

衡阳市中小学校教室内 CO₂ 浓度状况调查分析

周亚丽^{1,2}, 邓志红³, 孙倩莱³, 罗强¹, 李桀¹, 黄钢桥¹, 胡世雄³

1. 衡阳市疾病预防控制中心, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南现场流行病学培训项目, 湖南 长沙 410005;
3. 湖南省疾病预防控制中心, 湖南 长沙 410005

摘要: **目的** 了解衡阳市中小学校教室内的 CO₂ 浓度状况, 探索其影响因素, 提出教室内空气优化策略, 为防控学校呼吸道传染病以及修订教室通风换气的标准提供依据。 **方法** 采用多阶段分层抽样方法抽取衡阳市 74 所中小学校, 对教室内 CO₂ 浓度进行现场测量, 通过单因素分析和 logistic 回归分析通风设施和通风策略对教室 CO₂ 浓度的影响。 **结果** 共调查 68 所学校, 435 间教室, 教室总体的 CO₂ 浓度合格率为 54.94%。CO₂ 浓度的影响因素有室内风速 ($OR=0.238, 95\%CI:0.097\sim0.586$)、窗户面积开启率 <0.5 倍 ($OR=0.410, 95\%CI:0.170\sim0.988$)、窗户面积开启率 ≥ 0.5 倍 ($OR=0.297, 95\%CI:0.115\sim0.772$)、窗户连续开启 ≥ 30 min ($OR=0.615, 95\%CI:0.338\sim1.121$)、门开启 1 扇 ($OR=0.370, 95\%CI:0.184\sim0.742$)、门开启 2 扇 ($OR=0.188, 95\%CI:0.098\sim0.359$)、对流风 ($OR=0.334, 95\%CI:0.187\sim0.595$)、设门气窗 ($OR=0.397, 95\%CI:0.236\sim0.665$) 以及人均使用面积 ($OR=0.175, 95\%CI:0.097\sim0.317$)。 **结论** 衡阳市中小学校教室总体的 CO₂ 浓度合格率较低。窗户开启率、门开启面积、对流风、设门气窗以及人均使用面积是教室内 CO₂ 浓度的保护因素, 建议各中小学校改善相应的通风设施及通风策略, 降低教室内 CO₂ 浓度, 提升室内空气质量。

关键词: 中小学校教室; CO₂ 浓度; 影响因素; 通风

中图分类号: R122.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-3110(2021)02-0232-04 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2021.02.028

学校人群密集, 特别是教室, 作为学生学习活动的主要场所, 人员密度大, 呼吸道传染病在学校内极易暴发。CO₂ 浓度是室内空气质量的敏感指标, 通风不良会导致 CO₂ 浓度超标^[1-2]。而 CO₂ 浓度过高, 可使学习效率明显下降, 更与呼吸道传染病的发生密切相关^[3-4]。为深入了解衡阳市中小学校教室内的 CO₂ 浓度状况, 调查教室的通风条件, 并比较不同通风条件下的室内 CO₂ 浓度, 有效提高教室空气质量, 保障学生身体健康, 提出具体的改善对策和学校自身管理措施, 本课题选取衡阳市各县市区中小学校共 68 所, 于 2019 年 1—2 月对教室内 CO₂ 浓度进行实时监测, 现将结果报告如下。

1 对象与方法

1.1 调查对象 2019 年 1—2 月, 选择衡阳市各县市区中小学校教室为调查对象。

1.2 调查方法

1.2.1 抽样方法 采用多阶段分层抽样法。为保证样本的全面性和均衡性, 本研究将衡阳市按照经济发展水平划分为三大区域, 每个区域内随机抽取两个县市区开展调查(第一区域: 石鼓区、南岳区; 第二区域: 衡南县、耒阳市; 第三区域: 衡阳县、祁东县)。6 个县

市区辖区内中小学校共 1 007 所, 其中中学 313 所, 小学 599 所, 九年制 95 所。在每个县市区采取分层抽样的方式抽取被调查的学校。将衡阳市 6 个县市区的中小学校分为中学、小学、九年制三层、城市和农村两层, 各层的样本量按比例分配, 从各层中用简单随机法抽取了 74 所学校。

