

# 湘江中下游肾综合征出血热传播 风险预测和环境危险因素分析

肖 洪<sup>1</sup>, 林晓玲<sup>1</sup>, 高立冬<sup>2</sup>, 代翔宇<sup>1</sup>, 贺新光<sup>1</sup>,  
陈碧云<sup>2</sup>, 张锡兴<sup>3</sup>, 赵 曠<sup>4</sup>, 田怀玉<sup>1</sup>

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 湖南省疾病预防控制中心, 湖南 长沙 410005;  
3. 长沙市疾病预防控制中心, 湖南 长沙 410001; 4. 北京大学医学部, 北京 100191)

**摘要:** 利用2005~2010年湘江中下游地区HFRS病例数据和相关环境数据, 结合地理信息系统、遥感技术和最大熵值法生态位模型探索湘江中下游地区HFRS传播风险和主要危险因素。研究表明, 望城县和长沙县北部, 衡东县、株洲县和湘潭县交界处以及衡东县南部等区域为潜在风险区。5和7月的NDVI值在0.3~0.4之间的区域HFRS传播风险高, 城镇和建筑用地是主要风险用地类型。生态位模型结合地理景观、气象条件及人类活动数据对湘江中下游地区HFRS传播进行分析, 较其他模型获得的结果准确率更高。

**关键词:** 肾综合征出血热; 生态位模型; 最大熵值法; 湘江中下游

**中图分类号:** R188 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)01-0123-06

肾综合征出血热(hemorrhagic fever with renal syndrome, 以下简称HFRS)主要是以携带汉坦病毒(hantavirus, HV)的鼠类为主要传染源的自然疫源性疾病, 中国是受汉坦病毒危害最严重的国家, 近10 a来报告发病例数占全球病例总数的90%, 其中感染流行的主要为HFRS<sup>[1]</sup>。作为一种典型的以鼠类为主要传染源的自然疫源性疾病, HFRS的分布、传播和流行受到地理景观<sup>[2-5]</sup>、气候<sup>[6-8]</sup>和人类活动<sup>[9]</sup>等自然和社会因素的影响。生态位模型(Ecologic niche models, ENMs)根据疾病传播中媒介、宿主、病原体或人群病例信息, 结合相关地理景观和生态要素的变化, 探索疾病传播中潜在的地理和生态需求, 近年来逐渐被用于分析地理与生态因素的变化和疾病传播流行的关系<sup>[10,11]</sup>, 取得了很好的效果<sup>[12-14]</sup>。生态位模型可以有效地预测区域内疾病的潜在分布区, 以便对其进行提前预防, 也可以筛查影响疾病在区域内传播的主要危险因素, 为疾病的侧重防控提供决策支持, 这对自然疫源性疾病的防控工作具有很高的理论与现实意义。

义, 可以有效地降低各类损失。由于复杂多变的地形地貌、生态环境和气候特点<sup>[15]</sup>, 以及各种人类活动的影响, 中国的HFRS疫情存在显著的地区性差异<sup>[16]</sup>, 掌握疫情高发区的实际情况十分必要。本研究以湘江中下游区域为例, 结合地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和遥感(Remote Sensing, RS)构建最大熵值法生态位模型探索近年来湘江中下游HFRS的传播风险, 并分析相关的危险因素。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

湘江发源于广西东北部, 东流经湖南省永州市、衡阳市、株洲市、湘潭市、长沙市, 在岳阳市湘阴县入洞庭湖后归于长江, 全长817 km, 流域面积92 300 km<sup>2</sup>, 为湖南省最大的河流。湖南省处于海拔小于500 m的多水带和过渡带, 地势以丘陵为主, 气候温和多雨, 农作物主要以亚热带双季稻为主, 湘江流域为湖南省最发达的区域, 湿润的地理

**收稿日期:** 2012-05-05; **修订日期:** 2012-07-22

**基金项目:** 湖南省重点学科建设项目(2008001)、湖南省自然科学基金(11JJ3119)、湖南省高校创新平台开放基金(11K037)、湖南师范大学地图学与地理信息系统校级重点学科(2011001)资助。

**作者简介:** 肖 洪(1964—), 女, 湖南湘潭县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为空间流行病学。E-mail: xiaohong\_hnnu@gmail.com

