



· 综述 ·

## 中国大鲵种质资源保护与利用研究进展

蒋万胜<sup>1,2\*</sup>, 兰香英<sup>1,2</sup>, 王金秀<sup>1,2</sup>, 向红梅<sup>1</sup>, 田贺<sup>1,2</sup>, 罗庆华<sup>1,2</sup>

(1. 吉首大学, 大鲵资源保护与综合利用湖南省工程实验室,  
林产化工工程湖南省重点实验室, 湖南 张家界 427000;  
2. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000)

**摘要:** 中国大鲵是全球现生最大的两栖动物, 具有重要的科研、生态与经济价值。按照我国现行法律法规, 野生大鲵是国家二级保护动物, 但人工养殖子二代及之后子代可作为水产品或药食资源加以利用。作为一种我国特有且珍稀的水生动物, 在兼具保护与利用的双重特性下, 大鲵种质资源现状一直备受关注。然而, 尽管有多重保护地位加身, 其野生种群现状依然不容乐观, 目前的自然保护区就地保护方式与人工增殖放流迁地保护方式在实施方式和效果层面均有待评估与优化。与之相对的是, 随着人工繁养殖技术的逐步成熟, 养殖规模的日益扩大, 人工养殖大鲵逐渐成为一种较具市场前景的新兴养殖品种。然而, 养殖过程中疾病防治仍是目前最大的瓶颈问题之一。大鲵属于高蛋白低脂肪类高端水产品, 其蕴含的生物活性成分和功效正在逐步被揭示。受市场供需、产业发展与科研投入的影响, 目前其养殖规模仍然较小, 产品开发利用的广度和深度仍亟待加强。本文基于前人研究结果和团队的工作实践, 从大鲵基本生物学及栖息地特征、遗传多样性、种质资源保护、人工繁殖与疾病防治、营养活性成分与产业化利用等方面对其种质资源保护与利用进行了综合概述, 总结成功经验, 指出存在问题, 以期对未来针对这一特有珍稀物种的种质资源研究、保护方案制订、开发与可持续利用以及科普宣传等方面提供重要参考。

**关键词:** 中国大鲵; 遗传多样性; 种质资源; 人工繁养殖; 疾病; 产业利用

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

中国大鲵 (*Andrias davidianus*) (通常简称大鲵) 为我国特有珍稀动物, 是全球现生最大的两栖类, 其最大个体接近 2 m, 体质量超过 50 kg<sup>[1]</sup>。该物种隶属于两栖纲 (Amphibia) 有尾目 (Caudata) 隐鳃鲵科 (Cryptobranchidae) 大鲵属 (*Andrias*)。在全球范围内, 当前较普遍认为隐鳃鲵科仅存两属三物种: 即大鲵属的中国大鲵与日本大鲵 (*A. japonicus*), 以及隐鳃鲵属的北美隐鳃鲵 (*Crypto-*

*branchus alleganiensis*), 三个物种呈完全的间断隔离分布<sup>[2]</sup>。隐鳃鲵科物种生态习性较相似, 相较于其他有尾两栖类其最典型的特点即拥有巨大的体型, 因此又被统称为大鲵类 (the giant salamanders)。

大鲵是我国极其重要的动物种质资源, 不仅因为其体型大、性状独特、进化历史悠久且在生态系统中具关键地位而被赋予重要的科研与生态

收稿日期: 2021-08-06 修回日期: 2021-10-11

资助项目: 国家自然科学基金 (32060128); 湖南省创新平台与人才计划 (2020RC3057); 质兰基金 (2020040371B); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20211071); 吉首大学生态学双一流学科建设经费资助&研究生校级课题 (Jdy20086, DNGC2020, DNGC2021)

通信作者: 蒋万胜 (照片), 从事分子生态学及水产种质资源保护与利用研究, E-mail: jiangwschina@163.com



价值, 还在于其从传统古籍记载到现今科研证实的巨大开发与利用价值。按照我国现行法律法规, 野生大鲵是国家二级保护动物, 但人工养殖子二代及之后子代可作为水产品或其他资源开发利用<sup>[3]</sup>。一直以来, 大鲵作为我国两栖动物保护与利用的一张名片, 其种质资源现状与动态备受关注。然而, 近年来笔者团队在开展大鲵保护与利用相关研究工作时, 发现大量人员对大鲵的了解仍然十分有限, 特别普遍缺乏对近些年来其种质资源新的研究进展的把握, 导致因为信息的不对称而产生许多误导或误解。鉴于此, 团队成员全面收集相关资料, 对大鲵种质资源保护与利用研究进展做一综述, 以期为这一特有珍稀物种的种质资源研究、保护方案制定、产品开发与可持续利用以及科普宣传等提供参考。

## 1 大鲵基本生物学及栖息地特点

### 1.1 基本形态特征

大鲵体表裸露, 具四肢, 有尾, 个体大。其头宽扁, 眼极小, 无眼睑。鼻孔位于嘴端, 口大致呈半圆形, 上下颌具细齿, 咬合力较大。躯干粗而扁, 体侧有纵行皮肤褶。四肢短壮, 前肢四指, 后肢五趾, 趾间有蹼。尾长而侧扁, 尾端钝圆。头背腹面皮肤具成对疣粒, 躯干部较光滑。其背面一般棕褐色, 具不规则深色斑, 腹面浅褐或灰白色; 但随环境体色深浅有变化, 从暗黑色、黄褐色到浅灰色不等。另有一些天然白化突变体呈现米白、淡黄、金黄或红棕色等, 大多数白化体仍镶嵌有不规则的深色斑块。大鲵皮肤下有两种腺体: 一为颗粒腺, 受到惊吓时会分泌白色乳胶状黏液; 二为黏液腺, 长期分泌水样透明黏液。大鲵常蜕皮, 且在夏季为甚, 蜕下的皮呈薄膜状<sup>[4-5]</sup>。公众对大鲵较大的误解在于认为其可以发出如婴儿般哭泣的声音, 故名“娃娃鱼”, 而解剖学研究表明大鲵不具备声带等用于发声的器官结构。

虽然大鲵离开水可存活一段时间, 但其完成正常生活史几乎全在水中。外鳃是大鲵幼体阶段的主要呼吸器官, 当幼体发育到9~16月龄时, 外鳃脱落, 鳃孔逐渐封闭。溶解氧不足、水温偏低、饲养密度过高、个体差异等都可能影响外鳃脱落的时间<sup>[6]</sup>。外鳃脱落后发育至成体阶段皆用肺呼吸, 但皮肤辅助呼吸仍占很重要的地位, 特别是大鲵体侧大量的纵行皮肤褶皱能增加皮肤呼吸的

表面积, 充当全身“鳃被”的角色<sup>[2]</sup>。

### 1.2 生态与繁殖特点

野生大鲵白天栖息在洞穴或石头缝中, 夜间出来以伏击的方式捕食猎物。幼鲵以小型无脊椎动物为食, 如水蚯蚓、水蚤、昆虫幼虫等; 而成鲵的食物则包括鱼、虾、蛙、螃蟹、软体动物和水生昆虫等<sup>[5,7]</sup>。也曾有报道从野生成鲵消化系统中频繁检出幼鲵<sup>[7]</sup>, 这说明同类相食 (cannibalism) 可能是大鲵一种较为普遍的行为。大鲵捕食后将饵料囫圇吞下, 故胃中也常拌有腐叶、砂石等<sup>[7]</sup>。在人工养殖下, 一般投喂鲜活或冰冻鱼类, 也有养殖场投喂动物肉块、内脏或小鸡胚等。通过驯食, 大鲵也能摄取人工配合饲料。大鲵耐饥饿, 在禁食情况下可以生存数年 (实验证实至少11个月<sup>[8]</sup>)。

大鲵以体外受精方式繁殖, 一年繁殖1次, 繁殖时间一般在每年的6月下旬至8月底, 随着地区及气候变化或有延长。野生大鲵性成熟年龄为4~5龄, 人工养殖大鲵性成熟年龄为3~4龄<sup>[9]</sup>, 喂养条件不佳会有延迟。大鲵多数为一雄一雌制, 在仿生态养殖条件下, 一雄多雌也常有发生。在纯野生状态下观察大鲵繁殖行为较为困难。团队前期利用视频监控系统观察仿生态基地中大鲵的繁殖行为, 发现其繁殖前行为由雄鲵的推沙、淋浴、求爱等一系列动作组成; 雌鲵在与雄鲵追逐和交缠之后产卵, 雄鲵随即排精, 受精卵由雌性护佑并直至幼鲵出膜后自由游动<sup>[10]</sup>。雌鲵产卵带一般为1对, 呈念珠状, 长达数米, 其中蕴含的卵粒300~1500枚, 卵径5~8 mm, 呈乳黄色<sup>[11]</sup>。

大鲵的栖息水温为2~27℃, pH为6~8, 在适宜范围内, 水温稍高且温差较小的水体更利于大鲵的生长<sup>[12-13]</sup>。大鲵繁殖适宜水温为15~25℃, 若温度改变剧烈, 不仅会影响大鲵的繁殖性能, 导致流产、晚产或者不产, 也可能造成亲本对温度强烈的应激反应而死亡; 此外, 营养、环境和年龄都会影响雌鲵繁殖性能。为保障大鲵人工繁殖成功, 一般需要人工营造流水声或加大水流刺激, 在产前和产后1个月内, 对亲鲵投喂高蛋白、高脂肪、高热量的食物可使其营养获得有效补充<sup>[14]</sup>。

### 1.3 栖息地环境特征

野生大鲵对栖息地的水深、洞口宽高、水流

速度、河底组成, 以及植被特征都有一定的选择性。一般而言, 其会选择洞口高且受水深起伏影响不大, 进入洞内光线较少的天然暗河或石洞栖息; 或偏好开阔河道中由巨石与河底形成的藏匿间隙, 间隙外浅坑中流速相对缓慢, 极易形成回水湾使饵料生物富集。其生境选择与其穴居、伏击捕食行为以及躲避敌害的天性相一致。

大鲵对水质的要求较高, 栖息洞穴处的河底组成多以卵石为主, 这样更能保证河水的清度<sup>[15]</sup>。团队前期对野生大鲵的栖息繁殖洞穴研究后发现, 影响大鲵选择繁殖洞穴的主要因子是海拔、洞口高度、洞底组成, 以及洞穴中水的透明度、pH、流速、饵料丰度等 7 个因子<sup>[16]</sup>。而其自然栖息地特征主要包括: 两岸植被类型丰富, 植被覆盖度大 (>50%), 坡度较大 [(58±17)°], 且人为干扰弱等<sup>[17]</sup>。将大鲵重置到一条新的河流时, 它们会选择在较深的水中栖息, 且偏爱有足以掩体的巨石, 其最终栖息地的确定与巨石的大小、河流深度和植被覆盖度呈正相关, 而与巨石距离呈负相关<sup>[18]</sup>。

近年来, 旅游业的发展对某些大鲵生境带来了不可避免的影响。团队前期研究表明, 游客数量与大鲵栖息地洞穴数、水体溶解氧、总氮、总磷、细菌、放线菌、真菌和大肠杆菌含量呈显著相关性, 因此适度控制旅游人数十分关键<sup>[19]</sup>。此外, 旅游开发带来的噪音也可能对沿岸大鲵生存和繁衍带来负面影响, 在湖北省荆门地区就曾出现过由于水泥厂产生的噪音污染导致大鲵繁殖亲本死亡的成功索赔诉讼案例。大鲵对干扰的一般响应方式是向更上游寻求新的栖所, 水温和水位均影响大鲵的栖息地确定<sup>[20]</sup>。

大鲵对气候变化较为敏感, 随着全球气候变暖和栖息地质量下降, 栖息地的预测对制定大鲵未来保护策略具有重要意义。Chen 等<sup>[21]</sup>和 Shu 等<sup>[22]</sup>通过建立生境适宜性模型等方法预测了大鲵生境适宜范围, 主要见于陕西、贵州、湖南、四川、重庆、湖北、河南和浙江等。Zhang 等<sup>[23]</sup>用物种分布模型同样预示当前适合大鲵的栖息地主要位于中国中部, 包括重庆、陕西、河南、湖南、湖北和贵州一带。

## 2 大鲵遗传多样性

### 2.1 大鲵分子遗传多样性

最早开展大鲵遗传多样性研究是以简单 DNA

序列为遗传标记, 如 Murphy 等<sup>[24]</sup>基于同工酶和两个线粒体短片段 (~300 bp), 陶峰勇等<sup>[25-26]</sup>分别基于线粒体 D-loop (771 bp) 和 Cyt *b* 基因 (1 140 bp), 方耀林等<sup>[27]</sup>和吴侯学等<sup>[28]</sup>基于 D-loop, 黄立群等<sup>[29]</sup>基于线粒体 Cyt *b* 和 ATPase6 基因对少数野生种群或人工养殖种群开展分析, 整体上这些研究表明大鲵遗传多样性低, 遗传分化程度不大, 但也有个别地理支系 (如安徽黄山) 分化明显<sup>[24-29]</sup>。基于片段多态性研究大鲵遗传分化也有报道, 如 Lin 等<sup>[30]</sup>与杨丽萍等<sup>[31]</sup>基于随机扩增多态性 DNA (RAPD) 对野生种群和子代开展遗传分化研究, 揭示出黄河与长江水系为两个不同的支系, 但大鲵遗传多样性绝大部分位于种群内, 种群间遗传分化较弱。基于简单片段重复的微卫星分子标记 (SSR) 在大鲵遗传多样性研究中也多次运用。如孟彦等<sup>[32]</sup>和 Meng 等<sup>[33]</sup>先后开发了 10 和 11 对微卫星引物开展研究, 表明大鲵人工养殖群体遗传多样性水平明显低于野生群体, 推测可能与人工育种中的近亲繁殖有关。Wang 等<sup>[34-35]</sup>先后开发了 16 和 20 对微卫星引物, 分别研究了 2 个人工养殖种群和 3 个洞穴自然种群幼苗 (陕西、四川、贵州) 的遗传多样性, 结果表明 3 个洞穴种群遗传分化明显, 但各种群都遭受严重的遗传瓶颈, 洞穴小种群亟待保护和恢复。

