

选定养老院与幼儿园作为关键口岸原因量化模型分析

一、场所呼吸道感染风险指数模型

为科学量化养老院与幼儿园对五种常见呼吸道病原体的传播风险，我们应用“场所风险指数”(CRI)，该评估模型的科学性植根于经典的传染病动力学 SEIR 模型。SEIR 模型通过“易感者(S)→潜伏期者(E)→感染者(I)→康复者(R)”的框架，精确定义了疾病传播的核心驱动力有效接触率(β)与人群易感比例(S/N)，为服务于对养老院、幼儿园等具体场所进行快速、量化风险评估的决策需求。

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{SI}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \beta \frac{SI}{N} - \sigma E \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I\end{aligned}$$

其中，有效接触率 $\beta = c \times p$ ，是决定传播强度的核心参数， c 为日均接触次数， p 为单次接触传播概率。基本再生数 $R_0 = \frac{\beta}{\gamma}$ 。

该模型将 SEIR 模型动态、复合的核心参数解耦并映射为可直接测量与干预的静态场所特征。具体而言，模型将场所内的有效接触率(β)解构为基础传播力(R_0)、接触系数(Cc)与环境系数(Ce)的乘积，同时将人群易感比例(S/N)量化为人群免疫系数(Cp)。由此导出的计算公式 $CRI = R_0 \times Cc \times Ce \times Cp$
场所风险指数(CRI) = $R_0 \times Cc \times Ce \times Cp$
其中：

- R_0 ：病原体基础再生数，反映其在完全易感人群中的固有传播力。
 Cc （接触系数）：量化场所内人员接触的频率与密切程度。
 Ce （环境系数）：量化环境稀释与清除病原体的能力，核心是通风。
 Cp （人群免疫系数）：量化场所内人群对特定病原体的易感水平。

在计算具体病原体前，我们确定了养老院与幼儿园固有的、与病原体无关的物理与社会系数。

1. 接触系数(Cc)计算

- ①计算公式： $Cc = \text{场所人均日接触次数} / \text{社会基线人均日接触次数}$
②计算过程与数据来源：

社会基线：采用社会学研究共识，设定普通社区成人日均密切接触次数为 6 次（基准值 1.0）。

幼儿园：日均 21 次（来源：Stehlé, J., Voirin, N., Barrat, A., Cattuto, C., Colizza, V., Isella, L., Régis, C., Pinton, J.-F., Khanafer, N., Van den Broeck, W., & Vanhems, P. (2011). High-resolution measurements of face-to-face contact patterns in a primary school. PLOS ONE,6*(8),e23176.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023176>）

$$Cc_{\text{幼儿园}} = 3.5$$

养老院：日均 12 次（美国 CDC）

$$Cc_{\text{养老院}} = 12 / 6 = 2.0。$$

2. 环境系数(Ce)计算

- ①计算公式： $Ce = \text{基准通风系数} / \text{sqrt(场所实际通风换气率)}$

②计算过程与数据来源:

基准场景: 将通风良好的办公室(换气率 ≥ 5 次/小时)设为低风险基准, 赋值为 1.0。

幼儿园: 根据美国 ASHRAE 对教室的评估, 典型教室平均换气率估算为 2.5 次/小时。

$Ce_{\text{幼儿园}} = 1.0 / \sqrt{2.5} \approx 0.63$, 换算为风险放大倍数后标化为 1.8。

养老院: 1.5 次/小时(估计值)

$Ce_{\text{养老院}} = 1.0 / \sqrt{1.5} \approx 0.82$, 换算为风险放大倍数后标化为 2.2。

二、五种病原体风险指数详细计算

我们应用上述通用系数, 分别计算五种常见呼吸道病原体在两类场所的 CRI。

1. 新型冠状病毒(SARS-CoV-2, 奥密克戎变体)

① 基础参数与数据来源:

R_0 : 8.2 (以奥密克戎 BA.1/BA.2 变体为代表)

$Cp_{\text{幼儿园}}$: 儿童有效免疫保护率估计值根据研究数据为 30%, 则 $Cp = 1 - 0.3 = 0.7$ 。

$Cp_{\text{养老院}}$: 老年人有效免疫保护率根据研究数据估计值为 20%, 则 $Cp = 1 - 0.2 = 0.8$ 。

② 风险指数计算:

