· 调查报告与分析 ·

2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期大气污染特征及人群健康风险评价

贾芯芮[1]，魏娜娜[2]，杨升美[2]，张雯宇[1]，李欢[1]，岳宣志[1]，朱佳珂[1]，张文倩[1,2]，武多多[3]，韩见弘[4]，范耀春[1,2,5]

1. 内蒙古医科大学公共卫生学院，呼和浩特 010059；
2. 内蒙古自治区疾病预防控制中心，呼和浩特 010080；
3. 内蒙古科技大学包头医学院公共卫生学院，包头 014040；
4. 内蒙古自治区环境监测总站呼和浩特分站，呼和浩特 010011；
5. 内蒙古自治区个体化用药工程技术研究中心，通辽 028000

通信作者：范耀春，E-mail：fyc840815@163.com；韩见弘，E-mail：150161@126.com

【摘　要】目的 了解 2017—2022 年内蒙古呼和浩特市采暖期（每年 10 月 15 日至次年 4 月 15 日）和非采暖期（每年 4 月 16 日至次年 10 月 14 日）大气污染特征及人群健康风险，为该地区制定科学的环境保护政策提供参考依据。**方法** 收集 2017 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日呼和浩特市生态环境监测站采暖期与非采暖期监测污染物资料绘制污染物时间序列图，并采用美国环境保护署（USEPA）推荐模型计算健康风险值评估大气污染物对人群造成的健康风险。**结果** 2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期分别为 1 099 d 和 1 092 d，采暖期和非采暖期可吸入颗粒物（PM_{10}）、细颗粒物（$PM_{2.5}$）、二氧化硫（SO_2）、二氧化氮（NO_2）、一氧化碳（CO）、臭氧日最大 8 h 平均（$O_{3\text{-}8\,h}$）浓度超标率分别为 16.7% 和 4.0%、18.4% 和 1.1%、0 和 0、2.2% 和 0.1%、0.1% 和 0、0 和 12.5%；采暖期与非采暖期比较，采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 NO_2 超标率均高于非采暖期，$O_{3\text{-}8\,h}$ 超标率低于非采暖期（均 P<0.001）；2017—2022 年呼和浩特市采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和非采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、$O_{3\text{-}8\,h}$ 年均质量浓度均呈下降趋势（均 P<0.001），且采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 各年份年均质量浓度均高于非采暖期，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 各年份年均质量浓度则低于非采暖期（均 P<0.001）；时间序列图显示，2017—2022 年呼和浩特市 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 日均浓度呈现为采暖期浓度高非采暖期浓度低的特征，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 日均浓度则呈现为采暖期浓度低非采暖期浓度高的特征；大气污染物采暖期与非采暖期日均浓度对比图结果亦显示，2017—2022 年呼和浩特市各年份采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 日均浓度均高于非采暖期，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 日均浓度低于非采暖期，差异均有统计学意义（均 P<0.001）；2017—2022 年呼和浩特市 PM_{10} 的非致癌风险值在采暖期和非采暖期均>1×10^{-6}，$PM_{2.5}$ 的非致癌风险值在采暖期均>1×10^{-6} 而在非采暖期均<1×10^{-6}，SO_2 和 NO_2 的非致癌风险评估值在采暖期和非采暖期均<1×10^{-6}。**结论** 2017—2022 年呼和浩特市大气污染情况在采暖期均较非采暖期严重，该地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 超标较重，对人群健康具有潜在风险。

【关键词】 大气污染特征；人群健康风险评价；采暖期；非采暖期；呼和浩特市

Assessment of air pollution characteristics and population health risks during heating and non-heating seasons in Hohhot city from 2017 to 2022

JIA Xinrui[1], WEI Nana[2], YANG Shengmei[2], ZHANG Wenyu[1], LI Huan[1], YUE Xuanzhi[1], ZHU Jiake[1], ZHANG Wenqian[1,2], WU Duoduo[3], HAN Jianhong[4], FAN Yaochun[1,2,5] (*1. School of Public Health*, *Inner Mongolia Medical University*, *Hohhot* 010059, *China*; *2. Inner Mongolia Autonomous Region Center for Disease Control and Prevention*, *Hohhot* 010080, *China*; *3. School of Public Health*, *Baotou Medical College*, *Inner Mongolia University of Science and Technology*, *Baotou* 014040, *China*; *4. Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Station Hohhot Branch Station*, *Hohhot* 010011, *China*; *5. Inner Mongolia Engineering and Technical Research Center of Personzlized Medicine*, *Tongliao* 028000, *China*)

