综述
Review

气候变化对人群健康影响评估方法的研究进展

张明[1a, 1b]，过仲阳[1a, 1b]，谈建国[1b, 2]

1. 华东师范大学 a. 地理信息科学教育部重点实验室 b. 地理科学学院，上海 200241
2. 上海市气候中心，上海 200030

摘要：

气候变化可以通过多种途径直接或间接地影响人体健康，已成为21世纪人类健康最大的威胁。准确评估气候变化健康风险并提出针对性的适应策略和减缓措施已成为当务之急。本文系统收集和整理国内外气候变化健康风险研究，对气候变化健康风险评估方法进行综述，将其归纳为生态学分析法、面板数据分析法、灾害风险分析法、生态位分析法、机制分析法、可计算一般均衡分析法六大类，并对各类评估方法的应用情况和优缺点进行分析和评价，最后对气候变化健康风险研究领域发展提出建议和展望。

关键词：气候变化；健康风险；评估方法；研究进展

Systematic review of methodology in evaluating impacts of climate change on human health

ZHANG Ming[1a, 1b], GUO Zhongyang[1a, 1b], TAN Jianguo[1b, 2] (1.a.Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education b.School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2.Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030, China)

Abstract:

Climate change affects human health directly or indirectly through multiple channels and has become one of the biggest global health threats of the 21st century. Accurately assessing the impacts of climate change on human health and developing adaptation strategies and mitigation measures have become an urgent task. This paper systematically reviewed methods commonly used in health risk assessment of climate change. The reviewed methods can be categorized into ecological analysis, panel data analysis, disaster risk analysis, environmental niche analysis, mechanism analysis, and computable general equilibrium analysis. Then, the paper summarized the advantages and disadvantages of these methodological categories. Lastly, this paper presented current responses and outlined future directions in this field.

Keywords: climate change; health risk; assessment method; research progress

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20284

基金项目
国家重点研发计划（2018YFA0606204）

作者简介
张明（1989—），男，博士生；
E-mail：zhangminggeo@126.com

通信作者
谈建国，E-mail：jianguot@21cn.com

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2020-08-02
录用日期 2020-12-03

文章编号 2095-9982(2021)02-0169-06
中图分类号 R12
文献标志码 A

▸引用
张明，过仲阳，谈建国. 气候变化对人群健康影响评估方法的研究进展 [J]. 环境与职业医学，2021，38（2）：169-174.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20284

Funding
This study was funded.

Correspondence to
TAN Jianguo, E-mail: jianguot@21cn.com

Ethics approval Not required
Competing interests None declared
Received 2020-08-02
Accepted 2020-12-03

▸To cite
ZHANG Ming, GUO Zhongyang, TAN Jianguo. Systematic review of methodology in evaluating impacts of climate change on human health[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(2): 169-174.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20284

气候与人群健康密切相关，通过直接和间接的方式影响人群健康[1-2]。在气候变化情境下，全球平均温度增加、降水时空格局改变，极端事件以及复合事件的频次增加、强度增强、空间范围增大，这严重威胁人类的生命与健康[3-5]和人类社会福祉[6-10]。同时，由于地理环境和社会经济因素的影响，气候变化健康风险在时空尺度上呈现明显的差异[11-14]。因此，如何定量评估气候变化的健康效应及其时空变化成为研究热点。

目前，针对气候或气候变化对不同健康结局的影响研究取得了一定的进展，但缺乏对评估方法的应用及其研究进展进行系统总结、分析与评价。基于此，本文首次系统收集和整理了基于不同评估方法的气候变化健康风险研究，将评估方法归纳为生态学分析法、面板数据分析法、灾害风险分析法、生态位分析法、机制分析法和可计算一般均衡分析法六大类（表1），重点梳理评估方法的应用及存在的主要问题，并提出建议和展望。

1 评估方法研究进展

1.1 生态学分析法

生态学分析法是环境流行病学常用的方法，多采用时间序列数据建立天气变异与不良健康结局的关联，评估短期暴露对健康结局的影响。常用方法包括时间分层病例交叉设计、广义相加模型、分布滞后非线性模型[15]。

