



# 国内外降温服的研究热点及发展趋势

汪思婧<sup>a</sup>, 吴巧英<sup>b</sup>

(浙江理工大学, a. 服装学院; b. 国际教育学院, 杭州 310018)

**摘要:** 利用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件探索降温服的研究热点与发展趋势。检索中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 及 Web of Science (WoS) 数据库中历年来的相关文献, 对数据降重处理后, 分别选择国家、作者、关键词绘制可视化图谱, 并进行分析。结果表明: 英文文献共检索到 753 篇, 中文文献 212 篇, 该领域的中英文文献发文量均呈持续增长趋势, 且 WoS 数据库中 2007—2022 年间中国的总发文量已位居全球第一; 英文文献核心作者 64 位, 中文文献核心作者 50 位; 高被引论文以及关键词共现、突现以及聚类分析显示, 英文文献侧重辐射制冷纺织品开发研究, 中文文献则侧重降温服在医疗、消防和矿业上的应用效果研究, 而相变材料制冷为目前国内文献的共同研究热点。中英文数据库关于降温服方面的研究总体呈增长趋势, 且从军事和航空航天领域扩展至工业和医学领域。目前降温服研究重心已转向相变材料、数值模拟、辐射冷却、智能调温等方向。

**关键词:** 降温服; 相变材料; 辐射冷却; 通风服; 研究热点; 发展态势

**中图分类号:** TS101.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2024) 05-0347-11

**引文格式:** 汪思婧, 吴巧英. 国内外降温服的研究热点及发展趋势[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(3): 347-357.

**Reference Format:** WANG Sijing, WU Qiaoying. Research hotspots and development trends of cooling clothing at home and abroad[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(3): 347-357.

## Research hotspots and development trends of cooling clothing at home and abroad

WANG Sijing<sup>a</sup>, WU Qiaoying<sup>b</sup>

(a. School of Fashion Design & Engineering; b. School of International Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The study aims to explore the research hotspots and development trend of cooling clothing using the software of CiteSpace and VOSviewer. Relevant literature in China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WoS) databases over the years was retrieved, and after data weight reduction processing, the countries, authors, and keywords were selected to draw the visual analysis maps for further analysis. The results show that a total of 753 pieces of English literature and 212 pieces of Chinese literature were retrieved, the number of Chinese and English literature published in this field continued to grow, and the total number of Chinese papers published in the WoS database from 2007 to 2022 ranked first in the world; there were 64 core authors of the English literature and 50 core authors of the Chinese literature; the highly cited papers, keyword co-occurrences, emergence, and clustering analyses showed that the English literature focused on the development of radiative cooling textiles, while the Chinese literature focused on the application effect of cooling clothing in medical, fire-fighting and mining industries, with phase-change material cooling being a common research hotspot in Chinese and English

收稿日期: 2023-11-15 网络出版日期: 2024-03-13

基金项目: 企业资助项目 (22190860-J)

作者简介: 汪思婧 (2000—), 女, 安徽池州人, 硕士研究生, 研究方向为服装设计与工程。

通信作者: 吴巧英, E-mail: bettywu2000@126.com

literature. To sum up, there is a general trend of growth in research in the area of cooling clothing in both English and Chinese databases, and the research on cooling clothing has expanded from military and aerospace fields to industrial and medical fields. At present, the research center of cooling clothing has been tilted to phase-change materials, numerical simulation, radiation cooling and intelligent temperature regulation.

**Key words:** cooling clothing; phase-change materials; radiative cooling; ventilated clothing; research hotspot; development trend

## 0 引言

降温服又称冷却服,根据不同的冷却原理主要可分为蒸发型<sup>[1]</sup>、空气型<sup>[2]</sup>、相变型<sup>[3]</sup>和液体型<sup>[4]</sup>等4类<sup>[5]</sup>。降温服能耗低且轻便,不仅可降低高温环境下热暴露对人体造成的伤害,而且可用于航天员舱外活动、矿井采挖、火灾救援等特殊作业环境,还可弥补空调系统带来的温室效应和能源浪费等缺陷<sup>[6]</sup>,已成为特殊环境下常用的热防护措施之一<sup>[7]</sup>。降温服诞生于航空航天和军事领域,经过长期发展,降温服的类型日渐增多,应用领域变得更加广泛,研究热点不断变化。目前已有学者对部分类型降温服的研究进行了系统综述<sup>[8-9]</sup>,但这种研究方法主观性较强,评价标准较难统一,且分析的文献数量有限。而相较于系统综述,文献计量法注重采用数学和统计学方法对文献进行定性和定量分析,结果较为客观,同时该方法可以对大批量文献进行深入挖掘,从宏观上综合分析特定研究领域的发展趋势和热点变化,可将分析对象进行分类和综合,从而刻画出该领域研究的发展和演变态势,并结合可视化软件如CiteSpace和VOSviewer来绘制年发文量趋势图、国家和作者共现图谱、关键词共现和突现图谱等,进而识别并捕捉研究领域的起点和各时期研究重点的发展变化<sup>[10]</sup>。因此,本文运用CiteSpace和VOSviewer两种可视化分析软件,从文献计量学的角度对中国知网(China national knowledge infrastructure, CNKI)和Web of Science(WoS)中降温服研究文献进行系统梳理,分析降温服研究领域的研究热点及发展趋势,为降温服后续研究提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 文献来源与检索策略

中文文献来源于CNKI数据库,以主题词= (“降温服”or“冷却服”or“液冷服”or“通风服”or“相变降温服”)进行检索。在检索结果中,中文文献最早发表于1981年,遂设置检索时间为1981年1月1日至2022年12月31日。为了保证数据的可靠

性,去除重复论文、会议通知以及与降温服研究内容不相关的学术文献,用Citespace软件对数据进行降重处理,最终获得有效文献212篇。数据检索时间为2023年3月7日。

英文文献来源于WoS数据库,以主题词= (“cooling suit” or “cooling vest” or “cooling garment” or “PCS” or “personal cooling system”)进行检索,文章类型选取“article” or “review”进行精炼。检索结果中文献的最早发表年份为1958年,遂设置检索时间为1958年1月1日至2022年12月31日。为了保证数据的可靠性,用Citespace软件对数据进行降重处理,最终获得有效文献数量753篇。其中WoS核心合集数据库文献占465篇,时间跨度为2007年1月1日至2022年12月31日。数据检索时间为2023年3月7日。

