

1-18-2023

## Dynamic Risk Assessment of VOCs Cross Regional Flow Based on Petri Nets

Guangqiu Huang

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

He Wang

*Management College, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China,;*  
wanghe06@163.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.

---

## Dynamic Risk Assessment of VOCs Cross Regional Flow Based on Petri Nets

### Abstract

**Abstract:** In order to evaluate the interaction between regions due to the cross regional flow of VOCs(volatile organic compounds) under polluted weather, a dynamic risk assessment method of cross regional flow of VOCs is proposed by using Petri net modeling method. The migration paths of VOCs between multiple potential pollution sources and contaminated areas are determined by HYSPLIT model, and the relationship between each migration path is described by Petri net; *the dynamic risk assessment method is defined, and the calculation of dynamic risk is integrated into the operation of functional Petri net*; through case analysis, the dynamic risk assessment results of surrounding areas for Xi'an under polluted weather and the potential risk index of each pollution path are obtained. The research shows that under heavy pollution weather, the influence degree of each pollution source city on Xi'an is Baoji > Hanzhong > Xining > Lanzhou from high to low. This method provides a basis for evaluating the risk degree of potential pollution sources in the cross regional flow of VOCs.

### Keywords

volatile organic compounds(VOCs), risk assessment, cross regional, functional Petri net, contribution rate

### Recommended Citation

Guangqiu Huang, He Wang. Dynamic Risk Assessment of VOCs Cross Regional Flow Based on Petri Nets[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 57-68.

# 基于 Petri 网的 VOCs 跨区域流动动态风险评估方法

黄光球, 王焯\*

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了评价污染天气下由于 VOCs(volatile organic compounds)跨区域流动产生的区域间的相互影响作用的大小, 找出对受污染区域影响较大的路径, 结合 Petri 网模型提出了 VOCs 跨区域流动动态风险评估方法。利用 HYSPLIT 模型确定多个潜在污染源与受污染区域的 VOCs 迁移路径, 运用 Petri 网去描述各个迁移路径之间的关系; 将动态风险大小的计算融入到函数 Petri 网的运行中, 定量评估潜在污染源到受污染区域的各条路径的风险程度; 案例分析得出污染天气下周边区域对于西安的动态风险评估结果以及各污染路径的潜在风险指数。研究表明, 在重污染天气下各个污染源城市对西安的影响程度大小由高到低依次为宝鸡>汉中>西宁>兰州。该方法为评估 VOCs 跨区域流动过程中潜在污染源的风险程度提供了依据。

**关键词:** VOCs; 风险评估; 跨区域; 函数 Petri 网; 贡献率

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)01-0057-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0938

**引用格式:** 黄光球, 王焯. 基于 Petri 网的 VOCs 跨区域流动动态风险评估方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 57-68.

**Reference format:** Huang Guangqiu, Wang He. Dynamic Risk Assessment of VOCs Cross Regional Flow Based on Petri Nets[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 57-68.

## Dynamic Risk Assessment of VOCs Cross Regional Flow Based on Petri Nets

Huang Guangqiu, Wang He\*

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

**Abstract:** In order to evaluate the interaction between regions due to the cross regional flow of VOCs (volatile organic compounds) under polluted weather, a dynamic risk assessment method of cross regional flow of VOCs is proposed by using Petri net modeling method. The migration paths of VOCs between multiple potential pollution sources and contaminated areas are determined by HYSPLIT model, and the relationship between each migration path is described by Petri net; *the dynamic risk assessment method is defined, and the calculation of dynamic risk is integrated into the operation of functional Petri net;* through case analysis, the dynamic risk assessment results of surrounding areas for Xi'an under polluted weather and the potential risk index of each pollution path are obtained. The research shows that under heavy pollution weather, the influence degree of each pollution source city on Xi'an is Baoji > Hanzhong > Xining > Lanzhou from high to low. This method provides a basis for evaluating the risk degree of potential pollution sources in the cross regional flow of VOCs.

**Keywords:** volatile organic compounds(VOCs); risk assessment; cross regional; functional Petri net; contribution rate

收稿日期: 2021-09-12 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(71874134); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2019JZ-30)

第一作者: 黄光球(1964-), 男, 教授, 博士, 研究方向为 Petri 网, 系统动力学, 群智能算法, 计算机模拟等。

E-mail: huangnan93@163.com

通讯作者: 王焯(1996-), 女, 硕士生, 研究方向为 VOCs 污染控制与管理。E-mail: wanghe06@163.com

## 0 引言

目前,随着我国城市化进程的加快,大气污染问题日益严重,对于如何控制并减少城市间的大气污染流动性问题成为人们的关注要点。习近平在2018年全国生态环境保护大会上强调,要加大力度推进生态文明建设、解决生态环境问题,坚决打好污染防治攻坚战,推动我国生态文明建设迈上新台阶。近年来,随着工业化进程和城市发展速度的加快,区域复合型大气污染问题日益突出<sup>[1]</sup>,目前,大气污染物的首要来源仍是PM<sub>2.5</sub>。作为雾霾天气及PM<sub>2.5</sub>形成的重要前体物,挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)释放到大气中会成为空气质量恶化的重要诱因<sup>[2]</sup>。且挥发性有机物作为一种有毒空气污染物,会对人体健康产生直接的危害<sup>[3-4]</sup>。因此,有效地解决VOCs排放问题有利于保护人类健康和生态环境,针对挥发性有机物的跨区域治理迫在眉睫。

国内外许多学者对VOCs所带来的污染风险进行评价,主要分为对生态的污染风险评价以及对人体的健康风险评价。文献[5]通过调查南四湖VOCs的污染特征并对生态风险和健康风险进行评价;文献[6]以浙江平湖6家典型化学合成类制药企业为例,对VOCs所产生的环境与健康危害进行初步评价;文献[7]对海拉尔河及傍河地下水饮用水源中VOCs的污染特征和风险水平进行研究;文献[8]对郑州高新区环境大气中VOCs的来源及潜在危害进行风险评价;文献[9]对“一带一路”国际合作高峰论坛在京召开期间北京市典型城区环境空气中VOCs的污染特征及有毒有害VOCs的健康风险进行了研究;文献[10]为了研究区域内的VOCs排放源扩散与迁移对其他城市的危害,采用了基于随机Petri网的关联区域内VOCs级联危害评价方法,计算出了区域内污染源影响其他区域或地点所带来的VOCs浓度增值累积量并利用其记录相关区域或地点所受污染的程度;文献[11]为探究工业区大气VOCs污染特征,促进工业区

