

地理环境因子对螺情影响的探测分析

通拉嘎^{1,2}, 徐新良¹, 付颖^{1,2}, 魏凤华³

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖北省血吸虫病防治研究所, 武汉 430079)

摘要:近年来,由于自然环境、经济社会等因素影响,中国血吸虫病疫情呈回升态势,表现为急性感染人数和血吸虫病患者人数增多,局部地区钉螺扩散明显,感染性钉螺分布范围逐渐扩大等。钉螺是血吸虫的唯一中间宿主,控制钉螺对血吸虫病防治具有重要意义。本文根据钉螺的生态学特征,综合高程、水文、土地利用、土壤、植被等因子,基于地理探测器模型分析了地理环境因子对2009年湖北省钉螺分布的影响。结果表明:①在垅内型流行区,整个流行季(3-10月)、特别是7-9月期间的植被覆盖与钉螺分布范围有关,密螺地带的特征为土壤质地粉砂含量适中、黄红壤和淹育水稻土,第一季度有较高的植被覆盖度;②在垅外型流行区,湖泊滩地、高覆盖度草地是其主要分布环境,而第一季度较高的植被覆盖,尤其是荻、芦苇等植被类型是高密度地区的环境特征;③在山地丘陵,河流附近的林地和耕地,潴育或淹育水稻土是钉螺密集分布的环境。筛选出的地理环境指示因子可用于遥感技术监测钉螺孳生地,从而为采取有效的控螺措施提供科学依据。

关键词:钉螺;血吸虫病;地理环境因子;地理探测器;指示作用;湖北省

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.005.004

中图分类号:P951

文献标识码:A

1 引言

血吸虫病是一种人畜共患的地方性寄生虫病,其传播严重危害着流行区人民健康,阻碍当地社会经济发展(周晓农, 2005)。血吸虫病具有众多传染源,传播环节复杂的特点(赵安等, 2010):感染血吸虫病的病人、病畜粪便中的虫卵在一定条件下孵化为毛蚴,毛蚴感染钉螺,在钉螺体内经过生长发育成为尾蚴,排出螺体的尾蚴在水中扩散形成疫水,人和牲畜接触疫水,即有可能感染血吸虫病,其感染风险与疫水中尾蚴的密度和感染活性、人和牲畜接触疫水的频率和强度等有关。血吸虫的终宿主是广谱的,而钉螺是唯一的中间宿主,因此控制、消灭钉螺在血防工作中具有重要意义,研究钉螺的时空分布规律也成为医学地理研究的重要内容。

钉螺孳生地的自然地理环境是钉螺生长、发育、繁殖和扩散的重要影响因子。在鄱阳湖地区,

垅外洲滩植被覆盖面积大,呈不规则环带状或片状分布,群丛分布明显;钉螺分布在海拔15~17 m高程地带,与植被类型关系密切,植物优势群丛苔草或南荻盖度与钉螺密度成二次曲线关系(李召军等, 2006)。海拔高程和水系主要通过水淹时间和频率影响钉螺的繁殖、发育等生命过程,有螺高程一般相对稳定,鄱阳湖钉螺面积的94.5%分布于海拔14~17 m高程洲滩(林丹丹等, 2002)。山丘地区,耕地、荒草地、河滩地及灌溉沟渠也存在钉螺,其活螺密度顺序为:河滩地>灌溉沟渠>耕地>荒草地;土壤粉砂颗粒(0.02~0.002 mm)、土壤全P含量和土壤湿度是影响钉螺的最重要因子(张旭东等, 2007)。Boelee等(2004)用Logistic回归分析方法(Hilbe, 2009)、Spearman相关系数(Li et al, 2006)研究钉螺密度与环境因子的相关性,发现水流速度、植被对钉螺发现率和钉螺密度有影响,其中眼子菜属水生植物可作为钉螺分布的特征植物。Kristensen等

收稿日期:2013-10;修订日期:2014-02。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAI78B03, 2009BAI78B00-03);全国生态环境十年变化遥感调查与评估项目(STSN-14-00);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-08-01)。

作者简介:通拉嘎(1988-),蒙古族,内蒙古鄂尔多斯人,硕士生,主要研究方向为GIS与遥感应用,E-mail: mongoltgl@gmail.com。

通讯作者:徐新良(1972-),山东青岛人,博士,副研究员,主要从事生态环境遥感监测研究,E-mail: xuxl@reis.ac.cn。

625-635页

(2001)考虑NDVI和Tmax区间与钉螺流行范围,建立的最佳匹配模型在旱季、雨季、全年螺点覆盖率(5 km缓冲区)分别为91.4%、75.9%、81.1%,加入温度因子后,螺点覆盖率达到90.4%、94.2%、92.3%。

在环境因素对健康的影响研究中,若某个环境因素的分布与现象(如疾病发生)的分布一致,则认为该因素对疾病发生有显著影响;反之,若环境因素的分布与疾病分布差异较大,则认为该环境因素与疾病分布不相关。地理探测器模型(Wang et al, 2012)就是基于上述思想,用于评价健康与潜在致病因子之间关系的空间分析模型。地理探测器模型假设环境因子若与疾病分布一致,则认为对疾病发生有较大风险,称其为环境危险因子。类似地,若某个特定的地理环境因子与钉螺分布的空间特征一致,可以认为该地理环境因子对钉螺分布具有较高的指示作用,称其为环境指示因子。在环境健康领域,健康与潜在指示因子的相关性研究主要存在以下4个问题:①疾病的危险区域分布如何?②哪些环境因子导致疾病的发生?③环境因子之间的相对重要性怎样?④不同环境因子对疾病发生是独立作用还是交互作用?

针对以上问题,扫描统计方法(Kulldorff, 1997; Kulldorff et al, 1995)具有时空扫描、动态改变探测窗口、预警分析等特点,能够探测疾病聚集的热点区域,但无法揭示疾病发生相关的环境因子。空间回归模型(王劲峰, 2006)、Logistic回归模型和地理加权回归模型(Brunsdon et al, 1996)的回归系数能够反映环境危险因子对疾病发生的影响程度、相对重要性,但不能说明环境因子之间的交互作用。基于空间变异分析的地理探测器模型能够衡量健康风险与地理要素的空间一致性、统计显著性、检验确定空间相关性的有效性。风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测等4个地理探测器分别解决了健康与潜在指示因子的相关性研究中面临的4个问题,克服了随机变量分布不确定性,且对栅格分类数据和矢量的类别数据具有相同的适用性(Wang et al, 2010)。

鉴于以往研究在环境因子选择方面,只考虑单个或少量因子的组合,忽略了各因子之间的相互联系,本文在环境因子和钉螺分布的关系上,以简单的系统抽样调查后的统计分析、多个图层叠加分析和线性回归分析为主,未考虑空间数据自相关和变异特征的空间模型方法。综合考虑高程、水文、土

壤、植被以及土地利用等钉螺的生态学特征相关因子,结合地理探测器模型方法,分析地理环境因子对钉螺分布的影响和指示作用。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

