

校园大气中TSP、PM₁₀、PM_{2.5}的浓度监测与分析

徐森楠¹, 王丽丽^{1,2}

¹浙江农林大学暨阳学院生物环境学院, 浙江 诸暨

²浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年4月7日; 录用日期: 2024年5月8日; 发布日期: 2024年6月14日

摘要

校园大气质量与学生的生存环境息息相关, 大气中的污染物质直接与间接危害学生健康。为了监测校园大气的具体情况, 以2023年10月、12月以及2024年2月作为3个季节典型月在浙江农林大学暨阳学院南门口进行了早晨(7:30~9:30)和傍晚(17:30~19:30) 2个时段的颗粒物浓度监测, 并计算出TSP、PM₁₀、PM_{2.5}浓度。监测分析结果表明: 监测周期内, 温度与颗粒物的浓度总体呈正相关, 当温度在一定范围内逐渐上升时, 颗粒物的浓度也随之逐渐增加; 傍晚的颗粒物浓度总体高于早晨的颗粒物浓度。通过比较不同监测周期的浓度可以看出TSP、PM₁₀、PM_{2.5}浓度变化的起伏程度, 冬季要高于秋季和春季; TSP、PM₁₀、PM_{2.5}浓度整体上表现为: 冬季 > 秋季 > 春季, 即冬季的空气质量相对较差, 而春季的空气质量相对较好。

关键词

空气质量, 总悬浮颗粒物, 可吸入颗粒物, 细颗粒物

Concentration Monitoring and Analysis of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in the Campus Atmosphere

Sennan Xu¹, Lili Wang^{1,2}

¹School of Biological Environment, College of Jiyang, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Zhuji Zhejiang

²School of Environment and Resources, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 7th, 2024; accepted: May 8th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

The atmospheric quality of the campus is closely related to the living environment of students. In

order to monitor the specific situation of the atmosphere on the campus, October, December 2023 and February 2024 were used as three seasonal typical months at the south gate of Jiyang College of Zhejiang Agriculture and Forestry University. Degree monitoring and calculating the concentration of TSP, PM_{10} and $PM_{2.5}$. The monitoring and analysis results show that during the monitoring cycle, the temperature is generally positively correlated with the concentration of particulate matter. When the temperature gradually rises within a certain range, the concentration of particulate matter gradually increases; the concentration of particulate matter in the evening is generally higher than that of particulate matter in the morning. By comparing the concentrations of different monitoring cycles, we can see the fluctuation of the concentration of TSP, PM_{10} and $PM_{2.5}$, which is higher in winter than in autumn and spring; the overall concentration of TSP, PM_{10} and $PM_{2.5}$ is: winter > autumn > spring, that is, the air quality in winter is relatively poor, while in spring, the air quality is relatively good.

Keywords

Air Quality, Total Suspended Particulate Matter, Inhalable Particulate Matter, Fine Particulate Matter

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. 前言

1.1. 总悬浮颗粒物(TSP)的危害

总悬浮颗粒物是指那些漂浮在大气中的微小颗粒,其空气动力学当量直径不超过 100 微米。TSP 是这些颗粒物的缩写,其分为两大类,即人为来源和自然来源。人为来源主要涉及燃煤、燃油以及工业生产过程中排放的废气等。燃煤排放的烟尘、工业废气中的颗粒物以及地面的扬尘都是大气中总悬浮微粒的重要来源[1]。大气中 TSP 的组成错综复杂,随着时间和地点的变化而不断变化。直径超过 10 微米的颗粒物可能会被鼻毛拦截或通过咳嗽排出体外,也可能随着气流附着在皮肤上或进入眼睛,导致毛囊和汗腺阻塞,引发皮肤炎和眼结膜炎,甚至造成角膜损伤。长期吸入含有颗粒物的空气会导致鼻腔粘膜持续肿胀,引发肥大性鼻炎。