近年来, 随着更大范围的样品覆盖度和更多分子标记组合的使用, 我国大鲵的遗传多样性研究取得了一些新的重要进展。Yan 等<sup>[36]</sup>整合线粒体、微卫星及单核苷酸多态性 (SNPs) 等分子标记对 70 个野生大鲵个体 (来自 14 个样点, 图 1-a) 和 1034 个人工养殖个体进行了综合性的遗传多样性分析。其结果认为, 我国大鲵可分辨出 7 大支系, 其中 5 个支系 (图 1-b, A\B\C\D\E) 代表着来源地明确的 5 个隐存物种 (cryptic species), 另 2 个支系 (图 1-b, U1\U2) 代表来源地不明确的未识别物种 (unrecognized species)。与以往国内一直将大鲵作为单一物种考虑相比, 这一研究结果无疑对我国大鲵的物种确定和保护对策提出了新的问题与挑战。Liang 等<sup>[37]</sup>对来自 33 个采样点 (图 1-a) 的 320 尾野外采集大鲵样品的线粒体 D-loop 序列, 以及其中 19 个样品的线粒体基因组全序列, 88 个个体的核基因 Rag2 序列开展了综合的遗传多样性分析, 同样揭示出类似的 7 个支系 (图 1-c, A\B\C\D\E\F\G'), 尽管支系间的相互关系存在一些差异 (图 1-c), 但其支系内大体上与 Yan 等<sup>[36]</sup>

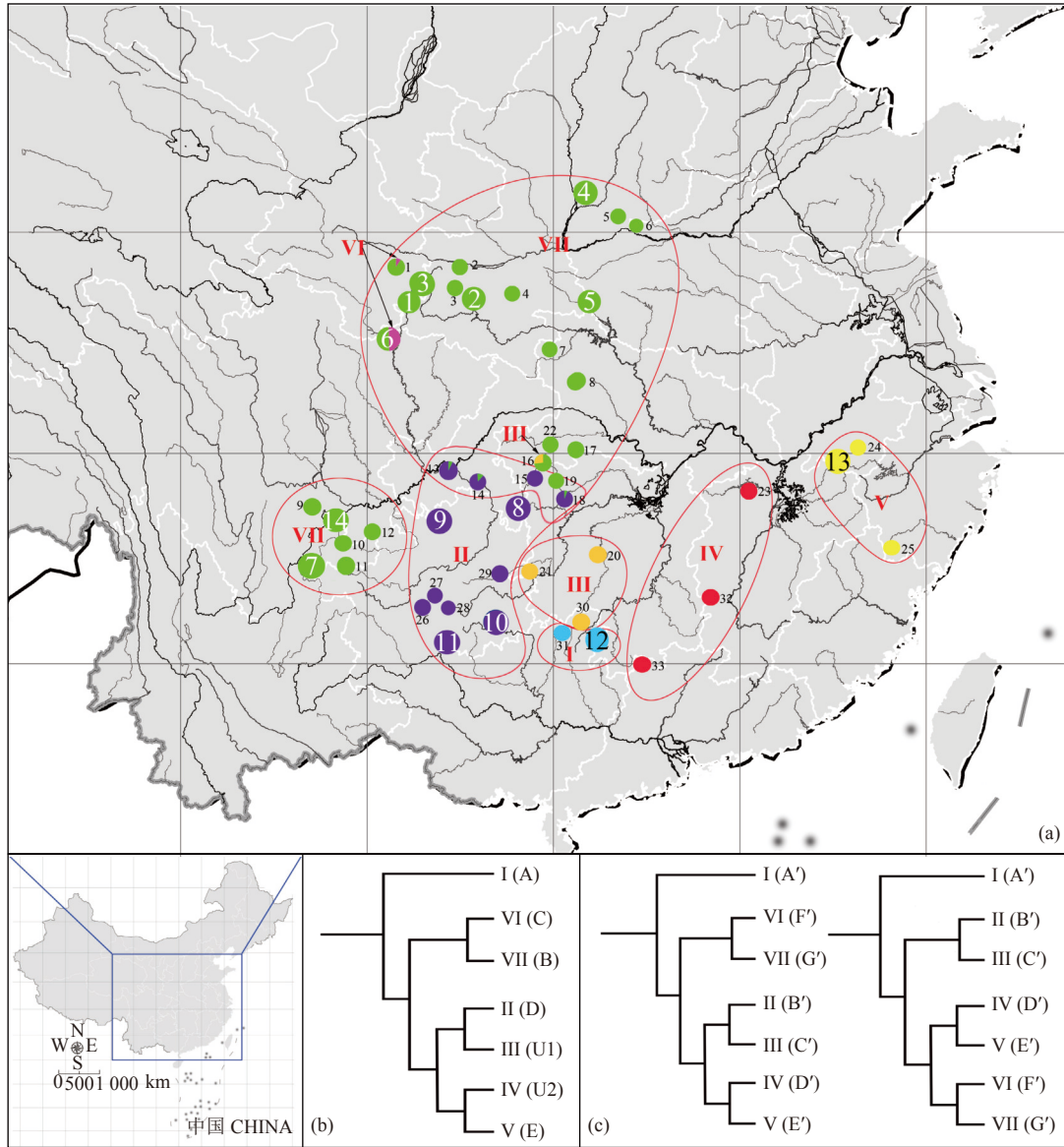


图 1 中国大鲵 (或复合物种) 最新种群遗传研究概览图

(a) Yan 等<sup>[36]</sup> 采样点 (圈内数字) 和 Liang 等<sup>[37]</sup> 采样点 (圈外数字) 及其共同揭示的七大地理支系 (I~VII); (b) Yan 等<sup>[36]</sup> 的分支结构图 (A-E、U1、U2); (c) Liang 等<sup>[37]</sup> 的分支结构图 [A'-G', 基于线粒体控制区 (左) 或线粒体基因组 (右)]

Fig. 1 Schematic overview of population genetic structure of *A. davidianus* (or complex species) from recent studies

(a) the sampling sites of Yan, *et al*<sup>[36]</sup> (number in cycle) and Liang, *et al*<sup>[37]</sup> (number outside cycle) and the revealed seven clades (I~VII); (b) the phylogenetic relationship revealed from Yan, *et al*<sup>[36]</sup> (A-E, U1, U2); (c) the phylogenetic relationship revealed from Liang, *et al*<sup>[37]</sup> [A'-G', based on mitochondrial control region (left) or mitochondrial genome (right)]

揭示出来的 7 个支系 (图 1-b) 相一致。尽管 Liang 等<sup>[37]</sup> 的研究并未提及是否应将这些分化的遗传支系当做独立的物种看待, 但这两个团队的研究结果同时揭示出一个长期不太明晰的问题<sup>[36-37]</sup>, 即我国大鲵确实存在较显著的遗传分化且形成了结构较为清楚的地理支系, 这为后续大鲵野生种群的资源保护和人工增殖放流的遗传管理等提供了

重要参考。

另外, 一项由伦敦动物学会 Turvey 等<sup>[38]</sup> 主导的, 对馆藏于中国多地标本馆的 17 个大鲵样本 (采集时间 1907—1992 年) 开展了基于线粒体基因组的物种演化研究, 通过其认为来源地最为可信的样本信息结合物种判别模型分析, 识别并正式提出了 3 个独立物种, 即: 中国大鲵、大鲵未命

名种 (unnamed species, 黄山种群)、华南大鲵 (*A. sligoi*)。其中华南大鲵曾由 Boulenger<sup>[39]</sup> 于 1924 年基于香港植物园的一个标本所描述, 其原始采集地不明 (疑来自中国大陆的广东或广西); 自 Thorn 于 1968 年将其作为中国大鲵的同物异名后, 长期被学术界遗忘, 直到 Turvey 等<sup>[38]</sup> 正式恢复其物种地位。目前, 这一物种的有效性已逐渐被收录到一些权威数据库中。然而, 笔者在 2020 年受邀参加 IUCN 组织的对大鲵濒危现状评估时意识到, Turvey 等<sup>[38]</sup> 的这一研究结果目前尚未被大多数大鲵研究者或相关人员熟知。尽管华南大鲵这一物种的认识变化过程 [从形态发表 (1924 年) 后被认为同物异名 (1968) 再到重新恢复有效性 (2019 年)] 在分类学上来说并不罕见, 但相对于中国大鲵这个多年来一直被广泛认可为单一物种的主流观点而言, 华南大鲵这一名称的出现和其将要涉及的物种和保护方案调整等问题显然还是具有较大的冲击性。可以预见的是, 围绕这一物种的争论仍会继续, 因为一来这一物种本身的模式产地至今不明, 二来其形态度量性状和鉴定特征依然缺乏系统的研究。此外, 不论是 Turvey 等<sup>[38]</sup> 恢复华南大鲵的地位还是 Yan 等<sup>[36]</sup> 提出的 5~7 个隐存种的观点, 都没有打破大多数人认为物种界定应当存在生殖隔离的传统认知。而目前多个人工繁殖和遗传渗透的研究表明, 中国大鲵不同种群之间似乎不存在明显生殖隔离。此外, 鉴于其他种群 (或隐存种) 的物种地位尚不明确, 中国大鲵 (或复合物种) 的分类学问题未来仍需一个更为整合的研究来予以回答。

## 2.2 核型及基因组研究

核型是染色体数目、大小和形态特征的总和, 关于大鲵的核型特征研究较少。Zhu 等<sup>[40]</sup> 分析了大鲵的血细胞核型, 得出其染色体数为 30 对, 并制备了雄性个体完整中期分裂图和核型图。李培青等<sup>[41]</sup> 研究获得更加完整的大鲵核型, 染色体由大染色体和微小染色体组成, 属于两型性染色体; 大染色体中有 8 对中部着丝粒染色体和 2 对亚中部着丝粒染色体; 微小染色体有 20 对, 大多是端着丝粒染色体; 此外, 雌雄大鲵核型较为相似。

大鲵的基因组包括线粒体基因组和核基因组两个部分。线粒体基因组由于相对较小, 易于获得而得到广泛研究。Zhang 等<sup>[42]</sup> 最早利用 LA-PCR

(long and accurate polymerase chain reaction) 技术对大鲵的线粒体全基因组进行了测序, 测定其长度为 16 503 bp, 包含 13 个蛋白质编码基因、2 个 rRNA 和 22 个 tRNA 基因, 除 tRNA-Thr 和 tRNA-Pro 基因之间有 318 bp 的非编码序列外, 其顺序与大多数脊椎动物相同。之后陆续有多个研究报道大鲵的线粒体基因组, 如 Xu 等<sup>[43]</sup> 测得 4 个野生大鲵线粒体全序列, 基因组总长度分别为 16 569、16 567、16 568 和 16 499 bp, 基因组成与 Zhang 等<sup>[42]</sup> 研究的基本一致。

大鲵的核基因组由于存在两栖动物普遍的基因组较大 (约 50 Gb)、杂合度较高等问题, 至今尚未见报道, 目前的研究多集中在转录组方面。最早, 由 Li 等<sup>[44]</sup> 使用高通量测序技术从大鲵脾脏和皮肤组织样本中从头组装得到 87 297 个转录本, 平均长度为 734 bp, 一共识别出 38 916 个基因。Geng 等<sup>[45]</sup> 通过 24 个组织样本的转录组测序, 获得了更高质量的基因集, 包含 93 366 个转录本, 平均长度 1 326 bp, 获得了 26 135 个编码基因。另有一些研究利用转录组测序技术比较了大鲵在不同控制条件下的基因表达模式, 如 Fan 等<sup>[46]</sup> 通过脾脏的转录组测序研究了感染和未感染大鲵虹彩病毒 (Chinese giant salamander iridovirus, GSIV) 的个体基因表达差异。Qi 等<sup>[47]</sup> 通过肝脏的转录组测序研究了大鲵对嗜水气单胞菌 (*Aeromonas hydrophilia*) 感染的基因表达差异等。Geng 等<sup>[8]</sup> 通过对禁食 3、7 和 11 个月的大鲵蛋白组进行了测序研究, 验证了肝脏在应对饥饿时调节脂类和乙酰辅酶 A 类代谢的中心作用。可以预见, 未来将会有更多的研究通过条件控制实验结合高通量测序技术加深我们对大鲵各方面机理的了解。

另外, 关于肠道微生物组的研究近年来受到广泛关注。对大鲵而言, 也已有研究通过宏基因组学测序技术, 报道了大鲵随着年龄改变其肠道微生物的变化情况<sup>[48]</sup>, 随着温度和发育时间改变, 其肠道微生物亦有显著不同<sup>[49]</sup>。此外, 还有研究对比了大鲵肺部微生物组和肠道微生物组的组成差异, 为了解大鲵的体内微生物组成和应对疾病的免疫反应机理提供了另一个视角<sup>[50]</sup>。

## 3 大鲵种质资源保护现状

### 3.1 种群濒危与保护现状

在谈论大鲵时通常有一种说法认为其起源于

3.5 亿年前的泥盆纪, 这可能与将大鲵回溯到其远祖——最早的两栖类鱼石螈由水登陆的时间有所关联。化石研究表明隐鳃鲵科基部类群自 1.6 亿年来身体结构无明显变化, 故其现生种类确实可被称之为“水中活化石”<sup>[51]</sup>。关于大鲵起源年代的争议主要来自看待问题的角度和方式, 基于当前物种分化的概念并结合现代分子生物学研究结果表明, 中国大鲵这一物种约起源于 10 Ma (million years ago, 百万年)<sup>[36, 38]</sup>。

大鲵是我国特有的珍稀物种, 同时也是全球两栖动物保护的旗舰种, 其物种走向濒危的过程很大程度上是近几十年来人类活动对野生动物影响的一大缩影。在 20 个世纪 50、60 年代, 大鲵还广泛分布于我国黄河、长江和珠江三大流域, 以及东南沿海的一些较小的水系当中, 覆盖 17 个省属区域<sup>[52]</sup>。但到 20 世纪 80、90 年代其数量急剧减少, 总结主要原因在三个方面: 一是栖息地环境的破坏和丧失, 如修建水坝、砍伐森林等使得栖息地片段化和岛屿化, 导致大鲵种群数量下降乃至消失。二是暴利之下的偷捕盗猎, 由于过去的畸形消费, 大鲵价格曾无序上涨, 偷捕盗猎之风对野生大鲵种群资源造成了极大的破坏。三是其自然恢复周期长, 由于大鲵性成熟时间晚, 对繁殖的环境要求较高, 当生境和种群遭到双重破坏后, 自然恢复需要很长时间<sup>[1, 52-54]</sup>。

1988 年, 大鲵就被列为国家二级保护动物, 其后被《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES) 附录 I 收录。2004 年, IUCN 专家评估认

