

我国柑橘木虱潜在适生区分布及趋势分析*

汪善勤^{1,2**} 肖云丽^{3,4} 张宏宇^{1,4***}

(1. 华中农业大学植物科技学院, 城市与园艺昆虫学研究所, 武汉 430070;

2. 华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;

3. 黄冈师范学院生命科学学院, 黄冈 438000; 4. 大别山特色资源开发湖北省协同创新中心, 黄冈 438000)

摘要 【目的】柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 是传播黄龙病的重要虫媒, 给柑橘生产带来极大危害。本文通过已知柑橘木虱发生地信息和 40 年气象数据求取准确的生物气候模型参数, 在此基础上分析我国柑橘木虱潜在适生区分布变化和未来发展趋势。【方法】本文从 1970 年以来公开发表的文献中整理提取了柑橘木虱在我国 1990 年前后的发生地信息, 分别基于 CLIMEX 的标准气象数据和国家气象局发布的 1991—2010 年的气象数据, 得到能够准确预测柑橘木虱潜在适生区分布的 CLIMEX 参数。然后使用 CliMond 发布的 2030 和 2050 年的全球气象数据, 预测了未来柑橘木虱在我国的潜在适生区。【结果】2010 年后柑橘木虱适生区分布北移明显, 与实际发生地信息相吻合; 全球气候变暖趋势影响下, 2030 年柑橘木虱适生区继续向北方扩展, 但到 2050 年的适生区北界基本稳定, 相比较而言临界区北移更加突出。【结论】柑橘木虱适生区北移明显, 在未来气候条件下, 干胁迫将阻止其进一步北移; 但在临界气候条件下有建立种群的可能, 对于目前未见该虫发生报道的潜在适生区, 应加强早期预警和检疫防控措施。

关键词 柑橘木虱, 潜在适生区, CLIMEX, 黄龙病

Studies of the past, current and future potential distributions of *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae) in China

WANG Shan-Qin^{1,2**} XIAO Yun-Li^{3,4} ZHANG Hong-Yu^{1,4***}

(1. Institute of Urban and Horticultural Entomology, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation, Middle and Lower Reaches of Yangtze River Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Huanggang Normal College, School of Life Science, Huanggang 438000, China; 4. Hubei Collaborative Innovation Center for the Characteristic Resources Exploitation of Dabie Mountains, Huanggang 438000, China)

Abstract [Objectives] *Dysphoria citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae), the vector of Huanglongbing (*Candidatus Liberobacter asiaticus*), has caused major damage to China's citrus industry. The objective of this paper is to (a) obtain optimal parameters for a CLIMEX model for *D. citri*, and (b) to investigate the past, current and future potential distributions of *D. citri* in China. [Methods] Information on the range of *D. citri* before and after 1990 in China were derived from the literature published since 1970. The parameters of a CLIMEX model were adjusted to fit these data and the species potential future range was estimated by the model. Two meteorological datasets, the CLIMEX integrated climate dataset (1961-1990) and a 1991-2010 dataset released by China Meteorological Administration, were used for model fitting. The future potential distributions of this pest in China were then predicted using CliMond datasets, including bioclimate data in 2030 and 2050. [Results] Compared with the distribution in 1990, by 2010 the northern boundary of *D. citri* range had, excluding the Sichuan Basin, moved north of latitude 32°N. The post-1990 range was a good fit to that predicted by CLIMEX. By 2030, *D. citri* is likely to colonize Central China as a result of global warming. Its 2050 distribution should, however, remain relatively

* 资助项目 Supported projects: 国家现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项资金资助(CARS-27)

**第一作者 First author, E-mail: sqwang@mail.hzau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: hongyu.zhang@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-04-22, 接受日期 Accepted: 2015-06-05

unchanged, due projected rising temperatures and decreasing precipitation. **[Conclusion]** The northern edge of *D. citri*'s range will advance significantly northward in the future, but due projected reduced rainfall should not extend beyond 32.5°N. It's worth noting, however, that marginal habitat, where populations of this pest could become established, will continuously move northward. Early warning and stricter regional quarantine measures should be taken in these areas to cope with the predicted expansion of the range of this pest.

Key words *Diaphorina citri* Kuwayama, potential distribution, CLIMEX, *Candidatus Liberobacter asiaticus*

柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae) 是危害芸香科植物嫩梢的一种重要害虫, 其寄主有柑、橙、桔、柠檬、柚、黄皮、九里香等。木虱成虫、若虫吸取嫩梢汁液, 严重时导致幼芽萎缩干枯, 若虫排出的分泌物还能引起煤烟病, 影响光合作用。柑橘木虱产生更严重的危害是传播黄龙病 *Candidatus Liberobacter asiaticus*, 该病通过取食病树的柑橘木虱成虫带病菌扩散传染, 对柑橘生产带来毁灭性威胁 (张宏宇和李红叶, 2012), 至今在浙江、江西、湖南、云南、贵州和海南等 11 省 (区) 均证实有黄龙病发生, 在我国已摧毁累计超过上百万亩的柑橘园 (邓晓玲, 2011)。由于黄龙病病原目前缺少有效防治措施, 主要限于控制柑橘木虱、挖除感病植株和培育无病菌木。在该虫发生地区, 防控柑橘木虱是阻止黄龙病蔓延的重要手段 (张宏宇和李红叶, 2012)。

