

《建筑科学》编辑部

稿件录用通知书

(刊号: ISSN 1002-8528 CN 11-1962/TU)

作者: 你好!

(注:该排序非论文作者位次)

由程征, 元晓琳, 杨婷婷, 张培峰, 陈禹彤, 高星, 赵书涵, 于洪瑞撰写的《北方滨海地区自然通风乒乓球馆冬季风热环境调查研究》(稿件编号1821)一文, 经专家评审, 已被本刊录用, 收取该论文版面费 5000 元, 特此通知。

欢迎你继续投稿本刊。

户名: 中建研科技股份有限公司

纳税人识别号: 91110000H52625196T

地址、电话: 北京市朝阳区北三环东路 30 号 010-64517502

开户行及账号: 建行北京北三环支行 11001021200059000031

《建筑科学》编辑部

2022 年 7 月 25 日

发票由我单位“中建研科技股份有限公司”开出

- 注: 1、汇款和财务转账时一定要注明作者的姓名, 转账后回复邮件通知我部。
2、本刊已加入《中国知网》《万方数据》《维普资讯》等国内知名数据库, 如您的文章不同意加入这些数据库, 请事先声明否则视为同意。

北方滨海地区自然通风乒乓球馆冬季风热环境调查研究

(注:前两作为课题导师, 本人学生位次第一)

程征, 杨婷婷, 陈禹彤, 高星, 赵书涵, 于洪瑞, 张培峰, 亓晓琳*, (中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 青岛, 266580)

[摘要]通过现场测试及主观问卷调查相结合的研究方法, 综合分析了初冬非采暖期青岛市某高校乒乓球馆在自然通风条件下运动人群在热舒适、室内空气品质、风速干扰性三方面的主观感受。研究发现: 1) 运动人群与非运动人群的热舒适感受差异较大。与非运动人群相比, 运动人群感觉偏暖, 可接受的舒适温度下限更低。2) 运动人群可接受的 CO₂ 浓度更高, 但同时 CO₂ 浓度的变化表现出更高的敏感度。3) 虽然乒乓球馆室内平均风速仅为 0.09m/s, 但仍有 65.67% 的运动者认为风速干扰较大。乒乓球资深运动人群有习惯性关窗的行为。4) 不同人群的开窗意愿不同。热感受是影响非运动人群和乒乓球业余爱好人群开窗意愿的最主要因素, 而乒乓球资深爱好者则更加关注风速干扰的问题。避免运动区域的风场干扰是乒乓球馆中引入自然通风亟需解决的首要问题。

[关键词] 乒乓球运动; 自然通风; 热舒适; 室内空气品质; 体育工艺

[中图分类号] TU834.3 **[文献标识码]** A

Field Investigation of Thermal and Ventilation Environment in Natural Ventilated Table Tennis Center in a Northern Coastal City in Early Winter

Zheng Cheng, Tingting Yang, Yutong Chen, Xing Gao, Shuhan Zhao, Hongrui Yu, Peifeng Zhang, Xiaolin Qi* (College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, 266580)

Abstract : Taking a table tennis college center in Qingdao as the research object, this paper analyzed the table tennis players' sensation in three aspects: thermal comfort, indoor air quality and wind speed disturbance with natural ventilation in early winter. Five-day field measurement and subjective questionnaire survey was conducted. The results show that the thermal comfort sensation of the exercise group and the non-exercise group is largely different. The lower limits of thermal comfort range of exercisers is lower than non-exercise people. The acceptability of carbon dioxide concentration of exercisers is higher but the sensation is more sensitive to the decline of indoor carbon dioxide. Different people have different willingness to control openings. Thermal sensation is the most significant factor affecting the willingness of the non-exercise and table tennis amateurs. However senior table tennis players show strong resistance to airflow movement and have the habit of closing windows.

[基金项目] 国家自然科学基金青年项目“适应“动-聚-急”多行为需求的体育建筑自然通风智能调控设计研究”(52008393)

[第一作者] 程征 (1988-), 女, 博士, 副教授, qingqingczcz@163.com

[通讯作者] 亓晓琳 (1984-), 女, 博士, 讲师, Qier1984@163.com

Keywords: Table tennis, Natural ventilation, Thermal comfort, Indoor air quality, Sports technology

0 引言

自然通风由风压和热压驱动，能够在降低能耗的同时起到良好的降温、换气作用，是健康、节能兼具的绿色调节方式。2020 年 7 月国家颁布的《新冠肺炎疫情期间重点场所和单位卫生防护指南》建议，为确保健身运动场所能够有效通风换气，温度适宜时尽量采用自然通风加强室内空气流通。但是与居住、办公、教育^[1-3]等普遍采用自然通风的建筑类型相比，目前体育建筑的环境调节以机械空调为主，自然通风的普及度相对较低^[4]。

