

高原建筑环境因素与人体健康的关联性初探

贾王龙¹ 王燕武¹ 王蕾² 井文强³ 李永刚¹ 罗恒博¹ 余富晨¹

1. 中国二十二冶集团有限公司 陕西西安 710000;

2. 陕西科技技术产业研究院有限公司 陕西西安 710000; 3. 西安欧亚学院 陕西西安 710000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20227

[摘要] 西藏那曲地区平均海拔在 4500 米以上, 具有典型的极高海拔环境特征, 高原环境对人体机能构成多重挑战。明确高海拔环境对人体健康的作用, 对高原地区建筑环境设计与健康保障具有重要意义。我们通过智能手环连续监测那曲旅居人员的心率、血氧饱和度及体表温度等生理指标, 并通过与环境因子的相关性分析构建模型。结果显示, 在温度适宜的夏秋季节, 大气温度是影响心率与外周体表温度的正向主导因子, 血氧饱和度则受 CO₂ 浓度的负向影响。研究初步揭示了在稳定高海拔环境中, 关键环境因子对人体生理状态的影响机制。

[关键词] 高原建筑环境; 健康关联; 生理监测; 环境因子

引言

高海拔地区的低压低氧环境容易导致外来工作人员的身体功能失调, 对人体健康造成威胁, 会严重制约高原地区的经济发展, 给工作人员营造健康舒适的工作环境是高原地区社会发展的重要课题。

近几十年来国内外关于高原环境与健康的相关研究整体呈增长趋势, 逐渐成为学科研究热点。然而, 无论是国内还是国外, 更多的研究聚焦于高原气候条件对人体器官功能、疾病等的影响, 这些研究的评价标准往往以疾病或健康异常状态为基准; 对于在人体具有一定适应能力的环境下, 如何通过优化环境指标改善人体机能的相关研究比较稀少。本研究基于以上背景下, 试图通过建立起高原环境与健康状态下的人体生理指标的相关关系, 为高原工作人员创造良好的环境提供依据。

1 从方法开始

1.1 研究对象

本次研究地点位于西藏那曲市色尼区, 具有典型的高寒低氧气候特征。既往研究表明急性进入高海拔地区的人群一般在两周左右从急性应激反应进入更为细微的内部适应性变化阶段^[1]。我们的研究旨在为外来进藏工作人员创造较好的工作环境, 由于初期的应激反应或高原病让人体处于无法工作的状态, 因此, 本研究以健康状态下的人体为基准, 选取 5 名年龄 24 - 35 岁、进藏超过两周、无重大慢性疾病的健康工作人员作为研究对象。所有人员均为汉族, 研究期间保持

正常室内工作状态。

1.2 现场数据监测

本研究的现场数据采集分为环境数据与生理数据两部分, 两者都以智能监测数据为基础, 辅助数据来自中国气象科学数据网。监测期为 2025 年 8 月 24 日至 9 月 27 日, 由于高原工作受气候特征及建设进度等影响, 自动监测时间段会根据现场工作进行适当平移。

环境数据: 采用自主研发的环境监测仪, 连续监测工作室室内气温、湿度、气压、光照、辐射、风速、噪声、CO₂ 浓度及 PM2.5 含量等九项指标, 采集间隔 10 分钟。

生理数据: 采用合作公司研发的智能手环(型号 RTJK-1)进行连续监测。监测时间为工作日的 9:00 - 18:00, 监测指标包含心率、血氧饱和度与外周体表温度, 采集间隔 30 分钟。

1.3 研究分析步骤

本研究基于以上监测数据, 针对环境与生理数据进行相关性分析, 筛选出与人体健康关联性高的环境因子, 为构建有效的健康预警模型打下基础。

在进行相关性分析之前, 我们基于文献调查对指标进行了筛选、确定调查方法; 通过上述现场数据监测方法, 我们获得了环境与生理两组数据; 由于仪器采集时间的错位与检测精度的不同使得数据需要进行多轮比对和清洗与对齐; 随后, 我们进行单因素相关分析, 通过逐步回归剔除冗余因子, 建立多元线性回归模型, 以探讨环境因子对生理指标的综合影响; 研究整体基于以下框架进行。

