室外开放空间中视觉感知对军训大学生热舒适的影响*

杨　斌[1]　白璐婷[1]　李　哲[1]　王俊江[2]

1　天津城建大学能源与安全工程学院　天津　300384
2　天津城建大学体育部　天津　300384

摘要：【目的】研究军训学生视觉感知对热舒适的影响，旨在探究不同训练场地的热舒适差异、阳光感觉和突出色彩对军训大学生热舒适的影响，有助于为校园室外活动空间规划设计提供参考。【方法】采用调查问卷的方式对天津城建大学新生在军训期间的热舒适和视觉感知进行调查和分析，并进行环境参数测量。【结果】74.9%的学生出现一种或多种热症状；休息期间有遮阳可以明显改善受试者的热舒适，平均热舒适投票（MTCV）增加 0.75；冷色（绿色和蓝色）可以显著提高受试者的热可接受性和热舒适度。【结论】军训学生在训练过程中面临着较高的健康风险，而视觉感知对军训学生的热舒适具有显著影响，良好的视觉环境可以明显改善军训学生的热舒适度。

关键词：室外热舒适；室外军训；热症状；视觉感知
DOI：10.12169/zgcsly.2025.02.13.0002

Effects of Visual Perception in Outdoor Open Spaces on Thermal Comfort of University Students Receiving Military Training

Yang Bin[1]　Bai Luting[1]　Li Zhe[1]　Wang Junjiang[2]

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Department of Physical Education, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract:【Objective】The study investigates the effects of visual perception on thermal comfort of university students in military training. It aims to explore the effects of thermal comfort differences, sunlight sensation and prominent colors across the different training sites. The findings are expected to provide valuable references for the planning and design of outdoor activity spaces in university campuses.【Method】During the breaks of military training, freshmen were invited to participate in a questionnaire, and environmental parameters were measured.【Result】74.9% of the students experience one or more types of heat symptoms. Staying in the shade during breaks can significantly improve thermal perception, with an increase of 0.75 in the mean thermal comfort vote (MTCV). Cool colors (green and blue) can significantly enhance thermal acceptability and thermal comfort.【Conclusion】Students receiving military training are confronted with significant health risks during the training process. Visual perception has a substantial effect on the thermal comfort of the students, and a well-designed visual environment can significantly improve their thermal comfort.

Keywords: outdoor thermal comfort; outdoor military training; heat symptom; visual perception

收稿日期：2025-02-13
*基金项目：国家自然科学基金面上项目（52278119）
第一作者：杨斌（1978-），男，博士，教授，研究方向为人体热舒适、通风与气流组织。E-mail：binyang@tcu.edu.cn
通信作者：李哲（1993-），男，博士，讲师，研究方向为人体热舒适。E-mail：lizhe24@tcu.edu.cn
王俊江（1978-），男，硕士，副教授，研究方向为体育教育训练学与运动人体科学。E-mail：junjiangwang@tcu.edu.cn

快速城市化和全球变暖导致室外活动环境的温度升高[1]。在炎热的室外环境中进行活动，人们的生理参数如体温、心率、血压和排汗量增加[2-3]，面临着中暑、热痉挛和热衰竭等疾病的可能性[4]，对健康构成严重的威胁[5]，限制了室外活动的进行[6]。了解室外热舒适状况，正确评价室外环境，是减少健康风险的必要条件。

热舒适是人类在热环境中感到满意的心理状态，并且是身体和心理适应性的主观感知[7-8]。近年来，室外开放空间中影响人员热舒适的因素引起了学者们的广泛关注[9-11]。研究表明，以热环境参数为主的物理因素对人体热舒适的影响最大。此外，视觉感知也对热舒适有一定的影响[12-13]。室外活动人员可以通过调整地点、活动水平、衣物和活动时间来适应室外环境[14-15]。然而，对于从事高代谢率活动的工人[16]、运动员[17]、军事化训练者[18]和其他专业的人员，他们的活动受到诸多限制，可调整范围较小[19]。这部分人员的热舒适性也与一般人群不同[20]，面临着更加严重的健康风险。但是，目前大多数研究主要关注公园和广场等娱乐活动场所，对在室外炎热环境中进行军事化训练人员的热舒适的研究较少。因此，有必要提高对这部分特殊人群热舒适性的关注，保证人员的安全健康。

中国的大学新生在学年伊始，需要统一进行室外军事训练，时间通常在 9 月，我国大部分地区依然炎热潮湿，进行室外训练的学生面临着高温高湿环境带来的健康风险。军训是一种特殊的集体活动，其时间安排、场地选择、活动状态和衣着等受到严格限制，与在公园和广场等区域活动的室外人群存在较大差异。但目前研究对军训学生这种特殊人群的热舒适性关注较少。因此，本研究采用主观问卷的方式，对天津城建大学军训学生的热舒适和视觉感知进行调查和分析，以明确学生在军训过程中面临的健康风险；分析不同军训场地环境条件下，军训学生的热舒适差异；探讨在训练过程中，阳光感觉和突出色彩对军训学生热舒适的影响；对于加强室外空间设计，提高室外活动人员的舒适度，确保室外运动人员的健康安全，保证室外活动的正常进行具有重要意义。

