

3-22-2022

## Cause Analysis of VOCs Hazards in Related Areas Based on Object Function Petri Net

Guangqiu Huang

*Management College, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China,;*  
huangnan93@163.com

Tiantian Wu

*Management College, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China,;*  
2515811107@qq.com

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Cause Analysis of VOCs Hazards in Related Areas Based on Object Function Petri Net

### Abstract

**Abstract:** The multi-resolution formal description based on discrete event system specification (DEVS) has the ability of hierarchical and structured description, but the description of the intelligent behavior inside the module is relatively lacking, while Agent-based modeling can describe the characteristics of individual perception, behavior, communication, cooperation, learning and evolution. *Under the framework of multi-resolution modeling, DEVS and Agent model descriptions are combined to provide the description capabilities for events, behaviors, mechanisms, etc. Based on the description of multi-resolution DEVS models, a formal model description method with coupling closure is proposed, which includes the description of the multi-resolution entity-level atomic model and the description of the multi-resolution system-level coupling model.* According to the characteristics of the framework, the modeling process is standardized and realistic modeling cases are used to verify the effectiveness of the description framework.

### Keywords

complex product, multi-resolution modeling, behavior modeling, discrete event system specification (DEVS), formal description

### Recommended Citation

Guangqiu Huang, Tiantian Wu. Cause Analysis of VOCs Hazards in Related Areas Based on Object Function Petri Net[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 470-481.

# 基于对象函数Petri网的关联区域VOCs危害成因解析

黄光球, 吴甜甜\*

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了找出排放并扩散挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)到目标区域的污染源, 防止目标区域受到进一步的污染, 提出基于对象函数Petri网的关联区域VOCs危害成因解析方法。网结构描述了各潜在污染源和受危害目标区域之间的联系, 网系统的运行反映了目标区域VOCs危害程度的变化情况, 并将危害程度的计算融入到Petri网系统的运行中。通过实际案例研究解析, 结果表明: 该Petri网模型适用于关联区域VOCs危害成因解析的建模和计算。

**关键词:** 关联区域; 危害程度; 成因解析; 对象函数Petri网; 挥发性有机物; 贡献率

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)03-0470-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0802

## Cause Analysis of VOCs Hazards in Related Areas Based on Object Function Petri Net

Huang Guangqiu, Wu Tiantian\*

(Management College, Xi'an University of Architecture &amp; Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to find out the source of VOCs(volatile organic compounds) emission and diffusion to the target area, and prevent the target area from further pollution, *this paper propose an analytical method of VOCs hazard causes in related areas based on object function Petri net. The net structure describes the relationship between the potential pollution sources and the target area, and the operation of the net system reflects the change of VOCs hazard degree in the target area, and the calculation of hazard degree is integrated into the operation of the Petri net system.* Through the actual case study, the analytical results show that the Petri net model is suitable for modeling and calculation of VOCs hazard analysis in related areas.

**Keywords:** related region; degree of harm; cause analysis; object function Petri net; volatile organic compounds(VOCs); rate of contribution

## 引言

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是颗粒物及臭氧前体, 且能发生光化学反应, 其造成的危害日益严重<sup>[1]</sup>。VOCs可形成光化学烟雾和二次污染物, 严重威胁着生态环境<sup>[2]</sup>。大部分VOCs具有毒性和致癌作用, 例如1,3-丁二烯和苯是已知的致癌物<sup>[3]</sup>, 危害着人体健康。因

此, 找出导致区域VOCs危害程度严重的成因至关重要, 有利于保护生态环境和人体健康。

有研究者对大气污染物臭氧和VOCs进行了成因解析的研究。蒋美青等<sup>[4]</sup>为了深入认识臭氧的区域污染特征及其成因, 对4个城市群开展了大气臭氧及其前体物氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、VOCs等的综合观测研究。结果发现机动车尾气排放和汽油挥发是城市VOCs主要来源, 占比最高达50%, 对臭氧生成贡

收稿日期: 2020-10-20

修回日期: 2021-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(71874134); 陕西省自然科学基金(2019JZ-30); 陕西省社会科学基金(2018S49)

第一作者: 黄光球(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为工业污染控制与管理。E-mail: huangnan93@163.com

通讯作者: 吴甜甜(1996-), 女, 硕士生, 研究方向为工业污染控制与管理。E-mail: 2515811107@qq.com

献明显; 其次是溶剂涂料使用, 最高可达20%, 对臭氧生成也具有较大的贡献。毕如意<sup>[9]</sup>对辽东湾新区进行环境空气VOCs污染监测与成因分析, 发现VOCs污染成因主要有有人为源、气候条件的影响和周边环境的影响。但是这些研究没有挖掘出造成区域污染严重的确定污染源。

国内外研究者也采用多种方法对不同区域的VOCs和PM<sub>2.5</sub>污染进行来源解析和潜在源区解析。古颖纲等<sup>[10]</sup>运用正定矩阵因子分析(positive matrix factorization, PMF)模型解析出广州市区2016年7月大气VOCs的来源分别是: 交通污染源、溶剂使用污染、加油站污染、植物排放和餐厨废气, 其贡献分别为29.79%, 26.61%, 24.86%, 9.91%, 8.84%。Xufeng Zhang等<sup>[7]</sup>运用PMF模型对位于中国西南部的典型旅游城市桂林进行VOCs的源解析并确定了5个源, 分别为燃料蒸发、汽车尾气、工业生产、溶剂使用和生物排放, 贡献率分别为35.32%, 28.29%, 15.65%, 11.20%和9.54%。窦筱艳等<sup>[8]</sup>采用化学质量平衡受体模型解析出西宁市大气环境中PM<sub>2.5</sub>的来源主要有: 城市扬尘、燃煤尘、机动车尾气、二次硫酸盐、生物质燃烧、二次硝酸盐、钢铁尘、锌冶炼尘、建筑尘、土壤尘和餐饮排放等。H Guo等<sup>[9]</sup>利用PCA/APCS(principal component analysis/absolute principal component scores)受体模型先后在中国香港地区和中国东部乡村地区对VOCs进行了源解析, 得到其主要污染源。龙启超等<sup>[10]</sup>用聚类方法、潜在源贡献因子法、浓度权重轨迹分析法分别模拟了乐山市研究期间PM<sub>2.5</sub>的主要潜在源区。结果表明: 乐山市东部边界附近、宜宾市西北部、自贡市南部等地是研究期间影响乐山市PM<sub>2.5</sub>浓度的重要潜在源区。王郭臣等<sup>[11]</sup>运用潜在源贡献因子法和浓度权重轨迹分析法分别模拟了北京市研究期间PM<sub>2.5</sub>的主要潜在源区。结果表明, 蒙古国中西部、新疆东部、内蒙古中西部、山西北部、河北和山东北部对北京PM<sub>2.5</sub>质量浓度贡献分别在0.7, 200 μg/m<sup>3</sup>以上, 表明这些地区是影响此次北京PM<sub>2.5</sub>的重要潜在源区。

