

福建省入侵红火蚁扩散规律研究*

张翔^{1,2**} 陈艺欣^{1,2,3} 侯有明^{1,2***} 谢毅璇⁴

(1. 福建农林大学植物保护学院福建省昆虫生态重点实验室, 福州 350002;

2. 农业部闽台作物有害生物综合治理重点实验室, 福州 350002;

3. 福建省农业科学院植物保护研究所, 福州 350013; 4. 厦门市植保植检站, 厦门 361000)

摘要 【目的】重大入侵害虫红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 广泛分布传播于世界各地, 为了掌握红火蚁在新入侵地的传播和扩散的规律, 对红火蚁入侵史进行溯源, 以期预防红火蚁入侵提供重要依据。【方法】本文对福建省各地入侵红火蚁的基本入侵参数进行分析, 分别对入侵时间与蚁巢数量、蚁巢发生密度以及不同生境蚁巢密度进行模型拟合。【结果】结果表明, 入侵方式和入侵地生境的差异导致了入侵红火蚁不同种群的发展状态。由废旧资源携带传入的入侵红火蚁种群, 其发生面积较小, 扩散的速率较慢, 为 28.1~116.4 m/年; 由草皮苗木携带传入的入侵红火蚁种群, 其发生面积较大, 扩散的速率较快, 为 126.1~555.5 m/年。【结论】建立了蚁巢数量、密度与入侵时间之间的关系模型, 分别为 $N = 1\,003.9 \ln(t) + 336.27$, $D = 0.0966e^{0.583t}$, 并以此推测三个入侵事件的发生时间范围。

关键词 红火蚁, 入侵时间, 不同生境, 蚁巢, 拟合模型

Expansion of *Solenopsis invicta* Buren in Fujian Province

ZHANG Xiang^{1,2**} CHEN Yi-Xin^{1,2,3} HOU You-Ming^{1,2***} XIE Yi-Xuan⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Insect Ecology, Department of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Fujian-Taiwan, Ministry of Agriculture, P. R.

China, Fuzhou 350002, China; 3. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;

4. Plant Protection and Quarantine Station of Xiamen, Xiamen 361000, China)

Abstract [Objectives] The red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, is a devastating invasive species that has had severe effects on the ecological environment, agriculture, and public safety in many countries. This paper aims to provide better understanding of the spread of this pest in newly colonized areas, to trace to the invasion history of *S. invicta*, and provide important theoretical references for the prevention of the establishment of this pest. [Methods] The primary parameters of invasion by *S. invicta* in Fujian Province were analyzed using a model fitting method. Models of the relationships between intrusion period and the number of mounds, as well as mound density in the invaded range and in different habitats, were constructed. [Results] The results suggest that different populations exhibited different patterns of invasion in response to habitat differences. Populations imported with reusable resources have so far occupied only relatively small ranges and their rate of invasion has been relatively slow (28.1-116.4 m/year). In contrast, populations that were imported with greensward and saplings have relatively large ranges and spread relatively rapidly (126.1-555.5m/year). [Conclusion] Models relating to mound density, number of mounds and intrusion period were constructed as followed: $N=1003.9\ln(t)+336.27$, $D=0.0966e^{0.583t}$, where t denotes the intrusion period, N denotes the number of mounds and D denotes the density of mounds. These models can be used to predict the temporal scope of three intrusion events.

Key words *Solenopsis invicta*, intrusion period, different habitats, mound, fitting model

* 资助项目 Supported projects : 科技部“973”项目 (2009CB119206); 福建省科技重大专项 (2006NZ0002); 福建省发改委农业“五新”项目“重大外来有害生物红火蚁监控技术应用与推广”

**第一作者 First author, E-mail: eason3124@gmail.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: ymhou@fafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-11-02, 接受日期 Accepted: 2015-11-12

入侵红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 是世界上最危险的有害入侵生物之一,已入侵了世界上很多国家和地区(曾玲等,2005;张润志等,2005;侯有明等,2011)。入侵红火蚁的扩散方式主要为随运输传播和婚飞扩散,以及随流水传播和短距离的分巢行为(Vinson,1997;James,2000)。国外相关学者相继应用了入侵红火蚁扩展预测模型(Pimm and Barteu,1980),生态生理生长模型(Morrison *et al.*,2005),物种分布模型(SDMs)(Matthew *et al.*,2007)等方法来推测入侵红火蚁可能入侵的范围及其发展趋势。国内也有学者分别应用 CLIMEX,GARP 生态位模型(薛大勇等,2005),GIS(陈林等,2006;陈晨等,2006)等方法预测了入侵红火蚁在国内潜在分布。陈浩涛(2009)通过对中国不同地理种群的入侵红火蚁过冷却点的测定探讨了该方法预测入侵红火蚁在中国分布范围的可能性。

