



# 生物多样性丧失机制研究进展

魏辅文<sup>①\*</sup>, 聂永刚<sup>①</sup>, 苗海霞<sup>②</sup>, 路浩<sup>②</sup>, 胡义波<sup>①</sup>

① 中国科学院动物研究所, 动物生态与保护生物学中国科学院重点实验室, 北京 100101;

② 中国科学院生命科学与生物技术局, 北京 100864

\* 联系人, E-mail: weifw@ioz.ac.cn

2013-05-10 收稿, 2013-09-09 接受, 2014-01-16 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(31230011)和中国科学院知识创新项目(KSCX2-EW-Z-4)资助

**摘要** 生物多样性是地球上所有生命形式的总称, 包括物种多样性、遗传多样性以及生态系统多样性。其中, 物种多样性是核心, 它既体现了生物与环境之间的复杂关系, 又体现了生物资源的丰富性; 物种的保护是生物多样性保护的主要内容。生态系统内的物质循环和能量流动是通过许多错综复杂的食物链和食物网完成的, 而动物有机体在此过程中起关键作用。因此, 物种多样性, 特别是动物种类多样性将直接影响整个生态系统的功能。然而, 随着世界人口的持续增长和经济全球化的快速发展, 人类社会对地球上的生物多样性造成了愈来愈显著的影响, 在这一过程中产生的诸如栖息地丧失与破碎化、过度利用、环境污染、气候变化等现象已对物种的生存产生了严重威胁。本文以生物多样性丧失为主线, 回顾了近 10 多年来在该方向的主要进展, 重点关注人类活动对物种多样性的影响, 分析了生物多样性丧失的主要原因、特征及其危害, 介绍了生物多样性研究的最新方法, 并根据我国生物多样性的现状提出了未来生物多样性研究中需要重点关注的科学问题。

## 关键词

物种多样性  
遗传多样性  
生态系统多样性  
多样性丧失  
人类活动  
保护基因组学

生物多样性是指一个区域内生命形态的丰富程度, 是生物及其与环境有规律地结合所构成稳定的生态综合体以及与此相关的各种生态过程的总和。它包括物种多样性、遗传多样性及生态系统多样性三个层次。其中, 物种多样性是生物多样性的核心, 它既体现了生物与环境之间的复杂关系, 又体现了生物资源的丰富性。目前已知的生物大约有 200 万种, 这些形形色色的生物种类就构成了物种的多样性。生物多样性优先保护的對象是物种多样性, 只有物种存在, 遗传物质才能够不丢失, 生态系统才不至于退化或消失。对于一个健康的生态系统来说, 物质循环和能量流动是维持其基本功能的重要过程, 这一过程是通过许多错综复杂的食物链和食物网完成的, 而动物有机体在此过程中起关键作用。因此,

物种多样性, 特别是动物种类的多样性将直接影响整个生态系统的质量, 也一直是生物多样性研究与保护的重要内容。本文对 2003~2012 年发表在 *Nature*, *Science* 和 *Proc Natl Acad Sci USA* 三种期刊上有关生物多样性的研究进行了调研, 涉及该方面的文章约 1608 篇(*Nature* 391 篇、*Science* 525 篇、*Proc Natl Acad Sci USA* 692 篇), 其中关于生物多样性丧失的文章约 206 篇, 说明生物多样性的研究目前仍然是热点领域。本文在文献调研的基础上, 以生物多样性丧失为主线, 回顾了近 10 多年来的主要进展, 分析了当前生物多样性丧失的主要原因、特征及其后果, 并根据我国生物多样性的现状, 提出了未来我国生物多样性研究中需要重点关注的科学问题, 以期对从事相关领域研究的科技工作者有所帮助。

**引用格式:** 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 等. 生物多样性丧失机制研究进展. 科学通报, 2014, 59: 430-437

Wei F W, Nie Y G, Miao H X, et al. Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2014, 59: 430-437, doi: 10.1360/972013-557

