

中文引用格式:汪磊,杨麒玉,洪瑞媛. 基于聚类算法的民航飞行员心理健康画像研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1): 249–256.

英文引用格式:WANG Lei, YANG Qiyu, HONG Ruiyuan. A clustering algorithm-based approach to pilot psychological health profiling[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 249–256.

基于聚类算法的民航飞行员心理健康画像研究^{*}

汪磊 研究员, 杨麒玉, 洪瑞媛

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号: X911

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0157

资助项目: 中国民航局安全能力建设项目(2022FS0013)。

【摘要】 为保障飞行员的飞行安全 and 提升工作效率, 基于机器学习聚类算法, 提出民航飞行员心理健康特征分类方法。首先, 选取 215 名现役航线飞行员作为被试, 通过飞行员心理胜任力测评系统, 采集心理品质和心理状态 2 个维度的心理健康数据; 然后, 采用主成分分析法对数据进行特征降维, 并结合肘部法确定最优聚类簇数, 运用 *K-means* 算法实现样本分类, 将飞行员划分为 4 类心理健康状况, 用以分析各类群体的心理特征差异; 最后, 基于聚类结果进行可视化操作, 进一步表征飞行员心理健康个体与群体画像, 采用雷达图呈现不同类别飞行员的心理特征分布模式。结果表明: 飞行员心理健康结构具有群体异质性和多元表现模式, 提出的聚类算法可将抽象的飞行员心理健康数据转化为可观测的群体特征画像, 在操作层面实现对飞行员心理状态的系统化辨识与可视化表达。

【关键词】 聚类算法; 飞行员; 心理健康画像; 心理状态; 心理胜任力

A clustering algorithm-based approach to pilot psychological health profiling

WANG Lei, YANG Qiyu, HONG Ruiyuan

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to ensure flight safety and enhance operational efficiency, a classification method for civil aviation pilots' psychological health characteristics was developed based on machine learning clustering algorithms. Firstly, 215 active airline pilots were selected as research subjects. Psychological health data across two dimensions—psychological traits and psychological states—were collected using a pilot psychological competency assessment system. Subsequently, principal component analysis was employed for dimensionality reduction, and the elbow method was utilized to determine the optimal number of clusters. The *K-means* algorithm was applied to classify the samples into four distinct psychological health categories, facilitating the analysis of psychological characteristic differences among groups. Finally, visualization techniques were implemented based on the clustering outcomes to construct individual and group psychological health profiles. Radar charts were adopted to illustrate the distribution patterns of psychological characteristics across different pilot categories. The psychological health structure of pilots has group heterogeneity and diverse expression patterns. The proposed clustering algorithm can transform pilots' psychological health data into observable group feature portraits, achieving systematic identification and visualization of pilot psychological states at the operational level.

Keywords: clustering algorithms; pilots; psychological health profiling; psychological state; psychological competency

0 引言

安全是民航运输业永恒的主题,随着航空技术的可靠性不断提高,机械原因所导致的事故比例持续降低,而人的因素所导致的事故比例却持续上升,飞行员操作的可靠性逐渐引起重视。据调查,60%以上的事故与飞行机组因素有关^[1]。同时,心理健康状态作为飞行员个体因素的重要组成部分^[2],与飞行安全有着密不可分的联系。中国民用航空局于2020年提出飞行员技能全生命周期管理(Professionalism Lifecycle Management, PLM)体系^[3],该体系涵盖核心胜任力、作风胜任力和心理胜任力3个评估维度,在心理胜任力这一维度中,心理健康被视为重要组成因素。

在飞行员心理健康领域,国内外学者已取得一些研究成果。ACKLAND等^[4]系统性指出评估飞行员心理健康主要依赖问卷,并存在因担忧执业资格而隐瞒的倾向。KE Luoma等^[5]采用机器学习算法识别心理相关特征,为心理素质导向的飞行员选拔提供了量化依据。20世纪90年代,COOPER^[6]提出用户画像这一概念,用以有效剖析目标个体或特定群体的心理特征和行为倾向,进而实现提供高度个性化的产品和服务的目标^[7],如今被广泛应用于各种领域^[8]。为适应飞行员职业生涯发展需求及PLM体系建设需求,国内学术界已逐步展开对飞行员的心理胜任力的研究^[9]。汪磊等^[10]通过心理画像方法研究风险型飞行员,并构建指标体系;陈农田等^[11]建立了作风胜任能力客观量化评价画像方法。画像方法在整合复杂、动态数据时具有较大的优势,心理健康数据恰好具有这些特点,然而,心理画像在民用航空领域的应用仍处于初步阶段,现有研究较少结合飞行员对心理健康画像展开探索。

