

Study on Indoor Air Quality of a University Classroom in Northern Region*

—Illustrated by the Case of Dalian

Feng You, Yang Lv[#], Bailin Fu, Bin Chen, Peng Dong, Zhiwang Ye, Qian Zhang

School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian
Email: [#]lvyang@dlut.edu.cn, fengfeizhiguo@163.com, 996079669@qq.com

Received: May 27th, 2013; revised: Jun. 27th, 2013; accepted: Jul. 4th, 2013

Copyright © 2013 Feng You et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Indoor air quality not only affects the comfort and health of the human body, but also has a significant impact on indoor work and learning efficiency. The research assesses a certain university in Dalian, using MCH-383SD and TSI Dust Monitor to measure the air quality of classroom, with measuring items including CO₂ concentration, temperature, relative humidity and repairable particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}), which aims to explore the impact of CO₂ concentration factors and their impacts on students' learning outcomes. The study concludes that the biggest factors affecting indoor air quality are exceeded indoor CO₂ concentration, insufficient fresh air volume (per person) and overcrowded classroom. The continuous monitoring reflects that the increase of the indoor CO₂ concentration is related to the number of people in the classroom and the ventilation condition. And the indoor CO₂ concentration is much higher in heating period of winter than the concentration in autumn. Based on the premise of the feasibility, the paper proposed several new methods to improve the indoor air quality in college during winter.

Keywords: Indoor Air Quality; CO₂; Particulate Matter; Ventilation Rate; Ventilation

北方某高校教室空气品质的研究*

—以大连市为例

游 峰, 吕 阳[#], 付柏林, 陈 滨, 董 鹏, 叶志旺, 张 倩

大连理工大学土木工程学院, 大连
Email: [#]lvyang@dlut.edu.cn, fengfeizhiguo@163.com, 996079669@qq.com

收稿日期: 2013年5月27日; 修回日期: 2013年6月27日; 录用日期: 2013年7月4日

摘 要: 室内空气品质不仅影响人体的舒适和健康, 而且对室内人员的工作和学习效率有着显著的影响。本研究以大连市某高校为研究对象, 利用 MCH-383SD CO₂ 浓度/温、湿度记忆仪和 TSI 粉尘仪对教室秋季及冬季空气品质进行现场测量, 测量项目包括 CO₂ 浓度、温度、相对湿度和颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)浓度, 探讨测量项目对学生学习效果的影响。研究得出, 影响高校室内空气品质的最主要原因是教室 CO₂ 浓度超标、人均新风量不足以及教室人数超员。连续监测反映出室内 CO₂ 浓度的增长与室内人数及通风情况有关, 且冬季采暖期室内 CO₂ 浓度远高于秋季。基于可行性前提, 本文提出了改善高校室内空气品质的几种方法。

关键词: 室内空气品质; 二氧化碳; 颗粒物; 换气次数; 通风

*本研究受国家“十二五”科技支撑计划课题“室内健康环境表征参数及评价方法研究”(2012BAJ02B05)及国家创新项目经费资助。
[#]通讯地址。

1. 引言

室内空气品质不仅影响人体的舒适和健康,而且对室内人员的工作和学习效率有着显著的影响。良好的空气品质能够使人感到神清气爽、精力充沛、心情愉悦。然而近二十多年的研究表明许多国家的室内空气环境却不容乐观,人们抱怨室内空气品质恶劣,使他们出现了某些病态反应:头痛、困倦、恶心和流鼻涕等,此类症状称为病态建筑综合症(简称 SBS)^[1]。室内温度、相对湿度、CO₂浓度和颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})是反映室内空气品质的四个重要指标,其中CO₂浓度常用来表征室内新鲜空气多少或通风程度的强弱。根据我国室内空气质量标准规定,CO₂日平均浓度值应不大于0.10%(0.10%为体积分数),在通风不良及人员密集场所CO₂容易产生浓度超标,长时间处于超标环境会有轻度头痛且体内电解质平衡遭到破坏,引起血液酸中毒,浓度过高将会导致头疼、疲劳、眼鼻和呼吸道等病症^[2]。

