

· 新型冠状病毒肺炎疫情防控 ·

基于SVEPIUHDR传染病动力学模型的
新型冠状病毒肺炎疫情趋势分析陈佳丽¹ 金美玲¹ 王霞² 杨晓静¹ 张娜¹ 刘芳妮¹ 刘嵘¹ 郭金鹏³ 陈勇³
王长军³¹中国医科大学公共卫生学院, 沈阳 110122; ²陕西师范大学, 西安 710119; ³中国人民解放军疾病预防控制中心, 北京 100071

通信作者: 陈勇, Email: chen Yong@126.com

【摘要】 目的 对美国 and 英国新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情的发展趋势进行模型拟合和预测, 对疫苗接种的效果进行初步分析。**方法** 在SEIR模型基础上, 增加症状前感染者、隔离措施及疫苗接种等要素, 建立SVEPIUHDR模型。利用公开发布的数据建模, 分别将美国2020年11月6日至2021年1月31日和英国2020年11月23日至2021年1月31日的数据进行拟合, 2021年2月1日至4月1日的疫情数据评估预测效果, 使用R 4.0.3软件进行分析, 并预测在疫苗不同接种率下每日新增病例数的变化。**结果** SVEPIUHDR模型对美国 and 英国的累计确诊病例数的拟合及预测平均偏差均<5%。按计划接种疫苗后, 预计美国2021年4月COVID-19累计确诊人数达31 864 970人, 若未接种疫苗, 累积确诊人数达35 317 082人, 相差345万余人。英国按计划接种疫苗后预计4月初累积确诊人数达4 195 538人, 若未接种疫苗情况下累积确诊人数达4 268 786人, 相差7万余人。**结论** SVEPIUHDR模型对美、英两国COVID-19疫情的预测效果较好。

【关键词】 新型冠状病毒肺炎; 传播动力学; 预测; 疫苗**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFC1200501); 北京市科技新星计划(Z181100006218107)

Fitting and predicting trend of COVID-19 by SVEPIUHDR dynamic model

Chen Jiali¹, Jin Meiling¹, Wang Xia², Yang Xiaojing¹, Zhang Na¹, Liu Fangni¹, Liu Rong¹, Guo Jinpeng³,
Chen Yong³, Wang Changjun³¹School of Public Health, China Medical University, Shenyang 110122, China; ²Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; ³Chinese People's Liberation Army Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100071, China

Corresponding author: Chen Yong, Email: chen Yong@126.com

【Abstract】 Objective To fit and predict the trend of COVID-19 epidemics in the United States (USA) and the United Kingdom (UK), and analyze the effect of vaccination. **Methods** Based on the SEIR dynamic model, considering the presymptomatic infections, isolation measures, vaccine vaccination coverage, etc., we developed a SEIR with vaccine inoculation, Presymptomatic infectious, unconfirmed infectious, hospital isolation and domiciliary isolation dynamics model. The publicly released incidence data of COVID-19 from November 6, 2020 to January 31, 2021 in USA and from November 23, 2020 to January 31, 2021 in UK were used to fit the model and the publicly released incidence data of COVID-19 from February 1, 2021 to April 1 were used to evaluate the predicting power of the model by software R 4.0.3 and predict changes in the daily new cases in the context of different vaccination coverage. **Results** According to the cumulative confirmed cases, the fitting bias and the predicting bias of the SVEPIUHDR model for USA and UK were less than 5%,

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210225-00147

收稿日期 2021-02-25 本文编辑 万玉立

引用本文: 陈佳丽, 金美玲, 王霞, 等. 基于SVEPIUHDR传染病动力学模型的新型冠状病毒肺炎疫情趋势分析[J]. 中华流行病学杂志, 2021, 42(8): 1341-1346. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20210225-00147.



respectively. From the model prediction results, the cumulative cases after COVID-19 vaccination in USA in early April reached 31 864 970. If there had not had such vaccination, the cumulative cases of COVID-19 would have reached to 35 317 082, with a gap of more than 3.4 million cases. In UK, the cumulative cases of COVID-19 after the vaccination was estimated to be 4 195 538 in early April, compared with 4 268 786 cases if no COVID-19 vaccination had been provided, there would have been a gap of more than 70 000 cases. **Conclusion** SVEPIUHDR model shows a good prediction effect on the epidemic of COVID-19 in both USA and UK.

