

# 地震科技前沿快报

2021 年第 12 期（月刊总第 36 期）

中国地震局科学技术委员会  
中国地震局科技与国际合作司

中国科学院兰州文献情报中心  
中国科学技术信息研究所

---

## 本期概要

- 1、利用量子方法感知重力
- 2、家用地震仪为海地地震提供关键数据
- 3、加纳南部西海岸盆地大型水坝的地震风险分析

## 利用量子方法感知重力

利用量子态的极端敏感性的设备正在走出实验室，进入建筑、医疗、地震学等领域。在 2021 年 11 月英国物理学会的 **Physics World** 上，英国科学作家 **Michael Allen** 详细介绍了建造量子重力传感器的技术，以及它在研究和工业方面的多种用途。

许多量子技术都与计算有关。很容易想象一台能够解决复杂问题的更好、更强大计算机的广泛用途。但是，如果不是数据处理机器，那么计算机到底是什么。计算机，无论是量子还是其他方式，都将数据转换为信息，然后用于指导科学、医疗和工业过程。它们输出与输入的数据一样，而这些输入数据是由传感器收集的。

事实上，新型传感器和获取信息的新方法引发了许多重大的技术和经

济变革。英国伯明翰大学量子物理学家 Bongs 表示，如果回顾历史，很多诺贝尔奖与传感器有关，例如，伦琴 1901 年因 X 射线获奖。没有人知道这是什么，但现在每家医院、机场以及许多工业质量控制机器都装有 X 光机。它让人们能够看到一些东西，获得以前无法获得的身体内部数据。同样，利用量子原理的传感器和其他设备（尤其是量子态相比于其环境的敏感性），很可能是商业量子革命的第一阶段。

Bongs 是英国量子感知与定时技术中心（Quantum Technology Hub Sensors and Timing）的首席研究员。该中心是英国国家量子技术计划的一部分，拥有 110 多个项目，总价值约 1.2 亿英镑。其目标是推动量子时钟和传感器的创新与商业化，例如，用于医疗保健和重力感知的磁传感器。这些技术在多个领域都有应用，包括气候、通信、能源、交通、医疗保健和城市发展等。

量子传感器指的是使用一些增强量子效应的传感器，比如叠加或可能的纠缠。叠加是量子粒子同时处于两种状态或同时沿两条轨迹运动，将它们重新组合在一起时，这两条轨迹之间的差异本质上会在最后产生量子干涉，这将使人们能够以非常高的精度发现导致差异的原因。

Bongs 和他的同事正在利用这种量子效应来创建基于原子干涉测量法的量子重力仪。在该设备中，原子在两个不同的高度沿两条不同的轨迹行进。这意味着，它们正在穿过两个略有不同的引力场，当它们回到一起时，干涉图可以用来揭示引力梯度。

## 测量重力

大多数重力仪基于悬挂在弹簧上的物质，物质位置的变化表明在重力的变化。然而，如果地面振动，弹簧会伸展并弹跳。这意味着，这些设备必须随着时间的推移重新校准。此外，它们还必须在原地放置很长时间才

能读取读数，以对各种因素（经过的卡车和火车低强度地震活动等）所引起振动而产生的背景噪音进行平均。

基于弹簧的重力仪已经非常灵敏，但量子重力仪的优点是，当地面因任何原因振动时，整个单元整体移动，因为没有弹簧可以四处弹跳。容器、原子云（clouds of atoms）和测量它们如何下落的激光，都一起移动。量子重力仪克服了地面振动的障碍，因此由于抑制了噪音，可以更快地进行测量。



图1 量子重力仪在土木工程领域的应用

在土木工程中，重力传感器可用于检测地下任何产生质量差异的物体，从而可以帮助找到埋在地下的基础设施，如管道、隧道和旧矿井。虽然还有其他技术可以做到这一点，例如探地雷达，但大多数都是主动技术，必须向地下发出信号，这就限制了其测量深度。重力的真正优势在于它是被动的，因为没有向地下发出信号，所以地面不会对信号造成衰减，人们只

是在地面被动地测量它，只要物体在地表产生的信号足够强，就可以被检测到。理论上，深度基本没有限制。

## 振动

尽管具有潜力，但量子重力传感器并不经常使用，即使在地球物理学中也是如此。这是因为它们目前过于昂贵，因为必须将它们留在原位足够长的时间，来收集足够的信息以消除振动噪音。不仅地震会产生噪声信号，即使是交通、人员移动、人为钻孔等，也会引起振动。量子传感器的真正机会是可以在更多地方使用它，因为可以更快、更准确地进行测量。