环境和密集的人类活动为鼠类的生存活动和HFRS的 人间传播提供天然的平台。另外,湖南省是中国HFRS 高发病率的典型疫区,其中湘潭市和长沙市均为湖南省HFRS 的高发区之一<sup>[17-20]</sup>。因此,本文选取湘江中下游区域,包括衡阳县,衡东县,株洲县,株洲市区,湘潭县,湘潭市区,望城县,长沙县,长沙市区,湘阴县和汨罗市等8个县级行政单位,3个市辖区为研究区域(图1),对HFRS 的传播规律进行研究,具有重要的理论和现实意义。

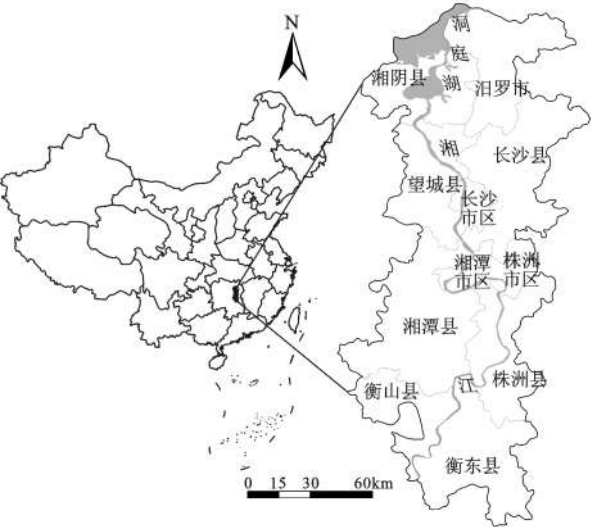


图1 研究区地理位置  
Fig.1 Location of the study area

1.2 研究数据

2005~2010 年HFRS 病例数据来自湖南省疾病预防控制中心疾病监测信息报告管理系统,所有病例均为实验室诊断数据<sup>[21]</sup>,病例信息包括性别、出生日期、年龄、详细居住地、职业、发病日期等,病例数据未区分汉坦病毒类型。

使用ArcGIS 9.3(Environmental Sciences Research Institute, Redlands, CA)软件建立湘江中下游地理空间数据库(表1),包括地理编码、HFRS 病例信息数据、复合地形指数(Compound topographic index, CTI)、人迹指数、主要生境(Major habitat types, MHT)、2005 ~2009 年年平均气温和年降水量、逐年土地利用变化和逐月NDVI 遥感影像数据,以及湘江中下游数字高程模型(Digital elevation model, DEM),其中NDVI 数据取2005~2009 年的月平均值,所有栅格数据空间分辨率为1 km。

表1 生态位模型环境变量

Table 1 Environmental variables of ecologic niche models		
变量名称	数据来源	数据类型
土地利用	MODIS <span> </span> 遥感影像提取与分类	分类型
CTI	美国地质调查局	连续型
MHT	世界野生动物基金会	分类型
人迹指数	国际地球科学信息中心	连续型
生态系统	世界环保组织	分类型
温度	中国气象科学数据服务共享网	连续型
降水量	中国气象科学数据服务共享网	连续型
NDVI	TM <span> </span> 遥感影响提取	连续型
高程	国际科学数据服务平台	连续型
坡度	高程数据中提取	连续型

1.3 最大熵值法生态位模型

通过构建生态位模型<sup>[10,11,22]</sup>,根据已知病例分布数据与相关环境变量(如用地类型和气象因子),探索疾病传播对地理景观和气象因子的潜在需求,对区域内的疾病传播风险进行模拟和预测<sup>[23]</sup>。本研究使用最大熵值法生态位模型探索已知病例分布区环境特征与研究区的非随机关系,根据最大熵模型,选择最优分布,对疫情进行预测<sup>[23,24]</sup>。假设研究区X是由有限数量的网格单元所组成, $\pi$ 为疫病在研究区内的分布, $\pi(x)$ 为 $\pi$ 的分布赋予每个单元x的值,总和为1,在满足已知各种环境变量 $f_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的条件下(式2和3),根据 $\pi$ 的近似期望分布 $\hat{\pi}$ 的熵(式1)选择熵最大的分布作为疫病的最优分布。

$$H(\hat{\pi})=-\sum_{x\in X}\hat{\pi}(x)\ln \hat{\pi}(x)$$
 (1)

$$\hat{\pi}[f_j]=\hat{\pi}[f_j]$$
 (2)

$$\hat{\pi}[f_j]=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^mf_j(x_i)$$
 (3)

