中国科学: 生命科学 2024 年 第 54 卷 第 10 期: 1744 ~ 1751
SCIENTIA SINICA Vitae lifecn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
科学史话 中国知名大学及研究院所专栏 中国热带农业科学院专辑

橡胶树改变世界的150年

高静[1], 程汉[1,2*]

1. 中国热带农业科学院, 橡胶研究所热带作物生物育种全国重点实验室, 海口 571101;
2. 中国热带农业科学院, 三亚研究院, 三亚 572024
* 联系人, E-mail: forcheng@gmail.com

收稿日期: 2024-07-09; 接受日期: 2024-08-09; 网络版发表日期: 2024-10-12
海南省科技人才创新项目(批准号: KJRC2023C18)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(批准号: 1630022023010, 1630022022004)资助

巴西橡胶树(*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.)原产于南美洲亚马孙河流域, 是大戟科(Euphorbiaceae)橡胶树属(*Hevea*)高大乔木, 又名帕拉橡胶树(Para rubber tree)、三叶橡胶树(Hevea tree), 俗称橡胶树. 印第安人称橡胶树为cahuchu或caoutchou, 意为"流泪之树", 指割胶采胶时, 胶乳(乳汁)像眼泪般流淌下来[1]. 欧洲除英语外, 带有橡胶含义的西班牙语的caucho、法语的caoutchouc和德语的kautschuk均来自caoutchou一词[1~3]. 在已知的产胶植物中, 橡胶树的产胶量最高, 品质最好. 目前世界各国使用的天然橡胶绝大部分来自橡胶树, 其产量占天然橡胶产量的99%以上[4].

天然橡胶是重要工业原料和战略物资, 其开发与利用有着悠久的历史[5]. 早在三千多年前, 印第安人已开始制作并使用原始橡胶制品. 1615年西班牙探险家托尔奎马达(Juan de Torquemada)出版的《印第安人的君主国》(*Monarquia Indiana*)中, 详细地记述了印第安人割胶, 收集胶乳, 制作粗糙瓶子、雨靴等过程[6,7]. 18世纪上半叶, 法国学者康达敏(de la Condamine)出版的《南美洲内地旅行记略》和弗朗索瓦•弗雷诺(F. Fresneau)关于橡胶的报告引起欧洲人对橡胶的关注和重视, 橡胶慢慢走进他们的生活[8,9]. 1819年, 苏格兰化学家马金托希(C. Macintosh)将橡胶溶解于焦油苯后涂在布上, 制成防水雨布和雨衣, 风靡一时[5].

橡胶硫化法的发明是橡胶工业的重要转折点. 1839年美国人查尔斯·固特异(C. Goodyear)发明了硫化法, 英国汉考克(T. Hancock)对硫化法进一步优化, 改进了生胶(原胶)高温变软发黏、低温变硬变脆等缺点, 保留了其弹性好、防水密封、耐磨、柔软等特性, 并增强了耐热和抗腐蚀等优点, 在蒸汽机密封垫圈等方面得到很好的应用[10]. 19世纪末20世纪初的第二次工业革命中, 橡胶在各类电线、电缆、电话线、电报线的绝缘层, 各类化工装备、设备、电器上的用胶零部件, 以及传送带、转动皮带等方面的应用层出不穷, 橡胶从此跻身四大工业原料之列[10~12]. 1888年英国人邓禄普(J. B. Dunlop)发明了充气轮胎, 应用于自行车和汽车轮胎[11]. 第二次工业革命和汽车工业的发展大大地刺激和拉动了橡胶种植、加工和制造业, 使橡胶成为工业生产和日常生活不可或缺的工业材料[11].

随后第一次、第二次世界大战的爆发, 更使橡胶成为不可或缺的战略资源. 例如, 战争中使用的谢尔曼坦克, 每辆大约需要0.5吨天然橡胶; 每架重型轰炸机大约需要1吨天然橡胶; 每艘战舰天然橡胶使用量达到72.6吨, 橡胶零部件达2万多个. 1940年, 美国成立橡胶储备公司(Rubber Reserve Company)用以囤积来自远东的天然橡胶, 当年橡胶进口就从不到50万吨猛增

引用格式: 高静, 程汉. 橡胶树改变世界的150年. 中国科学: 生命科学, 2024, 54: 1744–1751
Gao J, Cheng H. The rubber tree that changed the world in 150 years (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2024, 54: 1744–1751, doi: 10.1360/SSV-2024-0225

© 2024 《中国科学》杂志社

至约82万吨, 1941年又增加16%, 达95万吨[13]. 美国橡胶调查委员会(Rubber Survery Committee)的报告称: “在所有关键性战略性物资中, 橡胶是对我们国家的安全和盟国事业成功构成最大威胁的物资. 如果不能迅速确保大量新的橡胶供应, 我们的战争努力和国内经济都会崩溃”[13]. 日本发动太平洋战争的目的之一, 也是打破英、荷、美、法等国对东南亚产胶区的控制, 获取更多的天然橡胶资源. 珍珠港事件后, 日本掌握了世界上90%以上的天然橡胶供应[1].