VOCs 污染防控,研究了工业区和周边市区的大气VOCs污染特征、来源并开展健康风险评估,结果表明,机动车尾气和化石燃料燃烧导致了相对较高的致癌风险;文献[12]分析了2010—2016年济南市市区大气VOCs的浓度、组成特征、来源以及健康风险,健康风险评估结果表明,济南市市区大气VOCs在所研究的7年均不存在致癌风险,但是部分年份接近致癌风险水平,应引起重视,加以管控。

目前研究存在的问题:①大多数学者仅针对某一行业或地区排放的VOCs进行环境或健康风险评估,且多数针对VOCs组分进行分析;②针对VOCs生态风险评估研究的内容相对较少;③目前相关研究的情况是大多数学者仅仅只针对VOCs区域危害进行研究,没有对由于VOCs扩散而产生的区域之间的影响进行研究。

针对以上研究的不足,本文提出能够进行VOCs跨区域流动动态风险评估的函数Petri网模型,该模型具有如下优势:①借助Petri网可以将VOCs污染过程中区域间的联系清晰的呈现出来,通过定义潜在风险指数定量评估潜在污染源到受污染区域各条路径的风险程度;②可以将多个潜在污染源同时带入进行模型的建立和计算;③可以模拟出网中各对象的属性随时间变化的动态规律。

## 1 VOCs跨区域流动动态风险评估基本原理

VOCs作为目前空气污染物的重要组成部分,它的扩散受到天气、地形等多种因素的影响,在污染形成的过程中区域间的相互影响是不可避免的。VOCs来源地众多且区域间的影响程度各不相同,为了防止区域内的进一步污染,需要找出VOCs的区域间作用关系,对VOCs跨区域流动做出分析从而找出控制方法应对VOCs污染问题。下面分步骤介绍VOCs跨区域流动动态风险评估基本原理。

(1) 确定受污染区域的潜在风险源。根据

HYSPLIT 软件模拟出污染天气下受污染区域的大气扩散与迁移路径, 在路径上面提取若干个城市作为潜在污染源并确定其在同一污染时段的扩散路径, 确认这 4 个城市与受污染区域存在交叉路径, 以这些城市作为影响重污染天气形成的潜在风险源。将这些潜在污染源标记为  $P_1, P_2, \dots, P_n$ 。

(2) 用 Petri 网将区域内的潜在污染源与受污染区域的关系描述出来, 建立 Petri 网路径关系图, 作为后续计算的基础。

(3) 计算 VOCs 扩散路径的潜在风险指数, 并进行分级。首先, 沿着某一条从污染源到受污染区域的迁移路径, 结合上述 Petri 网路径关系图中的污染源和各路径交叉点信息, 计算该路径各源点以及交叉点的污染系数, 计算过程中考虑路径的交叉, 将污染系数看作一可累计的值直到所有路径提取完毕; 其次, 考虑到各条路径的贡献率不同, 故计算时通过路径贡献率来计算路径潜在风险指数。其评估原理如图 1 所示。

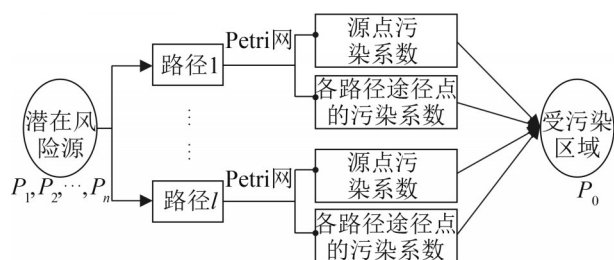


图 1 VOCs 跨区域流动动态风险评估原理  
Fig. 1 Schematic diagram of dynamic risk assessment of VOCs cross regional flow

### 1.1 VOCs 跨区域流场景分析

假设受污染区域为固定区域  $P_0$ , 受污染区域、若干个潜在扩散点与 VOCs 扩散过程的途经路径形成一个整体区域。假设  $P_1, P_2, \dots, P_n$  为整体区域内  $n$  个潜在扩散点, 在潜在扩散点与受污染区域确定的基础上, 对潜在扩散点  $P_1, P_2, \dots, P_n$  做前向轨迹聚类分析, 将潜在扩散点的轨迹与受污染区域的后向轨迹叠加, 在风的作用下 VOCs 发生迁移扩散, 假设轨迹上的风的作用仅发生一次, 各个潜在扩散

点到达受污染区域的路径分别与受污染区域附近路径发生交叉并产生交叉点。从潜在污染源扩散点开始沿着轨迹以及路径上的交叉点将 VOCs 迁移到受污染区域的路径表示出来, 从而建立各个扩散点  $P_1, P_2, \dots, P_n$  与受污染区域  $P_0$  的关系, 如图 2 所示。

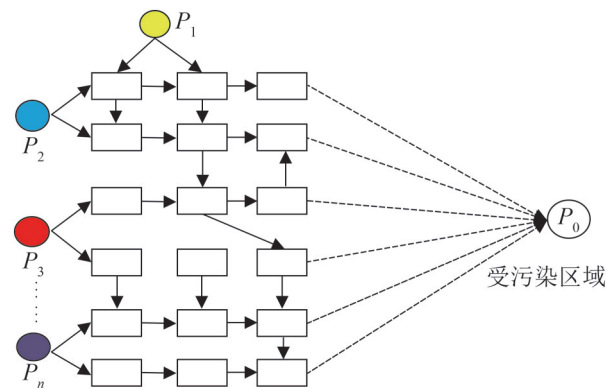


图 2 多个排放源与受污染区域关系  
Fig. 2 Relationship between multiple emission sources and contaminated areas

### 1.2 VOCs 跨区域流动动态风险评估方法

#### 1.2.1 综合污染指数法

综合污染指数法是由单项污染指数评价法与 Nemerow 综合污染指数评价 2 部分组成。其中, 单因子评价法为

$$\theta_i = \frac{C_i}{B_i} \tag{1}$$

式中:  $\theta_i$  为点  $i$  的 VOCs 污染指数;  $C_i$  为点  $i$  的 VOCs 实测值;  $B_i$  为点  $i$  的 VOCs 限值。