1.2.2 调查步骤 依据《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)、《公共场所空气中二氧化碳测定方法》(GB/T 18204-2014) 及相关文献^[1,5-7] 统一设计教室调查表。①由调查员通过询问学校负责人或分管学校卫生的校领导以及现场查看等方式获得学校一般情况及硬件设施的数据。②对被抽取教室, 研究人员在某节课下课前 5 min 使用 CO₂ 测试仪(美国 GE 公司的 TELAIRE-7001) 实地测量教室内 CO₂ 浓度。同时测量教室面积、窗户面积, 调查班主任和学生以获得教室的门窗开启时间段、通风持续时间和教室内人数等资料。

1.2.3 相关定义 九年制学校为初中和小学一体化教育学校; 教室人均面积合格标准: 小学 ≥ 1.36 m², 中学 ≥ 1.39 m²(参照《中小学校设计规范》(GB 50099-2011)); CO₂ 浓度合格标准为 $\leq 1\,500$ ppm(参照《中小学校教室换气卫生标准》(GB/T 17226-2017))。

1.3 调查内容

1.3.1 教室通风状况调查 一般情况(学校的类别、性质等)、通风设施(教室的面积、窗户类型、气窗设

作者简介: 周亚丽(1986-), 女, 湖南衡阳人, 大学本科, 主管医师, 主要从事急性传染病预防与控制工作。

通信作者: 胡世雄, E-mail: 379788967@qq.com。

置、对流设置、空调使用情况、机械通风设备、空气净化等)。

1.3.2 教室内 CO₂ 浓度测量表 实地测量不同时间点、不同通风状态的教室内 CO₂ 浓度。并详细记录测量当时教室所采取的通风策略(开启的窗户面积、门开启的状态、门和窗开启的时间段、是否形成对流风、测量当日是否连续通风 30 min 以上、教室内人数等)。

1.4 统计学分析 将原始数据资料进行编码整理后,全部输入 Epi Data 3.1 数据库并进行核查,用 SPSS 22.0 软件,对不符合正态分布的计量数据采用秩和检验,中学、小学和九年制的 CO₂ 浓度比较采用 Kruskal-Wallis 检验,农村和城镇的 CO₂ 浓度比较使用 Wilcoxon 检验。用 χ^2 检验对计数数据进行单因素分析,采用 logistic 回归分析进行多因素分析,检验水准均取 $\alpha=0.05$ 。

表 1 衡阳市不同类别学校教室 CO₂ 浓度测量结果

学校	数量	CO ₂ 浓度合格 (%)	χ^2 值	<i>P</i> 值	CO ₂ 浓度 [ppm, <i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅)]	<i>Z</i> / <i>H</i> 值	<i>P</i> 值
中学	125	64(51.20)	14.422	<0.001	1492.0(1227.5~1885.0)	-4.739	<0.001
小学	240	130(54.17)			1468.5(1244.3~1769.3)		
九年制	70	45(64.29)			1363.5(1201.0~1589.5)		
城镇	252	119(47.22)			1531.0(1318.3~1880.3)		
农村	183	120(65.57)			1364.0(1164.0~1666.0)		
合计	435	239(54.94)			1463.0(1223.5~1761.0)		

2.3 教室内 CO₂ 浓度单因素分析 不同的室内风速、门和窗户开启面积、门和窗户开启时段、窗户类型及人均面积,门和窗户连续开启是否 ≥ 30 min、是否形成对流风、是否设门气窗的教室 CO₂ 浓度合格率差异都有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

表 2 衡阳市学校教室内 CO₂ 浓度单因素分析(*n*=435)

因素	数量	CO ₂ 浓度合格 (%)	χ^2 值	<i>P</i> 值
风速(m/s)			16.975	<0.001
≤0.5	388	200(51.55)	51.808	<0.001
>0.5	47	39(82.98)		
窗户开启面积				
均关闭	68	15(22.06)		
开启率<0.5	139	66(47.48)	47.244	<0.001
开启率≥0.5	228	158(69.30)		
窗户开启时间段				
课间开启	31	20(64.52)		
课时开启	133	64(48.12)	20.338	<0.001
均开启	218	146(66.97)		
均关闭	53	9(16.98)		
窗户连续开启≥30 min				
是	307	190(61.89)	65.192	<0.001
否	128	49(38.28)		
门开启面积				
均关闭	109	27(24.77)		
开启 1 扇	110	57(51.82)	47.540	<0.001
开启 2 扇	216	155(71.76)		
门开启时间段				
课间开启	43	24(55.81)		