1.2. 可吸入颗粒物(PM_{10})的危害

PM_{10} 是指那些空气中直径不超过 10 微米的微粒,也被称为可吸入颗粒物。 PM_{10} 可被人体吸入,并在呼吸道、肺泡等部位沉积,从而引发疾病。通常直径为 10 微米的颗粒物会沉积在上呼吸道,而 5 微米以下的颗粒物能够深入到呼吸道的更深处,2 微米以下的则可进入细支气管和肺泡[2]。研究显示,在一定条件下, PM_{10} 可通过脂质过氧化作用破坏细胞膜并损伤 DNA,造成高度的细胞毒性; PM_{10} 可影响非特异性免疫功能,进入肺内后,肺泡巨噬细胞会吞噬这些颗粒并释放一系列细胞因子和前炎症因子; PM_{10} 还可能破坏机体的免疫监视,导致癌症和畸形的发生[3]。此外, PM_{10} 也可能对生殖系统造成损害,降低生育能力,并导致胎儿畸形等。

1.3. 细颗粒物($PM_{2.5}$)的危害

细颗粒物,又称 $PM_{2.5}$,是指环境中动力学直径小于或等于 2.5 微米的微小颗粒。2013 年 10 月 17 日,

世界卫生组织旗下的国际癌症研究机构发布了一份报告, 首次明确将大气污染列为人类致癌物, 并认定其为普遍和主要的环境致癌因素。据联合国环境规划署发布的《全球环境展望 5》报告显示, 近 200 万人过早死亡与颗粒物污染相关。研究表明, 长期暴露于 $PM_{2.5}$ 中可能诱发心血管疾病、呼吸道问题以及肺癌[4]。此外, $PM_{2.5}$ 容易吸附多环芳烃等有机污染物和重金属, 增加致癌、致畸、致突变的风险[5]。

1.4. 影响大气颗粒物浓度的因素

许多的外在因素都会影响颗粒物的浓度, 如温度、风力风向、大气压强、降水情况以及湿度条件等。本实验主要以暨阳校园南大门西广场的大气颗粒物为研究对象, 选定 2023 年 10 月、12 月以及 2024 年 2 月做以下研究:

- (1) 分别在相应月份的早晨和傍晚实验测得 TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的浓度。针对不同外部实验变量(温度)下对大气颗粒物浓度的影响。
- (2) 比较相同月份下早晨和傍晚的大气颗粒物浓度规律。
- (3) 比较不同月份下大气颗粒物浓度变化程度。

2. 实验材料和方法

2.1. 主要材料和仪器

实验所选择的场地为浙江农林大学暨阳学院南门西面广场, 时间为 2023 年 10 月、12 月以及 2024 年 2 月的早晨(7:30~9:30)和傍晚(17:30~19:30)。

实验所用到的材料有: 变色硅胶干燥剂(江苏汇达医疗器械有限公司); 定性滤纸(杭州特种纸业有限公司)。

实验采用的主要仪器有: JCH-120F 型智能中流量颗粒物采样器(青岛聚创环保有限公司); 101-3S 电热鼓风干燥箱(长葛市明途机械设备有限公司); 玻璃干燥器(江苏汇达医疗器械有限公司)。

2.2. 实验方法

(1) 从平衡室中取出滤膜, 滤膜的材质不应吸收或与废气中的气态化合物发生化学反应[6]。将干净滤膜连续称重 20 次, 去除最低值和最高值后求平均值得到其平均质量 m_0 。共计称量三张滤膜, 分别作为计算 TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量的初始数据。称量完毕后, 将干净滤膜以毛面向上放置于网板上。

(2) 到达预定监测点, 将采样器放置在平稳的地面上, 并避免阻挡风向。通入电源启动仪器后, 首先进行漏气检查, 若检查正常, 则采样器自动开始进行采样。当采样器完成采样, 仪器将自动停止工作, 并将采集到的数据信息保存下来。

(3) 返回实验室后, 取出切割头中含颗粒物的滤膜, 将其置于平衡室 24 小时, 并及时记录标准状态下的烟气体积 V_N 。24 小时后, 从平衡室中取出滤膜进行称量, 方法同称量 m_0 时一致, 分别得到 TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的质量 m_1 。最后利用公式计算得到 TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的浓度 C 。

(4) 在实验过程中, 记录可能会影响实验数据的温度要素。用温度计在实验开始 5 分钟内、实验进行中间时以及实验结束后 5 分钟内各记录一次环境温度, 然后通过计算得到该次实验的温度平均值。

