用于实时水产养殖监测的微型机器学习：摩洛哥案例研究

Achraf Hsain 理学院与工程学院 *Al Akhawayn*大学 伊夫兰，摩洛哥
A.Hsain@aui.ma

Yahya Zaki理学院与工程学院 *Al Akhawayn*大学伊夫兰，摩洛哥 Y.Zaki@aui.ma

Othman abaakil理学院与工程学院 *Al Akhawayn*大学伊夫兰，摩洛哥
O.Abaakil@aui.ma

Hibat-allah Bekkar 理学院与工程学院 *Al Akhawayn*大学 伊夫兰，摩洛哥
H.Bekkar@aui.ma

Yousra Chtouki 理学院与工程学院 *Al Akhawayn*大学 伊夫兰，摩洛哥
Y.Chtouki@aui.ma

摘要：

水产养殖是对水生生物进行养殖的行业，发展迅速，但面临水质波动、疾病暴发以及饲料管理效率低下等挑战。传统监测方法往往依赖人工，且耗时较长，可能导致问题处理延误。本文提出在水产养殖系统中集成采用微型机器学习（***TinyML***）的低功耗边缘设备，以实现实时自动化监测与控制，例如收集数据、触发警报并减少人力需求。该系统可实时提供所需参数的数据，例如***pH***值、温度、溶解氧和氨含量，以控制水质、营养物质含量和环境条件，从而更好地进行维护、高效利用资源，并优化封闭式水产养殖空间的管理。系统能够在检测到异常时发出警报。传感器长期收集的数据可为优化水处理过程、饲料分配、饲料模式分析以及提高饲料效率等重要决策提供依据，从而降低运营成本。本研究探讨开发基于***TinyML***的水产养殖监测解决方案的可行性，并考虑传感器选择、算法设计、硬件约束和伦理考量等因素。通过展示***TinyML***在水产养殖中的潜在优势，我们旨在推动开发更加可持续、高效的养殖实践。

关键词—***TinyML***、水产养殖、生态系统管理、可持续食品生产、环境可持续性。

I. 引言

摩洛哥阿兹鲁国家水产养殖中心通过传统人工方法管理其鱼菜共生系统，这需要大量人力劳动，且往往容易出现误差。通过整合技术，我们
预计可在可持续性和生产力方面取得显著改善。该智能监测系统可显示实时数据、提供自动化警报并提出建议

为相关问题提供解决方案，精准控制水产养殖环境，减少人工干预需求，并提升整体运营效率。这一目标与该中心推进可持续水产养殖实践、促进环境保护和推广创新农业技术的目标相一致。这项研究不仅将使阿兹鲁国家鱼类养殖中心受益，也将以现有进展为基础，进一步推动水产养殖现代化
现有进展，以进一步推动水产养殖现代化
通过智能技术实现全球化发展。农业是摩洛哥的重要部门之一，约占该国国内生产总值（GDP）的14% [1]。然而，摩洛哥正面临严峻的气候挑战：水资源短缺、温度变化和生态扰动，这些都对农民构成威胁。近期，水务部长 Nizar Baraka 强调了摩洛哥所面临形势的严重性：自2024年以来，该国已连续第六年遭遇干旱，与通常的季节平均值相比，降雨量减少了67%。2022年，水储量为容量的33%；而在 2024 [2]，这一比例进一步恶化，仅达到容量的23.5%。鱼菜共生提供了一种前景广阔的替代方案；这是一种可持续农业系统，将水产养殖与水培相结合，构成闭环水循环系统。鱼类残留物经细菌转化为植物所需的营养物质，随后水经过过滤并返回鱼缸。摩洛哥阿兹鲁国家水产养殖中心通过传统人工方法管理其鱼菜共生系统，这需要大量人力劳动，且往往容易出现误差。该系统比传统农业节水90%，生产力高、无农药，并为粮食生产提供了可持续的解决方案 [3]。阿兹鲁中心已认识到其潜力，并一直在使用该系统。然而，该系统相当复杂，需要农民持续监测。为解决这一问题，我们提出利用 TinyML 对水产养殖鱼类养殖区域进行智能监测，以实现实时监测和数据分析。

