
垃圾焚烧厂布袋式除尘系统 运行稳定性分析



队员一：	汪利军
队员二：	桂麟
队员三：	彭思达
队员四：	刘向国
指导老师：	许超

2016.08

摘要

本文为了研究垃圾焚烧厂现有的布袋除尘器的除尘效率并分析影响除尘系统总体除尘效率波动的因素及其敏感程度，建立了以下四个模型，从而给出了焚烧厂扩建规模的环境允许上限的估计以及监测方案。

布袋除尘模型：引入布袋总体执行概率来衡量布袋除尘效率，并由此建立布袋除尘的全局与局部两个模型。考虑到局部模型与全局模型的相似性，以及局部模型可计算性的特点，我们先根据附件及补充材料中的有关数据得到局部模型中处理后气体含尘量与总体执行概率之间的回归模型，然后再推广至全局模型。

除尘稳定性模型：由布袋除尘模型可知，除尘效率可以用布袋总体执行概率来衡量，而总体执行概率的波动情况反映了布袋除尘的稳定性。首先我们分析了影响布袋除尘稳定性的各种因素，得到每一种因素对总体执行概率的影响因子，进一步建立每天处理后气体含尘量和布袋使用时间的回归模型，从而得到总体执行概率与各种影响因素之间的关系式。

烟尘扩散模型：该模型基于连续点源高斯扩散模型，用于计算空气污染物在空间中的浓度分布。在考虑实际因素了，进行了重力修正和热力修正，用于修正污染物扩散中的实际高度；进行了镜源反射修正，用于仿真地面的影响；进行了降雨修正，用于考虑下雨天气对污染物扩散的影响。最后根据风向以及烟囱排气浓度，可以计算出污染物的浓度分布。

监测点选址模型：该模型使用模拟测算布点法。首先将监测区域网格化，标定各地区的空气污染物浓度的期望值。随后求出区域整体空气污染物浓度期望值，选出两点监测点用于监测污染浓度整体水平。同时选取污染物浓度较高的网格点作为监测点，用于监测空气污染物浓度的上限。基于以人为本的思想，模型将考虑到人口密度的因素。

稳定性能提升模型：该模型定义了一种衡量不同除尘工艺的除尘稳定性，然后根据该定义分别计算布袋除尘及新工艺的除尘稳定性能，计算两者之差便可以得到稳定性能提升值。

目 录

1	问题重述	4
2	布袋除尘模型	4
2.1	模型假设	4
2.2	模型建立	5
2.2.1	全局模型	6
2.2.2	局部模型	6
2.3	模型求解	7
2.4	模型评估	9
3	除尘稳定性模型	10
3.1	模型假设	10
3.2	模型建立	10
3.2.1	进口温度的影响	10
3.2.2	布袋差压的影响	11
3.2.3	布袋气源压力的影响	12
3.2.4	总体执行概率	13
3.3	模型求解	14
4	烟尘扩散模型	16
4.1	模型假设	16
4.2	模型建立	16
4.2.1	基础模型	16
4.2.2	模型修正	17
4.2.3	模型总结	19
4.3	模型求解	19
4.3.1	确定扩散系数	19
4.3.2	风速风向确定	20
4.3.3	降雨量确定	20
4.3.4	模型基本参数	21
4.3.5	模型求解	21
5	监测点选址模型	21
5.1	模型假设	21
5.2	模型建立	22
5.3	模型求解	22
6	稳定性能提升模型	23
6.1	模型假设	23
6.2	模型建立	23
6.3	模型求解	24

6.4	方差讨论	25
7	问题求解	25
7.1	问题一	25
7.1.1	扩建规模	25
7.1.2	综合监测建议方案	25
7.2	问题二	27

1 问题重述

随着社会经济的高速发展、城市规模不断扩大、城市人口持续增加和居民消费结构多样化发展,我国许多城市出现垃圾“围城”现状。城市生活垃圾无害化处理成为城市管理 and 环境保护的重要内容,是现代社会文明程度的重要标志,直接关系到人民群众的切身利益和城市的可持续稳定发展。今天,以焚烧方法处理生活垃圾已是我国社会维持可持续发展的必由之路。然而,随着社会对垃圾焚烧技术了解的逐步深入,民众对垃圾焚烧排放污染问题的担忧与日俱增,甚至是最新版的污染排放国标都难以满足民众对二恶英等剧毒物质排放的控制要求(例如国标允许焚烧炉每年有 60 小时的故障排放时间,而对于焚烧厂附近的居民来说这是难以接受的)。事实上,许多垃圾焚烧厂都存在“虽然排放达标,但却仍然扰民”的现象。国标控制排放量与民众环保诉求之间的落差,已成为阻碍新建垃圾焚烧厂选址落地的重要因素。而阻碍国标进一步提升的主要问题还是现行垃圾焚烧除尘工艺存在缺乏持续稳定性等重大缺陷。另外,在各地不得不建设大型焚烧厂集中处理垃圾的情况下,采用现行除尘工艺的大型焚烧厂即便其排放浓度不超标,却仍然存在排放总量限额超标的问题,也会给当地的环境带来重大的恶化影响。

现在,我们的任务有两个。分别是:

- 如果给定焚烧厂周边范围单位面积排放总量限额(地区总量/地区面积),在考虑除尘系统稳定性因素的前提下,试分析讨论焚烧厂扩建规模的环境允许上限是多少?并基于分析结果,向政府提出环境保护综合监测建议方案
- 如果采用一种能够完全稳定运行、且除尘效果超过布袋除尘工艺的新型超净除尘替代工艺,除尘模型稳定性能提升多少?

2 布袋除尘模型

2.1 模型假设

- 假设袋腔的体积为单位 1,则便携分析仪监测数据中的烟尘浓度(单位为 mg/m^3)和烟尘含量(单位为 mg)的数值相等。
- 预处理气体含尘量为 G_0 ,在袋腔中均匀分布,则每条布袋接触的预处理气体体积相同,含尘量为 $\frac{G_0}{N}$, $N = 1056$ 为布袋条数。
- 布袋第一次使用的除尘效率为 $\rho \in [0, 1]$
- 布袋除尘时以一定的执行概率除尘 $p_i \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, N$ 为布袋的编号。执行概率满足下列关系式

$$p_i = f(t, T_{in}, \Delta P, P) \quad (1)$$

- 要更换的布袋 $p_i = 0$, 更换后的布袋 $p_i = 1$
- 布袋总体执行概率

$$p = h(p_1, p_2, \dots, p_N) \tag{2}$$

2.2 模型建立

在除尘器工作的过程中，总会存在几个布袋执行效率过低，以至于可以视 p_i^k 为 0。现共有 N 个布袋正在除尘，其中假设存在 n 个布袋执行效率为 0。

就整体而言，虽然除尘器中有 n 个布袋经历了更换过程，但除尘器总是有 N 个布袋在其中工作的。以全局的角度，原先含尘量为 G_0 的预处理气体进入除尘器，经过 N 个布袋的处理，得到含尘量为 G 的气体。

就局部而言，除尘器实际上是有两个工作状态的，一个是 $N - n$ 个布袋工作的状态，一个是更换 n 个布袋后， N 个布袋正常工作的状态。从正常的思路去想，假设更换布袋的时间点为 t ，此时气体含尘量为 G_t ，则除尘器前一状态的初始含尘量为 G_0 ，后一状态的初始含尘量为 G_t ，然后切入两个处理过程中，用整体的视角思考问题。可惜的是，题目并没有提供更换布袋时的气体含尘量，于是我们根据已有的数据，将 $N - n$ 个布袋和 n 个布袋对气体的处理过程彻底分离开。如果整个过程都不更新那 n 个布袋，则含尘量 G_0 的气体被处理得到含尘量为 G_{before} 的气体。然后再由 n 个布袋去处理，最终得到含尘量为 G 的气体。

