

# 血吸虫病传播气候预警模型的应用与前景

杨国静<sup>1</sup>, 孙乐平<sup>1</sup>, 洪青标<sup>1</sup>, 杨坤<sup>1</sup>, 邓瑶<sup>1</sup>, 李石柱<sup>2</sup>, 吕山<sup>2</sup>, 周晓农<sup>2</sup>

**[摘要]** 本综述提出了与血吸虫病传播有关的气候敏感因子的基本概念, 分析了气候敏感因子与血吸虫病各传播环节间的关系, 介绍了已建立的气候敏感因子对血吸虫病传播影响的预警模型, 包括决定性模型和数理统计学模型。此外, 从不同情景下的血吸虫病传播范围与强度预测、各类预测模型的校准、模型预测的不确定性等 3 个方面, 提出了今后研究的重点与方向。

**[关键词]** 血吸虫病; 传播; 气候预警模型; 气候敏感因子

**[中图分类号]** R532.21 **[文献标识码]** A

## Application and perspective of climatic forecasting models related to schistosomiasis transmission

Yang Guo-jing<sup>1</sup>, Sun Le-ping<sup>1</sup>, Hong Qing-biao<sup>1</sup>, Yang Kun<sup>1</sup>, Deng Yao<sup>1</sup>, Li Shi-zhu<sup>2</sup>, Lv Shan<sup>2</sup>, Zhou Xiao-nong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Institute of Parasitic Diseases Wuxi 214064, China; <sup>2</sup> National Institute of Parasitic Diseases Chinese Center for Disease Control and Prevention China

**[Abstract]** The concept of sensitive climate factors related to schistosomiasis transmission was put forward and those sensitive climate factors were quantitatively correlated with the life cycle of *Schistosoma japonicum*. The models developed previously were summarized as a deterministic model and a mathematic model. Finally, three research priorities were recommended as ① predicting intensity and areas of schistosomiasis transmission under different scenarios ② validation and adjustment of forecast models and ③ determining uncertainty of forecast models

**[Key words]** Schistosomiasis; Transmission; Climatic forecasting model; Sensitive climate factors

气候既是自然环境的一个组成部分, 又是影响自然环境和人类活动的一个重要因素<sup>[1]</sup>。气候是天气的统计特征, 一个地区的气候是指某种统计的平衡状态, 它用温、湿、压、风、降水、蒸发、日照等气候因子在较长时段 (通常规定为 30 年) 的样本所取得的统计平均值、极差、方差和高阶矩来描述。而气候因子指形成生物环境的各因子<sup>[2-3]</sup>。由温度因子 (绝对值、变化类型和幅度)、水分因子 (降水量、降雨型、湿度)、光因子 (照度、日照时间)、大气因子 (氧气及 CO<sub>2</sub> 浓度、风) 等所组成<sup>[4]</sup>。近百年来, 地球气候经历了一次以全球变暖为主要特征的显著变化, 专家估计未来 50~100 年全球气候将继续变暖。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 第一款中, 将“气候变化”定义为: “经过相当一段时间的观察, 在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变。” UNFCCC 因此将因人类活动而改变大气组成的“气候变化”与归因于自然原因的“气候变率”区分开来<sup>[1]</sup>。因此, 气候变化是指气候平均状态统计学意义上的巨大改变或者持续较长一段时间 (典型的为 10 年或更长) 的气候变动。简而言之, 气候变化是指

气候平均值和离差值两者中的一个或两者同时随时间出现了统计学意义上的显著变化。平均值的升降, 表明气候平均状态的变化; 离差值增大, 表明气候状态不稳定性增加, 气候异常愈明显。气候变化的原因可能是自然的内部进程, 或是外部强迫, 或者是人为地持续对大气组成成分和土地利用的改变<sup>[5-6]</sup>。

