



瓦斯抽采和利用预可行性研究

中国山西省腾晖煤矿

**U.S. Environmental Protection
Agency**

March 2019

Publication No. 430R19005

瓦斯抽采及利用预可行性研究报告

中国山西省腾晖煤矿



美国环保局（EPA），美国华盛顿特区

2019年3月

编制说明

本报告是应美国环境保护局（USEPA）的要求制定，并用于对全球甲烷倡议小组（GMI）的支持。先进资源国际公司（ARI）根据 RTI 国际公司的分包合同撰写了本报告。该报告的编制基于煤矿合作伙伴---山西焦煤集团霍州煤电公司旗下的腾晖煤矿和 REI 钻探公司提供的信息。

免责声明

本报告是为美国环保局（USEPA）准备的。报告中除使用了公开可用的信息外，还通过与煤矿工作人员、设备供应商和项目开发人员直接联系获得信息。美国环保局（USEPA）没有：

- a) 就本报告中所含信息的准确性、完整性或可用性或者本报告中披露的任何设备、方法或工艺的使用是否侵犯拥有者的私有权利做出任何明示或暗示的保证或承诺；
- b) 对因使用本报告中披露的任何信息、设备、方法或工艺而导致的不当使用或损害承担任何责任；
- c) 表明对报告中提到的任何技术供应商、产品或工艺进行推荐或认可。

图示目录

图 ES-1: 评估期内煤矿瓦斯涌出来源分布图.....	ES-2
图 ES-2: 基于提议瓦斯抽采方案的年瓦斯产量预测.....	ES-4
图 1-1: 中国 2007-2017 年的煤矿产耗量.....	1
图 1-2: 中国 2007-2017 年煤矿消耗在能源消耗中的占比.....	2
图 1-3: 中国不同埋深的煤层气资源分布图.....	3
图 1-4: 临汾辖区内的腾晖煤矿位置.....	5
图 2-1: 评估期内瓦斯排放的来源分配.....	8
图 2-2: 吨煤平均年瓦斯涌出量.....	9
图 3-1: 井下基础设施施工前在每 50 m 一个硐室内进行本煤层预抽.....	11
图 3-2: 在 2 号煤层中间隙 4m 的本煤层钻孔.....	11
图 3-3: 2 号煤层本煤层单一钻孔的瓦斯产量及瓦斯含量的降低量预测.....	12
图 3-4: 评价期内本煤层抽采的混合气流量、瓦斯纯流量及浓度.....	13
图 3-5: 高低位裂隙带钻孔的平面图.....	14
图 3-6: 高低位裂隙带钻孔的剖面图.....	14
图 3-7: 评价期内裂隙带抽采的气体的混合流量、瓦斯纯流量及浓度.....	15
图 3-8: 在实地考察矿井期间的瓦斯抽采方案示意图.....	16
图 3-9: 2-104 工作面回采进度计划.....	18
图 3-10: 2-104 工作面本煤层钻孔平面图.....	19
图 3-11: 2-104 工作面本煤层钻孔剖面图.....	19
图 3-12: 2-104 工作面本煤层钻孔瓦斯生产率.....	20
图 3-13: 2-104 工作面本煤层钻孔瓦斯浓度.....	20
图 3-14: 2-104 工作面裂隙带钻孔剖面图.....	21
图 3-15: 2-104 工作面回采期间裂隙带钻孔抽采瓦斯产量.....	22
图 3-16: 2-104 工作面回采期间采空区瓦斯浓度.....	22
图 3-17: 2-104 工作面回采期间进入通风系统中的瓦斯量.....	23
图 3-18: 2-104 工作面瓦斯排放总量.....	24
图 3-19: 2-104 工作面瓦斯抽采效率.....	24
图 3-20: 2-104 瓦斯涌出量与煤矿总的瓦斯涌出量的比较.....	25
图 3-21: 煤矿瓦斯涌出平衡图.....	26
图 3-22: 矿井不同工作区域瓦斯涌出分布.....	27
图 4-1: 10 号煤层本煤层抽采方案剖面图.....	32
图 4-2: 2 号煤层后续回采预测.....	33
图 4-3: 10 号煤层后续回采预测.....	34
图 4-4: 2 号煤层关联模型平面图.....	35
图 4-5: 2 号煤层关联模型剖面图.....	36
图 4-6: 间隔 4m, 165m 深的单一本煤层钻孔瓦斯生产率匹配曲线.....	36
图 4-7: 长钻孔间距模型平面图.....	38
图 4-8: 长钻孔间距模型剖面图.....	38
图 4-9: 2 号煤层中不同钻孔间距下瓦斯含量下降分析.....	39

图 4-10: 10 号煤层中不同钻孔间距下瓦斯含量下降分析	40
图 4-11: 2 号煤层本煤定向钻孔平面图	41
图 4-12: 10 号煤层本煤定向钻孔平面图	42
图 4-13: 采空区高位水平定向钻孔方案剖面图.....	44
图 4-14: 井口负压为 20kPa 时不同钻孔长度与钻孔直径组合时的气体流量.....	45
图 4-15: 采空区水平钻孔 1,000 m x 96 mm 时, 不同井口负压的气体流量 (空气中瓦斯体积比 70%)	46
图 4-16: 2 号煤层采空区瓦斯抽采规划平面图	47
图 5-1: 基于提议的抽采方案的瓦斯产量预测.....	49
图 7-1: 建议的方案与现行方案之间逐年成本比较 (贴现现金流法)	65
图 7-2: 年或累积的成本节约	65
图 7-3: 瓦斯生产应用后出现稳定增长的温室气减排量.....	66
图 7-4: 整个项目期间 (2021-2029) 内年发电量	67

图表目录

表 ES- 1: 不同项目选项的投资回报分析条件	ES-5
表 ES- 2: 单一发电厂税前投资回报分析.....	ES-6
表 ES- 3: 发电厂及瓦斯抽采项目税前投资回报分析.....	ES-6
表 ES- 4: 采用定向钻孔方案后, 节约的成本.....	ES-6
表 3-1: 腾晖煤矿 2016 年 5 月 10 日日瓦斯涌出量统计	26
表 4-1: 2 号煤层待采工作面尺寸	33
表 4-2: 2 号煤层的核心储层参数	37
表 4-3: 2 号煤层抽放时间、瓦斯平均产量和钻孔间距.....	39
表 4-4: 10 号煤层抽放时间、瓦斯平均产量和钻孔间距.....	40
表 4-5: 2 号煤层采前定向钻孔预测计划	42
表 4-6: 10 号煤层本煤层定向钻孔计划表	43
表 5-1: 项目周期内的瓦斯抽采率	48
表 5-2: 基于建议的抽采方案的每年钻孔量.....	50
表 5-3: 新的抽采方案项目期内每年的管线需求.....	51
表 7-1: 瓦斯抽放系统输入参数	59
表 7-2: 瓦斯发电厂输入参数	61
表 7-3: 财务分析中高中低项目投资回报核心输入参数.....	63
表 7-4: 单一发电厂项目税前内部收益率	63
表 7-5: 瓦斯抽采和发电项目税前经济分析指标.....	64
表 7-6: 采用定向钻进方案抽采后节约的成本.....	64

目录

编制说明	i
免责声明	i
图示目录	ii
图表目录	iii
略缩语	vii
执行摘要	1
1 中国煤炭工业和煤层气产业	1
1.1 中国煤炭工业	1
1.2 中国煤矿瓦斯	2
1.3 选择腾晖煤矿进行预可行性研究	3
1.4 腾晖煤矿	4
1.4.1 地理位置	5
1.4.2 地形及气候	6
1.4.3 区域地质	6
1.5 山西焦煤集团-腾晖煤矿的母公司	7
2 煤矿瓦斯涌出分析	8
2.1 矿井瓦斯涌出分布情况	8
2.2 吨煤瓦斯涌出量	9
3 腾晖煤矿瓦斯抽采和利用	10
3.1 目前现状	10
3.1.1 采前预抽	10
3.1.2 裂隙带抽采	13
3.1.3 瓦斯利用	15
3.2 腾晖井下实地考察	15
3.2.1 回采前预抽	16
3.2.2 采空区瓦斯抽采	16
3.2.3 进入通风系统中的瓦斯	17
3.2.4 抽采泵站	17
3.2.5 实地观察	17
3.3 井下瓦斯涌出分析	18

3.3.1	工作面 2-104.....	18
3.3.2	长壁工作面 2-104 瓦斯抽放.....	18
3.3.3	2-104 工作面通风系统.....	23
3.3.4	2-104 工作面瓦斯总排放量.....	23
3.3.5	2-104 工作面瓦斯涌出量分布情况.....	24
3.3.6	瓦斯涌出平衡.....	25
3.4	观察和建议.....	28
3.4.1	煤矿瓦斯涌出量.....	28
3.4.2	瓦斯涌出源分析.....	28
3.4.3	降低瓦斯含量.....	28
3.4.4	采空区瓦斯抽排.....	29
3.4.5	井下气体管理.....	29
4	瓦斯抽采和利用改进建议.....	31
4.1	本煤层瓦斯抽采方案建议.....	31
4.1.1	定向钻进方案.....	31
4.1.2	未来的开采计划.....	32
4.1.3	现有煤层钻孔与储层建模结合.....	34
4.1.4	钻孔间距与排放时间的关系.....	37
4.1.5	2 号和 10 号煤层的采前瓦斯预抽方案.....	40
4.2	采空区瓦斯抽采建议.....	43
4.2.1	2 号煤层采空区瓦斯抽采方案.....	44
4.2.2	10 号煤层采空区抽采方案.....	47
5	未来瓦斯抽采预测.....	48
5.1	钻孔瓦斯生产率.....	48
5.2	煤矿瓦斯抽采率.....	48
5.3	瓦斯抽采钻孔要求.....	49
6	市场分析.....	52
6.1	山西省的经济形势.....	52
6.2	山西省能源消费市场.....	53
6.2.1	电力.....	53
6.2.2	其他相关能源市场.....	53
6.3	环境保护市场.....	54

6.4 法律和监管环境	55
6.5 腾晖煤矿瓦斯的利用方案	55
6.5.1 瓦斯发电	56
6.5.2 城镇燃气/天然气	56
6.5.3 工业用途	56
6.5.4 锅炉燃料	57
6.5.5 压缩天然气/液化天然气	57
6.5.6 排空燃烧	57
6.6 煤矿瓦斯利用建议	57
7 经济性分析	58
7.1 项目开发概述	58
7.2 项目经济性	58
7.2.1 经济评估方法	58
7.2.2 经济假设	58
7.2.3 经济分析结果	62
7.2.4 温室气体减排和能源生产	66
8 结论、建议和后续工作	68
9 参考文献	70

略缩语

AMM	废弃煤矿瓦斯
ARI	先进资源公司
Bbl	桶（原油）
Bcm	十亿立方米
CCII	中国煤炭信息研究院
CDM	清洁发展机制
CERs	经核证的减排量
CH ₄	瓦斯
CMOP	美国环保局煤层瓦斯扩大服务项目
CMM	煤矿瓦斯
CNG	压缩天然气
CO ₂	二氧化碳
CORSIA	国际航空碳减排计划
D (day)(days)	天
ETS	排放交易系统
GMI	全球甲烷倡议小组
Gt	十亿吨
HGB	采空区水平定向钻孔
Hp	马力
ICAO	国际民用航空组织
IRR	内部收益率
K	开氏温度
kPa	千帕
kWh	千瓦小时
LNG	液化天然气
LW 2-104	工作面 2-104
l/s	升/秒
m	米
m ³	立方米
m ³ /d	立方米/天
m ³ /t	立方米/吨
Mcf	百万立方英尺
mD	毫达西
min	分钟
Mm ³	百万立方米
mm	毫米
MT	百万吨
MtCO ₂ e	公吨二氧化碳当量

MW	兆瓦
MWh	兆瓦小时
NDRC	中国发改委
No.	序号
NPV	净现值
ROM	开采总量
RMB	人民币(元)
SASAC	国资委
SCCG	山西焦煤集团有限公司
T(t)	吨
tCO ₂	吨二氧化碳
tCO ₂ e	吨二氧化碳当量
Tcm	万亿立方米
UNFCCC	联合国气候变化框架公约
USEPA	美国环境保护局
year (Yr)	年
\$	美元

执行摘要

美国环境保护局（USEPA）的煤层瓦斯外展计划（CMOP）是与美国的煤矿进行合作，鼓励经济地使用煤矿瓦斯（CMM）气体，并尽量避免将这些气体直接排放到大气中。瓦斯是天然气的主要成分，也是释放到大气中的强效温室气体（GHG）。减少煤矿开采中的瓦斯排放，并建设瓦斯利用项目，将产生巨大的经济和环境效益，还可以改善煤矿安全性、提高矿山生产率，同时增加矿山的收入。

美国环保局的工作与全球甲烷倡议小组（GMI）的目标一致。该小组与 44 个成员国和欧洲委员会组成了国际伙伴合作关系，注重于具有经济效益的短期瓦斯回收和用作清洁能源的瓦斯利用项目。通过对瓦斯的可用性、最终用途选择和减排潜力进行研究，确定具有经济效益的项目方案。该研究协助煤矿运营商评估煤矿瓦斯抽采和利用方案，同时提供初步的财务分析，为更详细的可行性研究奠定基础，最终实现煤矿瓦斯抽采利用项目的最终实施，从而减少温室气体的排放。

该预可行性研究于 2018 年 1 月开始准备，制订初始数据要求。2018 年 6 月至 10 月期间，作为中国国际煤矿瓦斯卓越中心（ICE）综合最佳实践培训计划的一部分，预可行性研究已经完成。中国国际煤矿瓦斯卓越中心（ICE）是一个非营利性实体，其目标是成为一独立机构，能够识别和鉴定煤矿瓦斯回收和利用的机会，并能就煤矿瓦斯抽采和利用的最佳实践进行推广。培训的一个组成部分就是使用腾晖煤矿作为一个实际的培训平台，最终指导和完成详细的预可行性研究。经过与中国国际煤矿瓦斯卓越中心（ICE）协商，并在矿山的母公司霍州煤电集团及霍州煤电集团的母公司山西焦煤集团有限公司（SCCG）的支持下，选择腾晖煤矿进行预可行性研究。选择腾晖矿是因为它被归类为煤与瓦斯突出矿，每年原煤产量超过 100 万吨。该矿目前每年生产 120 万吨原煤，虽然有瓦斯抽采系统运行，但矿方并未利用抽取的瓦斯。此外，在与全球甲烷倡议小组、中国国际煤矿瓦斯卓越中心成员、腾晖煤矿及其母公司-霍州煤电及山西焦煤的讨论中，后续公司负责人都表示，如果该项目在技术和经济上可行的话，他们强烈支持煤矿瓦斯利用项目的实施。

腾晖矿位于中国山西省的西部边境，隶属于乡宁县枣岭镇店沟村。煤矿有 2 号和 10 号可采煤层。2 号煤层是目前唯一正在开采的煤层。回采中大约 50% 的瓦斯被抽采出来。

瓦斯主要来自于：采前本煤层钻孔、巷道施工、煤炭输送通道、采空区、煤层上部裂隙带及其它密闭区域。其中煤矿生产和输送中排出的瓦斯占了很大部分。

大约一半的煤矿瓦斯通过矿井的通风系统排放到大气中。其余一半通过抽采获得，其中大部分通过本煤层钻孔收集，小部分则通过采空区或裂隙带钻孔及大直径以孔代巷钻孔获取。

矿井平均瓦斯涌出量为 53,280 m³/d。原煤中涌出量为 15.5 m³/t。其中 2 号煤层中平均平均瓦斯含量为 9.2 m³/t，而 10 号平均瓦斯含量为 7.7 m³/t。2 号煤层厚度为 4.9-7.5m，需要通过采前预抽来减少气体含量，以便在单一煤层开采过程中实现安全开采，并达到合理的生产效率。

2 号煤层是矿山大部分瓦斯排放源。矿井瓦斯排放总量的 46%来自于 2 号煤层钻孔，20%的矿井瓦斯排放来自 2 号煤层的长壁工作面回采，20%的矿井瓦斯来源于 2 号煤层回采期间的通风系统（不含回采期间释放的瓦斯）。采空区及煤层上部裂隙带瓦斯排放量不到 5%，残余煤层瓦斯涌出量是有限的。

图 ES-1 说明了在评价期间整个煤矿三（3）个主要瓦斯涌出源的瓦斯流量分布情况。

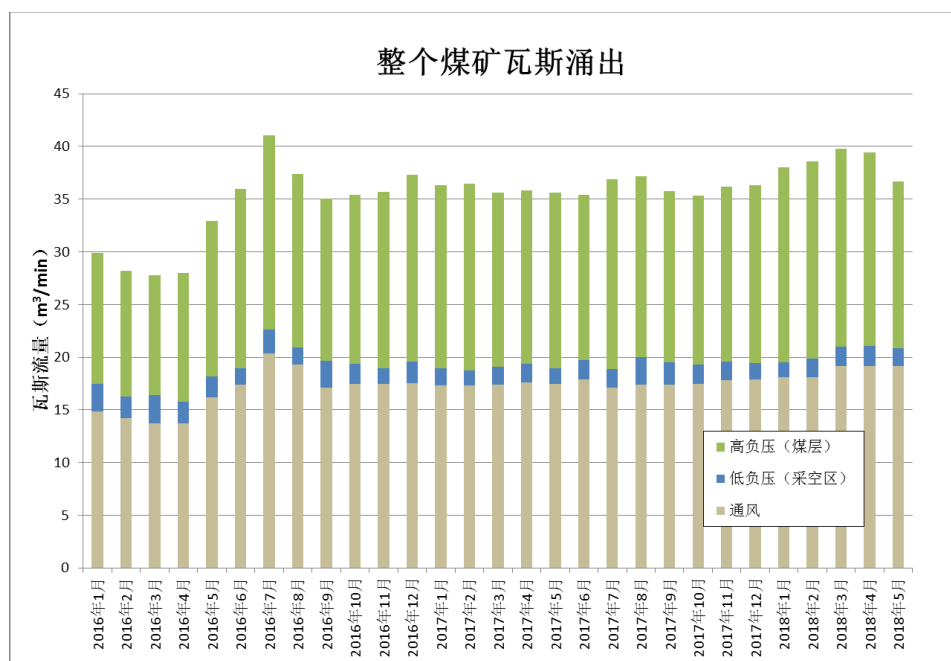


图 ES-1: 评估期内煤矿瓦斯涌出来源分布图

矿方提供了矿井通风中瓦斯的浓度及大量的与瓦斯抽采效果相关的历史信息供分析和使用。利用这些提供的信息，可以评估矿井内瓦斯涌出来源及不同的采掘作业下的瓦斯分布情况，如：长壁工作面回采与巷道施工相比。从 2016 年 1 月到 2018 年 5 月底，矿方提供每个月的特定日期的数据。对特定日期的数据进行平均后，推导出月平均数据。

腾晖现有煤矿瓦斯生产中最令人担忧的问题之一是瓦斯抽放系统中瓦斯浓度很低。这限制了瓦斯的利用，也对安全和健康造成直接的威胁。选定 2016 年已经开采的长壁工作面 2-104 (LW 2-104) 作为研究对象来分析瓦斯抽采率、瓦斯浓度和气体流量。通过对本煤层钻孔的储层建模，来协助矿方制定本煤层瓦斯抽采方案。首先建立一个初始的储层模型，将气体流量、气体浓度下降比例及时间的函数关系建立起来，从而在理论上对矿井本煤层钻孔瓦斯产量进行预测。关于采空区或煤层上部裂隙带瓦斯抽采，每间隔 4m 就有两个高低位裂隙带钻孔，相当于 1200m 工作面长度中就有 500 个钻孔。类似于本煤层钻孔，对对气体流量、浓度和产量的历史数据进行分析也进行了分析。利用一个计算采空区高位水平钻孔的经验公式计算气体流量。气体流量与气体构成及钻孔直径有关联。

为了提高本煤层钻孔瓦斯抽采效率，预可行性研究报告建议用采前长距离水平定向钻孔来取代现有的本煤层短距离密集钻孔。新的方案将减少井孔及抽放系统中潜在的漏气点的数量。为了改善采空区或煤层上部裂隙带采抽效果，本报告建议从回采的入口处，向上进入到煤层上面低压区的上部进行采空区高位水平钻孔 (HGB)。新推荐的方案会大大改善回收的瓦斯质量、降低抽放成本，并增加瓦斯的产量。

对工作面 2-104 进行初步分析，可以预测出单一工作面的瓦斯产量，再推导出从 2019 年到 2029 年为期十年的年瓦斯产量。为了设计该矿的瓦斯抽采方案，根据矿方提供信息，并假设煤矿生产率和开采技术不变，制定了 2019 年至 2029 年期间的未来回采计划。假设矿方采纳我们建议的瓦斯抽采方案，2019 年至 2023 年之间，从 2 号煤层平均可以抽采 800 万立方米的瓦斯。在 2024 年之后，10 号煤层回采时，预计每年平均有 300 万立方米的瓦斯。图 ES-2 显示了基于新的抽采方案的年瓦斯产量预测。

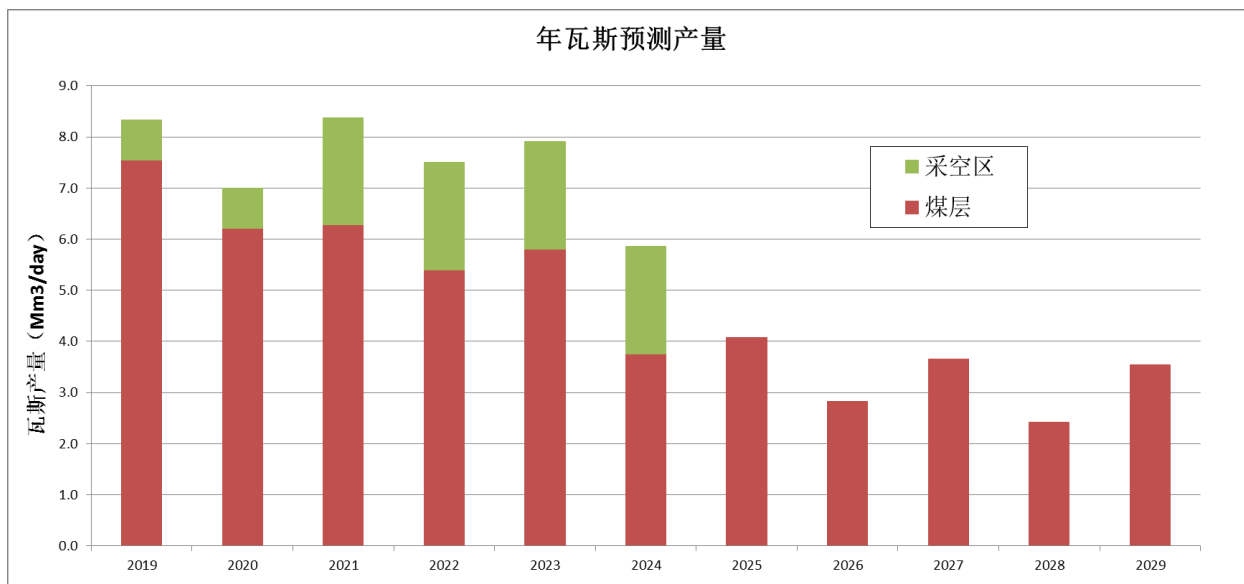


图 ES-2: 基于提议瓦斯抽采方案的年瓦斯产量预测

虽然腾晖煤矿的瓦斯利用有多种选项，但根据该研究的初步结果，瓦斯发电是最可行的选择。包括山西焦煤集团在内的中国煤炭企业在中国各地，特别是在山西省内具有丰富的瓦斯发电项目实施经验。另一方面，腾晖矿业支付的工业用电价格为 0.65 元/kWh (\$0.094/kWh)，而用纯瓦斯发电的补贴为 0.40 元/m³ (\$59,717 /Mm³)，这使得利用瓦斯进行发电的最终选项非常具有吸引力。

财务分析考虑了项目的全部资本和运营成本，包括钻孔成本、气体收集系统和发电厂的成成本。为了更好地了解项目的成本和效益，该报告对整个项目的回报作了分析研究，包括钻孔成本和单一的地表瓦斯发电厂的投资回报。财务分析还分析了改进瓦斯抽采方案后的成本和成本节约。表 ES-1 说明了不同瓦斯利用选项下的财务分析条件。

瓦斯利用选项	详细描述
发电和瓦斯抽采	<ul style="list-style-type: none"> • 该选项指同时实施提议的瓦斯抽采及和瓦斯发电厂项目。 • 与瓦斯抽采相关的成本涉及本煤层钻孔、采空区或裂隙带高位水平钻孔和水平孔-竖井贯通。电厂发电的入网电价、发电机效率和补贴都会对项目净现值和内部收益率产生重大影响。 • 抽采瓦斯直接以零成本进入电厂进行发电。
单一的发电	<ul style="list-style-type: none"> • 根据腾晖煤矿管理层的要求制订，该选项实质是指提议的瓦斯抽采项目成本被矿山作为运营成本吸收。 • 瓦斯抽采项目的现金流量置零，以突出单一电厂的回报。
单一的瓦斯抽采	<ul style="list-style-type: none"> • 该选项强调了现有/现存瓦斯抽采方案及实施提议的抽采方案后的的回报情况。 • 节省成本净现值作为比较工具，以决定是维持现有瓦斯抽采方案还是实施建议的抽采方案。 • 目前的瓦斯抽采计划包含两个部分，为矿方就目前的瓦斯抽采方案提供两种情况下的详细分析：1) 10 号煤层中不进行裂隙带钻孔，2) 10 号煤层中裂隙带进行钻孔。

表 ES- 1: 不同项目选项的投资回报分析条件

表 ES-2 列出了不考虑瓦斯抽采项目的单一发电项目的财务分析结果。“高”位表示回报方面最乐观的情况。“中”位是最实际的回报情景。用于财务分析中的可用关键输入数据也基于该方案。“低”位是一个次优的情景，其中生产效率较低，而且比其他更悲观的项目假设中的成本高于预期。应该注意的是，表 ES-2 中提供的内部收益率和净现值是税前数据，因此预计税后的内部收益率会降低。此外，该分析未考虑瓦斯发电厂购买瓦斯的价格，假设矿方免费提供抽采的瓦斯给瓦斯发电厂使用。如果矿方希望按内部价格收取费用，那么发电厂项目分析中需要显示购买瓦斯的成本作为运营成本，这也会降低内部收益率。

回报等级	最大发电量	净现值 (千美元)	内部收益率	回收期 (年)	净 CO ₂ 减排量 (tCO ₂ e)
高	5.23 MW	\$11,045	43.57%	2.3	1,481,616
中	3.71 MW	\$2,966	19.97%	4.5	1,139,704
低	3.47 MW	\$69	10.30%	6.3	797,793

表 ES-2: 单一发电厂税前投资回报分析

与单一发电厂相比，发电厂+瓦斯抽采项目的整个项目的回报率较低，“高”位的内部收益率分别为 22.06%和 43.57%。表 ES-3 列出了项目的税前投资回报数据。在这种情况下，矿方不会消化瓦斯抽采的成本，这就是表 7-5 中的回报明显降低的原因。与表 ES-2 类似，表 ES-3 中的结果为税前，并不考虑瓦斯发电厂购买瓦斯的价格。如果产生内部瓦斯购买价格，那税后内部收益率预计还会减少。

