



2035 年广东省内河航道通过能力及降碳预测^{*}

江森汇, 王 青, 李毅旭

(广州航海学院, 广东 广州 510725)

摘要: 随着“碳中和”战略的发展, 水路运输越来越受到重视。水路运输作为一种节能环保的运输方式, 在区域交通系统中占有举足轻重的地位, 水路运输的比重大大影响区域交通系统节能减排的效果。从《广东省航道发展规划(2020—2035 年)》的角度出发, 着重分析了广东省内河航道的发展现状和规划愿景, 对广东省内河航道理论通过能力的变化做出预测, 结合广东省内河航道的货运量, 探讨了广东省内河航道的发展对区域交通系统降碳的影响。研究结果表明, 广东内河航道的升级改造大大提升了内河航道的理论通过能力, 对公路、铁路等运输货物的分担使得广东省区域交通系统的碳排放量约减少 2.2%, 为更加合理建设广东省内河航道提供理论参考。

关键词: 内河航道; 航道通过能力; 碳中和; 区域交通系统

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0098-06

Prediction of inland waterway transit capacity and carbon reduction in Guangdong Province in 2035

JIANG Sen-hui, WANG Qing, LI Yi-xu

(Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China)

Abstract: Nowadays, increasing attention has been paid to water transportation to achieve the goal of carbon neutrality. As an energy-saving and environmentally friendly transportation mode, water transportation plays an important role in regional transportation systems. The proportion of water transportation greatly influences the effect of energy conservation and emission reduction of regional transportation systems. From the perspective of *Guangdong Province Waterway Development Plan (2020-2035)*, this paper focuses on the analysis of the development status and planning vision of inland waterways in Guangdong Province, predicts the change in the theoretical inland waterway transit capacity of the province, and explores the impact of the development of inland waterways on the carbon reduction in the regional transportation system of the province depending on the freight volume of its inland waterway. The results show that the upgrading of inland waterways in Guangdong greatly improves the theoretical inland waterway transit capacity and makes water transportation better share the goods transportation of highway and railway, which reduces the carbon emission of the regional transportation system in Guangdong by about 2.2%. This paper can provide a theoretical reference for the more rational construction of inland waterways in Guangdong.

Keywords: inland waterway; waterway transit capacity; carbon neutrality; regional transportation system

随着极端气候频发及其所引发的灾害日益严重, 国际社会和国内对气候变化关注程度与日俱增, 中国承诺“努力争取 2060 年前实现碳中和”,

将为世界降碳做出应有的贡献。近年来, 航运业的低碳发展和降碳的压力日益增加, 如何权衡航运业和经济社会发展之间的关系, 已引起社会

收稿日期: 2021-08-16

***基金项目:** 广东省科技计划项目(202002030248); 创新强校工程项目(G410210)

作者简介: 江森汇(1983—), 博士, 讲师, 从事海浪数值模拟及航道设计规划研究。

各界的高度重视。2020 年，为对标交通强国建设要求，适应粤港澳大湾区现代化综合交通运输体系的建设需求，广东省交通运输厅编制《广东省航道发展规划（2020—2035 年）》^[1]，明确广东省未来一段时期航道发展的目标和重点，升级改造广东省内河航道网，增加内河航道的货物通过能力，进而对广东省区域交通的碳排放总体水平产生影响，以达到降碳的效果。

目前，航道通过能力的研究大致经历了 4 个阶段：1) 纯经验分析阶段。根据工程经验，结合航道的实际情况，综合考虑管理服务水平，分析航道通过能力。2) 半经验半理论公式计算阶段。以理论航道通过能力为基础，结合不同因素的影响，计算出更准确的实际航道通过能力。在这一阶段涌现出很多公式，如西德公式^[2]、长江公式^[3]、川江公式^[4]、闵朝斌敞流航道公式^[5]、苏南运河公式^[6]和王宏达公式^[7]等。在上述公式的基础上，学者们考虑交通流理论和船舶领域基本概念，提出了各种不同的半经验半理论公式^[8-10]，进一步完善了利用经验公式计算航道通过能力的方法。3) 理论模型计算阶段。随着数学理论和方法的发展，出现了排队论^[11-12]、跟驰理论^[13-14]等理论模型，主要通过模拟船舶进出港及泊位装卸货、交通流等过程分析航道通过能力。4) 数值仿真阶段。随着数值仿真的出现及相对成熟，国内外专家采用 ARENA、SIMIO、EM-PLANT、FLEXSIM、WITNESS 等数值仿真软件对航道通过能力进行了建模、分析研究^[15]。

