

应急医学救援护理人员生物安全胜任能力评价指标体系构建及 PSO-BP 神经网络综合评价

赵默然¹, 曹堇沫², 沈佳延³, 杨卓轶¹, 王超¹, 孙彩虹^{4*}

(1 国防大学联合勤务学院, 北京 100858 2 中国人民解放军医学院, 北京 100853 3 武警士官学校, 杭州 310000 4 解放军总医院第一医学中心神经外科医学部, 北京 100853)

摘要: **目的/意义** 应急医学救援队伍护理人员的生物安全胜任能力关系到突发公共卫生事件、重大传染病疫情及生物安全事件中的救援任务完成质量, 但目前该领域尚缺乏将智能算法应用于综合评价的研究。本文构建应急医学救援队伍护理人员生物安全胜任能力评价指标体系, 采用层次分析法确定指标权重并进行综合评价, 进而探索 PSO-BP 神经网络对 AHP 综合评价结果的拟合效果, 以期为后续构建评价工具提供方法学基础。**方法/过程** 运用文献分析法、专家访谈法和德尔菲法构建评价指标体系; 采用层次分析法确定指标权重并计算综合评价值; 以 AHP 综合评价值作为网络训练的期望输出, 建立 PSO-BP 神经网络模型; 从 203 组数据中随机抽取 153 组为训练集、25 组为验证集、25 组为测试集, 对模型进行检验。**结果/结论** 构建的评价指标体系涵盖职业素养与应急准备、基础及急重症护理、生物防御护理、生物安全防护防护 4 个维度及 13 项指标, 通过专家一致性检验 (权威系数 0.91); PSO-BP 神经网络输出值与 AHP 综合评价值的拟合误差小于 2%, 决定系数 R^2 接近 1, 提示模型能够较好地拟合 AHP 综合评价结果。本研究构建的评价指标体系可为该领域综合评价提供一种结构化工具, PSO-BP 神经网络模型可较好地拟合 AHP 综合评价结果, 初步验证了该框架对 AHP 评价结果的拟合能力, 为后续引入客观数据、构建评价工具提供了方法学基础。

关键词: 粒子群优化; BP 神经网络; 应急医学救援护理人员; 生物安全; 综合评价¹

Construction of a Biosafety Competency Evaluation Index System for Emergency Medical Service Nursing Personnel and Comprehensive Evaluation Using PSO-BP Neural Network

Zhao Moran¹, Cao Jinmo², Shen Jiayan³, Yang Zhuoyi¹, Wang Chao¹, Sun Caihong^{4*}

¹Joint Logistics College, National Defence University of PLA ,Beijing 100858,China;²Chinese PLA Medical School ,Beijing 100853,China;³Non-Commissioned Officer Academy of PAP ,Zhejiang 310000,China;⁴Department of Neurosurgery Medicine,the First Medical Center,Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Abstract: Purpose/Significance The biosafety competency of nursing personnel in emergency medical service teams is directly related to the quality of emergency rescue missions in public health emergencies, major infectious disease outbreaks, and biosafety incidents. However, studies on the application of intelligent algorithms to comprehensive evaluation in this field remain limited. To construct a biosafety competency evaluation index system for nursing personnel in emergency medical service teams, and to explore the fitting effect of the PSO-BP neural network on AHP comprehensive evaluation results, providing a methodological foundation for developing evaluation tools in this field. **Method/Process** An evaluation index system was constructed through literature analysis, expert interviews, and the Delphi method.

¹[作者简介] 赵默然, 博士研究生, 主治医师; 通信作者: 孙彩虹, 主管护师[基金项目] 江西省重点研发计划项目 (S20254537); 国防生物科技优秀青年人才基金资助项目 (项目编号: 02-SWKJYCJ30)

The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine indicator weights and calculate comprehensive evaluation values. A PSO-BP neural network model was established using AHP comprehensive evaluation values as expected outputs for network training. From 203 datasets, 153 were randomly selected as the training set, 25 as the validation set, and 25 as the test set for model validation. **Result/Conclusion** The constructed evaluation index system, comprising 4 dimensions and 13 indicators, passed expert consistency testing with an expert authority coefficient of 0.91. The fitting error between the PSO-BP neural network output values and the AHP comprehensive evaluation values was less than 2%, and the coefficient of determination R^2 approached 1, indicating that the model could fit AHP comprehensive evaluation results well. The evaluation index system constructed in this study provides a structured tool for comprehensive evaluation in this field. Building on this foundation, the PSO-BP neural network model demonstrated good fitting performance against AHP comprehensive evaluation results, providing a methodological foundation for extending the evaluation model with objective data and developing evaluation tools in the future.

