

生态文明背景下环境DNA技术在水生生物学教学中的应用研究

彭 芙, 王 花, 刘曼红*, 程 鲲, 马成学

东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年7月30日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘 要

随着生态文明理念的不断深入, 水生生物学课程的教学改革势在必行。本文探讨了在生态文明背景下环境DNA技术在水生生物学教学中的现状及其应用。通过引入eDNA技术, 不仅可以提升学生对现代生物技术的理解与应用能力, 还能够加强其对生态保护和生物多样性的关注与实践能力。本文总结了当前水生生物学教学中的问题, 分析了eDNA技术的应用实例, 结合具体教学实例, 提出了eDNA技术在水生生物学教学中推广的挑战与建议, 拓宽了水生生物学的教学路径, 为培养具有生态保护素养的专业人才提供理论支持与实践参考。

关键词

环境DNA技术, 水生生物学, 教学改革

Research on the Application of Environmental DNA Technology in Aquatic Biology Education within the Context of Ecological Civilization

Fu Peng, Hua Wang, Manhong Liu*, Kun Cheng, Chengxue Ma

College of Wildlife and Protected Areas, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Jul. 30th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 彭芙, 王花, 刘曼红, 程鲲, 马成学. 生态文明背景下环境 DNA 技术在水生生物学教学中的应用研究[J]. 教育进展, 2025, 15(9): 497-504. DOI: 10.12677/ae.2025.1591702

Abstract

As the concept of ecological civilization continues to gain traction, reforms in the teaching of aquatic biology courses have become imperative. This paper explores the current status and applications of environmental DNA (eDNA) technology in aquatic biology education within the context of ecological civilization. By incorporating eDNA technology, educators can not only enhance students' understanding and application of modern biotechnology but also strengthen their awareness and practical skills regarding ecological conservation and biodiversity. This paper summarizes the current issues in aquatic biology education, analyzes application examples of eDNA technology, and, based on specific teaching examples, proposes challenges and recommendations for the promotion of eDNA technology in aquatic biology education. It broadens the teaching pathways in aquatic biology and provides theoretical support and practical references for cultivating professionals with ecological conservation literacy.

Keywords

Environmental DNA Technology, Aquatic Biology, Educational Reform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在全球范围内,生态环境问题日益严重,水生生态系统作为生态环境的重要组成部分,对维持生物多样性、调节气候、保持水质具有重要意义。在生态文明这一大背景下,加强水生生物学教学,培养具备生态保护意识和专业技能的人才,是当务之急。生态文明是指在人类社会发展过程中,以人与自然和谐共生为价值取向,以绿色低碳、可持续的发展方式为主要特征的新型文明。其核心内涵包括尊重自然、顺应自然、保护自然,实现经济发展与环境保护的统一。在水生生物学领域,生态文明理念强调保护水生生态系统,维护生物多样性,促进可持续发展。这种理念的融入不仅有助于培养学生的生态保护意识,还能引导其在未来职业生涯中践行环保理念。

水生生物学作为研究水生生物与水环境之间的相互关系,探讨水环境中的生命现象和生物学规律的学科[1],是学生了解水体生物养殖及水环境变化的基础,是为国家和地区发展渔业资源、保护水生生物多样性、实施可持续发展培养专业人才的重要途径[2]。然而,传统水生生物学教学长期面临内容更新滞后、技术手段单一和理论与实践脱节等挑战。随着分子生物学技术的快速发展,尤其是环境DNA (environmental DNA, eDNA)技术的成熟应用,为水生生物学教学改革提供了新的契机和突破口。

eDNA技术是指通过定量PCR和高通量测序,对环境样品中提取的eDNA进行定性和定量分析,从而推测和评估目标环境中生物的存在、种类、丰度和分布[3][4],是一种通过提取环境样品中的DNA片段来监测和分析生物多样性的方法。

本文旨在将eDNA等现代生物技术引入水生生物学教学,提升学生的科研能力和创新思维以及生态保护意识,使学生能将理论知识应用于实际操作中,解决现实中的环境问题,为未来的生态保护和科学研究储备人才。同时,以“利用eDNA技术监测校园湖泊入侵物种”实验课教案设计为例,来探讨生态文明背景下eDNA等现代生物技术在水生生物学教学中的应用,以此拓宽水生生物学的教学路径。

