

3-22-2023

## Calculation of Optimal VOCs Emission Reduction Based on Improved SEIRS Model in Cloud Environment

Guangqiu Huang

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

Xixuan Zhao

*Management College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;*

Qiuqin Lu

*Management College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;*

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.

---

## Calculation of Optimal VOCs Emission Reduction Based on Improved SEIRS Model in Cloud Environment

### Abstract

**Abstract:** Volatile organic compounds (VOCs) emissions in different regions are correlated and influenced. In order to minimize the impact of VOCs on the atmospheric environment and achieve synergistic governance of VOCs regions, *an optimal emission reduction model is established with the maximum VOCs emission reduction as the primary goal. An improved SEIRS infectious disease dynamics optimization algorithm considering environmental pollution(SEIRS-CE) is proposed and the model is solved in cloud environment.* Taking Xi'an city as an example, the SEIRS-CE algorithm is used in Ali cloud server to calculate the emission reduction of VOCs associated with 13 meteorological monitoring stations in Xi'an city and compared with the traditional intelligent optimization algorithm. The results show that the established VOCs optimal emission reduction model is scientific and feasible. Compared with the contrast algorithm, the SEIRS-CE algorithm in cloud environment can solve the VOCs optimal emission reduction problem with faster convergence speed, higher solution accuracy, lower probability of falling into local trap, with high concurrency, high security, high sharing, and provide reference for the joint prevention and control of VOCs among the government.

### Keywords

VOCs(volatile organic compounds), cloud computing, SEIRS infectious disease model, joint prevention and control, optimal emission reduction scheme

### Recommended Citation

Guangqiu Huang, Xixuan Zhao, Qiuqin Lu. Calculation of Optimal VOCs Emission Reduction Based on Improved SEIRS Model in Cloud Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 632-645.

# 云环境下基于改进 SEIRS 模型的 VOCs 最优减排计算

黄光球, 赵羲轩, 陆秋琴

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 不同区域的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)排放是相互关联与影响的, 为了将 VOCs 对大气环境的影响降到最低, 实现 VOCs 区域协同联动治理, 建立了以 VOCs 减排总量最大为首要目标最优减排模型, 提出一种考虑环境污染因素的改进 SEIRS 传染病动力学优化算法 (SEIRS infectious disease dynamics optimization algorithm considering environmental pollution, SEIRS-CE) 在云环境下求解模型。应用案例以西安市为例, 在阿里云服务器中使用 SEIRS-CE 算法对西安市 13 个气象监测站所对应 VOCs 关联区域减排问题进行计算并与传统智能优化算法进行对比, 结果表明建立的 VOCs 最优减排模型具有科学性和可行性, 在云环境下使用 SEIRS-CE 算法相较于对比算法求解 VOCs 最优减排问题的收敛速度更快, 求解精度更高, 陷入局部陷阱概率更低, 具有高并发性、高安全性、高共享性, 对府际间 VOCs 联防联控治理提供借鉴。

**关键词:** VOCs; 云计算; SEIRS 传染病模型; 联防联控; 最优减排方案

中图分类号: TP301.6; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)03-0632-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1177

**引用格式:** 黄光球, 赵羲轩, 陆秋琴. 云环境下基于改进 SEIRS 模型的 VOCs 最优减排计算[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 632-645.

**Reference format:** Huang Guangqiu, Zhao Xixuan, Lu Qiuqin. Calculation of Optimal VOCs Emission Reduction Based on Improved SEIRS Model in Cloud Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 632-645.

## Calculation of Optimal VOCs Emission Reduction Based on Improved SEIRS Model in Cloud Environment

Huang Guangqiu, Zhao Xixuan, Lu Qiuqin

(Management College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Volatile organic compounds (VOCs) emissions in different regions are correlated and influenced. In order to minimize the impact of VOCs on the atmospheric environment and achieve synergistic governance of VOCs regions, an optimal emission reduction model is established with the maximum VOCs emission reduction as the primary goal. An improved SEIRS infectious disease dynamics optimization algorithm considering environmental pollution (SEIRS-CE) is proposed and the model is solved in cloud environment. Taking Xi'an city as an example, the SEIRS-CE algorithm is used in Ali cloud server to calculate the emission reduction of VOCs associated with 13 meteorological monitoring stations in Xi'an city and compared with the traditional intelligent optimization algorithm. The results show that the established VOCs optimal emission reduction model is scientific and feasible. Compared with the contrast algorithm, the SEIRS-CE algorithm in cloud environment can solve the VOCs optimal emission reduction problem with faster convergence speed, higher solution accuracy, lower probability of falling into local trap, with high concurrency, high security, high sharing, and provide reference for the

收稿日期: 2021-11-16 修回日期: 2021-12-30

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, 研究方向为污染控制与管理, 群智能优化算法等。E-mail: huangnan93@163.com

joint prevention and control of VOCs among the government.

**Keywords:** VOCs(volatile organic compounds); cloud computing; SEIRS infectious disease model; joint prevention and control; optimal emission reduction scheme

## 0 引言

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)由烷烃、芳香烃类、烯烃类、卤烃类、酯类等8类化合物构成,几乎全部VOCs都是硫化物或含氯含氮有机化合物,同时VOCs也是形成臭氧(O<sub>3</sub>)和细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)的重要前体物<sup>[1-2]</sup>。VOCs可在空气中形成光化学烟雾,造成环境污染<sup>[3]</sup>。VOCs还会增加人患呼吸道疾病、白血病、神经认知障碍和癌症的风险,严重危害人体健康<sup>[4]</sup>。随着近几年城市化进程的加快,中国的大气污染问题日益突出,减少VOCs的排放对改善空气质量并降低VOCs对大气环境的影响至关重要<sup>[5]</sup>。

目前国内外对VOCs减排的研究,主要可分为污染源排放清单构建、空气质量模型模拟、VOCs最优减排优化计算三个方面。针对污染源排放清单构建的方法,早在21世纪初,已有外国学者对中国的气体排放情况研究并构建排放清单<sup>[6-7]</sup>,但是由于这些研究使用的资料缺乏陈旧,导致了排放清单不够系统且精度较差。目前国内关于排放清单最新的研究,如文献[8]利用排放因子法估算了天水市主城区十类污染源的九种污染物排放量,构建了2019年天水市主城区高分辨率排放清单,并采用横向比较法和模式验证法评估了排放清单的合理性,结果表明该研究构建的排放清单合理,可以作为天水市VOCs治理和环境空气质量管理的依据;文献[9]构建了中国非道路移动源排放清单,结果表明在2019年主要非道路移动源保有量持续增长的情况下,提前实行国IV阶段排放标准可减少工程机械各种污染物排放约0.8%~4.4%,挖掘机、装载机与叉车减排效果明显,为我国非道路移动源VOCs减排管控提供了思路。针对空气质量模型模拟的方法,该方法可对污染

物的空间分布进行模拟,对VOCs减排效果进行评估<sup>[10]</sup>。如文献[11]利用CMAQ模型分析了PM<sub>2.5</sub>对南京本地不同前体物排放的敏感性,模拟了4种减排情景的空气质量变化,最终获得达标约束下VOCs排放总量控制指标;文献[12]使用MCM模型确定了2018年华北平原区域臭氧的主要来源,得出了减少交通和工业部门的前体物排放,可有效降低VOCs浓度的结论;文献[13-14]利用GEOS-Chem模型分别模拟了RCP情景下2050年全球地面与2000—2050年中国区域近地面的臭氧浓度变化,量化了气候和排放变化对空气质量的影响,得出了应降低NO<sub>x</sub>、CO、VOCs的人为排放与全球CH<sub>4</sub>浓度的结论。对于VOCs最优减排进行优化计算的方法,文献[15]利用RegAEMS模型与多目标遗传算法,对临汾市14类行业源以及17个区域源的PM<sub>2.5</sub>浓度进行达标规划,实现了污染物排放量最大和减排成本最小的双目标优化;文献[16]使用MOEA/DAMA算法对VOCs最优减排问题进行求解,得到了以减排总量最大、减排成本最低、VOCs减排产生的经济影响最小的VOCs减排方案。