教室是学校师生进行教学活动的主要场所。尽管教室中的CO₂浓度一般不会达到致人死亡的程度,但常有超标的情况,给师生的身体健康造成不良影响,也会阻碍教学活动的有效进行,尤其是在冬季教室门窗紧闭、通风状况不佳的情况下,这种可能性更大^[3]。一项关于教室空气中CO₂浓度对学生脑力作业能力影响的研究表明,空气清洁度不同,对学生完成作业效果有明显影响,随着空气CO₂浓度的增加,学生脑力作业能力明显下降,可以认为空气污浊是引起学生疲劳、降低学习效果的一个不可忽视的因素^[4]。目前为止,国内外已经开展了许多针对教室内空气环境的调查研究,发现通风状况差、上课人数多、人员流动频繁的教室其污染状况尤为严重^[5],然而我国在这方面的研究还很少。

本研究对大连市某高校教室室内空气品质进行现场测量和分析研究,旨在探讨包括CO₂浓度、温度、相对湿度和颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)浓度对学生学习效果的影响,为改善高校教学环境和教学效果提供客观依据。

2. 仪器与方法

2.1. 检测对象

检测对象为大连市某大学学生教室,教室尺寸为

11 m(长)×7 m(宽)×3.8 m(高),教室设置座位72个,教室窗户朝南,外面种植物为雪松,靠近校内马路。检测教室物理模型如图1所示。

2.2. 检测仪器及检测方法

本研究检测教室上课期间的室内温度、相对湿度、CO₂浓度和颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)浓度,使用仪器见图2、图3。图2为MCH-383SDCO₂浓度、温度、相对湿度自动记忆仪,单位分别为ppm、℃、%,每分钟读数一次,能够自动存档。图3为TSI粉尘仪,主

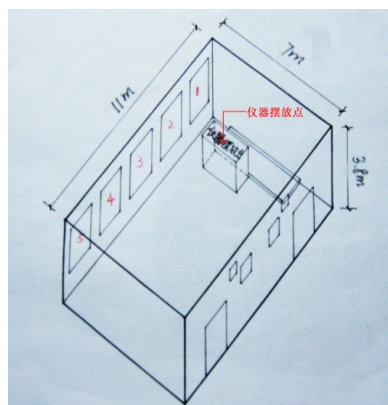


Figure 1. The physical model of testing classroom
图 1. 检测教室物理模型



Figure 2. MCH-383SD CO₂/Humidity/Temp Monitor
图 2. MCH-383SD CO₂浓度/温、湿度记忆仪



Figure 3. TSI Dust meter
图 3 TSI 粉尘仪

要测量室内可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5}), 每秒钟读数一次, 单位 mg/m³。

本研究利用 MCH-383SD 仪器分别在秋季和冬季对教学楼中典型教室上课期间的温度、相对湿度和 CO₂ 浓度进行连续检测, 然后根据检测结果分析上课期间温度、相对湿度及 CO₂ 浓度变化规律。

另外, 选取教学一馆和综合楼两个教室利用 TSI 粉尘仪对室内颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})进行测量及分析比较。本研究检测项目参照《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)中的浓度值进行比较, 如表 1 所示。

2.3. 计算公式及计算参数

假设在容积为 V 的房间内空气均匀混合, 设污染物散发速率为 m , 在通风前室内污染物浓度为 C_1 , 经过时间 τ 之后, 室内污染物浓度变为 C_2 , 室外新风中污染物浓度为 C_s , 新风风量是 Q , 则根据质量守恒可得室内污染物浓度 C 的变化:

$$V \frac{dC}{d\tau} = QC_s + mQC \quad (1)$$

初始条件为: $\tau = 0, C = C_1$

解上述方程为:

$$C_2 = C_1 \exp\left(\frac{Q}{V}\tau\right) + \left(\frac{m}{Q} + C_s\right) \left[1 - \exp\left(\frac{Q}{V}\tau\right)\right] \quad (2)$$