近年来, 随着石油化工技术的进展, 人们已经能够合成高分子量的聚异戊二烯(合成橡胶), 并在部分领域代替天然橡胶使用. 但由于天然橡胶中含有蛋白质、磷脂和金属离子等非胶组分, 能与聚异戊二烯的α′和ω′端基形成氢键、磷酸酯键、范德华力甚至离子键等, 从而形成较为复杂的网格状结构[5]. 这种结构赋予天然橡胶高延展、高耐磨、抗撕裂以及拉伸结晶等性能, 因此在诸多领域天然橡胶仍然具有不可替代性. 据不完全统计, 目前全球有七万多种工业产品需要使用天然橡胶[5].

1　橡胶树的引种栽培

1900年以前, 天然橡胶几乎全部来自野生采集[14]. 但从19世纪下半叶起, 随着橡胶制品业的飞速发展, 人类对橡胶的需求急剧增加, 采集野生植物橡胶已经不能满足市场需求. 1873年, 英国皇家植物园(邱园, Kew)主管约瑟夫·虎克(J. Hooker)派人搜集橡胶树种子和幼苗, 尝试在东南亚种植. 但从1873~1876的四年间, 送往印度的多批次幼苗均未能存活[15]. 1876年, 罗伯特·克洛斯(R. Cross)从巴拿马、巴西等地收集到1000余棵橡胶树送往锡兰(今斯里兰卡), 绝大多数也未能存活[16]. 同年, 亨利·魏克汉(H. Wickham)从巴西塔帕若斯(Tapajós)河和马代拉(Madeira)河交汇处采集70, 000余粒橡胶树种子, 送往邱园后发芽2899棵, 其中1900余株被分批次运往锡兰的植物园. 同年送往爪哇和新加坡的18株和50株橡胶树却陆续死亡. 1877年, 邱园又将22株送往新加坡, 时任新加坡植物园园长的默顿(J. H. Murton)将其栽培成活[17]. 同年, 默顿将其中的九株带到马来西亚的霹雳河谷种植, 在这里橡胶树生长良好, 并于1880年开花. 到1884年, 这九株母树的种子已在马来西亚繁殖了大约200株橡胶树[16]. 大量繁殖后的种子陆续被送往印度尼西亚、爪哇等地, 成为东亚地区栽培橡胶树的主要遗传来源[16](其后代被称为魏克汉品种或种质). 虽然送往锡兰的橡胶树更多, 但是由于种植方法、土壤环境等的限制, 它们并没有形成优势群体, 因而对现代橡胶树品种的基因贡献十分有限[18]. 现代广泛栽培的魏克汉品种由于遗传背景狭窄, 严重制约了产量及抗性的进一步提升.

2　橡胶种植业的兴起及其科技推动力

2.1　橡胶种植业的兴起

1876~1900年, 东南亚的橡胶树大多在设立于殖民地的植物园试种, 并没有大规模商业种植[19]. 据估计, 当时英国和荷兰殖民地所有橡胶种植面积仅有8000公顷[20]. 进入20世纪后, 汽车工业的繁荣带动橡胶工业的快速发展, 天然橡胶价格不断攀升, 橡胶树种植变得非常有利可图. 在当时, 巴西垄断了天然橡胶供应, 使价格上升至空前高度. 1910年天然橡胶价格达到323美元/吨[21], 比1840年上涨了近10倍. 另外, 由于茶叶和可可价格的持续走低, 东南亚的种植园大面积改种橡胶树. 1907~1913年, 美国橡胶公司在苏门答腊收购了十多个种植园, 创立了当时世界上最大的橡胶种植园, 面积达到30735公顷. 1910~1925年, 法国米其林公司在越南购买了14500公顷土地种植橡胶树. 1914年上半年, 英属、荷属橡胶树种植园已达到47.2公顷. 非洲和南美国家也纷纷开始种植橡胶树, 比利时殖民地刚果地区的天然橡胶产量于1908年已达到7.5万吨[6]. 1932年, 南美的橡胶种植业达到顶峰, 其中仅美国汽车巨头亨利福特(H. Ford)一人就在巴西拥有3000公顷以上的橡胶林[21].

