

# 交通拥堵对经济和公共健康的影响

## ——以北京为例

### 摘要

交通拥堵是世界各地城市都面临的一个棘手问题，尤其在大城市中，交通拥堵不仅造成了大量的经济损失，而且还带来了各种环境污染问题。本文以此为研究对象，建立了计算交通拥堵的经济损失和评判环境污染的标准。

对于问题 1，本文从时间浪费、运营成本上升、交通事故增加这三个方面来计算交通拥堵所带来的经济损失。对于时间浪费损失的计算问题，本文通过德克萨斯交通研究所拥堵外部成本估算模型，结合了北京的实际情况，得出北京时间浪费问题带来的总损失约为 1874332 万元。对于运营成本上升问题，本文通过计算拥堵时汽车在道路所产生的额外油耗来计算因为拥堵而产生的损失。将车型按照排量分为大排量汽车和小排量汽车，细化了不同排量车的油耗问题，使计算结果较为准确，并得出运营成本上升导致的损失为 457112 万元。所以总计损失为 2331444 万元。

对于问题 2，本文从两个不同的角度出发，分别是交通拥堵造成的噪声污染对人体健康的影响与交通拥堵造成的空气污染对人体健康的影响。对于交通拥堵造成的噪声污染对人体健康的影响情况，本文采用了噪声污染级这一标准，由于流量较大的街道(600 机动车/小时以上)车流符合高斯分布规律,本文利用统计声级式来表示北京市不同街道的噪声污染，最终利用物理模型，使用 Excel 程序比较了不同街道拥堵情况下和畅通情况下的噪声污染级差异。

对于交通拥堵造成的空气污染对人体健康的影响情况，我们先查找资料确定了主要的空气污染物类型和 2013 至 2015 年北京主要空气污染物的浓度，接着通过灰色预测模型预测出 2017 年北京主要空气污染物的浓度（利用 matlab 求解），然后通过查找资料得出交通拥堵时（即汽车发动机空转时）不同空气污染物浓度的变化情

况，在得到以上的数据后我们采用了“暴露一响应”的方法对不同空气污染物对人体健康的影响量化分析，将致病率作为健康效应从而衡量人群的健康状况，最终结合不同空气污染物对人体健康的影响得到多种空气污染物同时作用时对人体健康的总影响情况，得出结论：在北京市处于交通拥堵的情况时，交通拥堵导致空气污染浓度上升，使得致病率提高了 11.1%。

**关键字：**经济损失 环境污染 噪音污染 空气污染 Excel matlab

# 1. 问题的重述

## （一）问题背景及基本情况：

随着城市现代化的发展与人口的激增，城市中的交通问题日趋严重，而交通拥堵问题又是交通问题的关键，尤其在人口数目庞大、经济发达的大城市，交通拥挤堵塞及由此导致的时间浪费、运营成本上升、交通事故增加、空气和噪声污染加剧等，给人民的生活、工作带来诸多不便，增加了巨大的社会成本，严重阻碍了城市的持续健康发展。因此，对于交通拥堵问题的解决方案的研究成为了当务之急。经济和公共健康受拥堵影响的大小随城市规模（如城市的道路基础设施，人口密度，以及影响污染物形成的大气条件）变化。

## （二）待解决的问题：

1) 试以国内某城市或地区为例，建立数学模型估计城市交通拥堵带来的经济损失。

2) 试建立数学模型定量评估该市交通拥堵对公共健康的影响，例如可通过交通拥堵产生的  $PM_{2.5}$  浓度变化衡量。

# 2. 模型的假设

1. 所选用的数据都是有效且具有代表性的。
2. 一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  五种空气污染物之间不存在相互影响。

# 3. 符号的说明

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| $Delay_i$    | 第i种车单位车次延误时间         |
| $Distance_i$ | 第i种车在拥堵时间段每辆车的平均行程距离 |

