专栏：气候变化与人群健康的机制研究
Special column: Mechanisms underlying human health effects of climate change

气温影响登革热传播的机制及未来气温变化对其传播风险的影响

赵建国[1,2]，何冠豪[1]，肖建鹏[1]，祝光湖[2]，刘涛[3]，胡建雄[1]，曾韦霖[1]，李杏[1]，任周鹏[4]，马文军[1,3]

1. 广东省疾病预防控制中心广东省公共卫生研究院，广东 广州 511430
2. 桂林电子科技大学数学与计算科学学院，广西 桂林 541004
3. 暨南大学基础医学与公共卫生学院，广东 广州 510632
4. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室，北京 100101

摘要：

[背景] 登革热是由伊蚊传播的急性蚊媒传染病，在全球气候变暖背景下，其流行趋势及防控形势愈加严峻，严重危害人群健康。

[目的] 以广州市作为研究点，建立人蚊耦合动力学模型，分析气温影响登革热传播的机制及预估未来不同气候变化情景下登革热的发病风险，为适应气候变化提供参考。

[方法] 收集广州市 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日登革热报告病例及气象数据，数据分别从广东省疾病预防控制中心和中国气象科学数据共享服务平台获得。2030s（2031—2040 年）、2060s（2061—2070 年）、2090s（2091—2099 年）三个年代三种代表性浓度路径（RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5）情景下所对应的气温数据通过第五次耦合模式比较计划（CMIP5）提供的 5 个大气环流模式（GCMs）计算得到。通过构建登革热传播动力学（ELPSEI-SEIR）模型分别拟合 2015—2019 年登革热疫情趋势获得模型参数，分析气温影响登革热传播的机制，然后将 2030s、2060s 及 2090s 不同 RCP 情景下所对应的日平均气温纳入到已建立的动力学模型，预估未来不同气候变化情景下登革热的发病风险。

[结果] 2015—2019 年广州市共报告登革热 4 234 例，呈逐年上升趋势，其中本地和输入病例分别 3 741 例、493 例。回归结果显示，模型较好地拟合了广州市 2015—2019 年登革热疫情，拟合优度决定系数 R^2 和均方根误差分别是 0.82 和 1.96。气温与蚊媒习性间的“U”型或“倒 U”型关系，可以直接影响蚊媒的数量，从而影响登革热的传播。结合未来不同气候变化情景的气温预估数据，发现大部分情景下气温升高均促进登革热传播，且流行期明显宽于基线阶段。具体来说，在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下，登革热疫情在 2060s 达到高峰；在 RCP8.5 情景下，预估 2030s 发病数最高但随后呈下降趋势，到 2090s 明显降低，但每年发病高峰时间明显提前，集中在 5—7 月。

[结论] 气温通过影响蚊媒的习性而影响蚊媒的数量和登革热的传播，未来大部分气候变化情景下登革热疫情呈上升趋势，但 RCP8.5 情景下，登革热的流行风险可能受到抑制，但流行季节可能提前。

关键词：登革热；动力学模型；气候变化；温度

Mechanism of temperature on dengue fever transmission and impact of future temperature change on its transmission risk

ZHAO Jianguo[1,2], HE Guanhao[1], XIAO Jianpeng[1], ZHU Guanghu[2], LIU Tao[3], HU Jianxiong[1], ZENG Weilin[1], LI Xing[1], REN Zhoupeng[4], MA Wenjun[1,3] (1. Guangdong Provincial Institute of Public Health, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, Guangdong 511430, China; 2. School of Mathematics and Computing Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. School of Medicine, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China; 4. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

Abstract:

[Background] Dengue fever is a mosquito-borne disease transmitted by Aedes aegypti and Aedes albopictus. Under the background of climate change, there are great challenges in the prevention and control of dengue fever, posing a serious health risk to the population.

CC BY NC ND

DOI 10.11836/JEOM21457

组稿专家
马文军（暨南大学基础医学与公共卫生学院），E-mail：mawj@gdiph.org.cn

基金项目
国家重点研发计划项目（2018YFA0606200）；国家自然科学基金（81773497，42071377）

作者简介
赵建国（1995—），男，硕士生；
E-mail：Zhao_jg95@163.com

通信作者
马文军，E-mail：mawj@gdiph.org.cn

伦理审批 已获取
利益冲突 无申报
收稿日期 2021-09-26
录用日期 2022-01-12

文章编号 2095-9982(2022)03-0309-06
中图分类号 R12
文献标志码 A

补充材料
www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21457

▸引用
赵建国，何冠豪，肖建鹏，等. 气温影响登革热传播的机制及未来气温变化对其传播风险的影响 [J]. 环境与职业医学，2022，39（3）：309-314.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21457

Funding
This study was funded.

