揭示欧洲风能资源的空间和时间变异性：一种基于网络的数据挖掘工具

阿尔班·皮埃什巴黎综合理工学院，帕莱索，法国
alban.puech@polytechnique.edu

杰西·里德
´法国帕莱索综合理工学院计算机实验室
jesse.read@lix.polytechnique.edu

arXiv:2305.01343v1 [stat.AP] 2 May 2023

摘要

我们介绍REmap-eu.app，这是一款基于网页的数据挖掘可视化工具，用于展示风能资源的空间和时间变异性。它采用最新的开放获取数据集，涵盖1979年到2019年28个欧洲国家的日风电容量因子，并提供多种可由用户配置的可视化方式，以呈现风电容量因子的时间和空间变化。该平台支持深入分析风电容量因子的分布、跨国相关性以及低风电事件的成因。它提供易于使用的界面，能够满足研究人员和利益相关者的需求。该工具有望帮助识别风能潜力高的区域，以及可能影响欧洲大规模部署风力涡轮机的挑战。该工具尤其重视低风电事件的可视化，以及在日益依赖受天气影响的可再生能源的背景下，跨境合作缓解风能变异性的潜力。

1 引言

面对前所未有的能源危机，全球对间歇性可再生能源（IRES）的投资不断增加。国际可再生能源机构（IRENA）2019年的分析预测，到2050年，风电将满足欧盟28国40%的电力需求。随着能源生产越来越依赖天气条件，人们亟需能够帮助更好地理解和应对由此带来风险的工具。风能的变异性对能源生产构成了重大挑战，因为它会导致电力输出波动，使能源供应管理变得困难（Staffell & Pfenninger，2018）。因此，了解风电的历史变异性对于就风力涡轮机未来的部署和管理做出明智决策至关重要。解决风能变异性问题的一种方法是开展跨境合作，使各国能够共享风能资源并平衡电力输出的波动。2023年1月，欧盟委员会呼吁开展跨境可再生能源项目（欧洲气候、基础设施与环境执行局，2023），而人们也越来越关注对现有及未来所需法规、政策和激励措施的研究（Aras，2021；Ecofys 和 eclareon，2023；EEA，2020；Kerres 等，2020）。然而，要有效实施跨境合作，就需要深入了解不同国家和区域的风能空间和时间分布。数据挖掘可视化工具在此可以发挥关键作用：它们提供直观、交互式的方式来探索和分析不同区域的风能数据，帮助识别仅凭原始数据难以辨别的模式、趋势和潜在问题。

本文提出了一种仪表板式数据挖掘界面，旨在让决策者更便捷地了解风电历史时空变化。我们还希望弥合现有气候数据与能源行业需求之间的差距，为寻求更易理解的分析工具的能源行业提供支持。该工具：(1) 使用最新的开放获取数据集，涵盖1979年至2019年28个欧洲国家的日风电容量因子；(2) 提供16种以上完全可配置的可视化，用于展示风电容量因子的时间变化（日内、年内、同比）和空间变化；(3) 支持对分布进行深入分析， the

时间分布的跨国相关性，以及不同欧洲国家低风电事件的驱动因素。

我们预计该平台将对以下群体有所帮助：(1) 寻求风电历史变异性的可视化呈现、深入了解高度依赖风电的电力供应系统可能面临的可靠性障碍，以及更广泛地了解风电大规模并入电网相关问题的研究人员；(2) 为利益相关者提供有价值的见解，帮助他们了解各国发展风能的潜力以及开展区域合作的潜力，并协助他们做出明智的决策。

2 数据集、开发与部署细节

数据集。 本文使用的数据集是基于 ERA5 得出的欧洲各国汇总风力发电时间序列（Bloomfield 等人，2020年）。作者使用 ERA5 再分析数据（Hersbach 等人，2020年），计算了 28个欧洲国家1979年至2019年间的全国汇总逐小时容量因子。风力涡轮机的容量因子，是指在所考察时段内涡轮机产生的电能与同一时段内以满功率运行时可能产生的电能总量之比。有关数据的更多详情见附录 A1。

软件框架。我们的平台使用 Dash 构建。Dash 是一个基于 React.js 构建的 Python 库，可用于构建与 Plotly.js 完美集成的数据应用。Dash 因用于生物信息学数据库可视化而广受欢迎，见 Shammamah Hossain（2019）。Dash 使用回调，根据用户的操作修改或添加新的 HTML 元素。该平台可通过以下地址访问：REmap-eu.app

交互式双卡片布局。 Web 应用程序的布局由并排放置的两张卡片组成。附录中的图 1 展示了该平台的屏幕截图。每张卡片都将彼此交互的元素组合在一起。因此，两张卡片各自独立，只有一个例外：左侧卡片中的分级统计地图用于筛选右侧图中显示的国家。左侧卡片展示“原始”数据，仅经过少量预处理。它以简洁明了的方式描述容量因子的空间和时间分布。右侧卡片则提供了更详尽的可视化，需要进行更多预处理。解读这些可视化时，应结合左侧卡片中显示的数据。此布局旨在使两张图并排显示，让用户无需在它们之间切换。

3 风电空间与时间分析的可视化

本节介绍用于描述风能空间和时间变化的不同可视化方式。附录 A2 总结了提出的图及其设置。

分析欧洲风能资源的空间分布。欧洲各国的风能资源并不相同（Enevoldsen 等人（2019））。我们使用 [1]各国汇总容量因子的分级统计地图，以突出显示风电的空间分布。我们旨在提供一种简便的方式，以比较欧洲各国容量因子的平均值和标准差，并可选择不同的时间分辨率和时间段。该地图展示了各欧洲国家容量因子的平均值和标准差。此类可视化常用于展示不同地理实体之间的对比。附录 A2 总结了用户可用的设置，图 2 展示了这种地图的一种可能配置。