【Key words】 COVID-19; Transmission dynamics; Forecast; Vaccine

Fund programs: National Key Research and Development Program of China (2019YFC1200501); Beijing Research and Development Nova Program (Z181100006218107)

新型冠状病毒肺炎(COVID-19)全球大流行, 对各国公共卫生系统和经济、社会发展造成严重影响。COVID-19与SARS、流行性感冒(流感)等传染病在流行病学特征方面存在较大差异^[1], 需要针对性的传播模型、合理的参数对疫情的趋势做出较为精准的预测。已有研究采用了传统的SEIR[易感人群(S), 潜伏期人群(E), 感染人群(I)和移出者(R)]模型或改进的SEIR模型对COVID-19传播及疫情发展趋势预测^[2-5]。根据当前疫情提示, 不同国家和地区的疫情差异明显, 人口流动、新型冠状病毒感染者的类型、所采取的管控措施、病毒变异等不同都会使模型的拟合和疫情发展趋势效果有差异。英国新型冠状病毒发生新的突变, 美国COVID-19每日新增病例数虽有所减缓, 但情况仍不容乐观。考虑到美、英两国在新型冠状病毒疫苗接种方面处于世界前列, 本研究拟在传统的SEIR模型的基础上, 增加了对无症状感染者、症状前感染者、隔离措施及疫苗接种的考虑, 提出SVEPIUHDR (SEIR with vaccine inoculation, presymptomatic infectious, unconfirmed infectious, hospital isolation and domiciliary isolation)模型, 对美国 and 英国 COVID-19 疫情的流行规律进行模型预测分析。

资料与方法

1. 数据来源: 美国 2020 年 11 月 6 月至 2021 年 4 月 1 日和英国 2020 年 11 月 23 日至 2021 年 4 月 1 日 COVID-19 疫情数据, 其中美、英两国每日新增确诊病例数、逐日累计确诊病例数、每日住院人数等数据来源于 Our World in Data 网站 (<https://ourworldindata.org/#entries>), 美国 COVID-19 累计治愈人数和死亡人数数据来源于“百度新型冠状病毒肺炎疫情实时大数据报告”(https://voice.baidu.com/act/newpneumonia/newpneumonia/?from=osari_aladin_

top1&city=%E7%BE%8E%E5%9B%BD-%E7%BE%8E%E5%9B%BD)。

2. 模型构建: 在传统的 SEIR 模型基础上结合 COVID-19 疫情特点考虑了以下两个方面: 症状前感染者 (presymptomatic cases, P, 具有传染性); 未确诊感染者 (unconfirmed cases, U, 具有传染性)。同时根据实际情况中美国和英国针对疫情防控采取的隔离措施, 将感染人群进一步划分为医院隔离治疗病例 (hospital isolation, H) 和居家隔离病例 (domiciliary isolation, D), 以及正在开展的新型冠状病毒疫苗接种计划 (vaccine inoculation, V), 构建出 SVEPIUHDR 模型, 共 9 个仓室, 见图 1。图 2 表示本研究中感染、隔离、移出各阶段所经历的时间。S(t)、V(t)、E(t)、P(t)、I(t)、U(t)、H(t)、D(t)、R(t) 分别表示 t 时刻上述 9 类人群数量, 且为连续变量, 进一步连续可微。通过以上分析可以得出微分方程组, 见公式(1)。