此外,入侵红火蚁在入侵地的空间分布特点和扩散规律,也受到了广泛关注。李宁东等(2006)研究了农田生态系统中的生境类型和空间分布规律,表明入侵红火蚁活动蚁巢的平面空间分布类型主要为随机分布,空间分布的基本成分为单个蚁巢;陈艺欣(2007)和孙印兵(2009)探讨了入侵红火蚁的空间分布规律和理论最适抽样量,得出的结论与李宁东等(2006)的研究结果基本一致。许益鏊等(2006)调查研究了红火蚁在特定的生态环境类型中的自然传播扩散规律,提出入侵红火蚁的局域扩散具有方向性的观点。李宁东等(2008)研究了广东吴川地区红火蚁消长规律,表明该地区红火蚁的蚁巢数量、体积以及监测的工蚁数量在一年中有显著的高峰期,并且高峰期与气温,土壤温度相关。

然而,在同一入侵地区中,红火蚁所侵占的生境可能各不相同,它们在不同生境的密度和扩散速度也不同,此外,红火蚁在同一个地区可能有多次入侵事件(Zhang and Hou,2015)。因此,红火蚁在新入侵地的传播和扩散以及由此带来的危害程度常常是复杂的,对红火蚁入侵史进行溯源,将有利于人们找出红火蚁入侵的不同途径,为预防和检疫红火蚁入侵提供重要依据。本文借鉴拟合模型的方法,通过对入侵红火蚁在入

侵地主要参数的分析,探讨入侵红火蚁在福建省的入侵时间长度,以及不同入侵方式和不同生境的扩散速度。

1 材料与方法

1.1 调查工具和方法

利用手持全球卫星定位仪(集思宝 GPSMap 60CSx,北京合众思壮科技股份有限公司)对福建省龙岩、晋江、厦门和漳州4个地区各个入侵红火蚁发生地进行调查,记录蚁巢个数,对分布生境,分布范围和疫区范围进行定位、绘制。

蚁巢个数为对入侵红火蚁发生区进行全面普查所记录的所有活动蚁巢的数量。疫区面积为按入侵红火蚁疫区划分标准(曾玲等,2005)应用全球卫星定位仪划定的区域面积,单位为 hm^2 ;蚁巢分布面积为蚁巢实际覆盖区域的面积,单位为 m^2 (陆永跃等,2008);发生区域蚁巢密度为蚁巢数量与蚁巢分布面积之比乘以100,单位为个/ 100 m^2 ;同时对当地群众,农技站等进行调查访问,推测入侵红火蚁的入侵途径及入侵时间。

1.2 分析方法

1.2.1 入侵红火蚁入侵事件的相关分析 福建省入侵红火蚁的入侵事件均为随外省运输的货物携带运入,因此,可以对入侵红火蚁典型发生区进行访问调查,从而获得运入废旧塑料、皮革和种植苗木、草皮的时间,以此来确定入侵红火蚁大致的入侵时间。当仅能获得传入时间范围时,取该段时间范围的中间时期为入侵时间(陆永跃,2008)。

通过对入侵事件主要参数的分析,建立入侵红火蚁蚁巢数增长趋势与入侵时间长度之间以及蚁巢密度变化趋势与入侵时间长度之间的模型,其后,将一些入侵事件的相关参数代入该模型中,应用该拟合模型推测一些未能查清入侵时间的典型入侵事件的发生时间。通过对入侵地常见的3种生境类型——农田,人工草地和荒草地所在发生区域中心的发生面积和蚁巢数量进行统计,计算各生境单位面积蚁巢密度,并建立这

