

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-606-08

# 室内空气 CO<sub>2</sub> 对人体影响及其抑制措施综述

苏小文 陈宏宇

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 建筑室内二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 水平是衡量室内空气质量 (IAQ) 的重要指标之一。在暖通空调领域, CO<sub>2</sub> 浓度水平常用于评价室内通风效率和人员密度。同时室内 CO<sub>2</sub> 浓度也是空调通风的重要表征参数, 合理的水平能保证人们的正常休息、舒适体验感及高效工作。然而, 不同场景 CO<sub>2</sub> 对人体的作用效果存在差异, 研究发现即使低于标准规定限值的 CO<sub>2</sub> 浓度和暴露时间, 人体仍有不适症状, 将现有的 CO<sub>2</sub> 浓度规定和标准应用于空调通风设计仍有一定局限性。从 CO<sub>2</sub> 浓度、CO<sub>2</sub> 暴露时长以及 CO<sub>2</sub> 产生方式等因素对人体健康、舒适及工效等 3 方面的影响进行文献梳理, 在总结现有研究的基础上, 指出了不同情景下 CO<sub>2</sub> 对人体的影响规律, 并给出未来研究方向展望, 从而为不同功能房间的空调通风设计与环境营造提供参考。

**【关键词】** CO<sub>2</sub>; 人体健康; 舒适; 工效; 建筑环境

中图分类号 TU831.1 文献标志码 A

## Impact of Indoor Carbon Dioxide Levels on Human Health and Its Restraining Methods: A Literature Review

Su Xiaowen Chen Hongyu

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The level of indoor carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in buildings is an important indicator of indoor air quality (IAQ). CO<sub>2</sub> concentration levels are commonly used to evaluate indoor ventilation efficiency and occupant density. It is also an important parameter for HVAC ventilation, and maintaining appropriate levels can ensure normal rest, comfort, and efficient work for occupants. However, the effects of CO<sub>2</sub> on the human body vary among different situations. Even with CO<sub>2</sub> concentrations and exposure times below the standard limits, there can still be discomfort symptoms for occupants. Thus, there are limitations in applying existing regulations and standards of CO<sub>2</sub> concentration to designs of air conditioning and ventilation system. A literature review was conducted on the effects of CO<sub>2</sub> concentration, exposure duration, and creation methods on human health, comfort, and work efficiency. The impact of CO<sub>2</sub> on the human body in different scenarios was concluded and suggestions for future research work were proposed, providing references for designs of air conditioning and ventilation in buildings with different functional areas.

**【Keywords】** CO<sub>2</sub>; Human health; Comfort; Work efficiency; Building environment

## 0 引言

随着现代社会中人们室内生活时间的增加, 室内空气质量已成为人们关注的重要问题。室内二氧

化碳 (CO<sub>2</sub>) 浓度作为一个重要的指标, 被广泛用于评估室内空气质量<sup>[1]</sup>。建筑室内 CO<sub>2</sub> 主要来自人体呼吸以及燃烧活动<sup>[2]</sup>。室内 CO<sub>2</sub> 浓度在通风较差

基金项目: 国家自然科学基金 (52308119); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682023CX028)

作者 (通讯作者) 简介: 苏小文 (1993-), 女, 博士, 讲师, E-mail: suxiaowen@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-07-23

会显著升高, 对人体健康和学习工作效率产生潜在影响<sup>[3]</sup>。此外, CO<sub>2</sub> 浓度过高还会引起不良健康反应。长期处于高 CO<sub>2</sub> 浓度环境中的人会增加患上呼吸系统、心血管等疾病的可能性, 认知功能也会受到影响, 包括决策能力、注意力<sup>[4]</sup>。

除了 CO<sub>2</sub> 浓度外, 不同 CO<sub>2</sub> 暴露时长也会对人体产生不利的影响。长时间暴露于 CO<sub>2</sub> 中会导致头晕、头痛、注意力不集中、情绪波动等神经系统方面的不适症状, 这些症状可能会影响到人们的工作和生活质量<sup>[3]</sup>。

此外, 不同的 CO<sub>2</sub> 释放方式的影响也不相同, 室内人员密集增加 CO<sub>2</sub> 浓度往往伴随着其他污染物的累积, 通过呼吸道排出的代谢产物不仅含有 CO<sub>2</sub>, 还有丙酮、异戊二烯、苯酚等挥发性有机化合物 (VOCs)<sup>[5]</sup>。并且室内 VOCs 成分与人员组成存在密切关系, 据统计人体产生的 VOCs 占室内 VOCs 总量的 40%, 人体呼出气体以及皮脂的臭氧分解是室内 VOCs 的重要来源<sup>[6]</sup>。皮肤代谢是人体产生污染物的另一个途径, 其产生的代谢物主要包括 CO<sub>2</sub>、一氧化碳、丙酮、苯及甲烷等, 同时皮肤表面的分泌物还会与室内其他污染物发生化学反应, 从而引发二次污染<sup>[7]</sup>。并且室内人员产生 CO<sub>2</sub> 的同时产生污染物, 会导致 CO<sub>2</sub> 与这些污染物共同作用, 对室内人员健康造成威胁<sup>[8]</sup>。