根据选取的过程不同，我们建立全局与局部两个模型。如下图所示：

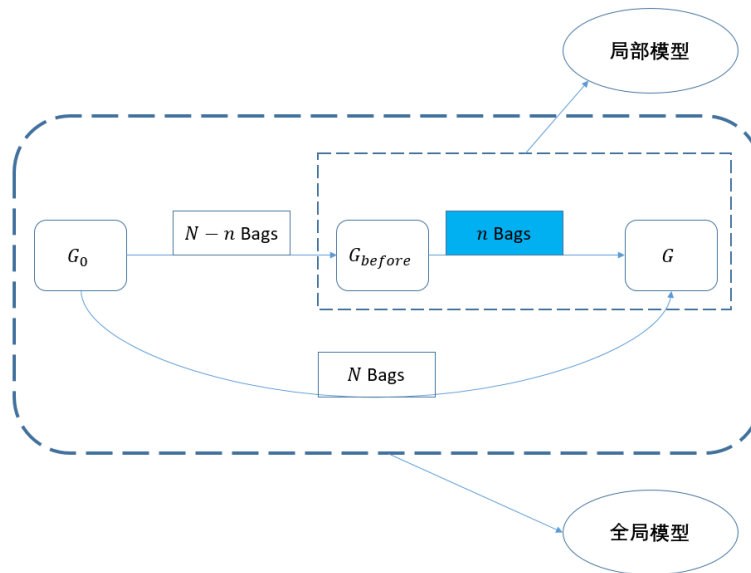


Figure 1: 全局模型 & 局部模型

2.2.1 全局模型

全局模型不考虑除尘过程中 n 个布袋的更换过程，而是整体考虑整个除尘过程。当含尘量为 G_0 的预处理气体进入除尘器后， N 个布袋对气体进行处理，最后有含尘量为 G 的气体从中排出。显而易见，除尘器的除尘量为进口气体与出口气体的含尘量差值，由公式表达为

$$\Delta G = G_0 - G \quad (3)$$

除尘量还可以通过除尘器本身的参数计算。

假设每个布袋初次使用时都有相同的除尘效率 ρ ，但随着使用时间的增加，考虑到烟尘、压差、高温等对布袋造成的损害，布袋除尘效率肯定不如当初。在此引入布袋执行效率的定义 p_i^k ，用以表示布袋实际除尘效率与布袋初始除尘效率的比值，则实际的除尘效率 ρ' 为 $\rho * p_i^k$ 。一个布袋的除尘量不仅与除尘效率有关，还和初始含尘量有关，为 $G_0 * \rho'$ 。

既然上述讨论的是一个布袋的除尘量，那么除尘器整体的除尘量还和其所拥有的布袋数量有关。综合考虑，除尘量与除尘器中的布袋数量、每个布袋的执行效率 p_i^k 、布袋的首次除尘效率 ρ 以及进口气体初始含尘量 G_0 有关，即

$$\Delta G = g(N, p_i^k, \rho, G_0) \quad (4)$$

2.2.2 局部模型

现在我们考虑除尘过程中更换布袋这一细节。

我们将 $N - n$ 个布袋和 n 个布袋对气体的处理过程彻底分离开。假设整个过程都不更新那 n 个布袋，根据上述假设知需要更换的布袋执行概率为 0，则无除尘作用，则含尘量 G_0 的气体相当于被 $N - n$ 个布袋处理，并得到含尘量为 G_{before} 的气体。然后再由 n 个布袋去处理，最终得到含尘量为 G 的气体。

之所以这么处理，是因为题目所给的数据中，仅包含“未更换布袋当天除尘器排出气体的含尘量”和“更换布袋当天除尘器排出气体的含尘量”，并没有提供“更换布袋时除尘器中的气体含尘量”，因此无法通过正常思路去处理数据。如此一来，我们将“未更换布袋当天除尘器排出气体的含尘量”作为 G_{before} ，将“更换布袋当天除尘器排出气体的含尘量”作为 G ，则 n 个布袋独自の除尘量为两者相减，公式为

$$\Delta G' = G_{before} - G \quad (5)$$

同样地，除尘量还可以通过除尘器本身的参数求得。类似于全局模型中的分析过程，除尘器的除尘量与布袋的数量、布袋的执行概率 p_i^k 、首次除尘效率 ρ 以及初始含尘量

G_{before} 有关，注意到更换后的布袋执行概率为 $p_i^k = 1$ ，则

$$\Delta G' = g'(n, \rho, G_{before}) \quad (6)$$

2.3 模型求解

模型求解即是确定 (4) 中的 g 和 (6) 中的 g' 。注意到我们缺少全局的数据——没有每天除尘的含尘量，而在局部模型中我们有相应的数据可以求解模型。又局部模型可以看成是全局模型的子集，所以 g 与 g' 应当有类似的形式。所以我们求解思路是先确定 g' ，然后导出 g 。

根据便携仪原始数据及附件中更换布袋的日期得到关于 2# 炉的更换布袋含尘量前后变化

更换时间	更换数量	更换前含尘量	更换后含尘量
2015/07/03	19	13.4	11
2015/11/11	8	9.5	6.1
2015/11/18	7	9.8	6.8
2015/11/19	6	22.3	10.2
2016/01/18	10	10.7	8.3

Table 2: 2# 炉更换布袋前后含尘量变化

首先对三个变量进行相关性分析，得到如下相关系数矩阵

	n	Q_{before}	ΔQ_2
n	1.000	-0.152	-0.489
Q_{before}	-0.152	1.000	0.931
ΔQ_2	-0.489	0.931	1.000

Table 3: 相关系数矩阵

上图中， $nBag2$ 代表 n ， $beforeDust2$ 代表 $Q_{2,before}$ ， $addDust2$ 代表 ΔQ_2 。图中直线大致代表两两数据间的关系。第一行第三列图代表 $nBag2$ 与 $addDust2$ 之间的关系，第二行第三列图代表 $beforeDust2$ 与 $addDust2$ 之间的关系。从上图可以直观地判断， ΔQ_2 与 n 负相关、与 $Q_{2,before}$ 正相关。根据这些判断我们拟合得到下面回归模型

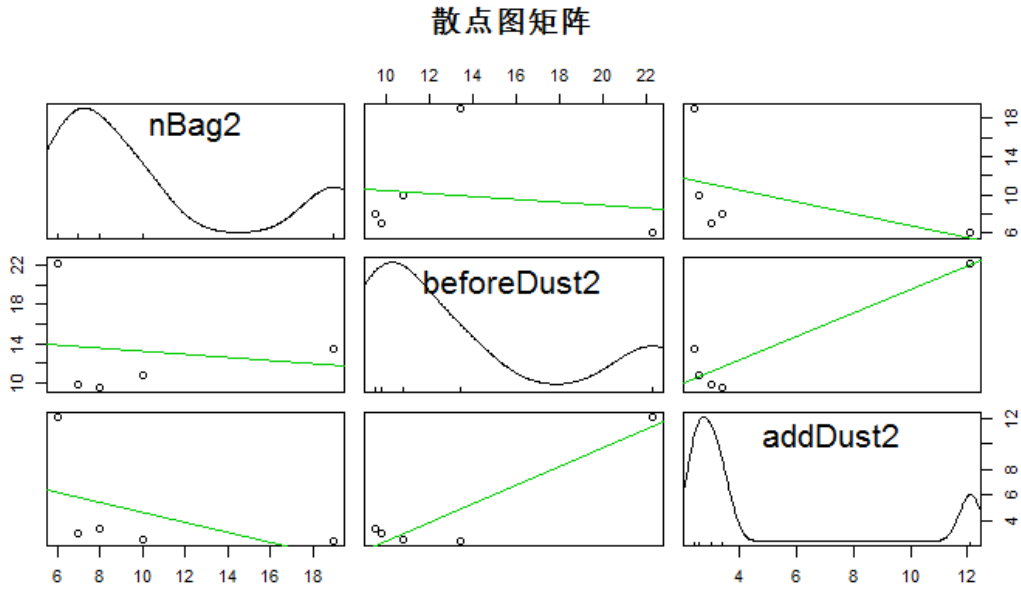


Figure 2: 散点图矩阵

从上图可以直观地判断， ΔG_2 与 n 负相关、与 $G_{2,before}$ 正相关。根据这些判断我们拟合得到下面回归模型

$$\Delta Q_2 = -0.28177 \times n + 0.68264 \times Q_{2,before} - 1.46579 \quad (7)$$

