

# 北京市首钢环境污染现状及风险评价研究



重庆大学硕士学位论文

(学术学位)

学生姓名：谢文华

指导教师：李楠 副教授

专    业：供热、供燃气、通风及空调工程

学科门类：工    学

重庆大学城市建设与环境工程学院

二〇一四年五月



# **Research on Environment Pollution and Risk Assessment of Shougang Beijing**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Master's Degree of Municipal Engineering

**By**

**Xie wenhua**

**Supervised by Ass. Prof. Li Nan**

**Major: Heating, Gassing, Ventilating and**

**Air-Conditioning Engineering**

Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering of  
Chongqing University, Chongqing China

May, 2014



## 摘 要

现代经济的不断发展迫使传统工业的转型越来越快，其中钢铁工业也需要从原来的粗放型生产转变为集约型生产，原有的钢铁企业选择搬迁到新厂区，老厂区的重新利用则需要考虑到其场地的污染程度是否达到人体的健康要求，而场地内的空气污染就是其中重要的一项。

因此本文以首钢老工业区为研究对象，于 2013 年 7 月 1 日至 7 月 30 日和 2014 年 2 月 11 日至 3 月 10 日两段时间在厂区内选择了 7 个测点对其空气污染物进行监测，每天测试时间为早 4:00 到晚 21:00。结合厂区内的主要气体污染物排放情况，监测指标定为  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物，通过监测数据发现过渡季节和夏季的污染物浓度随时间的走势图具有不同的规律，夏季 4 种污染物浓度每天 9:00 至 12:00 期间会达到浓度峰值，而早晚浓度值较低。过渡季节  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的浓度在早上 9:00 左右和晚上都会出现浓度的峰值，而  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度值从早到晚有缓步上升的趋势。

为了解首钢老工业区内的整体空气质量情况，文章选用了模糊综合评判方法对厂区内 7 个测点及这些测点的平均值（场地整体空气质量）进行了空气质量评价，模糊综合评价结果显示夏季场地内整体空气质量达到 II 级， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的隶属度分别为 26%、75%、44%和 95%，过渡季节场地内整体空气质量也达到 II 级， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的隶属度分别为 22%、32.5%、77%和 45%。

了解场地内的综合污染状况后，文章通过多因素方差分析法分析各个污染物的可能影响因素，分析发现场地内过渡季节  $\text{SO}_2$  浓度的影响因素为  $\text{SO}_2$  大气环境背景值和风速， $\text{NO}_2$  浓度的影响因素为  $\text{NO}_2$  大气环境背景值， $\text{PM}_{10}$  浓度的影响因素为  $\text{PM}_{10}$  大气环境背景值， $\text{PM}_{2.5}$  没有发现相应的影响因素对其有显著影响。最后通过回归分析方法对  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  建立了回归模型。

**关键词：**钢铁，老工业，空气污染，评价，方差分析



## ABSTRACT

The continuous development of modern economy forcing faster transformation of traditional industries. Iron and steel industry needs to change extensive production from the original to intensive production. The original steel companies have to relocate to the new plant. The re-use of the old factory need to take the environment pollution into account in case that it has a bad effect with people's health. Air pollution within the site is a kind of important pollution.

This paper considers Shougang old industrial area as a study case. Some tests are performed from July 1st to July 30th in 2013 and from February 11st to March 10th in 2014. The tests continue from 4:00 to 21:00 everyday. 7 points are choosed to monitor air pollution. Monitoring indicators are choosed to be  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$ , combined with the region's main plant emissions of gaseous pollutants. The pollutant concentration data has different laws between the transition season and summer. The four kinds of pollutant concentrations will reach the peak concentration from 9:00 to 12:00 every day in summer. They have lower concentration values during the rest of the day.  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  concentration will reach the peak at around 9:00 am and in the evening in transition season. The concentration of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  has a slowly rising trend from morning to night in transition season.

In order to understand the overall air quality of Shougang old industrial areas, the article selects fuzzy comprehensive evaluation method to assess the air quality of the 7 measuring points and their mean value in this region. Fuzzy comprehensive evaluation results show that the overall air quality in summer gets grade II. The fuzzy membership of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  are 26%, 75%, 44% and 95%. The overall air quality in the transition season has also reached grade II. The fuzzy membership of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  are 22%, 32.5%, 77% and 45%.

After comprehensive understanding of the air contamination, the author of the article analyzed the possible factors that may affect each air pollutant by multivariate analysis of variance. The results show that the atmospheric background value of  $\text{SO}_2$  and wind speed affects the  $\text{SO}_2$  concentration in this area in transition season. The atmospheric background value of  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{10}$  affects the  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{10}$

concentration separately in this area in transition season. The results didn't find any factors corresponding with the  $PM_{2.5}$  concentration in this area. Finally, the regression models of  $SO_2$  and  $NO_2$  are built by regression analysis method.

**Key words:** Iron and Steel, Old Industry, Air Pollution, Assessment, Variance Analysis



## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
1 绪 论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外现状研究综述.....	3
1.2.1 国外研究现状.....	3
1.2.2 国内研究现状.....	6
1.3 本文研究目的、内容、技术线路.....	9
1.3.1 研究目的.....	9
1.3.2 研究内容.....	9
1.3.3 技术路线.....	10
1.4 本章小结.....	10
2 空气品质的评价方法.....	11
2.1 国内外执行标准.....	11
2.2 评价方法对比.....	14
2.2.1 模糊综合评判方法.....	14
2.2.2 层次分析法.....	16
2.2.3 人工神经网络.....	21
2.2.4 灰色系统分析.....	23
2.2.5 综合指数评价法.....	27
2.2.6 各评价方法的对比.....	28
2.3 本章小结.....	28
3 钢铁企业的大气污染现状.....	29
3.1 中国钢铁行业发展现状.....	29
3.2 钢铁企业的生产流程以及产生污染的环节.....	33
3.2.1 钢铁企业生产方式的发展.....	33
3.2.2 炼铁及炼钢的流程简介.....	35
3.2.3 典型钢铁生产流程的污染物排放.....	36
3.2.4 各种污染气体的危害性简介.....	40
3.3 本章小结.....	41

4	首钢老工业区空气质量测试.....	43
4.1	测试参数的选择.....	43
4.2	测试场地与测试时间.....	43
4.3	实验仪器.....	44
4.4	污染物时空分布分析.....	46
4.4.1	均值浓度变化分析.....	46
4.4.2	过渡季节和夏季污染物浓度对比.....	52
4.5	本章小结.....	54
5	首钢老工业区空气品质的风险评价.....	55
5.1	环境空气质量的模糊综合评价.....	55
5.1.1	评价地点及评价内容.....	55
5.1.2	大气质量等级.....	56
5.1.3	建立隶属函数、计算各因子隶属度.....	56
5.1.4	计算各污染物的权值.....	58
5.1.5	模糊矩阵的复合运算.....	59
5.2	本章小结.....	60
6	污染物浓度相关分析及回归模型的建立.....	63
6.1	方差分析.....	63
6.1.1	方差分析的条件.....	63
6.1.2	方差分析条件不足的解决措施.....	64
6.1.3	多因素方差分析的原理和模型建立.....	65
6.1.4	多因素方差分析的步骤.....	66
6.2	首钢老工业区污染物影响因素研究.....	67
6.2.1	污染物浓度影响因素水平划分.....	67
6.2.2	方差分析条件检验.....	68
6.2.3	各污染物多因素方差分析.....	71
6.3	首钢老工业区污染物回归模型的建立.....	74
6.4	本章小结.....	76
7	结论与展望.....	77
7.1	本文工作和结论.....	77
7.2	展望.....	78
	致 谢.....	79
	参考文献.....	81
	附 录.....	85

A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录 .....	85
B. 作者在攻读硕士学位期间获得的专利 .....	85
C. 作者在攻读硕士学位期间参与的主要项目目录 .....	85



# 1 绪论

## 1.1 课题研究背景及意义

近代社会的发展中几次工业革命起到了极大的推动作用，特别是第一次工业革命，把人们带入了蒸汽和机械时代。然而在推动社会发展的同时，一些负面的影响也随之而来，煤炭、石油、天然气等化石燃料的燃烧对整个大气环境产生了极大的影响。现在全球总人口数已经超过了 60 亿，却有 10 亿多城市人口的健康受到了空气污染的威胁。世界卫生组织曾针对空气质量展开调查，覆盖面包括了全球 91 个国家约 1100 座城市，包括各国首都及人口超过 10 万以上的城市，2011 年其公布的统计数据显示，全球每年死于空气污染物已超过 200 万人。我国的大城市中，烟尘、粉尘等颗粒物每年使 5 万人死亡，40 万人感染上慢性支气管炎。现在空气污染已经严重危害到了人们的身体健康，特别是生活在城市里的居民。研究表明，在中国引起慢性障碍性呼吸道疾病的主要因素就是大气污染。我国的大气污染情况也在国际上造成了不良的声誉，世界卫生组织已经把北京列为大气污染最严重的城市之一，这对我国的社会主义现代化建设和对外的交流合作等方面都带来了不利的影响。

世界卫生组织认为大气污染的源头来自于很多方面的因素，但最主要的还是工业化的推进以及运输和发电时大量使用劣质燃料。我国是以燃煤为主的能源结构国家，煤产量位居世界首位，约占世界产量的 37%，据中国煤炭工业协会通报，2012 年我国煤炭产量为 36.6 亿吨。我国煤炭占一次能源消费的 75%，燃煤造成的大气污染包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  和粉尘等。随着煤炭消费的不断增长，燃煤产生的  $\text{SO}_2$  排放量已连续多年超过 2000 万吨，居世界首位，这也使得我国的酸雨和二氧化硫污染日渐严重。2012 年我国环境保护部发表了环境公报，公报显示全国城市空气质量总体良好，但部分城市有比较严重的污染，酸雨也有严重的污染。全国在开展环境空气质量检测的 471 个县级及以上城市中，达到一、二、三级标准的城市比重分别为 3.6%、79.2%和 15.5%，而在三级标准以下的城市占 1.7%。113 个环境保护重点城市中有 73.5%的城市达到了二级标准。全国 494 个城市进行了酸雨监测，而有 50.4%的城市出现了酸雨，出现严重或较重的酸雨程度（降水年均 pH 值小于 5.0）的城市有 107 个，占 21.6%。

我国是燃煤为主的能源结构国家，主要呈现出烟煤污染的特征，这一特征也源自于污染大气的行业的特点。在我国大多数的工业城市中，大气污染物主要来自于电力行业、冶金行业、化工行业、建材行业等重污染企业。其中钢铁冶金行业又是我国大气污染的大户，现有的燃料构成和工艺特征决定了钢铁行业对大气

污染中的颗粒物、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物等主要污染物都有很大的贡献。目前，在全国 40 个行业中，废气排放量在 100 万立方米（标）以上的 76 个大户中，钢铁企业就有 14 户，占 18.4%<sup>[1]</sup>。

近年来我国钢铁行业的速度发展十分迅猛。1996 年，我国的钢铁产量首次超过 1 亿吨，成为世界第一产钢大国；2003 年我国粗钢的产量达到了 2 亿吨，也是世界首屈一指。2008 年我国钢铁产量 5 亿吨，世界钢铁产量 13.3 亿吨，中国占世界钢铁产量的 38%<sup>[2]</sup>。从 90 年代初期到现在的发展当中，我国不仅变成了钢铁生

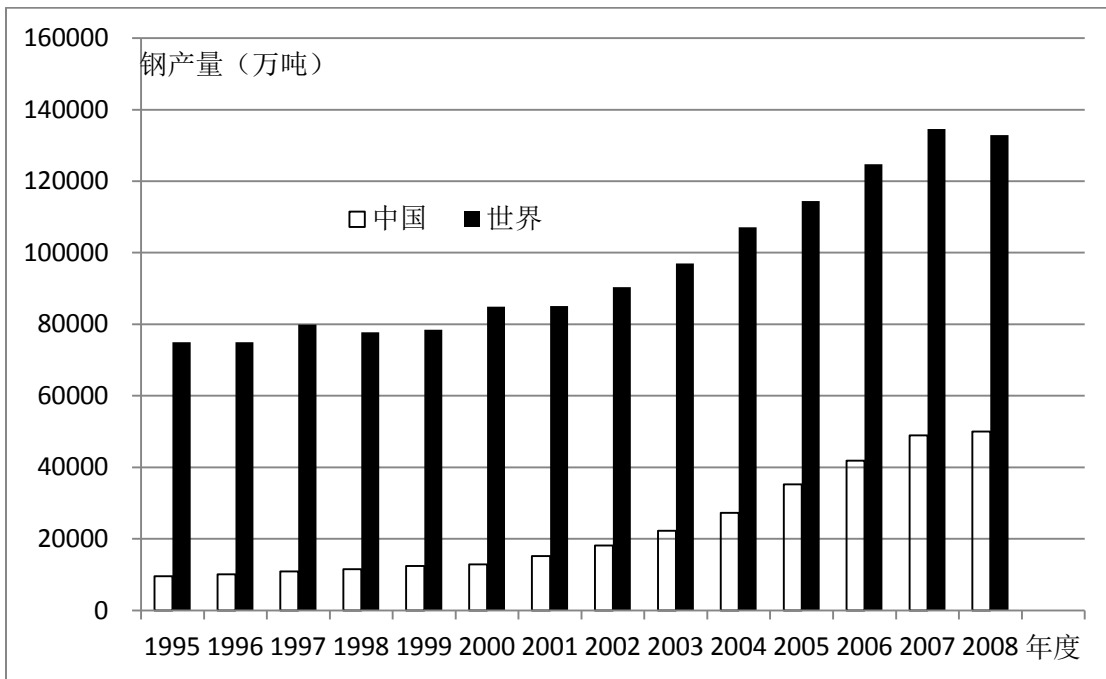


图 1.1 1995-2008 年中国与世界钢铁产量对比图

Fig. 1.1 Comparison of the iron and steel yield between China and the world in 1995-2008

资料来源：《中国钢铁工业年鉴》和世界钢协《钢铁统计年鉴》数据整理

产的大国，而且装备水平、产品质量等方面也与发达国家缩小了距离。钢铁企业的发展却对大气环境造成了一定的破坏。钢铁生产过程中产生的气体污染物包括烟尘、粉尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、氟化物、二噁英等，其中烟尘、粉尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 会刺激人体的呼吸道系统，氟化物、二噁英是致癌物质，长期生活在这种环境中的人员患病几率比正常环境中的人员高出很多。一些钢铁企业长期排放有害气体，给附近人员的健康造成了很坏的影响，也在社会舆论中给全国人民留下了坏的印象。面对这种情况，2012 年河北省出台了《钢铁工业大气污染物排放标准》，希望通过提高钢铁企业环保的门槛，强制钢铁工业加快结构调整、改造升级，还百

姓一片没有污染的天空。

随着社会的发展和产业的进步，一些我国早期建设的城市工业区存在着资源消耗严重、环境日益恶化、区域不断衰落等情况，进而导致这些产业逐步削减、搬迁或消失，大量的工业厂区和工业建筑失去了意义，而且还占用了大片的土地资源。另外一方面，随着城市化进程的不断加快，城市的范围不断向外扩张，新城区需要进行空间扩张。当原有的工业厂区不再适合传统工业生产的时候，亦或已严重干扰到新的发展是，这些工业废弃地的使用就成为了新的问题。以首钢老工业基地为例，2010年底，随着1号高炉全面熄灭，拥有91年历史的首钢北京石景山区钢铁主流程停产，如何重新利用这块被废弃的场地亟待解决。

在钢铁行业排放的污染物中，废气污染对自然环境和人类的影响非常巨大。例如废气中的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 产生的酸雨严重危害到了农作物和林木的生长；河流、湖泊及地表水的酸化，对渔业产生了危害，也影响到了人们的饮用水；另外还会使重要的建筑物、文化古迹等受到腐蚀侵害<sup>[3]</sup>。粉尘也会导致周围的居民产生肺部疾病，以及由粉尘引起的相关疾病。

因此，建立适合的评价模型来评价首钢老工业基地室内外的空气污染状况对于这块废气场地的再利用具有非常重要的意义，它关系着再利用后建筑物内的空气是否对人体的健康产生影响，本文也是基于这样的实际背景展开的。

## 1.2 国内外现状研究综述

### 1.2.1 国外研究现状

19世纪中后期越来越多的欧美国家进入工业化社会后，产业结构不断调整，人们也开始意识到工业化带来的环境问题，一些钢铁、煤炭、挖掘工业等重工业出现了结构性的萧条，随后产生了大量的工业废弃地。工业废弃地有一些不同的定义，英国政府对废弃地的定义为：凡是工业或其它方面原因受到损害，非经治理而无法利用的土地。另外，在上世纪末期美国也出现了棕地（Brownfield）的概念，棕地是指“由于现实污染以及可预见的污染使得未来再开发变得十分困难的废弃的或者正在使用的工业和商业用地”<sup>[4]</sup>。工业废弃地的出现是随着社会的发展必然产生的，就像工业的发展标志着现代化社会的到来一样。

国外对工业废弃地的再利用早就在不断的探索当中，迄今为止也出了很多的研究成果。G.W.Page等通过调查研究了工业废弃地的一些特征，他们调查了纽约和德克萨斯州两地1415个工业废弃地点，通过对多种废弃工业地点的调研，发现了新旧工业区的土地使用的现状<sup>[5]</sup>。

S. Schäler等描述了评估大型棕地评价模型的发展历程，并且在案例中呈现了评价模型的具体实施方法。介绍的模型结合了棕地再利用的三个关键点：第一是

地表整治和具体花销，第二是以市场为导向的经济评估，第三是计划修复的废弃地对社区的可持续性和地区的发展有多大的贡献。评价的焦点也集中在废弃地修复再利用的早期过程中。案例也表明综合评价对鉴定土地修复的可持续性和经济性方面都提供了重要的帮助<sup>[6]</sup>。

Raffaele Laforteza 等通过视觉偏好的方式叙述了量化、分析、比较修复方式的综合方法，该方法也被应用在意大利南部大量废弃工业建筑区域中的一部分场地，并具体分析了四种修复方式，包括地表植被种类的增加，地表植被种类和随意分布的树木的增加，地表植被种类和一个小群体树木的增加，地表植被种类和大树木群体的增加。这种方法被用来分析并和成本表面分析和视觉偏好评价的使用这种基本情况相比较。统计结果显示几种方法中对于林区鸟类分散更有生态功效的方式也是视觉偏好的分析结果，分析群体和位置的不同造成的结果不一致也被认同<sup>[7]</sup>。

Gareth Thornton 等发现工业废弃地的经济、环境和社会障碍阻止了它自身回归更有益的使用。文章指出欧盟及其成员国提供了各种激励机制来促进工业废弃地的再利用，但极少考虑其可持续性。决定如何重新利用工业废弃地应该还要考虑按照规程办理之外的其他事情。成员国，决策者，土地拥有者和开发者需要理解棕地再利用的所有内容，在选址方面可持续问题应该是重点考虑的。文章介绍了德国、英国、法国等欧盟国的激励机制，讨论了其影响和区别，并对工业废弃地的再利用提出了自己的意见和建议<sup>[8]</sup>。

笔者通过调研发现目前国外的工业废弃地的研究更多地偏向于土地的再次利用，土壤、水源的修复，还有原有工业厂区的建筑的改建和利用，对于工业废弃地的大气和室内空气污染的相关研究还比较少，这方面还有待后来的学者继续探究。

我国的工业起步比较晚，因此工业废弃地的出现也滞后于欧美发达国家，欧美国家在他们发展的历程中也经历过很多的工业废弃地的改造，有一些比较成功的实施案例可以给我国借鉴。

19 世纪晚期，纽约 SOHO 被大量的工厂占用，SOHO 不再适合居住。到 20 世纪初那里的文化和商业开始走下坡路，商业和经济变得萧条，其后 30 年间商家纷纷搬离此区，该区不再发展。到 1969 年，SOHO 已经成为非常破败的地方，其发展也到了最低点。由于租金便宜且空间宽敞，一些艺术家搬进了 SOHO 区，空厂房被他们改造成了工作室，SOHO 区逐渐成为艺术区而闻名于世。由于旅游者增加，商业逐渐繁荣，大部分穷困的艺术家不得不搬离他们自己创造的区域，但 SOHO 却因此发展成集居住、商业和艺术为一身的一个完善的社区。

德国的北杜伊斯堡景观公园是利用原蒂森公司（August Thyssen）的梅德里希



钢铁厂的原厂址建成。该钢铁厂原是产量很高的钢铁企业。因为欧洲产品配额限制的要求,1984年该工厂对5号高炉进行了现代化的改造。钢铁厂于1985年关闭,而该工厂在面临拆除还是保留的选择时城市选择了对工业遗迹的保留,而且对原厂址进行了景观美化和生态特制的强化。1989年杜伊斯堡市将原工业用地改变成公园用地。该改造项目吸引了包括彼得·拉兹事务所等大批优秀的景观设计团队。而彼得·拉兹事务所以其新颖独特的“后工业景观”设计思想、手法和现实可行的实施对策而最终赢得了该项目。彼得·拉兹事务所设计的公园不仅保存了鼓风机炼钢厂、煤矿,而且还保存了冶炼厂的烧结厂,公司厂区内部的铁路的铁轨也都保留了下来。改造设计的理念表现出了钢铁的制造和加工过程。厂区内通过生态和视觉设计对工业设施重新改造和应用,从而对他们进行再利用。公园中属于原钢铁厂的各生产系统独立存在,这些系统是通过视觉、功能或象征性的要素被连接起来。在改造过程中,设计师也制定了环境和生态的保护和利用原则,工厂中的植被均得以保护,荒草也任其自由生长。水的循环利用采用了科学的雨洪处理方式,达到了保护生态和美化景观的双重效果。在生态恢复问题上拉兹提出了长期而谨慎的分步建设设想,他认为生态恢复是个缓慢的过程,应从长远出发,采用柔和的修复手段,而不能采用生硬的改造方法产生新的环境污染。1994年夏天公园首次对公众正式开放,获得了很多的好评,北杜伊斯堡景观公园被誉为后工业景观公园的经典范例。

位于德国西部的鲁尔区(Ruhr Gebiet)曾经是欧洲最大的采矿城市,德国的工业命脉,也是欧洲最大的经济区。十九世纪,随着工业革命的兴起,鲁尔区渐渐成为德国的煤和钢铁生产基地。但是,在上个世纪六七十年代,鲁尔区遭遇了“煤炭危机”和“钢铁危机”,需要缩小煤矿规模和钢产量。现在鲁尔区关闭的炼钢厂和煤矿厂达到了90%。煤炭的没落使鲁尔区成为老旧过时的同义词。然而,德国北莱茵-威斯特法伦州政府大力推动工业文化旅游,把多个废弃的工业建筑改造成公园、美术馆、设计中心等,甚至还形成了一条“工业文化之路”的旅游线路,它连接了19个工业旅游景点、6个国家级博物馆和12个典型工业城镇,这也为老建筑注入了新气息,也让城市的寿命得以延续。位于西北部城市埃森(Essen)的矿业同盟(Zollverein)工业景观是其中最具代表性的例子。

埃森位于鲁尔工业区,拥有六十万人口。十九世纪初,煤炭和钢铁的发展使这个小镇成为德国最大的工业城。矿业同盟煤矿到1932年第十二矿场(Zollverein XII)的落成,让它一举成为世界上规模最大、效率最高的煤矿。当时矿业同盟煤矿每天生产1.2万吨的硬煤,是一般煤矿的4倍。随着天然气、热燃油、核能等新能源日趋便宜,煤炭逐渐失去作为生产原料的优势,而国际竞争也使德国的煤矿业开始走下坡。1986年矿业同盟煤矿正式结束营业。在煤矿倒闭之后,北威州政

府买下全部的工矿设备，并且完整地保留了煤矿工业区的结构。2001年，埃森煤矿获得联合国教科文组织列为世界文化遗产之一。

原有煤矿工业区经过了大量的改造，正如他们对自己的宣传语“埃森擦去了脸上的煤灰”那样，如今这里已经褪去了往日的沧桑，埃森焕发了青春的光彩。被改造的主体是埃姆舍尔河地区的17个城市，整个地区的地景被改造成生态大公园，原来被排放工业废水的埃姆舍尔河也恢复了往日的自然景观，厂区里的冲压车间被改造成了高档餐厅，厂房车间被改造成大型剧场。鲁尔区已经成功地将废弃的工业厂房废墟改变成了工业旅游胜地。现在老煤矿的工业建筑有的变身为煤矿博物馆、展览馆、舞蹈室、小戏院，有的是私人艺术工作室、办公楼、礼品店、餐馆和咖啡座。筹建中的，还包括一所国际设计学校、工业设计园以及国际建筑、设计与艺术实验室。过去囤积废料的空地，现在种满了树和各种植物，一片绿意盎然，一些过去用来运煤的火车铁路也改装成脚车道。矿业同盟工业区的这些改造都成为了当代工业设计的杰作。

### 1.2.2 国内研究现状

我国近年来城市化速度提高，城市的扩张范围也越来越大，城市建设发展迅猛。在全球经济一体化和政府的产业结构调整的指导下，我们正在逐步改善城市的环境，在此过程中工业废弃地也大量产生。我国对工业废弃地也有定义：工业废弃地指曾经用于工业生产及相关用途，而现在不再作为工业用途的场地。主要包括工业制造场地、商用或工业用的仓库、工业采掘地、废弃物的处理场地等<sup>[9]</sup>。

在社会产业的不断发展和结构不断调整的情况下，我国近十几年来也陆续出现了一些工业废弃场地。在场地停工和废弃之前，大家也都在全方位考虑企业的出路，也不乏专家学者的学术讨论。Fangfang Cheng等研究发现中国最近在工业废弃地的改造方面已经有了不少的案例，其中有成功的也有失败的，一方面是因为中国的快速城镇化，另一方面是因为没有完全掌握工业废弃地的地域和其它条件的相关信息。他们基于两种框架结构设计了一种方法来解释其中的差别，一个是识别可能性，另一个是建立修复优先级。这两种框架结构方法被用在深圳福田地区进行例证。研究数据包括土地使用、税务、2005年环境参数和2006至2010年的发展计划，这种方法也很好的响应了城市开拓者在改造工业废弃地方面不断增加的需求<sup>[10]</sup>。

Lina Sun等发现中国的快速城镇化和工业化产生了大量的废弃场地，为了避免城市的过渡扩张，少利用城市未开发土地，开发工业废弃地成了一个较好的选择。由于对工业废弃地缺乏足够的理解和认知，城市规划者对工业废弃地的污染问题关注较少，这种较少的关注对生态和居住健康问题都带来了风险。所以调查土壤

质量对城市生态系统的设计是有必要性的。文章调查了沈阳铁西原有工业生产地的多环芳烃（PAHs）的空间分布，结果发现原有的工业生产活动和运输带来的挥发对现在的场地产生了严重的 PAHs 污染，调研数据表示需要采取综合的措施来减缓 PAHs 污染<sup>[11]</sup>。

Hao Wu 等研究了中国城市旧工业区的转型和再开发问题，文章借助高密度案例的研究方法对广州原化学污染场地再建公寓的项目进行了研究，以了解中国城市内棕地的开发状态。文章发现虽然项目执行过程中对环境影响问题进行了认真的处理，但并没有具体的标准和政策进行指导，文章认为中国需要设计和开发相应的政策和行业标准专门用于城市棕地的改造和发展<sup>[12]</sup>。

石平等通过研究发现城市工业废弃地受到原有生产活动产生的有毒有害物质的影响，原有生态系统遭到破坏，特别是废弃的矿山，土壤重金属污染严重，生态修复非常困难，并指出植物群落的修复成为矿区生态系统修复的最为关键的一步。文章通过对植物进行野外跟踪调查，测定出矿区的优势植物对重金属的富集与转移能力，筛选出能够忍耐矿区土壤重金属污染的植物，最后对植物的配置方式进行合理设置，完成植物修复方式<sup>[13]</sup>。

赵超通过研究指出我国工业废弃地的特点及存在问题，文章根据景观设计、生态学、城市规划等学科的研究，论述了城市工业废弃地焕发活力的驱动力，根据废弃地的改造方式把废弃地分为历史保护型、经济复兴型、环境整治型三种。文章还从废弃地的地理位置、环境现状、周边状况及人员背景等因素入手，提出了工业废弃地的开发模式和修复方法。文中通过对我国典型工业废弃地修复案例的分析总结出适合我国改造和修复的方式，以供后来的实践参考<sup>[14]</sup>。