在我国, 柑橘木虱主要在南部地区发生, 福建、广东、广西、浙江等省分布广泛, 而江西、湖南、四川、贵州等省市的南部地区也已有发生报道 (张宏宇和李红叶, 2012), 特别近年对江西赣南脐橙造成灾害性危害。熊红利等 (2011) 对比了 1982、2004 和 2011 年的调查数据, 发现柑橘木虱分布区北界为北纬 28°45'~29°47', 认为其分布区受气候等因子影响在我国出现了明显北移。谢佩华等 (1988a, 1988b) 发现在自然条件下, 柑橘木虱成虫能够忍受 -10℃ 的极端低温, 而限制其地理分布的主要因子是最冷月的平均气温及极端低温和低温持续时间。柑橘木虱在柑橘上通常能发生 6~11 个世代, 其有效生长积温和各虫态发育起点温度对于种群的建立起着关键作用 (谢佩华等, 1989a; 许长藩等, 1992)。而湿度影响研究较少, 目前少数文献结果认为高

湿 (>80%) 和低湿 (<40%) 情况下, 柑橘木虱死亡率较高 (杨余兵, 1989)。在自然条件下, 柑橘木虱对气候变化的响应还受到寄主、海拔等其他因素的影响下, 产生适应性的过程非常复杂。但总的来说, 温度和湿度仍然是决定其地理分布的主要因素 (Gutierrez and Ponti, 2013)。

从 20 世纪 80 年代至今, 在全球气候变暖的背景下, 黄龙病的发生地区逐渐由热带向亚热带地区扩展, 而柑橘木虱发生区的纬度也在不断增加, 对连片种植的柑橘主产区带来重大威胁。因此, 掌握柑橘木虱在我国目前和未来的潜在适生区分布, 以及主要气候因素影响下的发展趋势, 对于建立黄龙病及其媒介柑橘木虱预警系统、有效防控黄龙病和保障柑橘安全生产具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 CLIMEX 生物气候模型

CLIMEX 生物气候模型的理论假设是物种生存区域的气候条件是其能够承受的, 基本方法是根据已知物种的发生区来推断适宜该物种生存的气候条件。模型主要采用位置比较 (Compare locations) 法, 对比物种已知发生区和预测区的气候条件, 计算预测区维持种群发展的生态气候指数 (Ecoclimatic index, EI), 从而确定其潜在适生区范围。CLIMEX 用来描述物种所需要的气候参数由三部分组成: 生长指数 (Growth index, GI)、胁迫指数 (Stress index, SI) 和限制条件 (Limitation conditions)。GI 描述适宜物种分布的适宜性因素, 通过环境温度、土壤湿度或者适宜物种最佳生长的天数来衡量; SI 包括限制物种分布的极端温度和湿度, 描述了限制物种分布的

胁迫因素,如寒冷、潮湿、炎热或干旱气候的时间长度,有时是两种恶劣气候同时出现的时长;限制条件包括滞育和有效积温等参数。根据三部分参数计算出 EI,综合反映该物种最适宜的气

候条件。EI 的取值范围为 0~100,然后对结果进行分级,分级没有任何标准,根据物种不同而采取特定的策略。Sutherst 和 Maywald (1985) 给出的分级参考如表 1。

表 1 EI 适宜性分级
Table 1 Suitability classification by ecoclimatic index

EI	适生性 Suitability	说明 Description
0-0.49	非适生 Unsuitable	物种在该地区即使是平常的环境条件也不能生存 No growing
0.50-9.99	临界条件 Marginal	特定条件能生存,但种群建立较困难 Growing under special conditions, but hardly to establish population
10-19.99	适生 Suitable	可建立正常的种群 Normal growing conditions for population establishment
20+	极适生 Highly suitable	适宜物种长期生存的气候条件 Perfect growing conditions year round

1.2 我国柑橘木虱发生地信息

柑橘木虱的已知发生区信息主要来源是 CNKI 数据库,从中检索到 1970 年以来发表的与柑橘木虱和黄龙病研究相关的期刊和硕博士论文,其中明确注明柑橘木虱发生地信息的共计 106 篇,限于篇幅不能在参考文献中一一列出(黄炳超等, 1985; 谢佩华等, 1989b; 周启明等, 1989; 赖剑锋和杨清华, 1991; 黄丽华等, 1992; 李一农等, 1992; 徐素芬等, 1994; 王祖泽, 2002; 胡水泉等, 2008; 谢钟琛等, 2009; 熊红利等, 2011; 林云彪等, 2013)。从文献发表年份的篇数统计来看(图 1),柑橘木虱在 2000 年后受到

的关注度越来越高。以此整理出我国大陆地区柑橘木虱的发生地点和时间的信息,因为文献获取途径,缺少台湾地区的有效发生信息。文献中注明的柑橘木虱发生地的地名信息,至少包括县、乡镇、村或调查实验果园场地的名称,有少量文献提供了详细的经纬度。根据地名信息,使用百度地图的地图 API 工具检索地名反向提取经纬度。

