



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Public Health—Article

## 全球新冠病毒肺炎疫情大流行——一年来世界各国汲取的经验并不多

魏永越<sup>a,b,#</sup>, 官锦兴<sup>a,#</sup>, 宁霄<sup>c</sup>, 李月霖<sup>d</sup>, 魏良敏<sup>a</sup>, 沈思鹏<sup>a</sup>, 张汝阳<sup>a</sup>, 赵杨<sup>a</sup>, 沈洪兵<sup>a,b,\*</sup>, 陈峰<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Epidemiology and Biostatistics & Center for Global Health, School of Public Health, Nanjing Medical University, Nanjing 211166, China

<sup>b</sup> China International Cooperation Center for Environment and Human Health & Center for Global Health, School of Public Health, Nanjing Medical University, Nanjing 211166, China

<sup>c</sup> Department of Biomedical Engineering, School of Biological Science and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

<sup>d</sup> Institute for Social and Economic Research and Policy, Columbia University, New York, NY 10027, USA

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 February 2021

Revised 25 May 2021

Accepted 28 July 2021

Available online 14 September 2021

#### 关键词

新冠肺炎疫情  
全球疫情  
防控措施及效果

### 摘要

新冠病毒肺炎(COVID-19)疫情席卷全球,世界各地感染人数激增;在这种情况下,许多国家采取了一系列严格的非药物干预措施,使得确诊病例增长速度有所放缓。然而,部分国家随后逐步放松防控,导致2020年7月下旬病例数突增,引起全球密切关注。本研究评估了2020年1月至2021年2月全球各个国家和地区的COVID-19大流行情况。计算了每个国家或地区的时依再生数 $R(t)$ ,结果表明,世界上几乎一半的国家和地区从未控制过疫情。在曾经疫情得到控制的国家和地区中,近一半未能持续采取疫情防控措施,导致全球疫情出现反弹,而且一半数量的国家和地区疫情反弹规模比第一波更大。本研究还提出并使用时依的国家级传播风险评分(CTRS),考虑 $R(t)$ 和每天的新增病例,以展示国家或地区一级的传播潜力和趋势。利用时依CTRS进行时依层次聚类,成功发现了促使2020年最后一个季度和2021年年初全球COVID-19大流行加剧的国家和地区,并提示近期COVID-19传播风险增加的国家和地区。此外,回归分析表明,实施和放松包括关闭工作场所和居家隔离在内的非药物干预措施,可能与最近的全球COVID-19传播变化有关。总之,对过去一年全球COVID-19大流行进行的系统评估表明,目前全球疫情处于一种未曾预料到的状态,各国在第一波疫情中吸取的教训有限。总结经验教训有助于制定有效的公共应对措施,以遏制全球未来的COVID-19疫情浪潮。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

新冠病毒肺炎(COVID-19)疫情席卷全球,截至2021年2月21日已经导致了1.1亿人感染和240万人死亡。COVID-19严重损害了人类健康对经济造成了巨大的损失,有望成为21世纪典型的全球公共卫生事件。在疫情发生之初,各国在实施干预措施的速度、规模和强度方面存在差异。中国、新加坡等许多国家迅速采取了隔离所有病例和疑

似感染者、追踪接触者、广泛进行检测等防控措施,遏制了疫情的发生[1–3]。然而,其他国家在疫情早期没有重视疫情防控工作,甚至选择了群体免疫的路线,使得早期确诊病例的大量累积以及极高的病死率[4–5]。在吸取了第一波疫情的惨痛教训后,意大利和英国等国家采取了关闭城市和宵禁等防控措施,以将每日确诊病例数保持在可负担水平,这是一个国家国内疫情得到有效防控的积极标志[6]。

中国、韩国、新加坡和许多欧洲国家的研究证明,人

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [hbshen@njmu.edu.cn](mailto:hbshen@njmu.edu.cn) (H. Shen), [fengchen@njmu.edu.cn](mailto:fengchen@njmu.edu.cn) (F. Chen).

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2022, 13(6): 186–196

引用本文: Yongyue Wei, Jinxing Guan, Xiao Ning, Yuelin Li, Liangmin Wei, Sipeng Shen, Ruyang Zhang, Yang Zhao, Hongbing Shen, Feng Chen. Global COVID-19 Pandemic Waves: Limited Lessons Learned Worldwide over the Past Year. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.07.015>

群层面的非药物干预措施 (NPI), 包括关闭学校、保持身体接触距离、封城等在减缓大流行方面是有效的[7]。不幸的是, 由于公开场所防控行为的松懈, 确诊病例数和死亡人数一直在增加。更糟糕的是, 许多国家的政府仍未采取足够严格的防控措施, 以在下一波疫情浪潮到来之前遏制住当前疫情, 致使每天仍有相当数量的新增病例出现。在第一波疫情大流行之后, 由于缺乏特异性的抗病毒预防和治疗措施及疫苗, NPI的放松意味着疫情复发不可避免。在疫情最严重的国家和地区, 如果不立即采取有效的行动来控制疫情, 全球疫情形势将会进一步加重。在下一波疫情大流行时期, 会有更多人死亡, 而这本来是可以避免的[8]。

时依再生数 $R(t)$ 是指在时间 $t$ 由一个原发病例感染引起的继发病例的预期数量。 $R(t)$ 是衡量不同时间点疫情传播能力的一个关键决策指标。然而 $R(t)$ 不能揭示大流行的规模, 而每日新增病例能够描述疫情的严重程度, 这也是至关重要的。因此, 本研究评估了全球各国对 COVID-19 大流行的防控情况, 综合 $R(t)$ 和每日新增病例数, 提出国家级传播风险评分 (CTRS) 这一时间序列指标用于评估各国疫情的增长潜力。本研究对 2020 年 10 月 1 日到 2021 年 2 月 21 日各国的 CTRS 进行了层次聚类, 以便按照真实情况对世界各国的 COVID-19 疫情发展趋势进行可视化。

