

DOI: 10. 12138/j. issn. 1671-9638. 20223173

论著·多重耐药菌专题

ARIMA 模型在耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌医院感染预测中的应用

黄世芳, 吴晓琴, 石理冉, 郭 风, 阚红侠

(江苏省徐州市贾汪区人民医院护理部, 江苏 徐州 221011)

[摘要] **目的** 探讨 ARIMA 时间序列模型在耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌(CRKP)医院感染预测中的应用。**方法** 选取 2018 年 1 月—2022 年 6 月某院住院患者每月 CRKP 医院感染发病率,应用 SPSS 19.0 建立 ARIMA 时间序列模型,分析模型的拟合,利用该模型对 2021 年 7 月—2022 年 6 月 CRKP 医院感染数据进行验证,评价预测价值。**结果** 采用 2018 年 1 月—2022 年 6 月住院患者每月 CRKP 医院感染发病率建模、拟合,建立最优模型 ARIMA(0,1,9),模型拟合值与实际值较吻合,此模型对 CRKP 医院感染发病率实际值与预测值吻合程度较高,平均相对误差值为 7.76%。**结论** 采用 ARIMA 模型可有效拟合、预测 CRKP 医院感染发病率,为 CRKP 医院感染预防与控制提供科学指导。

[关键词] 耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌; ARIMA 模型; 医院感染; 预测

[中图分类号] R181.3⁺2

Application of ARIMA model in predicting carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* healthcare-associated infection

HUANG Shi-fang, WU Xiao-qin, SHI Li-ran, GUO Feng, KAN Hong-xia (Department of Nursing, People's Hospital of Jiawang District of Xuzhou, Xuzhou 221011, China)

[Abstract] **Objective** To explore the application of autoregressive integrated moving average (ARIMA) model in the prediction of carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* (CRKP) healthcare-associated infection (HAI). **Methods** The monthly incidence of CRKP HAI in a hospital from January 2018 to June 2022 was selected. ARIMA model was established by SPSS19.0, and the fitting of the model were analyzed. CRKP HAI data from July 2021 to June 2022 was used to verify the model and evaluate its predictive value. **Results** Monthly CRKP HAI incidence of hospitalized patients from January 2018 to June 2022 was used to establish the model and conduct fitting process, finally acquired the optimal model ARIMA (0,1,9). With an average relative error of 7.76%, the model-predicted value for CRKP HAI incidence was consistent with the actual value, thus fitting well with actual data. **Conclusion** ARIMA model can effectively fit and predict the incidence of CRKP HAI, and provide scientific guidance for CRKP HAI prevention and control.

[Key words] carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*; ARIMA model; healthcare-associated infection; predict

细菌耐药已经成为全球公共卫生领域的重大挑战,尤其是近年来迅速增加的耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌(carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*, CRKP),CRKP 感染已经成为临床患者死亡的重要危险因素,致死率高达 40%~70%。CRKP 定

植率和感染率呈逐年上升趋势^[1],而且一旦患者感染 CRKP,其住院费用明显增加^[2]。中国自 2007 年首次报道 CRKP 以来^[3],全国多个地区都已发现 CRKP,而且检出率呈上升趋势^[4]。中国细菌耐药监测网(CHINET)2021 年数据^[5]显示,肺炎克雷伯

[收稿日期] 2022-07-28

[基金项目] 江苏省卫健委基金资助项目(N201711)