## 1 全球生物多样性的现状

科学研究发现,在过去的6亿年间,由于地质和气候的变迁,地球上经历了5次物种大灭绝事件,而根据化石记录分析,目前地球上的生物多样性已达到了前所未有的高度<sup>[1]</sup>。但是,随着世界人口的持续增长和人类活动范围与强度的不断增加,人类社会对地球上的生物多样性产生了愈来愈显著的影响,打破了生物多样性相对平衡的格局,在这一过程中产生的栖息地丧失与破碎化、资源过度利用、环境污染等现象已对物种的生存与繁衍构成了严重威胁。Barnosky 等人<sup>[2]</sup>分析比较了化石种和近代物种灭绝的数据,结果显示,当前物种灭绝的速度比预期要高得多。认为全球第六次物种大灭绝可能已经到来,而且这种灭绝速度有可能还被低估,因为很多物种在未被人类认识之前就已经消失了。不过,对于这一观点也有学者持不同看法,He 和 Hubbell<sup>[3]</sup>认为,当前物种的灭绝速度可能被高估了,因为传统的物种灭绝速率的估算方法 SAR(species-area relationship)是根据受破坏的生态环境面积逆向推导计算物种灭绝速率,使其得出的物种灭绝速率总是比实际观察到的高。虽然目前关于第六次生物大灭绝是否已经到来在学术界仍有争论,但有一个不争的事实,那就是由于近期人类活动的加剧,目前地球上的生物多样性正面临严重的威胁。研究认为,当前全球大约有1/5的脊椎动物处于濒危和易危状态,每年平均约有50个物种会走向下一个濒危等级,而目前人类所做的保护工作仍不足以阻止这一趋势<sup>[4]</sup>。2012年世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)濒危物种红色名录显示,在所有受评估的6万多类生物物种里,已经灭绝和受到不同程度威胁的占32%;而在所有受威胁的物种中,两栖类最高,约占41%。由于受社会生产力和经济发展的影响,全球物种受威胁最严重的区域主要集中在热带地区,多为印尼、印度、巴西等发展中国家。在这些地区,人们对资源的过度利用导致大量的热带雨林被砍伐、猖獗的盗猎活动等现象已对当地物种的生存构成严重威胁。同时,社会经济发展过程中所产生的诸如环境污染、气候变化等问题也在进一步威胁区域内物种的多样性<sup>[4,5]</sup>。虽然中国在地理位置上大部分属于北温带,但由于经济的高速发展,生物多样性同样面临严重威胁,许多物种处于濒危状态,存在灭绝风险。

## 2 生物多样性丧失的原因与特征

除自然条件改变导致的生物多样性丧失外,现代人类社会和经济发展所引起的栖息地丧失与破碎化、对动植物资源的过度利用、气候变化、环境污染、生物入侵以及动物疫病等现象是造成全球生物多样性丧失的主要因素。

### 2.1 栖息地丧失与破碎化

在所有影响生物多样性的因素中,栖息地丧失与破碎化被认为是造成生物多样性下降的最主要原因,其产生的危害也最大,往往不可恢复<sup>[6]</sup>。Kerr 和 Deguise<sup>[7]</sup>对生活在加拿大的243种受威胁等级不同的陆生物种的生存现状进行分析发现,尽管加拿大具有广阔的荒野,但农业活动导致的栖息地破碎化使得区域内物种恢复难度增加。他们认为,栖息地破碎化是妨碍物种恢复的主要因素。栖息地破碎化对物种的生存产生了严重的威胁,而其对不同物种的作用程度往往不同。研究认为,在栖息地面临严重破碎化时,处于高营养级的生物往往具有较强的灭绝延迟能力,学者们用灭绝债务(extinction debt)来表示这一现象,其主要观点为,人类破坏生态系统所导致的生活与该生态系统内物种的灭亡在时间上存在着几十年甚至几个世纪的延迟,并认为这一延迟过程可为人类进行及时有效的保护和拯救行动争取宝贵时间<sup>[8,9]</sup>。另外,不同物种的受威胁状况也存在显著的地理差异。Fritz 等人<sup>[10]</sup>对5020种现生哺乳动物进行研究,发现体型较大的物种在热带地区具有显著高的灭绝风险,而历史上生存在热带地区以外的哺乳动物数量的下降主要是由于人类活动造成的大范围的土地开发所引起的;此外,受人类活动的影响,一些分布范围窄、数量稀少的大型哺乳类物种目前正面临很高的灭绝风险。

对动物而言,栖息地破碎化主要通过影响其种群动态、繁殖成功率以及遗传变异等产生作用。栖息地的破碎化使得物种生存空间缩小并最终导致区域内物种种群数量下降或灭绝。破碎化可影响动物的繁殖活动。对鸟类的繁殖活动研究发现,在破碎化的栖息地内,鸟类的每日筑巢成功率均显著低于那些生活于连续栖息地内的同种鸟类<sup>[11]</sup>。破碎化的另一重要影响主要表现为阻碍个体或种群间的交流,导致形成小种群,进而导致遗传分化和遗传多样性的

