

高校学生室外运动的呼吸暴露研究

曾诗棋, 苑尊堯, 杨苏渲, 王赛男*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

为研究成都市大学生群体在室外运动过程中受到典型大气污染物的暴露影响, 本研究在对203位大学生室外运动爱好者调查的基础上, 根据2022年全年成都市三个代表性空气质量监测国控站点(君平街站、金博路站和金泉两河站)的PM_{2.5}、PM₁₀、O₃和NO₂等污染物监测数据, 分析其质量浓度的时空变化特征; 采用人体呼吸暴露数值模型, 研究成都市高校学生不同运动强度下的呼吸速率参数以及重度运动强度下污染物吸入剂量的时空差异。结果表明, 三个站点附近区域PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂春、冬季较高, 夏季较低, O₃则呈现出春季和夏季高、秋季和冬季低的特点; PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂在上午时段浓度较高, 下午时段浓度较低, 而O₃在下午时段浓度较高, 在早晨时段和晚上22:00之后浓度较低; 相同特征(性别、体重)人群进行等时长、等强度的运动时, 早晨的PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂吸入剂量高于下午和晚上, 下午的O₃吸入剂量高于早晨和晚上; 为有效降低各项污染物对人体健康的影响, 春季选择晚上运动较为适宜, 夏季应尽量选择早晨运动, 秋、冬季选择下午时段运动最佳。

关键词

高校学生, 呼吸暴露, 空气污染物, 成都

Research on Respiratory Exposure during Outdoor Exercise in College Students

Shiqi Zeng, Zunyao Yuan, Suxuan Yang, Sainan Wang*

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 22nd, 2024; accepted: Jul. 5th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

In order to explore the exposure effects of typical air pollutants on the college student population

*通讯作者。

文章引用: 曾诗棋, 苑尊堯, 杨苏渲, 王赛男. 高校学生室外运动的呼吸暴露研究[J]. 自然科学, 2024, 12(4): 667-683.
DOI: 10.12677/ojns.2024.124077

in Chengdu City during outdoor exercise, this study, based on a survey of 203 college students who were outdoor exercise enthusiasts, analysed the pollutant monitoring data of $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 and NO_2 from three representative air quality monitoring state-controlled stations in Chengdu City (Junping Street Station, Jinbo Road Station and Jinquan Two Rivers Station) throughout the whole year 2022. The data were used to analyse the temporal and spatial characteristics of their mass concentrations; the numerical model of human respiratory exposure was used to study the respiratory rate parameters of college students in Chengdu under different exercise intensities and the temporal and spatial differences of the pollutant inhalation dose under heavy exercise intensities. The results showed that $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 were higher in spring and winter and lower in summer in the areas near the three stations, while O_3 showed the characteristics of high in spring and summer and low in autumn and winter; the concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 were higher in the morning hours and lower in the afternoon hours, while O_3 was higher in the afternoon hours and lower in the morning hours and after 22:00 p.m.; when people with the same characteristics (gender and body weight) exercise with equal duration and intensity, the inhalation dose of $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 in the morning is higher than that in the afternoon and evening, and the inhalation dose of O_3 in the afternoon is higher than that in the morning and evening; in order to effectively reduce the impact of pollutants on human health, it is more appropriate to exercise in the evening in the spring, and in the summer, exercise in the morning, while exercise in the afternoon is the best choice in autumn and winter.

Keywords

College Student, Respiratory Exposure, Air Pollutants, Chengdu

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

最新版《世卫组织全球空气质量指南》重点关注了所谓的典型污染物,即颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})、臭氧(O_3)、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)和一氧化碳(CO)。空气污染是目前一大重要环境问题,对人体健康和经济发展等多个方面产生显著影响[1]。乔等[2]对吸入 $PM_{2.5}$ 致运动人体损伤机制的研究表明,暴露于 $PM_{2.5}$ 高浓度环境下运动,不但会抵消体育锻炼给人体带来的益处,而且会引起呼吸系统疾病如哮喘、炎症,还会影响心血管系统、神经系统等;Lim 等[3]在对美国成年人的臭氧暴露和特定原因死亡率的相关研究中发现,高浓度的臭氧会对人体健康造成一定危害,并且长期年平均 O_3 暴露与心血管疾病、呼吸系统疾病、慢阻肺等引起的死亡显著相关;Zhu 等[4]对 NO_2 与缺血性中风的相关性研究中发现 NO_2 严重损害人体的呼吸系统,Chen 等[5]对其进行了全国性的时间序列分析后发现 NO_2 与人群心血管疾病的死亡率呈正相关;马等[6]在对 SO_2 毒害性的系统性研究表明,低浓度的 SO_2 会使人产生窒息感,浓度过高会导致人的中毒甚至引起窒息性死亡;Chen 等[7]在环境一氧化碳与每日死亡率之间的短期关联研究中发现机动车燃料不完全燃烧产生的 CO 对人体心血管系统有极大的负面作用。

大学生作为社会中最具活力的群体之一,是未来社会的建设者和创造者,其身体健康不容忽视,且相对中小学生而言,大学生时间自由度更高,运动形式更丰富,室外活动时间更长,更易受到大气污染物的影响,是室外运动的一大群体。针对大学生群体受到空气污染及呼吸暴露等问题,国内外已有一系列定组研究。闫等[8]对学生住宅、电影院、健身房等微环境中的 $PM_{2.5}$ 个体暴露水平进行监测评估,发

现冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露水平较春季高；杨[9]、张等[10]、李等[11]分别针对短期暴露大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对大学生呼吸道先天免疫功能、呼吸道和肺的影响进行研究，发现 $\text{PM}_{2.5}$ 会导致先天免疫蛋白水平的降低，同时造成呼吸道损伤和肺功能的降低；余等[12]针对北京大学生个体平均臭氧暴露浓度与环境中臭氧监测值之间的定量关系进行研究，发现暴露率增加，臭氧健康风险增加，且夏季臭氧造成的健康危害最大；马[13]对甘肃农村大学生室内空气污染暴露风险的研究中发现室内空气污染暴露与呼吸道症状的发生呈正相关，还会导致肺通气功能下降等。

在现有研究中，对大学生日常呼吸暴露健康问题已有关关注，但针对其运动状态下的大气污染物呼吸暴露研究仍显不足。本文重点研究成都市大学生群体在室外运动过程中所受到大气污染物的暴露影响，在对 203 位大学生室外爱好者调查的基础上，结合成都市内污染物浓度的季节变化和日变化特征，研究成都市高校学生不同运动时段、不同运动类型下大气污染物吸入剂量差异，为开展城市大学生运动人群空气污染物暴露与健康研究提供依据，为全国大学生运动爱好者的科学运动提供参考。

2. 对象与方法

2.1. 研究对象

本研究以成都市高校学生作为调查对象，选取成都信息工程大学的学生作为代表性样本，通过线上问卷调查的方式对 203 名运动爱好者的运动行为习惯进行调查。在调查样本中，男性占 48.8%，共计 99 人；女性占 51.2%，共计 104 人。在对问卷调查结果进行统计分析后得到，一周内运动频次、单次运动时间、运动方式选择、运动区域偏好以及运动时段等运动特征数据。

