

DOI:10.13350/j.cjpb.260111

• 论著 •

# 基于 MaxEnt 的山东省恙虫病影响因素分析及风险区域预测\*

石兴龙<sup>1</sup>,徐欣颖<sup>1</sup>,乔颖异<sup>1</sup>,吕婧<sup>1</sup>,岳芳<sup>1</sup>,程传龙<sup>1</sup>,左慧<sup>1</sup>,鲁亮<sup>2\*\*</sup>,李秀君<sup>1\*\*</sup>

(1. 山东大学齐鲁医学院公共卫生学院生物统计学系, 山东济南 250012;

2. 传染病溯源预警与智能决策全国重点实验室, 中国疾病预防控制中心传染病预防控制所)

**【摘要】** 目的 分析山东省恙虫病发病的影响因素, 预测其高风险区域, 为恙虫病的精准防控提供科学依据。 方法

选取 2017-2021 年山东省恙虫病报告病例数据, 收集同期气象、环境和社会经济因素数据; 计算各影响因素间 Spearman 相关系数分析相关性; 构建最大熵模型(Maximum entropy model, MaxEnt), 评估各影响因素对恙虫病发生的相对贡献, 通过影响因素的响应曲线反映恙虫病的发生与影响因素之间的关联, 预测高风险区域, 绘制风险区域分布图, 通过受试者工作特征(Receiver operating characteristic, ROC)曲线与曲线下面积(Area under curve, AUC)评估模型预测效果。 结果 2017-2021 年山东省共报告 3 355 例恙虫病病例, 发病率较高的地区主要集中在山东省中南部及东部, 北部与西部地区发病率较低, 发病高峰在 10~11 月, 男女性别比为 1:1.27, 50 岁以上老人占比最多(81.31%), 农民是发病最多的职业(89.63%)。MaxEnt 模型结果显示, 归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、相对湿度、年平均温度、海拔、坡度对恙虫病的发生有着较大贡献(累计贡献度 86.10%), NDVI 对恙虫病发病贡献度最大(37.80%), 与恙虫病发病呈倒“U”型关系。模型预测的高风险区域主要集中在山东省中南部及胶东半岛地区, 在西部和北部预测有零散分布。ROC 曲线结果表明模型具有良好的预测性能(AUC=0.839)。 结论 山东省恙虫病受多种因素的影响, NDVI、相对湿度、年平均温度、海拔、坡度是影响恙虫病发生的主要因素, 山东省中南部及东部地区是恙虫病发生的高风险地区。应加强环境监测和健康教育, 针对高风险地区开展精准防控措施。

**【关键词】** 恙虫病; 最大熵模型; 影响因素; 风险区域

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1673-5234(2026)01-0055-06

[Journal of Pathogen Biology. 2026 Jan.; 21(01):55-60,65.]

## Analysis of influencing factors and risk area prediction of scrub typhus in Shandong Province based on the MaxEnt

SHI Xinglong<sup>1</sup>, XU Xinying<sup>1</sup>, QIAO Yingyi<sup>1</sup>, LV Jing<sup>1</sup>, YUE Fang<sup>1</sup>, CHENG Chuanlong<sup>1</sup>, ZUO Hui<sup>1</sup>, LU Liang<sup>2</sup>, LI Xiujun<sup>1</sup> (1. Department of Biostatistics, School of Public Health, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan 250012, China; 2. National Key Laboratory of Intelligent Tracking and Forecasting for Infectious Diseases, National Institute for Communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention)\*\*\*

**【Abstract】** **Objective** To analyze the influencing factors of scrub typhus incidence in Shandong Province, predict its high-risk areas, and provide a scientific basis for the precise prevention and control of scrub typhus. **Methods** Reported case data of scrub typhus in Shandong Province from 2017 to 2021 were selected, along with meteorological, environmental, and socio-economic data during the same period. The Spearman correlation coefficient was calculated to analyze the correlations among these factors. The Maximum Entropy Model (MaxEnt) was constructed to evaluate the relative contributions of each influencing factor to the occurrence of scrub typhus, reflect the association between scrub typhus occurrence and influencing factors through the response curves of influencing factors, predict high-risk areas, and draw the distribution map of risk areas. The model's predictive performance was assessed using the Receiver Operating Characteristic Curve (ROC) and Area Under Curve (AUC). **Results** A total of 3 355 cases of scrub typhus were reported in Shandong Province from 2017 to 2021. The regions with relatively higher incidence rates were mainly located in the central, southern, and eastern regions of Shandong Province, while the northern and western regions exhibited relatively lower incidence rates. The peak incidence occurred in October and November. The male-to-female ratio was 1 :

\* **【基金项目】** 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC2604401); 国家自然科学基金项目(No. 81673238)。

