环境 DNA 技术在生态保护和监测中的应用

张　辉[1, 2, 3]，线薇薇[1, 2, 3]

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室，山东 青岛 266071；2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室，山东 青岛 266237；3. 中国科学院海洋大科学研究中心，山东 青岛 266071)

摘要：生物多样性减少、生态系统功能退化、全球气候变化是全球性重大问题，在避免对当前生态环境再破坏的前提下，开展全面准确的生态监测来查清和明确生物多样性，对生态保护和可持续利用极其重要。环境 DNA 技术(eDNA)的发展提供了一种生态和生物多样性监测的新手段，是近年来的前沿热点技术之一。国际上已经将其广泛应用于生态监测中，而我国的相关研究成果，尤其是在海洋生态监测中的研究成果则相对缺乏。本文综述了 eDNA 技术的发展和国内外基于 eDNA 技术取得的相关成果，主要从 eDNA 技术与传统监测方法的互补性、基于 eDNA 技术监测物种生活史过程、基于 eDNA 技术推算物种丰度、基于 eDNA 技术研究生态系统结构变化等几个主要方面进行了介绍；阐释了 eDNA 技术应用的研究领域和方向；揭示了 eDNA 技术在生态监测中的适用性和重要性；指出了 eDNA 技术存在的一些问题。本综述对于生态保护与监测、资源的保护和可持续利用具有一定的参考价值。

关键词：环境 DNA；生态监测；生物多样性；资源保护

中图分类号：P735　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3096(2020)07-0096-07

DOI: 10.11759/hykx20200119002

生物多样性是全人类最终所依赖的所有尺度上生态系统服务的最初支撑者，也是人类生存和发展的基础，它与“全球变迁”和“持续发展”同被列为当代生态学和环境科学的三大前瞻性领域[1]。近一个世纪以来，随着人类活动的不断加剧，生物多样性和生态系统遭到了严重的破坏，物种灭绝的速度不断加快，人类赖以生存的生态系统中 60%已处于持续退化状态，自然资源的三分之二已被损耗，生物多样性减少、生态系统功能退化、全球气候变化等早已成为全球性的重大问题[2]。

基于此背景，在避免对当前生态环境再破坏的前提下，开展全面准确的生态监测来查清和明确生物多样性，对生态保护和可持续利用具有极其重要的意义。环境DNA技术(eDNA)的发展就提供了一种生态和生物多样性监测监测的新手段。该技术样品采集简单易行，是一种便捷地、环境友好型地大范围生态监测技术。

eDNA，是指环境中存在的 DNA，在大型生物研究中主要指生物脱落在环境中的组织或者细胞内含有的 DNA，例如皮毛、黏膜、粪便等[3]。通过采集 eDNA 样品，基于测序技术(现在通常使用第二代测序技术，即高通量测序)监测调查区域的生物种类，称为环境 DNA 宏条形码技术(图 1)。

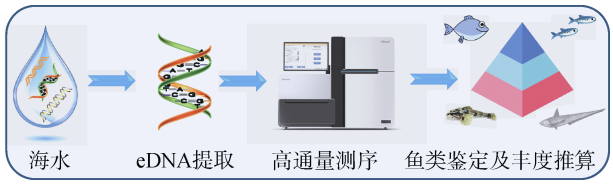


图 1　环境 DNA 宏条形码技术——以海洋鱼类为例

Fig. 1　Workflow of eDNA metabarcoding in the research on marine fishes

1　环境 DNA 技术的发展

eDNA 技术在水生生态系统中应用的灵感，来自于 20 世纪 90 年代利用潜水采集到的粪便来识别

收稿日期：2020-01-19；修回日期：2020-02-20

基金项目：国家自然科学基金(41976094，31872568)；中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019Q14)；中国科学院国际合作项目(GJHZ1885)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41976094, No. 31872568; Key Deployment Project of Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, No. COMS2019Q14; the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences, No. GJHZ1885]

作者简介：张辉(1986-)，男，山东安丘人，特聘研究员，博士，主要研究方向为渔业生态，E-mail: zhanghui@qdio.ac.cn；线薇薇，通信作者，研究员，主要研究方向为渔业资源，E-mail: wwxian@qdio.ac.cn