## 2. 方法

### 2.1. 数据来源和数据预处理

本研究使用的数据来源于世界卫生组织 (WHO) 网站 (<https://covid19.who.int/table>) 公布的 2021 年 2 月 21 日之前的国家级每日确诊病例数。2021 年 2 月 21 日之前累计确诊病例数小于 1000 例的国家和地区被剔除。为了避免由于工作日-休闲日变化引起的每周疫情数据波动, 本研究采用 7 天移动平均法, 即将每天的新增确诊病例数与之前 7 天的值进行平均, 然后取平均值, 使得新增确诊病例数平滑。此外, 一些国家和地区 (如赤道几内亚、博茨瓦纳和毛里塔尼亚) 的每日新增病例数出现了出乎意料的巨大变化, 违反了传染病传播规律; 这可能是由于这些国家和地区的核酸检测能力不足。因此, 引入了一种方法来衡量每个国家的每日新增病例数的波动。

$$\text{Volatility}_t = \ln\left(\frac{R_t}{R_{t-1}}\right)$$

$$\text{SD}_{\text{volatility}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^k (\text{Volatility}_t - \text{Mean volatility})^2}{k-1}} \quad (1)$$

式中,  $t = 1, \dots, k$  表示评估的时间点,  $k$  表示从第一个病例出现到分析截至日期的天数; 这一波动指标描述了不同国家  $R(t)$  的每日变化。因此, 波动指标的标准差 ( $\text{SD}_{\text{volatility}}$ ) 表示每日  $R(t)$  的离散程度。一个国家的每日新增病例数出现异常波动, 可能是由于核酸检测能力不足导致的, 致使该国的  $\text{SD}_{\text{volatility}}$  比较高。为了防止这些国家对国家级传播动态的分类产生影响, 本研究排除了  $\text{SD}_{\text{volatility}}$  前 10% 的国家和地区。

国家的 NPI 从牛津大学 COVID-19 政府应对跟踪器 (OxCGRT) 获取, 于 2021 年 2 月 21 日访问[9]。在 OxCGRT 中, NPI 被分为以下 15 类: 8 项限制和关闭措施 (关闭学校、关闭工作场所、取消公共活动、限制私人集会、关闭公共交通、居家要求、限制内部流动和国际旅行) 和 7 项卫生系统政策 (公共信息宣传活动、核酸检测政策、接触者追踪政策、卫生保健紧急投资、疫苗投资、口罩政策和疫苗接种政策)。OxCGRT 数据库中包含的干预措施的原始变量是有序、多分类的; 在本研究中, 将这些 NPI 变量转换为二元变量: “无干预” 或 “有记录的干预” [10] (见附录 A 中的表 S1)。对于 OxCGRT 中记录了省或者州级 NPI 的国家和地区 (如中国和美国), 首先为州或者省创建二元指标, 然后通过省或州一级指标取平均值得到国家级的 NPI 变量 (例如, 如果美国一半数量的州引入学校关闭策略, 那么美国学校关闭策略的状态值为 0.5)。

### 2.2. 数据分析

#### 2.2.1. $R(t)$ 变化情况分析

使用序贯贝叶斯模型来估计自疫情发生之初每个国家的  $R(t)$  [11]。模型中的代际间隔 (serial interval) 分布参数按已发表文献设置 (均值为 5.2, 标准差为 1.58) [12]。

$R(t)$  低于 0.8 被认为疫情缓解, 而  $R(t)$  高于 1.2 被认为疫情恶化。连续 11 个  $R(t)$  值 (代际间隔的两倍) 大于 1.2 的周期被认为是波峰, 而连续 11 个  $R(t)$  值小于 0.8 的周期被认为是波谷。为了比较各国之间的流行病模式, 每个国家自流行病开始以来的波峰和波谷数量都标准化为每 100 天的数目。根据 2020 年 10 月 1 日之前的数据, 本研究纳入的国家和地区可分为以下几个亚组: “从未控制” “曾经得到控制” “得到控制后反弹” “反弹超过之前最大值” “波动”。根据世界卫生组织, 国家和地区被分为 5 个区域: 美洲、欧洲、东南亚、东地中海、非洲和西太平洋。

#### 2.2.2. 国家级传播风险评分

剔除 CTRS 指标, 用于描述 COVID-19 的国家级传播风险:

$$CTRS_t = \lg(R(t) \times N_{\text{daily cases},t}) \quad (2)$$

式中,  $N_{\text{daily cases},t}$  表示第  $t$  天的新增确诊病例数;  $CTRS$  表示一个新病例在一个感染期产生的预期新感染人数的对数。

### 2.2.3. 层次聚类

为了确定自 2020 年 10 月 1 日以来各个国家和地区之间每 6 天 (大约一个感染期[12]) 的流行模式的相似性, 根据 6 天的  $CTRS$  值, 使用无监督聚类分析对这些国家和地区进行聚类。

### 2.2.4. 潜在传播风险预警

基于分析时间段最后一天的  $R(t)$  和每日新增病例数, 使用易感-暴露-感染-康复 (SEIR) 模型预测未来 12 天 COVID-19 疫情的传播动态。参数如下: 传播率  $\beta = R(t) \times \gamma$ , 其中  $\gamma = 5.2 \text{ d}^{-1}$  [12]; 潜伏期 ( $1/\alpha$ ) 设为 5.2 天[13]。模型的人口数是基于每个国家人口总数设置的。病例数的初始值 ( $I_0$ ) 为分析时间段最后一天之前的 5 天的累计新增病例数, 初始潜伏期人数  $E_0 = 5.2 \times I_d$ , 其中  $I_d$  为最后一天每日新增病例数。采用四节龙格库塔 (fourth-order Runge-Kutta method, RK4) 求解微分方程, 预测每日新增病例数。随后, 使用预测的每日新增病例数和  $R(t)$  来估计未来的时依  $CTRS$  值。

为了验证本文的模型, 将 2021 年 2 月 9 日定为最后一天, 以预测随后 12 天 (即 2021 年 2 月 10 日至 2021 年 2 月 21 日) 的新病例数量。将预测值与 2021 年 2 月 10 日至 2021 年 2 月 21 日的每日新增病例数和实际  $CTRS$  值进行比较, 评估预测效果。

### 2.2.5. 非药物干预措施效果评估

在 OxCGRT 记录的 15 项防控措施中, 排除实施频次小于 5% 或大于 95% 的防控措施, 只保留以下 9 项措施: 关闭学校、关闭工作场所、取消公共活动、限制私人集会、关闭公共交通、居家要求、限制内部流动、接触者追踪政策和疫苗接种政策。为了找到 6 天内  $CTRS$  的变化与控制措施之间的相关性, 对  $CTRS$  数据之间的差异 [从 2021 年 1 月 1 日至 2021 年 2 月 21 日中的每一天和其之前 6 天的  $CTRS$  的差值 (在以下方程中记为  $\Delta CTRS$ )], 以及之前 30 天 9 个防控措施的实施情况进行建模, 所采用的混合效应模型方程如下:

$$\Delta CTRS_{ij} = b_0 + \sum_{k=1}^8 b_{ijk} NPI_{ijk} + u_i + e_{ij} \quad (3)$$