根据上述分析,目前学者大多通过构建VOCs排放清单与进行空气质量模型模拟来对VOCs减排进行研究,对于通过数学理论方法进行VOCs最优减排的优化计算鲜有研究,而且现有研究大多只针对单个区域或地区,所使用的模型和参数共享性差,不能实现VOCs减排的区域协同与联防联控治理。鉴于此,本文在现有研究基础上建立了可在时间和空间上协同进行减排的VOCs最优减排模型。并综合考虑SEIRS传染病模型求解各种复杂非线性优化问题的优势后<sup>[17]</sup>,提出了一种考虑环境污染因素的SEIRS-CE(SEIRS infectious disease dynamics optimization algorithm

considering environmental pollution)算法, 该算法在SEIRS仓室模型的基础上增加了环境污染因素, 提高了仓室模型及相应微分方程组的复杂度, 提升了算法的搜索能力和求精能力, 降低了算法陷入局部陷阱的概率。然后将VOCs最优减排模型与SEIRS-CE算法程序部署到阿里云服务器, 实现在高并发性、高安全性、高共享性的云环境下快速精确求解VOCs最优减排问题, 对VOCs联防联控治理与环境保护具有重要意义。

## 1 VOCs最优减排模型构建

### 1.1 约束条件

某城市中建立了 $n$ 个气象监测点, 分别对应 $n$ 个区域, 每个区域都会排放 $m$ 种不同量的VOCs挥发性有机物。在气象因素的作用下, 各个监测点所对应区域排放的VOCs中的一部分会扩散到其他区域, 剩余部分仍留在本区域。为了实现VOCs最优减排, 建立了VOCs最优减排模型。该模型是一种跨时间和空间的协同减排模型, 既考虑了前面时期的排放状况, 又考虑到了 $n$ 个区域之间的互相影响。设当前的时期为 $t$ , 每个时期跨度为一个月, 则约束条件的具体构造方法如下。

#### (1) VOCs迁移表示

$t$ 时期各个区域污染物总减排量可表示为 $U(t)=[U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)]^T$ , 其中 $U_i(t)=[u_{i,1}(t), u_{i,2}(t), \dots, u_{i,m}(t)]$ 表示 $t$ 时期区域 $i$ 中的各种污染物的减排量, 则 $U(t)$ 可表示为 $U(t)=[u_{i,j}(t)]_{n \times m}$ 。

令矩阵 $P$ 为 $t$ 时期区域 $j$ 迁入到区域 $i$ 的VOCs浓度,  $P(t)=[p_{j,i}(t)]_{n \times n}$ 。  $p_{j,i}(t)$ 可由式(1)表示。

$$p_{j,i}(t) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{i=1}^m u_{i,i}(t) \lambda_j(t) \right) \quad (1)$$

式中:  $\lambda_j(t)$ 为 $t$ 时期区域 $j$ 的迁入迁出系数,  $\lambda \in (0, 1)$ 。

迁入矩阵 $P$ 可由式(2)表示。

$$P(t) = \begin{pmatrix} p_{1,1}(t) & \dots & p_{n,1}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ p_{1,n}(t) & \dots & p_{n,n}(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

同理, 设矩阵 $Q$ 为 $t$ 时期从区域 $i$ 迁出到区域 $j$ 的VOCs浓度,  $Q(t)=[q_{i,j}(t)]_{n \times n}$ 。  $q_{i,j}(t)$ 可由式(3)表示。

$$q_{i,j}(t) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) \lambda_i(t) \right) \quad (3)$$

迁出矩阵 $Q$ 可由式(4)表示。

$$Q(t) = \begin{pmatrix} q_{1,1}(t) & \dots & q_{1,n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ q_{n,1}(t) & \dots & q_{n,n}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

VOCs的扩散符合高斯扩散模型<sup>[18]</sup>, 可通过该模型模拟计算 $t$ 时期不同区域的迁入迁出系数 $\lambda$ , 如式(5)所示:

$$U_{x,y,z}^i(t) = \frac{\sum_{j=1}^n u_{i,j}(t)}{2\pi H \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ - \left( \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (5)$$

式中:  $U_{x,y,z}^i(t)$ 表示 $t$ 时期以监测点 $i$ 为中心, 空间坐标为 $x, y, z$ 处的VOCs气体浓度;  $\sum_{j=1}^n u_{i,j}(t)$ 为区域 $i$ 的VOCs总浓度;  $H$ 为传播距离;  $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 为扩散系数, 其取值与具体天气状况和风速有关。

同时为方便计算, 令矩阵 $PQ$ 为迁入迁出浓度矩阵, 其含义为 $t$ 时期区域 $i$ 迁出到其他区域以及其他区域迁入到区域 $i$ 后的剩余VOCs总浓度值。

$$PQ_i(t) = \sum_{k=1}^n (p_{ki}(t) - q_{ik}(t)) \quad (6)$$

#### (2) 约束条件定义

模型的试探解 $U(t)=[U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)]^T$ ,  $U_i(t)$ 为 $t$ 时期 $i$ 区域VOCs减排量。  $u_{i,j}(t) < 0$ 时目标函数值无意义, 每个区域的减排量都要大于等于0。

$$u_{i,j}(t) \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

在 $t$ 时期, 区域 $i$ 的VOCs减排浓度取值范围 $u_{i,j}(t)$ 还需要大于前面时期未完成的减排量, 小于该时期区域 $i$ 的总浓度, 如式(8), (9)所示:

$$u_{i,j}(t) \leq u_{i,j}(t-1) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) \geq \sum_{s=1}^{t-1} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(s) + PQ_i(s) - u_{i,j}(s-1) \right) \quad (9)$$



$VOCs\_V$ 为受区域*i*影响的其他区域集合, 在模型中, 假定每个区域均受到其他所有区域的影响, 则*t*时期区域*i*的受影响区域集合为

$$VOCs\_V_i(t) = \{1, 2, \dots, n\}, i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$VOCs\_V_0$ 为区域影响系数, 其含义为在各个区域的共同影响下, *t*时期区域*i*减排后的VOCs剩余浓度与所有区域的VOCs浓度和的绝对值之比不大于 $VOCs\_V_0$ , 其取值为给定常数, 由实际情况决定, 一般情况下 $VOCs\_V_0 \in (0, 1)$ 。

$$\left| \frac{\sum_{k \in VOCs\_V_i} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_k(t) \right) - u_{i,j}(t)}{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{k \in VOCs\_V_i} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_k(t) \right) - u_{i,j}(t) \right)} \right| \leq VOCs\_V_0 \quad (11)$$

$VOCs\_U$ 为区域减排系数, 其含义为*t*时期区域*i*的减排量与该区域经迁入迁出影响后的剩余浓度之比不小于 $VOCs\_U$ , 其取值为给定常数, 由实际情况决定, 一般情况下 $VOCs\_U \in (0, 1)$ 。

$$\frac{u_{i,j}(t)}{\sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_i(t)} \geq VOCs\_U \quad (12)$$

## 1.2 目标函数

(1) VOCs减排量函数

$$f_{1i}(\mathbf{U}_i(t)) = \frac{\sum_{j=1}^m u_{i,j}(t)}{PQ_i(t)} \quad (13)$$

式中:  $f_{1i}(\mathbf{U}_i(t))$ 为*t*时期区域*i*的VOCs减排量函数。

(2) 政府补贴函数

$$f_{2i}(\mathbf{U}_i(t)) = q_i e^{\sum_{j=1}^m (u_{i,j}(t) - u_{i,j}(t-1))} \quad (14)$$

式中:  $f_{2i}(\mathbf{U}_i(t))$ 为*t*时期区域*i*的政府补贴函数;  $q_i$ 为*i*区域的补贴系数, 根据实际政府政策确定。

(3) 减排成本函数

$$f_{3i}(\mathbf{U}_i(t)) = - \sum_{j=1}^m (u_{i,j}(t) c_i(t)) \quad (15)$$

式中:  $f_{3i}(\mathbf{U}_i(t))$ 为*t*时期区域*i*的减排成本函数;  $c_i(t)$ 为区域*i*的单位VOCs减排成本, 根据实际减排成本确定。