Keywords: particle swarm optimization; BP neural network; emergency medical service nursing personnel; biosafety; comprehensive evaluation

构建多层次应急医学救援体系是国家生物安全战略的重要组成部分^[1]。应急医学救援队伍作为应对突发公共卫生事件、重大传染病疫情、生物安全事件的核心力量，在国家应急救援体系中发挥着关键作用。护理人员作为其重要组成部分，在生物安全相关应急工作中所需要的知识、技能、决策能力与个人品质等生物安全胜任能力^[2]水平直接关系到能否圆满完成应急救援使命任务。无论是军队医疗机构还是地方三甲医院、疾控中心，都承担着生物安全防护和应急救援的重要职责，对护理人员的生物安全能力提出了共同要求。

护理人员能力评价研究日益受到关注，评价方法逐步从定性走向定量、从主观走向客观。传统方法包括德尔菲法结合层次分析法^[3-4]、客观结构化临床考核（OSCE）^[5-6]、能力评价量规^[7]、教学量规^[8]、直接临床技能观察（DOPS）^[9]等。上述方法各有优势和适用场景，但在处理多指标之间较为复杂的关系时仍存在一定局限性。应急医学救援护理人员生物安全胜任能力评价具有一定特殊性，其工作场景多涉及突发公共卫生事件和生物安全事件，能力要求不仅包括生物安全防护、病原体识别等专业技能，也涉及快速响应、协同配合等综合能力。随着人工智能技术的发展，粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）-反向传播（Back Propagation, BP）神经网络已被应用于混合教学质量评价^[10]、装备效能评估^[11]、无人机攻击效能评估^[12]等领域，为复杂多指标评价结果的建模分析提供了新的技术路径。本研究首先构建应急医学救援队伍护理人员生物安全胜任能力评价指标体系；其次，采用层次分析法确定指标权重并进行综合评价；最后，以AHP综合评价结果为参照，探索PSO-BP神经网络对该结果的拟合效果，为后续引入客观数据、构建评价工具提供方法学基础。

1 对象和方法

1.1 研究对象

选取三甲医院应急医学救援队伍护理人员为评价对象。纳入标准：（1）从事护理工作2年及以上；（2）至少参加过1次应急医学救援演练、培训或实际救援任务；（3）自愿参加本次研究并承诺如实填写评价问卷。

1.2 评价指标体系构建方法

本研究采用文献分析、半结构化访谈和德尔菲法相结合的方法构建应急医学救援护理人员生物安全胜任能力评价指标体系。首先，通过查阅国内外相关文献、《中华医学百科全书·生物武器医学防护学》^[13]等专业书籍、《中华人民共和国生物安全法》^[14]《中华人民共和国传染病防治法》^[15]等相关法律法规，初步形成评价指标框架；其次，通过半结构化访谈对初步框架进行补充和完善；最后，采用德尔菲法对初步指标条目进行筛选和修订，形成最终评价指标体系。

在初步框架构建阶段，选取院校、医院从事卫生管理、医疗护理、生物安全、应急救援等领域的专家进行半结构化访谈。访谈问题如下：①“您认为应急医学救援队伍护理人员应具备哪些职业素养和应急准备能力”；②“在应急医学救援任务中，护理人员需要哪些基础护理和急重症救护能力”；③“您认为护理人员在生物防御救护方面应掌握哪些核心知识和技能”；④“在生物安全防疫防护方面，护理人员最需要加强的能力是什么”；⑤“您认为上述各方面能力的相对重要性如何，当前最薄弱的环节是什么”。单次访谈时间约30~45 min，访谈过程中研究者根据实际情况调整访谈问题，并于访谈结束前询问受访者是否有补充内容。在文献分析基础上，结合访谈结果，对评价指标的内容表述和条目设置进行补充与修订，形成初步指标条目。

在此基础上，根据初步指标条目设计专家咨询问卷，采用德尔菲法对北京、上海等地的15位专家进行两轮咨询。专家的判断依据系数Ca和熟悉程度系数Cs分别为0.94和0.88，根据公式 $Cr=(Ca+Cs)/2$ 计算得出专家权威系数为0.91，表明专家权威程度较高。15位专家均为高级职称，其中研究生学历14位，工作年限10年以上，专业领域涵盖临床医学、卫生管理、生物安全、临床护理、应急医学等。经过两轮咨询，专家对初步指标进行修改、补充和筛选，形成评价指标体系。