3 种生境蚁巢密度和入侵时间长度之间的模型,探讨不同生境下蚁巢密度的动态发展。

1.2.2 数据分析方法 将手持卫星定位仪所记录的结果通过计算机导入 MapSource 软件 (Trip and Waypoint Manager Asian Version v1.0, Garmin Ltd. or Its Subsidiaries) 中,计算、统计分布面积,疫区面积和发生密度,提取入侵红火蚁发生区的活动蚁巢密度、分布面积等数据。扩散速度 (V) 的计算采用面积开方法 (Skellam, 1951; Taylor, 1978): $V = \sqrt{S/t}$ 。式中 S 代表发生区域面积,单位为 m^2 , t 代表扩散时间长度,单位为年。试验数据均在 Excel (2003) 和 SPSS17.0 (Statistical Product & Service Solutions, version 17.0) 软件中上完成。应用卡平方检验法 (Chi-square test) 对主要入侵参数所拟合的模型进行检验。

2 结果与分析

2.1 福建省入侵红火蚁典型入侵事件基本参数分析

由于龙岩市的新罗区大池镇黄美村和上杭县溪口乡云浮新村的入侵红火蚁所在发生地周围均有高山作为自然屏障,阻碍入侵红火蚁的自然扩散,虽然入侵时间较长,但蚁巢数量和扩散面积均较小,与其他地区入侵事件差异较为明显,因此不作为入侵红火蚁典型发生区分析。福建省入侵红火蚁的入侵方式主要有两种,一种为随废旧塑料、皮革运入,一种为随苗木、草皮运入。龙岩和晋江地区的种群属于第一种,其所在生境类型主要为农田,荒草地,果园,厂房区和居民区等;厦门和漳州地区的种群属于第二种,其所在的生境类型主要为人工草地,荒草地,农田。根据实地调查取样,福建省典型入侵红火蚁入侵事件基本参数见表 1。

由表 1 可知,虽然入侵红火蚁入侵龙岩地区的时间较长,但龙岩地区的疫区面积,蚁巢发生面积和蚁巢总个数都较少,说明该地入侵红火蚁扩散速度较为缓慢,而该地的蚁巢密度最大,为 5.43 个/ 100 m^2 和 6.16 个/ 100 m^2 。厦门地区的入侵红火蚁为多次入侵事件所引起的,即使在一个区,也有多次不同的入侵事件。该地区整体入

侵时间都较短,蚁巢个数较少,而各个地区的疫区面积和蚁巢发生面积却较大,导致蚁巢密度较小,这说明该地入侵红火蚁蚁巢分布较为分散。晋江地区的疫区面积最大,达 3 502 hm^2 ,而蚁巢数量和密度并不大,说明该地入侵红火蚁呈散发性分布。漳州市的入侵红火蚁蚁巢发生面积,蚁巢个数和蚁巢密度处于中等水平,但由于入侵时间无法获得,其年扩散速度也未知。

入侵红火蚁在福建省的疫区分布面积和蚁巢发生面积并不与入侵时间长度呈线性相关关系,而是显示出一定的不规则性。从年扩散速度来看,入侵红火蚁在新罗区和武平县的扩散速度最慢,为 28.1~34.6 m/年,在晋江市与厦门市集美的两个地区的速度居中,速度为 116.4~180 m/年,而扩散速度最快的为厦门市海沧区,其速度为 555.5 m/年。

这主要是由于入侵方式不同导致的。新罗区,武平县和晋江地区的入侵事件为随废旧塑料和皮革运入,这些资源进入该地后并不会随人为活动向周围传播,入侵红火蚁在当地只形成单一的传播点,基本依靠自然传播途径进行扩散,根据表 1 可得,其扩散速度范围为 28.1~116.4 m/年;漳州市和厦门地区的红火蚁入侵事件为随苗木、草皮运入,这些受侵染的植物在入侵地有多种种植或经营方式,如:1、作为景观植物直接在公园,学校,街道等绿地种植;2、由花卉商统一租于苗圃基地,出售时再运往各地;3、由某些园艺部门承包,先寄种于荒置地,再按计划转种于人造景观地区。因此,随植物运入入侵地的红火蚁,容易在该地形成多点甚至是片状入侵源,其传播方式不仅有自然扩散的方法,更主要的是依靠人为运输和种植植物传播,从而形成更加发散的传播方式。入侵红火蚁在厦门地区的传播速度为 126.1~555.5 m/年。

2.2 蚁巢数量、密度与入侵时间之间关系的分析

2.2.1 入侵地蚁巢数量、密度与入侵时间之间关系的分析 根据表 1 数据,由蚁巢数量、蚁巢密度与入侵时间的变化关系可知,蚁巢数量随入侵时间长度的增加而增加,且增加趋势随时间的推移