比较各国风能资源的时间分布。我们在分级统计地图下方显示容量因子 [2]的折线图。折线图用于根据用户选择的分辨率，展示欧洲国家容量因子的日内、年内和年度变化。它还可以比较不同国家在不同时间窗口内的容量因子。图中显示所有可用的28个欧洲国家的平均容量因子，并将该折线标记为“28C”。这样，用户可以将某个国家与欧洲汇总数据进行比较，也可以比较多个国家，如图3所示。

年内和日内风能资源的变异性。“每月容量因子的年内变化范围”条形图 [3] 展示各国每月容量因子的变化范围，如图4所示。该图还展示小时容量因子的日内变化范围。了解历史数据中的季节性模式，有助于建立更有效的预测模型，从而更准确地规划和管理电网。这些知识也可用于制定更有效的政策和策略，以便将风能接入电网（Kaspar 等人，2019年），并最大限度地发挥其潜在效益。例如，人们通常认为，基于太阳能和风能的混合能源系统更能应对可再生能源的变异性；然而，Mahmud 等人（2022年）指出，在某些国家，太阳能与风能的互补效果可能并不理想。如果冬季风力发电没有增加，便无法弥补太阳能发电量的下降。

阈值以上累计时长比较。 比较不同区域容量因子的一种方法，是查看容量因子高于某个阈值的天数占比。使用“阈值以上累计天数”图 [5]即可实现这一点。该图支持多国家选择，在这种情况下，还会添加一条对应于整个所选区域汇总数据的曲线，如图 5 所示。同样，这使用户能够在电网完全互联的情境下，将所选国家视为一个独立区域。

同比月度容量因子比较。 迄今为止，这些可视化主要关注风电的空间分布，以及各国基于容量因子得出的特征比较。然而，风能投资不断增加，推动了更多关于风能资源在国家尺度上逐年演变的研究 Jung 和 Schindler (2022)。风能资源的长期演变对于能源生产项目初步评估中的相关计算十分重要，例如平准化能源成本（LCOE）的计算。在“同比月度容量因子比较”图 [6], 中，我们展示了所选国家在所选年份内容量因子的年内变化。该时期内其他年份（1979—2019年）的对应曲线以灰色显示，便于用户将某一年的容量因子与该时期的其他年份进行比较。如图 6 所示。

4 分析低风电事件：发生频率、驱动因素与缓解策略

与具有相对可预测的昼夜和季节周期的太阳能光伏不同，风电的发电量在年际和年内尺度上都呈现出更复杂、不规则的变化。特别是，关于低风电事件时间分布的研究日益受到学界关注 Cai & Br´eon (2021); Ohlendorf 和 Schill (2020)。在风电占能源组合重要份额的国家，低风电事件正日益引发关注，因为这关系到能源安全与稳定性。研究过去发生的此类事件，能够深入了解变异性的驱动因素，并为制定减轻其影响的策略提供依据。尽管低风电事件尚无统一定义，但可将其定义为容量因子低于某一阈值的一段连续时段 Patlakas 等人 (2017); Leahy 和 Mckeogh (2013); Ohlendorf 和 Schill (2020)。在我们的网络应用中，我们将该阈值任意设定为 10%。在平台的下一个版本中，用户可以修改这一数值。

比较低风电事件的数量、持续时间和分布。当用户在下拉菜单中选择“低风电功率事件”时，会显示两张图。第一张是条形图，展示不同最短持续时间下低风电事件的发生次数。第二张是日历图，标示所选区域的低风电功率日。当用户选择多个国家时，条形图会针对每个国家显示相应的分组柱条。这便于比较所选国家中不同最短持续时间的低风电事件发生次数。我们还加入了所选区域聚合数据。用户由此可以了解电网互联如何降低发生低风电事件的风险，如图 7 所示。事实上，所选区域的低风电事件数量通常少于其任一组成国家，因为低风电事件不一定会在所有组成国家同时发生。日历图标示所选区域范围内的低风电功率日，并展示这些日期在所考虑年份中的时间分布。图 8 展示了这类图的示例。

低风电日时间分布的跨国相关性。 我们描述的前面几幅图允许用户根据低风电事件数量对国家进行比较。然而，了解邻国容量因子之间的相关性，对于确定能够帮助缓解风能空间变异性的互联水平至关重要 Olauson & Bergkvist（2016年）； Monforti 等（2016年）； Malvaldi 等（2017年）。例如，通过了解不同国家低风电事件的模式和趋势，可以确定最合适的市场机制，例如互联容量、定价方案和平衡机制，从而实现跨境合作。基于此，我们提出了两种不同的分级统计地图。两者都要求在左侧卡片中选择一个国家。第一幅图显示所选国家与其他国家在低风电日分布方面的皮尔逊相关系数，见图9。第二幅图显示相同的统计数据，但针对原始容量因子值。仅显示具有统计显著性的（p值≥0.05）相关性。