2.3. 计算方法

从在《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中, 学校区域属于环境空气质量二类区。其中 24 小时平均浓度的 $TSP \leq 300 \mu g/m^3$ 、 $PM_{10} \leq 150 \mu g/m^3$ 、 $PM_{2.5} \leq 75 \mu g/m^3$ 。

$$C = \frac{m_1 - m_0}{V_N} \quad (1)$$

其中 C 表示颗粒物的浓度, m_1 表示带有颗粒物的干燥滤膜的质量, m_0 表示干净的干燥滤膜的质量, V_N 表示标准状态下的烟气体积。

3. 结果与讨论

3.1. 秋季校园大气颗粒物浓度

以浙江农林大学暨阳学院南门口西边广场作为实验场地, 使用中流量颗粒物采样器在 2023 年 10 月 14 日至 10 月 20 日的早晨以及傍晚这两个时间段进行 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的采样分析, 结果如图 1 所示。

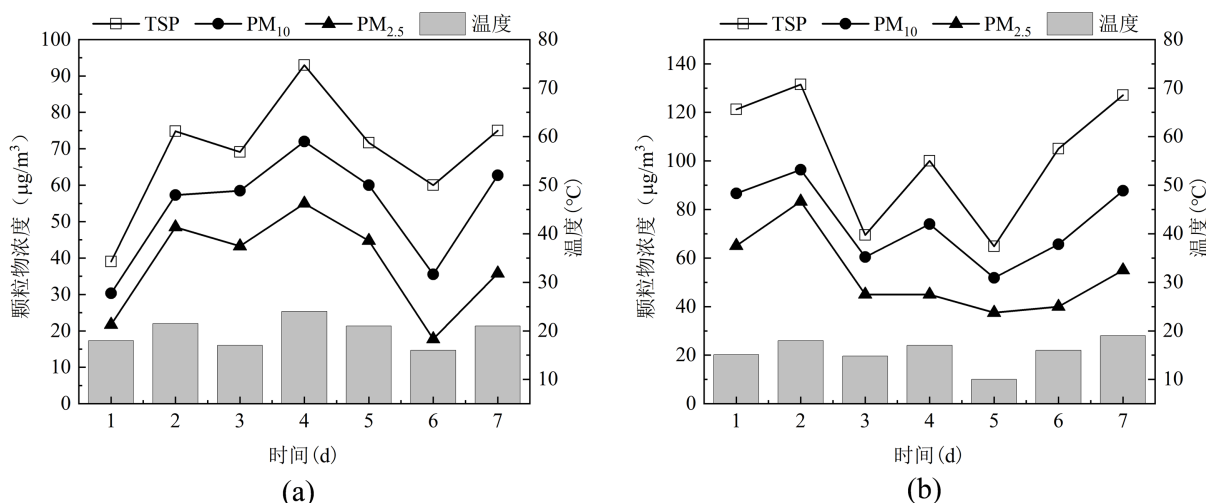


Figure 1. Atmospheric particulate concentration of Jiyang College campus in autumn. (a) Morning (sampling time 7:30~9:30); (b) Evening (sampling time 17:30~19:30)

图 1. 暨阳学院校园秋季大气颗粒物浓度。(a) 早晨(采样时间 7:30~9:30); (b) 傍晚(采样时间 17:30~19:30)

根据图 1(a)和图 1(b), 可以得知在相同季节气温变化的背景下, 温度与颗粒物的浓度总体上呈正相关关系。具体来说, 早晨的颗粒物浓度在 2023 年 10 月 17 日达到最高值, 此时早晨平均气温为 24℃, TSP 浓度为 92.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度为 72.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度为 55.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而早晨的 TSP 和 PM_{2.5} 最低浓度则出现在 2023 年 10 月 14 日, 当时平均气温为 18℃, TSP 浓度为 39.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度为 30.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。早晨的 PM_{2.5} 最低浓度出现在 2023 年 10 月 19 日, 当时平均气温为 17℃, PM_{2.5} 浓度为 17.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。相比之下, 傍晚的颗粒物浓度在 2023 年 10 月 15 日达到最高峰, 当时傍晚平均气温为 20℃, TSP 浓度为 131.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度为 96.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度为 83.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而最低浓度则出现在 2023 年 10 月 18 日傍晚, 当时平均气温为 10℃, TSP 浓度为 64.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度为 51.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度为 37.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

