

第二章 我们可以从能源行业的脱碳中学到什么？

A. J. Simon^{1*} and Seth W. Snyder^{2,3}

¹Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

²Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID, USA

³Northwestern University, Evanston, IL, USA

*Correspondence: simon19@llnl.gov

2.1 简介：能源与水：相似之处、不同之处和复杂的关系

水和污水脱碳处理是一项巨大的挑战，但它的总碳排放量远小于能源行业的脱碳量。在规划、执行和评估水务行业脱碳战略时，水专家应与能源行业合作，并听取该行业正在进行的脱碳过程中吸取的经验教训。在能源领域，脱碳途径可以像供应侧技术一样简单，可以更有效地将燃料转化为电力，从而减少每千瓦时产生的净碳排放量。然而，这些途径可能要复杂得多，就像在公共卫生危机期间在线购物或在家工作中看到的需求方行为重新排序的情况一样。这两种途径都减少了对私人车辆燃料的需求，并将一些工作和相关的碳排放转移到经济的其他部分。本章探讨了能源行业遵循的脱碳途径，并评估了它们对水务行业的适用性。

能源和水是两个以多种方式耦合的基础设施行业。本章无意量化评估能源和水为彼此脱碳做出贡献的机会。为了全面了解“能源-水关系”的问题和机会，建议读者查阅文献(DOE, 2014; EPRI, 2013; Gleick, 1994; Greenberg et al., 2017; Grubert & Sanders, 2018)。构成脱碳机会的最重要概念如下：

- 水和污水处理通常是曝气、泵送和加热的能源消耗者。这种能源使用与发电或现场使用天然气所产生的碳排放有关，能源行业的脱碳有助于水务行业的脱碳。
- 污水是碳的载体，大部分污水在处理过程中或排放后在环境中被氧化成 CO₂。拦截并永久固定这些碳是水务行业减少其总排放量的重要机会。
- 污水的厌氧消化将嵌入的碳分馏成甲烷和二氧化碳。甲烷在 100 年内的辐射强迫因子是二氧化碳的 28 倍（在 20 年内是二氧化碳的 86 倍），如果不捕获和燃烧甲烷，则会导致重大的短期气候影响(Roy et al., 2015)。
- 单元工艺层面的创新是控制水务行业碳强度的最直接方法。

- 水经济的结构变化（用水更有效、饮用水和非饮用水再利用等）也可能影响该行业的碳强度。

2.1.1 能源与水的关系

能源-水关系是指能源和水务行业之间的耦合。水务行业需要大量能源才能运行，并为能源回收和发电提供了机会。同样，能源行业需要大量的水才能运行，也为水处理和输送提供了机会。在能源与水的关系上，一个行业的变化可能会影响另一个行业的经济和环境可持续性。现代水系统使用外源能源来获取、输送、净化、分配、收集、处理和处置水。在某种程度上，这种外生能量是电力(泵和鼓风机的动力)，水系统的碳强度与电力供应的碳强度是耦合的。电力供应的脱碳已经在进行，因为燃煤发电正在被天然气（其碳强度约为煤炭的一半）所取代，并且更多的电力来自太阳能和风能等非燃料资源。

文献中对能源-水关系中的挑战和机遇进行了更全面的说明（见上文，包括这些参考文献中引用的作品），这里简要总结了一些主要的相互作用：

- 水的采集、处理和分配需要电力来抽水。这适用于市政、工业和灌溉供水。用于水处理的化学品的生产也是能源密集型的。
- 污水处理需要用于曝气鼓风机和泵送的电力。在某些气候条件下，污水处理厂还需要天然气或其他燃料来加热厌氧消化池。
- 能源用于商业、工业和住宅应用中的水加热。
- 能源可以以沼气、沼气发电或可焚烧生物固体发电的形式从污水中回收。间接地，可以通过用生物固体代替化学肥料来替代能源。
- 热电厂（核能、天然气和煤炭）的电力生产需要水来冷却和控制排放。
- 水电是由水资源产生的，并影响其他经济用途和环境服务。
- 生物燃料的生产可能需要水用于灌溉能源作物和将原料转化为燃料。
- 石油和天然气的生产可能需要水进行水力压裂，并且经常导致采出水过剩。根据来源和质量，采出水可能需要能量进行处理和处置，或者可能经过处理以用于有益用途。

未来，海水和微咸水淡化以及其他先进的水处理可能需要额外的能源。去除和破坏受关注的新污染物(CEC)，包括但不限于全氟和多氟烷基物质(PFAS)，将

会显著增加处理水所需的能量。这些需求可能会影响一系列应用，包括市政和工业废水处理、雨水管理和地下水清理。从发电和低碳燃料生产中捕获和封存二氧化碳可能需要额外的水。然而，对能源和水的相互依赖关系的全面说明超出了本书的范围。

2.1.2 规模差异

能源系统的脱碳战略和策略在多大程度上可以适应水资源，取决于这两个关键基础设施系统的相似性、差异性和相互依赖性。从能源行业持续脱碳中汲取的经验教训是从总系统规模、资源替代、排放控制、服务质量和可持续性政策方面得出的。在本章中，美国的水、能源和其他商品市场被用于这些框架研究，因为美国是可以随时获得完整记录的能源和水统计数据的最大国家。类似的经验教训将适用于大多数发达经济体，这些经验教训可以在全球范围内推广和调整。

按年用水量衡量，水是美国最大的基础设施/商品行业，其倍数超过 20 倍。表 2.1 将用水量与其他主要能源、农业和材料行业的年化质量和体积规模进行了比较。重要的是要注意，水基础设施的规模仅用于公共供水（市政水处理厂），增加污水处理将使该数字大约翻一番。将灌溉、发电厂冷却和其他非市政用途包括在内的总用水量则是公共供水量的 10 倍，每年大约 5000 亿公吨！

从这些统计数据可以清楚地看出，水作为一个系统，在规模上是独一无二的。全社会要处理以比其他任何商品大几个数量级的水，并且需要比能源或任何其他商品大得多的物理基础设施。与体量相关的脱碳挑战，例如处理系统的资本成本，对于水来说往往比其他行业更大。

尽管通过水系统的总物质流量大于通过能源系统的总物质流量，但与水和污水处理相关的碳排放量小于能源系统的碳排放量。此外，每单位水的增量经济价值明显小于能源或产品，从而减少了可用于管理碳的潜在收入。本书第 3 章介绍了城市水循环中的碳核算框架。在这里，我们估计美国的市政水和污水处理每年造成 6100 万吨 (MMT) 的二氧化碳当量温室气体排放。其中，38MMT (CO₂-e) 与城市污水处理和排放产生的甲烷和一氧化二氮排放有关 (EPA, 2021)。剩余的 23MMT 来自约 5900 万兆瓦时 (MWh) 的发电量。

