

logistic 模型在新型冠状病毒肺炎疫情中的应用

徐方, 陆殷昊, 黄晓燕

上海市疾病预防控制中心应急管理处, 上海 200336

摘要: **目的** 拟合新型冠状病毒肺炎疫情发展趋势, 为 logistic 模型在新发传染病流行中的应用提供依据。 **方法** 使用 logistic 模型, 基于官方公布的 2020 年 1 月 10 日—3 月 12 日新冠肺炎疫情报告数据, 采用非线性最小二乘法进行拟合。 **结果** logistic 模型拟合效果较好, 4 个模型的决定系数 R^2 均高于 0.99。拟合曲线与真实疫情的变化趋势吻合。始盛期前模型平均相对误差较大 (74.1%~427.0%), 始盛期之后降至 1.0%~4.1%。模型拟合结果显示全国 (湖北省除外)、湖北省 (武汉市除外) 和上海市于 2020 年 2 月 2—5 日达到疫情峰值, 2 月 6—11 日进入缓增期。武汉市则于 2 月 11 日达到高峰期, 2 月 16 日进入缓增期。模型显示首例病例报告到疫情高峰期的时间间隔以及启动一级响应到疫情盛末期的时间间隔均约为一个最长潜伏期。 **结论** logistic 模型对新型冠状病毒肺炎疫情的拟合效果较好, 能够对疫情发展态势进行分期, 为疫情防控决策和防控措施效果评价提供科学依据。

关键词: 新型冠状病毒肺炎; logistic 模型; 疫情拟合; 疫情防控; 传染病模型

中图分类号: R181.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3110(2022)06-0762-05 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2022.06.029

Application of logistic model to the COVID-19 epidemic

XU Fang, LU Yin-hao, HUANG Xiao-yan

Department of Emergency Management, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China

Corresponding author: HUANG Xiao-yan, E-mail: huangxiaoyan@scdc.sh.cn

Abstract: **Objective** To fit the epidemic trend of COVID-19 so as to provide evidence for application of logistic model to the epidemic of emerging infectious diseases. **Methods** Based on logistic model, the officially-reported data about the COVID-19 epidemic from January 10 to March 12, 2020 were used to fit the model. The parameters were estimated with non-linear least square estimation method. **Results** Logistic model fitted well, with the determination coefficients R^2 of 4 models being all higher than 0.99. The fitting curves were consistent with the changing trend of the real epidemic. The average relative errors of the model were large (74.1%–427.0%) before the gradually growing point and decreased to 1.0%–4.1% after the increasingly growing point. The fitting results revealed that the epidemic reached its peak in the whole country (except Hubei Province), Hubei Province (except Wuhan City) and Shanghai on February 2–5, 2020, and entered the slow-growing stage on February 6–11, 2020. The epidemic reached its peak in Wuhan on February 11, 2020, and entered the slow-growing stage on February 16, 2020. The model showed that the interval between the first case report and the peak of the epidemic as well as the interval between initiating the first level emergency response and the decreasingly growing point were both the longest incubation period. **Conclusion** Logistic model fitted well for the COVID-19 epidemic. It can divide the epidemic trend into stages, and provide a scientific basis for decision making in epidemic prevention and control and effect evaluation of prevention and control measures.

Keywords: COVID-19; logistic model; epidemic fitting; epidemic prevention and control; infectious disease model

新发传染病传播初期, 相应的防控措施较少, 累计报告的确证病例数基本按照疾病传播的自然规律演化, 呈现指数增长的模式。随着防控措施的加强, 新发

基金项目: 上海市公共卫生体系建设三年行动计划 (2020—2022 年) 重点学科项目 (GWV-10.1-XK23); 长三角区域重大公共卫生风险联合研判、预警和处置平台的开发及示范应用 (20492420100)