2001 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 3 次评估报告指出, 1860 年以来, 全球平均温度升高了 (0.6 ± 0.2) °C, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度明显增加。同时我国气候也在变暖, 以西北、华北和东北地区最为明显, 以冬季增温最为显著。1985 年以来, 我国已连续出现 17 个全国大范围的暖冬, 华北地区出现暖干化趋势。科学家预测 2100 年全球平均气温将比 1990 年上升 1.4~5.8 °C, 将是 20 世纪增温值 (0.6 °C 左右) 的 2~10 倍<sup>[1]</sup>。预计 2020~2030 年我国平均气温将比 1990 年上升 1.7 °C, 到 2050 年将上升 2.2 °C, 当大气中 CO<sub>2</sub> 浓度加倍时, 全国平均气温将上升 2.9 °C, 气候变暖可能会对地区的天气形式和生态平衡造成干扰, 从而对人体健康产生多方面影响<sup>[7-9]</sup>。

全球气候变暖所引起的降雨和温度变化, 势必影响血吸虫病的原有分布格局。褚秀娟等<sup>[7]</sup>、梁幼生等<sup>[10]</sup>提出气候变化可能对钉螺分布产生影响, Yang 等<sup>[11]</sup>、Zhou 等<sup>[12]</sup>认为研究全球气候变暖对钉螺分布和血吸虫病流行的影响十分必要。气候变暖一方面可扩大和加重原血吸虫病流行区的流行范围程度, 另一方面为钉螺向北方扩散创造了条件。因此, 应用时空预警模型来监测或预测这种影响很有必要<sup>[13-14]</sup>。本文首先归

**[基金项目]** 世界卫生组织 热带病研究与培训特别规划署资助项目 (A30298, A70530); 国家重大科技专项 (2008ZX1004-011)

**[作者单位]** <sup>1</sup>江苏省血吸虫病防治研究所 (无锡 214064); <sup>2</sup>中国疾病预防控制中心寄生虫病预防控制所

**[作者简介]** 杨国静, 女, 博士, 副研究员。研究方向: 血吸虫病流行病学与气候变化

纳了影响血吸虫病传播的气候敏感因子,在此基础上综述构建模型的主要方法与今后发展前景,旨在为定量分析气候变化对血吸虫病传播影响及其相应对策研究提供更好的方法。

1 气候敏感因子

日本血吸虫及其中间宿主钉螺的生活史均与环境关系极其密切。与血吸虫病相关的气候敏感因子,即血吸虫病传播过程中受气候变化影响较大的因子,如温度、湿度、雨量等。主要表现为日本血吸虫虫卵随粪便入水后的孵化、毛蚴在水中感染钉螺、子胞蚴和母胞蚴在钉螺体内的发育繁殖、尾蚴从钉螺体内逸出、尾蚴在水体中的分布等阶段;钉螺的螺卵孵化、幼螺在水中的生长、成螺在湿地中的孳生、交配、产卵,以及毛蚴感染钉螺的环境等<sup>[15-18]</sup>。研究发现,温度、湿度、雨量以及 pH 值均与日本血吸虫在环境中各阶段的发育有关,与毛蚴感染钉螺、尾蚴感染哺乳动物的概率有关<sup>[16, 19-27]</sup>(表 1)。

各种气候因子均可影响到日本血吸虫及钉螺生活史的各个阶段,进而影响到血吸虫病流行区和钉螺区域的分布<sup>[21, 28]</sup>。四川省调查显示,平坝地区有螺无病的乡(镇)有 91.1%分布在都江堰老灌区,该区水流量大、流速快、水温低,年平均水温为 12.4℃;另有 8.9%分布在中型堰首段,年平均水温为 14.7℃;小型堰年均水温>16℃,附近均为流行区。在高山区,血吸虫病流行程度随海拔高度的升高而降低,当气温<16℃时,即出现有螺无病区,但其间水温差异≤2℃(15.8~17.5℃)<sup>[29-30]</sup>。是否有其他因素对流速、水质等产生影响,还有待深入研究。有钉螺分布的地区,其 1 月份平均气温>0℃,或 1 月份平均最低温度>-4℃,或年平均气温>14℃,且年雨量>750 mm。提示钉螺分布与温度和雨量密切相关。另外,钉螺的分布还与土壤、植被等有一定的关系。

