

中国极小种群野生植物保护：进程和展望

本文2020年以英文稿“China's conservation program on Plant Species with Extremely Small Populations (PSESP): Progress and perspectives”发表于保护生物学经典期刊《Biological Conservation》。为展现和促进我国极小种群野生植物保护事业的发展，翻译成中文以令更多人阅读。

作者：杨静^{1#} 蔡磊^{1,2、#} 刘德团¹ 陈高^{1*} Joachim Gratzfeld³ 孙卫邦^{1*}

作者单位：1 云南省极小种群野生植物综合保护重点实验室/中国科学院东亚植物多样性与生物地理学重点实验室；2 中国科学院大学；3 国际植物园保护联盟（BGCI）

#号表示：共同第一作者；***号表示：**共同通讯作者（责任作者）

翻译：刘德团 李凤荣 杨佳俊 杨丰懋 马雨倩 郭世伟

翻译者单位：云南省极小种群野生植物综合保护重点实验室/中国科学院东亚植物多样性与生物地理学重点实验室/中国科学院大学

摘要：极小种群野生植物（Plant Species with Extremely Small Populations,简称：PSESP）是中国提出的保护生物学领域的新概念，旨在拯救保护我国最受威胁的植物种类。2005年，极小种群野生植物保护项目首次在云南省实施。本文回顾了这一概念的发展及其重要性，并重点介绍了《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划（2011-2015年）》实施以来的保护工作进展。根据该工程规划，中国有120个物种被列为优先保护对象，并启动实施了若干国家、省级保护行动和保护研究项目，取得了初步成效，但也存在一系列的困难和挑战，使得该工程规划的5个目标不能顺利完成。我们以这些保护行动和保护研究为例，阐述了取得保护成效采取的方法及其可能制约的因素，并指出研究和保护实践之间存在的空白。最后，我们提出了应鼓励跨学科、多方合作，包括由研究院所、政府机构、非政府组织和当地社区代表组成的联盟，以实现极小种群野生植物的成功保护。本文旨在推进我国艰巨的植物保护工作，克服现有的困难，并为未来的保护挑战做好准备。此外，中国的极小种群野生植物保护工程对其他国家受威胁植物的保护也有借鉴作用。

1. 引言

中国是世界生物多样性最丰富的国家之一，拥有全球第三最多的维管植物种类（约35000种），也是世界生物多样性热点地区之一和全球的优先保护区域之一（Ali et al., 2018; Meng et al., 2019）。中国还是大部分野生物种相关的主要国际条约或公约的签署国，如《濒危野生动植物种国际贸易公约》（CITES）、《拉姆萨尔公约》和《生物多样性公约》（CBD）（Huang et al., 2019）。对此，我国为保护濒危物种做出了前所未有的努力，但我国生物多样性的丧失仍然是一个严重的问题：在过去的50年里，至少有200种植物物种已经灭绝，约有5000种植物受到威胁或濒临灭绝（Volis, 2016）。导致这些物种灭绝或致危的

主要威胁包括生境丧失、生物入侵、过度采伐、外来单一物种的纯林造林或栽培和气候变化等 (Bachman et al., 2018; Huang et al., 2019)。

极小种群野生植物 (Plant Species with Extremely Small Populations, PSESP) 因为具有种群数量少 (远低于最小生存种群)、生境退化或呈破碎化分布、受人类干扰严重、面临着极高的灭绝风险等特征, 被确定为我国的优先保护类群 (Ma et al., 2013; Sun, 2013, Sun, 2016)。如果一个物种的成熟个体 (也就是开花结实的植株数量) 总数少于 5000 株、且每个独立种群的个体数少于 500 株, 则可以认为它符合极小种群野生植物的标准 (Sun, 2016; Sun et al., 2019a; Sun et al., 2019b)。

云南省始终走在中国拯救和保护生物多样性的前列。早在 2005 年, 云南省林业厅 (现云南省林业和草原局) 和云南省林业科学院 (现云南省林业和草原科学院) 就首次提出了“野生动植物极小种群”的保护理念, 但当时并未对这一理念进行阐述和定义。2012 年, 国家林业局和国家发展和改革委员会发布的《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划 (2011-2015 年)》, 对极小种群野生植物的概念进行了定义, 并提出了我国 120 个需要优先保护的极小种群野生植物。2013 年, “极小种群野生植物”这一概念的科学定义正式发表 (Ma et al., 2013; Sun, 2013; Sun, 2016)。2018 年, 云南省政府发布了《云南省生物多样性保护条例》, 这是我国第一部有关极小种群野生植物保护条例的省级法规 (Sun et al., 2019a)。

经过近 15 年的保护研究和实践, 目前, 极小种群野生植物理念在中国得到了各级政府部门和公众的广泛认可, 取得了实实在在的保护成效 (Sun et al., 2019a; Sun et al., 2019b)。然而, 由于资金不足, 缺乏在分类学、种子繁殖、组织培养或植物生态学等方面受过专业训练的人才, 阻碍了“保护工程规划”的顺利实施。比如: 大多数极小种群野生植物没有经过系统的调查、科学的监测和评估; 且在研究和保护工作开始后, 缺乏定期开展其保护行动的有效性评估, 以动态评价这些物种是否仍需优先保护。极小种群野生植物是基于种群层面的研究而提出的, 在制定保护行动计划时, 也应考虑影响种群或植物群落的多种因素。

我们认为, 除了 2012 年发布的第一批极小种群野生植物名录中的物种外, 仍有很多物种应后续列入极小种群野生植物名录, 大力开展保护工作 (Sun et al., 2019a; Sun et al., 2019b)。尽管一些极小种群野生植物的优秀保护案例可以指导其他物种的保护 (涉及野外调查、迁地保护、就地保护、种群增强/回归和公众科普等领域), 但这些方法并不是“万精油”, 不可能适合于每一个物种。例如, 常规的繁殖方法不可能适合所有的极小种群野生植物物种 (Wade et al., 2016)。因此, 在保护目标物种方面, 针对不同的物种, 需要研究特定的保护方法。拯救和保护极小种群野生植物任重而道远, 现有保护成效及其进展, 仅可算是“万