TinyML 正通过整合先进技术，革新实时水产养殖监测，改善鱼类养殖实践。这种方法利用物联网、机器学习和创新的传感器系统，优化水质和鱼类健康。实时监测系统：物联网集成：例如 [4]开发的系统，使用 Arduino 微控制器监测 pH值、浊度和水位，并通过短信和网页界面发送异常情况警报。水质管理：AquaBot 系统 [4] 可自动进行水质监测，并根据实时数据推荐合适的鱼类，达到 94 先进成像技术。显微跟踪：[5] 改装了配备红外激光器的飞行时间摄像机，用于跟踪鱼类幼体，在确保干扰最小的同时，还能在不同水况下提供精准监测 [5]。至于鱼类检测与跟踪：[6] 展示了人工智能在自动化鱼类监测方面的有效性，并使用深度

学习模型以提高水产养殖中的检测准确率- culture [6]。

尽管 TinyML 为水产养殖监测带来了显著进展，但仍需解决这些技术的可负担性和可及性问题，以确保小规模养殖户能够使用，否则可能会限制其广泛采用。本文其余部分的组织结构如下：II 背景与文献综述；III. 挑战：伦理考量；IV. 方法论；V. 局限性与未来工作； VI.结论

II. 背景与文献综述

A. 水产养殖中的现有监测方法

鱼类养殖正在全球范围内迅速普及，因此有必要密切监测环境，以确保最佳生长条件、防止疾病暴发并最大限度地提高生产效率。阿兹鲁国家水文生物学与鱼类养殖中心报告称，集约化水产养殖系统中的传统监测方法主要依赖直接观察和简单仪器 [7]。这些方法包括使用便携式传感器测量温度、pH值、溶解氧和盐度等参数。数据采集通常以数小时至数天为间隔进行，这可能导致在这些时间间隔内出现的不利状况未被及时发现 [8]。

然而，先进的监测系统已开始利用无线传感器网络（WSN）持续监测水质和摄食行为等关键参数 [9]。这些系统可提供实时数据，使农民能够及时采取行动 [10]。尽管具有诸多优势，水产养殖中的无线传感器网络往往伴随着高功耗、维护成本高昂以及设置和运行费用高等问题。因此，许多小规模养殖户可能无力采用这些系统。此外，严苛的水生环境也持续对传感器的耐用性和数据传输效率构成挑战。Tiny ML 在农业及相关领域的既往应用 [10] [11]。

Tiny ML 无需持续向集中式服务器传输数据，即可在边缘设备上进行智能数据处理；凭借这一能力，它在包括农业在内的多个行业引起了广泛关注 [12]。TinyML 已成功应用于作物病害早期检测、确定最佳灌溉时间以及预测害虫侵袭。例如，配备 TinyML 模型的传感器节点已被用于监测土壤湿度，并仅在需要灌溉时提醒农民，从而节约用水 [11]。在害虫管理方面，TinyML 通过分析昆虫的声学信号来区分不同种类，从而能够及时采取干预措施 [14]

除农业外，TinyML 也已应用于环境监测，尤其是空气和水质测量 [15]。采用 TinyML 的基于微控制器的系统已部署在城市环境中，用于检测污染水平，并向居民和政府部门提供即时反馈 [16]。此外，TinyML 还应用于灾害管理和环境保护领域的遥感，能够对关键数据进行实时分析 [16] [17]。

这些应用展现了 TinyML 的潜力：通过支持本地实时决策，提升各种实践的效率和可持续性。



图 1：阿兹鲁鱼类养殖场的鱼类养殖室

鱼缸中的水先经过过滤设备，去除所有颗粒物，然后再经过细菌过滤设备，去除微小颗粒，随后将温度适宜的清洁水依次输送到各个鱼缸中。房间内有 8 到 10 个鱼缸。当鱼类长到足以在户外生态系统中存活时，便会从鱼缸中移出，并重新放归该地区的自然环境，包括天然和人工河流及湖泊。其目的是保护自然环境中的物种。

III. 挑战：伦理考量

A. 隐私与监控：

水产养殖中的实时监测，尤其是借助视频系统或持续收集数据时，可能带来隐私风险。虽然这些系统主要采集水质等环境数据，但也有可能无意中记录在鱼场附近或场内工作的人员信息。如果没有采取适当的保护措施，这些数据可能被用于未经授权的监控，从而引发严重的隐私问题 [17]。

在摩洛哥水产养殖等新兴领域，遵守隐私法规至关重要。必须遵循通用数据保护条例（GDPR）等框架或摩洛哥当地法律，以确保数据不会遭到滥用。此外，与农民和社区进行公开、透明的沟通也至关重要。建立信任有助于避免引发不必要监视的疑虑 [18]。

