



数字化的足迹与日俱增

背景

《前瞻研究简报》由联合国环境规划署出版，其目的是强调一个环境变化热点，介绍一个新兴的科学主题，或讨论一个当代环境问题。公众有机会了解不断变化的环境正在发生哪些变化，以及自己在日常生活中做出的选择会有什么样的后果，并思考未来政策的方向。联合国环境规划署第27期《前瞻研究简报》探讨了互联网使用和经济日益数字化给环境带来的影响，并概述了一些可以实施的缓解因素，以期共谱绿色的数字化未来。

摘要

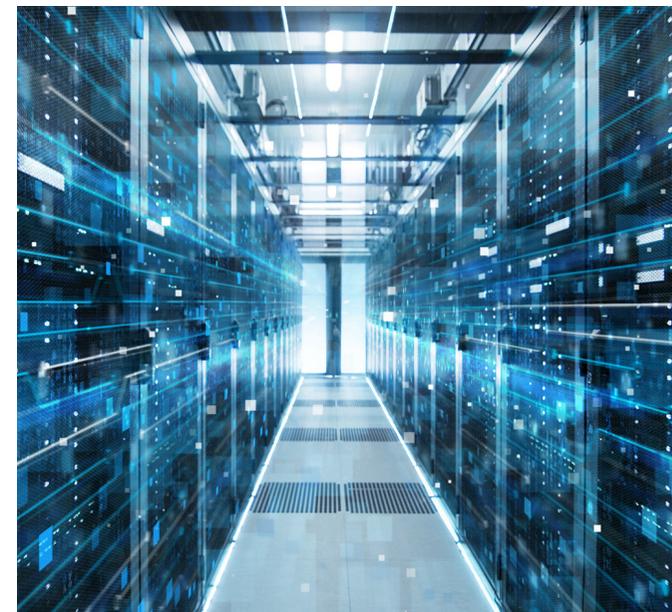
自2010年以来，全球互联网用户数量翻了一番，全球互联网流量增长了12倍。我们享受的数字服务有时被称为“非物质化技术”，但事实真的如此吗？计算机、服务器和其他电子设备需要大量的自然资源。它们运行中消耗的能源会排放大量的二氧化碳，而计划性报废和低比例的回收正在产生电子垃圾。云中的绝大多数数据都没有得到利用。在不否认这些技术带来的许多好处，包括有利环境的好处的前提下，用户、服务提供商和政策制定者必须了解相关影响，以及我们如何才能迈向更加绿色的数字技术。

导言

在过去的十年里，互联网和相关数字技术在我们个人生活和工作中的重要性呈指数级增长。“云中生活”——我们的音乐、照片、电影、电子邮件、文档、社交网络存储在远程服务器上，几乎可以从地球的任何角落通过个人电脑、笔记本电脑或手机即时访问——已经成为新的常态。此外，我们的大部分经济交易都已经数字化。据估计，到2022年底，全球60%的GDP将是数字化的，未来十年经济中创造的70%的新价值将基于数字化的平台（世界经济论坛，2019）。

虽然世界上有一半的人口仍然处于未联网状态（联合国秘书长，2020），但目前的社交媒体用户人数高达42亿。如今有52亿人使用手机，这使得手机成为所有国家中使用最广泛的互联网设备（Kemp，2021）。自2010年以来，全球互联网用户数量翻了一番，全球互联网流量增长了12倍（国际能源署[IEA]，2020）。2020年，世界上有超过一半的人口（47亿人）使用互联网——每天有超过一百万人首次上网。

