

理查德 · L. · 米汉 (RICHARD L. MEEHAN)

咨询工程师 · 50 年从业经验 · 大坝安全 · 工程地震学 · 热带岩土工程

邮箱地址: [meehan@stanford.edu](mailto:meehan@stanford.edu)

本报告首发于 2020 年 4 月 17 日, 经作者同意, 于 2022 年 7 月进行了修订, 以使意思更清晰。

## 印尼达瑞铅锌矿矿址风险与尾矿处置安全问题

**概要:** 以下, 我将根据现有信息、在未经实地考察的情况下, 就中色(印尼)达瑞矿业有限公司 (Dairi Prima Minerals, 以下简称“达瑞矿业”) 位于北苏门答腊省达瑞县的铅锌矿的尾矿坝稳定性风险发表评估意见。

2005 年, 达瑞铅锌矿项目获得了印尼的环境许可。但此后项目计划发生了变化。拟建的矿场比最初所申请的规模要大得多。这意味着围阻有毒尾矿将面临更多挑战。据我所知, 印尼环境与林业部已经通知达瑞矿业, 其计划变更需要取得新的环境许可, 但新许可尚未获批。

根据达瑞矿业的最新信息, 我估算“湿”尾矿处置需要库容约 1800 万立方米的地面储存设施。但达瑞矿业矿场所在的地区是世界上地震风险最高的地区之一, 发生大震级地震的风险很高, 而且地震持续时间很可能较长。根据其他地区的经验, 这种持续时间较长的地震对尾矿坝等任何民用构筑物都特别危险。

达瑞矿业矿场所在的地区也是洪灾和山体滑坡灾害多发区。该地区的汇水面积约 10 平方公里, 因此一个 1 平方公里的尾矿库需要应对暴雨时水位上升 5-10 米左右的情况。这意味着要在基本库容之上再增加 500 万立方米的调洪库容。山体滑坡也会对任何尾矿坝设施提出更高的要求。

拟建尾矿坝的选址区域的地质情况也很复杂, 由沉积物和更近期形成的火山凝灰岩构成。这种地质状况对任何尾矿设施都将构成严重问题。

面对这样的环境, 达瑞矿业似乎不愿公布相关信息, 同时监管环境也很薄弱。考虑到这些因素, 再加上地震和洪水风险, 我认为达瑞矿业矿场出现灾难性尾矿坝事故的风险极高。鉴于矿场下游生活着多个社区, 这将对人身安全构成严重威胁, 并带来重大环境危害。

本报告将讨论达瑞铅锌矿矿山废料(尾矿)储存设施的岩土工程安全问题。该矿位于印度尼西亚苏门答腊岛西北部, 地理坐标为北纬 2.78 度, 东经 98.15 度。据我了解, 该项目已于 2020 年初动工。我没有实地到访过该矿场, 此评估是根据新闻发布的消息和源自达瑞矿业矿业公司的信息进行的。在公开信息不足的情况下, 我使用了达瑞矿业过去对矿场条件和采矿作业的估算数据, 研究了卫星图像、已发表的地质报告、土地征用地图、从公司报告以及现场图片得出的初期施工信息, 并基于我本人以往在类似项目的经验, 提出评估意见。

过去二十年里，该矿场的拟建规模发生过多次重大改变。2005 年期间，该项目的计划是开采一个规模相对较小（600 万吨）的高品位、相对易开采的铅锌矿体。随着时间推移，拟建项目的规模已经扩大至 3000 万吨，还纳入了低品位、不易开采的矿石。

关于该矿场所需的大量地表废料处置工程的可行性和安全性的详细信息，似乎尚未公开。这一点很令人惊讶，因为：

1. 大型尾矿储存工程存在重大地震风险已是全球共识 (Cai et al., 2017)；
2. 致力于降低这些风险的新技术并未取得成功。《华尔街日报》最近的一篇文章就指出了这一事实。<sup>1</sup>因此，废料处置问题已成为制约新建和扩建矿场的首要因素。

