



中国地质调查局地学文献中心·中国地质图书馆

# 国外地学文献速递

Express Delivery of Foreign Geological Literature

地热能专辑 (2022年第4期)



地热能是一种绿色低碳、可循环利用的可再生能源，具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点，是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源。我国地热资源丰富，市场潜力巨大，发展前景广阔。加快开发利用地热能对调整我国能源结构、节能减排、改善环境具有十分重要的意义。

国外地学文献速递（地热能专辑）是中国地质调查局地学文献中心为切实服务地质调查中心工作而推出的《国外地学文献速递》系列专辑之一。通过对国外主要文献数据库中涉及地热能勘查开发的最新文献进行筛选、摘要编译形成专辑。

本期专辑收录了来自于 Elsevier、SpringerLink 等期刊文献 10 篇，内容涵盖了地热资源概率性评价、地热田地应力估计、人工智能在地热勘探中的应用、地热田三维地球物理勘探等。



# 目 录

利用三维地质和热模型评价英格兰北部干热岩的区域地热资源 .....	1
利用实验设计和响应面法概率性地对地热资源进行评价：莱特地热生产田 .....	2
巴西 EGS 地热资源综合评价与预测填图.....	3
墨西哥 MESILLAS 地热区地球化学勘探 .....	4
基于钻孔观测的 LOS HUMEROS 地热田地应力状态估计 .....	5
印度哥达瓦里河谷 MANUGURU 地热田的地热潜力 .....	6
利用温度-深度关系评价希腊北部 ARISTINO-TRAIANOUPOLIS 地区断层控制热液系统的地热资源 .....	7
用于地热勘探的地热人工智能 .....	8
浅层地热地球物理勘探应用：ARTÀ（西班牙巴利阿里群岛）案例研究 .....	9
LARDERELLO 地热田的三维深部地电勘探（意大利） .....	10



获取更多地学文献信息，请关注“中国地质图书馆公众号”

本刊由“地学文献信息采集与智能化服务”项目支持

专辑主编：贾凌霄

联系电话：(010)66554703

审 核：陈 晶

电子信箱：476015552@qq.com

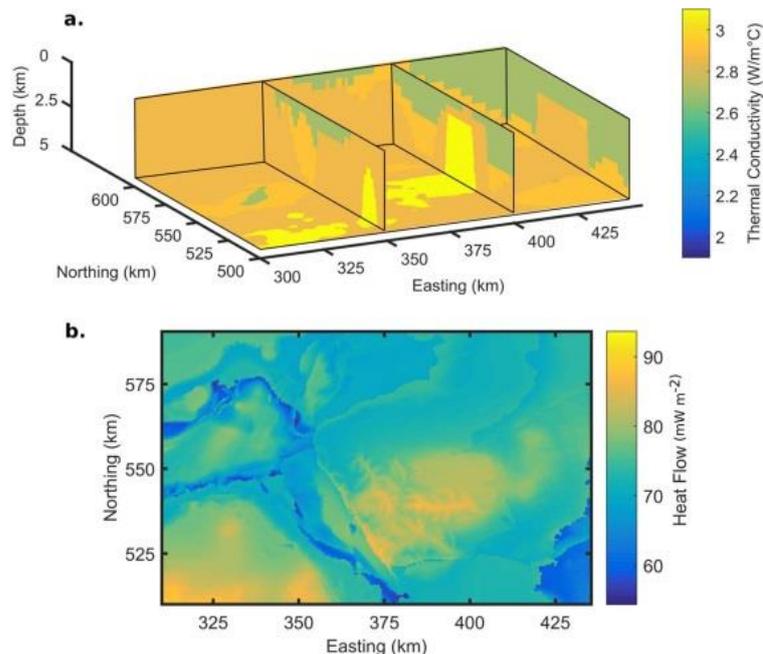


# 利用三维地质和热模型评价英格兰北部干热岩的区域地热资源

Regional geothermal resource assessment of hot dry rocks in Northern England using 3D geological and thermal models