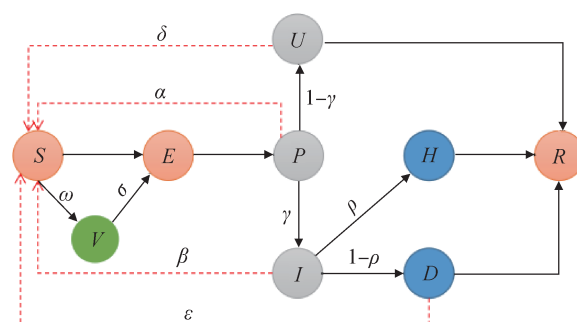


图1 考虑接种疫苗和隔离措施的SVEPIUHDR动力学模型

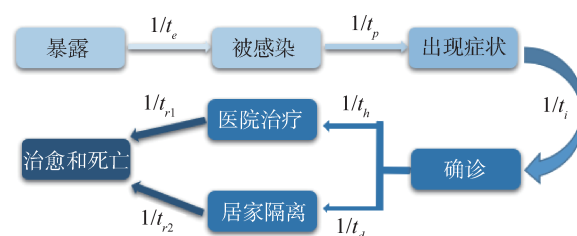


图2 SVEPIUHDR模型中各阶段所经历的时间

$$\begin{cases}
 \frac{dS}{dt} = \frac{S(\alpha P + \delta U + \beta I + \varepsilon D)}{N} - \omega S \\
 \frac{dV}{dt} = \omega S - (1 - \sigma) \frac{V(\alpha P + \delta U + \beta I + \varepsilon D)}{N} \\
 \frac{dE}{dt} = \frac{S(\alpha P + \delta U + \beta I + \varepsilon D)}{N} - t_e E + (1 - \sigma) \frac{V(\alpha P + \delta U + \beta I + \varepsilon D)}{N} \\
 \frac{dP}{dt} = t_e E - t_p P \\
 \frac{dU}{dt} = t_p (1 - \gamma) P - t_i U \\
 \frac{dI}{dt} = t_p \gamma P - t_h \rho I - t_d (1 - \rho) I \\
 \frac{dD}{dt} = t_d (1 - \rho) I - t_{r2} D \\
 \frac{dH}{dt} = t_h \rho I - t_{r1} H \\
 \frac{dR}{dt} = t_{r1} H + t_{r2} D + t_i U
 \end{cases} \quad (1)$$

3. 参数设置:根据美国、英国 COVID-19 疫情现状,结合参考文献与专家意见,在不同研究阶段各仓室起始值及参数设置见表 1~3。本研究传播动力学模型的假设:

(1)忽略出生人口与死亡人口的差值,美国和

表 1 SVEPUHDR 模型仓室含义及设置依据

仓室	含义	设置依据
S	易感人群	$S_0 = N - E_0 - P_0 - U_0 - I_0 - D_0 - H_0 - R_0 - V_0$
E	暴露人群	$E_0 = E_i(0)/\gamma, E_i(0) = (1/t_p + 1) \sim (1/t_p + 1/t_e)$ 期间确诊病例之和 ^[9]
V	疫苗接种人数	V_0 (截至起始日当天疫苗接种人数)
P	症状前感染者	$P_0 = P_i(0)/\gamma, P_i =$ 起始日当天至 $1/t_p$ 期间确诊病例之和 ^[9]
U	未确诊感染者	$U_0 = P_0 - I_0$
I	确诊病例	I_0 (起始日当天确诊病例)
H	医院隔离治疗病例	H_0 (起始日当天住院人数)
D	居家隔离病例	$D_0 = (1 - \rho) \times I_1(0), I_1(0) =$ 起始日之前 $1/t_{r2}$ 期间确诊病例之和
R	移出者(痊愈及死亡)	$R_0 =$ 累计死亡人数 + 累计治愈人数 (起始日之前) ^a

注:^a英国的治愈人数未公布,所以英国 R_0 = 累积确诊人数 - 正在住院人数 - 正在居家隔离人数

英国的总人口均保持不变;研究范围较广,总人口多,假设短期内人口规模固定,忽略流入和流出口对模型的影响;不考虑二次感染者,且仅考虑人和人之间的传播。

(2)确诊人群中一部分病例住院隔离且不再传染其他人群,除此以外的其余确诊人群全部居家隔离,居家隔离的传播率根据各国防控严格程度可进行调整。

(3)新型冠状病毒疫苗接种第 1 剂和第 2 剂后有效率不同,且疫苗产生的效果存在“滞后性”。依据美国和英国的疫苗接种政策^[6-7],本模型中只考虑了接种第 1 剂疫苗,根据研究假设疫苗效果产生于接种疫苗后的第 13 天^[8]。

4. 统计学分析:使用 Excel 2010 软件对数据进行整理及统计学描述。采用 R 4.0.3 软件分别对美国和英国 COVID-19 疫情进行分析和建模,并用平均偏差(BIAS)将预测结果(F_t)与实际逐日累计病例数(C_t)进行比较,对模型的拟合及预测效果进行评价,见公式(2)。

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{C_t - F_t}{C_t} \right| \quad (2)$$

结 果

1. 美国 COVID-19 疫情:

