

云杉花墨天牛在中国的风险分析*

邹 娅^{1**} 葛雪贞² 周玉婷¹ 郭思维¹ 王 涛³ 宗世祥^{1***}

(1. 北京林业大学林业有害生物防治北京市重点实验室, 北京 100083; 2. Department of Integrative Biology, University of Guelph, Guelph N1G 2W1, Canada; 3. 北京市门头沟区林业工作站, 北京 102300)

摘 要 【目的】为研究云杉花墨天牛 *Monochamus saltuarius* Gebler 在我国扩散的风险性。【方法】本文利用 BIOMOD2 建模平台中的 3 个物种分布模型预测云杉花墨天牛适生区分布, 从云杉花墨天牛的分布情况、潜在的经济危害性、寄主植物的分布和经济重要性、传播扩散的可能性和风险管理的难度 5 个方面对云杉花墨天牛进行风险分析。【结果】云杉花墨天牛在我国的适生区面积广泛, 综合风险值 R 为 2.05, 属于高度危险的有害生物。【结论】云杉花墨天牛在我国高度危险, 扩散到其他地区的风险性很高, 需要制定检疫管理和除治措施, 以期降低在我国的风险。

关键词 云杉花墨天牛; 风险分析; 风险管理

Risk of *Monochamus saltuarius* spreading in China

ZOU Ya^{1**} GE Xue-Zhen² ZHOU Yu-Ting¹ GUO Si-Wei¹ WANG Tao³ ZONG Shi-Xiang^{1***}

(1. Key Laboratory of Beijing for the Control of Forest Pests, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Department of Integrative Biology, University of Guelph, Guelph N1G 2W1, Canada;

3. Mentougou Forestry Station, Beijing 102300, China)

Abstract 【Objectives】To estimate the risk of *Monochamus saltuarius* Gebler spreading in China. 【Methods】Three species distribution models within the BIOMOD2 modeling platform were used to predict the future distribution of *M. saltuarius*. In addition, we analyzed five potential consequences of the spread of this pest: its future distribution, its potential economic impact, the economic importance of its host plants, the possibility of transmission and the difficulty of control and management. 【Results】The synthetic risk index, R, is 2.05 indicating that *M. saltuarius* has the potential to become widely distributed. 【Conclusion】*M. saltuarius* has the potential to become a widespread, economically significant, pest in China. Quarantine management and removal measures need to be formulated to reduce the risk posed by this pest.

Key words *Monochamus saltuarius* Gebler; risk analysis; risk management

云杉花墨天牛 *Monochamus saltuarius* Gebler, 英文名 Sakhalin pine longicorn beetle, 天牛科 Cerambycidae, 墨天牛属 *Monochamus* (赵胜国等, 2021)。云杉花墨天牛是我国东北部松材线虫的重要传播媒介, 2016 年辽宁大连市沙河口区大顶山发生松材线虫病, 从 2017 年 5 月开始, 又在丹东市、抚顺市、本溪市等地先后发生松材线虫病 (于海英和吴昊, 2018)。国内首次在辽宁省确认云杉花墨天牛为松材线虫的有

效传播媒介, 首次确认红松 *Pinus koraiensis* (2016 年)、落叶松 *Larix* spp. (2018 年) 和樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* (2019 年) 为松材线虫在我国的自然感病寄主 (于海英和吴昊, 2018; 于海英等, 2019; 于海英等, 2020)。云杉花墨天牛是一种钻蛀性害虫, 成虫取食后在健康树上造成伤口, 造成树木长势衰弱, 树脂减少, 松材线虫可通过取食伤口侵入树体, 此外, 天牛在衰弱木上产卵时, 松材线虫可经产卵刻槽进入

*资助项目 Supported projects: 国家林业和草原局重大应急科技项目 (ZD202001-05)

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

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zongsx@126.com

收稿日期 Received: 2021-09-07; 接受日期 Accepted: 2022-12-23

树体(宁眺等, 2004)。松材线虫能引起松材线虫病, 也称松树萎蔫病或松树枯萎病(宁眺等, 2004)。大多数植株感病后于当年夏季全株枯死, 病害初期并无明显症状, 但树脂分泌减少, 之后树冠部分针叶变黄, 树脂停止分泌, 到感病后期植株萎蔫, 树冠由黄色变为褐色, 全株枯死(朱克恭, 1995)。根据 2022 年国家林业和草原局第 6 号公告(2022 年松材线虫病疫区)(<http://www.forestry.gov.cn/main/6206/20220406/151041215456755.html>), 我国发生的县级松材线虫病疫区为 742 个, 松材线虫病对我国的森林资源造成了毁灭性的破坏, 在自然条件下, 受害植株死亡速度极快, 易感的松树通常在受侵染后 2-3 月内死亡。云杉花墨天牛作为松材线虫传播媒介, 给亚洲东部地区松林造成巨大经济损失, 根据欧洲和地中海植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)报告, 俄罗斯和哈萨克斯坦分别于 2014 年和 2017 年将云杉花墨天牛列为 A1 名录, 欧亚经济联盟(Eurasian Economic Union, EAEU)将其列为 A2 名录(<https://gd.eppo.int/taxon/MONCSL/categorization>), 引起多个国家重点关注。

我国于 2016 年确定云杉花墨天牛为松材线虫传播媒介, 目前云杉花墨天牛仅分布于我国东北部地区, 未来气候变化可能使得云杉花墨天牛和松材线虫的分布区扩大, 加速松材线虫病的传播(于海英和吴昊, 2018; 叶建仁, 2019), 因此有必要对云杉花墨天牛进行风险分析。本文基于云杉花墨天牛的生物学和生态学特性, 分布情况, 用定性和定量两种方法对其进行风险评估, 为云杉花墨天牛在我国的风险管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据收集

