

净零转型：从巴黎到格拉斯哥，直至未来

彭博

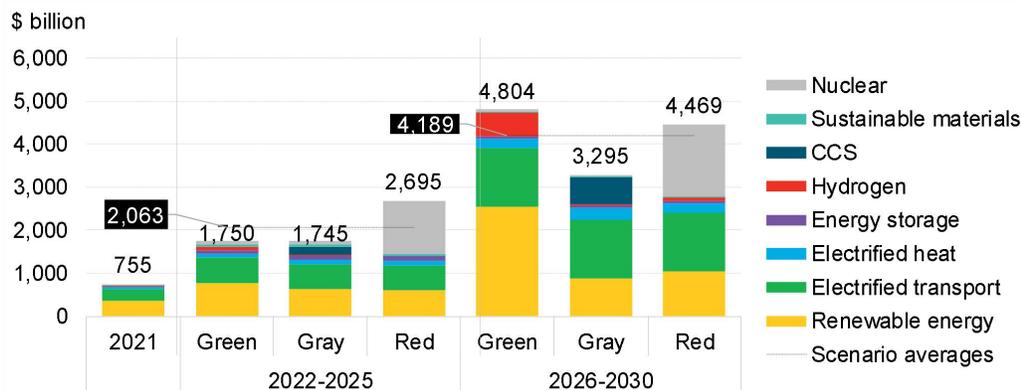
2021年11月达成的《格拉斯哥气候公约》重申了2015年的《巴黎气候协定》中的各项目标，并更强调在本世纪末将全球变暖程度限制在比工业化前水平高1.5摄氏度内。为实现这一目标，全球排放必须在本世纪中叶达到净零。本报告研究了各国制定的减排目标是否与实现这一整体目标一致，以及全球消除能源排放的三种情景。

- 全球平均地表温度已经平均上升了1.1摄氏度。根据目前趋势，我们将在2044年耗尽控制全球温升在2摄氏度以下所允许的排放预算，在更近的2028年，我们就将耗尽温升1.5摄氏度以下的排放预算。如果所有国家都能实现2030年减排目标（包括有条件的目标和长期脱碳目标，如中国在2060年前实现碳中和的目标），本世纪末的温升幅度可能将在1.8摄氏度。
- 为了实现全球净零排放的目标，能源经济的各行业都需要在本世纪中叶完全消除排放，没有行业可以坐享其成。即使那些减排难度最大的行业也需要采用零碳技术，只有在绝对必要的情况下才采用碳移除技术。我们在最新的《新能源市场长期展望报告》中设计出三种情景，为能源经济的每个行业设计了净零碳预算，在满足《巴黎气候协定》目标的同时也遵循有序过渡的原则。根据目前的排放发展轨迹和短期内的可行减排

方案，各行业减排的速度和时间存在差异。

- 绿色情景是采用清洁电力和绿氢的净零路径，氢气通过风能和太阳能电解水制氢技术获得。灰色情景是采用清洁电力和碳捕集与封存（CCS）的净零路径，部分行业使用化石燃料产生的碳排放通过碳捕集与封存技术得以降低。红色情景是采用清洁电力和核能的净零路径，采用小型模块化核能作为电力行业内风能、太阳能和电池的补充，同时用特定核电站供电制“红氢”。
- 2021-2030 年对到 2050 年实现全球净零排放将起到至关重要的作用。这十年的减排量中约 78%可能由电力行业贡献，风电、光伏和储能电池等已经具有经济性的解决方案的蓬勃发展意味着电力行业的减排速度能快于其他行业。