Corresponding authors: FAN Yaochun, E-mail: fyc840815@163.com; HAN Jianhong, E-mail: 150161@126.com

【Abstract】 Objective To understand the characteristics of air pollution and the associated population health risks during the heating season (October 15 to April 15 of the following year) and the non-heating season (April 16 to October 14 of the following year) in Hohhot city, Inner Mongolia, from 2017 to 2022, and to provide a reference for the development of scientific environmental protection policies in this region. **Methods** Data on monitored pollutants during the heating and non-heating seasons from January 1, 2017, to December 31, 2022, were collected from the Hohhot

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1144457

基金项目：2018 年空气污染（雾霾）对人群健康影响监测工作方案（国卫办疾控函 [2018]146 号）；全国空气污染（雾霾）对人群健康影响监测与防护项目（国卫办疾控函 [2021]250 号）；内蒙古自然科学基金（2024MS03039；2024QN08087）

第一作者：贾芯芮（1999—），硕士在读，研究方向：环境卫生。

收稿日期：2024-03-18　修回日期：2024-10-06　录用日期：2024-11-21

利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

Ecological Environment Monitoring Station. Time series plots of pollutants were generated, and health risk values were calculated using the model recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) to assess the health risks posed by air pollutants to the population. **Results** From 2017 to 2022, there were 1 099 days in the heating season and 1 092 days in the non-heating season in Hohhot city. The exceedance rates of inhalable particulate matter (PM_{10}), fine particulate matter ($PM_{2.5}$), sulfur dioxide (SO_2), nitrogen dioxide (NO_2), carbon monoxide (CO), and 8-hour ozone ($O_{3\text{-}8\ h}$) concentrations during the heating and non-heating seasons were 16.7% and 4.0%, 18.4% and 1.1%, 0 and 0, 2.2% and 0.1%, 0.1% and 0, and 0 and 12.5%, respectively. Compared with the non-heating season, the exceedance rates of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and NO_2 were higher during the heating season, while the exceedance rate of $O_{3\text{-}8\ h}$ was lower during the heating season (all P<0.001). From 2017 to 2022, the annual average mass concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, and CO during both the heating and non-heating seasons showed a downward trend (all P<0.001). The annual average mass concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, and CO were higher during the heating season than during the non-heating season for each year, while the annual average mass concentration of $O_{3\text{-}8\ h}$ was lower during the heating season (all P<0.001). Time series plots showed that the daily average concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, and CO in Hohhot city from 2017 to 2022 were higher during the heating season than during the non-heating season, while the daily average concentration of $O_{3\text{-}8\ h}$ was lower during the heating season. Comparison of the daily average concentrations of air pollutants between the heating and non-heating seasons also showed that the daily average concentrations of PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, and CO were higher during the heating season than during the non-heating season for each year from 2017 to 2022, while the daily average concentration of $O_{3\text{-}8\ h}$ was lower during the heating season; these differences were all statistically significant (all P<0.001). From 2017 to 2022, the non-carcinogenic risk value of PM_{10} was > 1×10^{-6} during both the heating and non-heating seasons in Hohhot city. The non-carcinogenic risk value of $PM_{2.5}$ was > 1×10^{-6} during the heating season and <1×10^{-6} during the non-heating season. The non-carcinogenic risk values of SO_2 and NO_2 were <1×10^{-6} during both the heating and non-heating seasons. **Conclusions** From 2017 to 2022, air pollution in Hohhot city was more severe during the heating season than during the non-heating season. PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution was particularly serious in this region, posing potential risks to human health.

【**Keywords**】 air pollution characteristics; population health risk assessment; heating season; non-heating season; Hohhot city

