

Application and challenges of environmental DNA technology in biodiversity monitoring

Wei Zhong

Ningbo Hangzhou Wanxin Area Public Utilities Development Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315000, China

Abstract

With the help of DNA fragments released by organisms in the environment, environmental DNA technology monitors biodiversity and innovates the traditional monitoring method. It can accurately detect the species and distribution of aquatic organisms and help evaluate the ecological health in the water area and monitor the trace of rare species and provide the basis for biological protection decisions. However, the technology also faces many challenges. This paper first expounds the principle and characteristics of eDNA technology, and analyzes its application in species detection, biodiversity assessment, ecosystem monitoring and other aspects. The study shows that eDNA technology provides an efficient and sensitive means for biodiversity monitoring, but many challenges need to be overcome to further improve its application effect and provide strong support for biodiversity conservation and management.

Keywords

environmental DNA technology; biodiversity monitoring; application; challenge

环境 DNA 技术在生物多样性监测中的应用与挑战

钟伟

宁波杭州湾新区公用事业发展有限公司, 中国·浙江 宁波 315000

摘 要

环境DNA技术借助生物在环境中释放的DNA片段,对生物多样性展开监测,革新了传统监测方式。其应用场景广泛,在水体环境中,能精准探测水生生物种类与分布,助力评估水域生态健康;于陆地生态系统,可监测珍稀物种踪迹,为生物保护决策提供依据。然而,该技术也面临诸多挑战。本文首先阐述eDNA技术的原理与特点,详细分析其在物种检测、生物多样性评估、生态系统监测等方面的应用。研究表明,eDNA技术为生物多样性监测提供了高效、灵敏的手段,但需克服诸多挑战以进一步提升其应用效果,为生物多样性保护与管理提供有力支持。

关键词

环境DNA技术; 生物多样性监测; 应用; 挑战

1 引言

生物多样性是地球上生命系统的基础,对维持生态平衡、提供生态服务、促进经济发展和保障人类福祉至关重要。然而,近年来由于人类活动的影响,如栖息地破坏、气候变化、物种入侵等,生物多样性面临着严重威胁。准确、及时地监测生物多样性的变化,对于制定有效的保护策略和管理措施至关重要。传统的生物多样性监测方法,如实地调查、陷阱捕获、样线法等,往往依赖于专业人员的经验,耗时费力,且对于一些难以观察或珍稀濒危物种的监测效果不佳。环境DNA(eDNA)技术作为一种新兴的分子生物学技术,为生物多样性监测提供了全新的视角和高效的手段,检测环境样本(如水、土壤、空气等)中生物体释放的DNA,

eDNA技术能够快速、灵敏地检测物种的存在,为生物多样性监测带来革命性的变革。

2 环境 DNA 技术原理

环境DNA是指从环境样本(如水、土壤、空气、沉积物等)中提取的所有DNA的总和,这些DNA来自于生活在该环境中的各种生物体,包括动植物、微生物等。生物体在生存过程中,会通过皮肤脱落、粪便排泄、分泌物释放等方式向周围环境中释放DNA。例如,鱼类在水中游动时会不断脱落皮肤细胞,这些细胞中的DNA就会进入水体环境;鸟类在飞行过程中会通过羽毛脱落、粪便排放等方式向空气中释放DNA。eDNA技术的基本原理是通过采集环境样本,利用特定的方法提取其中的DNA,然后采用聚合酶链式反应(PCR)、高通量测序等分子生物学技术对提取的DNA进行扩增和分析,从而检测环境中存在的物种信息^[1]。以水体环境为例,研究人员首先采集一定量的水样,结合

【作者简介】钟伟(1987-),男,中国浙江宁波人,本科,助理工程师,从事环境科学管理研究。

过滤、离心等方法将水样中的细胞或 DNA 片段富集,然后使用 DNA 提取试剂盒提取其中的 DNA。提取的 DNA 可作为模板,根据目标物种的特异性基因序列设计引物,进行 PCR 扩增。扩增后的产物可通过电泳、测序等技术进行检测和分析,确定环境中是否存在目标物种。若采用高通量测序技术,则可以同时对环境样本中的大量 DNA 进行测序,一次性检测出多种物种的 DNA 序列,实现生物多样性的全面监测(图1)。

