

杭州市中小学校秋冬季节教室空气质量状况

应笑¹, 朱璐², 吴育真³, 顾月明¹, 吴国华⁴

1. 浙江省杭州市卫生健康综合行政执法队, 310021; 2. 杭州市富阳区卫生监督所;

3. 杭州市江干区卫生监督所; 4. 杭州市萧山区卫生计生行政执法大队

【摘要】目的 了解杭州市中小学校秋冬季节教室室内空气质量状况, 为提升教室空气质量提供参考。**方法** 于 2018 年 9 月至 2019 年 1 月, 选取杭州市区 11 所中小学校 33 间教室作为研究对象, 利用空气质量检测仪对正常使用时段教室空气进行检测, 对收集的 PM_{2.5} 和 CO₂ 数据进行分析。**结果** 秋冬季节杭州中小学校教室 PM_{2.5} 和 CO₂ 平均质量体积浓度分别介于 35.30~74.65 μg/m³ 和 949.17~2 029.98 mg/m³ 之间, 且均随寒冷程度增加而逐月增高 (F 值分别为 1 412.84, 775.66, P 值均 <0.01)。PM_{2.5} 质量体积浓度不同时段之间的差异无统计学意义, CO₂ 质量体积浓度随时段变化呈现明显的波峰变化。在测量时段中, 68.42% 的监测时段教室 PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度符合标准。PM_{2.5} 水平与学校类型、寒冷程度有关, 年级越高、寒冷程度越高, PM_{2.5} 水平越高 (β 值分别为 0.44, 8.31, P 值均 <0.05); CO₂ 质量体积浓度与学校类型、寒冷程度及时段有关, 年级越高, 寒冷程度越高, CO₂ 水平越高; 时段越晚, CO₂ 水平越低 (β 值分别为 213.64, 162.38, -16.28, P 值均 <0.01)。**结论** 杭州市中小学校教室 CO₂ 质量体积浓度与欧洲中小学接近, 但 PM_{2.5} 质量体积浓度远高于国外; PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度均较国内其他城市中小学略低。在学校选址、规划设计、日常使用管理等方面应预先进行考虑以维持良好的教室室内空气质量。

【关键词】 空气污染, 室内; 公共卫生; 组织和管理; 环境监测; 季节

【中图分类号】 R 122.1 G 637.8 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-9817(2020)05-0765-04

Indoor air quality in classrooms of primary and secondary schools during autumn and winter in Hangzhou/YING Xiao^{*}, ZHU Lu, WU Yuzhen, GU Yueming, WU Guohua. ^{*} Administrative Law-enforcement Department of Hangzhou Municipal Health Commission, Hangzhou(310021), China

【Abstract】 Objective To understand indoor air quality in middle and primary schools of Hangzhou in autumn and winter seasons, and to provide references of promoting indoor air quality of schools. **Methods** Totally 33 classrooms of 11 schools in urban area were selected into study during Sept.2018 to Jan.2019. Daily measurements of PM_{2.5} and CO₂ were performed in selected classes during school working time by air quality monitors. Totally, monitoring data of 35 964 hours were analyzed using univariate and multiplicity analysis for PM_{2.5} and CO₂ level, variability and possible influence factors. **Results** In autumn and winter, hourly average values of classroom PM_{2.5} and CO₂ concentration level in Hangzhou were between 35.30 to 74.65 μg/m³ and between 949.17 to 2 029.98 mg/m³, respectively. The concentration levels of PM_{2.5} and CO₂ were higher with the temperature ($F = 1 412.84, 775.66, P < 0.01$). No statistical significance was be found for the difference of PM_{2.5} concentration among monitoring times. Wave changes in CO₂ were observed with time variation PM_{2.5} and CO₂ concentration level of 68.42% monitoring times was complied with standards. School type and temperature correlated with PM_{2.5} concentration level. The PM_{2.5} concentration level in senior high school was higher than that in junior high school, while the value in primary school was the minimum ($\beta = 0.44, P < 0.01$). And the PM_{2.5} concentration increased with the temperature decreased ($\beta = 8.31, P < 0.01$). School type, temperature and monitoring time correlated with CO₂ concentration level. CO₂ concentration increased with the increase of grade, decrease in temperature and later time during the day ($\beta = 213.64, 162.38, P < 0.01$). The CO₂ concentration level in later monitoring time was lower than that in earlier monitoring time ($\beta = -16.28, P < 0.01$). **Conclusion** Classroom CO₂ concentration level in Hangzhou was closed to that in European schools, while PM_{2.5} concentration level was much higher. Comparing with other cities in China, classroom PM_{2.5} and CO₂ concentration level in Hangzhou is better. The results highlighted that school location, design and routine management should be advanced consideration for good air quality in classroom.

