



# 界定页岩气的寿命周期： 确认及减少环境影响的框架

DEFINING THE SHALE GAS LIFE CYCLE:  
A FRAMEWORK FOR IDENTIFYING AND MITIGATING ENVIRONMENTAL IMPACTS

艾文·布拉诺斯基、阿曼达·斯蒂文斯、萨拉·福布斯 著

## 概要

关于页岩气活动的寿命周期的评估结论存在差异。在不同的研究项目中，研究者估算的温室气体排放量、水使用比率及产生废水的比率均存在差异。

这些差异一部分是源于每个研究的参数（尤其是寿命周期边界）不同。寿命周期边界决定了评估应该包括哪些寿命周期阶段以及与此些阶段的归因流程。例如，页岩气的寿命周期边界通常包括勘探、钻井、水力压裂、钻井生产、加工和燃烧。归因流程进一步界定了这些阶段中的活动。但是，有些评估忽略了某些阶段，例如勘探、加工或燃烧，或者在阶段与阶段以及流程与流程之间完全没有设定界限。由于存在这些差异，评估很难具有可比性，也很难开展建设性的对话，制定减少环境影响的战略。

本工作论文建议页岩气的寿命周期边界包括从勘探到封井/场地修复以及从天然气生产到使用的整个过程。该边界符合以ISO 14044寿命周期评估标准为依据并进行了扩充的《温室气体核算体系：产品寿命周期核算及报告标准》。此外，世界资源研究所将这一寿命周期边界与16份页岩气生产的环境影响评估进行了比较。结论显示这些研究的范围有较大差异，从而使页岩气的讨论变得复杂化。世界资源研究所将就这一寿命周期边界寻求反馈，并在下一份工作论文中加以应用，其将总结之前对页岩气生产中温室气体排放的评估结论，估算美国环保局修订的《温室气体报告规则》对排放的影响，并重点介绍美国天然气系统进一步减少甲烷排放的可能性。

## 目录

概要 .....	1
引言 .....	2
方法 .....	2
结果 .....	4
讨论 .....	8
结论 .....	8
参考资料 .....	9
附录1：寿命周期现有评估与世界资源研究所 寿命周期边界的比较 .....	10
附录2：定义 .....	11
尾注 .....	12

**Disclaimer:** Working Papers contain preliminary research, analysis, findings, and recommendations. They are circulated to stimulate timely discussion and critical feedback and to influence ongoing debate on emerging issues. Most working papers are eventually published in another form and their content may be revised.

**引用建议：**艾文·布拉诺斯基、阿曼达·斯蒂文斯、萨拉·福布斯，“界定页岩气的寿命周期：确认及减少环境影响的框架”，世界资源研究所工作论文，世界资源研究所，华盛顿哥伦比亚特区，2012年10月。网页地址<http://www.wri.org/publication/shale-gas-life-cycle-framework-for-impacts>。

## 引言

由于水平钻井和水力压裂技术，页岩地层的快速开采正在改写全球能源版图，但也引发了对页岩气生产造成的环境影响的担忧。遍布全球140个盆地的至少680个页岩气地层可以用于生产天然气（世界环境中心2010年）。美国的页岩气产量已从2000年的0.39万亿立方英尺增至2010年的4.8万亿立方英尺（美国能源信息署2011年b）。奥地利、澳大利亚、加拿大、中国、波兰、南非、英国及其它国家也进行了勘探。在所有拥有页岩气资源的国家，增加天然气产量可以为国家安全、经济效益环境效益提供保障。但是，生产产生的污染物和生产过程相关的活动也会对环境造成影响，包括温室气体的排放、水力压裂过程使用的化学物质，以及钻井需要的土地清理。本工作论文使用的术语定义参见附录2。

2012年初，世界资源研究所发起了一些项目，旨在澄清与页岩气相关的一些有争议问题。在参与讨论页岩气引发的环境影响时，世界资源研究所尤其关注温室气体排放估算的争论。这一争论在学术文献中也有涉及。比如，世界资源研究所发现，蒋（音译）等人（2011年）对页岩气寿命周期中生产阶段的活动所排放的温室气体量估算为9.7克二氧化碳当量/兆焦<sup>1</sup>。针对同一个阶段，斯蒂芬森等人（2011年）对排放量的估算为1.17克二氧化碳当量/兆焦<sup>2</sup>。世界资源研究所还发现，其它环境影响的评估结论也存在差异，包括抽水量、废水产生量以及野生动植物栖息地的破坏状况<sup>3</sup>。

很多因素都会导致页岩气生产的环境影响评估结论出现差异。排放因子、回收率和材料渗透率<sup>4</sup>会影响温室气体排放的估算。预测降雨量、钻井数量、完井和修井对水的需求都会影响水的用量并影响估算。另外，钻井的开发范围、空间分布及修复后场地的再生潜力都会影响野生动植物栖息地的破坏程度。除去上述因素，还有一个因素会影响结论，那就是页岩气寿命周期的边界<sup>5</sup>。不同的作者对寿命周期边界的界定存在差异。他们会根据评估的范围，决定包括或不包括不同的阶段及归因流程。此外，作者在不同的评估中对寿命周期活动的排序也有差异。这些差异增加了统一或比较结论的难度。

在本工作论文中，世界资源研究所建议了一个页岩气的寿命周期边界，包括阶段及归因流程。世界资源研究所的寿命周期边界基于《温室气体核算体系：产品寿命周期核算和报告标准》（《产品标准》）的边界设定指南。产品标准对国际标准化协会（ISO）14044寿命周期评估标准进行了扩充<sup>6</sup>。因此，世界资源研究所的寿命周期边界可以应用于所有地理区域的所有环境载体（空气、水或土地）。在界定了阶段和归因流程后，本工作论文还将这个寿命周期边界与16份页岩气开发的环境影响的评估<sup>7</sup>边界进行了比较，并对未来如何统一理解这些评估结论提出了建议。

世界资源研究所发现，使用统一的寿命周期边界对于理解

现有的评估并规划未来页岩气的工作非常有帮助，对其他利益相关方（包括开采页岩气的社区、监管机构、学术或研究机构及企业）也很有用。世界资源研究所会先就流程图向潜在的用户征求反馈意见，然后再将这一寿命周期边界应用于接下来的针对目前页岩气生产中温室气体排放评估的量化比较。另一份工作论文将阐述这些结论，评估修改后的《温室气体报告规则》对天然气井甲烷排放的影响，并讨论减少甲烷排放的可能性。