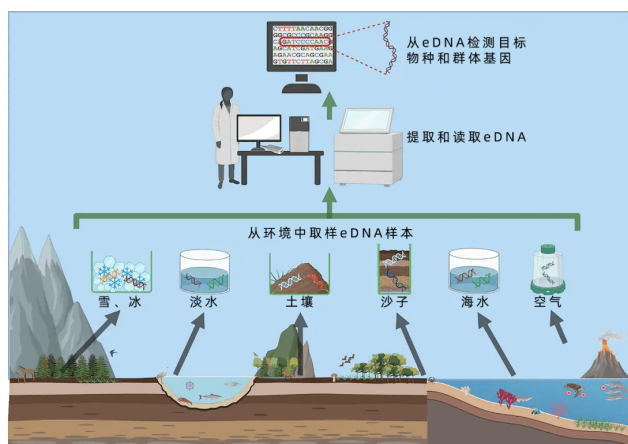


图1 环境 DNA 技术原理

3 环境 DNA 的技术特点

3.1 高效性

与传统生物多样性监测方法相比,eDNA 技术具有显著的高效性。传统方法需要专业人员在大面积的区域内进行长时间的实地调查,耗费大量的人力、物力和时间。而 eDNA 技术只需采集少量的环境样本,通过实验室分析即可快速获得物种信息。在对一个大型湖泊的鱼类多样性监测中,采用传统的电捕鱼调查方法需要数周甚至数月的时间,且需要专业的渔业人员操作设备,而使用 eDNA 技术,研究人员只需在湖泊不同点位采集几升水样,经过实验室处理和分析,在一周内即可获得该湖泊中鱼类物种的种类和相对丰度信息,有效提高监测效率^[2]。

3.2 高灵敏性

eDNA 技术能检测环境中极微量的 DNA,对于一些珍稀濒危物种、难以观察的物种或处于早期发育阶段的物种具有极高的检测灵敏度。一些珍稀鱼类的种群数量极为稀少,传统监测方法很难发现它们的踪迹,但利用 eDNA 技术,即使水体中只有少量来自这些珍稀鱼类的 DNA 片段,也能够被检测出来。

3.3 非侵入性

eDNA 技术无需直接观察或捕获生物体,对生物体的生存环境干扰极小,属于非侵入性监测方法。这对于保护珍稀濒危物种和脆弱的生态系统尤为重要。传统的监测方法,如陷阱捕获、活体采样等,对生物造成伤害,影响其生存和繁殖。而 eDNA 技术只需采集环境样本,不会对生物个体造

成任何伤害,在不干扰生物正常生活的情况下实现生物多样性的监测^[3]。

3.4 广泛性

eDNA 技术可应用于多种环境介质,包括水、土壤、空气、沉积物等,适用于不同生态系统的生物多样性监测。无论是水生生态系统,如河流、湖泊、海洋;还是陆生生态系统,如森林、草原、农田;亦或是湿地、洞穴等特殊生态系统,都可利用 eDNA 技术进行监测。在海洋生态系统中,采集海水样本可以监测海洋鱼类、浮游生物、珊瑚等生物的多样性;在土壤生态系统中,采集土壤样本检测土壤中的微生物、昆虫、小型哺乳动物等生物的种类。这种广泛的适用性使得 eDNA 技术成为一种通用的生物多样性监测工具,满足不同研究和管理需求^[4]。