式中,  $i = 1, \dots, 151$  代表本研究所涉及的国家和地区 (166 个国家和地区中, 有 151 个国家和地区的防控措施被记录在 OxCGRT 中);  $j = 1, \dots, 52$  表示 2021 年 1 月 1 日至 2 月

21 日中的第  $j$  天;  $k = 1, \dots, 9$  代表不同的 NPI;  $\Delta CTRS_{ij}$  表示  $CTRS_{ij} - CTRS_{ij-6}$  的 6 天变化;  $NPI_{ijk}$  和  $b_{ijk}$  分别为第  $i$  个国家/地区第  $j$  天第  $k$  个 NPI 的指标和对应的回归系数;  $u$  表示当天的随机效应,  $e$  表示残差, 两者都服从正态分布。为了更好地说明这一点, 将系数转换为  $10^b$ , 以反映下一代病例数的变化。

### 2.3. 统计分析

所有分析采用 R 软件 (3.6.3 版本)。采用 R 包 EpiEstim (2.2.3 版本)、Pheatmap (1.0.12 版本)、nlme (3.1.145 版本) 来估计  $R(t)$ , 进行层次聚类以及评估 NPI 和  $CTRS$  变化之前的关联程度[11,14]。

## 3. 结果

206 个国家和地区的 COVID-19 感染数据来自 WHO 网站; 其中, 186 个国家和地区累计感染人数超过 1000 人 (图 1)。 $R(t)$  波动率分析显示, 186 个国家和地区中, 有 18 个国家和地区的  $R(t)$  波动率变化较大, 排名前 10%, 原因可能是核酸检测能力不足或资源不足 (见附录 A 中的图 S1)。剔除这 18 个国家和地区后, 对剩余的 168 个国家和地区进行后续分析。然后, 剔除 2020 年 10 月 1 日之后开始出现 COVID-19 疫情的两个国家或地区, 最终纳入分析的国家或地区总数为 166 个。非洲  $R(t)$  波动率的变化显著高于其他地区 ( $P < 0.0001$ ) (见附录 A 中的图 S2)。

根据标准化后的每 100 天波峰和波谷的数量, 对 166 个国家和地区绘制散点图, 并按标准化的波峰和波谷数目的三分位数将其划分为低、中、高三个水平 [图 2 (a)]。除了 81 个从未对 COVID-19 流行进行控制的国家或地区 (如美国) 之外, 有 6 个国家和地区 (如奥地利、突尼斯和冰岛) 出现了高波峰和低波谷, 表明在没有采取充分控制措施的情况下, COVID-19 疫情容易卷土重来。另外, 10 个国家和地区 (如斯里兰卡、约旦和南苏丹) 有高波峰和高波谷, 代表对 COVID-19 疫情采取了有效的遏制措施。8 个国家和地区 (如中非共和国、芬兰和卢森堡) 有低波峰和高波谷。此外, 15 个国家和地区 (如加拿大、德国和意大利) 出现了较低的波峰和波谷, 表明总体上对 COVID-19 疫情大流行的控制效果显著。中国被划分为中波峰、高波谷, 表明多次局部发生或复苏后被迅速有效地遏制。

按照 2020 年 10 月 1 日前的  $R(t)$  对全球疫情防控效果进行汇总分类。在研究的 166 个国家或地区中, 至少有一个波谷的 85 个国家或地区被列为 “曾经得到控制”。在这 85 个国家或地区中, 56 个国家和地区的疫情出现反弹, 更

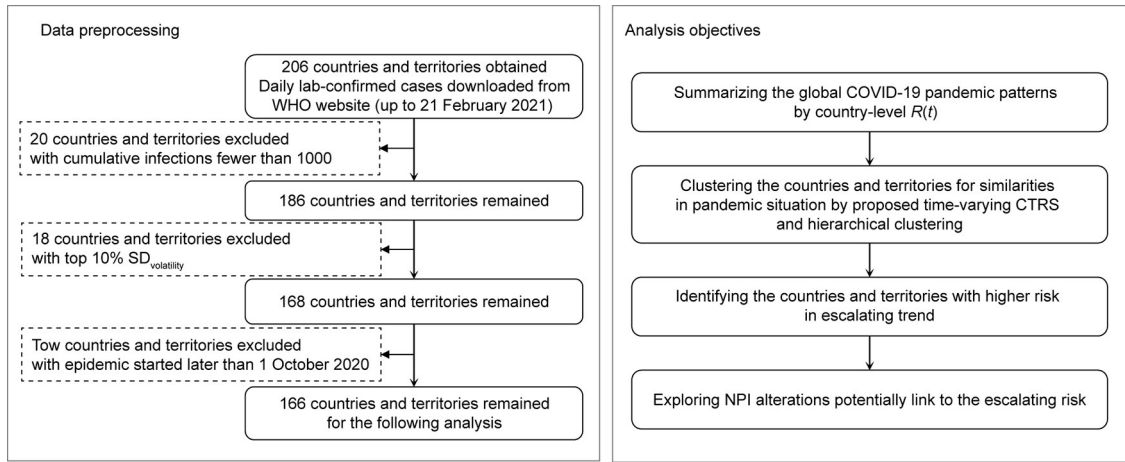


图1. 数据分析和处理流程图。CTRS表示以国家为单位的COVID-19传播潜力； $SD_{volatility}$ 表示 $R(t)$ 波动的标准差。

糟糕的是，28个国家和地区反弹后的疫情比之前更严重[图2(b)]。值得注意的是，美洲纳入研究的37个国家和地区中的27个(73.0%)、东南亚纳入研究的8个国家和地区中的5个(62.5%)、地中海东部纳入研究的21个国家和地区中的12个(57.1%)，以及非洲纳入研究的36个国家和地区中的17个(47.2%)的COVID-19疫情没有得到有效控制；高于欧洲(54个国家和地区中的17个，占31.5%)和西太平洋(10个国家和地区中的3个，占30.0%) ( $P = 0.0025$ )。与其他区域 ( $P = 0.0001$ ) 相比，西太平洋(6/10, 60.0%)和欧洲(30/54, 55.6%)有更多的国家和地区在疫情在得到控制后反弹，而且比之前更严重。另外还进行了敏感度分析，连续11天(两倍代际间隔)  $R(t)$ 在1.1以上则被认为是流行波的波峰，而连续11天  $R(t)$ 小于0.9被认为是波谷[见附录A中的图S3(a)]。此外，还研究了  $R(t)$ 大于1.3被定义为波峰而  $R(t)$ 小于0.7被定义为波谷的情况[见附录A中的图S3(b)]。