由于式(1)仅仅可以研究单个污染点的污染指数, 为了进一步讨论整条路径的污染指数, 提出式(2), 即 Nemerow 综合污染指数评价法:

$$\theta = \sqrt{\frac{\theta_{\max}^2 + \theta_{\text{ave}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中:  $\theta_{\max}$  为第  $l$  条路径上 VOCs 污染指数最大值;  $\theta_{\text{ave}}$  为第  $l$  条路径上所有点 VOCs 污染指数平均值;  $\theta$  为第  $l$  条路径的综合污染指数。

基于上述综合污染指数法仅仅考虑到路径上点的 VOCs 浓度值以及限值, 故以下将多条路径分别对受污染区域的贡献率分别带入计算, 将其

定义为路径潜在风险指数。

### 1.2.2 潜在危害指数法

潜在风险指数(RI)的计算是对于特定的一条 VOCs 迁移路径而言, 由于式(1)、(2)仅考虑到路径的污染程度, 并未将确切路径对于受污染区域的贡献率考虑在内, 故提出式(3)、(4):

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_l} \quad (3)$$

$$RI = \sum E_l^i = \sum \rho_i \cdot C_f^i \quad (4)$$

式中:  $C_f^i$  为点  $i$  的 VOCs 污染系数;  $C_i$  为点  $i$  的实测值;  $C_l^i$  为第  $l$  条路径上第  $i$  个点的限值;  $E_l^i$  为路径  $l$  上点  $i$  的 VOCs 潜在风险系数;  $\rho_i$  为点  $i$  所在路径的贡献率;  $RI$  为路径的 VOCs 潜在风险指数。潜在污染源风险评价指标的分级如表 1 所示。

表 1 潜在污染源风险评价指标的分级  
Table 1 Classification of risk assessment indicators of potential pollution sources

VOCs 潜在风险系数	单点源风险	潜在风险指数(RI)	总的潜在风险程度
<0.5	轻微	<0.5	轻微
0.5~0.75	中	0.5~1.5	中等
0.75~1	较强	1.5~2.5	强
1~1.5	强	>2.5	极强
>1.5	极强		

## 2 VOCs 跨区域流动动态风险评估 Petri 网模型

进行 VOCs 跨区域流动动态风险评估需要确定受污染区域与潜在扩散点之间的联系, 通过路径的建立表示出受污染区域与潜在扩散点之间的逻辑关系, 从而通过计算出污染过程中对受污染区域影响较大的扩散点。Petri 网能够构建多个同时进行的并行关系, 借助 Petri 网模型对复杂系统的描述和分析能力, 将空间地理信息融入 Petri 网的对象中, 可以实现对空间对象之间的模拟。

### 2.1 VOCs 跨区域流动 Petri 网的构造思路

选取西安作为受污染区域, 首先使用

HYSPLIT4.0 对西安进行后向轨迹模拟, 以提取周边受 VOCs 扩散与迁移影响的区域, 确定对受污染区域产生影响的扩散源点; 其次, 分别模拟出 4 个源点的前向轨迹聚类路径, 利用 Arcgis 将受污染区域与潜在扩散点的聚类路径呈现在一张图中; 选取路径交叉点以及各路径上受污染的部分区域作为研究库所点; 最后, 将路径抽象成连接各库所点的变迁, 构建 Petri 网模型。本文研究受污染区域与潜在扩散点之间的联系, 同时考虑潜在扩散点源的叠加作用, 用 Petri 网描述在气象因素、地形因素作用下 VOCs 如何从潜在扩散点源进行扩散与迁移。

### 2.2 VOCs 跨区域流动动态风险评估 Petri 网模型构造原理

#### 2.2.1 多个 VOCs 扩散源点风险评估 Petri 网评价模型

定义 1: 基于 Petri 网的 VOCs 跨区域流动动态风险评估模型 PN-IDRA 定义为一个八元组:

$$N = \langle P, T, M, J, \lambda, \theta, R, \forall \rangle$$

其中,  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$  为一个库所的有限集合,  $i > 0$ , 每个库所表示 VOCs 在关联区域内迁移的关键节点,  $\forall P_i \in P$ ,  $P_i$  为 VOCs 污染物迁移路径关键节点抽象成的对象, 包括一组属性;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  为 PN-IDRA 模型中  $m$  个变迁的集合, 表示导致 VOCs 迁移发生的事件,  $P \cap T = \emptyset$  且  $P \cup T = \emptyset$ ;  $M$  表示  $P$  到模型状态的映射, 当  $p$  表示的节点具备完全的 VOCs 扩散与迁移条件时  $M_p = 1$ , 否则  $M_p = 0$ ,  $M_0$  为初始状态;  $J$  表示库所与变迁的连接弧;  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  与变迁集  $T$  中的元素对应, 表示 VOCs 迁移速率的集合, 是 VOCs 迁移到某对象库所需平均时间的倒数;  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i\}$  与库所集  $P$  中的元素对应, 表示迁移路径的当前的 VOCs 综合污染指数;  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i\}$  与库所所在的路径相对应, 表示路径的 VOCs 潜在风险指数;  $\forall$  是一个非空有限颜色集合, 每一种颜色对应一个污染源,  $P \rightarrow \forall$ 。

根据扩散源点与受污染区域之间的关系, 构造出在 4 个扩散源点干扰下区域内关联的 Petri 网模

型, 本文将所构建的模型划分为 4 个潜在污染源与受污染区域的联系, 4 个潜在污染源相互独立又相互影响, 在气象因素的作用下 VOCs 发生扩散与迁移, 每个潜在污染源皆以西安为受污染区域。

(1) 潜在污染源 VOCs 扩散存在多条路径, 每一条路径中产生的变迁以及对于受污染区域产生的影响是不同的。提取某个潜在污染源路径上的某段受污染区域, 建立潜在污染源与受污染区域的关联, 如图 3 所示。

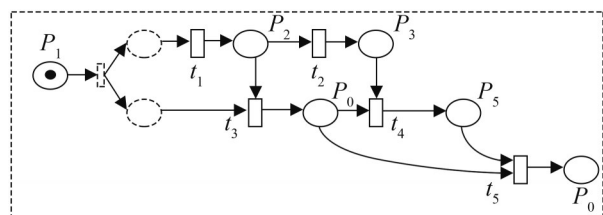


图 3 单个潜在污染源与受污染区域 Petri 网表示  
Fig. 3 Petri net representation of single potential pollution source and polluted area