Correspondence to
MA Wenjun, E-mail: mawj@gdiph.org.cn

Ethics approval Obtained
Competing interests None declared
Received 2021-09-26
Accepted 2022-01-12

Supplemental material
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21457

▸ **To cite**
ZHAO Jianguo, HE Guanhao, XIAO Jianpeng, et al. Mechanism of temperature on dengue fever transmission and impact of future temperature change on its transmission risk[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(3): 309-314.

▸ **Link to this article**
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21457

[Objective] To analyze the mechanism of temperature on dengue fever transmission and estimate the risk of dengue fever under different climate change scenarios by establishing a coupled human-mosquito dynamics model using Guangzhou as a research site, and to provide reference for adaptation to climate change.

[Methods] Reported dengue fever cases and meteorological data from January 1, 2015 to December 31, 2019 in Guangzhou were collected from Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention and China Meteorological Data Service Centre, respectively. The temperature data under three Representative Concentration Pahtyway (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) scenarios in 2030s (2031–2040), 2060s (2061–2070), and 2090s (2091–2099) were calculated by five general circulation models (GCMs) provided by the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project. A dengue fever transmission dynamics (ELPSEI-SEIR) model was constructed to analyze the mechanism of temperature affecting dengue fever transmission by fitting the dengue fever epidemic trend from 2015–2019, and then the daily mean temperature under selected RCP scenarios for 2030s, 2060s, and 2090s was incorporated into the established dynamics model to predict the risk of dengue fever under different climate change scenarios in the future.

[Results] From January 1, 2015 to December 31, 2019, a total of 4 234 cases of dengue fever were reported in Guangzhou, including 3 741 local cases and 493 imported cases. The regression results showed that the model well fitted the dengue fever cases in Guangzhou from 2015 to 2019, and the coefficient of determination R2 to evaluate goodness of fit and the root mean squared error were 0.82 and 1.96, respectively. A U-shaped or inverted U-shaped relationship between temperature and mosquito habits could directly affect the number of mosquitoes and the transmission of dengue fever. We also found that temperature increase in most future scenarios could promote the transmission of dengue fever, and the epidemic period was significantly wider than the baseline stage. The epidemic of dengue fever would peak in the 2060s under the scenarios of RCP2.6 and RCP4.5. The estimated incidence of dengue fever was predicated to be highest in the 2030s and then decrease in the following years under RCP8.5, and in the 2090s, the incidence would decrease significantly, but the incidence peak would be earlier in each year, mainly from May to July.

[Conclusion] Temperature can directly affect mosquito population and dengue fever transmission by affecting mosquito habits. The cases of dengue fever will increase under most climate scenarios in the future. However, the epidemic risk of dengue fever may be suppressed, and the epidemic season may be advanced under RCP8.5.

Keywords: dengue fever; dynamics model; climate change; temperature

登革热(Dengue fever)是由白纹伊蚊(*Aedes albopictus*)和埃及伊蚊(*Aedes aegypti*)传播的一类急性虫媒传染病[1]。过去 50 年,全球登革热疫情愈加严峻,许多国家面临登革热流行的风险[2]。登革热通过人、伊蚊以及登革病毒之间的相互作用而传播,同时受到气象、人口流动、环境等多种因素的影响[3–6]。已有研究表明,气温是影响登革热传播的最重要因素,气温可影响伊蚊幼虫的发育速率、成蚊叮咬率和死亡率等,从而影响登革热的发生[7–8]。以往研究多侧重研究气温对蚊媒习性以及蚊媒种群的影响[9–12],较少研究基于动力学模型分析气温对登革热传播影响的机制,也缺乏未来气候变化情景下气温对登革热传播风险影响的研究[13–14]。