表 1 气候因子与日本血吸虫病传播的相关性分析

气候因子	作用阶段	相关性分析要点
温度	虫卵孵化	日本血吸虫虫卵最适孵化温度为 25~30℃ (范围为 3~37℃)
	毛蚴感染钉螺	毛蚴感染钉螺较适宜温度为 21~31℃。温度越高,毛蚴活力越强,但寿命愈短
	尾蚴逸出钉螺	最适宜温度为 20~25℃。<5℃或>30℃均不利于尾蚴逸出
	尾蚴感染人体、动物	最适温度为 15~20℃
	钉螺螺卵发育	最适温度为 27℃ (范围为 11.79~38.22℃),有效积温 236 日度
	钉螺成螺孳生与繁殖	最适温度为 20~25℃,有效积温为 3 846.3 日度,钉螺致死最低温度为 2.72℃,最高温度为 42.13℃。钉螺冬眠温度为 5.82℃,夏蛰温度为 40℃
	幼虫在钉螺体内完成发育	有效积温为 852.6 日度,<15.35℃或>40℃就停止在钉螺体内发育
湿度	钉螺螺卵发育	在较潮湿泥土中螺卵才能孵化
	钉螺成螺孳生与繁殖	最适湿度为泥土含水量>30%
水(洪水)	虫卵孵化	虫卵孵化以井水效果最好,其次为搁置 24 h 的自来水,煮沸冷却至室温的自来水次之,新鲜自来水则效果最差(余氯太多之故)
	毛蚴感染钉螺	实验室条件下水量越大,感染机会越小;流速有助于提高感染机会,但太快(如>13.11 cm/s)时,感染概率可减小至 0
	尾蚴逸出钉螺	河水、井水和自来水对尾蚴逸出无影响,但蒸馏水不利于尾蚴逸出
	尾蚴感染人体、动物	尾蚴分布在水面上,易感染人体及动物。水速为 0.1 m/s 时,尾蚴可向下游扩散达 600 m
	钉螺螺卵孵化	在水中才能孵化,但水淹时间>1 个月不能孵化
	钉螺成螺孳生与繁殖	最适温度为 20~25℃
pH 值	虫卵孵化	最适 pH 值为 7.4~7.8(pH 值范围为 3.0~8.6)
	毛蚴感染钉螺	最适宜 pH 值为 8(pH 值范围为 7~9),在 pH<5 或>10 时,感染概率可降至 0
	尾蚴逸出钉螺	适宜 pH 值为 6.6~7.8
	尾蚴感染人体、动物	适宜 pH 值为 4.4~7.4
	钉螺成螺孳生与繁殖	最适 pH 值为中性,或微酸、微碱性
光照	虫卵孵化	光照能加速日本血吸虫虫卵的孵化,在 75 W 光照下大多数虫卵在 5~6 h 孵出,在全黑环境中虫卵几乎被全部抑制而不能孵化
	尾蚴逸出钉螺	最适宜光照度为 1 888~3 491 lx。现场水体中,尾蚴密度最高峰时段为 10.00~18.00,高峰季节为 6 月下旬~7 月上旬和 8 月下旬~11 月上旬
	钉螺成螺孳生与繁殖	最适光照度为 3 600~3 800 lx

## 2 预测模型的构建及应用范围

预测模型可分为气候因子决定性模型、数理统计学模型<sup>[31-33]</sup>。决定性模型多数根据生物学实验得出寄生虫或中间宿主的最低或最高发育阈值来预测疾病的流行范围;数理统计学模型则采用数理统计学方法,如 *logistic* 多因素回归模型、贝叶斯空间模型等找出主要决定因子,然后应用建立的模型进行预测。

**2.1 气候因子决定性模型** 我国已开展一系列的工作来研究气候变化对日本血吸虫病传播的影响。研究发现,在过去 30 年内,中国 1 月份平均气温上升了 0.96℃<sup>[11]</sup>,这与全球的气候变化情景基本一致。全球气候变暖自 1970 年代中期进入快速上升通道,北半球高纬度地区上升的幅度比低纬度地区大。另一项研究预测,2030 年和 2050 年中国 1 月份平均温度将分别上升 0.9℃ 和 1.6℃<sup>[12]</sup>。上述研究结果为进一步研究血吸虫病潜在流行区是否有可能向北扩散提供了科学依据。