1.1.1 时间分层病例交叉设计　时间分层病例交叉设计是病例交叉研究的一种，实践中按照时间对数据进行分层，将数据分为病例组和对照组，通过对比两组数据在气象要素或极端事件上的差异，估算暴露因素的健康效应。Auger 等[16]基于加拿大蒙特利尔数据探讨了高温对婴儿猝死的影响。文章指出日最高气温从 20°C增加到 29°C及以上时，婴儿猝死风险增加了 2.78 倍。此外，有研究表明极端温度会增加糖尿病健康风险，且极端高温健康风险更高[17]。Kim 等[18]采用韩国首尔数据考察了个体和区域特征对热浪死亡关系的修饰作用，研究发现贫困和低学历能增加人群热浪死亡风险，植被覆盖率和医院数量能影响区域热浪死亡风险。虽然该方法能有效控制个体特征、区域特征和时间趋势等混杂因素，但是对照组的选择标缺乏统一标准，不适合对慢性病的研究。

1.1.2 广义相加模型　广义相加模型是广义线性模型的扩展，通过连接函数关系来估计反应变量和各解释变量间非线性关系。实践中通过参数或非参数方法控制如大气污染物等混杂因素的影响，建立不良健康结局和气象因素的关联。Curriero 等[19]利用美国 11 个城市数据研究表明温度 - 死亡关系与纬度密切相关，南方城市冷相关死亡风险较大，北方城市热相关死亡风险较大。Liu 等[20]采用济南市数据考察了温度与细菌性疟疾发病率的非线性关系。Tong 等[21]则运用澳大利亚布里斯班数据分析了热浪的健康效应，通过在模型中加入相对湿度和大气污染物，探讨了混杂因素对热浪健康效应的修饰作用。尽管广义相加模型设定自由灵活，适用于多种分布类型和分析复杂的非线性关系，但该模型对异常值比较敏感，交互项需要手动设定[22]。

1.1.3 分布滞后非线性模型　分布滞后非线性模型是通过交叉基函数同时拟合暴露 - 反应关系的非线性效应和滞后效应[23]。Gasparrini 等[23]结合分布滞后非线性模型、最低死亡温度和 meta 分析，先后提出了单城市[23]和区域温度健康效应评估方法[24]。然而此类方法不能进行风险归因。在此基础上，Gasparrini 和 Leone[25]提出了死亡归因的“前向算法”和“后向算法”，实现了健康风险定量归因。相关研究表明全球温度死亡风险为 7.71%[3]。在气候变化情境下，全球健康风险将增加，其中美洲和东南亚温度死亡风险分别增长 3.0% 和 12.7%[11]。然而，该方法不能识别热浪、寒潮等极端事件的健康风险。Gasparrini 等[26]提出结合分布滞后非线性模型的热浪健康效应评估方法。研究表明热浪健康效应分为由热浪强度引起的主效应和热浪持续时间引起的附加效应，其中主效应影响更大。分布滞后非线性模型广泛用于识别天气冲击的累积效应和滞后效应，但在节点的数目、最大滞后天数等设置上缺乏统一的标准。

生态学分析法能有效控制季节性变化、周期性波动和长期趋势等混杂因素，从非线性视角评估天气变异对健康的短期影响，但该方法评估的是群体而非个体暴露 - 反应关系，属于关联性研究，难以识别气候因素导致健康风险的关键环节要素[15]。

1.2 面板数据分析法

面板数据分析法是气候变化经济学领域常用的方法，利用长时间尺度的面板数据，建立不良健康格局与天气波动的面板固定效应回归模型，估计天气冲击的健康效应以及预测未来气候变化健康风险，常用的方法包括区间回归法、面板分布滞后模型和交互项法。