座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)，抹香鲸(*Physeter macrocephalus*)及露脊鲸(*Eubalaena glacialis*)等的相关研究中[3]。而世界上首例证明 eDNA 适用于水生生态系统的研究是 2008 年 Ficetola 等对美国牛蛙入侵的报道[4]。该研究表明即使目标水域内的牛蛙数量很少(例如每平方公里水域仅有 1~2 只牛蛙)，亦可通过 eDNA 将该物种检测出来。

此后，一些对不同水环境、不同生物门类的研究均验证了 eDNA 在物种检测中的有效性和灵敏性。例如，美国水产生物保护中心进行的一项大型研究开发了在大湖系统的运河中检测白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*H.nobilis*)等物种的 eDNA 技术[5]。Goldberg 等通过测试多种 DNA 提取和 PCR 方法完善了 eDNA 技术，以检测源头水流中的蝾螈(*Dicamptodon aterrimus*)和尾蟾落基山亚种(*Ascaphus montanus*)[6]。Thomsen 等[7]表明基于 eDNA 技术对于甲壳动物、水生昆虫、水生哺乳动物以及鸟类和陆生哺乳动物等的监测是有效的。2012 年以来，利用 eDNA 检测脊椎动物的论文大量增加，其中包括综述论文，如“环境 DNA 生态学研究及其在保护遗传学中的应用”[8]，“基于 eDNA 的野生生物及生物多样性监测”[9]和“基于 eDNA 对水生动物的监测——生态学研究中 eDNA 作为调查工具的综述”[10]以及生物保护集刊《环境 DNA：生物保护的高效新工具》中的 12 篇研究论文对 eDNA 在生物保护学领域的应用进行了报道等等[11]。这些研究为 eDNA 技术在水生生态系统，尤其是海洋生态系统监测中的应用奠定了必要的基础(图 2)。

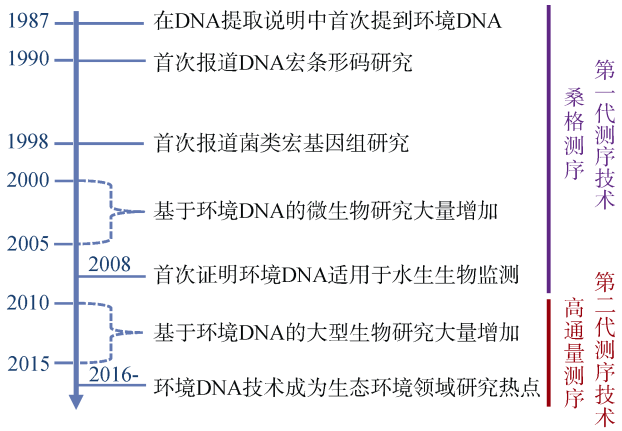


图 2 环境 DNA 研究发展概略图

Fig. 2 Overview of the research history of eDNA

2 国际上环境 DNA 技术在生态监测中的应用

国际上相关研究验证了 eDNA 技术在生态监测中的有效性和灵敏性。Bálint 等[12]综述了最近的研究成果，强调 eDNA 为生态研究提供了强有力的新时态数据来源，并讨论了基于 eDNA 技术的潜在研究方向，概述了相关挑战。《2018 研究前沿》[13]显示在生态与环境科学领域，eDNA 技术监测生物多样性连续第 2 年入选热点研究前沿(图 3)。本研究主要对 eDNA 技术在生态监测中的几个主要方向进行介绍。



图 3 生态与环境科学领域 Top10 热点前沿的施引论文

Fig. 3 Top 10 research topics in the fields of ecology and environment science

注：改编自《2018 研究前沿》[13]