1.1.1 物种分布数据 根据已发表文献和全球生物多样性网络数据库(<https://www.gbif.org/>, GBIF), 明确了云杉花墨天牛在全球的地理分布情况。云杉花墨天牛广泛分布于亚洲东部(日本, 韩国和中国)和欧洲(奥地利、德国、意大利、波兰、俄罗斯、立陶宛、瑞士和乌克兰)(Akbulut

and Stamps, 2012; Kwon *et al.*, 2018)。韩国于 2006 年首次确认该天牛在韩国中部为松材线虫传播媒介, 并危害新奇主红松(Shin, 2008; Kang *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2016; Cho *et al.*, 2018), 目前该天牛分布于韩国的中北部地区(Kwon *et al.*, 2006)。云杉花墨天牛在日本作为松材线虫的传播媒介分布于四国、本州等地(佐藤平典和关文彬, 1991)。在中国, 该天牛主要分布于黑龙江哈尔滨市, 吉林省吉林市舒兰市、永吉县、桦甸市、蛟河市, 通化市辉南县, 延边朝鲜族自治州安图县、敦化市, 长春市农安县, 白山市长白朝鲜族自治县、临江市, 辽宁抚顺市, 新疆, 甘肃, 内蒙古, 陕西等地(余恩裕等, 1992; 孟维洋和林蛟飞, 1997; 刘生冬等, 2016; 王志明等, 2018)。

1.1.2 气象数据 气象因子数据来自于 CHELSA 数据集(Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas, <https://chelsa-climate.org/>)。共下载 19 个生物气候变量(1981-2010), 采用方差膨胀因子(Variance inflation factor)检验气候变量之间的共线性(Naimi and Araújo, 2016), 最终选取昼夜温差月均值平均日温差(Mean diurnal range), 日均温差(Isothermality), 最湿季度平均温度(Mean temperature of wettest quarter), 最干季度平均温度(Mean temperature of driest quarter), 最湿月降水量(Precipitation of wettest month), 最干月降水量(Precipitation of driest month)用于构建云杉花墨天牛的物种分布模型。

1.2 模型的建立与评估

本研究利用云杉花墨天牛分布数据和环境变量, 采用 BIOMOD2 软件包进行不同的模型组合预测(Thuiller *et al.*, 2009)。本研究采用的物种分布模型算法包括广义线性模型(Generalized linear model, GLM)、广义相加模型(Generalized additive models)和推进式回归树模型(Generalized boosted model), 3 种算法均使用 BIOMOD2 中的默认设置运行。物种分布模型的建立需要存在数据和缺失数据, 由于无法获得准确的云杉花墨天牛的缺失数据, 我们随机生

成 20 组伪缺失数据, 每组伪缺失点数目为 1 000。此外, 本研究使用 blockCV 软件包的 K 折交叉验证 (K-fold cross validation) 中的环境块分割的方法, 将其中的 K-1 个子集作为训练集, 剩余的 1 个子集作为验证集, 此过程在 K 份数据上依次循环 (Valavi *et al.*, 2018)。在本研究中, 设置 K=5, 将云杉花墨天牛的分布数据根据环境相似性分成 5 份, 每个模型重复 20 次。本研究选择遗漏率 (Omission rate, OR) 评估模型, 表示验证集中分布点落入适生区外的百分比 (Guisan and Thuiller, 2005)。当 $OR \leq 0.1$ 时, 表示模型结果较为准确。在运算过程中, 选择 $OR \leq 0.1$ 的模型并获取多模型平均值构建云杉花墨天牛适生区。将适生指数划分 4 个适宜性等级: $0 \leq \text{适生指数} < 0.2$ 为非适生区, $0.2 \leq \text{适生指数} < 0.4$ 为低度适生区, $0.4 \leq \text{适生指数} < 0.6$ 为中度适生区, $0.6 \leq \text{适生指数} \leq 1$ 为高度适生区 (Qin *et al.*, 2017; Wani *et al.*, 2022)。以上模型构建和分析均在 R 平台完成 (R Core Team, 2022)。

1.3 云杉花墨天牛风险指标的确定

根据国家林业局 2016 年发布、制定的林业有害生物风险分析准则 (Guidelines for the pest risk analysis in forestry, PRA) (李娟等, 2016), 并结合云杉花墨天牛适生性分析结果, 对云杉花墨天牛进行风险分析。按照风险分析指标准则要求, 分析影响云杉花墨天牛危险性的相关因素, 从分布状况、潜在经济危害性、寄主植物的经济重要性、传播扩散的可能性和危险性管理难度五个方面对云杉花墨天牛在中国的风险进行量化和分析。并通过以下公式得出云杉花墨天牛综合风险值 R。国内分布情况: $P_1 = P_{11}$; 潜在经济危害性: $P_2 = 0.70 P_{21} + 0.20 P_{22} + 0.05 P_{23} + 0.05 P_{24}$; 寄主植物的经济重要性: $P_3 = \text{Max}(P_{31}, P_{32}, P_{33})$; 传播扩散的可能性: $P_4 = (P_{41} \times P_{42} \times P_{43} \times P_{44} \times P_{45})^{1/5}$; 危险性管理难度: $P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53})/3$; 风险性 R 值: $R = (P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5)^{1/5}$, 具体见表 1。

1.4 数据处理与分析

由专家根据林业有害生物风险分析准则对云杉花墨天牛各项风险指标进行赋分, 计算各项

指标层 (如 P_{11} 、 P_{21} 、 P_{22} ... P_{52} 、 P_{53}) 的平均值, 随后计算各项指标 (P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5) 的结果。最后对风险性 R 值进行计算和分析。

2 结果与分析

2.1 云杉花墨天牛风险性定性分析

2.1.1 分布状况 (P_1) 基于气候因子和云杉花墨天牛的分布数据, 利用物种分布模型预测了云杉花墨天牛在中国的适生区分布。预测结果显示, 除我国西部部分地区外, 其他地区都为云杉花墨天牛潜在适生区, 适生区分布范围广泛, 如图 1 所示。其中, 中度和高度适生区主要分布于我国的南部和东北部, 面积为 711.02 km^2 , 共占我国国土的面积 74.06%。