1.3 气象数据和气候变化

CLIMEX 2.0 版中自带两个气象数据库,一个是标准气象数据库,包含 1961—1990 年全球 2 500 个站点的气象资料,其中中国大陆气象站点 85 个。包括月平均降雨量、日最高温、日最低温、9:00 和 15:00 的相对降雨量。由于气象站数量有限并且分布不规则,通常用于初始参数拟合。另一个是 TYN SC 2.0 规则格网数据库,时间与标准气象数据库一致。包括日降雨量,日平均温度,昼夜温度范围,气压和云量。该数据库由间隔 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的 67 420 个规则网格点组成,覆盖全球绝大部分陆地,因此可以进行更准确地拟合。

本文首先用 1990 年前发生地信息来调试 CLIMEX 参数;然后用 1991 至今新增发生地信息和国家气象局发布的 1991—2010 年的气象数据验证和修正参数;最后用 CliMond 在 2014 年

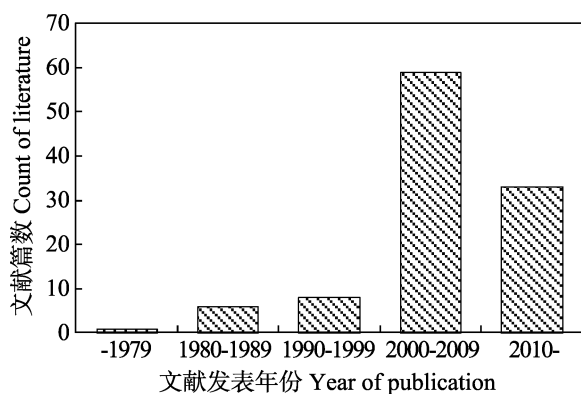


图 1 不同时间段相关文献数量统计
Fig. 1 Histogram of the counts of literatures published since 1970

发布的全球 2030 和 2050 年模拟气象数据 (Kriticos *et al.*, 2012), 预测气候变暖趋势下我国柑橘木虱未来的分布情况。该数据是在 WorldClim、CRU CL1.0 和 CRU CL2.0 的数据基础上, 采用 CSIRO Mk3.0 模型和 Microc-H 模型计算得到的全球 0.5° 的格网数据, 其中包含 CLIMEX 需要的所有气象参数 (<http://www.climond.org>)。

1.4 CLIMEX 拟合率的计算

从 CLIMEX 模型拟合结果中提取了各发生地的 EI 值, 按照表 1 划分得到不同发生地所在的适生区类型, 然后统计各类型的实际发生地数量, 并用适生区和极适生区的数量占总数的比例作为拟合率 (ρ)。计算公式如下:

$$\rho = \frac{n_1 + n_2}{n} \times 100\% \quad (1)$$

其中, n_1 是适生区发生地个数, n_2 是极适生区发生地个数, n 是总发生地个数。

本文使用 1:100 万中国省区地图数据, 下载自中国地球系统科学数据共享网 (<http://www.geodata.cn/Portal/>)。

2 结果与分析

2.1 我国柑橘木虱的发生地

从文献中共整理得到 193 个发生点位置, 同时综合文献内容和发表时间推断各地发现柑橘木虱的最早时间。整理共得到 1990 年前已见发生地 124 个, 其余 69 个为 1990 年后见发生地点。从发生地的分布来看 (图 2), 1990 年前柑橘木虱主要在福建、广西、广东等多见发生, 而浙江、湖南、江西、贵州各省只有南部县市报道发生; 1990 年后, 云南西部和南部、四川南部有少数县市报道发现柑橘木虱, 而新增的发生地主要出现在贵州、湖南和浙江省, 靠近已发生地区并且比较密集, 说明柑橘木虱不断向潜在的适宜生存地区扩散蔓延。在四川和云南新出现的发生地与资料显示的其它发生地距离较远, 则可能是随寄主植物运输传入或为原本地发生但未见调查研究和报道。

