

一些大科学设施能耗与一座小城市相当，科学研究的“碳中和”之路怎么走？

减少科研碳足迹，科学设施正在“绿化”



为减少未来加速器的碳足迹，欧洲核子研究中心(CERN)专门请专家对方案进行评估。图为欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)内部。

(图片来源:CERN官网)

应对气候变暖，人类需要科学研究来探索“碳中和”之路。然而，科研本身也要耗费大量能源，一些大型科学设施的能耗甚至与一座小城市相当。随着低碳、零碳社会的推进，科学家们已开始正视科研碳足迹，并着手改进。他们努力通过更低碳节能的设计、可再生能源的使用、提升效率等方式，促使科研迈向“碳中和”。

■ 慕子岚/编译

荷兰莱顿大学的天体物理学家西蒙·波尔蒂奇环保意识很强。他几乎不坐飞机出差，而是选择乘坐火车。生活中，他常常吃素，尽量选用可再生能源和产品，甚至告诉孩子不要洗澡太久，以此努力减少碳足迹。渐渐地，西蒙开始考虑自己其他方面的碳足迹。

“我的工作经常使用大型科研设备，它们消耗的能源几乎相当于一座小城市。”他解释道，“当我运行一台超级计算机时，所耗费的能源甚至超过一万个家庭。那么，我有什么资格告诉我的孩子或他人，洗澡20分钟是不应该的？”西蒙的想法是科学界的一个缩影。眼下，全球正努力应对气候变化，不少科学家也开始把减碳行动引入他们的科研日常。

差旅碳排放

一次会议相当于全城一周

一些事实令科研人员有些坐立不安。例如，统计显示，从事气候变化的研究人员比其他领域的科学家更频繁地飞行。根据2020年的一项研究，气候科学家平均每年坐飞机两到三次。2019年的一项研究发现，加拿大蒙特利尔大学的教授们每年的碳足迹是普通加拿大人的两倍，其中大部分与职业出行有关。

在科学家的职业出行中，参加学术会议占了大头。当美国地球物理联盟秋季会议于2019年在加利福尼亚州举行时，2.8万名代表在会议往返途中共排放了大约8万吨二氧化碳当量，人均接近3吨，这几乎是英国爱丁堡市一周的二氧化碳碳排放量。

另一项来自加拿大不列颠哥伦比亚大学的研究表明，学术界的航空旅行对于推动全球研究或促进生产力贡献不大。自新冠疫情全球蔓延以来，大多数学者不得不改用在线会议和研讨会。在线活动不仅允许有更多不同的代表参加，对环境保护也有好处。2021年的一项研究发现，2020年在网上举行的三个大型科学会议，7000名网上参会者所产生的碳足迹仅与2019年实地参加的一名与会者碳足迹相等。

处理天文数据

人均排放超出常人40%

虽然学术旅行对气候变化的影响毋庸置疑，但在过去几年里，一些物理学家发现，计算机的使用量占了他们碳足迹的很大一部分——有时甚至比航空旅行还要多。

西澳大利亚大学的天体物理学家亚当·史蒂文斯和同事一起分析了澳大利亚天文学家在2018年至2019年间的温室气体排放总量，这些温室气体来自旅行、使用超级计算机和在大望远镜站工作等常规活动。

该研究发现，澳大利亚天文学家平均每年产生约37吨二氧化碳，这一数字比澳大利亚的人均水平高出40%，是全球平均水平的五倍。而其中对排放量贡献最大的，是使用超级计算机来处理望远镜收集的大量数据并进行宇宙学模拟——每个天文学家在这方面的排放量约为15吨，几乎是他们每年飞行排放量的四倍。

另一个例子来自即将开展的中微子探测巨型阵列(GRAND)项目。该项目将使用

分布在世界各地山区的20万台天线，探测来自宇宙深处的超高能中微子。去年，项目团队估算了三个不同阶段实验的温室气体排放量：样机阶段、建设中期，全面实验阶段(预计将于2030年开始)。他们发现，数字技术——模拟和数据分析、数据传输和存储，以及计算机和其他电子设备，将在项目的碳足迹中占很大比例。

在初始阶段，预计69%的排放量来自数字技术；一旦完整的实验开始运行，大部分的排放将由硬件(48%)和数字技术(45%)产生。

其实，耗能大户不仅仅是计算，还有数据存储和传输。数据存储和传输的碳足迹来自数据中心的能源需求。与超级计算机一样，数据存储在某种程度上可通过使用低排放的数据中心来解决，但更重要的是减少数据量。例如，GRAND项目就在持续推进减少数据量的策略——并非所有数据都要保留，如果能迅速清理数据，即可更多地减排。