全球气候变暖对我国钉螺分布的潜在影响首先表现为钉螺向北方地区扩散,使钉螺的分布区域扩大;其次是其可使原有螺区的钉螺孳生范围和数量增加。对此,俞善贤等<sup>[34]</sup>利用钉螺越冬温度探索了冬季变暖导致钉螺北移的可能性;Zhou 等<sup>[12]</sup>进行了系列研究后,在建立钉螺和日本血吸虫的有效积温模型和绘制出血吸虫病传播指数分布图的基础上,分析了过去 50 年间全国钉螺和日本血吸虫有效积温的波动趋势,预测了今后 50 年内血吸虫病潜在流行区北移扩散的可能性和范围。根据全国气温资料对 1950~2000 年的钉螺分布进行分析,发现从 1990 年代起钉螺分布区域出现了明显北移,分布区域向北逐渐扩大,这与全国平均气温在 1980 年代后期已出现升高趋势一致,表明气温升高可能导致全国钉螺分布面积的增加。而我国现场某些新发现的大面积钉螺分布区域,如 1979~2003 年湖南省共发现新流行区 6 个县(区)38 处,面积达 0.4 亿 m<sup>2</sup>,可能与全球气候变暖导致流行区扩散有一定关系。

根据生物学模型预测,温度上升将导致血吸虫病传播范围的改变,可能北移造成新的疾病流行区。根据时间序列分析合并应用 GIS 和空间统计分析研究显示,如按钉螺孳生与繁殖适宜温度的阈值来推测,中国过去 30 年间的气温上升,可使 41 335 km<sup>2</sup> 的区域成为钉螺潜在孳生地,这样将间接导致 2 100 万的人口受到血吸虫病威胁<sup>[11]</sup>,约占全球血吸虫病流行区 6.52 亿人口的 3%<sup>[35]</sup>,这无疑对我国公共卫生和经济发展均具有重要影响。该研究还同时发现,洪泽湖和白马湖处于新的钉螺潜在孳生地区域内。由于南水北调途经上述 2 湖,从而可能使北移钉螺找到适合孳生的湿地,增加钉螺向北扩散而形成血吸虫病流行区的概率<sup>[36]</sup>。这一预警分析提示需尽早在这潜在流行区域建立钉螺扩散的监测系统。

另一项研究应用 3 个主要气候敏感因子,对 2030 年和 2050 年我国血吸虫病潜在流行区进行了预测。这 3 个因子分别是:① 决定钉螺能否越冬的 1 月份冰冻线;② 日本血吸虫在中间宿主钉螺体内发育完成 1 个周期的有效累积温度为 852.6 日度;③ 钉螺完成 1 个生命周期的有效累积温度为 3846.3 日度。结合 2050 年气候变暖的情景,发现 2050 年将有 783 883 km<sup>2</sup> 新的钉螺潜在孳生地产生,该区域占整个中国土地面积的

8.1%。研究还提示在已有血吸虫病流行的地区,流行强度将会因气候变暖而加重<sup>[12]</sup>。

**2.2 数理统计学模型** 在应用贝叶斯时空模型研究气候敏感因子对血吸虫病传播的影响方面,Yang 等<sup>[37]</sup>收集了 1990~1998 年江苏省 47 个血吸虫病流行县的横断面调查资料,从同期 AVHRR 遥感资料中提取了归一化植被指数 (NDVI) 和地表温度 (LST),采用贝叶斯时空模型对资料进行了分析,在 WinBUGS 1.4 (Imperial College and MRC, London, UK) 中,建立了 3 种模型并采用 DIC 准则比较不同模型的拟合优度。在模型 1 不纳入时空效应,即采用传统的 *logistic* 回归分析方法,分析血吸虫感染与 NDVI 和 LST 之间的关联;在模型 2 中,假设时间和空间效应相互独立,其中时间效应服从一阶自回归过程 AR(1),空间效应服从条件自回归过程 CAR(r) (其中 r 为空间相关系数);在模型 3 中,假设空间效应随时间而改变,即时空交互效应,其中空间效应服从条件自回归过程 CAR(rt) (其中 rt 为第 t 年的空间相关系数)。结果显示 1990~1992 年间,江苏省血吸虫病空间自相关性显著下降,随后逐渐上升,可能与大规模吡喹酮化疗有关;结果还表明 NDVI 与日本血吸虫感染呈负相关,LST 与之呈正相关。