## 2 模型求解

### 2.1 VOCs最优减排模型

本文建立的VOCs最优减排模型的最终目的在于如何控制关联区域内各个区域的VOCs排放量, 才能使关联区域内VOCs对大气环境的影响降到最低。在目标函数中包括三种指标函数, 其中VOCs减排量函数占最大权重, 政府补贴函数和减排成本函数分别占次小和最小权重。综上所述, VOCs最优减排模型可由式(16)表示。该模型是复杂非线性优化模型, 传统的基于连续可导性的优化方法无法求解该模型, 为此提出了SEIRS-CE算法进行模型求解。

$$\begin{aligned} \max F(\mathbf{U}(t)) = & Z_1 \frac{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_i(t) \right)}{\max_i \left\{ \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t_0) \right\}} + \\ & \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^n Z_{m+1} \frac{f_{mi}(\mathbf{U}(t)) - \min_k \{f_{mk}(\mathbf{U}(t))\}}{\max_k \{f_{mk}(\mathbf{U}(t))\}} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} u_{i,j}(t) \leq u_{i,j}(t-1) \\ \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) \geq \sum_{s=1}^{t-1} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(s) + PQ_i(s) - u_{i,j}(s-1) \right) \\ \frac{u_{i,j}(t)}{\sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_i(t)} \geq VOCs\_U \\ \left| \frac{\sum_{k \in VOCs\_V_i} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_k(t) \right) - u_{i,j}(t)}{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{k \in VOCs\_V_i} \left( \sum_{j=1}^m u_{i,j}(t) + PQ_k(t) \right) - u_{i,j}(t) \right)} \right| \leq VOCs\_V_0 \\ u_{i,j}(t) \geq 0 \\ i, k=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $Z_1 \sim Z_4$ 为优先级系数,  $Z_1 \sim Z_4$ 可取100、10、

1、0.1;  $\sum_{j=1}^m u_{i,j}(t_0)$ 为初始时期区域*i*的VOCs浓度。

## 2.2 考虑环境污染的改进SEIRS传染病动力学优化算法(SEIRS-CE算法)

### 2.2.1 SEIRS 传染病模型

传染病模型可分为无潜伏期和有潜伏期两类。无潜伏期的传染病模型可分为 SIS 模型、SIR 模型、SIRS 模型；有潜伏期的传染病模型可分为 SEIR 模型和 SEIRS 模型<sup>[19]</sup>。其中，文献[20]在 1972 年研究伦敦黑死病时提出了 SIR 模型，随后其他种类的模型被相继提出，基于传染病模型的优化算法为求解各种复杂非线性优化问题提供了新思路<sup>[17]</sup>。

传统的 SEIRS 模型描述了易感人群与病菌或发病者接触并经历一段潜伏期后发病成为新的发病者以及发病者经治愈后被再次感染的过程。SEIRS 模型将人群分为四类：易感者(susceptible)，表示生态系统中未患病的个体集合；暴露者(exposed)，表示已被感染但处在潜伏期还未发病的个体集合；发病者(infective)，表示已经发病的个体集合；治愈者(recover)，表示已患病并被治愈的个体集合。在  $t$  时期，上述四类人群可分别用  $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$  表示。传统的 SEIRS 传染病仓室模型如图 1 所示。

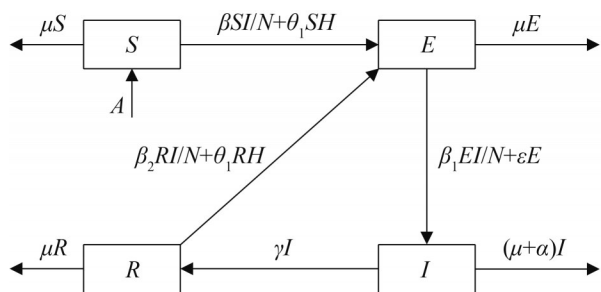


图1 传统 SEIRS 传染病仓室模型  
Fig. 1 Traditional SEIRS infectious disease warehouse model

### 2.2.2 SEIRS-CE 算法设计

本文在传统 SEIRS 模型的基础上，增加了环境因素，设计出一种全新的 SEIRS-CE 算法，增加了仓室模型及相应的微分方程组的复杂度，提升了算法的搜索能力和求精能力，降低了算法陷入局部陷

阱的概率。SEIRS-CE 算法的场景描述如下。

假设在一个小镇由  $N$  个居民组成，居民用编号  $1, 2, \dots, N$  表示。每个居民均由  $n$  个特征表达，对应  $n$  个器官，即 VOCs 最优减排模型所对应的  $n$  个区域。致病菌攻击居民部分特征，如肺部、胸壁等。VOCs 减排模型全局最优解的搜索空间与小镇相对应，即  $t$  时期  $N$  个居民对应试探解集合  $\mathbf{X}(t)=[\mathbf{X}_1(t), \mathbf{X}_2(t), \dots, \mathbf{X}_N(t)]^T$ ，第  $k$  个居民对应的试探解为

$$\mathbf{X}_k(t)=[U_1^k(t), U_2^k(t), \dots, U_n^k(t)]^T=[u_{i,j}^k(t)]_{n \times m} \quad (17)$$

$\mathbf{X}_k(t)$  即为  $t$  时期的第  $k$  种减排方案。假设居民  $k$  当前状态为  $a$ ，相当于在搜索空间  $H$  中的位置为  $\mathbf{X}_a$ 。该居民在致病菌传播作用下从状态  $a$  演变到  $b$ ，相当于在  $H$  中从位置  $\mathbf{X}_a$  转到位置  $\mathbf{X}_b$ 。按式(16)计算，若  $F(\mathbf{X}_b) > F(\mathbf{X}_a)$ ，则认为该居民强壮。强壮居民能以较高几率不断生长；而虚弱居民有可能死亡。对于居民  $k$  的强壮度指数为

$$ZI(\mathbf{X}_k)=\begin{cases} 1+F(\mathbf{X}_k), & F(\mathbf{X}_k) \geq 0 \\ \frac{1}{1+|F(\mathbf{X}_k)|}, & F(\mathbf{X}_k) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

$k=1, 2, \dots, N$

将环境中的致病菌类记为  $H$ 。 $t$  时期四类居民和环境致病菌类数量分别记为  $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 、 $H(t)$ 。根据环境因素及结核病传播特征，得到如图 2 所示的改进的 SEIRS 仓室模型。

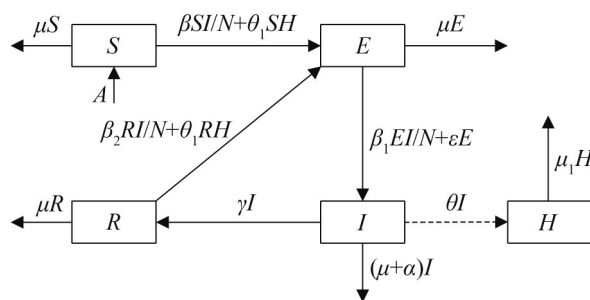


图2 改进的 SEIRS 仓室模型  
Fig. 2 Improved SEIRS warehouse model

为方便计算，对图 2 的仓室模型进行简化，简化方法为：令  $A=0$ ，一个居民死亡后，立即有一个新居民产生，确保小镇中的居民总数保持不变。于是，图 2 变为图 3。

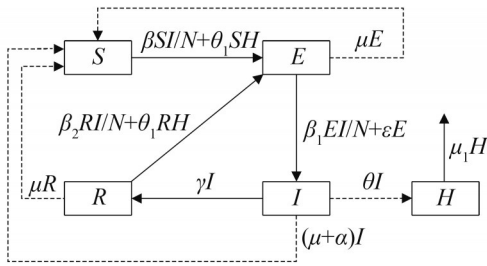


图 3 改进的 SEIRS 仓室模型(情景简化后)  
Fig. 3 Improved SEIRS warehouse model (after simplified scenario)

图 3 所对应的传染病动力学微分方程组为

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \mu E + \mu R + (\mu + \alpha)I - \beta_1 SI/N - \theta_1 SH \\ \frac{dE}{dt} = \beta_1 SI/N - \beta_1 EI/N - \epsilon E - \mu E + \beta_2 RI/N + \theta_1 (S + R)H \\ \frac{dI}{dt} = \beta_1 EI/N + \epsilon E - (\mu + \alpha + \gamma)I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I - \beta_2 RI/N - \theta_1 RH - \mu R \\ \frac{dH}{dt} = \theta I - \mu_1 H \end{cases} \quad (19)$$