丧失. Dixon 等人<sup>[12]</sup>的研究发现, 人类活动的加剧阻碍了佛罗里达美洲黑熊(*Ursus americanus floridanus*)种群个体间的扩散, 导致基因流受阻, 形成遗传分化程度很高的 9 个种群. 另外, 在袋鼯(*Antechinus agilis*)的研究中也发现, 由于破碎化所引起的栖息地质量下降和隔离作用导致了其种群数量下降和遗传多样性改变<sup>[13,14]</sup>. 对于一个物种而言, 栖息地丧失与破碎化首先作用于种群水平, 种群的消失速度比一个物种的灭绝速度要快得多<sup>[1]</sup>. 因此, 加强对栖息地破碎化所形成的孤立小种群命运的关注, 对生物多样性保护具有重要意义. 例如, 历史上大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)的分布范围很广, 而如今被分割形成了由南向北的 20 多个孤立种群. 种群遗传学研究发现, 由于历史上人口的快速扩张和人类活动的不断加剧, 小相岭山系的大熊猫种群曾发生严重的种群崩溃事件, 进而形成了孤立的小种群; 而近期人类活动的影响, 如 108 国道的修建, 则进一步阻碍了大熊猫的扩散与基因流, 加剧了这些小种群的灭绝风险<sup>[15-17]</sup>. 根据这些研究结果, 目前相关主管部门已在这些区域实施大熊猫放归和生态廊道建设工程, 以挽救该区域内孤立的大熊猫小种群.

## 2.2 过度利用

地球为人类提供了各类重要的生存资源, 然而, 由于人类对生物资源的过度需求所导致的非法利用已对全球生物多样性保护构成严重威胁. 目前, 人类对动植物资源过度利用的现象广泛存在, 非法动植物贸易也已成为各国共同关注的国际问题. 2013 年 3 月, 濒危野生动植物种国际贸易公约(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES)在泰国曼谷举行第十六届缔约方大会, 来自全球各地约 2000 名代表参会, 他们将决定这个世界上包括非洲象(*Loxodontaafricana*)、白犀牛(*Ceratotherium simum*)、北极熊(*Ursus maritimus*)在内的众多濒危物种的命运. 研究发现, 在全球受威胁的物种中, 30%是由于国际贸易引起的<sup>[18]</sup>. 其中, 最具代表性的就是犀牛(*Dicerorhinus*), 由于人类对犀牛角无止境的需求, 导致其价格甚至超过了黄金, 从而在非洲引起了疯狂的盗猎行为, 使得非洲犀牛的数量急剧下降, 个别地区甚至面临灭绝的风险<sup>[19]</sup>. 除犀牛外, 人类对象牙制品的需求也导致每年数以万计的野生大象被非法猎杀. 联合国环境规划署(United

Nations Environment Programme, UNEP)和 CITES 等机构联合发布的报告显示, 非法象牙贸易在过去 10 年里增至 3 倍, 而随着非法象牙贸易的不断增长, 非洲中西部的象数量将持续下降. CITES 网络对部分非洲大象数量的监测显示, 仅 2011 年就有约 1.7 万头大象被非法猎杀, 这已严重威胁到其种群的未来. 人类对动植物资源的利用除了直接导致物种的种群数量下降甚至灭绝外, 也会造成种群遗传特征的变化, 如种群遗传分化、遗传多样性丧失以及选择性的遗传变化等, 进而影响种群的生存力<sup>[20]</sup>. 因此, 加强生物多样性保护, 除需要制定相关法律措施来防止非法贸易所引起的物种多样性丧失外, 还需要制定合理的资源利用规则, 如基于基本的遗传学原理, 结合分子遗传学的监测进行合理利用, 从而将生物资源利用过程中产生的种群遗传学影响降到最低.

