气候变化对中国媒介生物传染病的影响及应对

——重大研究发现及未来研究建议

刘起勇

中国疾病预防控制中心传染病预防控制所媒介生物控制室, 传染病预防控制国家重点实验室, 感染性疾病诊治协同创新中心, 世界卫生组织媒介生物监测与管理合作中心, 北京 102206

摘要: 全球气候变化, 可能对媒介生物及其传播疾病流行产生影响, 严重威胁人群健康。该文基于目前研究总结了气候变化对我国媒介生物及其传染病的影响, 发现温度、湿度和降雨量等气象因素对媒介生物种群数量、密度、分布以及媒介生物传染病的时空动态、流行频率和强度等产生了显著影响, 并存在时空异质性。气候变化驱动我国登革热等媒介生物传染病流行区向西向北显著扩展、流行频率和强度显著增加, 且随着气候继续变暖未来流行强度和风险人群将加速增加。针对气候变化等导致的媒介生物传染病新挑战, 开展的适应性策略和措施研究, 提供了“自上而下”行政干预和“自下而上”社区媒介综合治理相结合的应对方案。基于媒介生物可持续控制策略的世界卫生组织“全球病媒控制对策 2017—2030”, 对媒介生物传染病防控提出了具体目标和要求。未来, 我国亟待在该策略指引下, 加强经费投入, 注重高端人才培养, 完善针对气候变化的媒介生物及相关疾病监测系统, 加强风险评估、预测预警、防控策略和干预措施研究, 为有效应对气候敏感媒介生物传染病新挑战, 保护脆弱人群健康和公共卫生安全, 提供持续创新的精准策略和措施。

关键词: 气候变化; 媒介生物; 传染病; 应对; 研究

中图分类号: R512.32 文献标识码: A 文章编号: 1003-8280(2021)01-0001-11

DOI: 10.11853/j.issn.1003.8280.2021.01.001

Impact of climate change on vector-borne diseases and related response strategies in China: Major research findings and recommendations for future research

LIU Qi-yong

State Key Laboratory of Infectious Disease Prevention and Control, Collaborative Innovation Center for Diagnosis and Treatment of Infectious Diseases, WHO Collaborating Centre for Vector Surveillance and Management, Department of Vector Biology and Control, National Institute for Communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China

Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2020YFC1200101) and the Special Project of the Ministry of Ecology and Environment in Response to Climate Change “Study on Public Health Problems Caused by Climate Change” (No. 202046)

Abstract: Global climate change may have an impact on disease vectors and vector-borne diseases and seriously threaten human health. Based on the current research findings, this article summarizes the impact of climate change on vectors and vector-borne diseases in China, and it is revealed that meteorological factors, including temperature, humidity, and precipitation, have a significant impact on the number, density, and distribution of disease vectors, as well as the spatial and temporal dynamics, epidemic frequency, and intensity of vector-borne diseases, with the coexistence of spatial-temporal heterogeneity. Climate change drives the epidemic areas of vector-borne diseases, such as dengue fever, to expand significantly to the west and the north and significantly increases the epidemic frequency and intensity of such diseases, and with continuous climate warming, there will be accelerated increases in epidemic intensity and risk population in the future. The research on adaptive strategies and measures has been carried out for the new challenges of vector-borne diseases caused by climate change and has provided a solution combining “top-down” administrative intervention and “bottom-up” community-integrated vector management. The WHO Global Vector Control Response 2017–2030 on a

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1200101); 生态环境部应对气候变化工作专项“气候变化引起的公共卫生问题研究”(202046)

作者简介: 刘起勇, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国疾病预防控制中心病媒生物首席专家, 国家 973 项目气候变化与健康首席科学家, 从事媒介生物传染病、气候变化健康风险及应对研究工作, E-mail: liuqiyoung@icdc.cn

basis of sustainable vector management strategy puts forward specific objectives and requirements for the control of vector-borne diseases. Under the guidance of this strategy in the future, China needs to increase funding, pay attention to the cultivation of high-end talents, upgrade the surveillance system for vectors and vector-borne diseases in the context of climate change, and strengthen the research on risk assessment, prediction and early warning, control strategies, and intervention measures, so as to effectively cope with the new challenges of climate-sensitive vector-borne diseases, protect the vulnerable populations and public health security, and provide continuous, innovative, and precise strategies and measures.

Key words: Climate change; Vector; Vector-borne disease; Response; Research

全球气候变暖已经是不争的事实,根据联合国政府间气候变化专门委员会第五次评估报告(IPCC AR5),1901—2012年,全球陆地和海洋温度上升了 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.69\sim 1.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)。相比全球平均水平,我国的增温情况更为显著,中国近50年来年平均地表气温增温幅度约为 $1.10\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温速率接近 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ^[1]。气候变化还会引起海平面的上升、极端天气气候事件的发生频率和范围增加等,对人群健康构成严重威胁。在气候变暖对传染病影响中,以媒介生物传染病最为敏感,一方面由于媒介生物的时空分布易受气候因素的影响,温度即使是微小的上升也会引发媒介生物数量和分布的巨大变化,另一方面病原体在媒介生物体内的繁殖与扩增也受到气候因素的影响。本文通过总结气候变化对我国媒介生物及相关传染病的影响及应对研究进展,提出研究不足及未来研究重点,为适应气候变化保护我国人群健康提供科学依据。

1 气候变化对媒介生物的影响

1.1 气候变化对蚊虫的影响 我国蚊虫约21属400余种,重要的媒介蚊虫包括中华按蚊(*Anopheles sinensis*)、雷氏按蚊(*An. lesteri*)、微小按蚊(*An. minimus*)、大劣按蚊(*An. dirus*)、白纹伊蚊(*Aedes albopictus*)、埃及伊蚊(*Ae. aegypti*)、三带喙库蚊(*Culex tritaeniorhynchus*)、淡色库蚊(*Cx. pipiens pallens*)和致倦库蚊(*Cx. pipiens quinquefasciatus*)等。气候变暖引起感染或携带病原体的媒介蚊虫分布区扩展,媒介蚊虫及宿主在年内活动期延长,病原体生长繁殖期扩大。白纹伊蚊和埃及伊蚊是登革热的主要传播媒介,气候是影响我国白纹伊蚊西北分布边界的潜在原因^[2],对我国云南省埃及伊蚊入侵扩散有重要影响。大多数研究发现,媒介伊蚊密度与温度、湿度和降雨量呈正相关,少数研究发现湿度与蚊密度无相关或负相关^[3-4]。日照时数、风速和平均气压等可对媒介伊蚊密度产生影响。在 $20.00\sim 30.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度升高会加速卵的发育,在极端环境下会以滞育卵的形式存活^[5];温度还会影响羽化后雌蚊比例和成蚊体积,即在 $25.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时产生的雌性个体

最多,成蚊个体与其寻找宿主能力呈正相关。温度还会影响媒介伊蚊叮咬和觅食行为,媒介伊蚊在 $25.00\sim 30.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时叮咬率最高^[6],温度 $<18.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,飞行距离 $<50\text{ m}$;在 $20.00\sim 27.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可飞行 400 m ^[6-7]。温度会影响登革病毒外潜伏期(EIP)。例如,在 $30.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时登革Ⅱ型病毒EIP是12 d,在 $32.00\sim 35.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时是7 d,缩短了5 d^[8],加速了登革病毒在蚊体内繁殖。湿度、气压和日照时数等还会影响媒介伊蚊行为和存活率^[9]。气温和降雨量可影响疟疾媒介按蚊繁殖和体内疟原虫发育速度,恶性疟原虫比间日疟原虫对温度和降雨量更为敏感^[10]。疟疾一般传播到冬季等温线为 $16.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区;当气温在 $20.00\sim 27.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,疟原虫体外潜伏期明显缩短。气温升高媒介按蚊吸血频率增加,繁殖加快,是疟疾在地方性流行区之外发生暴发重要的原因。降雨量和湿度变化可引起媒介按蚊孳生地分布变化。在我国中部,凉爽季节疟疾对最低温度敏感,而温暖季节疟疾对最大温度敏感,凉爽气候带滞后效应期较温暖气候带更长^[11]。

