

低温条件下松墨天牛在我国适生区分布预测

时 鹏¹,王 壮²,曾 辉³,石 娟^{1*}

(1.北京林业大学 林木有害生物防治北京市重点实验室,北京 100083;2.北京林业大学 成教学院,北京 100083;

3.辽宁林业有害生物防治检疫局,辽宁 沈阳 110804)

摘 要:松墨天牛(*Monochamus alternatus*)是我国的一种本土蛀干害虫,是重大外来入侵病害松材线虫的传播媒介。通过对低温驯化条件下的松墨天牛进行试验,可以预测松墨天牛受低温因素影响而产生的分布变化。选取山东烟台的松墨天牛越冬幼虫为研究对象,选取4~5龄松墨天牛健康幼虫,对其进行4个温度梯度(0、-5、-15、-20℃)和10个时间梯度(0.5、1、2、3、4、6、12 h和1、7、32 d)的低温暴露处理,通过SPSS22.0软件中的Probit回归分析方法处理数据,得出低温半致死温度(LLT₅₀)和低温99%致死温度(LLT₉₉)。统计我国46个气象站点1月份的平均气温作为气象参数,利用软件生成等温线,并利用Arcgis10.2.2软件以LLT₅₀、LLT₉₉为界限,通过统计分析、制图,预测出不同低温胁迫条件下松墨天牛的高度适生区、中度适生区和非适生区。明确了松墨天牛在低温胁迫条件下,具有向高纬度地区扩散的能力。

关键词:松墨天牛;耐寒性;预测;潜在分布区

中图分类号:S763

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2019)04-0156-06

Tolerance to Temperature Stresses on *Monochamus alternatus* and Its Potential Range in China

SHI Peng¹, WANG Zhuang², ZENG Hui³, SHI Juan^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory for Forestry Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Adult Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Liaoning Forestry Pest Control and Quarantine Bureau, Shenyang 110804, Liaoning, China)

Abstract: *Monochamus alternatus* is a local stem borer in China, also a medium of pine wood nematode, a major alien invasive disease. The observation on *M. alternatus* that are under cold acclimation can predict its distribution patterns which is influenced by low temperature. In this study, 3rd to 4th instar over-wintering *M. alternatus* larvae from Yantai, Shandong Province were selected to be subjected to a series low temperature exposures (0, -5, -15, and -20℃) for different time durations (0.5, 1, 2, 3, 4, 6, and 12 h, and 1, 7, and 32 d). The observed data were processed by Probit regression analysis method in the software SPSS 22.0 to obtain semilethal low temperature (LLT₅₀) and 99% lethal temperature (LLT₉₉). By using the average temperatures from 46 meteorological stations in January within China as meteorological parameters, isotherm was generated with relative software. Besides, by statistic analysis and charting, with LLT₅₀ and LLT₉₉ as boundaries, highly suitable, moderately suitable, and non-suitable distribution areas for *M. alternatus* in China were predicted under different low-temperature stresses. This paper clarified the capabilities of *M. alternatus* to diffuse in high latitude areas in China under low-temperature stress.

Key words: *Monochamus alternatus*; cold tolerance; predict; potential rang

收稿日期:2018-06-15 修回日期:2019-02-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2016ZCQ07);林业公益性行业科研专项(201504304)。

作者简介:时 鹏,男,硕士在读,研究方向:森林资源保护。E-mail:1104131570@qq.com

*通信作者:石 娟,女,博士生导师,研究方向:林业外来生物入侵、植物检疫。E-mail:shi_juan@263.net

松墨天牛(*Monochamus alternatus*)是我国的本土物种,又名松褐天牛,是危害松树的主要蛀干害虫之一^[1-3]。虫口密度较大的松墨天牛种群可以导致受害区域内松树的大量死亡,同时松墨天牛还是重大外来入侵物种——松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)在我国传播的主要媒介之一^[4-5]。我国很多地区有松墨天牛分布,截止2017年,其分布在福建、湖南、湖北、浙江、江苏、四川、云南、河南、河北、贵州、安徽、西藏、新疆、吉林、山东、广东、广西、上海、香港、海南、台湾、陕西^[6-7],由此可见松墨天牛适应能力强,在我国分布广泛。

