不同国家和时段COVID-19控制策略效果评价: 基于自适应PSO-SEIR模型

罗丹婷¹, 钱华^{1*}, 刘聪¹, 黄顺祥²

1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210000;

2. 中国人民解放军陆军防化学院核生化应急技术支持中心, 北京 102205

* 联系人, E-mail: qianh@seu.edu.cn

2020-08-29 收稿, 2020-10-21 修回, 2020-10-22 接受, 2020-10-23 网络版发表

国家自然科学基金(41973730)资助

摘要 新型冠状病毒肺炎(COVID-19)在超过100个国家和地区相继暴发。目前, 疫情依然在蔓延, 如何快速控制疫情已成为各国面临的首要问题。本文基于常规粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法, 提出了一种采用自适应权重的PSO算法, 对SEIR(susceptible-exposed-infected-recovered)改进模型的关键参数进行反演计算。利用中国大陆、意大利、西班牙和德国的确诊、治愈和死亡数据进行模拟及预测, 发现所得结果与实际值的相关系数 R^2 均在0.93以上, 验证了算法有效性。再利用反演求得的不同阶段各国疫情防控中的关键参数, 分析并评估疫情控制中的有效策略及其所占比重, 发现送医时间为降低患者数量的首要因素, 隔离率次之, 且隔离率影响程度随送医时间缩短而提高。当送医时间从13 d缩短至1 d时, 即使不考虑隔离率和人群防护意识的作用, 有效再生数依然可以从3.9下降至1.4。通过研究有效控制疫情的重大事件, 发现增加临床诊断和建立方舱医院使湖北省患者就医时间从16 d逐渐降至1~2 d。各国防疫效果主要受患者就医时间差异的影响, 侧面佐证了加快患者收治速度和建立方舱医院的重要性。此外, 当人群的防护意识指数从0.25上升至0.69时, 所研究国家的确诊人数均可下降近1/3。本文对防疫影响因素进行研究分析, 可为疫情尚未得到控制的地区制定有效的防控措施提供理论指导, 并对未来可能出现的类似疫情的防控政策制定提供参考。

关键词 新型冠状病毒肺炎(COVID-19), SEIR模型, 粒子群算法, 疫情防控

从2019年12月开始, 一种造成了大量疾病和死亡的人传人肺炎COVID-19^[1]引起了全球范围内的广泛关注^[2]。自首例新型冠状病毒(简称“新冠病毒”)感染者被检测出来以后^[3], 包括美国^[4]和大部分欧洲国家^[5,6]在内的超过100个国家及地区^[7]接连发现新冠病毒感染者。目前, 疫情依然在部分国家蔓延, 如何快速控制疫情已成为各国面临的首要问题。

传统的传染病模型已成为分析新冠病毒传播特性的重要手段^[8,9], 其中最常见的是考虑潜伏期的SEIR

(susceptible-exposed-infected-recovered)模型^[10]。但是, 传统的SEIR模型并没有考虑在抗击疫情时采取的应对措施产生的有效作用, 因此需要对原有模型进行改进。此外, 模型的模拟效果在很大程度上受参数设置的影响。通常来说, 参数通过其他文献给出的实验或者经验值进行估计^[11], 但这种方式得到的模拟效果通常不理想。为了提升模拟效果, Fang等人^[12]提出一种基于经典SEIR模型的数据驱动模拟方式, 通过拟合结果与实际数据的对比, 调整输入参数的修正因子, 但

引用格式: 罗丹婷, 钱华, 刘聪, 等. 不同国家和时段COVID-19控制策略效果评价: 基于自适应PSO-SEIR模型. 科学通报, 2021, 66: 453–464

Luo D T, Qian H, Liu C, et al. Evaluation of COVID-19 control strategies in different countries and periods based on an adaptive PSO-SEIR model (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 453–464, doi: [10.1360/TB-2020-1085](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1085)

该方法根据结果人为调整修正, 不仅过程复杂, 而且仅模拟了确诊人数而忽略了治愈人数和死亡人数. 除去基于经验的参数设定方法和根据结果的人为修正方法, 人工智能也为求解问题贡献了不同思路. Yang等人^[13]采用一种基于人工智能的长短时记忆模型, 预测中国部分城市新型冠状病毒肺炎(简称“新冠肺炎”)疫情的传播峰值和规模, 但是受限于过小的研究样本, 不得不采用与新冠肺炎疫情具有相似特性的SARS疫情数据库来训练模型, 一定程度上限制了模型的可解释性. 相比之下, 智能优化算法弥补了上述方案的缺点, 采用算法自动搜索的方式更可能得到最优参数并忽略样本规模的影响. 粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法作为智能优化算法中较为成熟的群智能启发算法, 由于方便、高效的特点近年来受到各行业的追捧.

本文基于常规粒子群算法, 提出了一种采用自适应权重的PSO算法, 对SEIR改进模型的关键参数进行反演计算. 利用中国大陆、意大利、西班牙和德国的确诊、治愈和死亡数据进行模型验证, 并利用反演求得的不同阶段各国疫情防控中的关键参数, 分析并评估疫情控制中的有效策略及所占比重.

