

城市居住建筑室内 CO₂ 分布特性研究

刘 鸣*, 任静薇, 连超丽, 张宝刚, 谷红磊, 陈庆周

(大连理工大学 建筑与艺术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: CO₂ 浓度是评价室内空气质量的重要指标之一, 控制较低的室内 CO₂ 浓度对室内空气质量和人的身心健康起着重要作用. 对大连市某小区室内 CO₂ 浓度的变化情况进行了连续监测. 通过设置不同开窗状态, 分别监测了该小区室内不同条件下的 CO₂ 浓度变化. 结果表明, CO₂ 浓度随时间和通风情况呈现出不同的变化趋势, 室内不同位置的 CO₂ 分布特性也有所不同. 密闭情况下, 时间越长, 室内 CO₂ 浓度越高. 当进行自然通风时, 即使较短的开窗时间也能使室内 CO₂ 浓度迅速降低. 研究表明, 保持良好的室内通风, 选择性开窗对降低室内 CO₂ 浓度、保持较好的室内空气质量有着重要作用.

关键词: CO₂ 浓度; 空气质量监测; 自然通风; 居住建筑

中图分类号: TU11

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201706004

0 引言

研究表明, 室内空气质量受室内通风、空气温湿度、空气污染物等多种因素影响. 对于居住建筑来说, 室内 CO₂ 浓度的高低直接影响居住品质以及身心健康^[1-3]. CO₂ 作为大气常规组分和人体呼吸排放气体, 通常情况下对人体无毒无害, 但在人群密集和通风不畅的室内条件下, 人们会有各种不适反应. 当室内 CO₂ 体积分数处于 $0.35 \times 10^{-3} \sim 0.45 \times 10^{-3}$ 时, 人体生理反应与在一般室外环境相同; 处于 $0.45 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^{-3}$ 时, 感觉空气清新, 呼吸顺畅; 处于 $1.00 \times 10^{-3} \sim 2.00 \times 10^{-3}$ 时, 感觉空气浑浊, 开始昏昏欲睡; 处于 $2.00 \times 10^{-3} \sim 5.00 \times 10^{-3}$ 时, 感觉头痛、嗜睡、呆滞、注意力无法集中、心跳加速、轻度恶心; 大于 5.00×10^{-3} 时, 可能导致严重缺氧, 造成永久性脑损伤、昏迷, 甚至死亡.

本文通过对大连市某小区不同类型住宅室内 CO₂ 浓度进行全天候不同工况监测, 研究室内 CO₂ 浓度的变化规律, 旨在为改善居住区室内空气质量状况提供客观依据和建议.

1 测量仪器和方法

本次测量选取大连市某小区 32 号楼的住宅, 户型图如图 1 所示. 测量仪器选取 TES 温湿度非色散式 CO₂ 测试计. 室内测量区域主要为人们活动时间较多的起居室和卧室, 每个空间测量时间为 24 h. 遵照《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002), 在测量户型的起居室和卧室中分别布置测点, 测点的高度距地面 1 m, 每小时的平均浓度采样时间均大于 45 min^[3-6].

2 测量结果统计与分析

2.1 户型 1 室内 CO₂ 体积分数测量结果统计与分析

(1) 卧室 CO₂ 体积分数测量与分析

卧室调研测量条件及数据统计见表 1, 卧室 24 h 内 CO₂ 体积分数见图 2, 每个测量阶段卧室内 CO₂ 体积分数平均值见图 3.

由图 2、3 可知, 卧室测量时间内除了开窗通风所在时间段及开窗通风后的一小段时间内, CO₂ 体积分数平均值低于 1.00×10^{-3} 外, 其余大部分时间段 CO₂ 体积分数平均值都高于