图 1：2021 年能源转型投资与各净零情景下 2022-2025 年和 2026-2030 年间每年所需投资比较



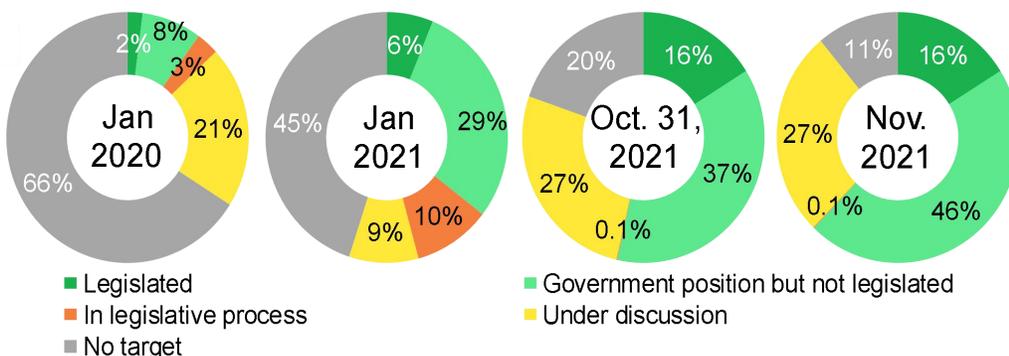
来源：彭博新能源财经

一、从巴黎到格拉斯哥

2015 年召开的第 21 届联合国气候变化大会（COP21）达成《巴黎协定》，承诺“将全球气温升幅限制在比工业化前水平高 2 摄氏度以内，并寻

求将气温升幅进一步限制在 1.5 摄氏度以内的措施”。为探讨《巴黎协定》中 1.5 摄氏度更高目标的潜在含义，政府间气候变化专门委员会（IPCC）于 2018 年发布了《全球升温 1.5 摄氏度》特别报告。这份 IPCC 报告得出结论称，要实现《巴黎协定》中 1.5 摄氏度的更高目标，全球温室气体排放必须在本世纪中叶降至“净零”。在该报告发布后，世界上诸多政府开始纷纷宣布净零目标。

图 2：净零及碳中和目标覆盖的全球温室气体排放规模



来源：世界资源研究所（WRI）气候分析指标工具（CAIT）、彭博新能源财经。注：包括 2018 年土地利用和土地利用变化及林业（LULUCF）

到 2021 年 10 月底，即在格拉斯哥举行第 26 次缔约方大会（COP26）前夕，减碳目标覆盖了全球近 80% 的排放量。在 COP26 期间，印度和越南等国宣布的碳中和目标，将此覆盖率提高至近 90%，虽然这些脱碳目标的达成年份相差很大。

《格拉斯哥气候公约》的前三个减缓要素进一步强化了《巴黎协定》中 1.5 摄氏度的更高目标，具体表述如下：

“15. 重申长期全球目标，即把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 2 摄氏度之内，并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5 摄氏

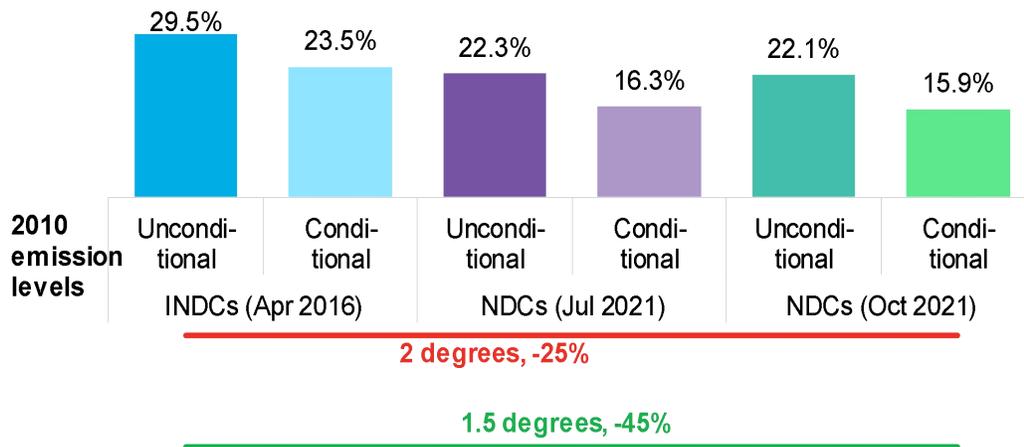
度之内，认识到这将显著降低气候变化造成的风险和影响；

16. 认识到，升温 1.5 摄氏度与升温 2 摄氏度相比，气候变化的影响要小得多，并决心努力将气温升幅限制在 1.5 摄氏度之内；

17. 还认识到将全球升温限制在 1.5 摄氏度之内，需要迅速、深度和持续地减少全球温室气体排放，包括到 2030 年将全球二氧化碳排放量较 2010 年的水平减少 45%，并在本世纪中叶左右实现净零排放，以及其他温室气体的大幅减少；”