### 1.2 研究方法

采用CiteSpace和VOSviewer软件对检索得到的降温服领域文献绘制可视化图谱并分析。CiteSpace是由陈超美团队开发的一款文献计量分析软件,能够对所研究领域的发文量、国家、作者、机构、关键词等进行共现、自动聚类 and 关键词突现等可视化分析,在探究相关领域发展的热点、前沿和趋势等方面具有很大优势<sup>[11]</sup>。VOSviewer是由荷兰莱顿大学的研究人员开发的另一款文献分析可视化软件<sup>[12]</sup>。与CiteSpace相比,VOSviewer绘制的关键词和作者共现图谱能更清晰地展现各时期研究热点的变化及作者合作关系。因此,本文采用CiteSpace软件对年发文量、国家、关键词(聚类、突现)进行分析,采用VOSviewer软件进行关键词和作者共现分析,最后利用Origin 2022软件处理数据并绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 年发文量及国家共现分析

通过分析降温服研究领域的年发文量及其变化趋势可以直观得出该领域各时期的发展态势,进而分析该领域的发展现状和未来发展趋势,图1为中英文文献的年发文量。从总体看,中文年均发文量

为 5.05 篇,英文年均发文量为 11.58 篇,中英文数据库中降温服领域的发文量均呈现出持续增长的趋

势,国内外对于降温服的研究仍保持着较高的研究热度。

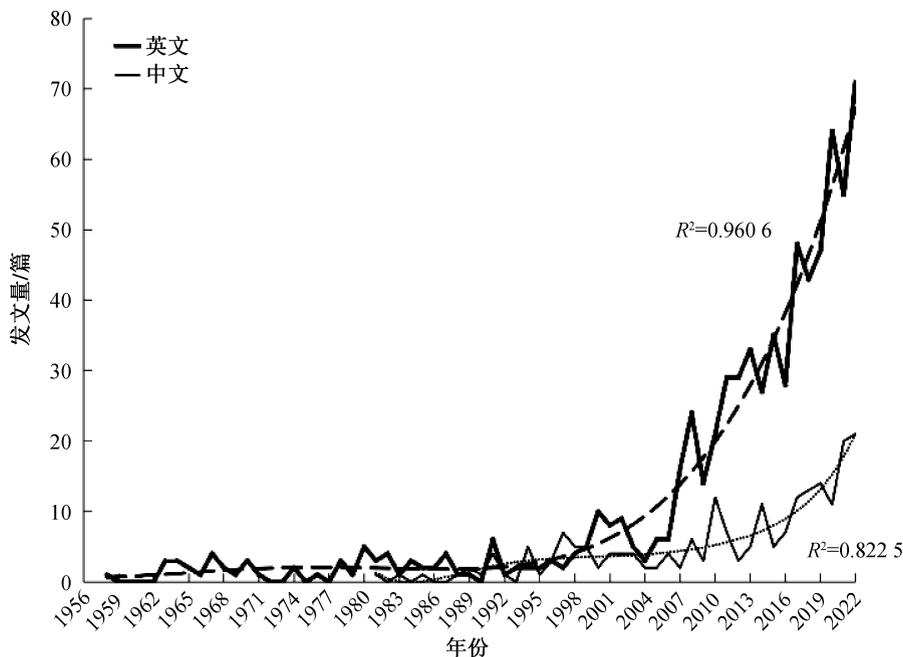


图1 年发文量趋势图

从图1可见,从年份上来看,有关降温服的研究在1958年首次出现在英文期刊上,“管道液冷服”的概念由 Billingham<sup>[13]</sup>首次提出,降温服的研究由此展开;而中文期刊中关于降温服的研究首次发表时间为1981年,明显晚于英文期刊。2006年之前,英文发文量和中文发文量均呈波动式增长,1958—2006年英文年均发文量为2.61篇,1981—2006年中文年均发文量为2.31篇,此时期降温服领域的研究尚处于萌芽时期,以摸索为主。该阶段学者们主要研究降温服在航空航天领域的应用且液冷型降温服为该阶段研究重点<sup>[15-17]</sup>,在阿波罗计划中,手动式管道液冷服就为保持宇航员们个体热量的平衡起到了很大的作用<sup>[14]</sup>。2006年后,中英文年均发文量明显增加,分别为9.50篇和36.50篇,说明该领域研究保持着较高的热度,且中英文期刊的刊文量差距进一步拉大。近二十年来,随着工业化和科技的发展,降温服逐渐应用到工业、医疗服务和消防活动中来,相变式和通风式的降温服也开始频繁应用<sup>[18-20]</sup>,并且随着环保意识的提高、节能减排的倡导以及全球夏季温度的升高,应用于室内个体冷却的降温服<sup>[21]</sup>的研究热度增大。

分析 WoS 数据库各国家 2007—2022 年间总发文量,结果见图 2。从图 2 可知:共有 55 个国家参与研究,总发文量排名前五的国家依次为中国(122 篇)、美国(116 篇)、英国(37 篇)、加拿大(25 篇)、澳

大利亚(24 篇),其中美国、英格兰和加拿大对降温服的研究较早,且美国的影响力最广。美国年发文量呈波动式增长,而此时期,中国年发文量总体呈持续增长,这说明虽然中国在降温服领域的研究起步相对较晚,但近年来年发文量持续增长,显示出较强劲的发展势头。同时,中国的研究成果在国内外的影响力也在不断扩大,为全球降温服领域的发展做出了重要贡献。

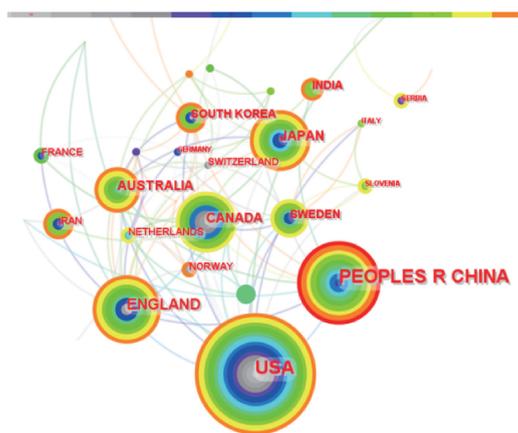
## 2.2 研究作者分析

通过分析文献作者的合作关系可进一步了解降温服领域内研究学者和团队的合作状况,从而分析得到该领域的主要研究方向及重点。研究者某一时期的某领域发表论文的数量即为发文量,是一项衡量研究者对该领域贡献大小的重要指标,根据普赖斯定律<sup>[22]</sup>,核心著者至少发表论文数  $M=0.749 \times (N_{\max})^{1/2}$  ( $N_{\max}$  为最高作者发文数量),计算得出英文中  $M \approx 4$ ,故发文量  $\geq 4$  篇即为英文中降温服领域的核心作者,共 64 位;中文中  $M=2.247$ ,故发文量  $\geq 2.247$  篇即为中文中该领域的核心作者,共 50 位。