运动行为对环境需求的特殊性是导致这种现象的原因。首先，体育建筑中运动场地风速需要满足一定的体育工艺要求^[5]，风速过高会对乒乓球、羽毛球等的运动轨迹造成干扰，影响比赛公平性和运动体验感。第二，活动强度的增加会改变人体对热舒适的要求。李晋发现，与观众人群相比，运动人群的热舒适范围上限更高，但二者热舒适范围下限相近^[6]。高亚萍发现，运动人体相较安静人群能够接受的环境温度范围更宽^[7]。翟永超发现运动时提高风速有助于改善运动者的热舒适感受^[8]。第三，与低强度活动相比，人体在中等活动强度下人均新风量要求相应增加约 1.7 倍^[9]，运动时需要更高的换气效率。

因此，为提高体育建筑特别是小球运动空间对自然通风的接受度，从体育工艺、热舒适、室内空气品质三个方面全面了解自然通风作用下运动人群的风热环境感受是需要解决的问题。本文

通过对一处自然通风乒乓球馆进行现场测试与问卷调查，对自然通风条件下运动者的热舒适感受、室内空气品质评价及风速干扰反馈进行全面调查，期望获取综合性的体育建筑自然通风设计依据。

1 研究方法

1.1 气候条件

本研究所选择的乒乓球馆位于山东省青岛市黄岛区某高校内（东经 120°177'、北纬 35°94'），据《中国建筑气候区划图》属于寒冷气候区，但由于所在地濒临黄海，具有显著的海洋性气候特点，空气湿润，雨量充沛，温度适中。年平均气温为 13.88 °C，最热月 8 月平均气温为 26.70 °C，最冷月 1 月的平均气温为 0.30 °C，主导风向为南风，平均风速为 3.56 m/s。青岛市典型气象年数据（TMY3）分析如图 1 所示。

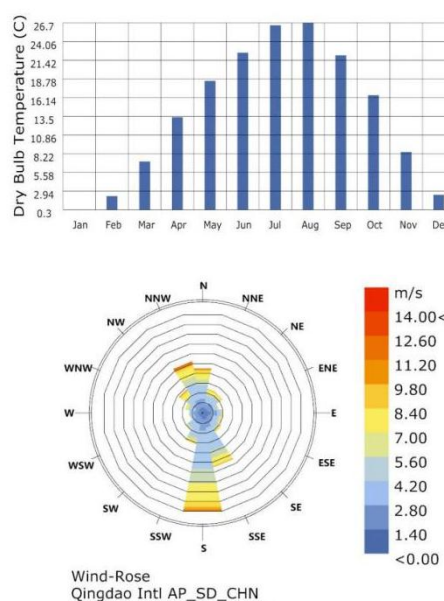


图 1 青岛市典型气象年月平均气温及风玫瑰图

1.2 样本选择

乒乓球馆位于体育馆训练馆一层，建筑朝向

为东南向，室外环境对风场的阻扰较弱且无明显室外遮阳物，建筑外观如图 2 所示。乒乓球馆面积 353.5 m²，开间 24 米，最大进深约 19.7 米，净高 4.2 米，内设 7 个球台，30 座固定休息椅，平面布局如图 3 所示。球馆外墙呈弧形，开有 12 扇上悬窗，最大可开启角度为 20°，室内环境如图 4 所示。乒乓球馆主要面向教职工及大学生开放，满足专业训练、业余健身等需求。现场调研选择在初冬非采暖期展开，时间为 2021 年 11 月