表 2.1 美国广泛使用的材料商品的年流量

商品	质量流量 (百万吨/年)	体积流量 (百万 m ³ /年)	备注
水(Dieter et al., 2018)	53880	53880	只从市政水处理厂输送
可成混凝土或修路等用的骨料(USGS, 2021)	2538	1586	美国碎石、沙子和砾石的总消耗量
石油(EIA, 2021)	895	1133	美国的总消费量, 包括净进口
煤(EIA, 2021)	724	804	美国的总消费量, 不包括出口
天然气(EIA, 2021)	607	771400	在标准温度和压力下计算的体积流量; 实际体积流量要小得多, 因为气体管道是加压的
玉米(USDA, 2021a)	340	479	美国总产量
钢铁(USGS, 2021)	100	13	美国的总表观消费量, 包括占总量 20%的进口量
小麦(USDA, 2021b)	51	66	美国的总产量, 包括占总产量 50%的出口量

美国水和污水处理厂消耗的电力(Greenberg et al., 2017)。额外的温室气体排放很可能归因于天然气现场燃烧的水和污水处理行业, 但是无法找到量化该排放源的数据。还假设用于水和污水处理的化学品的异地制造对该行业的使用寿命温室气体足迹做出了重大贡献, 但文献中对这一数量的估计差异很大(Kyung et al., 2015; Szulc et al., 2021)。美国整个能源行业的化石燃料燃烧排放了 5300 MMT 的二氧化碳。这两个统计数据不能直接比较; 与水务行业相关的 61 MMT CO₂-e 占特定行业范围 1、2 和 3 中的 CO₂ 和其他温室气体, 而能源行业的 5300 MMT CO₂ 仅占化石燃料衍生的 CO₂。此外, 水处理产生的范围 2 排放(约 2300 万吨)包括在能源行业产生的 5300 万吨化石燃料排放中。然而, 这两个数字之间的巨大差异表明, 尽管管理着大量的材料, 但水务行业管理的碳量要小得多。水务行业温室气体排放和能源行业温室气体排放之间的这种重叠是上述能源-水关系的一个标志。

2.1.3 碳水关系

对脱碳的关注主要集中在消除发电、运输和工业行业使用化石燃料产生的二氧化碳排放上。水务行业的温室气体排放是这些行业的排放（范围 2 排放）、污水中有机物质转化产生的非 CO₂ 温室气体以及污水本身中有机物质的 CO₂ 产物的组合。尽管污水中的大部分碳本质上是生物碳（最近来自大气碳），但考虑通过污水系统的水载碳的总流量是有益的。假设化学需氧量 (COD) 为 350 毫克/升，并且有机物(CH₂O)占该负荷的大部分，则每升污水中大约含有 11 mmol 碳。假设美国每天处理 320 亿加仑的污水，每年有 5.8 MMT 的碳通过污水处理厂，可能会产生 21.3MMT 来自厂内工艺以及氧化污水中的生物固体、沼气和剩余的 BOD/COD 的 CO₂ 排放量。

用美国国土安全部的术语来说，能源和水务行业都是“国家关键职能行业”（DHS, 2021），它们都将材料从环境转移到工程系统，然后再回到环境。但是，存在实质性差异。相对少量的能量会移动大量的水，而这些水会携带少量的有机碳。水资源从地表水或地下水库中获取，水作为受损或处理过的水返回地表。就能源而言，多种资源取自环境，当今的能源系统在很大程度上依赖于煤炭、石油和天然气地下储层中的化学化石能源。工程系统将能源与碳分离，提供服务并将相关的碳返回环境，最常见的是二氧化碳排放到大气中。本章的其余部分将重点关注能源系统的脱碳趋势，以及这些趋势如何通过能源-水关系以及共享技术、最佳实践和经验教训，有利于水系统的脱碳。

2.2 能源行业的脱碳

2020 年，能源行业的碳强度以每年约 1% 的速度下降。尽管这个速度看起来很慢，而且肯定不足以达到气候科学所认为的必要排放目标，但它代表了与前一个时代相比的重大变化。从 1977 年到 2005 年的 28 年间，能源使用的碳强度几乎没有变化，从每焦耳 (MMT/EJ) 的 58.3 吨二氧化碳下降到 56.6MMT/EJ，每年下降 0.1%。期间从 2005 年到 2017 年的 12 年间，碳强度从 56.6 下降到 49.9MMT/EJ，每年下降 1%（EIA, 2021）（这些统计数据中的每一个都采用报告年份的五年平均能源碳强度为消除统计数据中的噪音——从个别年份来看，

2005-2017 年的趋势似乎至少持续到 2019 年，并且可能还在加速)。脱碳步伐的十倍增长是由于能源系统的以下变化（按碳强度影响大小排列）：

- 发电领域从煤炭到天然气的重大转变；
- 风能和太阳能发电量大幅增加；
- 提高整体车辆效率和运输行业消耗的生物燃料百分比。

除了能源运输的碳强度降低外，美国经济的能源强度也有所下降。以实际 GDP 计算（所有价值均以 2012 年美元报价），1978 年美国每万亿美元 (EJ/\$T) 经济活动消耗 13.1 艾焦耳，2005 年为 7.1 EJ/\$T，2017 年为 5.7 EJ/\$T (US Bureau of Economic Analysis, 2021)。在整个时间范围内，经济能源强度的下降速度一直稳定在每年 1.6%。整体经济的能源强度下降是由于以下因素：

- 经济结构变化有利于能源强度较低的商业活动，例如金融和计算/数据驱动的服务，而不是能源强度较高的工业活动，例如钢铁制造；
- 提高能源效率，为较小的能源投入提供同等经济服务，例如：
 - 提高重型和轻型车辆的燃油效率；
 - 改善住宅和商业建筑的绝缘；
 - LED 照明等高效设备和电器。

图 2.1 以示意图方式展示了这些趋势。尽管实际 GDP（2012 年美元）增长了近 300%，从 1975 年的约 5.6 美元/吨增长到 2019 年的 19.1 美元/吨，但由于能源强度降低，能源使用在此期间仅增长了 40%，并且由于能源强度和碳排放强度下降，碳排放量已从 2005 年的高峰开始下降

这些趋势背后有多个相互关联的因素，包括鼓励可持续能源使用的能源政策、许多应用中的能源效率带来的成本节约、提高效率和减少排放的能源技术创新，以及消费者对更可持续解决方案的偏好。本章的其余部分将分析其中的一些因素并提供示例。