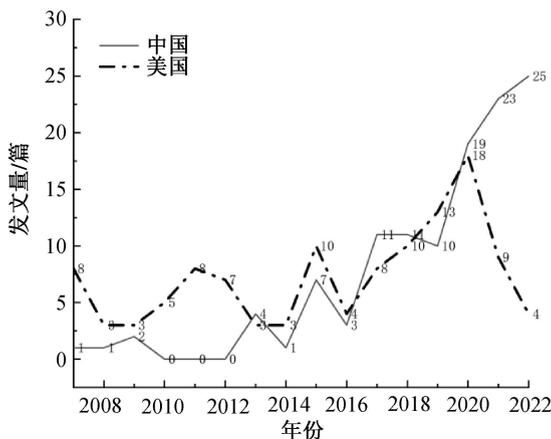
表 1 和图 3(a)显示:英文文献中该领域的研究人员主要为中国学者,主要合作团队有 6 个,其中以 Wang Faming(王发明)、Ke Ying(柯莹)为代表的团队和以 Li Jun(李军)、Gao Chuansi(高传思)为代表的团队发文量最多且合作较紧密,以 Fan

Shanhui(范山辉)、Hsu Po-Chun 为代表的团队和以 Li Wei(李伟)、Zhang Xingxiang(张兴祥)为代表的团队也有着密切合作; Wang Faming(王发明)团队主要研究通风型降温服中风扇通风流速、风扇放置位置、服装孔眼设计对躯干冷却和热舒适度的影响<sup>[23-24]</sup>以及环境温度和相对湿度、风扇控制方式对混合型降温服(结合相变材料和风扇)冷却性能的影响<sup>[25-26]</sup>, Wang Faming(王发明)、Ke Ying(柯莹)、Ma Zhihao(马志浩)等还研究了辐射冷却类纺织品的热舒适性<sup>[27]</sup>并构建了综合热舒适节能评价模型,探讨了皮肤与服装之间的气隙厚度对该类纺织品热

舒适性和节能性的影响<sup>[28]</sup>; Fan Shanhui(范山辉)和 Li Wei(李伟)团队主要研发新型日间辐射冷却纺织品,该纺织品可反射超过 90% 的太阳辐射并选择性地透过人体热辐射,具有卓越的被动冷却能力<sup>[29]</sup>;此外, Li Wei(李伟)团队还制备了一种可逆的热致变色微相变材料,在可穿戴温度传感器和智能调温方面的应用具有广阔的应用前景<sup>[30]</sup>; Ghaddar Nesreen 团队<sup>[31-32]</sup>主要研究蒸发冷却服和相变降温服, Dabrowska Anna 团队<sup>[33-34]</sup>在热电制冷、相变材料、液冷服、智能调温领域贡献了较多的发文量,但两者与其他团队合作均比较松散。



(a) 国家共现分析图



(b) 中国、美国发文量

图 2 2007—2022 年发表降温服相关文献的国家共现分析图及中国、美国发文量趋势图

表 1 WoS、CNKI 数据库中降温服研究领域发文量前 10 的作者

序号	英文文献		中文文献	
	姓名	发文量/篇	姓名	发文量/篇
1	Wang Faming	24	周孟颖	9
2	Li Jun	13	梁国治	9
3	Gao Chuansi	10	刘何清	8
4	Ghaddar Nesreen	9	张奋奋	8
5	Ghali Kamel	9	钱晓明	8
6	Dabrowska Anna	9	游波	7
7	Fan Jintu	9	赵蒙蒙	7
8	Li Wei	8	刘长明	7
9	Bartkowiak Grazyna	8	冯立品	5
10	Fan Shanhui	7	柯莹	5

由表 1 和图 3(b) 可知:整体上看中文文献降温服领域的作者合作关系并不紧密,以小团队内部合作为主,主要有 6 个合作团队,以梁国治和周孟颖为代表的团队<sup>[35]</sup>主要探讨矿用降温服的工作原理及设计方案,对相变蓄冷材料制备及在煤矿中的应用进行研究,并对矿用降温服的热舒适性进行理论研究和现场试验;以刘何清和游波为代表的团队<sup>[36]</sup>主要研究矿

用通风服微空间传热特征,探讨管道通风服对着装人体的局部降温效果;以赵蒙蒙为代表的团队<sup>[37-38]</sup>主要对微型风扇型通风服进行研发与测评,并探讨了服装开口方式和风扇风速对通风服衣下空气层的体积、厚度及分布的影响;以钱晓明为代表的团队<sup>[39]</sup>为解决消防服厚重多层的结构带来的热应力问题,设计液冷式降温服来缓解消防员的热应激反应;刘长明团队<sup>[40]</sup>和袁修干团队<sup>[41]</sup>研究降温服对于飞行员的防护作用,为航天服降温服设计提供了依据。

### 2.3 高被引论文分析

对所研究领域进行文献高被引分析可以挖掘该领域的研究热点。由总被引频次,得到英文文献中高被引 TOP10 文献见表 2,前 5 名高被引论文均集中于开发对中红外人体辐射(主要波长为 7~14  $\mu\text{m}$ )透明但对可见光不透明的织物(Infrared-Transparent visible-opaque fabric, ITVOF)来对人体进行辐射冷却。Hsu Po-Chun 等<sup>[42]</sup>、Cai Lili 等<sup>[29]</sup>和 Tong Jonathan K 等<sup>[43]</sup>均对具有低红外吸收率的聚乙烯材料进行了改进,用这种材料加工后的纺织品可反射超过 90% 的太阳辐射并选择性地

透过人体热辐射,以使白天高温条件下皮肤温度降低。Liu Hui 等<sup>[44]</sup>设计的超织物中具有随机分散的分层形态,该超织物在大气窗口(8~13  $\mu\text{m}$ )可以提供高发射率(94.5%),在太阳光波段(0.2~2.5  $\mu\text{m}$ )中可以提供高反射率(92.4%),具有优秀的辐射冷却能力。Hu Run 等<sup>[45]</sup>强调了 ITVOF 对于个人热管理技术与辐射冷却结合的重要性,并介绍了可穿戴加热器,柔性热电器件和汗液管理 Janus 纺织品。6~10 名高被引论文大部分集中于

