

基于 SD-GM 循环预测理论的机动车污染物收费政策效应分析

贾书伟¹, 严广乐²

(1. 河南农业大学 信息与管理科学学院, 郑州 450046; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘 要 本文从减排和缓堵两层视角, 基于北京市 2005–2017 年的相关数据, 构建了城市机动车污染物减排管理模型. 首先, 采用系统动力学与灰色预测理论相结合的方法来构建变函数, 从而提高了参数的预测精度, 并提出了一种新的系统动力学建模方法. 其次, 采用整体性检验法 (如关联度合格检验) 对模型进行验证, 克服了局部性检验方法的一些不足. 再者, 对低、中、高三类方案进行了模拟, 结果显示: 低收费政策具有“双拐点效应”, 中 - 高收费方案间存在“边际递减效应”. 最后, 以中等收费方案为例, 对机动车 CO, HC, NO_x 和 PM 总量 (减排效果) 以及车均道路面积 (缓堵效果) 等主要变量进行中长期的动态仿真, 结果表明: 适度的收费能够实现减排和缓堵的“双赢”. 特别的, 从短期来看, 高收费方案的效果比较显著, 但从长期视角来考虑, 这种效果将逐渐被削弱. 据此, 能够为政府交通部门及环保部门提供决策依据.

关键词 系统动力学; 循环预测; 雾霾污染; 生态承载力; 拐点效应

Effects of the policy of air pollution charging fee based on system dynamics and grey model approach

JIA Shuwei¹, YAN Guangle²

(1. College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract From the perspectives of “reduction emission” and “congestion releasing”, a vehicle pollution reducing management model is established based on the relevant data of 2005–2017 in Beijing. Firstly, the graphical function is constructed by using the approach of integrating system dynamics and grey model theory. It has improved the prediction precision of the parameters and put forward a new method of system dynamics modeling. Secondly, the integrity test (such as qualified verification of the degree of incidence) is used to test the model, in order to overcome some insufficient of the local testing method. Moreover, three kinds (including the low, medium and high policy) of schemes are simulated, and the results show that the low policy has a “double inflection-point effect”. In addition, there is a “marginal diminishing effect” between the medium and high policy. Finally, taking the medium policy as an example, mid-long term dynamic simulation is carried out for the major variables (such as CO, HC, NO_x, PM, and per vehicle area of roads). In particular, in the short term, the effect of high scheme is quite significant, but from the long-term perspective, the effect will be gradually weakened. Therefore, it can provide decision-making basis for the government.

收稿日期: 2018-08-17

作者简介: 贾书伟 (1982–), 男, 河南平顶山人, 博士, 研究方向: 系统工程、复杂系统建模与仿真, E-mail: shuweijia999666@163.com; 严广乐 (1957–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 系统工程、复杂系统.

基金项目: 国家自然科学基金 (71571119); 中国博士后科学基金 (2018M630404); 河南省教育厅人文社会科学研究项目 (2019-ZZJH-047); 河南省重点研发与推广专项 (软科学) 项目 (192400410023)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71571119); China Postdoctoral Science Foundation (2018M630404); Humanities and Social Science Research Project of Educational Department of Henan Province (2019-ZZJH-047); Soft Science Project of the Science and Technology Department of Henan Province (192400410023)

中文引用格式: 贾书伟, 严广乐. 基于 SD-GM 循环预测理论的机动车污染物收费政策效应分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(9): 2436–2450.

英文引用格式: Jia S W, Yan G L. Effects of the policy of air pollution charging fee based on system dynamics and grey model approach[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(9): 2436–2450.

Keywords system dynamics; cycle prediction; haze pollution; ecological capacity; inflection-point effect

1 引言

随着城市化建设步伐的不断推进和人民生活水平的不断提高, 雾霾和交通拥堵程度也在不断地加剧, 并成为影响智慧城市建设的两大因素, 如北京, 上海, 深圳, 郑州等城市. 雾霾污染^[1,2], 不但给人们生活带来不变, 更会危害人的身心健康^[3-5], 2017 年之前, 煤炭燃烧是“雾霾”污染的重要来源之一. 随着国家宏观调控的实施, 燃煤污染得到了一定的控制, 使得机动车污染物排放对“雾霾”污染的贡献比不断升高, 例如北京, 天津, 上海等 15 个城市大气 PM_{2.5} 源解析工作结果显示, 本地排放源中移动源对 PM_{2.5} 浓度的贡献范围为 13.5% 至 52.1%^[6,7]. 因此, 机动车污染物减排管理问题将成为一个热门话题, 并亟待解决.

在机动车尾气排放方面, 许多学者以 CO, HC, NO_x 和颗粒物 (PM) 为重点^[8-11], 研究了其排放规律, 并提出了相应的减排措施. 在减排策略的研究方面, 部分学者提出了源头控制和末端控制相结合的协同控制策略, 为后续研究打下了坚实的基础^[12]. 文献 [13, 14] 讨论了限行政策对公共交通供给水平的影响, 结果表明: 单凭机动车限行政策无法有效地激励出行者转向公共交通. 文献 [15, 16] 的研究结果显示: 态度主观规范和道德规范对机动车 PM_{2.5} 减排具有积极作用, 进而验证了公众接受度的提高有利于“雾霾”污染的治理. 近年来, 研究者们以北京市为例, 探讨了拥堵收费政策对交通排放的影响, 结果表明: 该政策能够增加公共交通使用量, 进而减少收费区域内 CO, HC 及 NO_x 排放量^[17]. Jia 等^[18] 以上海市为例, 采用收费和补贴的组合政策, 从“减排”和“缓堵”两层视角, 探索了城市机动车污染物减排管理策略, 并提出了相应的优化方案. 另有部分学者以西安市为例, 研究了不同类型道路上颗粒物排放情况 (包括 PM_{2.5}, PM₁₀ 和 PM₁), 结果表明: 在高峰时段, 城市道路拥堵区的污染物排放情况明显高于其它路段等结论^[19]. 以上结果为机动车污染物减排管理策略的研究提供了有益的借鉴.

在以上研究的基础上, 本文采用污染物收费政策 (air pollution charging fee, 简称 APCF) 这一经济手段来更深入地探究以下问题:

问题一: 是否收费越高越好? 低中高三种收费方案分别揭示了什么政策效应?

问题二: 从“减排”和“缓堵”的视角, 机动车污染物收费政策各有何优缺点, 针对其缺点, 应该采取哪些措施来弥补?

针对以上问题, 本文的研究思路如下: 首先, 根据北京市近 13 年的相关数据, 结合实际情况, 采用系统动力学与灰色 GM 预测理论 (system dynamics and grey model approach, 简称 SD-GM 理论) 相结合的方法来构建城市机动车污染物减排管理模型; 其次, 对于模型中具有非线性特征的变量, 利用循环预测理论来构造表函数和逻辑函数; 最后, 对不同方案进行动态仿真和政策效应分析, 以此来评估该政策对缓解交通拥堵和雾霾污染的作用效果, 进而提出相应的政策建议.

2 基于 SD-GM 循环预测理论的机动车污染物减排管理模型

根据现有研究 (如文献 [8, 9] 和文献 [20, 21]), 结合北京市的实际情形, 本文利用系统动力学方法构建了机动车污染物减排管理模型, 如图 1 所示, 并将 APCF 政策嵌入到模型中进行仿真. 特别地, 在参数和方程的确定方面, 综合了系统动力学和灰色系统理论的优势, 基于 SD-GM 循环预测理论, 提出了一种新的表函数构建算法, 进而能够动态地刻画出变量间的一些非线性关系.

2.1 系统动力学方法

系统动力学是利用仿真技术来研究系统结构内部的不同行为模式及各变量之间的相互关系的一门综合性学科. 其创始人是美国麻省理工学院的教授福瑞斯特 (Jay W. Forrester), 该方法适合于研究与规划复杂的社会经济系统未来行为和相对应的战略决策, 进而能够为管理科学与工程感兴趣的学者提供解决工业工程中诸多问题的一种新思维. 因此, 系统动力学方法在资源、环境、科技、社会与经济可持续发展等领域有着广泛的应用, 例如建筑废弃物管理^[22], 绿色 GDP 增长^[23,24], 电子产品回收^[25,26] 以及能源消耗与政策分析^[27] 等方面.