广州市作为我国重要的中心城市,国内外交流和人口流动频繁,属于亚热带季风气候,炎热多雨,是登革热流行区。2014 年我国登革热流行规模达到 1986 年以来的新高,其中广州市病例占大多数[15];2015—2019 年广州市登革热病例数较 2014 年有明显减少,但仍有逐年升高趋势[16]。本研究以 2015—2019 年广州市登革热为基线,构建登革热人蚊耦合动力学模型,探讨气温影响登革热传播的机制及预估未来气候变化下登革热发病风险,为防控登革热提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 登革热数据 2015—2019 年广州市登革热病例数据从广东省疾病预防控制中心收集,数据包括病例性别、年龄、职业、发病日期、来源等详细信息,其中本地病例指发病前 14 d 内未离开本县区(现住址)的登革热病例;输入病例分为境外输入病例和境内输入病例,境外输入病例指发病前 14 d 内到过境外登革热流行的国家或地区且有蚊虫叮咬史的病例,境内输入病例是指境内发病前 14 d 内到过本县区(现住址)外的登革热流行地区且有蚊虫叮咬史的病例。本研究已经通过广东省疾病预防控制中心伦理委员会的审查评估,伦理审批号为 2019025。

1.1.2 气象数据 全国 698 个气象站点 2015—2019 年所对应的日均气温数据获取于中国气象科学数据共享服务平台。为了获取更为精确的气温数据,利用 Anusplin 空间插值的方法对气温数据进行插值,形成 1 km×1 km 的日均气温栅格数据,同时采用十折交叉验证的方法对其准确度进行验证,结果显示日均气温的决定系数为 0.96。然后从插值后的栅格数据中提取广州市的气温数据。

1.1.3 未来气温预测数据 未来气象预估数据通过第五次耦合模式比较计划(The fifth phase of the Coupled

Model Intercomparison Project, CMIP5)提供的 5 个大气环流模式(general circulation models, GCMs)计算得到[17]。本研究提取广州市 2030s(2031—2040 年)、2060s(2061—2070 年)、2090s(2091—2099 年；2090s 的未来数据缺少 2100 年的数据，因此为 2091—2099 年)三种代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)——RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 依次作为低、中、高温室气体排放量情景下的日平均气温进行分析。其中：RCP2.6 表示全球年均温室气体排放在 21 世纪中期达到顶峰之后大幅下降的情景；RCP4.5 为稳定的场景，其假设温室气体的排放随着科技进步发展及政策措施推广而有所减少；RCP8.5 代表在整个 21 世纪温室气体排放量不断增加的情景[17]。

1.2 动力学模型

1.2.1 基本模型 Kermack 与 McKendrick 提出的 SEIR 模型是最经典、最基本的动力学模型，刻画了疾病在人群中的传播机制[18]。本研究根据登革热人蚊耦合的传播机制，同时基于 SEIR 模型以及其他研究所建立的登革热模型进行扩展[5, 10]，建立了登革热传播(ELPSEI-SEIR)模型，该模型包括两个部分：蚊媒动力学和人群动力学。蚊媒动力学可描述为伊蚊生存发育过程经历卵期、幼虫期、蛹期，再经历羽化变成成年伊蚊，易感成年伊蚊叮咬登革热患者后以一定的概率转化为潜伏类，再经过一段潜伏期，以一定的概率转化为感染类。人群动力学可描述为易感人群被感染伊蚊叮咬以一定的概率进入潜伏期，再经过一段潜伏期，以一定的概率转化为感染者，经过治疗变成恢复者，登革热人蚊耦合传播动力学流程图见补充材料图 S1，相应构建的微分方程见补充材料图 S2。

1.2.2 模型参数及评价 模型所涉及的已知参数均来自于参考文献，其中多数参数是气温的表达式，对于未知参数采用马尔科夫链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)算法进行估计，对不同参数组合模拟 5 万次，退火算法 2 万次。由于产卵率为实验室蚊媒全供血时所获得的参数，通过引入与人口密度相关的参数来刻画蚊媒在野外获取血液的影响[12]。由于登革热在广州市未形成地方性流行，主要通过输入病例引起本地暴发为主，因此模型中加入输入系数 *imp* 来体现这一影响。其他参数及初始值含义来源于文献及统计年鉴[7, 9, 11–13, 19–24]，具体见补充材料表 S1。采用拟合优度确定系数 R^2 以及均方根误差(root mean squared error, *RMSE*)，同时结合实际每日病例数与模拟病例数间的趋势对模型进行评价。已建立的动力学模型刻画了登革热在人与蚊之间传播的动力学过程，由于伊蚊易受环境温度影响，因此将气温纳入模型可研究气温变化对登革热传播影响的机制。