这些趋势很可能在未来加速。除了上述低排放和高效率技术的持续扩展外，以下趋势和技术开始在美国能源市场大规模推广。它们对整体能源消耗和排放的影响虽然还不显着，但到 2025 年可能会在整个经济的统计数据中显现出来：

- 远程工作选择（减少本地通勤和长途商务旅行，2020 年新冠流行引发的永久性变化）；

- 在线订购或“电子商务”在过去十年中稳步增长，并在新冠大流行期间迅速增长，大大减少了短途旅行的数量(DOE, 2020);
- 电动汽车（乘用车和送货车);
- 高效电加热（热泵）。

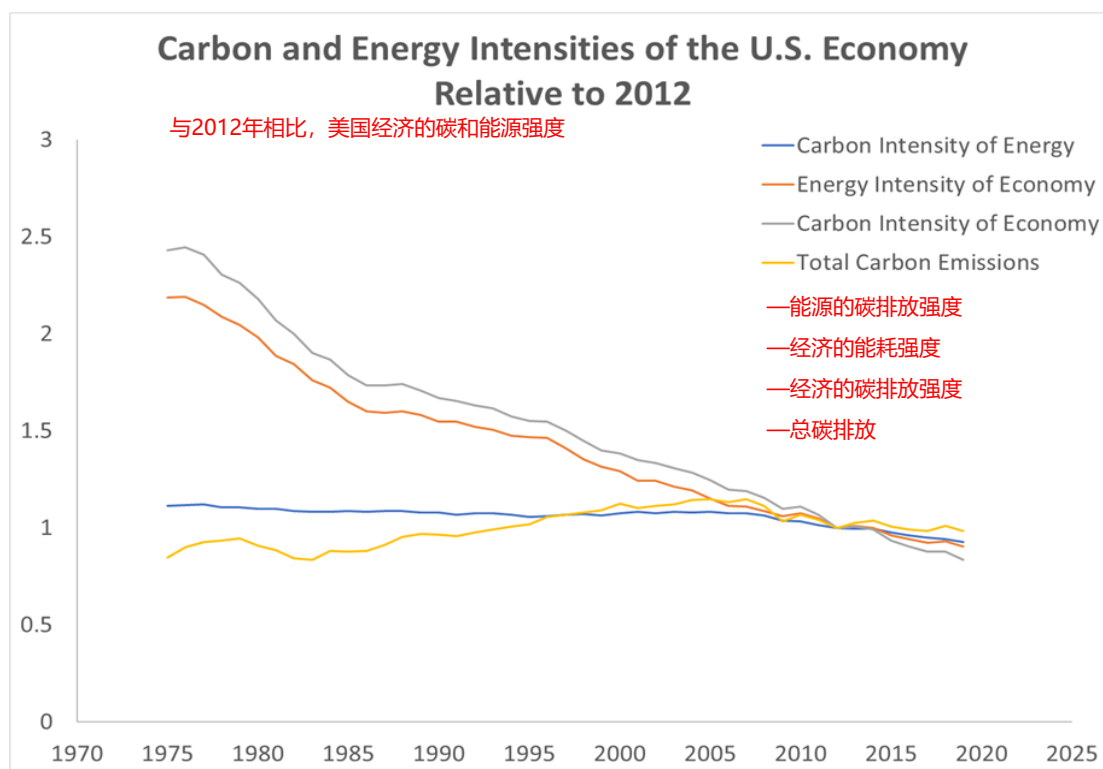


图 2.1 能源的碳强度，经济的能源强度，经济的碳强度，以及美国 2012 年的整体经济碳排放量

使用技术上可行并已大规模证明但尚未达到与竞争技术同等性能和/或成本的能源技术，有可能进一步大幅提高能源效率和经济活动的碳强度。如果实施某些政策或制定碳排放价格，这些技术的需求可能会大幅增加：

- 通过碳捕获和封存发电；
- 氢气作为运输燃料、加热燃料或化学过程输入；
- 小型模块化核反应堆；
- 生物质衍生能源（乙醇、其他液体、沼气、氢气或电力），具有过程排放的碳捕获和封存。

欧洲和一些亚洲经济体的能源强度低于拥有同样发达经济的美国。尽管中国在能源强度方面落后于美国和欧洲，但其改善速度要快得多。发展中国家的经济

能源强度要高得多，但总和人均能源使用量与发达经济体相比相形见绌。

2.3 能源和水的可持续性框架

能源、供水和污水管理是现代社会的​​基本需求。然而，由于供应限制和环境影​​响，不受约束的能源和水的使用是不可持续的。在这里，我们介绍了一个框架，如图 2.2 所示，用于组织增强可持续性的事件、行为和技术进步。该框架适用于能源和水服务。虽然该框架大致是分层的，类别从最低到最高列出，但每个类别之间没有严格的划分。可持续发展的进步可能受到资源限制和环境保护的推动（左半部分），通过创新和其他“高度可持续的”实践取得成功（右半部分）。任何特定能源/水干预措施的有效性取决于技术状况和现有基础设施的状况。压力源、行为变化、技术进步和能源/水系统的演变不会沿着这个范围线性发展。现代化和脱碳的历史包括迭代循环和多步跳跃。