1.2 气候变化对鼠类的影响 鼠类可传播鼠疫、肾综合征出血热(HFRS)等疾病。气候变暖使得适宜鼠类生长繁殖环境时空范围扩大,引起其分布区增加和年内危害期延长,增加鼠传疾病扩散的可能性。以黄胸鼠(*Rattus tanezumi*)为例,气候变暖使携带鼠疫耶尔森菌(*Yersinia pestis*,鼠疫菌)的黄胸鼠活动范围超出北纬 17° 以南地区。不同啮齿动物种群对温度和降雨量的响应也不相同。在内蒙古自治区(内蒙古)半干旱草原,温度对小型啮齿动物的生物多样性有显著积极影响;降雨量既有正面影响,也有负面影响^[12]。在阿拉善荒漠地区,温度升高会抑制子午沙鼠(*Meriones meridianus*)种群数量且该鼠对高温耐受性低于跳鼠。气温会影响鼠类活动强度, $20.00\sim 30.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有利于其活动,当气温 $>30.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $<10.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,活动强度明显降低。降雨量可促进植物生物量增加,阿拉善荒漠地区子午沙鼠与植物生物量关系密切^[13-14]。上海市奉贤区鼠类种群动态与气候、生态因子存在相关性,其中鼠密度与气温大多呈负相关,与相对湿度大多呈正相关,极端暖事件

对鼠密度有滞后正效应,降雨量与鼠密度相关性不显著^[15]。

1.3 气候变化对蝉的影响 我国约有 110 余种蝉分布,可传播发热伴血小板减少综合征(SFTS)、蝉传脑炎、莱姆病和人粒细胞无形体病等疾病。气候变暖可引起某些蝉分布范围扩大、活动季节改变,进而引起蝉传疾病发病率增高。温度是对活动蝉的数量影响最为显著的环境变量,对蝉的各期发育均有影响,温度越低,蝉发育时期和生活史延长,繁殖前蝉的死亡率增大^[16]。温暖的冬季会降低蝉的死亡率,延长蝉活跃的时段,年平均温度上升还会影响蝉的地理分布。相对湿度和降雨量也会影响蝉的发育周期和数量,研究发现,当湿度<73%时,蝉的产卵期会延长,数量会减少。

1.4 气候变化对恙螨的影响 温度是影响恙螨生长发育各期的重要因子,同时,其生长发育还受降雨量和湿度等影响,表现为地理和季节分布上的异质性。小体纤恙螨(*Leptotrombidium scutellare*)在我国南北分布广泛,其幼虫出现时间随等温线的推进自北向南推迟^[17]。地里纤恙螨(*L. deliense*)主要分布在长江以南的大部分地区,是夏季型恙虫病疫区的主要媒介,在广东和福建省呈现不同的季节性和周期性消长规律。地里纤恙螨在广州市每年有 6—7 月与 9—10 月 2 个密度高峰^[18];福建省平潭岛的地里纤恙螨 5 月出现,6—7 月密度达高峰,9 月以后逐渐减少。受气候变化影响,病原体、媒介、宿主和环境相互作用规律变动,上述恙螨的范围、时期和密度消长和分布规律发生改变。既往观察发现,我国恙虫病夏季型疫区(广东、福建、浙江和云南省等地)分布在北纬 31°以南,6—8 月为发病高峰;受气候变化的影响,恙螨出现时间提前,福建省出现了恙虫病春季病例^[19]。

1.5 气候变化对钉螺的影响 钉螺是血吸虫病的唯一中间宿主,受温度、光照、湿度、降雨量等因素影响,钉螺在地理分布上呈现出一定的地方性。研究发现,气温升高有助于钉螺的繁殖和扩散。冬春季温度升高,钉螺体内一氧化氮合成酶等发生变化,更有利于钉螺生存^[20-21]。在一定温度范围内(15.00~30.00℃),活螺和幼螺平均密度与温度和湿度变化呈正相关。温度对钉螺产卵量的影响极其显著,最适繁殖温度为 25.00℃^[22]。血吸虫幼虫毛蚴活动性、在钉螺体内发育速度和尾蚴的溢出等均与温度有关。一项针对尾蚴溢出研究发现,1.00~3.00℃未见尾蚴溢出,5.00℃仅有少量溢出,20.00~25.00℃为适宜温度^[23]。气候变暖伴随的降雨量和湿度的变化,可能造成钉螺孳生面积扩大,使血吸虫在钉螺内

生长发育的季节延长。也有研究基于温度、湿度、降雨量和日照时间等与钉螺感染率进行模型拟合,发现钉螺感染率与年平均温度呈正相关,而与年平均相对湿度、年平均降雨量及年平均日照时数无相关性^[24]。气候变化对我国主要媒介生物的影响见表 1。

2 气候变化对媒介生物传染病的影响

2.1 蚊媒传播疾病

2.1.1 登革热 登革热(dengue fever, DF)是由 4 种血清型登革病毒引起的一种虫媒传染病,在我国主要传播媒介为白纹伊蚊和埃及伊蚊。2019 年,登革热在我国 13 省(自治区、直辖市)出现本地病例,严重威胁人群健康。世界卫生组织(WHO)认为,气候变化是全球登革热扩散的主要原因。IPCC AR5 指出,登革热和气候变量在全球和区域尺度上均存在密切相关(高置信度)。温度、降雨量、光照、湿度、极端天气事件对登革热的传播有重要影响。气温升高,登革病毒的外潜伏期缩短,媒介伊蚊成蚊叮人频率增加。降雨量增多可加速媒介伊蚊的发育和繁殖。气候变化对登革热影响存在滞后效应。Bai 等^[25]研究发现,温度升高将明显增加登革热传播的可能性。郑学礼和罗雷^[26]指出,当气温升高时,病毒外潜伏期缩短,蚊虫叮咬频率加快,媒介伊蚊分布区可能扩大。侯祥等^[27]发现,上月降雨天数与登革热的发生呈非线性正相关关系。气候因素驱动了广州市的登革热发病;上月最低温度、上月平均相对湿度、当月平均相对湿度与广州市登革热发生呈正相关,而当月风速、当月温度、滞后 2 个月降雨量与广州市登革热发生呈负相关^[28]。在台湾省南部,气象因素是登革热发生的重要决定因素,登革热确诊病例数与滞后 1~2 月的气象变量(温度、降雨量和相对湿度)呈阳性相关^[29]。气候变暖对降雨的分布也存在影响,有助于增加媒介伊蚊孳生地数量,导致媒介伊蚊幼虫大量繁殖,从而增加登革热暴发风险^[30]。

2.1.2 流行性乙型脑炎(乙脑) 乙脑是由乙脑病毒引起,主要经三带喙库蚊叮咬传播的一种急性传染病。近年来,乙脑发病率维持在较低水平,流行区已由西南地区(云南、贵州省及重庆市、四川省等)扩大到了西北地区(陕西、甘肃省和宁夏回族自治区等)及东北地区(辽宁省等),且成人发病率增高。乙脑发病与气象因素,如温度、湿度、降雨量等密切相关。大多数研究认为,气候变化对我国乙脑发病影响存在滞后效应。例如,在我国西南地区,滞后 1 个月的温度和滞后 2 个月的降雨增加了乙脑的发病风险^[31]。在重庆市,基于零膨胀回归模型显示气温(滞

表 1 气候变化对我国主要媒介生物的影响
Table 1 The impact of climate change on major disease vectors in China