## 3 应用前景

目前,随着现代空间流行病学的发展,GIS 技术应用于传染病预防与控制的研究报告也越来越多,主要集中于制作疾病分布地图、探讨危险因素、确定疾病或媒介的空间分布特征、了解疾病随时间的变化规律等方面<sup>[38]</sup>。通过时空模型分析不同时期疾病或媒介的空间动态变化,了解疾病随时间的变化规律,对疾病未来的发展趋势做出分析、预测和评估,从而可为疾病的预警预报及干预措施的制定提供依据。如在较大范围内可利用不同时间段的区域数据建立时空模型,并进一步利用已建的时空模型进行各区域数据的空间自相关分析,一方面可达到空间聚类分析的目的,另一方面可规律时间对空间聚类特征的影响,以探索各时段的自然因素和社会因素对疾病流行的影响程度,包括对预防控制措施效果的评价<sup>[39]</sup>。

随着气候变化研究的全球升温以及气候变化对人体影响不可争议的定论,越来越多的研究着重于气候变化对媒介传染性传播趋势的预测。但气候变化对血吸虫病传播的预测研究目前仅开展于部分国家<sup>[12 40]</sup>。因此,今后需从以下 3 个方面着重开展类似研究,即不同情景下的血吸虫病传播范围与强度的预测、各类预测模型参数的校正与验证、模型预测不确定性的分析等<sup>[41]</sup>。

**3.1 气候变化情景下的影响分析** 目前气候变化对疾病影响的分析是利用未来气候情景与相关疾病模拟模型相结合进行的。所谓情景不是对未来的预测或者预报,而是对未来世界发展可能性的一种描述<sup>[42 44]</sup>。目前气候变化情景大致分为 2 类,即假定模式和全球环流模式 (GCM)。假定模式可基于某些气候变化规律得到相关数据,具有一定意义。GCM 模式是目前进行气候变化影响评估的主要方式,其可以很好地模拟大尺度地区已观测的气候特征。但由于 GCM 输出分辨率较低,在结合气候情景与疾病模拟模型时常存在时空尺度不匹配的问题,如 GCM 的输出基于网格的月数据,但血吸虫病传播模拟模型不仅

要求数据为逐日天气数据,且要使用当地站点的气候情景数据。

根据我国实际情况,在血吸虫病传播范围与强度预测中,需结合区域气候模式 PRECIS及血吸虫病生物学模型模拟和分析未来不同的温室气体排放情景,2020、2050年和 2080年各时段的血吸虫病传播情景,并结合社会经济的发展,分析气候变化及其变化程度对未来血吸虫病传播范围和强度的影响。随着国家尺度上预测的完成,还可开展区域气候模式(RCM)和 GCM 下的血吸虫病传播范围与强度的研究。但不同地区的血吸虫种与宿主种类不同,疾病模拟模型中的相关生物学参数或阈值有所不同。如曼氏血吸虫病、埃及血吸虫病、湄公血吸虫病的模拟模型需要分别建立,通过与相关区域 RCM 或 GCM 配合,可开展预测,并最后复合成全球血吸虫病预测地图。