1.2.1 区间回归法　面板数据区间回归法是通过区间函数构造气象要素的区间统计量，利用区间统计量与不良健康结局建立面板数据固定效应模型，识别天气波动与不良结局之间的非线性关系。Deschenes 等[27]分析了极端温度与美国婴儿体重之间的非线性关系，研究发现产前高温暴露每增加 1 d，婴儿体重将降低 0.003%~0.009%。甚至有研究指出不良孕产还会降低人力资本以及成本年后的收入水平[6]。Deschênes 等[7]考察了气温与美国人口年死亡率的非线性关系，结果显示，极端高温和极端低温每增加 1 d，年死亡率分别增加约 0.11% 和 0.07%~0.08%。尽管区间回归法能有效识别非线性关系，但需要高频天气数据，同一区间内不同值的边际效应相等，不能识别热浪和寒潮的健康效应。

1.2.2 面板分布滞后模型　面板分布滞后模型主要通过对面板固定效应模型中的气象要素进行滞后处理，考察天气冲击对健康影响的滞后性和持续性。

Deschênes 等[9]考察了极端温度对美国人口死亡率的影响，他们发现极端低温对死亡的影响持续约两周，而极端高温的影响局限在 3 d 以内。Karlsson 等[10]分析了极端气温对德国发病率和死亡率的影响，研究显示考虑滞后效应和位移效应后，极端高温分别增加 12% 死亡率和 6% 门诊量。Barreca 等[14]采用美国数据分析了极端高温与早产的关系，结果显示极端高温对早产的影响持续近 2 周。面板分布滞后模型能有效评估极端温度的累积健康效应和滞后效应，但常常依赖于较高时间尺度数据，最大滞后期设定缺乏统一的标准。

1.2.3 交互项法　交互项法是在面板模型中加入天气变量与感兴趣因素（区域、空调拥有率等）的交互项，考察天气冲击健康效应的时空异质性和识别气候变化适应程度。Li 等[28]在回归中采用极端高温天数与地区构造的交互项，研究发现中国北方地区高温健康风险是南方地区的 3 倍。另一项在德国的研究表明寒冷地区的极端高温健康风险更大，极端高温导致寒冷地区和炎热地区入院人数分别增加 6% 和 4%[10]。Barreca 等[8]在模型中加入极端高温天数与空调普及率的交互项，研究表明空调是降低美国极端高温健康风险的重要措施。交互项法能有效识别天气健康效应的时空差异，还能评估气候变化适应措施的效果，但构造指标的选取具有一定的主观性，常常依靠历史经验。

尽管面板数据分析法能有效缓解遗漏变量的影响，有效估计天气的健康效应，还能进行因果识别，但该方法不能识别气候变化健康效应，难以评估长期的气候变化适应行为[29]。目前，有学者提出使用混合分析方法来评估气候变化长期效应[29]。

1.3 灾害风险分析法

灾害风险分析法是利用“健康风险 = 致灾因子 × 脆弱性 × 人口暴露”的框架，采用遥感或气象数据模拟致灾因子时空分布，采用人口空间数据计算人口暴露，运用社会经济统计数据或者健康数据估算脆弱性，然后通过空间运算得到灾害健康风险，常用的方法包括单灾害风险分析法和多灾害风险分析法。Hu 等[30]采用单灾害风险分析法评估了中国浙江省高温健康风险，并用健康数据进行了验证，然而，未对高温健康效应展开评估。Jongman 等[31]提出了通过灾害死亡人口与灾害影响人口构建脆弱性来评估洪灾健康风险的方法，发现气候变化将导致全球洪灾死亡风险增加 15%~214%。在此基础上，Forzieri 等[5]使用多灾害风险分析法评估了欧洲极端事件健康风险。研究表明 21 世纪末欧洲每年约三分之一人口受极端事件（热浪、寒潮、干旱、海岸洪水、河流洪水、野火、风暴）的影响，约 15 万人死于极端事件。灾害风险分析法有利于从致灾因子、暴露性和脆弱性三个方面对健康风险进行归因，但脆弱性指标缺乏统一的标准，常常假定脆弱性固定不变，忽视了人类行为和风险感知对脆弱性的影响[32]。