其中, $H(\hat{\pi})$ 为期望分布 $\hat{\pi}$ 的熵, $x_i$ 为研究区X中的第i个单元,m为单元个数, $f_j$ 为环境变量, $\hat{\pi}[f_j]$ 为样本点环境变量在 $\hat{\pi}$ 分布下的先验均值。

由上可知最大熵值法概率分布与吉布斯概率分布(式4)是相同的,均是最大化所有样本点的相似性,降低损失函数(式3)。由于Maxent所用的变量为经验性变量,而不是确定的实际值,可能会导致其对训练数据的过度拟合,为减小过度拟合,需要适当的放宽环境变量的限制(式6)。同时,为了使Maxent能有效选取重要的环境变量,使用最小化对数损失和限制环境变量过大权重 $\lambda_i$ (式7)的吉布斯分布来表示最大熵值概率分布。

$$q_{\lambda}(x) = \frac{e^{\lambda \cdot f(x)}}{Z_{\lambda}} \quad (4)$$

$$\tilde{\pi}[-\ln(q_{\lambda})] \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  是表示所有环境变量权重的向量,  $f$  是所有环境变量的向量,  $Z_{\lambda}$  为标准化常数, 用于确保  $q_{\lambda}$  的总和为 1。

$$|\hat{\pi}[f_j] - \tilde{\pi}[f_j]| \leq \beta_j \quad (6)$$

$$\tilde{\pi}[-\ln(q_{\lambda})] + \sum_j \beta_j |\lambda_j| \quad (7)$$

其中,  $\beta_j$  为常数,  $\tilde{\pi}[-\ln(q_{\lambda})]$  是损失函数,  $\sum_j \beta_j |\lambda_j|$  表示对环境变量权重的限制。

## 2 生态位模型预测结果

根据第一次运算结果, 选择月平均 NDVI 值 (包括 3、5、7、8 和 9 月, 累计贡献率为 37.0%), 土地利用类型 (包括 2005、2006、2007 和 2008 年, 累计贡献率 13.2%), 年平均温度 (贡献率 19.8%), 年降水量 (贡献率 11.7%), 人迹指数 (贡献率 7.4%), 坡度 (贡献率 4.8%) 和 CTI (贡献率 1.1%) 等影响 HFRS 传播的主要生态环境变量, 对湘江中下游 HFRS 的传播风险进行预测, 接受者操作特性曲线 (Receiver operating characteristic, ROC) 平均线下面积 (Area under the curve, AUC) 值为 0.785 (SD = 0.032), 表明模型预测效果较好。取 10 个预测模型的平均预测风险等级图为最佳预测图 (图 2), 其

中黑线内区域表示潜在风险区, 即尚无病例出现但风险较高的区域<sup>[25]</sup>, 结果表明, 传播高风险区预测与实际病例分布相符合, 2010 年预留的 64 例测试病例数据, 除 1 例预测为低风险和 13 例预测为中风险, 其余均位于高风险区, 望城县和长沙县的北部, 衡东县、株洲县和湘潭县交界处以及衡东县南部等被预测为潜在风险区 (图 2)。

## 3 环境危险因素分析

研究结果表明, HFRS 的传播风险在年平均温度 16℃ 左右开始上升, 在 18℃ 左右达到最大, 然后一直下降到 18.3℃ 左右保持不变, 在年降水量为 1 350 mm 和 1 500 mm 左右急剧上升, 在 1 500 mm 左右达到最大后持续下降 (图 3a 和 b, 图中温度为真实值乘以 10 后得到的值)。同时 HFRS 的传播风险随着坡度的上升而下降, 在坡度大于 10° 的区域, HFRS 的传播风险基本为 0, 随着人迹指数的增大而持续增加 (图 3e 和 f)。城镇和建筑用地 (用地类型 4) 是 HFRS 传播的主要用地风险 (图 3g、h、i 和 j)。当 5 月和 7 月的 NDVI 值在 0.3~0.4 之间时 HFRS 传播风险最高, 且 HFRS 在 NDVI 低值区域的传播风险 5 月大于 7 月, 5 月高峰期后在 NDVI 值为 0.7 左右有个小高峰 (图 3c 和 d)。