2.1 环境 DNA 技术与传统监测方法的互补性

野生生物资源调查通常使用网具进行，这在监测高丰度物种时较为可靠，而对低丰度、珍惜、濒危物种的捕获概率较低，随着野生生物资源不断减少，传统资源调查得到的结果会存在较大误差[14]。研究表明，eDNA 方法比传统的调查方法更为灵敏、有效。Dejean 等[15]在外来物种入侵研究中，以两种美国牛蛙为研究对象，将传统调查方法与 eDNA 技术进行了比较，结果表明 eDNA 技术更加便捷有效。Davy 等[16]利用 eDNA 方法对 8 种淡水龟进行了监测，结果表明 eDNA 方法在龟类资源调查和监测中具有适用性，可以推广至濒危龟类物种的监测等领域。Sigsgaard 等[17]在丹麦水域同时使用传统调查方法和 eDNA 技术对泥鳅进行了监测，结果表明 eDNA 方法结果可靠，且所需成本较小。Smart 等[18]认为 eDNA 方法比传统方法在水生生物分类领域更高效，并就优化 eDNA 的成本进行了探索。Evans 等[19]以美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)为研究对象比较了电击法和 eDNA 方法的优劣，表明 eDNA 方法更加省时省力，约能节省 67%的成本，因此 eDNA 可以成为电击法调查的有力补充。

2.2 基于环境 DNA 技术监测物种生活史过程

由于 eDNA 技术对目标物种的干扰和生态系统的破坏性较小，因此可用于监测不同门类的物种，如日本大鲵(*Andrias japonicus*)[20]、泥鳅(*Misgurnus fossilis*)[21]、阿拉巴马鲟(*Scaphirhynchus suttkusi*)[22]等。相关研究进一步表明，通过监测 eDNA 浓度的变化，可以实现对目标物种在特定区域的产卵场、索饵场及迁移路径等生活史过程的监测和预测，显著提高了生态监测的效率，同时降低了大量人工成本和科研成本。Spear 等[23]利用 eDNA 对隐鳃鲵(*Cryptobranchus alleganiensis alleganiensis*)进行资源调查发现在隐鳃鲵的繁殖期，其 eDNA 浓度处于最高值。Erickson 等[24]基于 eDNA 方法研究了鳙鱼入侵的迁移路径、产卵场位置，发现了 eDNA 浓度与其迁移路径的相关性。Buxton 等[25]研究发现在疣螈(*Triturus cristatus*)繁殖期(6 月开始)及稚鱼期(8 月中旬开始)水域中的 eDNA 浓度最高。Bylemans 等[26]证明 eDNA 浓度变化可以作为监测濒危物种澳洲麦氏鲈(*Macquaria australasica*)产卵行为的重要手段，并有望在其他门类物种产卵过程中推广使用。

2.3 基于环境 DNA 技术推算物种丰度

研究表明，基于 eDNA 浓度与物种生物量之间的正相关关系可以确定物种的丰度和区系分布。Pilliod 等[27]在美国爱达荷州的 13 条河流中利用传统野外调查方法和 eDNA 方法采集了样品进行比较研究，结果表明 eDNA 浓度与野外调查得到的生物密度、生物量等结果呈显著正相关关系。Evans 等[28]测定了 9 种动物(包括 8 种淡水鱼类和 1 种两栖动物)的 6 个线粒体基因片段序列，发现序列拷贝数与上述 9 种生物的丰度存在正相关关系，提示 eDNA 具有生物丰度评价指标的潜力。Lacoursiere-Roussel 等[29]认为关于 eDNA 浓度与物种丰度之间关系的大量例证使得 eDNA 在渔业评估管理中具有广泛应用前景。Doi 等[30]基于日本佐波河水域浮潜调查研究，证明了香鱼(*Plecoglossus altivelis*)eDNA 浓度与其丰度及生物量的关系，结果表明 eDNA 分析是估算鱼类丰度/生物量以及它们在河流中的空间分布的有效工具。Salter 等[31]比较了基于 eDNA 技术与传统拖网调查结果，发现大西洋鳕鱼(*Gadus morhua*)的捕获量与定量 PCR 结果呈显著正相关关系，提出 eDNA 技术可以用于重要海洋经济鱼类的区域性资源量评估。