可以看出, 室内污染物浓度按照指数规律增加或者减少, 其增减率取决于 $\frac{Q}{V}$, 该值的大小反映了房间通风变化规律^[6], 我们将其定义为换气次数:

$$n = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

对式(2)进行变形如下:

$$\frac{QC_1 m QC_s}{QC_2 m QC_s} = \exp\left(\frac{Q}{V}\tau\right) \quad (4)$$

可得新风量:

$$Q = \frac{m}{C_2 C_s} \cdot \frac{V C_2 C_1}{\tau C_2 C_s} \quad (6)$$

式中, Q ——新风量, m³/h

m ——污染物散发速率, m³/h

V ——房间体积, m³

C_1 ——房间污染物初始浓度, ppm

C_2 ——房间污染物终始浓度, ppm

Table 1. Indoor air quality of testing items
表 1. 检测对象的室内空气标准值

参数	单位	标准值	备注
温度	℃	22~28	夏季空调
		16~24	冬季采暖
相对湿度	%	40~80	夏季空调
		30~60	冬季采暖
新风量	m ³ /(h.人)	30	1 h均值
CO ₂	ppm	1000	日均值
PM ₁₀	mg/m ³	0.15	日均值
PM _{2.5}	mg/m ³	0.075	日均值

C_s ——室外污染物浓度, ppm

τ ——经过时间, h

人体 CO₂ 呼出量与人体新陈代谢有关^[7], 即

$$q = 1.44 \times 10^4 (MA_p) \quad (7)$$

式中, q ——每个人的 CO₂ 呼出量, m³/h

M ——新陈代谢率, W/m²

A_p ——人体皮肤表面积, m²

人体皮肤表面积可用下式进行计算:

$$A_p = 0.202 m_b^{0.425} H^{0.725} \quad (8)$$

式中, m_b ——体重, kg, H ——身高, m

对于一个标准中国人, 当其坐着活动时, 新陈代谢率约为 70 W/m², 根据(7)、(8)式可计算得出本研究中每个人的 CO₂ 呼出量约为 0.02 m³/h。

在本研究中教室标准计算体积为 308 m³, 扣除电脑、桌椅设备等体积(本研究按室内体积 10%计)以及人的体积(每人 0.3 m³计)。假设教室有 30 人上课时, 则在本研究中教室计算体积为 270 m³。

2.4. 测量概要

为便于比较, 本研究对 4 个学生教室进行测量, 教室名称定义为 A、B、C、D。一次测量时间为 90 分钟, 其中上午 10:05~10:50 为第三节课, 10:55~11:40 为第四节课; 下午 13:30~14:15 为第五节课, 14:20~15:05 为第六节课。具体测量次数和内容如表 2 所示。

3. 结果及分析

3.1. 教室上课期间 CO₂ 平均浓度和新风量

教室上课期间 CO₂ 平均浓度和新风量如表 3 所

Table 2. Testing results summary
表 2. 测量概要

教室名称	CO ₂ 浓度	相对湿度	温度	颗粒物 (PM _{2.5} 、PM ₁₀)
A		秋季测量2次 冬季测量4次		—
B		冬季测量4次		冬季测量1次 PM _{2.5}
C		秋季测量1次		—
D		—		冬季测量1次 PM ₁₀

Table 3. Measurement of CO₂ concentration and fresh air volume
in testing classroom during the class
表 3. 教室上课期间 CO₂ 浓度和新风量测量情况

