



2022中国制冷展专题研讨会

绿色冬奥—对我国制冷行业的影响与展望

极端寒冷环境人体热舒适特征 与改善措施



曹 彬

清华大学建筑学院

2022-08-02

caobin@tsinghua.edu.cn

“十三五”国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项—— 人工剖面赛道类场馆新型建造、维护与运营技术

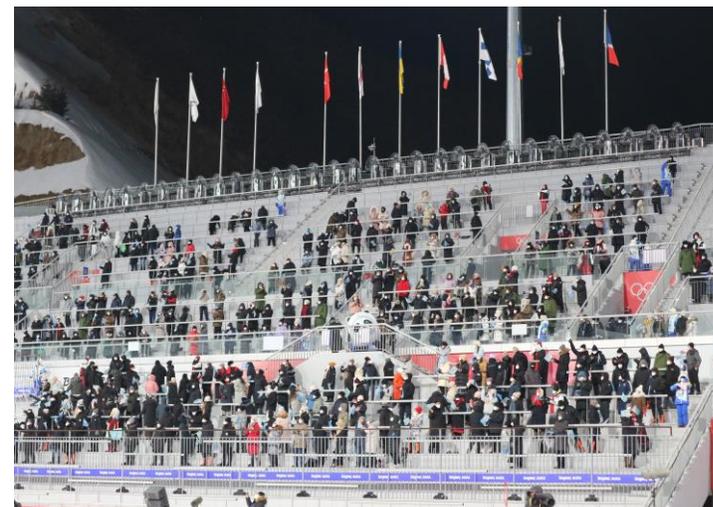
- 课题1：竞技型人工剖面赛道精细建造技术研究
- 课题2：竞速型赛道建造及制冰系统节能关键技术研究
- 课题3：赛道转换、共享及设施全季利用技术研究
- **课题4：赛道环境营造及观赛环境保障技术研究**
- 课题5：局部山体切削面的生态再造格宾支护体系技术研究
- 课题6：赛道设施可持续建造技术研究

- 室外寒冷环境长时间停留，严重影响观众的舒适观赛体验，如缺乏足够的热保障措施，甚至存在冻伤、失温等健康风险
- 针对极端低温环境下的人体热舒适保障技术少有关注，缺乏理论基础和系统性研究

时间	举办地点	日均最高气温 $^{\circ}\text{C}$	日均最低气温 $^{\circ}\text{C}$
1998.2.7~1998.2.22	日本长野	11	-9
2002.2.8~2002.2.24	美国盐湖城	14	-10
2006.2.10~2006.2.26	意大利都灵	14	1
2010.2.12~2010.2.28	加拿大温哥华	10	-8
2014.2.7~2014.2.23	俄罗斯索契	16	6
2018.2.9~2018.2.25	韩国平昌郡	13	-11
2022.2.5-2.17	张家口崇礼赛区	-5	-19

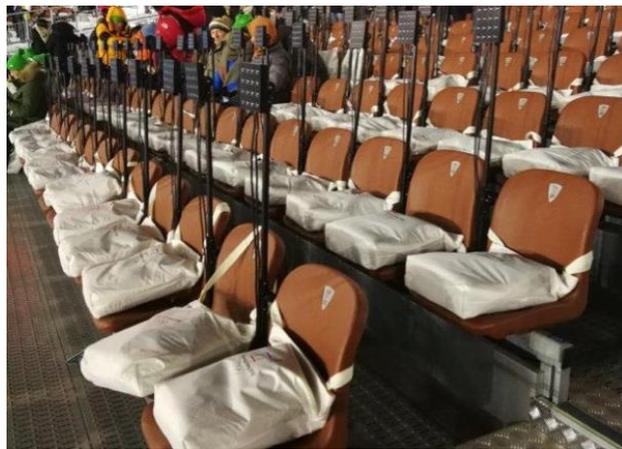


冬奥会观赛区域为露天敞开式，环境寒冷
低温、高风速的室外环境



比赛期间观众保持静坐或站立
代谢率小、产热量低的生理状态

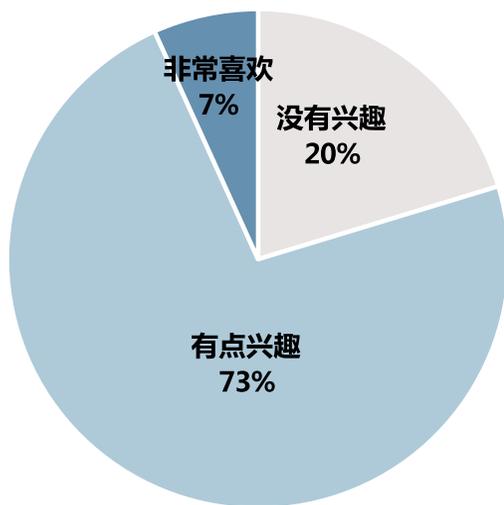
- 往届冬奥会防寒措施效果甚微
 - 在观赛区周边设置**取暖设备**
 - 向观众提供**帽子、毛毯、暖宝宝**等防寒用品
 - **起效速度缓慢，作用时间有限**



• 冰雪运动群众认知及参与度调研 (有效问卷1020份)