\*\* **【通信作者】** 李秀君, E-mail: xjli@sdu.edu.cn; 鲁亮, E-mail: luliang@icdc.cn

**【作者简介】** 石兴龙(2000-), 男, 山东人, 硕士研究生, 研究方向: 流行病与卫生统计学。E-mail: shixinglong@mail.sdu.edu.cn

1. 27. Patients aged 50 years and older accounted for the highest proportion of cases (81.31%), and farmers accounted for the highest proportion of cases among occupational groups (89.63%). The MaxEnt model results showed that the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), relative humidity, annual mean temperature, altitude, and slope had significant contributions to scrub typhus incidence (cumulative contribution of 86.10%). NDVI contributed the most to scrub typhus incidence (37.80%) and exhibited an inverted "U"-shaped relationship with the disease. The high-risk areas predicted by the model were mainly concentrated in the central-southern region of Shandong Province and the Jiaodong Peninsula, with scattered distributions in the western and northern regions. ROC curve results indicated that the model had good predictive performance (AUC = 0.839). **Conclusion** The occurrence of scrub typhus in Shandong Province is influenced by multiple factors, among which NDVI, relative humidity, annual mean temperature, altitude, and slope are the primary determinants. The central-southern and eastern regions of Shandong Province are high-risk areas for scrub typhus. Environmental monitoring and health education should be strengthened, and targeted prevention and control measures should be implemented in high-risk areas.

**【Keywords】** scrub typhus; maximum entropy model; influencing factors; risk areas

恙虫病 (Scrub typhus) 又称丛林斑疹伤寒, 是一种由恙虫病东方体 (*Orientia tsutsugamushi*) 引起的急性自然疫源性传染病, 通过恙螨幼虫叮咬传播<sup>[1]</sup>。该病在全球范围内广泛流行, 尤其在亚太地区、非洲、中东以及南美洲等地区, 每年约有 100 万人感染, 超过 10 亿人面临感染风险<sup>[2]</sup>。恙虫病的流行与自然环境因素密切相关, 其分布受到气候、植被、地形等多种因素影响<sup>[3]</sup>。随着全球气候变化和人类活动的加剧, 恙虫病的流行范围不断扩大, 发病率显著上升, 已成为全球公共卫生的重要挑战<sup>[4]</sup>。

近 50 年来, 恙虫病在中国的发病范围从传统的南方地区逐渐向北、向西扩散, 全国 31 个省级行政区均有病例报告<sup>[5]</sup>。山东省作为中国东部沿海的重要省份, 自 1986 年首次报告恙虫病以来, 发病人数逐年增加。据统计, 山东省恙虫病发病率在北方各省中一直位居前列<sup>[6]</sup>。多项研究均表明恙虫病已成为山东省不容忽视的公共卫生问题<sup>[7-8]</sup>。

目前已有山东省恙虫病的流行特征、危险因素的分析, 但有关生态位模型对山东省恙虫病发生风险的研究鲜有报道。最大熵模型 (Maximum entropy model, MaxEnt) 是一种基于生态位理论和统计学习所建立的生态位模型, 核心思想是在满足已知约束条件的前提下, 选择熵最大的分布来描述物种的潜在分布, 目前已广泛用于预测物种的地理分布及其潜在生态位<sup>[9-10]</sup>。因此, 本研究旨在通过最大熵模型探索影响恙虫病发生的相关因素, 预测山东省恙虫病的高风险区域, 揭示自然环境和社会经济因素对恙虫病流行的影响, 为今后防控提供科学依据。

## 材料与方法

### 1 资料来源

2017 年 1 月 1 日-2021 年 12 月 31 日山东省恙虫病报告病例数据来源于中国疾病预防控制中心信息系

统, 包括年龄、性别、诊断日期、现住址国标等; 将病例现住址地址国标编码与山东省县级以上行政区划代码 (<http://mzt.shandong.gov.cn/>) 进行匹配, 获得病例居住地址, 通过调用百度地图 API, 获取病例居住地经纬度坐标, 同时剔除缺失地址信息和不能与山东省县级以上行政区划代码匹配的病例。收集山东省的气象、环境和社会经济数据 (表 1)。本研究所使用的地图来自国家地理信息公共服务平台 (天地图) (<https://www.tianditu.gov.cn>), 审图号为 GS (2024)0650 号。

表 1 数据来源及描述  
Table 1 Data source and description

影响因素	描述(单位)	数据来源
TEM	年平均温度(°C)	
EVP	年平均蒸发量(mm)	
RH	相对湿度(%)	欧洲中期天气预报中心 ( <a href="http://www.ecmwf.int/">http://www.ecmwf.int/</a> )
PRE	年平均降水量(mm)	
PRS	年平均气压(kPa)	
WIN	年平均风速(m/s)	
DEM	海拔(m)	中国科学院资源与环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
Slope	坡度(°)	
GDP	国内生产总值(万元)	中分辨率成像光谱仪数据集 ( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/">https://www.earthdata.nasa.gov/</a> )
NDVI	归一化植被指数	
PD	人口密度(人/km <sup>2</sup> )	开放空间人口统计数据与研究 ( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )

## 2 方法

**2.1 描述性分析** 对 2017-2021 年山东省恙虫病数据进行流行病学描述, 分析其时间分布特征, 计算并展示 2017-2021 年山东省恙虫病月度和累计病例分布; 以区县为单位, 绘制恙虫病发病率空间分布地图。

**2.2 影响因素筛选** 为避免影响因素间存在高度相关性, 影响 MaxEnt 模型的输出结果<sup>[11]</sup>, 本研究计算所有影响因素之间的 Spearman 相关系数。如果两个因素的相关系数绝对值超过 0.7 ( $|r| > 0.7$ ), 认为具有强相关性<sup>[12]</sup>, 保留 MaxEnt 模型中贡献百分比比较高