4 环境 DNA 技术在生物多样性监测中的应用

4.1 物种检测

4.1.1 珍稀濒危物种检测

eDNA 技术在珍稀濒危物种检测方面具有巨大优势,许多珍稀濒危物种由于数量稀少、分布范围狭窄且习性隐秘,传统监测方法很难对其进行有效监测。eDNA 技术检测环境样本中的微量 DNA,准确判断珍稀濒危物种的存在。在对长江江豚的监测中,长江江豚是中国国家一级保护动物,由于其种群数量持续减少且活动范围广,传统监测方法如目视观察、声学监测等效果不佳。研究人员采集长江不同区域的水样,利用 eDNA 技术检测水样中江豚的 DNA。实验结果表明,eDNA 技术能够准确检测到江豚的存在,并且对不同采样点 eDNA 浓度的分析,还能大致了解江豚在长江中的分布范围和相对数量变化,为江豚的保护和管理提供了重要的数据支持。

4.1.2 入侵物种检测

入侵物种对本地生物多样性和生态系统造成严重威胁,及时准确地检测入侵物种的存在对于采取有效的防控措施至关重要。eDNA 技术能快速、灵敏地检测环境中的入侵物种 DNA,为入侵物种的早期预警和防控提供有力手段。

4.2 生物多样性评估

4.2.1 物种丰富度评估

物种丰富度是生物多样性的重要指标之一,指一个区域内物种的数量。eDNA 技术对环境样本中多种物种 DNA 的检测,快速准确地评估生物多样性的物种丰富度。在对一片热带雨林的生物多样性评估中,传统方法需要大量的专业人员在森林中进行长时间的样线调查,记录观察到的物种。而采用 eDNA 技术,研究人员只需在森林中采集土壤、雨水和空气样本,利用高通量测序技术对样本中的 DNA 进行分析,即可一次性检测出大量物种的 DNA 序列,快速确定该区域的物种丰富度。研究表明,eDNA 技术检测到的物种数量明显多于传统样线调查方法,更全面反映热带雨林的生物多样性状况。

4.2.2 物种相对丰度评估

除物种丰富度,物种相对丰度也是生物多样性评估的重要内容,反映不同物种在生态系统中的数量比例关系。eDNA 技术对环境样本中不同物种 DNA 含量的定量分析,可估算物种的相对丰度。例如,在对一个淡水湖泊的鱼类生物多样性评估中,研究人员采集湖泊不同深度和位置的水样,提取水样中的 eDNA 并进行定量 PCR 分析。根据不同鱼类特异性基因的扩增产物量,估算出各种鱼类的相对丰度。实验结果表明,eDNA 技术估算的鱼类相对丰度与传统的鱼类采样方法(如网捕、电捕鱼)得到的结果具有较好的一致性,且 eDNA 技术检测到一些传统方法难以捕获的小型鱼类和幼鱼,为更准确地评估湖泊鱼类生物多样性提供新的手段。

4.3 生态系统监测

4.3.1 水生生态系统监测

水生生态系统是生物多样性的的重要组成部分,eDNA 技术在水生生态系统监测中得到广泛应用。采集水样,eDNA 技术可检测水生生态系统中的鱼类、浮游生物、底栖生物、水生植物等多种生物的 DNA,全面了解水生生态系统的生物多样性状况和生态功能。

4.3.2 陆生生态系统监测

eDNA 技术同样适用于陆生生态系统的监测。采集土壤、空气等环境样本,eDNA 技术可以检测陆生生态系统中的植物、动物、微生物等生物的 DNA,评估陆生生态系统的生物多样性和生态功能。例如,在对一片草原生态系统的监测中,研究人员采集草原土壤样本,利用 eDNA 技术检测土壤中的植物根系 DNA、昆虫 DNA 以及土壤微生物 DNA。结果表明,eDNA 技术准确反映草原生态系统中植物群落的组成、昆虫的多样性以及土壤微生物的丰富度,为草原生态系统的保护和可持续利用提供重要信息。

