

新型冠状病毒在家庭环境中的主要传播途径

雷浩¹, 肖胜蓝², 张楠³, 魏健健^{4*}, 金滔⁴

1. 浙江大学公共卫生学院, 杭州 310058
2. 中山大学公共卫生学院(深圳), 深圳 518100
3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124
4. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310058

摘要 通过构建数学模型, 定量研究了1个3人家庭环境中飞沫传播、接触传播和气溶胶传播在COVID-19传播中的作用。研究表明, 飞沫传播和接触传播在COVID-19传播中起着最重要的作用。和患者交流时保持1.5~2 m的空间距离对控制飞沫传播至关重要, 洗手和保护环境表面清洁是控制接触传播的最有效手段。虽然通过气溶胶途径传播风险相对较小, 但当患者呼出飞沫中病原体浓度较高时(患者可能为超级感染者), 在家庭环境中24 h暴露下, 气溶胶传播风险依然可以高达26%。

关键词 新型冠状病毒; 飞沫传播; 接触传播; 气溶胶传播; 相对重要性; 数学模型

新型冠状病毒肺炎其病原体为新型冠状病毒(SARS-CoV-2), 世界卫生组织已经正式将其命名为coronavirus disease 2019, 简称COVID-19。自从2019年12月8日第1例COVID-19患者确诊以来^[1], 截至2020年6月19日, 中国已经累计确诊COVID-19感染84940人, 累计死亡4645人^[2]。作为一种呼吸道传染病, 目前认为经呼吸道的飞沫和

接触传播是其主要传播途径^[3], 可能存在粪-口、气溶胶和母婴传播风险^[3]。不同传播途径的防控措施不同, 因此探索各传播途径在不同环境中的相对重要性以及不同防控措施的效果, 对制定具有针对性的COVID-19预防控制措施至关重要。

通过对中国近千例聚集性病例分析发现, 83%的聚集性病例以家庭为单位^[3]。同时文献综述表

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ20H260009); 国家自然科学基金项目(51808488)

作者简介: 雷浩, 讲师, 研究方向为传染病流行病学, 电子信箱: leolei@zju.edu.cn; 肖胜蓝(共同第一作者), 副教授, 研究方向为传染病流行病学, 电子信箱: xiaoshlan3@mail.sysu.edu.cn; 魏健健(通信作者), 讲师, 研究方向为空气动力学, 电子信箱: weijzju@zju.edu.cn

引用格式: 雷浩, 肖胜蓝, 张楠, 等. 新型冠状病毒在家庭环境中的主要传播途径[J]. 科技导报, 2021, 39(9): 78-86; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.09.009

明家庭环境中 COVID-19 传播风险是其他环境下传播风险的 10 倍^[4]。因此探索家庭环境中不同传播途径的相对重要性对家庭环境中 COVID-19 的精准防控具有重要应用价值。此前有研究构建模型分别探究了流感在家庭环境和不同传播途径的相对重要性^[5-6],以及飞机上流感、严重急性呼吸综合征(SARS)和诺如病毒不同传播途径的相对重要性^[7]。最新的研究表明 COVID-19 不同传播途径在不同环境下的相对重要性不同^[8]。本研究考虑到家庭环境是 COVID-19 高传播风险区域,因此基于家庭环境中人之间接触的特点,构建数学模型,探索家庭环境中 COVID-19 不同传播途径的相对重要性以及不同措施在 COVID-19 防控中的效果。

1 COVID-19 传播模型

1.1 研究环境概述

2019 年,中国平均家庭户规模为 3.00 人/户^[9],因此假设 1 个 3 口之家组成为:父母和 1 个子女。考虑到在中国,COVID-19 患者主要为成年人^[3],因此假设该 3 口之家中父母其中 1 人为 COVID-19 患者。同时研究表明性别对 COVID-19 易感性没有差别^[3],因此假设该家庭中,父亲为 COVID-19 患者,其子女性别为男。由于疫情期间,大部分人都处于居家隔离状态,为了简化条件,不考虑可能的访客或者亲戚朋友。该家庭环境假设为 1 个 100 m² 的三居室,层高为 3 m,因此整个家庭空间体积为 300 m³。

1.2 SARS-CoV-2 传播途径定义

研究不考虑粪-口传播以及母婴传播风险,因此假设 SARS-CoV-2 主要有以下 3 种传播途径:飞沫传播,接触传播(直接和间接接触)和气溶胶传播。图 1 是 3 种传播途径的示意图^[13]。飞沫传播指患者通过打喷嚏、咳嗽、说话和呼吸等产生的飞沫,通过被易感者吸入呼吸道,或者黏附在易感者的黏膜(眼睛、鼻孔、嘴唇)引起的感染^[10]。被吸入的飞沫的半径一般介于 5~50 μm^[11]。半径大于 50 μm 的飞沫主要黏附于易感者的黏膜,这些大飞沫移动最大水平距离一般为 1.5~2 m^[12]。接触传播分为直