的影响因素<sup>[13-14]</sup>。

**2.3 模型原理** 最大熵模型是一种基于统计概率的机器学习模型,已广泛应用于生态学和环境科学等不同领域,尤其是物种分布的预测<sup>[15]</sup>。它将物种的分布以1个概率分布来表示,并为研究区的每个位置分配1个非负值。每个环境变量的平均值要求在允许的误差范围内,接近观察样本区域的经验均值。由于约束集通常不能完全确定模型,因此在所有满足这些约束的概率分布中,选择具有最大熵的分布<sup>[16]</sup>。

MaxEnt模型的目标是根据1组约束条件,推导出1个概率分布 $P(x)$ ,使得该分布的熵最大化,表达为: $H(P) = -\sum_x P(x)\log p(x)$ 。式中: $H(P)$ 为熵, $P(x)$ 为带估计的概率分布。

为了使MaxEnt模型的输出符合已知数据的统计特征,需要设置约束条件。假设有 $K$ 个环境变量 $f_k(x)$ ,每个变量与每个位置 $x$ 相关联,要求每个变量的期望值与训练数据中的观测值相匹配。即,约束条件为: $\sum_x P(x)f_k(x) = mean(f_k(x))$ 。式中: $k=1, 2, \dots, K, mean(f_k(x))$ ,是环境变量 $f_k(x)$ 在训练数据中的观测均值,反映了已知信息的统计特征。

设定了约束条件,MaxEnt模型便可通过拉格朗日乘子法来求解最优概率分布。模型的优化目标是求出满足约束条件的最大熵概率分布。最终,模型的概

率分布可以表示为: $P(x) = \frac{\exp[\sum_{k=1}^K \lambda_k f_k(x)]}{Z}$ 。式

中, $\lambda_k$ 是拉格朗日乘子; $Z$ 为归规范化常数,确保所有概率和为1。

**2.4 模型构建** 本研究使用Maxent 3.4.4软件构建恙虫病的生态位模型,探索影响恙虫病发生的潜在危险因素并预测风险区域。通过调整不同的正则化参数和特征组合,分析各种参数条件下模型的复杂度,选取最优参数组合构建模型<sup>[13]</sup>,选取正则化参数为1.5,特征组合为LQPTH作为最终参数组合;随机选取75%的数据作为训练集,其余25%为测试集<sup>[14]</sup>,重复训练10次以避免随机误差;采用Jackknife检验评估模型中各因素对恙虫病分布预测的重要性,正则化训练收益表示各变量对模型预测能力的贡献,数值越高,表明该因素对恙虫病发生的影响越强;通过响应曲线反映恙虫病发生与重要因素之间的关联;使用受试者工作特征(Receiver operating characteristic, ROC)曲线与曲线下面积(Area under curve, AUC)衡量模型预测性能。AUC的值范围为0~1, AUC值为0.5~0.6为预测性能差,0.7~0.8为一般,0.8~0.9为良好,0.9~1为优秀,越接近1说明模型预测的结果越准确。根据模型预测的风险概率将风险区域划分为4个

等级,其中<0.1为非风险区,0.1~0.3为低风险区,0.3~0.5为中风险区,>0.5为高风险区<sup>[17]</sup>。

## 结果

### 1 流行病学特征

2017-2021年山东省累计报告恙虫病病例3355例,年均报告发病率为0.66/10万人。其中男性病例1480例,占44.11%,女性病例1875例,占55.89%,男女性别比为1:1.27;病例主要分布在50岁以上人群,占总病例数的81.31%;发病最多的职业是农民,共3007例,占比89.63%(表2)。发病率较高的地区主要在山东省东部及中南部,总体呈现东南高西北低的趋势(图1)。图2显示2017-2021年山东省恙虫病发病时间呈现出明显的季节性,发病人数主要集中在10-11月,其他月份均维持在较低水平,呈单峰分布。

表2 2017-2021年山东省恙虫病发病人群分布情况  
Table 2 Distribution of scrub typhus incidence population in Shandong Province from 2017 to 2021

变量	2017	2018	2019	2020	2021	合计	
性别	男	534	252	350	152	192	1480(44.11%)
	女	658	334	413	207	263	1875(55.89%)
年龄(岁)	<10	25	16	7	0	7	55(1.64%)
	10~19	10	6	3	2	4	25(0.75%)
	20~29	26	8	9	2	6	51(1.52%)
	30~39	54	28	24	13	17	136(4.05%)
	40~49	133	81	91	25	30	360(10.73%)
	50~59	346	140	200	100	107	893(26.62%)
职业	60~69	360	187	245	138	137	1067(31.80%)
	≥70	238	120	184	79	147	768(22.89%)
	农民	1077	519	693	313	405	3007(89.63%)
	工人	24	10	6	5	7	52(1.55%)
	离退人员	19	14	21	12	11	77(2.30%)
	家务待业	13	10	14	19	11	67(2.00%)
	学生	13	10	5	1	6	35(1.04%)
	其他	46	23	24	9	15	117(3.49%)
	总计	1192	586	763	359	455	3355(100.00%)