式(19)满足  $\frac{dS}{dt} + \frac{dE}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0$ ,  $S(t) + E(t) + I(t) + R(t) = N$  (N 为常数)。式(19)中的  $\mu$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\epsilon$ 、 $\gamma$  参数, 可由式(20)~(24)确定。

$$\alpha > \mu \quad (20)$$

$$\beta_1^{*1} < \beta_1^{*3} < \beta_1^{*4} < \beta_1^{*2} \quad (21)$$

$$\text{式中: } \beta_1^{*1} = \frac{\alpha(\alpha - \omega) - \sqrt{\Delta_h}}{2}; \beta_1^{*2} = \frac{\alpha(\alpha - \omega) + \sqrt{\Delta_h}}{2},$$

$\Delta_h = \alpha^2(\alpha - \omega)^2 - 4\omega\alpha^2(\delta + \epsilon)$ ;  $\beta_1^{*3}$  和  $\beta_1^{*4}$  为满足  $h_3(y) = 0$  的 2 个较大正解:

$$h_3(y) = \epsilon^2 h_1(y) - [y - \omega(\delta + \epsilon)] \cdot [(y - \mu\delta - \mu\epsilon)^2 + y\mu\epsilon],$$

$$h_1(y) = -y^2 + \alpha(\alpha - \omega)y - \alpha^2\omega(\delta + \epsilon).$$

$$\theta_D^* < 0 < \theta_C^* \quad (22)$$

$$\text{式中: } \theta_C^* = \frac{\delta\mu_1 h(\beta_1\mu)}{\alpha[\beta_1 - \delta - \epsilon]^2 + \beta_1\epsilon}; \theta_D^* = \frac{\delta\mu_1\mu^2}{\alpha\epsilon^2} (\beta_1\mu -$$

$\omega(\delta + \epsilon))$ 。

$$\max\{\beta_B^*, \beta_D^*\} < \beta\mu_1 < \beta_C^* \quad (23)$$

$$\text{式中: } \beta_B^* = \frac{\delta\alpha\beta_1\mu\mu_1}{(\alpha - \mu)\beta_1 - \alpha(\delta + \epsilon)}; \beta_C^* = \frac{\delta\mu\mu_1(\mu\beta_1 + \alpha\omega)}{\mu\beta_1 + \alpha\epsilon - \delta\mu - \epsilon\mu};$$

$$\beta_D^* = \frac{\delta\mu\mu_1\omega}{\epsilon}.$$

$$R_1^* < 1 < R_0 < R_2^* \quad (24)$$

$$\text{式中: } R_0 = \frac{\epsilon\beta}{\delta\omega}; R_1^* = 1 - \frac{2B^3 - 9ABC + 2\sqrt{\Delta^3}}{27A^2\delta\omega\mu^2\mu_1};$$

$$R_2^* = 1 - \frac{2B^3 - 9ABC - 2\sqrt{\Delta^3}}{27A^2\delta\omega\mu^2\mu_1}. \text{ 其中, } A = -\alpha^2\beta\beta_1\mu\mu_1,$$

$$B = [(\alpha - \mu)\beta_1 - \alpha(\delta + \epsilon)](\beta_1\mu\mu - \beta_B^*),$$

$$C = [\beta_1\mu + \epsilon\alpha - \delta\mu - \epsilon\mu](\beta_1\mu\mu - \beta_C^*),$$

$$D = \epsilon\mu(\beta_1\mu\mu - \beta_D^*).$$

文献[20]已证明当式(20)~(24)均成立时, 疾病将持续存在, 即式(20)~(24)存在地方病平衡点。

依据文献[21]的参数取值方法并经随机化后, 可得  $\mu = \text{Rand}(0.2, 0.4)$ ,  $\alpha = \text{Rand}(0.4, 0.9)$ ,  $\beta = \text{Rand}(0.1, 0.2)$ ,  $\beta_1 = \text{Rand}(0.3, 0.5)$ ,  $\beta_2 = \text{Rand}(0.2, 0.4)$ ,  $\epsilon = \text{Rand}(0.1, 0.2)$ ,  $\gamma = \text{Rand}(0.2, 0.4)$ ,  $\theta = \text{Rand}(0.3, 0.5)$ ,  $\theta_1 = \text{Rand}(0.3, 0.5)$ ,  $\mu_1 = \text{Rand}(0.3, 0.5)$ 。

任取  $S_i(t)$  进行随机性测试, 如图 4 所示。由图 4 可以看出,  $S_i(t)$  具有极好的随机性。

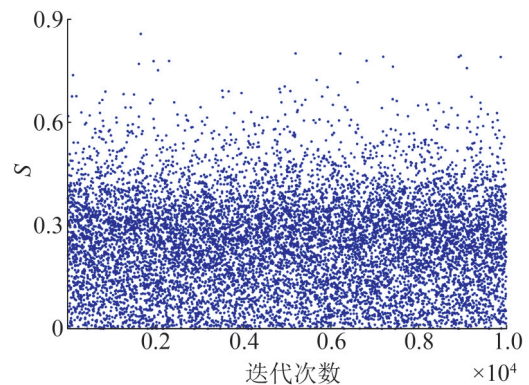


图 4 状态 S 的随机性  
Fig. 4 Randomicity of state S

将式(19)改写为

$$\begin{cases} S_i(t+1) = S_i(t) + \mu E_i(t) + \mu R_i(t) + (\mu + \alpha)I_i(t) - \beta S_i(t)I_i(t) - \theta_1 S_i(t)H(t) \\ E_i(t+1) = E_i(t) + \beta S_i(t)I_i(t) - \beta_1 I_i(t)E_i(t) - \epsilon E_i(t) - \mu E_i(t) + \beta_2 R_i(t)I_i(t) + \theta_1 (S_i(t) + R_i(t))H(t) \\ I_i(t+1) = I_i(t) + \beta_1 I_i(t)E_i(t) + \epsilon E_i(t) - (\mu + \alpha + \gamma)I_i(t) \\ R_i(t+1) = R_i(t) + \gamma I_i(t) - \beta_2 R_i(t)I_i(t) - \theta_1 R_i(t)H(t) - \mu R_i(t) \\ H(t+1) = H(t) + \theta I_i(t) - \mu_1 H(t) \end{cases} \quad (25)$$



式中： $S(t)$ 、 $E(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ 分别表示在  $t$  时期该居民属于  $S$  类、 $E$  类、 $I$  类和  $R$  类的概率。前 4 个公式中的  $I_i(t)$  表示居民  $i$  发病的概率，最后一个公式中  $I(t)$  为已发病居民的数量。采用式(25)计算  $t$  时期居民  $i$  的四种概率  $S_i(t)$ 、 $E_i(t)$ 、 $I_i(t)$  和  $R_i(t)$ 。居民  $i$  的状态由  $S_i(t)$ 、 $E_i(t)$ 、 $I_i(t)$ 、 $R_i(t)$  中最大者确定。识别出所有合法状态转移类型，如图 5 所示。

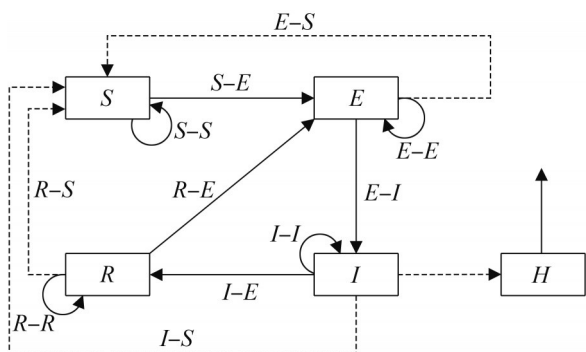


图 5 合法的状态转移类型  
Fig. 5 Valid state transition type

特别注意，图 5 中状态转移  $E \rightarrow S$  和  $I \rightarrow S$ 、 $R \rightarrow S$  分别表示居民在暴露期间、发病期间或治愈期间因自然死亡或发病死亡后，有新居民进入到小镇中。