值得一提的是, 华人在东南亚的橡胶种植方面扮演了重要角色. 1896年, 25岁的陈齐贤(Tan Chay Yan)从时任新加坡植物园园长亨利•尼古拉斯•李德利(H. N. Ridley)手中得到了一些免费的橡胶树苗, 在马六甲州试种了17 公顷橡胶树, 几年后初具规模[22]. 这是马来西亚首次成功地商业化种植橡胶树, 而且橡胶胶片品质极佳, 陈齐贤也因此被称为“马来亚橡胶之父”. 受其影响, 橡胶种植在马来西亚不断扩张, 仅1915~1916年间开垦的橡胶园就达56个, 其中34个为华人所有[22]. 1902年, 曾汪源、曾金城父子在广东英德县、海南儋县(今儋州市)尝试橡胶树种植, 但未获

成功. 1904年, 傣族土司刀安仁从新加坡购得橡胶苗7000株, 在云南德宏干崖(今盈江县)种植成功[23]. 这是中国首次成功种植橡胶树, 至今仍然有一棵存活(图1). 之后, 在中国台湾恒春、海南琼海和儋县分别成功建立了橡胶种植园. 新中国成立时, 国内建有胶园2800公顷, 共106万株胶树, 其中64万株已经开割, 年产干胶200多吨[23,24].

2.2 橡胶种植业的科技推动力

1900年前后, 南美橡胶树遭受南美叶疫病(South American Leaf Blight)危害, 使得当地植胶业遭受毁灭性打击[25,26], 之后橡胶产量逐年萎缩. 到1940年, 巴西橡胶产量仅占全球产量的1.3%. 亚洲橡胶种植蓬勃发展, 引进至今仅150年左右, 就从最初的几棵树发展为全球最大的产胶区(目前亚洲天然橡胶产量占全球90%以上), 这个成功主要得益于持续不断的技术进步.

2.2.1 割胶新方法——连续割胶法的发明

巴西原住民通过深割胶树(至木质部)2.5~5cm长的割口采集胶乳. 这种割胶方式割面宽, 树皮伤害大, 割口处易形成大的疤, 橡胶树割胶年限短. 在成功栽培橡胶树后, 东南亚各种植园一直试图研发既提高产量、又延长割胶年限的割胶方法. 1877年, 新加坡植物园园长李德利发明了连续割胶法(图2), 大幅度延长了橡胶树的利用周期. 他还极力推荐种植橡胶树, 被人称为“疯子李德利(mad Ridley)”, 在他的推动下, 马来半岛成为首个商业化种植橡胶树的地区[18].

图 1 中国最古老的橡胶树(云南盈江, 胡彦师供图)
Figure 1 The oldest rubber tree in China (Yingjiang, Yunnan; Photo provided by Yanshi Hu)

2.2.2 无性繁殖——芽接法的发明

在东南亚大规模建立橡胶种植园后, 人们发现不同橡胶树植株间产量存在明显差异. 但由于橡胶树异花授粉, 基因型高度杂合, 产量高的植株无法通过种子将高产性状遗传下去. 1916年, 印度尼西亚的赫尔顿(van Helten)发明了芽接法, 能够通过无性繁殖扩繁高产单株[14]. 这项发明奠定了橡胶树育种的基础, 各大胶园选育出了一大批高产的初生代无性系, 如PR 107、PB 86、GT1、Tijr1等. 1922年, 马来西亚橡胶研究院(Rubber Research Institute of Malaysia, RRIM)成立, 加强了橡胶树杂交育种研究, 利用初生代无性系杂交选育出了以RRIM 600为代表的优秀品种, 极大地推动了橡胶树种植业的发展.

2.2.3 割胶刺激剂——乙烯利的筛选与合成

为了追求更高产量, 人们使用各种激素和化学物质对橡胶树进行刺激处理. 1970年, 马来西亚橡胶研究院从187种化学品中筛选出12种能明显提升橡胶树产量的化合物, 其中乙烯利(Ethrel)表现最为突出[27]. 华南热带作物科学研究院从1971年开始测试乙烯利的田间效果, 并同步研发乙烯利合成工艺. 同年成功试制出乙烯利, 并开始工厂化生产, 为后续“橡胶树乙烯利刺激研究”提供了充足试剂. 1977年, 许闻献等解决了我国橡胶实生树和国内低产芽接树乙烯利刺激的重大技术难题, 形成了具有我国特色的“减刀、浅割、增肥, 产胶动态分析”的技术规程, 逐步形成“三天一刀”新割制, 显著降低劳动强度, 提高了生产效率[28]. 因此, “中国橡胶树主栽区割胶技术体系改进及应用”获2006年国家科学技术进步奖二等奖.