1.4 生态位分析法

生态位分析法是根据物种的空间分布和相关环境参数，结合特定算法构建物种空间分布模型，通过模拟不同气候条件下物种出现的概率、生境适宜度或媒介物丰富度及其时空分布变化，从而评估气候变化健康风险，常用算法包括随机森林、增强回归树等。Jiang 等[33]采用随机森林等算法研究发现，寨卡病毒传播高风险地区集中在北美东南部、南美东部、非洲中部和东亚。Bhatt 等[34]运用增强回归树算法考察了全球登革热分布对疾病负担的影响，发现全球每年感染登革热病例数为 3.9 亿。另外，有研究表明气候变化将增加全球登革热健康风险，到 21 世纪末全球约 60% 人口面临登革热感染风险，而气候变化和经济社会发展是影响虫媒传染病健康风险的重要因素[13]。生态位分析法有利于识别气候变化潜在的媒介性传染病健康风险及其时空分布，但该方法依赖于高质量媒介物空间分布数据，缺乏公认的最佳算法模型，难以模拟极端气候事件对健康风险的影响[1]。

1.5 机制分析法

机制分析法是用模型将气候（天气）与疾病的爆发和传播过程联系起来，通过模拟气候（天气）变化对疾病病原体、宿主和传播途径的影响，考察气候（天气）变化对健康风险的影响，常用的机制模型包括传染病模型、基本繁殖率模型和媒介能量模型。Dalziel 等[35]运用传染病模型考察了城市规模和绝对湿度对美国流感疫情的影响，发现城市规模越大，流感疫情的严重程度越低。Caminade 等[36]采用基本繁殖率模型建立了媒介传染性疾病与气候因子的联系，分析发现 2015 年厄尔尼诺是造成南美洲寨卡病毒传播的重要原因。另外，在全球变暖背景下，全球将新增约 10 亿人面临蚊媒传染疾病感染风险[4]，而有效的检测和控制措施是降低媒介性传染病的重要措施[37]。Liu-Helmersson 等[38]采用媒介能量模型分析表明，气候变化导致欧洲登革热流行时间延长以及流行区域向北欧扩展。目

前，有学者还采用耦合自然因素和人文因素的机制模型预估了欧洲蜱传染疾病健康风险[12]。机制分析法能揭示疾病发展过程、流行规律和预测发展趋势以及识别流行的原因和关键因素，但该方法需要大量参数数值。

1.6 可计算一般均衡分析法

可计算一般均衡分析法是以一般均衡理论为基础，借助投入产出分析框架，将气候作为影响商品需求、供给、贸易和投资的因素，通过模拟不同气候情境下各部门的经济产出变化，从而评估气候变化健康风险及其外溢效应。Hasegawa 等[39]提出了“两阶法”评估气候变化及减缓措施对全球饥饿风险的影响。首先利用气候模式数据驱动农业生态区划模型，估算气候变化对粮食产量的影响；其次把粮食产量输入可计算一般均衡模型估算粮食消费情况，从而根据粮食消费估算全球饥饿风险。相关研究表明到 2050 年不当的气候变化缓解政策可能导致全球饥饿人数增加 1.6 亿人[2]，而改善贸易环境可以减少全球饥饿人数 0.2 亿人[40]。另外，气候变化健康效应也会通过影响劳动力供给和卫生服务需求对宏观经济产生影响[41]。可计算一般均衡分析方法有利于评估气候变化及减缓措施的健康及其外溢效应，识别健康风险在经济部门之间的传递和扩散，但其依赖社会核算账户和替代弹性，模型假设过于理想，评估结果难以验证[7, 32]。

