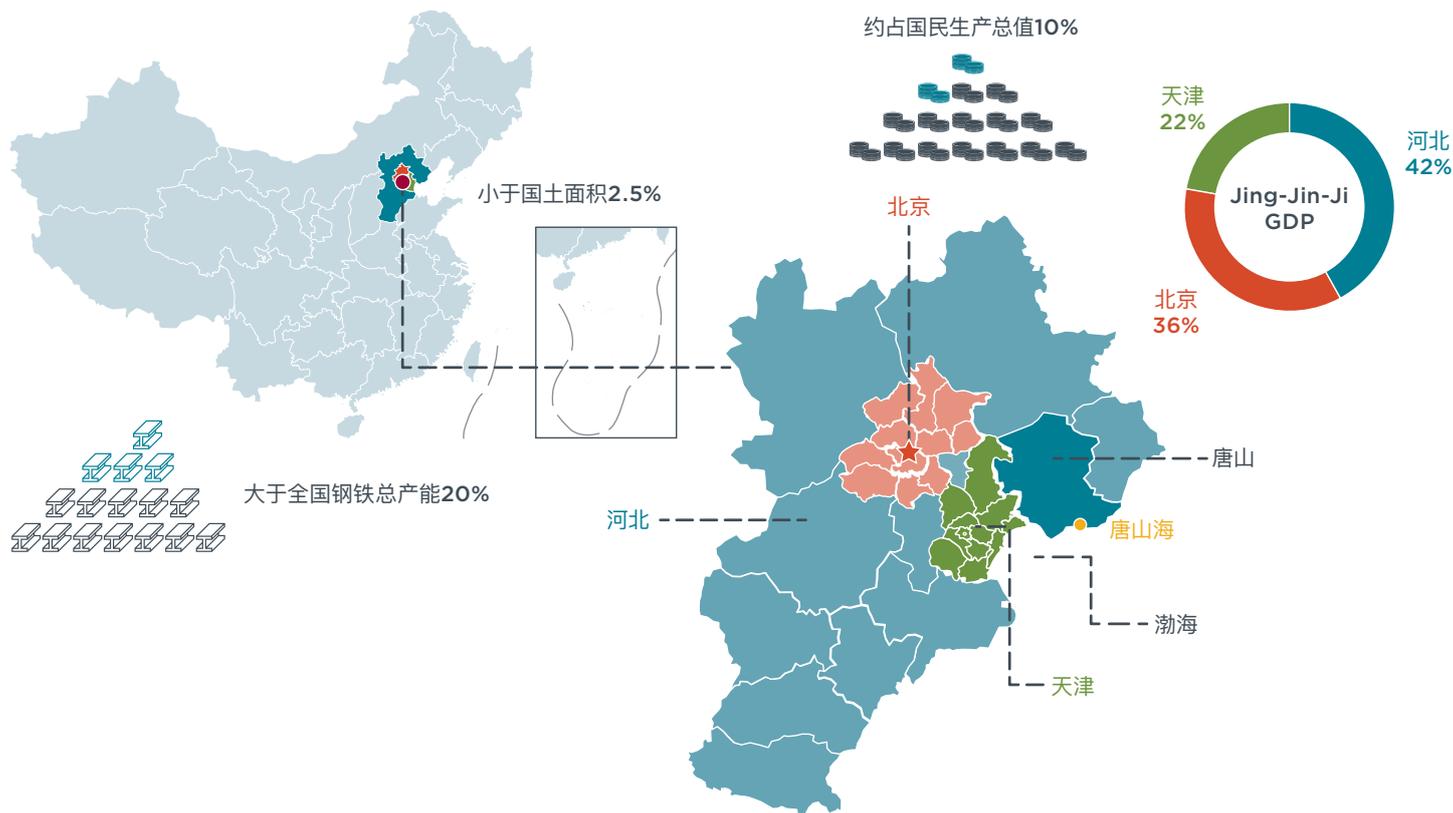


图3. 京津冀地图

位于渤海沿岸的唐山港是全球年货运量最大的10个港口之一（Clemenson, 2017）。2018年，唐山港运输量最大的两种货物是煤炭和铁矿石，分别为2.62亿吨和2.20亿吨，其中绝大部分是由道路柴油卡车完成运输的（唐山市政府，2019b）。

对重型柴油卡车的高度依赖给唐山带来了严峻的空气质量问题，根据污染源解析，机动车是唐山市空气质量的前五大污染源之一，约10%的空气污染物是由机动车排放造成的（Wen, Han, Chen, Cheng, & Zhang, 2015; Sun, 2015）。目前用于进出港运输的卡车，虽然大多是符合国IV或国V标准的车辆，但由于缺少最先进的排放控制技术和全面的在用车达标监管方案，其污染物排放量相对还是较高，同时由于需求大量卡车进行运输，还造成了道路扬尘和严重的拥堵问题。在用车达标监管不到位和超载问题也是导致卡车排放的升高的重要原因之一（Ding, 2018）。

为解决重型柴油车造成的空气污染问题，同时响应中央政府向铁路运输模式转变的战略，唐山市计划通过铁路运输所有进出唐山港的大宗货物，最早将从2020年开始实施（河北省政府，2018；“唐山市”，2018）。唐山市政府还制定了57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的2019年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标以及50-54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的2020年目标，意在将唐山从空气质量最差的十大城市中移除（“唐山市”，2018；唐山市政府，2019a）。

目前，唐山市已优先开始实施公路向铁路运输模式转换，禁止使用柴油卡车运输铁矿石，并提供了超过25.6亿元人民币（约3.7亿美元）在16家主要钢铁企业和港口码头之间修建专用轨道（机动车排污监控中心，2018；机动车排污监控中心，2019）。此外，这笔资金还用于补贴小型的钢铁企业搬迁至港口附近（唐山市政府，2019c）。上述政策决定正是响应支持了生态环境部关于推进实施钢铁行业超低排放的相关要求（2019b）。

方法论和数据

本次研究对每年进入唐山港的超过2亿吨铁矿石运输所需的燃料全生命周期环境影响和能源消耗量进行了评估。我们考虑了两大类运输模式转换形式，即向铁路运输模式转换（“公转铁”）和采用

