

# 黑龙江省降雪的湿清除作用及影响因素

武心雨, 王 恒

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年12月22日; 录用日期: 2024年1月4日; 发布日期: 2024年2月5日

## 摘 要

黑龙江省为中国东北地区重要的城市, 由于工业发展及城市建设和人口增加, 空气污染日益严重。黑龙江省冬季降雪极为丰富, 研究表明降雪对空气污染物具有清除作用。本文采用黑龙江省生态环境厅及中央气象台等实时数据, 运用线性拟合等多种分析法, 研究黑龙江降雪对6种具体污染物包括固态污染物(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)和气态污染物(O<sub>3</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>)的湿清除作用的影响机制。结果表明, 降雪量和降雪时间对污染物湿清除作用均有影响, 其中对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>这两类大气颗粒物污染的湿清除作用最为明显, 且呈显著正相关。在降雪量、降雪时间与清除效率的关系上, NO<sub>2</sub>和CO这两类气态污染物, 其他污染物的浓度均值都存在负相关关系。且降雪时间对O<sub>3</sub>还是存在着一定的影响, 及随强度增加清除作用减小的负相关。

## 关键词

湿清除作用, 降雪, 黑龙江

# Wet Removal Effect and Influencing Factors of Snowfall in Heilongjiang Province

Xinyu Wu, Heng Wang

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 5<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Heilongjiang Province is an important city in Northeast China, and air pollution is becoming increasingly severe due to industrial development, urban construction and population growth. Heilongjiang Province is extremely rich in winter snowfall, and studies have shown that snowfall has a scavenging effect on air pollutants. In this paper, we used real-time data from the ecological environment of Heilongjiang Province and the Central Meteorological Observatory to study the in-

fluence mechanism of snowfall in Heilongjiang Province on the wet removal of six specific pollutants, including solid pollutants ( $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ ) and gaseous pollutants ( $O_3$ , CO,  $SO_2$  and  $NO_2$ ), by using linear fitting and other multi-method analysis methods. The results showed that both snowfall and snowfall time had an impact on the wet removal of pollutants, and the wet removal effect on  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  was the most obvious, and there was a significant positive correlation. In terms of the relationship between snowfall amount, snowfall time and removal efficiency, there was a negative correlation between the concentrations of  $NO_2$  and CO, two gaseous pollutants, and the average concentrations of other pollutants. Moreover, there is a certain effect of snowfall time on  $O_3$ , and there is a negative correlation with the decrease of scavenging effect with the increase of intensity.

## Keywords

Wet Removal, Snowfall, Heilongjiang

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的快速发展,环境问题日益突出。其中,大气环境与人类生活密切相关,城市空气质量日益受到关注(Chate D.M., 2005) [1],空气质量是大气污染物变化的结果,这对人体和生态健康有不利影响(成勤等人, 2018) [2]。现在已经发现长期暴露于包括  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 $NO_2$  和  $NO_x$  在内的空气污染物中,无论是暴露于单一污染物还是多种污染物,都与高血压发病风险增加相关[3]。因此大量研究关注气象因子对空气污染的影响,其中包括降水、风速风向、相对湿度等等。大气污染状况和影响因素成为了气象学近年来极为更关注的话题。早在 1995 年已有研究,降水对大气污染物的影响,有学者通过采用 GDX-富集、GC-MS 分析,对北方降雪中的有机污染物进行分析,检出多种有机污染物,其中含有多种美国公布的重点有机污染物,从而证明北方降雪确实对大气污染有清洁作用(盖新杰、贾春明等 1995)。说明了冬季降雪对大气污染同样具有净化作用[4]。

这种清除过程是维持大气成分稳定的重要组成部分,通常分为两类:干清除过程和湿清除过程。在没有降水的条件下,通过重力沉降作用和湍流输送作用将大气微量成分(包括气溶胶粒子和微量气体)直接送到地球表面而使之从大气中消失的过程叫做干清除(或干沉降)过程。干清除过程会明显改变城市空气污染物的时空浓度分布,尤其是下垫面复杂的城市区域。通过降落的水汽凝结体(雨滴、雪片、霰粒等)把大气微量成分带到地面使之从大气中消失的过程叫做湿清除(或湿沉降)过程。降雪就是典型的湿清除过程。湿清除可有效、快速地清除许多大气成分,通常又分为雨冲刷和水冲刷两类。最终形成降水的云,在云中过程所造成的大气微量成分的清除叫做雨冲刷,而把云底以下降落雨滴对大气微量成分的清除叫做水冲刷(没有形成降水的云对整体的大气没有清除作用,但对局地大气化学成分的转化却起着重大作用) [5]。

## 2. 国内外研究进展

### 2.1. 国内研究现状

国内学者对 2000 年 11 月至 2003 年 2 月期间冬季的 49 次降雪天气分级统计了它们对污染物  $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  浓度的稀释作用,发现当时冬季降雪对污染物稀释有一定的作用,但作用不很明显(王艳秋等)

[6]。不仅如此, 还有发现降雪只对粒径小于  $0.03 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子清除效果较好, 且清除能力低于降雨和强浓雾过程(康汉青, 朱彬等, 2009) [7]。在中国昌吉市采集多起降雪事件前后的样本(TSP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_5$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ )结果表明, 雪的清除作用效果明显。清除量和清除比例最高的是 TSP, 其次是  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_5$  和  $\text{PM}_{2.5}$  [8]。都用不同的研究手段证明了雪不仅仅对大气颗粒物, 还有气溶胶粒子和气态污染物都有不同程度的清除作用。