表 1　常见的气候变化健康风险评估方法

Table 1　Common climate change health risk assessment methods

评估方法	特点	适用性及主要健康结局	典型文献
生态学分析方法 时间分层病例交叉设计 广义相加模型 分布滞后非线性模型	多采用日时间尺度的健康计数数据和天气数据估计短期天气变异的健康效应 有效识别非线性暴露 - 反应关系	温度相关健康风险 极端事件相关健康风险；死亡、气候敏感性疾病、不良孕产	[3, 11, 16, 21, 26]
面板数据分析法 区间回归法 面板分布滞后模型 交互项法	利用长时间跨度健康面板数据和高频天气数据估计天气波动的健康效应而非气候变化健康效应；有效缓解遗漏变量偏误；直接实现因果识别	国家或区域尺度的气候变化健康风险评估和适应性研究；死亡率、就诊人数、不良孕产	[7-8, 10, 14, 27]
灾害风险分析法 单灾害风险分析法 多灾害风险分析法	从致灾因子、脆弱性和暴露性三个方面，综合分析气候变化对健康风险的影响	极端事件（热浪、洪涝等）健康风险评估及精细化时空分布模拟；死亡	[5, 30-31]
生态位分析法 增强回归树 随机森林	需要物种分布数据和环境参数数据；依赖特定的算法；识别气候变化对潜在适应生长时间或生长区域的影响	多尺度媒介性传染疾病时空分布预测和制图；登革热、寨卡病毒、虫媒传染病	[1, 13, 34]
机制分析法 传染病模型 基本繁殖率模型 媒介能量模型	揭示疾病发展过程、流行规律和预测发展趋势；识别流行的原因和关键因素	气候敏感性疾病健康风险评估及机理研究；流感、寨卡病毒、媒介传染病	[1, 4, 36]
可计算一般均衡分析法	依赖社会核算账户和替代弹性；识别气候变化及其适应措施对经济产出和健康的影响	气候变化对健康风险的宏观影响和外溢效应；劳动生产率、饥饿、营养不良	[2, 39-40]

2 研究不足

国内外学者关于气候变化健康风险评估和预估开展了大量研究，取得了丰硕的成果，但还存在一定不足，归纳如下：

一是气候影响人体健康的因果机制不够清楚。现有研究多集中在气象要素与健康格局的统计分析，并据此评估和预估研究区的健康风险，难以反映暴露因素与反应之间的机理。

二是评估数据不够准确。首先，气候数据和健康结局数据时空尺度不匹配，站台数据难以反映区域真实的暴露水平，评估结果可能存在偏误。其次，全球气候模式存在系统误差，其对不同区域和不同要素模拟存在偏差，无法很好地体现气候变化影响健康明显的时空差异。

三是气候变化健康风险的程度、时空间范围不明确。首先，基于单气候因子与单健康结局研究，容易得出片面化的结果，难以反映气候变化健康综合风险的时空分布规律。其次，缺乏考虑环境要素、经济状况、年龄结构等因素交互作用对健康风险的影响，难以利用历史资料来预测气候变化健康风险。

四是缺乏气候变化适应策略和减缓措施研究。首先，由于数据可获得性等原因，缺乏针对不同区域和不同尺度的减缓措施和适应策略研究。其次，基于单健康结局的研究，难以准确反映不同气候变化适应策略和减缓措施的成本效益。

3 展望

综上所述，为全面系统地评估气候变化对人群健康风险的影响及其时空分异规律，提出有针对性的减缓措施和适应策略，笔者认为有以下几方面内容可供

读者参考。

一是发展气候变化健康风险的检测技术和归因方法。发展新的评估方法，有效识别天气波动健康效应和气候变化健康效应，归因人类活动对气候变化健康风险的影响以及识别不同区域人类适应气候变化能力的大小及其时空变化规律，从而更好进行气候变化健康风险识别、评估、管理和适应。

二是开展气候变化情景数据降尺度方法研究。采用动力降尺度、统计降尺度，基于全球气候模式的情景数据，驱动区域气模式，生成高时空分辨率的区域气候模式输出数据，从而建立从全球尺度、区域尺度到局地尺度上的气候变化情景数据集，以满足气候变化健康风险综合评估所需要的数据要求。

