四川地震100天之后（照片：李铮（音）/ IFRC）

断裂带的分布

揭示水坝诱发的地震潜藏的危险

科学家除了提出水坝存在的巨大风险外，还越来越确信它们本身也会引发地震。全球范围内，超过六大洲，有100多个可能是水库诱发地震的案例。最严重的可能是2008年5月发生在中国四川的7.9级地震，一些专家认为可能由紫坪铺大坝引起。

什么使水库引发地震？

水库诱发地震(RIS)有两种情况：（1）由于水库增加了重量和（2）由于渗入地下裂缝或沿断裂带渗入地下的水。在第一种情况下，水库注入的数百万吨甚至几十亿吨的水会增加断层的压力而使其断裂。在第二种情况下，水渗入岩石，改变了水库下面或附近的地下微裂纹和裂缝的流体压力。第一种情况下的负荷影响是直接的，而第二种情况下气孔压力的影响是滞后的，因为它需要水在岩石间流动。这种滞后性会在水库首次蓄水几年后才开始引发地震。

虽然在科学界早已公认大型水坝会引发地震，然而自从1960年代到1970年代，RIS成为人们的焦点，此后的讨论却停滞不前。直到2009年的新闻报道将紫坪铺大坝的蓄水和2008年5月四川的灾难性地震联系起来，才使这一话题重新获得公众舆论和科学界的关注。

尽管对特定和全球的RIS事件已有了数年的研究，但至今仍无科学的定论。没有一个模型可以解释所有这些不同的地震案例，或是预测何时何地RIS会发生，尤其鉴于缺少地震资料—或是即便有也难以

得到。然而，地震学家已经对以下观点达成一致共识：

- 水库的水深是RIS的最重要因素。
- 水的体积也是关键的要素。其它因素还包括当地的地质类型，以及该地区历史上的地震压力形态。
- 水库会增加以前极少地质活动区域的地震频率。
- RIS事件通常发生在注水水库10－15公里范围内。
- RIS的影响通常会加速（随着水库的初次蓄水）或滞后（发生在水库的生命周期后期）。极少RIS事件是立即发生在蓄水期。

揭开RIS之谜

尽管还有一些不确定性，地震学家已经大致了解水库对地下岩石的影响，及产生地震风险的可能性。许多研究RIS的人建议采取谨慎原则来避免大灾难。研究RIS的世界顶级专家，美国哥伦比亚大学的拉蒙特－多尔蒂地球观测站的地震学家来昂纳多.西比尔(Leonardo Seeber)最近对紫坪铺评论说，“我的立场是，地震灾害需要进行公开全面的评价，并把结果公之于众。但是，以我的经验，当一个项目在寻求公众支持时，地震的危害往往被弱化或忽视。”下面是一套RIS怀疑者的普遍观点，以及鉴于最近科学研究的答复：

地震和水库之间没有令人信服的相关性。

在一些情况下，例如印度（1967）的柯依纳(Koyna)和中国的新丰江（1962）大坝，认真的研究表明了RIS与大坝之间有很强的因果关系。然而，大多数科学家都承认，水库自身并不能产生足够的能量来引发地震，但许多地区的地壳已经接近崩溃的边缘，水库能够使地震提前数百甚至数千年发生。尽管在工程领域接受RIS的重要性还有阻力，但是象国际大坝委员会（是大坝建设者最重要的行业组织）这样的团体也建议，应该考虑深度超过100米水库的RIS可能性。

如果自然的地震活动性低，RIS的风险也低。

虽然不稳定地区有较大RIS风险，以前地震不活跃的地区也可能经历RIS。一个例子是印度Killari水库，可能引发了6.1级地震，荡平了20个村庄，致10000人死亡。重要的是，不但要对缺乏足够防震准备的地震多发区引起重视，而且对非地震易发区也要重视，那儿往往缺乏任何形式的防震准则。

还没有因RIS而导致灾难性垮塌的大坝，所以其危险性被严重夸大。

柯依纳和新丰江都在RIS事件中接近溃坝，并释放出大量致命的洪水波。尽管大坝可能（或可能不）可以承受RIS的时候，周围的城市和村庄往往不能。Killari和四川地震已经表明，即使大坝没有垮塌，大坝诱发的地震有可能造成数千人死亡。

美国加利福尼亚理工学院的地震学家克拉伦斯.艾伦(Clarence Allen)早在1982年写道，“不幸目前的事态是，我们对水库诱发地震的理解程度是极小的，所以在世界任何地方几乎没有新的水库可宣称没有这一危险。“他认为任何蓄水深度超过80-100米的新大坝，要按附近可能发生6.5级地震的假设来设计。由于这一声明，许多新情况可能证明了他预言的真实性，包括7.9级的四川地震。

> **“我的立场是，地震灾害必须进行公开全面的评价，并把结果公之于众。”**
> **－来昂纳多.西比尔(Leonardo Seeber)，美国哥伦比亚大学的拉蒙特－多尔蒂地球观测站的地震学家**

下一个大地震

世界各地许多已计划或在建的高坝，都建于具重大RIS风险的地区。例如，在地球上地质活动最活跃的地区之一－喜马拉雅，有数百个新大坝正在计划建设中。其它主要的大坝项目的地震热点地区，包括伊朗、土耳其、莫桑比克、巴塔哥尼亚、墨西哥和

水坝诱发的主要地震

卡里巴，2007（Rhys Jones）

中国四川：紫坪铺大坝，2008年，7.9级

2008年5月的四川大地震，估计死亡80000人，撕开近300公里的断层，并损坏多达2380座水坝，其中包括156米高的紫坪铺大坝。紫坪铺2004年注水重量为315万吨。根据哥伦比亚大学拉蒙特－多尔蒂(Lamont －Doherty)地球观测站的克里斯汀。克鲁兹(Christian Klose)的说法，水库增加的重量削弱了断层，并增加了断层破裂的压力，结果板块构造运动提高了一年承载的天然应力25倍。