清洁排放控制技术的柴油卡车运输，详见表1。我们分析模拟了两种卡车运输和五种铁路运输情景，并结合其技术潜力总结出了每种运输模式下的污染物排放变化情况。

在“基准情景”中，我们假设所有铁矿石都由目前的卡车车队进行运输，车队中约90%为柴油车辆，另外10%为天然气车辆，基础数据由唐山港提供。在“国VI卡车车队”情景中，我们假设铁矿石仍然全部由柴油卡车运输，但所有车辆均为国VI认证车型，从而评估采用先进卡车技术所能获得的减排潜力。在对唐山的运输模式转型战略进行评估时，我们在“当前铁路机车”情景中假设改用现有铁路系统承担运输，其中70%的铁路机车为电气化机车，其余30%为柴油机车。现有铁路机车使用的电网电力87%是煤电，7%是可再生能源发电，其余为其他传统能源发电，该设定与中国电网的平均情况是相一致的（国家电网，2019）。为了对当前铁路系统内部的排放贡献率进行划分，我们还设置了“全柴油铁路机车”和“全电气化铁路机车”两种情景，来研究全部使用无排放控制技术的柴油机车的排放影响（当前的现状）和在现有电网下全部使用电气化机车的排放影响¹。最后，本次研究模拟了在更清洁的电网下使用电气化铁路机车运输铁矿石的“电气化铁路机车+清洁电网”情景（可再生能源发电占比20%以上）以及采用先进柴油铁路机车进行运输的“先进柴油铁路机车”情景，即假设铁矿石均由经认证符合美国Tier 4排放标准的柴油铁路机车进行运输。

我们的研究假设在所有铁路运输情景中均未采用码头短驳运输卡车，从而体现唐山市在主要钢铁企业和港口码头之间建设专用铁轨的成果²。因此，我们在所有情境中假设的运输距离是相同的。尽管此次的情景设定中包含有一些对未来的技术和战略政策预期，但本研究并没有考虑货运量方面的任何变化。这是为了更清楚地体现出战略政策对能源使用和排放的影响。

表1. 唐山港进口铁矿石疏港运输的情景和假设，2018年数据

模拟情景	运输模式	燃油类型	技术特征
当前卡车车队	卡车	柴油 - 90% CNG - 10%	卡车： • 20% 国III认证车型 • 40% 国IV认证车型 • 30% 国V认证车型 • 10% CNG
国VI卡车车队	卡车	柴油	卡车：100% 国VI认证车型
当前铁路机车	铁路	电力 - 70% 柴油 - 30%	柴油机车：无排放控制标准要求 电网能源：87%煤电，7%可再生能源发电
全电气化铁路机车	铁路	电力	电网能源：87%煤电，7%可再生能源发电
全柴油铁路机车	铁路	柴油	柴油机车：无排放控制标准要求
电气化铁路机车+ 清洁电网	铁路	电力	电网能源：可再生能源发电占比20%以上，减少煤炭基础资源应用，在电厂应用先进的排放控制技术
先进柴油铁路机车	铁路	柴油	柴油机车：符合美国Tier 4排放标准

本次研究主要评估的排放污染物包括二氧化碳（CO₂）、粒径小于等于2.5 μm的颗粒物（PM_{2.5}）和氮氧化物（NO_x），其中二氧化碳是货运交通领域贡献最大的长期气候污染物。二氧化碳、氮氧化物和颗粒物的排放量是通过货运量、行驶里程、排放因子/燃油能效以及能源生产阶段的上游排放综合计算出的。铁路和卡车运输的计算程序略有差异，这主要是数据收集流程方面的因素导致的。

管理政策背景

近年来，中国一直在不断加严车辆排放标准。中国自2000年开始实施车辆尾气排放管理，实施了国I/I车辆排放标准，随后不断加严直至追赶上美国和欧盟标准实施的步伐（图4）。中国最新出台的国VI重型车排放标准是全世界最严格的管理标准之一，中国同时还加强了车辆达标监管，相信这些措施将会成为降低柴油车排放的关键（Cui等人，2018；Yang & He, 2018）。京津冀地区提前实施了国VI标准，因此在有需要的情况下，是有可能全部采用国VI认证柴油卡车来进行货物进出港运输的。