尽管实现净零排放的势头有所增强，但各国 2030 年的减排目标——《巴黎协定》中的国家自主贡献（NDC）——仍不能实现到 2030 年全球排放量较 2010 年减少 45% 的目标。然而，国家自主贡献正逐渐变得更有雄心。在《巴黎协定》达成之前，世界正朝着到本世纪末全球升温 4-5 摄氏度的方向发展。随后，2016 年国家自主贡献预案（NDC 的前身）意味着 2030 年排放量将比 2010 年的水平高出 23.5-29.5%，进而意味着到本世纪末气温将升高约 3 摄氏度。COP26 开始前所做出的一系列最新承诺使世界更接近于升温约 2.7 摄氏度。这仍然意味着 2030 年全球排放量将比 2010 年的水平高出 22%，而如果发展中国家在金融和其他支持方面的条件得到满足，全球排放量将比 2010 年的水平高出 16%。

图 3：气候计划所暗示的全球温室气体排放相比 2010 年水平的变化



来源：联合国国家自主贡献综合报告、彭博新能源财经

一些声明则更为乐观，其国际能源署（IEA）估计，最近的一系列承诺将会使全球升温幅度控制在 1.8 摄氏度。然而，这一分析考量了各国的长期计划以及《全球甲烷承诺》，其中假设各国从现在开始采取足够的行动来实现长期目标（但许多国家的情况并非如此）。

二、 能源行业碳预算

我们在这一章节考虑能源行业的碳预算。2016-2020 年间，全球能源行业碳排放每年增长 0.9%，根据目前趋势，我们将在 2044 年耗尽控制全球温升在 2 摄氏度以下所允许的排放预算，在更近的 2028 年，我们就将耗尽温升 1.5 摄氏度以下的排放预算。形势紧迫，我们需要立即采取切实政策措施，加快脱碳步伐。仅实现本世纪中叶的气候目标已不足够，中期目标也必须同时实现。

为了实现全球净零排放的目标，能源经济的各行业都需要在本世纪中叶完全消除排放，没有行业可以坐享其成。即使那些减排难度最大的行业也需

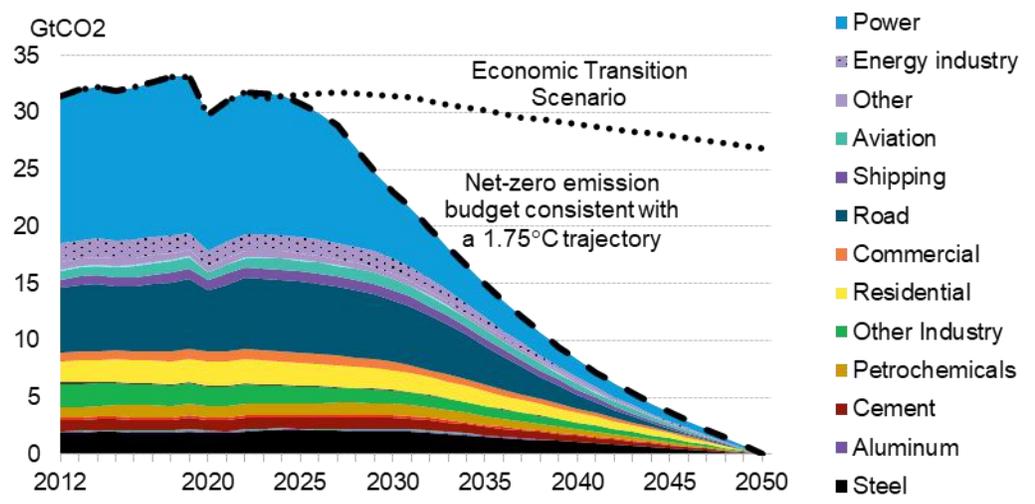
要采用零碳技术，只有在绝对必要的情况下才采用碳移除技术。

我们为能源经济的每个行业设计了净零碳预算，它们的总和可以满足《巴黎气候协定》目标，也遵循有序过渡的原则。根据目前的排放轨迹和短期内的有效减排方案，各行业减排的速度和时间存在差异。