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| $V_{crowded_i}$   | 第i种车在拥堵时间段的平均速度    |
| $V_{clear_i}$     | 第i种车在畅通时间段的平均速度    |
| $Salary_0$        | 每人每小时时间价值          |
| $Slary$           | 每人每年的平均工资          |
| $Day$             | 每人每月的工作日天数         |
| $t$               | 早晚高峰每个人平均拥堵时间      |
| $TrafficVolume_i$ | 路段i的车流量            |
| $Price$           | 各种汽油的平均油价          |
| $DayCost$         | 每天所有汽车的油耗之和        |
| $TotalCost$       | 一年(按工作日)所有汽车的油耗之和  |
| $TotalPrice$      | 一年(按工作日)因拥堵造成的经济损失 |
| $\beta$           | 暴露-响应关系系数          |
| $C$               | 污染物的实际浓度           |
| $C_0$             | 污染物的参照浓度           |
| $E$               | 污染物实际浓度下的人群健康效应    |
| $E_0$             | 污染物参照浓度下的人群健康效应    |
| $x$               | 浓度的增加量             |
| $y$               | 致病率的增加量            |

## 4. 问题分析

### 4.1 对交通拥堵的理解

由于统计数据的限制，我们将一天中的早高峰(7:00 – 8:00)和晚高峰(17:00 – 18:00)时间设为是交通的拥堵的时间，将其他时间设为是交通畅通的时间。

## 4.2 交通拥堵对经济损失的影响

本文考虑交通拥堵对经济损失的如下三个方面的影响：

- 时间浪费；
- 运营成本上升；
- 交通事故增加；

最终的总经济损失就是如上三个方面的损失总和。

## 4.3 空气污染对公共健康的影响

机动车在行驶时，排出的尾气含有多种污染物，如一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮等。并且，在不同的行驶速度下，排出的污染物的量也不同，在车辆拥堵时，汽车尾气的污染物含量急剧增加，因而交通拥堵造成的空气污染十分可观。空气污染对于公共健康存在着不小的影响，人体吸入污染颗粒后，会增加致病概率。

通过查找资料，我们了解到，空气污染物的主要成分为一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>。于是，本问就这五种空气污染物在车辆拥堵时浓度的上升情况对人体健康的影响进行研究。

在考虑不同空气污染物浓度变化对人体健康的影响时，本问采用了“暴露一响应”的方法进行评估。

暴露评价的目的是确定人群受到的污染物暴露剂量，对于空气污染的健康风险评估，暴露评价主要考虑呼吸途径的暴露剂量。

在定量分析不同空气污染物浓度变化对人体健康的影响时，本问将致病率作为健康效应，从而得出不同空气污染物浓度变化对致病率的影响情况，最终考虑五种空气污染物浓度同时变化时致病率的情况，。

## 5. 模型的建立与求解

### 5.1 问题 1 交通拥堵导致的时间浪费模型

#### 5.1.1 模型的建立

以 2015 年度中国主要城市交通分析报告为例：

则一共有 4 种类型的机动车可能会造成拥堵，分别是：

- 1) 公交车
- 2) 班车
- 3) 小汽车
- 4) 出租车

我们采用德克萨斯交通研究所拥堵外部成本估算模型[1]来计算总共的时间浪费带来的经济损失：

**STEP 1** 估计第*i*种车单位车次延误时间（通过同样的距离，拥堵时间段比畅通时间段多开的时间）

$$\text{Delay}_i = \text{Distance}_i \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{crowded}_i}} - \frac{1}{V_{\text{clear}_i}} \right) \quad (\text{式 5.1 - 1})$$

其中

$\text{Delay}_i$ 表示第*i*种车单位车次延误时间（单位：小时），序号*i*和本章列举机动车类型顺序相同；

$\text{Distance}_i$ 表示第*i*种车在拥堵时间段每辆车的平均行程距离（单位：千米）；

$V_{\text{crowded}_i}$ 表示第*i*种车在拥堵时间段的平均速度（单位：千米/小时）；

$V_{\text{clear}_i}$ 表示第*i*种车在畅通时间段的平均速度（单位：千米/小时）。

**STEP 2** 计算每人每小时时间价值

$$\text{Salary}_0 = \text{Salary} \cdot \frac{1}{\text{Day} \cdot 8} \quad (\text{式 5.1 - 2})$$