进一步对比图 1(a)与图 1(b)发现, 在 2023 年 10 月 14 日至 10 月 20 日期间, 傍晚的颗粒物浓度有 6 天均高于早晨的颗粒物浓度。其中, 早晚差距最大的一天是在 2023 年 10 月 14 日, TSP 浓度相差 82.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度相差 56.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度相差 43.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而早晚差距最小的一天是在 2023 年 10 月 16 日, TSP 浓度仅相差 0.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 浓度仅相差 1.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度仅相差 1.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。值得注意的是, 在 2023 年 10 月 18 日早晨的颗粒物浓度却高于晚上的情况。这一异常现象主要是由于当天下午气象台发布了狂风警报, 风力达到 6 级, 持续近 3 小时, 导致颗粒物在风力作用下不容易积聚, 最终导致当天晚上的采样浓度下降[7]。

通过对图 1(a)和图 1(b)的观察, 可知 2023 年 10 月 15 日傍晚与 2023 年 10 月 16 日早晨的颗粒物浓度存在较大差异。原因在于 15 日夜间出现了降雨天气, 一直持续到实验开始。雨水具有清洗空气中颗粒物

的作用, 可视为一种天然的空气净化剂[8]。雨滴与气溶胶态物质相互碰撞, 使颗粒物附着在雨滴上, 从而降低了空气中 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的浓度, 导致 16 日早晨的颗粒物浓度较前一天晚上显著减少。

进一步查阅参考资料得知, TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 浓度的变化趋势具有一致性[9]。但值得注意的是, 2023 年 10 月 16 日早晨的 PM₁₀ 浓度并没有符合这一规律。可能的原因是由于下雨天气, 导致采样后的滤膜含水量较高。尽管在平衡室中进行了 24 小时的干燥处理, 但这仍然不足以完全将滤膜中的水分完全除去。因此, 含水量较高的滤膜可能会导致 PM₁₀ 数据产生较大的误差。

3.2. 冬季校园大气颗粒物浓度

在 2023 年 12 月 25 日至 12 月 31 日期间的早晨和傍晚, 利用中流量颗粒物采样器对 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 进行了采样。大气颗粒物的浓度分析结果见图 2。

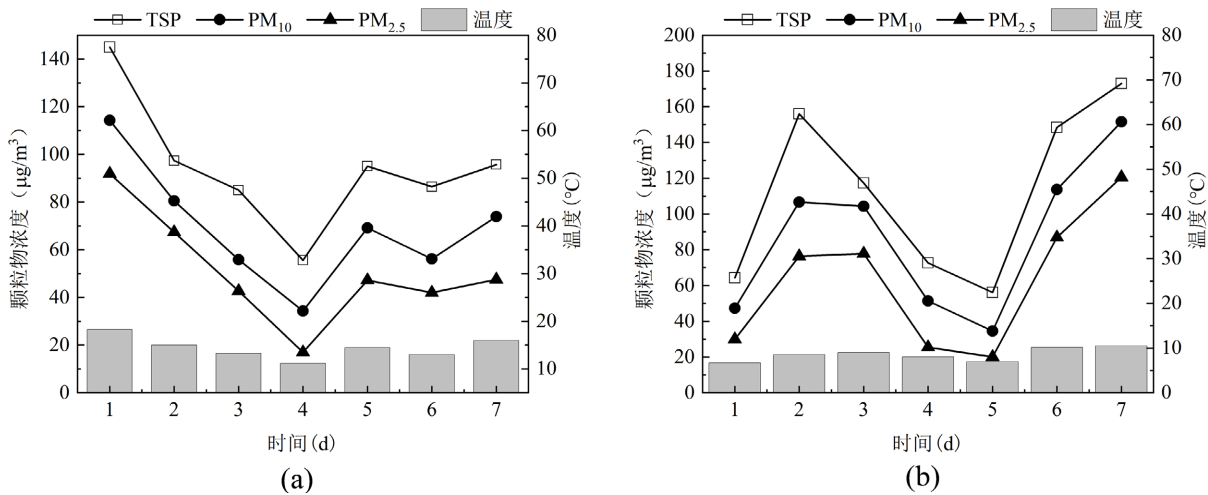


Figure 2. Atmospheric particulate concentration of Jiyang College campus in winter. (a) Morning (sampling time 7:30~9:30); (b) Evening (sampling time 17:30~19:30)

图 2. 暨阳学院校园冬季大气颗粒物浓度。(a) 早晨(采样时间 7:30~9:30); (b) 傍晚(采样时间 17:30~19:30)