媒介生物	温度 (°C)	相对湿度 (%)	降雨量 (mm)	日照时数 (h)	主要支持证据	不确定性
蚊虫	+	+	+	+	朱佳贤等(2015)、张红等(2017)、丁国允等(2015)、张叶群等(2016)、王振山等(2011)、吴争鸣等(2007)、Sang 等(2014)、Li 等(2019)	*
伊蚊	+	+	+	+/-	唐烨榕等(2020)、杜晓云等(2018)、俞泉宇等(2017)、易彬樑等(2003)、黎祖秋等(2018)、马敏等(2018)、赖辉兵等(2018)、郭钜旋等(2017)	*
白纹伊蚊	+/-	+	+	-	曾杜娟等(2020)、彭伟军等(2019)、肖扬等(2017)、周毅彬等(2010、2014)、苏露等(2015)、景晓等(1988)、林燕如等(2012)、杨荫子等(2019)、Wang 等(2020)、Liu 等(2017)、Yin 等(2019)、Jia 等(2016)	*
埃及伊蚊	+	+			丁鲁民等(1999)	*
致倦库蚊	+				Wang 等(2020)	*
三带喙库蚊	+/-		+	+	杨维芳等(2010)、《洪涝灾害常见自然疫源性疾病预防控制技术指南》(中国疾病预防控制中心, 2016)	*
中华按蚊	+/-	+	+/-		薛钊等(1985)、胡玉祥等(1986)、贾尚春等(2004)、吴旭光等(2005)、王伟明等(2010)、段金花等(2010)、刘小波等(2012)、Ren 等(2015)	*
雷氏按蚊		+			刘小波等(2012)	*
微小按蚊	+		+		杨继清等(2016)	*
斯氏按蚊	+				秦杰等(2020)	*
鼠	+/-	+	+		张知彬等(2003、2013)、武晓东等(2015)、Jiang 等(2013)、费蕾等(2015)	*
子午沙鼠	-		+		武晓东等(2015)	*
黑线仓鼠	-		+		武晓东等(2015)	*
三趾跳鼠	-		+		武晓东等(2015)	*
五趾跳鼠	-		+		武晓东等(2015)	*
根田鼠					孙平等(2002)	*
草原田鼠			+		Deitloff 等(2010)	*
高原鼯鼠	-		-	+	郭强等(2020)	**
布氏田鼠				+	张立等(2004)	*
灰仓鼠				+	廖力夫等(1999)	*
黑线姬鼠	-	+			费蕾等(2015)	*
褐家鼠	-	+			费蕾等(2015)	*
黄胸鼠	-	+			费蕾等(2015)	*
小家鼠	-	+			费蕾等(2015)	*
蜚	+	+	+	+/-	Sun 等(2017)、刘起勇等(2013)、曾四清等(2002)、赵国平等(2018)、邓国藩等(1991)	*
全沟硬蜱	+	+			姚清媚等(2020)、赵国平等(2018)	*
篦子硬蜱	+	+	+		翟羽佳等(2016)、姚清媚等(2020)	*
钉螺	+		+		黄轶昕等(2009)、Stensgaard 等(2019)、洪青标等(2003)、刘可群等(2015)	*

注: + 为正相关; - 为负相关; * 表示研究结果一致性在 90.01%~100%; ** 表示研究结果一致性在 33.00%~90.00%。

后 1 和 3 个月)与乙脑发病率呈正相关,降雨量(当月、滞后 4 个月)与乙脑发病率呈负相关^[32]。在山东省临沂市,当剔除了疫苗作用后,乙脑的发病与月平均温度和相对湿度呈正相关^[33]。

2.1.3 疟疾 疟疾曾是严重威胁我国人群健康的重要媒介生物传染病。自 2017 年起,中国已经无本地疟疾病例,2020 年中国已经完成了消除疟疾省级考核,国家卫生健康委员会已向 WHO 提交了中国消除疟疾申请。当前防控研究的重点是输入性疟疾引起的本地传播问题,特别是来自于非洲、东南亚等疫区归国人员。IPCC AR5 指出,疟疾和气象变量在区域尺度上呈正相关(高置信度)。疟疾的分布和传播与温度、降雨量、湿度、日照时数等气象因素密切

相关^[34-36]。

2.2 鼠传播疾病

2.2.1 气候变化对鼠疫的影响 鼠疫是人群感染鼠疫菌引起的,媒介蚤类是鼠疫菌的储存宿主,气候改变会影响蚤类数量增减,其中季节性变化带来的温湿度改变对其影响最为显著。蚤类主要通过形成菌栓来传播鼠疫,蚤类与菌栓的最适生存温度共同决定着鼠疫菌的繁殖能力,菌栓形成率及形成速度明显受气温影响^[37]。有研究表明,春天气温增加 1.00 °C 会导致沙鼠鼠疫流行率增加 50.00% 以上^[38]。啮齿目动物更适宜在温暖、湿润的冬季和春季生存,受未来气候变化影响,鼠疫在温带区的危险性将可能增加^[39]。极端天气和自然灾害现象的出现对鼠疫

流行的影响更加严重,更易引发大规模的鼠疫疫情^[40]。

2.2.2 气候变化对 HFRS 的影响 HFRS 是由汉坦病毒引起的一种以发热、出血及肾功能受损为主要症状的自然疫源性疾病^[41]。既往研究认为,HFRS 发生数量与温度、降雨量等有关。在高发季节前 1~6 个月内适宜的温度(10.00~25.00 ℃)和充足的降雨量(>120 mm)是 HFRS 的高危因素。充足的降雨量、较高的空气湿度和适宜温度等通过影响汉坦病毒宿主数量而影响 HFRS 发病^[42]。此外,较高的湿度可以增强汉坦病毒在外环境的感染性和生命力,潮湿地区或半湿润地区对汉坦病毒传播有促进作用^[43-44]。平均温度、降雨量、相对湿度和植被 4 个因素对 HFRS 影响的滞后模式不同^[45],温度对 HFRS 的最大滞后效应在不同气候带的表现也不相同^[46]。

2.3 蜱螨传播疾病

2.3.1 气候变化对 SFTS 的影响 SFTS 是 2009 年我国首次发现的新发蜱媒传染病,近年来主要发生在辽宁、河南、湖北、安徽和山东省等地区。气象因素是决定我国 SFTS 发生的独立危险因素。既往研究发现,SFTS 的发生主要与温度、相对湿度、降雨量、日照时数等密切相关,多呈“倒 U 型”分布^[47-56],而平均气压为保护因素^[53]。

2.3.2 气候变化对蜱传脑炎(TBE)的影响 TBE 是一种具有潜在致命性的人兽共患疾病,由 TBE 病毒引起,蜱叮咬传播。我国 TBE 多发于黑龙江、吉林、云南省及新疆维吾尔自治区和内蒙古等地,该病发生与温度、相对湿度和降雨量呈显著正相关^[57]。在我国东北地区,TBE 发病率与当月的平均气温、前 1 个月的累积日照时数呈正相关,与当月累积降雨量、前 2 个月月平均相对湿度呈负相关^[58]。

2.3.3 气候变化对恙虫病的影响 我国位于全球“恙虫病流行三角”的区域内,受气候变化、社会经济、城市化和医疗水平等影响,该病在我国的分布和发病呈扩大趋势。温度、降雨量、光照和湿度等变化直接影响媒介及宿主或者通过影响植被间接影响恙虫病分布。有研究显示,恙虫病发生风险在月平均最高、平均、最低降雨量分别为 600、200、12 mm 时达到最大,月平均最高、平均、最低温度分别在 34.00、22.00、12.00 ℃ 时发生风险最高,月平均归一化植被指数(NDVI)值在 100~200 时发生风险较高。气象因素对恙虫病发病影响呈现区域异质性。在我国北方,恙虫病高风险区分布于降雨量达 400 mm、日照时间 140~180 h 和相对湿度在 62.00%~65.00% 的区域;我国南方相对湿润,有利于恙螨的定殖、扩散^[59]。气候变化通过对生境的非线性影响,改变食

物来源、媒介和宿主的丰度,使得云南省恙虫病发病率随草地面积增加而先降后升,随着灌木面积增加而先升后降^[60]。上述影响过程存在潜隐期,危险因素的暴露与发病间存在滞后性,在广州市表现为温度升高 1.00 ℃,本周恙虫病发生风险增加 3.80%;相对湿度增加 10.00%,滞后 4 个月发病风险增加 8.50%^[61]。