6 日~11 月 10 日，共 5 天。

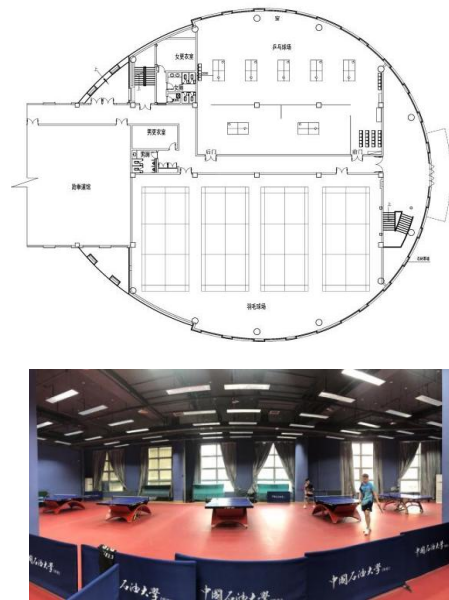
图 2 建筑外观

图 3 训练馆平面图

图 4 乒乓球馆室内环境

1.3 现场调研

1.3.1 客观物理因素调研



客观物理因素调研包括室内环境参数和室外环境参数的采集。室外参数由乒乓球馆外空旷地带安装的小型气象站获取。室内测试参数包括空气温湿度、室内风速、CO₂ 浓度，由布置在乒乓球台边缘、靠近乒乓球馆对角线等分点的 4 组测试仪器采集，测量仪器的具体信息如表 1 所示。所有测点与墙面/柱子的距离均为 1.0 m。由于运动时人接近为站姿，因此测点设置在距地面 1.7 m 处。测点的具体位置如图 5 所示。温度、湿度、CO₂ 浓度、风速间隔 10 min 记录一次，室外小型气象站间隔 30 min 记录一次。

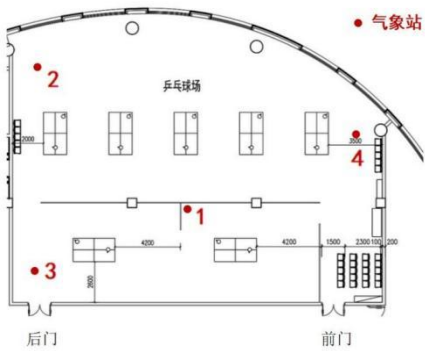
表 1 设备参数明细表

测量参数	仪器名称	测试范围	误差及分辨率
室内温度	HOBO UX100-011 温湿度仪	-20°C~70°C	±0.21°C (0° to 50°C)
室内风速	Swema 03 万向风速仪	0.05~3.00m/s 0.1~15 m/s	±0.03m/s
CO ₂ 浓度	Testo480 多功能测量仪	0 ~ 10000 ppm	1 ppm
室外温度	Onset HOBO U30 小型气象站数据	-40°C~ +75°C	±0.2°C
室外风速	Onset HOBO U30 小型气象站数据	0~44m/s	±0.5m/s (<17 m/s) ; ±3% (17 到 30m/s); ±4% (30 到 44m/s)

图 5 测点摆放位置

1.3.2 主观感受问卷调查

调研期内随机抽选 86 名运动人员及 49 名非运动人员参与主观问卷调查，所有人员仅参与 1 次主观问卷调查，受试对象主要为在校大学生及教职工。运动人员的问卷采集安排在持续运动至少 20 分钟之后进行，这时人体的新陈代谢率以及热感受和皮肤温度趋于稳定；非运动人员为旁



观观众及工作人员，填写问卷时已进入场馆 20 分钟以上并处于静坐或站立放松的状态。每份问卷对应的各项室内环境参数为填写前 30 分钟的平均值。现场测试过程中同步进行问卷投放，最终收取有效问卷 113 份。

调研问卷分为两个部分：第一部分用来收集受试者的基本信息，包括：年龄、性别、穿衣情况等；第二部分用来收集受试者的主观感受，内容主要包括热感觉、热满意度、空气品质新鲜度感受、空气品质满意度、风速干扰度感受等，主观感受投票刻度采用 ASHRAE Standard 55 所建议使用的 7 级刻度划分。表 2 给出了问卷第二部分的主要问题与选项。

表 2 问卷问题与选项

热感觉		热满意度		空气新鲜度		空气品质满意度	
指标	程度	指标	程度	指标	程度	指标	程度
-3	冷	-3	很不满意	-3	很不新鲜	-3	很不满意
-2	凉	-2	不满意	-2	不新鲜	-2	不满意
-1	较凉	-1	比较不满意	-1	比较不新鲜	-1	比较不满意
0	适中	0	一般	0	适中	0	一般
1	较暖	1	比较满意	1	比较新鲜	1	比较满意
2	暖	2	满意	2	新鲜	2	满意
3	热	3	很满意	3	很新鲜	3	很满意