名称	日期	CO ₂ 浓度 (ppm)	新风量 (m ³ /h)	人均新风量 (m ³ /h人)	换气次数 (h ⁻¹)
A	27-Sep	553	3171	144.0	10.6
	18-Oct	1389	1065	42.6	3.6
	8-Nov	1356	995	30.2	3.3
	15-Nov	1523	342	11.0	1.1
	22-Nov	1910	219	6.4	0.7
	6-Dec	1716	1426	50.9	4.8
B	13-Nov	2040	324	7.4	1.1
	20-Nov	1766	416	9.7	1.4
	4-Dec	2471	155	3.5	0.5
	5-Dec	2278	286	23.8	1
C	18-Oct	1648	243	9.4	0.8

示。由表 3 可见, CO₂ 平均浓度最低值为 A 教室 9 月 27 日的 553 ppm, 且在测试期间仅此一次没有超过我国《室内空气质量标准》的限定值 1000 ppm, 其他教室在上课期间 CO₂ 浓度均处于超标状态, 其中 CO₂ 平均浓度最高点是 12 月 4 日在 B 教室的测量值, 达到了 2471 ppm, 超标近 2.5 倍。另外, 由表 3 可见, 当进入 11 月冬季采暖期后, 教室内 CO₂ 平均浓度明显增高, 这是因为冬季采暖期上课期间长期关闭窗户, 导致室内通风不畅, 引起室内 CO₂ 平均浓度不断升高, 极大降低了室内空气品质, 这将会影响教学效果和学生学习效率。

另外, 表 3 反映出的另一个重要指标是“人均新风量”。根据《室内空气质量标准》, 人均新风量不得少于 30 m³/h, 在测量中发现除 A 教室秋季及冬季测量日的 11 月 8 日、12 月 6 日达到国家标准人均新风量要求外, 其余测量教室在测量日均未达标, A、B、

C 教室在某些测量日人均新风量甚至没有达到 10 m³/h, 远远低于国家标准, 教室空气质量堪忧。

3.2. 教室温度、相对湿度及颗粒物含量

教室温度、相对湿度和颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)情况如表 4 所示。根据我国《室内空气质量标准》^[8]和《环境空气质量标准》^[9], 冬季采暖温度标准值为 16℃~24℃, 相对湿度标准值为 30~60%, 可吸入颗粒物 PM₁₀ 二级标准值为 0.15 mg/m³, 可入肺颗粒物 PM_{2.5} 二级试用标准为 0.075 mg/m³。由表 4 可见, 室内温度和相对湿度满足我国相关标准, 教室内颗粒物的测量结果也在标准值范围内。

3.3. 典型房间的温度、相对湿度、CO₂ 浓度以及颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)随时间变化分析

3.3.1. CO₂ 浓度、温度、相对湿度

图 4 为秋季 9 月 27 日 A 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度变化情况, 由图 4 可见, 随着上课时间的推移, 三者并没有太大变化。只是 CO₂ 浓度有稍微波动, 但一直处于标准值之下。分析原因, 这与上课期间窗户开启通风有关。10:50~10:55 下课期间, 由于前后门开启, 室内自然通风增强, 以及室内人员减少, 因此 CO₂ 浓度出现小幅度的降低。

图 5 为秋季 10 月 18 日 A 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度变化情况, 从中可以发现 CO₂ 浓度始终处于超标状态, 最高浓度达到 2100 ppm。其中第一节课期间 CO₂ 浓度和相对湿度同时增高, 这是因为门窗都关闭, 导致室内通风不畅。下课期间由于打开窗户和前后门, 室内人数也有减少, 因此 10:50 左右 CO₂ 浓度开始降低, 而后相对湿度也开始降低, 这显示出相对湿度比 CO₂ 浓度的变化滞后。到 11:05 时, 由于处于上课时间, 前后门重新处于关闭状态, CO₂ 浓度和相对湿度开始停止降低。同时因为第二节课教室窗户被打开, 室内 CO₂ 浓度并没有重新开始上升, 维持在 1000 ppm 附近, 相对湿度有所降低, 最后维持在 35% 左右。