[作者简介] 黄世芳(1977-),女(汉族),江苏省徐州市人,副主任护师,主要从事护理管理研究。

[通信作者] 吴晓琴 E-mail: 1652672427@qq.com

菌对亚胺培南和美罗培南的耐药率从 2005 年的 3.0%、2.9% 上升至 2021 年的 23.1%、24.4%。一项研究^[6]结果显示,中国西南地区流行的 CRKP 菌株表现出耐药性强的特点,病死率高。研究^[7]发现在重症监护病房(intensive care unit, ICU)医护人员工作服上 CRKP 检出率高达 18.75%。CRKP 在中国的流行形势日趋严峻,特别是碳青霉烯耐药高毒力肺炎克雷伯菌(carbapenemase-resistant hyper-virulent *Klebsiella pneumoniae*, CR-hvKP) 的出现,给临床抗感染治疗又增添了极大的挑战性^[8]。研究^[9]表明,在新型冠状病毒肺炎(COVID-19)大流行期间,由于手卫生依从性低、防护用品短缺和抗菌药物使用率高仍出现了 CRKP 医院感染暴发。在 COVID-19 大流行期间,由于对多重耐药菌(multidrug-resistant organism, MDRO)感染预防与控制措施缺乏管控,以及不合理使用抗菌药物,也导致 MDRO 感染暴发^[10]。面对医疗机构 CRKP 等 MDRO 感染的暴发流行,迫切需要加强对 CRKP 等 MDRO 感染的前瞻性监测,目前医院感染调查多采用横断面调查,仅描述感染流行病学特点及危险因素,而不能预测未来感染率的趋势,时间序列分析是利用已有的数据随时间变化趋势预测未来变化的过程,因此,本研究通过对医疗机构住院患者的 CRKP 医院感染发病率建立时间序列 ARIMA 模型,对 CRKP 医院感染发病率进行短期预测,早期预警,为 CRKP 医院感染的预防与控制提供精准防控的新方法及新思路。

1 资料与方法

1.1 数据来源 利用医院感染实时监测系统,提取 2018 年 1 月—2022 年 6 月江苏省徐州市贾汪区人民医院住院患者的 CRKP 医院感染数据、微生物室检出 CRKP 菌株数据。CRKP 医院感染诊断标准参照卫生部 2001 年颁发的《医院感染诊断标准(试行)》^[11], CRKP 医院感染发病率 = CRKP 医院感染患者例数/同期住院患者例数 × 1 000‰^[12],排除污染和定植菌。本研究数据的使用获得医院伦理委员会批准[2019 伦申第(010)]。

1.2 ARIMA 建模前平稳性检验 在建模前对每月的 CRKP 医院感染发病率时间序列数据进行平稳性检验,首先采用时序图进行平稳性检验,从时序图直观上看出序列呈现一定的波动,表现为先上升

后下降的变化趋势,序列存在较大波动情况,不能直接用该序列进行建模分析预测,否则会出现伪回归,使得结果出现偏误的现象,为了更加准确检验序列平稳性,进一步采用单位根检验的方法进行分析检验序列的平稳性。因此,为进一步检验序列平稳性,采用单位根检验方法(ADF)进行考察,序列经过一阶差分后不存在单位根现象,即为一阶单整序列。

1.3 模型的识别定阶 经过建模前平稳性检验后。CRKP 医院感染发病率序列在一阶差分为平稳序列,应建立 ARIMA 模型,对平稳后的数据作出自相关函数(AC)和偏自相关函数(PAC),识别、分析时间序列的随机性、稳定性和季节性特征,为确定最优模型,采用 SC 和 AIC 最小准则来判断模型的最优阶数,相关检验结果显示,ARIMA(0,1,9)的 AIC 为 1.556,SC 值为 1.593,为 3 个模型中最小,因此最终选择 ARIMA(0,1,9)进行本次模型的建立。

1.4 模型检验 通过统计软件运行 ARIMA(0,1,9)模型,为进一步检验模型的稳定,对模型的残差序列进行自相关检验($\chi^2 = 8.088, P > 0.01$),模型不存在自相关。同样对模型残差进行异方差检验($P > 0.01$),模型通过了异方差检验,模型构建合理。

1.5 模型预测 利用模型对 2021 年 7 月—2022 年 6 月的原始数据进行预测,并利用预测值与原始值进行相对误差计算,并通过计算相对误差来评价 ARIMA 模型的精度。

1.6 统计分析 应用 SPSS 19.0 统计软件进行 ARIMA 模型建模,进行时间序列分析,定义时间变量,首先进行平稳序列检验,初步确定模型的取值范围,通过确定模型范围来进行模型预测,并对所选模型进行参数估计与检验, $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 CRKP 医院感染发病率及趋势分析 对 2018 年 1 月—2022 年 6 月 CRKP 医院感染发病率进行时间序列分析,时间序列图结果显示,每月 CRKP 医院感染发病率呈现波动起伏状态,且每年均出现发病高峰期,不满足序列平稳性要求,见图 1,进一步采用差分处理数据的波动性,序列经过一阶差分方法进行平稳性处理后,ADF 检验统计量($t = -6.882, P < 0.01$),经处理后 CRKP 医院感染发病率序列在一阶差分为平稳序列。