2.2. 研究区域

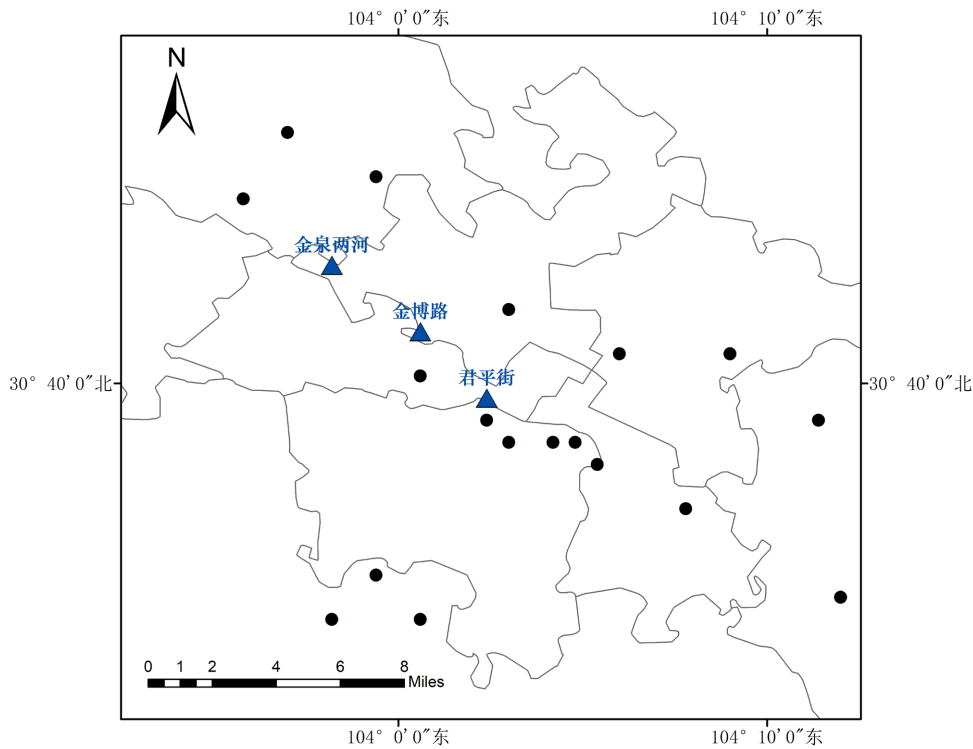


Figure 1. Distribution of state-controlled sites and university locations
图 1. 国控站点及高校位置分布

本研究选取成都市内三个典型空气质量监测国控站点作为代表性站点，分别为君平街站、金博路站和金泉两河站，以此三个站点 2022 年全年的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 等污染物监测数据为基础进行深入分析，三个监测站点以及成都部分高校位置如图 1 所示。其中君平街站位于成都市中心，交通繁忙，人口密集，能够大致反映城市中心区域的空气质量状况；金博路站临近青羊工业集中区，工业活动密集，排放源多样，能够大致体现工业园区对空气质量的影响；金泉两河站位于成都市郊区，车流量相对较少，能够大致反映郊区空气质量状况。监测站点严格按照《环境空气质量监测规范(试行)》中的要求建设，主要监测指标包括 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 PM_{10} 、 SO_2 、 O_3 、 NO_2 ，即我国参与空气质量评价的六种污染物。

2.3. 呼吸剂量计算方法

2.3.1. 吸入剂量公式

吸入剂量的概念能够较好地反映进入人体内的污染物的量，适宜成为暴露风险分析的评价指标 [14]-[17]。

吸入剂量含义如公式(1)所示：

$$E_{\text{吸}} = \int_{t_1}^{t_2} C_t \cdot IR dt \quad (1)$$

式中， $E_{\text{吸}}$ 为高校学生单次室外运动的吸入剂量(μg)， C_t 为暴露浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)， IR 为人运动时的呼吸速率(m^3/h)， t_1 和 t_2 分别是运动的起止时间，即暴露时间(h)。

2.3.2. 呼吸速率参数

呼吸速率(IR , m^3/h)的确定方法主要有直接测量法、心律呼吸速率回归法及人体能量代谢估算法等。本文采用人体能量代谢估算法 [18]，见公式(2) [19]：

$$IR = E \cdot H \cdot VQ \quad (2)$$

式中： H ：消耗单位能量的耗氧量，0.05 L/KJ (参考美国研究结果：0.21 L/kcal [18])； VQ ：通气当量，27 [19]； E ：每类活动强度下单位时间的能量消耗量，KJ/min 或 KJ/d。其计算见公式(3) [19]：

$$E = BMR \cdot N \quad (3)$$

式中： BMR ：基础代谢率，相当于平躺休息时的活动强度水平，KJ/min 或 KJ/d； N ：各类活动强度水平下的能量消耗量与基础代谢率的比值，无量纲。休息时的能量消耗量应等于基础代谢率 [20]，而坐、轻微活动、中度体力活动、重体力活动和极重体力活动的能量消耗分别约为基础代谢率的 1.2、1.5、4、6 和 10 倍 [21]。

BMR 可通过测量确定，但一般情况下主要通过模型计算而得。Schofield 公式更适合于估算我国 18~30 岁健康成人的基础代谢率 [22]；18 岁以下和 60 岁以上人群的 BMR 采用 Shizgal-Rosa 公式估算 [23]。各年龄段人群 BMR 的计算方法见表 1。男性和女性基础代谢率分别采用 $63BW + 2896$ 和 $62BW + 2036$ 计算。

Table 1. Formula for calculating BMR in all age groups

表 1. 各年龄段人群 BMR 计算公式

年龄(岁)	男性	女性
<18 [24]	$370 + 20H + 52BW - 25A$	$1873 + 13H + 39 BW - 18A$
18~29 [22]	$63BW + 2896$	$62BW + 2036$
30~60 [22]	$48BW + 3653$	$34BW + 3538$
>61 [24]	$370 + 20H + 52BW - 25A$	$1873 + 13H + 39 BW - 18A$

注： H ——身高，cm； BW ——体重，kg； A ——年龄，岁。

2.4. 空气质量指数

本文参考环境保护部于 2012 年发布的《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》中所规定的环境空气质量指数的分级方案、计算方法和环境空气质量级别与类别。

空气质量指数(AQI)，是定量描述空气质量状况的无量纲指数；空气质量分指数(IAQI)，是单项污染物的空气质量指数；首要污染物，是 AQI 大于 50 时 IAQI 最大的空气污染物[25]。AQI 指数是将空气污染物简化为单一评价空气污染的指标，指数越大，空气污染越严重，对人体越有害[26]。空气质量指数(AQI)及空气质量分指数(IAQI)的计算如式(4)和式(5)所示[25]：

$$AQI = \max \{IAQI_1, IAQI_2, \cdots, IAQI_n\}$$
 (4)

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{L0}}{BP_{Hi} - BP_{L0}}(C_p - BP_{L0}) + IAQI_{L0}$$
 (5)

式(4)、(5)中：IAQI 为空气质量分指数，n 为污染物项目；IAQI_p 为污染物项目 P 的空气质量分指数，C_p 为污染物项目 P 的质量浓度值，BP_{Hi} 为 C_p 相近的污染物浓度限值的高位值，BP_{L0} 为 C_p 相近的污染物浓度限值的低位值，IAQI_{Hi} 为 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数，IAQI_{L0} 为 BP_{L0} 对应的空气质量分指数。

3. 结果与讨论

3.1. 问卷调查情况

3.1.1. 问卷内容

本研究在预调查的基础上完善调查问卷后，最终确定问卷内容大致包括 4 个部分(如表 2)：不同大学生人群的人体特征参数(性别、年龄)；不同大学生人群日常室外运动类型；不同学生人群一天内室内外运动的时段；不同大学生人群单周室内外运动频次及单次运动时间。因本问卷调查大多为多选题，同一位学生会参与多种运动并选择多个选项，则会出现调查内容占比情况总和不为 100%的情况。为确保问卷数据的准确性和真实性，量化选项精确到小数点后两位，并保证各位学生根据自身真实情况答题。

Table 2. Status of questionnaire survey
表 2. 问卷调查情况

内容	类别	人数	占比
室外运动强度	轻度	59	29.00%
	中度	156	76.80%
	重度	64	31.50%
单周运动频次	4 次及以下	148	72.90%
	5 次及以下	43	21.20%
	无运动	12	5.90%
运动时间段	6:00~12:00	21	10.30%
	12:00~18:00	53	26.10%
	18:00~23:00	167	82.20%
单次运动时间	1 h 以内	97	47.80%
	1 h~2 h	88	43.30%
	2 h 以上	18	8.90%

3.1.2. 运动类型

调查结果显示, 室外运动类型分为轻度、中度和重度, 轻度运动(乒乓球)与重度运动(篮球、足球)占比相当, 各占总人数 30%左右, 重度运动比例略高于轻度运动; 中度运动(网球、跑步、羽毛球和排球)占比最大, 约为 76.8%, 且男性和女性对于运动类型选择无显著差异。综合上述结果, 根据 2.3.2 节内容计算出调查对象运动能量消耗大约为基础代谢率的 5.33 倍。