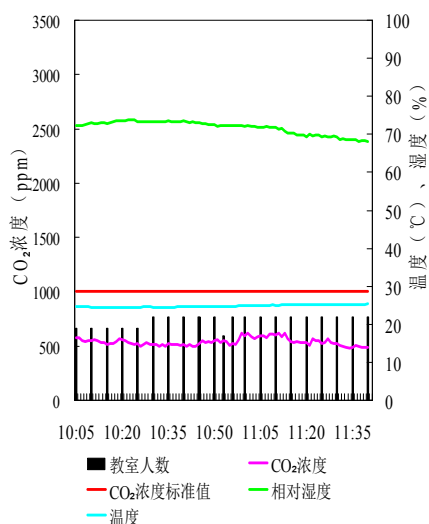
图 6 为 11 月 13 日 B 教室 CO₂ 浓度、温度相对湿度变化情况。从图 6 可以发现, 室内 CO₂ 浓度从上课开始就处于超标状态, 并且随着上课时间的推移不断升高, 虽然课间下课时候, 前门开启、室内人员减少, 但是 CO₂ 浓度整体仍然呈现上升趋势。这是因为 11

Table 4. Concentrations of temperature, humidity and particle in classroom
表 4. 教室温、相对湿度和颗粒物浓度

教室名称	日期	温度(°C)	湿度(%)	颗粒物(mg/m ³)	
A	27-Sep	24.8	72		
	18-Oct	21.8	45		
	8-Nov	22.8	37	—	
	15-Nov	21.7	36		
	22-Nov	21.6	41		
	6-Dec	18.8	32		
B	13-Nov	23.1	38	—	—
	20-Nov	22.5	40	—	—
	4-Dec	22.8	39	PM _{2.5}	0.026
	5-Dec	20.7	41	—	—
D	5-Dec	—	—	PM ₁₀	0.067

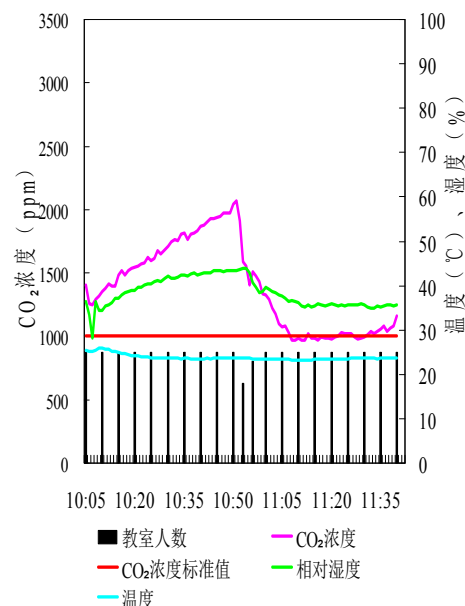
月 13 日大连已经进入冬季采暖期，上课期间窗户密闭，渗风量不足，无法满足室内人员的需求。

图 7 为 12 月 4 日 B 教室 CO₂ 浓度、温度相对湿度变化情况。比较图 6、图 7 可见，室内温度和相对湿度变化不大，但是 CO₂ 浓度变化明显。图 6 上课期间窗户一直关闭，因而 CO₂ 浓度一直上升；图 7 下课期间窗户开启过，因而 CO₂ 浓度有过短暂下降，而后整体处于上升状态，而且均为超标情况。测试期间，观察到教室学生有打瞌睡、注意力不集中的情况，CO₂ 浓度超标已影响到学生的学习效果。



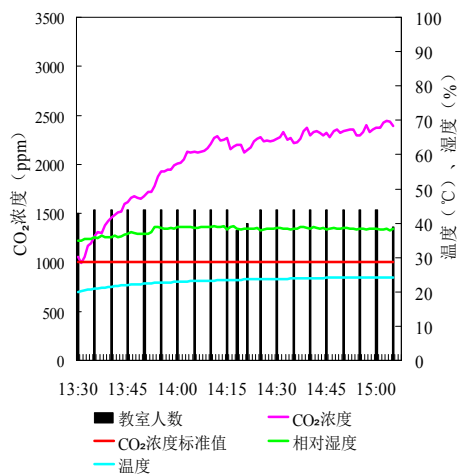
(注：A 教室上课期间窗户处于开启状态)