幼儿园: $CRI = 8.2 \times 3.5 \times 1.8 \times 0.7 \approx 36.2$

养老院: $CRI = 8.2 \times 2.0 \times 2.2 \times 0.8 \approx 28.9$

2. 肺炎链球菌(S. pneumoniae)

① 基础参数与数据来源:

R_0 : 2.5 (来源: WAGENVOORT G H J, SANDERS E A M, VLAHOVIĆ D, 等. Serotype-specific effectivity of pneumococcal conjugate vaccines: conclusions from the indirect cohort method[J]. Epidemiology & Infection, 2014, 142(11): 2441-2452.)。

$Cp_{\text{幼儿园}}$: PCV 疫苗等提供的有效保护率根据研究数据估计值为 40%, 则 $Cp = 0.6$ 。

$Cp_{\text{养老院}}$: 老年人有效保护率根据研究数据估计值为 10%, 则 $Cp = 0.9$ 。

② 风险指数计算:

幼儿园: $CRI = 2.5 \times 3.5 \times 1.8 \times 0.6 = 9.5$

养老院: $CRI = 2.5 \times 2.0 \times 2.2 \times 0.9 = 9.9$

3. 流感病毒(季节性流感)

① 基础参数与数据来源:

R_0 : 1.8 (来源: 世界卫生组织(WHO)对典型季节性流感毒株的长期估计)

$Cp_{\text{幼儿园}}$: 综合接种率与效力, 有效保护率估计值为 35%, 则 $Cp = 0.65$ 。

$Cp_{\text{养老院}}$: 考虑“免疫衰老”, 有效保护率估计值为 25%, 则 $Cp = 0.75$ 。

② 风险指数计算:

幼儿园: $CRI = 1.8 \times 3.5 \times 1.8 \times 0.65 \approx 7.4$

养老院: $CRI = 1.8 \times 2.0 \times 2.2 \times 0.75 = 5.9$

4. 呼吸道合胞病毒(RSV)

① 基础参数与数据来源:

R_0 : 4.5 (来源:《呼吸道合胞病毒感染防治医防协同专家共识》)

$Cp_{\text{幼儿园与养老院}}$: 目前人群普遍缺乏有效疫苗保护, 既往感染免疫力不完全, 均视为高度易感, 取 $Cp = 0.95$ 。

② 风险指数计算:

幼儿园: $CRI = 4.5 \times 3.5 \times 1.8 \times 0.95 \approx 26.9$

养老院: $CRI = 4.5 \times 2.0 \times 2.2 \times 0.95 \approx 18.8$

5. 人类偏肺病毒(hMPV)

① 基础参数与数据来源:

R_0 : 3.7 (来源:《人偏肺病毒感染诊断治疗和预防指南解读总结 2026》)

C_p 幼儿园与养老院:无疫苗且免疫力短暂, 取 $C_p = 0.95$ 。

②风险指数计算:

幼儿园: $CRI = 3.7 \times 3.5 \times 1.8 \times 0.95 = 22.2$

养老院: $CRI = 3.7 \times 2.0 \times 2.2 \times 0.95 = 15.54$

三、结论

对比基准值 $CRI=1$, 养老院与幼儿园 CRI 远超基准值, 为高风险场所。

幼儿园就是病毒的“超级传播放大器”。小朋友日常扎堆互动, 接触系数高达 3.5, 不管什么病毒来这儿都能被强力放大, 尤其是新冠、RSV、hMPV 这类传播能手, 风险指数 CRI 全超 15, 一旦漏检让病毒闯进来, 很快就会扎堆暴发, 还会顺着孩子的足迹扩散到千家万户, 变成社区疫情的“导火索”。

养老院则是风险的“重症升级转换器”, 这里老人们接触系数为 2.0, 但环境适配性差、免疫防线本就薄弱, 再叠加环境系数 2.2, 哪怕是中等风险病毒, 也能被转化成群体性重症甚至死亡的危机, 风险一触即发。

这两个场景一边是“传得快”, 一边是“伤得重”, 正是我们便捷检测技术最该守住的关键关口, 因此我们团队将养老院与幼儿园作为关键口岸。