在此预算下，全球碳排放量需在 2030 年较 2019 年水平下降 30%，到 2040 年下降 75%，最终在 2050 年归零。电力行业减排步伐最快，其路径对应于温升 1.6 摄氏度的需求，2030 年和 2040 年排放水平分别比 2019 年下降 57% 和 89%。

道路交通运输的排放水平到 2030 年下降 11%，并在之后 10 年加速，到 2040 年排放水平比 2019 年下降 80%。住宅与商业建筑则沿着更为线性的轨迹减排，与 2019 年相比，2030 年和 2040 年排放水平分别下降 16% 和 58%。航空、钢铁和水泥等减排难度较大的行业步伐最慢，其排放在 2030 年前达到峰值，随后到本世纪中叶直线下降至零。

图 4：能源行业排放和净零碳预算，按行业分



三、 在 2030 年前按计划实现减排目标

当前到 2030 年的阶段对实现净零目标至关重要。为了走上碳预算的轨道，需要立刻以前所未有的力度加速推广使用现有减排技术，如可再生能源和新能源汽车。与此同时，新技术需要开展商业化试运行并扩大试点范围，为 2030 年之前实现大规模推广奠定基础。

在此期间，超过四分之三的减排通过电力行业以及加快风能和太阳能光伏的建设来实现。交通运输、建筑供热和低温工业用热等方面的电气化贡献了另外 16% 的减排量。钢铁、铝和塑料等产品更高比例的回收占减排贡献的 4%，而可持续航空燃料和航运的生物能源的利用贡献了 1%。

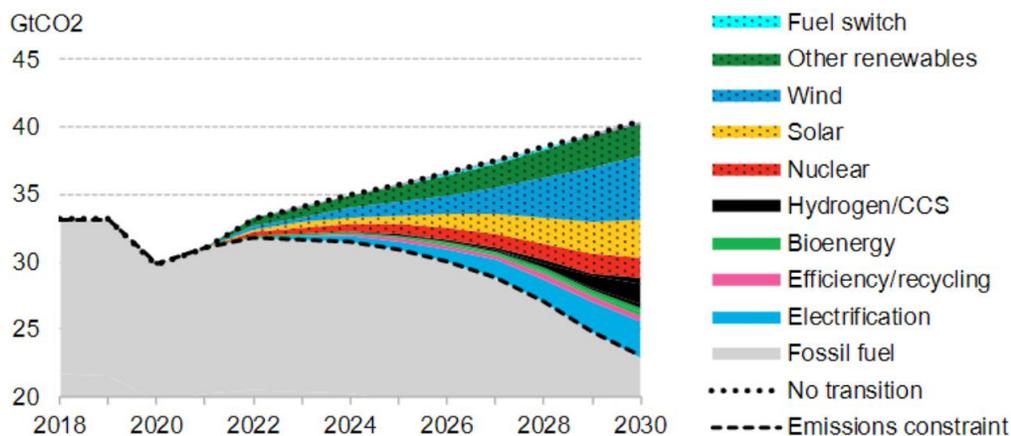
就电力行业而言，按计划实现减排目标意味着在我们的绿色情景下，到 2030 年前全球平均每年新增 5.05 亿千瓦的风能、4.55 亿千瓦的太阳能和 2.45 亿千瓦时的电池储能，分别为 2020 年风能、光伏和电池储能新增装机容量的 5.2 倍、3.2 倍和 26 倍。到 2030 年，全球风能、光伏和储能的累计装机容量分别为 58 亿千瓦、53 亿千瓦和 25 亿千瓦时，分别是 2020 年底累计装机容量的 8 倍、9 倍和 176 倍。同时，平均每年需要有超过 1 亿千瓦的燃煤机组退役，到 2030 年燃煤发电总装机容量比 2019 年底的水平下降 67%-72%。资本流动也需要显著加速，近年来，风能和太阳能发电装机的新增投资一直保持在每年 3,000 亿美元左右。在我们的几种情景下，2021 年至 2030 年之间这一数字需要增加到每年 7,630 亿美元至 18,000 亿美元之间，才有望实现净零目标。