国内对于工业废弃地的研究大多偏向建筑及景观的改造和再利用，对于土壤和水源的污染问题也有少许关注，但是大气的污染和是否适合人员居住的问题方面关注较少，这是被忽略而且值得重点研究的问题之一。过去的发展历程中，国内已经有一些工业废弃地的修复和改造案例，我们可以从中学习和总结出成败之处，在后来的工程中加以思考。

我国的一些发展较早的大城市也出现过废弃厂区改造利用的实例，如上海、北京、昆明、广州等地方，这些不同工业厂区的改造给其他城市的改造做出了榜样。但是已改造的工厂和改造方式等也仅供参考，毕竟每个工厂的情况不同，后来的改造应该学会因地制宜，根据自己的情况来决定改造方式。

中山岐江公园位于广东省中山市，场址原来是中山的粤中造船厂，占地 11 公顷，其中水面 3.6 公顷，建筑 3000 平方米，岐江公园合理地保留了原厂地上最具

代表性的植物、建筑物和生产工具。原来的造船厂是随着社会主义的发展而成长起来的，从 20 世纪 50 年代初发展到 90 年代后期，历经中国工业化进程的道路。

岐江公园设计和施工中，彻底抛弃了园无直路、小桥流水和注重园艺及传统的亭台楼阁的传统手法，代之以直线形的便捷步道，遵从两点最近距离，充分提炼和应用工业化的线条和肌理。中山市岐江公园的改造充分利用了大规模水景且采用了大量的绿化工程，绿化工程还保存了之前的古树花木。

北京 798 艺术工厂是位于北京市朝阳区大山子地区的一个艺术园区，原为北京第三无线电器材厂。80 年代到 90 年代 798 厂逐渐衰落，从 2002 年开始，由于租金低廉，来自北京周边和北京以外的艺术家开始聚集于此，逐渐形成了一个艺术群落。798 厂区内的建筑是一位德国的建筑师根据包豪斯的设计理念进行设计的，主要采用现代主义的简洁、朴素的建筑设计手法。1999 年之后随着房地产的升温，地产商看中了 798 这块被闲置的场地，厂区面临着被拆除的命运。2003 年一批中外艺术家和商业文化中心的进驻成了转机，他们租用了这里的空置厂房，并把这里逐渐发展成拥有画廊、艺术工作室、酒吧等不同风格的艺术社区，在规模的不断扩大下，这里也被称为大山子艺术区。由于这里承载了中国近几十年来政治、经济、文化的发展历程，798 厂的何去何从逐渐被社会关注，国内外的建筑设计大师都给出了一些建议性的设计方案，包括法国建筑师努维尔，中央美术学院的师生等。2005 年，北京市规委和市宣传部组织参加过 718 建厂的专家和北京市规划院的建造师及工程师参加了 798 厂去留的座谈会。与会的大部分专家同意保留 798 厂主要的旧厂房，但是要做一个具体地说研究改造方案，以便兼顾产权房、租赁房和社会公益方的利益<sup>[15]</sup>。

798 工厂的改造却没有经过设计师的刻意设计，而是长期居住于此的艺术家们通过一系列的艺术创作自然形成的艺术社区。虽然不同艺术家的设计风格不同，但是这种艺术的参杂却给旧建筑赋予了生命力，逐步褪去了旧厂区的荒凉，今天的 798 工厂已经完全成为了发展成熟的艺术社区，是一个工业废弃地改造成功的典型案例。

我国东北的老工业基地也有很多厂区面临着改革、改造或者产业的转型，沈阳铁西旧工业基地就是其中的代表。铁西区曾经是中国重工业的代名词，为了保护当地的自然环境和自然资源，如今城市的发展使得一些粗矿型产业受到挑战，铁西的企业面临着经济、产业结构的调整。到 2009 年底，铁西区共关闭了 86 家重污染企业，搬迁和改造了 292 家工业企业。沈阳铸造厂、沈阳第一毛纺厂、沈阳冶炼厂、沈阳自行车厂等一大批重污染企业先后被关闭。厂区内改造了河水系

统，新建了污水处理厂，改建了多处公园，并且实现了大面积的绿化，植树达到300多万株，破败的铁西区又焕发了生机。

铁西区在工业改造的过程中很注重生态环境的保护，在近十年当中经历了东搬西建、资源普查、出台政策法规、建立两馆开展旅游、成立工业旅游联盟等一系列事件铁西区在区域内对细河和浑河进行了护堤加固，并且在大坝上进行绿化种植，另外还在浑河岸边建了生态景观城。厂区的改造给未来的地区规划提供了良好的条件，有助于厂区的未来发展。

纵观全国的工业厂房改造历史，已经有不少的案例，这些成功案例给我们以

表 1.1 中国部分典型原有工业区改造案例

Tab1.1 Some typical transformation cases of the existing industrial zone in China

原有工业区	改造后的区域
北京 798 工厂	北京大山子艺术家社区
抚顺露天煤矿	抚顺西露天矿森林公园
铁西工业区	铁西工业景观走廊
徐家汇橡胶厂	上海徐家汇公园
粤中造船厂	中山岐江公园
昆明机模厂	昆明上河创库艺术社区

后的改造带来的很多的启示，但是我们在总结的时候也要注重对新的实际情况的分析。国内学者对老工业区改造的研究多在景观的规划、建筑的再利用等方面，具体地对场地内环境风险的评价和分析还很少，这方面我国尚处于起步阶段，有待更多的学者讨论研究。

### 1.3 本文研究目的、内容、技术线路

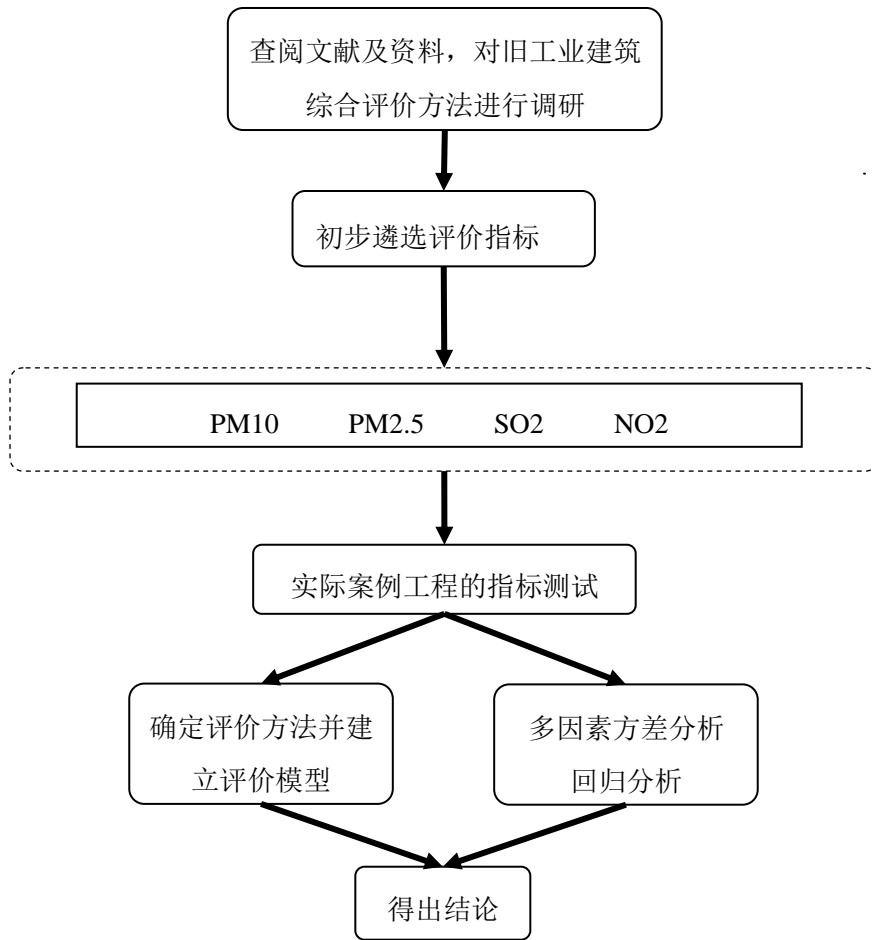
#### 1.3.1 研究目的

- ① 建立原有工业建筑室外环境的评价方法和指标体系
- ② 探寻原有工业建筑室外空气污染的影响因素

#### 1.3.2 研究内容

- ① 为老工业搬迁区原有工业建筑的室外空气探求合适的评价模型。
- ② 根据测试数据对老工业搬迁区环境状况进行分析，了解空气污染现状并分析其影响因素。

### 1.3.3 技术路线



### 1.4 本章小结

本章首先阐述了本课题的研究意义及其必要性，接着从国内外原有工业建筑的改造研究和已有的改造实例这两个方面，详细叙述了国内外相关领域的研究历史和现状，以及已经取得的研究成果，最后简单概括介绍了本论文的研究目标和研究内容。

## 2 空气品质的评价方法

### 2.1 国内外执行标准

环境评价标准的选择方面有下面几个依据：首先是我国已经颁布并且实施的环境质量标准，如果有地方标准还应该首选地方标准，因为地方标准会根据当地的具体情况对国家标准中不合适的情况作一些调整，更具有适用性。其次，如果国家没有制定相应的标准，则可以参考国内外相关标准。评价标准选择的最主要要求是要从人体的健康考虑，正确评价污染对环境及人体的影响。

大气环境质量的評價标准的编制工作我国起步较晚，相对于西方发达国家来说也没有足够完善。1962年我国颁布了《工业企业设计卫生标准》(TJ36-79)，1982年颁布了《大气环境质量标准》(GB3095-82)，1996年颁布了《环境空气质量标准》(GB3095-1996)，2003年颁布实施《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)。

国内外对大气环境的污染物浓度限值做出限定并且正在实施的几部标准如下，国内针对大气质量和室内空气质量分别制定了《环境空气质量标准》(GB3095-1996)<sup>[16]</sup>、《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)<sup>[17]</sup>，美国环保署(EPA)制定了国家大气环境质量标准(National Ambient Air Quality Standards)<sup>[18]</sup>。

表 2.1 《环境空气质量标准》(GB3095-1996) 各项污染物的浓度限值

Tab 2.1 The pollutant concentration limits in Ambient Air Quality Standards (GB3095-1996)

污染物名称	取值时间	浓度限值			浓度单位
		一级标准	二级标准	三级标准	
SO <sub>2</sub>	年平均	0.02	0.06	0.1	mg/m <sup>3</sup> 标准 状态
	日平均	0.05	0.15	0.25	
	1小时平均	0.15	0.5	0.7	
TSP	年平均	0.08	0.2	0.3	
	日平均	0.12	0.3	0.5	
PM <sub>10</sub>	年平均	0.04	0.1	0.15	
	日平均	0.05	0.15	0.25	
NO <sub>x</sub>	年平均	0.05	0.05	0.1	
	日平均	0.1	0.1	0.15	
	1小时平均	0.15	0.15	0.3	

污染物名称	取值时间	浓度限值		
		均		
NO <sub>2</sub>	年平均	0.04	0.04	0.08
	日平均	0.08	0.08	0.12
	1 小时平均	0.12	0.12	0.24
CO	日平均	4	4	6
	1 小时平均	10	10	20
臭氧	1 小时平均	0.12	0.16	0.2
铅	季平均	1.5		
	年平均	1		
苯并[a]芘	日平均	0.01		
氟化物	日平均	7		
	1 小时平均	20		
F	月平均	1.8	3	$\mu\text{g}/(\text{dm}^2 \cdot \text{d})$
	植物生长季平均	1.2	2	

表 2.2 《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)

Tab 2.2 Indoor air quality standards (GB/T 18883-2002)

参数类别	参数	标准值	备注
物理性	温度 °C	22-28	夏季空调
		16-24	冬季采暖
	相对湿度 %	40-80	夏季空调
		30-60	冬季采暖
	空气流速 m/s	0.3	夏季空调
		0.2	冬季采暖
新风量 (m <sup>3</sup> /h·人)	30		
化学性	SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	0.5	1 小时均值
	NO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	0.24	1 小时均值



参数类别	参数	标准值	备注
	CO mg/m <sup>3</sup>	10	1 小时均值
	CO <sub>2</sub> %	0.1	日平均值
	NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	0.2	1 小时均值
	O <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	0.16	1 小时均值
	甲醛 mg/m <sup>3</sup>	0.1	1 小时均值
	苯 mg/m <sup>3</sup>	0.11	1 小时均值
	甲苯 mg/m <sup>3</sup>	0.2	1 小时均值
	二甲苯 mg/m <sup>3</sup>	0.2	1 小时均值
	苯并【a】芘 B (a) P ng/m <sup>3</sup>	1	日平均值
	可吸入颗粒物 PM10 mg/m <sup>3</sup>	0.15	日平均值
	TVOC mg/m <sup>3</sup>	0.6	8 小时均值
生物性	菌落总数 cfu/m <sup>3</sup>	2500	依据仪器定
放射性	氡 222 Rn Bq/m <sup>3</sup>	400	年平均值

表 2.3 美国国家大气质量标准 (NAAQS)

Tab 2.3 National ambient air quality standards

污染物名称	主要标准		次要标准	
	浓度	平均时间	浓度	平均时间
CO	9 ppm (10mg/m <sup>3</sup> )	8 小时	无	
	35 ppm (40mg/m <sup>3</sup> )	1 小时		
铅 Pb	0.15 μg/m <sup>3</sup>	3 个月波动值	同主要标准	
	1.5 μg/m <sup>3</sup>	季度平均	同主要标准	
NO <sub>2</sub>	53 ppb	全年算术平均	同主要标准	
	100 ppb	1 小时	无	
PM <sub>10</sub>	150 μg/m <sup>3</sup>	24 小时	同主要标准	
PM <sub>2.5</sub>	15.0 μg/m <sup>3</sup>	全年算术平均	同主要标准	
	35 μg/m <sup>3</sup>	24 小时	同主要标准	
O <sub>3</sub>	0.075 ppm 2008std	8 小时	同主要标准	

	主要标准		次要标准	
	0.08 ppm 1997std	8 小时	同主要标准	
	0.12 ppm	1 小时	同主要标准	
SO <sub>2</sub>	0.03 ppm	全年算术平均	0.5 ppm	3 小时
	0.14 ppm	24 小时		
	75 ppb	1 小时	无	

可以看出国内外的标准在浓度限值上有一些细微的差别，这也跟不同国家的国情有关。

## 2.2 评价方法对比

对大气环境的评价方法主要包括主观评价法和客观评价法两种。主观评价法是利用人的感觉对工作进行描述和评判，主观评价一般需要对某方面有丰富经验的专家来进行评判。主观评价法能够直接描述判断结果，但也有局限性。每个人的感觉不一样，判断尺度也不相同，难免出现误差，特别是对大气环境的评价时，大气环境的复杂性更容易造成评价结果的不准确，所以还要结合客观评价方法才能得出更加可靠的结论。

客观评价法是研究人员在对某研究对象进行评价研究是运用数学方法客观的描述被评价对象的某些特性，是现在科研中采用较多的方法。当然客观评价法包括很多种，各自的特点也不相同，他们有各自的优缺点。在实际问题的研究时应该根据具体问题选择合适的评价方法，这样才能比较正确地得到所需的研究结论。以下列举一些常用的环境评价方法，介绍并对比他们的各自特点，并为本文选择合适的评判方法。

### 2.2.1 模糊综合评判方法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法，该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价，即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。这种评价方法是由美国自动控制专家 Zadeh 于 1965 年首次提出<sup>[19]</sup>，后来在卫生质量、生存质量、卫生资源等工作中得到了大量的使用。环境科学的特点是综合性和复杂性相结合，要去识别和评价环境质量是不可能做到绝对精确的，也是没有必要的。由于大气质量评定等级划分的界限是模糊的，所以用模糊集理论中的隶属函数来表征大气质量，可以消除环境质量分级中的人为因素，从而更加客观合理地确定环境质量分级水平<sup>[20]</sup>。

模糊综合评价的优点在于：通过精确的数字手段对评价对象进行模糊化处理，对于带有模糊性质的评价对象做出科学合理的量化评价；另外一个优点是评价结果不是一个具体的数值，而是包含了更多更丰富的信息。缺点在于：计算过程复杂，指标权重的确定带有较强的主观性；另外当指标集数量较多时，评价结果过分模糊，分辨率不高，严重时可能造成评判失败。

模糊综合评判方法的步骤：

① 建立因子集

对某一因素进行评价，如果该因素的指标有  $m$  个，则参与评价的  $m$  个参数  $u_1, u_2, \dots, u_m$  便构成评价因素的有限集合：

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$$

② 建立评价等级集

评价等级集是评价者对各个评价因素可能做出的各种等级组成的集合，假设某种污染因子有  $n$  个等级，记为  $v_1, v_2, \dots, v_n$ ，则该污染物的评价等级为：

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$$

评价时根据实际的污染物对  $v$  进行赋值。

③ 设计评价参数对评定等级的隶属函数

各个评价参数对各评定等级的隶属函数的建立方法如下：

对第一级评定等级

$$\mu_{i1}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \geq v_{i2} \\ -\frac{u_i - v_{i2}}{v_{i2} - v_{i1}} & v_{i1} < u_i < v_{i2} \\ 1 & u_i \leq v_{i1} \end{cases}$$

对第  $j$  级评定等级

$$\mu_{ij}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq v_{ij-1}, u_i \geq v_{ij+1} \\ \frac{u_i - v_{ij-1}}{v_{ij} - v_{ij-1}} & v_{ij-1} < u_i < v_{ij} \\ -\frac{u_i - v_{ij+1}}{v_{ij+1} - v_{ij}} & v_{ij} < u_i < v_{ij+1} \end{cases}$$

对第  $n$  级评定等级

$$\mu_{in}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq v_{in-1} \\ \frac{u_i - v_{in-1}}{v_{in} - v_{in-1}} & v_{in-1} < u_i < v_{in} \\ 1 & u_i \geq v_{in} \end{cases}$$

将测试数据代入各个参数对各级标准的隶属函数公式中，算出个评价参数对各个评定等级的隶属度，从而构成模糊关系矩阵  $R$ 。

④ 建立评价参数的权重集  $A$

由于各个因素的重要性是不同的，为了反映各个因素的重要程度，对各个评

价因素  $u_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 赋予相应的加权系数  $a_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 加权系数的集合

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$$

被称为权重集。

权重的大小是关键问题也是难题, 采用较多的是李祚泳等<sup>[21]</sup>推荐的权重计算统一化公式:

$$\omega_i = \frac{C_i / \bar{S}_i}{\sum_{i=1}^m C_i / \bar{S}_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\bar{S}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij}$$

公式中,  $\omega_i$  为污染物  $i$  的归一化权重值;

$C_i$  为污染物  $i$  的监测浓度值;

$\bar{S}_i$  为污染物  $i$  的各级标准的算术平均值。

由此, 评价参数的模糊权重集为  $A = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$

#### ⑤ 建立模糊评价矩阵

模糊评价矩阵  $R$  是一个  $m$  行  $n$  列的矩阵, 即:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

矩阵中的元素  $r_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ) 表示第  $i$  个元素对第  $j$  评价等级的隶属度, 而第  $i$  个因素的模糊评价子集就是  $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。

#### ⑥ 进行复合运算

$$A \cdot R = B$$

矩阵  $B$  中的最大值即为大气污染等级。

### 2.2.2 层次分析法

层次分析法是将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。该方法是美国运筹学家匹茨堡大学教授 T.L.Saaty 于 20 世纪 70 年代初, 在为美国国防部研究“根据各个工业部门对国家福利的贡献大小而进行电力分配”课题时, 应用网络系统理论和多目标综合评价方法, 提出的一种层次权重决策分析方法。这种方法的好处是可以将一些难以用具体数字描述的问题拆分为多个组成因素, 将这些因素进行分层, 最后的问题会演变成对这些层次的重要性进行排序, 所以层次分析法适用于对多目标、多准则问题的处理。现在层次分析法已经在环境质量评价、项目复杂性评价以及教育和医疗等领域得到了广泛的应用<sup>[22][23][24][25]</sup>。

层次分析法的评判步骤:

① 问题的确定

明确评价的对象、范围和目的, 筛选和识别评价因子, 确定评价因子, 了解评价因子之间的关系。例如对大气环境进行评价, 就要找出污染大气环境的各种气体污染因子, 分析他们的相对重要性。

② 层次结构的建立

在对所需解决的问题充分了解之后, 应该自上而下地从结论到每一个影响因素之间建立几个层次结构, 每一层都对上下两层有直接的联系, 即某一层的所有因素隶属于上一层因素又包含下一层的所有因素。这种关系类似于企业中从老板到低层员工之间需要中间的管理层作为连接的桥梁。在划分的层次结构中最上层为目标层, 就是所要解决的问题, 最下层是对象层, 包括所有影响因素。

③ 判断矩阵的构造

因为大气环境的影响因素众多, 有可以定量描述的因素, 也有只能定性表述的因素, 特别当影响因素较多的时候很难判断各个因素的重要性。层次分析法是通过对所有可能的两两组合的因素进行对比, 确定他们的相对重要性, 从而极大的提升了判断的精确性, 这是层次分析法最大的判断优势。

在构造矩阵时, 需要利用因素之间的相对重要性这个概念, T.L.Saaty 推荐了九级标度法进行相互比较, 其含义如下:

表 2.4 Saaty 九级标度法及其含义

Tab 2.4 Saaty nine scale method and its meaning

标度	定义 (比较因素 i 和 j)
1	因素 i 和 j 同样重要
3	因素 i 比 j 稍微重要
5	因素 i 比 j 较强重要
7	因素 i 比 j 强烈重要
9	因素 i 比 j 绝对重要
2,4, 6,8	上述两相邻判断的中间值
1~9 的倒数	表示因素 i 和因素 j 比较的标度值等于因素 j 和因素 i 比较的标度值的倒数

根据 Saaty 的九级标度法的标准可以构造一下判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

上式中 $a_{ij}$  ( $i, j=1,2, \dots, n$ ) 表示第  $i$  个因素与第  $j$  个因素的重要性之比, 其数值为 1~9 的整数或倒数:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad a_{ii} = 1$$

在实际的环境评价过程中, 每一个结构层次的评价标准必须一致, 这是每一层所有因素相比较的前提条件。构造判断矩阵主要通过专家的讨论或者对专家进行调查确定, 常用的有 Brainstorming 和 Delphi 等方法。

④ 层次单排序、一致性检验

层次单排序是相对上一层次而言根据判断矩阵计算某一层元素的权值, 并进行排序。计算步骤如下:

- 1) 求出判断矩阵每一行所有元素的积  $M_i$

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

- 2) 对  $M_i$  开  $n$  次根

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i}$$

- 3) 正规化向量  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ , 算出特征向量  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$

$$w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i$$

- 4) 求最大特征值  $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \{(AW)_i / n w_i\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n (a_{ij} w_j) / w_i \right)$$

- 5) 一致性检验

要算出各因素的权重首先要判断矩阵的一致性, 主要是确定一致性指标  $CI$  和平均随机一致性指标  $RI$  (见表 2-5), 并求两者比率, 公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

计算得  $CR < 0.10$  时, 判断矩阵可被认为满足一致性, 否则需调整。

表 2.5 不同阶的 RI 值

Tab 2.5 RI values for different bands

n 阶	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

## 6) 层次总排序、一致性检验

层次总排序就是利用同一层次所有单排序的结果，计算对于上层次的本层所有元素重要性的权值组合。层次总排序必须从上至下逐层进行。对最高层的下一层，它的层次单排序就是总排序（表 2-6）。

层次总排序和层次单排序的一致性检验相似，计算方法都是  $CR = CI/RI$

表 2.6 层次总排序的合成权重计算表

Tab 2.6 The total synthesis of the right sort of weight calculation table level

A 层次					
B 层次	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	.....	A <sub>m</sub>	B 层次总排序
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	.....	a <sub>m</sub>	
B <sub>1</sub>	b <sub>1</sub> <sup>1</sup>	b <sub>1</sub> <sup>2</sup>	.....	b <sub>1</sub> <sup>m</sup>	$\sum_i a_i b_1^i$
B <sub>2</sub>	b <sub>2</sub> <sup>1</sup>	b <sub>2</sub> <sup>2</sup>	.....	b <sub>2</sub> <sup>m</sup>	$\sum_i a_i b_2^i$
.....	.....	.....	.....	.....	.....
B <sub>n</sub>	b <sub>n</sub> <sup>1</sup>	b <sub>n</sub> <sup>2</sup>	.....	b <sub>n</sub> <sup>m</sup>	$\sum_i a_i b_n^i$

上表中的关系还应有： $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_i b_j^i = 1$

层次分析法的数据处理和计算过程经常需要利用计算机进行计算，其计算流程如下：

层次分析法的优点主要有以下几个方面：

## ① 分析方法的系统性

层次分析法把研究问题分解为不同的结构层次，对目标层下面层次里的因素两两比较判断，分析各因素的影响权重的大小，最终反馈给目标层。所以层次分析法中的每一个因素都会最终影响到目标层，影响大小可以精确的用数值体现。

## ② 决策简单

该方法可以有机结合定性和定量方式，逐层分解问题，化繁为简，用映射的方式将目标层和决策层一一对应，最后通过数学方法来判定结果。

## ③ 需要的量化数据少

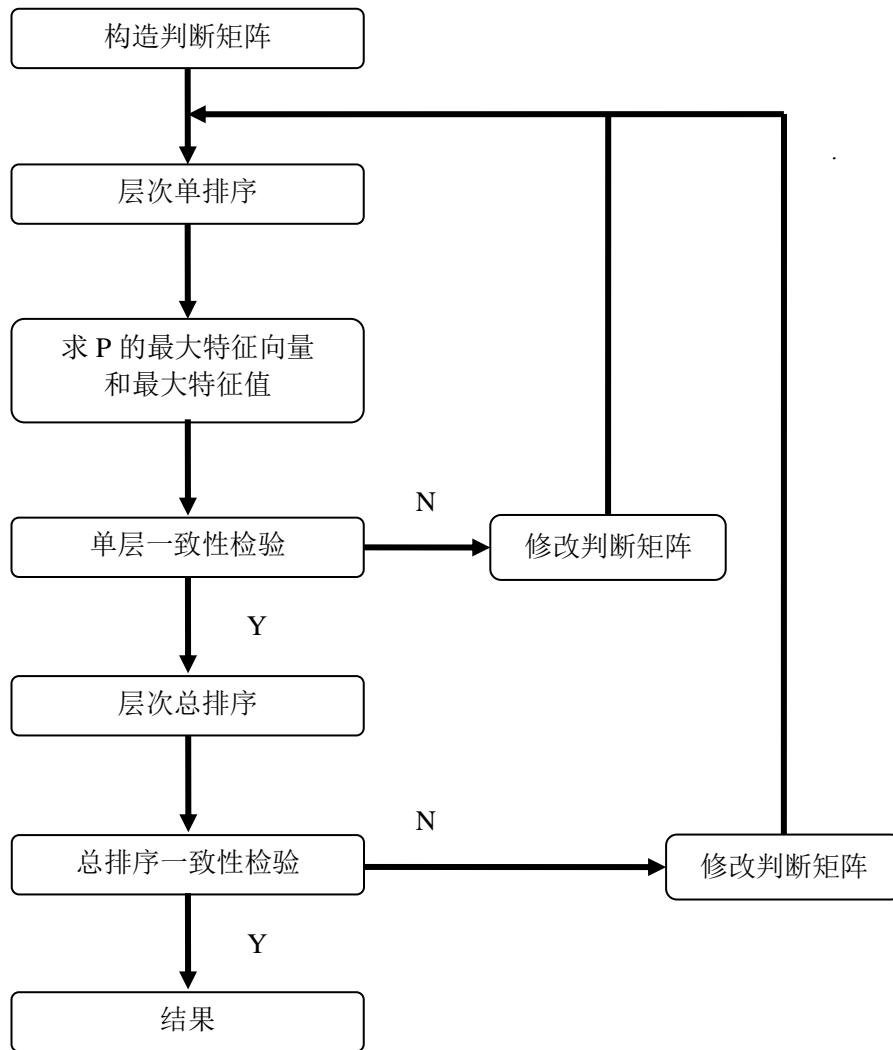


图 2.1 层次分析法计算流程图

Fig 2.1 AHP calculation flowchart

层次分析法合理统一定性和定量的分析，巧妙地把各个因素的重要性转换为因素权重的计算，因此对数据的需求量较小。

层次分析法的缺点主要有以下几个方面：

① 定性成分多于定量数据，可信度降低

科学研究一般需要通过缜密的数学推断和定量计算才能体现它的严谨性，但是层次分析法是模仿人的大脑进行思维，不能完全通过数字来解决问题，所以定性分析不能避免。

② 指标过多时数据处理量大，权重不易确定

指标越多我们就需要构造更多的结构层次和更大的判断矩阵，在进行相对重



要性计算是，两两比较的数量会增加很多。另外，采用常规的九级标度法表达重要性时可能在指标量大的时候不易分辨，甚至有可能影响到层次但排序和层次总排序的一致性检验，对结果造成影响，所以就要不断调整判断矩阵，调整的过程将会是一个庞大的工作。