国内外 CO<sub>2</sub> 相关研究包含不同 CO<sub>2</sub> 浓度、暴露时长对人体的影响, 还有不同 CO<sub>2</sub> 释放方式的对比研究, 以及 CO<sub>2</sub> 与其他因素的交互作用对人体的影响<sup>[9,10]</sup>, 但关于 CO<sub>2</sub> 对人体影响规律尚未形成定论, 如在低于标准规定限值的 CO<sub>2</sub> 浓度场景下, 研究发现人体依然存在不适症状<sup>[11,12]</sup>, 既有研究结论在环境营造方面的应用仍有一定限制。本文将通过对研究现状的梳理, 分析不同 CO<sub>2</sub> 浓度以及暴露时长对人体生理、心理和认知等方面的影响。同时研究发现 CO<sub>2</sub> 的产生方式不同, 其对人体的影响的规律也有差异, 因此针对 CO<sub>2</sub> 的产生方式展开论述, 揭示其影响规律的本质内涵。最后结合前述影响规律, 提出室内空气 CO<sub>2</sub> 的抑制措施, 为未来的研究及环境改善技术措施提供参考。

## 1 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对人体的影响

在常规大气环境中, CO<sub>2</sub> 的浓度很低, 大约为 400ppm<sup>[13]</sup>。但是室内的 CO<sub>2</sub> 浓度往往大于室外大

气平均 CO<sub>2</sub> 浓度, Pettenkofer 教授<sup>[14]</sup>认为, 室内空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度限值应保持在 1000ppm 以下, 只有这样, 才能保证人们摄入足够的新鲜空气, 即每人 25m<sup>3</sup>/h。这一观点被广泛接受并普遍应用于影剧院、报告厅、礼堂、会议室、候车厅等公共场所的室内空气质量监测。如表 1 所示, 人员长期停留的大多数民用建筑室内 CO<sub>2</sub> 浓度限值在 1000ppm, 少数场所的环控级别要求降低, 在 1500ppm 左右。对于地下矿井或施工隧道等有限空间的 CO<sub>2</sub> 浓度限值较高, 达 5000ppm。

表 1 国内外室内 CO<sub>2</sub> 浓度限值相关标准

Table 1 Domestic and international indoor carbon dioxide concentration limit related standards

标准/建议	建议值
ASHRAE 62.1	1000ppm
ET 16798-1 第一类	△CO <sub>2</sub> =380ppm
ET 16798-1 第二类	△CO <sub>2</sub> =550ppm
National Health and Medical Research Council	1000ppm
Facility in Service Indoor Air Quality (S1)	1000ppm
Facility in Service Indoor Air Quality (S2)	1200ppm
Facility in Service Indoor Air Quality (S3)	1500ppm
GB/T 18883-2022	1000ppm
GB 37488-2019	1000ppm
TB 10304-2022	低于 5000ppm
日本健康福利部	1000ppm
煤矿安全规程 135-143	低于 5000ppm

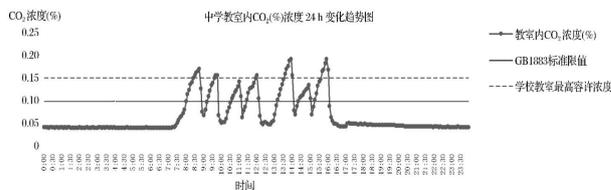


图 1 北京市城区某小学教室内 CO<sub>2</sub> 浓度 24 小时变化趋势图<sup>[15]</sup>

Fig.1 24-hour variation trend chart of carbon dioxide concentration in a classroom in a primary school in the urban area of Beijing City<sup>[15]</sup>

但在调研中发现某些室内环境中例如教室, CO<sub>2</sub> 浓度出现大于限值的 CO<sub>2</sub> 浓度的情况 (见图 1), 金艳伶等人为了深入了解北京市城区学校教

室内 CO<sub>2</sub> 的浓度水平及变化规律,随机抽取城区的一所中学和一所小学,对学校教室内的 CO<sub>2</sub> 浓度进行实时在线监测。结果表明,教室内 CO<sub>2</sub> 浓度水平在超过 4 小时的时间段大于 1000ppm,最高浓度甚至达到 2000ppm<sup>[15]</sup>。

当室内 CO<sub>2</sub> 浓度超过限值时,会影响人体生理参数、舒适度及认知水平和工作效率,还可能对人体的免疫系统产生负面影响。因此,控制 CO<sub>2</sub> 浓度对个体健康至关重要。表 2 总结了不同浓度对人体的影响研究。

### 1.1 CO<sub>2</sub> 浓度对生理参数的影响

生理参数的变化是人体对室内环境变化的应激调节,高浓度的 CO<sub>2</sub> 会导致人体血液中 CO<sub>2</sub> 含量增加,引起呼吸困难、头晕、乏力等症状,严重时甚至可造成窒息<sup>[16]</sup>。随着浓度的增加,CO<sub>2</sub> 首先对人体呼吸系统产生影响。当浓度超过 1000ppm 时,CO<sub>2</sub> 开始通过中枢化学感受器影响人体的呼吸<sup>[17]</sup>。Schaefer 等人的研究发现,在室温条件下,当室内 CO<sub>2</sub> 浓度达到 1500ppm 时<sup>[18]</sup>,测试人员的呼吸分钟量和肺泡 CO<sub>2</sub> 浓度持续增加。Sliwka 等人<sup>[19]</sup>在室温下观察到,当 CO<sub>2</sub> 浓度达到 1200ppm 时,受试者的大脑血流量增加,这表明 CO<sub>2</sub> 会影响神经系统。在相似的室温环境下,Vehviläinen 等人<sup>[20]</sup>和 Kajtár 等人<sup>[21]</sup>分别发现,当 CO<sub>2</sub> 浓度为 2800ppm 和 5000ppm 时,受试者的血液中 CO<sub>2</sub> 分压 (pCO<sub>2</sub>) 升高,以及心率变异性出现改变和舒张压明显升高,说明了室内 CO<sub>2</sub> 对人体心血管系统的作用。

