

杨子民. 实现巴黎协议环保目标的化石能源可燃烧总量研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(9): 111-118. Yang Zimin. Analysis of Paris Agreement-compliant fossil fuel burnable upper limit[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(9): 111-118.

实现巴黎协议环保目标的化石能源可燃烧总量研究

杨子民

(曼彻斯特大学, 廷德尔气候变化研究中心, 英国 曼彻斯特 M139PL)

摘要:随着工业化时代的到来,人类对于能源需求的急剧增加,对环境造成了剧烈的影响,其中全球变暖这一关系到生态平衡乃至人类生存的问题,便是由于对化石能源不加节制的使用所导致的。长期以来,对于化石能源需求的关注,一直停留在满足发展需要这一角度。然而,随着全球变暖问题日趋严重,环境也对化石能源的使用提出了限制,若仅从满足人类自身来考虑化石能源的使用,势必对环境造成毁灭性的破坏。文章从环境角度入手,以巴黎协议提出的要求“全球变暖不超过2℃”为参照,构建未来30年的能源情景,以分析环境因素对化石能源使用的限制,即若要避免全球变暖造成的毁灭性灾难,化石能源可使用的极限是多少。基于对历史情势以及未来趋势的分析来构建能源情景,探索不同初始假设条件对结果的影响。结果显示,大约超过70%的现有石油和天然气储量,以及90%的现有煤炭储量不可燃烧。该结果表明,从环境角度考虑,人类已无任何必要探寻新的化石能源资源,现有的化石能源储量已严重过剩。

关键词:化石能源; 巴黎协议; 碳预算; 能源情景; 碳捕捉与储存技术

中图分类号:X24 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.09.016 **文章编号:**1003-6504(2020)09-0111-08

Analysis of Paris Agreement-compliant Fossil Fuel Burnable Upper Limit

YANG Zimin

(Tyndau Center for Climate Change, University of Manchester, Manchester M139PL, UK)

Abstract: With the arrival of the industrialization era, the rapid increase of human energy demand has had a violent impact on the environment, among which global warming is related to the ecological balance and even the survival of human beings. It is due to the uncontrolled use of fossil energy. For a long time, the attention to fossil energy demand has been staying in the perspective of meeting the needs of development. However, with the increasing problem of global warming, the environment also limits the use of fossil energy. The environment would be devastatingly damaged if human only consider the usage of fossil fuel from the aspect of self-need. From the environmental point of view, taking the Paris Agreement's request that "global warming should not exceed 2 degrees celsius" as a reference, the energy scenario for the next 30 years is constructed to analyze the limitations of environmental factors on the use of fossil energy. The aim is to analyze the upper limit of burnable fossil fuel that will not cause irreversible damage to environment. The energy scenario is built from analysis of historical situation as well as future trend. Besides, the impact of different underlying assumptions are explored. The final result shows that about more than 70% of oil and gas reserve and 90% of coal reserve is unburnable, indicating that from environment aspect, people have no need to explore new fossil resources, current reserves are overstocked.

Key words: fossil source; Paris Agreement; carbon budget; energy scenario; carbon capture and storage

随着科技与经济的发展,人类对能源的需求将会愈来愈高。一次能源可以简单分为两大类,即产生大量碳排放的化石能源和其他产生少量甚至无碳排放的清洁能源。人类对于能源的选择以及消费习惯往往取决于经济。然而,随着大量化石能源燃烧导致的温室效应日趋严重,环境也对能源的选择以及消费习惯提出了不可忽视的要求:若要使地球环境不遭受不可逆的破坏,则当下以化石能源为依赖的能源消费习

惯必须做出改变。因此,基于这一角度,有必要去分析环境问题所决定的化石能源使用上限。

2016年生效的致力于解决这一环境问题的巴黎协议指出,21世纪全球平均气温上升幅度应控制在2℃以内,并努力将全球气温上升控制在前工业化时期水平之上1.5℃以内。与此同时,环境科学提供了全球温度上升与碳排放之间的直接联系^[1]。因此,巴黎协议的目标即等效于规定CO₂的排放总量,即碳预

算。此外,假若不考虑自然界本身所产生的排放(诸如植物呼吸作用),仅从能源的角度来看,化石能源的燃烧已被证实是产生温室气体的首要影响因素^[2]。因此,巴黎协议对于温度上升的限制,可以进一步理解为对化石能源的燃烧总量提出了一个上限。

近年来,权威机构已对碳预算的设定提供了参考。2018年发表的联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)全球升温1.5℃特别报告(IPSS SR1.5)就温度上升水平与碳预算之间的联系提供了指导^[3]。随后,Tyndall Manchester 气候变化研究中心在分析 IPSS SR1.5后,于2019年计算出了符合巴黎协议的仅与人类能耗相关的碳预算(人类能耗活动专指以将一次能源转化为满足自身需要的其他能源,如燃烧化石能源来获取其中的化学能,光伏发电将太阳能转变为电能等;不包括自然界中碳平衡影响因素,如呼吸作用,以及将能源作为原料而非燃料消耗等过程),数值为655 Gt(giga-tone)^[4],这意味着2020年后人类的能源消耗产生的碳排放总和应当不超过该数值(2016年的全球年度能耗相关碳排放约为33 Gt CO₂,而1990年仅为20 Gt)。