### ③ 特征值以及特征向量的计算复杂

在求判断矩阵的特征值和特征向量时，如果指标增加，阶数也会随之增加，计算量将会变得很大。

## 2.2.3 人工神经网络

人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）是一种模拟大脑神经系统处理信息的数学模型。工程界和学术界中也称为神经网络或类神经网络。它也是一种运算模型，这种模型是由很多节点（或称神经元）相互连接而成。各节点表示某特定的输出函数，也被称作激励函数。任意两节点的连接都表示对于通过这个连接信号的权值，也被称作权重，这相当于人工神经网络的记忆。网络输出是随不同的网络连接方式、权值还有激励函数而改变的。网络本身则是对某种算法或函数的逼近，或者表达了某种逻辑策略。

人工神经网络的学习过程是一种归纳总结的过程，它是通过大样本的学习总结而不断修正节点之间连接的权重，最后神经网络里所有的权重都会收敛到一个稳定的区间，这样一个学习、修正和稳定的过程使得人工神经网络最终建立，建成的网络可以求解相关的问题<sup>[26]</sup>。

人工神经网络有下列几个特征<sup>[27][28]</sup>：

### ① 信息分散存储

信息的存储分散在不同的网络位置，神经网络的连接方式和各个连接之间的权值都是存储的信息。而且当某个局部网络出现问题时，神经网络仍能正确输出结果。

### ② 神经元并列运行

人工神经网络中每一个神经元都可以根据接受到的信息独立运行并传送给下一层，所以同一层的所有神经元可以同时处理信息。

### ③ 神经元可处理和存储信息

人工神经网络中所有的神经元都同时具有处理信息和存储信息的功能，这主要体现在神经元之间的连接强度不断变动。

### ④ 人工神经网络具有自学习的功能

人工神经网络各个神经元之间的连接强度是通过权值的大小来体现的，然而权值也会随着样本数量的增加而变动，样本越大，网络的学习量越多，神经元的连接强度也越大。

由于人工神经网络的发展成熟，很多环境评价研究都采用人工神经网络理论进行分析。Yin Li 等利用 BP 人工神经网络方法对广东省惠州市土壤采样点进行了模型学习，并成功预测了土壤重金属含量<sup>[29]</sup>。Dahe Jiang 等运用人工神经网络的方法建立了上海气象预报模型，在实例应用中发现预报值和观测值相关系数较高，说明用 BP 神经网络方法预测城市空气质量是可行的<sup>[30]</sup>。

人工神经网络的模型有很多种，按学习方式的不同可以分为有导师和无导师型，按照反馈形式可以分为前馈型和反馈型。一些具有代表性的模型有径向基函数网络（RBF 网络）、Hopfield 网络和 BP 网络，而 BP 网络模型是目前研究最为成熟的一种，下面简单介绍一下 BP 网络模型。

BP 神经网络是一种多层前馈的神经网络，它包括输入层、隐层和输出层，同一层所有神经元之间没有联系，每一个神经元只接受前一层的输入，也只影响下一层的输出，它的结构如图 2.2 所示。

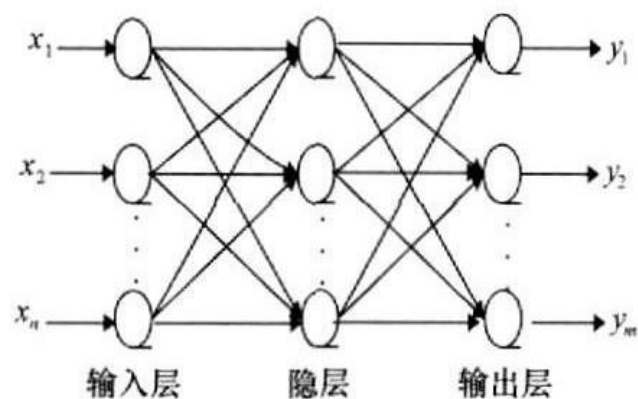


图 2.2 BP 神经网络

Fig 2.2 BP neural network

BP 网络的基本原理：

BP 算法的学习过程包括正向传播信息和误差的反向传播两种过程，正向传播时输入的信息经过输入层传输到隐层经过处理到输出层，如果输出的结果和期望的不相符时就进入误差的反响传播过程，误差沿原路返回，这样不断反复修改每一层神经元的权值和阈值，最终输出期望值。

BP 算法的计算步骤归纳如下：

- ① 任意输入一个学习样本得到初始的权值和阈值；
- ② 提供学习样本进行训练，包含输入向量和预期输出结果；
- ③ 计算隐层和输出层的结果；
- ④ 修改网络中的权值和阈值；

- ⑤ 算出网络误差的均方和；
- ⑥ 循环计算步骤 2 到步骤 5，直到误差的均方和满足精度的要求，最终建立正确的输入和输出的映射关系。

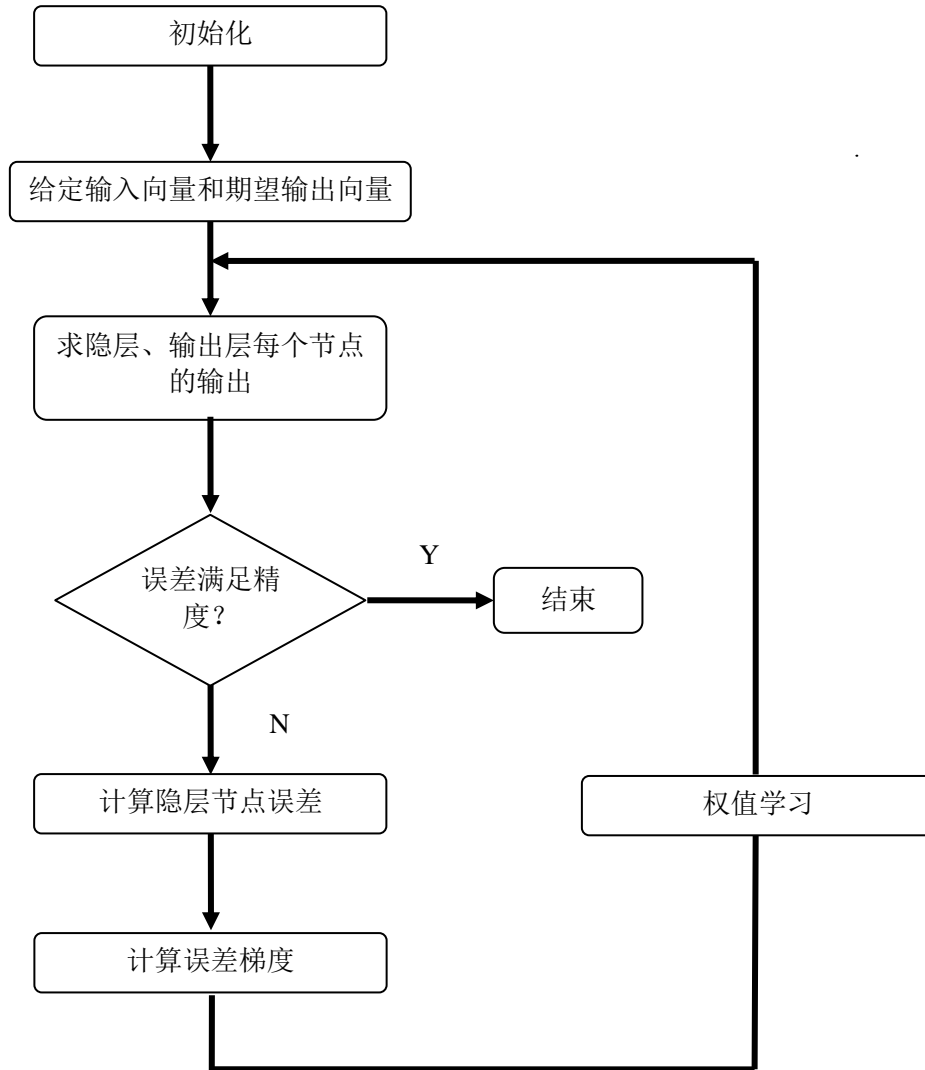


图 2.3 BP 网络模型的算法结构图

Fig 2.3 Algorithm structure of BP network model

#### 2.2.4 灰色系统分析

灰色系统的分析方法现在已经比较成熟，很多的学者在进行各种评价研究时都会采用到这种方法。张桂芳<sup>[31]</sup>等使用灰色综合评判方法对室内空气品质进行评价，并与模糊评判方法对比，发现评价结果一致，说明其评价结果客观可靠。李念平<sup>[32]</sup>等利用灰色关联分析方法对室内空气品质进行评价，并对 4 栋建筑物的室

内空气进行比较,发现评价结果客观可靠。文伟<sup>[33]</sup>等通过灰色关联分析方法分析建筑内气体污染物和人员对空气质量的主观评价间的关系,把气体污染物浓度和室内人员的感受相联系,并分析出建筑物内各污染物对人员影响最大的因素。徐卫国<sup>[34]</sup>等在环境空气质量评价中建立了基于指数型白化函数的环境空气质量评价修正聚类模型,该模型不仅能准确的评价样本的综合等级,还可用于确定单项指标的允许值范围,文章还根据模型评价了贵阳市环境空气质量,结果合理可靠。

### ① 灰色系统的概念和原理

在现实世界中,事物之间是相互关联的。人们要了解和掌握这个世界就需要弄清楚他们之间的联系,然而有些事物的信息并不能完全显示出来,几种常见的情况有:参数信息、结构信息、边界信息、运行行为信息不完全。信息不完全的系统被学者称之为灰色系统,灰色系统的信息包含人们了解的信息和不了解的信息,如果了解的信息较多则为白色系统,如果不了解的信息较多则为黑色系统。所以白色系统和黑色系统都是灰色系统的特殊情况。

灰色系统的基本原理是由很多不同的原理组成,包括差异信息原理、解的非唯一性原理、最少信息原理、认知根据原理、新信息优先原理和灰性不灭原理。差异信息原理表达了信息的差异性,解的非唯一性原理说明不完全和不确定信息的解是不唯一的,最少信息原理是指灰色系统理论利用最少的能够获得的信息,认知根据原理说明认知必须以信息为根据,新信息优先原理说明新信息对认知的作用大于旧信息,灰性不灭原理表明信息无穷尽,认知也无穷尽,所以信息不完全是绝对的,信息的灰性也永不消失。

### ② 灰色系统的数学表述

灰色系统在短暂的发展过程当中已经有了成熟的数学理论基础,可以用灰数、灰色方程、灰色矩阵等来描述灰色系统。

#### ① 灰数

灰色系统中某些只知道范围而不知道确切值的参数被称为灰数,在实际应用中灰数指某个区间或者某个数集内的不确定数值,通常用记号“ $\otimes$ ”表示。

#### ② 灰数的种类

##### 1) 只有下界的灰数

只有下界而没有上界的灰数记为 $\otimes \in [a, \infty)$ 或者 $\otimes (a)$ ,其中 $a$ 为灰数的下确界,是一个确定的数值。 $[a, \infty)$ 为 $\otimes$ 的取数域。

##### 2) 只有上界的灰数

只有上界而没有下界的灰数记为 $\otimes \in (-\infty, a]$ 或者 $\otimes (\bar{a})$ ,其中 $\bar{a}$ 为灰数的上确界,也是一个确定的数值。 $(-\infty, a]$ 也为 $\otimes$ 的取数域。

##### 3) 区间灰数

同时有下界  $\underline{a}$  和上界  $\bar{a}$  的灰数被称为区间灰数，记为  $\otimes \in [\underline{a}, \bar{a})$ 。

#### ① 连续灰数和离散灰数

某一区间内取有限个值的灰数称为离散灰数，某一区间内可连续取任意数值的灰数称为连续灰数。

#### ② 黑数和白数

当  $\otimes \in (-\infty, \infty)$  或  $\otimes \in (\otimes_1, \otimes_2)$ ，即上界和下界都是无穷或者都是灰数时，称为黑数。

当  $\otimes \in [\underline{a}, \bar{a})$ ，且  $\underline{a}=\bar{a}$  时，称为白数。

#### ③ 灰数的白化

灰数的白化就是利用一些经验提取灰数的信息，使灰数接近白数。灰数白化的方法主要有基本值白化、等权白化、权函数白化。

#### ④ 灰色方程

科学研究中经常用方程来描述问题，含有灰数的方程被称为灰色方程。灰色方程包括灰色代数方程和灰色微分方程等。

#### ⑤ 灰色系统理论的分析方法

灰色系统的分析方法包括灰色关联分析、灰色聚类分析、灰色决策等。

#### ⑥ 灰色关联分析

灰色关联分析是根据序列的几何形状的相似程度来判断因素和系统是否紧密联系，并且用灰色关联度来衡量相似的程度。灰色关联分析拥有计算量小、结果可靠等特点，其分析步骤如下：

1) 进行灰色关联分析首先应选取影响系统主要行为的有关因素的时序数据序列和间接表征系统行为的时序数据序列。

2) 各因素进行量化处理，数量级处理为近似的无量纲数据。

3) 计算灰色关联度。

4) 最后分析各因素行为序列的关联度大小，根据大小判断各因素对系统的影响程度。

#### ⑦ 灰色聚类分析

灰色聚类是根据灰色关联矩阵或者灰数的白化权函数将一类观测对象聚集成若干个可定义类别的方法。在进行空气品质的评价时由于每个因素的意义和量纲都不同，所以适于采用白化权函数的方式对每个因素定权，然后进行评价。评级的原理如下：

假定有  $n$  个聚类对象， $m$  个聚类指标， $s$  个不同的灰类，对象  $i$  关于指标  $j$  的样本观测值为  $x_{ij}$  ( $i=1,2, \dots, n; j=1,2, \dots, m$ )，根据  $x_{ij}$  值对对应对象评价，步骤为：

1) 按要求划分灰类数  $s$ , 把每个指标取值的范围划分成  $s$  个灰类, 建立  $j$  个指标和  $k$  个子类的白化权函数。第  $j$  个指标的灰类  $k$  ( $k=2,3, \dots, s-1, s$ ) 的白化函数如下:

$$f_{j1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq x_m \\ \frac{x_h - x}{x_h - x_m}, & x_m < x < x_h \\ 0 & x \geq x_h \end{cases}$$

$$f_{jk}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_0 \\ \frac{x - x_0}{x_m - x_0} & x_0 < x < x_m \\ \frac{x_h - x}{x_h - x_m} & x_m < x < x_h \\ 1 & x = x_m \\ 0 & x \geq x_h \end{cases} \quad k=2,3, \dots, s-1$$

$$f_{jh}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_m \\ \frac{x - x_0}{x_m - x_0}, & x_0 < x < x_m \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases}$$

设  $f_{jk}$  为第  $j$  个聚类指标并且是属于  $k$  灰类的白化函数, 则三种白化函数的形式 (如图 2-4), 其中  $\lambda_{jk}$  是白化函数  $f_{jk}$  的阈值。

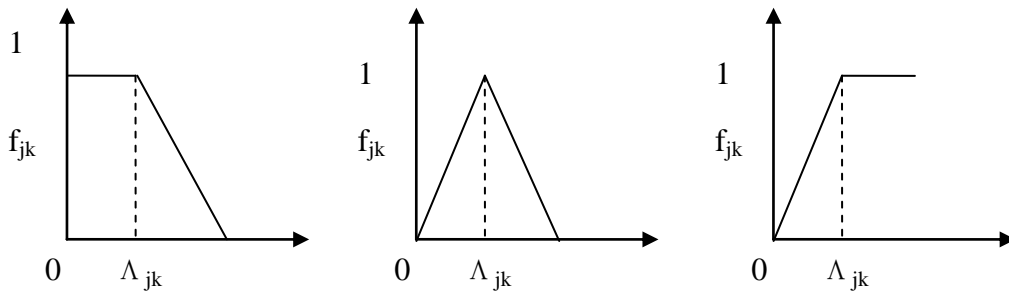


图 2-4 白化函数的形式

Fig 2-4 Form of the albino function

2) 计算对象  $i$  ( $i=1,2, \dots, n$ ) 关于灰类  $k$  ( $k=1,2, \dots, s$ ) 的综合聚类系数

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j$$

$f_j^k(x_{ij})$  是对象  $i$  在指标  $j$  下属于灰类  $k$  的白化权函数,  $\eta_j$  是指标  $j$  在综合聚类里的权重。

3) 根据  $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$  可以判断出对象  $i$  属于灰类  $k^*$ 。

4) 灰色决策

决策的本质含义就是“做出决定”或“决定对策”。决策活动不仅是各类管理活动的重要组成部分而且贯穿于每个人的工作、学习和生活过程的始终。

灰色决策是在决策模型中含灰元或一般决策模型与灰色相结合的情况下进行的决策。灰色决策的计算主要有两种，一是在 GM (n, k) 模型的基础上计算，另一种是根据关联系数进行扩展得到的。

### 2.2.5 综合指数评价法

综合指数评价法评价室内空气品质的理念是沈晋明教授提出，他也是参考了上海医科大学姚志麟教授提出的大气质量指数法<sup>[35]</sup>，该方法已经得到学界的广泛认可。利用该方法进行评价时应该先选择典型的评价指标，评价指标的实验测试数据需要整理分析，用该方法计算成指数来表示环境质量。假定污染物的浓度是  $C_i$ ，污染物的标准值上限  $C_{Vi}$  的倒数作为权重系数， $C_i/C_{Vi}$  的无量纲数值被称为污染物的分指数，分指数组合而成的综合评价指数  $I$  可以反映出空气品质的优劣情况。综合指数有各种不同的计算方法，下表是常用的指数评价模型。

表 2.7 指数评价模型汇总

Tab 2.7 Summary of Index Evaluation Model

	类别	评价公式	公式特点
单因子指数	普通	$I_i = \frac{C_i}{C_{Vi}}$	$I_i \leq 1$ 达标。某种污染物占明显优势
	分级	$I_i = \frac{C_i - C_{ij}}{C_{ij+1} - C_{ij}} (I_{ij+1} - I_{ij}) + I_{ij}$	内插法计算，指数与评价因子是分段线性函数关系
多因子指数	最大值	$I_i = \max (I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n)$	多种污染物中，某种污染物占明显优势
	算术平均值	$I = \frac{1}{n} \sum I_i$	各种污染物对环境质量产生影响所占比例相同
	加权平均值	$I = \sum W_i I_i$	各种污染物对环境质量影响的重要程度不同
	沈氏模式	$I = \sqrt{(\max I_i) (\frac{1}{n} \sum I_i)}$	兼顾最大单因子指数和算术平均指数
	综合指数	$I = \sqrt{\frac{(\max I_i)^2 + (\frac{1}{n} \sum I_i)^2}{2}}$	兼顾最大单因子指数和算术平均指数，还突出最大单因子指数

综合指数评价法迄今为止已得到了大量的应用。张小彬<sup>[36]</sup>在评价哈尔滨某地下商场空气品质时利用综合指数评价法并与主观评价法、灰色关联评价、模糊综合评价等方法进行了对比,发现评价结果相似,结论客观合理。王东梅<sup>[37]</sup>在对室内空气品质评价的研究中采用了综合指数评价法,并采用主观评价方法与之对比,发现评价结果具有明显的相关性。舒爱霞<sup>[38]</sup>等在对室内空气品质评价研究时采用了综合指数评价,实例分析表明,该方法是一种客观有效的评价模式。

### 2.2.6 各评价方法的对比

根据上述介绍,室内外空气的评价方法很多,但可以分析总结各自的评价特点,找出适合本研究的评价模型,表 2-8 是各种评价模型的特点对比。

表 2.8 评价模型优缺点对比分析

Tab 2.8 Comparative analysis of the advantages and disadvantages of evaluation model

评价方法	优点	缺点
综合指数法	简明方便,易于应用	类比参照值较难获取,评估结果偏差较大
模糊数学综合评价法	公式简单,容易应用	多级评价缺乏通用准则
层次分析法	有很强的逻辑性和系统性	评价结果存在较大的主观性
人工神经网络法	较强的稳定性和容错性	目标函数建立复杂,没有理论依据支持网络隐含层数的选择,且不易操作
灰色关联度法	原理简单,应用广泛	参考数据列代表性不够,评估结果不具代表性

## 2.3 本章小结

本章首先介绍了一些国内外空气质量的执行标准,然后分别介绍了几种常用的空气质量评价模型,通过对各个评价方法的介绍对比分析了各自的优缺点,结合本文需要研究的钢铁企业原有厂区的空气质量研究现状,本文选取模糊数学综合评价法对空气质量进行对比评价。



### 3 钢铁企业的大气污染现状

#### 3.1 中国钢铁行业发展现状

建国以来，中国钢铁工业走过了半个多世纪，从新中国刚成立的废墟中逐渐成长，经历的改革开放的快速发展，今天的中国钢铁行业已经在世界钢铁大国中占有一席之地。六十多年的发展历程当中，中国钢铁行业大致经历了三个发展阶段，第一阶段是从建国到 1957 年，这个阶段是中国钢铁工业一个最美好的开头。第二阶段是 1958 年到 1978 年，期间经历了自然灾害和文革，这样动荡的时期自然也影响了钢铁工业的发展。第三个阶段是从 1979 年到现在，这个时期中国钢铁工业得到了飞速的发展。

中国钢铁工业实际上是从上世纪 90 年代才开始真正崛起，粗钢产量从 1990 年的 6535 万吨增长到了 2011 年的 68388 万吨，21 年间粗钢产量增长了近 9.5 倍。特别是进入新世纪，钢铁工业的发展速度更是惊人，2007 年生产粗钢，48924.08 万吨，增长同比 15.66%，2008 年生产粗钢 50048.80 万吨，增长 1.13%，2009 年生产粗钢 56784.24 万吨，增长 13.50%，2010 年生产粗钢 62665 万吨，增长 9.26%，2011 年生产粗钢 68388 万吨，增长 7.3%。从产量上来看，1996 年中国突破了 1 亿吨粗钢产量，到 2010 年中国生产粗钢突破了 6 亿吨。2003 年中国的人均钢产量达到 173kg/（人·年），首次超过了世界平均水平 152 kg/（人·年），中国钢铁行业的发展在世界钢铁行业中也堪称是绝无仅有的<sup>[39][40]</sup>。

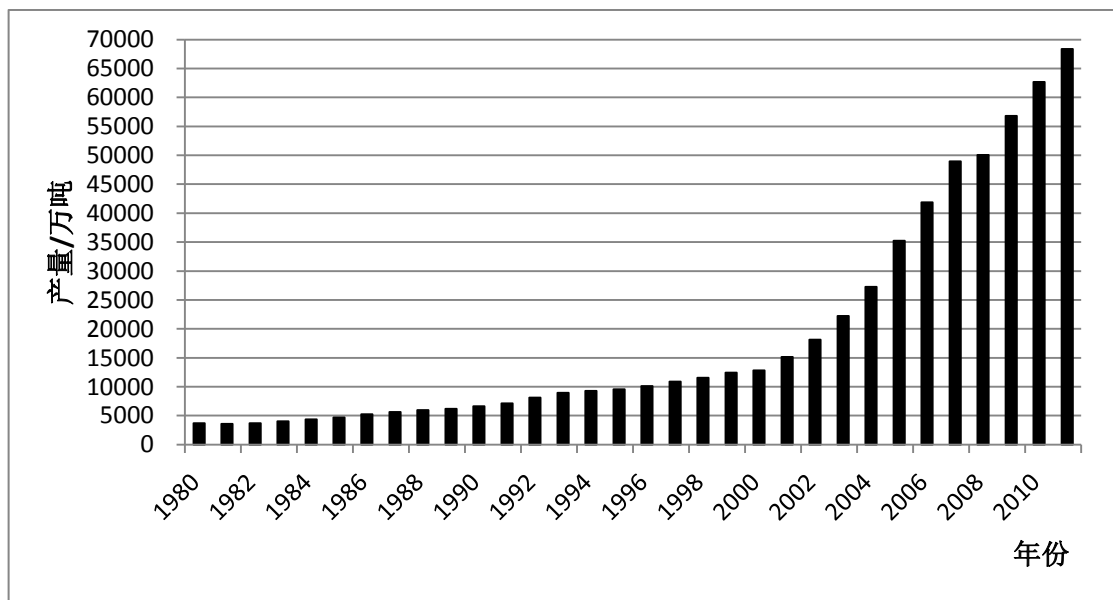


图 3.1 1980-2011 中国粗钢产量

Fig 3.1 Crude steel production in China from 1980 to 2011

资料来源：《中国钢铁工业年鉴》数据整理

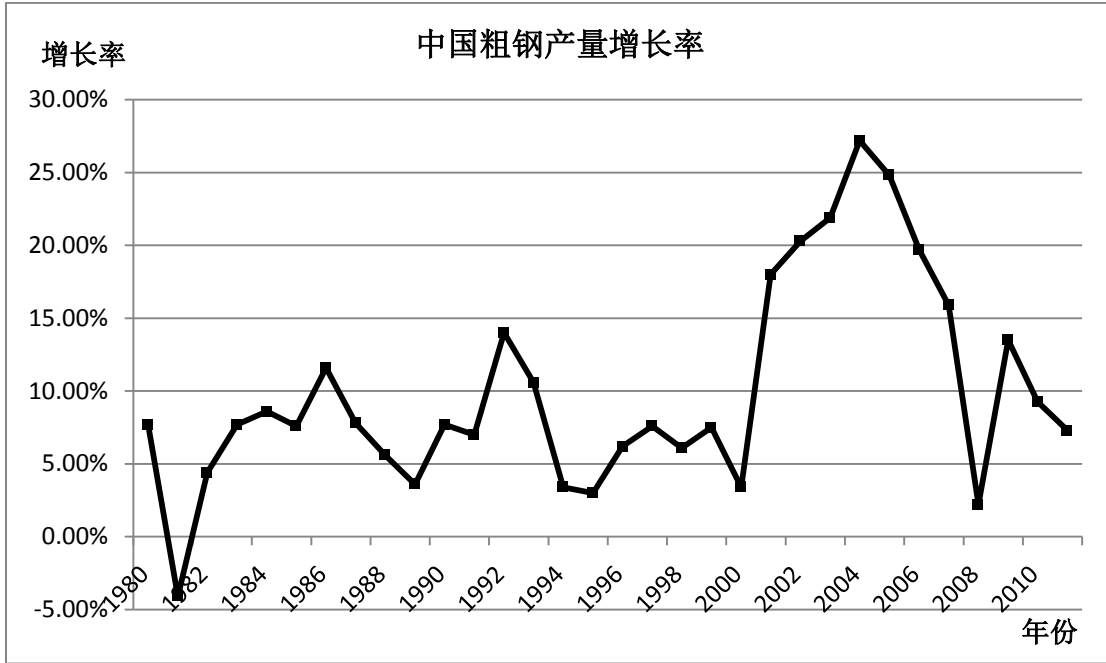


图 3.2 1980-2011 中国粗钢产量增长率

Fig 3.2 Crude steel production growth in China from 1980 to 2011

资料来源：《中国钢铁工业年鉴》数据整理

表 3.1 2011 年粗钢产量世界前 10 位国家或地区

Tab 3.1 Top 10 countries or regions of the world crude steel production in 2011

国家	2011 年产量 (万吨)
1.中国内地	70200
2.日本	10760
3.美国	8640
4.印度	7130
5.俄罗斯	6890
6.韩国	6850
7.德国	4430
8.乌克兰	3530
9.巴西	3520
10.土耳其	3410
剩余其他国家和地区总计	26440
全球粗钢总计	151800

资料来源：国际钢铁协会

从上图 3.2 中可以看出近 30 年来，中国粗钢产量几乎都呈正增长，且产量增加幅度有增大的趋势，2011 年比 2010 年产量增加约 5723 万吨，这样的增量已经超过了 1987 年全国粗钢总产量。而且从 1996 年中国钢产量跃居世界首位以来，直到现在中国已经连续 16 年稳居世界首位，并稳步向上发展。