区域受到污染严重是一个动态变化的过程, 而这些方法未能反映区域受到污染危害的动态过程, 也不能进行进一步的系统性能分析。

针对上述研究方法的不足, 本文提出能够进行关联区域VOCs危害成因解析的对象函数Petri网模型。该模型具有如下优势:

(1) 使用对象函数Petri网能清晰地挖掘出污染源排放VOCs导致目标区域污染严重的逻辑因果关系, 定量计算VOCs危害程度贡献率, 探究出区域污染严重的成因;

(2) 对象函数Petri网的使用有效解决了各对象库所的属性随时间动态变化的过程;

(3) 该模型可用于多个潜在污染源排放VOCs导致目标区域污染严重的复杂系统的建模和计算。

## 1 关联区域VOCs危害成因解析的基本原理

### 1.1 VOCs危害成因解析的场景描述

假设某个区域受到VOCs严重污染, 我们将该区域称为目标区域。为了防止目标区域受到进一步的污染, 需要找出产生并扩散VOCs到该区域的污染源, 从而采取措施控制污染源VOCs的排放。

根据VOCs浓度的分布特征, 可以确定VOCs迁移扩散受影响的区域, 根据受影响程度不同, 可以将受影响的区域划分为若干关联区域。在关联区域内, 污染物会在气象条件作用下在各区域之间迁移和扩散, 从而造成区域污染程度严重。关联区域VOCs危害成因解析是指在得出目标区域VOCs危害程度的基础上, 利用后向轨迹聚类分析找出对目标区域产生污染的所有潜在污染源, 根据潜在污染源的传播路径确定污染的关联区域, 并计算所有潜在污染源对目标区域VOCs危害程度的贡献率, 根据计算得出的贡献率大小, 从而探究出造成目标区域VOCs污染程度严重的若干污染源。

下面进行VOCs危害成因解析的场景描述: 假设受危害的目标区域 $A_0$ 已经确定, 其与潜在污

污染源所在区域(简称潜在源区域)以及在 VOCs 迁移过程中受潜在污染源污染的过渡区域构成污染的关联区域。假设  $S_1, S_2, \dots, S_M$  为关联区域内的  $M$  个潜在污染源, 潜在污染源之间相互没有关联性, 每个潜在污染源用“●”表示, 本文只研究各个潜在污染源与目标区域之间的联系。考虑在气象因素以及地表多种促进因素和障碍因素的作用下, VOCs 会在从潜在污染源产生后进行迁移和扩散, 其中, 对 VOCs 迁移和扩散有促进作用的因素称为促进因素, 例如工厂、村庄等会产生 VOCs 的场所, 用“■”表示; 抑制 VOCs 迁移和扩散的因素称为障碍因素, 例如高山、河流等, 用“▲”表示。图1描述了关联区域组成要素的分布图, 关联区域内含有目标区域  $A_0$ 、潜在污染源、潜在污染源所在区域(1, 2, 3)、受潜在污染源污染的过渡区域(4, 5, 6, 7, 8)以及若干促进因素和障碍因素。

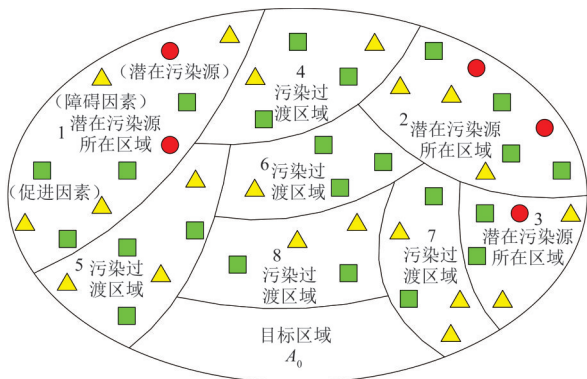


图1 关联区域组成要素分布图  
Fig. 1 Distribution map of constituent elements in related area

### 1.2 潜在污染源与目标区域联系的建立

在确定潜在污染源的数量和地理位置的基础上, 对各个潜在污染源  $S_1, S_2, \dots, S_M$  做前向轨迹聚类分析, 将各个潜在污染源的聚类轨迹信息叠加在含有促进因素和障碍因素的图上。在促进因素的作用下, VOCs 的迁移量会增加; 在障碍因素的作用下, VOCs 迁移量会减少。假设将轨迹经过的所有促进因素和障碍因素考虑在内, 且每个因素只出现一次, 不区分出现的先后顺序, 每个潜在污

染源考虑4条到目标区域的路径, 不考虑路径的交叉, 按照聚类轨迹迁移方向, 从潜在污染源开始沿着识别出来的因素将 VOCs 迁移至目标区域  $A_0$  的各条路径表示出来, 从而建立各个潜在污染源  $S_1, S_2, \dots, S_M$  与目标区域  $A_0$  的连接关系, 如图2所示。

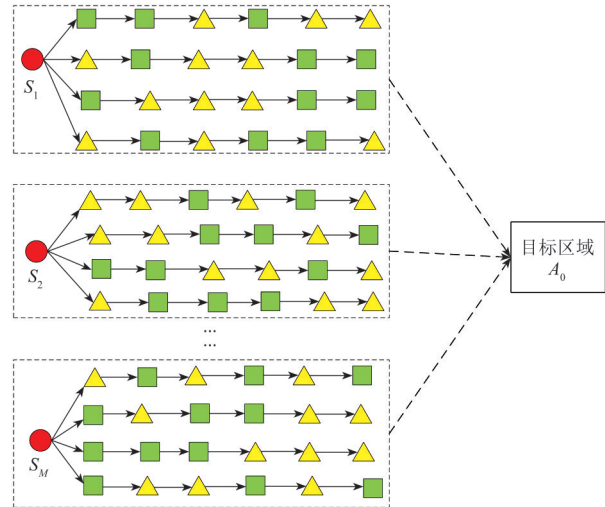


图2 关联区域内各潜在污染源与目标区域的关系图  
Fig. 2 Relationship between each potential pollution source and the target area in the related area

### 1.3 关联区域 VOCs 危害成因解析的步骤

VOCs 从潜在污染源  $S_1, S_2, \dots, S_M$  排出后, 在气象因素以及地表多种促进因素和障碍因素作用下, 沿着多条路径到达目标区域  $A_0$ , 下面介绍对目标区域  $A_0$  危害最大的污染源是哪些的成因解析方法。