### 1.2 CO<sub>2</sub> 浓度对舒适的影响

室内 CO<sub>2</sub> 浓度是室内空气质量的重要评价参数,空气质量恶化会使人头痛、疲劳、焦虑<sup>[22]</sup>。本节将分析 CO<sub>2</sub> 对人体主观舒适度的影响。现有研究常采用问卷的形式获取人体舒适度信息,在实验中请受试者填写在不同浓度暴露下的接受度、偏好、舒适度等主观感受。当 CO<sub>2</sub> 浓度升高超过 2000ppm 时,呼吸系统会通过增加呼气中的 CO<sub>2</sub> 排出量,从而减少血液中 CO<sub>2</sub> 的浓度,促进 pH 值恢复正常,导致呼出末 CO<sub>2</sub> 浓度 (ETCO<sub>2</sub>) 增加。同时,人体的心率变异性 (HRV) 中频成分降低<sup>[23]</sup>。这些生理参数的变化可能导致人产生困倦感,影响人体舒适度。张晓静<sup>[24]</sup>则发现在室温条件下,CO<sub>2</sub> 浓度达到 3000ppm,受试者对于空气质量更不可接受、更不愉快,而且会有显著的头痛、疲劳、嗜睡等不适感。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 浓度对认知水平和工作效率的影响

除生理与心理外,室内 CO<sub>2</sub> 还会影响人员的认知水平、工作效率,室内 CO<sub>2</sub> 浓度升高会导致认知能力下降<sup>[11,25]</sup>、注意力分散以及生产力的下降<sup>[26]</sup>。当室内 CO<sub>2</sub> 浓度超过 5000ppm 时,吸入 CO<sub>2</sub> 使血管明显扩张,增加血流量。它为脑组织提供足够的氧气和营养物质,导致舒张压升高<sup>[27]</sup>,但也会改变血液流动性,影响脑部的氧合情况,从而影响认知功能的表现。研究人员通常使用认知能力测试、行为观察、生理指标和主观报告等方法获取 CO<sub>2</sub> 浓度对认知水平和工作效率影响的数据。

表 2 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对于人体影响的研究总结

Table 2 Summary of the research on the impact of different carbon dioxide concentrations on human health				
CO <sub>2</sub> 浓度	大于 1000ppm 小于 2000ppm	大于 2000ppm 小于 5000ppm	大于 5000ppm	
生理参数	大脑血流量增加 <sup>[18]</sup> ,呼吸分钟量和肺泡 CO <sub>2</sub> 浓度持续增加 <sup>[19]</sup>	血液中 CO <sub>2</sub> 分压 (pCO <sub>2</sub> ) <sup>[20]</sup> 升高	心率变异性出现改变,人体的舒张压明显升高 <sup>[21]</sup>	
舒适度	出现各种病态建筑综合征并不断加重 <sup>[23]</sup>	出现显著的头痛、疲劳、嗜睡等不适感,对于空气质量更不可接受、更不愉快 <sup>[23]</sup>	头痛、疲劳、焦虑 <sup>[22]</sup>	
认知水平和工作效率	决策绩效和认知水平有所下降,工作效率下降 <sup>[11,25]</sup>	工作效率显著减慢 <sup>[26]</sup>	——	

## 2 不同 CO<sub>2</sub> 暴露时长对于人体的影响

除了 CO<sub>2</sub> 浓度外,CO<sub>2</sub> 作用时长的差异同样会引起人体在生理功能、心理反应和认知水平上出现差异。国际标准对 CO<sub>2</sub> 暴露时长同样做出相关规

定,如表 3 所示。其中,工作场所有害因素职业接触限值 GBZ 2.1-2019 规定的限值均为时间加权平均值,考虑 CO<sub>2</sub> 间歇暴露限值。但较多标准规定的时长限值并未明确给出暴露方式(如连续暴露或间

断暴露), 研究发现在低于标准的暴露时长, 人体同样出现了不适症状, 如头痛疲劳<sup>[24]</sup>, 注意力分散和集中力下降<sup>[25]</sup>。(美国)职业安全与健康管理局 (Occupational Safety and Health Administration, OSHA)、美国政府工业卫生学家会议 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)、(美国)国家职业安全与健康研究院 (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 所制定了一些标准, 此类标准规定 CO<sub>2</sub> 日均 8h 暴露阈值为 5000ppm<sup>[28]</sup>, 可以将暴露时长 8h 作为短期和中长期暴露界限的一个参考值。因此, 本文以 8h 为时长暴露的界限, 进行短期及中长期 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体影响的综述。

表 3 CO<sub>2</sub> 暴露时长相关国际标准

**Table 3 International standards related to CO<sub>2</sub> exposure duration**

CO <sub>2</sub> 浓度(%)*	暴露时长	标准
0.1	—	ASHRAE Standard 62.1-2010
	8h/天, 40h/周	OSHA permissible exposure limit
0.5	8h/天, 40h/周	ACGIH threshold limit value
	10h/天, 40h/周	New NIOSH recommended Long-term exposure limit
0.7	7 到 180 天	SMAC: hyperventilation and headache
	8h/天, 40h/周	GBZ 2.1-2019
1.3	24h	SMAC: hyperventilation, headache and visual disturbance
0.92 (18000mg/m <sup>3</sup> )	15min	GBZ 2.1-2019
	1h	SMAC: hyperventilation, headache and visual disturbance
3	15min	OSHA, ACGIH and NIOSH 2005 recommended