## ■ 摘要译文

本研究评估了英格兰北部干热岩的地热潜力，特别关注北奔宁山脉和湖泊地区（Lake District）岩基。使用考虑地下三维地质和热模型的自适应体积法估算了地下热量。使用确定性方法，现场总热量计算为 2639.9 EJ，可回收热量计算为 52.8 EJ。当仅考虑可用于发电的热量时，现场热量计算为 1856.1 EJ，可回收热量为 37.1 EJ。概率方法也用于求出不确定性，但提供了与上述确定性平均值相似的 P50 值。P90 - P50 - P10 估算值确定了现场总热量的不确定性范围，该估算值对应于 2572 EJ - 3104 EJ - 3637 EJ。英格兰北部的地热资源有限，这项研究结果为英格兰北部成功开发干热岩的前景提供了鼓励。



(a) 示例 3D 地质模型强调了不同的地质单元和热导率（黄色对应岩基，注意地形表面未显示），以及 (b) 地表下岩石上部 2km 的热流

## ■ 作者信息

**Christopher S. Brown**

James Watt School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK

本文发表于: Geothermics

2022 第 105 卷 102503

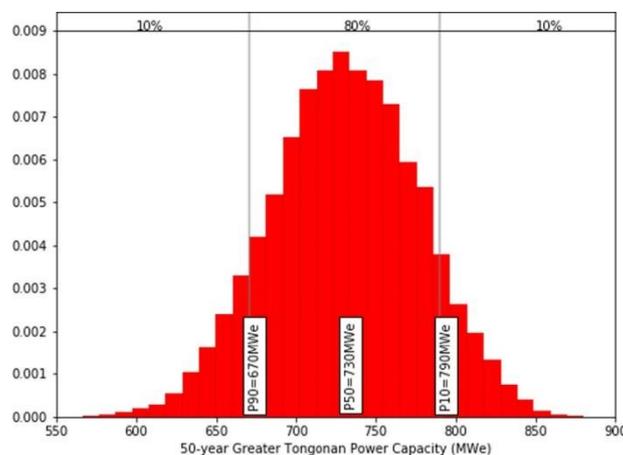
全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102503>

## 利用实验设计和响应面法概率性地对地热资源进行评价：莱特地热生产田

Probabilistic geothermal resource assessment using experimental design and response surface methodology: The Leyte geothermal production field

### ■ 摘要译文

以更高的精度估算发电潜力(MWe)仍然是地热行业面临的一个必要性和挑战。储层模型可以概率地预测 MWe 容量,用于资源管理和决策使用,但该过程仍很难实施。这项工作涉及将实验设计(ED)和响应面法(RSM)框架应用于校准的自然状态储层模型,以概率预测 MWe,量化预测中的不确定性,并识别关键驱动因素。本研究选择了六个不确定参数,并采用 Plackett-Burman 设计构建了十二个版本的莱特储层模型,用于不确定性量化。这些不确定参数包括 x、y 和 z 方向的渗透率、孔隙度、回注焓(RI焓)和回注分数(%RI)。结果表明,除 RI焓外,所有这些参数都是 MWe 的重要预测因子,莱特地热生产田(LGPF)的指示容量为 670 MWe (P90)、730 MWe (P50) 和 790 MWe (P10) (如果运行 50 年)。



对发电潜力回归模型进行蒙特卡罗模拟,计算莱特地热田 50 年可持续期的概率发电潜力分布

### ■ 作者信息

Anthony E. Ciriaco<sup>a,\*</sup>, Marie Hazel Uribe<sup>b</sup>, Sadiq J. Zarrouk<sup>a</sup> 等

<sup>a</sup> Department of Engineering Science, University of Auckland, Private Bag 92019, Auckland 1142, New Zealand

<sup>b</sup> Energy Development Corporation, Ortigas Center, Pasig, Philippines

本文发表于: Geothermics

2022 第 103 卷 102426

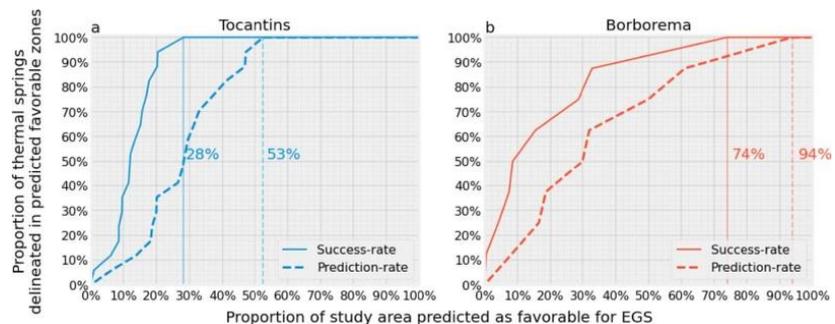
全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102426>