图 1 主要包括经济子系统, 人口子系统, 资源-环境子系统以及交通子系统等. 其中, 与“减排”相关的关

键变量有环境生态承载力, 空气污染程度, 载客(货)汽车 CO/HC/NO_x/PM 污染程度, 机动车 CO/HC/NO_x/PM 总量; 与“缓堵”相关的关键变量有道路生态承载力, 机动车出行量, 车均道路面积, 交通拥堵程度等。APCF 政策的主要目的是通过收费这一经济手段来减少机动车出行总量, 实现缓解交通拥堵的目的; 同时, 也降低了机动车污染物排放总量, 进而实现减排的目标。本文参考伦敦和新加坡收费模式, 按区域进行收费。

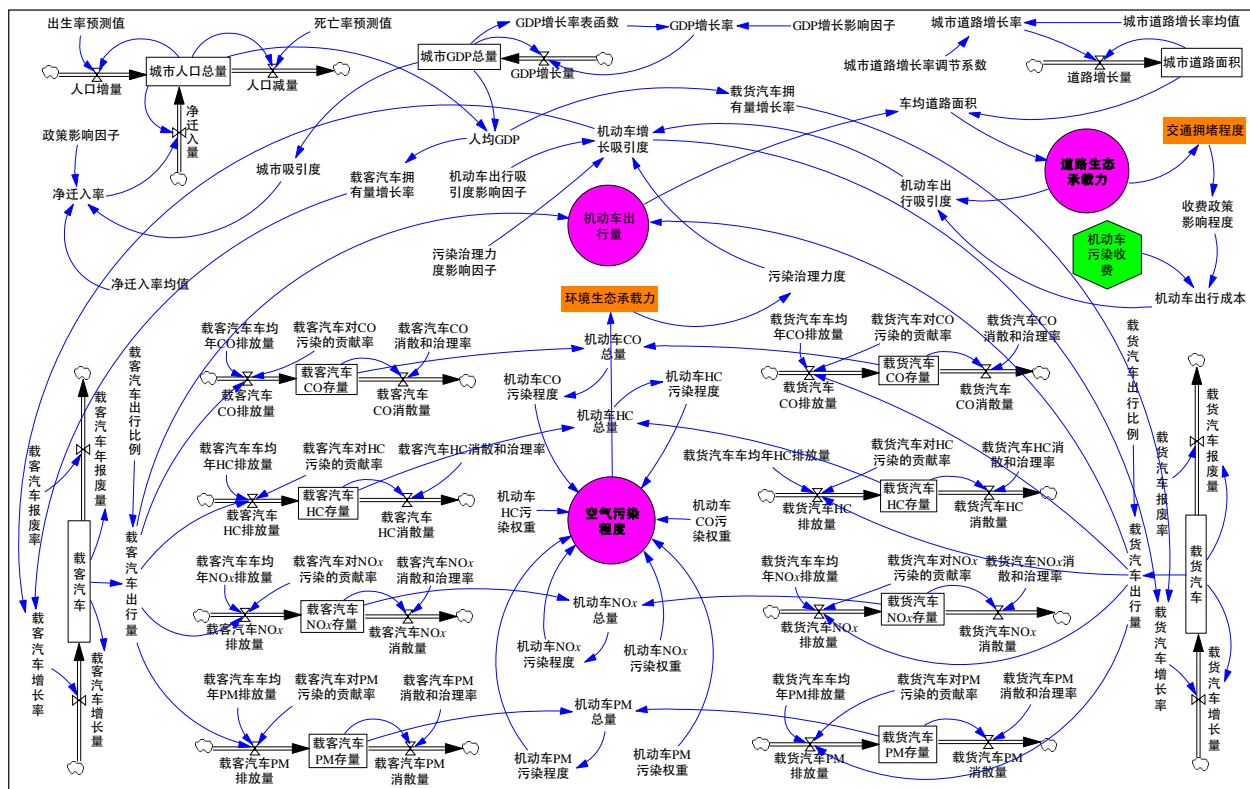


图 1 机动车污染物减排管理模型

2.2 参数和方程的确定

根据图 1 中数据变量的不同特点, 我们将其分为以下几类: 依据现有文献直接得到的数据, 需要根据官网数据进行计算的变量, 以及利用 SD-GM 循环预测理论构建的具有非线性关系的方程 (如表函数和逻辑函数方程).

2.2.1 基于 SD-GM 循环预测理论的表函数构建算法

系统动力学主要强调的是系统的结构, 对于模型中某些缺乏历史数据的参数, 可以对其进行大胆而合理的预测及估计, 虽然这样可能导致模型产生某些不确定性, 但比起在建模中忽略这些因素更接近现实情况. 为此, 本文对历史数据较为缺乏的参数, 采用灰色系统理论进行预测及估计.

当数据不完全或者数据变化的趋势不明显时, 仍然求其平均值会产生较大误差, 不符合数据的变化规律, 此时可以先利用缓冲算子进行处理, 挖掘出数据中有价值的隐含规律. 然后利用灰色预测理论对其进行循环预测, 得到仿真期内的预测值. 最后结合数据的现实变化趋势, 利用 VENSIM 软件中的表函数来动态的刻画变量间的非线性关系. 此方法可用于确定 GDP 增长率、机动车拥有量增长率、人口出生率和死亡率等. 本文以 GDP 增长率为例, 具体算法步骤见图 2, 详细计算过程见附录 A.

2.2.2 根据官网数据进行计算的变量

当数据的稳定性较强时,可以利用历史统计资料求算术平均值。可参考的资料如《中国机动车环境管理年报 2016-2018》、《中国机动车污染防治年报 2015》、《北京市统计年鉴 2005-2017》及《中国统计年鉴 2005-2017》等。该方法可确定的参数有:载客(货)汽车车均 CO/HC/NO_x/PM 排放量;载客(货)汽车 CO/HC/NO_x/PM 存量的初值;车均道路面积以及城市道路增长率均值等。载客(货)汽车车均 CO/HC/NO_x/PM 排放量及其初值的详细计算过程见附录 B。

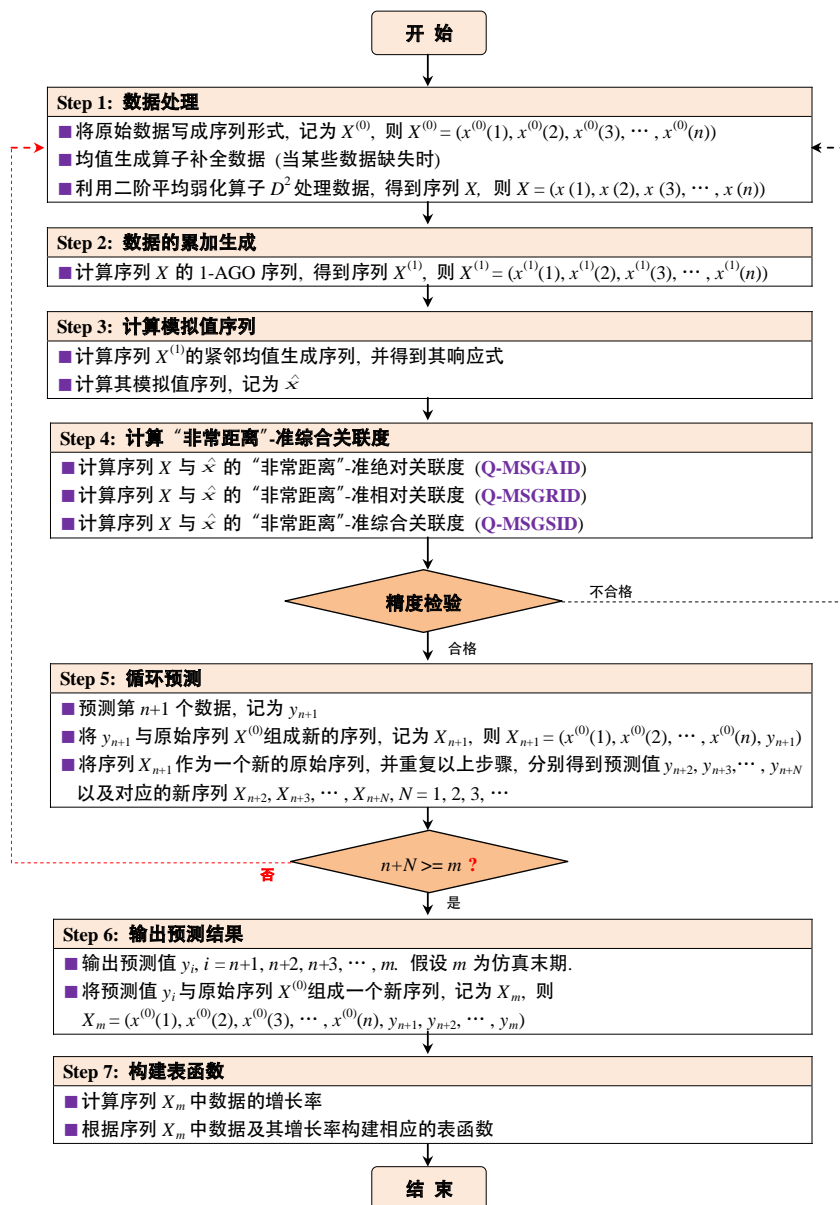


图2 基于SD-GM循环预测理论的表函数构建算法

用类似的方法, 可计算出城市道路增长率均值 (0.0297) 以及每年的车均道路面积, 进而确定道路生态承载力表函数:

道路生态承载力 = WITH LOOKUP (车均道路面积, $[(25, 0) - (130, 1)], (30, 0.05), (34.143, 0.1), (34.369, 0.12), (34.443, 0.13), (34.489, 0.14), (34.586, 0.15), (35.778, 0.2), (38.377, 0.25), (45.887, 0.35), (51.547, 0.45), (52.593, 0.5), (56.083, 0.6), (60, 0.65), (80, 0.8), (100, 0.9), (120, 0.95))$).

2.2.3 现有文献借鉴

模型中某些特殊的参数, 可以参考已有研究的数据 (如文献 [28], [21] 和 [14]). 例如: 机动车报废率, 机动车污染物消散率, 机动车出行比例, 城市吸引力, 净迁入率等, 具体结果见附录 C.