而对湿清除作用的影响因子的研究, 分别以降水的不同形态、不同降水强度、不同降水量等方向进行分析。比如, 李霞等在研究乌鲁木齐不同相态的降水对大气污染物的湿清除能力时, 发现微量降雪会引起大气污染物浓度升高, 而微量降雨则能减少大气污染物浓度。另在分析雨和降雪对气溶胶粒子的清除效果的区别时发现在冬季降雪对气溶胶粒子的清除效率远大于夏季降雨的清除效率, 但是这与特定地区、特定期污染物分布差异有关[9]。陈小敏等在研究重庆冬春季降水强度与  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  的关系时通过对不同降水过程进行分级, 研究降水对大气污染物的清除能力, 发现不同的雨量对这三种污染物的清除效率不一样。当降雨量大于  $5 \text{ mm}$  时, 降雨量越大, 这三种污染物的降雨清除效率就越高。但是并不是每次降雨污染物的浓度都能降低, 当降雨量过小时, 污染物的浓度不降反而增加。在连续降雨日, 降雨的前两天, 清除效率高, 但是后面几天污染物的浓度基本维持不变, 降雨的清除效率很低, 说明降水对大气污染物清除能力存在一个最低极限[10]。汤天然等研究了  $\text{PM}_{2.5}$  与降雨的关系以及影响因素。他们发现大气稳定度、相对湿度、风速、降雨等都会对  $\text{PM}_{2.5}$  产生影响, 虽然降雨可以降低空气中的  $\text{PM}_{2.5}$ , 如果降雨的时候风速小、湿度大, 降雨对其的去除效果并不明显。风速大, 湿度大, 还有降雨是  $\text{PM}_{2.5}$  浓度降低的有利因素[11]。周国兵分别研究了日降水、连续降水和逐小时降水对  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  及 AQI 指数的影响[12]。以上是关于湿清除作用的影响因素的研究, 其中虽然有着对冬春季的降水研究, 却把这样的研究对象集中与降雨上。

而关于降雪是研究, 许多学者研究了关于地区性的降雪对空气污染的影响, 其中东北地区作为我国降雪最为丰富的地区为主要的研究地点。比如长时间序列分析, 在气象条件变化对哈尔滨市空气质量的影响, 选取了哈尔滨地区不同雪量降雪之后与前一天是比较, 认为降雪在  $24 \text{ h}$  内有加重污染的趋势, 因为降雪时一般天气较稳定, 大气扩散能力很弱, 造成污染浓度增加(高煜中等, 2003) [13]。还有选取沈阳市 2014 年 12 月~2018 年 12 月的大气颗粒物浓度数据和气象数据资料, 包括  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、降雪量等数据资料, 结果表明降雪对大气颗粒物的浓度具有明显的清除作用, 且不同降雪量对大气颗粒物的清除作用均有差异(刁军, 董秋婷等, 2020) [14]。用西宁市区 2013~2014 年逐日空气污染日平均浓度资料和日平均降水资料, 分析了西宁市区大气污染物浓度的分布和不同等级降水对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  污染物浓度的清除能力。不同等级的降雪量对 4 种污染物的稀释作用不同[15]以及单次及特殊时刻降雪分析: 在东北地区空气质量特殊时段特征, 研究了东北地区初雪和暴雪的污染物变化情况, 并证明了降水对空气的清洁作用均有明显相关性(杨莹等) [16]。南京一次暴雪过程大气污染特征分析, 在此次暴雪影响下, 南京空气质量改善, 污染物浓度日变化特征受到影响。次日空气质量状况为优, AQI 和颗粒物浓度下降明显(谢放尖、李文青等, 2015) [17]; 降雪对哈尔滨市 2019 年冬季空气质量的影响, 以哈尔滨空气质量和降雪为研究对象, 分别对哈尔滨市 2019 年冬季空气质量时间变化特征、哈尔滨市 2019 年冬季降雪特征时间变化规律进行了分析(贾宏杰、孙丽, 2022) [18]。

## 2.2. 国外研究现状

而关于降雪的湿清除作用研究, 国外学者从不同的方面出发对此进行了大量研究, 得出众多结论。Tai 等和 Chart 等从降水的角度出发, 研究发现降水与污染物浓度存在强烈的负相关, 且在相同的雨强下, 环境湿度为  $50\%$  时, 清除效果只有环境湿度为  $95\%$  时的一半[19]。而对于那个气象因子对空气质量的影响

响作用最大, 国内外的研究成果由于研究地点的不同, 当地污染状况不同, 自然条件不同, 研究结果存在分歧。而对于那个气象因子对空气质量的影响作用最大, 国内外的研究成果由于研究地点的不同, 当地污染状况不同, 自然条件不同, 研究结果存在分歧。

学者研究发现清除是一个净化的过程。降水对大气颗粒物有明显的清除作用。且很多学者不仅仅以空气污染变化作为研究对象, 同时以雪本身的性质进行研究。发现雪可以有效去除空气中的气态和颗粒物污染[20] (Shan *et al.*, 2015)。由于雪花有更大的颗粒比表面, 高孔隙率和更慢的下落速度, 它们可以比雨丰富更多的污染物。雪花也被认为是比雨更有效的清污剂[21] (Francovietal *et al.*, 2016)。研究发现, 雪事件后,  $PM_{10}$  下降了 80%, 对有一定的影响(Guo *et al.*, 2013) [22]。而 Logan 的研究也发现, 雪可以有效地监测 PM 的浓度(Malek *et al.*, 2006) [23]。而在波罗的海沿海地区的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的研究中, 认为雨水比雪更有效清除空气中的有机碳[24]。我们发现关于降水湿清除的研究在不同形态的降水上国外学者的研究结果存在分歧。