昆虫耐寒能力的高低决定了其种群的存在和发展,并受多种因素影响^[8-9]。在自然环境中,一些生长在不同地区的同种昆虫会随着食物、气候等差异而在耐寒性方面产生分化,并最终扩大其分布范围^[10-11]。同种昆虫不同个体间耐寒性也有很大差异^[12],其变化范围较宽的耐寒性为其在不同地区的扩散提供了基础。钟景辉^[11]等研究显示,随着分布纬度上升,松突圆蚧(*Hemiberlesia pitysophila*)耐寒性存在逐步增强的趋势;赵捷^[13]等研究发现,随着低温胁迫时间延长,松材线虫产生低温适应性驯化,分布区有向北扩散的趋势。

因此,以松墨天牛在我国分布的地理位置为标准,以分布靠北的山东烟台地区(代表较寒冷地区)的松墨天牛种群为研究对象,对其越冬幼虫进行低温暴露试验,用以预测松墨天牛在受低温条件影响下,在我国的潜在分布区和扩散范围,为松墨天牛的监测和预警提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2018年1月初,供试昆虫松墨天牛越冬幼虫采集于山东省烟台市大南山(37°17'N, 121°20'E),采集到的带松墨天牛幼虫的木段,通过保鲜膜包裹、编织袋套装后,集中装入纸箱打包,在保证木段与外界隔绝的情况下,运输至北京林业大学森林保护检疫实验室。通过测定幼虫头壳宽度,对照已有幼虫虫龄划分标准^[14-15],在从木段中取出的幼虫中选取新鲜4龄和5龄越冬幼虫(主要越冬虫龄)置于10 mL透明塑料离心管中用于试验。

1.2 低温暴露试验

低温暴露试验共设置4个温度梯度(0、-5、-15、-20℃)和10个时间梯度(0.5、1、2、3、4、6、12 h和1、7、32 d),每一暴露时间对应4个温度梯度,作为一个处理,每次处理10~12个样本,每个处理重复3次。试验过程中每头松墨天牛越冬幼虫需

单独放在10 mL的塑料离心管中避免互相残杀。低温暴露处理完成后,将实验幼虫置于标准室温环境中(25℃),6 h后,用镊子触碰虫体,观察其是否存活,尚能摆动头部或尾部或口器能够进行咬合的视为存活。

表1 松墨天牛各龄期幼虫头宽和体长

Table 1 The head capsule width and body length of *M. alternatus* in different instars

龄期	历期/d	头宽/mm	体长/mm
1	6~12	0.1~1.4	5.0~16.5
2	14~22	1.4~2.0	15.5~18.6
3	28~129	2.1~2.7	18.6~24.5
4	47~143	2.7~3.3	24.5~31.2
5	94~156	3.4~4.2	31.2~40.3

1.3 环境温度数据采集

各地气温数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(data.cma.cn)。随机选取我国46个气象站进行气温数据采集,对46个气象站连续3 a(2015—2017年)的冬季气象数据(11月至次年1月)统计结果表明:46个气象站中有44个气象站的冬季最低月平均气温出现于1月,剩余2个气象台的冬季最低月平均气温出现于12月,且与1月的月平均气温差异较小,所以本试验选择1月作为我国冬季月平均气温最低的月份,即为我国冬季最冷的月份。统计表明,冬季月平均最低气温中最低的为黑龙江漠河(-33.13℃),最高的为广东深圳(14.07℃)。

1.4 以极端温度耐受性为引导的松墨天牛适生分布区探讨

选择我国46个气象站连续3 a(2015年至2017年)间1月份的月平均气温和月极端最低气温作为气象参数,用来衡量松墨天牛种群在我国的分布区域受到冬季长时间及短时间(假定当地月极端最低温度可以持续24 h)低温影响的程度。所有气象数据用Arcgis10.2.2软件进行统计分析、作图。