$$\triangleq k_2 \cdot n + \rho \cdot Q_{2,before} + b_2 \quad (8)$$

对于 1# 炉，由于可用数据太少，我们无法再次进行回归计算，但我们注意到 1# 和 2# 炉所用布袋都是一样的，而 ρ 仅与布袋本身材质有关，且 2# 炉更换的布袋每次大致是 1# 炉的 2 倍，所以我们在 (8) 中取 $k_1 = 2k_2$ 便可以了，即对于 1# 炉我们有下面除尘模型

$$\Delta Q_1 = k_1 \cdot n + \rho \cdot Q_{1,before} + b_1 \quad (9)$$

对于全局模型 (4) 有类似形式

$$\Delta G = K \cdot N + \rho p \cdot G_0 + B_0 \quad (10)$$

其中， $p = h(p_1, p_2, \dots, p_N)$ 为整体执行概率。

又由 $\Delta G = G_0 - G$ 则

$$G = (1 - \rho p)G_0 - K \cdot N - B_0 \quad (11)$$

2.4 模型评估

对模型 (8) 的回归系数进行 t 检验, 可以得到

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	8.462772	0.704109	12.02	0.00685
n	-1.690338	0.136950	-12.34	0.00650
$n \cdot Q_{before}$	0.102501	0.009535	10.75	0.00854

Table 4: 回归参数的 t 检验结果

可见, 三个回归参数在 $p < 0.01$ 的水平下都显著不为 0。

自由度	残差标准误差	R^2	F 统计量	p-值
2	0.6685	0.9871	76.24	0.01295

Table 5: 回归模型的拟合效果

从 R^2 及 F 统计量的 p 值知拟合效果不错。进一步, 对线性模型这一假设进行综合验证得到结果如下。

	值	p-值	结果
总体	4.0618217	0.39770	接受原假设
偏度	0.0006657	0.97942	接受原假设
峰度	0.0602964	0.80603	接受原假设
联系函数	3.6889113	0.05478	接受原假设
异方差	0.3119483	0.57649	接受原假设

Table 6: 线性模型假设的综合检验

从上面可以看出, 我们可以看到拟合数据满足 OLS 回归模型所有的统计假设 (p 值 = 0.39770), 即满足独立性、正态性、线性及同方差性。

3 除尘稳定性模型

考虑两次更换布袋之间工作日的除尘过程，此时有效工作的布袋都为 N 条，则由模型 (11) 可以看出每天处理后的气体含尘量不同是因为 $(1 - \rho p)G_0$ 不同，即每天预处理气体的含尘量 G_0 不同以及总体除尘执行概率 p 不同。根据附件中“布袋除尘器在运行初期一般都能保持较高的除尘效率，但随着使用时间的增长，很多除尘器的除尘效率会逐步下降，在布袋使用寿命的中后期，布袋破损已比较严重，除尘效率已不能满足环保要求”可知，总体执行概率 p 应是关于时间 t 的递减函数。

3.1 模型假设

- 每天预处理气体含尘量 G_0 满足

$$G_0 = \mu_0 + \xi \quad (12)$$

其中， $\xi \sim N(0, \sigma^2)$ 。

- 总体执行概率

$$p = f(t, T_{in}, \Delta P, P, others) \quad (13)$$

3.2 模型建立

3.2.1 进口温度的影响

对于模型 (13)，我们首先考虑进口温度 T_{in} 对执行概率 p 的影响。利用补充数据中的“2号炉烟气处理系统日报表（2015年6月-2016年6月）”分析2#炉进口温度变化情况，下面是进口温度随时间变化的散点图及箱线图。

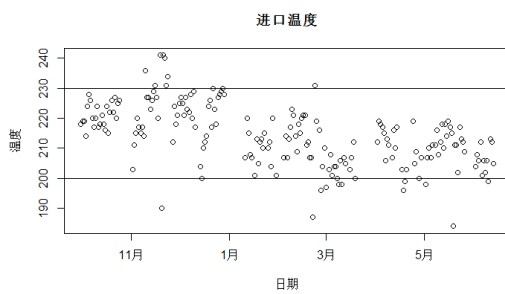


Figure 3: 进口温度散点图

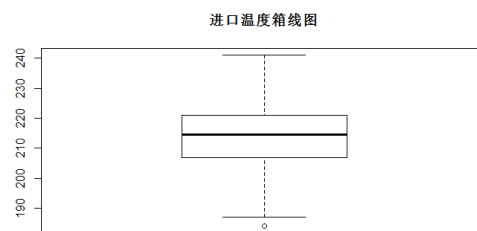


Figure 4: 进口温度箱线图

散点图中横线是布袋运行时能够接受的温度上下限，显然，大多数的情况下烟温处

于正常情况。再结合箱线图可以判断，进出口温度在允许范围内分布大致均匀，且只有极个别异常点。

对进口温度进行正态性检验。首先从 QQ 图上直观判断进口温度基本服从正态分布，

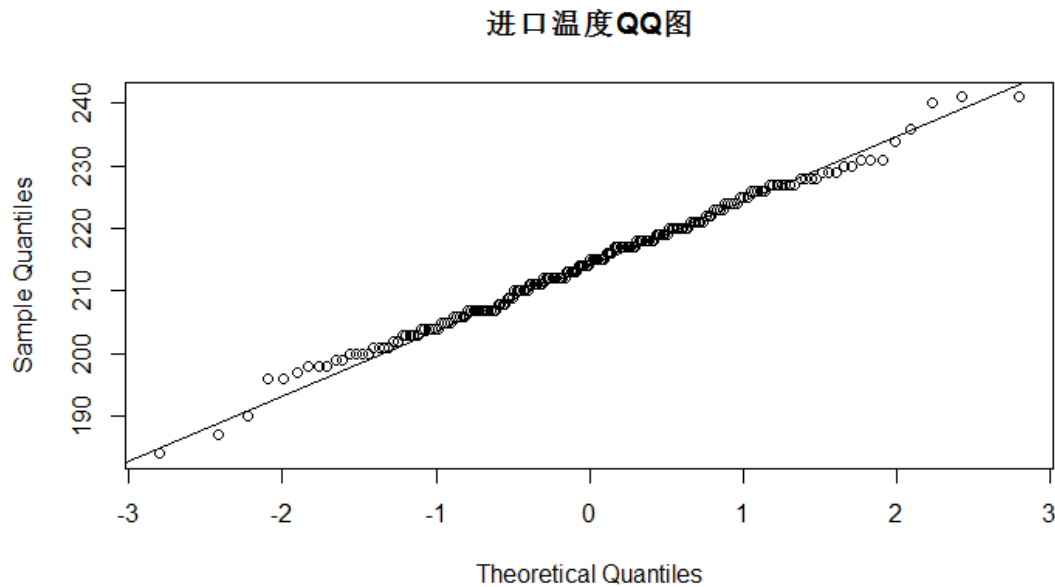


Figure 5: 进口温度 QQ 图

为了验证这一判断,我们进行 Shapiro-Wilk 正态性检验,原假设为 H_0 : 服从正态分布。经过计算得到统计量 $W = 0.99427$, 且 p -值为 0.6627 , 于是在 0.05 水平下可以判定进口温度服从正态分布。