表 1 福建省入侵红火蚁典型入侵事件基本参数
Table 1 Primary parameters of typical invasion cases for *Solenopsis invicta* in Fujian Province

地点 Location	调查时间 Survey time (year.month)	疫区面积 Epidemic zone (hm ²)	蚁巢发生面积 Mounds occurring area (m ²)	蚁巢个数 Amount of mounds	蚁巢密度 Mounds density (nest/100m ²)	可能的入侵时间 Probable intrusion date (year.month)	入侵时长 Intrusion period (year)	年扩散速度 Annual spread velocity (meter/year)
龙岩市新罗区南燕村 Nanyan village of Longyan	2006.03	15.3	35 100	2 162	6.16	2000.08	5.41	34.6
龙岩市武平县新岗村 Xingang village of Longyan	2009.04	60	44 333	2 409	5.43	2001.08	7.50	28.1
厦门市集美区 (1) Jimei district of Xiamen (1)	2008.06	120	376 227	971	0.26	2006.10	1.67	367.3
厦门市集美区 (2) Jimei district of Xiamen (2)	2009.10	40	37 790	77	0.20	2008.09	1.08	180.0
厦门市集美区 (3) Jimei district of Xiamen (3)	2008.08	630	298 115	1 606	0.54	2004.04	4.33	126.1
厦门市湖里区 Huli district of Xiamen	2008.11	36	141 033	394	0.28	—	—	—
厦门市海沧区 Haicang district of Xiamen	2009.05	210	613 527	1 081	0.18	2007.12	1.41	555.5
厦门市同安区 Tongan district of Xiamen	2009.10	714	491 475	1 326	0.27	—	—	—
漳州市漳浦县 Zhangpu county of Zhangzhou	2008.10	140	98 595	1 885	1.91	—	—	—
晋江市 Jinjiang city	2007.09	3 502	157 591	1 405	0.89	2004.04	3.41	116.4

而慢慢变缓,符合对数方程形式,所得蚁巢数量-入侵时间长度关系如图 1,模拟方程为 $N = 1\,003.9\ln(t) + 336.27$, ($r = 0.9477$)。其中 N 为蚁巢数量(个), t 为入侵时间长度(年), r 为趋势线拟合程度的相关系数;同时通过卡平方检验,所得似然比卡方值 χ^2 为 1.593, $df=1$, $P=0.207>0.05$ 。蚁巢密度则随入侵时间长度的增加而表现为加速增长,符合指数方程形式,所得蚁巢密度-入侵时间长度关系如图 2,模拟方程为 $D = 0.0966e^{0.583t}$, ($r = 0.8149$)。其中 D 为蚁巢密度(个/100 m²), t 为入侵时间长度(年), r 为趋势线拟合程度的相关系数;同时通过卡平方检验,所得似然比卡方值 χ^2 为 0.492, $df=1$, $P=0.483>0.05$ 。因此,所拟合的两种曲线与实际调查值无显著差异。

由图 1 可得,入侵红火蚁在进入新的入侵点后的 1~4 年中,蚁巢个数增长较为迅速,随后增

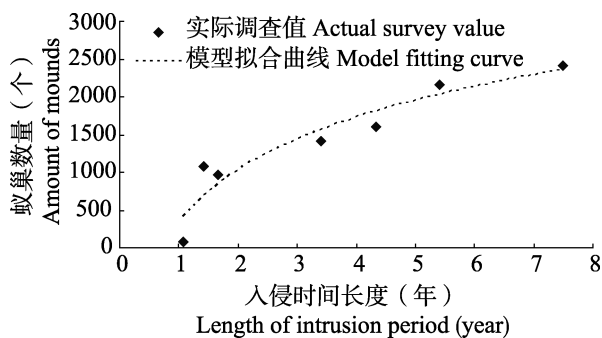


图 1 入侵红火蚁蚁巢数量和入侵时间长度之间的关系
Fig. 1 Relationship between the amount of mounds and intrusion period of *Solenopsis invicta*