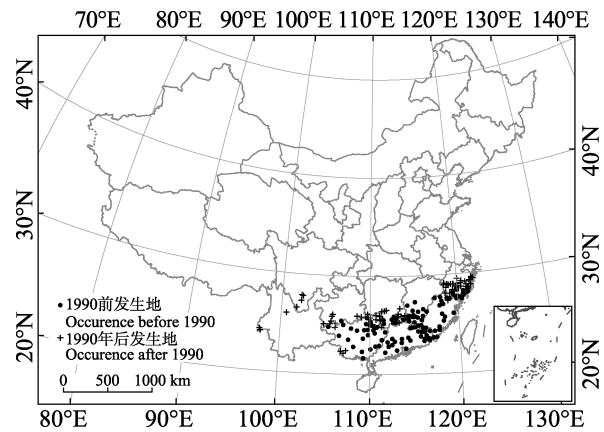


图 2 柑橘木虱在我国的发生地分布

Fig. 2 Reported occurrence sites of *Diaphorina citri* in China since 1970

2.2 CLIMEX 参数

2.2.1 土壤湿度 土壤湿度是 CLIMEX 的必要参数, 但是柑橘木虱没有在土壤中的生活史。植物和生活在土壤中的昆虫直接受到土壤湿度的影响, 而对于完全不在土壤中生活的昆虫, 由于其寄主植物的关系也会间接地受到土壤湿度的影响。相关研究发现, 当空气相对湿度为 43%~75% 时, 其若虫死亡率低, 卵在相对湿度为 43%~92% 时的孵化率较高; 而在高温 (>82%) 时, 若虫死亡率升高。由于空气相对湿度不能直接转换为土壤湿度, 因此参照文献 (He *et al.*, 2012) 根据空气湿度推算了大致的土壤湿度初始值, 然后根据 CLIMEX 预测结果与已知发生地的拟合程度来调整湿度参数, 经过反复修正得到表 3 的 4 个土壤湿度参数。

2.2.2 温度 实验室测定柑橘木虱成虫能够忍耐 -10°C 低温, 暴露于 -5~-6°C 下大部分成虫和若虫还能成活, 但时间一般不能超过 4 h, 说明该虫有一定的耐寒性。自然界发生冻害时, 低温持续时间较长。尽管极端低温条件下少数成虫能够安全过冬, 但是存活后的数量将很难快速恢复种群。因此, 种群正常延续所需要的发育起点温度不应设置为可耐受的最低温。谢佩华等 (1988b) 运用自然变温法, 测定得到柑橘木虱全世代发育起点温度 11.1°C, 本文将该值设为 DV0 的初始值。杨余兵 (1989) 发现 15~34°C 范围温度对卵的孵化率影响不大, 而 25~30°C 是若

虫的最适温度,而当温度超过 34℃时,若虫死亡率升高。由于成虫对高温的耐受性更好,因此综合上述研究结果,DV1、DV2 和 DV3 的初始值分别设为 25℃、30℃和 34℃。

2.2.3 热胁迫 热胁迫临界温度 (Temperature threshold of heat stress, TTHS) 设置等于 DV3 (=34℃),热胁迫积累速率 (Heat stress accumulation rate, THHS) 经过调试后设为 0.001。

2.2.4 冷胁迫 冷胁迫临界温度 (Temperature threshold of cold stress, TTCS) 设置等于 DV0 (=11.1℃),冷胁迫累计速率 (Cold stress accumulation rate, THCS) 设置为 -0.0005,较小的 THCS 说明冷胁迫对物种生存的影响较小,与柑橘木虱较强的耐寒性相符。

2.2.5 干胁迫 干胁迫临界土壤湿度 (Threshold soil moisture of dry stress, SMDS) 设置等于 SM0 (=0.4),干胁迫累计速率 (Dry stress accumulation rate, HDS) 设置为 -0.005。可以认为空气湿度降低对柑橘木虱的影响较明显。

2.2.6 湿胁迫 湿胁迫临界土壤湿度 (Threshold soil moisture of wet stress, SMWS) 设置等于 SM3 (=2.0),湿胁迫累计速率 (Wet stress accumulation rate, HWS) 设置为 0.01。高湿条件下,柑橘木虱各虫态生存明显受到影响,因此累积速率值较大。

2.2.7 有效积温 在 CLIMEX 中,有效积温定义为物种发生一代所需要的日度或积温。柑橘木虱多世代交叠发生,有效积温设置为 482.72 ± 18.65 (日·度)。

上述参数经过 CLIMEX 拟合与 1990 年前发生地分布对照并进行调整,最终确定得到柑橘木虱 CLIMEX 适用的参数 (表 2)。

2.3 1990 和 2010 年柑橘木虱的潜在分布区及其与实际发生地的拟合

按照公式(1)计算得到 1990 年和 2010 年拟合结果的拟合率分别为 94%和 92%,新增发生地后,采用 1991—2010 的气象数据的拟合率较 1990 年前略低,可能与该时间段内气候变化复杂有关。统计结果显示 (图 3),两个时间段内,没有发生地在非适生区内出现,大部分发生地出

表 2 适合估计柑橘木虱适生区分布的 CLIMEX 参数值
Table 2 Parameters and values for CLIMEX model to estimate the potential distribution of *Diaphorina citri* in China

参数 Parameters	描述 Description	参数值 Value
SM0	土壤湿度临界下限 Lower soil moisture threshold	0.4
SM1	最适土壤湿度下限 Lower optimal soil moisture	0.8
SM2	最适土壤湿度上限 Upper optimal soil moisture	1.5
SM3	土壤湿度临界上限 Upper soil moisture threshold	2.0
DV0	发育起点温度 Lower temperature threshold	11.1℃
DV1	最适发育温度下限 Lower optimum temperature	20℃
DV2	最适发育温度上限 Upper optimum temperature	30℃
DV3	发育上限温度 Upper temperature threshold	34℃
TTHS	热胁迫临界温度 Temperature threshold of heat stress	34℃
THHS	热胁迫积累速率 Heat stress accumulation rate	0.001
TTCS	冷胁迫临界温度 Temperature threshold of cold stress	11.1℃
THCS	冷胁迫积累速率 Cold stress accumulation rate	-0.0005
SMDS	干胁迫临界土壤湿度 Threshold soil moisture of dry stree	0.4
HDS	干胁迫累计速率 Dry stress accumulation rate	-0.005
SMWS	湿胁迫临界土壤湿度 Threshold soil moisture of wet stress	2.0
HWS	湿胁迫累计速率 Wet stress accumulation rate	0.01
PDD	有效积温 Heat sum threshold	482.72