为其 80% 的野外种群已经灭绝, 被评为极度濒危 (critically endangered) 物种<sup>[55]</sup>。此外, 鉴于其演化历史和濒危状况, 大鲵还被认定为全球优先保护对象<sup>[56]</sup>。目前, 尽管其获得了显著的保护地位, 但野外种群现状仍然极不乐观, 2021 年最新的 IUCN 评估仍将其保留为极度濒危物种等级 (尚未发布)。

由于野生大鲵的数量严重减少, 对其开展野外种群的资源调查研究也较为少见。团队梳理了在全国范围内曾开展过大鲵资源量调查的具体研究, 发现只在 7 个省份的一些县域有过关于资源量的报道 (表 1)<sup>[57-68]</sup>。然而, 由于缺乏统一而科学的估算方式, 这些研究中的估计值可能与实际情况存在较大的出入。近年来, 也有研究对原记录的分布地如青海<sup>[69]</sup>、贵州 (梵净山、雷公山和麻阳河) 等地开展调查<sup>[70]</sup>, 但结果显示均难觅大鲵踪影。2013—2016 年, 一项由伦敦动物学会主导的调查工作, 范围涉及了我国 16 个省的 97 个分布点, 也仅在 4 个点发现尚有野生大鲵分布的证据<sup>[71]</sup>。

立足全国范围, 梁志强等<sup>[72]</sup>曾估算中国大鲵自然资源密度约 0.108 尾/hm<sup>2</sup> 水面, 采用简单的面积×密度公式, 推算中国大鲵自然资源量约为 7.50 万尾。而据生态环保部报告, 1978—1999 年大鲵分布的县域面积还达到 528 440 km<sup>2</sup>, 但在 2000—2019 年, 大鲵野外种群的分布县市下降到仅 38 个, 其分布的县域面积也下降到目前仅有 85 560 km<sup>2</sup><sup>[73]</sup>。

一般而言, 建立自然保护区是濒危动物首选

表 1 全国多区域大鲵资源量调查结果信息表

Tab. 1 Number or weight information of *A. davidianus* investigated in several regions of China

省份 province	调查地 survey site	数量/重量 number/weight	调查时间 survey time	参考文献 reference
河南省	卢氏县	300尾	1990—1991	[57]
安徽省	休宁等8县39乡镇	13.2~22.0 t	1994	[58]
甘肃省	康县大鲵自然保护区	约4 620尾	2016	[59]
山西省	垣曲县	约500尾	2009—2010	[60]
陕西省	城固县	22 778~23 786尾	1988	[61]
陕西省	太白县	7 709尾	2011—2012	[62]
贵州省	岩下自然保护区	1.7 t	2006—2007	[63]
贵州省	松桃县	5 000~10 000尾	2009	[64]
贵州省	正安县谢坝河	18 000~20 000尾	2013	[65]
湖南省	桑植县	976尾	2006—2007	[66]
湖南省	张家界市	约2 000尾	2006—2008	[67]
湖南省	隆回县大鲵自然保护区	约80尾	2014	[68]

的保护举措, 因为自然保护区能同时保护种群和生境的完整性, 从而预期可以起到最佳的就地保护效果。从 1982 年至今全国已成立约 53 个涉及到大鲵的自然保护区 (其中以大鲵为主要保护对象和任务的保护区就有 38 个), 总面积约为 62.51 万  $\text{hm}^2$ <sup>[72]</sup>。然而, 这些保护区当前的物种保护现状和相关保护效果如何, 目前还缺少整体评估。另外, 遗憾的是还有很多保护区存在功能分区结构不合理、违背了生态完整性原则、保护与经济发展存在严重矛盾等突出问题<sup>[74]</sup>。

### 3.2 大鲵人工增殖放流

为了恢复和保护大鲵野外种群, 人工增殖放流是另一种流行的保护举措, 在全国多地被广泛实施。Shu 等<sup>[22]</sup>根据文献记录、网络搜索及渔业部门提供的资料, 统计自 2002—2019 年 10 月底, 我国中部和南部的 16 个省 (市) 的 98 个县市共记录放流大鲵 287 840 尾 (图 2-a)。事实上, 由于不是所有的放流都被报告, 放流的大鲵数量还可能被低估。从时间看, 2008—2012 年, 放流数量逐渐增加, 2013—2015 年放流数量急剧增加, 在 2016 年达到顶峰, 随后有所下降 (图 2-b)。从区域看, 自 2002 年以来, 陕西省放流数量最大, 总量达 94 464 尾; 其次是甘肃和湖南; 相比之下, 北京放流数量最少 (图 2-c)。在这些大鲵人工放流活动中, 有 40.8% 是为了种群复壮, 即有意将大鲵释放到这些现有的同种群中; 24.5% 是为了重引入, 即将人工养殖大鲵放流到已经消失的野外分布范围内; 另外, 还有 34.7% 是为了发挥生态置换的功能, 即将其放流到原始记录的分布范围之外<sup>[22, 73]</sup>。

人工增殖放流成为了我国大鲵保护的重要措施之一, 具有规模大、数量多、放流点广的特点, 然而放流实际效果却存在争议。一方面, 大量人工放流缺乏相应的监测和评估。与全国 98 个县市存在大鲵人工放流的规模相比, 仅湖南张家界、陕西略阳、秦岭地区、安徽率水河、浙江古田山等少数放流种群有过后续报道, 且普遍认为其放流存活率低或成效不高<sup>[75-77]</sup>; 仅浙江古田山大鲵种群放流监测结果显示, 野外群体生存状况良好且能自然繁殖, 并认为取得了显著的成效<sup>[78]</sup>。另一方面, 当前几乎所有的人工放流都未考虑到遗传风险的管理问题。近年的研究表明, 目前作为放流来源的部分人工养殖群体遗传同质化现象十

分严重, 大规模放流或可造成巨大的遗传污染、疾病传播和生态安全风险<sup>[79]</sup>, 以至于有研究呼吁暂停所有的人工放流活动<sup>[80]</sup>。

整体而言, 由于人类活动的影响, 中国大鲵野生种群下降乃至濒临灭绝是一个仍在发生的事实。然而, 当前两种主要保护措施都存在的问题, 以建立自然保护区为主要手段的就地保护措施整体上缺乏评估, 而许多保护区还存在功能分区不合理的问题, 导致保护效果不甚理想。而以人工增殖放流为主要手段的迁地保护措施又存在适应力低和遗传污染等潜在问题, 相应的放流后监测和效果评估也同样极为缺乏。鉴于此, 加大对大鲵保护问题的科学研究, 基于实质数据和研究结论来制订和完善科学的保护方案将在未来的大鲵保护中发挥十分关键的指导作用。

## 4 大鲵人工繁养殖与疾病

### 4.1 大鲵人工繁养殖技术体系

大鲵的人工繁养殖有着较长时间的历史积累。1958 年, 贵州省最先开展我国大鲵的驯养实验; 1978 年, 张家界桑植县大鲵研究所与湖南省水产科学研究所合作取得了大鲵首次人工繁殖成功<sup>[81]</sup>。之后, 中国水产科学研究院长江水产研究所 (1989 年) 和南昌大学 (2000 年) 也相继繁育出幼鲵<sup>[82]</sup>。相关人工繁育技术也逐步发展成熟, 如刘鉴毅等<sup>[83]</sup>系统报道了包括亲鲵的选择、人工催产、人工授精、人工孵化及幼鲵培育等技术流程。随着技术的进步, 90 年代后期, 大鲵人工养殖兴起并快速发展, 成为中国特种水产养殖业的重点对象之一。

目前, 大鲵人工繁养殖主要有仿生态和全人工两种模式。其中大鲵仿生态繁育模式是仿照自然界中野生大鲵的自然配对方式产卵繁殖, 其出苗率和成活率均较高, 该模式可以养殖出数量稳定、质量可靠的苗种<sup>[84]</sup>。但该模式对场地和空间的需求量较大, 一般不适用于大规模的人工养殖。而全人工繁殖技术目前也日益成熟, 相应的苗种获得具有更大的人为可控性。据报道, 浙江永强、湖南润孚、张家界金鲵、珠海斗门、广州华宝等公司都通过全人工繁殖技术成功繁育出子二代幼鲵<sup>[82]</sup>。也有许多公司通过仿生态繁育获得苗种, 并在全人工条件下进行养殖, 实现苗种的自产自供。

整体来说, 目前大鲵的人工繁殖和养殖技术

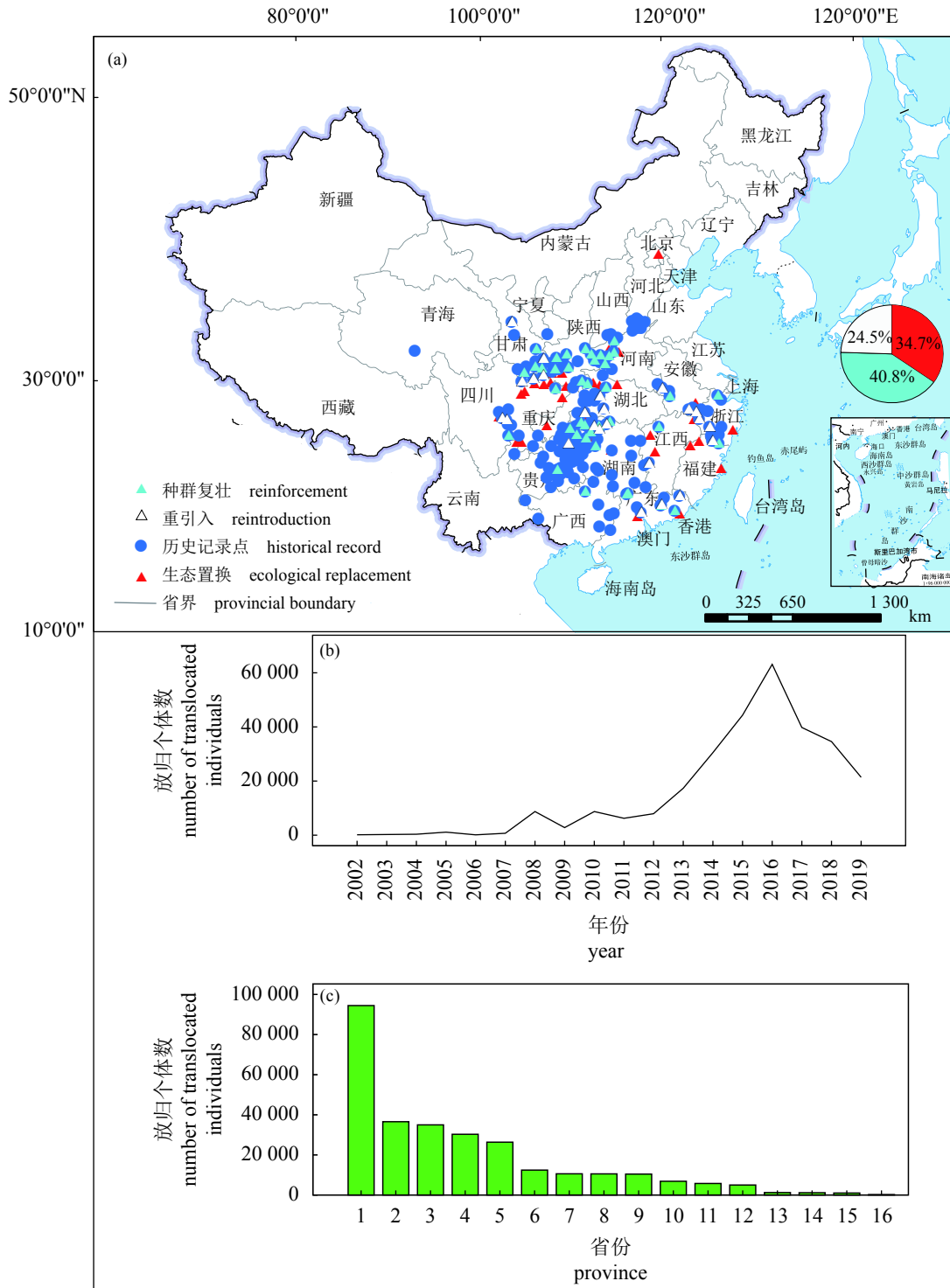


图2 国内大鲵人工放流概况 (引自 Shu 等<sup>[22]</sup>, 赵天 供图)

(a) 大鲵在我国的放流点和放流方式; (b) 2002 年以来放流大鲵数量在我国的变动趋势; (c) 全国不同省份的大鲵放流数目, 1.陕西, 2.甘肃, 3.湖南, 4.四川, 5.江西, 6.河南, 7.湖北, 8.安徽, 9.浙江, 10.福建, 11.重庆, 12.广东, 13.广西, 14.贵州, 15.云南, 16.北京

Fig. 2 Translocation overview of the *A. davidianus* (from Shu, et al<sup>[22]</sup>, courtesy of Zhao Tian)

(a) translocation sites (triangles) and types; (b) trends in numbers of the translocations since 2002; (c) the number of translocations across different provinces in China, 1. Shaanxi, 2. Gansu, 3. Hunan, 4. Sichuan, 5. Jiangxi, 6. Henan, 7. Hubei, 8. Anhui, 9. Zhejiang, 10. Fujian, 11. Chongqing, 12. Guangdong, 13. Guangxi, 14. Guizhou, 15. Yunnan, 16. Beijing



已日趋成熟, 但苗种的数量保障和质量控制仍有一些关键技术问题有待解决。团队前期通过视频监控技术, 获得了较为详实的大鲵人工繁殖行为特征和环境参数<sup>[10]</sup>, 为进一步提高大鲵繁殖效率提供了一定的科学基础。

## 4.2 大鲵人工养殖疾病研究

随着动物从人工到家养环境的转变, 集约化程度增加, 疾病是无法完全避免的现实问题。大鲵疾病也随着人工养殖的时间增加和规模变大后逐渐显现, 某些疾病甚至成为大鲵养殖业中非常关键的瓶颈问题。目前有关大鲵的疾病主要有病毒性、细菌性、真菌性、寄生虫性和其他种类疾病。