2.3 模型测试与检验

为了确保所构建的模型与现实相符, 分别进行了模型测试和检验, 以此来考察模型的可信度. 模型测试的主要目的是检测模型的结构行为是否符合现实, 主要方法包括极端条件测试, 现实性测试, 敏感性测试, 量纲一致性测试, 积分误差测试等, 本文以极端条件测试, 现实性测试, 敏感性测试为例.

在模型测试的基础上, 常选取城市道路面积, 人口, GDP, 载客 (货) 汽车保有量等具有代表性的变量进行历史数据检验, 以验证模型的有效性, 主要方法分为整体性检验和局部性检验两大类. 整体性检验方法包

括关联度合格检验, 图形对比法. 局部性检验方法包括残差合格检验, 相对误差检验, 均方差比合格检验以及小误差概率合格检验等, 本文采用关联度合格检验的方法.

2.3.1 极端条件测试

极端条件测试主要考察变量在受到极端策略及参数的影响时, 是否依然合理或有意义? 是否具有稳定性? 图 3 显示: 当机动车污染收费分别取 5 和 1000 两个极端值时, 机动车出行总量和机动车 CO 总量相应取最大值和最小值, 这些结果具有一定的合理性.

另外, 由图 3(a) 可知, 随着 APCF 的不断增加, 机动车出行量在不断地下降, 但曲线 2 和 3 之间的间隔较窄, 说明收费由 100 增加到 1000, 所产生的缓堵效果并不明显, 图 3(b) 的分析与之类似.

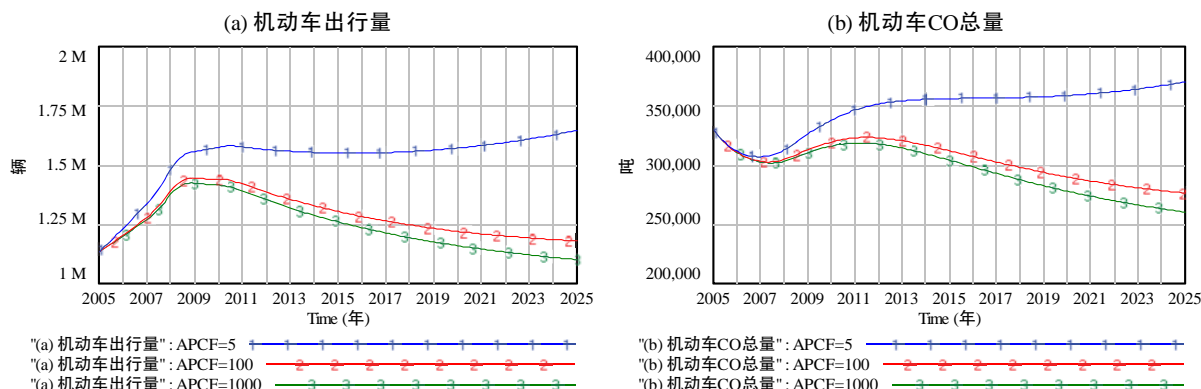


图 3 极端条件测试. (a) 机动车出行量; (b) 机动车 CO 总量

2.3.2 现实性测试

根据 2.2.1 节的分析, 为了寻找 APCF 的更合理范围, 本节对 $[0, 100]$ 这一范围进行了现实性测试. 分别取 100, 80, 60, 40, 20 和 10, 测试结果如图 4 所示. 以图 4(b) 为例, 随着 APCF 的增加, 曲线 1 至 6 的间隙逐渐缩小, 说明在收费增加幅度相同的情况下, 机动车 CO 总量的减排效果却在不断地被削弱. 特别地, 当 APCF 超过 60, 曲线几乎不变化, 故 APCF 的取值应不超过 60. 曲线 1 在 2017 年之后几乎不再下降, 而且大约 2022 年之后, 有“反弹”趋势, 因此, $[20, 60]$ 是收费的一个较为合理的范围.

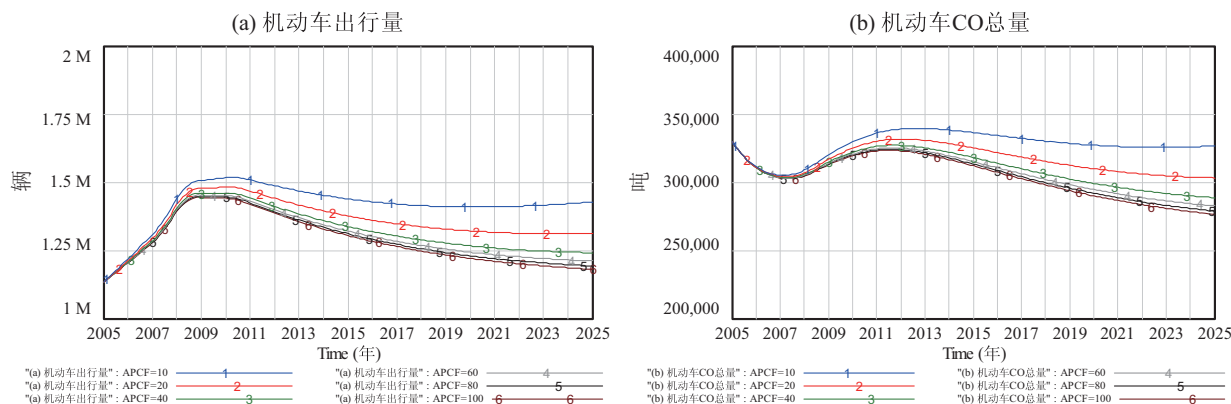


图 4 现实性测试. (a) 机动车出行量; (b) 机动车 CO 总量

2.3.3 敏感性测试

从减排的角度出发, 本文对机动车 CO 总量, 载客汽车 CO 存量, 载货汽车 CO 存量等关键变量进行了仿真, 如图 5 所示. 结果显示: 对于不同的 APCF 值, 曲线所呈现出的行为结构也略有不同, 但所有变量的变化均未出现过于敏感的地方.

2.3.4 模型检验

系统动力学模型主要是针对现实中实际问题而建立的, 最终的模型并不完美, 模拟出的结果也不一定是完全精确的. 因此, 必须检验仿真数据的发展趋势与实际发展的趋势是否吻合, 本文主要采用关联度合格检验. 因为它主要考虑两个序列间的紧密关联程度, 根据“关联度越大, 数据间的变化特征就越相似 (接近)”的

原则, 从整体上检验模拟值和实际值之间的误差, 因此是一种整体性检验方法, 能够克服局部性检验的一些缺陷.