中国血吸虫病疫区主要分布在长江流域及其以南的12个省市(中华人民共和国卫生部疾病控制司, 2000)。根据地理环境、钉螺分布特点和流行特征,可将血吸虫病疫区划分为湖沼型、水网型和山丘型3种类型。湖北省是血吸虫病流行重点省份,疫区以湖沼型为主。据2008年湖北省血吸虫病监测报告(黄希宝等, 2009),全省钉螺总面积达7.74万 hm^2 ,患病人数17.8万人,人群感染率为1.7%,查出病牛数5555头,耕牛感染率为2.2%;全省共有63个血吸虫病流行县、521个流行乡、5431个流行村,现已达到传播阻断、传播控制、疫情控制标准的行政村分别占流行村的17.05%、21.71%、61.24%。研究区位于湖北省中东部(图1),覆盖荆州、宜昌、荆门、咸宁、武汉、孝感、黄石、黄冈等市的30个县、市、区,共13669个行政村。

2.2 数据来源及处理

2.2.1 螺情数据

研究区螺情数据来自湖北省血吸虫病防治研究所提供的2009年湖北省30个县市的村级螺情监测数据。调查数据采用系统抽样方法在易感地带和易感环境采集,调查内容包括查螺地点相关资料(村名、查螺的螺点等)、流行类型、钉螺面积相关资料(调查面积、实有钉螺面积等)、钉螺密度相关资料(调查框数、有螺框数、捕螺总数、活螺数、阳性螺数等)、灭螺面积资料等。通过对2009年螺情监测数据流行类型的属性查询,提取三大流行类型钉螺资料,用于开展地理环境因子对螺情影响研究。

2.2.2 地理环境因子数据

地理环境因子包括高程因子、水文因子、土壤因子,植被因子和土地利用等,对应每类因子,分别选取DEM、水系、土壤类型和土壤质地、植被类型和植被覆盖度、土地利用数据。环境数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心,在ArcGIS 9.3中进行数据整理和预处理。根据地理探测器模型输入要求,投影统一到Krasovsky-1940-Albers投影坐标系统,矢量数据要素对应类别变量,栅格数据重

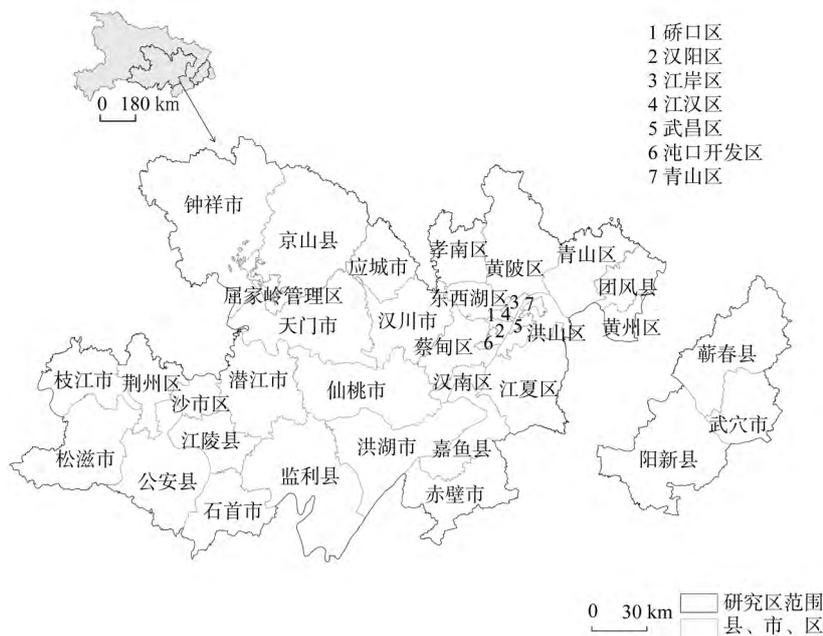


图1 研究区县(市)分布图

Fig.1 Counties of the study area

分类为6~8个等级(Cao et al, 2013),并转换为矢量数据类型。各类数据具体说明如下:

(1) DEM数据(图2a)为SRTM 90 m分辨率海拔高程数据,使用分位数分级方法进行重分类,共分为8个类别。

(2) 水系数据(图2b)包括5级以上河流和湖泊,经缓冲区分析得到各村至水源的距离,并使用分位数分类方法,将各村至水源的距离分为8个类别。

(3) 土地利用类型数据(图2c)来自覆盖全国陆地区域多时相的1:10万比例尺土地利用数据集,该数据集以Lansat TM/ETM遥感影像为数据源,经人工目视解译而成。土地利用分类体系包括6个一级类型和25个二级类型,其中1级类型包括耕地,林地,草地,水域,城乡、工矿、居民用地和未利用地。

(4) 植被覆盖数据(图2d)来自MODIS长时间序列NDVI(植被指数)数据集,该数据集为250 m分辨率的2009年16天合成数据产品。处理中对1-3月、4-6月、7-9月、10-12月、3-10月(血吸虫流行季)(周晓农等, 1999)的数据进行最大值合成、重分类、矢量转换等处理后得到5个时相的NDVI矢量数据,并使用自然间隔分级方法重分类为6个类别。

(5) 土壤类型数据(图3a)来自全国1:100万土壤类型分布数据。该数据最小制图单元为中国土壤

系统分类的亚类,共有72个土类,247个亚类。

(6) 土壤质地数据(图3b-3d)来自全国1:100万土壤质地数据集,反映了砂粒、粉砂粒、黏粒的百分比含量,使用自然间隔分级方法重分类分为6个类型。

(7) 植被类型数据(图4)来自1:100万植被图。该数据共有11个大类,54个亚类。植被大类包括针叶林、针阔叶混交林、阔叶林、灌丛、荒漠、草原、草丛、草甸、沼泽、高山植被、栽培植被等。

2.3 研究方法

2.3.1 螺情指标

由于钉螺分布面积能够反映其环境适应性,钉螺密度是划分易感地带的指标,主要有钉螺面积(单位: hm^2)和活螺密度(只/ 0.1 m^2)两个螺情指标。实有钉螺面积的具体数据可在钉螺统计资料中获取,活螺密度的计算方法如公式(1)所示,其中框的大小为 $0.33 \text{ m} \times 0.33 \text{ m}$ 。

$$\text{活螺平均密度} = \text{捕获活螺数} / \text{调查框数} \quad (1)$$

2.3.2 地理探测器模型原理

地理探测器模型PD(Power of Determinant)值(Wang et al, 2010)用来衡量环境因子对疾病发生的影响程度。设研究区为 D ,不同环境因子将研究区划分为 k 个子区域 $\{D_1, D_2, \dots, D_k\}$,研究区及其各子