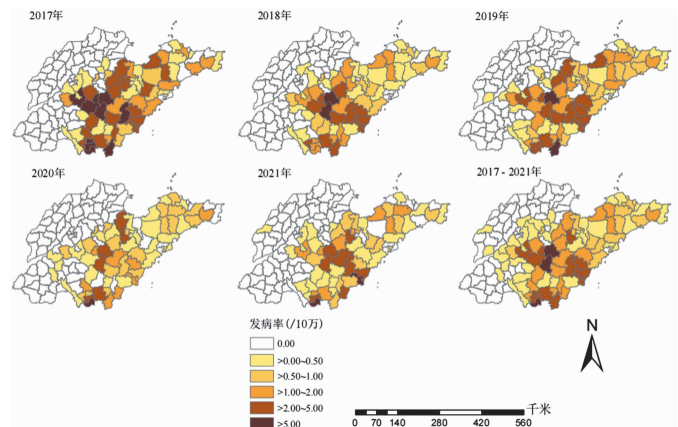


图1 2017-2021年山东省恙虫病发病率空间分布  
Fig. 1 Spatial distribution of incidence rate of scrub typhus in Shandong Province from 2017 to 2021

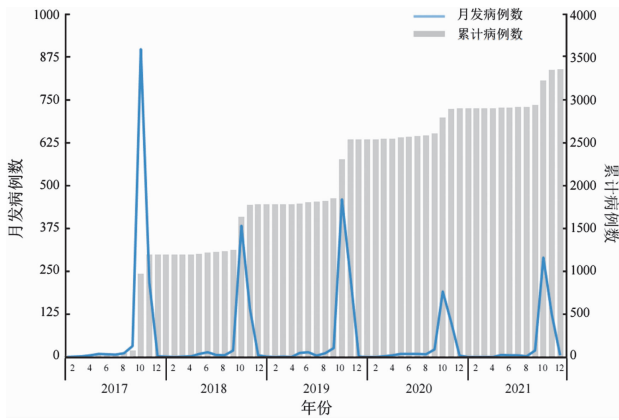


图 2 2017-2021 年山东省恙虫病病例的月度和累计分布  
Fig. 2 Monthly and cumulative distribution of scrub typhus cases in Shandong Province from 2017 to 2021

## 2 影响因素分析

采用 Spearman 相关性分析探究各影响因素之间的相关性,其中相对湿度与年蒸发量、年蒸发量与年降水量、海拔与气压之间的相关系数绝对值超过 0.7 ( $|r| > 0.7$ ),见图 3。贡献率可以评估参与模型预测的影响因素的重要性,各影响因素对 MaxEnt 模型的贡献百分比见表 3。依据纳入原则,最终排除气压和年蒸发量,其余因素纳入模型。贡献率最大的因素是归一化植被指数(NDVI),该因素对山东省恙虫病的发生有着最大影响。此外相对湿度、年平均温度、海拔与坡度也有较大的影响,其余因素贡献较低。Jackknife 检验结果显示(图 4),在控制其他变量的影响,只考虑 NDVI 单一因素,NDVI 依然能显著提升模型预测能力,表明 NDVI 是影响恙虫病发生的关键因素。综合各因素对恙虫病发生的贡献,影响恙虫病发生的主要因素为 NDVI、相对湿度、年平均温度、海拔与坡度。

表 3 各影响因素对最大熵模型的百分比贡献

Table 3 The percent contribution of influencing factors to the MaxEnt

影响因素	贡献百分比(%)	累计贡献度(%)
NDVI	37.80	37.80
RH	18.20	56.00
TEM	9.90	65.90
Slope	10.90	76.80
DEM	9.30	86.10
PRE	3.40	89.50
PRS	3.80	93.30
EVP	3.00	96.30
PD	2.80	99.10
GDP	0.50	99.60
WIN	0.30	99.90

图 5 展示了主要影响因素对恙虫病发生的响应曲线,NDVI 对恙虫病的发生呈现先上升后下降的“倒 U 型”趋势,当 NDVI 在 0.3~0.5 左右时,恙虫病的发生概率较高。相对湿度与恙虫病的发生呈现正相关,随

着相对湿度增加,恙虫病发生概率逐渐升高。温度与恙虫病发生之间呈现负相关,在超过 15 °C 后发生概率迅速下降。随着海拔的升高,恙虫病的发生概率迅速上升,在 50~200 m 范围内维持较高水平,而海拔进一步升高,发生概率迅速降低。坡度对恙虫病的发生呈现负相关,发生概率随坡度的增加逐渐降低。

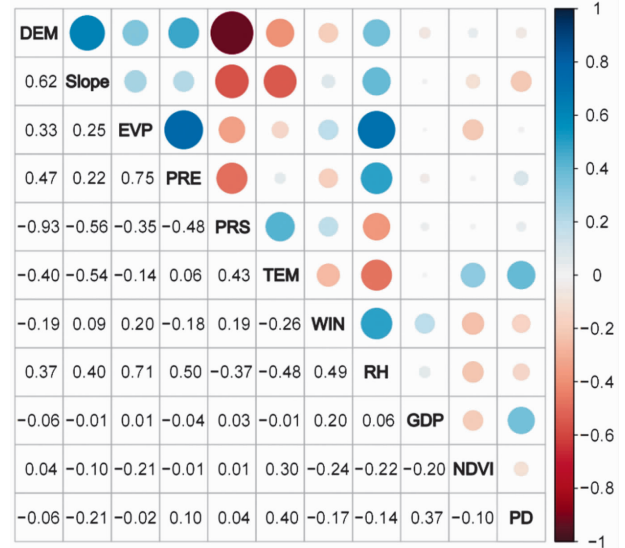


图 3 山东省各影响因素的 Spearman 相关性分析  
Fig. 3 Spearman correlation analysis of influencing factors in Shandong Province