里长征”的第一步。我们需要研究、试验更多的方法，以更有效地保护每一种极小种群野生植物，降低它们丧失的速度。

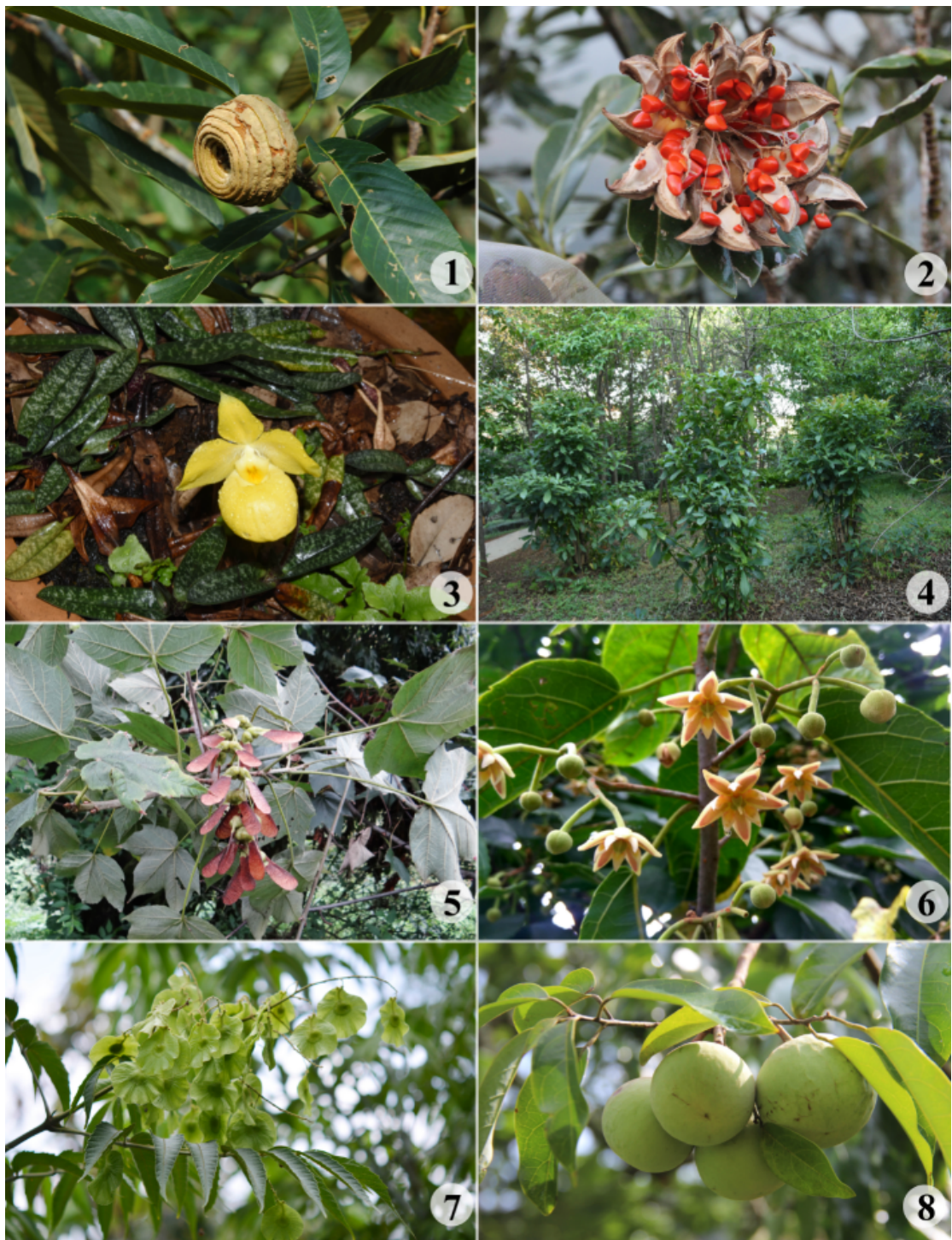


图 1.开展了综合保护研究的几个极小种群野生植物：1.西畴青冈；2.华盖木；3. 杏黄兜兰；4.云南蓝果树；5. 漾濞槭；6. 滇桐；7.云南金钱槭；8. 蒜头果

本文研究了极小种群野生植物保护在国家和省级的的发展情况，重点阐述了相关成效，并讨论了当前和未来面临的挑战。本综述是在收集了各种有关极小种群野生植物的信息，包括研究论文、受威胁物种名录、主流媒体报道、以及政府部门发布的官方文件或通信等资料的

基础上，并分别从国家和省级层面对这些资料进行了研读、统计和分析后完成的。为总结国家层面的保护行动和成效，我们对国家层面保护项目的数量、覆盖区域、种群的大小、过去或现在的保护措施、以及保护资金的来源和数额进行了统计和对比分析。最后，我们以云南省为例，阐述了极小种群野生植物相关的具体保护。更多细节见附件资料（Table S1, Table S2）。

我们根据 1990 年至 2019 年的资料，评估了国家 120 种极小种群野生植物相关的研究和保护行动的进展；以 Web of Science 和中国知网（CNKI）资源数据库为平台，以国家 120 个极小种群野生植物的名称、“极小种群野生植物”及其缩写为关键词进行文献检索，统计和记录了保护相关研究的论文数量和内容（Table S3），对文献进行了综述，研究了极小种群野生植物概念对我国生物多样性保护工作的影响和贡献。

2. 行动规划和实施

自 2005 年“极小种群野生植物”概念第一次提出以来，国家及各省、市、自治区均颁布了极小种群野生植物的保护规划和行动措施，其中一些措施得到了政府、自然保护区、林业和环境保护部门的支持，以便对极小种群野生植物开展针对性保护，各部门还制定了新的法律和政策来保护这些急需拯救的物种。

2.1 国家层面

2008 年，由国家林业局(现国家林业和草原局)、云南省林业厅(现云南省林业和草原局)和中国科学院昆明植物研究所在昆明联合举办了首届“全国极小种群野生植物保护研讨会暨回归自然启动仪式”，开展了 100 株西畴青冈(*Cyclobalanopsis sichourensis*)（图 1）、200 株华盖木(*Manglietiastrum sinicum*)（图 1、3）和 400 株杏黄兜兰(*Paphiopedilum armeniacum*)（图 1）的回归自然试验示范工作，这标志着首次在国家层面开展极小种群野生植物的拯救保护工作。2011 年，国家林业局与云南省政府联合实施的“云南省极小种群野生植物保护试点项目”启动了西畴青冈、滇藏榄(*Diploknema yunnanensis*)、华盖木、云南蓝果树(*Nyssa yunnanensis*)（图 1）和弥勒苣苔(*Paraisometrum mileense*)的保护工作。2012 年，国家林业局和国家发改委（林规发[2012]59 号）联合发布了《全国极小种群野生植物保护工程规划(2011-2015 年)》(国家林业局, 2012 年)，确定了 120 种极小种群野生植物并指定了各物种的优先保护等级，这标志着极小种群野生植物保护行动上升到了国家层面(国家林业局, 2018 年；孙卫邦等, 2019b)。2013 年，国家自然科学基金(NSFC)—云南省联合基金重点项目资助了“极小种群野

生植物高风险灭绝机制及保护有效性研究”(U1302262)项目, 该项目对 5 个物种, 包括: 漾濞槭(*Acer yangbiense*)(图 1,3)、西畴青冈、毛果木莲(*Manglietia ventii*)、华盖木和大树杜鹃(*Rhododendron protistum* var. *giganteum*), 展开了全面的研究和保护工作。

2015 年, 国家环保部印发了《生态保护红线划定技术指南》, 旨在保护包括极小种群野生植物在内的物种多样性的长期生存, 这些准则明确规定, 极小种群野生植物的生境应受法律保护。2016 年, 国家重点研发计划典型脆弱生态修复与保护研究重点专项项目“典型极小种群野生植物保护与恢复技术研究”(2016YFC0503100)启动。2017 年公布的“生态保护红线”范围包含极小种群野生植物的栖息地。同年, 国家科技部提供专项资金 2426 万元的国家科技基础资源调查专项项目中国西南地区极小种群野生植物调查与种质保存”(2017FY100100)正式立项, 这项为期 5 年的调查项目旨在研究中国西南地区 6 个省(直辖市)490 个县的 146 万平方公里土地上分布的 231 种极小种群野生植物, 并制定相应的保护措施(杨静和孙卫邦, 2017; 国家林业和草原局, 2018; 孙卫邦等, 2019a; 孙卫邦等, 2019b)。

2017 年, 国家林业局评估了 120 种国家级极小种群野生植物的保护成效, 大多数物种都实施了全面的调查, 有了详细的信息资料, 同时一些物种被重新发现或发现了新的分布区域, 但有些类群却没有找到, 如: 海南石豆兰(*Bulbophyllum hainanense*)、海南鹤顶兰(*Phaius hainanensis*)和海南大苞兰(*Sunipia hainanensis*)等。评估发现有 37 个物种分布在自然保护区, 60 个物种通过委托护林员或当地管理部门得到保护, 同时为 26 个物种建立了就地保护小区。诸如: 漾濞槭和西畴青冈, 已经建立了几个近地保护种群(在目标物种分布范围附近气候相似、生境相似的条件下建立保护地点)。仅有 20 个物种建立了迁地保护种群, 这主要是由植物园、树木园和其它专注于植物保护的研究机构开展实施的。实际上, 已进行迁地保护试验示范的物种有 80 种, 人工繁殖的物种有 56 种, 26 个物种开展了种群增强与回归试验。成功的例子包括德保苏铁(*Cycas debaoensis*)和观光木(*Tsoongiodendron odorum*), 人工建立的种群已经能自行繁殖更新。虽然目标是实现 120 个国家级极小种群野生植物的种质资源保存, 但目前只有一半的物种被保存。