1 模型建立

1.1 数据来源

本文从国家卫生健康委员会(简称“国家卫健委”)收集了自疫情暴发至2020年3月23日的确诊人数、治愈人数和死亡人数信息, 用以构建中国大陆地区的疫情数据库; 并根据截至4月8日约翰斯·霍普金斯大学(Johns Hopkins University)医学院提供的疫情数据, 构建意大利、西班牙和德国等国家的疫情数据库.

1.2 改进的SEIR模型

在经典的SEIR模型中, 当地人口仅被划分为易感者、潜伏者、感染者和治愈者4类. 但是, 随着政府采取一系列疫情防控举措, 经典的SEIR模型不再能够准确反映出当地的疫情防控情况, 需要在下述4方面进行改进. 首先, 考虑到各国为防止新冠病毒传播实施的隔离措施, 改进模型在人群分类中加入了被隔离的感染者和被隔离的潜伏者两种类型. 其次, 新冠肺炎的症状普遍较轻但传染性强, 感染者因为病情难以识别以及医院床位紧张等原因无法在发病后第一时间被确诊. 改进模型中通过考虑患者发病到确诊的时间间隔将确诊人群和感染者区分开, 以提高模型描述的准确性. 此外, He等人^[14]研究发现, 潜伏者也具有一定的传染性, 所以改进模型考虑了潜伏者传播的情况, 并设立了潜伏者和感染者的传播比率. 最后, 考虑到医疗投入的增加和新冠病毒研究的深入, 医疗资源紧缺的局面也有所缓解, 而且人们对疫情的防护意识逐渐提升, 改进的SEIR模型建立了具有阶段识别策略的参数设置方法.

流程^{图1}描述了上述过程. 易感者 S_t 在接触潜伏者 E_t 或感染者 I_t 后有一定概率转化为潜伏者, 并在潜伏期 θ 天后出现症状成为感染者, 并在 $\sigma_{i,s}$ 天内被送往医院. 疑似接触患者的易感者 $S_{Q,t}$ 和潜伏者 Q_t 分别依照隔离率 q_s 被隔离, 隔离的易感者在 λ 天后自动解除隔离, 而隔离的潜伏者在 $\sigma_{q,s}$ 天内确诊 C_t 并接受治疗, 死亡率和治愈率分别为 α_s 和 γ_s . 改进的SEIR模型的数学描述如^{式(1)~(8)}所示:

$$\frac{dS_t}{dt} = -\beta(1-p_s)(1-q_s)\frac{I_t + \phi E_t}{N_t}S_t - q_s S_t + \frac{S_{Q,t}}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_t}{dt} = -\frac{(1-q_s)E_t}{\theta} - q_s E_t + \beta(1-p_s)(1-q_s)\frac{I_t + \phi E_t}{N_t}S_t, \quad (2)$$

$$\frac{dI_t}{dt} = \frac{(1-q_s)E_t}{\theta} - \frac{I_t}{\sigma_{i,s}}, \quad (3)$$

图1 (网络版彩色)SEIR模型的流程图

Figure 1 (Color online) The flowchart of SEIR model

$$\frac{dR_t}{dt} = \gamma_s C_t, \quad (4)$$

$$\frac{dD_t}{dt} = \alpha_s C_t, \quad (5)$$

$$\frac{dC_t}{dt} = \frac{I_t}{\sigma_{i,s}} - (\alpha_s + \gamma_s) C_t + \frac{Q_t}{\sigma_{q,s}}, \quad (6)$$

$$\frac{dQ_t}{dt} = q_s E_t - \frac{Q_t}{\sigma_{q,s}}, \quad (7)$$

$$\frac{dS_{Q,t}}{dt} = q_s S_t - \frac{S_{Q,t}}{\lambda}. \quad (8)$$

其中, 下角标 s 和 t 分别表示逐阶段变化量和逐日变化量. D_t 、 C_t 、 Q_t 和 $S_{Q,t}$ 分别表示第 t 天的死亡人数、确诊人数、被隔离的潜伏者人数和被隔离的易感者人数. 隔离人数通过各阶段隔离率 q_s 控制, 被隔离的易感人群将自我隔离 λ 天后解除隔离, 根据官方规定, λ 设置为14.

$\beta \frac{I_t + \phi E_t}{N_t}$ 表示易感者的患病率, 其中, β 表示一个易感个体在没有任何防护意识和防护措施的前提下, 与潜伏者或感染者接触时的感染概率, 考虑到潜伏者传播的情况, 将 ϕ 表示为潜伏者和感染者的传播率之比. 考虑患者从发病到确诊的时间间隔, 假设感染者和被隔离的潜伏者将分别在 $\sigma_{i,s}$ 和 $\sigma_{q,s}$ 天内确诊, $\frac{1}{\sigma_{i,s}}$ 和 $\frac{1}{\sigma_{q,s}}$ 分别为感染者和被隔离潜伏者的确诊转化率. 此外, p_s 为各阶段人群防护意识指数, 表示每个阶段受政策影响下人群防护意识的提高程度, 假设初始阶段为0. θ 是人群从感染新冠病毒到发病出现症状的潜伏期. α_s 和 γ_s 分别为各阶段确诊患者的日死亡率和日治愈率. R_t 和 D_t 分别表示治愈病例和死亡病例.