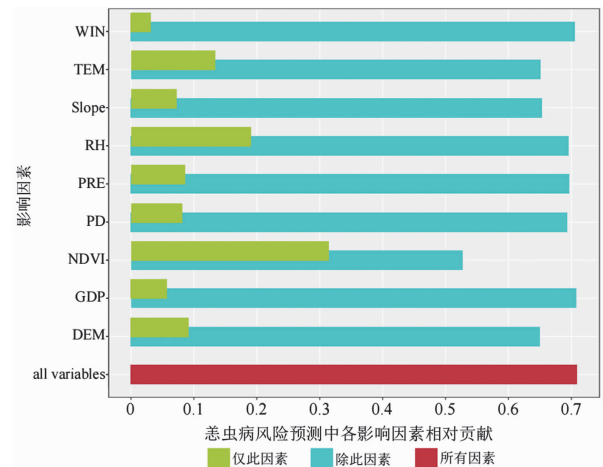


图 4 最大熵模型 Jackknife 检验结果  
Fig. 4 Jackknife test results of the Maxent

## 3 山东省恙虫病潜在风险区域

图 6 显示了 MaxEnt 模型预测的山东省恙虫病潜在风险区域。高风险区域主要集中在中南部山区以及东部的丘陵地区,西部和北部的平原地区风险较低,但存在零散分布的高风险区域。

## 4 模型预测效果评估

MaxEnt 模型的 ROC 曲线结果显示平均 AUC 值为 0.839,表明模型在识别和预测高风险区域方面预测效果良好(图 7)。

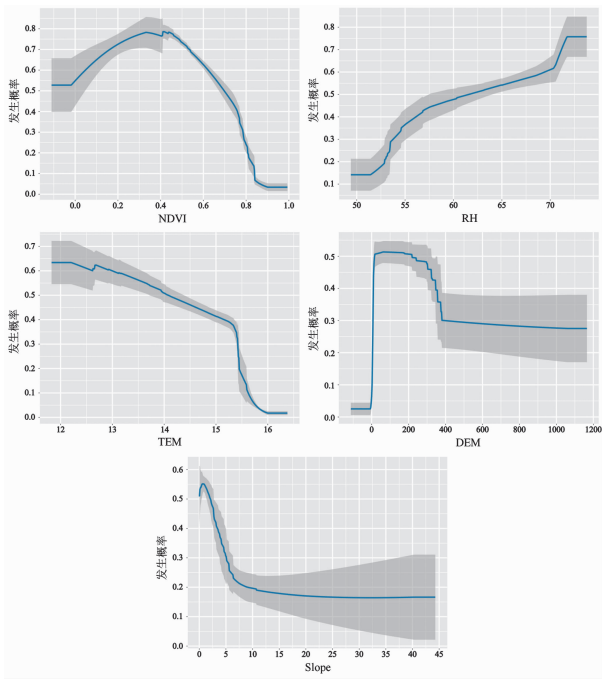


图5 影响因素对恙虫病发生的响应曲线  
Fig. 5 Response curves of influencing factors to the occurrence of scrub typhus

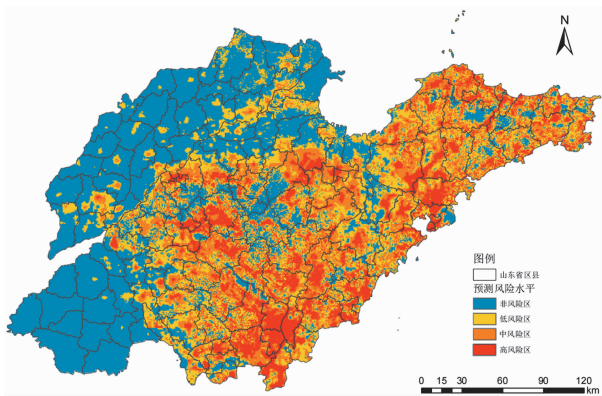


图6 山东省恙虫病风险区域  
Fig. 6 Risk areas of scrub typhus in Shandong Province

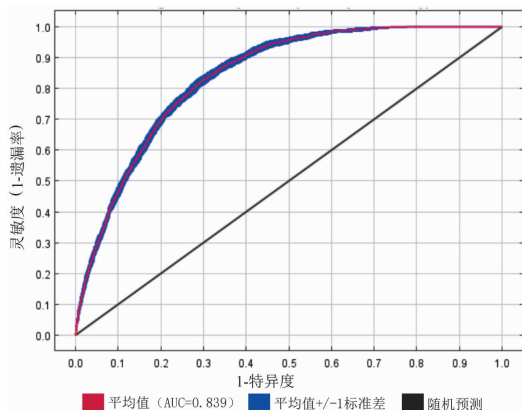


图7 山东省恙虫病最大熵模型的受试者工作特征曲线(ROC)  
Fig. 7 Receiver operating characteristic curve (ROC) of the MaxEnt for scrub typhus in Shandong Province

