· 专题报道——传染病监测 ·

2020—2023 年宁波市水痘暴发疫情及其传播力分析

石泽峰[1]，张丹丹[2]，张琰[2]，赵薛飞[2]，王珊珊[3]，潘兴强[1,2]

1. 宁波大学医学部公共卫生学院，宁波 315211；
2. 宁波市疾病预防控制中心，宁波 315010；
3. 宁波大学附属第一医院，宁波 315000
通信作者：王珊珊，E-mail：787132948@qq.com；潘兴强，E-mail：pank1980@163.com

【摘　要】目的　分析 2020—2023 年浙江省宁波市水痘的传播力，为后续建立群体免疫屏障、制定水痘疫苗接种目标提供参考依据。**方法**　回顾性分析 2020—2023 年宁波市发生的符合研究要求的水痘暴发疫情案例。基于宁波市的多起暴发疫情，使用数据计算或曲线拟合等方法提供模型需要的参数。计算出罹患率、潜伏期（*Te*）、代际间隔（*Tg*）、基本再生数（R_0）、时变再生数（R_t）等重要流行参数。**结果**　2020—2023 年，宁波市每年水痘罹患率呈波浪上升趋势，共报告 17 起水痘公共卫生突发事件，均为校园暴发疫情。疫情主要发生在当年 10 月—次年 1 月，发病具有季节性。暴露人口 43 503 人，报告病例 414 例，总罹患率为 0.952%。水痘发病平均潜伏期中位数为 12.39（95%*CI*=11.83 ~ 12.94）d，平均代际间隔为 14.05（95%*CI*=12.75 ~ 15.35）d。R_0 值为 3.74±0.73，R_t 变化趋势提示宁波市水痘疫情传播基本在第 30 d 左右时出现消亡趋势。**结论**　宁波市水痘疫情的防控措施是有效的，疫情总体走向消亡，控制成效在第 3 代病例凸显。应强化防控，进一步建立群体免疫屏障，以降低流行高峰、缩短流行时间。

【关键词】 水痘；动力学模型；基本再生数 R_0；时变再生数 R_t；流行病学参数；宁波市

Varicella outbreak epidemics and their transmissibility in Ningbo city from 2020 to 2023: a retrospective study

SHI Zefeng[1], ZHANG Dandan[2], ZHANG Yan[2], ZHAO Xuefei[2], WANG Shanshan[3], PAN Xingqiang[1,2]
(*1. School of Public Health*, *Health Science Center*, *Ningbo University*, *Ningbo* 315211, *China*; *2. Ningbo Municipal Center for Disease Control and Prevention*, *Ningbo* 315010, *China*; *3. The First Affiliated Hospital of Ningbo University*, *Ningbo* 315000, *China*)
Corresponding authors: WANG Shanshan, E-mail: 787132948@qq.com; PAN Xingqiang, E-mail: pank1980@163.com

【Abstract】 Objective To analyze the transmissibility of varicella in Ningbo city from 2020 to 2023 and provide a reference for establishing herd immunity targets for varicella vaccination. **Methods** A retrospective analysis of varicella outbreak cases in Ningbo city from 2020 to 2023 that met the research criteria was conducted. Based on multiple outbreaks in Ningbo city, parameters required for the model were provided using data calculation or curve fitting methods. Important epidemic parameters such as attack rate, incubation period (*Te*), serial interval (*Tg*), basic reproduction number (R_0), and time-varying reproduction number (R_t) were calculated. **Results** From 2020 to 2023, the annual varicella attack rate in Ningbo city showed a wave-like upward trend, with a total of 17 reported public health emergencies of varicella, all of which were school outbreaks. The outbreaks mainly occurred from October to January of the following year, exhibiting seasonality. The exposed population was 43 503, with 414 reported cases, resulting in a total attack rate of 0.952%. The median incubation period of varicella was 12.39 (95%*CI*: 11.83 - 12.94) days, and the average serial interval was 14.05 (95%*CI*: 12.75 - 15.35) days. The R_0 value was 3.74 ± 0.73, and the changing trend of R_t indicated that the spread of varicella in Ningbo city basically showed a trend of extinction around the 30th day. **Conclusions** The prevention and control measures for varicella outbreaks in Ningbo city are effective, with the overall epidemic trending towards extinction, and the control effect becoming prominent in the third generation of cases. Prevention and control should be strengthened to further establish herd immunity to reduce the peak of the epidemic and shorten its duration.