2.1.2 潜在经济危害性 (P_2) 云杉花墨天牛在中国、日本和韩国是松材线虫的重要传播媒介 (Shin *et al.*, 2011; 于海英和吴昊, 2018), 对当地的针叶林树种造成巨大经济损失 (Jeon *et al.*, 2015)。2020 年全国共有 18 个省 (自治区、直辖市) 726 个县级行政区发生松材线虫病疫情, 累计发生面积 180.92 万 hm^2 , 同比上升 62.40%, 造成病死松树 1 947.03 万株 (孙红等, 2021)。在自然界, 松材线虫的扩散主要发生在墨天牛属天牛取食和产卵期, 位于木质部的分散型 3 龄幼虫聚集到天牛蛹室周围, 随后蜕皮发育成 4 龄幼虫, 松材线虫的 4 龄扩散型幼虫通过外露在天牛体上的气门进入天牛体内并附着在新羽化天牛成虫的气管中, 通过天牛成虫在新健康松树上补充营养时咬食的伤口或者是在被害木上产卵时由成虫咬食的产卵刻槽进入松树体内, 从而完成借助天牛进行传播扩散的过程, 而天牛可在被松材线虫危害的衰弱木中产卵 (Linit, 1988; Zhao *et al.*, 2007; 郑雅楠等, 2014)。这种协同相互作用为墨天牛属天牛提供了产卵资源, 而引起其在危害区的种群动态发生变化 (Roques *et al.*, 2015)。除此之外, 有研究表明, 松材线虫还可以通过松墨天牛和云杉花墨天牛之间的交配行为进行传播 (Togashi *et al.*, 2019), 多种传播方式给我国松材线虫进一步传播扩散带来巨大风险。

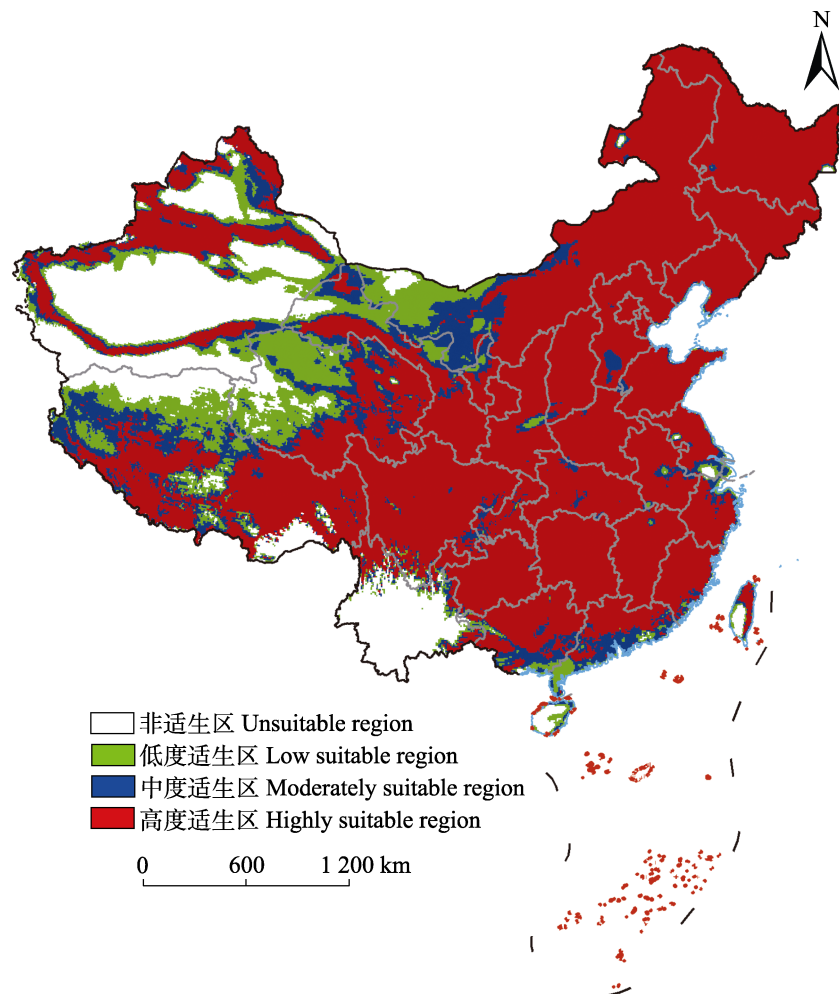


图 1 历史 (1981-2010) 气候条件下云杉花墨天牛在中国的潜在适生区

Fig. 1 The potential distribution of *Monochamus saltuarius* under historical climate conditions in China (1981-2010)

地图来源于中国自然资源部 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>) [审图号: GS 京 (2023) 0649 号]。

The map is from Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>).

据报道,云杉花墨天牛的北界到达俄罗斯西伯利亚地区 (Kulinich and Orlinskii, 1988), 分布范围广泛, 表明该天牛发育适宜温度范围较广。2006 年前云杉花墨天牛在韩国作为松材线虫的潜在传播媒介, 2006 年确认其在京畿道传播松材线虫病并危害红松 (Kang *et al.*, 2009)。此外, 云杉花墨天牛在韩国分布于夏季凉爽地区, 但近来发现该天牛分布于韩国半岛的南部地区 (Lee *et al.*, 2017)。2016 年之前, 松材线虫病基本上在我国南方最适宜病害发生的区域流行, 而 2016 年辽宁省发现的松材线虫情况表明, 在我国云杉花墨天牛已成为其新传播媒介, 传播媒介范围扩大 (于海英和吴昊, 2018; 叶建