2.4 螺传疾病 血吸虫病主要分布于热带和亚热带地区,在我国日本血吸虫病流行最广,主要分布于长江以南地区。近年来随着防控力度加大,我国血吸虫病感染率持续下降,但输入性血吸虫病风险日益增加。气温、相对湿度和降雨量对血吸虫病传播风险有较大贡献。研究发现,我国血吸虫病流行于 1 月平均气温 0 ℃ 以上地区,随着气温升高,0 ℃ 等温线向北移动,使更多人处于罹患血吸虫病风险中^[62]。我国血吸虫病传播的高风险区年降雨量在 1 095~1 927 mm,最暖月平均气温 19.70~29.30 ℃。气候变化对我国媒介生物传染病的影响见表 2。

3 气候变化对媒介生物及相关传染病影响的预估研究

3.1 气候变化对蚊媒传染病影响预估研究

3.1.1 气候变化对媒介伊蚊及登革热影响预估 未来气候变化情景下,我国媒介伊蚊适生区及登革热高风险区将进一步向北、向西扩大。例如,樊景春等利用 CLIMEX 模型预估发现,当前我国白纹伊蚊的高度适生区集中于海南、台湾、广东、广西、云南和福建等省(自治区、直辖市)的 269 个县(区)(6 085.87 km²)。未来气候变化情景下,白纹伊蚊高度适生区将向西、向北扩展,如在典型浓度路径(RCP)2.6 情景下(最低增温),到 2050 年高度适生区将达到 400 个县(区)(9 319.25 km²),在 RCP8.5 情景下(最高增温),到 2050 年高度适生区将达到 602 个县(区)(13 074.75 km²)。受未来气候变化情景下媒介伊蚊适生区变化的影响,将有更多的地区适合登革热传播。当前我国有 142 个县(区)的 1.68 亿人处于登革热高风险区,在 RCP2.6 情景下,2050 年高风险区将覆盖 344 个县(区)的 2.78 亿人,2100 年高风险区将覆盖 277 个县(区)的 2.33 亿人。RCP8.5 情景下,登革热的高风险区将进一步扩大,到 2100 年将增加至 598 个县(区)的 4.93 亿人^[63-64]。

3.1.2 气候变化对媒介按蚊及疟疾影响的预估 未来气候变化将对我国媒介按蚊适生区和疟疾风险区产生重要影响,对我国维持消除疟疾状态构成重大威胁。基于 Maxent 物种分布模型发现,同时考虑土地利用和城市化后,2030 和 2050 年代暴露于 4 种媒

表 2 气候变化对我国媒介生物传染病的影响
Table 2 The impact of climate change on vector-borne diseases in China

传染病	温度 (°C)	相对湿度 (%)	降雨量 (mm)	日照时数 (h)	主要支持证据	不确定性
登革热	+	+/-	+/-	+/-	Li 等(2013)、Zheng 等(2010)、侯祥等(2019)、Xu 等(2016)、Xiao 等(2018)、Wang 等(2014)、Chuang 等(2017)、Lai 等(2018)、Chang 等(2018)	**
乙脑	+	+	+		张斐斐等(2017)、王利亚等(2014)、樊正伟等(2018)、刘亚杰等(2003)、姜瀟月等(2016)、Bi 等(2003)、Wang 等(2014)	*
疟疾	+	+	+	+	樊雯婧等(2012)、郑金鑫等(2017)、郭萃等(2016)、刘体亚等(2011)、杨和仙等(2014)、张本光等(2013)、李月等(2014)、Guo 等(2015)、樊雯婧等(2013)、夏菁等(2016)、Zhai 等(2018)、Zhang 等(2012)、Zhou 等(2010)、Huang 等(2011)、Bi 等(2003)、Li 等(2013)	*
鼠疫	+	+	+		祁腾等(2014)、张宁等(2011)、徐丹丹等(2018)、Zhang 等(2014)、Xu 等(2011)	*
肾综合征出血热	+	+	+		Liang 等(2017)、He 等(2019)、Cao 等(2020)、Xiang 等(2018)、Yan 等(2007)、肖洪等(2011)	*
恙虫病	+	+	+	+	Li 等(2014)、Wu 等(2016)、Yao 等(2019)、孙焯等(2018)、Wei 等(2017)、Yu 等(2018)、吴义城等(2016)	*
发热伴血小板减少综合征	+	+	+	+	王旭等(2018)、何卫华等(2015)、尤爱国等(2012)、Du 等(2014)、Sun 等(2018)、Sun 等(2018)、Wang 等(2017)、Wu 等(2016)、Zhai 等(2016)、Zhang 等(2019)、郭辉等(2016)、Liu 等(2015)	*
蜱传脑炎	+/-	+/-	+/-	+	Sun 等(2017)、Zhao 等(2019)、Li 等(2017)、孙若曦等(2016)	**
血吸虫病	+	+	+		Wang 等(2007)、Zhou 等(2008)、Wang 等(2015)、Zhu 等(2017)	*

注: + 为正相关; - 为负相关; * 表示研究结果一致性在 90.01%~100%; ** 表示研究结果一致性在 33.00%~90.00%。

介按蚊的人口可能会呈现显著的净增长^[65]。未来不同情景下不同年代的疟疾发病率呈现同样的趋势。以 2004—2010 年河南和安徽省 205 个县(区)为现场^[66],使用遗传规划模型(GP-based model)发现,未进行防控情景下,未来疟疾发病率会显著升高,分布范围将显著增加,其中,2020 年华北地区发病率将会升高 19.00%~29.00%。基于广义可加模型(GAM)的预测发现,在 RCP4.5 和 RCP 8.5 情景下,间日疟和恶性疟分布范围在西北、北部、东北预计会有较高增长(>50%),间日疟空间变化比恶性疟更加明显。2030 年 2 个情景(RCP4.5、RCP 8.5)下间日疟将会平均增加 5.50% 和 9.80%,恶性疟将会平均增加 8.40% 和 6.90%;2080 年代上述 2 个情景下间日疟将会平均增加 49.80% 和 34.30%,恶性疟将会平均增加 47.10% 和 79.60%^[67]。

3.2 气候变化对未来鼠传疾病影响的预估 目前大多数研究基于模型进行不同时空的预测预警研究。一项基于最大熵(MaxEnt)模型对山东省 HFRS 的流行区风险预测,结果表明 HFRS 发病高风险区预测结果与实际发病分布基本一致,效果较好。全国 HFRS 发病的预测结果显示华北、华东、华中及西南地区多个省份为高危地区^[68]。目前尚未发现针对 HFRS 的预估研究报道。

3.3 气候变化对未来钉螺及血吸虫病影响的预估 气候变暖可使钉螺的分布区扩大,对我国 2030 年消

除血吸虫病目标构成不利影响。既往研究发现,在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,同基准期相比,钉螺的非适生区面积减小,而低-中适生区面积扩大,中-高适生区呈现向北方移动的趋势。杨坤等^[69]对不同气候变化情景下血吸虫病在我国传播范围与强度进行预估,发现 2050 和 2070 年代 2 种情景下血吸虫病分布北界出现北移,风险扩大,到 2050 年,血吸虫病例将增加 500 万例,但也有研究发现不同的结果。一项针对江苏、山东、河北等省份的研究表明,在全球气候变暖的前提下,随着纬度升高,北部地区气温升高,但是降雨量呈现减少趋势,并不能完全满足钉螺北移和血吸虫病流行向北扩展的气候条件^[70]。

4 气候变化对我国媒介生物传染病影响应对策略措施研究进展

随着气候变化对我国媒介生物时空分布的影响不断增加,我国媒介生物传染病发生风险也随之增加,加之近年来人群的自我防护意识越来越强,应对气候变化影响相关的防控策略措施也不断发展。

4.1 气候变化对媒介生物及相关传染病影响的应对策略 2000 年以前,我国媒介生物防控策略是媒介生物综合治理(integrated vector management, IVM)。2000 年以后,随着驱动我国媒介生物及相关传染病发生的自然和社会因素的改变,我国媒介生