四川地矿局的总工程师范晓曾在紫坪铺大坝完工前警告过其地震风险。地震后他说，“我们不能排除建设紫坪铺大坝引发地震的可能性，因为震中离坝如此之近。” 另外，水库诱发地震最大的危险是，地震一周前紫铺大坝水位快速上升。鉴于大坝和地震之间的密切联系，范晓说：“主要的教训就是，在建造这些大工程之前，我们需要更多考虑其科学性，而不能仅仅关心能发多少电，能蓄多少水或者是经济上的利益。”

印度柯依纳(Koyna)：瓦尔纳(Warna)水库，1967年，6.3级

四川地震之前，有强有力的证据表明水库引发的地震中，最大和最具破坏性的是 1967年在印度的Koynanagar 。这个6.3级的地震造成约180人死亡， 1500多人受伤。1962年蓄水后，在库区记录到约35000次地 震。就像紫坪铺和奥罗维尔水坝， 在柯依纳(Koyna)首次注水时没有发生大地震，而是数年后快速的季节性注水后。103米的大坝和厂房受到地震严重破坏。

赞比亚/津巴布韦卡里巴(Kariba)：卡里巴(Kariba)大坝，1963年 6.2级

128米高的卡里巴(Kariba)大坝是非洲最大的大坝之一，由赞比西河管理局代表津巴布韦和赞比亚营运。它从建设伊始，一直因安全问题而备受关注，包括RIS。水库位于裂谷(Rift Valley)南端的地震活跃区。卡里巴(Kariba)水库的总体积为180亿吨。在20世纪60年代注水时是当时世界上最大的水库，随之而来的是相当大的地震活动发生在该水库注水的那一年，5级以上的地震有20次，1次是6.2级。

美国奥罗维尔(Oroville)：奥罗维尔(Oroville)大坝，1975年，5.7级

奥罗维尔(Oroville)地震可能是世界上RIS系列研究最具代表性的案例。奥罗维尔(Oroville)是美国最高的土石坝，上世纪50年代建在活跃断层带上。在1970年代，该地区经历了一系列不寻常的地震，其中最大的一次（5.7级）发生于1975年在水库12公里以南地区。大坝蓄水4,364立方公里，建在以前认为非活跃的断层上。地震前，水库水位下降到注水以来的最低水平。美国地质调查局（USGS）随后发现了地震和水库注水之间的紧密联系。

全球主要的RIS事件

地区	水坝名称	国家	大坝高度(m)	蓄水年份	最大的地震年份	震级
亚洲/太平洋						
	柯依纳(Koyna)	印度	103	1962	1967	6.3
	新丰江	中国	105	1959	1962	6.1
	Killari	印度	75	1991	1993	6.1
	Srinagarind	泰国	140	1977	1983	5.9
	恰尔瓦克(Charvak)	乌兹别克斯坦	148	1971	1977	5.3
	努列克(Nurek)	塔吉克斯坦	317	1963	1972	4.6
	卡伦三级(Karun III)	伊朗	205	2005	2006	4.3
非洲						
	卡里巴(Kariba)	赞比亚/津巴布韦	128	1958	1963	6.2
	阿斯旺(Aswan)	埃及	111	1964	1981	5.6
	阿科松博(Akosombo)	加纳	134	1964	1964	4.7
北美洲						
	奥罗维尔(Oroville)	美国	236	1967	1975	5.7
	胡佛(Hoover)	美国	221	1935	1939	5.0
	曼尼古根三级(Manicouagan 3)	加拿大	108	1975	1975	4.1
南美洲						
	波尔图哥伦比亚/沃尔塔格兰德(Porto Colombia/Volta Grande)	巴西	40 / 56	1973-74	1974	4.2
	卡皮瓦拉(Capivara)	巴西	59	1976	1976	3.7
	Carmo do Cajura	巴西	22	1954	1972	3.7
欧洲						
	克瑞马斯塔(Kremasta)	希腊	160	1965	1966	6.2
	蒙台纳尔(Monteynard)	法国	155	1962	1963	4.9
	卡内列斯(Canelles)	西班牙	150	1960	1962	4.7

中美洲。在中国西南，尽管紫坪铺大坝的水库活动和随后的地震有密切联系，在地震带以西和西北的地震活跃地区，新的大坝仍不断建设。四川地震后，62位地质、水资源管理和环境保护专家向中国政府呼吁，暂缓批准中国西南地质不稳定地区的新大坝项目，并评估该地区的RIS风险。

增加知识和提高安全措施

目前，RIS是一个被忽视且缺乏资金研究的领域。然而，鉴于其潜在的灾难性后果，各国政府必须加大支持力度，监测全球的大坝站点。在预防原则下，开发商有责任承认水坝建设增加地震的可能性。任何水坝开工之前，开发商和政府必须进行公开透明的RIS分析，包括检查与拟建水坝地点有相似地质环境的其它地区历史上的RIS。作为水坝设计过程组成部分的地震灾害评估，必须包括RIS的概率，并确认RIS将会提高当地地震灾害风险数倍。

凡已获批准建设的水坝，建设者应该在蓄水时监测地震活动，一旦发生RIS，就改变或扭转注水程序，以及建立孔隙水压力和地下力学的变化模型，以理解RIS发生的原因。在整个大坝建设过程，必须对利益相关者充分披露RIS信息，以便谈判可以在充分知情的基础上进行。