因此,进口温度对执行概率的影响可以用 $\varepsilon_T \sim N(\mu_T, \sigma^2)$ 表示。

3.2.2 布袋差压的影响

差压值为布袋除尘器进口负压和出口负压的差值,反映的是除尘器的压损和漏风率,也可以表征布袋是否附袋。差压大意味着布袋运行中承受的阻力更大,是导致布袋的损坏加剧的原因之一。2# 炉布袋差压要求为 1650Pa 左右,比 1# 炉差压 1300Pa 高,这可能就是 2# 炉布袋破损更多的缘故。我们以 2# 炉为例,考虑 2015.10.01-2016.01.18 时间段的布袋差压变化。布袋差压取自“2 号炉烟气处理系统日报表 (2015 年 6 月-2016 年 6 月)” 9: 00 的数据。下面是布袋差压随时间变化的散点图及箱线图。

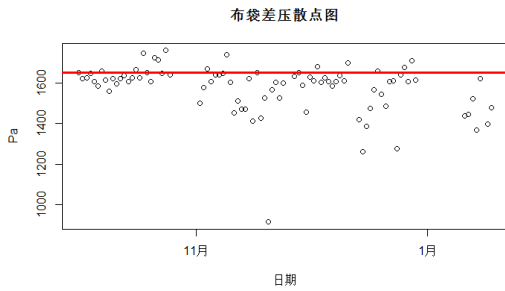


Figure 6: 布袋差压散点图

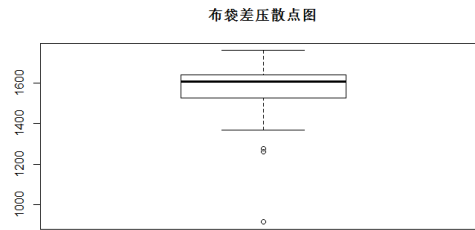


Figure 7: 布袋差压箱线图

从图中可以看出，异常点的布袋差压普遍偏小。但正常点大致分布在 1650Pa 附近。另外从箱线图可以看出，至少 50% 的天数布袋差压都在 1650Pa 附近。

所以在正常情况下，布袋差压基本都稳定在 1650Pa 附近，记布袋差压对布袋执行概率的影响为 $\epsilon_{\Delta P}$ 。

3.2.3 布袋气源压力的影响

布袋气源压力也称作喷吹压力，指的是喷吹时压缩空气的压力。布袋气源压力取自“2号炉烟气处理系统日报表（2015年6月-2016年6月）”9:00时的数据。以2015.10.01-2016.01.18作为样本进行分析气源压力的变化情况。下面是气源压力随时间变化的散点图及箱线图。

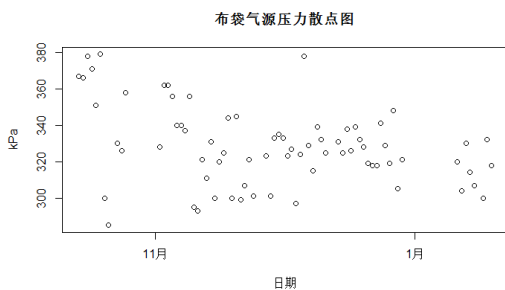


Figure 8: 布袋气源压力散点图

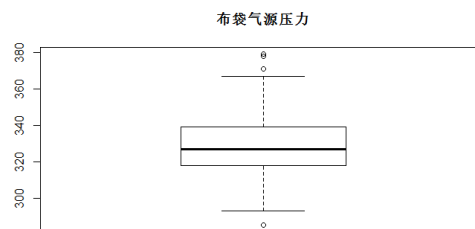


Figure 9: 布袋气源压力箱线图

从散点图和箱线图可以直观看出布袋气源压力分布还是比较均匀的，为了进一步研究布袋气源压力的变化情况，绘制了如下 QQ 图。

布袋气源压力QQ图

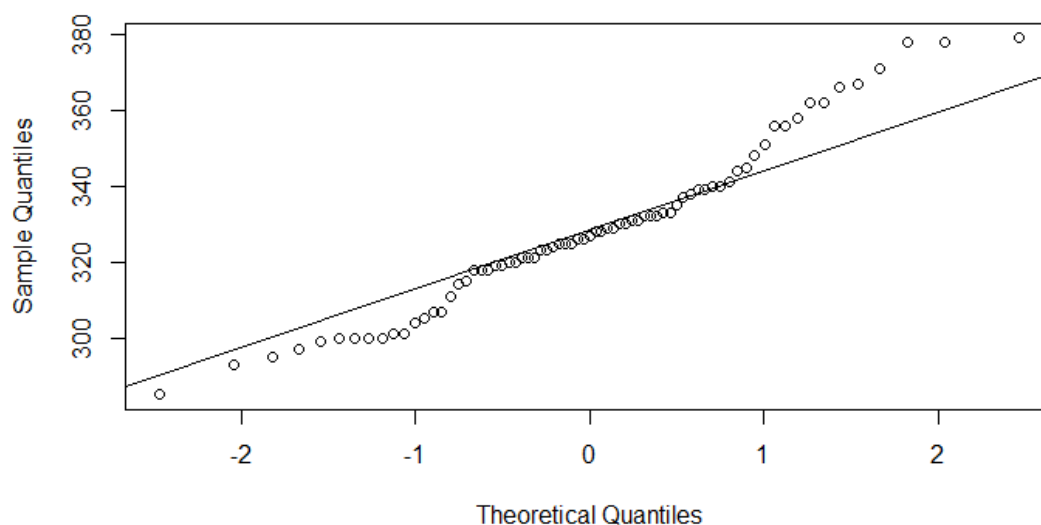


Figure 10: 布袋气源压力 QQ 图

从这张图还是比较难判断是否服从正态分布，为此，进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验，计算得到 p 值为 0.05385，则在水平 0.05 下可以认定布袋气源压力服从正态分布。于是，我们可以假设布袋气源压力对总体执行概率的影响为 $\varepsilon \sim N(\mu_P, \sigma_P^2)$ 。

3.2.4 总体执行概率

根据上述讨论，进口温度 T_{in} 、布袋差压 ΔP 、布袋气源压力 P 在一般情况下分布都比较均匀，且进口温度对总体执行概率的影响 ε_T 和布袋气源压力对总体执行概率的影响 ε_P 可看成是正态型变量。于是我们有

$$p = f(t) + \varepsilon_T + \varepsilon_P + \varepsilon_{\Delta P} \quad (14)$$

$$\triangleq f(t) + \varepsilon \quad (15)$$

且从上述分析可以看出这些自然因素（温度、差压、气源压力等）的变化较小，所以不妨用 ε 的期望值 ε_0 代替 ε ，则有

$$p = f(t) + \varepsilon_0 \quad (16)$$

3.3 模型求解

这部分我们对总体执行概率模型求解，即确定式 (16) 中的 f 。为此，我们先分析处理后的气体含尘量随时间的变化，然后根据执行概率反映了布袋除尘效率推导出执行概率随时间的变化关系，即解出 f 。

首先考虑处理后气体含尘量随时间的变化情况，我们选取两次更换布袋之间的时间段进行分析。考虑 2# 炉的除尘情况并选了 2015.07.03-2015.08.19 和 2015.11.19-2015.12.14 这两个时间段进行分析，并且绘制如下含尘量随时间变化趋势图。