英国伯明翰大学的 **Metje** 和 **Boddice** 最近一直在使用量子重力传感器来检测铁路轨道上的涵洞。这些涵洞主要用于排水，如果被堵塞，道床（**track bed**）就会被水浸透，就会得到所谓的“湿床”。进而，影响轨道的稳定性，并可能产生结构问题，例如倾斜，从而影响列车安全行驶的速度，导致延误。

这些涵洞深埋在轨道下，这使得找到它们并评估其状况具有很大挑战性。探地雷达通常无法穿透到足够深的地方，而测量必须迅速进行，因为工程师通常在晚上只有几个小时的时间可在轨道上工作。**Metje** 已经证明，量子重力传感器在寻找铁路涵洞方面比任何其他技术都好。



图2 在意大利埃特纳（Mount Etna）火山进行重力测量的量子重力仪

## 衰减风险

英国环境和工程咨询公司 **RSK** 的 **George Tuckwell** 也一直在探索如何将量子重力传感器用于土木工程领域。**RSK** 通过在早期阶段评估地面条件，帮助客户降低建设项目的风险。通过绘制地面地图，可识别基岩和地下水的变化，以及地面的其他自然和人工变化，例如垃圾填埋场和矿山作业。这可以保护项目免受不可预见问题造成的成本和延误。

**Tuckwell** 和他的同事已经进行了重力测量，但这些测量速度慢、耗时长，因此成本高昂。此外，他们还几乎总是需要后续工作，例如钻孔，以识别质量异常。**Tuckwell** 希望量子传感器可以改变这一点，因为它们应该更准确、更快，并且能够测量当前设备无法测量的东西。

与伯明翰大学和其他工业合作伙伴一起，**Tuckwell** 一直致力于将量子重力传感器与人工智能、历史数据和机器学习相结合，以创建一个可以提供最好地面条件模型的系统。其最终目标是创建一个装置，可以扫描一块土地，并提供准确的地下地图，包含所有必需的信息，无需进一步调查。

目前，**Tuckwell** 已经开发出了一种算法。在进行调查时，它可以向用户建议下一个测量点的位置，从而对用户获得的地下模型的确定性产生最大影响，并且，在调查过程中就可以进行。

虽然土木工程将是量子重力传感器的第一个商业应用领域，但对于国防和安全应用（可能是秘密隧道或一些地下设施）而言，因为不可能屏蔽地下特征免受其重力影响，所以没有办法隐藏它，这样就可以通过重力来对其进行测量。

## 从船运到火山活动

量子重力仪还可用于创建安全导航系统。近年来，人们越来越关注 **GPS** 欺骗，尤其是在海上导航中——船舶的导航系统收到错误信号，认为自己

位于与实际位置不同的位置。在流氓国家或海盗手中，这可能被用来劫持或破坏船只，或将它们引导到敌人的领海。

如果能够创建精确的重力图，那么船舶就可以有一个机载量子重力仪，然后可以追踪重力值并将它们与地图匹配，给出它们的位置。理论上，这个重力仪可以放在一个完全与外界隔绝的封闭盒子里，使其无法破解。即使有人干扰了这艘船的通信、卫星和雷达导航系统，它仍然能够导航。

法国 **Muquans** 公司专门从事高精度量子测量。虽然该公司有一些激光和冷原子工程产品及原子钟，但其量子重力仪已经在实地使用。但更令人兴奋的是，**Muquans** 已经开发了绝对量子重力仪，目前该系统部署于意大利埃特纳火山（**Mount Etna**）的顶部附近，已经收集了大约一年的数据。

测量火山周围的重力变化至关重要，因为它可以提供有关岩石、气体和岩浆等底层物质密度变化的线索。重力增加可能表明岩浆等密度更大物质的涌入，而密度的下降则表明可能存在下沉洞（**sink hole**）。绝对量子重力仪实际上是利用火山表面的重力测量，以获得有关地下地球物理过程的一些信息，并更好地了解火山内部发生的事情。长期来看，收集足够的数数据可帮助预测火山喷发。减少噪音是量子重力仪监测火山活动的一个巨大优势。另一个优势是量子系统中没有任何弹簧，这意味着可以进行很长时间的测量，而无需重新校准系统。能够长时间不间断地收集数据对于理解复杂的地球物理系统非常重要，而机械重力仪根本不可能做到这一点。