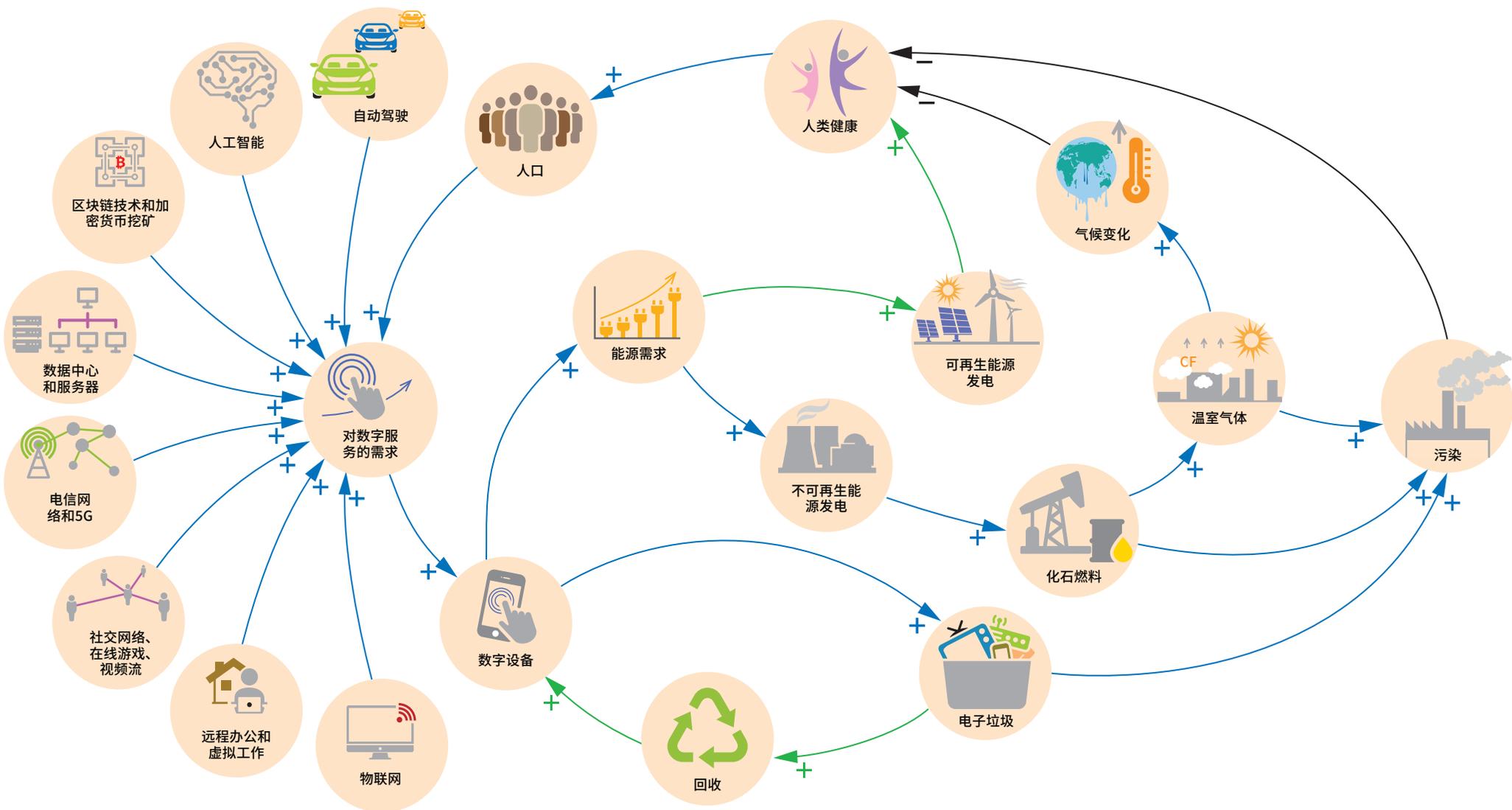
新冠肺炎危机加快了数字化转型的步伐。我们抵御新冠肺炎的能力很大程度上依赖于数字技术，包括疫苗开发、风险建模和接触者追踪。许多雇主和教育机构也搬到网上，网络会议在大多数发达国家成为工作和学校授课的标准方式，也成为与家人和朋友保持联系的标准方式。



图片来源：Belen Desmaison

实现数字技术所用的时间非常短暂，而所取得的数字进步却令人震惊。但这种进步也不无代价，因为制造硬件和推动这一互联网爆炸式增长所需的电力都留下了大量的环境足迹。数字经济为减少我们造成的环境影响带来了机遇，例如，用视频会议代替乘飞机参加会议，以及许多其他好处（见UNEP，2019a；UNEP，2020）。因此，本期《前瞻研究简报》提出并回答了一个问题：我们如何开始谱写绿色的数字未来？

系统思维视角



对数字服务的需求推动了数字设备的生产和供应，导致能源需求增加。采用造成污染和增加温室气体的化石燃料供电，将加剧气候变化，进而对人类健康产生不利影响。如果使用可再生能源和可回收的部件（如电池）来制造和使用数字设备，将有助于减少污染和气候变化。进而改善人类健康。这种方法反过来将更可持续地强化对数字服务的需求。(+)影响是在同一方向，(-)影响是在相反方向。

为什么这个问题很重要？

互联网流量增长迅猛，而2020年是一个特殊的年份，因为在新冠肺炎的第一波疫情浪潮中，全球互联网流量增长了近40%。随着数字鸿沟的缩小，这一趋势将进一步加剧。这种增长是由远程办公、对视频会议、在线游戏、视频流和社交网络的需求激增所推动的。虽然很难估计，但这些变化确实减少了出行需求和相应的排放，但技术本身的环境足迹有多大呢？

找到一个直截了当的答案并不容易，因为这取决于许多因素，例如用于生产和使用数字设备的电力是如何生产的，是来自可再生能源还是来自煤电厂？以下是一些平均数字：一次搜索查询会排放大约1.45克的二氧化碳 (Gröger, 2020)。如果每天查询50次，一个人每年就会产生26公斤的二氧化碳当量。这一数字听起来不是很大，但需要乘以每天在互联网上搜索的数十亿人。谷歌自己报告说，2018年谷歌的碳足迹为490万吨二氧化碳当量，耗电量为10太瓦时¹ (谷歌, 2019年)，这相当于新西兰或匈牙利用电量的四分之一 (IEA, 2021)。下面列出了大量使用互联网和数字化造成的一些影响。

能源需求增加

如果互联网是一个国家，那么它将是地球上第六大电力消费国，在全球用电量中的占比高达7% (Andrae, 2020; eon, 2021)，并造成高达3.8%的全球温室气体排放量 (Bordage, 2019) ——比国际空中交通在全球温室气体排放的占比2.5%还要多 (Lee等人, 2021)。

¹太瓦时 = 1,000,000,000,000瓦时

“如果互联网是一个国家，它将是地球上第六大电力消费国……”

Andrae, 2020; eon, 2021

以德国为例，据计算，400个大型和5万多个小型数据中心仅在2018年就消耗了14太瓦时，占德国总用电量的2.7%，与柏林市的用电量差不多 (Hintemann, 2019)。德国所有的数据中心、网络和设备加起来共消耗了55太瓦时——相当于10座中型煤电厂 (Klump, 2018; Statista, 2021)。这比2010年增长了近40% (Hintemann, 2019)。

