

川南页岩气区块生命周期用水核算*

桂玉茹^{1,2,3} 贾婉玲^{1,2,3} 曾勇^{1,2,3}

(1. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院; 2. 重质油国家重点实验室; 3. 北京市油气污染防治重点实验室)

摘 要 选取川南页岩气区块为研究对象,运用过程生命周期评估和投入产出生命周期方法核算页岩气开采生命周期的直接和间接用水量,并与美国 Marcellus 页岩气区块用水量进行比较。川南区块总直接用水量为 22 928 m³/井,高于 Marcellus 区块的总直接用水量 15 320 m³/井。从生命周期阶段来看,川南页岩气开采钻井和压裂阶段的直接用水均远大于 Marcellus 区块。结合水环境管理指标,自然资源禀赋条件主要决定了直接用水量的差异。川南区块总间接用水量为 25 098 m³/井,超过总直接用水量,约为 Marcellus 区块总间接用水量的 3 倍。除井场准备阶段外,其余阶段的间接用水量均大于 Marcellus 区块,间接用水量的差异与钻井和压裂过程的添加剂、能源使用量和全行业用水效率有关。减少川南区块页岩气开发用水量的主要途径包括提高钻井液和压裂液回用率、改善钻井和压裂添加剂使用效率、提高柴油和电力等能源利用效率和全行业用水效率。

关键词 页岩气; 生命周期; 用水量; 过程生命周期评估; 投入产出生命周期方法

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2020.02.002

文章编号:1005-3158(2020)02-0006-05

0 引 言

页岩气是储藏于页岩烃源岩地层中可供开发的典型非常规天然气能源,主要成分为甲烷,是一种高效、环境友好型的化工原料和资源^[1-3]。川南地区页岩气资源较为丰富,储量达 4.13~8.48 万亿 m³,主要包括威远、长宁和昭通区块^[4]。前期调查结果表明,各区块间的工艺、物耗、能耗和水耗相差不大。页岩气开采采用水力压裂技术,而水力压裂液的配制需要消耗大量水资源。川南地区人均水资源量为 923 m³,属于缺水地带。因此,对川南页岩气区块用水的核算,对当地水资源的可持续利用有重要意义。

目前的研究大多针对直接用水,Wang 等研究发现四川页岩气区块直接用水量达 24 500 m³/井^[5],但未计算间接用水量;Yang 等发现重庆涪陵页岩气区块平均直接用水量为 27 490 m³/井^[6];美国 Marcellus 页岩气区块直接用水量平均为 12 000 m³/井(2 600~21 000 m³/井),而物料、能源消耗的间接用水量平均为 7 900 m³/井(4 100~12 000 m³/井)^[7];North Dakota 地区巴肯石油公司 2012 年油田生活用水是当年水力压裂用水量的一半^[8]。以上资料表明,除直接用水外,页岩气生产的间接用水和生活耗水也不可忽视,需将生命周期评价(LCA)方法引入到页岩气开采过程的用水评价中,重视间接用水。

目前较少有研究系统地核算过川南区块生命周

期间接用水,也缺乏同国外典型区块用水的比较。本文通过对川南区块开采生命周期的直接和间接用水量核算,与 Marcellus 区块的直接和间接用水量进行比较,发现国内外用水差异,分析原因,并提出改进对策,以提高我国页岩气开采用水管理水平。

1 分析方法及数据来源

LCA 是从系统的角度对产品的整个生命周期,包括原材料的获取、使用、制造、循环到最终处理等阶段进行详尽的评估,进而得到生命周期各阶段和整体的状态,为产品性能的分析提供更完整和有效的信息^[9]。LCA 可分为 4 个层次,即目标和范围界定、清单分析、影响评价和结论分析^[10]。LCA 在环境影响分析中的应用越来越广泛,1969 年美国可口可乐公司运用 LCA 方法分析其饮料容器对环境的影响;20 世纪 80、90 年代,北欧多国运用 LCA 在全球变暖、臭氧层和光化学烟雾等环境热点领域展开一系列研究。但随着评价方法的不断发展,发现单一的 LCA 方法存在一定的不确定性。因此,Zufia 和 Arana^[11]对评价方法进行了优化,采用全过程的 LCA 对新西兰的苹果生产对环境的影响进行评估,王玉^[12]运用基于过程生命周期评价分析建筑碳排放,郭金花^[13]采用投入产出生命周期方法(EIO-LCA)对蔬菜种植系统的经济效益进行评估分析。综上可知,LCA 对量化各行业