1 对全柴油铁路机车情景进行建模的原因是确定柴油机车在现有有机车车队中的排放贡献率，而不是建议中国向全柴油铁路机车转型。

2 码头运输卡车指在港口、火车货运站点和其他位置之间进行集装箱或大宗货物运输的重型柴油卡车（加州空气资源委员会，2019）。

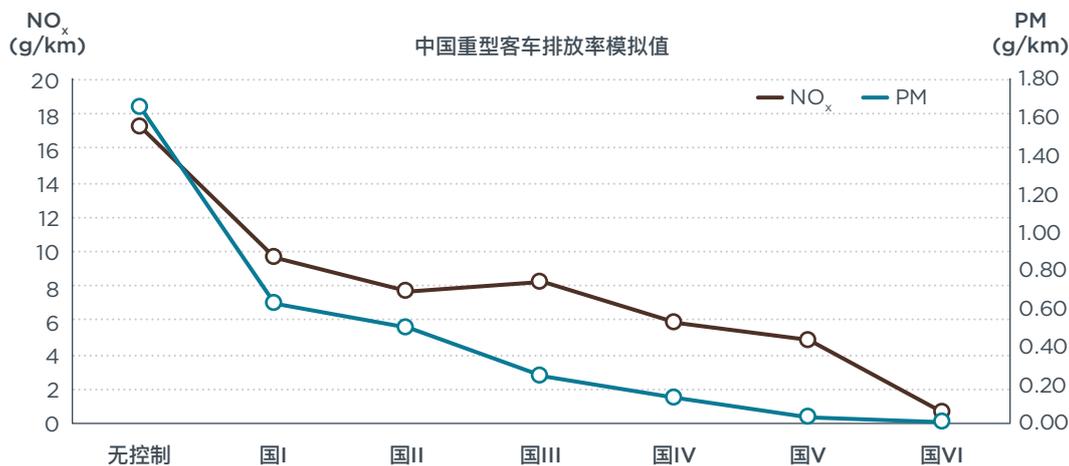


图4. 中国重型卡车排放因子

中国目前并未实施铁路的排放标准，但在大力推进铁路系统电气化的进程中，目前中国铁路电气化发展速度是全世界最快的之一（国际能源组织，2019），上世纪90年代末中国铁路电气化率不足四分之一，近年来已增长至近四分之三。尽管中国并未将铁路机车纳入非道路尾气排放管理范围，但美国和欧盟成员国已有实施针对铁路机车排放管理方面的先进措施。目前美国和欧盟对火车机车的管理大体相一致，美国的Tier 4标准和欧盟Stage IV阶段标准都可实现火车机车颗粒物和氮氧化物减排90%（图5）。欧盟Stage V阶段排放标准从2020年开始逐步实施，将纳入颗粒物数量（PN）标准，该标准预期将促使火车机车安装使用颗粒物捕集器，此外PN标准还能实现重型车颗粒物进一步减排90%（Shao, 2016b; Dallmann, 2016）。

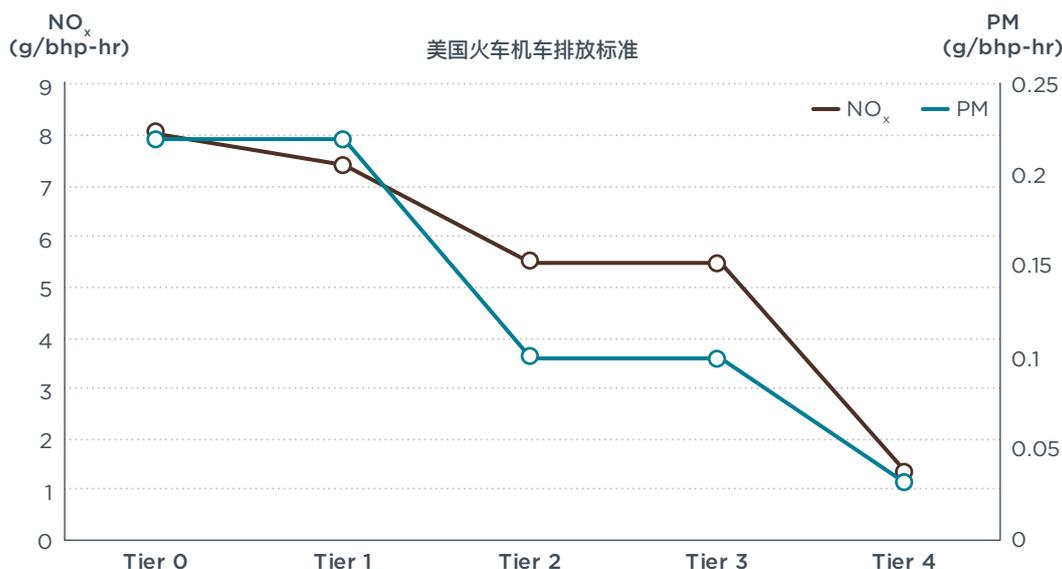


图5. 美国铁路机车排放标准

表2列出了此次用于计算的输入数据，其中卡车的平均运输里程、铁矿石运输量、燃料类型比例、排放认证标准、平均负载和能效数据均采集自唐山港。计算时所采用的卡车排放因子则与ICCT中国国VI车辆排放标准成本效益评估研究中所采用的排放因子相一致（Cui等人，2018）。铁路运输服务数据来源于文献查阅和ICCT此前的相关研究，柴油铁路机车的排放率数据来自机动车排污监控中心和生态环境部，而燃油能效则是通过ICCT的全球Roadmap模型（Façanha, Blumberg, & Miller, 2012）推断得出。至于符合更严格排放标准认证的铁路机车，其排放率数据源自于ICCT的非道路模型（Shao, 2016a），返程空驶率数据则是与ICCT此前的相关研究保持一致（Yang, 2019）。燃料碳强度和中国电网的上游排放率是基于几项针对中国燃料能源全生命周期排放率的本地研究（Huo, 2010; Cai, Wang, Jin, & Chen, 2013; Jiang, Ou, Ma, Li, & Ni, 2013; Huo, 2015）和Roadmap模型中的信息得出的（Façanha等人，2012）。

表2. 主要输入和数据和数据来源

输入项	输入值	来源
运输里程	200公里	唐山港
铁矿石运输量	2.2亿吨	唐山港
卡车燃料类型	90% 柴油 10% CNG	唐山港
铁路机车燃料类型	70% 电力 30% 柴油	国家铁路局, 2019
卡车排放标准	<ul style="list-style-type: none"> • 20% 国III认证车型 • 40% 国IV认证车型 • 30% 国V认证车型 • 10% CNG 	唐山港
铁路机车排放标准	无排放控制标准	机动车排污监控中心
卡车平均负载	33吨 / 车次	唐山港
铁路机车平均负载	8,400吨 / 车次	唐山港
卡车燃油能效	60升 / 100公里	唐山港
铁路机车燃油能效	0.33兆焦 / 吨 - 公里	ICCT Roadmap模型
卡车运输返程空驶率	40%	Yang, 2019
铁路运输返程空驶率	50%	“互联网+物流,” 2016

我们此次的分析范围具有几方面的局限性。首先，在卡车或铁路运输模拟情景中均未考虑未来燃油能效的提升；这主要是为了反映当前的状况。其次，由于每种模拟情景中只采用单一一种运输模式（即卡车或铁路），本次研究并未采集怠速排放或交通拥堵导致的排放率和能效变化；而根据相关深圳港的研究，这部分因素预计可导致车辆运行时的二氧化碳排放量额外增加20%–40%（Yang, Cai, Zhong, Shi, & Zhang, 2017）。不过，公转铁运输模式转变预计将会减少怠速排放和拥堵。最后，本次研究并未包含道路车辆和铁路机车生产、维修保养、报废环节所产生的排放和能源消耗，亦不包含因为改变运输模式而新建、维修和报废公路、铁路、传送带等基础设施所产生的排放和能源消耗。