自2020年10月1日起，对每个国家和地区每天的CTRS进行估算。在6天移动窗口内(大约一个感染期)，根据连续6天CTRS的相似性，将166个国家和地区聚类为8个子集；国家和地区的时依聚类结果清楚地显示了2020年10月至2021年2月国家级的疫情和趋势(图3)。首先，美国始终处于最高层级，甚至是最高层级中的唯一成员(图3中的I)。在2020年12月上旬和中旬，全球疫情大流行形势异常严峻，可能主要是由于美国(图3中的I)和土耳其(图3中的II)的疫情恶化，而巴西、英国和俄罗斯的疫情加重(图3中的III)进一步提高了全球疫情大流行浪潮。幸运的是，2020年12月至2021年1月初，巴西、英国和俄罗斯疫情迅速好转，与美国的疫情形成鲜明对比(图3中的IV)。在2021年1月中旬，巴西、西班牙和英国疫情恶化(图3中的V)，而捷克、土耳其、波

兰、加拿大、日本和爱尔兰的情况有所改善(图3中的VI)。此外，在2021年1月23日至2021年1月28日的聚类窗口中，情况有所恶化：美国、巴西、英国、西班牙、法国、墨西哥和俄罗斯等7个国家位于最高层级(图3中的VII)，13个国家和地区进入第二层级(图3中的VIII)，以至于最高层级国家的疫情形势看似有所好转。此外，2021年1月29日至2021年2月3日，4个国家(法国、墨西哥、俄罗斯和英国)疫情得到改善，进入第二层级(图3中的IX)。2021年2月4日到2021年2月9日西班牙疫情恶化，进入了第二层级(图3中的X)，此外波兰和马来西亚也进入了第二层级(图3中的XI)。最近，一些国家和地区的情况继续好转。例如，2021年2月10日到2021年2月15日，马来西亚和葡萄牙下降到第三层级(图3中的XII)；2021年2月16日到2021年2月21日，以色列疫情也好转，进入第三层级(图3中的XIII)。在同一时间，第二层级的情况有所改善，这是由于6个国家和地区(伊拉克、乌克兰、智利、荷兰、瑞典和阿拉伯联合酋长国)进入了第二层级(图3中的XIV)。占全球人口总数7.1%的美国和巴西是全球疫情最严重的国家，至今疫情形势依然严峻，每日新增病例数占全球每日新增病例数的34.6%。

CTRS也有能力识别未来风险。本研究首先测试了CTRS预测未来情景的能力。利用2021年2月9日之前的数据，对2021年2月10日至21日的每日新增病例数进行SEIR模型拟合，结果与观测值较一致(Pearson相关系数  $r = 0.991$ ,  $P < 0.001$ ) [见附录A中的图S4(a)]。然后假设  $R(t)$ 自2021年2月9日以来保持不变，预测2021年2月10日至21日的CTRS值；预测CTRS值与实际CTRS值的Pearson相关系数  $r$ 为0.988 ( $P < 0.0001$ ) [见附录A中的图S4(b)]。因此，为了探讨各个国家未来COVID-19的传播情况，基于2021年2月21日之前的CTRS值，对随后的

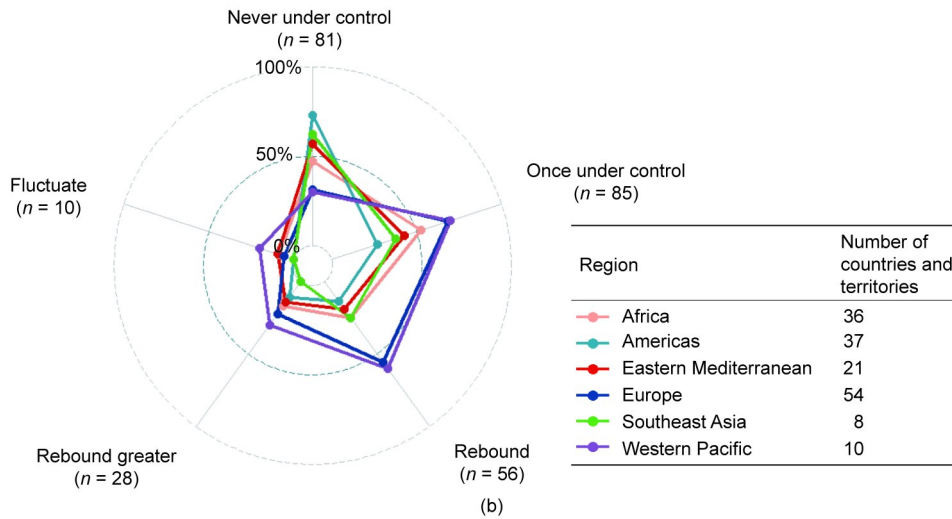
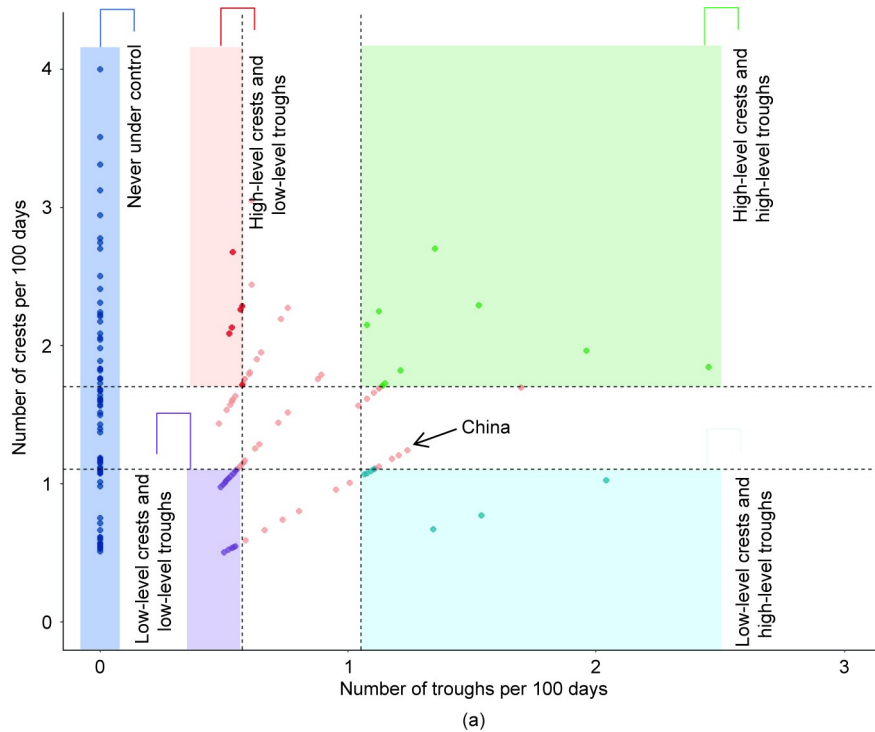