* 基金项目:“十三五”国家油气重大专项“页岩气等非常规油气开发环境影响评估与环境效益综合评价技术”(2016ZX05040-001)。

桂玉茹,中国石油大学(北京)2018 级环境科学专业在读硕士,主要从事水环境与水生态方面的研究工作。通信地址:北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京),102249。E-mail:ulaguicup@163.com。

产品的环境影响有重要作用,能减少产品生产的环境影响和经济损失,是改进生产方案的重要手段^[14]。

本文不仅关注页岩气开采过程中的直接和间接用水总量,同时计算研究了页岩气开采生命周期各阶段的用水特点。LCA方法是一种有效的环境影响管理工具^[15],能探讨页岩气开发全过程的用水规律,有助于全面理解页岩气开发对水资源的影响。本文采用基于过程清单的过程生命周期评估(PLCA)方法核算直接用水量,根据工艺过程物料、能源的使用情况和投入产出表,采用EIO-LCA核算间接用水量。

1.1 分析方法

1.1.1 评价范围

将页岩气开采生命周期划分为井场准备、钻井、水力压裂、产气、集输和闭井6个阶段,不考虑页岩气的分配和最终使用。

1)井场准备阶段

井场准备阶段即为钻前工程阶段。直接用水主要包括道路建设、平整井场和辅助设施建设。其中道路建设和平整井场无明显用水,仅计算辅助设施建设的用水,如污水池、淡水蓄水池、固化填埋池、放喷池建设配制水泥的用水。间接用水是指各阶段投入的供应链产品用水,包括投入的物料、能源、人员等产品和服务用水,此阶段为生产钢筋、水泥、沙石产品所隐含的水资源。

2)钻井阶段

钻井阶段主要包括钻井和固井。直接用水主要是钻井液和水泥浆的配制所消耗的水资源;间接用水主要包括生产柴油、用电、套管用钢、油基泥浆添加剂和水基泥浆添加剂所消耗的水资源。

3)水力压裂阶段

压裂和完井阶段通常包括洗井、射孔、压裂和试生产过程。直接用水主要集中在压裂液的配制;间接用水主要包括柴油、压裂液添加剂所消耗的水资源。

4)产气阶段

产气阶段主要包括页岩气生产和生产水的回收、循环和处理。此阶段没有明显的直接用水,主要是压裂液和地层水的返排液;间接用水隐含在用电和机油的投入中。

5)集输阶段

集输阶段主要是对页岩气进行气液分离和计量,增压后输送至脱水站,再经脱水处理后外输。此阶段无明显的直接用水,主要是气液分离后的生产水;间接用水体现在用电、用钢和三层PE防腐管。

6)闭井阶段

采气完成后须用水泥封堵内外井眼,并拆除井口设备,清理场地,恢复原有地貌。直接用水是水泥浆

配制用水;间接用水主要是生产水泥的用水。

页岩气开采生命周期各阶段直接用水均包含生活用水。

川南地区页岩气生命周期用水过程见图1。

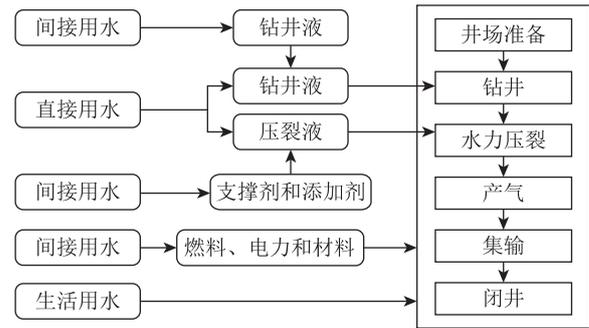


图1 川南地区页岩气生命周期用水过程

1.1.2 直接用水计算方法与参数

采用PLCA方法,经查阅相关文献和现场调查询问,整理得出川南地区页岩气生命周期直接用水计算清单和参数,见表1。

表1 川南地区页岩气生命周期直接用水计算清单和参数

阶段	计算清单	参数
井场准备	道路建设、平整井场、辅助设施建设	辅助设施尺寸、水泥消耗量、单位水泥取水量(191 kg/m ³) ^[5]
钻井	钻井液	单井用水量(772 m ³) ^[5] 循环率(90%) 淡水损失率(5%)
水力压裂	压裂液	单井压裂液用量(21 468 m ³) 压裂液返排率(15%~30%) 气田水返排率(8%~16%) 单井压裂回用水量(4 147~8 294 m ³)
产气	生产水	单井气田水返排量(1 590~2 340 m ³)
集输	集气、脱水	气田水产生量(20~25 m ³ /d) 服务井数(102~142口)
闭井	配制水泥浆	单井水泥浆制备取水量(390 m ³)
	生活用水	人数、工作天数、人均每日用水量

