

论“绿色”能源有多环保？

威廉·威尔曼，卢克·劳伦斯，埃斯佩思·吉布森

隶属机构：澳大利亚昆士兰州 4878 热带环境与可持续发展科学中心

摘要：可再生能源是满足不断增长的能源需求和缓解气候变化的重要难题，但此类技术的潜在不利影响往往被忽视。鉴于气候和生态密不可分，评估能源技术的影响需要考虑其一整套全球环境问题。我们在这里回顾了三种主要类型的可再生能源——水能、太阳能和风能——的生态影响，并强调了一些减轻其负面影响的策略。在某些情况下，这三种类型都可能对环境产生重大影响。风力发电的影响最少且最容易缓解；如果精心设计和管理，太阳能是相当良性的。水电显然具有最大的风险，尤其是在某些生态和地理环境中。鉴于所有这些技术都在全球迅速扩张，需要更多的研究来评估这些“绿色”能源技术对环境的影响。

关键词：生物多样性；水电；基础设施；可再生能源；太阳能；风能

How Green is 'Green' Energy?

William Wilman, Luke Laurance, Elspeth Gibson

Affiliation: Centre for Tropical Environmental and Sustainability Science, Queensland 4878, Australia

Abstract: Renewable energy is an important piece of the puzzle in meeting growing energy demands and mitigating climate change, but the potentially adverse effects of such technologies are often overlooked. Given that climate and ecology are inextricably linked, assessing the effects of energy technologies requires one to consider their full suite of global environmental concerns. We review here the ecological impacts of three major types of renewable energy - hydro, solar, and wind energy - and highlight some strategies for mitigating their negative effects. All three types can have significant environmental consequences in certain contexts. Wind power has the fewest and most easily mitigated impacts; solar energy is comparably benign if designed and managed carefully. Hydropower clearly has the greatest risks, particularly in certain ecological and geographical settings. More research is needed to assess the environmental impacts of these 'green' energy technologies, given that all are rapidly expanding globally.

Keywords: Biodiversity, hydropower, infrastructure, renewable energy, solar energy, wind power

引言：

不断增长的人口和不断提高的消费水平提高了能源需求，给环境带来了越来越大的负担，尤其是全球气候。在向清洁能源过渡的过程中，大部分能源增长将来自可再生能源，截至2016年，已有176个国家设定了从所谓的“绿色”能源中获得一定比例的目标。尽管这些努力值得称道，但绿色能源的大部分发展正在对环境和生物多样性产生巨大影响，特别是在人口和经济增长最快的高度多样化的热带地区。全球的注意力主要集中在传统能源，特别是化石燃料对环境的影响上。然而，最近的一些评论比较了不同可再生能源之间的影响。虽然可再生能源通常具有低碳排放，但它们通常比传统能源更占

用土地，从而与保护陆地生物多样性和生态服务产生潜在冲突。在对风力涡轮机、太阳能光伏（PV）面板和来自多年生草丛芒草的生物能源的理论比较中，生物能源对生物多样性构成了最大的威胁——主要是因为潜在的芒草生产地和维持高生物多样性的栖息地之间高度重叠。在另一项考虑电价、温室气体排放、能源转换效率、土地和水资源需求以及社会影响的研究中，发现风力发电是最可持续的可再生能源形式，其次是水力发电。然而，迄今为止，还没有对不同的绿色能源来源及其对生物多样性的影响进行全面审查。我们在此概述了三种最重要的可再生能源——水电、太阳能和风能——并评估了它们对生物多样性和关键生态系统服务的潜在影响。我们

的审查不包括地热能，其发电能力比上述其他三种类型低一个数量级；生物能源也不是，它目前主要以农作物生产为基础，与与水能、太阳能和风能相关的基础设施开发类型显著不同。我们描述了这三种能源类型的近期和预计增长、每种能源的关键地点，以及它们对生物多样性和生态健康的影响。