#### (1) 潜在污染源的确定

假设目标区域  $A_0$  的危害程度大小为  $D_0$ 。在关联区域内对目标区域  $A_0$  进行后向轨迹聚类分析, 确定影响该区域的气流轨迹的方向和空间位置分布。将  $A_0$  的聚类轨迹信息叠加在含有工厂等会产生大量 VOCs 的潜在污染源的图上, 确定所有会迁移和扩散 VOCs 到目标区域  $A_0$  的潜在污染源的数量和地理位置, 将各个潜在污染源记为  $S_1, S_2, \dots, S_M$ 。

#### (2) 潜在污染源与目标区域联系的建立

如第1.2节和图2的描述, 建立关联区域内各个潜在污染源与目标区域之间的关联关系, 为之后的计算做准备。

### (3) 目标区域VOCs危害成因的确定

首先计算各个潜在污染源的危害程度值 $D$ ; 其次, 根据图2所示, 沿着从潜在污染源到目标区域的路径, 在一定时间内, 确定VOCs迁移次数, 分别多次计算各个潜在污染源 $S_1, S_2, \dots, S_M$ 能迁移扩散到目标区域 $A_0$ 的危害程度增量值, 直至计算到最后一次迁移。最终根据最后一次迁移各潜在污染源对目标区域的危害程度增量值和目标区域 $A_0$ 的危害程度值, 进行计算即可得出各个潜在污染源对目标区域 $A_0$ 危害程度的贡献率, 将计算得到的贡献率进行排序, 贡献率较大的若干潜在污染源即为目标区域污染严重的成因。

## 2 VOCs危害成因解析Petri网模型

研究目标区域VOCs危害成因解析的主要目的在于挖掘导致目标区域VOCs污染严重的逻辑因果关系, 从而找出其污染严重的成因。而Petri网能恰当处理因果上的不存在依赖性的并行现象和表示不确定性的选择的能力, 并且能将系统模型用网状图形清晰地表示出来<sup>[12]</sup>。因此本文采用对象函数Petri网进行建模和计算。

### 2.1 VOCs危害成因解析的定义

定义1: 基于对象函数Petri网的VOCs危害成因解析模型(analytic model of VOCs hazards based on object function Petri net, OFPNM)定义为一个八元组,  $OFPNM=(S, T, F, M, G, h, \lambda, \mu)$ , 其中,

(1)  $N=(S, T, F)$ 为 OFPNM 模型的基本网, 其中,  $|S|=n>0, |T|=m>0$ 。

(2) 库所集 $S$ 可划分为促进状态集 $S_p$ 和障碍状态集 $S_r, S=S_p \cup S_r, S_p \cap S_r = \emptyset$ , 其中, 促进状态集 $S_p$ 包括工厂、村庄等, 障碍状态集 $S_r$ 包括高山、河流等; 对于任意 $s \in S, s = \{A, B\}, A$ 为对象库所 $p_i$ 的属性集, 由静态属性集 $A_s$ 和动态属性集 $A_d$ 组成。前者 $A_s = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 是描述对象库所的特征, 如地理信息, 对象库所的性质(促进或抑制作用)一般为模型的输入; 后者 $A_d = \{x_{k+1}, x_{k+2}, \dots,$

$x_l\}$ 描述对象库所在运行过程中动态变化的属性, 如危害程度。 $A_s \cup A_d = A, A_s \cap A_d = \emptyset; B = \{b_{k+1}, b_{k+2}, \dots, b_l\}$ 是属性的一套操作函数集, 用于对动态属性进行更新。

(3)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为模型中 $m$ 个变迁的集合, 每个变迁表示导致VOCs发生迁移的事件, 如气象因素中的风吹;  $F$ 为地表重要库所与事件的连接弧。

(4)  $M: S \rightarrow \{0, 1\}$ , 对于任意 $s \in S, M(s)$ 有2种状态, 当 $s$ 表示的库所具备VOCs迁移的条件时,  $M(s)=1$ , 否则,  $M(s)=0$ 。

(5)  $G$ 表示各库所的危害程度水平, 对于任意的 $s \in S, G_h(s)=k$ 表示库所 $s$ 在 $h$ 时刻的危害程度值为 $k$ 。

(6)  $h$ 为系统时钟, 用于表示系统当前状态, 当 $h=0$ 时, 系统处于初始状态。

(7)  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ 表示VOCs迁移速率的集合, 与变迁一一对应, 是VOCs迁移至对象库所平均时间 $t_0$ 的倒数。

(8)  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ 是定义在变迁集上的平均变化系数集合, 其第 $i$ 个分量 $\mu_i = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ik}\} (k=|t_i|)$ 表示变迁 $t_i$ 所对应的第 $k$ 条输入弧的平均变化系数, 它主要是用来计算变迁实施后各库所危害程度的增量, 是一个实数值。

### 2.2 OFPNM模型的构建流程

#### (1) OFPNM中传播路径的确定

确定传播路径是构建该模型的关键。从潜在污染源持续排放的污染物VOCs, 在气象因素的作用下向远距离迁移和扩散, 本文使用HYSPLIT4.0追踪从潜在污染源出发的VOCs迁移轨迹, 将HYSPLIT模式前向轨迹聚类路径抽象为VOCs危害程度成因解析Petri网的传播路径, 并确定污染的关联区域。

#### (2) OFPNM中库所的确定

将关联区域内每个潜在污染源的前向轨迹聚类信息叠加到含有促进因素和障碍因素的图上, 以潜在污染源所在子系统为起点, 以固定分辨率

在传播路径上不断搜索其他子系统，直到到达目标区域，将搜索到的所有子系统(如高山、河流、村庄、城镇、县城、工厂等)抽象为对象库所。

(3) OFPNM 中变迁关系的确定

当同一条传播路径上 2 个子系统存在地理空间关系时，在两者之间添加一个变迁，并建立起库所到变迁和变迁到库所的两条弧。

(4) OFPNM 模型的形成

针对 VOCs 迁移扩散造成区域污染的问题，结合前文给出成因解析模型的 Petri 网定义，将路径上受到污染的子系统抽象为对象库所，子系统之间的关系抽象为变迁，建立各潜在污染源到目标区域的复杂网络。