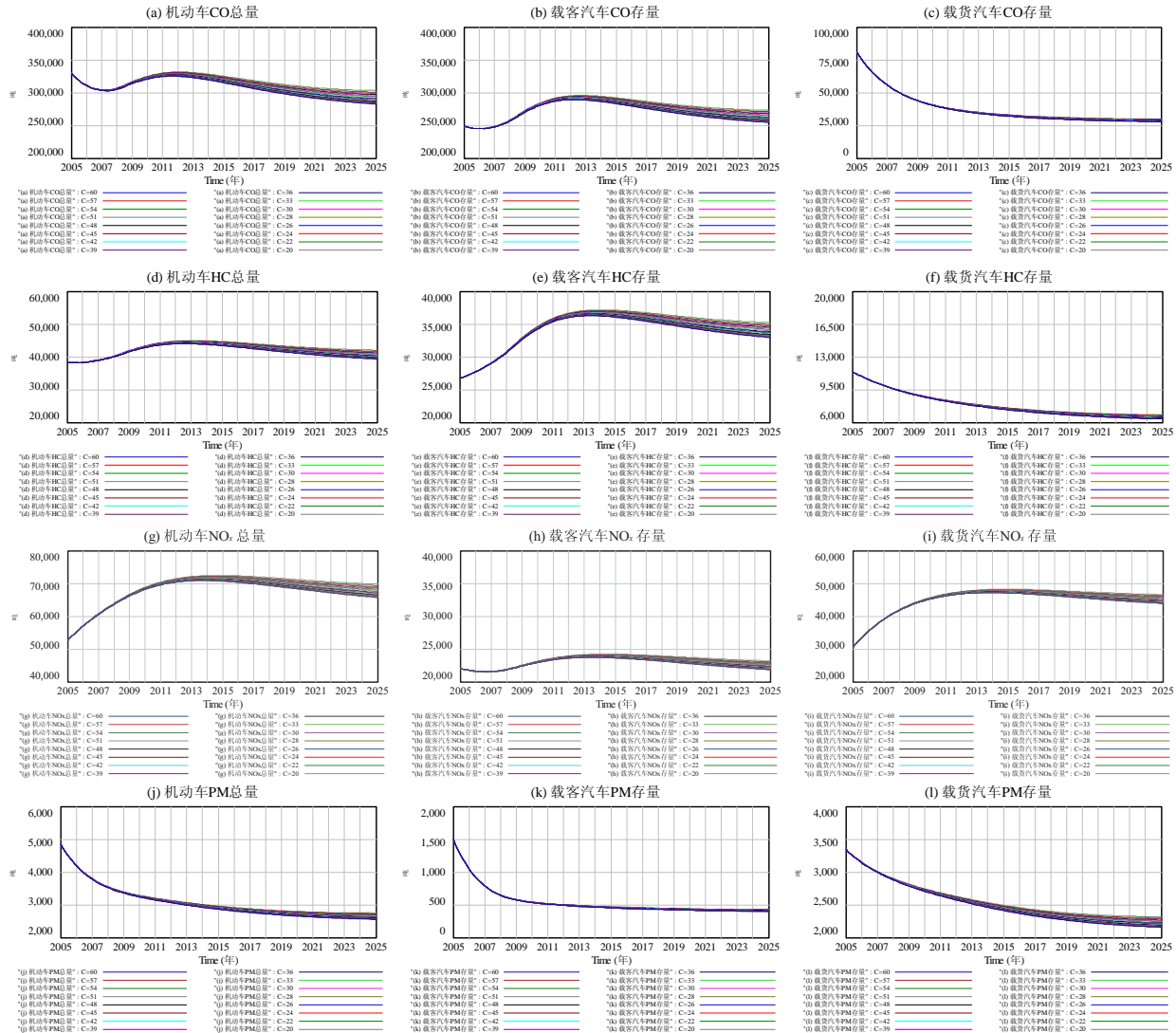


图 5 敏感性测试. (a) 机动车 CO 总量; (b) 载客汽车 CO 存量; (c) 载货汽车 CO 存量; (d) 机动车 HC 总量; (e) 载客汽车 HC 存量; (f) 载货汽车 HC 存量; (g) 机动车 NO_x 总量; (h) 载客汽车 NO_x 存量; (i) 载货汽车 NO_x 存量; (j) 机动车 PM 总量; (k) 载客汽车 PM 存量; (l) 载货汽车 PM 存量

定义 1^[29] 记序列 X'_i 与 X'_j 的始点零化像为 X_i^0 与 X_j^0 , 定义

$$\varepsilon_{ij}^{(\lambda,p)} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j| + \lambda \cdot d_{ij}^p} \quad (1)$$

和

$$r_{ij}^{(\lambda,p)} = \frac{1 + |s'_i| + |s'_j|}{1 + |s'_i| + |s'_j| + |s'_i - s'_j| + \lambda \cdot d_{ij}^p} \quad (2)$$

分别是序列 X_i 与 X_j 的灰色准绝对关联度和灰色准相对关联度, 其中 $\lambda \in [0, 1], p \in \mathbb{N}^+$, 称

$$\rho_{ij}^{(\lambda,p)} = \sigma_1^{(\lambda,p)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(\lambda,p)} + \sigma_2^{(\lambda,p)} \cdot r_{ij}^{(\lambda,p)} \quad (3)$$

为 X_i 与 X_j 的灰色准综合关联度, 其中:

$$\sigma_1^{(\lambda,p)} > 0, \sigma_2^{(\lambda,p)} > 0, \sigma_1^{(\lambda,p)} + \sigma_2^{(\lambda,p)} = 1. \quad (4)$$

特别地: 1) 当 $\lambda = 0$ 时, $\varepsilon_{ij}^{(0,p)}$, $r_{ij}^{(0,p)}$ 和 $\rho_{ij}^{(0,p)}$ 分别为序列 X_i 与 X_j 的绝对关联度, 相对关联度和综合关联度; 2) 当 $\lambda = 1, p = 1$ 时, $\varepsilon_{ij}^{(1,1)}$, $r_{ij}^{(1,1)}$ 和 $\rho_{ij}^{(1,1)}$ 分别为序列 X_i 与 X_j 的“非常距离”- 灰色准绝对关联度 (Q-MSG AID), 灰色准相对关联度 (Q-MSG RID) 和灰色准综合关联度 (Q-MSG SID), 其中:

$$\varepsilon_{ij}^{(1,1)} = \frac{1 + |\sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2}x_i^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} x_j^0(k) + \frac{1}{2}x_j^0(n)|}{1 + |\sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2}x_i^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} x_j^0(k) + \frac{1}{2}x_j^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} [x_i^0(k) - x_j^0(k)] + \frac{1}{2}[x_i^0(n) - x_j^0(n)]| + d_{ij}^1}, \quad (5)$$

$$r_{ij}^{(1,1)} = \frac{1 + |\sum_{k=2}^{n-1} x_i'^0(k) + \frac{1}{2}x_i'^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} x_j'^0(k) + \frac{1}{2}x_j'^0(n)|}{1 + |\sum_{k=2}^{n-1} x_i'^0(k) + \frac{1}{2}x_i'^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} x_j'^0(k) + \frac{1}{2}x_j'^0(n)| + |\sum_{k=2}^{n-1} [x_i'^0(k) - x_j'^0(k)] + \frac{1}{2}[x_i'^0(n) - x_j'^0(n)]| + d_{ij}^1}, \quad (6)$$

$$d_{ij}^1 = \sum_{k=1}^n |x_i(k) - x_j(k)|, d_{ij}'^1 = \sum_{k=1}^n |x_i'(k) - x_j'(k)|, \quad (7)$$

$$\rho_{ij}^{(1,1)} = \sigma_1^{(1,1)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(1,1)} + \sigma_2^{(1,1)} \cdot r_{ij}^{(1,1)}. \quad (8)$$

定义 2^[30] 设 X_i 为原始序列, X_j 为其模拟值序列, ρ 为 X_i 与 X_j 的灰色关联度, 若对于给定的 $\rho_0 > 0$, 有 $\rho > \rho_0$, 则称模型为关联度合格模型. 该模型对关联度 ρ 的要求则是越大越好, 精度等级见表 1.

表 1 精度检验等级参照表

精度等级	一级	二级	三级	四级
“非常距离”- 灰色准综合关联度	0.90	0.80	0.70	0.60

本节以城市道路面积为例, 采用综合关联度来检验模型的稳定性. 北京市城市道路面积 (2005–2016) 的真实值和模拟值序列分别记为 X_i 和 X_j , 则

$$\begin{aligned} X_i &= (74430000, 72580000, 76320000, 89410000, 91790000, \\ &93950000, 91640000, 92360000, 96110000, 100020000, 100290000, 102750000), \\ X_j &= (74430000, 76669500, 78976400, 81352700, 83800500, \\ &86322000, 88919300, 91594800, 94356700, 97189600, 100114000, 103126000). \end{aligned}$$

因此

$$\varepsilon_{ij}^{(0,p)} = \frac{1 + 174330000 + 149343500}{1 + 174330000 + 149343500 + 24986500} \approx 0.9283, r_{ij}^{(0,p)} = \frac{1 + 2.34215 + 2.00655}{1 + 2.34215 + 2.00655 + 0.33559} \approx 0.9410.$$

故, $\exists \rho_0 = 0.9$, 当 $\sigma_1^{(0,p)} = 0.5 = \sigma_1^{(0,p)}$ 时, 有 $\rho_{ij}^{(0,p)} = \sigma_1^{(0,p)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(0,p)} + \sigma_2^{(0,p)} \cdot r_{ij}^{(0,p)} = 0.9347 > 0.9 = \rho_0$.

根据定义 1 和定义 2 可知: 精度等级为一级.

3 政策效应分析

本节将收费划分为低中高三种类型 (APCF 分别以 5, 50 和 100 为例), 通过仿真分析来揭示低收费, 中等收费和高收费方案所产生的一系列政策效应.

3.1 低收费政策的双拐点效应

本文探究了低收费政策对机动车 CO 和 HC 总量的影响, 仿真结果见图 6 和表 2. 由表 2 可知: 机动车 CO 总量的增长率在 2007–2009 年呈上升趋势, 2010–2017 年则表现为下降态势, 2017 年之后又呈现上升趋势. 对应于图 6(a), 曲线在 2009 年之前是增长率不断增加的快速增长, 2009 至 2017 年间, 呈现增长率不断减小的缓慢增长, 从 2018 年起, 又呈现出增长率不断增加的快速增长态势, 因此 2009 和 2017 是两个拐点, 分别记为 P_1 和 P_2 . 同理, 图 6(b) 也存在两个拐点, 分别记为 P_3 和 P_4 .

对于机动车 CO 总量的减排: 起初作用效果不明显 (2007–2009 年), 机动车 CO 总量仍保持快速增长; 随着政策的不断实施 (2010–2017 年), 曲线开始缓慢增长, 说明短期内, 低收费政策虽然抑制了机动车 CO 总量的快速增长, 但总体作用效果十分有限; 从长期来看 (2018–2025), 曲线又恢复了快速增长, 因此从长期作用效果来看, 低收费政策将逐渐失去作用, 导致机动车 CO 总量又开始快速增长. 同样的方法, 可以分析拐点 P_3 和 P_4 (见图 6(b)).

总之, 收费政策对机动车 CO 和 HC 总量的减排具有“双拐点效应”, 第一个拐点 (P_1 和 P_3) 揭示了低收费政策作用效果十分有限, 而且具有时间延迟. 第二个拐点 (P_2 和 P_4) 说明: 从长期来看, 低收费方案不但不能实现减排的目的, 而且作用效果会发生“反弹”.