(1)拟合效果:基于 2020 年 11 月 6 日至 2021 年 1 月 31 日累计确诊病例数,利用 SVEPUHDR 模型建模,分为两个阶段:①2020 年 11 月 6 日至 12 月 25 日,此阶段未考虑新型冠状病毒疫苗对疫情的影响。尽管美国在 12 月 14 日开始了首轮新型冠状病毒疫苗接种^[20],但是接种疫苗后不能立即产生效果。症状前感染者的传播指数 α 为 0.18,未确诊病

表 2 美国和英国疫情分阶段的各仓室起始数值设置

仓室	美国				英国			
	2020/11/06	2020/12/25	2021/02/01	2020/11/23	2020/12/20	2021/01/06	2021/01/22	2021/02/01
E_0	751 544 ^a	1 210 138	759 950	126 597	288 665	458 290	181 305	147 882
V_0	0	0	1 869 935 ^d	0	0	1 188 094	2 266 418	5 840 070
P_0	509 916 ^b	765 064	500 996	67 022	174 002	288 357	184 932	99 645
U_0	382 166	538 220	365 811	23 197	137 918	225 801	144 611	75 824
I_0	127 750	226 844	135 185	15 465	36 084	62 556	40 321	18 668
H_0	55 005	117 344	93 536	17 664	19 972	31 910	38 167	36 931
D_0	1 573 287 ^c	2 739 281	2 147 470	31 535	189 413	43 370	340 531	209 041
R_0	6 534 338	11 219 819	16 781 726	14 823 676	1 836 776	2 769 985	3 215 396	3 604 028

注:^a E_0 =2020 年 11 月 8-10 日 3 d 确诊病例之和/ γ ;^b P_0 =2020 年 11 月 6-7 日 2 d 确诊病例之和/ γ ;^c D_0 =2020 年 10 月 17 日至 11 月 5 日 20 d 确诊病例之和 $\times(1-\rho)$, ($1/t_{r2}=20$);^d V_0 为模型预测值

表3 SVEPIUHDR 模型参数含义及取值

参数	含义	美国	英国	取值来源
α	症状前感染者的传染指数	0.16	0.18	参考文献 ^[9-10]
δ	未确诊患者的传染指数	0.15	0.17	参考文献 ^[9]
β	确诊感染者的传染指数	0.8	1.2	参考文献 ^[10-11]
ε	居家隔离病例的传染指数	0.01	0	估计值
γ	感染确诊率	0.5	0.4	估计值 ^[12]
ρ	住院率	0.034	0.129	估计值 ^a
ω	疫苗接种率	0.001 7	0.000 8	估计值 ^b
σ	接种第 1 剂疫苗有效率	0.85	0.85	参考文献 ^[13]
$1/t_e$	潜伏期(d)	2.9	2.9	参考文献 ^[9,14-15]
$1/t_p$	症状前感染期(d)	2.3	2.3	参考文献 ^[9]
$1/t_i$	有症状的感染期(d)	2.9	2.9	参考文献 ^[9]
$1/t_d$	确诊到居家隔离的时间(d)	1	1	假设病例确诊后立即居家隔离
$1/t_h$	确诊到入院的时间(d)	6	6	参考文献 ^[16-17]
$1/t_{ri}$	在医院的隔离期/治疗期(d)	10.7	10.7	参考文献 ^[17]
$1/t_{r2}$	居家隔离期(d)	14	9	估计值 ^[18]
N	总人口	331 002 647	67 886 004	参考文献 ^[19]

注:表内数据为研究的第二阶段参数的取值,每个阶段部分参数有调整;^a住院率=研究起始日之前累计住院人数/累计确诊人数;^b疫苗接种率=计划每日接种疫苗数/总人口

例的传播指数 δ 为0.17,住院率 ρ 为0.048, $1/t_{r2}$ 居家隔离期为20 d,其余参数设置同表3。②2020年12月20日至2021年1月31日,接种疫苗开始产生效果,预计每日接种约55万剂疫苗。基于上述前两个阶段,将模型预测值与实际逐日累计病例数进行比较,评价模型拟合效果,计算BIAS为1.417%,见图4。