用软件对我国行政边界矢量图进行处理,利用反距离权重法将搜集到的各地气象站的气温数据进行差值处理,而后生成等温线,形成我国1月平均气温的等温线图。以松墨天牛幼虫在低温度短期胁迫24 h和长期胁迫32 d后的半致死温度LLT₅₀和99%致死温度LLT₉₉为界定值,在等温线图上将松墨天牛在我国的地理分布区划分为3类:高度适生区、中度适生区和非适生区。具体划分方法如下:

高度适生区:当某地区冬季在特定时间段的低温环境下,该地区分布的松墨天牛种群有50%以上个体存活时,则这个地区在该时间段内的低温对松墨天牛伤害程度较弱,可以判定该地区为松墨天牛

表 2 全国 46 个气象站冬季月平均最低气温

Table 2 Average monthly minimum temperature of 46 weather stations nationwide

地点	1月平均最低气温/℃	1月极端最低气温/℃	E/(°)	N/(°)
漠河	-33.13	-40.30	122.531 9	52.970 73
满洲里	-29.07	-35.23	117.370 6	49.596 08
哈尔滨	-22.53	-28.50	126.528 9	45.801 2
富锦	-21.77	-28.47	132.049 1	47.210 27
改则	-20.7	-28.90	84.059 88	32.305 05
阿勒泰	-19.33	-29.43	88.137 94	47.843 68
长春	-17.87	-25.10	125.317 5	43.813 78
沈阳	-16.4	-23.40	123.454	41.680 14
乌兰	-16.13	-23.43	98.489 79	36.922 84
玉树	-16	-24.50	97.006 21	33.007 28
呼和浩特	-15.13	-23.33	111.742	40.841 08
西宁	-14.43	-19.67	101.776 1	36.617 21
额济纳	-14.3	-20.17	101.053 8	41.952 21
乌鲁木齐	-13.53	-20.47	87.615 18	43.823 34
敦煌	-13.17	-18.93	94.661 05	40.141 08
日喀则	-13.07	-17.60	29.252 83	88.894 45
景洪	-12.7	-8.37	100.815 1	22.012 38
库尔勒	-12	-16.97	86.172 52	41.724 71
银川	-10.7	-16.93	106.229 5	38.482 61
太原	-9.17	-17.50	112.543 7	37.870 13
拉萨	-6.93	-10.93	91.112 74	29.646 76
北京	-6.1	-11.00	116.400 8	39.903 18
石家庄	-6	-12.70	114.509	38.041 78
和田	-5.93	-11.00	79.920 18	37.114 54
大连	-5.6	-13.23	121.610 1	38.912 52
林芝	-4.87	-11.07	94.360 33	29.650 88
都江堰	-4.3	-2.10	103.611 5	31.003 71
武功	-4.3	-11.03	108.195 3	34.261 63
济南	-2.83	-10.83	117.012 7	36.676 25
威海	-2.43	-8.87	122.116	37.509 49
郑州	-1.53	-6.53	113.618 9	34.748 37
沭阳	-1.4	-8.33	118.798 6	34.112 46
丽江	0.63	-4.53	100.224 9	26.858 06
合肥	1.2	-6.70	117.221 5	31.822 31
武汉	1.47	-5.67	114.299 6	30.595 21
南京	2.7	-6.43	118.790 8	32.060 36
腾冲	3.13	0.60	98.490 74	25.023 56
昆明	3.43	2.23	102.844 6	24.870 76
杭州	3.53	-4.20	120.204 5	30.249 42
贵阳	3.63	3.03	106.626 4	26.651 23
长沙	4.3	-2.43	112.933 5	28.232 3
南昌	5.37	-0.80	115.853 1	28.687 09
福州	9.7	2.67	119.292 2	26.077 28
广州	11.1	4.67	113.259 7	23.131 76
南宁	11.2	3.90	108.362 9	22.818 97
深圳	14.07	7.30	114.052 9	22.545 52

的高度适生区。

中度适生区:当某地区冬季在特定的时间段的

低温致使当地分布的松墨天牛种群的个体死亡率在 50%~99%时,则这个地区在该时间段内的低温对松墨天牛伤害程度中等,可以判定该地区为松墨天牛的中度适生区。

非适生区:当某地区冬季在特定的时间段内的平均低温致使当地分布的松墨天牛种群的 99%以上个体因低温胁迫死亡时,则该地区在该时间段内的低温对松墨天牛伤害程度较高,判定该地区为松墨天牛的非适生区。