【 Keywords】 varicella; dynamic model; basic reproduction number R_0; time-varying reproduction number R_t; epidemiological parameters; Ningbo city

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1146704
基金项目：浙江省医药卫生科技计划（2023KY1130）；宁波市科技计划项目（2023S042）；宁波市医疗卫生高端团队重大攻坚项目（2023020713）；浙江省基础公益研究计划项目（LGF21C010001）
第一作者：石泽峰（1999—），硕士在读，研究方向：流行病与卫生统计学。
收稿日期：2024-12-18　修回日期：2025-03-04　录用日期：2025-05-16
利益冲突：不存在　伦理审查：已获取　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

水痘(varicella)是由水痘—带状疱疹病毒(varicella zoster-virus, VZV)感染引起的一种急性呼吸道传染病，主要通过呼吸道飞沫传播或直接接触传播，传染性强，易引起暴发流行[1]，是引起学校等集体单位突发公共卫生事件的最主要传染病之一，且其导致的社会经济负担较重[2−3]。不同地区的气候、人口密度、行为习惯、社会经济状况等对水痘传播力影响较大[4−5]，因此水痘传播具有时空异质性的特征。人类是水痘带状疱疹病毒的唯一宿主，具有高度特异性。因此基于动力学模型的发展预测、措施评估和溯源已成为流行病学调查的重要方法[6−7]。基本再生数(basic reproduction number, R_0)为在无干预情况下，完全易感人群中典型原发病例引起的继发感染病例数量，通常记作 R_0[8]，是衡量传染病传播力的一个重要指标；了解 R_0 可以为构建水痘传播动力学模型提供本地参数，为建立群体免疫屏障制定接种率目标提供依据。本研究以 2020—2023 年宁波市的水痘病例数据为研究对象，估算基本再生数，并进一步计算时变再生数，以期为评估宁波市水痘的传播力提供新的证据。

1 资料与方法

1.1 资料来源 通过中国疾病预防控制信息系统，按照发病时间收集 2020—2023 年宁波市水痘病例数据，包括患者的年龄、性别、现住址等基本信息，以及水痘发病信息等。

1.2 方法 结合水痘的发病进程，采用基于易感人群、潜伏人群、感染人群、恢复人群(SEIR 模型)计算水痘传染病动力学相关参数，以评估宁波市水痘的传播力。选取具有清晰传播链的疫情计算基本再生数。基本再生数计算公式参照文献所述[9−10]：

$$R_0 = 1+rTg+\rho(1-\rho)(rTg)^2$$

其中，ρ 为潜伏期与代际间隔之比，记 $\rho=Te/Tg$，为潜伏期(incubation period, Te)占代际间隔(generation interval, Tg)的比例[10]。r 为早期指数增长时的增长率，计算公式：

$$r=\ln Y(t)/t$$

其中，$Y(t)$是截止到 t 时刻的感染人数。

选取有明确的一次性单源暴露病例的疫情，计算 Te 和 Tg 的值。Tg 通过传播链中的连续病例发病日期之间的间隔时间估算。Te 按文献[11]的方法，以观测确定每个病例最早和最晚的暴露时间到出现症状的时间间隔估计。本研究 Te 的估计区间为：[二代病例发病日期−(一代病例发病日期+恢复期时间)，二代病例发病日期−(一代病例发病日期−前驱期时间)]。

其中，前驱期通常为 1～2 d，此期间内病例已具有传染性[12]；为方便计算，本研究前驱期取 2 d、恢复期取 7 d[13]。时变再生数(time-varying reproduction number, R_t)依托病例的发病时间数据直接计算，旨在定量评估水痘在不同时间点的传播能力。

1.3 统计分析 使用 Python 语言和 Excel 办公软件收集、清理和分析数据。采用中位数(median，M)和四分位数间距(inter quartile range, IQR)描述水痘突发公共卫生事件(public health emergency events, PHEE)的持续时间、罹患率、病例数等指标；以 $\bar{x}\pm s$描述 R_0 值，以 P<0.05 为差异有统计学意义。使用 Python 语言中的 scipy.stats 库，用 Kolmogorov-Smirnov 检验，对 Te 和 Tg 的值进行 gamma 分布的拟合优度检验后，再使用 Python 语言中的 scipy.stats 库实现伽马曲线拟合，计算 Te 和 Tg 的平均值。使用 Python 语言中的 scipy.stats 库，采用 Shapiro-Wilk 检验，对 R_0 值数据进行正态检验。使用 matplotlib.pyplot 库绘制时变再生数变化趋势图。