仁, 2019), 导致松材线虫病在我国的分布范围增加。云杉花墨天牛在日本和韩国易受高温影响, 在一定程度上解释了其地理分布, 并表明了该天牛在气候变化的影响下向北移动的可能性 (Jung *et al.*, 2015)。在全球气候变化的大背景下, 云杉花墨天牛和松材线虫的适生区可能向北扩散, 导致松材线虫病的分布范围增加。云杉花墨天牛和松材线虫的寄主植物松树在我国分布范围广泛, 这为云杉花墨天牛的扩大危害提供了基本的寄主条件, 将对我国的松属植物造成巨大损失, 因此云杉花墨天牛在我国有较大的潜在经济危害性。

2.1.3 寄主植物的经济重要性 (P_3) 云杉花墨

天牛常发生在针叶树(云杉属、松属和落叶松属),包括红松 *P. koraiensis*, 赤松 *P. densiflora*, 黑松 *P. thunbergii*, 日本五针松 *P. parviflora*, 北美乔松 *P. strobus*, 油松 *P. tabuliformis*, 欧洲云杉 *Picea abies*、樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* 和落叶松 *Larix* spp.等。针叶树种虽然以北方针叶林为主,但在温带和寒温带均有种植(郭晓华等, 2008)。如红松为我国重要的珍贵树种,是国家储备林树种之一。成熟红松树高可达 40 m 以上,胸径 1-2 m,在我国主要分布于东北部(小兴安岭和长白山)(张宗艺, 2016)。红松为我国二级保护珍贵树种,用于木材制作,建筑材料,对促进国内木材行业发展,具有重要的经济和生态价值(张宗艺, 2016)。根据第九次中国森林资源报告(2014-2018),全国森林面积为 220 446 200 hm^2 ,我国针叶林覆盖面积为 7 311 200 hm^2 ,占我国森林面积的 33.17% (<http://forest.ckcest.cn/sd/si/zgslzy.html>),我国松树种植面积占全国森林面积 23%以上(冯益明等, 2009)。针叶林是重要的木材资源,世界工业用材总量的一半以上来自针叶林(郭晓华等, 2008)。松属树种不仅是我国重要的木材原料,对于涵养水源和促进森林的可持续发展也具有重要作用,此外,一些松树也是重要的古树名木资源,具有重要的经济和生态价值(许水威, 2020; 郑学良, 2020)。

2.1.4 传播扩散的可能性 (P_4) 云杉花墨天牛的扩散方式主要有自然飞行扩散和人类活动介导的扩散。云杉花墨天牛成虫在野外以爬行为主,较少飞行。对产卵期雌成虫进行室内吊飞发现,雌成虫最长连续飞行距离为 1.3 km,而未交配的雄性和雌性云杉花墨天牛成虫在其整个寿命中飞行可超过 5 km (张建军等, 2007; Kwon *et al.*, 2018)。而该天牛长距离的扩散往往与人类活动有关 (Zhao *et al.*, 2008)。随着我国经济的发展,贸易活动愈加频繁,带有云杉花墨天牛的林木(包括原木,木材和木质包装材料)在车船等运输工具的转运下可使云杉花墨天牛进行远距离扩散,这种跳跃式的扩散方式不受自然屏障的限制,从而扩大云杉花墨天牛的扩散范围 (Fu *et al.*, 2010)。云杉花墨天牛寄主松树在东

北地区分布广泛,为云杉花墨天牛的扩散提供了寄主条件。

2.1.5 风险管理难度 (P_5) 据报道,云杉花墨天牛的季节性羽化期因寄主不同存在差异,云杉花墨天牛的成虫孵化期开始时间在红松中比在赤松中早,而羽化结束日期晚 (Han *et al.*, 2007)。云杉花墨天牛在我国吉林一年一代,在被害木坑道中以幼虫滞育越冬,成虫出现期在 6-8 月份,生活隐蔽 (孟维洋和林蛟飞, 1997; 王志明等, 2007, 2018),为云杉花墨天牛防治带来了治理难度。云杉花墨天牛在日本和韩国也是松材线虫的传播媒介,随着全球经济发展,木材及其制品的商业往来愈加频繁,云杉花墨天牛随着松木及其制品、包装材料等人类活动传入的可能性增大,加大了云杉花墨天牛的防治和检疫管理难度 (Fu *et al.*, 2010)。

2.2 云杉花墨天牛风险性的定量分析

根据云杉花墨天牛的分布情况、潜在的经济危害性、寄主植物的分布和经济重要性、传播扩散的可能性和风险管理的难度评判指标,本研究根据 4 位专家对各项评判指标赋值结果,求取各项指标赋分的平均值作为各项指标的赋分值(表 1),综合评估云杉花墨天牛在我国的风险程度。

根据以下有害生物风险性定量分析计算公式,分别进行各项评判指标 (P) 和风险 R 值的计算:

$$P_1 = P_{11} = 1.68,$$

$$P_2 = (0.70 \times P_{21} + 0.20 \times P_{22} + 0.05 \times P_{23} + 0.05 \times P_{24}) = 0.70 \times 2.90 + 0.2 \times 2.23 + 0.05 \times 0.59 + 0.05 \times 1.00 = 2.56,$$

$$P_3 = \text{Max} (P_{31}, P_{32}, P_{33}) = 2.63,$$

$$P_4 = (P_{41} \times P_{42} \times P_{43} \times P_{44} \times P_{45})^{1/5} = (2.45 \times 2.63 \times 2.23 \times 2.60 \times 0.40)^{1/5} = 1.72,$$

$$P_5 = (P_{51} + P_{52} + P_{53}) / 3 = (1.80 + 1.88 + 1.90) / 3 = 1.86。$$

云杉花墨天牛在我国的风险性 R 值:

$$R = (P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5)^{1/5} = (1.68 \times 2.56 \times 2.63 \times 1.72 \times 1.86)^{1/5} = 2.05。$$

我国林业有害生物的危险程度一般分为 4 级: $2.5 \leq R < 3.0$ 为特别危险, $2.0 \leq R < 2.5$ 为高度危险, $1.5 \leq R < 2.0$ 为中度危险, $0 \leq R < 1.5$ 为低度危险。云杉花墨天牛入侵及危害的风险性定性和定量