1.3 PSO-BP神经网络评价模型

1.3.1 理论基础 BP神经网络是一种基于误差反向传播算法的多层前馈神经网络，具有较强的非线性映射能力，但存在易陷入局部最优解等缺陷^[16]，其结构见图1。粒子群优化算法（PSO）是一种群体智能优化算法，具有全局搜索

能力强、收敛速度快等特点^[17]。本研究采用 PSO 优化 BP 神经网络初始权重，以提高模型在 AHP 综合评价结果拟合过程中的稳定性和训练效率。

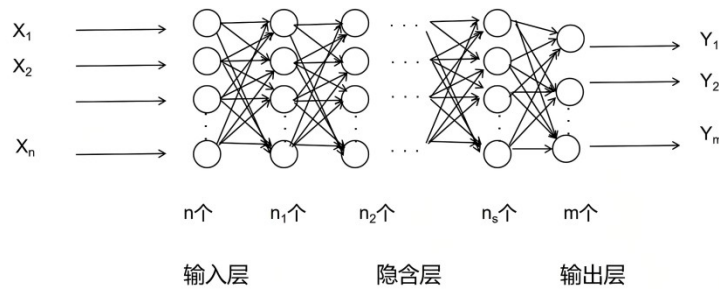


图 1 BP 神经网络结构示意图

Fig.1 Schematic Diagram of BP Neural Network Structure

1.3.2 模型构建方法 护理人员进行自评，并采用归一化处理（详见 1.4 节）。以归一化后的指标得分作为神经网络输入，以层次分析法加权求和所得的综合评价值作为网络训练的期望输出，通过粒子群算法优化神经网络参数，建立 PSO-BP 神经网络模型，以考察 PSO-BP 神经网络对多指标综合评价结果的拟合能力。具体而言，先采用 PSO 算法优化神经网络初始权重，迭代至收敛后进行 BP 精细训练。PSO-BP 神经网络算法流程见图 2，核心公式^[18]为粒子速度更新公式（1）和位置更新公式（2）。

$$V_i(t+1) = w V_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i - X_i(t)) + c_2 r_2 (gbest_i - X_i(t)) \quad (1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2)$$

式中， V_i 和 X_i 分别为粒子速度和位置向量， w 为惯性权重， c_1 和 c_2 为学习因子， r_1 和 r_2 为[0,1]区间随机数， $pbest_i$ 和 $gbest_i$ 分别为个体最优和全局最优位置。各参数的具体取值及确定依据详见 1.5.2 节。

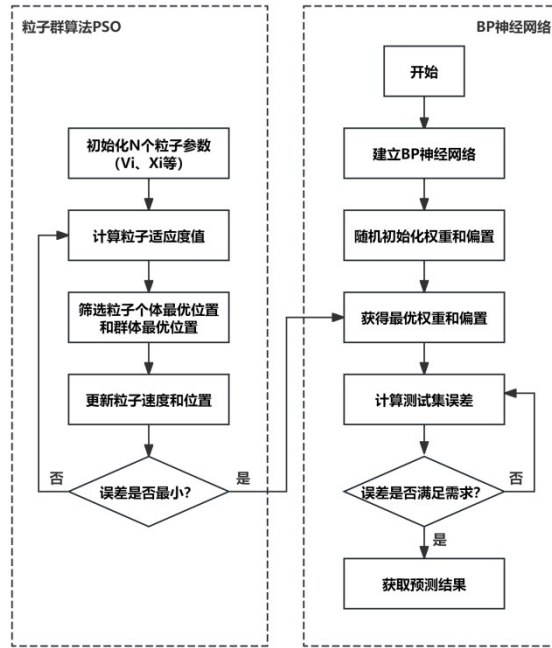


图 2 PSO-BP 神经网络算法流程图

Fig.2 Flowchart of PSO-BP Neural Network Algorithm

1.4 数据采集与处理

采用 Likert 5 级评分法进行自评打分，回收有效问卷 203 份。请参与指标体系构建的 15 名专家填写层次分析法问卷，采用 Saaty 1-9 标度法对各项指标的重要性进行两两比较打分。基于层次分析法原理^[19]，运用 Yaahp 10.2 软件整合专家意见并构建判断矩阵。经计算所有判断矩阵的一致性比率 CR 均小于 0.1，通过一致性检验。最终形成的评价指标权重见表 2。根据文献将胜任能力等级划分为优、良、中、差^[20]。采用最大最小值法，按公式（3）对 203 组数据进行归一化处理：