1　研究方法

1.1　试验地点

天津（116°43′—118°04′E，38°34′—40°15′N）位于中国华北平原的东北部，四季分明，夏季炎热潮湿，冬季寒冷干燥。根据 Köppen 气候分类，天津的气候类型属于温带季风气候，年平均气温约 14 ℃，最热月为 7 月，月平均气温为 28 ℃，历史最高气温为 41.6 ℃；最冷月为 1 月，月平均气温为-2 ℃，历史最低温度为-17.8 ℃[21]。根据学生军训和休息的实际情况、训练地点具体的景观元素和有无遮阳，选择天津城建大学 3 类训练地点进行实地研究（图 1、表 1）。

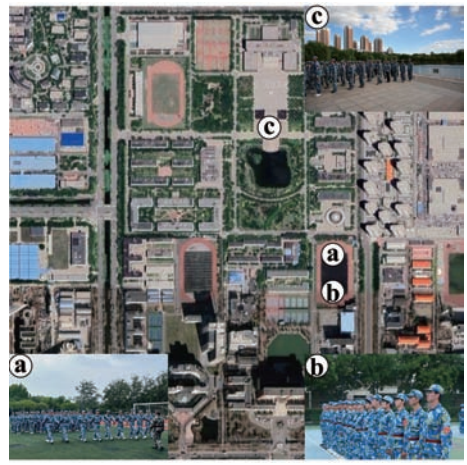


图 1　研究地点

表 1　试验场地描述

名称	地点	面积/ m^2	植物种类	遮阳情况
a	操场	约 6 300	在操场四周主要有毛白杨、国槐、臭椿等	训练和休息区域距离植被较远，无遮阳
b	操场	约 6 300		训练区域无遮阳；休息区域距离植被较近，有遮阳
c	湖边下沉广场	约 4 000	在下沉广场周围主要有垂柳、旱柳、臭椿、鸢尾、千屈菜、芦苇等	训练和休息区域距离植被较远，无遮阳

1.2　试验流程

于 2024 年 9 月 6—13 日的上午 8：00—12：00和下午 2：00—5：00 进行环境参数测量和问卷调查。军训项目主要包括立正、正步走和打

军体拳。在军训过程中，学生们进行约 30 min 的训练后，有约 10 min 的休息时间。由于军训过程不能中断，因此在学生休息期间进行问卷调查，调研流程如图 2 所示。



图 2 调研流程

1.3 环境参数测量

监测的环境参数包括空气温度（T_a）、相对湿度（RH）、黑球温度（T_g）、风速（V_a）、太阳辐射（G）和光照强度（LUX）。在训练区域内，仪器布置在 1.5 m 高度。在休息区域内，仪器布置在 0.6 m 高度（表 2）。每隔 1 min 记录 1 次环境参数，以捕捉环境的实时变化。平均辐射温度（T_{mrt}）由 T_a、T_g和 V_a得出[22]。

表 2 用于测量环境参数的仪器

测量参数	仪器及型号	测量范围	精度	布置高度/m
空气温度	温湿度记录仪 HOBO U12-011	-20~70 ℃	±0.35 ℃	0.6，1.5
相对湿度		5%~95 %RH	±2.5 %RH	0.6，1.5
黑球温度	黑球温度记录仪 RS-HQ-USB	-20~80 ℃	±0.3 ℃	0.6，1.5
风速	万象风速仪 WWFWZY-1	0.05~30 m·s^{-1}	±0.05m·s^{-1}	0.6，1.5
太阳辐射量	太阳辐射仪 JTR05	0~2 000 W·m^{-2}	≤±2 %	0.6，1.5
光照强度	专业级照度计 TES-1339R	0.000 01~999.9 klx	±0.003 klx	0.6，1.5

1.4 问卷调查

在试验过程中，发放电子问卷，受试者通过手机进行填写。所有填写问卷的受试者均为在 3 个研究区域内参与军训的大学新生。在完成问卷之前，所有受试者已在试验现场军训至少 30 min，以适应室外环境。试验共回收 2 217 份问卷，其中有效问卷 1 754 份。调查问卷分为 3 个部分以评估受试者的热舒适和视觉感知：1）个人信息包括性别、年龄、身高、体重、着装、常住城市（居住 3 年以上）、已到天津多长时间、军训和休息时是否处于荫蔽处和情绪状态等信息。2）热舒适信息用于评估不同训练场地中受试者的热舒适情况，包括不同训练场地中受试者的热感觉投票（TSV）、热可接受性投票（TA）和热舒适投票（TCV）。根据 ASHRAE 标准 55-2020 和军训时的天气情况，TSV 采用七分制量表（-3：非常冷；-2：冷；-1：凉爽；0：中性；1：温暖；2：热；3：非常热）。TA 使用五分制量表（-2：非常不可接受；-1：不可接受；0：中性；1：可接受；2：非常可接受）。TCV 也采用七分制量表（-3：非常不舒适；-2：不舒适；-1：有点不舒适；0：中性；1：有点舒适；2：舒适；3：非常舒适）。3）视觉感知信息用于评估不同训练场地中受试者的视觉感知情况，使用阳光感觉投票（SSV）和突出色彩两个问题。SSV 采用七分制量表（-3：非常暗；-2：暗；-1：微暗；0：中性；+1：微亮；+2：亮；+3：非常亮；突出的颜色包括冷色、中性色和暖色（冷色：蓝色和绿色；中性色：灰色和白色；暖色：红色和黄色）。