《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划》(2011-2015 年)(国家林业局, 2012 年)的目标仅部分实现。从 2011-2017 年, 为保护极小种群野生植物投入的 8770 万元仅占实施计划目标的 6.4%。在这些群体中保护效率差距较大, 尤其是兰科植物, 这是由于缺乏对繁殖生物学、繁育技术和其它知识的研究阻碍了它们的保护(国家林业局, 2018; 孙卫邦等, 2019b)。极小种群野生植物项目为许多一线部门(例如: 林业和保护区的管理部门), 首次提出了有针对性的受威胁物种保护实践, 而人工繁殖、迁地保护、就地保护、种群增强与回归的概念和

方法对他们来说较为陌生,意识到这一点,云南省林业厅委托编撰出版了两本专著介绍了极小种群野生植物的保护方法和研究进展(图 2):《云南省极小种群野生植物保护实践与探索》(孙卫邦,2013)和《云南省极小种群野生植物研究与保护》(孙卫邦等,2019b)。这加强了国家基层保护部门及其从业人员的能力建设,鼓励积极申请项目资金、自我学习、专家咨询和保护最佳实践。然而,为了更有效、更全面的保护极小种群野生植物,需要改善所有利益相关者的协调和认识,包括评估和制定更新极小种群野生植物名录清单。



图 2. 极小种群野生植物专著: (1)《云南省极小种群野生植物保护实践与探索》(2013 年出版),介绍了极小种群野生植物的概念和云南省保护的方法。(2)《云南省极小种群野生植物研究与保护》(2019 年出版),介绍了云南省极小种群野生植物的保护和研究进展,含云南省 152 种极小种群野生植物的详细介绍。(3)《植物多样性》极小种群野生植物专刊(2016 年出版),包括 7 篇研究论文。(4) 昆明植物园每年出版的《极小种群野生植物拯救保护通讯》,从 2014 至 2018 年,共发表新闻 63 篇,案例研究 41 篇,新发现 54 篇,科普文章 14 篇。

2.2 省级层面

在国家颁布了第一批极小种群野生植物名录之后,有 24 个省、市(自治区)发布了各自的拯救和保护其所辖区域内的极小种群野生植物的实施计划。由于各省加大了对极小种群野

生植物的调查力度,对大多数目标物种的已知和潜在分布区域进行了全面调查,包括生境状况、范围、种群规模、保护状况和资金投入等(国家林业局, 2018; 孙卫邦等, 2019b)。

北京市在国家发布的极小种群野生植物名录种中没有物种列入,在后来的调查中发现了两个极度受威胁物种百花山葡萄(*Vitis baihuashanensis*)和丁香叶忍冬(*Lonicera oblata*)(野外分布的个体分别只有 2 株和 27 株)。这两种植物将考虑与北京的其它高度受威胁植物一起被列为北京市级极小种群野生植物。甘肃省也有类似的情况,在国家极小种群野生植物名录公布后,才发现了庙台槭(*Acer miaotaiense*),随后采取了就地保护措施。其他在国家级极小种群野生植物名录中未有物种列入的省区,例如:内蒙古、宁夏、青海、山东、上海、山西和天津,也加大了调查和宣传力度。在仅有 1 至 2 个物种列入国家极小种群野生植物名录的省区,例如:黑龙江、河北、河南、吉林、江苏、辽宁和新疆等,有关部门也迅速采取了调查和保护有关物种的行动(国家林业局, 2018; 孙卫邦等, 2019b)。

在极小种群野生植物数量较多的省份,例如:广东、广西、海南、湖南、四川和浙江省,均发布了省级名录和保护行动指南,例如广东的猪血木(*Euryodendron excelsum*)、丹霞梧桐(*Firmiana danxiaensis*)、广西的德保苏铁(*Cycas debaoensis*)、广西火桐(*Erythropsis kwangsiensis*)(黎德丘和彭定人, 2017),四川的峨眉拟单性木兰(*Parakmeria omeiensis*)和五小叶槭(*Acer pentaphyllum*)(潘红丽等, 2014),湖南的长果秤锤树(*Sinojackia dolichocarpa*),浙江的天目铁木(*Ostrya rehderiana*)和普陀鹅耳枥(*Carpinus putoensis*)。前,对这些物种和其它极小种群野生植物的研究和实践性保护工作正在进行中。这些省份的极小种群野生植物的拯救和保护策略制定,囊括了高校和其它研究机构、林业和环境保护部门的专家。

云南是第一个开展极小种群野生植物保护的省份,也将会继续引领这一领域的进一步发展。有一批种保护成功的典型案例,包括:漾濞槭(*Acer yangbiense*)(图 1、3)、西畴青冈(*Cyclobalanopsis sichourensis*)(图 1)、滇桐(*Craigia yunnanensis*)(图 1、3)、毛果木莲(*Manglietia ventii*)、华盖木(*Manglietiastrum sinicum*)(图 1、3)和杏黄兜兰(*Paphiopedilum armeniacum*)(图 1)等。2009 年至 2017 年,云南省累计投入极小种群野生植物拯救保护专项资金 2158 万元人民币(约 306 万美元),实施拯救保护项目 92 个(孙卫邦, 2013; 孙卫邦 等, 2019b)。2010 年,云南省政府批复了《云南省极小种群物种拯救保护规划纲要(2010-2020 年)和紧急行动计划(2010-2015 年)》(以下简称《规划纲要与行动计划》),该计划在国家行动计划之前就已实施。在《规划纲要与行动计划》中,列出了至 2020 年前需要拯救保护的极小种群野生植物 62 种,其中在 2015 年前需要采取紧急行动进行优先保护的共 20 种(杨文忠和杨宇明, 2014)。2018 年,云南省政府颁布了《云南省生物多样性保护条例》,该条例强调了对极小种群物种实施

抢救性保护，同时对“极小种群物种”的含义进行了专门阐述。2017 年和 2018 年，云南省科



图 3. 极小种群野生植物的保护行动。(1) 极小种群野生植物的实地调查途中；(2) 漾濞槭的回归；(3) 滇桐的回归；(4) 华盖木回归种群的监测和数据收集；(5) 云南西部漕涧迁地保护基地航拍照片(北纬 25°45'42",东经 99°6'59")；(6) 昆明植物园极小种群野生植物专类园航拍照片(北纬 25°8'32",东经 102°44'28")。

技厅依托中国科学院昆明植物研究所分别成立了“云南省极小种群野生植物综合保护重点实验室”和“云南省极小种群野生植物保护与利用创新团队”。这些项目的目标是采用科学的方法来拯救和保护在云南乃至整个中国的极小种群野生植物(国家林业局, 2018; 孙卫邦等, 2019b)。

迄今为止，云南省已纳入政府层面保护行动计划的极小种群野生植物共计 87 种，涵盖了国家、省和其它重大项目的物种。自 2017 年底以来，对自然保护区和其它就地保护点内的 67 个物种进行了科学管理和保护，占纳入政府层面保护行动计划总数的 77%。同时已对 61 个物种开展了人工繁殖基础上的迁地保护，占纳入政府层面保护行动计划总数的 70.1%。

另外, 也对 20 种极小种群野生植物开展了回归自然与种群重建试验示范工作, 同时已建设了 30 个就地保护小区或保护点(其中 23 种在保护区外)和 18 个迁地保护基地(图 3)以及 9 个物种的 4 个近地保护试验基地。在昆明植物园的极小种群野生植物专类园(图 3)中已构建了 56 种以上极小种群野生植物的迁地保护种群, 包括: 漾濞槭(*Acer yangbiense*)、滇桐(*Craigia yunnanensis*)、云南金钱槭(*Dipteronia dyeriana*)、华盖木(*Manglietiastrum sinicum*)、壮丽含笑(*Michelia lacei*)等。中国西南野生生物种质资源库已保存极小种群野生植物的种子 20 种、DNA 材料 28 种。总体来说, 云南省通过多个机构(自然保护区、林业和环境保护部门、研究机构和高校等), 成功开展了许多极小种群野生植物保护的项目(国家林业局, 2018; 孙卫邦等, 2019b)