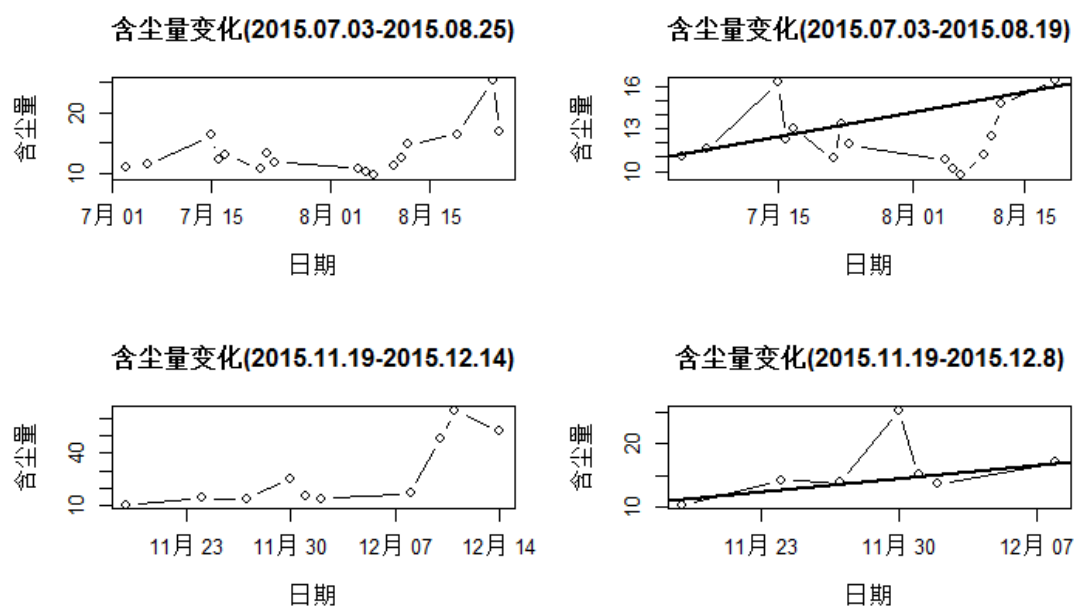


Figure 11: 含尘量变化趋势图

从图中可以看出，两个时间段的含尘量都有上升趋势，并且含尘量会出现波峰波谷的情形，我们可以把这种波动解释为每天含尘量带来的影响，而大多数情况下含尘量相差不大，所以含尘量整体呈现上升趋势。为此，除去极端的异常点，我们对含尘量进行回归分析，得到如下结果。

对于 2015.07.03-2015.08.19 这一时间段，

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	11.141484	0.248228	44.88	1.47e-06
t	0.102701	0.008899	11.54	0.000322

Residual Standard Error: 0.3829 on 4 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9708, **Adjusted R-squared:** 0.9636

F-statistic: 133.2 on 1 and 4 DF, **p-value:** 0.000322

Table 7: 拟合结果 (2015.07.03-2015.08.19)

从上表可以看出，截距的回归系数的 t 检验 $Pr = 1.47 \times 10^{-6} < 0.001$ ，斜率的回归系数的 t 检验 $Pr = 0.000322 < 0.001$ ，则在 0.001 水平下回归系数均显著不为零。此外，根据 $R^2 = 0.9708$ 可以判断拟合结果很好。且拟合结果为

$$\hat{G} = 11.141484 + 0.102701t \quad (17)$$

对于 2015.11.19-2015.12.14 这一时间段，

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	10.81911	0.94294	11.474	0.000329
t	0.30135	0.07773	3.877	0.017886
Residual Standard Error: 1.157 on 4 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.7898, Adjusted R-squared: 0.7373				
F-statistic: 15.03 on 1 and 4 DF, p-value: 0.01789				

Table 8: 拟合结果 (2015.11.19-2015.12.14)

从上表可以看出，截距的回归系数的 t 检验 $Pr = 0.000329 < 0.05$ ，斜率的回归系数的 t 检验 $Pr = 0.017886 < 0.05$ ，则在 0.05 水平下回归系数均显著不为零。此外，根据 $R^2 = 0.7898$ 可以判断拟合结果较好。拟合结果为

$$\hat{G} = 10.81911 + 0.30135t \quad (18)$$

于是，根据上述讨论，我们可以判断出两次更换布袋之间，处理后气体的含尘量 G 与布袋使用的时间 t (从最近一次更换布袋的时间点开始计算) 大致满足线性关系

$$G = \alpha t + \beta \quad (19)$$

其中， α, β 取决于上一次更换布袋时布袋的整体运行状况。由式 (11)、(12) 及 (16)，我们有

$$G = -\rho(f(t) + \varepsilon)(\mu_0 + \xi) - KN - B_0 \quad (20)$$

$$\approx -\rho\mu_0 f(t) - KN - B_0 \quad (21)$$

再联立式 (19), 我们有

$$f(t) = -\frac{\alpha}{\rho\mu_0}t \quad (22)$$

再由式 (13), 有

$$p = -\frac{\alpha}{\rho\mu_0}t + \varepsilon_0 \quad (23)$$

其中, ρ 取决于布袋的材质, 故为定常数; μ_0 为每天预处理气体含尘量的期望值, 故也可看成定常数; 而 α 取决于最近一次更换布袋时布袋的整体状况。显然, 每次更换布袋时, 布袋整体执行概率也不一样, 所以上文中拟合处理后含尘量时得到了不同的 α 值。

当 $\alpha = 0$ 时, 总体执行概率为 $p = \varepsilon_0$, 即总体执行概率不随布袋运行时间变化而变化, 实际意义则代表布袋能够稳定运行。 $\alpha > 0$ 则表示总体执行概率随布袋使用时间延长而降低, 且 α 越大则表示越不稳定。2015.07.03-2015.08.19 时间段内, $\alpha_1 = 0.102701$, 2015.11.19-2015.12.14 时间段内 $\alpha_2 = 0.30135$ 。因 $\alpha_1 < \alpha_2$, 则 2015.07.03-2015.08.19 时间段内的布袋更稳定。

4 烟尘扩散模型

4.1 模型假设

- 垃圾焚烧厂周围地势平坦, 只有少量建筑物覆盖。
- 烟气流量和垃圾处理量成正比关系。

4.2 模型建立

4.2.1 基础模型

查阅资料知, 垃圾焚烧厂周边空气污染物浓度变化时一个典型的连续点源高斯扩散模型 [1]。

以垃圾焚烧厂烟囱为排放点源, 此点源为有边界点源, 实际高度为 H 。以其在地面投影点为坐标原点。在只考虑风的因素的情况下, 以风向为 x 轴, 铅直方向为 z 轴, 建立 $x - y - z$ 直角坐标系。假设点源在没有任何障碍物的自由空间扩散, 不考虑下垫面的存在。此时, 烟气扩散模型是一个非常典型的点源高斯扩散模型, 大气中的扩散是具有 y 与 z 两个坐标方向相互独立的两一维正态分布的乘积。可以求得, 下风向任意一点的烟气浓度为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (24)$$

其中, Q 是模型中的源强, 也就是排烟口的排放速度。 \bar{u} 是排烟口的平均风速, σ_y 、 σ_z 分别是用浓度标准差表示的在 x 、 y 轴上的扩散系数。

根据迪肯的幂定律, 在中性层结条件下, 且地形开阔平坦只有少量地表覆盖物时, 高度为 z 的地方平均风速为:

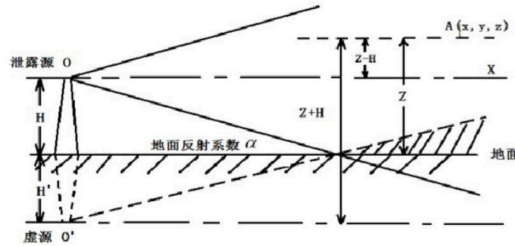
$$u = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (25)$$

其中, u_0 是已知高度 z_0 处的平均风速。

4.2.2 模型修正

4.2.2.1 镜源反射修正 在基础模型中, 我们假设下垫面是不存在的, 然而在实际中, 排烟口不够高, 下垫面需要加入考虑。在烟尘扩散过程中, 部分烟尘在地面上沉积, 也有一部分被反射。查阅资料 [2] 可以查得地面反射系数 α 。

为了求得实际中空间的烟尘浓度, 可以利用“像源法”。下图为该模型的示意图



根据“像源法”, 空间中的烟尘浓度由实象和像源贡献。

其中, 实象的贡献为

$$C_1(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (26)$$

像源的贡献为

$$C_2(x, y, z) = \frac{\alpha Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (27)$$

这样, 空间点的烟尘浓度为

$$C(x, y, z) = C_1 + C_2 = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + \alpha e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \quad (28)$$