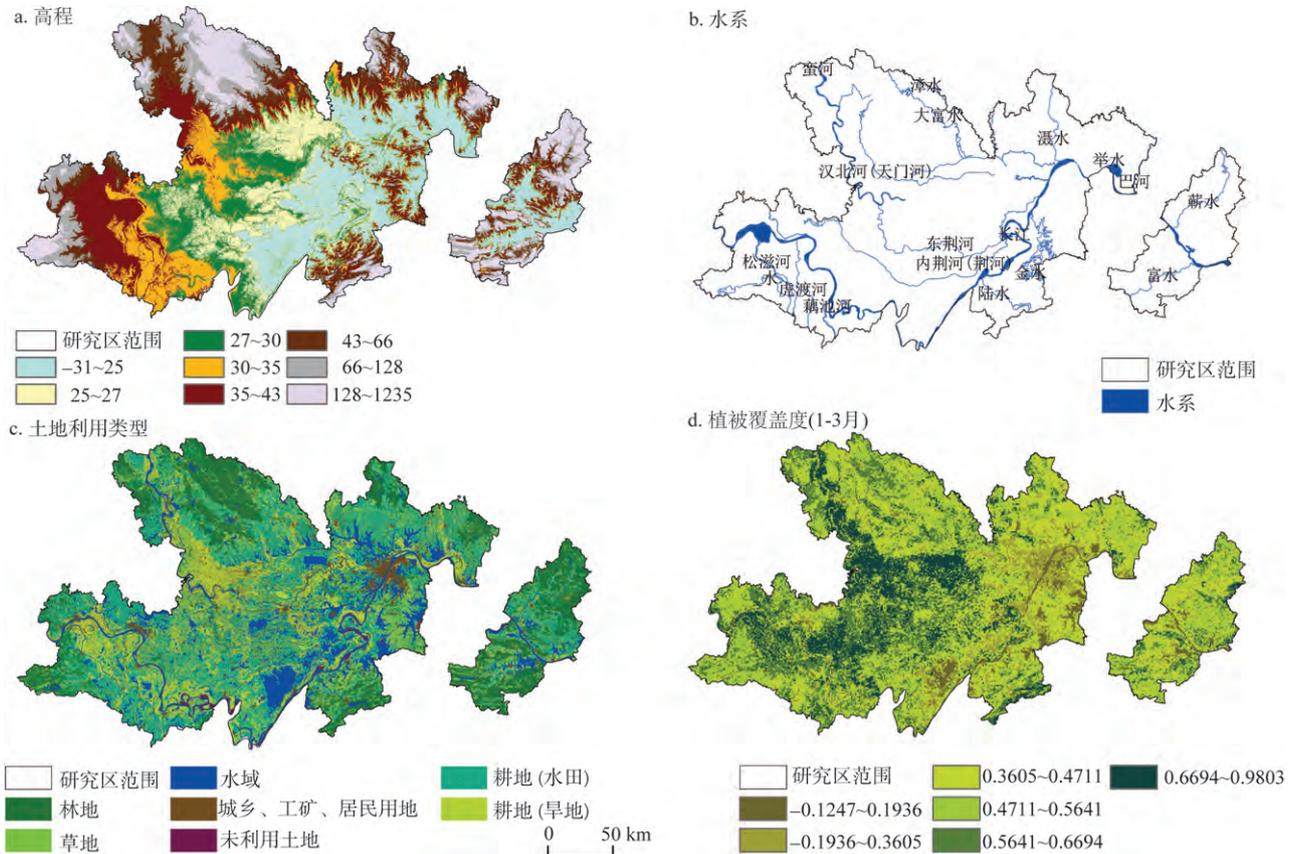


图2 研究区环境因子分布图(a. 高程, b. 水系, c. 土地利用类型, d. 植被覆盖度(1-3月))

Fig.2 Environmental factors of the study area(a. DEM, b. main rivers, c. LUCC, d. NDVI(Jan. to Mar.))

区域的平均疾病发病率和方差分别记为 $\bar{y}_D, \bar{y}_{d_1}, \bar{y}_{d_2}, \dots, \bar{y}_{d_k}$ 和 $Var_D, Var_{d_1}, Var_{d_2}, \dots, Var_{d_k}$ 。PD 值计算方法如公式(2)所示。

$$PD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (N_{d_i} \times Var_{d_i})}{N_D \times Var_D} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, k$; N_{d_i} 为第 i 个子区域的面积; N_D 为研究区面积。如果疾病的发生与环境因子分布完全一致, 那么每个子区域 $\{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ 内的疾病发病率分布均匀, 即 $Var_{d_i}=0$, 使得 $PD=1$; 如果疾病的发生与环境因子无关, 那么 Var_{d_i} 的面积加权和与 Var_D 相等, 即 $\sum_{i=1}^k \left(\frac{N_{d_i}}{N_D} \times Var_{d_i} \right) = Var_D$, 从而 $PD=0$; 因此 PD 值的取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大, 说明环境因子对疾病发生的相关性越大。

4个地理探测器模型功能分别为: 因子探测器计算各环境因子的 PD 值排序; 生态探测器比较环境因子作用下螺情方差的差异, 给出对钉螺分布具有显著差异的环境因子; 交互作用探测器通过对比单个

指示因子 PD 值与双因子 PD 值, 判断指示因子之间是独立作用还是交互作用, 以及其交互表现为协同作用还是抑制作用; 风险探测器用来计算某个环境因子内各类型或分类范围螺情分布的差异性。例如, Hu 等(2011)基于地理探测器分析了汶川地震中五岁以下儿童死亡的危险因子, 发现潜在环境因子的 PD 值排序为: 地震强度(0.446) > 房屋倒塌(0.338) > 地形坡度(0.315) > 人口密度(0.141) > 高程(0.116) > 断裂带(0.063) > 地貌(0.060) > GDP(0.048), 其中前三项对儿童死亡的影响较大, 且它们之间无显著差异, 其余因子对儿童死亡的影响较小, 且各因子间亦无显著差异。其中具有较大影响的交互因子为: 地震强度与人口密度(0.58)、地震强度与房屋倒塌(0.54)、地震强度与 GDP(0.52) 及地震强度与高程(0.48), 它们之间的交互作用均都大于单个因子对儿童死亡的影响。其中, 地震强度的危险区间为 XI (地震强度类型为 VII-XI), 该区间内平均死亡率为 50.69%。