综上所述, 通过对国内外研究的文献分析, 我们可以发现, 对于雪对空气的清除作用已经引起了国内外学者的高度关注, 并且也进行了广泛的研究。学者主要通过两种方式研究冬季降雪对大气污染的影响, 一是利用长时间序列资料进行大数据分析, 基于相关性分析等方法, 研究各气象因素与空气污染的关系, 而集中于降水的定量及一般规律性研究较多。二是采集样本进行实验, 分析降雪的去效率。但是国内外研究在于大都选择逐日数据, 间隔时间较长, 忽略了降雪清除作用的及时性。其次选择大都是单次或特殊时段的降雪个例, 是极端情况而不具有普遍性。甚至由于研究地点限制和研究方法不同, 研究结果存在分歧。三是传统对大气污染的研究大多数集中于某一单一污染物, 在对污染物浓度的研究上, 且更多的是针对颗粒物等气溶胶粒子。

### 3. 研究内容

本文研究选择了黑龙江地区的 10 个地级市站点及多个空气污染监测站点作为主要研究对象。目前我国对环境质量的标准定自 2012 年《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 该标准规定对于我国现阶段的环境空气污染物基本项目有两大类, 共 6 种具体污染物, 包括固态污染物( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ )和气态污染物( $O_3$ 、 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ )。空气污染指数(air quality index, 简称 AQI)是反映和评价空气质量的一种方法, 按规定共划分为 6 档, 对应于空气质量的 6 个级别: 1 级: 优, 2 级: 良, 3 级: 轻度污染, 4 级: 中度污染, 5 级: 重度污染, 6 级: 严重污染。污染指数越大, 级别越高, 说明污染越严重。由于城市工业为主要污染源, 在研究区域选取上, 结合黑龙江省不同城市工业区域类型, 分别选取商业型城市、煤炭型工业城市、石油工业城市、森林生态型工业城市, 重工业城市及农业型城市 6 大类型作为参考, 选取 10 个目标城市。选择 2022 年 11 月到 3 月 21 日降雪及晴朗天气的污染物监测数据, 研究黑龙江省不同城市的主要污染物差异, 以及污染物浓度在降雪前后 2 h 内的变化及后续 12 h 的变化情况, 即降雪过后的空气污染变化过程; 研究各个样本降雪湿清除作用及不同降雪要素对不同污染物( $O_3$ 、 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ )的影响, 包括降雪量, 降雪时间, 分析黑龙江省降雪的湿清除作用及影响因素; 以及结合 AQI 指数评价分析降雪对空气污染的清洁对人类生活质量的影响。本研究以黑龙江降雪的湿清除作用为主要研究对象, 改变之前研究中, 多针对某一个特殊时段, 或某地单一降雪的湿清除作用的研究; 且不仅仅针对大气颗粒物, 同时也将气态污染物的浓度包含在内, 不同程度降雪对空气污染的影响进行对比, 定量研究降雪量等因素对不同污染物的影响。

空气质量直接影响到人类的身体健康和生命安全, 并且雪已被证明是追踪金属和其他类型环境污染物的最相关指标。因此, 将雪与空气污染物结合起来也可以为今天的污染评估提供非常有用的信息。深入分析降雪对区域空气质量的时空格局变化的影响及影响因素, 对区域污染防治具有重要意义。黑龙江



省重工业规模较大, 人口众多, 废气的排放给人类生存环境带来危害, 冬季漫长且降雪丰富。为此, 分析冬季降雪对黑龙江省空气污染的清除作用, 对冬季大气污染预报和环境治理提供科学依据。

## 4. 数据来源和研究方法

### 4.1. 数据来源

论黑龙江省生态环境厅官方网站(<http://sthj.hlj.gov.cn>), 中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn>)发布的由黑龙江省环境监测中心站实时监测的  $O_3$ 、 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  污染物数据。

中国天气网(<http://www.weather.com.cn>), 中央气象台(<http://www.nmc.cn>)天气预报及 24 小时实时天气数据包括降雪量、降雪时间, 风速, 风向和空气湿度等等。

### 4.2. 研究方法

清除效率的计算公式:

清除过程根据降雪过程选取, 降雪量最小为 0.1 mm, 以第一分钟出现 0.1 mm 以上降雪为过程的起始, 最后一次出现 0.1 mm 以上降水的时间作为过程的结束, 若降水中断不足 4 h 的过程均按一次过程计算。选取过程开始前 4 h 内的六种污染物平均浓度 CON1 和过程结束后 4 h 的平均浓度 CON2 作为清除过程前的浓度和清除过程后的浓度。

清除效率  $R$  如(1)所示。

$$R = \frac{CON1 - CON2}{CON1} \times 100\% \quad (1)$$

对  $n$  次过程中的平均清除效率则以  $n$  次过程前平均浓度和  $n$  次过程后其平均浓度计算, 如(2)所示。

$$R = \frac{\sum \ln(CON1 - CON2)}{n} \quad (2)$$

将  $R > 0$  的清除过程定义为正清除过程, 将  $R < 0$  的清除过程定义为负清除过程,  $R = 0$  定义为零清除过程。

本文以降雪的湿清除作用的影响因素为主要的研究对象, 包括降雪量及降雪时间。降雪量的分级标准, 以中央气象局发布的 12 小时降水量为划分标准, 其中, 降水量 0.1~0.9 毫米为小雪, 0.5~1.9 毫米为小到中雪, 1.0~2.9 毫米为中雪, 2.0~4.4 毫米为中到大雪, 达到 3.0~5.9 毫米为大雪, 4.5~7.4 毫米为大到暴雪, 降水量达到或超过 10 毫米为暴雪。分级后进行分组平均数比较、SPSS 的显著性分析和 Origin 2018 软件的线性拟合分析, 对降雪量对污染物清除效率的影响进行分析。

降雪时间无标准分级, 选用的分级以 3 h 单位。

选取 2022 年 11 月至 2023 年 3 月底, 4188 个降雪样本, 其中 1775 次正清除样本进行影响因素分析。前人的研究选用为正负清除样本进行研究, 但本文认为在负清除的样本中存在其它环境因素的影响及超出降雪湿清除作用的清除极限, 存在误差影响对其主要因素的分析。