上述模型的构建流程如图 3 所示。

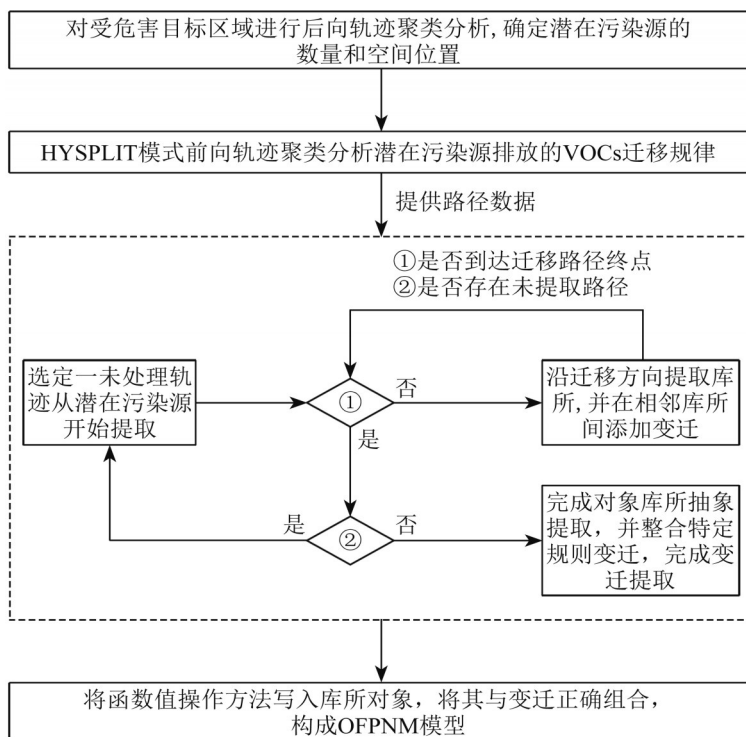


图3 OFPNM 模型构建方法流程图

Fig. 3 Flow chart of OFPNM model construction method

2.3 VOCs 浓度计算

在进行 VOCs 危害成因解析的过程中，需得出从潜在污染源排放的 VOCs 在各对象库所处的浓度分布，将利用高斯模型对 OFPNM 模型上任意对象库所的浓度进行模拟计算，如式(1)所示：

$$C(x,y,z,t)=\rho_i \frac{Q_0}{4\pi x(\sigma_y\sigma_z)^{1/2}} \exp[-\frac{\mu}{4x}(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2})] \tag{1}$$

式中： $Q_0$ 为潜在污染源瞬时排放量； $\rho_i$ 为聚类路径*i*的贡献率； $x, y, z$ 分别为对象库所距离潜在污染源的垂直距离； $\mu$ 为平均风速； $\sigma_y, \sigma_z$ 分别为*y, z*的

扩散系数，其取值与天气和风速有关<sup>[13]</sup>。

2.4 VOCs 迁移表示及计算

2.4.1 危害程度计算

目标区域的危害程度和 OFPNM 模型上所有对象库所的初始危害程度，可按式(2)计算。

$$D = \frac{C}{C_T} \tag{2}$$

式中： $C$ 为 VOCs 浓度值，目标区域的 VOCs 浓度值可根据中国环境监测总站进行查找，各对象库所的浓度值可按式(1)进行计算； $C_T$ 为 VOCs 的浓度限值，可根据国家或国际现行标准、现有理论

量化和现有文献资料确定。

## 2.4.2 Petri网运行过程中的有关计算

从潜在污染源排放的VOCs在迁移和扩散过程中,各对象库所的危害程度会发生一系列的变化,因此需要理清各种情况下危害程度值的计算方法。针对定义1,VOCs迁移过程的Petri网图形表达如图4所示。

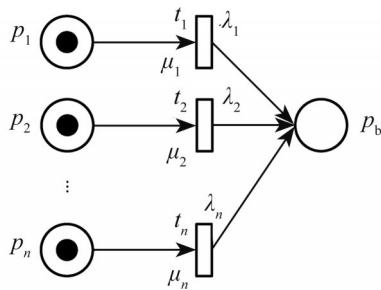


图4 VOCs迁移过程的Petri网图形表示  
Fig. 4 Graphical representation of VOCs migration process using Petri net

设  $p_k \in t_k$ ,  $p_b \in t_k^*$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ),  $\lambda_k$  为  $t_k$  的平均实施速率,  $\mu_k$  为  $t_k$  的平均变化系数集合,  $G_h(p_k)$ ,  $G_h(p_b)$  分别表示库所  $p_k$ ,  $p_b$  的危害程度值, 式(3)~(5)中的  $h=0, 1, 2, \dots$ 。

### (1) 加权值

若  $p_b$  的危害程度值是一个加权值, 当各变迁激发后,  $G_h(p_b)$  的计算表达式为

$$G_h(p_b) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \mu_k G_h(p_k) \quad (3)$$

### (2) 累积值

若  $p_b$  的危害程度值是一个累积值, 当各变迁激发后,  $G_h(p_b)$  的计算表达式为

$$G_h(p_b) = G_{h-1}(p_b) + \sum_{k=1}^n \lambda_k \mu_k G_h(p_k) \quad (4)$$

### (3) 约束条件

考虑到在VOCs危害程度成因解析中,各库所的危害程度值不会出现负值,因此需要对  $G_h(p_b)$  加上下面的约束条件,即

$$G_h(p_b) = \begin{cases} G_h(p_b) & G_h(p_b) > 0 \\ 0 & G_h(p_b) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

## 2.5 目标区域污染严重成因确定步骤

利用对象函数Petri网计算一定时间序列内各潜在污染源对目标区域VOCs危害程度贡献率的步骤为:

(1) 确定各对象库所在式(1)中的各个参数,计算OFPNM模型中各对象库所的VOCs浓度值,查找目标区域的VOCs浓度值,并确定VOCs浓度限值  $C_T$ 。

(2) 根据式(2)计算目标区域的危害程度值  $D_0$ 、各潜在污染源的危害程度值  $D$  和各对象库所的初始危害程度。明确各对象库所危害程度值的计算方法,确定参数  $\lambda$ ,  $\mu$ , 设最大迭代次数为  $N$  个时间单位,令当前迭代次数  $h=0$ 。

(3) 令迭代次数  $h=h+1$ , 结合VOCs危害程度成因解析Petri网的变迁发生规则及危害程度值的计算方法运行Petri网,变迁发生后,根据式(3)~(5)计算变迁后集库所的危害程度,直至找不到可以发生的变迁。

(4) 若  $h < N$ , 则记录下当前各潜在污染源对目标区域产生的危害程度增量值,返回步骤(2),继续运行Petri网;若  $h=N$ , 则迭代结束,同样记录下当前各潜在污染源对目标区域产生的危害程度增量值。

(5) 根据上述得到的各潜在污染源对目标区域产生的危害程度增量值和目标区域危害程度值,通过计算即可得到各个潜在污染源对目标区域危害程度的贡献率,并将得出的各个贡献率进行比较大小,贡献率较大的若干潜在污染源即是造成目标区域VOCs污染严重的成因。