## 巴西 EGS 地热资源综合评价与预测填图

Integrated assessment and prospectivity mapping of geothermal resources for EGS in Brazil

### ■ 摘要译文

巴西的地热资源研究主要由国家观测台进行。根据研究结果，巴西大片地区的地表热流超过  $60 \text{ mW/m}^2$ ，深度在 3~6 km 之间的温度超过  $100^\circ\text{C}$ 。这些地区的热源性质和散热方式基本未知。与这些区域可能相关的地热资源可存在于热沉积含水层 (HSA) 和热干岩 (HDR) 单元中，它们分别位于克拉通内的沉积盆地和高热产花岗岩 (HHPG) 中。我们的研究重点是在 HHPG 中寻找高焓 (高于  $150^\circ\text{C}$ ) 的资源，无论其水文性质 (孔隙度、渗透性) 如何，这些资源都可以被视为增强地热系统 (EGS) 的潜在目标。托坎廷斯和博尔博雷马的地质构造区被选为试点地区，这是基于 HDR 的指示和丰富的开放获取地理参考信息。在 GIS 下汇编和处理了一个综合数据库，其中包括地质、断层、土壤类型学、辐射热、热流和来自井的地热梯度、温泉位置、航空伽马射线光谱和磁力测量、地面重力测量和地震位置。同时，定义了各种关键因素，以确定和表征 EGS 隔热沉积岩下最有前景的 HHPG。这些关键因素分为三大类：“热源”、“隔热”和“主动路径”。在缺乏巴西现有 EGS 的勘探数据的情况下，本研究将这些关键因素与三个独立的工作流程一起使用，以开发基于模糊逻辑的知识驱动模型，以提高地热资源前景预测的知识。对开发的模型进行了进一步的验证。所选方法预计将适用于其他地区中具有 EGS 潜力的填图区域，这些区域有类似的地质状况和开放获取地理参考数据库。



验证托坎廷斯 (Tocantins) 和博尔博雷马 (Borborema) 构造区花岗岩中 EGS 有利性区块的模糊逻辑模型

### ■ 作者信息

**Christian Michel Lacasse 等**

Geological Survey of Brazil (SGB-CPRM), Center of Applied Geosciences (CGA), Quadra 02, Bloco H, Edifício Central Brasília, Setor Bancário Norte, Asa Norte, CEP: 70040-904, Brasília, DF, Brazil

本文发表于: Geothermics

2022 年第 100 卷 102321

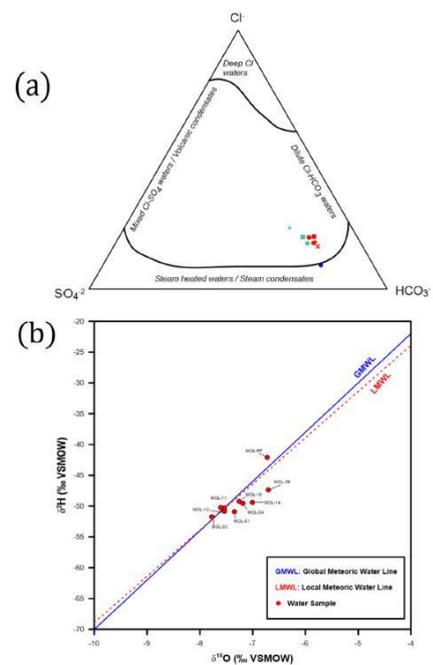
全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102321>