接接触传播和间接接触传播 2 种,直接接触指通过和患者的直接皮肤接触(如握手)导致的传播;间接接触传播指易感者通过接触被患者污染的环境表面导致的传播。气溶胶传播也称为空气传播,这是因为患者呼出的带有 SARS-CoV-2 的飞沫中有很多小粒径,这些小粒径的颗粒蒸发后如果半径小于 5 μm,它们就可以在空气中悬浮很久,并随着气流运动到很远距离,从而造成气溶胶传播。

1.3 气溶胶传播模型

假设 t 时刻空气中粒径为 r 的飞沫核的浓度是 $C_a(r, t)$,易感者在室内暴露时间为 T_a ,那么在暴露时间 T_a ,易感者的暴露剂量可以通过式(1)计算

$$D_a = \int_0^{T_a} \int_0^{r_a} p C_a(r, t) \frac{4}{3} \pi r^3 L(r_0, t) dr dt \quad (1)$$

式中, r_a 为可以通过气溶胶途径传播的飞沫最大半径; p 为肺呼吸率; r_0 为飞沫呼出时的最初半径,假设蒸发后的飞沫核半径 $r = r_0/3^{[12]}$; $L(r_0, t)$ 为最初半径为 r_0 的飞沫在呼出时间 t 后其中有活性的病原体的浓度。

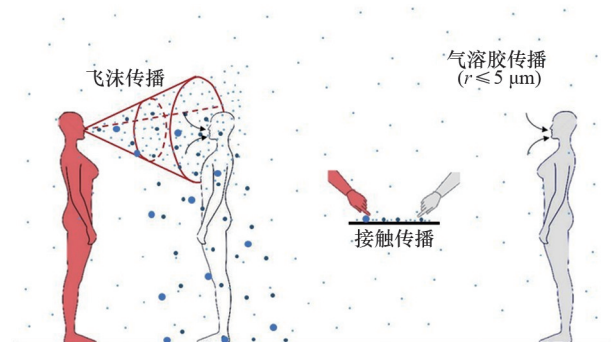


图1 SARS-CoV-2通过飞沫传播、气溶胶传播和接触传播示意

飞沫中有活性的病原体的浓度随呼出时间变化而变化。研究表明,病原体在飞沫的蒸发过程快速死亡^[13]。对于半径小于 5 μm 的飞沫来说,其从呼出到蒸发成飞沫核的时间小于 0.1 s^[13]。因此假设蒸发后,飞沫中有活性的病原体浓度为最初的 25%^[13]。

空气中半径为 r 的飞沫核的浓度 $C_a(r, t)$ 由式(2)计算:

$$\frac{d[C_a(r,t)L(r_0,t)]}{dt} = G_i(r_0)L(r_0,0) - (q + b_a + kr^2)VC_a(r,t)L(r_0,t) \quad (2)$$

式中, $L(r_0,0)$ 为半径为 r_0 的飞沫中冠状病毒的浓度; q 为房间换气次数; b_a 为气溶胶中冠状病毒的死亡率; V 为房间体积; kr^2 为量化空气中粒径为 r 的飞沫在水平环境表面的沉积率, 考虑到垂直表面飞沫沉积率相对较小, 故不考虑飞沫在垂直表面的沉积; $G_i(r_0)$ 为患者呼出的半径为 r_0 的飞沫的速率, 假设患者每小时呼出飞沫的总量为 N_d , 呼出飞沫的粒径分布为 $f(r_0)$, 那么 $G_i(r_0) = N_d f(r_0)$ 。

研究表明飞沫粒径分布一般是右倾的, 假设呼出的飞沫的最大半径为 $r_c = 2000 \mu\text{m}$ ^[11], 采用以下分布:

$$f(r_0) = \begin{cases} \frac{0.71f_1(2r_0) + 0.29f_2(2r_0)}{\int_0^{2000} [0.71f_1(2r_0) + 0.29f_2(2r_0)] dr}, & r_0 < 2000 \mu\text{m} \\ 0, & r_0 > 2000 \mu\text{m} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $f_1(r_0)$ 和 $f_2(r_0)$ 为 2 个对数正态分布, 其几何均数和几何标准差分别为 $9.8, 9 \mu\text{m}$, $160, 1.7 \mu\text{m}$ ^[7]。