检测低风电事件的可能驱动因素。 气候指数用于衡量影响风能资源的大尺度大气环流和天气条件。例如，北大西洋涛动（NAO）是研究最为广泛的气候指数之一，与欧洲的风电呈正相关 Brayshaw等（2011年）； Ely等（2013年）。我们绘制了低风速事件期间的历史气候指数，为研究气候指数与风力发电之间的关系提供了有价值的工具。这有助于识别与风力发电相关性最高的指数。这些历史信息可用于开发更准确的风电发电量预测模型。该图显示所选年份的气候指数，并突出显示所选国家低风电功率日对应的数值，如图10所示。用户可以选择要显示的气候指数，包括北大西洋涛动指数（NAO）、北极涛动指数（AO）、不同经度的马登-朱利安振荡指数（MJO）以及厄尔尼~诺南方涛动（NINO）。

5 个附加功能

电价。 为了全面了解能源市场，重要的是考虑风电、电价及其他因素之间的相互作用。低风电功率日会对电价产生重大影响。当风力发电量下降时，其他电力来源（如化石燃料或水力发电）需要提高产量以作补偿。这可能导致电价上涨，因为这些能源的可变成本通常较高，而风能和太阳能无需燃料，也没有可变运维成本。我们绘制了日前电价每日平均值，如图 11 所示。我们突出显示了低风电功率日对应的电价，并展示低风电事件与电价之间的相关性；对于高度依赖这一能源来源的欧洲国家，这种相关性较高。价格数据来自 Ember Climate（2023）。

太阳能数据。 将风能和太阳能结合起来，作为缓解二者间歇性和变异性的一种方式，已受到越来越多的关注，从而形成更可靠、更稳定的能源组合。该平台允许用户通过选择计算可视化中所展示的容量因子数据时赋予太阳能和风能的权重，比较不同的可再生能源组合。太阳能容量因子数据同样取自 Bloomfield 等人（2020）。默认情况下，仅显示对应风能的数据（风能和太阳能的权重分别为 1 和 0）；本文仅关注使用此设置生成的可视化结果。

6 结论与未来工作

在本文中，我们介绍了一个新的网络平台，提供多种可视化方式，用于展示欧洲历史风能资源的时空变异性。该工具提供可配置图表，用户可以借此深入分析 Bloomfield 等人（2020）的 ERA5 派生的容量因子数据集。我们主要希望气候研究人员、能源行业和决策者能够从该平台中受益，同时也希望满足机器学习工程师和科学家的需求，帮助他们更好地了解风能资源评估挑战。我们计划根据已向学术界人士和利益相关者介绍该工具后收到的反馈，持续改进平台。具体而言，我们将添加

需求数据。这将有助于研究电力需求与风力发电之间的关系。我们还计划添加净风电需求，即需要由风能以外的其他能源满足的电力需求。

7 致谢

我们感谢 Naveen Goutham 博士帮助修订论文的最后一版。我们也感谢 Hannah Bloomfield 博士和 Emmanuel Pietriga 教授提出见解和建议，帮助改进该平台。

参考文献

Melis Aras。欧盟跨境可再生能源合作的领土治理：当前框架下的可解模型还是动荡模型？全球能源法与可持续发展，2021年2月。doi：10.3366/gels.2021.0048。

Hannah Bloomfield、David Brayshaw 和 Andrew Charlton-Perez。基于 ERA5 的欧洲国家汇总用电需求、风电发电量和太阳能发电量时间序列：1979—2019年每小时数据，2020年。

Hannah Bloomfield、David Brayshaw、David Brayshaw、Paula Gonzalez、Paula Gonzalez 和 Andrew Charlton-Perez。28个欧洲国家需求、风电和太阳能发电的次季节预测。地球系统科学数据，13:2259–2274，2021年5月。doi: 10.5194/essd-13-2259-2021。

David James Brayshaw、Alberto Troccoli、Rachael Fordham 和 John Methven。大尺度大气环流模式对风电发电及其潜在可预测性的影响：以英国为例。可再生能源，36(8):2087–2096，2011年。ISSN 0960-1481。doi: https: //doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.025。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0960148111000474。

Yiling Cai 和 Franc¸ois-Marie Br´eon。气候变化背景下的风电潜力与间歇性问题。能源转换与管理，240:114276，2021年。ISSN 0196-8904。doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114276。

Ecofys 和 eclareon。可再生能源跨境合作，2023年1月。URL https://www.agora-energiewende.de/en/publications/cross-border-renewables-cooperation/。

EEA。可再生能源领域的跨境合作，2020年12月。URL https://www.eea.europa.eu/themes/energy/renewable-energy/cross-border-cooperation-on-renewable-energy。

Caroline R. Ely、David J. Brayshaw、John Methven、James Cox 和 Oliver Pearce。北大西洋涛动对英国–挪威可再生能源系统的影响。能源政策，62: 1420–1427，2013年。ISSN 0301-4215。doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.037。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513005223。

Ember Climate。欧洲批发电价数据，2023年1月。网址 https://ember-climate.org/data-catalogue/european-wholesale-electricity-price-data/。

Peter Enevoldsen、Finn-Hendrik Permien、Ines Bakhtaoui、Anna-Katharina von Krauland、Mark Z. Jacobson、George Xydis、BenjaminK. Sovacool、Scott V.Valentine、DanielLuecht 和 Gregory Oxley。欧洲有多少风电潜力？利用增强型社会技术图谱考察欧洲的风电潜力。《能源政策》，132：1092–1100，2019年。ISSN 0301-4215。doi：https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.064。

欧洲气候、基础设施和环境执行局。2023 年跨境可再生能源项目（CB RES）申请认定资格的征集，2023 年 1 月。网址：https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/cef-energy-2023-call-cross-border-renewable-energy-projects-cb-res-obtain-status-2023-01-10 en.