现在适生区和极适生区,说明 CLIMEX 拟合结果与实际发生情况吻合程度高。1990 年前,少量发生地出现在临界区内,主要分布在浙江丽水 and 台州,以及福建南平武夷山地区;1990 年后,浙江衢州、金华、台州等地柑橘木虱发生,但 EI 值小于 10,处于临界气候条件下。值得注意的是,1990 年后,云南北部的丽江永胜县,四

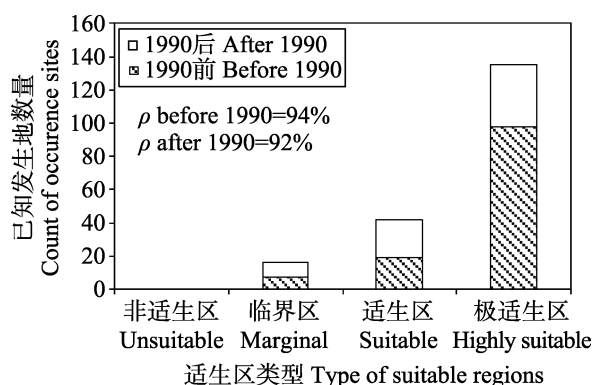


图3 1990年前后 CLIMEX 拟合结果统计及拟合率

Fig. 3 Histogram of estimation fitting to the occurrence sites before and after 1990 by CLIMEX

川攀枝花市南部、西昌、德昌和宁南县等,均处于临界区内,且有柑橘木虱发生报道。可认为是柑橘木虱扩散趋势的正常反映,气象数据的准确度也有一定的影响。

拟合适生区分布结果表明(图4,图5),在1990年和2010年的气候条件下,柑橘木虱在广西、广东、福建和重庆等省市的适生区变化不大;云南玉溪和临沧的极适生区扩大,临界区北移至丽江地区。而在湖南和江西两省,1990年的适生区在2010年的模拟结果中转变成极适生区,主要分布在湖南的衡阳、长沙、益阳和岳阳,江西的临川、鹰潭和南昌等地区;1990年湖北省的沙市和咸宁地区南部县区存在临界区,而在2010年气候条件下已转变为柑橘木虱生存的适

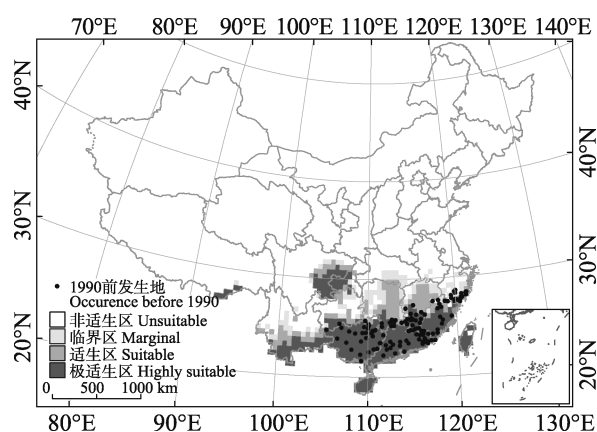


图4 1990年 CLIMEX 模拟柑橘木虱适生区与实际发生地

Fig. 4 CLIMEX-estimated distribution regions and occurrence sites before 1990

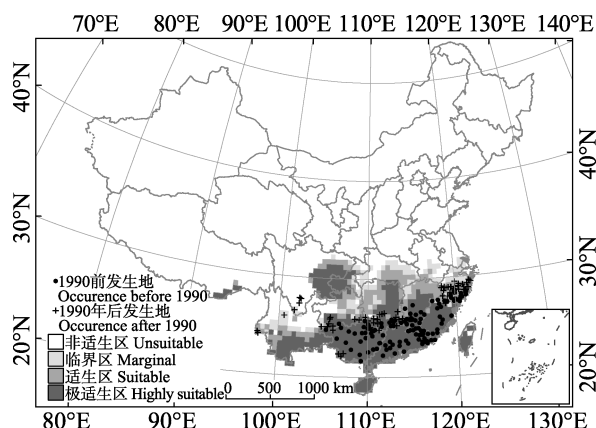


图5 2010年 CLIMEX 模拟柑橘木虱适生区与实际发生地

Fig. 5 CLIMEX-estimated distribution regions and occurrence sites of *Diaphorina citri* before 2010

宜地区,临界区向北推进到了武汉、孝感、襄樊等地区的部分县市。值得注意的是,安徽省的安庆和芜湖地区在2010年气候条件下也出现了临界地区,北界已经到达合肥。浙江省适生区北移明显,该省1990年后报道的发生地集中在临界区和适生区交错发生的地带,如金华浦江、东阳县,衢州开化县,北部湖州也进入临界区。四川盆地大部分地区都是柑橘木虱的适生区,而且西藏日喀则南部地区也出现极适生区,但始终没有发生报道,缺少柑橘木虱来源以及阻止柑橘木虱扩散的周边高山地区等自然屏障可能是主要原因。