1.3 采用自适应权重的粒子群模型

Kennedy受自然界中群智能启发所提出的粒子群算法是一种具有优化稳定性和全局收敛性的智能优化算法^[15,16]. 该算法可以通过在 N 维搜索空间的 M 个粒子组成的粒子群在 G 次迭代中完成优化问题的求解. 迭代过程由4部分组成: 求解空间内粒子的当前位置 $x_m^k = (x_{m1}^k, x_{m2}^k, \dots, x_{mn}^k, \dots, x_{mN}^k)^T$, $m=1, 2, \dots, M$; $k=1, 2, \dots, G$; 粒子在第 k 次迭代时的速度 $v_m^k = (v_{m1}^k, v_{m2}^k, \dots, v_{mn}^k, \dots, v_{mN}^k)^T$; 前 k 次迭代过程中粒子搜索到的历史最优位置 $p_m^k = (p_{m1}^k, p_{m2}^k, \dots, p_{mn}^k, \dots, p_{mN}^k)^T$; 前 k 次迭代过程中种群搜索到的最优位置 $p_g^k = (p_{g1}^k, p_{g2}^k, \dots,$

$p_{gn}^k, \dots, p_{gN}^k)^T$. 传统PSO算法中的粒子行为数学描述如下:

$$v_{mn}^{k+1} = w_m v_{mn}^k + c_1 r_1^k (p_{mn}^k - x_{mn}^k) + c_2 r_2^k (p_{gn}^k - x_{mn}^k), \quad (9)$$

$$x_{mn}^{k+1} = x_{mn}^k + v_{mn}^{k+1}, \quad (10)$$

其中, w_m 是惯性权重, 用来描述上一代粒子速度对当前代粒子速度的贡献程度; v_{mn}^k 表示第 k 次迭代的粒子群中第 m 个粒子的第 n 维速度. 根据经验, 将社会因子 c_1 和认知因子 c_2 均设为2, r_1^k 和 r_2^k 均为 $[0,1]$ 区间内的随机数.

传统PSO算法的搜索能力有限且易于陷入局部最优. 为了提升PSO算法的搜索能力, 本文提出结合粒子个体历史最优适应度和种群最优适应度的自适应惯性权重, 以指导粒子速度的更新过程:

$$w_m = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{f_{mw}^k} f_g^k, \quad (11)$$

其中, $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 分别取0.9和0.4^[17]; 第 m 个粒子的加权适应度 f_{mw}^k 由粒子搜索得到的前 k 次迭代历史最优适应度 f_{pm}^k 和种群在前 k 次搜索过程中获得的历史最优适应度 f_g^k 共同确定:

$$f_{pm}^k = \min\{f_m^1, f_m^2, \dots, f_m^k\}, (1 \leq k \leq G), \quad (12)$$

$$f_g^k = \min\{f_1^1, f_1^2, \dots, f_1^k, f_2^1, f_2^2, \dots, f_2^k, \dots, f_m^1, f_m^2, \dots, f_m^k\}, \quad (13)$$

$$f_{mw}^k = \left(1 - \frac{m}{G}\right) f_{pm}^k + \frac{m}{G} f_g^k. \quad (14)$$

本文中, 由SEIR模型中各待定关键参数组成单个粒子, 通过将单个粒子各维度代入SEIR模型即可得到对应的模拟阶段 T 天内的确诊、死亡和治愈病例数值 $P_{\text{sim},t}$ 、 $P_{\text{sim},t}$ 和实际病例数 $P_{\text{pre},t}$ 的均方差即为第 k 次迭代中第 m 个粒子的适应度 f_m^k :

$$f_m^k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{sim},t} - P_{\text{rep},t})^2. \quad (15)$$

1.4 评价指标

采用相关系数 R^2 计算模拟值和实际值的吻合程度, 以此评价所提出模型的有效性. 其计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{\text{rep},t} - P_{\text{sim},t})^2}{\sum_{t=1}^T (P_{\text{rep},t} - \overline{P_{\text{rep}}})^2}, \quad (16)$$

其中, $\overline{P_{\text{rep}}}$ 是模拟时间段 T 天内实际数据的平均值,

$$\text{即 } \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{rep},t}}{T}.$$

有效再生数 R_s 是评价疫情能否得到控制的关键指标. 其计算公式如下:

$$R_s = \beta(1-p_s)(1-q_s) \left(\frac{\varphi}{\frac{(1-q_s)}{\theta} + q_s} + \sigma_{i,s} \right). \quad (17)$$