## 墨西哥 Mesillas 地热区地球化学勘探

Geochemical exploration in Mesillas geothermal area, Mexico

### ■ 摘要译文

这项工作介绍了墨西哥火山带西部边界纳亚里特州 Mesillas 地热区的地球化学勘探结果。地热资源的评估基于一种地球化学方法，包括：(i) 填图和地质调查，(ii) 地热显示的化学特征，(iii) 扩散通量分析 ( $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$ )，(iv) 使用经典和综合多组分地热温度测量进行深度温度计算。地球化学问题的社会传播是通过在当地人中设计和分发地质图来实现的。地质调查确定了五个安山岩单元(约  $1.5 \text{ km}^2$ )，其中 25 个释放  $\text{Na-CO}_3$  温泉的温度在  $47\sim 90^\circ\text{C}$  之间，PH 约为 9。地温计算表明底部温度在  $125\sim 130^\circ\text{C}$  之间。安山岩显示出与正断层系统相关的强烈断裂产生的高渗透性，正断层系统走向为 NW-SE、SW-NE、NS 和 EW。表面热液蚀变主要为硅化的泥质。 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  热液脱气主要局限于 NW-SE 方向的温泉。地热区西南偏南地带 (MOL10、MOL13、MOL14 和 MOL15) 存在高温、最高脱气和热液蚀变的温泉；它们对应于 NW-SE 构造走向。此外，使用地温计估算的深度温度范围为  $125\sim 130^\circ\text{C}$ ，表面温度平均为  $20^\circ\text{C}$ ；考虑到局部热梯度，估计平衡深度为  $2.0\sim 2.1 \text{ km}$ 。这些结果表明，Mesillas 地热远景可归类为具有良好渗透性的中温系统，可用于发电和直接使用。



温泉的化学和同位素组成：(a) 采集水样的  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  三元图；(b) 水样的  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) 与  $\delta^2\text{H}$  (‰)

### ■ 作者信息

Mariana Patricia Jácome Paza<sup>a,\*</sup>, Daniel Pérez-Zarate<sup>b</sup>, Rosa María Prol-Ledesma<sup>a</sup> 等

<sup>a</sup> Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n. Ciudad Universitaria, Del Coyoacán. CP. 04510, Ciudad de México, Mexico

<sup>b</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, Mexico

本文发表于：Applied Geochemistry

2022年第143卷 105376

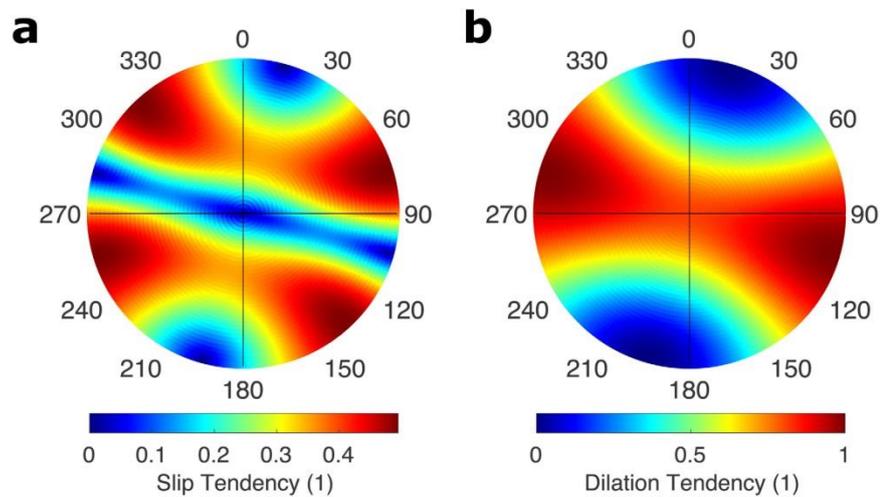
全文链接：<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105376>

## 基于钻孔观测的 Los Humeros 地热田地应力状态估计

Borehole observation-based in situ stress state estimation of the Los Humeros geothermal field (Mexico)