回报等级	最大发电量	净现值 (千美元)	内部收益率	回收期 (年)	净 CO ₂ 减排量 (tCO ₂ e)
高	5.23 MW	\$9,491	22.06%	4.9	1,481,616
中	3.71 MW	\$1,684	12.23%	6.45	1,139,704
低	3.47 MW	\$(943)	8.72%	7.24	797,793

表 ES-3: 发电厂及瓦斯抽采项目税前投资回报分析

该分析仅仅基于在没有地面利用项目的情况下，现有本煤层钻孔和裂隙带钻孔方案与建议的定向钻孔方案的成本比较。（见表 ES-4）。如果腾晖矿在第 2 号和第 10 号煤层中采用现有密集的本煤层和裂隙带常规钻孔方法，那么转换为定向钻孔所节省的成本将达到 1,100 万美元。即使矿方不在 10 号煤层中实施常规钻孔方案，直接采用定向钻孔方案，也可节省约 540 万美元的成本。

现有钻孔方案	建议的定向钻孔方案节约的净成本 (千美元)
10号煤层中不进行常规裂隙带钻孔	5,442
10号煤层中进行常规裂隙带钻孔	10,943

表 ES-4: 采用定向钻孔方案后，节约的成本

与现有瓦斯抽采方案相比，定向钻孔瓦斯抽采方案可节省成本，原因如下：

- 钻孔数量较少，建议的方案中钻孔总 m 数显著降低。
- 现有抽采方案中管路数量几乎是建议抽采方案的 7 倍。
- 在 10 号煤层中只需进行本煤层钻孔，不需要进行采空区高位水平钻孔。

建议的煤矿瓦斯利用项目可以实现的最佳净减排潜力为 1,481,616 tCO₂e 及 5.23MW 的发电量。这是一个具有吸引力的投资机会，并具有减排和提高能源安全的好处。作为预可行性研究，本报告旨在提供项目可行性的初步评估。一个针对项目投资方、银行和其它融资机构可接受的，可以用来提供“融资”的正式可行性研究是必要的。第 7 节和第 8 节为山西焦煤集团提供了进一步的指导和建议，以帮助他们对煤矿瓦斯抽采和应用项目进行最终决策。

1 中国煤炭工业和煤层气产业

1.1 中国煤炭工业

中国在全球煤炭产量中排名第一，产量为 35.23 亿吨，占全球总产量的 46% (BP, 2018)。2007 年至 2017 年，中国的煤炭产量增加了 30.8 亿吨，即 21% (图 1-1)。2014 年起，由于需求减少，煤炭生产开始趋于稳定 (BP, 2018)。

截至 2017 年底，中国煤炭探明的总储量为 1388.19 亿吨 (全球排名第四，仅次于美国，俄罗斯和澳大利亚)，其中 94% 为无烟煤或烟煤，其余 6% 为次烟煤或褐煤 (BP, 2018)。中国的煤炭储量遍布全国，其中大部分位于山西，内蒙古，新疆，陕西和贵州，山西的总储量居首位 (USEIA, 2015)。

如图 1-1 所示，煤炭产量从 2007 年的 27.6 亿吨增长到 2017 年的 35.3 亿吨，尽管 2017 年的煤炭产量低于 2013 年的 39.7 亿吨的高峰产量。到 2017 年底，中国的煤炭消费总量为 38.1 亿吨，中国每年的煤炭消费总量占能源消费总量的 60% (图 1-2)，但中国政府在其能源发展战略计划中的目标是到 2020 年达到 58% 的消费水平。(NRDC, 2016)。

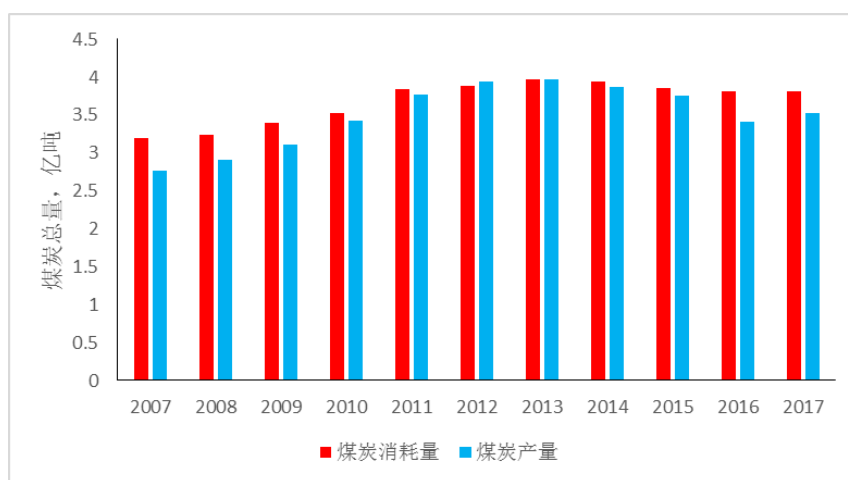


图 1-1: 中国 2007-2017 年的煤矿产耗量

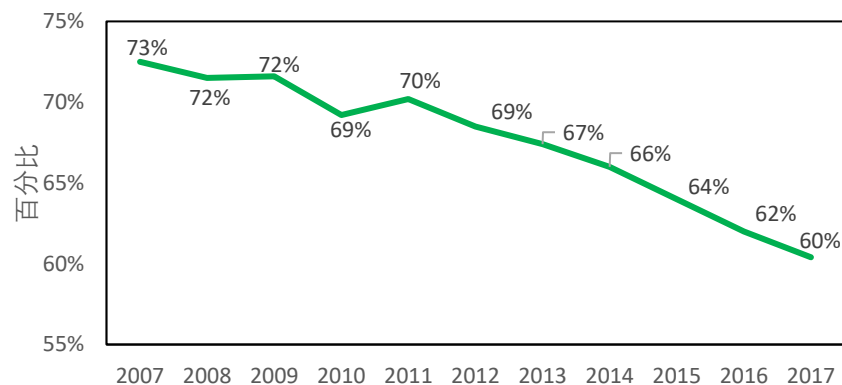


图 1-2: 中国 2007-2017 年煤矿消耗在能源消耗中的占比

中国政府目前正在试行整合国家煤矿，以改善企业的整体经济性、减少污染、提高国家煤炭企业的效率及安全性 (USEPA, 2015)。截至到 2017 年，中国有 7,000 个煤矿，而 2005 年为 24,800 个煤矿 (黄盛初, 2018)。中国计划关闭 300 个大型煤矿和 4,000 个小煤矿，这些煤矿将在未来三到五年内开采完毕。

1.2 中国煤矿瓦斯

根据报导，2017 年中国的煤矿瓦斯排放总量为 178 亿立方米 (黄盛初, 2018 年)。煤矿企业仍然面临与煤矿瓦斯治理和煤矿安全相关的重大挑战。2017 年，中国瓦斯抽采总量为 128 亿立方米，其中利用了 49 亿立方米 (黄盛初, 2018 年)。煤矿瓦斯排放量在过去三年中已达到稳定水平，并随着瓦斯抽采投入增加，煤矿瓦斯的利用率在过去也稳步增加。中国政府继续为煤矿瓦斯回收提供资金支持，努力在 2022 年前将煤层气/煤矿瓦斯利用率提高到 200 亿立方米。

“中国油气资源评价”结果表明，中国的煤层气总量约为 36.81 万亿立方米。大多数煤层气资源的埋藏深度小于 2,000m，埋深在 1000m 至 1500m 之间占总资源的 39% (图 1-3)。

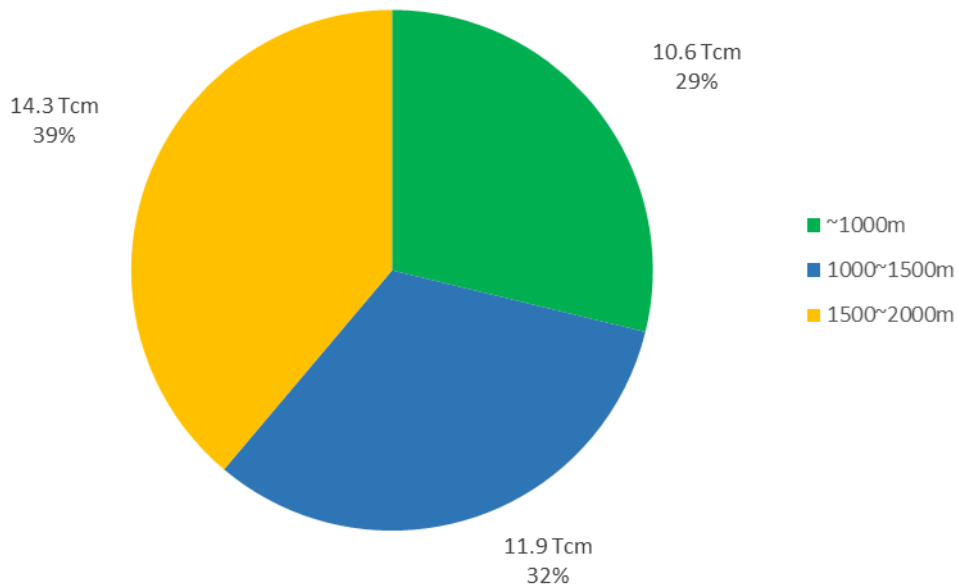


图 1-3: 中国不同埋深的煤层气资源分布图

尽管煤炭总产量与历史峰值相比略有下降，但随着储深较浅的煤炭资源的枯竭，为了满足需求，现有矿山采深增加到富瓦斯的煤层，预计会出现更多的水和瓦斯治理及利用问题。伴随着煤矿开采中瓦斯抽采和利用经验的积累及抽采技术的提高，以及煤炭生产集中在大型矿井中，煤矿瓦斯的抽放和利用项目也有望增加。煤矿瓦斯的治理和利用也是煤矿开采省份自身和国家级的优先事项，当然，这也包括腾晖煤矿所在的山西省。

1.3 选择腾晖煤矿进行预可行性研究

该预可行性研究是作为 2018 年 6 月至 10 月期间中国国际煤矿卓越瓦斯中心 (ICE) 综合最佳实践培训计划的一部分完成的，其中包括从 2018 年 1 月开始的准备工作及初始数据的收集。中国国际煤矿卓越瓦斯中心 (ICE) 是一家非营利性实体，受联合国欧洲经济委员会 (UNECE) 煤矿瓦斯专家组赞助，并受中国国家法律的约束。培训的目标是协助 ICE 成为一独立组织，能够识别和鉴定煤矿瓦斯回收和利用的机会，并能就煤矿瓦斯抽采和利用的最佳实践进行推广。中国国际煤矿卓越瓦斯中心 (ICE) 旨在提供一个煤矿瓦斯的安全、环境和经济方面的讨论平台，并重点关注于煤矿水及瓦斯治理及利用等问题。中心开展的活动包括：煤矿瓦斯治理的知识和经验交流、组织专业培训，并为进一步制定有效的煤矿瓦斯治理和利用提供最佳实践指南。培训的一个组成部分是将腾晖煤矿作为实

际案例，指导和完成详细的预可行性研究。经与中国国际煤矿卓越瓦斯中心协商，并得到各级母公司，山西焦煤集团有限公司和霍州煤电集团的支持，最终选择腾晖煤矿进行此预可行性研究，来确定煤矿瓦斯抽取和利用技术的经济性和可行性。

腾晖矿是进行预可行性研究的理想对象。立项依据如下：

- 该矿被归类为煤与瓦斯突出矿井。
- 矿井使用本煤层和裂隙带钻孔方式抽采瓦斯，但目前并没有进行瓦斯利用。
- 瓦斯抽放系统中的瓦斯浓度处于爆炸范围之内和之下，进行预可行性研究可以提出改进瓦斯抽采的建议，从而提高燃气的质和量。
- 矿山自身需要电力，因此瓦斯发电有市场。
- 腾晖煤业的母公司霍州煤电集团有限公司与最上一级的山西焦煤集团有限公司一样，都拥有瓦斯回收和利用经验。
- 山西省的电价和煤矿瓦斯补贴使得煤矿瓦斯项目更具经济性。
- 在与全球瓦斯倡议小组（GMI）的讨论中，腾晖、霍州煤电和山西焦煤集团的负责人表示，如果该项目在技术和经济上可行，他们就继续进行瓦斯抽采和利用项目的实施（尽管他们知道，目前的研究仅仅是一个初步的可行性研究）。

1.4 腾晖煤矿

腾晖煤矿位于鄂尔多斯盆地东南部的山西省。该矿被归类为煤与瓦斯突出矿，目前年产原煤 120 万吨。腾晖矿有两个可采煤层：山西组的 2 号煤层和太原组的 10 号煤层。该矿估计总煤炭储量为 2510 万吨；其中：2 号煤层可采储量为 1050 万吨，10 号煤层可采储量为 1460 万吨。目前仅开采 2 号煤层；2012 年至 2018 年期间开采了 500 万吨原煤。该矿估计寿命为 14.9 年（2 号煤层为 6.2 年，10 号煤层为 8.7 年）。

2 号煤层位于山西组下层的上部，K7 砂岩上方 17.29m 处，在 10 号煤层上部 43.11~52.18m 处，平均高度为 47.3m。煤层厚度 4.88~7.47m，平均煤层厚度 5.94m。2 号煤层结构简单，包括 0-2 层煤矸石，位于顶部的砂质泥岩和底部的泥岩之间，在整个矿井中赋存稳定，适于可采。来自该煤层的煤主要由贫煤和瘦煤及其组合构成。

10 号煤层位于太原组下部上端，K2 石灰岩下，K1 砂岩上部 14.58m。煤层厚度 1.92~4.85m，平均厚度 3.60m。10 号煤层比 2 号煤层薄得多。10 号煤层结构简单，包括 0-2 层煤矸石，并在整个矿井中稳定可采。介于顶部的石灰岩和泥岩和底部的泥岩之间，10 号煤层主要由贫瘦煤和一些贫煤组成。

两个煤层的总瓦斯储量为 4.95 亿立方米，其中 2 号煤层为 2.41 亿立方米，10 号煤层为 2.54 亿立方米。基于储量，该矿预测可以从两个煤层中抽采 1.49 亿立方米瓦斯（来自 2 号煤层 7200 万立方米，来自 10 号煤层 7600 万立方米）。2017 年，矿井抽采了 570 万立方米的瓦斯。2 号和 10 号煤层原煤中平均瓦斯含量分别为 $9.15 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $7.69 \text{ m}^3/\text{t}$ 。两个煤层中残余瓦斯含量为 $2.18 \text{ m}^3/\text{t}$ 。来自 2 号和 10 号煤层的煤的自燃试验的结果表明，两个煤层都有自燃的危险，煤尘容易爆炸。

1.4.1 地理位置

腾晖煤座落于中国山西省西南部。在乡宁县枣岭镇店沟村的西部。该矿的地理坐标为 $110^{\circ}34'48'' \sim 110^{\circ}37'05'' \text{ E}$ 和 $35^{\circ}46'22'' \sim 35^{\circ}47'11'' \text{ N}$ 。图 1-4 显示了该矿在地图上的位置。

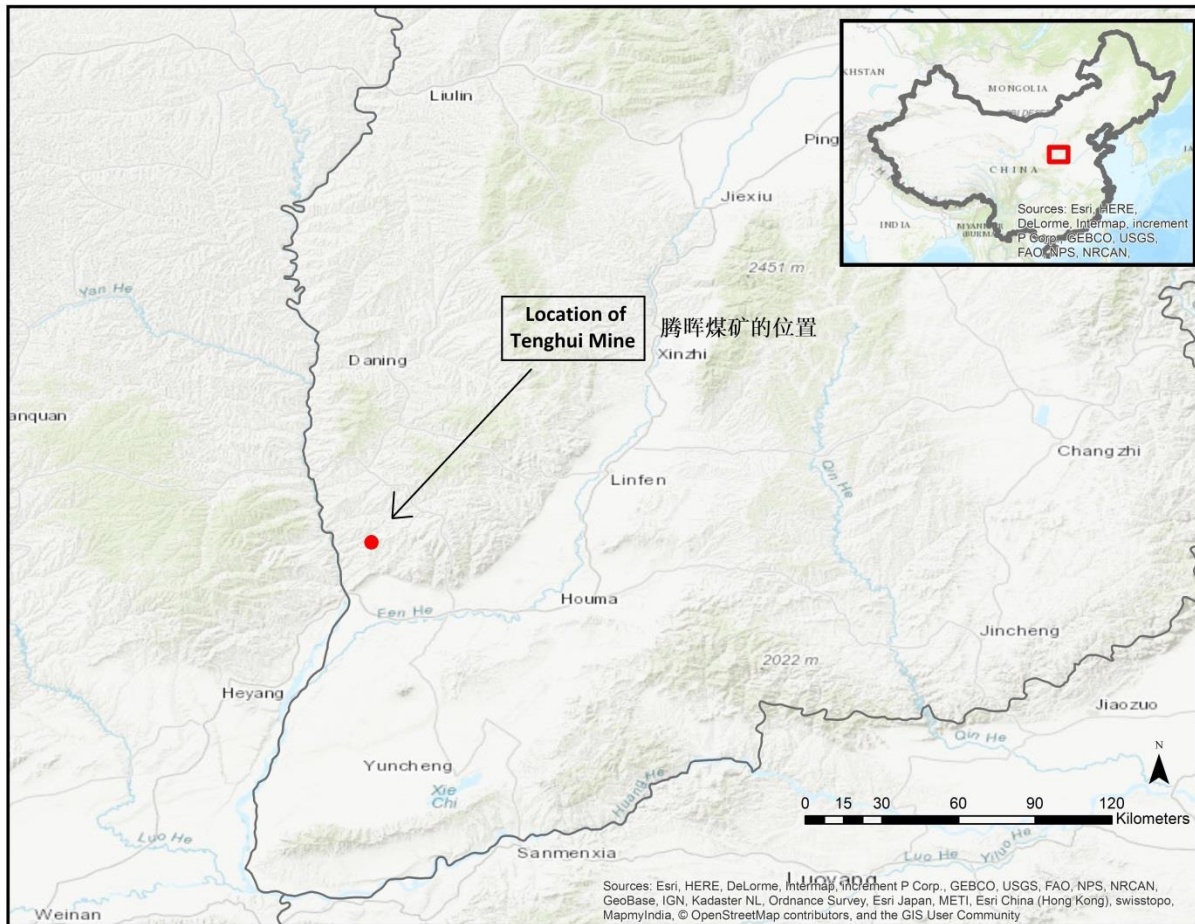


图 1-4: 临汾辖区内的腾晖煤矿位置

腾晖煤矿位于山西省河津市附近，介于山西省西南部的临汾和运城市之间。河津市毗邻晋陕交界的黄河边上。在山西省内，临汾或运城可能是与河津市最近的城市。这两个城市都可以经乘火车或飞机到达。由临汾和运城前往河津市的主要交通工具是汽车或其他机动车辆。省外最近的省会城市应该是陕西省的西安市。

该矿位于黄河以东的店沟村内，距离河津市中心约 50km。从河津市中心到达矿山大约需要 90 分钟，因为沿途主要是盘山公路。煤矿办公场所、建筑物和主要人员和材料通道位于山谷中。山坡两侧环绕着建筑物，但煤矿周围没有村庄和居民。

1.4.2 地形及气候

腾晖煤矿所在的山西省地处黄土高原，其高原地形的特点是低山，丘陵和盆地，以覆盖地表的黄土为特征。地形至少海拔 1500m，从东北向西南倾斜。煤矿比邻吕梁山脉和黄河。

山西省地处温带，在气候类型上属于温带大陆性季风气候。四季分明，温暖和寒冷的季节之间有很大的温差。春季气候非常干燥，容易发生沙尘暴，夏季通常温暖潮湿。山西的年平均气温为 4.2 °C 至 17.0 °C (40 °F 至 63 °F)。1 月是山西最寒冷的月份，平均气温在 -13 °C 至 -2 °C (7 °F 至 27 °F) 之间，而 7 月是山西最温暖的月份，平均气温在 20 °C 至 31 °C 之间 (68 °F 至 88 °F)。山西省年平均降水量为 400 至 650mm (大英百科全书, 2018)。冬季的极端天气如冰雪可能会影响该省的地面施工。

1.4.3 区域地质

该矿位于鄂尔多斯盆地东部，该盆地是中国的主要资源型区域，面积达 36 万平方公里。鄂尔多斯盆地拥有丰富的煤炭、石油和天然气资源。鄂尔多斯盆地拥有大约 4 万亿吨煤的巨大煤炭储量，以及石油、天然气和铀等大量的其他资源。腾晖煤矿所在的鄂尔多斯盆地东部地层以褶皱和断层为特征，主要受山西褶皱带的影响 (李贵红, 2016)。山西省的大部分煤和天然气资源分布在晚二叠纪和早石炭纪含煤地层。

腾晖煤矿可开采的煤层主要分布在山西组和太原组。在二叠纪期间沉积的山西组地层主要由煤层和硅质碎砂岩组成。这种形成主要沉积在三角洲平原环境中。该地层的平均厚度为 55m，与太原组地层中煤层相比，发育不太理想。在沉积构造和沉积相中可以找到各种河流系统，包括网状，蜿蜒和交汇河流系统。在整个地层中也可以发现许多化石。山

西组地层中发现的丰富植物化石表明沉积过程中温暖潮湿的史前气候。在石炭系沉积的太原地层由细粒物质组成，包括泥浆和细粒砂岩。地层的平均厚度为 120m。该地层主要沉积在平坦的湖泊或富含碳酸盐的湿地中。海洋化石通常可以在地层中找到。

1.5 山西焦煤集团-腾晖煤矿的母公司

腾晖煤矿隶属于山西焦煤集团旗下的子公司霍州煤电集团。霍州煤电集团的业务领域多元化，包括煤炭、电力、焦化、机械和建材。该集团在山西省有十个生产矿井，并计划开建新矿（山西焦煤，2018）。山西焦煤集团则是一家大型国有企业，总部位于山西省太原市。霍州煤电集团公司前身为始建于 1958 年霍县矿务局，2000 年改制为霍州煤电集团有限责任公司，2001 年加入山西焦煤集团公司并成为其子公司之一。

山西焦煤集团成立于 2001 年，是中国七大煤炭企业集团之一，也是中国最大的焦煤生产企业。2016 年，该集团生产商用焦煤 1.15 亿吨（山西焦煤，2018 年）。山西焦煤在山西省拥有约 100 个煤矿，年产能为 1.74 亿吨，另有 28 个选煤厂、5 个焦化厂、9 个燃煤电厂和 14 个燃气和余热发电厂。山西焦煤集团的子公司之一，西山煤电有限公司，目前在其三个矿山建有煤矿瓦斯发电项目。

2 煤矿瓦斯涌出分析

将三（3）处瓦斯排放量相加，就得出腾晖矿（“矿井”）的瓦斯总排放量：（a）矿井通风系统中稀释的瓦斯；（b）本煤层瓦斯高负压抽排瓦斯；和（c）低负压采空区抽排瓦斯。2016年1月至2018年5月（评价周期）的矿井瓦斯排放总量在35-40 m³/min 之间。这相当于大约2000万立方米的年排放量。

2.1 矿井瓦斯涌出分布情况

大约一半的矿井瓦斯排放通过矿井的通风系统排放到大气中。余下的大部分瓦斯是由2号煤层的本煤层钻孔抽采或采前预抽捕获的。这些本煤层钻孔连接到平均负压为41kPa帕的高负压系统。少量的瓦斯则经过裂隙带钻孔或大直径的以孔代替所捕获（2-3 m³/min）。裂隙带钻孔则连接到平均负压为37Kpa的低负压系统。图2-1说明了在评价期间三（3）个瓦斯排放源在煤矿总排放中所占的比重。

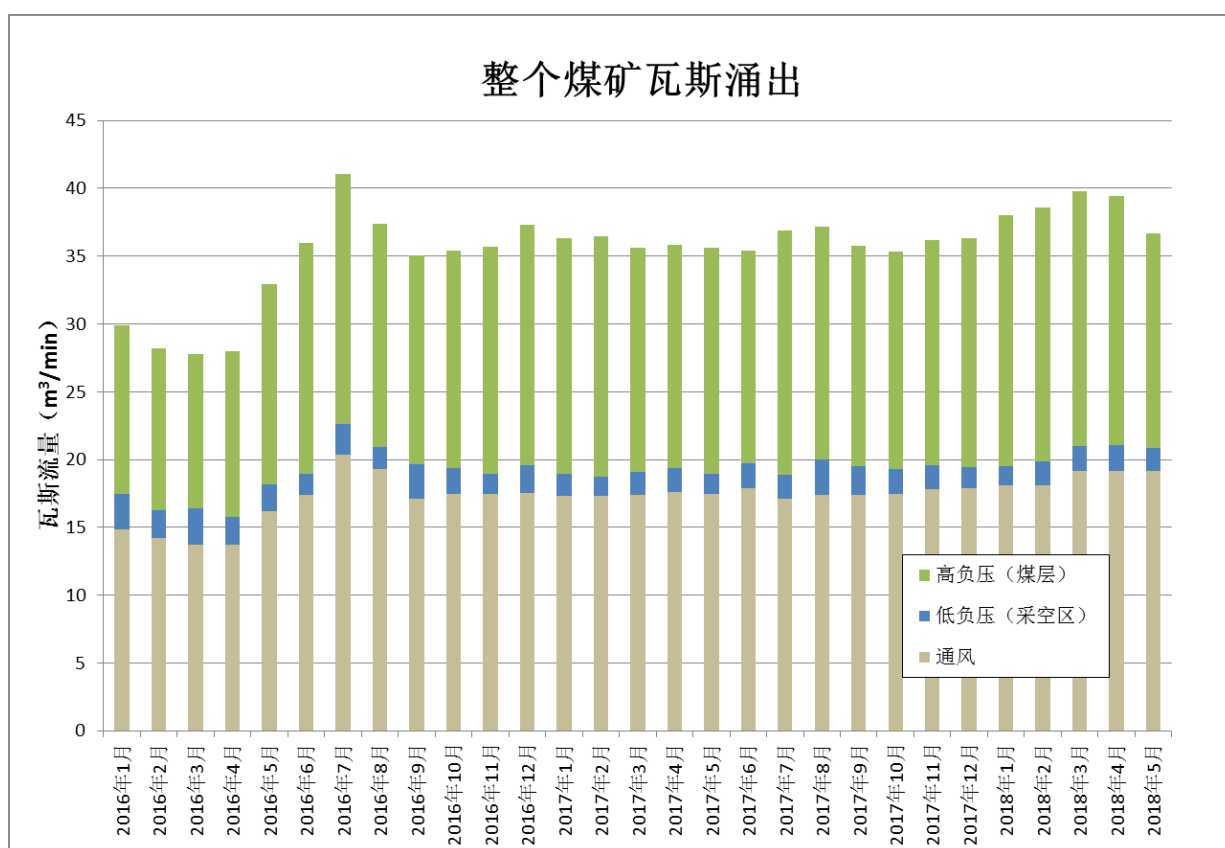


图 2-1: 评估期内瓦斯排放的来源分配

2.2 吨煤瓦斯涌出量

假设矿山的年平均原煤产量为 120 万吨，那么在评估期内，该矿的平均瓦斯涌出量在 14.4 和 16.4 m³/t 之间，如图 2-2 所示。

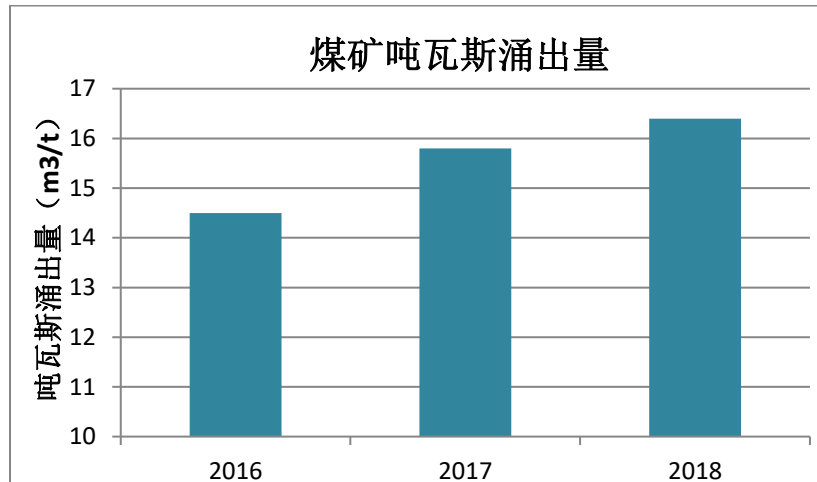


图 2-2: 吨煤平均年瓦斯涌出量

3 腾晖煤矿瓦斯抽采和利用

该矿实施了采前本煤层预抽和裂隙带瓦斯抽采方案，抽采的瓦斯质量不高，不适合使用。本节概述了现行的抽采方法，并经过对现场进行实际考察后，对所见进行了初步的观察和评估。最后，经过对现有数据进行更详细分析的后，得出了进一步的观察结果。