Figure 4. Concentrations of CO₂, temperature, humidity in classroom A on 27-Sep
图 4. 27-Sep A 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度情况



(注：A 教室第一节期间窗户处于关闭状态，10:50 下课之后打开窗户，一直开启到 11:40)

Figure 5. Concentrations of CO₂, temperature, humidity in classroom A on 18-Oct
图 5. 18-Oct A 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度情况



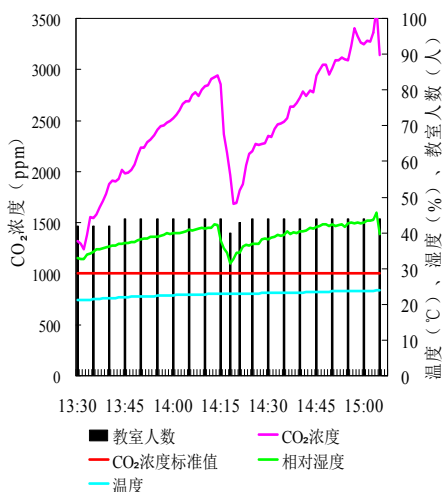
(注：B 教室上、下课期间窗户始终处于关闭状态)

Figure 6. Concentrations of CO₂, temperature, humidity in classroom B on 13-Nov
图 6. 13-Nov B 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度情况

3.3.2. 室内颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)浓度

图 8 为 12 月 4 日 B 教室可入肺颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度。其中测点 1~9 是课前测量，测点 10~15 是课间测量，测点 16~27 是课后测量。

由图 8 可见，PM_{2.5} 质量浓度的变化趋势是，课前浓度比较高，课间降低，课后又升高。这说明室内颗粒物的浓度值与室内人员活动密切相关，课前和课后



(注: B 教室上课期间窗户始终处于关闭状态, 下课时短暂开启窗户和前门)

Figure 7. Concentrations of CO₂, temperature, humidity in classroom B on 4-Dec

图 7. 4-Dec B 教室 CO₂ 浓度、温度、相对湿度情况

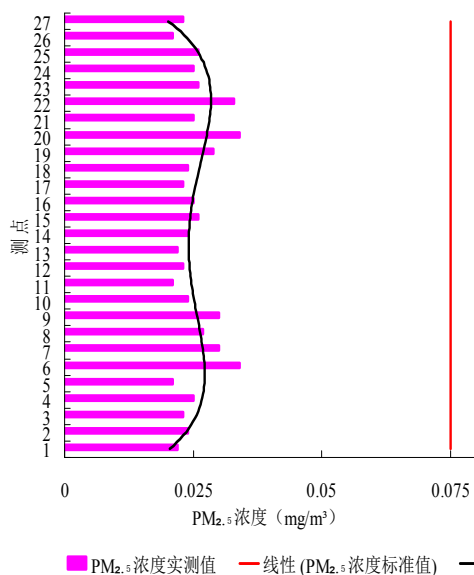


Figure 8. Concentrations of PM_{2.5} in classroom B on 4-Dec
图 8. 12 月 4 日 B 教室可吸入颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度

学生活动比较频繁, 引起室内颗粒飞扬或再飞散, 因此颗粒物浓度相对课间要高一些, 人员活动对颗粒物的影响值得今后深入研究。另外, 在本研究中室内颗粒物检测值均在国家限定标准之下, 对室内空气质量影响不大。

表 5 是 12 月 5 日教室 D 室内 PM₁₀ 浓度值。由表 5 可见, D 教室室内可吸入颗粒物 PM₁₀ 平均值均在《室内空气质量标准》限值内, 但最大值仍有超过标准限值 0.15 mg/m³ 的测点。

Table 5. Measurement of Concentration of PM₁₀ in classroom D on 5-Dec
表 5. 12 月 5 日教室 D 室内 PM₁₀ 实测数据