鉴于此,笔者拟基于中国民航局PLM建设需求,结合民航飞行员(简称飞行员)心理健康数据特点,采用机器学习方法进行特征提取与分类。通过雷达图可视化技术,构建飞行员心理健康画像,呈现各类群体在关键维度上的特征分布,以期为心理健康评估提供客观、全面的分析框架。

1 品质-状态双层次模型

结合航空运输飞行员的职业特点和PLM的要

求,汪磊等^[12-14]建立了一种民航飞行员心理胜任力测量指标框架并开发出了完整测试系统,如图1所示,文中采用该平板测试端进行数据采集工作。



图1 飞行员心理胜任力测评系统

Fig. 1 Psychological competency assessment system for pilots

该系列研究还提出关于飞行员心理能力的浮动冰山模型^[12-14],在冰山模型中,飞行员可观察到心理健康状态就好比冰山漂浮在水面上的可见部分,冰山表面下隐藏着飞行员的专业适应能力。冰山模型表明:心理健康在水面和水下之间波动,具有可变性。

为阐明这种关系,汪磊等^[14]建立了一个分层质量-状态模型,该理论下心理健康可分为心理品质和心理状态。心理品质是个体心理健康的基础,较为内隐,相对静态;心理状态较为明确,相对动态。同时,心理品质与心理状态相互影响,这种互动机制揭示了个体的心理品质和心理状态如何相互作用,进而引发个体心理健康水平的动态变化。

根据以上理论,可以确定心理健康水平由心理品质和心理状态2部分组成,指标共分为积极状态、消极状态、自我倾向和社会适应能力4个维度。

2 基于聚类算法的飞行员心理健康画像研究

聚类分析是研究(样品或指标)分类问题的一种统计分析方法,同时也是数据挖掘的一个重要算法。聚类分析主要以相似性为基础,目标是将数据通过相似度划分类别,从而形成不同的子集,这种子集称为簇,每个簇之间的数据彼此相似,而簇与簇之间的差异性较为显著^[15]。

典型的聚类算法通常分为特征提取、相似度计算以及进行分组3个阶段^[16]。作为机器学习的2

种算法,分类和聚类有着很大程度上的差异,分类是对已知的类别进行标记和归类;而聚类是在预先不知道类别的状况下,以某种度量对其进行分组^[17]。

聚类的方法多种多样,大致分为划分式聚类算法、基于密度的聚类算法、层次化聚类算法 3 类。划分式聚类算法需要确定初始化聚类中心或聚类数目,通过迭代令不同类簇的数据具有高相似度,常见算法有 *K*-means、*K*-means++ 及 bi-kmeans 等。近年来 *K*-means 算法常用于航空航天领域^[18],以其较高的计算效率成为目前最为实用和流行的算法。

2.1 K-means 算法介绍

K-means 算法是一种无监督学习方法,也是最常用的划分式聚类方法之一。该算法主张 2 个样本距离越近,其相似度就越高的原则,最终达到局部最优解,文中采用 *k*-means++ 初始化以提高稳定性。它通常以欧氏距离作为划分数据相似度的依据,相似度和样本距离成反比,即样本距离越大,它们之间的相似度就越小。算法需要提前设定初始聚类中心以及聚类的数目,以相似度为基础,在迭代的过程中逐渐更新中心的位置,并持续降低类簇的误差平方和(Sum of Squared Error, SSE),直至算法收敛,得出最终聚类结果^[19]。

K-means 算法首先从 *N* 个样本中随机选取 *K* 个对象作为初始聚类中心;随后计算每个样本至各聚类中心的距离,并将其分配至最近的簇;完成全部样本分配后,更新每个簇的聚类中心,即簇内所有样本在各维度上的均值;迭代执行上述步骤,直至聚类中心不再发生变化,算法收敛,最终输出聚类结果。*K*-means 算法的基本流程如图 2 所示。