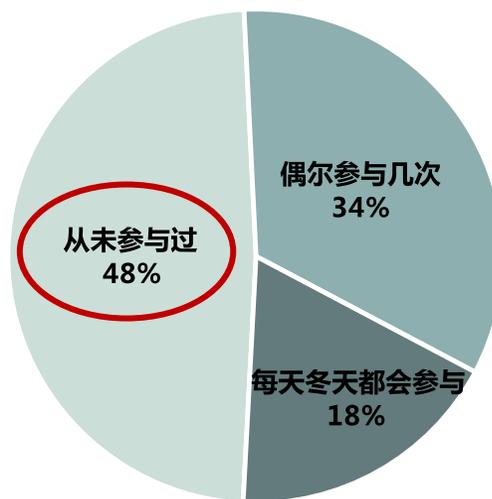
80%受访者

对冰雪运动感兴趣

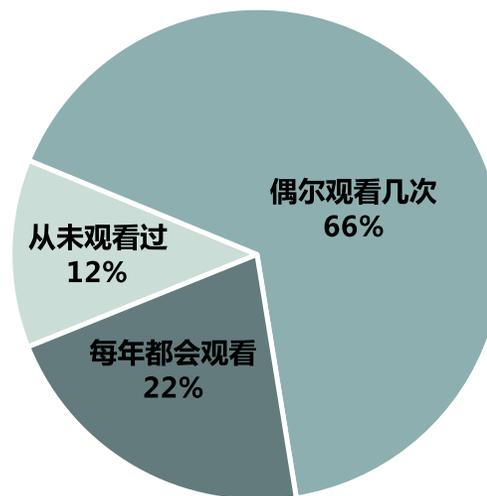


仅**12%**的受访者有过**现场观赛经历**

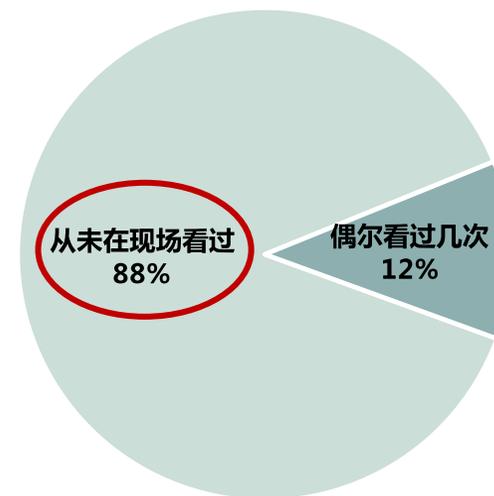
亲身参与



线上观赛

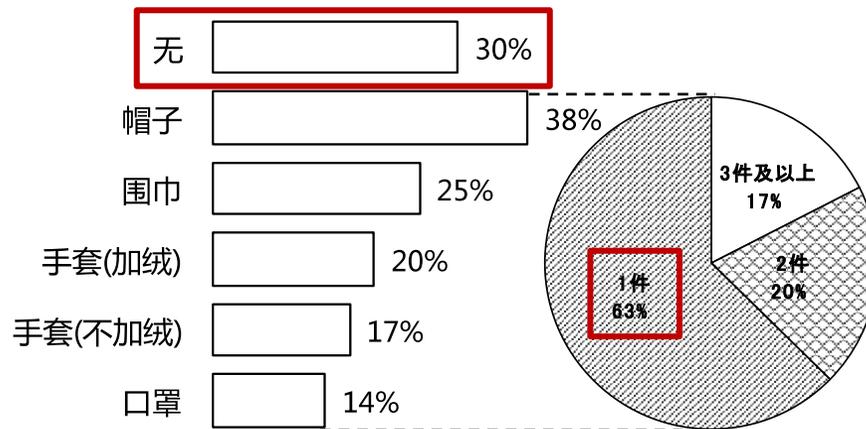


现场观赛



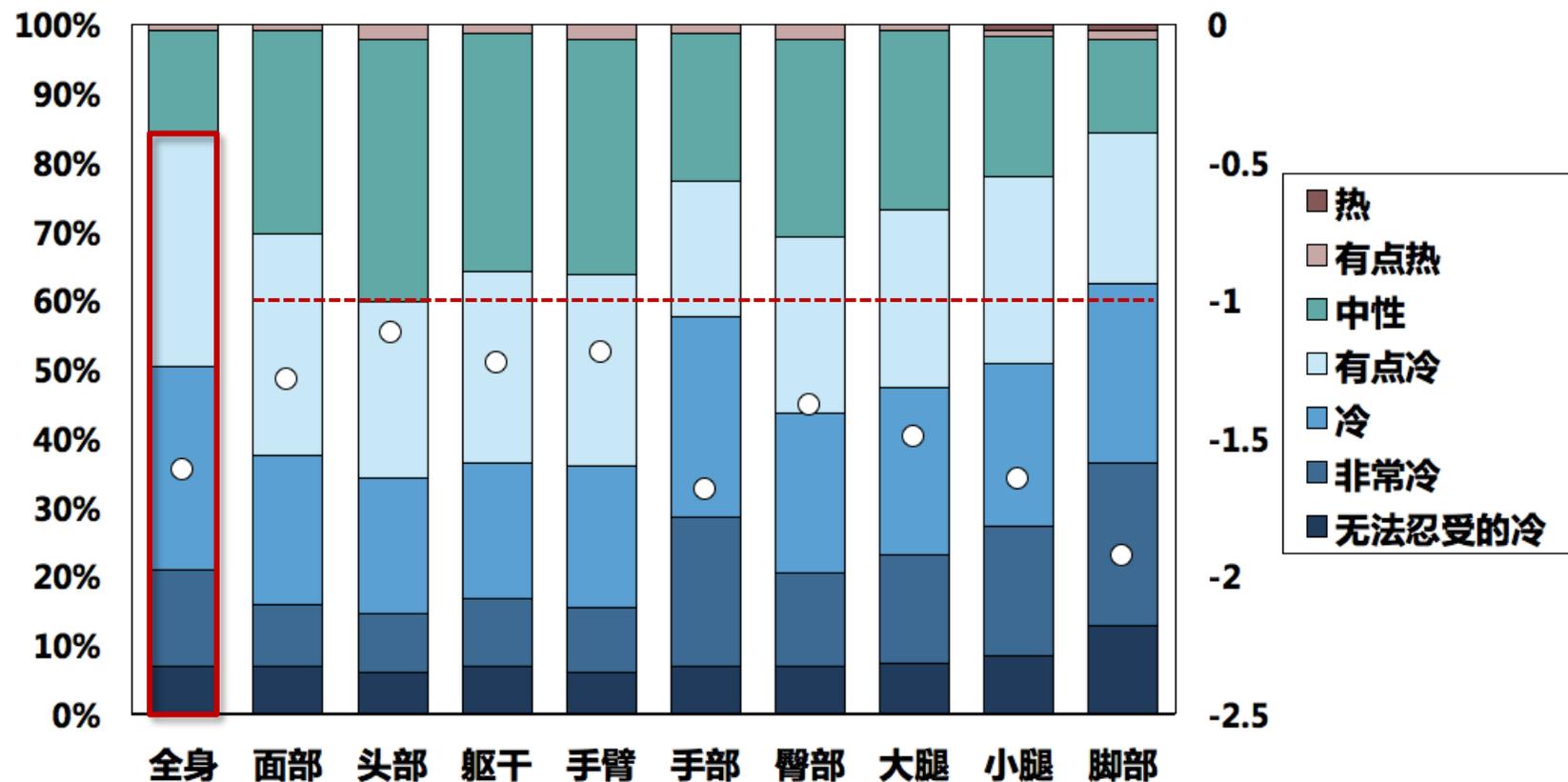
观众**对寒冷环境观赛不熟悉**

• 首钢大跳台观赛区热舒适调研 (2019年首钢单板滑雪世界杯比赛期间)



观众的整体**服装热阻偏低**，
保暖意识较低

• 首钢大跳台观赛区热舒适调研 (2019年首钢单板滑雪世界杯比赛期间)