## 5. 黑龙江省降雪清除作用的影响因素

选择 2022 年 11 月至 2023 年 3 月底, 黑龙江省哈尔滨市, 齐齐哈尔市, 鸡西市等 10 个城市的共 43 个空气检测站点的所有降雪前后的空气污染物数值, 通过成对样本  $t$  检验进行分析, 得出结果如下表 1 所示。由结果可知, 大多数的污染物在不同站点均优显著和极显著的前后差异, 说明降雪对  $O_3$ 、 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  空气污染物均有清除作用。

**Table 1.** Paired sample t-test analysis table of air pollutant values before and after snowfall  
**表 1.** 降雪前后的空气污染物数值成对样本 t 检验分析表

		SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
哈尔滨	岭北	0.00003**	0.000098**	0.00004**	0.000103**	0.24	0.000098**
	松北商大	0.007**	0.007**	0.007**	0**	0.217	0.0004**
	阿城会宁	0.000034**	0.001**	0.05*	0**	0.516	0.057
	南岗学府路	0.599	0.001**	0.77	0.05*	0.021*	0.917
	太平宏伟公园	0.003**	0.003**	0.68	0**	0.339	0.002**
	道外承德广场	0.035*	0.001**	0.067	0.006**	0.388	0.05*
	香坊红旗大街	0.00003**	0.023*	0.00049**	0.000001**	0.501	0.001**
	动力和平路	0.004**	0.048*	0.025*	0.000009**	0.392	0.004**
	道里建国路	0.002**	0.006**	0.446	0.000004**	0.181	0.003**
	平房东轻场	0.021*	0.012*	0.157	0**	0.0481*	0.00036**
	呼兰师专	0.017*	0.0003**	0.001**	0.000001**	0.117	0.003**
	省农科院	0.001**	0.008**	0.004**	0.009**	0.18	0.000238**
齐齐哈尔	安居小区	0.003**	0.26	0.006**	0**	0.507	0.000024**
	中心广场	0.045*	0.445	0.027*	0.000002*	0.000182**	0.003**
	农牧车辆厂	0.217	0.115	0.001**	0.000006**	0.00137**	0.000006**
	市环境监测站	0.913	0.043*	0.003**	0**	0.001**	0.000123**
鸡西	环保局	0.608	0.662	0.477	0.000066**	0.244	0.097
	气象局	0.656	0.113	0.001**	0.000031**	0.004**	0.001**
鹤岗	哈啤分公司	0.048*	0.002**	0.113	0**	0.158	0.357
	斯达机电	0.053	0.01**	0.104	0**	0.452	0.227
	东山纸板厂	0.019*	0.01**	0.648	0.000023**	0.103	0.077
	五号水库	0.049*	0.248	0.00003**	0**	0.002**	0.91
大庆	大同区	0.005**	0.085	0.002**	0.0007**	0.05*	0.01**
	龙凤区	0.13	0.02*	0.03*	0.000049**	0.004**	0.003**
	红岗区	0.242	0.151	0.041*	0.01**	0.034*	0.001**
	萨尔图区	0.000037**	0.033**	0.003**	0.00134**	0.001**	0.000014**
	让胡路区	0.000475	0.019*	0.002**	0.00016**	0.001**	0.000091**
伊春	中心医院	0.804	0.0221*	0.855	0.005**	0.002**	0.004**
	林管局	0.034*	0.417	0.253	0**	0.002**	0.001**
	汤旺河国家公园	0.723	0.168	0.962	0.002**	0.000306**	0.016*

续表

	环保局	0.095	0.064	0.018*	0.25	0.000492**	0.000016**
	发电厂	0.072	0.001**	0**	0.000223**	0.081	0.000078**
佳木斯	十一中	0.002**	0.023*	0.001**	0.007**	0.756	0.000215**
	四丰	0.721	0.001**	0.005**	0**	0.000104**	0.000003**
	佳纺	0**	0.169	0**	0.00001**	0.007**	0.324
	文化广场	0.000002**	0.086	0.000411**	0.000001**	0.004**	0.025*
牡丹江	第一医院	0.596	0.125	0.000379**	0**	0.002**	0.001**
	机车工厂	0.28	0.03*	0.49	0.000272**	0.00006**	0.004**
	第一中学	0.006**	0.003**	0**	0**	0.002**	0.000191**
黑河	交通局	0.677	0.038*	0.2	0**	0.452	0.669
	党校	0.091	0.109	0.085	0**	0.072	0.669
绥化	人和东街	0**	0.00004**	0**	0.000035**	0.075	0.005**
	党政办公中心	0**	0.0001**	0.000001**	0.00018**	0.007**	0.000162**

结果<0.05 标注 “\*”，≤0.01 标注 “\*\*”。

### 5.1. 降雪量对清除作用的影响

在 2022 年 11 月到 3 月 21 日共 33 次降雪，根据哈尔滨市、大庆市、齐齐哈尔市等十个城市共 43 个站点的 4188 个降雪样本，其中 1775 次正清除样本。在降雪前的空气质量等级的各降雪量样本数量统计，如下表 2 所示。

**Table 2.** Statistical table of the sample size of snowfall  
**表 2.** 降雪量样本数量统计表

AQI 等级	降雪等级	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
优	小雪	179	256	209	101	87	89
	中	41	67	58	33	21	16
	大	24	31	28	4	7	10
	暴	12	17	20	10	7	7
良	小雪	0	4	0	0	121	79
	中	4	0	0	0	52	36
	大	0	0	0	0	21	8
	暴	0	0	0	0	6	1
轻度污染	小雪	0	0	0	0	32	24
	中	0	0	0	0	0	1
	大	0	0	0	0	3	7
	暴	0	0	0	0	0	0