### 计算之外

当人们仍在谈论量子计算机的研究活动和长期前景时，量子重力仪已经投入使用，且已经达到了非常高的技术成熟度。量子重力传感器可用于了解有关地下质量分布的任何活动，这适用于水文和地震学研究，以及用于探测空隙、沉洞、隧道和空洞的土木工程项目。另外，量子重力仪还可

以被用来探测暗物质。

截至 2021 年 1 月，英国研究与创新中心（UKRI）已经资助了 7 个项目，经费总额 3100 万英镑，以期展示量子技术如何解决基础物理学中的一些最大谜团。其中三个项目正在为寻找暗物质而研发量子增强干涉测量法和传感器，以检测轴子（axion）等超轻候选物，或测试关于时空量子化的理论。通常情况下，引起科学范式转换的发现是在新技术和既定理论融合的基础上产生的。人类可能仍然处于量子传感器的黎明阶段，但其能够同时帮助人类建造一条更好的道路，并深入研究宇宙最深的奥秘。

来源：Michael A. Sensing Gravity, The Quantum Way. Physics World, 2021-11-22.

## 家用地震仪为海地地震提供关键数据

由于海地国家地震台网的不稳定，科学家们发起了社区地震学项目，在家里部署地震仪，来监测地震活动，结果表明十分有效。现在，该网络正在帮助监测 2021 年 8 月海地地震的余震并阐明未来危险。有关介绍和分析以新闻报道形式发表在 2021 年 9 月的 *Nature*。

一个安装在海地各地家庭起居室、花园和工作场所的廉价地震仪网络正在帮助科学家们解开 2021 年 8 月摧毁这个加勒比国家西南部的 7.2 级地震的内部机制。这项社区科学（community-science）工作是在该国上一次大地震（2010 年发生 7 级地震，造成 10 多万人死亡）后于 2019 年发起的，其正在帮助揭示海地地震活动的更多细节。

在一个官方地震监测站因资源有限而有时不能联网的国家，社区地震学（community-seismology）项目提供了非常需要的数据。现在，该网络正在检测继续摇晃该地区的余震。它的地震仪将数据传入一个系统，在一个基于网络的门户网站上实时显示海地地震的位置和震级。位于太子港（海地首都）的海地国立大学（State University of Haiti）的地质学家 Dominique Boisson 帮助运行该网络，虽然这些设备不是专业设备，而且有很多限制，但是，有些结果非常好。

### 海地的地震研究

该网络显示了海地的地震学研究在近年取得的巨大进步。当 2010 年太子港附近发生地震时，海地没有地震学家，只有一个官方地震监测站。现在，有几个专业的地震学家，拥有由海地矿业和能源局（Bureau of Mines and Energy）运营的国家网络中的 7 个台站，以及社区科学网络中的 15 个台站。



2021年8月14日大地震发生后的几天内，科学家和技术人员团队就带着地震仪和其他仪器奔赴震中，以测量地面运动情况。在地震发生后立即用科学仪器监测，使研究人员能够更好地了解地震发生的原因和未来的地震风险。2010年，外国研究人员在地震发生后花了数周时间飞往海地部署仪器。

2021年，由于新冠疫情的限制和海地总统 Jovenel Moïse 在7月被暗杀后的政治不稳定，许多外国团队被禁止前往海地。目前，这项工作由海地的地震学家领导，例如同样在海地国立大学的 Steeve Symithe，他在 Facebook 上向海地公众直播介绍地震科学知识及有关实况。

2010年和2021年的地震都发生在 Enriquillo-Plantain Garden 断裂带，这是一个错综复杂的断裂带，在那里，加勒比板块相对于北美板块向东移动。该断裂带沿着海地的南部半岛从西向东延伸，2010年的地震发生在该断裂带一个以前未知的断层上，2021年地震的震中位于海地西部的尼普斯省（Nippes）。