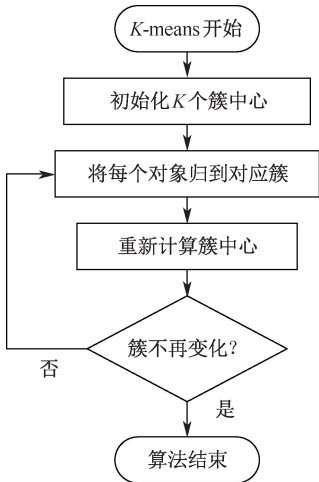


图 2 算法流程
Fig. 2 Algorithm flowchart

2.2 算法适用性分析

目前,判断飞行员心理健康程度缺乏明确的、统一的标准,在采用测量指标中,影响飞行员心理健康的因素有很多,这些指标之间没有明确的关联关系,且样本量较大,对数据的直接分类难度较高,鉴于 *K*-means 算法在处理大规模数据集分类任务时表现出高效实用性^[20],选择利用该算法进行数据分析。心理状态会随着外界的变化而变化,时间、环境等因素都有可能对其产生影响,而心理状态又直接影响着心理健康水平,因此,聚类分析提出一种模糊的分析方式,将相似度高的数据聚集起来从而凸显某些显著特征^[21]。分析飞行员心理健康的相关指标数据,运用该算法对飞行员心理健康特征归类,这一过程不仅有助于客观地解析飞行员的心理健康状况,也为监控和评估飞行员的心理状态提供科学依据。

2.3 研究对象与数据来源

从某运输航空公司选取 215 名飞行员作为被试,采集有效数据 215 份。被试的平均年龄为 (23.88±0.73) 岁,均持有中国民航局颁发的商用飞行驾驶执照 (Commercial Pilot License, CPL)。

2.4 研究工具与指标体系

通过飞行员心理胜任力测评系统采集飞行员心理健康数据。心理状态方面使用症状自评量表、Beck 自杀意念量表以及酒精依赖疾患识别测验表征飞行员消极心理状态;使用幸福感指数量表表征飞行员积极心理状态。心理品质的指标构建分为自我倾向和社会适应能力,自我倾向通过自尊量表、一般自我效能感量表、内控性、有势力的他人及机遇量表以及生活定向测验修订版进行表征;社会适应能力由心理弹性量表及人际关系综合诊断量表表征。

由于被试未检出存在自杀倾向及酒精依赖,以症状自评、幸福感指数、自尊、一般自我效能感、生活定向、心理弹性、人际关系困扰、内控性、机遇、有势力的他人这 10 个指标作为样本的输入变量。其中,内控性、机遇和有势力的他人指标来源于 LEVENSON^[22] 设计的“内控、权威和机遇控制定向量表”。该量表主要测量个体在多大程度上相信自己能够控制生活(内控性),相信有势力的人能够控制事件(有势力的他人),相信机遇、运气等因素能够决定事件的结果(机遇)。

使用 Matlab R2022b 进行数据清洗、转换及消减等工作。通过数据标准化消除各指标量纲影响。结合数据高维性,通过 SPSS 25.0 进行主成分分析

实现数据降维。再利用肘部法^[23]确定最佳聚类数,使用 Matlab R2022b 完成 K -means 聚类分析。

2.5 特征降维方法

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验与巴特利特检验见表 1,由表 1 可知:原始变量间存在相关性,适合做降维因子分析,并提取 3 个因子,3 个因子共同解释总方差的 70.726%,具有研究意义。

表 1 KMO 与巴特利特检验

Table 1 KMO and Bartlett's test

检验名称	—	数值
KMO 取样适切性量数	—	0.833
巴特利特球形度检验	近似卡方	989.960
	自由度	45
	显著性	0.000

各因子对降维后的各成分贡献程度见表 2,通过降维提取出对研究有意义的 6 个关键变量:成分 1 与生活定向有较强关联,因此,命名为乐观;成分 2 与一般自我效能感、内控性和心理弹性有较强关联,因此,命名为积极心理资本^[24];成分 3 与症状自评和人际关系困扰有较强关联,因此,命名为心理困扰。