图2. 2020年全球COVID-19大流行防控情况。全球防控措施的效果用 $R(t)$ 来描述。对于每个国家，若 $R(t)$ 连续11天（代际间隔时长的两倍）在1.2以上则视为一个波峰。若 $R(t)$ 连续11天在0.8以下则视为一个波谷。166个国家和地区的波峰和波谷数目被标准化为每100天的数目。(a) 深蓝色点表示81个未曾控制住COVID-19传播的国家和地区。对剩下的曾控制住COVID-19的传播的85个国家和地区，其每100天的波峰波谷数目以三分位数为界分为高中低三类；两条垂直虚线和水平虚线分别表示波峰波谷数目的三分位数。(b) 各个国家的防控措施效果评估。本研究包含的166个国家和地区参考WHO划分为6个区域。图例中的数字表示本研究中每个区域的国家和地区数目。雷达图极点上的数字表示每个亚组的国家和地区的总数。雷达图上列出的比例表示每个亚组内不同区域所占比例。

12天（2021年2月22日到2021年3月5日）的CTRS值进行估计，并进一步进行层次聚类。在随后的6天里，7个国家（阿根廷、智利、哥伦比亚、荷兰、西班牙、瑞典和阿拉伯联合酋长国）的风险下降了一级，进入了第三层级（图3中的XV）。

为了探究近期各个国家COVID-19疫情大流行形势变化的潜在原因，本研究评估了之前30天的NPI与6天CTRS变化之间的相关性（如所评估日期和其6天前CTRS

的差值）。前1~27天实施的工作场所关闭政策与CTRS减少6.8%（95%置信区间：0.8%~10.5%）至10.2%（95%置信区间：5.7%~14.5%）相关[图4（a）]。此外，前1~28天的居家隔离与CTRS降低3.2%（95%置信区间：0.4%~7.2%）至7.1%（95%置信区间：3.8%~10.3%）相关[图4（b）]。纳入研究的其他7个NPI对CTRS的变化没有决定性的影响。工作场所关闭政策和30天前的居家隔离措施的共同实施，使得下一代病例数量从6.2%

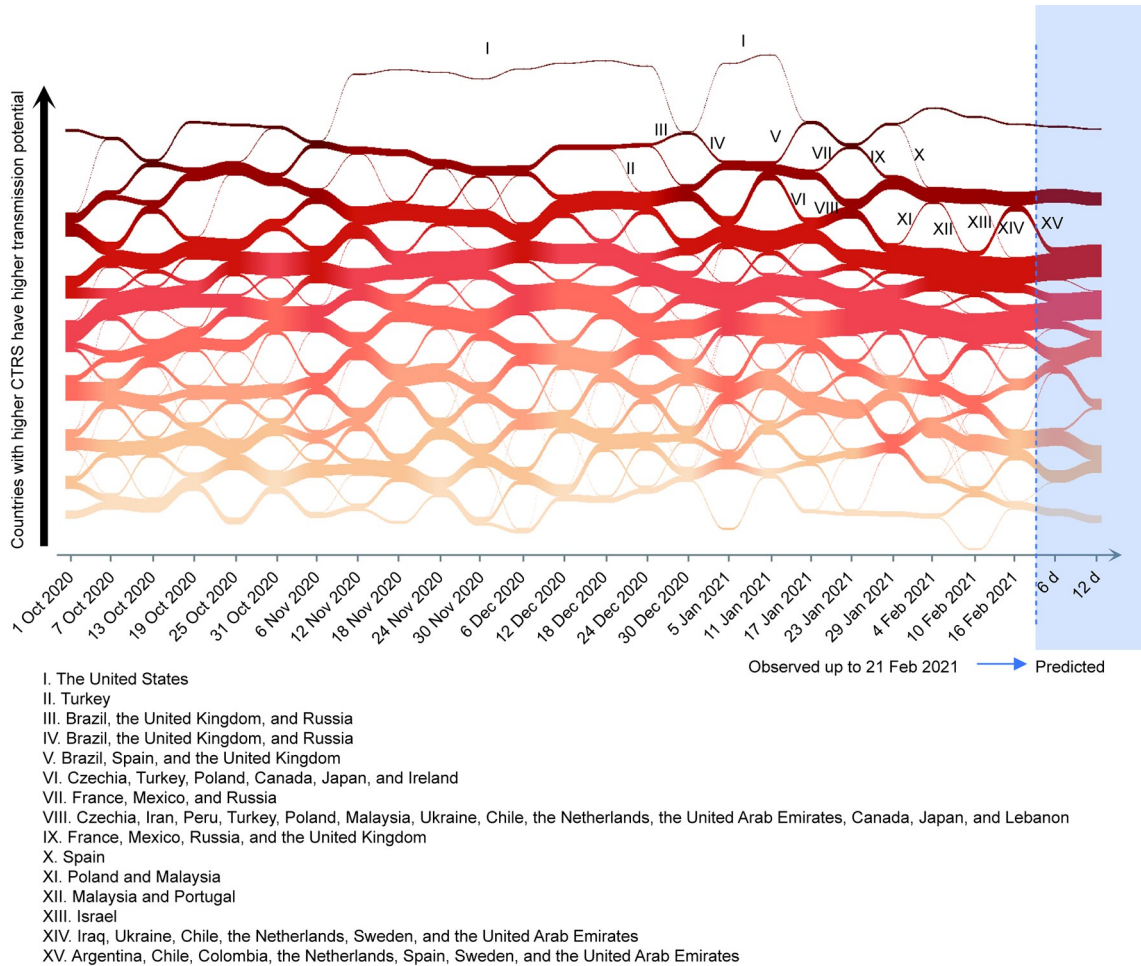


图3. 2020年10月至2021年2月期间世界各地的国家级COVID-19传播的河流图。蓝色虚线的左边表示根据6天CTRS划分的过去的层级，右边为未来的层级。未来层级根据SEIR模型预测的未来的6天CTRS层次聚类分析得到。颜色越红表示这些国家和地区未来的传播风险越高。每个箱子高度表示这一层及的国家和地区的数目。罗马数字标注了不同层级的关键变化，这些关键变化的有关国家和地区列在最下方。每个层级窗口的起始日期展示在图形下方。两个层级箱子之间的条带表示从左边层级到右边层级变化的国家数目。