物及相关传染病的防控策略也随之改变。刘起勇指出,媒介生物可持续控制是实现全球病媒控制对策 2017—2030 年的核心路径,该策略充分考虑了健康、生态和社会效益的最大化,在媒介生物综合治理的基础上进一步创新,实现了媒介生物的常规长效控制及媒介生物传染病风险的精准管控,在指导我国媒介生物传染病从暴发应急控制向暴发风险控制的转变中发挥重要作用。此外,《“健康中国 2030”规划纲要》、WHO“全球病媒控制对策 2017—2030”均涉及应对策略方面的内容。毕鹏^[71]认为,加强气候变化对人群健康影响的社区干预是应对气候变化保护人类健康的策略之一。在安徽省,一项针对 611 名临床医护人员的研究表明,多部门合作,有效防控措施,提高农村保健经费投入,加强网络直报硬件建设是气候变化背景下应对新发和再发传染病的主要策略^[72]。

4.2 气候变化对媒介生物及相关传染病影响的应对措施 气候变化对媒介生物及相关传染病的影响与日俱增,为有效应对气候变化的不利影响,近年来关于气候变化对媒介生物及相关传染病影响的应对研究也不断深入。在监测网络建设方面,中国疾病预防控制中心传染病预防控制所牵头建立了覆盖全国 31 个省(自治区、直辖市)及新疆生产建设兵团的 91 个地市的“全国病媒生物监测系统”以及覆盖全国 22 个省(自治区、直辖市)及新疆生产建设兵团的 58 个地市的“全国重要病媒生物抗药性监测系统”。基于上述监测系统,正在逐步建立和完善我国重要病媒生物监测预警系统。在干预研究方面,口岸利用大数据^[73]、物联网、地理信息系统(GIS)为核心的视频监控网等新技术手段进行了输入性病媒生物智能监控研究。在广东省,陈斌等^[74]对以“自上而下”行政干预和“自下而上”社区媒介综合治理相结合的登革热社区参与式干预模型进行了系统研究。

5 气候变化对我国媒介生物传染病影响未来研究建议

5.1 加强气候变化对我国媒介生物及相关传染病影响及应对策略研究顶层设计 我国已有少数省份针对气候变化背景下媒介生物及相关传染病应对策略开展了一些探索性的研究,但是研究区域碎片化,国家层面尚缺乏此方面的顶层设计和充足的研究证据。未来,应进一步推动此领域的研究实施并基于取得的研究证据指导国家层面的应对策略制定,力争将应对气候变化降低媒介生物及相关传染病负担纳入我国的疾病防控相关的政策、策略、规范、健康规划和行动计划制定中去。

5.2 加强气候变化对我国媒介生物及相关传染病影响及应对的系统性风险评估 当前,我国已经针对气候变化对媒介生物及相关传染病的影响开展了一些研究,但是仍缺乏系统性的评估。我国病媒生物监测预警网络尚不够完善,基于多维因素开展媒介生物传染病的风险评估及预警能力较弱。因此,我国应开展气候变化对媒介生物及相关传染病影响的系统性、经常性的研究,特别是其对未来 30~50 年的长期影响,加强气候变化对媒介生物及相关传染病实时动态风险评估和预警体系研究,定期发布国家风险评估报告,指导我国媒介生物及相关传染病科学精准控制。

5.3 厘清气候变化对我国媒介生物及相关传染病影响研究的盲区及薄弱点 从研究病种来看,当前气候变化对我国媒介生物及其相关传染病影响及应对研究主要聚焦于蚊传疾病中的登革热、疟疾和乙脑,鼠传疾病中的鼠疫和 HFRS 以及螺传疾病中的血吸虫病。其他重要媒介生物传染病研究较少,如基孔肯雅热、西尼罗热、黑热病和钩端螺旋体病等。从研究内容来看,气候变化对鼠疫和 HFRS 影响预估研究不足;气候变化背景下病媒生物入侵侦检及风险研究刚刚起步,如采采蝇(Tsetse fly)和部分种类锥蝽等;应用研究相对较多,但机制研究等基础性研究明显不足;气候变化背景下媒介生物传染病社区干预及可持续控制研究不足。从研究方法来看,传统研究方法较多,但社会学、人口学、气象学、地理学、环境学等学科研究方法不足。

5.4 加强气候变化对我国媒介生物及相关传染病影响以及应对研究立项和经费投入 气候变化对媒介生物及相关传染病影响以及应对属于当前的研究热点。与西方发达国家相比,目前我国在气候变化对媒介生物及相关传染病影响的风险以及应对机制方面研究起步晚、立项少、经费投入不足,对实现《“健康中国 2030”规划纲要》中提到的鼠疫、HFRS、登革热、疟疾、黑热病、包虫病等重要虫媒传染病和寄生虫病防治目标任务不利。建议我国科研项目管理部门如国家科技部、国家自然科学基金委员会等应进一步加大基金投入,确保创新成果产出,为应对气候变化降低媒介生物及相关传染病风险,保护人群健康方面提供依据。

5.5 注重气候变化对我国媒介生物及相关传染病影响以及应对领域高端人才培养 气候变化对媒介生物及相关传染病的影响以及应对研究,具有多学科交叉的研究性质,涉及多部门通力合作,对研究队伍人员的知识和能力要求高,但目前我国在该领域的高端复合型人才十分匮乏。广东省疾病预防控制

系统中仅 1/4 的被调查人员可以较好地理解气候变化对媒介生物及相关传染病的影响^[75]。建议:未来应进一步拓宽人才培养途径,不断加强该领域的高端人才、“一专多能”的复合型人才队伍建设,将加强人才培养提高到该领域战略发展的高度,确保应对气候变化保护人群健康工作的可持续性。

综上所述,我国应加强经费投入和人才队伍建设,做好气候变化对媒介生物及相关传染病影响以及应对策略研究的顶层设计,做好系统性的风险评估、预测预警、防控策略规划和干预措施研究,为有效应对气候敏感媒介生物传染病新挑战,保护脆弱人群健康和公共卫生安全,提供持续创新的精准策略和措施。