**病毒性疾病** 当前大鲵养殖中病毒性疾病危害性最为严重, 主要由中国大鲵虹彩病毒引起, 有时又被称大鲵蛙病毒 (*A. davidianus* ranavirus, ADRV)。虽然名称并不统一, 但致病的病毒序列相似, 都属于虹彩病毒科的虹彩病毒。虹彩病毒主要感染鱼类、两栖类和爬行类, 历来就是危害水产养殖最严重的病毒之一<sup>[85]</sup>。2009年, 甘肃陇南与陕西汉中的养殖场暴发大鲵大规模死亡事件, 后确认是虹彩病毒感染所致, 这是虹彩病毒对我国大鲵养殖造成危害的首次报道<sup>[86]</sup>。病鲵的行为特征为食欲减退, 甚至废绝, 一些还出现呕吐现象, 体表黏液分泌增多, 精神差, 躺卧在池底。病鲵主要的外部特征为下颌出血, 头、四肢、腹部肿大, 有出血斑, 背部有突起的白色病灶; 严重者白色病灶溃烂, 四肢皮肤坏死、肌肉溃烂, 甚至断肢。解剖发现腹腔内有大量淡黄色或含血液体, 肝肿大、呈灰白色或因淤血呈花斑状, 脾肿大、紫黑色, 肾肿大、出血, 肺囊充血、出血等<sup>[87]</sup>。

虹彩病毒已经给国内的大鲵养殖户造成了不少损失, 几乎到了“谈虎色变”的地步, 严重制约了大鲵养殖业的发展。由于病毒性疾病目前还没有特效药可进行针对性治疗, 对于大鲵虹彩病毒的防治措施主要依靠日常预防和疫苗防护 2 个方面。提高日常防护主要是要杜绝传染源, 切断传播途径, 及时隔离治疗或处理患病个体。而给幼鲵注射 GSIV 疫苗也是有效的预防手段, 目前已有少量疫苗在试制当中<sup>[88]</sup>。

**细菌性疾病** 目前有报道的大鲵主要的细菌性疾病包括疖疮病、赤皮病、打印病、烂尾病、烂嘴病、腹水病、腐皮病、烂尾病、白点病、出

血病等; 病原体细菌包括单胞杆菌 (*Aeromonas punctata f. furunculus*)、荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*)、单胞菌点状亚种 (*A. punctata sub. punctata*)、维氏气单胞菌 (*A. veronii*)、杀鲑气单胞菌 (*A. salmonicida sub. salmonicida*)、屈挠菌属 (*Flexibacter sp.*) 等; 细菌感染症状多样, 最常见的为肝脏等内脏肿大充血、腹水增多、体表糜烂、食欲减退、活动力减弱、失去平衡等<sup>[89-91]</sup>。细菌性疾病一般通过抗生素治疗, 在某些情况下特别是感染后期, 多出现由多种不同致病菌导致的细菌性感染综合征, 可采用抗生素组合法进行治疗。然而, 抗生素的特异性或敏感性研究目前仍然较为有限, 而大多数养殖场也不具备鉴定病原体的条件, 应对细菌性感染也通常只能凭借经验进行。在夏季高温季节, 细菌性疾病高发有时也会大鲵养殖造成重大的经济损失, 需重点防范。

**真菌性疾病** 最常见的真菌病主要为由水霉属 (*Saprolegnia sp.*)、绵霉属 (*Achlya sp.*) 或丝囊菌属 (*Aphanomyce sp.*) 的真菌引起的水霉病。患病大鲵行动迟缓, 食欲减退, 身体消瘦, 直至死亡。早期感染部位只看到边缘不明显的小白点, 随后逐渐长出棉絮状的菌丝。研究表明, 受机械损伤或寄生虫侵袭引起创伤的大鲵更易感染水霉病<sup>[92]</sup>; 而水温剧烈变化、死卵堆积也是水霉病的重要诱因<sup>[93]</sup>。治疗时一般使用棉签擦去肉眼可见的菌丝部分, 再配合一些广谱的抗真菌药物如克霉唑等进行涂抹。近年来, 有研究表明植物中药制剂对水霉病有一定的疗效, 如李川等<sup>[94]</sup>研究表明, 大黄和五倍子药液对水霉菌有较好的抑制作用。

**寄生虫病** 在自然生长状态下, 大鲵体内也会有寄生线虫, 但一般不太严重。对养殖大鲵带来危害的寄生虫大多来自饵料生物中所携带的线虫。寄生性疾病除主要的线虫病 (*Philometra sp.* 和 *Capillaria sp.*) 外, 还有吸虫病 (*Diplostomulum sp.*)、车轮虫病 (*Trichodina sp.*)、艾美球虫病 (*Eimeria sp.*) 等<sup>[95-96]</sup>。被寄生的病鲵常表现为拒食, 行动减少并逐渐消瘦; 受害严重者皮肤充血发炎甚至轻度腐烂<sup>[97]</sup>。预防寄生虫病主要通过定期对养殖池体进行消毒冲洗, 并配合使用一些敌百虫类的广谱药物添加到饲料中投喂驱虫。

**其他疾病** 大鲵养殖过程中的其他疾病主要由非病原微生物导致, 包括多种类型。机械损伤最为常见, 这是由于大鲵常因争夺食物和空间而打斗撕咬, 机械损伤后就会随即带来更大的病

原微生物感染风险。提早分群适应, 定时定量投喂都是避免机械损伤十分关键的因素。另外还由于养殖水体氧或氮的含量太高而导致的气泡病、氧气不足导致的浮头病、脊椎弯曲变形导致的弯体病等<sup>[98]</sup>。这些疾病重在防控, 应加强日常管理, 避免问题长期累积造成较大的经济损失。

## 5 大鲵营养及活性成分与产业化利用现状

大鲵作为我国一种传统的食材已有上千年的食用历史, 据不完全考证, 在《本草纲目》、《本草经集注》、《本草拾遗》、《西泽补遗》等古籍中都有对大鲵(或娃娃鱼)可食用及药用的记载。现代科学研究亦表明, 大鲵含有较佳的营养成分和生物活性成分, 其在食品加工、化妆品、医药等方面的利用潜力也逐渐得到认可<sup>[3]</sup>。其主要的营养成分包括蛋白质、脂类、矿物质和维生素等, 功能活性成分有胶原蛋白、活性肽、多聚糖肽及脂肪酸等<sup>[99]</sup>。除了大鲵肉作为水产品主供食用之外, 大鲵的黏液、皮肤、肉和骨中含有多种生物活性物质, 具有抗衰老、抗疲劳、抗肿瘤、治疗烧伤、抗感染等多种生理功效<sup>[3]</sup>。正是因为大鲵的这种药食同源特性, 围绕其产品开发和产业化利用也得到了较大的发展。

### 5.1 大鲵营养成分

**蛋白质与氨基酸组成** 大鲵肌肉除水分外(约80%), 主要营养成分为粗蛋白(约16%)。到目前为止, 有10余篇论文针对大鲵肌肉或其他组织开展过营养成分分析, 几乎所有研究都表明, 大鲵肌肉中必需氨基酸与氨基酸总量的比例大于40%, 必需氨基酸与非必需氨基酸的比例大于60%, 以及必需氨基酸系数(65.93%~81.65%)均较高, 符合FAO/WHO的高质量蛋白质的理想模型<sup>[3]</sup>。具体而言, 大鲵肌肉蛋白质由18种氨基酸组成, 包括8种必需氨基酸和6种呈味氨基酸<sup>[100]</sup>, 且其含量较高, 分别占氨基酸总量的45.38%与43.63%<sup>[101]</sup>。非必需氨基酸中谷氨酸的含量最高, 达2.43%; 必需氨基酸中赖氨酸的含量高达1.47%, 是我国人民以谷物为主要食物的赖氨酸缺乏现象的有效补充<sup>[100]</sup>。

**脂肪与脂肪酸组成** 大鲵脂肪组织主要集中在尾部2/3处至尾尖<sup>[102]</sup>, 肌肉虽不是主要的存脂组织, 但其成分中也有少量脂肪酸。王立新等<sup>[103]</sup>从肌肉中共检出11种全部为C20以下的脂

肪酸, 而尾脂中共检出14种脂肪酸, 较肌肉多了3种不饱和脂肪酸。肌肉中饱和脂肪酸含量为27.68%, 不饱和脂肪酸含量为72.32%; 尾脂中饱和脂肪酸含量为25.70%, 不饱和脂肪酸含量为74.20%, 整体而言, 尾脂中不饱和脂肪酸含量高于肌肉。黄世英等<sup>[104]</sup>对大鲵肌肉的研究表明, 其不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸之比达3.15, 高于牛肉、猪肉、鸡蛋、虾、鲑等食物。李林强等<sup>[105]</sup>从大鲵肌肉的脂肪中检出13种脂肪酸, 在不饱和脂肪酸中单不饱和脂肪酸(MUFA)为42.8%, 多不饱和脂肪酸(PUFA)为28.5%, 其中具有保健功能性作用的 $\omega$ -6型PUFA为13.0%,  $\omega$ -3型PUFA为15.5%;  $\omega$ -6型与 $\omega$ -3型PUFA比为0.8, 接近于1, 对人体的营养保健功能十分理想, 特别其中二十二碳六烯酸(DHA)含量丰富<sup>[106]</sup>。团队前期采用常压皂化水解法并结合低温结晶法对大鲵油不饱和脂肪酸进行了富集, 使MUFA含量提高了3.91%, PUFA含量提高了10.29%, 其中二十碳五烯酸(EPA)和DHA含量共提高了5.47%, 具有良好的应用前景<sup>[107]</sup>。

**矿物质及维生素** 大鲵肉中微量元素依次为镁、锌、铁、钙、磷、锰、铜, 其中锌、锰、铜含量丰富, 是人体补充矿物质元素的一种很好的食物来源<sup>[104]</sup>。其锌铁比为3.2, 属于较合理的范围<sup>[108]</sup>。大鲵肌肉中锌含量高于鱼、虾、蟹、贝类, 每百克大鲵软骨与肌肉提供的锌分别可达成成年男性推荐摄入量(recommended nutrient intake, RNI)的34.3%和26.3%; 同样含量相当高的还有钙, 每百克大鲵软骨中钙可达成成年男性适宜摄入量(adequate intake, AI)的61.6%<sup>[100]</sup>。大鲵肌肉中还含有相当量的硒, 每百克大鲵软骨与肌肉提供的硒分别可达成成年男性RNI的80.6%和76.2%<sup>[100]</sup>, 有些地区检测的大鲵肉中硒含量已达到富硒标准(0.02~0.20 mg/100 g)<sup>[109]</sup>。大鲵维生素的研究仅见于刘绍等<sup>[100]</sup>的研究, 其测定大鲵肝脏中维生素V<sub>B1</sub>、V<sub>B2</sub>、V<sub>A</sub>、V<sub>D</sub>与尼克酸的含量分别为0.8、3.7、11.34、0.017与21.9 mg/kg。每百克大鲵肝脏提供的V<sub>A</sub>可达成成年男性RNI的41.8%, V<sub>D</sub>可达成成年男性AI的34%。总体而言, 大鲵能够为人体提供较好的矿物质元素和维生素来源。

### 5.2 大鲵的生物活性成分

大鲵具有广泛报道的药用价值, 大鲵皮肤、肉、黏液、骨等各器官和成分都可入药, 《本草

纲目》和《本草拾遗》等药典中都提到大鲵具有滋阴补气、益智、养血等功效, 对于治疗病后虚弱, 神经性疾病, 贫血等疾病有很好的效果<sup>[99]</sup>。胡代花<sup>[100]</sup>、He 等<sup>[3]</sup> 对大鲵活性肽等生物活性成分进行了相关论述, 综合研究表明在大鲵肌肉、肝脏、脂肪、黏液、皮肤、软骨等各部位分别富含不同的生物活性因子 (图 3), 其数量达到 70 余种, 这些活性成分可促进人体生理活动, 改善生理代谢, 促进蛋白质合成, 调节机体免疫功能, 增强人体对疾病的抵抗力等<sup>[3, 110]</sup>。本研究根据活性成分的组织分布, 对当前主要被关注的黏液多聚糖肽、皮肤胶原蛋白、肉活性肽和其他组织活性成分等做简要概述。

**黏液多聚糖肽** 糖肽是生物活性肽的一类, 是糖蛋白在水解作用下分解成带有糖链的小分子肽段。Qu 等<sup>[111]</sup> 利用海洋曲霉菌酸性蛋白酶 (*Aspergillus* sp. acid protease) 酶解大鲵体表黏液, 获得了分子量小于 3 500 u 的大鲵低聚糖肽, 并通过化学方法测定大鲵低聚糖肽中总蛋白含量较高, 为 80.01%, 总糖含量为 15.15%。李伟等<sup>[112]</sup> 采用复合蛋白酶进行酶解, 研究了最佳酶解条件包括酶的加量、底物浓度、酶解时间、酶解产物等。金桥等<sup>[113]</sup> 发现在皮肤黏液中获得低聚糖肽具有

清除自由基的作用, 且呈剂量效应。此后, 还有系列研究表明大鲵多聚糖肽具有促进免疫功能、体外抗氧化活性、抗疲劳作用、抗紫外线能力, 抗血小板聚集, 对四氯化碳导致小鼠肝损伤的保护以及对人肺癌细胞有明显的抑制作用等<sup>[111, 114-117]</sup>, 因而在食品、保健食品以及药品领域有着广泛的应用前景<sup>[118]</sup>。

**皮肤胶原蛋白** 胶原蛋白是一种重要的功能性蛋白质, 具有营养和生物活性价值<sup>[119]</sup>, 其获得率取决于酶解工艺。有多个研究利用不同酶解提取方法, 对大鲵皮的胶原蛋白提取效率和成分进行了分析。顾赛麒等<sup>[120]</sup> 对大鲵皮提取纯化后获得了两类不同胶原蛋白: 酸溶性胶原蛋白 (acid-soluble collagen, ASC) 和酶促溶性胶原蛋白 (pepsin-soluble collagen, PSC), 并进行了理化性质研究。李静等<sup>[119]</sup> 研究表明高温高压法对提高大鲵皮胶原蛋白肽提取率有显著作用, 在优化的条件下其提取率可达 80.76%。在生物活性方面, 李林格等<sup>[121]</sup> 研究表明大鲵皮胶原蛋白肽具有保护乙醇诱导小鼠肝损伤的作用。周艳华等<sup>[122]</sup> 研究显示其制备的胶原蛋白抗氧化肽对羟自由基的清除率为 83.15%。总之, 由于大鲵皮肤厚实, 胶质成分多, 其胶原蛋白含量达 22.31%, 占大鲵皮总蛋白质的