2.4 基于环境 DNA 技术研究生态系统结构变化

生态系统结构变化是生态监测的重要方面，通过 eDNA 分析，可以同时监测生物在多个营养级和群落中的动态变化，从而提供与生态系统变化相关的生物间作用的关键信息。Djurhuus 等[32]利用 eDNA 高通量测序技术，基于加利福尼亚蒙特雷湾 18 个月(2015—2016 年)的海水样品，研究了该生态系统中的生物多样性，推断了群落结构变化及其与环境的关系，提供了预期的捕食者与被捕食者之间的关系、营养级关系及季节性变化的证据，认为基于 eDNA 分析可以掌握海洋生态系统变化并为保护敏感生物提供依据。Holman 等[33]基于 eDNA 调查了英国沿海 4 个码头的沉积物和水样，并与历史结果进行了比较。结果发现了含多个新引进种在内的多个非本地种，凸显了 eDNA 宏条形码技术在非本地种早期检测和时空监测中的实用性，认为在是评估群落结构变化相关研究时需选择不同类型的环境样本。Sigsgaard 等[34]在丹麦沿海进行了为期一年的水样采集和浮潜观察，基于 eDNA 技术分析了水样品，并与

已有的 7 年历史数据进行了比较。结果证明 eDNA 鉴定的 OTUs 随鱼类群落结构的季节性变化而变化。尽管浮潜观察结果与 eDNA 结果存在差异，但是通过浮潜观察到的的绝大多数鱼类都可以在 eDNA 结果中获得，该研究证明了 eDNA 在重建海水鱼类群落结构季节变化中至关重要。

3 我国环境 DNA 技术在生态监测中的应用

国内学者近年来亦开展了 eDNA 相关研究，但总体仍处于起步状态，且大部分聚焦于淡水生态系统，对海洋生态系统的研究报道较少。

徐浩等[35]、陈炼等[36]、赵明等[37]通过综述介绍了环境 DNA 技术在生物多样性和生态学研究领域中的应用。姜维等[38]以川陕哲罗鲑为目标物种，对环境 DNA 分析流程进行了设计优化；刘军等[39]对鱼类环境 DNA 研究中的通用引物进行了筛选验证。徐念和常剑波[40]基于长江中下游干流环境 DNA 样本，开展了鱼类物种检测的相关工作，该研究从来源于 17 个采样点的 115 条匹配成功的序列中检测出了 15 种鱼类。孙晶莹等[41]研究表明 eDNA 宏条形码技术可实现对浮游动物物种的半定量检测，在生物多样性监测和生物完整性评价有显著的应用价值。李苗等[42]建立了一套中国对虾 eDNA 技术的操作流程，提高了中国对虾的检出率。Zhang 等[43]基于 eDNA 技术研究了长江口及其邻近水域鱼类群落结构的季节变化特征。结果显示：eDNA 技术适用于长江口及其邻近水域的资源监测，与传统方法相比更加灵敏和有效。张辉和线薇薇开发了一种收集海水中环境 DNA 的装置[44]。陈治等[45]以曼氏无针乌贼(*Sepiella japonica*)为研究对象，通过绝对定量技术建立和优化了舟山近海高浊度水样 eDNA 的获取方法，建立了舟山近海水样大生物 eDNA 最适获取方法，为相似水域的水样采集及 eDNA 提取提供了借鉴参考。

4 结论与展望

eDNA 技术的优势使其能够作为传统资源调查的有力补充，在生态保护和监测中能够发挥重要作用，已在美国、日本等发达国家广泛应用。我国的相关研究，尤其是在海洋领域的研究十分匮乏，亦应当稳步开展、不断加强，充分发挥 eDNA 技术的优势服务于生态保护。

需要指出的是，任何技术的发展都会存在一系列挑战。在 eDNA 技术研究中，亦存在一些问题。例如，在海洋监测中，海水样品高质量保存与提取难度大；野外现场水样品容易被污染；不同门类选择的通用引物尚没有统一认识；在鉴定 OUTs 时往往依赖于相关数据库中的已有序列，而当数据库中不存在该物种的相关信息或者信息存在错误时，物种鉴定结果就不准确；虽然有大量研究尝试了基于 qPCR 产物浓度或者 PCR 序列数量来推测生物量，但基于 eDNA 技术计算生物量不仅流程复杂，而且其结果与实际情况通常存在较大差距等等，这些都是亟需科学工作者努力解决的问题。

参考文献:

[1] Reid W V, Mooney H A, Cropper A, et al. Ecosystems and Human Well-being, Millennium ecosystem assessment synthesis report[R]. 2005.

