评估因电力市场优化设计而导致的负荷损失价值

可靠的缺供电价值（VoLL）估算——即表达消费者为避免供电中断所附加的货币价值——对于高效电力市场设计和解决所谓的“资金缺口问题”至关重要。 然而，严谨的VoLL研究对于大多数发展中国家仍难以企及。基于对47个国家56项研究的534个缺供电成本估算进行的元分析（Jin 2025），本篇《Live Wire》提出了一种可复制的效益转移工具，可为96个国家提供特定情境下的VoLL估算。该工具仅需人均GDP、电价和总电力消费作为输入，支持住宅和非住宅部门的基于价值的可靠性规划。

为什么量化停运成本对发展和电力系统规划至关重要？

停电给家庭、企业和公共服务带来沉重的经济负担。 消费者避免停电的重视程度是世界银行在规划模式中用于与客户国合作的核心输入之一。

量化停电带来的经济负担对于设计兼顾效率和可靠性的电力市场至关重要。 该行UPBEAT数据集涵盖64个发展中国家数据显示，人均GDP与电力中断的频率和持续时间之间存在明确的负相关关系（见图1）。这种相关性在输电方面尤为突出。

服务行业，其可靠性提升与经济增长密切相关。 虽然配送可靠性也与收入呈负相关，但其更大的波动性表明，除收入水平外，公用事业管理和网络状况也发挥着重要作用。

对企业造成的财务影响是巨大的。 根据世界银行的企业调查，全球有26.6%的公司至少经历过一次停电，且不可靠的电力供应主要集中在低收入地区（Solis Sosa 2025）。每月停电20至30小时会导致企业平均损失年销售额的5.3%。电力不可靠还会迫使企业调整生产流程、减少运营时间或投资昂贵的备用系统，从而削弱其竞争力和就业创造能力。例如，印度的电力短缺使制造企业的收入至少减少了5%。在加纳，中小规模企业的劳动生产率...