3.2 模型校准 建立气候影响血吸虫病传播模型后,需对模型进行验证与校准。首先要求用于验证的基础数据及其时空尺度匹配正确。模型的验证与校准包括模型比较和模型预测效果。为尽可能使建立的空间或时空模型能反映疾病或健康事件潜在的分布规律,通常需要建立不同的模型并进行比较以选出最佳模型<sup>[45]</sup>。模型比较通常集中在两个方面,一是模型的拟合优度,即反映实测值和拟合值差异的统计量,另一个是模型的复杂性,即模型中自由参数的个数。最佳模型应以最少的参数获取最好的拟合效果。除比较模型外,还要评价模型预测效果,拟合好的模型预测效果不一定好,因此有必要对模型的预测效果进行比较。有两种方式可供参考:一种是将收集的数据随机分成 2组,一组为训练样本,另一组作为考核样本,利用训练样本建立模型,然后对考核样本中的个体进行预测,比较实测值与预测值间的差异;另一种方法是交叉验证,将所有的数据作为训练样本,设其中观察个体为  $n$ 个,依次取出 1个个体,用剩下的  $n-1$ 个建立模型,然后对取出的个体进行预测,如此循环  $n$ 次,最后比较所有实测值与预测值间的差异。模型的校准还包括对不同区域的血吸虫种株变异或钉螺不同区域的螺种变异导致的生物学参数或阈值的校准,如光壳钉螺和肋壳钉螺完成一代其有效累积温度有一定的差异,需要校正。

3.3 模型预测不确定性 关于气候变化影响血吸虫病传播范围与强度的预测,随着研究的深入其不确定性逐渐引起了人们的关注<sup>[46-47]</sup>。不确定性来源于多方面,一是气候敏感因子的不确定性,包括各类气候敏感因子相互作用的不确定性;二是气候变化增量趋势的不确定性,涉及到全球温室气体排放量的不确定性;三是血吸虫病生物学模型中的参数变异导致的预测结果不确定性。在气候因子变化影响血吸虫病传播范围与强度研究中,应着重研究血吸虫病模拟模型中各参数变异的问题,以减少其预测结果的不确定性。预测结果中的潜在流行区范围(以面积表示)、传播强度(以感染率表示)等指标可以用经典的统计方法、Monte Carlo 模型或专家评估方法确定其不确定性<sup>[2,21]</sup>。

综上所述,我国在气候变化对血吸虫病传播影响预测方面的工作尚处于起步阶段,许多关于不同气候情景下血吸虫病潜在流行区的变化以及适应对策的研究仍需进一步加强<sup>[40,48-49]</sup>,在关注因气候变化不确定性带来的血吸虫病传播变

化预测的不确定性的同时,更要关注血吸虫不同区域生物学特征参数的变异带来的预测模型及预测值的不确定性。同时,我们还应关注目前及今后的发展趋势。研究发现,过去 30年内钉螺北部敏感孳生带已北移近 40 km<sup>[11]</sup>,另根据气候变暖的趋势,到 2030年全国平均气温将再升高 1.7℃<sup>[12]</sup>,我国钉螺向北扩散分布的可能区域,即 2000~2030年钉螺可能扩散的敏感地带,主要分布于江苏省北部及山东省西南部,其同时也是南水北调东线工程的途经区域,由于东线工程的取水口位于血吸虫病疫区,随着南水北调工程的开工及全国平均气温的升高,极易发生钉螺北移扩散。因此,上述地区应列入血吸虫病流行的潜在地区,加强监测,以防止钉螺扩散<sup>[50-52]</sup>。同时,本文提出的气候敏感因子概念及今后研究的重点为定量分析全球气候变化对血吸虫病的影响、建立传染病的预警机制与相应对策具有重要意义。