[2] 联合国环境规划署. 全球环境展望——旨在发展的环境[M]. 北京：中国环境科学出版社, 2007.
UN Environment. Global Environment Outlook–Environment for development[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.

[3] Amos W, Whitehead H, Ferrari M J, et al. Restrictable DNA from sloughed cetacean skin; its potential for use in population analysis[J]. Marine Mammal Science, 1992, 8(3): 275-283.

[4] Ficetola G F, Miaud C, Pompanon F, et al. Species detection using environmental DNA from water samples[J]. Biology letters, 2008, 4(4): 423-425.

[5] Jerde C L, Mahon A R, Chadderton W L, et al. “Sight-unseen” detection of rare aquatic species using environmental DNA[J]. Conservation Letters, 2011, 4(2): 150-157.

[6] Goldberg C S, Pilliod D S, Arkle R S, et al. Molecular detection of vertebrates in stream water: a demonstration using Rocky Mountain tailed frogs and Idaho giant salamanders[J]. PloS ONE, 2011, 6(7): e22746.

[7] Thomsen P F, Kielgast J O S, Iversen L L, et al. Monitoring endangered freshwater biodiversity using environmental DNA[J]. Molecular ecology, 2012, 21(11): 2565-2573.

[8] Barnes M A, Turner C R. The ecology of environmental DNA and implications for conservation genetics[J]. Conservation Genetics, 2016, 17(1): 1-17.

[9] Bohmann K, Evans A, Gilbert M T P, et al. Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring[J]. Trends in ecology & evolution, 2014, 29(6): 358-367.

[10] Rees H C, Maddison B C, Middleditch D J, et al. The detection of aquatic animal species using environmental

DNA–a review of eDNA as a survey tool in ecology[J]. Journal of Applied Ecology, 2014, 51(5): 1450-1459.

[11] Goldberg C S, Strickler K M, Pilliod D S. Moving environmental DNA methods from concept to practice for monitoring aquatic macroorganisms[J]. Biological Conservation, 2015, 183: 1-3.

[12] Bálint M, Pfenninger M, Grossart H P, et al. Environmental DNA time series in ecology[J]. Trends in ecology & evolution, 2018.

[13] 中国科学院科技战略咨询研究院，中国科学院文献情报中心，科睿唯安公司. 2018 研究前沿[R/OL]. 2018-10-24.https://clarivate.com.cn/blog/2018research-fronts/.
Institutes of Science and Development Chinese Academy of Sciences, National Science Library Chinese Academy of Sciences, Clarivate Analytics. 2018 Research Fronts[R/OL]. 2018-10-24. https://clarivate.com.cn/blog/2018researchfronts/.

[14] Magnuson J J, Benson B J, McLain A S. Insights on species richness and turnover from long-term ecological research: fishes in north temperate lakes[J]. American Zoologist, 1994, 34(3): 437-451.

[15] Dejean T, Valentini A, Miquel C, et al. Improved detection of an alien invasive species through environmental DNA barcoding: the example of the American bullfrog *Lithobates catesbeianus*[J]. Journal of applied ecology, 2012, 49(4): 953-959.

[16] Davy C M, Kidd A G, Wilson C C. Development and validation of environmental DNA (eDNA) markers for detection of freshwater turtles[J]. PloS ONE, 2015, 10(7): e0130965.

[17] Sigsgaard E E, Carl H, Møller P R, et al. Monitoring the near-extinct European weather loach in Denmark based on environmental DNA from water samples[J]. Biological Conservation, 2015, 183: 46-52.

[18] Smart A S, Weeks A R, van Rooyen A R, et al. Assessing the cost - efficiency of environmental DNA sampling[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2016, 7(11): 1291-1298.