尽管效率的提高所带来的能源节约使能源使用曲线趋于平缓，但全球趋势，如加密货币挖矿、云使用、人工智能、虚拟和增强现实、自动驾驶、物联网和预计实施的5G，将推动能源需求进一步增长。



图片来源: Belen Desmaison

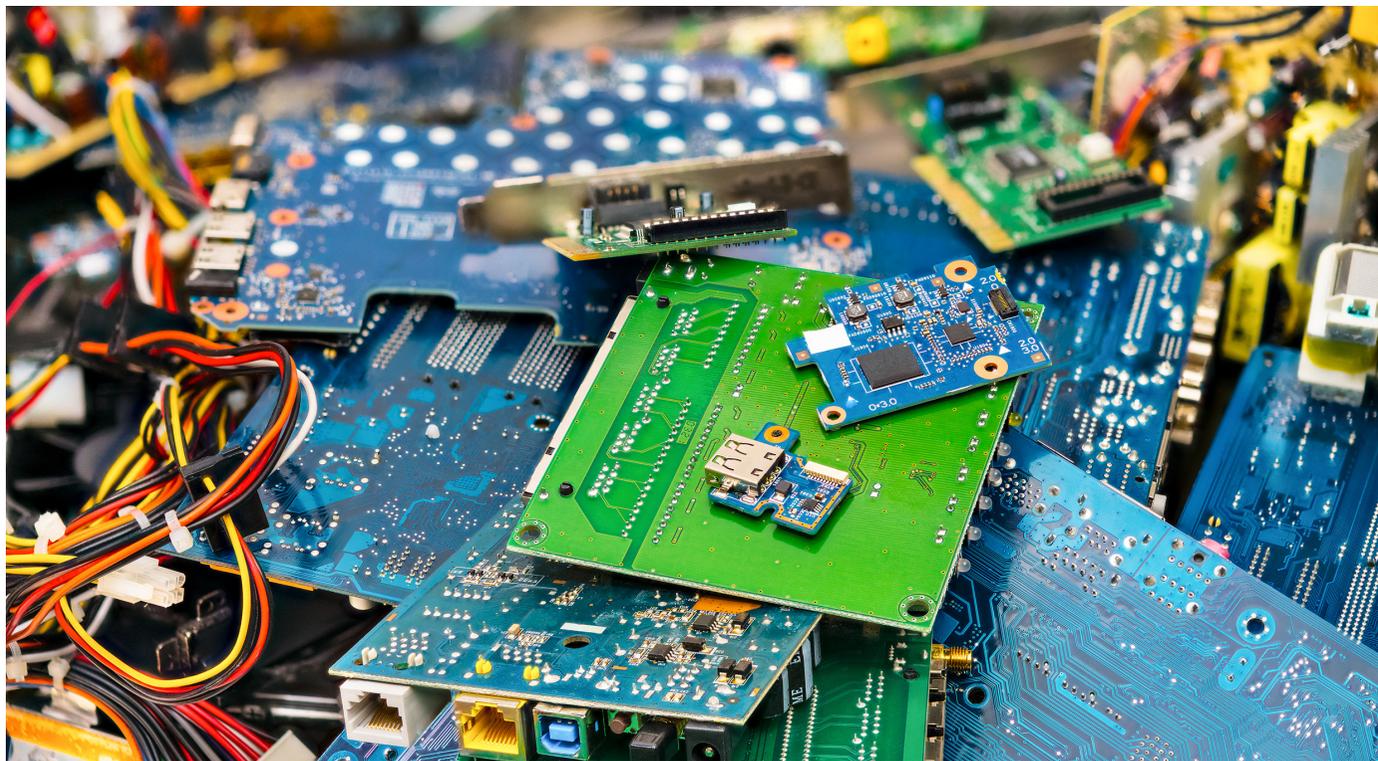


图片来源: Belen Desmaison

数字产品和能源技术所需的矿物和金属供应链造成的影响

我们的眼睛看不到比特和字节，但运行这个隐藏网络的引擎是由从地球上采掘的材料建造的。这一采掘过程，以及将矿物变成手机、电脑和服务器的生产过程，在整个生命周期中都留下了自身的环境足迹。同样，为数字技术提供动力的绿色能源技术水平越来越高，其供应链也以大量使用金属和稀土矿物为基础。

在政治不稳定的国家，由于采矿业的治理能力薄弱，开采这些矿物时可能涉及暴力、冲突、侵犯人权和严重破坏环境。在许多情况下，这些关键矿物的全球储藏地区与发生冲突和暴力的脆弱地区相重合。钴、石墨、铜和稀土尤其值得关注，因为大量矿藏都集中在脆弱地区。在2017年腐败认知指数排名靠前的国家，发现存储有大量18种关键矿物 (国际可持续发展研究院 [IISD] 2018)。



图片来源: Shutterstock.com

电子垃圾增加

我们的数字硬件寿命相对较短——往往只有几年。妥善收集电子垃圾的挑战，以及在最好的情况下，回收电子垃圾的挑战仍然非常艰巨。

2019年，产生了创纪录的5360万公吨电子垃圾，相当于12.5万架波音747大型喷气式客机的重量——超过了有史以来制造的所有商用飞机数量。这使得电子垃圾成为世界上增长最快的生活垃圾，主要是因为电气设备和电子设备的消耗率较高、生命周期短、维修选择少。只有17.4%的电子垃圾被正式记录为得到正式收集和回收。只有78个国家有电子垃圾立法 (Forti等人, 2020)。