三是建立气候变化健康风险综合评估模型。人群健康是自然系统-气候系统-经济社会共同作用的结果。因此，需要发展人体健康领域气候变化风险综合评估方法，建立耦合自然要素和人文要素的多作用因子、多影响途径、多健康结局的健康风险综合评估模型，评估气候变化健康风险的程度和时空变化范围，识别气候变化敏感区域及其时空格局变化规律。

四是未来情景健康风险预估和适应策略研究。建立气候变化健康综合风险预估方法，利用不同排放情景数据和共享社会经济路径情景数据，分析不同排放情境、共享社会经济路径情景和不同适应策略对健康风险的影响，评估不同适应策略和减缓措施的成本收益。

参考文献

[1] TJADEN N B，CAMINADE C，BEIERKUHNLEIN C，et al. Mosquito-borne diseases：advances in modelling climate-change impacts [J]. Trends Parasitol，2018，34 (3)：227-245.

[2] FUJIMORI S，HASEGAWA T，KREY V，et al. A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation [J]. Nat Sustain，2019，2 (5)：386-396.

[3] GASPARRINI A，GUO Y，HASHIZUME M，et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature：a multicountry observational study [J]. Lancet，2015，386 (9991)：369-375.

[4] 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.

[5] FORZIERI G，CESCATTI A，E SILVA F B，et al. Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population：a data-driven prognostic study [J]. Lancet Planet Health，2017，1 (5)：e200-e208.

[6] ISEN A，ROSSIN-SLATER M，WALKER R. Relationship between season of birth，temperature exposure，and later life wellbeing [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2017，114 (51)：13447-13452.

[7] DESCHÊNES O，GREENSTONE M. Climate change，mortality，and adaptation：evidence from annual fluctuations in weather in the US [J]. Am Econ J Appl Econ，2011，3 (4)：152-185.

[8] BARRECA A，CLAY K，DESCHENES O，et al. Adapting to climate change：the remarkable decline in the US temperature-mortality relationship over the twentieth century [J]. J Polit Economy，2016，124 (1)：105-159.

[9] DESCHÊNES O，MORETTI E. Extreme weather events，mortality，and migration [J]. Rev Econ Statist，2009，91 (4)：659-681.

[10] KARLSSON M，ZIEBARTH N R. Population health effects and health-related costs of extreme temperatures：comprehensive evidence from Germany [J]. J Environ Econ Manage，2018，91：93-117.

[11] GASPARRINI A，GUO Y，SERA F，et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios [J]. Lancet Planet Health，2017，1 (9)：e360-e367.

[12] LI S，GILBERT L，VANWAMBEKE S O，et al. Lyme disease risks in Europe under multiple uncertain drivers of change [J]. Environ Health Perspect，2019，127 (6)：067010.

[13] MESSINA J P，BRADY O J，GOLDING N，et al. The current and future global distribution and population at risk of dengue [J]. Nat Microbiol，2019，4 (9)：1508-1515.

[14] BARRECA A，SCHALLER J. The impact of high ambient temperatures on delivery timing and gestational lengths [J]. Nat Clim Chang，2020，10 (1)：77-82.

[15] 马文军，刘涛，黄存瑞. 气候变化对人群健康的风险评估和适应性研究亟需加强 [J]. 环境卫生学杂志，2018，8 (5)：365-367.
MA W J，LIU T，HUANG C R. Research on the risk assessment and adaptation of climate change to population health urgently needs to be strengthened [J]. J Environ Hyg，

2018，8（5）：365-367.

[16] AUGER N，FRASER W D，SMARGIASSI A，et al. Ambient heat and sudden infant death：a case-crossover study spanning 30 years in Montreal，Canada [J]. Environ Health Perspect，2015，123（7）：712-716.

[17] HAJAT S，HAINES A，SARRAN C，et al. The effect of ambient temperature on type-2-diabetes：case-crossover analysis of 4+ million GP consultations across England [J]. Environ Health，2017，16（1）：73.