3.1 目前现状

该矿有独立的瓦斯抽采系统实施采前本煤层和裂隙带预抽。每个系统都配有专用的地下气体收集管线，并与负压系统连接。两个系统均使用大容量液环真空泵（每个容量 100 m³/min）在高负压下运行，本煤层预采系统的工作压力略高于裂隙带抽采系统（由矿方指定为“高负压系统”）。两种系统都产生低质量的瓦斯，所有回收的气体都直接释放到大气中。

3.1.1 采前预抽

该矿在主巷道及其它井下设施施工前使用螺旋钻在煤层内进行密集钻孔以降低煤层瓦斯含量。矿方目标是，6 个月的抽采，2 号煤层的瓦斯含量能降低 30%。

3.1.1.1 本煤层预抽

为了在主巷道施工前减少瓦斯含量，矿方在专为此目的挖掘的硐室内采用旋转钻机进行钻孔，长度为 45 至 120m，直径为 94mm，如图 3 所示。在这种做法中，正式开采前需要不断的钻孔，且需要每 50m 挖掘一个硐室，并延伸相应的气体收集管线。在主要巷道施工前抽放效果和瓦斯浓度降低不明显。

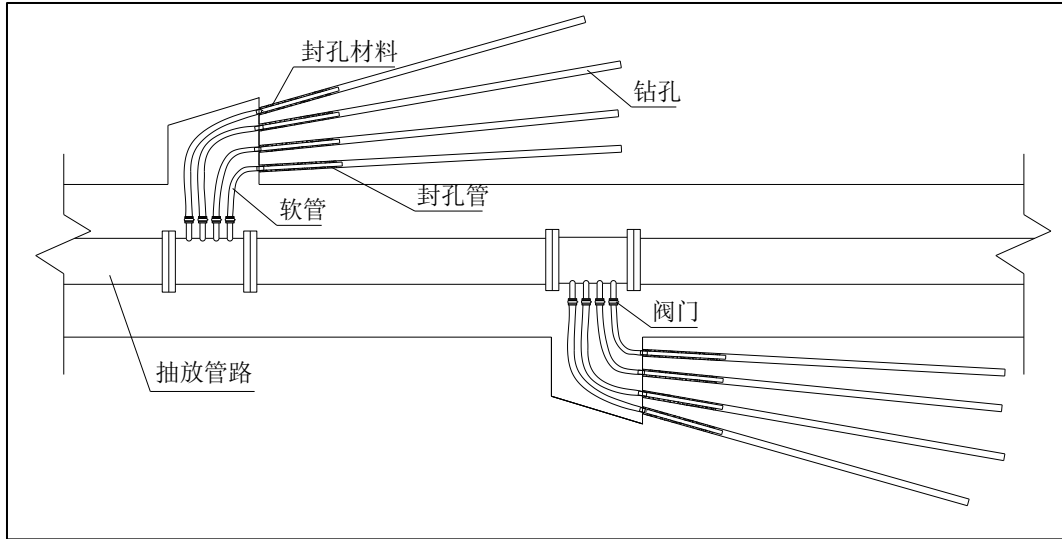


图 3-1: 井下基础设施施工前在每 50 m 一个硐室内进行本煤层预抽

3.1.1.2 长壁工作面回采前的煤层瓦斯预抽

为了在长壁工作面回采之前降低瓦斯含量，矿方在主要巷道施工期间，采用普通旋转钻机，由巷道内垂直于回采方向进行钻孔。这些钻孔的长度一般为 165m，直径为 113mm，间隔 4m，高度交错排列。如图 3-2 所示。

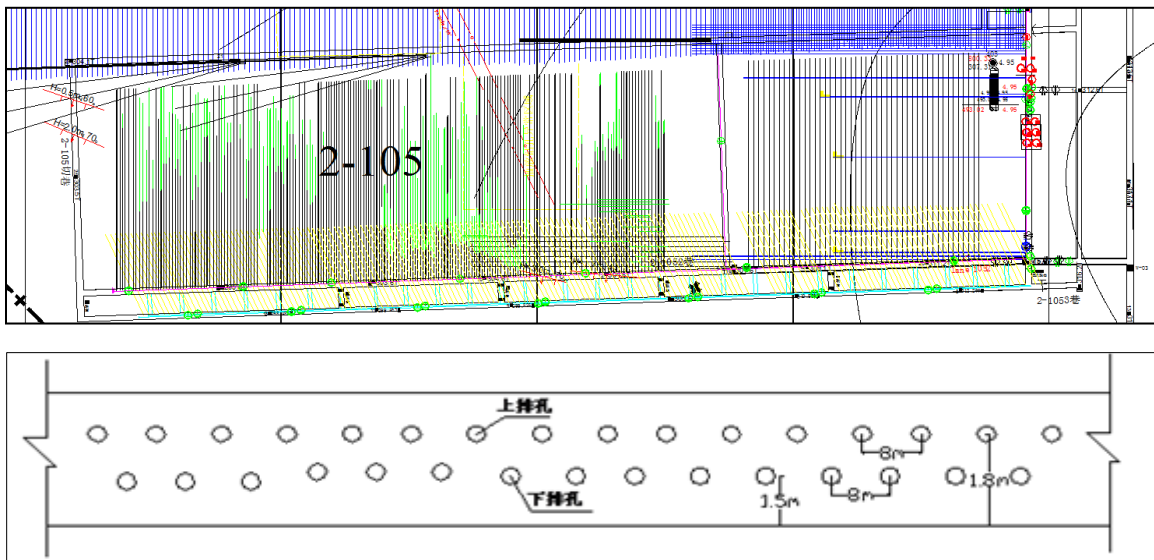


图 3-2: 在 2 号煤层中间隔 4m 的本煤层钻孔

矿井提供的下列经验公式，用来进行计算 2 号煤层钻孔抽采的瓦斯预测产量和相关的 气体含量随时间的减少的函数关系。

$$Q_t = \frac{l}{100} * Q_i * e^{-\lambda t}$$

其中：

Q_t = 生产率 (m^3/d)

l = 钻孔长度 (m)

Q_i = 初始生产率 (m^3/d)

λ = 衰减系数 ($1/\text{d}$)

t = 消逝的时间 (days)

对于 2 号煤层中的单个 165 m 本煤层钻孔，使用该等式，可以推导出瓦斯的产量和相关的随着时间的消逝气体含量的衰减量，如图 3-3 所示

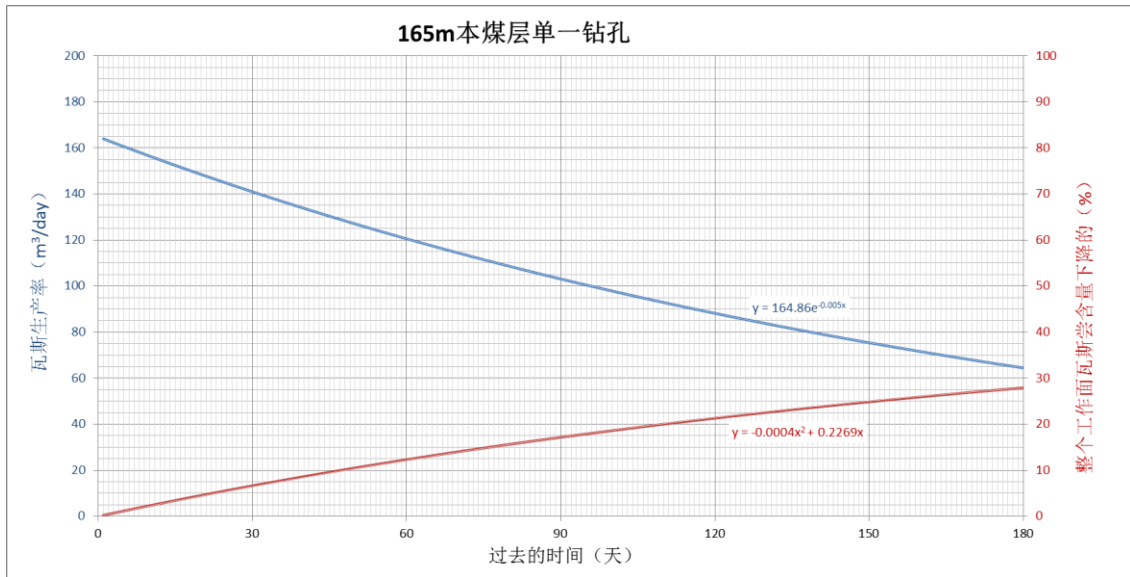


图 3-3: 2 号煤层本煤层单一钻孔的瓦斯产量及瓦斯含量的降低量预测

3.1.1.3 本煤层抽采

所有的本煤层钻孔内都下有一个套管，通过灌注水泥来固定在钻孔内。每个钻孔的管口汇集到集管口（通常 6 个井孔被汇接在一起），集管另一端则连接到直径 325mm 的总管。总管道长度 2 至 3m 不等，由法兰+垫圈连接在一起。这种总管道内有大于 20kPa 负压，最终通过 630mm 直径的主管道将矿井内的本煤层抽采瓦斯输送到地面。

图 3-4 显示了瓦斯、瓦斯空气混合物的流量及瓦斯浓度。这些瓦斯是指在 29 个月的评价周期内，由整个矿井范围内的煤层钻孔中产生的。

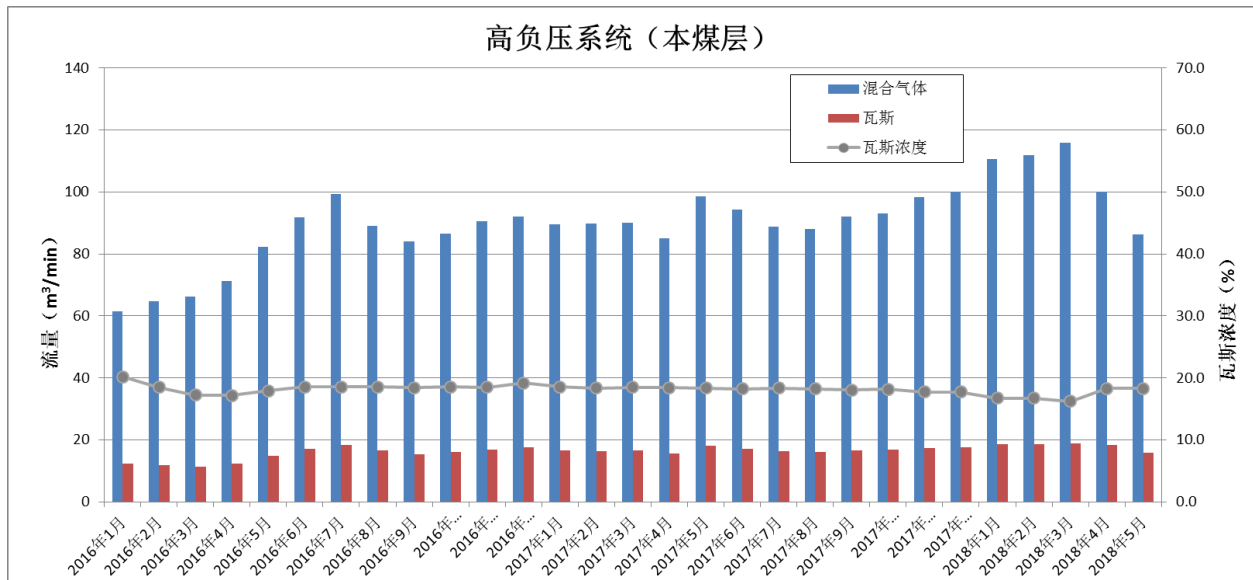


图 3-4: 评价期内本煤层抽采的混合气流量、瓦斯纯流量及浓度

评价期间瓦斯的平均生产率为 $17 \text{ m}^3/\text{min}$ ，空气中瓦斯的平均浓度为 19% 。瓦斯空气混合气体的平均流量为 $90 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3.1.2 裂隙带抽采

工作面在回采期间，常常通过一定间隔的顶板裂隙带钻孔进行抽采。在一些工作面，则通过施工超大直径的以孔代巷孔将两个回风巷联通，以控制瓦斯的涌出。

3.1.2.1 裂隙带钻孔

煤矿通常采用不同角度的裂隙带钻孔。这些钻孔是在工作面回采前施工（与巷道夹角为 60° ），如图 3-5 所示，在工作面上的水平投影距离为 5 到 25m 之间。高位裂隙带钻孔长度为 80 至 105m ，钻至 2 号煤层顶板上方 50 至 60m 的高度，而低位裂隙带钻孔长度一般 40m ，钻至煤层约 5m 上方，如图 3-6 所示。在某些情况下，低位裂隙带钻孔与巷道垂直。所有的裂隙带钻孔的直径为 94mm ，并预制双封隔器并灌浆，孔间隔通常为 4m 。

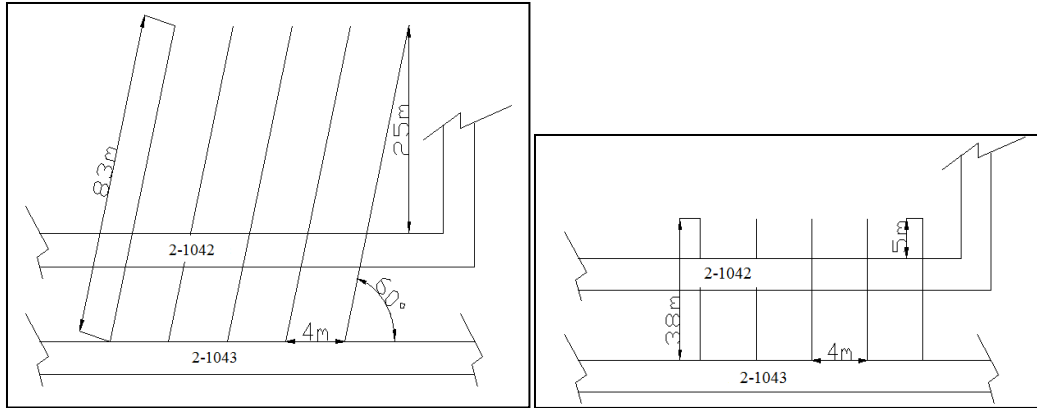


图 3-5: 高低位裂隙带钻孔的平面图

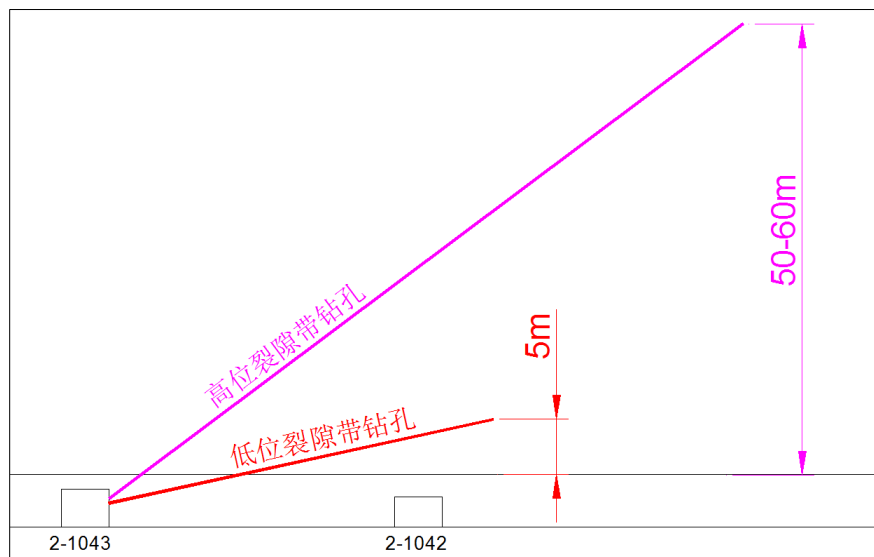


图 3-6: 高低位裂隙带钻孔的剖面图

3.1.2.2 大直径的以孔代巷孔

在个别长壁回采工作面，该矿通过在两个平行的巷道之间施钻大直径的钻孔以收集/控制采空区的气体。这些钻孔通常间隔 75m，钻孔直径为 500mm，并在完孔后将其连接到气体收集主管线。

3.1.2.3 采空区瓦斯抽采情况

所有顶板裂隙带孔和大直径以孔代巷孔直接地或通过集管口再连接到悬挂于巷道上方的两个直径为 325mm 的总管。总管重量较轻，壁厚为 2mm，长度 2 至 3m，通过垫圈+法兰连接在一起。总管路和低负压管路联接，最终并入直径为 630mm 的主管线将矿井内的混合气体输送到地面。图 3-7 显示了混合流量，瓦斯纯流量和浓度。这些是指在评价期内全矿范围抽采的裂隙带瓦斯。

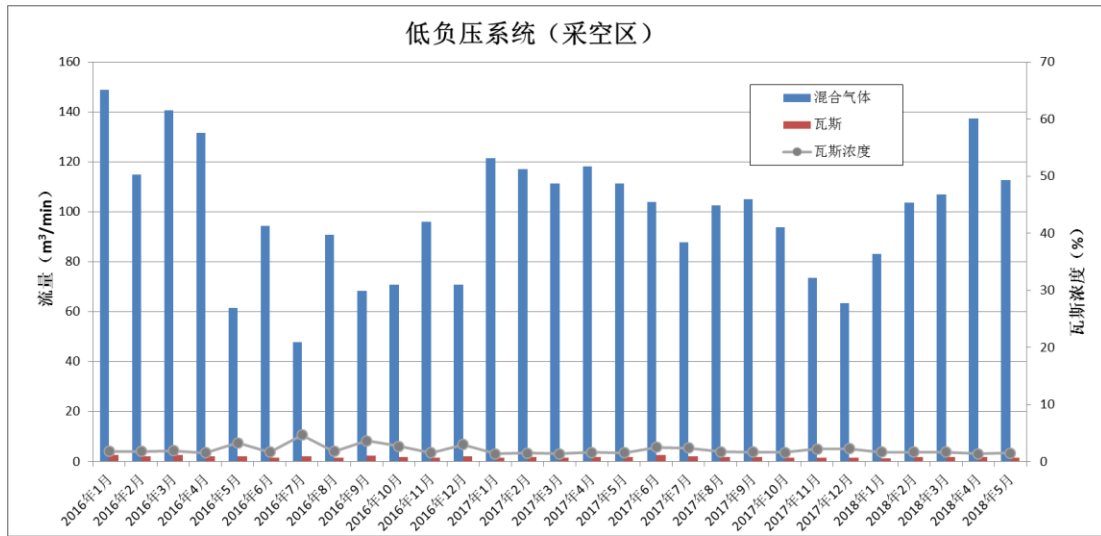


图 3-7：评价期内裂隙带抽采的气体的混合流量、瓦斯纯流量及浓度

评价期内瓦斯的平均生产率为 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ ，空气中瓦斯的平均浓度为 2% 。混合气体平均流量为 $100 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3.1.3 瓦斯利用

由于抽采出的气体质量较差，矿井将通过高低负压系统收集的瓦斯直接排放到大气中。在评价期内，通过两种途径抽采的混合气中平均瓦斯浓度为 10% （体积比）。

3.2 腾晖井下实地考察

2018年6月我们对矿井进行实地考察，了解了当时的回采、通风和瓦斯抽采现状。在考察期间，该矿刚刚开始对长壁工作面 2-105 的开采。从 1052 巷道入口开始，每隔 4m 钻一本煤层钻孔，而顶板裂隙钻孔（高位和低位，每个间距为 4m ）也刚刚从 1053 巷道入口开始施工，同时还有巷道间隔 75m 的大直径的以孔代巷孔，如图 3-8 所示。

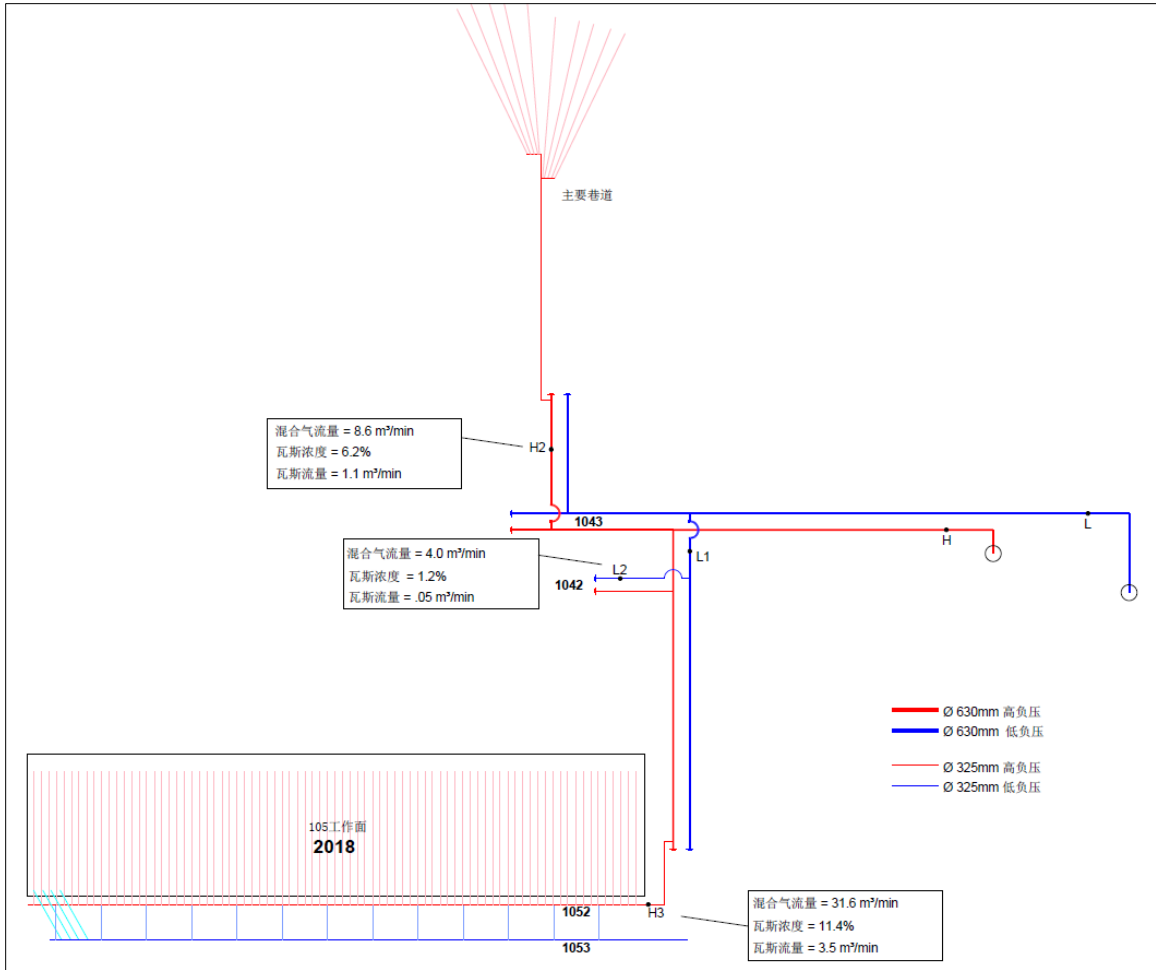


图 3-8: 在实地考察矿井期间的瓦斯抽采方案示意图

3.2.1 回采前预抽

从 1052 巷道的入口就可以看到间隔 2m 的本煤层钻孔，进入煤层后间隔到 4m。这些孔的钻孔长度在 130 到 140m 之间。每 6 个钻孔的孔口汇集到集管口，集管再与气/水分离器连接。回收的气体则由分离器的顶部输送到主管（直径 325mm）。这些钻孔与高负压系统连接，如矿方在每个井口上记录的那样，系统内的负压超过 20kPa。在井孔周边观察到气体泄漏（可以看见，并听见），通过法兰结合部，进入螺栓孔，再出来。因此，井口测量的瓦斯浓度起伏很大，从 10%到 80%（孔口测量值）。从 1052 巷道的孔口测量的瓦斯浓度约为 11%。

3.2.2 采空区瓦斯抽采

采空区瓦斯抽采采用高低位裂隙带钻孔，在 1053 巷道的第二个入口处施钻，将长度为 9m，直径 75mm 的套管灌浆固定到 115mm 的井孔内。它们的间隔为 2m（高位和低

位)。在 1052 和 1053 巷道之间，钻出大直径 (500mm) ，间隔 75m 的以孔代巷孔。在钻孔后将套管插入孔深约 2m 处，在其周边的环形空间内灌注水泥。安装后，一些套管在接头处分开。两个直径为 325mm 的主管道安装 1053 巷道的第二个入口处，并悬挂在巷道的顶部。主管道长约 2m，通过法兰+垫圈进行连接。2-105 工作面的采空区气体收集系统在现场参观时未曾运行。

3.2.3 进入通风系统中的瓦斯

在实地考察期间，煤矿人员使用手持式瓦斯计测量各点的瓦斯浓度。从长壁工作面 2-105 的回风巷道中测的瓦斯浓度在 0.3%和 0.4%之间，此时，没有回采作业（长期停工）。这些瓦斯来自于裸露的煤层和采区表面。