(2) 不同潜在污染源共同对受污染区与产生影响, 主要是由于不同潜在污染源内部点源的扩散与迁移路径发生交叉时所产生的。如图 4 所示, 在 VOCs 扩散过程中当变迁  $t_{17}$ ,  $t_{18}$  发生后, 原本仅发生在  $P_1$  与  $P_2$  之间的相互作用受到了  $P_3$  所带来的干扰, 此时受污染区域的浓度不再受单一源点影响, 而是受到多个源点的叠加作用。

### 2.2.2 VOCs 动态风险评估 Petri 网模型构造方法

为了进行 VOCs 跨区域流动动态风险评估, 需要将整体区域抽象为 PN-IDRA 模型, 利用 VOCs 迁移过程中的浓度变化, 并结合综合污染指数法与潜在危害指数法建立评价模型, 模型构建步骤如下。

(1) 迁移路径的确定。分析 VOCs 迁移规律, 确定迁移路径是构建该模型的基础。本文使用 HYSPLIT 模型对 VOCs 潜在排放源点进行前向路径模拟, 对评价对象区域做后向路径模拟, 分别将潜在排放源点的 VOCs 扩散路径与评价对象对应的来源路径叠加, 寻找路径的交叉点, 构建一

条完整的扩散源点到受影响区域的 VOCs 迁移路径。

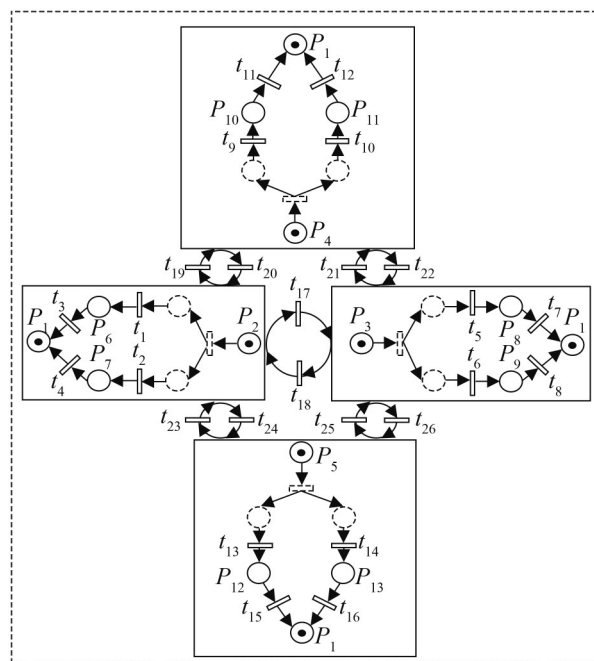


图 4 受污染区域及其潜在污染源关联 Petri 网表示  
Fig. 4 Petri net representation of contaminated areas and their potential pollution sources

(2) 将交叉点抽象为库所。模型的库所代表 VOCs 迁移路径上的扩散源点及路径交叉点, 并将其看作关键节点, 按照下列步骤抽象出库所: ①选定一条路径, 将扩散点抽象为第一个库所, 按照 VOCs 迁移路径寻找路径交叉点以及其他关键节点, 将其抽象为库所, 直至到达路径终点; ②选择另一条路径重复步骤①, 直至所有路径抽象为库所; ③将重复的库所合并。

(3) 确定变迁关系。PN-IDRA 模型的变迁由库所所表示的关键节点之间的 VOCs 迁移路径抽象而来, 若 2 个库所之间存在 VOCs 迁移路径, 必然可以确定变迁关系。变迁关系的确定按照下列步骤进行: ①确定一条迁移路径, 从扩散源点出发沿着 VOCs 迁移路径寻找第一个库所  $p$ , 在 2 个库所间建立变迁关系, 继而从库所  $p$  出发, 按照相同方法寻找下一库所添加变迁直到到达路径终点; ②选择一条未进行变迁的路径重复上一步骤, 直

到所有路径提取完毕。

(4) 添加库所属性值。将 VOCs 浓度值、综合污染指数、潜在风险指数作为库所中的属性值代入，描述对象库所在运行过程中动态变化的属性。在运行过程中，结合 VOCs 动态风险评估 Petri 网变迁规则，代入 VOCs 浓度、关联区域系统污染指数以及潜在危害指数计算方法运行 Petri 网，直至所有迁移路径提取完毕。

(5) 形成 PN-IDRA 模型。以 VOCs 迁移路径为基础对系统做抽象处理，将迁移路径关键节点抽象为库所，将关键节点之间的 VOCs 迁移路径抽象为变迁，代入 VOCs 浓度、关联区域系统污染指数以及潜在危害指数计算方法，构造 VOCs 迁移影响下跨区域流动动态风险评估 PN-IDRA 模型。