B. 数据完整性与准确性：

在动态的水产养殖环境中部署 TinyML，会面临数据准确性方面的挑战。环境因素可能会给传感器读数带来噪声，增加分析难度；若不加以处理，还可能导致对水质或鱼类健康得出错误结论。此类错误可能造成重大影响，既损害水产养殖业，也危及周边生态系统 [19]。为确保基于这些数据作出的决策可靠，必须采用稳健的验证技术。这样才能确保数据完整性，尤其是在数据影响到关乎农民生计和水生环境可持续性的关键决策过程时 [20]。合乎伦理的数据处理——着重于负责任地收集、存储和使用数据——对于避免任何操纵或剥削行为至关重要。

C. 双重用途潜力和技术滥用：

尽管 TinyML 为水产养殖中的实时监测带来了诸多益处，但也存在风险。旨在提升水产养殖水平的同一套技术可能被重新用于有害活动。例如，监测系统可能被用于非法捕鱼，甚至造成环境破坏。此外，收集的数据可能遭到操纵，从而对自然保护和地方经济构成威胁[21]。

应对这些风险需要严格的安全规程。限制对敏感数据的访问，确保数据使用符合伦理标准，并由主管部门持续监督，可以防止数据遭到滥用。这些措施将确保该技术助力可持续水产养殖，而不是损害其发展。

D. 借助技术促进环境可持续性：

摩洛哥正借助 TinyML 推动水产养殖业发展，致力于打造可持续且环保的产业。水产养殖经营者可利用实时数据维持鱼类养殖的最佳条件，降低疾病暴发的风险，并优化用水量。TinyML 系统能够实现精准监测与控制，从而有效利用自然资源。

妥善应用这项技术，旨在为更广泛的环境目标作出贡献。可持续发展不仅是一项目标，更是一种必需。通过智能监测，水产养殖活动能够与周边生态系统共存，甚至为其提供支持。这种平衡既能促进经济增长，也能强化环境责任，使摩洛哥水产养殖业成为全球可持续发展的典范。

IV. 方法论

为加强对阿兹鲁国家鱼类养殖中心水产养殖系统的监测与管理，我们提出了一套智能监测与管理系统。该系统分为三个主要组成部分：输入（传感器）、微控制器和输出（数据分析与警报）。

A. 输入：传感器选择与数据采集：

我们选择了多种先进传感器，用于监测水产养殖系统中维持最佳条件所必需的关键水参数和空气参数。选择这些传感器的依据是其精度、可靠性，以及与微控制器集成的便捷性。*a)* 水参数：

- **pH值：**选择 Atlas Scientific EZO-pH 套件，是因为它具有高精度和连续监测能力。

- **温度：**选择 DS18B20 防水温度传感器，是因为它准确且易于集成。

- **溶解氧（DO）：**Atlas Scientific EZO- DO 套件对于维持鱼类和植物所需的充足氧气水平至关重要。

- **氨、亚硝酸盐和硝酸盐（NH3/NO2/NO3）：**选用 Vernier 铵离子选择电极和 Vernier 亚硝酸根离子选择电极监测有毒物质的浓度，确保其保持在安全限值内。

- **总溶解固体（TDS）：**使用 DFRobot Gravity 模拟式 TDS 传感器评估水体清澈度和整体水质。

- **浊度：**建议使用 Aqua TROLL 浊度传感器监测水体清澈度。

b) 模型开发与选择：

在先前的研究中 [22]，，研究人员开发并训练了多个模型，包括卷积神经网络（CNN）、深度长短期记忆网络（LSTM）、门控循环单元（GRU）和人工神经网络（ANN），用于预测鱼菜共生系统中的关键指标。