3.1.3. 运动时间

由于室内外空气中的污染物浓度不同, 室内外活动时间会直接影响人体对于污染物的暴露水平, 进而影响健康风险评估的准确性[27]。世卫组织制定的《关于身体活动有益健康的全球建议》中提到, 成年人每周要进行至少 150 min 中等强度的有氧运动。为获得更多的健康效益, 成年人应增加有氧运动, 达到每周 300 min 中等强度的有氧运动[28]。对大学生单次运动时间进行平均取值得到, 大学生平均单日运动时间为 1.1 h, 结合一周运动频次的统计, 得到 72.9% 大学生每周运动时间为 4 h 以下, 21.2% 大学生运动时间能达到 5 h 以上。研究表明, 大学生可自由支配时间较多, 但却缺乏正确利用自由时间的意识, 较多的大学生在自由时间进行的并不是体育运动[29]。因此, 为了拥有更好的健康状态, 当代大学生还需正确利用自由时间以加强体育锻炼。

3.2. 污染物季节变化

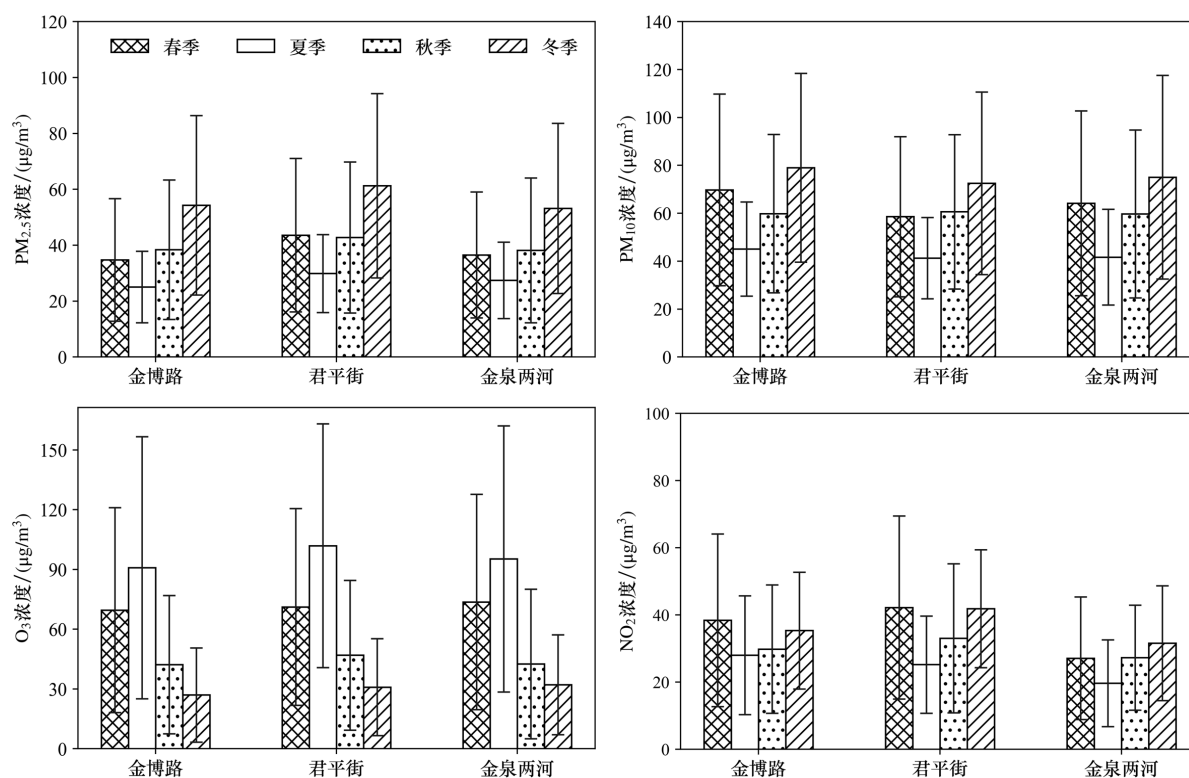


Figure 2. Seasonal variation in pollutant concentration

图 2. 污染物浓度季节变化

图 2 显示了成都市三个国控站点君平街站、金博路站和金泉两河站附近区域典型污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 O₃ 浓度的季节变化情况。从图 2 可看出, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度大致呈现出冬季 > 春季 > 秋季 > 夏

季的特征,这与冯晨旭等[30]研究的绵阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化特征相同,可能是由于成都市地处盆地,特殊的地理地势使得颗粒物难以扩散。三个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均浓度变化范围在 $17.78\sim 143.70\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,超过环境空气质量一级标准($35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)的天数占 48.49%; PM_{10} 的日均浓度在 $7.38\sim 173.28\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,超过环境空气质量一级标准($50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)的天数占 53.97%。

如图 2 所示, O_3 呈现出春夏季高、秋冬季低的特点,这主要是由于 O_3 的生成受到光照、气温等季节性因素的影响[31]。 O_3 的日均浓度在 $3.08\sim 157.27\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,其日均浓度超过《环境空气质量标准》日最大 8 小时平均一级浓度限值($100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)的天数占比为 14.25%。 NO_2 浓度则呈现出秋冬季高、春夏季低的特点,浓度均值变化范围在 $19.71\sim 42.21\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,均显著低于《环境空气质量标准》24 小时平均一级浓度限值($80\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

3.3. 污染物浓度日变化

本研究所选站点附近区域典型污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 的浓度日变化情况如图 3~6。

从图 3 可看出, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化表现出明显的季节差异。从变化趋势上来看,三个站点春、夏、冬三季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈现出“单峰单谷”的日变化特征,出峰时间大致在上午 8:00~10:00 之间,直至下午 14:00~16:00 晚高峰时间段, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度再次出现攀升趋势,说明白天 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受到交通情况等人类活动较为明显。秋季三个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 的日变化特征差异最为显著,主要体现在变化趋势上,其中君平街站与金泉两河站的整体趋势较为相似,金博路站晚上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度曲线出现明显波动,这可能与监测站点周围的风速等气象要素相关。

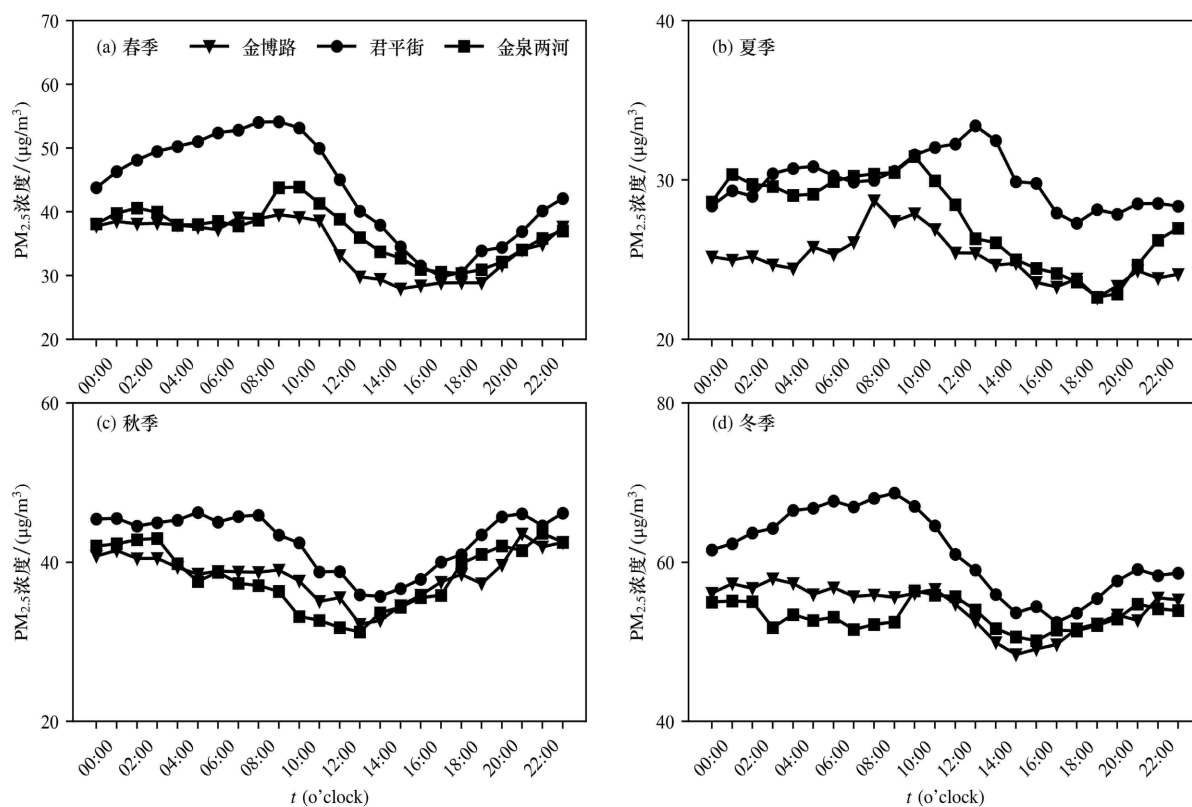


Figure 3. Diurnal variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

图 3. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化

如图 4 显示, 三个监测点的 PM_{10} 浓度日变化规律基本一致, 趋势大致为“双峰双谷型”。春、秋、冬三季主峰值出现时间大致为上午 8:00~10:00, 为交通早高峰时段; 夏季三个站点出峰时间略有差异, 君平街站的出峰时间较另外两站点滞后两个小时左右。次峰值大致出现于晚高峰后大约 20:00~22:00 左右。两个谷值出现时间分别为下午 16:00~18:00 和凌晨 4:00~6:00。