### [参考文献]

- [1] Intergovernment Panel on Climate Change. Climate change 2001: impacts adaptation and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 任国玉. 气候变暖成因研究的历史、现状和不确定性[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1084-1091.
- [3] 左昕昕, 靳鹤龄. 中世纪暖期气候研究综述[J]. 中国沙漠, 2009, 23(1): 136-142.
- [4] Easterling DR, Meehl GA, Parnesan G, et al. Climate extremes: observations, modeling and impacts[J]. Science, 2000, 289(4587): 2068-2074.
- [5] 邓振镛, 张强, 蒲金涌, 等. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3760-3768.
- [6] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 534-643.
- [7] 褚秀娟, 郭家钢. 气候变暖对血吸虫病传播的影响及相关研究技术的应用[J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 2009, 27(3): 267-271.
- [8] 仇安娜, 尚尔泰, 张国毅. 气候变化对人类健康影响的探讨[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 31(5): 52-54.
- [9] 程杨, 杨林生, 李海蓉. 全球环境变化与人类健康[J]. 地理科学进展, 2006, 25(2): 46-58.
- [10] 梁幼生, 肖荣炜, 戴建荣, 等. 钉螺在不同纬度地区生存繁殖的研究[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 1996, 8(5): 259-262.
- [11] 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.
- [12] Zhou XN, Yang GJ, Yang K, et al. Potential impact of climate change on schistosomiasis transmission in China[J]. Am J Trop Med Hyg, 2008, 78(2): 188-194.
- [13] 杨坤, 王显红, 吕山, 等. 气候变暖对中国几种重要媒介传播疾病的影响[J]. 国际医学寄生虫病杂志, 2006, 33(4): 182-224.
- [14] 宫鹏, 徐冰, 梁松. 用遥感和地理信息系统研究传染病时空分布[J]. 中国科学 C辑: 生命科学, 2006, 36(2): 184-192.
- [15] 洪青标, 黄铁旺, 孙勇平, 等. 2006年江苏省血吸虫病监测点疫情分析 II 钉螺和感染性钉螺分布情况[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2007, 19(5): 349-353.