3. 极小种群野生植物 (PSESP) 研究概况

3.1 极小种群野生植物的就地保护

随着国家、省极小种群野生植物名录的发布和保护计划的制定, 众多关于植物分布和保护现状的研究不断开展。作为就地保护的核心方式, 自然保护区是保护极小种群野生植物最直接, 最有效的地点。尽管中国有超过 2700 个自然保护区, 但 120 种国家级极小种群野生植物的分布区范围中只有 21.5%分布于国家级自然保护区、10.9%分布于省级自然保护区。120 种国家级极小种群野生植物中, 有 35 种未在国家级自然保护区内就地保护, 17 种未在省级保护区内就地保护(张则瑾 等, 2018)。由于存在较多的极小种群野生植物, 云南省和海南省成为需要就地保护极小种群野生植物最关键的区域。海南岛(海南省)是印缅生物多样性热点地区最大的岛屿, 蕴藏着我国面积最广的雨林(Chen et al., 2014; Yu et al., 2016)。海南天然的热带森林正因种植桉树和橡胶林而逐渐减少, 同时自然保护区也变得更加孤立。这些因素弱化了海南就地保护极小种群野生植物的潜力。Chen(2014)等对海南进行了全面的实地调查, 建立了 108 个样方, 分析了影响 20 种国家级极小种群野生植物分布格局的因素。这篇研究证实了人为活动干扰是造成大多数极小种群野生植物濒临灭绝的主要因素, 同时文章也强调了加强对现有保护区的管理应作为海南省就地保护极小种群野生植物的重点。

云南省是中国生物多样性保护的重点区域, 其面积仅占中国总面积的 4.1%, 却包含了中国高等植物生物多样性的 51.6%。到 2018 年末, 云南共建立了 162 个自然保护区。与中国其他省份相同, 云南的自然保护区也存在保护生物多样性与满足当地经济发展的双重挑战。这些问题对受威胁植物保护和管理的影响已被广泛评述(Liu et al., 2003; Volis, 2016; Yang et al., 2016; Zhang et al., 2017)。

然而,改进和解决方法已被提出。例如,Qiu(2018)分析了人为干扰对58个云南省的自然保护区的影响,发现这些保护区被保护的很好,但省级自然保护区面临的人为干扰更为严重。一项基于地理信息系统的研究分析了云南省自然保护区的空间分布格局(Wang et al.,2018),揭示了云南省存在9种生态环境未被充分保护。虽然云南以及中国其他生物多样性热点地区需要更多的保护区,建立就地保护点和保护小区(Volis, 2016; Fos et al., 2017; Yang et al., 2017)则是保护受威胁极小种群野生植物的生境的另一种可行方案。在之前章节陈述过,建立这种保护小区在云南已取得进展。Yang等人(2017)通过保护云南蓝果树(一种列入国家和云南省极小种群野生植物名录的物种)为这种方法提供了一个范例。他们建立的保护小区根据其功能分成核心区和缓冲区,并制定了小型保护区的规划、开发和管理方法。但是由于数据的收集和分析所需时间较长,保护小区的保护效果短期内还无法评估。

3.2 极小种群野生植物的繁育与栽培

虽然了解繁殖生物学是保护自然种群的基础,但对于极小种群野生植物而言,仅有13篇相关的研究。在这些研究中,部分仅观测了物种繁殖生物学特性,例如滇桐、滇西槽舌兰、红榄李、毛果木莲、华盖木、大树杜鹃和黄梅秤锤树被报道因传粉限制而存在很低的结实率和坐果率(Jin et al., 2005;张金菊等, 2008; 高则睿等, 2012; Chen et al., 2016; 张晓楠等, 2016; Wang et al., 2017; Li et al., 2018a)。大部分极小种群野生植物生长在研究人员很难到达的地点。需要长时间实验的研究常常因缺少实验材料而受到阻碍。但是,我们发现对于极小种群野生植物人工繁殖栽培(如人工授粉、种子萌发、无性繁殖和组织培养)的研究(包括专利)占了120种国家级极小种群野生植物的一半(51.7%),表明在中国采用人工繁殖方法保护极小种群野生植物的需求不断增长(Gratzfeld, 2017)。

这个现状可以从以下几个例子中看出。2006年统计的359株红榄李中,2016年只剩下14个(张晓楠等, 2016)。在该红榄李种群中,六年的观察中未发现有结实,而且其种子萌发困难。不仅如此,尝试通过扦插和组织培养来繁殖也失败了。因此,对红榄李的扩繁研究集中于人工授粉。人工授粉实验成功获得了这些成熟个体的新生萌发种子,且种子萌发率从0.02%增长到0.56%(张晓楠等, 2016)。水杉和银杉是两种有象征意义的孑遗植物,对其的保护工作在几十年前就开展了。1970年,中国为保护银杉建立了三个国家级和一个省级自然保护区。然而,一个为期十年(2003-2013)的种群研究揭示了银杉种群的更新障碍(Qian et al.,2016)。这可能是由于邻近的阔叶树种的竞争以及微生境的减少。作者建议使用疏伐林冠制造人工林的空隙来帮助银杉种群复壮。对于水杉,尽管保护措施自1940年发现水杉时就在进行,过

去 41 年（2007 年之前）中，所有水杉种群都出现了更新困难的现象(Tang et al.,2011)。由于其过去的保护措施大多集中于保护成年植株而不是保护其生境和伴生物种，所以当地居民可随意采集水杉种子使得更新情况恶化(王希群等,2005)。尽管如此，水杉目前已经在全世界广泛栽植，其迁地保护可以被认为是非常成功(Li et al.,2005)。这些案例强调了即使已经对目标物种开展就地保护，也应注意有效的迁地繁育措施。为了提高极小种群野生植物的更新，需要使用多种手段，比如减少其他物种的竞争，提供合适的微环境，以及进行人工杂交授粉、种群回归和再引入等。

3.3 极小种群野生植物的保护遗传学

保护遗传学的基础研究对制定受威胁物种保护计划至关重要(Frankham, 1995;Avise and Hamrick, 1996)。基于不同的分子标记，对极小种群野生植物的分类鉴定、遗传变异、遗传结构和近交进行研究，以解决分类歧义、了解遗传状况，并制定有针对性的保护措施(Frankham, 2010; Shafer et al., 2015)。

大多数关于 120 种国家发布极小种群野生植物的系统发育研究都集中在澄清种间或属间的分类关系上(Chen et al.,2014; Wei and Zhang,2014; Liu et al.,2016)。遗传学研究的结果可能会导致关于以不同名称建立的分类群的保护优先顺序的争议。例如大树杜鹃 (*Rhododendron protistum* var. *giganteum*)，在 2015 年之前，人们认为其只有两个种群(Wu et al., 2015 年)，由于大树杜鹃的稀有性和观赏价值，其中一个种群成为了受欢迎的旅游景点。然而，科研人员在 2018 年进行了野外调查、形态特征分析和 SSR 标记研究后表明，大树杜鹃应重新归入翘首杜鹃(*R. protistum* var. *protistum*)，这是一个有着 11 个记录种群的物种。这就引发了一个问题：大树杜鹃是否应该受到优先保护 (Li et al., 2018b)? 其答案可能会降低人们对大树杜鹃和与之相关的生态旅游的兴趣，或者减少对这个明星物种的资助。因此，明确的物种划定是拯救极小种群野生植物的关键第一步，因为分类学上的不确定性往往会阻碍保护工作的开展(Garnett and Christidis,2017)。关于大树杜鹃和大花醉鱼草的研究中都重申了这一点，强调了明确的分类名称与制定保护优先事项以及资金需求密切相关(Ge et al.,2018; Li et al.,2018b)。