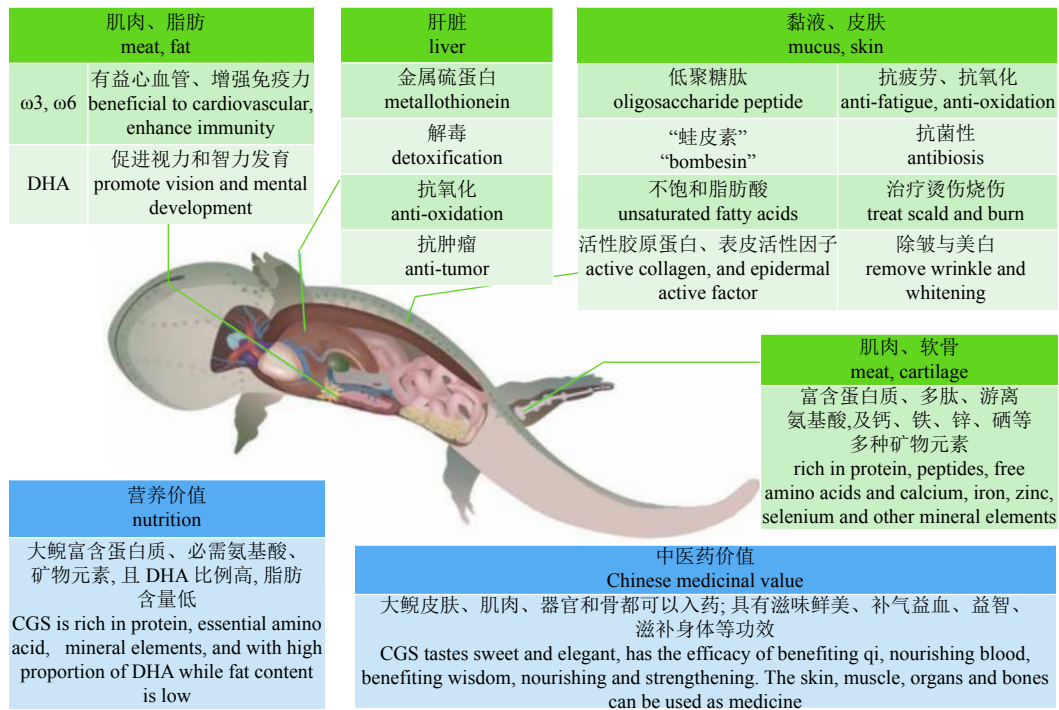


图 3 人工养殖大鲵的生物活性成分 (引自 He 等<sup>[3]</sup>)

Fig. 3 Bioactive substances of the captive-bred *A. davidianus* (from He, et al<sup>[3]</sup>)

79.65%，因此具有潜在的多种开发价值<sup>[119]</sup>。

**肌肉活性肽** 大鲵个体大，肌肉含量高，是其可利用组织中比例最高的部分。王文莉等<sup>[123]</sup>利用海洋曲霉菌酸性蛋白酶对大鲵肉进行酶解，获得了最佳工艺条件，其同步抗氧化实验表明酶解产物清除羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )和 DPPH 自由基的能力随浓度升高而增强，最大能到 80% 左右。付静等<sup>[124]</sup>多酶比较研究表明 Protamex 酶解产物的肽得率最高，并通过正交试验确立大鲵肌肉粉 Protamex 酶解的最佳工艺条件。徐阳等<sup>[125]</sup>研究了不同蛋白酶组合效果，发现最佳酶解组合为中性蛋白酶和风味蛋白酶，并获得了其最佳酶解工艺条件。鲍九枝等<sup>[126]</sup>研究大鲵肉活性肽的响应面提取工艺，并进行了运动饮料的研制。杨志伟等<sup>[127]</sup>以果蝇为模式动物，表明大鲵肉对延缓其衰老有显著效果。蔡佳佳等<sup>[128]</sup>通过小鼠模型，证明大鲵肉蛋白肽对小鼠抗衰老能力有显著增强作用。总而言之，作为产量最丰富的活性成分来源，大鲵肌肉活性肽展现出了较大的开发潜力。

**其他组织活性成分** 除上述几类组织的主要活性肽之外，王利锋等<sup>[129]</sup>利用电刺激法首次从大鲵皮肤分泌黏液中分离纯化到一种抗菌肽，其对铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)具有很强的抑制作用。Pei 等<sup>[130]</sup>分离得到一种抗菌肽并测得其氨基酸序列(AIGHCLGATL)和分子质量(955.14 u)，命名为 Andricin 01，该肽对常见革兰氏阳性和阴性菌具有广谱抗菌活性。另据报道，大鲵皮肤分泌的黏液还含有多种“蛙皮素”，具有较强的抗菌作用<sup>[131]</sup>；在大鲵肝脏中含有较多的“金属硫蛋白”，它能清除人体的有害“自由基”，结合有害的重金属离子起到“排毒”作用，还能有效改善人体的血液微循环，增强免疫力和延缓衰老等<sup>[3]</sup>。然而，对大鲵“蛙皮素”、“金属硫蛋白”和其他活性成分的科学分离、鉴定、功能成分等仍有待更多具体的研究。

### 5.3 大鲵人工养殖现状

**人工养殖产业概况** 为挽救濒危野生大鲵，同时开发利用大鲵资源，20 世纪 80 年代各地陆续出台相关政策或补贴，鼓励人工养殖大鲵。在大鲵人工养殖初期，由于背景知识较少，技术受限，人工繁育的成活率也不高，因此养殖规模较小。随着大鲵产业经济效益成果初显，各地积极开展大鲵产业布局，无论在规模上还是技术上，

都有了长足的进步。到 21 世纪初，各地大鲵养殖产业开始快速发展，到目前其人工养殖技术已日趋成熟，成为一种极具市场前景的新兴养殖品种<sup>[132]</sup>。而且在 2021 版《国家重点保护野生动物名录》中，也明确了仅野生大鲵为保护对象。

据 2015 年的调查显示，全国养殖量约为 1 249 万尾，其中 100 万尾以上的有 4 省；最多的是陕西，约 363.8 万尾；浙江次之，约 241.6 万尾；广东第三，150 万尾。存量在 10 万尾以上的省份有 9 省。驯养繁殖大鲵的企业有 2 622 家，已办理驯养繁殖许可证的企业有 2 080 家<sup>[133]</sup>。2018 年，全国大鲵苗总产量接近 1 000 万尾，2019 年，大鲵存量达 3 000 万尾。大鲵总量的快速增长为进一步开发利用大鲵资源提供了有力保障。然而，随着市场供需的变化、人工养殖数量的增加、近年来新型冠状病毒肺炎疫情影响等多种原因，养殖大鲵价格发生了巨大的波动，售价自 20 世纪 70 年代 10 元/kg，到 2010 年左右 2 000 元/kg，增长了 200 倍；而 2015 年以后大鲵价格又持续走低，每千克市场价格低至 100 元；近两年来受疫情影响，价格持续低迷且销量受阻，导致许多养殖场难以为继。尽管全国各地大鲵养殖产业众多，但目前的管理、服务、市场、研发等层面都存在一些问题。人工养殖大鲵作为一种新兴水产品种，相对于其他大宗水产品，其市场仍处于较小的规模<sup>[132]</sup>。其产业发展还需要进一步的规划、引导、研究和落实。

### 5.4 大鲵产品开发现状

**冷鲜或添加性食品** 大鲵作为一种传统食材已有几千年的食用历史，这主要得益于其滋味鲜美、营养丰富，颇受大众欢迎。鲜活或冷冻水产品是大鲵最常规的利用方式。此外，大鲵还被制成大鲵火锅、大鲵罐头、大鲵肉酱、大鲵手撕肉干、大鲵面条、大鲵粉丝、大鲵饼干、大鲵酒等添加性食品。目前市面上最常售卖的为大鲵面条，即采用一定比例的大鲵肉粉与面粉为主要原料，混合后压制成条<sup>[134]</sup>。

**保健或功能性食品** 将大鲵的生物活性成分提取并开发成功能性食品，是大鲵产品高值化利用的一种主要方式。目前已开发的产品有大鲵蛋白粉、蛋白肽粉、冻干粉、骨质多肽粉、低聚糖肽类固体饮料和果汁饮料等。当前产品主要注重口感和安全性，而作为功能性食品推广以及其

对人体保健功效的具体机制尚未完全阐明。然而,从市场认可度和回购率来看,这类产品仍然具有较大的开发潜力,而相应地科学研发和转化应用还有待加强。

**护肤类产品** 大鲵护肤类产品的基础主要来自对大鲵黏液多聚糖肽和大鲵皮胶原蛋白活性成分的分离与活性研究。大鲵黏液多聚糖肽的抗氧化性、抗紫外线活性,大鲵皮胶原蛋白的抗氧化活性都已得到一定的实验验证<sup>[111,135]</sup>。目前市场已开发在售的产品包括大鲵面膜、洁面乳、精华液、生物功能皂等。

**其他类产品** 利用大鲵的生物学特性和生物活性,还有一些其他产品被开发出来。如将大鲵皮肤分泌物、脂肪及皮肤加适当基质制成鲵酥膏、鲵油膏及鲵皮膏等,能明显缩短小鼠烫伤和冻伤后创面愈合时间,因此具有促进人体烫伤和冻伤创面愈合的作用<sup>[136]</sup>。大鲵皮肤分泌物的水凝胶作为一种新的粘合材料,可作为传统伤口闭合方法的临床替代技术<sup>[137]</sup>。利用大鲵皮经过科学加工,还能够制造出具有较高经济价值的高档箱包皮革<sup>[138]</sup>等。

**产品与经营销售模式** 大鲵有较高的利用价值和文化基础,不管是食用,还是作为精深产品加工都有良好的发展前景。然而目前其相关产品仍然面临种类单一、品牌缺失等问题;此外现实中产学研结合不够紧密,科研成果也较少能转化成产业价值<sup>[132]</sup>。笔者了解到,尽管目前市场上有一些大鲵产品在售,但真正意义能被市场广泛认可的“拳头产品”仍然较为缺乏。另外,由于缺乏品牌意识,大鲵产品质量、价格也是参差不齐,大鲵营养食品中功能成分的含量和营养机理也都缺乏科学的阐明。

目前,大鲵产品的销售模式主要有线下和线上两种模式。线下模式以旅游市场和本地消费市场为主,通过导游带团进店消费是旅游市场最主要的销售模式,本地消费则以餐馆为主。线上销售模式则更加多元化,主要有官网销售、本地APP、微信小程序等,也有借助于大的电子商务平台如“天猫”旗舰店等。有的公司已在“新三板”成功挂牌上市<sup>[132]</sup>。

## 6 总结与展望

中国大鲵作为我国特有且珍稀的动物种质资

源,不仅具有重要的科研与生态价值,还具有巨大的开发与利用价值。我国科研人员通过近几十年的研究,在大鲵种质资源保护与利用方面取得了长足的进展,积累了许多重要的研究成果。本文从大鲵的基本生物学及栖息地特征、遗传多样性、种质资源保护、人工繁殖与疾病、营养及活性成分与产业化利用等方面进行了综合概述。就野生种群来说,尽管大鲵具有多重保护地位,目前其野外种群现状仍然不容乐观,受损野生种群修复较慢,各地自然保护区的保护效率和效果均有待评估。在人工繁殖技术的推动下,全国范围内开展了大量的大鲵人工增殖放流活动,以期恢复其濒危的野生种群。然而,最新的遗传多样性研究表明,无序的放流可能会存在一定的遗传风险,这方面仍需进行深入的研究与管理;另外放流后种群存活情况也需开展更加规范的调查与评估。就人工养殖群体而言,目前我国大鲵人工繁殖技术已经较为成熟,通过仿生态或全人工繁殖方式使得大鲵苗种的获得有了充分的保障。然而,苗种培育和养殖阶段仍然不可避免遭受各种疾病侵袭,特别以虹彩病毒等病毒性疾病和细菌性疾病最为严重。而目前抗病机理研究仍然较少,养殖户的治疗方式也主要凭借其他水产动物的防治经验。大鲵作为一种中国传统食材,具有药食同源的特点,在古籍中亦多有记载。对其营养成分分析表明,其整体上属于高蛋白低脂肪类的高端水产品种,其蕴含的生物活性成分和功效也正在逐步被揭示。然而,目前在市场供需、产业发展及科研投入的综合影响现状下,销售价格持续走低,养殖规模也仍然较小。尽管目前已研发的产品也较为多样,但仍缺乏有竞争力的拳头产品,这与其作为一种优良种质资源的特质极不相符,未来其开发利用的广度和深度仍亟待加强。

该论文部分图片得到了中国科学院成都生物研究所江建平研究员、赵天博士,清华大学邢新会教授的授权与支持,一并致谢!

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献 (References):

- [1] Wang X M, Zhang K J, Wang Z H, et al. The decline of the Chinese giant salamander *Andrias davidianus* and