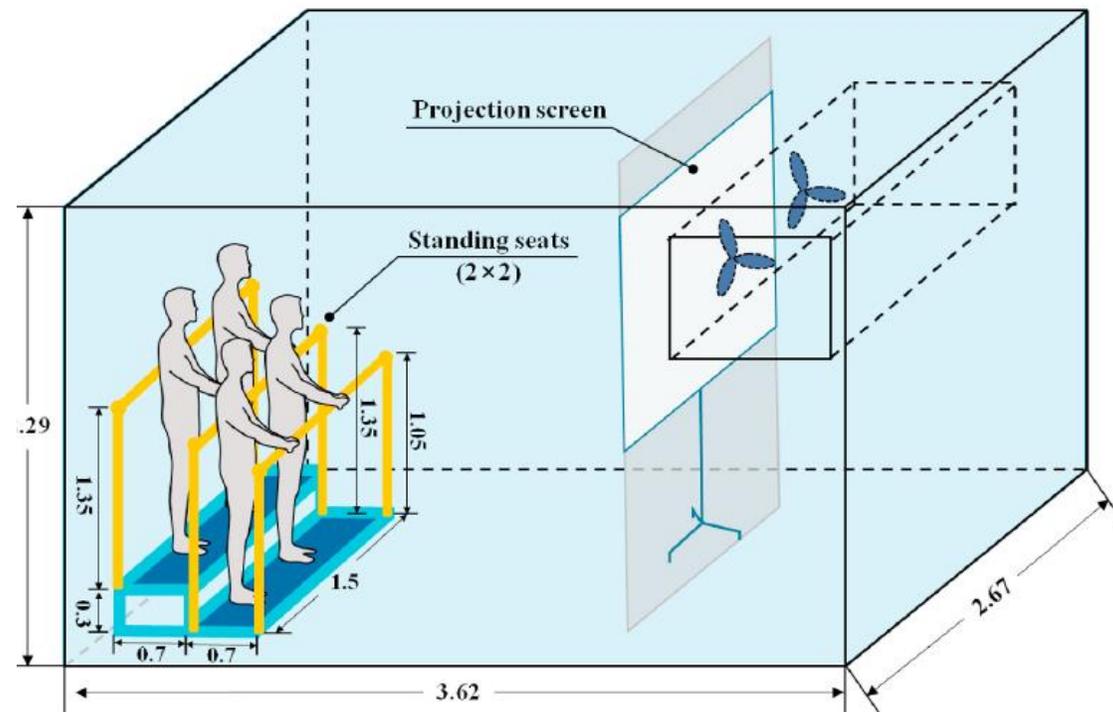
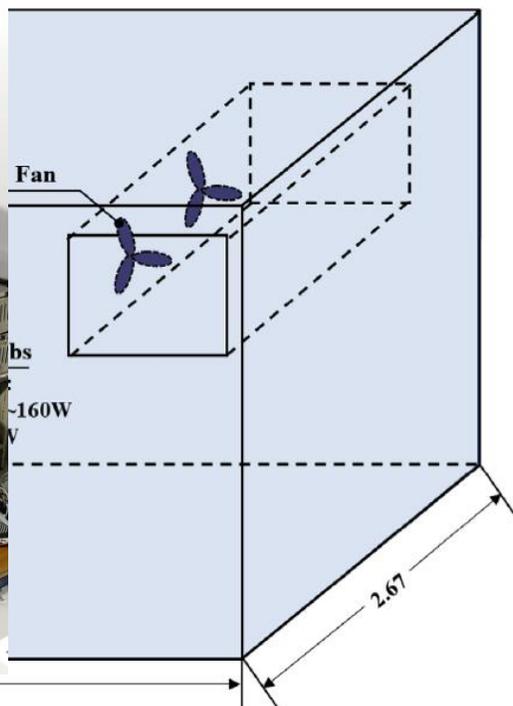


在缺乏改善措施的情况下，
观众**难以抵御长时间的冷暴露**

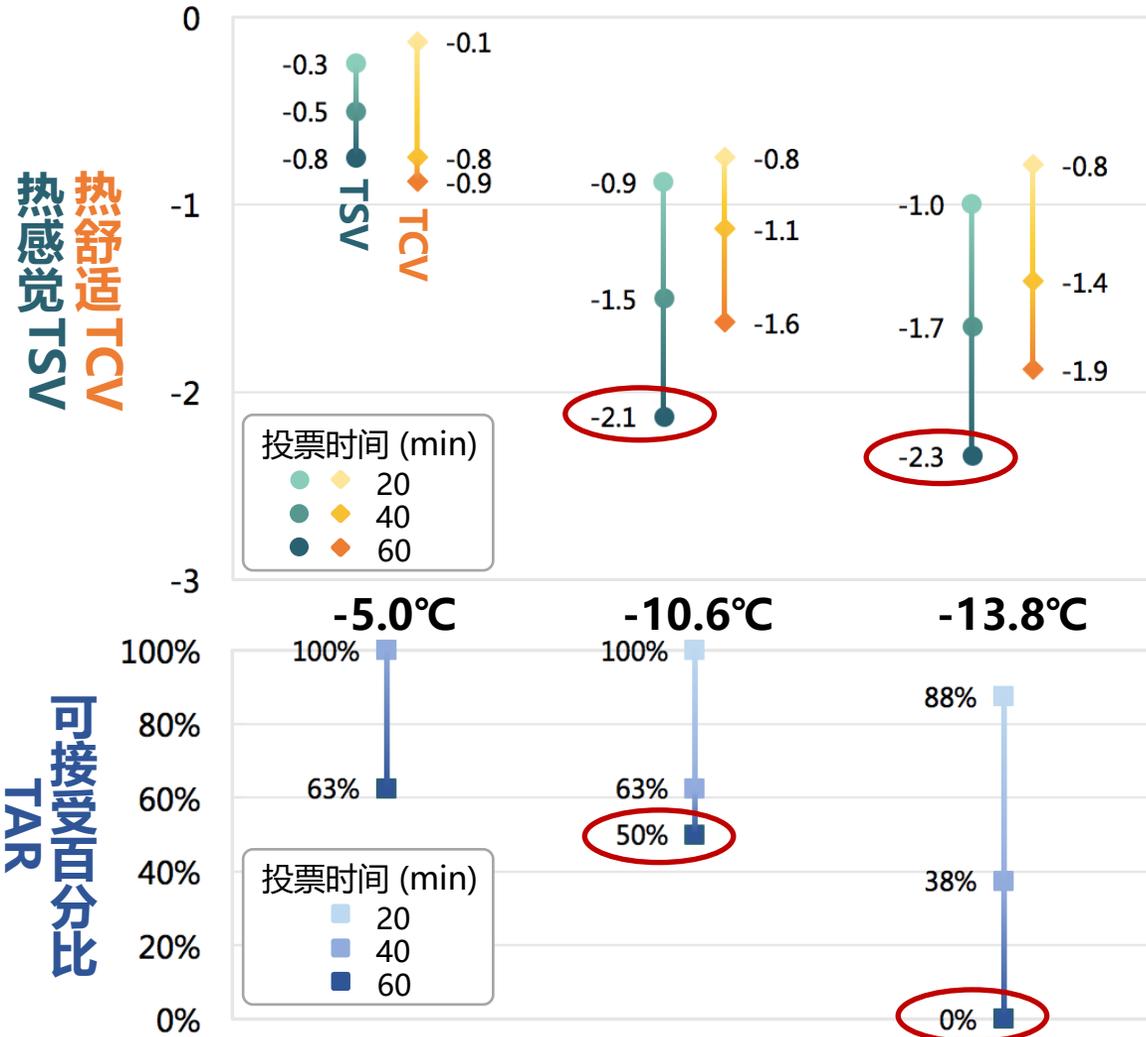
- **超过80%**的观众全身有明确的冷感
- 身体九个部位均有**超过60%**的投票反映感到寒冷

在天津商业大学低温环境舱开展了 0至-20℃ 环境人体热舒适实验

- **生理参数:** 皮肤温度、核心温度、心率、血流量等
- **主观评价:** 全身及局部 热感觉 / 热舒适 / 热满意度等



不同冷暴露强度下的热舒适水平——整体热评价



1. 三个温度工况下，**整体TSV和TCV**均随冷暴露时间**显著降低**。
2. -5°C工况，整体TSV和TCV维持在-1以上，**无需进行改善**。
3. 低于-10°C工况，整体TSV降低至-2以下，TAR低于50%，**有必要采取改善措施提升观众的热舒适水平**。