2.4 CLIMEX 预测 2030 年和 2050 年柑橘木虱的潜在分布区

根据预测结果(图6,图7),未来气候背景下,2030和2050年柑橘木虱的适生区分布与2010年的结果相比没有太大变化。但出乎意料的是,湖南和江西省内极适生区有向南回退的趋势,如湖南岳阳、江西鹰潭和临川等EI值减小到20以下。同时也发现,临界区向北移动更明显,2050年将覆盖河南信阳,江苏苏州、南通、无锡,安徽的合肥、芜湖、六安等地,西藏南部日喀则地区柑橘木虱适生区有轻微扩大趋势,而四川南部攀枝花和西昌仍然处于临界区内,考虑到1990年后该地区已有柑橘木虱发生危害报道(熊红利等,2011),因此对于临界区北移,柑橘木虱随迁风险增加,应该引起足够重视。

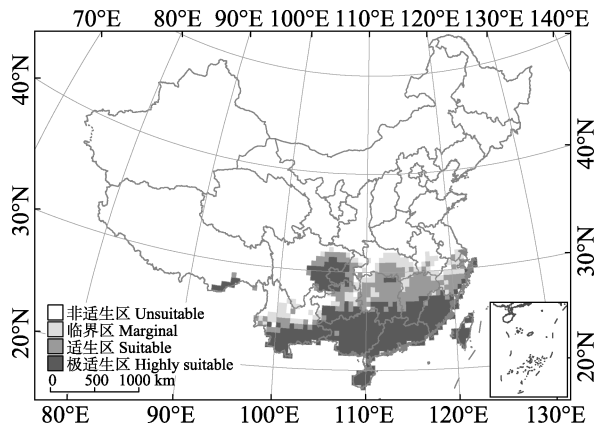


图 6 CLIMEX 预测 2030 年柑橘木虱潜在适生区
Fig. 6 CLIMEX-estimated potential distribution of *Diaphorina citri* in 2030

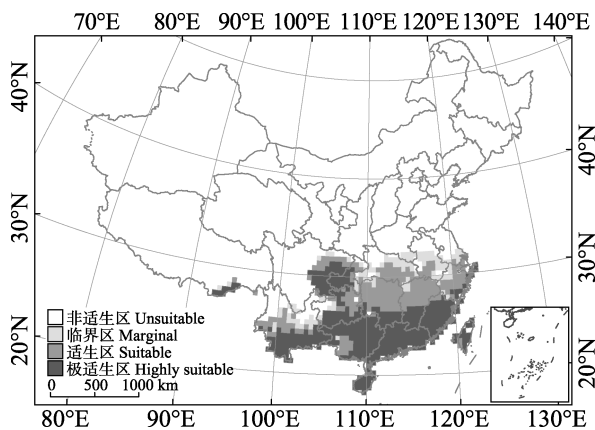


图 7 CLIMEX 预测 2050 年柑橘木虱的潜在适生区分布
Fig. 7 CLIMEX-estimated potential distribution of *Diaphorina citri* in 2050

3 讨论

亚洲柑橘木虱在柑橘寄主上一年可发生 6~8 代,而在九里香、黄皮等寄主上最多可发生 11 代。柑橘木虱的适生区与寄主的适生区分布密切相关,分析其对寄主的依存关系有助于提高 CLIMEX 预测的准确性,本文没有使用 CLIMEX 预测各种寄主的适生区分布,但从相关文献可以确定我国柑橘主要产区覆盖了柑橘木虱的适生区,而九里香等生长地理范围更广。因此,对于柑橘木虱而言,CLIMEX 从单一物种受气候影响的预测结果仍然具有很高的可信度。另外,气候因素与海拔关系密切。海拔影响温度和降雨量,

主要还是温度和年有效积温。海拔高于 500~600 m 的南方地区基本上没有发现柑橘木虱种群(黄丽华等,1992;马骁和王祖泽,2001;王祖泽,2002);而逐渐向北的地区,此海拔限制会更低。因此山区会形成自然屏障,阻碍柑橘木虱扩散,正如四川盆地和西藏南部都存在适宜该虫生存的地区(图 3~图 6),但迄今还未有发现报道,因此这些地区的检疫措施应该更加严格,以阻止其扩散传入。