Table 1 Scoring of risk evaluation index of *Monochamus saltuarius*

序号 No.	评判指标 (P _i) Evaluation indexes	评判标准 Evaluation criteria	赋分区间 Assignment interval	赋分值 Assigned value
1	国内分布情况 P ₁₁ Domestic distribution P ₁₁	占其适生面积的百分率<5% The percentage of its potential suitable area<5% 5%≤占其适生面积的百分率<20% 5%≤The percentage of its potential suitable area<20% 20%≤占其适生面积的百分率<50% 20%≤The percentage of its potential suitable area<50% 占其适生面积的百分率≥50% The percentage of its potential suitable area≥50%	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00 0	1.68 2.90
2.1	潜在经济或生态危害性 P ₂₁ (权重值 0.70) Potential economic or ecological hazard P ₂₁ (weighted value 0.70)	如传入可造成≥20%的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失 If introduced, it can cause≥20% tree mortality or yield loss or ecological loss equivalent to the same economic value 20%>如传入可造成≥5%的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失 20%>If introduced, it can cause≥5% tree mortality or yield loss or ecological loss equivalent to the same economic value 5%>如传入可造成≥1%的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失 5%>If introduced, it can cause≥1% tree mortality or yield loss or ecological loss equivalent to the same economic value 如传入可造成<1%的树木死亡率或产量损失或相当于同等经济价值的生态损失 If introduction, it can cause<1% tree mortality or yield loss or ecological loss equivalent to the same economic value	1.01-2.00 0.01-1.00 0	2.23
2.2	是否为其它有害生物传播媒介 P ₂₂ (权重值 0.20) Whether it is a vector of other pest P ₂₂ (weighted value 0.20)	可携带 1 种或 1 种以上有害生物 It can carry 1 or more kinds of pest species 否 No	2.01-3.00 2.00	2.23
2.3	国外重视程度 P ₂₃ (权重值 0.05) Overseas attention level P ₂₃ (weighted value 0.05)	≥20 个国家将其列入禁止进境有害生物名单 ≥20 countries have included it in the list of pest prohibited from entering the country 10-19 个国家将其列入禁止进境有害生物名单 10-19 countries have included it in the list of pest prohibited from entering the country 0-9 个国家将其列入禁止进境有害生物名单 0-9 countries have included it in the list of pest prohibited from entering the country	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	0.59

续表 1 (Table 1 continued)

序号 No.	评判指标 (P _i) Evaluation indexes	评判标准 Evaluation criteria	赋分区间 Assignment interval	赋分值 Assigned value
2.4	外检重视程度 P ₂₄ (权重值 0.05) External inspection emphasis P ₂₄ (weighted value 0.05)	列为进境植物检疫危险性病、虫、杂草一、二类名录 Listed as the first and second categories of entry plant quarantine dangerous diseases, insects, and weeds 列为进境植物检疫潜在危险性病、虫、杂草名录 Listed as potentially dangerous diseases, insects, and weeds for entry plant quarantine 未列入 Not listed	3.00	1.00
3.1	危害对象的种类 P ₃₁ The kinds of hazardous objects	≥10 种 ≥10 kinds 5-9 种 5-9 kinds 1-4 种 1-4 kinds 无 None	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00 0	2.40 2.40 1.00
3.2	危害对象的分布范围或生态效益 P ₃₂ Distribution range or ecological benefits of hazardous objects P ₃₂	分布范围广或产量大或生态效益大 Wide distribution or large yield or high ecological benefits 分布范围中等或产量中等或“生态效益”一般 Medium distribution or medium yield or average ecological benefits 分布范围小或产量有限或生态效益差 Small distribution range or limited yield or poor ecological benefits	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	2.55 2.63 2.63
3.3	危害对象的特殊经济价值 P ₃₃ The special economic value of the hazardous objects P ₃₃	经济价值高, 社会影响大 High economic value and great social impacts 经济价值一般, 社会影响一般 Average economic value, average social impacts 经济价值低, 社会影响小 Low economic value, small social impacts	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	2.63 2.45 2.45
4.1	有害生物被截获的频率 P ₄₁ Frequency of interception of pest P ₄₁	经常被截获 Frequently been intercepted 偶尔被截获 Occasionally been intercepted 从未被截获 Never been intercepted	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	2.45 2.63 2.63
4.2	运输过程中有害生物存活率 P ₄₂ Pest survival rate during transport P ₄₂	存活率 ≥40% Survival rate ≥40% 10% ≤ 存活率 <40% 10% ≤ Survival rate <40% 1% ≤ 存活率 <10% 1% ≤ Survival rate <10% 存活率 <1% Survival rate <1%	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00 0	2.63 2.63 0

续表 1 (Table 1 continued)