## 2.3 气候变化

在过去的几亿年间, 地球经历了多次大的地质和气候变化过程, 这些由于自然条件的改变所引起的地质变化和气候异常现象对地球上的生命体产生了重要影响, 导致了在地球漫长的历史进程中 5 次大的物种灭绝事件发生. 然而, 在工业革命全面开展仅仅 200 多年后, 地球生物却面临了前所未有的生存危机, 这个危机来自全球气候变化. 以二氧化碳为主的温室气体大肆排放, 造成了全球气温持续升高. 特别是 20 世纪以来, 全球平均温度升高了 0.3~0.6℃. 随着气候变暖, 北半球的冰雪覆盖量和冰雪厚度在过去的几十年间已经显著下降. 由于人类活动和社会发展所导致的气候变化对生物多样性的影响已越来越显著. 气候变化对生物物候、分布、迁徙、群落结构、栖息地质量、生态系统、景观以及遗传多样性都产生了一定的影响. 近年来的一系列研究已经证明气候变化已严重影响物种的种群动态以及遗传特征. 温室效应引起的全球气温上升已改变许多物种的生存环境, 并进一步影响其种群动态. Molnár 等人<sup>[21]</sup>运用能量收支模型预测北极熊在未来气温变暖情况下的繁殖能力(每窝产仔数), 结果显示, 在西哈德逊海湾, 气候变暖导致的大量冰块融化使得北极熊的食物获得变得越来越困难, 从而引起生育率下降, 损害种群的生存力. 气候变化导致的物种生存环境的改变会促进生物体随之产生适应性的遗传变异. 例如, 在北半球, 由于温度上升引起的积雪覆盖率减

少已对当地物种的皮毛颜色产生影响。研究发现,为适应不断变化的气候条件,黄鸮(*Strix aluco*)羽毛颜色在过去的 30 年内发生了变异,并最终分化成褐色和灰色两种不同的体色<sup>[22]</sup>。关于气候变化对生物多样性的影响,有一个重要的假说——临界点(tipping points)假说,认为全球气温在逐渐上升过程中正在对物种的数量和分布产生一系列复杂的影响,直到产生某些不可逆转的生态变化,即临界点的到来,那时,无论人类如何努力都将无法使其恢复到历史状态,地球上的生物多样性也将遭受严重破坏<sup>[23]</sup>。相关的研究发现,原本生活在英国一些小岛上的红背伯劳(*Lanius collurio*),随着气温的升高,其分布范围在逐渐扩大,而且由于温度上升导致了生物物候的改变,使得生活在小岛上的个体已经逐渐丧失繁殖能力<sup>[23]</sup>。一项关于气候变化对秦岭山系大熊猫分布区主食竹分布的影响研究表明,大熊猫主食竹分布区在未来 100 年内将极大退缩,严重威胁到该区域内大熊猫的生存<sup>[24]</sup>。

人类活动所造成的气候变化对生物多样性的影响是一个长期的过程。最新的研究表明,全球气候变化已在不同水平影响生物多样性,未来将会有更多的物种逐渐消失<sup>[25]</sup>。目前,温室效应气体(greenhouse gas)的排放所造成的气候变暖速度已经超过以往一万年的总和,而普遍的共识是气温的升高应该控制在 2℃以内。由于各国在哥本哈根气候峰会没有达成普遍共识,未能出台一份具有法律约束力的协议文件,分析认为,以目前温室气体的排放速度,预测排放超限可能会在 2100 年出现。而估计到 2070 年,全球许多重点区域每月都将遭受到极端气候的影响,届时,高达 86%的陆地系统和 83%的水生系统都将暴露于恶劣的气候状况下。因此,减少温室气体的排放已迫在眉睫<sup>[26]</sup>。

## 2.4 环境污染

环境污染是一种生态破坏,随着全球经济的高速发展,大量的废弃物被不断排放,污染已存在于陆地、水域、大气以及太空的各个角落。环境污染对物种多样性的影响主要表现为:(i) 污染物的直接毒害作用。通过有毒物质的毒害作用阻碍有机体的正常生长发育,使生物丧失生存或繁衍能力;(ii) 污染引起环境的改变,导致物种丧失生存的环境;(iii) 污染物在生态系统中通过生物富集作用,影响食物链

后端生物的生存与繁殖。研究表明,当前快速发展的城市化改变了传统的土地利用模式,不仅造成了栖息地的破碎化,同时也导致了严重的环境污染,严重威胁到许多物种的生存,进而影响生态系统服务和资源利用模式<sup>[27]</sup>。目前,除了常见的大气、水、土壤等污染对生物多样性产生威胁外,在社会经济发展过程中出现的一些新型污染的影响也在逐渐显现。例如,由于在城市化发展过程中电力的广泛应用,黑暗的缩短与缺失已对物种生存和生物多样性产生不可忽视的影响,许多夜行性物种被迫长时间暴露于光照之下,增加了被捕食的风险,也在一定程度上改变了动物的繁殖规律,分析认为,两栖类物种的大量灭绝可能与这类污染直接相关<sup>[28]</sup>。因此,“光污染”、“噪声污染”、“重金属污染”等新型污染源在生物多样性研究和保护中需引起高度重视,应加强相关研究的力度并制定合理的应对措施。目前,环境污染不仅分布范围广,而且已对多种生物有机体产生影响,其中也包括一些珍稀濒危的物种。Dai 等人<sup>[29]</sup>和 Hu 等人<sup>[30]</sup>的研究表明,溴代阻燃剂是大熊猫组织中的主要污染物,并首次在大熊猫体内发现 2 种新的溴代阻燃剂污染物,而且在睾丸中含量最高,推测其可能会对大熊猫的生殖有较大的影响。