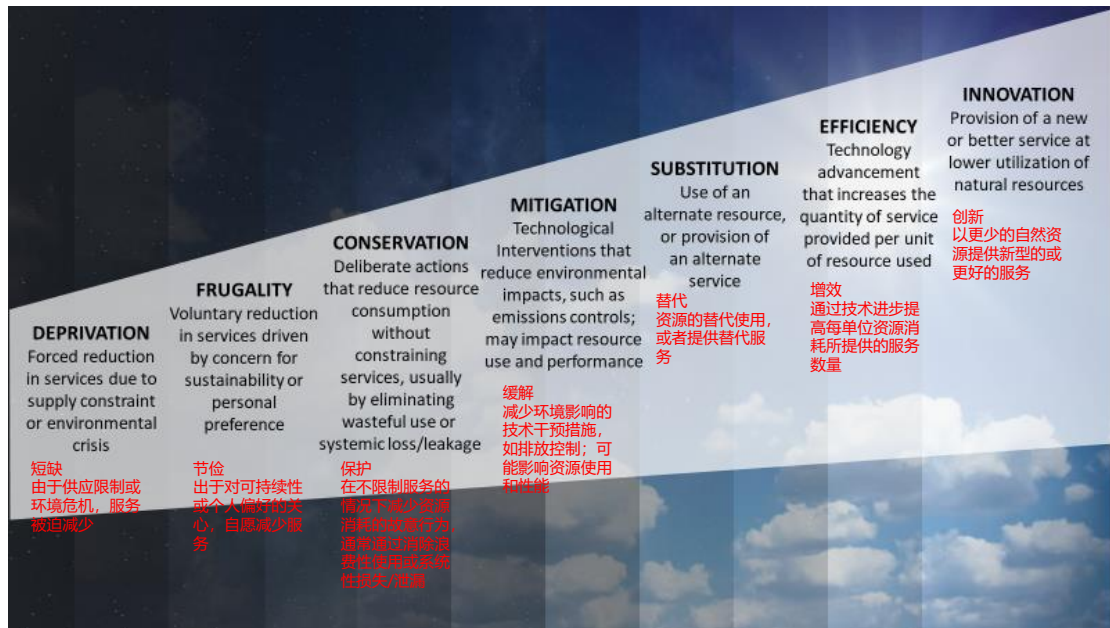


图 2.2 一个定性评估能源和水系统可持续性驱动因素的框架，左边是最不值得提倡的，右边是最值得提倡的

表 2.2 给出了每个类别的示例，说明了该框架的广泛适用性。从成功和不成功的能源脱碳努力中吸取的经验教训可能会延伸到水工业的脱碳中。

2.4 脱碳步伐

节俭和节约措施通过减少对与能源和用水相关的服务的需求，在短期内减少排放。然而，从长远来看，对能源和水提供的服务的需求持续增长。因此，这些行业的排放由将资源转化为服务的资本设备的效率和排放控制。脱碳的步伐几乎完全取决于资本周转率。与能源或水系统中的设备相关的排放将在该设备的整个使用寿命期间持续存在。资本周转是更换能源相关设备、设施和基础设施的预计时间。该时间段取决于系统的功能寿命和潜在替代品的相对价值。如上所述，替代价值可以通过创新（更好的服务）、效率（更低的能源消耗）、替代（替代投入的成本更低）和缓解（更好的环境足迹）来增加。技术发展和政策激励措施可以通过增加替代价值来加速脱碳，但系统的资本成本及其预期剩余使用寿命对整体步伐产生重大影响（如果不是主要影响的话）。

表 2.2 可持续发展框架的每个部分都有减轻能源和用水影响的例子，这些例子表明资源短缺供应的不利后果和创新的好处

<p>1. 能源短缺-被迫降低能源服务和生活质量</p> <p>燃料配给：在 20 世纪 70 年代美国能源危机期间，国际政治紧张局势导致石油进口突然紧缩，随之而来的是用于运输和发电的燃料价格飙升。加油站排起了长队，还有一段时间没有燃料供应。</p> <p>轮流停电：21 世纪初，加州经历了一次电力危机。有缺陷的电力监管和市场设计允许市场操纵者限制供应并推高价格。一些地区断电以缓解电力短缺。</p>
<p>2. 水资源短缺-农业和卫生设施用水被迫减少</p> <p>千年期干旱：由于几个地区没有足够的灌溉用水，澳大利亚的农业产量大幅下降。虽然由于全球粮食网络的弹性，饥荒得以避免，但农民的生计遭到破坏，全球粮食价格上涨。</p> <p>零水日：2018 年，南非开普敦市在一场极端干旱导致水库水位降至危险的低水平后，宣布了主要的用水限制。这种严重的水配给导致了失业（尤其是对那些工资已经很低的工人）、食品价格上涨和旅游收入的损失。该市被迫计划关闭市政供水和瓶装水的分配，这将导致所有居民的生活质量受到严重破坏。</p>
<p>3. 节约能源-与能源服务相关的生活质量自愿下降</p> <p>小型简单汽车：较小的车辆让购买者享有更少的乘客空间和（通常）更少的设施。这些服务的减少通过降低燃料费用得到补偿，并伴随着更低的排放和其他环境影响。</p> <p>恒温器设置：冬季较低的温度设定可以实现较低的燃料费用和碳排放，但降低舒适度。</p>
<p>4. 节约水资源-与充足水资源相关的生活质量自愿下降</p> <p>景观灌溉：在水资源短缺时减少或放弃灌溉，让草坪/田地变成棕色，可以降低水费，给</p>

人一种“尽自己的一份力”的感觉。然而，它影响了住宅的美观和室外的舒适性。较低的水量可以减少与灌溉用水处理相关的能源和碳排放。

小便不冲：小便后不冲洗可以减少水的使用，从而减少能源和水供应和处理的相关排放。然而，它会产生气味，并可能降低适当卫生设施的外观。

5. 节约能源-审慎行动以减少能源浪费

关灯：运动传感器、定时器和在不使用时关闭照明，以降低能源使用和相关排放，并以轻微的不便换取在控制方面的少量投资。

发动机启动/停止：自动关闭汽车发动机的系统，节省燃料和减少空转污染，换取成本更高的启动设备和排放控制。

6. 节约用水-审慎行动以减少水资源浪费

修复漏洞：地下基础设施的漏水是看不见的，即使是小的漏水，比如滴水的水龙头，也会大大增加单个住宅的用水量。加强补救措施，有时甚至需要昂贵的干预，从而降低消费者的用水成本，并在处理点节省能源/温室气体。

低流量的固定装置和电器：厕所、水龙头、洗碗机和其他电器的设计可以提供同样的卫生效益，同时减少使用过程中未被利用的水量。这减少了供水和污水处理的总用水量和能源消耗。一些节水设备为消费者提供相同的服务，而另一些则降低了舒适性或便利性。

7. 能源缓解-为减少能源使用对环境的影响而产生的成本

碳捕获和封存：使用化石能源产生的二氧化碳可以在排气烟囱中分离，加压，并重新注入地下。这一过程需要昂贵的设备，并降低整体能源效率，但它可以减少某些设施 90% 的温室气体排放。

填埋场气体回收：从垃圾填埋场的有机腐烂物中拦截和回收甲烷可以避免全球变暖高潜能值气体的排放。将垃圾填埋气体转化为电力有一个小的附带好处，即避免了一些化石燃料的使用。

8. 水资源缓解-减少与污水处理相关的排放的投资

厌氧消化：有机物质在生物反应器中被消化，产生沼气流和低能量的污泥。安装和操作厌氧消化的投资可以产生有用的能源产品，可以抵消化石燃料的使用，并降低有机废物排放对环境的影响。