表 2 成分矩阵

Table 2 Component matrix

指标	乐观	积极心理资本	心理困扰
症状自评	0.00	-0.06	0.68
幸福感指数	0.30	0.11	-0.14
自尊	0.39	0.11	0.02
一般自我效能感	0.00	0.59	0.00
内控性	-0.10	0.64	0.08
机遇	-0.51	0.08	0.02
有势力的他人	-0.53	0.15	0.03
生活定向	0.42	0.11	0.29
心理弹性	0.16	0.41	-0.11
人际关系困扰	-0.05	0.01	0.65

2.6 最佳聚类数确定方法

肘部法则的核心思想为:随着聚类数 K 值不断增大,数据划分越为详细,SSE 的值就越小。因此,SSE 值和 K 值的关系以折线图的形式呈现,连线变平缓的“肘部”是最优 K 值。如图 3 所示,当 K 值为 4 时,SSE 值下降逐步趋于平稳,故该数据集的最优聚类数量应为 4。

2.7 聚类分析

利用 Matlab R2022b 运行算法,根据肘部法则

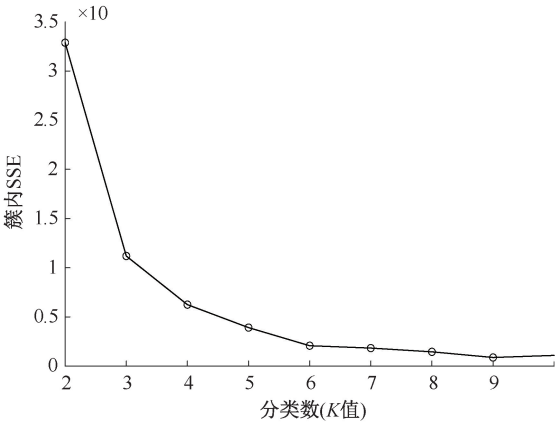


图 3 肘部拐点
Fig. 3 Elbow inflection point

选择要划分的簇数 $K=4$,随机选取 4 个对象作为初始聚类中心,其中,以经过降维处理的 3 个因子作为输入变量,计算每个对象与各聚类中心的距离,将每个对象分配给距离它最近的聚类中心。每分配一个样本,聚类中心会根据现有的对象被重新计算。最大迭代次数设置为 100,经过迭代后聚类中心不变,算法实现收敛,得到的可视化散点结果如图 4(3 个坐标轴分别代表主成分分析提取的 3 个因子,其坐标值为各样本在相应因子上的标准化得分)所示,并统计聚类结果,类别 1—类别 4 分别占 30.7%、36.3%、20.5%、12.6%。

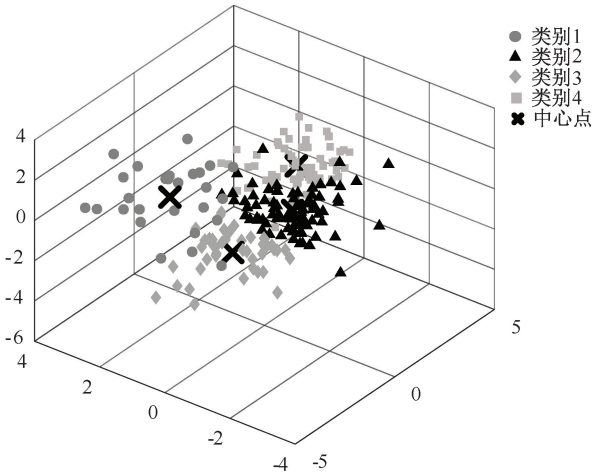


图 4 最终聚类中心
Fig. 4 Final cluster centers

聚类结果均值分析见表 3,采用标准化的数据显示聚类中心结果,并分析聚类结果均值。标准化值围绕 0 上下波动,可根据均值结合成分矩阵,判断各类指标在特征上的表现,进而分析各类飞行员的心理健康水平。

表 3 聚类结果均值分析

个案类别	乐观	积极心理资本	心理困扰
优(类别 1)	2.44	0.50	-0.03
良(类别 2)	0.07	-0.76	0.21
中(类别 3)	-1.89	-0.16	-1.09
差(类别 4)	-3.08	1.25	1.24

由表 3 可知:类别 1 乐观水平最高,积极心理水平高于一般水平,心理困扰程度也较低,总体心理健康状况最优;类别 2 的乐观水平和心理困扰程度略高于平均水平,积极心理资本略低于平均水平,总体心理健康状况稳定,存在轻微的心理困扰;类别 3 的乐观和积极心理资本水平虽然偏低,但心理困扰程度最低;类别 4 尽管具备较高水平的积极心理资本要素,但乐观水平最低,同时心理困扰程度最高。