作者简介: 徐方 (1987-), 女, 硕士, 主管医师, 主要从事公共卫生应急管理工作。

通信作者: 黄晓燕, E-mail: huangxiaoyan@scdc.sh.cn。

病例逐渐减少, 累计病例数接近饱和, 传染病流行态势趋于缓和, 最终流行终止。该过程与“慢-快-慢”的 logistic 增长曲线模式高度符合。既往研究表明 logistic 增长模型对 SARS、埃博拉出血热、甲型 H1N1 流感等新发传染病流行的拟合效果较好^[1-5]。logistic 增长模型适用于研究传染病流行由慢变快、达到高峰以及高峰后疫情变缓的拐点, 通过计算各流行阶段的时间点可对疫情进行分期, 对现实防控工作具有重要的指导意义。新型冠状病毒肺炎 (简称新冠肺炎) 疫情研究多采用传染病动力学模型拟合疫情走势, 但该模型较

为复杂,因此本研究使用 logistic 增长曲线模型中的 Pearl 模型分别对全国(湖北省除外)、湖北省(武汉市除外)、武汉市和上海市进行建模,推算出疫情进展过程的三个拐点“始盛期”“高峰期”和“盛末期”,进而将疫情分为三个阶段“渐增期”“快增期”“缓增期”,为 logistic 模型在新发传染病流行中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源 数据来源于国家卫生健康委员会、湖北省、武汉市和上海市卫生健康委员会的官方网站,收集自 2020 年 1 月 10 日—3 月 12 日期间发布的每日累计新冠肺炎确诊病例数,排除核减病例数和境外输入病例数据,整理得到每日累计本地确诊病例数。此处的“确诊病例”包括“临床诊断”病例。在“不明原因的病毒性肺炎”病原体初步判定为新型冠状病毒之后,武汉市卫生健康委员会对现有不明原因的病毒性肺炎患者进行综合研判,于 2020 年 1 月 11 日发布通报称截至 2020 年 1 月 10 日,初步诊断新冠肺炎确诊病例 41 例,因此本研究将武汉市首例确诊病例报告日期定为 2020 年 1 月 10 日。国务院联防联控机制于 2020 年 3 月 13 日宣布我国新冠肺炎疫情防控取得阶段性重要成果,因此数据收集时间截至 2020 年 3 月 12 日 24 时。

1.2 logistic 模型基本原理 以发现首例病例的日期作为时间坐标的起点,此时 $t=1$,此后的时间数据均以此起点进行类推。设 t 时刻累计病例数为 $X(t)$,病例增长率为 r , X_0 表示初始时刻的病例数, r_0 表示初始时刻的增长率, X_m 表示最大病例数,则:

$$X(t) = X_0(1+r)^t \quad (1)$$

logistic 模型微分方程为:

$$\frac{dX(t)}{dt} = rX(t) \quad (2)$$

随着病例数的增加,防控措施对传染病蔓延起到限制作用,此时病例增长率会随着病例数的增加而逐渐减少,因此 $r(X)$ 为 $X(t)$ 的减函数:

$$r(X) = r_0 - sX(t) \quad (3)$$

当 $X=X_m$ 时,增长率应为零,即 $r(X_m) = 0$,代入式

(3) 得到 $s = \frac{r_0}{X_m}$,将 s 再代入式(3)得到:

$$r(X) = r_0(1 - \frac{X(t)}{X_m}) \quad (4)$$

将式(4)代入 logistic 模型微分方程(2)得到:

$$\frac{dX(t)}{dt} = r_0(1 - \frac{X(t)}{X_m})X(t) \quad (5)$$

$\frac{dX(t)}{dt}$ 为 t 时刻累计病例的变化速率。根据数学

推导,方程(1)中的 $X(t)$ 求解得:

$$X(t) = \frac{X_m}{1 + (\frac{X_m}{X_0} - 1)e^{-r_0 t}} \quad (6)$$

1.3 计算始盛期、高峰期和盛末期 计算方程(6)的一阶导数,可得到累计病例速度变化的函数,再对其求导,即计算方程(6)的二阶导数,可得到新发病例增减速度的函数,令其等于 0,求解得:

$$t = \frac{\ln(\frac{X_m}{X_0} - 1)}{r_0} \quad (7)$$

计算方程(6)的三阶导数,并令其等于 0,求解得:

$$t_1 = \frac{\ln(\frac{X_m}{X_0} - 1.317)}{r_0} \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{\ln(\frac{X_m}{X_0} + 1.317)}{r_0} \quad (9)$$