[19] Evans N T, Shirey P D, Wieringa J G, et al. Comparative cost and effort of fish distribution detection via environmental DNA analysis and electrofishing[J]. Fisheries, 2017, 42(2): 90-99.

[20] Fukumoto S, Ushimaru A, Minamoto T. A basin - scale application of environmental DNA assessment for rare endemic species and closely related exotic species in rivers: a case study of giant salamanders in Japan[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(2): 358-365.

[21] Sigsgaard E E, Carl H, Møller P R, et al. Monitoring the near-extinct European weather loach in Denmark based on environmental DNA from water samples[J]. Biological Conservation, 2015, 183: 46-52.

[22] Pfleger M O, Rider S J, Johnston C E, et al. Saving the doomed: Using eDNA to aid in detection of rare sturgeon for conservation (Acipenseridae)[J]. Global Ecology and Conservation, 2016, 8: 99-107.

[23] Spear S F, Groves J D, Williams L A, et al. Using environmental DNA methods to improve detectability in a hellbender (*Cryptobranchus alleganiensis*) monitoring program[J]. Biological Conservation, 2015, 183: 38-45.

[24] Erickson R A, Rees C B, Coulter A A, et al. Detecting the movement and spawning activity of bigheaded carps with environmental DNA[J]. Molecular Ecology Resources, 2016, 16(4): 957-965.

[25] Buxton A S, Groombridge J J, Zakaria N B, et al. Seasonal variation in environmental DNA in relation to population size and environmental factors[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46294.

[26] Bylemans J, Furlan E M, Hardy C M, et al. An environmental DNA - based method for monitoring spawning activity: A case study, using the endangered Macquarie perch (*Macquaria australasica*)[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8(5): 646-655.

[27] Pilliod D S, Goldberg C S, Arkle R S, et al. Estimating occupancy and abundance of stream amphibians using environmental DNA from filtered water samples[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2013, 70(8): 1123-1130.

[28] Evans N T, Olds B P, Renshaw M A, et al. Quantification of mesocosm fish and amphibian species diversity via environmental DNA metabarcoding[J]. Molecular ecology resources, 2016, 16(1): 29-41.

[29] Lacoursière - Roussel A, Côté G, Leclerc V, et al. Quantifying relative fish abundance with eDNA: a promising tool for fisheries management[J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(4): 1148-1157.

[30] Doi H, Inui R, Akamatsu Y, et al. Environmental DNA analysis for estimating the abundance and biomass of stream fish[J]. Freshwater Biology, 2017, 62(1): 30-39.

[31] Salter I, Joensen M, Kristiansen R, et al. Environmental DNA concentrations are correlated with regional biomass of Atlantic cod in oceanic waters[J]. Communications Biology, 2019, 2: 461.

[32] Djurhuus A, Closek C J, Kelly R P, et al. Environmental DNA reveals seasonal shifts and potential interactions in a marine community[J]. Nature Communications, 2020, 11: 254.

[33] Holman L E, Bruyn M, Creer S, et al. Detection of introduced and resident marine species using environmental DNA metabarcoding of sediment and water[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 11559.

[34] Sigsgaard E E, Nielsen I B, Carl H, et al. Seawater

environmental DNA reflects seasonality of a coastal fish community[J]. Marine Biology, 2017, 164: 128.

[35] 徐浩, 罗茜, 李云, 等. 环境 DNA 研究技术及其在生态学领域的应用[J]. 生物技术通报, 2014, (10): 49-55.
Xu Hao, Luo Qian, Li Yun, et al. Applications of environmental DNA approaches to ecological research[J]. Biotechnology Bulletin, 2014, (10): 49-55.

[36] 陈炼, 吴琳, 刘燕, 等. 环境 DNA metabarcoding 及其在生态学研究中的应用[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4573-4582.
Chen Lian, Wu Lin, Liu Yan, et al. Application of environmental DNA metabarcoding in ecology[J]. Acta Ecologica Sinica. 2016, 36(15): 4573-4582.

[37] 赵明, 赵梦迪, 马春艳, 等. 环境 DNA 在水域生态中的研究进展[J]. 中国水产科学, 2018, (4): 714-720.
Zhao Ming, Zhao Mengdi, Ma Chunyan, et al. Studies on the application of the environmental DNA in aquatic ecosystem[J]. Journal of Fishery Sciences of China. 2018, (4): 714-720.