1.3 未来不同气候变化情景下登革热发病数预估

将 2030s、2060s 及 2090s 三个年代三种不同 RCP 情景下所对应的日平均气温代入蚊媒习性参数表达式(补充材料表 S1)，获取在相应温度下的蚊媒习性参数值以及感染概率，并将 2015—2019 年模拟参数的均值作为预估模型的定值参数，最后将所有的参数值纳入所建立的动力学模型分析未来不同气候变化情景下登革热的发病情况。考虑到初始值的影响，均采用基线年份年末模拟的值作为模型未来预估的初值。为了便于观察趋势，利用滑动平均法对模型结果进行处理。

1.4 统计学分析

采用 R 4.0.3 统计软件，并基于“deSolve”和“FME”包进行分析和建模。

2 结果

2.1 数据概况

2015—2019 年，广州市共报告登革热 4 234 例，年均发病率为 5.53/10 万，呈逐年上升趋势，其中包括本地病例 3 741 例(88.4%)，输入病例 493 例(11.6%)，见表 1。登革热病例数具有明显的季节性趋势，主要集中在 7—12 月，流行高峰为 8—11 月。

表 1 2015—2019 年广州市登革热报告病例及年均温度

Table 1 Dengue fever cases and average temperature in Guangzhou from 2015–2019

年份 Year	总病例 Total cases	本地病例 Local cases	输入病例 Imported cases	年均温度/°C Mean temperature/°C
2015	101	60	41	22.33
2016	243	207	36	21.91
2017	941	876	65	22.14
2018	1 296	1 200	96	21.97
2019	1 653	1 398	255	22.49

2.2 模型拟合

基于 2015—2019 年广州本地报告病例，采用已建立的登革热传播动力学模型进行建模分析。以年为单位，利用 MCMC 依次估计每年所对应参数的后验分布(结果见补充材料表 S2)，并依次将每日实际报告病例与预测报告病例进行对比(见图 1)，模型的拟合优度 R^2 和 *RMSE* 分别为 0.82 和 1.96。

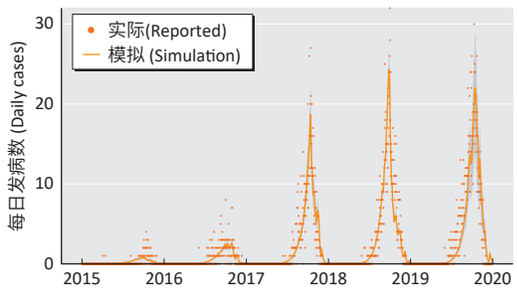

图 1 2015—2019 年广州市登革热模型拟合的病例数与实际报告病例数比较

Figure 1 Comparison of dengue fever case number from 2015 to 2019 fitted by model with the reported cases

2.3 气温影响登革热传播的机制

蚊媒的生态习性参数(补充材料表 S2)随气温变化明显，大多数蚊媒生活习性指标与气温呈“U”型或“倒 U”型关系(如图 2)。蚊媒的发育速率(包括孵化率、幼虫发育率及蛹发育率)和成蚊的产卵率、叮咬率在 20~30 ℃ 均随气温的上升而增加；蚊媒的死亡率(包括幼虫死亡率、蛹死亡率以及成蚊死亡率)在气温 20~30 ℃ 时保持在较低水平，但当气温≥30 ℃ 时明显增加。