技术进步使得橡胶树比其他产胶植物优势更加显著, 目前99%的天然橡胶产自橡胶树. 除杜仲、银胶菊、橡胶草等还有少量试验性生产外, 人们已经不再

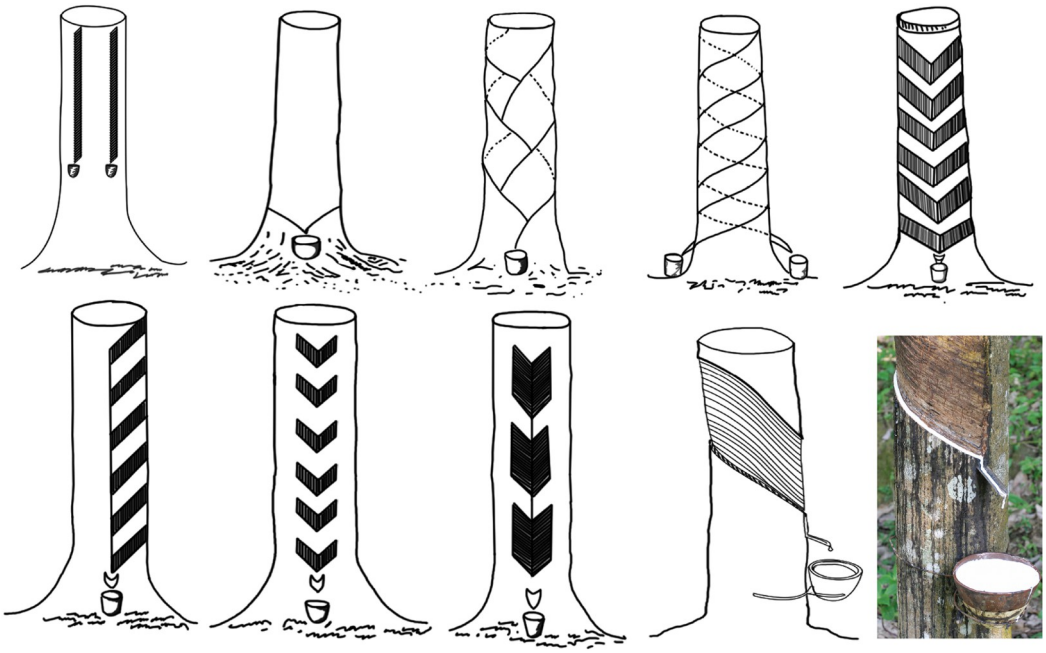

图 2　19世纪使用过的不同割胶方法(下排右一和右二为连续割胶法)
Figure 2　Tapping methods in 19th century (the right two figures in the bottom row indicate the Ridley's tapping method)

利用野生采集时代的其他产胶植物，也避免了更多的产胶植物由于过度采集而灭绝.

3　我国天然橡胶产业的发展历程及突破

20世纪50年代, 我国的天然橡胶进口受到限制. 朝鲜战争爆发后, 中共中央作出"一定要建立我们自己的橡胶生产基地"的决定. 1950年, 中苏签订了《中苏联合发展天然橡胶的协议》, 确定3年之内在中国种植橡胶树53.33万公顷, 1959年开始向苏联出口天然橡胶. 1951年, 政务院第100次政务会议作出《关于扩大培植橡胶树的决定》, 对华南地区种植橡胶树作出部署, 指出"为保证国防及工业建设的需要, 必须争取橡胶自给", 要求自1952年至1957年, 以最快的速度在广东、广西、云南、福建、四川等5个省区种植巴西橡胶树及印度橡胶榕51.33万公顷(海南岛任务另定), 争取10年后每年产胶量达10万吨.

为了达成以上目标, 研究人员首先在全国各地对产胶植物和植胶环境资源进行了广泛调查. 1951年, 由秦仁昌、冯国楣、蔡希陶组成的调查队分别在云南保山、思茅、蒙自、文山等地发现了解放前建立的暹华胶园等橡胶种植园和野外遗存的橡胶树[29]; 同年, 中山大学蒋英教授带领的两广产胶植物调查队赴广西的十万大山、六万大山, 广东的雷州半岛及海南岛调查产胶植物, 在徐闻发现3处遗存的橡胶种植园. 1953年, 由乐天宇、齐雅堂等20人组成的工作队赴广西、粤西、海南等地调查植胶环境资源情况, 其间黄宗道也参加了海南岛土壤考察工作[30]. 在这些调查的基础上, 我国于1954年在广州成立了华南热带林业科学研究所, 专门从事天然橡胶栽培和加工研究. 1958年, 研究所搬迁至海南岛儋县联昌试验站(1965年更名为华南热带作物科学研究院), 并与华南热带作物学院一起合称为"热作两院", 何康任首任院校长, 为中国天然橡胶和热作事业培养了一大批人才[30].