根据图 2(a)和图 2(b)的数据显示, 在相同季节的气温变化条件下, 温度与大气颗粒物的浓度呈正相关。然而, 在 2023 年 12 月 30 日和 12 月 31 日这两天的傍晚, 尽管温度变化不大, 但颗粒物的浓度, 尤其是 PM_{2.5} 的浓度却有显著差异。这主要是因为 12 月 31 日傍晚是跨年夜, 附近居民区燃放烟花爆竹, 导致大气中颗粒物浓度升高, 进而使得采样浓度偏高。

通过比较图 2(a)与图 2(b)的数据, 可以看出, 在 2023 年 12 月 25 日至 12 月 31 日期间, 傍晚的颗粒物浓度有 5 天高于早晨的浓度。然而, 在 2023 年 12 月 25 日和 12 月 29 日的早晨, 颗粒物浓度相较于晚上的浓度更高, 这是因为气象台在这两天的早晨发布了雾霾警报, 其中 25 日为橙色警报, 29 日为黄色警报。雾霾天气导致大气中颗粒物产生积聚作用, 使得这两天早晨的采样浓度偏高[10]。

3.3. 春季校园大气颗粒物浓度

2024 年 2 月 23 日至 2 月 29 日, 利用中流量颗粒物采样器在早晨和傍晚这两个时间段进行 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的采样。大气颗粒物的浓度分析结果见图 3。

根据图 3(a)和图 3(b)的数据, 可以观察到在相同季节气温变化的情况下, 温度与颗粒物的浓度整体上呈现正相关关系。通过对比可知, 在 2024 年 2 月 23 日至 2 月 29 日这一周中, 傍晚时段的颗粒物浓度有 6 天都高于早晨时段的浓度。值得注意的是, 在 2024 年 2 月 26 日的早晨和傍晚, 颗粒物浓度基本保

持不变, 其原因目前尚不清楚。

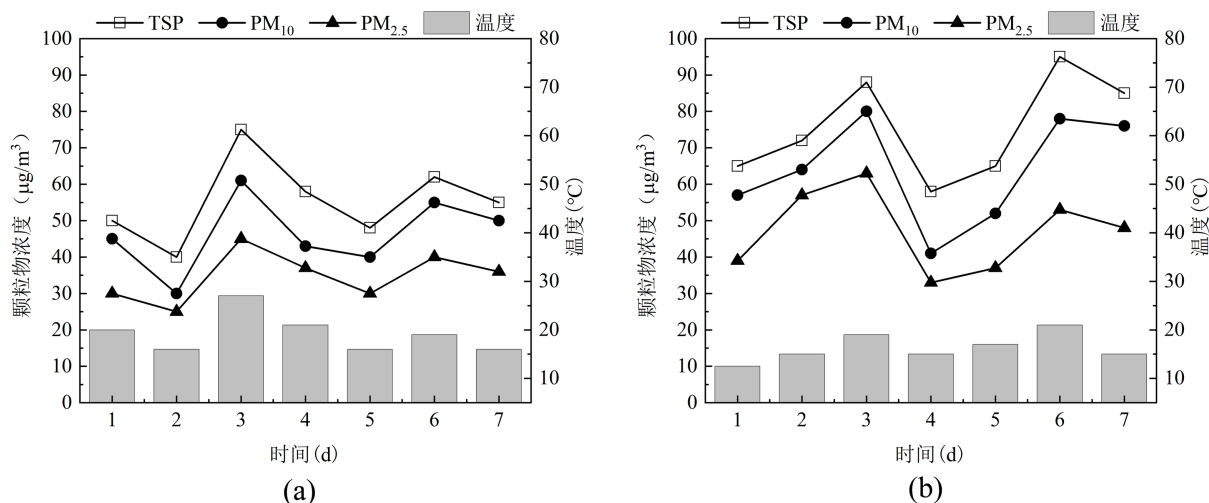


Figure 3. Atmospheric particulate concentration of Jiyang College campus in spring. (a) Morning (sampling time 7:30~9:30); (b) Evening (sampling time 17:30~19:30)

图 3. 暨阳学院校园春季大气颗粒物浓度。(a) 早晨(采样时间 7:30~9:30); (b) 傍晚(采样时间 17:30~19:30)