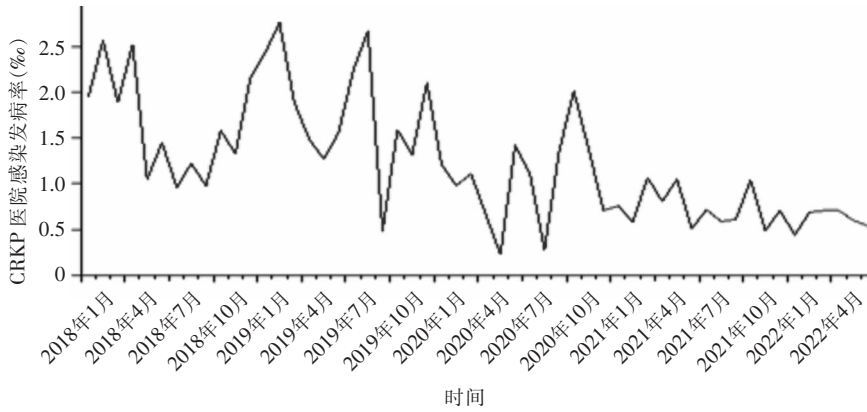


图 1 2018 年 1 月—2022 年 6 月 CRKP 医院感染发病率时间序列图

Figure 1 Time series diagram of CRKP HAI incidence from January 2018 to June 2022

2.2 模型的定阶识别 CRKP 医院感染发病率序列在一阶差分为平稳序列,所以应建立 ARIMA 模型,利用统计软件对平稳后的数据作出 AC 和 PAC 图,见图 2。AC 图显示出一阶明显的拖尾性质,而 PAC 图显示出拖尾现象,因此认为应建立 ARIMA(0,1,1),此外自相关滞后 3 阶和 9 阶刚好处于临界

处,因此加入 ARIMA(0,1,3)和 ARIMA(0,1,9)模型进行对比。为确定最优模型,采用 SC 和 AIC 最小准则判断模型的最优阶数,结果显示 ARIMA(0,1,9)的 AIC 为 1.556,SC 值为 1.593,为 3 个模型中最小,因此选择 ARIMA(0,1,9)建立本次模型。

Autocorrelation	Partial correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 -0.408	-0.408	9.338 3	0.002
		2 0.046	-0.144	9.460 3	0.009
		3 -0.250	-0.352	13.095	0.004
		4 0.215	-0.061	15.852	0.003
		5 -0.171	-0.202	17.627	0.003
		6 0.163	-0.045	19.271	0.004
		7 -0.112	-0.066	20.063	0.005
		8 0.052	-0.093	20.237	0.009
		9 -0.250	-0.336	24.375	0.004
		10 0.223	-0.169	27.737	0.002
		11 0.094	0.081	28.353	0.003
		12 0.007	0.019	28.357	0.005

图 2 CRKP 医院感染发病率一阶差分后 AC 和 PAC 图

Figure 2 AC and PAC diagrams of CRKP HAI incidence after conducting the first-order difference

2.3 模型检验 通过运行 ARIMA(0,1,9)模型,回归结果为:模型可决系数(R-squared)为 0.83,调整后的可决系数(adjusted R-squared)为 0.80,模型的解释能力尚可。为进一步检验模型的稳定,对模型的残差序列进行自相关检验,自相关结果($\chi^2 = 8.088, P = 0.017$),模型不存在自相关。同样,对模型残差序列进行异方差检验,结果 $P > 0.01$,模型建立较好,可以进行预测。

2.4 模型预测 通过采用 ARIMA(0,1,9)进行预

测分析,以 CRKP 医院感染发病率实际值为原序列,以 CRKP 医院感染发病率预测值为预测序列,进行模型拟合,结果见图 3,模型拟合效果良好。随即利用构建的模型对 2021 年 7 月—2022 年 6 月的原始数据进行预测,预测相对误差 $< 15\%$,预测效果较好,最大预测相对误差为 2021 年 11 月,相对误差为 16.33%,最小为 2021 年 7 月,相对误差值为 4.17%,平均相对误差为 7.76%,预测值与实际值的时序图基本保持一致,拟合预测结果见表 1。