3.2.4 抽采泵站

在现场参观时观察到，地表抽采泵站有两台大容量液环真空泵在运行：一个用于“高负压”煤层瓦斯抽放系统，一个用于“低负压”采空区瓦斯抽采系统。每个系统配有备用泵，每个备用泵的排量为 460 m³/min。

高负压系统瓦斯生产率为 75 m³/min，瓦斯浓度为 18.6%，真空压力为 36.6kPa。低负压系统瓦斯生产率为 75 m³/min，瓦斯浓度为 1.3%，真空压力为 35.2kPa。在典型的气体收集方案中，低负压系统用于采空区瓦斯抽采，而高负压系统用于本煤层瓦斯抽采。

3.2.5 实地观察

矿方中的瓦斯抽放系统输送不可用的低质量气体，瓦斯含量为 0.3%至 18.6%，包括空气中具有爆炸性的混合气体。这些混合气体来源于气体收集系统中的大量的漏气点，包括孔口和管汇连接处（每 1000m 工作面有 250 x 3 个接点）和管道连接部分。

在矿井中没有实施实时监控，例如：根据各个接点处（井孔、集管及管线接头）的瓦斯流量和浓度调节负压大小。

地下管道应该是防爆的，但如果发生管线事故，不具备完整性监控和系统分隔功能。

矿方正在努力抽采裂隙区瓦斯（2%瓦斯浓度，90 m³/min 流量），事实上，是以抽采代替通风，以便将长壁工作面和巷道交叉区域的瓦斯浓度维持在的允许范围以内。

3.3 井下瓦斯涌出分析

矿方提供了大量有关瓦斯抽采系统和矿井通风系统中瓦斯浓度的历史信息以供分析。利用该信息可以评估井下瓦斯的分布情况及各种情况下的瓦斯产生量，如：长壁工作面回采与巷道施工期间瓦斯分布情况。提供从 2016 年 1 月初到 2018 年 5 月底的每个月的特定日期的数据。将每个月的特定日期数据求和平均得到该月的月平均数据。

3.3.1 工作面 2-104

分析了 2016 年 2-104 工作面 (LW 2-104) 在回采过程中的瓦斯抽采率、瓦斯浓度及气体流量。2-104 工作面尺寸为 180m 宽，800m 长。2-104 所处的 2 号煤层厚度为 5.2m，采用顶部放顶法开采，采煤机回采厚度为 2.5m，顶部的煤层 (2.7m) 则在回采后塌陷，进入单独的输送机。2-104 工作面的平面图如图 3-9 所示，工作面按月计划进度进行分隔 (2015 年 12 月开始，然后在 2017 年 3 月结束，其中有两个月停工)。本分析仅对 2016 年 1 月至 12 月的连续开采期进行了评估。

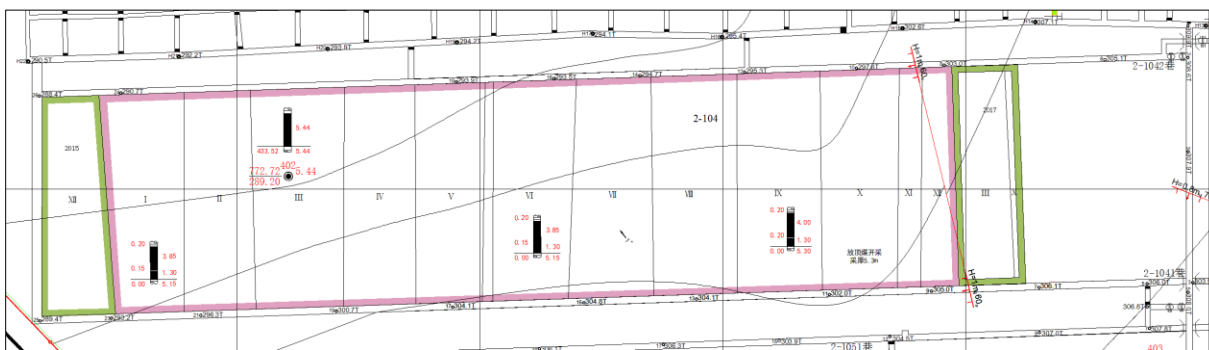


图 3-9: 2-104 工作面回采进度计划

3.3.2 长壁工作面 2-104 瓦斯抽放

该矿采用本煤层预抽采 (本煤层钻孔) 和裂隙 (采空) 区抽采方法 (裂隙钻孔)，以控制 2-104 工作面回采过程中的瓦斯涌出。

3.3.2.1 本煤层钻孔

矿方在 2-1042 进行施钻，钻出 200 个孔。这些钻孔为 2 号煤层内的本煤层钻孔，高度为 1.5 和 1.8m，并交替排列，钻孔的平均长度在 113 mm 和 165 m 之间，如图 3-10 和图 3-11 所示。平均在 6 个月前进行钻孔，以便在回采前降低 2 号煤层中的瓦斯含量。这些钻孔与集管连接在一起，并连接到 325mm 内径的集气系统主管。

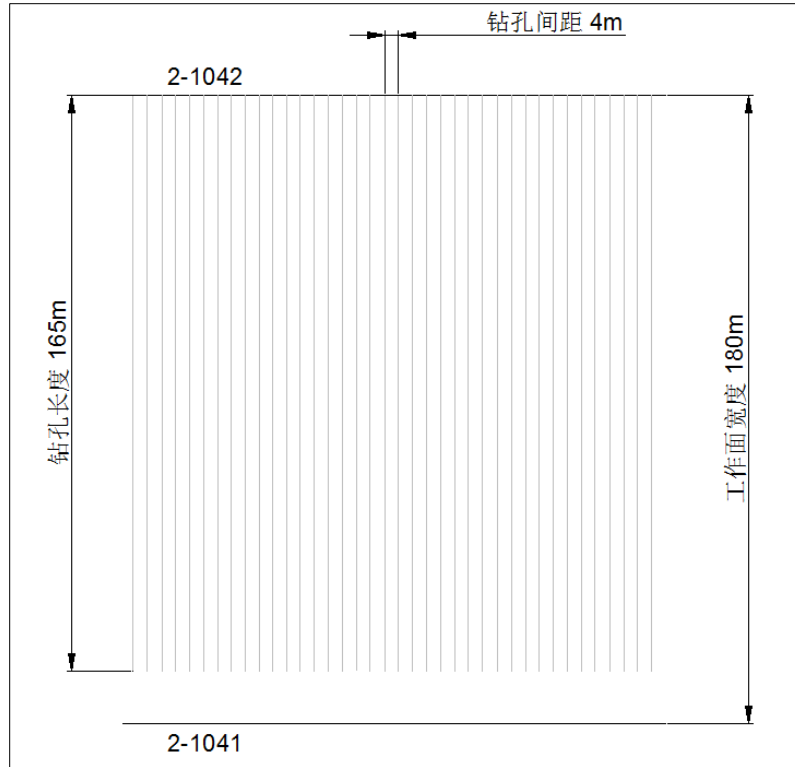


图 3-10: 2-104 工作面本煤层钻孔平面图

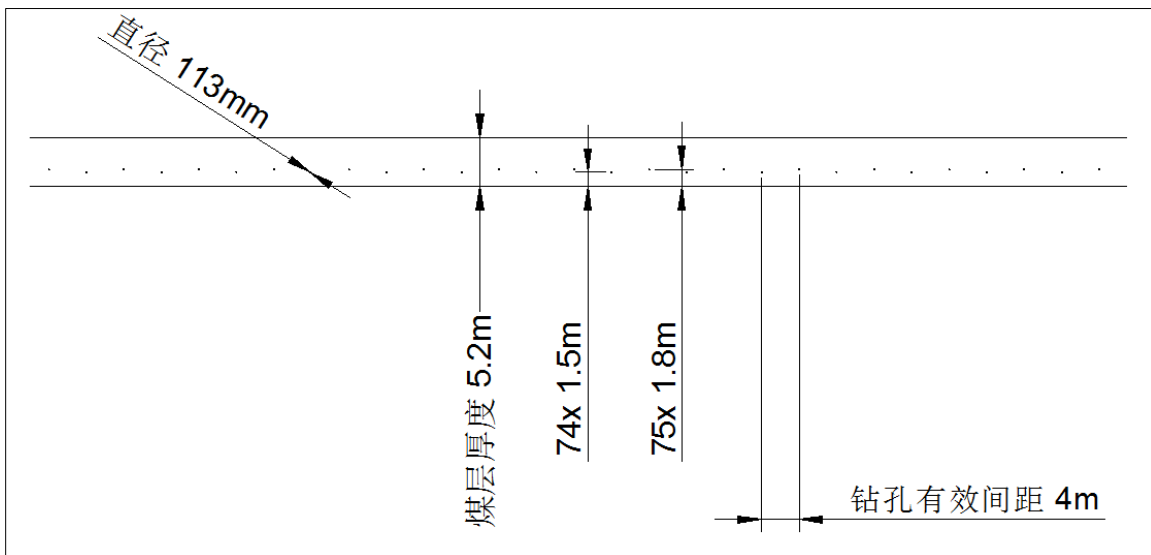


图 3-11: 2-104 工作面本煤层钻孔剖面图

在长壁工作面开始回采时，来自煤层内的瓦斯流量为 $9 \text{ m}^3/\text{min}$ ，在正常生产期间平均流量为 $5.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ，如图 3-12 所示。如图所示，随着回采工作的进行，部分本煤层钻孔被切割，瓦斯流量降低。

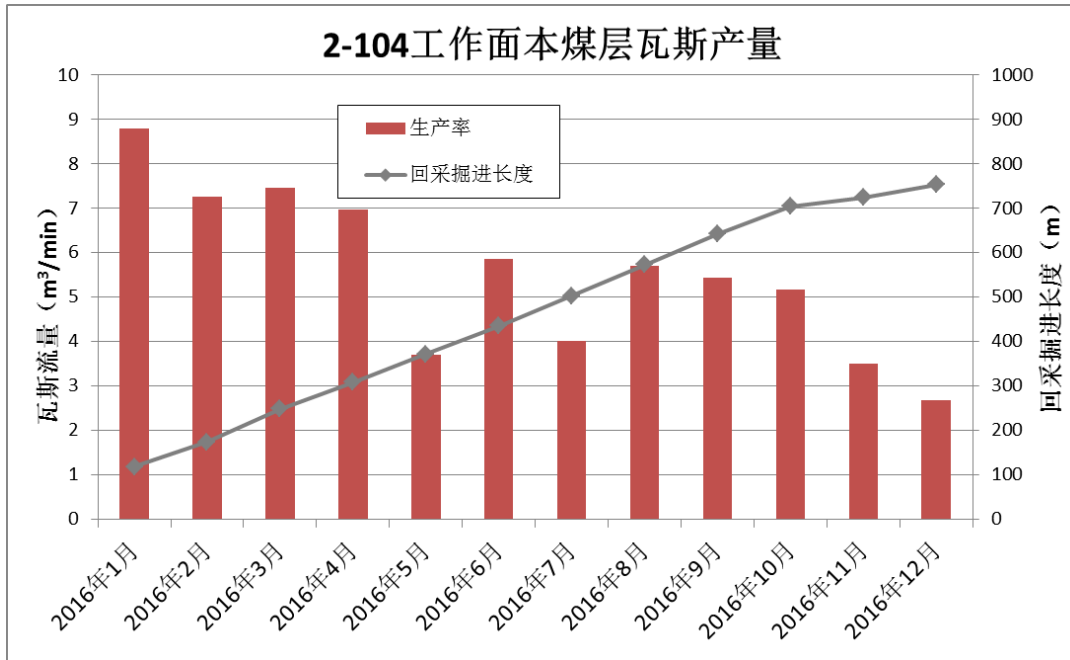


图 3-12: 2-104 工作面本煤层钻孔瓦斯生产率

2-104 工作面回采期间的，通过“高负压”系统从本煤层钻孔中抽采的瓦斯浓度范围为 10%到 20%，在回采期间的大部分时间内处于爆炸范围内，如图 3-13 所示。这因于高负压系统将空气吸入，以及较多的瓦斯泄漏点（孔口，连接处和套管处）。

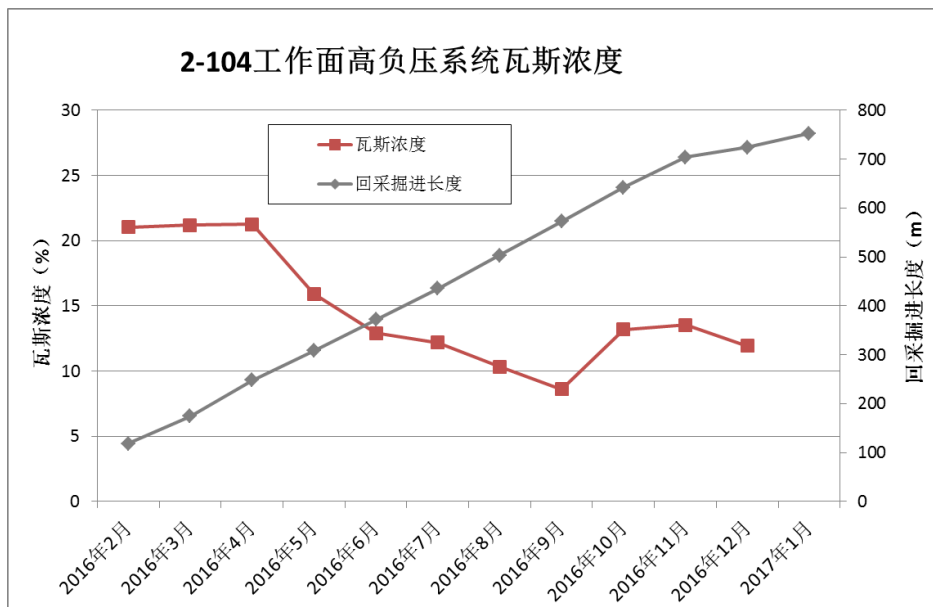


图 3-13: 2-104 工作面本煤层钻孔瓦斯浓度

3.3.2.2 裂隙带钻孔

为了抽采采空区瓦斯，矿方在 2-1013 巷道实施两种裂隙带钻孔，如图 3-14 所示。第一种裂隙带钻孔以大的仰角（36 度）钻孔并与回采方向成 60 度夹角，在 2 号煤层上方钻深约为 83m 的目标高度为 50m。这些高位钻孔正交投影至工作面外 25m 处，钻孔间隔为 4m。第二种裂隙带钻孔较短，向上倾斜 12 度，长度为 38m，达到 2 号煤层上方 5m 的目标高度。低位钻孔垂直于 2-1043 巷，钻孔间隔为 4m。

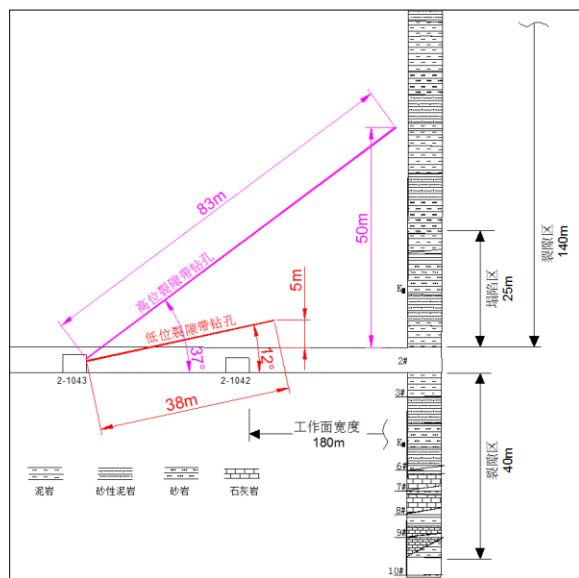


图 3-14: 2-104 工作面裂隙带钻孔剖面图

裂隙带钻孔连接到气体收集系统，该系统由内径为 325 mm 的钢管在低负压下工作。

在回采过程中通过连接到“低负压”系统的裂隙带钻孔抽采的瓦斯非常少，平均瓦斯流量为 1.6 m³/min，如图 3-15 所示。回采切割宽度达到工作面宽度后，工作区的采空区瓦斯产量最高。接下来在整个 2-104 工作面回采期间，来自裂隙带钻孔的瓦斯平均流量可以稳定在 1 和 1.6 m³/min 之间。采空区的瓦斯产量基本上与裂隙带钻孔抽采系统保持一致。

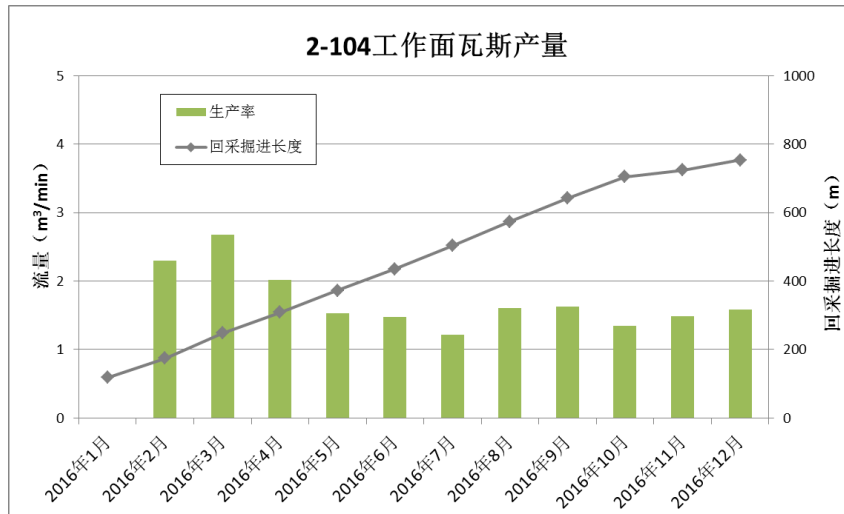


图 3-15: 2-104 工作面回采期间裂隙带钻孔抽采瓦斯产量

2-104 工作面出口处“低压”气体收集系统中测量的瓦斯浓度在回采期间也非常低，平均约 2.5%，如图 3-16 所示。这归因于高的负压和潜在数量较多的泄漏点，例如孔口和管路连接处，以及完孔的质量和钻孔的后期处理（不再产气的裂隙带钻孔，主要吸入通风空气）。

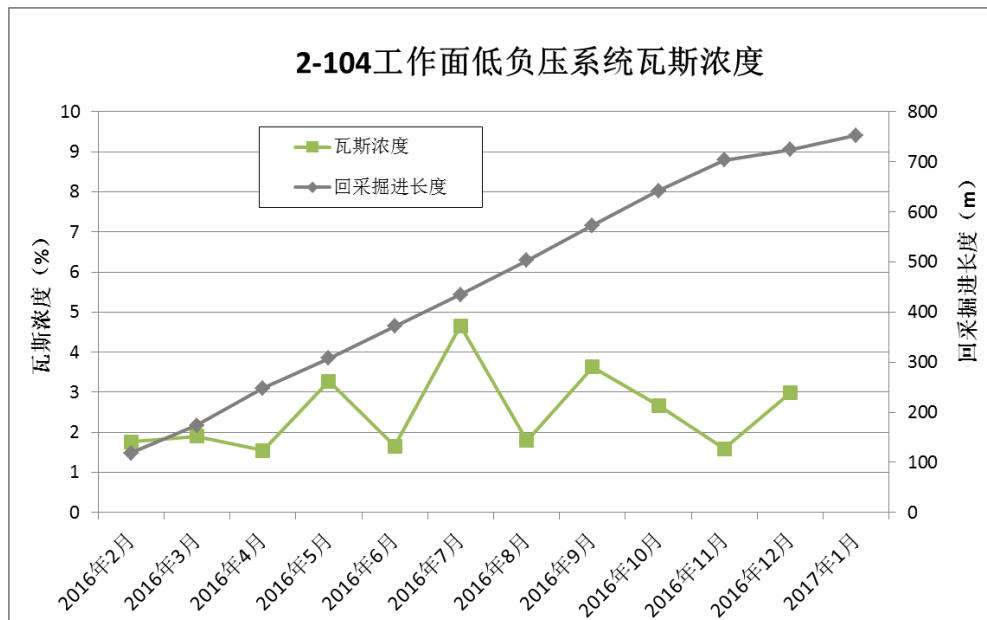


图 3-16: 2-104 工作面回采期间采空区瓦斯浓度

3.3.3 2-104 工作面通风系统

工作面 2-104 在回采期间通过通风系统中释放的瓦斯平均流量为 $7.4 \text{ m}^3/\text{min}$ ，如图 3-17 所示。通风系统中瓦斯释放走势与本煤层释放的瓦斯类似。请注意，在 2016 年底回采结束时，回采速度放缓，通风系统中的瓦斯流量下降。

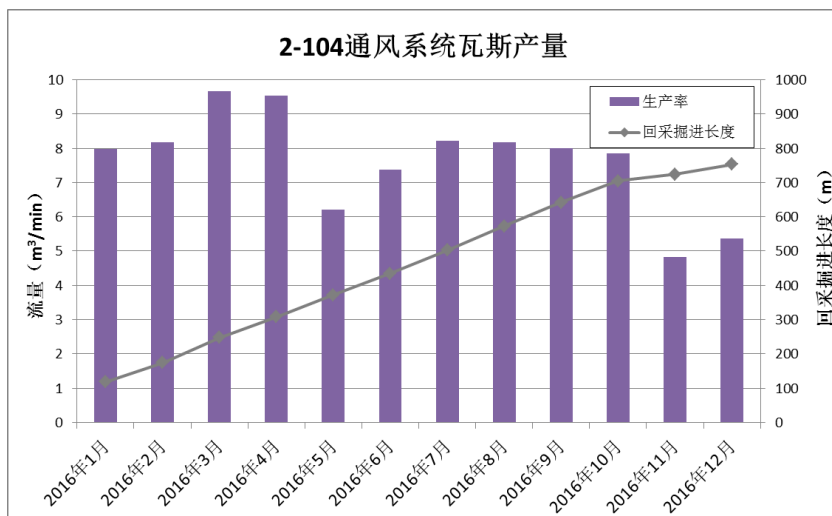


图 3-17: 2-104 工作面回采期间进入通风系统中的瓦斯量

3.3.4 2-104 工作面瓦斯总排放量

2-104 工作面在回采期间释放的瓦斯平均总流量为 $14.7 \text{ m}^3/\text{min}$ ，如图 3-18 所示。排放瓦斯通常 50%为本煤层抽采捕获，而 50%则被排放到通风系统中。2-104 工作面的平均整体瓦斯抽采效率为 48%，如图 3-19 所示。

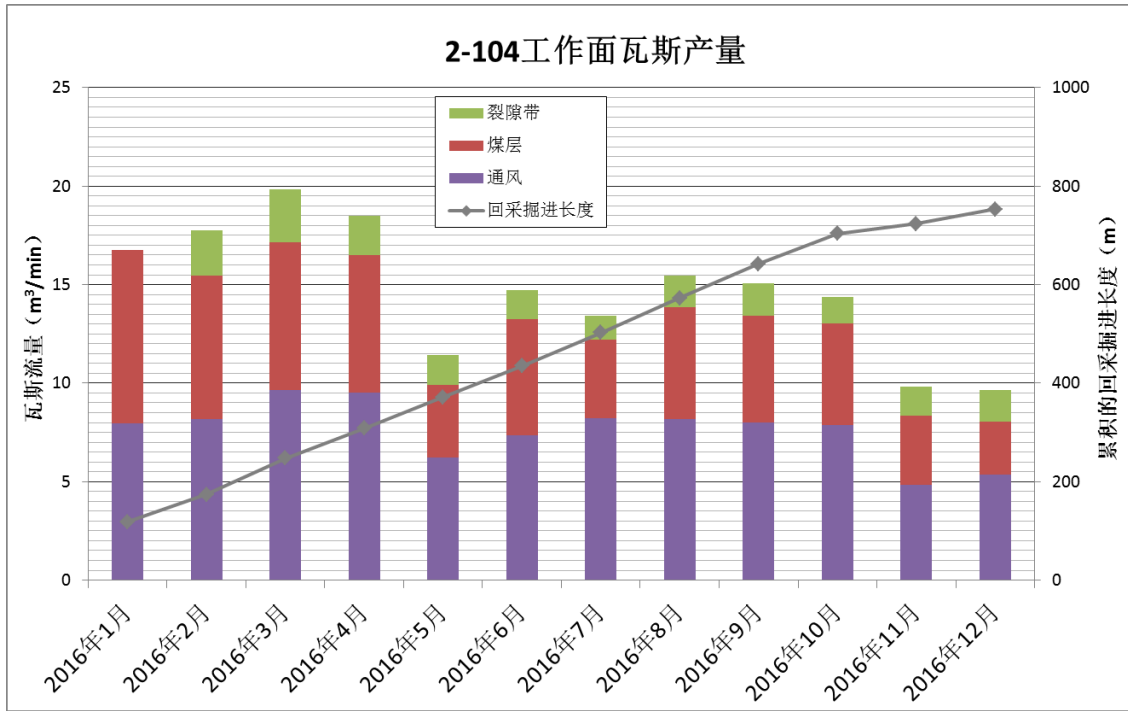


图 3-18: 2-104 工作面瓦斯排放总量

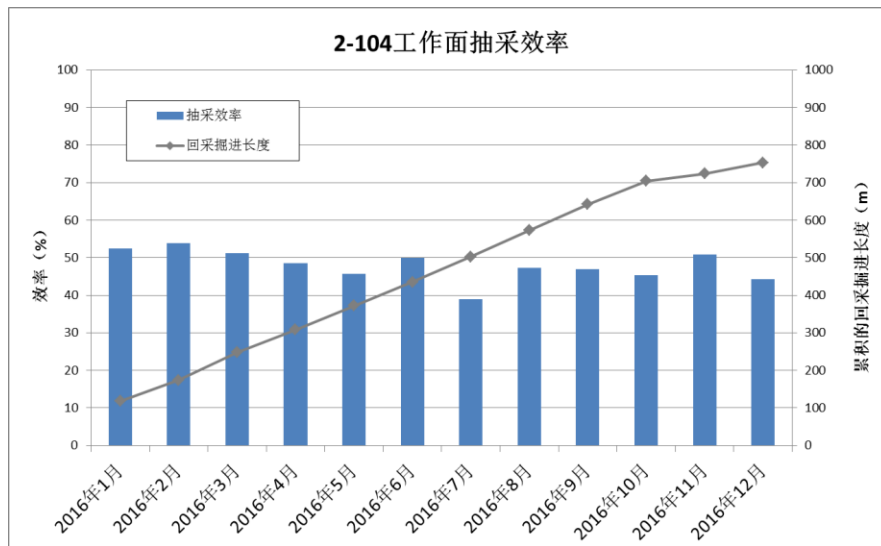


图 3-19: 2-104 工作面瓦斯抽采效率

3.3.5 2-104 工作面瓦斯涌出量分布情况

图 3-20 显示了 2-104 工作面在不同回采阶段瓦斯涌出量与煤矿总涌出量的比较。平均而言，2-104 工作面瓦斯涌出量平均占矿山瓦斯总涌出总量的 45%，当然，个别月份占的比例不到 25%，而在其他月份，特别是在生产开始时，最多占的比例可达到 75%。