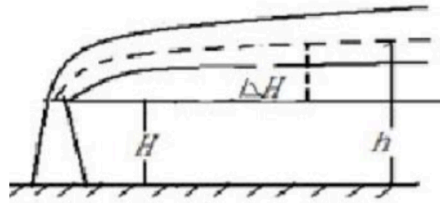
4.2.2.2 重力倾斜修正 在实际情况下, 重力因素对烟尘的扩散影响也很大。由于重力因素, 烟尘在按平流输送扩散的同时还按重力沉降速度下沉, 因而烟尘整体地往地

面倾斜。根据斯托克斯公式，可得烟尘在重力作用下在竖直方向做匀速下降的速度为 $u_g = \frac{2r^2 g \rho}{9\mu}$ 。

这时针对不同的下风距离修正有效源高为 $h - \frac{u_g x}{u}$ ，可以得到空间点的烟尘浓度为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ e^{-\frac{(z-H+\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} + \alpha e^{-\frac{(z+H-\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \quad (29)$$

4.2.2.3 热力抬升修正 在实际扩散中，气团由于受到热力抬升和本身动量，产生一个附加高度 ΔH ，其烟尘实际高度为 $h = H + \Delta H$ ，如下图



根据霍兰德公式可以求得这个附加高度为

$$\Delta H = \frac{v_s D}{\bar{u}} \left(1.5 + 2.7 \frac{T_s - T_a}{T_s} D \right) = \frac{1}{\bar{u}} (1.5 v_s D + 9.6 \times 10^{-3} Q_H) \quad (30)$$

其中 $Q_H = \frac{\pi D^2}{4} v_s$

在此修正后，空间点的烟尘浓度为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ e^{-\frac{(z-H-\Delta H+\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} + \alpha e^{-\frac{(z+H+\Delta H-\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \quad (31)$$

4.2.2.4 降雨修正 雨水对污染物有一定的吸附能力，因此在降雨天需要考虑雨水对污染物浓度的影响。查询文献 [3]，发现雨水对烟尘的吸附作用与吸附率 β 和降雨强度 I 有很大的关系。具体公式如下

$$C(x, y, z) = \frac{Q e^{-\beta x}}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ e^{-\frac{(z-H-\Delta H+\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} + \alpha e^{-\frac{(z+H+\Delta H-\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \quad (32)$$

其中吸附率 β 的计算公式为 $\beta = aI^b$ ，根据经验，取 $a = 1.2 \times 10^{-5}$ ， $b = 0.5$ 。

4.2.3 模型总结

在根据点源高斯扩散模型提出基础模型后，我们考虑了各种实际因素。考虑到地面的存在，我们进行了镜源反射修正；考虑到重力的影响，我们进行了重力倾斜修正；考虑到烟尘自身温度的因素，我们进行了热力抬升修正；考虑到降雨，我们进行了降雨修正。最后，垃圾焚烧厂排放的烟尘扩散模型为

$$\begin{cases} C(x, y, z) = \frac{Qe^{-\beta x}}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ e^{-\frac{(z-H-\Delta H+\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} + \alpha e^{-\frac{(z+H+\Delta H-\frac{u_g x}{u})^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \\ u = u_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{1}{7}} \\ u_g = \frac{2r^2 g \rho}{9\mu} \\ Q_H = \frac{\pi D^2}{4} v_s \\ \Delta H = \frac{1}{u} (1.5 v_s D + 9.6 \times 10^{-3} Q_H) \end{cases} \quad (33)$$

4.3 模型求解

接下来，我们收集了深圳地区的气象信息，包括扩散系数、风速风向等信息，并结合已有的焚烧厂烟尘排放情况等模型所需要的数据来求解焚烧厂附近的空气污染物扩散情况。

4.3.1 确定扩散系数

根据国家标准 [4]，扩散系数可以由扩散参数幂函数查得。而扩散参数幂函数表的查询参数是大气稳定度。规定利用天气条件确定辐射等级，然后根据辐射等级和风速确定大气稳定度。

下表为国标制定的大气稳定度参考级别表

地面风速 (m/s)	白天太阳辐射			阴天的百 态或夜回	有云的夜晚	
	强	中	弱		薄云遮天 或低 云>=0.5	云量<=0.4
<3	A	A-B	B	D	-	-
2-3	B	B	C	D	E	F
3-5	B-C	B-C	C	D	D	E
5-6	C-D	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

通过查找资料确定深圳当地的大气稳定度后，再根据下表确定扩散系数。

大气稳定度	σ_y	σ_z
A-B	$0.32x(1+0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$	$0.24x(1+0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-\frac{1}{2}}$
E-F	$0.11x(1+0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-\frac{1}{2}}$

根据天气网的数据 [5] 可知，深圳 2015 年 10 月的大气稳定度以 D 级居多，因此取深圳的扩散系数为

$$\begin{cases} \sigma_y = 0.16x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}} \\ \sigma_z = 0.14x(1 + 0.0003x)^{-\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (34)$$

4.3.2 风速风向确定

根据天气网 [5] 的资料，可以获得深圳 2015 年 9 月的风向风速数据，部分数据如下表

日期 (年/月/日)	风速 (m/s)	风向
2015/10/10	1.7	东北风
2015/10/11	2.8	东北风
2015/10/12	1.6	西北风
2015/10/13	1.8	东北风
2015/10/14	1.3	东北风
2015/10/15	1.2	东北风
2015/10/16	2	东北风
2015/10/17	1.9	东北风
2015/10/18	2	东北风

Table 9: 深圳风速风向表

分析可知，深圳在 2015 年 10 月，以东北风 (风频为 60%) 为主，其平均风速为 1.736m/s。在之后的讨论中，深圳的风向只有东北风，风速为其平均值。

4.3.3 降雨量确定

根据深圳气象局统计的数据 [6]，深圳市累年平均年降水量为 1935.8 毫米，最大年降水量为 2747 毫米，最小年降水量为 912.5 毫米。我们假设平均年降水量为降雨天时的降雨量。

4.3.4 模型基本参数

根据所查找到的数据，确定了模型中的参数，见下表

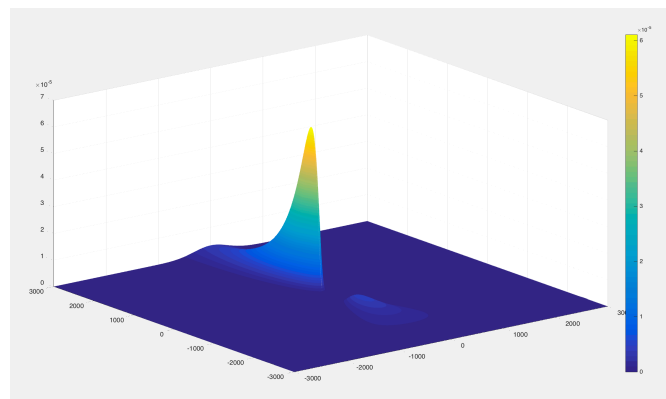
变量名称	数值	变量名称	数值
H	80m	D	4m
r	32um	u_0	东北风:1.736m/s
z_0	10m	g	9.81m/s
u_g	0.2276m/s	α	0.3
I	1935.8mm	v_s	15m/s

依据焚烧炉烟尘监控数据,可处理垃圾 $350t/d$ 的焚烧炉烟气平均流量为 $346687.5m^3/h$ 。根据资料,深圳地区焚烧炉的处理能力为 $624t/d$ 。假设烟气流量与垃圾处理量为正比关系,可求得 $624t/d$ 焚烧炉的烟气流量 V 为 $618094.3m^3/h$ 。

设 C 为排放浓度 (mg/m^3), 则源强计算为: $Q = \frac{V \times C}{3600} (mg/s)$ 。

4.3.5 模型求解

以 2015.07.03 为例, 此日源强 $3.827g/s$, 讨论烟尘在离水平面高 10 米处的浓度分布。使用 matlab 求解模型, 并画出刮东北风时的烟尘浓度空间分布。