2 结果

2.1 学校基本情况 本次实际调查 68 所学校,调查率为 91.89%(68/74)。其中,中学 19 所、小学 44 所。九年制 5 所,城镇学校 20 所,农村学校 48 所。共抽取 435 间教室,11 间教室有排风扇,113 间教室有空调,但在本次调查中,发现教室的排风扇和空调均未启用。

2.2 教室内 CO₂ 浓度测量结果 68 所中小学校 435 间教室平均 CO₂ 浓度为 1 463.0(1 223.5~1 761.0)ppm,合格率为 54.94%。城镇中小学校的 CO₂ 浓度高于农村中小学校的 CO₂ 浓度,差异有统计学意义($Z=-4.739, P<0.001$)。对不同学校教室的 CO₂ 浓度合格率进行统计分析,城镇和农村的学校教室 CO₂ 浓度合格率差异有统计学意义($\chi^2=14.422, P<0.001$),见表 1。

续表 2

因素	数量	CO ₂ 浓度合格 (%)	χ^2 值	<i>P</i> 值
课时开启	70	42(60.00)	30.921	<0.001
均开启	232	152(65.52)		
均关闭	90	21(23.33)		
门连续开启≥30 min				
是	283	183(64.66)	66.541	<0.001
否	152	56(36.84)		
对流风				
是	216	161(74.54)		
否	219	78(35.62)	6.524	0.010
窗户类型				
外推窗	39	29(74.36)		
推拉窗	396	210(53.03)		
人均面积(m ²)			37.272	<0.001
低于标准	317	146(46.06)		
符合标准	118	93(78.81)		
是否设门气窗			4.525	0.033
是	184	112(60.87)		
否	251	127(50.60)		

2.4 教室内 CO₂ 浓度多因素 logistic 回归分析 以教室内 CO₂ 浓度是否合格(0=合格,1=不合格)为因变量,将单因素分析中差异有统计学意义的因素作为自变量纳入非条件 logistic 回归分析方程模型中进行多因素分析。结果显示:室内风速、窗户开启面积、窗户连续通风 ≥ 30 min、门开启面积、对流风、窗户类型、设门气窗、人均使用面积等因素最终纳入方程,这些因素是

CO₂ 浓度的影响因素。等级变量窗户开启面积和门开启面积通过设定哑变量进行进一步的分析,显示当窗户的开启率达到一半时(窗户可开启面积的一半),室内 CO₂ 浓度改善明显,当开窗面积继续增大时,甚至全开状态时,CO₂ 浓度改善不明显,见表 3、表 4。

表 3 变量赋值说明表

因素	变量赋值	纳入模型方式
窗户开启面积	均关闭=Ref,开启率<0.5 倍=1,开启率≥0.5 倍=2	哑变量
窗户开启时间段	课间开启=1,课时开启=2,均开启=3,均关闭=4	哑变量
窗户连续开启≥30 min	否=0,是=1	原始变量
门开启面积	均关闭=Ref,开 1 扇=1,开 2 扇=2	哑变量
门开启时间段	课间开启=1,课时开启=2,均开启=3,均关闭=4	哑变量
门连续开启≥30 min	否=0,是=1	原始变量
对流风	无=0,有=1	原始变量
窗户类型	推拉窗=0,外推窗=1	原始变量
人均面积	低于标准=0,符合标准=1	原始变量
门气窗	无=0,有=1	原始变量
室内风速(m/s)	≤0.5=0,>0.5=1	原始变量

注:所有哑变量均以第一个变量值为对照。

表 4 衡阳市学校教室内 CO₂ 浓度多因素 logistic 回归分析

变量	β	SE	Wald χ^2 值	P 值	OR(95%CI)
风速	-1.435	0.459	9.765	0.002	0.238(0.097~0.586)
窗户均关闭			6.214	0.045	
窗户面积开启率<0.5 倍	-0.891	0.449	3.950	0.047	0.410(0.170~0.988)
窗户面积开启率≥0.5 倍	-1.213	0.487	6.214	0.013	0.297(0.115~0.772)
窗户连续开启≥30 min	-0.486	0.306	2.517	0.113	0.615(0.338~1.121)
门关闭			26.085	0.000	
门开启 1 扇	-0.995	0.356	7.826	0.005	0.370(0.184~0.742)
门开启 2 扇	-1.673	0.33	25.640	0.000	0.188(0.098~0.359)
对流风	-1.097	0.295	13.814	0.000	0.334(0.187~0.595)
窗户类型	-0.827	0.436	3.594	0.058	0.438(0.186~1.028)
人均面积	-1.741	0.302	33.182	0.000	0.175(0.097~0.317)
设门气窗	-0.925	0.264	12.267	0.000	0.397(0.236~0.665)