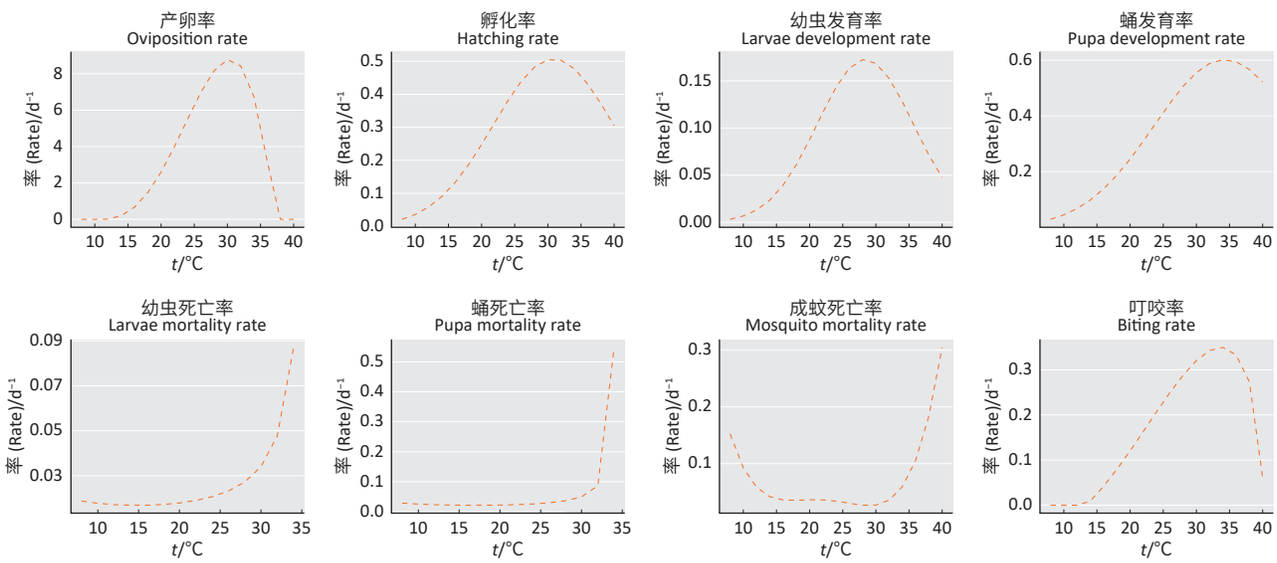

图 2 气温变化对蚊媒参数的影响

Figure 2 The effect of temperature change on mosquito vector parameters

根据模型产生结果显示，2015—2019 年蚊媒水生阶段和成蚊阶段的数量变化具有相似的特征，均呈先上升后下降的趋势(如图 3)。从趋势看，随着蚊媒数量的逐渐增加且达到一定储量时，登革热逐渐开始流行；随着气温降低、蚊媒数量的减少，登革热病例数也开始逐渐减少。

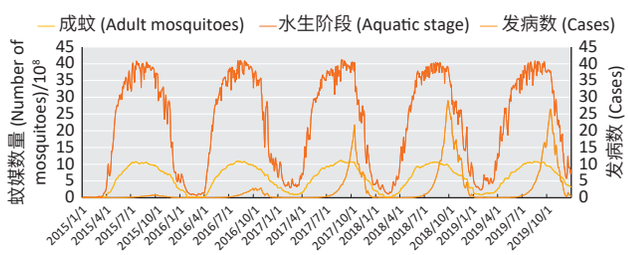

图 3 2015—2019 年广州市蚊媒参数与登革热发病数

Figure 3 Numbers of mosquitoes and dengue fever cases from 2015 to 2019

2.4 未来气候变化情景下登革热发病数预估

预估广州市未来不同 RCP 情景下气温呈上升趋势，大部分情景下登革热发病风险高于现阶段(2015—2019 年)，且流行期明显宽于现阶段(见图 4)。2030s 年代，RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 的平均气温相较于现阶段增幅依次为 1.13、1.63、1.59 ℃，RCP4.5 和 RCP8.5 所对应的登革热发病风险大致相同，但明显高于 RCP2.6 所对应的发病风险。2060s 年代，三种 RCP 场景下的平均气温较现阶段增幅依次为 1.52、2.22、3.09 ℃，RCP4.5 下的发病风险明显高于其他两种场景，但 RCP8.5 下的发病风险低于 RCP2.6。2090s 年代，三种 RCP 场景下的平均气温较现阶段增幅依次为 1.55、2.53、4.60 ℃，在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下预估发病风险基本一致，但 RCP8.5 情景下所对应的发病风险明显降低，呈双峰现象，发病高峰提前到 5—7 月。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下预估发病风险在 2060s 年代达到高峰，但在 RCP8.5 情景下 2030s 预估发病数最高，随后呈下降趋势。