【Key words】 Air pollution, indoor; Public health; Organization and administration; Environmental monitoring; Seasons

【作者简介】 应笑(1982-), 女, 浙江金华人, 硕士, 主要从事学校卫生监督工作。

DOI: 10.16835/j.cnki.1000-9817.2020.05.035

由于青少年特殊的生理和行为特征,如呼吸率较高、活动量较大,更容易受到环境污染物的影响^[1-2]。学校是青少年学习生活的重要场所,青少年一天中有大约 1/3 的时间在教室度过,教室空气质量直接影响青少年身体健康、学习能力与行为表现^[2-3]。为了解中小学校教室空气质量状况,笔者于 2018 年 9 月至 2019 年 1 月对杭州市 11 所中小学校 33 间教室的室内空气质量进行测量,结果报道如下。

1 对象与方法

1.1 对象 经协商教育行政主管部门,并在知情同意的原则下选取杭州市区 4 所小学、4 所初中和 3 所高中共计 33 间教室安装空气在线检测设备。选取室内空气指标中有代表性的 PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度作为观测指标。

1.2 方法 选用经校准的国产蓝居 U-MINI-205 室内空气质量检测仪进行检测,PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度测量量程分别为 0~400 μg/m³ 和 0~8 000 mg/m³,分辨率分别为 1 μg/m³ 和 2 mg/m³。仪器安装位置为教室中心点位置天花板下方,每 5 s 读取数据 1 次,取小时平均值进行分析。

根据学校教学活动规律设定开机时间为 7:00,关机时间为 22:00,2018 年 9 月至 2019 年 1 月期间总监测时长为 35 964 h,测量期间保持正常教学活动。

参照《建筑通风效果测试与评价标准》(GJ/T 309—2013)^[4],将 PM_{2.5} 小时平均质量体积浓度 >75 μg/m³ 定义为不符合标准。参照《中小学校教室换气卫生要求》(GB/T 17226—2017)^[5],结合 CO₂ 质量体

积浓度单位换算,将 CO₂ 小时平均质量体积浓度 >2 000 mg/m³ 定义为不符合标准。

1.3 统计学处理 采用 SAS 9.1 进行统计学分析。用均数描述连续性变量,不同组间的比较采用方差分析,通过拟合一般线性模型(GLM)分析学校类别、寒冷程度、时间段等因素对 PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度的影响。

2 结果

2.1 不同类别学校各月份教室空气质量比较 9 月至 1 月期间教室平均 PM_{2.5} 质量体积浓度分别为 36.64,49.15,56.29,57.58 和 74.13 μg/m³,差异有统计学意义($F=1\ 412.84, P<0.01$);随着月份呈逐渐上升趋势(P 值均 <0.05)。9,10 月不同类型学校教室平均 PM_{2.5} 质量体积浓度差异有统计学意义(P 值均 <0.01);两两比较发现,教室平均 PM_{2.5} 质量体积浓度呈现高中>小学>初中趋势。11,12 和 1 月不同类型学校教室平均 PM_{2.5} 水平差异无统计学意义。