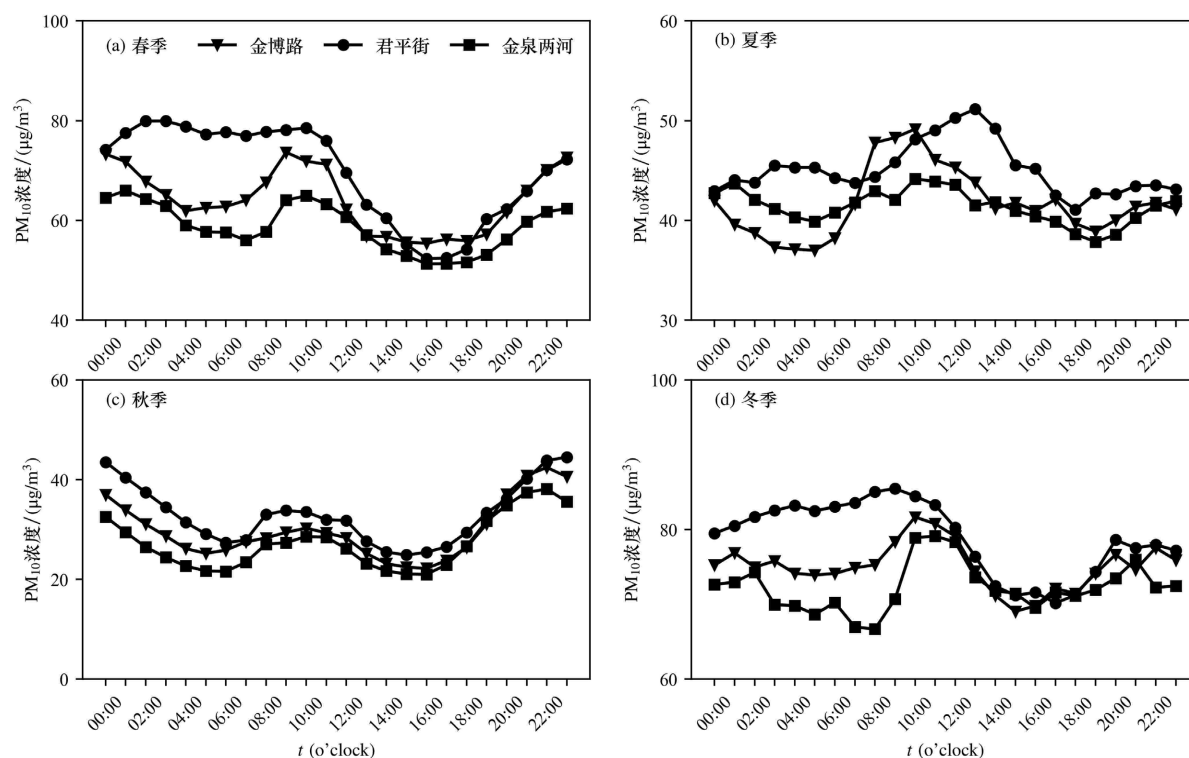
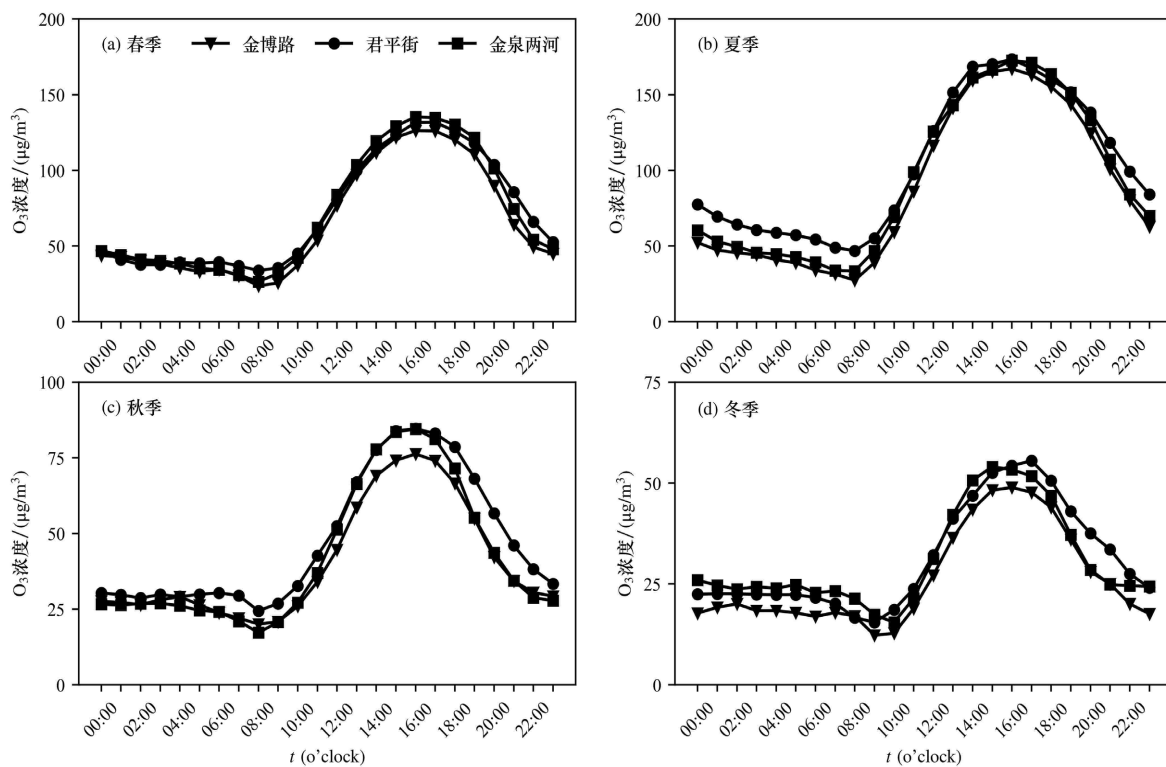
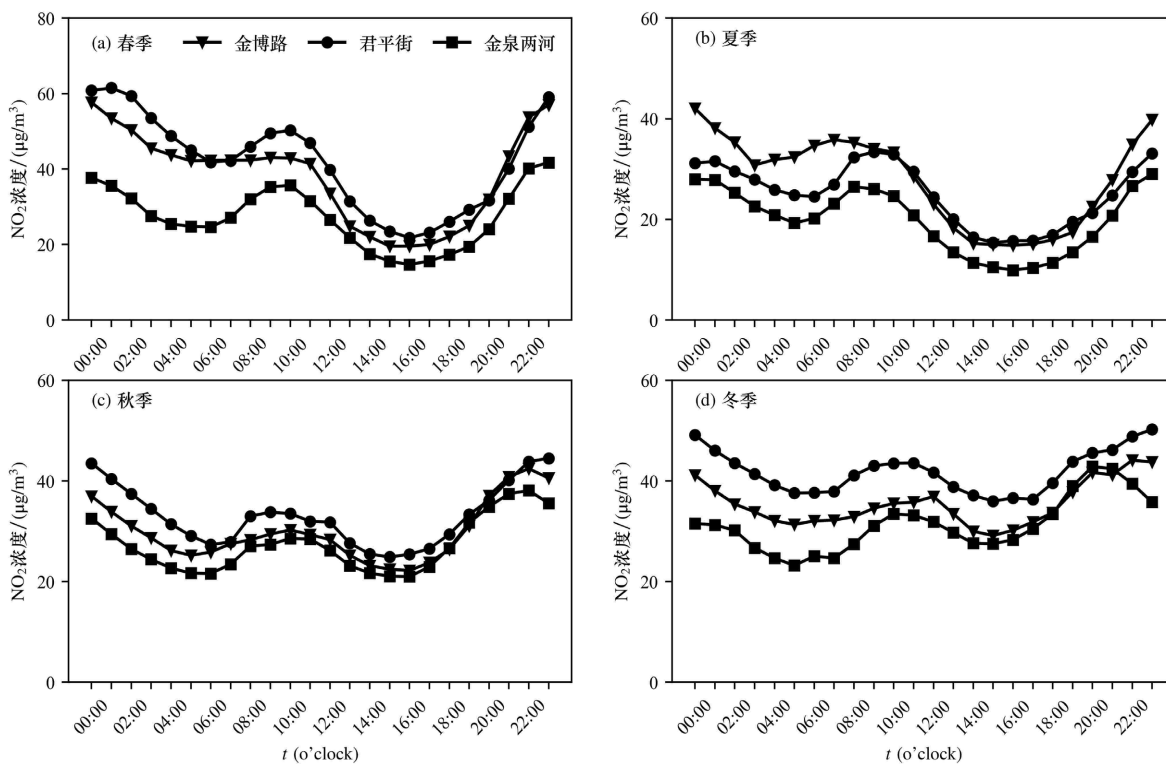