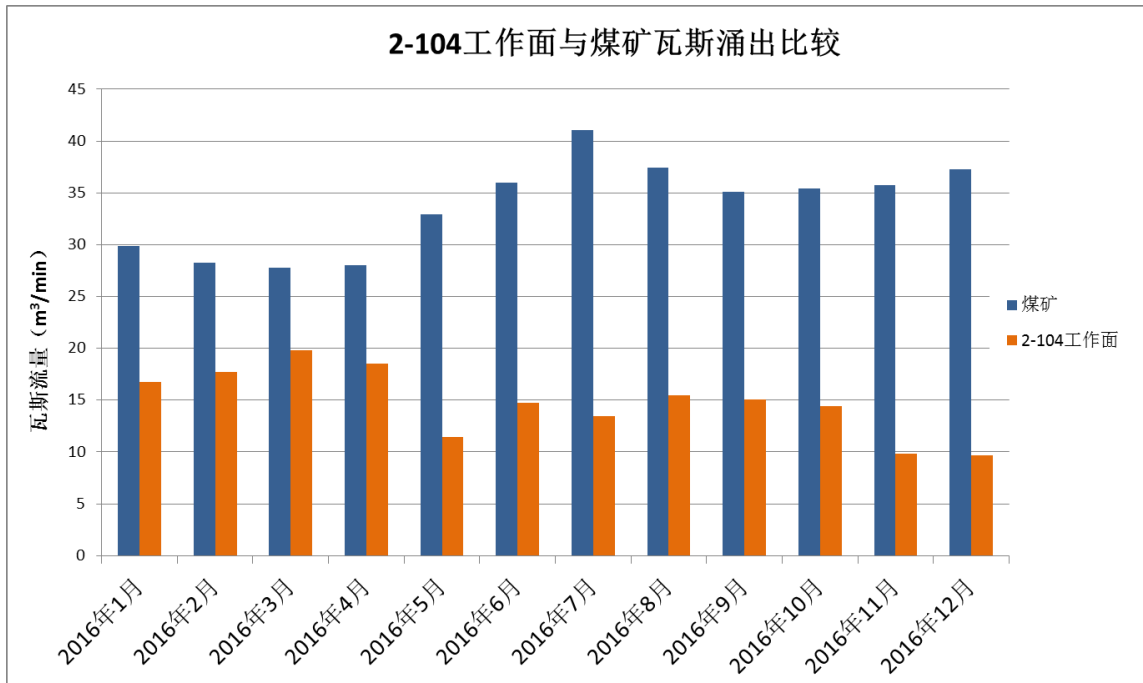


图 3-20: 2-104 瓦斯涌出量与煤矿总的瓦斯涌出量的比较

这一趋势也表明，煤矿瓦斯主要来源于：巷道施工、巷道施工前的钻孔、密闭区域、裸露煤层及运输中的原煤。

3.3.6 瓦斯涌出平衡

作为准备预可行性研究培训的一部分，井下瓦斯涌出平衡由山西焦煤集团来制定。取样日期为 2016 年 5 月 10 日，并制定了如图 3-21 所示的平衡图。这包括整个矿井通风系统中瓦斯浓度和气体流量的所有可用数据，以及当天的瓦斯抽放数据。目的是得出矿井每个工作区域的瓦斯涌出量，包括由本煤层钻孔抽采的瓦斯和排放到通风系统中的瓦斯。

2016年5月10日的平衡数据汇编在表3-1中，并且总的瓦斯涌出量接近 29 m³/min。

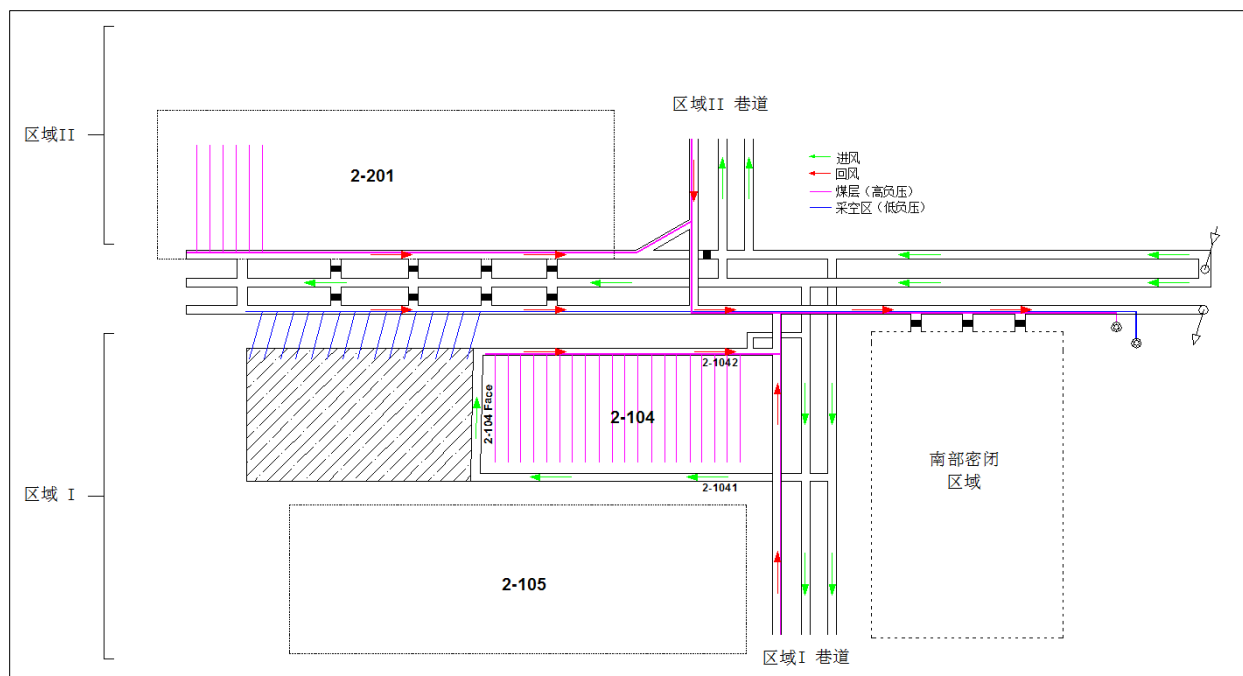


图 3-21: 煤矿瓦斯涌出平衡图

2016年5月16日			
区域		涌出量 (m ³ /min)	
区域I主巷道	进风	3.83	3.83
区域I通风	2-104 支巷及通道	2.48	8.42
	2-104 回采面	5.52	
	主巷道	0.42	
区域I抽采	2-104 本煤层	2.14	4.19
	2-104 采空区	1.35	
	主巷道	0.70	
区域II通风	2-201 支巷及通道	0.13	0.32
	主巷道	0.19	
区域II抽采	2-201 本煤层	9.72	10.47
	主巷道	0.75	
南部密闭区域通风		1.29	1.29
其它通风		0.25	0.25
经通风总涌出量		14.11	
经抽采总涌出量		14.66	

表 3-1: 腾晖煤矿 2016 年 5 月 10 日日瓦斯涌出量统计

5月10日数据分析表明，2-104工作面的瓦斯涌出量（通风和抽排）占煤矿总量的40%（类似于图3-22所示结果）。

3.3.6.1 涌入通风系统中的瓦斯

由于2-104工作面回采过程中的煤炭切割和顶部崩落，瓦斯会涌入通风系统，它占总通风瓦斯排放量的40%，约占煤矿总瓦斯排放量的20%。

占煤矿总瓦斯涌出量20%的瓦斯会经过进风巷经过回采区域（区域I和区域II），再从回采区域进入回风巷。瓦斯主要来源于裸露的煤层表面及支撑，硐室及输送过程中的原煤。作为平衡，占煤矿总涌出总量80%的瓦斯来自回采区域，即区域I和II。

3.3.6.2 抽采的瓦斯

根据2016年5月10日数据，从2号煤层的经采区域I和II的采前预抽收集到大部分的瓦斯（84%）。特别是II区内的未来2-201工作面的本煤层钻孔（87%）。

3.3.6.3 煤矿瓦斯涌出分布

2016年5月10整个煤矿各区域瓦斯分布如图3-22所示。

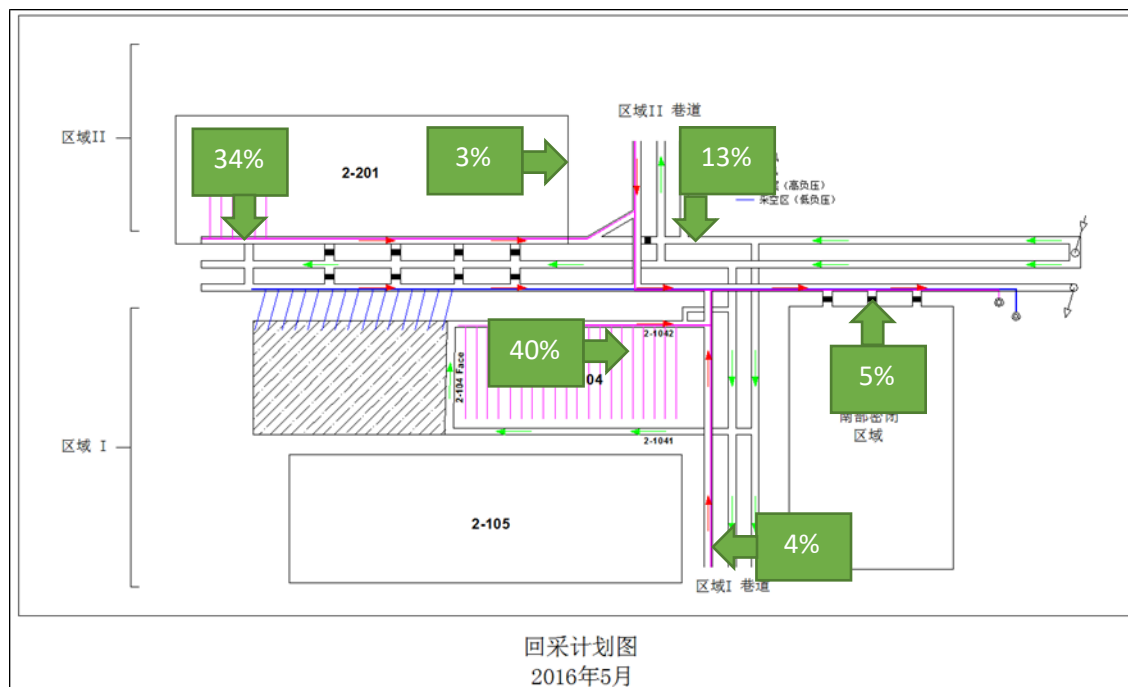


图 3-22: 矿井不同工作区域瓦斯涌出分布

3.4 观察和建议

以下观察和建议来自对煤矿的实地考察和可用数据的分析，包括过去三年的回采和瓦斯抽采计划、瓦斯抽采系统设计、井下气体收集系统中记录的瓦斯流量和浓度及通风系统中统计的生产数据。

3.4.1 煤矿瓦斯涌出量

平均每日矿井瓦斯涌出总量为 53,280 m³/d。吨煤瓦斯涌出量为 15.5 m³/t。从高瓦斯矿井的角度来看，这个矿井的涌出量应该超过这个数量的 5 到 10 倍，因此腾晖煤矿并不是超高瓦斯矿井。据报道，2 号煤层的平均原煤瓦斯含量为 9.2 m³/t，而 10 号则为 7.7 m³/t。这些数据不足以定义该矿井为高瓦斯矿井。2 号煤层非常厚 (4.9-7.5m)，需要通过采前预抽来降低瓦斯含量，以便简单回采作业时保证合理的生产率，如：目前所采用的底层回采，顶层崩落方法。

3.4.2 瓦斯涌出源分析

矿山大部分的瓦斯来源于 2 号煤层。矿井中 46% 的瓦斯来自 2 号煤层的钻孔，2 号煤层回采过程中释放的瓦斯占 20%，20% 的矿井瓦斯进入到矿井的通风系统（不含正在回采的工作面）。采空区瓦斯不到 5%，这可能是来自于回采中顶部崩落而留下的残余煤层，而非上部的有限的含气层。

煤矿在进行回采期间从煤层上下岩层产生的瓦斯一般大于来自原煤中的瓦斯。腾晖煤矿的情况是，2 号煤层回采中的数据非常接近（1.6 倍以上）。

3.4.3 降低瓦斯含量

2 号煤层的渗透率低，这可以从矿方做过的试验可以看出这一点。因此采用了巷道施工前的预抽及本煤层预抽，以及密集的本煤层钻孔（2 至 4 m 间距）。

2-104 工作面大约有 250 个平均长度为 165m 的本煤层钻孔。测量的瓦斯流量为 8.7 m³/min（2016 年 1 月，图 3-22）。这相当于每个钻孔的瓦斯平均流量为 0.035 m³/min，每个钻孔每 m 的平均瓦斯流量为 0.0002 m³/min。相比之下，中等渗透率的煤层中每米煤层钻孔的瓦斯流量将是该数值的 10 倍。

为了在 6 个月内将气体含量降低 30%，矿方每隔 4m 进行本煤层钻孔。这需要大量的钻孔，每 1000m 工作面 250 个，这带来 250 个潜在的空气引入点，特别是在高负压

抽排时。另一种方案是，可以在工作面巷道施工前的入口处进行本煤层水平定向钻孔，这样可以保证更长的排放时间及更大的钻孔间距。这将显著减少钻孔的总长度，同时也减少潜在的泄漏点的数量，提高生产管理水平。

3.4.4 采空区瓦斯抽排

在回采过程中，矿方投入了大量精力来抽采来自于采空区的少量瓦斯。对于 2-104 工作面，采空区瓦斯涌出不到煤矿瓦斯涌出总量的 5%。采空区瓦斯抽排的关键是通风系统的效果。在高负压下，空气流量达 98 m³/min 的通风系统，在工作面上方形成一负压区，这有助将气体抽离回采工作区或巷道内的瓦斯监测器区域。

矿方使用目前实施的通风系统系统，并需要 500 个钻孔，及 500 个孔口联接、重要的井下基础管道设施来控制监测点附近的瓦斯浓度。矿方应对现在的通风和抽采系统就有效性和经济性进行分析，以实现两个系统的优化。

为了从采空区作业实现类似的效果，可以通过采空区高位水平定向钻孔（HGB），在回采作业前，由工作面入口处向上，沿着工作面的纵向钻入顶部的突出碎石区域之上，以取代目前的 500 个钻孔。HGB 是裂隙带钻孔的有效替代品，并且在中国和澳大利亚普遍应用，偶尔在美国应用。单个 HGB 钻孔只有一套井孔装置，最高可抽采达 6 m³/min 中等质量的瓦斯，成本远低于现行做法。

3.4.5 井下气体管理

通过实施井下水平定向钻孔和采空区高位水平定向钻孔（HGB）方案，最大限度地减少钻孔数量，将有助于井下气体收集系统的性能监测和控制。需要对存在负压的孔口进行监测，然后根据气体质量和气体产量的测量结果进行控制，以优化系统性能并防止瓦斯和空气中爆炸性混合物的输送。当然，这可以通过人工例行操作，也可以通过经防爆认证的自动控制系统来完成。

经过防爆认证的自动化系统还可以控制在高负压下集气管道中的积水，以减少故障并提高整体系统性能。

采用高密度聚乙烯(HDPE)管道，可以提前或在井下入风口处进行熔接，以取代现有的法兰+密封联接。这将进一步减少空气侵入井下集气管道的潜在侵入点数量，提高回收的气体质量。

现代集输管线可以完全实现监控，并可分段实现，如果出现采矿设备或顶板掉落而产生的破坏事故，则会马上隔离不同区域。通常，管路与加压管道连接，管路结合处与气动阀门连接。当管路出现故障并失压是，能将管路分段自动关闭。

4 瓦斯抽采和利用改进建议

按照建议的本煤层和采空区抽采方案将会提高瓦斯抽采效率、改善回收的气体质量、降低瓦斯抽放成本，并增加气体的附加值。

这些建议是基于对矿井的实地考察及现有数据经过上述评估后所得。

4.1 本煤层瓦斯抽采方案建议

定向钻进提供了本煤层瓦斯抽采的解决方案，可减少井孔和潜在漏气点的数量，并提供更长的抽放时间，以进一步减少残余气体含量。

建议通过水平定向钻进方案进行采前预抽，而不是在回采前或回采中施工专门的硐室。

长的水平定向钻孔可以在主要巷道入口处施钻，钻进方向与回采方向平行，也可以在巷道开挖前进行施工。而采用传统的螺旋钻进，一是必需横向钻进，二是必需等到在巷道开挖结束后才可施钻。

4.1.1 定向钻进方案

采用定向钻进方案进行采前预抽，以减少 2 号和 10 号煤层的气体含量，这一定需要详细了解未来的开采计划。钻孔设计时需要考虑到矿山的基础设施（钻孔位置）、瓦斯排放时间、钻孔间距、气体含量降低要求和正确的套管安装方法。

4.1.1.1 钻孔设计

煤层内定向钻孔可以从主副巷道施钻，也可以在巷道施工前进行。钻孔需要根据抽放的时间和残余瓦斯含量的目标值来进行设计。矿方可以根据使残余气体含量减少 30% 的目标所需的间距来设计长距离水平定向钻孔。基于第 3.1.1 节中介绍的 2 号煤层现行实践所获得的理论瓦斯降低值，可作为一个良好的开端。

4.1.1.2 钻孔套管

在实施定向钻孔方案时，可以从单一入口钻出多个分支钻孔，这大大减少了所需的井孔数量。这样就可以花更多时间安装适当长度的套管，使其置中，并有效地灌浆到位。还可以进行压力测试以维持 1.5 倍的关井压力。显著减少孔口数量将有助于后续气体的收集管理，从而提高瓦斯浓度和流量，最终达到对抽采系统的整体优化。

4.1.1.3 邻近煤层

为了最大限度地增加钻孔间距、减少抽放时间和降低瓦斯含量，并最大限度地减少钻孔数量，可以通过定向钻进方式在 10 煤层（2 号煤层以下 43 至 52m）回采前的几年从目前的 2 号煤层施钻。在这个方案中，煤层定向钻孔穿过岩层进入 10 号煤层，与竖井贯通，如图 4-1 所示。这些竖井位于矿井内部，由 2 号煤层延伸到 10 号煤层下方。采用磁矢量拦截技术实现定向钻孔与竖井的贯通。该方案涉及使用精准的随钻测量系统及磁导技术。由于导向系统具有一定的方位角误差（通常为 ± 1 度），因此需将旋转磁体放置在钻头后部，并在竖井中放入传感器，以实现引导。几个水平定向钻孔可与单个竖井贯通。竖井下的泵站可以用来收集地下水和钻液。所有的水和瓦斯收集基础设施将安装在 2 号煤层。

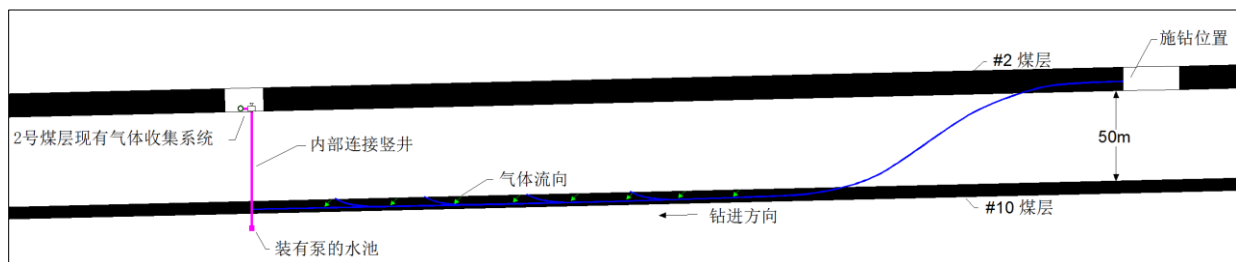


图 4-1： 10 号煤层本煤层抽采方案剖面图

4.1.2 未来的开采计划

为了制定煤矿的瓦斯抽采计划，根据矿方的规划信息生成了未来 10 年的回采计划，并假设开采率和开采技术不变。

4.1.2.1 2 号煤层计划

目前，该矿每年生产约 120 万吨原煤，全部来自 2 号煤层。到 2020 年的长壁回采工作面已由矿方确定，并提供了尺寸（表 4-1）。按相同的生产率推算，到 2024 年，新增两个工作面，之后 2 号煤层将回采完毕，如图 4-2 所示。

4.1.2.2 10 号煤层计划

假设在未来 10 号煤层开采过程中能保持现有的回采率，如图 4-3 所示，到 2029 年，经过推断，总共会有五个工作面。

工作面	宽 (m)	长 (m)
2-203	100/60	922
2-202	165	1,170
2-206	78/100/128/170/200	1,372

表 4-1: 2 号煤层待采工作面尺寸

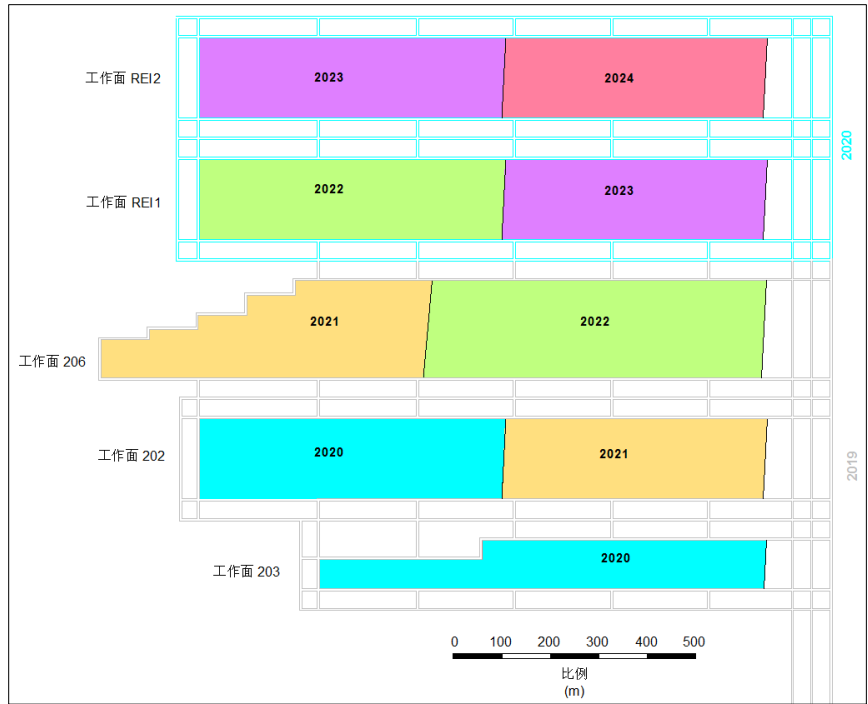


图 4-2: 2 号煤层后续回采预测

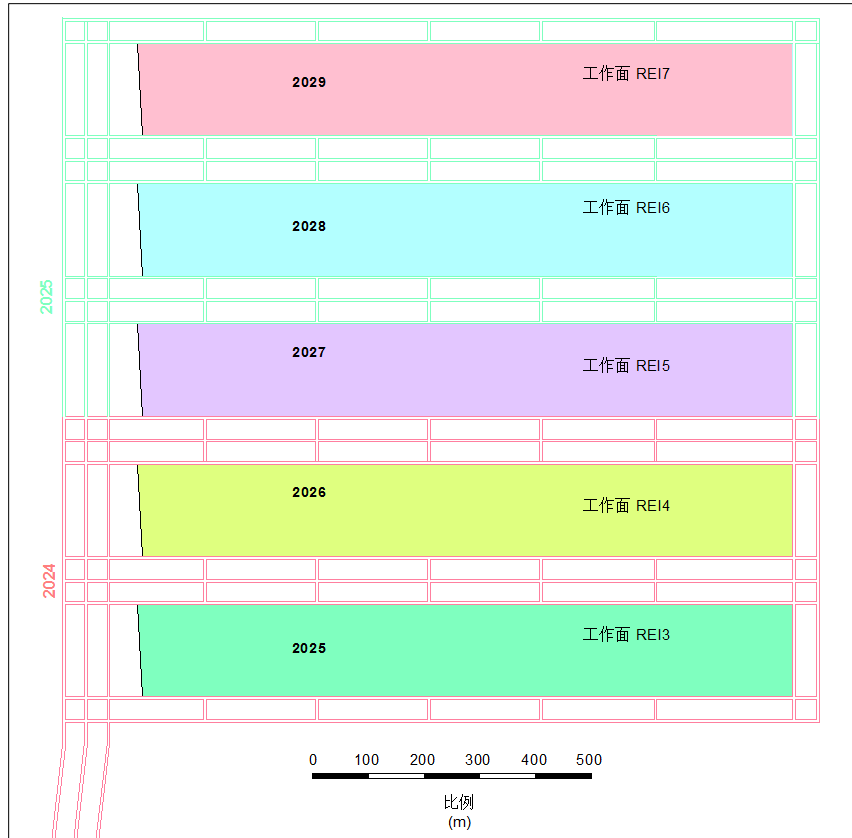


图 4-3：10 号煤层后续回采预测

4.1.3 现有煤层钻孔与储层建模结合

利用储层建模以协助制定煤层瓦斯抽采计划。用于这项工作的所有定量模型都是基于最初的相关储层模型。

4.1.3.1 储层模拟软件

“COMET2”是由先进资源国际公司（ARI）开发的三维两相有限差分储层裂隙模拟软件。该模型模拟了瓦斯流通过煤的三个过程：从煤表面的微孔解吸，到煤体裂隙，再到夹层和天然裂缝进行扩散，达西流经过这些夹层和天然裂缝后，压力耗尽。