注: 1%=10000ppm

2.1 短期 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体的影响

短期高浓度的室内 CO<sub>2</sub> 暴露出现在一些特殊

的密闭空间, 如行车空间人员被困使 CO<sub>2</sub> 浓度迅速升高<sup>[29]</sup>。在这些情况下, 人们暴露于高浓度的室内 CO<sub>2</sub> 环境中, 对人体健康、生理参数、舒适度、认知水平和工作效率会产生一些负面效果<sup>[30]</sup>。此时, 呼吸系统和心血管系统的生理参数首先会有所改变, 人体暴露于 2800ppm 的 CO<sub>2</sub> 浓度下 4h, 发现受试者的 CO<sub>2</sub> 分压 (pCO<sub>2</sub>) 升高及心率变异性均出现改变<sup>[20]</sup>。在 20000ppm 的 CO<sub>2</sub> 环境中, 人体的酸碱平衡和呼吸速率显著变化<sup>[31]</sup> (见图 2)。

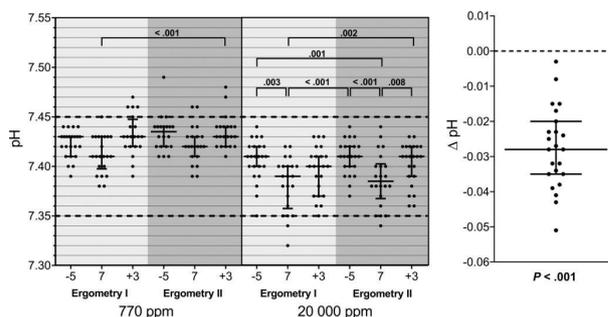


图 2 短期 CO<sub>2</sub> 暴露对人体血液 PH 的影响<sup>[31]</sup>

Fig.2 Short-term effect of carbon dioxide exposure on human blood pH<sup>[31]</sup>

生理参数的改变通常会影响到人体的舒适度, 出现头痛疲劳的现象。短期的 CO<sub>2</sub> 暴露还会导致注意力分散和集中力下降, 进一步影响认知水平和工作效率<sup>[11,25]</sup>。

2.2 中长期 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体的影响

中长期的室内 CO<sub>2</sub> 暴露一般出现在一些持续性的工作环境如潜艇、航天器内部, 在这些环境内 CO<sub>2</sub> 浓度最高可达 10000ppm<sup>[32]</sup>。而在工业环境中 (如啤酒厂、饮料灌装厂), 室内的 CO<sub>2</sub> 浓度更高, 工作人员在此类环境中的暴露时间相对更长, 可达数日甚至数月。长期处于高浓度 CO<sub>2</sub> 的环境中会对呼吸系统造成负面影响, 如加重哮喘症状、引发呼吸道感染等。还可能会增加心血管疾病的风险, 如高血压、心脏病等, 甚至会对神经系统产生损伤, 增加患上神经系统疾病的风险<sup>[33]</sup>。

中长期 CO<sub>2</sub> 累积暴露会增加呼吸系统和心血管系统负担, 影响酸碱平衡<sup>[12]</sup>。Schaefer<sup>[27]</sup>也发现在 CO<sub>2</sub> 浓度为 15000ppm 的环境下暴露 42 天, 受试者的每分钟换气量和 ETCO<sub>2</sub> 显著升高。

这种中长期的累积暴露同样也会降低舒适度, 引起不适感和疲劳甚至影响大脑功能和工作效率, Sliwka<sup>[19]</sup>的实验中测试人员暴露在 CO<sub>2</sub> 浓度为

12000ppm 的实验室中 23 天后出现头痛现象，Allen<sup>[25]</sup>将受试者在 1400ppm 和 1500ppm 的办公室环境下 6 天，受试者认知水平显著降低（见表 4）。

综上所述，长短期暴露都会导致呼吸系统问题如呼吸困难、头晕等。但是中长期暴露则可能导致更严重的健康问题，如呼吸系统疾病、心血管问题

等，这些问题会随着时间的推移逐渐加重，长期暴露可能增加患上神经系统疾病的风险。表 5 为 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体的影响的研究总结，然而不同年龄、性别、健康状况和遗传背景的人在 CO<sub>2</sub> 暴露的特征反应不同，需要在研究中加以区分。

表 4 中长期 CO<sub>2</sub> 暴露对人体认知水平的影响<sup>[25]</sup>

Table 4 The impact of medium to long-term carbon dioxide exposure on human cognitive levels<sup>[25]</sup>

天数	认知水平测试内容							平均值
	基本认知	应用能力	注意力	危机应对能力	信息搜索能力	信息应用能力	策略能力	
第一天	1.35	1.39	1.44	2.35	1.10	3.94	3.77	1.99
第二天	1.20	1.08	1.68	2.05	1.11	2.61	3.17	1.69
第三天	0.91	0.88	0.85	1.33	1.08	1.01	0.83	0.99

表 5 不同 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体的影响

Table 5 Summary of the impact of different durations of carbon dioxide exposure on the human body