5 环境 DNA 技术在生物多样性监测中的挑战

5.1 样本采集与保存

环境 DNA 样本采集缺乏统一标准,不同研究人员所用工具、采样量与频率各异。在水体采样时,过滤或离心等富集 DNA 的方法对不同大小 DNA 片段捕获效果不同,影响物种检测。采样量不当,过少易遗漏物种 DNA,过多则徒增成本与处理难度。而且样本保存与运输中,eDNA 稳定性差,高温、微生物及运输震动等,都会加速其降解,破坏 DNA 完整性,干扰后续检测分析。

5.2 DNA 提取与扩增

在环境 DNA 技术应用于生物多样性监测时,DNA 提取与扩增面临诸多挑战。一方面,从样本中提取环境 DNA 难度较大。自然环境复杂,样本中不仅包含目标生物的 DNA,还存在大量腐殖酸、多糖、金属离子等抑制物。这些杂质会干扰 DNA 提取过程,降低提取效率,甚至导致提

取失败。而且不同环境样本如土壤、水体、空气,成分差异显著,需要针对性研发提取方法,增加了技术复杂性;另一方面,扩增环节同样问题重重。不同物种 DNA 片段存在差异,通用引物难以对所有目标生物的 DNA 进行有效扩增,容易出现扩增偏好性,致使部分物种的 DNA 无法被检测到,造成生物多样性信息缺失。同时,扩增过程中可能产生非特异性扩增,即扩增出非目标生物或非目标片段的 DNA,增加数据分析难度,导致结果出现偏差。此外,痕量 DNA 扩增时,容易受外界环境中微量 DNA 污染,影响扩增准确性,最终干扰生物多样性监测结果的可靠性与科学性。

5.3 数据分析与解读

首先,数据量庞大且复杂是首要难题。环境样本中存在来自不同生物的海量 DNA 信息,测序后会产生巨量数据,这些数据包含不同物种、不同片段的信息,还可能混有杂质序列,对数据存储和处理能力提出了极高要求。普通的计算设备和常规数据分析软件难以应对如此规模和复杂程度的数据,导致分析效率低下,甚至无法正常开展分析工作;其次,物种鉴定准确性存疑。当前的物种 DNA 数据库并不完善,许多物种的 DNA 序列信息缺失或不准确,这使得在比对分析时,难以精确鉴定某些生物,容易出现误判或无法识别的情况。比如一些稀有物种或新物种,因缺乏参考序列,很难在数据库中找到匹配信息,影响生物多样性评估的准确性;第三,数据解读存在不确定性。环境 DNA 信号强度与生物个体数量并非简单的线性关系,受到 DNA 降解速率、释放量等多种因素影响,仅依据 DNA 丰度来推断物种的种群数量和分布情况并不准确。

6 结论

环境 DNA 技术以其高效、灵敏、非侵入性及广泛适用性,在生物多样性监测领域展现出巨大潜力,为珍稀濒危物种检测、生物多样性评估以及生态系统监测提供了创新且有力的手段。在物种检测中精准识别珍稀物种与入侵物种,在生物多样性评估里准确测定物种丰富度与相对丰度,在生态系统监测中全面反映水生和陆生生态系统的生物多样性状况,未来,随着技术的不断进步与完善,环境 DNA 技术将在生物多样性监测中发挥更为关键的作用,为生物多样性保护与管理提供坚实的数据支撑,助力人类更好地守护地球的生物多样性,维护生态平衡。

参考文献

- [1] 刘辰涵,彭友贵,吴颢林,等.环境DNA技术在生物多样性监测中的应用及展望[J].南方农业,2024,18(21):107-114.
- [2] 徐念,熊美华,邵科,等.长江中下游环境DNA宏条形码生物多样性检测技术初步研究[J].环境科学研究,2020,33(5):1187-1196.
- [3] 张丹薇,王宁.环境DNA技术在湖泊生物多样性研究中的运用分析[J].黑龙江环境通报,2024,37(11):163-165.
- [4] 张浩博.基于环境DNA技术的东海三种鱼类资源追踪监测研究[D].浙江海洋大学,2023.