

# 基于ARIMA模型的短期内急进高海拔矿山环境下血氧心率变化分析研究

张晓丹 陈辉

新疆大学地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830017

**摘要:** 为分析短期内急进高海拔矿山环境下个体血氧饱和度与心率的动态变化特征, 基于连续监测数据构建 ARIMA 时间序列模型。通过平稳性检验、模型识别与残差诊断, 对血氧和心率序列进行建模与短期预测。结果表明, ARIMA 模型能够较好地拟合两项生理指标的变化趋势, 预测结果与实测数据一致性较高, 残差满足白噪声假设。研究结果可为高海拔矿山作业人员的健康监测与风险预警提供参考。

**关键词:** 急进高海拔; ARIMA 模型; 矿山环境; 血氧饱和度; 心率

## Research on the Changes of Blood Oxygen and Heart Rate in the Acute High-Altitude Mine Environment in the Short Term Based on the ARIMA Model

Zhang Xiaodan, Chen Hui

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, China Xinjiang Urumqi 830017

**Abstract:** To analyse the dynamic characteristics of individual blood oxygen saturation and heart rate in the short term under the extreme high-altitude mining environment, an ARIMA time series model was constructed based on continuous monitoring data. Through stationarity testing, model identification, and residual diagnosis, modelling and short-term forecasting were performed for the blood oxygen and heart rate sequences. Results indicate that the ARIMA model effectively captures the trends in both physiological indicators, with prediction outcomes exhibiting high consistency with measured data and residuals satisfying the white noise assumption. These findings provide valuable reference for health monitoring and risk early warning systems for personnel working in high-altitude mining environments.

**Keywords:** Acute entry into high altitude; ARIMA model; Mine environment; Blood oxygen saturation; Heart rate

## 0 引言

随着矿山作业向高海拔、低氧环境延伸, 急进高海拔条件下人员的生理适应问题日益突出<sup>[1]</sup>。血氧饱和度和心率是反映人体缺氧应激和心肺负荷的重要指标, 其动态变化直接关系到急性高原病等健康风险。

现有研究多集中于职业安全防护, 对生理指标的动态建模与预测关注不足<sup>[2]</sup>。ARIMA 模型具有数据需求量小、可解释性强和短期预测性能稳定等优势, 适用于高海拔环境下有限样本的时间序列分析<sup>[3,4]</sup>。

鉴于急进高海拔实验条件受限, 本文采用单一个体的高频纵向监测数据, 构建血氧和心率时间序列模型, 探索 ARIMA 在高海拔矿山生理指标预测中的可行性, 为后续个体化健康评估提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

研究对象为 1 名急进高海拔个体 (a), 年龄 20~25 岁, 近期无高原居住史及重大疾病。

## 1.2 方法

受试者在 4 h 内由海拔 1600 m 快速上升至约 5400 m 的矿区, 全程佩戴脉搏血氧仪连续记录血氧饱和度和心率数据, 采集过程覆盖出发前至到达高海拔后的全过程。

## 2 ARIMA 模型建立

### 2.1 数据来源与预处理

如图 1 所示, 共采集 160 min 连续数据。数据完整, 无缺失值。血氧呈整体下降趋势, 心率整体上升并伴随波动。

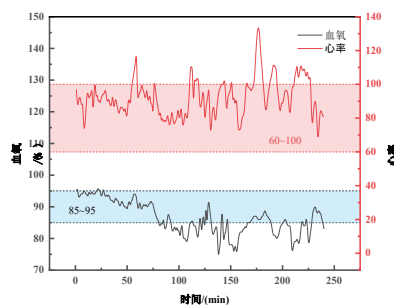


图1 个体 a 的血氧心率变化

## 2.2 ARIMA 模型的选择与构建

ARIMA 模型是一种广泛应用于时间序列分析的模型，适用于非季节性的数据分析。

### 2.2.1 平稳性检验与差分

为了确保时间序列满足平稳性的假设条件，本文采用 Augmented Dickey-Fuller (ADF) 检验对原始数据进行平稳性分析。ADF 检验表明血氧序列为非平稳序列，经一阶差分后达到平稳；心率序列本身平稳，无需差分。一阶差分公式如下：

$$一阶差分公式: y_t' = y_t - y_{t-1}$$

表1 ADF检验显著性水平临界值

	显著性水平临界值
1%	-3.4756
5%	-2.8814
10%	-2.5774

### 2.2.2 参数选择

ARIMA 模型包含三个关键参数：自回归项阶数 (p)、差分次数 (d) 和移动平均项阶数 (q) [5]。通过分析序列的自相关函数 (ACF) 和偏自相关函数 (PACF) 图，可以识别模型的最优阶数。

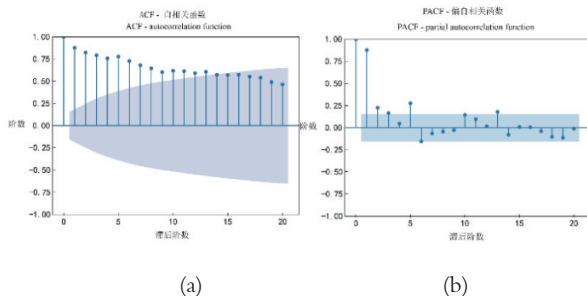
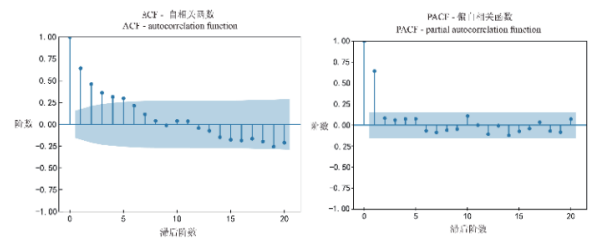