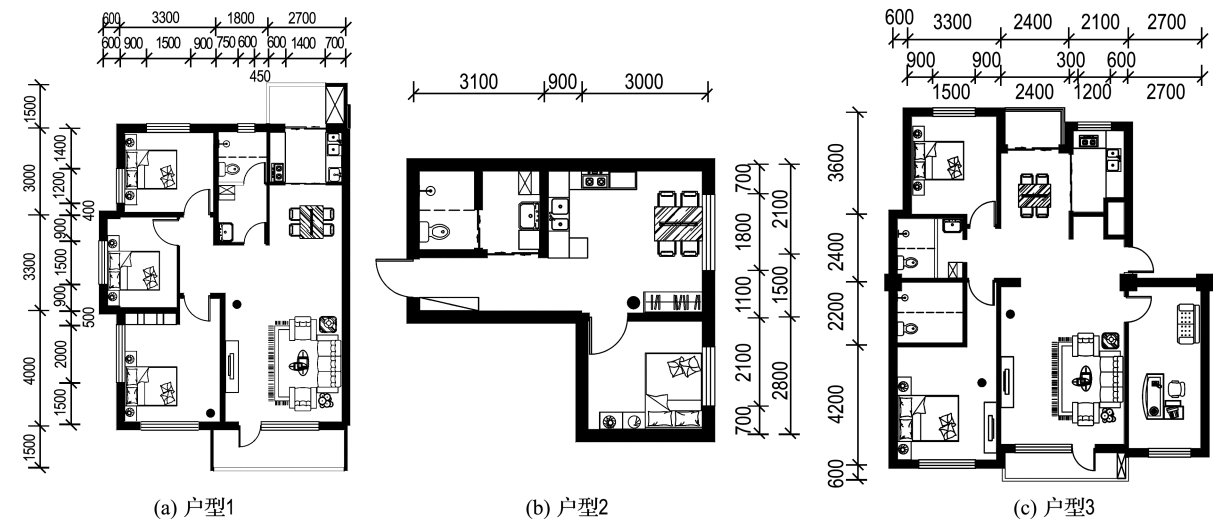


图 1 测点布置图

Fig. 1 Layout of measuring points

表 1 户型 1 卧室 CO₂ 体积分数测量统计表

Tab. 1 Measurement and statistics table of volume fraction of CO₂ in bedroom of apartment 1

测量条件	测量 时间段	测量时 间长度	$\bar{\varphi}/10^{-6}$	$\varphi_{\max}/10^{-6}$	$\varphi_{\min}/10^{-6}$
1. 卧室开门 关窗	-05T20:04:09/ -05T20:34:09	30 min	1 621	1 781	1 466
2. 卧室关门 关窗	-05T20:34:39/ -06T06:34:39	10 h	2 641	3 624	1 784
3. 卧室开门 关窗	-06T06:34:39/ -06T14:29:39	≈8 h	1 647	3 626	1 159
4. 卧室关门 开窗	-06T14:30:09/ -06T15:16:39	≈45 min	635	1 205	321
5. 卧室开门 关窗	-06T15:17:09/ -06T20:00:39	≈5 h	844	1 136	340
6. 全天内	-05T20:04:09/ -06T20:00:39	≈24 h	1 859	3 626	321

注:测量时间为-12-05T20/-12-06T20;卧室居住人数 2 人。

1. 0.00×10^{-3} , 并且在夜间睡眠时间段内, CO₂ 体积分数平均值在 2.50×10^{-3} 以上, 已经明显影响到了室内空气质量和人体舒适性. 其中 CO₂ 体积分数变化明显的几个阶段如下: 20:30 至第 2 d 的 06:30, 由于卧室内关门关窗, 在人体正常呼出 CO₂ 情况下, 卧室内 CO₂ 体积分数随时间逐渐升高, 最高可达 3.60×10^{-3} 以上. 6:30 至 14:30, 在卧室门打开的条件下, 卧室内 CO₂ 体积分数在一段时间内迅速下降, 随后进入一个相对平稳下降的阶段, 但始终在 1.00×10^{-3} 以上. 14:30 至 15:15 这段关门开窗通风时间段内, 卧室内 CO₂