2 结果与讨论

从当地发生第一起死亡病例开始, 对中国大陆及意大利、西班牙和德国进行疫情信息收集. 其中, 中国大陆疫情数据来自国家卫健委, 海外疫情数据来自约翰斯·霍普金斯大学医学院. 由于2020年4月26日湖北省确诊患者全部被治愈出院, 湖北省新冠肺炎患者信息数据仅从1月23日收集至4月26日. 此外, 主要研究城市封锁情况下的疫情, 忽略不同国家和地区之间的人群迁移. 从3月24日起, 国家卫健委将境外流入患者信息加入统计, 故针对其他省份新冠肺炎患者的信息收集截至3月23日. 中国大陆合计收集到81498例确诊病例(其中68128例来自湖北省, 占83.6%)、76452例治愈病例(其中63616例来自湖北省, 占83.2%)以及4629例死亡病例(其中4512例来自湖北省, 占97.5%), 并以此构建数据库. 因为中国大陆不同地区的抗疫情形有所差异, 所以将中国大陆的数据集分为湖北省和中国大

陆除湖北省以外的其他省份(下称“中国其他省份”)两部分进行模拟与讨论. 由于西班牙的治愈病例数仅更新至5月18日, 数据库中仅收录西班牙从3月3日至5月18日的疫情数据, 而意大利和德国的疫情数据分别从2月22日和3月9日收集至7月11日. 西班牙收集到231606例确诊、150376例治愈和27709例死亡病例. 意大利和德国分别收集到242827和199709例确诊、194579和184266例治愈、34945和9070例死亡病例.

2.1 基于中国大陆及意大利、西班牙和德国疫情数据的模型验证

基于上述数据库, 通过PSO智能优化算法搜索的参数求解各阶段的确诊、治愈和死亡人数, 并针对3种人数进行为期10 d的预测以验证模型可靠性. 其中, 湖北省和中国其他省份的结果分别如图2(a)和(b)所示, 图3(a)、(b)和(c)则分别绘制出意大利、西班牙和德国的情况. 图中的散点表示政府公布的实际人数, 曲线表示模型计算的模拟值, 预测阶段用阴影部分表示. 由于国家卫健委在4月17日订正了武汉市的确诊、治愈和死亡人数, 图2(a)中湖北省的预测段还增加了基于4月17日校正数据作为初始条件的预测结果. 此外, 海外国家大部分采用居家隔离而不是集中隔离的形式, 所以研究海外国家时取消了 Q_i 人群和相应的 $\sigma_{q,i}$. 此时的 q_i 仅表示居家隔离的隔离率. 模拟段和预测段中3种病例数与实际值的相关系数 R^2 见表1, 除去湖北省未校正的情况, 其余所有病例的相关系数均在0.93以上. 根据图2和3的模拟和预测结果, 发现无论是国内还是海外的疫情情况, 模型所得结果在确诊病例、治愈病例和死亡病例3个方面均与实际数据有较强的相关性, 并能给出较准确的预测结果, 表明本文所提出模型是有效的.

图2 (网络版彩色)湖北省(a)和中国其他省份(b)累计确诊、治愈和死亡人数的模拟结果和实际情况比较

Figure 2 (Color online) A comparison between the predicted results and the actual data on the cumulation of confirmed cases, cured cases and death cases in Hubei Province (a) and other provinces in China (b)

图3 (网络版彩色)意大利(a)、西班牙(b)和德国(c)累计确诊、治愈和死亡人数的模拟结果和实际情况比较

Figure 3 (Color online) A comparison between the predicted results and the actual data on the cumulation of confirmed cases, cured cases and death cases in Italy (a), Spain (b) and Germany (c)

表1 确诊、治愈和死亡病例模拟值和实际值的相关系数(R^2)

Table 1 Correlation coefficient (R^2) between simulation results and the reality of the confirmed cases, the cured cases and the death cases

国家/地区	阶段	相关系数 R^2		
		确诊病例	治愈病例	死亡病例
湖北省	模拟段	0.9977	0.9972	0.9923
	模拟段+预测段(未校正)	0.9978	0.9975	0.8989
	模拟段+预测段(校正)	0.9978	0.9975	0.9945
中国其他省份	模拟段	0.9975	0.9952	0.9915
	模拟段+预测段	0.9959	0.9959	0.9905
意大利	模拟段	0.9989	0.9988	0.9839
	模拟段+预测段	0.9989	0.9990	0.9849
西班牙	模拟段	0.9891	0.9856	0.9600
	模拟段+预测段	0.9911	0.9899	0.9324
德国	模拟段	0.9990	0.9977	0.9965
	模拟段+预测段	0.9988	0.9979	0.9968

2.2 各地疫情的传播特性分析

表2列出了所研究国家/地区新冠肺炎疫情的传播特性. 研究发现, 在没有任何防护措施的情况下, 易感者接触患者后的感染概率 β 为0.19~0.24, 受各地人群的