随着社会的发展和城市化进程的加快，环境污染问题日益突出，2019 年世界卫生组织已将气候变化和大气污染列为威胁人类健康的十大问题之首[1]。研究表明，大气污染具有明显的季节性波动，冬季的污染水平普遍高于夏季[2–3]，采暖期的大气污染特征与非采暖期明显不同，且各时期的大气成分差异明显[4–5]。在采暖期间，污染物排放量激增[6]，包括可吸入颗粒物（particulate matter 10，PM_{10}）、细颗粒物（particulate matter 2.5，$PM_{2.5}$）、二氧化硫（sulfur dioxide，SO_2）和氮氧化物（nitrogen oxide，NO_X）等，可直接影响空气质量并对人类健康带来风险[7–8]。即使在非采暖季节，工业排放和交通运输工具尾气等污染源依旧对空气质量造成影响，且其影响程度受气象条件的调节[9]，从而影响居民的日常生活和工作环境。内蒙古呼和浩特市具有典型的温带大陆季风性气候[10]，不仅是中国北方城市的代表之一，也是干旱半干旱地区的典型代表之一。为了解 2017—2022 年呼和浩特市采暖期（每年 10 月 15 日至次年 4 月 15 日）和非采暖期（每年 4 月 16 日至次年 10 月 14 日）大气污染特征及人群健康风险，为该地区制定科学的环境保护政策和人群健康策略提供参考依据，本研究收集 2017 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日呼和浩特市生态环境监测站采暖期与非采暖期监测污染物资料绘制污染物时间序列图，并采用美国环境保护署（United States Environmental Protection Agency，USEPA）推荐模型计算健康风险值评估大气污染物对人群造成的健康风险。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源　呼和浩特市生态环境监测站采暖期与非采暖期监测污染物资料来源于呼和浩特市生态环境监测站 2017 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日大气污染物监测数据，污染物指标包括 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、二氧化氮（nitrogen dioxide，NO_2）、一氧化碳（carbonic oxide，CO）和臭氧（ozone，O_3）日最大 8 h 平均（$O_{3\text{-}8\ h}$）浓度资料。

1.2 大气污染物暴露剂量计算　大气污染物 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_2 主要经呼吸途径暴露[11]，经呼吸途径暴露剂量的计算公式为：

$$ADD = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ [12]

式中，ADD 为非致癌物经呼吸道的日均暴露剂量 [mg/(kg·d)]；C 为某环境介质中污染物的质量浓度（mg/m^3）；IR 为摄入量，即呼吸速率（m^3/d）；EF 为暴露频率（天/年）；ED 为暴露持续时间；BW 为体重；AT 为平均暴露时间。参考暴露参数采用《中国人群暴露参数手册（成人卷）》[12]，呼吸速率为 15.8 m^3/d，暴露频率为 365 天/年，暴露持续时间为 70 年体重 62 kg 平均暴露时间为 25 550 d。

1.3 健康风险评价　本研究采用 USEPA 推荐的非致癌物通过呼吸途径最终进入人体的非致癌风险评价模型[13]评估人群暴露于大气污染物

（PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_2）的非致癌健康风险，由于 USEPA 等机构并未公布 CO 和 $O_{3\text{-}8\,h}$ 的健康风险参考剂量，因此本研究对此 2 种污染物暂不进行评价。

1.3.1 NO_2 和 SO_2 的健康风险评价模型 NO_2 和 SO_2 所致的健康风险计算公式为：

$$R = ADD \times 10^{-6}/(RfD \times 70)^{[11]}$$

式中，R 为人体暴露某污染物的健康风险，无量纲；ADD 为污染物的日均暴露剂量 [mg/(kg·d)]；10^{-6} 指非致癌性污染物的可接受风险水平；RfD 为污染物在呼吸暴露途径下的参考剂量 [mg/(kg·d)]；70 为平均寿命（年）。SO_2 的 RfD（呼吸途径）为 0.023 mg/(kg·d)，NO_2 的 RfD（呼吸途径）为 0.029 mg/(kg·d)[14]。采用 USEPA 推荐的可接受风险值为 1×10^{-6}[15] 作为健康风险评价依据。

1.3.2 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的健康风险评价模型 采用非致癌效应污染物健康风险评估模型对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 进行健康风险评价，其计算公式为：

$$R = \left(\frac{C}{RfD}\right) \times 10^{-6[16]}$$

式中，R 为污染物产生的健康风险，无量纲；C 为终生日均暴露计量（μg/m³）；RfD 为待评价污染物的参考浓度（μg/m³）。PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的 RfD 值分别为 50 μg/m³ 和 25 μg/m³[17–18]。采用 USEPA 推荐的可接受风险值为 1×10^{-6} 作为健康风险评价依据[15]。