3 飞行员心理健康画像可视化表征

为得到更全面的飞行员心理健康画像,使用降维提取剩余的指标进行分析,根据聚类算法划分的 4 个类别,并结合心理状态中幸福感指数的均值,生成可视化画像,如图 5 所示。结果显示,类别 2 和类别 3 的幸福感的指数较高,类别 4 的幸福感的指数最低。

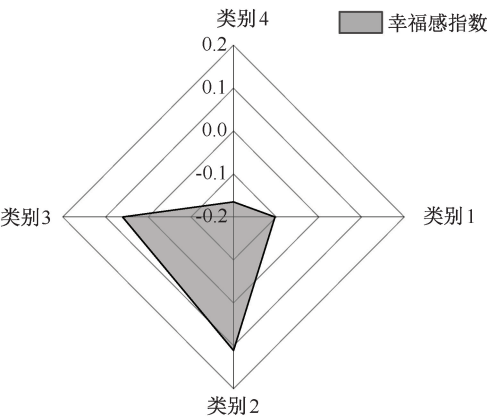


图 5 幸福感指数画像
Fig. 5 Happiness index profile

结合心理品质中自尊、机遇及有势力的他人指标,得出各类别的心理品质均值,并生成可视化图像,如图 6 所示,由图 6 可知:各指标都在均值水平上下,并无太大波动,类别 1 在机遇和有势力的他人指标中水平较高;类别 2 在自尊水平上表现优越;类别 3 总体较为均衡,各指标处于均值附近,无明显偏向;类别 4 机遇水平较高,更倾向于将得失归因于机遇。

使用提取后的 3 类指标与剩余指标共同形成飞行员个体心理健康画像,从 7 个维度展示,包含品质

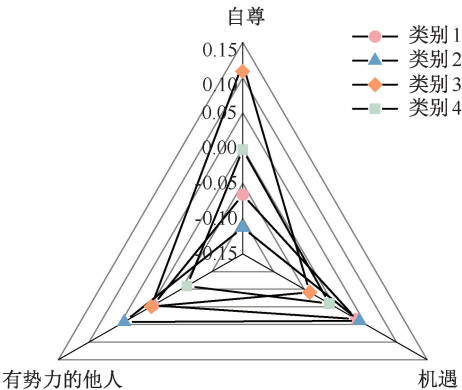


图 6 心理品质画像
Fig. 6 Psychological profile

与状态数据,飞行员个体心理健康画像如图 7 所示,飞行员群体心理健康画像如图 8 所示。相较于个体画像,被试总体的画像各指标显示出较为均衡的表现,因其前期的标准化处理,在此基础上计算各指标的平均值时发现,所有指标的均值均非常接近于 0,且相互之间的差异极小,进一步说明数据在标准化之后达到较好统一性与一致性,有利于后续的多指标综合评价和可视化分析。

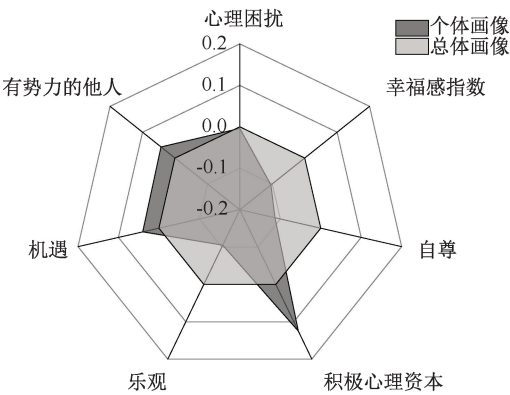


图 7 飞行员个体/总体心理健康画像示例
Fig. 7 Example of individual/overall psychological health profile for pilots

4 飞行员心理健康画像特征解析

根据算法结果显示,形成 4 类飞行员心理画像,4 类飞行员的特征分别为:

1) 第 1 类飞行员 (30.7%) 总体心理健康状况最优。这种较高乐观水平和积极心理资本要素对情绪调节具有一定积极作用,同时幸福感指数和自尊程度较高,研究表明:该状态能有效应对工作压力^[25],不易产生抑郁等消极情绪,对飞行安全十分有利。该类飞行员占比较高,能够快速适应环境变化,有保持良好心理健康水平的能力,是飞行员群体