9. 能源替代-使用具有潜在成本或可靠性影响的替代资源

更清洁的燃料：气代煤进行发电，降低了生产单位电力的二氧化碳排放量。当每单位天然气的价格与煤炭相当时，没有什么理由不进行替代。

可再生电力：来自太阳能电池板和风力涡轮机的电力可以取代化石燃料发电。太阳能以较高的资本成本和固有的间歇性换取零燃料成本和零碳排放

10. 水替代-可能驱动系统重新配置的替代资源或技术

非饮用性复用：紫色管道系统将三级处理污水输送到灌溉和一些工业/冷却应用。这减少了对淡水供应的需求，并可能抵消抽水和处理饮用水所消耗的能源。

紫外线消毒：紫外线可以代替氯，用来杀死供水系统或回收污水中的病原体。紫外线不需要化学输送或加药设备，避免产生消毒副产物。然而，紫外反应器会产生巨大的前期成本和持续的能源成本。

11. 能源效率-从同等资源中提供服务的技术提高

空气动力学：车辆外形的改进减少了阻力，使汽车和卡车在相同重量和客货容量的情况下，用相同数量的燃料能够行驶得更远。

热回收：发电和许多工业过程将热能从废气转移到进气。这一过程需要昂贵的热交换设备，实现大量的能源节约，从而减少排放。

变速驱动器：新颖的电子器件使驱动压缩机和泵的电机以较低的速度（因此功率较低）运行而不损失效率。在曝气或泵送需求较低的时期，这节省了大量的能源。

12. 用水效率-增加单位用水的效益

滴管：用滴灌代替播散，大大减少了蒸发和渗透造成的水分损失，从而减少了供水的泵送和处理要求（以及相关的能源和排放）。然而，滴灌系统的安装和维护成本更高。

13. 能源创新-以更少的资源消耗提供更好的能源服务

LED 照明：新的二极管和荧光粉材料能够在相同（或更好）的质量和光强度下大幅降低能源消耗，具有更长的寿命并产生更低的热量。

混合动力和电动汽车：更高的能量密度和更耐用的电池可以实现再生制动和电动燃料，从而提高效率并减少排放。电动汽车更安静，还能消除当地污染。它们的加速和操控性能都优于同类传统车辆，有时还可以在家加油。

14. 用水创新-以更少的能源/材料投入提供更好的处理

好氧生物膜反应器：与传统曝气相比，新材料和管道配置能够以更低的泵送能量在污水中进行有机解构，从而减少排放。

水和能源投资的资本周转率范围很广。在住宅和商业最终用途领域，水和能源设备的资本周转速度往往最快。运输设备周转较慢。工业和公用事业领域设备的巨大资本密集度往往会导致周转率最慢。能源和水的分配和收集基础设施也设计用于较长的使用寿命，因此变化非常缓慢。

2.4.1 住宅和商业设备

住宅和商业领域的资本周转分为三大类。对于灯泡、电子产品和小家电等“设备”，更换时间约为五年。它们可以根据消费者的喜好进行升级。消费者在购买时通常会选择效率最高的设备。电炉、热水器、空调和冰箱等耗能和耗水的“主要电器”的使用寿命约为 20 年。它们通常在发生故障时被更换。有联邦和州一级的激励措施来提高效率。这些激励措施有效地影响了消费者在需要更换时选择效率更高的设备，但它们只会加速富裕消费者群体在寿命结束前更换低效设备的决定。“住宅”本身就是一个家庭最大的支出（作为租金或资本购买）。住房资本存

量周转率通常以生命周期来衡量，很难评估脱碳。很少以可持续性为主要动机对电气、燃料和管道系统进行重大更改。一个例外是太阳能的增加，随着价格下降和创新融资模式的普及，太阳能变得越来越普遍。

2.4.2 运输设备

除住房外，大多数美国人最大的资本投资是个人车辆。车辆能源使用和碳排放受到若干敏感因素的影响。消费者通常根据当前的市场条件（即加油站的燃料价格）而不是总拥有成本做出决定。因此，当燃料价格较高时，消费者倾向于购买效率更高、碳排放量更低的车辆，而当燃料价格较低时，消费者倾向于购买效率显著降低的车辆。随着汽车制造技术的提高，汽车使用寿命延长，接近 15 年。从生命周期考虑，车辆的长寿命避免了制造过程中的能源消耗和碳排放。它还阻碍了更高效技术的大规模部署。

预计交通电气化将对整个经济的碳排放产生最大的影响之一。通过低碳发电，电池电动汽车 (EV) 为脱碳提供了强有力的途径。然而，今天销售的更耐用的传统车辆的影响是，它们延长的使用寿命将导致长期的碳排放。几家汽车制造商已宣布到 2035 年仅生产电动汽车的计划。由于资本周转时间约为 15 年，这表明到 2050 年我们仍将有内燃机排放。这是大多数发达经济体净碳为零的目标时间框架。因此，电气化延迟的空间有限。

2.4.3 公用设备

与水一样，能源公用事业规模的资本周转可能非常缓慢。作为一个极端的例子，位于印第安纳州怀廷的 BP 炼油厂最初由标准石油公司于 1889 年建造，至今仍是美国最大的炼油厂。与脱碳最相关的是电力行业的资本周转。公用事业规模（100 兆瓦到 GW）热电厂是大多数电力行业的基础。煤炭、核能和最近的天然气工厂在十年或更长时间内贬值，但仍继续使用 50 年。折旧资本为老旧工厂提供了运营优势。随着煤炭在全球范围内的下降，在社会对改善空气质量的需求的推动下，早在脱碳运动盛行之前，煤电就一直在下降。在过去十年中，美国已经淘汰了近一半的煤电产能，从占总产能的 60% 以上下降到 20% 左右。一些公用事业公司正在寻求利用燃煤电厂基础设施并用更清洁的能源改造燃煤电厂。与煤

炭一样，运行中的核电站几乎都已完成折旧。有了无碳排放，就有强大的动力来维持核舰队。挑战在于在核电站以恒定输出运行而需求和定价由于风能和太阳能发电的增长而动态变化的市场中保持盈利。自 1979 年三哩岛核电站部分熔毁以来，没有一座新核电站投入使用。乔治亚州有一座核电站正在建设中。

与热电厂 50 多年的资本周转相比，可再生能源电厂往往分布更广，资本周转率也更高。风力涡轮机和太阳能光伏(PV)设施的使用寿命预计约为 20 年。这是基于 20 世纪 70 年代和 80 年代投入使用的设施，这些设施在 90 年代和 2000 年初达到其使用寿命。新风力涡轮机的铭牌容量为 1-3 兆瓦（而不是燃气/热力涡轮机的 10 至 100 兆瓦），新风电场的总容量为 10 至 100 兆瓦。单个太阳能电池板的铭牌容量为 100 瓦，使太阳能发电厂的设计和安装非常模块化。随着产能逐步增加，风能和太阳能发电一直在稳步增长，预计这一趋势将持续下去。与风能和太阳能相比，水电的资本周转时间可能非常长。百年水电站仍在运行。基于大坝的水力发电厂会显著伤害野生动物，例如鱼类产卵。最近对水电的投资已经用“河流”系统取代了水坝，以满足社会需求和环境法规。