利益冲突 无

参考文献

- [1] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956. DOI:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.011.
Ren GY, Guo J, Xu MZ, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteor Sin, 2005, 63(6):942-956. DOI:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.06.011.
- [2] Wu F, Liu QY, Lu L, et al. Distribution of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in northwestern China [J]. Vector Borne Zoonotic Dis, 2011, 11(8):1181-1186. DOI:10.1089/vbz.2010.0032.
- [3] 易彬樨,张治英,徐德忠,等.气候因素对登革热媒介伊蚊密度影响的研究[J].中国公共卫生,2003,19(2):129-131. DOI:10.11847/zgggws2003-19-02-01.
Yi BT, Zhang ZY, Xu DZ, et al. Influence of climate factors on vector aedes density of dengue [J]. Chin J Public Health, 2003, 19(2):129-131. DOI:10.11847/zgggws2003-19-02-01.
- [4] 赖辉兵,罗立旷,欧庆华,等.云浮市登革热媒介密度与气候因素相关性分析[J].中华卫生杀虫药械,2018,24(1):51-55. DOI:10.19821/j.1671-2781.2018.01.016.
Lai HB, Luo LK, Ou QH, et al. Analysis on correlation between the density of dengue fever vector and climatic factors in Yunfu city [J]. Chin J Hyg Insect Equip, 2018, 24(1):51-55. DOI:10.19821/j.1671-2781.2018.01.016.
- [5] Jia PF, Lu L, Chen X, et al. A climate-driven mechanistic population model of *Aedes albopictus* with diapause [J]. Parasit Vectors, 2016, 9:175. DOI:10.1186/s13071-016-1448-y.
- [6] 葛文鑫,靳珂珂,孙丽娜,等.登革热流行与不同气象因素相关性研究进展[J].中国媒介生物学及控制杂志,2019,30(4):367-370. DOI:10.11853/j.issn.1003.8280.2019.04.002.
Ge WX, Jin KK, Sun LN, et al. Research advances in the relationship between dengue epidemic and different meteorological factors [J]. Chin J Vector Biol Control, 2019, 30(4):367-370. DOI:10.11853/j.issn.1003.8280.2019.04.002.
- [7] 景晓,王学军,江媛媛.白纹伊蚊飞翔能力和扩散距离观察[J].中国媒介生物学及控制杂志,1998,9(3):165-167. DOI:10.3969/j.issn.1003-4692.1998.03.004.
Jing X, Wang XJ, Jiang YY. Investigation on the hover ability and spread range of *Aedes albopictus* [J]. Chin J Vector Biol Control, 1998, 9(3):165-167. DOI:10.3969/j.issn.1003-4692.1998.03.004.
- [8] 喻潇.白纹伊蚊和埃及伊蚊对温度、光周期耐受范围的比较研究[D].北京:中国疾病预防控制中心,2013.
Yu X. Comparative study on tolerance range of *Aedes albopictus* and *Ae. aegypti* to temperature and photoperiod [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2013.
- [9] Li S, Tao HY, Xu Y. Abiotic determinants to the spatial dynamics of dengue fever in Guangzhou [J]. Asia Pac J Public Health, 2013, 25(3):239-247. DOI:10.1177/1010539511418819.
- [10] Guo C, Yang L, Ou CQ, et al. Malaria incidence from 2005-2013 and its associations with meteorological factors in Guangdong, China [J]. Malar J, 2015, 14:116. DOI:10.1186/s12936-015-0630-6.
- [11] Xiang J, Hansen A, Liu Q, et al. Association between malaria incidence and meteorological factors: a multi-location study in China, 2005-2012 [J]. Epidemiol Infect, 2018, 146(1):89-99. DOI:10.1017/S0950268817002254.
- [12] Jiang GS, Liu J, Xu L, et al. Climate warming increases biodiversity of small rodents by favoring rare or less abundant species in a grassland ecosystem [J]. Integr Zool, 2013, 8(2):162-174. DOI:10.1111/1749-4877.12027.
- [13] 武晓东,袁帅,付和平,等.不同干扰下阿拉善荒漠啮齿动物优势种对气候变化的响应[J].生态学报,2016,36(6):1765-1773. DOI:10.5846/stxb201408061564.
Wu XD, Yuan S, Fu HP, et al. Responses of dominant rodent species to climate change in different disturbed habitats in the Alashan desert [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(6):1765-1773. DOI:10.5846/stxb201408061564.
- [14] Orland MC, Kelt DA. Responses of a heteromyid rodent community to large and small-scale resource pulses: diversity, abundance, and home-range dynamics [J]. J Mammal, 2007, 88(5):1280-1287. DOI:10.1644/06-MAMM-A-408.1.
- [15] 费蕾,汪祖国,姚瑶,等.上海奉贤区农田鼠类种群数量变动以及气候和耕作因素的影响[J].应用生态学报,2015,26(2):579-587.
Fei L, Wang ZG, Yao Y, et al. Population change of farmland rodent and the influences of climate and cultivation factors in Fengxian district of Shanghai, China [J]. Chin J Appl Ecol, 2015, 26(2):579-587.
- [16] Sun RX, Lai SJ, Yang Y, et al. Mapping the distribution of tick-borne encephalitis in mainland China [J]. Ticks Tick-Borne Dis, 2017, 8(4):631-639. DOI:10.1016/j.ttbdis.2017.04.009.
- [17] 李贵昌,王玉娟,岳玉娟,等.我国恙虫病夏季型和秋季型疫区划分研究[J].中国媒介生物学及控制杂志,2019,30(3):233-236. DOI:10.11853/j.issn.1003.8280.2019.03.001.
Li GC, Wang YJ, Yue YJ, et al. Division of epidemic areas for summer-and autumn-type scrub typhus in China [J]. Chin J Vector Biol Control, 2019, 30(3):233-236. DOI:10.11853/j.issn.1003.8280.2019.03.001.

- [18] 徐秉锬, 苏克勤, 陈心陶. 地里红恙虫蚴的出现数量、分布和恙虫病的流行之关系的研究[J]. 微生物学报, 1959, 7(1/2): 1-9. DOI: 10.13343/j.cnki.wsxb.1959.z1.013.
Xu BK, Su KQ, Chen XT. Larvae of *Trombicula akamushi* var. *deliensis* as related to the epidemiology of tsutsugamushi [J]. Acta Microbiol Sin, 1959, 7(1/2): 1-9. DOI: 10.13343/j.cnki.wsxb.1959.z1.013.
- [19] Cao M, Guo HB, Tang T, et al. Spring scrub typhus, people's republic of China [J]. Emerg Infect Dis, 2006, 12(9): 1463-1465. DOI: 10.3201/eid1209.060257.
- [20] 杨坤, 周晓农, 梁幼生, 等. 冬季温度变化对钉螺一氧化氮合酶的影响[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2003, 15(2): 93-97. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6661.2003.02.004.
Yang K, Zhou XN, Liang YS, et al. Impact of temperature on Nitric Oxide Synthase of *Oncomelania hupensis* during winter [J]. Chin J Schisto Control, 2003, 15(2): 93-97. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6661.2003.02.004.
- [21] 杨坤, 周晓农, 梁幼生, 等. 春季温度变化对钉螺酶活性的影响[J]. 中国人兽共患病杂志, 2004, 20(6): 515-518. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2694.2004.06.015.
Yang K, Zhou XN, Liang YS, et al. Influence of temperature change in spring on the activities of enzymes in *Oncomelania hupensis* [J]. Chin J Zoonoses, 2004, 20(6): 515-518. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2694.2004.06.015.
- [22] 张聪, 易佳, 李博, 等. 温湿度环境因素对钉螺在野外实验基地生存繁殖的影响[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(5): 34-37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2483.2020.05.009.
Zhang C, Yi J, Li B, et al. Effects of the environmental temperature and humidity on the survival and reproduction of *Oncomelania snails* in field experimental base [J]. J Public Health Prev Med, 2020, 31(5): 34-37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2483.2020.05.009.
- [23] 孙乐平, 洪青标, 周晓农, 等. 日本血吸虫毛蚴存活曲线和期望寿命的实验观察[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2000, 12(4): 221-223. DOI: 10.16250/j.32.1374.2000.04.013.
Sun LP, Hong QB, Zhou XN, et al. Observation on survival curve and expected life span of miracidia of *Schistosoma japonicum* [J]. Chin J Schisto Control, 2000, 12(4): 221-223. DOI: 10.16250/j.32.1374.2000.04.013.
- [24] 陈艳艳, 刘建兵, 肖瑛, 等. 钉螺感染率与气候因素的空间回归关系研究[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2015, 27(2): 125-128. DOI: 10.16250/j.32.1374.2014245.
Chen YY, Liu JB, Xiao Y, et al. Spatial regression analysis of relationship between schistosome infection rate of *Oncomelania hupensis* snails and climate factors [J]. Chin J Schisto Control, 2015, 27(2): 125-128. DOI: 10.16250/j.32.1374.2014245.
- [25] Bai L, Morton LC, Liu QY. Climate change and mosquito-borne diseases in China: a review [J]. Global Health, 2013, 9: 10. DOI: 10.1186/1744-8603-9-10.
- [26] 郑学礼, 罗雷. 埃及伊蚊对重要黄病毒易感性研究概况(一) [J]. 寄生虫与医学昆虫学报, 2010, 17(1): 47-54.
Zheng XL, Luo L. Research progress on flavivirus susceptibility in *Aedes aegypti* [J]. Acta Parasitol Med Entomol Sin, 2010, 17(1): 47-54.
- [27] 侯祥, 刘可可, 刘小波, 等. 气候因素对广东省登革热流行影响的非线性效应[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2019, 30(1): 25-30. DOI: 10.11853/j.issn.1003.8280.2019.01.005.
Hou X, Liu KK, Liu XB, et al. Nonlinear effects of climate factors on dengue epidemic in Guangdong province, China [J]. Chin J Vector Biol Control, 2019, 30(1): 25-30. DOI: 10.11853/j.issn.1003.8280.2019.01.005.
- [28] Wang CG, Jiang BF, Fan JC, et al. A study of the dengue epidemic and meteorological factors in Guangzhou, China, by using a zero-inflated Poisson regression model [J]. Asia Pac J Public Health, 2014, 26(1): 48-57. DOI: 10.1177/1010539513490195.
- [29] Chang CJ, Chen CS, Tien CJ, et al. Epidemiological, clinical and climatic characteristics of dengue fever in Kaohsiung city, Taiwan with implication for prevention and control [J]. PLoS One, 2018, 13(1): e0190637. DOI: 10.1371/journal.pone.0190637.
- [30] 易彬橙, 张治英, 徐德忠, 等. 广东省登革热流行与伊蚊种群随气候因素变化的相互关系[J]. 卫生研究, 2003, 32(2): 152-154. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8020.2003.02.018.
Yi BT, Zhang ZY, Xu DZ, et al. Relationship of dengue fever epidemic to Aedes density changed by climate factors in Guangdong province [J]. J Hyg Res, 2003, 32(2): 152-154. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8020.2003.02.018.
- [31] Zhao X, Cao MQ, Feng HH, et al. Japanese encephalitis risk and contextual risk factors in southwest China: a Bayesian hierarchical spatial and spatiotemporal analysis [J]. Int J Environ Res Public Health, 2014, 11(4): 4201-4217. DOI: 10.3390/ijerph110404201.
- [32] Bai YT, Xu ZG, Zhang J, et al. Regional impact of climate on Japanese encephalitis in areas located near the three gorges dam [J]. PLoS One, 2014, 9(1): e84326. DOI: 10.1371/journal.pone.0084326.
- [33] Lin HL, Yang LQ, Liu QY, et al. Time series analysis of Japanese encephalitis and weather in Linyi city, China [J]. Int J Public Health, 2012, 57(2): 289-296. DOI: 10.1007/s00038-011-0236-x.
- [34] 李月, 孟郁洁, 陈倩倩, 等. 亳州市疟疾发病与气象因素关系的研究[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(11): 988-992. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2014.11.026.
Li Y, Meng YJ, Chen QQ. Association between meteorological factor and incidence of malaria in Bozhou city, Anhui province [J]. J Environ Health, 2014, 31(11): 988-992. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2014.11.026.
- [35] 樊雯婧, 陆群, 仰凤桃, 等. 合肥市 1999-2009 年间日疟与气象因素关系研究[J]. 中国热带医学, 2012, 12(9): 1058-1061. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2012.09.028.
Fan WJ, Lu Q, Yang FT, et al. Relationship between morbidity of *Plasmodium vivax* malaria infection and meteorological factors in Hefei city of Anhui province in 1999-2009 [J]. China Trop Med, 2012, 12(9): 1058-1061. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2012.09.028.
- [36] 郑金鑫, 史本云, 杨国静. 间日疟疫情与气象因素的广义相加