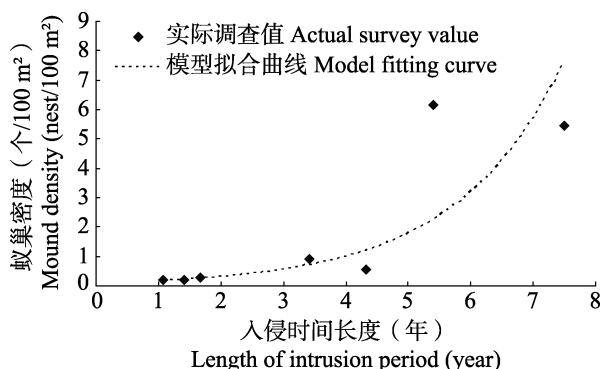


图 2 入侵红火蚁蚁巢密度和入侵时间长度的关系
Fig. 2 Relationship between the density of mounds and intrusion period of *Solenopsis invicta*

速变缓;由图 2 可得,入侵红火蚁在入侵后的前期,种群密度增长速度较慢,在入侵后的 4~5 年起,种群密度开始迅速上升。综合分析可知,在入侵初期,由于种间竞争力强,生物天敌缺失,觅食生态位广泛,食物资源丰富等有利因素,使入侵红火蚁种群数量迅速上升,同时在入侵地占据较多的领土;在顺利定殖于入侵地后,由于入侵红火蚁自身扩散能力有限,自然生境中的种群数量维持稳定发展,在具备一定的种群基数下,单位面积的入侵红火蚁数量迅速上升。

2.2.2 不同生境蚁巢密度与入侵时间之间关系的分析 图 3~图 5 分别为草坪,农田和荒地生境中蚁巢密度随入侵时间的改变而变化的拟合模型图,可以看出,3 种生境中的蚁巢密度均随入侵时间的增加而增长,且增长速率随时间的推移而逐渐升高,符合对数方程形式,其拟合模型分

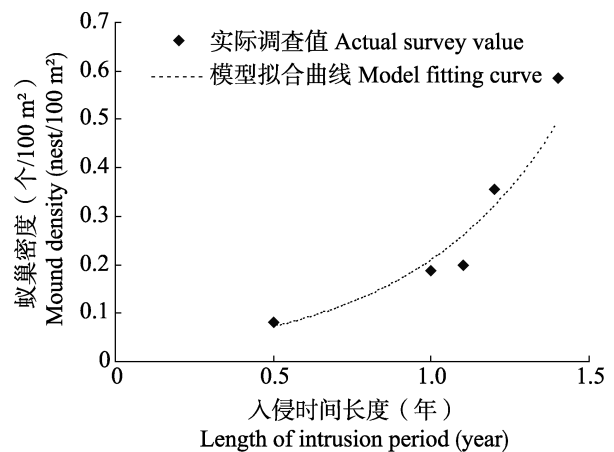


图 3 入侵时间长度与草坪生境蚁巢密度的关系
Fig. 3 Relationship between the density of mounds and intrusion period in lawn habitat

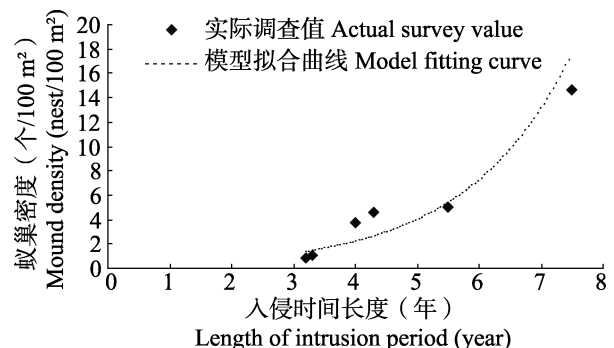


图 4 入侵时间长度与农田生境蚁巢密度的关系
Fig. 4 Relationship between the density of mounds and intrusion period in cropland habitat

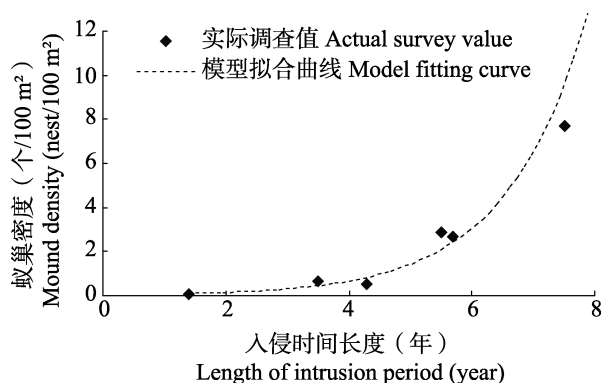


图 5 入侵时间长度与荒地生境蚁巢密度的关系
Fig. 5 Relationship between the density of mounds and intrusion period in waste grassland habitat