## 2.5 生物入侵

生物入侵,也称外来物种入侵,指外源生物被引入本土,并迅速蔓延失控,造成本土种类濒临灭绝并引发其他危害的现象。当前,生物入侵已成为普遍现象,入侵生物的种类基本包括所有的生物类群,也几乎影响到所有的生态系统和生物区系。生物入侵不仅造成巨大的经济损失,同时也对全球生物多样性保护产生严重威胁,近 10 年来,生物入侵已成为全球共同关注的重要生态学问题。生物入侵主要包括自然和人为两种途径,特别是随着人类社会的发展和经济全球化进程的加快,人类活动造成的外来物种入侵已成为生物入侵的主要方式。人为引入的最初目的主要是为了经济利益,然而,引入种往往会在当地迅速扩张并产生严重的生态后果。外来物种入侵对本地物种多样性的影响主要表现为加快本地物种的灭绝速度,使物种多样性锐减,同时还可能导致物种遗传多样性丢失和遗传污染。一般来说,能够成功入侵的外来物种往往具有较强的竞争能力,容易抑制或排挤本地物种,最终导致入侵地物种多样性

及遗传多样性的丧失. 研究发现, 在过去的 200 年间, 欧洲和新西兰的外来物种数量急剧增加, 已对本地物种和生物多样性保护造成严重威胁<sup>[31]</sup>. 总的来说, 生物入侵对生物多样性的影响已越来越显著, 如何加以应对也是生物多样性保护的重要科学问题. 正如 Simberloff 等人<sup>[31]</sup>所说, 生物入侵往往由最初的有利变成后来的负担, 它的影响存在于种群、群落以及生态系统的每个水平. 而人们采取的应对措施也主要是阻止、根除以及长期的管理, 但是每种措施都有利弊, 代价与结果往往有很大差异. 未来生物入侵学科的研究方向和目标就是帮助人们理解一种生物的进入将如何改变本地生物多样性以及生态系统的功能, 从而更好地利用和解决生物入侵带来的利弊.

## 2.6 动物疫病

动物疫病是指动物传染病、寄生虫病等. 近年来, 随着经济全球化进程的加快, 动物及动物制品的流通越来越频繁, 动物疫病的传播途径也在不断增多, 而全球气候的变化进一步加剧了动物疫病的发病和传播几率, 不仅在经济上造成重大损失, 同时也严重危害了人类的健康和生命安全. 在刚刚过去的 10 几年间就有严重急性呼吸综合征(severe acute respiratory syndrome, SARS)、禽流感等具有较大危害的动物疫病发生. 动物疫病的危害途径主要表现在动物与动物之间以及动物与人类之间的相互传播<sup>[32]</sup>. Gozlan 等人<sup>[33]</sup>的研究发现, 携带病菌的亚洲鲤科鱼类小赤梢鱼(*Pseudorasbora parva*)进入欧洲鱼类麦名(*Leucaspis delineatus*)的水域, 会导致整个水域内麦名的数量在短期内急剧下降并最终灭绝, 分析认为引种前疫病的检测评估尤为重要. 除了病毒和病菌所引起的动物疫病具有较大的危害外, 近期的研究发现, 真菌的感染也对生物体产生了严重威胁. 通过分析全球范围由真菌引起的传染疾病在动植物内的感染情况、全球分布状况以及最近百年间导致的物种灭绝情况, 发现由真菌引起的传染疾病已严重威胁到全球生物多样性的安全<sup>[34]</sup>. 动物疫病的一个特别值得关注的危害是病毒和病菌可在动物与人之间进行传播, 如 SARS、鼠疫、禽流感病毒等. Köndgen 等人<sup>[35]</sup>对死亡的非洲黑猩猩(*Gorilla gorilla*)个体进行病毒检验, 发现人类(旅游或科研活动)在与黑猩猩的接触过程中可向猩猩传播病毒而导致其种群数量下降, 建议减少人类与野生动物的直接接触, 避免传染

性疾病在人类与动物之间传播, 从而降低对野生动物的威胁; 同样, 也可降低有害病原体由动物向人类传播的几率. 在动物疫病的研究和防控中, 一个重要的问题就是病原体的快速变异. 疫病会导致许多物种种群数量的下降甚至灭绝, 这种由病毒和病菌引起的选择压力会促进宿主不断产生快速的协同进化, 从而对动物疫病的有效控制构成严峻挑战. 病原微生物和宿主的共同进化会成为决定生物多样性的主要因素. 因此, 在对动物疫病进行研究和制定应对措施时应充分考虑这一问题, 需重点关注那些濒危宿主以及对宿主有严重威胁的病原微生物, 掌握其传播规律及其快速进化的机制.