(95% 置信区间: 1.0%~11.2%) 下降到 14.6% (95% 置信区间: 9.9%~19.2%) [图4 (c)]。附录A中的图S5和表S2展示了其他NPI与CTRS的分析结果。在CTRS的12天变化的分析中也观察到了类似的结果[见附录A中的图S4 (d) ~ (f) 和图S6]。

#### 4. 讨论

目前还没有研究人员对世界各个国家和地区 COVID-19 疫情流行模式进行过研究，本文尚属首次。总的来说，本研究评估了全球各个国家和地区在疫情大流行第一年的情况，并确定了各个国家和地区在疫情以及发展趋势方面的相似之处。本研究所提出的方法还能够预测和监测近期国家级疫情大流行形势的变化趋势。

值得注意的是，有18个国家和地区由于 $R(t)$ 波动率的变化较大而被排除在外，其中一半是非洲国家和地区，非

洲国家的 $R(t)$ 波动率的变化比其他国家和地区更大。由于每日新增确诊病例数波动较大，导致 $R(t)$ 波动率变化较大，表明核酸检测能力以及关键医疗资源可能存在不足。非洲国家和地区的卫生设施有限，在社区方面可能存在医疗资源短缺的问题。非洲国家和地区平均每千人拥有1.8张医院床位和0.9名医生，远低于意大利（每千人4.0名医生）、美国（每千人2.6名医生），以及中国（每千人2.0名医生）[15]。非洲的医疗用品主要依赖进口；在COVID-19疫情大流行的早期，世界各国对COVID-19防控诊疗所需的物资的出口进行了限制，加剧了非洲医疗资源的短缺[16]。截至2021年2月21日，非洲国家和地区平均每百万人进行核酸检测29 118次，远低于北美洲（660 339次）、欧洲（657 773次）、南美洲（160 837次），以及亚洲（127 634次）[17]。随着核酸检测能力的提高，非洲的确诊病例数可能会增加。

每个国家和地区的 $R(t)$ 显示，一些国家和地区通过迅

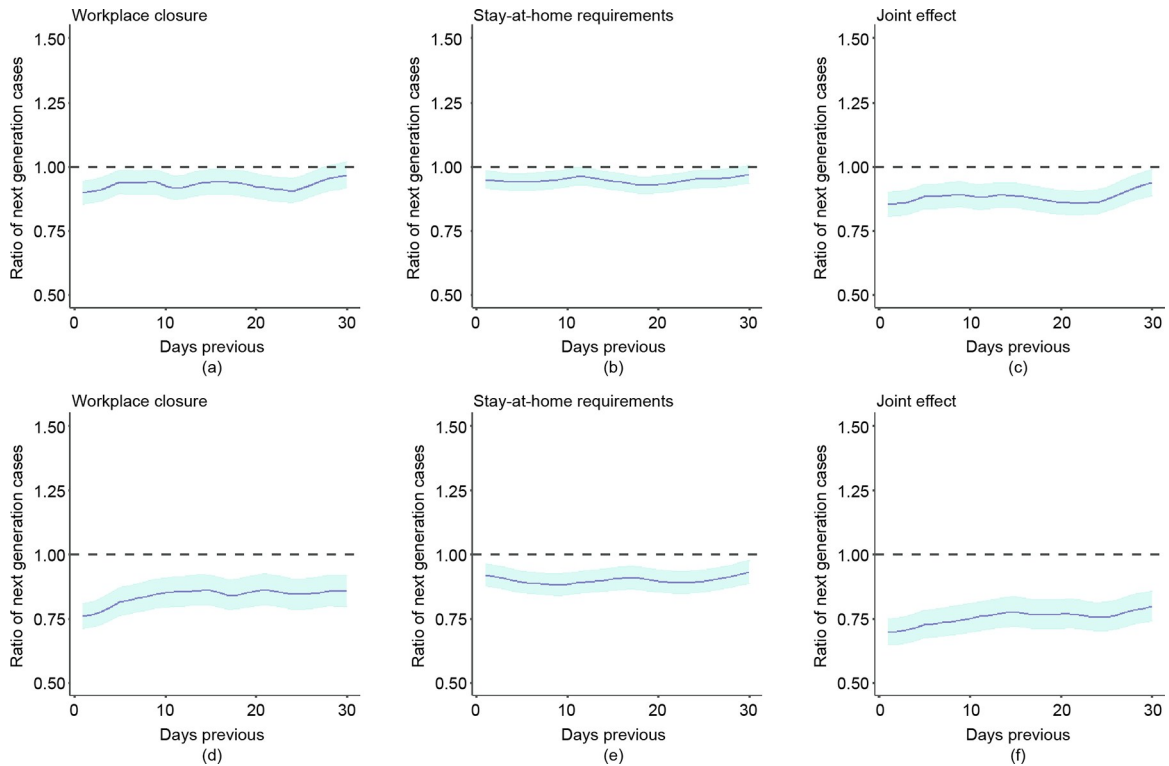


图4. 前30天工作场所关闭政策和居家隔离对CTRS的影响。CTRS的6天变化值是根据2021年1月1日至2021年2月21日每一天的CTRS与6天前CTRS的差值计算的；同样，也计算了CTRS的12天变化值。采用混合效应模型对9种防控措施在过去30天的实施状态进行分析。下一代病例数比率表示实施单独的防控措施将导致的下一代病例数的变化（如果比率为0.9，则表示如果实施该措施，则在实施该措施后的6天或12天下一代病例将减少10%）。关闭工作场所、居家要求，以及这两个措施联合实施对CTRS的6天变化值的影响分别在图（a）、（b）和（c）中展示；对CTRS的12天变化值的影响分别在图（d）、（e）和（f）中展示。