社交习惯和社会年龄结构等因素影响有微小差异^[18]. 而且, 潜伏期为 (5.1 ± 0.1) d, 这与Li等人^[19]的实际病例研究结果相近. 此外, 潜伏者和感染者的传播率相近, 为1.1, 建议在未发现有症状人群的区域做好消毒并佩戴口罩. 表2还给出了模拟首日潜伏者和感染者的估

表 2 中国大陆、意大利、西班牙和德国疫情的传播特性及初始潜伏者和感染者数

Table 2 Transmission characteristics and the number of exposed cases and infected cases at early stage in Chinese mainland, Italy, Spain and Germany

国家/地区	β	θ	φ	E_0	I_0
湖北省	0.233	5.2	1.29	10990	2862
中国其他省份	0.228	5.2	0.90	2950	1257
意大利	0.197	5.0	1.14	1865	1061
西班牙	0.211	5.2	1.25	4907	677
德国	0.236	5.1	1.15	4646	3083

计值, 1月23日湖北省潜伏者和感染者数量约为中国其他省份总和的3.29倍。

2.3 影响中国大陆疫情走向的重大事件

图4呈现了中国大陆新冠肺炎疫情防控阶段发生的重大事件。结合图2湖北省及中国其他省份的阶段划分, 可以粗略看出影响中国大陆地区疫情走向的重大事件。自疫情暴发以来, 全国各省在2020年1月23~28日陆续发布公共卫生事件一级响应, 其中湖北省在1月25日发布一级响应, 这作为一个标志性事件使疫情防控由第一阶段进入第二阶段。此外, 湖北省在2月12日将临床诊断加入新冠肺炎诊断标准的举措极大地影响了省内确诊人数, 即使该措施在2月19日宣布取消, 但这个做法依然被算法识别为使湖北省划分第二阶段和第三阶段的重要事件。除了诊疗方案, 另外两个医疗资源相关重要事件也在全国范围内起着推动作用: 2月17日, 国家宣布有效的治疗途径; 2月3~22日, 雷神山和火神山医院以及一系列方舱医院建立。可以看出, 影响疫情

防控的重要事件主要分为公共防控和医疗资源两部分, 以一级响应为代表的公共防控措施主导着隔离措施的实施, 也影响着公民自身防控意识, 而临时专门医院的建立和诊疗方案的研究影响着医院的患者容纳率、治愈率、死亡率。

根据式(15), 影响患者人数的指标再生数 R_s 主要受隔离率 q_i 、人群防控意识 p_i 、患者送医时间 $\sigma_{i,t}$ 的影响。图5对其进行敏感性分析, 假定感染概率为0.21、潜伏期为5.1 d、传播比为1.1。研究发现, 送医时间为影响患者人数的首要因素, 隔离率次之, 且送医时间越短, R_s 随隔离率降低下降得越明显。当送医时间从13 d缩短至1 d时, 即使不考虑隔离率和人群防护意识的作用, 有效再生数也从3.9下降至1.4。当患者在1 d内完成送医且隔离率高于0.1时, R_s 小于1, 疫情传播将得到有效遏制。此外, 隔离率在送医时间短时影响更明显。

结合上述重大事件, 分析各事件在疫情中产生的影响。所有措施的影响参数如表3所示。其中, 公共卫生事件一级响应被细化为增加隔离措施、提升人群防

图 4 (网络版彩色)中国大陆疫情各阶段发生的重大事件

Figure 4 (Color online) Significant events at each stage in the Chinese mainland

图 5 (网络版彩色)有效再生数(R_s)敏感性分析. (a) $\sigma_{i,t}=1$; (b) $\sigma_{i,t}=4$; (c) $\sigma_{i,t}=7$; (d) $\sigma_{i,t}=10$; (e) $\sigma_{i,t}=13$
Figure 5 (Color online) Sensitivity analysis of effective reproduction number R_s . (a) $\sigma_{i,t}=1$; (b) $\sigma_{i,t}=4$; (c) $\sigma_{i,t}=7$; (d) $\sigma_{i,t}=10$; (e) $\sigma_{i,t}=13$

表 3 中国各阶段防疫情况^{a)}

Table 3 Epidemic prevention situation at each stage in China

主要举措	地区	影响参数	原值	现值
启动重大突发公共卫生事件一级响应:				
(1) 增加隔离措施	湖北省	q_t	—	0.21
	中国其他省份		—	0.14
(2) 提高人群防护意识	湖北省	p_t	—	0.10
	中国其他省份		—	0.25
(3) 提升就医意识	湖北省	$\sigma_{i,t}$	40	16
		$\sigma_{q,t}$	—	16
	中国其他省份	$\sigma_{i,t}$	10	4
		$\sigma_{q,t}$	—	6
(4) 设立医院专门收治	湖北省	γ_t	0.020	0.020
		α_t	0.00662	0.00662
	中国其他省份	γ_t	0.026	0.027
		α_t	0.00128	0.00055
春节期间加大宣传力度	湖北省	q_t	0.21	0.42
		p_t	0.10	0.30
	中国其他省份	q_t	0.14	0.14
		p_t	0.25	0.69
增加临床诊断作为诊断标准 建立方舱医院	湖北省	$\sigma_{i,t}$	16	7
		$\sigma_{q,t}$	16	1
公布诊疗方案	中国其他省份	γ_t	0.027	0.125
		α_t	0.00055	0.00053
建立方舱医院 公布诊疗方案		$\sigma_{q,t}$	1	1
	湖北省	$\sigma_{i,t}$	7	2
		γ_t	0.020	0.071
		α_t	0.00662	0.00157