降水量可以影响湿度条件和鼠类生存环境, 湿润的环境可以增强汉坦病毒的生命力和感染性, 适量的降水有利于植被的生长, 对鼠类的存活

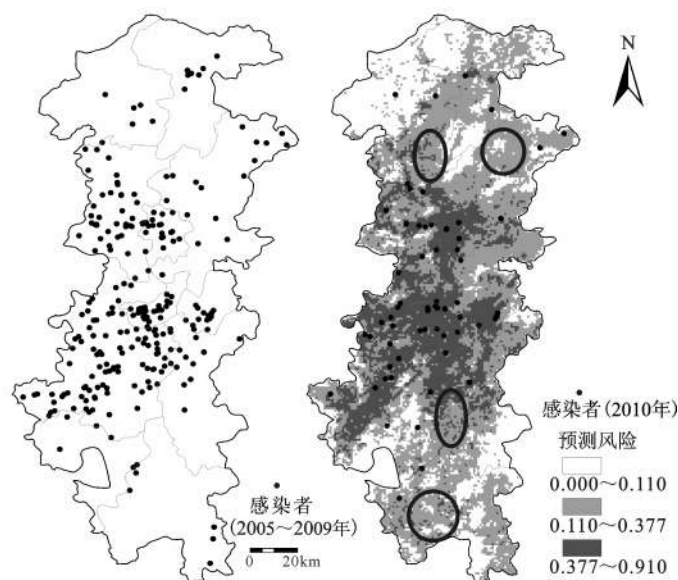


图 2 湘江中下游 HFRS 发病情况与生态位模型预测结果

Fig. 2 The distribution of human hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) cases in 2005-2009 and the predicted HFRS risk in 2010 by Maximum Entropy Model in midstream and downstream of the Xiangjiang River