2.3.3 技术流程

根据钉螺分布的地理环境, 湖北省血吸虫流行

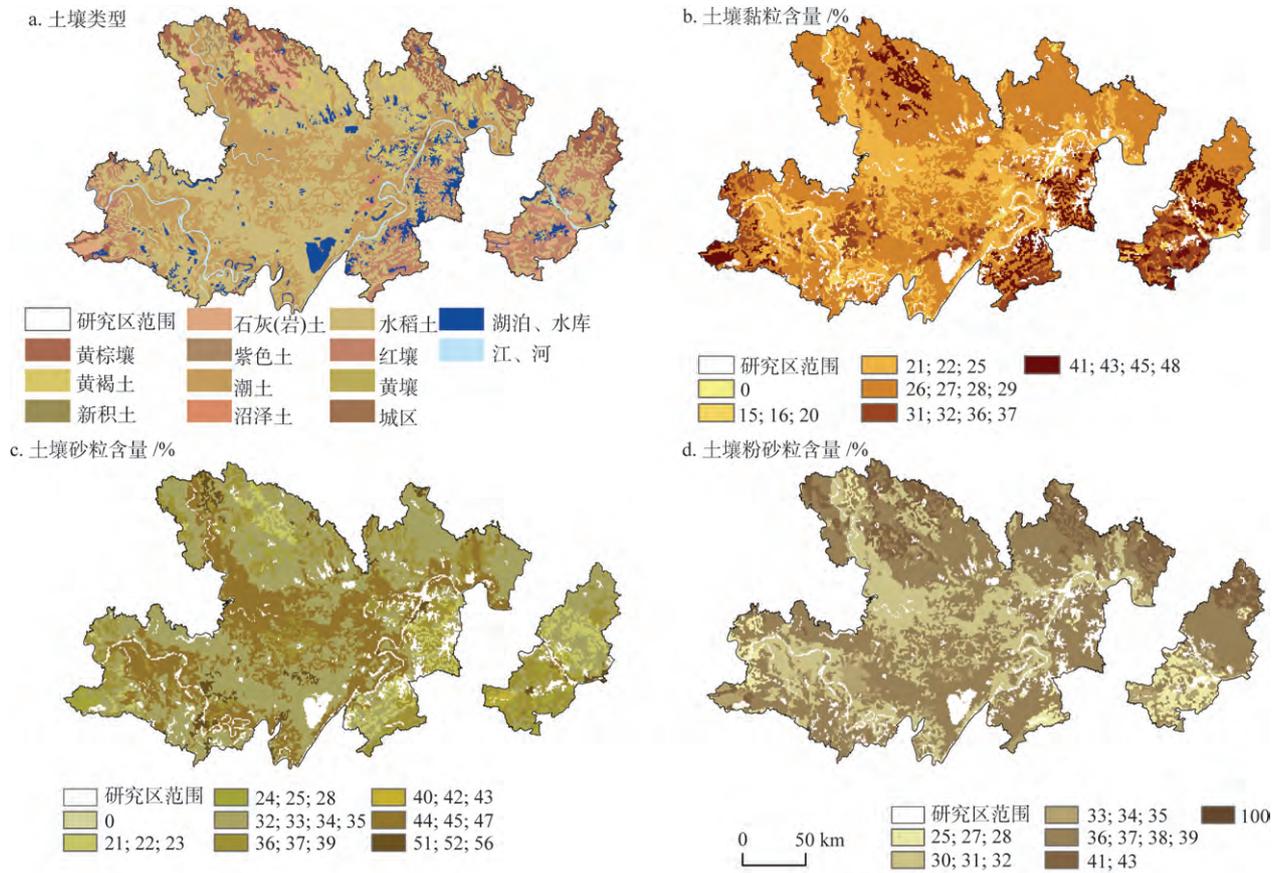


图3 研究区土壤因子分布图(a. 土壤类型 b. 土壤黏粒含量 c. 土壤砂粒含量 d. 土壤粉砂粒含量)

Fig.3 Soil factors of the study area(a. soil type b. clay c. sand d. silt)

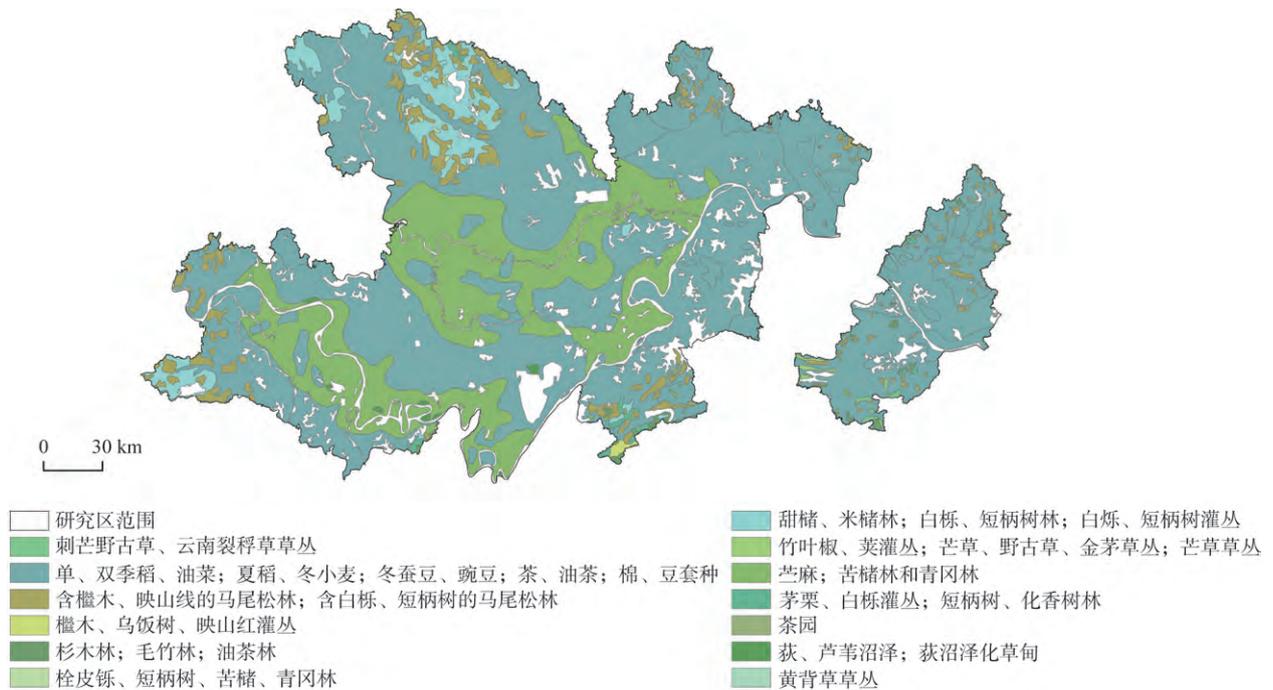


图4 研究区植被类型分布图

Fig.4 Vegetation type of the study area

区划分为湖沼型垅内亚型、湖沼型垅外亚型和山丘型(邱娟等, 2012)等三大类型区域。针对不同流行类型分布特征及规律(张志杰等, 2007), 地理探测器模型分析内容分为两大步骤: 地理环境因子对螺情的影响和地理环境因子对螺情的指示作用, 具体技术流程如图5所示。经过整理的螺情数据和环境因子数据分别输入到因子探测器和生态探测器模型; 模型输出结果又作为交互探测器和风险探测器的输入项。综合模型分析结果, 可筛选对钉螺分布影响显著的环境指示因子, 结合其他因子显著影响螺情的辅助指示因子, 以及各指示因子的适宜类型或范围。

3 结果与分析

3.1 研究区螺情现状

湖沼型垅内亚型钉螺典型区(简称垅内型, 图6)集中在公安县、江陵县、沙市区、潜江市、仙桃市全境, 以及松滋市东部、荆州区南部、监利县部分地区、洪湖市北部和阳新县东南部, 大多沿河流和沟渠成片状分布, 范围较广; 湖沼型垅外亚型钉螺典型区(简称垅外型, 图6)分布在石首市中部、监利县