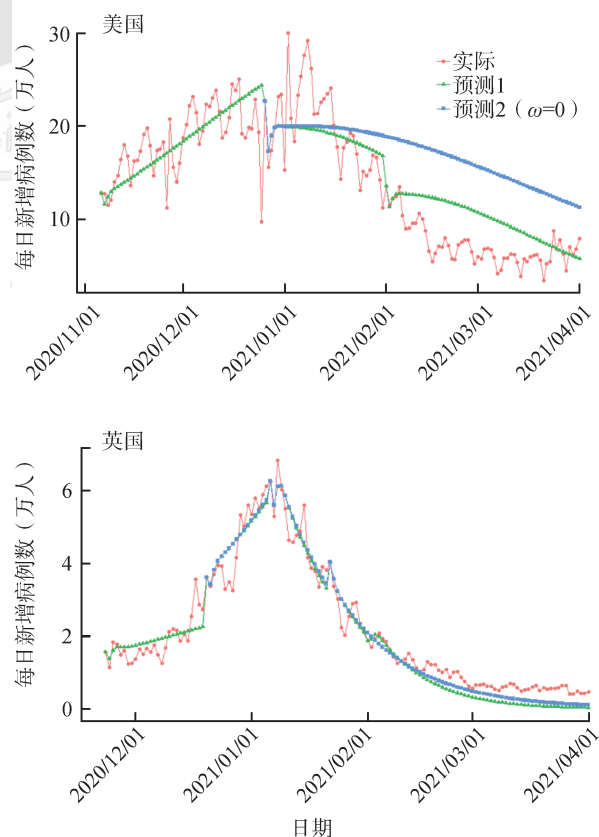
(2)模型预测:采用未纳入模型的2021年2月1日至4月1日的模型预测值与实际逐日累计病例数相比,计算BIAS为2.692%,较好地预测了美国COVID-19疫情的变化趋势,见图4。与无疫苗接种($\omega=0$,预测2)情况累积确诊人数达35 317 082人比较,按计划接种疫苗后(预测1)美国每日确诊病例数随着新型冠状病毒疫苗产生效果下降趋势更明显:预计4月1日累积确诊人数达31 864 970人,相差3 452 112人,见图3。2021年2月1日起,调整第1剂疫苗接种率,计划每日接种100万剂^[6]、200万、400万剂疫苗,随着疫苗接种率的增大,美国疫情下降越明显,当每日接种400万剂疫苗($\omega=0.0128$),截至4月初,疫苗接种人数达1.632亿余人,见图5。

2. 英国 COVID-19 疫情:

(1)拟合效果:将2020年11月23日至2021年1月31日分为4个阶段:①2020年11月23日至12月19日,该阶段因变异病毒的出现等原因^[21],疫情逐渐开始失控,在12月8日开始大规模接种疫苗^[17];②2020年12月20日至2021年1月5日,接种

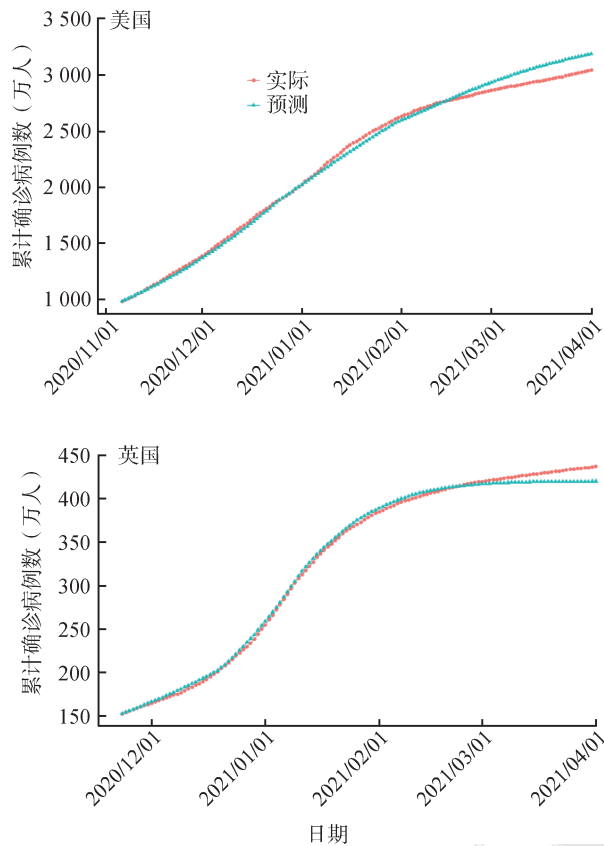
疫苗开始产生效果,每日平均接种约5万余剂疫苗;③2021年1月6日至2021年1月21日,英国政府对于更加恶劣的疫情,加强各类防疫措施,传播率也有所下降;④2021年1月22-31日,加速接种疫苗,平均每日接种30万余剂,病毒传播率也有所下降。基于上述4个阶段,将模型预测值与实际逐日累计病例数进行比较,计算BIAS为1.111%,见图4。