续表

中度污染	小雪	0	0	0	0	6	17
	中	0	0	0	0	0	0
	大	0	0	0	0	0	1
	暴	0	0	0	0	0	0
重度污染	小雪	0	0	0	0	0	16
	中	0	0	0	0	0	0
	大	0	0	0	0	0	2
	暴	0	0	0	0	0	0
严重污染	小雪	0	0	0	0	0	0
	中	0	0	0	0	0	0
	大	0	0	0	0	0	0
	暴	0	0	0	0	0	0

表 2 根据降雪前 AQI 数值进行分组, 可知, 降雪前污染物等级集中在优良组, 轻度污染和中度污染组, 而重度污染有 18 个样本, 严重污染的样本为 0。因此在以下的分析中, 以优良组, 轻中组的进行降雪时间比较, 以确保样本量充分。分组为 AQI 值在 1~100 的优良组, 101~200 的轻度污染和中度污染组, 及 200~300 的重度污染组。2022 年 11 月到 3 月的各站点降雪前空气质量等级, 主要集中在 0~100 组和 101~200 组。

表 3 为不同等级降雪前后污染物浓度差及清除效率平均值比较, 结果可知: 无论 AQI 值在 1~100 的优良, 101~200 的轻度污染和中度污染, 及 200~300 的重度污染时, 降雪量都影响降雪的清除作用。随着降雪量的增大, 清除作用增强; 由表 4 可知, 在降雪量大于 5 mm 时降雪的清除作用会有显著增强; 降雪量对不同污染物浓度变化的影响, 大气颗粒物大于气态污染物。降雪量大于等于 10.0 mm 的暴雪, 除 NO<sub>2</sub> 的暴雪组, 其他污染物均随着降雪量的增加, 前后污染物浓度差增大。NO<sub>2</sub> 组的暴雪浓度差低于前面几组, 是由于其降雪前的空气质量等级大部分为优, 且浓度值较低。六种污染物的清除效率与降雪量的关系, 除 NO<sub>2</sub> 的暴雪, 清除效率均随降雪量的增加而增强。且降雪前空气质量指数越高, 降雪的清除效率越高。在空气质量指数都在 1~100 间时, O<sub>3</sub> 的清除效率明显低于其他污染物。相同降雪量对 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染物的清除效率差距较小。且与空气质量等级为优或良相比, 空气质量指数在轻度污染到重度污染时, 大雪和中雪的清除效率明显较大。

**Table 3.** Concentration difference and removal efficiency of air quality under different snowfalls, and the average snowfall sample size statistics

**表 3.** 空气质量在不同降雪量下浓度差及清除效率平均降雪量样本数量统计表

AQI	降雪量	SO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>		CO		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
		浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率
优良 (1~100)	小	6.89	0.38	14.12	0.41	0.29	0.34	10.70	0.15	32.53	0.40	19.42	0.40
	中	8.61	0.45	15.79	0.45	0.34	0.44	12.09	0.16	42.58	0.47	33.28	0.56
	大	12.38	0.47	23.00	0.46	0.41	0.45	15.00	0.17	56.71	0.54		
	暴	14.00	0.52	9.24	0.36	0.61	0.50	15.30	0.19	63.17	0.59		



续表

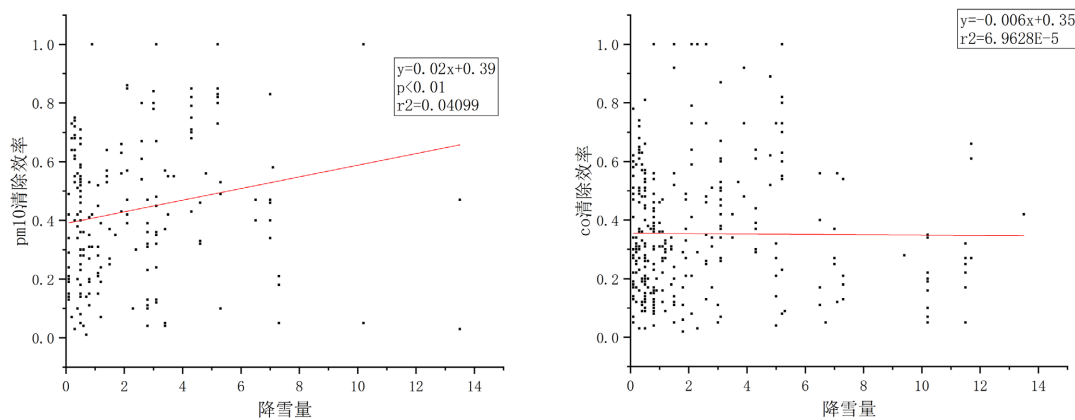
轻中 (101~200)	小	83.06	0.25	46.81	0.51
	中	144.67	0.81	68.00	0.83
	大			97.67	0.85
	暴				
重度 (201~300)	小			59.50	0.31
	中				
	大			153.00	0.88
	暴				