对于减排,碳捕捉与储存(carbon capture and storage, CCS)技术是最近兴起的一项减排技术,其原理是将工业排放的CO₂收集起来,输送到封存地点(如已枯竭的油井),与大气长期隔绝^[5]。该项技术目前处在新兴萌芽阶段,尽管目前的捕捉与储存能力相比于排放量是不值一提的,但因其发展迅速,被认为在未来的抑制气候变化的策略中将会起到重要的作用^[6]。基于对能源情景的时效性的考量,即采用最新数据,本文构建了未来30年内符合巴黎协议的全球层面的能源情景,这其中包含石油、天然气、煤炭每年的消耗量,清洁能源的年需求量,以及相对应的年度碳排放总量与能耗总量。将该能源情景中液体、气体以及固体这3种化石能源的消耗量与当今世界化石能源的储量进行比较,最终得出各能源的可燃烧量与不可燃烧比,估算了CCS的实际影响,从准确性与精确性的角度评估了能源情景的科技层面可行性。

1 数据搜集

1.1 碳预算

IPCC SR1.5^[3]指出,在以可观测全球地表平均温度为参考地球平均温度时,770 Gt的碳预算意味着温度上升有50%的概率低于1.5℃,而570 Gt预算对应的概率为66%;在以全球地表空气平均温度为参考地球平均温度时,580 Gt和420 Gt的碳预算分别对应50%和66%的概率。此外,IPCC还给出了数值为900

Gt CO₂的自2018年起的指导预算,对应66%的概率使温度上升小于2℃,以及30%的概率小于1.5℃。Tyndall Manchester 气候变化研究中心从该指导预算入手,移除了用以代表甲烷反馈(methane feedback)的100 Gt碳预算,剔除了2018年和2019年的碳排放(每年40 Gt,共80 Gt),并减去了代表水泥生产造成的60 Gt碳排放,在考虑森林面积与陆地使用面积变化后,最终得出了655 Gt CO₂作为2020年后人类仅与能源消耗相关的碳预算^[4]。此外,值得一提的是,在制定该预算的过程中,为确保准确性,高不确定性的负排放科技与气候系统的不确定性被排除在外。研究采用该655 Gt CO₂的碳预算,制定其在2050年消耗殆尽的能源情景。

1.2 用于构建能源情景的有关数据

合理的能源情景必须基于过去的趋势与现在的形势,因此,本文采集了1990-2018年的排放与能耗数据。

(1)CO₂排放。选择 International Energy Agency (IEA)的数据,因为其排放仅与能源燃烧有关,与本研究的碳预算保持一致性^[7]。

(2)一次能源供给。为确保一致性,关于一次能源供给的数据也参考 IEA 数据库。此外,还参考了文献[8-11]。

(3)化石能源的排放系数。用作计算的化石能源的排放系数参考自文献[12],低碳能源的排放系数则参考文献[13]。研究中,石油、天然气以及煤炭分别是对液体化石能源、气体化石能源以及固体化石能源的统称。因3种化石能源可具体细分出排放系数有微小差异的子种类(如石油可分为重油、柴油等),故本文选择采用具有代表性的且数值较为居中的3种化石能源来分别代表石油、天然气以及煤炭,分别为燃油(排放系数0.283 9 kg CO₂/(kW·h))、天然气(排放系数0.203 9 kg CO₂/(kW·h))、工业煤(排放系数0.345 63 kg CO₂/(kW·h))。低碳能源是对诸如太阳能、风能、核能等清洁能源的总称,它们的排放系数不是定值,后续专门给出数值以及论证。

1.3 化石能源储量

化石能源的储量数据参考文献[14,15]。在权衡与比较后,采用当今全球化石能源储量:石油1 730 Gb(giga-barrel)、天然气197 Tm³(trillion cubic meter)、煤炭1 055 Gt。

1.4 CCS

研究仅考虑 CCS 的效用。CCS 可以将CO₂与大气隔离,但这并不意味着应用该技术后,就能实现零排放。由于一些环境因素(CO₂封存在地表之下后,渗

透入地下水,再循环至生态圈以及气候系统;封存可以持续上千年的时间,但是封存地点的建造过程中以及使用寿命结束后还是会对环境产生影响;陆地使用面积增加等),即使一个燃料发电厂全部应用CCS,其仍将释放少量CO₂。因此,笔者在研究中关注的是多少化石能源的燃烧会采用该技术以及应用该技术后化石能源的排放系数会减少至何种程度。

研究中应用的假设及数据如下:CCS从2025年开始逐渐发展,至2050年其全球总捕捉能力为3 Gt CO₂(即每年可捕捉3 Gt CO₂)。此外,应用CCS后,化石能源的排放系数将减少75%。

2 能源情景构建

将一次能源粗略分为石油、天然气、煤炭以及其他能源4类。其他能源代表除化石能源外的所有清洁能源。能源情景将会包含未来30年这4种能源的使用情况。能源情景的制定流程图如图1所示。通过碳预算按年度分配得出未来的碳排放走势,通过过去能耗的数据分析得出未来的能耗走势。这2个走势随即构成能源情景的限制条件,即这4种一次能源既要能释放出需要的能量,又不能产生超预算的CO₂排放。为了确定能源供应的构成,即4种能源的比例,除了2个走势限制之外,另一个至关因素为人们的使用习惯——从过去的能源供应构成以及变化趋势来预测未来的能源构成。在确定了未来每年的一次能源供应量以及构成之后,就搭建好能源情景,再通过求和,便可得出未来30年各化石能源的总消耗量。