不同冷暴露强度下的热舒适水平——局部热评价

局部热感觉

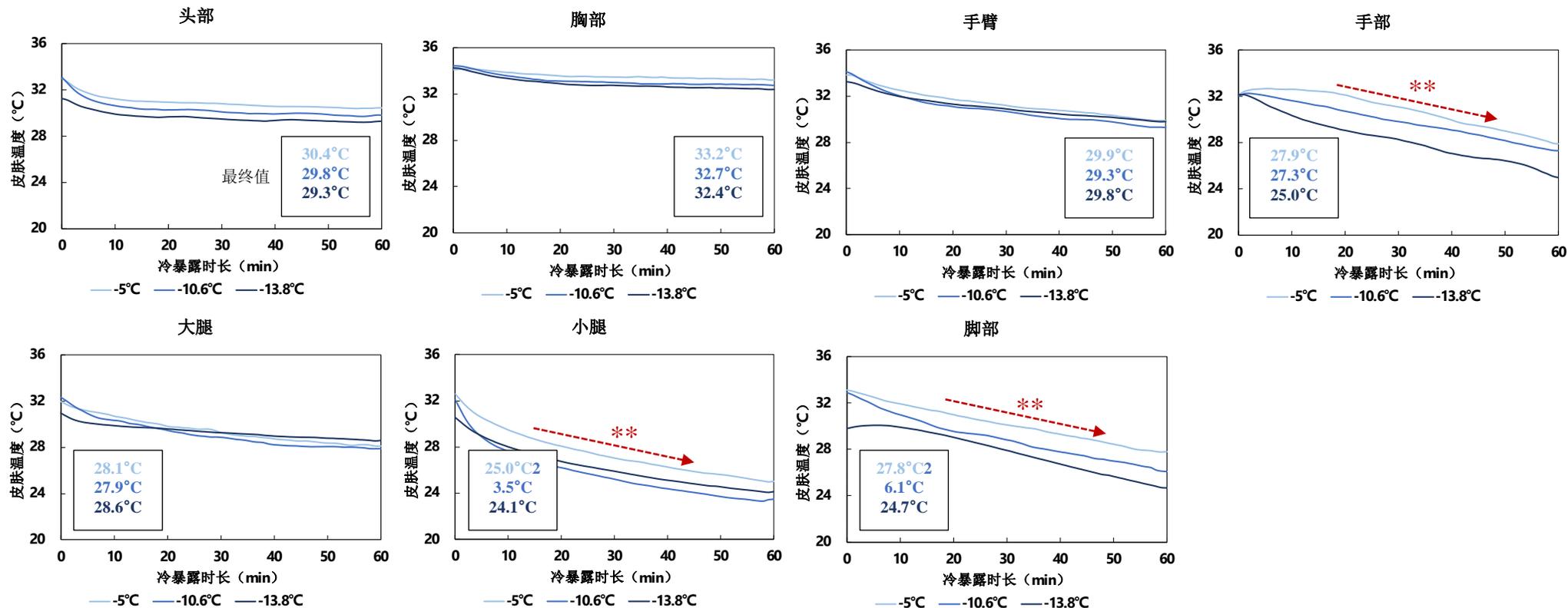
	头部	呼吸	躯干	手臂	** 手部	* 大腿	* 臀部	** 小腿	** 脚部
-5°C (20min)	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.3
-5°C (40min)	0	0	0	0	-0.4	-0.1	-0.3	-0.5	-0.5
-5°C (60min)	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.9	-1.0
-10.6°C (20min)	0.0	-0.1	-0.3	0.0	-0.5	-0.8	-0.9	-0.9	-0.6
-10.6°C (40min)	-0.3	-0.1	-0.5	-0.4	-1.3	-1.1	-0.9	-1.0	-1.4
-10.6°C (60min)	-0.4	-0.3	-0.5	-0.4	-2.0	-1.3	-1.0	-1.3	-1.6
-13.8°C (20min)	-0.3	0	0	0	-0.7	-0.4	-0.6	-0.6	-1
-13.8°C (40min)	-0.3	-0.1	0	-0.4	-1.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.7
-13.8°C (60min)	-0.4	-0.1	-0.1	-0.7	-2.4	-0.9	-1.1	-1.3	-2.7

局部热舒适

	头部	呼吸	躯干	手臂	** 手部	** 大腿	* 臀部	** 小腿	** 脚部
-5°C (20min)	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.3
-5°C (40min)	0	-0.1	0	0	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
-5°C (60min)	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-1.1	-0.6	-0.4	-0.8	-0.8
-10.6°C (20min)	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.4	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6
-10.6°C (40min)	0.0	-0.1	-0.1	-0.4	-0.9	-1.1	-1.0	-1.4	-1.1
-10.6°C (60min)	-0.1	0.0	0.0	-0.3	-1.1	-1.1	-1.0	-1.4	-1.4
-13.8°C (20min)	-0.2	0	0	-0.1	-0.9	-0.5	-0.4	-0.7	-1
-13.8°C (40min)	-0.3	0	0	-0.4	-1.5	-0.9	-0.7	-0.9	-1.5
-13.8°C (60min)	-0.4	-0.2	-0.2	-0.7	-2.2	-1	-0.9	-1.1	-2.4

1. 通过服装保温基本满足头部、呼吸道、躯干和手臂的热舒适需求。
2. 手部、脚部和下肢的局部热评价随冷暴露时间显著下降。
3. 手部和脚部的冷感和不舒适感最强，局部热评价降低至-2.5左右。