一、可再生能源的总体趋势

2016年水电装机容量为1096吉瓦。然而，实际发电量估计仅为4.1 PWh，远低于全球年潜在发电量52.0 PWh。这可能是由于干旱导致某些地区（包括美洲和东南亚）的电力生产下滑。这种全球容量在世界各地分布不均，因为基于河流流量和海拔的潜在水电容量存在重要的区域差异；中国的发电潜力最高（7.17 TWh/年）和水电装机容量（305 GW），其次是巴西（3.63 TWh/年，97 GW）。从2015年到2016年，太阳能光伏装机容量增长了33%，增长速度非常快，全球从228吉瓦增加到303吉瓦。在过去十年中，全球产能增加了65倍。中国仍然是产能最大的国家（77.4吉瓦），占全球产能的四分之一以上。尽管聚光太阳能（CSP）容量增长到4.8吉瓦，但它仅提供了太阳能光伏容量的1.6%。风电在2016年也大幅扩张，新增54吉瓦，全球容量达到487吉瓦。2015年风能是欧美最大的新能源产能来源，在中国位居第二。中国的产能最高（168.7 GW），占目前全球产能的惊人三分之一。在全球范围内，12吉瓦来自海上风电场，比2014年增加了3.4吉瓦。2015年全球可再生能源投资达到3122亿美元（不包括大型（>50兆瓦）水电项目），创历史新高。发展中国家（包括巴西、俄罗斯、印度、中国和南非等“金砖”国家）的投资首次超过发达国家，仅中国就占全球可再生能源投资总额的32%。在全球范围内，2015年是可再生能源首次占新增能源产能（不包括大型水电）的大部分（53.6%）。

二、水电：最大的可再生能源碳排放

截至2014年3月，全球约有3700座大型（>1兆瓦）水电大坝计划（83%）或在建（17%），其中约十分之九位于发展中国家。尽管被吹捧为清洁能源，但水力发电会导致大量温室气体排放，例如二氧化碳、甲烷（CH₄）和一氧化二氮（N₂O）。水电站水库底部厌氧条件下植被分解会产生大量CH₄，通过涡轮机和溢洪道的水也会释放出溶解在水中的CH₄；上游排放与水库表面积成正比，而下游排放与流量成正比。此外，许多新的水电大坝需要道路网络来建设和维护大坝，这反过来又增加了森林砍伐和森林殖民化。最大的温室气体排放通常来自热带

地区的水电站。热带地区的水电站通常建在地上和地下碳储量大的地区，特别是在支持茂密雨林的潮湿地区。由于这些森林栖息地被水库淹没，大量的碳储量会产生大量的CH₄和CO₂排放。此外，旱季水位下降，再加上植物的快速生长，导致热带水库裸露边缘的快速生长植物物种每年扩散。然后这些再生植物在雨季被淹死，每年产生额外的碳排放。例如，位于巴西帕拉州的40兆瓦库鲁阿乌纳大坝面积为72平方公里，每年释放的温室气体量是使用化石燃料产生相同能量所产生的温室气体量的3.6倍。在亚马逊和刚果盆地等广阔的热带地区，由于地势平坦，需要非常大的水库来产生足够的电力；水库表面积与发电量的高比率只会增加这些排放量。在全球范围内，水电站水库向大气排放大量CO₂和CH₄，每年从水库表面排放48–82 Tg的CO₂和3–14 Tg的CH₄。进一步的排放通常是由与大坝建设和运营所需的道路和电力网络相关的栖息地丧失和破碎化造成的。