析如表 2。草坪生境蚁巢密度是两种生境中增长速率最快的,在入侵的第 3.5 年后增长速率开始迅速上升,约在第 4 年该生境蚁巢密度便可达到 1 个蚁巢/ m^2 ;农田生境和荒地生境蚁巢密度增长速率的变化较为相似,约在第 6 年后开始迅速上升,由表 2 的拟合模型可以得出,农田生境的增长速率比荒地生境的增长速率略快,它们达到每平方米一个蚁巢的时间分别为 10.4 年和 10.6 年。

2.3 入侵时间的推测

将厦门市湖里区,厦门市同安区和漳州市漳浦县入侵红火蚁发生区的蚁巢数量和蚁巢密度,以及发生区中的草坪生境和荒地生境蚁巢密度分别代入相关模型中,推测 3 个地方的入侵时间范围,结果如表 3。从表 3 可以看出,由发生区总体蚁巢数量和蚁巢密度代入相关模型推测的入侵时间长度与单一生境蚁巢密度推测的入侵时间长度总体相似,只有厦门市湖里区荒地生境

所得的入侵时间长度与该地其他推测值差异较大。由于各个入侵红火蚁发生地的生境均有不同程度的不连续性,另外,各地生境结构也会有或多或少的差异,因此,建议用入侵红火蚁发生区的蚁巢数量和蚁巢密度来推测入侵红火蚁的入侵时间长度。

结合上述 3 个地方的调查时间,可以得出:厦门市湖里区入侵红火蚁的入侵时间范围为 2007 年 1 月至 10 月;厦门市同安区入侵红火蚁的入侵时间范围为 2007 年 2 月至 2008 年 1 月;漳州市漳浦县入侵红火蚁的入侵时间范围为 2003 年 9 月至 2004 年 2 月。

3 小结与讨论

本文对福建省入侵红火蚁的入侵时间做了相关分析,应用了拟合模型的方法阐述了入侵时间长度与多个入侵参数之间的关系,并推测了一些入侵红火蚁疫区可能的入侵时间范围。可以得出,入侵红火蚁由于传入方式的不同以及入侵地区客观条件的差异导致了不同的种群发展状态。由废旧资源方式传入方式侵入的入侵红火蚁种群,其扩散的速率较慢,发生面积较小,在一定时间长度后,密度将达到较高水平;由草皮苗木传入方式侵入的入侵红火蚁种群,其扩散的速率较快,发生面积较大,在同一发生区中显得更为发散,而其在公共场所的特性使其潜在的入侵历史变得短暂,密度也较低。

由调查数据也可看出,草坪生境的入侵红火蚁疫情一般在两年内即被发现,这可能与该生境

表 2 3 种生境拟合模型分析
Table 2 Analysis of models fitted for the three habitats

生境类型 Habitat type	草坪生境 Lawn habitat	农田生境 Cropland habitat	荒地生境 Waste grassland habitat
拟合模型 Fitting model	$D = 0.025e^{2.1301t}$	$D = 0.2106e^{0.5907t}$	$D = 0.0315e^{0.7617t}$
相关系数 r Correlation coefficient r	0.9859	0.9804	0.8149
卡方值 χ^2	0.500*	0.691	0.957
P 值 P value	0.480	0.406	0.328

由于该样地样本数量级较小,该值为少数样本合并后的检验值。

As the sample size is small, it is a test value after minority samples combined.