## 本人资历与项目经验

我从麻省理工学院和帝国理工学院获得工程学学位。毕业后，在泰国东北部热带地区从事过大坝项目的设计和建造工作。上世纪 60 年代末（1965 年埃尔科布雷（El Cobre）尾矿坝因地震发生世人皆知的灾难性溃坝之后），我曾在智利铜矿企业厄尔特尼恩特矿业公司（Sociedad Minera El Teniente）担任水电站和尾矿坝选址顾问。上世纪 70 年代，在洛杉矶地震引发圣费尔南多（San Fernando）水力充填坝溃坝事故之后，我回到加州，与知名工程师托马斯·莱普斯（Thomas Leps）一起评估了多个水力充填采矿坝的抗震安全性。我和我的合作伙伴道格拉斯·汉密尔顿（Douglas Hamilton）还与澳大利亚的工程师一起组建了一家合伙公司，参与了澳大利亚和布干维尔多个尾矿坝的规划工作。随后，我们在斯坦福大学帮助新开设了工程地质学专业，并在那里任教多年，现在仍与布鲁姆地震研究中心（Blume Earthquake Center）保持着联系。

此后，我一直专注于大坝和核电站的抗震安全性问题。我最近参与的项目是对老挝桑片-桑南内（Xe Pain Xe Namnoy）项目 2018 年的溃坝事故进行评估。该项目在地理条件和问题方面与达瑞项目具有很多共同点（不同之处是达瑞还存在很高的地震风险）。在发布了关于桑片-桑南内项目的审评意见后，我应邀提供以下研究报告。

## 项目概况

达瑞矿是一个拟建的地下铅锌矿，位于苏门答腊岛棉兰市（Medan）西南方向的一个山村地区（图 1）。我所能确定的达瑞矿业规划历程如下：

**2003 年：**根据米德尔顿（Middleton）的规划（Middleton, 2003）以及环境影响评价（以下简称“环评”），Anjing Hitam 矿段按年产 100 万吨采矿 600 万吨，其中 1/3 固体将进入地上尾矿处置区。

**2003-2011 年：**继续勘查并确定“可能的”补充矿体。

**2011 年：**修订项目规划，开采规模增加至 2500 至 3000 万吨，年产量 100 万吨，这将需要更大的尾矿区。

---

<sup>1</sup>根据中色股份的公开文件，达瑞矿业(DPM)原为 PT Bumi Resource Minerals TBK (IDX:BRMS)的子公司，拥有达瑞铅锌矿 30 年的矿权许可。该项目包括 Anjing Hitam 矿段和 Lae Jahe 矿段，项目总生产服务年限为 17 年。预计每年采选处理能力 100 万吨（约 3,000 吨/天）。  
[http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2\\_AN201904181320531728\\_1.pdf](http://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN201904181320531728_1.pdf)

近期发布的新闻表明，一个年产 100 万吨、为期 30 年的规划生产项目已于今年即 2020 年启动。该规划项目打算将部分矿浆废渣（约 2000 万立方米）转化为膏体，用于回填和加固地下采矿产生的空腔。其余的尾矿显然会以湿浆的形式永久地储存在地面上是常见做法。有些早期但已过时的资料提出过较低的比例，约为 35%。但无论是哪种情况，都会形成一个巨大的永久性废矿湖。

根据目前的 3000 万吨开采规划，我估算地上废浆储存量大约为 1000 万立方。另外还需要增加库容来储存暴雨水量和滑坡残体（见下文）以及安全超高（储备容量）。考虑到所有这些因素，我估计储存设施的全库容约为 1800 万立方米。如果这一估算正确，就需要建造如图 2 所示的尾矿设施。需要注意的是，这一估值假设膏体回填计划完全成功实施，但目前无论是经济层面（需要数百万吨昂贵的水泥）、技术层面（没有提出成功的膏体制备方案）或安全层面（膏体回填可能增加有毒化学品从废弃矿井泄漏到环境中的可能性），其可行性都还没得到论证。