公开披露授权



新信刘是世行基础设施首席经济学家办公室的一名数据科学家和经济学家。

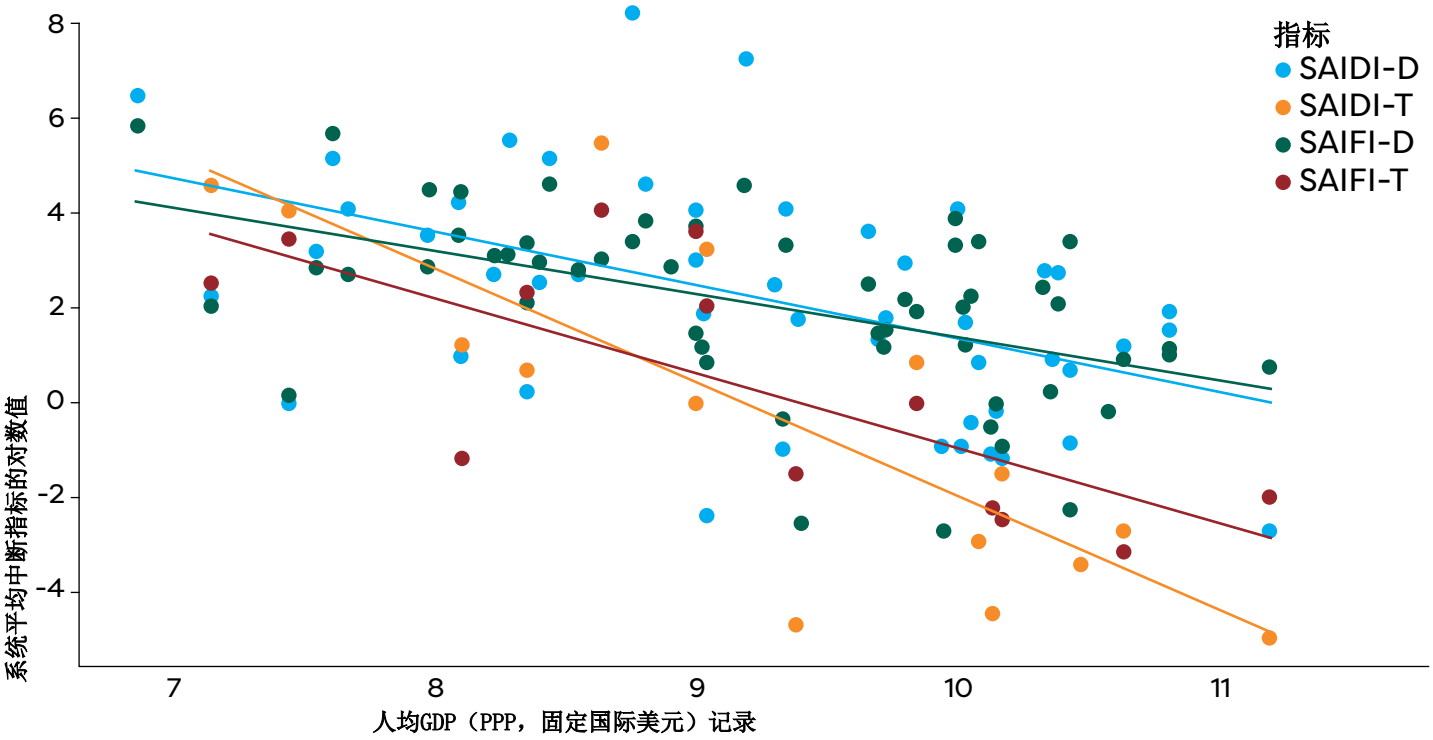


她是世界银行Jevgenijs Steinbuks能源全球部门的资深经济学家。

THE WORLD BANK
IBRD • IDA

图1. 随着收入的提高，电力系统可靠性得到提升

系统平均频率中断时间（SAIFI）和平均中断持续时间（SAIDI）与人均国内生产总值（PPP）



注意：数据来自UPBEAT，使用每个国家的最新可用年份。 SAIDI（系统平均中断持续时间指数）衡量每位客户每年的平均总中断持续时间；SAIFI（系统平均中断频率指数）衡量每位客户每年的平均中断次数。“T”表示输电服务，“D”表示配电服务。横轴显示人均GDP（PPP）的对数。

如果消除了服务中断，制造业可能增加10%。 公司通常采用柴油发电机进行自发电，这需要大量的前期投资，并且运营成本很高。

量化这些影响的标准指标是损失负荷价值（VoLL），它反映了消费者为避免供应中断所愿意支付的货币价值。 作为未供电的单位成本，VoLL是解决“资金缺口问题”并推动发电和输电基础设施高效投资的关键指标。

这些原则并非抽象的。 VoLL 是用于最低成本能力扩展和调度模型的工作输入。

支撑全球电力系统规划。 此类模型通过最小化在给定规划期内总系统成本净现值，选择最优技术组合、投资时间表和跨境互联策略。满足需求不必不惜一切代价：未供电能源是规划模型的一个决策变量。每兆瓦时的负荷都根据VoLL被视为一项成本，该成本被纳入目标函数以最小化总系统成本。世界银行的开放源电力规划模型是此类工具之一，被客户国家的能源部和公用事业部门使用；在该模型中，总系统成本涵盖成本范围（资本、固定和可变运营、储备和交易成本），加上未供应能源的放弃价值（即VoLL）（世界银行，2018年；ESMAP，2026年）。