同时,根据低温胁迫时间的长度,分为长时间胁迫和短时间胁迫,胁迫时间的变化也能导致昆虫死亡率变化进而导致昆虫适生区的变化。

1.5 数据处理

记录低温暴露试验所得数据后,低温暴露试验数据的处理由 SPSS22.0 中回归分析的 Probit 方法计算得出。并求得在一定的时间内造成松墨天牛幼虫总数 50% 死亡的温度,即低温半致死温度 (LLT₅₀),以及在一定的时间内造成松墨天牛幼虫总数 99% 死亡的温度,即 99% 低温致死温度 (LLT₉₉)。

2 结果与分析

2.1 松墨天牛越冬幼虫低温致死率

试验过程中发现,相同的时间内,低温暴露环境的温度越低,松墨天牛幼虫的死亡率越高,二者呈反比。当松墨天牛幼虫暴露于-15℃以上的低温环境中的时间在 1 h 内时,大部分松墨天牛幼虫均能承受该程度的低温胁迫;当松墨天牛幼虫暴露于-5℃以上的低温环境中的时间在 32 d 以内时,排除个体间差异影响,所有松墨天牛幼虫都能存活;当温度下降至-15℃或更低时,4 h 以内所有松墨天牛幼虫结冰死亡,即表示松墨天牛幼虫对-15℃以下低温耐受性低;松墨天牛越冬幼虫在-20℃的低温下 1 h 内近半数结冰,2 h 全部结冰死亡。

2.2 松墨天牛越冬幼虫受低温胁迫的结冰温度

通过对比相同暴露时间下、不同强度低温的致死率,以及相同强度低温下、不同暴露时间的致死率,能够把低温暴露温度、低温暴露时间和松墨天牛幼虫低温致死率之间的关系更加清楚的表达出来。随着低温暴露时间的延长,松墨天牛幼虫的半致死温度 (LLT₅₀) 和 99% 致死温度 (LLT₉₉) 呈现升高趋势(表 4)。进一步对表 4 数据进行分析发现,当幼虫低温暴露时间短至 0.5 h 时,松墨天牛低温半致死温度为-20.904℃,而当环境低温在-29.438℃时,松墨天牛越冬幼虫才近乎全部结冰死亡。随着低温暴露时间的延长,低温致死温度也不断上升,在

表 3 不同处理温度和时长下的松墨天牛致死率

Table 3 Lethality of *M. alternatus* under different treatment temperatures and durations

温度/°C	低温暴露时间/h									
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	12 h	24 h	168 h	768 h
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	0	0	1/30	0	1/30	2/31	1/10	2/31	4/33	6/33
-15	1/5	13/30	22/31	26/31	30/32	1	1	1	1	1
-20	8/31	16/31	25/32	1	1	1	1	1	1	1

表 4 松墨天牛越冬幼虫在不同低温胁迫时间内的低温致死温度(LLT₅₀和 LLT₉₉)Table 4 Lethal low temperature of *M. alternatus* overwintering larvae in different exposure time(LLT₅₀ and LLT₉₉)

暴露时间/h	截距	回归系数	拟合优度	LLT ₅₀ /°C	95%置信区间		LLT ₉₉ /°C	95%置信区间	
					Low	Up		Low	Up
0.5	-5.698	0.327	0	-20.904	-23.146	-18.809	-29.438	-32.595	-26.906
1	-4.862	0.307	0	-17.837	-19.727	-15.962	-26.372	-29.02	-24.216
2	-3.911	0.294	0	-14.347	-16.312	-12.285	-22.882	-25.371	-20.772
3	-3.149	0.291	0	-11.552	-14.002	-9.016	-20.086	-23.031	-17.532
4	-2.806	0.275	0	-10.292	-12.838	-7.72	-18.826	-21.953	-16.151
6	-2.538	0.26	0	-9.311	-11.92	-6.739	-17.845	-21.124	-15.081
12	-2.463	0.257	0	-9.037	-11.693	-6.448	-17.571	-20.936	-14.751
24	-2.533	0.26	0	-9.293	-11.914	-6.718	-17.828	-21.12	-15.049
168	-2.437	0.246	0	-8.939	-11.49	-6.467	-17.474	-20.765	-14.737
768	-2.261	0.234	0	-8.295	-10.785	-5.904	-16.83	-20.102	-14.133