在炎热的环境中进行高强度训练，大多数人会感到不舒适，出现各种热症状。大部分热症状主要集中在乏力、头晕、恶心、大量出汗、胸闷、脸色苍白、心跳加快、胃部不适、焦虑和头痛共十种热症状上[23]。我们在问卷中考虑了热症状这一问题。根据 ASHRAE 标准 55-2020，我们对受试者的服装热阻进行估计。此外，受试者的肥胖程度对热舒适也有一定的影响，肥胖程度一般可以通过身体质量指数（Body Mass Index，BMI）来体现。

1.5　热指标

生理等效温度（Physiologically Equivalent Temperature，PET）是一种从人体热平衡转换方程（慕尼黑能量平衡模型）中衍生的室外热环境评估指标，它被定义为在典型室内环境（无太阳辐射，风速为 0.1 m·s^{-1}，水蒸汽压力为 12 hPa）中，人体代谢率为 80 W 且服装热阻为 0.9 clo 时，达到与复杂室外条件相同的核心温度和皮肤温度所需的平衡空气温度[24]。PET 将复杂的室外热环境等同于特定的室内环境，结果更加易于理解，且更适合在天津地区使用[25]。因此，本研究选择 PET 作为室外热舒适评价的指标。利用 RayMan Pro 软件输入环境参数测量值来计算 PET 值。

2　结果与分析

2.1　环境参数

通过图 3 发现：空气温度、相对湿度、黑球温度、太阳辐射和光照强度的变化有明显规律，具有时序性；风速无规律波动，变化较大。空气温度、黑球温度、太阳辐射和光照强度都呈现先上升后下降的趋势，不同景观元素空间达到最高值的时间略有不同。操场有遮阳休息区域的光照强度波动幅度相较于其他区域较小。值得注意的是，操场训练区域的空气温度、黑球温度、太阳辐射和光照强度明显高于其他区域，空气温度最高可达到 32.6℃，黑球温度最高可达 39.4℃，太阳辐射最高可达 902 W·m^{-2}，光照强度最高可达 98.9 klx。相对湿度在早上最高，呈现先下降后升高的趋势，与空气温度恰恰相反。风速的变化规律虽然不明显，但是可以观察到湖边训练区域的风速高于其他区域，这可能是由于湖边训练区域比较开阔。