Figure 4. Diurnal variation of PM_{10} concentration

图 4. PM_{10} 浓度日变化

从图 5 可知, 三个监测点的 O_3 浓度日变化呈现出明显的“单峰单谷型”。由于晚上生成 O_3 的光化学反应较弱, 且 O_3 与 NO 反应造成 O_3 不断被消耗, 因此晚上至日出之前 O_3 浓度较低, 在早上 8:00 达到最低值, 其中金博路站点的 O_3 浓度略低于其他两站点, 在冬季达到最低值为 $27.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。早上 8:00 之后, 随着太阳辐射的不断增强, O_3 浓度开始不断上升, 至下午 16:00 达到峰值。16:00 之后由于日落造成太阳辐射不断减少, O_3 浓度逐渐降低。三个站点中金泉两河站点的 O_3 浓度整体高于其他两站点, 在夏季达到最高值为 $172.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 可能是由于金泉两河站临近森林公园, 植被覆盖率较大, 树木释放的有机挥发物(BVOCs)会促进 O_3 的生成[32]。

从图 6 可以看出, 三个监测站点的 NO_2 浓度大致呈现出“双峰双谷”的日变化特征, 两个峰值分别出现在 8:00~10:00 和 23:00 左右, 两个谷值分别出现在 4:00~6:00 和 14:00~16:00。主峰值出现时间与早高峰期的时间相对应, 而上午 10:00 过后, NO_2 浓度不断降低, 至下午 16:00 左右达到最低值, 这与白天边界层不稳定以及太阳辐射变化相关, 边界层不稳定使得污染物混合稀释和扩散, 同时随着太阳辐射增强, NO_2 光解使得浓度明显减小[33] [34]。由于晚上大气边界层较为稳定, 因此在晚上 18:00 左右开始, NO_2 的浓度又开始不断升高, 于晚上 23:00 再次达到峰值。春季三个监测点 NO_2 的变化幅度较夏、秋、冬三季更大, 主要表现为春季晚上浓度上升速率快, 金博路、君平街、金泉两河三个站点 18:00~23:00 间 NO_2 浓度的变化值分别为 $34.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $33.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $24.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Figure 5. Diurnal variation of O_3 concentration图 5. O_3 浓度日变化Figure 6. Diurnal variation of NO_2 concentration图 6. NO_2 浓度日变化

3.4. 污染物吸入剂量

3.4.1. 呼吸速率参数

呼吸速率采用人体能量代谢估算法[18]，由 1.3.2 节中公式(2)计算，其中能量消耗量由公式(3)得出，BMR 根据研究对象实际情况，采用 Schofield 公式，即男性和女性分别采用 $63BW + 2896$ 和 $62BW + 2036$ 计算。坐、轻微活动、中度体力活动、重体力活动和极重体力活动的能量消耗分别约为基础代谢率的 1.2、1.5、4、6 和 10 倍[21]。由上述公式，区分不同体重人群，计算出不同运动强度的呼吸速率如表 3 所示。

Table 3. Respiratory rates at different exercise levels in different populations (IR, m³/h)

表 3. 不同人群在不同运动强度下的呼吸速率(IR, m³/h)

性别	BW (kg)	IR (坐)	IR (轻微)	IR (中度)	IR (重度)	IR (极重)
男	45	0.39	0.48	1.29	1.93	3.22
	50	0.41	0.51	1.36	2.04	3.4
	55	0.43	0.54	1.43	2.15	3.58
	60	0.45	0.56	1.5	2.25	3.76
	65	0.47	0.59	1.57	2.36	3.93
	70	0.49	0.62	1.64	2.47	4.11
	75	0.51	0.64	1.71	2.57	4.29
	80	0.54	0.67	1.79	2.68	4.46
女	45	0.33	0.41	1.09	1.63	2.71
	50	0.35	0.43	1.16	1.73	2.89
	55	0.37	0.46	1.23	1.84	3.06
	60	0.39	0.49	1.3	1.94	3.24
	65	0.41	0.51	1.36	2.05	3.41
	70	0.43	0.54	1.43	2.15	3.59
	75	0.45	0.56	1.5	2.26	3.76
	80	0.47	0.59	1.57	2.36	3.94

由表 3 中数据可得，对于相同体重不同性别的学生在进行相同运动时，男生呼吸速率高于女生。运动强度越高，相同体重的男女生在进行相同运动时的呼吸速率差值越大，极重体力活动的男女生呼吸速率差值最大。对于相同性别相同体重的学生在进行不同运动时，运动强度越高，呼吸速率越大。由于坐、轻微活动、中度体力活动、重体力活动和极重体力活动的能量消耗分别约为基础代谢率的 1.2、1.5、4、6 和 10 倍[21]，即轻微活动、中度体力活动、重体力活动和极重体力活动的呼吸速率分别约为坐的呼吸速率的 1.25、3.33、5、8.33 倍。对于相同性别不同体重的学生在进行相同运动时，体重越高，呼吸速率越大。等差体重间的呼吸速率也为等差，且运动强度越高的呼吸速率差值越大。根据调查问卷中收集到的在校大学生日常运动中的运动类型，计算得出各项运动的呼吸速率如表 4 所示。

Table 4. Respiratory rates in different populations under different types of exercise (IR, m³/h)
表 4. 不同人群在不同运动类型下的呼吸速率(IR, m³/h)

性别	BW	类型							
		篮球	快跑	足球	排球	网球	羽毛球	慢跑	乒乓球
男	45	1.93	1.93	1.93	1.29	1.29	1.29	1.29	0.48
	50	2.04	2.04	2.04	1.36	1.36	1.36	1.36	0.51
	55	2.15	2.15	2.15	1.43	1.43	1.43	1.43	0.54
	60	2.25	2.25	2.25	1.5	1.5	1.5	1.5	0.56
	65	2.36	2.36	2.36	1.57	1.57	1.57	1.57	0.59
	70	2.47	2.47	2.47	1.64	1.64	1.64	1.64	0.62
	75	2.57	2.57	2.57	1.71	1.71	1.71	1.71	0.64
	80	2.68	2.68	2.68	1.79	1.79	1.79	1.79	0.67
女	45	1.63	1.63	1.63	1.09	1.09	1.09	1.09	0.41
	50	1.73	1.73	1.73	1.16	1.16	1.16	1.16	0.43
	55	1.84	1.84	1.84	1.23	1.23	1.23	1.23	0.46
	60	1.94	1.94	1.94	1.3	1.3	1.3	1.3	0.49
	65	2.05	2.05	2.05	1.36	1.36	1.36	1.36	0.51
	70	2.15	2.15	2.15	1.43	1.43	1.43	1.43	0.54
	75	2.26	2.26	2.26	1.5	1.5	1.5	1.5	0.56
	80	2.36	2.36	2.36	1.57	1.57	1.57	1.57	0.59