a) “—”表示无数值

护意识、提升人群就医意识和加强医院专门收治. 研究发现, 宣布一级响应对提升隔离率 q_t 和人群防护意识 p_t 起着重要作用. 因为湖北省疫情更严重且隔离目

标没有中国其他省份明确, 所以湖北省在春节之后进一步加大了控制力度, 隔离率从0.21提升至0.42. 此外, 春节期间政府大力宣传新冠肺炎的防疫知识, 加大管

控力度,截至春节结束,湖北省和中国其他省份的人群防护意识比之前分别提升了2倍和1.76倍.一级响应发布后,人群开始重视新冠肺炎的相关症状,并产生就医意识,但苦于无法快速识别病情和医院运行超出荷载,患者就医时间较长,特别是患者规模更大的湖北省.该情况在湖北省增加临床诊断和建立方舱医院后有所缓解,患者就医时间分别缩短了56.25%和71%,隔离人群就医时间也缩短至1 d.此外,研究结果表明,一级响应对降低较轻病情(主要为中国其他省份患者)的死亡人数有帮助,但是对提升治愈率的帮助较小.在公布诊疗方案后,湖北省和中国其他省份的治愈率分别提升2.5倍和3.6倍.

为了研究上述重要事件对疫情控制的影响,图6展示了当疫情防控措施维持在各阶段时,患者总人数与确诊病例、死亡病例和治愈病例的数量情况.情况A、B、C分别表示各参数维持在第一阶段、第二阶段和第三阶段.结合图6(a)和(c)可以发现,湖北省在不采取任何措施的情况A下,其患者总人数将持续飙升直至全员感染.受限于医疗条件,情况A的确诊人数在前期较短时间略低于实际情况,但随后迅速攀升,远超实际的确诊人数.这是因为在不采取任何措施的情况A下,医院的患者收治量较小,患者由于无法得到确诊并收治,依然可以在外活动并传播疫情,因此确诊病例呈现前期较低然后持续飙升的情况.情况B虽然得到了部分

图6 (网络版彩色)各阶段防疫措施对湖北省((a), (c))和中国其他省份((b), (d))患者总人数、确诊病例数、治愈病例数和死亡病例数的影响.图(c)中的实际情况和情况C的数据点对应左侧线性坐标轴,情况A和B的数据点对应右侧对数坐标轴;图(d)中的实际情况和情况B的数据点对应左侧线性坐标轴,情况A的数据点对应右侧对数坐标轴

Figure 6 (Color online) The impact of epidemic prevention measures at each stage on the total number of patients, confirmed cases, cured cases and death cases in Hubei Province ((a), (c)) and other provinces in China ((b), (d)). Data points of the reality and situation C (c) correspond to the left linear coordinate axis, and data points of situation A and situation B correspond to the right logarithmic axis, while data points of the reality and situation B in (d) correspond to the left linear coordinate axis, and data points of situation A correspond to the right logarithmic axis

改善,但措施强度仅减轻了疫情蔓延而不足以在模拟期间控制住疫情。情况C虽然可以控制住疫情,患者总人数仅比实际人数多1000左右,但是在治愈率方面不及实际情况。由图6(b)和(d)可得,对于中国其他省份,情况A无法控制住疫情蔓延,而情况B的治愈率不及实际情况。结合图4和6,结果表明,公共卫生事件一级响应以及春节期间的大力宣传对疫情的控制至关重要。对于湖北省,建立方舱医院和添加临床诊断方法作为临时确诊手段功不可没。

2.4 防疫措施力度对意大利、西班牙和德国疫情走势的影响

选择意大利、西班牙和德国为代表进行海外防疫措施力度的研究分析。以封禁日和解封日将模拟区间分为初始期、封禁期和解封期3部分。这3个国家在每个阶段的参数如表4所示。研究发现,意大利、西班牙和德国各阶段疫情防控强度与中国其他省份相近,但是送医时间长于中国防疫后期的送医时间,维持在中国第二阶段水平。意大利在解封后依然保持较强警戒性,在隔离率和人群意识上与解封期间持平,且由于医疗的不断投入,在患者送医时间、治愈率和死亡率方面也有所改善。德国在解封复工后放松了防疫警惕,表现在隔离率和人群意识的下降以及送医时间的延长,这也解释了德国复工后确诊人数反弹的现象。