这三个点是 logistic 模型曲线的 3 个拐点,其中 t 为发病高峰点,此时疫情发展速度最快。 t_1 、 t_2 和分别对应疫情发展的三个关键时期:始盛期、高峰期和盛末期,将疫情发展过程分为渐增期 $0 \sim t_1$,快增期 $t_1 \sim t_2$ 和缓增期 $t_2 \sim t_{max}$ 。

1.4 参数估计与初始值设置 参考徐付霞等^[4]和 Batista 等^[6]的研究,本文采用非线性最小二乘法拟合 logistic 模型参数。设参数 $\alpha = X_m/X_0 - 1$, X_m 的初始值设置为截至 2020 年 3 月 12 日的累计确诊病例数,采用非线性最小二乘法估计参数 X_m 、 a 和 r_0 ,并对模型的拟合结果进行分析,根据拟合所得参数计算 3 个拐点 t_1 、 t_2 和 t_{max} 。logistic 模型拟合效果使用决定系数 R^2 、均方根误差(root mean square error, RMSE) 和平均相对误差进行评估。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \hat{X}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}_t)^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \hat{X}_t)^2} \quad (11)$$

$$\text{平均相对误差}(\%) = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{\hat{X}_t - X_t}{X_t} \right|}{n} \times 100\% \quad (12)$$

1.5 统计学分析 非线性最小二乘法估计以及模型的拟合结果分析采用 STATA 14.0 统计软件中的

Nonlinear least-squares estimation.

2 结果

2.1 拟合参数估计值和拟合效果 全国(湖北省除外)、湖北省(武汉市除外)、武汉市和上海市的 4 个模

表 1 各地区新冠肺炎疫情 logistic 模型拟合参数估计值和拟合效果

地区	截至 3 月 12 日实际累计本地确诊病例数	X_m	a	r_0	RMSE	R^2	数据源
全国(湖北省除外)	12 939	12 878. 14	56. 4323	0. 2570	200. 91	0. 9996	2020/1/19—2020/3/12
湖北省(武汉市除外)	17 795	17 788. 97	77. 6966	0. 2568	367. 17	0. 9993	2020/1/20—2020/3/12
武汉市	49 991	49 485. 50	7 708. 1570	0. 2742	1 430. 41	0. 9982	2020/1/10—2020/3/12
上海市	338	336. 02	34. 9448	0. 2731	3. 98	0. 9998	2020/1/20—2020/3/12