在稳态下 $\frac{d[C_a(r,t)L(r_0,t)]}{dt} = 0$, 有

$$C_a(r,t)L(r_0,t) = G_i(r_0)L(r_0,0) / [(q + b_a + kr^2)V] \quad (4)$$

1.4 飞沫传播模型

对于飞沫传播, 主要通过以下 2 种途径: (1) 对于半径介于 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 的飞沫, 其可以被易感者吸入, 并沉积在上呼吸道; (2) 对于大粒径的飞沫其主要黏附在易感者眼睛嘴唇等黏膜。假设患者呼出的飞沫运动轨迹形成图 2 所示射流^[14]。假设咳嗽时, 射流形成的圆锥体角度为 α , 1 个人黏膜面积为 A_m , 在距离患者水平距离为 S 处 ($S \leq 2 \text{ m}$), 飞沫中所含病毒浓度为

$$C_d(r,t)L(r_0,t) = G_i(r_0)L(r_0,0) / p\pi \left(S \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2 \quad (5)$$

假设易感者在飞沫传播中暴露时间为 T_d , 那么通过吸入导致的暴露剂量为

$$D_{di} = \int_0^{T_d} \int_5^{r_b} p C_d(r,t) L(r_0,t) \frac{4}{3} \pi r^3 dr dt \quad (6)$$

式中, r_b 为可吸入的飞沫的最大半径; $L(r_0,t)$ 为最初粒径为 r_0 的飞沫在呼出时间 t 后其中有活性的病原体的浓度。

对于粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的小飞沫, 其在还没有被易感者吸入的时候都已经蒸发完全了, 因此 $L(r_0,t) = 0.25L(r_0,0)$, 但对于大飞沫, 其被易感者吸入的时候可能还未完全蒸发。因此 $L(r_0,t)$ 由其蒸发时间和被易感者吸入时间决定。假设最初粒径为 r_0 的飞沫运动到距离患者水平距离为 S 处的易感者所需时间为 $t_m(s)$, 其蒸发时间为 $t_e(r_0)$ 。假设

$$L(r_0,t) = \begin{cases} L(r_0,0), & t_m(s) < t_e(r_0) \\ 0.25L(r_0,0), & t_m(s) \geq t_e(r_0) \end{cases} \quad (7)$$

根据对 Xie 等^[15]研究数据的拟合, 假设初始粒

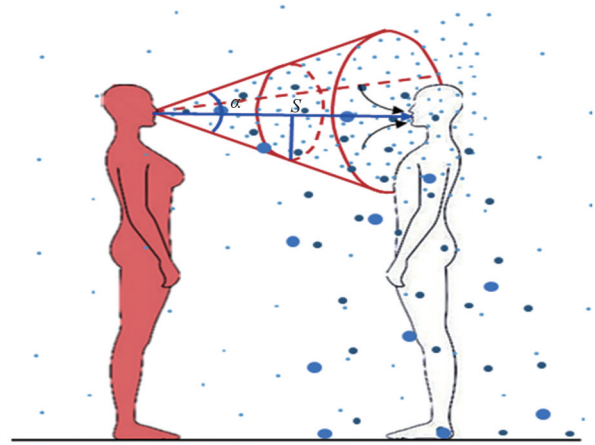


图2 理想情况下, 新型冠状病毒肺炎通过飞沫传播射流示意

径为 r_0 的飞沫完全蒸发所需时间 $t_e(r_0) = 7 \times 10^{-4} r_0^2$ 。
 $T_m(s) = s/V_m$, 其中 V_m 为飞沫呼出后的运动速度。

通过喷射到黏膜上导致的暴露剂量为

$$D_{ds} = \int_0^{T_d} \int_5^{r_c/2} \frac{4}{3} \pi r^3 A_m C_d(r,t) L(r_0,t) dr dt \quad (8)$$

1.5 接触传播模型

COVID-19 患者的呼吸活动可产生大量的含

病毒的飞沫。在大粒径的飞沫沉降过程中,部分黏附在患者的手上。当患者与易感者握手或触摸表面时,病毒在表面和手之间传播。如果易感者用被病毒污染的手指触摸眼、鼻和嘴上黏膜,可能造成感染。病毒沉降到感染者手上的速率 S_s 为

$$S_s = \frac{A_p}{A_d} \int_5^{1000} N_d f(r_0) L(r_0, 0) \frac{4}{3} \pi r_0^3 dr_0 \quad (9)$$

式中, A_p 和 A_d 分别为手和大粒径飞沫沉降范围的面积。

在稳态下,患者手上病毒量 \bar{n}_{ip} 维持平衡,即单位时间内病毒沉降到感染者手上的量等于病毒自然死亡的量,则

$$\bar{n}_{ip} = \frac{S_s}{\eta_{np}} \quad (10)$$

式中, η_{np} 为病毒在手上的自然死亡速率。

假设患者与易感者触摸环境表面的频率为 $c_{p,s}$, 握手的频率为 $c_{p,p}$, 则易感者手上和第 k 个环境表面上病毒量 $n_p(t)$ 和 $n_{sk}(t)$ 满足