### ■ 摘要译文

在本研究中,我们给出了位于横贯墨西哥火山带东段的 Los Humeros 地热田(墨西哥)的地应力状态估算结果。在 40 多年的地热能源生产过程中, Los Humeros 发生了与诱发地震活动、储层耗竭、沉降和井筒稳定性有关的问题。作为上述现象的主要控制因素之一的地应力张量仍然高度不确定。Los Humeros 地热储层的高温常常超过水的临界点,增加了现场应力测量的难度。在本研究中,基于从 Los Humeros 火山口内 11 口高温井的钻井作业中获得的数据,我们限制了地热场的地应力状态。为此,我们采用了钻孔观测方法,包括钻孔爆破、流体循环损失示例和注入测试。该研究结果表明主要为走滑机制,其具有强烈的反向分量和 NE-SW 作用的主要水平应力。利用滑动和膨胀趋势分析,地热田内主要断裂带的渗透性和地震活动性可以通过作用应力机制得到恰当的解释。本研究的结果为 Los Humeros 火山口的地应力状态提供了有价值的见解,并支持常规和非常规(即超临界)地热资源的勘探。



Los Humeros 地热田任意方向不连续的 (a) 滑动和 (b) 膨胀趋势

### ■ 作者信息

Michal Kruszewski<sup>a,b,\*</sup>等

<sup>a</sup> Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geothermal Systems IEG, Am Hochschulcampus 1 IEG, 44801 Bochum, Germany

<sup>b</sup> Institute of Geology, Mineralogy, and Geophysics, Ruhr-University Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Germany

本文发表于: Geomechanics for Energy and the Environment 2022 年 8 月 100392

全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100392>

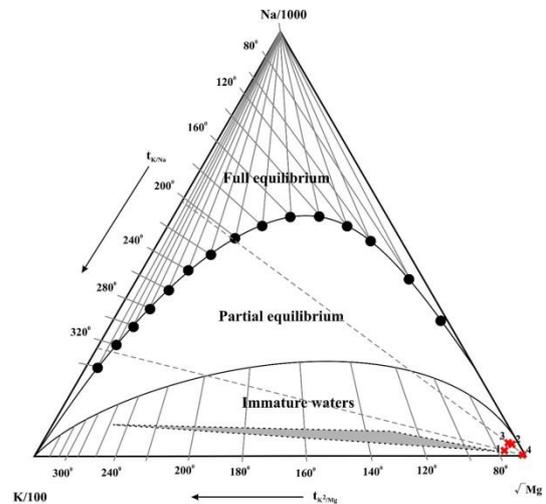
## 印度哥达瓦里河谷 Manuguru 地热田的地热潜力

Geothermal potential of Manuguru geothermal field of Godavari valley, India

### ■ 摘要译文

印度的戈达瓦里地热田是几个地热水和地下水的潜力区域之一。该地区的地热水接近中性(pH:6.5~7.3),表面温度为 30~55°C,而地下水也接近中性(pH:6.6~7.5),表面温度为 24~28°C。地热水的水文地球化学表明,地热水显示出 Na-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> 至 Ca-HCO<sub>3</sub> 类型,地下水为 Ca-HCO<sub>3</sub> 至 Na-Ca-HCO<sub>3</sub> 类型,而地下水和河水为 Ca-Na-SO<sub>4</sub> 类型。由于与含黄铁矿的冈瓦纳大陆沉积物和花岗质片麻岩基底岩石的相互作用,研究区域的地热水富含 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 Cl<sup>-</sup>。此外,地热水中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的富集以及 HCO<sub>3</sub>/Cl 比率的增加是由于在升高的温度下上升至地表的水-岩石相互作用过程中发生的交换和/或混合过程造成的。在 100°C的水-岩石相互作用实验中,也观察到了这种类型的水行为。

对地热气体地球化学的研究表明,地壳中的地热水循环较深,氦浓度较高,是一种可用于商业目的的热气体。石英和 Na-K-Ca 地质测温法估算的储层温度范围为 110~195°C。因此,研究区的地热水属于中等焓地热系统。钻孔中的热测井和深度范围为 50~1000 m,表明 Manuguru 地区的地热梯度范围为 22.5~105.5°C/km,热流范围为 83~388 mW/m<sup>2</sup>,高于区域状态。因此,通过使用戈达瓦里山谷 Manuguru 地热区的有机朗肯循环(ORC),可以产生 3584 MW<sub>e</sub>的电力。