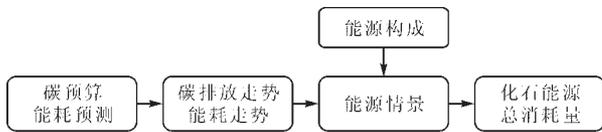


图1 能源情景的制定流程图
Fig.1 Block diagram for building scenario

2.1 碳预算与碳排放走势

碳排放走势如图2所示。

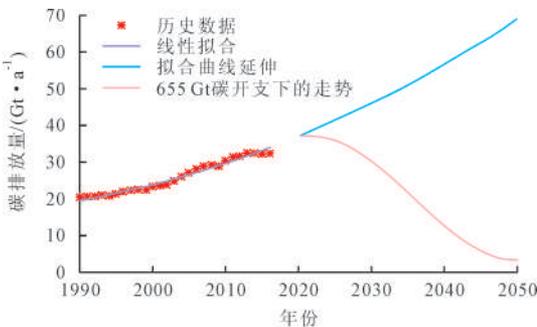


图2 碳排放走势
Fig.2 Carbon pathway

碳排放走势是一条曲线,反映的是每年CO₂排放量的趋势。对每年的碳排放量进行时间上的求和,即

曲线下横轴上围成的曲边梯形的面积,为这一段时间内碳排放总量。图2中红点对应的是1990–2016年全球年度人类能耗产生的碳排放总量,紫色线是通过多项式拟合的具有代表性且能够反映其趋势的曲线,浅蓝色曲线为其在2020–2050年的延伸。若不加任何干预,未来每年的碳排放量将持续升高。在该曲线下,未来30年的累计碳排放将显著大于655 Gt CO₂的碳预算。

红线与横轴围城的曲边梯形的面积为655 Gt CO₂,即碳预算。其意义为要满足该碳预算,则未来的碳排放应当按照该趋势逐步平滑减缓。

围成相同面积的曲线是可以不同的。因此,对于相同的碳预算,其对应的碳排放走势曲线也是可以不同的。图2中红色曲线描述655 Gt CO₂碳预算是基于现实性的考量,即排放的减缓趋势应当尽可能平滑且缓慢,否则一个大的排放下降坡度意味着对科技提出更苛刻的要求。如果在前期不开始适当减少排放,那么留给后期的预算就会非常低,而每年的减排能力应当是逐步增加的,不大可能会出现突变。

2.2 能耗预测与走势

能耗走势如图3所示。其中红点是取自BP数据库^[14]的自2010–2018年的全球总能耗数据;绿点是取自IEA数据库^[7]的2010–2016年的全球总能耗数据(约有5%的偏差,是调查方法不同导致的)。标注为“数据库中值数据”的红色直线,则取自二者平均值所对应的回归直线。4条分别标注为“来自文献2018–report”“来自文献2013–Jazz”“来自文献2013–Symphony”与“来自文献2016–forecast”的彩色虚线取自文献[8–11]。此外,另外4条以“来自模型AIM”或“来自模型REMIND”开头的彩色虚线,取自AR5(IPCC Fifth Assessment Report)情景数据库^[16]。AR5情景数据库目前储存了上千个不同的能源情景,这4条的选取是基于一个尽可能相似的碳排放走势。

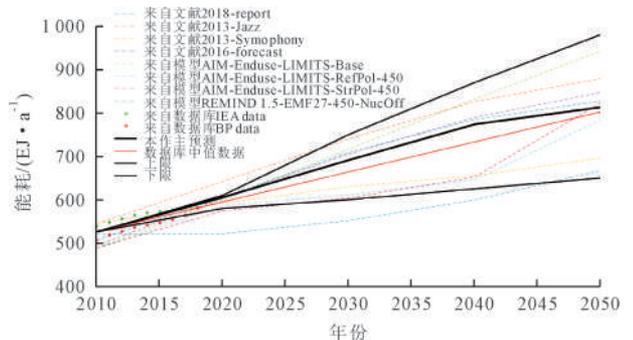


图3 能耗走势
Fig.3 Energy pathway

结合以上数据,本文得到的预测为图3中3条黑色实线。“本作主预测”为最主要的预测,“上限”和“下

限”分别为未来能耗波动的预测上、下限。不同的能耗走势所确定的能源情景是不同的,本文最终提供了12个不同的能源情景。为方便起见,在后文中提到的能耗走势,若非特殊说明,均认为是主预测对应的走势。

2.3 能源构成与能源情景

CO₂的产生量等于能源消耗量与排放系数的乘积。用C、E、EF分别代表碳排放(carbon)、能耗(energy)、排放系数(emission factor),于是有:

$$C_{\text{yearly}} = EF_{\text{oil}} \times E_{\text{oil}} + EF_{\text{gas}} \times E_{\text{gas}} + EF_{\text{coal}} \times E_{\text{coal}} + EF_{\text{other}} \times E_{\text{other}} \quad (1)$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{oil}} + E_{\text{gas}} + E_{\text{coal}} + E_{\text{other}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)为能源情景的公式表述,若求出公式中的所有项,则能源情景便可成型。式中,C_{yearly}为每年的碳排放,即图2中红色曲线对应的碳排放走势;E_{total}为每年的能耗,即图3中主预测对应的能耗走势。化石能源的排放系数已经给出,至此,仅需确定“其他”能源的排放系数EF_{other}以及4种能源在未来30年间各自的消耗量就可制定出能源情景。