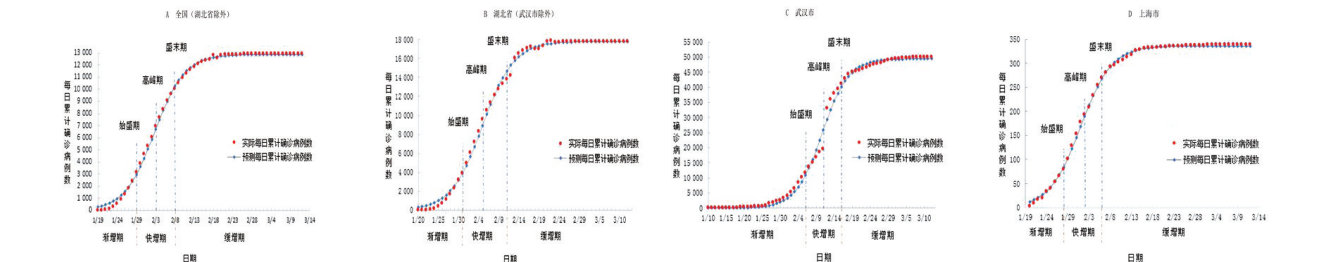


图 1 各地区新冠肺炎疫情 logistic 模型拟合效果

由图 1 可见总体上拟合曲线与真实疫情的变化趋势吻合。全国(湖北省除外)、湖北省(武汉市除外)和上海市疫情初期,模型预测值略高于实际病例数,疫情后期模型预测值略低于实际病例数。对各地区疫情发展始盛期前后的累计确诊病例数与模型拟合值进行比较并计算平均相对误差,发现疫情前期的平均相对误差较大(74.1%~427.0%),模型拟合效果较差。随着疫情数据的不断完善和精准,始盛期之后 4 个模型的平均相对误差降低到 1.0%~4.1%左右。湖北省自 2020 年 2 月 12 日起将临床诊断病例纳入确诊病例统计,造成武汉市和湖北省(武汉市除外)单日内出现病例数激增,一定程度上影响了模型拟合效果,见表 2。

表 2 各地区新冠肺炎疫情 logistic 模型平均相对误差

地区	平均相对误差(%)	
	始盛期前	始盛期后
全国(湖北省除外)	427. 0	1. 3
湖北省(武汉市除外)	792. 9	1. 8
武汉市	33. 0	4. 1
上海市	74. 1	1. 0

2.2 各地区疫情流行过程 2020 年 1 月 19 日广东省发现首例湖北以外的新冠肺炎确诊病例,随后 2 d 各省陆续报告了本省首例确诊病例。由模型拟合可得出几个地区的疫情发展拐点:一是始盛期,即疫情开始快速增长;二是高峰期,即疫情发展速度最快时;三是盛末期,即疫情开始下降。相应地,疫情被分为渐增期(始盛期之前)、快增期(始盛期-盛末期)和缓增期(盛末期之后)。模型拟合结果显示全国(湖北省除外)、

型拟合参数估计值和拟合效果见表 1。4 个模型的决定系数 R^2 均高于 0.99,说明 logistic 模型拟合效果较好。受临床诊断病例的影响,湖北省(武汉市除外)和武汉市的拟合效果较其他 2 个模型稍差,见图 1。

湖北省(武汉市除外)和上海市分别经过 10 d、11 d 和 8 d 的渐增,和 5 d 的快增,于 2 月 2 日—5 日左右达到疫情发展峰值。受临床诊断病例影响,武汉市的高峰期略晚,于 2 月 11 日左右达到峰值。各地区疫情快增期均持续 10~11 d 左右。上海市较早进入缓增期,2 月 6 日盛末期之后新增病例数呈下降趋势,直至 2 月 18 日首次出现病例零增长,此后偶有零星散发。在防控措施的有力实施下,武汉市、湖北省(武汉市除外)和全国(湖北省除外)分别在 2 月 16 日、2 月 11 日和 2 月 8 日陆续进入缓增期,疫情均得到有效控制,见表 3、图 1。

从模型拟合结果还可得出疫情发展和疫情得到控制的两个关键时间段。全国(湖北省除外)、湖北省(武汉市除外)和上海市首例病例报告到疫情高峰期的间隔分别为 15 d、16 d 和 13 d,约为一个最长潜伏期,见表 3。全国各地自 2020 年 1 月 23 日起陆续启动突发公共卫生事件一级响应,湖北省和上海市均于 1 月 24 日启动一级响应。启动一级响应到疫情盛末期的时间间隔分别为全国(湖北省除外)16 d、湖北省(武汉市除外)18 d、上海市 13 d,也基本为一个最长潜伏期。