比较 1990 和 2010 年的结果发现柑橘木虱适生区北移趋势明显,与该时间段内气候变暖的情况吻合,尤其是南方冬季气温偏高,有利于该虫越冬。但是,在 2008 年初南方数省发生的大面积冻害的影响下,柑橘木虱虫口密度急剧降低,甚至部分地区数月没有发现种群报道(白先进等,2008),说明自然条件下持续时间较长的低温可以杀死大部分柑橘木虱,但气温回暖后种群也即迅速恢复,CLIMEX 设置较小的冷胁迫累计速率($THCS = -0.0005$)较好地模拟此效果。根据 CliMond 发布的 2030 年和 2050 年全球气候预测气象数据,与 2010 年的相比,我国黄河以南地区年平均气温将分别升高 0.8°C 和 1.3°C ,而年总降雨量将分别降低 4% 和 6%。本文预测的结果发现 2030 和 2050 年柑橘木虱在我国的适生区变化并不剧烈,虽然北移趋势明显,但以临界气候条件下的发生区为主。到 2050 年,适生区的最北端将进入湖北荆门、安徽巢湖、江苏无锡等地,接近北纬 32° ;而临界区最北端将到达北纬 32.51° ,覆盖四川广元、湖北襄樊、河南信阳、安徽淮南等地。平均温度升高有利于柑橘木虱在适生区内建立种群,但降雨量减少导致湿度降低,同样会影响该虫在高温低湿地区的适生性。未来气候变化还存在很大的不确定性,当新的全球气候预测数据公布后,采用本文的 CLIMEX 参数将为柑橘木虱适生区估计提供帮助。

本文收集的 1990 年前文献有部分综合报道了各省的发生情况,1990 后文献也有数篇说明发生时间早于 1990 年。因此,尽管 1990 年前文献较少,但实际整理的发生点数更多。本文收集的文献主要来源于正式期刊,发生报道的真实性

和准确性高但是, 由于缺乏准确的地理定位信息, 考虑到 CLIMEX 主要采用“地点比较法”来预测适生区, 因此结果的不确定性需要进一步评估。总的来说, 从数据的收集难度和准确度来看, 本文的分析和预测结果能够满足全国尺度上监测柑橘木虱发生区的要求。

参考文献 (References)

Bai XJ, Deng CL, Lu BG, Zhao XL, Deng GZ, Li GG, Chen QW, Wu NC, Tang Y, Chen GP, Fu HM, Mo JS, 2008. Study on cold tolerance of citrus psylla. *South China Fruits* 37(6): 22–24. [白先进, 邓崇岭, 陆国保, 赵小龙, 邓光宙, 李国刚, 陈传武, 吴弼超, 唐艳, 陈国平, 付慧敏, 莫健生, 2008. 柑桔木虱耐寒性调查研究. 中国南方果树, 37(6): 22–24.]

Deng XL, 2011. Diagnosis and control techniques of citrus Honglingbing. Oral report at the Conference on cooperation in citrus research and development of citrus industry in Hunan Province, 2011. Changsha: 1–72. [邓晓玲, 2011. 柑橘黄龙病的诊断与防控技术. 2011 湖南省柑橘科研协作会暨柑橘种业发展研讨会报告. 长沙: 1–72.]

Gutierrez AP, Ponti L, 2013. Prospective analysis of the geographic distribution and relative abundance of Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae) and citrus greening disease in North America and the Mediterranean Basin. *Fla. Entomol.*, 96(4): 1375–1391.

Hall DG, Wenninger EJ, Hentz MG, 2011. Temperature studies with the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*: cold hardiness and temperature thresholds for oviposition. *J. Insect Sci.*, 11(1): 83.

He S, Worner SP, Ikeda T, 2012. Modeling the potential global distribution of light brown apple moth *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) using CLIMEX. *J. Asia-Pac. Entomol.*, 15(3): 479–485.

Hu SQ, Xu WG, He GG, Li JZ, Jiang Z, Wei YM, 2008. Occurrence rules and control measures of citrus psylla in Western Zhejiang Province. *China Plant Protection*, 28(2): 27–28. [胡水泉, 许渭根, 何刚国, 李建忠, 蒋峥, 魏有明, 2008. 浙西地区柑橘木虱的发生规律与防控对策. 中国植保导刊, 28(2): 27–28.]

Huang BC, Liu XQ, Chen XY, 1985. A study on the transmission of yellow shoot disease of citrus by the Asiatic citrus psyllid. *Journal of South Agricultural University*, 6(4): 46–50. [黄炳超, 刘秀琼, 陈循渊, 1985. 柑桔木虱传播柑桔黄龙病的研究. 华南农业大学学报, 6(4): 46–50.]

Huang LH, Xiao QM, Dong JY, Li YN, Mao XL, 1992. Occurrence rules and control measures of citrus psylla in Hunan Province. *China Citrus*, 23(4): 36–37. [黄丽华, 肖启明, 董俊珣, 李一农,

毛晓林, 1992. 湖南柑桔木虱发生规律及防治研究. 中国柑桔, 23(4): 36–37.]

Kriticos DJ, Webber BL, Leriche A, Ota N, Bathols J, Macadam I, Scott JK, 2012. CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods Ecol. Evol.*, 3(1): 53–64.

Lai JF, Yang QH, 1991. Occurrence rules and control measures of citrus psylla in Southern Jiangxi Province. *Jiangxi Plant Protection*, 14(3): 67–74. [赖剑锋, 杨清华, 1991. 赣南柑桔木虱发生规律与防治研究. 江西植保, 14(3): 67–74.]

Li YN, Tang GY, Mao XL, 1992. Distribution of citrus psylla in Hunan Province. *Plant Quarantine*, 6(5): 326–328. [李一农, 唐庚元, 毛晓林, 1992. 柑桔木虱在湖南省的分布. 植物检疫, 6(5): 326–328.]