表 3 由主要入侵参数推测所得的入侵时间
Table 3 Invasion time horizons speculated by primary parameters of typical invading cases

拟合模型类型 Type of fitting model	代入方程 Fitting model	厦门市湖里区 Huli district of Xiamen		厦门市同安区 Tongan district of Xiamen		漳州市漳浦县 Zhangpu county of Zhangzhou	
		入侵时长 Intrusion period (year)	入侵年月 Intrusion date (year.month)	入侵时长 Intrusion period (year)	入侵年月 Intrusion date (year.month)	入侵时长 Intrusion period (year)	入侵年月 Intrusion date (year.month)
蚁巢数量-入侵时间 Mounds amount of -intrusion period	$N = 1003.9\text{Ln}(t) + 336.27$	1.06	2007.10	2.68	2007.02	4.68	2004.02
蚁巢密度-入侵时间 Mounds density-intrusion period	$D = 0.0966e^{0.583t}$	1.83	2007.01	1.76	2008.01	5.12	2003.09
草坪生境蚁巢密度-入侵时间 Lawn habitat mounds density-intrusion period	$D = 0.025e^{2.1301t}$	1.06	2007.10	2.06	2007.09	—	—
荒地生境蚁巢密度-入侵时间 Waste grassland habitat mounds density-intrusion period	$D = 0.0315e^{0.7617t}$	3.40	2005.06	2.96	2006.10	5.39	2003.05

人为活动较多有关系,而更为频繁的人为活动也将导致更多的人受到入侵红火蚁的侵害从而对其进行调查和铲除;而草坪生境中各种人为活动频繁的特性也有助于入侵红火蚁的扩散,使其在较短时间内占据较大的空间。在农田生境入侵初期,由于农民对入侵红火蚁的防范意识并不强,一般会将入侵红火蚁当成本地蚂蚁看待,加上农民具备一些广谱性的农药,虽不能将入侵红火蚁彻底消灭,但却能减少其在入侵初期的危害。因此,在入侵初期,入侵红火蚁会对农田生境产生反复侵入,因而其在初始阶段蚁巢密度的增长速率较为缓慢。由于荒地生境中的物种较丰富,生物多样性较高,本地蚂蚁种群也较丰富,入侵红火蚁在入侵初期受到一定程度的生存竞争,其发展速度也较慢。当入侵红火蚁在入侵地发展到一定的程度时,其对环境的适应性及对其他地表生物的竞争力也较强,加上具备一定的种群基数,入侵红火蚁在入侵后期的增殖速度将越来越快。

对入侵地各基本参数与入侵时间相互关系的模拟,只是对入侵红火蚁各入侵地扩散状态的一种演绎说明,而不起归纳总结作用,因为入侵红火蚁在扩散过程中所受到的各种客观方面的影响是多样的。入侵红火蚁在入侵地生存和扩散的过程中,必然会受到人为活动的影响。在实际调查中,蚁巢密度是不可能达到每平方米一个蚁巢的,该分析只是在入侵红火蚁生存发展过程中,各种环境条件和客观因素保持不变的前提下产生的。此外,本文仅讨论了各入侵地主要共有的生境,其余生境的种群发展规律有待进一步的研究。

入侵红火蚁早在 2000 年就已进入福建省,而其入侵前期为入侵红火蚁入侵福建省的潜伏期;而在近几年中,入侵红火蚁的种群数量开始大爆发,福建省多个地区相继出现新的发生点,这里面也包含一些入侵时间较久的发生点。可以推测,在未来的几年中,福建省仍会有新的入侵红火蚁发生点出现。因此,福建省各地应持续预防和控制入侵红火蚁的发生和发展。

参考文献 (References)

Chen HT, Luo LZ, Jiang XF, 2009. Determination of the

supercooling points of various castes and developmental stages of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in mainland China. *Acta Entomologica Sinica*, 52(5): 502–508. [陈浩涛, 罗礼智, 江幸福, 2009. 我国大陆红火蚁不同等级和虫态过冷却点的测定. *昆虫学报*, 52(5): 502–508.]

Chen L, Korzukhin MD, Cheng DF, Lu QG, Wang FX, 2006. The analysis for the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) distribution in China based on 3S technology, climate model and colony dynamic model. *Acta Phytophylacica Sinica*, 33(4): 384–390. [陈林, Korzukhin MD, 程登发, 陆庆光, 王福祥, 2006. 基于 GIS 和气候、种群动态模型的红火蚁适生性分析. *植物保护学报*, 33(4): 384–390.]

Chen YX, 2007. Studies on the monitoring and control techniques of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae). Master's dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [陈艺欣, 2007. 入侵红火蚁监测与控制技术的研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]

Gong WR, Hu BS, Zhou GL, Bao YX, Liu FQ, 2006. Potential establishment areas of *Solenopsis invicta* in China: A prediction based on GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(11): 2093–2097. [陈晨, 龚伟荣, 胡白石, 周国梁, 包云轩, 刘凤权, 2006. 基于地理信息系统的红火蚁在中国适生区的预测. *应用生态学报*, 17(11): 2093–2097.]