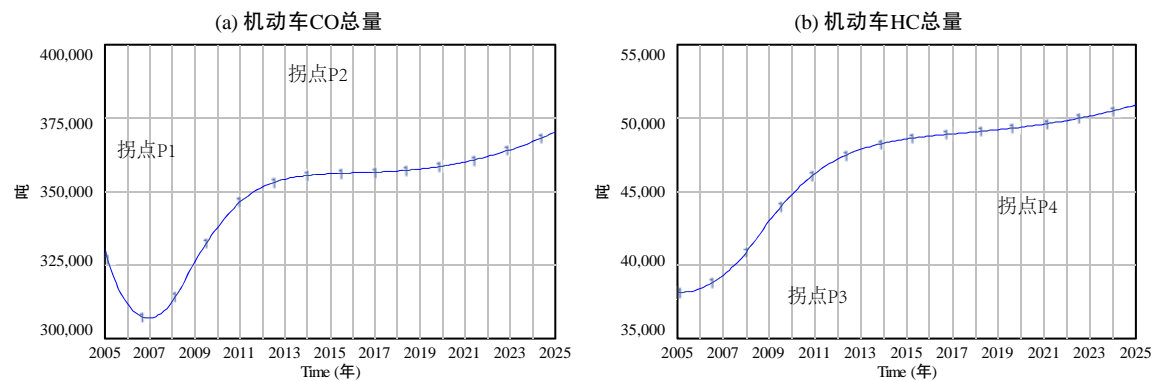


图 6 低收费政策的双拐点效应. (a) 机动车 CO 总量; (b) 机动车 HC 总量

表 2 低收费政策对机动车污染物排放总量的影响				
时间	机动车 CO 总量 (t)	变化率 (%)	机动车 HC 总量 (t)	变化率 (%)
2005	330028	—	38172.8	—
2006	311713	—	38402.7	0.60
2007	307022	-1.50	39318.7	2.39
2008	312671	1.84	40866.7	3.94
2009	326147	4.31	42981.1	5.17
2010	337760	3.56	44802.9	4.24
2011	346447	2.57	46237.5	3.20
2012	351551	1.47	47222.5	2.13
2013	354210	0.76	47869.6	1.37
2014	355510	0.37	48296.4	0.89
2015	356093	0.16	48580.8	0.59
2016	356371	0.08	48779	0.41
2017	356618	0.07	48932	0.31
2018	357015	0.11	49070.4	0.28
2019	357681	0.19	49216.2	0.30
2020	358695	0.28	49385.8	0.34
2021	360108	0.39	49591.3	0.42
2022	361955	0.51	49841.4	0.50
2023	364256	0.64	50142.4	0.60
2024	367027	0.76	50499.2	0.71
2025	370264	0.88	50913.7	0.82

3.2 中 - 高收费政策间的边际递减效应

由图 7(a) 可知: 曲线 1 仍在不断地增长, 而曲线 2 和 3 有了显著的下降; 图 7(b) 显示: 随着 APCF 的增加, 曲线 2 和 3 有了明显的提升, 道路生态承载力得到了显著的提高. 这些结果说明中 - 高方案能够实现减排 (图 7(a)) 和缓堵 (图 7(b)) 两大目标. 但曲线 2 和 3 之间的距离十分狭窄, 因此, 中等收费和高收费之间又存在边际递减效应.

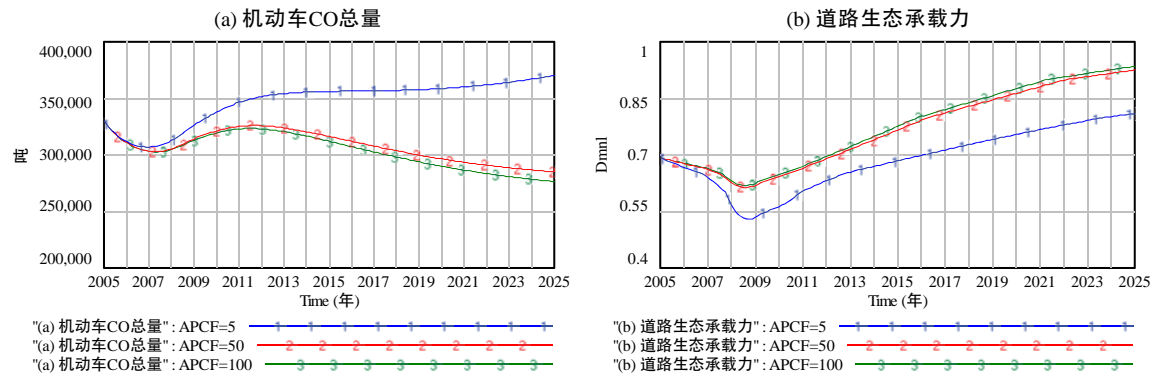


图 7 中 - 高收费政策间的边际递减效应. (a) 机动车 CO 总量; (b) 道路生态承载力

3.3 缓堵和减排效应

由 3.2 节的分析可知并非收费越高越好, 因此本节以 60 元/天 * 辆为例进行仿真, 结果如图 8 所示. 另外, 我们更关注政策的长期作用效果, 因此, 以下分析将重点考虑中长期的情况.

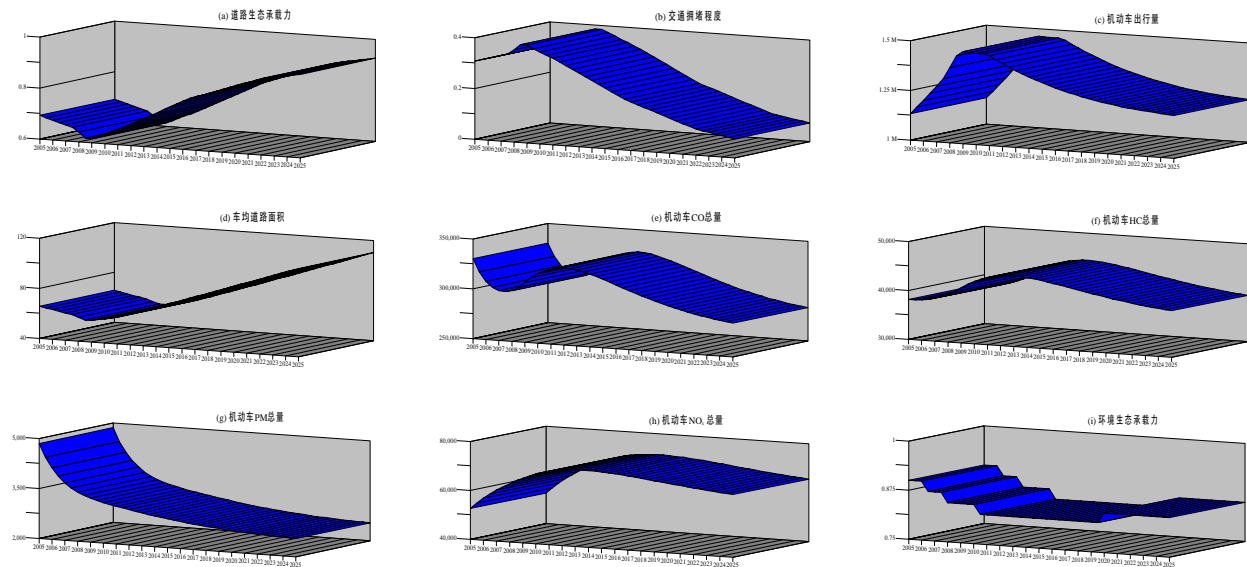


图 8 缓堵和减排效应分析. (a) 道路生态承载力; (b) 交通拥堵程度; (c) 机动车出行量; (d) 车均道路面积; (e) 机动车 CO 总量; (f) 机动车 HC 总量; (g) 机动车 PM 总量; (h) 机动车 NO_x 总量; (i) 环境生态承载力

在缓解交通拥堵方面: 图 8(a) 和 8(b) 有了显著提升, 即: 车均道路面积的改善, 促使了道路生态承载力的提高, 进而能够有效地减少机动车出行量 (8(c)), 并最终降低交通拥堵程度 (8(b)).

在机动车污染物减排方面: 一方面, 中等收费方案能够显著地降低机动车污染物排放总量, 特别是 CO 总量 (8(e)), HC 总量 (8(f)), PM 总量 (8(g)) 和 NO_x 总量 (8(h)). 另一方面, 从中长期作用效果来看, 环境生态承载力 (8(i)) 不但不再降低, 而且在仿真中后期有了明显的提升.

4 结论

为了降低城市“雾霾”污染程度和交通拥堵程度, 本文采用 SD-GD 循环预测理论构建了一种机动车污染物减排管理模型. 通过对关键变量的动态仿真分析, 得到了以下结论: 1) 低 -APCF 政策具有“双拐点效应”, 随着政策的不断实施, 其作用效果将逐渐被削弱. 2) 并非收费越高越好, 中方案和高方案间存在“边际递减效应”, 因此, APCF 的额度应遵循“适度原则”. 3) 从政策的长期作用效果来考虑, 中 -APCF 政策 (以 60 元/天 * 辆为例) 不但能够有效地提升道路生态承载力, 车均道路面积和环境生态承载力, 而且在一定程度上降低了机动车出行量和机动车 CO/HC/NO_x/PM 总量, 进而实现了减排和缓堵的“双赢”.