$$\frac{dn_p(t)}{dt} = \sum_{k=1}^2 c_{p,s} \alpha_{p,sk} \frac{A_{cps}}{A_s} n_{sk}(t) + c_{p,p} \alpha_{p,p} \frac{A_{cpp}}{A_p} \bar{n}_{ip} - \left(\sum_{k=1}^2 c_{p,s} \alpha_{p,sk} \frac{A_{cps}}{A_p} + c_{p,p} \alpha_{p,p} \frac{A_{cpp}}{A_p} + \eta_{np} \right) n_p(t) \quad (11)$$

$$\frac{dn_{sk}(t)}{dt} = c_{p,s} \alpha_{p,sk} \frac{A_{cps}}{A_p} [n_p(t) + \bar{n}_{ip}] - \left(2c_{p,s} \alpha_{p,sk} \frac{A_{cps}}{A_s} + \eta_{nsk} \right) n_{sk}(t), \quad k = 1, 2 \quad (12)$$

式中, $\alpha_{p,sk}$, $\alpha_{sk,p}$ 和 $\alpha_{p,p}$ 分别为病毒从手到第 k 个环境表面、从第 k 个表面到手以及从手到手的传播效率; A_s 为环境表面的面积; A_{cps} 和 A_{cpp} 分别为手触摸环境表面时和手接触手的接触面积; 而 η_{nsk} 为病毒在第 k 个环境表面上的自然死亡速率。假设洗手和清洁表面按一定频率在一些时间点上进行, 其中洗手的频率为 r_p , 洗手效率为 η_p , 清洁表面的频率为 r_s , 表面清洁的效率为 η_s 。

在暴露时间 T 内, 易感者的暴露剂量可以通过式(13)计算

$$D_f = \int_0^T c_{p,m} \alpha_{p,m} \frac{A_f}{A_p} n_p(t) dt \quad (13)$$

式中, $c_{p,m}$ 为易感者触摸黏膜的频率; $\alpha_{p,m}$ 为病毒从

手到黏膜的传播效率; 而 A_f 为手指的面积。

1.6 感染风险评估

采用 dose-response 模型来评估患病风险, 在暴露剂量为 D 的情况下, 其患病风险为

$$P = 1 - e^{-\eta D} \quad (14)$$

式中, η 为感染系数。

迄今还没有相关研究来量化 SARS-CoV-2 在不同部位的感染能力, 假设 SARS-CoV-2 在黏膜上的感染系数和 SARS 相同, 为 $\eta_m = 3.2 \times 10^{-3} / \text{mRNA copy}$ 。其在下呼吸道的感染系数假设分为以下 2 种情形: (1) 在下呼吸道的感染系数和在黏膜上相同, 为 $\eta_r = 3.2 \times 10^{-3} / \text{mRNA copy}$ 。(2) 和流感类似, 新冠肺炎病毒在下呼吸道具有更高的感染能力, 为 $\eta_r = 1 / \text{mRNA copy}$ 。分别分析这 2 种情形下新冠病毒不同传播途径的感染风险。

1.7 参数选择

表 1 汇总了本文模型中所用参数, 参数解释说明以及参数值的来源。

2 不同传播途径的相对重要性以及不同防控措施效果

2.1 家庭环境中 SARS-CoV-2 不同传播途径的相对重要性

首先模拟 1 d 的时间内, SARS-CoV-2 通过各个途径传播的感染风险以及总风险。假设 1 d 中处于飞沫暴露的时间(即面对面交流时间)为 0.5 h, 易感者和患者的水平距离为 1 m。在不同病毒浓度下, 不同传播途径的易感者感染概率如表 2 所示。当 SARS-CoV-2 在黏膜上和在下呼吸道的感染系数相同时, 发现气溶胶传播风险相对于飞沫传播和接触传播几乎可以忽略不计。SARS-CoV-2 主要通过飞沫和接触传播 2 种途径传播, 且 2 种途径感染风险接近。当 SARS-CoV-2 在下呼吸道的感染系数是在黏膜上的 300 倍时, 通过气溶胶传播的风险大幅增加, 但仍小于飞沫传播和接触传播。