1.1.3 间接用水计算方法与参数

投入产出表是整个国民经济范围内各部门之间生产中的投入和使用组成的实物或价值平衡表^[16],是投入产出模型分析的核心内容和重要工具。根据投入产出表可计算相关参数。

完全用水系数包括直接用水系数和间接用水系数,即一个部门生产单位产品带来的整个国民经济体系用水量的增加量。在产品的生产过程中包含一定数量的各部门产品为中间投入,中间投入在生产过程中也需要用水。这部分用水虽然发生在其他部门,但却是为了满足该部

门生产需求产生的,所以也应计入该部门的总用水量,这中间投入的用水就是间接用水。完全用水系数是在直接用水系数的基础上进行计算的,见公式(1)。

$$B^W = [(I - A)^{-1} - I]A^W \quad (1)$$

式中: B^W 为完全用水系数列向量; A^W 为直接用水系数列向量; I 为单位矩阵; A 为投入产出表直接消耗系数矩阵。

根据各物料、能源用量和完全用水系数,计算各阶段投入的物料和能源所在行业的间接用水量,见公式(2)。

$$W'_i = \sum_{j=1}^m p_{i,j} \times B_i \quad (2)$$

式中: W'_i 为行业 i 的间接用水量, m^3 ; $p_{i,j}$ 为使用的 i 行业产品 j 的产值,万元; j 为产品 $1, 2, \dots, n$; B_i 是行业 i 的完全用水系数, m^3 /万元。

1.2 数据来源

计算页岩气开采生命周期间接用水需要各行业用水数据、投入产出表以及开采过程中使用的各物料、能源的产值,数据来源如下:①各行业用水数据来自2010年《四川省行业用水定额》;②产值和直接消耗系数来自2012年《四川省经济投入产出表》;③各阶段物料、能源用量来自实地调研和2015年《长宁、威远、昭通三个区块页岩气开发产能建设项目环境影响报告书》。

2 计算结果与讨论

2.1 取水系数计算结果

投入的物料和能源划分为5个行业,各行业的用

水系数见表2。

表2 川南地区页岩气开采相关行业的用水系数

行业	取水系数 / (m ³ · 万元 ⁻¹)	
	直接取水系数 / (m ³ · 万元 ⁻¹)	完全取水系数 / (m ³ · 万元 ⁻¹)
石油和天然气开采产品	0.6	14.2
化学产品	24.0	46.7
非金属矿物制品	5.6	7.6
金属冶炼和压延加工品	3.0	30.5
电力、热力的生产与供应	1.4	30.3
均值	6.9	25.9

由表2可知,直接取水系数中化学行业系数最大,表明钻井和压裂过程的添加剂使用量对间接用水影响大;完全取水系数中化学、金属冶炼和电力、热力行业系数较大,说明钻井和压裂过程中的添加剂使用量、套管使用量和用电消耗是导致间接用水增加的主要因素。

2.2 物料、能耗统计结果

川南区块页岩气开采各阶段所需要的物料和能源统计如表3所示。与Marcellus区块的物料、能源使用量相比较^[17-19],在井场准备和闭井阶段,川南区块的主要物料、能源使用量均小于Marcellus区块,这与两个区块的工程建设行业标准^[20]有关。其他阶段川南区块的主要物料、能源使用量均大于Marcellus区块,说明川南区块能源、物料使用效率均低于Marcellus区块。尤其是钻井和压裂阶段的化学产品和能源产品的使用效率远低于Marcellus区块,将导致川南区块页岩气开采间接用水量增大。

表3 页岩气开采各阶段主要物料和能源消耗量比较

项目名称	所属行业	消耗量	
		川南区块	Marcellus 区块
井场准备	钢材/(t · 井 ⁻¹)	2 019.35	2 496.84
	水泥、沙子、石子/(t · 井 ⁻¹)		
钻井固井	柴油/(t · 井 ⁻¹)	436.17	209.00
	套管用钢/(t · 井 ⁻¹)	226.92	145.45
	膨润土浆/(t · 井 ⁻¹)	109.88	43.77
	化学添加剂/(t · 井 ⁻¹)	175.89	2.87
水力压裂	柴油/(t · 井 ⁻¹)	195.00	16.80
	化学添加剂/(t · 井 ⁻¹)	146.64	21.50
	降阻支撑剂/(t · 井 ⁻¹)	2 784.60	2 743.90
	用电/(kW · h · 井 ⁻¹)	1 647.19	659.00
产气	用电/(kW · h · 井 ⁻¹)	18.76	—
	柴油/(L · 井 ⁻¹)	4.50	2.97
集输	集气用电/(kW · h · 井 ⁻¹)	77.72	—
	采气和外输用钢/(t · 井 ⁻¹)	68.27	1.50
闭井	水泥/(t · 井 ⁻¹)	7.64	45.70