CO <sub>2</sub> 暴露时长	小于 8h	大于 8h
生理参数	酸碱平衡和呼吸速率显著变化 <sup>[31]</sup> CO <sub>2</sub> 分压 (pCO <sub>2</sub> ) 升高，心率变异性出现改变 <sup>[20]</sup>	血液 pH 值出现下降现象 <sup>[11]</sup> ，每分钟换气量和 ETCO <sub>2</sub> 显著升高 <sup>[27]</sup>
舒适度	出现头痛和疲劳现象 <sup>[21,35]</sup>	出现头痛现象 <sup>[19]</sup>
认知水平和工作效率	实验的人员工作效率显著下降 <sup>[11,25]</sup>	受试者认知水平显著降低 <sup>[25]</sup>

### 3 不同 CO<sub>2</sub> 释放方式的影响

研究发现，尽管暴露于相同的 CO<sub>2</sub> 浓度或时长下，关于人体反应的研究结论却存在较大差异。例如同样为 3000ppm 的 CO<sub>2</sub> 浓度暴露，一组测试人员出现头痛疲劳、认知水平下降和工作效率降低现象，而另一组则没有出现上述情况<sup>[24]</sup>，这种差异主要因为 CO<sub>2</sub> 的产生方式不同。因此，针对不同 CO<sub>2</sub> 产生方式对人体的影响展开相关综述。

目前营造理想 CO<sub>2</sub> 浓度环境常见的途径有两类，第一类是保持通风量不变，同时增加纯 CO<sub>2</sub> 气体以营造特定的 CO<sub>2</sub> 环境，这种做法通常用于研究特定 CO<sub>2</sub> 浓度对生物体的影响，或者不同敏感度人群在 CO<sub>2</sub> 浓度的暴露反应。个体对 CO<sub>2</sub> 的敏感性差异很大，如哮喘患者和一些对空气环境有要求的工作人员（飞行控制人员、核电厂人员）对 CO<sub>2</sub> 浓度更为敏感，如果做模拟这些人员的实验，可以采用此类方法控制 CO<sub>2</sub> 浓度。

第二类方法通过降低通风量使实验舱内人员的代谢产生的 CO<sub>2</sub> 积聚，这是一种模拟封闭或限制通风环境下的实验方法。这种方法通常用于模拟潜水舱或其他需要限制通风的场景，以研究高 CO<sub>2</sub>

浓度对人体健康、认知能力、心理状态等的影响。通过降低或关闭通风系统以减少外部空气的流入，从而使实验舱内 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐上升。在实验过程中，需要持续监测室内 CO<sub>2</sub> 浓度，以确保达到预定的目标浓度，并及时调整通风以控制 CO<sub>2</sub> 浓度。

#### 3.1 保持通风量不变增加纯 CO<sub>2</sub> 气体

保持通风量不变增加纯 CO<sub>2</sub> 气体的方式，通过使用专门设计的 CO<sub>2</sub> 注入装置，将纯 CO<sub>2</sub> 气体直接注入到室内环境中<sup>[34]</sup>。这些装置通常会控制 CO<sub>2</sub> 的注入速率和量，以确保达到所需的 CO<sub>2</sub> 浓度。又或者将纯 CO<sub>2</sub> 气体与室内空气混合，以达到所需的 CO<sub>2</sub> 浓度，这可以通过在室内设置混合器或者使用风扇等设备来实现。

这种方式营造的实验下，研究发现人体生理参数和工作效率会受到一定影响。通过向一个办公室添加纯 CO<sub>2</sub> 的方式营造浓度为 700ppm 和 2700ppm 两类环境<sup>[35]</sup>，结果显示人的执行能力和认知能力下降且会产生困意，这种方式对人体舒适度的影响则相对较小。通过保持通风量不变增加纯 CO<sub>2</sub> 气体来营造环境，结果显示受试者的舒适度无显著性变化<sup>[27,36]</sup>。Kajtar 和 Herczeg<sup>[21]</sup>的实验中受试者也只

是出现轻微的困倦、注意力难以集中的情况。

### 3.2 降低通风量增加 CO<sub>2</sub> 浓度

降低通风量可以使实验舱内人员呼出的 CO<sub>2</sub> 无法被有效排出, 导致 CO<sub>2</sub> 在空气中逐渐积聚<sup>[24]</sup> (见表 6)。相比于第一类 CO<sub>2</sub> 产生方式, 降低通风量使实验舱内人员代谢产生 CO<sub>2</sub> 积聚除了会产生 CO<sub>2</sub> 之外, 人体还会产生一些其他的污染物, 比如呼吸过程中排出的气体中可能含有气味物质<sup>[37]</sup>, 以及呼吸过程中产生的颗粒物<sup>[38]</sup>, 这些颗粒物可能在空气中悬浮并影响室内空气质量, 从而对人体呼吸以及神经系统产生影响<sup>[7]</sup>。因此, 人员代谢产生 CO<sub>2</sub> 的实验方式也不可避免地融合了其他生物代谢物对人体的影响。

增加纯 CO<sub>2</sub> 的方式严格控制 CO<sub>2</sub> 为唯一的变量参数。通过人员代谢产生 CO<sub>2</sub> 的方式虽然能较为准确地模拟室内真实场景, 但人员代谢除产生 CO<sub>2</sub> 外, 也会有其他生物代谢产物, 此种方式下的人体反应是 CO<sub>2</sub> 与其他因素的共同作用产生的。因此, 需要进一步厘清 CO<sub>2</sub> 与其他生物代谢污染物对人体的作用机理, 为 CO<sub>2</sub> 的作用规律提出科学依据。