序号 No.	评判指标 (P _i) Evaluation indexes	评判标准 Evaluation criteria	赋分区间 Assignment interval	赋分值 Assigned value
4.3	传播方式 (介体) P ₄₃ Methods of transmission (mediator) P ₄₃	主要为人为传播 Mainly man-made 通过气流或水流传播 Spread by air or water 上传或活动能力很弱或有限的个体传播 Soil or vector transmission with very weak or limited mobility	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	2.23
4.4	国内适生范围 P ₄₄ Domestic suitable range P ₄₄	≥ 50%的地区能够适生 ≥ 50% of the area can be suitable for survival 25% ≤ 地区能够适生 < 50% 25% ≤ Area suitable for survival < 50% 1% ≤ 地区能够适生 < 25% 1% ≤ Area suitable for survival < 25% ≥ 50%的国家有分布 National distribution ≥ 50% 25% ≤ 国家有分布 < 50% 25% ≤ National distribution < 50% 0 ≤ 国家有分布 < 25% 0 ≤ National distribution < 25%	2.01-3.00 1.01-2.00 1.01-2.00 2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00	2.60 0.40
4.5	国外分布状况 P ₄₅ Foreign distribution P ₄₅	当场鉴定可靠性低、费时, 需经专家鉴定 On-the-spot identification is low in reliability and time-consuming, and expert identification is required	2.01-3.00	1.80
5.1	检验检疫难度 P ₅₁ Inspection and quarantine difficulty P ₅₁	当场鉴定可靠性一般, 需经专门培训的技术人员鉴定 The reliability of on-the-spot identification is average, and it needs to be appraised by specially trained technicians 当场鉴定非常可靠, 简便快捷, 一般技术人员可鉴定 On-the-spot identification is very reliable, simple and fast, and can be identified by general technicians	1.01-2.00 0.01-1.00	
5.2	除害处理难度 P ₅₂ Pest control difficulty P ₅₂	常规方法不能杀死有害生物 Common methods cannot kill pests 常规方法的除害效率 < 50% Common pest removal efficiency < 50% 50% ≤ 常规方法的除害效率 < 100% 50% ≤ Common pest removal efficiency < 100% 常规方法的除害效率为 100% Common pest removal efficiency is 100%	2.01-3.00 1.01-2.00 0.01-1.00 0	1.88
5.3	根除难度 P ₅₃ Difficulty of eradication P ₅₃	效果差, 成本高, 难度大 Ineffective, high cost, difficult 效果好, 成本低, 简便易行 Good effect, low cost, easy to implement 介于二者之间 Fall in between	2.01-3.00 0 0.01-2.00	1.90

分析结果表明, 其风险值 R 为 2.05, 在我国属于高度危险的林业有害生物。

2.3 风险管理建议

云杉花墨天牛在我国为高度危险的林业有害生物, 其可传播松材线虫, 是松材线虫重要的传播媒介, 因此要加强对云杉花墨天牛的管理, 防止该天牛进一步传播蔓延。

2.3.1 限制从国外进口和从国内云杉花墨天牛发生区调运松属植物。首先, 应对疫区及其相邻地区加强虫害检测, 并定期采取防治工作。其次, 应对寄主植物加强检验检疫, 来自疫区的松属植物材料必须进行销毁或除害处理, 来自非疫区的松属植物也应进行严格检查, 特别是寄主植物的主干。如果在非疫区的松属植物发现云杉花墨天牛, 应立即销毁, 且将材料来源地划为疫区, 禁止从该地区调运此植物。

2.3.2 加强发生区检疫把关与疫情除治。对于云杉花墨天牛已发生区要加强疫情除治, 以降低虫口密度和其进一步扩散的风险。

2.3.3 加强对云杉花墨天牛在生物学、生态学、防治方法和检疫措施等方面的研究,为云杉花墨天牛的管理防治提供理论依据。

3 讨论

20 世纪初墨天牛作为松材线虫传播媒介引起广泛关注。云杉花墨天牛在韩国和日本传播松材线虫, 给韩国和日本的松林造成严重损失。2016 年前, 在我国云杉花墨天牛仅被认为是次期性害虫, 2016 年后, 在辽宁省首次确认云杉花墨天牛为松材线虫的有效传播媒介, 给我国东北林业带来严重危害。云杉花墨天牛是我国东北地区松材线虫重要传播媒介, 因此有必要对云杉花墨天牛的传入和扩散进行风险分析。本文利用相关风险性分析方法, 分布状况、潜在经济危害性、寄主植物的经济重要性、传播扩散的可能性和危险性管理难度五个方面对云杉花墨天牛进行定性和定量风险分析, 其综合风险值 R 为 2.05, 表明该虫具有高风险性。

云杉花墨天牛目前仅分布于我国东北部, 但

是该虫在我国的适生区范围广泛, 绝大部分地区为其适生区。该虫在我国南方适生指数高, 适生范围广, 而我国南方地方也是松材线虫的分布区, 因此该虫传入其他地区定殖并建立种群的风险很高, 传播松材线虫的风险也会增高, 需加强对该虫的检验检疫。

据文献记载, 云杉花墨天牛分布于我国的新疆, 陕西, 甘肃, 内蒙古(余恩裕等, 1992), 但未有其他更详细的分布记录, 四省(自治区)面积占我国陆地面积的 36.19%, 因此专家在对其进行国内分布情况 P_1 进行赋值时, 并未将新疆, 陕西, 甘肃, 内蒙古的全省(自治区)面积算为其分布面积, 否则会对其在我国的风险造成过低估计。

致谢:感谢北京林业大学林学院石娟教授、温俊宝教授、西华师范大学生命科学学院何善勇老师和中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所姚艳霞副研究员为云杉花墨天牛提供风险赋值及建议。

参考文献 (References)

- Akbulut S, Stamps WT, 2012. Insect vectors of the pinewood nematode: A review of the biology and ecology of *Monochamus* species. *Forest Pathology*, 42(2): 89–99.
- Cho WS, Koo HN, Yun SH, Lee JS, Jeong DH, Kang WJ, Lee SJ, Kim HK, Han JH, Kwon YD, Kwon GH, Kim CH, Kim GH, 2018. Electron beam-induced sterility and inhibition of ovarian development in the sakhalin pine longicorn, *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Economic Entomology*, 111(2): 725–731.
- Feng YM, Zhang HJ, Lv Q, Liang J, Zhang XY, 2009. Quantification of suitability distribution region of *Bursaphelenchus xylophilus* in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(2): 65–71. [冯益明, 张海军, 吕全, 梁军, 张星耀, 2009. 松材线虫病在我国适生性分布的定量估计. 林业科学, 45(2): 65–71.]
- Fu DY, Hu SJ, Ye H, Haack RA, Zhou PY, 2010. Pine wilt disease in Yunnan, China: Evidence of non-local pine sawyer *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) populations revealed by mitochondrial DNA. *Insect Science*, 17(5): 439–447.
- Guisan A, Thuiller W, 2005. Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9): 993–1009.
- Guo XH, Jiang PW, Chang EZ, 2008. Research on the loss