## 方法

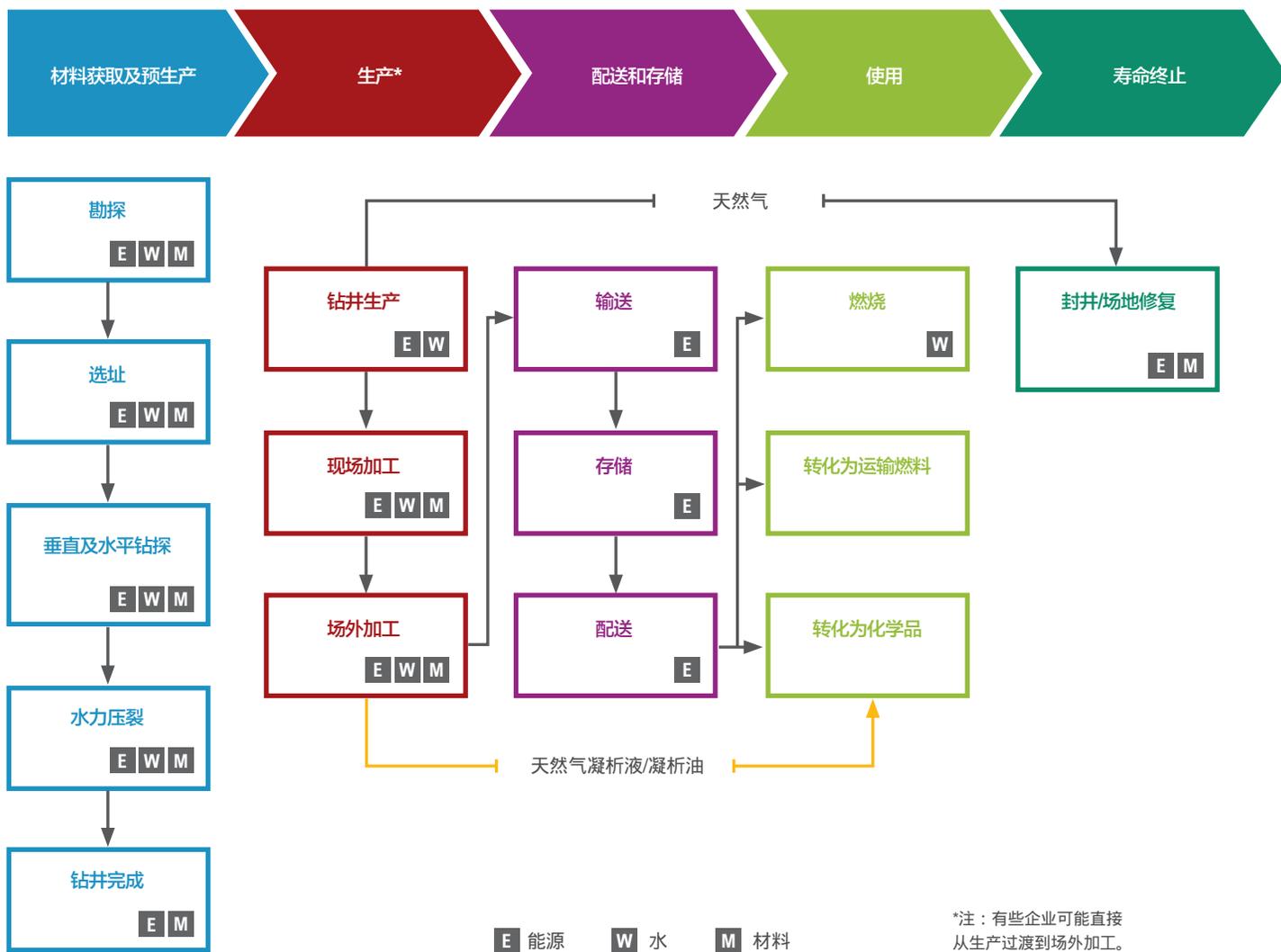
世界资源研究所通过三个步骤来设定寿命周期边界。第一步，世界资源研究所从一些学术、政府、非政府及私营部门的文献中找出关于界定寿命周期边界的阶段和归因流程的报告。第二步，世界资源研究所为标准化寿命周期阶段制定了归因流程。这个步骤非常重要，每一个归因流程必须明确界定，以避免构成这些流程中的活动被“重复计算”。第三步，世界资源研究所将这一寿命周期边界与其它评估中的边界进行了对比，并进行必要的修改。

世界资源研究所的寿命周期边界基于《产品标准》<sup>8</sup>。在所有产品的寿命周期中，边界的设定都是一个重要的组成部分。《产品标准》建议机构在陈述结论时使用流程图，包括标准的寿命周期阶段及与这些阶段的归因流程。在图1中，《产品标准》的阶段呈水平状排列，包括（1）材料获取及预生产<sup>9</sup>，（2）生产，（3）配送和存储，（4）使用及（5）寿命终止。归因流程呈垂直状排列，发生的顺序由左上角开始（勘探），在右下角箭头终点处结束（封井/场地修复）。由于能源使用、水的投入和产出（即水的使用和废水生产）及引入材料的使用（例如沙砾覆盖、钻井架及穿孔炸药）适用于多个归因流程，这些活动通过交叉使用的符号来表示（即E、W、M），而不是通过顺序发生的流程来表示<sup>10,11</sup>。与其它页岩气环境影响研究的寿命周期边界类似，世界资源研究所的流程图也涵盖了一个井使用寿命的全过程。

### 寿命周期边界对比

在界定了阶段和归因流程后，世界资源研究所将这一寿命周期边界与其它页岩气环境影响评估的边界进行了对比。经常被引用的研究很容易找到，例如斯孔恩等人（2011年）、豪沃斯等人（2011年）和莫尼兹等人（2011年），原因是这些研究受到了媒体的关注。为了寻找其它研究，世界资源研究所查询了与天然气行业相关以及2009年1月至2011年12月期间主要全球性报纸包含的关键词。相关文章参考了35份评估。在审阅这些评估的过程中，世界资源研究所发现了16份含有较完备寿命周期边界的评估，并将其纳入了分析范围<sup>12</sup>。世界资源研究所将自己界定的阶段和归因流程与上述研究中的相应部分进行了对比，并做出了必要的修改，结果参见之后的图表。

图 1 | 世界资源研究所的寿命周期流程图包括寿命周期的阶段和归因流程



## 结果

下面的图表和文字清楚表明，这些评估的范围和目标不同。因此，评估中的寿命周期边界不同，包含的归因流程也不同。世界资源研究所仅对寿命周期边界而并未对评估的目的进行了比较。例如，蒋等人（2011年）对温室气体排放的评估只包含两个阶段：（1）预生产及（2）预生产后<sup>13</sup>。作者描述了与这两个阶段的22个归因流程。相反，奥姆斯戴德（2011年）提供了所有环境影响的框架，但没有把活动区分成阶段和归因流程，而是指出了开采过程的九个单独步骤。虽然两份评估的开采过程都是从场地准备开始到使用结束，但各自对水的处理有不同的界定。蒋等人（2011年）把水的投入和产出看作两个归因流程，而奥姆斯戴德（2011年）只关注水的产出，包括回流、废水的存储及最终的处理。