暴露时间达 6 h 时,半致死温度(LLT₅₀)上升至 -9.311°C,99%致死温度(LLT₉₉)上升至 -17.845°C。由此可以得出,松墨天牛幼虫可以耐受较短时间、中等强度的环境低温。

当幼虫暴露在低温环境下 168 h(7 d)和 768 h(32 d)时,松墨天牛幼虫的半致死温度(LLT₅₀)分别上升至 -8.939°C和 -8.295°C,99%致死温度(LLT₉₉)分别上升至 -17.474°C和 -16.83°C,这说明松墨天牛幼虫对长时间一般程度的低温胁迫具有一定的耐受性。

2.3 长时间(32 d)低温胁迫下的松墨天牛适生区划分

根据表 4 得到,松墨天牛越冬幼虫受长时间低温胁迫(32 d)后,其 LLT₅₀为 -8.295°C,LLT₉₉为 -16.83°C。由此可划分出松墨天牛在我国的高度适生区、中度适生区和非适生区。

以当年最低月平均温度作为参数的条件下,冬季长期(32 d)的低温胁迫对松墨天牛幼虫所造成的死亡率具有明显的地理差异。我国东北地区(包括黑龙江、吉林)以及内蒙古的部分地区和新疆、西藏的少数地区属于松墨天牛的非适生区(图 1 蓝色区域),而内蒙古、新疆、甘肃、西藏、辽宁、山西的绝大部分地区以及青海属于松墨天牛的中度适生区(图 1 黄色区域);我国东南方及中部的大部分省份以及

辽宁的小部分地区、北京、西藏和山西的部分地区均属于松墨天牛的高度适生区(图 1 红色区域)。

2.4 短时间低温胁迫下的松墨天牛适生区划分

根据表 4 得到,松墨天牛在低温胁迫 1 d 后的 50%致死温度 LLT₅₀为 -9.29°C,99%致死温度 LLT₉₉为 -17.828°C,由此将松墨天牛越冬幼虫在冬季受短期(1 d)极端低温胁迫下的 50%致死温度(LLT₅₀)、99%致死温度(LLT₉₉)的值与我国冬季 1 月份等温线进行叠加,并由此划分出松墨天牛高度适生区、中度适生区和非适生区。

图 2 中蓝黄色块交界线为 24 h 低温胁迫下的 LLT₉₉值与我国冬季 1 月等温线的重合线,黄红色块交界处为 24 h 处理条件下的 LLT₅₀值与我国冬季 1 月等温线的重合线。根据适生区划分标准,-17.828°C(LLT₉₉)等温线以北(图 2 蓝色区域)皆为松墨天牛非适生区,主要包括我国东北地区的黑龙江省和吉林省以及内蒙古的部分地区以及我国西北的部分地区(改则、阿勒泰等);而长春、沈阳、呼和浩特、银川、西宁、玉树、乌兰、敦煌、乌鲁木齐、库尔勒、景洪等地的气象站测量得到的年最低月平均气温均高于 24 h 低温胁迫下的 LLT₉₉值,并且低于 24 h 低温胁迫下的 LLT₅₀值。根据适生区划分标准可以判定 -17.828°C(LLT₉₉)与 -9.29°C(LLT₅₀)等温线之间的地区为松墨天牛的中度适生区(图 2 黄