电力市场中资金缺失的问题，是指发电企业通过销售电力所获得的收入不足以覆盖其全部成本，包括固定成本以及为可靠满足需求而维持足够产能所产生的成本。

VoLL 是电力系统规划中仲裁核心权衡的参数：应在发电、输电、储能和备用方面投资多少，以及可以容忍多少的负荷削减。

因此，VoLL 是电力系统规划中仲裁核心权衡的参数：应在发电、输电、储能和备用上投资多少，以及容忍多少负荷削减。 在成本最小化框架下，当供应的边际成本等于未服务能源的避免成本（以VoLL估值）时，容量便增加到该点。该参数同样 governs 电力稀缺时段的影子价格；峰值电厂、电池和互联线的经济性；并通过分配给未满足备用的成本，体现了规划所蕴含的有效可靠性标准。一个有充分依据的VoLL，能将可靠性从指定的工程标准（例如固定的储备边际或确定性冗余规则）转化为一个经济选择，该选择反映了中断对消费者实际造成的成本。

然而，在实践中，特定国家的VoLL估算却很少可用，规划团队往往不得不简单假设一个数值：一个方便的整数值、从一个高收入体系研究中未经批判地转移过来的数字，或是在先前合作中使用的数值。其后果并非无害。如果假设的VoLL过高，模型会对系统进行过度配置：它过度建设容量和储备，导致投资计划膨胀，最终反映为电价或财政转移。如果过低，模型将削峰填谷视为廉价，允许投资不足，其成本最终会以柴油自发自用形式出现在消费者账单上，而柴油每千瓦时的成本通常远高于电网供电。在两种情况下，最终形成的计划仅在建设成本上才是“最低成本”，这取决于一个任意参数，并且模型结果对该参数高度敏感，恰恰是在最关键的驱动峰值和储能容量投资的缺电时段。不同研究间VoLL假设的不一致也削弱了各国在提高可靠性投资方面的成本效益分析的横向和纵向可比性。

时间。 本简报提出了一种效益转移框架，为规划者提供了一种可辩护、可复制的替代方案，以应对此类临时性假设。

如何才能在各种不同情境下稳健地估计VoLL？

通过元分析和效益转移技术，可以系统地从全球数据库中推导出针对特定环境的VoLL估计，并考虑不同的经济状况和方法论。

尽管其适用范围广泛，VoLL估算仍然成本高昂且方法复杂，对于数据有限、难以建立全面的VoLL数据库的许多国家而言并不可行。 本简报所依据的研究（Jin 2025）通过结合元分析与效益转移的实证基础框架来应对这些挑战。该研究汇编了一个全面数据库，其中包含来自56项研究、覆盖47个国家的534项停电成本估算。该数据库纳入了多种估算方法和背景变量，构成了一个元回归模型的基础，该模型旨在识别停电成本如何系统地随着宏观经济状况、估算方法、部门差异和停电特征的变化而变化。

VoLL估计方法通常分为三类，每类适用于不同的领域和数据可用程度。

3. 问卷调查衡量消费者支付费用以避免停电的意愿，或接受相应赔偿的意愿。此方法在住宅领域尤其常见。

通过对失去负荷造成的潜在生产损失进行评估，并评估劳动、资本、中间产品和电力消耗等投入相关的部门增加值，对3 VoLL在工业和生产功能以及商业部门进行了估算。

3 主要用于住宅领域，该休闲成本方法基于时间分配理论估算因停电造成的效用损失，并替代了休闲损失的价值。

2. 转移效益是一种经济分析方法，通过借鉴在其他情境下进行的研究所获得的估算值，来估算某一特定情境下某项商品或服务的价值。

用于本次分析的元回归模型（金2025年模型5）为：

$$\ln VoLL = -10.784 - 0.983 \times Sector + 0.585 \times Method1 + 1.602 \times Method2 + 0.640 \times \ln GDP - 0.339 \times \ln POP + 0.435 \times \ln EP - 0.385 \times \ln TEL$$

该模型揭示了VoLL的几个关键驱动因素。

3 VoLL评估结果与收入水平密切相关。 这体现在对数GDP系数为正，而对数人口系数为负，且两者均具有统计学意义。人均经济产出越高，感知到的停机成本就越高。

3 电价与VoLL呈正相关且关联显著。 电价每增长1%，VoLL大约增长0.435%。较高电价可能源于电网可靠性的投资和提高的质量标准，这使电力依赖型产业受益不成比例；在这些产业中，停电的机会成本远高于那些不严重依赖电力的产业。