物种丧失遗传多样性可能危及野生种群的生存能力，使其更容易灭绝(Barrett and Kohn, 1991; Frankham, 2005)。我们对 120 个国家级极小种群野生植物的遗传变异进行了总体回顾，发现在研究的 44 种物种中，只有 10 种在物种水平上具有较低的遗传多样性，包括 资源冷杉 (*Abies ziyuanensis*)、银杉 (*Cathaya argyrophylla*)、丹霞梧桐 (*Firmiana danxiaensis*)、

水松 (*Glyptostrobus pensilis*)、云南蓝果树 (*Nyssa yunnanensis*)、弥勒苣荬 (*Paraisometrum mileense*)、巧家五针松 (*Pinus squamata*)、黄梅秤锤树 (*Sinojackia huangmeiensis*)、密叶红豆杉 (*Taxus fuana*)、广西青梅 (*Vatica guangxiensis*) (Li et al., 2002; Zhang and Li, 2003; Li and Xa, 2005; Wang and Ge, 2006; Shah et al., 2008; Tang et al., 2008; Chen et al., 2014; Chen et al., 2014; Xiang et al., 2015; Zhao et al., 2016)。其中有 4 个物种分布的范围极其狭窄: 巧家五针松、丹霞梧桐、云南蓝果树和广西青梅 (后两者分别仅存一个种群)。其余 6 个物种在种群或地区之间表现出高度分化。另一项研究调查了一种国家级极小种群野生植物报春苣荬 (*Primulina tabacum*), 仅有三个已知种群分布在喀斯特地下水系洞穴的入口处。Wang et al. (2013) 发现, 在两个样本种群 (来自不同的洞穴) 以及同一洞穴中孤立的亚种群之间, 都存在着相当大的遗传差异。

苏铁属 (*Cycas*) 是中国最受威胁的植物类群之一。苏铁属均为国家一级保护植物, 有 11 种被列入国家极小种群野生植物名录。Zheng et al. (2017) 回顾了中国苏铁属植物的研究成果, 发现这些植物通常在物种水平上表现出较高的遗传多样性, 但种群间遗传分化明显。作者还提出了 6 条完善我国苏铁保护措施的指导意见, 从我们的观点来看, 这些指南也适用于大多数受威胁植物的保护, 并且已经在极小种群野生植物的保护遗传学研究中一再强调过。这些措施总结下来包括: 应优先保护遗传变异较高或具有特殊单倍型的群体; 就地和迁地保护应同等重视遗传上产生分化的种群; 种群间的杂交应注意避免远交衰退; 对遗传衰退的种群应进行人工控制的种群间杂交和/或重新引入其他种群的个体。其他建议包括: 应减少栖息地破坏和人类干扰; 应对无法就地恢复的种群实施迁地保护; 应收集种质并将其储存在种子库; 应促进保护教育和保护立法。

在 120 种国家发布的极小种群野生植物中, 一些人工建立的种群也进行了遗传多样性评估。这些物种包括: 云南金钱槭 (*Dipteronia dyeriana*)、广西火桐 (*Erythropsis kwangsiensis*)、猪血木 (*Euryodendron excelsum*)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*)、大别山五针松 (*Pinus dabeshanensis*)、广西青梅 (*Vatica guangxiensis*) (Li et al., 2002; Li et al., 2005; Qiu et al., 2007; Su et al., 2009; Luo et al., 2015; Zhang et al., 2016)。在这些物种的所有人工种群中都观察到了遗传多样性的下降, 但大多数研究都没有讨论这个现象。水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*) 自 20 世纪 40 年代作为活化石被发现以来, 引起了人们的广泛关注, 其人工繁殖后代的数量和分布已经超过了现有的自然种群 (Li et al., 2005)。虽然水杉被认为是被成功保护的物种, 但人工种群的遗传多样性还是比自然种群的遗传多样性要小 (Li et al., 2005)。研究认为由于缺乏要保存物种遗传多样性的知识, 过去的保护工作者们不经意的仅对水杉个别

单株(*M.glyptostroboides*)进行取样并扩繁,造成了这个现象。同样的情况也发生在了广西火桐(*Erythropsis kwangsiensis*)(Luo et al., 2015)和云南红豆杉(Mang et al., 2015)上(云南红豆杉没有列入极小种群野生植物名录)。

虽然迁地保护工作成果应该涵盖物种完整的遗传变异是一种常识,但要有多少变异才能说是足够的,仍然是一个重点讨论话题。对极小种群野生植物的研究中仅邱英雄等人(2007)提出了这个指标。他们发现:云南金钱槭(*Dipteronia dyeriana*)的迁地种群仅保留了该物种总 ISSR 片段多样性的 70.1 %。他们认为,按照 Marshall 和 Brown (1975)提出的采样标准,迁地保护应该至少保存云南金钱槭 95%的遗传变异。由于空间或其他资源的限制,对于大多数物种来说,实现这一目标十分困难,尽管对种子可长期贮藏的物种,种子库保存能够作为补充或替代手段。最近对华盖木(*Manglietiastrum sinucum*)的 SSR 片段多样性研究表明,该种有 70.3 %的物种遗传变异在昆明植物园得到了迁地保存, 46.9 % -54.5 %的物种遗传变异在自然生境中通过引种回归得以保存(陈叶, 2017)。PSESP 保护项目进展的各个阶段都需要得到保护效果的评估,这样的评估就需要评价遗传多样性的保护效果。因此,保护遗传学研究人员应在研究中重点考虑这个方向,积极参与到用研究指导保护政策的制定和实施中去(Laikre,2010)。

新一代高通量测序技术使保护基因组学成为一种基于全基因组信息的有效保护工具(Shafer et al.,2015)。科研人员对云南省的两个极小种群野生植物蒜头果(*Malania Oleifera*)(图 1)和漾濞槭(*Acer Yangbiense*)(图 1、图 3)的基因组进行了从头测序和组装(Xu et al.,2019; Yang et al.,2019)。这两个物种的基因组都没有显示出后期全基因组加倍的迹象。Yang et al.(2018)研究对比了极小种群植物天目铁木(*Ostrya rehderiana*)(5 个植株在野外生存)以及其广泛分布的同属植物铁木(*Ostrya chinensis*)的基因组,揭示了天目铁木经历种群崩溃、遗传多样性侵蚀的历史。这项研究揭示了极小种群植物通过消除高度有害突变而长期生存的遗传机制,是我国极小种群野生植物保护基因组学的开创性研究。

4.对未来的展望

《全国极小种群野生植物保护工程规划》的第一个五年计划已经完成,但应保持势头,扩大保护行动。包括需要进一步开展极小种群野生植物资源调查和清点、查明受威胁程度;开展繁殖生物学和遗传学研究;开展迁地和/或就地保护、监测和评估以及立法保护等措施。此外,应由来自各领域的研究人员讨论极小种群野生植物名录的修改和扩展。例如,我们最近提出,保护工作不应仅仅针对面临高灭绝危险的极小种群野生植物物种,也应密切关注

受威胁的、更为广布的物种，因为其孤立的种群也面临灭绝的威胁。

保护生物学是一门以危机为导向的学科，它处理受干扰物种、群落和生态系统的动态和问题。拯救受威胁物种对于种群数量极小的植物和动物物种都至关重要。虽然极小种群野生植物保护在过去 15 年中取得了一些成功，但应进一步探索极小种群野生植物这个新概念的各个方面，包括深入科学研究、提高公众意识、探索极小种群野生植物的潜在经济价值等。此外，还应讨论极小种群野生植物名录的扩展。极小种群野生植物今后的保护行动应考虑以下内容：