图2 血氧时间序列自相关函数与偏自相关函数

由图 2 可见，横坐标是滞后期数 (Lag)，纵坐标自相关系数表示相关性的正负。图中序列的当前值主要依赖于前一个值，考虑模型简约性原则，取 q=1 或 q=2，自回归项的阶数 p=1 或 2, 3。由于序列经过一阶差分后达到平稳，故确定差分阶数 d=1。

表2 血氧信息准则对比表

ARIMA血氧模型	AIC	BIC	HQIC
(1,1,0)	756.833	762.971	759.325
(1,1,1)	741.936	751.143	745.675
(2,1,1)	743.917	756.193	748.902
(2,1,2)	740.360	755.705	746.591
(3,1,1)	745.909	761.254	752.140
(3,1,2)	741.071	759.484	748.548



(a) (b)

图3 心率时间序列自相关函数与偏自相关函数

由图 3 可见，横坐标是滞后期数 (Lag)，纵坐标自相关系数表示相关性的正负。图中特征表明时间序列仅存在显著的一阶相关性，移除一阶相关性后，更高阶的直接依赖关系不再显著，可确定自回归项的阶数 p=1。由于心率时间序列未经过差分，故确定差分阶数 d=0。

通过 ACF 和 PACF 分析并结合信息准则，确定血氧序列最优模型为 ARIMA(1,1,1)，心率序列为 ARIMA(1,0,1)。各模型参数显著，残差诊断良好。

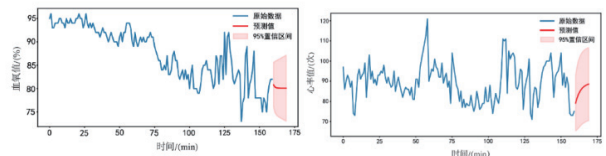
## 3 ARIMA 模型预测

### 3.1 模型预测结果

基于构建的 ARIMA 模型，对血氧和心率进行未来 10 个时间点的短期预测，预测结果与实际变化趋势一致，模型拟合效果较好。

表3 未来10个点预测结果

时间	血氧	心率
160	80.776588	79.070534
161	80.332123	81.593784
162	80.170650	83.498555
163	80.111987	84.936444
164	80.090675	86.021889
165	80.082932	86.841279
166	80.080119	87.459826
167	80.079097	87.926760
168	80.078726	88.279243
169	80.078591	88.545328

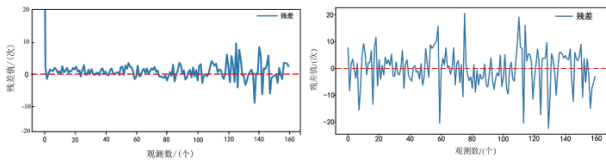


(a)血氧 (b)心率

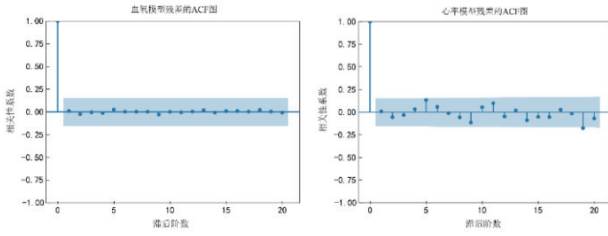
图4 血氧、心率预测图

### 3.2 残差检验

残差均值接近 0，见图 5。ACF 图未发现显著自相关，见图 6。Ljung-Box 检验 p 值均大于 0.05，残差序列符合白噪声假设。



(a)血氧 (b)心率  
图5血氧、心率模型残差



(a) (b)

图6 残差的ACF图

### 3.3 模型评估

模型的 MAE、RMSE 等指标表明，血氧和心率预测误差处于可接受范围内，心率模型整体预测精度略高。

表4 模型评估表

	血氧ARIMA模型	心率ARIMA模型
均方误差 (MSE)	62.3501	48.8216
平均绝对误差 (MAE)	2.3003	5.4202
均方根误差 (RMSE)	7.8962	6.9872

### 4 结语

(1) ARIMA 模型能够有效描述急进高海拔矿山环境

下血氧和心率的时间序列特征。

(2) 模型拟合稳定，残差满足白噪声假设，具备较好的短期预测能力。

(3) 研究为高海拔矿山人员个体健康监测和风险预警提供了一种可行的建模方法。

### 参考文献：

[1] 赵树磊, 孙兵, 陈稳干等. 超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4):239-246.

[2] Baur, X., Latza, U., Weber, A. High-altitude medicine and physiology in mining: a review. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2011, 84(8), 849-856.

[3] Chen, J., Li, Z., Zhang, H. Time-series analysis of miners' heart rate variability using ARIMA models: implications for fatigue management. Safety Science, 2020.121, 476-483.

[4] 张阳杰, 张智, 王杨等. 基于时序数据的环空带压预测混合模型[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(05):1870-1877.

[5] 胡晓艳, 冯陈琼潞, 于晨静等. 中国布鲁氏菌病时空分布特征及预测模型研究进展[J]. 中国公共卫生, 2025, 41(01):100-104.

作者简介：张晓丹，硕士研究生，研究方向：矿山安全技术方向。