哥达瓦里河谷温泉储层温度估算的 Na-K-√Mg 三线图

### ■ 作者信息

Hemant Kumar Singh 等

School of Environmental Sciences, Jawaharlal Nehru University, Delhi 110067, India

本文发表于: Geothermics

2022年第105卷 102545

全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102545>

## 利用温度-深度关系评价希腊北部 Aristino-Traianoupolis 地区断层控制热液系统的地热资源

Geothermal resources assessment using temperature–depth relationships in the fault-controlled hydrothermal system of Aristino-Traianoupolis area, Northern Greece

### ■ 摘要译文

Aristino-Traianoupolis 地区拥有希腊最重要的以水为主的低温地热田之一。它位于第三纪埃夫罗斯三角洲 molassic 盆地的西南隆起边缘，距离阿历山德鲁波利斯镇（希腊东北部色雷斯）以东 10 km。Aristino 地热田（AGF）的上部热液系统是希腊大陆上最有前景的热液系统之一，在一系列极低深度（100~430 m）的重叠含水层中，含有温度为 51~99°C 的流体。温度高于 90°C 的主要地热异常面积为 6 km<sup>2</sup>，最大勘探深度为地表以下 500 m。零散的区域异常超过 50 km<sup>2</sup>，其特征是温度梯度（42~450°C/km）和热流（80~800 mW/m<sup>2</sup>）过高且急剧变化，这两者都是断层控制的热液系统的典型特征。自 1993 年以来，AGF 进行了非系统地热调查，重点是低深度（100~500 m）钻探。本文首次对过去 25 年收集的所有可用温度数据进行了综合和详细的评估。稳态温度测井揭示了上部地热系统传导的主导作用，在大多数情况下，伴随着快速变化和异常高的热梯度（100~450°C/km），很可能是由较深的高温系统触发的。这一假设也得到了应用化学地温计的支持，这些化学地温计显示初始流体温度为 140~150°C，上层系统中较深且最有前景的研究储层（熔结凝灰岩）中流体的水化学特征，以及传导温度-深度剖面的推测温度。较低分布的中焓热液系统应延伸至火山岩和第三纪层序中预计的始新世灰岩和基底碎屑岩系内的 500~1000 m 深度。然而，这些假设需要通过适当的调查和深度大于 600~700 m 的新钻探进行验证，这将证实存在多产的中等焓储层。

### ■ 作者信息

**P. Dalampakis<sup>a\*</sup>, M. Papachristou<sup>b</sup>, P. Neofotistos<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Soil and Water Resources Institute, Hellenic Agricultural Organization DIMITRA, 57400, Sindos, Greece

<sup>b</sup> School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki, Greece

本文发表于：Geothermal Energy

2022 年第 10 卷

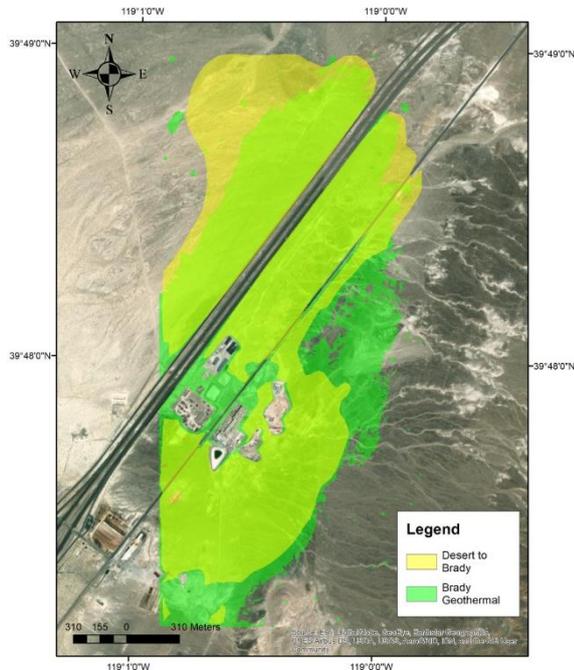
全文链接：<https://doi.org/10.1186/s40517-022-00232-4>