2.4.4 一体化

能源行业的资本周转可能会带来一些独特的挑战。例如，汽车电气化决策预计将对液体燃料生产和发电产生重大影响。车辆电力需求的大幅增加可能会引发电力行业新一波资本支出，及现有发电和输电资产运营的重大变化。同样，液体燃料消耗量的大幅下降将对汽油和乙醇市场造成重大破坏（见第 2.5.3 节）。对于用水户而言，没有类似的“燃料转换”资本替代方案。

2.5 实例研究

2.5.1 节能照明

2010 年至 2020 年间，节能照明进入市场是新技术采用的巨大成功。在大约十年的时间里，住宅领域的照明能源强度下降了 75-88%（能源强度增加了~5 倍效率），在美国每年可节省约 500 千兆焦的能源。与平均碳强度为 450 g CO₂/kWh，这一变化导致电力行业每年减排 6250 万吨二氧化碳。发光二极管

(LED) 取代了白炽灯，不仅因为它们更节能，而且因为它们更耐用（用户维护更少，从长远来看可以节省购买新灯泡的钱），并且因为它们提供了更好的照明服务可以选择吸引许多不同消费者的“色温”。

人们早就知道白炽灯泡效率极低。白炽灯泡消耗的电能中约有 3% 以可见光的形式辐射。其余部分作为热量散发。这一事实表明，如果使用新技术，同样的服务可以用更少的电力完成。此外，白炽灯泡散发的多余热量增加了温暖气候下空调系统的负载，进一步增加了能源需求。

不过，向节能照明的过渡并非没有挑战。紧凑型荧光灯 (CFL) 是早期的节能照明技术，未能获得消费者的认可。CFL 的效率几乎与 LED 一样，与之前的白炽灯相比节省了 70-80% 的照明电力。然而，消费者不喜欢 CFL，因为它们产生的光质量较差。CFL 灯具有高色温（偏蓝色调），许多用户认为它具有闪烁的特性。CFL 被宣传为比白炽灯寿命长得多，但它们比预期的更早烧毁。CFL 在市场上的失败证明了消费者可能不愿意用服务质量来换取能源节约，即使从长远来看，服务数量相当，成本节约也不大。当白炽灯泡的唯一可行替代品是 CFL 时，支持向更高效照明过渡的政策举措（效率标准和白炽灯“禁令”）遭到了强烈反对。

政府研究机构和私营企业投入大量资源开发 LED 技术。其中一些投资基于 LED 最终将成为更好技术的证据。有些人对上述政策激励措施所产生的消费者需求做出了回应。今天，除了最利基的应用之外，在住宅领域购买白炽灯几乎是不可想象的。制造技术的进步使 LED 灯泡的生产能够满足几乎任何应用和外形尺寸的需求。

2.5.2 电动汽车

电动汽车 (EV) 的采用代表着交通领域的巨变，它开始改变社会能源使用和碳排放。几十年来一直停滞不前的电池技术在 1970 年代开始发生巨大变化，首先是发现科学，然后是规模化制造。镍金属氢化物化学在 2000 年代初期被锂离子技术迅速超越。改进电池技术已经影响了广泛的市场领域。与其他电池化学成分相比，锂离子电池在充电方面具有灵活性、更高的能量密度（每单位质量或单位体积的能量）和更高的功率密度（相同电压下的更高电流）。锂离子技术改变了小型电子行业，讽刺的是增加了能源需求。虽然高尔夫球车等有限续航里程的

车辆可以使用传统的可充电铅酸电池作为主要能源来运行，但续航里程较长的公路车辆超出了现有能源容量的可用范围。锂离子电池为适用于道路的车辆提供了远距离的潜力。

虽然 19 世纪的一些早期车辆是电动的，但与那个时代内燃机 (ICE) 显着更高的功率和能量密度相比，它们逐渐失宠。在 21 世纪初，第一个广泛商业化的“电动化”移动电池技术是使用混合动力汽车（如丰田普锐斯）推出的。普锐斯既采用了传统的以液体燃料为燃料的内燃机，也采用了由可充电电池供电的电动机。电池通过使用再生制动回收能量进行充电，车辆享受燃油里程增加约 50%。储能虽然不作为一次能源供应，但能够克服传统动力总成设计的弱点导致效率低下。因此，电气化（电池、电机和具有动力传动系统的电力电子设备）在汽车行业站稳了脚跟。

随后，2000 年代中期石油价格的上涨引发了企业家对全电动汽车的兴趣。虽然混合动力汽车中的电池通常提供不到 20 英里的续航里程，但电池 EV 至少需要 100 英里的续航里程，最好大于 300 英里。这需要在电池化学、电极设计和电池组组装方面进行多项创新。学术和研究实验室的研究发现了新的化学物质和设计，大型化学公司对开发制造技术以部署它们产生了浓厚的兴趣。几年之内，特斯拉和通用汽车（分别是一家初创公司和一家全球大型公司）以及其他市场进入者都将轻型电动汽车推向了市场。2021 年，轻型电动汽车占据了美国约 2% 的市场份额。在北欧，高昂的燃料价格推动新车市场上电动汽车销量超过 50%。全球最大的轻型汽车市场是中国，中国拥有最大的电动汽车车队。虽然 EV 的前期成本高于 ICE，但在考虑燃料、维修和车辆寿命成本时，总拥有成本使 EV 的成本低于 ICE。在当前美国能源价格和典型的汽车能源效率下，电动汽车的燃料成本远低于汽油动力汽车。与内燃机相比，电动汽车的运动部件更少，产生的热量更少，并且不需要经常更换润滑油、冷却液和刹车片。因此，维修频率较低，除了更换电池（~10 年），车辆寿命显著延长，维护成本显著降低。

然而，随着轻型电动汽车市场的扩大，很明显，车辆充电将成为电动汽车广泛采用的一个限制因素。由于电动汽车的前期成本高于内燃机汽车，大多数早期采用者都是富裕的买家，他们随时可以在私人车库过夜充电。居住在城市和郊区出租单元中的不太富裕的司机将不会有同样的机会。同样，公共充电基础设施正