进一步分析不同防控措施对控制 SARS-CoV-2 传播的作用。基线设置为 $L = 10^6$ mRNA copy/mL。

表1 模型参数

参数	参数含义	参数值	文献
T_a	气溶胶传播暴露时间	24 h	本文假设
T_d	飞沫传播暴露时间	0.5 h	本文假设
r_a	气溶胶途径传播的飞沫最大半径	5 μm	[11]
r_b	可吸入的飞沫的最大半径	50 μm	[11]
r_c	吸出的飞沫的最大半径	2000 μm	[7]
b_a	新冠肺炎病毒在空气中的死亡率	0.22/h	[16]
α	射流形成的圆锥体角度为	0.52	[7]
V	房间体积	300 m^3	本文假设
k	飞沫在水平环境表面的沉积率系数	0.14/(h $\cdot\mu\text{m}^2$)	[17]
q	房间换气次数	1/h	[18]
V_m	飞沫呼出后的运动速度	0.1 m/s	本文假设
p	肺呼吸率	0.48 m^3/h	[19]
$L(r_0,0)$	半径为 r_0 的飞沫呼出时有活性的病原体的浓度	10^6 mRNA copies/mL(基线)	[20]
$c_{p,s}$	人们触摸环境表面的频率	3/h	本文假设
$c_{p,p}$	人们握手频率	0.075/h	[21]
$c_{p,m}$	易感者触摸黏膜的频率	5/h	[22]
η_p	易感者洗手的清洁效率	100%	本文假设
η_s	表面的清洁效率	100%	本文假设
$\alpha_{p,s1}$	病毒从手到孔隙表面(表面1)的传播效率	17%	[23]
$\alpha_{p,s2}$	病毒从手到非孔隙表面(表面2)的传播效率	14%	[23]
$\alpha_{p,m}$	病毒从手到黏膜的传播效率	34%	[23]
$\alpha_{p,p}$	病毒从手到手的传播效率	17%	[23]
$\alpha_{s1,p}$	病毒从孔隙表面(表面1)到手的传播效率	0.3%	[24]
$\alpha_{s2,p}$	病毒从非孔隙表面(表面2)到手的传播效率	37%	[24]
A_s	环境表面面积	5000 cm^2	本文假设
A_p	手掌面积	140 cm^2	[25]
A_d	大粒径飞沫沉降范围面积	7850 cm^2	本文假设
A_{cps}	手触摸表面时的接触面积	70 cm^2	本文假设
A_{cpp}	手触摸手时的接触面积	70 cm^2	本文假设
A_f	手指面积	2 cm^2	[26]
η_{ns1}	病毒在孔隙表面(表面1)上自然死亡速率	0.14/h	本文假设
η_{ns2}	病毒在非孔隙表面(表面2)上自然死亡速率	0.14/h	[27]
η_{np}	病毒在手上自然死亡速率	0.80/h	[28]
a_m	病毒在黏膜上的感染系数	$3.2 \times 10^{-3}/\text{mRNA copy}$	[13]

2.2 通风对气溶胶传播的影响

分析不同通风条件下,易感者通过气溶胶途径感染 COVID-19 的风险,如图 3 所示。研究发现,随着换气率从 0.5 次/h 增加到 5 次/h,在 24 h 暴露时间,易感者通过气溶胶途径感染 SARS-Cov-2 的概率从 3.7% 降低为 1.3%。虽然在本文基线情况下,

在不同换气率情况下,SARS-Cov-2 通过气溶胶传播的风险都很低,增加换气次数对 COVID-19 的通过气溶胶传播途径似乎不重要。但当 SARS-Cov-2 在飞沫中的浓度高达 10^7 mRNA copy/mL 时,随着换气率从 0.5 次/h 增加到 5 次/h,易感者通过气溶胶途径感染病毒的概率从 32% 显著降低为 12%。

表2 基线情况下不同飞沫中病毒浓度下的感染概率以及3条途径的作用

感染系数	传播途径	感染风险(贡献比例)			
		10 ⁵ mRNA copy/mL	10 ⁶ mRNA copy/mL	10 ⁷ mRNA copy/mL	
$\eta_{lr} = 1/\text{mRNA copy}$ $\eta_m = 3.2 \times 10^{-3}/\text{mRNA copy}$	气溶胶传播	0.00(4.50%)	0.03(5.15%)	0.26(11.82%)	
	飞沫传播	吸入飞沫	0.00(0.90%)	0.01(1.03%)	0.06(2.64%)
		飞沫喷射	0.04(54.05%)	0.31(52.83%)	0.98(43.67%)
	接触传播	0.03(40.54%)	0.24(40.99%)	0.93(41.87%)	
	总的感染概率	0.07	0.49	1	
$\eta_{lr} = 3.2 \times 10^{-3}/\text{mRNA copy}$ $\eta_m = 3.2 \times 10^{-3}/\text{mRNA copy}$	气溶胶传播	0.00(0.00%)	0.00(0.00%)	0.00(0.05%)	
	飞沫传播	吸入飞沫	0.00(0.94%)	0.01(1.08%)	0.06(3.00%)
		飞沫喷射	0.04(56.60%)	0.31(55.70%)	0.98(49.50%)
	接触传播	0.03(42.45%)	0.24(43.22%)	0.93(47.46%)	
	总的感染概率	0.06	0.48	1	