据国际钢铁协会最新统计显示，2011 年全球粗钢产量首次突破 15 亿吨，达到 15.18 亿吨，比 2010 年的 14.30 亿吨增加了 8720 万吨，涨幅达 6.1%，中国的贡献率达到 46.2%，接近全球粗钢总产量的一半，遥遥领先第二名的日本，且中国钢铁总产量为日本的 6.5 倍，另外中国的粗钢总产量甚至还超过了世界粗钢产量排名前十位的其它九个国家的粗钢产量的总和。

如表 3-1 和图 3-3 所示，2011 年世界粗钢产量前 10 位的国家粗钢产量总计 125360 万吨，占全球粗钢总产量的 82.6%，其中中国占 46.2%。

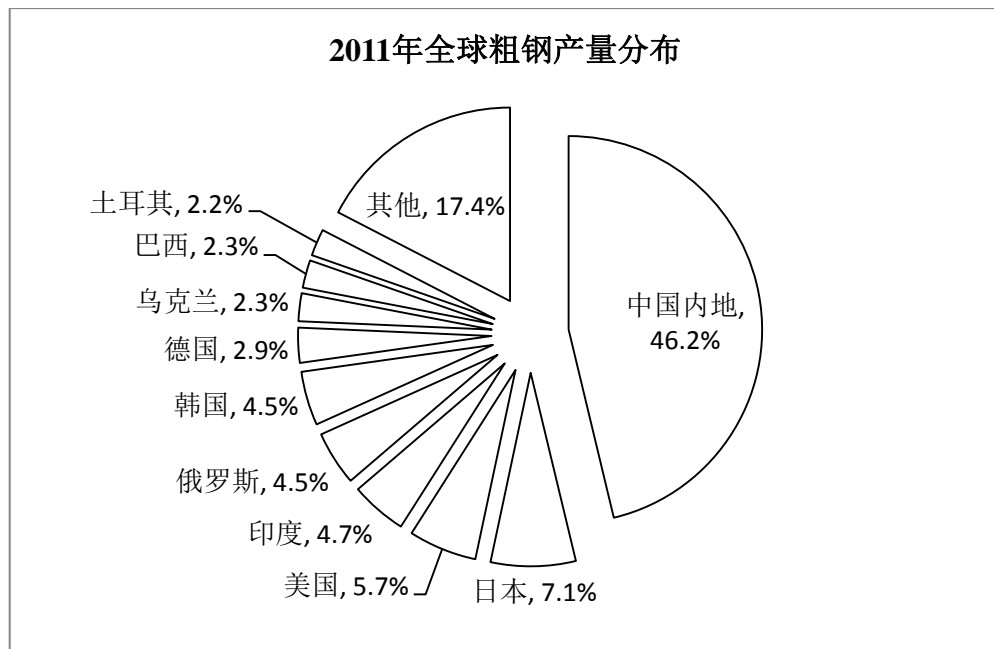


图 3.3 2011 年全球粗钢产量分布比例图

Fig 3.3 Global crude steel production distribution scale drawing

资料来源：国际钢铁协会

中国在钢铁消费问题上也是一个超级大国，2011 年全球钢材表观消费量为 137300 万吨，中国内地钢材表观消费量就达 62400 万吨，比 2010 年增加 5.6%，占世界总消费量的 45.4%。美国继续保持世界第二钢材消费国，2011 年钢材消费 8910 万吨。中国大陆自从 2001 年钢材表观消费（1.6 亿吨）首次超过美国后就一直保持世界第一的水平。中国虽然现在人均钢材消费量相比发达国家较低，但是

巨大的消费总量和持续的稳步增长却体现了我国强劲的内需，而且也从一定程度上体现了我国经济的快速发展。

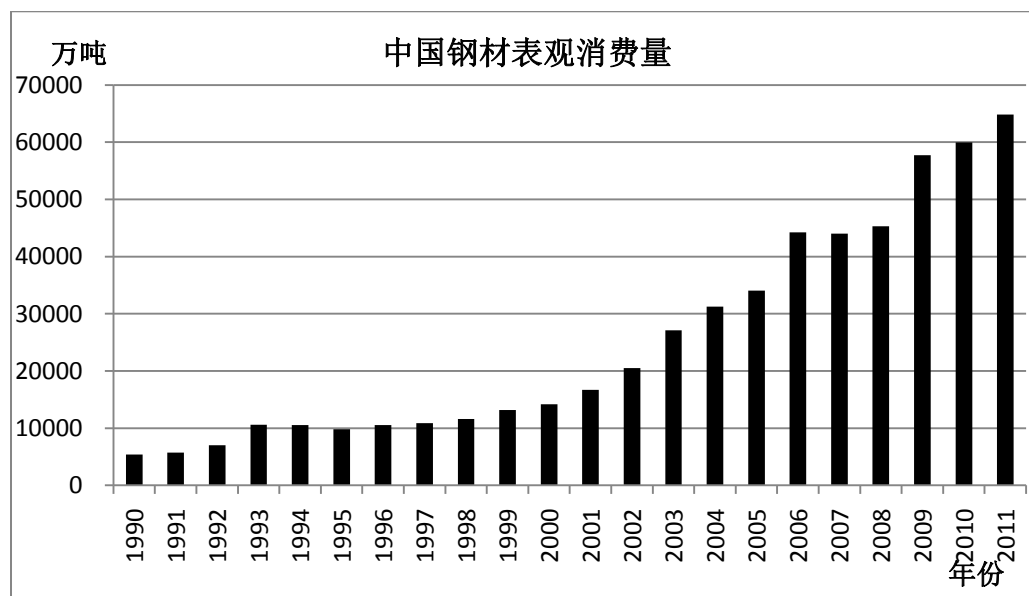


图 3.4 1990-2011 年中国钢材表观消费量

Fig 3.4 Apparent consumption of steel in China from 1990 to 2011

资料来源：《中国钢铁工业年鉴》数据统计

上述数据显示，中国无论是在粗钢产量还是在钢材表观消费量上都是世界钢铁工业的大国，然而高速发展的同时钢铁生产和消费过程中的一些问题，例如中国的钢铁发展相对粗放，带来一系列环境污染问题，还有钢铁产量的合理性，以及钢铁利用的效率等，这些问题都需要学者进一步讨论。

近年来中国钢铁企业的规模不断扩大，生产量也不断提高。根据 2012 年 12 月《中国钢铁工业统计月报》，2012 年我国的钢铁产业共生产粗钢 71654.2 万吨，比 2011 年增加了 2154.5 万吨，增加幅度达到 3.1%。《中国钢铁工业统计月报》还显示了粗钢生产的集中度，2012 年粗钢产量前 10 位的钢铁企业合计产量为 32916.57 万吨，占全国总产量 45.94%，2012 年粗钢产量前 15 位的钢铁企业合计产量为 38937.24 万吨，占全国总产量 54.34%，2012 年前 10 位、前 15 位钢铁企业粗钢生产集中度比 2011 年分别降低了 3.26%、3.76%<sup>[41]</sup>。

近年来中国钢铁工业不仅产量增加，企业数量也比以前增多，根据《中国钢铁工业年鉴》2011 年数据统计显示，全国共有 10224 个钢铁企业，其中以辽宁省 1256 个企业数为最多，紧随其后的还有河北省 1179 个，江苏省 968 个，浙江省 688 个。

表 3.2 2011 年中国各地区钢铁企业数量

Tab 3.2 Number of steel companies in all regions of China in 2011

合计 10224									
北京	天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	上海	江苏
30	330	1179	374	413	1256	146	48	88	968
浙江	安徽	福建	江西	山东	河南	湖北	湖南	广东	广西
688	251	254	177	532	435	268	530	534	298
海南	重庆	四川	贵州	云南	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆
9	161	419	190	177	100	103	49	82	133

数据来源：《中国钢铁工业年鉴》2011 年

在现在的这些钢铁企业中，有些是从新中国成立初期开始发展的，有些是后来逐步发展的。在早期成立的这些钢铁企业中，现在很多都面临旧设备和原有技术的更新，而一些老厂区也被废弃，需重新改造成其他功能的建筑。中国的老工业基地主要包括东北老工业基地，西北老工业基地，西南老工业基地，华中老工业基地以及上海老工业基地。需要改造的废旧钢铁厂包括沈阳铁西搬迁区，首钢老厂区，重钢老厂区等。

## 3.2 钢铁企业的生产流程以及产生污染的环节

### 3.2.1 钢铁企业生产方式的发展

治理环境污染的最好的措施无疑是解决源头问题，如果我们搞清楚了钢铁生产的流程和其中产生污染的环节，我们才能对症下药，找出解决的措施。

钢铁生产的流程包括主要流程和辅助的流程，主要流程包括长流程（高炉-转炉流程）和短流程（电炉流程），长流程的发展图如图 3-4 所示<sup>[42]</sup>。

长流程包括高炉、转炉、轧材三道主要工序，也是传统的炼钢方式，其流程为高炉—混铁炉—平炉—模铸—轧钢等（如图 3.4 线路 A），这种传统方式耗能大且消耗很长时间，例如平炉的冶炼周期较长，而氧气顶吹转炉的发展解决了时效性的问题，另外在连铸方式的生产取代模铸后，世界上普遍形成了图 3.4 中 B 线路所示的“转炉—连铸”流程，这种生产方式现在也发展得比较完善。图 3.4 总 C、D 线展示的是转炉配合炉外精炼生产优质钢，这种生产方式现在也发展的非常完善。

现在的钢铁生产方式已经成熟地发展为高炉—转炉—连铸—轧材的长流程，采用这种方式生产的钢产量已经达到总产量的 60%-70%。

短流程是指利用废钢等含铁原料生产钢铁产品，中间过程包括电炉、钢包炉

连铸、连轧等。

辅助的生产工序包括炼焦、锅炉、制氧、燃气加工、能源放散和生产场地内的材料运输等，这些工序都会对环境产生很大的影响<sup>[43]</sup>。

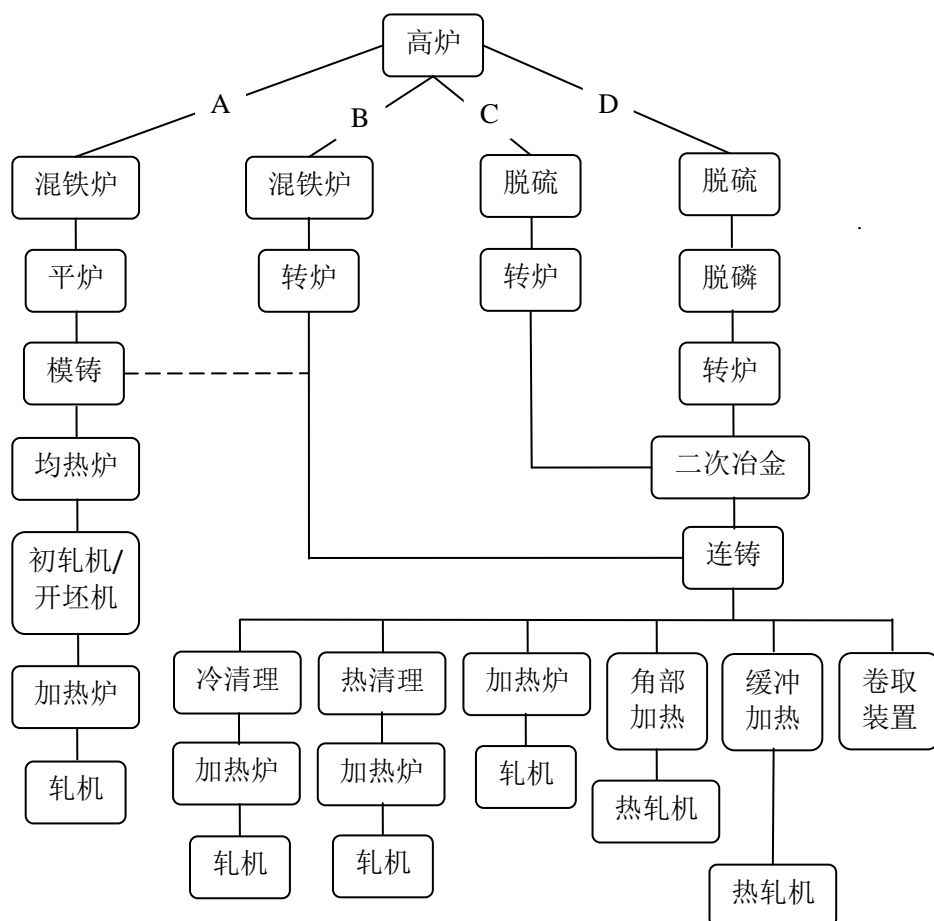


图 3.4 高炉—转炉钢铁生产流程的发展过程图

Fig 3.4 BF-BOF steel production process development process diagram

现在随着钢铁工业的发展，生产技术的提高，炼钢过程对含铁原料的要求也比以前提高不少。转炉炼钢的原料几乎全部由高炉铁水热装提供，高炉的大型化却对原料和焦炭的要求更高。电炉生产流程能过充分利用废钢，这种方法在世界范围内也得到了广泛的应用，然而我国废钢量缺乏，加之质量不好，国内的发展有一定的限制。对于电炉冶炼优质钢，由于原料要求高，含铁量高、杂质少的直接还原铁成为其原料的重要来源。直接还原铁原料只需要铁矿石、煤和石灰石三种物料，原料的种类比烧结工艺要简单，但是粒子大小的要求比烧结工艺严格。直接还原铁还比高炉炼铁少了烧结、焦化的工序，这两个工序也是钢铁生产中污染最大的工序，现在直接还原铁的生产原料只能采用进口的铁矿石或者氧化球团，

这样必然增加了生产成本，所以这种生产方式也只有条件合适的地方才能采用。在很长时期内，我国生产钢铁的方式还是主要依靠以铁矿石和煤为原料的高炉—转炉—连铸—热轧流程和以废钢为原料的电炉—连铸—热轧流程的生产方式。

### 3.2.2 炼铁及炼钢的流程简介

#### ① 炼铁流程

表 3.3 是直接还原法和高炉炼铁的特征比较，从表中可以看出他们之间的区别：1.直接还原法生产的铁含碳低、渣多，为固体产品；高炉炼铁含碳高，无渣，为固体或液体产品；2.直接还原法对原料的品质有较高的要求；高炉炼铁对原料要求不高；3.直接还原法需要消耗天然气或者煤，对煤的要求是有较高的灰熔点，较好的反应性；高炉炼铁需要消耗炼焦煤；4.采用天然气的直接还原法耗能和高炉炼铁相当，利用煤的直接还原法耗能高于高炉炼铁的能耗；5.投资方面采用天然气的直接还原法和高炉炼铁的方式相差不大，利用煤的直接还原法投资稍微高出以上两种方式；6.单炉的最大产出上高炉明显比直接还原法大。

表 3.3 直接还原法和高炉炼铁的特征比较

	产品形态	产品特点	原料要求	主要能源	耗能	投资(美元/ta)	单炉最大产出(万吨/a)
Midrex	固体	碳低含渣	矿石含铁高，脉石少，硫低	天然气	天然气: 13GJ/t 电: 120kWh/t	250	100
HYL	固体	碳低含渣	矿石含铁高，脉石少，硫低	天然气	天然气: 11GJ/t 电: 85kWh/t	250	100
SL/RN (煤基 回转 窑)	固体	碳低含渣	矿石含铁高，脉石少，硫低	煤	19.4-19.9GJ/t 电: 110kWh/t	260-320	20
高炉	铁水 或铁 块	碳高 无渣	对原料适应 性强	焦炭 煤粉	12-14.5GJ/t (高炉、焦炉全 部能耗)	236 (包 括高炉、 焦炉)	350

#### ② 炼钢流程

表 3.4 是三种不同的炼钢流程的能耗比较，从表中可以看出电炉全废钢冶炼的方式能耗最低。而高炉—转炉—连铸或模铸—轧钢、直接还原—电炉—连铸—轧钢等方式需要较高的能耗，高能耗自然也会产生更多的污染物排放，所以利用废钢冶炼是重要的节能减排的方法。

表 3.4 三种不同炼钢流程的能耗比较

Tab 3.4 Three different steelmaking processes compare energy consumption

流 程	能 耗	
	KJ/吨钢	合标煤, Kg/吨钢
高炉—转炉—连铸或模铸—轧钢	$20.68 \times 10^6$	706
电炉全废钢冶炼—连铸—轧钢	$8.375 \times 10^6$	285
直接还原—电炉—连铸—轧钢	$22.966 \times 10^6$	784

### 3.2.3 典型钢铁生产流程的污染物排放

#### ① 高炉生产流程的污染物排放

由于钢铁工业的快速发展，原料的需求量越来越大，而富矿数量较少，不得不开采贫矿。贫矿需要通过选取含铁较高的精矿才能入炉冶炼，这样可以提高生产指标和经济效益。精矿在开采和加工的过程中产生的粉矿需要经过造块才能进入高炉冶炼，造块主要有烧结和球团两种方式。球团生产对原料的要求较高，它需要粒度较细的粉矿或者精矿，因为粒度越细，成球性越好，球团强度越高。烧结对原料的要求相对简单，它可以适应粒度较粗的富矿粉和精矿，还能处理含铁废弃物。图 3.5 是高炉—转炉生产流程及其排放示意图。

通过上述高炉—转炉生产流程图的简单示意介绍可以知道烧结和炼焦两个过程需要投入大量的原料，与此同时也会产生种类多且量大的污染物，包括废气、废液、粉尘等。废气主要有  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NH}_3$  等，废液主要有氨液、焦油等，固体废弃物主要是粉尘和烟尘。转炉炼钢的过程中也在各个流程中产生大量的固、液、气废弃物，尤其是铸锭过程，产生的废弃物种类较多，对环境危害较大。

#### ② 电炉生产流程的污染物排放

电炉炼钢是以电能为主要热源，利用电极和炉料之间产生的高温电弧来加热和融化炉料的生产方式，它也是继转炉、平炉之后的有一种炼钢方式<sup>[44]</sup>。电炉炼钢的主要原料是废钢铁料，传统的电炉炼钢工艺也是采用全废钢的工艺方式。由于这种方式资源消耗较少，所以近年来得到了广泛的使用。中国电炉产钢的产量如表 3.5 所示<sup>[45]</sup>。



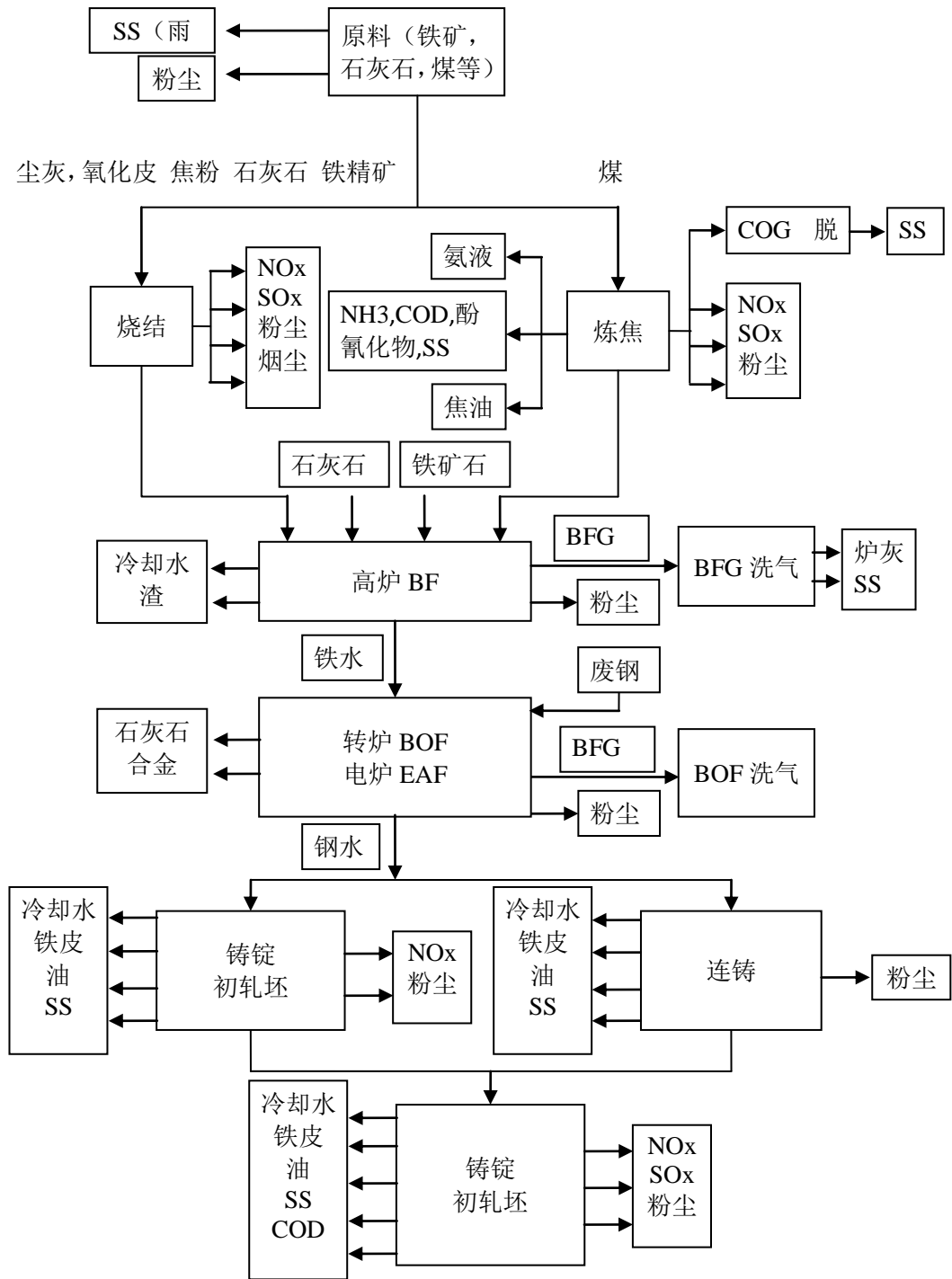


图 3.5 高炉—转炉生产流程及污染物排放示意图

Fig 3.5 BF-BOF pollutant emission production process and schematic

表 3.5 中国电炉钢产量发展

Tab 3.5 Electric furnace steel output in China

年份	2004	2005	2006	2007	2008
钢总产量/万吨	23354	28393	34944	38195	38239
转炉钢产量/万吨	20018	25062	31560	34383	34508
电炉钢产量/万吨	3333	3327	3384	3812	3731
电炉钢比例/%	14.27	11.72	9.68	9.98	9.76

从上表中可以看出虽然转炉产钢依然占主导地位，但是电炉产钢也开始发挥相当大的作用。电炉产钢产量相对较少主要是我国电炉产钢的发展起步较晚，进入 90 年代国家才开始逐步重视，另外我国的电力和废钢资源紧缺也是一个重要原因。

生铁是电炉炼钢中添加的辅助原料，在废钢缺乏的情况下可以增加生铁的配比，并且增加供氧量，这样可以起到明显的节能效果。另外热铁水在电炉炼钢中也是高纯度的原材料，因为它含有的其它残余金属元素少，热铁水的高温还能使炼钢的耗电量大大减少，冶炼的时间也缩短，所以对冶炼的整体效益帮助很大。

图 3.6 是电炉炼钢的生产流程和污染物的排放框图。

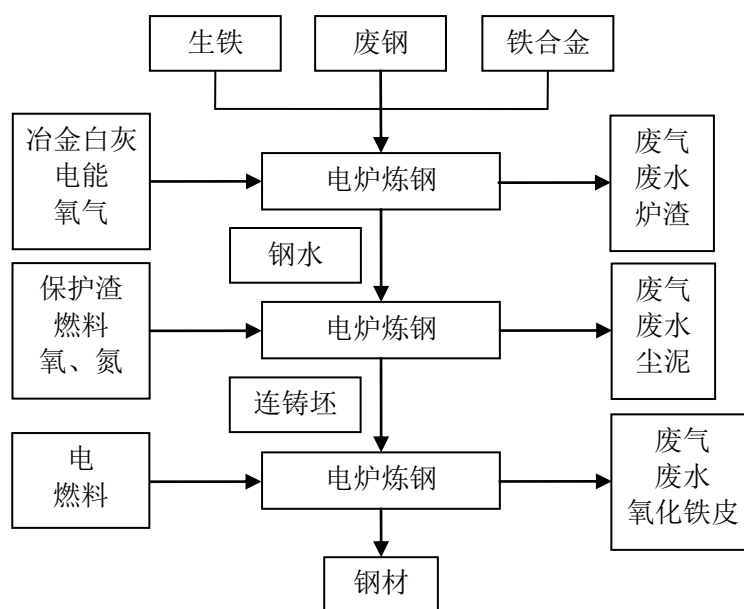


图 3.6 电炉流程物流排放图

Fig.3.6 Flowchart of materials and waste emissions in EAF flow

③ 直接还原法电炉炼钢污染物排放

随着钢铁工业的发展规模变大，适合高炉使用的冶金焦变得不断紧张，直接还原法的设想被提了出来。但直接还原法到 20 世纪 60 年代才得到发展，主要是由于石油和天然气的大量开发为直接还原法提供了方便的能源，另外选矿技术的提高，能提供高品位精矿，降低脉石含量，这些方面都简化了直接还原的工艺，也是其发展的重要原因。

直接还原法按照还原剂主要分为两类，即使用气体还原剂和使用固体还原剂的直接还原法。使用气体还原剂的直接还原法又包括竖炉法、反应罐法和流态化法。竖炉中炉料与煤气逆向运动，下降的炉料逐步被煤气加热和还原，传热、传质效率较高。竖炉法以 Midrex 法为代表，是当前发展最快、应用最广的直接还原炼铁法。反应罐法是指在反应罐中炉料固定不动，通入热还原煤气依次进行预热、还原和冷却，最后定期停气，把炉料排出罐外的方法，其中墨西哥的 HyL 法是唯一工业化反应罐法。流态化还原法有直接使用矿粉、省去造块的优点，并且由于直接还原炼铁法矿石粒度小而能加速还原，缺点是因细粒矿粉甚易粘结，一般在 600~700℃ 不高的温度下操作，不仅还原速度不大，而且极易促成 CO 的析碳反应。使用固体还原剂的直接还原法中一个重要的设备是回转窑。回转窑炼铁的主要优点是可以直接使用资源丰富的煤炭，其缺点是生产率低。最有代表性的回转窑炼制海绵铁法是 SL/RN 和 Krupp 法，二者工艺流程基本相同。

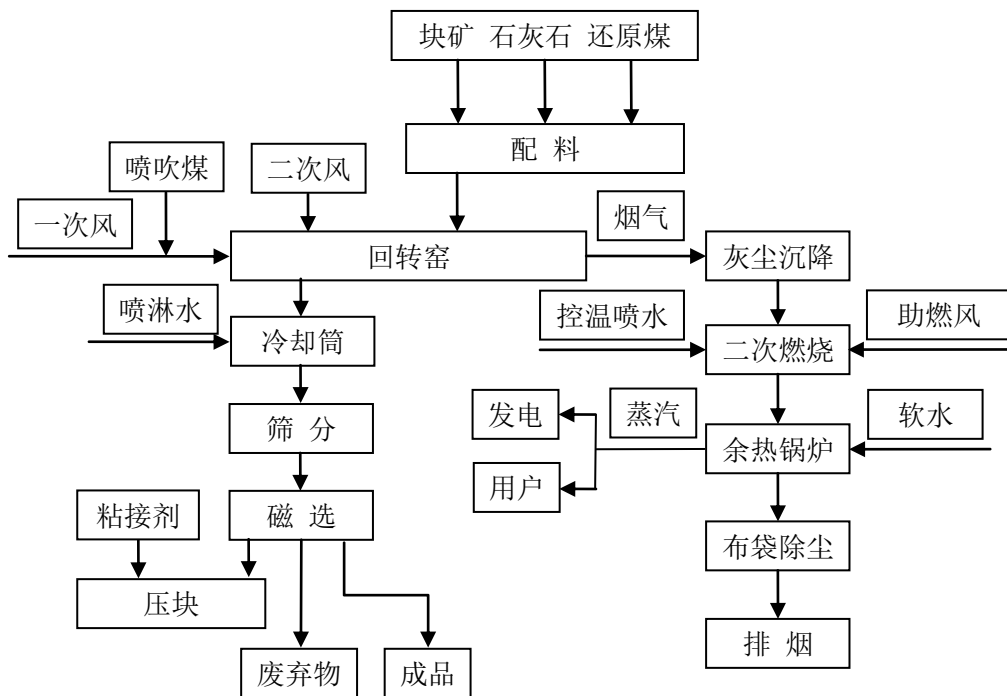


图 3.7 直接还原铁生产流程和污染物排放图

Fig. 3.7 Flowchart of materials and waste emissions in DRI process

直接还原法电炉炼钢的优点主要有：流程短，直接还原铁作为电炉的原材料；不用焦炭，不受炼焦煤短缺的影响；生产过程产生的污染相对于高炉炼铁和电炉直接炼钢产生的污染物都要大大减少。从环境保护的角度来看，直接还原法电炉炼钢是清洁的生产方法，并且我国采用这种方法炼钢的产量也在逐步增长。