2. 水生生物学教学现状及现代分子生物学技术应用现状

2.1. 现行水生生物学课程教学中存在的问题

水生生物学课程在打基础、促理解方面有其重要作用，而现行教学过程中存在以下问题：

第一，教学模式单一，学生缺乏兴趣。“水生生物学”是一门知识体系比较完备的课程，课程安排应符合由浅入深、由单一到综合、由简单到复杂的认识规律，从大方向到精确到属。目前，大多课程采用的是以水生生物的门类依次分类介绍的单一教学模式，学生在缺少实践和科研经历的情况下大多缺少对浮游生物的感知能力，难以对课程产生兴趣，从而导致学习动力较低[5]。

第二，理论与实践脱节，学生缺乏实践。“水生生物学”作为一门实践性极强的课程[6]，目前面临着明显的教学挑战。传统课程偏重理论教学，学生在实践中无法有效应用所学知识。例如，学生常因为缺少实际观察和实验操作机会，只能依赖于课本描述和理论讲解，导致对微型生物的形态结构和行为特征的理解停留在表面，学习变得枯燥且缺乏深入理解。

第三，教学资源不足，教材更新滞后。首先，大多数本科生缺乏参与科研的机会，这限制了学生在实际操作、研究经验，以及对微型生物的认识上的发展。其次，实验标本的获取和观察对学生而言极为困难，特别是浮游生物的标本固定和观察，常因水质浑浊或操作不当而难以避免干扰，增加了从混合样本中准确识别目标个体的难度。此外，部分教材和教学内容陈旧，缺乏立体化的教材和全面、清晰的彩色图鉴或实验标本，缺少清晰的实物显微照片，且未能及时反映学科最新发展动态和技术进步，大大增加了学习难度，影响了学生掌握水生生物学知识的效率和深度。

第四，生态意识薄弱，缺乏系统设计。课程中对生态文明理念的融入不够深入，学生生态保护意识和责任感的培养缺乏系统设计。

综上所述，这些挑战强调了要优化教学模式，整合理论与实践资源，提高教师教学能力和融入生态文明理念，以提升水生生物学课程的教学质量和学习效果。

2.2. 现代分子生物学技术在水生生物学教学中的应用现状

分子生物学技术在水生生物学教学中的应用已呈现出多样化、创新化的发展趋势，从基础的 DNA 条形码技术到前沿的宏基因组学方法，为传统水生生物学教学注入了新的活力。这些技术应用不仅拓展了教学内容，更革新了教学方法和评价体系，使水生生物学教育更加符合当代科学发展和人才培养的需求。

2.2.1. 环境 DNA 技术的教学整合

环境 DNA 技术作为近年来发展迅速的分子监测手段，已被多所高校引入水生生物学课程体系。圭尔夫大学的研究团队开发了基于 eDNA 的“课程嵌入式本科研究体验”(Course-based Undergraduate Research Experiences, CUREs)，通过三个典型案例展示了 eDNA 技术在教学中的创新应用：系统文献综述、溪鱚鱼生物监测和淡水鱼类宏条形码检测[7]。这些项目使学生全程参与科学问题提出、实验设计、数据收集与分析以及成果交流等科研流程，培养了学生的综合科研能力。

在中国，中国科学院昆明动物研究所生物多样性基因组中心的研究人员将 eDNA 技术应用于复杂山地环境中的生物多样性监测教学，比较了水体 eDNA、空气 eDNA 和水蛭 iDNA 三种采样方法的效率差异[8]。这种实践性教学不仅使学生掌握了现代监测技术，还培养了其比较分析能力和批判性思维。获得的实证数据为学生理解不同 eDNA 技术的适用场景提供了直观案例。

2.2.2. 其他分子生物学技术的教学应用

除 eDNA 技术外，多种分子生物学方法也被创新性地应用于水生生物学教学。上海海洋大学水产动物遗传育种团队在分子生物学课程中引入基因组学研究前沿，特别强调我国在水产动物基因组学领域的

贡献,如人类基因组计划“1%项目”和水产动物基因组研究进展。这种教学内容设计不仅传授了专业知识,还培养了学生的民族自豪感和科研使命感。

海南大学海洋学院在分子生物学课程中采用“专题式讨论”教学法,设置了四个专题[9]。这些专题紧密结合水产养殖实践,如“投喂益生菌是否可以提高养殖动物的抗病力?”等问题,引导学生运用分子生物学知识解决实际问题。教学实践表明,这种专题讨论显著提高了学生的学习主动性和问题解决能力[9]。

