

分类号: X52
学号: 20222107094

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



石河子地区有组织废气中颗粒物组分分析 及其对环境空气质量影响的研究

学位申请人 卡那特·海拉提

指导教师 李维军 (正高级工程师)

申请学位类别 专业硕士

学科、专业名称 材料与化工

研究方向 环境化工

所在学院 化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年06月

分类号: X52
学号: 20222107094

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



石河子地区有组织废气中颗粒物组分分析 及其对环境空气质量影响的研究

学位申请人	卡那特·海拉提
指导教师	李维军（正高级工程师）
申请学位类别	专业硕士
学科、专业名称	材料与化工
研究方向	环境化工
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年06月

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Professional Master's Degree

By

KaNaTe
(Materials and Chemicals)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Weijun

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：  时间：2025年5月27日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：  时间：2025年5月27日

导师签名：  时间：2025年5月28日

摘要

本研究聚焦于石河子地区，旨在深入剖析有组织废气中颗粒物组分特征及其对环境空气质量的影响，为区域大气污染精准治理提供科学依据。研究期间，在石河子地区针对重点行业有组织废气展开广泛采样，并对环境空气进行长期监测。运用离子色谱、ICP-MS等先进技术，对采集样品中的颗粒物组分进行细致分析，同时借助源解析技术和环境空气质量模型，全面评估其对环境的影响。

研究结果显示，2020 - 2024年石河子地区的硅业、水泥、铝业等支柱产业蓬勃发展，在推动经济显著增长的同时，却引发了严峻的大气污染问题。以硅业为例，其生产过程不仅造成周边环境氟化物和颗粒物污染，还致使周边土壤和水体中的氟化物含量大幅上升。2024年不同季节的监测数据表明，PM_{2.5}、PM₁₀平均浓度超标情况频发，其中冬季的污染状况最为严重。深入研究发现，各行业排放的颗粒物组分差异显著。硅厂排放物中，氟化物与硅元素含量突出；水泥厂排放则以钙、硅等元素为主；铝厂排放的颗粒物富含铝及相关化合物。通过源解析技术进一步确定，工业源、交通源、扬尘源是石河子地区大气颗粒物的主要来源，且这些污染源的贡献比例会随季节更替和区域变化而改变。气象条件方面，温度、湿度、风速和风向等因素对颗粒物的排放和转化影响深远。如低温、高湿和低风速的气象条件，会严重阻碍污染物的扩散，进而导致颗粒物浓度急剧升高。

通过多种环境空气质量模型的综合评估，证实有组织废气颗粒物对石河子地区环境空气质量影响巨大，且存在明显的区域传输现象。周边地区污染源在特定气象条件下，会对石河子的空气质量产生不可忽视的影响。基于上述研究成果，本研究提出一系列具有针对性的污染控制策略。例如，对硅厂实施更为严格的氟化物减排措施，从源头控制污染；对工业布局进行优化，减少污染物的集中排放；加强区域联防联控，实现跨区域的协同治理。

本研究首次对石河子地区有组织废气中的颗粒物组分进行全面系统的分析，成功明确了不同行业的颗粒物组分谱。创新性地引入先进的源解析技术，并紧密结合当地实际情况，精准识别污染源。同时，综合运用多种环境空气质量模型，全面且深入地揭示了污染物的传输路径和潜在源区。通过对比不同污染控制情景下的空气质量变化，为石河子地区量身定制了切实可行的污染控制策略。这不仅对推动该区域的生态文明建设具有重要意义，也为其他面临类似问题的地区在大气污染研究和治理方面提供了极具价值的参考范例。

关键词：石河子地区；有组织废气；颗粒物组分；环境空气质量；源解析技术

Abstract

This study focuses on the Shihezi area and aims to deeply analyze the characteristics of particulate matter components in organized waste gas and their impact on environmental air quality, providing scientific basis for precise control of regional air pollution. During the research period, extensive sampling was conducted on organized waste gases from key industries in the Shihezi area, and long-term monitoring of ambient air was carried out. By using advanced technologies such as ion chromatography and ICP-MS, the particulate matter components in the collected samples are analyzed in detail. At the same time, with the help of source apportionment technology and environmental air quality models, their impact on the environment is comprehensively evaluated.