上述模型的构建流程如图5所示。

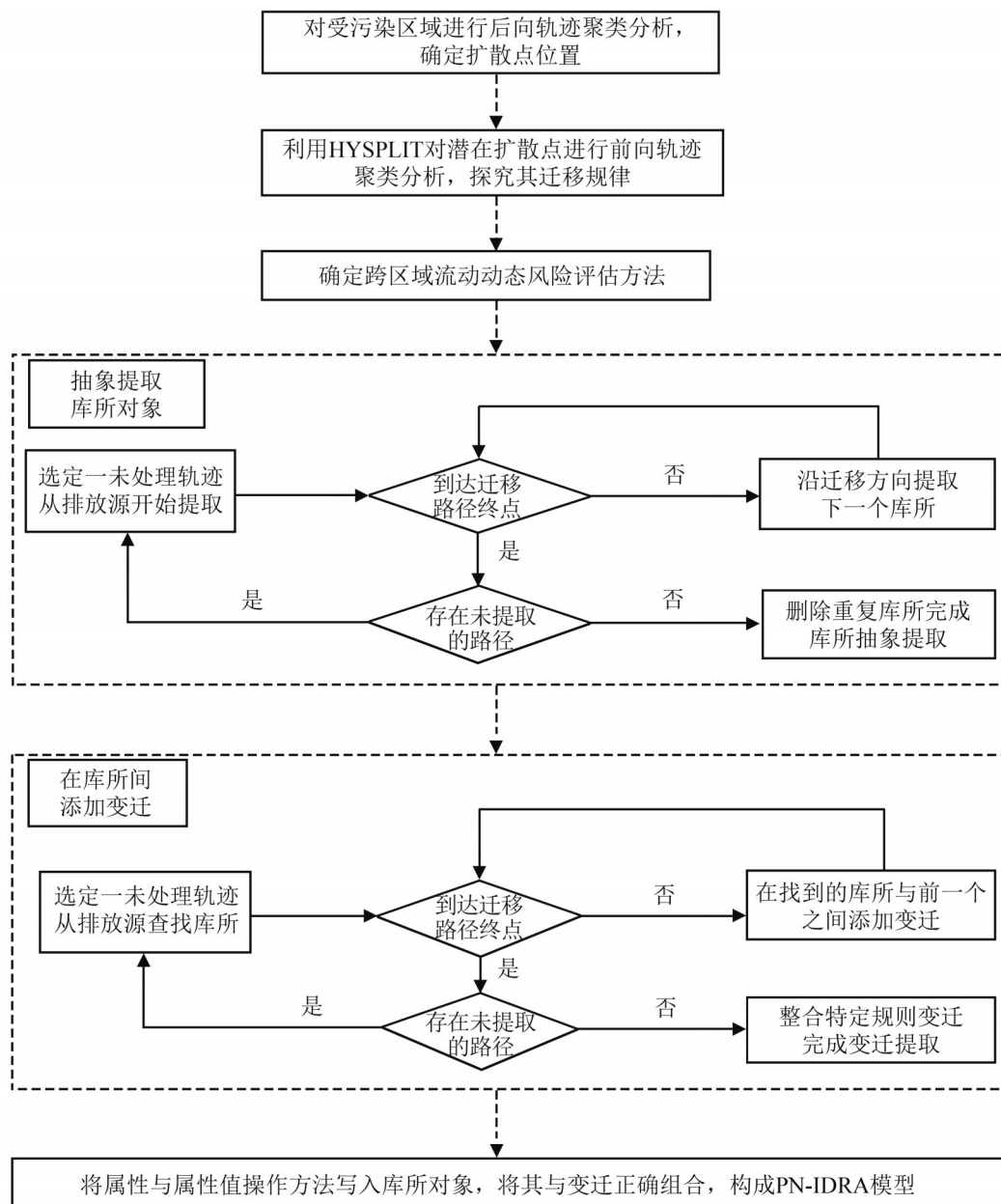


图5 PN-IDRA 模型构建方法流程图  
Fig. 5 Flow chart of PN-IDRA model construction method



### 2.3 模型变迁规则及相关计算

#### 2.3.1 模型变迁规则

模型中的变迁表示 VOCs 在迁移路径节点之间的运动, 在模型中按照固定的规则计算库所中的各种属性。从多个潜在扩散点排放 VOCs 的过程中, 每个来源都可以对受污染区域的环境造成损害, VOCs 对整体区域造成的风险应该基于评价指标衡量, 当评价指标达到或者超过一个定值, VOCs 迁移过程将会对受污染区域产生的风险等级较高, 反之评价指标值较小则说明对受污染区域产生的风险等级较低, 但是无论风险大小其都是一个叠加的过程, 直至风险等级达到极强。

(1) 累加值。若  $\varphi_w$  表示发生变迁后库所待更新属性当前时刻的值,  $\varphi_v$  为库所未发生变迁前的库所属性值, 是一个累计值, 当变迁  $t$  发生时:

$$\varphi_w(t+1) = \begin{cases} \varphi_w(t), & M(p)=0 \\ \varphi_w(t) + \lambda\varphi_v, & M(p)=1 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 约束条件。在 PN-IDRA 模型中, 污染物在迁移过程中整体区域的风险在不断累计, 因而系统风险值不会出现负值。

$$D(p_w) = \begin{cases} D(p_w), & D(p_w) > 0 \\ 0, & D(p_w) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

#### 2.3.2 VOCs 浓度计算

在进行 VOCs 跨区域流动动态风险评估的计算过程中, 需要得出受污染区域、扩散点及其路径所形成的交叉点所形成的各库所 VOCs 污染物浓度分布, 高斯烟羽模型可以对污染物颗粒扩散进行准确模拟, 本文利用高斯烟羽模型对 PN-IDRA 模型上任意对象库所进行 VOCs 浓度模拟, 将模型定义为

$$C(x, y, z, t) = \rho_l \frac{Q_0}{4\pi x(\sigma_y \sigma_z)^2} \exp \left[ -\frac{\mu}{4x} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $\rho_l$  为聚类路径  $l$  的贡献率;  $Q_0$  为潜在扩散点源瞬时排放量;  $x, y, z$  分别为对象库所距离

污染潜在源的距离;  $\mu$  为平均风速;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为  $x, y, z$  的扩散系数; 其取值与天气和风速有关<sup>[1]</sup>。

## 3 实例分析

### 3.1 VOCs 跨区域流动动态风险评估 Petri 网模型的构建

VOCs 跨区域流动动态风险评估模型的构建基于 VOCs 扩散与迁移路径, 本文以西安为例, 通过对比全国城市的空气质量指数, 发现 2019 年 11 月西安成为全国空气质量最差的城市, 因此以该时段为例进行跨区域 VOCs 动态风险评价研究具有重大意义, 以此验证模型的可行性。本文以西安作为 VOCs 聚集路径的目标, 分别以兰州、西宁、汉中、宝鸡作为 VOCs 迁移的起始点, 研究在重污染天气下各污染源沿聚集路径与扩散路径对西安造成的污染风险。选取时间为 2019 年 11 月的第一周, 利用 HYSPLIT4.0 分别对 VOCs 排放点和聚集目标进行前向和后向轨迹模拟, 期间得出有效前向轨迹共计 672 条, 有效后向轨迹共计 168 条, 分别对后向轨迹和前向轨迹进行聚类分析, 并按照经纬度叠加并选取路径交叉点, 如图 6 所示。

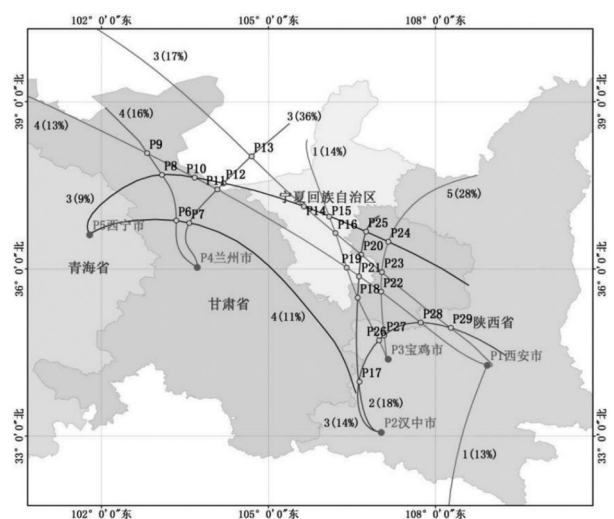


图 6 受污染区域与其潜在扩散点聚类图  
Fig. 6 Cluster diagram of polluted area and its potential diffusion points