(2)模型预测:将未纳入模型2021年2月1日至4月1日的预测值与实际值比较,BIAS为1.522%,见图4。与无疫苗接种($\omega=0$,预测2)情况累积确诊人数达4 268 786人相比,按计划



注:2020年11月至2021年4月美国和英国实际的疫情趋势(实际)、基于SVEPIUHDR模型预测的疫情趋势(预测1)以及假设未接种疫苗情况下的疫情趋势(预测2, $\omega=0$)的比较

图3 美国和英国SVEPIUHDR模型每日新增病例数的拟合和预测结果



注:利用2020年11月至2021年1月31日的数据进行拟合,利用2021年2月1日至4月1日的数据进行预测效果评价

图4 美国和英国实际的累计确诊病例数(实际)与基于SVEPIUHDR模型预测值(预测)之间的比较

接种疫苗后(预测1)预计4月初累积确诊人数达4 195 538人,相差7万余人,见图3。从2021年2月1日开始,调整第1剂疫苗接种率,计划每日接种50万剂^[6]、100万剂、200万剂疫苗,随着疫苗接种率的增大,英国疫情下降越明显,每日接种200万剂疫苗($\omega=0.032$),截至4月上旬,疫苗接种人数预计达54 602 288人,已达到群体免疫(80.43%),见图5。

讨 论

本研究根据 COVID-19 疫情的特点,在传统的 SEIR 模型基础上,建立了 SVEPIUHDR 模型,该模型的创新点主要有:①在 SEIR 模型中增加了 5 个仓室,能更好地模拟出 COVID-19 疫情发展趋势。由于医疗卫生系统负担重,一些 COVID-19 轻症患者无法住院治疗,因而居家隔离,本研究将确诊病例进一步划分为住院治疗病例和居家隔离病例,可为其他类似研究提供参考。②本研究在对疫苗接种率进行调整后,2021 年 2 月 1 日起的每日新增病

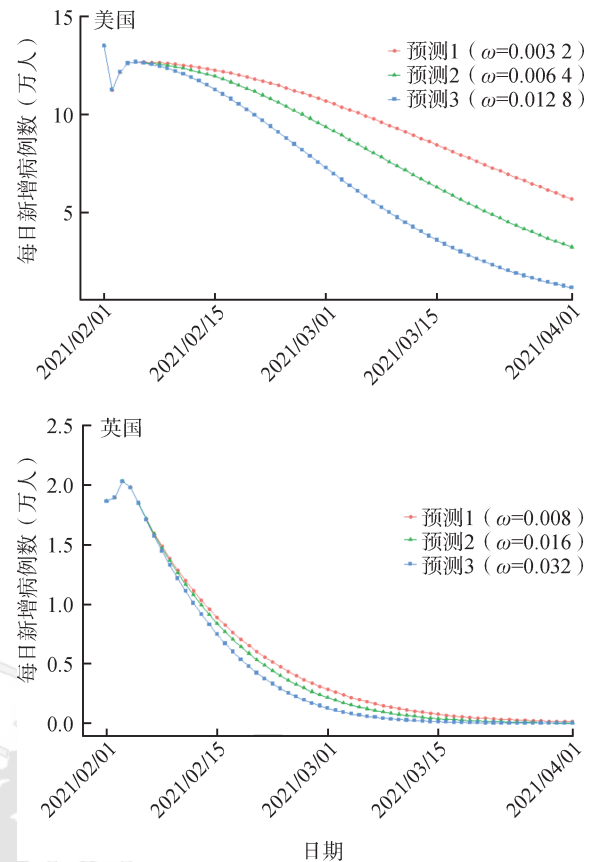


图5 2021年2月1日至4月1日美国和英国不同疫苗接种率(ω)每日新增病例数的变化趋势

例数进行预测,提示及时接种新型冠状病毒疫苗对疫情控制有效。英国已经出现新型冠状病毒的变异,传播力增强^[11,22]。③所建模型针对美国和英国的实际情况进行多阶段拟合,在不同阶段进行了参数的调整,对疫情的趋势预测更准确。