为进一步研究防控力度对疫情走势的影响,图7展示了意大利、西班牙以及德国在封禁期间达到中国其他省份各阶段疫情防控力度时的疫情走向。3国封禁期采用我国疫情防控第二阶段所预测的各病例数为确诊A、治愈A、死亡A指示,称为预测组A;采用第三阶段

预测的各病例数为确诊B、治愈B、死亡B指示,称为预测组B。研究发现,意大利、西班牙和德国封禁期防疫效果均没有中国其他省份的好,其中德国防疫效果在3个国家中相对较好,与中国其他省份封禁第二阶段水平相近。结合表3和4发现,防疫效果的差异主要来自患者就医时间和集中隔离。3个国家的送医时间均为我国的2~3倍且没有集中隔离群体,所以意大利和西班牙的实际患者人数为预测组A的2倍,而德国通过更高的家庭隔离率尽可能弥补了这一不足。该结果证明了防疫期间患者就医时间对疫情防控的重要性,侧面佐证了加大核酸检测力度等方式加快患者收治速度和建立方舱医院的重要性。此外,对比3个国家确诊A和确诊B的病例人数时发现,当人群的防护意识指数从0.25上升至0.69时,意大利、西班牙和德国的确诊人数均可以下降近1/3。

3 结论

本文提出了一种采用自适应权重的PSO算法,对SEIR改进模型的关键参数进行反演计算。利用中国大陆、意大利、西班牙和德国的确诊、治愈和死亡数据进行模拟及预测,发现所得结果与实际值的相关系数 R^2 均在0.93以上,验证了该算法的有效性。利用反演求得的不同阶段各国疫情防控中的关键参数,分析并评估疫情控制中的有效策略及所占比重,得到结论如下。

- (1) 送医时间为影响患者数量的首要因素,隔离率次之,且隔离率影响程度随送医时间缩短而提升。当送医时间从13 d缩短至1 d时,即使不考虑隔离率和人群防护意识的作用,有效再生数依然可以从3.9下降至1.4。
- (2) 对我国疫情防控工作产生重大影响的事件分

表4 意大利、西班牙和德国各阶段的防疫情况^{a)}

Table 4 Epidemic prevention situation at each stage in Italy, Spain and Germany

国家	阶段	日期	q_t	p_t	$\sigma_{i,t}$	γ_t	α_t
意大利	初始期	2/22~3/10	—	—	13	0.0196	0.16667
	封禁期	3/11~5/4	0.18	0.28	11	0.0200	0.00617
	解封期	5/4~7/11	0.18	0.28	7	0.0400	0.00175
西班牙	初始期	3/3~3/15	—	—	25	0.0120	0.00943
	封禁期	3/16~5/9	0.17	0.20	7	0.0385	0.00855
德国	初始期	3/9~3/18	—	—	21	0.0167	0.0034
	封禁期	3/19~5/4	0.30	0.19	8	0.0625	0.0034
	解封期	5/5~7/11	0.25	0.18	15	0.0833	0.0034

a) “—”表示无数值

图7 (网络版彩色)防疫措施力度对意大利(a)、西班牙(b)和德国(c)疫情走势的影响

Figure 7 (Color online) The impact of the intensity of epidemic prevention measures on the epidemic situation (tendency) in Italy (a), Spain (b) and Germany (c)

别是公共卫生事件一级响应、春节期间大力宣传疫情防控知识、增加临床诊断标准、公布诊疗方案以及建立方舱医院。其中,增加临床诊断和建立方舱医院将湖北省的患者就医时间从16 d逐渐降至1~2 d,侧面佐证了加快患者收治速度和建立方舱医院的重要性。

(3) 意大利、西班牙和德国封禁期防疫效果均不

及中国其他省份,其中德国在3个国家中相对较优,与中国其他省份封禁第二阶段水平相近。当人群的防护意识指数从0.25上升至0.69时,所研究各国的确诊人数均可以下降近1/3。

本文对防疫影响因素的分析可为疫情尚未得到控制的地区制定有效疫情防控措施提供理论指导。

参考文献

- 1 Chan J F W, Yuan S, Kok K H, et al. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: A study of a family cluster. *Lancet*, 2020, 395: 514–523
- 2 Paules C I, Marston H D, Fauci A S. Coronavirus infections—More than just the common cold. *JAMA*, 2020, 323: 707–708
- 3 Chen N, Zhou M, Dong X, et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: A descriptive study. *Lancet*, 2020, 395: 507–513
- 4 Ghinai I, McPherson T D, Hunter J C, et al. First known person-to-person transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in the USA. *Lancet*, 2020, 395: 1137–1144
- 5 Chintalapudi N, Battineni G, Amenta F. COVID-19 virus outbreak forecasting of registered and recovered cases after sixty day lockdown in Italy: A data driven model approach. *J Microbiol Immunol*, 2020, 53: 396–403
- 6 Spiteri G, Fielding J, Diercke M, et al. First cases of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in the WHO European Region, 24 January to 21 February 2020. *Eurosurveillance*, 2020, 25: 2000178
- 7 Zhang S, Diao M Y, Yu W, et al. Estimation of the reproductive number of novel coronavirus (COVID-19) and the probable outbreak size on the Diamond Princess cruise ship: A data-driven analysis. *Int J Infect Dis*, 2020, 93: 201–204
- 8 Mizumoto K, Chowell G. Estimating risk for death from 2019 novel coronavirus disease, China, January–February 2020. *Emerg Infect Dis*, 2020,