结果

如果，每年唐山港进口的2.2亿吨铁矿石均改由铁路运输，约可减少30000车次卡车日常进出港的运输，这将能缓解拥堵，减轻唐山港及唐山市周边的交通压力。这一结论与早先另一份研究报告的结论也是一致的，该研究指出如果采用铁路运输曹妃甸港区进口的1亿吨铁矿石，约可避免17000车次卡车进出港运输（Si, 2018）³。但是，单纯的公转铁模式切换并不一定能减少燃料全生命周期的排放，在我们模拟的所有情景中，如果从燃料全生命周期排放角度进行比较，带有先进排放控制技术的卡车在颗粒物、氮氧化物和二氧化碳排放方面均具有竞争优势。图6展示了此次分析的详情，我们将“当前卡车车队”从油箱到车轮（TTW）的排放标定为1，浅色阴影部分则表示上游排放。

3 曹妃甸港是唐山港的重要组成部分，每年可承担唐山港约一半的货物运输量。

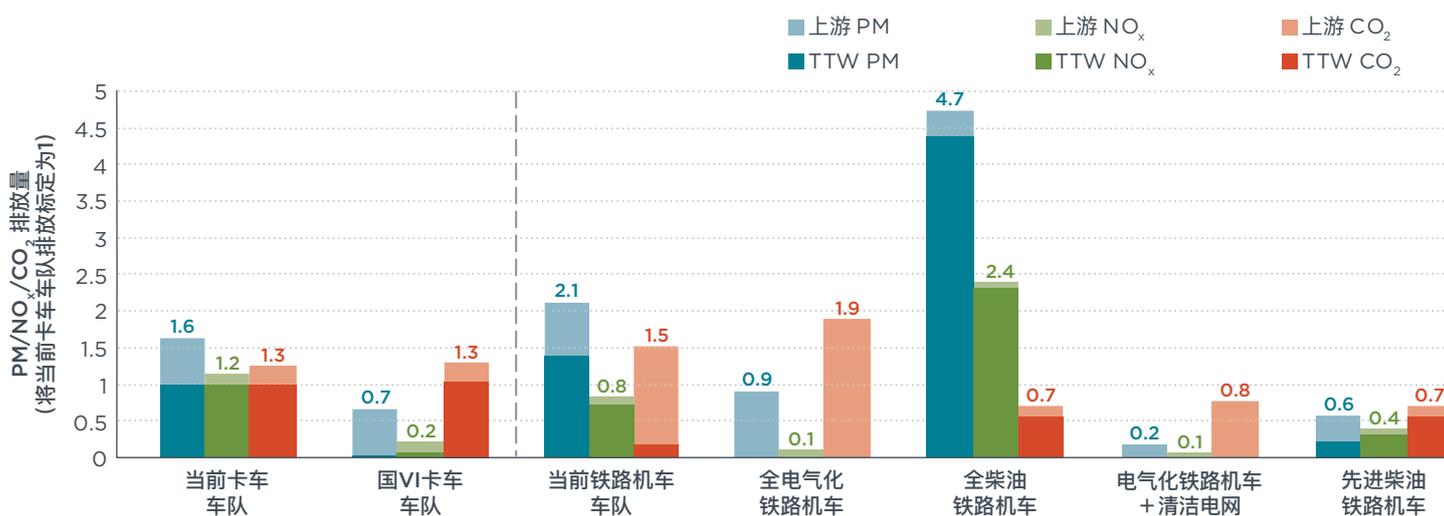


图6. 各个模拟情境下的从油井到车轮 (WTW) PM, NO_x, 和CO₂排放对比

分析结果表明:

- » 如果采用“当前铁路机车车队”实施公转铁运输模式切换,可以减少当地的氮氧化物排放,但从油箱到车轮 (TTW) 的颗粒物排放会有所增加。此外,当我们纳入上游排放,铁路运输从油井到车轮 (WTW) 阶段的颗粒物和二氧化碳排放要远远高于“当前卡车车队”。
- » 如果在公转铁过程中全部采用“全电气化铁路机车”则能够消除本地的油箱到车轮 (TTW) 的排放。此外,对电网系统实施超低排放标准将确保全电气化公转铁后实现从油井到车轮 (WTW) 阶段的颗粒物和氮氧化物减排 (生态环境部, 2015)。但是,由于目前中国高度依赖煤电,在“全电气化铁路机车”情景中,从油井到车轮 (WTW) 阶段的二氧化碳排放量是有所增加的。
- » 与“当前铁路机车车队”相比,采用“全柴油铁路机车”会增加油箱到车轮 (TTW) 的颗粒物和氮氧化物排放量,特别是会大量增加唐山本地的空气污染。在本模拟情景中,当地的颗粒物排放量高达基准排放的4倍,氮氧化物排放量为基准排放的2倍,不过,在“全柴油铁路机车”的情景下,从油井到车轮 (WTW) 阶段的二氧化碳排放却是所有模拟情景中最低的。
- » 我们在“电气化铁路机车+清洁电网情景”中假设电网系统采用了可持续能源和先进的排放控制技术,能够大幅减少电气化铁路机车的上游排放,而电气化机车同时还会消除油箱到车轮 (TTW) 阶段的本地排放。因此,该情景是所有模拟情景中从油井到车轮 (WTW) 阶段颗粒物和氮氧化物排放量最低的。该情景从油井到车轮 (WTW) 阶段的二氧化碳排放量并不是所有情景中最低的,这是因为尽管发电厂已经采用了一些先进的排放控制技术 (例如碳回收和储存技术),但煤电仍然在唐山地区电网中占据主导地位。
- » 与基准情景相比,在“先进柴油铁路机车”情景下,从油井到车轮 (WTW) 阶段的所有污染物排放量均可减少一半,使其成为所有模拟情景中整体排放量最低的方案。
- » 与“当前卡车车队”情景相比,全部采用“国VI卡车”可以减少95%以上的从油箱到车轮 (TTW) 阶段颗粒物和氮氧化物排放。由于卡车依然使用的是柴油燃料,因此并没有上游减排收益。另外我们对燃油能效改进持比较保守的假设态度,因此也没有在“国VI卡车”情景中考虑任何二氧化碳减排收益。