表 6 降低通风量使实验舱内人员代谢产生 CO<sub>2</sub> 积聚<sup>[24]</sup>

**Table 6 Reducing ventilation rates leads to the accumulation of CO<sub>2</sub> generated by the metabolism of personnel in the experimental chamber<sup>[24]</sup>**

工况	送风量 (m <sup>3</sup> /h) / (ls/人)	室外 CO <sub>2</sub> (l/min)	舱内人员代 谢产生 CO <sub>2</sub> (l/min)	舱内 CO <sub>2</sub> 浓度 (室外取 350ppm)
B500	720 / 33.3	4.2	1.9	500
M1000	155 / 7.2	4.2	1.9	1000
M3000	38 / 1.8	4.2	1.9	3000

## 4 技术措施

不同 CO<sub>2</sub> 浓度及暴露时长对人员的影响有差异, 因此, 室内 CO<sub>2</sub> 的抑制措施需要根据场景及需求差异确定。本节将分析通过抑制 CO<sub>2</sub> 改善室内空气环境的技术措施。

首先是对于高浓度 CO<sub>2</sub> 暴露场所的抑制措施, 主要出现在特定工厂和车间。在涉及 CO<sub>2</sub> 排放或使用的工业生产环境中, 由于缺乏足够的自然通风, CO<sub>2</sub> 浓度会较高<sup>[39]</sup>。通过安装 CO<sub>2</sub> 传感器, 实时监测 CO<sub>2</sub> 浓度, 自动控制通风设备的开启和关闭, 可

以保持适宜的 CO<sub>2</sub> 水平, 但是 CO<sub>2</sub> 浓度的阈值通常较难确定<sup>[40]</sup>。基于上述不同 CO<sub>2</sub> 浓度对于人体的三大方面的影响总结, 建议人员短暂停留的场所如地下停车场等, 可以将 CO<sub>2</sub> 浓度的阈值设置为 2000ppm, 而对于对人员长期停留且需保证工作效率的场所, 可以将阈值下限调低为 1000ppm。若监测实时浓度超过阈值, 则启动通风系统。

此外是缓解中长期 CO<sub>2</sub> 暴露对于人体影响的相关研究。此类场景经常出现在办公室, 可采用定期开窗通风或使用排气扇等措施帮助 CO<sub>2</sub> 排出, 并引入新鲜空气<sup>[41]</sup>。但是对于定期开窗通风不便的场所, 基于不同 CO<sub>2</sub> 暴露时长对人体的影响的总结, 可以给出一些优化措施, 对于人员认知水平要求较高比如办公室等场所, 可以采用间隔小于 8h 进行一次大规模的开窗或使用排气扇通风的措施。而对于承运车厢等对人员认知水平要求较低的场所, 可以采用间隔大于 8h 进行一次大规模的开窗或使用排气扇通风的措施。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

本文基于建筑室内 CO<sub>2</sub> 对人体影响, 将其划分为三个不同的方面, 主要结论如下:

(1) 关于室内 CO<sub>2</sub> 浓度对人体的具体影响, 当室内 CO<sub>2</sub> 浓度在 1000ppm 至 2000ppm 之间时, 会引起人体生理参数的显著变化, 如大脑血流量、呼吸频率和深度, 同时也会影响决策能力和工作效率。当 CO<sub>2</sub> 浓度升高至 2000ppm 以上但不超过 5000ppm 时, 除了上述症状外, 人体舒适度也会明显下降, 表现为疲劳和嗜睡。而当浓度超过 5000ppm 时, 人体的生理参数、舒适度以及工作效率和认知水平将受到更加严重的影响, 如血液 pH 值下降、头痛等症状显著。

(2) 在小于 8h 的短期暴露中, 当 CO<sub>2</sub> 浓度处于 1000ppm 到 2000ppm 之间, 人体主要是工作效率受到影响, 生理参数和舒适度受到的影响比较小, 如心率性发生改变, 感到轻微疲惫; 当实验中的 CO<sub>2</sub> 浓度升高到大于 2000ppm 时, 不仅工作效率下降, 同时人体的生理参数如心率和 pCO<sub>2</sub> 也会出现改变, 而且会出现头痛, 疲惫等不舒适症状。在超过 8h 的连续暴露下, CO<sub>2</sub> 浓度小于 1000ppm 时会影响人体生理参数, 如血液 PH 下降, 当 CO<sub>2</sub>

浓度升高到 1000ppm 以上小于 2000ppm 时, 人体的认知水平也会下降, 当 CO<sub>2</sub> 浓度进一步升高到 2000ppm 以上时, 不适感和疲劳也会随之出现, 甚至和呼吸系统和心血管系统有关的生理参数会受到影响, 人员的每分钟换气量和 ET<sub>CO<sub>2</sub></sub> 显著升高。同时还发现不同年龄、性别、健康状况和遗传背景的个体在不同时长暴露反应有差异。

(3) 保持通风量不变增加纯 CO<sub>2</sub> 气体(方式 1), 以及降低通风量使实验舱内人员代谢产生 CO<sub>2</sub> 积聚(方式 2) 这两种方式虽然都会影响人体的生理参数, 舒适度, 认知水平, 如每分钟换气量和 ET<sub>CO<sub>2</sub></sub> 显著升高, 工作效率和决策能力下降。但是方式 2 在相同的暴露时长和 CO<sub>2</sub> 浓度水平下, 对于人体的舒适度的影响更显著, 如受试者出现更加头晕、乏力现象。