速有效的防控措施遏制了第一波COVID-19疫情的流行浪潮。然而，在曾经实施过疫情防控政策的国家和地区中，2/3的国家和地区随后经历了多次疫情复发。此外，在疫情反弹的国家和地区中，有一半的国家和地区经历了更严重的疫情，比首次疫情规模更大。更糟糕的是，过去一年有81个国家和地区（如美国）的疫情未曾得到控制，占全球国家和地区总数的一半左右，占全球人口总数的55.3%。在欧洲，68.5%的国家和地区控制了第一波疫情，但55.6%的欧洲国家和地区出现了疫情反弹，22.2%的国家和地区后续反弹的疫情规模更大。防控措施的放松可能是导致这些结果的一个重要原因。在随后的COVID-19疫情流行浪潮中，欧洲国家和地区似乎没有从第一波疫情中吸取太多经验教训。值得注意的是，根据本文的分析，美洲73.0%的国家和领土（即北美洲、中美洲和南美洲）从未对疫情进行控制；除了美国、加拿大和巴西，美洲的其他国家和地区也需要其邻国给予更多的关注和援助[18–20]。

时依再生数 $R(t)$ 表示传染期中一个病例能够传染的新患者的平均人数[21]。因此，本文提出了CTRS指标，用于代表当前新病例在未来一个传染期能够感染的预期新病

例数，从而揭示一个国家未来的短期风险。在验证阶段，将预测和实际的CTRS进行比较，以证明CTRS指标在揭示国家和地区COVID-19流行风险方面的可靠性。使用时依的CTRS值进行层次聚类分析，将世界各个国家和地区划分为不同等级，这一等级能反映国家和地区在COVID-19疫情流行风险和趋势方面的相似性。自2020年最后一个季度以来，美国COVID-19疫情一直处于第一层级。根据OxCGRT数据，自2020年10月1日以来，美国只有不到一半数量的州关闭了公共交通，这可能是美国肺炎患者大量增加的原因之一。此外，巴西一度进入第一层级，进一步加剧全球疫情的恶化[22]。巴西的一些州曾经取消了关闭公共交通的策略以及限制城内流动措施，这可能是巴西出现恶化的一个原因。即使每日新增病例数显著减少，处于第一和第二层级的国家在未来将继续推动COVID-19疫情的全球大流行。

值得注意的是，全球疫情的6天变化似乎与实施或取消关闭工作场所的措施和居家隔离有关；因此，取消这些措施可能是全球每日新病例数增加的主要原因。与实施关闭工作场所措施相比，取消这一措施导致6天内新发病例数增加6.1%~11.4%。居家隔离也被证明是值得实施的措

施, 因为该措施对疫情防控有重要影响; 取消这一措施将导致6天内下一代病例最多增加7.6%。此外, 同时实施工作场所关闭策略和居家隔离措施的效果比单独实施这两种措施的效果更大; 因此, 这一防控措施的组合可以作为一种应急策略, 以控制突发COVID-19疫情。另一方面, 尽管有研究表明完全取消其他NPI可能会导致毁灭性的结果, 但是这些NPI在CTRS的6天变化中并没有表现出决定性的作用[10]。值得注意的是, 一些国家实行了疫苗接种策略。根据本研究, 疫苗接种策略似乎是有效的, 但目前效果有限。如附录A中的图S5(g)所示, 前17~30天实施的接种疫苗策略对减少新的CTRS显著有效, 这表明接种疫苗策略不会马上对疫情产生影响。需要更详细的数据来准确地分析疫苗接种策略的影响。

本研究有一定局限性。第一, 本研究是基于从WHO网站获得的每个国家和地区每天的新增确诊病例数据进行的分析。但由于核酸检测能力不足, 一些国家每日新增病例数出现异常波动, 疫情曲线出现异常, 无法真实反映疫情的实际传播动态。为了回避这一点, 本研究排除了SD<sub>volatility</sub>前10%的国家。然而, 核酸检测能力不足的影响仍然存在。更好的分析将依赖于当前无法公开获取的发病数据。第二, 本研究不考虑无症状感染者, 而且症状较轻的患者可能不愿意去门诊; 这两者都将导致对全球疫情传播形势的低估。第三, 由于防控措施的复杂影响, 各个国家和地区的大流行情况和疫情趋势发生重大变化的原因仍不清楚。第四, 虽然本文所提出的方法被证明对各国风险的短期预测是可信的, 但对长期预测应保持谨慎。第五, 本研究只考虑了NPI对CTRS变化的影响。然而, 天气和气候通过影响宿主的易感性、病毒的生存和传播过程, 在传染病的传播中发挥着重要作用。多项研究表明, 气象指标对COVID-19疫情的传播有影响。例如, Liu等[23]分析了中国30个省会城市COVID-19病例与气象因素的相关性, 发现气象因素在控制人口迁移后对新冠肺炎的传播起独立作用。根据这项研究, 低温、较小的昼夜温差和低湿度可能有利于疫情传播。虽然已有研究表明这些因素与疾病传播并不具有相关性, 但气象因素仍可能是影响全球疫情传播动态的重要因素, 并可能与NPI存在交互作用[24–27]。第六, OxCGRT关于防控策略实施情况的记录不能反映策略的实际实施或执行情况, 这对大流行动态产生了影响, 从而影响了措施有效性的评估。第七, 对于实施或取消防控措施时机而言, 可能会存在一个阈值——超过这个阈值, 流行病就会卷土重来, 因此需要精心设计一项研究来探讨。

总之, 全球COVID-19疫情大流行的规模和模式是出

乎意料的。各个国家和地区的疫情发生发展的时间不同, 相互叠加, 形成全球范围内不断恶化的疫情趋势。除了对新冠病毒这一全新病毒的了解较少以外, 各国对抗疫经验的学习相对不足, 这在很大程度上导致了未曾预料到的全球疫情困境。本研究所提出的方法和指标是基于对世界各国和各地区过去一年所学到的经验的总结, 这对未来采取有效的公共应对措施, 以遏制COVID-19疫情大流行具有重要意义。

## 致谢

本研究获得国家自然科学基金(82041024、82041026、81973142)、比尔&梅琳达·盖茨基金(INV-006371)的资助。

## Compliance with ethics guidelines

Yongyue Wei, Jinxing Guan, Xiao Ning, Yuelin Li, Liangmin Wei, Sipeng Shen, Ruyang Zhang, Yang Zhao, Feng Chen, and Hongbing Shen declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.07.015>.