结果表明,公转铁运输模式转换确实可以大幅减少颗粒物和氮氧化物排放,但前提是结合应用最清洁的排放控制技术。与“当前卡车车队”的情景相比,“当前铁路机车”情景在燃料全生命周期排放方面并无竞争优势。但是,如果采用了先进的排放控制技术,无论是在上游发电阶段还是柴油机车发动机上应用,在“电气化铁路机车+清洁电网”情景和“先进柴油铁路机车”情景下,公转铁切换都能大幅减少铁矿石运输带来的污染物排放,并帮助实现钢铁行业超低排放的目标。

要想达到国VI卡车所能实现的环境收益,需要对铁路系统实施更加严格的排放控制。借力于京津冀地区提前实施国VI (b) 排放标准的优势,生态环境部建议在铁路运载能力尚未满足所有运输需

求的情况下，可以临时全部采用国VI或可再生能源卡车进行铁矿石运输（生态环境部，2019b）。另外，如果结合低碳电网供电，零排放货运卡车可以带来成本效益更佳改革方案和更深层次的减排收益（Moultak, Lutsey, & Hall, 2017; Hall & Lutsey, 2019）。

加严柴油发动机排放控制标准可以有效减少所有类别的污染物排放。如表3所示，与“现有卡车车队”情景相比，将卡车车队升级至国VI标准（“国VI卡车”情景）可减少约60%的颗粒物排放和80%的氮氧化物排放。如果在运输模式切换过程中要求所有柴油铁路机车符合美国的Tier 4排放标准（“先进柴油铁路机车”情景）也能获得类似幅度的减排收益，与“现有卡车车队”情景相比，可实现颗粒物和氮氧化物减排三分之二以上，与“全柴油铁路机车”情景相比，可实现颗粒物减排88%，氮氧化物减排84%。而要实施类似Tier 4的排放标准则需要在火车机车上应用与重型车类似的排放控制技术。

表3. 各模拟情景下的颗粒物、氮氧化物和二氧化碳排放量以及与现有卡车车队情景相比的排放量变化比例

	PM (吨)			NO _x (吨)			CO ₂ (吨)		
	TTW	上游	WTW (%)	TTW	上游	WTW (%)	TTW	上游	WTW (%)
当前卡车车队	229	145	—	11,588	1,772	—	3,373,539	858,668	—
国VI卡车	3	150	↓ -59%	657	1,838	↓ -81%	3,494,791	898,807	↑ 4%
当前铁路机车	316	166	↑ 29%	8,465	1,105	↓ -28%	593,169	4,543,212	↑ 21%
全电气化铁路机车	—	205	↓ -45%	—	1,158	↓ -91%	—	6,409,720	↑ 51%
全柴油铁路机车	1,003	81	↑ 190%	26,874	990	↑ 109%	1,883,076	484,298	↓ -44%
电气化铁路机车 + 清洁电网	—	38	↓ -90%	—	844	↓ -94%	—	2,558,771	↓ -40%
先进柴油铁路机车	48	81	↓ -66%	3,476	990	↓ -67%	1,883,076	484,298	↓ -44%

对柴油消耗量的影响

与卡车运输模拟情景相比，所有改为全铁路运输的模拟情景都能减少柴油燃料消耗量并减轻对柴油燃料的依赖。如图7所示，在“全柴油铁路机车”情景和“先进柴油铁路机车”情景下，可减少40%的柴油消耗量，而“当前铁路机车”情景每年可减少83%的柴油消耗量，这一结论与此前曹妃甸港公转铁的结果是相一致的（河北新闻，2018）。如果将运输模式切换至“全电气化铁路机车”和“电气化铁路机车 + 清洁电网”两种模拟情景，则可用电力完全取代柴油燃料，同时降低中国对进口原油的依赖度。尽管上文中提到由于应用先进的排放控制技术，在“国VI卡车情景”下也能够大幅减少颗粒物和氮氧化物排放，但由于我们在本次分析中并未对重型卡车设定燃油能效改善的假设条件，因此在该模拟情景下并不会降低对柴油燃料的依赖度。