The research results show that from 2020 to 2024, the pillar industries such as silicon, cement, and aluminum in Shihezi area will flourish, promoting significant economic growth but also causing severe air pollution problems. Taking the silicon industry as an example, its production process not only causes pollution of fluoride and particulate matter in the surrounding environment, but also leads to a significant increase in fluoride content in the surrounding soil and water bodies. Monitoring data from different seasons in 2024 indicate that the average concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ frequently exceed the standard, with the most severe pollution occurring in winter. In depth research has found significant differences in the composition of particulate matter emissions across different industries. In the emissions of silicon plants, the content of fluoride and silicon elements is prominent; The emissions from cement plants are mainly composed of elements such as calcium and silicon; The particulate matter emitted by aluminum plants is rich in aluminum and related compounds. Through source analysis technology, it was further determined that industrial sources, transportation sources, and dust sources are the main sources of atmospheric particulate matter in the Shihezi area, and the contribution ratio of these pollution sources will change with seasonal and regional changes. In terms of meteorological conditions, factors such as temperature, humidity, wind speed, and direction have a profound impact on the emission and transformation of particulate matter. Meteorological conditions such as low temperature, high humidity, and low wind speed can seriously hinder the diffusion of pollutants, leading to a sharp increase in particulate matter concentration.

Through comprehensive evaluation of various environmental air quality models, it has been confirmed that organized exhaust particulate matter has a significant impact on the environmental air quality in the Shihezi area, and there is a clear regional transmission phenomenon. Under specific meteorological conditions, pollution sources in the surrounding areas can have an undeniable impact on the air quality of Shihezi. Based on the above research results, this study proposes a series of targeted pollution control strategies. For example, implementing stricter fluoride emission reduction measures for

silicon plants to control pollution from the source; Optimize industrial layout to reduce centralized emissions of pollutants; Strengthen regional joint prevention and control, and achieve cross regional collaborative governance.

This study is the first to conduct a comprehensive and systematic analysis of particulate matter components in organized waste gas in the Shihezi area, successfully clarifying the particulate matter component spectra of different industries. Innovatively introducing advanced source apportionment technology and closely integrating it with local conditions to accurately identify pollution sources. At the same time, by comprehensively utilizing various environmental air quality models, the transmission pathways and potential source areas of pollutants are comprehensively and deeply revealed. By comparing the changes in air quality under different pollution control scenarios, practical and feasible pollution control strategies were tailored for the Shihezi area. This is not only of great significance for promoting the construction of ecological civilization in the region, but also provides valuable reference examples for other areas facing similar problems in air pollution research and control.

Key words: Shihezi area; Organized waste gas; Particulate matter components; Environmental air quality; Source parsing technology

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 石河子地区工业发展与大气污染现状.....	1
1.1.2 有组织废气颗粒物污染的危害及研究意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 工业源颗粒物组分特征研究现状.....	2
1.2.2 源解析技术在有组织废气研究中的应用.....	2
1.2.3 环境空气质量影响评估方法.....	3
1.3 研究目标与技术路线.....	3
1.3.1 研究目标与科学问题.....	3
1.3.2 技术路线与创新点.....	4
第2章 研究方法数据来源.....	12
2.1 研究区域概况.....	12
2.1.1 石河子地区地理与气候特征.....	12
2.1.2 重点行业分布及排放特点.....	12
2.2 数据来源与采样设计.....	15
2.2.1 有组织废气监测数据.....	15
2.2.2 环境空气组分站数据.....	16
2.2.3 企业排放量数据库.....	17
2.3 分析方法.....	17
2.3.1 组分特征分析方法.....	17
2.3.2 源解析方法.....	18
第3章 有组织废气颗粒物组分特征分析.....	20
3.1 行业排放特征.....	20
3.1.1 硅厂、水泥厂、铝厂等典型行业颗粒物组分谱.....	20
3.1.2 可溶性离子分布.....	21
3.1.3 重金属污染特征.....	22
3.2 季节变化规律.....	24