根据研究区域 PN-IDRA 模型，将受污染区域与潜在排放源进行编号，分别为  $P_1$ (西安)， $P_2$ (汉中)， $P_3$ (宝鸡)， $P_4$ (兰州)， $P_5$ (西宁)，迁移路径上产生的交点依次编号为  $P_6 \sim P_{29}$ ，每一个点作为一个对应库所， $t_m$  表示库所之间的变迁，建立的 Petri 网模型如图 7 所示。

在以西安为受污染区域的系统模型中， $t_1 \sim t_{38}$  表示 VOCs 在扩散与迁移过程中的变迁，均指气象因素中的风的作用。提取的对象库所皆为地区，Petri 网中各地区的地理信息如表 2 所示。

通过计算可以得出各条路径上的点在研究时段的污染系数以及路径的潜在风险指数以及综合污染指数，结合潜在风险指数将各条路径对于西安市的影响分别作出风险等级评估，评估标准如表 1。进而进行由于 VOCs 跨区域流动引起的区域风险评估，如表 3 所示。

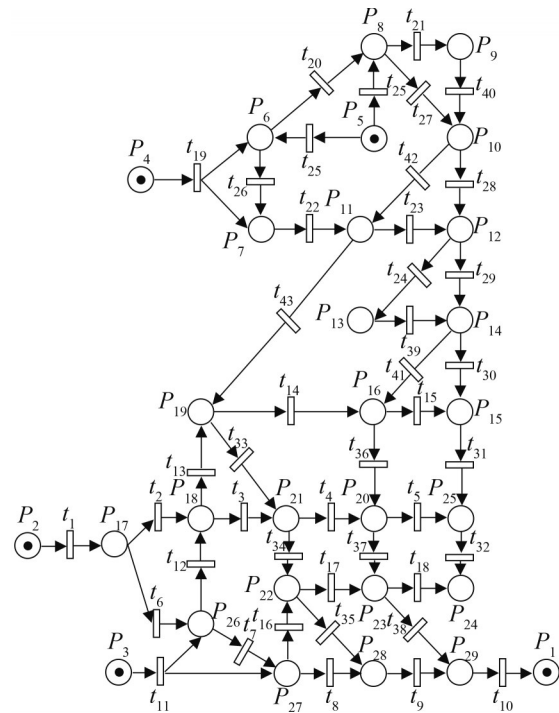


图 7 多污染源 VOCs 跨区域流动 Petri 网模型  
Fig. 7 Multi pollution source VOCs cross regional flow Petri nets model

表 2 Petri 网中各个路径的库所详细信息  
Table 2 Library details of each path in Petri nets

潜在污染源	路径编号	路径贡献率/%	库所编号	坐标	库所位置			
兰州	4	16	$P_6$	36.87N, 103.34E	永登县			
			$P_8$	37.69N, 103.09E	景泰县			
			$P_9$	38.08N, 108.82E	古浪县黄花滩镇			
	3	36	$P_7$	36.82N, 103.58E	兰州新区上川镇			
			$P_{11}$	37.43N, 104.08E	景泰县草窝滩镇			
			$P_{12}$	37.54N, 104.19E	景泰县温都尔勒图镇			
			$P_{13}$	38.02N, 104.70E	中卫市			
			西宁	3	9	$P_8$	37.69N, 103.09E	景泰县
						$P_{10}$	37.64N, 103.67E	武威市
$P_{12}$	37.54N, 104.19E	景泰县温都尔勒图镇						
4	11	$P_{14}$		37.12N, 105.64E	同心县喊叫水乡			
		$P_{15}$		36.94N, 106.09E	同心县王团镇			
		$P_{24}$		36.49N, 107.15E	环县			
		$P_{25}$		36.67N, 106.75E	小南沟乡			
		汉中		2	18	$P_6$	36.87N, 103.34E	永登县
						$P_7$	36.82N, 103.58E	兰州新区上川镇
$P_{17}$	33.98N, 106.63E		凤县					
4	18		$P_{18}$	35.48N, 106.60E	平凉市			
			$P_{20}$	36.26N, 106.67E	固原市王洼镇			
			$P_{21}$	35.87N, 106.63E	彭阳县			
			$P_{25}$	36.67N, 106.75E	小南沟乡			

续表

潜在污染源	路径编号	路径贡献率/%	库所编号	坐标	库所位置
宝鸡	3	14	$P_{26}$	34.72N, 106.98E	千阳县水沟镇
			$P_{27}$	34.81N, 107.08E	千阳县张家塬镇
			$P_{28}$	35.04N, 107.74E	灵台县
			$P_{29}$	34.94N, 108.28E	旬邑县龙高镇
	1	14	$P_{15}$	36.94N, 106.09E	同心县王团镇
			$P_{16}$	36.64N, 106.20E	同心县七营镇
			$P_{18}$	35.48N, 106.60E	平凉市
			$P_{19}$	36.02N, 106.40E	固原市
			$P_{26}$	34.72N, 106.98E	千阳县水沟镇
			$P_{27}$	34.81N, 107.08E	千阳县张家塬镇
	5	28	$P_{22}$	35.59N, 107.02E	镇原县
			$P_{23}$	35.94N, 107.04E	庙渠镇
			$P_{24}$	36.49N, 107.15E	环县
			$P_{27}$	34.81N, 107.08E	千阳县张家塬镇

表 3 对象库所的综合污染指数以及路径风险等级  
Table 3 Comprehensive pollution index and path risk level of object library