但因数据有限, 本文所建立的模型仍存在一定的局限. 例如, 利用仿真模拟和变量的灵敏性分析, 以北京市为例, 只是讨论了缓解拥堵和机动车尾气减排的政策效应, 探索了收费的大致范围. 对政策的具体实施细节并没有进行更多的研究, 因此未来研究及改进的地方包括以下几方面: 加大调研力度与广度, 构建民众对收费政策的认知程度及真实需求的大数据信息, 并适当引入其它政策 (如补贴和共享机制), 进而制定出更符合实际、更令人满意的政策方案.

参考文献

- [1] Wu X H, Chen Y F, Guo J, et al. Inputs optimization to reduce the undesirable outputs by environmental hazards: A DEA model with data of PM_{2.5} in China[J]. Natural Hazards, 2018, 90(1): 1–25.
- [2] Wu X H, Chen Y F, Guo J, et al. Spatial concentration, impact factors and prevention-control measures of PM_{2.5} pollution in China[J]. Natural Hazards, 2016, 86(1): 1–18.

- [3] Xiao Y Y, Murray J, Lenzen M. International trade linked with disease burden from airborne particulate pollution[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2018, 129: 1–11.
- [4] Madaniyazi L, Nagashima T, Guo Y, et al. Projecting fine particulate matter-related mortality in east China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11141–11150.
- [5] Apte J S, Marshall J D, Cohen A J, et al. Addressing global mortality from ambient PM_{2.5}[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(13): 8057–8066.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报 [R]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201706/t20170603_415265.htm, 2017.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 中国机动车环境管理年报 [R]. http://www.mep.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201806/t20180601_442293.htm, 2018.
- [8] Wu X M, Wu Y, Zhang S J, et al. Assessment of vehicle emission programs in China during 1998–2013: Achievement, challenges and implications[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 556–567.
- [9] Wu Y, Zhang S J, Hao J M, et al. On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 332–349.
- [10] Wu X M, Zhang S J, Wu Y, et al. Real-world emissions and fuel consumption of diesel buses and trucks in Macao: From on-road measurement to policy implications[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 120: 393–403.
- [11] Jia S W, Yan G L, Shen A Z. Traffic and emissions impact of the combination scenarios of air pollution charging fee and subsidy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 678–689.
- [12] Yang X, Teng F. The air quality co-benefit of coal control strategy in China[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2016, 129: 373–382.
- [13] Liu Y X, Hong Z S, Liu Y. Do driving restriction policies effectively motivate commuters to use public transportation?[J]. *Energy Policy*, 2016, 90: 253–261.
- [14] 杨浩雄, 李金丹, 张浩, 等. 基于系统动力学的城市交通拥堵治理问题研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(8): 2135–2143.
- Yang H X, Li J D, Zhang H, et al. Research on the governance of urban traffic jam based on system dynamics[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(8): 2135–2143.
- [15] Shi H X, Wang S Y, Zhao D T. Exploring urban resident's vehicular PM_{2.5} reduction behavior intention: An application of the extended theory of planned behavior[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 603–613.
- [16] Sun C W, Yuan X, Yao X. Social acceptance towards the air pollution in China: Evidence from public's willingness to pay for smog mitigation[J]. *Energy Policy*, 2016, 92: 313–324.
- [17] Wu K H, Chen Y Y, Ma J M, et al. Traffic and emissions impact of congestion charging in the central Beijing urban area: A simulation analysis[J]. *Transportation Research Part D*, 2017, 51: 203–215.
- [18] Jia S W, Yan G L, Shen A Z, et al. A system dynamics model for determining the traffic congestion charges and subsidies[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42(12): 5291–5304.
- [19] Qiu Z W, Xu X Q, Song J H, et al. Pedestrian exposure to traffic PM on different types of urban roads: A case study of Xi'an, China[J]. *Sustainable Cities & Society*, 2017, 32: 475–485.
- [20] Jia S W. A dynamic analysis of a motor vehicle pollutant emission reduction management model based on the SD-GM approach[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Volume 2018, Article ID 2512350, 18 pages.
- [21] Jia S W, Yang K, Zhao J J, et al. The traffic-congestion charging fee management model based on the system dynamics approach[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2017, Article ID 3024898, 13pages.
- [22] Yuan H P, Wang J Y. A system dynamics model for determining the waste disposal charging fee in construction[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(3): 988–996.
- [23] 郭玲玲, 武春友, 于惊涛, 等. 中国绿色增长模式的动态仿真分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(8): 2119–2130.
- Guo L L, Wu C Y, Yu J T, et al. Dynamic simulation analysis of green growth model in China[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2017, 37(8): 2119–2130.
- [24] Guo L L, Qu Y, Wu C Y, et al. Identifying a pathway towards green growth of Chinese industrial regions based on a system dynamics approach[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 128: 143–154.
- [25] 钟永光, 钱颖, 尹凤福, 等. 激励居民参与环保化回收废弃家电及电子产品的系统动力学模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4): 709–722.
- Zhong Y G, Qian Y, Yin F M, et al. Stimulating residents to recycle waste electrical and electronic equipments: A system dynamics model[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2010, 30(4): 709–722.
- [26] 余福茂, 钟永光, 沈祖志. 考虑政府引导激励的电子废弃物回收处理决策模型研究 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(5): 131–137.
- Yu F M, Zhong Y G, Shen Z Z. Decision model on E-waste collecting and recycling considering the leading of government's premium mechanisms[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(5): 131–137.
- [27] Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 44–52.

- [28] 朱明皓. 城市交通拥堵的社会经济影响分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
Zhu M H. Research on socio-economic impact of urban traffic congestion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [29] 贾书伟, 严广乐. 基于灵敏性分析的 Q-MSGSID 的优化及应用 [J]. 运筹与管理, 2017, 26(4): 105–111.
Jia S W, Yan G L. Optimization of Q-MSGSID based on sensitivity analysis and its application[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(4): 105–111.
- [30] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Liu S F, Yang Y J, Wu L F. Grey system theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2014.

附录 A: 基于 SD-GM 循环预测理论的表函数构建算法

Step 1 数据处理

首先, 将原始数据写成序列形式

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(13)) = (714140000000, 831260000000, 1007190000000, 1139200000000, 1241900000000, 1444160000000, 1662790000000, 1835010000000, 2033010000000, 2194410000000, 2368570000000, 2566910000000, 2800400000000).$$

其次, 引入二阶平均弱化算子 D^2 , 令 $X^{(0)}D^2 = (x^{(0)}(1)d^2, x^{(0)}(2)d^2, \dots, x^{(0)}(13)d^2)$, 得到以下序列

$$X^{(0)}D^2 = \begin{bmatrix} 2214591840650.80 \\ 2259147891474.27 \\ 2304488533123.44 \\ 2350450568253.97 \\ 2397318853615.52 \\ 2444939821428.57 \\ 2492337295918.37 \\ 2539605416666.67 \\ 2587582833333.34 \\ 2636313541666.67 \\ 2687560555555.56 \\ 2742027500000.00 \\ 2800400000000.00 \end{bmatrix} \doteq X = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(13) \end{bmatrix}.$$

Step 2 计算序列 X 的累加生成序列 (1-AGO) 及 1-AGO 生成序列的紧邻均值生成序列, 分别记为 $X^{(1)}$ 和 $X'^{(1)}$, 则

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(13) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2214591840650.800 \\ 4473739732125.070 \\ 6778228265248.510 \\ 9128678833502.480 \\ 11525997687118.00 \\ 13970937508546.60 \\ 16463274804464.90 \\ 19002880221131.60 \\ 21590463054464.90 \\ 24226776596131.60 \\ 26914337151687.20 \\ 29656364651687.20 \\ 32456764651687.20 \end{bmatrix}, \quad X'^{(1)} = \begin{bmatrix} x'(1) \\ x'(2) \\ x'(3) \\ \vdots \\ x'(12) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3344165786387.940 \\ 5625983998686.790 \\ 7953453549375.500 \\ 10327338260310.20 \\ 12748467597832.30 \\ 15217106156505.80 \\ 17733077512798.30 \\ 20296671637798.30 \\ 22908619825298.30 \\ 25570556873909.40 \\ 28285350901687.20 \\ 31056564651687.20 \end{bmatrix}.$$

Step 3 计算模拟值序列

运用灰色 GM 预测理论得到其响应式为

$$\begin{cases} \hat{x}^{(1)}(k+1) = 11381882591840650.8e^{0.0193k} - 11379668000000000, \\ \hat{Y}(k+1) = \hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, 13. \end{cases}$$

因此, 模拟值序列为

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}(1) \\ \hat{x}(2) \\ \hat{x}(3) \\ \vdots \\ \hat{x}(13) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2214591840650.80 \\ 2260868655108.29 \\ 2304999006986.49 \\ 2349990748115.46 \\ 2395860692125.94 \\ 2442625980837.33 \\ 2490304090663.67 \\ 2538912839144.66 \\ 2588470391604.15 \\ 2638995267938.61 \\ 2690506349538.11 \\ 2743022886342.40 \\ 2796564504034.67 \end{bmatrix}.$$

Step 4 计算“非常距离”-准综合关联度

根据定义 1 可计算序列 X 与其模拟值序列 \hat{X} 的“非常距离”-准绝对关联度和“非常距离”-准相对关联度分别为

$$\varepsilon_{Q-MSG\text{AID}}^{(1,1)} = \frac{1 + 3374166643552.18 + 3375032992938.25}{1 + 3374166643552.18 + 3375032992938.25 + 866349386.064941 + 20534803326.1403} \approx 0.9968,$$

$$r_{Q-MSG\text{RID}}^{(1,1)} = \frac{1 + 1.52355 + 1.5239}{1 + 1.52355 + 1.5239 + 0.00035 + 0.0091} \approx 0.9977.$$

因此, “非常距离”-准综合关联度为 $\rho_{Q-MSG\text{SID}}^{(1,1)} = \sigma_1^{(1,1)} \cdot \varepsilon_{Q-MSG\text{AID}}^{(1,1)} + \sigma_2^{(1,1)} \cdot r_{Q-MSG\text{RID}}^{(1,1)} = 0.9973$.