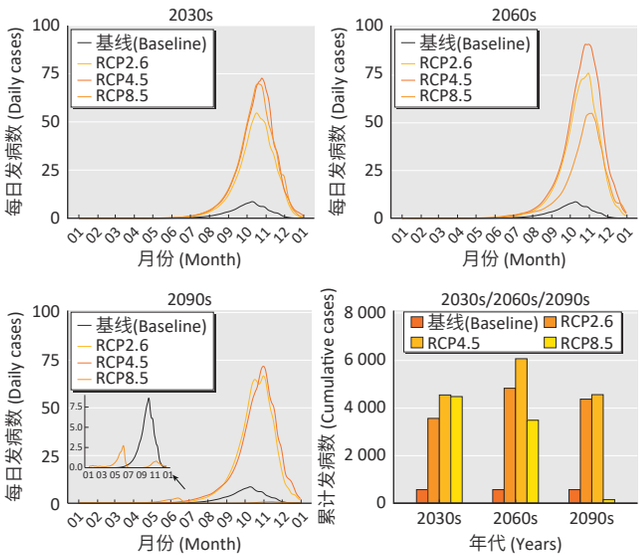

图 4 不同 RCP 场景下 2030s(2031—2040 年)、2060s(2061—2070 年)、2090s(2091—2099 年)登革热预估发病情况

Figure 4 Estimated incidences of dengue fever under selected RCP scenarios in the 2030s (2031-2040), 2060s (2061-2070), and 2090s (2091-2099)

3 讨论

全球气候变暖背景下，登革热流行趋势及防控形势愈加严峻，严重危害人群健康。目前已有大量关于温度与登革热发病关系的研究，但关注其内在的关联机制及未来登革热发病风险的研究不多。为此，本研究基于 2015—2019 年广州市登革热发病及气象数据，建立人蚊耦合的传播动力学模型，探究气温影响登革热传播的机制并预估未来不同气候变化情景下广州市登革热发病风险。

气温变化在多方面影响登革热的传播。首先，温度变化会改变伊蚊水生阶段的发育速率。当温度处于 15~35 °C 区间时，水生阶段的雌蚊死亡率处于较低水平，且转化速率较高[7]。同时，温度变化也会显著影响成年伊蚊的习性(如产卵率、死亡率等)。成年伊蚊最佳的生存温度为 15~30 °C，且温度处于 20~30 °C，其存活概率在 88%~93%，当温度降低为 15 °C 时，存活概率大大减少为 23.5%[7, 25]。温度变化也会影响病毒在人与蚊之间的传播速率。温度升高会加快登革热病毒在蚊子体内的复制速率，但极端高温也会限制病毒的传播[26]，实验数据显示温度与病毒的传染率呈“倒 U”型关系，当温度≤12.286 °C 或≥32.461 °C 时，其传染率显著降低[8, 23]。本研究结果表明，蚊媒的数量会随着温度的上升而逐渐增加，从而促进登革热的流行；然而随着温度的降低，蚊媒数量也随之减少，间接降低了登革热的发病数。多项研究表明温度与登革热发病间呈现非线性关系[27–28]，且当温度为 28 °C 时最适于登革热的传播，高于或低于此温度时均会降低登革热的发病率[14, 28]。

本研究结果显示，广州市未来不同时间段大部分气候变化情景下登革热发病风险增加，这与其他研究相类似[29–31]。但本研究结果也表明，气温持续增加可能会降低登革热在广州的流行风险。如在 RCP8.5 情景下，随着年代的增加登革热疫情呈下降趋势，而在其他两种情景下，登革热预估发病数均在 2060s 到达高峰。有研究显示气候变化会促进埃及伊蚊和白纹伊蚊在高纬度区域传播，且未来的登革热发病高峰发生在中等气候变化情景下(RCP4.5 和 RCP6.0)，但 RCP8.5 情景下一些热带地区变暖以至于不再适合伊蚊传播病毒[32]。近期一项研究表明，在未来 RCP8.5 的情景下，两种媒介的适应性在中国大多数地区将会逐渐增加，但在广东等部分省市呈下降趋势[33]，与本研究结果基本一致。

本研究结果显示，在 2090s 年代 RCP8.5 情景下，登革热流行期明显提前，可能是由于该情景下温度较其他情景下升高明显，提前达到蚊媒滋生的阈值导致登革热较早发生流行，但由于升高后的夏季温度超过蚊媒生存的阈值，导致蚊虫大量死亡以及吸血率下降而降低登革热在夏季的发病率。有研究表明，随着温度的上升，蚊虫在夏季的生长将会受到限制，即使较小程度的温度升高也会成倍提高蚊虫死亡率[21]。在其他年代不同 RCP 情景下，登革热的发病高峰期大致相同，但登革热流行期较现阶段有明显的扩大，可能由于在温度升高后更多的月份适宜登革热的传播，与欧洲多个国家在未来气温变化下传播流行期延长类似[30]。