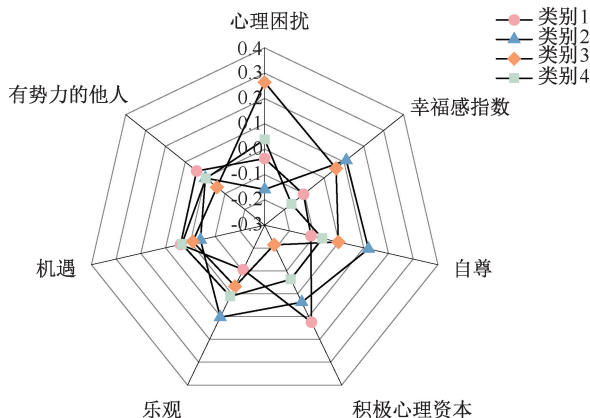


图8 飞行员群体心理健康画像示例

Fig. 8 Example of a psychological health profile for the pilot population

中的优质资源。

2) 第2类飞行员(36.3%)总体心理健康水平较为稳定,各指标都处于均值水平,上下略有波动。该类飞行员的乐观程度与均值相差不大,积极心理资本水平略低,代表不太相信情境或环境能靠自己改变,面对问题采取的态度可能不积极。研究指出,较低的心理弹性在面对工作压力、逆境或挫折时,达不到较好的对应结果,可能产生一定的心理困扰^[26],这一说法支持了文中结论。该类飞行员因存在轻微的心理不稳定因素,所以需要建立一定的监控机制,定期检查他们的心理健康状态。

3) 第3类飞行员(20.5%)总体心理健康水平较为稳定。该类飞行员的积极心理资本水平与均值相差不大,通过均值分析可知:该群体的乐观水平显示出较低倾向。在当前社会经济转型背景下,面对社会压力,飞行员群体也无法避免持续竞争,研究显示,焦虑使得部分年轻人承受的压力超过其心理阈值^[27],因此,造成低乐观水平现状。研究表明:对未来不抱有积极期望的个体,往往可能出现“逃避心理”^[28],对自我能力和自我价值持有怀疑态度,采取自我保护策略避免竞争^[29],这可能导致该类群体心理困扰较少。值得注意的是,该类飞行员的心理困扰程度最低,在人际关系方面表现突出,合作交流能力强,较少出现心理不健康状态,该优势为飞行工作提供良好的心理条件,而该类飞行员也因轻微的心理不稳定因素需要加以关注。

4) 第4类飞行员(12.6%)总体心理健康水平一般。该群体积极心理资本水平较高,这表明自我效能、内控性和心理弹性水平较高。有研究显示,心理弹性较高的人向外界寻求自我保护的程度较高^[30],这可能导致防御性悲观主义的产生,即以低的期望值思考事情的各种结果,这会导致乐观水平显示出较低的倾向。由画像雷达图可知:这类飞行员具有低幸福感和低自尊水平,有研究显示,该群体可能经受了更多压力,产生更多心理困扰^[31]。该类飞行员值得教员和航空公司等加以关注,对其心理薄弱之处采取针对性干预措施,鼓励其发挥积极心理要素的作用。

综上所述,被试飞行员整体的心理健康水平较为良好。4类飞行员分别占比30.7%、36.3%、20.5%和12.6%。有研究发现,焦虑型人格的飞行员占比达到12.34%,这一类飞行员往往是人际关系紧张、心理疾病及家庭矛盾高发的人群^[32],大部分飞行员总体心理健康水平良好,只有类别4这一少数飞行员群体显示出略低于平均水平的心理健康水平,这一具体的占比直接支持了文中分类比例结果。

5 结 论

1) 基于K-means聚类算法,将215名民航飞行员划分为4类心理健康特征群体,发现飞行员心理健康结构具有群体异质性。这一研究深化了对飞行员心理健康多元表现模式的理解,可为超越单一评估标准、建立分级分类管理体系提供理论依据。

2) 基于飞行员心理健康数据的画像方法能够将抽象的心理健康数据转化为可观测的群体特征画像,从而在操作层面实现对飞行员心理状态的系统化辨识与可视化表达。这不仅为航空公司在飞行员选拔、训练配置与健康管理等环节提供精准化工具,也为完善PLM体系中心理胜任力的动态评估机制提供实践路径。