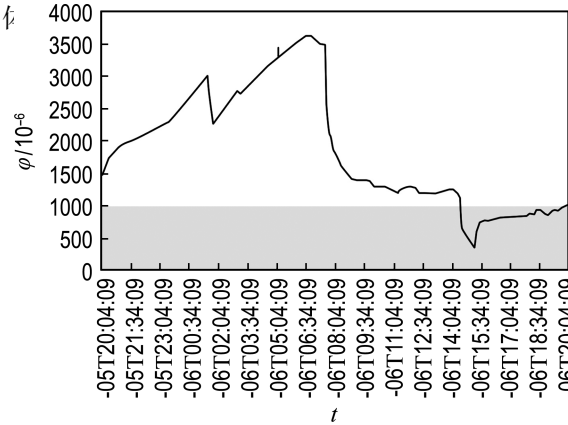


图 2 户型 1 卧室 24 h 内 CO₂ 体积分数

Fig. 2 Volume fraction of CO₂ in bedroom of apartment 1 within 24 h

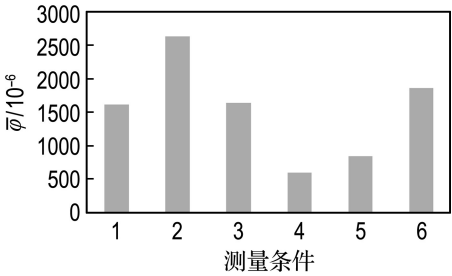


图 3 户型 1 卧室各阶段 CO₂ 体积分数平均值

Fig. 3 Average volume fraction of CO₂ in each phase of bedroom of apartment 1

分数明显下降, 尤其是在开窗后 5 min 内, 下降速度非常快, 随后平稳下降, 最低值在 0.30×10^{-3} 左右. 15:15 至 20:00 这一开门关窗时间段内, 在前 30 min, 卧室内 CO₂ 体积分数快速上升, 之后

进入平稳上升阶段,最高值在 1.00×10^{-3} 左右.

(2)起居室CO₂体积分数测量与分析

起居室调研测量条件及数据统计见表2,起居室24 h内CO₂体积分数见图4.

表2 户型1起居室CO₂体积分数测量统计表
Tab. 2 Measurement and statistics table of volume fraction of CO₂ in living room of apartment 1

测量条件	测量 时间段	测量时 间长度	$\bar{\varphi}/10^{-6}$	$\varphi_{\max}/10^{-6}$	$\varphi_{\min}/10^{-6}$
起居室关窗	-12-06T20/ -12-07T20	≈24 h	988	2 335	412

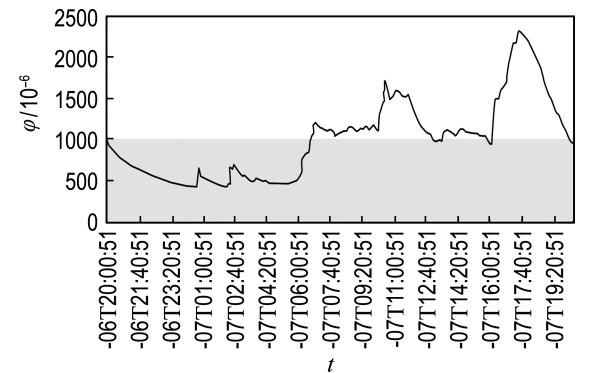


图4 户型1起居室24 h内CO₂体积分数
Fig. 4 Volume fraction of CO₂ in living room of apartment 1 within 24 h

由图4可知,在关窗条件下,起居室24 h内CO₂体积分数最高值在 2.30×10^{-3} 左右,最低值在 0.40×10^{-3} 左右,平均值在 1.00×10^{-3} 左右.从整体CO₂体积分数变化曲线可以看出,1 d之内有10:00至13:00和16:00至20:00两个高峰期.总体来讲,起居室内CO₂体积分数明显优于卧室内CO₂体积分数.

24 h内CO₂体积分数变化趋势可以分为以下几个阶段:在20:00至第2 d 6:00这一夜间休息阶段,CO₂体积分数先平稳下降,之后逐渐稳定在 0.50×10^{-3} 左右.在6:00至10:00,CO₂体积分数在前1 h内迅速升高到 1.00×10^{-3} 以上,随后进入一个相对平稳阶段.在10:00至13:00,CO₂体积分数曲线进入第1个高峰期,先是迅速升高到 1.50×10^{-3} 以上,最高值达到 1.70×10^{-3} ,在 1.50×10^{-3} 以上维持一段时间后又迅速下降到 1.00×10^{-3} 左右.在13:00至16:00,CO₂体积分数呈稳定状态,一直保持在 1.00×10^{-3} 左右.在16:00至20:00,CO₂体积分数曲线进入第

2个高峰期,先是从 1.00×10^{-3} 迅速升高到 2.00×10^{-3} 以上,之后又很快下降到 1.00×10^{-3} 左右.