Hans Hersbach、Bill Bell、Paul Berrisford、Shoji Hirahara、Andr´as Hor´anyi、Joaqu´ın Mu˜noz-Sabater、Julien Nicolas、Carole Peubey、Raluca Radu、Dinand Schepers、Adrian Simmons、Cornel Soci、Saleh Abdalla、Xavier Abellan、Gianpaolo Balsamo、Peter Bechtold、Gionata Biavati、Jean Bidlot、Massimo Bonavita、Giovanna De Chiara、Per Dahlgren、Dick Dee、Michail Diamantakis、Rossana Dragani、J ohannes Flemming、Richard Forbes、Manuel Fuentes、Alan Geer、Leo Haimberger、Sean Healy、Robin J. Hogan、El´ıas H´olm、Marta Janisková´a、Sarah Keeley、Patrick Laloyaux、Philippe Lopez、Cristina Lupu、Gabor Radnoti、Patricia de Rosnay、Iryna Rozum、Freja Vamborg、Sebastien Villaume 和 Jean-No¨el Th´ epaut。ERA5全球再分析。英国皇家气象学会季刊，146(730):1999–2049，2020年。doi: https://doi.org/10.1002/qj.3803.

IRENA。《风能的未来：部署、投资、技术、电网整合及社会经济方面》（全球能源转型报告）。技术报告，国际可再生能源署，2019年。

Christopher Jung 和 Dirk Schindler。陆上风力涡轮机群的发展抵消了气候变化导致的全球容量因子下降。《自然能源》，第7卷，2022年7月。doi：10.1038/s41560-022-01056-z。

Frank Kaspar、Michael Borsche、Uwe Pfeifroth、J¨orgTrentmann、Jaqueline Dr¨ucke 和 Paul Becker。对德国和欧洲光伏与风能平衡效应及短缺风险的气候学评估。《科学与研究进展》，16：119–128，2019年7月。doi：10.5194/asr-16-119-2019。

Pia Kerres、Bastian Lotz、Felix von Bl¨ucher、Fabian Wigand、Naida Taso、Jasmina Trhulj 和 Dirk Buschle。《政策简报：能源共同体中的可再生能源跨境合作》，2020年11月。网址：http://aures2project.eu/2020/11/25/policy-brief-renewables-cross-border-cooperation-in-the-energy-community/。

Paul Leahy 和 Eamon Mckeogh。低风速状况的持续性及其对风电变异性的影响。风能，16，2013年05月。doi：10.1002/we.1509。

Zabir Mahmud、Kenji Shiraishi、Mahmoud Youssef Abido、Dev millstein、Pedro Perez 和 Sarah Kurtz。夏季与冬季主导型陆上风能的地理变异性。可再生与可持续能源期刊，14，2022年03月。doi：10.1063/5.0070430。

A. Malvaldi、S. Weiss、D. Infield、J. Browell、P. Leahy 和 A. M. Foley。《理想互联的欧洲中聚合风电的时空相关性分析》。风能，20(8):1315–1329，2017年。doi: https://doi.org/10.1002/we.2095。

F. Monforti、M. Gaetani 和 E. Vignati。《欧洲国家之间的风能生产有多同步？》可再生能源与可持续能源评论，59:1622–1638，2016年。ISSN 1364-0321。doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.318。

Nils Ohlendorf 和 Wolf-Peter Schill。《德国低风电事件的频率与持续时间》。环境研究快报，15，2020年08月。doi: 10.1088/1748-9326/ab91e9。

Jon Olauson 和 Mikael Bergkvist。欧洲
。能源co114:663–670，2016年11月。doi: 10.1016/j.energy.2016.08.036。

Wendy S. Parker。再分析资料与观测：有何区别？美国气象学会公报，97(9):1565 – 1572，2016年。doi: 10.1175/BAMS-D-14-00226.1。

Platon Patlakas、George Galanis、Dimitris Diamantis 和 George Kallos。低风速事件：持续性与频率。风能，20，2017年6月。doi: 10.1002/we.2078。

Shammamah Hossain。使用 Dash Bio 可视化生物信息学数据。载于 Chris Calloway、David Lippa、Dillon Niederhut 和 David Shupe（编），第*18*届 *Python* 科学会议论文集，第126 – 133页，2019年。doi: 10.25080/Majora-7ddc1dd1-012。

Iain Staffell 和 Stefan Pfenninger。天气对电力供应和需求的影响日益增大。《能源》，145：65–78，2018年。ISSN0360-5442。doi：https://doi.org/10.1016/j.energy.2017. 12.051。

A 附录

A.1 A1 - 数据集

该平台使用的数据集由 Bloomfield 等人（2020）编制，他们使用 ERA5 再分析数据 Hersbach 等人（2020），计算了 28个欧洲国家在1979年至2019年间的全国汇总逐小时容量因子。再分析结合过去的天气观测和当前大气模型，生成历史气候与天气数据 Parker（2016）。它能够根据过去稀疏的观测数据（无论在空间还是时间上）生成完整的天气记录。除了风速数据，作者还使用了取自 https://thewindpower.net 的2017年风电场空间分布。不过，值得一提的是，由于计算容量因子时未使用绝对风电装机容量，因此仅假设风力涡轮机的相对空间分布保持不变。每个国家的容量因子通过汇总各网格单元的容量因子估算得出，并按估算的装机容量加权。各网格单元的容量因子根据100米风速以及整个时期（1979—2019年）发电量最大的风力涡轮机类型的功率曲线计算得出，具体如 Bloomfield 等（2021）所述。尽管作者报告称，在验证设置中平均百分比误差为10%，但需要注意的是，此处所示的容量因子可能与真实值存在偏差。