- 模型研究[J]. 中国人兽共患病学报, 2017, 33(8): 674-679. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2694.2017.08.002.
- Zheng JX, Shi BY, Yang GJ. Generalized additive model of *Plasmodium vivax* malaria incidence and meteorological factors [J]. Chin J Zoonoses, 2017, 33(8): 674-679. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2694.2017.08.002.
- [37] 祁腾, 杨孔, 杨艾琳. 鼠疫在自然界延续生存的生态学机制 [J]. 现代预防医学, 2014, 41(17): 3227-3229.
- Qi T, Yang K, Yang AL. Ecological mechanism of plague exist in nature [J]. Mod Prev Med, 2014, 41(17): 3227-3229.
- [38] Stenseth NC, Samia NI, Viljugrein H, et al. Plague dynamics are driven by climate variation [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103(35): 13110-13115. DOI: 10.1073/pnas.0602447103.
- [39] Kausrud KL, Viljugrein H, Frigessi A, et al. Climatically driven synchrony of gerbil populations allows large-scale plague outbreaks [J]. Proc Biol Sci, 2007, 274(1621): 1963-1969. DOI: 10.1098/rspb.2007.0568.
- [40] 徐丹丹, 尹家祥. 气候变化对鼠疫流行的影响[J]. 热带医学杂志, 2018, 18(1): 111-113, 121. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3619.2018.01.030.
- Xu DD, Yin JX. Impact of climate change on the epidemic of plague [J]. J Trop Med, 2018, 18(1): 111-113, 121. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3619.2018.01.030.
- [41] Zhang YZ, Holmes EC. What is the time-scale of hantavirus evolution? [J]. Infect Genet Evol, 2014, 25: 144-145. DOI: 10.1016/j.meegid.2014.04.017.
- [42] Liu J, Xue FZ, Wang JZ, et al. Association of haemorrhagic fever with renal syndrome and weather factors in Junan county, China: a case-crossover study [J]. Epidemiol Infect, 2013, 141(4): 697-705. DOI: 10.1017/S0950268812001434.
- [43] Yan L, Liu W, Huang HG, et al. Landscape elements and Hantaan virus-related hemorrhagic fever with renal syndrome, People's Republic of China [J]. Emerg Infect Dis, 2007, 13(9): 1301-1306. DOI: 10.3201/eid1309.061481.
- [44] Hardestam J, Simon M, Hedlund KO, et al. Ex vivo stability of the rodent-borne Hantaan virus in comparison to that of arthropod-borne members of the *Bunyaviridae* family [J]. Appl Environ Microbiol, 2007, 73(8): 2547-2551. DOI: 10.1128/AEM.02869-06.
- [45] He JY, Wang Y, Mu D, et al. The impacts of climatic factors and vegetation on hemorrhagic fever with renal syndrome transmission in China: a study of 109 counties [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(18): 3434. DOI: 10.3390/ijerph16183434.
- [46] Cao LN, Huo XY, Xiang JJ, et al. Interactions and marginal effects of meteorological factors on haemorrhagic fever with renal syndrome in different climate zones: evidence from 254 cities of China [J]. Sci Total Environ, 2020, 721: 137564. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137564.
- [47] 王旭, 张丹丹, 郑兆磊, 等. 威海市发热伴血小板减少综合征与气象因素关系 [J]. 山东大学学报: 医学版, 2018, 56(8): 114-120. DOI: 10.6040/j.issn.1671-7554.0.2018.459.
- Wang X, Zhang DD, Zheng ZL, et al. Relationship between severe fever with thrombocytopenia syndrome and meteorological factors in Weihai city [J]. J Shandong Univ Health Sci, 2018, 56(8): 114-120. DOI: 10.6040/j.issn.1671-7554.0.2018.459.
- [48] 何卫华, 郭芳, 刘晓辉, 等. 随州市发热伴血小板减少综合征的发病与气象因素关系研究 [J]. 实用预防医学, 2015, 22(11): 1302-1304. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3110.2015.011.006.
- He WH, Guo F, Liu XH, et al. Relationship between the incidence of fever with thrombocytopenia syndrome and meteorological factors in Suizhou city [J]. Pract Prev Med, 2015, 22(11): 1302-1304. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3110.2015.011.006.
- [49] 尤爱国, 康锴, 王海峰, 等. 气象因素与发热伴血小板减少综合征发病关系的生态学研究 [J]. 中国人兽共患病学报, 2012, 28(9): 898-901. DOI: 10.3969/cjz.j.issn.1002-2694.2012.09.008.
- You AG, Kang K, Wang HF, et al. Ecological study on the relationship between meteorological factors and incidence of fever, thrombocytopenia and leukopenia syndrome (FTLS) [J]. Chin J Zoonoses, 2012, 28(9): 898-901. DOI: 10.3969/cjz.j.issn.1002-2694.2012.09.008.
- [50] 郭辉, 王建跃, 仝振东, 等. 舟山海岛气象因素与发热伴血小板减少综合征流行关系研究 [J]. 中国公共卫生管理, 2016, 32(2): 159-161. DOI: 10.19568/j.cnki.23-1318.2016.02.006.
- Wu H, Wang JY, Tong ZD, et al. Study on relationship between meteorological factors and epidemiology of severe fever with thrombocytopenia syndrome in Zhoushan islands [J]. Chin J Public Health Manage, 2016, 32(2): 159-161. DOI: 10.19568/j.cnki.23-1318.2016.02.006.
- [51] Sun JM, Lu L, Liu KK, et al. Forecast of severe fever with thrombocytopenia syndrome incidence with meteorological factors [J]. Sci Total Environ, 2018, 626: 1188-1192. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.196.
- [52] Liang W, Deng F, Xie Z, et al. Spatial analysis of severe fever with thrombocytopenia syndrome virus in China using a geographically weighted logistic regression model [J]. Int J Environ Res Public Health, 2016, 13(11): 1125. DOI: 10.3390/ijerph13111125.
- [53] 翟羽佳, 李傅冬, 尚晓鹏, 等. 气象因素与发热伴血小板减少综合征关联研究 [J]. 浙江预防医学, 2016, 28(2): 117-120. DOI: 10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.02.003.
- Zhai YJ, Li FD, Shang XP, et al. A study on the association between meteorological factors and severe fever with thrombocytopenia syndrome [J]. Zhejiang Prev Med, 2016, 28(2): 117-120. DOI: 10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.02.003.
- [54] Liu K, Cui N, Fang LQ, et al. Epidemiologic features and environmental risk factors of severe fever with thrombocytopenia syndrome, Xinyang, China [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2014, 8(5): e2820. DOI: 10.1371/journal.pntd.0002820.
- [55] Sun JM, Lu L, Yang J, et al. Association between severe fever with thrombocytopenia syndrome incidence and ambient temperature [J]. Am J Trop Med Hyg, 2018, 98(5): 1478-1483. DOI: 10.4269/ajtmh.17-0991.
- [56] Wang T, Li XL, Liu M, et al. Epidemiological characteristics and environmental risk factors of severe fever with thrombocytopenia