(3)卧室与起居室CO₂体积分数对比分析

将24 h内卧室与起居室的测量数据进行对比,如图2、4所示.通过计算得到,卧室CO₂体积分数平均值为 1.86×10^{-3} ,起居室CO₂体积分数平均值为 1.00×10^{-3} ,卧室内大部分时间属于空气混浊状态.

2.2 户型2室内CO₂体积分数测量结果统计与分析

户型2室内空间相对单一,卧室与起居室之间的门除晚上睡眠时间外,大部分时间处于开启状态.因此,除晚上睡眠时间外,可以将卧室与起居室作为一个空间来进行测量,扩大测量容积,将测量仪器放置在起居室内.户型2整个空间调研测量条件及数据统计见表3,各阶段CO₂体积分数平均值见图5,起居室24 h内CO₂体积分数见图6.

表3 户型2测量统计表

Tab. 3 Measurement and statistics table of apartment 2

测量条件	测量 时间段	测量时 间长度	$\bar{\varphi}/10^{-6}$	$\varphi_{\max}/10^{-6}$	$\varphi_{\min}/10^{-6}$
1. 关窗	-15T10:05:53/ -15T11:00:53	≈1 h	715	771	663
2. 起居室 开窗	-15T11:01:23/ -15T11:25:53	≈25 min	605	765	317
3. 关窗	-15T11:26:23/ -15T15:25:53	≈4 h	696	854	304
4. 卧室开 窗	-15T15:26:23/ -15T15:40:23	≈15 min	598	852	399
5. 关窗	-15T15:40:53/ -15T22:40:23	≈7 h	948	1 193	434
6. 卧室门 关闭	-15T22:40:53/ -16T06:50:53	≈8 h	801	993	727
7. 卧室门 开启	-16T06:51:23/ -16T07:54:53	≈1 h	934	1 205	799
8. 卧室开 窗	-16T07:55:23/ -16T08:00:23	5 min	811	990	628
9. 关窗	-16T08:00:53/ -16T09:06:23	≈1 h	865	1 119	728
10. 起居室 开窗	-16T09:06:53/ -16T10:00:23	≈1 h	659	1 085	382
11. 全天内	-15T10:05:53/ -16T10:00:23	≈24 h	807	1 205	304

注:测量时间为-12-15T10/-12-16T10.

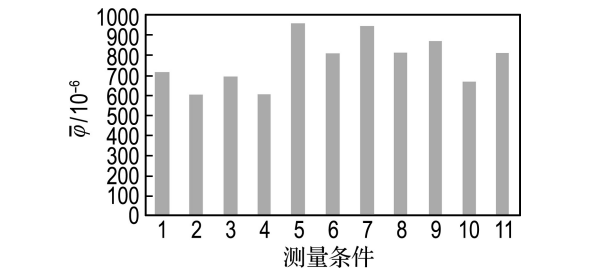


图 5 户型 2 起居室内各阶段 CO₂ 体积分数平均值
Fig. 5 Average volume fraction of CO₂ in each phase of living room of apartment 2

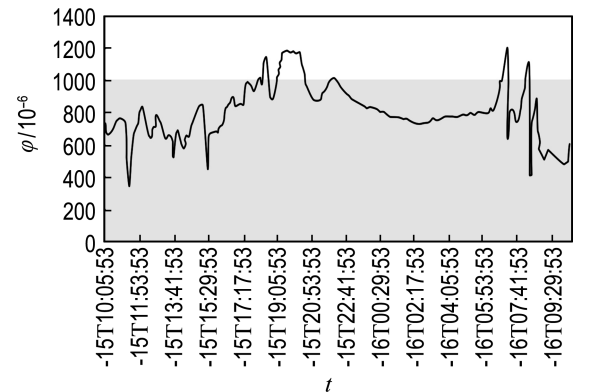


图 6 户型 2 起居室内 24 h 内 CO₂ 体积分数
Fig. 6 Volume fraction of CO₂ in living room of apartment 2 within 24 h

由图 6 可以看出,在其中的 3 个开窗通风阶段,起居室内 CO₂ 体积分数都迅速下降到 0.40×10^{-3} 左右. 在夜间卧室门关闭的情况下,起居室内 CO₂ 体积分数保持在 $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^{-3}$ 这一相对稳定的状态. 24 h 内,起居室内 CO₂ 体积分数平均值在 0.80×10^{-3} 左右,最高值在 1.20×10^{-3} 左右,绝大多数时间段内起居室内 CO₂ 体积分数都在 1.00×10^{-3} 以下. 因此,在总计 4 次开窗通风换气的条件下,可以保证 24 h 内都有较好的室内空气质量.