2 结 果

2.1 水痘暴发疫情基本情况(表 1) 2020—2023 年，宁波市共 10 个区县市，发生 17 起水痘暴发疫情，均发生于学校，确诊病例共 414 例，其中有 408 名学生和 6 名教师，暴露 43 503 人，总罹患率 0.952%(414/43 503)。无死亡病例报告，每起疫情病例均超过 10 例。

表 1 2020—2023 年宁波市水痘流行状况
Table 1 Varicella incidence in Ningbo city from 2020 to 2023

年份	疫情数/起	病例数/例	波及或暴露数/人	总罹患率/%	每起罹患率[M(IQR)]/%	持续时间[M(IQR)] /d	每起病例数[M(IQR)]/例
2020	5	192	21 417	0.896	0.962(0.843，2.043)	49.0(45.0，69.0)	32.0(29.0，35.0)
2021	6	101	9 420	1.072	1.214(0.731，1.762)	28.5(24.5，38.5)	16.5(13.3，20.5)
2022	4	82	9 188	0.892	0.867(0.681，1.091)	27.5(17.5，34.3)	20.0(16.0，24.5)
2023	2	39	3 478	1.121	1.226(0.931，1.521)	40.0(28.5，51.5)	19.5(16.3，22.8)
合计	17	414	43 503	0.952	0.962(0.686，1.810)	35.0(24.0，49.0)	21.0(16.0，26.0)

2.2 流行特征

2.2.1 地区分布(表 2)　2020—2023 年共暴发 17 起水痘疫情，其中城市 6 起(35.3%)、总罹患率 0.832%(177/21 274)，城乡接合部 11 起(64.7%)、总罹患率 1.066%(237/22 229)高于城市地区，农村地区未发生水痘疫情。

表 2　2020—2023 宁波市水痘发病地区分布

Table 2　Distribution of varicella cases in Ningbo city in urban and urban-rural fringe area from 2020 to 2023

地区	疫情数/起	病例数/例	波及或暴露数/人	总罹患率/%	每起罹患率 [*M*(*IQR*)] /%
城市	6	177	21 274	0.832	1.142(0.605，1.815)
城乡接合部	11	237	22 229	1.066	0.962(0.757，1.514)
合计	17	414	43 503	0.952	0.962(0.686，1.810)

2.2.2 季节分布(图 1)　17 起水痘疫情中，16 起暴发于秋冬季节，主要集中于 10 月到次年 1 月；仅有 1 起暴发于春季的 4 月份，疫情暴发具有明显的季节性的特征。