3.2.1 不同季节组分浓度差异	24
3.2.2 气象条件对排放组分的影响	25
3.3 行业间组分差异与污染标识物	26
3.3.1 硅厂 (Si、F ⁻ 特征)	26
3.3.2 铝厂 (Al、NH ₄ ⁺ 特征)	27
3.3.3 电石厂 (Ca ²⁺ 、Cl ⁻ 特征)	28
第 4 章 环境空气中颗粒物污染特征	31
4.1 环境空气组分时空分布	31
4.1.1 PM _{2.5} /PM ₁₀ 质量浓度水平	31
4.1.2 离子与重金属组分占比	35
4.2 污染事件案例分析	39
4.2.1 重污染天气下组分特征	39
4.2.2 重污染天气下组分特征	42
4.3 有组织废气与环境空气组分的关联性	43
4.3.1 同种组分的浓度相关性	43
4.3.2 工业源贡献率估算	45
第 5 章 有组织废气对环境空气质量的影响	47
5.1 基于排放清单的源解析	47
5.1.1 行业排放量与环境空气污染的空间匹配	47
5.1.2 PMF/CMB 模型解析主要贡献源	48
5.2 传输路径与潜在源区	50
5.2.1 后向轨迹模型 (HYSPLIT/TrajStat)	50
5.2.2 石河子地区污染物跨区域传输特征	51
5.3 控制情景模拟	52
5.3.1 重点行业减排方案设计	52
5.3.2 减排措施对 PM _{2.5} 浓度的预测影响	54
5.4 管理建议	55
5.4.1 行业针对性管控措施	55
5.4.2 区域联防联控机制优化	55
5.4.3 能源结构调整推动减排	56
第 6 章 结论与建议	57
6.1 主要结论	57
6.2 研究展望	58

参考文献.....	59
致谢.....	63
作者简介.....	64

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 石河子地区工业发展与大气污染现状

石河子地区作为新疆重要的工业聚集地，近年来工业发展态势较快。根据2024年季度监测数据显示，工业总产值逐年递增，2020 - 2024年间，年平均增长率达到8%。其中，硅厂、水泥厂、铝厂等成为推动工业增长的主力军。硅产业发展迅速，随着市场对硅基材料需求的攀升，硅厂数量从2019年的5家增加至2024年的8家，产能提升了约40%。水泥厂在基础设施建设需求带动下，产量稳步增长，2024年相较于2019年，水泥年产量提高了30%。铝厂通过技术革新与产能扩张，铝产量在这五年间增长了25%。从工业布局来看，借助石河子地区地图能够清晰发现，工业集中区域主要分布于城市的北部工业园区。依托便利的交通干线与丰富的矿产资源，集聚了多家硅厂与铝厂。例如，某大型硅厂紧邻铁路货运站，便于原材料的运入与产品的输出。北工业园区中部则因产业布设，成为水泥厂的集中区域，大量水泥厂在此落户，形成产业集群。这种布局虽在一定程度上促进了产业集聚效应，但也给周边环境带来了较大压力^[1]。

在大气污染方面，环境空气组分数据揭示了石河子市环境空气质量情况。2022 - 2024年期间，PM_{2.5}年均浓度变化曲线总体呈现下降趋势，2022年PM_{2.5}年均浓度为83μg/m³，到2024年已降至47μg/m³。PM₁₀年均浓度变化情况大致相同。但在冬季采暖期，由于工业生产与居民供暖双重因素影响，大气污染物浓度显著升高^[2]，PM_{2.5}和PM₁₀浓度在部分时段超出国家二级空气质量标准，大气污染形势严峻，对居民生活和生态环境构成严重威胁。

1.1.2 有组织废气颗粒物污染的危害及研究意义

有组织废气颗粒物污染带来的危害是多方面的。在人体健康层面，粒径较小的颗粒物，如PM_{2.5}，能够直接进入人体呼吸系统深部，甚至通过气血交换进入血液循环系统。长期暴露在这样的环境中，会引发呼吸道炎症、心血管疾病等。据相关医学研究统计，在大气污染严重区域，居民呼吸道疾病发病率相较于清洁地区高出30%。

对于生态环境而言，有组织废气颗粒物中的重金属、酸性物质等会随着降水沉降到地面，污染土壤和水体。土壤受到污染后，会影响植被生长，改变土壤微生物群落结构。水体被污染后，会危害水生生物生存，破坏水生态平衡。例如，某河流周边因工业废气颗粒物排放，导致河水中重金属含量超标，部分水生生物数量锐减^[3]。