## 3 实例分析

### 3.1 VOCs危害成因解析Petri网模型的构建

本实例选择西安市作为目标区域,2018年11月,西安市成为全国污染最严重的地区,因此研究该时段西安市污染严重的成因具有重要意义,以此验证模型的有效性及其可行性。选取时间为2018年11月份的第2周,在这个时段利用HYSPLIT4.0对西安市中心点(34°23'N, 108°93'E)



进行后向轨迹聚类分析，将西安市后向轨迹信息显示在叠加了工厂、工业园等潜在污染源矢量数据的 ARCGIS 中。得到 A 食品工业园、B 肥料厂、C 制药厂、D 化工公司和 E 电子公司 5 个潜在污染源。分别对这 5 个潜在污染源作前向轨迹分析，剔除没有到达西安市的路径，得到 5 个潜在污染

源到西安市的聚类轨迹图。

为了提高 VOCs 远距离输送路径上各促进和阻碍因素的识别程度，将各潜在污染源聚类轨迹的三维信息导入到 ARCGIS 中，如图 5 所示。根据图 5 的轨迹提取出 VOCs 危害成因解析的 Petri 网模型，见图 6 所示。

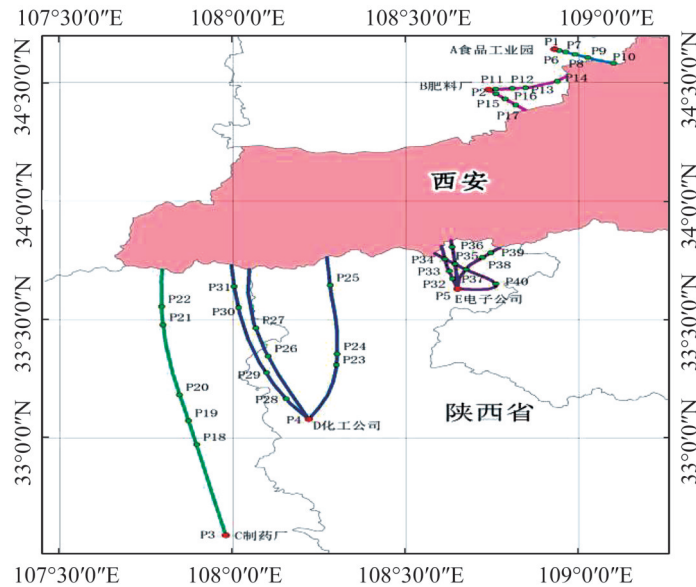


图 5 基于 HYSPLIT 模型的聚类轨迹图

Fig. 5 Cluster trajectory based on HYSPLIT model

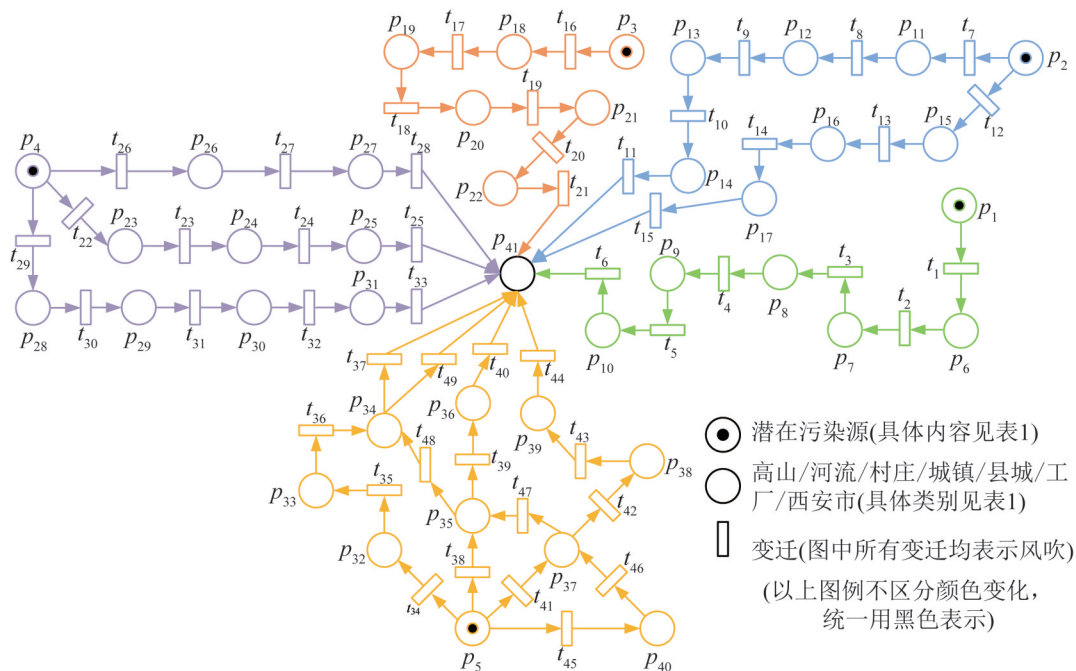


图 6 西安市 VOCs 危害成因解析 Petri 网模型

Fig. 6 Petri net model for cause analysis of VOCs hazard in Xi'an

在西安市 VOCs 危害成因解析 Petri 网模型中, 城镇、县城、工厂这 6 种类型。该 Petri 网中  $p_1 \sim t_1 \sim t_{49}$  这 49 个变迁均表示气象因素中风的作用这一事件, 提取到的对象库所包含高山、河流、村庄、

$p_{49}$  这 49 个对象库所的信息如表 1 所示。

表 1 VOCs 危害成因解析 Petri 网中各对象库所的信息  
Table 1 Detailed information of each object place in Petri net for VOCs hazard cause analysis