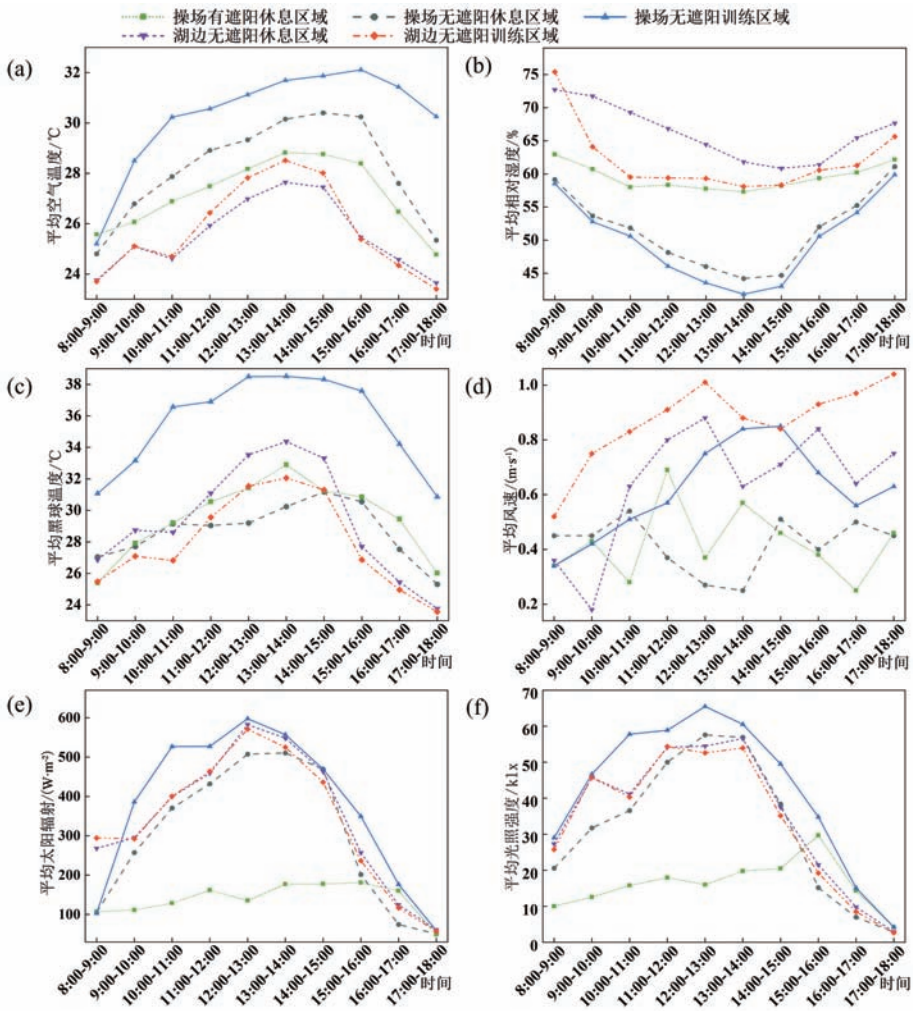


图 3　训练和休息区域的环境参数

2.2 热症状

图 4 显示了学生在军训过程中因暴露在室外高温环境中出现热症状的百分比。在军训过程中，只有 25.1%的学生没有出现热症状，74.9%的学生出现一种或多种热症状，其中，54.1%的学生出现“乏力”的症状，比例最大；感到“头晕”和“大量出汗”的学生的占比也很大，分别为 38.5%和 40.8%。可见，在室外炎热潮湿的环境中进行高强度训练，大部分军训学生感到身体不适，存在较高的健康风险。

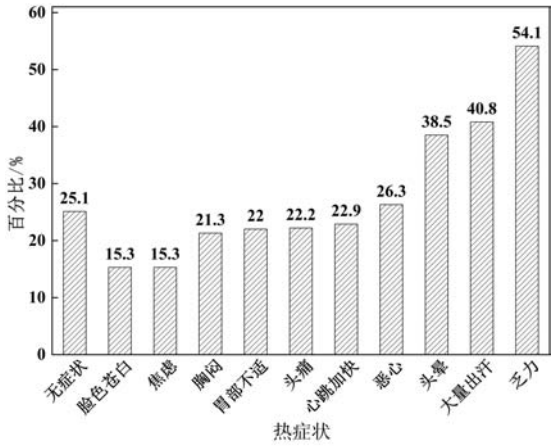


图 4 暴露在高温环境中热症状分布

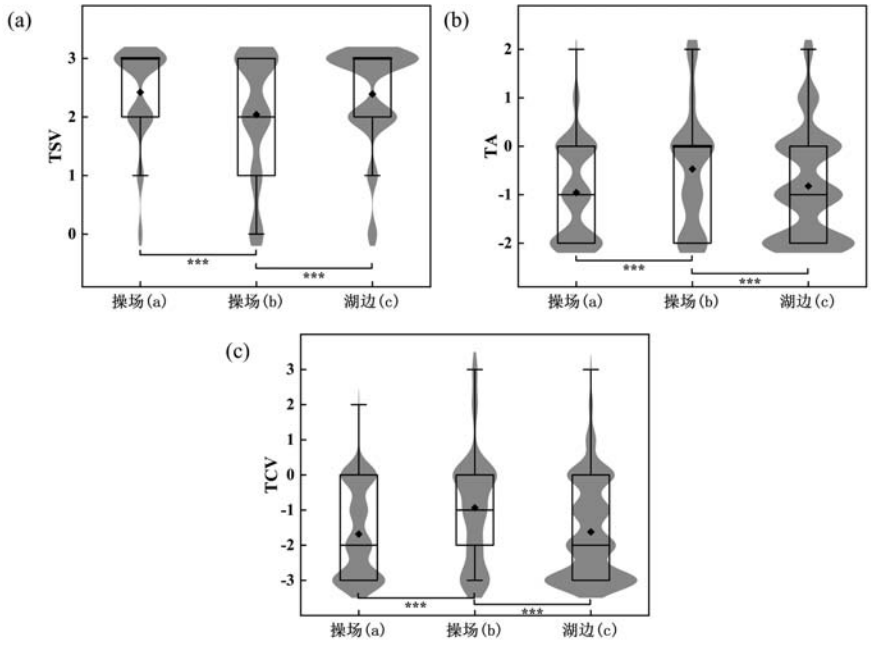
2.3 热舒适指标

图 5 显示了 3 种试验地点条件下 TSV、TA 和 TCV 的分布情况。其中，操场（b）的 TSV、TA 和 TCV 分布与其余两个地点具有显著性差异（$P<0.001$）。