由于只有不到20%的电子垃圾被正式回收，剩下的80%要么被填埋，要么被非正式地回收——其中大部分是在发展中国家手工回收的，工人们因此接触到汞、铅和镉等有害物质和致癌物质。被填埋的电子垃圾会污染土壤和地下水，使粮食供应系统和水源面临风险 (联合国, 2017; 环境署, 2019b; Forti等人, 2020)。这些有害物质通过直接接触以及污染土壤和水威胁着人类健康，主要受影响的是最不发达国家的最贫穷人口，因此具有重大的社会和环境的影响。

有哪些主要的发现?

随着数字化和数字服务消费增加，并将在未来随着数字鸿沟得到克服而加速，我们必须考虑这一趋势对环境的影响。

- **能源消耗和二氧化碳排放:**好消息是，近年来能源效率快速提高，有助于限制数据中心的能源需求增长 (图 1) (IEA, 2017; Shehabi等人, 2018; Masanet等人, 2020)。

尽管如此，信通技术的总能耗和相关的温室气体排放仍在稳步上升。

- **能源消耗:**从2010年的700太瓦时上升到2020年的1,500-3,000太瓦时，包括制造设备所需的

2010-2019年互联网流量、数据中心工作负荷和数据中心能源使用的全球趋势

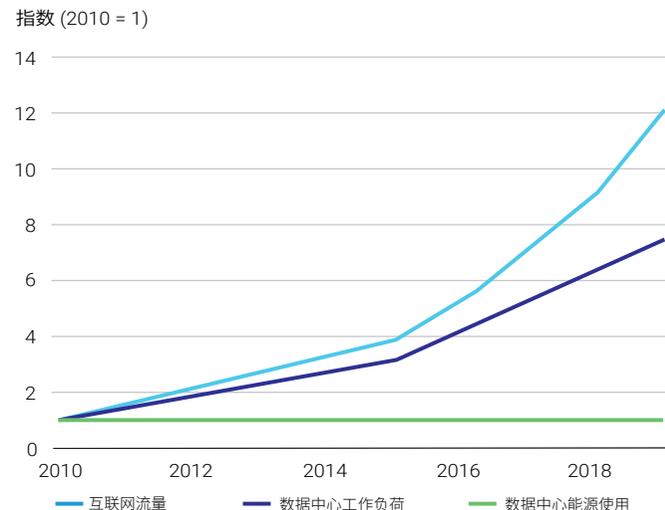


图1: 2010-2019年互联网流量、数据中心工作负荷和数据中心能源使用的全球趋势 (IEA, 2020)

2018-2030年信通技术用电情况(太瓦时)

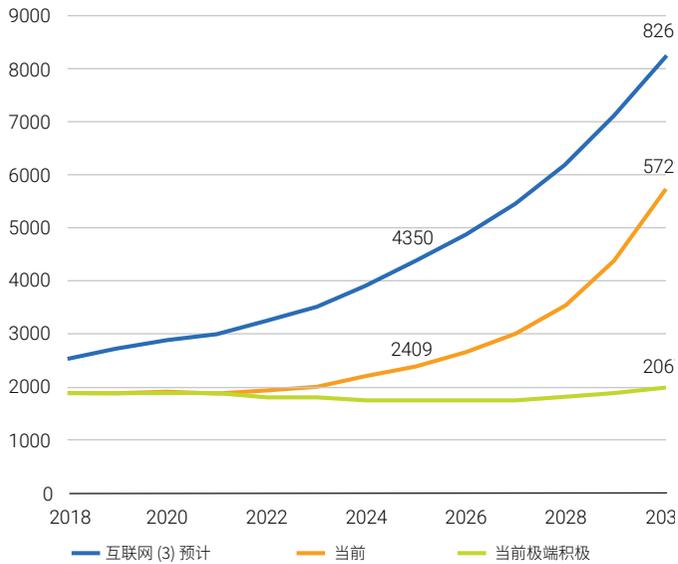


图2: 信通技术用电情景。(Andrae, 2020)

灰色能源在内在为8,000太瓦时 (Bordage, 2019; Andrae, 2020)。

- **温室气体排放:** 这些排放量从8亿吨二氧化碳当量增加到15-20亿吨二氧化碳当量, 不包括制造过程, 因为制造过程可能会使这些数值再增加10-40% (Malmodin和Lundén, 2018; Bordage, 2019; Bieser等人, 2020)。

信通技术未来能源消耗的情景显示出重要的增长(图2): 最乐观的研究估计表明, 到2030年, 使用阶段的能源需求可能只略微增长到2000太瓦时, 而最悲观的研究估计表明, 能源需求甚至会高达8000多太瓦时 (Andrae和Edler, 2015; Belkhir和Elmeligi, 2018; Hintemann, 2018; Bordage, 2019; Efoui-

Hess, 2019; Andrae, 2020; Bieser等人, 2020; Obringer等人, 2021)。

- **节省的排放量:** 近年来, 使用阶段的能源效率提高是很重要的; 然而, 却无法再补偿例如终端消费产品的屏幕尺寸和功耗要求的持续上升——这是一种典型的“反弹效应”。