大气中的颗粒物还会显著降低能见度，影响交通出行安全。在雾霾天气中，PM_{2.5}和PM₁₀等颗粒物散射和吸收光线，使能见度降低，增加了交通事故发生概率。

依据企业排放量数据，硅厂、水泥厂、铝厂等重点行业颗粒物排放总量占比颇高。其中，水泥厂颗粒物排放总量占工业源排放总量的40%，主要源于水泥生产过程中的物料破碎、煅烧、运输等环节。铝厂占比约25%，其电解铝工艺会产生大量含铝及其他重金属的颗粒物。研究有组织废气颗粒物对环境空气质量的影响至关重要，通过深入探究，能够精准识别污染来源与传输路径，为区域大气污染治理提供科学依据，助力制定更有效的污染防控措施，改善石河子地区的环境空气质量，保障居民健康与生态环境安全。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 工业源颗粒物组分特征研究现状

国内外针对工业源颗粒物组分特征展开了诸多研究。在可溶性离子方面，行业间排放的离子种类与浓度大不相同。钢铁行业在生产中运用石灰石造渣，燃料燃烧又产生二氧化硫，致使排放的颗粒物里Ca²⁺、SO₄²⁻离子浓度偏高。化工行业因使用含氯原料、排放氮氧化物，其颗粒物中Cl⁻、NO₃⁻离子相对较多。重金属组分上，电子垃圾拆解行业排放的颗粒物含大量Cd、Pb等重金属，严重污染周边环境。

地区产业结构与能源结构不同，工业源颗粒物组分特征也有差异。我国东部沿海地区电子、机械制造产业发达，颗粒物中重金属及有机污染物含量高。中西部能源重化工基地以煤炭燃烧和冶金行业为主，排放的颗粒物多为无机离子和金属氧化物^[4]。

就石河子地区而言，目前对本地工业源颗粒物特殊组分的研究不足。硅厂排放颗粒物除Si、F等已知特征组分外，微量有机硅化合物及其他伴生元素研究较少。多行业复合污染时，颗粒物各组分相互作用及转化机制也有待深入探究。

1.2.2 源解析技术在有组织废气研究中的应用

PMF（正定矩阵因子分解）与CMB（化学质量平衡）是常用的源解析技术。国外，PMF技术在城市大气污染源解析中应用广泛^[5]。如美国洛杉矶地区，借PMF模型确定机动车尾气、工业排放、生物质燃烧等为主要污染源，依此制定污染控制措施，

空气质量得以改善^[6]。PMF 模型能处理复杂多源数据，无需预先知晓污染源成分谱，靠数据驱动解析污染源。但它对数据质量要求高，数据缺失或有异常值时，解析结果易偏差。

CMB 模型在欧洲工业城市也有成功案例。德国鲁尔区利用 CMB 模型精准识别钢铁厂、化工厂等工业源对大气污染物的贡献。CMB 模型基于质量守恒原理，计算直观，污染源成分谱明确时，解析结果较准确。不过，它需要大量精准的污染源成分谱数据，且实际中污染源成分谱随时间、生产工艺变化，获取准确成分谱有难度^[7]。

石河子地区工业企业多、行业类型杂，污染源成分谱复杂，且春秋季节大风、冬季逆温等特殊气象条件影响污染物传输扩散，增加源解析难度。但通过合理筛选数据、优化模型参数，结合本地实际调整，PMF 和 CMB 技术在该地区有组织废气源解析中仍具可行性与适应性。

1.2.3 环境空气质量影响评估方法

国内外评估环境空气质量影响的方法多样，排放-浓度响应关系模型较为常用。在平原地区，地形平坦，污染物扩散规律简单，该模型能较好模拟污染源排放与环境空气质量的关系。如我国华北平原部分城市，用此模型评估工业源排放对 PM_{2.5}浓度的影响，模型预测值与实际监测值相关性高，相关系数可达 0.8 以上^[8]。

山区等地形复杂区域，地形阻挡、扰动气流，污染物扩散路径复杂，模型应用效果受限。污染源类型方面，点源污染时，排放 - 浓度响应关系模型能较准确评估对周边环境空气质量的影响；面源污染，像城市里众多小型餐饮企业、居民生活源，排放源分散，排放量难精确统计，模型模拟结果准确性受影响^[9]。