在实验教学方面,贵州大学基于教育生态学理论重构了分子生物学实验课程体系,将实验分为验证性、综合性和创新性三个层次[10]。验证性实验如“琼脂糖凝胶电泳检测 DNA”培养学生基础技能;综合性实验如“用 CTAB 法、SDS 法或试剂盒法提取 DNA”锻炼学生方法选择能力;创新性实验则由学生自主设计课题,全面培养其科研创新能力[10]。这种分层实验教学模式有效衔接了理论知识与实践技能。

2.2.3. 技术整合的教学模式创新

现代分子生物学技术在水生生物学教学中的应用不仅体现在内容更新上,更推动了教学模式的深层变革。混合式教学是普遍采用的方法,如河南科技大学在水生生物学课程中,线上教学实现布鲁姆分类法中的低阶目标,线下课堂通过多元化任务实现高阶目标[11]。这种模式充分发挥了技术优势,优化了教学资源配置。

除此之外,项目式学习也被广泛应用于水生生物学教学中,而跨学科融合是另一重要趋势。总体而言,现代分子生物学技术在水生生物学教学中的应用已从单纯的技术传授发展为融合知识、技能与价值观的综合教育实践。这些应用不仅更新了教学内容,更重塑了教学理念和方法,为培养适应生态文明建设需求的复合型人才提供了有效路径。

2.2.4. 支撑分子生物学技术教学应用的教育学理论框架

现代分子生物学技术在教学中的应用实际上融合了多种教育理论,形成了多元整合的设计框架。这个框架以布鲁姆分类法指导目标设定,以教育生态学优化教学环境与关系,以建构主义设计学习体验,共同支持技术融合的有效实施。

TPACK 理论(Technological Pedagogical Content Knowledge)为这种整合提供了概念模型,强调技术知识(TK)、教学法知识(PK)和学科内容知识(CK)三者的交融[11]。优秀的技术整合教学需要教师同时掌握这三个维度及其交互关系。如 eDNA 技术教学不仅要求教师理解技术原理(TK)和水生生物学知识(CK),还需要设计合适的教学方法(PK)使学生有效学习。

3. “利用 eDNA 技术监测校园湖泊入侵物种”实验课教学案例

3.1. 教学目标

(1) 了解 eDNA 技术的基本原理和应用;掌握水样采集、DNA 提取及 PCR 扩增的基本实验技能;学习利用生物信息学方法分析 eDNA 数据,识别潜在入侵物种。

(2) 通过小组合作完成实验操作,培养团队协作能力;结合实验数据,分析校园湖泊生态健康状况,提出保护建议。

(3) 增强生态保护意识,理解生物多样性监测的重要性;探讨人类活动对生态系统的影响,树立生态文明观念。

3.2. 实验材料与设备

(1) 采样工具:无菌采样瓶、一次性手套、冰盒、标签纸。

(2) 实验试剂: DNA 提取试剂盒、PCR Master Mix、引物(通用或入侵物种特异性引物)、电泳缓冲液、琼脂糖。

(3) 实验仪器: 离心机、PCR 仪、电泳槽、紫外凝胶成像仪。

(4) 数据分析: 电脑(安装 BLAST、MEGA 等生物信息学软件)。

3.3. 实验步骤

(1) 课前导入(20 分钟)

教师讲解: 介绍 eDNA 技术的原理(生物体脱落的 DNA 片段可在环境中留存, 通过检测可推断物种存在)。

案例讨论: 展示入侵物种(如福寿螺、水葫芦)对生态系统的危害, 强调监测的重要性。

问题引导:

为什么 eDNA 比传统调查方法更高效?

如何通过实验设计减少污染风险?

(2) 水样采集(30 分钟)

步骤:

1. 分组(3~4 人/组), 在湖泊不同区域(近岸、中心点)采集 500 mL 水样, 记录 GPS 坐标。

2. 用 0.22 μm 滤膜过滤水样, 收集滤膜置于无菌管中, -20°C 保存。

注意事项:

避免交叉污染(更换手套、使用无菌器具); 记录水温、pH 值等环境参数。

(3) DNA 提取与 PCR 扩增(60 分钟)

步骤:

1. 使用商业 DNA 提取试剂盒提取滤膜上的 eDNA。

2. PCR 扩增(引物选择: 如 COI 基因通用引物或特定入侵物种引物)。

3. 琼脂糖凝胶电泳验证 PCR 产物。

思考题:

如果电泳无条带, 可能的原因是什么? (如 DNA 降解、引物不匹配)

(4) 数据分析(40 分钟)

步骤:

1. 将 PCR 产物送测序, 获得 DNA 序列。

2. 使用 BLAST 比对 NCBI 数据库, 鉴定物种。

3. 统计各采样点物种组成, 分析是否存在入侵物种。

示例问题:

比对结果中出现了非本地物种, 可能通过什么途径入侵?