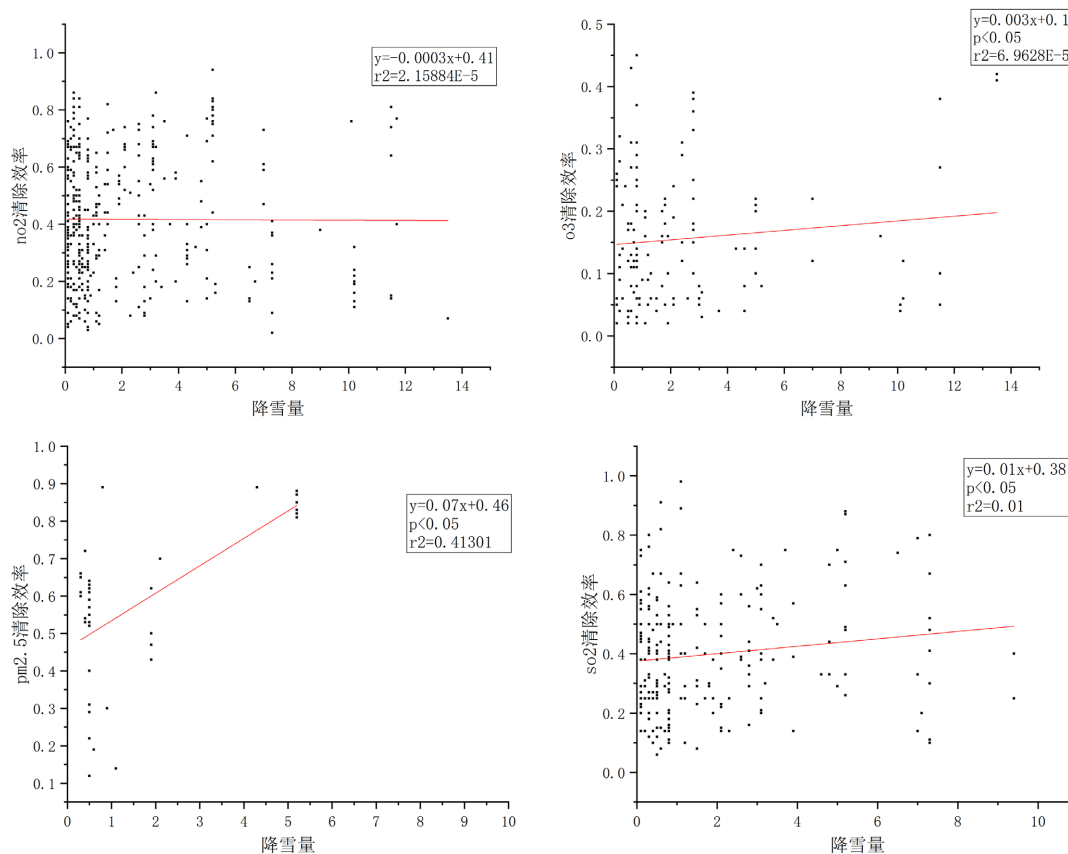
Table 4. Analysis of variance for snowfall grouping

表 4. 降雪量分组方差分析

		SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
优良 (1~100)	小雪	b	b	b	a	b	b
	中	b	b	ab	a	a	a
	大	b	a	ab	a	a	
	暴	a	b	a	a	a	
轻中 (101~200)	小雪					b	c
	中					a	b
	大						a
	暴					b	b
重度 (201~300)	小雪						
	中						
	大					a	a
	暴						

分析具体不同降雪量对清除作用的影响强弱。所有站点降雪量和清除效率做线性拟合分析。如图可以看出六种污染物的浓度差与降雪量均有线性关系。由图 1 可知, O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 均优显著的正相关。而 CO 和 NO<sub>2</sub> 呈负相关。





**Figure 1.** Linear correlation plot of removal efficiency versus snowfall  
**图 1.** 清除效率与降雪量的线性相关图

## 5.2. 降雪时间对清除作用的影响

在 2022 年 11 月到 3 月 21 日共 33 次降雪, 根据哈尔滨市、大庆市、齐齐哈尔市等十个城市共 43 个站点的 4188 个降雪样本。其中 1775 次正清除样本。降雪时间以降雪开始到降雪量小于 0.1 mm 为结束, 之间间隔 4 h 以下为一次降雪。将降雪时间分组, 为每 3 h 一组。

由表 5 可知, 降雪前污染物等级集中在优良组, 轻度污染和中度污染组。而重度污染只有 9 个样本, 严重污染的样本为 0。因此在以下的分析中, 以优良组, 轻中组的进行降雪时间比较, 以确保样本量充分, 保证研究的可行性和科学性。

**Table 5.** Statistical table of the sample size of snowfall time

**表 5.** 降雪时间样本数量统计表

AQI 等级	降雪时间	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
优	0~3	107	152	115	55	59	55
	4~6	66	88	77	44	21	24
	7~9	37	63	55	63	16	18
	10~12	24	42	41	17	16	24
	12	22	26	27	9	5	6

续表

良	0~3	0	4	0	0	68	39
	4~6	4	0	0	0	44	25
	7~9	0	0	0	0	47	44
	10~12	0	0	0	0	25	13
	12	0	0	0	0	19	3
轻度污染	0~3	0	0	0	0	13	9
	4~6	0	0	0	0	9	12
	7~9	0	0	0	0	0	3
	10~12	0	0	0	0	2	0
	12	0	0	0	0	3	7
中度污染	0~3	0	0	0	0	4	6
	4~6	0	0	0	0	2	10
	7~9	0	0	0	0	0	1
	10~12	0	0	0	0	0	1
	12	0	0	0	0	0	0
重度污染	0~3	0	0	0	0	0	9
	4~6	0	0	0	0	0	3
	7~9	0	0	0	0	0	0
	10~12	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0
严重污染	0~3	0	0	0	0	0	0
	4~6	0	0	0	0	0	0
	7~9	0	0	0	0	0	0
	10~12	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0

表 6 可知, 在不同降雪时间影响下, 优良组 O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub> 10 小时以上降雪时, 浓度差和清除效率相对较

**Table 6.** Average statistical table of concentration difference and removal efficiency of air quality under different snowfall times  
**表 6.** 空气质量在不同降雪时间下浓度差及清除效率平均统计表