研究相变材料降温服在高温环境下对人体的冷却效果。Gao Chuansi、Hsu Po-Chun 等<sup>[46-48]</sup>研究得出相变材料(PCM)背心的冷却速率与 PCM 的熔化温度呈正相关。在炎热气候中使用 PCM 背心时,建议所需的温度梯度大于 6  $^{\circ}\text{C}$ ,且在相同的温度梯度下,覆盖面积是决定相变材料冷却速率的主要因素,而冷却效果的持续时间取决于 PCM 的质量和潜热。从高被引论文可以得出,目前关于降温服的研究主要集中于被动辐射冷却纺织品以及相变材料降温。

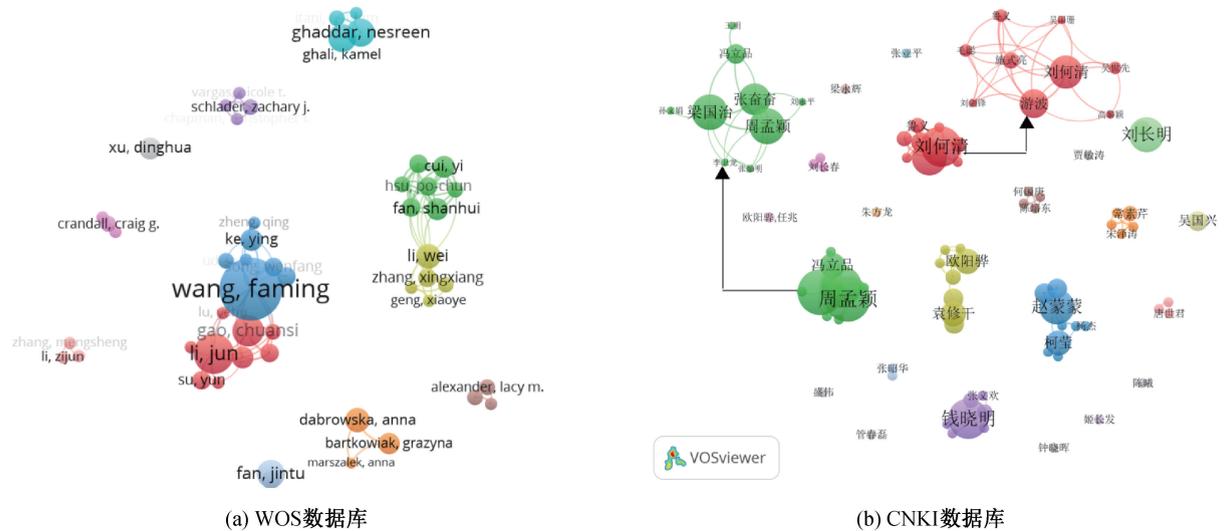


图 3 降温服研究作者共现图谱

中文文献中高被引 TOP10 的文献见表 3。中文高被引论文大部分集中于研究降温服在医疗、消防和煤矿开采上的应用,且通常为相变材料降温服<sup>[49-51]</sup>。分析高被引论文的异同点可知,相变材料型降温服是中英文热门的研究对象;与英文文献相比,目前中文文献中对辐射制冷纺织品的研究较少,主要集中于用改性的二氧化硅粒子涂覆于织物得到优异的辐射制冷面料<sup>[52-53]</sup>或用纺丝技术将二氧化硅等无机粉体与高分子基体材料复合,直接制备具有优异辐射制冷性能纤维<sup>[54]</sup>。

## 2.4 研究热点分析

### 2.4.1 关键词共现及突现分析

关键词是一篇文献的精准提炼,对关键词的研究可以准确地把握该领域的研究重点及重点演变趋势<sup>[55]</sup>。中英文关键词共现图如图 4 所示,可得中英文对降温服的研究重点均是从液冷服、航天服、抗荷服逐渐过渡到矿井热害防护服、通风服、相变材料降温服的趋势流向,目前中文研究的关键词主要聚焦于传热模型和数值模拟<sup>[56-57]</sup>,英文则集中于辐射制冷型纺织品的开发。

关键词突现分析可得到该领域某一阶段急剧增

加的关键词,可进一步预测前沿热点。对 WoS 筛选出的文献进行突现分析,得到 16 个突现词及其突现强度如图 5(a)所示。从图 5(a)中可看到 2012 年前的突现词主要集中于探讨高温环境对于人体机体造成的血流速度、心率、温度等生理反应;近十年(2012—2022 年)的突现词向热模型、相变材料、辐射制冷方向倾斜,如“protective clothing(防护服)”“thermal mannequin(热模型)”“thermoregulation(体温调节)”“design(设计)”“stress(压力)”“phase change(相变)”“ventilation system(通风系统)”“personal thermal management(个人热管理)”“radiative cooling(辐射制冷)。其中,热模型的建立可评估降温服性能,预测降温服对高温作业人员的热舒适度和防护性能,对于指导降温服的设计开发,推动降温服的发展有着基础性的作用。目前在纺织服装领域应用最多的热调节模型为 Gagge 开发的两节点简化模型<sup>[58]</sup>。热调节模型的应用,使得“人体-服装-环境”系统、热湿传递、衣下空气层得到广泛关注<sup>[59]</sup>。相变材料、通风系统和辐射制冷纺织品因其便携环保性和高冷却的性能已成为目前降温服领域的重点研究方向。

表2 WoS 数据库中被引频次前 10 的文献

序号	作者	发表年份	被引频次	题目	期刊名称	影响因子
1	Hsu Po-Chun	2016	638	Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile(纳米多孔聚乙烯纺织品辐射人体降温)	Science	56.9
2	Cai Lili	2018	308	Spectrally Selective Nanocomposite Textile for Outdoor Personal Cooling(用于户外个体冷却的光谱选择性纳米复合纺织品)	Advanced Materials	29.4
3	Liu Hui	2021	268	Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling(用于可扩展的被动日间辐射冷却的分层形态超织物)	Science	56.9
4	Hu Run	2020	219	Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management(个人热管理的新材料和策略)	Advanced Energy Materials	27.8
5	Tong Jonathan K	2015	211	Infrared-Transparent Visible-Opaque Fabrics for Wearable Personal Thermal Management (用于可穿戴个人热管理的高透过率红外不透明织物)	Acs Photonics	7
6	Gao Chuansi	2012	122	Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective(使用相变材料进行个人冷却,提高高温气候下热舒适度)	Indoor Air	5.8
7	Gao Chuansi	2011	111	Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment(采用相变材料的冷却背心:熔化温度对极热环境下热应变缓解的影响)	European Journal of Applied Physiology	3
8	Yazdi Motahareh Mokhtari	2014	115	Personal cooling garments: a review(个人降温服:综述)	Journal of The Textile Institute	1.7
9	Zhao Mengmeng	2013	104	A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites(在不同躯干部位放置通风风扇和开口的服装局部冷却研究)	International Journal of Industrial Ergonomics	3.1
10	Gao Chuansi	2010	102	Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area(带相变材料包的冷却背心:温度梯度、质量和覆盖面积的影响)	Ergonomics	2.4