1.4 统计分析 对 2017—2022 年呼和浩特市大气污染物资料进行描述性分析，分析采暖期和非采暖期大气污染物（PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和 $O_{3\text{-}8\,h}$）的污染特征与健康风险。本研究数据均不符合正态分布，故采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 进行统计描述。采用 Excel 2024 绘制污染物时间序列图。应用 SPSS 26.0 软件对采暖期与非采暖期的大气污染物超标率差异进行 χ^2 检验，超过 GB 3095—2012《环境空气质量标准》[19] 中 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和 $O_{3\text{-}8\,h}$ 的标准即为超标；对采暖期和非采暖期大气污染物的浓度差异进行 Kruskal-Wallis 检验和 Mann-Whitney U 检验，采用 Spearman 等级相关性分析方法对 2017—2022 年呼和浩特市采暖期与非采暖期的 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和 $O_{3\text{-}8h}$ 浓度以及 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_2 的健康风险值进行趋势性检验，检验水准为双侧检验 $\alpha = 0.05$。

2 结 果

2.1 2017—2022 年呼和浩特市采暖期与非采暖期大气污染物超标情况比较 2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期分别为 1 099 d 和 1 092 d，采暖期和非采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、$O_{3\text{-}8\,h}$ 浓度超标率分别为 16.7%（184/1 099）和 4.0%（44/1 092）、18.4%（202/1 099）和 1.1%（12/1 092）、0（0/1 099）和 0（0/1 092）、2.2%（24/1 099）和 0.1%（1/1 092）、0.1%（1/1 099）和 0（0/1 092）、0（0/1 099）和 12.5%（136/1 092）；采暖期与非采暖期比较，采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 NO_2 超标率均高于非采暖期，$O_{3\text{-}8h}$ 超标率低于非采暖期（均 P<0.001）。

2.2 2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期大气污染物变化趋势（表 1，图 1） 2017—2022 年呼和浩特市采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和非采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、$O_{3\text{-}8h}$ 年均质量浓度均呈下降趋势（均 P<0.001）；采暖期与非采暖期比较，采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 各年份年均质量浓度均高于非采暖期，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 各年份年均质量浓度则低于非采暖期（均 P<0.001）。时间序列图显示，2017—2022 年呼和浩特市 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 日均浓度呈采暖期浓度高非采暖期浓度低的特征，而 $O_{3\text{-}8h}$ 日均浓度则呈采暖期浓度低非采暖期浓度高的特征（见图 1）；大气污染物采暖期和非采暖期日均浓度对比图结果亦显示，2017—2022 年呼和浩特市各年份采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 日均浓度均高于非采暖期，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 日均浓度低于非采暖期，差异均有统计学意义（均 P<0.001）。

表 1 2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期 6 种大气污染物年均质量浓度及趋势性检验 [$M(P_{25}, P_{75})$]

Table 1 Annual average mass concentrations and trend test [$M(P_{25}, P_{75})$] of six air pollutants during the heating and non-heating periods in Hohhot city from 2017 to 2022

时期	大气污染物	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	r_s值	P值
采暖期	PM_{10}/(μg/m³)	107.44(67.11, 147.11)	111.13(69.38, 154.38)	89.00(49.86, 121.29)	83.19(49.84, 126.34)	78.25(46.25, 116.54)	55.19(33.72, 81.38)	–0.297	<0.001
	$PM_{2.5}$/(μg/m³)	54.33(29.33, 87.78)	48.38(28.25, 69.00)	45.14(24.86, 70.29)	40.81(22.31, 73.50)	36.19(19.72, 54.25)	27.06(14.75, 39.38)	–0.268	<0.001
	SO_2/(μg/m³)	41.89(27.67, 54.11)	26.63(19.75, 34.25)	19.00(13.86, 24.86)	16.50(11.94, 22.44)	13.81(9.38, 18.50)	12.75(9.88, 15.84)	–0.680	<0.001
	NO_2/(μg/m³)	55.22(39.33, 68.33)	47.63(36.88, 61.25)	47.29(32.71, 60.00)	38.56(27.88, 51.47)	33.75(23.25, 46.00)	30.92(19.78, 42.35)	–0.386	<0.001
	CO/(mg/m³)	1.69(1.12, 2.21)	1.40(1.07, 1.80)	1.29(0.87, 1.73)	1.12(0.74, 1.68)	0.81(0.60, 1.20)	0.64(0.48, 0.83)	–0.574	<0.001
	$O_{3\text{-}8\,h}$/(μg/m³)	63.56(49.67, 87.67)	65.38(48.5, 81.38)	61.14(41.57, 82.43)	68.25(48.25, 84.44)	66.88(49.72, 81.91)	70.46(47.59, 87.22)	–0.002	0.941
非采暖期	PM_{10}/(μg/m³)	77.78(52.86, 103.42)[a]	64.25(44.84, 94.19)[b]	47.00(31.96, 64.43)[b]	42.69(31.97, 61.66)[b]	40.81(27.35, 60.24)[b]	41.19(26.83, 57.66)[b]	–0.401	<0.001