表 3 各地区新冠肺炎疫情流行过程关键时间点

地区	t_1	t	t_2	首例日期	始盛期	高峰期	盛末期
全国(湖北省除外)	10. 57	15. 69	20. 82	2020/1/19	2020/1/29	2020/2/3	2020/2/8
湖北省(武汉市除外)	11. 82	16. 95	22. 08	2020/1/20	2020/1/31	2020/2/5	2020/2/11
武汉市	27. 84	32. 65	37. 45	2020/1/10	2020/2/6	2020/2/11	2020/2/16
上海市	8. 19	13. 01	17. 84	2020/1/20	2020/1/28	2020/2/2	2020/2/6

3 讨论

本研究针对 logistic 模型的拟合效果进行评估,结果显示该模型拟合曲线与真实疫情发展趋势吻合,拟合效果较好。logistic 模型的优势在于能够对疫情进行分期,计算疫情发展的关键时间点,有助于量化和了解疫情进展的状态,帮助决策者判断防疫措施的效果,特别是渐增期疫情发展缓慢,是采取防控措施的最佳时期。通过模型拟合,可直观地看到从首例病例的报告发展到疫情高峰经历了约 14 d,说明疫情早期的发展趋势与新冠肺炎 1~14 d 潜伏期的自然发展规律相符。另一方面,全国各地自 2020 年 1 月 23 日陆续启动突发公共卫生事件一级响应后,实施了一系列综合防控措施,包括早发现病例、密切接触者追踪、隔离和管理以及增加社交距离等。从全国各地开始实施严格的防控措施到疫情得到控制也经历了约 14 d,提示这些防控措施卓有成效。武汉市在疫情早期没有采取管控措施,错过了最佳防控时期,导致后续控制措施实施前就发生了社区暴发,给疫情控制增加了难度。

在实际应用中,应考虑到 logistic 模型的以下局限性。第一,由于本文使用的 logistic 模型拟合是完全基于已经确诊的病例,未考虑传染病的传播速度、传播模式以及各种防控措施的实施等关键因素,因此用于预测有强力干预措施的情况下传染病发展的未来趋势并不可靠。本研究发现 logistic 模型拟合的累计病例最大值较真实值偏低,其他研究结果也提示该模型对短期数据的模拟效果尚可,但长期的预测效果不佳,可能会低估最终的预测值^[7-12]。第二,新冠肺炎是一种新发传染病,确诊病例数据在很大程度上受病例定义、检测能力、检测方法、报告系统等外在因素影响。在疫情前期,诊断标准、检测手段等还在不断完善,疫情数据的欠精准,尤其是湖北省和武汉市的疫情数据,在一定程度上影响了模型的拟合效果。当疫情数据的精准度提高时,模型的拟合误差最低可降至仅 1%。第三,随着对新发传染病认识的提升,诊断标准越来越完善,检测手段越来越精准,使得病例定义发生变化,病例发现能力提高,确诊速度越来越快。第五版《新型冠状病毒肺炎的诊断标准》^[13]将临床诊断病例纳入确诊病例,使得湖北省(武汉市除外)和武汉市累计病例激增,也影响了模型拟合效果。后续应用中,可以从以下两方面提高模型的拟合效果。第一,目前官方公布的每日累计确诊病例数是根据新冠肺炎确诊日期而不是发病日期统计所得,后期如能将发病人数纳入分析,应能提高模型的拟合效果。第二,通过综合确诊、死亡及治愈数据的拟合结果,以及 logistic 分段拟合,能更好地拟合和预测新冠肺炎疫情的不同传播阶段和发展趋