尽管目前总的死亡人数还没有统计出来，但至少已有 2100 人在 2021 年的地震中死亡。美国地质调查局（USGS）估计，可能有超过 10 000 人死亡。许多幸存者在试图外出避难时，忍受着热带风暴带来的大风大雨。前往该地区的科学家们在车里过了一夜，因为雨水倾泻而下，软化了地面，并在余震中导致了滑坡。由此可见，开展实地调查相当困难。

### 自建社区地震台网

在海地进行实地调查的挑战激发了 2019 年社区地震学项目的创建。巴黎高等师范学院的地震学家 Eric Calais 多年来一直在研究海地的地震，

偶然发现了一家向业余爱好者出售地震仪的公司。为了寻找解决海地国家网络数据不连续的方法，他用一个项目的剩余资金购买了一些地震仪。它们含有微小的加速度计，可以检测到地面的颤动，还可将这些信息传送出去进行处理，并与其他地震仪的信息整合在一起。

这些 500 美元的监测站并不像海地官方 50 000 美元的监测站那样复杂。但是，当定位地震、确定震级、进行基础的地震学研究时，却真的很出色。而且，由于它们位于人们的家中和工作场所，因此经常有稳定的电力供应和可靠的互联网接入。该项目团队成员包括 Calais、Boisson、Symithe 等，同时，他们还招募人员来运营这些台站（将地震仪按要求部署在家里或其他地方）。在 8 月的地震中，离震中最近的志愿者的台站在地震期间脱机，当其恢复联网后，台站很快就恢复了运行。

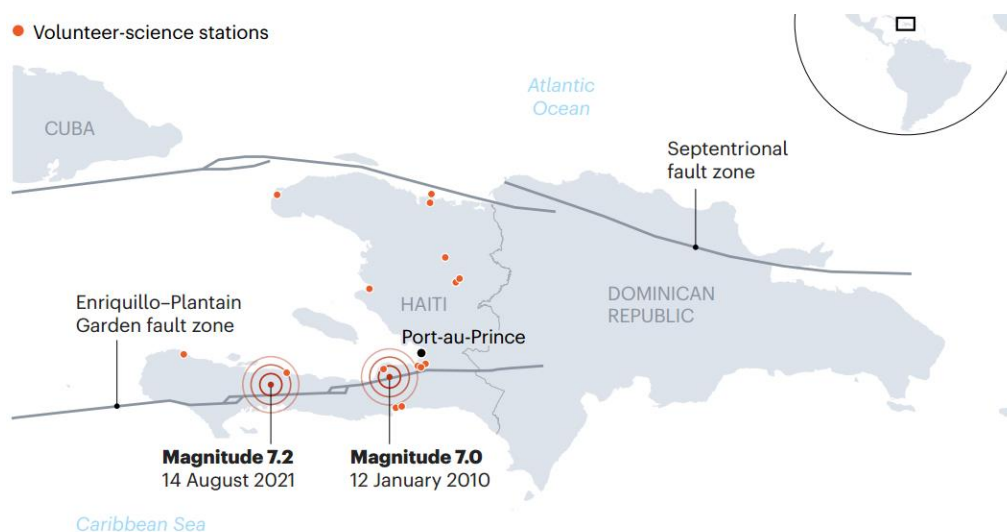


图 1 海地社区地震网络的台站分布

在国际支持者的资助下，Calais 和他的同事们使由 15 个台站组成的网络运行了两年。他们的目标是将台站很快增加到 50 个或更多。目前，社区地震学网络已经在世界其他地方兴起，但海地的网络是独一无二的，因

为它在一个很少收集地震数据的地区开展监测。

海地的社区地震学数据被输入一个名为 **Ayiti-Séismes** 的全国性实验系统，该系统由位于法国尼斯的蔚蓝海岸大学运营的网站托管。**Ayiti-Séismes** 还从海地的官方地震台网，以及附近国家的地震台网获取数据，包括多米尼加和古巴。其最终结果是一张实时的余震地图，以红色和橙色色调覆盖了海地西南部。**USGS** 的地震学家 **Susan Hough** 在海地工作多年，包括 2010 年的地震之后，他指出，这个网络运行着的，且非常有用。

### 海地未来的地震风险

此次地震的震中与 1952 年和 1953 年发生的地震相当接近，那两次地震的震级可能在 5 到 6 级之间。就未来的风险而言，**Enriquillo-Plantain Garden** 断裂带仍可能发生另一次大地震。有专家推测，2010 年的地震通过将应力转移到刚刚破裂的区域，而促成了最近的地震。未来，太子港和 **Enriquillo-Plantain Garden** 断裂带的大部分地区的地震风险仍然很高。