续表 1
Table 1 Continued

时期	大气污染物	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	r_s值	P值
	$PM_{2.5}$/(μg/m³)	26.39(17.67, 35.36)[b]	23.75(14.72, 36.38)[b]	18.86(13.39, 27.29)[b]	16.81(12.38, 24.06)[b]	16.61(11.97, 24.19)[b]	16.25(9.63, 24.13)[b]	–0.308	<0.001
	SO_2/(μg/m³)	13.33(11.00, 15.67)[b]	10.50(9.09, 12.50)[b]	8.14(7.14, 9.86)[b]	7.13(6.13, 8.69)[b]	7.38(6.47, 8.63)[b]	7.20(6.00, 8.45)[b]	–0.639	<0.001
	NO_2/(μg/m³)	37.89(31.14, 46.64)[b]	33.56(24.5, 41.00)[b]	31.71(23.39, 39.79)[b]	23.88(18.34, 29.28)[b]	21.81(16.31, 27.06)[b]	23.56(17.88, 30.63)[b]	–0.422	<0.001
	CO/(mg/m³)	0.74(0.66, 0.87)[b]	0.89(0.80, 1.00)[b]	0.64(0.56, 0.74)[b]	0.63(0.54, 0.71)[b]	0.49(0.40, 0.59)[b]	0.44(0.36, 0.52)[b]	–0.676	<0.001
	$O_{3\text{-}8\,h}$/(μg/m³)	129.39(106.00, 155.44)[b]	122.75(100.31, 143.20)[b]	121.29(101.04, 142.43)[b]	115.06(92.50, 136.41)[b]	115.19(95.16, 138.17)[b]	116.75(98.44, 138.13)[b]	–0.154	<0.001