3.4. 不同季节的空气质量比较分析

采用中流量颗粒物采样器在浙江农林大学暨阳学院南门口西边广场进行实验, 取 2023 年 10 月、12 月以及 2024 年 2 月这三个时间段对 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 进行了采样。大气颗粒物在不同季节下的浓度比较分析结果见图 4、图 5 和图 6。

通过对比图 4、图 5 和图 6 的数据, 可以观察到 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度整体表现为: 冬季 > 秋季 > 春季。这说明冬季的空气质量相对较差, 而春季的空气质量相对较好。在图上可以看出, TSP 在不同季节的浓度差异比 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 要大, 其中浓度差距最大的一天出现在冬季和春季的第 2 天, 达到了 70.68 µg/m³。PM₁₀ 的浓度差异最大的一天出现在冬季和春季的第 7 天, 达到了 49.75 µg/m³, 而 PM_{2.5} 的浓度差异最大的一天也出现在冬季和春季的第 7 天, 达到了 42.03 µg/m³。

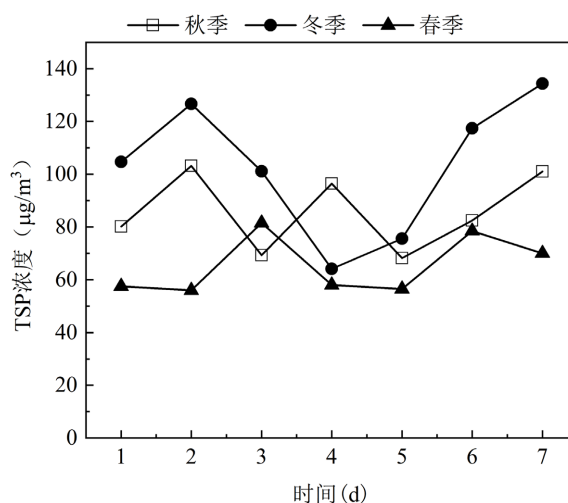


Figure 4. Comparison of TSP concentrations in different seasons

图 4. 不同季节的 TSP 浓度对比

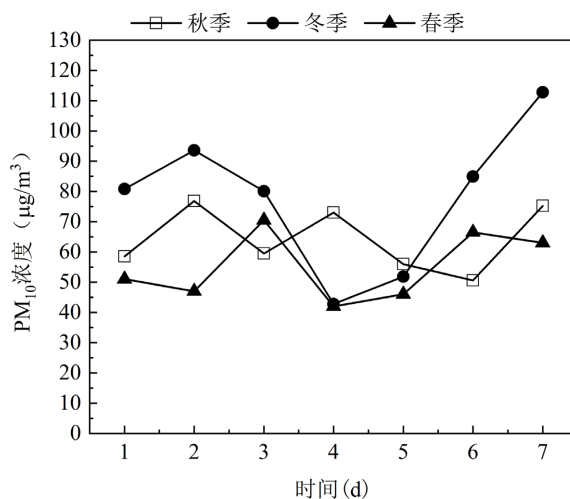


Figure 5. Comparison of PM₁₀ concentrations in different seasons

图 5. 不同季节的 PM₁₀ 浓度对比

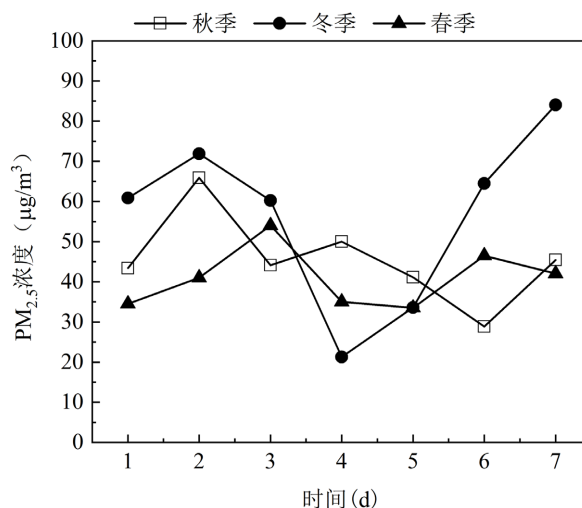


Figure 6. Comparison of PM_{2.5} concentrations in different seasons

图 6. 不同季节的 PM_{2.5} 浓度对比

根据图 4、图 5 和图 6 的数据分析, 不论是 TSP、PM₁₀ 还是 PM_{2.5}, 冬季每天的浓度变化幅度都高于秋季和春季。这是因为冬季的气候条件相对于其他两个季节更加复杂多变, 比如频繁的风向风力变化以及不可控的逆温现象都会对浓度产生影响。