## 讨论

本研究探讨了山东省恙虫病的时空流行病学特征,通过 MaxEnt 模型探索多种影响因素与恙虫病之间的关联,并预测山东省恙虫病高风险区域。模型预测的高风险地区主要集中在山东省中南部以及东部低山丘陵地带,山东省恙虫病的发病率空间分布结果同样显示这些地区有着较高的发病率,说明当地存在着适合恙螨生存的气候、环境等条件,西北部地区虽然发病率较低,但模型显示这些地区存在零散分布的高风险区域,提示相关地区应加强恙虫病的监测与防控。

研究首先对山东省 2017-2021 年病例的流行病学特征进行分析,结果显示研究期间病例集中分布在山东省中部以及沿海的丘陵山地,平原地区分布较少,这可能与恙螨的分布有关,山区和丘陵地带气温适宜,植被覆盖率高的环境有利于恙螨及其宿主的生存和繁衍,增加了恙虫病的传播风险<sup>[18]</sup>;恙虫病的发病存在明显的季节性,每年 10-11 月为其发病高峰,与安徽省和江苏省等<sup>[19-20]</sup>地区的发病季节相似;农民与老年人是发病率较高的两类人群,这与既往研究一致<sup>[21-22]</sup>,这可能是由于农民长时间在田间进行农业活动,与恙螨及其宿主的接触机会增多,增加了农民感染风险;并且随着农村青壮年不断进城务工,留在农村并进行田间作业的老年人比例不断上升,使老年人群的感染风险增加<sup>[23-24]</sup>。

本文结果显示 NDVI 对恙虫病发生的影响呈现先增加后降低的趋势。对于许多传染病媒介,植被为其生存和繁殖提供了重要的场所,植被的增加将导致螨虫及其宿主动物数量增加,从而增加人群感染恙虫病的风险。较高的 NDVI 可能对应茂密的丛林灌木地区,人类活动减少,降低了感染恙虫病的风险。先前研究也表明 NDVI 对恙虫病的发生有着积极作用<sup>[25-27]</sup>,而 Min 等<sup>[28]</sup>的研究表明恙虫病的发病率在森林砍伐较严重的地区趋于增加,说明森林覆盖率的降低增加了其发病风险。孙焯等<sup>[29]</sup>对云南省恙虫病流行特征及危险因素研究发现,恙虫病发病率随草地面积增加而先下降后上升,随着灌木面积增加而先上升后下降,提示未来应对不同的植被覆盖类型开展更深入的研究。

相对湿度与恙虫病的发生呈正相关,与先前研究结果基本一致<sup>[30-31]</sup>。Wei 等<sup>[31]</sup>通过构建分布滞后非线性模型对广州市恙虫病的影响因素进行分析,结果表明相对湿度每增加 10.00%,滞后 4 个月发病风险增加 8.50%。这可能是由于较高的相对湿度可以提供有利于恙螨生长的潮湿环境<sup>[32]</sup>。年平均温度与山东省恙虫病之间存在负相关。这与 Qian 等<sup>[33]</sup>研究结

果相似。而先前一些研究得出了相反的结果<sup>[31,34]</sup>,这可能与不同地区主要传播媒介不同有关,小板纤恙螨为山东省恙虫病的主要传播媒介<sup>[35]</sup>,小板纤恙螨更适应相对寒冷的季节,高温的环境反而不利于其生存、发育和繁殖<sup>[36]</sup>。

此外,随着海拔的升高,恙虫病的发生概率迅速上升,在<300 m 的范围内恙虫病的发生概率保持较高水平,而随着海拔进一步的升高,恙虫病的发生概率逐渐降低。一项云南的调查研究发现,海拔在“500-999 m”和“>2 499 m”范围之间,恙螨群落的物种丰富度随着海拔的增加而呈逐渐降低的趋势<sup>[37]</sup>,表明过高的海拔不利于恙螨的生存。坡度对恙虫病的发生呈现负相关。一项使用生态位模型和随机森林模型对尼泊尔恙虫病影响因素的研究也得出了相似的结果<sup>[38]</sup>。这可能是由于农田的分布随着坡度增加而减少,进而减少了人群与恙螨的接触机会。本研究存在一定局限性。生态学研究可能存在生态学谬误,研究结果可能存在一定偏差。作为自然疫源性疾,未能考虑恙螨以及啮齿类动物种群密度等生物变量对恙虫病发病的影响。

综上所述,山东省恙虫病的发生受多种因素的共同影响,NDVI、相对湿度、年平均温度、坡度、海拔是影响恙虫病发生的主要因素。高风险区域主要集中在山东省中南部以及东部地区,在西北部地区零散分布。农民和 50 岁及以上的人群应作为恙虫病防控的重点人群,对其加强健康教育,提高防护意识。卫生部门应加强环境监测,及时调整防控策略,对恙虫病进行针对性预测和预警。

#### 【参考文献】

[1] Musa TH, Ahmad T, Wana MN, et al. The epidemiology, diagnosis and management of scrub typhus disease in China [J]. Hum Vaccin Immunother, 2021, 17(10): 3795-3805.

[2] Xu G, Walker DH, Jupiter D, et al. A review of the global epidemiology of scrub typhus [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2017, 11(11): e0006062.

[3] Elliott I, Pearson I, Dahal P, et al. Scrub typhus ecology: a systematic review of orientia in vectors and hosts [J]. Parasit Vectors, 2019, 12(1): 513.