注：采暖期与非采暖期同年份比较，a P<0.01；b P<0.001。

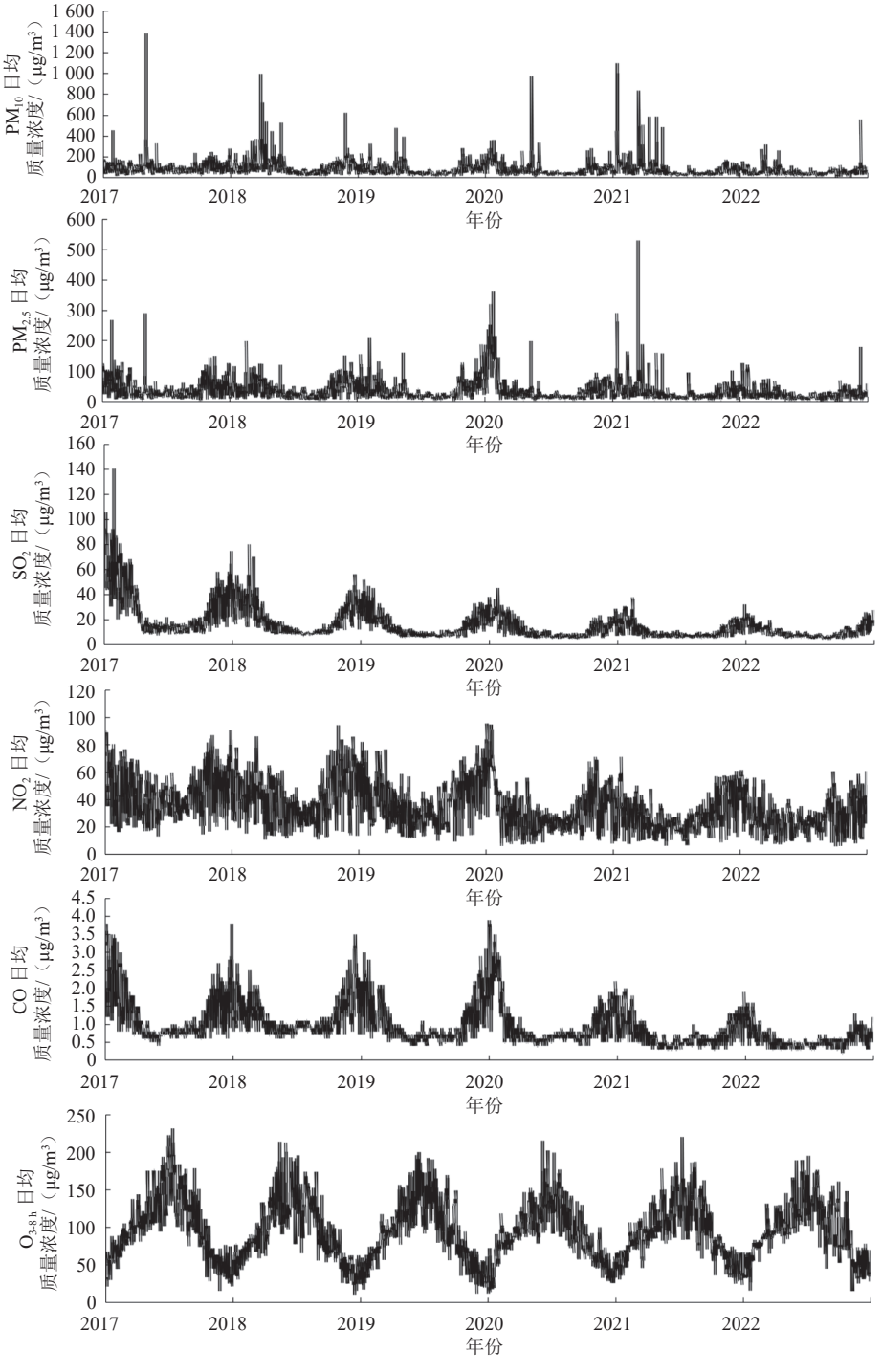


图 1　2017—2022 年呼和浩特市大气污染物 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO 和 $O_{3\text{-}8\,h}$ 的时间序列分布图
Fig. 1　Time series distribution of air pollutants PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, CO, and $O_{3\text{-}8\,h}$ in Hohhot city from 2017 to 2022

2.3　2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期大气污染人群健康风险评价（表 2）　采用 USEPA 推荐的可接受风险值为 1×10^{-6} 作为健康风险评价依据，结果显示，2017—2022 年采暖期

和非采暖期 PM_{10} 的非致癌风险评估值均>1×10^{-6}，$PM_{2.5}$ 的非致癌风险评估值在采暖期均>1×10^{-6}，在非采暖期均<1×10^{-6}；SO_2 和 NO_2 的非致癌风险评估值均<1×10^{-6}，均处于可接受水平，且非致癌风险均呈逐年下降趋势（r_s= –0.647 和–0.416，均 P<0.001）。

表 2 2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期 4 种大气污染物非致癌风险评估值及趋势性检验

Table 2 Non-carcinogenic risk assessment values and trend test of four air pollutants during the heating and non-heating periods in Hohhot city from 2017 to 2022

时期	大气污染物	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	r_s值	P值
采暖期	PM_{10}	2.20×10^{-6}	2.65×10^{-6}	1.87×10^{-6}	1.97×10^{-6}	2.23×10^{-6}	2.20×10^{-6}	–0.287	<0.001
	$PM_{2.5}$	1.21×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.21×10^{-6}	9.14×10^{-7}	1.21×10^{-6}	–0.260	<0.001
	SO_2	6.99×10^{-9}	4.49×10^{-9}	3.26×10^{-9}	2.72×10^{-9}	2.30×10^{-9}	2.11×10^{-9}	–0.686	<0.001
	NO_2	6.66×10^{-9}	6.09×10^{-9}	5.82×10^{-9}	5.03×10^{-9}	4.31×10^{-9}	6.66×10^{-9}	–0.396	<0.001
非采暖期	PM_{10}	1.86×10^{-6}	1.59×10^{-6}	1.17×10^{-6}	1.17×10^{-6}	1.08×10^{-6}	1.86×10^{-6}	–0.393	<0.001
	$PM_{2.5}$	5.97×10^{-7}	5.32×10^{-7}	4.55×10^{-7}	4.14×10^{-7}	4.25×10^{-7}	5.97×10^{-7}	–0.295	<0.001
	SO_2	2.14×10^{-9}	1.79×10^{-9}	1.37×10^{-9}	1.20×10^{-9}	1.20×10^{-9}	1.18×10^{-9}	–0.647	<0.001
	NO_2	4.87×10^{-9}	4.27×10^{-9}	4.01×10^{-9}	3.09×10^{-9}	2.79×10^{-9}	4.87×10^{-9}	–0.416	<0.001