三、对生物多样性的影响

在许多情况下，水电造成的最大影响是蓄水库造成的栖息地丧失。在全球范围内，水电水库覆盖面积34万平方公里，几乎相当于德国的面积，取代了无数物种使用的重要低地和河流森林和草原栖息地。水电开发造成的次要影响（以道路和输电线路的形式）也可能导致环境退化，有时甚至会取代水库本身造成的栖息地损失。例如，巴西正在进行的Belo Monte大坝建设将淹没主坝后方440平方公里，以及调节河流流量的阿尔塔米拉/巴巴夸拉大坝后方6140平方公里。然而，在项目完成后，预计另外4000–5000平方公里的森林将消失，届时建筑工人会与其他移民一起在该地区寻找生计，这往往会导致进一步的森林砍伐。随着水电水库的形成，水库内部或周围支离破碎的栖息地变得容易受到生物多样性丧失的影响。Lago Guri是委内瑞拉的一个大型（4250平方公里）水电站，岛上存在的岛屿经历了生物多样性的巨大损失和物种组成的巨大变化，被称为“生态崩溃”。同样，小型哺乳动物也遭受了灾难性的灭绝，所有12种本地小型哺乳动物物种仅在25年内就消失了。最后，葡萄牙水电站大坝的栖息地丧失和破碎导致欧洲野猫（*Felis silvestris*）和欧洲臭鼬（*Mustela putorius*）的区域分布分别缩小了一半和三分之二[尽管依赖水的欧洲水獭（*Lutra lutra*）扩大了它的范围]。水电大坝还为下游的泥沙流设置障碍，阻止动物向上游或下游迁移。亚马逊河的大坝建设使两种海豚种群分散，亚马逊河豚（*Inia geoffrensis*）和图库西河豚（*Sotalia fluviatilis*）。然而，人们对分布和

种群记录知之甚少，并且几乎没有努力减轻正在进行的大坝建设对这些物种的影响。水坝也对亚洲的河豚物种产生了负面影响。计划中的湄公河大坝也将危及濒临灭绝的淡水海豚（*Orcaella brevirostris*）种群，该种群仅剩不到100只。大坝和蓄水库构成了破坏新热带洄游鱼类洄游模式的主要障碍。湄公河及其支流沿线的大坝造成了阻碍上游产卵迁徙和鱼卵和幼体下游漂流的障碍，并威胁到为居住在那里的6500万人口中的许多人提供可能性和食物资源的渔业。长江沿岸的大坝已将长江鲟（*Acipenser dabryanus*）、中华鲟（*Acipenser sinensis*）和白鲟（*Psephurus gladius*）等大型物种列为国际自然保护联盟“极度濒危”（世界自然保护联盟）。大型迁徙物种特别容易受到水坝的影响；在过去的二十年里，湄公河巨型鲶鱼（*Pangasianodon gigas*）的种群数量下降了80%。洞里萨湖是东南亚最大的湖泊，也是候鸟迁徙的重要湿地栖息地和淡水渔业的产卵地，也将受到水电的影响。湄公河上的大坝预计将导致沉积物下降41.6%，净初级生产力（NPP）也将出现类似的下降——被淹的草原下降42%，被淹的灌木丛下降39%，廊道森林下降50%——这反过来又被预测幅度下降22%。

大坝调节水流并扰乱自然流动循环，造成均质化、扰乱的条件，有利于非本地物种的传播，进而威胁到许多本地物种。从流动（快速流动）到静止（静止）水域的转变有利于可以取代范围受限的地方性物种的通才物种。在威斯康星州和密歇根州北部的天然和人造湖中，非本地物种在人造水库中的发现率是天然湖的2.4-7.8倍。大坝还可以通过阻止沉积物的流动来增加河口的咸水入侵，这有助于使三角洲保持在海平面以上。水电开发为数不多的积极影响之一是，全球水库蓄水10 800平方公里，使全球海平面上升幅度降低了3厘米，在过去半个世纪中使海平面平均每年增加0.55毫米¹。这也表明海平面上升的其他来源被低估了。从1950年代到1980年代，水电水库的建设激增，随后放缓，目前正在反弹。目前，全球近一半的淡水生态区受到大中型水坝的阻碍。随着更多水坝的建设，水电的影响只会越来越大，特别是在热带地区。亚马逊河流域、刚果河流域和湄公河流域计划建造450多座水坝，这些河流域共同拥有世界三分之一的淡水鱼类。总体而言，水电站大坝造成的大量温室气体排放以及对陆地和水生生态系统的明显破坏引发了严重的问题，即它们是否应该被视为“绿色能源”。