对 CNKI 筛选出的文献进行突现分析,得到 22 个突现词及其突现强度如图 5(b)所示。从图 5(b)中可看到 2000 年前的突现词主要集中于航空航天和军事领域,如“航天服”“生保系统”“防护服”“液冷服”“通风服”“飞行员”“抗荷服”“热负荷”“出舱活动”“舱外活动”“通风”,航空环境对飞行员的影响一直是航空医学界共同关注的热点<sup>[60]</sup>,航天服是航天出舱活动生存和执行任务的基本装备,热防护系统是舱外航天服的重要功能组成<sup>[61]</sup>。并且随着中国科技和军事实力的提升,飞行员和军事人员的热防

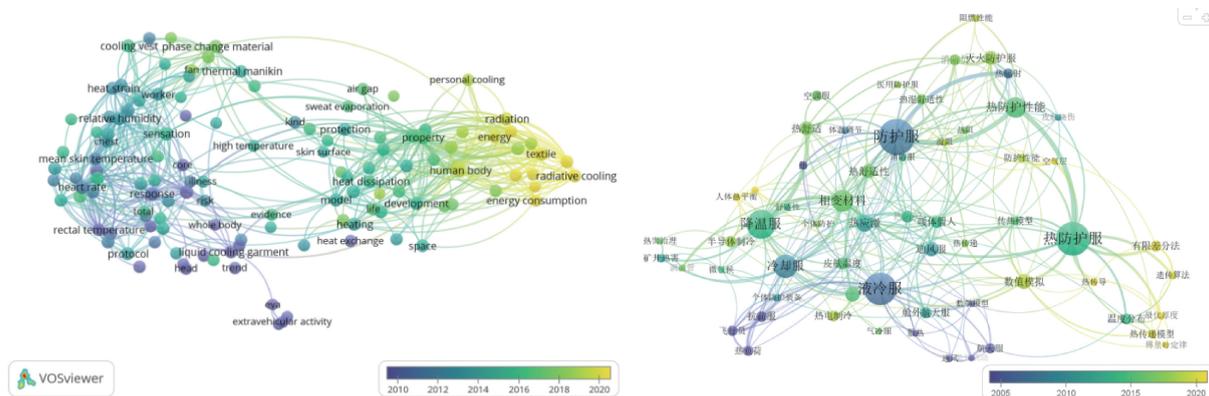
护也得到了加强。2000 年后的突现词主要集中于煤矿开发、消防等领域,且相变蓄冷降温服的研究热度持续升温,如“气闸舱”“热应激”“冷却服”“相变温度”“煤矿”“降温服”“消防服”“蓄冷材料”“相变潜热”“皮肤温度”“热舒适”。中国拥有丰富的煤矿资源,但目前随着浅部煤炭资源的消耗殆尽,深部煤炭资源成为了中国主体能源,深部矿井开采带来的热害问题凸显,严重影响了工作人员的健康和工作效率,亟待解决<sup>[62]</sup>。同时中国火灾事故频发,情况不容乐观,消防员是消防救援工作中的核心力量,常处

于高温高湿高热的火场环境中,降温服对于缓解消防人员的热应激和保护消防人员的安全有着至关重要的作用。相变材料因其质量轻、易于服装结

合、温度可调的特点,在消防服中已有广泛应用,相变材料的蓄热调温功能也是消防服领域目前的研究焦点之一<sup>[63]</sup>。

表 3 CNKI 数据库中被引频次前 10 的文献

序号	作者	发表年份	被引频次	题目	期刊名称	综合影响因子
1	张寅平	2003	85	医用降温服热性能与应用效果研究	暖通空调	0.678
2	张冬霞	2007	71	相变材料在调温服装中的应用	针织工业	0.821
3	黄颖华	2006	53	高温矿井降温技术研究动态	安全与健康	0.100
4	亓玉栋	2014	49	我国煤矿高温热害防治技术现状综述与进展	煤矿安全	1.106
5	韩增旺	2009	45	国内外冷却服的发展现状及关键技术	中国个体防护装备	0.206
6	朱方龙	2014	44	相变材料在消防服中的应用及可行性分析	纺织学报	1.325
7	朱方龙	2011	35	附加相变材料层的热防护服传热数值模拟	应用基础与工程科学学报	0.992
8	李利娜	2008	30	冷却服装的发展现状及应用	中国个体防护装备	0.206
9	张万欣	2001	30	利用暖体假人对液冷服散热特性的实验研究分析	航天医学与医学工程	0.521
10	盛伟	2003	26	人体降温服在矿井热环境中的应用综述	中国安全生产科学技术	1.348

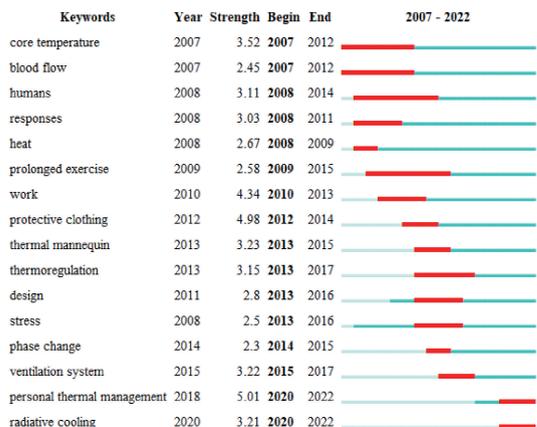


(a) WoS数据库

(b) CNKI数据库

图 4 降温服研究关键词共现图

Top 16 Keywords with the Strongest Citation Bursts



(a) WoS数据库

Top 22 Keywords with the Strongest Citation Bursts



(b) CNKI数据库

图 5 降温服领域研究突现词

2.4.2 关键词聚类分析

关键词聚类可对研究热点进行归纳总结,利用 CiteSpace 软件,以 LLR 对数似然比聚类算法分别

对英文和中文文献的关键词进行聚类分析,图 6 为降温服领域关键词聚类图,英文文献和中文文献分别形成了 11 个和 9 个聚类。WoS 中模块聚类  $Q =$

0.5164 ( $> 0.3$ ), 聚类平均轮廓值  $S = 0.7994$  ( $> 0.7$ ); CNKI 中模块聚类  $Q = 0.6823$  ( $> 0.3$ ), 聚