交通运输行业按计划实现减排目标意味着每年平均增加 3,500 万辆新能源汽车，到 2030 年新能源汽车保有量达到 3.55 亿辆，道路交通运输部门的

排放量比 2019 年水平下降 11%。与此同时，到 2030 年，可持续航空燃料在航空燃料总消费量中所占比重应提高到 10%。我们还需要更加重视航运的运营效率，并将生物燃料占燃料消耗的比重提高到 4%。

建筑行业按计划实现减排目标意味着到 2030 年前平均每年增加 1,800 万台热泵，或在 2030 年前总计增加 1.86 亿台，同时还要继续提高建筑能效水平。

图 5：所有情景中 2030 年前能源行业总排放量及减排量，按来源分



来源：彭博新能源财经

工业按计划实现减排目标意味着 2030 年铝的回收量相较于 2020 年水平提升 67%，钢铁回收规模需要增长 44%，而塑料回收规模则需增加 149%。这些回收的废料将作为能耗、排放都更低的循环生产的原料，回收再加工需要贡献 2030 年钢铁总产量的 43%、铝总产量的 37%和塑料总产量的 22%。按计划实现减排目标还意味着这十年间电力在低温工艺的终端能源消费的占比升至 50%。

氢能、碳捕集与封存 (CCS) 以及新的核能技术在 2030 年前不会成为减排的主力，但这些技术的规模化应用是这十年的一项关键任务。在我们的

绿色情景中，到 2030 年需要累计投产 19 亿千瓦的电解槽以启动氢能行业。在我们的**灰色情景**中，到 2030 年需要累计实现 9.36 亿吨的碳捕集与封存规模。在我们的**红色情景**中，到 2027 年，第一座小型模块化核反应堆需要投入运营，到 2030 年前累计投产容量需要达到 3.9 亿千瓦。如果无法实现这些重要目标，将很难在后续的两个十年内实现各个情景下这些技术所需的新增装机目标。

四、 2050 年实现净零排放

各情景的核心特征是各行业终端用能的电气化转型。转型减少了交通运输、建筑和工业的直接排放，尽管更多的电能消费增加了电力行业的碳排放，但是发电总体上来说比在终端直接使用化石能源更加清洁，这带来了一定量的减排。于此同时，更高比例的零碳电源陆续投运会持续增加减排效果。

所有情景都包含增加钢铁、铝和化工品的回收利用，消费者也将更多地采用屋顶光伏系统和小型储能系统。为了抵消此过程后仍存的残余排放，我们综合使用 CCS 和碳移除技术，并在下一个十年为尚无有效减排方案的行业（例如水泥生产）进行少量碳移除。

绿色情景中，到 2050 年，清洁电力占减排总量的 61%。新能源汽车、热泵和低温工业流程中使用更多的电力将贡献 23%的减排量。终端经济部门中的氢能占减排总量的另外 10%，这些应用包括需要高温热源的炼钢、化工和水泥等工业流程，航空、航运、某些公路和铁路运输，以及采暖和热水锅炉。氢能在发电和终端用能部门的应用对绿色情景减排总量的贡献达到 19%。

灰色情景中的减排同样以清洁能源为主，占到 2050 年减排总量的 61%。在此情景中，碳捕集与封存（CCS）技术可使煤炭和天然气继续发挥重要作

用。CCS 应用于发电和终端经济部门，在该情景中占净零减排总量的 18%。应用于终端经济部门的生物能源在该情景中发挥了更大的作用，特别是在航空和航运方面，占减排总量的 3%。工业中回收和循环制造的增加占减排总量的 3%，蓝氢在工业和运输中有少量使用，贡献了 3%的减排。