### 材料获取及预生产阶段

在世界资源研究所的流程图中，材料获取及预生产阶段包括五个归因流程。16份评估中有些也包括这些归因流程（图2）。

世界资源研究所的第一个归因流程（勘探）和第二个归因

流程（选址）在这些评估中的描述存在差异。只有康西丁等人（2009年）的评估包含了勘探，并把其列在租赁之后<sup>14</sup>。关于选址，大多数经审阅的评估提到了与这一流程相关的活动，例如：

- 获得许可证（莫尼兹2011年）
- 准备向气井注入液体（蒋等人2011年）
- 原材料提炼（斯孔恩等人2011年）
- 道路和钻井场地/注入液体/建设（美国林业局2007年和纽约州环保局2011年）
- 场地开采和钻探准备（奥姆斯戴德2011年）
- 选址（塞尔斯2011年）
- 钻井基础设施（博汉姆等人2011年）

对于世界资源研究所的第三个归因流程垂直和水平钻探，大多数评估中都直接包含了这一流程。10份评估在流程描述时提到了“钻探”。有些评估把垂直和水平钻探合并在一起，而另一些评估（例如纽约州环保局2011年和奥姆斯戴德2011年）则将两者

图 2 | 材料获取及预生产阶段的差异

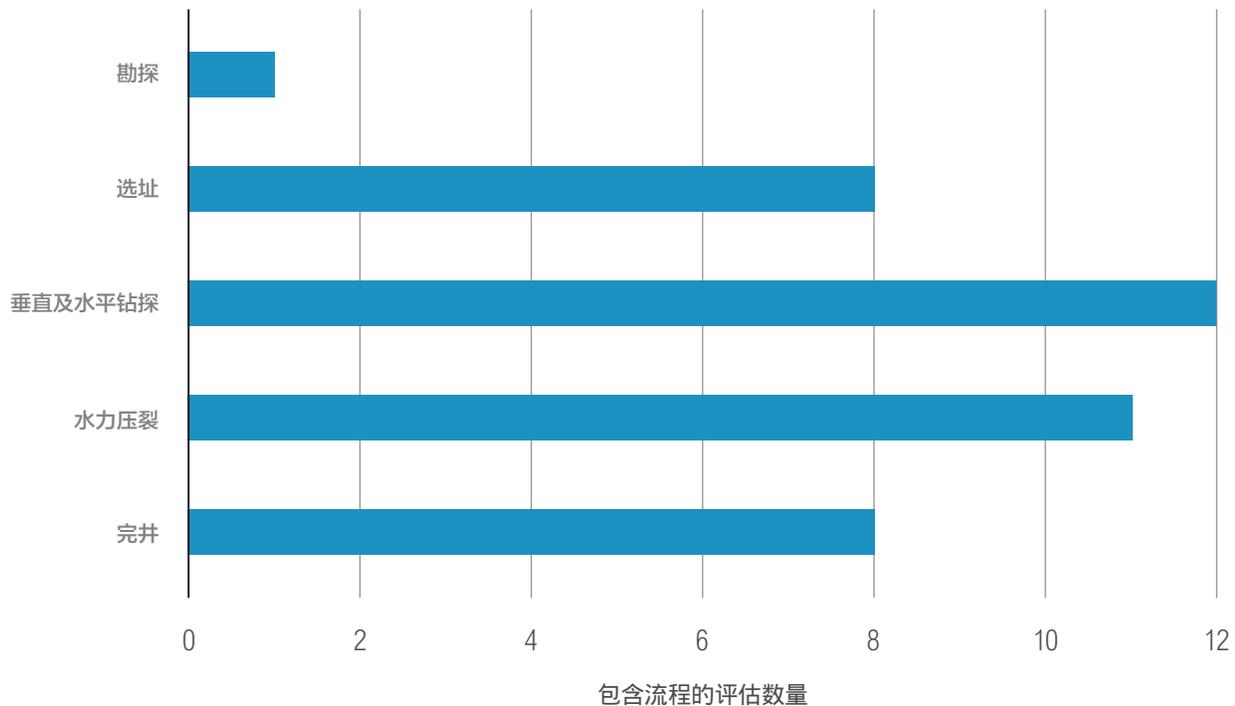
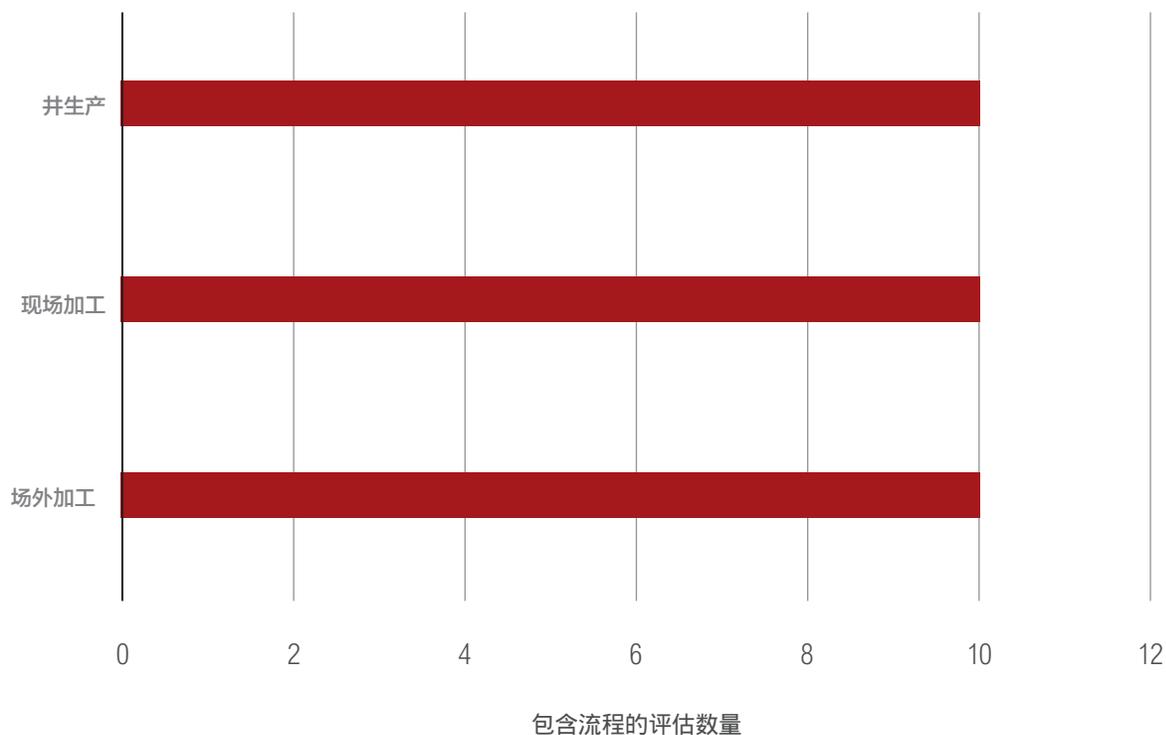