基于以上结论, 对建筑环境设计和管理提出一些建议: 对于工作时长小于 8 小时且通风良好的房间, 良好的通风可以有效消除人员产生的污染物, 确保空气清新。在这种情况下, 应该确保 CO<sub>2</sub> 的峰值浓度保持在 2000ppm 以下, 以维持员工的工作效率和舒适度。

在密闭空间仅依靠机械通风的房间中, 由于室内存在人员产生的污染物, CO<sub>2</sub> 浓度的控制尤为重要。建议保持 CO<sub>2</sub> 的峰值浓度低于 1000ppm, 以减少员工疲劳和不适感, 提高工作效率。

对于工作时长超过 8 小时的场所, 不论是房间通风良好还是密闭空间依赖机械通风, 都应将 CO<sub>2</sub> 浓度限制在 1000ppm 以下, 确保员工的健康和舒适度不受影响。

## 5.2 展望

目前已有较多关于 CO<sub>2</sub> 的研究, 但研究结论受限于实验条件或为现场调研规律的总结, 不同室内条件 CO<sub>2</sub> 对人体的影响机理尚缺少科学统一的理论体系, 未来方向应注重 CO<sub>2</sub> 对人体影响的生理机制等基础研究, 从基础层面揭示 CO<sub>2</sub> 作用于人体引起不同效应的阈值, 从而增加相关研究成果的普适性。

另一方面, 不同 CO<sub>2</sub> 产生方式研究表明, 纯 CO<sub>2</sub> 对人体的作用效果与 CO<sub>2</sub> 及其他空气污染物的混合效果有差异。未来研究应更多关注 CO<sub>2</sub> 与其他因素相互作用对人体的影响, 不同因素的耦合作用对人体的影响作用存在协同与拮抗, 关注 CO<sub>2</sub>

与室内其他因素的交互作用, 从而为改善室内空气质量提供更科学的参考价值。

在 CO<sub>2</sub> 控制措施方面, 智能化通风系统和先进的 CO<sub>2</sub> 控制技术将成为未来研究重点。建筑环境设计需考虑个体差异, 定制符合不同需求和健康状况的室内环境, 提供舒适和健康的工作和生活空间。未来的建筑环境将致力于提高室内空气质量, 优化通风系统设计, 并全面考虑各种因素, 创造更健康、舒适和高效的生活和工作环境。

## 参考文献:

- [1] 王澎. 室内空气质量及污染控制[J]. 环境科学与技术, 2001, (2): 26-27.
- [2] 刘建国, 刘洋. 室内空气中 CO<sub>2</sub> 的评价作用与评价标准[J]. 环境与健康杂志, 2005, (4): 303-305.
- [3] 蒋婧, 王登甲, 刘艳峰, 等. 室内 CO<sub>2</sub> 浓度对学习效率影响实验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 81-87.
- [4] 兰丽. 室内环境对人员工作效率影响机理与评价研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [5] Fenske J D, Paulson S E. Human breath emissions of VOCs[J]. Journal of The Air & Waste Management Association, 1999, 49: 594-598.
- [6] Liu S, Li R, Wild R J, et al. Contribution of human-related sources to indoor volatile organic compounds in a university classroom[J]. Indoor Air, 2015, 26(6): 925-938.
- [7] Strøm Tejsen P, Zukowska D, Fang L, et al. Advantages for passengers and cabin crew of operating a gas-phase adsorption air purifier in 11-h simulated flights[J]. Indoor Air, 2008, 18: 172-181.
- [8] 全海芹, 高彦峰. 室内空气污染及净化方法综述[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(S1): 254-262.
- [9] 张英杰. 狭小空间内温度和 CO<sub>2</sub> 对人体舒适性影响实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [10] 韩豪. CO<sub>2</sub> 浓度与温湿度的交互作用对人体的影响[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [11] Satish U, Mendell M J, Shekhar K, et al. (2012). Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(12): 1671-1677.
- [12] Gortner D A, Messier A A, Heyder E. The effects of

- elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on acid-base balance and red-cell electrolytes of FBM submarine crew members[M]. Groton: Naval Submarine Medical Center, 1971.
- [13] 邓安健,郭海波,胡洁,等.GOSAT 卫星数据监测中国大陆上空 CO<sub>2</sub> 浓度时空变化特征[J].遥感学报, 2020,24(3):319-325.
- [14] Pettenkofer M V. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden[M]. München:Cotta'schenbuchhandlung, 1858.
- [15] 金艳伶,郑雪倩,贾予平,等.北京市城区两所学校教室 CO<sub>2</sub> 浓度监测结果与分析[J].中国卫生法制, 2015, 23(6):62-67.
- [16] 汪澍,金龙哲,欧盛南,等.井下紧急避险设施内人体舒适度预测模型[J].工程科学学报, 2015,37(5):551-555.
- [17] Natsui T. Chemoreceptor: CO<sub>2</sub> and H<sup>+</sup> as respiratory stimuli, and central chemoreceptor (author's transl)[J]. Kokyu To Junkan, 1975,23(11):956-964.
- [18] Schaefer K E, Nichols Jr G, Carey C R. Acid-base balance and blood and urine electrolytes of man during acclimatization to CO<sub>2</sub>[J]. Journal of Applied Physiology, 1964,19(1):48-58.
- [19] Sliwka U, Krasney J A, Simon S G. Effects of sustained low-level elevations of carbon dioxide on cerebral blood flow and autoregulation of the intracerebral arteries in humans[J]. Aviation Space And Environmental Medicine, 1998,69:299-306.
- [20] Vehviläinen T, Lindholm H, Rintamäki H, et al. High indoor CO<sub>2</sub> concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO<sub>2</sub> level and sleepiness during cognitive work[J]. Journal of occupational and environmental hygiene, 2016,13(1):19-29.
- [21] Kajtár L, Herczeg L. Influence of carbon dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work, Quarterl[J]. Journal of the Hungarian Meteorological Service, 2012,116:145-169.
- [22] Tu Z, Li Y, Geng S, et al. Human responses to high levels of carbon dioxide and air temperature[J]. Indoor Air, 2020,31(3):872-886.
- [23] 张弘源,狄育慧,蒋婧.夏季室内 CO<sub>2</sub> 对学习效率的影响研究[J].节能,2019,38(10):141-145.
- [24] 张晓静.CO<sub>2</sub> 对人员健康、舒适及工作效率的影响[D].上海:上海交通大学,2016.
- [25] Allen J G, Macnaughton P, Satish U, et al. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments[J]. Environmental Health Perspectives, 2015,124(6):805-812.
- [26] Zhang L. Investigation of human perceptions and acceptance thresholds for carbon dioxide in office buildings[J]. Building and Environment, 2020,182: 107060.
- [27] Schaefer K E, Hastings B J, Carey C R, et al. Respiratory acclimatization to carbon dioxide[J]. Journal of Applied Physiology, 1963,18:1071-1078.
- [28] NIOSH. Pocket guide to chemical hazards[M]. Washington DC: National Institute for Occupational Safety and Health, 2015.
- [29] 李磊,施继忠,张小强.地铁车辆故障模式危害度评估方法研究[J].中国安全科学学报,2018,28(5):43-48.
- [30] Wargocki P, Wyon D P, Sundell J, et al. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity[J]. Indoor air, 2000,10(4):222-236.
- [31] Maniscalco J, Hoffmeyer F, Monsé C, et al. Physiological responses, selfreported health effects, and cognitive performance during exposure to carbon dioxide at 20000 ppm[J]. Indoor air, 2021,32(1):12939.
- [32] 王忠伟.航天器舱内 CO<sub>2</sub> 浓度控制研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
- [33] 周乾宇.居家环境对老年人呼吸系统疾病的影响[D].郑州:郑州大学,2022.
- [34] 高源.整合碳排放评价的中国绿色建筑评价体系研究[D].天津:天津大学,2015.
- [35] Stephen S, Amy S B, Karlien H W, et al. Exploring the physiological, neurophysiological and cognitive performance effects of elevated carbon dioxide concentrations indoors[J]. Building and Environment, 2019,156:243-252.
- [36] Liu W W, Wargocki P. The effect of high air temperature and CO<sub>2</sub> concentration on human subjective responses[C]. Proceedings of Healthy Buildings Europe, 2015.

- 散研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [5] 程友鹏.高速列车车厢火灾烟气迁移规律及防控技术优化研究[D].成都:四川师范大学,2020.
- [6] 苟琦林,毕海权,李盎.基于 FDS 的行李架对高速列车客室火灾影响的研究[J].制冷与空调,2019,33(2):103-107.
- [7] 张昊,赵金勇,李金龙,等.空调通风工况地铁站台初期火灾烟气运动规律[J].消防科学与技术,2011,30(8):679-682.
- [8] 刘辰.基于安全疏散驱动的地铁列车旅客界面布局优化设计研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [9] 李盎,毕海权,秦萍,等.基于移动载荷引燃的高速列车火灾人员安全疏散研究[J].制冷与空调,2019,33(3):337-342.
- [10] 王松,王子云,梁园,等.某公路隧道火灾烟气流动和人员疏散模拟分析[J].制冷与空调,2015,29(4):374-379.
- [11] 李琦,王明年,于丽.长大铁路隧道火灾模式下人员疏散试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(6):78-84.
- [12] 欧洲标准化委员会(CEN).铁路设施.铁路车辆的防火保护.第 5 部分:包括无轨电车,轨道导向的巴士和磁悬浮车辆在内的电气设备的消防安全要求: EN45545-5[S]. 2015.
- [13] McGrattan K, McDermott R, Hostikka S, et al. Fire Dynamics Simulator user's guide[M]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology(NIST), 2021.
- [14] 王驰.某地铁站火灾情况下人员安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [15] 于恒.基于火灾动力学与人群疏散模拟的地铁车站火灾安全疏散问题研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [16] 李国辉.NFPA 130《有轨列车及铁路客运体系标准》[J].消防科学与技术,2018,37(1):121.
- [17] GB 50157-2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [18] 尹萍.基于 PyroSim 和 Pathfinder 的某散货船机舱火灾模拟及安全疏散研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

---

(上接第 613 页)

- [37] 于乃云.室内空气品质评价与污染物控制[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [38] Buonanno G, Stabile L, Morawska L, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities[J]. Journal of Aerosol Science, 2019,40(3):256-269.
- [39] 高娜,金龙哲,李玲,等.矿井避险空间 CO<sub>2</sub> 吸收效率及阻力研究[J].中国矿业大学学报,2014,(6):1058-1062.
- [40] 任聪聪,苗洁莹.绿色建筑室内空气质量评估与改善技术[J].居舍,2024,(14):29-32.
- [41] 郑萍.自然通风对室内空气质量影响的研究[D].重庆:重庆大学,2006.