首先，了解极小种群野生植物的受威胁因素是量身定制保护措施的基本要求。先前的研究表明，传粉者和种子散播者的丧失可引发导致物种崩溃的机制，例如阿利效应（Allee effect）和无名种灭绝的后果（cryptic extinction）。极小种群野生植物通常分布在具有独特地形和生境的地区，其分布范围极其有限，极易受到生境破坏的压力。因此，花与传粉者、种子和种子散播者、花部器官和食草动物之间的相互作用需要深入研究。需要扩大对变化因素对物种生态相互依存影响的全面研究。

其次，气候变化也会影响保护区网络的有效性。因此，在自然保护区设计极小种群野生植物保护计划时应制定可行的、长期的措施。应促进立法以减少生境破坏和人类干扰。应重点保护代表性或旗舰植物物种，以支持生态系统的恢复。应科学管理受威胁的植物物种，例如如何增加新个体、减少来自其他物种的竞争、提供合适的微生境，以及进行人工异花授粉等。

第三，随着高通量测序技术的不断改进，基因靶向的方法和策略将可能有利于保护基因组学的努力。最近关于极小种群野生植物蒜头果 *Malania oleifera*、漾濞槭 *Acer yangbiense* 和天目铁木 *Ostrya rehderiana* 基因组的研究揭示了历史上的种群收缩和遗传多样性的丢失，以及影响种群数量极小物种的遗传机制。此外，保护进化生物学有助于了解物种如何适应和应对环境变化以确保长期生存，或在不断变化的条件下如何无法生存，从整体上研究各种因素和原因。因此，极小种群野生植物保护项目中应从演化的角度强调物种的过去、现在和未来的状态。

最后，重要的是应当开展长期监测、保护效果评估、保护适应性管理等措施以增强保护效果，确保极小种群野生植物的种群规模始终高于最小生存种群的规模。我们还建议，应该鼓励保护相关机构或组织（研究机构、政府机构、非政府组织和地方社区）开展跨领域和跨学科的保护工作，以实现极小种群野生植物的成功保护。我们希望这篇全面的综述将有助于促进中国的植物保护工作，使中国极小种群野生植物的保护行动成世界其他地区植物

多样性保护的重要模式之一。

致谢:

全体作者致谢以下项目的资助: 国家科技基础资源调查专项项目 (2017FY100100); 国家自然科学基金 (NSFC) - 云南联合基金重点项目 (U1302262、U1602264); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0502); 中国植物园联盟的本土植物全覆盖项目 (KFJ-3W-No1) 和云南省极小种群野生植物保护利用创新团队项目 (2019HC015)。

参考文献:

- Ali, M., Kennedy, C.M., Kiesecker, J., Geng, Y., 2018. Integrating biodiversity offsets within Circular Economy policy in China. *J. Clean. Prod.* 185, 32-43.
- Avise, J.C., Hamrick, J.L., 1996. *Conservation Genetics, Case Histories from Nature*. Chapman & Hall, New York.
- Bachman, S.P., Lughadha, E.M.N., Rivers, M.C., 2018. Quantifying progress toward a conservation assessment for all plants. *Conserv. Biol.* 32, 516-524.
- Barrett, S.C., Kohn, J.R., 1991. Genetic and evolutionary consequences of small population size in plants: implications for conservation, In *Genetics and conservation of rare plants*. eds D.A. Falk, K.E. Holsinger, pp. 3-30. Oxford University Press, New York.
- Bonte, D., Dahirel, M., 2017. Dispersal: a central and independent trait in life history. *Oikos* 126, 472-479.
- Browne, L., Karubian, J., 2018. Habitat loss and fragmentation reduce effective gene flow by disrupting seed dispersal in a neotropical palm. *Mol. Ecol.* 27, 3055-3069.
- Chen, S.F., Li, M.W., Hou, R.F., Liao, W.B., Zhou, R.C., Fan, Q., 2014a. Low genetic diversity and weak population differentiation in *Firmiana danxiaensis*, a tree species endemic to Danxia landform in northern Guangdong, China. *Biochem. Syst. Ecol.* 55, 66-72.
- Chen, W.H., Shui, Y.M., Yang, J.B., Wang, H., Nishii, K., Wen, F., Zhang, Z.R., Moeller, M., 2014b. Taxonomic status, phylogenetic affinities and genetic diversity of a presumed extinct genus, *Paraisometrum* WT Wang (Gesneriaceae) from the karst regions of southwest China. *PLoS One* 9.
- Chen, Y.K., Yang, X.B., Yang, Q., Li, D.H., Long, W.X., Luo, W.Q., 2014c. Factors affecting the distribution pattern of Wild Plants with Extremely Small Populations in Hainan Island, China. *PLoS One* 9.
- Chen, G., Luo, S.H., Mei, N.S., Shen, D.F., Sun, W.B., 2015. Case study of building of conservation coalitions to conserve ecological interactions. *Conserv. Biol.* 29, 1527-1536.

- Chen, G., Liu, C.Q., Sun, W.B., 2016a. Pollination and seed dispersal of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg (Thymelaeaceae): An economic plant species with extremely small populations in China. *Plant diversity* 38, 227-232.
- Chen, Y., Chen, G., Yang, J., Sun, W.B., 2016b. Reproductive biology of *Magnolia sinica* (Magnoliaceae), a threatened species with extremely small populations in Yunnan, China. *Plant diversity* 38, 253-258.
- Chen, Y., 2017. Conservation biology of *Manglietiastrum sinicum* Law (Magnoliaceae), a plant species with extremely small populations, In Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. University of Chinese Academy of Sciences.
- Chen, G., Sun, W.B., Wang, X.X., Kongkiatpaiboon, S., Cai, X.H., 2019. Conserving threatened widespread species: a case study using a traditional medicinal plant in Asia. *Biodivers. Conserv.* 28, 213-227.
- Fos, S., Laguna, E., Jimenez, J., Gomez-Serrano, M.A., 2017. Plant micro-reserves in Valencia (E. Spain): A model to preserve threatened flora in China? *Plant diversity* 39, 383-389.
- Frankham, R., 1995. Conservation genetics. *Annu. Rev. Genet.* 29, 305-327.
- Frankham, R., 2005. Genetics and extinction. *Biol. Conserv.* 126, 131-140.
- Frankham, R., 2010. Challenges and opportunities of genetic approaches to biological conservation. *Biol. Conserv.* 143, 1919-1927.
- Gao, Z.R., Zhang, C.Q., Han, Z.Q., Li, Z., Wei, J., Shi, H.L., 2012. Pollination biology and breeding system of *Craigia yunnanensis* in fragmented habitat. *Chinese Journal of Ecology* 31, 2217-2224.
- Garnett, S.T., Christidis, L., 2017. Taxonomy anarchy hampers conservation. *Nature* 546, 25-27.
- Ge, J., Cai, L., Bi, G.Q., Chen, G., Sun, W.B., 2018. Characterization of the complete chloroplast genomes of *Buddleja colvilei* and *B. sessilifolia*: implications for the taxonomy of *Buddleja* L. *Molecules* 23.
- Gratzfeld, J., 2017. What is conservation horticulture? *BGjournal* 14, 14-17.
- Huang, Y., Fu, J., Wang, W., Li, J., 2019. Development of China's nature reserves over the past 60 years: An overview. *Land Use Policy* 80, 224-232.
- Jin, X.H., Chen, S.C., Qin, H.N., 2005. Pollination system of *Holcoglossum rupestre* (Orchidaceae): A special and unstable system. *Plant Syst. Evol.* 254, 31-38.
- Kardos, M., Shafer, A.B.A., 2018. The peril of gene-targeted conservation. *Trends Ecol. Evol.* 33, 827-839.
- Laikre, L., 2010. Genetic diversity is overlooked in international conservation policy implementation. *Conserv. Genet.* 11, 349-354.
- Li, Q.M., Xu, Z.F., He, T.H., 2002. Ex situ genetic conservation of endangered *Vatica guangxiensis*