随着航道建设投入的增加，航道等级提升，高等级航道里程数日益增长，大大促进了航道货物通过能力的变化，克服了原先低等级航道单次运量少、周转便利性差等缺点，吸引货物运输向水路航运倾斜，优化了区域运输结构。水路运输相较于公路、铁路、民航等运输方式，其能耗低、污染少、更环保；水路运输将分担公路、铁路货物量，进而从总体上降低碳排放量。目前，较为广泛应用的交通碳排放量计算方法是由 IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change，联合国

政府间气候变化专门委员会）提出的“自上而下”^[16-17]和“自下而上”^[18]两种形式。由于两者在计算交通碳排放量均存在缺点，在使用中通常将二者结合计算交通碳排放量^[19]。在交通碳排放量预测研究取得进展的同时，学者们采用分解分析法^[20]、空间计量法^[21]、可拓展随机性的评估模型（STIRPAT）^[22]等对交通碳排放的主要影响因素开展了相关研究。通过大量研究发现，交通运输结构对交通碳排放具有显著影响，区域交通运输结构的优化将成为中国交通运输行业重点发展方向之一^[23]。本文涉及到的“交通运输结构”主要表示区域交通运输货物量在不同交通运输形式下的分担。国内外学者通过文字分析和实证分析两种方式对优化交通运输结构实现碳减排开展了相关研究。前者主要集中于交通运输结构优化的理论指导及政策^[24-25]；后者则是通过采用综合指标评价体系、情景分析法、线性规划模型等方法，研究理想状态下实现碳减排目标最优的交通运输结构^[26-27]。

本文根据《广东省航道发展规划（2020—2035 年）》的部署，结合广东省内河航道的发展现状和规划愿景，采用考虑不同安全间距的经验计算方法，计算 2035 年广东省内河航道通过能力，分析升级改造前后航道通过能力的变化情况；利用 Logit 分配模型，结合各运输方式的效用指标，预测水路运输对公路和铁路的分担率，进而分析碳排放总量的变化情况，阐明内河航道提升对区域交通系统减碳的贡献，为更加合理地开展内河航道降碳相关工作提供理论参考。

1 广东省内河航道发展现状

广东省拥有优良海岸和密集水网，为充分发挥其优势，打造一流水运网络，形成综合交通体系。依据全国航道和港口布局规划，结合航道所处的地理位置、自然条件以及在综合交通运输体系和经济社会发展中的作用，广东省确立全省航道的总体布局为“八通、两横、一网、三连、四线”，见图 1。