与此同时，许多科学家一直在担心海地北部的另一个主要地质区域，即所谓的 **Septentrional** 断裂带，其在 1842 年发生了一次大地震。2010 年之后，**Boisson** 等认为下一次地震会发生在这个断裂带，但是，实际却发生在了 **Enriquillo-Plantain Garden** 断裂带。

迄今为止，从 2021 年 8 月 14 日的地震中已经监测到大约 600 次余震。相比之下，2010 年地震后的同一时期大约只有 10 次。**Calais** 表示，毫无疑问，还有很多余震没有被检测到，但是，借助于社区地震台网，现在不仅有关于此次地震发生地点的强有力的信息，而且还有关于断层有多宽、断层向哪个方向倾斜的信息，这对了解地震发生的原因和未来形势分析至

关重要。

来源: Witze A. Home Seismometers Provide Crucial Data on Haiti's Quake. *Nature*, 2021, 597(7874): 18-19.

## 加纳南部西海岸盆地大型水坝的地震风险分析

大坝是任何国家关键基础设施的一部分，一旦发生问题，大坝附近的人员和财产就会面临很大的风险。加纳是西非地震最活跃的地区之一，该地区至少有 5 座大型水坝建在战略位置。该地区以中低地震活动为主，但历史事件表明，在西海岸盆地发生过具有潜在破坏性的大地震。本研究总结了用于分析地震风险的方法，并根据大坝所在地的地震活动和大坝结构特性及其位置讨论了西海岸盆地内三座大坝的地震危险性。结果表明，大坝所在地的峰值地面加速度（PGA）在 10 000 年重现期内为 0.31~0.52 g。盆地内一座大坝属于高风险等级，应对该大坝的抗震安全和下游地区的人员安全进行检查和分析。相关研究成果于 2021 年 9 月发表在 *Journal of Seismology*。

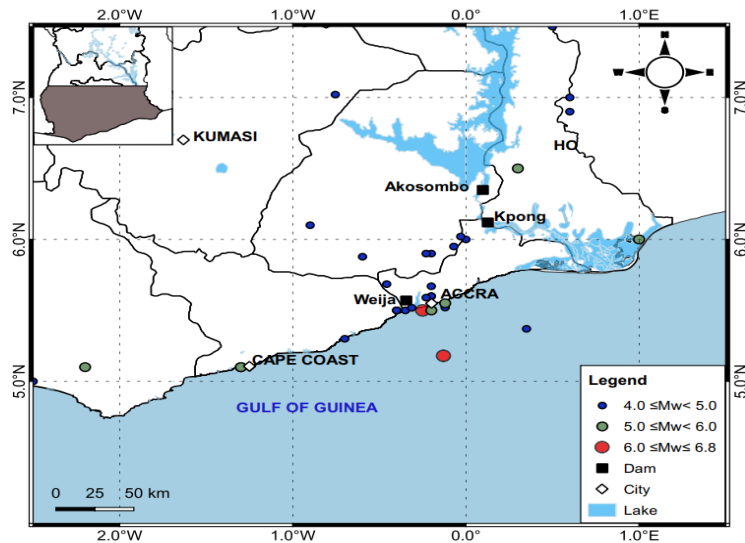


图 1 研究区大坝和地震活动位置

大坝在经济、农业和工业发展中发挥着重要作用。加纳位于非洲西部，面积为 238 540 km<sup>2</sup>。在总面积中，4.8%（11 400 km<sup>2</sup>）为耕地。总的来说，加纳包括三个的流域：沃尔特河（Volta River）流域、西南流域和沿海河流。研究者基于 Bureau（2003）方法的简化程序，对加纳南部西海

岸三座坝高超过 15 m 的大坝进行了地震风险分析，其中有两座位于沃尔特河流域。

根据 ICOLD (1989) 的定义，坝高 15 m 以上，5~15 m 范围内的水库容量超过 100 万立方米的坝，属于大坝 (large dam)。ICOLD (2020) 的方法可分别评价坝址地震危险性和坝体及附属结构的危险等级。然而，Bureau (2003) 提出了一个方法，其结合这两个因素来定义大坝结构的总体地震风险，这主要取决于两个因素：坝址的地震危险等级、大坝及其附属结构的危险等级。