3 讨 论

本研究结果显示，2017—2022 年呼和浩特市大气污染物存在超标现象，且采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 各年份年均质量浓度均高于非采暖期，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 各年份年均质量浓度则低于非采暖期（均 P<0.001）。结合 2017—2022 年采暖期和非采暖期 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、$O_{3\text{-}8\,h}$ 6 种大气污染物日均浓度的对比图，可得出结论，2017—2022 年呼和浩特市采暖期的大气污染情况较非采暖期严重，此结果与国内多地区研究结果一致[20–22]。时间序列图显示，2017—2022 年呼和浩特市 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 日均浓度呈采暖期浓度高非采暖期浓度低的特征，而 $O_{3\text{-}8\,h}$ 日均浓度则呈采暖期浓度低非采暖期浓度高的特征，与其他相关研究[23–27]结果一致，这可能与 O_3 的形成有关。有研究表明，O_3 的形成与来源较其他污染物不同，挥发性有机化合物（Volatile organic compounds，VOCs）是形成 O_3 的前体物质[28]，且大气中的 O_3 是由许多化合物经过化学反应形成，而 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 和 CO 则主要来源于污染源的排放[29–31]。此外，结合 6 种大气污染物的时间序列图和年均浓度可以看出，2017—2022 年呼和浩特市大气颗粒物（PM_{10} 和 $PM_{2.5}$）污染情况较其他污染物更为严重，且 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的日均浓度极值出现在采暖期，与其他学者研究结果一致[32–34]。

本研究中，2017—2022 年呼和浩特市采暖期和非采暖期 SO_2、NO_2 的风险评估值均<1×10^{-6}，均处于可接受水平，且非致癌风险均呈逐年下降趋势（r_s= –0.647 和–0.416，均 P<0.001），提示在该时间段 SO_2 和 NO_2 对人群健康的潜在风险较低。然而，在相同时间段采暖期和非采暖期 PM_{10} 的风险评估值均>1×10^{-6}，提示不论是在采暖期还是非采暖期，PM_{10} 对人群健康均存在潜在风险。但研究结果还显示，各年份采暖期的 PM_{10} 风险评估值均高于非采暖期，提示人群在采暖期面临的 PM_{10} 潜在风险更高。此外，$PM_{2.5}$ 的风险评估值在采暖期均>1×10^{-6}，在非采暖期间均<1×10^{-6}，提示 $PM_{2.5}$ 在采暖季节内对人群健康存在潜在风险。以上结果显示，2017—2022 年呼和浩特市采暖期的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 对人群健康存在潜在风险，且采暖期的风险较非采暖期更高。这可能是因为采暖期通常需要大量燃烧煤炭和天然气等燃料，会释放出大量的空气污染物，如颗粒物（PM_{10} 和 $PM_{2.5}$）、SO_2 和 NO_2 等[4, 35–36]，这些污染物均会对人体呼吸系统产生不良影响，尤其是对敏感人群（如儿童、老年人和有呼吸系统疾病者）的健康造成潜在的风险[37–39]。

综上所述，2017—2022 年呼和浩特市采暖期大气污染情况较非采暖期严重，该地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 超标较重，对人群健康具有潜在风险。因此，采暖季节应加强个人防护，特别是敏感人群要注意空气质量变化、减少户外活动时间并采取适当的防护措施，以降低接触有害空气污染物的风险。

参考文献

[1] WHO. Ten threats to global health in 2019[R]. Geneva: WHO, 2019.

[2] 贾艳青, 兰杰, 刘秀丽. 山西省大气污染特征及对公众健康的空间影响 [J]. 中国环境监测, 2023, 39(6): 78-89.

[3] Popovicheva O, Diapouli E, Chichaeva M, et al. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: 170315.

[4] 李萌津, 张勇, 张倩, 等. 西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2571-2580.