从整体环境足迹的角度来看, 最近由新冠肺炎疫情引发的在线视频会议和家庭办公的趋势至少可以被认为对排放有部分积极影响: 尽管新冠肺炎危机暴发不久, 缺乏详细的数据, 但这场危机可能会大大减少与运输相关的温室气体排放。由于数字化程度的提高, 能源消耗不断增加, 但可能只在因新冠肺炎危机而减少的能源消耗(和排放量)中占较小的比例。

2020年互联网上的一分钟

互联网上一分钟内创建的估算数据



图3: 互联网上一分钟内创建的估算数据。(Statista, 2020)

“今天我们只使用了我们产生的数据的6%, 其他94%的数据归入我所说的数据填埋场。”

慧与科技公司首席执行官安东尼奥·内里在达沃斯2020年世界经济论坛上的发言, 由露西·英厄姆引用(2020)。

- **视频:** 可在不同平台上获得, 无需下载即可观看(流媒体)——占全球数据传输的80% (Efoui-Hess, 2019)。这些视频大多与工作无关, 只是为了娱乐休闲。在一分钟的时间内, 奈飞的电影播放量接近40万小时, YouTube上观看的视频达到450万个(图3) (Lewis, 2019; Statista, 2020)。
- **数据中心:** 构成了互联网的主干; 全球只有几千个大型数据中心, 最多有6700万台托管服务器 (Bordage, 2019; Statistica, 2021); 它们消耗了大约400-500太瓦时的电力, 排放了2-2.5亿吨二氧化碳当量(其中包括生产排放) (Bieser等人, 2020)。大约60%的数据中心温室气体排放量是由服务器、存储系统和网络等IT组件造成的。40%的温室气体排放量是由于基础设施造成的, 特别是冷却和空调以及保障电力供应安全的基础设施。冷却这些系统需要大量能源。例如, 尽管服务器群产生的热量可以用于为附近的家庭供暖, 但全球只有19%的数据中心会重复利用所产生的热量。使用阶段



图片来源: Shutterstock.com

的温室气体排放量占总排放量的90% (Bieser等人, 2020)。

此外, 存储在“云中”的大量数据包含陈旧过时的信息。慧与科技公司首席执行官安东尼奥·内里 (Antonio Neri) 估计, 产生的数据中只有6%被使用; 其他94%归入他所说的“数据填埋场” (Ingham, 2020)。

- **电信网络:** 将用户终端彼此连接以及将用户终端和数据中心连接在一起的网络由11亿个光纤路由器、1000万个用于移动通信的中继器和2亿个互联网“连接器”组成 (Bordage, 2019)。2020年电信网络的能源消耗约为200-550太瓦时, 温室气体排放量为2-2.5亿吨二氧化碳当量 (包括设备的生产)。电信网络的使用阶段温室气体排放量占其总排放量的90% (Bieser等人, 2020)。

- **终端设备:** 使用电脑、笔记本电脑、平板电脑和智能手机产生的温室气体排放总量为9-11亿吨二氧化碳当量。生产和运输终端设备产生的温室气体排放量占其总排放量的50%以上, 而且这一数字还可能上升 (Bieser等人, 2020)。
- **5G:** 由于5G的频率只能短距离传播, 中型手提箱大小的小型基站将需要相隔250米放置。这样的基站可能需要200到1000瓦的功率。虽然5G每传输一个GB所需的能量比4G少 (GSMA, 2019; t3n, 2019), 但使用5G需要增加大量的天线, 从而增大了电力需求。在4G时代, 数字设备一次连接到一个基础设施 (基站), 再传输到下一个基站, 以此类推。而在5G时代, 设备和器材将同时与多个基站和其他基础设施进行通信。传统数据中心不足以实现这种连接性和延迟。为了减少延迟, 将需要建造更多的数据中心, 其中许多“微型数据

中心”就位于网络边缘 (即在基站的底部), 这可能导致网络总能耗到2026年增加150-170% (EMFSA, 2019)。

一份报告发现, 法国的5G网络可能会导致30至70亿吨额外的二氧化碳排放到大气中, 占目前排放量的1-2% (法国高级气候委员会, 2020)。除了新的网络要求外, 能够利用5G的新一代移动设备需要进入市场, 从而使目前使用的手机以及其他技术设备变得过时。由于对计算能力的需求增加, 5G将对电池容量产生相当大的影响。

- **人工智能 (AI):** 人工智能正日益渗透到人类社会, 并开始在我们周围使用, 例如, 从客厅的语音识别到在关键基础设施中使用深度学习应用的云解决方案。人工智能可能导致数据中心的能耗增加。据麻省理工学院的研究人员计算, 训练一个语音识别的人工智能应用程序所



图片来源: Shutterstock.com

产生的二氧化碳量是一辆汽车在其整个生命周期产生的二氧化碳量的五倍 (Hao, 2019; Strubell、Ganesh和McCallum, 2019)。

- **区块链技术:**一笔比特币交易大约消耗660千瓦时 (Digiconomist, 2020), 相当于一台150瓦的冰箱运行约8个月。如果比特币是一个国家, 它将以60-80太瓦时的电力消耗排名第38位, 处于比利时和奥地利之间。比特币的二氧化碳排放量为3700万吨, 排名处于新西兰和爱尔兰之间。(Kamiya, 2019; Digiconomist, 2020)。伊朗已决定禁止生产比特币, 因为这会导致电力短缺 (Turak, 2021)。之所以有这么大的影响, 是因为比特币所选择的生成方式。并非所有的区块链技术都需要那么多的能源。其他数字货币选择了生成代币的其他方式, 对能源的要求也较低。