2.3 户型 3 室内 CO₂ 体积分数测量结果统计与分析

户型 3 与户型 1 的空间布置相似,区别在于户型 3 是一个三居室住宅. 表 4 是测量条件和测试数据的统计.

(1) 卧室 CO₂ 体积分数测量与分析

由表 4 可知,卧室在开窗通风所在时间段及开窗通风后的一小段时间内,CO₂ 体积分数平均值均低于 1.00×10^{-3} ,在夜间关门关窗大部分时间段内 CO₂ 体积分数都高于 1.00×10^{-3} ,已经明显影响到了室内空气质量和人体的舒适性. 其中

表 4 户型 3 测量统计表
Tab. 4 Measurement and statistics table of apartment 3

测量条件	测量时间段	测量时间长度	$\bar{\varphi}/10^{-6}$	$\varphi_{\max}/10^{-6}$	$\varphi_{\min}/10^{-6}$
1. 卧室 开门开窗	-23T07:02:48/ -23T07:59:26	≈1 h	925	1 204	654
2. 卧室 关门开窗	-23T09:05:33/ -23T12:05:33	3 h	413	452	398
3. 卧室 关门关窗	-23T13:02:13/ -23T14:01:11	≈1 h	705	874	520
4. 卧室 关门开窗	-23T15:08:37/ -23T19:01:57	≈4 h	482	672	412
5. 卧室 开门关窗	-23T20:06:49/ -23T21:01:16	≈1 h	488	523	455
6. 卧室 关门关窗	-23T22:02:23/ -24T07:02:48	≈9 h	1 085	1 234	654
7. 起居室 开门开窗	-23T07:02:48/ -23T18:08:37	≈11 h	503	886	383
8. 起居室 关门关窗	-23T19:01:57/ -23T21:01:16	≈2 h	687	872	465
9. 起居室 关门关窗	-23T22:02:23/ -24T07:02:48	≈9 h	886	903	845

注:测量时间为-07-23T07/-07-24T07.

CO₂ 体积分数变化明显的几个阶段分别为 7:00 至 8:00,卧室开门开窗通风阶段,此阶段卧室内 CO₂ 体积分数由 1.20×10^{-3} 迅速下降到 0.65×10^{-3} ;9:00 至 12:00,卧室关门开窗进入到一个相对平稳下降阶段;13:00 至 14:00 为午休阶段,此时卧室关门关窗,人在睡眠过程中释放大量 CO₂,CO₂ 体积分数迅速升高到 0.87×10^{-3} ,午休过后继续关门开窗至 19:00;20:00 至 21:00 为卧室开门关窗阶段,家庭成员开始准备洗漱,室内 CO₂ 体积分数有所升高;22:00 以后卧室一直关门关窗至第 2 d 7:00,此阶段在人体正常呼出 CO₂ 情况下,CO₂ 体积分数持续升高,但到达一定高度后会逐渐趋于稳定,最高值为 1.20×10^{-3} 左右.

(2) 起居室 CO₂ 体积分数测量与分析

由表 4 可知,起居室的测量阶段相对卧室比较少,7:00 至 18:00 起居室一直处于开窗状态,CO₂ 体积分数由 0.89×10^{-3} 逐渐降低,下降速度第 1 个小时最快,然后逐渐变缓. 白天家庭成员大部分时间会在起居室活动,但由于起居室空间较大,且一直处于开窗状态,CO₂ 体积分数上升并不明显. 19:00 至 21:00 起居室处于关窗状态,此时家庭成员聚集,活动强度大,CO₂ 体积分数迅速上升,此后起居室一直处于关窗状态,但无人员

活动,CO₂ 体积分数趋于稳定. 总体来看,在关窗条件下起居室内 CO₂ 体积分数会逐渐上升,最高值在 0.90×10^{-3} 左右,最低值在 0.46×10^{-3} 左右;在开窗条件下,CO₂ 体积分数会迅速下降,最低值在 0.38×10^{-3} 左右. 起居室内 CO₂ 体积分数变化情况相对优于卧室.