A.2 A2 - 第3节所述可视化摘要

描述	用户交互	评论
[1] 分级统计地图 的 平均值 or 的标准差 每小时、 每月 or 每年 容量 因子	- 右侧下拉菜单 设置数据分辨率 （每年， 每月， 或每小时）。 - 左侧下拉菜单 可在 be- 容量因子的平均值和标准差之间切换 容量因子 - 滑块用于筛选 数据中包含的年份、月份或小时 数据中	- 平均值和标准差的计算范围为 整个时间段（1979—2019年）， 但时间分辨率设为每年时除外，此时 用户可以决定要纳入哪些年份 clude
[2] .....的折线图 日内、年内或 每年平均容- 量因子	- 这些国家 dis- 已播放 on the plot are 那些 已选择 when 点击 on the 分级设色图 map （按住 转移允许 多选） - 此时可以使用范围滑块 筛选 所显示的时间段 已显示	- 未选择国家时（初始状态）， 将显示所有28个欧洲国家的平均容量因子， 并且可用国家的数量为28，折线 标记为“28C”
[3] 以下内容的条形图 年内/日内 变化 范围 of 每月/每小时 容量因子	- 位于上方的下拉 位于顶部部分的 该卡片用于选择 数据年份 以供显示 - 这些国家 dis- 发挥了 on the plot are 那些 已选择 when 单击 on the 分级设色图 map （按住 Shift 键可进行 多选）	- 当左侧卡片上未选择任何国家时， 所有欧洲国家都会按数值升序 排列。这是因为此 可视化旨在根据各国容量因子的变异性对国家进行排名， 以此为依据 - 柱形差值的刻度从 0 开始 高度以准确表示.....之间的差异 容量因子变化范围。 - 每个国家所使用的颜色保持一致 贯穿网络应用中的所有可视化效果，从而使 用户能够快速在所选国家中找到 每个图
[4] 小型图的 mum，最大值和 平均值日内/年- 内容量因- tor	子，如3 所示。	- 散点图用叉号表示平均值 以及带有误差线的最小值和最大值 - 国家按平均值排序
[5] 的折线图 累计 days 高于容量因子 阈值	如第 3 节所示。此外： - 当选择多个国 家时， an 将显示相应的附加行 对应 于所选 所选区域（ 所有选定国家的平均值 ）会显示	- 未选择国家时，将显示 28 个国家汇总的容量因子， 并显示对应于各个欧洲国家的曲线 欧洲国家以浅灰色显示。这 让用户能够快速查看每个国家的情况 只需将鼠标悬停在对应的线上，即可与其他 27 个欧洲国家进行比较 将鼠标悬停在其对应的线条上
[6] 同比（年比）每月容量 年度）每月容量 容量因子图	如图 4 所 示。	- 由于此处的目标实际上是比较 单个区域逐年的容量因子， 选择多个国家会导致 只显示一条对应的线 整个所选时期汇总的数据 gion - 对应其他年份的线条 1979—2019年以浅灰色显示， 使用户能够快速了解 某一年的容量因子与 该时期其他年份的对比情况

A.3 A3 - 图与用例示例

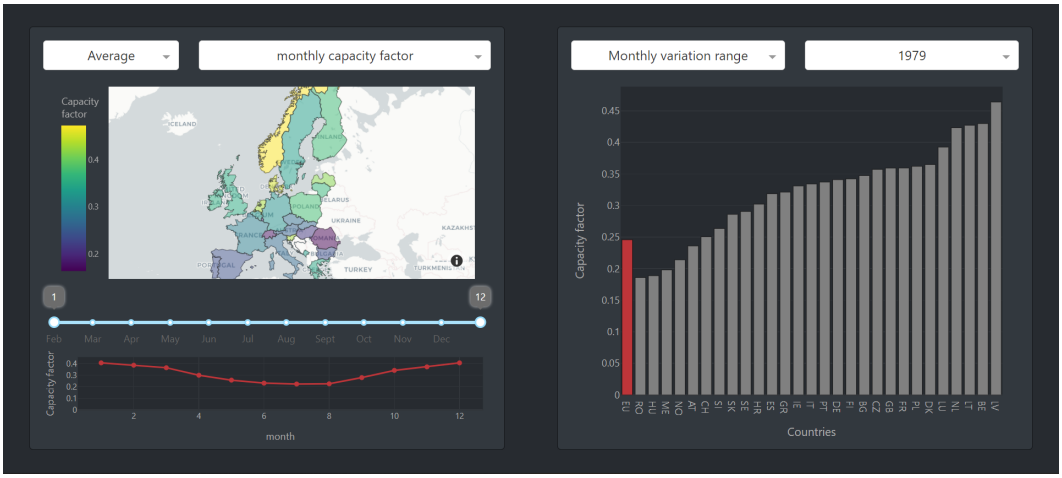
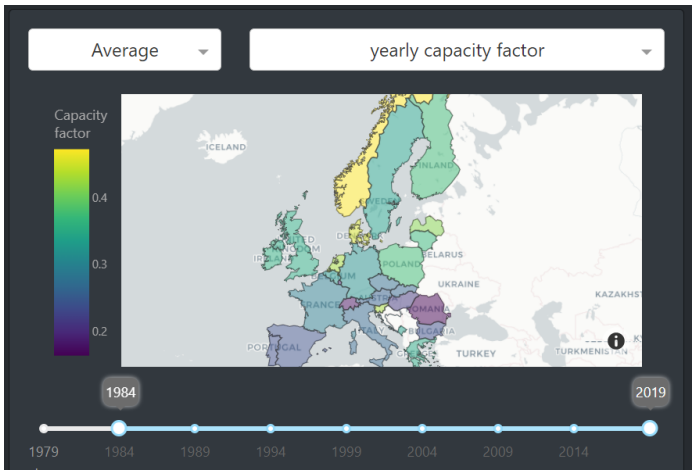