图 3 | 生产阶段的差异



分开。对于没有直接提及钻探的四份评估，这一流程可以被称为“钻井基础设施”或包含在水力压裂或完井流程中。

有几份评估将水力压裂和完井界定为独立的步骤，即世界资源研究所的第四个及第五个归因流程，参见美国林业局（2007年）、蒋等人（2011年）、纽约州环保局（2011年）、塞尔斯（2011年）及布罗德里克（2011年）。世界资源研究所流程图将这两个归因流程区分开是因为完井独立发生于水力压裂之外。也就是说，完井过程也会发生在常规天然气开采中。康西丁（2009年）把钻探、水力压裂和完井合并在一起，而奥姆斯戴德（2011年）则把水力压裂看作是完井的一部分。蒋等人（2011年）把完井看作是研究中预生产阶段的一部分。斯孔恩等人（2011年）则把它放进了“原材料提炼”阶段。

### 生产阶段

世界资源研究所的流程图包含生产阶段，而归因流程包括井生产、现场加工和场外加工（图3）。

大多数审阅的评估都提到了世界资源研究所包含在生产阶段的归因流程。10份评估提到了钻井生产，但S&T2（2010年）称之为“回收”。图3中列举的10份评估均把现场加工和场外加工合并为一类。斯孔恩等人（2011年）提到了“原材料加工”阶段。斯蒂芬森（2011年）把这一流程称为“气处理”。康西丁（2009年）把运输、加工和销售合并为一个流程。世界资源研究所把现场和场外加工区分开，为的是将流程完成前的运输产生的环境影响也纳入考虑范围。

## 配送和存储阶段

在世界资源研究所的流程图中，配送和存储阶段包括输送、存储和配送三个归因流程（图4）。

16份评估中有一部分包含了世界资源研究所的归因流程。有六份评估直接使用了“管道输送”这一术语，即博汉姆等人（2012年）、加拉米罗（2007年）、蒋等人（2011年）、S&T2（2011年）、斯蒂芬森等人（2011年）和富尔顿（2011年）。有两份评估将这一流程称为“运输”，即斯孔恩等人（2011年）和豪沃斯等人（2011年）。有五份评估包含存储，豪特曼等人（2011年）额外增加了液态天然气（LNG）这个流程。此外，有八份评估列举了配送流程。

## 使用阶段

世界资源研究所的使用阶段包括三个归因流程（燃烧、转化为运输燃料、转化为化学品）<sup>15</sup>。把这三个流程加以区分是因为每种使用方式的影响是不同的（图5）<sup>16</sup>。

有七份评估假设天然气被“燃烧”。斯孔恩等人（2011年）使用的术语是“能源转化装置”，涵盖了各种发电的能效转换程序及技术。博汉姆等人（2012年）、富尔顿等人（2011年）和蒋等人（2011年）也包含一系列以燃烧发电为最终用途的能效转换程序及技术。博汉姆等人（2012年）还包含燃烧天然气作为运输燃料。没有一份评估包含世界资源研究所的“转化为化学品”这一归因流程。

## 寿命终止阶段

世界资源研究所流程图的最后一项是寿命周期终止阶段。该阶段仅包含一个归因流程，即封井/场地修复。有些评估与此吻合（图6）。

有六份评估包含封井/场地修复，但描述该流程使用的术语不同。这些术语包括“封井”（布罗德里克（2011年）、美国林业局（2007年）和奥姆斯戴德（2011年））；“停止运作”（布罗德里克（2011年），斯孔恩等人（2011年））；“废弃”（奥姆斯戴德（2011年））；以及“再利用”（美国林业局（2007年））。纽约州环保局（2011年）的最后一个流程还包括钻井测试和最后的清理。