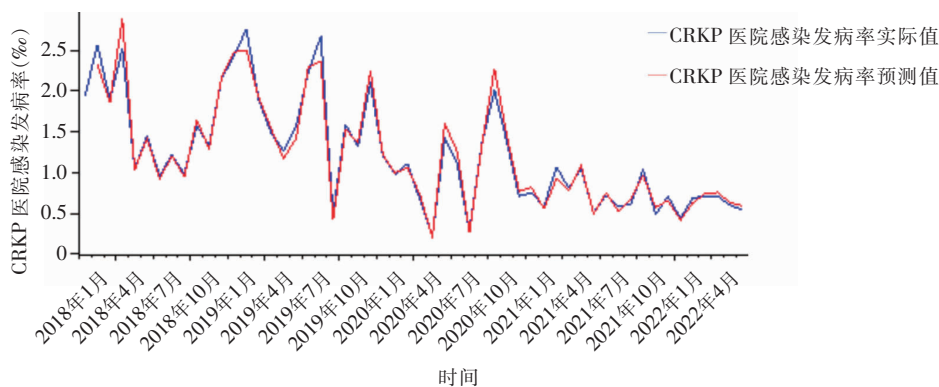


图 3 2018 年 1 月—2022 年 6 月 CRKP 医院感染发病率 ARIMA 模型拟合及预测结果

Figure 3 Fitting and prediction results of ARIMA model for CRKP HAI incidence from January 2018 to June 2022

表 1 2021 年 7 月—2022 年 6 月 CRKP 医院感染发病率实际值与预测值比较

Table 1 Comparison between actual and predicted values of CRKP HAI incidence from July 2021 to June 2022

时间	实际值(%)	预测值(%)	相对误差(%)
2021 年 7 月	0.72	0.75	4.17
2021 年 8 月	0.59	0.53	10.17
2021 年 9 月	0.61	0.67	9.84
2021 年 10 月	1.04	0.97	6.73
2021 年 11 月	0.49	0.57	16.33
2021 年 12 月	0.71	0.66	7.04
2022 年 1 月	0.44	0.42	4.55
2022 年 2 月	0.69	0.63	8.70
2022 年 3 月	0.71	0.74	4.23
2022 年 4 月	0.71	0.76	7.04
2022 年 5 月	0.60	0.63	5.00
2022 年 6 月	0.54	0.59	9.26

注:相对误差 = |(实际值 - 预测值)/实际值| × 100%。

3 讨论

时间序列分析已经在公共卫生领域被广泛应用于传染病流行的预测,是一种分析和预测变量或事物变化趋势的一种经典统计方法^[13-14],Balinskaite 等^[15]采用间断时间序列回归分析表明,实施国家财政激励政策可减少抗菌药物处方使用量,提高抗菌药物处方质量。高胜春等^[16]研究显示,ARIMA 乘积季节模型能准确模拟和预测 CRKP 感染发病率。ARIMA 乘积季节模型预测产超广谱 β-内酰胺酶大肠埃希菌流行趋势,高峰出现在夏秋季^[17],ARIMA 模型被用于预测住院患者每月 MDRO 感染发病率,

在医院感染精细化管理中发挥着重要作用^[18-19]。本研究通过建模预测筛选出 CRKP 医院感染发病率进行 ARIMA 时间序列分析,结果表明 CRKP 医院感染率预测值与实际值几乎一致,CRKP 医院感染发病率预测值平均相对误差为 7.76%,表明采用 CRKP 医院感染发病率时间序列分析模型为一种适用模型,预测值与实际值的时序图基本保持一致,模型预测值有较好的适用效果,但在 2021 年 7 月,实际值与预测值误差较大(相对误差为 16.33%),自 2021 年 9 月起 CRKP 医院感染发病率实际值和预测值呈短暂下降趋势,这可能与 2021 年 8 月江苏省南京禄口机场及扬州 COVID-19 疫情暴发后,全省各级卫生行政部门下达相关文件,加大了医院感染防控措施力度,随着对 COVID-19 疫情的严防严控,医院感染管理工作受到前所未有的重视,手卫生等各项防控措施得到有效落实,使医院感染发病率进一步下降,也充分体现了疫情防控对降低医院感染具有积极作用。但 2021 年 10 月底进入冬季后,老年患者发病进入高峰期,老年患者又是 MDRO 感染的高危人群^[20],出现了 MDRO 感染的季节性波动。本研究采用 ARIMA 预测 CRKP 医院感染发病率的可行性及准确性得到了验证,基于 18 个季节的 CRKP 医院感染数据优选 ARIMA(0,1,9)模型,对 CRKP 医院感染发病率实际值与预测值进行验证,模型拟合度良好,预测结果显示 CRKP 医院感染有一定的季节性,因此需根据预测结果,在发生 CRKP 医院感染的高发月份,加强医务人员 MDRO 相关知识的培训,落实感染防控措施。