类平均轮廓值  $S = 0.9156$  ( $> 0.7$ ); 说明本次聚类结构显著, 内部同质性较高, 聚类合理。

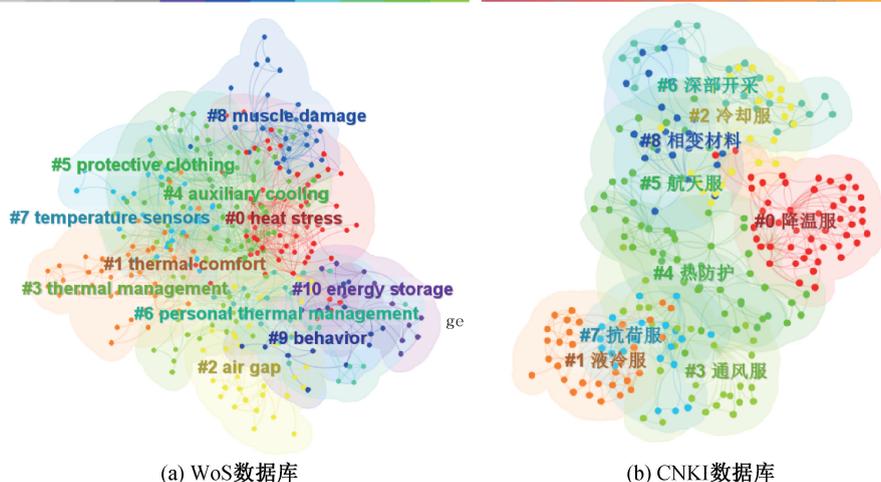


图6 降温服领域关键词聚类图

WoS 中降温服领域关键词聚类图如图 6(a) 所示。由图谱信息和各聚类成员信息, 大致可分为 4 个研究方向: a) 降温服热湿舒适性及缓解热应变的能力 (#0 Heat Stress 热应力、#1 Thermal Comfort 热舒适、#8 Muscle Damage 肌肉损伤和 #9 Behavior 行为); b) 个人热管理技术 (#3 Thermal Management 热管理、#4 Auxiliary Cooling 辅助冷却、#5 Protective Clothing 防护服和 #6 Personal Thermal Management 个人热管理), 采用服装来对机体散热量进行调控, 不仅可以实现体温调节, 在降低建筑能耗和满足个人热舒适方面也有着巨大的潜力<sup>[64]</sup>; c) 围绕目前常用的两种防护服—通风型降温服和相变型降温服展开研究 (#2 Air Gap 空隙、#10 Energy Storage 蓄能)。通风型降温服研究主要集中在通风风速, 风扇位置和服装开口位置的研究<sup>[23-24]</sup>。相变型降温服研究主要聚焦于延长相变材料的冷却时间, 更好地实现相变材料与纺织品服装的结合; d) 智能调温技术 (#7 Temperature Sensors 温度传感器), 随着传感器和可穿戴技术的发展, 智能调温服装应运而生。Li Wei(李伟)团队制备了一系列含有微纳封装相变材料的简单柔性可逆热致变色膜, 并以此膜设计制备了一种简易的温度色度计, 可作为一种很有前途的可穿戴温度传感器, 在热调节、储能和可穿戴温度传感器方面的应用具有广阔的应用前景<sup>[65]</sup>。温度传感器作为智能调节的重要部分, 可对“人-服装-环境”的温度参数进行监控和传输, 以保证系统可根据此参数来发出调控指令, 进而实现机体的降温<sup>[66]</sup>。

CNKI 中降温服领域关键词聚类图如图 6(b)

所示。由图谱信息和各聚类成员信息, 大致可分为 3 个研究方向: a) 降温服热湿舒适性、降温材料、冷却方式 (#0 降温服、#1 液冷服、#2 冷却服、#3 通风服、#8 相变材料)。其中液冷服聚类成员数最多, 出现最早, 常应用于航空航天领域, 如降低宇航员出舱活动中的热应激反应; b) 航空航天用降温服 (#5 航天服、#7 抗荷服)。降温服最早是飞行员的一种个体防护装备, 用来降低飞行员舱外活动时的热负荷; c) 工业用降温服 (#4 热防护、#6 深部开采)。经过长期的发展, 降温服的应用场景也更加多元, 目前消防工作和矿井作业中已经广泛使用降温服来进行热防护, 降低高温及深井热害对机体的影响。

通过比较中英文文献的核心关键词聚类可知, 缓解人体高温环境下热应变的能力以及热湿舒适性是降温服研究的重点之一。在降温服的种类上, 中英文均关注较多的有液冷服、通风型降温服和相变型降温服。目前英文侧重于研究智能型降温服, 而中文则侧重于开发工业用降温服, 对于智能降温服的研究有待进一步加强。

### 3 结论与展望

本文利用文献计量法, 在中国知网、WoS 数据库选择了 965 篇文献, 运用 CiteSpace 和 VOSviewer 软件对这些文献进行了量化研究与可视化分析, 分析了年发文量、国家发文量、作者合作图谱、关键词(共现及聚类)、突现词等, 主要得到以下结论:

a) 降温服研究领域的发文量呈逐年上升趋势, 中国发文量增长趋势最快, WoS 数据库中 2007—

2022年间中国的总发文量已位居全球第一。

b)从作者合作网络圈来看,英文文献作者中以Wang Faming(王发明)、Ke Ying(柯莹)为代表的团队和以Li Jun(李军)、Gao Chuansi(高传思)为代表的团队合作较密切,主要研发通风型和混合型降温服且对辐射制冷纺织品也有一定的研究;Fan Shanhui(范山辉)、Hsu Po-Chun(许宝俊)为代表的团队和以Li Wei(李伟)、Zhang Xingxiang(张兴祥)为代表的团队合作关系较为密切,主要研发辐射制冷型纺织品。中文文献作者团队间合作相对较不紧密,以小团队内部合作为主,主要有6个合作团队,研究侧重于降温服在煤矿开采、消防和日常生活中的应用。

c)从高被引论文分析结果看,英文文献中降温服研究主要集中于辐射冷却技术的应用,中文文献中降温服研究主要集中于医疗、消防和矿业用降温服的开发,而相变材料制冷为目前中英文文献的共同研究热点。目前中文期刊需要加强对辐射制冷纺织品研究的重视,辐射冷却技术节能且环保,在降温服领域有着巨大的发展潜力。

d)从关键词分析结果看,在不同时期,降温服关注的研究重点不同。前期研究均侧重于军事和航空航天领域和液体降温服的开发,中期研究侧重于将降温服应用于工业和医学领域,此时通风型降温服和相变型降温服的研究增多。目前的研究重心向相变材料、数值模拟、辐射冷却、智能调温倾斜,适用于日常生活的降温服成为研究者的研究重点。