(5) 生态文明讨论(30 分钟)

主题:

入侵物种对本地生态的影响(如竞争资源、传播疾病)。

如何通过科学监测与公众参与预防入侵物种扩散?

活动形式:

小组辩论: “人类活动是入侵物种传播的主因吗?”

设计校园生态保护倡议书(如禁止随意放生外来生物)。

3.4. 实验报告与评价

(1) 报告内容:

实验目的、方法、数据(电泳图、BLAST 结果截图)。

入侵物种鉴定结果及生态风险分析。

结合校园实际,提出 3 条保护建议。

(2) 评价标准:

实验操作规范性(30%)、数据分析逻辑性(30%)、生态文明讨论深度(40%)。

3.5. 拓展延伸

课外实践:长期监测湖泊 eDNA,建立物种动态数据库。

跨学科联系:结合地理信息系统(GIS)绘制物种分布热力图。

3.6. 教学反思

是否通过实验让学生理解 eDNA 技术的实际应用价值?

生态文明讨论是否有效引发学生的责任意识?

4. 小结

本文围绕生态文明背景下水生生物学课程的教学改革展开研究,明确了生态文明理念在水生生物学课程中的重要性,强调了生态保护意识的培养必要性。通过融入生态文明理念的课程设计和案例教学,增强了学生对生态环境保护的认识和行动力。其次,在生态文明的背景下,将 eDNA 技术应用于本科水生生物学课程教学,不仅能够提升学生的实践能力和科研素养,还能培养其生态意识和跨学科能力。这种教学创新顺应了生态文明发展的需求,为水生生物学教学注入了新的活力。

与已有研究相比,生态文明视角下的 eDNA 技术教学应用也呈现出多方面的区别和创新。这些差异不仅体现在技术层面,更反映在教学目标、内容和价值导向的深层次变革上。

(1) 从教学目标看,传统分子生物学技术教学多侧重技术原理和操作技能的传授,而生态文明背景下的 eDNA 教学则强调技术应用的生态伦理维度,培养“技术应用者”而非仅仅是“技术操作者”。

(2) 在教学内容设计上,已有研究多关注实验室内的技术流程,而新的教学实践则更加重视野外应用和实际问题解决。

(3) 从教学方式上看,生态文明背景下的 eDNA 教学更强调跨学科协作和多方参与。巧妙地将分子生物学和水生生物学结合在一起,通过小组探究与讨论,提升学生的综合素质。

5. 挑战与展望

eDNA 技术作为一项革命性的生物监测手段,正逐步从科研领域走向教育实践。将 eDNA 技术整合到水生生物学课程教学中,不仅能够反映学科前沿发展,增强课程的实践性和趣味性,更能培养学生的生态监测能力和科研素养。然而,这一技术的教学推广面临着多重挑战,包括技术标准化不足、师资力量短缺、课程整合难度大等问题。

(1) 技术标准化与可靠性问题: eDNA 技术存在假阳性和假阴性问题^[12],如采样过程中的污染可能导致假阳性,而 DNA 降解或 PCR 抑制则可能造成假阴性。这些技术局限要求教师在教学中必须引导学生批判性思考数据的可靠性,增加了教学设计的复杂度。而参考数据库的缺口是另一重大限制,也给教学解释和数据解读带来困难。

(2) 教学资源与基础设施限制：实验成本和设备要求构成了推广 eDNA 技术教学的重要障碍。典型的 eDNA 分析涉及水样采集、过滤、DNA 提取、PCR 扩增、测序和生物信息学分析等多个环节，每个环节都需要专用设备和试剂，容易面临实验经费和实验场地的限制，从而不得不采取大班分组教学模式，影响学生的个体参与深度。

(3) 课时安排与传统教学模式冲突：eDNA 实验通常需要连续多个步骤，从样品采集到结果分析可能需要数天甚至数周时间，这与传统课程固定的课时安排形成矛盾。

(4) 师资能力与教学理念的局限：教师专业素养的不足是阻碍 eDNA 技术教学推广的关键因素。有效开展 eDNA 教学要求教师既精通分子生物学技术原理，又掌握水生生物学知识，还需要熟悉现代教学方法。这种跨学科能力在当前高校教师队伍中并不普遍，特别是对于长期从事传统分类学教学的教师而言，分子生物学技术的快速更新带来了巨大的适应压力。而教师培训体系的不完善则加剧了这一问题。