对象库所	浓度实测值/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	路径贡献率/%	污染系数 $E$	风险等级	潜在风险指数 $RI$	综合污染指数 $\theta$
$P_4$	115	16	0.297	轻微	0.365	0.22
$P_6$	10.427		0.027			
$P_7$	13.417		0.035			
$P_8$	2.3		0.006			
$P_9$	0.153	36	0.001	轻微	0.1	0.035
$P_{11}$	7.283		0.042			
$P_{12}$	7.053		0.041			
$P_{13}$	2.683		0.016			
$P_5$	189	11	0.347	轻微	0.402	0.263
$P_6$	15.419		0.028			
$P_7$	14.726		0.027			
$P_8$	12.687		0.019			
$P_{10}$	11.481	9	0.017	轻微	0.08	0.016
$P_{12}$	10.064		0.015			
$P_{14}$	6.946		0.010			
$P_{15}$	5.812		0.006			
$P_{25}$	4.820		0.007			
$P_{24}$	3.898		0.006			
$P_2$	125	14	0.407	中等	0.52	0.294
$P_{17}$	10.865		0.035			
$P_{26}$	8.24		0.027			
$P_{27}$	7.802		0.025			
$P_{28}$	4.885		0.016			
$P_{29}$	3.063		0.010			
$P_{18}$	8.343	18	0.345	轻微	0.409	0.254
$P_{20}$	6.938		0.029			
$P_{21}$	5.343		0.022			
$P_{25}$	3.094		0.013			

续表

对象库所	浓度实测值/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	路径贡献率/%	污染系数 $E$	风险等级	潜在风险指数 $RI$	综合污染指数 $\theta$
$P_3$	228		1.030			
$P_{27}$	57.456		0.259			
$P_{22}$	44.954	28	0.203	强	1.819	0.772
$P_{23}$	39.9		0.180			
$P_{24}$	32.452		0.147			
$P_{26}$	28.728		0.065			
$P_{18}$	22.078		0.050			
$P_{19}$	18.62	14	0.042	轻微	0.221	0.056
$P_{16}$	15.162		0.034			
$P_{15}$	13.3		0.030			
$P_1$	331		1.705			
$P_{29}$	46.892		0.242			
$P_{23}$	37.279		0.192			
$P_{20}$	35.169	17	0.181	极强	2.739	1.237
$P_{16}$	32.355		0.167			
$P_{14}$	28.369		0.146			
$P_{13}$	20.632		0.106			
$P_{28}$	53.457		0.211			
$P_{22}$	51.346		0.202			
$P_{21}$	49.471		0.195			
$P_{19}$	49.002	13	0.193	中等	1.285	0.198
$P_{11}$	42.203		0.166			
$P_{10}$	41.265		0.163			
$P_9$	39.389		0.155			

### 3.2 结果分析与讨论

通过计算, 可以得出各条潜在污染路径所对应的综合污染指数以及风险等级, 即可以分析出西安市潜在污染源的风险程度大小, 如图 8、9 所示。

由图 8 可知, 在重污染天气下由各个污染源城市对西安产生的影响各不相同, 结合表 3 可知汉中、宝鸡对西安的污染程度最强, 其中汉中的危害程度 0.52, 危害程度中等, 综合污染指数为 0.294。宝鸡的危害程度为 1.819, 其综合污染指数为 0.772。总体来说, 各个污染源城市对西安的影响程度大小由高到低依次为宝鸡>汉中>西宁>兰州。其中宝鸡所在路径 1 的贡献率是 14%, 路径 5 的贡献率是 28%, 其中路径 5 的危害程度较强,

综合污染指数达到 0.772。汉中所在路径 2 贡献率为 18%、路径 3 为 14%, 其中路径 3 的危害性较强, 综合污染指数为 0.294。西宁所在路径 3 贡献率为 9%, 所在路径 4 贡献率为 11%, 其中路径 4 的危害程度较大, 综合污染指数为 0.263。兰州所在路径 4 贡献率为 16%, 路径 3 的贡献率为 36%, 路径 4 的危害程度较大, 综合污染指数更高为 0.22。其中宝鸡距离西安较近, 受到重污染天气影响较强, 对西安的综合污染指数也较其他城市较大。汉中在扩散过程中, 在接近西安的扩散路径时呈现出较高的污染系数。所以在西安污染防治过程中, 需要采取措施从源头减少周边城市如宝鸡、汉中的 VOCs 排放, 并根据污染源的迁移路径建立联防联控措施减少 VOCs 的扩散。