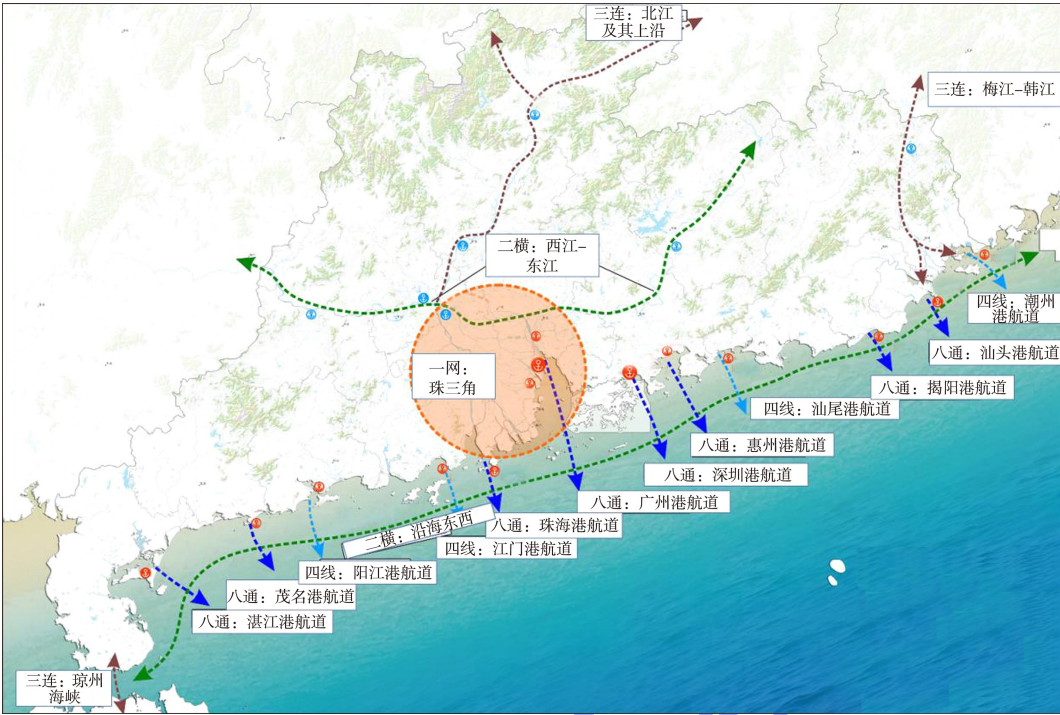


图 1 广东省航道总体布局

至 2020 年底，广东省内河航道通航总里程达 1.2 万 km，Ⅰ～Ⅲ级高等级内河航道总里程为 1 397 km(其中Ⅰ级航道 563 km，Ⅱ级航道 73 km，Ⅲ级航道 761 km)，占比 11.5%；Ⅳ～Ⅶ级航道里程数为 3 033 km；等外航道里程数为 7 698 km。2035 年，内河高等级航道总里程将达到 1 952.6 km (其中Ⅰ级航道 873.6 km，Ⅱ级航道 318 km，Ⅲ级航道 1 096 km)，Ⅳ～Ⅶ级航道里程数将为 3 304 km，其对比关系见图 2。从图 2 不难发现，2035 年相较于 2019 年，不论Ⅰ～Ⅲ级航道或是Ⅳ～Ⅶ级航道，其里程数均有所增加。Ⅰ级航道增加了约 55%；Ⅱ级航道增加比例最大，约 335%；Ⅲ级航道增加比例约 44%；Ⅳ～Ⅶ级航道增加了约 8.9%。因省级航道管理部门未给出等外航道里程的增长状况，总里程增加的确切数据尚不明确。

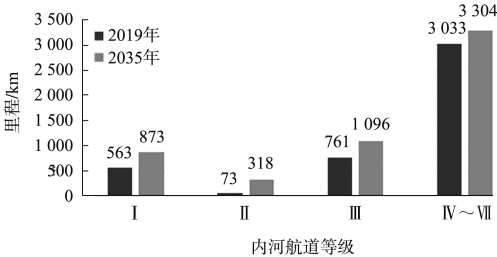


图 2 Ⅰ～Ⅶ级内河航道变化对比

广东省内河运输承担了水陆交通运输周转量的 24%，航道体系为水上大宗货物运输提供了绿色环保的运输通道保障，但在综合交通运输体系中的占比仍不高，水运的优势和运输能力远没有发挥出来。为推动经济高质量发展和支撑社会可持续发展的要求，广东省内河航道还存在与产业发展新变化不适应、主要河流港口规模化发展滞后、航道发展资源制约因素加剧、航道建设和养护经费不足、航道现代化水平有待提升等问题，有待进一步优化和解决。

2 航道通过能力预测分析

航道通过能力是反映航道适航性的一个重要指标，通常是指在某一计算时间段内航道某一区段或控制阶段处可能通过的最大货运量，一般可采用货吨或船吨数来表示^[28]。航道通过能力能够直观反映航道的疏导能力，影响水运经济和服务水平的发展，也受到航道等级、船舶种类、管理能力等因素的制约，科学有效地预测航道通过能力不仅可以为航道主管部门设计规划、港口部门管理运营等提供辅助性决策，还可以为区域交通组织、航道的升级改造等提供理论和技术支持，

具有重要的理论价值和现实意义^[29-31]。

目前，航道通过能力尚无统一公式，本文将采用考虑交通流和船舶领域理论的半经验半理论公式对广东省内河航道通过能力进行计算。

$$C=\begin{cases} \frac{3\,600}{T}\left(1-\frac{3.6l}{v_fT}\right) & (v_f>7.2l/T) \\ 250\,v_f/l & (v_f\leq 7.2l/T) \end{cases} \quad (1)$$