2 研究结果

2.1 室内外环境参数分析

2.1.1 室内外温度分析

青岛市受海洋性气候影响冬季降温迟缓，十一月平均气温约 8.46℃。与典型气象年数据相比，调研期间室外温度略暖，平均差值为 5.91℃(图 6)。

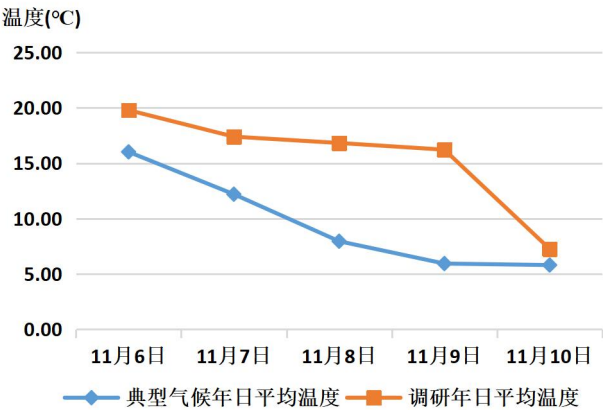
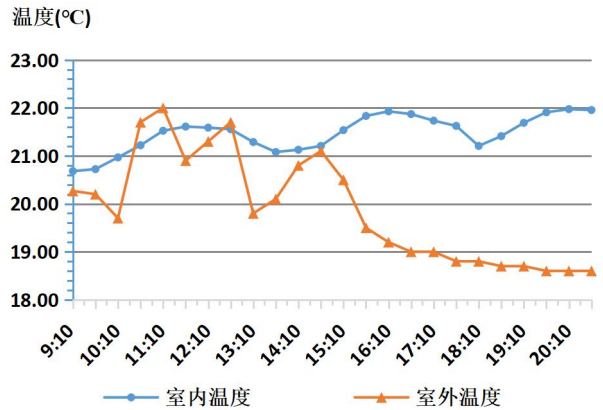


图 6 调研期间日平均气温与典型气象年数据对比

以 11 月 6 日为例，比较乒乓球馆开馆期间室内外空气温度的 0.5 h 间隔测量数据(图 7)发现，室外气温变化较大，最大差值为 3.40℃；室内温度变化相对平稳，最大差值为 1.29℃。当日

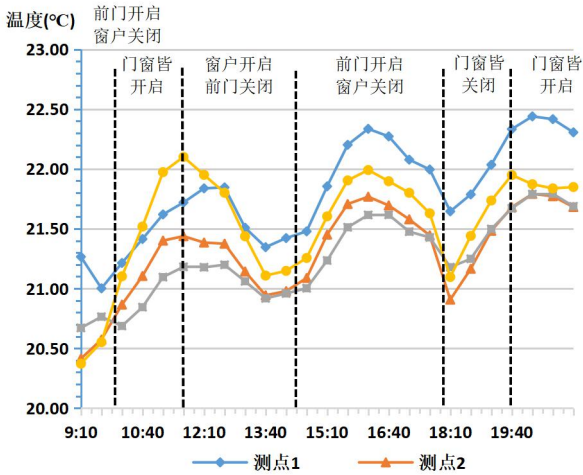


绝大多数时间内室外气温低于室内，室内外最大温差为 3.37℃。

图 7 11 月 6 日室内外平均气温

对比室内不同测点的 0.5 h 间隔空气温度测量数据发现，各点温度的变化趋势大体相同，但变化幅度稍有差异(图 8)。其中，测点 1 的平均温度最高(21.82℃)，但在 10:40~12:10 测点 4 温度超过测点 1。该时间段前门及窗户均开启，临

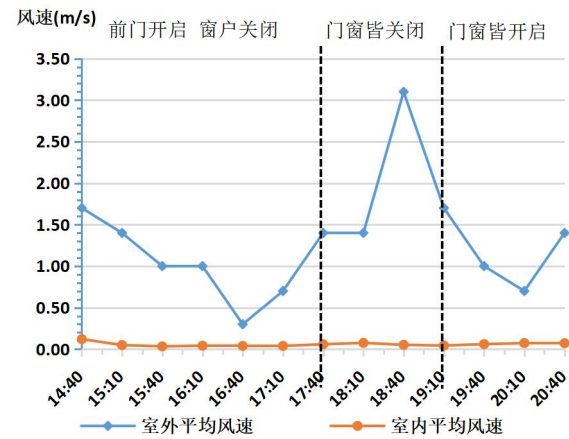
近窗户及前门的测点 4 空气温度与室外温度相关度最高，说明前门和窗户之间是乒乓球馆内自然通风效率最高的区域。与其他测点相比，10:40~12:10 测点 3 的温度变化相对平稳，这是由于测点 3 的位置距离窗户和前门最远，自然通风的效率最低。此外，测点 2 和测点 4 的位置虽均靠近窗户，但 10:40~12:10 测点 2 的温度变化相对较小，这是由于测点 2 远离前门，通风效率受到影响。综上所述，乒乓球馆内的温度分布与距门