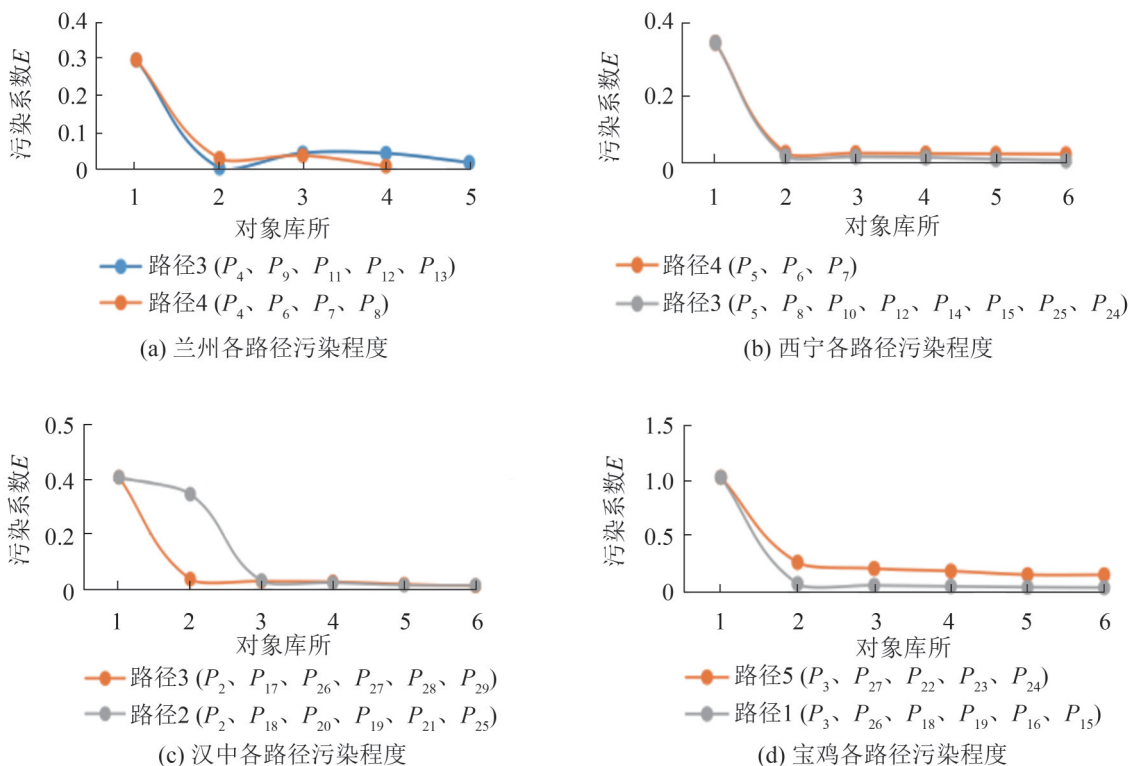


图8 各潜在污染源对受污染区域的影响

Fig. 8 Impact of potential pollution sources on polluted areas

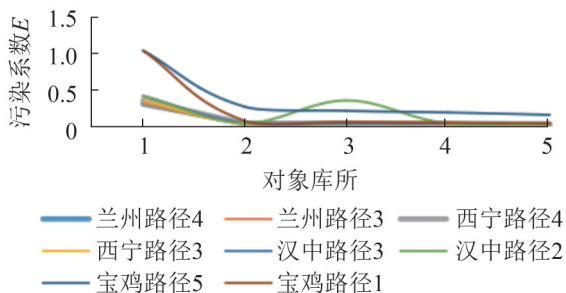


图9 各个潜在污染路径污染程度对比

Fig. 9 Comparison of pollution degree of each potential pollution path

## 4 结论

(1) 本文基于 Petri 网的特点, 提出一种基于 Petri 网的 VOCs 跨区域流动动态风险评估方法, 定量评估污染过程中潜在污染源的风险和污染指数, 从而分析出 VOCs 跨区域流动过程中受污染区域以及周边区域互相影响的程度, 为大气污染物跨区域流动的分析过程提供了理论依据。

(2) 以西安为例, 结合模型运行过程将西安的

VOCs 扩散过程以及西安周边潜在污染源的 VOCs 扩散过程直观地表示出来, 分析结果显示宝鸡和汉中是西安大气污染的主要来源区域, 故后续要加强这两个城市对西安污染物传播路径的控制, 提升西安的空气质量。

(3) 为研究 VOCs 对其他区域造成的污染提供科学的评估方法及体系, 为大气污染联防联控区域的建立提供理论依据, 并可以提供相应的治理方案为实现环境保护以及人类健康提供参考。

(4) 所描述的 VOCs 跨区域流动动态风险评估仅基于潜在污染源对受污染区域的影响做出了相应的结果分析, 未对区域之间的交互影响做出进一步的分析, 后续可将 Petri 网模型进一步优化, 从而输出多个区域间相互作用的 VOCs 跨区域流动动态风险评估结果。

## 参考文献:

[1] 陆秋琴, 李玮, 黄光球. 陕西省 VOCs 人为源高分辨率排放清单及时空分布[J]. 福建师范大学学报(自然科学

- 版), 2018, 34(4): 32-43.
- Lu Qiuqin, Li Wei, Huang Guangqiu. High Resolution Emission Inventory and Temporal and Spatial Distribution of VOCs from Anthropogenic Sources in Shaanxi Province[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2018, 34(4): 32-43.
- [2] 王琴, 刘保献, 张大伟, 等. 北京市大气VOCs的时空分布特征及化学反应活性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3636-3646.
- Wang Qin, Liu Baoxian, Zhang Dawei, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Chemical Reaction Activity of Atmospheric VOCs in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3636-3646.
- [3] 陈雨, 万宝春, 倪爽英, 等. 京津冀VOCs排放环境政策比较分析[J]. 绿色科技, 2018(4): 130-133, 135.
- Chen Yu, Wan Baochun, Ni Shuangying, et al. Comparative Analysis of VOCs Emission Environmental Policies in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Green Technology, 2018(4): 130-133, 135.
- [4] Zhang Xinmin, Xue Zhigang, Li Hong, et al. Ambient Volatile Organic Compounds Pollution in China[J]. Journal of Environmental Sciences (S1001-0742), 2017, 55(5): 69-75.
- [5] 程云轩, 高秋生, 李捷, 等. 淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1820-1829.
- Cheng Yunxuan, Gao Qiusheng, Li Jie, et al. Pollution Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Nansi Lake of Huaihe River Basin[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1820-1829.
- [6] 周洁, 何雪芹, 王捷. 化学合成类制药行业工艺废气VOCs排放特征与危害评估分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(5): 166-169.
- Zhou Jie, He Xueqin, Wang Jie. VOCs Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Process Waste Gas in Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2020, 38(5): 166-169.
- [7] 张坤锋, 赵少延, 孙兴滨, 等. 海拉尔河及傍河地下水饮用水源中挥发性有机物的污染特征与风险[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 74-82.
- Zhang Kunfeng, Zhao Shaoyan, Sun Xingbin, et al. Pollution Characteristics and Risks of Volatile Organic Compounds in Drinking Water Sources of Groundwater in Hailar River and Adjacent Rivers[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 74-82.
- [8] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市高新区大气VOCs源解析及风险评估[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增2): 201-208.
- Qi Yijin, Ni Jingwei, Zhao Dongxu, et al. Source Analysis and Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Zhengzhou High Tech Zone[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43(S2): 201-208.
- [9] 程曦, 张利慧, 李红, 等. 首届"一带一路"会议期间北京市典型城区空气中VOCs的污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2019, 39(9): 2839-2851.
- Cheng Xi, Zhang Lihui, Li Hong, et al. One Belt, One Road Conference, Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Typical Urban Area of Beijing During[J]. Journal of Environmental Science, 2019, 39(9): 2839-2851.
- [10] 黄光球, 叶文娟, 陆秋琴. 基于随机Petri网的关联区域内VOCs级联危害评价[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(7): 1882-1896.
- Huang Guangqiu, Ye Wenjuan, Lu qiuqin. Cascading Hazard Assessment of VOCs in Associated Areas Based on Stochastic Petri Nets[J]. System Engineering Theory and Practice, 2021, 41(7): 1882-1896.
- [11] 李陵, 张丹, 胡伟, 等. 西南地区大型综合工业区和周边区域大气VOCs污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 102-112.
- Li Ling, Zhang Dan, Hu Wei, et al. Characteristics of Atmospheric VOCs Pollution and Health Risk Assessment in Large Comprehensive Industrial Areas and Surrounding Areas in Southwest China[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 102-112.
- [12] 桑博, 魏凤霞. 济南市区大气中VOCs的浓度、来源及健康风险评估[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(2): 169-177.
- Sang Bo, Wei Fengxia. Concentration, Source and Health Risk Assessment of VOCs in the Atmosphere of Jinan City[J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(2): 169-177.