3 估计方法的选择对VoLL值有显著影响。 对于非住宅部门，生产函数方法往往得出更高的数值；而对于住宅部门，休闲成本方法通常产生更高的估计值。陈述偏好方法往往比其他方法得出的数值更低。3 住宅部门的VoLL值在统计上比非住宅部门低，大约低0.983个对数值。

值得注意的是，在元回归分析中发现，像SAIDI和SAIFI这样的常用电网可靠性指标不具有统计学上的显著性。 这些指标应被视为电力市场设计的输出结果，受VoLL影响，而非其决定因素。停电的提前公告未显示出与VoLL具有统计学上的显著关联。

综上所述，VoLL的估算结果与收入水平、电价和估算方法密切相关，而常用的电网可靠性指标（如SAIDI和SAIFI）在统计上则不显著。

缺乏关于VoLL的直接证据的发展中国家有哪些实际应用？

元分析方法为发展中国家提供了具有特定背景的VoLL估计，且数据需求量极低。

此方法的最大优势在于其对输入数据的需求较低，使其在数据匮乏的环境中极具实用性。 所有所需输入均可从公开可访问的来源获取（见表1）。

使用上述框架，对非住宅部门的92个国家和住宅部门的66个国家计算了VoLL。 平均而言，基于生产函数方法计算的非住宅VoLL估计为每千瓦时4.38美元，反映了因负荷损失造成的生产损失。采用休闲成本方法计算的住宅VoLL平均为每千瓦时4.06美元。如前所述，陈述偏好方法通常会给住宅部门带来较低的VoLL估计。

国家财富与VoLL之间存在明显的正相关关系（见图2）。 低收入和低收入中等收入国家的VoLL主要分布在每千瓦时2至4美元之间，低收入国家的住宅VoLL明显较低。中等收入国家估计值在每千瓦时2至5美元之间，而高收入国家显示出最高的总体估值，主要集中在每千瓦时5至7美元之间。VoLL估计值的多样性和差异性也随着国家收入的提高而增加。

表1. 应用效益转移工具的数据需求

输入	Unit	来源
GDP	2015 US$, billions	世界银行开放数据
人口	数百万	世界银行开放数据
电价（住宅和）commercial)	2015 US$/MWh	全球油价网电力价格
总电量消耗	ktoe	国际能源署世界能源统计数据和余额；countryeconomy.com电力消耗数据

兆瓦时； 千吨油当量（1千吨油当量≈11.63吉瓦时）

区域上（见图3），拉丁美洲和加勒比地区的中间VoLL最高，范围在每千瓦时4. 50至5. 00美元之间。撒哈拉以南非洲、中东、北非、阿富汗和巴基斯坦的分布情况相似，其中间VoLL通常在3至...美元之间。

每千瓦时5美元。 南亚地区的中位数VoLL明显较低，尤其是对于住宅客户，约为每千瓦时2美元。东亚和大平洋地区的样本仅限于越南，导致该地区的VoLL分布范围狭窄且数值较低。