色区域),而 -9.29°C (LLT_{50})等温线以南地区(图2红色区域)皆为松墨天牛的高度适生区。

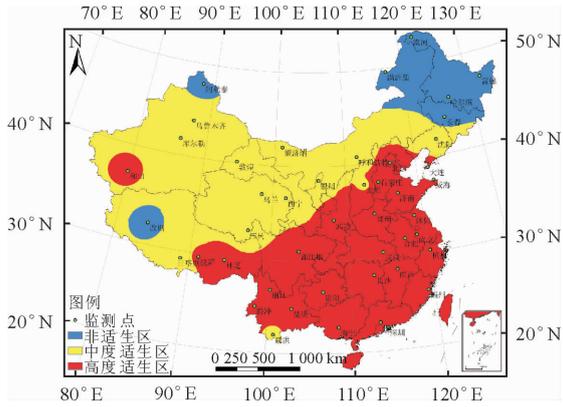


图1 长时间(32 d)低温胁迫下的松墨天牛适生区划分
Fig. 1 A long time (32 d) zone division of *M. alternatus* under low temperature stress

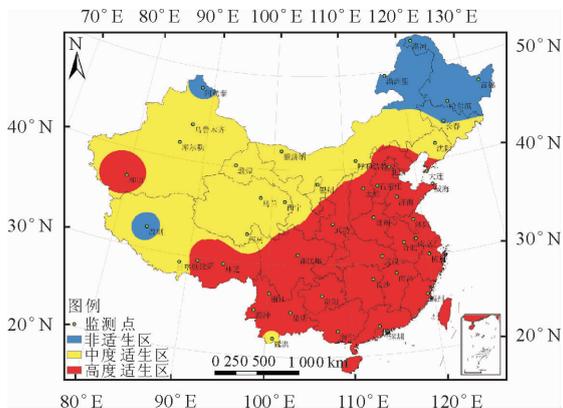


图2 短时间(24 h)低温胁迫下的松墨天牛适生区划分
Fig. 2 A short time (24 h) zone division of *M. alternatus* under low temperature stress

2.5 结合不同时长低温胁迫 LLT 对适生区划分

在对长期低温胁迫条件(32 d)下得到的半致死温度 LLT_{50} (-8.295°C)和99%致死温度 LLT_{99} (-16.83°C)与短期低温胁迫条件(24 h)下得到的半致死温度 LLT_{50} (-9.29°C)和99%致死温度 LLT_{99} (17.828°C)进行对比后可以发现,长期低温胁迫下得到的 LLT 比短期低温胁迫下得到的 LLT 高约 1°C ,这也导致在同时考虑2种不同时长低温胁迫情况并对松墨天牛适生区划分的过程中,适生区边界线不同程度的移动。图3中深蓝色区域表示冬季在该地区内无论松墨天牛受到长期低温胁迫(32 d)还是短期低温胁迫(24 h),其致死率均高于99%,这意味着松墨天牛在该地区绝对无法耐受冬季的寒冷气候,因而在该地区分布的机率几乎为零。

图3中浅蓝色的区域表示松墨天牛在该地区可以忍受冬季短期较强的低温(-17.828°C ,24 h),但是当遭遇长时间的低强度低温(-16.83°C ,32 d)则无法忍受,致死率 $>99\%$ 。这表示松墨天牛越冬幼

虫在该地区可以耐受短时间的低温胁迫(-17.828°C 以上),低温对松墨天牛的致死率在50%~99%,而当受到较低强度低温胁迫持续至32 d时,松墨天牛低温致死率则提升至99%以上,由此可以将其划分为松墨天牛在我国的亚非适生区。

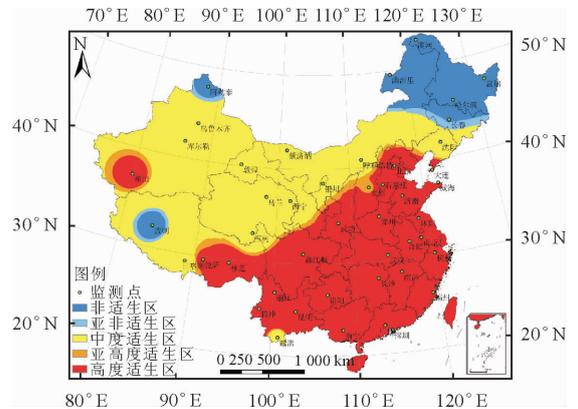


图3 短时间(24 h)与长时间(32 d)低温胁迫下的松墨天牛适生区划分

Fig. 3 A short time (24 h) and a long time (32 d) zone division of *Monochamus alternatus* under low temperature stress