为逐个击破,现将3个化石能源视为一个整体,命名为“fossil”,对该整体内部,有:

$$C_{\text{fossil}} = EF_{\text{oil}} \times E_{\text{oil}} + EF_{\text{gas}} \times E_{\text{gas}} + EF_{\text{coal}} \times E_{\text{coal}} \quad (3)$$

若已知3种化石能源的比例以及化石能源总碳排放,C_{fossil}可根据式(3)求得3种化石能源各自的能耗。再根据化石能源与其他能源的总排放走势得出其他能源所产生的碳排放,代入其他能源的排放系数EF_{other},便可解出所有项,得出能源情景。因此,构建能源情景的核心就是确定化石能源构成,即石油、天然气、煤炭在总化石能源中的占比。

对能源构成的分析,有一个很重要的假设:若改变一个整体,则组成整体的各部分将均匀地承受整体的改变,即若化石能源总排放下降一定的比例,则3种化石能源各自的排放量都将下降相同的比例,也即3种能源的比例始终保持不变。基于此,根据过去的能源消耗趋势,通过线性拟合的方法,来预测该能源在未来的消耗趋势,如图4所示。据此,可得出3种化石能源在总化石能源中的比例,如图5所示。

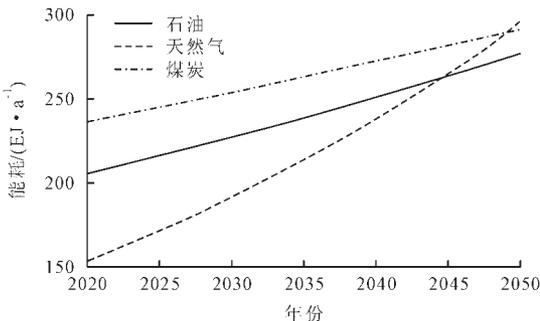


图4 常态下未来能耗趋势

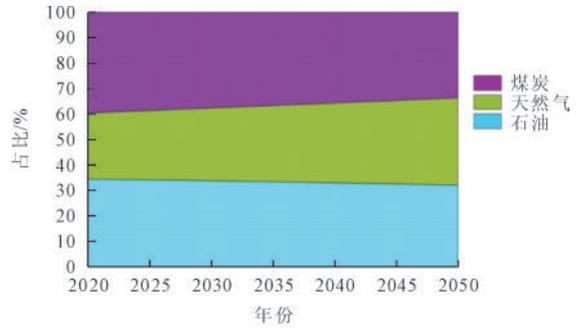


图5 各化石能源的份额
Fig.5 Fossil fuel mix make-up

若将石油、天然气、煤炭在化石能源中所占百分比表示为Oil%、Gas%、Coal%,化石能源总消耗记为E_{fossil},则图4与图5的换算式可表示为:

$$Oil\% = E_{\text{oil}} / E_{\text{fossil}}, Gas\% = E_{\text{gas}} / E_{\text{fossil}}, Coal\% = E_{\text{coal}} / E_{\text{fossil}} \quad (4)$$

因此,式(3)可改写为:

$$C_{\text{fossil}} = E_{\text{fossil}} \times (EF_{\text{oil}} \times Oil\% + EF_{\text{gas}} \times Gas\% + EF_{\text{coal}} \times Coal\%) \quad (5)$$

至此,求解能源情景的未知项只剩下C_{fossil}和EF_{other}。确定这2项的算法如下:

步骤1:假设其他能源的碳排放为0,即直接等于由图2确定的C_{yearly},由式(5)与图5计算化石能源总能耗E_{fossil},这只是一个用于计算并无实际意义的中间值,记其为E_{fs-asp},以区分最终确定的E_{fossil};

步骤2:通过式(2)和由图3确定的E_{total}来确定其他能源的消耗E_{other},记其为E_{ot-asp}以示区分;

步骤3:因方程组中未知量个数大于方程个数,故先赋予未知量EF_{other}一个尽可能准确的预估值,用其乘以E_{ot-asp},即得到其他能源的碳排放C_{other};

步骤4:用C_{yearly}减去C_{other}得到真实的C_{fossil},再用真实的C_{fossil}按照步骤1的方法计算真实的总能耗E_{fossil};

步骤5:因E_{fs-asp}直接对应于C_{yearly},而E_{fossil}对应的C_{fossil}仅属于C_{yearly}的一部分,因此E_{fs-asp}-E_{fossil}>0;

步骤6:将这个差值认为成0碳排放的清洁能源,代入步2确定的E_{ot-asp},即得出真实的其他能源总能耗E_{other}=E_{ot-asp}+(E_{fs-asp}-E_{fossil});

步骤7:用E_{other}除C_{other}求其他能源的排放因数EF_{other},再与步骤3代入的预估的EF_{other}进行对比,通过比较其偏差程度来衡量该算法的准确性。

步骤3代入的E_{other}与步骤7重新计算的E_{other}如图6所示。显而易见,清洁能源的排放因数在未来30年是持续下降的,这也是本文研究的重要假设之一,否则,实现低排放碳预算将难上加难。用于步骤3预估清洁能源的排放因数在2020年的初始值,取自于文献[13]中提供的各清洁能源的排放因数及其在现今总清洁能源中所占比例,结果显示,2条线的平均偏差程