观测的 5 个月内教室平均 CO₂ 质量体积浓度分别为 1 162.48,1 189.83,1 305.99,1 643.27 和 1 754.78 mg/m³,不同月份之间的差异有统计学意义($F=775.66, P<0.01$);各类型学校均呈随寒冷程度增高而呈上升趋势(P 值均 <0.05)。任一月份中不同类型学校 CO₂ 质量体积浓度差异均有统计学意义(P 值均 <0.01);两两比较发现,除 10 月初中与高中之间差异无统计学意义外,其余差异均有统计学意义(P 值均 <0.05);9 月呈现初中>高中>小学的趋势,11 月至次年 1 月呈现高中>初中>小学的趋势。见表 1。

表 1 杭州市不同类别学校各月份教室 PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度比较(\bar{x})

学校 类型	9月(n=7 469)		10月(n=6 342)		11月(n=8 126)		12月(n=7 510)		1月(n=6 517)	
	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	CO ₂ / (mg·m ⁻³)	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	CO ₂ / (mg·m ⁻³)	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	CO ₂ / (mg·m ⁻³)	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	CO ₂ / (mg·m ⁻³)	PM _{2.5} / (μg·m ⁻³)	CO ₂ / (mg·m ⁻³)
小学	36.35	949.21	50.58	1 042.24	56.39	1 101.68	57.52	1 217.89	73.37	1 253.39
初中	35.30	1 453.28	45.46	1 266.31	56.37	1 370.45	57.54	1 812.84	74.65	1 977.13
高中	38.60	1 032.35	52.10	1 245.70	56.13	1 430.55	57.68	1 876.88	74.34	2 029.98
F 值	25.32	313.48	46.47	232.16	0.04	308.89	0.01	409.52	0.96	328.08
P 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.96	<0.01	0.99	<0.01	0.38	<0.01

2.2 不同类别学校不同时段教室空气质量比较 不论小学、初中还是高中,教室 PM_{2.5} 质量体积浓度呈现下午略低的波动趋势,但不同时段之间、不同类型学校之间的差异无统计学意义。见图 1。

3 类不同学校教室 CO₂ 质量体积浓度随时间呈现不同波动状态,小学呈现不明显双波峰形态,初中和高中呈现三波峰状态,其中高中呈现典型三波峰状态。3 类学校各时段 CO₂ 质量体积浓度差异均有统计学意义(P 值均 <0.05),且均以小学最低。

2.3 教室空气质量多因素分析 分别以教室 PM_{2.5} 和 CO₂ 质量体积浓度小时均值为应变量拟合一般线性模型分析学校类型、月份、时段产生的影响,其中依据平均温度将 9,10,11,12 和 1 月分别修正为寒冷程度 1,2,3,4,5 纳入分析。PM_{2.5} 质量体积浓度与学校类型、寒冷程度有关,年级越高、寒冷程度越高,PM_{2.5} 质量体积浓度越高。CO₂ 质量体积浓度与学校类型、寒冷程度及时段有关,年级越高、寒冷程度越高,CO₂ 质量体积浓度越高;时段越晚,CO₂ 质量体积浓度越