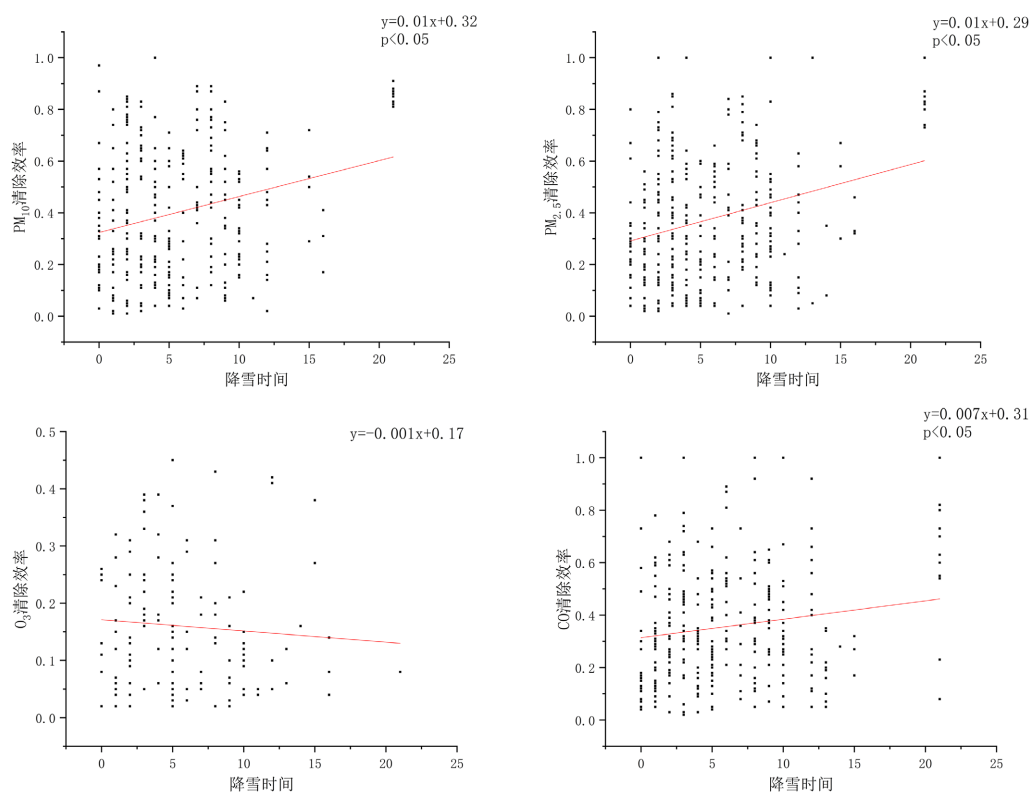
AQI 等级	降雪时间	SO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>		CO		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
		浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率	浓度差	清除效率
优良	0~3	5.91	0.38	12.84	0.40	0.27	0.33	10.00	0.15	21.49	0.30	13.39	0.38
	4~6	8.33	0.38	12.32	0.35	0.36	0.34	10.70	0.15	24.74	0.31	14.31	0.31

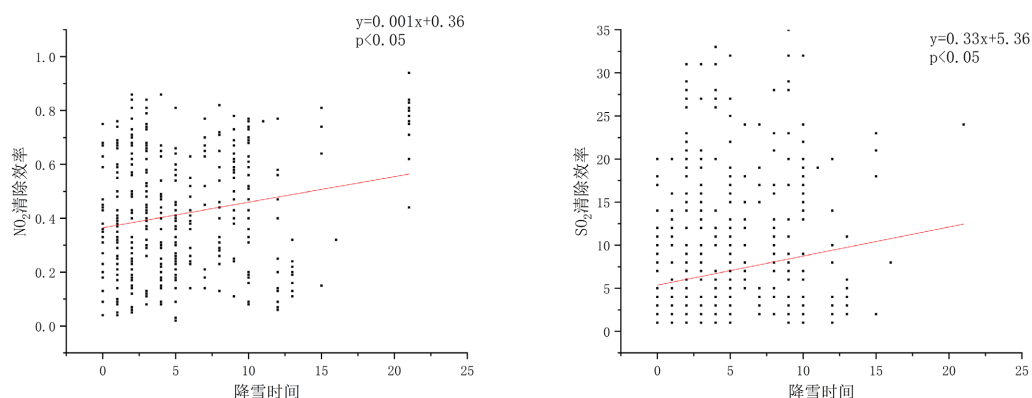
续表

优良	7~9	10.32	0.45	13.62	0.47	0.37	0.37	10.75	0.16	35.19	0.43	22.45	0.48
	10~12	11.22	0.45	14.00	0.43	0.37	0.38	11.40	0.21	35.63	0.46	11.65	0.35
	12	12.45	0.46	23.17	0.53	0.42	0.40	8.89	0.15	57.21	0.60	18.83	0.51
轻中	0~3									73.29	0.32	42.07	0.39
	4~6									59.36	0.58	43.37	0.65
	7~9											60.00	0.85
	10~12									32.50	0.61		
	12									144.67	0.81	90.88	0.36
重度	0~3											79.67	0.88
	4~6											153.00	
	7~9												
	10~12												
	12												

低；其他污染物  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{PM}_{10}$  在 10 小时内，随着降雪时间的增长，浓度差及清除效率之间增长。因此，优良组 10 小时内的在轻中组的  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ，及轻中组  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  在 10 小时及以上存在明显的随降雪时间增长，降雪前后的浓度差和清除效率更高。

而全省所有站点六种污染物的清除效率做线性拟合分析，图 2 显示，除  $\text{O}_3$  呈不显著负相关，其他五种污染物均呈显著正相关。





**Figure 2.** Linear correlation plot of clearance efficiency versus snowfall time

**图 2.** 清除效率与降雪时间的线性相关图

## 6. 结论

关于降雪清除作用的影响因素, 主要分析了 2 个主要的影响因素, 分别是降雪量、降雪时间。结果可知降雪量和降雪时间对污染物湿清除作用均有影响, 其中对  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  这两类大气颗粒物污染的清除作用最为明显。