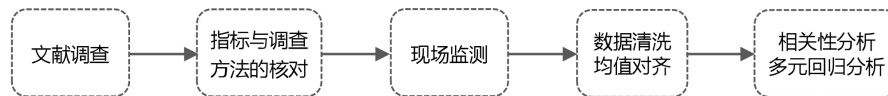


图 1 研究分析步骤

2 结果概述

2.1 数据概况

本次调查期间设定在温暖多雨的夏秋时节,具体的环境数据反映出夏秋季那曲的气候特征:温度适中(平均 18.58℃),湿度较低(平均 43.42%),光照与辐射呈昼高夜低趋势。生理指标方面,工作人员的平均心率为 89.37 bpm,血氧饱和度 98.52%,体表温度 30.95℃,均处于适应期人群常见范围。

2.2 单相关分析

我们对比同时间节点的各个环境指标与生理指标发现,由于监测仪器的敏感度不同,多数环境监测仪的数据比智能手环的分辨率高,导致数据精度不一;针对此问题,我们通过取整的方式,又将同时间节点的生理指标取平均值进行数据对齐,并将对齐后的数据序列投入单相关分析。我们发现与生理指标具有显著相关性、且强度处于中等水平之上($r \geq 0.3, p < 0.05$)的环境因子仅包括大气温度、空气湿度、CO₂浓度以及 PM2.5 含量四项指标,具体结果总结如下:

(1) 心率方面,大气温度、CO₂浓度呈现出极其显著的

正相关性,PM2.5 含量呈现出显著的正相关性,空气湿度呈现出显著的负相关性;

(2) 外周血氧饱和度方面,仅 CO₂浓度呈现出极其显著的负相关性;

(3) 外周体表温度方面,空气湿度与 CO₂浓度都呈现出极其显著的相关性,只是前者为负相关,后者为正相关;

(4) 强度方面,除心率与大气温度具有强相关($r=0.71$)以外,整体处于中等强度水平($0.32 \leq r < 0.7$)。

2.3 多元线性回归分析

本次选取的建筑环境因子因环境监测仪的研发局限使得指标筛选具有局限性,我们针对不同生理指标(因变量),通过逐步回归剔除 p 值 > 0.1 的变量,选取共线性较弱、比较独立的指标用于多元线性回归分析。最终,得到各个生理指标的回归模型(表 2)。

根据多元线性回归方程可知,模型检验 P 值均小于 0.05,说明自变量的组合对因变量的线性影响显著,回归模型成立;而模型复相关系数 R 均在 0.3 以下,整体拟合度一般。

表 2 各生理指标的回归模型一览表

建筑环境指标	多元线性回归模型			
	方程式	F	p	R
心率参考值 (b/m)	$Y_{HR} = 71.865 + 0.495T + 0.242N + 0.017\rho_{PM2.5}$ T: 大气温度、N: 噪音、 $\rho_{PM2.5}$: PM2.5 含量	F=14.433	$p < 0.001$	R=0.265
外周血氧参考值 (%)	$Y_{SpO_2} = 98.715 - 0.026V + 0.0004\rho_{CO_2}$ V: 风速、 ρ_{CO_2} : CO ₂ 浓度	F=4.125	$p = 0.017$	R=0.119
外周体表温度参考值 (℃)	$Y_{PT} = -125.679 + 0.19T + 2.575AP + 0.003L$ T: 大气温度、AP: 大气压力、L: 光照强度	F=10.628	$p < 0.001$	R=0.230

3 讨论

3.1 温度主导性影响

实验结果显示,大气温度对心率及体表温度表现出主导性正相关作用。

(1) 在心率的回归模型中,大气温度的标准化系数以超过 3.5 倍大小远高于其他环境指标的系数,决定了其对心率的主导性影响;单相关分析中也呈现出两者的高强度、极其显著的正相关性。此结果预示了在人体比较舒适且平稳的气

温环境下,大气温度对心率具有一定主导性的正相关作用。

然而,既往研究表明低温环境下人体通过血管收缩、肌肉颤抖等方式维持核心体温,这会导致心率与能量消耗的增加^[2-3],这些研究说明温度下降会导致心率增加;而本次研究的结论却是大气温度与心率正相关,温度下降会导致心率下降;两者结果似乎具有矛盾性。