图2. 按收入群体划分的VoLL（美元/千瓦时）

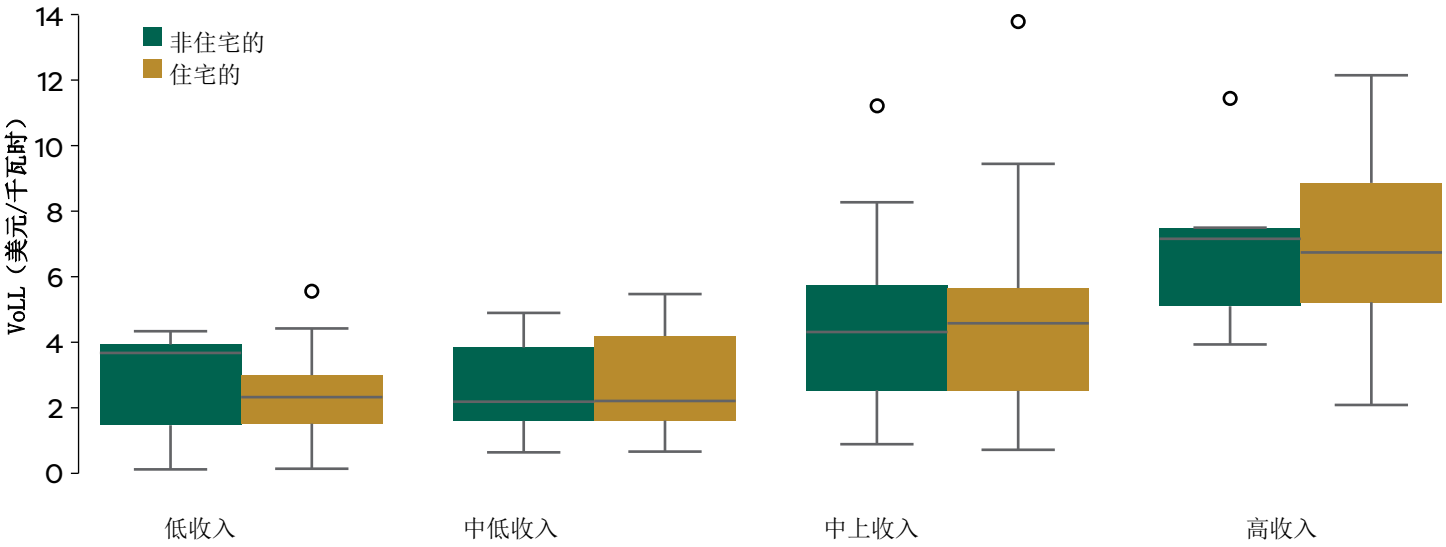
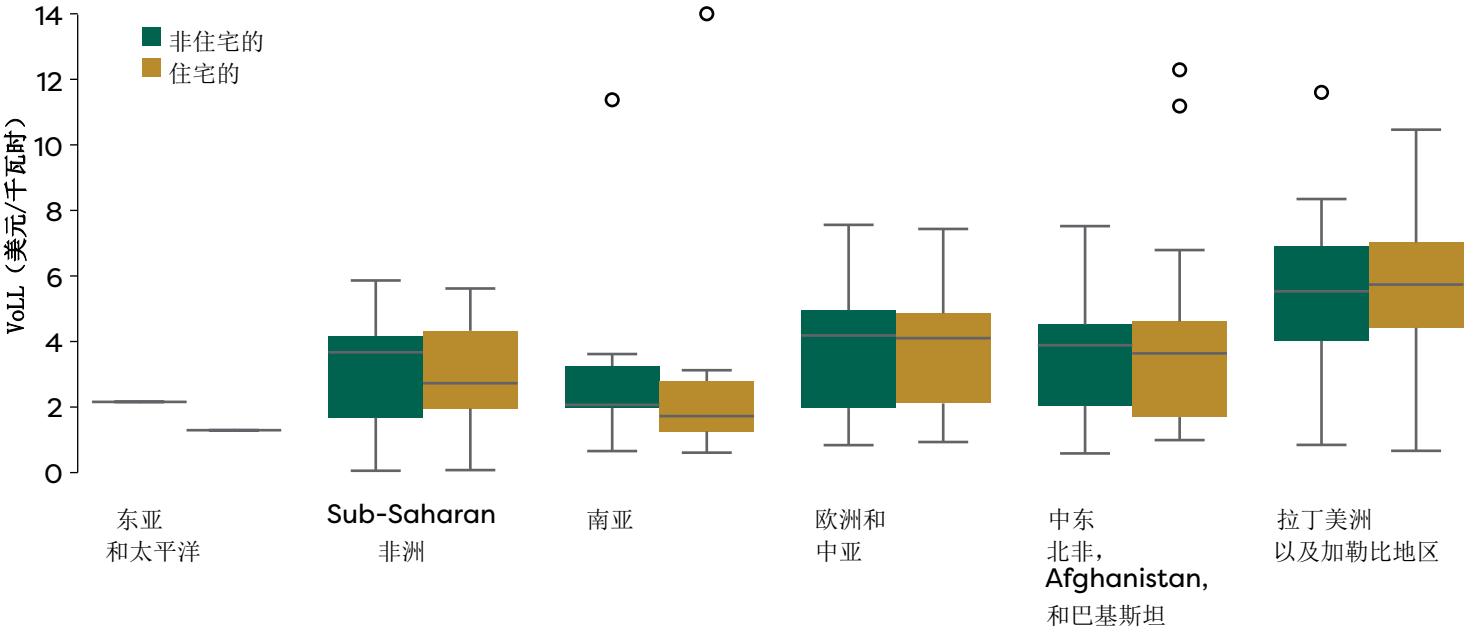