现阶段,医疗机构面临 COVID-19 疫情、MDRO 感染等多重威胁,对医院感染防控工作提出了更高要求。本研究结果表明,CRKP 医院感染发

病率实际值与预测值呈季节性波动,因此,对 CRKP 感染的防控,一方面要根据预测结果在 CRKP 医院感染高发季节加强医院感染防控措施培训及防控措施的严格落实;另一方面还应按照世界卫生组织《医疗机构耐碳青霉烯的肠杆菌科细菌、铜绿假单胞菌和鲍曼不动杆菌防控指南》中“2 个卫生、2 个隔离、2 个监测”等进行核心防控措施的落实,提高对 CRKP 感染的防控能力和防控措施的依从性,并优化 CRKP 感染患者的预防措施,以遏制 CRKP 等 MDRO 感染的暴发流行。此外,本研究所选用的模型仅针对一所医院的数据进行建模,结果可能不适合于其他医疗机构,要获得更好的预测结果还需不断收集更多的数据。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

- [1] 中华预防医学会医院感染控制分会, 中华医学会感染病学分会, 中国医院协会医院感染管理专业委员会, 等. 中国碳青霉烯耐药革兰阴性杆菌(CRO)感染预防与控制技术指引[J]. 中华医院感染学杂志, 2019, 29(13): 2075-2080.
Hospital Infection Control Branch of Chinese Preventive Medicine Association, Infectious Diseases Branch of Chinese Medical Association, Hospital Infection Management Committee of Chinese Hospital Association, et al. Technical guidelines for prevention and control of carbapenem-resistant Gram-negative bacteria (CRO) infection in China[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2019, 29(13): 2075-2080.
- [2] Tacconelli E, Carrara E, Savoldi A, et al. Discovery, research, and development of new antibiotics: the WHO priority list of antibiotic-resistant bacteria and tuberculosis[J]. Lancet Infect Dis, 2018, 18(3): 318-327.
- [3] Wei ZQ, Du XX, Yu YS, et al. Plasmid-mediated KPC-2 in a *Klebsiella pneumoniae* isolate from China [J]. Antimicrob Agents Chemother, 2007, 51(2): 763-765.
- [4] 全国细菌耐药监测网. 全国细菌耐药监测网 2014—2019 年耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌流行病学变迁[J]. 中国感染控制杂志, 2021, 20(2): 175-179.
China Antimicrobial Resistance Surveillance System. Epidemiological change in carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*: surveillance report from China Antimicrobial Resistance Surveillance in 2014-2019[J]. Chinese Journal of Infection Control, 2021, 20(2): 175-179.
- [5] CHINET. 肺炎克雷伯菌对亚胺培南和美罗培南的耐药变迁 [EB/OL]. (2022-02-14) [2022-07-26]. <http://www.chinets.com/Data/GermYear/2021 年 CHINET 三级医院细菌耐药监测>.
CHINET. Changes of drug resistance of *Klebsiella pneumoni-*
- ae* to imipenem and meropenem [EB/OL]. (2022-02-14) [2022-07-26]. <http://www.chinets.com/Data/GermYear/2021 年 CHINET 三级医院细菌耐药监测>. PPT.
- [6] 胡小品, 袁国航, 吴瑶瑶, 等. 中国西南地区 3 所综合性医院耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌流行病学特征及耐药性[J]. 中国感染控制杂志, 2022, 21(2): 121-127.
Hu XP, Yuan GH, Wu YY, et al. Molecular epidemiological characteristics and antimicrobial resistance of carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* in three general hospital in southwest China [J]. Chinese Journal of Infection Control, 2022, 21(2): 121-127.
- [7] 顾克菊, 李园, 陶建敏, 等. 重症监护病房环境耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌监测及集束化防控措施[J]. 中华医院感染学杂志, 2022, 32(8): 1257-1260.
Gu KJ, Li Y, Tao JM, et al. Carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* in intensive care units and cluster prevention and control measures [J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2022, 32(8): 1257-1260.
- [8] Zhang R, Chan EWC, Zhou HW, et al. Prevalence and genetic characteristics of carbapenem-resistant *Enterobacteriaceae* strains in China [J]. Lancet Infect Dis, 2017, 17(3): 256-257.
- [9] Thoma R, Seneghini M, Seiffert SN, et al. The challenge of preventing and containing outbreaks of multidrug-resistant organisms and *Candida auris* during the coronavirus disease 2019 pandemic: report of a carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* outbreak and a systematic review of the literature [J]. Antimicrob Resist Infect Control, 2022, 11(1): 12.
- [10] Sun Jin L, Fisher D. MDRO transmission in acute hospitals during the COVID-19 pandemic [J]. Curr Opin Infect Dis, 2021, 34(4): 365-371.
- [11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 关于印发医院感染诊断标准(试行)的通知: 卫医发[2001]2 号 [EB/OL]. (2001-11-07) [2022-07-26]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/gfxwj/201304/37cad8d95582456d8907ad04a5f3bd4c.shtml>.
National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on printing and distributing diagnostic standards for hospital infection (trial): [2001] No. 2 [EB/OL]. (2001-11-07) [2022-07-26]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/gfxwj/201304/37cad8d95582456d8907ad04a5f3bd4c.shtml>.
- [12] 付强, 刘运喜. 医院感染监测基本数据集及质量控制指标集实施指南(2016 版) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
Fu Q, Liu YX. Guidelines for the implementation of basic data set and quality control indicator set of hospital infection monitoring (2016 edition) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016.
- [13] Wang T, Liu J, Zhou YP, et al. Prevalence of hemorrhagic fever with renal syndrome in Yiyuan County, China, 2005-2014 [J]. BMC Infect Dis, 2016, 16: 69.
- [14] Song X, Xiao J, Deng J, et al. Time series analysis of influenza incidence in Chinese provinces from 2004 to 2011 [J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(26): e3929.