窗的距离关系密切。

图 8 11 月 6 日各测点 0.5h 间隔平均气温

在室外气温通常低于室内温度的情况下，虽然测点 4 所处位置的自然通风效率更高，但温度始终高于测点 2，而二者在刚开馆（9:10~9:40）和闭馆前（20:10~20:40）两个时段的空气温度十分接近。分析造成这一现象的原因可能是室内人员分布的差异：测点 4 与休息区距离较近，周围人员较多，在人体热源作用下空气温度更高，而



在刚开馆和闭馆前室内人员数量减少，导致二者温度趋同。

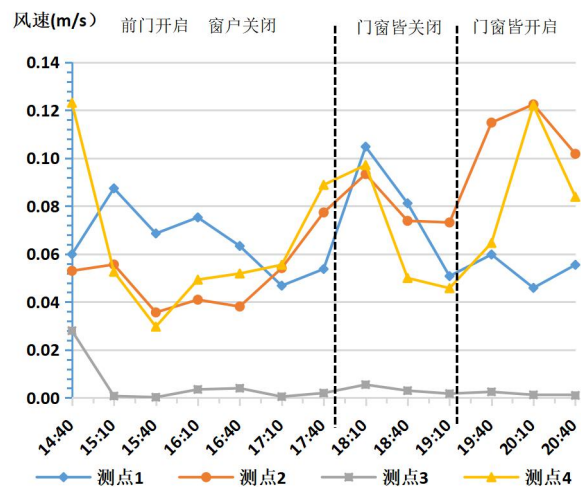
2.1.2 室内外风速分析

对比 11 月 6 日 14:40~20:40 的室内外风速变化（图 9），发现乒乓球馆的室内外风速差距较大，室内平均风速 0.10m/s，仅为室外平均风速 1.30 m/s 的 4.50%。室外风速波动较明显，最大风速为 3.10m/s，而室内风速相对平稳，最大风速仅为 0.12m/s。室内外风速相关性低，房间通风效果不佳。

图 9 11 月 6 日室内外平均风速

图 10 对比乒乓球馆内不同测点的风速变化，

发现在四个测点中，测点 1、2、4 的平均风速相近而测点 3 的平均风速最低且风速波动最小。远



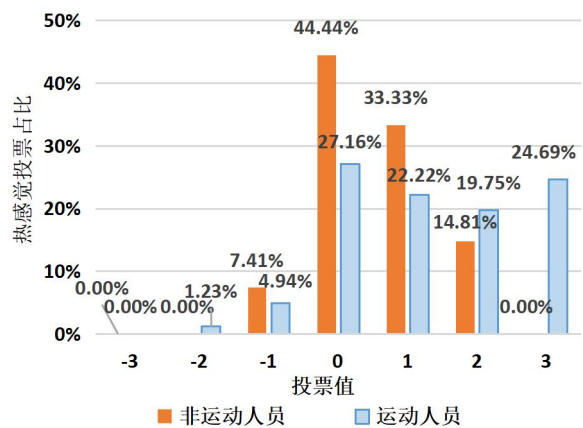
离门窗的位置使测点 3 几乎处于静风状态。19:30 后门窗开启，虽然该时段室外风速较低，但是靠近窗户的测点 2 和测点 4 风速明显提升，这说明虽然该房间通风效果不佳，但开窗对自然通风效率提升作用仍可观。

图 10 11 月 6 日各测点 0.5h 间隔平均风速

2.2 热舒适评价分析

调研期间室内非运动人员服装以毛衣/卫衣、长裤为主，服装热阻范围在 0.37~1.22clo 之间，运动人员服装以短袖 T 恤、运动短裤或薄长裤为主，服装热阻范围在 0.28~0.91clo 之间。

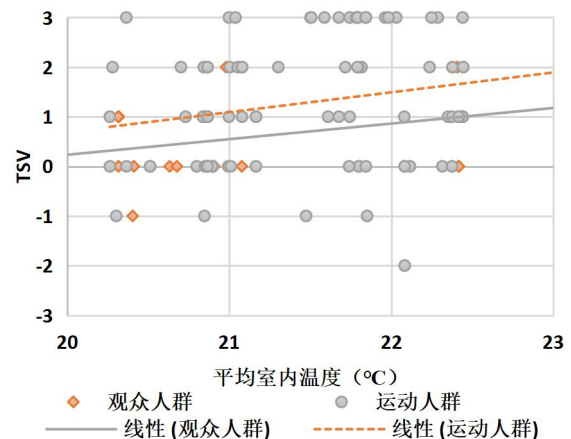
比较乒乓球馆内运动人群和非运动人群两类使用者的热感觉投票百分比（图 11），发现运动人群和非运动人群的热感觉投票值处于-1~1（舒适范围区间）之间的百分比分别是 54.32% 和 85.19%。其中，运动人群的热感觉偏暖。虽然调研期间室内平均温度仅为 21.47℃，但是仍有 44.44% 的运动人群感觉热或较热，而热感觉投票