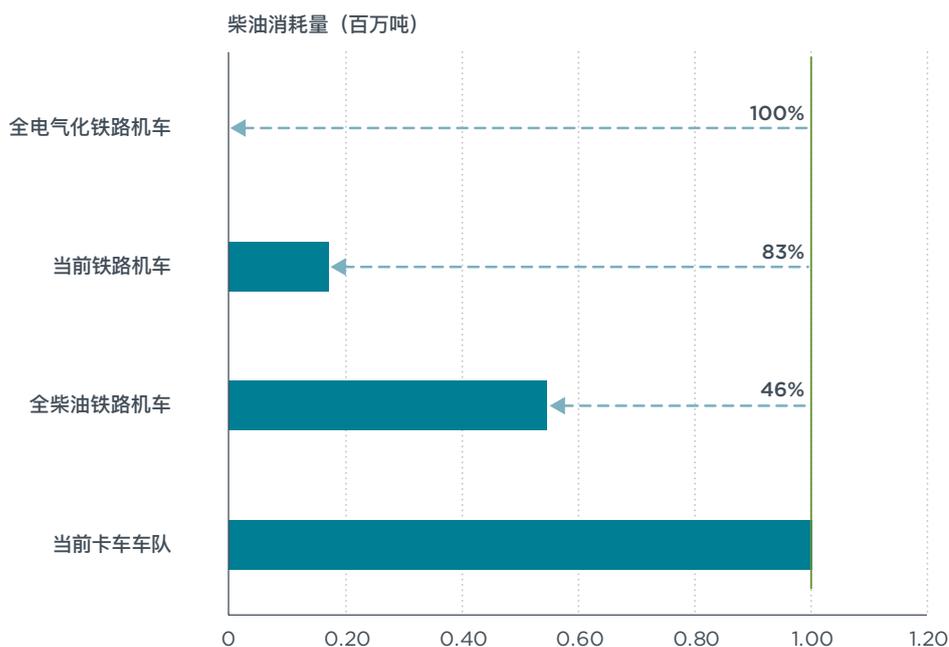


图7. 各模拟情境下的柴油消耗量

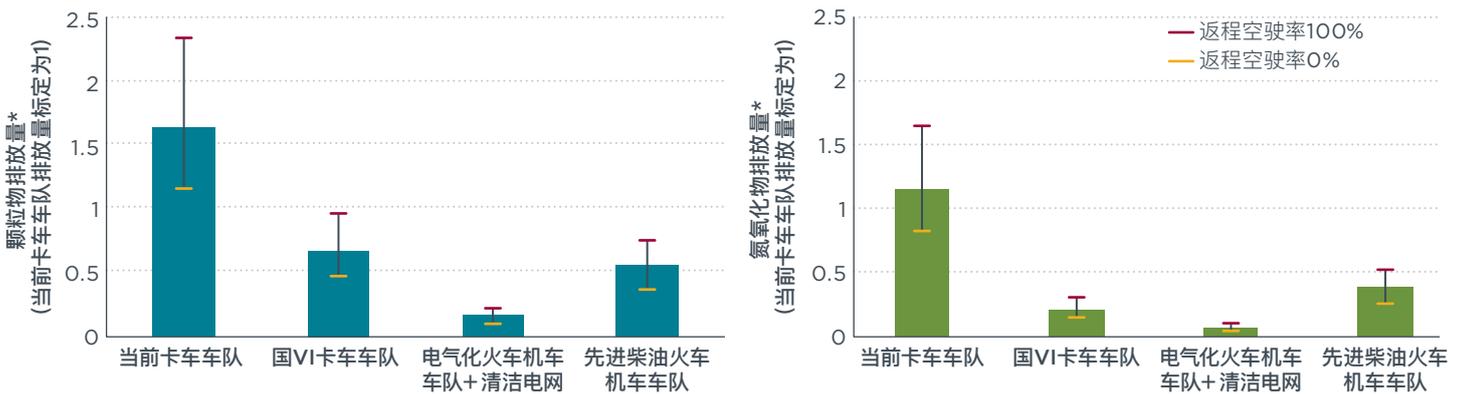
电网的作用

目前中国铁路系统的电气化比例为70%，随着电气化程度的不断增加，电网能源清洁与否就成了整体减排的关键。与“当前卡车车队”情景相比，在“当前铁路机车”情景下，颗粒物排放量会增长30%，二氧化碳排放量会增长15%。“全电气化铁路机车”情景的整体排放会稍好一些，但上游排放则有所增加；这表明单纯推进铁路系统电气化是不够的，这样会把排放转移至发电厂所在的上游地区，还会导致从从油井到车轮（WTW）阶段的整体排放有所增加。

如果电力系统能够实现可持续性发展，包括增加可再生能源应用、降低煤炭依赖度和提升上游排放控制技术等，在“电气化铁路机车+清洁电网”情景下，与“当前卡车车队”情景相比可实现颗粒物减排90%，氮氧化物减排94%，二氧化碳减排40%；与“全电气化铁路机车”情景相比可实现颗粒物减排81%，氮氧化物减排27%，二氧化碳减排60%。该模拟情景预期符合中国着力发展可再生能源，减少化石能源依赖的长期能源发展规划，分析结果表明在完成电网清洁化过渡之前实施公转铁切换会导致唐山铁矿石运输产生的全生命周期污染物排放有所增加，同时也会给京津冀地区带来更多的空气污染。

返程空驶率的作用

公转铁运输模式切换成功与否的另一个关键因素就是返程空驶率。因为铁路运输车次的发车安排和线路设计相对缺少灵活性，使得降低铁路返程空驶率是比较困难的，因而这一点显得尤为重要。我们在上文的图表中将两个卡车运输模拟情景的返程空驶率假设为40%，所有铁路运输模拟情景的返程空驶率假设为50%。如图8所示，如果将“国VI卡车情景”和“先进柴油铁路机车情景”的返程空驶率假设为100%，将“当前卡车车队情景”的返程空驶率假设为0%，那么即便安装应用最清洁的排放控制技术，这两个模拟情景在颗粒物减排方面的优势仍然不大。



*卡车运输返程空驶率40%，铁路运输返程空驶率50%

图8. 返程空驶率在部分模拟情景下对颗粒物和氮氧化物排放量的影响

码头短驳卡车的作用

码头短驳运输卡车在货物运输的最初和最后阶段产生的排放还会进一步降低所有铁路运输模拟情景的减排收益，不过我们在此次分析中并未纳入这部分排放。转换至铁路运输可以减少从出发地到目的地之间的卡车运输行程，但若缺乏妥善规划，可能会增加码头运输卡车的接驳运输量。唐山目前正在大力建设连接钢铁企业与码头口岸之间的专用轨道；同时协助小型企业搬迁至港口附近，采用传送带进行运输⁴。这些措施切实避免了使用码头短驳运输卡车来进行铁矿石运输，但在其他城市，如果不是采用国VI卡车和/或零排放卡车来完成“第一和最后一公里”运输，公转铁所带来的的环境和健康收益必然会有所减少甚至被全部抵消。

讨论及未来的研究方向

运输模式转变所能带来的环境收益可能比模型计算出的结果更大，这是因为交通环境改善会相应减少所有机动车的怠速时间，从而减少其他道路车辆的尾气污染物排放和能源消耗。并且，我们此次

⁴ 传送带运输是一种广泛应用的短途大宗货运运输方式，特别是对于位于港口附近的企业，传送带运输的成本效益很高，且避免了使用卡车进行运输。

的分析针对的仅仅是唐山港目前的铁矿石运输，如果扩大评估范围将能够确定更多的潜在收益。随着京津冀地区经济的不断发展增长，唐山港在进出口货运处理方面的作用也将不断增大，切换至更清洁的运输模式将能大幅减少污染物对唐山市乃至整个京津冀地区的影响，每年可消除数千吨常规污染物排放，消除上百万吨二氧化碳排放。此外，大多数经过最清洁排放控制标准认证的发动机尚较新，剩余使用寿命较长，从长期角度看具有相当高的成本收益。