2.4 不同户型住宅室内 CO₂ 体积分数对比分析

表 5 为不同户型住宅室内 CO₂ 体积分数平均值统计,从表中可以看出,随着室内测量容积的逐渐扩大,室内 CO₂ 体积分数呈现出逐渐衰减的趋势. 室内测量容积由小到大的顺序为户型 1<户型 2<户型 3,户型 3 的室内容积最大,其 CO₂ 体积分数最低.

表 5 CO₂ 体积分数平均值统计表
Tab. 5 Statistics table of average volume fraction of CO₂

户型类型	CO ₂ 体积分数平均值/ 10^{-6}	
	起居室	卧室
户型 1	988	1 859
户型 2	807	807
户型 3	683	768

2.5 开窗状态下的新风量估算

在室内气态物种分布均匀、室外 CO₂ 浓度均匀的条件下,人体可以作为室内 CO₂ 释放源,室内新风量可以根据差分法方程来进行计算^[7-10]:

$$u=\left(\frac{\rho_{t+1}-\rho_t}{\Delta t}-\frac{Q}{V}\right)V/\left(\rho_o-\frac{\rho_{t+1}+\rho_t}{2}\right)$$

式中: ρ_o 为室外 CO₂ 浓度 (mg/m³); ρ_t 为室内 t 时刻 CO₂ 浓度 (mg/m³); Q 为 CO₂ 排放量 (mg/h); t 为时间 (min); u 为新风量 (m³/h); V 为室内空间 (m³). 室内 CO₂ 排放量:一个成人呼出 CO₂ 的量为 18 L/h(549 mg/min). 室内空间:室内体积扣除家具等 10% 的体积和人的体积(每人按 0.3 m³ 计). 借助以上室内新风量的计算方法,本文主要针对户型 1 和户型 2 在开窗状态下的通风量进行计算.

(1)户型 1 卧室开窗状态下的通风量

户型 1 测量过程中共有 1 次开窗通风过程,通风过程中的计算参数见表 6.

由室内新风量差分法方程可得新风量 u 为 68.6 m³/h.

(2)户型 2 起居室开窗状态下的通风量

户型 2 测量过程中共有 4 次开窗通风过程,每次通风过程中的计算参数见表 7.

表 6 户型 1 通风计算参数
Tab. 6 Ventilation calculation parameters of apartment 1

开窗过程	$\varphi_o/10^{-6}$	$\varphi_t/10^{-6}$	$\varphi_{t+1}/10^{-6}$	t/min	V/m^3	$Q/(\text{mg}\cdot\text{h}^{-1})$
1	153	1 887	593	45	32.76	32 940

表 7 户型 2 通风计算参数
Tab. 7 Ventilation calculation parameters of apartment 2

开窗过程	$\varphi_o/10^{-6}$	$\varphi_t/10^{-6}$	$\varphi_{t+1}/10^{-6}$	t/min	V/m^3	$Q/(\text{mg}\cdot\text{h}^{-1})$
1	153	1 485	586	25	57.33	32 940
2	153	1 575	752	15	57.33	32 940
3	153	1 756	1 451	5	57.33	65 880
4	153	2 005	706	60	57.33	32 940

由室内新风量差分法方程可得 4 个过程中新风量 u 分别为 160.6、204.6、169.5、76.9 m³/h. 对比户型 1 和户型 2 通风过程中的新风量和每次通风时间可以看出,在开窗通风过程中,开窗前 5~15 min,通风效率最高,因此每次开窗通风时间以 5~15 min 为宜.

3 结 论

(1)如果通风不当,住宅室内主要活动空间 CO₂ 体积分数大部分时间处于较高状态,很容易超过 1.00×10^{-3} ,从而影响人体健康.

(2)由于人体夜间睡眠时会作为 CO₂ 释放源排出大量 CO₂,而卧室空间相对较小,夜间卧室内 CO₂ 往往会长期处于较高的状态,早晨起床时卧室内的 CO₂ 体积分数会升高到一个很高的状态,甚至高于 2.00×10^{-3} ,因此,每天早晨对卧室进行有规律的开窗通风非常必要.

(3)由于起居室空间相对较大,同时大部分起居室较为宽敞,起居室内 CO₂ 体积分数普遍低于卧室,但是也会随着人们 24 h 的生活规律出现大的浮动状态,如果通风不当,也会出现超标现象.