潜在污染源	路径编号	路径贡献率%	路径上的对象库所	位置	库所编号
A 食品工业园	0		A 食品工业园	34.64N, 108.93E	$p_1$
	1	36	西焦村	34.63N, 108.94E	$p_6$
			白象方便面厂	34.63N, 108.96E	$p_7$
			渠岸镇	34.62N, 108.99E	$p_8$
			安乐镇	34.60N, 109.03E	$p_9$
			滩李村	34.58N, 109.10E	$p_{10}$
B 肥料厂	0		B 肥料厂	34.47N, 108.74E	$p_2$
	1	18	空港新城临空产业园	34.48N, 108.76E	$p_{11}$
			高庄镇	34.48N, 108.81E	$p_{12}$
			泾电铜业	34.48N, 108.85E	$p_{13}$
			崇文镇	34.51N, 108.94E	$p_{14}$
	4	18	岳家村	34.45N, 108.76E	$p_{15}$
			新兴工业园	34.42N, 108.81E	$p_{16}$
C 制药厂	0		C 制药厂	32.59N, 107.98E	$p_3$
	4	36	西乡县	32.97N, 107.90E	$p_{18}$
			牧马河	33.07N, 107.87E	$p_{19}$
			黄金峡镇	33.18N, 107.85E	$p_{20}$
			西河	33.48N, 107.80E	$p_{21}$
			岳坝镇	33.56N, 107.79E	$p_{22}$
D 化工公司	0		D 化工公司	33.08N, 108.22E	$p_4$
	1	50	宁陕县	33.31N, 108.30E	$p_{23}$
			五金厂	33.36N, 108.30E	$p_{24}$
			新场镇	33.65N, 108.28E	$p_{25}$
	2	14	梅子镇	33.35N, 108.10E	$p_{26}$
			陈家坝镇	33.47N, 108.07E	$p_{27}$
	4	18	饶峰镇	33.17N, 108.15E	$p_{28}$
			两河镇	33.28N, 108.10E	$p_{29}$
			长角坝镇	33.55N, 108.02E	$p_{30}$
			龙草坪乡	33.64N, 108.00E	$p_{31}$
	E 电子公司	0		E 电子公司	33.63N, 108.65E
1		50	安沟村	33.67N, 108.64E	$p_{32}$
			小四方沟村	33.70N, 108.63E	$p_{33}$
			神仙岩	33.76N, 108.61E	$p_{34}$
2		36	西沟村	33.73N, 108.64E	$p_{35}$
			旬河	33.81N, 108.64E	$p_{36}$
3		9	苦竹沟村	33.71N, 108.67E	$p_{37}$
			广货街镇	33.76N, 108.72E	$p_{38}$
			秦岭山脉	33.78N, 108.75E	$p_{39}$
4		5	杨柳村	33.65N, 108.76E	$p_{40}$
			苦竹沟村(交点)	33.71N, 108.67E	$p_{37}$
			西沟村(交点)	33.71N, 108.68E	$p_{35}$
			神仙岩(交点)	33.76N, 108.61E	$p_{34}$
西安市			西安市	34.23N, 108.93E	$p_{41}$

根据各潜在污染源扩散的起始时间和地理位置, 确定其风速和天气状况, 并根据文献[13]确定  $y, z$  方向的扩散系数。参照天津市《工业企业挥发性有机物排放控制标准》(DB12 524-2014)对各行

业 VOCs 排放速率限值的规定, 确定 5 个污染源排气筒高度为 30 m 时 VOCs 的排放速率, VOCs 排放限值参照《大气污染物综合排放标准》(GB16297-1996), 计算结果见表 2。

表2 模型地理信息数据(2018年11月8日)及对象库所的初始危害程度

Table 2 Model geographic information data (November 8, 2018) and initial hazard degree of object repository

对象库所	海拔/m	天气	到达时间/h	浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sub>30 m</sub>	初始危害程度	对象库所	海拔/m	天气	到达时间/h	浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sub>30 m</sub>	初始危害程度
$p_1$	425	晴	0.0	3.477 2	0.043 5	$p_4$	410	多云	0.0	5.819 4	0.072 7
$p_6$	420	晴	1.2	1.607 2	0.020 1	$p_{23}$	930	晴	5.4	2.856 3	0.035 7
$p_7$	422	晴	2.1	1.391 2	0.017 4	$p_{24}$	123 1	晴	6.9	2.216 2	0.027 7
$p_8$	413	晴	3.7	0.956 9	0.012 0	$p_{25}$	159 3	晴	12.7	0.420 8	0.005 3
$p_9$	402	晴	5.4	0.410 7	0.005 1	$p_{26}$	749	晴	7.3	0.980 5	0.012 3
$p_{10}$	379	晴	7.3	0.015 7	0.000 2	$p_{27}$	938	晴	9.8	0.103 7	0.001 3
$p_2$	497	晴	0.0	3.723 2	0.046 5	$p_{28}$	633	多云	3.1	1.147 8	0.014 3
$p_{11}$	492	晴	1.4	1.483 5	0.018 5	$p_{29}$	576	多云	5.5	0.257 9	0.003 2
$p_{12}$	466	晴	3.6	1.013 6	0.012 7	$p_{30}$	148 8	晴	11.3	0.057 3	0.000 7
$p_{13}$	450	晴	4.8	0.793 5	0.009 9	$p_{31}$	145 2	晴	13.5	0.041 8	0.000 5
$p_{14}$	388	晴	7.7	0.191 6	0.002 4	$p_5$	751	晴	0.0	3.066 3	0.038 3
$p_{15}$	477	晴	1.8	1.257 3	0.015 7	$p_{32}$	117 0	晴	2.3	1.485 8	0.018 6
$p_{16}$	464	晴	3.1	0.907 4	0.011 3	$p_{33}$	160 1	晴	3.1	1.155 3	0.014 4
$p_{17}$	415	晴	4.5	0.437 6	0.005 5	$p_{34}$	137 0	晴	4.7	0.605 2	0.007 6
$p_3$	139 1	多云	0.0	5.025 9	0.062 8	$p_{35}$	136 9	晴	4.0	1.145 5	0.014 3
$p_{18}$	107 6	晴	9.1	1.901 7	0.023 8	$p_{36}$	167 1	晴	5.7	0.514 9	0.006 4
$p_{19}$	455	晴	10.7	1.381 6	0.017 3	$p_{37}$	123 4	晴	3.4	0.340 7	0.004 3
$p_{20}$	599	晴	12.5	0.731 5	0.009 1	$p_{38}$	119 5	晴	5.1	0.178 9	0.002 2
$p_{21}$	849	晴	17.2	0.053 4	0.000 7	$p_{39}$	155 9	晴	6.0	0.038 6	0.000 5
$p_{22}$	176 9	晴	18.4	0.045 9	0.000 6	$p_{40}$	128 7	晴	3.2	0.133 8	0.001 7

根据上述计算的各对象库所的危害程度, 以天为时间单位, 模拟 5 个潜在污染源单独存在时, 计算一周内各潜在污染源对西安市 VOCs 危害程度的影响情况, 并对比 5 个潜在污染源分别对西安市污染造成的影响程度各占多少, 在此称为贡献率, 以此找出西安市污染严重的成因。根据各对象库所的到达时间得到各变迁速率, 如表 3 所示, 根据迁移路径上各对象库所的性质, 确定平均变化系数的取值, 见表 4。