其中

$\text{Salary}_0$ 表示每人每小时时间价值（单位：元）；

Salary表示每人每月的平均工资（单位：元）；

Day表示每人每月的工作日天数。

式中的“12”表示一年有12个月；“8”表示按照每人每天工作8小时计算。

**SETP3** 计算一年延误时间总损失

$$\text{Loss} = \sum_{i=1}^3 \text{Delay}_i \cdot \text{Population}_i \cdot \text{Salary}_o \cdot (\text{Day} \cdot 12) \quad (\text{式 } 5.1 - 3)$$

其中

Loss表示一年延误时间总损失（单位：万元）；

Population<sub>i</sub>表示每天高峰（早高峰与晚高峰一共的）时间段中选择第i种车作为出行方式的总人次（单位：万人次）；

(Day · 12)表示一年中的有效工作天数（由于非工作日没有拥堵时间段）

综上所述，式 5.1 - 3 中的Loss就是所求的一年中时间浪费的总经济损失。

### 5.1.2 模型的求解

以《2015 年度中国主要城市交通分析报告》中的数据为例：

用矩阵来表示数据：

如果

$$\text{Distance} = \begin{bmatrix} 7.3 \\ 16.7 \\ 13.2 \\ 9.9 \end{bmatrix}$$

那么

$$\text{Distance}_1 = 7.3, \text{Distance}_2 = 16.7, \text{Distance}_3 = 13.2, \text{Distance}_4 = 9.9$$

同理地从《2015 年度中国主要城市交通分析报告》中可以得到

$$\text{Vcrowded} = \begin{bmatrix} 7.1 \\ 17.05 \\ 14.9 \\ 9.05 \end{bmatrix}$$

$$V_{\text{clear}} = \begin{bmatrix} 14.6 \\ 35.05 \\ 30.63 \\ 18.61 \end{bmatrix}$$

$$\text{Salary} = 7068$$

$$\text{Day} = 22$$

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} 126.10 \\ 16.29 \\ 211.18 \\ 10.60 \end{bmatrix}$$

代入 5.1.1 中德克萨斯交通研究所拥堵外部成本估算模型，可得

$$\text{Loss} = 1874332$$

也就是交通拥堵导致的时间浪费为1874332 万元。

## 5.2 问题 1 交通拥堵导致的运营成本上升模型

### 5.2.1 模型的建立

一般说来，堵车时不熄火。一方面，车队随时在前进，熄火后增加了行驶程序，容易造成后面和周围车辆的等待和催促，延迟启动的时间;另一方面，根据专家的测算，每启动一次车辆，发动机的怠速和车辆行驶 1 分钟的怠速是相当的，所以在 1 分钟左右的堵车时间里，熄火并不能起到节油的效果。而大量汽车密集的排列在一起将在短时间内造成一定区域内空气中的污染浓度大幅提升，所以摇下车窗透气不是一个正确的选择，多数人会关闭车窗开启空调透气。通过网络查询到不同发动机排量的汽车在开启空调时的每小时怠速油耗表 5.2.1.1。

| 车型        | 每小时怠速油耗 |
|-----------|---------|
| 速腾 1.4TSI | 2.72 升  |
| MG5 1.5L  | 3.2 升   |
| 思域 1.8L   | 4.35 升  |
| S60 2.0T  | 2.47 升  |
| 凯尊 2.4L   | 0.97 升  |



|            |        |
|------------|--------|
| A6L 30 FSI | 1.39 升 |
|------------|--------|

表 5.2.1.1 不同排量汽车在开启空调时的每小时怠速油耗表

市面上主流排量的车型（1.4-2.5L）每小时怠速(开启空调时)油耗 2-4L 之间都属于正常，排量较大的汽车每小时怠速油耗在 3L 以上。对此我们将小排量汽车的每小时怠速油耗定为 $C_1 = 2.5L/h$ ，将大型客运等汽车每小时怠速油耗定为 $C_2 = 3.5L/h$ 。