2.3 直接用水量核算与比较

计算得到川南地区页岩气生命周期各阶段用水量,并与 Marcellus 区块生命周期用水量^[21]相比较,见表 4。

表 4 页岩气开采用水量比较 $\text{m}^3/\text{井}$

阶段	取水类型	川南区块	Marcellus 区块
井场准备	直接	42	无明显用水
	间接	21.80	2 100
	小计	63.8	2 100
钻井	直接	772	320
	间接	16 193	253
	小计	16 965	573
水力压裂	直接	21 468	15 000
	间接	5 844	4 120
	小计	27 312	19 120
产气	直接	无明显用水	无明显用水
	间接	1 118	834
	小计	1 118	834
集输	直接	无明显用水	无明显用水
	间接	1 238	176
	小计	1 238	176
闭井	直接	646	无明显用水
	间接	83	390
	小计	729	390
合计	直接	22 928	15 320
	间接	25 098	7 873
	总用水量	48 026	23 193

川南区块总直接用水量为 $22\,928\text{ m}^3/\text{井}$,其中压裂阶段平均直接用水量高达 $21\,468\text{ m}^3/\text{井}$,占总直接用水量的 93.6% 。Marcellus 区块总直接用水量为 $15\,320\text{ m}^3/\text{井}$,其中压裂阶段用水量为 $15\,000\text{ m}^3/\text{井}$,占总直接用水量的 97.9% 。钻井和压裂两个阶段川南区块直接用水量均远大于 Marcellus 区块。结合表 5 水资源管理指标比较^[22],川南区块页岩气开采过程中的钻井液循环率和压裂液返排率均高于 Marcellus 区块,压裂液回用率稍低于 Marcellus 区块,表明两者水资源管理水平相当。综上所述,川南区块直接用水量大的原因是低渗透率、低孔隙度、黏土含量大的气藏条件和较长的水平段长度所导致的压裂作业量大、

储层可改造性差^[23],因而直接用水量更大。

表 5 页岩气开采水资源管理指标比较 %

项目	川南区块	Marcellus 区块
钻井液循环率	90.00	77.85
压裂液返排率	15~30	10~15
压裂液回用率	85.0	92.4

如前所述,Wang 等研究发现四川页岩气区块直接用水量达 $24\,500\text{ m}^3/\text{井}$ 左右^[5],《威远页岩气田年产 50 亿立方米开发方案环境影响报告书》和《长宁页岩气田年产 50 亿立方米开发方案环境影响报告书》中统计威远和长宁页岩气区块直接用水量为 $22\,263\text{ m}^3/\text{井}$ 。本文计算的总直接用水量为 $22\,928\text{ m}^3/\text{井}$,处于两者之间,计算结果基本一致,表明本文计算结果具有一定的可靠性。

2.4 间接用水量核算与比较

由表 4 可知,川南区块页岩气开采总间接用水量达 $25\,098\text{ m}^3/\text{井}$,超过了总直接用水量 $22\,928\text{ m}^3/\text{井}$,不可忽视。其中钻井阶段间接用水最多,达 $16\,193\text{ m}^3/\text{井}$,占总间接用水量的 64.5% ;其次是压裂阶段用水量大。这是因为在这两个阶段里,涉及钻井液和压裂液的配制,在配制过程中需加入大量的添加剂所隐含的用水,表明页岩气开采拉动的其他行业的耗水增长不可忽视,表 2 中各行业的完全用水系数也说明了这一点。

Marcellus 区块间接用水量最大的 5 个行业^[20]与川南区块相应行业间接用水量比较结果见表 6。

表 6 页岩气开采过程各行业间接用水量比较 $\text{m}^3/\text{井}$

行业	中国川南	美国 Marcellus
石油和天然气开采产品	6 743	<500
化学产品	7 003	4 500
非金属矿物制品	4 190	1 500
金属冶炼和压延加工品	2 758	<500
电力、热力的生产与供应	3 876	500
合计	24 570	8 000

由表 6 可知,川南区块页岩气开采各行业用水约是 Marcellus 区块的 3 倍。川南区块页岩气开采用水最大的行业为化学产品、石油和天然气开采产品,占总间接用水量的 56% ,而 Marcellus 区块页岩气开采