根据以上结论,降温服未来的发展关键主要在于:

a)新型降温技术和材料的开发。目前传统降温服大多存在便携性能差、续航时间短,不适用于变化的热环境,与服装结合性弱和舒适性差的问题,急需开发新型的降温材料和技术以解决。例如,装备有相变材料层的消防服遇到过强的火场热流量冲击时,相变材料不能及时发生吸热相变反应,从而使人体皮肤烧伤,因此需要研发可与外界高温环境的蓄热效率高,可快速突变的相变材料。同时,随着环境温度的升高,相变材料的持续时间呈指数式下降,开发高蓄热能力、可长时间续航的相变材料也是未来的研究趋势之一。除了相变材料,目前辐射制冷纺织品的研究热度也在不断上升。辐射制冷纺织品具有环保和节能的优点,可利用太空中的辐射来达到制冷效果并且不消耗任何能源,符合可持续发展 and 低碳生活的理念。此外辐射制冷的纺织品通常

使用轻质的纺织材料制成,方便携带,穿着舒适性较好,适合夏季日常户外活动等场合。辐射冷却纺织品是目前英文降温服文献的研究热点之一,但目前中文文献中此类纺织品研究较缺乏,研究力度需要加强。

b)降温服智能化升级。随着2014年德国提出未来纺织计划(future TEX),智能纺织品的研究热度在不断上升。并且随着传感器和可穿戴技术的完善和物联网、人工智能等技术的发展,降温服可实现更多的智能化功能。例如,在降温服中设计智能控制模块,通过集成传感器和算法来实时监测环境温度和用户生理参数,自动调整降温策略,在不同的应用场景具有不同的功能侧重,可提供更加个性化的穿着体验。在降温服中集成高温预警、智能定位模块,可避免使用者产生高温热应激反应且实时定位使用者位置,在深部开采和火场救援中具有重要意义。智能纺织品中能源供给问题也是研究重点之一,目前已有学者研发出可将机械能转化成电能的摩擦纳米发电机(TENG),它可以灵活地附着在身体不同位置,将生物力学能转化为电能,实现电输出,是集成于智能降温服中替代外部电源的理想材料。推动智能降温服的开发也可促进我国传统产业升级。在《中国制造2025》报告中,“智能制造”一词被多次提及,在我国颁布的“十二五”和“十四五”规划中,智能制造已经成为目前和未来的主要发展方向,推动降温服智能化的升级可加快我国由制造大国转向制造强国的进程。

## 参考文献:

- [1] 陈莹, 宋泽涛, 郑晓慧, 等. 蒸发型降温服的降温性能研究[J]. 纺织学报, 2022, 43(11): 141-147.
- [2] 崔彦. 智能形变调温服装设计及其舒适性测评研究[D]. 上海: 东华大学, 2021: 38-39.
- [3] 何骞. 基于相变材料的个体冷却服及其降温性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018: 4-6.
- [4] 舒伟程. 便携式液冷服系统设计及其热舒适性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 3-6.
- [5] 周觅, 钱晓明, 黄顺伟. 冷却服发展进展[J]. 纺织科技进展, 2017(2): 1-5.
- [6] 刘钊, 蔡闻佳, 罗勇, 等. “柳叶刀倒计时: 人群健康与气候变化”2020年度报告解读[J]. 科技导报, 2021, 39(19): 24-31.
- [7] 党天华, 赵蒙蒙, 钱静. 降温服的研究现状及应用前景[J]. 毛纺科技, 2021, 49(6): 95-100.
- [8] 柯莹, 张海棠. 降温服的研究现状及发展趋势[J]. 服装

- 学报, 2020, 5(1): 40-46.
- [9] 姜茸凡, 梁建芳. 夏季户外作业人群的主动式降温服的研究进展[J]. 纺织高校基础科学学报, 2023, 36(2): 29-35.
- [10] 袁东彤, 张桥云, 顾瑞涛, 等. 金融科技的知识图谱分析-基于大数据与文献计量的视角[J]. 产业经济评论, 2022(6): 153-171.
- [11] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [12] 高凯. 文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究[J]. 科技情报开发与经济, 2015(12): 95-98.
- [13] Billingham J. Heat exchange between man and his environment on the surface of the moon[J]. British Interplanetary Society, 1959, 17: 297-300.
- [14] Chambers A B. Controlling thermal comfort in the EVA space suit[J]. Ashrae Journal, 1970, 12: 33-38.
- [15] 赵朝义, 孙金镖, 袁修干. 舱外航天服温控系统的研究现状与展望[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(2): 74-78.
- [16] 邱义芬, 袁修干, 梅志光, 等. 舱外航天液冷服传热分析[J]. 航天医学与医学工程, 2001, 14(5): 364-367.
- [17] 欧阳骅, 任兆生. 从 BKK-15K 一体化飞行防护服看抗高过载综合措施[J]. 中华航空航天医学杂志, 1999, 10(2): 46.
- [18] Featherstone G. Development and use of an air-cooled suit for work in nuclear reactors [J]. Ergonomics, 1988, 31(7): 1025-1029.
- [19] Nishihara N, Tanabe S I, Hayama H, et al. A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment[J]. Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science, 2002, 21(1): 75-82.
- [20] 朱晓荣, 何佳臻, 王敏. 相变材料在热防护服上的应用研究进展[J]. 纺织学报, 2022, 43(4): 194-202.
- [21] Song W F, Wang F M, Wei F R. Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment [J]. Building and Environment, 2016, 100: 92-101.
- [22] 宗淑萍. 基于普赖斯定律和综合指数法的核心著者测评-以《中国科技期刊研究》为例[J]. 中国科技期刊研究, 2016, 27(12): 1310-1314.
- [23] Zhao M M, Yang J, Wang F M, et al. The cooling performance of forced air ventilation garments in a warm environment: the effect of clothing eyelet designs [J]. The Journal of the Textile Institute, 2023, 114(3): 378-387.
- [24] Zhao M M, Wang F M, Gao C S, et al. The effect of flow rate of a Short Sleeve Air Ventilation Garment on Torso Thermal Comfort in a Moderate Environment [J]. Fibers And Polymers, 2022, 23(2): 546-553.
- [25] Xu P J, Kang Z X, Wang F M, et al. A numerical analysis of the cooling performance of a hybrid personal cooling system (HPCS): Effects of ambient temperature and relative humidity [J]. International Journal Of Environmental Research And Public Health, 2020, 17(14): 4995.
- [26] Wang F M, Ke Y, Udayraj, et al. Effect of cooling strategies on overall performance of a hybrid personal cooling system incorporated with phase change materials (PCMs) and electric fans [J]. Journal of Thermal Biology, 2020, 92: 102655.
- [27] Ke Y, Wang F M, Xu P J, et al. On the use of a novel nanoporous polyethylene (nanoPE) passive cooling material for personal thermal comfort management under uniform indoor environments[J]. Building and Environment, 2018, 145: 85-95.
- [28] Ma Z H, Zhao D L, Wang F M, et al. A novel thermal comfort and energy saving evaluation model for radiative cooling and heating textiles[J]. Energy And Buildings, 2022, 258: 111842.
- [29] Cai L L, Song A Y, Li W, et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling[J]. Advanced Materials, 2018, 30(35): e1802152.
- [30] Geng X Y, Gao Y, Wang N, et al. Intelligent adjustment of light-to-thermal energy conversion efficiency of thermo-regulated fabric containing reversible thermochromic MicroPCMs [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 408: 127276.
- [31] El Loubani M, Ghaddar N, Ghali K, et al. Hybrid cooling system integrating PCM-desiccant dehumidification and personal evaporative cooling for hot and humid climates [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101580.
- [32] Itani M, Bachnak R, Ghaddar N, et al. Evaluating performance of hybrid PCM-fan and hybrid PCM-desiccant vests in moderate and hot climates [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 383-396.
- [33] Dąbrowska A, Kobus M, Starzak Ł, et al. Evaluation of performance and power consumption of a thermoelectric module-based personal cooling system-A case study[J]. Energies, 2023, 16(12): 4699.
- [34] Młynarczyk M, Bartkowiak G, Dąbrowska A. Cooling effect of phase change materials applied in undergarments of mine rescuers in simulated utility conditions on thermal manikin[J]. Materials, 2022, 15(6): 1999.
- [35] 梁国治, 周孟颖, 张奋奋. 矿用高分子蓄冷材料降温服的研发[J]. 能源技术与管理, 2016, 41(3): 102-103.
- [36] 游波, 毛聪, 施式亮, 等. 管路结构对矿用通风服微气