通过数据查询，北京市上班平均每个人需要拥堵时间为

$$t = 1h$$

将 19 个路段在早高峰时期车流量记为

$$TrafficVolume_i \quad i = 1 \dots 19$$

将 19 个路段在早高峰时期交通构成记为 $B_{ij}$  ( $19 \times 2$ )，行指标代表 19 个路段，第一列与第二列分别代表在路段 $i$ 小排量和大排量汽车占高峰期流量的比例。

将各种车平均油价记为

$$price$$

假定晚高峰时期拥堵情况相同，则早晚高峰时段，每天所有的汽车油耗之和为

$$DayCost = 2 \cdot t \cdot price \cdot \left( \sum_{i=1}^{19} TrafficVolume_i \cdot B_{i,1} \cdot C_1 + \sum_{i=1}^{19} TrafficVolume_i \cdot B_{i,2} \cdot C_2 \right)$$

每个月工作天数为 $Day$ ，则一年的油耗之和为

$$TotalCost = 12 \cdot Day \cdot DayCost$$

一年因为拥堵所造成的油耗损失为

$$TotalPrice = price \cdot TotalCost$$

### 5.2.2 模型的求解

由 2016 年北京交通发展年报得 2016 年北京高峰时期各路段的车流量表 5.2.2.1 和 2016 年北京高峰时期各路段交通构成表 5.2.2.2。

| 路段  | 全天     | 高峰时段<br>(7-9 点) | 路段  | 全天     | 高峰时段<br>(7-9 点) |
|-----|--------|-----------------|-----|--------|-----------------|
| 东二环 | 228863 | 30389           | 西二环 | 216498 | 28775           |

|       |        |       |      |        |       |
|-------|--------|-------|------|--------|-------|
| 东三环   | 242967 | 30203 | 西三环  | 216168 | 27034 |
| 东四环   | 248012 | 30463 | 西四环  | 283561 | 34484 |
| 东五环   | 164305 | 20435 | 西五环  | 167537 | 21415 |
| 南二环   | 176032 | 23066 | 北二环  | 198325 | 24745 |
| 南三环   | 187949 | 21615 | 北三环  | 209494 | 26805 |
| 南四环   | 245664 | 27222 | 北四环  | 249214 | 32465 |
| 南五环   | 156315 | 17214 | 北五环  | 190345 | 24127 |
| 长安街   | 129538 | 17768 | 两广大街 | 88146  | 11432 |
| 前门西大街 | 55904  | 6658  |      |        |       |

表 5.2.2.1 2016 年北京高峰时期各路段的车流量表

| 路段    | 小排量汽车 | 大排量汽车 | 路段   | 小排量汽车 | 大排量汽车 |
|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 东二环   | 0.861 | 0.139 | 西二环  | 0.877 | 0.123 |
| 东三环   | 0.837 | 0.163 | 西三环  | 0.882 | 0.118 |
| 东四环   | 0.858 | 0.142 | 西四环  | 0.878 | 0.122 |
| 东五环   | 0.751 | 0.249 | 西五环  | 0.795 | 0.205 |
| 南二环   | 0.91  | 0.09  | 北二环  | 0.896 | 0.104 |
| 南三环   | 0.817 | 0.183 | 北三环  | 0.879 | 0.121 |
| 南四环   | 0.83  | 0.17  | 北四环  | 0.901 | 0.099 |
| 南五环   | 0.645 | 0.355 | 北五环  | 0.828 | 0.172 |
| 长安街   | 0.811 | 0.189 | 两广大街 | 0.714 | 0.286 |
| 前门西大街 | 0.85  | 0.15  |      |       |       |

表 5.2.2.1 2016 年北京高峰时期各路段交通构成表

利用已有数据按照公式，每天因拥堵造成的油耗为 $\text{DayCost} = 2697015\text{L}$ ，一年因拥堵所造成油耗为 $\text{TotalCost} = 712011960\text{L}$ ，平均油价为 $\text{price} = 6.42 \text{ 元/L}$ ，一年因拥堵造成的经济损失为 $\text{TotalPrice} = 4571116783\text{元}$ 。