图 4 | 配送和存储阶段的差异

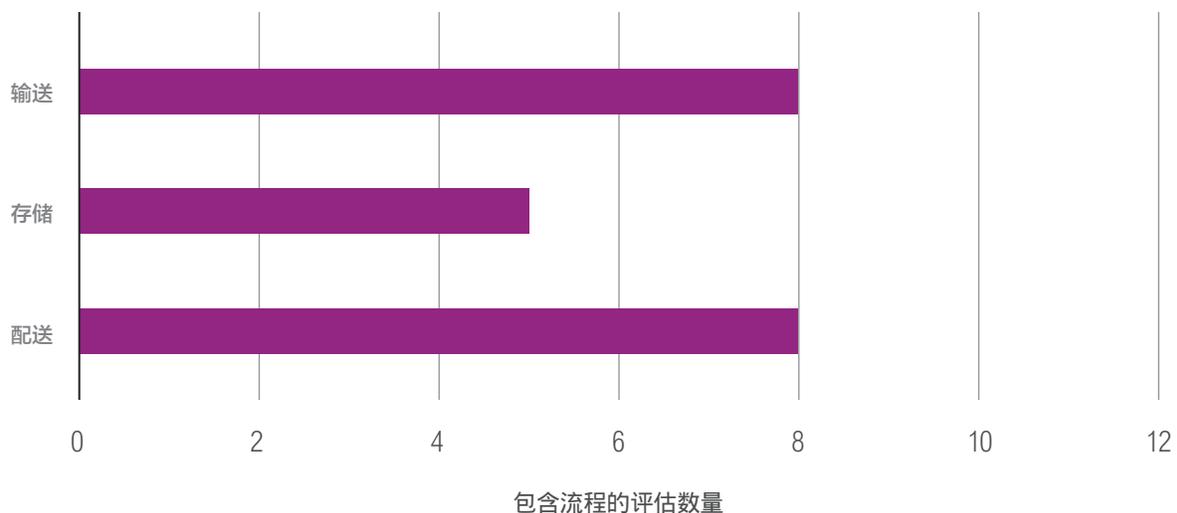


图 5 | 使用阶段的差异

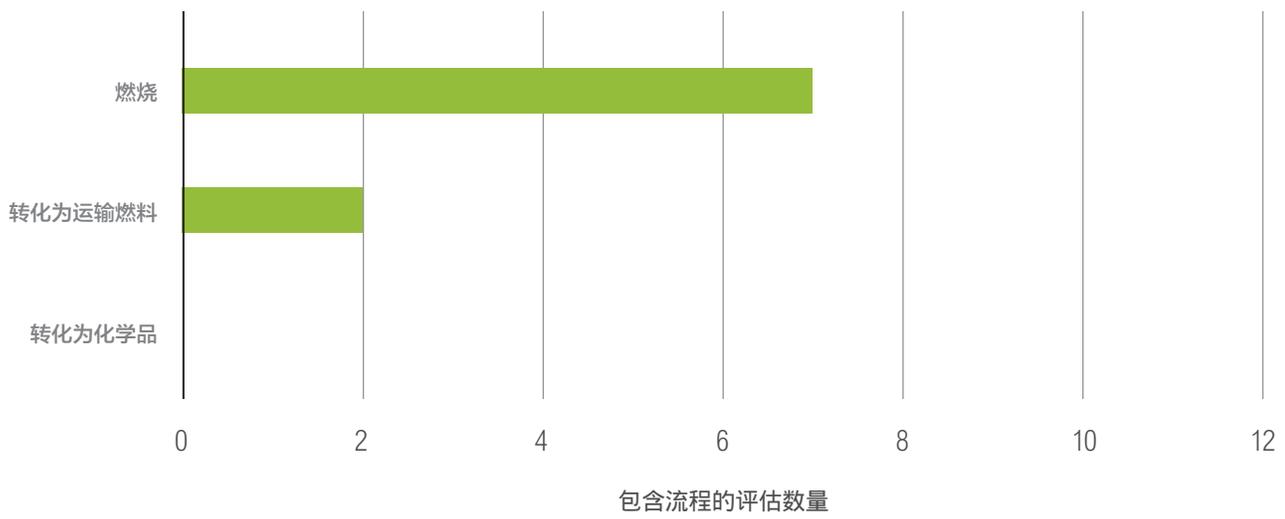
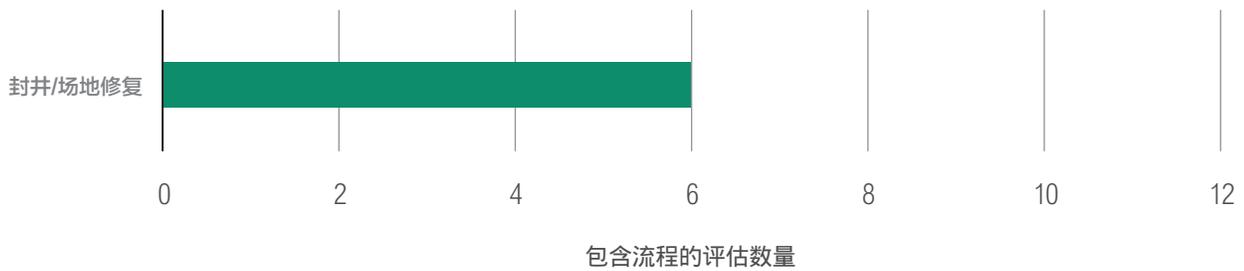


图 6 | 寿命周期终止阶段的差异



---

## 讨论

世界资源研究所的流程图和寿命周期边界和与其相比较的评估有着明显的共性和差异。同理，不同的评估之间也有差异。这些差异一部分是因为每位作者希望在研究中解决的问题不同，因此他们对页岩气生产关注的侧重点也不同。例如，试图量化废水产生的评估可能会关注水力压裂流程中的回流。但是，这份评估可能不会考虑勘探过程中钻井的产出水、长期钻井生产流程中产生的水，以及现场和场外加工过程中从天然气里分离出来的废水。关注水力压裂的评估可能会也可能不会向读者和研究人员提供必要的信息。如果读者将这类评估的结论与全寿命周期分析的结论混淆，关于解决方案的讨论会变得复杂。

经比较的评估除了在边界上有差异外，术语的使用也有较大差异。世界资源研究所的术语“现场加工”和“场外加工”指的是与回收的天然气转化为最终用途相关的全部活动。相反，有一份评估使用“原材料”加工，而另一份评估使用“气处理”来描述在同一流程中的部分活动。如果术语具有模糊性，研究人员可能会质疑不同的评估之间是否具有可比性。

最后，不同的评估对于相同活动的排序也可能有差异。例如，世界资源研究所建议将垂直和水平钻探流程放在水力压裂流程前面，之后才是钻井完成流程。在美国林业局（2007年）的评估里，第二个流程“钻探和完井”发生在第三个流程“水力压裂”之前。这样的差异可能不会影响全寿命周期环境影响分析的结论，原因是这在一定程度上是术语的定义不同造成的。但是，这个问题是一个重大的发现，值得探讨。

## 结论

在这份工作论文中，世界资源研究所提议了页岩气生产的寿命周期边界，并显示了这个边界与现有页岩气生产环境影响评估的边界之间的异同。统一的寿命周期边界不仅有助于读者理解现有页岩气生产环境影响评估的结论，而且也有助于规划未来的评估。作者今后在准备评估的时候，可以按照各自的评估需要定制流程图，在必要的时候可以将阶段及归因流程分离开。此外，使用者也可以将重点放在归因流程的定义上，并进一步细化定义，以尽可能多地包括与页岩气生产相关的活动。最后，进行全寿命周期评估的研究人员可以全盘采用世界资源研究所的寿命周期边界。不同的评估采用统一的边界可以加深对页岩气环境影响的共识。世界资源研究所将向用户群体征询对本工作论文的反馈意见，包括社区组织及其他组织，并在未来致力于将其应用于页岩气生产排放的温室气体总量的比较中。

## 参考资料

美国天然气协会 (AGA)。2012年。“天然气词汇表”。参见<http://www.aga.org/Kc/glossary/Pages/default.aspx> (2012年6月28日查询)。

美国石油学会 (API)。2012年。“天然气供需”。参见[http://new.api.org/aboutoilgas/natgas/supply\\_demand.cfm?renderforprint=1](http://new.api.org/aboutoilgas/natgas/supply_demand.cfm?renderforprint=1) (2012年4月18日查询)。

约翰·布罗德里克。2011年。“页岩气：新版环境和气候变化影响评估”。廷德尔气候变化研究中心；参见<http://www.co-operative.coop/Corporate/Fracking/Shale%20gas%20update%20-%20full%20report.pdf>。