不同地点大坝结构的地震危险性可以基于 PGA 来分析。加纳的地震事件由加纳政府建立的国家数字地震观测网 (NDSO) 监测。在研究区域内，没有观察到由于地震活动对大坝造成损坏的记录。1964 年和 1969 年加纳地震在 Akosombo 大坝附近有震感，同时，该大坝还受到了诱发地震活动的影响。本研究评估了加纳地区内这些选定大坝的地震危险性，并确定了总体地震风险，可用于调查和改造大坝结构以避免破坏。

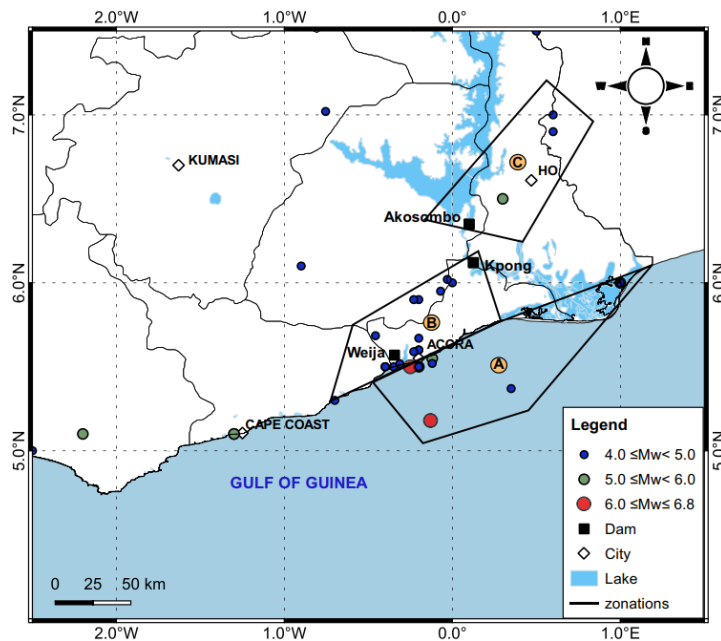


图 2 研究区地震带与地震位置

两条主要的活动断层控制着加纳西海岸盆地的新构造。它们是作为盆地主要构造特征的 Akwapim 断裂带,以及海岸边界断层——沿着海岸线的正断层,大约在  $60^{\circ}\text{E}-70^{\circ}\text{E}$ ,距海岸约 5 km,从侏罗纪至今,其一直处于构造活跃状态。Akwapim 断裂带由一系列断层组成,这些断层从阿克拉 (Accra) 以西向东北方向延伸。

根据 ICOLD (2010) 方法,大坝的总体风险被分为四级(低、中、高和极高)。基于该方法的坝址危险等级表明了初步的抗震评价要求。根据 ICOLD (1989) 的研究,大坝的地震风险取决于结构和社会经济因素。其中,结构因素主要根据水库容量和大坝高度来确定,社会经济因素取决于疏散要求和对下游的潜在破坏。

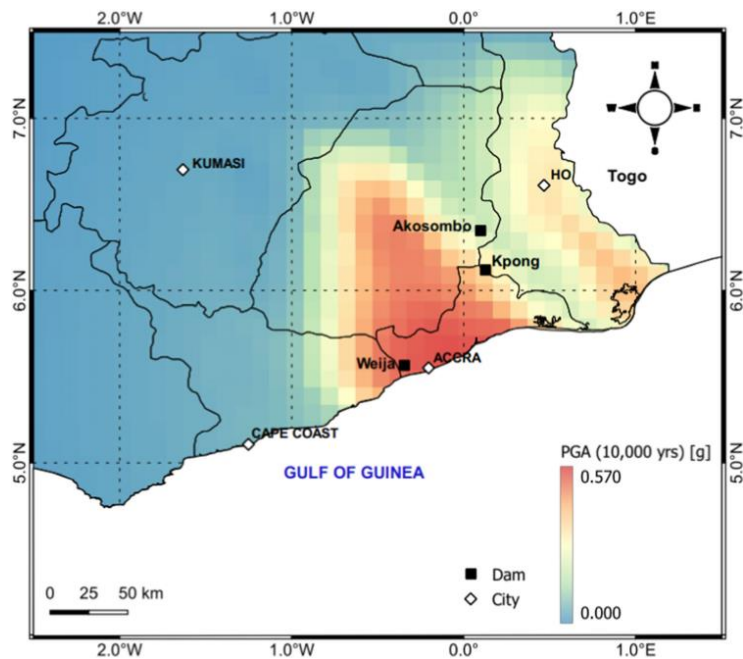


图3 研究区地震灾害图

### 地震风险分析

为分析盆地内坝址的地震危险性,研究人员确定了所有可能产生显著地面震动的震源。研究过程中,从地震目录中收集了历史和仪器地震数据,使用地质特征和地震活动性来量化地震活动率 (seismic activity rate)。