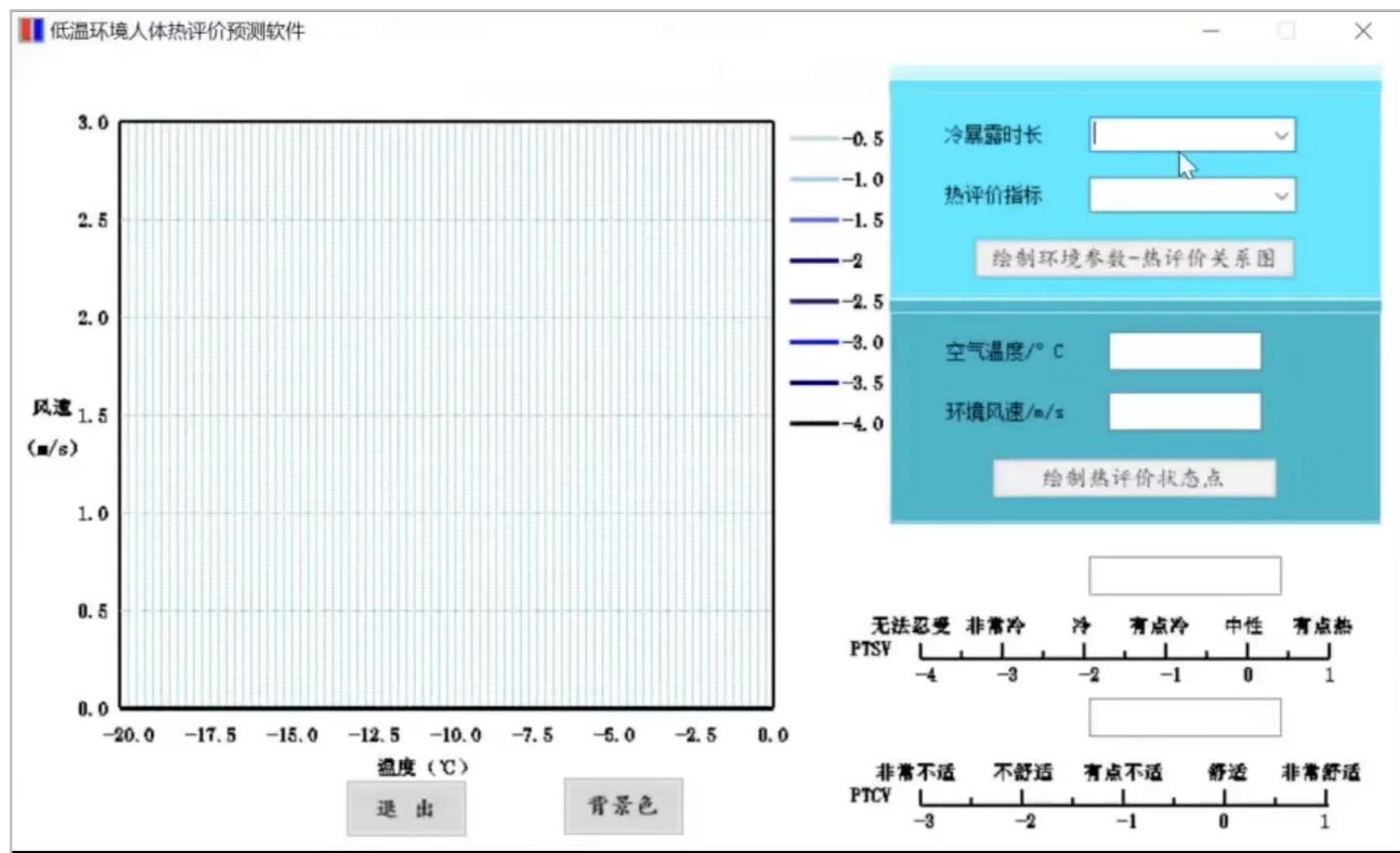
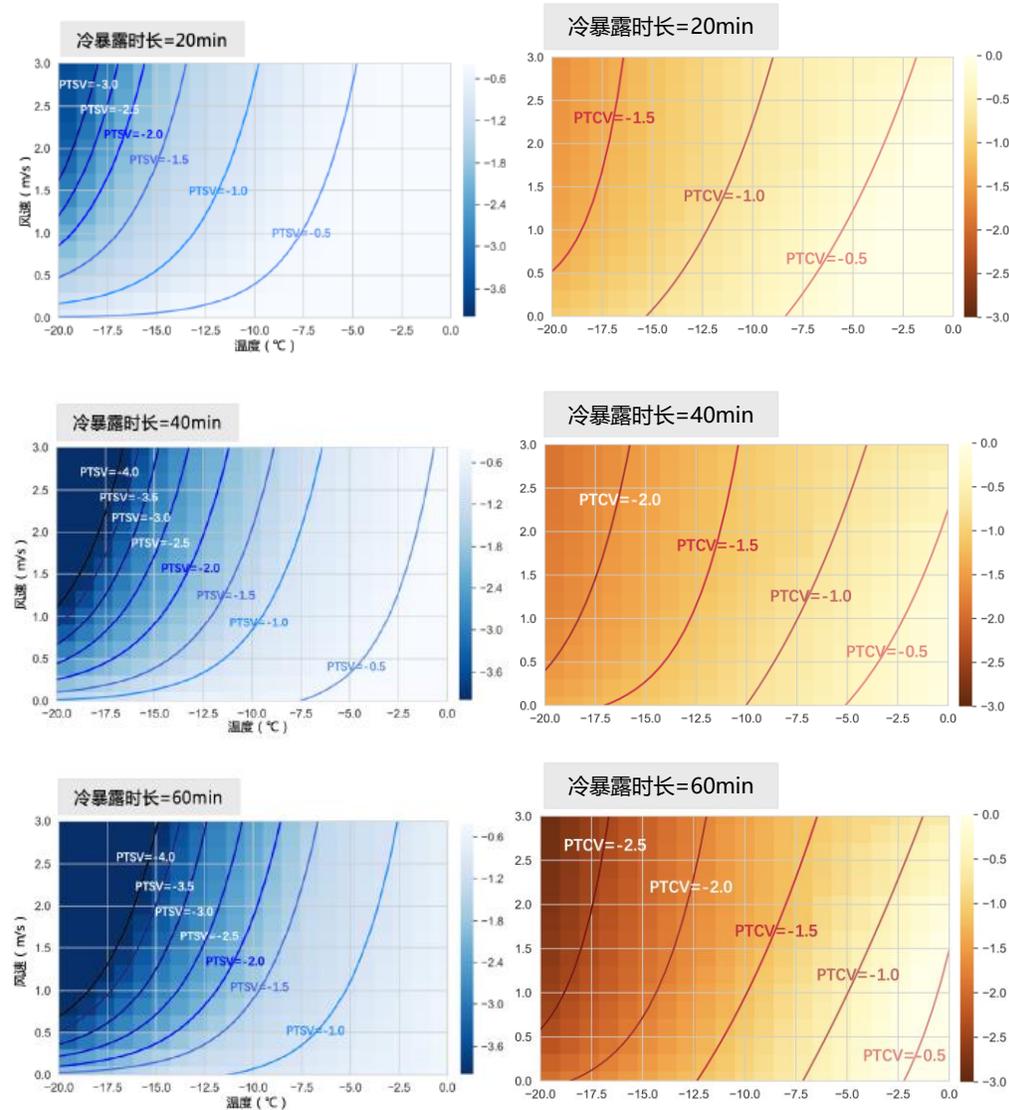
低温环境下皮肤温度的变化



1. 冷暴露期间，**头部和胸部的皮肤温度达到稳定**，其余五个部位的皮肤温度持续下降。
2. **手部、小腿和脚部的皮肤温度下降最剧烈**，受环境温度变化影响最大，最终降低至25°C左右。