测点	平均值 mg/m ³	最小值 mg/m ³	最 mg/m ³
1	0.074	0.059	0.109
2	0.074	0.051	0.138
3	0.079	0.054	0.441
4	0.067	0.002	0.195
5	0.055	0.04	0.093
6	0.053	0.037	0.238
7	0.042	0.035	0.049

3.4. 同一季节不同教室室内 CO₂ 浓度的比较

图 9 是冬季 A 教室和 B 教室室内 CO₂ 浓度的比较。由图 9 可以发现, 同一季节, 教室不同, 室内 CO₂ 浓度的变化情况也不同。分析原因主要是与教室通风情况和人员密度相关。

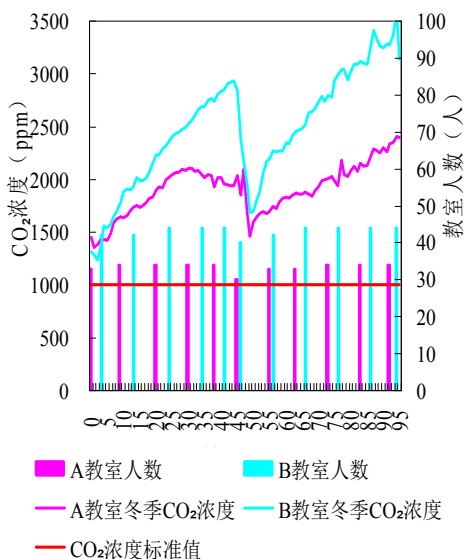
由图 9 可见, 冬季采暖期 A 教室与 B 教室的 CO₂ 浓度变化趋势相同, 但是 B 教室 CO₂ 浓度明显高于 A 教室的。因为 B 教室的人员密度比 A 教室的大, 人员呼吸是室内 CO₂ 的主要来源, 冬季采暖期门窗紧闭, 渗透的新风量远远不能满足室内人员的新风量需求, 这样十分容易引起 CO₂ 浓度持续超标, 进而威胁师生健康, 学习效果也无法得到保证。

3.5. 同一教室不同季节室内 CO₂ 浓度的比较

图 10 为 A 教室秋季和冬季室内 CO₂ 浓度的比较。由图 10 可见, 同一教室不同季节的室内 CO₂ 浓度也不同, 冬季采暖期 CO₂ 浓度显著高于秋季, 并且窗户开启状态与室内 CO₂ 浓度有很大关系。

3.6. 满座率与室内 CO₂ 浓度的关系

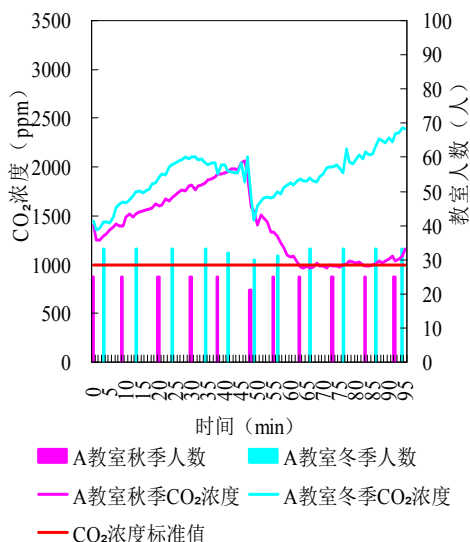
表 6 为 A 教室和 B 教室的满座率情况。从中可以看出, 满座率也是影响室内 CO₂ 浓度的重要因素之一。因为每个教室的空间和座位有限, 而由于班级人数可能会很多, 这样如果学校安排在一个小教室里面的话就会造成满座率高, 特别是冬季采暖期, 学生大都不愿去室外活动, 大量消耗室内氧气, 同时引起室内 CO₂ 浓度不断升高。



(注：此时处于采暖期，故上、下课时期间两个教室窗户都是紧闭的)