从研究范围上来讲,既往研究更多是基于全国甚至世界范围内比较不同海拔的环境因素(含大气温度)对人体的影

响; 调查所处的那曲地区的气温普遍比低海拔地区低, 检测的心率平均值(89.37)亦高于低海拔地区^[2,4], 这与上述低温环境导致心率偏高的宏观规律一致。此外, 本次研究旨在为外来进藏人员创造较好的工作环境, 仅针对在那曲地区的中长期工作人员, 研究更侧重于揭示在相对稳定的高原工作环境中, 温度变化对已适应人群生理状态的即时影响。在稳定的工作环境中, 原本在宏观规律中影响心率的气压及氧含量等^[2]变化并不明显, 使得大气温度成为了突出的影响要素。

(2) 在外周体表温度的回归模型中, 大气温度的标准化系数显著高于其他环境指标的系数, 决定了其对外周体表温度的主导性正相关影响。

虽然前面的单相关分析显示大气温度与外周体表温度相关性不高, 却能从空气湿度与外周体表温度的相关性看出问题。首先, 两者具有显著的、较强的负相关性($r=-0.46$), 而空气湿度与大气温度又具有强负相关性($r=-0.802$); 因此, 回归模型中大气温度对外周体表温度有正相关作用也就能够被理解。同时, 由于本次研究采用电阻式体温测量仪, 其监测结果受环境温度影响较大, 可以认为在回归模型中大气温度呈现正向主导作用的结果是合理的。

3.2 血氧饱和度与环境气体

在外周血氧饱和度的回归模型中, 风速与 CO₂浓度的标准化系数量级旗鼓相当, 且模型的 p 值与复相关系数 R 并不优良; 这说明了本模型的拟合度偏差。实际上, 进入高海拔后人体内的血氧饱和度与大气中氧含量强正相关^[1], 环境氧含量或许更值得被纳入模型中。

此外, 研究结果显示 CO₂浓度与外周血氧饱和度存在比较显著的负相关性。由于本次监测均在建筑室内进行, 我们推测人体呼吸作用引起的氧气消耗与二氧化碳产出会降低环境氧气浓度, 进而影响外周血氧饱和度。

3.3 研究局限与改进方向

(1) 本研究周期较短、样本量有限, 环境监测仪的研发局限使得部分环境指标未被纳入监测系统(如环境氧含量等), 本研究结果具有一定的局限性; 后续研究应优化精选监测指标, 增加样本规模, 提升模型精度。

(2) 本次采用的手环虽得到合作公司研发团队的技术支撑与保障, 却尚未在那曲地区进行现场验证; 而精准采集人

体数据是未来健康预警模型构建的重要环节, 后续研究应核实验并优化仪器检测精度, 实现从实验到应用落地。

(3) 本研究仅从生理指标来考察人体健康, 尚未包含血液指标、神经功能指标及人体舒适度等内容, 未来的研究中需要科学合理地将这些指标纳入评估系统。

4 结论与建议

4.1 环境设计导向

那曲地区独特的高原环境特征对体会产生多维度影响。在温度没有极端低下, 且湿度、风速等其他指标宜人的夏秋季, 大气温度对心率及外周体表温度起着正向主导性作用。因此, 那曲地区建筑应考虑维持适宜的温度与保温, 避免室内温度剧烈波动; 同时应加强通风, 控制 CO₂浓度, 以维护血氧水平。

4.2 健康评估

在人体基本适应高海拔地区环境的状态下, 完善的高原健康评估是衡量环境适宜性的基准。除了本研究所涉及的生理指标, 应采集血液指标、神经功能指标及人体舒适度等多维度的人体指标, 完善评估系统。

4.3 跨学科合作

本研究远景是建立建筑环境的健康风险预警系统, 其应用场景是通过智慧平台或小程序软件完成环境的健康评估。除自动监测的生理数据以外, 后续研究需要与那曲当地医疗机构合作, 获取更为全面的人体健康信息, 构建健康-环境关联模型, 推动高原健康建筑向标准化与智能化发展。

[参考文献]

[1] Andrew M. Luks, Philip N. Ainslie, etc. Ward, Milledge and West's High Altitude Medicine and Physiology[B]. CRC Press, Sixth edition published 2021.

[2] 刘萍, 葛淼, 等. 中国健康人心率正常参考值的地理分布规律[J]. 国外医学医学地理分册, 2011, 32(1): 31-35.

[3] 井静, 葛淼, 等. 不同心率和地理环境因子与健康成年男性左室射血分数参考值的相关性[J]. 中国医学科学院学报, 2018, 40(4): 487-492.

[4] 向思亭, 葛淼, 等. 成年男性心率参考值与地理环境的主成分分析[C]. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会议论文集, 2022: 1566-1572.