根据 ICOLD(2010)的方法,最大可信地震(Maximum Credible Earthquake, MCE)是确定性事件,是沿着公认的断层或地形定义的构造框架内可能发生的最大地震。MCE 通常是基于统计定义的,典型的重现期为 10 000 年。最大设计地震(Maximum Design Earthquake, MDE)通常的特征是,其运动水平等于坝址内 MCE 确定性评估预计的运动水平。

Weiland (2012)指出,对于大型水坝,基于概率地震危险性分析(PSHA)的 MDE 地面参数的重现期应为 10 000 年。研究人员利用基于区域特征最大可信震级(Mmax)的概率方法来估计坝址最大预期 PGA。对每个坝址, Mmax 由半径 100 km 内的地震确定。需要注意的是, Mmax 大于常用的万年重现期最大可信地震。由于没有强震记录,研究采用了五种不同的衰减关系来计算坝址的预期 PGA。由于研究区缺少数据, Mmax 通过观测到的最大震级加 0.5 获得,  $M_{max}=M_{obs}+0.5$ 。

根据 Mavonga 和 Durrheim (2009)的研究,在可能导致设定地震(scenario earthquake)的断层位置信息记录不充分的情况下,地震危险性评估应主要基于研究区的可用地震资料和地质历史。然而,由于没有可用的文献来正确识别该研究区的断层滑移速率、几何形状和分段长度,因此,使用面源区来定义可能的震源区。用于估计坝址地震危险性的三个地震带主要基于研究区的地质和地震活动性。图 2 中, A 区是代表侏罗纪的几内亚湾近海带, B 区(Accra 地区)和 C 区(Ho 地区)都是新元古代的。研究人员使用计算机程序 ZMAP(Wiemer, 2001)实现的最大似然方法计算每个区域的 b 值和  $\lambda$  的递归参数。由于记录数据有限,通常对中低地震活动中的所有震源区使用唯一的 b 值。已知  $\lambda$  参数在给定区域内的不同区域有显著差异,通过震级  $\geq$  最小震级(Mmin)的年度地震次数的平均值,对每个区域进行了不同的估计。地震危害使用计算机程序 R-CRISIS(版本



20.0.0) 进行估算，分析在尺寸为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的网格上进行。结果表明，基于盆地地震构造环境，PGA 的变化范围很广。

盆地中最关键的区域是靠近 Akwapim 断裂带的阿克拉地区，因为在该地区有更大的加速度值。此外，该地区 1939 年发生了 Mw6.4 地震。研究的三个大坝分别是 Weija、Kpong 和 Akosombo 大坝。对于 10 000 年重现期，估计 PGA 值为 0.31~0.52 g。最高危险位于阿克拉地区的 Weija 坝址附近，在 475、2475 和 10 000 年的重现期中，PGA 的最大值分别 0.11g、0.29g 和 0.52g。

### **Bureau 的方法**

该方法提供了各种风险因素和加权点，以根据大坝类型、年龄 (ARF)、规模 (HFR)、下游风险 (DHF) 和脆弱性 (CRF) 来近似评估任何大坝的总风险因子 (TRF)，这主要取决于给定坝址的地震危险。四个风险因素分别为低、中、高、极高：

$$\text{TRF}=[(\text{CRF}+\text{HFR}+\text{ARF})+\text{DHF}]\times\text{PDF}$$

下游破坏风险指数 (DRI) 基于潜在洪水路径中私人、商业、工业或政府财产的价值。最好的 DHF 值可从明确的大坝溃口、淹没测绘和经济研究的综合分析中获得。预测破坏系数 (PDF)，即易损性等级，是与坝址相关的地震危险性和类似大坝在地震期间的表现的函数。PDF 可以由预测破坏指数 (PDI) 定义，并根据公式计算：