即使在没有地震的情况下，尾矿坝（包括那些据说采用了更多现代安全措施的尾矿坝）也有很高的事故率（全球每年 2 至 5 座）（下文有对达瑞地震风险的具体讨论）。2014 年加拿大波利山（Mount Polley）尾矿事故就是一个值得注意的例子。考虑到加拿大安全部门的高级别监管，这种事故本不应该发生。事故原因在于矿业公司没有探查到挡水坝的地基中存在一个局部薄弱地带（冰川湖沉积物）。

最近，巴西布鲁马迪纽（Brumadinho）矿区的尾矿坝溃坝事故引起了全世界的关注。一段令人印象深刻的视频<sup>2</sup>记录下了这次自发溃坝事故（非地震引发），从中可以清楚看到破坏扩散的速度之快，波及范围之广。这一由“湿尾矿”沉积物溃决引发的事故造成了 200 多人死亡。需要注意的是，如此风险不会随着时间的推移而消失；即使项目“关闭”很久之后——甚至 100 年后，事故仍然可能发生。



图2 根据笔者估算的尾矿库示意图

<sup>2</sup> [www.youtube.com/watch?v=uI4Lq3Lf\\_yw](http://www.youtube.com/watch?v=uI4Lq3Lf_yw)

除地震外，其他环境条件也威胁着尾矿坝的安全。高降雨量容易让尾矿上方山体发生地面塌陷，造成山体滑坡和泥石流。潮湿气候使尾砂难以干燥，导致尾砂不仅含水量高，而且蓄水量大，这在即便只有一个小溃口的情况下也大大增加了不稳定性和高流动性。正如我对老挝桑片-桑南内大坝（米汉，2019年，图5a）的调查表明，热带条件严重削弱了重型构筑物（甚至是小型围堰构筑物）的地基支撑，还容易形成强大的地下水压，破坏其稳定性。所有这些水文状况在拟建的达瑞矿尾矿区都很突出（见下文对达瑞矿洪水灾害的具体讨论）。

20世纪60年代发生多起世人皆知的尾矿事故以来，人们普遍呼吁撤除这些尾矿设施（参见前文提到的《华尔街日报》2019年12月22日的报道）。采矿业循众要求，已经试图改进流程，但过去数年，全球尾矿设施的安全记录实际上在恶化。出现这一令人惊讶的趋势，原因在于矿业公司开采了品位较低的矿体，从而产生了更多的尾矿。此外，尤其是在矿产价格下跌时期，企业往往孤注一掷，采取极端的降低尾矿处置成本的做法。在许多采矿项目的后期，产权和人员经常发生变动，监督管理也随之减弱。笔者本人曾在这种情况下尝试指导安全措施，以远程摄像头监察代替现场监督，但收效甚微。现场的采矿作业者有很强的动机去尽可能地降低成本，往往会采取不安全的“临时”措施，而这些措施在设施匆匆“关闭”时从未得到纠正。最终的结果常常是，尽管同样的安全隐患仍然存在，实际上往往在未来几年，几十年，甚至几百年里恶化，但涉事公司却并不提供任何维护已“关闭”矿床的保证。最近，尾矿事故评审专家呼吁采取更强有力的法律措施，以落实安全问题的长期责任，包括将责任延伸到公司实体和董事。

达瑞项目的规模从600万吨扩大到3000万吨，将面临与上述类似的情形，在利润最终不断下滑的情况下面对同样的废料处置问题。

#### 当地涉及安全问题的地质条件

拟建尾矿坝区域的地基特征尤为重要。整个项目区的地下岩石（包括各种矿体）大多是非常古老的（石炭纪-二叠纪）岩石、碳质页岩和白云质粉砂岩，这些岩石在苏门答腊岛西岸因板块汇聚发生了断层和褶皱（图3a中的浅绿色部分）。根据米德尔顿2003年的研究，该地层由东西走向的倾斜岩层组成，倾角约为45度，有脆性构造变形造成的断裂。查看各种显示索科米山谷近期（2019年）路堑的图片可以看出，倾斜岩层序列如我的简图（图3a）中所示，向北延伸至山谷两侧的山丘。