图片来源: Shutterstock.com



图片来源: Belen Desmaison

- **自动驾驶:**尽管自动驾驶汽车仍处于早期发展阶段, 但更广泛的运用将极大地增加移动通信和互联网带宽需求。据估计, 一辆自动驾驶汽车每天产生4至8TB的数据, 每小时向云端上传25至250GB的数据 (Kallenbach, 2017; it-daily, 2021)。

- **大型服务器群的搬迁:**一些企业已经将他们的服务器群完全搬到了可再生能源丰富的地区, 如挪威。
- **热量的再利用:**一些数据中心已经启动了相关项目, 旨在将冷却过程中产生的热量重新用于加热附近的建筑 (Börje, 2019)。

正在采取哪些措施?

业界越来越关注行业内外数字足迹, 对寻找环境可持续的全球数字化解决方案的兴趣也越来越大:

- **净零承诺:**包括亚马逊、谷歌和微软在内的主要云和数据中心运营商, 以及较小的和国家供应商, 已经采纳了到2030年甚至更早实现气候中和这一目标 (Stramski, 2020)。许多运营商已经实施了一些措施, 比如对风力涡轮机和光伏设施进行大量投资。许多企业正在抵消自身的二氧化碳排放, 例如, 投资于减少二氧化碳或甲烷的技术, 或投资于再生农业和植树造林项目 (苹果公司, 2020; RegenNetwork, 2021)。

- **能效提升:**各个技术层面的效率都有很大提高。例如, 所谓的“超大规模”²数据中心已经大幅提高了效率。
- **国际倡议:**欧盟绿色数字宣言: 26家公司首席执行官签署了一份宣言, 支持欧盟的绿色数字化转型。27个欧盟国家和另外两个成员国签署了一份欧盟宣言, 承诺引领绿色数字化转型。“数字化促进可持续发展——对话中的科学”(D4S): 是一个新的欧洲研究团队, 致力于为环境和社会可持续发展的数字化制定一

² 超大规模数据中心是用于在云计算和大数据领域实现大规模扩展的计算网络。超大规模数据中心的基础设施经设计, 可以实现横向扩展。相应地, 超大规模数据中心提供了非常高的性能、吞吐量以及冗余。

个进步的愿景。该项目旨在通过对数字化和可持续性方面的机会、风险和治理方案进行全面分析，加强科学政策讨论。

对政策有什么影响？

显然，数字化提供了将人、项目和想法联系起来的许多机会。这是很明显的趋势，而且经济正在围绕这些新技术进行组织。然而，为了避免数字化本身成为一个环境问题，政策制定者、企业、服务提供商和用户可以采取不同的措施和激励措施：

- **电力生产**：加快信通技术行业对可再生能源的采用以及披露，包括制造商和服务器群。这应该包括采购可再生能源证书。
- **信通技术供应链绿色化**：改善信通技术部门供应链的治理，特别是在稀土矿物和金属的开采、电子垃圾的回收和有毒材料的安全处置方面。
- **寿命**：利用进化式设计和循环经济模式来延长服务器和其他设备的使用寿命，以实现关键部件的升级和可替换性。确保设备退役时得到重新使用或完全回收。
- **冷却**：减少服务器群所需的空调，并将产生的热量重新用于其他用途。
- **数字碎片**：鼓励用户和机构删除不再使用的云内容，或将信息存档到长期存储时关闭的外部驱动器。

- **5G**：研究这种新技术的优势和负面影响，以及替代技术，如高速光纤电缆。考虑安装一个单一的天线网络，可以由不同的运营商共享，以减少天线的数量，从而减少所需的硬件数量以及辐射暴露。
- **在线行为**：许多人大规模地采取对环境负责的在线行为，这对于应对气候变化和促进可持续发展至关重要。在虚拟会议期间关闭视频，降低流媒体服务的质量，减少游戏时间，限制花在社交媒体上的时间，减少发送电子邮件（并且去掉不必要的抄送），删除基于云的存储服务上的电子邮件和非必要的内容，或取消订阅电子邮件列表等小行动，可以大大减少互联网使用的环境足迹。
- **加密货币**：应评估加密货币的技术框架。需要有法规和政策来指导所使用的技术类型和相关的能源需求。
- **数字产品护照**：欧盟目前正在创造数字“产品护照”这一概念。产品护照将提供关于产品原产地、耐用性、成分、环境足迹和碳足迹、再利用、维修和拆卸的可能性以及报废处理等数字化信息。产品护照的不同方面将提供给企业、政府和消费者。
- **绿色信通技术的公共采购**：政府和国际组织在采购信通技术基础设施以升级服务或缩小数字鸿沟时，应遵循绿色信通技术方面的最佳做法。



图片来源：Belen Desmaison

结论

互联网和数字化工具日益增长的潜力既带来好处，也带来挑战。从积极的方面来看，数字化可以减少旅行的需要；降低监测和分享数据和信息的成本；实现互操作性，从而实现服务器之间的通信；提供近乎实时的数据来改善我们的决策，或转向智能城市，更好地一边生产一边利用可再生能源；让我们可以方便地与世界各地的朋友和家人沟通。它将在不久的将来为许多紧迫的社会生态问题提供新的解决方案。