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

式中，X 表示初始值，X' 表示初始值归一化后的结果。Xmax 表示同一类目下最大值，Xmin 表示最小值。

1.5 模型训练方法

1.5.1 网络结构设计 根据构建的指标体系，设置输入层节点数为 13 对应 13 个指标，输出层节点数为 1 对应评价值。采用公式（4）确定隐含层节点数：

$$h = \sqrt{m+n+a} \quad (4)$$

式中，h 表示隐含层节点数，m 表示输入层节点数，n 表示输出层节点数，a 为 0-10 自然数，隐含层节点数范围为[4,13]。通过比较不同节点数下的均方误

差，隐含层节点数为 7 时模型性能最优。

1.5.2 PSO 参数设置 设置个体学习因子 c_1 和群体学习因子 c_2 为 2.0^[21]，通过对比不同种群规模（ $N=10$ 、 20 、 30 、 50 等）下的均方误差和训练耗时， $N=30$ 时取得最佳平衡，确定种群规模 N 为 30，速度最大值 V_{max} 为 1，迭代次数 $maxgen$ 为 100。采用均方误差和决定系数 R^2 进行模型检验，设置精度为 1×10^{-6} 。当均方误差小于目标值则停止训练，当决定系数 R^2 的值趋近于 1 时，表示拟合效果更好。

1.5.3 数据集划分与训练 从 203 组归一化处理后的数据中，随机抽取 153 组（75.4%）为训练集、25 组（12.3%）为验证集、25 组（12.3%）为测试集。训练集用于模型训练，验证集用于调整超参数和防止过拟合，测试集用于最终评价模型性能。使用 MATLAB R2021a 进行模型训练，经过迭代，模型收敛，达到预设的误差要求。

2 结果

2.1 评价指标体系

最终确定评价指标体系，包含目标层 A、准则层 B1-B4，指标层 C1-C13，结构及指标含义见表 1。

表 1 评价指标体系及指标含义

Tab.1 Evaluation Index System and Indicator Definitions

目标层	准则层	含义	指标层	内涵
A 应急医学救援队伍护理人员生物安全胜任能力	B ₁ 职业素养与应急准备能力	护理人员在职业素养、应急响应能力与团队协作能力方面的综合能力。	C ₁ 职业素养基础	职业使命与责任、应急救援知识、职业基础素养、身体素质、心理素质等
			C ₂ 应急响应能力	应急响应能力、医疗队伍展开与撤收能力、现场基本防卫能力等
			C ₃ 团队协作能力	团队合作精神、跨部门联合行动配合能力、沟通协调能力等
	B ₂ 基础及急重症护理能力	护理人员在基础护理、急救护理与灾害医学护理方面的核心能力。	C ₄ 基础护理能力	生物事件心理护理能力、生物安全防御健康教育、生命体征监测能力、基础生命支持能力、静脉通路建立能力等
			C ₅ 急救护理能力	急救护理操作能力、急救药物使用能力、转运工具选择与应用能力等
			C ₆ 灾害医学护理能力	常见创伤护理能力、特殊环境伤病护理能力、多发伤复合伤护理能力等
	B ₃ 生物防御护理能力	护理人员在生物防御理论、救护技术与侦检处置方面的专业能力。	C ₇ 生物防御理论知识	掌握生物安全基础知识、掌握卫生流行病学知识、掌握生物威胁防护知识、掌握生物防御应急预案等
			C ₈ 生物防御救护能力	生物事件模拟演练能力、生物安全事件应对与救护能力、生物损伤现场检伤分类能力、生物损伤现场急救能力、生物损伤早期救护能力、特异性生物损伤护理能力、生物损伤康复护理能力、救护信息记录能力等
			C ₉ 生物防御侦检能力	病原体标本采集与筛查能力、生物毒素与病原体暴露处理能力、生物废弃物管理能力等
			C ₁₀ 疾病监测与预警能力	症状观察能力、疾病风险评价与识别能力、信息收集能力、掌握人工智能辅助监测预警的工具应用等
	B ₄ 生物安全防疫防护能力	护理人员在疾病监测、卫生防疫、防护用品使用与隔离上报方面的实践能力。	C ₁₁ 卫生防疫能力	掌握免疫预防知识、掌握消毒灭菌物品存储方式与使用、环境洗消能力、装备设施洗消能力、护理人员洗消能力等
			C ₁₂ 防护用品配备与使用	掌握防护用品理论知识、防护用品的选择与佩戴使用能力等
			C ₁₃ 隔离与上报	掌握传染病的隔离与消毒方法、掌握传染病信息上报流程、掌握大数据分析在传染病防控中的应用等