根据相关文献资料显示, 在 2019 年 11 月 28 日至 12 月 11 日期间, 杭州市的 PM_{2.5} 日均质量浓度曾达到 375.00 μg/m³, 相当于 GB3095-2012 二级标准的 5.0 倍[11]。同时, PM₁₀ 浓度与 PM_{2.5} 浓度的变化趋势一致, 也呈显著上升趋势。相比之下, 2023 年 12 月 25 日至 12 月 31 日期间, 诸暨市的 PM_{2.5} 浓度最高为 84.03 μg/m³, PM₁₀ 浓度最高为 112.75 μg/m³, 明显低于 2019 年杭州市的大气颗粒物浓度水平。由此可以得出结论, 诸暨市的空气质量较杭州市更为优越。

4. 结论

通过对不同季节下大气颗粒物浓度的分析研究, 得出以下实验结论:

(1) 不同季节的温度与颗粒物的浓度总体呈正相关, 当温度在一定范围内逐渐升高时, 颗粒物的浓度

也随之逐渐增加。

(2) 不同季节的实验周期内, 傍晚的颗粒物浓度普遍高于早晨的颗粒物浓度。

(3) TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 浓度的波动程度, 冬季要高于秋季和春季。

(4) 整体而言, TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的浓度呈现出冬季 > 秋季 > 春季的趋势, 这表明了冬季的空气质量相对较差, 而春季的空气质量相对较好。

(5) 诸暨市的空气质量较杭州市更为优越。

基金项目

本文由暨阳 533 人才项目(JY21E0102)资助。

参考文献

- [1] Wang, Y.S., Yao, L., Wang, L.L., *et al.* (2014) Mechanism for the Formation of the January 2013 Heavy Haze Pollution Episode over Central and Eastern China. *Science China Earth Sciences*, **57**, 14-25.
<https://doi.org/10.1007/s11430-013-4773-4>
- [2] Orona, S.N., Astort, F., Maglione, A.G., *et al.* (2020) Hazardous Effects of Urban Air Particulate Matter Acute Exposure on Lung and Extrapulmonary Organs in Mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **19**, Article 110120.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110120>
- [3] Covarrubias, G.D., Díaz, R.I., Linares, G.J., *et al.* (2024) Epigenetic Mechanisms of Particulate Matter Exposure: Air Pollution and Hazards on Human Health. *Frontiers in Genetics*, **14**, Article 1306600.
- [4] 邢延峰. 大气颗粒物污染危害及控制技术[J]. 资源节约与环保, 2016(4): 122.
- [5] 张文丽, 崔九思, 戚其平. 空气细颗粒物(PM_{2.5})生物效应指标研究进展[J]. 卫生研究, 2001, 30(6): 379-382.
- [6] 酆冰峰, 刘含笑, 郭高飞, 等. 超低排放条件下烟尘、PM_{2.5} 测试方法研究[C]//第十八届中国电除尘学术会议论文集: 2019 年卷. 2019: 639-646.
- [7] Zhang, B., Jiao, L., Xu, G., *et al.* (2018) Influences of Wind and Precipitation on Different-Sized Particulate Matter Concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10}). *Meteorology and Atmospheric Physics*, **130**, 383-392.
<https://doi.org/10.1007/s00703-017-0526-9>
- [8] Ouyang, W., Guo, B., Cai, G., *et al.* (2015) The Washing Effect of Precipitation on Particulate Matter and the Pollution Dynamics of Rainwater in Downtown Beijing. *Science of the Total Environment*, **505**, 306-314.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.062>
- [9] 程昊, 康娜, 张佳欣, 张嘉月. 南京冬季典型霾天气过程多元对比分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 993-1004.
- [10] Guo, L.J., Guo, X.L., Fang, C.G., *et al.* (2015) Observation Analysis on Characteristics of Formation, Evolution and Transition of a Long-Lasting Severe Fog and Haze Episode in North China. *Science China Earth Sciences*, **58**, 329-344.
- [11] 王琼真, 于燕, 孟伟江, 等. 一次长三角大气重污染期间浙江典型城市大气 PM_{2.5} 污染成因分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1076-1081. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4924-2>