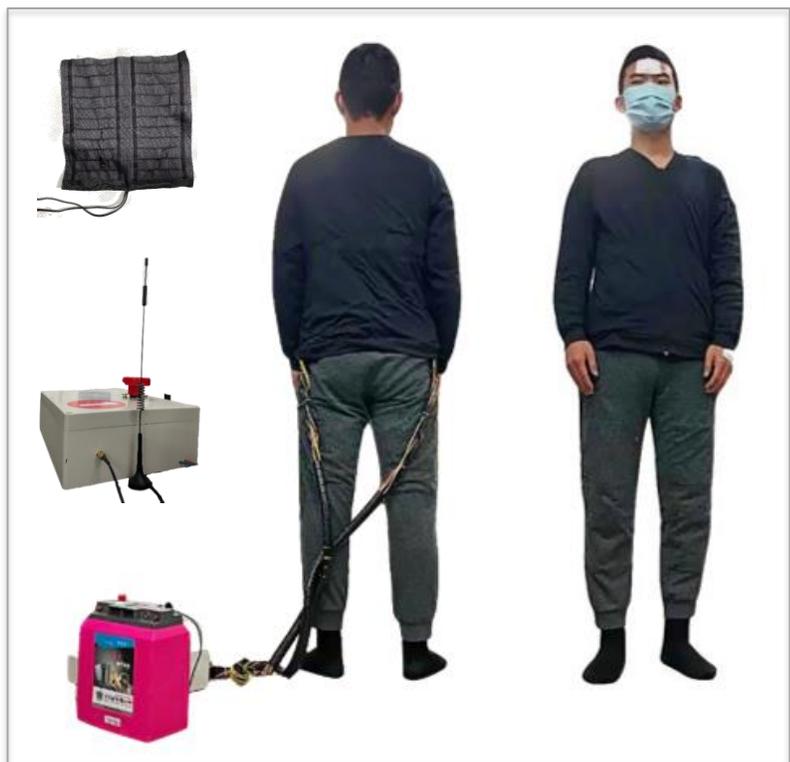
开发了低温环境人体热评价预测软件

- 针对不同**温度、风速、冷暴露时间**组合，预测人体的热感觉与热舒适程度，可为**赛事组织和观赛安排**提供参考

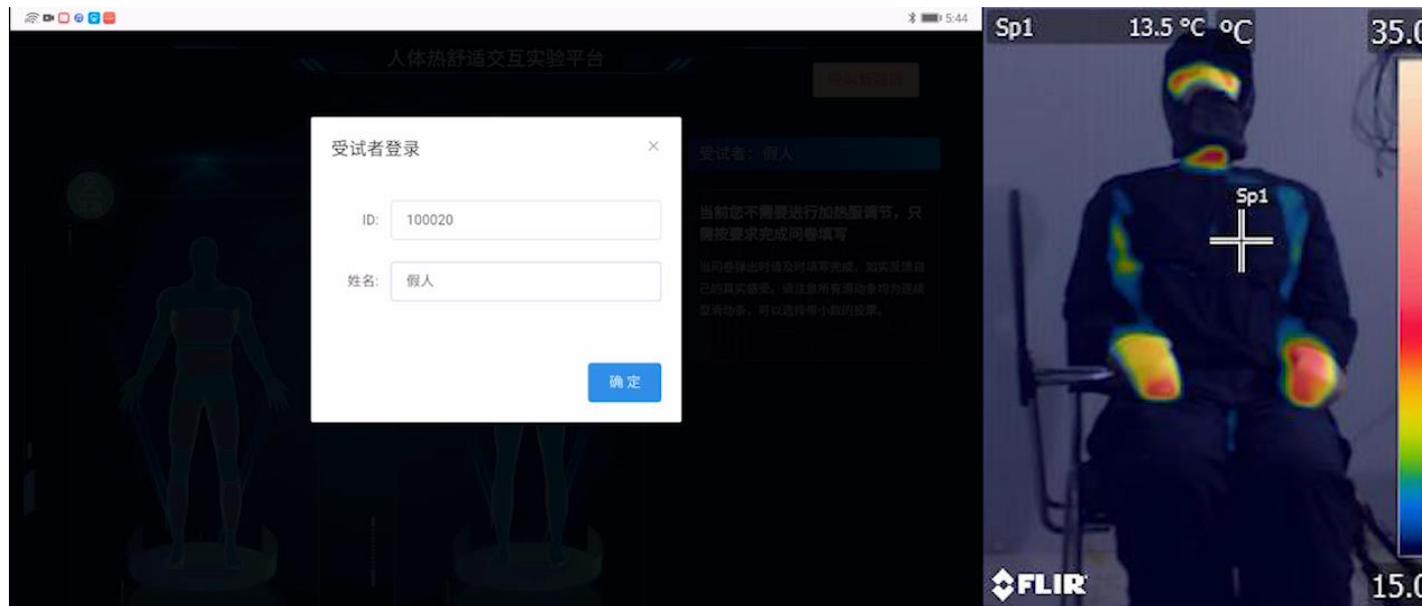
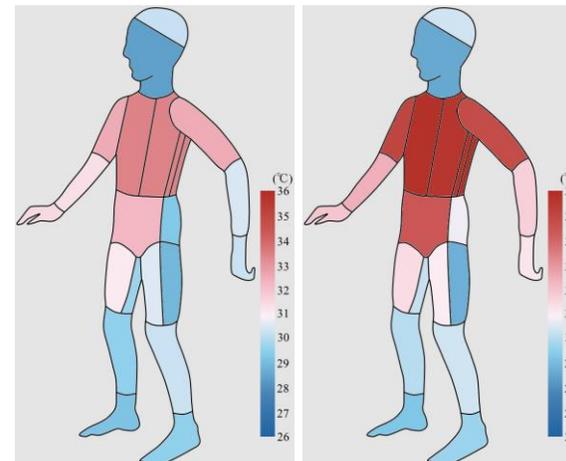
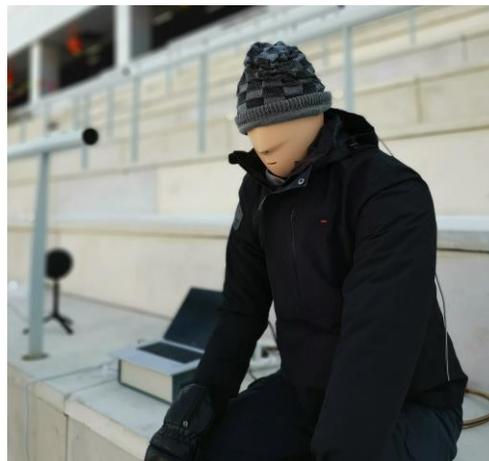


开发了全身多点位加热系统

- 开发了**人机交互式**全身多点位加热系统，结合高仿真度**暖体假人系统**开展实验，明确了低温环境下人体需要的补热量



全身多点位“加热衣”



人机交互操作界面

局部加热响应效果

开发了可穿戴智能动态温控马甲

物理性能

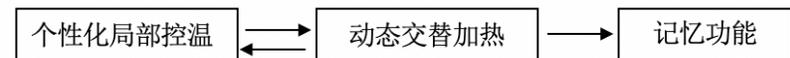
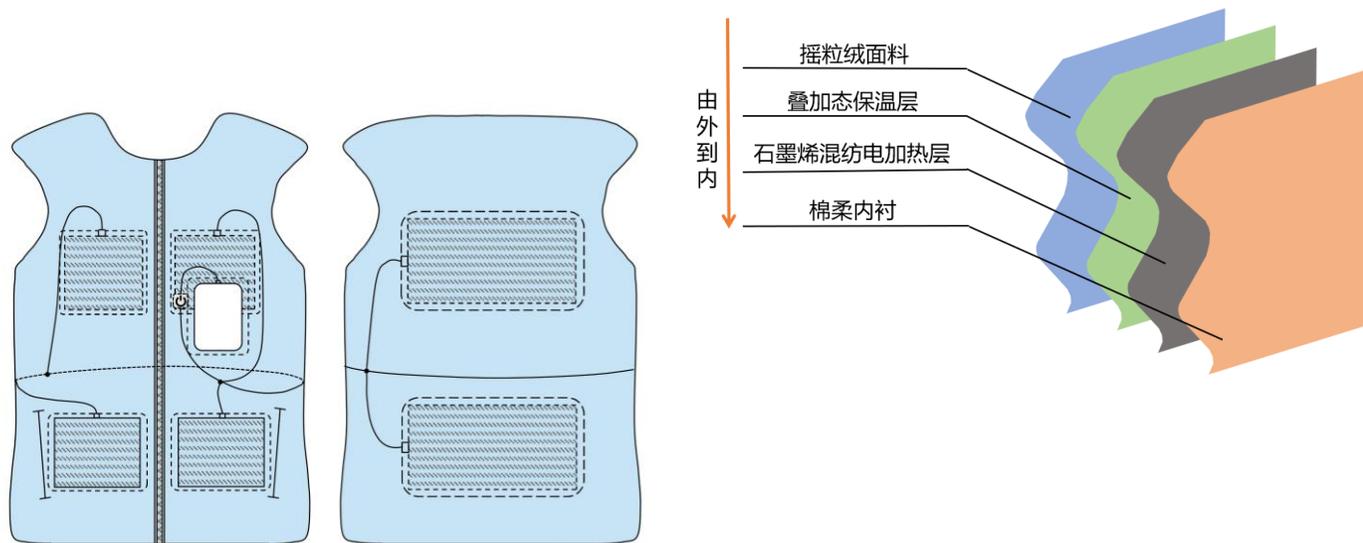
- 智能动态温控系统：控制范围为**25-45°C**，控制精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，响应速度为**3-3.6°C/min**
- 续航能力：**10000mAh**容量的移动电源可以支持该智能动态温控马甲使用约**3h**