图3. 各地区的VoLL（美元/千瓦时）



来源：金（2025）和作者计算。 注：东亚和大洋洲地区唯一进行过调查的国家是越南。

政策制定者和系统规划者应把握的关键要点是什么？

采用通过元分析得出的、稳健且具有情境适应性的VoLL方法，对于构建经济高效且可靠的电力系统至关重要。

未来，在碳中和电力市场中，VoLL 将变得愈发关键，尤其是在可变可再生能源和分布式能源资源日益整合的背景下。 对于政策制定者和系统规划者而言，有两个见解至关重要。

3 选择合适的方法论至关重要。 在应用利益转移时，选择适当的方法论并考虑部门差异是关键，因为VoLL的估计值会因所使用的方法而有很大差异。

3 政策制定者应优先关注经济驱动力，将收入水平和电价视为VoLL的基本驱动因素，而非仅仅依赖电网可靠性指标（如SAIDI和SAIFI）。 这些指标应被更好地理解为电力市场设计的输出结果，并受到VoLL的影响，而非决定因素。

当采用VoLL假设而非估计时，所得方案仅从构建角度上是“成本最低”； 过高值会使系统过度设计，过低值则会造成投资不足。

虽然元分析方法增强了可推广性，但效益转移本质上是一种近似。 当地市场条件、消费者偏好和监管环境可能存在差异，在解释和应用结果时应考虑这些因素。未来研究可以纳入更细粒度的本地数据，探索停电特征、经济变量和政策设计之间的交互效应，并解决VoLL与经济指标之间潜在的逆向因果关系问题。不同国家在停电的文化认知、监管框架和方法实践方面的差异，也可能引入模型未能完全捕捉的异质性。

作者感谢Debabrata Chattopadhyay和Lamin Njie提供的有益评论和建议。

参考文献

能源部门管理援助计划 (ESMAP)。 2026年。“能源规划模型(EPM)：电力规划模型文档。”世界银行，华盛顿特区。https://esmap-world-bank-group.github.io/EPM/。

金泰泳. 2025. “基于价值的可靠性规划中的停机成本元分析.” 能源战略评论 62: 101975.

索利斯·索萨，B. *O.H. 2025. 应对电力不可靠：面临停电挑战的企业困境与策略。政策指标简报。华盛顿特区：世界银行集团。http://documents.worldbank.org/curated/en/099859206252515733.*

世界银行。 2018。“世界银行电力规划模型（EPM）：数学公式化。” 世界银行，华盛顿特区。

建立更多联系

活线 2015/38。 “将可变可再生能源整合到电力系统运行中”，作者为德巴达特·查托帕迪亚伊和托马斯·尼科拉卡基斯。

活线 2015/43. “将气候模型数据整合到电力系统规划中”，作者为德巴特拉·查特帕德亚伊和罗娜·L·乔丹。

活线 2025/146. “衡量电力部门的气候韧性：协调而非同质化”，作者：李诗韵。

活线 2026/149。 “将韧性融入电网：输电系统的韧性指标与标准”，作者：李诗韵 (Selena Jihyun Lee) 和 卡尔马卡尔 (Ipshita Karmakar)。