## 5.3 问题 1 交通拥堵导致的交通事故增加的经济损失

通过资料的查找，我们得出，2016 年北京市交通事故的经济损失总量为 2089.6 万元。

## 5.4 问题 1 交通拥堵产生的总经济损失的计算

将时间浪费造成的经济损失、运营成本上升造成的经济损失、交通事故增加造成的经济损失相加，得出交通拥堵产生的总经济损失约为 233.35 亿元。

## 5.5 问题 2 交通拥堵造成的噪声污染对公共健康的影响模型

### 5.5.1 模型的建立

交通噪声是属于非稳态的，可用等效连续声级 $L_{eq}$ 表达其大小，但是对噪声随机的起伏程度却没有表达出来，因而可以用概率统计的方法来处理。

为了测量一段时间内起伏变化的噪声，可每隔一定时间测量一次，这样就得到了很多的数据，把这些数据按大小顺序排列后，可以找出 $x\%$ 的所测数据超过的声级，我们把这个声级叫做累积百分声级 $L_x$ 。那么找出 $10\%$ 的所测数据超过的声级，这个声级就称为  $L_{10}$ ， $50\%$ 所测数据超过的声级为 $L_{50}$ ， $90\%$ 的所测数据超过的声级为 $L_{90}$ 。

噪声污染级是( $L_{NP}$ )在能量平均声级(也称等效声级)的基础上，再考虑噪声起伏变化的因素，而对于车流量较大的街道( $600\text{veh/h}$ 以上)，噪声统计曲线一般都较好地符合高斯分布规律，因此，也可以利用统计声级  $L_{10}$ 、 $L_{50}$ 、 $L_{90}$ 来表示噪声污染级，即

$$L_{NP} = L_{50} + d + \frac{d^2}{6}$$

其中

$$d = L_{10} - L_{90}$$

设实际上的道路有 $m$ 条车道、 $n$ 种车型，第 $i$ 条车道距离噪声观测点的距离为 $l_i$ ，在上面行驶的第 $j$ 种车辆的速度为 $v_j$ ，声功率级为 $Lw_j$ ，车流量为 $\lambda_j$ ，第 $i$ 条车道的累积百分声级为 $L_{xi}$ ，则

$$L_x = 10 \lg(10^{0.1L_{xi}}) = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\pi(k \cdot \lambda_j)}{2V_{crowded_j} l_i} 10^{0.1L_{wj}} \right) - 8$$

其中超过累积百分声级 $L_x$ 对应的车流量为 $k \cdot \lambda_j$ 可通过正态分布规律算出。

## 5.5.2 模型的求解

通过正态分布规律计算可得：

- $L_{10}$ 对应的车流量是  $0.35\lambda_j$ ；
- $L_{50}$ 对应的车流量是  $0.774\lambda_j$ ；
- $L_{90}$ 对应的车流量是  $0.97\lambda_j$ 。

根据高德地图的全景地图，北京道路一般为 6 车道；对于车型，我们只考虑 4 种车型。北京的道路宽度为 3.75 米，本文以距离道路 5 米的噪声污染级为例，得到

$$l_1 = 5, l_2 = 8.75, l_3 = 12.5, l_4 = 16.25, l_5 = 20, l_6 = 23.75$$

不同汽车在高峰时的速度为：

$$V_{crowded} = \begin{bmatrix} 7.1 \\ 17.05 \\ 14.9 \\ 9.05 \end{bmatrix}$$

不同汽车在高峰时期所产生的声级为

$$L_{wj} = \begin{bmatrix} 83 \\ 85 \\ 80 \\ 80 \end{bmatrix}$$

得到高峰时间段北京市平均的噪声污染级

$$L_{NP} =$$

同理得到

非高峰时间段北京市平均的噪声污染级

$$L'_{NP} =$$

## 5.6 问题 2 交通拥堵造成的空气污染对公共健康的影响模型

### 5.6.1 模型的建立与求解

通过查找资料，我们了解到，空气污染物的主要成分为一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>。于是，本问就这五种空气污染物在车辆拥堵时浓度的上升情况对人体健康的影响进行研究。