安德鲁·博汉姆、韩俊武 (音译)、科瑞·克拉克、迈克尔·王、詹妮弗·邓恩及伊戈纳西·帕劳·里维拉。2012年。“页岩气、天然气、煤和石油寿命周期的温室气体排放”。《环境科学与技术》46(2):619-27。

蒂摩西·康西丁、罗伯特·华特森、丽贝卡·恩特勒及杰弗里·斯巴克。2009年。《新兴的巨人：开采马塞勒斯页岩天然气项目的前景及经济影响》。宾夕法尼亚大学城，宾州州立大学。

马克·富尔顿、尼尔斯·梅奎斯特、萨雅·齐塔塞及乔·布鲁斯坦。2011年。《比较天然气和煤寿命周期的温室气体排放》。华盛顿特区：德意志银行集团和世界观察研究所。

罗伯特·豪沃斯、蕾妮·桑托洛及安东尼·英格拉法。2011年。“甲烷以及页岩气地层天然气的温室气体足迹”。《气候变化文献》，DOI: 10.1007/s10584-011-0061-5。

内森·豪特曼、迪兰·里博伊斯、迈克尔·舒尔顿及克里斯托弗·拉米格。2011年。“用非常规天然气发电的温室影响”。《环境研究信件》6 044008。

保利娜·加拉米洛。2007年。“用于发电和生产运输燃料的煤及天然气的寿命周期比较”。博士论文。宾夕法尼亚州匹兹堡市：卡内基梅隆大学。

蒋默涵 (音译)、迈克尔·格律菲斯、克里斯·亨德里克森、保利娜·加拉米洛、吉恩·樊布里森及阿蓝雅·樊卡特什。2011年。“马塞勒斯页岩气寿命周期的温室气体排放”。《环境研究信件》6 034014。

厄内斯特·莫尼兹等人。2011年。《天然气的未来：麻省理工学院跨学科研究》。马萨诸塞州波士顿市：麻省理工学院 (MIT)。

纽约州环保局 (NYSDEC)。2011年。“石油、天然气和采矿监管项目补充统一环境影响声明修订版：关于马塞勒斯页岩气及其它低渗透性气田水平钻探及高强度水力压裂钻井许可证的颁发”。

希拉·奥姆斯戴德。2011年。“管理页岩气风险：寻找负责的开采方法”。2011年11月14日举行的“管理页岩气风险：寻找负责的开采方法大会”报告。

詹姆斯·塞尔斯。2011年。“与页岩气开采相关的水质问题”。2011年11月14日举行的“页岩气管理风险：寻找负责的开采方法大会”报告。

(S&T)2 咨询公司 (S&T)2。2010年。“在GHGenius模型中加入非常规天然气供应”。加拿大自然资源部。参见<http://www.ghgenius.ca/reports/UnconventionalGas.pdf>。

斯伦贝谢公司。2012年。“斯伦贝谢油田词汇表” (SOG)。参见<http://www.glossary.oilfield.slb.com/> (2012年4月15日查询)。

蒂摩西·斯孔恩、詹姆斯·利特福德及乔·马里奥特。2011年。《天然气萃取、输送和发电寿命周期的温室气体核算》。西弗吉尼亚州摩根城：美国能源部，国家能源技术实验室。

特莱福·斯蒂芬森、何塞·瓦利及扎西尔·雷拉帕劳。2011年。“常规天然气及页岩气生产的相对温室气体排放模型”。《环境科学与技术》4545(24): 10757-10764。

美国农业部林业局 (USFS)。2007年。《阿勒格尼国家森林最终环境影响声明》。(附录C：阿勒格尼国家森林石油天然气储量及开采量)。

美国能源信息署 (USEIA)。2011年a。《2010年天然气年报》。华盛顿哥伦比亚特区：美国能源部。参见<http://205.254.135.7/naturalgas/annual/pdf/nga10.pdf> (2012年6月28日查询)。

美国能源信息署 (USEIA)。2011年b。《世界页岩气资源：美国以外14个地区的初步评估》。华盛顿哥伦比亚特区：美国能源信息署。

克里斯托弗·韦伯及克里斯托弗·克莱文。2012年。“页岩气寿命周期的碳足迹：证据和影响评估”。《环境科学与技术》：DOI 10.1021/es300375n。

世界能源理事会 (WEC)。2010年。《能源资源调查：聚焦页岩气》。英国伦敦：世界能源理事会。

世界资源研究所 (WRI) 与世界可持续发展工商理事会 (WBCSD)。2011年。《产品寿命周期核算及报告标准》。华盛顿哥伦比亚特区：世界资源研究所。

## 附录1：与世界资源研究所寿命周期边界进行比较的现有评估

**布罗德里克（2011年）：**这份廷德尔气候变化研究中心的评估介绍了欧洲页岩气生产的影响及监管。寿命周期将非常规天然气生产视为与常规天然气生产截然不同的方法。此外，作者用寿命周期来显示潜在的环境影响。这份评估关注的是钻井场地，从钻探和水力压裂这两个预生产阶段过渡到生产阶段、封井及停止运作。

**博汉姆等人（2012年）：**由阿贡国家实验室的研究人员准备的评估通过寿命周期模型比较了页岩气、天然气、煤和石油的温室气体排放。这一寿命周期是为“温室气体、监管排放和运输中的能源使用”（GREET）模型制定的，用于估算页岩气活动的总排放。流程包括钻井基础设施（即准备场地、钻探和水力压裂）、天然气回收、加工、输送和配送以及最终使用。

**康西丁等人（2009年）：**康西丁等人对宾夕法尼亚州马塞勒斯页岩气进行了经济分析，报告由宾州州立大学出版。寿命周期显示了每一种活动的经济影响。这一寿命周期从租赁和场地勘探开始，包括钻探和完井等活动，以运输、加工和销售作为结束。

**富尔顿等人（2011年）：**德意志银行和世界观察研究所比较了页岩气和常规天然气温室气体排放的现有文献。作者根据美国环保局2011年公布的排放因子调整了评估结果。寿命周期为调整后的数据组设立了边界。边界从生产开始，经过加工、输送和配送等流程，最后是燃烧。

**豪沃斯等人（2011年）：**豪沃斯等人是康奈尔大学的研究人员。这份寿命周期评估对比了页岩气与煤和石油排放的甲烷。温室气体的计算界定了寿命周期。评估中的计算从完井开始，包括例行通风和设备泄漏、加工、运输、存储和配送。

**豪特曼等人（2011年）：**豪特曼等人是马里兰大学的研究人员，这份评估估算了发电用非常规天然气的温室气体影响。寿命周期的界定为温室气体的评估建立了基础。寿命周期始于钻井和完井，包括定期钻井维修和其它例行生产活动，然后是加工、配送给最终用户和存储。由于有些天然气是出口的，寿命周期还包括存储、以液态天然气为加工终端及最终的配送。