巴西橡胶树起源南美亚马孙河流域的热带静风区, 在长期进化中丢失了低温抗性基因. 在气温低于15℃时橡胶树停止光合作用, 低于10℃就有可能受到寒害. 《大英百科全书》甚至得出"北纬15°以北无法种植橡胶树"的论断. 我国地处热带北缘, 每年受到冬春寒潮、沿海台风的侵袭, 发展我国植胶事业, 就需要突破低温、台风对橡胶树的侵袭, 必须筛选耐寒抗风

橡胶树品种, 并且还能够在我国植胶环境下取得高产表现. 建国初期, 我国受苏联李森科主义的影响, 认为通过环境选择获得性遗传能够提升后代抗性. 苏联树木育种专家认为, 通过优选优良母树建立无性系能够提升产量1倍以上. 但后来的实验表明, 按该原则建立的无性系产量仅为普通实生树的97%. 同时, 我国开展了从国外引进优良品种的工作, 从东南亚引进了PB 86、PR 107和RRIM 600等优良无性系品种, 并且在琼山、文昌、保亭等地大规模推广[31]. 1960~1962年间, 刘松泉又从斯里兰卡引进国外优良无性系136份, 进一步丰富了我国橡胶树品种资源.

1962年, 在广东湛江召开了第一次全国橡胶树育种工作会议, 认真总结了过去橡胶树育种工作中的经验和教训, 制定了在现有的国内外优良品系的基础上“有性无性交替并重”选育优良品系的橡胶树选育方针[31], 标志着我国植胶事业进入了新的发展阶段. 到1982年, 我国成功在北纬18°~24°之间大面积种植橡胶树, 建立了海南、广东、云南三大植胶区, 干胶产量达12.8万吨, 该成果以“全国橡胶科研协作组”的名义获国家发明奖一等奖. 1983年6月, 第二次全国橡胶树选育种会议于北京召开, 会上提出了“加速培育适合我国自然条件的抗性强、产量高、质量好的新品种”的方针. 在“六五”到“八五”连续3个“五年计划”中, 橡胶树新品种选育均被列为重点攻关项目. 1998年, 我国天然橡胶产量达45万吨, 位居世界第五. 到1999年, 在不同生态类型区广泛生产性试种国外优良无性系, 大幅度提高了我国的产胶水平. “橡胶树优良无性系的引种、选育与大面积推广应用”成果荣获国家科技进步奖一等奖[31].

我国橡胶树育种家通过近40年的努力, 从国内外搜集优选抗性好、产量高的种质资源, 通过亲本选配、抗寒前哨站筛选等, 自主选育出一大批适合我国植胶区气候特点的抗逆高产新品种, 如热研7-33-97、热研8-79、云研77-4等(表1). 其中热研8-79在比国外少割胶3个月的情况下, 仍然取得了单产最高纪录. 最近10年, 我国自主培育品种在新植胶园中应用占比超过80%, 实现了天然橡胶种源自主可控[31].

表 1 橡胶树大规模推广级品种

Table 1 Rubber tree clones for large-scale planting in China

品种名称	类型	产量 (千克/树·年)
热研 7-33-97	高产抗风	4.56
93-114	抗寒	2.35
海垦1	高产抗风	3.03
文昌 217	高产抗风	3.60
文昌 11	高产抗风	3.63
大丰95	高产抗风	5.20
海垦 2	高产抗风	5.89
云研77-4	高产抗寒	2.65
云研77-2	高产抗寒	3.46
云研277-5	高产	6.4

4 国内外天然橡胶产业的发展现状与挑战

据天然橡胶生产者联合会(ANPRC)统计, 全球有64个国家栽培橡胶树, 种植面积达到1533万公顷. 泰国、印度尼西亚和越南位列前三, 其中泰、印两国橡胶种植面积合计766.67万公顷, 占全球种植面积的一半. 2022年, 全球天然橡胶产量1453万吨, 泰国、印度尼西亚和越南前三大生产国产量合计918万吨, 占全球产量的63.2%(https://www.anrpc.org/). 我国橡胶树种植面积112.96万公顷, 产量86.2万吨, 年进口量达到606万吨, 占全球总产量的40%左右. 但是随着消费量的增加, 我国天然橡胶自给率逐年下降, 目前仅有13.2%, 远远低于战略安全线.