在考虑不同空气污染物浓度变化对人体健康的影响时，本问采用了“暴露—响应”的方法进行评估。

暴露评价的目的是确定人群受到的污染物暴露剂量，对于空气污染的健康风险评价，暴露评价主要考虑呼吸途径的暴露剂量。

接下来，我们就不同的空气污染物浓度变化对人体健康的影响进行定量评估。定量评估空气污染的健康风险需要对暴露—响应关系进行量化描述。相对于人群来说，疾病或死亡的发生都是小概率事件，符合统计学上的泊松分布。因此，目前大气污染的流行病学研究采用的暴露—反应关系多基于泊松回归的比例模型。在泊松回归比例模型中，某一大气污染物浓度下的人群健康效应的计算可表示为：

$$E = e^{\beta \cdot (C - C_0)} \cdot E_0 \quad (\text{式 5.6.1-1})$$

式中， $\beta$ —暴露—响应关系系数；

$C$ —污染物的实际浓度；

$C_0$ —污染物的参照浓度；

$E$ —污染物实际浓度下的人群健康效应；

$E_0$ —污染物参照浓度下的人群健康效应。

在本问中，我们首先通过查找资料得到了 2013 年至 2015 年北京市的空气污染物的年平均浓度，如下表所示：

| 年份<br>空气<br>污染物浓度                                      | 2013    | 2014    | 2015    |
|--|---------|---------|---------|
| CO/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )               | 2600.00 | 2758.00 | 2693.00 |
| SO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 30.00   | 24.29   | 15.00   |
| NO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 55.00   | 55.71   | 50.00   |

|                                 |        |        |        |
|---------------------------------|--------|--------|--------|
| $PM_{10}/(\mu g \cdot m^{-3})$  | 108.57 | 117.86 | 100.00 |
| $PM_{2.5}/(\mu g \cdot m^{-3})$ | 92.86  | 90.71  | 82.86  |

表 5.6.1-1 北京市空气污染物年均浓度  
(数据来源于《2015 北京市环境状况公报》)

然后，我们通过 GM(1,1)模型推测出了 2017 年北京市的空气污染年平均浓度作为参照浓度 $C_0$  (利用 matlab 求解，程序为附录)，如下表所示：

| 空气<br>污染物浓度 $C_0$               | 年份      |
|---------------------------------|---------|
|                                 | 2017    |
| $CO/(\mu g \cdot m^{-3})$       | 2567.45 |
| $SO_2/(\mu g \cdot m^{-3})$     | 5.79    |
| $NO_2/(\mu g \cdot m^{-3})$     | 40.25   |
| $PM_{10}/(\mu g \cdot m^{-3})$  | 71.92   |
| $PM_{2.5}/(\mu g \cdot m^{-3})$ | 69.11   |

表 5.6.1-2 北京市 2017 预测空气污染物年均浓度

上述所得的空气污染物浓度均可以认为是正常情形，接着我们通过数据查找得到了不同空气污染物正常浓度情况下的致病率作为参考健康效应 $E_0$ ，如下表所示：

| 空气污染物名称    | 空气污染物正常<br>浓度 $C_0/(\mu g \cdot m^{-3})$ | 致病率 $E_0$ |
|------------|--|-----------|
| CO         | 2567.45                                  | 0.1%      |
| $SO_2$     | 5.79                                     | 0.1%      |
| $NO_2$     | 40.25                                    | 0.1%      |
| $PM_{10}$  | 71.92                                    | 0.3%      |
| $PM_{2.5}$ | 69.11                                    | 0.3%      |

表 5.6.1-3 不同空气污染物正常浓度下的致病率

在分析完各类空气污染物正常浓度下的致病率后，我们研究了在拥堵情况下各类空气污染物的浓度作为实际浓度 $C$ ，如下表所示：

| 空气污染物名称    | 空气污染物在拥<br>堵情况下的浓度<br>$C/(\mu g \cdot m^{-3})$ |
|------------|--|
| CO         | 4621.41  |
| $SO_2$     | 11.58  |
| $NO_2$     | 60.375   |
| $PM_{10}$  | 107.88   |
| $PM_{2.5}$ | 103.665  |