4.1.3.2 关联储层模型

开发的原始储层模型，将瓦斯流量和气体浓度下降与时间以函数关联起来，理论上可以预测来自于矿方完成的本煤层钻孔瓦斯产量。

使用 2 号煤层的可用储层特征参数和用近似或类似的输入数据进行相关模拟，以模拟和匹配图 3-3 所示的单一本煤层钻孔的理论瓦斯产量下降曲线。储层模型取样边界在井

孔左右 2m 处，做为零流动边界。模型每侧的相邻钻孔间隔为 4m。取样长度是 2-104 工作面的宽度。图 4-4 和 4-5 分别表示其平面图和剖面图。

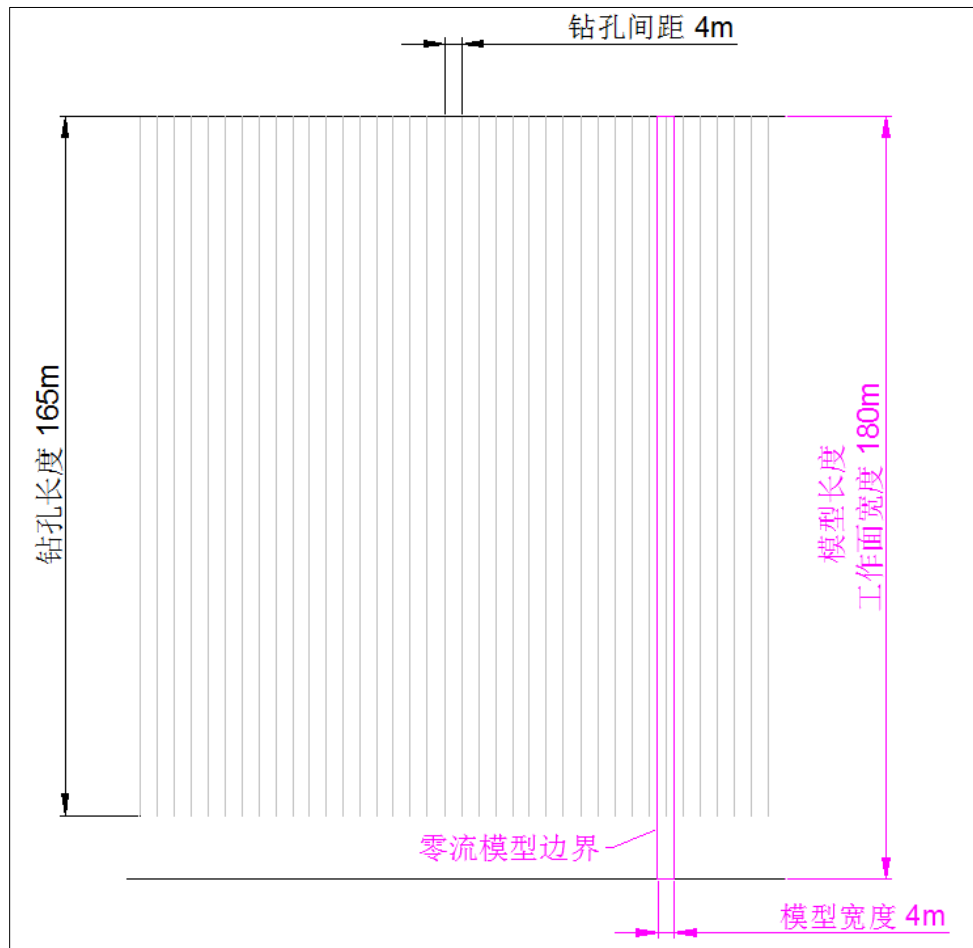


图 4-4: 2 号煤层关联模型平面图

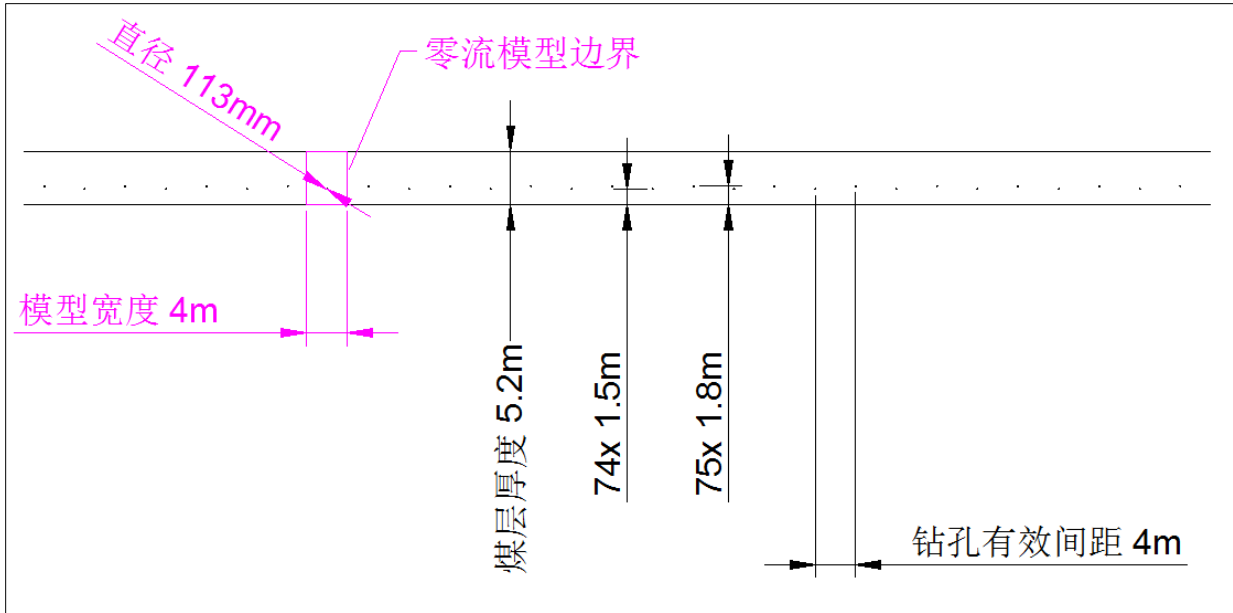


图 4-5: 2 号煤层关联模型剖面图

4.1.3.3 储层核心参数

调整储层核心参数，直到单一本煤层钻孔的瓦斯生产率与理论预测的生产率相匹配。

如图 4-6 所示，预测的理论生产率与排放时间互为函数。

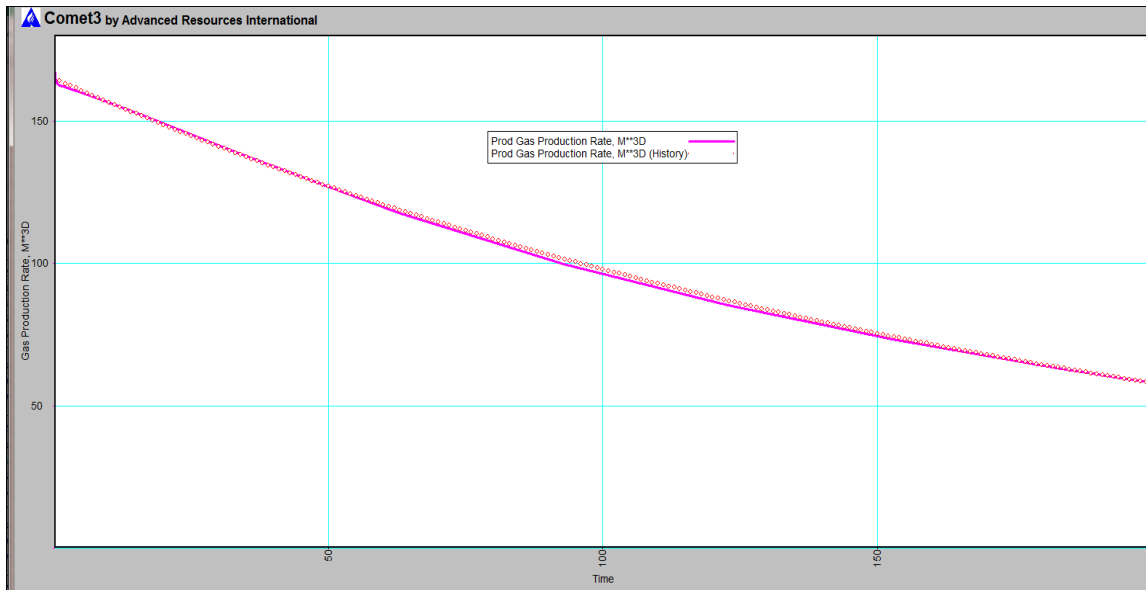


图 4-6: 间隔 4m，165m 深的单一本煤层钻孔瓦斯生产率匹配曲线

在表 4-2 中给出了建模过程中，为了实现匹配进行调整的核心储层参数的值。

参数名称	数值
渗透性（各向同性）	.075 mD
层间孔隙度	1.70%
吸附时间	10 days
朗缪尔体积	48.23 m ³ /m ³
朗缪尔压力	2,000 kPa
压力梯度	9kPa/m

表 4-2: 2 号煤层的核心储层参数

4.1.4 钻孔间距与排放时间的关系

利用从关联模型得到的储层核心参数，建立多个储层模型，以模拟沿着与回采方向平行的方向的不同间距的煤层钻孔。目的是在不同的钻孔间距下，实现 30%残余瓦斯含量目标，最终得到所需的抽放时间。

4.1.4.1 储层模型

为模拟 1000m 长 96mm 直径定向钻孔而创建的模型的平面图和剖面图分别如图 4-7 和 4-8 所示。与关联模型一样，沿钻孔两侧创建零流边界，使得储层模型取样宽度等于钻孔间距。除了煤层厚度、深度和储层压力之外，经过对 2 号煤层进行的相关模拟得到的储层特征被用于建立 10 号煤层的储层模型。

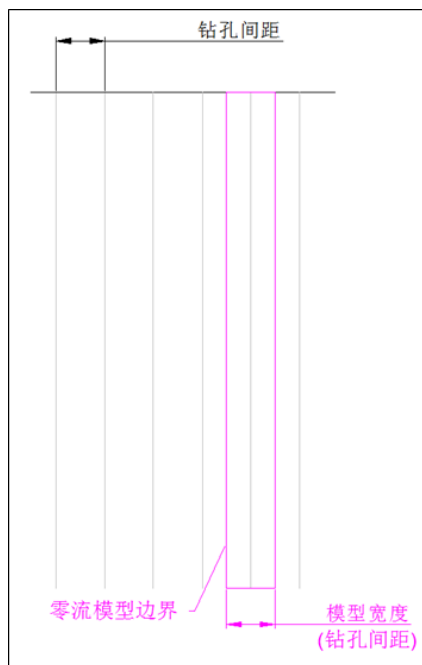


图 4-7：长钻孔间距模型平面图

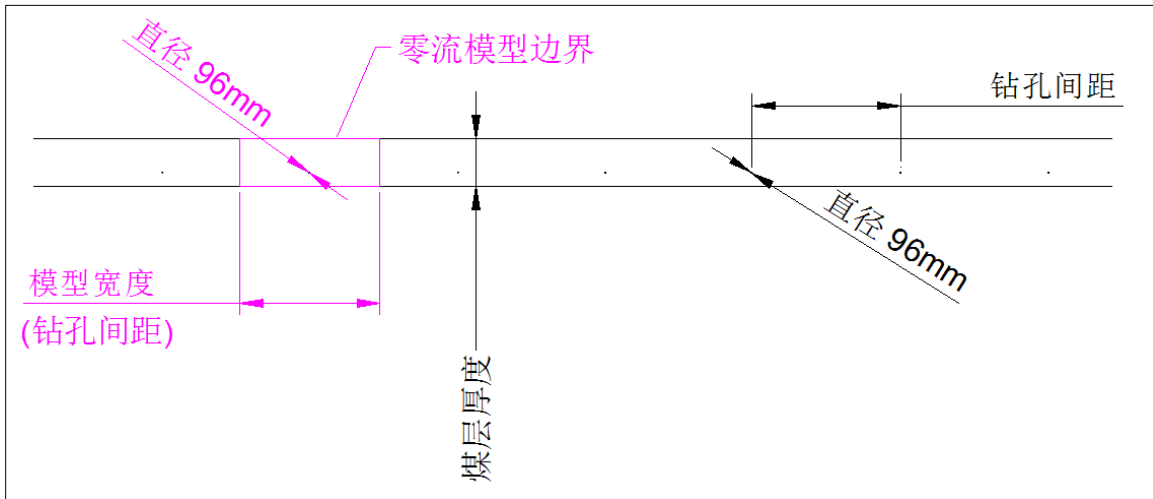


图 4-8：长钻孔间距模型剖面图

4.1.4.2 本煤层钻孔瓦斯产量预测

储层模型假定 1000m 的本煤层钻孔，在 2 号煤层中间隔分别为 8.5、12、16、20、24 和 40m，在 10 号煤层中则间隔分别为 37、47 和 57m。模型以瓦斯流量和含量做为时间（5 年时间）的函数，如图 4-9 和 4-10 所示，分别为 2 号和 10 号煤层。在此期间，将残留瓦斯减少 30%，不同的钻孔间距下，所需的排放时间和平均瓦斯流量见下表表 4-3 和 4-4 中，分别表示 2 号和 10 号煤层。

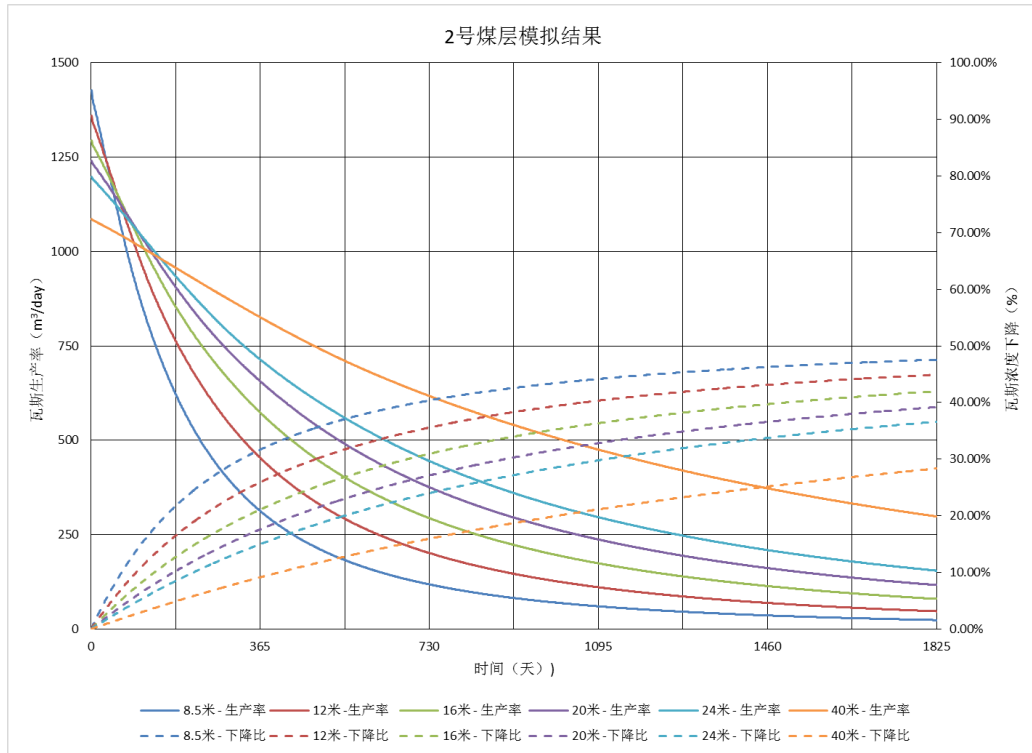


图 4-9: 2 号煤层中不同钻孔间距下瓦斯含量下降分析

间距 (m)	时间 (Year)	瓦斯浓度下降 (%)	平均瓦斯流量 (m3/day)
8.5	1	30	686
12	1.5	30	651
16	2	30	639
20	2.5	30	627
24	3	30	618
40	5	50	590

表 4-3: 2 号煤层抽放时间、瓦斯平均产量和钻孔间距

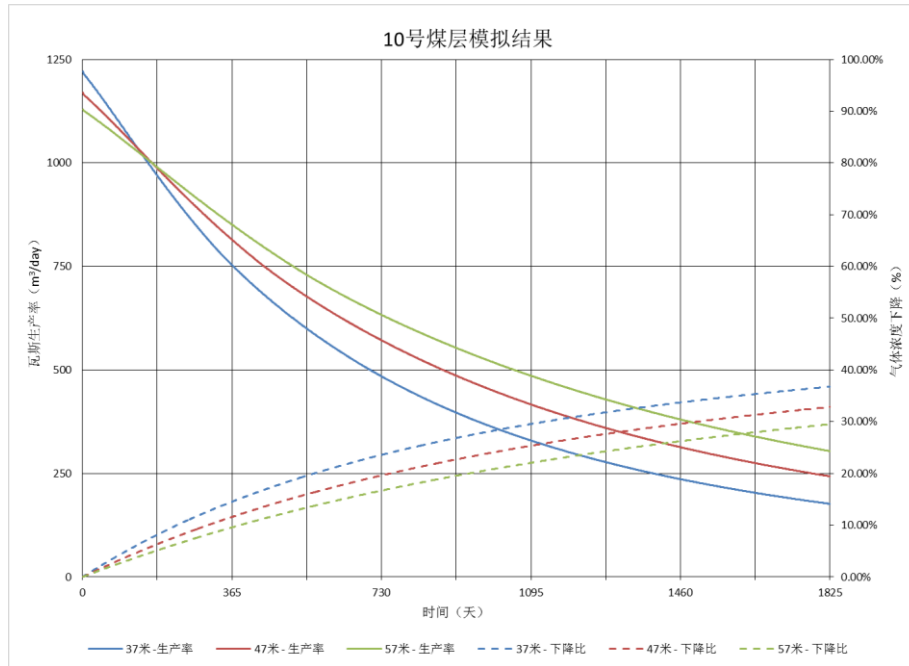


图 4-10: 10 号煤层中不同钻孔间距下瓦斯含量下降分析

间距 (m)	时间 (years)	瓦斯浓度下降 (%)	平均瓦斯流量 (m ³ /day)
37	3	30	654
47	4	30	626
57	5	30	606

表 4-4: 10 号煤层抽放时间、瓦斯平均产量和钻孔间距

4.1.5 2 号和 10 号煤层的采前瓦斯预抽方案

基于对不同的钻孔间距进行的模拟，制订了未来 2 号和 10 号煤层的本煤层定向钻孔方案。

4.1.5.1 2 号煤层

根据图 4-2 所示的 2024 年的 2 号煤层开采计划，设计了先于主巷道、通道及工作面回采前的长距离定向钻孔。通过比较基于开采计划的瓦斯抽采时间要求及残余瓦斯含量减少 30% 的目标，得出了合理的定向钻孔间距，见图 4-9 和表 4-3。本预可行性研究假设定向钻孔将于 2019 年开始施工，在主要巷道施工前的入口处，顺着 203 两侧进行钻孔，以减少工作面的瓦斯含量。根据矿方的回采和抽采计划，为了获得最短的抽排时间，需要 8.5m 的钻孔间距，如图 4-11 所示。随着定向钻孔的开始及允许更长的抽排时间，

钻孔间距增加，最大限度地减少了后期的年度钻孔总量。表 4-5 中所示不同时期的钻孔间距。总体而言，2 号煤层总共需要 72,000m 的采前预钻孔量，所有钻孔都可以从 32 个主孔通过开分支来完成。

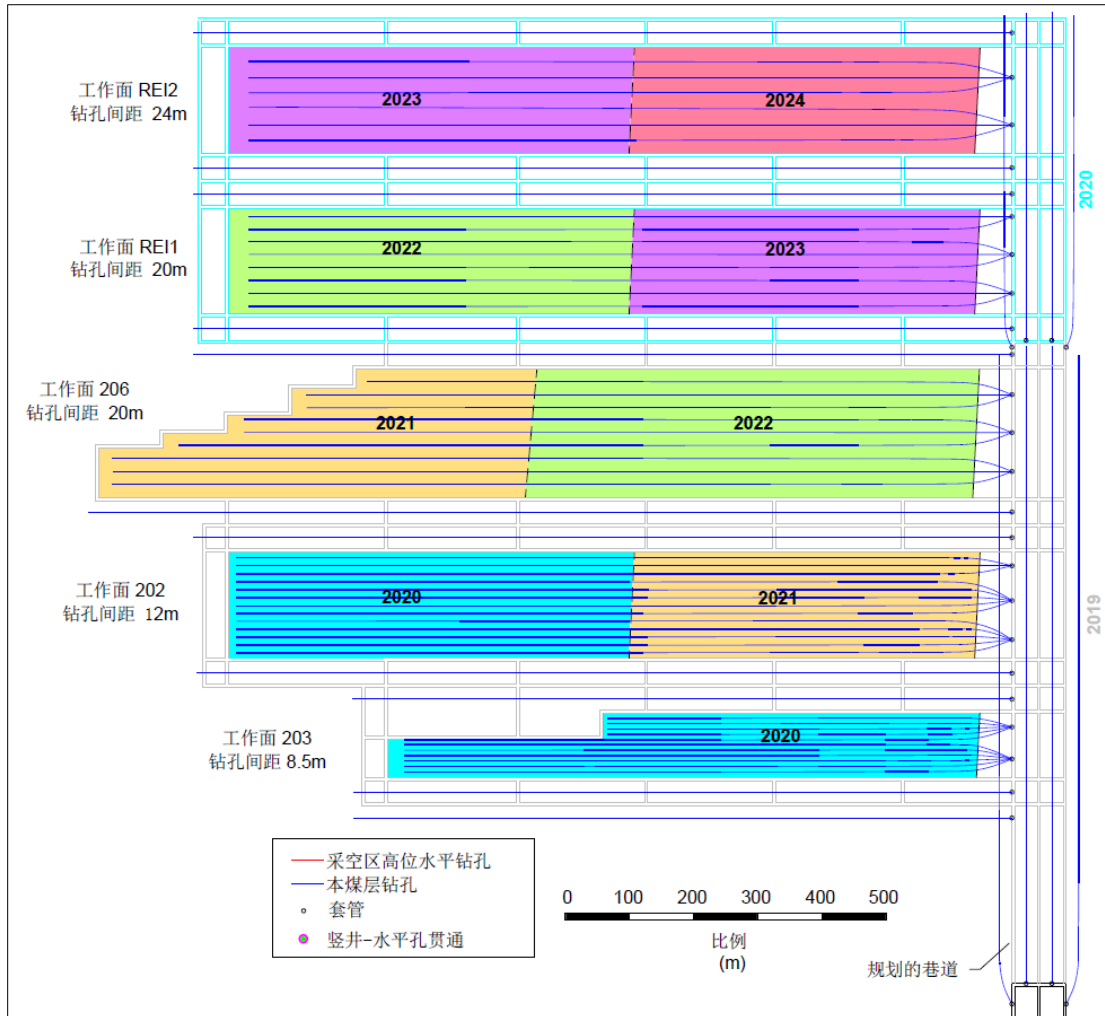


图 4-11: 2 号煤层本煤定向钻孔平面图

2号煤层本煤层定向钻孔量		
年	区域	年钻进量 (m)
2019	主要巷道	4,000
	203工作面	12,230
	202工作面	18,271
	206工作面	12,552
2020	主要巷道	2,055
	REI1工作面	12,069
	REI2工作面	9,688

表 4-5: 2 号煤层采前定向钻孔预测计划

4.1.5.2 10 号煤层

图 4-12 显示了 2025 年至 2029 年间 10 号煤层长壁工作面的采前瓦斯预抽计划。预可行性研究建议在 2 号煤层工作区域向 10 号煤层钻本煤层定向孔，以增加排放时间。这可以在 2021 年开始，使用第 3.1.1 节 (图 3-1) 中提出的与竖井贯通的方案进行。因有足够长的时间抽排，钻孔间距可以大到 47 至 57m，以达到残余气体含量减少 30% 的目标。

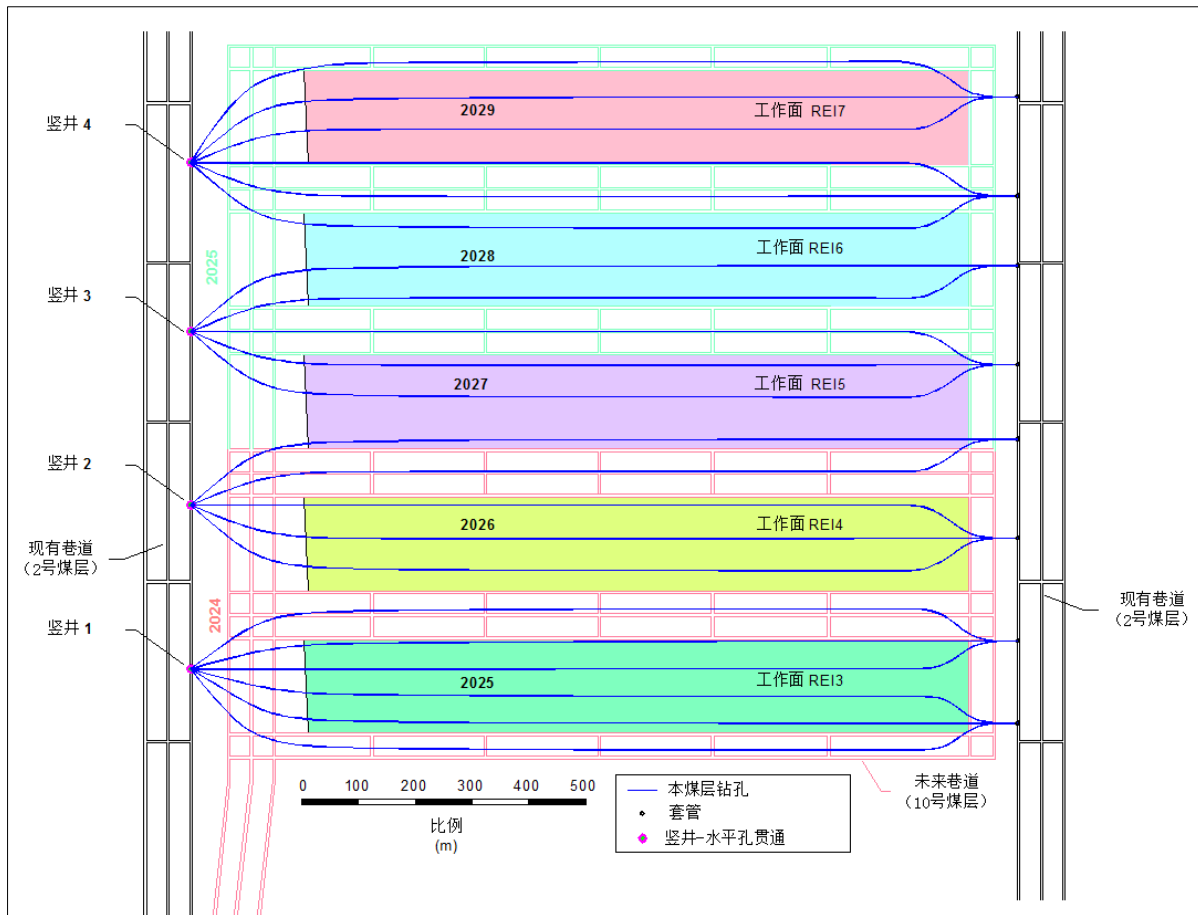


图 4-12: 10 号煤层本煤定向钻孔平面图

预可行性研究假设 10 号煤层的第二个长壁回采区由六个工作面组成，类似于图 4-12 所示。从 2 号煤层进行瓦斯预抽采钻孔是可行的，并可持续到 2029 年。预计到 2029 年 10 号煤层的本煤层定向钻孔总长度为 66,000m，包括：22 个主孔和 7 个竖井，40 次贯通。10 号煤层预采定向钻孔计划见表 4-6。

10号煤层本煤层定向钻孔量		
年	区域	年钻进量 (m)
2021	REI3工作面	7,312
	REI4工作面	5,840
	REI5工作面	2,974
2022	REI5工作面	4,427
	REI6工作面	4,423
2023	REI6工作面	2,947
	REI7工作面	5,944
2024	REI8工作面	4,445
2025	REI9工作面	4,445
2026	REI10工作面	4,445
2027	REI11工作面	4,445
2028	REI12工作面	4,445
2029	REI13工作面	4,445