图3 总体地质特征与报告的备选尾矿坝处置区简图

大约7万多年前，多巴（Toba）火山爆发，让该地区被热灰流所覆盖，形成熔结凝灰岩，通常被称为多巴凝灰岩（图3a中的浅黄色部分）。根据米德尔顿的研究（显然是基于阿尔迪斯（Aldiss）等人1983年的论文），这些沉积物构成索科米谷底的底部，而尾矿区就拟建于此。

这些沉积物通常被认为经各种形式的胶结（“熔结”）而形成，但据报道，在地表附近往往以轻灰沉积物形式存在。从我见过的图片来看，在一些河滩沉积物中可以发现这种轻灰沉积物。阿尔迪斯等人称，该区域的浅层凝灰岩是火山灰从空中落下成岩，未经熔结，且一般经过河流重塑。这类岩石通常密度低，易受崩解风化，甚至存在熔结、断裂或含水的部分亦是如此。凝灰岩与其下成岩更早的岩层交界处（深度未知）往往透水性高，再加上其蓄水能力，因此形成潜在的不稳定地带。一篇关于 2007 年地震的论文（Gratchev 等人，2011 年）中介绍了这种不稳定性的例子。该地震发生地距达瑞矿址有些距离，但地形类似。2007 年，地震和暴雨叠加引发了该地区凝灰岩层大规模滑坡，导致多个村庄被掩埋，造成大量人员伤亡。

有专家认为（汉密尔顿，口头交流），图 4 中环形脊线内的索科米(q)山谷和邻近的峡谷可能曾是一个古老的火山口。这种地貌通常由熔岩喷发堆积形成的流纹岩所覆盖。这类岩石通常是断裂的和含水的。

在索科米附近被绘制为凝灰岩的区域内，查看河床及其图片可以发现，河床主要由砂卵石冲积层构成，这些冲积物是上游（包括矿体区域）发现的更古老岩石的碎屑随洪水下流而来。

要确定拟建（原计划于 2020 年开工）的尾矿库和挡水坝的地基稳定性，需要开展岩土工程勘察。虽然勘察尚未进行，但在我看来，现有证据几乎可以确定该地基包含诸多上述有问题的地质特征，在地震和强降雨时将存在高度不稳定性。

## 地震风险

该矿位于世界上最活跃的地震带之一，沿苏门答腊岛俯冲带巨型逆冲断层分布，明显靠近一个三板块交界处。这个交界处分别在 2004 年和 2005 年发生了 9 级和 8 级以上的地震（图 3）。这两次地震让远在曼谷的建筑物都发生了晃动，并造成了严重的区域性破坏，包括路堤和桥墩。而尾矿坝在地震中的表现与这些设施类似。强烈的地面震动还破坏了班达亚齐（Banda Aceh）的设施，而班达亚齐与达瑞矿距地震发生地的距离相当。日本调查人员（Sorenson 等人）发现，其破坏程度约高达日本气象厅的 6 级标准。这一破坏烈度（6.0-6.4 级）会造成如下后果：

无法站立；只能爬行……桥梁和道路遭到中度到重度破坏。多层公寓楼部分或全部倒塌。许多墙壁坍塌，或至少严重受损。一些抗震性较差的建筑物会坍塌。即使是抗震能力很强的建筑也会遭到严重破坏。地面可能出现裂缝，并发生山体滑坡。  $a=315 - 400 \text{ cm/s}^2$