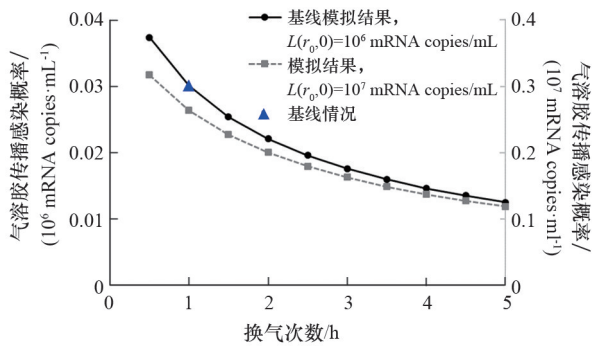


图3 不同换气次数情况下,易感者通过气溶胶途径感染 COVID-19 风险

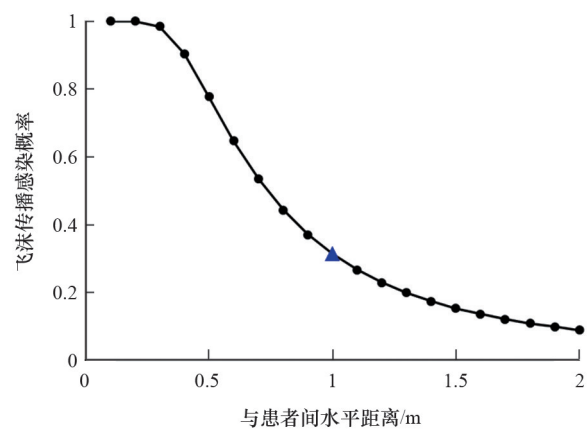


图4 离患者不同水平距离下,易感者通过飞沫传播感染 COVID-19 的风险

2.3 与患者距离对飞沫传播的影响

分析在离患者不同水平距离下,易感者通过飞沫传播感染 COVID-19 的风险。结果如图 4 所示,表明离患者的水平距离远一些可以显著降低感染风险。尤其是在 1 m 距离以内,当易感者离患者的水平距离从 0.2 m 增加到 1 m 时,感染风险从 100% 降低为 31%。继续增加离患者的水平距离可以继续降低感染风险,当离患者的水平距离为 2 m 时,感染风险降低为 9%。

2.4 洗手和清洗环境表面对接触传播的影响

分析了不同洗手和表面清洁频率条件下,易感者通过接触传播途径感染 COVID-19 的风险(图 5)。研究发现,洗手和清洁表面均能有效降低接触传播感染概率。其中,随着洗手频率从 0 增加到每

天 16 次,易感者通过接触传播途径感染 COVID-19 的感染概率匀速下降,从 23.9% 降低为 11.2%。随着清洁表面频率从 0 增加到每天 8 次,易感者通过接触传播途径感染 COVID-19 的感染概率下降速度较快,从 23.9% 降低为 12.4%,而当清洁表面频率从每天 8 次增加到每天 16 次,感染概率下降速度较慢,从 12.4% 下降为 10.9%。

3 讨论

研究表明,飞沫与接触传播是 SARS-CoV-2 的主要传播途径,这与中国国家卫生健康委发布的

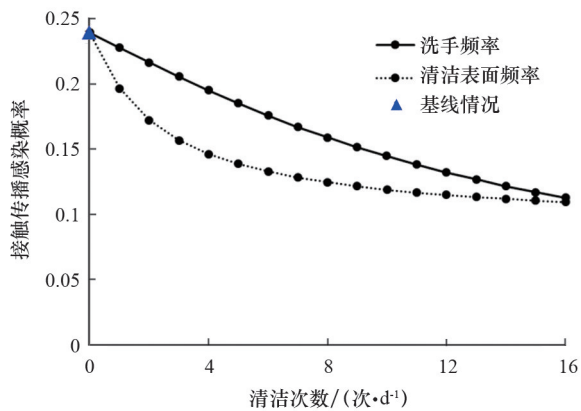


图5 不同洗手和表面清洁频率下,易感者通过接触传播感染 COVID-19 的风险

COVID-19 诊疗方案内的观点一致。发表在《Nature》杂志上的一份研究通过动物模型实验,调查了 SARS-CoV-2 在金色叙利亚仓鼠间的传播性,验证了飞沫传播途径具有较高的效率^[20]。SARS-CoV-2 在表面的自然死亡率低,例如 72 h 后仍可在塑料和不锈钢表面检测到具有活性的病毒^[12],增大了接触传播的传播风险。