- [16] 操治国, 汪天平, 吴维铎, 等. 安徽省宁国市有螺无病地区钉螺对日本血吸虫易感性的研究 [J]. 热带病与寄生虫学, 2007, 5(3): 147-152.
- [17] 陈琳, 许发森, 尹洪智, 等. 新型户用沼气池对血吸虫卵杀灭效果观察 [J]. 寄生虫病与感染性疾病, 2008, 6(1): 25-27.
- [18] 张媛媛, 罗建平, 吴海玮. 血吸虫虫卵计量的分布及数学模型 [J]. 中华流行病学杂志, 2006, 27(3): 272-274.
- [19] 洪青标, 周晓农, 孙乐平, 等. 全球气候变暖对中国血吸虫病传播影响的研究 II 钉螺越冬致死高温与夏蛰的研究 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2003, 15(1): 24-26.
- [20] 孙乐平, 周晓农, 洪青标, 等. 日本血吸虫幼虫在钉螺体内发育起点温度的研究 [J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 2003, 21(5): 303-306.
- [21] 崔道永, 张志杰, 倪映, 等. 年极端最低气温在湖北钉螺分布中的敏感性分析 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2007, 19(4): 289-292.
- [22] 李兆芹, 滕卫平, 俞善贤, 等. 适合钉螺、血吸虫生长发育的气候条件变化 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 106-110.
- [23] 孙乐平, 周晓农, 洪青标, 等. 全球气候变暖对中国血吸虫病传播影响的研究 III 钉螺感染率与环境温度的关系 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2003, 15(3): 161-163.
- [24] 洪青标, 周晓农, 孙乐平, 等. 全球气候变暖对中国血吸虫病传播影响的研究 I 钉螺冬眠与越冬致死温度的测定 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2002, 14(3): 192-195.
- [25] 洪青标, 周晓农, 孙乐平, 等. 全球气候变暖对中国血吸虫病传播影响的研究 IV 自然环境中钉螺世代发育积温的研究 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2003, 15(4): 269-271.
- [26] 毛守白. 血吸虫生物学与血吸虫病的防治 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1990, 72-74.
- [27] 周晓农. 实用钉螺学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 226-233.
- [28] 何战英, 林丹丹, 朱蓉, 等. 地表温度在监测湖区钉螺孳生地中的作用 [J]. 中华预防医学杂志, 2006, 40(4): 234-237.
- [29] 辜学广. 四川省血吸虫病防治科研现状 [J]. 寄生虫病与感染性疾病, 2004, 2(3): 97-98.
- [30] 郑江, 辜学广, 徐承隆, 等. 三峡建坝生态环境改变与血吸虫病传播关系研究 [J]. 医学研究通讯, 2003, 32(5): 7-10.
- [31] 欧阳婷婷, 赵军伟, 丁光宏. 血吸虫病传播动力学模型及其应用 [J]. 生物医学工程学进展, 2009, 30(2): 63-66.
- [32] 吴开琛, 吴开录. 疾病数学模型和传播动力学研究的流行病学意义 [J]. 中国热带医学, 2006, 6(12): 2272-2277.
- [33] 周晓农, 杨坤, 洪青标, 等. 气候变暖对中国血吸虫病传播影响的预测 [J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 2004, 22(5): 262-265.
- [34] 俞善贤, 滕卫平, 沈锦花, 等. 冬季气候变暖对血吸虫病影响的气候评估 [J]. 中华流行病学杂志, 2004, 25(7): 575-577.
- [35] Utzinger J, Keiser J. Schistosomiasis and soil-transmitted helminthiasis: common drugs for treatment and control [J]. Expert Opin Pharmacother, 2004, 5(2): 263-285.
- [36] Yang GJ, Vounatsou P, Tanner M, et al. Remote sensing for predicting potential habitats of *Oncomelania hupensis* in Hongze, Baime and Gaoyou lakes in Jiangsu Province, China [J]. Geospat Health, 2006, 1(1): 85-92.
- [37] Yang GJ, Vounatsou P, Zhou XN, et al. A Bayesian-based approach for spatio-temporal modeling of county level prevalence of *Schistosoma japonicum* infection in Jiangsu Province, China [J]. Int J Parasitol, 2005, 35(2): 155-162.
- [38] 杜娟, 关泽群. GIS在流行病学研究中的应用 [J]. 现代预防医学, 2007, 34(19): 3691-3697.
- [39] 钟少波. GIS和遥感应用于传染病流行病学研究 [D]. 中国科学院研究生院 (遥感应用研究所) 博士论文, 2006.
- [40] Yang GJ, P Vounatsou, Zhou XN, et al. A review of geographic information system and remote sensing with applications to the epidemiology and control of schistosomiasis in China [J]. Acta Trop, 2005, 96(2/3): 117-129.
- [41] 王玲玲. 基于不确定性理论的洞庭湖水资源系统分析 [D]. 湖南大学博士论文, 2008.
- [42] 张雪芹, 彭莉莉, 林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 174-185.
- [43] 王冀, 江志红, 丁裕国, 等. 21世纪中国极端气温指数变化情况预估 [J]. 资源科学, 2008, 30(7): 1084-1092.
- [44] 林而达, 刘颖杰. 温室气体排放和气候变化新情景研究的最新进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1700-1707.
- [45] Yang GJ, Vounatsou P, Zhou XN, et al. A Bayesian-based approach for spatio-temporal modeling of county level prevalence of *Schistosoma japonicum* infection in Jiangsu Province, China [J]. Int J Parasitol, 2005, 35(2): 155-162.
- [46] 郭艳君. 高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(1): 24-30.
- [47] 张乔民. 热带生物海岸对全球变化的响应 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 834-844.
- [48] Utzinger J, Zhou XN, Chen MG, et al. Conquering schistosomiasis in China: the long march [J]. Acta Trop, 2005, 96(2/3): 69-96.
- [49] Zhou XN, Wang LY, Chen MG, et al. The public health significance and control of schistosomiasis in China: then and now [J]. Acta Trop, 2005, 96(2/3): 97-105.
- [50] 肖邦忠, 廖文芳, 吴成果, 等. 三峡库区生态环境变化对血吸虫病流行的影响及防治对策研究 [J]. 热带医学杂志, 2008, 8(8): 844-847.
- [51] 周晓农, 王立英, 郑江, 等. 南水北调工程对血吸虫病传播扩散影响的调查 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2003, 15(4): 294-297.
- [52] 汪天平, 张世清. 南水北调与钉螺扩散和血吸虫病蔓延 [J]. 中华流行病学杂志, 2002, 23(2): 87-89.

[收稿日期] 2009-08-18 [编辑] 邓瑶