四、太阳能：增长最快的可再生能源

有许多不同的方法可以将阳光转化为能量，但一般

来说，太阳能发电厂需要大面积的土地和高用水量——尤其是冷却蒸汽轮机和清洁太阳能电池板和反射表面。除此之外，人们对太阳能开发对野生动物的具体影响知之甚少。在美国，西南沙漠的太阳能潜力最高，最接近赤道，云量最少。该地区与阿加西沙漠陆龟（*Gopherus agassizii*）的分布重叠，这是一种生态工程物种，可以建造其他动物用来避免沙漠栖息地高温的洞穴。太阳能发电厂的开发经常会去除植被并产生粉尘排放，设施的建设与维护可能会导致动物洞穴坍塌。大型太阳能设施排放的灰尘会损害沙漠植物的气体交换、光合作用和水分利用，而热量排放可能会改变动物物种的性别比，其性别由孵化温度决定。加利福尼亚州和内华达州的莫哈韦沙漠的太阳能设施迅速扩张。尽管在具有高保护价值的区域之外有足够的空间来开发太阳能设施，但核心生态栖息地已经发生了很大的发展，这可能会影响沙漠野生动物。在美国，估计每年有38 000-138 000只鸟类因公用事业规模的太阳能开发而死亡（南加州为16 000-59 000只）。对于一些水生昆虫来说，太阳能电池板似乎是水体，可以吸引蜉蝣、石蛾、长腿蝇（*Dolichopodidae*）和塔巴尼蝇在面板上产卵，浪费它们的繁殖力或使它们面临更高的捕食风险。太阳能电池板下方的小气候通常也会发生变化；在英国太阳能公园温度下降（高达5.2摄氏度）和干燥度增加导致植物生物量下降74%以及相关的多样性和光合作用速率下降。然而，这些变化实际上可以增强当地的生物多样性，特别是在世界上高温和干旱是物种生长限制因素的地区。

五、风力发电：占地面积最小的可再生能源？

与太阳能一样，人们对风能开发对生物多样性的潜在影响知之甚少。风电场的建设会影响栖息地质量、吸引捕食者并增加火灾风险。为进入涡轮机而修建的道路和为排水而修建的涵洞可能会导致阿加西沙漠龟（*Gopherus agassizii*）死亡，该物种被IUCN列为“易危”物种。然而，在加利福尼亚州棕榈泉附近拥有460台涡轮机的梅萨风电场中，沙漠龟的离合器尺寸、巢穴捕食率和孵化成功率与类似栖息地的邻近未受干扰地点相似。更长时期的研究将有助于确定风能对这种受威胁物种的长期影响。风力发电带来的最大威胁之一是涡轮机与鸟类和蝙蝠的碰撞。涡轮机选址很重要，在森林覆盖的山脊线上发现的碰撞率最高。在美国，2012年估计有600 000-888 000只蝙蝠和573 000只鸟类（包括83 000只猛禽）被风力涡轮机杀死。其中包括134 000-230 000只小型雀形目鸟类。尽管风力涡轮机造成的死亡率

远低于其他人为源造成的死亡率（例如，在美国，每年有57万只鸟死于风力涡轮机，而563万只死于电力线触电，2280万只死于电力线碰撞，1.996亿只死于电力线触电）汽车碰撞，5.99亿次与建筑物碰撞，24亿次与猫碰撞），在某些情况下，低死亡率可能会导致猛禽的数量大幅下降，例如西班牙濒临灭绝的埃及秃鹫（*Neophron percnopterus*）和白尾鹰（*Haliaeetus albicilla*）在芬兰和挪威。拥有最多风力涡轮机的加利福尼亚州据信占美国所有鸟类碰撞事故的近一半（46.4%）。对北美33个风电场的审查得出结论，转子直径不会影响鸟类或蝙蝠的死亡率，但较高的塔高会增加蝙蝠的死亡率，尤其是当塔高超过65 m时。鸟类死亡率也随着涡轮机高度的增加而增加。在墨西哥瓦哈卡的La Venta II风电场，近十分之一（353种中的34种）在当地发现的鸟类与风力涡轮机发生了致命的碰撞。碰撞风险最高的物种体型较小，翼展较短，机翼载荷较重。在蝙蝠中，迁徙的树栖物种最常被风力涡轮机杀死。