## 3 生物多样性丧失对生态系统功能的作用特征

生物多样性丧失对生态系统的影响也一直是生物多样性研究的热点之一. 一般来说, 生物多样性水平越高, 越有利于生态系统的稳定. 生物多样性高的生态系统内食物链多, 食物网更为复杂, 为能量流动提供了多种选择途径, 使各营养级间的能量流动更能趋于稳定. 近期的一些研究也发现, 生态系统的功能主要由系统内有机体的功能特点所决定而并非完全依赖于物种的数目, 群落对生境变化的反应也可通过优势种的功能特点来预测<sup>[36]</sup>. Cardinale 等人<sup>[37]</sup>通过实验控制物种的多样性, 模拟生态系统内物种丧失对生物多样性的影响, 结果表明, 物种丧失确实影响到生态系统的功能, 但其影响程度却最终由消失的物种在该生态系统内的地位特征来决定. 另外, 最新的一项研究表明, 本地物种对生态系统的稳定往往起决定作用, 认为生物多样性尤其是本地物种的丧失将造成生态系统内的生产能力和分解能力的改变, 进而破坏生态系统的结构与功能, 使得整个生态系统面临巨大压力. 这一点应逐渐引起重视并制定科学的管理措施, 将对生物多样性保护起到至关重要的作用<sup>[38]</sup>. 因此, 加强生态系统内物种多样性保护, 特别是本地优势物种的保护将直接关系到整个生态系统的稳定与功能的发挥.

## 4 基因组学在生物多样性研究中的应用

近年来, 基因组学和生物信息学的迅速发展, 为生物多样性研究提供了革新性的研究工具. 大量动

植物全基因组序列的公布使得研究者从基因组水平全面且深入地探索物种的遗传多样性、进化历史及遗传格局等深层次的问题成为可能,并产生了种群基因组学和保护基因组学等新兴分支学科.通过在种群水平进行基因组重测序,应用种群基因组学(population genomics)方法可以详细评估物种的遗传多样性,重构物种的动态历史,揭示种群动态和分歧历史,并探讨种群波动与分歧的驱动因素<sup>[39]</sup>.例如,Gutenkunst 等人<sup>[40]</sup>基于不同种群重测序的单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)数据,用种群内和种群间 SNP 的联合频率谱,采用扩散近似种群历史推断法(diffusion approximations for demographic inference),揭示了人类走出非洲的种群动态及分歧历史.Zhao 等人<sup>[41]</sup>通过对大熊猫全基因组和 48 个个体的重测序进行种群基因组学分析,发现在基因组水平,大熊猫仍具有较高的遗传多态性,揭示了大熊猫在长期的进化历程中经历了 2 次种群扩张、2 次种群瓶颈和 2 次种群分歧事件;揭示了大熊猫的濒危历史,即第四纪冰期气候变化和近期人类活动可能是影响种群波动的主要因素,独特的秦岭种群约在 30 万年前开始分化,与第四纪倒数第二个冰期(penultimate glaciations)的发生时间相吻合,而岷山和其他种群的分化约在 2800 年前,可能与当时的人类活动密切相关.

另外,应用保护基因组学(conservation genomics)思想,可鉴定适应性进化或受环境变化影响的基因位点,揭示物种的适应性进化和环境变化响应的遗传机制.此类研究主要是基于全基因组水平的数据,

鉴定物种适应性进化的基因位点,探讨那些决定物种对环境适应所产生的形态或行为变异、抗病或抗逆境能力等的关键基因在物种进化历程中的作用<sup>[42,43]</sup>.例如,Zhao 等人<sup>[41]</sup>通过对大熊猫种群间全基因组水平的 SNP 数据进行选择信号分析,发现种群间受到选择作用的位点包含与味觉、嗅觉等感知系统方面相关的基因.其中在秦岭和其他区域大熊猫种群之间,2 个苦味受体基因 *Tas2r3* 和 *Tas2r49* 受到显著的正选择作用,推测可能与秦岭大熊猫摄食更多的含苦味物质的竹叶有关.