本模型中模拟了在不同疫苗接种率的情况下疫情的变化趋势,从图3中可看出接种及未接种疫苗时疫情的变化有差别,而且随着每日接种率的增大,每日新增病例数也逐渐减少。可以说明,疫苗免疫对于疫情的控制有很大的帮助。目前英美两国旨在先接种第1剂疫苗,且疫苗接种速度快,效果明显,可能比我们更早实现群体免疫,提示我国疫苗接种速度需要加快。我国 COVID-19 疫情虽总体控制稳定,但境外输入性疫情风险仍然持续存在。借鉴英国对所有居民定期进行新型冠状病毒检测等防控措施,建议在加快疫苗接种的同时,坚决做好境外输入疫情防控,加强冷链物品管理,定期对各类高危人群进行新型冠状病毒筛查检测,以便尽早发现病例和控制疫情传播扩散。

本模型中的参数来源于公开发表的数据,美国 and 英国的大部分参数均根据该国疫情的相关研究

进行设置,更符合疫情的实际发展情况。2-4 月的模型预测结果显示,模型预测的每日新增病例数略低于实际每日新增病例数。在当前变异病毒肆虐等复杂因素影响下,不同疫苗接种策略的现实有效性仍有待进一步评价。

本研究存在局限性。①有研究提示,气候、口罩使用、流入和流出人口、确诊病例的临床分型、康复病例的再次感染、病毒的变异等也会对疫情产生影响^[2,9,23-24],但本次模型中并未考虑这些因素,在之后的研究中可以增加对该类因素的考虑,作出与实际更为相符的动力学模型;②因为美国和英国目前接种第 1 剂疫苗较多,接种第 2 剂疫苗的人数相对较少,本模型中未考虑接种第 2 剂疫苗带来的影响;③疫苗接种率是动态变化的,疫苗接种的剂量数会对疫苗有效率产生较大影响,模型中只将接种率作为固定值;④本模型中参数过多,可能导致模型过度拟合,影响最终预测效果。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Petersen E, Koopmans M, Go U, et al. Comparing SARS-CoV-2 with SARS-CoV and influenza pandemics[J]. *Lancet Infect Dis*, 2020, 20(9): e238-244. DOI: 10.1016/S1473-3099(20)30484-9.
- [2] 魏永越, 卢珍珍, 杜志成, 等. 基于改进的 SEIR^{CAQ} 传染病动力学模型进行新型冠状病毒肺炎疫情趋势分析[J]. *中华流行病学杂志*, 2020, 41(4): 470-475. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200216-00106.
Wei YY, Lu ZZ, Du ZC, et al. Fitting and forecasting the trend of COVID-19 by SEIR^{CAQ} dynamic model[J]. *Chin J Epidemiol*, 2020, 41(4): 470-475. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20200216-00106.
- [3] Peirlinck M, Linka K, Costabal CFS, et al. Outbreak dynamics of COVID-19 in China and the United States[J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2020, 19(6): 2179-2193. DOI:10.1007/s10237-020-01332-5.
- [4] Mwalili S, Kimathi M, Ojiambo V, et al. SEIR model for COVID-19 dynamics incorporating the environment and social distancing[J]. *BMC Res Notes*, 2020, 13(1):352. DOI: 10.1186/s13104-020-05192-1.
- [5] Wu JT, Leung K, Leung GM. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study[J]. *Lancet*, 2020, 395(10225): 689-697. DOI:10.1016/S0140-6736(20)30260-9.
- [6] The White House. Press briefing by white house COVID-19 response team and public health officials[EB/OL]. (2021-02-10) [2021-02-11]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/press-briefings/2021/02/10/press-briefing-by-white-house-covid-19-response-team-and-public-health-officials-3/>.
- [7] GOV. UK. Letter to the profession from the UK Chief Medical Officers regarding the UK COVID-19 vaccination programmes[EB/OL]. (2020-12-31) [2021-01-30]. <https://www.gov.uk/government/publications/letter-to-the-profession-from-the-uk-chief-medical-officers-on-the-uk-covid-19-vaccination-programmes/letter-to-the-profession-from-the-uk-chief-medical-officers-regarding-the-uk-covid-19-vaccination-programmes>.
- [8] Polack FP, Thomas SJ, Kitchin N, et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA COVID-19 vaccine[J]. *N Engl J Med*, 2020, 383(27): 2603-2615. DOI: 10.1056/NEJMoa2034577.
- [9] Hao XJ, Cheng SS, Wu DG, et al. Reconstruction of the full transmission dynamics of COVID-19 in Wuhan[J]. *Nature*, 2020, 584(7821):420-424. DOI:10.1038/s41586-020-2554-8.
- [10] 丁中兴, 宋文煜, 方欣玉, 等. 基于 SEIAQR 动力学模型预测湖北省武汉市新型冠状病毒肺炎疫情趋势[J]. *中国卫生统计*, 2020, 37(3):327-330, 334. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3674.2020.03.002.