表 4-6: 10 号煤层本煤层定向钻孔计划表

4.2 采空区瓦斯抽采建议

建议采用采空区高位水平定向钻孔 (HGB), 从工作面入口的煤层向上, 沿着回采方向, 钻入顶部的低压裂隙带。采用这种方法, 钻孔长约 1,000m, 并且可以从主孔开多个分支孔。目的是将 HGB 布置在崩裂带上部, 因其在工作面回采时能保持完整性。另一方面, 沿着工作面的边缘布置, 因为在回采时地层将处于拉伸状态, 而非布置在工作面中心, 在回采时处于挤压状态。总的目标是创建一个远离工作面回采入口的低应力区, 以吸收已经受到回采诱发裂缝的上部覆盖地层产生的瓦斯, 如图 4-13 的概念图所示。

注意套管本身质量, 并要求居中和浇灌到位, 进行压力测试以承受 1.5 倍的应急关闭压力。采空区高位水平定向钻孔可以钻到更大的直径以增加抽采效果, 保持开孔, 或在整个长度下筛管, 以保持井眼的稳定性。

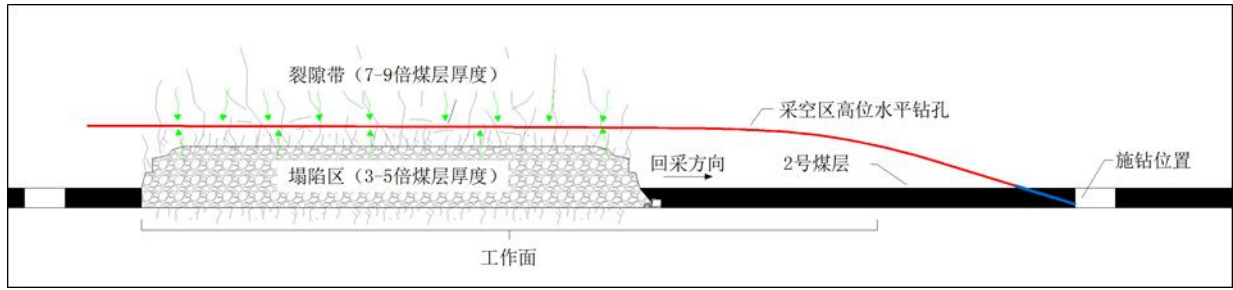


图 4-13: 采空区高位水平定向钻孔方案剖面图

4.2.1.2 2号煤层采空区瓦斯抽采方案

本预可行性研究中提议用采空区水平定向钻孔来取代当前采用的高低裂隙带钻孔，以保证相同的瓦斯生产量。与现行做法相比，这种方法将大大减少整体钻孔数量及和瓦斯收集基础设施的投入。由于只需要一套主管（孔口负压与气体生产率和气体质量密切相关），通过采空区水平钻孔方案抽采的瓦斯质量将远高于现行做法所抽采的瓦斯质量，估计空气中瓦斯体积比可达到 60-70%。

4.2.1.1 采空区气体流量

采空区水平钻孔的气体流量与气体构成、钻孔直径和井口负压大小有关。一般通过实际现场采集的测量值来进行经验分析，并使用下面给出的经验公式来估算。图 4-14 和 4-15 是使用下述相同的经验公式，基于混合气中瓦斯气体体积含量为 70%的假设，1000m 的水平钻孔，不同的井口负压值及钻孔直径的计算结果。

采空区水平钻孔流量:

$$Q = 1.3303 (10)^{-5} \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{GT_f LZ f} \right]^{0.5} D^{2.5}$$

式中:

Q = 在标准条件下所测得气体流量, l/s

f = 摩擦系数, 无单位

P_b = 基层 (标准) 压力, kPa

T_b = 基层 (标准) 温度, K

P_1 = 上游压力, kPa

P_2 = 下游压力, kPa

G = 气体比重 (空气 = 1.0)

T_f = 平均气流温度, K

L = 管道长度, km

孔口负压为20千帕时1000米的采空区高位水平钻孔气体流量
(空气中瓦斯体积比70%)

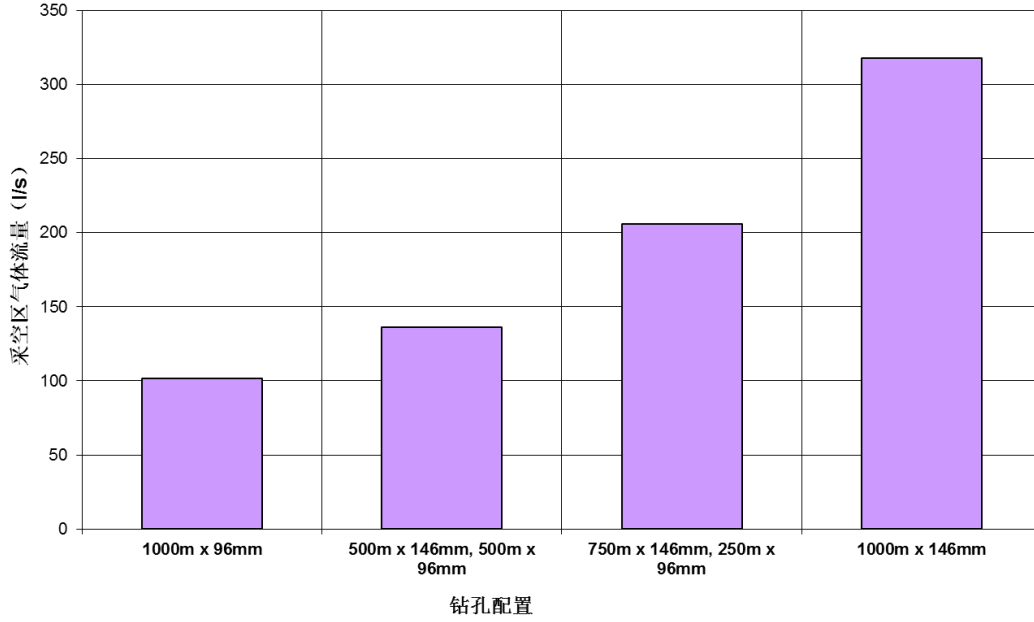


图 4-14: 井口负压为 20kPa 时不同钻孔长度与钻孔直径组合时的气体流量
(空气中瓦斯体积比 70%)

不同负压下1000米的采空区高位水平钻孔 (96mm直径) 孔口的气体流量
(空气中瓦斯体积比70%)

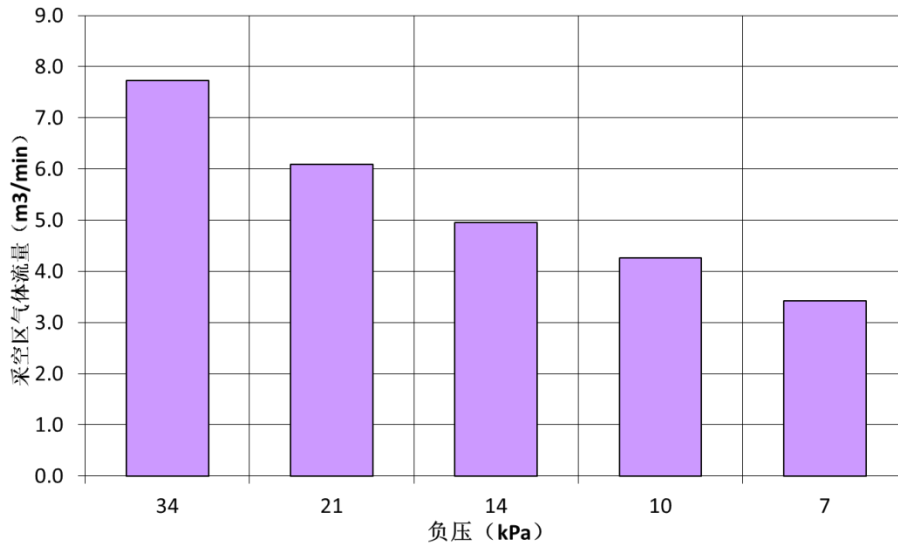


图 4-15: 采空区水平钻孔 1,000 m x 96 mm 时, 不同井口负压的气体流量 (空气中瓦斯体积比 70%)

4.2.1.2 2 号煤层新方案的应用

根据 2-104 工作面的历史数据, 近 500 个煤层钻孔 (上下交错, 每 4m 间隔) 的最大月平均瓦斯生产率为 $2.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。如图 4-14 所示, 一个直径为 96 mm 的采空区水平钻孔, 在井口负压为 20 kPa, 空气中瓦斯体积比 70% 的假设条件下, 采空区气体流量为 100 l/s 或 $6 \text{ m}^3/\text{min}$, 其中瓦斯流量 (产量) 为 $4.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 。这接近于为 2-104 工作面实际测量的最大平均月瓦斯生产率的两倍。这项预可行性研究中假定一个直径为 96mm 的采空区水平钻孔, 在 20 kPa 的井口负压条件下, 将足以抽采来自采空区覆盖层或残余煤层的瓦斯。2 号煤层采空区抽采规划, 见下图 4-16。

新方案与现行的高低位裂隙钻孔相比, 不利于让在回采切割和顶部崩落期间释放的瓦斯远离工作面及入口处的瓦斯监测点。这可以通过 3.4.4 节的建议改进现有的通风措施得以解决。

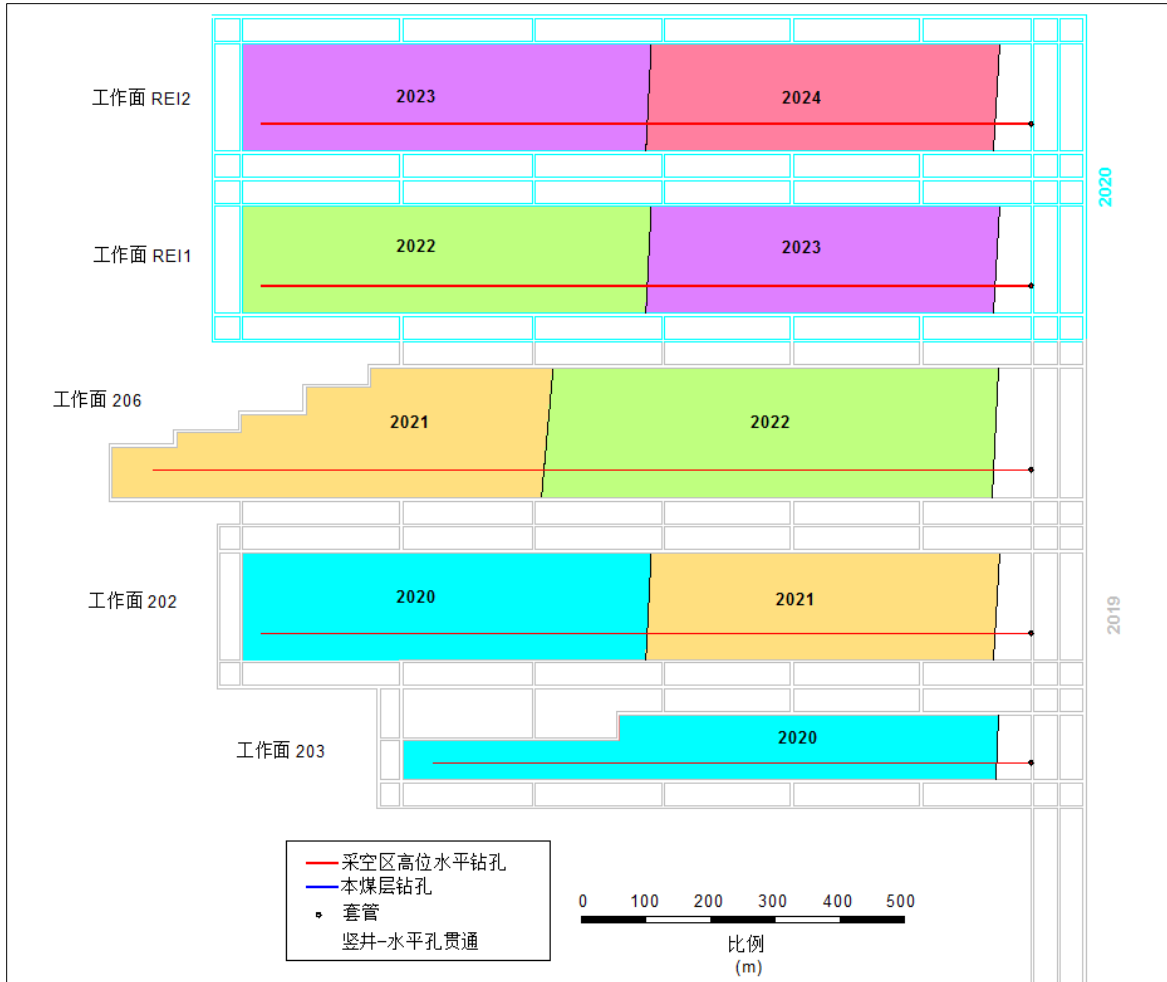


图 4-16: 2 号煤层采空区瓦斯抽采规划平面图

4.2.2 10 号煤层采空区抽采方案

基于当前在 2 号煤层实施的采空区抽采系统的瓦斯回收率可忽略不计，并考虑到 10 号煤层切割高度仅仅是 2 号煤层切割高度的 60%，并且 2 号煤层位于 10 号煤层上部已经开采，这项预可行性研究假设 10 号煤层不实施采空区瓦斯抽放。

5 未来瓦斯抽采预测

瓦斯年产量预测是基于 10 年的开采计划（2019-2029 年）（“项目周期”）来制定的。

5.1 钻孔瓦斯生产率

在项目实施期间的每年，确定了每年平均煤层钻孔和采空区水平钻孔的数量。考虑了项目实施进度及钻孔间距，并参考图 4-9 和 4-10 中的瓦斯流量预测曲线表得出 2 号和 10 号煤层的瓦斯生产率，参见下表 5-1。本预可行性研究中，所有由采空区高位水平钻孔抽采的瓦斯，均按参数：6 m³ / min（流量）和 70%（浓度）来进行计算，并加到煤层瓦斯产量中，最终得出年瓦斯抽采量。对 2-105 工作面 and 203 工作面，数据有所调整，因为 2-105 使用现行的裂隙带钻孔方案，而 203 工作面宽度仅仅是典型工作面宽度的一半（60/100m 比 200m）。

年份	瓦斯生产率 (m ³ /day)				年瓦斯产量 (Mm ³)		
	本煤层		采空区	合计	本煤层	采空区	合计
	2号煤层	10号煤层					
2019	20,665	-	2,160	22,825	7.54	0.79	8.33
2020	17,000	-	2,160	19,160	6.21	0.79	6.99
2021	6,420	10,780	5,760	22,960	6.28	2.10	8.38
2022	2,160	12,630	5,760	20,550	5.40	2.10	7.50
2023	690	15,220	5,760	21,670	5.81	2.10	7.91
2024	-	10,290	5,760	16,050	3.76	2.10	5.86
2025	-	11,160	-	11,160	4.07	-	4.07
2026	-	7,750	-	7,750	2.83	-	2.83
2027	-	10,000	-	10,000	3.65	-	3.65
2028	-	6,640	-	6,640	2.42	-	2.42
2029	-	9,720	-	9,720	3.55	-	3.55

表 5-1: 项目周期内的瓦斯抽采率

5.2 煤矿瓦斯抽采率

图 5-1 显示了采用第 3 节和第 4 节中推荐的瓦斯抽采方案后，在 2019 年至 2029 年的 10 年期间，整个矿井的年度瓦斯生产率和产量预测。预测从 2019 至 2023 年间，年平均抽采量为 800 万立方米。2024 年以后，开始回采较薄的 10 号煤层时，预测平均每年抽采 300 万立方米瓦斯，瓦斯浓度较低，主要通过本煤层抽采。采空区抽采没有必要。

2019 年至 2023 年项目早期的瓦斯产量预测比目前每年 1000 万立方米的产量低 20%，但是，抽采的瓦斯质量将显著提高，并将为瓦斯的利用创造机会。本报告并没有

考虑额外的本煤层钻孔作业及一些封闭区域的瓦斯回收方法，仅仅基于目前矿方的安全开采计划。

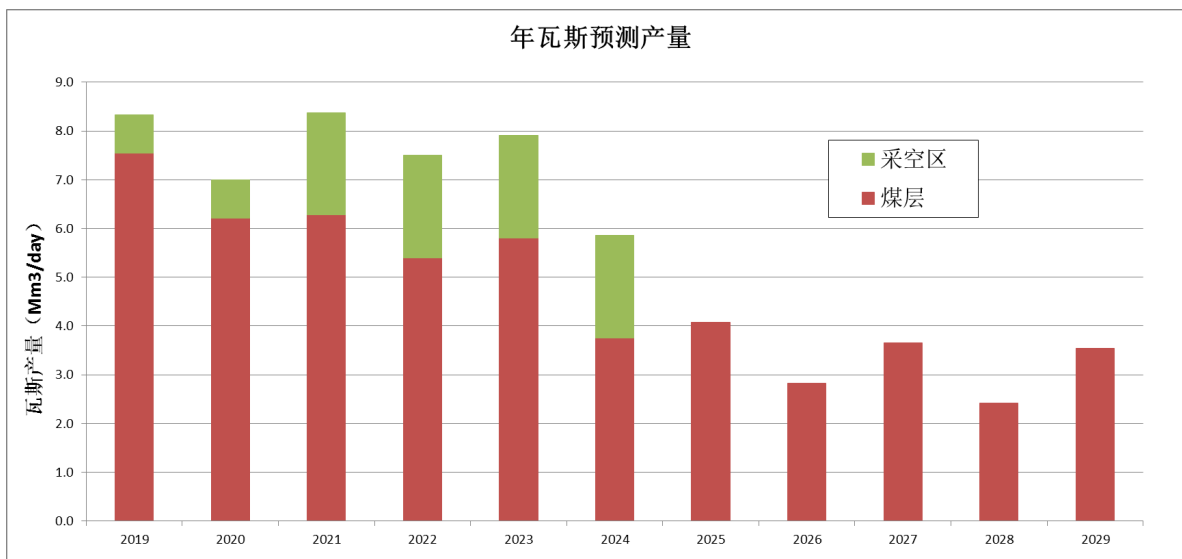


图 5-1: 基于提议的抽采方案的瓦斯产量预测

5.3 瓦斯抽采钻孔要求

表 5-2 列出了项目期间基于建议的抽采方案所需要的年度定向钻孔、竖井、水平-竖井贯通数量及井下气体收集管路的要求。在项目建设初期的几年，结合回采计划，本煤层定向钻孔数量多而密集，以便留有足够时间来进行抽放。时间将是至关重要的，可以采用多台钻机同时作业。该预可行性研究报告中假设矿方将寻找可以提供定向钻进服务的公司，并可以通过多台钻机满足项目初期的要求。

采空区高位 水平钻孔量 (m)	铺设管路 (m)	竖井总深 (m)	水平- 竖井贯通数量 (次)
925	1,200	-	0
1,191	650	-	0
1,358	800	80	11
1,191	300	40	5
1,191	300	40	6
-	300	-	3
-	300	40	3
-	300	-	3
-	300	40	3
-	300	-	3
-	300	40	3
5,856	5,050	280	40

表 5-2: 基于建议的抽采方案的每年钻孔量

总体而言，项目期间的定向钻孔总量达到 138,000m，其中大部分是本煤层钻孔。这大致相当现行方案中一年的钻孔量（米数）。虽然定向钻孔比普通螺旋钻孔要昂贵得多，但可以从后续抽采方案中看到，钻孔的总量会减少 90%（米数）。

按照建议的瓦斯抽采方案，需增加额外的井下管路（管道和连接）估计为 5,000m，这样可以改进现有管路，并实现监控和管理井下积水。如果矿山继续采用现行做法，项目期间所需的额外地下管道数量将增加 7 倍，数不清的钻孔套管、井口联接和管道联接将会是空气的潜在侵入点，这也给后续监控和管理带来困难。

表 5-3 提供了项目期间逐年所需的大约管路数量。请注意，根据目前的做法，管路沿着巷道延伸，通常是双管道，按推荐的瓦斯抽采方案，定向钻孔主要从主巷道的入口钻入，因此管道仅局限于主要巷道的入口处。

年份	低负压管 理铺设量 (m)	高负压管 理铺设量 (m)
2019	1,200	1,250
2020	1,470	1,470
2021	1,540	1,540
2022	1,470	1,470
2023	1,470	1,470
2024	1,470	1,470
2025	1,470	1,470
2026	1,470	1,470
2027	1,470	1,470
2028	1,470	1,470
2029	1,470	1,470
合 计	15,970	16,020

表 5-3: 新的抽采方案项目期内每年的管线需求

6 市场分析

中国的煤矿瓦斯已从过去的安全隐患变成为有价值的商品和重要的天然气来源 (USEPA, 2015)。2011 年, 中国政府“十二五”期间的“天然气发展规划”首次包括了煤层气和煤矿瓦斯。该计划涵盖了 2011 年至 2015 年间的年份, 目标是到 2015 年消耗 200 亿立方米的煤层气/煤矿瓦斯 (USEPA, 2015 年)。此外, 更加雄心勃勃的“煤层气和煤矿瓦斯第十二个五年计划”要求总产量达到 84 亿立方米, 并建设 13 条管道, 总长度为 2,000 公里, 每年运输总量为 120 亿立方米。(USEPA, 2015 年)。“煤层气和煤矿瓦斯第十二个五年计划”进一步将煤矿瓦斯主要用于当地发电, 要求将家庭用户数量增加到 330 万户, 煤矿瓦斯发电量将在 2010 年到 2015 年之间翻两番, 达到 2,850 兆瓦 (USEPA, 2015 年)。“煤层气和煤层气开发利用”十三五“规划”旨在将煤层气/煤矿瓦斯产量提高到 240 亿立方米, 煤矿瓦斯发电机组装机容量达到 280 万千瓦。除了新的煤矿瓦斯发电容量目标之外, 新计划还强调了废弃煤矿瓦斯 (AMM) 资源的利用 (CCII, 2017)。

虽然中国政府大力推广煤矿瓦斯的抽采和利用项目, 但项目开发仍存在重大障碍, 目前天然气仅占中国主要能源消耗的约 6.6% (BP, 2018)。由于中国的天然气市场和基础设施不发达, 很多中国城镇的大多数居民都无法获得天然气。生产煤矿瓦斯的煤矿大多位于偏远的山区, 无法进行并网分销。由于地形陡峭, 在这些偏远地区建造输送管网很困难。

2006 年到 2011 年间, 山西已经建设了 26 个独立的煤矿瓦斯发电站, 总发电量为 381 兆瓦, 并与山西省电网达成了互联和承购协议。然而, 如今煤矿企业经常将瓦斯发电项目视为矿山的电力供应来源, 以减轻电网压力, 为其它用户服务。

6.1 山西省的经济形势

山西相对于中国其他省份, 山西省拥有丰富的能源储备, 近年来增长强劲。全省人均 GDP 为 35,303 元人民币 (5,140 美元), 2016 年全省 GDP 增长速度为 4.5% (香港贸发局, 2018 年)。另外, 其他主要经济指标近年来也有所改善, 例如:

- 零售额为人民币 6481 亿元 (943.5 亿美元), 2016 年同比增长 7.4%。
- 2016 年出口额为人民币 687 亿元 (99 亿美元), 年增长率为 17.9%。
- 2016 年高科技产品出口增长 68.3% 至 416 亿元人民币 (60.6 亿美元)。

- 服务业占 GDP 总份额从 2011 年的 35% 上升至 2016 年的 55.7%，2016 年全省旅游业收入为人民币 422.8 亿元（62.86 亿美元），年增长率为 23.3%。

根据中国的“十三五”规划（2016-2020），山西计划到 2020 年将煤炭产量减少 2.58 亿吨，以提倡更清洁的能源需求。虽然煤炭仍然在该省经济中发挥着重要作用，但由于新兴产业的投资占 2015 年总投资的 53.1%，与 2011 年相比增长近 20%（中国日报，2018 年），其占 GDP 的总份额正在下降。煤层气和煤矿瓦斯抽采和利用项目，如腾晖煤矿考虑的项目，将有助于为更清洁的能源需求提供供应来源。

6.2 山西省能源消费市场

6.2.1 电力

截至 2017 年底，全省发电装机容量为 8070 万千瓦，比 2016 年底增加 5.7%。占总装机容量的一部分是火电装机容量 6370 万千瓦，增长 0.6%；并网风电装机容量 870 万千瓦，同比增长 13.1%；并网太阳能发电装机容量，比上年增长 98.9%，达到 590 万千瓦。2017 年，第二产业（制造业和建筑业）消耗了 78.7%，即该省电力的 1568.7 亿度。工业部门的总投资增长了 3.1%，但 2017 年煤炭工业的投资下降了 8.6%（NSBSSC，2018）。

省政府正在大力推动当地可再生能源的发展，但估计条件只允许小规模分布式风能和生物质（燃煤）发电厂。因此，具有能源盈余和赤字的省份之间不同形式的能源传输将成为中央电网地区电力经济日益重要的特征（USEPA，2015）。

6.2.2 其他相关能源市场

政府的第十二个五年天然气计划草案首次明确包括煤层气，山西省正率先采取相对激进的省内混合天然气 - 煤层气管道计划，其中包括：

- 从长治到太原的每年 20 亿立方米，460km 的线路，于 2012 年完工，混合了沁水盆地煤层气和中石化陕西 - 山东线的常规天然气。
- 两条管道总长 300 多公里，可从鄂尔多斯和古交地区运往太原约 10 亿立方米。
- 2012 年鄂尔多斯煤层气盆地临县地区以南至临河的 471km 线延伸至西北，接收陕西第三条管道的天然气
- 2010 年底完成了从山西沁水县到河南博爱县的 10 亿立方米 / 年，50km 的跨河管线。

根据山西省煤层气开采计划，山西计划到 2020 年底达到 200 亿立方米的煤层气开采量，建设超过 1 万公里的管线，将天然气输送到全省 70% 的区域。该省国有资产监督管理委员会（SASAC）最近计划重组山西天然气集团，成为中国第一家通过资产等方式整

合天然气勘探、开发、管线和天然气终端的省级天然气公司。这会更多涉及到能源、运输和煤层气的企业的资产转让、股权转让和股权合作。

迄今为止，由于竞争导致山西省天然气公司无法实现互联互通，导致管道运输成本上升，运营效率降低。预计建立省级天然气公司将有助于促进山西自然资源的整合，同时使用更清洁的能源（新华财金社，2017）。

6.3 环境保护市场

自 2005 年以来，中国通过“联合国气候变化框架公约”（UNFCCC）下的清洁发展机制（CDM）成了全球碳市场的参与者。从 2005 年到 2012 年，国家发展和改革委员会（国家发改委）批准了清洁发展机制下的 128 个煤矿瓦斯项目，但并非所有项目都有资格在 2008 年至 2012 年的资格期内获得核证减排量（CERs）。自 2012 年以来，由于缺乏需求，核证减排量（CERs）的价格从最初的 139 元人民币（20 美元）开始降至 1.79 元人民币（0.26 美元），清洁发展机制（CDM）不再适用于中国新的煤矿瓦斯利用项目（ICE，2018）。然而，到 2013 年，中国建立了 7 个试点碳市场，并于 2017 年底启动了全国减排市场，目前仅覆盖发电行业。七个碳排放交易试点在深圳，北京，广东，上海，天津，湖北和重庆设立，2016 年，四川新增第八个碳交易所。