近年来, 天然橡胶产业面临着诸多挑战: 需求不振和价格低迷; 传统植胶国种植面积萎缩; 科研机构经费投入削减; 以及由于受气候与环境变化冲击, 出现橡胶树新型病害等.

随着全球经济放缓, 航运、基建等主要领域对天然橡胶的需求下降, 天然橡胶进一步供过于求. 天然橡胶价格持续多年的低迷, 加上劳动力成本上升, 使得橡胶种植业无利可图, 橡胶树逐步从20世纪的“黑色黄金”转变为21世纪的“贫困树(poverty tree)”. 因此, 一些传统植胶国, 如马来西亚、印度尼西亚等纷纷转向油棕等其他作物, 橡胶种植面积出现了萎缩.

受新冠疫情的影响, 除中国和印度等经济快速发展国家以外, 大部分橡胶种植国削减了相关科研机构的经费投入, 天然橡胶科技创新速度放缓. 例如, 马来西亚作为传统的天然橡胶科技研发中心, 在20世纪后

期调整了产业政策, 将橡胶种植调整为油棕, 因此天然橡胶科技水平长期停滞不前. 法国农业国际合作研究发展中心(CIRAD)在橡胶树产排胶生理与遗传转化等领域曾引领全球, 近些年由于在橡胶科技研发领域投入不足, 科研人员老龄化等问题, 部分团队合并裁撤, 研发能力严重下降. 美国、日本等主要天然橡胶消费国没有种植橡胶树, 因而几乎没有专门的天然橡胶研究机构, 仅有少量从事天然橡胶加工的科研队伍. 印度近些年在橡胶树育种和转基因领域保持稳定进展, 已陆续推出RRII系列橡胶树品种, 并在2021年在全球率先开展橡胶树转基因品种(转*HbMnSOD*基因)的商业化种植[32], 2023年又授权通过转*osmotin*基因品种的商业化试种(个人通讯). 我国近年来通过加大科研投入, 在生物育种等基础研究领域取得长足进步, 特别是基因组学、组培苗生产和智能割胶装备研发等方面进展迅速.

植胶业除了受经济发展与政策影响外, 还面临气候与环境变化的冲击. 20世纪初暴发的南美叶疫病, 几乎摧毁了巴西、秘鲁等原产地植胶产业, 世界橡胶生产中心因而迁移到东南亚. 随着雨季时间和降水量的变化, 2018年在印度尼西亚苏门答腊岛暴发了一种新型橡胶树落叶病, 造成多轮新抽叶片脱落. 病理分析检测到多种病原菌, 包括*Fusicoccum*, *Pestalotiopsis*和*Colletotrichum*. 目前该落叶病已经在印度尼西亚、马来西亚和泰国大面积传播, 严重时造成40%的减产, 部分胶园已经失去生产能力[33]. 科学家们评估该落叶病对植胶业的威胁甚至超过南美叶疫病, 严重影响到世界天然橡胶生产.

5　展望

为了应对挑战, 国际天然橡胶研究与发展委员会于2023年设立了青年特别专家组, 旨在为各成员国培育40岁以下的青年科技人员; 法国CIRAD也开始加大天然橡胶青年科技人才的引进和培养; 美国则关注南美叶疫病的抗性基因改良, 试图通过基因编辑技术攻克南美叶疫病, 重建南美的橡胶生产中心. 同时, 橡胶草、银胶菊等短周期产胶植物的研究利用又成为国际热点. 相信新一轮的科技投入与竞争, 将会推动天然橡胶科技进步(图3).

由于橡胶树是长周期作物, 育种周期长达30年, 往往需要几代人的接续努力才能完成一个新品种的培育. 随着基因组学和生物育种技术的进步, 特别是基因组选择育种技术和基因编辑技术的出现, 科学家们有望在橡胶树的产量和抗性等方面取得突破, 并大幅缩短橡胶树育种周期. 新品种和技术突破将会对天然橡胶产业格局带来新的冲击.

物联网、大数据、云计算等信息技术推动智慧农业正在茁壮成长. 在天然橡胶领域, 通过物联网和大数据技术, 实现胶园灾害精准监测预警、自动化灌溉施肥、机器人等智能割胶、病虫害精准防治、生产与销售策略量化调整等, 无疑会大幅度降低现有天然橡胶生产成本, 改变生产模式, 推动产业升级.

目前天然橡胶科技研发存在严重的不平衡性, 科技力量强的消费国家缺少相应的农业科研条件, 资源禀赋好的种植国缺少科技投入. 只有加强天然橡胶科技领域的国际合作, 通过整合资源才能大力推动天然橡胶科技创新, 推动产业升级和产业结构调整.