[5] Cheng Y L, Chen L, Wu H, et al. Wintertime fine aerosol particles composition and its evolution in two megacities of southern and northern China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169778.
[6] 解淑艳, 王帅, 张霞, 等. 中国北方地区采暖期颗粒物污染现状 [J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 25-33.
[7] 凌再莉, 宋世杰, 黄韬. 新疆博斯腾湖地区大气 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征、来源及健康风险评价 [J]. 地球与环境, 2024, 52(1): 29-40.
[8] 王燕, 高衍新, 李仁波, 等. 济南市大气 $PM_{2.5}$ 铅污染特征、变化趋势与风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2023, 40(7): 811-816.
[9] 李雨茹, 吴韬, 张军. 基于 PMF 模型的宝鸡市不同时期地表灰尘重金属来源解析 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 147-154.
[10] 李庆, 周娜, 王盛, 等. 气候变化和人类活动对土壤风蚀影响的定量评估——以内蒙古自治区为例 [J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 178-188.
[11] 董洁, 张普, 李楠, 等. 榆林市区大气主要污染物健康风险评价 [J]. 地下水, 2014, 36(4): 209-212.
[12] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
[13] EPA US. Handbook for non-cancer health effects valuation[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2000.
[14] 王航, 李欢, 任东晓, 等. 西安市大气污染物健康风险评价 [J]. 地下水, 2014, 36(6): 279-282.
[15] EPA US. Risk assessment guidance for superfund volume I-human health evaluation manual (Part A)[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 1989.
[16] 于云江. 环境污染的健康风险评估与管理技术研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
[17] 盛丹睿, 温小虎, 冯起, 等. 2018 年春季西北五省省会城市大气质量与健康风险评价 [J]. 高原气象, 2021, 40(1): 200-208.
[18] 李燃, 夏依章, 张艳, 等. 2020 年成渝地区大气污染所致老年人群健康风险评估及预测分析 [J]. 中国医药导报, 2023, 20(14): 159-162.
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, GB 3095—2012 中国国家标准化管理委员会. 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
[20] 王丽娜, 李博, 赵彦博. 2018 年黑龙江省环境空气质量时空变化特征分析研究 [J]. 环境科学与管理, 2019, 44(7): 135-139.
[21] 杨朝旭, 包琳琳, 葛蕊婷, 等. 吉林市采暖期空气质量演变特征调查研究 [J]. 吉林化工学院学报, 2019, 36(5): 42-45.
[22] 宋晓辉, 杜亮亮, 李剑东, 等. 邯郸采暖期环境污染特征及空气质量预报方法研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 998-1005.
[23] Ma Y X, Zhang Y F, Wang W C, et al. Estimation of health risk and economic loss attributable to $PM_{2.5}$ and O_3 pollution in Jilin Province, China[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 17717.
[24] 李灿然, 布多, 谢民生, 等. 青藏高原城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3060-3069.
[25] 徐传奇, 白杨, 唐远薇, 等. 西安市大气污染物时空演化特征及对人体健康评价 [J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3746-3755.
[26] 赵阳, 李崇浩, 周凯, 等. 新乡市细颗粒物和臭氧协同污染特征 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45(4): 541-543, 548.
[27] 樊欣怡, 廉丽姝, 王猛. 环渤海城市群空气污染特征及其与气象要素的关系 [J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(5): 506-520.
[28] Chen W H, Guenther A B, Jia S G, et al. Synergistic effects of biogenic volatile organic compounds and soil nitric oxide emissions on summertime ozone formation in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154218.
[29] 王晨, 鲍艾, 刘俊, 等. 基于入户调查的农村民用源排放清单与清洁能源政策的减排效果 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2811-2822.
[30] 严晓瑜, 缑晓辉, 杨婧, 等. 中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 高原气象, 2020, 39(2): 416-430.
[31] 韩见弘, 王佳, 李忠, 等. 呼和浩特市臭氧浓度变化特征及相关因子分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 73-78.
[32] 曹亚强, 顾雯, 崔倩, 等. 北京市朝阳区采暖期和非采暖期 $PM_{2.5}$ 中四种邻苯二甲酸酯的污染特征及健康风险 [J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(2): 95-101.
[33] 胡芸迪, 杜小红, 戚发秋, 等. 西北某工业区周围空气采暖期与非采暖期 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃污染特征、来源分析及人群健康风险评估 [J]. 现代预防医学, 2022, 49(2): 227-231, 235.
[34] 单慧, 欧阳钏, 柯鸿阳, 等. 西北地区典型城市 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 中国公共卫生, 2022, 38(4): 476-480.
[35] 李雪超. 兰州地区采暖期空气污染天气分型研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
[36] 杨似玉, 赵秋艳, 张杰, 等. 大气 $PM_{2.5}$ 暴露对河南省 3～79 岁居民血铅水平影响 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(4): 456-460.
[37] Tan X R, Han L J, Zhang X Y, et al. A review of current air quality indexes and improvements under the multi-contaminant air pollution exposure[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111681.
[38] Zhou X Y, Guo M, Li Z F, et al. Associations between air pollutant and pneumonia and asthma requiring hospitalization among children aged under 5 years in Ningbo, 2015–2017[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 10: 1017105.
[39] Yang Y S, Pei Y H, Gu Y Y, et al. Association between short-term exposure to ambient air pollution and heart failure: an updated systematic review and meta-analysis of more than 7 million participants[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 10: 948765.