- (Dipterocarpaceae) in China. *Biol. Conserv.* 106, 151-156.
- Li, F.G., Xa, N.H., 2005. Population structure and genetic diversity of an endangered species, *Glyptostrobus pensilis* (Cupressaceae). *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 46, 155-162.
- Li, Y.Y., Chen, X.Y., Zhang, X., Wu, T.Y., Lu, H.P., Cai, Y.W., 2005. Genetic differences between wild and artificial populations of *Metasequoia glyptostroboides*: Implications for species recovery. *Conserv. Biol.* 19, 224-231.
- Li, D.Q., Peng, D.R., 2017. Study on the protection counter measure to Extremely Small Population of Wild Plant of Guangxi. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* 37, 14806-14807.
- Li, S., Sun, W., Ma, Y., 2018a. Current conservation status and reproductive biology of the giant tree *Rhododendron* in China. *Nord. J. Bot.* 36.
- Li, S.H., Sun, W.B., Ma, Y.P., 2018b. Does the giant tree rhododendron need conservation priority? *Global Ecology and Conservation* 15.
- Liu, J.G., Ouyang, Z.Y., Pimm, S.L., Raven, P.H., Wang, X.K., Miao, H., Han, N.Y., 2003. Protecting China's biodiversity. *Science* 300, 1240-1241.
- Liu, J., Lindstrom, A.J., Gong, X., 2016. Supplementary description of *Cycas hongheensis* (Cycadaceae) from Yunnan, China and its phylogenetic position. *Phytotaxa* 257, 71-80.
- Luo, W.H., Dai, W.J., Liu, J., Hu, X.H., Li, X.J., Huang, S.X., 2015. Comparison of genetic diversity of natural and ex-situ conservation populations of *Erythropsis kwangsiensis*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* 35, 66-71.
- Ma, Y.P., Chen, G., Grumbine, R.E., Dao, Z.L., Sun, W.B., Guo, H.J., 2013. Conserving plant species with extremely small populations (PSESP) in China. *Biodivers. Conserv.* 22, 803-809.
- Maron, J.L., Pearson, D.E., 2011. Vertebrate predators have minimal cascading effects on plant production or seed predation in an intact grassland ecosystem. *Ecol. Lett.* 14, 661-669.
- Marshall, D.R., Brown, A.H.D., 1975. Optimum sampling strategies in genetic conservation, In *Crop Genetic Resources for Today and Tomorrow*. eds O.H. Frankel, J.G. Hawkes, pp. 53-80. Cambridge University Press, Cambridge.
- Meng, H.H., Zhou, S.S., Li, L., Tan, Y.H., Li, J.W., Li, J., 2019. Conflict between biodiversity conservation and economic growth: insight into rare plants in tropical China. *Biodivers. Conserv.* 28, 523-537.
- Miao, Y.C., Su, J.R., Zhang, Z.J., Lang, X.D., Liu, W.D., Li, S.F., 2015. Microsatellite markers indicate genetic differences between cultivated and natural populations of endangered *Taxus yunnanensis*. *Bot. J. Linn. Soc.*

177, 450-461.

- Pan, H.L., Feng, Q.H., Long, T.L., He, F., Liu, X.L., 2014. Discussion on resource condition and protection technique for rare endangered species in Sichuan province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* 35, 41-46.
- Qian, S.H., Yang, Y.C., Tang, C.Q., Momohara, A., Yi, S.R., Ohsawa, M., 2016. Effective conservation measures are needed for wild *Cathaya argyrophylla* populations in China: Insights from the population structure and regeneration characteristics. *For. Ecol. Manage.* 361, 358-367.
- Qiu, Y.X., Luo, Y.P., Comes, H.P., Ouyang, Z.Q., Fu, C.X., 2007. Population genetic diversity and structure of *Dipteronia dyerana* (Sapindaceae), a rare endemic from Yunnan Province, China, with implications for conservation. *Taxon* 56, 427-437.
- Qiu, C., Hu, J.M., Yang, F.L., Liu, F., Li, X.W., 2018. Human pressures on natural reserves in Yunnan Province and management implications. *Sci. Rep.* 8.
- Shafer, A.B.A., Wolf, J.B.W., Alves, P.C., Bergstrom, L., Bruford, M.W., Brannstrom, I., Colling, G., Dalen, L., De Meester, L., Ekblom, R., Fawcett, K.D., Fior, S., Hajibabaei, M., Hill, J.A., Hoezel, A.R., Hoglund, J., Jensen, E.L., Krause, J., Kristensen, T.N., Kruetzen, M., McKay, J.K., Norman, A.J., Ogden, R., Osterling, E.M., Ouborg, N.J., Piccolo, J., Popovic, D., Primmer, C.R., Reed, F.A., Roumet, M., Salmons, J., Schenekar, T., Schwartz, M.K., Segelbacher, G., Senn, H., Thaulow, J., Valtonen, M., Veale, A., Vergeer, P., Vijay, N., Vila, C., Weissensteiner, M., Wennerstrom, L., Wheat, C.W., Zielinski, P., 2015. Genomics and the challenging translation into conservation practice. *Trends Ecol. Evol.* 30, 78-87.
- Shah, A., Li, D.Z., Gao, L.M., Li, H.T., Möller, M., 2008. Genetic diversity within and among populations of the endangered species *Taxus fuana* (Taxaceae) from Pakistan and implications for its conservation. *Biochem. Syst. Ecol.* 36, 183-193.
- Soule, M.E., 1985. What is conservation biology? *Bioscience* 35, 727-734.
- State Forestry Administration of China, 2012. *The Implementation Plan of Rescuing and Conserving China's PSESP (2011–2015)*. State Forestry Administration, Beijing, China.
- State Forestry Administration of China, 2018. Assessment Report of the *Implementation Plan of Rescuing and Conserving China's PSESP (2011–2015)*. State Forestry Administration, Beijing, China.
- Su, Y.J., Wang, T., Sun, Y.F., Ye, H.G., 2009. High ISSR variation in 14 surviving individuals of *Euryodendron excelsum* (Ternstroemiaceae) endemic to China. *Biochem. Genet.* 47, 56-65.
- Sun, W.B., 2013. Conservation of Plant Species with Extremely Small Populations in Yunnan - Practice and

Exploration. Yunnan Science and Technology Press, Kunming, China.

- Sun, W.B., 2016. Words from the Guest Editor-in-Chief. *Plant Diversity* 38, 207-208.
- Sun, W.B., Ma, Y.P., Blackmore, S., 2019a. How a new conservation action concept has accelerated plant conservation in China. *Trends Plant Sci.* 24, 4-6.
- Sun, W.B., Yang, J., Dao, Z.L., 2019b. Study and Conservation of Plant Species with Extremely Small Populations (PSESP) in Yunnan Province, China. Science Press, Beijing, China.
- Tang, S.Q., Dai, W.J., Li, M.S., Zhang, Y., Geng, Y.P., Wang, L., Zhong, Y., 2008. Genetic diversity of relictual and endangered plant *Abies ziyuanensis* (Pinaceae) revealed by AFLP and SSR markers. *Genetica* 133, 21-30.
- Tang, C.Q., Yang, Y.C., Ohsawa, M., Momohara, A., Hara, M., Cheng, S.L., Fan, S.H., 2011. Population structure of relict *Metasequoia glyptostroboides* and its habitat fragmentation and degradation in south-central China. *Biol. Conserv.* 144, 279-289.
- Valiente-Banuet, A., Aizen, M.A., Alcantara, J.M., Arroyo, J., Cocucci, A., Galetti, M., Garcia, M.B., Garcia, D., Gomez, J.M., Jordano, P., Medel, R., Navarro, L., Obeso, J.R., Oviedo, R., Ramirez, N., Rey, P.J., Traveset, A., Verdu, M., Zamora, R., 2015. Beyond species loss: the extinction of ecological interactions in a changing world. *Funct. Ecol.* 29, 299-307.
- Volis, S., 2016. How to conserve threatened Chinese plant species with extremely small populations? *Plant Diversity* 38, 45-52.
- Wang, X.Q., Ma, L.Y., Guo, B.X., Fan, S.H., Tan, J.X., 2005. Analysis on the change of the original *Metasequoia glyptostroboides* population and its environment in Lichuan Hubei from 1948 to 2003. *Acta Ecologica Sinica* 25, 972-977.
- Wang, H.W., Ge, S., 2006. Phylogeography of the endangered *Cathaya argyrophylla* (Pinaceae) inferred from sequence variation of mitochondrial and nuclear DNA. *Mol. Ecol.* 15, 4109-4122.
- Wang, Z.F., Ren, H., Li, Z.C., Zhang, Q.M., Liang, K.M., Ye, W.H., Wang, Z.M., 2013. Local genetic structure in the critically endangered, cave-associated perennial herb *Primulina tabacum* (Gesneriaceae). *Biol. J. Linn. Soc.* 109, 747-756.
- Wade, E.M., Nadarajan, J., Yang, X.Y., Ballesteros, D., Sun, W.B., Pritchard, H.W., 2016. Plant species with extremely small populations (PSESP) in China: A seed and spore biology perspective. *Plant diversity* 38, 209-220.
- Wang, B., Chen, G., Li, C.R., Sun, W.B., 2017. Floral characteristics and pollination ecology of *Manglietia ventii* (Magnoliaceae), a plant species with extremely small populations (PSESP) endemic to South Yunnan of China.