表 5.6.1-4 不同空气污染物在拥堵情况下的浓度

在查阅了相关资料后，我们得出了不同的空气污染物在浓度变化时致病率的变化情况，如下表所示：

| 空气污染物名称           | 浓度的增加量 $x/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | 致病率的增加量 $y$ |
|-------------------|--|-------------|
| CO                | 200  | 5%          |
| SO <sub>2</sub>   | 5  | 10%         |
| NO <sub>2</sub>   | 5  | 8%          |
| PM <sub>10</sub>  | 10   | 3%          |
| PM <sub>2.5</sub> | 8  | 5%          |

表 5.6.1-5 不同空气污染物在浓度变化时致病率的变化情况

由式 5.6.1-1 与表 5.6.1-5 可知，

$$\begin{cases} \frac{E}{E_0} = e^{\beta \cdot x} \\ \frac{E}{E_0} = 1 + y \end{cases} \quad (\text{式 5.6.1-2})$$

在  $E$ 、 $E_0$ 、 $x$ 、 $y$  均已知的情况下，利用式 5.6.1-2 可以求出暴露-响应关系系数  $\beta$  的值（利用 matlab 求解，程序为附录），解得不同空气污染物的暴露-响应关系系数  $\beta$  的值如下表所示：

| 空气污染物名称           | 暴露-响应关系系数 $\beta$ |
|-------------------|-------------------|
| CO                | 0.00024           |
| SO <sub>2</sub>   | 0.019             |
| NO <sub>2</sub>   | 0.015             |
| PM <sub>10</sub>  | 0.003             |
| PM <sub>2.5</sub> | 0.006             |

表 5.6.1-6 不同空气污染物的暴露-响应关系系数

再求出了不同空气污染物的暴露-响应关系系数  $\beta$  的值后，式 5.6.1-1 中的所有变量的值都得到了，因而根据式 5.6.1-1 可以求出污染物实际浓度下的人群健康效应  $E$ ，求得的结果如下表所示：

| 空气污染物名称           | 污染物实际浓度下的人群健康效应 $E$ |
|-------------------|---------------------|
| CO                | 1.6%                |
| SO <sub>2</sub>   | 1.1%                |
| NO <sub>2</sub>   | 1.4%                |
| PM <sub>10</sub>  | 3.3%                |
| PM <sub>2.5</sub> | 3.7%                |

表 5.6.1-7 不同污染物实际浓度下的人群健康效应

最终，将不同污染物实际浓度下的人群健康效应相加得到拥堵情况下的人群健康效应：

$$E = \sum_{i=1}^5 E_i \quad (\text{式 5.6.1-3})$$

根据表 5.6.1-7 可知，式 5.6.1-3 中

$$\begin{cases} E_1 = 1.6\% \\ E_2 = 1.1\% \\ E_3 = 1.4\% \\ E_4 = 3.3\% \\ E_5 = 3.7\% \end{cases}$$

最终求得 E 的值为 11.1%。

综上所述，在北京市处于交通拥堵的情况时，交通拥堵导致空气污染浓度上升，使得致病率提高了 11.1%。

## 6. 模型的评价

## 7. 参考文献

- [1] 冯相昭.城市交通拥堵的外部成本估算.环境与可持续发展, 2009-06-16
- [6] 《空气和废气监测分析方法指南》编委会.空气和废气监测分析方法指南[E].中国环境科学出版社.2006.1;
- [7] 北京市环境保护局. 2015 北京市环境状况公报[E]. 2016.4;

## 附录

附录 1 ( ):

附录 2 ( ):

附录 3 (灰色预测 matlab 程序):



附录 4（大气污染物浓度下的人群健康效应 matlab 程序）:

```
E=[];  
B=[0.00024,0.019,0.015,0.003,0.006];  
C=[4621.41,11.58,60.375,107.88,103.665];  
C0=[2567.45,5.79,40.25,71.92,69.11];  
E0=[0.001,0.001,0.001,0.003,0.003];  
for i=1:5  
E(i)=exp(B(i)*(C(i)-C0(i)))*E0(i);  
end  
disp(E)
```