图 1：Web 应用的布局。左侧卡片显示分级统计地图 [1] 和容量因子折线图 [2]，右侧卡片则提供更高级的可视化。左侧卡片中的分级统计地图用于筛选右侧卡片上绘制的数据。



Figu图 2：1984-2019 年期间每年容量因子的平均值分级统计地图。T
范围
滑块和两个下拉菜单用于设置可视化参数。

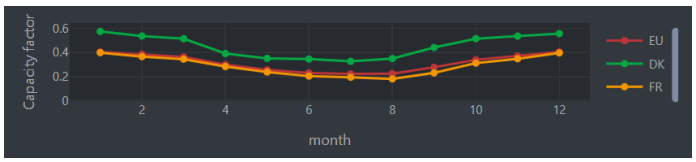


图 3：折线图 [2] 显示了 1979—2019年期间法国、英国和 28个欧洲国家（28C）的每月平均容量因子。刻度从 0 开始，以便更好地比较各国。用户通过点击图 2 [1]所示的分级统计地图选择要显示的国家，并使用图 1 所示的下拉菜单设置时间分辨率。

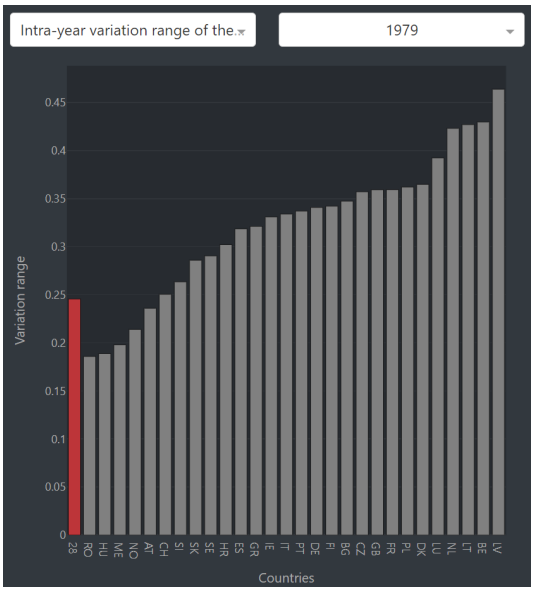


图 4：28 个国家 1979 年每月容量因子年内变化范围的柱状图。红色柱表示 28 个国家汇总后的容量因子范围。此图有助于识别高风电月份与低风电月份之间容量因子差距较大的国家。

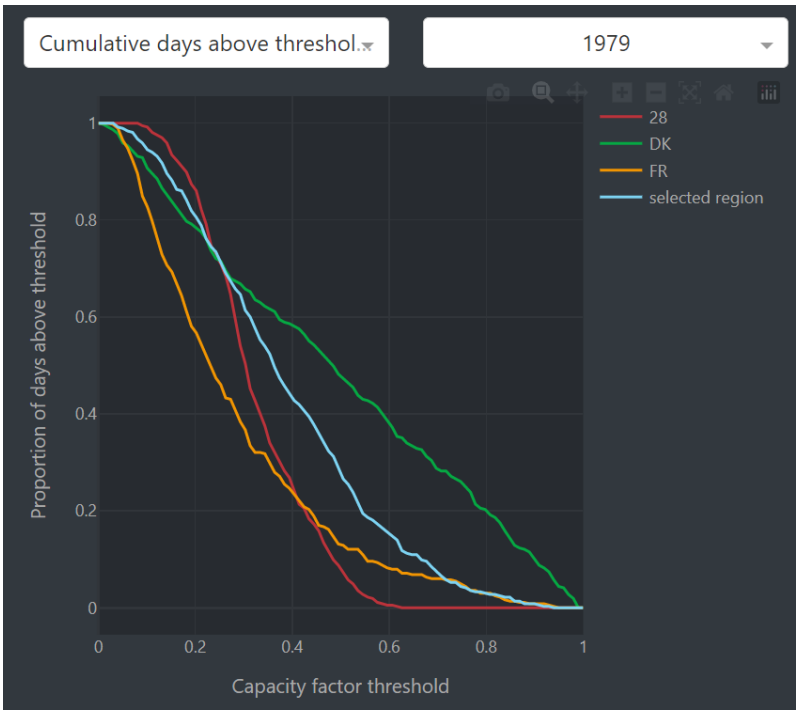


图 5：1979 年超过阈值的累计天数折线图。图中展示了法国和丹麦的数据，以及区域汇总数据（法国+丹麦），均以蓝色表示。连接邻国后，可以将风力充沛区域的富余能源输送到风力较弱的区域，从而减少对备用容量的需求。实际上，这可以提高互联系统中风电的整体容量因子。