势^[7, 14]。尽管 logistic 增长模型有较多的局限性,在疾病防控中也有重要的应用价值和应用场景,主要有以下五点:①在疫情初期,对新发传染病认识有限的情况下,对于疾病的传播机理、感染谱、流行特征等因素不明确时,无法使用 SEIR (susceptible-exposed-infectious-recovered, SEIR) 等传播动力学模型,可用 logistic 模型进行短期预测,使决策者在疫情初期即对疫情发展趋势有一个较为明确的认识。例如 Zhao 等^[15]基于我国 2020 年 1 月 10—24 日的公开数据采用指数增长曲线拟合,通过非线性最小二乘法估计初始增长速度,进一步估计 R_0 并由此判断新冠肺炎的传播能力可能引起暴发;②通过计算疫情发展的拐点,对疫情发展态势进行分期,为疫情初期研判采取防控措施的最佳时期以及疫情后期复盘提供科学依据;③ logistic 模型方法原理简单,需要的参数少,操作简便、实用性好,可广泛适用于基层疾病预防控制机构开展疫情趋势评估;④ logistic 模型和传播动力学模型单独使用均有其局限性,将两者结合能得到更好的拟合和预测效果,对公共卫生政策的制定具有一定的参考价值。冯苗胜等^[16]先利用 logistic 模型拟合初始感染人数、最终累计感染人数和传染速率这几个关键参数,再将其应用到 SEIR 模型中,大大降低了单独使用 SEIR 模型调参的数量和难度,比较容易地取得了较好的拟合效果。焦海燕等^[17]通过动力学模型拟合估计流行拐点、 R_0 、最终累计确诊病例数,利用 logistic 模型拟合日新增确诊病例数估计增长速度,对新疆 2020 年 1 月和 7 月的新冠肺炎疫情流行规律进行比较,拟合效果也较好;⑤通过比较理论预测数与实际发病数,可评价防控措施的效果^[7]。刘胜等^[7]利用 logistic 分段模型,综合确诊、死亡及治愈模型的拟合结果,较好地描述了新冠病毒传播特性与人为干预对感染的影响。

虽然 logistic 增长曲线模型对新冠肺炎疫情的长期预测能力差强人意,本研究认为其在对疾病早期决策过程的理论支持,对疫情进展的量化分期,以及辅助传染病动力学模型等其他方法进行预测和防控措施效果评估等实际应用中仍有重要价值。

声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] Chowell G, Simonsen L, Viboud C, et al. Is West Africa approaching a catastrophic phase or is the 2014 Ebola epidemic slowing down? Different models yield different answers for Liberia [J]. PLoS Curr, 2014, 6: 1-20.
- [2] Pell B, Kuang Y, Viboud C, et al. Using phenomenological models for forecasting the 2015 Ebola challenge [J]. Epidemics, 2016, 22: 62-70.
- [3] 王建锋. SARS 流行预测分析 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(8): 23-29.

HIV-1 CRF55_01B 毒株流行特征的研究进展

梁淑家¹, 辛若雷²

1. 广西壮族自治区疾病预防控制中心, 广西重大传染病防控与生物安全应急响应重点实验室(21-220-12), 广西 南宁 530028;
2. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013

摘要: CRF55_01B 是我国报道的 HIV-1 主要流行毒株之一, 具有较为独特的流行病学和基因进化特征。近几年 HIV-1 分子流行病学监测发现 CRF55_01B 已经成为我国第五个主要流行 HIV-1 毒株。本研究从他的发现起源、流行情况、致病性和耐药性及参与的重组等方面进行综述, 并讨论了与其流行密切相关的社会和生物学因素。

关键词: HIV-1; CRF55_01B 重组毒株; 流行特征; 流行重组型

中图分类号: R512.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3110(2022)06-0766-04 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2022.06.030

Research progress on the epidemic characteristics of HIV-1 CRF55_01B

LIANG Shu-jia¹, XIN Ruo-lei²

1. Guangxi Key Laboratory of Major Infectious Disease Prevention and Control and Biosafety Emergency Response (21-220-12), Guangxi Zhuang Autonomous Region Center for Disease Prevention and Control, Nanning, Guangxi 530028, China;
 2. Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China
- Corresponding author: XIN Ruo-lei, E-mail: xinruolei@sina.com

Abstract: With unique epidemiology and genetic evolution characteristics, CRF55_01B has become one of the major epidemic strains of HIV-1 in published public reports in China. Recent HIV-1 molecular epidemiology surveillance indicates that CRF55_01B has become the fifth major HIV-1 strain in China. In this paper, characters like the origin of its discovery, prevalence, pathogenicity, drug resistance and involved recombination have been described in detail. In addition, the possible factors of sociology and biology closely associated with the prevalence of CRF55_01B are also discussed.