同时，本研究存在一定的局限性：首先，已有研究发现降雨、相对湿度等其他气象因素以及卫生条件、绿地面积等因素对蚊媒的生存以及登革热的传播有一定的影响[34–35]，但在本研究中缺乏相关数据，无法耦合这些因素进行研究；其次，登革热的传播也易受短期天气波动的影响[36]，但在未来预估中未考虑到这些因素；第三，登革热会受人口密度和人口数量变动的影响，但本研究选取固定人数作为基线年份和未来预估的模拟，可能会在一定程度上低估登革热的发病风险；第四，大部分气候变化情景下未来气温变化虽然有利于登革热发病，但人类适应能力也会逐渐加强，这些也可能影响登革热的发病风险，但在模型中未考虑这些影响。

综上，本研究明确了气温可通过影响蚊媒习性从

而影响蚊媒数量和登革热的暴发流行；同时发现未来大部分气候变化情景下登革热疫情呈上升的趋势，但在 RCP8.5 情景下，登革热的流行风险可能受到抑制，但流行季节可能提前，此结果可为政府更好的应对未来登革热风险提供科学依据。

参考文献

[1] GUZMAN M G, HARRIS E. Dengue[J]. Lancet, 2015, 385(9966): 453-465.

[2] WHO. Dengue and severe dengue[EB/OL]. [2021-05-19]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue.

[3] NAISH S, DALE P, MACKENZIE J S, et al. Climate change and dengue: a critical and systematic review of quantitative modelling approaches[J]. BMC Infect Dis, 2014, 14: 167.

[4] SANG S, GU S, BI P, et al. Predicting unprecedented dengue outbreak using imported cases and climatic factors in Guangzhou, 2014[J]. PLoS Negl Trop Dis, 2015, 9(5): e0003808.

[5] ZHU G, LIU T, XIAO J, et al. Effects of human mobility, temperature and mosquito control on the spatiotemporal transmission of dengue[J]. Sci Total Environ, 2019, 651: 969-978.

[6] 赵建国, 贾巧娟, 王丽莹, 等. 气象因素对登革热传播影响的研究进展[J]. 现代预防医学, 2020, 47(22): 4185-4189.
ZHAO J G, JIA Q J, WANG L Y, et al. Research advances in the impacts of meteorological factors on dengue transmission[J]. Mod Prev Med, 2020, 47(22): 4185-4189.

[7] YANG H M, MACORIS M L G, GALVANI K C, et al. Assessing the effects of temperature on dengue transmission[J]. Epidemiol Infect, 2009, 137(8): 1179-1187.

[8] LAMBRECHTS L, PAAIJMANS K P, FANSIRI T, et al. Impact of daily temperature fluctuations on dengue virus transmission by *Aedes aegypti*[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108(18): 7460-7465.

[9] CAILLY P, TRAN A, BALENGHIEN T, et al. A climate-driven abundance model to assess mosquito control strategies[J]. Ecol Modell, 2012, 227: 7-17.

[10] JIA P, LU L, CHEN X, et al. A climate-driven mechanistic population model of *Aedes albopictus* with diapause[J]. Parasit Vectors, 2016, 9: 175.

[11] TRAN A, L'AMBERT G, LACOUR G, et al. A rainfall- and temperature-driven abundance model for *Aedes albopictus* populations[J]. Int J Environ Res Public Health, 2013, 10(5): 1698-1719.

[12] LIU-HELMERSSON J, ROCKLÖV J, SEWE M, et al. Climate change may enable *Aedes aegypti* infestation in major European cities by 2100[J]. Environ Res, 2019, 172: 693-699.

[13] LEE H, KIM J E, LEE S, et al. Potential effects of climate change on dengue transmission dynamics in Korea[J]. PLoS One, 2018, 13(6): e0199205.

[14] CHEN S C, HSIEH M H. Modeling the transmission dynamics of dengue fever: implications of temperature effects[J]. Sci Total Environ, 2012, 431: 385-391.

[15] XIAO J P, HE J F, DENG A P, et al. Characterizing a large outbreak of dengue fever in Guangdong Province, China[J]. Infect Dis Poverty, 2016, 5: 44.