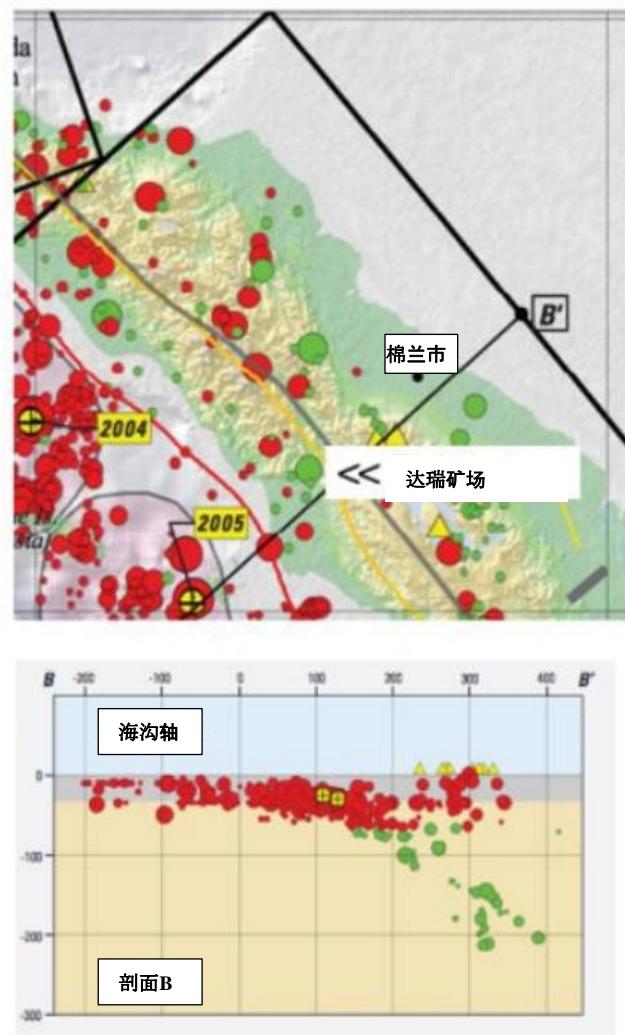


图3 历史上发生的地震 (Hayes et al., 2013)

图3显示历史地震的地图和横截面是从美国地质调查局（USGS）（Hayes et al., 2013）发布的该地区地震情况综述中提取的。这张地图和许多其他出版物提供了关于该区域地震活动的全面信息，足以评估地震风险。

与大多数地震不同，近海巨型逆冲断层区发生的9级地震会产生持续数分钟的强烈地面震动。这种重复的或持续的震动可能会完全摧毁包括大坝在内的构筑物。若地震历时较短，大坝等构筑物可能只会部分崩塌（如圣费尔南多大坝（图6b））。历史记录显示，在过去的两个世纪里，这样的特大地震经常发生，而且在达瑞尾矿设施较长的服务年限里，肯定会再次发生。

虽然近海俯冲带的特大地震对尾矿库等长周期构筑物已经构成威胁，但苏门答腊大断层（Great Sumatra fault）可能发生更危险的地震，而苏门答腊大断层位于达瑞矿场以东仅15公里处。根据彼得森等人（Petersen et al., 2004）和其他人的估算，该断层能够生成震级高达7.5到7.9级的地震，在距离如此之近的情况下，这样震级的地震可能会产生非常高的地震加速度，约达0.5-1g（图5）。

对中国汶川地震中尾矿库事故的研究（参考资料 蔡嗣经等人，图6c）表明，堤坝构筑物（包括尾矿坝）具有聚集并将地震能量向上传导的特性，因此尾矿顶部经受的破坏烈度比底部要高2-3倍。设计一个能够承受这种程度的震动而不发生开裂和位移的尾矿围堰坝体将是极其困难和昂贵的，即使假设山谷具备所有最佳的地基条件，而这一假设在热带火山地形中不太可能成立。

苏门答腊大断层带及其周边地区经常发生6到7级的地震，在采矿阶段肯定也会发生。即使在最好的条件下，即在坚固的岩石地基上建造坚固的干坝，如此强度的地震也会对设施造成一定程度的破坏。如果大坝，尤其是其地基，没有达到这一理想条件（极有可能），破坏将非常严重，可能导致决口。而拟建尾矿库地基很可能是由各种火山灰和上述其他沉积物构成的，无法为大坝提供良好的支撑。