对于 TSV，3 个场地主要获得了“非常热”投票（操场（a）58.7%，操场（b）44.2%，湖边（c）57.2%），其次是“热”（分别为 29.2%，29.5%和 30.3%）。操场（a）、操场（b）和湖边（c）的平均热感觉投票（MTSV）分别为 2.42、2.04 和 2.39。相比于其余两个地点，由于操场（b）的学生休息时有遮阳，TSV 整体较低，对改善受试者的热感觉具有明显效果。

对于 TA，操场（a）和湖边（c）“非常不可接受”投票率最高（分别为 39.8%和 35.7%），而在操场（b）中，“中性”投票率最高（38.9%）。操场（a）、操场（b）和湖边（c）的平均热可接受性投票（MTA）分别为-0.96、-0.47 和-0.82。在操场（b）处训练的学生对热环境的接受度明显高于其余两个试验地点。

对于 TCV，操场（a）和湖边（c）“非常不舒适”投票占比最高（分别为 39.0%和 38.1%），而操场（b）“中性”投票占比最高（35.5%）。操场（a）、操场（b）和湖边（c）的平均热舒适投票（MTCV）分别为-1.68、-0.93 和-1.62。操场（b）整体具有更高的热舒适度。



注：*** 代表 $P<0.001$。

图 5 不同训练地点的 TSV、TA 和 TCV

2.4　阳光感觉和突出色彩对热舒适的影响

2.4.1　阳光感觉对热舒适的影响

图 6 显示了阳光感觉对热舒适的影响，回归直线的斜率反映了受试者对 PET 变化的敏感性（表 3）。在不同的阳光感觉条件下，感到“微暗至非常暗”的受试者对热环境的热感觉投票最低，热可接受度和热舒适度最高；感到“微亮至非常亮”的受试者的热感觉投票最高，热可接受性最低，热环境体验最差；感到“微暗至非常暗”的受试者对热环境的变化最敏感，剩余两个组敏感程度比较接近。“微暗至非常暗”组的斜率分别为 0.07、−1.02 和−1.17，这表明 PET 每升高 10℃，相应的 TSV 增加 0.7，TA 和 TCV 分别下降 10.2 和 11.7。总体而言，不同阳光感觉组受试者的 TSV、TA 和 TCV 和 PET 之间的变化趋势相似。

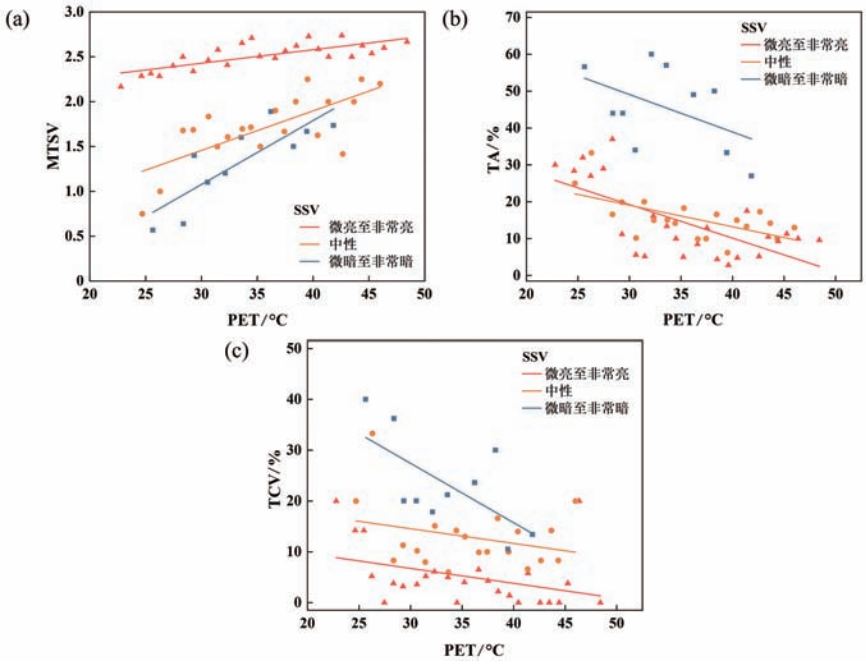


图 6　不同阳光感觉条件下 PET 和 TSV、TA 和 TCV 的关系

表 3　回归直线关系式

组别		关系式
TSV− PET	微亮至非常亮	$y=0.015\,05x+1.976\,65$，$R^2=0.557\,25$
	中性	$y=0.044\,05x+0.134\,75$，$R^2=0.520\,98$
	微暗至非常暗	$y=0.071\,23x-1.060\,25$，$R^2=0.693\,78$
TA− PET	微亮至非常亮	$y=-0.909\,78x+46.534\,13$，$R^2=0.449\,32$
	中性	$y=-0.584\,22x+36.594\,6$，$R^2=0.369\,62$
	微暗至非常暗	$y=-1.016\,47x+79.589\,16$，$R^2=0.229\,45$
TCV− PET	微亮至非常亮	$y=-0.293\,61x+15.551\,87$，$R^2=0.139\,37$
	中性	$y=-0.289\,25x+23.232\,38$，$R^2=0.082\,25$
	微暗至非常暗	$y=-1.168\,64x+62.473\,86$，$R^2=0.422\,39$