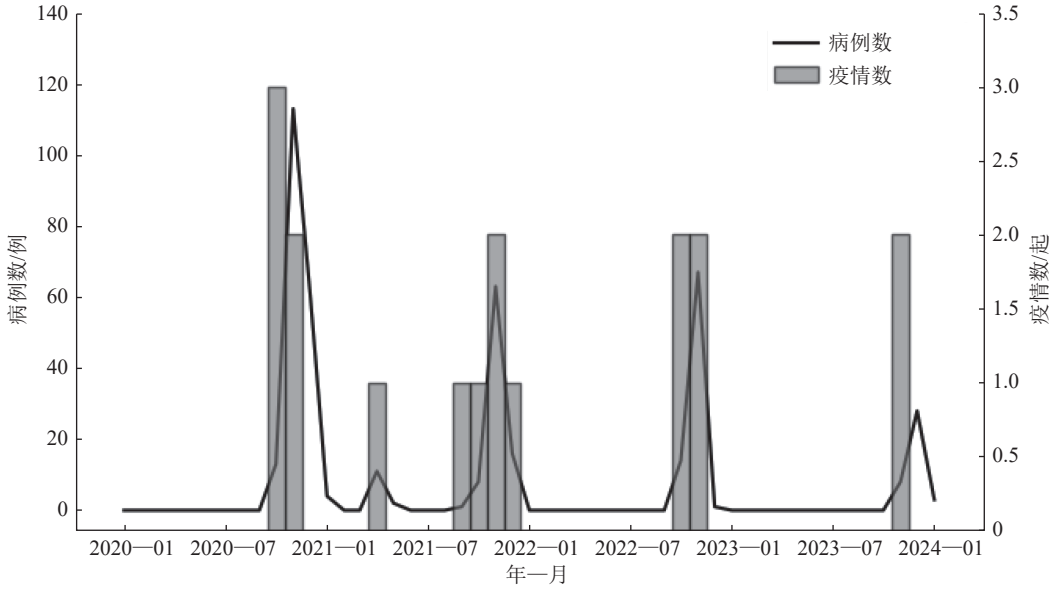


图 1　宁波市水痘病例报告时间分布

Fig. 1　Distribution of varicella case reporting time in Ningbo city

2.3 关键参数计算

2.3.1 潜伏期(*Te*)和病例代际间隔时间(*Tg*)　17 起暴发疫情中，78 例为一次性单源暴露病例，涉及其中 8 起疫情。计算的平均潜伏期中位数为 12.39(95%*CI*=11.83～12.94)d，分布的拟合优度检验差异无统计学意义(*D*=0.152，*P*>0.05)，*Te* 时长数据符合 gamma 分布。水痘发病日期有明显的代际间隔，17 起疫情排除其中一起只发生一代代际传播外，平均代际间隔为 14.05(95%*CI*=12.75～15.35)d，分布的拟合优度检验差异无统计学意义(*D*=0.146，*P*>0.05)，*Tg* 数据符合 gamma 分布。

2.3.2 基本再生数(R_0)(表 3)　通过计算得出 ρ=0.882，各起疫情的基本再生数差异无统计学意义(w=0.826，*P*>0.05)。R_0 值分布符合正态分布，宁波市水痘感染 R_0 为 3.74±0.73。

表 3　基本再生数相关参数计算结果

Table 3　Calculation results of parameters related to the basic reproduction number

年份	疫情	r	R_0
2020	宁海县	0.150	3.570
	北仑区	0.171	4.004
2021	慈溪市	0.174	4.067
	镇海区	0.071	2.101
	北仑区	0.196	4.544
2022	奉化区	0.179	4.174
2023	宁海县	0.157	3.173

2.3.3 时变再生数(R_t)(图 2)　时变再生数变化趋势显示宁海县 2 起疫情分别在第 34 d 和第 39 d 时 R_t<1；镇海区的一起疫情不断反复，最终在第

50 d 时 R_t<1；慈溪市的一起疫情截止到 24 d 时 R_t 停止发生变化；北仑地区 2 起疫情分别在第 29 d 和 31 d 时 R_t<1；而奉化地区的一起疫情则是在第 31 d 时 R_t<1。