在降雪量与清除效率的关系上, 除  $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}$  这两类气态污染物呈负相关, 及污染物的浓度随着降雪量的增大而减小,  $\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  均有显著的正相关。

在降雪时间与清除效率的关系上, 降雪时间对  $\text{O}_3$  是存在着一定的影响, 及随强度增加清除作用减小的负相关关系。

本文在前人研究的基础上对降雪的正清除进行分析, 由于负清除在降雪中其他环境因素的影响和由于污染过重超过湿清除作用的影响极限, 在本文中在分析对清除作用的影响因素中采用正清除样本。由此可知, 在降雪的湿清除作用下对空气污染具有一定的清洁作用, 且不仅仅对大气颗粒物, 对其他气态污染物也有一定的清除作用。且在不同的降雪量及降雪时间的影响下, 对不同污染物存在差异, 这对降雪天气空气污染的防治及监测提供了科学参考。

## 参考文献

- [1] Chate, D.M. (2005) Study of Scavenging of Submicron-Sized Aerosol Particles by Thunderstorm Rain Events. *Atmospheric Environment*, **39**, 6608-6619. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.063>
- [2] 成勤, 王清龙, 张翠, 等. 宜昌地区降水湿清除作用分析[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会论文集(一). 南昌: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2022: 429-439.
- [3] 付苹, 李吉庆, 司书成, 等. 空气污染暴露与高血压发病风险的关联: 基于英国生物银行的队列研究[J]. 中华疾病控制杂志, 2022, 26(10): 1229-1234. <https://doi.org/10.16462/j.cnki.zhjbkz.2022.10.020>
- [4] 盖新杰, 贾春明, 郑铁力, 等. 北方降雪对大气中有机污染物的净化[J]. 环境与健康杂志, 1995(6): 257-259. <https://doi.org/10.16241/j.cnki.1001-5914.1995.06.008>
- [5] B. Hicks, 陈世范. 湿清除和干清除过程[J]. 气象科技, 1987(2): 54-58. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.1987.02.009>
- [6] 王艳秋, 杨晓丽. 哈尔滨市降水形势对大气污染物浓度稀释的影响[J]. 自然灾害学报, 2007(5): 65-68.
- [7] 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(5): 523-530.
- [8] 刘玉彦. 中国昌吉的积雪清除大气颗粒物[J]. 全球 NEST 期刊, 2018, 26(6): 471-476.
- [9] 蔡仁, 李霞, 赵克明, 等. 乌鲁木齐大气污染特征及气象条件的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S1): 40-48.



- [10] 陈小敏, 邹倩, 杨乐, 等. 重庆中心城区不同类型降雨对  $PM_{2.5}$  清除作用分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1169-1185.
- [11] 汤天然, 陈建楠, 李广前, 等. 降雨对  $PM_{2.5}$  浓度的影响及人工降雨降低  $PM_{2.5}$  浓度的探讨[J]. 贵州气象, 2013, 37(4): 35-37.
- [12] 陈小敏, 邹倩, 周国兵. 重庆主城区冬春季降水强度对大气污染物影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(7): 113-121. <https://doi.org/10.13718/j.cnki.xsxb.2013.07.015>
- [13] 高煜中, 潘华盛, 张桂华, 等. 气象条件变化对哈尔滨市空气质量的影响[J]. 气象科技, 2003(6): 361-365. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2003.06.008>
- [14] 刁军, 董秋婷, 贺明慧, 等. 降雪对沈阳市大气颗粒物清除作用的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5): 162-168. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2020.140>
- [15] 张占峰, 甘露马, 小萍, 等. 降水对西宁市大气污染物浓度的影响分析[J]. 青海环境, 2016, 26(2): 57-61.
- [16] 杨莹, 王琨, 崔晨, 等. 哈尔滨市大气污染与气象因素的相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5945-5950.
- [17] 谢放尖, 李文青, 卢宁川, 等. 南京一次暴雪过程大气污染特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 9-14.
- [18] 贾宏杰, 孙丽. 降雪对哈尔滨市 2019 年冬季空气质量的影响[J]. 绿色科技, 2022, 24(14): 86-90. <https://doi.org/10.16663/j.cnki.lskj.2022.14.022>
- [19] Tai, A.P.K., Mickley, L.J. and Jacob, D.J. (2010) Correlations between Fine Particulate Matter ( $PM_{2.5}$ ) and Meteorological Variables in the United States: Implications for the Sensitivity of  $PM_{2.5}$  to Climate Change. *Atmospheric Environment*, **44**, 3976-3984. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>
- [20] Shan, G., Chen, X. and Zhu, L. (2015) Occurrence, Fluxes and Sources of Perfluoroalkyl Substances with Isomer Analysis in the Snow of Northern China. *Journal of Hazardous Materials*, **299**, 639-646.
- [21] Francová, A., Chrástný, V., Šillerová, H., Vítková, M., Kocourková, J. and Komárek, M. (2016) Evaluating the Suitability of Different Environmental Samples for Tracing Atmospheric Pollution in Industrial Areas. *Environmental Pollution*, **220**, 286-297.
- [22] Guo, E.G., *et al.* (2013) Influence of Typical Weather Conditions on the Airborne Particulate Matters in Urban Forests in Northern China. *China Environmental Science*, **33**, 1185-1198.
- [23] Malek, E., Davis, T., Martin, R.S. and Silva, P.J. (2006) Meteorological and Environmental Aspects of One of the Worst National Air Pollution Episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA. *Atmospheric Research*, **79**, 108-122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.05.003>
- [24] Witkowska, A. and Lewandowska, A.U. (2016) Water Soluble Organic Carbon in Aerosols ( $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ) and Various Precipitation Forms (Rain, Snow, Mixed) over the Southern Baltic Sea Station. *Science of the Total Environment*, **573**, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.123>