红色情景中的减排与**绿色情景**十分类似，但电力板块是例外，其中核能的复兴减少了可再生能源的总规模。核电更高的利用小时以及有限的灵活性意味着不再需要用氢能发电满足季节性需求变化，但同时导致电池储能需求出现增长。到 2050 年，清洁电力占减排总量的 61%，其中风能占 41%，太阳能占 20%，核能占 26%，其他零碳排放电力（包括水电）约占 13%。

（一）终端能源消费

在所有情景中，终端能源消费都出现了下降。随着需求侧能源效率的提升、循环再利用的增加、石油产品使用的减少以及更广泛的电气化应用，尽管人口和财富的增长推动出行、供暖和生产的需求不断增加，整体能源需求不升反降。

在我们的三个情景里，终端能源消费的电气化是脱碳转型的核心，电力在 2050 年终端能源消费中的比例提升至 49%。这一转变在道路交通和建筑领域最为显著：在交通领域，新能源汽车会占据道路交通的主导地位；在建筑领域，电力供暖系统对传统石油和天然气供暖系统的取代会推动用能转换；低温工艺的能源消费同样也在向电力过渡。这一系列电气化进程将整体电能需求在各情景的基准轨迹上又推高了约 47%。

在我们的三个情景中，煤炭、天然气和石油产品的终端消费都出现大幅下降。化石能源在当前终端能源中的占比高达 68%，但在**灰色情景**中其占比在 2050 年跌落至 30%，在**绿色情景**和**红色情景**中更是仅占 13%，仅作

为化工原料使用。

在*灰色情景*中，煤炭和天然气在 2050 年的终端能源中分别保有 10%和 9%的占比，这是因为碳捕集和封存技术允许这些燃料在工业生产的供热流程中继续得到应用。与之相对，这一技术很难应用至道路交通和航运业，因此在本情景中，石油在终端能源消费中的占比将由当前的 42%跌至 10%。

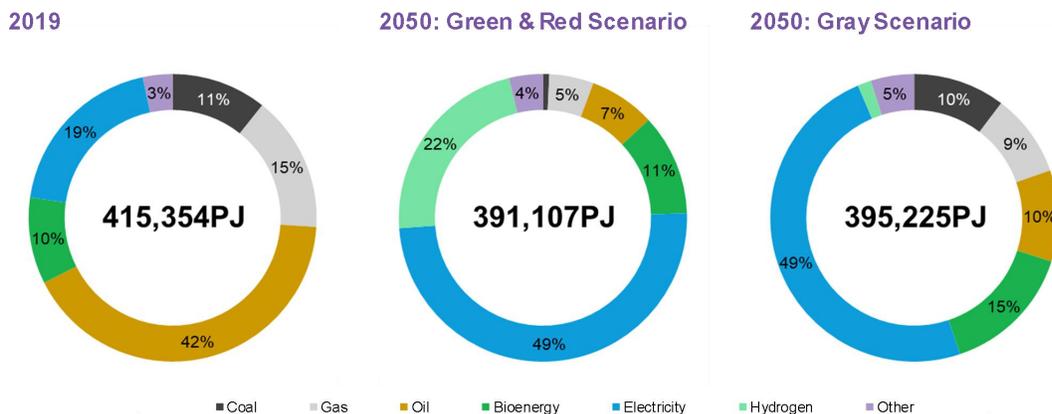
在三大情景中，氢能都成为终端能源消费的组成部分。在*灰色情景*中，氢能只扮演次要角色，到 2050 年时的需求仅为 1.9 亿吨。但氢能对*绿色情景*意义重大，相关需求达到 13.2 亿吨，在终端能源中的占比也由目前低于 0.002%的水平提升至 22%。