低。见表 2。

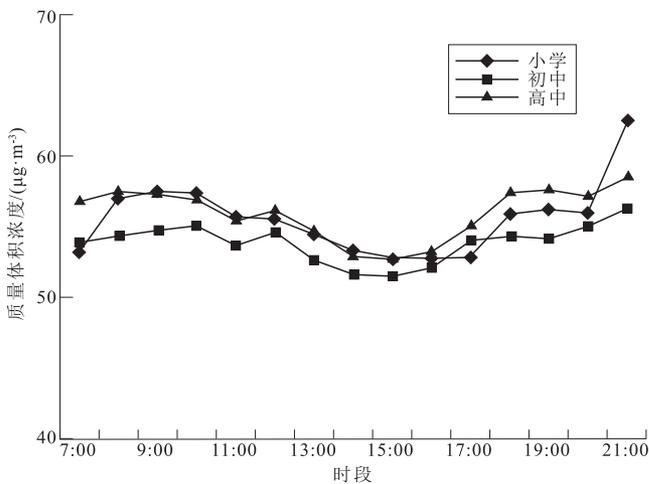


图 1 杭州市不同类型学校不同时段教室 PM2.5 质量体积浓度

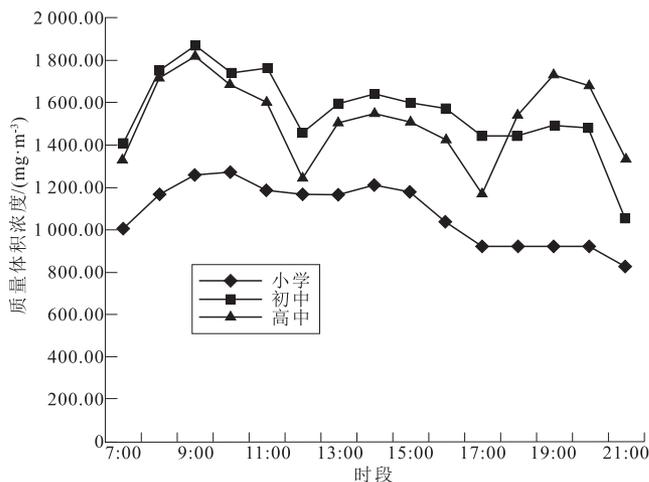


图 2 杭州市不同类型学校不同时段教室 CO₂ 质量体积浓度

表 2 杭州市中小学校教室 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度影响因素分析 (n=35 964)

因变量	影响变量	β 值(β 值 95%CI)	标准误	t 值	P 值
PM2.5	学校类型	0.44(0.05~0.84)	0.20	2.19	0.03
	寒冷程度	8.31(8.08~8.53)	0.12	72.16	<0.01
	时段	-0.07(-0.14~0.01)	0.04	-1.76	0.08
CO₂	学校类型	213.64(203.34~223.95)	5.26	40.64	<0.01
	寒冷程度	162.38(156.49~168.27)	3.01	54.03	<0.01
	时段	-16.28(-18.26~14.30)	1.01	-16.12	<0.01

2.4 教室空气质量评价 在 35 964 h 的监测时段中, 教室 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度符合标准的比例分别为 79.22% 和 85.61%, 68.42% 的时段教室 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度均符合标准。

9 月至次年 1 月期间中小学校教室 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度均符合标准的比例分别为 93.19%, 83.59%, 71.92%, 53.33% 和 38.28%, 且各类型学校随着寒冷程度增加, 该比例均逐渐降低 (Cochran-Armitage 趋势检验, P 值均 < 0.01)。同一月份内不同类型学校教室空气质量合格率之间的比较均存在同一变

化趋势, 即小学 > 初中 > 高中 (P 值均 < 0.05)。见表 3。

表 3 杭州市不同类型学校各月份教室空气质量合格率比较 / %

学校	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月
类型	(n=7 469)	(n=6 342)	(n=8 126)	(n=7 510)	(n=6 517)
小学	97.97	85.06	75.98	64.16	53.09
初中	87.22	84.01	71.55	50.36	30.58
高中	95.41	81.62	68.43	46.05	31.45
Z 值	-3.77	-2.93	-6.05	-12.73	-14.55
P 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

3 类学校不同时段教室空气质量合格率之间的差异均有统计学意义 (P 值均 < 0.01), 且基本在 9:00 左右合格率最低。同一时段不同类型学校合格率比较, 差异也均有统计学意义 (P 值均 < 0.05), 且基本为小学合格率最高。见图 3。