热舒适度

- 在 -10°C 以下的低温环境中，可**显著提升全身热感觉**

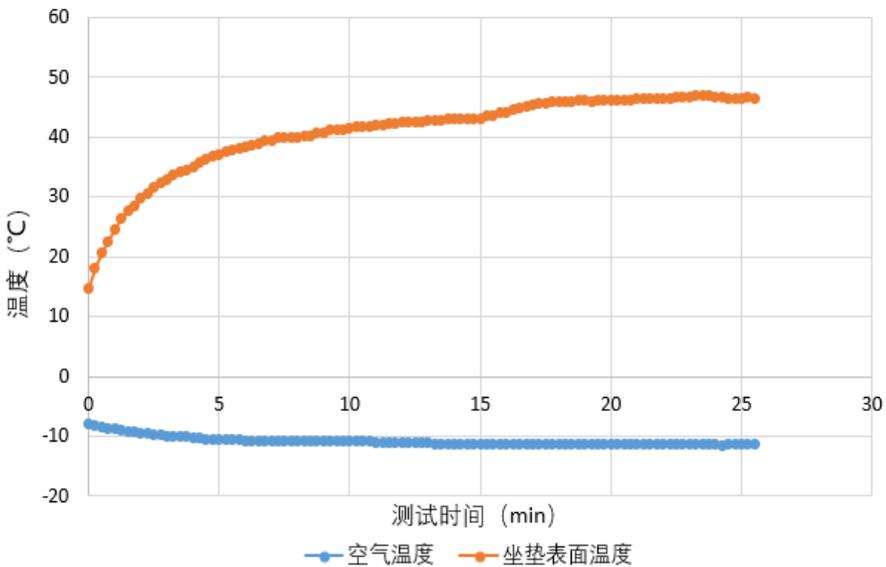
能效指标

- 动态交替加热模式（节能模式）可实现**单位时间加热能耗降低50%**，**电源续航时间延长1倍**

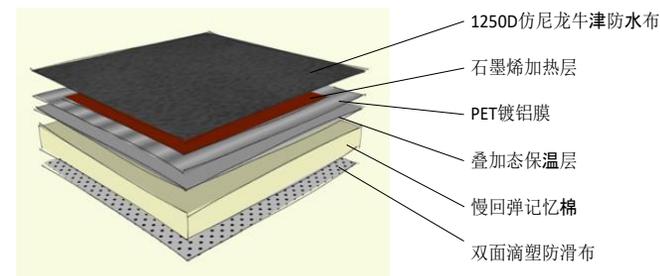
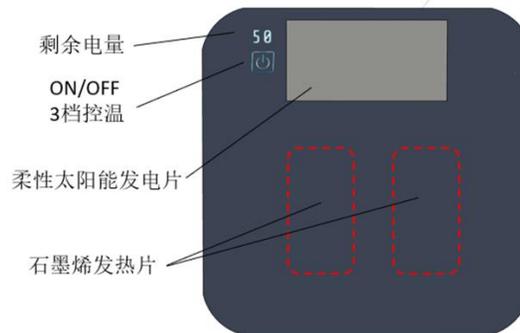


开发了便携式加热坐垫

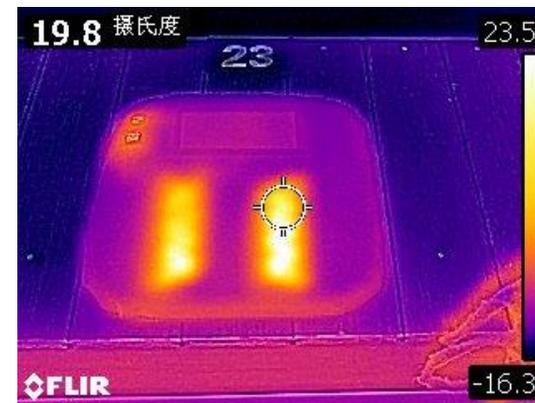
- **安全性:** 低压供电、高温限制
- **舒适性:** 3档温度调节, 石墨烯均匀加热
- **节能性:** 叠加态材料隔热
- **便携性:** 5V2A主动式电源供电, 一体化防水设计
- **稳定性:** 低温环境($\leq -10^{\circ}\text{C}$) 稳定运行