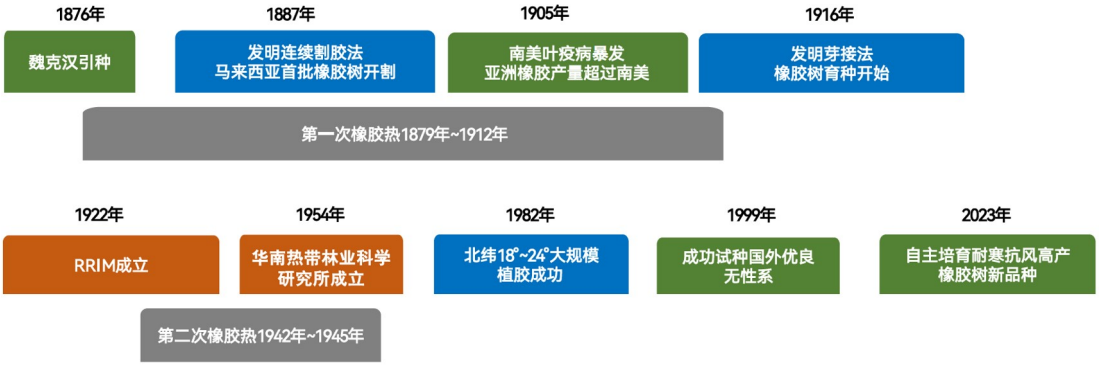

图 3　天然橡胶产业发展时间线
Figure 3　Timeline of the development of nature rubber industry

参考文献

1 Zhang J. To discuss initially the history of rubber (tree)'s development and spread in the world (in Chinese). Agric His Chin, 2015, 34: 3–16 [张箭. 世界橡胶(树)发展传播史初论, 2015, 34: 3–16]
2 Wang Z L. Rubber Encyclopedia (1) (in Chinese). World Rubber Ind., 2008, 29: 50–53 [王作龄. 橡胶百科(一). 世界橡胶工业, 2008, 29: 50–53]
3 Mo Q H. Rubber traceability (in Chinese). Agr Archaeol, 1982, 28: 167–168 [莫清华. 橡胶溯源. 农业考古, 1982, 28: 167–168]
4 Tan H Y, Wu J L. Trace to the source of natural rubber (in Chinese). Plants, 1997, 2: 28–29 [谭海燕, 吴继林. 天然橡胶溯源. 植物杂志, 1997, 2: 28–29]
5 Zhang L Q, Zhang J C, Liao S Q. Natural Rubber and Bio-based Elastomers (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press Co. Ltd., 2014. 2–38 [张立群, 张继川, 廖双泉. 天然橡胶及生物基弹性体. 北京: 化学工业出版社, 2014. 2–38]
6 Hobhouse H. Seeds of Wealth: Four Plants that Made Men Rich. London: Pan Macmillan Publishers Ltd., 2003. 126–172
7 Morton M. Rubber. Encyclopedia Americana.Vol XXII. Danbury: Grolier Inc., 1990, 22: 824–835
8 Musgrave T W. An Empire of Plants: People and Plants that Changed the World. London: Cassell Co., 2000. 164–177
9 Rocco F. The Miranculous Fever–Tree: Malaria and Quest for a Cure that Changed the World. New York: Harper Collins Publishers, 2003. 169
10 Jockson J. The Thief at the End of the World, Rubber, Power, and the Seeds of Empire. New York: Penguin Books, 2008. 157–299
11 Singer S, Holmyard E J, Hall A R, et al. A History of Technology. Volume V. The Late Nineteenth Century, C. 1850 to C. 1900 (in Chinese). Wang Q, Sun Z X, eds. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2004, 5: 529–535 [辛格 S, 霍姆亚德 E J, 霍尔 A R, 等. 技术史. 第五卷. 19世纪下半叶. 王前, 孙希忠译. 上海: 上海科技教育出版社, 2004, 5: 529–535]
12 Zhang J. Rubber and its development in an international view (in Chinese). Hebei Acad J, 2014, 34: 51–55 [张箭. 国际视野下的橡胶及其发展初论. 河北学刊, 2014, 34: 51–55]
13 Wang S G. No retreat is the way to victory (part 1)–The chip crisis and the rubber crisis (in Chinese). Economic Herald, 2020, 29: 28–32 [王绍光. 没有退路就是胜利之路(上)—芯片危机与橡胶危机. 经济导刊, 2020, 29: 28–32]
14 Dijkman M J, Rands R D. Hevea: Thirty Years of Research in the Far East. Florida: University of Miami Press Coral Gables, 1951. 34–44
15 Cook O F. Beginnings of rubber culture. J Heredity, 1928, 19: 204–215
16 Wycherley P R. The Singapore Botanic Gardens and rubber in Malaya. Gard Bull Singap, 1959, 17: 175–186
17 Purseglove J W. History and functions of Botanic Gardens with special reference to Singapore. Gard Bull Singap, 1959, 17: 125–154
18 Wright H. Hevea Brasiliensis, or Para Rubber, Its Botany, Cultivation, Chemistry and Diseases. London: Maclaren & Sons Ltd, 1908. 15–198
19 Zhao S W, Li L Z. Rubber in Southeast Asia (in Chinese). Southeast Asian Studies, 1963, 5: 81–91 [赵仕万, 李禄增. 东南亚的橡胶. 东南亚研究资料, 1963, 5: 81–91]
20 Wright H. My Tour in Eastern Rubber Lands. London: Maclaren & Sons, 1908. 19–76