[4] Richards AL, Jiang J. Scrub Typhus: Historic perspective and current status of the worldwide presence of orientia species [J]. Trop Med Infect Dis, 2020, 5(2): 49.

[5] Jiang J, Richards AL. Scrub typhus: No longer restricted to the Tsutsugamushi triangle [J]. Trop Med Infect Dis, 2018, 3(1): 11.

[6] Ni Z, Li S, Xi R, et al. Meteorological factors and normalized difference vegetation index drivers of scrub typhus incidence in Shandong Province based on a 16-year time-frequency analysis [J]. BMC Public Health, 2025, 25(1): 752.

[7] Xin H, Fu P, Sun J, et al. Risk mapping of scrub typhus infections in Qingdao city, China [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2020, 14(12): e0008757.

[8] Yang LP, Liang SY, Wang XJ, et al. Burden of disease measured

by disability-adjusted life years and a disease forecasting time series model of scrub typhus in Laiwu, China [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2015, 9(1): e3420.

[9] Yang S, Wang H, Tong J, et al. Impacts of environment and human activity on grid-scale land cropping suitability and optimization of planting structure, measured based on the MaxEnt model [J]. Sci Total Environ, 2022, 836: 155356.

[10] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4): 231-259.

[11] Merow C, Smith MJ, Silander JA. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter [J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058-1069.

[12] Schober P, Mascha EJ, Vetter TR. Statistics from A (Agreement) to Z (z Score): A guide to interpreting common measures of association, agreement, diagnostic accuracy, effect size, heterogeneity, and reliability in medical research [J]. Anesth Analg, 2021, 133(6): 1633-1641.

[13] Tao M, Liu Y, Ling F, et al. Factors Associated with the spatial distribution of severe fever with thrombocytopenia syndrome in Zhejiang Province, China: Risk analysis based on maximum entropy [J]. JMIR Public Health Surveill, 2024, 10: e46070.

[14] Liu L, Xiao Y, Wei X, et al. Spatiotemporal epidemiology and risk factors of scrub typhus in Hainan Province, China, 2011-2020 [J]. One Health, 2023, 17: 100645.

[15] Kornejady A, Ownegh M, Bahremand A. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods [J]. Catena, 2017, 152: 144-262.

[16] Felicimo M, Cuartero A, Remondo J, et al. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study [J]. Landslides, 2012, 10(2): 175-289.

[17] Li X, Wei X, Yin W, et al. Using ecological niche modeling to predict the potential distribution of scrub typhus in Fujian Province, China [J]. Parasit Vectors, 2023, 16(1): 44.

[18] 石圆, 伦辛畅, 陈奕瑾, 等. 山东省 2006-2021 年恙虫病流行特征和时空聚集性分析 [J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2024, 35(3): 316-322.

[19] Wei X, He J, Yin W, et al. Spatiotemporal dynamics and environmental determinants of scrub typhus in Anhui Province, China, 2010-2020 [J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 2131.

[20] 陈安喜, 孔卫荣, 田野, 等. 江苏省常州市 2012-2021 年恙虫病流行特征分析 [J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 2023, 34(3): 372-377.

[21] 岳玉娟, 王玉姣, 李贵昌, 等. 2006-2018 年中国大陆恙虫病高发区流行病学特征分析 [J]. 疾病监测, 2020, 35(4): 301-306.

[22] Qian L, Wang Y, Wei X, et al. Epidemiological characteristics and spatiotemporal patterns of scrub typhus in Fujian province during 2012-2020 [J]. PLoS Negl Trop Dis, 2022, 16(9): e0010278.

[23] Wei Y, Huang Y, Luo L, et al. Rapid increase of scrub typhus: an epidemiology and spatial-temporal cluster analysis in Guangzhou City, Southern China, 2006-2012 [J]. PLoS One, 2014, 9(7): e101976.

[24] Yu H, Sun C, Liu W, et al. Scrub typhus in Jiangsu Province, China: Epidemiologic features and spatial risk analysis [J]. BMC Infect Dis, 2018, 18(1): 372.

[25] Kim S, Kim Y. Hierarchical Bayesian modeling of spatio-temporal patterns of scrub typhus incidence for 2009-2013 in South Korea [J]. Applied Geography, 2018, 100: 1-11.

[26] Kumar M, Valiaveetil KA, Chandran J, et al. Scrub typhus: a spatial and temporal analysis from South India [J]. J Trop Pediatr, 2022, 68(4): fmac054.