算子具体设计过程如下：

(1) 特征集合生成方法

设当前居民编号为  $i$ ，居民状态  $s \in \{S, E, I, R\}$ ，则从处于状态  $s$  的居民中随机挑出  $L$  个居民， $L$  称为施加影响的居民数，特征集合生成方法如表 1 所示。

表 1 特征集合生成方法

特征集合类型	变量名	产生方法
强壮居民集合	$SR_s$	$L$ 个居民的强壮度比当前居民 $i$ 的强壮度高
普通居民集合	$CR_s$	$L$ 个居民的强壮度与当前居民 $i$ 的强壮度无关
虚弱居民集合	$WR_s$	$L$ 个居民的强壮度是所有居民中最小的

(2) 状态转移算子设计方法

设当前居民编号为  $i$ ，该居民处于状态  $s \in \{S, E, I, R\}$ ，则

1)  $S$ - $S$ 、 $E$ - $E$ 、 $I$ - $I$ 、 $R$ - $R$ 算子。此类算子描述的是在  $t$  时期处于状态  $s$  的居民，在  $t+1$  时期仍处于状态  $s$  的情形。可将强壮居民集合  $SR_s$  中的  $L$  个居民的特征  $j$  的状态值经加工处理后传给当前居民  $i$  的对应特征  $j$ ，使其具有强壮居民的特征。即在  $t+1$  时期，对处于状态  $s$  的居民  $i$ ，有

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \sum_{k \in SR_s} \alpha_k x_{k,j}(t), & |SR_s| \geq 2 \\ x_{u,j}(t), & |SR_s| = 1 \\ x_{i,j}(t), & |SR_s| = 0 \end{cases}$$

式中： $u \in SR_s$ ， $\alpha_k = Rand(-0.5, 0.5)$ ； $Rand(a, b)$  表示区间  $[a, b]$  内产生均匀分布随机数。

2)  $S$ - $E$ 、 $E$ - $I$ 、 $I$ - $R$ 、 $R$ - $E$ 算子。此类算子描述在  $t$  时期处于状态  $s$  的居民，在  $t+1$  时期转移到其他状态  $v$  的情形， $v \in \{E, I, R\}$ ，但  $v \neq s$ 。其中，算子  $S$ - $E$  表示易感居民暴露了，算子  $E$ - $I$  表示暴露居民发病，算子  $I$ - $R$  表示发病居民治愈了，算子  $R$ - $E$  表示治愈的居民再感染暴露。将  $CR_v$  中  $L$  个处于状态  $v$  的居民的对应特征  $j$  的状态值经加工处理后传给处于状态  $s$  的居民  $i$  的对应特征  $j$ ，使发生状态转移。即在  $t+1$  时期，对处于状态  $s$  的当前居民  $i$ ，有

$$v_{i,j}(t+1) = \begin{cases} x_{i_1,j}(t) + 0.5(x_{i_2,j}(t) - x_{i_3,j}(t)), & |CR_v| \geq 3 \\ 0.5(x_{i_1,j}(t) + x_{i_2,j}(t)), & |CR_v| = 2 \\ x_{i_1,j}(t), & |CR_v| = 1 \\ x_{i,j}(t), & |CR_v| = 0 \end{cases}$$

式中： $i_1$ 、 $i_2$  和  $i_3$  分别从集合  $CR_v$  中随机选择，且  $i_1 \neq i_2 \neq i_3$ 。

3)  $E$ - $S$ 、 $I$ - $S$ 、 $R$ - $S$ 算子。此类算子描述的是在  $t$  时期处于状态  $v$  的居民， $v \in \{E, I, R\}$ ，因死亡而重新产生一个新居民的情形，令该居民属于  $S$  类。从  $WR_v$  中任选一居民  $z$ ，令该居民死亡，也即将该居民的信息删除掉，然后将  $S$  类中重新生成一个新居民  $w$ ，该居民是从易感的强壮居民集合  $SR_s$  中任意挑选出来的，即

$$V_w(t+1) = X_r(t), r \in SR_s$$

4) 生长算子。对于优化问题式(16), 其生长算子可以描述为

$$X_i(t+1) = \begin{cases} V_i(t+1), & ZI(V_i(t+1)) > ZI(X_i(t)) \\ X_i(t), & \text{其他} \end{cases},$$

$$i=1, 2, \dots, N$$

式中:  $X_i(t+1) = (x_{i,1}(t+1), x_{i,2}(t+1), \dots, x_{i,N}(t+1))$ ;  
 $V_i(t+1) = (v_{i,1}(t+1), v_{i,2}(t+1), \dots, v_{i,N_u}(t+1))$ 。

从各算子定义知, 新试探解的产生只与当前状态有关, 与该试探解演变历程无关, 且新试探解的 ZI 指数不小于老试探解, 因而 SEIRS-CE 算法具有 Markov 性和 ZI 指数递增性。利用上述特性, 可以证明 SEIRS-CE 算法的全局收敛性, 其证明过程可参见文献[22]。

### 2.2.3 SEIRS-CE 算法的参数选择及时间复杂度

SEIRS-CE 算法参数包括 2 部分: 一部分是改进后的 SEIRS 模型参数, 该部分为算法内置参数, 无需用户进行设置; 另一部分是算法控制参数, 此类参数需要用户自行设置。

SEIRS-CE 算法控制参数有: 演化时期数  $G$ 、全局最优解计算误差  $\varepsilon$ 、患病概率  $E_0$ 、施加影响的居民数  $L$ 、居民数  $N$ 、居民特征数  $n$ 。通常可取  $\varepsilon = 10^{-5} \sim 10^{-8}$ ,  $G = 10^8 \sim 10^{10}$ 。 $G$  和  $\varepsilon$  是 2 个互补参数, 由所求解的问题决定, SEIRS-CE 算法关键参数只有  $E_0$ 、 $L$ 、 $N$ 、 $n$ 。一般情况下, 建议  $E_0 = 0.01 \sim 0.001$ ,  $L = 3 \sim 6$ ,  $N = 100 \sim 200$ ,  $n = 2 \sim 50$ 。

SEIRS-CE 算法的时间复杂度如表 2 所示。

## 2.3 云环境下 SEIRS-CE 算法实现与 VOCs 最优减排模型求解

### 2.3.1 云环境搭建与 SEIRS-CE 参数设置

本文使用阿里云服务器作为云服务器主机, 使用 Apache 服务器搭建网络, 使用 Python 和 HTML 语言编程。所需要用到的软件和服务器的需求清单如表 3 所示, 搭建云环境的部署图如图 6 所示, SEIRS-CE 算法参数设置如表 4 所示。

表 2 SEIRS-CE 算法的时间复杂度计算表

Table 2 Time complexity calculation table of the SEIRS-CE algorithm

操作	时间复杂度	最多循环次数
初始化	$O(6n+5(n+1)N+2n^2N)$	1
计算 $S_i(t), E_i(t), I_i(t), R_i(t)$	$O(7)$	$(G+N+3)N$
$S-S, S-E, E-E, E-I, E-S, I-I, I-R, I-S, R-R, R-E, R-S$	$O((N+5+4)nE_0/18)$	$(G+N+7)N$
状态保持	$O((1-5E_0/12)n)$	$(G+N+7)N$
目标函数计算	$O(n) \sim O(n^2)$	$(G+N+7)N$
生长算子	$O(3n)$	$(G+N+7)N$
结果输出	$O(n)$	1

表 3 搭建云环境需求清单

Table 3 Cloud environment requirement list

名称	版本	要求
阿里云服务器	轻量应用服务器, 系统镜像 Windows Server 2008 R2	无
Python	Python 3.8.3, 64 位	安装在云服务器上
Apache 服务器	Apache-2.4.46	安装在云服务器上
Python numpy	numpy-1.19.3+mkl-cp38-cp38-win_amd64.whl	安装在 Python 中
Python CGI	无	在 Apache 服务器中配置