在 2~3 之间的非运动人群人数仅占 14.81%。

图 11 不同人群的热感觉投票百分比

将乒乓球馆内运动人群和非运动人群的热感觉投票（TSV）和室内平均空气温度相关联，生成线性关系如图 12 所示，对比发现：两种人群的热感觉投票值均随着室内温度的升高而升高。虽然运动人群的服装热阻低于非运动人群，但是热感觉投票值更高。这与以往研究^[10-12]发现的人体中性温度会随着运动强度的升高而降低的规律一致。



运动人群感觉舒适的温度下限更低。

图 12 不同人群热感觉与温度变化的关系

比较不同开关窗状态下运动人群和非运动人群的热满意度投票，如图 13 所示，开窗时，运动人群和非运动人群的热满意度投票值在-1~1 之间的百分比分别是 66.04%和 46.67%：关窗状态下，运动人群感觉舒适的百分比下降至 45.16%，非运动人群百分比上升至 91.67%。开窗状态下室内相对较高的气流速度有助于改善运动人群的热感觉。

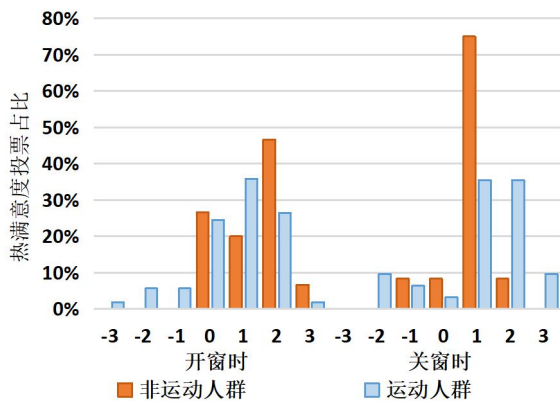


图 13 开关窗状态下不同人群的热满意度投票百分比

2.3 室内空气品质评价分析

比较乒乓球馆内 CO₂ 浓度大于 1000 ppm 时运动人群和非运动人群的室内空气品质满意度的投票结果（图 14）发现，运动人群和非运动人群对室内空气质量感觉满意（投票值≥ 0）的百分比分别是 71.43%和 36.36%。运动人群对空气质量的满意度更高。

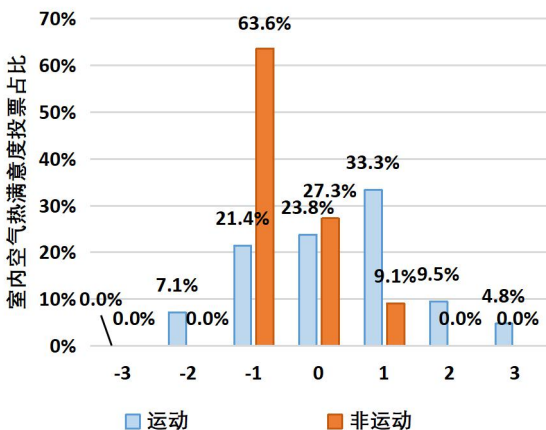


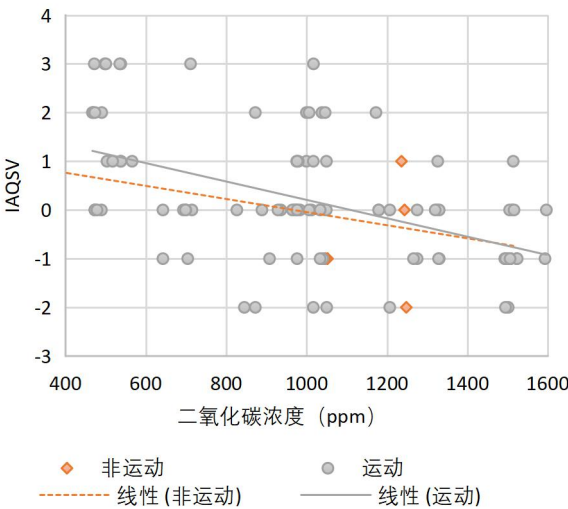
图 14 CO₂ 浓度超过 1000ppm 时

不同人群的空气质量满意度投票百分比

将乒乓球馆不同使用人群的室内空气品质感觉投票（IAQSV）结果与 CO₂ 浓度相关联并生成线性关系（图 15），发现运动人群及非运动人群对空气品质新鲜度的评价均随着 CO₂ 浓度的升高而降低。在相同的 CO₂ 浓度下，运动人群的满意度更高，但是随着 CO₂ 浓度升高运动人群的空气质量感觉下降地更加剧烈，空气质量感觉的敏感度更高。