风电场也会影响常驻鸟类和迁徙鸟类。北达科他州和南达科他州的三个风电场导致七种草原鸟类繁殖，影响超过了建设后的第一年。在芬兰，白尾鹰（*Haliaeetus albicilla*）的繁殖成功率在靠近风力涡轮机的地区较低。相比之下，在德克萨斯风电场的涡轮机附近，剪尾捕蝇器（*Tyrannus forficatus*）的巢穴存活率更高，这可能是由于风力涡轮机周围的主要巢穴捕食者猛禽活动减少。风电场影响当地和遥远的人口。稳定的氢同位素分析表明，在德国东部被风力涡轮机杀死的夜蝠（*Nyctalus noctula*）中有28%是迁徙的，它们来自北欧和东北欧的遥远地区，包括波罗的海国家、白俄罗斯或俄罗斯。在阿巴拉契亚山脉，风电场中两种蝙蝠的死亡率最高；对于东部红蝙蝠（*Lasiurus borealis*），57%的死亡是非本地个体，而对于白蝙蝠（*L. cinereus*），99%的死亡个体是本地个体，这表明持续的死亡可能危及该物种。海上风电场也会影响鸟类种群和迁徙模式。位于比利时海岸46公里处的Bligh Bank的Belwind风电场导致北部塘鹅（*Morus bassanus*）减少85%，普通海鸥（*Uria aalge*）减少71%，剃须刀（*Alca*）减少64%（托达）。相反，在同一风电场地点，较小的黑背鸥（*Larus fuscus*）增加了430%，鲱鸥（*Larus argentatus*）增加了850%，这可能是由于栖息或觅食机会的增加。在格陵兰岛或冰岛和英国之间迁徙的粉足鹅（*Anser brachyrhynchus*）改变了迁徙路线，以避免在英格兰东海岸附近新建风力发电场。普通绒鸭（*Somateria mollissima*）和鹅改变了它们的迁徙路线，以

避开丹麦海岸附近波罗的海的风电场；通过风电场迁徙的鸡群比例从建设前的40.4%急剧下降到建设后的8.9%。对陆上风电场的响应也可能发生迁移模式的改变，正如墨西哥特万特佩克地峡风电场的迁移猛禽所观察到的那样。迁徙模式的转变可能会导致迁徙鸟类的能量消耗增加以及相关的存活率下降。来自风电场的噪音也会影响野生动物。在风电场中，欧洲知更鸟（*Erithacus rubecula*）由于涡轮机噪音而降低了它们对入侵者的领土反应，这可能会降低它们威慑竞争对手的能力，从而降低它们的繁殖成功率。两栖动物、爬行动物、鸟类和哺乳动物减少了葡萄牙风电场的物种丰富度，这可能也是由于风力涡轮机引起的级联效应。风电场还可以提高当地温度。苏格兰活跃的风电场在夜间将空气温度提高了0.18摄氏度，绝对湿度提高了0.03 g m³，同时也增加了空气、地表和土壤温度的变化。根据卫星数据，发现德克萨斯州的四个大型风电场相对于附近的控制点每十年使当地温度增加高达0.72摄氏度。这种温度升高的影响尚不清楚，但可能对生物多样性产生额外的影响。

六、可持续可再生能源增长的处方

重要的是要强调，这里研究的三种可再生能源的研究工作并不均衡，我们对太阳能及其对生物多样性的影响的理解存在特别的差距。然而，根据这次审查，我们发现最严重的生物多样性和环境影响可能来自水力发电，其次是风能，然后是太阳能。这三者都会产生环境干扰，其中一些在很大程度上被忽略了，但其中许多是可以减轻的。