## 5 展望

我国地域辽阔,自然条件复杂多样,由南向北跨越不同的气候带.青藏高原的隆起形成独特的自然地理环境,造就了丰富多样的生物种类,使我国成为全球生物多样性最丰富的国家之一.但是,随着最近几十年内人口的迅速扩张和社会经济的高速发展,人类活动已对我国生物多样性产生严重威胁.为阻止我国生物多样性的进一步丧失,除制定合理的保护和管理措施外,还有许多科学问题亟待我们去探讨和解决.(i) 如何精准地评估生物多样性受威胁格局和变化趋势;(ii) 栖息地破碎化所导致的生态和遗传后果;(iii) 小种群的崩溃与灭绝机制;(iv) 气候变化对物种分布、表型、行为、生理和遗传的影响;(v) 环境和气候变化对种群波动的影响;(vi) 野生动物病原体传播规律和病原体与宿主的协同进化模式;(vii) 环境污染物所引起的生态毒理效应;(viii) 外来物种与本地物种的拮抗与共存机制.

## 参考文献

- 1 Dirzo R, Raven P H. Global state of biodiversity and loss. *Annu Rev Environ Resour*, 2003, 28: 137-167
- 2 Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, et al. Has the earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471: 51-57
- 3 He F, Hubbell S P. Species-area relationships always overestimate extinction rates from habitat loss. *Nature*, 2011, 473: 368-371
- 4 Hoffmann M, Hilton-Taylor C, Angulo A, et al. The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. *Science*, 2012, 330: 1503-1509
- 5 Ceballos G, Ehrlich P R. Global mammal distributions, biodiversity hotspots, and conservation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 19374-19379
- 6 Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 2001, 292: 281-284
- 7 Kerr J T, Deguise I. Habitat loss and the limits to endangered species recovery. *Ecol Lett*, 2004, 7: 1163-1169
- 8 Kuussaari M, Bommarco R, Heikkinen R K, et al. Extinction debt: A challenge for biodiversity conservation. *Trends Ecol Evol*, 2009, 24: 564-571
- 9 Krauss J, Bommarco R, Guardiola M. Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecol Lett*, 2010, 13: 597-605