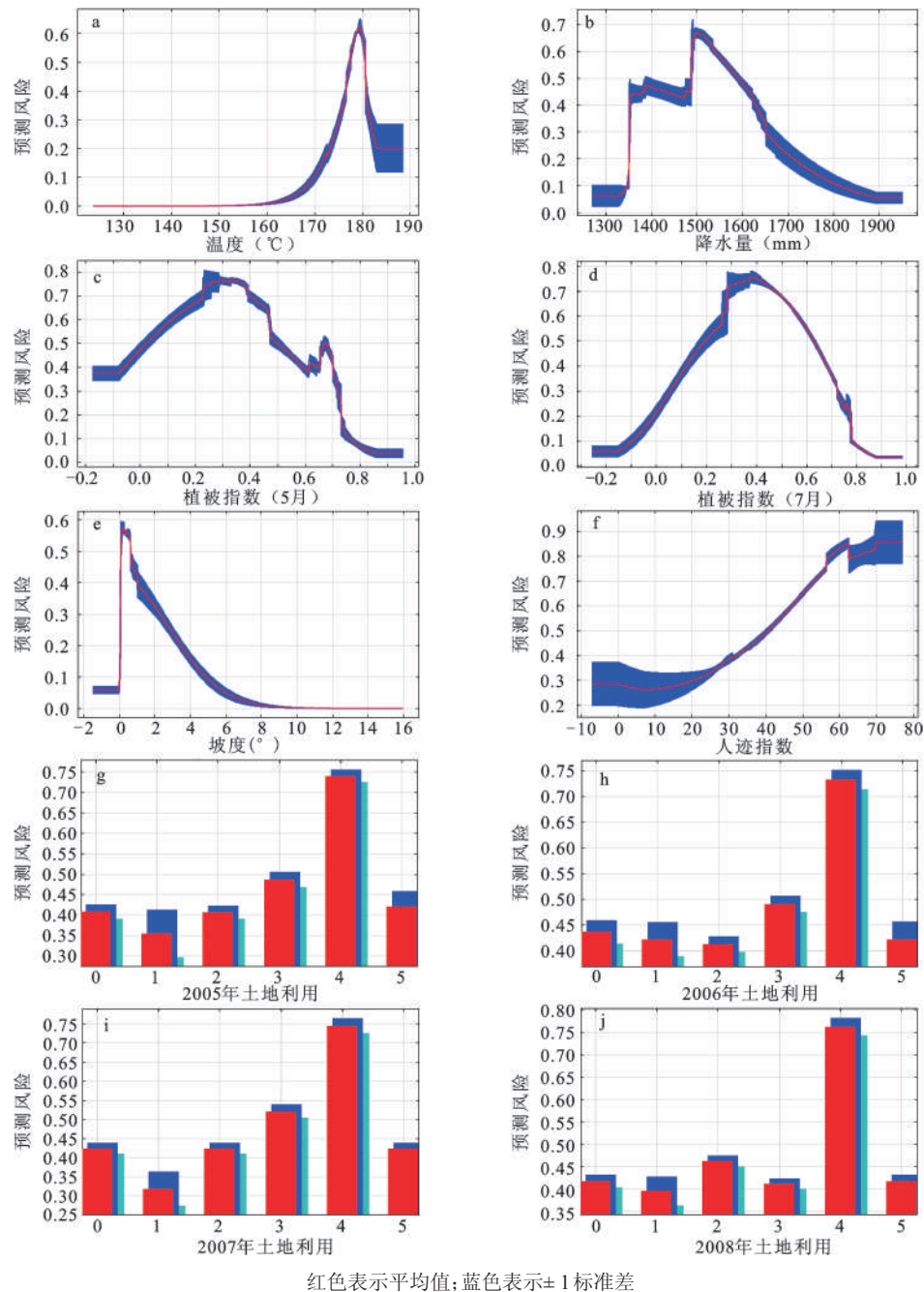


图3 湘江中下游环境对肾综合征出血热传播的响应响应曲线

Fig. 3 Response curves for the variables related to presence of HFRS (Red lines are mean values for the 10 Maxent runs and blue bars represent  $\pm 1$  SD)

和繁殖有着促进作用,因此适度的降水有助于HFRS的传播,但过多或持续的降水则会破坏鼠类的生存环境,导致其数量的减少,降低鼠类之间的相互接触<sup>[8,26]</sup>,HFRS传播风险在年降水量1350和1500 mm的区域急剧上升(图3b)进一步证明鼠类对降水量的敏感。温度通过影响怀孕率、胎仔数、出生率和成活率影响鼠类的种群数量,相关研究表明,作为HFRS主要动物传染源的黑线姬鼠和褐

家鼠的怀孕盛期均受到温度影响<sup>[7]</sup>,适宜的温度有利于鼠类数量增加。研究表明,年均温度和年降水量是影响湘江中下游HFRS传播的重要气象因子,HFRS高传播风险主要集中在年均温度18℃,降水量1500 mm左右的区域(图3a、b)。

NDVI是反应地表植被覆盖程度的变量,可综合反应区域的地理环境特征<sup>[27,28]</sup>,HFRS的传播和NDVI有着密切关系<sup>[29,30]</sup>。5月和7月的NDVI值对

HFRS 传播有重要影响,且 HFRS 在 NDVI 低值区传播风险 5 月高于 7 月(图 3c 和 d),这可能是湘江区域传统的农耕方式和其对鼠类生存环境的影响,7 月是双季稻早稻收获的时候,植被覆盖率较高,同时也有利于野外优势鼠种黑线姬鼠的生存和活动。人类活动,包括森林砍伐、道路修建、农业活动、水坝修建、开矿等造成的用地类型的改变,对传染病的暴发和重现有重要影响<sup>[31, 32]</sup>,城市化带来的密集的人口也可以增加感染者和易感染者的接触加快传染病的传播。HFRS 的传播风险在地势平坦的区域最高(图 3e),这可能与低坡度区域的土地利用情况相关。城镇和建筑用地是影响 HFRS 传播的主要用地风险,HFRS 的传播风险随着人迹指数的增加而增加(图 3f、g、h、i、j),说明人类活动对 HFRS 持续传播的潜在驱动。

## 4 结果与讨论

本文结合 GIS 技术、遥感技术和 Maxent 生态位模型有效地获得了湘江中下游 HFRS 传播的主要危险因素,同时也成功地预测了 HFRS 在湘江中下游的潜在风险地区。研究结果表明,湘江中下游区域 Maxent 生态位模型预测 HFRS 传播高风险区与实际病例分布相符合,对望城县和长沙县的北部,衡东县、株洲县和湘潭县交界处以及衡东县南部等 HFRS 潜在风险区的预测(图 2),可为区域 HFRS 疫情的提前防控提供理论依据,同时,NDVI 和土地利用对 HFRS 的传播有着重要影响,可结合 NDVI 和土地利用对 HFRS 的传播规律做进一步分析。本文将生态位应用于传染病研究中,有效地解决传统传染病研究在流行强度预测和传播区域预测相结合上的不足<sup>[34]</sup>,但是,本研究单纯考虑地理景观和生态环境对 HFRS 的传播影响,未结合区域宿主动物的种群分布和带病毒情况,同时传染病的流行与传播的存在时空差异性,如何选择适宜的环境变量也有待进一步深入思考研究。