- implications for its conservation[J]. *Oryx*, 2004, 38(2): 197-202.
- [ 2 ] Browne R K, Li H, Wang Z H, *et al.* The giant salamanders (Cryptobranchidae): Part A, palaeontology, phylogeny, genetics, and morphology[J]. *Amphibian and Reptile Conservation*, 2014, 5(4): 17-29.
- [ 3 ] He D, Zhu W M, Zeng W, *et al.* Nutritional and medicinal characteristics of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) for applications in healthcare industry by artificial cultivation: a review[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2018, 7(1): 1-10.
- [ 4 ] 艾为明, 敖鑫如. 大鲵的生物学特性及人工模拟生态繁殖[J]. *水利渔业*, 2005, 25(6): 46-47.
- Ai W M, Ao X R. The biological characteristics of the giant salamander and reproduction in simulated ecological conditions[J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, 25(6): 46-47 (in Chinese).
- [ 5 ] 林作昆, 曾德胜. 大鲵生物学特性及人工繁殖技术[J]. *现代农业科技*, 2019(23): 209,211.
- Lin Z K, Zeng D S. Biological characteristics and artificial reproduction technology of the Chinese giant salamander[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(23): 209,211 (in Chinese).
- [ 6 ] 赵虎, 邓捷, 孔飞, 等. 关于大鲵外鳃脱落期延长的探讨[J]. *河北渔业*, 2018(12): 35-36.
- Zhao H, Deng J, Kong F, *et al.* A discussion to the prolonged period of gill abscission of the Chinese giant salamander[J]. *Hebei Fisheries*, 2018(12): 35-36 (in Chinese).
- [ 7 ] 宋鸣涛. 中国大鲵的食性研究[J]. *动物学杂志*, 1994, 29(4): 38-42.
- Song M T. Food habit of great salamander of China[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1994, 29(4): 38-42 (in Chinese).
- [ 8 ] Geng X F, Guo J L, Zhang L, *et al.* Differential proteomic analysis of Chinese giant salamander liver in response to fasting[J]. *Frontiers in Physiology*, 2020, 11: 208.
- [ 9 ] 罗庆华, 卢成英, 刘清波. 中国大鲵繁殖生物学研究进展[J]. *四川动物*, 2005, 24(3): 417-420.
- Luo Q H, Lu C Y, Liu Q B. Advances in reproductive biology of Chinese giant salamander[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2005, 24(3): 417-420 (in Chinese).
- [ 10 ] Luo Q H, Tong F, Song Y J, *et al.* Observation of the breeding behavior of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) using a digital monitoring system[J]. *Animals (Basel)*, 2018, 8(10): 161.
- [ 11 ] 费梁, 叶昌媛, 江建平. 中国两栖动物彩色图鉴[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2010: 71.
- Fei L, Ye C Y, Jiang J P. Colored atlas of Chinese amphibians[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 2010: 71 (in Chinese).
- [ 12 ] 郑合勋, 王才安, 葛荫榕. 卢氏县的大鲵资源[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 1992, 22(4): 51-56.
- Zheng H X, Wang C A, Ge Y R. Resources of *Megalobatrachus davidianus* in Lushi county[J]. *Journal of Henan University (Natural Science Edition)*, 1992, 22(4): 51-56 (in Chinese).
- [ 13 ] 邓捷, 王启军, 赵虎, 等. 水温对大鲵野外放流的影响初探[J]. *基因组学与应用生物学*, 2016, 35(6): 1377-1382.
- Deng J, Wang Q J, Zhao H, *et al.* Study on the impact of water temperature on the artificial releasing of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2016, 35(6): 1377-1382 (in Chinese).
- [ 14 ] 王永杰, 陈红莲, 王银东. 人工繁殖大鲵的关键技术[J]. *养殖与饲料*, 2016(7): 19-22.
- Wang Y J, Chen H L, Wang Y D. Key technologies to the artificial breeding of Chinese giant salamander[J]. *Animals Breeding and Feed*, 2016(7): 19-22 (in Chinese).
- [ 15 ] 陶峰勇, 王小明, 章克家. 大鲵栖息地环境的初步研究[J]. *四川动物*, 2004, 23(2): 83-87.
- Tao F Y, Wang X M, Zhang K J. Preliminary study on characters of habitat dens and river types of Chinese giant salamander[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2004, 23(2): 83-87 (in Chinese).
- [ 16 ] 罗庆华, 刘清波, 刘英, 等. 野生大鲵繁殖洞穴生态环境的初步研究[J]. *动物学杂志*, 2007, 42(3): 114-119.
- Luo Q H, Liu Q B, Liu Y, *et al.* Preliminary study on ecological conditions in breeding den of Chinese giant salamander[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, 42(3): 114-119 (in Chinese).
- [ 17 ] 罗庆华. 张家界大鲵生境特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1723-1730.
- Luo Q H. Habitat characteristics of *Andrias davidianus* in Zhangjiajie of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1723-1730 (in Chinese).

- Ecology, 2009, 20(7): 1723-1730 (in Chinese).
- [ 18 ] Zhang L, Wang Q J, Willard S T, *et al.* Environmental characteristics associated with settlement of reintroduced Chinese giant salamanders[J]. *Journal of Herpetology*, 2017, 51(3): 417-424.
- [ 19 ] 罗庆华, 童芳, 陶水秀, 等. 旅游干扰对张家界大鲵生境及水质的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2101-2108.
- Luo Q H, Tong F, Tao S X, *et al.* Effects of tourism disturbance on the habitat and water quality for *Andrias davidianus* in Zhangjiajie, Hunan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 2101-2108 (in Chinese).
- [ 20 ] Zheng H X, Wang X M. Telemetric data reveals ecologically adaptive behavior of captive raised Chinese giant salamanders when reintroduced into their native habitat[J]. *Asian Herpetological Research*, 2010, 1(1): 31-35.
- [ 21 ] Chen S, Cunningham A A, Wei G, *et al.* Determining threatened species distributions in the face of limited data: spatial conservation prioritization for the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(6): 3098-3108.
- [ 22 ] Shu G C, Liu P, Zhao T, *et al.* Disordered translocation is hastening local extinction of the Chinese giant salamander[J]. *Asian Herpetological Research*, 2021, 12(3): 271-279.
- [ 23 ] Zhang Z X, Stefano M, Liang Z Q, *et al.* Future climate change will severely reduce habitat suitability of the critically endangered Chinese giant salamander[J]. *Freshwater Biology*, 2020, 65(5): 971-980.
- [ 24 ] Murphy R W, Fu J Z, Upton D E, *et al.* Genetic variability among endangered Chinese giant salamanders, *Andrias davidianus*[J]. *Molecular Ecology*, 2000, 9(10): 1539-1547.
- [ 25 ] 陶峰勇, 王小明, 郑合勋, 等. 中国大鲵四种群的遗传结构和地理分化[J]. *动物学研究*, 2005, 26(2): 162-167.
- Tao F Y, Wang X M, Zhang H X, *et al.* Genetic structure and geographic subdivision of four populations of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Zoological Research*, 2005, 26(2): 162-167 (in Chinese).
- [ 26 ] 陶峰勇, 王小明, 郑合勋. 中国大鲵五地理种群Cyt b 基因全序列及其遗传关系分析[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(5): 625-628.
- Tao F Y, Wang X M, Zheng H X. Analysis of complete cytochrome *B* sequences and genetic relationship among Chinese giant salamanders (*Andrias davidianus*) from different areas[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(5): 625-628 (in Chinese).
- [ 27 ] 方耀林, 张燕, 肖汉兵, 等. 野生大鲵及其人工繁殖后代的遗传多样性分析[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(5): 783-786.
- Fang Y L, Zhang Y, Bing X H, *et al.* Genetic diversity analysis of wild Chinese giant salamander (*Andria davidianus*) and their artificially propagated progenies[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(5): 783-786 (in Chinese).
- [ 28 ] 吴侯学, 谢巧雄, 姚俊杰, 等. 贵州省3个地理种群大鲵的遗传多样性及遗传结构[J]. *水产科学*, 2017, 36(2): 207-211.
- Wu Y X, Xie Q X, Yao J J, *et al.* Genetic diversity and genetic structure of giant salamander from three geographical populations in Guizhou Province[J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(2): 207-211 (in Chinese).
- [ 29 ] 黄立群, 仪慧兰, 崔松林, 等. 历山中国大鲵线粒体片段序列的测定及其遗传差异研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(6): 513-517.
- Huang L Q, Yi H L, Cui S L, *et al.* Nucleotide sequence differences in some mitochondrial DNA regions in wild Chinese giant salamander *Andrias davidianus* in Lishan[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2012, 27(6): 513-517 (in Chinese).
- [ 30 ] Lin M, Huang J, Li Z, *et al.* RAPD analysis on the wild parents and second filial generation of artificial breeding of *Andrias davidianus*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2003, 12(S1): 20-23.
- [ 31 ] 杨丽萍, 蒙子宁, 刘晓春, 等. 中国大鲵5个野生种群AFLP分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(2): 99-104.
- Yang L P, Meng Z N, Liu X C, *et al.* AFLP analysis of five natural populations of *Andrias davidianus*[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(2): 99-104 (in Chinese).
- [ 32 ] 孟彦, 杨焱清, 张燕, 等. 野生和养殖大鲵群体遗传多样性的微卫星分析[J]. *生物多样性*, 2008, 16(6): 533-538.

- Meng Y, Yang Y Q, Zhang Y, *et al.* A comparison of genetic diversity between wild and cultured populations of the Chinese giant salamander, *Andrias davidianus*, based on microsatellite analyses[J]. *Biodiversity Science*, 2008, 16(6): 533-538 (in Chinese).
- [ 33 ] Meng Y, Zhang Y, Liang H W, *et al.* Genetic diversity of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) based on the novel microsatellite markers[J]. *Russian Journal of Genetics*, 2012, 48(12): 1227-1231.
- [ 34 ] Wang J, Zhang J, Li X L, *et al.* Isolation and characterization of 16 microsatellite loci for the giant salamander *Andrias davidianus*[J]. *Conservation Genetics Resources*, 2014, 6(2): 367-368.
- [ 35 ] Wang J, Zhang H X, Xie F, *et al.* Genetic bottlenecks of the wild Chinese giant salamander in karst caves[J]. *Asian Herpetological Research*, 2017, 8(3): 174-183.
- [ 36 ] Yan F, Lü J C, Zhang B L, *et al.* The Chinese giant salamander exemplifies the hidden extinction of cryptic species[J]. *Current Biology*, 2018, 28(10): R590-R592.
- [ 37 ] Liang Z Q, Chen W T, Wang D Q, *et al.* Phylogeographic patterns and conservation implications of the endangered Chinese giant salamander[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(7): 3879-3890.
- [ 38 ] Turvey S T, Marr M M, Barnes I, *et al.* Historical museum collections clarify the evolutionary history of cryptic species radiation in the world's largest amphibians[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(18): 10070-10084.
- [ 39 ] Boulenger E G. On a new giant salamander, living in the society's gardens[J]. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 1924, 94(1): 173-174.
- [ 40 ] Zhu B C, Feng Z J, Qu A, *et al.* The karyotype of the caudate amphibian *Andrias davidianus*[J]. *Hereditas*, 2002, 136(1): 85-88.
- [ 41 ] 李培青, 朱必才, 侯进慧, 等. 中国大鲵核型特征研究[J]. *四川动物*, 2008, 27(3): 344-346.
- Li P Q, Zhu B C, Hou J H, *et al.* Karyotype feature of *Andrias davidianus*[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(3): 344-346 (in Chinese).
- [ 42 ] Zhang P, Chen Y Q, Liu Y F, *et al.* The complete mitochondrial genome of the Chinese giant salamander, *Andrias davidianus* (Amphibia: Caudata)[J]. *Gene*, 2003, 311: 93-98.
- [ 43 ] Xu J C, Peng L F, Chen Y R, *et al.* Four complete mitochondrial genomes of living wild-type Chinese giant salamander *Andrias davidianus* (Amphibia: Cryptobranchidae)[J]. *Mitochondrial DNA Part B*, 2018, 3(2): 1200-1202.
- [ 44 ] Li F G, Wang L X, Lan Q J, *et al.* RNA-Seq analysis and gene discovery of *Andrias davidianus* using illumina short read sequencing[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123730.
- [ 45 ] Geng X F, Li W S, Shang H T, *et al.* A reference gene set construction using RNA-seq of multiple tissues of Chinese giant salamander, *Andrias davidianus*[J]. *Gigascience*, 2017, 6(3): gix006.
- [ 46 ] Fan Y D, Chang M X, Ma J, *et al.* Transcriptomic analysis of the host response to an iridovirus infection in Chinese giant salamander, *Andrias davidianus*[J]. *Veterinary Research*, 2015, 46: 136.
- [ 47 ] Qi Z T, Zhang Q H, Wang Z S, *et al.* Transcriptome analysis of the endangered Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*): immune modulation in response to *Aeromonas hydrophila* infection[J]. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2016, 169: 85-95.
- [ 48 ] Zhang M J, Gaughan S, Chang Q, *et al.* Age-related changes in the gut microbiota of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Microbiologyopen*, 2018, 8(7): e778.
- [ 49 ] Zhu L F, Zhu W, Zhao T, *et al.* Environmental temperatures affect the gastrointestinal microbes of the Chinese giant salamander[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 543767.
- [ 50 ] Wu Z B, Gatesoupe F J, Zhang Q Q, *et al.* High-throughput sequencing reveals the gut and lung prokaryotic community profiles of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Molecular Biology Reports*, 2019, 46(5): 5143-5154.
- [ 51 ] Gao K Q, Shubin N H. Earliest known crown-group salamanders[J]. *Nature*, 2003, 422(6930): 424-428.
- [ 52 ] 章克家, 王小明, 吴巍, 等. 大鲵保护生物学及其研究进展[J]. *生物多样性*, 2002, 10(3): 291-297.
- Zhang K J, Wang X M, Wu W, *et al.* Advances in conservation biology of Chinese giant salamander[J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10(3): 291-297 (in Chinese).
- [ 53 ] 张书环, 梁志强, 杜浩, 等. 隐鳃鲵科的生物地理与种群遗传研究进展[J]. *海洋渔业*, 2019, 41(5): 623-630.
- Zhang S H, Liang Z Q, Du H, *et al.* Progress in biogeography of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)