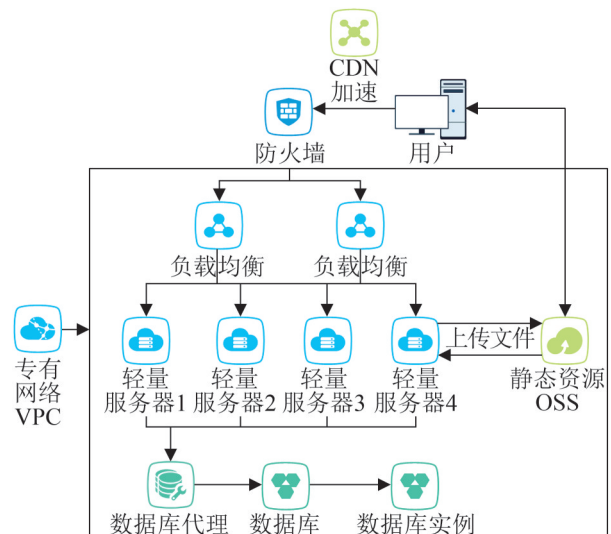


图 6 云环境部署图

Fig. 6 Cloud environment deployment diagram

表4 SEIRS-CE算法参数设置  
Table 4 Parameter settings of the SEIRS-CE algorithm

参数名称	取值依据
演化时期数 $G$	算法迭代次数, 由实际问题决定, $G=800$
居民数量 $N$	试探解数量, 设置过少容易陷入局部最优, 设置过多会影响收敛效果, $N=100$
每个居民的特征数 $n$	每个试探解的维数, 在本文中 $n=13$ , 对应 13 个气象监测点
患病概率 $E_0$	算子调度概率或居民状态变化概率, $E_0=0.01$
施加影响的居民数 $L$	决定了特征集合的维度与算法时间复杂度的大小, $L=3$
全局最优解误差 $\varepsilon$	$\varepsilon$ 为趋于 0 的数, 取值越小代表精确度越高, $\varepsilon=0.001$

### 2.3.2 VOCs 最优减排模型求解

使用 SEIRS-CE 算法求解 VOCs 最优减排模型, 求解步骤如下。

$VOCs\_V_0=0.05$ ,  $VOCs\_U=0.3$ ,  $\mathbf{X}(0) = [\mathbf{X}_1(0), \mathbf{X}_2(0), \dots, \mathbf{X}_n(0)]^T$ ;

FOR  $i=1$  TO  $N$

$\mathbf{X}^*(0)=\max(F(\mathbf{X}_i(0)))$ ,  $\mathbf{X}^*(1)=\mathbf{X}^*(0)$ ;

FOR  $j=1$  TO 4

$a_j=Rand(0, 1)$ ;

$SUM=a_1+a_2+a_3+a_4$ ,  $S_i(0) = a_1/SUM$ ,  $E_i(0) = a_2/SUM$ ,  $I_i(0)=a_3/SUM$ ,  $R_i(0)=a_4/SUM$ ;

$SEIR_i(0)=GetSEIR(S_i(0), E_i(0), I_i(0), R_i(0))$ ;

SUB *TransferInformation*( $i$ , *operator*,  $t$ ) // *operator* 为算子名

FOR  $j=1$  TO  $n$

令  $p=Rand(0, 1)$ ; //  $p$  为居民的特征被致病菌攻击的实际概率。

IF  $p \leq E_0$  THEN

利用算子 *operator* 计算  $v_{i,j}(t)$ ;

ELSE

$v_{i,j}(t)=x_{i,j}(t-1)$ ;

END IF

END FOR

END SUB

FOR  $t=1$  TO  $G$  //开始 SEIRS-CE 算法迭代

按 2.2.2 节介绍的方法确定  $\mu$ 、 $\mu_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\varepsilon$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\theta_1$

FOR  $i=1$  TO  $N$

利用式(21)计算  $S_i(t)$ ,  $E_i(t)$ ,  $I_i(t)$ ,  $R_i(t)$  以及  $SEIR_i(t)$

IF  $SEIR_i(t-1)=S$  THEN

IF  $SEIR_i(t)=S$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $S-S$ ,  $t$ );

ELSE IF  $SEIR_i(t)=E$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $S-E$ ,  $t$ );

ELSE

$V_i(t)=X_i(t-1)$ ,  $SEIR_i(t)=SEIR_i(t-1)$ ;

END IF

ELSE IF  $SEIR_i(t-1)=E$  THEN

IF  $SEIR_i(t)=E$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $E-E$ ,  $t$ );

ELSE IF  $SEIR_i(t)=I$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $E-I$ ,  $t$ );

ELSE IF  $SEIR_i(t)=S$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $E-S$ ,  $t$ );

ELSE

$V_i(t)=X_i(t-1)$ ,  $SEIR_i(t)=SEIR_i(t-1)$ ;

END IF

ELSE IF  $SEIR_i(t-1)=I$  THEN

IF  $SEIR_i(t)=I$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $I-I$ ,  $t$ );

ELSE IF  $SEIR_i(t)=R$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $I-R$ ,  $t$ );

ELSE IF  $SEIR_i(t)=S$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $I-S$ ,  $t$ );

ELSE

$V_i(t)=X_i(t-1)$ ,  $SEIR_i(t)=SEIR_i(t-1)$ ;

END IF

ELSE IF  $SEIR_i(t-1)=R$  THEN

IF  $SEIR_i(t)=R$  THEN

*TransferInformation*( $i$ ,  $R-R$ ,  $t$ );

```

ELSE IF  $SEIR_i(t)=E$  THEN
  TransferInformation( $i, R-E, t$ );
ELSE IF  $SEIR_i(t)=S$  THEN
  TransferInformation( $i, R-S, t$ );
ELSE
   $V_i(t)=X_i(t-1)$ ,  $SEIR_i(t)=SEIR_i(t-1)$ ;
END IF
END IF

```

执行计算生长算子, 获得  $X_i(t)$ ;

END FOR

IF  $|X(t)-X^*(t)| \leq \varepsilon$  OR  $t=G$  THEN //  $X^*(t)$  为优化问题的当前全局最优解

算法求解结束;

END IF

$X^*(t)=X(t)$ ;

END FOR

### 3 应用实例

#### 3.1 数据来源

本文以西安市为例, 共有 13 个气象监测点,

编号为 1462A~1474A, 通过 ArcGIS 软件画出各个气象监测点的地理分布图, 如图 7 所示。

在中国环境监测总站获取 13 个空气质量监测点采集到的影响 VOCs 浓度的 6 种空气质量数据, 时间跨度为 2020 年 11 月 1~30 日共一个月, 数据采样频率为逐小时数据, 并经处理后得到逐天的原数据, 对这 6 种数据进行最优减排计算, 以第一个监测点 1462A 为例, 原始 VOCs 数据对应的变量为  $U_1(0)=[u_{1,1}(0), u_{1,2}(0), \dots, u_{1,6}(0)]$ , 部分原始数据如表 5 所示。

#### 3.2 VOCs 最优减排计算

参考文献[23]中给出的各区县监测点的 VOCs 减排成本和减排补贴系数, 选择 5 种优化算法与 SEIRS-CE 算法进行对比, 分别为 DE<sup>[24]</sup>、GA<sup>[25]</sup>、PSO<sup>[26]</sup>、AFSA<sup>[27]</sup>和 CS<sup>[28]</sup>, 5 种优化算法的参数按表 6 进行初始化。SEIRS-CE 算法按表 4 设置的参数输入, 使用 Python 编程, 在结果中取 50 次求平均值, 13 个区域最优减排方案如表 7 和图 8 所示。