**加拉米洛（2007年）：**这份寿命周期评估是卡内基梅隆大学的博士论文，估算了几种化石燃料的温室气体排放，包括天然气。寿命周期针对的是天然气而不特指页岩气。活动始于钻井生产，包括加工、输送、配送和产品存储，终于燃烧或最终使用。

**蒋等人（2011年）：**蒋等人是卡内基梅隆大学的作者，对马塞勒斯页岩气资源回收的天然气进行了温室气体寿命周期评估。作者将页岩气开采分为“预生产”和“预生产后”两个阶段。预生产阶段包括钻井场地的调查和准备，以及钻探、水力压裂、完成及水/废水排放。预生产后阶段从生产开始，然后遵循产品线，经过加工、输送、配送和燃烧等流程。

**莫尼兹等人（2011）：**这份评估由麻省理工学院撰写，包括天然气（含页岩气）开采的环境和经济影响分析。寿命周期边界从获得许可证及场地建设开始，然后是钻探、搭井架、穿孔、和水力压裂，最后是水力压裂液体回流和钻井投产。

**纽约州环保局（2011年）：**《补充统一环境影响声明》界定了页岩气开采对纽约州各县的潜在影响。寿命周期就页岩气的开采过程提供读者教育，包括环境影响的部分。寿命周期从钻井液体注入设备和公路建设开始，然后是垂直和水平钻探流程，水力压裂准备和完成流程，回流液体收集和处理流程，最后是钻井清理。

**奥姆斯戴德（2011年）：**在2011年10月的一个研讨会上，希拉·奥姆斯戴德代表未来资源研究所（RFF）做了寿命周期的报告，包括影响通道或导致环境和社会风险的寿命周期活动。寿命周期分为九个阶段，包括场地开发和钻探准备、垂直钻探、水平钻探、水力压裂和完成、钻井和操作、液体回流/废水存储/处置、关闭封井和废弃、钻井维修，以及上游和下游活动。

**塞尔斯（2011年）：**在同一个未来资源研究所的研讨会上，詹姆斯·塞尔斯代表耶鲁大学林业与环境研究院探讨了页岩气和水质问题。他的报告界定了七个阶段，包括选址、气井钻探、搭井架、水力压裂、气井生产、气井封井和废弃。

**（S&T）2（2010年）：**GHGENIUS是加拿大自然资源部使用的温室气体排放模型项目，用于估算天然气产品不同回收技术及最终用途排放的温室气体。模型包含了与页岩气相关的活动。寿命周期将页岩气与其它回收技术区分开来，并包括天然气回收、原气加工和输送流程。

**斯孔恩等人（2011年）：**这份国家能源技术实验室的评估比较了各种回收天然气和开采煤的过程排放的温室气体。研究单独将页岩气区分出来，原因是页岩气的寿命周期活动比较独特。作者使用的寿命周期包括原材料获取（场地建设、钻井建设、完井）、原材料加工和原材料运输。在最后阶段，作者应用了能源转换因子来区分燃烧发电的能效。描述中还包括向最终用户配送及钻井停止运作，但作者没有将其包括在流程图中。

**斯蒂芬森等人（2011年）：**这份评估的作者是皇家荷兰壳牌有限公司的子公司壳牌全球解决方案的研究人员。评估使用了排放数据和因子来比较页岩气（即非常规）和常规天然气的排放。研究为两种天然气来源建立了“从钻井到电线”（WELL-TO-WIRE）的渠道。非常规天然气从“钻井到电线”的渠道始于与页岩气开采相关的活动，包括钻探、水力压裂、水的使用及处理。第二阶段汇集了所有回收技术相同的流程，包括生产、管道输送及发电厂的最后使用。

**美国林业局（2007年）：**《阿勒格尼国家森林最终环境影响声明》计划为阿勒格尼国家森林现有或规划的石油及天然气开采项目提供了背景和最近成果。寿命周期的目的是为石油和天然气开采提供背景，并为未来的环境影响分析提供指南。寿命周期始于道路和钻井场地开发，包括其它建设流程，例如钻探、完成和水力压裂。寿命周期还包括生产和废物处理（即盐水、卤水）。最后是封井和场地修复。

## 附录2：定义

**归因流程：**成为产品、生产产品并使产品度过寿命周期的服务、材料和能源流动（世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会2011年）。

**燃烧：**点燃燃料（通常在锅炉、焚烧炉或发动机/涡轮机内）并以热的形式释放能源的过程。

**转化为化学品：**将原料（在本工作论文的语境中指的是天然气或天然气衍生产品）转化为可用于多种工业的化学品的过程。

**转化为运输燃料：**将天然气转化为交通工具（例如汽车、公交车、飞机）可以使用的液体或压缩燃料的化学过程。

**配送：**通过当地的管道系统将天然气及相关产品输送给最终用户（根据美国石油学会2012年的定义改编）。配送管道的直径小于输送管道的直径。

**勘探：**通常指的是寻找地表下潜在的天然气或石油储备的活动。方法包括使用地磁仪、重力仪、地震勘探、地表测绘、勘探钻井及其它方法（美国天然气协会2012年定义）。

**回流：**在水力压裂归因流程中，随着钻井孔压力的释放，使用过的处理液流回地表。

**水力压裂：**将特殊制造的液体以高压和高速注入需处理的储备池，并导致垂直裂纹张开的增产处理。压裂支撑剂（例如某种尺寸的沙粒）与处理液混合后可保证裂纹在处理完成后保持张开状态（根据斯伦贝谢油田词汇表2012年改编）。世界资源研究所对水力压裂归因流程的定义包括分阶段对钻井架穿孔、处理液回流及处理废水。

**寿命周期：**产品系统连续和关联的阶段，从原材料获取或产生到生命结束（世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会2011年）。

**液体释放：**将钻井孔中的液体去除的过程，否则会减慢成熟钻井的生产。有些方法包括使用井下泵或降低井口的压力。世界资源研究所的生产阶段包括液体释放。

**矿产租赁：**获得在特定地点进行勘探和生产活动的权利或许可证的过程。

**流程图：**寿命周期边界的视觉化表现形式，包括相应的阶段和归因流程。

**加工（现场和场外）：**从回收的天然气中去除各种碳氢化合物或杂质（例如硫和水）的活动。初步沉淀可以在现场的存储管或存储池里进行。然后将天然气通过采集设备运输到场外，进行进一步加工。

**产出水：**在钻井生命期内流回地表的液体。

**选址：**为开采天然气活动的场地进行的准备，包括获得许可证、购买水和材料、建设钻井液体注入设备、准备连接道路、铺设采集设备并建造其它必要的基础设施。

**存储：**将天然气短期或长期储藏在本地的分管和高压池内或是地下的天然地质储备池（例如盐穹和枯竭的石油和天然气田）内的过程（根据美国天然气协会2012年和斯伦贝谢油田词汇表2012年改编）。

**输送：**天然气实物从一个或多个供应点运送到一个或多个终点（美国能源信息署2011年A）。输送管道的直径大于配送管道的直径。

**垂直和水平钻探：**钻井孔从垂直向水平方向偏移，以便钻孔可以在与储备平行的方向深入产气的页岩（根据美国职业安全与健康管理局2012年的定义改编）。世界资源研究所对垂直和水平钻探归因流程的定义包括泥（即在钻探过程中钻井孔内流动的液体）的处理，以及钻井架的安放和固定。