CNN 模型表现最佳，在所有指标中均取得了最低误差：平均绝对误差、均方根误差、均方误差、中位数绝对百分比误差

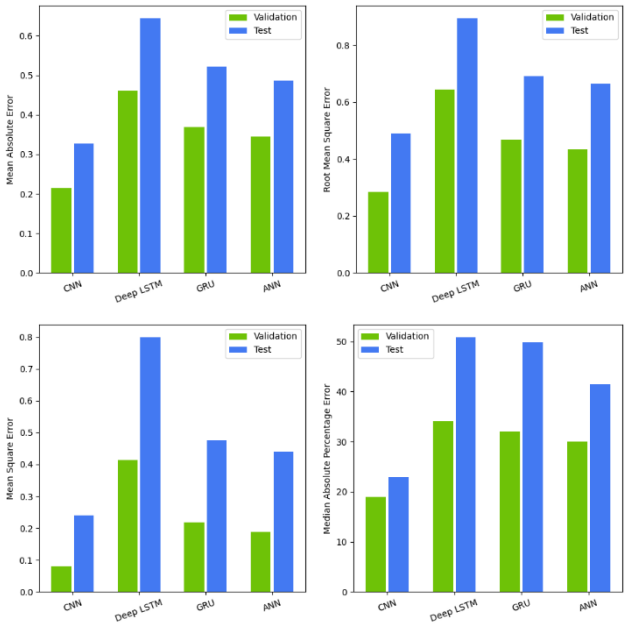


图2：用于预测的不同深度 学习架构的指标值比较

我们选择使用**中位数绝对百分比误差（MdAPE）**，而非传统的**平均绝对百分比误差（MAPE）**，以应对指标（如浊度）中大量离群值和突变的情况，这些情况通常由测量错误造成。这些异常可能会严重扭曲模型真实性能的表现。此外，由于物理部署完成后仍将继续收集数据，我们预计模型性能会随着时间推移而提升。在本研究中，CNN 模型将使用水产养殖专用数据进行微调，而这类数据在在线存储库中较为稀少。微调还将纳入此前在鱼菜共生场景中未考虑的额外指标，为持续改进模型奠定基础，同时从水产养殖设施收集并处理实时数据。

created_at	entry_id	temperature	turbidity	disolved_oxg	ph	ammonia	nitrate	population	fish_length	fish_weight
2021-06-19 00:00:05	1889	24.875	100	4.505	8.43365	0.45842	193	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:01:02	1890	24.9375	100	6.601	8.43818	0.45842	194	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:01:22	1891	24.875	100	15.797	8.42457	0.45842	192	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:01:44	1892	24.9375	100	5.046	8.43365	0.45842	193	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:02:07	1893	24.9375	100	38.407	8.40641	0.45842	192	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:02:27	1894	24.9375	100	3.862	8.42003	0.45842	193	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:02:47	1895	24.875	100	2.831	8.43818	0.45842	194	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:03:07	1896	24.9375	100	5.012	8.42911	0.45842	193	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:03:27	1897	24.9375	100	2.916	8.42911	0.45842	192	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:03:47	1898	24.875	100	17.005	8.43365	0.45842	192	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:04:31	1900	24.875	100	6.964	8.48358	0.45842	191	50	7.11	2.91
2021-06-19 00:05:11	1902	24.9375	100	3.465	8.42911	0.45842	187	50	7.11	2.91

图3：用于预训练和模型评估的数据快照

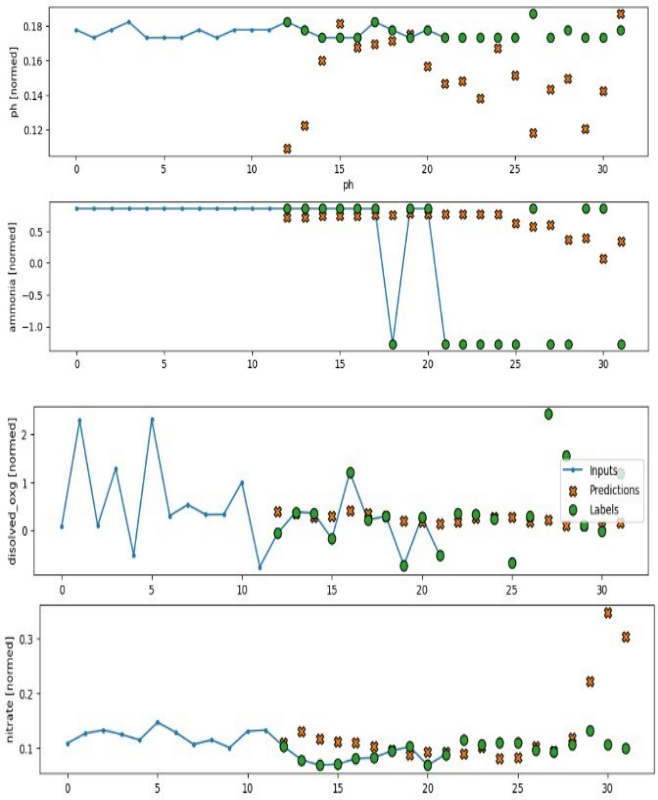


图3：由

卷积神经网络架构

测量频率：在我们此前的鱼菜共生研究中，TinyML 模型使用过去 30 分钟的历史数据，每 10 分钟进行一次预测 [22]。对于这一水产养殖应用场景，我们估计每小时运行一次模型即可满足需求。