### 3.2.4 各种污染气体的危害性简介

#### ① $PM_{10}$ 的特点及危害

$PM_{10}$  是大气中粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物，也被称作可吸入颗粒物。 $PM_{10}$  在大气环境中持续的时间长，对人体的健康和大气能见度都有很大的影响。近年来国内外专家对大气颗粒物的来源进行了大量的探索，张晶等<sup>[46]</sup>应用 CMB 法对北京市大气颗粒物进行了来源探索，并发现尘土、燃煤和汽车尾气是北京市大气的三大重要污染源，汽车尾气又是其中影响最大的因素。刘咸德<sup>[47]</sup>等也通过 CMB 法定量研究出了可吸入颗粒物的 3 种主要来源，土壤扬尘、燃煤飞灰、硫酸盐二次颗粒物和其他类型的工业排放等。

可吸入颗粒物的毒理探索已经有了大量的研究，主要是通过活体方法和体外方法两种方式进行。活体方法是用动物吸入  $PM_{10}$  后对其解剖，观察不同吸入量对动物造成的生理变化，找出  $PM_{10}$  和人体健康之间的关系。Dreher 等<sup>[48]</sup>研究发现大气颗粒物的粒径不同对大鼠的肺毒性不同，并得到大鼠受到最小颗粒物的伤害最大，肺部损伤最为严重。体外方法是把颗粒物暴露在活体细胞中或者分离的组织中，通过研究颗粒物对细胞或组织的破坏程度来评价颗粒物的毒性。贾玉巧等<sup>[49]</sup>研究发现大气颗粒物  $PM_{10}$  对人肺成纤维细胞有一定毒性： $PM_{10}$  染毒 24h 后能诱导人肺成纤维细胞分泌炎症因子 TNF- $\alpha$ 、IL-6、IL-8。

#### ② $PM_{2.5}$ 的特点及危害

$PM_{2.5}$  又称细颗粒物，指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 微米的颗粒物。它能较长时间悬浮于空气中，其在空气中含量浓度越高，就代表空气污染越严重。虽然  $PM_{2.5}$  只是地球大气成分中含量很少的组分，但它对空气质量和能见度等有重要的影响。与较粗的大气颗粒物相比， $PM_{2.5}$  粒径小，面积大，活性强，易附带有毒、有害物质，且在大气中的停留时间长、输送距离远，因而对人体健康和大气环境质量的影响更大。 $PM_{2.5}$  的来源主要是人为活动，例如工业生产过程中的煤炭的燃烧、汽车尾气的排放等。

关于  $PM_{2.5}$  对人体的健康影响已经有不少的研究，戴海夏<sup>[50]</sup>等在研究大气  $PM_{2.5}$  的影响中总结发现， $PM_{2.5}$  浓度的增高与心肺疾病的超额发病率、死亡率相关，尤其是在原先患有呼吸、心血管系统疾病的人群及身体状况不佳的中老年人群中。Schwartz<sup>[51]</sup>通过时间序列的分析方式发现当大气中  $PM_{2.5}$  浓度增加  $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  时，被研究人群的总死亡率由 2.1% 上升到 3.75%，而且发现肺炎、心脏病等疾病的死亡

率上升效应随着暴露时间的延长而增强。吴国平<sup>[52]</sup>等在对广州、武汉、兰州、重庆的 8 所小学共 8000 余名学生父母患呼吸系统疾病的病症率受到空气污染影响的研究中发现，每个城市人群呼吸系统的病症率和空气 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的污染浓度呈正相关。

#### ③ SO<sub>2</sub> 的特点及危害

SO<sub>2</sub> 在常温下是无色有刺激性气味的有毒气体，它对人体的危害表现为容易被湿润的粘膜表面吸收生成亚硫酸和硫酸，这样刺激作用还会增强。研究发现，如果人体每天吸入浓度为 100ppm 的 SO<sub>2</sub> 8h 后支气管和肺部将出现明显的刺激症状，使肺部组织受到伤害。SO<sub>2</sub> 还可被人体吸收进入血液，对全身产生毒性作用，它能破坏酶的活力，影响人体新陈代谢，对肝脏造成一定的损害。对动物的慢性毒性试验显示，SO<sub>2</sub> 有全身性毒性作用，出现免疫反应受抑制的现象。所以长期接触者可能会有呼吸道疾病发病率增加或感冒后不易痊愈，除由 SO<sub>2</sub> 的直接刺激作用外，尚可能与免疫反应受抑制有关。孟紫强等<sup>[53]</sup>为研究 SO<sub>2</sub> 对哺乳类细胞的遗传毒理效应，对亚硫酸氢钠和亚硫酸钠处理培养的中国仓鼠进行定量研究分析，发现 SO<sub>2</sub> 是不需要体内酶促转化的直接的细胞染色体断裂剂和基因毒性因子，长期接触环境低浓度 SO<sub>2</sub> 污染有引起人体细胞遗传物质损伤的潜在危险。

#### ④ NO<sub>2</sub> 的特点及危害

NO<sub>2</sub> 是一种棕红色、高度活性的气态物质，NO<sub>2</sub> 的产生多数来自认为原因，例如机动车、工厂等的排放。它对人体的危害也是对呼吸道的损伤。人体吸入 NO<sub>2</sub> 气体初期仅有轻微的眼及上呼吸道刺激症状，如咽部不适、干咳等。经数小时或者更长时间潜伏期后会发生迟发性肺水肿和一系列附带症状。邱榕等<sup>[54]</sup>在研究 NO<sub>2</sub> 的生物毒理时总结到 NO<sub>2</sub> 存在未成对电子，具有很高的反应活性，可以与生命的三大物质基础—脂质、蛋白质和核酸发生反应，进而对蛋白质、核酸等生物大分子及细胞成分的结构和功能造成影响，使生物体机能异常。

### 3.3 本章小结

本章介绍了中国钢铁行业现在发展状况，并着重介绍了钢铁生产过程中产生空气污染的环节，列举了生产过程中产生的污染物种类，并介绍了各种污染物气体对人体的健康危害。



## 4 首钢老工业区空气品质测试

### 4.1 测试参数的选择

我国《环境空气质量标准》(GB3095-1996)对 $\text{SO}_2$ 、TSP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{NO}_2$ 、CO、 $\text{O}_3$ 、铅、苯并[a]芘、氟化物、F等多种污染物浓度做出限制,以确保在规定浓度一下的空气不会对人体的健康造成影响。本文在深入了解首钢老工业区的生产特点和主要污染气体的情况下选取钢铁生产过程中产生的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 和 $\text{PM}_{10}$ 为主要研究对象,另外针对北京的大气环境质量的重要污染物,把重点污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 也考虑到研究对象当中。

### 4.2 测试场地与测试时间

测试地点选取在北京市石景山区首钢集团内部老厂区,测点的选择是根据原生产地点进行选择,主要包括7个测点,测点分别为料仓附近2个,筒仓附近1个,高炉附近2个,焦炉附近2个。

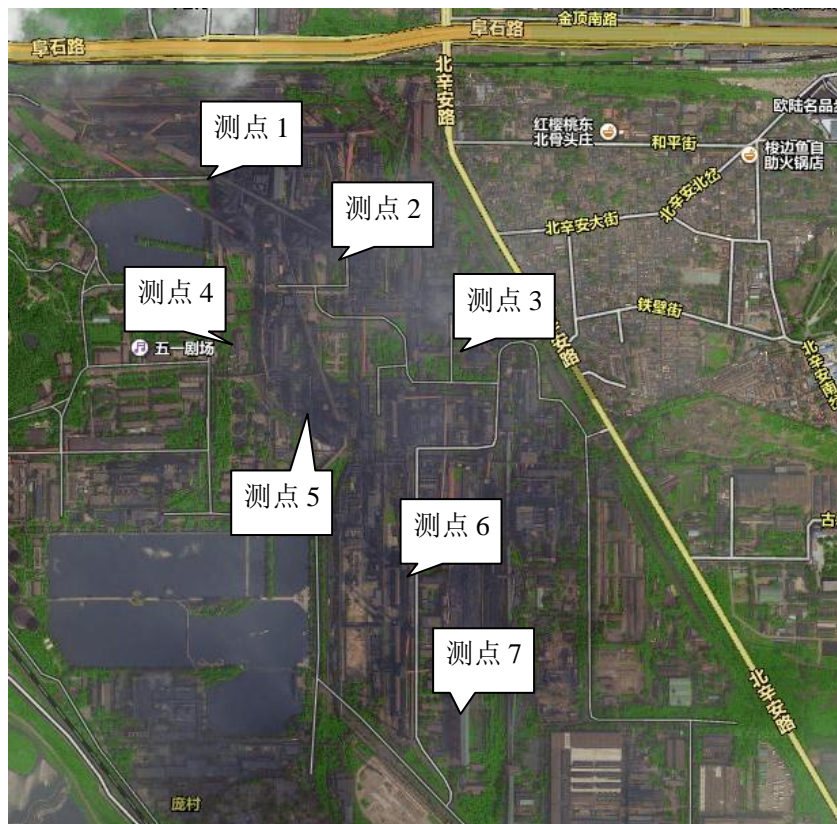


图 4.1 测试点分布位置

Fig 4.1 Location of test points

布点原则视场地的具体情况遵循均匀分布的原则，因厂区范围较大，测点的布置选择在每个具有独立生产功能的区域内至少布置一个点，独立生产区过大则布置两个测点，采样点的高度选取 0.5—1.5m 之间。

测试时间选取 2013 年 7 月 1 日至 7 月 30 日和 2014 年 2 月 11 日至 3 月 10 日两段时间，分别观测两段时间内老厂区的空气污染变化情况，每天的测试时间为早 4:00 至晚 21:00。

采样方式遵循以下原则：日平均浓度至少连续或间隔采样 18h，1h 平均浓度至少连续或间隔采样 45min。



图 4.2 场地测试

Fig 4.2 Field test

### 4.3 实验仪器

由于首钢老厂区已经不再生产，厂区内没有电源，选取在线式仪器无法操作，而且便携式仪器适合携带，所以测试仪器选取了 2 套便携式仪器，深圳科尔诺电子科技有限公司 GT-2000 多功能复合气体分析仪和北京宏昌信科技有限公司 LD-5C 激光粉尘仪。





图 4.3 GT-2000 多功能复合气体分析仪和 LD-5C 激光粉尘仪

Fig 4.3 GT-2000 multifunctional composite gas analyzer and LD-5C laser dust monitor

表 4.1 GT-2000 多功能复合气体分析仪测试参数

Tab 4.1 Parameters of GT-2000 multifunctional composite gas analyzer

检测气体	量程	精度	分辨率	相应时间
SO <sub>2</sub>	0-10PPM	±3%	0.001PPM	≤20 秒
NO <sub>2</sub>	0-10PPM	±3%	0.001PPM	≤20 秒
NO <sub>x</sub>	0-1000PPM	±3%	0.1PPM	≤30 秒
CO	0-1000PPM	±3%	0.1PPM	≤25 秒
CO <sub>2</sub>	0-50000PPM	±1%	1PPM	≤20 秒
VOC	0-10PPM	±1%	0.001PPM	≤10 秒
抽气方式	泵吸式，内置强力真空泵，流速：2L/min，抽气距离 5-8 米			

表 4.2 LD-5C 激光粉尘仪测试参数

Tab 4.2 Parameters of LD-5C laser dust monitor

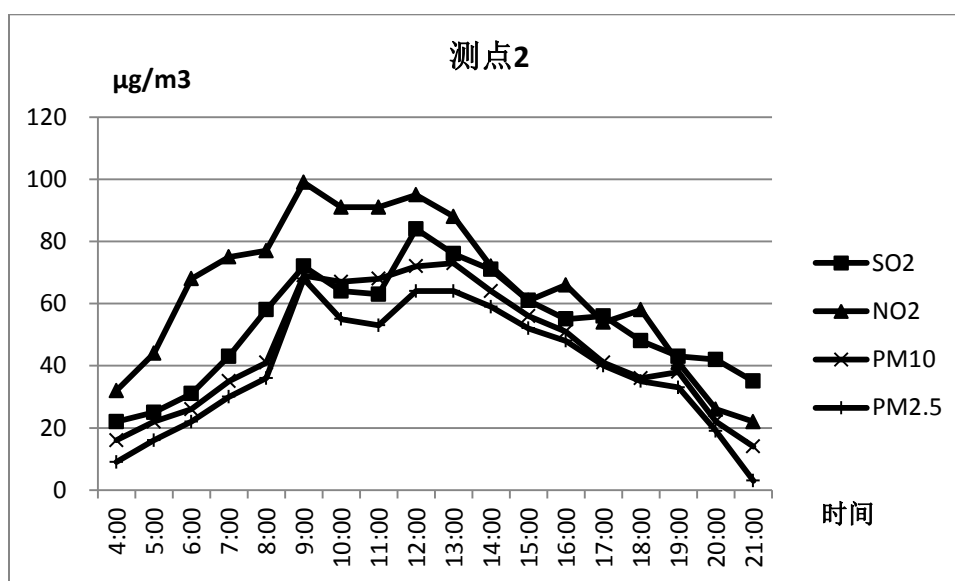
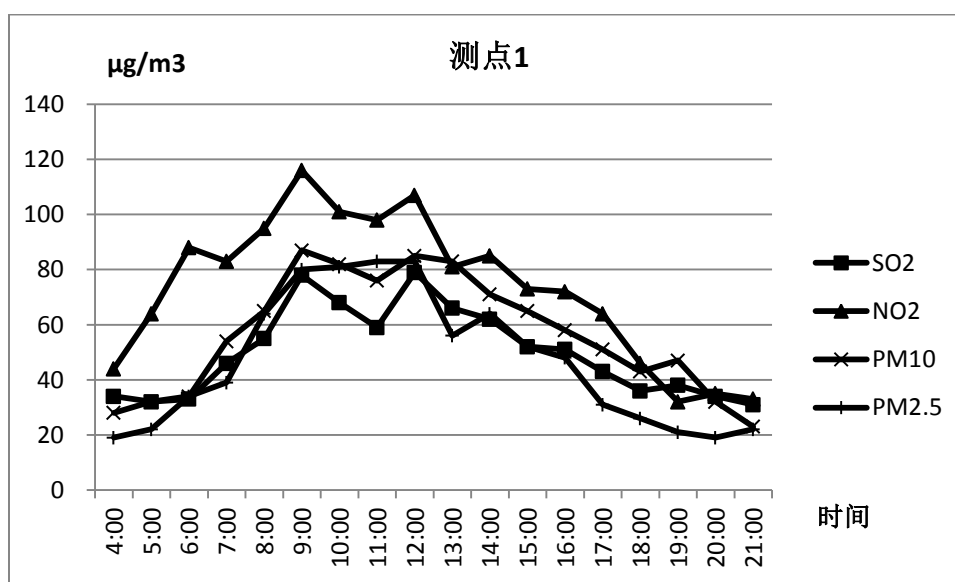
粒子切割器	TSP, PM10, PM2.5
灵敏度	0.001mg/m <sup>3</sup>
重复性误差	±2%
精度	±10%
量程	0.001~10 mg/m <sup>3</sup>
测定时间	标准时间为 1 分钟，设有 0.1 分及手动档（可任意设定采样时间）

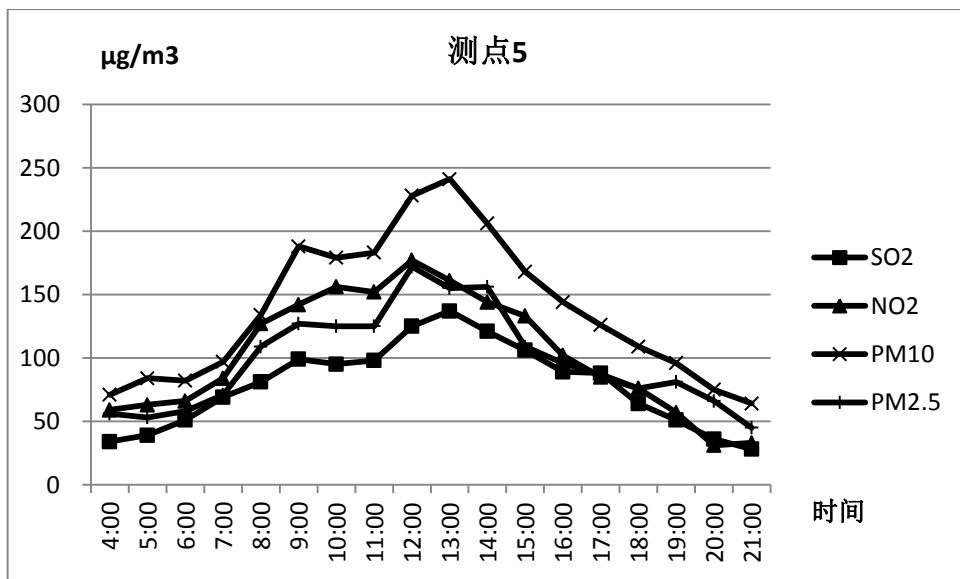
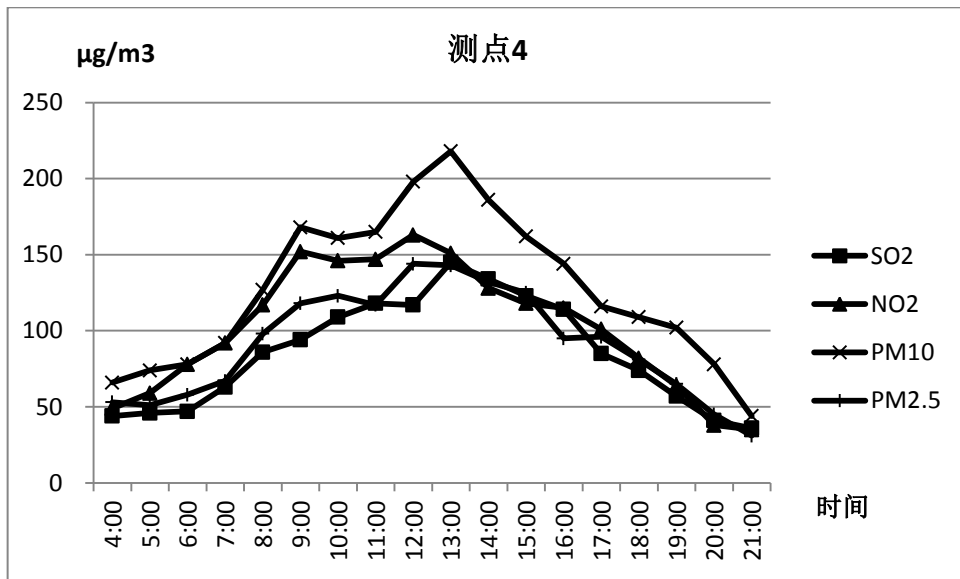
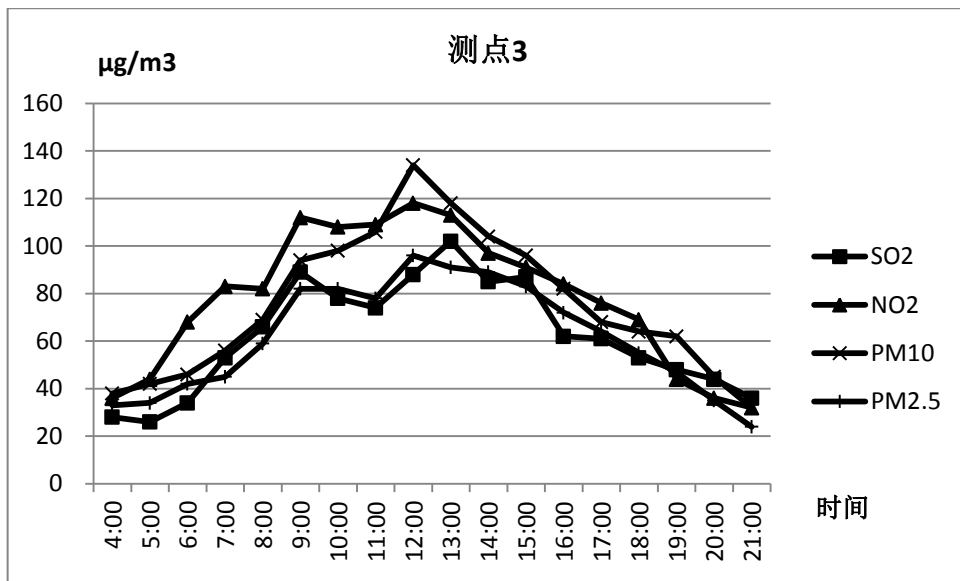
## 4.4 污染物时空分布分析

### 4.4.1 均值浓度变化分析

图 4-4 是 2013 年 7 月 1 日至 7 月 30 日期间对各污染物浓度的监测情况, 由于期间降雨的原因, 导致降雨期间空气质量大幅上升, 不能代表典型的空气质量, 因此截取 2013 年 7 月 19 日至 7 月 25 日期间的各污染物浓度进行分析。图表中每个时刻的数据取 7 日均值, 代表 7 月份每个污染物的变化趋势。

测点 1 和测点 2 位于料仓附近,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的 7 日均值浓度变化趋势都是早晚浓度较低, 早上 9 点至中午 12 点期间出现高浓度, 并且呈现出两个时间点的极大值情况, 而且测点 1 和测点 2 两个地点都是  $\text{NO}_2$  的浓度值明显高于其他 3 种污染物的浓度,  $\text{NO}_2$  在 9 点和 12 点的浓度均值达到了  $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的峰值。





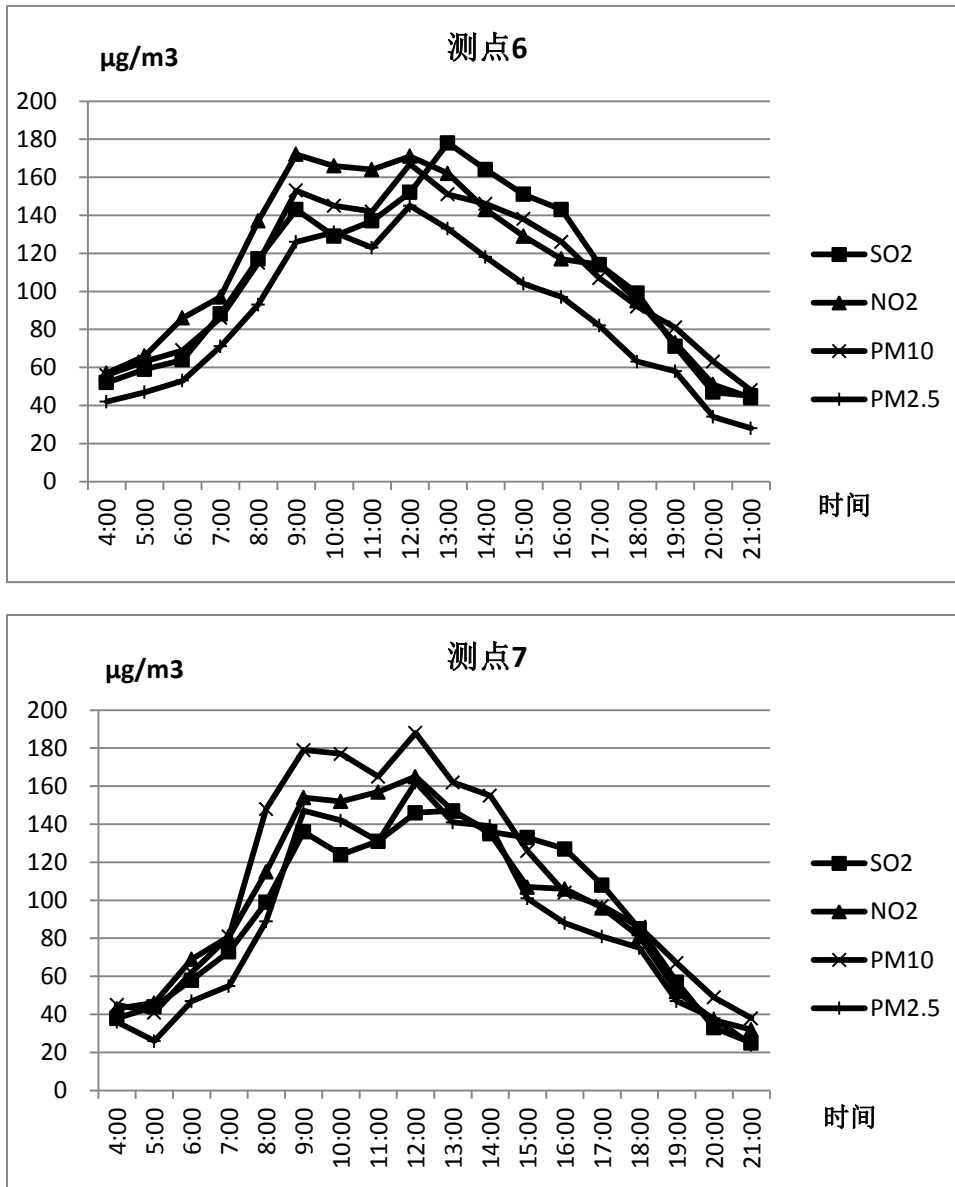


图 4.4 夏季污染物浓度变化趋势图

Fig 4.4 Trends of changes in the concentration of pollutants in summer

测点 3 位于筒仓附近，其均值浓度变化趋势是早晚低，中午浓度达到高峰，且 4 种污染物的浓度值相差不大。

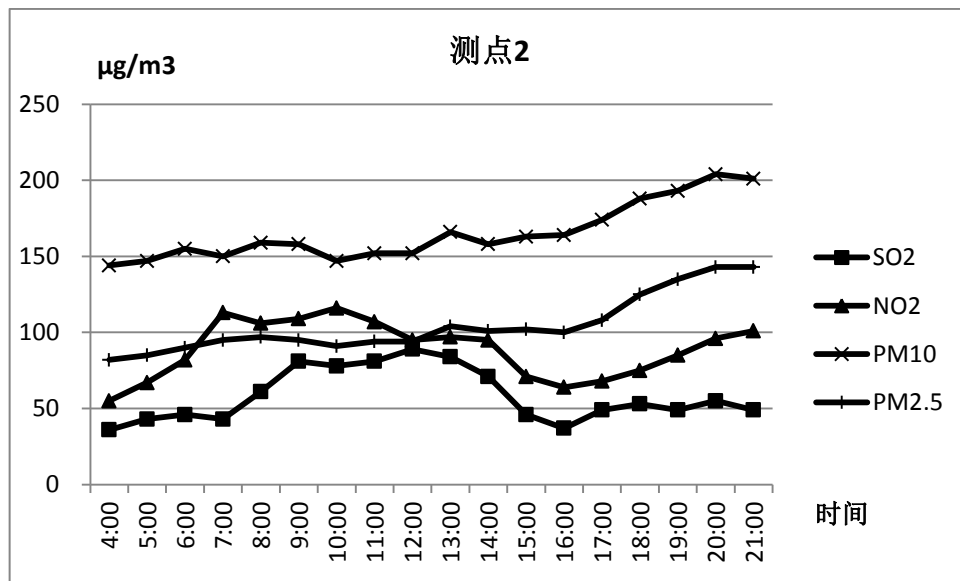
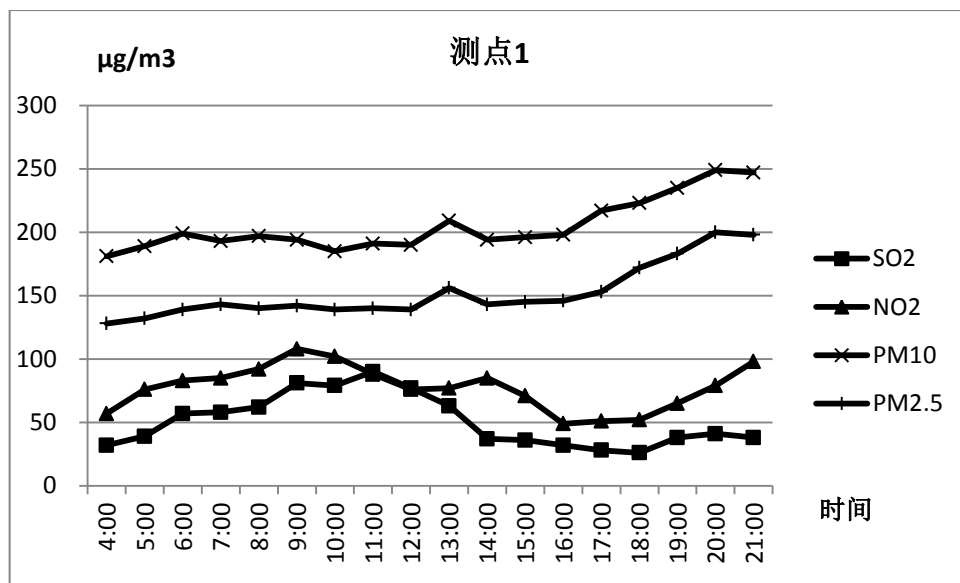
测点 4 和测点 5 位于高炉附近，其浓度变化趋势都是早晚偏低，中午有双峰的变化趋势，但 12 点左右的浓度峰值明显要大于 9 点左右的浓度峰值，4 种污染物中  $PM_{10}$  的浓度均值明显高于其他 3 种污染物的浓度，两个测点的峰值分别达到了  $218 \mu g/m^3$  和  $177 \mu g/m^3$ 。