图4 溃口出现时的泥浆下泄路径

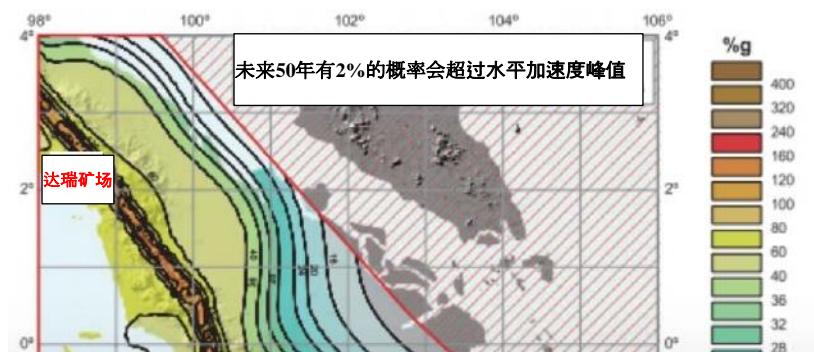


图5 拟建达瑞尾矿坝临近苏门答腊断层，可能发生震级高达7.5-7.9级、加速度高达1g的地震。

值得注意的是，从长远来看，在下个世纪甚至更长的时间里，拟建尾矿坝将多次遭受这些强烈地震的冲击。这将导致尾矿坝结构内部发生位移，损害其内部系统，并随着时间的推移造成渗漏、提高坝中水压力。这种隐患只有用专门的仪器监控设施安全的训练有素的工程师能察觉。即使有专家诊断，受损之处也很难或不可能修复，特别是考虑到主震之后余震还会接连发生（图6d）。

总之，拟建的达瑞矿位于世界上地震风险最高的地区之一。虽然目前尚不清楚达瑞矿业打算如何处置可能产生的尾矿，但我无法得出如此结论：在尾矿库“关闭”后的几十年内，很可能会出现地震引发的尾矿坝溃坝突发事故，形成灾难性的溃口，让泥浆向北下泄。

## 洪水灾害

潮湿气候也给尾矿库带来特殊问题，导致尾矿无法干燥以获得稳定性。尾矿库、地基、以及挡水坝基座渗流会对稳定性构成长期威胁。如果内部排水结构和防渗屏障受到地震等因素破坏，内部侵蚀会随时间推移而恶化。最后，雨季的强降水会增强任何溃口的运动，并因此增加溃决时泥浆下泄的波及距离。

苏门答腊岛西部是世界上雨量最多的地区之一，达瑞矿场一带年降雨量在 3000 至 5000 毫米之间。对当地雨量站数据的分析显示，日降雨量达 300 毫米很常见 (Dosseur, 1985)。达瑞矿场还可能出现高达年降雨量 10% (也即约 500 毫米) 的暴雨，而国际标准规定的重大设施的设计洪水 (有时称为“最大可能洪水”) 可能远远超过这一数值。该地区的汇水面积约 10 平方公里，一个 1 平方公里的尾矿库需要应对暴雨时水位上升 5-10 米左右的情况。这意味着要在基本库容之上再增加 500 万立方米的调洪库容。从该地区的大多数卫星图像中可以看到，暴雨洪水还夹杂多处滑坡造成的泥石流。此外，基岩的热带地质特性会导致严重的地下渗流 (参见桑片-桑南内项目——参考资料 米汉，2018 年)，即使没有地震，也会增加大坝失稳的危险。如果坝体出现任何裂缝或局部溃口，过量的水也会迅速引发溃坝事故。

已知尾矿区周围的山丘中普遍存在活跃的泥石流，但对可能存在的大型半活跃滑坡现象则尚未开展研究。这些滑坡现象也可能存在，并与项目发生不利的相互作用。

## 尾矿库事故的后果

汛期时由于大量雨水涌入库内，湿法尾矿库事故最为危险。挡水构筑物的开裂和滑坡最初表现为如圣费尔南多大坝所出现的局部损毁，如图 6b 所示 (Castro 等人, 2003)。圣费尔南多大坝只经历了几秒钟的强烈晃动，而 7.5 到 9 级的更强地震会产生持续时间更长的震动。在这种震动下，即使是建造得很坚固的大坝也会出现数米的开裂和滑坡。这会使拟建的达瑞尾矿坝坝体出现溃口，让水流和湿尾矿泄漏，(如鲍德温山水库<sup>3</sup> (Baldwin Hills Reservoir) 和巴西布鲁马迪纽尾矿坝事故)。