5 监测点选址模型

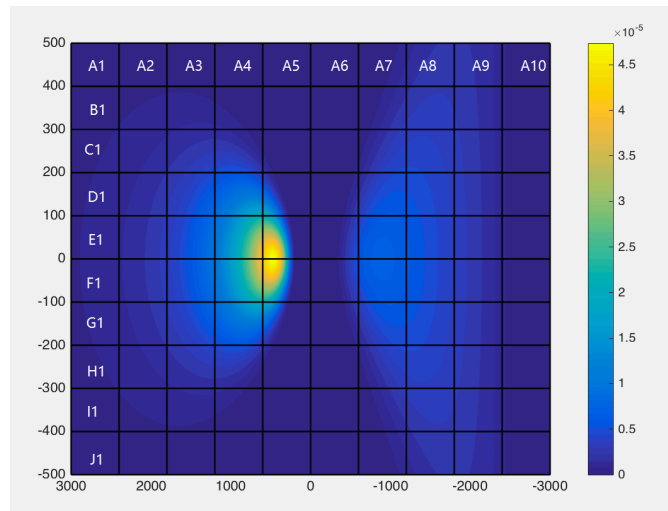
5.1 模型假设

- 焚烧厂周边地形较为平坦, 仅有少量建筑物覆盖。
- 监测点的地势高为 10m 左右。

5.2 模型建立

常见的监测点设置方法有功能区布点法、网格布点法、同心圆布点法、扇形布点法和模拟测算布点法等。这些布点方法各有优缺点，我们这里采用的是模拟测算布点法，用以建立监测点选址模型。

首先确定需要监测的区域，并划分出网格。现在我们只考虑一个烟囱。我们以烟囱为中心建立网络坐标，将污染物所影响到的范围定为 6 平方公里，并划分为 100 个网格，每个网格代表 100m*600m 的范围，并分别用 A_1 J_{10} 对其标注。如下图所示



随后我们根据每个空间点的污染物浓度设立监测点。我们将每个网格中污染物浓度众数 a_i 作为该网格的期望值。每个网格面积为 S_i 。在此引入期望值 $E(X)$ 的定义，指的是整个污染区域烟尘浓度的期望值，公式为

$$E(X) = \frac{\sum a_i \times S_i}{\sum S_i} \quad (35)$$

从所有网格中找出与期望值相对误差不超过 1% 的期望点，用于污染区空气质量的监测。

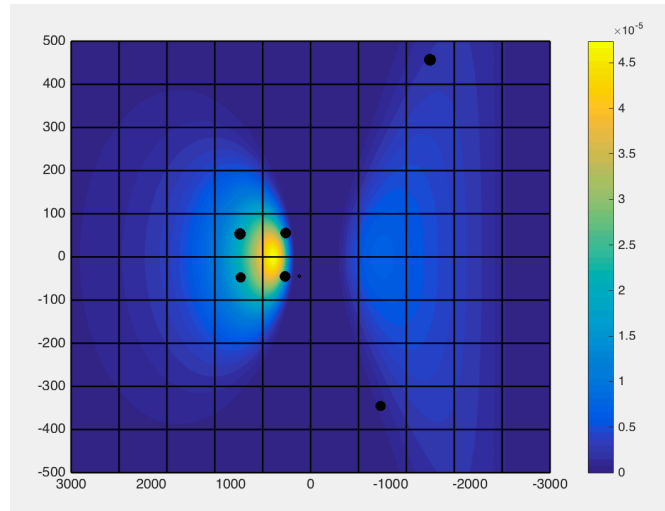
考虑到实际情况，我们更关心的是某地区空气污染物浓度是否超标，于是我们在空气污染物浓度较高的地方设置监测点。出于人文主义的考虑，我们将在居住区等人口较为密集的地区设置较多的监测点，用于实时监测人们生活周围的空气质量。

5.3 模型求解

根据烟尘扩散模型的计算，烟尘污染物期望值为 2.40×10^{-6} 。可作为监测点的网格与其相对误差如下表

网格	相对误差 (%)
A8	0.98
I7	0.83

虽然源强会随着时间变化，但烟尘污染物峰值出现的位置总落在沿风向方向 465m 至 480m 的位置，于是我们计划在 E_4 、 E_5 、 F_4 、 F_5 网格设置监测点。除了已经选好的 6 个监测点，我们计划再根据人口因素和空气污染物浓度分布图选取 1 个作为监测点。由于人口密度分布和烟囱具体所在地未知，因此这 1 个监测点未在图上标注。下图为监测点示意图



6 稳定性能提升模型

6.1 模型假设

- 新型超净除尘工艺满足更高的排放标准
- 新工艺完全克服老工艺布袋除尘器的缺点，短时间内不会发生故障
- 新工艺除尘后的含尘量符合正态分布

6.2 模型建立

由于对该工艺的工作原理不甚了解，我们根据附件信息假设其满足高排放标准，为使其除尘效果具有一定的随机性，假设其符合正态分布，即

$$G_i \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (36)$$

其中, G_i 表示第 i 天处理气体中的含尘量。从含尘量的角度, 我们定义时间段 (n 天) 内除尘工艺的稳定性函数

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{N})^2}}{\frac{\sum_{i=1}^N G_i}{N}} \quad (37)$$

通过该稳定性函数值, 我们可以比较不同除尘工艺下除尘的稳定性。

6.3 模型求解

根据假设, 除尘后的含尘量符合正态分布, 我们对比布袋除尘的数据, 模拟了新型超净除尘工艺在 2015/11/19-2016/1/18 的除尘后含尘量数据. 将两种工艺除尘后的含尘量数据按均值归一化后, 作出如下对比图。