根据定义 2 和表 1 可知, 精度等级为一级.

Step 5 循环预测

根据 Step 3 可预测下一个数据 $y_{14} = 2851151211375.81$, 将 y_{14} 与原始序列 $X^{(0)}$ 组成一个新序列, 记为 X_{14} , 则 $X_{14} = (714140000000, 831260000000, 1007190000000, 1139200000000, 1241900000000, 1444160000000, 1662790000000, 1835010000000, 2033010000000, 2194410000000, 2368570000000, 2566910000000, 2800400000000, 2851151211375.81)$.

重复 Step 1 至 Step 4, 可得到 $y_{15} = 2933131718705.61$.

按照类似的方法进行循环预测, 得到 $y_{16}, y_{17}, \dots, y_{21}$ 的值分别为 3011710516824.52, 3085332609222.32, 3154267640378.09, 3219038074722.34, 3280156632841.24, 3338074648980.17.

Step 6 输出预测结果

根据以上步骤得到的预测值 $y_i, i = 14, 15, 16, \dots, 21$. 将 y_i 与原始序列 $X^{(0)}$ 组成一个新序列, 记为 X_{21} , 则 $X_{21} = (714140000000, 831260000000, 1007190000000, 1139200000000, 1241900000000, 1444160000000, 1662790000000, 1835010000000, 2033010000000, 2194410000000, 2368570000000, 2566910000000, 2800400000000, 2851151211375.81, 2933131718705.61, 3011710516824.52, 3085332609222.32, 3154267640378.09, 3219038074722.34, 3280156632841.24, 3338074648980.17)$.

Step 7 构建表函数

由以上步骤可以得到北京市 GDP 总量及其增长率 (2005–2025), 具体结果见表 A1 所示.

因此, 可得到 GDP 增长率的表函数为:

GDP 增长率表函数 = WITH LOOKUP(城市 GDP 总量, $[(6 \times 10^{11}, 0) - (3.6 \times 10^{12}, 0.25)], (7.1414 \times 10^{11}, 0.1584), (8.3126 \times 10^{11}, 0.164), (1.00719 \times 10^{12}, 0.21164), (1.1392 \times 10^{12}, 0.13107), (1.2419 \times 10^{12}, 0.09015), (1.44416 \times 10^{12}, 0.16286), (1.66279 \times 10^{12}, 0.15139), (1.83501 \times 10^{12}, 0.10357), (2.03301 \times 10^{12}, 0.1079), (2.19441 \times 10^{12}, 0.07939), (2.36857 \times 10^{12}, 0.07937), (2.56691 \times 10^{12}, 0.08374), (2.8004 \times 10^{12}, 0.09096), (2.85115 \times 10^{12}, 0.01812), (2.93313 \times 10^{12}, 0.02875), (3.01171 \times 10^{12}, 0.02679), (3.08533 \times 10^{12}, 0.02445), (3.15427 \times 10^{12}, 0.02234), (3.21904 \times 10^{12}, 0.02053), (3.28016 \times 10^{12}, 0.01899), (3.33807 \times 10^{12}, 0.01766))$).

表 A1 北京市 GDP 总量及其增长率

时间	GDP 总量	增长率	时间	GDP 总量	增长率	时间	GDP 总量	增长率
2005	7.14410×10^{11}	0.15840	2012	1.83501×10^{12}	0.10357	2019	2.93313×10^{12}	0.02875
2006	8.31260×10^{11}	0.16400	2013	2.03301×10^{12}	0.10790	2020	3.01171×10^{12}	0.02679
2007	1.00719×10^{12}	0.21164	2014	2.19441×10^{12}	0.07939	2021	3.08533×10^{12}	0.02445
2008	1.13920×10^{12}	0.13107	2015	2.36857×10^{12}	0.07937	2022	3.15427×10^{12}	0.02234
2009	1.24190×10^{12}	0.09015	2016	2.56691×10^{12}	0.08374	2023	3.21904×10^{12}	0.02053
2010	1.44416×10^{12}	0.16286	2017	2.80040×10^{12}	0.09096	2024	3.28016×10^{12}	0.01899
2011	1.66279×10^{12}	0.15139	2018	2.85115×10^{12}	0.01812	2025	3.33807×10^{12}	0.01766

类似的方法,可以得到人口出生率和死亡率预测值,见表 A2,根据近几年的人口政策,可取预测值的平均值作为参考值,因此,人口出生率均值 $_{2018-2025}=9.2725\%$,人口死亡率均值 $_{2018-2025}=5.5463\%$.

表 A2 北京市人口出生率和死亡率

出生率及其预测值 (‰)						死亡率及其预测值 (‰)					
时间	出生率	时间	出生率	时间	出生率	时间	死亡率	时间	死亡率	时间	死亡率
2005	6.29	2012	9.05	2019	9.17	2005	5.20	2012	4.31	2019	5.41
2006	6.22	2013	8.93	2020	9.21	2006	4.94	2013	4.52	2020	5.47
2007	8.16	2014	9.75	2021	9.25	2007	4.83	2014	4.92	2021	5.53
2008	7.89	2015	7.96	2022	9.31	2008	4.59	2015	4.95	2022	5.58
2009	7.66	2016	9.32	2023	9.34	2009	4.33	2016	5.20	2023	5.63
2010	7.27	2017	9.06	2024	9.37	2010	4.29	2017	5.30	2024	5.68
2011	8.29	2018	9.13	2025	9.40	2011	4.27	2018	5.35	1025	5.72

附录 B: 载客 (货) 汽车车均年 CO/HC/NO_x/PM 排放量的确定方法

根据《中国机动车环境管理年报 2016–2018》、《中国机动车污染防治年报 2015》、《北京市统计年鉴 2005–2017》及《中国统计年鉴 2005–2017》,可知近几年载客 (货) 汽车年 CO/HC/NO_x/PM 排放总量,见表 B1 和 B2 所示,结合相应的机动车保有量,能够计算出载客 (货) 汽车车均年 CO/HC/NO_x/PM 排放量,见表 B1 和 B2 加粗部分数据.因此,载客汽车和载货汽车车均年 CO, HC, NO_x 和 PM 排放量均值分别为 0.1323, 0.0142, 0.0117, 0.0008, 0.4571, 0.0646, 0.1726, 0.0189.

表 B1 载客汽车 CO/HC/NO_x/PM 总排放量及车均年污染物排放量

时间	2014	2015	2016	2017
载客汽车 CO 总排放量 (万吨)	1927.5	1998.0	2012.0	1985.7
载客汽车 HC 总排放量 (万吨)	207.6	214.8	215.8	211.5
载客汽车 NO _x 总排放量 (万吨)	184.1	171.4	168.9	168.9
载客汽车 PM 总排放量 (万吨)	11.8	11.7	11.2	10.8
载客汽车车均年 CO 排放量 (吨/辆 * 年)	0.1564	0.1417	0.1234	0.1075
载客汽车车均年 HC 排放量 (吨/辆 * 年)	0.0168	0.0152	0.0132	0.0114
载客汽车车均年 NO _x 排放量 (吨/辆 * 年)	0.0149	0.0122	0.0104	0.0091
载客汽车车均年 PM 排放量 (吨/辆 * 年)	0.00096	0.0008	0.0007	0.0006

表 B2 载货汽车 CO/HC/NO_x/PM 总排放量及车均年污染物排放量

时间	2014	2015	2016	2017
载货汽车 CO 总排放量 (万吨)	1015.2	1011.1	986.5	934.5
载货汽车 HC 总排放量 (万吨)	144.2	143.6	139.2	130.7
载货汽车 NO _x 总排放量 (万吨)	394.8	367.7	365.7	363.9
载货汽车 PM 总排放量 (万吨)	43.2	41.9	40.0	38.0
载货汽车车均年 CO 排放量 (吨/辆 * 年)	0.4776	0.4881	0.4634	0.3992
载货汽车车均年 HC 排放量 (吨/辆 * 年)	0.0678	0.0693	0.0654	0.0558
载货汽车车均年 NO _x 排放量 (吨/辆 * 年)	0.1857	0.1775	0.1718	0.1554
载货汽车车均年 PM 排放量 (吨/辆 * 年)	0.0203	0.0202	0.0188	0.0162