东南部、仙桃市和洪湖市东部交接地区、嘉鱼县和汉南区部分地区、孝南区和黄浦区南部, 主要沿江两岸成带状分布, 范围较窄; 山丘型丘陵亚型(简称山丘型, 图6)主要分布在松滋市西部、钟祥市中

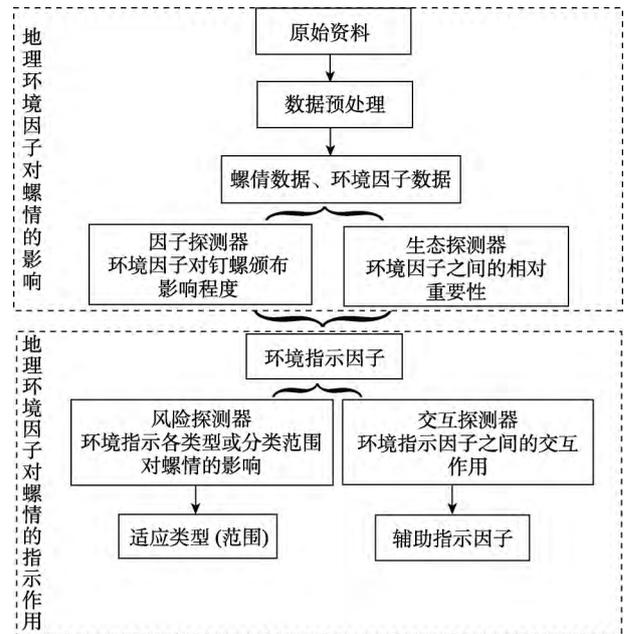


图5 技术流程图

Fig.5 Technique flowchart

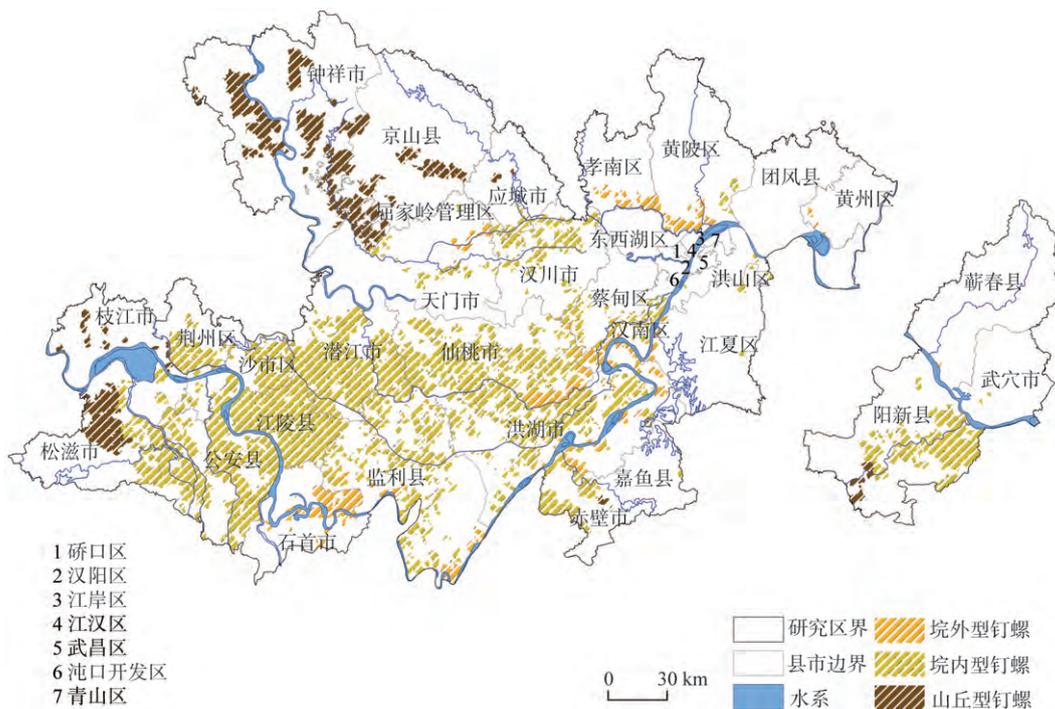


图6 研究区三类钉螺分布图

Fig.6 Distribution of three main subtypes of snail in the study area

部、屈家岭管理区、京山县中部地区,集中在鄂西山地与江汉平原之间的丘陵地带,沿山谷和水系成小片状,分布较为分散。

3.2 地理环境因子对螺情的影响

从地理环境因子对垅内型钉螺分布的影响来看(表1),垅内型与实有钉螺面积相关的地理环境因子中,3-10月 *NDVI* 的 *PD* 值最大,且3-10月 *NDVI*、7-9月 *NDVI*、*DEM* 等因子 *PD* 值之间无显著差异;*DEM* 与近水源距离之间 *PD* 值差异显著;近水源距离与土壤类型的 *PD* 值差异显著。说明3-10月流行季植被覆盖度、7-9月植被覆盖度、*DEM* 对垅内型钉螺分布面积影响最大;近水源距离、土壤类型对其影响较大;其余因子影响较小。同理,垅内型活螺密度相关的地理环境因子中,粉砂含量、砂粒含量、土壤类型对其密度的影响显著;而黏粒含量、1-3月植被覆盖度对其影响较大;其余因子影响较小。

垅外型实有钉螺面积相关的地理环境因子中(表2),土壤砂粒含量、黏粒含量对垅外型钉螺分布面积影响显著;土壤类型、土地利用、土壤粉砂含量对其影响较大;其余因子影响较小。而就垅外型钉

螺密度而言,土地利用、1-3月 *NDVI*、近水源距离等因子的影响最显著;植被类型对其影响较大;其余因子影响较小。

山丘型实有钉螺面积与地理环境因子的分析结果表明(表3),由于山丘型钉螺分布环境较复杂,不存在某些环境因子起明显主导作用。但山丘型活螺密度相关因子中,*DEM*、土壤类型、植被类型等因子影响显著;土地利用和近水源距离对其影响较大;其余因子影响较小。

3.3 地理环境因子对螺情的指示作用

经过因子探测器和生态探测器模型分析,能够在诸多潜在环境指示因子中,筛选出对钉螺分布影响显著的一些因子,成为环境指示因子。风险探测器能够进一步分析各指示因子的适宜类型或范围(置信水平95%);交互探测器则分析各环境因子之间的交互作用。由表4可知,对垅内型钉螺分布面积来说,较低3-10月和7-9月植被覆盖、较低海拔为其环境指示因子的适宜类型(范围)。3-10月 *NDVI* 和7-9月 *NDVI*、*DEM* 和土壤类型等交互因子具有较强的协同作用,特别是土壤类型与 *DEM* 表现为非线性协同作用, $PD(A \cap B) > PD(A) + PD(B)$, 即