从消极的方面来看，数字基础设施的环境足迹对我们的星球和子孙后代构成严重威胁。我们希望数字化有助于应对气候变化和减少我们在地球上产生的环境足迹，而生产基础设施产生的贵重/稀有金属需求和运行基础设施所需的巨大能源消耗却构成了严峻的挑战。

有许多机会可以把握，因为许多公司确实在投资于企业的绿色化。需要加大努力，特别是在转向100%的可再生能源，优化数据中心的冷却系统，重新使用产生的热量以及用过的材料等方面。消费者需要调整在线行为，以减少自己的在线足迹——减少高分辨率视频，减少花在互联网上的时间，更经常地清理电子邮件，减少照片和电子邮件的云存储。

致谢

作者

Stefan Schwarzer, Pascal Peduzzi, 联合国环境规划署/全球资源信息数据库
日内瓦中心和日内瓦大学

审稿人

外部

Anna Dyson (耶鲁大学建筑生态系统中心)、Lambert Hogenhout (联合国信息和通信技术办公室(OICT))

联合国环境署审稿人

Angeline Djampou, Virginia Gitari, Samuel Opiyo, David Jensen, Saiful
Ridwan, Ray Goh, Pooja Munshi

联合国环境规划署前瞻研究简报小组

Alexandre Caldas, Sandor Frigyk, Audrey Ringler, Esther Katu, Erick
Litswa, Pascil Muchesia

免责声明

本出版物所采用的名称与呈现方式并不意味着联合国环境规划署或合作机构
对任何国家、领土、城市及其当局的法律地位或其边界划定表示任何意见。

© 地图、照片和插图来源请参照说明。

联系方式

unep-foresight@un.org

参考文献

Andrae, A. and Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology. Trends to 2030, *Challenges* 6(1), pp. 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>.

Andrae, A.S.G. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030, p. 14. <https://pirst.org/psrpress/j/easl/2020/2/3/new-perspectives-on-internet-electricity-use-in-2030.pdf>.

Apple (2020). Apple commits to be 100 percent carbon neutral for its supply chain and products by 2030. *Apple Newsroom*, 21 July. Available at: <https://www.apple.com/newsroom/2020/07/apple-commits-to-be-100-percent-carbon-neutral-for-its-supply-chain-and-products-by-2030/> (Accessed: 15 March 2021).

Belkhir, L. and Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, pp. 448–463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>.

Bieser, J. et al. (2020). Climate protection through digital technologies. Bitkom e.V.

Bieser, J., Saliari, B., Hischer, R. and Hilty, R. (2020). Next Generation Mobile Networks: Problem or Opportunity for Climate Protection? Zurich: University of Zurich.

Bordage, F. (2019). *The Environmental Footprint of the Digital World*. GreenIT.fr, p. 39. https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/11/GREENIT_EENM_etude_EN_accessible.pdf.

Börje, J. (2019). Three new data centers with heat recovery in Stockholm Data Parks. *Stockholm Data Parks*, 12 November. Available at: <https://stockholmdataparks.com/2019/11/12/three-new-data-centers-with-heat-recovery-in-stockholm-data-parks/> (Accessed: 10 March 2021).

Digiconomist (2020). *Bitcoin Energy Consumption Index*. Available at: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/> (Accessed: 15 March 2021).

Efoui-Hess, M. (2019). Climate crisis: the unsustainable use of online video: the practical case for digital sobriety. *The Shift Project*. Available at: <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/07/2019-02.pdf>.

EMFSA (2019). 5G – Energy Consumption, Carbon Footprint, Climate Change: Environmental Impact. EMFSA. Available at: <https://www.emfsa.co.za/news/5g-energy-consumption-carbon-footprint-climate-change-environmental-impact/> (Accessed: 27 January 2021).

eon (2021). *Green Internet: Solutions for the future of data centres | E.ON*. Available at: <https://www.eon.com/en/about-us/green-internet.html> (Accessed: 15 March 2021).

Forti, V., Balde, C., Kuehr, R. and Bel, G. (2020).

France, Haut Conseil pour le Climat (2020). Maitriser l'impact carbone de la 5G. https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/12/haut-conseil-pour-le-climat_rapport-5g.pdf.

Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. UNU, UNITAR, ITU, ISWA.

Google (2019). *Google Environmental Report 2019*. Google. Available at: <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2019-environmental-report.pdf>.

Gröger, J. (2020). *The carbon footprint of our digital lifestyles*, Oeko-Institut. Available at: <https://blog.oeko.de/digitaler-co2-fussabdruck/> (Accessed: 15 March 2021).

GSMA (2019). *Energy Efficiency: An Overview*. Future Networks. Available at: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2/> (Accessed: 19 April 2021).

Hao, K. (2019). Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes: Deep learning has a terrible carbon footprint. *MIT Technology Review*, 6 June. Available at: <https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/> (Accessed: 15 March 2021).

Hintemann, R. (2018) (2020). *Efficiency Gains are Not Enough: Data Center Energy Consumption Continues to Rise Significantly*. Borderstep Inst. für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH. https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/04/Borderstep-Datacenter-2018_en.pdf

Hintemann, R. (2019). *Energiebedarf der Rechenzentren steigt deutlich an*, Borderstep Institut. Available at: <https://www.borderstep.de/energiebedarf-der-rechenzentren-steigt-deutlich-an/> (Accessed: 15 March 2021).