度约为2.25%,在允许范围之内。图6虚线中所用的排放系数,取自CO₂当量,并非CO₂。CO₂当量,除了包含CO₂之外,还将其他温室气体如甲烷折算为同等影响的CO₂。这里专门选用CO₂当量用于步骤3计算的原因,是因为对于同一燃料,其CO₂当量排放系数通常比CO₂排放系数高0.5%~3%^[14],这正好可以用来大致弥补步骤7得出的实线的2.25%下降。此外,这个偏差还将被视为清洁能源的柔韧性,与“清洁能源的排放因数在未来持续下降”这一假设一同在后文中讨论。

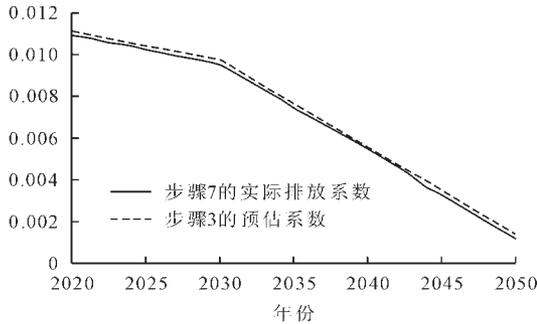


图6 其他能源(清洁能源)的排放系数
Fig.6 Emission factor for other energy

至此,构建能源情景的所有项均已求出,能源情景如图7所示。

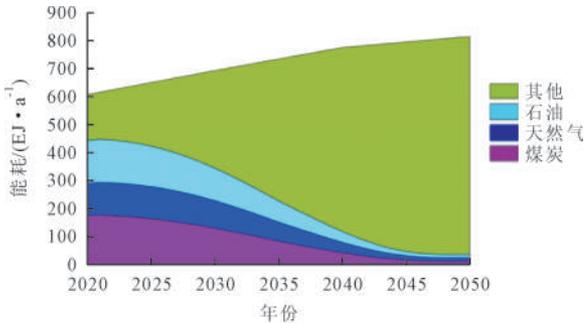


图7 能源情景
Fig.7 Energy scenario

此外,值得一提的是图6所示模型在2030年斜率出现拐点的原因:从数学意义上来看,图7所示2020-2030年化石能源的使用变化情况并不剧烈,而2030以后其使用量将会急剧下降从而导致清洁能源使用量大幅上升。由于碳排放走势的限制,划分给清洁能源产生的碳排放总量不应当随着用量的上升而上升,因此从数值上造成了其必须变得更小这一现象。从现实意义的角度来说,这意味着未来变化相对缓和的10年是缓冲期,不会对现有技术提出不合常理的要求,但是如果在此期间不能大力改良技术,那么未来形势将会更加严峻。

2.4 CCS模型

要将CCS模型插入到前文所建立的能源情景中,需要知道有多少CCS分别应用于石油、天然气和煤炭,或者石油、天然气和煤炭各自应用CCS的比例。笔者尝试性认为,超过半数的CCS将被部署于煤炭,约

30%将被部署于天然气,仅有10%左右的将被部署于石油。

将CCS模型插入能源情景,是基于同等碳开支的条件。同等碳排放的条件下,一个较为简单的做法就是假设各能源种类对于排放的贡献,在有无CCS的情况下保持一致;或者能源供给中各化石能源的比例,在有无CCS的情况下也保持一致。受篇幅限制,这里不叙述将CCS模型插入能源情景的具体算法,直接给出CCS渗透率(penetration),如图8所示,即3种化石能源应用CCS的比例。从图8可以看出,在2050年,超过80%的煤炭会在燃烧时应用CCS;超过70%的天然气燃烧会部署CCS;而仅有约25%的石油燃烧会使用CCS。这是因为,大部分石油都是消耗在运输行业,而运输行业中诸如汽车、轮船、飞机的尾气是很难捕捉的。

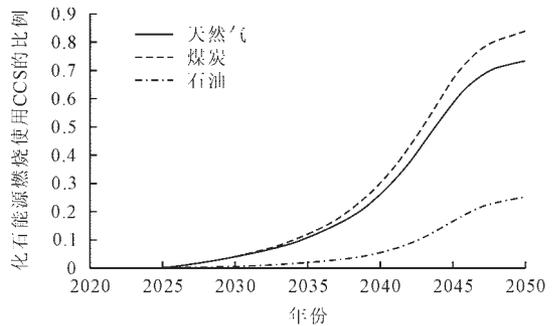


图8 CCS渗透率
Fig.8 CCS penetration

3 研究结果

能源情景的建立基于1条碳排放走势(图2)、3条能耗走势(图3)。能源构成的构建中,除了用拟合回归来模拟未来趋势(记为能源构成1)之外,还构建了从过去10年趋势所延伸而出的未来趋势(记为能源构成2),即一共构建出2种不同的能源构成。此外,每个能源情景又分为有、无CCS这2种情况。因此,最终一共建立了12条类似于图7的能源情景。

3.1 末态(2050年)能源构成

2050年一次能源构成如图9和图10所示,总能耗上下限以及主预测的取值与图3对应。为了确保结果的精确性,对不同初始假设条件对能源情景最终结果的影响也进行了分析。图4的化石能源趋势分析分别采用了2个不同的假设,分别为:未来的趋势由历史数据的线性拟合曲线决定;未来的趋势取自权威数据库^[7,14]的分析。前文旨在表述方法论,只展示了基于线性拟合分析的结果。不同的假设会导致不同的最终结果,因此会产生略有差异的能源情景。图9所示能源构成1为基于线性拟合的结果;图10所示能源构成2为基于数据库分析的结果。