- 26: 1251–1256
- 9 Wu J T, Leung K, Leung G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: A modelling study. [Lancet](#), 2020, 395: 689–697
- 10 Wu J T, Leung K, Bushman M, et al. Estimating clinical severity of COVID-19 from the transmission dynamics in Wuhan, China. [Nat Med](#), 2020, 26: 506–510
- 11 Chang R, Wang H, Zhang S, et al. Phase- and epidemic region-adjusted estimation of the number of coronavirus disease 2019 cases in China. [Front Med](#), 2020, 14: 199–209
- 12 Fang Y, Nie Y, Penny M. Transmission dynamics of the COVID-19 outbreak and effectiveness of government interventions: A data-driven analysis. [J Med Virol](#), 2020, 92: 645–659
- 13 Yang Z, Zeng Z, Wang K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions. [J Thorac Dis](#), 2020, 12: 165–174
- 14 He X, Lau E H Y, Wu P, et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. [Nat Med](#), 2020, 26: 672–675
- 15 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In: 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995. 1942–1948
- 16 Li J, Zhang C, Zhang X, et al. Temperature compensation of piezo-resistive pressure sensor utilizing ensemble AMPSO-SVR based on improved Adaboost.RT. [IEEE Access](#), 2020, 8: 12413–12425
- 17 Shi Y, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization. In: Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego, 1998. 591–600
- 18 Guan W J, Ni Z Y, Hu Y, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. [N Engl J Med](#), 2020, 382: 1708–1720
- 19 Li Q, Guan X, Wu P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus–infected pneumonia. [N Engl J Med](#), 2020, 382: 1199–1207

Summary for “不同国家和时段COVID-19控制策略效果评价: 基于自适应PSO-SEIR模型”

Evaluation of COVID-19 control strategies in different countries and periods based on an adaptive PSO-SEIR model

Danting Luo¹, Hua Qian^{1*}, Cong Liu¹ & Shunxiang Huang²

¹ School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210000, China;

² Nuclear, Biological and Chemical Emergency Technical Support Centre, Institute of NBC Defence, Beijing 102205, China

* Corresponding author, E-mail: qianh@seu.edu.cn

The COVID-19 pandemic has battered the world in more than 100 countries and regions due to its deadly and high transmission. How to control or limit the first and possible second wave of the infection has become an essential problem based on the control strategies implemented globally. This study presented a model to evaluate the efficiency of strategies based on an improved multi-stage SEIR (susceptible-exposed-infectious-recovered) model considering quarantine factor, treatment delay, transmission risk by the exposed, and time. The particle swarm optimization (PSO) algorithm with an adaptive weight strategy is adopted to find the SEIR model's critical parameters associated with the control strategies based on the confirmed cases, the cured cases, and the death cases in the Chinese mainland, Italy, Spain, and Germany. The model was verified by the coefficients of correlation (R^2) between the predicted results using parameters found by PSO and the actual data on the confirmed, the death, and the cured cases. The R^2 s are all greater than 0.93 in the Chinese mainland, Italy, Spain, and Germany, showing a good accuracy of the proposed model. Base on the data of analyzed countries, PSO finds the incubation period of COVID-19 is approximately 5.1 d, which is consistent with other literatures. Besides, the period from exposure to medical care delivery is the most significant for controlling the transmission, followed by the quarantined rate according to our model. The effective reproduction number reduces from 3.9 to 1.4 while the delivery period shortens from 13 to 1 d, even without considering the effect of quarantined rate and crowd protection awareness, indicating the importance of acid testing. Moreover, the effective reproduction number is smaller than 1 when the delivery period is 1 d and the quarantined rate is higher than 0.1, which shows the transmission of COVID-19 can be contained in these conditions. Furthermore, the establishment of Fangcang shelter hospitals and the implication of aided diagnosis guideline of COVID-19 gradually reduce the period to the hospital for patients in Hubei Province from 16 to 1–2 d. In addition, the efficiency of strategies among Italy, Spain, and Germany shows that Germany reached a better condition in comparison with others, and the number of confirmed cases in each country can drop by nearly 1/3 as the protection awareness of the population rises from 0.25 to 0.69, through reducing social activities, keeping social distance, and wearing masks, indicating the importance of government advertisement, education, etc. This study might help the governments to make strategies to limit the spreading of COVID-19 or potential outbreak of emerging infectious diseases in the future.

coronavirus disease 2019 (COVID-19), SEIR (susceptible-exposed-infectious-recovered) model, particle swarm optimization algorithm, epidemic prevention and control

doi: [10.1360/TB-2020-1085](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1085)