3) 未来研究可结合生理数据、行为数据等多模态信息提升画像的全面性与准确性,进一步验证模型的预测效度及行业适用性。后续研究可引入纵向追踪设计,持续监测飞行员心理健康变化,验证模型的预测效度与稳定性,同时拓展跨航空公司、跨文化背景的样本,提升模型的泛化能力与行业适用性。

参 考 文 献

[1] 汪磊,邹颖,王朔. QAR数据驱动的飞行员不安全操作行为量化评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 49-56.

- WANG Lei, ZOU Ying, WANG Shuo. Quantitative evaluation of pilots' unsafe operation behavior driven by QAR data[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(5): 49-56.
- [2] SALAS E, DAN M. Human factors in aviation[M]. Salt Lake: Academic Press, 2010: 3-19.
- [3] 中国民用航空局. 运输航空飞行员技能全生命周期管理体系建设实施路线图[R/OL]. (2020-12-25). https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZCFB/202012/t20201225_205785.html.
- [4] ACKLAND C A, MOLESWORTH B R C, GRISHAM J R, et al. Pilot mental health, methodologies, and findings: a systematic review[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2022, 93(9): 696-708.
- [5] KE Luoma, ZHANG Guangpeng, HE Jibo, et al. Pilot selection in the era of virtual reality: algorithms for accurate and interpretable machine learning models[J]. Aerospace, 2023, 10(5): DOI: 10.3390/AEROSPACE10050394.
- [6] COOPER A. The inmates are running the asylum[M]. Wiesbaden: Vieweg+ Teubner Verlag, 1999: 17.
- [7] 袁萌,徐桂. 大学生焦虑情绪精准干预探究:基于心理画像技术的实施[J]. 北京教育(德育),2020,13(增1): 119-122.
- [8] 徐芳,应洁茹. 国内外用户画像研究综述[J]. 图书馆学研究,2020,39(12): 7-16.
- XU Fang, YING Jieru. A review of user profile research at home and abroad[J]. Research on Library Science, 2020, 39(12): 7-16.
- [9] 徐开俊,刘鼎一,王泉川. 基于扎根理论的民航飞行员心理胜任力专家访谈分析[J]. 综合运输,2024,46(4): 45-49.
- XU Kaijun, LIU Dingyi, WANG Quanchuan. An expert interview analysis on the psychological competence of civil aviation pilots based on grounded theory[J]. China Transportation Review, 2024,46(4): 45-49.
- [10] 汪磊,蒋引,谭维. 航线飞行员风险画像指标体系构建[J]. 中国安全科学学报,2020,30(11):13-21.
- WANG Lei, JIANG Yin, TAN Wei. Study on construction of risk portrait index system for airline pilots[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(11): 13-21.
- [11] 陈农田,宁威峰,齐少桓. 面向飞行员飞行全生命周期的作风胜任能力画像[J]. 人类工效学,2023,29(3):30-36.
- CHEN Nongtian, NING Weifeng, QI Shaohuan. Portrait of pilot conduct competency for the professionalism lifecycle[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2023,29(3): 30-36.
- [12] ZHANG Mengxi, WANG Lei, ZOU Ying, et al. Preliminary research on evaluation index of professional adaptability for airline transport pilot[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2022: 473-487.
- [13] 汪磊,邹颖,张梦茜,等. 基于品质-状态双层次模型的民航飞行员心理健康评价指标体系构建[J]. 南京航空航天大学学报:社会科学版,2023,25(4):96-104.
- WANG Lei, ZOU Ying, ZHANG Mengxi, et al. Construction of evaluation index system of airline pilots' mental health based on quality-state dual level mode[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics: Social Sciences, 2023,25(4): 96-104.
- [14] WANG Lei, PENG Jiahua, ZOU Ying, et al. A measurement framework and method on airline transport pilot's psychological competency[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2023: 276-285.
- [15] 张敏,于剑. 基于划分的模糊聚类算法[J]. 软件学报,2004,15(6):858-868.
- ZHANG Min, YU Jian. Fuzzy partitional clustering algorithms[J]. Journal of Software, 2004,15(6): 858-868.
- [16] JAIN A K, MURTY N M., FLYNN P J. Data clustering: a review[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1999, 31(3): 264-323.
- [17] 夏咏梅. 基于文本挖掘的分类与聚类技术[J]. 情报探索,2005,12(3):65-67.
- [18] FENG Xin, HU Xiaoxi, LIU Yang. Radar signal sorting algorithm of k-means clustering based on data field[C]. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2017: 2 262-2 266.
- [19] 杨俊闯,赵超. K-Means 聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(23): 7-14,63.
- YANG Junchuang, ZHAO Chao. Survey on K-Means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019,55(23): 7-14, 63.
- [20] HUANG Zhexue. A fast clustering algorithm to cluster very large categorical data sets in data mining[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1997, 3(8): 34-39.
- [21] 李哲,张映雪,胡蕙. 聚类分析在大学生心理健康管理中的应用[J]. 湖北工程学院学报,2014,34(6):53-57.
- LI Zhe, ZHANG Yingxue, HU Hui. Application research on psychological health management of university students using