### 3.2 结果分析与讨论

通过计算, 可得到各潜在污染源的各条路径对西安市危害程度的贡献大小以及各潜在污染源对西安危害程度的总贡献情况, 即可探究出西安市污染严重的成因, 如图 7 所示。

表3 变迁速率

Table 3 Transition rate

变迁	速率 $\lambda$	变迁	速率 $\lambda$	变迁	速率 $\lambda$	变迁	速率 $\lambda$
$t_1$	0.833	$t_{14}$	0.222	$t_{27}$	0.102	$t_{40}$	0.159
$t_2$	0.476	$t_{15}$	0.175	$t_{28}$	0.069	$t_{41}$	0.294
$t_3$	0.270	$t_{16}$	0.110	$t_{29}$	0.323	$t_{42}$	0.196
$t_4$	0.185	$t_{17}$	0.093	$t_{30}$	0.182	$t_{43}$	0.167
$t_5$	0.137	$t_{18}$	0.080	$t_{31}$	0.088	$t_{44}$	0.149
$t_6$	0.128	$t_{19}$	0.058	$t_{32}$	0.074	$t_{45}$	0.313
$t_7$	0.714	$t_{20}$	0.054	$t_{33}$	0.067	$t_{46}$	0.154
$t_8$	0.278	$t_{21}$	0.049	$t_{34}$	0.435	$t_{47}$	0.130
$t_9$	0.208	$t_{22}$	0.185	$t_{35}$	0.323	$t_{48}$	0.111
$t_{10}$	0.128	$t_{23}$	0.145	$t_{36}$	0.213	$t_{49}$	0.102
$t_{11}$	0.112	$t_{24}$	0.079	$t_{37}$	0.169		
$t_{12}$	0.556	$t_{25}$	0.066	$t_{38}$	0.250		
$t_{13}$	0.323	$t_{26}$	0.137	$t_{39}$	0.175		

表 4 平均变化系数  
Table 4 Coefficient of mean variation

平均变化系数 $\mu$	值	平均变化系数 $\mu$	值	平均变化系数 $\mu$	值	平均变化系数 $\mu$	值
$\mu_1$	1	$\mu_{14}$	2.93	$\mu_{27}$	1.45	$\mu_{40}$	0.38
$\mu_2$	2.32	$\mu_{15}$	1.3	$\mu_{28}$	1.75	$\mu_{41}$	1
$\mu_3$	1.48	$\mu_{16}$	1	$\mu_{29}$	1	$\mu_{42}$	1.73
$\mu_4$	1.78	$\mu_{17}$	0.53	$\mu_{30}$	1.99	$\mu_{43}$	1.41
$\mu_5$	1.73	$\mu_{18}$	0.47	$\mu_{31}$	1.63	$\mu_{44}$	0.35
$\mu_6$	1.43	$\mu_{19}$	1.92	$\mu_{32}$	1.41	$\mu_{45}$	1
$\mu_7$	1	$\mu_{20}$	0.55	$\mu_{33}$	1.55	$\mu_{46}$	1.92
$\mu_8$	2.93	$\mu_{21}$	2.03	$\mu_{34}$	1	$\mu_{47}$	1.73
$\mu_9$	1.72	$\mu_{22}$	1	$\mu_{35}$	1.61	$\mu_{48}$	1.83
$\mu_{10}$	2.58	$\mu_{23}$	0.72	$\mu_{36}$	1.81	$\mu_{49}$	0.44
$\mu_{11}$	1.63	$\mu_{24}$	2.15	$\mu_{37}$	0.44		
$\mu_{12}$	1	$\mu_{25}$	1.32	$\mu_{38}$	1		
$\mu_{13}$	1.38	$\mu_{26}$	1	$\mu_{39}$	1.83		

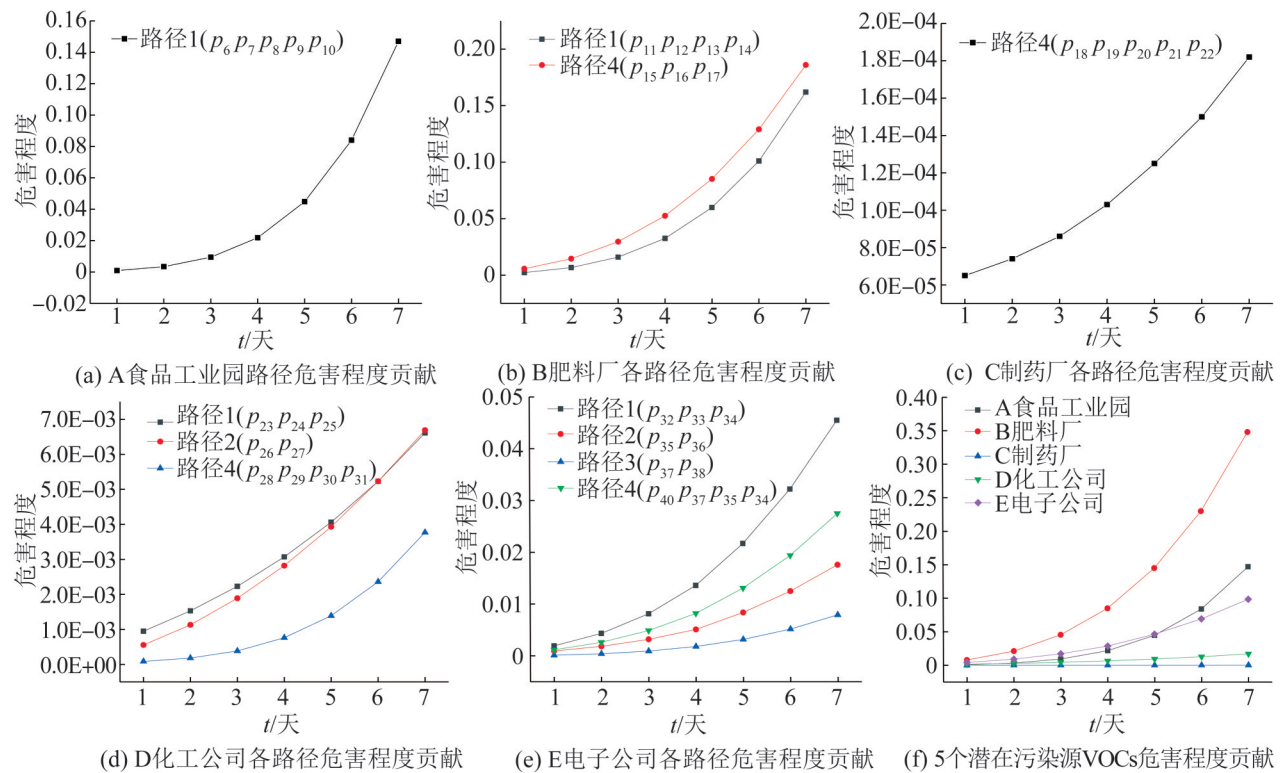


图 7 各潜在污染源危害程度贡献率情况

Fig. 7 Contribution rate of hazard degree of each potential pollution source

通过图 7 可以看出, 5 个潜在污染源的各项路径对西安市的危害程度贡献以及各潜在污染源的总贡献是随时间呈直线增长状态, 且潜在污染源距离西安市越远, 对西安市的危害程度贡献越小。虽然 C 制药厂的危害程度值比较大, 但是其在污