附录 C: 主要变量和方程

- 1) GDP 增长率表函数 = *WITH LOOKUP*(城市 GDP 总量, $[(6 \times 10^{11}, 0) - (3.6 \times 10^{12}, 0.25)]$, $(7.1414 \times 10^{11}, 0.1584)$, $(8.3126 \times 10^{11}, 0.164)$, $(1.00719 \times 10^{12}, 0.21164)$, $(1.1392 \times 10^{12}, 0.13107)$, $(1.2419 \times 10^{12}, 0.09015)$, $(1.44416 \times 10^{12}, 0.16286)$, $(1.66279 \times 10^{12}, 0.15139)$, $(1.83501 \times 10^{12}, 0.10357)$, $(2.03301 \times 10^{12}, 0.1079)$, $(2.19441 \times 10^{12}, 0.07939)$, $(2.36857 \times 10^{12}, 0.07937)$, $(2.56691 \times 10^{12}, 0.08374)$, $(2.8004 \times 10^{12}, 0.09096)$, $(2.85115 \times 10^{12}, 0.01812)$, $(2.93313 \times 10^{12}, 0.02875)$, $(3.01171 \times 10^{12}, 0.02679)$, $(3.08533 \times 10^{12}, 0.02445)$, $(3.15427 \times 10^{12}, 0.02234)$, $(3.21904 \times 10^{12}, 0.02053)$, $(3.28016 \times 10^{12}, 0.01899)$, $(3.33807 \times 10^{12}, 0.01766)$)).
- 2) 城市 GDP 总量 = *INTEG* (GDP 增长量, 7.1414×10^{11}), Unit: 元.
- 3) 城市人口总量 = *INTEG* (人口增量 + 净迁入量 - 人口减量, 1.538×10^7), Unit: 人.
- 4) 出生率预测值 = 0.0092725, Unit: 1/年.
- 5) 死亡率预测值 = 0.0055463, Unit: 1/年.
- 6) 净迁入率均值 = 0.0058474, Unit: 1/年.
- 7) 政策影响因子 = 2.5.
- 8) 城市道路面积 = *INTEG*(道路增长量, 7.443×10^7), Unit: m^2 .
- 9) 城市道路增长率均值 = 0.0297, Unit: 1/年.
- 10) 道路生态承载力 = *WITH LOOKUP*(车均道路面积, $[(25, 0) - (130, 1)]$, $(30, 0.05)$, $(34.143, 0.1)$, $(34.369, 0.12)$, $(34.443, 0.13)$, $(34.489, 0.14)$, $(34.586, 0.15)$, $(35.778, 0.2)$, $(38.377, 0.25)$, $(45.887, 0.35)$, $(51.547, 0.45)$, $(52.593, 0.5)$, $(56.083, 0.6)$, $(60, 0.65)$, $(80, 0.8)$, $(100, 0.9)$, $(120, 0.95)$)).
- 11) 污染治理力度 = *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.2 , 1, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.25 , 0.85, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.3 , 0.8, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.35 , 0.75, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.4 , 0.7, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.45 , 0.65, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.55 , 0.6, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.7 , 0.5, *IF THEN ELSE* (环境生态承载力 ≥ 0.8 , 0.4, 0.3)))))))).
- 12) 环境生态承载力 = 1 - 空气污染程度.
- 13) 空气污染程度 = 机动车 CO 污染权重 * 机动车 CO 污染程度 + 机动车 HC 污染权重 * 机动车 HC 污染程度 + 机动车 NO_x 污染权重 * 机动车 NO_x 污染程度 + 机动车 PM 污染权重 * 机动车 PM 污染程度.
- 14) 载客汽车拥有量增长率 = *WITH LOOKUP* (人均 GDP, $[(50000, 0) - (120000, 0.3)]$, $(51722, 0.1556)$, $(60096, 0.1563)$, $(64491, 0.1566)$, $(66940, 0.1869)$, $(73856, 0.2325)$, $(81658, 0.0435)$, $(87475, 0.0466)$, $(94648, 0.0456)$, $(99995, 0.0222)$, $(106497, 0.0024)$)).
- 15) 载货汽车拥有量增长率 = *WITH LOOKUP* (人均 GDP, $[(50000, -0.1) - (120000, 0.2)]$, $(51722, 0)$, $(60096, -0.0056)$, $(64491, 0.0284)$, $(66940, 0.011)$, $(73856, 0.0601)$, $(81658, 0.1082)$, $(87475, 0.1023)$, $(94648, 0.0844)$, $(99995, 0.1245)$, $(106497, 0.0588)$)).
- 16) 载客汽车 = *INTEG* (载客汽车增长量 - 载客汽车年报废量, 1883000), Unit: 辆.
- 17) 载客汽车报废率 = 0.067, Unit: 1/年.
- 18) 载货汽车 = *INTEG* (载货汽车增长量 - 载货汽车报废量, 177000), Unit: 辆.
- 19) 载货汽车报废率 = 0.067, Unit: 1/年.
- 20) 载客汽车 CO 存量 = *INTEG* (载客汽车 CO 排放量 - 载客汽车 CO 消散量, 249120.9), Unit: 吨.
- 21) 载客汽车车均年 CO 排放量 = 0.1323, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 22) 载客汽车对 CO 污染的贡献率 = 0.6673.
- 23) 载客汽车 CO 排放量 = 载客汽车车均年 CO 排放量 * 载客汽车出行量 * 载客汽车对 CO 污染的贡献率, Unit: 吨/年.
- 24) 载客汽车 CO 消散量 = 载客汽车 CO 存量 * 载客汽车 CO 消散和治理率, Unit: 吨/年.
- 25) 载货汽车 CO 存量 = *INTEG* (载货汽车 CO 排放量 - 载货汽车 CO 消散量, 80906.7), Unit: 吨.
- 26) 载货汽车车均年 CO 排放量 = 0.4571, Unit: 吨/(辆 * 年).

- 27) 载货汽车对 CO 污染的贡献率 = 0.3327.
- 28) 载客汽车 HC 存量 = INTEG (载客汽车 HC 排放量 - 载客汽车 HC 消散量, 26738.6), Unit: 吨.
- 29) 载客汽车车均年 HC 排放量 = 0.0142, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 30) 载客汽车对 HC 污染的贡献率 = 0.5995.
- 31) 载货汽车 HC 存量 = INTEG (载货汽车 HC 排放量 - 载货汽车 HC 消散量, 11434.2), Unit: 吨.
- 32) 载货汽车车均年 HC 排放量 = 0.0646, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 33) 载货汽车对 HC 污染的贡献率 = 0.4005.
- 34) 载客汽车 NO_x 存量 = INTEG (载客汽车 NO_x 排放量 - 载客汽车 NO_x 消散量, 22031.1), Unit: 吨.
- 35) 载客汽车车均年 NO_x 排放量 = 0.0117, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 36) 载客汽车对 NO_x 污染的贡献率 = 0.3173.
- 37) 载货汽车 NO_x 存量 = INTEG (载货汽车 NO_x 排放量 - 载货汽车 NO_x 消散量, 30550.2), Unit: 吨.
- 38) 载货汽车车均年 NO_x 排放量 = 0.1726, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 39) 载货汽车对 NO_x 污染的贡献率 = 0.6827.
- 40) 载客汽车 PM 存量 = INTEG (载客汽车 PM 排放量 - 载客汽车 PM 消散量, 1506.4), Unit: 吨.
- 41) 载客汽车车均年 PM 排放量 = 0.0008, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 42) 载客汽车对 PM 污染的贡献率 = 0.218.
- 43) 载货汽车 PM 存量 = INTEG (载货汽车 PM 排放量 - 载货汽车 PM 消散量, 3345.3), Unit: 吨.
- 44) 载货汽车车均年 PM 排放量 = 0.0189, Unit: 吨/(辆 * 年).
- 45) 载货汽车对 PM 污染的贡献率 = 0.782.
- 46) 机动车 CO 污染程度 = IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 845609, 0.9, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 835824, 0.85, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 805405, 0.8, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 766091, 0.7, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 726527, 0.65, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 690530, 0.6, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 572468, 0.5, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 495083, 0.4, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 437344, 0.3, IF THEN ELSE (机动车 CO 总量 ≥ 390051, 0.2, 0.1)))))))).
- 47) 机动车 HC 污染程度 = IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 95868.1, 0.9, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 94539.4, 0.85, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 90748.6, 0.8, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 86197.4, 0.7, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 81586.7, 0.65, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 77375.7, 0.6, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 64507.9, 0.5, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 56158.5, 0.4, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 49871.6, 0.3, IF THEN ELSE (机动车 HC 总量 ≥ 44805.1, 0.2, 0.1)))))))).
- 48) 机动车 NO_x 污染程度 = IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 116822, 0.9, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 113641, 0.85, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 106586, 0.8, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 100370, 0.7, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 93859.5, 0.65, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 87802.7, 0.6, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 75803.9, 0.5, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 68647.3, 0.4, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 62830.8, 0.3, IF THEN ELSE (机动车 NO_x 总量 ≥ 58759.1, 0.2, 0.1)))))))).
- 49) 机动车 PM 污染程度 = IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 10043.6, 0.9, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 9697.4, 0.85, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 8977.4, 0.8, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 8411.8, 0.7, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 7810.6, 0.65, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 7246.8, 0.6, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 6386.6, 0.5, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 5911.8, 0.4, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 5497.6, 0.3, IF THEN ELSE (机动车 PM 总量 ≥ 5245.4, 0.2, 0.1)))))))).