Ding ZZ, Song WY, Fang XY, et al. Using SEIAQR dynamic model to predict the epidemic trend of novel coronavirus pneumonia in Wuhan, Hubei province[J]. *Chin J Health Stat*, 2020, 37(3): 327-330, 334. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3674.2020.03.002.
- [11] WHO. Numbers at a glance[EB/OL]. (2020-12-21) [2021-01-30]. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>.
- [12] Oran DP, Topol EJ. The proportion of SARS-CoV-2 infections that are asymptomatic: a systematic review[J]. *Ann Intern Med*, 2021: M20-6976. DOI: 10.7326/M20-6976.
- [13] Amit S, Regev-Yochay G, Afek A, et al. Early rate reductions of SARS-CoV-2 infection and COVID-19 in BNT162b2 vaccine recipients[J]. *Lancet*, 2021, 397(10277):875-877. DOI:10.1016/S0140-6736(21)00448-7.
- [14] He X, Lau EHY, Wu P, et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19[J]. *Nat Med*, 2020, 26(5):672-675. DOI:10.1038/s41591-020-0869-5.
- [15] Ferretti L, Wymant C, Kendall M, et al. Quantifying SARS-CoV-2 transmission suggests epidemic control with digital contact tracing[J]. *Science*, 2020, 368(6491): eabb6936. DOI:10.1126/science.abb6936.
- [16] Xie YW, Wang ZS, Liao HP, et al. Epidemiologic, clinical, and laboratory findings of the COVID-19 in the current pandemic: systematic review and Meta-analysis[J]. *BMC Infect Dis*, 2020, 20(1): 640. DOI: 10.1186/s12879-020-05371-2.
- [17] Lewnard J A, Liu VX, Jackson ML, et al. Incidence, clinical outcomes, and transmission dynamics of severe coronavirus disease 2019 in California and Washington: prospective cohort study[J]. *BMJ*, 2020, 369:m1923. DOI: 10.1136/bmj.m1923.
- [18] CDC. Staying Away from People When You Have COVID-19 | CDC[EB/OL]. (2020-01-08) [2021-01-30]. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/easy-to-read/end-home-isolation.html>.
- [19] Our World in Data. The complete Our World in Data COVID-19 dataset[EB/OL]. (2020-04-01) [2021-04-01]. <https://ourworldindata.org/#entries>.
- [20] CDC. Trends in number of COVID-19 cases and deaths in the US reported to CDC, by state/territory[EB/OL]. [2021-02-05]. https://covid.cdc.gov/covid-data-tracker/#trends_dailytrendsdeaths.
- [21] GOV. UK. COVID-19 (SARS-CoV-2): information about the new virus variant[EB/OL]. (2020-12-20) [2021-01-30]. <https://www.gov.uk/government/news/covid-19-sars-cov-2-information-about-the-new-virus-variant>.
- [22] Rahimi F, Abadi ATB. Implications of the emergence of a new variant of SARS-CoV-2, VUI-202012/01[J]. *Arch Med Res*, 2021. DOI:10.1016/j.jarmed.2021.01.001.
- [23] 刘可群, 元艺, 刘志雄, 等. 气候环境条件对新冠肺炎传播影响分析[J]. *公共卫生与预防医学*, 2020, 31(4):9-13. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2483.2020.04.003.
Liu KQ, Yuan Y, Liu ZX, et al. The impact of meteorological and environmental conditions on the spread of COVID-19[J]. *J Pub Health Prev Med*, 2020, 31(4): 9-13. DOI:10.3969/j.issn.1006-2483.2020.04.003.
- [24] Pathak EB, Salemi JL, Sobers N, et al. COVID-19 in Children in the United States: intensive care admissions, estimated total infected, and projected numbers of severe pediatric cases in 2020[J]. *J Public Health Manag Pract*, 2020, 26(4): 325-333. DOI: 10.1097/PHH.0000000000001190.