(5) 评价体系限制：教学评价方法的革新滞后于技术教学的发展。传统实验课评价多侧重操作规范和结果准确性，而 eDNA 技术教学更强调科学思维、问题解决和数据分析能力，需要开发与之匹配的评价体系。

应对 eDNA 技术教学推广中的挑战需要系统性的策略和多方位的解决方案。这些策略不仅针对技术层面的限制，更涉及教学资源建设、师资发展、课程重构等深层次改革，形成支持技术教学可持续发展的生态系统：

(1) 建立多元协作与资源共享机制。采用产学研协同模式、校际资源共享和国际交流合作的方式来解决技术标准化与数据库限制的问题。

(2) 针对不同教学目标和资源条件，应开发从基础到前沿的梯度化技术方案。如基础教学可采用成本较低的 PCR 和电泳技术；中级课程引入 DNA 条形码和常规 eDNA 分析；高级课程则开展宏基因组学和纳米孔测序等前沿实践。这种分层设计使各院校都能找到适合自身条件的技术切入点。

(3) 创新课程设计与教学模式。采用混合式教学，线上学习技术原理和案例分析，线下开展实验操作和数据处理。有助于缓解课时压力，使有限的实验时间更加高效。线上平台还可用于实验预习、数据共享和结果讨论，延伸学习的时间和空间。

(4) 建立跨学科教学团队。分子生物学与水生生物学教师协作，达成知识互补，方法融合的目的。

(5) 对学生进行多元能力评估。结合学生的操作、报告、创新设计等多维度进行评估，全面反映学生成长。

基金项目

黑龙江省高等教育教学改革研究项目(SJGYY2024089)。

参考文献

- [1] 刘健康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-402.
- [2] 唐汇娟, 李博星, 牛文静. 水产养殖专业水生生物学实验教学改革初探[J]. 家畜生态学报, 2019, 40(9): 91-93.
- [3] Adams, C.I.M., Knapp, M., Gemmell, N.J., Jeunen, G., Bunce, M., Lamare, M.D., *et al.* (2019) Beyond Biodiversity: Can Environmental DNA (eDNA) Cut It as a Population Genetics Tool? *Genes*, 10, Article 192. <https://doi.org/10.3390/genes10030192>
- [4] Barrenechea Angeles, I., Lejzerowicz, F., Cordier, T., Scheplitz, J., Kucera, M., Ariztegui, D., *et al.* (2020) Planktonic Foraminifera Edna Signature Deposited on the Seafloor Remains Preserved after Burial in Marine Sediments. *Scientific Reports*, 10, Article No. 20351. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77179-8>
- [5] 杨慧荣, 董涵. “水生生物学”课程教学改革探索[J]. 西部素质教育, 2025, 11(3): 27-31.
- [6] 唐毅, 付梅, 姚维志, 等. 强化水生生物学实践教学改革提高学生综合素质和能力[J]. 西南师范大学学报(自然

- 科学版), 2015, 40(12): 158-163.
- [7] Nolan, K.P., Grunspan, D.Z., Myler, E., Brimble, N., Heyland, A. and Hanner, R.H. (2024) DNA at the Whim of the Water: Environmental DNA as a Course-Based Undergraduate Research Experience. *Genome*, **67**, 256-266. <https://doi.org/10.1139/gen-2023-0102>
 - [8] Wang, Y., Liu, Z., Popescu, V., Ding, Z., Luo, X., Yang, C., *et al.* (2025) Comparative Efficiency of Multiple Edna Sampling Methods for Monitoring Vertebrate Diversity in Mountainous Region. *Environmental DNA*, **7**, 235-250. <https://doi.org/10.1002/edn3.70168>
 - [9] 战欣. “专题式讨论”在《分子生物学》课程中的应用[J]. 科技创新导报, 2019, 16(13): 235-236.
 - [10] 牛熙. 教育生态学视域下分子生物学实验课程教学研究[J]. 河南农业, 2020(24): 15-17.
 - [11] 高小蝉, 黄勇, 熊建利, 等. 基于布鲁姆教育目标分类法的线上线下混合式教学模式在水生生物学课程教学中的应用探索[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(1): 273-275.
 - [12] 李晨虹, 凌岚馨, 谭娟, 等. 环境 DNA 技术在水生生物监测中的挑战、突破和发展前景[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 564-574.