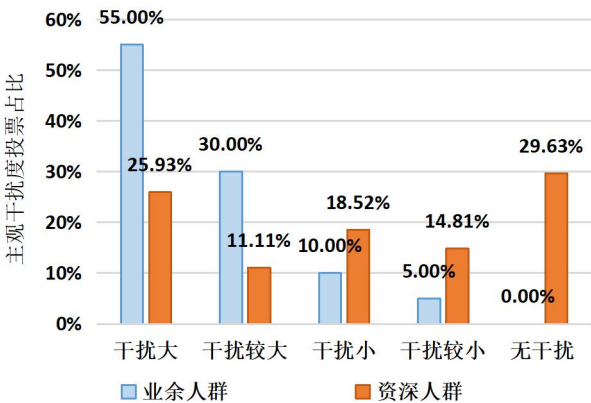
图 15 不同人群空气质量满意度投票与 CO₂ 浓度的关系

2.4 自然通风对运动干扰度的评价分析



考虑到运动人群专业程度有可能影响对体育工艺的要求，将运动人群进一步细分为业余爱好人群和资深爱好人群：将球龄长（>5 年）且运动频次高（近三年周打球频率>1 次）界定为资深爱好者，将球龄短（≤5 年）或运动频次低（近三年周平均打球频率≤1 次）界定为业余爱好者，分析两类运动人群对风场干扰情况的感受，如图 16 所

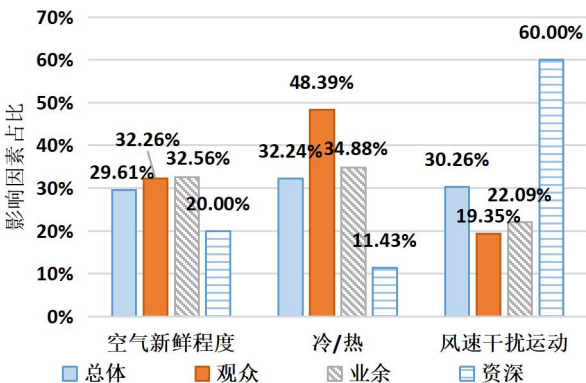
示。研究发现，虽然调研期间的室内平均风速仅 0.09m/s，远低于《体育建筑设计规范》中乒乓球馆风速 0.2m/s 的上限建议值^[1]，但大多数运动者仍然认为室内风速对运动干扰较大。相对而言，业余人群感觉风速干扰大或较大的比例更高，占比



为 85.00%，而资深人群感觉风速干扰大或较大的占比仅为 37.04%。

图 16 不同运动人群在不同风速时主观干扰度投票百分比

图 17 分析了不同人群开关窗意愿的影响因素，可以看出不同人群的投票结果有较大差异：热感觉为非运动人群和业余运动人群投票比例最高的因素，分别占比为 48.39%和 34.88%，两种人群投票比例最低的因素均为担心风速干扰，比例分别为 19.35%和 22.09%；资深运动人群与前两种人群的投票结果相反，担心风速干扰的投票占 60.00%，



热感觉的影响最小，仅为 11.43%。

图 17 不同人群开关窗意愿的影响因素对比

值得注意的是，资深运动人群对风速干扰显著的规避意愿与干扰度投票的实际结果出现了矛盾。分析造成现象的原因是，在调研过程中发现资深运动人群在开始打球之前有习惯性关窗的行为，而非运动人群和业余运动者对窗户控制并不敏感。据此推测，可能是关窗行为的发生使资深运动者主动控制了风速，在心理上降低了对风速干扰的敏感度。

进一步分析疫情前后不同人群开关窗意愿的变化（图 18），发现非运动人群和业余运动人群表示更愿意开窗的比例较高，分别达到 46.67%和 36.73%，而表示更愿意开窗的资深爱好者仅占 3.33%，83.33%和 13.33%的资深运动人群表示开关窗意愿无变化或更喜欢关窗。结合已经发现的资深运动人群习惯性关窗的现象，乒乓球运动资深爱好者的关窗意愿十分坚定，而造成这种现象的原因是他们对于室内风速的要求比较严格，对体育工艺要求高。