这就需要科学家找到更有效梳理数据的方法。事实上，研究人员发现，每年用飞机运送四次硬盘，将比在线传输数据减少很多数量级的碳排放。

碳排放差异

可再生能源“左右”碳强度

那么，科学家是否需要为了消减碳足迹而放弃使用超级计算机？或是干脆停止对于宇宙的探索呢？

一个有趣的事实是，超级计算机的环境成本在很大程度上取决于为设备供电的能源来自何处。2020年，荷兰天文学会对六个成员研究所的碳足迹进行了分析。根据他们的评估，2019年，荷兰天文学家平均只排放了4.7吨二氧化碳——远远低于澳大利亚。而且，这些排放中只有4%来自超级计算机。

领导这项研究的荷兰空间研究所天体物理学家弗洛里斯·范德特认为，并没有迹象表明，荷兰天文学家的超级计算机使用量比澳大利亚同行少。因此，这些碳排放的差异可能是由于能源供应不同而产生的。

值得一提的是，荷兰国家超级计算设施SURF使用的是100%风能或太阳能生产的可

再生电力，不产生任何碳排放。占比4%的少数排放来自科学家使用国际超算设施和荷兰国内较小型的超级计算机所进行的研究。

英国剑桥大学数学家和物理学家洛伊克·兰格洛开发了一个在线工具，让研究人员能够估算其使用算力所产生的碳足迹。结果发现，在相同硬件上运行相同的任务，在澳大利亚产生的碳排放将是瑞士的70倍左右，因为瑞士的大部分电力来自水电。

研究还发现，南非及美国一些州的计算排放量与澳大利亚相似。另一方面，冰岛、挪威和瑞典的电力碳强度特别低。如今，云计算的发展可以让研究人员更容易地选择超级计算机。现在，西蒙在使用超级计算机前，首先会确认该设备是否使用了绿色能源。如果不是，他会考虑更换其他设施。范德特也建议科学家对设施使用的能源进行检查，尽量选用绿色能源的科研设施。

积极绿色转型

走向科研“零碳”运行

位于德国海德堡的马克斯-普朗克天文研究所的温室气体排放，凸显了类似的国家间差异。2018年，该研究所的每位研究人员排放了大约18吨二氧化碳——比荷兰的天文学家多，但仍只有澳大利亚同行的一半。不过，这些排放量也比普通德国居民高60%，是德国2030年目标的三倍。

马克斯-普朗克研究所2018年约29%的排放量来自电力消耗，其中计算、特别是超级计算，占比75%~90%。德国和澳大利亚的关键区别在于电力的来源。2018年，德国约有一半电力来自太阳能和风能，而在澳大利亚，绝大部分电力来自化石燃料，主要是煤炭。这意味着，在澳大利亚，计算用电每千瓦时产生0.905千克二氧化碳，而德国马普研究所计算用电每千瓦时排放仅0.23千克二氧化碳。

范德特指出，这些调研统计工作大部分是在几年前进行的，现在全球可再生能源的使用已更为普遍。2019年，荷兰天文学家的碳足迹仅约29%来自电力的使用，这包括了六个

研究机构的本地计算用电。就在当年，已有三家研究所使用绿色电力运行。如今，又有两个研究所已经完全使用可再生能源。范德克预计，最后那个研究所将在未来两年内转换到全绿电运行。

事实上，澳大利亚的情况也发生了变化。自2020年7月起，该国三个国家高性能计算设施之一的OzSTAR超级计算机，已经从使用火电切换成从附近的风力发电厂购买可再生能源。超级计算机所在的澳大利亚斯威本科技大学称，这将极大缩减其碳足迹，因为电力所产生的碳排放占到其排放总量的70%以上。

改变思维方式

赋予科学家“减碳”动力

兰格洛希望研究人员认真考虑他们所用计算机的排放量，并将其纳入科研决策中。

通宵运行低效的代码和软件就是一个很好的例子。“如果你有计算机资源，反正也要回家睡觉，即使花很长时间运行也无所谓。”他认为，如果将“减少碳足迹”的意识放到更重要的位置，就会有动力去改变。“如果能使计算更有效，将减少温室气体排放，减少使用者的碳足迹。”

GRAND中微子项目共同创始人、法国索邦大学的小寺久美子说，项目计划中有实验的模拟库，允许研究人员重复使用通常运行的模拟程序，而不是每次都自己去跑，从而防止低效重复的科研。

久美子说，这是常见的一种浪费，甚至在大型合作项目上也是如此：不同的人重复运行相同的模拟。“只需按下一个按钮，就可让程序运行一个星期，得到一个结果，然后说‘哦，我并不真的需要它’，这太容易了。”她说，“模拟实验的目标是鼓励人们在运行程序时提前认真思考，这的确是他们真正需要的东西吗？”

未来希格斯工厂 能耗大比拼

根据选址与设计不同，未来希格斯工厂的碳足迹几乎可以相差100倍。这是近期一项研究得出的结论，它比较了不同的希格斯工厂在每个单位物理学产出方面对环境的影响。根据分析结论，电子-正电子希格斯工厂(FCC-ee)是目前在这方面表现最好的设计，与其他设计相比，它产生希格斯玻色子的单位能耗更少，产生的碳排放量更低。