- Declaration of Helsinki; Ethical principles for medical research involving human subjects [J]. *JAMA*, 2013, 310 (20): 2191-2194.
- [6] Santamaría JI, Vega JM, Valverde JM, et al. Study of intestinal motility in the child with acute appendicitis using phonogastroenterography [J]. *Cir Pediatr*, 1993, 6(3): 117-119.
- [7] Hosokawa T, Yamada Y, Tanami Y, et al. Associations between sonographic findings and operative time of transumbilical laparoscopic-assisted appendectomy for acute appendicitis in children [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2019, 213(1): 191-199.
- [8] Choi ES, Lee J, Lee JH, et al. Effects of neuromuscular block reversal with neostigmine/glycopyrrolate versus sugammadex on bowel motility recovery after laparoscopic colorectal surgery: A randomized controlled trial [J]. *J Clin Anesth*, 2024, 98: 111588.
- [9] 卢章云, 吕仁仙, 汤加利, 等. 针刺对阑尾炎切除术后肠道功能影响的观察 [J]. *中国中西医结合外科杂志*, 2006, 12(3): 297.
- [10] 黄振文, 吕昌恒, 唐海洲, 等. 儿童穿孔性阑尾炎术后胃肠功能恢复情况及其危险因素分析 [J]. *中国当代医药*, 2022, 29(20): 109-112.
- [11] Bai X, De Palma G, Boschetti E, et al. Vasoactive intestinal polypeptide plays a key role in the microbial-neuroimmune control of intestinal motility [J]. *Cell Mol Gastroenterol Hepatol*, 2024, 17(3): 383-398.
- [12] Yang YH, Cui DJ, Yang ZL, et al. Immune function, gastrointestinal hormone levels, and their clinical significance in patients with gastric ulcers complicated with depression [J]. *World J Psychiatry*, 2023, 13(9): 665-674.
- [13] Liu B, Yao C, Li H. Laparoscopic radical resection of colorectal cancer in the treatment of elderly colorectal cancer and its effect on gastrointestinal function [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 840461.
- [14] Gao X, Zhang YZ, Zhang YZ, et al. Electroacupuncture for gastrointestinal function recovery after gynecological surgery: A systematic review and meta-analysis [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2021: 8329366.
- [15] Singaram K, Gold-Smith FD, Petrov MS. Motilin: a panoply of communications between the gut, brain, and pancreas [J]. *Expert Rev Gastroenterol Hepatol*, 2020, 14(2): 103-111.
- [16] Labanski A, Langhorst J, Engler H, et al. Stress and the brain-gut axis in functional and chronic-inflammatory gastrointestinal diseases: A transdisciplinary challenge [J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2020, 111: 104501.
- [17] Bettolli M, De Carli C, Cornejo-Palma D, et al. Interstitial cell of Cajal loss correlates with the degree of inflammation in the human appendix and reverses after inflammation [J]. *J Pediatr Surg*, 2012, 47(10): 1891-1899.
- [18] Lloyd-Price J, Arze C, Ananthakrishnan AN, et al. Multi-omics of the gut microbial ecosystem in inflammatory bowel diseases [J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 655-662.
- [19] O'Riordan KJ, Moloney GM, Keane L, et al. The gut microbiota-immune-brain axis: Therapeutic implications [J]. *Cell Rep Med*, 2025, 6(3): 101982.
- [20] Parada Venegas D, De la Fuente MK, Landskron G, et al. Short chain fatty acids (SCFAs)-mediated gut epithelial and immune regulation and its relevance for inflammatory bowel diseases [J]. *Front Immunol*, 2019, 10: 277.

【收稿日期】 2025-08-18 【修回日期】 2025-10-30

(上接 60 页)

- [27] Kuo CC, Huang JL, Ko CY, et al. Spatial analysis of scrub typhus infection and its association with environmental and socioeconomic factors in Taiwan [J]. *Acta Trop*, 2011, 120(1-2): 52-8.
- [28] Min KD, Lee JY, So Y, et al. Deforestation increases the risk of scrub typhus in Korea [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(9): 1518.
- [29] 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.
- [30] 孙焯, 方立群, 曹务春. 山东、安徽、江苏省 2006-2013 年秋冬型恙虫病流行特征及影响因素研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2016, 37(8): 1112-1116.
- [31] Wei Y, Huang Y, Li X, et al. Climate variability, animal reservoir and transmission of scrub typhus in Southern China [J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2017, 11(3): e0005447.
- [32] Han L, Sun Z, Li Z, et al. Impacts of meteorological factors on the risk of scrub typhus in China, from 2006 to 2020: A multicenter retrospective study [J]. *Front Microbiol*, 2023, 14: 1118001.
- [33] Qian J, Wu Y, Zhu C, et al. Spatiotemporal heterogeneity and long-term impact of meteorological, environmental, and socio-economic factors on scrub typhus in China from 2006 to 2018 [J]. *BMC Public Health*, 2024, 24(1): 538.
- [34] Wu YC, Qian Q, Soares Magalhaes RJ, et al. Spatiotemporal dynamics of scrub typhus transmission in Mainland China, 2006-2014 [J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2016, 10(8): e0004875.
- [35] 李文, 李贵昌, 刘小波, 等. 恙虫病流行特征及影响因素研究进展 [J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2020, 31(6): 738-743.
- [36] Lv Y, Guo X, Jin D, et al. Infestation and seasonal fluctuation of chigger mites on the Southeast Asian house rat (*Rattus brunneusculus*) in southern Yunnan Province, China [J]. *Int J Parasitol Parasites Wildl*, 2021, 14: 141-149.
- [37] Ding F, Jiang WL, Guo XG, et al. Infestation and related ecology of chigger mites on the Asian house rat (*Rattus tanezumi*) in Yunnan Province, Southwest China [J]. *Korean J Parasitol*, 2021, 59(4): 377-392.
- [38] Acharya BK, Chen W, Ruan Z, et al. Mapping environmental suitability of scrub typhus in Nepal using MaxEnt and random forest models [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(23): 4845.

【收稿日期】 2025-07-06 【修回日期】 2025-09-26