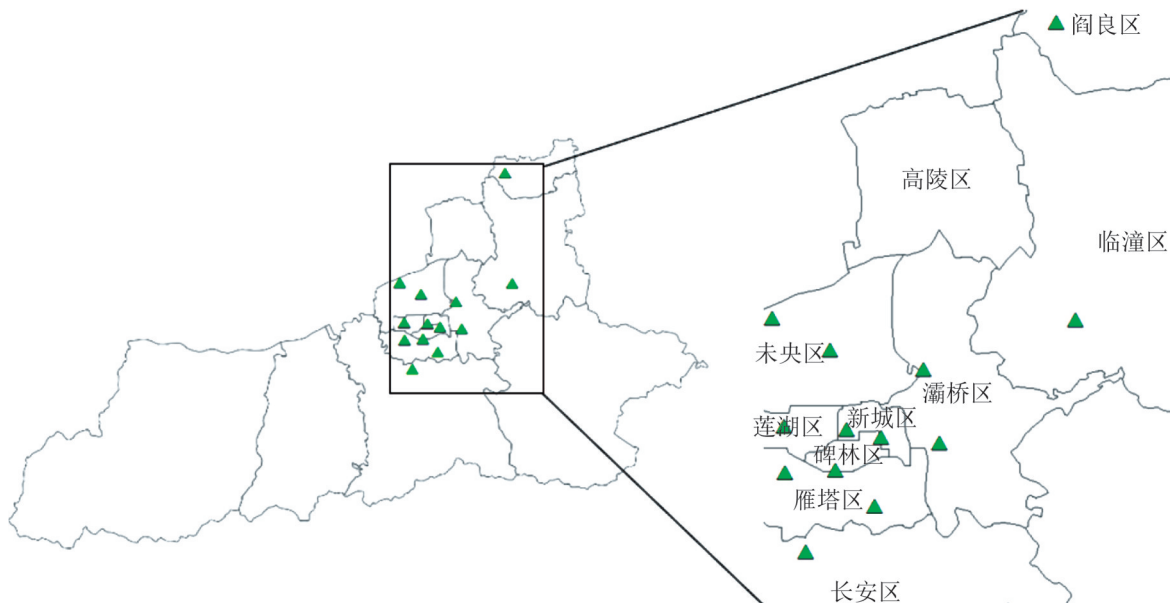


图7 西安市气象监测点地理分布图

Fig. 7 Geographical distribution map of meteorological monitoring points in Xi'an city

表 5 监测点 1462A 原始空气质量数据  
Table 5 Original air quality data of monitoring point 1462A

日期	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,1</sub> (0)	PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,2</sub> (0)	SO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,3</sub> (0)	NO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,4</sub> (0)	O <sub>3</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,5</sub> (0)	CO(mg/m <sup>3</sup> ) <i>u</i> <sub>1,6</sub> (0)
11.01	27.0	108.0	11.0	51.0	100.0	0.7
11.02	35.0	97.0	13.0	57.0	87.0	1.0
...	...	...	...	...	...	...
11.29	80.0	99.0	9.0	49.0	64.0	1.0
11.30	92.0	110.0	7.0	51.0	86.0	1.4

表 6 5 种优化算法的参数  
Table 6 Parameters of 5 optimization algorithms

优化算法	参数
DE	变异因子 $F=0.5$ , 交叉概率=0.3, 每个种群中的生物量 $n=13$ , 种群数量 $N=100$
GA	变异概率=0.01, 每个种群中的生物量 $n=13$ , 种群数量 $N=100$
PSO	加速系数 $c_1=c_2=0.5$ , 粒子维数 $n=13$ , 粒子数 $N=100$
AFSA	鱼的最大感知范围=0.3, 最大位移比例=0.5, 感知范围衰减系数=0.98, 拥挤度阈值=0.5, 最大尝试捕食次数=100, 每个种群中的生物量 $n=13$ , 种群数量 $N=100$
CS	鸟巢数目 $N=100$ , 寻优维数 $n=13$ , 鸟蛋被发现概率 $P_a=0.25$ , $\beta=1$

表 7 2021 年 1 月各监测点最优减排方案平均值  
Table 7 Average value of optimal emission reduction scheme at each monitoring point in January 2021 mg/m<sup>3</sup>

监测点编码	SEIRS-CE	DE	GA	PSO	AFSA	CS
1462A	1.166 4	1.078 4	0.825 6	1.079 0	1.064 0	1.023 7
1463A	1.059 4	1.032 0	0.907 9	0.941 0	1.013 8	1.022 9
1464A	1.193 9	0.500 0	1.350 7	0.566 9	1.072 9	0.933 4
1465A	1.094 6	1.081 9	0.862 1	0.941 1	1.213 8	1.023 9
1466A	1.115 6	1.079 4	0.852 3	0.988 3	1.153 7	1.023 2
1467A	1.203 9	1.082 1	1.183 4	1.012 1	1.071 1	1.023 9
1468A	1.249 5	1.082 1	0.990 4	0.932 4	1.144 7	1.021 2
1469A	1.089 7	0.983 8	1.007 2	0.799 9	0.802 9	0.924 6
1470A	1.162 0	1.081 9	1.030 9	0.828 3	1.152 4	1.023 8
1471A	1.083 8	1.081 1	0.823 8	1.009 4	0.902 9	1.023 3
1472A	1.037 9	1.037 9	1.052 3	0.769 8	0.514 4	0.979 8
1473A	1.078 1	1.081 8	1.062 3	0.863 9	0.973 8	1.023 6
1474A	0.920 1	1.078 5	0.872 8	1.094 9	1.149 4	1.018 7
标准差	$3.285 4 \times 10^{-3}$	$4.267 5 \times 10^{-3}$	$3.897 2 \times 10^{-3}$	$5.608 5 \times 10^{-2}$	$6.589 2 \times 10^{-4}$	$3.488 3 \times 10^{-3}$

从表 7 可以看出, SEIRS-CE 算法计算得到的目标函数值要优于其他 5 种算法, 以监测点 1462A 为例, SEIRS-CE 算法得到的 VOCs 减排方案最优, DE、AFSA 和 PSO 算法次之, CS 算法再次, GA 算法最差, 针对其他监测点也可做出类似分析。从图 8 看出, SEIRS-CE 算法的计算结

果总体上优于另外 5 种算法, 且与实际排放量最接近, 证明了 SEIRS-CE 算法的减排量计算结果最优。以监测点 1462A 为例, 通过 SEIRS-CE 算法计算出的各个污染物的最优减排量与实际排放量对比如图 9 所示。6 种算法的总收敛曲线如图 10 所示。



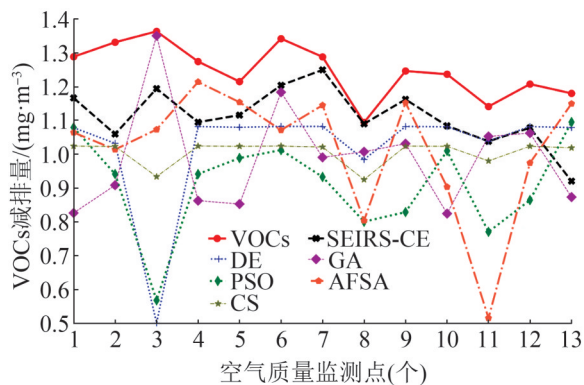


图8 6种算法VOCs减排量对比

Fig. 8 VOCs emission reduction comparison diagram of six algorithms

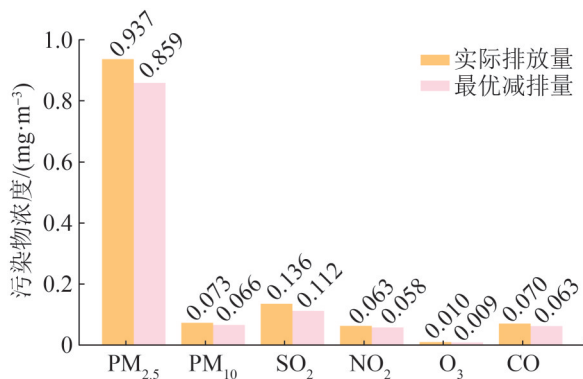


图9 最优减排量与实际排放量对比

Fig. 9 Comparison of optimal emission reduction and actual emission

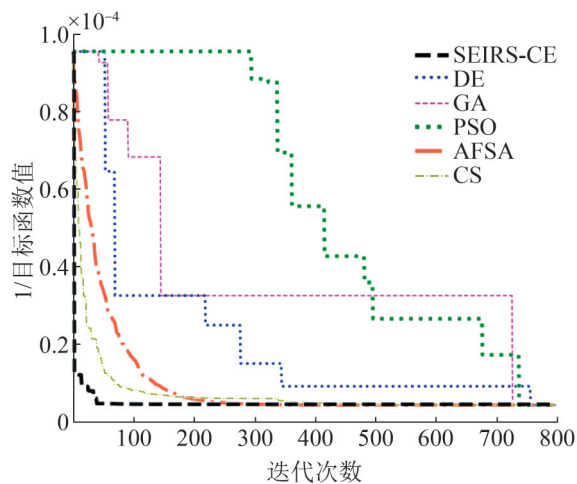


图10 算法收敛曲线

Fig. 10 Algorithm convergence curve

由图9可以看出, 最优减排量与实际排放量接近, 证明了VOCs最优减排模型的构建较合理;