注:本研究 logistic 回归进入方法使用逐步回归法,没有进入模型中的变量已被剔除。

3 讨 论

《中小学校教室换气卫生标准》(GB/T 17226-2017)中规定 CO₂ 浓度平均值低于 1 000 ppm,最高浓度限值为 1 500 ppm。本次研究中均在下课前 5 min 测量 CO₂ 浓度,故本文取 1 500 ppm 作为 CO₂ 浓度的评价指标,若超过该值则判断 CO₂ 浓度超标。衡阳市中小学校的 CO₂ 浓度合格率为 54.94%,低于牛姣涵等^[8]、陈群等^[9]报道的合格率,表明衡阳市中小学校教室总体的 CO₂ 浓度合格状况欠佳,通风状况有待改善。

影响教室内 CO₂ 浓度的设施主要为教室人均面积和门气窗的设置。室内人均面积即反映教室人员密度的指标,人均面积越大,教室人员密度越小;室内有大量人员的通风房间,其室内空气流动状态比较复杂,在人体附近会出现绕流、贴附流动等现象,室内空气流动的大循环被破坏^[10-11]。因此,在教室不能有效开窗通风的情况下,可以通过改变教室的人员密度来改善教

室内空气状况。同样的,气窗设计也应当得到重视。如未设气窗,尤其在冬春季呼吸道传染病高发季节,对学校疾病防控极为不利^[12]。气窗可以显著提高室内风速,提高空气质量,十分有利于教室的夜间通风^[13-14]。而本次调查发现衡阳市中小学校教室只有不到 50%的教室设置了气窗,应在学校推广门上设置气窗,让室内的气流贯通起来,优化自然通风。

另外,对教室 CO₂ 浓度影响显著的是教室的通风策略。改善教室自然通风,可有效降低教室 CO₂ 浓度,一个行之有效的策略是增加外界空气进口处的窗户和门开启的面积。开启面积增大后室内平均风速变大,同时,进风口面积的变化加大了室内进风量,加强了室内与室外空气的置换量,起到良好的通风作用^[15-16]。本次调查中发现采取门窗同开的方式,CO₂ 浓度改善显著,与李磊^[17]报道相似,采取门窗同开的方式进行通风,其室内气流流通更好。当门开启且窗面积开启率达到 50%时,CO₂ 浓度最低。另一个重要的通风策略,就是使教室形成对流风。当空气从房间一侧门窗进入,从另一侧门窗流出时会形成对流风。对于有条件的教室,采用开门窗使之形成对流风,从而达到加强自然通风的效果。李磊^[17]的研究模拟对比了三种通风方式下的速度场,结果显示形成对流的情况下,其室内气流流通更好,温度分布更均匀,CO₂ 浓度改善更为显著。Escombe 等^[18-19]的研究,通过对现有基础设施的简单修改使得室内能够形成对流风,从而大大增加了自然通风,并以极低的成本大大降低了疾病的传播风险。冬季由于热适应的要求,大部分教室的开窗时长很短,窗户甚至长时间是关闭的。有研究报道在冬季,在满足温湿度情况下,增大开窗时长,可以明显降低室内 CO₂ 浓度^[20]。本次研究结果显示,延长开窗时间可有效降低室内 CO₂ 浓度,特别是在测量时间之前持续开窗 30 min 以上的教室,CO₂ 浓度改善明显。

综上,对改善教室内 CO₂ 浓度的建议有:①控制每班学生人数,增大教室人均面积。②开启 50%以上的可开启门和窗户,并保证课前的良好通风。③采取双侧开窗或者门窗同开的方式使室内形成对流风。④教室设置气窗或者机械通风设施(备循环风空气净化消毒器的新风系统、排风扇等)有极大的必要性。⑤冬季,由于热适应的要求课时不能实现开窗通风的,可采用增加开窗通风时长来改善通风,可在课前、课间、午休、体育课或是放学后保持教室至少连续开窗通风 30 min 以上。

本次研究的创新之处是采用量化的指标对衡阳市中小学教室通风情况有所了解;分析了学校教室 CO₂