- syndrome in Hubei province, China, from 2011 to 2016[J]. Front Microbiol, 2017, 8:387.
- [57] Zhao QL, Li XL, Zhang WY, et al. Epidemiological characteristics and spatial analysis of tick-borne encephalitis in Jilin province, China [J]. Am J Trop Med Hyg, 2019, 101(1): 189-197. DOI: 10.4269/ajtmh.18-0958.
- [58] 孙若曦, 李新楼, 刘昆, 等. 我国东北地区森林脑炎的分布与环境特征研究[J]. 中国病原生物学杂志, 2016, 11(6): 481-487, 490. DOI: 10.13350/j.cjpb.160601.
- Sun RX, Li XL, Liu K, et al. Study on the distribution and environmental determinants of tick-borne encephalitis in northeastern China [J]. J Parasit Biol, 2016, 11(6): 481-487, 490. DOI: 10.13350/j.cjpb.160601.
- [59] 孙焯. 我国恙虫病地方性流行南北异质性比较研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2016.
- Sun Y. A comparative study on the epidemiological heterogeneity of Scrub Typhus between northern and southern China [D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2016.
- [60] 孙焯, 史超, 李新楼, 等. 云南省 2006—2013 年恙虫病流行特征及影响因素研究[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(1): 54-57. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.01.011.
- Sun Y, Shi C, Li XL, et al. Epidemiology of scrub typhus and influencing factors in Yunnan province, 2006-2013 [J]. Chin J Epidemiol, 2018, 39(1): 54-57. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.01.011.
- [61] Wei YH, Huang Y, Li XN, et al. Climate variability, animal reservoir and transmission of scrub typhus in Southern China [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2017, 11(3): e0005447. DOI: 10.1371/journal.pntd.0005447.
- [62] Yang GJ, Vounatsou P, Zhou XN, et al. A potential impact of climate change and water resource development on the transmission of *Schistosoma japonicum* in China [J]. Parasitologia, 2005, 47(1): 127-134.
- [63] 刘小波, 吴海霞, 鲁亮. 对话刘起勇: 媒介伊蚊可持续控制是预防寨卡病毒病的杀手锏[J]. 科学通报, 2016, 61(21): 2323-2325.
- Liu XB, Wu HX, Lu L. Dialogue Qiyong Liu: the sustainable control of *Aedes* mosquitoes is the key to the prevention of Zika virus disease [J]. Chin Sci Bull, 2016, 61(21): 2323-2325.
- [64] Fan JC, Liu QY. Potential impacts of climate change on dengue fever distribution using RCP scenarios in China [J]. Adv Climate Change Res, 2019, 10(1): 1-8. DOI: 10.1016/j.accre.2019.03.006.
- [65] Ren ZP, Wang DQ, Ma AM, et al. Predicting malaria vector distribution under climate change scenarios in China: challenges for malaria elimination [J]. Sci Rep, 2016, 6: 20604. DOI: 10.1038/srep20604.
- [66] 宋泳泽, 葛咏, 彭军还, 等. 疟疾预测的遗传规划方法与应用: 以安徽省省(市)疟疾发病率为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(8): 954-962. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00954.
- Song YZ, Ge Y, Peng JH, et al. Application of genetic programming on predicting and mapping malaria in Anhui province [J]. J Geo-Inf Sci, 2015, 17(8): 954-962. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00954.
- [67] Hundessa S, Williams G, Li SS, et al. Projecting potential spatial and temporal changes in the distribution of *Plasmodium vivax* and *P. falciparum* malaria in China with climate change [J]. Sci Total Environ, 2018, 627: 1285-1293. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.300.
- [68] 许勤勤. 山东省肾综合征出血热流行特征及其区域风险预测 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- Xu QQ. Epidemiological characteristics and regional risk prediction of hemorrhagic fever with renal syndrome in Shandong province [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.
- [69] 杨坤, 潘婕, 杨国静, 等. 不同气候变化情景下中国血吸虫病传播的范围与强度预估[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 248-253. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2010.04.003.
- Yang K, Pan J, Yang GJ, et al. Projection of the transmission scale and intensity of schistosomiasis in China Under A2 and B2 climate change scenarios [J]. Adv Climate Change Res, 2010, 6(4): 248-253. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2010.04.003.
- [70] 黄轶昕, 任志远, 杭德荣, 等. 南水北调东线气候变化对血吸虫病传播潜在影响的研究[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2009, 21(3): 197-204. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6661.2009.03.009.
- Huang YX, Ren ZY, Hang DR, et al. Potential effect of climate changes on schistosomiasis japonica transmission in east route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Chin J Schisto Control, 2009, 21(3): 197-204. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6661.2009.03.009.
- [71] 毕鹏. 气候变化对弱势群体健康影响的社区干预[J]. 中华预防医学杂志, 2018, 52(4): 348-351.
- Bi P. Climate change, health impacts in the vulnerable communities and adaptations [J]. Chin J Prev Med, 2018, 52(4): 348-351.
- [72] Tong MX, Hansen A, Hanson-Easey S, et al. China's capacity of hospitals to deal with infectious diseases in the context of climate change [J]. Soc Sci Med, 2018, 206: 60-66. DOI: 10.1016/j.socscimed.2018.04.021.
- [73] 孙晓东, 张芳, 李绪芝, 等. 大数据在国境口岸媒介生物监测与控制中的应用[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2015, 38 增刊 1: 71.
- Sun XD, Zhang F, Li XZ, et al. Application of big data in vector surveillance and control at frontier ports [J]. Chin J Front Health Quarant, 2015, 38 Suppl 1: 71.
- [74] 陈斌, 杨军, 桑少伟, 等. 广州市登革热疫情响应与适应机制定性评估研究[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2016, 27(3): 216-219. DOI: 10.11853/j.issn.1003.8280.2016.03.002.
- Chen B, Yang J, Sang SW, et al. Qualitative assessment on response and adaptation strategies of dengue fever in Guangzhou, China [J]. Chin J Vector Biol Control, 2016, 27(3): 216-219. DOI: 10.11853/j.issn.1003.8280.2016.03.002.
- [75] Tong MX, Hansen A, Hanson-Easey S, et al. Perceptions of capacity for infectious disease control and prevention to meet the challenges of dengue fever in the face of climate change: a survey among CDC staff in Guangdong province, China [J]. Environ Res, 2016, 148: 295-302. DOI: 10.1016/j.envres.2016.03.043.