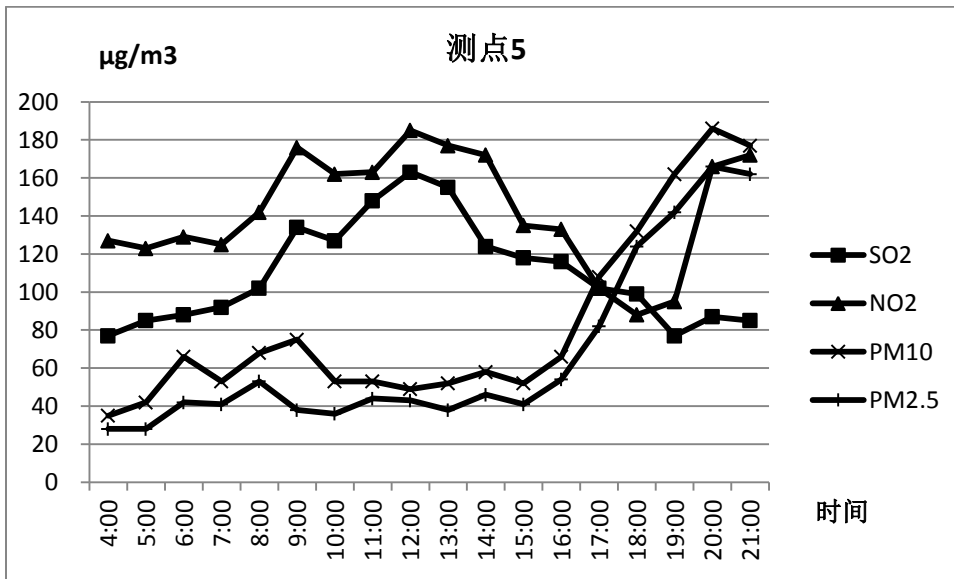
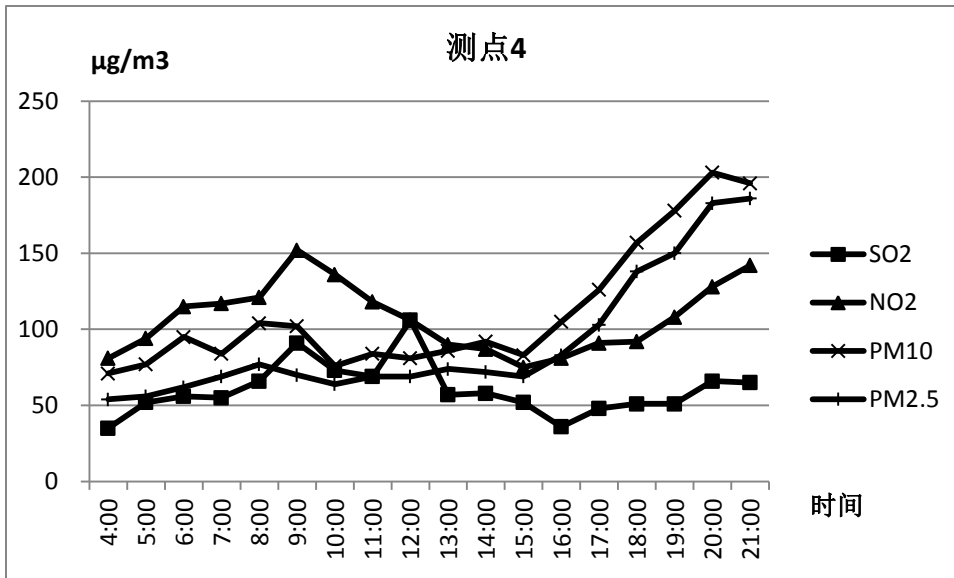
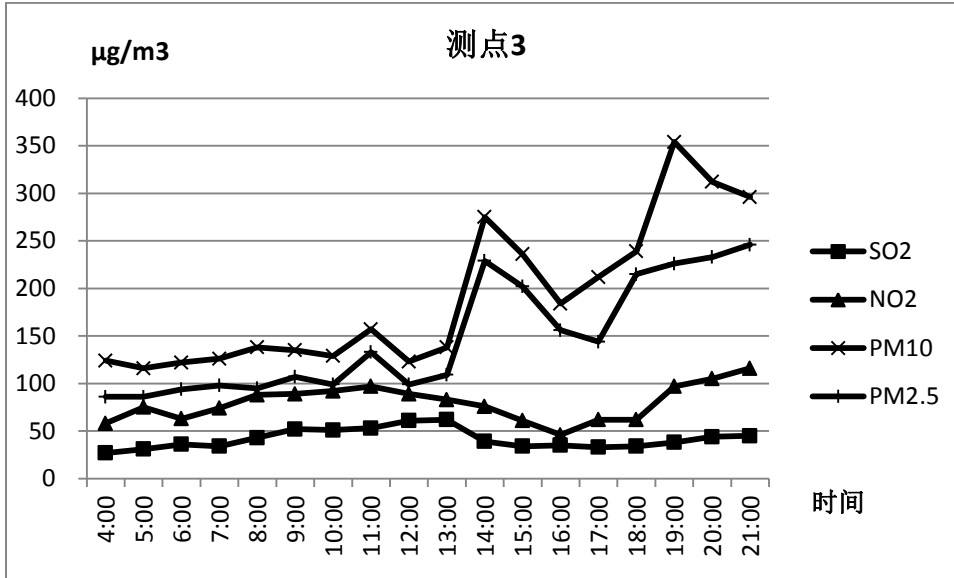
测点 6 和测点 7 位于焦炉附近，两个测点的浓度变化趋势都是早晚偏低，早上 9 点至中午 12 点左右达到两个峰值，4 种污染物的浓度值比较接近，峰值浓度

和最低值浓度相差较大，峰值浓度均超过了  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  而早晩的污染物浓度都在  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下。

图 4-5 是 2014 年 2 月 11 日至 3 月 10 日期间对各污染物浓度的监测情况，图表中每个时刻的数据是取 28 日平均均值，代表过渡季节每个污染物的变化趋势。

测点 1 和测点 2 位于料仓附近， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的 28 日均值浓度变化趋势如下图所示， $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的浓度在早上会出现峰值，下午浓度降低，晚上又有浓度回升的过程， $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度从早到晚有逐渐增大的过程，晚上达到一天的浓度最大值。





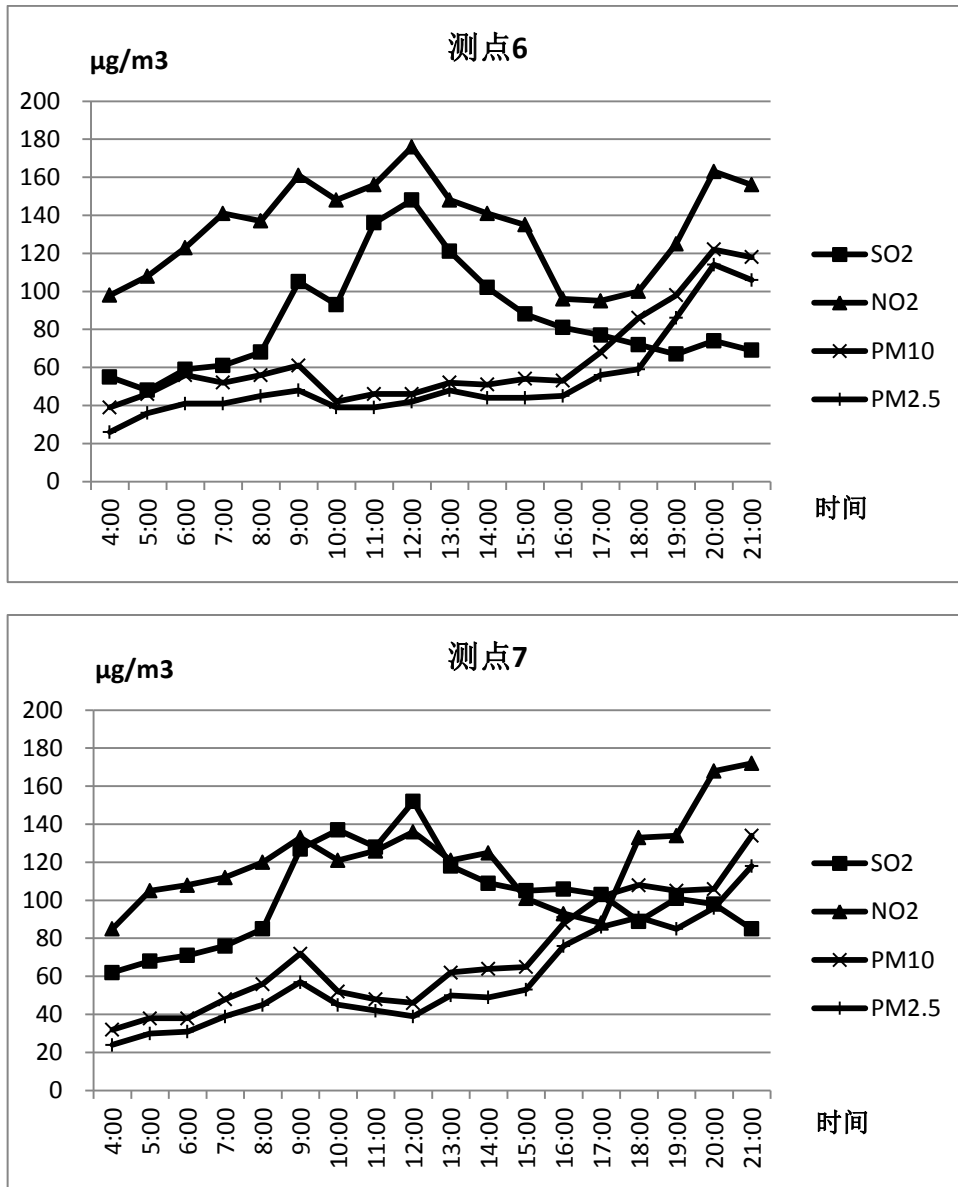


图 4.5 过渡季节污染物浓度变化趋势图

Fig 4.5 Trends of changes in the concentration of pollutants in transition season

测点 3 位于筒仓附近,  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的均值浓度均值变化不明显,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的均值浓度在 18h 的时间里有所增大的趋势, 其中在下午 14:00 左右出现了一天的峰值浓度。

测点 4 和测点 5 位于高炉附近, 这两个测点的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  浓度在早上 9:00 至中午 12:00 期间出现了较高的浓度, 下午两种污染物的浓度回落, 到晚上又有增大的趋势,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的均值浓度从早上到下午 15:00 左右保持平稳趋势, 下午 15:00 之后两者的均值浓度都有明显的提升过程。

测点 6 和测点 7 位于焦炉附近, 两个测点的  $\text{NO}_2$  均值浓度在上午 9:00 至 12:00

期间有较大的浓度，下午浓度降低，到晚上又出现上升的过程。 $\text{SO}_2$  的浓度在中午 12:00 左右出现最大值，早晚浓度都较低， $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的均值浓度在 18h 中都是处在稳步增加的过程当中。

#### 4.4.2 过渡季节和夏季污染物浓度对比

根据测试数据算出各个污染物浓度的日均值，并根据实验测试的天数对日均值进行平均计算，得到日均值的平均值。比较各污染物均值浓度在过渡季节和夏季的区别。

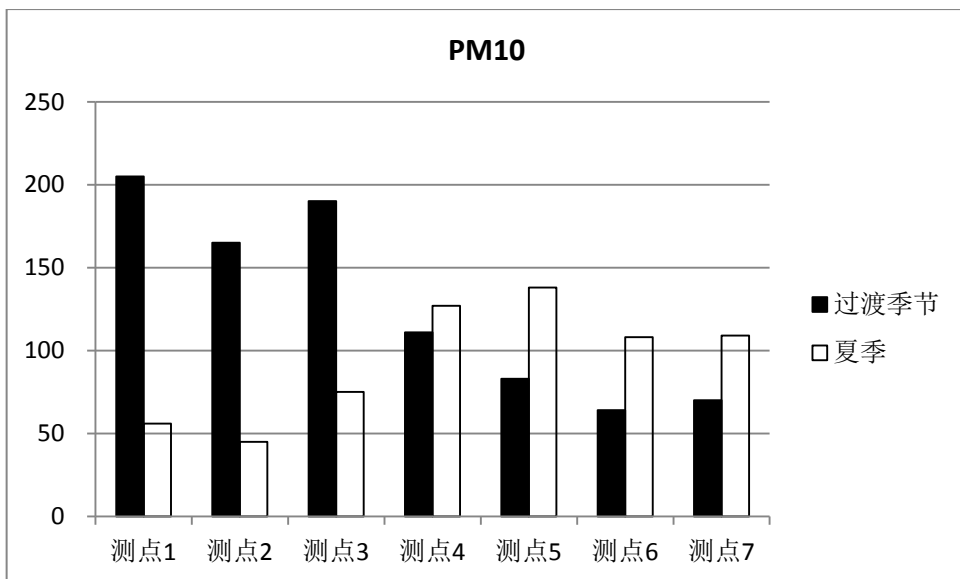
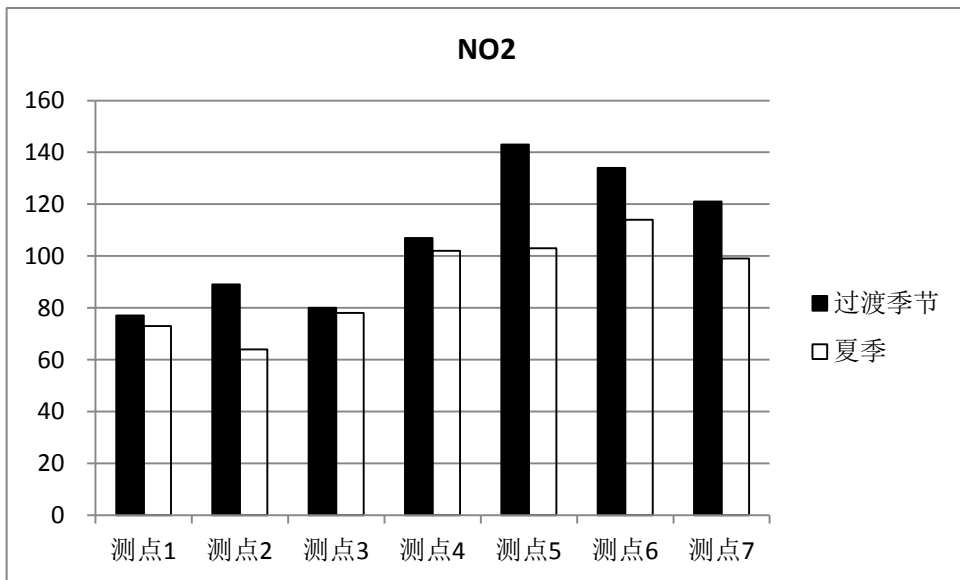
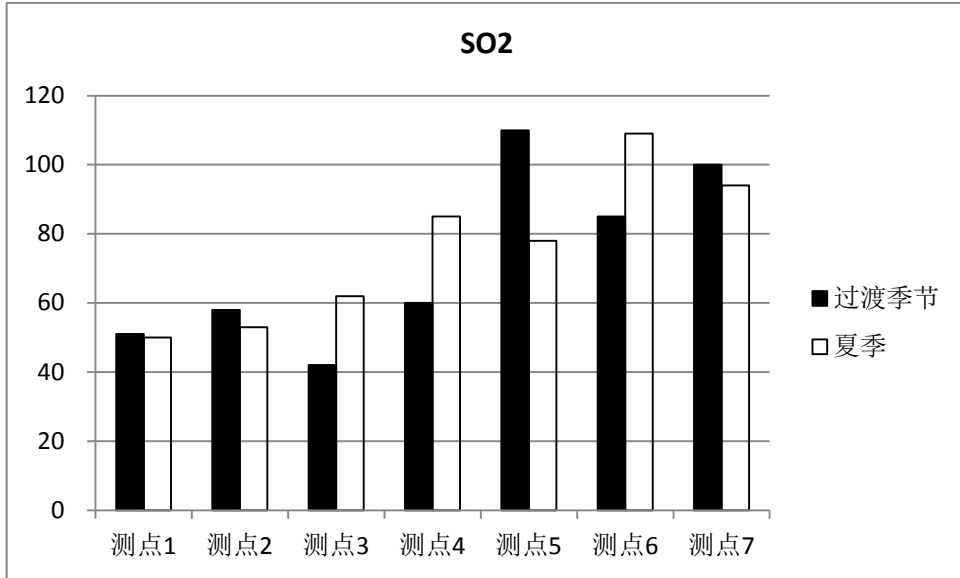
由图 4.6 可以看出  $\text{SO}_2$  的浓度中有 4 个测点是过渡季节的浓度高于夏季的浓度，3 个测点的浓度是夏季浓度高于过渡季节浓度，所以可以看出首钢老厂区内  $\text{SO}_2$  的浓度和季节没有相关性。而且 7 个测点的  $\text{SO}_2$  浓度都低于《环境空气质量标准》GB3095-1996 中的二级标准  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，场地内  $\text{SO}_2$  的浓度没有超过影响人体健康的浓度值。

$\text{NO}_2$  的均值浓度中所有测点过渡季节的浓度均值都高于夏季的浓度均值，据此可以推断首钢老工业厂区内过渡季节的  $\text{NO}_2$  浓度高于夏季厂区内的  $\text{NO}_2$  浓度，根据图中的浓度可以得知 7 个测点在两个季节 14 个均值浓度中有 6 个超过二级标准  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

$\text{PM}_{10}$  的均值浓度中有 4 个测点夏季浓度高于过渡季节，3 个测点过渡季节高于夏季浓度。过渡季节和夏季 7 个测点的 14 个测试值中 11 个测试值未达到  $\text{PM}_{10}$  二级标准  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，所以场地内大部分测点  $\text{PM}_{10}$  没有对人体健康造成不利影响。

$\text{PM}_{2.5}$  的均值浓度分布特征和  $\text{PM}_{10}$  的分布特征相似，场地内有 3 个测点夏季浓度高于过渡季节，4 个测点过渡季节高于夏季浓度。《环境空气质量标准》GB3095-2012（发布稿，未实施）中对  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度做出限制， $\text{PM}_{2.5}$  日均值一级标准为  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级标准为  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由对比图中可以看出有 8 个测点超出了  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，6 个测点浓度均值未超出二级标准  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且场地内所有测点的浓度均值都没有达到一级标准  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。





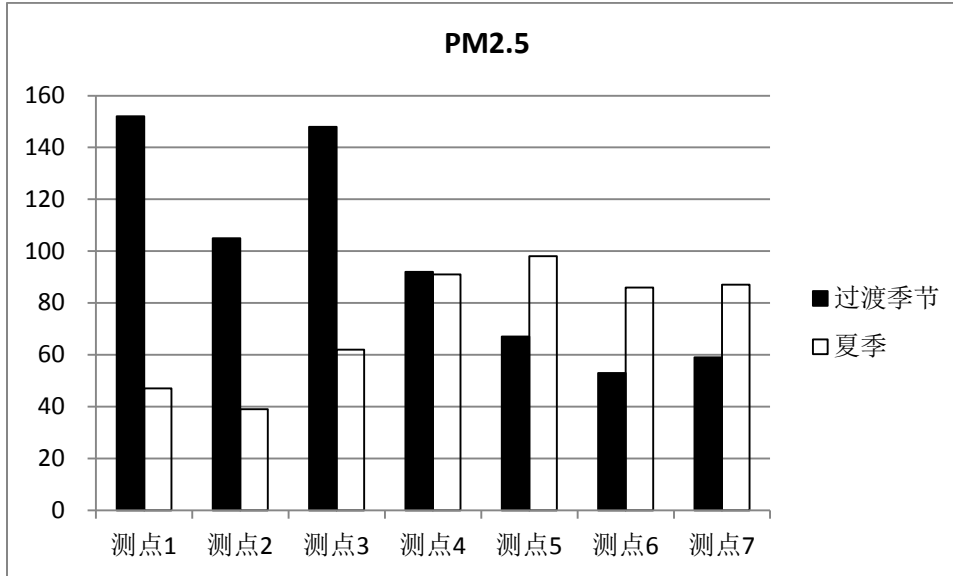


图 4.6 过渡季节和夏季不同测点污染物浓度对比

Fig 4.6 Comparison of the concentration of pollutants in different points  
between summer and transition season

#### 4.5 本章小结

本章介绍了实验测试的过程和具体方法，对首钢老厂区内污染物均值浓度的时空变化特征作了简要的分析，发现了污染物平均浓度在一天 18h 内的变化和分布特征，并且对比了过渡季节和夏季的污染物浓度水平，找到了两个季节的浓度差异。

## 5 首钢老工业区空气品质的风险评价

### 5.1 环境空气质量的模糊综合评价

#### 5.1.1 评价地点及评价内容

以本次实验地点首钢老工业厂区为评价地点，根据环境空气质量标准（GB3095-1996）的污染物限制要求和首钢重要空气污染物选取二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）、颗粒物（PM<sub>10</sub>）、颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）作为评价因子，并对测试场地的 7 个测点的室外空气质量进行评价。各空气污染物浓度数据来自于实测值，并采用污染物的日平均值的测试期间测试均值作为特征值，各项指标的具体特征值见表 5.1。

表 5.1 评价指标特征值

Tab 5.1 Evaluation eigenvalues

季节	测点	评价指标（日均值的平均值）			
		SO <sub>2</sub> /μg m <sup>-3</sup>	NO <sub>2</sub> /μg m <sup>-3</sup>	PM <sub>10</sub> /μg m <sup>-3</sup>	PM <sub>2.5</sub> /μg m <sup>-3</sup>
夏季	测点 1	50	73	56	47
	测点 2	53	64	45	39
	测点 3	62	78	75	62
	测点 4	85	102	127	91
	测点 5	78	103	138	98
	测点 6	109	114	108	86
	测点 7	94	99	109	87
	整体测点	76	90	94	73
过渡季节	测点 1	51	77	205	152
	测点 2	58	89	165	105
	测点 3	42	80	190	148
	测点 4	60	107	111	92
	测点 5	110	143	83	67
	测点 6	85	134	64	53
	测点 7	100	121	70	59
	整体测点	72	107	127	97

### 5.1.2 大气质量等级

评价等级参照《环境空气质量标准》(GB3095-1996),以日均值作为限值将空气质量划分为 I、II、III 3 个等级,它们分别代表的空气质量是清洁、轻污染、重污染 3 个水平。《环境空气质量标准》(GB3095-1996)中 NO<sub>2</sub> 的 I 级和 II 级标准都是 80 μg/m<sup>3</sup>,不便于评价,参照《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633-2012)(试行)的分级方式将 I 级标准的要求提高到 40 μg/m<sup>3</sup>。另外由于《环境空气质量标准》(GB3095-1996)没有对 PM<sub>2.5</sub> 的浓度做出限制,本文参考《环境空气质量标准》(GB3095-2012)(发布稿,未实施)和《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633-2012)(试行)的规定,将 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平也划分为 3 个等级,分别是 I 级 35 μg/m<sup>3</sup>、II 级 75 μg/m<sup>3</sup>、III 级 115 μg/m<sup>3</sup>。建立因子集 U={SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>}, 评价集 V={I, II, III}, 大气环境质量分级标准如表 5.2 所示。

表 5.2 大气质量分级标准

Tab 5.2 Air quality grading standards

污染物	评价等级		
	I 级 (清洁)	II 级 (轻污染)	III 级 (重污染)
SO <sub>2</sub> / μg · m <sup>-3</sup>	50	150	250
NO <sub>2</sub> / μg · m <sup>-3</sup>	40	80	120
PM <sub>10</sub> / μg · m <sup>-3</sup>	50	150	250
PM <sub>2.5</sub> / μg · m <sup>-3</sup>	35	75	115

### 5.1.3 建立隶属函数、计算各因子隶属度

① SO<sub>2</sub> 对各评定等级的隶属函数的建立过程如下:

对第 I 级评定等级

$$r_{11}(SO_2) = \begin{cases} 0 & SO_2 \geq 150 \\ -\frac{SO_2 - 150}{150 - 50} & 50 < SO_2 < 150 \\ 1 & SO_2 \leq 50 \end{cases}$$

对第 II 级评定等级

$$r_{12}(SO_2) = \begin{cases} 0 & SO_2 \leq 50, SO_2 \geq 250 \\ \frac{SO_2 - 50}{150 - 50} & 50 < SO_2 < 150 \\ -\frac{SO_2 - 250}{250 - 150} & 150 < SO_2 < 250 \end{cases}$$

对第 III 级评定等级

$$r_{13}(\text{SO}_2) = \begin{cases} 0 & \text{SO}_2 \leq 150 \\ \frac{\text{SO}_2 - 150}{250 - 150} & 150 < \text{SO}_2 < 250 \\ 1 & \text{SO}_2 \geq 250 \end{cases}$$

②  $\text{NO}_2$  对各评定等级的隶属函数的建立过程如下:

对第 I 级评定等级

$$r_{21}(\text{NO}_2) = \begin{cases} 0 & \text{NO}_2 \geq 80 \\ -\frac{\text{NO}_2 - 80}{80 - 40} & 40 < \text{NO}_2 < 80 \\ 1 & \text{NO}_2 \leq 40 \end{cases}$$

对第 II 级评定等级

$$r_{22}(\text{NO}_2) = \begin{cases} 0 & \text{NO}_2 \leq 40, \text{NO}_2 \geq 120 \\ \frac{\text{NO}_2 - 40}{80 - 40} & 40 < \text{NO}_2 < 80 \\ -\frac{\text{NO}_2 - 120}{120 - 80} & 80 < \text{NO}_2 < 120 \end{cases}$$

对第 III 级评定等级

$$r_{23}(\text{NO}_2) = \begin{cases} 0 & \text{NO}_2 \leq 80 \\ \frac{\text{NO}_2 - 80}{120 - 80} & 80 < \text{NO}_2 < 120 \\ 1 & \text{NO}_2 \geq 120 \end{cases}$$

③  $\text{PM}_{10}$  对各评定等级的隶属函数的建立过程如下:

对第 I 级评定等级

$$r_{31}(\text{PM}_{10}) = \begin{cases} 0 & \text{PM}_{10} \geq 150 \\ -\frac{\text{PM}_{10} - 150}{150 - 50} & 50 < \text{PM}_{10} < 150 \\ 1 & \text{PM}_{10} \leq 50 \end{cases}$$

对第 II 级评定等级

$$r_{32}(\text{PM}_{10}) = \begin{cases} 0 & \text{PM}_{10} \leq 50, \text{PM}_{10} \geq 250 \\ \frac{\text{PM}_{10} - 50}{150 - 50} & 50 < \text{PM}_{10} < 150 \\ -\frac{\text{PM}_{10} - 250}{250 - 150} & 150 < \text{PM}_{10} < 250 \end{cases}$$