cluster analysis[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2014,34(6): 53-57.

[22] LEVENSON H. Multidimensional locus of control in psychiatric patients [J]. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 1973, 41(3): 397-404.

[23] TIBSHIRANI R, WALTHER G, HASTIE T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 2001, 63(2): 411-423.

[24] LUTHANS F, LUTHANS K W, LUTHANS B C. Positive psychological capital: Beyond human and social capital[J]. Business Horizons, 2004,47(1): 45-50.

[25] 苏彦丽, 张进辅. 国外防御性悲观研究述评[J]. 心理科学进展, 2008, 16(5): 745-752.
SU Yanli, ZHANG Jinfu. Review of foreign studies on defensive pessimism[J]. Advances in Psychological Science, 2008, 16(5): 745-752.

[26] 程诚, 黄俊, 梁宝勇. 心理健康素质测评系统·中国成年人心理弹性全国采样调查报告[J]. 心理与行为研究, 2014, 12(6): 735-742.
CHENG Cheng, HUANG Jun, LIANG Baoyong. Psychological health diathesis assessment system: a nationwide survey of resilient trait scale for Chinese adults[J]. Studies of Psychology and Behavior, 2014, 12(6): 735-742.

[27] ZUBIN J, SPRING B. Vulnerability: a new view of schizophrenia[J]. Journal of Abnormal Psychology, 1977, 86(2): 103.

[28] 耿艳, 张蕾, 郭誉, 等. 战斗机飞行员心理弹性在心理压力与应对方式中的调节效应[J]. 华南国防医学杂志, 2022, 36(6): 444-448.
GENG Yan, ZHANG Lei, GUO Yu, et al. Regulatory effects of psychological resilience on relationship between mental stress and coping style in fighter pilots[J]. Military Medicine of Joint Logistics, 2022, 36(6): 444-448.

[29] 陈友华, 曹云鹤. “躺平”: 兴起、形成机制与社会后果[J]. 福建论坛: 人文社会科学版, 2021, 38(9): 181-192.
CHEN Youhua, CAO Yunhe. "Lying Flat": rise, formation mechanism and social consequences[J]. Fujian Tribune, 2021, 38(9): 181-192.

[30] GLANTZ M D, JOHNSON J L, et al. Resilience and development: positive life adaptations[M]. New York: Springer, 1999: 17-83.

[31] 于肖楠, 张建新. 韧性(resilience): 在压力下复原和成长的心理机制[J]. 心理科学进展, 2005, 23(5): 658-665.
YU Xiaonan, ZHANG Jianxin. Resilience: the psychological mechanism for recovery and growth during stress[J]. Advances in Psychological Science, 2005, 23(5): 658-665.

[32] 马香琰, 娄振山, 刘传勇. 飞行员适应与焦虑型人格对心理健康影响的路径分析[J]. 中国疗养医学, 2011, 20(4): 332-334.
MA Xiangyan, LOU Zhenshan, LIU Chuanyong. Path analysis about effects of pilots adaption and dysphoria personalities on mental health[J]. Chinese Journal of Convalescent Medicine, 2011, 20(4): 332-334.



作者简介：汪磊（1982—），男，安徽霍山人，博士，研究员，博士生导师，主要从事航空安全与人为因素等方面的研究。E-mail: wanglei0564@ hotmail. com。