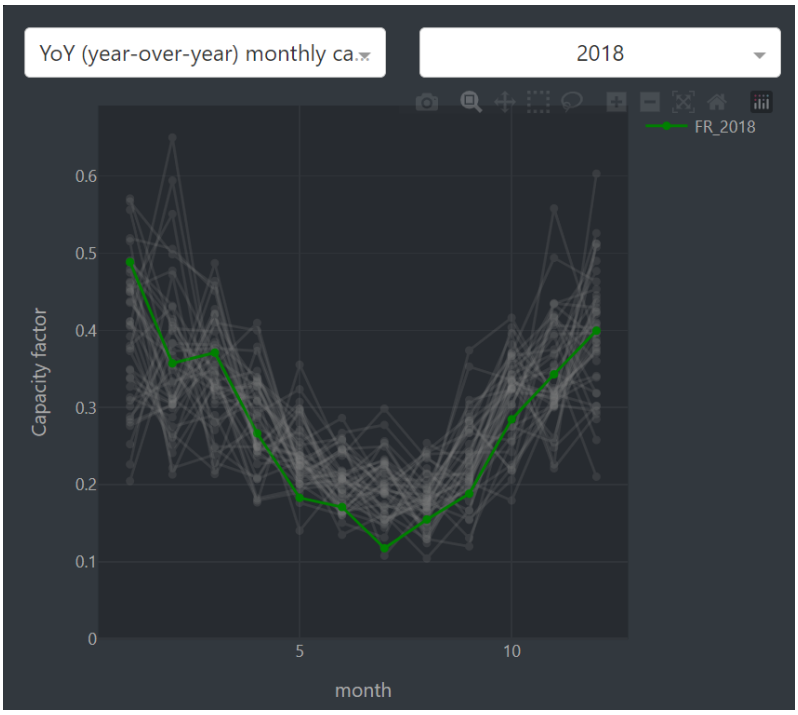


图 6：法国月度容量因子同比比较。高亮显示的年份为2018年。灰色线条对应该时期的其他年份（1979—2019年）。2018年夏季的风力发电量尤其低（注意绿色线条的高度与灰色线条相比如何）。

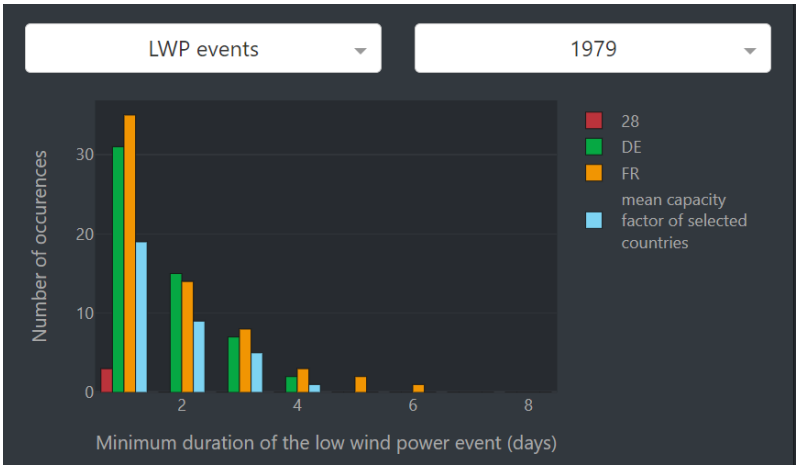


图 7：1979年法国、德国以及法国+德国整体区域的低风电事件数量，按不同的低风电事件最短持续时间划分。互联国家往往经历较少的低风电事件，因为一国能够弥补另一国容量因子的低值；当两国沿海地区各异且风况模式不同，这种情况尤为明显。电网互联通常能提高能源供应的可靠性。