---

<sup>3</sup> 此视频记录了该过程 <https://www.youtube.com/watch?v=c4sm7DdIMkk>



c. 汶川8级地震中尾矿坝溃坝实图与模拟图

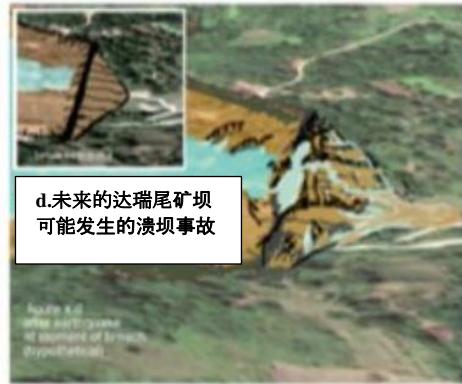
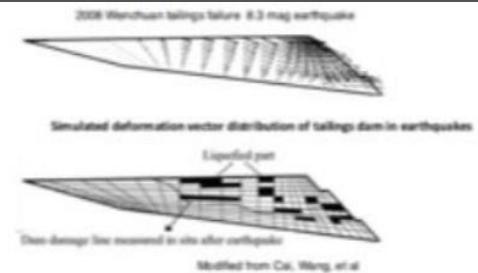


图 6 a. 2008 年老挝桑片-桑南内大坝溃坝；这张照片拍摄后不久，大坝决堤，5 亿立方米的水倾泻 100 公里，淹没了 6 个村庄。虽然没有发生地震，但此坝建在在典型的易渗、不坚实的热带土壤上，且建造质量不过关，因而无法经受住蓄水的考验。b. 加州圣费尔南多大坝在持续时间很短的 6.6 级地震中几近溃坝。若震动再持续几秒，大坝就会溃决，造成大量人员死亡。c. 蔡、王等人对 2008 年汶川地震中某尾矿坝的分析表明，该尾矿坝在 8 级地震中发生溃坝事故。d. 达瑞矿场尾矿坝在强震中的可能表现，地震可能发生在临近矿场的大苏门答腊断层带。

### 监管不足以及无法“关闭”的安全隐患

目前，智利和加拿大等国因长期饱受重大事故重创，已经在尾矿库部署方面制定了更严格的监管措施，以及减少尾矿库数量的政策。加拿大在 2014 年波利山灾难发生后，意识到其所谓的合格监管是不充分的，并呼吁对尾矿设施进行新的限制，尤其对达瑞矿场可能开建的这类“湿堆”尾矿库持谨慎态度。加拿大有责任感的评审人员建议进行政策改革，例如对董事和“合伙人”追责，这些人过去一直设法卸责。印度尼西亚刚刚才开始建立一个掌握大坝安全知识的监管机构（由联合国出资培训），在这方面的经验尚浅。

业界有个说法，一个尾矿处置设施的“寿命”长达 1 万年，而且只要仍然存在重大隐患（达瑞的情况就是如此），就不可能认为是已经“关闭”。

## 有毒化学物质释放到环境中

矿体硫化物含量高，会形成酸，让铅等危险物质溶解。产生酸性含重金属浸出液。中国研究人员最近探讨了铅锌矿这一无法让人接受的问题，呼吁必须加以防范（张等人， 2012 年）。达瑞矿场的地质条件有利于包括铅在内的有毒物质向地下环境大范围转移。

## 缺失的关键数据

达瑞项目的矿山废料处置存在许多技术安全问题，包括与酸性矿井排水、粉尘、滑坡相关的问题，以及本报告讨论的洪水/地震问题。就本评估意见的关注点而言，有几项主要数据缺失。