黄色区域(图3)表示,无论冬季松墨天牛幼虫在此区域接受长达1个月的低温胁迫还是短至1 d的极端低温胁迫,其低温致死率均在50%~99%,属于松墨天牛的中度适生区。

橙色区域(图3)表示,若松墨天牛在此区域内越冬,受到短时低温胁迫的情况下,其低温致死率低于50%;而在受到长时间低温胁迫的情况下,其低温致死率上升至50%~99%,所以松墨天牛越冬幼虫在该区域可以忍受短时间内温度较高的低温胁迫,而随着时间的延长,松墨天牛受低温胁迫影响,会导致其死亡率上升,由此我们可以将其划分为松墨天牛在我国的亚高度适生区。

红色区域(图3)表示,无论越冬期松墨天牛在该地区受到长或短时间的低温胁迫,其低温致死率均 $<50\%$,该地区为我国松墨天牛的高度适生区。

3 结论与讨论

以本文中的方法进行松墨天牛适生区界定时,我国仅东北地区的黑龙江、吉林和内蒙古的部分地区、辽宁的少数地区和我国西北部的部分高海拔地区即乌兰浩特、白城、长春、吉林、敦化、图们的连线以北和西北部地区的部分高海拔地区(改则地区、阿勒泰地区)可以划分为松墨天牛在我国的非适生区,除此以外的我国其他地区均有松墨天牛存活并繁衍的可能。张新平^[16]利用有害生物危险性分析方法判定松墨天牛在新疆适生区域相当广阔,在当地属于高度危险有害生物;王志明^[17]在吉林省通化市金

厂子地区采集到松墨天牛成虫,证实松墨天牛在吉林省已存在。结合我国近年来新发现的松墨天牛分布地区和本研究预测的我国松墨天牛的适生区来看,松墨天牛在我国具有向高纬度地区扩散的能力和趋势。

孔维娜^[18]曾利用1961—1990年的数据得到松墨天牛分布北限主要受每年最低温度和中国北部1月平均气温的影响,但时隔近30 a,很多气候气象因子指标已经随着时间推移和气候变化发生改变,如气候变化导致的环境温度升高等,松墨天牛种群也会一定程度上受到温度驯化影响,进而导致适生分布区变化。本研究利用更有时效性的数据和方法进行研究,更能体现当前环境条件下的规律特点。王庆^[19]将月平均气温、季度平均气温、有效积温日以及降雪量等12个气象因子作为建立回归模型的入选因子,并依据此模型结合过去一段时间内松墨天牛空间分布情况,得到我国松墨天牛在未来一段时间内的空间格局变化趋势。该研究表明,至2080 s,我国松墨天牛总发生面积为递减趋势,这与本研究结果不符。但该研究未考虑病虫害的扩散速度滞后于气候的变化速度,松墨天牛种群有很大可能在扩散过程中产生了新的适应性,而使其适生区域再度扩大,故本研究结论不与王庆的研究冲突。

在全球气候变暖的背景下,随着自然环境对松墨天牛个体的不断驯化,松墨天牛在我国具备不断向高纬度、冬季温度较低的地区继续扩散蔓延的能力,因此应引起林业工作者的足够重视。本研究只针对各地气温数据进行了统计分析并建模,并以温度为主要划分依据,并未考虑到各地具体的海拔等其他环境因素对松墨天牛分布的影响,在未来的研究中需结合其他环境因素,其划分和预测效果会更好。

参考文献:

- [1] 何贵友,付觉民,高富先.松墨天牛的生物学特性及防治控制技术[J].河南林业科技,2005,25(2):53-54.
- [2] 朱巽,旷建军,林仲桂,等.南岳松墨天牛生物学特性研究[J].西北林学院学报,2006,21(5):113-115.
- ZHU X, KUANG J J, LIN Z G. Bionomics of *Monochamus alternatus* occurring in Nanyue Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 113-115. (in Chinese)
- [3] 彭龙慧,曾城,周峰.松墨天牛灾害发生风险监测预警研究[J].江西农业大学学报,2015,37(2):290-295.
- PENG L H, ZENG C, ZHOU F. Studies on the early-warning against calamity of *Monochamus alternatus* Hope[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, 37(2): 290-295. (in Chinese)
- [4] 温小遂,喻爱林,唐艳龙,等.4种引诱剂诱捕松墨天牛效果比较[J].林业科学研究,2017,30(5):765-770.
- WEN X S, YU A L, TANG Y L, et al. Comparison on efficien-