连接到

livewire

世界银行集团能源与矿产全球实践部门发起的在线知识笔记《活线》系列，提供了世界银行集团在项目和分析工作中取得的丰富见解。

每天，银行集团专家们运用他们的知识和专长，为客户国的实际问题提供解决方案。 快讯（Live Wire）捕捉了实地调研中获得的丰富见解，使作者能够与其他从业者、政策制定者和规划者分享他们的发现。

你不应该连接到Live Wire吗？

自2014年以来，该系列中的140多项简报涵盖了能源需求与供应、可再生能源、能源效率、能源政策、经济增长、环境保护、气候变化减缓、电力系统、城乡发展、能源获取、基础设施经济、私营部门参与、融资获取以及监管等关键议题。

- ✓ 提供关于关键能源问题的技术知识。主题简介
- ✓ 从私营部门参与中汲取经验教训，以突出实施过程中的启示，通常通过案例研究进行。
- ✓ 提供关于关键能源数据和全球趋势发展的分析概述。
- ✓ 描绘银行集团在能源和采掘行业的活动。银行的观点

其格式易于理解、严谨且简洁，便于分享。 每份简报的8至16页内容充分利用了图形元素。简报由世界银行集团内经验丰富的从业者进行同行评审，并由专业人士进行编辑和制作。虽然其主要传播渠道是线上，但针对特定客户需求，Live Wires也提供可打印的文件。

“Live Wire”是为世界银行集团的内部及外部从业者、政策制定者和规划者设计的。 它是一个与客户、同事和合作伙伴共享的资源。

《Live Wire》简报专为屏幕阅读、彩色或黑白下载及自印而设计。

世界银行集团employees:
printing can be done on a customized basis for meetings and events by contacting CGCSSV Customer Service Center at 202-473-1010 or sending a written request to cgcssv@worldbank.org

Printing & Multimedia Services
General Services

请访问世界银行集团的开放知识库，浏览“即时快讯”（Live Wire）系列并下载您感兴趣的问题：https://hdl.handle.net/10986/17135

OPEN KNOWLEDGE REPOSITORY

连接到

livewire

世界银行集团员工邀请函

你有话要说吗？在“即时快讯”上说出来！

新兴经济体能源和矿产开发一线工作者拥有丰富的技术知识和案例经验可以与同事分享，但他们可能没有时间将其写成文章发表。

Live Wire 为有志作者提供支持体系，使其分享知识更加容易：

能源与矿产全球业务部的3名员工可协助运营人员撰写《即时报道》文章。 3份用户友好型指南帮助作者使其贡献符合《即时报道》受众的期待。

自2014年以来，能源与矿产全球业务部已通过300多名员工作者的名义发布了140多份《即时简报》。 这些《即时简报》从世界银行的开放知识库下载了数千次，并以印刷形式在无数次会议和活动中传播。

《现场精英》旨在提升那些拥有实践知识、无论身处何地都乐于分享的运营人员的知名度。

成为 Live Wire 作者，通过分享您的见解和经验为他人树立良好“知识公民”的榜样，从而促进您的实践与职业发展。

如果你没有时间参与《活线》的贡献，但有关于我们应该探讨的主题或案例的想法，请告诉我们！我们欢迎通过以下任何渠道提出你的想法：

3 通过您活跃参与的实践社区
3 通过参加能源与矿产全球实践组的年度“生命线”系列评审会议

3 通过直接联系Live Wire团队（联系Sara Sultan，ssultan1@worldbankgroup.org）

OPEN KNOWLEDGE REPOSITORY