- graphy and population genetics of the Cryptobranchidae[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 41(5): 623-630 (in Chinese).
- [ 54 ] 李媛, 姚俊杰. 大鲵资源的保护[J]. *科技咨询导报*, 2007(30): 110.  
Li Y, Yao J J. Conservation of Chinese giant salamander[J]. *Science and Technology Consulting Bulletin*, 2007(30): 110 (in Chinese).
- [ 55 ] Liang G, Geng B R, Zhao E M. *Andrias davidianus*. The IUCN red list of threatened species 2004[CP/OL]. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T1272.A3375181.en>
- [ 56 ] Isaac N J B, Redding D W, Meredith H M, *et al.* Phylogenetically-informed priorities for amphibian conservation[J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e43912.
- [ 57 ] 郑合勋, 王小明, 陈平. 卢氏县大鲵资源变化和致危因素分析[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2005: 339-346.  
Zheng H X, Wang X M, Chen P. The source change of Chinese giant salamander in Lushi County and factor analysis of being in severe danger[M]. Changchun: Jilin People's Press, 2005: 339-346 (in Chinese).
- [ 58 ] 王渊. 安徽省大鲵资源初步调查报告[J]. *淡水渔业*, 1996, 26(3): 22-24.  
Wang Y. Preliminary investigation report on resources of Chinese giant salamander in Anhui Province[J]. *Freshwater Fisheries*, 1996, 26(3): 22-24 (in Chinese).
- [ 59 ] 王永杰, 吕文军, 王静, 等. 甘肃康县大鲵自然保护区大鲵资源调查与分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, 53(2): 23-30.  
Wang Y J, Lyu W J, Wang J, *et al.* Investigation and analysis on resources of the Chinese giant salamander in Kang County Nature Reserve of Gansu Province[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(2): 23-30 (in Chinese).
- [ 60 ] 郭军. 山西省野生大鲵资源现状及栖息地生境特征研究[D]. 太原: 山西大学, 2011.  
Guo J. Resources and characteristics of habitat of wild Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) in Shanxi[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011 (in Chinese).
- [ 61 ] 刘诗峰, 杨兴中, 田英孝. 汉江支流涓水河流域大鲵数量统计方法的探讨及其资源[J]. *动物学杂志*, 1991, 26(6): 35-40.  
Liu S F, Yang X Z, Tian Y X. Study on the statistical method and resources of Chinese giant salamander in Xushui River valley, a tributary of Hanjiang River[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1991, 26(6): 35-40 (in Chinese).
- [ 62 ] 王启军. 陕西省太白县大鲵资源调查及其变动情况分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
Wang Q J. Survey and analysis of Chinese giant salamander resources in Taibai county Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese).
- [ 63 ] 粟海军, 喻理飞, 马建章. 贵州岩下自然保护区的野生大鲵资源现状及历史动态[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(7): 652-657.  
Su H J, Yu L F, Ma J Z. Population status and history dynamics of wild Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) in Yanxia Natural Reserve in Guizhou Province, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(7): 652-657 (in Chinese).
- [ 64 ] 向前光. 贵州省松桃县大鲵资源保护与产业发展思路[J]. *北京农业*, 2014(21): 290.  
Xiang Q G. Resources protection and industrial development of Chinese giant salamander in Songtao County, Guizhou Province[J]. *Beijing Agriculture*, 2014(21): 290 (in Chinese).
- [ 65 ] 吴纪国, 赵雪峰. 正安县谢坝河大鲵种质资源调查及保护[J]. *贵州畜牧兽医*, 2016, 40(2): 66-68.  
Wu J G, Zhao X F. Investigation and protection of the germplasm resources of Chinese giant salamander in Xiebahe River of Zheng'an County[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016, 40(2): 66-68 (in Chinese).
- [ 66 ] 罗庆华, 张立云, 刘英, 等. 桑植县大鲵资源调查[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8): 727-731.  
Luo Q H, Zhang L Y, Liu Y, *et al.* Investigation on resources of Chinese giant salamander in Sangzhi County[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(8): 727-731 (in Chinese).
- [ 67 ] 罗庆华, 刘英, 张立云, 等. 湖南张家界市大鲵资源调查[J]. *四川动物*, 2009, 28(3): 422-426, 436.  
Luo Q H, Liu Y, Zhang L Y, *et al.* Investigation on resources of Chinese giant salamander in Zhangjiajie City[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2009, 28(3): 422-426, 436 (in Chinese).
- [ 68 ] 肖秀娥, 谭德展, 曾宪忠, 等. 湖南隆回县野生大鲵资

- 源的现状 & 对策[J]. *北京农业*, 2014(30): 189-190.
- Xiao X E, Tan D Z, Zeng X Z, *et al.* Current situation and countermeasures of wild Chinese giant salamander resources in Longhui County of Hunan Province[J]. *Beijing Agriculture*, 2014(30): 189-190 (in Chinese).
- [ 69 ] Pierson T W, Yan F, Wang Y Y, *et al.* A survey for the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*; Blanchard, 1871) in the Qinghai Province[J]. *Amphibian & Reptile Conservation*, 2014, 8(1): 1-6.
- [ 70 ] Pan Y, Wei G, Cunningham A A, *et al.* Using local ecological knowledge to assess the status of the critically endangered Chinese giant salamander *Andrias davidianus* in Guizhou Province, China[J]. *Oryx*, 2016, 50(2): 257-264.
- [ 71 ] Turvey S T, Chen S, Tapley B, *et al.* Imminent extinction in the wild of the world's largest amphibian[J]. *Current Biology*, 2018, 28(10): R592-R594.
- [ 72 ] 梁志强, 张书环, 王崇瑞, 等. 大鲵资源现状与保护建议[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(S1): 13-17.
- Liang Z Q, Zhang S H, Wang C R, *et al.* Present situation of natural resources and protection recommendations of *Andrias davidianus*[J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(S1): 13-17 (in Chinese).
- [ 73 ] Zhao T, Zhang W Y, Zhou J, *et al.* Niche divergence of evolutionarily significant units with implications for repopulation programs of the world's largest amphibians[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140269.
- [ 74 ] 魏梦雅, 罗庆华, 李捷, 等. 张家界大鲵国家级自然保护区功能分区研究[J]. *湖南农业科学*, 2017(7): 59-64.
- Wei M Y, Luo Q H, Li J, *et al.* Functional zoning research on giant salamander of Zhangjiajie national nature reserve[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(7): 59-64 (in Chinese).
- [ 75 ] 张红星. 陕西省大鲵资源调查与人工放流效果评价[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(S1): 29.
- Zhang H X. Resources survey and evaluation of artificial translocation of the Chinese giant salamander in Shaanxi Province[J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, 43(S1): 29 (in Chinese).
- [ 76 ] 林衍峰, 甘成叙, 王永杰. 率水河大鲵放流效果及影响因素分析[J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(6): 88-96.
- Lin Y F, Gan C X, Wang Y J. Evaluation of the effect of releasing giant salamanders into the Shuaishui River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(6): 88-96 (in Chinese).
- [ 77 ] 罗庆华, 刘英, 张立云. 张家界大鲵人工放流效果及其影响因素分析[J]. *生物多样性*, 2009, 17(3): 310-317.
- Luo Q H, Liu Y, Zhang L Y. Effectiveness of releasing artificially-bred Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) into the wild in Zhangjiajie, Hunan[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(3): 310-317 (in Chinese).
- [ 78 ] 刘萍, 赵春霖, 熊姗, 等. 中国大鲵古田山放流种群监测及成效评估[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 823-830.
- Liu P, Zhao C L, Xiong S, *et al.* Population monitoring and effect evaluation of the stock enhancement of Chinese giant salamander in the Gutian mountain national nature reserve[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(4): 823-830 (in Chinese).
- [ 79 ] Cunningham A A, Turvey S T, Zhou F, *et al.* Development of the Chinese giant salamander *Andrias davidianus* farming industry in Shaanxi Province, China: Conservation threats and opportunities[J]. *Oryx*, 2016, 50(2): 265-273.
- [ 80 ] Lu C Q, Chai J, Murphy R W, *et al.* Giant salamanders: farmed yet endangered[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 989.
- [ 81 ] 阳爱生, 刘国钧. 大鲵人工繁殖的初步研究[J]. *淡水渔业*, 1979(2): 1-5.
- Yang A S, Liu G J. Preliminary study on artificial reproduction of Chinese giant salamander[J]. *Freshwater Fisheries*, 1979(2): 1-5 (in Chinese).
- [ 82 ] 伍远安, 梁志强, 王冬武. 大鲵生态养殖 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2015: 2-3.
- Wu Y A, Liang Z Q, Wang D W. The ecological breeding of Chinese giant salamander [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2015: 2-3 (in Chinese).
- [ 83 ] 刘鉴毅, 肖汉兵, 杨焱清. 中国大鲵养殖繁育技术的探讨[J]. *经济动物学报*, 1999, 3(3): 38-42.
- Liu J Y, Xiao H B, Yang Y Q. Exploration on techniques in culture and breeding of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Journal of Economic Animal*, 1999, 3(3): 38-42 (in Chinese).
- [ 84 ] 梁刚. 陕西省大鲵的繁育模式及初步评价[J]. *经济动物学报*, 1999, 3(3): 38-42 (in Chinese).

- 物学报, 2007, 11(4): 234-237.
- Liang G. Chinese giant salamander captive breeding models in Shaanxi Province and primary assessment[J]. *Journal of Economic Animal*, 2007, 11(4): 234-237 (in Chinese).
- [ 85 ] 周小愿, 张星朗, 吉红, 等. 大鲵虹彩病毒的形态结构及其包涵体特征[J]. *淡水渔业*, 2015, 45(1): 62-66.
- Zhou X Y, Zhang X L, Ji H, *et al.* Morphology of *Andrias davidianus* iridovirus and characterization of its inclusion bodies[J]. *Freshwater Fisheries*, 2015, 45(1): 62-66 (in Chinese).
- [ 86 ] Geng Y, Wang K Y, Zhou Z Y, *et al.* First report of a ranavirus associated with morbidity and mortality in farmed Chinese giant salamanders (*Andrias davidianus*)[J]. *Journal of Comparative Pathology*, 2011, 145(1): 95-102.
- [ 87 ] 耿毅, 汪开毓, 李成伟, 等. 蛙病毒感染致养殖大鲵大规模死亡的电镜观察及PCR检测[J]. *中国兽医科学*, 2010, 40(8): 817-821.
- Geng Y, Wang K Y, Li C W, *et al.* PCR detection and electron microscopic observation of bred Chinese giant salamander infected with ranavirus associated with mass mortality[J]. *Veterinary Science in China*, 2010, 40(8): 817-821 (in Chinese).
- [ 88 ] 张晗, 邓捷, 赵虎, 等. 大鲵病毒性疾病最新研究进展[J]. *河北渔业*, 2020(4): 49-52.
- Zhang H, Deng J, Zhao H, *et al.* Research progress on viral disease of Chinese giant salamander[J]. *Hebei Fisheries*, 2020(4): 49-52 (in Chinese).
- [ 89 ] 王高学, 白占涛, 张向前, 等. 大鲵赤皮病病原分离鉴定及防治试验[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 71-74.
- Wang G X, Bai Z T, Zhang X Q, *et al.* Studies on the red skin disease in *Andrias davidianus*[J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis*, 1999, 27(4): 71-74 (in Chinese).
- [ 90 ] 徐景峨, 余波, 文正常, 等. 大鲵致病性嗜水气单胞菌的分离鉴定与药敏试验[J]. *畜牧与兽医*, 2010, 42(3): 56-58.
- Xu J E, Yu B, Wen Z C, *et al.* Isolation, identification and drug sensitivity test of pathogenic *Aeromonas hydrophila* from Chinese giant salamander[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 42(3): 56-58 (in Chinese).
- [ 91 ] 钟蕾, 肖调义, 刘晓燕, 等. 大鲵细菌性败血症的组织病理学观察[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2009, 32(3): 84-88.
- Zhong L, Xiao D Y, Liu X Y, *et al.* Histopathological study on bacterial septicemia of giant salamander[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2009, 32(3): 84-88 (in Chinese).
- [ 92 ] 李敏, 张龙, 姚俊杰, 等. 大鲵水霉病的特征及产生原因探究[J]. *现代农业科学*, 2008, 15(12): 99-100.
- Li M, Zhang L, Yao J J, *et al.* Characteristics and exploration on water disease of mildew of giant salamander[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2008, 15(12): 99-100 (in Chinese).
- [ 93 ] 安苗, 张龙, 姚俊杰, 等. 大鲵水霉病原的形态学观察[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(10): 146-148.
- An M, Zhang L, Yao J J, *et al.* Morphology of saprolegniasis and its pathogen in Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(10): 146-148 (in Chinese).
- [ 94 ] 李川, 何登菊, 牟洪民, 等. 大鲵水霉病中草药治疗试验[J]. *河北渔业*, 2010(1): 33,57.
- Li C, He D J, Mou H M, *et al.* Treatment of water molds of Chinese giant salamander *Andrias davidianus* with herbal medicine[J]. *Hebei Fisheries*, 2010(1): 33,57 (in Chinese).
- [ 95 ] 何承德, 刘世修, 马小琴. 寄生在中国大鲵的卷尾属线虫三新种(锥尾目: 异尾科)[J]. *四川动物*, 1992, 11(3): 1-5.
- He C D, Liu S X, Ma X Q. Three new species of the genus *spironoura* from Chinese giant salamander *Andrias davidianus* (Oxyuridae: Kathlaniidae)[J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 1992, 11(3): 1-5 (in Chinese).
- [ 96 ] 张同富, 杨明琅. 四川大鲵寄生吸虫一新属新种(吸虫纲: 复殖目)[J]. *动物分类学报*, 1997, 22(2): 125-129.
- Zhang T F, Yang M L. A new genus and species of trematodes from *Andrias davidianus* in Sichuan Province (Trematoda: Digenea)[J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 1997, 22(2): 125-129 (in Chinese).
- [ 97 ] 张晗, 邓捷, 赵虎, 等. 大鲵寄生虫性疾病研究进展[J]. *河北渔业*, 2021(2): 37-38,46.
- Zhang H, Deng J, Zhao H, *et al.* Research progress on parasitic diseases of the Chinese giant salamander[J]. *Hebei Fisheries*, 2021(2): 37-38,46 (in Chinese).