不同运动对应的不同运动强度，乒乓球为轻度运动，网球、慢跑、羽毛球、排球为中度运动，篮球、快跑、足球为重度运动[35] [36]。相同运动强度的呼吸速率大致相同，网球、慢跑、羽毛球、排球等中度运动和篮球、快跑、足球等重度运动的呼吸速率分别为乒乓球等轻度运动的呼吸速率的 2.67、4 倍。在以上不同类型的运动中，进行乒乓球类轻度运动时的呼吸速率明显小于其他运动，进行篮球、快跑、足球等重度运动时的呼吸速率最大。在进行相同运动时，女生的呼吸速率小于同体重的男生，且运动强度越低，男女生的呼吸速率差值越小。

3.4.2. 吸入剂量

选取三个站点的小时平均浓度数据，根据公式(1)计算出高校学生在三个监测站点附近区域、不同时段进行室外运动时各类污染物的吸入剂量。根据 2.1 节中问卷调查结果，本研究按照平均单次运动时间 1.1 h 作为高校学生典型运动特征进行计算。根据中国环境部研究得出的中国人群分省份的短期呼吸量推荐值[19]，公式(1)中的呼吸速率 *IR* 取四川省城市人群在重度体力活动条件下的呼吸速率值 32.1 L/min，计算结果如表 5 和表 6 所示。

Table 5. Inhalation of PM_{2.5} and PM₁₀ at different times of the day in different sports areas (μg)
表 5. 不同运动区域不同时段 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 吸入剂量(μg)

区域	季节	PM _{2.5}			PM ₁₀		
		06:00~08:00	16:00~18:00	18:00~20:00	06:00~08:00	16:00~18:00	18:00~20:00
金博路	春	81.49	61.15	61.70	135.54	119.30	120.93
	夏	54.95	50.07	49.60	85.36	88.79	83.96
	秋	83.01	78.43	81.00	119.50	123.43	130.62
	冬	120.25	105.54	111.07	159.27	151.70	155.59
君平街	春	112.46	66.25	68.66	165.29	112.33	121.63
	夏	64.27	61.30	58.85	94.05	93.60	89.08
	秋	97.01	82.53	89.26	124.98	120.81	129.76
	冬	143.88	116.68	118.81	178.11	154.56	160.10
金泉两河	春	90.20	65.49	65.29	131.92	109.35	112.07
	夏	64.14	51.50	49.36	86.44	85.10	80.80
	秋	82.92	76.71	87.28	122.59	127.91	139.00
	冬	124.96	110.64	116.04	166.39	153.12	160.03

Table 6. Inhalation of O₃ and NO₂ at different times of the day in different sports areas (μg)
表 6. 不同运动区域不同时段 O₃ 和 NO₂ 吸入剂量(μg)

区域	季节	O ₃			NO ₂		
		06:00~08:00	16:00~18:00	18:00~20:00	06:00~08:00	16:00~18:00	18:00~20:00
金博路	春	69.23	269.74	246.74	90.44	42.28	50.32
	夏	69.91	352.92	319.37	75.37	31.98	35.66
	秋	49.04	160.66	129.96	57.07	49.16	61.45
	冬	37.18	103.25	85.75	68.70	66.30	76.35
君平街	春	81.62	277.10	258.34	89.84	48.23	58.85
	夏	110.45	367.25	337.26	54.97	33.45	38.84
	秋	63.98	178.67	155.80	59.04	54.85	65.94
	冬	44.62	113.34	96.40	80.78	80.02	91.60
金泉两河	春	69.37	290.19	268.40	63.16	32.37	39.38
	夏	78.72	366.79	334.75	46.03	21.59	26.25
	秋	48.48	177.32	134.46	50.25	46.76	63.62
	冬	48.80	113.82	91.56	63.77	64.46	78.34

结果表明,相同区域不同运动时段的污染物吸入剂量差异明显。对于污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸入剂量,金博路、君平街和金泉两河三个运动区域在春、秋、冬季节大致呈现出早晨 $[(104.02 \pm 21.07) \mu\text{g}] > \text{晚上}[(88.79 \pm 20.80) \mu\text{g}] > \text{下午}[(84.83 \pm 19.72) \mu\text{g}]$ 的特点,在夏季则表现为早晨 $[(61.12 \pm 4.36) \mu\text{g}] > \text{下午}[(54.29 \pm 4.99) \mu\text{g}] > \text{晚上}[(52.60 \pm 4.42) \mu\text{g}]$,其中君平街春季早晨运动 $\text{PM}_{2.5}$ 吸入剂量是下午运动的 1.697 倍、是晚上运动的 1.638 倍;对于污染物 PM_{10} ,三个区域春、冬季均呈现早晨 $[(156.09 \pm 16.79) \mu\text{g}] > \text{晚上}[(138.39 \pm 20.47) \mu\text{g}] > \text{下午}[(133.39 \pm 19.97) \mu\text{g}]$ 的特点,秋季则表现为晚上 $[(133.13 \pm 4.17) \mu\text{g}] > \text{下午}[(124.05 \pm 2.93) \mu\text{g}] > \text{早晨}[(122.36 \pm 2.24) \mu\text{g}]$,夏季未表现出明显差异;对于污染物 O_3 ,三个区域在四季均表现为下午 $[(230.92 \pm 97.24) \mu\text{g}] > \text{晚上}[(204.90 \pm 94.84) \mu\text{g}] > \text{早晨}[(64.29 \pm 19.50) \mu\text{g}]$,且春、夏两季差异更为明显,其中金博路夏季下午运动的 O_3 吸入剂量是早晨运动的 5.046 倍、是晚上运动的 1.105 倍;对于污染物 NO_2 ,总体表现为春、夏季早晨 $[(69.97 \pm 16.77) \mu\text{g}] > \text{晚上}[(41.55 \pm 10.46) \mu\text{g}] > \text{下午}[(34.98 \pm 8.43) \mu\text{g}]$,秋、冬季晚上 $[(72.88 \pm 10.46) \mu\text{g}] > \text{早晨}[(63.27 \pm 9.68) \mu\text{g}] > \text{下午}[(60.26 \pm 11.40) \mu\text{g}]$,其中金博路夏季早晨运动吸入剂量是下午运动的 2.356 倍、是晚上运动的 2.113 倍。

不同区域同一时段的污染物吸入剂量差异明显。对比早晨时段各污染物吸入剂量均值可知,君平街的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 吸入剂量均值分别较金博路高 22.94%、12.56%、33.42%,分别较金泉两河高 15.29%、10.86%、22.54%,而对于该时段 NO_2 的吸入剂量,金博路分别高于君平街 8.73%、金泉两河 1.43%。对于下午时段,君平街 $\text{PM}_{2.5}$ 吸入剂量均值高于金博路 10.69%、金泉两河 7.37%,金博路 PM_{10} 吸入剂量均值高于君平街 0.40%、金泉两河 1.63%,金泉两河 O_3 和 NO_2 吸入剂量均值分别高于金博路 6.91%、15.03%,金泉两河 1.26%、11.02%。对于晚上时段,君平街的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 吸入剂量均值分别高于金博路 10.61%、1.93%、8.44%,高于金泉两河 5.53%、1.76%、2.25%,而该时段的 NO_2 吸入剂量均值在君平街附近高于金博路 17.17%、君平街 13.37%。

3.5. IAQI 变化特征

根据公式(5)计算出成都市 2022 年整年各项污染物的 IAQI,其逐日变化如图 7 所示。由图 7 可知,成都市 2022 年六项污染物的 IAQI 大多处于 150 以内,且 CO 、 SO_2 两污染物的 IAQI 均低于 50,故不加以讨论。如表 7 所示,春季 O_3 为首要污染物的天数占春季总天数的 47.83%,其次为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,分别占春季总天数的 17.39%和 11.96%;夏季 O_3 的 IAQI 显著高于其他污染物,即首要污染物以 O_3 为主,占比达 84.78%;秋季各污染物所占比例大小为 $\text{PM}_{2.5} > \text{O}_3 > \text{PM}_{10} > \text{NO}_2$, $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数最多,占比为 36.26%, O_3 为首要污染物的天数占比为 16.48%,其余两种污染物所占天数不足 10%;冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的 IAQI 值明显高于其余四项污染物,首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 的天数最多,占比 68.89%,较少天数表现为 PM_{10} 污染,占比 10.00%,且不存在 O_3 污染。