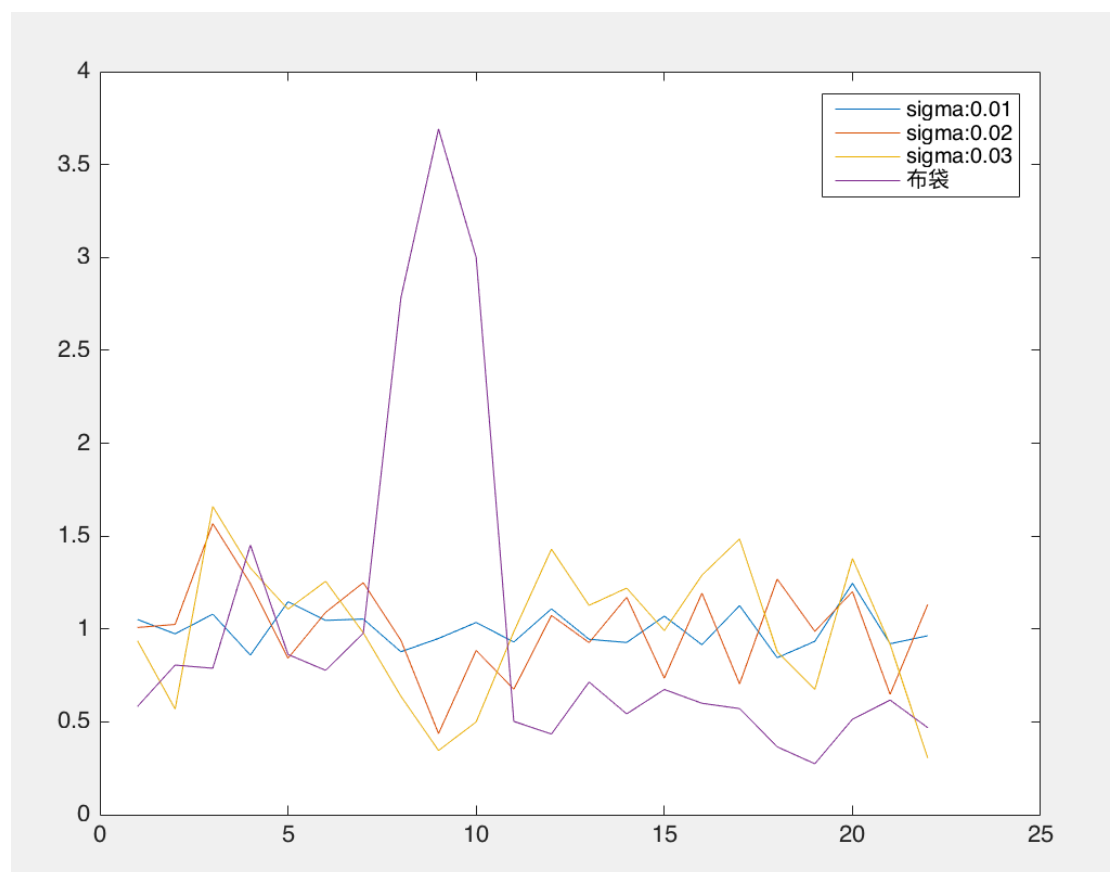


Figure 12: 不同标准差下除尘后的归一化烟尘含量

通过稳定性能函数先后求得布袋除尘和新型超净除尘工艺除尘后的稳定性能值。

$$S = 0.4628 \quad S_{new} = 1.5930 \quad (38)$$

由上可见，新工艺不仅除尘的效果大大提升，其在稳定性能上也远远优于布袋除尘。

6.4 方差讨论

以上关于稳定性能提升的讨论基于模型建立初期假设新工艺除尘后的含尘量符合方差为正态分布。由于对新工艺了解甚少，我们继续模拟了符合更大方差分布的新工艺除尘后的含尘量，并计算了稳定性能值。如下表

正态分布的标准差	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	
稳定性能值	0.4628	0.6927	1.1330	1.1766	1.7992	
正态分布的标准差	0.035	0.04	0.045	0.05	0.055	布袋除尘
稳定性能值	1.5930	1.9657	1.8608	2.0217	3.5403	4.2253

7 问题求解

7.1 问题一

7.1.1 扩建规模

扩建方式为增加焚烧炉，每个焚烧炉有相同数量的烟囱用于排放废气。正常而言，焚烧炉之间是独立运行的，每个焚烧炉排放废气的期望值也应该是相同的。用数学语言描述，就是焚烧炉数量与废气排放量的关系是线性的。已知废气排放总量限额，又知道焚烧炉数量与废气排放量为线性关系。现在只要求出每个焚烧炉的废气排放量，就能得到焚烧炉的数量，也就是焚烧厂扩建规模的上限。根据上面的布袋除尘模型以及除尘稳定性模型，可知每个焚烧炉的废气排放量与总体执行概率有关。

7.1.2 综合监测建议方案

关于监测模型，本题只涉及到了含尘量这一污染物，而在补充材料中我们看到还有CO、SO₂、NO、NO₂、NO_x这五种污染物的监测数据。为了判断布袋除尘器对这些污染物的除尘效果，我们对处理后气体的含尘量和其它五种污染物的相关性进行了分析，得到下列的相关系数表及相关系数图。

SO ₂	NO	NO ₂	CO	NO _x
-----------------	----	-----------------	----	-----------------

0.0586	0.1417	0.0033	-0.0086	0.1413
--------	--------	--------	---------	--------

Table 11: 烟尘与其它五种污染物的相关系数

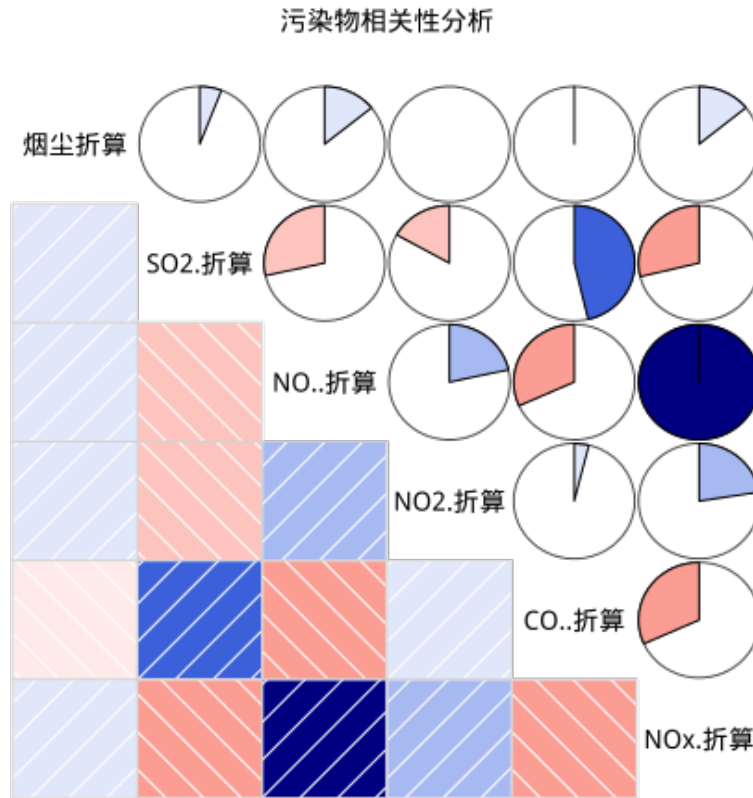


Figure 13: 烟尘与其它五种污染物的相关系数图

对于图 (), 我们先从下三角单元格 (在主对角线下方的单元格) 开始解释。蓝色和从左下指向右上的斜杠表示单元格中的两个变量呈正相关。反过来, 红色和从左上指向右下的斜杠表示变量呈负相关。色彩越深, 饱和度越高, 说明变量相关性越大。相关性接近于 0 的单元格基本无色。上三角单元格用饼图展示了相同的信息。颜色的功能同上, 但相关性大小由被填充的饼图块的大小来展示。正相关性将从 12 点钟处开始顺时针填充饼图, 而负相关性则逆时针方向填充饼图。从饼图可以看出, 烟尘与其它五种污染物相关性均小于 0.25 (第一排阴影部分均不足 1/4 圆), 可见, 经布袋除尘对其它污染物的处理几乎不起作用。所以, 即使烟尘排放达到标准, 也要继续进行 NO、SO₂、NO、NO₂、

NO_x 的处理。

基于烟尘扩散和监测点选址模型,可以回答第一问中对环境保护监测综合建议的问题。

我们决定在垃圾焚烧厂周围 16.25 平方公里的范围建立 n 个监测点,其中 1 个监测点用于监测垃圾焚烧厂附近污染物浓度最大值,其余监测点用于监测空气污染物浓度的期望值。

基于烟尘扩散模型以及相关数据运算,可以知道风速越小时,污染物更集中,在焚烧场周围的污染物浓度也越高。因此在风速小或是无风的天气情况下,污染物排放更容易超标。对于降雨这一因素的影响,通过上述模型的分析可以知道降雨会降低污染物的浓度,因此在晴天的情况下污染物浓度更有可能超标。因此政府在监测排放情况的时候可以考虑在晴天无风情况下对焚烧场的排放情况重点监测。

7.2 问题二

因为采用了新型工艺,所以用来衡量布袋模型的稳定性的 α 不适用于衡量新工艺的稳定性,为此我们需要定义一种普遍的衡量除尘稳定性的方法,这在稳定性能提升模型中有详细讨论。稳定性能提升值即为两种不同除尘方式的稳定性差值。

参考文献

- [1] 施介宽, 大气粉尘弥散模式的剖析环境科学情报 1987.6.64
- [2] 施介宽, 大气颗粒污染物的干沉积速度兰州大学
- [3] 蒋维楣, 空气污染气象学
- [4] 国家标准 GB/T 132001-1991 制定地方大气污染物排放标准的技术方法
- [5] 天气网 <http://lishi.tianqi.com/shenzhen/index.html>
- [6] 深圳气象局 <http://www.szmb.gov.cn/article/QiXiangKePu/QiXiangYaoSu/2012/04/11/4a98a7578a414.html>