Keywords: HIV-1; CRF55_01B recombinant strain; epidemic characteristic; circulating recombinant form

全球广泛流行的 HIV-1 毒株属于 M 组, 根据遗

传多样性可分为 10 种亚型(A-D、F-H、J-L)、118 种流行重组型(circulating recombinant forms, CRFs)以及大量独特重组型(unique recombinant forms, URFs)^[1-2]。2018 年第四次全国 HIV 分子流行病学调查结果显示, 我国共有 19 种基因亚型及 CRFs, 是 HIV 流行亚型种类最多、遗传多样性最复杂并且以重组病毒流行为主

基金项目:“十三五”国家科技重大专项(2018ZX10715008); 北京市自然科学基金面向项目(7202074)

作者简介:梁淑家(1975-), 女, 广西环江县人, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 艾滋病防治。

通信作者:辛若雷, E-mail: xinruolei@sina.com。

- [4] 徐付霞, 李秀敏, 徐红梅, 等. 传染病的 logistic 模型研究[J]. 中国卫生统计, 2007, 24(2):168-170.
- [5] 张锡兴, 陈田木, 刘如春, 等. logistic 模型在甲型 H1N1 流感大流行模拟中的应用[J]. 实用预防医学, 2014, 21(9):1052-1055.
- [6] Batista M. Estimation of the final size of coronavirus epidemic by the logistic model[EB/OL]. (2020-02-20) [2021-08-15]. <https://doi.org/10.1101/2020.02.16.20023606>.
- [7] 刘胜, 王书昌, 修志龙. 新型冠状病毒肺炎的传染动力学[J]. 病毒学报, 2020, 36(3):355-364.
- [8] Wu K, Darce D, Wang Q, et al. Generalized logistic growth modeling of the COVID-19 outbreak: comparing the dynamics in the 29 provinces in China and in the rest of the world[J]. Nonlinear Dyn, 2020;1-21.
- [9] Cássaro FAM, Pires LF. Can we predict the occurrence of COVID-19 cases? Considerations using a simple model of growth[J]. Sci Total Environ, 2020, 728:138834.
- [10] 黄丽红, 魏永越, 沈思鹏, 等. 常见新型冠状病毒肺炎疫情影响预测方法及其评价[J]. 中国卫生统计, 2020, 37(3):322-326.
- [11] Chen DG, Chen X, Chen JK. Reconstructing and forecasting the COVID-19 epidemic in the United States using a 5-parameter logistic growth model[J]. Glob Health Res Policy, 2020, 5:25.
- [12] Shen CY. Logistic growth modelling of COVID-19 proliferation in China and its international implications[J]. Int J Infect Dis, 2020, 96:582-589.
- [13] 国家卫生健康委办公厅, 国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第五版)[R]. 2020-02-04.
- [14] 王义康, 刘学艺. 复合 logistic 模型对 SARS 区域疫情的动态描述[J]. 中国计量学院学报, 2005, 16(2):159-162.
- [15] Zhao S, Lin Q, Ran J, et al. Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: a data-driven analysis in the early phase of the outbreak[J]. Int J Infect Dis, 2020, 92:214-217.
- [16] 冯苗胜, 王连生, 林文水. logistic 与 SEIR 结合模型预测新型冠状病毒肺炎传播规律[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(279):1041-1046.
- [17] 焦海燕, 廖影, 王蕾. 新疆 2020 年 1 月和 7 月新型冠状病毒肺炎疫情影响流行规律的比较研究—基于 SIR 动力学模型和 Richards 生长曲线模型[J]. 现代预防医学, 2021, 48(12):2124-2129.

收稿日期: 2021-07-09