2.4.2　突出色彩对热舒适的影响

图 7 显示了受试者视线中的突出色彩对热舒适的影响，回归直线的斜率反映了受试者对 PET 变化的敏感性（表 4）。3 个色彩组受试者的 TSV、TA 和 TCV 和 PET 之间的变化趋势相似。TSV 较高，平均 TSV 都大于 1.6。“冷色”组受试者的热可接受性和热舒适度都高于其余两组。由拟合直线斜率（表 4）可以看到，“暖色”组受试者对热环境的变化最敏感，其次是“冷色”组。结果表明，在炎热的夏季，冷色调的植被、建筑和雕塑等，可以提高室外运动人员的热可接受性和热舒适度。

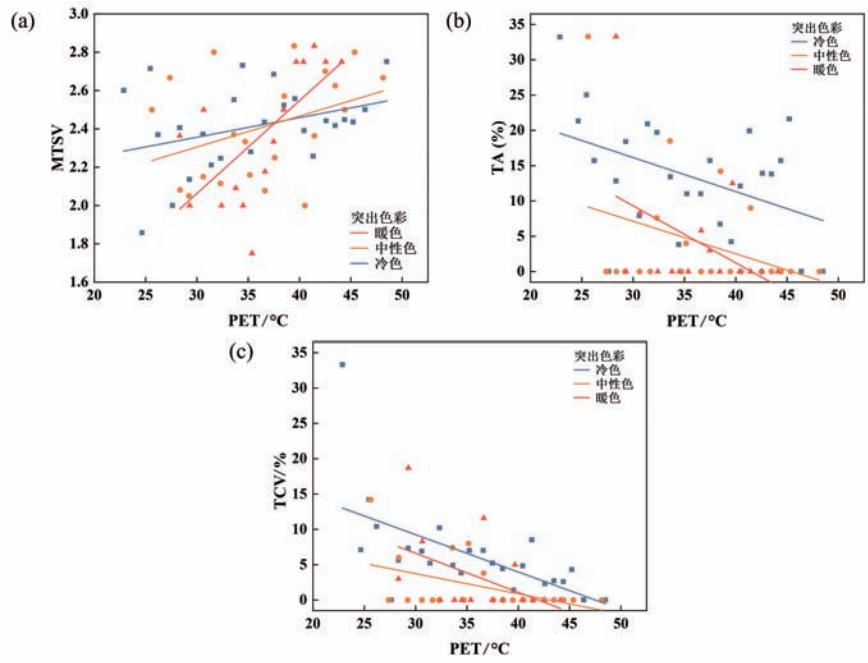


图 7 不同突出色彩条件下 PET 和 TSV、TA 和 TCV 的关系

表 4 拟合直线关系式

组别		关系式
TSV- PET	冷色	$y=0.0102x+2.050\ 43$，$R^2=0.121\ 03$
	中性色	$y=0.016\ 13x+1.821\ 33$，$R^2=0.138\ 11$
	暖色	$y=0.048\ 49x+0.608\ 01$，$R^2=0.446\ 72$
TA- PET	冷色	$y=-0.482\ 73x+30.629\ 87$，$R^2=0.189\ 74$
	中性色	$y=-0.461\ 31x+20.963\ 8$，$R^2=0.121\ 19$
	暖色	$y=-0.807\ 85x+33.547\ 34$，$R^2=0.193\ 65$
TCV- PET	冷色	$y=-0.528\ 55x+25.111\ 19$，$R^2=0.359\ 36$
	中性色	$y=-0.285\ 11x+12.283\ 93$，$R^2=0.226\ 12$
	暖色	$y=-0.552\ 96x+23.198\ 84$，$R^2=0.228\ 25$

3 讨论

3.1 不同训练场地下的热舒适差异

气象条件是影响人体热感觉的主要决定因素[26-28]。树荫对平均辐射温度（T_{mrt}）[29-30]和 PET 有强烈的影响[31]，可以提供 70%的冷却效果[32]。同时，过多的阳光直射会导致室外人员眩光和热不舒适[33-34]，适当的遮阳措施例如树荫可以降低阳光感觉从而改善视觉舒适度和热舒适度[35-37]。我们的试验结果与先前的试验研究结果一致，在休息期间有遮阳极大地改善了受试者的热舒适体验。因此，操场和广场等校园公共区域和人员活动区域夏季要注重遮阳设施的设计与放置，提高室外活动人员的舒适度，以吸引更多学生进行室外活动。

然而，在训练场地（a）和（c）中，景观差异较大，视觉条件不同，热舒适却并没有显著差异，这可能是因为气象条件是影响人体热舒适的主要因素。此外人体热舒适还受其他视觉条件的影响，导致这两个场地受试者的热舒适没有显著性差异。