[16] 刘起勇. 我国登革热流行新趋势、防控挑战及策略分析[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2020, 31(1): 1-6.
LIU Q Y. Dengue fever in China: new epidemical trend, challenges and strategies for prevention and control[J]. Chin J Vevtor Biol Control, 2020, 31(1): 1-6.

[17] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bull Am Meteor Soc, 2012, 93(4): 485-498.

[18] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. Contributions to the mathematical theory of epidemics-I. 1927[J]. Bull Math Biol, 1991, 53(1/2): 33-55.

[19] LIAO C M, HUANG T L, CHENG Y H, et al. Assessing dengue infection risk in the southern region of Taiwan: implications for control[J]. Epidemiol Infect, 2015, 143(5): 1059-1072.

[20] 广东省统计信息网. 广东统计年鉴2020年[EB/OL]. [2021-09-01]. http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_3098041.html.
Guangdong Provincial Statistical Information Network. Guangdong statistical yearbook 2020[EB/OL]. [2021-09-01]. http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_3098041.html.

[21] JIA P F, CHEN X, CHEN J, et al. How does the dengue vector mosquito *Aedes albopictus* respond to global warming?[J]. Parasit Vectors, 2017, 10(1): 140.

[22] MORDECAI E A, COHEN J M, EVANS M V, et al. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models[J]. PLoS Negl Trop Dis, 2017, 11(4): e0005568.

[23] WESOLOWSKI A, QURESHI T, BONI M F, et al. Impact of human mobility on the emergence of dengue epidemics in Pakistan[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112(38): 11887-11892.

[24] WEARING H J, ROHANI P. Ecological and immunological determinants of dengue epidemics[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103(31): 11802-11807.

[25] TUN-LIN W, BURKOT T R, KAY B H. Effects of temperature and larval diet on development rates and survival of the dengue vector *Aedes aegypti* in north Queensland, Australia[J]. Med Vet Entomol, 2000, 14(1): 31-37.

[26] FAN J, WEI W, BAI Z, et al. A systematic review and meta-analysis of dengue risk with temperature change[J]. Int J Environ Res Public Health, 2015, 12(1): 1-15.

[27] XIANG J J, HANSEN A, LIU Q Y, et al. Association between dengue fever incidence and meteorological factors in Guangzhou, China, 2005-2014[J]. Environ Res, 2017, 153: 17-26.

[28] WU X C, LANG L L, MA W J, et al. Non-linear effects of mean temperature and relative humidity on dengue incidence in Guangzhou, China[J]. Sci Total Environ, 2018, 628-629: 766-771.

[29] ROBERT M A, CHRISTOFFERSON R C, WEBER P D, et al. Temperature impacts on dengue emergence in the United States: investigating the role of seasonality and climate change[J]. Epidemics, 2019, 28: 100344.

[30] LIU-HELMERSSON J, QUAM M, WILDER-SMITH A, et al. Climate change and *Aedes* vectors: 21 st century projections for dengue transmission in Europe[J]. eBioMedicine, 2016, 7: 267-277.

[31] FAN J C, LIU Q Y. Potential impacts of climate change on dengue fever distribution using RCP scenarios in China[J]. Adv Climate Change Res, 2019, 10(1): 1-8.

[32] RYAN S J, CARLSON C J, MORDECAI E A, et al. Global expansion and redistribution of *Aedes*-borne virus transmission risk with climate change[J]. PLoS Negl Trop Dis, 2019, 13(3): e0007213.

[33] DAVIS C, MURPHY A K, BAMBRICK H, et al. A regional suitable conditions index to forecast the impact of climate change on dengue vectorial capacity[J]. Environ Res, 2021, 195: 110849.

[34] XU Z W, BAMBRICK H, YAKOB L, et al. High relative humidity might trigger the occurrence of the second seasonal peak of dengue in the Philippines[J]. Sci Total Environ, 2020, 708: 134849.

[35] POLWIANG S. The time series seasonal patterns of dengue fever and associated weather variables in Bangkok (2003-2017)[J]. BMC Infect Dis, 2020, 20(1): 208.

[36] CARRINGTON L B, ARMIJOS M V, LAMBRECHTS L, et al. Fluctuations at a low mean temperature accelerate dengue virus transmission by *Aedes aegypti*[J]. PLoS Negl Trop Dis, 2013, 7(4): e2190.

(**英文编辑**：汪源；**责任编辑**：王晓宇)