B. 微控制器：数据采集与传输：

由于与所选传感器兼容且易于集成，因此选用了 Arduino 微控制器。该微控制器将从所有传感器采集数据，并将其传输至中央处理器，以便进行进一步分析。此设置可确保持续进行实时数据采集，从而实现对水产养殖系统的主动管理。

C. 输出：数据分析与预测性监测：

采集的数据将使用专为实时监测和预测分析设计的 TinyML算法进行处理。随后，对于任何偏离最佳范围的参数，系统将启动相应的电机，并提供维护建议。这种方法最大限度地减少了人工干预的需求，实现了对水产养殖环境的精准控制，并提升了整体运营效率。

随后，系统将根据预测值是否落在以下指标的最佳范围内采取必要措施：[23]

指标	**最佳范围**
温度	25 °C – 32 °C
PH	6.5 – 8.5
溶解氧（DO）	>5 mg/L
总溶解固体（TDS）	400 mg/L
亚硝酸盐（NO_2）	<0.2
硝酸盐（NO_3）	0-100
浊度	30 – 80 cm

表 1：水产养殖 系统指标值的最佳范围

系统将采取的一项关键措施是：如果任何预测的指标值超出已确定的最佳范围，就向工作人员发送通知。这些通知会明确指出导致问题的具体指标，使工作人员能够及时采取适当的纠正措施。

此外，系统还将加入一项安全措施，使阿兹鲁中心的工作人员在发生故障时能够迅速关闭系统。这项功能对于防止鱼类或水质受到潜在损害至关重要，从而确保水产养殖环境的整体安全。

V. 局限性与未来工作：

本研究的主要局限之一是缺乏水产养殖环境的可用数据，无论是线上还是现场数据。为了解决这一问题，我们采用了基于鱼菜共生数据集的预训练模型 [24], ，因为鱼菜共生与水产养殖系统之间存在显著相似性。这种方法提供了一个基础模型，在部署到水产养殖环境后，随着更多相关数据的不断积累，该模型可以持续进行微调。未来，我们计划将计算机视觉技术集成到系统中，使摄像机能够识别并收集与鱼类相关的信息。这将使系统能够为工作人员提供更详细、更有用的见解。

此外，我们的目标是在阿兹鲁国家鱼类养殖中心实现该系统的实体原型，以便进行测试和数据收集。此次部署所获得的反馈将用于进一步改进系统。我们计划探索的另一个有趣研究方向，是利用收集到的数据进行分析，以发现有价值的信息，例如与鱼类喂养或鱼类密度相关的数据。这些信息有望帮助我们进一步改进系统。

VI. 结论：

本文介绍了一种基于 TinyML 的边缘系统框架，旨在监测阿兹鲁国家鱼类养殖中心的水产养殖环境并提高运营效率。我们提出了一种架构，通过人工智能驱动的分析自动监测关键指标，从而减轻工作人员的工作负担。我们的方法采用预训练的机器学习算法，可部署在边缘设备上，按小时预测关键指标。检测到异常时，系统会向工作人员发送详细通知，以确保及时采取干预措施。

此外，我们还纳入了安全措施，以便在系统发生故障时负责任地保护鱼类和水体。展望未来，我们概述了后续计划，包括整合计算机视觉技术以实现更先进的鱼类监测，并对系统进行实体部署和测试，以收集反馈并进一步完善其功能。