对第 III 级评定等级

$$r_{33}(\text{PM}_{10}) = \begin{cases} 0 & \text{PM}_{10} \leq 150 \\ \frac{\text{PM}_{10} - 150}{250 - 150} & 150 < \text{PM}_{10} < 250 \\ 1 & \text{PM}_{10} \geq 250 \end{cases}$$

④  $\text{PM}_{2.5}$  对各评定等级的隶属函数的建立过程如下:

对第 I 级评定等级

$$r_{41}(PM_{2.5}) = \begin{cases} 0 & PM_{2.5} \geq 75 \\ -\frac{PM_{2.5} - 75}{75 - 35} & 35 < PM_{2.5} < 75 \\ 1 & PM_{2.5} \leq 35 \end{cases}$$

对第 II 级评定等级

$$r_{42}(PM_{2.5}) = \begin{cases} 0 & PM_{2.5} \leq 35, PM_{2.5} \geq 115 \\ \frac{PM_{2.5} - 35}{75 - 35} & 35 < PM_{2.5} < 75 \\ -\frac{PM_{2.5} - 115}{115 - 75} & 75 < PM_{2.5} < 115 \end{cases}$$

对第 III 级评定等级

$$r_{43}(PM_{2.5}) = \begin{cases} 0 & PM_{2.5} \leq 75 \\ \frac{PM_{2.5} - 75}{115 - 75} & 75 < PM_{2.5} < 115 \\ 1 & PM_{2.5} \geq 115 \end{cases}$$

根据模糊数学综合评价的原理，建立  $m \times n$  的隶属度矩阵，由于评价因子数  $m=4$ ，评价等级  $n=3$ ，所以需对每一年建立一个  $4 \times 3$  的隶属度矩阵  $R_x$ 。以夏季测点 1 的隶属度矩阵为例建立方式如下：

$$R_1 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.175 & 0.825 & 0 \\ 0.94 & 0.06 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \end{pmatrix} \cdots \cdots \begin{matrix} SO_2 \\ NO_2 \\ PM_{10} \\ PM_{2.5} \end{matrix}$$

#### 5.1.4 计算各污染物的权值

污染物权值的计算方法有多种，主要有标准赋权法和主因素突出赋权法，超标倍数法是主因素突出赋权法其中的一种，也就是本文第二章模糊综合评判方法原理中介绍的李祚泳等推荐的权重计算统一化公式，本文采用这种方法进行权值计算。以夏季测点 1 为例，计算方式如下所示。

$$\begin{aligned} \omega_{SO_2} &= \frac{50/150}{50/150 + 73/80 + 56/150 + 47/75} = 0.148 \\ \omega_{NO_2} &= \frac{73/80}{50/150 + 73/80 + 56/150 + 47/75} = 0.406 \\ \omega_{PM_{10}} &= \frac{56/150}{50/150 + 73/80 + 56/150 + 47/75} = 0.166 \\ \omega_{PM_{2.5}} &= \frac{47/75}{50/150 + 73/80 + 56/150 + 47/75} = 0.279 \end{aligned}$$

由此可以得到夏季测点 1 的权重集为  $A = (0.148, 0.406, 0.166, 0.279)$  各测点的权重计算结果如表 5-3 所示。

表 5.3 各测点权值大小

Tab 5.3 Weights of each point

污染物		权值大小			
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
夏季	测点 1	0.148	0.406	0.166	0.279
	测点 2	0.179	0.405	0.152	0.263
	测点 3	0.152	0.359	0.184	0.304
	测点 4	0.145	0.326	0.217	0.310
	测点 5	0.128	0.319	0.228	0.323
	测点 6	0.180	0.354	0.179	0.285
	测点 7	0.167	0.329	0.193	0.309
	整体测点	0.156	0.348	0.193	0.301
过渡季节	测点 1	0.072	0.205	0.291	0.432
	测点 2	0.097	0.278	0.275	0.350
	测点 3	0.062	0.221	0.280	0.437
	测点 4	0.108	0.361	0.200	0.331
	测点 5	0.185	0.451	0.139	0.225
	测点 6	0.168	0.496	0.126	0.209
	测点 7	0.194	0.441	0.136	0.229
	整体测点	0.121	0.338	0.214	0.327

### 5.1.5 模糊矩阵的复合运算

对 A 和 R 进行模糊矩阵复合运算，得到模糊综合评价结果。

以夏季测点 1 为例： $B = \{b_j\}_{1 \times n} = A \cdot R$

$$b_j = \sum_{i=1}^m (\omega_i \wedge \gamma_{ij}) = (0.148 \quad 0.406 \quad 0.166 \quad 0.279) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.175 & 0.825 & 0 \\ 0.94 & 0.06 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.571 \quad 0.428 \quad 0)$$

各测点的评价结果如表 5.4 所示

表 5.4 各测点综合评价结果

Tab 5.4 Comprehensive Evaluation of the results of each measuring point

监测点		B=A R	$\{b_j\}_{\max}$	评级结果
夏季	测点 1	(0.571 0.428 0)	0.571	I 级
	测点 2	(0.725 0.275 0)	0.725	I 级
	测点 3	(0.389 0.611 0)	0.611	II 级
	测点 4	(0.144 0.463 0.392)	0.463	II 级
	测点 5	(0.120 0.429 0.451)	0.451	III 级
	测点 6	(0.149 0.471 0.380)	0.471	II 级
	测点 7	(0.173 0.578 0.249)	0.578	II 级
	整体测点	(0.240 0.673 0.087)	0.673	II 级
过渡季节	测点 1	(0.087 0.321 0.592)	0.592	III 级
	测点 2	(0.089 0.545 0.366)	0.545	II 级
	测点 3	(0.062 0.333 0.605)	0.605	III 级
	测点 4	(0.175 0.440 0.384)	0.440	II 级
	测点 5	(0.212 0.337 0.451)	0.451	III 级
	测点 6	(0.333 0.171 0.496)	0.496	III 级
	测点 7	(0.298 0.262 0.441)	0.441	III 级
	整体测点	(0.144 0.448 0.408)	0.448	II 级

由评价结果可以得知,夏季 7 个测点中有 2 个测点的空气等级达到 I 级, 4 个测点的空气等级达到 II 级, 1 个测点的空气等级达到 III 级, 夏季场地内 7 个测点的平均空气质量达到 II 级, 通过对夏季场地平均空气质量的隶属度计算得知场地内空气达到 II 级时  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  四种污染物的隶属度分别为 26%、75%、44%和 95%。而过渡季节的 7 个测点中有 2 个测点的空气质量等级达到了 II 级, 5 个测点的空气质量等级达到了 III 级, 场地内 7 个测点的平均空气质量达到 II 级,  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  四种污染物的对场地内平均空气质量的隶属度分别为 22%、32.5%、77%和 45%。总体而言, 过渡季节场地内的整体空气质量 (II 级) 和夏季场地内的整体空气质量 (II 级) 是一致的。

## 5.2 本章小结

本章利用模糊综合评价法对首钢老工业区场地内的环境空气质量进行了评价,



得出了夏季和过渡季节首钢老工业厂区内 7 个测点的室外空气质量综合评价等级，且两个季节场地内整体测点的平均空气综合质量都达到了 II 级，对整体空气质量具有最大贡献率的污染物分别为  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$ ，评价结果显示该评价方法对首钢老工业区内的空气质量的评价真实可靠，且具有很高的适应性。



## 6 污染物浓度相关分析及回归模型的建立

第五章利用模糊综合评价方法对首钢老工业区进行了场地室外空气污染程度的评价，了解到场地各测点及总体的污染情况，但是这些污染物的产生到底和哪些因素相关，仍不得而知。为了解此问题，本章利用多因素方差分析的原理对可能存在的影响因素（包括污染物环境背景值、室外风速、室外温度、相对湿度）进行方差分析，并通过相关因素建立首钢老工业区污染物的预测模型。

### 6.1 方差分析

方差分析(Analysis of Variance, 简称 ANOVA), 又称“变异数分析”或“F 检验”, 它是用于两个及以上样本均数差别的显著性检验。它的目的是要检验观测变量是否根据控制变量在各水平上的取值而发生显著差异。方差分析的分析思路是利用观测值的方差来研究很多控制变量中对观测值有显著影响的那一部分变量。在有显著影响的这一部分变量中, 还需要分析出控制变量的不同水平及水平的交互搭配对观测变量的影响<sup>[55]</sup>。

方差分析结果发现观测变量受两种因素的影响: 第一类是控制变量不同水平所产生的影响; 第二类是控制变量以外的随机因素所产生的影响。这里随机因素是指认为很难控制的因素, 包含实验过程中的抽样误差, 以及许多影响细微的因素。将第一类和第二类因素的影响分别称为系统误差和随机误差。

方差分析的本质是对两个独立样本 T 检验的衍生, 变成多个独立总体的假设检验, 它是参数检验方法的一种, 它检验的是多个总体的均值有无显著差异。如果某个因素存在显著性差异, 则它对观测因素的影响就是显著的。常用的方差分析包括单因素方差分析、多因素方差分析、多元方差分析、协方差分析以及重复设计方差分析等<sup>[56]</sup>。其中多因素方差分析主要是用于分析一个观测变量是否受多个控制变量的影响, 并且可以分析各个控制变量之间是否存在交互作用而对观测变量产生影响。

由于首钢老工业区的污染物不能确定由哪些因素影响, 也不能确定是否收到假定因素的影响, 因此多因素方差分析最适合用来对污染物的影响因素进行分析, 以确定具体的影响因素。

#### 6.1.1 方差分析的条件

在应用方差分析的过程中, 必须满足以下几个条件:

首先, 控制变量各个水平上的观测变量值需要满足正态分布。方差分析属于参数检验方法其中的一种, 而所有的参数方法都对总体变量的分布有着假定描述。

在方差分析的过程当中，假设所有总体的分布都属于正态分布，这种假设是能够推导出 F 统计量服从 F 分布的前提条件，而 SPSS 软件对 P 值（sig 值）是根据 F 分布算出来的。如果总体不服从于正态分布，则 F 统计量不再服从 F 分布，所以 SPSS 计算出来的 P 值对于统计检验将毫无意义。故在进行方差分析之前，需要验证每一个总体的分布是不是属于正态分布，验证的方法可以利用 SPSS 软件中的 Q-Q 图，也可以使用单样本非参数 K-S 检验。

Q-Q 图（quantile—quantile）是一种散点分布图，在 Q-Q 图上，它的横坐标是标准正态分布的分位数，纵坐标是样本值的散点分布图。利用 Q-Q 图来区分样本数据值是否属于正态分布或者近似于正态分布，只要观察 Q-Q 图上的离散分布点是不是均匀分布在一条直线的周围，而且该直线的斜率是标准差，截距就是均值。

K-S 检验（Kolmogorov-Smirnov）是一种拟合优度检验，用来研究样本观察值的分布和指定的理论分布是否吻合。K-S 检验通过对两个分布间的差异的分析，确定样本值是否来自指定的某分布总体。K-S 检验是先比较理论和观测的累计频率分布，并计算出其最大的偏离数值，然后在某给定显著性水平上检验并分析这种偏离值的出现是否属于偶然。

其次，观测变量各个总体的方差应相同。统计上称此条件为方差齐性，它对于推导 F 统计量的分布和自由度也十分重要，假如本条件不能得到满足，则 F 统计量不再服从 F 分布，其自由度和理论上推导出来的自由度也不相同。而且 SPSS 软件计算出的 P 值（sig 值）对统计检验来说也不再适用。但是相对来说，此条件对假设检验的影响比第一个条件要小。如果上面一个条件不能得到满足，那么方差分析就完全不可用，而如果本条件不满足，还可以根据 SPSS 计算的统计量值，利用修正的自由度人工计算准确的概率 P 值，进而完成假设检验。

最后，控制变量必须是取值有限的名义尺度或者顺序尺度变量。控制变量的所有取值决定了假设检验的总体个数，因此控制变量只有取少数几个值时，才能确保各总体有充足的样本数来计算样本均值以及样本方差；如果总体的个数过多，那么各个总体的样本数量便会减少，样本均值、样本方差的计算值可能有比较大的偏差，这会影响假设检验的整体精度。此条件对假设检验的影响最小，如果不满足本条件也可人工采取措施使得方差分析能够完成。

### 6.1.2 方差分析条件不足的解决措施

对于三个控制性要求来说，我们可以得知在进行方差分析时观测变量必须满足总体呈正态分布和总体方差应该相同两个要求，而控制变量必须满足取值有限的名义尺度这个要求。三个条件当中第一个条件影响最大，第三个条件影响最小。

然而如果这些条件不能满足时应如何处理呢？当第一个条件不能满足时，则不能进行方差分析，如需比较各个总体的均值和分布是否相同时，可采用多独立

样本非参数检验的方法，如 Kruskai-Wallis 检验。

当各总体方差不齐时，只要满足总体的正态分布特征，仍然可以进行方差分析，有两个处理方法可供选择：第一个是利用组内方差和组间方差值，建立新的统计量，并推导新统计量的分布，然后统计决策；第二个是对较小方差的总体样本等比例放大，比例系数取两总体样本标准差的比值，经过处理的样本则可以进行方差分析。上述两个方法第一个方法比较准确，但可实施性较差；第二个方法比较容易实行，但是会影响方差分析一定的精度，因为这相当于人为放大了一部分总体的方差，这必然对组内方差和组间方差有影响，当总体数目较多（四个以上）时，相对而言改变一个总体的方差对整个组内方差和组间方差影响较小，可以采用这种方法。

而当控制变量是间隔尺度变量的时候，可用变量重新赋值法，划分控制变量的区间，得到一个新顺序的尺度变量，把新变量当做控制变量，则可进行方差分析的假设检验了。

### 6.1.3 多因素方差分析的原理和模型建立

多因素方差分析是一种研究两个以上控制因素是否是对观测变量有显著影响的方法，它可以检验多个因素取值水平的不同组合之间因变量的均值是否存在显著的差异。多因素方差分析既可以分析单个因素的作用，也可以分析因素之间的交互作用，还可以进行协方差分析，以及各因素变量与协变量之间的交互作用。

在建立多因素方差分析模型时，可以先假设有 A、B 两个控制因素，它们分别有 a 个水平和 b 个水平，两个因素交叉搭配形成 a×b 个水平组合，每个水平的观测变量可以表达成如下公式：

$$X_{ijk} = \mu_i + v_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, q; k = 1, 2, \dots, n_{ij}$$

上式当中， $X_{ijk}$ 表示因素 A 的第 i 个水平和因素 B 的第 j 个水平当中的第 k 个样本； $\varepsilon_{ijk}$ 表示相应的随机误差，服从正态分布；而 $\mu_i$ ， $v_j$ 分别表示因素 A 和因素 B 各自在 i 和 j 水平上的总体均值，表示两个因素对观测因素各自独立的影响； $\delta_{ij}$ 代表了两个因素的 i、j 水平的交互作用对观测变量样本的影响。

当因素 A 对观测变量没有显著影响时， $\mu_i$ 等于常数，此时变量主要受因素 B 和交互作用及随机作用的影响；同理可以分析因素 B 和交互作用 AB 对观测变量的影响。

对于因素对观测变量的影响可以从样本方差入手，只是现在计算的样本方差更多，需要对样本方差 SST 进行分解，分解方式如下：

$$SST = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{n_{ij}} (X_{ijk} - \bar{X})^2 = SSA + SSB + SSAB + SSE$$

式中， $n_{ij}$ 表示观测变量在因素 A 的  $i$  水平，因素 B 的  $j$  水平样本数。有

$$\sum_{i=1}^p n_{ij} = n_{.j}, \sum_{j=1}^q n_{ij} = n_{i.}, \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q n_{ij} = n$$

式中 $n_{i.}$ ， $n_{.j}$ 分别代表观测变量在  $i$ 、 $j$  水平边际样本数， $n$  代表样本总数。其它统计量可以定义为：

$$SSA = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q n_{ij} (\bar{X}_i^A - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^p n_{i.} (\bar{X}_i^A - \bar{X})^2$$

$$SSB = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q n_{ij} (\bar{X}_j^B - \bar{X})^2 = \sum_{j=1}^q n_{.j} (\bar{X}_j^B - \bar{X})^2$$

$$SSE = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{n_{ij}} (X_{ijk} - \bar{X}_{ij}^{AB})^2$$

$$SSAB = SST - SSA - SSB - SSE$$

式中， $SSA$  和  $SSB$  表示控制变量 A、B 分别对观测变量的影响；

$SSAB$  表示 A、B 两个控制变量的交互作用对观测变量的影响；

$SSE$  表示随机变量对观测变量的影响。

#### 6.1.4 多因素方差分析的步骤

多因素方差分析的目的是要检验各个因素单独的影响和因素之间的交互影响是否对结果存在影响，因此要利用样本方差构造统计量进行假设检验其基本步骤如下：

提出假设检验的原假设：多因素方差分析原假设为各因素在各个水平下，观测变量各总体均值无显著差异，公式表达为：

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p = \mu, \quad v_1 = v_2 = \dots = v_q = v, \quad \delta_{ij} = 0, i=1, \dots, p, j=1, \dots, q$$

选择检验统计量：选用 F 统计量，并且对三个不同的原假设要构造 3 个不同的统计量：

$$F_A = \frac{SSA/(p-1)}{SSE/(n-pq)} = \frac{MSA}{MSE}$$

$$F_B = \frac{SSB/(q-1)}{SSE/(n-pq)} = \frac{MSB}{MSE}$$

$$F_{AB} = \frac{SSAB/(p-1)(q-1)}{SSE/(n-pq)} = \frac{MSB}{MSE}$$

从上面的公式可发现，各个统计量的构造方式类似于单因素方差分析。当原假设为真时，各个统计量服从不同自由度的 F 分布。

计算样本的统计量观测值和概率 P 值：利用 SPSS 软件进行计算。如果 P 值大

于显著水平，就不能拒绝原假设，认为因素水平上无显著差异，如果 P 值小于显著水平，则需要拒绝原假设，并承认各因素水平有显著差异。

## 6.2 首钢老工业区污染物影响因素研究

本文研究的是首钢老工业区的大气环境污染情况，由于场地内的一切生产活动在 2010 年底全面停止，故不考虑炼钢、炼铁等生产因素对场地的环境影响。根据场地内的实际情况，考虑北京市大气环境背景污染物浓度、室外风速、室外温度以及相对湿度为可能的影响因素，并对其进行相关性分析。本文中首钢老工业区  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四个参数浓度为现场实测值，北京大气环境背景的污染物浓度数据来自全国城市空气质量实时发布平台<sup>[57]</sup>，并取北京市石景山区古城监测点为背景值，室外风速、室外温度和相对湿度数据来自中国气象局石景山天气预报的普通监测数据<sup>[58]</sup>。本章主要针对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四个参数在首钢老工业区内七个测点的平均值进行相关性分析，另外由于石景山古城监测站的维护和检修，没有获得 2013 年夏季的连续室外污染物浓度数据，这里仅对 2014 年春季的室外数据做研究。

### 6.2.1 污染物浓度影响因素水平划分

在进行多因素方差分析之前，必须对各个控制变量进行水平划分，以保证分析结果更加准确可靠。并且根据因素水平的划分可以了解到各因素水平的分布情况。因素水平分布见表 6.1。根据监测平台数据显示，2014 年春季测试期间室外  $\text{SO}_2$  浓度分布范围为 0-110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{NO}_2$  浓度分布范围为 0-180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{PM}_{10}$  浓度分布范围为 0-180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布范围为 0-250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，室外风速分布范围为 1-7m/s，室外温度分布范围为-3-11 $^{\circ}\text{C}$ ，环境相对湿度分布范围为 10%-80%。根据实际监测数据将每个因素都分为 4 水平。

表 6.1 污染物浓度影响因素水平分布

Tab 6.1 The distribution levels of affecting factors of pollutant concentration

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
$\text{SO}_2$ 背景值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\leq 16$	17-30	31-66	$\geq 67$
$\text{NO}_2$ 背景值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\leq 35$	36-67	68-99	$\geq 100$
$\text{PM}_{10}$ 背景值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\leq 26$	27-87	88-151	$\geq 152$
$\text{PM}_{2.5}$ 背景值 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\leq 14$	15-44	45-116	$\geq 117$
风速 (m/s)	1	2	4	7
室外温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\leq 1$	2-4	5-6	$\geq 7$
相对湿度 (%)	$\leq 16$	17-24	25-49	$\geq 50$

经过不同水平划分后， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四个参数中每种参数都会和风速、室外温度、相对湿度产生  $4^4$  个组合条件，由于笔者主要研究的是首钢老工业厂区内实测污染物浓度和室外环境各个单独参数之间的关系，而不同因素的组合对结果的影响并没有终点考虑，所以各因素水平划分只是根据其分布范围并按照 SPSS 软件的计算要求进行，而没有严格的限制。

### 6.2.2 方差分析条件检验

由方差分析的介绍可知，在进行方差分析之前必须检验各因素是否满足方差分析的要求，而首先应该满足的是各因素的所有水平上的取值必须满足正态分布。这可以利用单样本非参数 K-S 检验或者 Q-Q 来检验各因素总体是否服从正太分布，而 K-S 检验适合于大样本检验 ( $n > 2000$ )，因此这里选用 Q-Q 图来判断各假定影响因素是否满足正态分布特性。

图 6.1 至 6.7 是首钢老工业区环境假定影响因素的正态 Q-Q 图，图中横坐标表示室外各大气因素的观测值，纵坐标表示这些因素的期望正态值，如果观测值呈正态分布，则图中的散点会均匀地依附于期望值的理论直线上。从途中可以看出， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四个参数和室外风速、室外温度、相对湿度的散点分布均较好地分布在期望直线的周围，各假定影响因素均满足正态分布特征。

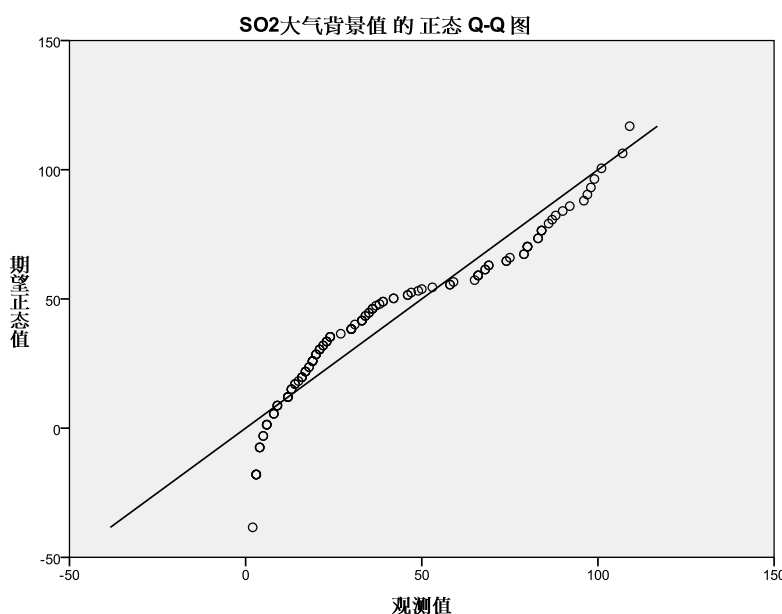


图 6.1  $\text{SO}_2$  大气背景值的正态 Q-Q 图

Fig 6.1 Gaussian distribution Q-Q figure of density of  $\text{SO}_2$  in the air



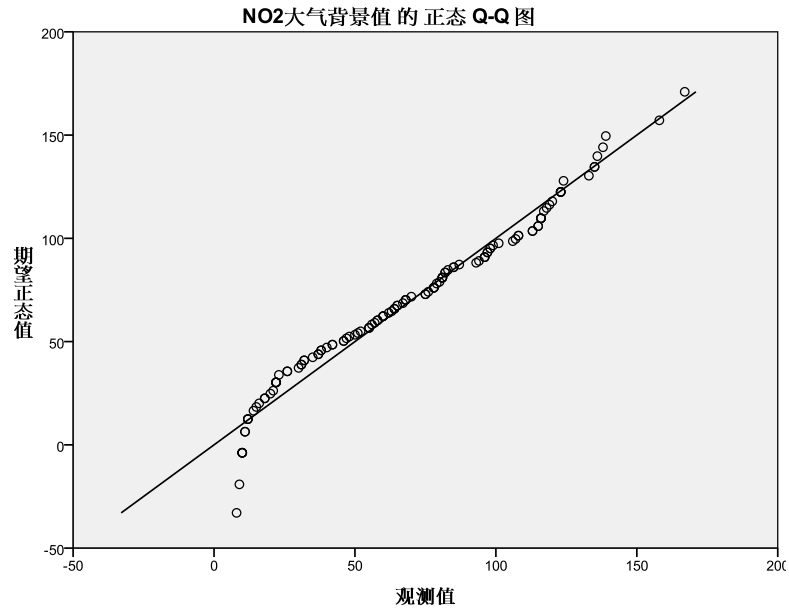


图 6.2 NO<sub>2</sub>大气背景值的正态 Q-Q 图

Fig 6.2 Gaussian distribution Q-Q figure of density of NO<sub>2</sub> in the air

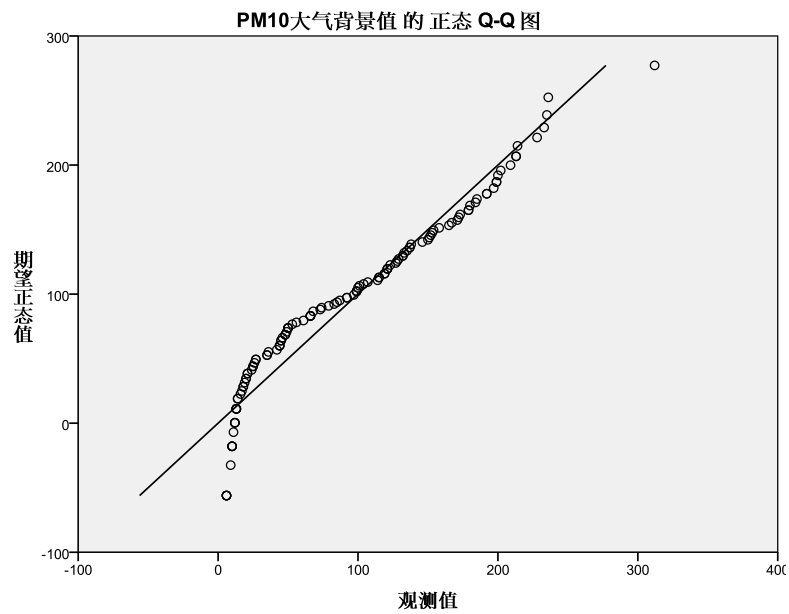


图 6.3 PM<sub>10</sub>大气背景值的正态 Q-Q 图

Fig 6.3 Gaussian distribution Q-Q figure of density of PM<sub>10</sub> in the air

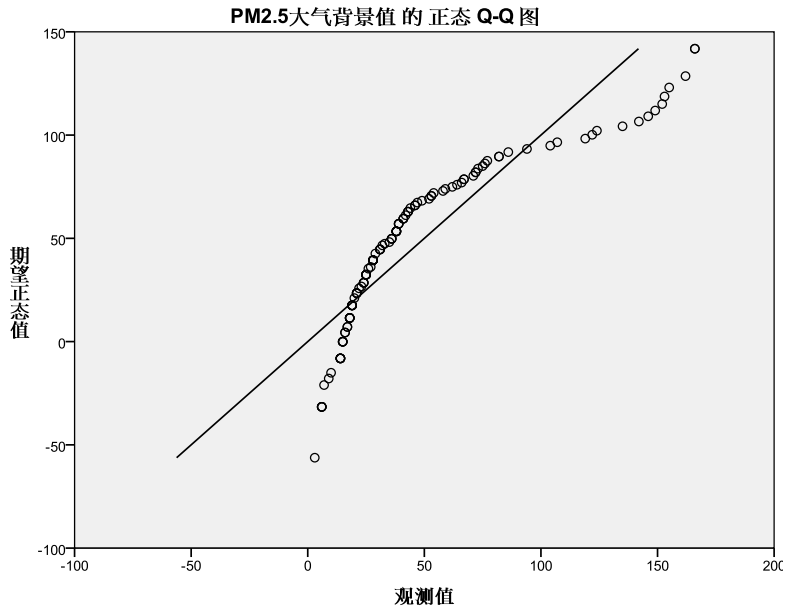


图 6.4 PM<sub>2.5</sub>大气背景值的正态 Q-Q 图

Fig 6.4 Gaussian distribution Q-Q figure of density of PM<sub>2.5</sub> in the air