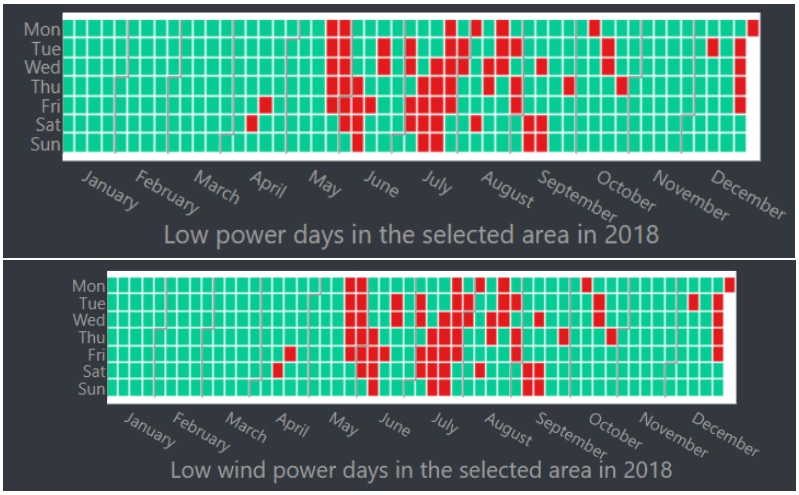


图 8：法国（上图）以及 2018 年该区域（法国+德国）低风电功率日的日历图。低风电功率日以红色显示。观察结果与图 7 中的观察结果相似。

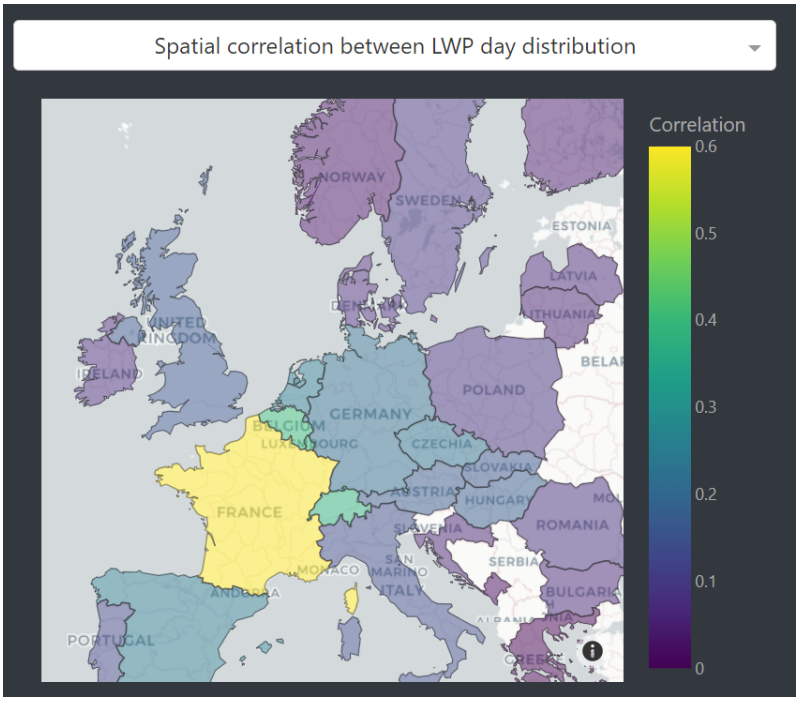


图 9：法国的低风电事件分布与其他 28 个欧洲国家的低风电事件分布之间的相关性。

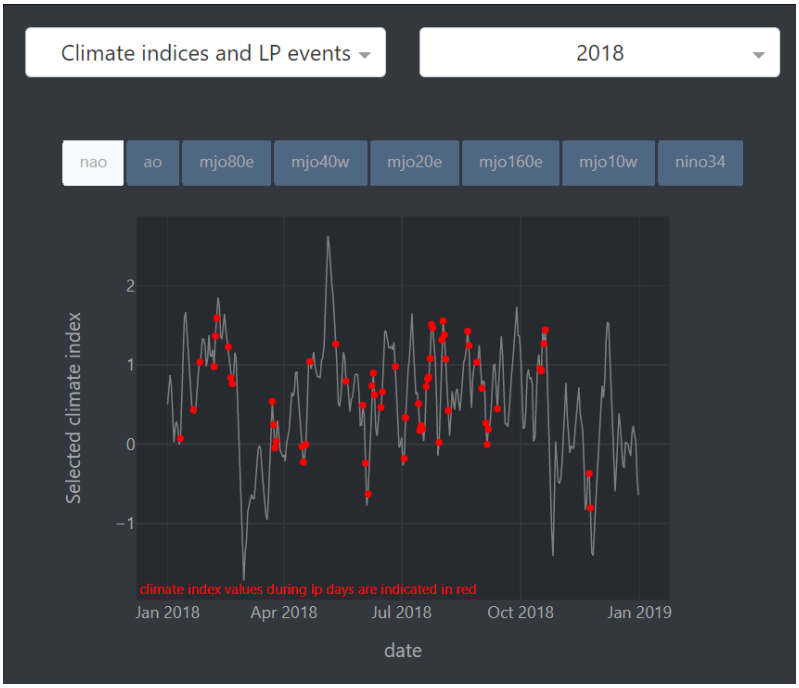


图 10：2018年北大西洋涛动（NAO）气候指数折线图。红色圆点表示所选国家（此处为法国）的低风电功率日。使用图 8 所示的日历图识别低风电功率事件后，通常会利用此可视化来调查该事件发生前的气候指数。

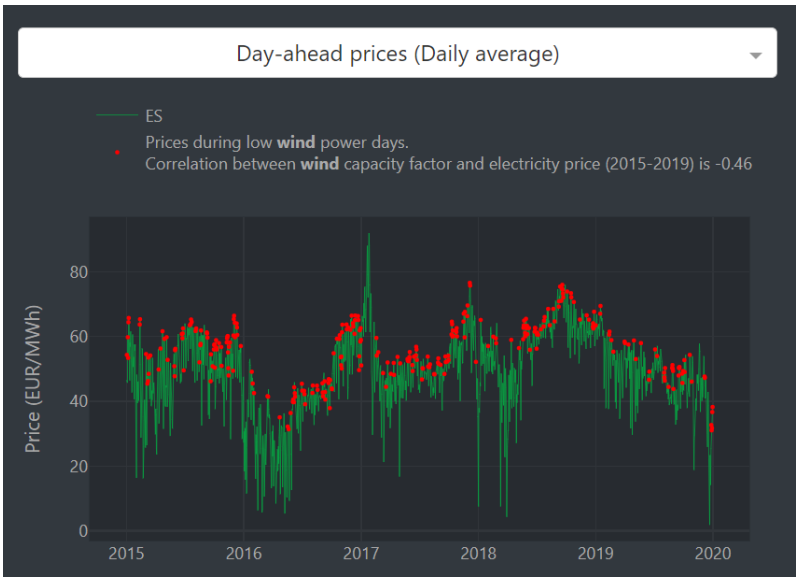


图 11：德国电价折线图。红色圆点表示低风电功率日。在高度依赖风电的国家，风电容量因子与电价之间的相关性尤其高，德国便是如此。