- 候的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 195-204.
- [37] 党天华, 赵蒙蒙, 钱静. 基于微型风扇阵列的通风服研发与测评[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(4): 214-221, 229.
- [38] 钱静, 赵蒙蒙, 党天华. 多孔式通风服衣下空气层的定量研究[J]. 纺织学报, 2022, 43(4): 133-139.
- [39] 牛丽, 钱晓明, 范金土, 等. 可降温式消防服的设计与降温效果评价[J]. 纺织学报, 2018, 39(6): 106-112.
- [40] 朱铮, 刘长明. 人体热状况和极端温度条件下飞行员的防护装备[J]. 中国个体防护装备, 2019(3): 7-10.
- [41] 郭新梅, 杨春信, 袁修干. 气冷式个体热防护系统关键技术分析[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(4): 262-266.
- [42] Hsu P C, Song A Y, Catrysse P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile [J]. Science, 2016, 353(6303): 1019-1023.
- [43] Tong J K, Huang X P, Boriskina S V, et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management[J]. ACS Photonics, 2015, 2(6): 769-778.
- [44] Zeng S, Pian S, Su M, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling [J]. Science, 2021, 373(6555): 692-696.
- [45] Hu R, Liu Y D, Shin S, et al. Emerging materials and strategies for personal thermal management [J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(17): 1903921.
- [46] Gao C, Kuklane K, Wang F, et al. Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective[J]. Indoor Air, 2012, 22(6): 523-530.
- [47] Gao C S, Kuklane K, Holmér I. Cooling vests with phase change materials; the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment [J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(6): 1207-1216.
- [48] Gao C S, Kuklane K, Holmér I. Cooling vests with phase change material packs; the effects of temperature gradient, mass and covering area [J]. Ergonomics, 2010, 53(5): 716-723.
- [49] 张寅平, 王馨, 朱颖心, 等. 医用降温服热性能与应用效果研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(U06): 58-61.
- [50] 张冬霞, 郭凤芝. 相变材料在调温服装中的应用[J]. 针织工业, 2007(3): 28-31.
- [51] 亓玉栋, 程卫民, 于岩斌, 等. 我国煤矿高温热害防治技术现状综述与进展[J]. 煤矿安全, 2014, 45(3): 167-170, 174.
- [52] 张迅, 钟申洁, 张佳文, 等. 具有日间被动辐射制冷功能的超疏水锦纶6织物的制备及性能研究[J]. 丝绸, 2022, 59(2): 31-39.
- [53] 潘毕成, 张佳文, 杨孝全, 等. 被动式日间辐射制冷超疏水涤纶织物的制备及其性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(1): 55-62.
- [54] 程海鑫. 辐射制冷纤维的制备与应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 26-50.
- [55] 何儒汉, 唐娇, 刘军平, 等. 基于 CiteSpace 的全球纺织服装研究热点及其趋势文献计量分析[J]. 毛纺科技, 2020, 48(4): 1-6.
- [56] 陈慧臻. 基于 CFD 的人体-防化服-环境系统传热研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2022: 36-62.
- [57] 张美丽. 高温作业专用服装设计的数学模型研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 52-55.
- [58] Apug, Jajus. Effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [J]. ASHRAE Transactions, 1971, 77(1): 247-263.
- [59] 刘珺, 叶超群, 王俊华, 等. 飞行员常见疾病诊断防治和医学鉴定研究文献分析[J]. 空军医学杂志, 2022, 38(2): 161-165.
- [60] 杨冬晖, 李猛, 尚坤. 航天服隔热材料技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(2): 87-96.
- [61] 黄瑶瑶. 矿井制冷降温技术发展综述[J]. 科技与企业, 2016(6): 195.
- [62] 朱方龙, 樊建彬, 冯倩倩, 等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(8): 124-132.
- [63] 吴天宇, 卢业虎. 基于 CiteSpace 的人体热调节模型研究分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2023, 36(2): 1-7.
- [64] Ma Z, Zhao D, She C, et al. Personal thermal management techniques for thermal comfort and building energy saving [J]. Materials Today Physics, 2021, 20: 100465.
- [65] He Y Y, Li W, Han N, et al. Facile flexible reversible thermochromic membranes based on micro/nanoencapsulated phase change materials for wearable temperature sensor [J]. Applied Energy, 2019, 247: 615-629.
- [66] Zhao Y, Liu L Y, Zhang F J, et al. Advances in organic thermoelectric materials and devices for smart applications [J]. SmartMat, 2021, 2(4): 426-445.