$$\text{PDF}=2.5\times\text{PDI}$$

PDI 取决于大坝类型和坝址地震危险性，由地震严重性指数 (ESI) 表示，这一地震危害表示设定地震下坝址的预期地面运动：

$$\text{ESI}=\text{PGA}\times(\text{M}_w-4.5)^3$$

大坝结构的地震风险主要取决于坝址的地震危险性等级和大坝结构

及其附属结构的危险等级。因此，Bureau (2003) 方法考虑了大坝类型、年龄、大小、下游破坏潜力和疏散要求，以便开展盆地的风险分析。该方法根据总风险因子 (TRF) 推荐四个独立的风险等级，范围从 I (低风险) 到 IV (极高风险)。按照该方法，盆地内的三座大坝有两个为 II 级，一个为 III 级。

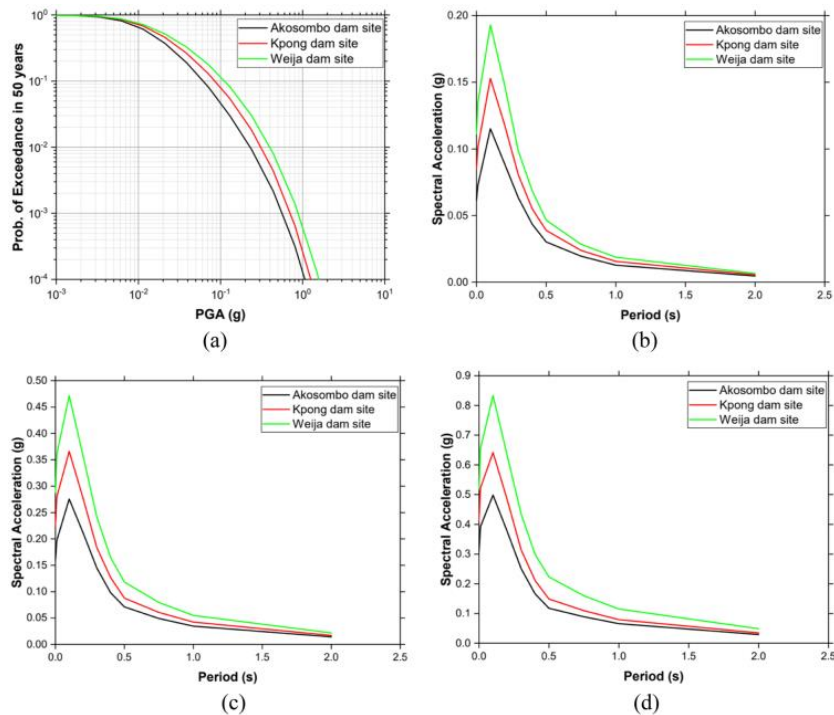


图 4 地震灾害曲线

Akosombo 大坝是研究中最高的, 距河 134 m, 库容量最大, 为  $147\,960 \times 10^6 \text{m}^3$ 。其始建于 1961 年, 并于 1965 年竣工。设计发电装机容量为 1038 兆瓦。其 TRF 值为 107.4, 风险等级为 II 级, 将承受 0.31g 的 PGA, 最大可信地震为 5.5 级。

Weija 坝是 1978 年建成的石坝, 坝长 375 m, 坝顶高 17.07 m。其位于阿克拉市以西 18 km 的 Densu 河上, 主要目的是为阿克拉市的许多地区供水。大坝库区面积  $20.5 \text{ km}^2$ , 平均水位 14.33 m。大坝设计库容为  $113.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 最大设计水位和库容分别为 15.25 m 和  $143.115 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。该大

坝被确定为 III 级风险，将承受 0.52 g 的 PGA，最大可信地震为 6.9 级。

Kpong 大坝是位于阿克拉市东北 65 km 处沃尔特河下游的一座堆石坝。相对于河床而言，高 20 米，库容  $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，始建于 1977 年，并于 1982 年全部完工，主要用于发电，并提供灌溉服务。其风险等级为 II 级，将承受 0.41g 的 PGA，最大可信地震为 5.5 级。

来源：Irinymy S A. Seismic Risk Analysis for Large Dams in West Coast Basin, Southern Ghana. Journal of Seismology, 2021: 1-16.