2.2 指标权重

最终形成的评价指标权重见表 2，能力等级判定标准见表 3^[22]，根据表 2 计算各护理人员的 AHP 综合评价价值，部分结果见表 4。

表 2 能力评价指标权重

Tab.2 Weights of Competency Evaluation Indicators

目标层	准则层	相对权重	指标层	相对权重	综合权重
A 应急医学救援队伍护理人员生物安全胜任能力	B ₁ 职业素养与应急准备能力	0.4550	C ₁ 职业素养基础	0.1958	0.0891
			C ₂ 应急响应能力	0.3108	0.1414
			C ₃ 团队协作能力	0.4934	0.2245
	B ₂ 基础及急重症护理能力	0.1412	C ₄ 基础护理能力	0.2500	0.0353
			C ₅ 急救护理能力	0.2500	0.0353

力	B ₃ 生物防御 护理能力	0.2627	C ₆ 灾害医学护理能力	0.5000	0.0706
			C ₇ 生物防御理论知识	0.2493	0.0655
			C ₈ 生物防御救护能力	0.5936	0.1559
			C ₉ 生物防御侦检能力	0.1571	0.0413
B ₄ 生物安全 防疫防护能 力	0.1411		C ₁₀ 疾病监测与预警能 力	0.1051	0.0148
			C ₁₁ 卫生防疫能力	0.2848	0.0402
			C ₁₂ 防护用品配备与使 用	0.4457	0.0629
			C ₁₃ 隔离与上报	0.1644	0.0232

表 3 能力等级判定标准

Tab.3 Criteria for Competency Level Determination

胜任能力等级	差	中	良	优
胜任能力评分	< 0.4	[0.4-0.6)	[0.6-0.8)	≥0.8

表 4 AHP 综合评价部分示例

Tab.4 Partial Examples of AHP Comprehensive Evaluation Values

序号	C1	C2	C3	C4	...	C13	生物安全胜任能力
1	3	4	5	4	...	3	0.73
2	4	4	5	5	...	4	0.84
3	2	2	3	3	...	3	0.37
4	2	3	4	3	...	2	0.43
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
203	3	3	5	3	...	3	0.52

2.3 模型检验结果

随着迭代次数增加，均方误差值逐渐降低并趋于稳定。从图 3 可见，训练集、验证集、测试集的决定系数 R^2 均接近 1，拟合曲线与样本值变化趋势一致，表明模型训练效果良好。从图 4 可见，随着迭代次数增加，模型误差逐步下降；迭代至 20 次时，误差不再明显下降，表明模型已收敛。