- evaluation index system of *Bursaphelenchus xylophilus* nickle invading China. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2008(5): 5–8. [郭晓华, 江丕文, 昌恩梓, 孙娜, 2008. 松材线虫入侵损失评估指标体系研究. 辽宁林业科技, 2008(5): 5–8.]
- Han JH, Kim HK, Kang WJ, Kim GH, 2016. Feeding and oviposition preference of the Sakhalin pine sawyer *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) for various tree species. *Entomological Research*, 46(6): 331–336.
- Han JH, Yoon C, Shin SC, Kim GH, 2007. Seasonal occurrence and morphological measurements of pine sawyer, *Monochamus saltuarius* adults (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 10(1): 63–67.
- Jeon JH, Byun BK, Cho YB, Woo SY, Kim CH, Lim J, Park DS, 2015. Intraspecific diversity of *Monochamus saltuarius* (Gebler) based on DNA barcode analysis. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 8(4): 305–308.
- Jung CS, Koh SH, Nam Y, Ahn JJ, Lee CY, Choi WI, 2015. A model for predicting spring emergence of *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) from Korean white pine, *Pinus koraiensis*. *Journal of Economic Entomology*, 108(4): 1830–1836.
- Kang SH, Kim MK, Yang JO, Yoon C, Goh SH, Shin SC, Kim CS, Kim GH, 2009. Attraction effects to various conditions of *Pinus koraiensis* against pine sawyer, *Monochamus saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 52(5): 456–465.
- Kulinich OA, Orlinskii PD, 1998. Distribution of conifer beetles (Scolytidae, Curculionidae, Cerambycidae) and wood nematodes (*Bursaphelenchus* spp.) in European and Asian Russia. *Eppo Bulletin*, 28(1/2): 39–52.
- Kwon HJ, Jung JK, Jung C, Han H, Koh SH, 2018. Dispersal capacity of *Monochamus saltuarius* on flight mills. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(5): 420–427.
- Kwon TS, Lim JH, Sim SJ, Kwon YD, Son SK, Lee KY, Park YS, 2006. Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 95(5): 543–550.
- Lee HR, Lee SC, Lee DH, Choi WS, Jung CS, Jeon JH, Kim JE, Park IK, 2017. Identification of the aggregation-sex pheromone produced by male *Monochamus saltuarius*, a major insect vector of the pine wood nematode. *Journal of Chemical Ecology*, 43(7): 670–678.
- Li J, Zhao WX, Song YS, Cui YS, Zhao YX, Cui ZQ, Yao YX, Zhou MJ, Yan H, Cheng XC, Li S. 2016. LY/T 2588-2016. Beijing: National Forestry Administration. [李娟, 赵文霞, 宋玉双, 崔永三, 赵宇翔, 崔振强, 姚艳霞, 周茂建, 阎合, 程相称, 李硕. 2016. LY/T 2588-2016. 北京: 国家林业局.]
- Linit MJ, 1988. Nematode-vector relationships in the pine wilt disease system. *Journal of Nematology*, 20(2): 227.
- Liu SD, Meng QF, Gao WT, Li Y, 2016. Cerambycidae species diversity and temporal dynamics of adults emergence in broad-leaved Korean pine forest of southern Zhang Guangcai mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(2): 74–81. [刘生冬, 孟庆繁, 高文韬, 李燕, 2016. 张广才岭南段阔叶红松林天牛科昆虫物种多样性与成虫出现期时间动态. 林业科学, 52(2): 74–81.]
- Meng WY, Lin JF, 1997. Preliminary report on the relationship between the occurrence of *Monochamus saltuarius* and environmental conditions. *Jilin Forestry Science & Technology*, 1997(4): 10–12. [孟维洋, 林蛟飞, 1997. 云杉花墨天牛虫害发生与环境条件关系的研究初报. 吉林林业科技, 1997(4): 10–12.]
- Naimi B, Araújo MB, 2016. sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39(4): 368–375.
- Ning T, Fang YL, Tong J, Sun JH, 2004. Advances in research on *Bursaphelenchus xylophilus* and its key vector *Monochamus* spp. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(2): 97–104. [宁眺, 方宇凌, 汤坚, 孙江华, 2004. 松材线虫及其关键传媒墨天牛的研究进展. 昆虫知识, 41(2): 97–104.]
- Qin A, Liu B, Guo Q, Bussmann RW, Ma F, Jian Z, Xu G, Pei S, 2017. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 10: 139–146.
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Roques A, Zhao L, Sun J, Robinet C, 2015. Pine Wood Nematode, Pine Wilt Disease, Vector Beetle and Pine Tree: How a Multiplayer System Could Reply to Climate Change. Wallingford UK: CABI. 220–234.
- Sato H, Guan WB, 1991. Test on the ability of *Monochamus saltuarius* to spread pine wood nematode. *Foreign Forestry*, 1991(1): 22–23. [佐藤平典, 关文彬, 1991. 云杉墨天牛传播松材线虫能力的试验. 国外林业, 1991(1): 22–23.]
- Shin SC, 2008. Pine wilt disease in Korea// Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y (eds.). Pine Wilt Disease. Tokyo: Springer. 26–32.
- Shin TY, Choi JB, Bae SM, Koo HN, Roh JY, Je YH, Jin BR, Woo SD, 2011. Characterization of *Beauveria bassiana* MsW1 isolated from pine sawyers, *Monochamus saltuarius*. *Journal of Basic Microbiology*, 51(5): 531–539.
- Sun H, Zhou YT, Li XD, Zhang YZ, Wang Y, 2021. The occurrence of major forestry pests in China in 2020 and the forecast of their