在城市地区和高使用率的交通走廊沿线部署，因此农村用户处于不利地位。最后，出租车和送货司机的充电需求将与纯粹出于个人用途的车主有很大不同。

水务行业在采用电动汽车方面有重要的经验教训。运输是美国碳排放的一个贡献者，轻型电动汽车占液体燃料使用量的 60% 以上。如果不改造轻型车队，世界就无法实现任何有意义的脱碳目标。请注意，只有在车辆使用无碳电力充电的情况下，使车队电气化才能实现脱碳目标。同样，只有在电网脱碳的情况下，水和污水处理行业的电气化能源输入或单元操作才会有效。此外，成功需要对基础科学和工程以及基础设施进行投资。新生的科学技术可以成长为主要的商机。例如，自疫情爆发以来，特斯拉已成为全球最有价值的汽车制造商。然而，在大规模采用低碳技术之前，必须满足某些性能目标。就电动汽车而言，性能目标是电池的能量密度，市场需要等待锂离子化学技术足够先进（可靠、可制造）才能被采用。水务行业必须确定脱碳系统的绩效目标，并寻求对能够达到这些目标的技术进行投资。

2.5.3 纤维素生物质

使用农业衍生燃料（酒精或转化植物油）运行的发动机几乎与使用化石燃料运行的发动机存在的时间一样长。然而，在大多数情况下，石油燃料在成本和能源回报的基础上远远优于生物燃料。尽管 1970 年代的石油危机引发了人们对生物燃料的兴趣，但几十年来这些燃料的市场仍然很小。

随着 2000 年代中期石油价格的上涨，美国首先通过了 2005 年的能源政策法案 (EPACT) 和 2007 年的能源独立安全法案 (EISA) (EPA, 2007)。这些法律旨在确保可靠的国内燃料供应，同时为农场和农村地区创造经济机会。EPACT 为乙醇制定了国家混合量要求。由于这些好处，燃料制造商很容易超过乙醇混合物的要求。EISA 提出了更激进的混合要求，并首次强制要求减少基于生命周期的温室气体排放。生命周期分析 (LCA) 表明，尽管玉米淀粉乙醇本质上是生物来源的，但由于农业和工艺热需要大量的化石能源，因此仅能减少约 20% 的温室气体排放。纤维素乙醇具有降低生命周期温室气体排放量的潜力，因为它使用了更多的植物材料（从而减少了每吨原料的耕作总面积），并且因为它旨在使用生物质作为工艺能源。EPACT 和 EISA 为淀粉乙醇作为早期市场进入者创造了一条途径，

并预计纤维素乙醇将在 2021 年主导生产并达到稳定水平。EISA 2007 引起了风险投资者、企业家和科学家对纤维素研究的极大兴趣。

随着玉米淀粉乙醇的早期授权，投资者被激励增加传统生物精炼厂的规模，并且产量超过了 EISA 的目标产量。几年之内，玉米乙醇利用了 40% 的玉米作物产量，很大程度上实现了 EPACT 最初的目标之一——支持农村经济发展。乙醇迅速达到~10% 体积混合汽油供应，扩大液体燃料供应作为目标任务。

纤维素生物燃料进展较慢。最初，限制性技术因素被认为是将顽固的纤维素分解成可发酵糖的酶。纤维素是一种结构聚合物，由难以解聚的单体糖组成。相比之下，淀粉是一种由易于消化的糖聚合物组成的营养来源。随着纤维素酶科学的进步，在纤维素生物燃料过程中发现了其他技术挑战。在建造先驱纤维素生物精炼厂时，最初的估计是每单位产品体积的资本成本大约是其两倍。与成熟的淀粉乙醇生物精炼厂相比，由于整体生产率较低，纤维素生物精炼厂的资本成本增长到 5 到 10 倍。这导致了纤维素工业的商业化延迟和独特的挑战。在 EISA 为纤维素生物燃料制定指令和激励措施 14 年后，该行业尚未对脱碳产生重大影响。

纤维素和整个生物燃料市场迅速发展了两个截然不同的挑战。第一个挑战是市场规模在结构上受到限制。随着玉米淀粉乙醇产量的快速增长，美国很快生产了足够的燃料，达到了整个汽油市场 10% 的产量。当时，由于材料兼容性，大多数车辆和大多数燃料基础设施仅限于 10% 乙醇(E10)混合物。传统技术在脱碳方面相对无效，已经超出了市场的消费能力。作为一种解决方案，提出了能够使用含有高达 85% 乙醇燃料的灵活燃料汽车 (FFV)。制造成本差异仅为 100 美元左右。车辆制造商因车辆获得积分，就好像车辆始终使用 85% 乙醇(E85)燃料来满足车队范围内的企业平均燃油经济性(CAFE)标准。燃料市场没有任何销售 E85 燃料的动力，因此 FFV 继续使用传统的 E10 燃料运行。因此，FFV 只会偶然增加乙醇的使用量，因此对温室气体减排的影响很小。EPACT 16 年后，玉米乙醇约占汽油市场的 10%，每加仑可减少约 20% 的温室气体排放。

因此，乙醇导致温室气体减少约 2%。EISA 2007 和纤维素生物燃料基本上没有对温室气体排放的额外影响。生物燃料市场的第二个挑战，尤其是纤维素生物燃料，是对水务行业的重大警告。在 2007 年 EISA 意识到纤维素生产是一个新兴行业，制定了一项监管要求，要求美国 EPA 每年监测纤维素生物燃料的生

产能力。EISA 对纤维素燃料的要求每年调整一次，以避免燃料混合器被要求使用不存在的纤维素生物燃料。自第一个混合要求以来，制造能力一直落后于混合要求，因此 EPA 调整了体积要求。纤维素生物精炼厂是一项复杂的操作，需要数年的时间来建造和部署。本章的一位作者采访了项目投资银行，并描述了 EISA 的要求、EPA 的监管角色以及建设的时间和成本(Blazy et al., 2015)。人们普遍认为这是一个糟糕的投资决定。因此，很少有纤维素生物精炼项目启动，行业几乎没有成功。水务行业应该明白，不考虑市场、经济学、基础科学、技术状况和任务的全部范围的任务可能导致投资失败，在实现脱碳目标方面进展甚微。

2.5.4 风能和太阳能

能源行业脱碳的真正成功案例之一是风能和太阳能的大幅增长。虽然这些技术截然不同，但我们在这里评估了它们的综合影响。太阳能具有满足所有社会能源需求的潜力(Hermann, 2006)，并被认为是脱碳的最终解决方案。虽然风能在总潜力方面受到更多限制，但它的增长速度比太阳能快。风能和太阳能的优势在于无碳排放，无燃料要求。对燃料的需求带来了供应链风险，也增加了总成本的燃料价格波动风险。在本书出版之时，可再生能源是美国仅次于天然气的第二大发电能源，赶超核能并超过煤炭。