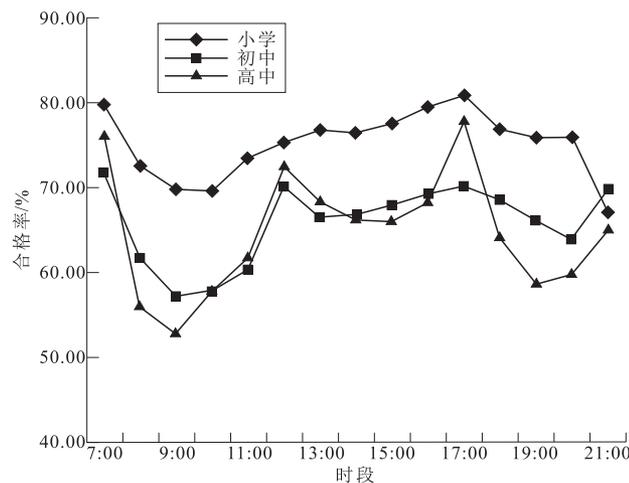


图 3 杭州市不同类型学校不同时段教室空气质量合格率

3 讨论

近年来, 我国大部分地区雾霾天气频发, 引起人们对颗粒污染物 PM2.5 的强烈关注^[6-7], 而 CO₂ 则是室内空气质量的常见指示指标^[8-11], 因此本研究选取上述指标作为研究对象, 并对秋冬季节正常使用状态中小学教室 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度变化情况进行分析, 有较强的卫生学意义。

与国外相关研究结果比较, 本研究 CO₂ 质量体积浓度与塞尔维亚城市中小学接近, 但略高于希腊雅典、西班牙巴塞罗那中小学正常使用教室 CO₂ 质量体积浓度; PM2.5 质量体积浓度远高于国外^[1-2, 12]; 与国内上海、济南、武汉、南昌、北京等地进行的研究相比, 杭州市中小学校 PM2.5 和 CO₂ 质量体积浓度相对较低^[3, 13-16], 总体合格率为 68.42%。

PM2.5 质量体积浓度一天内波动幅度不大且不同类型学校教室之间差异无统计学意义; 但所有类型学校教室 PM2.5 均随着寒冷程度增加而升高, 与我国环

境天气趋势基本一致(寒冷季节空气中 PM_{2.5} 较高)。提示教室 PM_{2.5} 除受室内污染源(有机装修材料、纺织品和粉笔的使用,学生活动产生颗粒物或造成颗粒物再悬浮)的影响外,受室外环境中 PM_{2.5} 质量体积浓度的影响更大^[1,12,17-18]。

教室 CO₂ 质量体积浓度受室外环境的影响较小,而与教室通风状况、室内人数、人员活动情况、上课及课间休息时长等因素密切相关^[2,12],本研究结果也证实了该观点。随着天气寒冷程度的增加,为维持室内温度学生减少了教室通风次数,课间休息时间也由户外活动变为室内活动,造成室内 CO₂ 质量体积浓度逐渐升高。根据现行班额配置情况,中学学生人数一般在 40~50 人,小学一般在 30~45 人,教室内人员多,产生的 CO₂ 也多;中学每节课持续时间与小学相比略长 5~10 min,CO₂ 累积效应更明显;因此呈现中学教室 CO₂ 质量体积浓度高于小学的现象。通过分时段分析发现,教室内 CO₂ 质量体积浓度变化与学生作息高度相关,中学在 9:00,14:00,19:00 出现明显波峰,在 12:00,17:00 出现波谷;小学在 10:00,14:00 出现波峰,11:00—12:00 略有下降,17:00 后逐渐降低。提示休息时间由于教室的空置及有效通风使室内 CO₂ 质量体积浓度降低,而上课时由于通风不良及人员活动造成 CO₂ 升高。