参考文献：

[1] AgriMaroc。但根据MAP，“L’Agriculture，UN pilier del’économie marocaine，”AgriMaroc.ma，https://www.agrimaroc.ma/agriculture-pilier- economie/#:~:text=La%20part%20de%20l’amont%20agric ole%20dans%20l’économie%20nationale,et%20ce%20malg ré%20des%20cycles%20de%20sécheresse%20répétés。（访问日期：2024年9月6日）。[2] “摩洛哥农业：2024年关键数据，”AgriMaroc.ma，2024年2月15日。[在线]。可访问：https://www.agrimaroc.ma/agriculture- marocaine-2024/。[3] “鱼菜共生系统能节约用水吗？”FarmingAquaponics.com，2021年6月27日。可访问：https://farmingaquaponics.com/do-aquaponics-systems-save-water/。[4] S. Arthi、P. Anitha、S. Gowri和P. Sasikala，“使用物联网进行异构集成的研究问题与可能的解决方案”，*Dhanalakshmi Srinivasan女子艺术与科学学院*，佩兰巴卢尔，泰米尔纳德邦，印度。可访问：/mnt/data/ResearchIssuesandPossibleSolutions.pdf。[5] A. Kunapinuna、W. Fairman、P. S. Wills、S. Mejri、M. Kostelnik和B. Ouyang，“创新的水产养殖生物特征分析：利用红外激光器和飞行时间相机进行显微鱼类幼体追踪”，载于SPIE海洋传感与监测第十六届会议论文集，第13061卷，130610F，2024年，doi：10.1117/12.3014053。[6] J. Salako、F. Ojo和O. O. Awe，“Fish-NET：通过人工智能增强的鱼类监测与追踪推进水产养殖管理”，AGRIS在线经济学与信息学论文集，第16卷，第（2）期，第121–131页，2024年。可访问：https://www.proquest.com/scholarly-journals/fish-net-advancing-aquaculture-management-through/docview/3097525339/se-2。DOI：https://doi.org/10.7160/aol.2024.160209。[7] J. Moni、P. M. Jacob、S. Sudeesh、M. J. Nair、M. S. George和M. S. Thomas，“具有鱼类疾病自动识别功能的智能水产养殖监测系统”，2024年第一届工程系统与技术趋势国际会议（ICTEST），印度科钦，2024年，第01–06页，doi：10.1109/ICTEST60614.2024.10576108。[8] S. H. Shaikh、V. Vijayalaxmi和P. Sampathkumar，“基于深度学习的面部表情识别”，*计算机科学与工程研究期刊*，第6卷，第3期，第1–8页，2023年6月。可访问：
h
tt
ps://technicaljournals.org/RJCSE/index.php/journal/article/view/86/82[9] 阿兹鲁国家水文生物学与鱼类养殖中心。（2020）。水产养殖实践与监测技术年度报告。[10] Bhatnagar，A.和Devi，P。（2013）。“池塘养鱼管理的水质指南。”《国际环境科学杂志》，3（6），1980–2009。[11] Boyd，C. E.和Tucker，C. S。（1998）。池塘水产养殖水质管理。施普林格。[12] Han, G., Liu, L., Jiang, J., 等（2011）。“用于水产养殖的基于传感器云的水质监测系统。”《传感器》，11(6)，5716-5731。[13] Li, X., Ju, Z., & Hao, F.（2018）。“基于无线传感器网络的水产养殖监测系统研究。”《水产养殖研究与发展杂志》[14] Patel, P. K., & Patel, A. M.（2021）。“基于TinyML的精准农业边缘计算系统。”《农业信息学杂志》，12(2)，10-20。[15] Whelan, B., McBratney, A. B., & Taylor, J. A.（2013）。“面向作物与畜牧生产的精准农业。”《皇家学会哲学汇刊B辑：生物科学》，368(1619)。[16] Bhushan, S., 等（2020）。“基于边缘机器学习的智慧农业监测系统。”《IEEE物联网期刊》，7(10)，8970-8981。[17] Koenig, R.（2020）。“TinyML在灾害与环境管理遥感中的应用。”《IEEE传感器期刊》，20(8)，1235-1242。[18] Zhu, D., & Wang, L.（2020）。“利用低成本传感器进行实时空气质量监测的TinyML方法。”《环境监测与评估》，192(12)，1-10。[19] Chakrabarty, S., & Engels, D. W.（2022）。大数据时代智慧环境的社会与伦理影响。书籍章节。[20] Kininmonth, S.（2007）。建立环境传感器网络时的注意事项。会议论文。[21] Srivastava, M., & Kumar, R.（2021）。基于物联网的智慧环境监测：架构、问题与挑战。书籍章节。[22] El Azzouzi, K., Hsain, A., Chawqi, K., & Chtouki, Y.（2024）。智慧农业：利用TinyML创新革新鱼菜共生与生态系统。*IEEE*人工智能与物联网全球会议。理学院与工程学院，Al Akhawayn大学，伊夫兰，摩洛哥。[23] Hemal, M. M., Rahman, A., Nurjahan,, Islam, F., Ahmed, S., Kaiser, M. S., & Ahmed, M. R.（2024）。智慧池塘水质监测与鱼类养殖推荐一体化Aquabot系统。《传感器》，24(11)，3682。[24] B. Ogbuokiri，“基于传感器的鱼菜共生鱼塘数据集”，Kaggle，网址：
h
t
t
p
s://
www.kaggle.com/datasets/ogbuokiriblessing/sensor-basedaquaponics-fish-pond-datasets。