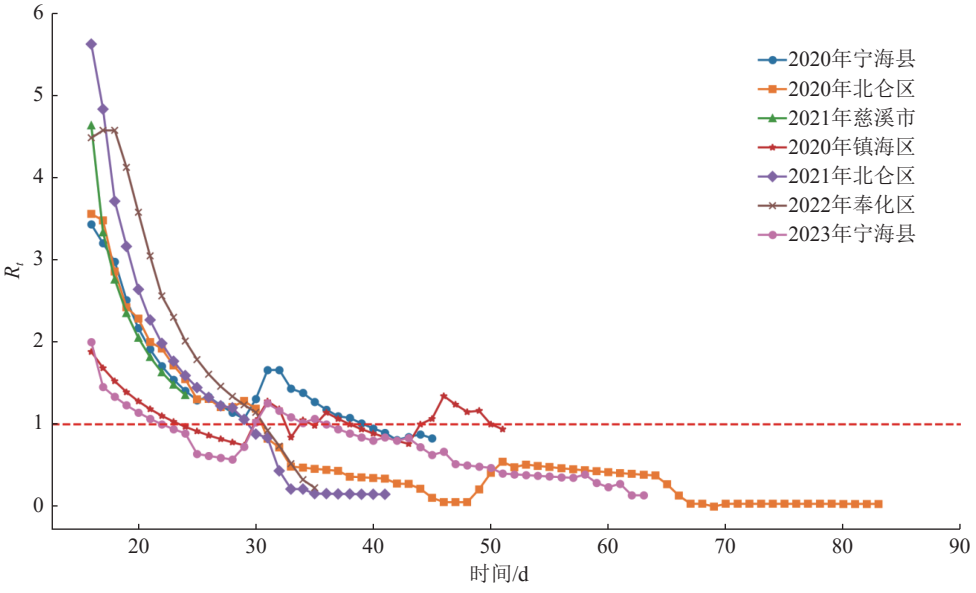


图 2　时变再生数变化趋势

Fig. 2　Trend of time-varying reproduction number

3 讨　论

2020—2023 年宁波市的多起水痘暴发疫情分析显示，发病地点和发病人群主要为学校与学生。根据《国家突发公共卫生事件应急预案》和《国家突发公共卫生事件相关信息报告管理工作规范（试行）》相关规定，水痘突发公共卫生事件判断标准为在同一学校、幼儿园等集体单位中发生 10 例及以上临床诊断或确诊水痘病例，所以以上暴发疫情均可被认定为水痘突发公共卫生事件[14]。分析表明，2020—2023 年宁波市水痘暴发疫情主要集中在人口相对密集的城市和城乡接合部，而农村地区未发生一起水痘疫情，所波及或暴露人数则显示城市与城乡接合部地区基本持平；发病主要集中在当年 10 月至次年 1 月，具有明显的季节性的特征，发病时间与既往报道一致[15-16]，区别此次分析结果 4—6 月发病较少。

本研究计算宁波市水痘总罹患率（0.952%，414/43 503）低于王淼[14]等报道的华东地区水痘总罹患率（1.83%）；逐年的罹患率变化显示，虽然 2020—2023 年波及规模逐渐缩小，但每年罹患率呈波浪上升的趋势。平均潜伏期中位数为 12.39（95%*CI*=11.83～12.94）d，处于国家卫生健康委发布的《水痘诊疗方案（2023 年版）》中 10～21 d 的水痘潜伏期区间内[12]。观察发病日期发现有明显的代际间隔 14.05（95%*CI*=12.75～15.35）d，与既往研究报道的水痘 14 d 左右代际间隔时间结果接近[17]。在不同地区，水痘的 R_0 值不同。既往文献显示，欧洲国家水痘疫情的 R_0 值在 2.75～7.6，其中英格兰和威尔士最低（2.75）、荷兰最高（7.6）[18]；而亚太地区水痘的 R_0 值存在着差异，如韩国为 5.67（95%*CI*=5.33，6.33）[19]，中国江苏省则为（1.831±0.078）[20]，深圳不同年龄组 R_0 值分别为 0～3 岁 2.46、4～6 岁 6.47、7～12 岁 8.09、13～15 岁 6.60[21]。本研究宁波市的基本再生数（R_0=3.74±0.73）与上述研究结果也有差异，可能与单起疫情中病例较少有关，且因本次研究收集数据的时间处于新冠疫情期间，宁波市采取了各种非药物干预措施，Xiao J P 等[22]的一项基于中国广东省人群的大型观察性研究发现，因新冠疫情防控采取的措施呼吸道传染病减少达 87.4%。本研究中宁波市的水痘 R_0 提示，宁波市水痘传播力较高，需要尽快制定进一步的群体免疫屏障策略，以降低水痘给个人和社会带来的直接和间接经济损失，提高人群生命质量。

随着时间的推移，政府、学校等组织采取干预措施之后，再生数会发生实时变化，表明该传染病在人群中的传播能力变化。此时需采取时变再生数 R_t 来描述传染病传播能力的动态变化，更符合实际状况[23]。本研究结果显示，宁海县的水痘消亡日期（R_t<1）明显滞后于北仑地区和奉化地区，其中宁海地区和镇海地区的两起疫情前期 R_t 值已降低至 1 以下时，疫情后期 R_t 值又上升至 1 以上，显示疫情发生了反扑现象，表明疫情控制不到位；慈溪市的一起疫情因为学校对班级采取了严格的隔离干预措施，使得时变再生数 R_t 停止变化。因时变再生数 R_t 的值总体均呈现逐渐减

小的趋势，且大多在第 30 d 左右时 R_t 值降低在 1 以下，说明疫情总体发展趋势均逐渐走向消亡；而基于平均代际间隔结果，可认为宁波市水痘暴发疫情的控制成效主要显现在第 3 代病例上，即从第 3 代病例开始，人群中水痘的传播得到有效控制，R_t 值小于 1，该起疫情将趋于结束。

综上，宁波市可从切断传染病传播的流行过程入手，应尽早发现传染源，尽快实施隔离和治疗病例，及时通风、消杀疫源地，切断传播途径；采取应急接种疫苗等措施保护易感人群。要尽可能在更早一代的传播病例上进行有效控制，降低流行高峰、缩短流行时间。

参考文献

[1] Heininger U, Seward J F. Varicella[J]. Lancet (London, England), 2006, 368(9544): 1365-1376.

[2] 鲁琴宝, 吴昊澄, 吴晨, 等. 2023 年浙江省突发公共卫生事件特征分析 [J]. 预防医学, 2024, 36(6): 487-490.