- occurrence in 2021. *Forest Pest and Disease*, 40(2): 45–48. [孙红, 周艳涛, 李晓冬, 张玉洲, 王越, 2021. 2020 年全国主要林业有害生物发生情况及 2021 年发生趋势预测. 中国森林病虫, 40(2): 45–48.]
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araújo MB, 2009. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32(3): 369–373.
- Togashi K, Akbulut S, Matsunaga K, Sugimoto H, Yanagisawa K, 2019. Transmission of *Bursaphelenchus xylophilus* between *Monochamus alternatus* and *Monochamus saltuarius* through interspecific mating behaviour. *Journal of Applied Entomology*, 143(4): 483–486.
- Valavi R, Elith J, Lahoz-Monfort JJ, Guillera-Aroita G, 2018 blockCV: An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 10: 225–232.
- Wang ZM, Cao YZ, Zhang J, 2018. Potential beetles as possible vectors of pine wilt nematode (PWN) *Bursaphelenchus xylophilus* in Jilin province. *Jilin Forestry Science & Technology*, 47(3): 25–28. [王志明, 曹玉忠, 张健, 2018. 吉林省潜在松材线虫病媒介甲虫. 吉林林业科技, 47(3): 25–28.]
- Wang ZM, Pi ZQ, Hou B, 2007. Account of the genus *Monochamus* Guerin-Meneville in Jilin province. *Journal of Jilin Agricultural University*, 29(1): 41–43. [王志明, 皮忠庆, 侯彬, 2007. 吉林省墨天牛属昆虫种类记述. 吉林农业大学学报, 29(1): 41–43.]
- Wani IA, Khan S, Verma S, Al-Misned FA, Shafik HM, El-Serehy HA, 2022. Predicting habitat suitability and niche dynamics of *Dactylorhiza hatagirea* and *Rheum webbianum* in the Himalaya under projected climate change. *Scientific Reports*, 12(1): 1–8.
- Xu SW, 2020. Investigation and distribution status analysis of ancient and famous tree resources in Xinbin county. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2020(6): 59–60, 63. [许水威, 2020. 新宾县古树名木资源调查及分布现状分析. 辽宁林业科技, 2020(6): 59–60, 63.]
- Ye JR, 2019. Epidemic status of pine wilt disease in China and its prevention and control techniques and counter measures. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(9): 1–10. [叶建仁, 2019. 松材线虫病在中国的流行现状, 防治技术与对策分析. 林业科学, 55(9): 1–10.]
- Yu EY, Zhang ZQ, Meng WY, 1992. *Monochamus saltuarius* damaging *Pinus banksiana*. *Forest Protection*, 18(1): 51. [余恩裕, 章志强, 孟维洋, 1992. 云杉花墨天牛为害班克松. 植物保护, 18(1): 51.]
- Yu HY, Wu H, 2018. New host plants and new vector insects for pine wood nematodes discovered in Liaoning. *Forest Pest and Disease*, 37(5): 61. [于海英, 吴昊, 2018. 辽宁发现松材线虫病新寄主植物和新传播媒介昆虫. 中国森林病虫, 37(5): 61.]
- Yu HY, Wu H, Huang RF, Wang J, Zhang RX, Song YS, 2020. Separation and identification of *Bursaphelenchus xylophilus* from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Fushun city. *Forest Pest and Disease*, 39(2): 6–10. [于海英, 吴昊, 黄瑞芬, 王蛟, 张睿轩, 宋玉双, 2020. 辽宁抚顺樟子松松材线虫分离与鉴定. 中国森林病虫, 39(2): 6–10.]
- Yu HY, Wu H, Zhang XD, Wang LM, Zhang XF, Song YS, 2019. Preliminary study on *Larix* spp. infected by *Bursaphelenchus xylophilus* in natural environment. *Forest Pest and Disease*, 38(4): 7–10. [于海英, 吴昊, 张旭东, 王立明, 张歆逢, 宋玉双, 2019. 落叶松自然条件下感染松材线虫初报. 中国森林病虫, 38(4): 7–10.]
- Zhang JJ, Zhang RZ, Chen JY, 2007. Species and their dispersal ability of *Monochamus* as vectors to transmit *Bursaphelenchus xylophilus*. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 24(3): 350–356. [张建军, 张润志, 陈京元, 2007. 松材线虫媒介昆虫种类及其扩散能力. 浙江林学院学报, 24(3): 350–356.]
- Zhang ZY, 2016. Study on tree species suitability of national reserve forest based on data mining. Master thesis. Beijing: Beijing Forestry University. [张宗艺, 2016. 基于数据挖掘的储备林树种适宜性研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y, 2008. Pine Wilt Disease. Tokyo, Japan: Springer. 144–161.
- Zhao LL, Wei W, Kang L, Sun JH, 2007. Chemotaxis of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, to volatiles associated with host pine, *Pinus massoniana*, and its vector *Monochamus alternatus*. *Journal of Chemical Ecology*, 33(6): 1207–1216.
- Zhao SG, Chen GF, Qu HC, Xu SL, Lu YG, Wang J, 2021. Advances in studies on biological and ecological characteristics of *Monochamus saltuarius*. *Forest Pest and Disease*, 40(5): 37–43. [赵胜国, 陈国发, 曲宏城, 许胜利, 鲁英华, 王蛟, 2021. 云杉花墨天牛生物生态学特性研究进展. 中国森林病虫, 40(5): 37–43.]
- Zheng XL, 2020. The influence of water conservation forest structure on the function and forest health assessment in Eastern Liaoning. Doctor dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [郑学良, 2020. 辽东水源涵养林结构对涵养水源功能影响及健康评价. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Zheng YN, Yang ZQ, Wang XY, 2014. Mechanism of chemical ecology of *Bursaphelenchus xylophilus* vectored by *Monochamus alternatus*. *Plant Protection*, 40(1): 12–15. [郑雅楠, 杨忠岐, 王小艺, 2014. 松墨天牛携带松材线虫传播的化学生态学机制. 植物保护, 40(1): 12–15.]
- Zhu KG, 1995. Studies on Pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*: A review. *World Forestry Research*, 8(4): 28–33. [朱克恭, 1995. 松材线虫病研究综述. 世界林业研究, 8(4): 28–33.]