**封井/场地修复：**钻井生命期结束后，通过封闭钻井孔、移除设备并将场地恢复到勘探前状态从而停止生产的过程。

**完井：**用于描述钻探操作完成后将钻井孔投入生产所必需的活动和设备的一般性术语，包括但不限于确保气井安全高效生产的设备组装（根据斯伦贝谢油田词汇表2012年改编）。世界资源研究所不认为钻井架的安放和固定（见垂直和水平钻探）是钻井完成阶段的活动。同样道理，水力压裂自身就构成了一个阶段，因此也不是与钻井完成相关的活动。

**钻井：**与材料采购和预加工阶段（即从气田中排除碳氢化合物）相关的流程顺利结束后发生的流程（根据斯伦贝谢油田词汇表2012年改编）。回收的碳氢化合物可能会将产出水送回地表，因此需要在排放前进行处理。同样道理，液体释放也是必要的。

**维修：**对投产的气井进行一个或多个修复操作以增加产量（美国职业安全与健康管理局2012年）。

## 注释

<sup>1</sup> 温室气体估算报告以100年为期限。

<sup>2</sup> 差异源于作者在各自的生命周期边界中包含的活动不同。此外，蒋等人（2011年）在生产阶段包括排液；斯蒂芬森等人（2011年）则不包括。

<sup>3</sup> 参见纽约州环保局。2011年。“石油、天然气和采矿监管项目补充统一环境影响声明修订版：关于马塞勒斯页岩气及其它低渗透性气田水平钻探及高强度水力压裂钻并许可证的颁发”。美国农业部林业局。2007年。“阿勒格尼国家森林最终环境影响声明”。（附录C：阿勒格尼国家森林石油天然气储量及开采量）。

<sup>4</sup> 材料渗漏包括钢管和铜管渗漏的沼气。

<sup>5</sup> ISO 14044标准规定“必须决定生命周期评估应当包括哪些流程。系统边界的选择应与研究目标保持一致”。但边界不同对于不同页岩气环境影响评估的比较一直是个挑战。例如，在对页岩气和常规天然气生产碳足迹的六份研究进行比较时，韦伯和克莱文（2012年）说：“六份研究都试图研究页岩气的碳足迹……但每份研究的范围对于哪些活动应该包括或不应该包括的处理方法不同”。此外，富尔顿等人（2011年）在研究中调整了界定的生命周期边界，以评估对煤和天然气发电平均温室气体足迹的认识。作者对数据组进行了必要的调整，以便包括与进口天然气相关的排放，也就是将天然气作为石油副产品以及通过配送管道送达发电厂的天然气份额。

<sup>6</sup> 单独应用ISO 14044标准不太有用，原因是其边界设定标准比较模糊，而且缺乏产品标准的具体规定及额外指导。

<sup>7</sup> 参见附录1的16份评估。

<sup>8</sup> 由55个国家的2300人用三年时间制定的产品标准获得了广泛的认可，并涵盖了温室气体核算过程的所有步骤，从建立产品核算的范围到设定减排目标和追踪核算变化。

<sup>9</sup> 产品标准建议将“大自然”作为生命周期的第一个阶段。大自然阶段承认所有产品都来源于某种自然资源。这份研究不包括大自然这一阶段，其假设是用户群体都知道这是开采化石燃料的必经阶段。

<sup>10</sup> 例如，在场外加工后不再需要对产出水和回流水的处理。废水处理是一个持续的过程，只要废水产生就必须处理。

<sup>11</sup> 对能源、水和材料的使用及管理在不同的钻井场地差别较大。例如，一个钻井的作业人员可以在现场收回回流水，或将其送往工业废水处理厂，或将其送往地下注入井永久封存。至于材料，可以在钻井的生命期内多次增产，从而增加其使用。

<sup>12</sup> 包括的研究参见附录1。

<sup>13</sup> 蒋等人（2011年）、斯孔恩等人（2011年）和斯蒂芬森等人（2011年）是唯一将流程分类的评估（相当于采用世界资源研究所的方法论，将归因流程纳入不同的阶段）。

<sup>14</sup> 塞尔斯（2011年）也将租赁纳入了第一阶段，但使用的术语是“矿产租赁”。

<sup>15</sup> 转化为运输燃料及转化为化学品都会在下游产生影响。但这些影响并未纳入生命周期边界。

<sup>16</sup> 转化为化学品没有纳入任何一份审阅的评估。但是作者将其纳入生命周期边界是因为液化天然气的生产以及在化工行业的使用正在不断上升。

## 关于世界资源研究所

世界资源研究所（WRI）是一个全球性环境与发展智库，其研究活动致力于寻求保护环境和改善民生的实际解决方案。我们与政府、企业和公民社会合作，为迫在眉睫的环境挑战提供切实的解决方案。正因为可持续发展对满足人类今天的需求和实现明天的愿望至关重要，世界资源研究所为保护地球，促进发展，促进社会公平提供锐意进取的解决方案。

## 作者介绍

**艾文·布拉诺斯基**是世界资源研究所人类与生态系统项目的研究员。联系方式：[ebranosky@wri.org](mailto:ebranosky@wri.org)

**阿曼达·斯蒂文斯**是世界资源研究所可持续发展倡议的研究助理。联系方式：[astevens@wri.org](mailto:astevens@wri.org)

**萨拉·福布斯**是世界资源研究所气候与能源项目的高级研究员。联系方式：[sforbes@wri.org](mailto:sforbes@wri.org)

## 致谢

作者感谢世界资源研究所的同事对这份工作文件的内容及结构提出了有益建议。他们是詹姆斯·布拉德伯利、劳拉·德劳克、凯文·肯尼迪、维多利亚·普赛尔、珍妮特·兰嘉纳森、保罗·雷格、萧心恬和温华。作者还要感谢尼克·普莱斯的排版及艾什雷·里奇在评估过程中的协调。