式中： C 为单向航道通过能力（艘/h）； v_f 为船速（km/h）； l 为最小船头间距（m）； t 为船舶驾驶员反应时间（s）； T 为不同安全条件下的时间（s）。公式（1）是以船舶之间运行状态为基础，考虑两船

跟船碰撞情况，是不同安全条件下的船舶通过量和实际船舶通过量综合作用的结果。相较传统的航道通过能力经验公式，明确了安全条件的限制，符合实际航道中船舶航行相互跟驰并选择一定跟船距离的基本原则。根据不同安全水平的安全距离，可计算出相应安全条件下的航道通过能力。该公式已应用于苏南运河中航道通过能力的计算，计算结果较为合理，符合实际船舶运行状况。

依据上述公式，结合广东省内河航道的现状及规划状况，计算得到广东省内河航道通过能力，计算参数见表 1，计算结果见图 3。

表 1 广东省内河航道通过能力计算参数

航道等级	吨位/t	船长/m	设计船速/ (kn·h ⁻¹)	现状理论航道 通过能力/万 t	里程对比 综合因素	规划理论航道 通过能力/万 t
I 级	3 000	95.0	12.0	28 136.8	1.30	36 577.8
II 级	2 000	90.0	12.0	19 800.0	1.50	29 700.0
III 级	1 000	85.0	12.0	10 482.4	1.20	12 578.9
IV 级	500	67.5	11.0	6 050.0	1.05	6 352.5
V 级	300	55.0	11.0	4 455.0	1.05	4 677.8
VI 级	100	45.0	11.0	1 815.0	1.05	1 905.8
VII 级	50	32.5	10.0	1 117.9	1.05	1 173.8

注：船舶参数来源于 JTS 165—2013《海港总体设计规范》；船舶驾驶员反应时间参考文献[8]，取 21.2~28.5 s。

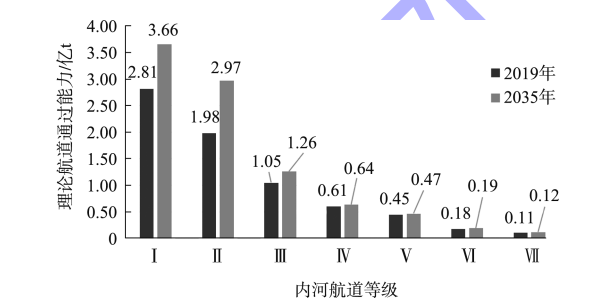


图 3 理论航道通过能力对比

由图 3 可以看出，随着广东省内河航道改扩建工程的实施，其航道的理论通过能力均得到了一定的提升。基于现状的内河航道理论通过能力，其计算结果均与文献[32]的计算结果基本一致，I 级内河航道的理论通过能力约为 2.81 亿 t/a、II 级内河航道约为 1.98 亿 t/a、III 级内河航道约为 1.05 亿 t/a。到 2035 年，随着高等级内河航道里程的增加，其通过能力也有所增加，I 级内河航道约增长 30%、II 级内河航道约增加 50%、III 级

内河航道约增加 20%。

3 内河航运在区域交通体系中的降碳贡献预测

针对航运业如何降碳这一问题，学者们积极开展相关研究，主要集中在航道和港口的升级改造、船舶种类及能效的改进、货运方式及装卸工艺的改善、节能减排技术及推广、区域交通运输组织等方面，并取得了较多的成果^[33-34]。

据统计，2019 年广东省公路货运量为 31.90 亿 t（比上年增速 4.8%），铁路货运量为 0.82 亿 t（比上年增速 7.5%），水路货运量为 4.50 亿 t（比上年增速 5.9%），民航的货运量最少，仅为 238 万 t（比上年增速 5.6%）。随着广东省内河航道的改扩建，航道货物通过能力不断提升，因其运价的优势，航运将分担其他运输方式的货运量。根据《广东省航道发展规划（2020—2035 年）》的预测，2035 年内河航运的货运量为 8.2 亿 t。假定水路、公路、铁