在*绿色情景*中，电力板块是氢能最主要的应用领域，2050 年的需求达到 5.53 亿吨，占氢能需求总额的 42%。*绿色情景*和*红色情景*中的终端用能部门将消费 7.7 亿吨氢气。在终端用能行业中，工业将占氢能需求的大头，在 2050 年达到 3.4 亿吨，其中约 40%将用于钢铁生产。另有 1.6 亿吨氢能应用于交通运输板块，主要是航空业，其氢气需求量达 9,500 万吨，占该板块氢气需求的 59%，而中型和重型商用车会另外消耗 3,000 万吨氢气。建筑板块消耗的氢气较少，在 2050 年达 1.02 亿吨，其中有三分之二用于住宅建筑。随着水电解制氢技术的进步，我们假设生产一吨氢气所需的电量将从今天的 5.3 万千瓦时降低至 2050 年的 4.5 万千瓦时。这意味着在我们*绿色情景*和*红色情景*中，需要 34.4 万亿千瓦时至 59.3 万亿千瓦时的电力以满足氢能的生产。生产*绿色情景*中所需氢气要消耗的电能是目前全球发电量的 1.9 倍，而*红色情景*中氢气消耗的电能则为 1.5 倍。

在*红色情景*中，我们预测整体电能消耗，包括用于制氢的电能，在 2050 年增长至 96.4 万亿千瓦时，较 2019 年水平增长 3.7 倍。在*绿色情景*的

预测中，该数值还要更高，到 2050 年将增长至 121.5 万亿千瓦时，较 2019 年水平增长 4.6 倍。总体来看，到本世纪中叶，我们绿色情景中预测约有 71% 的终端能源直接或间接地来源于电力。

图 6：终端能源消费



来源：彭博新能源财经

（二）一次能源供应

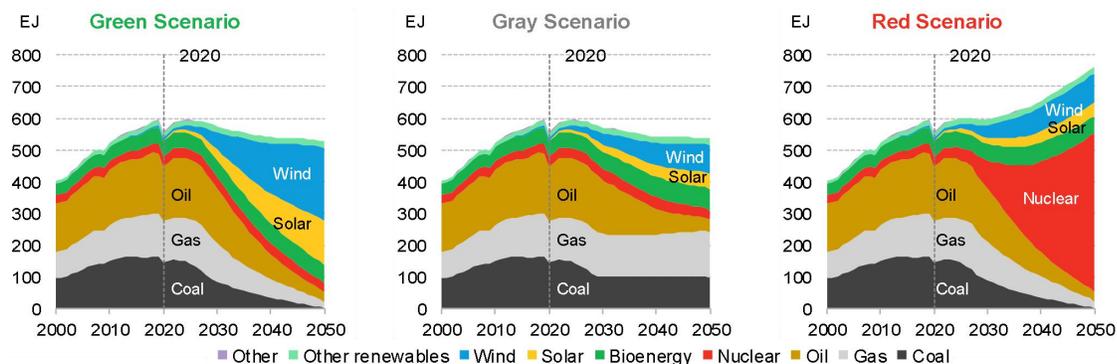
我们的三个净零情景均描述了一次能源供应出现的重大转变。在绿色情景中，风能、光伏、水电和其他可再生能源于 2030 年、2040 年和 2050 年在一次能源中的占比分别为 28%、62% 和 85%，而这一比例在今天仅为 12%。如果仅计算风能和太阳能，这一比例目前只有 1.3%。与此同时，化石燃料的使用从 2019 年起以每年 7% 的速度下降，至 2050 年仅占能源供应的 10%。

在红色情景中，核能是一次能源供应的主导，占比达 66%。如此大的比例反映出核燃料转化为核电及核电转化为氢能的低效率。在灰色情景中，燃烧后碳捕集和封存技术得到广泛应用，煤炭和天然气因此也被继续使用，在此情景中，化石燃料每年降低 2%，但到 2050 年仍占据一次能源的 52%。

化石燃料目前占据一次能源总量的 83%，这一比例包括了化石燃料在转换为电力或炼化后被使用的过程中损失的能量。目前，约有 53% 的一次能源在有效利用前就被浪费在了转换的过程中。在各个情景中，化石燃料需求达峰的时间都提前到来，石油和煤炭的需求不会再触及疫情前的高点。