## 参考文献:

- [1] 张永振,肖东楼,王 玉,等.中国肾综合征出血热流行趋势及其防治对策[J].中华流行病学杂志, 2004, **25**(6): 466~469.
- [2] Chen H X, Qiu F X. Epidemiologic surveillance on the hemorrhagic fever with renal syndrome in China[J]. Chin Med J (Engl), 1993, **106**(11): 857-863.
- [3] Chen H X, Qiu F X. Studies on the environment structure of natural nidi and epidemic areas of hemorrhagic fever with renal syndrome in China [J]. Chin Med J (Engl), 1994, **107**(2):107-112.
- [4] Chen H X, Qiu F X, Dong B J, et al. Epidemiological studies on hemorrhagic fever with renal syndrome in China[J]. J Infect Dis, 1986, **154**(3): 394-398.
- [5] 肖 洪,田怀玉,代翔宇,等.地理景观对长沙市肾综合征出血热传播的影响[J].中华预防医学杂志, 2011, **46**(3): 246~251.
- [6] Zhang W Y, Fang L Q, Jiang J F, et al. Predicting the risk of hantavirus infection in Beijing, People's Republic of China[J]. Am J Trop Med Hyg, 2009, **80**(4):678-683.
- [7] 刘 静,王洁贞,薛付忠,等.肾综合征出血热发病率与气象因素关系的研究[J].中国卫生统计, 2006, **23**(4): 326~329.
- [8] 肖 洪,田怀玉,张锡兴,等.气候变化对长沙市肾综合征出血热发病的影响与预警模型[J].中华预防医学杂志, 2011, **45**(10): 881~885.
- [9] 阮玉华,柳 炜,徐校平,等.流行性出血热发病危险因素病例对照研究[J].中华流行病学杂志, 2000, **21**(5): 344~346.
- [10] Peterson A T. Ecologic niche modeling and spatial patterns of disease transmission[J]. Emerg Infect Dis, 2006, **12**(12): 1822-1826.
- [11] Peterson A T. Ecological niche modelling and understanding the geography of disease transmission[J]. Vet Ital, 2007, **43**(3): 393-400.
- [12] Peterson A T, Bauer J T, Mills J N. Ecologic and geographic distribution of filovirus disease[J]. Emerging Infectious Diseases, 2004, **10**(1): 40-47.
- [13] Peterson A T, Sánchez-Cordero V, Beard C B, et al. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico[J]. Emerging Infectious Diseases, 2002, **8**(7): 662.
- [14] Fang L Q, De Vlas S J, Liang S, et al. Environmental factors contributing to the spread of H5N1 avian influenza in mainland China[J]. PLoS One, 2008, **3**(5): e2268.
- [15] 罗成旺,陈化新.肾综合征出血热流行因素的影响研究[J].中国媒介生物学及控制杂志, 2003, **14**(6): 451~454.
- [16] 王 芹,周 航,李德新,等. 2009 年中国肾综合征出血热监测分析[J]. 疾病监测, 2010, **25**(12): 938~943.
- [17] Yan L, Fang L Q, Huang H G, 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.
- [18] 刘富强,高立冬,戴德芳,等. 2002~2005 年湖南省人群肾综合征出血热监测分析研究[J]. 疾病监测, 2007, **22**(7): 452~455.
- [19] 刘富强,高立冬,戴德芳,等.湖南省 2007 年肾综合征出血热监测结果分析[J]. 中国自然医学杂志, 2008, **10**(3): 199~202.
- [20] 罗成旺,陈化新.中国 1998~2007 年肾综合征出血热流行病学特征及疫苗接种策略探讨[J]. 中华流行病学杂志, 2008, **29**(10): 1017~1019.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 扩大国家免疫规划实施方案 [M]. 2007.
- [22] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. Ecol Model, 2000, **135**(2-3): 147-186.
- [23] Wei L, Qian Q, Wang Z Q, et al. Using Geographic Information System-based Ecologic Niche Models to Forecast the Risk of