由图10可以看出SEIRS-CE算法最早收敛且收敛曲线下降的最快, 表明SEIRS-CE算法的收敛速度最快, 陷入局部最优陷阱的概率最低, 总体性能优于其他对比算法。

## 4 结束语

本文首先建立了一种以减排量最优、对环境造成的影响最小为目标的VOCs最优减排模型, 然后提出了一种考虑环境污染因素的改进SEIRS传染病动力学优化算法(SEIRS-CE), 在云环境下使用SEIRS-CE算法进行VOCs最优减排求解。最后通过实例应用证明了提出的模型与算法具有科学性、可行性、实用性, 而且在云环境下求解VOCs最优减排问题, 可以使不同的用户同时进行求解计算, 安全性高、速度快且对用户的软硬件要求低, 可以实现云平台计算结果共享, 对各级政府、企业与社会公众之间的VOCs联防联控治理与环境保护具有重要意义。

## 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 of Domestic and Foreign Emission Standards for Volatile Organic Compounds[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(2): 209-218.
- [2] 王伶俐, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市2018年大气VOCs分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1385-1400.  
Wang Lingrui, Li Haiyan, Chen Cheng, et al. Distributions of VOCs in a Coastal City in the Northern Yangtze River Delta During 2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1385-1400.
- [3] 林燕芬, 段玉森, 高宗江. 基于VOCs加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 126-133.  
Lin Yanfang, Duan Yusen, Gao Zongjiang. Typical Ozone Pollution Process and Source Identification in Shanghai Based on VOCs Intense Measurement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(1): 126-133.
- [4] Cbabc D, Nva B, Jc E, et al. Gestational Exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in Northeastern British Columbia, Canada: A Pilot Study[J]. Environment

- International (S0160-4120), 2018, 110: 131-138.
- [5] 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 等. 基于SOA和O<sub>3</sub>生成潜势的杭州市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>协同控制[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1799-1807.
- Lin Xu, Yan Renchang, Jin Jiajia, et al. Coordinated Control of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in Hangzhou Based on SOA and O<sub>3</sub> Formation Potential[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1799-1807.
- [6] Klimont Z, Cofala J, Schöpp W, et al. Projections of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> and VOC Emissions in East Asia up to 2030 [J]. Water, Air, and Soil Pollution (S0049-6979), 2001, 130(1): 193-198.
- [7] Streets D G, Waldhoff S T. Present and Future Emissions of Air Pollutants in China: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO[J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2000, 34(3): 363-374.
- [8] 刘扬, 王颖, 刘灏, 等. 基于WRF-Chem模拟验证的天水市主城区大气污染源排放清单[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 32-42.
- Liu Yang, Wang Ying, Liu Hao, et al. Air Pollutants Emission Inventory for the Main Urban Area of Tianshui City Based on Verification by WRF-Chem Simulation[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 32-42.
- [9] 王燕军, 黄志辉, 唐祎骥, 等. 我国非道路移动源排放清单估算及技术减排潜力分析[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(4): 64-69.
- Wang Yanjun, Huang Zhihui, Tang Yisu, et al. Estimation on Non-road Mobile Source Emission Inventory in 2017 and Its Technological Reduction Potential Analysis[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(4): 64-69.
- [10] 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 等. 基于前体物多情景排放的兰州市2030年夏季臭氧预测[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2403-2414.
- Chen Tianlei, Wu Min, Pan Chengke, et al. Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2403-2414.
- [11] 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 等. 基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 2967-2976.
- Xie Fangjian, Shi Zhihao, Li Jingyi, et al. Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 2967-2976.
- [12] Zhang Y N, Xue L K, Li H Y, et al. Source Apportionment of Regional Ozone Pollution Observed at Mount Tai, North China: Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model and Implications for Control Policy[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (S2169-897X), 2021, 126(6): e2020JD03519.
- [13] Kim M J, Park R J, Ho C H, et al. Future Ozone and Oxidants Change under the RCP Scenarios[J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2015, 101: 103-115.
- [14] Zhu J, Liao H. Future Ozone Air Quality and Radiative Forcing over China Owing to Future Changes in Emissions under the Representative Concentration Pathways (RCPs) [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres (S2169-897X), 2016, 121(4): 1978-2001.
- [15] 杨丹丹, 王体健, 李树, 等. 基于空气质量模式和数学规划模型的城市PM<sub>2.5</sub>达标策略——以临汾为例[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3493-3501.
- Yang Dandan, Wang Tijian, Li Shu, et al. Urban PM<sub>2.5</sub> Compliance Strategy Based on Air Quality and Mathematical Planning Model[J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3493-3501.
- [16] 陆秋琴, 何舒, 黄光球. 区域联防联控挥发性有机物(VOCs)最优减排方案研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1764-1773.
- Lu Qiuqin, He Shu, Huang Guangqiu. Research on the Best Emission Reduction Scheme for Regional Joint Prevention and Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1764-1773.
- [17] 黄梦瑶, 黄丽达, 袁宏永, 等. 社交隔离对COVID-19的发展影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(2): 96-103.
- Huang Mengyao, Huang Lida, Yuan Hongyong, et al. Effects of Social Isolation on COVID-19 Trends[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(2): 96-103.
- [18] 程穆阳. 高斯模型在中小城市多点源大气扩散模拟中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2020.
- Cheng Muyang. Research on the Application of Gauss Model in Multi-point Atmospheric Diffusion Simulation of Small and Medium-sized Cities-A Case Study of Suihua City[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2020.
- [19] 张瑞锋, 李欣秋. 基于SWN-SEIRS模型的供应链金融信用风险传染测度研究[J]. 财经理论与实践, 2021, 42(2): 20-26.
- Zhang Ruifeng, Li Xinqiu. Research on Credit Risk Contagion Measure of Supply Chain Finance Based on SWN-SEIRS Model[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2021, 42(2): 20-26.
- [20] Kermack W O, Mckendrick A G. Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A (S0950-1207),

- 1927, A115: 700-721.
- [21] 杨伟. 传染病动力学的一些数学模型及其分析[D]. 上海: 复旦大学, 2010.  
Yang Wei. Some Mathematical Models and Analysis of Infectious Disease Dynamics[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.
- [22] Iisufescu M. Finite Markov Processes and Their Applications[M]. Wiley: Chichester, 1980.
- [23] 黄光球, 陆秋琴. 具有跨物种多级传播特征的包虫病优化算法[J]. 计算机科学与探索, 2020, 14(6): 1054-1069.  
Huang Guangqiu, Lu Qiuqin. Hydatid Disease Optimization Algorithm with Multistage Cross-Species Transmission Characteristics[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(6): 1054-1069.
- [24] Li Y X, Shi B D, Pan X R. Ballistic Target Signal Separation Based on Differential Evolution Algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series (1742-6588), 2021, 1883(1): 012005.
- [25] Lim J Y, Kim T W, Wang X Y, et al. Evaluation of Compressive Strength of Sustainable Concrete Using Genetic Algorithm Assisted Artificial Neural Networks [J]. Materials Science Forum (S0255-5476), 2021, 1029: 83-88.
- [26] Bangyal W H, Hameed A, Alosaimi W, et al. A New Initialization Approach in Particle Swarm Optimization for Global Optimization Problems[J]. Computational Intelligence and Neuroscience (S1687-5265), 2021, 2021: 6628889.
- [27] Liu Yi, Feng Xuesong, Ding Chuanchen, et al. Electric Transit Network Design by an Improved Artificial Fish-Swarm Algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems (S2473-2907), 2020, 146 (8): 04020071.
- [28] 张晓凤, 王秀英. 布谷鸟搜索算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(18): 8-16.  
Zhang Xiaofeng, Wang Xiuying. Survey of Cuckoo Search Algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(18): 8-16.