[18] KIM E J，KIM H. Effect modification of individual- and regional-scale characteristics on heat wave-related mortality rates between 2009 and 2012 in Seoul，South Korea [J]. Sci Total Environ，2017，595：141-148.

[19] CURRIERO F C，HEINER K S，SAMET J M，et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States [J]. Am J Epidemiol，2002，155（1）：80-87.

[20] LIU Z，LIU Y，ZHANG Y，et al. Effect of ambient temperature and its effect modifiers on bacillary dysentery in Jinan，China [J]. Sci Total Environ，2019，650：2980-2986.

[21] TONG S，WANG X Y，GUO Y. Assessing the short-term effects of heatwaves on mortality and morbidity in Brisbane，Australia：comparison of case-crossover and time series analyses [J]. PLoS One，2012，7（5）：e37500.

[22] RAVINDRA K，RATTAN P，MOR S，et al. Generalized additive models：building evidence of air pollution，climate change and human health [J]. Environ Int，2019，132：104987.

[23] GASPARRINI A，ARMSTRONG B，KENWARD M G. Distributed lag non-linear models [J]. Stat Med，2010，29（21）：2224-2234.

[24] GASPARRINI A，ARMSTRONG B，KENWARD M G. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations [J]. Stat Med，2012，31（29）：3821-3839.

[25] GASPARRINI A，LEONE M. Attributable risk from distributed lag models [J]. BMC Med Res Methodol，2014，14（1）：55.

[26] GASPARRINI A，ARMSTRONG B. The impact of heat waves on mortality [J]. Epidemiology，2011，22（1）：68-73.

[27] DESCHENES O，GREENSTONE M，GURYAN J. Climate change and birth weight [J]. Amer Econ Rev，2009，99（2）：211-217.

[28] LI C，GU H. Climate change and mortality evolution in China [J]. J Environ Manage，2020，267：110622.

[29] HSIANG S. Climate econometrics [J]. Ann Rev Res Econ，2016，8（1）：43-75.

[30] HU K，YANG X，ZHONG J，et al. Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data [J]. Environ Sci Technol，2017，51（3）：1498-1507.

[31] JONGMAN B，WINSEMIUS H C，AERTS J C，et al. Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2015，112（18）：E2271-E2280.

[32] BOTZEN W J，DESCHENES O，SANDERS M. The economic impacts of natural disasters：a review of models and empirical studies [J]. Rev Environ Econ Policy，2019，13（2）：167-188.

[33] JIANG D，HAO M，DING F，et al. Mapping the transmission risk of Zika virus using machine learning models [J]. Acta Trop，2018，185：391-399.

[34] BHATT S，GETHING P W，BRADY O J，et al. The global distribution and burden of dengue [J]. Nature，2013，496（7446）：504-507.

[35] DALZIEL B D，KISSLER S，GOG J R，et al. Urbanization and humidity shape the intensity of influenza epidemics in U.S. cities [J]. Science，2018，362（6410）：75-79.

[36] CAMINADE C，TURNER J，METELMANN S，et al. Global risk model for vector-borne transmission of Zika virus reveals the role of El Niño 2015 [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2017，114（1）：119-124.

[37] JONES A E，TURNER J，CAMINADE C，et al. Bluetongue risk under future climates [J]. Nat Clim Chang，2019，9（2）：153-157.

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

[39] HASEGAWA T，FUJIMORI S，SHIN Y，et al. Climate change impact and adaptation assessment on food consumption utilizing a new scenario framework [J]. Environ Sci Technol，2014，48（1）：438-445.

[40] JANSSENS C，HAVLÍK P，KRISZTIN T，et al. Global hunger and climate change adaptation through international trade [J]. Nat Clim Chang，2020，10（9）：829-835.

[41] BOSELLO F，ROSON R，TOL R S. Economy-wide estimates of the implications of climate change：human health [J]. Ecol Econ，2006，58（3）：579-591.

（英文编辑：汪源；责任编辑：陈姣）