## 用于地热勘探的地热人工智能

The Geothermal Artificial Intelligence for geothermal exploration

### ■ 摘要译文

地热资源勘探涉及大量不确定性的分析和管理的挑战。遥感 (RS)、机器学习 (ML) 和人工智能 (AI) 在管理地热勘探挑战方面具有潜力。在本文中, 我们提出了一种综合 RS、ML 和 AI 的方法, 通过利用已知的地热区指标, 即矿物标记、地表温度、断层和变形, 对地热潜力进行初步评估。我们在两个地点 (Brady 和 Desert Peak 地热点) 演示了该方法的实施, 这两个地点彼此靠近, 但具有不同的特征 (Brady 有清晰的地表显示, Desert Peak 是一个盲点)。我们处理了各种卫星图像和地理空间数据, 以获取矿物标志、温度、断层和变形, 然后实施 ML 方法, 以获得地热点的地表显示模式。我们开发了一种 AI, 利用地表显示的模式来预测每个像素点的地热潜力。我们使用独立数据集测试地热 AI, 获得 92%~95% 的准确率; 还测试了在一个站点上训练的地热 AI, 通过为另一个站点执行它来预测地热/非地热描绘, 地热 AI 在预测方面表现良好, 准确率为 72%~76%。



使用 Desert Peak 训练模型对 Brady 进行预测

### ■ 作者信息

J. Moraga<sup>a,\*</sup>, H.S. Duzgun<sup>b</sup>, M. Cavour<sup>c</sup> 等

<sup>a</sup> Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, 1610 Illinois St., Golden, CO, 80401, USA

<sup>b</sup> Fred Banfield Distinguished Endowed Chair and Professor, Mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, CO, 80401, USA

<sup>c</sup> Management Information Systems Department, Kadir Has University, \_Istanbul, 34083, Turkey

本文发表于: Renewable Energy

2022 年第 192 卷 134-149 页

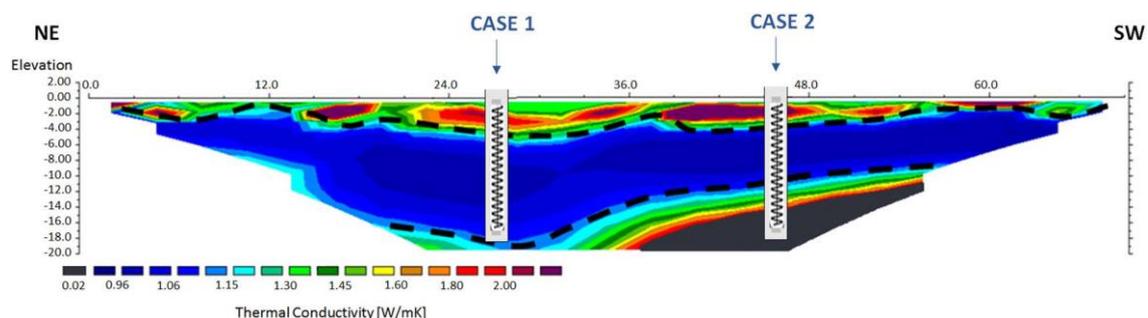
全文链接: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.113>

## 浅层地热地球物理勘探应用：Artà（西班牙巴利阿里群岛）案例研究

Geophysical exploration for shallow geothermal applications: A case study in Artà, (Balearic Islands, Spain)

### ■ 摘要译文

在浅层地热系统的安装过程中，缺乏关于地下土壤的信息常常导致地热井场设计的错误。本研究提出了地球物理的应用，结合 2D 和 3D 电阻率层析成像测量和特定区域的地质信息来确定地下结构分布。经过处理的电阻率数据可以解释可能的地质单元和深层材料的热行为。使用特定的地热软件 GES-CAL 设计了两种不同的假设（井的位置不同）。结果表明，案例 1（基于地球物理结果，因此避免复杂区域）允许减少总的钻井长度，从而减少系统的总体初始投资（约 20%）。同时，案例 2（不考虑地球物理）在经济上不太有利，也可能在钻井过程中带来技术困难，以及对正常系统操作造成影响。这项研究强调了地球物理作为一种有效的方法来描述地下特征和帮助理解其热行为的好处，这反过来又对正确的地热设计至关重要。