染传播过程中经过的地表阻碍因素较多, 导致 VOCs 扩散受到阻挡, 所有其对西安市危害的贡献程度极小。而 B 肥料厂产生 VOCs 扩散到西安市的时间较短, 因此其危害程度贡献是最大的。

经计算西安市的危害程度为 1.066 7, 因此各

潜在污染源对西安市 VOCs 危害程度的贡献率情况为：A 食品工业园的贡献率为 13.78%，B 肥料厂的贡献率为 32.62%，C 制药厂的贡献率 0.017%，D 化工公司的贡献率为 1.60%，E 电子公司的贡献率为 9.23%，可以看出对西安市污染影响贡献率大小排序为：B 肥料厂>A 食品工业园>E 电子公司>D 化工公司>C 制药厂。可以看出贡献率排序靠前的 3 个污染源为 B 肥料厂、A 食品工业园和 E 电子公司，即这 3 个潜在污染源是西安市在此段时间受到 VOCs 污染严重的成因，所以要防止西安市产生更严重的污染，需要采取措施控制这 3 个污染源 VOCs 的排放，并可以根据污染源所在位置及其 VOCs 迁移路径建立联防联控区域来控制污染的扩散。

## 4 结论

(1) 本文将若干潜在污染源产生的 VOCs 迁移路径按照标准流程抽象为对象库所和变迁，构建了关联区域内 VOCs 危害成因解析的对象函数 Petri 网模型，并给出关联区域内各潜在污染源对目标区域 VOCs 危害程度贡献率的算法，从而探索出目标区域 VOCs 危害程度严重的原因。

(2) 以西安市为具体案例，通过模型运行将各潜在污染源排放的 VOCs 迁移扩散到西安市的过程形象直观地展现出来，为探究区域污染程度严重的成因提供了一种新的方法，并扩展了对象函数 Petri 网的应用领域。

(3) 本文可用于制定大气 VOCs 污染治理方案以实现环境和人体健康保护提供参考，也可为联防联控区域的建立以进行共同防护和治理提供理论依据。

## 参考文献：

[1] 竹涛, 朱晓晶, 牛文凤, 等. 国内外挥发性有机物排放标准对比研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(2): 209-218.  
Zhu Tao, Zhu Xiaojing, Niu Wenfeng, et al. Comparative Study on Emission Standards of Volatile Organic Compounds at Home and Abroad[J]. Journal of Mining

Science, 2020, 5(2): 209-218.  
[2] 胡桐搏, 张长平, 刘浩, 等. VOCs 废气危害及处理技术进展[J]. 化工管理, 2018(10): 125-127.  
Hu Tongbo, Zhang Changping, Liu Hao, et al. Hazards of VOCs and Progress of Treatment Technology[J]. Chemical Industry Management, 2018(10): 125-127.  
[3] Xinmin Zhang, Zhigang Xue, Hong Li, et al. Ambient Volatile Organic Compounds Pollution in China[J]. Journal of Environmental Sciences (S1001-0742), 2017, 55(5): 69-75.  
[4] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O<sub>3</sub> 污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. 科学通报, 2018, 63(12): 1130-1141.  
Jiang Meiqing, Lu Keding, Su Rong, et al. Causes of Ozone Pollution and Analysis of Key VOCs Activity in Typical Urban Agglomerations in China [J]. Science Bulletin, 2018, 63(12): 1130-1141.  
[5] 毕如意. 辽东湾新区环境空气 VOCs 污染监测与成因分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Bi Ruyi. Monitoring and Cause Analysis of VOCs Pollution in Liaodong Bay New Area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.  
[6] 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 等. 广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2528-2537.  
Gu Yinggang, Yu Xiaofang, Yang Wenda, et al. Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Rainy Season of 2016 in Tianhe District, Guangzhou[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2528-2537.  
[7] Xufeng Zhang, Yuanyuan Yin, Jianhui Wen, et al. Characteristics, Reactivity and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Tourist City[J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2019, 215:116898.1-116898.13.  
[8] 窦筱艳, 赵雪艳, 徐珣, 等. 应用化学质量平衡模型解析西宁大气 PM<sub>2.5</sub> 的来源[J]. 中国环境监测, 2016, 32(4): 7-14.  
Dou Xiaoyan, Zhao Xueyan, Xu Xun, et al. Application of Chemical Mass Balance Model to the Source Analysis of PM<sub>2.5</sub> in Xining[J]. Chinese Journal of Environmental Monitoring, 2016, 32(4): 7-14.  
[9] H Guo, K L So, I J Simpson, et al. C1-C8 Volatile Organic Compounds in the Atmosphere of Hong Kong: Overview of Atmospheric Processing and Source Apportionment[J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2007, 41(7): 1456-1472.  
[10] 龙启超, 陈军辉, 廖婷婷, 等. 乐山市 2016 年冬季颗粒物重污染过程与输送路径及潜在源区[J]. 环境科学研究,

- 2019, 32(2): 263-272.
- Long Qichao, Chen Junhui, Liao Tingting, et al. Heavy Pollution Process, Transport Path and Potential Source Area of Particulate Matter in Winter of 2016 in Leshan City[J]. Environmental Science Research, 2019, 32(2): 263-272.
- [11] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的PM<sub>2.5</sub>污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1931-1937.
- Wang Guochen, Wang Dongqi, Chen Zhenlou. Pollution Characteristics, Transport Pathways and Potential Source Areas of PM<sub>2.5</sub> during Severe Pollution Process in Winter in Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2016, 36 (7): 1931-1937.
- [12] 袁崇义. Petri网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- Yuan Chongyi. Principle and Application of Petri Nets [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [13] 何宁, 吴宗之, 郑伟. 一种改进的有毒气体扩散高斯模型算法及仿真[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18 (4): 571-580.
- He Ning, Wu Zongzhi, Zheng Wei. An Improved Gaussian Model Algorithm for Toxic Gas Diffusion and its Simulation[J]. Journal of Applied Foundation and Engineering Science, 2010, 18(4): 571-580.