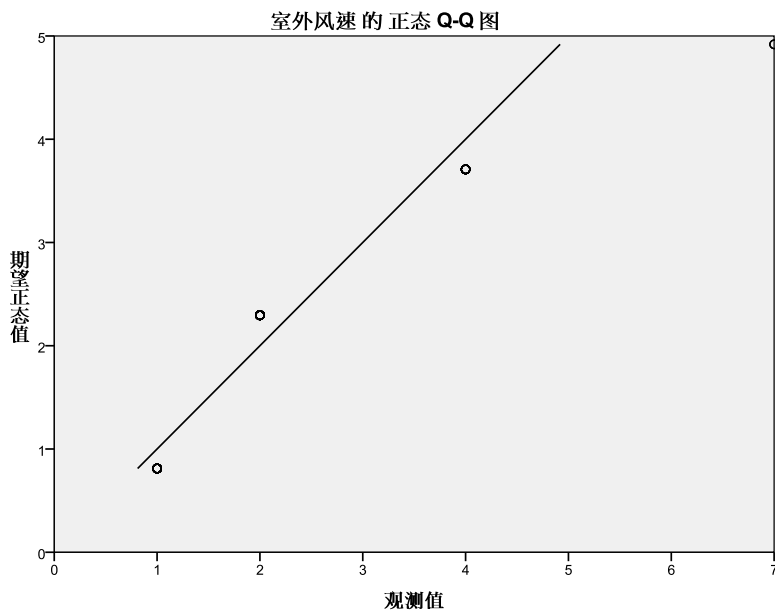


图 6.5 室外风速的正态 Q-Q 图

Fig 6.5 Gaussian distribution Q-Q figure of outdoor wind speed

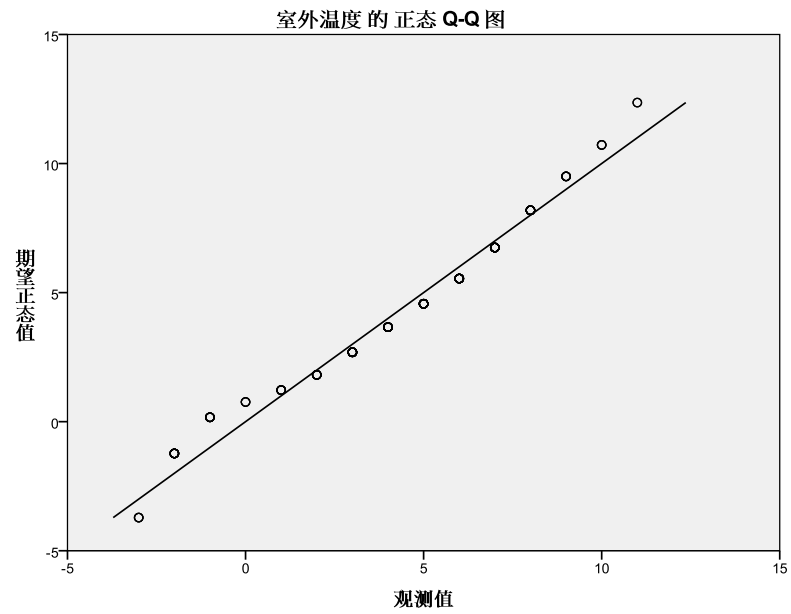


图 6.6 室外温度的正态 Q-Q 图

Fig 6.6 Gaussian distribution Q-Q figure of outdoor air temperature

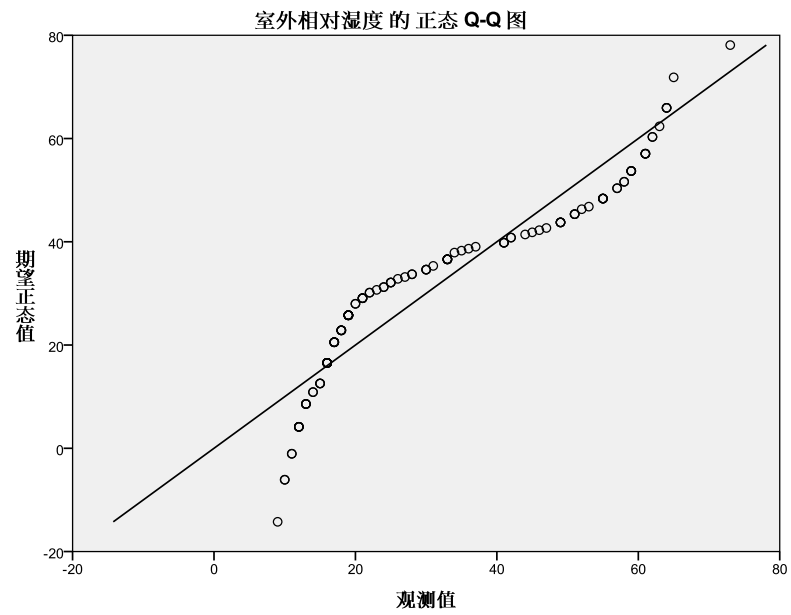


图 6.7 室外相对湿度的正态 Q-Q 图

Fig 6.7 Gaussian distribution Q-Q figure of outdoor relative humidity

### 6.2.3 各污染物多因素方差分析

表 6.2 至表 6.5 分别是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的多因素方差分析结果，分析场地内 7 个测点的污染物平均值和大气环境污染背景值、室外风速、

室外温度和相对适度的相关性。以表 6.2 为例进行说明，表中校正模型这一行表示整体的相关分析结果，表中 F 统计量的观测值为 4.581，sig 值为 0.000 小于显著性水平 0.05，则该模型具有统计学意义。该多因素方差分析的原假设为检验统计量和理论函数  $H_0$ -无差异还是  $H_1$ -有差异。因 sig 值小于显著性水平 0.05，则拒绝原假设，表明  $SO_2$  背景值、风速、温度和相对湿度至少有一个变量对场地内  $SO_2$  的浓度有显著性影响。表中  $SO_2$  背景值、风速、温度、相对湿度这几行的检验结果显示  $SO_2$  背景值和风速的 sig 值是小于 0.05 的，且从下面交互影响的几行检验结果发现，sig 值均大于 0.05，说明除了  $SO_2$  背景值和风速这两个因素外，其它因素对观测因素的影响结果都很小。综上所述， $SO_2$  背景值和风速对  $SO_2$  场地实测值存在显著性差异。

利用和  $SO_2$  相同的分析方法发现， $NO_2$  的场地实测值只有大气环境中  $NO_2$  背景值对其显著相关， $PM_{10}$  的场地实测值也只有  $PM_{10}$  的背景值对其显著相关， $PM_{2.5}$  的模型校正中 sig 值为 0.101，大于 0.05，说明场地内  $PM_{2.5}$  的实测浓度不和其它因素有显著的相关性。

表6.2  $SO_2$ 主体间效应的检验

Tab 6.2 The  $SO_2$  test result of the effect among subjects

因变量: $SO_2$ 实测值					
源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	116.555 <sup>a</sup>	48	2.428	4.581	0.000
截距	214.330	1	214.330	404.317	0.000
$SO_2$ 背景值	10.156	3	3.385	6.386	0.001
风速	5.226	3	1.742	3.286	0.025
温度	0.022	3	0.007	0.014	0.998
相对湿度	4.299	3	1.433	2.703	0.051
$SO_2$ 背景值 * 风速	6.835	4	1.709	3.223	0.067
$SO_2$ 背景值 * 温度	1.336	4	0.334	0.630	0.643
$SO_2$ 背景值 * 相对湿度	2.594	6	0.432	0.816	0.561
风速 * 温度	2.980	3	0.993	1.874	0.141
风速 * 相对湿度	2.005	5	0.401	0.756	0.584
温度 * 相对湿度	2.552	5	0.510	0.963	0.446
误差	40.818	77	0.530		
总计	925.000	126			
校正的总计	157.373	125			

表6.3 NO<sub>2</sub>主体间效应的检验Tab 6.3 The NO<sub>2</sub> test result of the effect among subjects

因变量:NO <sub>2</sub> 实测值					
源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	109.799 <sup>a</sup>	54	2.033	3.159	0.000
截距	208.692	1	208.692	324.218	0.000
NO <sub>2</sub> 背景值	17.109	3	5.703	8.860	0.000
风速	2.390	3	0.797	1.238	0.302
温度	0.196	3	0.065	0.101	0.959
相对湿度	3.996	3	1.332	2.069	0.112
NO <sub>2</sub> 背景值 * 风速	4.557	5	0.911	1.416	0.229
NO <sub>2</sub> 背景值 * 温度	2.999	8	0.375	0.582	0.789
NO <sub>2</sub> 背景值 * 相对湿度	3.758	8	0.470	0.730	0.665
风速 * 温度	3.519	3	1.173	1.823	0.151
风速 * 相对湿度	5.797	5	1.159	1.801	0.124
温度 * 相对湿度	3.131	5	0.626	0.973	0.440
误差	45.701	71	0.644		
总计	943.000	126			
校正的总计	155.500	125			

表6.4 PM<sub>10</sub>主体间效应的检验Tab 6.4 The PM<sub>10</sub> test result of the effect among subjects

因变量:PM <sub>10</sub> 实测值					
源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	100.783 <sup>a</sup>	55	1.832	2.347	0.000
截距	208.406	1	208.406	266.966	0.000
PM <sub>10</sub> 背景值	7.561	3	2.520	3.228	0.028
风速	6.651	3	2.217	2.840	0.144
温度	5.058	3	1.686	2.160	0.101
相对湿度	1.054	3	0.351	0.450	0.718
PM <sub>10</sub> 背景值 * 风速	9.942	5	1.988	2.547	0.136
PM <sub>10</sub> 背景值 * 温度	1.230	5	0.246	0.315	0.902

因变量:PM <sub>10</sub> 实测值					
PM <sub>10</sub> 背景值 * 相对湿度	6.582	8	0.823	1.054	0.405
风速 * 温度	0.916	3	0.305	0.391	0.760
风速 * 相对湿度	11.533	4	2.883	3.693	0.109
温度 * 相对湿度	3.872	4	0.968	1.240	0.302
误差	54.645	70	0.781		
总计	928.000	126			
校正的总计	155.429	125			

表6.5 PM<sub>2.5</sub>主体间效应的检验

Tab 6.5 The PM<sub>2.5</sub> test result of the effect among subjects

因变量:PM <sub>2.5</sub> 实测值					
源	III 型平方和	df	均方	F	Sig.
校正模型	93.523 <sup>a</sup>	52	1.799	2.196	0.101
截距	188.878	1	188.878	230.653	0.000
PM <sub>2.5</sub> 背景值	3.019	3	1.006	1.229	0.305
风速	7.718	3	2.573	3.142	0.113
温度	2.112	3	0.704	0.860	0.466
相对湿度	8.756	3	2.919	3.564	0.161
PM <sub>2.5</sub> 背景值 * 风速	6.755	4	1.689	2.062	0.095
PM <sub>2.5</sub> 背景值 * 温度	6.211	5	1.242	1.517	0.195
PM <sub>2.5</sub> 背景值 * 相对湿度	4.701	8	0.588	0.718	0.675
风速 * 温度	3.525	3	1.175	1.435	0.240
风速 * 相对湿度	3.493	4	0.873	1.066	0.379
温度 * 相对湿度	3.190	4	0.797	0.974	0.427
误差	59.779	73	0.819		
总计	916.000	126			
校正的总计	153.302	125			

### 6.3 首钢老工业区污染物回归模型的建立

通过上述的方差分析可以发现首钢老工业厂区内 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的浓度（7 个测点的均值浓度）都有相关因素对其实测值显著相关，因此可以建立三者的线性回归模型。利用 SPSS 软件对三者进行线性回归分析，回归参数如下表所示（表

6.6 至表 6.8)。可以看到回归参数表中 sig 值均小于显著性水平 0.05，表明控制因素与观测因素显著相关。表中非标准化系数的 B 值为线性回归的系数值。根据回归模型参数表可以得到各线性回归方程。

$$\text{SO}_2 \text{ 实测值} = 1.010 \times \text{SO}_2 \text{ 背景值} + 4.280 \times \text{风速} + 24.878 \quad R^2 = 0.742$$

$$\text{NO}_2 \text{ 实测值} = 0.679 \times \text{NO}_2 \text{ 背景值} + 60.474 \quad R^2 = 0.659$$

三个回归方程中，SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的回归模型决定系数 (R<sup>2</sup> 值) 较大，分别为 0.742 和 0.659，表示分别有 74.2% 和 65.9% 的数据进入回归模型，而 PM<sub>10</sub> 的回归模型决定系数较小，只有 18.6% 的数据进入回归模型，回归模型意义不大，故未列出回归方程式。

表6.6 SO<sub>2</sub>回归模型参数表Tab 6.6 SO<sub>2</sub> regression model parameter table

模型	系数 <sup>a</sup>			t	Sig.
	非标准化系数		标准系数		
	B	标准误差	试用版		
(常量)	25.642	4.457		5.753	0.000
SO <sub>2</sub> 背景值	0.979	0.054	0.908	18.247	0.000
风速	3.914	1.323	0.147	2.959	0.004

表6.7 NO<sub>2</sub>回归模型参数表Tab 6.7 NO<sub>2</sub> regression model parameter table

模型	系数 <sup>a</sup>			t	Sig.
	非标准化系数		标准系数		
	B	标准误差	试用版		
(常量)	60.474	3.481		17.373	0.000
NO <sub>2</sub> 背景值	0.679	0.044	0.812	15.495	0.000

表6.8 PM<sub>10</sub>回归模型参数表Tab 6.8 PM<sub>10</sub> regression model parameter table

模型	系数 <sup>a</sup>			t	Sig.
	非标准化系数		标准系数		
	B	标准误差	试用版		
(常量)	166.247	9.247		17.978	0.000
PM <sub>10</sub> 背景值	-0.418	0.078	-0.432	-5.328	0.000

## 6.4 本章小结

本章介绍了多因素方差分析的原理和分析方式，并利用多因素方差分析对首钢老工业厂区内的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物进行了因素相关性分析，并发现了对这几种污染物分别有显著性影响的因素，其中  $\text{PM}_{2.5}$  没有发现对其有显著性影响的因素。最后利用线性模型对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  这两种污染物建立了回归模型。



## 7 结论与展望

### 7.1 本文工作和结论

中国的老工业钢铁基地历经几十年的发展，现在面临着产业转型的问题，一些原有的城市中的生产基地因为生产模式粗放、能源利用效率不高、产生较大量的污染气体而需要搬迁到新的区域进行高效生产，那么这些老工业区就需要被改造成其它商业或办公建筑以再利用，而场地内的空气环境质量是否满足对人体的健康要求，则需要实测分析。

本次研究分别在 2013 年 7 月 1 日至 7 月 30 日和 2014 年 2 月 11 日至 3 月 10 日两段时间选取了首钢石景山老工业厂区对其空气质量进行了实测，每天测试时间为早 4:00 至晚 21:00，测试数据中由于 2013 年夏季降雨对空气质量的影响只截取了 7 月 19 日至 7 月 25 日期间的数据进行分析，实测数据显示 4 种污染物浓度每天 9:00 至 12:00 期间会达到浓度峰值，而早晚浓度值较低。2014 年春季的实测数据显示  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的浓度在早上 9:00 左右和晚上都会出现浓度的峰值，而  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度值从早到晚有缓步上升的趋势。

经对比分析发现，过渡季节和夏季的  $\text{SO}_2$  浓度无可比性，但都不超过《环境空气质量标准》中的二级标准，所有测点  $\text{NO}_2$  在过渡季节的浓度均超过了夏季浓度，且  $\text{NO}_2$  在过渡季节和夏季的 14 个测试值中有 6 个超过了《环境空气质量标准》中的二级标准， $\text{PM}_{10}$  在过渡季节和夏季的 14 个测试值中有 3 个超过了《环境空气质量标准》中的二级标准， $\text{PM}_{2.5}$  在过渡季节和夏季的 14 个测试值中有 8 个超过了《环境空气质量标准》中的二级标准。由此看出首钢老工业厂区内超过二级标准最多的污染物为  $\text{PM}_{2.5}$ 。

本文中还利用模糊综合评价法对首钢老工业区的空气综合污染状况作出了风险评价，评价了 7 个测点的均值即厂区内整体空气环境的质量。模糊综合评价结果显示夏季场地内整体空气质量达到 II 级， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的隶属度分别为 26%、75%、44%和 95%，过渡季节场地内整体空气质量也达到 II 级， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物的隶属度分别为 22%、32.5%、77%和 45%。

文章对过渡季节场地内的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  四种污染物进行了相关性分析，并通过多因素方差分析发现场地内  $\text{SO}_2$  浓度的影响因素为  $\text{SO}_2$  大气环境背景值和风速， $\text{NO}_2$  浓度的影响因素为  $\text{NO}_2$  大气环境背景值， $\text{PM}_{10}$  浓度的影响因素为  $\text{PM}_{10}$  大气环境背景值， $\text{PM}_{2.5}$  没有发现相应的影响因素对其有显著影响。通过显著性分析后对三种污染物在过渡季节建立了回归模型（其中的  $\text{PM}_{10}$  决定系数过小，故舍去其回归方程）：

$$\text{SO}_2 \text{ 实测值} = 1.010 * \text{SO}_2 \text{ 背景值} + 4.280 * \text{风速} + 24.878 \quad R^2 = 0.742$$

$$\text{NO}_2 \text{ 实测值} = 0.679 * \text{NO}_2 \text{ 背景值} + 60.474 \quad R^2 = 0.659$$

两个回归模型中,SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的回归模型的决定系数分别达到了0.742和0.659,决定系数较高,模型具有较高的准确性。

本文通过对首钢老工业厂区内四种典型空气污染物的研究给老工业厂区的改造提供了数据参考,并为老工业厂区内的环境修复工作提供了数据基础。

## 7.2 展望

本文研究了首钢大气环境主要污染物的污染特征,但由于时间和本人能力的限制,本文对首钢老工业区的环境空气污染的研究还有一些不足之处:

本文只对厂区内春季和夏季做了测试,而秋冬季节没有实测,若能测试每个典型季节的数据并进行分析将会更具代表性,本文在首钢老工业区的测试只布置了7个测点,测点位置比较稀疏,若能增加一些测点以覆盖整个厂区范围内则会对厂区内环境污染的掌握更加全面。

本文仅对首钢老工业区的空气污染状况作出调查研究,而没有涉及对厂区内环境改造方式的研究,希望有兴趣的研究者针对这方面进行研究,并能把研究成果落实到对首钢老工业区的改造工程当中。

## 致 谢

本论文的工作是在我的导师李楠副教授的指导下完成的，李楠老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我很大的影响，在此衷心感谢三年来李楠老师对我的关心和指导。

同时还要感谢李百战教授、丁勇教授、刘红教授、刘猛教授、罗庆副教授、高亚锋老师和喻伟老师在平时的学习生活中给予我的启迪。

感谢清华大学李匡老师和首钢工作人员在我实验测试期间的帮助，使我能够顺利地完成实验测试。

感谢我的同门范瑞娟、李芸、刘皓、纪如飞、朱荣鑫和刘庆在我学习生活中的一些帮助。

最后，感谢在百忙之中抽出时间评阅论文和参加答辩的各位专家、教授。

谢文华

二〇一四年五月 于重庆



## 参考文献

- [1] 韩剑宏. 钢铁工业环保技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006,7:153-294.
- [2] 《钢铁产业调整和振兴规划》[R], 中华人民共和国国务院办公厅, 2009.
- [3] 李光强, 朱诚意. 钢铁冶金的环保与节能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006, 8:75-80.
- [4] 张钦楠 著. 《建筑设计方法学》[M]. 山西科学技术出版. 1995.
- [5] G. W. Pagea, R. S. Bergerb. Characteristics and land use of contaminated brownfield properties in voluntary cleanup agreement programs[J]. Land Use Policy,2006,23:551-559.
- [6] S. Schäler, M. Morio, S. Bartke, R. Rohr-Zänker, M. Finkel. Designing sustainable and economically attractive brownfield revitalization options using an integrated assessment model[J]. Journal of Environmental Management, 2001,92:827-837.
- [7] Raffaele Laforzezza,Robert C. Corry, Giovanni Sanesi, Robert D. Brown. Visual preference and ecological assessments for designed alternative brownfield rehabilitations[J]. Journal of Environmental Management, 2008, ,89:257-269
- [8] Gareth Thornton, Martin Franz, David Edwards, Gernot Pahlen, Paul Nathanail. The challenge of sustainability: incentives for brownfield regeneration in Europe[J]. Environmental science & policy, 2007, 10:116-134
- [9] 钱锋 著. 《中国近代建筑研究与保护》(二): 《上海近代优秀产业建筑保护意义策略研究》[M]. 清华大学出版社. 2001.
- [10] Fangfang Cheng, Stan Geertman, Monika Kuffer,Qingming Zhan. An integrative methodology to improve brownfield redevelopment planning in Chinese cities: A case study of Futian, Shenzhen[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2011,35:388-398
- [11] Lina Sun, Yong Geng, Joseph Sarkis, Mingming Yang, Fengming Xi, Yaohua Zhanga, Bing Xue, Qing Luo, Wanxia Ren, Tong Bao. Measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a Chinese brownfield redevelopment site: The case of Shenyang[J]. Ecological Engineering, 2003,53:115-119
- [12] Hao Wu,Chuan Chen.A pilot case study of brownfield high-density housing development in China[J].International Journal of Housing Markets and Analysis,2010, 3(2):119-131
- [13] 石平, 付艳华, 张广新, 郭爽. 辽宁省城市工业废弃地的植物修复研究[J]. 生态环境, 2013,7:149-152
- [14] 赵超. 城市工业废弃地活力重生的景观修复途径研究[D]. 昆明理工大学, 2011
- [15] 俞孔坚, 方琬丽. 中国工业遗产初探[J]. 建筑学报, 2006,8

- [16] 中华人民共和国国家标准—环境空气质量标准— GB3095-1996[S].北京:中国标准出版社, 1996
- [17] 中华人民共和国国家标准—室内空气质量标准— GB/T 18883-2002[S].北京: 中国标准出版社, 2003
- [18] <http://www.epa.gov/air/criteria.html> [S]. U.S. Environmental Protection Agency
- [19] Zadeh L A. Fuzzy Sets [J]. Inf.Cont. 1965,8:338-358
- [20] 童英伟, 刘志斌, 初玲玲. 基于模糊综合评价的大气环境质量评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27
- [21] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [22] TIAN Hui, ZHAO Hai-qing, GUO Xiao-dong, DU Ji-zhong. Evaluation of Ecological Environment in Jingxin Wetland Using Analytic Hierarchy Process[J]. Meteorological and Environmental Research,2012,3(12):60-62
- [23] Ludovic-Alexandre Vidal,Franck Marle,Jean-Claude Bocquet.Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects[J].Expert Systems with Applications,2011, 38(5): 5388-5405
- [24] Mónica Garc á Mel ón,Pablo Aragon é s Beltran,M. Carmen Gonz ález Cruz.An AHP-based evaluation procedure for Innovative Educational Projects: A face-to-face vs. computer-mediated case study[J].Omega,2008, 36(5):754-765
- [25] Pi-Fang Hsua,Cheng-Ru Wub, Ya-Ting Li.Selection of infectious medical waste disposal firms by using the analytic hierarchy process and sensitivity analysis[J].Waste Management,2008, 28(8):1386-1394
- [26] 何璠. 基于 BP 神经网络的环境质量评价模型研究[D]. 四川大学, 2006
- [27] 胡守仁. 神经网络导论[M]. 国防科技大学出版社, 1992
- [28] 焦李成. 神经网络的应用与实现[M]. 西安电子科技大学出版社, 1995
- [29] Yin Li,Chao-kui Li,Jian-jun Tao,Li-dong Wang.Study on Spatial Distribution of Soil Heavy Metals in Huizhou City Based on BP--ANN Modeling and GIS[J].Procedia Environmental Sciences,2011,10:1953-1960
- [30] Dahe Jianga,Yang Zhanga,Xiang Hua,Yun Zenga,Jianguo Tanb,Demin Shaob.Progress in developing an ANN model for air pollution index forecast[J].Atmospheric Environment,2004, 38(40):7055-7064
- [31] 张桂芳, 汤广发, 李念平, 张泠, 黄宇.室内空气品质的灰色综合评判[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2001,10(28)
- [32] 李念平, 朱赤晖, 文伟.室内空气品质的灰色评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2002,8(29)

- [33] 文伟, 李念平, 朱赤晖. 室内空气品质主观评价与室内空气污染物的灰色系统关联度分析[J]. 建筑热能通风空调, 2001,6
- [34] 徐卫国, 张清宇, 陈英旭. 空气质量评价灰色聚类修正模型的建立与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,6(40)
- [35] 陆雍森. 环境评价[M]. 同济大学出版社, 1990, : 96-97
- [36] 张小彬. 哈尔滨市某地下商场空气品质评价与数值模拟[D]. 哈尔滨工程大学, 2006
- [37] 王东梅. 室内空气品质评价系统研究[D]. 西南交通大学, 2007
- [38] 舒爱霞, 李孜军, 邓艳星, 郭宁. 综合指数评价法在室内空气品质评价中的应用[J]. 化工装备技术, 2010,31(2)
- [39] 赵昌旭. 中国钢铁产业组织研究—基于有效竞争的视角[D]. 华中科技大学, 2006
- [40] 杜春丽. 基于循环经济的中国钢铁产业生态效率评价研究[D]. 中国地质大学, 2009
- [41] 李拥军. 2012年中国钢铁产业集中度指标分析[J]. 冶金经济与管理, 2013(4)
- [42] 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础[M]. 北京: 科学出版社, 1993,55-66
- [43] 徐泮来. 绿色钢铁的生产流程与环境协调性分析研究[D]. 西安建筑科技大学, 2010
- [44] 李士琦, 郁健, 李京社. 电弧炉炼钢技术进展[J]. 中国冶金, 2010,20(4)
- [45] 侯伟. 电弧炉炼钢的能量节约与利用[D]. 西安建筑科技大学, 2010
- [46] 张晶, 陈宗良, 王玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析[J]. 环境科学学报, 1998,18(1)
- [47] 刘咸德, 贾红, 齐建兵, 张冀强. 青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别[J]. 环境科学研究, 1994,7(3)
- [48] Dreher, k, Jaskot, R.H., Lehmann, J.R., et al. Soluble transition metals mediate residual oil fly ash induced lung injury. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1995,50:285-305.
- [49] 贾玉巧, 赵晓红, 郭新彪. 大气颗粒物  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  对人肺成纤维细胞及其炎症因子分泌的影响[J]. 环境与健康杂志, 2011,28(3)
- [50] 戴海夏, 宋伟民. 大气  $PM_{2.5}$  的健康影响[J]. 国外医学卫生学分册, 2001,28(5)
- [51] Schwartz J. [J]. *Am J Epidemiol*, 2000,151(5):440-448
- [52] 吴国平, 胡伟, 滕恩江, 魏复盛. 室外空气污染对成人呼吸系统健康影响的分析[J]. 中国环境监测, 2001, 17(7)
- [53] 孟紫强, 桑楠, 张波, 张建彪. 二氧化硫体内衍生物诱发中国仓鼠肺细胞微核的效应[J]. 环境与健康杂志, 2001,18(1)
- [54] 邱榕, 范维澄. 火灾常见有害燃烧产物的生物毒理 (II) ——一氧化氮、二氧化氮[J]. 火灾科学, 2001,10(4)
- [55] 夏怡凡. SPSS 统计分析精要与实例讲解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- [56] 杜强, 贾丽艳. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009
- [57] <http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>
- [58] <http://www.weather.com.cn/weather/101011000.shtml>





## 附 录

### A. 作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] 谢文华, 李楠. 中国重点城市大气质量特征研究及评价. 中国科技论文在线, 2014.

### B. 作者在攻读硕士学位期间获得的专利

- [1] 一种笔记本电脑的散热装置, 201310019056.7, 第五专利人, 2013-01-19, 发明专利, 国家专利局.

### C. 作者在攻读硕士学位期间参与的主要项目目录

- [1] 原有工业建筑功能提升与生态改造关键技术与示范, 2011BAJ06B03, 科技部国家科技支撑计划重点项目, 2011.1.1-2013.12.31.
- [2] 夏热冬冷地区建筑节能关键技术研究示范项目, 2011BAJ03B13, 国家“十二五”科技支撑计划重大项目课题, 2011.1.1-2015.12.1.