本研究指出,尽管气溶胶传播风险相对其他 2 条途径较小,但是在相对封闭的环境中长时间暴露于高浓度气溶胶情况下,其风险仍然不容忽视。如表 1 所示,当易感人群与患者在换气次数为 1ACH 的家庭环境里相处 1 d,且患者飞沫中病毒浓度较高(10^7 mRNA copy/mL)时,易感人群通过气溶胶传播感染 COVID-19 的概率达到 26%。许多文献为 SARS-CoV-2 的气溶胶传播提供了证据。首先,COVID-19 患者可产生含病毒的气溶胶。SARS-CoV-2 广泛存在于患者的呼吸道分泌物、粪便及尿液中^[29],因此患者的日常呼吸活动、医院内气管插管等医疗操作和马桶冲水等均可产生大量含病毒气溶胶。其次,SARS-CoV-2 可在气溶胶中存活一定时间。在武汉的医院及患者卫生间等环境空气中可检测到 SARS-CoV-2^[30],并且在实验条件下,SARS-CoV-2 在气溶胶中可存活 3 h^[16]。最后,含 SARS-CoV-2 的气溶胶可到达靶组织并引起感染。有研究发现 SARS-CoV-2 受体 ACE-2 存在于呼吸道中,且在支气管细胞等组织中表达^[31]。

同时,提高通风率可显著降低气溶胶传播风

险。自 1957 年起,香港葛量洪医院在结核病病房采用自然通风系统,有效控制了病菌随空气远距离传播^[32]。在普通住宅中,可采用间歇开窗自然通风或加强机械通风率,以降低气溶胶传播风险。对于飞沫传播,增大社交距离是有效的控制措施。一份研究运用数学模型估算了不同措施对控制新冠病毒传播的影响,发现同时隔离、关闭学校和增大办公人员社交距离,可减少 78% 以上的病患^[33]。提高洗手和表面清洁频率有助于减小接触传播风险。世界卫生组织建议疫情期间,人们应该经常性彻底地清洁手部^[34]。干净的手触摸有病毒的表面将被再次污染,因此,表面清洁也同等重要^[35]。

4 结论

自 2019 年 12 月 COVID-19 暴发以来,迅速在全世界范围内扩散,给全国人民的生命健康造成巨大威胁。通过构建数学模型,量化了家庭环境中 SARS-CoV-2 通过不同途径传播的风险,并评估了不同防控措施降低感染风险的效果,对疾控与卫生部门进行 COVID-19 疫情防控与决策具有理论指导意义。

本研究具有 2 个局限性。首先,由于相关文献缺失,对模型中的关于 SARS-CoV-2 的某些参数(如病毒在手与表面间的传播率)基于其他病毒的数据进行了估算。其次,由于家庭环境中人的行为数据不够完善,对人的触摸行为进行了简化假设。这些局限可能带来误差。因此,将来需要进一步进行实验测量和触摸行为观测研究,以加深对新冠病毒传播的理解。

参考文献(References)

- [1] Li Q, Guan X, Wu P, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of Novel coronavirus-infected pneumonia[J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382: 1199-1207.
- [2] Coronavirus Disease (COVID-19) Situation Report-151 [R]. Geneva: World Health Organization, 2020.
- [3] 中华预防医学会新型冠状病毒肺炎防控专家组. 新型冠