表1 垅内型钉螺分布相关地理环境因子 *PD* 值排序

Tab.1 *PD* value ranking of environmental factors affecting distribution of the subtype inside embankments

| 螺情指标 | 地理环境因子及其 <i>PD</i> 值(前5项) | | | | |
|--------|---------------------------|------------------|--------------|-------|------------------|
| 实有钉螺面积 | 3-10月 <i>NDVI</i> | 7-9月 <i>NDVI</i> | <i>DEM</i> * | 近水源距离 | 土壤类型 |
| | 0.279 | 0.241 | 0.191 | 0.164 | 0.138 |
| 活螺密度 | 粉砂含量 | 砂粒含量 | 土壤类型* | 黏粒含量 | 1-3月 <i>NDVI</i> |
| | 0.121 | 0.112 | 0.094 | 0.075 | 0.024 |

注:*标识的环境因子 *PD* 值显著区别于相邻环境因子 *PD* 值(显著性水平95%)。

表2 垅外型钉螺分布相关地理环境因子 *PD* 值排序

Tab.2 *PD* value ranking of environmental factors affecting distribution of the subtype outside embankments

| 螺情指标 | 地理环境因子及其 <i>PD</i> 值(前5项) | | | | |
|--------|---------------------------|------------------|--------|-------|-------|
| 实有钉螺面积 | 砂粒含量 | 黏粒含量* | 土壤类型 | 土地利用 | 粉砂含量 |
| | 0.421 | 0.415 | 0.406 | 0.314 | 0.284 |
| 活螺密度 | 土地利用 | 1-3月 <i>NDVI</i> | 近水源距离* | 植被类型 | |
| | 0.218 | 0.173 | 0.121 | 0.103 | |

注:*标识的环境因子 *PD* 值显著区别于相邻环境因子 *PD* 值(显著性水平95%)。

表3 山丘型钉螺分布相关地理环境因子 *PD* 值排序

Tab.3 *PD* value ranking of environmental factors affecting distribution of the subtype in hilly areas

| 螺情指标 | 地理环境因子及其 <i>PD</i> 值(前5项) | | | | |
|--------|---------------------------|-------|------------|-------|-------|
| 实有钉螺面积 | 10-12月 <i>NDVI</i> | 土壤类型 | <i>DEM</i> | 土地利用 | 黏粒含量 |
| | 0.085 | 0.073 | 0.033 | 0.031 | 0.03 |
| 活螺密度 | <i>DEM</i> | 土壤类型 | 植被类型* | 土地利用 | 近水源距离 |
| | 0.129 | 0.084 | 0.079 | 0.07 | 0.062 |

注:*标识的环境因子 *PD* 值显著区别于相邻环境因子 *PD* 值(显著性水平95%)。

土壤类型与DEM的交互因子PD值大于单个土壤因子和DEM因子PD值之和,说明土壤因子能够增强DEM对螺情的影响。因此,可在钉螺孳生地监测中,作为辅助指示因子。垅内型钉螺密度相关因子中,较低的粉砂含量(31%~32%)、砂粒含量(33%~34%)、红黄壤和淹育水稻土为其适宜类型(范围);土壤类型和粉砂含量,土壤类型和砂粒含量具有较强的协同作用,类似地,1-3月NDVI可作为钉螺高密度区的辅助指示因子。

对垅外型钉螺分布面积来说(表5),指示因子的适宜类型(范围)是土壤砂粒含量43%~44%、黏粒含量16%~20%;具有较强协同作用的因子包括:砂粒含量和土地利用、黏粒含量和土地利用、土壤类型和土地利用,其中土地利用和土壤类型是辅助指

表4 垅内型钉螺分布的地理指示因子及其适宜类型(范围)

Tab.4 Indicators and their suitable type/range for the subtype inside embankments

| 垅内型 | 指示因子 | 适宜类型(范围) | 平均值 |
|------|-----------|--------------|-----------------------------|
| 实有钉螺 | 3-10月NDVI | 0.026~0.364 | 73.409 hm ² |
| 面积 | 7-9月NDVI | -0.094~0.307 | 67.998 hm ² |
| | DEM | 43~128 m | 31.745 hm ² |
| | 土壤类型* | 石灰(岩)土 | |
| 活螺密度 | 粉砂含量 | 31%~32% | 0.969 只/0.11 m ² |
| | 砂粒含量 | 33%~34% | 1.474 只/0.11 m ² |
| | 土壤类型 | 黄红壤 | 2.303 只/0.11 m ² |
| | | 淹育水稻土 | 1.485 只/0.11 m ² |
| | 1-3月NDVI* | 0.665~0.980 | |

注:*标识的环境因子为辅助指示因子。

表5 垅外型钉螺分布的地理指示因子及其适宜类型(范围)

Tab.5 Indicators and their suitable type/range for the subtype outside embankments

| 垅外型 | 指示因子 | 适宜类型(范围) | 平均值 |
|------|----------|------------------------------|-----------------------------|
| 实有钉螺 | 砂粒含量 | 43%~44% | 2021.291 hm ² |
| 面积 | 黏粒含量 | 16%~20% | 1991.106 hm ² |
| | 土地利用* | 高覆盖度草地、 滩地湖泊、 水库坑塘 | |
| | 土壤类型* | 沼泽土 | |
| 活螺密度 | 土地利用 | 湖泊 | 0.290 只/0.11 m ² |
| | 1-3月NDVI | 0.467~0.562 | 0.388 只/0.11 m ² |
| | 近水源距离 | 0~105 m | 0.317 只/0.11 m ² |
| | 植被类型* | 夏稻、冬小麦 (局部双季稻); 荻、芦苇沼泽 | |

注:*标识的环境因子为辅助指示因子。

示因子。钉螺密度的环境指示因子—土地利用的适宜类型为湖泊周围滩地,1-3月NDVI适宜范围为0.467~0.562,近水源距离适宜范围是0~105 m;其中协同作用较强的交互因子有:土地利用和植被类型、近水源距离和1-3月NDVI、近水源距离和植被类型,植被类型为辅助指示因子。

山丘型钉螺分布面积不存在明显的地理环境指示因子(表6);山丘型钉螺高密度区的指示因子适宜类型(范围)是低海拔,潞育和淹育水稻土等土壤类型、苦楮林和青冈林以及单季稻种植区;其中,植被类型和土壤类型、植被类型和近水源距离、土壤类型和近水源距离等交互因子的协同作用较强,近水源距离是辅助指示因子。

表6 山丘型钉螺分布的地理指示因子及其适宜类型(范围)

Tab.6 Indicators and their suitable type/range for the subtype in hilly areas

| 山丘型 | 指示因子 | 适宜类型(范围) | 平均值 |
|------|--------|----------|-----------------------------|
| 活螺密度 | DEM | 36~43/m | 0.417 只/0.11 m ² |
| | 土壤类型 | 潞育水稻土 | 0.550 只/0.11 m ² |
| | | 淹育水稻土 | 0.537 只/0.11 m ² |
| | 植被类型 | 苦楮林和青冈林 | 0.805 只/0.11 m ² |
| | | 单季稻 | 0.708 只/0.11 m ² |
| | 近水源距离* | 0~105/m | |