研究案例中地面的热导率和钻孔的初步位置

### ■ 作者信息

**Cristina SáezBlázquez<sup>a,b\*</sup>, Ignacio MartínNieto<sup>a</sup>, Miguel ÁngelMatéGonzález<sup>a,c</sup> 等**

<sup>a</sup> Department of Cartographic and Land Engineering, University of Salamanca, Higher Polytechnic School of Avila, Hornos Caleros 50, Avila 05003, Spain

<sup>b</sup> Department of Electric, System and Automatic Engineering, Universidad de León, León, Spain

<sup>c</sup> Department of Topographic and Cartography Engineering, Higher Technical School of Engineers in Topography, Geodesy and Cartography, Technical University of Madrid, Mercator 2, Madrid 28031, Spain

本文发表于：Geothermics

2022 年第 105 卷 102517

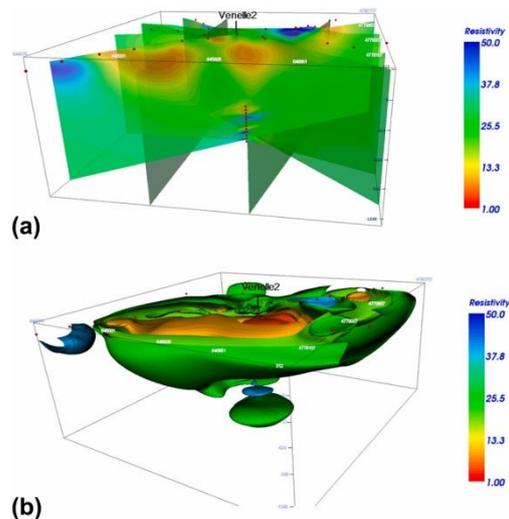
全文链接：<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102517>

## Larderello 地热田的三维深部地电勘探 (意大利)

3D deep geoelectrical exploration in the Larderello geothermal sites (Italy)

### ■ 摘要译文

本文介绍了一种用于探测深部和浅部地热系统的新的实验性深部电阻率采集技术(深度达 1600 m)。测试地点位于 Larderello 地热区,这是世界上最古老的地热田,正在开发用于发电。在该地区,在以前的勘探项目框架内获得了许多数据,但现在仍有几个关键问题存在争议:渗透率分布、岩浆热源的深度和体积、深度超临界流体条件以及干蒸汽结晶和碳酸盐岩储层中低电阻率异常的出现。为了开发解决热液储层问题的新方法,设计了一种实验性高分辨率 3D 表孔深电阻率层析成像(SH-DERT),并使用 Larderello 地热现场的 Venelle2 井(位于结晶单元中)进行实验。本文介绍了井下实验的设计和深部地电测量的结果。SH-DERT 经过适当设计,以应对地热井的极端深度条件。它提供了三维电阻率分布。发射和接收电极分布在广大表面(6 km<sup>2</sup>)和 Venelle2 井(1600 m 深度)。孔内电缆的配备能够在非常高的温度条件下运行。该实验为地热区应用地球物理学提供了一个挑战和机遇,在地热区,储层上方区域的电阻率最低,储层的电阻率较高。此外,温度、粘土蚀变和电阻率之间的关系可以确定通过电阻率测量更好地预测储层温度分布的挑战。这是对储层知识的潜在改进,也是勘探钻井的有益成功



使用地面和钻孔电极获得的 (a) 3D 完整数据 DERT 和 (b) 电阻率等值面

### ■ 作者信息

E. Rizzo<sup>a,b,\*</sup>, V. Giampaolo<sup>b</sup>, L. Capozzoli<sup>b</sup> 等

<sup>a</sup> University of Ferrara, Department of Physics and Earth Science, via Saragat, 1, 44122 Ferrara, Italy

<sup>b</sup> National Research Council, Institute of Methodologies for Environmental Analysis, Hydrogeosite Laboratory, c.da S. Loja Tito Scalo (PZ), Italy

本文发表于: Physics of the Earth and Planetary Interiors 2022 年第 329-330 卷 106906  
全文链接: <https://doi.org/10.1016/i.pepi.2022.106906>