- [98] 李银花, 程王琨. 大鲵饲养中常见疾病的防治及病因探讨[J]. 农业与技术, 2017, 37(16): 104-105.  
Li Y H, Cheng W K. Discussion on prevention and treatment, and etiology of the common diseases in artificial breeding of Chinese giant salamander[J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(16): 104-105 (in Chinese).
- [99] 耿敬章, 李新生, 党娅. 中国大鲵营养成分和功能因子研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2013, 35(2): 9-12.  
Geng J Z, Li X S, Dang Y. Progress on nutrition and functional factors in Chinese giant salamander[J]. Amino Acids and Biotic Resources, 2013, 35(2): 9-12 (in Chinese).
- [100] 刘绍, 刘卉琳, 周月华, 等. 中国大鲵营养成分的分析[J]. 营养学报, 2010, 32(2): 198-200.  
Liu S, Liu H L, Zhou Y H, et al. Analysis of the nutritional composition of *Andrias davidianus*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2010, 32(2): 198-200 (in Chinese).
- [101] 罗庆华. 中国大鲵营养成分研究进展及食品开发探讨[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 390-393.  
Luo Q H. Research advances in nutritional composition and exploitation of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. Food Science, 2010, 31(19): 390-393 (in Chinese).
- [102] 李林强, 咎林森, 田万强, 等. 大鲵脂肪组织分布及其理化特性[J]. 西北农业学报, 2010, 19(2): 7-10.  
Li L Q, Zan L S, Tian W Q, et al. Adipose tissue distribution and physical and chemical properties of *Andrias davidianus*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(2): 7-10 (in Chinese).
- [103] 王立新, 郑尧, 艾闯, 等. 中国大鲵肌肉、尾脂营养成分分析与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 67-74.  
Wang L X, Zheng Y, Ai M, et al. Analysis of the nutritional ingredient and nutrient value of the muscle and tail lipid in Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(2): 67-74 (in Chinese).
- [104] 黄世英, 郭文韬, 杨志伟, 等. 人工养殖大鲵肉营养成分分析[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(5): I - II.  
Huang S Y, Guo W T, Yang Z W, et al. Nutritional analysis of the meat of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2009, 20(5): I - II (in Chinese).
- [105] 李林强, 咎林森. 中国大鲵肌肉脂肪酸组成及其抗氧化研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(1): 364-366.  
Li L Q, Zan L S. Study on fatty acids composition and antioxidation of Chinese giant salamander muscle oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(1): 364-366 (in Chinese).
- [106] 刘绍, 刘卉琳, 周治德, 等. 饲养中国大鲵肝脏与肌肉中几种重要脂肪酸的测定与分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 21-22, 26.  
Liu S, Liu H L, Zhou Z D, et al. Determination and analysis of essential fatty acid in *Andrias davidianus*' liver and muscle[J]. Food & Machinery, 2009, 25(3): 21-22, 26 (in Chinese).
- [107] 罗庆华, 王寒, 王苗苗, 等. 大鲵油不饱和脂肪酸的富集研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(10): 34-38.  
Luo Q H, Wang H, Wang M M, et al. Enrichment of unsaturated fatty acids from Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) oil[J]. China Oils and Fats, 2016, 41(10): 34-38 (in Chinese).
- [108] 艾为明, 陈少波, 曾国权, 等. 人工模拟生态养殖子二代大鲵肌肉营养成分分析[J]. 水生态学杂志, 2008, 1(2): 120-123.  
Ai W M, Chen S B, Zeng G Q, et al. Nutritional components of the muscle of the artificial breeding Chinese giant salamander in simulated ecological condition[J]. Journal of Hydroecology, 2008, 1(2): 120-123 (in Chinese).
- [109] 王苗苗, 罗庆华, 王海磊, 等. 张家界大鲵肌肉营养成分分析[J]. 营养学报, 2015, 37(4): 411-413.  
Wang M M, Luo Q H, Wang H L, et al. Analysis of nutrients components in the muscle of Zhangjiajie giant salamander[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2015, 37(4): 411-413 (in Chinese).
- [110] 胡代花. 大鲵生物活性肽和酶解产物研究及应用进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017, 3(5): 75-79.  
Hu D H. Research and application progress of bioactive peptides and enzymatic hydrolysates of the Chinese giant salamander[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2017, 3(5): 75-79 (in Chinese).
- [111] Qu M, Kong L, Wang W L, et al. Preparation and characterization of skin secretion hydrolysates from giant salamander (*Andrias davidianus*)[C]//Proceedings of 2011 International Conference on New Technology of 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Agricultural. Zibo, China: IEEE, 2011: 931-933.
- [112] 李伟, 于新莹, 佟长青, 等. 大鲵黏液酶解产物的制备及其抗疲劳作用研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 146-148,151.
- Li W, Yu X Y, Tong C Q, *et al.* Study on the enzymatic hydrolysates of skin mucous from *Andrias davidianus* and its anti-fatigue effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 146-148,151 (in Chinese).
- [113] 金桥, 魏芳, 佟长青, 等. 大鲵糖肽组分的高效液相色谱分析及其抗氧化活性研究[J]. 北京农学院学报, 2011, 26(1): 27-29.
- Jin Q, Wei F, Tong C Q, *et al.* HPLC analysis and anti-oxidative activity of glycopeptides from *Andrias davidianus*[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2011, 26(1): 27-29 (in Chinese).
- [114] 陈丽萍, 蔡剑雄, 王剑. 大鲵黏液低聚糖肽抑菌、抗血小板聚集活性研究[J]. 亚太传统医药, 2015, 11(1): 11-13.
- Chen L P, Cai J X, Wang J. Research on the antiplatelet aggregation and antibacterial of the giant salamander mucin oligosaccharide peptide[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2015, 11(1): 11-13 (in Chinese).
- [115] 徐伟良, 陈德经, 刘宇, 等. 大鲵皮肤黏液糖蛋白的提取纯化及抗肺癌活性研究[J]. 中国生化药物杂志, 2015, 35(8): 44-47.
- Xu W L, Chen D J, Liu Y, *et al.* Extraction and purification of giant salamander skin mucous glycoprotein and study its anti-cancer activity of lung cancer[J]. Chinese Journal of Biochemical and Pharmaceuticals, 2015, 35(8): 44-47 (in Chinese).
- [116] 徐伟良, 陈德经, 魏泓, 等. 大鲵皮肤黏液的抗氧化性及安全性评价研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2015, 31(2): 56-61.
- Xu W L, Chen D J, Wei H, *et al.* Study on the toxicity and antioxidant activity of mucus powder from salamander skin[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 31(2): 56-61 (in Chinese).
- [117] 王茁. 不同育龄大鲵皮肤黏液中低聚糖肽抗氧化活性研究[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(8): 34-36.
- Wang Z. Study on antioxidant activity of oligosaccharide peptides in skin mucus of different age of the Chinese giant salamander[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(8): 34-36 (in Chinese).
- [118] 佟长青, 余睿智, 赵菲, 等. 大鲵低聚糖肽的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2581-2586.
- Tong C Q, Yu R Z, Zhao F, *et al.* Research progress of *Andrias davidianus* glycopeptides[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(7): 2581-2586 (in Chinese).
- [119] 李静, 叶欣, 冉旭. 高温高压提高大鲵皮胶原蛋白肽提取率的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(10): 1-5.
- Li J, Ye X, Ran X. Study on extraction yield of collagen peptide of *Andrias davidianus* skin by high temperature and pressure[J]. The Food Industry, 2015, 36(10): 1-5 (in Chinese).
- [120] 顾赛麒, 李莉, 王锡昌, 等. 人工养殖大鲵皮胶原蛋白的性质研究[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 74-79.
- Gu S Q, Li L, Wang X C, *et al.* Properties of collagen extracted from the skin of farmed Chinese giant salamander (*Andrias davidianus* Blanchard)[J]. Food Science, 2014, 35(9): 74-79 (in Chinese).
- [121] 李林格, 曲敏. 大鲵皮胶原蛋白肽的结构特性及其对乙醇诱导肝损伤小鼠的保护作用[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 340-343.
- Li L G, Qu M. The structural character of collagen peptides from *Andrias davidianus* skin and its hepatoprotective effect against alcohol-induced liver injury in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(8): 340-343 (in Chinese).
- [122] 周艳华, 谭璐, 李涛, 等. 酶解大鲵皮胶原蛋白制备抗氧化肽工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(2): 111-117.
- Zhou Y H, Tan L, Li T, *et al.* Study on processing of antioxidant peptide extraction by enzymatic hydrolysis from the giant salamander skin collagen[J]. China Food Additives, 2019, 30(2): 111-117 (in Chinese).
- [123] 王文莉, 张伟, 于新莹, 等. 大鲵肉酶解产物的制备及其抗氧化性的研究[J]. 河北渔业, 2012(9): 1-4.
- Wang W L, Zhang W, Yu X Y, *et al.* Study on the enzymatic hydrolysates of flesh from *Andrias davidianus* and its antioxidant activities[J]. Hebei Fisheries, 2012(9): 1-4 (in Chinese).
- [124] 付静, 陈德经, 曹米娜. 大鲵多肽制备工艺的研究[J]. 食品科技, 2012, 37(2): 66-68,72.
- Fu J, Chen D J, Cao M N. The processing of the extraction of peptides by enzymatic hydrolysis of *Andrias davidianus* muscle meal[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(2): 66-68,72 (in Chinese).

- [125] 徐阳, 孙强, 青维, 等. 复合酶法制备大鲵多肽的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 180-185,189.  
Xu Y, Sun Q, Qing W, *et al.* Study on preparation of *Andrias davidianus* peptide by combined-enzyme method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 180-185,189 (in Chinese).
- [126] 鲍九枝, 余可锋. 响应面优化大鲵肉活性肽制备及运动饮料开发[J]. 食品工业, 2014, 35(11): 175-178.  
Bao J Z, Yu K F. Study on preparation of active peptide of *Andrias davidianus* flesh and its sports beverage[J]. The Food Industry, 2014, 35(11): 175-178 (in Chinese).
- [127] 杨志伟, 郭文韬, 黄世英, 等. 人工养殖大鲵肉延缓黑腹果蝇衰老的实验研究[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(4): 1025-1026.  
Yang Z W, Guo W T, Huang S Y, *et al.* Studies on Anti-aging effect of artificial breeding *Andrias davidianus* meat in drosophila[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2009, 20(4): 1025-1026 (in Chinese).
- [128] 蔡佳佳, 刘振珂, 李吉华, 等. 大鲵肉对D-半乳糖诱发小鼠衰老相关指标的影响[J]. 西部中医药, 2015, 28(7): 4-7.  
Cai J J, Liu Z K, Li J H, *et al.* Effects of giant salamander meat on physiological indexes of D-galactose induced aging mice models[J]. Western Journal of Traditional Chinese Medicine, 2015, 28(7): 4-7 (in Chinese).
- [129] 王利锋, 李学英, 王大忠. 大鲵皮肤分泌物中抗菌肽对铜绿假单胞菌感染小鼠创面的抗菌作用[J]. 华西药理学杂志, 2011, 26(4): 336-339.  
Wang L F, Li X Y, Wang D Z. Antibacterial effect of antimicrobial peptide from skin secretions of *Andrias davidianus* on the wound of *Pseudomonas aeruginosa* infection in mice[J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2011, 26(4): 336-339 (in Chinese).
- [130] Pei J J, Jiang L. Antimicrobial peptide from mucus of *Andrias davidianus*: screening and purification by magnetic cell membrane separation technique[J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2017, 50(1): 41-46.
- [131] 张神虎. 大鲵药用价值及人工养殖[J]. 广西农业生物科学, 2001, 20(4): 309-310.  
Zhang S H. Artificial cultivation of *Andrias davidianus* and its application virtue of medicine[J]. Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science, 2001, 20(4): 309-310 (in Chinese).
- [132] 王文博, 刘品, 窦玲玲, 等. 我国大鲵产业发展研究[J]. 中国水产, 2020(11): 57-58.  
Wang W B, Liu P, Dou L L, *et al.* Research on development of industry of Chinese giant salamander in China[J]. China Fisheries, 2020(11): 57-58 (in Chinese).
- [133] 全国水生野生动物保护分会. 全国大鲵驯养繁殖和经营利用调查报告[J]. 中国水产, 2015(3): 23-26.  
National Aquatic Wildlife Conservation Association. Investigation report on domestication reproduction and management utilization of Chinese giant salamander in China[J]. China Fisheries, 2015(3): 23-26 (in Chinese).
- [134] 张耀武, 陈万光, 张静. 大鲵肉粉面条的研制[J]. 粮食与饲料工业, 2019(8): 23-25.  
Zhang Y W, Chen W G, Zhang J. Research and development of nutritious noodles with meat flour of giant salamander[J]. Cereal & Feed Industry, 2019(8): 23-25 (in Chinese).
- [135] 兰洪明, 李灿, 黄晓欣, 等. 中国大鲵产业化开发现状与潜力[J]. 大科技, 2010(2): 321.  
Lan H M, Li C, Huang X X, *et al.* Present situation and potentiality of industrialization development of Chinese giant salamander[J]. Super Science, 2010(2): 321 (in Chinese).
- [136] 万军梅, 敖明章, 余龙江. 大鲵不同部位制备物治疗烫伤与冻伤作用研究[J]. 医药导报, 2013, 32(5): 603-604.  
Wan J M, Ao M Z, Yu L J. Study on the therapeutic effects of different parts of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) on scalds and frostbite[J]. Herald of Medicine, 2013, 32(5): 603-604 (in Chinese).
- [137] 汤颖颖. 来源于大鲵皮肤分泌物的水凝胶促进伤口愈合的初步研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2020.  
Tang Y Y. Preliminary study on hydrogels derived from skin secretion of the *Andrias davidianus* for wound healing[D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2020 (in Chinese).
- [138] 徐达宇, 雷明智, 周赟, 等. 大鲵皮箱包革工艺技术[J]. 中国皮革, 2012, 41(7): 1-2,5.  
Xu D Y, Lei M Z, Zhou Y, *et al.* Process of luggage leather by giant salamander skin[J]. China Leather, 2012, 41(7): 1-2,5 (in Chinese).

## Recent progress in the germplasm resources conservation and utilization of the Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)

JIANG Wansheng<sup>1,2\*</sup>, LAN Xiangying<sup>1,2</sup>, WANG Jinxiu<sup>1,2</sup>, XIANG Hongmei<sup>1</sup>,  
TIAN He<sup>1,2</sup>, LUO Qinghua<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Engineering Laboratory for Chinese Giant Salamander's Resource Protection and Comprehensive Utilization, Key Laboratory of Hunan Forest Products and Chemical Industry Engineering, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China;

2. College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, China)

**Abstract:** The Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) is the largest extant amphibian species in the world, with significant scientific, ecological and economic values. According to the Chinese law, wild populations of *A. davidianus* are treated as the class II state protected species, while the second and subsequent generations of captive-bred *A. davidianus* can be utilized as aquatic products or resources for the food and pharmaceutical industry. As one of the endemic and rare animals in China that possess both conservation and utilization values, the process about germplasm resources of *A. davidianus* has raised considerable concern. Although with multiple conservative status, the current situation of wild *A. davidianus* is still unoptimistic. The present practices and effects on the conservation of *A. davidianus* through in-situ conservation in terms of nature reserves and ex-situ conservation by artificial enhancement and translocation are yet to be evaluated. In contrast, with the increasing development of artificial culture and expanding of the husbandry scales, the captive-bred *A. davidianus* has become one of the new aquaculture species with good market prospects. However, the disease control is still one of the bottleneck problems during the process of captive breeding. *A. davidianus* is one of the high-valued aquaculture species with high protein and low fat, and additionally, its bioactive substances and efficacies are being revealed gradually. However, by restrictions of the market, industry, and the input of scientific research, the scale of captive *A. davidianus* is still very limited, thus the scope and depth of its utilization need to be greatly strengthened. Based on the studies from previous papers and the practices from our team, in this study we reviewed the conservation and utilization of the germplasm resources of *A. davidianus*, from the aspects of basic biology, habitat characteristics, genetic diversity, conservation, captive breeding, disease, nutrition, bioactive substances, industrial utilization, etc. By summarizing the successful experiences and identifying the problems, this paper aims to provide a valuable reference for studying the genetic germplasm resources, planning the conservation strategies, developing and sustainable utilization, as well as enhancing the public awareness of this precious species in the future.

**Key words:** *Andrias davidianus*; genetic diversity; germplasm resources; artificial culture; disease; industrial utilization

**Corresponding author:** JIANG Wansheng. E-mail: jiangwschina@163.com

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (32060128); Talent Project of Hunan Provincial Science and Technology Department (2020RC3057); Zhilan Foundation (2020040371B); Graduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX20211071); Opening Projects of "Ecology" and "Graduate Student" of Jishou University (Jdy20086, DNGC2020, DNGC2021)