Plant diversity 39, 52-59.

- Wang, Y., Yu, C.Y., Yang, D., Yang, G.W., Zheng, J.X., Cai, W.J., 2018. Study on conservation gap of natural reserves in Yunnan Province. *Forest Inventory and Planning* 43, 55-58.
- Wei, R., Zhang, X.C., 2014. Rediscovery of *Cystoathyrium chinense* Ching (Cystopteridaceae): Phylogenetic placement of the critically endangered fern species endemic to China. *Plant Syst. Evol.* 52, 450-457.
- Wei, F.W., Shan, L., Hu, Y.B., Nie, Y.G., 2019. Conservation evolutionary biology: A new branch of conservation biology. *Scientia Sinica Vitae* 19, 498-508.
- Wu, F.Q., Shen, S.K., Zhang, X.J., Wang, Y.H., Sun, W.B., 2015. Genetic diversity and population structure of an extremely endangered species: the world's largest *Rhododendron*. *Aob Plants* 7.
- Xia, J., Lu, J., Wang, Z.X., Hao, B.B., Wang, H.B., Liu, G.H., 2013. Pollen limitation and Allee effect related to population size and sex ratio in the endangered *Ottelia acuminata* (Hydrocharitaceae): implications for conservation and reintroduction. *Plant Biol.* 15, 376-383.
- Xiang, Z.Y., Zhang, S.S., Yang, W.Z., Kang, H.M., 2015. Conservation of *Nyssa yunnanensis* based on genetic diversity analysis using ISSR markers. *Journal of Plant Genetic Resources* 16, 664-668.
- Xu, C.Q., Liu, H., Zhou, S.S., Zhang, D.X., Zhao, W., Wang, S., Chen, F., Sun, Y.Q., Nie, S., Jia, K.H., Jiao, S.Q., Zhang, R.G., Yun, Q.Z., Guan, W.B., Wang, X.W., Gao, Q., Bennetzen, J.L., Maghuly, F., Porth, I., Van de Peer, Y., Wang, X.R., Ma, Y.P., Mao, J.F., 2019. Genome sequence of *Malania oleifera*, a tree with great value for nervonic acid production. *Gigascience* 8.
- Yang, W.Z., Yang, Y.M., 2014. Conservation priorities of Wild Plant Species with Extremely Small Populations (PSESP) in Yunnan Province. *Journal of West China Forestry Science* 43, 1-9.
- Yang, J., Gao, Z.R., Sun, W.B., Zhang, C.Q., 2016. High regional genetic differentiation of an endangered relict plant *Craigia yunnanensis* and implications for its conservation. *Plant diversity* 38, 221-226.
- Yang, J., Sun, W.B., 2017. A new programme for conservation of Plant Species with Extremely Small Populations in south-west China. *Oryx* 51, 396-397.
- Yang, W.Z., Zhang, S.S., Wang, W.B., Kang, H.M., Ma, N., 2017. A sophisticated species conservation strategy for *Nyssa yunnanensis*, a species with extremely small populations in China. *Biodivers. Conserv.* 26, 967-981.
- Yang, Y.Z., Ma, T., Wang, Z.F., Lu, Z.Q., Li, Y., Fu, C.X., Chen, X.Y., Zhao, M.S., Olson, M.S., Liu, J.Q., 2018. Genomic effects of population collapse in a critically endangered ironwood tree *Ostrya rehderiana*. *Nature Communications* 9.
- Yang, J., Wariss, H.M., Tao, L.D., Zhang, R.G., Yun, Q.Z., Hollingsworth, P., Dao, Z.L., Luo, G.F., Guo, H.J., Ma,

- Y.P., Sun, W.B., 2019. De novo genome assembly of the endangered *Acer yangbiense*, a plant species with extremely small populations endemic to Yunnan Province, China. *GigaScience* 8.
- Yu, B.W., Chao, X.L., Zhang, J.D., Xu, W.H., Ouyang, Z.Y., 2016. Effectiveness of nature reserves for natural forests protection in tropical Hainan: a 20 year analysis. *Chinese Geographical Science* 26, 208-215.
- Zhai, D.L., Cannon, C.H., Slik, J.W.F., Zhang, C.P., Dai, Z.C., 2012. Rubber and pulp plantations represent a double threat to Hainan's natural tropical forests. *J. Environ. Manage.* 96, 64-73.
- Zhang, Z.Y., Li, D.Z., 2003. Conservation genetics of an extremely endangered Pine, *Pinus squamata*. *Acta Botanica Yunnanica* 25, 544-550.
- Zhang, J.J., Ye, Q.G., Yao, X.H., Zhang, S.J., Huang, H.W., 2008. Preliminary studies on the floral biology, breeding system and reproductive success of *Sinojackia huangmeiensis*, an endangered plant in a fragmented habitat in Hubei province, china. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* 32, 743-750.
- Zhang, X.N., Zhong, C.R., Yan, T.L., Zhang, Y., 2016a. The germplasm resource rescue of endangered mangrove (*Lumnitzera littorea* (Jack.) Voigt) by artificial pollination. *Ecological Science* 35, 38-42.
- Zhang, Z.Y., Wang, H., Chen, W., Pang, X.M., Li, Y.Y., 2016b. Genetic diversity and structure of native and non-native populations of the endangered plant *Pinus dabeshanensis*. *Gen. Mol. Res.* 15.
- Zhang, L.B., Luo, Z.H., Mallon, D., Li, C.W., Jiang, Z.G., 2017. Biodiversity conservation status in China's growing protected areas. *Biol. Conserv.* 210, 89-100.
- Zhang, Z.J., Guo, Y.P., He, J.S., Tang, Z.Y., 2018. Conservation status of wild plant species with extremely small populations in china. *Biodiversity Science* 26, 572-577.
- Zhao, J., Tong, Y.Q., Ge, T.M., Ge, J.W., 2016. Genetic diversity estimation and core collection construction of *Sinojackia huangmeiensis* based on novel microsatellite markers. *Biochem. Syst. Ecol.* 64, 74-80.
- Zheng, Y., Liu, J., Feng, X.Y., Gong, X., 2017. The distribution, diversity, and conservation status of *Cycas* in China. *Ecol. Evol.* 7, 3212-3224.
- Zomer, R.J., Xu, J.C., Wang, M.C., Trabucco, A., Li, Z.Q., 2015. Projected impact of climate change on the effectiveness of the existing protected area network for biodiversity conservation within Yunnan Province, China. *Biol. Conserv.* 184, 335-345.