[3] 翁熹君, 王锐, 王霄晔, 等. 2014—2016 年全国学校 (托幼机构) 传染性突发公共卫生事件流行特征分析 [J]. 疾病监测, 2019, 34(5): 446-450.

[4] Hervás D, Hervás-Masip J, Nicolau A, et al. Solar radiation and water vapor pressure to forecast chickenpox epidemics[J]. European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases, 2015, 34(3): 439-446.

[5] 冯黄, 于飞, 方海. 人口政策对传染病流行病学负担的影响探究——基于水痘动态传播模型 [J]. 人口与发展, 2023, 29(2): 73-80.

[6] 陈秋萍, 陈田木, 赵衡文. 长沙市某高校肺结核暴发疫情与防控效果评价 [J]. 中国学校卫生, 2012, 33(2): 172-173, 176.

[7] Tang S Y, Xiao Y N, Yang Y P, et al. Community-based measures for mitigating the 2009 H1N1 pandemic in China[J]. PLoS One, 2010, 5(6): e10911.

[8] Wallinga J, Lipsitch M. How generation intervals shape the relationship between growth rates and reproductive numbers[J]. Proceedings of the Royal Society B, 2007, 274(1609): 599-604.

[9] 张晓宝, 严丹莹, 陈灿, 等. 传染病流行病学中基本再生数与有效再生数指标的研究进展 [J]. 中华疾病控制杂志, 2021, 25(7): 753-757, 790.

[10] 周涛, 刘权辉, 杨紫陌, 等. 新型冠状病毒肺炎基本再生数的初步预测 [J]. 中国循证医学杂志, 2020, 20(3): 359-364.

[11] 宋倩倩, 赵涵, 方立群, 等. 新型冠状病毒肺炎的早期传染病流行病学参数估计研究 [J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(4): 461-465.

[12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会办公厅, 中华人民共和国国家中医药局综合司. 水痘诊疗方案 (2023 年版)[J]. 中国实用乡村医生杂志, 2024, 31(1): 4-7.

[13] Ohkusa Y, Taniguchi K, Okubo I. Prediction of smallpox outbreak and evaluation of control-measure policy in Japan, using a mathematical model[J]. Journal of Infection and Chemotherapy, 2005, 11(2): 71-80.

[14] 王淼, 曾祥, 张一平, 等. 中国 2007—2021 年水痘突发公共卫生事件流行病学特征 [J]. 中国疫苗和免疫, 2023, 29(3): 274-279.

[15] 潘兴强, 马瑞, 方挺, 等. 浙江省宁波市 2012—2016 年水痘流行病学分析 [J]. 中国疫苗和免疫, 2017, 23(3): 302-305.

[16] 潘兴强, 马瑞, 杨天池, 等. 应用 Python 编程语言构建宁波市水痘发病率预测的季节性 ARIMA 模型 [J]. 中国疫苗和免疫, 2022, 28(1): 83-87, 104.

[17] Vink M A, Bootsma M C J, Wallinga J. Serial intervals of respiratory infectious diseases: a systematic review and analysis[J]. American Journal of Epidemiology, 2014, 180(9): 865-875.

[18] Santermans E, Goeyvaerts N, Melegaro A, et al. The social contact hypothesis under the assumption of endemic equilibrium: elucidating the transmission potential of VZV in Europe[J]. Epidemics, 2015, 11: 14-23.

[19] Lee T, Suh J, Choi J K, et al. Estimating the basic reproductive number of varicella in the Republic of Korea incorporating social contact patterns and seroprevalence[J]. Human Vaccines and Immunotherapeutics, 2021, 17(8): 2488-2493.

[20] Sun X, Dai C X, Wang K, et al. A dynamic compartmental model to explore the optimal strategy of varicella vaccination: an epidemiological study in Jiangsu province, China[J]. Tropical Medicine and Infectious Disease, 2023, 8(1): 17.

[21] Tang X J, Zhao S, Chiu A P Y, et al. Modelling the transmission and control strategies of varicella among school children in Shenzhen, China[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177514.

[22] Xiao J P, Dai J Y, Hu J X, et al. Co-benefits of nonpharmaceutical intervention against COVID-19 on infectious diseases in China: a large population-based observational study[J]. The Lancet Regional Health-Western Pacific, 2021, 17: 100282.

[23] Wallinga J, Teunis P. Different epidemic curves for severe acute respiratory syndrome reveal similar impacts of control measures[J]. American Journal of Epidemiology, 2004, 160(6): 509-516.