风能和太阳能的增长展示了水脱碳可以效仿的技术“学习曲线”。在包括投资税收抵免 (ITC) 和生产税收抵免 (PTC) 在内的激励措施的推动下，风电装机容量的总体增幅是所有发电类型中最大的。这种快速的建设促进了“边做边学”，风力发电的模块化特性允许在涡轮机的设计、制造和建造中不断创新。风能领域的重点研发只带来了渐进式改进，但对于风能技术而言，渐进式改进带来了巨大的性能提升。例如，涡轮机的发电量与其叶片长度的平方成正比。因此，通过新颖的设计和材料实现的叶片长度的小幅增加导致涡轮容量的非线性增加。同样，更高的塔架使涡轮机能够获得更可靠的风力资源。除了产生的千瓦时的大量增加之外，更高的可靠性转化为更有价值的电力资源。最终，这些改进提高了土地利用效率。

对新型光伏太阳能材料进行了大量研究投资，但尚未大规模部署新材料。相反，价格的急剧下降（以及基于光伏发电的相应快速建设）主要是由于传统太阳

能材料（多晶硅，以及较小程度的碲化镉）的制造成本和安装成本的降低。中国推动了制造成本的降低。ITC 加快了国内安装市场的步伐，边干边学再次降低了安装成本。每个新的光伏装置都为地面安装和屋顶安装系统的机架、互连和施工物流带来了增量创新。在本书出版时，太阳能光伏在阳光充足的地区（例如美国西南部）提供了最低的电力成本。然而，由于发电量在中午达到峰值，而需求在其他时间达到峰值，因此在太阳能普及率较高的地区，额外太阳能装置的价值开始下降(Bolinger et al., 2021)。

风能和太阳能面临的挑战是间歇性。最终的解决方案是将间歇性可再生能源生产与能源储存联系起来。储能包括电池、超级电容器、抽水蓄能、其他机械系统，甚至是热力系统。电网规模储能的价值低于纯电动汽车，因此电网储能正在向电动汽车学习和适应。可再生能源发电为水务行业脱碳提供了重要模板。市场转型不需要技术上的重大进步。相反，政策激励措施足以推动经济增长以促进产能扩张。安装量的增加推动了制造业和基础设施支持的学习曲线，以进一步激励部署。几年来，激励措施使可再生能源成为增加容量的最低成本途径。随着制造和安装过程的成熟，不再需要 ITC。随着容量增长到破坏电网弹性的程度，存储和其他机制正在发展为解决方案。存储激励措施正推动存储容量增长。预计可再生能源加上电网规模的存储将提供具有成本竞争力和可靠的无碳电力行业。

致谢

这项工作得到了美国能源部通过合同 DE-AC07-05ID14517（爱达荷国家实验室）的支持。这项工作是在美国能源部的赞助下由劳伦斯利弗莫尔国家实验室根据合同 DE-AC52-07NA27344 进行的。本文件是作为对美国政府机构赞助的工作的说明而编写的。美国政府、Lawrence Livermore National Security, LLC 及其任何员工均不作任何明示或暗示的保证，也不承担任何法律责任或对披露的任何信息、设备、产品或过程的准确性、完整性或有用性负责，或表示其使用不会侵犯私有权利。本文通过商品名称、商标、制造商或其他方式提及任何特定的商业产品、流程或服务，并不一定构成或暗示美国政府或 Lawrence Livermore National Security, LLC 对其的认可、推荐或支持。本文所表达作者的观点和意见不一定陈述或反映美国政府或 Lawrence Livermore National Security, LLC 的观点

和意见，并且不得用于广告或产品代言目的。

参考文献

- Blazy D., Pearlson M. N., Miller B. and Bartlett R. E. (2015). A Monte Carlo-Based Methodology for Valuing Refineries Producing Aviation Biofuel, Chapter 15. Royal Society of Chemistry, Cambridge UK, pp. 336–351. <https://doi.org/10.1039/9781782622444-00336>
- Bolinger M., Seel J., Warner C. and Robson D. (2021). Utility Scale Solar 2021 Technical Brief. Lawrence Berkeley National Lab, Berkeley, CA. https://emp.lbl.gov/sites/default/files/utility-scale_solar_2021_technical_brief.pdf (accessed 2 November 2021)
- DHS (2021). National Critical Functions. U.S. Department of Homeland Security, Washington, DC. <https://www.dhs.gov/cisa/national-critical-functions> (accessed 30 October 2021)
- Dieter C. A., Maupin M. A., Caldwell R. R., Harris M. A., Ivahnenko T. I., Lovelace J. K., Barber N. L. and Linsey
- K. S. (2018). Estimated use of Water in the United States in 2015. In USGS (Circular 1441). U.S. Geological Survey, Reston VA. <https://doi.org/10.3133/cir1441>
- DOE (2014). The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities. U.S. Department of Energy, Washington DC. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/Water_Energy_Nexus_Executive_Summary_July_2014.pdf (accessed 20 April 2020)
- DOE (2020). Moving Goods in A SMART Mobility System. U.S. Department of Energy, Washington DC. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/downloads/smart-webinar-6-moving-goods-smart-mobility-system> (accessed 30 October 2021)
- EIA (2021). Monthly Energy Review. U.S. Department of Energy, Washington DC. <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly> no (accessed 24 November 2020)
- EPA (2007). Energy Independence and Security Act. Public Law 110-140. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act> (accessed 11 January 2022)
- EPA (2021). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990–2019 (No. EPA430-R-21-005). U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-green-house-gas-emissions-and-sinks-1990-2019> (accessed 30 October 2021)
- EPRI (2013). Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries (No. 3002001433). Electric Power Research Institute, Palo Alto CA. <https://publicdownload.epri.com/PublicDownload.svc/product=000000003002001433/type=Product> (accessed 14 January 2020)
- Gleick P. H. (1994). Water and energy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 19(1), 267–299. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.19.110194.001411>
- Greenberg H. R., Simon A. J., Singer S. L. and Shuster E. P. (2017). Development of Energy-Water

Nexus State-Level Hybrid Sankey Diagrams for 2010. In LLNL (LLNL-TR-669059). Lawrence Livermore National Lab, Livermore CA. <https://flowcharts.llnl.gov/report> (accessed 7 January 2020)

- Grubert E. and Sanders K. T. (2018). Water use in the United States energy system: A national assessment and unit process inventory of water consumption and withdrawals (research article). *Environmental Science and Technology*, 52(11), 6695–6703. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00139>
- Hermann W. (2006). Quantifying global exergy resources. *Energy*, 31(12), 1685–1702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.09.006>
- Kyung D., Kim M., Chang J. and Lee W. (2015). Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 95, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.032>
- Roy M., Edwards M. R. and Trancik J. E. (2015). Methane mitigation timelines to inform energy technology evaluation. *Environmental Research Letters*, 10(11), 114024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114024>