Lin YB, Yang JY, Wang RZ, Li YM, Xue HM, 2013. Occurrences and controls of harmful agricultural quarantined pests in Zhejiang Province. *Zhejiang Agricultural Science*, 54(11): 1384–1386. [林云彪, 杨金云, 王荣洲, 李艳敏, 薛惠明, 2013. 浙江省重大农业检疫性有害生物发生与防控. 浙江农业科学, 54(11): 1384–1386.]

Ma X, Wang ZZ, 2001. Occurrence rules and control measures of citrus psylla. *Zhejiang Citrus*, 18(1): 26–28. [马骁, 王祖泽, 2001. 柑橘木虱的发生消长规律及防治措施. 浙江柑桔, 18(1): 26–28.]

Sutherst RW, Maywald GF, 1985. A computerized system for matching climates in ecology. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 13(3): 281–299.

Wang ZZ, 2002. Distribution and transmission of citrus psylla in Guizhou Province. *Tillage and Cultivation*, 22(4): 62–63. [王祖泽, 2002. 柑橘黄龙病在贵州橘区的分布及蔓延. 耕作与栽培, 22(4): 62–63.]

Xie PH, Su CA, Lin ZG, 1988a. Study on cold tolerance of citrus psylla. *Plant Protection*, 27(1): 5–7. [谢佩华, 苏朝安, 林自国, 1988a. 柑桔木虱耐寒性研究. 植物保护, 27(1): 5–7.]

Xie PH, Su CA, Lin ZG, 1988b. Studies on development zero and effective cumulative temperature of *Diaphorina citri* KUW. *Acta Phytophylacica Sinica*, 15(2): 111–116. [谢佩华, 苏朝安, 林自国, 1988b. 柑桔木虱发育起点温度及有效积温的研究. 植物保护学报, 15(2): 111–116.]

Xie PH, Su CA, Lin ZG, 1989a. Studies on the biology of citrus psylla, *Diaphorina Citri* Kuwayama (Homoptera Psyllidae). *Acta Agriculturae Universitatis Zhejiangensis*, 15(2): 90–94. [谢佩华, 苏朝安, 林自国, 1989a. 柑桔木虱生物学研究. 浙江农业大学学报, 15(2): 90–94.]

Xie PH, Su CA, Lin ZG, 1989b. Investigation on the damage of citrus psylla in Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang*

- Agricultural Sciences*, 30(5): 231–234. [谢佩华, 苏朝安, 林自国, 1989b. 浙江省柑桔木虱发生为害情况的调查. 浙江农业科学, 30(5): 231–234.]
- Xie ZC, Li J, Shi Q, Xie WL, Yang JR, Chen YF, Zhong LS, 2009. Damage and epidemics of citrus Huanglongbing in Fujian Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 42(11): 3888–3897. [谢钟琛, 李健, 施清, 谢文龙, 杨建榕, 陈跃飞, 钟连生, 2009. 福建省柑橘黄龙病危害及其流行规律研究. 中国农业科学, 42(11): 3888–3897.]
- Xiong HL, Lin YB, Xiang Y, Liu H, Li XN, 2011. The north edge of the occurrence region of citrus Huanglongbing and citrus psylla in China. *Plant Quarantine*, 25(4): 79–80. [熊红利, 林云彪, 项宇, 刘慧, 李潇楠, 2011. 柑橘黄龙病与柑橘木虱在我国发生北界调查. 植物检疫, 25(4): 79–80.]
- Xu SF, Wang ZW, Zhang W, 1994. Occurrence rules and control measures of citrus psylla in Yunnan Province. *Zhejiang Citrus*, 11(1): 32–33. [徐素芬, 王仲文, 张伟, 1994. 云南柑桔木虱的发生规律及防治研究. 浙江柑桔, 11(1): 32–33.]
- Xu CP, Xia YH, Ke C, 1992. Effects of ecologic factors on dynamics of citrus psylla population. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 12(2): 60–64. [许长藩, 夏雨华, 柯冲, 1992. 若干生态因素对柑桔木虱种群消长的影响. 福建省农科院学报, 12(2): 60–64.]
- Yang YB, 1989. Effects of light, temperature and humidity on the development, reproduction and survival of citrus psylla. *Acta Ecologica Sinica*, 9(4): 348–354. [杨余兵, 1989. 光、温湿度对柑桔木虱发育、繁殖与存活的影响. 生态学报, 9(4): 348–354.]
- Zhang HY, Li HY, 2012. Pictures of Citrus Diseases And Pests And Key Control Techniques. Beijing: China Agriculture Press. 2–4. [张宏宇, 李红叶, 2012. 图说柑橘病虫害防治关键技术. 北京: 中国农业出版社. 2–4.]
- Zhou QM, Qiu ZS, Quan JC, 1989. Survey and cause analysis on north-moving of the distribution of citrus psylla in Guangxi Province. *China Citrus*, 20(4): 31. [周启明, 邱柱石, 全金城, 1989. 广西柑桔木虱分布北移情况调查及原因的初步分析. 中国柑桔, 20(4): 31.]