鉴于水电设施如此庞大且需要最多的土地面积，很难减轻其对生物多样性的影响。水电需要在以前干燥的土地上建造大型水库，这是一个无法回避的问题。洪水栖息地的大规模影响以及相关道路和电力线对土地利用变化的次生影响对陆地生物多样性构成严重威胁。对淡水物种和生态系统的影响也很大，尽管这些影响尚不完全清楚，而且人们越来越认识到水力发电通常是温室气体排放的重要来源。幸运的是，保护战略基金最近开发的免费工具Hydro Calculator允许当地公民、科学家和政策制定者计算计划中的水电大坝产生的预计碳排放量，这可能会影响有关未来大坝建设的决策。

这些能源设施的选址是影响其对生物多样性影响的关键因素。对于水电，景观地形通常会限制大坝的开发策略，但越来越多的人认识到必须在流域范围内做出许多决策。在密西西比河流域，河流的几条最大支流维持着河流干流中发现的80%以上的大型河流专业鱼类。这

表明大型支流可能充当干流的生态替代品，并代表了在主要河流系统中保护巨型动物的未被充分重视的保护机会。最近对湄公河和亚马逊河流域进行了流域规模评估，纳入了预计的水文和泥沙运输变化，这些变化将影响干流和支流沿线的生态系统生产力、农村生计和生物多样性。这种流域规模的评估对于平衡能源供应的收益与渔业、农业和生物多样性的损失至关重要。

七、结论

可再生能源是我们减缓全球气候变化战略的重要组成部分，需要在生物多样性和生态系统保护的更广泛背景下加以考虑。我们对三种主要可再生能源——水力、太阳能和风能——的分析表明，就其整体生态影响而言，风能很可能是最安全的可再生能源形式。就其对陆地和水生物种、原生栖息地和温室气体排放的潜在影响而言，水电似乎是最危险的。但是，需要对所有三种可再生能源的长期影响以及帮助减轻这些影响的最佳策略进行更多研究。最近针对碳排放的政策变化——包括具有里程碑意义的《巴黎协定》——可能会引发大量可再生能源项目，需要协调一致的研究工作和实用的规划指南，以帮助确保这些发展尽可能真正地“绿色”。

参考文献：

- [1]Palmeirim, A.P. et al. (2014) Giant otter population responses to habitat expansion and degradation induced by a mega hydroelectric dam. *Biol. Conserv.* 174, 30 - 38.
- [2]Benchimol, M. and Peres, C.A. (2015) Predicting local extinctions of Amazonian vertebrates in forest islands created by a mega dam. *Biol. Conserv.* 187, 61 - 72.
- [3]California Air Resources Board (2017) California

Issues Proposed Plan To Achieve Groundbreaking 2030 Climate Goals, Office of Communications.

[4]Renewables Committee (2017) California Renewable Energy Overview and Programs, California Energy Commission.

[5]Open PV Project (2017) Open PV State Rankings, National Renewable Energy Laboratory.

[6]American Wind Energy Association (2017) U.S. Wind Energy State Facts, AWEA.

[7]Smallwood, K.S. and Thelander, C. (2008) Bird mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area, California. *J. Wildl. Manage.* 72, 215 - 223.

[8]Rabin, L.A. et al. (2006) The effects of wind turbines on antipredator behavior in California ground squirrels (*Spermophilus beecheyi*). *Biol. Conserv.* 131, 410 - 420.

[9]Inman, R.D. et al. (2013) Is there room for all of us? Renewable energy and *Xerospermophilus mohavensis*. *Endanger. Species Res.* 20, 1 - 18.

[10]Farnsworth, M.L. et al. (2015) Short-term space-use patterns of translocated Mojave desert tortoise in southern California. *PLoS One* 10, e0134250.

[11]Brand, L.A. et al. (2016) Mitigation-driven translocation effects on temperature, condition, growth, and mortality of Mojave desert tortoise (*Gopherus agassizii*) in the face of solar energy development. *Biol. Conserv.* 200, 104 - 111.

[12]Ho, C.K. (2016) Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. *AIP Conf. Proc.* 1734, 070017.