本研究选择评估方法时，需综合考量石河子地区地形地貌、气象条件与污染源类型。结合本地实际，改进优化排放 - 浓度响应关系模型，还可结合受体模型、数值模拟模型等，相互验证补充，从而更精准评估有组织废气对环境空气质量的影响。

1.3 研究目标与技术路线

1.3.1 研究目标与科学问题

本研究旨在全面解析石河子地区有组织废气颗粒物组分特征，精准量化其对环境空气质量的影响。具体而言，将通过实地采样、实验室分析等手段，深入探究硅厂、水泥厂、铝厂等重点行业有组织废气颗粒物中各种化学组分的浓度水平、分布规律以及季节变化特征。针对硅厂，详细测定颗粒物中 Si、F 等关键组分在不同生产阶段的

浓度变化；对于水泥厂，着重分析 Ca、SO₄²⁻等组分在物料破碎、煅烧等环节产生的颗粒物中的分布情况。运用先进的源解析技术，如 PMF、CMB 等模型，明确不同行业有组织废气颗粒物对环境空气中颗粒物的贡献份额，以及各污染源在不同季节、不同区域的贡献差异。

研究中拟解决的关键科学问题包括：如何准确确定不同行业有组织废气颗粒物的污染标识物，以便在复杂的大气环境中快速识别污染源。石河子地区多行业共存，大气成分复杂，需通过对比分析不同行业颗粒物的化学指纹，结合源解析结果，找出特征性的污染标识物。在石河子地区复杂的地形和气象条件下，如何优化源解析模型，提高对有组织废气污染源的解析精度。本地春秋季节大风、冬季逆温等特殊气象条件，以及复杂地形，会干扰污染物传输扩散，影响模型输入数据的准确性，需对模型参数进行本地化调整，结合本地气象和地形数据，优化模型算法。怎样构建更符合本地实际的排放 - 浓度响应关系模型，精确评估有组织废气排放对环境空气质量的影响程度。考虑到本地工业源排放特征、气象条件和地形因素，综合运用本地监测数据和模拟数据，构建更贴合实际的模型，为污染防控提供可靠依据。

1.3.2 技术路线与创新点

首先，通过实地监测、企业调研等方式，全面收集石河子地区有组织废气及环境空气数据。接着，运用离子色谱、ICP-MS 等分析技术，测定颗粒物化学组分。随后，借助 PMF、CMB 等源解析模型及排放 - 浓度响应关系模型，解析污染源并评估影响。最后，基于结果提出污染治理建议。