路、民航货运量增长速度维持 2019 年的比例关系，到 2035 年预测的货运量分别为 8.2 亿、47.3 亿、1.9 亿 t 和 412 万 t。

内河航运能力的提升，势必分担公路、铁路和民航的货物运输量，进而影响区域交通系统的节能减排效果。采用 Logit 分配模型计算内河航道能力提升对公路、铁路和民航货物运输量的分担率，结合货物周转的排放量，分析 2035 年广东省内河航运能力提升对区域交通系统节能减排的贡献。计算方法如下：

$$P_{公路} = \frac{e^{S_{公路}}}{e^{S_{公路}} + e^{S_{水运}}} \tag{2}$$

$$P_{铁路} = \frac{e^{S_{铁路}}}{e^{S_{铁路}} + e^{S_{水运}}} \tag{3}$$

式中： $P_{公路}$ 、 $P_{铁路}$ 分别表示航运能力提升对公路和铁路货物运输量的分担率； $S_{公路}$ 、 $S_{铁路}$ 、 $S_{水路}$ 分别表示公路、铁路和水运的特征函数，其主要因素包括运输时间、等待时间、运输费用及其他不可测因素等。参考文献 [34] 的计算思路，采用运输方式效用值指标替代特征函数，公式如下：

$$V = C_1 W_Y + C_2 W_K \tag{4}$$

式中： V 是交通运输方式综合效用值； C_1 和 C_2 分别表示运价权重和快捷性权重； W_Y 和 W_K 分别表示运价影响因素和快捷性影响因素，取值见表 2。

表 2 分担率计算参数

运输方式	C_1	W_Y	C_2	W_K	V	分担率 $P/\%$
水路	0.9	0.35	0.1	0.05	0.32	—
公路	0.7	0.90	0.3	0.20	0.69	40.9
铁路	0.9	0.70	0.3	0.40	0.61	42.8

注：参数通过查阅文献及调研获得。

由表 2 可看出，水路货物运输对公路和铁路货物运输的理论分担率分别为 40.9% 和 42.8%。结合广东省不同交通运输方式的实际情况和 2035 年预测货运量，水路货物运输对公路和铁路的承担量分别为 1.51 亿和 1.58 亿 t。另外，民航运输的分担率暂定为 0%，民航运输追求时间效率，与航运时间相对较长存在一定的矛盾性；民航运输货物量相对其他运输方式占比较小，故未进行相应分担计算。

基于上述计算，按照文献[35]货物周转的单位碳排放量，见表 3，并结合各运输方式的货运量，可得到各运输方式的碳排放总量，其计算公式如下：

$$P = GH \tag{5}$$

式中： P 为碳排放总量； G 为单位碳排放量； H 为货运量。

从表 3 可看出，2019 年，碳排放总量为 18.779 万 t；2035 年，若水路对公路和铁路的分担率为零，即不分担的条件下，碳总排放量为 27.745 万 t；通过航运业的分担后，碳排放总量为 27.137 万 t；比较分担前后的碳排放总量，减少了 0.608 万 t，占比约为 2.2%。

表 3 碳排放预测分析

运输方式	单位碳排放量/ (kg·t ⁻¹)	2019 年			2035 年		
		货运量/亿 t	碳排放总量/万 t	占比/%	货运量/亿 t	碳排放总量/万 t	占比/%
公路	0.055 6	31.900	17.737	94.45	45.79	25.459	93.92
铁路	0.016 5	0.819	0.135	0.72	0.32	0.053	0.19
水运	0.013 3	4.500	0.599	3.19	8.20	1.091	4.02
民航	1.297 2	0.024	0.309	1.64	0.04	0.534	1.97

注：1)碳排放量特指碳量，非二氧化碳量；2)单位碳排放量是根据全国交通各行业能源消耗情况，并结合 2008 年交通运输业的碳排放量和运输周转量计算得到，见文献[35]。

4 结论

1) 基于《广东省航道发展规划(2020—2035 年)》的分析，到 2035 年，广东省内河高等级航道和低等级航道通过升级改造，其里程数均有一定程度的增

加。高等级航道(I~Ⅲ级)将增加约 890 km，占比 63.7%；低等级航道(Ⅳ~Ⅶ级)将增加 271 km，占比 8.9%。

2) 通过采用考虑交通流和船舶领域理论的半

经验半理论公式对广东内河航道的理论通过能力进行计算。结果表明, 到 2035 年, 广东内河航道的理论通过能力得到一定的提升; 相较于 2019 年, I 级内河航道约增长了 30%, II 级内河航道约增加了 50%, III 级内河航道约增加了 20%。