Figure 9. Concentrations of CO₂ in A and B classrooms during winter

图 9. 冬季 A 教室和 B 教室内 CO₂ 浓度的比较



(注：A 教室秋季第一节下课窗户关闭，下课之后打开并且一直保持开启；冬季采暖期窗户一直处于关闭状态)

Figure 10. Concentrations of CO₂ in classroom A during autumn and winter

图 10. A 教室秋季和冬季室内 CO₂ 浓度的比较

4. 结论和建议

4.1. 结论

本研究以大连市某高校教室为研究对象，对教室空气品质进行实测，并且探讨教室内室内空气品质的影响因素及对学生学习效果的影响，得到结论如下：

Table 6. Full rate in classroom
表 6. 教室满座率情况

教室名称	日期	人数(人)	CO ₂ 浓度 (ppm)	满座率(%)
A	18-Oct	25	1389	35
	8-Nov	33	1356	46
	15-Nov	31	1523	43
	22-Nov	34	1910	47
B	13-Nov	44	2040	61
	20-Nov	43	1766	60
	4-Dec	44	2471	61

1) 本次测量中教室上课期间平均温度范围是 18.8℃到 24.8℃，平均相对湿度范围为 32%到 72%，基本达到我国《室内空气质量标准》(GB/T1883-2002)。室内 CO₂ 平均浓度基本处于超标情况，最高浓度值达到 2471 ppm，超标近 2.5 倍，人均新风量多次测试不足 10 m³/h，远远低于国家标准。可吸入颗粒物 PM₁₀ 平均浓度为 0.042 mg/m³ 到 0.074 mg/m³，可入肺颗粒物 PM_{2.5} 平均浓度约为 0.025 mg/m³，基本达到我国《室内空气质量标准》(GB/T1883-2002)和《环境空气质量标准》(GB3095-2012)。

2) 目前高校教室内空气品质的主要问题是 CO₂ 浓度超标及新风量的不足，特别是在冬季采暖期，教室上课期间由于窗户一直关闭，并且人员产生大量 CO₂，造成教室空气品质恶化，严重影响教学质量和学生的学习效率。

4.2. 建议

1) 冬季采暖期尽量增强通风，减小室内人员密度以此来确保高校师生身体健康。

2) 教室里面的自然通风口要利用起来，因为冬季门窗实际上很难经常打开，可以考虑改造自然通风管道。

3) 在教室的墙面上涂刷吸附 CO₂ 的材料。

4) 多在教室里面摆放可以吸收 CO₂ 的植物。

5) 学校根据班级人数合理安排上课教室，人数多的班级尽量安排至比较大的教室，人数少的安排小教室，尽量减少满座率。

6) 在教室里面安放 CO₂ 报警器，随时监控教室 CO₂ 浓度。

参考文献 (References)

- [1] P. O. Fanger. Thermal Comfort. Malabar: Robert E Krieger Publishing Company, 1982.
- [2] P. O. Fanger, J. Toftum. Prediction of thermal sensation in non-air-conditioned building in warm climates. Proceedings of 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, 30 June-5 July 2002, 92-97.
- [3] R. J. De Dear, G. S. Bragger. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transaction, 1998 104(1): 145-167.
- [4] R. J. De Dear, G. S. Bragger. Thermal comfort in naturally ventilated building: Revisions to ASHRAE Standard 55. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 549-561.
- [5] L. K. Eduardo, H. T. Paulo. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. Building and Environment, 2004, 39, 1055-1063.
- [6] S. C. Carpenter. Energy and IAQ impacts of CO₂-based demand-controlled ventilation. ASHRAE Transaction, 1996; 102(2): 80e8.
- [7] L. C. Ng, A. Musser, S. J. Emmerich and A. K. Persily. Airflow and indoor air quality models of DOE reference commercial buildings. Technical Note 1734. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [8] GB/T1883-2002, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [9] GB3095-2012, 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.