设计



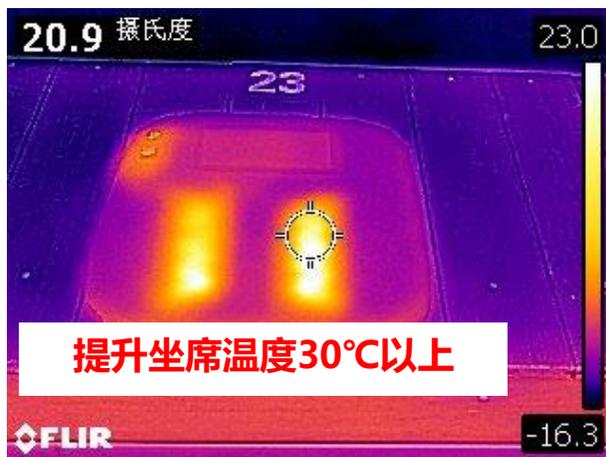
制作



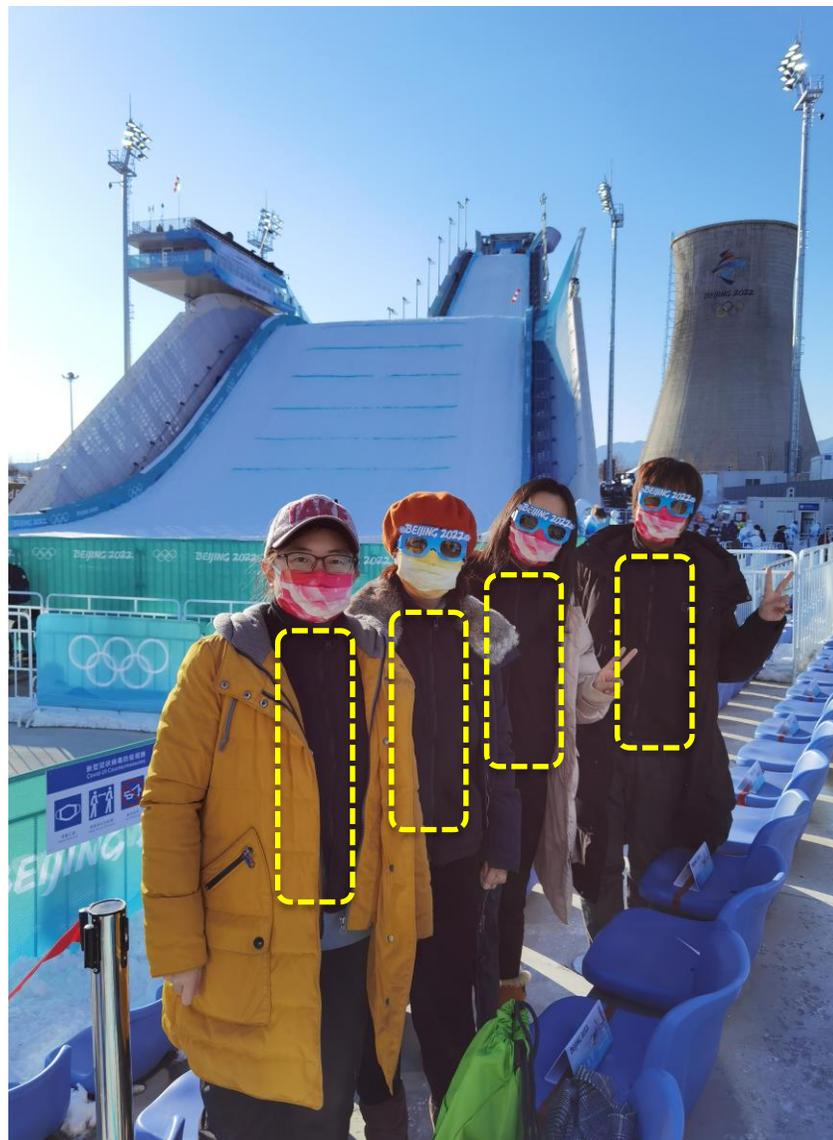
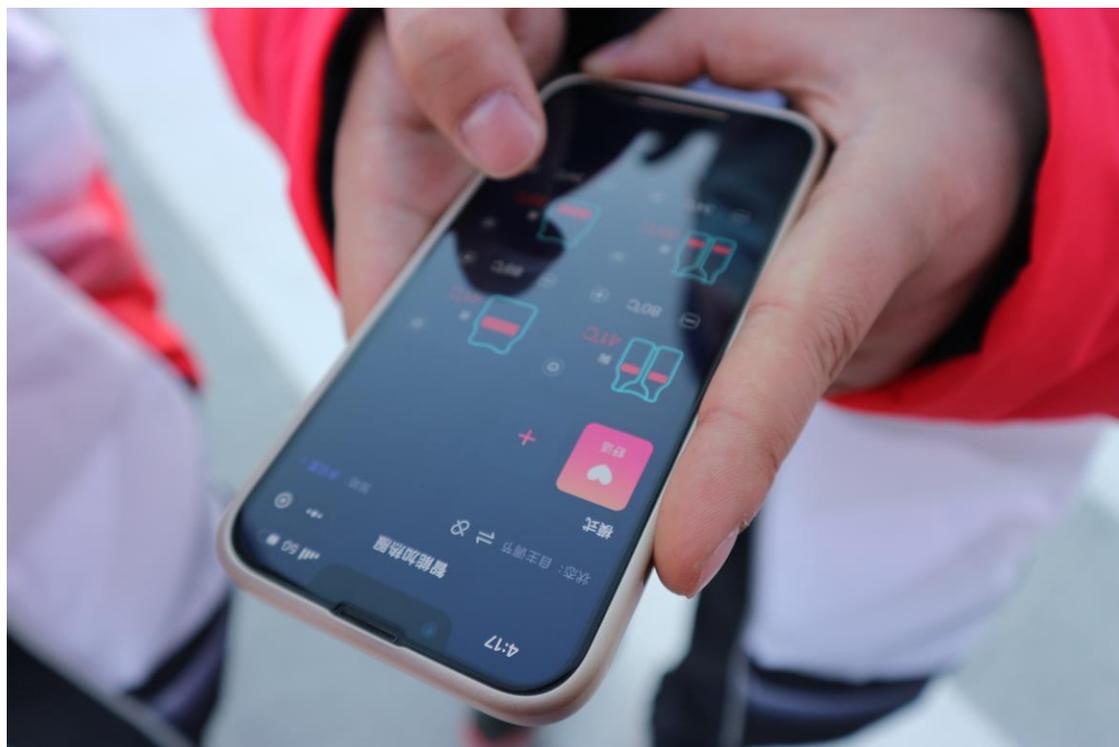
应用



为河北省第三届冰雪运动会开幕式进行了热舒适保障



冬奥会期间，为“雪如意”、首钢大跳台、鸟巢的部分现场人员提供了保暖装备



科技日报

2021年11月19日 星期五 SCIENCE AND TECHNOLOGY DAILY 总第11886期

习近平分别同波兰总统杜达、塔吉克斯坦总统拉赫蒙通电话

科技冬奥 创新先行

科技冬奥重点专项围绕8个方面部署任务，落实办奥理念

冬奥会成功以来，“科技冬奥”重点攻关大力推进，《科技冬奥(2022)行动计划》全面展开，国家高新技术企业研发计划“科技冬奥”重点专项有序推进，取得了一系列科技创新成果，助力冬奥筹办各项工作，落实办奥理念。

在日前结束的“相约北京”冰球室内测试赛中，一系列科技创新成果亮相冬奥场馆，通过手机可实现观赛现场的实时互动，通过手机可实现观赛现场的实时互动，通过手机可实现观赛现场的实时互动...

《科技冬奥(2022)行动计划》围绕8个方面，助力冬奥筹办各项工作。冬奥筹办工作启动以来，“科技冬奥”重点攻关大力推进...

“在室外观赛，天气比较寒冷，为了解决观众观赛取暖的问题，我们研发了场馆坐席和站席观赛环境的舒适性提升技术，实现零下20摄氏度体感温度下，设备表面温度10秒内升至40摄氏度以上，可以显著提升观众热舒适感受。”吴远彬说。

团体坛观澜

让更多“苏炳添”走进校园

发挥体教融合相关政策的作用，促进教育和体育资源的互通互融，更多“苏炳添”在赛场上绽放光彩，也可让更多优秀运动员走进校园。

在日前结束的“相约北京”冰球室内测试赛中，一系列科技创新成果亮相冬奥场馆，通过手机可实现观赛现场的实时互动...

在日前结束的“相约北京”冰球室内测试赛中，一系列科技创新成果亮相冬奥场馆，通过手机可实现观赛现场的实时互动...

《人民日报》、《央视新闻》、《科技日报》、《中国电子报》等媒体报道

冬奥观赛：新技术提升人体体感温度10℃—15℃

Advertisement for a heating technology. It features a smartphone displaying a graph of body temperature and a heating suit. Text includes '冬奥观赛：新技术提升人体体感温度10℃—15℃', '科技冬奥进行时', and '冬奥中的高校力量·清华大学'.

《人民日报》、《央视新闻》、《科技日报》、《中国电子报》等媒体报道

习近平在中央党校(国家行政学院)中青年干部培训班开班式上发表重要讲话 强调 立志做党光荣传统和优良作风的忠实传人在新时代新征程中奋勇争先建功立业



习近平在中央党校(国家行政学院)中青年干部培训班开班式上发表重要讲话 强调 立志做党光荣传统和优良作风的忠实传人在新时代新征程中奋勇争先建功立业

冬奥观赛：新技术提升人体体感温度10℃—15℃

科技冬奥进行时。冬奥筹办工作启动以来，“科技冬奥”重点攻关大力推进，取得了一系列科技创新成果，助力冬奥筹办各项工作，落实办奥理念。

Advertisement for a technology company. It features a photograph of a person and text including '勇担贵州高质量发展的科技先锋', '学习宣传贯彻全会精神', and '贵州日报'.

那年红军过六盘，回族待我如一家。六盘山红军长征纪念馆，是红军长征途中的一座丰碑，也是回民同胞对红军将士深情厚谊的见证。



2022中国制冷展专题研讨会

绿色冬奥—对我国制冷行业的影响与展望

感谢关注!



曹彬

caobin@tsinghua.edu.cn