3) 广东内河航道理论通过能力的增加, 促进了航运能力的提升, 分担了公路、铁路和民航的货物运输量, 优化区域交通结构, 对区域降碳做出相应的贡献。基于 Logit 分配模型, 预测水路货物运输对公路和铁路货物运输的理论分担率及货物承担量, 进而得到碳排放总量降低约 2.2%。

4) 在计算航道的理论通过能力时, 未考虑船闸等交通节点的影响, 其计算结果可能存在一定的偏差; 后续将寻求与省航道管理部门的合作, 采用数值仿真的方法对广东省内河航道的实际通过能力, 以求更加准确地模拟出区域交通结构的变化对节能减排的影响, 进而为实现碳中和提供更加合理的理论参考。

参考文献:

[1] 广东省交通运输厅. 广东省航道发展规划(2020-2035 年)[R]. 广州: 广东省交通运输厅, 2020.

[2] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 25-35.

[3] 张起森, 张亚平. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[4] 张亚平. 公路通行能力研究现状与发展方向[J]. 国外公路, 2000(5): 26-29.

[5] 卞艺杰. 航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2000(8): 27-30, 48.

[6] 邹宝山, 何凡能, 何为刚. 京杭运河治理与开发[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 10-15.

[7] 王宏达. 内河航道通过量估算[J]. 水运工程, 1998(9): 4-6.

[8] 徐婷婷. 不同安全条件下的航道通过能力研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[9] 董宇, 姜晔, 何良德. 内河航道通过能力计算方法研究[J]. 水运工程, 2007(1): 59-65.

[10] 何良德, 黄雄, 刘智慧, 等. 内河航道可接受间隙理论模型改进及其应用[J]. 水运工程, 2017(4): 124-130.

[11] 李文杰, 龙浩, 戴佳伶, 等. 基于排队理论的单线控制河段航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2020(1): 97-102.

[12] 曹兴飞. 基于排队论的港口航道通过能力仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.

[13] 朱俊, 张玮. 基于跟驰理论的内河航道通过能力计算模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 83-87.

[14] 刘宗杨, 周春辉, 赵俊男, 等. 基于元胞自动机的航道通过能力建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(11): 2478-2487.

[15] 吕鹏飞. 基于 Petri 网的海港航道系统通过能力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

[16] 胡鹏飞, 赵淑芝, 刘华胜, 等. 网购影响下的城市交通碳排放测算方法研究[J]. 公路工程, 2018, 43(06): 97-101, 227.

[17] 吴雯, 李玮. 中部六省交通运输业碳排放影响因素分析[J]. 管理现代化, 2019, 39(1): 62-65.

[18] 陶玉国, 黄震方, 史春云. 基于替代式自下而上法的区域旅游交通碳排放测度[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4224-4233.

[19] 尚玲宇. 运输结构对交通碳排放的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

[20] LUO X, DONG L, DOU Y, et al. Regional disparity analysis of Chinese freight transport CO₂ emissions from 1990 to 2007: Driving forces and policy challenges[J]. Journal of transport geography, 2016, 56: 1-14.

[21] 张陶新, 曾熬志. 中国交通碳排放空间计量分析[J]. 城市发展研究, 2013, 20(10): 14-20.

[22] 李灵杰, 吴群琪. 中国省域交通运输经济发展与碳排放的联合动态性分析[J]. 西安财经学院学报, 2017, 30(6): 44-49.

[23] 董彬, 吴群琪, 彭志敏. 综合运输体系结构演变特征及趋势分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 151-158.

[24] 林建英. 基于碳排放的交通运输优化方式研究[J]. 内燃机与配件, 2018, 260(8): 179.

[25] 陈淑玲, 康兆霞, 武剑红. 运输结构调整政策的国际比较及启示[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(2): 33-37.

[26] AGGARWAL P, JAIN S. Energy demand and CO₂ emissions from urban on-road transport in Delhi: current and future projections under various policy measures[J]. Journal of cleaner production, 2014, 128(15): 48-61.