- 10 Fritz S A, Bininda-Emonds O R P, Purvis A. Geographical variation in predictors of mammalian extinction risk: Big is bad, but only in the tropics. *Ecol Lett*, 2009, 12: 538–549
- 11 Newmark W D, Stanley T R. Habitat fragmentation reduces nest survival in an Afrotropical bird community in a biodiversity hotspot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 11488–11493
- 12 Dixon J D, Oli M K, Wooten M C, et al. Genetic consequences of habitat fragmentation and loss: The case of the Florida black bear (*Ursus americanus floridanus*). *Conserv Genet*, 2007, 8: 455–464
- 13 Banks S C, Finlayson G R, Lawson S J. The effects of habitat fragmentation due to forestry plantation establishment on the demography and genetic variation of a marsupial carnivore, *Antechinus agilis*. *Biol Conserv*, 2005, 122: 581–597
- 14 Banks S C, Lindenmayer D B, Ward S J, et al. The effects of habitat fragmentation via forestry plantation establishment on spatial genotypic structure in the small marsupial carnivore, *Antechinus agilis*. *Mol Ecol*, 2005, 14: 1667–1680
- 15 Zhu L F, Zhan X J, Wu H, et al. Drastic reduction of the smallest and most isolated giant panda population: Implications for conservation. *Conserv Biol*, 2010, 24: 1299–1306
- 16 Zhu L F, Zhan X J, Meng T, et al. Landscape features influence gene flow as measured by cost-distance and genetic analyses: A case study for giant pandas in the Daxiangling and Xiaoxiangling Mountains. *BMC Genet*, 2010, 11: 72
- 17 Zhu L F, Zhang S N, Gu X D, et al. Significant genetic boundaries and spatial dynamics of giant pandas occupying fragmented habitat across Southwest China. *Mol Ecol*, 2011, 20: 1122–1132
- 18 Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 2012, 486: 109–112
- 19 Graham-Rowe D. Biodiversity: Endangered and in demand. *Nature*, 2011, 480: S101–S103
- 20 Allendorf F W, England P R, Luikart G, et al. Genetic effects of harvest on wild animal populations. *Trends Ecol Evol*, 2008, 23: 327–337
- 21 Molnár P K, Derocher A E, Klanjscek T, et al. Predicting climate change impacts on polar bear litter size. *Nat Commun*, 2012, 2: 186
- 22 Karell P, Ahola K, Karstinen T, et al. Climate change drives microevolution in a wild bird. *Nat Commun*, 2011, 2: 208
- 23 Pimm S L. Climate disruption and biodiversity. *Curr Biol*, 2009, 19: R595–R601
- 24 Tuanmu M N, Viña A, Winkler J A, et al. Climate-change impacts on understorey bamboo species and giant pandas in China's Qinling Mountains. *Nat Clim Chang*, 2013, 3, doi:10.1038/nclimate1727
- 25 Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol Lett*, 2012, 15: 365–377
- 26 Beaumont L J, Pitman A, Perkins S. Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 2306–2311
- 27 Grimm N B, Foster D, Groffman P, et al. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Front Ecol Environ*, 2008, 6: 264–272
- 28 Holker F, Wolter C, Perkin E K, et al. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25: 681–682
- 29 Dai J, Li M, Jin Y, et al. Perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in red panda and giant panda from China. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 5647–5652
- 30 Hu G C, Luo X J, Dai J Y, et al. Brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in captive giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and red panda (*Ailurus fulgens*) from China. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 4704–4709
- 31 Simberloff D, Martin J L, Genovesi P, et al. Impacts of biological invasions: What's what and the way forward. *Trends Ecol Evol*, 2013, 28: 58–66
- 32 Daszak P, Cunningham A A, Hyatt A D. Emerging infectious diseases of wildlife—threats to biodiversity and human health. *Science*, 2000, 287: 443–449
- 33 Gozlan R E, St-Hilaire S, Feist S W, et al. Biodiversity: Disease threat to European fish. *Nature*, 2005, 435: 1046
- 34 Fisher M C, Henk D A, Briggs C J, et al. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*, 2012, 484: 186–194
- 35 Köndgen S, Kühl H, N'Goran P K, et al. Pandemic human viruses cause decline of endangered great apes. *Curr Biol*, 2008, 18: 260–264
- 36 O'Connor N E, Crowe T P. Biodiversity loss and ecosystem functioning: Distinguishing between number and identity of species. *Ecology*, 2005, 86: 1783–1796
- 37 Cardinale B J, Srivastava D S, Duffy J E, et al. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature*, 2006, 443: 989–992
- 38 Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, 486: 105–109
- 39 Li H, Durbin R. Inference of human population history from individual whole-genome sequences. *Nature*, 2011, 475: 493–496
- 40 Gutenkunst R N, Hernandez R D, Williamson S H, et al. Inferring the joint demographic history of multiple populations from multidimensional SNP frequency data. *PLoS Genet*, 2009, 10: e1000695
- 41 Zhao S C, Zheng P P, Dong S S, et al. Whole genome sequencing of giant pandas provides insights into demographic history and local adaptation. *Nat Genet*, 2013, 45: 67–71

- 42 Luikart G, England P R, Tallmon D, et al. The power and promise of population genomics—from genotyping to genome typing. *Nature*, 2003, 4: 981–994
- 43 Allendorf F W, Hohenlohe P A, Luikart G. Genomics and the future of conservation genetics. *Nature*, 2010, 11: 697–709

---

## Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms

WEI FuWen<sup>1</sup>, NIE YongGang<sup>1</sup>, MIAO HaiXia<sup>2</sup>, LU Hao<sup>2</sup> & HU YiBo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>2</sup>Bureau of Life Sciences and Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China

Biodiversity is the sum total of all life on earth and encompasses genetic diversity, species diversity and ecosystem diversity. Among these three levels of diversity, species diversity reflects not only the relationship between life and the environment, but also the richness of biological resources. The main goal of biodiversity conservation is thought to be the protection of species. Animals play an important role in the processes of material cycling and energy flow in ecosystems through the use of intricate food chains and webs. Thus species diversity, especially animal diversity, directly affects the functioning of ecosystems. However, as a result of the sustained increase in the world's human population and the rapid development of economic globalization, human society has heavily affected the world's biodiversity and caused a series of ecological consequences such as habitat loss and fragmentation, pollution, and climate change. These changes have seriously threatened the survival of many species on Earth. In this paper, we reviewed advancements in the research related to this ongoing loss of biodiversity over the past ten years by focusing on the influences of human activities on biodiversity and analyzing the primary drivers, characteristics and impacts of this loss in biodiversity. We also introduce some new biodiversity research methods and raise some important scientific questions that address the future of biodiversity research.

**species diversity, genetic diversity, ecosystem diversity, diversity loss, human activity, conservation genomics**

doi: 10.1360/972013-557