21 Coomes O T, Barham B L. The Amazon rubber boom: Labor control, resistance, and failed plantation development revisited. Hispanic Am Historical Rev, 1994, 74: 231–257
22 Chen H Z. Father of Malaysia Rubber Industry (in Chinese). CSS. 2000, 20: 36–37 [陈惠真. 马来亚的橡胶之父. 东南亚纵横, 2000, 20: 36–37]
23 He K, Huang Z D. Rubber Culture in the Northern Part of Tropical Area (in Chinese). GuangZhou: Guangdong Science and Technology Press, 1987. 1–6 [何康, 黄宗道. 热带北缘橡胶树栽培. 广州: 广东科技出版社, 1987. 1–6]
24 Liu S Q. Hevea Brasiliensis. Encyclopedia of Chinese Agriculture, Crop Volume (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1991. 5–10 [刘松泉. 巴西橡胶. 中国农业百科全书, 农作物卷. 北京: 中国农业出版社, 1991. 5–10]
25 Department of Plant Protection, South China Institute of Tropical Crops, South China Tropical Crop Research Institute. Review of Major Foreign Literature and Data on Rubber South American Leaf Blight (in Chinese). World Tropic Agr Info, 1977, 9: 1–5 [华南热带作物研究院植保系. 橡胶南美叶疫病国外主要文献及资料综述. 热带作物译丛, 1977, 9: 1–5]
26 Hollidaty P, Gao T Y. South American leaf blight of rubber trees (in Chinese). Plant Quarantine, 1986, 8: 25–27 [Hollidaty P, 高天裕. 橡胶南美叶疫病. 植物检疫, 1986, 8: 25–27]
27 Pakianathan S W. The search for new stimulants. Plant Bull Rubber Res Inst Malaya. 1970, 85: 111–351
28 Xu W X, Zeng Q, Huang W C. China's progress in the reform of rubber tapping system for rubber trees in the past 30 years (in Chinese). Chin J Tropic Agri, 2000, 6: 57–71 [许闻献, 曾庆, 黄文成. 中国橡胶树割制改革30年. 热带农业科学, 2000, 6: 57–71]

29 Botanical Society of China. Plant Science in China for Improving People's Livelihood (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023. 193–195 [中国植物学会. 改善民生的中国植物科学. 北京: 科学出版社, 2023. 193–195]
30 Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, South China University of Tropical Agriculture. A Great Cause Arised from the Mountain: Historical Materials of Natural Rubber Science and Education of the Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences and South China University of Tropical Agriculture (in Chinese). Haikou: Hainan Publishing House, 2009. 413–430 [中国热带农业科学院, 华南热带农业大学. 山野崛伟业: 热作两院天然橡胶科教事业史料. 海口: 海南出版社, 2009. 413–430]
31 Huang H S, Wu Y T. Fifty Years of Rubber Tree Breeding in China (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005. 138–207 [黄华孙, 吴云通. 中国橡胶树育种五十年. 中国农业出版社, 2005. 138–207]
32 Jayashree R, Rekha K, Jayasree P K, et al. Genetically modified (GM) rubber integrated with *HbMnSOD* gene for abiotic stress tolerance, way to confined field trial. Rubber Sci, 2023, 31: 96–103
33 Azizan F A, Astuti I S, Young A, et al. Rubber leaf fall phenomenon linked to increased temperature. Agr EcoSyst Environ, 2023, 352: 108531

The rubber tree that changed the world in 150 years

GAO Jing[1] & CHENG Han[1,2]

1 National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China;
2 Sanya Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya 572024, China

doi: 10.1360/SSV-2024-0225