注:*标识的环境因子为辅助指示因子。

4 结论

地理探测器模型筛选出的地理环境指示因子及其适宜类型或范围,可应用于钉螺孳生地的遥感监测,将有助于从宏观上掌握钉螺分布范围和密螺区等重点防治地带的分布情况,减少钉螺调查采样的成本。在垅内型流行区,整个流行季(3-10月),特别是7-9月期间的植被覆盖与钉螺分布范围有关,密螺地带的特征为粉砂含量适中的土壤质地、黄红壤和淹育水稻土为主的土壤类型和第一季度较高的植被覆盖;垅外型流行地区,湖泊滩地、高覆盖度草地是其主要分布环境,而在1-3月期间较高植被覆盖,尤其是荻、芦苇等植被类型是高密度地区的环境特征;在山地丘陵,河流附近的林地以及沟渠纵横的耕地,潞育或淹育水稻土是钉螺密集分布的环境。

大量研究已证实,钉螺孳生、繁殖等生命活动与水源、土壤、植被等环境因子密切相关(吕大兵

等, 2003)。土壤和水源是钉螺必需的生存条件, “无草不见螺”, 植被能够调节土壤湿度, 提供食物和遮荫避寒的环境。秦建新等(2008)发现, 洞庭湖区江滩钉螺孳生地植被类型主要为芦苇和莎草类, 孳生地的土壤类型主要为潜育土, 80%孳生地的NDVI在0.100~0.375之间, 近水源距离为10~230 m之间。张世清等(2003)在应用遥感技术探索洲滩钉螺孳生地生态监测指标时, 发现适宜钉螺孳生繁殖地物环境(芦苇和草地)NDVI值的95%可信区间为0.052~0.357。山丘型地区钉螺孳生环境的调查发现(蒋俊明等, 2006), 土壤含水率、土壤湿度、植被盖度等因子与钉螺分布呈现抛物线或抛物线状曲线, 说明环境因子对钉螺影响存在适宜范围; 土壤水分含量和钉螺密度存在稳定的线性相关关系, 表明土壤水分含量是影响钉螺孳生的主导因素。分析结果符合钉螺的生态学特征, 与前人的研究结论相一致。

需要指出的是, 地理探测器的分析基础是统计关系, 而非因果关系(胡艺, 2012)。例如, 土壤砂粒含量(43%~44%)、黏粒含量(16%~20%)与垸外型钉螺分布面积之间具有很强的正相关关系(0.421、0.415), 但仅根据土壤质地的砂粒和黏粒含量显然不能确定是否有钉螺, 仅为钉螺孳生的环境条件之一。

另外, 由于地理环境要素的多样性, 以及数据的空间分辨率或者螺情采样调查范围的限制, 导致地理探测器模型并不能探测到所有指示因子, 或者导致环境指示因子的适宜类型或范围与实际不符。如分析结果中的山丘型密螺带DEM的适宜范围是36~43 m, 与山丘地区地势情况不符, 使得分析结果具有一定的局限性。

因此, 在以后的研究中, 还须补充更多土壤理化因素以及气温、降水等气象因子(洪青标等, 2004; 王家生等, 2007), 采用时空分析模型(Li et al, 2012; Kolovos et al, 2013)分析环境因子对螺情的影响。

参考文献(References)

洪青标, 姜玉骥, 杨坤, 等. 2004. 钉螺卵在恒温环境中发育零点和有效积温的研究. 中国血吸虫病防治杂志, 16(6): 432-435. [Hong Q B, Jiang Y J, Yang K, et al. 2004. Developmental zero and effective accumulated temperature of oncomelania eggs under constant temperature.

Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 16(6): 432-435.]

胡艺. 2012. 基于空间模型的小概率地理健康事件生态学研究[D]. 北京: 中国地质大学. [Hu Y. 2012. Spatial model-based ecological study on geographical health events[D]. Beijing, China: China University of Geosciences.]

黄希宝, 张险峰, 朱惠国, 等. 2009. 2008年湖北省血吸虫病疫情. 中国血吸虫病防治杂志, 21(6): 486-490. [Huang X B, Zhang X F, Zhu H G, et al. 2009. Endemic situation of schistosomiasis in Hubei Province, 2008. Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 21(6): 486-490.]

蒋俊明, 何亚平, 费世民, 等. 2006. 山丘型地区钉螺孳生数量与植被和土壤环境因子的关系. 湿地科学与管理, 2(4): 33-39. [Jiang J M, He Y P, Fei S M, et al. 2006. Relationships between the quantity of oncomelania and environmental factors of vegetation and soil in hilly and mountainous areas. Wetland Science & Management, 2(4): 33-39.]

李召军, 陈红根, 刘跃民, 等. 2006. 鄱阳湖区圩垸内外植被与钉螺分布关系研究. 中国血吸虫病防治杂志, 18(6): 406-410. [Li Z J, Chen H G, Liu Y M, et al. 2006. Studies on relationship between vegetation and snail distribution inside and outside embankment of Poyang Lake Region. Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 18(6): 406-410.]

林丹丹, 张绍基. 2002. 鄱阳湖区地理环境与血吸虫病传播. 中华流行病学杂志, 23(2): 15-18. [Lin D D, Zhang S J. 2002. Geographical environment and schistosomiasis transimission of Dongting Lake Area. Chinese Journal of Epidemiology, 23(2): 15-18.]

吕大兵, 姜庆五. 2003. 钉螺生态学研究及其应用. 中国血吸虫病防治杂志, 15(2): 154-156. [Lv D B, Jiang Q W. 2003. Study on the ecology of oncomelania snails and its application. Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 15(2): 154-156.]

秦建新, 谭子芳, 张春. 2008. 洞庭湖区江滩钉螺分布的环境因子及空间特征: 基于RS/GIS的研究. 自然灾害学报, 17(4): 19-27. [Qin J X, Tan Z F, Zhang C. 2008. Environment factors and spatial characters of distribution of oncomelania snails in islet and beach of Dongting Lake Area. Journal of Natural Disasters, 17(4): 19-27.]

邱娟, 李仁东, 徐兴建. 2012. 湖北省钉螺分布现状的地理特征分析. 长江流域资源与环境, 21(1): 100-104. [Qiu J, Li R D, Xu X J. 2012. Characteristics analysis of oncomelania hupensis's geographical distribution in Hubei Province. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 21(1): 100-104.]