公转铁运输模式转换预计将在中国所有港口广泛推行。本次对唐山港的研究展示了运输模式转换战略方案会对节能减排目标带来的影响。结果表明，在不同的情景下，公转铁的空气污染减排可能存在局限性，甚至并无空气污染物减排效果，而采用符合当前排放管理要求的先进柴油卡车，也能带来显著的减排收益。

无论如何，公转铁运输模式转换可以有效减少对柴油燃料的依赖度并缓解交通拥堵。铁路运输的能效要高于卡车运输，而且即便铁路机车全部采用柴油发动机，柴油消耗量也能有所降低。唐山迈出的重要一步是在钢铁企业和港口之间建设专用轨道，在小型生产企业和港口之间建设运输传送带，从而彻底消除了码头运输短驳卡车的使用需求。随着道路卡车使用需求的减少，货运要道的拥堵程度必然有所缓解，从而会减少所有车辆的怠速时间和污染物排放。

不过，只有在结合应用先进技术的前提下，公转铁战略才能实现燃料全生命周期减排。唐山的例子表明，采用全电气化铁路机车加清洁电网或是采用符合美国Tier 4排放标准的柴油铁路机车都能够实现显著的燃料全生命周期减排。反过来，如果依靠当前的铁路系统，无论是电气化还是柴油机车，都无法全面实现预想的空气污染物减排收益。目前，中国已经可以供应超低硫柴油燃料，从而保障先进排放控制技术在柴油铁路机车上的应用（Shao, 2018）。另一方面，中国近期实施的国VI重型车排放标准也能为减排提供有效支持，国VI认证卡车的污染物排放量较其他标准卡车有实质性的降低，这可能也会给铁路方面带来一些压力，推动先进排放控制技术在铁路系统中的应用。

最后，我们认为在未来的研究中应对唐山港所有进出港商品运输模式改进方案进行环境影响评估，并评估唐山港的短期和中长期空气质量及健康影响。另外一项工作则是分析其他地区主要港口运输模式转换的潜在环境影响，同时评估商品供应链的能源和环境性能及其预计成本。

参考文献

- Cai, W., Wang, C., Jin, Z., & Chen, J. (2013). Quantifying baseline emission factors of air pollutants in China's regional power grids. *Environmental Science and Technology*, 47(8), 3590–3597. doi: 10.1021/es304915q.
- California Air Resources Board (2019). *Drayage trucks at seaports and railyards*. Retrieved from <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/drayage-trucks-seaports-railyards>
- China Air Quality Monitoring and Analysis Platform (n.d.). 唐山空气质量指数月统计历史数据 (Tangshan city monthly air quality data). Retrieved from <https://www.aqistudy.cn/historydata/monthdata.php?city=%E5%94%90%E5%B1%B1>
- China Industry Information (2018). 2017年中国辽宁省、河北省钢材行业产量、消费量及政策分析(Analysis of steel production, consumption, and relevant policy for China Liaoning and Hebei province). Retrieved from <http://www.chyxx.com/industry/201801/605711.html>
- Clemenson, D. (2017, October 15). Tonnage titans—top 20 ports by annual cargo throughout. *Fairplay Magazine*. Retrieved from http://ports1.com/wp-content/uploads/2017/10/2017_10_15_IHSFairplayMag_Top_20_World_Ports.pdf
- Cui, H., Posada, F., Lv, Z., Shao, Z., Yang, L., & Liu, H. (2018). Cost-benefit assessment of the China VI emission standard for new heavy-duty vehicles. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/China_VI_cost_benefit_assessment_20180910.pdf
- Dallmann, T., & Menon, A. (2016). Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicle and equipment. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Non-Road-Tech-Pathways_white-%20paper_vF_ICCT_20160915.pdf
- Ding, Y. (2018). 2+26城市重型货车的排放情况 (Heavy-duty trucks' emissions in 2+26 cities). Vehicle Emission Control Center. Retrieved from <http://www.vecc-mep.org.cn/ke/three/159.html>
- Façanha, C., Blumberg, K., & Miller, J. (2012). *Global transportation energy and climate roadmap*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://www.theicct.org/publications/global-transportation-energy-and-climate-roadmap>
- Government of Tangshan (2019). 我市集中开展全域无超载超限城市创建统一行动(Tangshan creates actions on preventing overrun and overloaded issues). Retrieved from <http://www.tangshan.gov.cn/zhuzhan/zhengwuxinwen/20190409/684839.html>
- Greenpeace (2014). Infographic: 2013年全国74个城市PM_{2.5}排行榜 (Infographic: 2013 PM_{2.5} ranking for 74 cities in China). Retrieved from <http://www.greenpeace.org/china/zh/news/stories/climate-energy/2014/01/PM25-ranking-infographic/>
- Hall, D., & Lutsey, N. (2019). Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_HDVs_Infrastructure_20190809.pdf
- Hebei Government (2018). 河北省人民政府关于印发河北省打赢蓝天保卫战三年行动方案的通知 (Hebei Government released three-year action plan on winning the BlueSky Defense War). Retrieved from <http://info.hebei.gov.cn/hbszfxgk/6806024/6807473/6806589/6806185zc/index.html>
- Huo, H., Zhang, Q., Wang, M., Streets, D., & He, K. (2010). Environmental implication of electric vehicles in China. *Environmental Science and Technology*, 44, 4856–4861. doi: 10.1021/es100520c
- Huo, H., Cai, H., Zhang, Q., Liu, F., & He, K. (2015). Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: a comparison between China and the U.S. *Atmospheric Environment*, 108, 107–116. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.073
- “Internet + logistics” saved trucks’ empty backhaul for almost 2 billion kilometers in Henan province in about 10 years (2016, August 8). (互联网+物流”河南10年前就有 减少货车空载里程近20亿公里). *Ifeng News*. Retrieved from http://inews.ifeng.com/yidian/49737202/news.shtml?ch=ref_zbs_ydxx_news
- International Energy Agency (2019). *The future of rail – opportunities for energy and environment*. International Energy Agency. Retrieved from <https://webstore.iea.org/the-future-of-rail>
- Jiang, L., Ou, X., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2013). Life-cycle GHG emission factors of final energy in China. *Energy Procedia*, 37, 2848–2855. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.170
- Kodjak, D. (2015). *Policies to reduce fuel consumption, air pollution, and carbon emissions from vehicles in G20 nations*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://www.theicct.org/publications/policies-reduce-fuelconsumption-air-pollution-and-carbon-emissions-vehicles-g20>

- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (2012). *Ambient air quality standards*. GB 3095-2012. Retrieved from <http://210.72.1.216:8080/gzaqi/Document/gjzlbz.pdf>
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (2015). 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知 (Notice about implementation of ultra-low emission and reducing energy for coal-fired electricity plants). Retrieved from http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (2019a). 柴油货车污染治理攻坚战行动计划 (Diesel Truck Pollution Control Battle Plan). Retrieved from http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201901/t20190104_688587.html
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (2019b). 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见 (Requirements on promoting super low emission in steel production industry). Retrieved from http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463_wap.shtml?from=timeline&isappinstalled=0
- Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D. (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf
- National Bureau of Statistics of China (2019). *National Data*. Retrieved from <http://data.stats.gov.cn/>
- National Development and Reform Commission of China (2016). 能源生产和消费革命战略 (2016-2030) (Energy production and consuming revolution strategy [2016-2030]). Retrieved from http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425_845284.html
- National Railway Administration (2019). 国家铁路局关于发布《2018年铁道统计公报》的公告 (National Railway Administration release "2018 railway statistics report"). Retrieved from <http://www.nra.gov.cn/xwzx/zlxz/hytj/201904/P020190426367686178375.pdf>
- Shao, Z. (2016a). *Non-road emission inventory model methodology*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_nonroad-model-method_20160224.pdf
- Shao, Z. (2016b). *European stage V non-road emission standards*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf
- Shao, Z. (2018). *Early adoption of China VI vehicle fuel standards in Jing-Jin-Ji and surrounding areas*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://www.theicct.org/publications/early-adoption-china-vi-vehicle-fuel-standards-jing-jin-ji>
- Si, S. (2018, December 4). 探索曹妃甸港区“公转铁”：汽车少了 污染排放降了 (Explore Caofeidian port area with modal shift to rail: Less trucks, less pollution). *Hebei Daily*. Retrieved from http://hebei.ifeng.com/a/20181204/7075078_0.shtml
- Sun, M. (2015, May 15). 河北11市完成PM_{2.5}源解析 污染源各不相同 (Various emission sources found in the source apportionment analysis for eleven cities in Hebei province). *Hebei News*. Retrieved from http://hebei.hebnews.cn/2015-05/15/content_4773685_2.htm
- State Council (2013). 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 (State Council announced air pollution prevention and control action plan). Retrieved from http://www.gov.cn/zwggk/2013-09/12/content_2486773.htm
- State Council (2018a). 打赢蓝天保卫战三年行动计划 (Three-year National Plan of Blue-Sky Defense). Retrieved from http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm
- State Council (2018b). 推进运输结构调整三年行动计划 (2018—2020年) (Three-year Action Plan on Promoting Shipping Structure Adjustment [2018-2020]). Retrieved from http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/09/content_5328817.htm
- State Grid Corporation of China (2019). 清洁能源 (Clean sources). Retrieved from http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017041274/column_2017041274_1.shtml?childColumnId=2017041274
- Tangshan city defined workplan for winning Blue-Sky war action items (我市制定工作方案 部署打赢蓝天保卫战暨“退出后十”三年行动) (2018, October 12). *Sohu News*. Retrieved from http://www.sohu.com/a/259088292_100193195
- Tangshan Government (2019a). 2018年全市大气污染防治情况 (2018 Tangshan city air pollution prevention updates). Retrieved from <http://www.tangshan.gov.cn/zhuzhan/2019zyfb/20190125/671445.html>
- Tangshan Government (2019b). 2018年唐山港货物吞吐量6.3亿吨 (2018 Tangshan port reached 630 million cargo throughout). Retrieved from <http://www.tangshan.gov.cn/zhuzhan/shehuixinwen/20190112/668675.html>

- Tangshan Government (2019c). *Tangshan government work report*. Retrieved from http://district.ce.cn/newarea/roll/201903/06/t20190306_31623304.shtml
- Vehicle Emission Control Center (2018). *唐山港京唐港区首列铁矿石专列开进滦南 (First iron ore train from Tangshan Jingtang port drove to Luannan)*. Retrieved from <http://www.vecc-mep.org.cn/work/two/905.html>
- Vehicle Emission Control Center (2019). *推进“公转铁”，年底前唐山16家钢铁企业铁路专用线将建成 (Promoting “rail instead of road”, dedicated railways will be built into 16 steel companies by the end of the year)*. Retrieved from <http://www.vecc-mep.org.cn/tabloid/1329.html>
- Wen, W., Han, L., Chen, X., Cheng, S.Y., & Zhang, Y.L. (2015). 唐山市PM_{2.5}理化特征及来源解析 (Tangshan's PM_{2.5} physical and chemical characteristics and source apportionment analysis). *Journal of Safety and Environment*, 15(2), 313–318.
- Xue, S. (2018, May 22). Coal burning, industry and diesel vehicles are the largest contributors to air pollution in Jing-Jin-Ji and surrounding regions. *Xinhua News Agency*. Retrieved from <http://app.xinhua08.com/print.php?contentid=1761471>
- Yang, L., Cai Y., Zhong, X., Shi, Y., & Zhang, Z. (2017). A carbon emission evaluation for an integrated logistics system – a case study of the port of Shenzhen. *MDPI Sustainability*, 9(3), 462. doi: [10.3390/su9030462](https://doi.org/10.3390/su9030462)
- Yang, L., & He, H. (2018). *China's stage VI emission standard for heavy-duty vehicles (final rule)*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/China_VI_Policy_Update_20180720.pdf
- Yang, L., Delgado, O., & Muncrief, R. (2019). *Barriers and opportunities for improving long-haul freight efficiency in China*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/barriers-and-opportunities-improving-long-haul-freight-efficiency-china>