- 状病毒肺炎流行病学特征的最新认识[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 10(2): 86-92.
- [4] Lei H, Xu X, Xiao S, et al. Household transmission of COVID-19—a systematic review and meta-analysis [J]. *Journal of Infection*, 2020, doi: 10.1016/j.jinf.2020.08.033.
- [5] Atkinson M P, Wei L M. Quantifying the routes of transmission for pandemic influenza[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 2008, 70(3): 820-867.
- [6] Nicas M, Jones R M. Relative contributions of four exposure pathways to influenza infection risk[J]. *Risk Analysis*, 2009, 29(9): 1292-1303.
- [7] Lei H, Li Y, Xiao S, et al. Routes of transmission of influenza A H1N1, SARS CoV and norovirus in air cabin: Comparative analyses[J]. *Indoor Air*, 2018, 28(3): 394-403.
- [8] Gao X C, Li Y, Wei J, et al. Multi-route respiratory infection: When a transmission route may dominate[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141856.
- [9] 国家统计局. 中国统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [10] Chen W, Zhang N, Wei J, et al. Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact[J]. *Building Environment*, 2020, 176: 106359.
- [11] Nicas M, Jones R M. Relative contributions of four exposure pathways to influenza infection risk[J]. *Risk Analysis*, 2009, 29(9): 1292-1303.
- [12] Liu L, Li Y, Nielsen P V, et al. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people [J]. *Indoor Air*, 2017, 27(2): 452-462.
- [13] Xie X, Li Y, Zhang T, et al. Bacterial survival in evaporating deposited droplets on a teflon-coated surface[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 73(3): 703-712.
- [14] Xiao S, Li Y, Sung M, et al. A study of the probable transmission routes of MERS-CoV during the first hospital outbreak in the Republic of Korea[J]. *Indoor Air*, 2018, 28(1): 51-63.
- [15] Xie X, Li Y, Chwang A T Y, et al. How far droplets can move in indoor environments—revisiting the wells evaporation-falling curve[J]. *Indoor Air*, 2007, 17(3): 211-225.
- [16] van Doremalen N, Bushmaker T, Morris D H, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1[J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(16): 1564-1567.
- [17] Thatcher T L, Lai A C K, Moreno-Jackson R, et al. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(11):1811-1819.
- [18] Wallace L A, Emmerich S J, Howard-Reed C. Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows[J]. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2002, 12(4): 296-306.
- [19] Chen S C, Chang C F, Liao C M. Predictive models of control strategies involved in containing indoor airborne infections[J]. *Indoor Air*, 2006(16): 469-481.
- [20] Sia S F, Yan L M, Chin A W H, et al. Pathogenesis and transmission of SARS-CoV-2 in golden hamsters[J]. *Nature*, 2020, 583(7818): 1-7.
- [21] Miura F, Watanabe T, Watanabe K, et al. Comparative assessment of primary and secondary infection risks in a norovirus outbreak using a household model simulation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 50: 13-20.
- [22] Hendley J O, Wenzel R P, Gwaltney Jr J M. Transmission of rhinovirus colds by self-inoculation[J]. *New England Journal of Medicine*, 1973, 288(26): 1361-1364.
- [23] Lopez G U. Transfer of microorganisms from fomites to hands and risk assessment of contaminated and disinfected surfaces[D]. Arizona: University of Arizona, 2013.
- [24] Lopez G U, Gerba C P, Tamimi A H, et al. Transfer efficiency of bacteria and viruses from porous and nonporous fomites to fingers under different relative humidity conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*. 2013, 79: 5728-5734.
- [25] Lee J Y, Choi J W, Kim H. Determination of hand surface area by sex and body shape using alginate[J]. *Journal of Physiological Anthropology*, 2007, 26: 475-483.
- [26] Wiertlewski M, Hayward V. Mechanical behavior of the fingertip in the range of frequencies and displacements relevant to touch[J]. *Journal of Biomechanics*, 2012, 45: 1869-1874.
- [27] Van Doremalen N, Bushmaker T, Munster V J. Stability of Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) under different environmental conditions [J]. *Eurosurveillance*. 2013, 18: 20590.
- [28] Wolff M H, Sattar S A, Adegbunrin O, et al. Environmental survival and microbicide inactivation of coronaviruses, with special emphasis on first insights concerning SARS[M]. Birkhäuser: Springer, 2005: 201-212.

- [29] Pan Y, Zhang D, Yang P, et al. Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples[J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2020, 20(4): 411-412.
- [30] Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals[J]. *Nature*, 2020, 582(7813): 557-560.
- [31] Lukassen S, Chua R L, Trefzer T, et al. SARS-CoV-2 receptor ACE 2 and TMPRSS 2 are primarily expressed in bronchial transient secretory cells[J]. *EMBO Journal*, 2020, 39(10): e105114.
- [32] Atkinson J, Chartier Y, Pessoa-Silva C L, et al. Natural ventilation for infection control in health-care settings [R]. World Health Organization, 2009.
- [33] Koo J R, Cook A R, Park M, et al. Interventions to mitigate early spread of SARS-CoV-2 in Singapore: A modelling study[J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2020, 20(6): 678-688.
- [34] Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public [R]. Geneva: World Health Organization, 2020.
- [35] Lei H, Xiao S, Cowling B J, et al. Hand hygiene and surface cleaning should be paired for prevention of fomite transmission[J]. *Indoor Air*, 2020, 30(1): 49-59.

Exploring dominant transmission routes of COVID-19 in households

LEI Hao¹, XIAO Shenglan², ZHANG Nan³, WEI Jianjian^{4*}, JIN Tao⁴

1. School of Public Health, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. School of Public Health (Shenzhen), Sun Yat-sen University, Shenzhen 518100, China

3. College of Architecture and Civil Engineerin, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

4. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract By June 19, 2020, there had been 84940 COVID-19 confirmed cases in China, in which 83% of the clustered infections occurred within families. Thus, exploring the relative contributions of different transmission routes is significant for developing efficient intervention strategies in household. In this study, we build a mathematical model to quantify the relative degrees of importance of airborne, droplet and contact route in COVID-19 transmission in household environments. We find that the droplet and contact routes play the dominant role in COVID-19 transmission in household. Keeping a 1.5-2 m distance when communicating with the infector is the key intervention to control droplet transmission. Hand hygiene and surface cleaning are significant for controlling contact transmission. The infection risk by airborne route is relatively small, however, when the virus concentration in the droplets exhaled by the infector is high (possibly super-spreader), e.g. 107 mRNA copy/mL, the infection risk via the airborne route can be as high as 26%. This study may provide a theoretical guidance for developing targeted interventions in household environments.

Keywords SARS-CoV-2; droplet transmission; contact transmission; airborne transmission; relative importance; mathematical model ●



(责任编辑 徐丽娇)