- cy of pheromone lures equipped with panel traps in catching Japanese Pine sawyer *Monochamus alternatus* adults[J]. Forest Research, 2017, 30(5): 765-770. (in Chinese)
- [5] 肖稻青,范海元,吴小龙,等.松墨天牛防治探讨[J].农业灾害研究,2014(3):7-8,25.
- XIAO D Q, FAN H Y, WU X L, et al. Study on control methods of *Monochamus alternatus* Hope[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2014(3): 7-8, 25. (in Chinese)
- [6] 曹露凡,杨龙,高峰.松墨天牛生物学特性及防治的研究进展[J].山东林业科技,2010(2):111-115.
- [7] 朱诚棋,王博,沈婧,等.松墨天牛综合防治进展.中国植保导刊,2017,37(2):19-22.
- [8] 景晓红,康乐.昆虫耐寒性研究[J].生态学报,2002,22(12):183-188.
- JING X H, KANG L. Research progress in insect cold hardiness[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 183-188. (in Chinese)
- [9] 秦明,王红芳,刘振国.蜜蜂耐寒性及其机理的研究进展[J].中国蜂业,2017(7):21-24.
- [10] 史彩华,胡静荣,李传仁,等.环境胁迫下昆虫的耐寒适应机制研究进展[J].植物保护,2016,42(6):21-28.
- [11] 钟景辉,张飞萍,江宝福,等.不同地区松突圆蚧耐寒性的研究[J].中国生态农业学报,2010,18(1):117-122.
- ZHONG J H, ZHANG F P, JIANG B F, et al. Cold tolerance of the pine armored scale *Hemiberlesia pitiosophila* (Homoptera: Diaspididae) in different regions[J]. Chinese Journal Of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 117-122. (in Chinese)
- [12] 冯宇倩,王锦林,宗世祥.昆虫越冬虫态及耐寒策略概述[J].中国农学通报,2014,30(9):22-25.
- [13] 赵捷,韩晓,石娟.低温条件下松材线虫在中国的风险分布区预测[J].生物安全学报,2017,26(3):191-198.
- ZHAO J, HAN X, SHI J. Potential distribution of *Bursaphelenchus xylophilus* in China due to adaptation cold conditions[J]. Journal of Biosafety, 2017, 26(3): 191-198. (in Chinese)
- [14] 李恂,戴立霞,何慎.郴州市松墨天牛生物学特性研究[J].湖南林业科技,2010,37(01):24-26.
- [15] 王玲萍.松墨天牛生物学特性的研究[J].福建林业科技,2004(3):27-30.
- WANG L P. Study on the biological characteristic of *Monochamus alternatus* Hope[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2004(3): 27-30. (in Chinese)
- [16] 张新平,焦淑萍,张静文,等.松褐天牛入侵新疆的风险分析[J].西北林学院学报,2013,28(1):110-113.
- ZHANG X P, JIAO S P, ZHANG J W, et al. Risk analysis of *Monochamus alternatus* in Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 110-113. (in Chinese)
- [17] 王志明,皮忠庆,侯彬.吉林省墨天牛属昆虫种类记述[J].吉林农业大学学报,2007,29(1):41-43.
- WANG Z M, PI Z Q, HOU B. Account of the genus *Monochamus* Guerin-Meneville in Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2007, 29(1): 41-43. (in Chinese)
- [18] 孔维娜.入侵种松材线虫的关键传媒——松墨天牛的耐寒性[D].太谷:山西农业大学,2005.
- [19] 王庆,毕猛,马思佳,等.基于气象因子的松墨天牛发生率空间格局研究[J].林业科学研究,2015,28(1):65-70.