1. 不同的膏体回填成功率下，需要储存的最大尾矿量（本报告根据年产 100 万吨、为期 30 年的假设估算。如果达瑞矿业提供新的信息，此估算可能需要修改。）
2. 尾矿库选址及设计细节：包括斜坡、材料、防渗和防洪措施等。
3. 尾矿和坝体下方的地基条件。热带地区典型的不坚实且易渗地基可能使任何设计都不安全(图 6a)。
4. 矿山服务年限内及闭库后的长期监控和安全评估方案。

不公开或者提供上述信息应被视为完全不可接受。该矿场已经在高风险地区，如果不仔细审查以上信息，项目安全性的评估完全无法得到保证。



理查德 • L • 米汉

## 参考文献

Cai S, Wang X, Lyu W, Yang P. Liquefying-damage of mine tailings dams in earthquakes. Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings 2017. DOI: 10.36487/acg\_rep/1752\_23\_cai.

Castro G, Poulos SJ, Leathers FD. Re-Examination of Slide of Lower San Fernando Dam. *Journal of Geotechnical Engineering* 1985; 111(9): 1093–1107. DOI: 10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:9(1093).

Dosseur H and Ibiza D. Hydrological Study for Mini Hydros Projects in West Sumatra (Indonesia). *Horizon Pleins Textes* 1985. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers16-07/33800.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-07/33800.pdf)

Gratchev I, Irsyam M, Towhata I, Muin B, Nawir H. Geotechnical Aspects of the Sumatra Earthquake of September 30, 2009, *Indonesia. Soils and Foundations* 2011; 51(2): 333–341. DOI: 10.3208/sandf.51.333.

Hayes, GP, Bernardino M., Dannemann F, Smoczyk, G, Briggs R, Benz HM, Furlong KP, Villaseñor A. Seismicity of the Earth 1900–2012 Sumatra and vicinity: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1083-L, scale 1:6,000,000. *U.S. Geological Survey* 2013. <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/l/>

Lyu Z, Chai J, Xu Z, Qin Y, Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering* 2019; 2019: 1–18. DOI: 10.1155/2019/4159306.

Meehan, RL, Hamilton D. Xe Pian Xe Namnoy: Land stability and dam failure on the Bolaven Plateau, Laos. *The Landslide Blog* 2019. <https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/09/11/xe-pian-xe-namnoy/>

Meehan, RL. New Space Data Offer Instant Clues to Cause of Deadly Laos Dam Disaster. *Stanford Blume Earthquake Engineering Center* 2018. <https://blume.stanford.edu/news/new-space-data-offer-instant-clues-cause-deadly-laos-dam-disaster>

Meehan, RL. Ground Rupture in the Baldwin Hills: Fracking 2012. *Youtube* 2012. <https://www.youtube.com/watch?v=c4sm7DdIMkk> [accessed December 15, 2012] See video minute 1:22 for this failure in progress.

Middleton TW. The Dairi Zinc-Lead Project, North Sumatra, Indonesia: Discovery to Feasibility. *Sydney Minerals Exploration Discussion Group* 2003. <https://www.smedg.org.au/Tiger/DairiZinc.htm>

Petersen MD, Dewey J, Hartzell S, Mueller C, Harmsen S, Frankel AD, et al. Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula. *Tectonophysics* 2004; 390(1–4): 141–158. DOI: 10.1016/j.tecto.2004.03.026.

Hoyle R. “After Deadly Dam Spills, Miners Seek a Better Way—It Isn’t Working Out.” *Wall Street Journal* 2019. <https://www.wsj.com/amp/articles/miners-seek-safer-waste-disposalbut-it-hasnt-been-easy-11577016001>

Sørensen MB, Atakan K, Pulido N. Simulated Strong Ground Motions for the Great M 9.3 Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2007; 97(1A): S139–S151. DOI: 10.1785/0120050608.

Zhang X, Yang L, Li Y, Li H, Wang W, Ye B. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China. *Environmental Monitoring and Assessment* 2012; 184(4): 2261–2273. DOI: 10.1007/s10661-011-2115-6.