耗水最大的行业为化学产品和非金属矿物制品。这一结果再次证明了川南区块钻井和压裂过程使用的添加剂和柴油、机油、电力等能源消耗量大,使用效率低,未来应节约使用能源和化学添加剂,减少间接用水量。

查阅 2017 年《国家节水行动方案》《四川省水资源公报》,获得川南地区行业用水情况,并与 Marcellus 区块行业用水相比较,结果见表 7。

表 7 川南地区与 Marcellus 区块行业用水效率比较

参数	川南地区	Marcellus 区块
万元工业增加值用水量/m ³	44.6	22.8
农田灌溉水有效利用系数	0.467	0.750

由表 7 可知,川南地区万元工业增加值用水量为 44.6 m³,约为 Marcellus 区块的两倍,农田灌溉水有效利用系数与 Marcellus 区块相差 0.283,说明川南地区全行业用水效率的差异也是导致间接用水偏大的原因。为减少间接用水量,除了在钻井和压裂过程减少化学添加剂和全过程的能源使用量外,提高全行业用水效率也至关重要。

3 结 论

1)川南区块生命周期总用水量为 48 026 m³/井,约为 Marcellus 区块的两倍。其中压裂阶段用水量最大,为 27 312 m³/井;其次是钻井阶段,为 16 965 m³/井,这两个阶段用水量占总用水量的 92.2%。

2)川南区块总直接用水量为 22 928 m³/井,约是 Marcellus 区块的 1.5 倍,尤其是钻井和压裂阶段直接用水量占总直接用水量的 93.6%。由于川南区块水资源管理指标与 Marcellus 区块相近,直接用水量的差异主要由两个区块的自然资源禀赋条件所决定,川南区块由于压裂作业量大、储层条件复杂导致其直接用水量更大。

3)川南区块总间接用水量为 25 098 m³/井,超过总直接用水量,约是 Marcellus 区块的 3 倍。从生命周期阶段来看,钻井阶段的间接用水量最大为 16 193 m³/井,占总间接用水量的 64.5%;其次为压裂阶段。行业间接用水中,化学产品行业用水量最大,为 7 003 m³/井,其次是石油和天然气开采产品行业。间接用水的差异可解释为钻井和压裂阶段的添加剂消耗量、全过程能源消耗量的不同及全行业用水效率存在差异。

4)根据本文用水比较结果,减少川南页岩气开采用水量的途径除自然禀赋外,需进一步提高钻井液和

压裂液回用率,改善钻井和压裂添加剂使用效率,提高柴油、电力等能源利用效率和全行业用水效率。

参 考 文 献

[1] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.

[2] 邹才能.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2011:1-47.

[3] 孙张涛,田黔宁,赵霞,等.世界页岩气开发现状及对中国页岩气合理勘探开发的建议[J].国土资源情报,2015(7):48-51.

[4] 李雪菲.四川省水资源分布及承载力评价研究[D].成都:西南交通大学,2012:11-22.

[5] WANG J L, LIU M M, BENTLEY Y M, et al. Water use for shale gas extraction in the Sichuan Basin, China [J]. Journal of environmental management, 2018, 226: 13-21.

[6] YANG H, HUANG X J, YANG Q Y, et al. Water requirements for shale gas fracking in Fuling, Chongqing, Southwest China[J]. Energy procedia, 2015, 76:106-112.

[7] DALE A T, KHANNA V, VIDIC R D, et al. Process based life-cycle assessment of natural gas from the Marcellus Shale [J]. Environmental science & technology, 2013, 47(10):5459-5466.

[8] HORNER R M, HARTO C B, JACKSON R B, et al. Water use and mangement in the Bakken Shale Oil play in North Dakota[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(6):3275-3282.

[9] ISO. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework: BIS IS/ISO 14040—2006 [S]. 2006.

[10] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科技进步与对策,2013,30(6):155-160.

[11] ZUFIA J, ARANA L. Life cycle assessment to eco-design food products: Industrial cooked dish case study[J]. Journal of cleaner production, 2008, 16(17):1915-1921.

[12] 王玉.工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D].南京:东南大学,2016:10-20.

[13] 郭金花.典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D].北京:中国农业大学,2016:13-26.

[14] 汪永超,张根保,向东,等. LCA 原理及其在环境影响分析中的应用[J].机械与电子,1999(2):13-16.

[15] 贾婉琳.页岩气开采生命周期用水规律和水环境影响评价[D].北京:中国石油大学(北京),2018:4-12.

(下转第 15 页)