- [15] Balinskaite V, Johnson AP, Holmes A, et al. The impact of a national antimicrobial stewardship program on antibiotic prescribing in primary care: an interrupted time series analysis [J]. *Clin Infect Dis*, 2019, 69(2): 227-232.
- [16] 高胜春, 吴红梅. 基于 ARIMA 时间序列模型预测某三级甲等医院耐碳青霉烯类铜绿假单胞菌的感染率[J]. *中国医院统计*, 2021, 28(5): 401-404.
Gao SC, Wu HM. Prediction of infection incidence of carbapenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa* by ARIMA time series model[J]. *Chinese Journal of Hospital Statistics*, 2021, 28(5): 401-404.
- [17] 储文杰, 金凯玲, 林凯, 等. 基于 ARIMA 乘积季节模型预测产超广谱 β -内酰胺酶大肠埃希菌流行趋势研究[J]. *预防医学*, 2018, 30(7): 680-684.
Chu WJ, Jin KL, Lin K, et al. Forecasting incidence of extended spectrum β -lactamases-producing *Escherichia coli* by multiple seasonal ARIMA model [J]. *Preventive Medicine*, 2018, 30(7): 680-684.
- [18] 张佑健, 李鹏, 刘云红, 等. 河南省某三甲医院多药耐药菌感染率时间序列分析[J]. *中华医院感染学杂志*, 2020, 30(1): 44-48.
Zhang YJ, Li P, Liu YH, et al. Time series of incidence of multidrug-resistant organism infection in a tertiary hospital in Henan province[J]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2020, 30(1): 44-48.
- [19] 姜迪, 杨洋, 孔晓颖, 等. 时间序列分析方法在医院管理中的

应用[J]. *预防医学论坛*, 2022, 28(2): 158-160.

Jiang D, Yang Y, Kong XY, et al. Application of time series analysis in hospital management [J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2022, 28(2): 158-160.

- [20] 陈玉, 张朝辉, 樊发超. 应用主动筛查预防与控制重症监护病房患者多重耐药菌感染[J]. *中国感染控制杂志*, 2022, 21(2): 190-195.

Chen Y, Zhang CH, Fan FC. Application of active screening to prevent and control multidrug-resistant organism infection in patients in intensive care unit[J]. *Chinese Journal of Infection Control*, 2022, 21(2): 190-195.

(本文编辑:陈玉华)

本文引用格式:黄世芳, 吴晓琴, 石理冉, 等. ARIMA 模型在耐碳青霉烯类肺炎克雷伯菌医院感染预测中的应用[J]. *中国感染控制杂志*, 2022, 21(12): 1200-1205. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20223173.

Cite this article as: HUANG Shi-fang, WU Xiao-qin, SHI Li-ran, et al. Application of ARIMA model in predicting carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* healthcare-associated infection[J]. *Chin J Infect Control*, 2022, 21(12): 1200-1205. DOI: 10.12138/j.issn.1671-9638.20223173.