科学家面临的挑战在于，如何设计一个对气候影响最小的科学设施。2012年，欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)发现了希格斯玻色子，这种粒子与赋予物质质量的场有关，但LHC产生的希格斯玻色子很少。目前，物理学家想要耗资数十亿美元打造“希格斯工厂”，用来专门生产这种粒子，并希望通过对它们的精确研究，发现令人兴奋的成果。

CERN的帕特里克·雅诺特和日内瓦大学的粒子物理学家阿兰·布朗德尔，利用已公布的五个主要希格斯工厂的设计细节，计算了产生每一个希格斯玻色子的能量消耗。这五个希格斯工厂分别是欧洲核子中心规划的未来环形对撞机(FCC-ee)、中国提出的环形正负电子对撞机(CEPC)、日本国际线性对撞机(ILC)、CERN的紧凑型线性对撞机(CLIC)和美国紧凑型加速器“冷铜对撞机”(C3)。

对于希格斯工厂来说，其科研能力与生产希格斯玻色子的数量直接相关。假设希格斯工厂A每年生产4万个希格斯玻色子，耗能为0.5太瓦时；而希格斯工厂B每年生产40万个希格斯玻色子，耗能为1太瓦时。如果物理学家需要100万个希格斯玻色子来做研究，那么希格斯工厂A需要25年才能满足，而希格斯工厂B只需要2.5年。就能耗而言，这相当于希格斯工厂A需耗能12.5太瓦时，而希格斯工厂B只需耗能2.5太瓦时(尽管B工厂每年消耗的能源是A的两倍)。由此可见，相比于年度总能耗，每个希格斯玻色子所消耗的能量是更合适的评估指标。

经过考察和计算，研究人员发现，FCC-ee是最节能的，它每生产一个希格斯玻色子仅消耗3兆瓦时的电力——其次是CEPC，每个希格斯玻色子消耗4.1兆瓦时，而最耗能的选项是C3，其能耗高达18兆瓦时/希格斯玻色子。

在这项分析中，FCC-ee被假定为只有两个探测器。如果有四个探测器，FCC-ee的估值将被除以系数1.7。在这种情况下，每产生一个希格斯玻色子只需消耗1.8兆瓦时能源，并排放0.1吨二氧化碳当量。

调研还涉及建筑物和探测器的环境足迹等内容，将在后续论文中陆续发表。人类正在经历前所未有的气候变化，因此在选择下一代科学设施时，既要努力将科学成果最大化，也要将环境问题考虑在内。

超级计算机的“绿色”捷径

耗能巨大的计算机如何减少碳足迹？使用绿色能源固然是一条路，其实还有一个更简便的办法——使用最新版本的软件，更新版本、使用优化的软件可以提升计算效率，从而显著降低能耗。

评估一台超算设备的碳足迹，一般都会基于硬件、任务所需时间，以及数据中心或超级计算机的地理位置等主要因素。在评估算法中设有一个“务实的缩放系数”，它将考虑算法的实际运行次数，这也会对实际排放量产生直接影响。

事实上，大多数算法都要运行多次，有时甚至要用不同的参数运行成百上千次，而且运行次数会因任务和研究领域不同产生很大差异。因此，高效的算法程序对于“绿色”计算至关重要。荷兰莱顿大学的天体物理学家西

蒙·波尔蒂奇说：“我看到周围很多人所运行的程序效率极低。如果可以多花一点时间优化代码，它将运行得更快，也将因此减少排放。”

转换计算机编程语言可能是一个好主意。为此，西蒙做了个实验，他用十几种不同的计算机编程语言来运行同一个算法。他发现，在物理学家中最流行的Python，需要更长的时间来运行，因此它比C++或Fortran等语言产生更多排放。西蒙认为，问题在于Python极其容易使用，但很难优化，而其他语言写程序更困难，却更容易优化。

然而，只要不用Python就能更加绿色节能吗？并不一定。针对西蒙的论文观点，法国国家科学研究中心研究员皮埃尔·奥吉尔认为，更好的教育和使用Python编译器可能同样有效。奥吉尔是法国格勒诺布尔阿尔卑斯大学的流体动

力学和湍流专家。他用不同语言的优化代码和五种不同的Python实现方式来进行类似的实验。结果发现，Python有四种实现方式比C++和Fortran更快，产生的排放更少，而且还更容易理解和使用。“我不认为换一种语言更容易，因为学习如何正确使用Python并不十分困难。”奥吉尔认为，与其关注使用什么编程语言，不如说计算和编程应在物理学教育中占据更重要的位置。“只要专攻物理学，就应在学生时代就学习编程”。

西蒙也同意Python可以更高效，但他认为，也许物理学研究机构应该雇用更多的计算机专家。他说：“我们在物理学方面很出色，但一个计算机科学家把我们学习物理学的所有时间都用来学习如何与计算机沟通，毫无疑问，他们在编程方面会做得更好。”



科研人员正在监测超级计算机运行。图/视觉中国