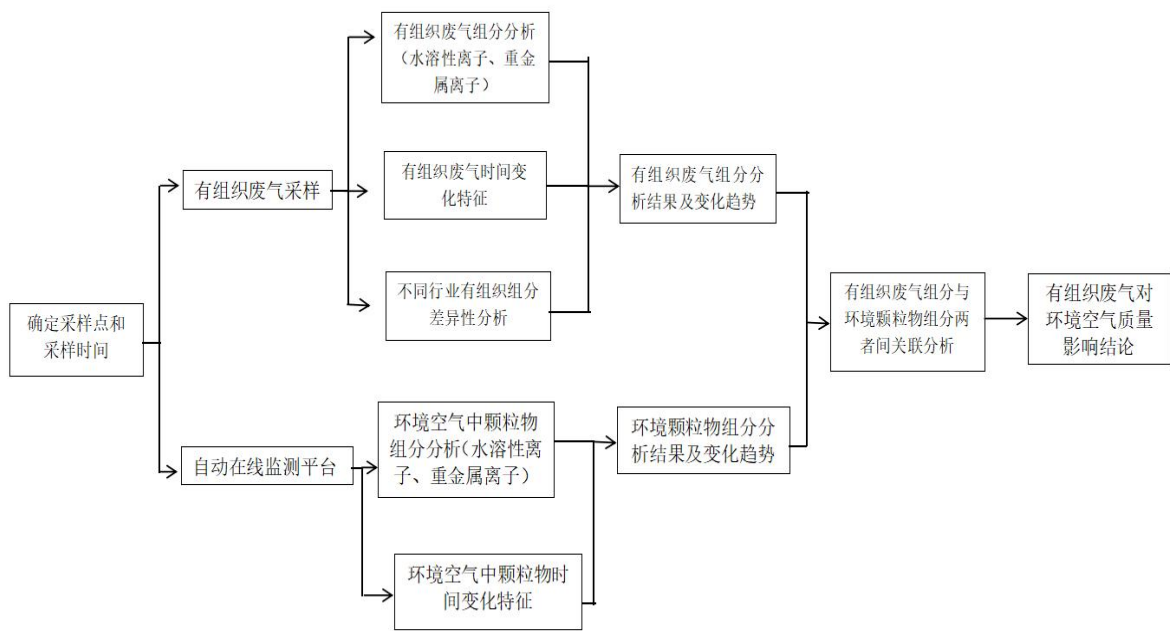


图 1-1 技术路线

本研究在研究方法上，创新性地将多种先进分析技术与模型有机融合，相互验证补充，提高研究准确性。例如，在分析颗粒物化学组分时，将离子色谱对可溶性离子的精确测定与 ICP-MS 对重金属及微量元素的高效检测相结合，确保数据的全面性。在运用源解析模型时，对比 PMF 和 CMB 模型结果，相互印证，减少单一模型的误差^[10]。在数据应用方面，深度挖掘石河子本地丰富监测数据，构建本地化污染源成分谱及排放 - 浓度响应关系模型，使其更契合本地复杂工业与气象环境。通过对本地企业生产工艺、原材料使用的详细调研，精准确定污染源成分，同时结合本地气象站长期积累的气象数据，优化排放 - 浓度响应关系模型参数。结果分析中，不仅关注常规组分，还着重探究硅厂等特殊行业的特殊排放组分，全面揭示有组织废气颗粒物污染特性，为区域大气污染治理提供新颖、全面的科学依据。针对硅厂，深入研究其排放的有机硅化合物及其他伴生元素，明确其在大气中的迁移转化规律，助力制定更具针对性的污染防控策略。

第2章 研究方法与数据来源

2.1 研究区域概况

2.1.1 石河子地区地理与气候特征

石河子地区地处新疆维吾尔自治区北部，坐落于天山北麓、准噶尔盆地南缘，作为新疆生产建设兵团重要的农业基地与工业城市，地理坐标大致处于东经 84°58' - 86°24'，北纬 43°26' - 45°20'之间。该区域地形主要为平原，整体地势呈现出自东南向西北倾斜的态势。东南部地势相对较高，海拔在 450 - 500 米左右，多为山前冲积扇平原，土壤肥沃，适宜农业耕种，是石河子重要的粮棉产区。而西北部分地势较低，海拔约 250 - 300 米，靠近古尔班通古特沙漠边缘，地势较为平坦开阔。

石河子地区属典型的温带大陆性气候，四季分明，光照资源极为充足，热量也颇为丰富。春季时，多风天气频繁，气候干燥，昼夜温差极为显著，日间最高气温可达 20°C 左右，而夜间最低气温可能骤降至 5°C 以下。这一时期，大风常裹挟着沙尘，影响空气质量。夏季炎热难耐，降水稀少，蒸发作用强烈，月均降水量仅 20 - 30 毫米，而月均蒸发量却高达 250 - 300 毫米，最高气温可突破 40°C。秋季气候凉爽宜人，天气晴朗，昼夜温差逐渐缩小，是一年中气候较为舒适的时段。冬季则寒冷漫长，雪量相对较大，最低气温可达 -20°C 以下，积雪期长达 3 - 4 个月，为来年农业生产储备了丰富的水资源。年均气温维持在约 8.1°C，年均降水量约 200 毫米，蒸发量却高达 1500 毫米以上，这种气候条件深刻影响着区域内的生态环境与人类活动^[11]。

2.1.2 重点行业分布及排放特点

石河子地区的工业发展以资源型产业为主导，电厂、铝厂和硅厂等重点行业在区域经济发展中占据核心地位。诸多重点行业企业集聚于石河子经济技术开发区，尤其是北工业园区，这里交通便利，基础设施完善，为企业发展提供了良好条件。2005 年 11 月，八师石河子市人民政府将自治区级的北工业园区委托由开发区管委会进行统一开发建设，推动了产业的集中布局与规模化发展。

2.1.2.1 水泥厂分布及排放特点

石河子地区的水泥厂代表企业位于北工业园区中部，园区内交通专线直接接入厂