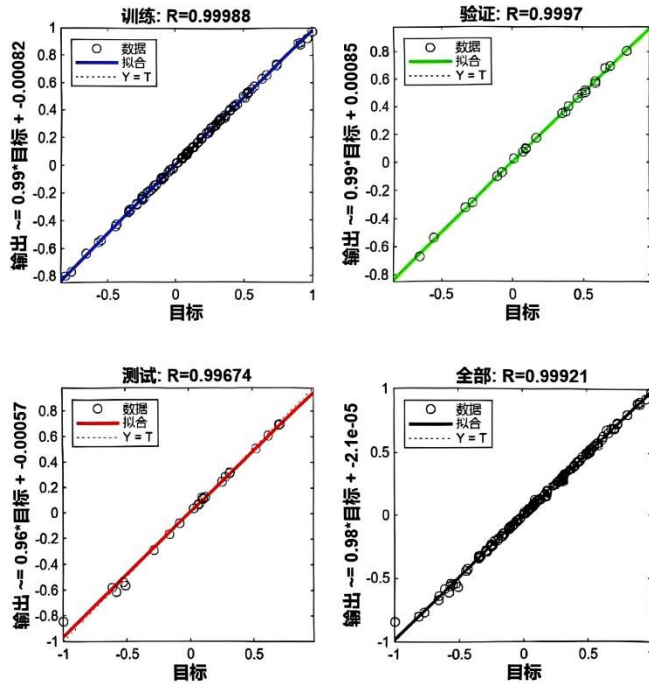


图 3 数据拟合结果

Fig.3 Data Fitting Results

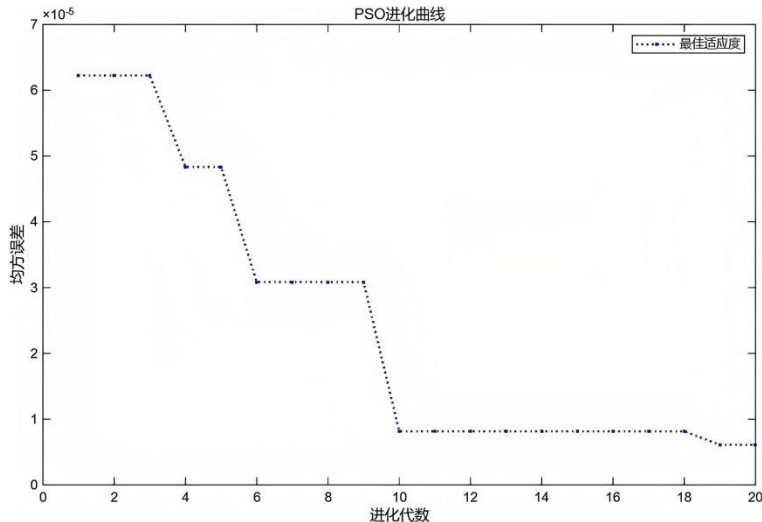


图 4 误差变化图

Fig.4 Error Variation Chart

使用测试集对模型性能进行最终评价，部分结果见表 5。其中模型输出值与 AHP 综合评价值的拟合误差在 2.0%以内，表明 PSO-BP 神经网络能够较好拟合 AHP 综合评价结果。

表 5 模型输出值与 AHP 综合评价值对比

Tab.5 Comparison between Model Output Values and AHP Comprehensive Evaluation Values

模型输出值	AHP 综合评价值	等级	误差 (%)
0.5850	0.5954	中	1.7467

模型输出值	AHP 综合评价价值	等级	误差 (%)
0.2954	0.2984	差	1.0053
0.8804	0.8938	优	1.4992
0.7161	0.7211	良	0.6933

3 讨论

3.1 评价指标体系与结果分析

本研究首先构建了包含 4 个准则层和 13 个指标层的评价指标体系，并采用层次分析法确定指标权重并计算 AHP 综合评价价值（表 2、表 4）。从权重结果看，职业素养与应急准备能力（B1）权重最高（45.5%），体现了“常态化准备、快速响应”的职业特征；团队协作能力（C3）综合权重 22.45%，提示多部门协同是生物安全事件中的关键能力要求；生物防御救护能力（C8）综合权重 15.59%，为单项指标最高，提示该岗位需具备较强的生物防御专业能力。上述权重分布在一定程度上反映了应急医学救援护理人员区别于普通护理岗位的能力侧重点。在此基础上，以 AHP 综合评价价值作为网络训练的期望输出，建立 PSO-BP 神经网络模型。模型训练完成后，在测试集上将神经网络输出值与 AHP 综合评价价值进行对比（表 5），通过拟合误差和决定系数 R^2 评估拟合情况（图 3、图 4）。结果表明，PSO-BP 神经网络能够较好拟合 AHP 综合评价结果。

3.2 研究意义

本研究的主要意义体现在以下两个层面。一方面，本研究构建了兼顾应急医学救援任务特征与生物安全要求的护理人员能力评价指标体系，涵盖职业素养与应急准备、基础及急重症护理、生物防御护理、生物安全防护防护 4 个维度，可为该领域开展综合评价提供一种结构化工具。另一方面，在方法学层面，本研究以 AHP 综合评价结果为参照，初步验证了 PSO-BP 神经网络框架对此类多指标综合评价结果的拟合能力，初步确定了网络结构与参数配置方案。该框架在引入客观考核数据或拓展评价维度时，可直接在现有训练流程与参数方案基础上训练，无需从头构建网络框架，为后续构建评价工具提供了可复用的方法学基础。