(4)每次开窗通风 15 min 左右,室内 CO₂ 浓度接近室外水平. 通过每天人为有规律地控制开窗时间,可以将室内 CO₂ 浓度全天控制在一个较为健康的水平,维持室内空气质量.

(5)室内 CO₂ 浓度的高低与室内容积的大小呈负相关,随着室内容积的逐渐扩大,室内 CO₂ 浓度呈现逐渐衰减的状态.

参考文献:

- [1] LIU Xiaochen, SWEENEY J. Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO₂ emissions in the Greater Dublin Region [J]. *Energy Policy*, 2012(46):359-369.
- [2] BURROUGHS H E, HANSENS J. *Managing Indoor Air Quality* [M]. 5th ed. Lilburn: Fairmont Press, 2011.
- [3] 梁宝生, 刘建国. 我国二氧化碳室内空气质量标准建议值的探讨[J]. 重庆环境科学, 2003, 12:198-200.
LIANG Baosheng, LIU Jianguo. Discussion on recommended value of indoor air quality standard of carbon dioxide in China [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 12: 198-200. (in Chinese)
- [4] 高松. 夏季上海城区大气中二氧化碳浓度特征及相关因素分析[J]. 中国环境监测, 2011, 72(2):70-76.
GAO Song. Analysis of characteristics and affecting factors of atmospheric CO₂ concentration in urban area in summer, Shanghai [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 72(2): 70-76. (in Chinese)
- [5] 叶尔江·拜克吐尔汗, 康剑, 王雅佩, 等. 校园二氧化碳浓度时空动态特征[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(4):42-46, 52.
BAIKETUERHAN Yeeoiang, KANG Jian, WANG Yapei, *et al.* Temporal and spatial dynamic characteristics of CO₂ concentration on Xinjiang Agricultural University campus [J]. *Environmental Science Survey*, 2015, 34(4): 42-46, 52. (in Chinese)
- [6] 张孝东, 王成端, 唐中华. 办公室二氧化碳浓度的测试实验分析[J]. 制冷与空调, 2013(3):301-303, 306.
ZHANG Xiaodong, WANG Chengduan, TANG Zhonghua. Experimental analysis of CO₂ concentration in an office [J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2013(3):301-303, 306. (in Chinese)
- [7] 陈威威. 北方地区高校教室内空气品质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
CHEN Weiwei. Study on air quality in classrooms of universities in north China [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [8] 刘建国, 刘洋. 室内空气中 CO₂ 的评价作用与评价标准[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(4):303-305.
LIU Jianguo, LIU Yang. Evaluation function and evaluation standard of CO₂ in indoor air [J]. *Journal of Environment and Health*, 2005, 22(4):303-305. (in Chinese)
- [9] SU Yingming, LIN C H. CO₂ purify effect on improvement of indoor air quality (IAQ) through indoor vertical greening [J]. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2013, 2 LNECS(2 of 3):953-957.
- [10] YU C K H, WONG S L, LAI A C K. Study of ventilation parameters on indoor carbon dioxide and fine particulate matter concentrations [C]// *13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air 2014*. Hong Kong: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2014:516-519.

Study of distribution characteristics of CO₂ in urban residential buildings

LIU Ming*, REN Jingwei, LIAN Chaoli, ZHANG Baogang, GU Honglei, CHEN Qingzhou

(School of Architecture & Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: CO₂ concentration is one of the important indexes to evaluate indoor air quality, and keeping a low indoor CO₂ concentration is very important to improve indoor air quality and maintain physical and mental health. The change of CO₂ concentration in the residential building of Dalian city is monitored continuously. By setting different window conditions, the change of CO₂ concentration is monitored in different locations in the building. The result shows that the CO₂ concentration has different change trends with time and indoor ventilation, and the distribution characteristics of CO₂ are also different at different locations. When the windows are closed, the longer the time is, the higher the indoor CO₂ concentration is. But even a short opening time can make the indoor CO₂ concentration decrease rapidly. Keeping good indoor ventilation and windows opening for fixed time have a significant effect on reducing the indoor CO₂ concentration and keeping good indoor air quality.

Key words: CO₂ concentration; air quality monitoring; natural ventilation; residential buildings