International Energy Agency (2017). *Digitalization and Energy*. IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (Accessed: 15 March 2021).

International Energy Agency (2020). *Data Centres and Data Transmission Networks – Analysis*, IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Accessed: 10 August 2021).

International Energy Agency (2020). *Data Centres and Data Transmission Networks – Analysis*, IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Accessed: 27 January 2021).

International Institute for Sustainable Development (2018). *State of Sustainability Initiatives Review: Standards and the Extractive Economy*. Available at: <https://www.deslibris.ca/ID/10097867> (Accessed: 9 August 2021).

Ingham, L. (2020). HPE CEO: Mining the "data landfill" is key to solving the digital divide. *Verdict*, 24 January. Available at: <https://www.verdict.co.uk/hpe-ceo-data-landfill/> (Accessed: 15 March 2021).

it-daily (2021). *Fachartikel über Digitale Transformation, it-daily.net*. Available at: <https://www.it-daily.net/it-management/digitalisierung/27200-ki-baendigt-datenmengen-fuer-automatisiertes-fahren> (Accessed: 3 March 2021).

Kallenbach, C. (2017). *Datentreiber Connected Car: Das Auto - Dein Freund und Helfer*. Available at: <https://www.computerwoche.de/a/das-auto-dein-freund-und-helfer,3329638> (Accessed: 3 March 2021).

Kamiya, G. (2019). *Bitcoin Energy Use - Mined the Gap*. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/bitcoin-energy-use-mined-the-gap> (Accessed: 15 March 2021).

Kemp, S. (2021). *Digital 2021: the latest insights into the 'state of digital', We Are Social USA*. Available at: <https://wearesocial.com/us/blog/2021/01/digital-2021-the-latest-insights-into-the-state-of-digital> (Accessed: 15 March 2021).

Klumpp, D. (2018). *Energiefresser Internet - Die Ökobilanz eines Mausclicks*, swr.online. Available at: <https://www.swr.de/odyssey/oeobilanz-des-internets/-/id=13831216/did=21791748/nid=13831216/a60zjw/index.html> (Accessed: 9 March 2021).

Lee, D.S., Fahey, D.W., Skowron, A., Allen, M.R., Burkhardt, U., Chen, Q. et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, 244, p. 117834. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.

Lewis, L. (2019). What Happens in an Internet Minute in 2019?, *Visual Capitalist*, 13 March. Available at: <https://www.visualcapitalist.com/what-happens-in-an-internet-minute-in-2019/> (Accessed: 11 August 2021).

Malmodin, J. and Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), p. 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>.

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N. and Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science* 367(6481), p. 4. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758>.

Obinger, R., Rachunok, B., Maia-Silva, D., Arbabzadeh, M., Nateghi, R. and Madani, K. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Resources, Conservation and Recycling* 167, 105389. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105389>.

RegenNetwork (2021). *Regen Network Announces Historic Carbon Credit Sale in Australia*, Medium. Available at: <https://medium.com/regen-network/regen-network-announces-historic-carbon-credit-sale-in-australia-b76dfadcc095> (Accessed: 15 March 2021).

Shehabi, A., Smith, S.J., Masanet, E. and Koomey, J. (2018). Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use. *Environmental Research Letters*, 13(12), p. 124030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaec9c>.

Statista (2020). *Infographic: A Minute on the Internet in 2020*, Statista Infographics. Available at: <https://www.statista.com/chart/17518/data-created-in-an-internet-minute/> (Accessed: 9 August 2021).

Statista (2021). *Data centers worldwide by country 2021*, Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1228433/data-centers-worldwide-by-country/> (Accessed: 19 May 2021).

Stramski, W. (2020). *Climate Neutral Data Center Pact: The Green Deal Needs Green Infrastructure*. Available at: <https://www.climateneutraldatacentre.net/> (Accessed: 15 March 2021).

Strubell, E., Ganesh, A. and McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. *arXiv:1906.02243 [cs]* [Preprint]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1906.02243> (Accessed: 15 March 2021).

t3n (2019). *Studie: 5G-Rechenzentren verbrauchen deutlich mehr Strom*, t3n Magazin. Available at: <https://t3n.de/news/studie-5g-rechenzentren-deutlich-1232548/> (Accessed: 27 January 2021).

Turak, N. (2021). Iran bans bitcoin mining as its cities suffer blackouts and power shortages. *CNBC*. Available at: <https://www.cnbc.com/2021/05/26/iran-bans-bitcoin-mining-as-its-cities-suffer-blackouts.html> (Accessed: 2 November 2021).

United Nations (2017) *United Nations System-wide Response to Tackling E-waste*. UNEP.

United Nations Environment Programme (2019a). Building a digital ecosystem for the planet. *Foresight Brief 014*, September 2019. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30612/Foresight014.pdf>.

United Nations Environment Programme (2019b). *UN Report: Time to seize opportunity, tackle challenge of e-waste, UN Environment*. Available at: <http://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/un-report-time-seize-opportunity-tackle-challenge-e-waste> (Accessed: 27 January 2021).

United Nations Environment Programme (2020). *Blockchain technology and environmental sustainability*. *Foresight Brief 019*, Octobre 2020. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34226/FB019.pdf>.

United States Energy Information Administration (2021) *International - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Available at: <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-consumption> (Accessed: 19 April 2021).

如要在线阅读本期和往期联合国环境规划署《前瞻研究简报》和下载简报, 请访问

<https://data.unep.org/foresight>