石油、天然气和煤炭需求下降的速度和时机在不同情景中都不一致。石油需求在三个情景中都会出现长期且显著的下降，而煤炭和天然气因为 CCS 技术的应用可在灰色情景中长期存在。政策制定者必须谨慎地管理这些下降进程，对多种战略目标和需求进行考虑，把投资从此类板块中撤出并将搁浅资产的规模最小化，同时公正地对相关工人和社区进行转型，并在可行的前提下保留对本国具显著意义的经济板块。

图 7：一次能源供应



来源：彭博新能源财经

在我们的绿色情景和红色情景中，煤炭很早就出现了快速下降，每年降幅达到 5%，到 2030 年供应量仅剩 38 亿吨，比 2019 年水平低 45%。随着脱碳进一步在重工业领域展开，煤炭的供应量将一路下跌，到 2050 年时将缩减至 1.1 亿吨。CCS 技术在灰色情景的运用为发电和包括钢铁和水泥在内的高温工业煤炭需求提供支撑，自约 2027 年起煤炭使用量的下降趋势显著

放缓。

石油在三个情景中均受重创。疫情后的需求将出现恢复，但不会再达到疫情前的水平。到 2030 年时，不同情景下石油需求量将由 2019 年的每天 9,700 万桶跌落至每天 8,500-8,700 万桶。在 **绿色情景** 和 **红色情景** 中，到 2050 年时，新能源汽车、可持续航空燃料和氢能将使石油需求降低至每天 1,500 万桶，仅作原料使用。即便在 **灰色情景** 中，石油的使用同样出现下降，这是因为 CCS 技术在石油应用最广泛的交通运输板块作用寥寥，此情景下的石油需求将在 2050 年跌落至 2,100 万桶。

天然气在未来十年将继续小幅增长，每年的增速约为 1%，在不同情景下于 2026 或 2027 年达到峰值，这是因为电力板块会出现小规模的气电替代煤电。在我们的 **绿色情景** 和 **红色情景** 中，随着氢能和其他零碳燃料取代天然气在建筑、工业和发电方面的应用，整体天然气需求将在 2050 年跌至 5,180 亿立方米。而在灰色情景中，电力和工业领域对 CCS 技术的运用可令天然气需求由 2034 年 3.4 万亿立方米的低点反弹，到 2050 年时回升至 3.7 万亿立方米，比 2019 年的水平高 4.2%。

整体而言，我们的情景描述了能源及碳排放将与经济增长显著脱钩的趋势。在 2019 年至 2050 年间，终端能源消费相比 GDP 将下滑 62%，也即单位 GDP 能耗每年下降 3.1%。2000 年至 2018 年间，终端能源消费强度平均每年只降低了 1.3%。单位 GDP 一次能源能耗的降低将更为显著，**绿色情景**、**灰色情景** 和 **红色情景** 中 2019 年至 2050 年间降幅分别为 65%、64%和 49%。

五、 所需投资

能源转型离不开对能源基础设施的大规模投资，资本将从化石燃料中退出，转而投向清洁电力和其他气候解决方案。尽管各个路径所需的整体成本

具有不确定性，我们估计能源供给和基础设施领域在未来 30 年间所需的投资额将达到 94 万亿美元至 175 万亿美元。为了实现这一目标，年度投资额至少需要翻倍，如今的每年 1.7 万亿美元需要在未来的 30 年间提升至 3.1 万亿美元至 5.8 万亿美元。

对于**绿色情景**而言，整体投资额中约有 56% 会流向氢能的生产、储存和运输，电力的生产、储存和电网将占据另外 35% 的投资，而剩下的 9% 将归化石燃料所有。与此相对，**红色情景** 要求有 55% 的投资额流向电力板块，其中有 35% 将去向发电，包含可再生能源和核能；氢能和化石燃料分别将占投资额的 34% 和 11%。与之类似，灰色情景中发电、储能和电网将占投资额的主要部分，比重达 57%，化石燃料和 CCS 技术分别将利用 20% 和 15% 的投资额，而剩余的 8% 将流向氢能。