- 王家生, 卢金友, 魏国远, 等. 2007. 环境变化对钉螺扩散影响规律研究. 长江科学院院报, 24(3): 16-19. [Wang J S, Lu J Y, Wei G Y, et al. 2007. Impact of environment changes on oncomelania spread. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 24(3): 16-19.]
- 王劲峰. 2006. 空间分析. 北京: 科学出版社. [Wang J F. 2006. Spatial analysis. Beijing, China: Science Press.]
- 张世清, 姜庆五, 汪天平, 等. 2003. 遥感技术用于洲滩型血吸虫病流行区钉螺孳生地生态的监测. 中华预防医学杂志, 37(5): 31-34. [Zhang S Q, Jiang Q W, Wang T P, et al. 2003. Ecological surveillance on breeding ground for oncomelania hupensis snails in the areas prevalent with islet-type schistosomiasis using remote sensing technology. Chinese Journal of Preventive Medicine, 37(5): 31-34.]
- 张旭东, 漆良华, 黄玲玲, 等. 2007. 山丘区土壤环境因子对钉螺分布的影响. 生态学报, 27(6): 2460-2467. [Zhang X D, Qi L H, Huang L L, et al. 2007. Influences of soil environmental factors on oncomelania snail distribution in the hilly and mountainous areas. Acta Ecologica Sinica, 27(6): 2460-2467.]
- 张志杰, 彭文祥, 陈更新, 等. 2007. 湖沼地区钉螺分布动态性的初步证据. 中国血吸虫病防治杂志, 19(2): 86-90. [Zhang Z J, Peng W X, Chen G X, et al. 2007. Elementary proof on the dynamic distribution of oncomelania hupensis in marshland and lake regions. Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 19(2): 86-90.]
- 赵安, 蒋梅鑫, 简敏菲, 等. 2010. 血吸虫病医学地理研究的回顾与展望. 地理科学进展, 29(1): 45-51. [Zhao A, Jiang M X, Jian M F, et al. 2010. Progress and prospects of schistosomiasis-medical geography. Progress in Geography, 29(1): 45-51.]
- 中华人民共和国卫生部疾病控制司. 2000. 血吸虫病防治手册. 上海科学技术出版社. [Department of Health Disease Control of Health Ministry of the People's Republic of China. 2000. Schistosomiasis control manual. Shanghai, China: Shanghai Science and Technology Press.]
- 周晓农. 2005. 实用钉螺学. 北京: 科学出版社. [Zhou X N. 2005. Practical oncomelania science. Beijing, China: Science Press.]
- 周晓农, 胡晓抒, 孙宁生, 等. 1999. 地理信息系统应用于血吸虫病的监测 II: 流行程度的预测. 中国血吸虫病防治杂志, 11(2): 66-70. [Zhou X N, Hu X S, Sun N S, et al. 1999. Application of geographic information systems on schistosomiasis surveillance II: predicting transmission intensity. Chinese Journal of Schistosomiasis Control, 11(2): 66-70.]
- Boelee E, Laamrani H. 2004. Environmental control of schistosomiasis through community participation in a Moroccan oasis. Tropical Medicine & International Health, 9(9): 997-1004.
- Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. 1996. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical Analysis, 28(4): 281-298.
- Cao F, Ge Y, Wang J F. 2013. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment. GIScience & Remote Sensing, 50(1): 78-92.
- Hilbe J M. 2009. Logistic regression models. Boca Raton, US: CRC Press.
- Hu Y, Wang J F, Li X H, et al. 2011. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan Earthquake, China. Plos One, 6(6): e21427.
- Kolovos A, Angulo J M, Modis K, et al. 2013. Model-driven development of covariances for spatiotemporal environmental health assessment. Environmental Monitoring and Assessment, 185(1): 815-831.
- Kristensen T K, Malone J B, Mccarroll J C. 2001. Use of satellite remote sensing and geographic information systems to model the distribution and abundance of snail intermediate hosts in Africa: a preliminary model for Biomphalaria pfeifferi in Ethiopia. Acta Tropica, 79(1): 73-78.
- Kulldorff M. 1997. A spatial scan statistic. Communications in Statistics: Theory and Methods, 26(6): 1481-1496.
- Kulldorff M, Nagarwalla N. 1995. Spatial disease clusters: detection and inference. Statistics in Medicine, 14(8): 799-810.
- Li L F, Wang J F, Wu J. 2012. A spatial model to predict the incidence of neural tube defects. BMC Public Health, 12(1): 951-960.
- Li X H, Wang J F, Liao Y L, et al. 2006. A geological analysis for the environmental cause of human birth defects based on GIS. Toxicological & Environmental Chemistry, 88(3): 551-559.
- Wang J F, Hu Y. 2012. Environmental health risk detection with GeogDetector. Environmental Modelling & Software, 33(7): 114-115.
- Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. International Journal of Geographical Information Science, 24(1): 107-127.

Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model

TONG Laga^{1,2}, XU Xinliang¹, FU Ying^{1,2}, WEI FengHua³

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Institute of Parasitic Diseases, Wuhan 430079, China)

Abstract: Schistosomiasis japonica is a parasitic disease that debilitates human bodies and greatly impedes socioeconomic progress in endemic areas. It was widespread in southern China several decades ago and the disease prevention effort of the Chinese government and researchers achieved remarkable results in reducing infections. However, in recent year, the epidemic situation has worsened due to a series of changes in the natural environment and socioeconomic conditions. As the only intermediate host of Schistosome, *Oncomelania hupensis* plays an important role in the spread of this disease and its control is critical for the prevention and control of Schistosome. Therefore, identifying the environmental factors that determine the distribution of the snail could help predict the distribution and extent of snail breeding sites, obtain a macroscopic view on snail spreading trend, and take effective measures to eliminate the snails. In this paper, we aim to determine key indicators that could be used in remote sensing monitoring of *Oncomelania hupensis* breeding extent and density. Hubei Province is one of the serious epidemic areas in China. *Oncomelania hupensis* here can be classified into three subtypes: the subtype inside embankments, subtype outside embankments, and subtype in hilly areas, according to the geographical environment of snail habitats. We take into account several environmental factors including elevation, nearest distance to river (water), land use, soil and vegetation to analyze their influence on snail distribution. Geographical Detector Model used in this research is based on spatial variation analysis of the geographical strata to assess the health risks in different environment. It contains four geographical detectors: factor detector identifies which factors are responsible for the risk; ecological detector compares the relative importance of risk factors; risk detector discloses where the high risk areas are; and interaction detector reveals whether the risk factors interact or lead to disease independently. The main procedures of our analysis are as follows: first, both snail statistics and environmental data are collected and preprocessed with ArcGIS Desktop software; then the environmental indicators that are strongly related to snail distribution are identified by the factor detector and ecological detector; finally, favorable (suitable) type or range of each indicator as well as the reference factors that indirectly influence the snails can be computed from the risk detector and interaction detector. It is found that for the subtype inside embankments, vegetation coverage of epidemic season (March to October), especially July to September, determines the extent of distribution, while high density areas are characterized by moderate silt content in soil texture, yellowish red soil and submerged paddy soil, high vegetation coverage in the first quarter of the year. The subtype outsider embankments distributed mainly at lake beaches with high vegetation coverage, while high vegetation coverage in the first quarter, reed and amur silver grass vegetation contributes to its abundance. In hilly areas, there is no clear indicator for the extent of distribution of the subtype due to the relatively complex environment, yet woodland and farmland close to river, waterlogged paddy soil as well as submerged paddy soil are strongly related to high dense of the snails. This result is consistent with previous studies. The result and method of this research could provide scientific reference for policy makers and researchers to take efficient measures to control snail prevalence.

Key words: snail; schistosomiasis; geographical environmental factor; geographical detector; key indicator; Hubei Province