[38] 姜维, 王启军, 邓捷, 等. 以川陕哲罗鲑为目标物种的水样环境 DNA 分析流程的优化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7) : 2372-2378.
Jiang Wei, Zhao Qijun, Deng Jie, et al. Protocol optimization of eDNA analysis workflow for detecting *Hucho bleekeri*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7) : 2372-2378.

[39] 刘军, 赵良杰, 凡迎春, 等. 鱼类环境 DNA 研究中通用引物的筛选验证[J]. 淡水渔业, 2016, 46(1): 9-17.
Liu Jun, Zhao Liangjie, Fan Yingchun, et al. Universal primer screening and verification for fish environment DNA research [J]. Freshwater Fisheries, 2016, 46(1): 9-17.

[40] 徐念, 常剑波. 长江中下游干流环境 DNA 样本鱼类物种检测的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(5): 49-55.
Xu Nian, Chang Jianbo. Preliminary study on fish species detection in the middle and lower Yangtze River using environmental DNA[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(5): 49-55.

[41] 孙晶莹, 杨江华, 张效伟. 环境 DNA (eDNA) 宏条形码技术对枝角类浮游动物物种鉴定及其生物量监测研究[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(5): 76-86.
Sun Jingying, Yang Jianghua, Zhang Xiaowei. Identification and biomass monitoring of zooplankton Cladocera species with eDNA Metabarcoding Technology[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(5): 76-86.

[42] 李苗, 单秀娟, 王伟继, 等. 中国对虾生物量评估的环境 DNA 检测技术的建立及优化[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(1): 12-19.
Li Miao, Shan Xiujuan, Wang Weiji, et al. Establishment and optimization of environmental DNA detection techniques for assessment of Fenneropenaeus chinensis biomass[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(1): 12-19.

[43] Zhang H, Yoshizawa S, Iwasaki W, et al. Seasonal fish assemblage structure using environmental DNA in the Yangtze Estuary and its adjacent waters [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 515.

[44] 张辉, 线薇薇. 一种收集海水中环境 DNA 的装置. ZL201920125138.2[P].2019-11-12.
Zhang Hui, Xian Weiwei. A device for collecting environmental DNA in seawater, ZL201920125138.2[P]. 2019-11-12.

[45] 陈治, 宋娜, 源利文, 等. 舟山近海水样环境 DNA 获取方法的建立[J]. 水生生物学报, 2020, 44(1): 50-58.
Chen Zhi, Song Na, Yuan Liwen, et al. The eDNA Collection method of Zhoushan coastal waters[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(1): 50-58.

Application of environmental DNA technology in ecological conservation and monitoring

ZHANG Hui[1, 2, 3], XIAN Wei-wei[1, 2, 3]

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 19, 2020
Key words: environmental DNA; ecological monitoring; biodiversity; resources conservation

Abstract: Decline in biodiversity, degradation of ecosystem functions, and global climate change are major global problems. Comprehensive and accurate ecological monitoring to identify and clarify biodiversity for ecological conservation and sustainable use is important for preventing further damage to the ecological environment. The development of environmental DNA technology (eDNA) provides a novel method for ecological and biodiversity monitoring. In recent years, eDNA has become a hot topic for research and has been widely used in ecological monitoring internationally. However, eDNA-based research in China is lacking, especially in the field of marine ecological monitoring. This review summarizes the development of eDNA technology and the achievements based on this technology in China and abroad. The review introduces several major aspects, such as the complementarity between eDNA technology and traditional monitoring methods as well as the monitoring of species' life history process, estimation of species abundance, and study of the changes in the structure of the ecosystem based on eDNA technology. The research fields and directions of the application of eDNA technology are explained, and the applicability and importance of eDNA technology in ecological monitoring are revealed. Further, some limitations of eDNA technology are presented. This review can act as a reference for ecological conservation and monitoring as well as for the conservation and sustainable use of resources.

(本文编辑: 赵卫红)