Table 7. The number of days and proportion of each pollutant as the primary pollutant

表 7. 各项污染物作为首要污染物的天数及占比

季节	$\text{PM}_{2.5}$		PM_{10}		O_3		NO_2	
	天数	占比	天数	占比	天数	占比	天数	占比
春	16	17.39%	11	11.96%	44	47.83%	1	1.09%
夏	1	1.09%	0	0.00%	78	84.78%	0	0.00%
秋	33	36.26%	7	7.69%	15	16.48%	1	1.10%
冬	62	68.89%	9	10.00%	0	0.00%	0	0.00%

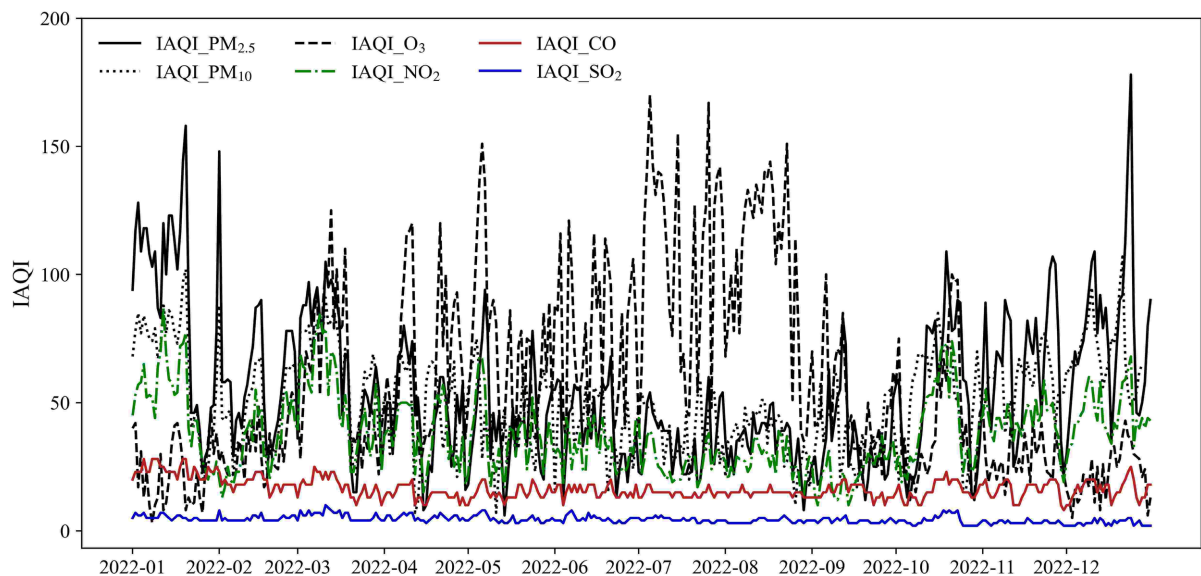


Figure 7. Daily change of pollutant IAQI for 2022
图 7. 2022 年污染物 IAQI 逐日变化

3.6. 污染物吸入剂量与 IAQI

根据公式(1)代入各项污染物的《环境空气质量标准》24 小时平均一级浓度限值，以计算各污染物在此限值下的吸入剂量作为参考值，计算出污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂ 的吸入剂量参考值分别为 74.83 μg，106.89 μg，213.79 μg，171.03 μg。将三个站点各项污染物的吸入剂量均值与上述参考值作差后得到各项污染物的吸入剂量差值如表 8 所示(NO₂ 的吸入剂量均值均低于其参考值，故不加以讨论)。该差值可定量描述人体受污染物的影响程度，正值越大，表示人体受污染物的暴露影响越大，负值越大则相反。

Table 8. Inhaled dose difference of each pollutant
表 8. 各项污染物的吸入剂量差值

区域	季节	PM _{2.5}			PM ₁₀			O ₃		
		早晨	下午	晚上	早晨	下午	晚上	早晨	下午	晚上
校园室外	春	+19.89	-10.53	-9.61	+37.36	+6.77	+11.32	-140.38	+65.22	+44.04
	夏	-13.71	-20.54	-22.22	-18.28	-17.73	-22.28	-127.43	+148.53	+116.67
	秋	+12.82	+4.40	+11.02	+15.46	+17.16	+26.23	-159.95	-41.57	-73.71
	冬	+54.87	+36.13	+40.48	+61.03	+46.23	+51.68	-170.25	-103.65	-122.55

注：早晨：6:00~8:00，下午：16:00~18:00，晚上：18:00~20:00；“+”：吸入剂量均值高于参考值，“-”：反之。

结合表 7 和表 8 可知，春季 PM_{2.5}、PM₁₀ 的吸入剂量差值下午时段最低，晚上次之；O₃ 的吸入剂量差值早晨时段最低，晚上次之，由于春季首要污染物占比大小为 O₃ > PM_{2.5} > PM₁₀，为同时降低运动过程中受到 O₃、PM_{2.5}、PM₁₀ 的污染影响，春季选择晚上运动较为适宜。夏季 PM_{2.5}、PM₁₀ 三个时段的吸入剂量平均值均低于参考值，O₃ 的吸入剂量差值早晨时段最低，且较吸入剂量参考值低 127.43 μg，由于夏季首要污染物以 O₃ 为主，为有效降低夏季高 O₃ 暴露对人体健康的影响，夏季应尽量选择早晨运动。秋

季 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸入剂量差值下午时段最低, 仅高于参考值 $4.4 \mu\text{g}$, PM_{10} 的吸入剂量差值早晨时段最低, 下午次之; 污染物 O_3 秋季三个时段的吸入剂量均值均未超过参考值, 由于秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数占比最高, 因此为避免秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度暴露影响人体健康, 秋季选择下午时段运动最佳。冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的吸入剂量差值下午时段最低, O_3 冬季三个时段的吸入剂量均值均低于其吸入剂量参考值, 且冬季的首要污染物以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为主, 故为减少冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 对人体健康的影响, 选择下午时段运动较为适宜。根据上述分析得到不同季节一天内适宜进行室外运动的时段如表 9 所示。

Table 9. The appropriate time of day for exercise in different seasons

表 9. 不同季节一天中适宜运动的时段

运动区域	运动季节	早晨	下午	晚上
校园室外	春			√
	夏	√		
	秋		√	
	冬		√	

4. 结论

本研究根据 2022 年成都市三个空气质量监测站点的污染物监测数据, 分析得出 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 四项污染物质量浓度的季节变化与日变化特征; 基于对高校学生运动行为习惯特征的调查结果, 采用人体呼吸暴露数值模型计算出成都市高校学生在重度运动强度下的污染物吸入剂量, 并结合上述污染物的 IAQI 变化特征得出不同季节一天内适宜运动的时段。本文得出结论如下:

1) 相同运动区域不同污染物浓度的季节变化特征明显, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度整体呈现出冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的特征, 其日均浓度超过环境空气质量一级标准的天数分别占全年的 48.49%、53.97%; O_3 表现为春夏季高、秋冬季低, 其日均浓度超过日最大 8 小时平均一级浓度限值的天数占比较小; NO_2 浓度表现为秋冬季较高、夏秋季较低, 全年均低于其环境空气质量一级标准。

2) 污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 NO_2 的浓度日变化差异显著, 大致可分为“双峰双谷型”和“单峰单谷型”两类。污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 在上午 8:00~10:00 之间浓度较高, 在下午 14:00~18:00 之间浓度较低; O_3 在下午 14:00~18:00 之间浓度较高, 在早晨 6:00~8:00 和晚上 22:00 之后浓度较低; NO_2 在上午 8:00~10:00 之间和晚上 22:00 之后浓度较高, 在下午 14:00~16:00 之间浓度较低。