Hou YM, Zhang X, Chen YX, Zhang SH, Chen J, Sun YB, Su YC, Zhan, ZX, 2011. The current invasion status, warning and control of red imported fire ant in Fujian Province//Xie LH, You MS, Hou YM (eds.). *Biological Invasion: Problems and Countermeasures*. Beijing: Science Press. 216–294. [侯有明, 张翔, 陈艺欣, 章霜红, 陈兢, 孙印兵, 苏艳超, 占志雄, 2011. 福建红火蚁入侵现状、预警和控制//谢联辉, 尤民生, 侯有明(编著). *生物入侵——问题与对策*. 北京: 科学出版社. 216–294.]

James TV, Arthur GA, Mark SW, 2000. Flight energetics and dispersal capability of the fire ant, *Solenopsis invicta* Buren. *Journal of Insect Physiology*, 46(5): 697–707.

Li ND, Lu YY, Zeng L, Liang GW, Xu YJ, 2006. Study on types of environment, spatial distribution and sampling of red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren active mounds in Wuchuan, Guangdong Province. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 25(1): 31–36. [李宁东, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 许益鏊, 2006. 广东省吴川红火蚁生境类型、空间分布和抽样技术的研究. *华中农业大学学报*, 25(1): 31–36.]

Li ND, Zeng L, Liang GW, Lu YY, 2008. Dynamics of red imported fire ant *Solenopsis invicta* in Wuchuan, Guangdong. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(1): 54–57. [李宁东, 曾玲, 梁广文, 陆永跃, 2008. 广东吴川红火蚁消长规律. *昆虫知识*, 45(1): 54–57.]

- Lu YY, Liang GW, Zeng L, 2008. Study on expansion pattern of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, in south China. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(4): 1053–1063. [陆永跃, 梁广文, 曾玲, 2008. 华南地区红火蚁局域和长距离扩散规律研究. 中国农业科学, 41(4): 1053–1063.]
- Matthew CF, Jake FW, Nathan JS, Robert RD, 2007. The biogeography of prediction error: why does the introduced range of the fire ant over-predict its native range? *Global Ecology and Biogeography*, 16(1): 24–33.
- Morrison LW, Korzukhin MD, Porter SD, 2005. Predicted range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*, in the eastern United States based on the VEMAP global warming scenario. *Diversity and Distributions*, 11(3): 199–204.
- Pimm SL, Bartell DP, 1980. Statistical model for predicting range expansion of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, in Texas. *Environmental Entomology*, 9(5): 653–658.
- Skellam JG, 1951. Random dispersal in theoretical population. *Biometrika*, 38: 196–218.
- Sun YB, 2009. Study on spatial distribution pattern and monitoring techniques of red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren). Master's dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [孙印兵, 2009. 入侵红火蚁空间分布规律及监测技术研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Taylor RA, 1978. The relationship between density and distance of dispersing insects. *Ecological Entomology*, 3(1): 63–70.
- Vinson SB, 1997. Invasion of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): Spread, biology, and impact. *American Entomologist*, 43: 23–39.
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, Xi YB, Huang J, 2006. Study on location expansion of *Solenopsis invicta*. *Journal of South China Agricultural University*, 27(1): 34–36. [许益鏊, 陆永跃, 曾玲, 席银宝, 黄俊, 2006. 红火蚁局域扩散规律研究. 华南农业大学学报, 27(1): 34–36.]
- Xue DY, Li HM, Han HX, Zhang RZ, 2005. A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 57–60. [薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志, 2005. 红火蚁在中国的分布区预测. 昆虫知识, 42(1): 57–60.]
- Zeng L, Lu YY, Chen ZN, 2005. Survey and Control for Red Imported Fire Ant *Solenopsis invicta* Buren. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. 18–50. [曾玲, 陆永跃, 陈忠南, 2005. 红火蚁监测与防治. 广州: 广东科技出版社. 18–50.]
- Zhang RZ, Ren L, Liu N, 2005. An introduction and strict precautions against red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, for its potential invasion to the mainland of China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 6–10. [张润志, 任立, 刘宁, 2005. 严防危险性害虫红火蚁入侵. 昆虫知识, 42(1): 6–10.]