教室室内空气质量不良不仅影响学生身体健康,也影响教师身体健康^[2]。而维持教室良好室内空气质量需要从学校选址到日常管理进行系统安排。首先应选择远离工业区、港口、交通主干道的区域建设学校,避免教室临街建设,现有研究证明工业和交通污染是室外 PM_{2.5} 的主要来源^[1,6]。其次,教学楼及教室规划设计时应结合当地气候特点、风向,按照有利于组织教室有效通风的原则来设计朝向和窗洞面积大小,必要时可附设教室机械通风系统。再次,教室日常使用中的管理也很重要,应利用每个课间休息时段进行全面开窗通风,限制学生在教室内活动,避免 CO₂ 的持续蓄积;放学后开窗进行教室湿式清扫,减少跑、跳等大幅度活动,避免颗粒物的再悬浮。此外,在教室安装室内空气质量预警系统,根据实时监测数据对教室通风或活动行为进行指导也有利于教室室内空气质量的改善。

志谢 感谢杭州市富阳区、江干区卫健局及教育局以及所有参与学校对本项目的大力支持。

4 参考文献

- [1] IOAR R, XAVIER Q, JOHN W, et al. How to protect school children from the neurodevelopmental harms of air pollution by interventions in the school environment in the urban context[J]. *Environ Int*, 2018, 121:199-206. DOI:10.1016/j.envint.2018.08.063.
- [2] IVAN M L, ZARKO M S, MILENA V J, et al. Impact of CO₂ concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia[J]. *Thermal Sci*, 2016, 20(suppl 1):S297-S307.
- [3] 周书涵,郭森杰,王雪羽,等.学校教室室内空气质量调查及成因分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2017, 36(12):35-37.
- [4] 住房和城乡建设部.建筑通风效果测试与评价标准 JGJ/T 309—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [5] 卫生和计划生育委员会,标准化管理委员会.中小学校教室换气卫生要求 GB/T 17226—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [6] 王清勤,李国柱,赵力,等.建筑室内细颗粒物(PM_{2.5})污染现状、控制技术与标准[J]. *暖通空调*, 2016, 46(2):1-7.
- [7] 朱梅,文远高.室内 PM_{2.5} 浓度标准的探讨[J]. *制冷与空调*, 2014, 28(6):726-730.
- [8] DAISEY J M, ANGELL W J, APTE M G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(1):53-64.
- [9] RADHA G, MUKESH K. Indoor-outdoor concentrations of RSPM in classroom of a naturally ventilated school building near an urban traffic roadway[J]. *Atmosp Environ*, 2009, 43(38):6026-6038.
- [10] GRIFFITHS M, EFTEKHARI M. Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom[J]. *Energ Build*, 2008, 40(4):556-560.
- [11] 周云.长沙市 8 所小学学校教室卫生学现状调查[J]. *基础医学与医药前沿*, 2017, 4(16):333-334.
- [12] NIKOLAOS B, MARGARITA N A, VASILIKI D A, et al. Indoor air quality and thermal conditions in a primary school with a green roof system[J]. *Atmosphere*, 2018, 9:75-88. DOI:10.3390/atmos9020075.
- [13] 曲云霞,季佳艳,季英波,等.冬季雾霾期间中学教室室内污染物测量与分析[J]. *低温建筑技术*, 2019, 248:111-113. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2019.02.031.
- [14] 张锐,陶晶,魏建荣,等.公共场所室内空气中 PM_{2.5} 污染水平及其分布特征研究[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(12):1082-1084.
- [15] 陈陵,范义兵,杨树,等.南昌市公共场所室内空气中 PM_{2.5} 浓度调查[J]. *卫生研究*, 2014, 43(1):146-148.
- [16] 刘延湘,待会会,刘君侠.江汉大学校园典型室内空间空气质量分析[J]. *广东化工*, 2015, 42(9):160-162.
- [17] CYRYS J, PITZ M, BISCHOF W, et al. Relationship between indoor and outdoor levels of fine particle mass, particle number concentrations and black smoke under different ventilation conditions[J]. *J Exp Anal Environ Epidemiol*, 2004, 14(4):275-283.
- [18] 熊志明,张国强,彭建国,等.室内可吸入颗粒物污染研究现状[J]. *暖通空调*, 2004, 34(4):32-36.

收稿日期:2019-12-19;修回日期:2020-02-18