图9和图10中的数据合并列于表1

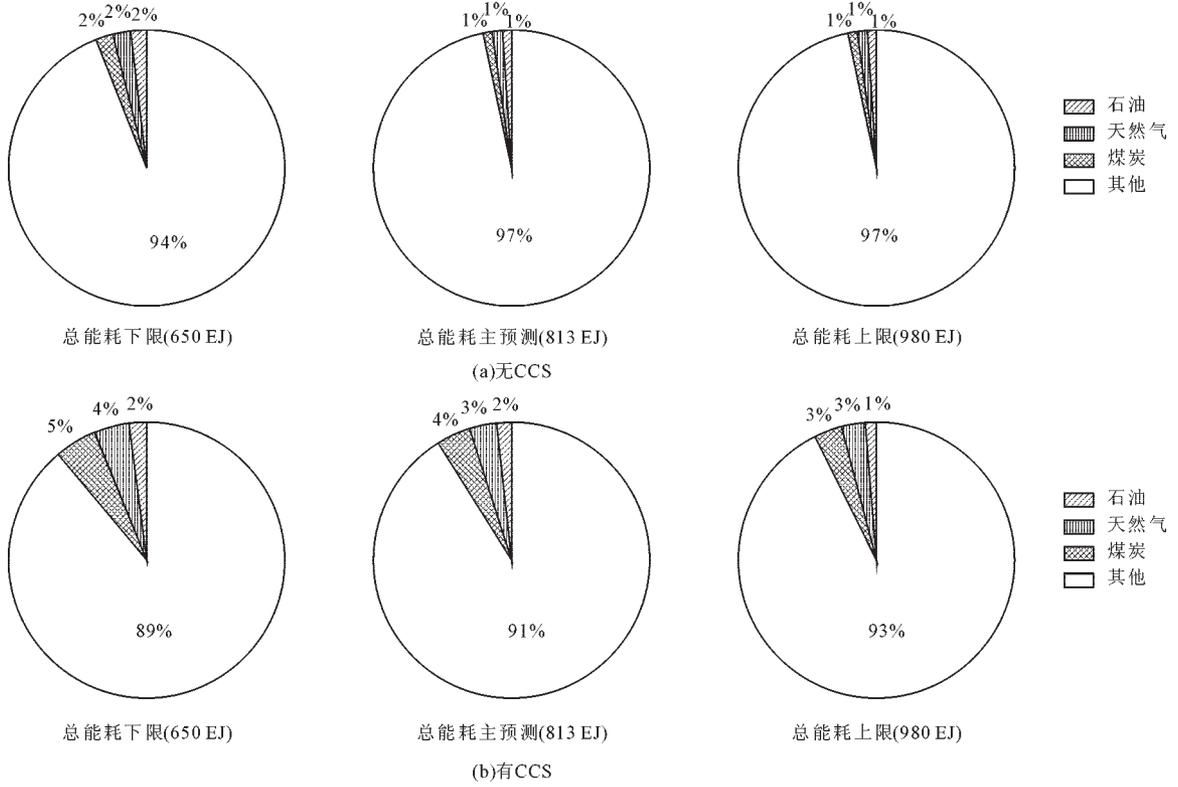


图9 2050年一次能源构成1
Fig.9 Energy mix 1 in 2050

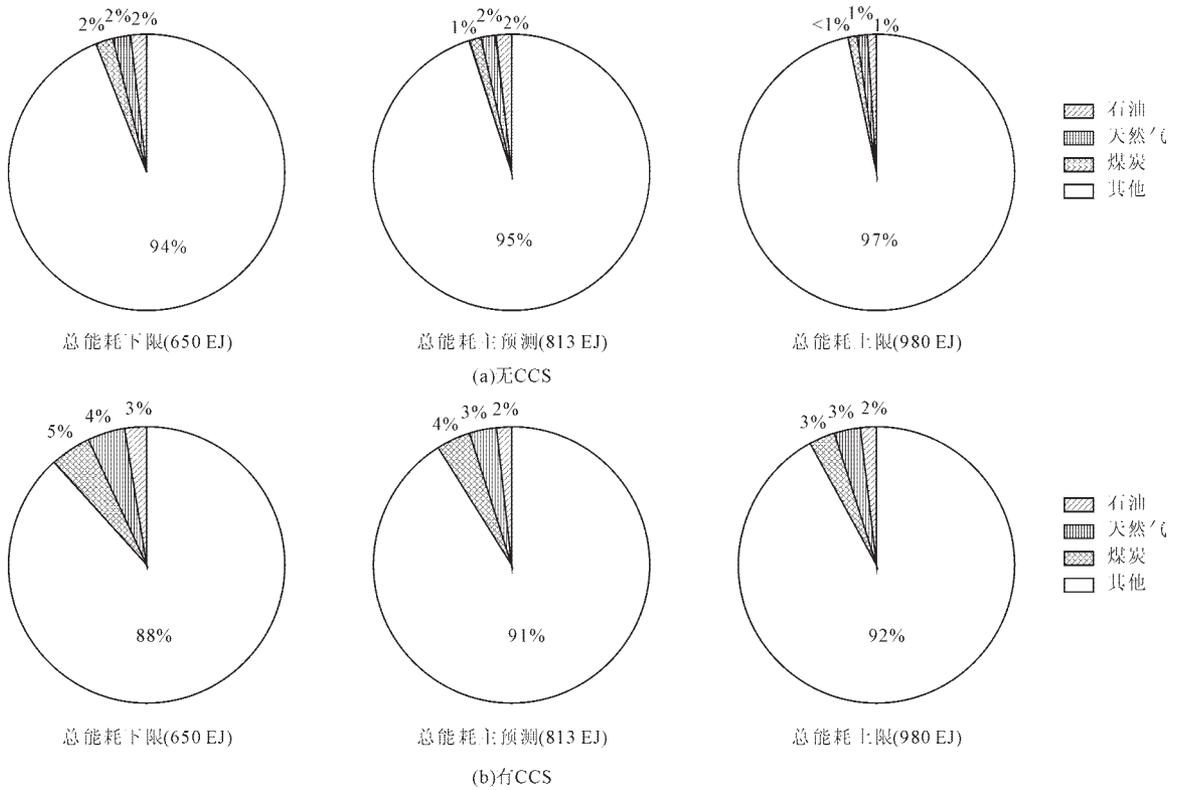


图10 2050年一次能源构成2
Fig.10 Energy mix 2 in 2050

表1 能源构成数据汇总
Table 1 Summary for energy mix

CCS	比例/%			
	石油	天然气	煤炭	其他能源
有	1~3	3~4	3~5	88~93
无	1~2	1~2	1~2	94~97

从图9、图10和表1中可得出如下结论:CCS可以增加化石能源的可燃烧量,进而增加它们在能源构成中的占比;CCS对煤炭的影响>CCS对天然气的影响>CCS对石油的影响,这与前文所述CCS的部署保持一致;一个大的能源需求意味着大的清洁能源供

应比例(图9、10每一行从左自右总能耗增加,其他能源的比例也增加),这是因为碳预算,即燃料燃烧释放的总CO₂量是保持不变的,因此额外的能源需求只能用清洁能源来满足;2个能源构成之间的差异不大,这是因为2个能源构成均是基于过去的趋势和当今的形势,向未来做的不同可能性的延伸;此外,655 Gt CO₂的碳预算已十分严峻,留给化石能源的伸缩空间并不是很大。

3.2 化石能源储量不可燃烧比

能源构成2在主预测能耗走势下未来30年内消耗的总化石能源如表2所示。可以看出,仅通过可燃烧能源的表述,并不能直观反映出其意义,因此这里不提供其他能源情景中总能耗的求和计算结果,直接给出从所有能源情景得出的化石能源不可燃烧比汇总于表3(当今全球化石能源储量为石油1 730 Gb、天然气197 Tcm、煤炭1 055 Gt)。

表2 能源构成2在主预测能耗走势下未来30年内消耗的总化石能源

Table 2 Total burnable fossil fuel under energy mix 2 and mainly figured energy pathway

CCS	可燃烧能源		
	石油	天然气	煤炭