3) 相同区域不同运动时段的污染物吸入剂量差异明显, $\text{PM}_{2.5}$ 的吸入剂量在春、秋、冬季节大致呈现出早晨 > 晚上 > 下午的特点, 在夏季则表现为早晨 > 下午 > 晚上; PM_{10} 的吸入剂量在春、冬季均呈现早晨 > 晚上 > 下午的特点, 秋季则表现为晚上最高, 夏季无明显差异; O_3 的吸入剂量在四季均表现为下午 > 晚上 > 早晨; NO_2 的吸入剂量春、夏季总体表现为早晨 > 晚上 > 下午, 秋、冬季则表现为晚上 > 早晨 > 下午。

4) 春季首要污染物占比为 $\text{O}_3 > \text{PM}_{2.5} > \text{PM}_{10}$, 为同时降低运动过程中受到 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的污染影响, 春季选择晚上运动较为适宜; 夏季首要污染物以 O_3 为主, 为有效降低 O_3 暴露对人体健康的影响, 夏季应尽量选择早晨运动; 秋、冬季首要污染物主要为 $\text{PM}_{2.5}$, 为避免 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度暴露影响人体健康, 秋、冬季选择下午时段运动最佳。

本研究采用问卷调查、线下追踪调查等形式对成都市高校学生运动的行为习惯特征进行了真实、深入的调研, 并将实际调研结果与国控站点的污染物监测数据相结合, 重点讨论了成都市高校学生在室外

运动过程中的呼吸暴露情况, 为开展城市大学生运动人群空气污染物暴露与健康研究提供了依据, 为全国大学生运动爱好者的科学运动提供了参考。此外, 大学生人群应增强自身身体素质, 并在加强锻炼的同时, 关注空气污染物对人体健康的影响。

基金项目

成都信息工程大学大学生创新创业项目(202310621031)。

参考文献

- [1] 丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 空气污染与气候变化[J]. 气象, 2009, 35(3): 3-14.
- [2] 乔玉成, 张琦. 吸入 PM2.5 对运动人体致伤机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(10): 998-1017.
- [3] Lim, C.C., Hayes, R.B., Ahn, J., Shao, Y., Silverman, D.T., Jones, R.R., *et al.* (2019) Long-term Exposure to Ozone and Cause-Specific Mortality Risk in the United States. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **200**, 1022-1031. <https://doi.org/10.1164/rccm.201806-1161oc>
- [4] Zhu, N., Li, H., Han, M., Guo, L., Chen, L., Yun, Y., *et al.* (2012) Environmental Nitrogen Dioxide (NO2) Exposure Influences Development and Progression of Ischemic Stroke. *Toxicology Letters*, **214**, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2012.08.021>
- [5] Chen, R., Yin, P., Meng, X., Wang, L., Liu, C., Niu, Y., *et al.* (2018) Associations between Ambient Nitrogen Dioxide and Daily Cause-Specific Mortality. *Epidemiology*, **29**, 482-489. <https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000829>
- [6] 马玉贞, 陶明信, 张新民, 等. 煤层气及天然气中的 H2S 与 SO2 及其危害性[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1408-1415.
- [7] Chen, R., Pan, G., Zhang, Y., Xu, Q., Zeng, G., Xu, X., *et al.* (2011) Ambient Carbon Monoxide and Daily Mortality in Three Chinese Cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (capes). *Science of the Total Environment*, **409**, 4923-4928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.029>
- [8] 闫伟奇, 张潇尹, 郎凤玲, 等. 北京地区大气细颗粒物的个体暴露水平[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 774-779.
- [9] 杨富云. 短期暴露大气 PM2.5 对呼吸道先天免疫功能的影响: 在校大学生定组研究[D]: [硕士学位论文]. 新乡: 新乡医学院, 2022.
- [10] 张云权, 马露, 朱耀辉, 等. 冬季颗粒物暴露对大学生 1s 最大呼气量及呼吸道症状的急性影响[J]. 中华预防医学杂志, 2015(4): 350-355.
- [11] 李娇元, 马露, 刘立志, 等. 武汉市秋冬季空气颗粒物暴露对大学生肺功能的短期影响[J]. 中华预防医学杂志, 2013, 47(2): 155-159.
- [12] 余焜, 苑耀文, 李方舟, 等. 北京大学生个体臭氧暴露直接测量及潜在健康风险评估[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2023(3): 13-20.
- [13] 马月玲. 甘肃农村地区室内空气污染对大学生呼吸系统的短期影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [14] Chan, L.Y., Lau, W.L., Wang, X.M. and Tang, J.H. (2003) Preliminary Measurements of Aromatic VOCs in Public Transportation Modes in Guangzhou, China. *Environment International*, **29**, 429-435. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(02\)00189-7](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(02)00189-7)
- [15] Chan, L.Y., Lau, W.L., Zou, S.C., Cao, Z.X. and Lai, S.C. (2002) Exposure Level of Carbon Monoxide and Respirable Suspended Particulate in Public Transportation Modes While Commuting in Urban Area of Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **36**, 5831-5840. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(02\)00687-8](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(02)00687-8)
- [16] Ho, K.F., Lee, S.C., Guo, H. and Tsai, W.Y. (2004) Seasonal and Diurnal Variations of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Atmosphere of Hong Kong. *Science of the Total Environment*, **322**, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.004>
- [17] Wang, X., Sheng, G., Fu, J., Chan, C., Lee, S., Chan, L.Y., *et al.* (2002) Urban Roadside Aromatic Hydrocarbons in Three Cities of the Pearl River Delta, People's Republic of China. *Atmospheric Environment*, **36**, 5141-5148. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(02\)00640-4](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(02)00640-4)
- [18] Layton, D.W. (1993) Metabolically Consistent Breathing Rates for Use in Dose Assessments. *Health Physics*, **64**, 22-36. <https://doi.org/10.1097/00004032-199301000-00003>
- [19] 中华人民共和国环境保护部. 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, 43.
- [20] US EPA (2024) Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. <http://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>

- [21] 张春华, 陈文鹤, 陈佩杰, 等. 不同体育健身项目能量消耗研究及应用——上海市民体育健身项目锻炼指南的研制[J]. 中国运动医学杂志, 2007, 26(1): 76-78.
- [22] 梁洁, 蒋卓勤, 何玉敏, 等. 中国健康成人基础代谢率估算公式的探讨[J]. 中国校医, 2008, 22(4): 372-374.
- [23] 李可基, 屈宁宁. 中国成人基础代谢率实测值与公式预测值的比较[J]. 营养学报, 2004, 26(4): 244-248.
- [24] 任建安, 李宁, 黎介寿. 能量代谢监测与营养物质需要量[J]. 中国实用外科杂志, 2001, 21(10): 631-636.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. HJ633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [26] 沈双全, 杜越, 徐丽君, 等. 2015 年我国城市空气质量时空特征分析[J]. 环境与健康杂志, 2017, 34(3): 213-215, 282.
- [27] 王叶晴, 段小丽, 李天昕, 等. 空气污染健康风险评价中暴露参数的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(2): 104-108.
- [28] 阿翁. 世界卫生组织发布《2013 全球运动健身建议》不同年龄段, 有不同的运动处方[J]. 自我保健, 2013(10): 32-33.
- [29] 孙建彦. 石家庄市高校本科大学生闲暇体育活动现状调查及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北师范大学, 2009.
- [30] 冯晨旭, 董发勤, 霍婷婷, 等. 绵阳市 PM_{2.5}、PM₁₀ 变化特征和城郊对比分析[J]. 地球化学, 2020, 49(3): 315-323.
- [31] 陶双成, 邓顺熙, 李彦鹏. 光化学烟雾形成的化学动力学模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 27-31.
- [32] 段文军, 王成, 张昶, 等. 深圳夏季 3 种生境城市森林内臭氧浓度变化规律[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2064-2071.
- [33] 张红, 刘桂建, 梅建鸣, 等. 铜陵市空气污染物浓度日变化特征的观测分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(8): 679-688.
- [34] 曹杨, 王晨曦, 刘炜桦, 等. 2014-2017 年成都市大气污染特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(1): 48-54, 73.
- [35] Ainsworth, B.E., Haskell, W.L., Herrmann, S.D., Meckes, N., Bassett, D.R., Tudor-Locke, C., *et al.* (2011) 2011 Compendium of Physical Activities. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **43**, 1575-1581.
<https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31821ece12>
- [36] 赵文华, 丛琳. 体力活动划分: 不同类型体力活动的代谢当量及体力活动的分级[J]. 卫生研究, 2004, 33(2): 246-249.