- Hantavirus Infection in Shandong Province, China[J]. *Am J Trop Med Hyg*, 2011, **84**(3): 497-503.
- [24] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, **190**(3-4): 231-259.
- [25] Peterson A T, Papes M, Soberón J. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling[J]. *Ecological Modelling*, 2008, **213**(1): 63-72.
- [26] Fang L Q, Wang X J, Liang S, et al. Spatiotemporal trends and climatic factors of hemorrhagic fever with renal syndrome epidemic in Shandong Province, China[J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2010, **4**(8): e789.
- [27] 李惠敏, 刘洪斌, 武 伟, 等. 近 10 年重庆市归一化植被指数变化分析[J]. *地理科学*, 2010, **30**(1): 119-123.
- [28] 南 颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000~2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究[J]. *地理科学*, 2010, **30**(6): 921-928.
- [29] 方立群, 曹务春, 陈化新, 等. 应用地理信息系统分析中国肾综合征出血热的空间分布[J]. *中华流行病学杂志*, 2003, **24**(4): 265-268.
- [30] 闫 磊, 黄华国, 张文义, 等. 肾综合征出血热疫情与 NDVI 的时间关系——以内蒙古自治区大杨树镇为例[J]. *遥感学报*, 2009, **13**(5): 880-886.
- [31] 杨 坤, 周晓农. 景观流行病学研究现状及其进展[J]. *中华流行病学杂志*, 2008, **29**(2): 198-201.
- [32] 李雪铭, 晋培育. 中国城市人居环境质量特征与时空差异分析[J]. *地理科学*, 2012, **32**(5): 521-529.
- [33] 吴玉鸣, 柏 玲. 广西城市化与环境系统的耦合协调测度与互动分析[J]. *地理科学*, 2011, **31**(12): 1474-1479.
- [34] 肖 洪, 田怀玉, 赵 瞰, 等. 传染病模型分析与预测方法研究进展[J]. *中华流行病学杂志*, 2011, **32**(1): 81-85.

## Environmental Factors Contributing to the Spread of Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome and Potential Risk Areas Prediction in Midstream and Downstream of the Xiangjiang River

XIAO Hong<sup>1</sup>, LIN Xiao-ling<sup>1</sup>, GAO Li-dong<sup>2</sup>, DAI Xiang-yu<sup>1</sup>, HE Xin-guang<sup>1</sup>,  
CHEN Bi-yun<sup>2</sup>, ZHANG Xi-xing<sup>3</sup>, ZHAO Jian<sup>4</sup>, TIAN Huai-yu<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China;

2. Hunan Provincial Center for Disease Control and Prevention, Changsha, Hunan 410002, China;

3. Changsha Municipal Center for Disease Control and Prevention, Changsha, Hunan 410001, China;

4. Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China)

**Abstract:** HFRS (human hemorrhagic fever with renal syndrome) occurs at very high frequency in the midstream and downstream of the Xiangjiang River. It is of great significance for understanding the regulation of the transmission of HFRS in this area due to its major impact on local economy development and public health. The risk factors and potential risk of HFRS in the midstream and downstream of the Xiangjiang River were explored by combining the ecologic niche modeling, geographic information systems (GIS) and remote sensing technique in this article. The average area under the Receiver Operating Characteristic curve was 0.785. The 64 cases in 2010 were predicted correctly except for one case in a low risk area. These showed that the model possess good prediction performance. The modeling results indicated that the north of Wangcheng County and Changsha County, the border of Hengdong County, Zhuzhou County and Xiangtan County, and the south of Hengdong County were predicted as the potential risk area. The following factors were found to be closely relative to the highest risk of HFRS transmission: mean annual temperature of 18°C, annual precipitation of about 1 500 mm, at urban and constructive land, and normalized difference vegetation index between 0.3 and 0.4 in May and July and with low elevation. The transmission of HFRS in the midstream and downstream of the Xiangjiang River was analyzed by using the ecologic niche model combining the geographical environment, climatic condition and human activity data. Our results are more accurate than those from other models and these findings in the study. Therefore, they are applicable for targeting control and prevention efforts.

**Key words:** hemorrhagic fever with renal syndrome; ecologic niche modeling; maximum entropy; midstream and downstream of the Xiangjiang River