3.3 研究局限性

本研究仍存在一定局限性。第一，本研究以 AHP 综合评价结果作为网络训练的期望输出，模型输出与期望输出之间的一致性主要反映其拟合效果，尚未引入客观考核数据以拓展至更广泛的应用场景。第二，本研究使用的数据主要来源于护理人员自评，可能受到个体主观判断的影响，后续研究可结合他评、客观考核及任务表现记录等多源数据进一步完善评价依据。第三，本研究总样

本量为 203 组，其中测试集为 25 组，样本规模和验证强度仍较有限，后续尚需在更大样本及多中心数据基础上进一步检验模型的稳定性。

作者贡献：赵默然负责总体设计、论文撰写；曹堇沫负责指标体系设计；沈佳延负责模型算法构建；杨卓轶责数据处理；王超负责数据处理；孙彩虹负责论文指导。
利益声明：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1]加强国家生物安全风险防控和治理体系建设 提高国家生物安全治理能力[N]. 人民日报, 2021-09-30(01).
- [2]蒋玮, 申颖, 张娜, 等. 野战传染病医院护理人员生物安全核心能力培训体系的构建[J]. 空军航空医学, 2025, 42(2): 171-175.
- [3]HE H, ZHOU T, ZENG D, et al. Development of the competency assessment scale for clinical nursing teachers: results of a Delphi study and validation[J]. Nurse Education Today, 2021, 101: 104876.
- [4]李长英, 曾连, 林代琼, 等. 基于岗位胜任力构建感染科新入职护士呼吸道传染性疾病预防护理能力评价指标体系[J]. 循证护理, 2025, 11(10): 1938-1943.
- [5]ALIZADEH S, ZAMANZADEH V, OSTOVAR S, et al. The development and validation of a standardised eight-station OSCE for registration of undergraduate nursing students: a Delphi study[J]. Nurse Education in Practice, 2023, 73: 103817.
- [6]魏婷, 郭娟, 张玮珏. 客观结构化临床考核在新生儿科护士护理能力评价中的应用效果[J]. 中国当代医药, 2019, 26(31): 232-234.
- [7]YASUMARU R, OYAMADA K. Development of rubric for evaluation of nursing competency of early career nurses in critical care[J]. Journal of Japan Academy of Nursing Science, 2024, 44: 22-31.
- [8]王艳. 使用教学量规评价护理学生循证护理能力[J]. 循证护理, 2017, 3(5): 500-503.
- [9]RAFII F, GHEZELJEH T N, NASROLLAH S. Design and implementation of clinical competency evaluation system for nursing students in medical-surgical wards[J]. Journal of Family Medicine and Primary Care, 2019, 8(4): 1408-1413.
- [10]ZHOU Y, ZHANG L. Hybrid teaching quality evaluation based on PSO-BP neural network[J]. International Journal of Continuing Engineering Education and Life-long Learning, 2025, 35: 312-330.
- [11]石宸睿, 田露, 徐湛, 等. 基于 PSO-BP 的应急通信感知装备效能评价方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(11): 3455-3462.
- [12]CHEN X, HU N K. Effectiveness evaluation for UAV air-to-ground attack based on PSO-BP neural network[C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: IEEE, 2017: 3864-3869.
- [13]祝庆余. 中华医学百科全书·生物武器医学防护学[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2020: 144-189.
- [14]中华人民共和国生物安全法[S]. 2024.
- [15]中华人民共和国传染病防治法[S]. 2025.
- [16]高燕, 杜玥, 曾森. 基于 BP 神经网络的制造企业财务风险预警研究[J]. 会计之友, 2023, (1): 62-70.
- [17]TANG J, LIU G, PAN Q T. A review on representative swarm intelligence algorithms for solving optimization problems: applications and trends[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(10): 1627-1643.
- [18]张溪, 龚战胜, 何秋池, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的战时军队物资供应商评价研究[J]. 军事运筹与评估, 2024, 39(4): 35-41.
- [19]方积乾, 孙振球. 卫生统计学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 423-428.
- [20]万舟, 汤超, 许有才. 基于 AHP 与 PSO-BP 神经网络的电梯安全评价研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(9): 1561-1565, 1598.
- [21]LIU X, LIU Z, LIANG Z, et al. PSO-BP neural network-based strain prediction of wind turbine blades[J]. Materials, 2019, 12(12): 1889.
- [22]MULUMBA D M. 基于 AHP 和 BP 神经网络的煤矿井下安全风险评估研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.