有	2 646.2 EJ (451.45 Gb)	2 320.8 EJ (59.51 Tcm)	2 815.8 EJ (96.42 Gt)
无	2 611 EJ (445.55 Gb)	2 128 EJ (54.56 Tcm)	2 561.8 EJ (87.41 Gt)

表3 不可燃烧比

Table 3 Unburnable reserves as percentage

CCS	储量不可燃烧比/%		
	石油	天然气	煤炭
无	73.26~76.40 (平均值74.83)	71.2~74.02 (平均值72.61)	90.81~91.90 (平均值91.36)
有	72.92~76.08 (平均值74.50)	68.70~71.50 (平均值70.10)	89.95~91.05 (平均值90.50)

全球储量减去能源情景中给出的可燃烧总量即得出不可燃烧量,其与全球储量的比值即储量不可燃烧比。本文的能源情景构建采用了2个能源构成假设、3条能耗趋势预测、有无CCS的假设,因此最终共有12组数据。表3中范围是这12组数据的集合。总体来说,大约超过70%的石油和天然气储量以及超过90%的煤炭储量是不可燃烧的。这意味着人类已经没有必要再探寻新的化石能源资源了,现有的化石能源储量已严重过剩。同时,若不加大力度改变以化石能源为主的消费习惯,那么全球变暖的趋势将难以得到遏制。

此外,值得一提的是,CCS确实可以在一定程度上提高化石能源可使用量,如表2煤炭可提高大约10%;但相较于全球储量来说,这提高的10%在表3中转化为平均不可燃烧比只缓解了不到1个百分点。这

也印证了储量太过庞大这一事实。

4 讨论

4.1 精确性和准确性

(1)精确性。表3结果取自于12个能源情景的汇总,这12个能源情景,建立于1个相同的碳开支、3个不同的能耗走势以及2个不同的能源构成。这些结果之间的偏差(峰值之于平均值)小于1.6%,是精确的。

(2)准确性。对比文献[15]结果,3种化石能源可燃烧比与碳开支之比在单位储量的情况下呈现出同样的线性关系,即单位碳开支对应的3种化石能源可燃烧净值与文献[15]基本是一致的,反映出研究结果的准确性。