3.2 阳光感觉和突出色彩对热舒适的影响

在炎热的室外环境中，视觉感知突出色彩为冷色调的人员会感到更加舒适[38]。我们的结果与之前的研究结果一致。因此，夏季可以通过设计一些冷色调景观设施来吸引室外人员的注意力，提高室外人员的热舒适度和热可接受性。

然而，以往研究表明阳光感受为中性的受试者对 PET 的变化更加敏感[39]，与我们的结果不同，这或许是由于军训学生的活动状态（立正、正步走和打军体拳）与以往研究的受试者的活动水平（坐着或行走）不同，导致室外不同活动水平的人员在热舒适方面存在显著差异。以往研究表明在相同的热环境条件下，坐着、站着和行走

的人员的热感觉是依次增加的[9]。运动人群对热环境的接受度更高，尤其是进行肢体运动的人群[10]。但活动状态对环境敏感程度的影响仍需进一步探索。

3.3　展望

本研究比较了不同训练场地的环境参数差异，明确了军训学生在训练过程中面临着较大的健康风险，分析了不同训练场地军训学生的热舒适差异，探究了视觉条件（阳光感觉和突出色彩）对军训学生热舒适的影响。然而，本研究只在军训休息期间进行了问卷调查，未来可以对运动过程中不同运动时长的热舒适和视觉感知进行分析，对运动人员的运动过程进行更全面的评估。遮阳对热舒适改善效果明显，但遮阳的频率和时长等因素对室外运动人员的舒适度的影响仍有待探索。由于军训活动的特殊性，本研究未设置对照组，在未来的试验研究中应进一步优化试验设计，以提高研究的科学性。此外，大多数大学新生到达天津的时间并不长，与长期处于天津的学生具有不同的热适应和热调节机制。因此，热经历对军训大学生热舒适的影响也是未来研究中一个不可忽视的重要因素。

4　结论

本研究对 3 个具有代表性的军训场地进行了环境参数测量。采用问卷调查的方法，对军训大学生在训练过程中出现的热症状和在不同军训场地的热舒适差异进行了评估，并对阳光感觉和突出色彩对热舒适的影响进行了分析。主要研究结论如下：

1）军训学生在训练过程中面临着较高的健康风险，其中 74.9%的学生出现一种或多种热症状。

2）良好的视觉环境可以明显改善军训学生的热舒适度。在军训学生休息期间提供遮阳措施，对其热舒适的改善效果在统计学上是显著的（$P<0.001$），平均热舒适投票（MTCV）增加 0.75。

3）视觉感知对军训学生的热舒适具有显著影响。阳光感觉为“微暗至非常暗”的受试者的热感觉最低，热可接受性和热舒适度最高；突出色彩为“冷色”的受试者的热可接受性和热舒适度最高。

参考文献

[1] LI Z Y, ZHOU L, HONG X Q, et al. Outdoor thermal comfort and activities in urban parks: an experiment study in humid subtropical climates[J]. Building and Environment, 2024, 253: 111361.

[2] PANTAVOU K, THEOHARATOS G, MAVRAKIS A, et al. Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens [J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 339-344.

[3] TIAN Z, ZHU N, ZHENG G Z, et al. Experimental study on physiological and psychological effects of heat acclimatization in extreme hot environments[J]. Building and Environment, 2011, 46(10): 2033-2041.

[4] ZHENG G Z, ZHU N, TIAN Z, et al. Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments[J]. Safety Science, 2012, 50(2): 228-239.

[5] WATTS N, AMANN M, ARNELL N, et al. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises[J]. The Lancet, 2021, 397(10269): 129-170.

[6] NIU J Q, XIONG J P, QIN H Q, et al. Influence of thermal comfort of green spaces on physical activity: Empirical study in an urban park in Chongqing, China[J]. Building and Environment, 2022, 219: 109168.

[7] 高庆龙，沈师琪，欧阳金龙. 典型浅街峡谷中街道可视因子对行人夏季热舒适的影响[J]. 中国城市林业，2024，22(6)：1-9.

[8] FORMENTI F, CONSTANTIN-TEODOSIU D, EMMANUEL Y, et al. Regulation of human metabolism by hypoxia-inducible factor[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(28): 12722-12727.

[9] LAM C K C, HANG J, ZHANG D D, et al. Effects of short-term physiological and psychological adaptation on summer thermal comfort of outdoor exercising people in China[J]. Building and Environment, 2021, 198: 107877.

[10] LIN Y J, JIN Y M, JIN H. Effects of different exercise types on outdoor thermal comfort in a severe cold city[J]. Journal of Thermal Biology, 2022, 109: 103330.

[11] LAI D Y, LIAN Z W, LIU W W, et al. A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces[J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140092.

[12] WANG Y Y, WANG Y P, WANG X X, et al. Comparative analysis of visual-thermal perceptions and emotional responses in outdoor open spaces: impacts of look-up *vs*. look-forward viewing perspectives[J]. International Journal of Biometeorology, 2024, 68(11): 2373-2385.