## References

- [1] Kucharski AJ, Klepac P, Conlan AJK, Kissler SM, Tang ML, Fry H, et al; CMMID COVID-19 working group. Effectiveness of isolation, testing, contact tracing, and physical distancing on reducing transmission of SARS-CoV-2 in different settings: a mathematical modelling study. *Lancet Infect Dis* 2020;20(10):1151–60.
- [2] Pan A, Liu L, Wang C, Guo H, Hao X, Wang Q, et al. Association of public health interventions with the epidemiology of the COVID-19. *JAMA* 2020;323(19):1915–23.
- [3] Wei Y, Wei L, Jiang Y, Shen S, Zhao Y, Hao Y, et al. Implementation of clinical diagnostic criteria and universal symptom survey contributed to lower magnitude and faster resolution of the COVID-19 epidemic. *Engineering* 2020;6(10):1141–6.
- [4] Jefferies S, French N, Gilkison C, Graham G, Hope V, Marshall J, et al. COVID-19 in New Zealand and the impact of the national response: a descriptive epidemiological study. *Lancet Public Health* 2020;5(11):e612–23.
- [5] Paterlini M. COVID: 19: Italy has wasted the sacrifices of the first wave, say experts. *BMJ* 2020;371:m4279.
- [6] Han E, Tan MMJ, Turk E, Sridhar D, Leung GM, Shibuya K, et al. Lessons learnt from easing COVID-19 restrictions: an analysis of countries and regions in Asia Pacific and Europe. *Lancet* 2020;396(10261):1525–34.
- [7] Tian H, Liu Y, Li Y, Wu CH, Chen B, Kraemer MUG, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic. *Science* 2020;368(6491):638–42.
- [8] Haug N, Geyrhofer L, Londei A, Dervic E, Desvars-Larrive A, Loreto V, et al.



- Ranking the effectiveness of worldwide COVID-19 government interventions. *Nat Hum Behav* 2020;4(12):1303–12.
- [9] Hale T, Angrist N, Goldszmidt R, Kira B, Petherick A, Phillips T, et al. A global panel database of pandemic policies (Oxford COVID-19 Government Response Tracker). *Nat Hum Behav* 2021;5(4):529–38.
- [10] Li Y, Campbell H, Kulkarni D, Harpur A, Nundy M, Wang X, et al. The temporal association of introducing and lifting non-pharmaceutical interventions with the time-varying reproduction number (R) of SARS-CoV-2: a modelling study across 131 countries. *Lancet Infect Dis* 2021;21(2):193–202.
- [11] Cori A, Ferguson NM, Fraser C, Cauchemez S. A new framework and software to estimate time-varying reproduction numbers during epidemics. *Am J Epidemiol* 2013;178(9):1505–12.
- [12] Hao X, Cheng S, Wu D, Wu T, Lin X, Wang C. Reconstruction of the full transmission dynamics of COVID-19. *Nature* 2020;584(7821):420–4.
- [13] Kucharski AJ, Russell TW, Diamond C, Liu Y, Edmunds J, Funk S, et al. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *Lancet Infect Dis* 2020;20(5):553–8.
- [14] Lindstrom MJ, Bates DM. Newton–Raphson and EM algorithm for linear mixed-effects models for repeated-measures data. *J Am Stat Assoc* 2020; 83(404):1014–22.
- [15] Post LA, Argaw ST, Jones C, Moss CB, Resnick D, Singh LN, et al. A SARSCoV-2 surveillance system in Sub-Saharan Africa: modeling study for persistence and transmission to inform policy. *J Med Internet Res* 2020;22(11):e24248.
- [16] Ogunleye OO, Basu D, Mueller D, Sneddon J, Seaton RA, Yinka-Ogunleye AF, et al. Response to the novel corona virus (COVID-19) pandemic across Africa: successes, challenges, and implications for the future. *Front Pharmacol* 2020;11:1205.
- [17] www.worldometers.info [Internet]. New York City: Worldometer; 2021 [cited 2021 Feb 21]. Available from: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>.
- [18] Callejas D, Echevarria JM, Carrero Y, Rodríguez-Morales AJ, Moreira R. The SARS-CoV-2 pandemic in Latin America: the need for multidisciplinary approaches. *Curr Trop Med Rep* 2020;7(4):120–5.
- [19] Taylor L. How Latin America is fighting COVID-19, for better and worse. *BMJ* 2020;370:m3319.
- [20] Rodríguez Mega E. Latin American scientists join the coronavirus vaccine race: ‘no one’s coming to rescue us’. *Nature* 2020;582(7813):470–1.
- [21] Li Q, Guan X, Wu P, Wang X, Zhou L, Tong Y, et al. Early transmission dynamics of novel coronavirus-infected pneumonia. *N Engl J Med* 2020; 382(13):1199–207.
- [22] Buss LF, Prete CA, Abraham CMM, Mendrone A, Salomon T, de Almeida-Neto C, et al. Three-quarters attack rate of SARS-CoV-2 in the Brazilian Amazon during a largely unmitigated epidemic. *Science* 2021;371(6526):288–92.
- [23] Liu J, Zhou Ji, Yao J, Zhang X, Li L, Xu X, et al. Impact of meteorological factors on the COVID-19 transmission: a multi-city study in China. *Sci Total Environ* 2020;726:138513.
- [24] Pan J, Yao Y, Liu Z, Meng X, Ji JS, Qiu Y, et al. Warmer weather unlikely to reduce the COVID-19 transmission: an ecological study in 202 locations in 8 countries. *Sci Total Environ* 2021;753:142272.
- [25] Briz-Redón Á, Serrano-Aroca Á. A spatio-temporal analysis for exploring the effect of temperature on COVID-19 early evolution in Spain. *Sci Total Environ* 2020;728:138811.
- [26] Yao Y, Pan J, Liu Z, Meng X, Wang W, Kan H, et al. No association of COVID-19 transmission with temperature or UV radiation in Chinese cities. *Eur Respir J* 2020;55(5):2000517.
- [27] Jüni P, Rothenbühler M, Bobos P, Thorpe KE, da Costa BR, Fisman DN, et al. Impact of climate and public health interventions on the COVID-19 pandemic: a prospective cohort study. *CMAJ* 2020;192(21):E566–73.