4.2 能源情景的科技可行性

科技可行性是评估能源情景的一项重要标准,其反映的是一个能源情景以现有的真实条件是否可以实现。尽管655 Gt的碳预算相比于如今的排放(超过35 Gt每年)显得十分严峻,但只要尽快且坚定地实施改变,从理论上来说其还是可行的。

从图7可以看出,2030年的化石能源消耗大约是现在的80%,在这之后出现较大幅度的变化。这意味着有10年的缓冲时期,在这10年里,重点应放在清洁能源的建设上,在逐步用清洁能源取代少量化石能源的过程中,同时大力开发清洁能源基础设施建设,提高清洁能源的供应容量;此后再用大规模的已建设好的清洁能源来替代传统化石能源。此外,其他诸如储能、智能电网、分布式发电的减排举措也可增强低排放能源情景的科技可行性。

4.3 能源情景的局限性

(1)2050-2100年。研究未考虑2050年后的情景。在未来的30年内排放的CO₂不超出碳开支已十分严峻,若还要分出一部分碳开支留给未来的50年,那么情势将更加严峻。值得注意的是,研究中2050年末碳排放仍大于零,这意味着在2050年之后仍会有碳排放,也就是说,2020-2100年期间的总碳开支有可能大于研究中给定的655 Gt CO₂。此类后续的影响超出了研究的考虑范围,这里给出最好的愿景,就是在实现低排放之后不久就能达到零净排放。此外,另一个积极的看法是,未来会出现成熟且大规模运用的负排放科技,再加上植树造林等措施,使得全球净排放能低于零。

(2)CCS模型。研究中对于CCS的模型建立是宏观的。现实中,CCS的部署存在选址问题。目前,CCS的项目基本上分布在欧美等发达国家和地区,而高污染地区(如亚洲)的CCS项目不是很多,这意味着有些

地域的化石能源燃烧将会无法应用CCS,或者还需要建设较远距离的CO₂运输设施。CCS的具体实施方案不在该研究的考虑范围之内,具体细分至地域的影响还有待调查。从表3来看,CCS对于化石能源储量可燃烧或不可燃烧比的影响并不是很大,若CCS的效用再进一步削弱,它对化石能源储量可燃烧或不可燃烧比的影响将进一步减小。

(3)清洁能源的碳排放。清洁能源的排放系数不是一成不变的,而是逐渐减少的。同时,排放系数还存在着极小的波动。若清洁能源的碳排放系数保持不变,那么即使未来人类全部使用清洁能源来发电,其产生的碳排放仍然是不可忽视的,其对碳预算的占据,将会进一步挤压化石能源的使用空间,意味着更加难以实现符合巴黎协议的温度上升控制。生物质能是排放最严重的清洁能源,同时其在清洁能源中所占份额也最多。从另一个角度来看,生物质能同样具有应用CCS的潜力,甚至还有望实现负排放。这就是说,的确存在减少清洁能源排放系数的可能性与途径。

4.4 现实意义

在发展经济与科技的过程中,从环境出发的这一角度往往没有得到足够的重视,或者即使得到了足够的重视,仍然也没有有效地做出改变。超过70%的储量不可燃烧比表明人类面临的环境问题随着时间的流逝将会非常严峻。从环境角度出发,现在已无必要再去探索新的化石能源资源,现有储量已严重溢出,应当集中精力投入到清洁能源的开发上,强迫自己改变以化石能源为依赖的消费习惯。

[参考文献]

[1] Powell J L. The Greenhouse Effect: from Curiosity to Threat [A]//The Inquisition of Climate Science[M]. New York: Columbia University Press, 2011:43-50.
 [2] Le Quéré C, Andres R J, Boden T, et al. The global carbon budget 1959-2011[J]. Earth System Science Data Discussions, 2012,5(2):1107-1157.
 [3] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, et al. "Summary

for Policymakers," in Global Warming of 1.5 °C[R]. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, IPCC, 2018.

[4] Anderson K. Reference for 655 Gt CO₂[Z]. 2019.
 [5] Fanchi J R, Fanchi C J. Energy in the 21st Century[M]. 4th ed. World Scientific Publishing Co Inc, 2016.
 [6] Mostafa K, Her I. Stabilization Wedges as a Tool of Engineering Optimization, with an Example of CO₂ Emission Control[C]. Tainan: 2010 International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA), 2010,1:69-72.
 [7] International Energy Agency. Statistics Data Browser[R]. 2019.
 [8] British Petroleum Company. Energy Charting Tool and App [R]. 2019.
 [9] Li M. Part 1 World Energy 2018-2050[R]. World Energy Annual Report, 2018.
 [10] Nyquist S. Energy 2050: Insights from the Ground up[M]. McKinsey & Company, 2016.
 [11] World Energy Council. Appendix 1: Key Scenario Data at a Glance in World Energy Scenarios: Composing Energy Futures to 2050[M]. London: Regency House, 2013:247-255.
 [12] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. Government Emission Conversion Factors for Greenhouse Gas Company Reporting[R]. 2019.
 [13] WNA Report. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources[R]. World Nuclear Association, 2011:10.
 [14] British Petroleum Company. BP Statistical Review of World Energy 2019[R]. 68th edition, 2019.
 [15] McGlade C, Ekins P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C[J]. Nature, 2015,517(7533):187-190.
 [16] IPCC WGIII. IAMC, "AR5 Scenario Database," Science for Global Insight[R]. 2015.