[13] LAM C K C, YANG H Y, YANG X, et al. Cross-modal effects of thermal and visual conditions on outdoor thermal and visual comfort perception[J]. Building and Environment, 2020, 186:

107297.
[14]胡琪琪,顾韩.室外热舒适影响因素及其评价指标研究进展[J].中国城市林业,2023,21(1):43-49.
[15]MA T,ZHANG J.Integrating thermal perception and public space use-an experimental outdoor comfort study in cold winter-hot summer zone: Beijing, China [J]. Urban Climate, 2024, 58: 102138.
[16]MORRIS N B,JAY O,FLOURIS A D,et al.Sustainable solutions to mitigate occupational heat strain - an umbrella review of physiological effects and global health perspectives [J]. Environmental Health,2020,19(1):95.
[17]LEE J K W, NIO A Q X, FUN D C Y, et al. Effects of heatacclimatisation on work tolerance and thermoregulation in trained tropical natives[J].Journal of Thermal Biology,2012,37(5):366-373.
[18]PARSONS I T,STACEY M J,WOODS D R.Heat adaptation in military personnel:mitigating risk,maximizing performance[J]. Frontiers in Physiology,2019,10:1485.
[19]BROTHERHOOD J R. Heat stress and strain in exercise and sport[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2008, 11(1):6-19.
[20]SHEN D D,ZHU N.Influence of the temperature and relative humidity on human heat acclimatization during training in extremely hot environments [J]. Building and Environment, 2015,94:1-11.
[21]BIAN G M, GAO X Y, ZOU Q S, et al. Effects of thermal environment and air quality on outdoor thermal comfort in urban parks of Tianjin,China[J].Environmental Science and Pollution Research,2023,30(43):97363-97376.
[22]TALEGHANI M,KLEEREKOPER L,TENPIERIK M,et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherland[J].Building and Environment,2015,83:1-14.
[23]FANG Z S,XU X N,ZHOU X Q,et al.Investigation into the thermal comfort of university students conducting outdoor training[J].Building and Environment,2019,149:26-38.
[24]HÖPPE P.The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 43(2):71-75.
[25]LAI D Y, LIU W Y, GAN T T, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces [J]. Science of the Total Environment,2019,661:337-353.
[26]SADAKORN W, TETIRANONT S, PRASITTISOPIN L, et al. Assessing thermal comfort in hot and humid (tropical) climates: Urban outdoor and semi-outdoor conditions in waiting areas of railway stations [J]. Building and Environment, 2025, 267: 112240.
[27]DE SOUZA L P,BRACHT M K,BAVARESCO M,et al.Thermal sensation and adaptation after spatial transition: a review and meta-analysis [J]. Building and Environment, 2024, 258: 111585.
[28]XU M,HONG B,JIANG R S,et al.Outdoor thermal comfort of shaded spaces in an urban park in the cold region of China[J]. Building and Environment,2019,155:408-420.
[29]LAI A L, MAING M, NG E. Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment [J]. Building and Environment,2017,114:397-409.
[30]PARK C Y,LEE D K,KRAYENHOFF E S,et al.Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees[J].Sustainable Cities and Society,2019,48: 101521.
[31]COLTER K R,MIDDEL A C,MARTIN C A.Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix,Arizona,USA[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,44:126429.
[32]TAN P Y,WONG N H,TAN C L,et al.A method to partition the relative effects of evaporative cooling and shading on air temperature within vegetation canopy [J]. Journal of Urban Ecology,2018,4(1):juy012.
[33]TZEMPELIKOS A.Advances on daylighting and visual comfort research[J].Building and Environment,2017,113:1-4.
[34]ZHENG Y Q,WU J X,ZHANG H,et al.A novel Sun-shading design for indoor visual comfort and energy saving in typical office space in Shenzhen[J].Energy and Buildings,2025,328: 115083.
[35]LAM C K C,WENG J F,LIU K,et al.The effects of shading devices on outdoor thermal and visual comfort in Southern China during summer [J]. Building and Environment, 2023, 228: 109743.
[36]CHEN T H,PAN H N,LU M R,et al.Effects of tree plantings and aspect ratios on pedestrian visual and thermal comfort using scaled outdoor experiments [J]. Science of the Total Environment,2021,801:149527.
[37]ZHANG T, HONG B, SU X J, et al. Effects of tree seasonal characteristics on thermal-visual perception and thermal comfort[J]. Building and Environment,2022,212:108793.
[38]LUO W,KRAMER R,KOMPIER M,et al.Effects of correlated color temperature of light on thermal comfort,thermophysiology and cognitive performance[J].Building and Environment,2023, 231:109944.
[39]QIN H Q,CHEN J H,NIU J Q,et al.The effects of brightness and prominent colors on outdoor thermal perception in Chongqing,China[J].International Journal of Biometeorology, 2024,68(6):1143-1154.