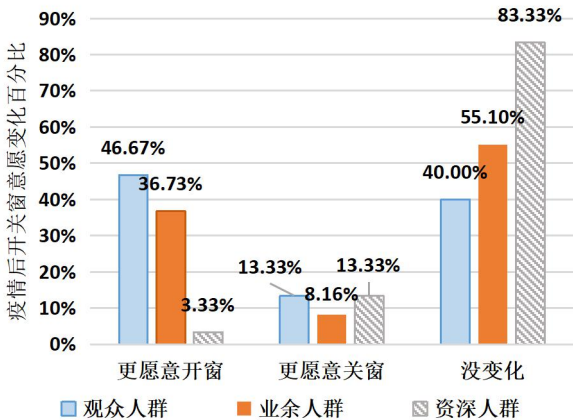


图 18 不同人群在后疫情时代开关窗意愿变化

结论

本研究通过现场测试及主观问卷调查相结合的研究方法,对比青岛地区冬季非采暖期自然通风条件下乒乓球馆内不同人群的热舒适、室内空气品质、风速干扰度感受,得出以下结论:

1) 本次调研的乒乓球馆自然通风效果不佳,进入室内的气流运动衰减严重,室内平均风速仅为室外平均风速的 4.50%,但门窗布局对室内温度场和风场分布仍有一定影响。集中设置的休息区使室内温度分布不均衡。

2) 运动人群与非运动人群的热舒适感受差异较大。运动人群在服装热阻(0.37~1.22clo)低于非运动人群(0.28~0.91clo)的情况下热感觉投票值更高,感觉舒适的温度下限更低。

3) 运动人群及非运动人群对空气品质新鲜度的评价均随着 CO₂ 浓度的升高而降低。同样的 CO₂ 浓度下,运动人群的满意度更高,但随着 CO₂ 浓度升高运动人群的感觉更加敏感。

4) 运动人群对风速的敏感性高。虽然调研期间乒乓球馆的室内平均风速仅 0.09m/s,远低于《体育建筑设计规范》中 0.2m/s 的限值,但仍有 65.67% 的运动者感觉风速对运动干扰较大。

5) 乒乓球资深爱好人群存在运动前习惯性关窗的行为,且关窗意愿十分坚定。担心风速干扰是乒乓球资深爱好者关窗行为发生的最主要原因。与之相比,非运动人群和业余运动人群的关窗意愿并

不强烈,影响其开关窗意愿的最主要因素为热舒适。

6) 青岛地区自然通风体育馆在初冬温度较低的情况下仍然能够满足大部分运动者与非运动人群的热舒适需求,热感觉投票在-1~1 区间的比例分别为 54.32%和 85.19%。但是,为提高乒乓球运动人群对自然通风的接受度,避免开窗时气流对小球运动造成干扰是需要解决的首要问题。

参考文献

- [1] 陈敏,余贞贞,周传辉. 湖北农村自然通风住宅热舒适调查研究 [J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(05): 571-576.
- [2] 孟瑶,牟迪,曹彬,朱颖心. 温和地区自然通风办公建筑的实际热环境评价研究 [J]. 建筑节能, 2020, 48(06): 27-32+45.
- [3] 代金,姜曙光,徐鑫,吴梦云. 北疆地区高校教室夏季自然通风热舒适性研究 [J]. 建筑科学, 2020, 36(02): 79-86.
- [4] 钱锋,史泽道,杨丽.体育建筑热环境研究思考 [J]. 建筑科学, 2019, 35(12): 164-169.
- [5] JGJ 31-2003, 体育建筑设计规范 [S].
- [6] 李晋,卢频,郑海林. 亚热带地区自然通风体育馆室内热舒适范围 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(05): 173-182.
- [7] 高亚萍. 运动人体热舒适性视角下的夏季体育场馆热环境参数优化研究 [D]. 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2020.
- [8] 翟永超,李梦,梁斌,杨柳.空气流动对室内健康体育运动人体热舒适的影响及设计策略研究 [J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34 (02): 29-35.
- [9] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2017: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality [S].
- [10] Luo M, Zhang Z, Kevin K, et al. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge[J].Building and Environment, 2018, 131(1): 44-52.

[11] Wang H, Hu S. Experimental study on thermal sensation of people in moderate activities[J]. Building and Environment, 2016, 100 (1): 127-134.

[12] 马高祥,丁秀娟,新陈代谢对人体热舒适的影响[J]. 建筑节能, 2019, 7(1): 37-38.