未来，中国国家碳排放交易体系（ETS）可能成为全球最大的碳排放许可市场。最初设想是包括主要的工业部门，现在预计全国碳排放交易体系仅涵盖发电行业（EDF，2017）。煤矿瓦斯利用项目产生的中国碳排放信用额度预计有资格作为一些试点碳市场中的国家市场抵消额。但是，中国碳排放信用额度可以达到的分配百分比目前尚不清楚。碳市场覆盖的碳排放量占碳排放总量的百分比约为 30%，相当于 35 亿吨二氧化碳当量。

自愿碳市场仍然是中国煤矿瓦斯利用项目的一个选择。煤矿瓦斯利用和其他类型的抵消项目存在一个全球市场。市场通常由企业社会责任或旨在改善企业环保形象的其他行动所驱使。自愿市场交易通常象“非处方药”，这意味着它们的交易直接在买方和卖方之间进行，交易的价格和交易量很少公布与众。与这些市场上的活跃人士的交流后得到的信息表明，每吨二氧化碳当量的价格可达 27.86 至 34.82 元人民币（4.00 至 5.00 美元）。不过，这些价格无法确认，并且假设这么高的价格很不现实。

环境市场的另一个潜在选择是基于国际民用航空组织 (ICAO)。2016 年 10 月, 国际民航组织于通过了一个于 2020 年生效的碳中性增长的法案。截至 2018 年 9 月, 66 个国家就占了国际航空公司总碳排放量的 86% 以上, 从 2020 年开始自愿加入该计划。国际民航组织目前正在制定其国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA) 的抵消和核准规则。根据该计划, 国际民航组织成员将要求到 2035 年减少 25 亿吨二氧化碳当量的碳排放量, 这将导致到 2025 年每年抵消碳排放量的需求量为 1.42 至 1.74 亿吨二氧化碳当量, 而到 2035 年, 达到 4.43-5.96 亿吨二氧化碳当量 (Ripley, 2018 年)。该市场可能为国际煤矿瓦斯排放抵消项目提供重要的机会。

尽管煤矿瓦斯减排有潜在的抵消市场, 并且可以想象煤矿瓦斯利用项目可以通过销售减排信用额度来实现一些额外收入, 但本可研报告中的分析假定中等情况下没有排放抵消市场。鉴于减排信用额度价格较低, 自愿减排定价也缺乏透明度以及国际民航组织国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA) 计划的不确定性, 很难提供一个合理的价格进行测算。

6.4 法律和监管环境

作为中国减少空气污染的更广义战略的一部分, 政府制定了到 2020 年生产煤层气/煤层气产量 400 亿立方米的目标, 这是中国 2015 年产量 180 亿立方米的两倍多。为鼓励企业在煤层气/煤矿瓦斯开采及利用项目上的投资, 中国向燃气生产商提供优惠政策, 包括免征设备进口关税、退还气体销售的增值税、资产加速折旧、技术创新投资税收抵免、免去天然气市场定价的费用, 以及获得国家技术开发基金 (经济时报, 2016)。

山西省煤矿瓦斯发电厂与山西电力公司签订的承购和互联协议多于其他省份。

- 目前, 电网支付的入网价为 0.30RMB/kWh (\$0.043/kWh), 作为对煤层气/煤矿瓦斯生产企业的补贴。
- “十三五”期间政府对煤矿瓦斯开发和开发的补贴为山西省提供了 0.1RMB/m³ (\$0.015/m³) 的额外资金 (GMI, 2016)。

尽管存在许多有利于促进中国煤层气/煤层气产业发展的有利政策, 目前尚不清楚这些激励措施的有效性, 从而使该领域面临着许多发展的障碍。

6.5 腾晖煤矿瓦斯的利用方案

腾晖将提议的瓦斯抽采方案付诸实施将大大提升抽采的煤矿瓦斯质量。虽然抽采的瓦斯总量不会有明显变化, 但预计采空区瓦斯抽放瓦斯浓度将增加到 65%, 而本煤层抽采

瓦斯浓度将增加到 85%。瓦斯质量的提高为目前矿山无法使用的煤矿瓦斯利用提供了机会。以下部分简要说明腾晖煤矿瓦斯利用的各种可能方案。

6.5.1 瓦斯发电

利用煤矿瓦斯就地进行发电是本预可行性研究中考虑的利用方案之一。瓦斯发电厂产生的电力将用于矿山自身。由于工厂的规模限制，不太可能生产多余电力出售给当地电网。借鉴山西焦煤集团自身和其它遍布中国煤田的瓦斯发电项目的丰富经验，有充分理由将抽采瓦斯用于发电。现有的专业知识和经验可广泛用于煤矿瓦斯发电厂项目的实施、运行和维护。工业电力价格也对瓦斯电力项目也具有吸引力。煤矿瓦斯发电项目普遍接受的盈亏平衡成本为 0.27 至 0.40RMB/kWh (\$0.039 至 0.058kWh)。腾晖煤矿的价格为 0.65 RMB/kWh (\$0.094kWh)。另外，通过国家和省级的支持，0.40 RMB/m³ (\$59,717 /Mm³) 的补贴使山西的瓦斯发电项目更具吸引力 (GMI, 2015)。

将瓦斯进行发电也是腾晖煤业管理层青睐的方案。他们表示，如果证明可行，他们计划推进瓦斯发电项目。

6.5.2 城镇燃气/天然气

在联合国的“京都议定书”实施之前，作为城市燃气是中国煤矿瓦斯的主要用途，后来利用瓦斯进行发电越来越受欢迎。城市煤气来自矿井内煤层瓦斯抽采或采空区地面竖井抽采。城镇燃气质量要求偏中，通常瓦斯浓度为 30%至 60%，并通过低压管线输送到矿区附近的居民区。相比之下，天然气管道通常需要非常高质量的气体，通常气体浓度高于 90%，且对其他杂质成分（包括水分，二氧化碳，硫化氢等含量）有严格的要求。

这两个方案都不适用于腾晖煤矿。矿山坐落在偏远山区，这意味着建造城镇燃气输送管网将非常昂贵。此外，还需要改变当地居民的由煤换气的生活习惯，以创造需求市场。同样，天然气也不是一个现实的选择，一没有输送管网，二没有满足要求的气体质量。

6.5.3 工业用途

除了可能利用瓦斯为选煤厂提供燃料之外，矿山附近不存在工业用途。腾晖煤业管理层也并未对此方案表示有兴趣。

6.5.4 锅炉燃料

许多矿山利用燃煤锅炉给矿区内的建筑物及煤矿井下提供取暖和热水。中国政府鼓励优先考虑使用天然气或其他清洁燃料的锅炉，从而最终彻底取代燃煤锅炉。腾晖煤矿可以使用煤矿瓦斯为矿区建筑物和员工公寓中的供暖和热水锅炉提供燃料（矿区冬季需要供暖）。如在锅炉中使用瓦斯来代替燃煤必然需要将气体质量提高到至少中等浓度。考虑到天然气处理设备的成本，在经济上不太可行。与瓦斯发电方案相比，腾晖管理层不对该方案优先考虑。

6.5.5 压缩天然气/液化天然气

美国环保局对重庆松藻煤矿的可行性研究表明，中国对压缩天然气（CNG）和液化天然气（LNG）越来越有兴趣（美国环境保护局，2009）。当然，山西省天然气基础设施的持续发展，包括 CNG 和 LNG 的推广，为煤矿瓦斯通过 CNG/LNG 的运营提供了潜在的途径。然而，即使未来能生产出中等质量的天然气，CNG 或 LNG 目前在经济上是不可行的，生产 CNG 和 LNG 需要大量资金投入来提升气体质量，并进行压缩和液化。例如，目前一个煤矿瓦斯抽采和利用项目的投入可能总计为人民币 2061 万元（300 万美元），而液化天然气工厂投入则为人民币 4121-4806 万元（约合 6-7 百万美元）。另外，一个煤矿一年的运营费用可达人民币 687-1374 万元（1-2 百万美元）。液化天然气的销售价格需要大约为每 1000 公吨 2.15RMB 或相当于人民币 3.0RMB/m³（\$12.00/Mcf）的管道质量天然气。

6.5.6 排空燃烧

在中国允许将瓦斯排空燃烧，也是瓦斯利用方案中，包括：发电、工业用途、锅炉燃料或生产 CNG/LNG 的一个选项。一个好的策略可能是在瓦斯利用项目中作为一个补充，以便在出现问题时，例如：当燃气发动机停机进行维护时减少温室气体的排放。虽然没有为增加排放付出代价，但在瓦斯发电项目中，增加因瓦斯排空燃烧的设备可能不是一个经济上可行的选项。

6.6 煤矿瓦斯利用建议

在考虑了腾晖煤矿瓦斯利用的可能的方案后，并结合山西省目前的市场情况和煤矿管理层的优先顺序，将瓦斯进行发电是最可行的选择。因此，对于该预可行性研究，第 7 节中的经济分析侧重于瓦斯发电。根据瓦斯产量预测，该矿发电量可高达 5.2 兆瓦。

7 经济性分析

7.1 项目开发概述

为了对本报告中的瓦斯抽放及利用的经济性进行评估，有必要先确定项目的范围。这是一个本煤层和采空区瓦斯抽采及利用的一个简单案例。

7.2 项目经济性

7.2.1 经济评估方法

建立了一个煤矿瓦斯抽采和电力销售的现金流模型，用以评估项目的经济性。用于评估项目的关键绩效指标有净现值（NPV），内部收益率（IRR）和投资回收期（年）。评论分析结果均为税前数据。

7.2.2 经济假设

腾晖辉煤矿瓦斯抽采和利用项目所需的设备和服务成本估算基于矿方提供的数据。这些数据来自于该地区类似项目的已知平均成本和公开数据。预可行性研究使用了保守的假设。如果该项目需要进行更全面的可行性研究，则应进行更详细的分析。煤矿瓦斯抽采和利用项目的主要成本构成为本煤层和采空区钻孔、气体收集管线、瓦斯发电厂建设及其它成本。

7.2.2.1 瓦斯抽采系统输入参数

表 7-1 中提供瓦斯抽采系统的投资及运营成本假设，并提供了财务分析中使用的物理和财务因素。下面我们对每个输入参数进详细的讨论。

实体和财务指标	单位	数值
价格浮动	百分比	3%
成本浮动	百分比	3%
Capital Expenditures 资本支出	单位	数值
抽采系统		
本煤层钻孔成本 -建议的本煤层水平定向钻孔	\$/m	100
采空区钻孔成本 -建议的采空区高位水平定向钻孔	\$/m	130
本煤层钻孔成本 -目前腾晖采取的本煤层钻孔	\$/m	30
裂隙带钻孔成本 -目前腾晖采用的裂隙带钻孔	\$/m	39
气体收集和输送系统		
集气管路成本	\$/m	75
压缩机效率	hp/ m ³	1
应急费用	百分比	0%
运营成本	单位	数值
能源消耗（气体）	百分比	10%
水的回收和处理	\$/bbl	0.5

表 7-1: 瓦斯抽放系统输入参数

7.2.2.1.1 瓦斯抽采系统实体和财务指标

价格和成本浮动：所有价格和成本按每年上浮 3%假设。

7.2.2.1.2 抽采系统资本性支出

抽采系统成本包括本煤层和采空区定向钻孔成本，通常还包括将瓦斯从井下抽放到地面的真空泵的成本。不达，最近腾晖新投入一个泵站，根据提议的瓦斯抽采方案，可以提供足够的服务。

与抽采系统相关的主要输入参数和假设条件如下：

钻孔成本：本煤层水平定向钻孔成本估计为\$100/m。采空区高位水平定向钻孔成本估计为\$130/m。相比之下，腾晖矿目前抽采方案中钻孔成本仅仅是水平定向钻孔成本（\$/m）的 30%。

气体收集系统成本：气体收集系统包括管道和相关的阀门和仪表，用于将矿井内的气体输送到位于地面的发电厂。收集系统成本最决于管道长度和每 m 价格。按建议的抽采

方案，我们假设管道成本为\$75/m，从 2019 年至 2029 年需新加大约 5,050m 的管线。相比之下，按腾晖现有的抽采方案，需铺设 31,990m 的管线。

应急费用：对抽采方案中出现的不可预见的技术或监管方面的困难，不收取任何费用。

7.2.2.1.3 抽采系统营运成本

能源消耗：对于提议的抽采利用方案，假设由煤矿发电用于为气体收集和输送系统中的真空泵和压缩机提供动力。假设的使用量为 10%，这是从提供给最终用途的能源中扣除。

水的回收和处理：与水的回收和处理相关的成本为\$0.5/bbl。

7.2.2.2 瓦斯发电厂输入参数

抽采的瓦斯可为气轮机提供燃料，内燃机驱动发电机产生电力供煤矿使用或出售给当地电网。瓦斯发电厂的主要成本由由气轮机和发电机的成本构成，另外还有用于去除气体中的固形物和水的处理设备成本、以及与电网的连接设备成本。用于评估瓦斯发电项目经济效果的假定参数见表 7-2。后续提供了对每个输入参数的更详细的讨论。

实体和财务指标	单位	数值
价格浮动	百分比	3%
成本浮动	百分比	3%
基准发电机容量	MW	3.71
销售电价	\$/kWh	0.094
	RMB/kWh	0.65
发电机效率	百分比	35%
运行时间	百分比	60%
发电项目延期	年	1.5
煤矿瓦斯补贴	\$/Mm ³	59,717
	RMB/m ³	0.40
资本支出	单位	数值
发电机成本指数	\$/kW	800
发电机搬迁费用	\$/kW	0
项目开发费用	百分比	20%
应急费用	百分比	10%
运营成本	单位	数值
电厂运营成本	\$/kWh	0.03
应急费用	百分比	10%
碳减排量	单位	数值
潜在的温室气体	tCO ₂ e	25
吨瓦斯燃烧释放的二氧化碳	tCO ₂	2.75

表 7-2：瓦斯发电厂输入参数

7.2.2.2.1 瓦斯发电厂实体和财务指标

价格和成本浮动：所有价格和成本按每年上浮 3%假设。

基准发电机容量：选取 3.71MW 的最低发电机容量为基准发电量。在发电期间没有考虑排空燃烧，因为中级投资回报方案没有考虑有真正的碳交易市场。

发电机效率和运行时间：典型的效率在 30%到 44%之间，运行时间通常在每年 5,000 到 8,300 小时之间，具体取决于发电机制造商。中国制造的燃气轮机通常在该范围的较低端运行，本分析假设将使用中国制造的发动机。建议的瓦斯发电项目，假设发电效率为 35%，年运行时间为 60%，即 5,256 小时。发电效率值基于中国煤炭信息研究院 (CCII) 提供的信息，运行时间值与煤矿电厂所用的典型的发动机一致。

电价和煤矿瓦斯补贴：电网电价为 0.65RMB/KWh (0.094\$/KWh)，煤矿瓦斯补贴为 0.40 RMB/m³ (\$59,717/Mm³)。

发电项目延期：实施定向钻进抽采方案后，电厂项目将会延迟 18 个月。

减排效益/ 煤矿瓦斯补贴：虽然煤矿排放会抵消碳排放，但本研究采取了保守的假设，即此抵消没有价值。如前所述，中国煤矿瓦斯项目的碳减排抵消价值一不确定，二不透明。

7.2.2.2.2 发电厂资本支出

发电成本指数：该值假设为 800\$/kW，是一个满负荷成本。假设包括集装箱式瓦斯发电机组（燃气轮机和发电机）、市政工程、气体处理设备（包括除尘和除湿）、电网互连、备件、保修交货、安装，调试和启动的资本费用。

发电机搬迁费：搬迁费为 0，因为该项目不涉及搬迁。

项目开发费用：项目开发的费用包括人员费用、设备办公空场所、交通和用于计划和开发项目所需的其他资源费用。根据实际经验，该费用估计为发电厂总成本的 20%。

固定资产投资应急费用：为不可预见的额外费用增加 10%的应急费用。

7.2.2.2.3 发电厂运营成本

发电厂运行和维护成本：发电厂的运行和维护成本假设为 0.03\$/KWh。

运营成本应急费用：对于不可预见的额外费用，加收 10%的应急费用

7.2.2.2.4 碳减排量

潜在的温室气体：使用系数 25。该值来自政府间气候变化专门委员会第四次评估报告 (IPCC, 2013)。

瓦斯燃烧产生的二氧化碳：瓦斯燃烧会产生二氧化碳。估算煤矿瓦斯项目的减排量时必须考虑到除去瓦斯燃烧产生的二氧化碳后得到的净二氧化碳减排量。按每吨瓦斯燃烧会排放 2.75 tCO₂ 来计算，每吨瓦斯的净减排量为 18.25 tCO₂e。

7.2.3 经济分析结果

表 7-4 总结了瓦斯发电项目的经济效益。煤矿管理部门要求仅限于瓦斯发电方案，因为瓦斯抽采成本将算在煤矿正常运营成本内。瓦斯发电项目的回报中是通过将瓦斯抽采的现金流置零来体现瓦斯抽采作业成本初煤矿正常运营成本所吸收。成本计算中少算了这部分，才使发电项目财务分析中出现更高的净现值和内部收益率真。另一方面，更高的内

部收益率和净现值也可归因于较低的发电项目建设成本指数人民币 5,567RMB/kW (800\$/kW) , 电力销售价格 0.65RMB/KWh (0.094\$/KWh) 和煤矿瓦斯的补贴人民币 0.40RMB/m³ (\$59,717/Mm³) 。还要注意的, 在瓦斯发电项目方案中, 不包括购买发电用瓦斯的成本。假设矿方将向发电厂免费提供煤矿瓦斯。如果计算购买瓦斯的成本, 预计将会使高、中、低投资回报下都降低项目的内部收益率和净现值。

在表 7-5 中给出了高、中、低三种投资回报等级下的整个项目, 包括瓦斯抽采和瓦斯发电项目的输入参数。瓦斯抽采项目涉及本煤层定向钻孔、采空区高位水平钻孔和水平孔与竖井的贯通。这些都会增加了项目成本, 而使投资回报降低。两个项目的最大发电量和净二氧化碳减排量是相同的, 因为这些值主要依赖于瓦斯的产量, 瓦斯产量使用相同的高、中和低等级来表示不同的项目情景。 改变关键输入变量, 再根据高、中和低的等级, 其在表 7-1,7-2 和 7-3 中详述。 结果表中用于所有净现值计算的折现率为 10%。

投资回报等级	低	中	高
电价(\$/KWh)	-10%	.094	+10%
项目建设延期(年)	2 年	1.5 年	1 年
发电厂固定资产投资(千美元)	25%	20%	15%
发电厂运营成本(千美元)	+10%	0.03	-10%
减排效益 (\$/tCO ₂ e)	0.0	0.0	1.0
瓦斯产量 (Mm ³)	-30%	86.2	+30%
运营效率	30%	35%	40%
运营时间	55%	60%	65%

表 7-3: 财务分析中高中低项目投资回报核心输入参数

回报等级	最大发电量	净现值(千美元)	内部收益率	回收期(年)	CO ₂ 减排当量(tCO ₂ e)
高	5.23 MW	\$11,045	43.57%	2.3	1,481,616
中	3.71 MW	\$2,966	19.97%	4.5	1,139,704
低	3.47 MW	\$69	10.30%	6.3	797,793

表 7-4: 单一发电厂项目税前内部收益率

回报等级	最大发电量	净现值 (千美元)	内部收益率	回收期 (年)	CO2 减排当量 (tCO2e)
高	5.23 MW	\$9,491	22.06%	4.9	1,481,616
中	3.71 MW	\$1,684	12.23%	6.45	1,139,704
低	3.47 MW	\$(943)	8.72%	7.24	797,793

表 7-5: 瓦斯抽采和发电项目税前经济分析指标

在观察整个项目，即瓦斯抽放和瓦斯发电项目的回报时，对投资回报的主要贡献是通过采用建议的定向钻孔抽采方案来节约成本，尽管定向钻孔的边际成本较高。具体原因如下：

- 提议的定向钻孔抽采方案中钻孔较少，导致钻孔的总长度显著减少，如表 5-2 所示。在 1,200m 长的工作面，现有抽采方案要求一个 165m 的本煤层钻孔、一个 83m 高的高位裂隙带钻、以及一个每 4m 间隔高为 38m 的低位裂隙带钻孔。这导致每 1,200m 长的工作在，总钻孔 m 数大约 86,000m。相比之下，当沿着工作面回采平行方向的水平定钻孔时，需要更少的钻孔。建议的瓦斯抽采方案排水计划估算，到 2029 年，该矿只需钻孔 142,000m，而按现行作法则需 938,000m。
- 建议的抽采方案将大大减少管线的铺设。现行作法使用 31,990m 的管线，而采用新的方法仅使用 5,050m，如表 5-2 和表 5-3 所示。按腾晖矿采用的现行作法要求在每个工作面的整个长度上铺设高低负压气体收集管线，同时在主要巷道入口处铺设主管线。根据新的抽采方案，只有主要巷道才需要铺设气体收集管线。
- 10 号煤层中仅需施工本煤层钻孔。采空区高位水平定向钻孔不是必需的。

预可行性研究报告在表 7-6 中利用贴现现金流法就采用建议的抽采方案后产生的成本节约进行了量化比较。与目前的腾晖现行方案，也就是在 2 号煤层中采用本煤层钻孔和裂隙带钻孔，并计划在 10 号煤层也采用相同作法相比，定向钻进方案在 10 年内能节省了近 1,100 万美元。即使腾晖煤矿将修改目前的抽采方案，不在 10 号煤层中进行裂隙带钻孔，改为定向钻孔后，也将节约 540 万美元的成本。

现有钻孔方案	提议的定向钻孔方案节约的净现值 (千美元)
10号煤层中不进行常规裂隙带钻孔	5,442
10 号煤层中进行常规裂隙带钻孔	10,943

表 7-6: 采用定向钻进方案抽采后节约的成本

项目期间不同年份的成本节约（见图 7-1 和 7-2）。图 7-1 中所示，提议方案在 2019 年成本较高，但考虑到整个项目期间（2019-2029），成本会减少。。在项目的后期，与项目的最初几年相比，潜在的成本节约显著增加。

现有抽采和建议的抽采方案成本比较

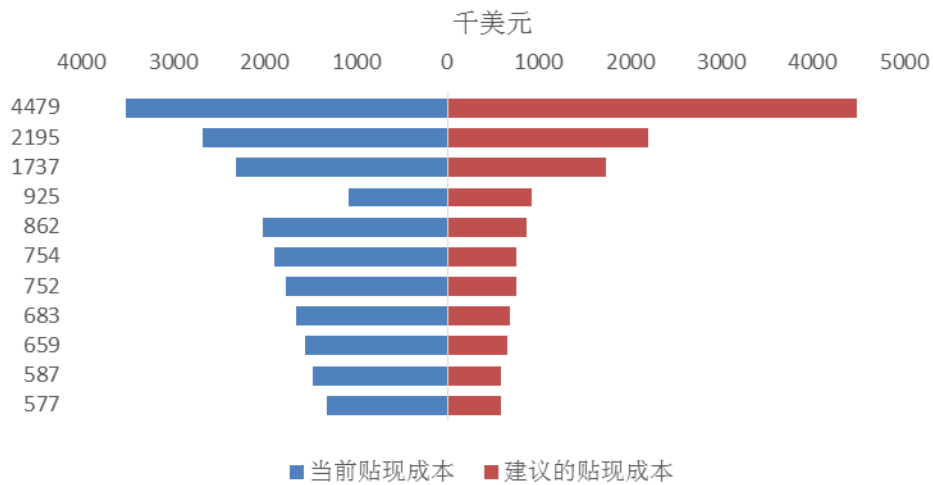


图 7-1: 建议的方案与现行方案之间逐年成本比较（贴现现金流法）

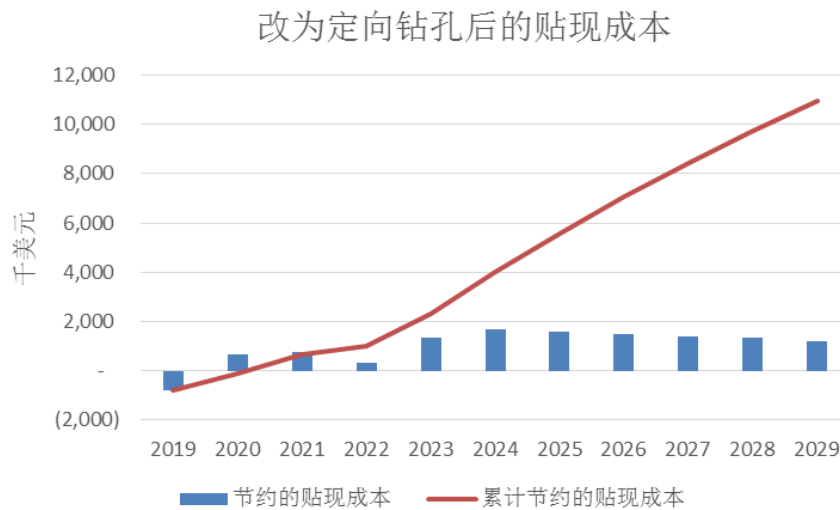


图 7-2: 年或累积的成本节约

7.2.4 温室气体减排和能源生产

图 7-3 和 7-4 分别显示了中等投资回报条件下的年度和累计温室气体减排量以及年发电量和累计发电量 (MWh)。减排量按年计算,与年度瓦斯产量和甲烷对全球变暖的影响密切相关。与二氧化碳相比,甲烷具有更短的大气寿命,但更容易捕获辐射,从而使得甲烷的影响在 100 年内比二氧化碳高 25 倍 (IPCC 2007)。更高的瓦斯产量预测也导致更高的减排量,因为瓦斯用于发电而不是直接释放到大气中。图 7-3 和 7-4 均显示随着时间的推移减排量和发电量将稳定增长,因为它们受年度瓦斯产量的严格控制。由于在项目的初始阶段会有 18 个月的电厂建设期,直到 2021 年才达到全部发电和减排能力。

在图 7-3 中,从 2021 年至 2029 年,该项目的平均减排量为每年 121,434 tCO₂e。累计减排量描述了项目生命周期内的总减排潜力,在中级投资回报条件下,在 2029 年达到 1,139,704tCO₂e。项目前两年的预计总减排量达到较低的 46,799tCO₂e,这主要考虑到 18 个月的发电厂建设周期。在图 7-4 中,从 2021 年至 2029 年,平均发电量每年达到 19,479MWh。累积发电量显示项目生命周期内的总发电量,在中级投资回报情况中,2029 年达到 185,051MWh。同样考虑到有 18 个月的发电厂建设周期,低预计发电量在项目的前两年总计达到较低的 9,740MWh。在项目的 11 年运营期内,该项目的最佳情况下可实现净减排量 1,481,616tCO₂e 和 211,487MWh 的总产量。

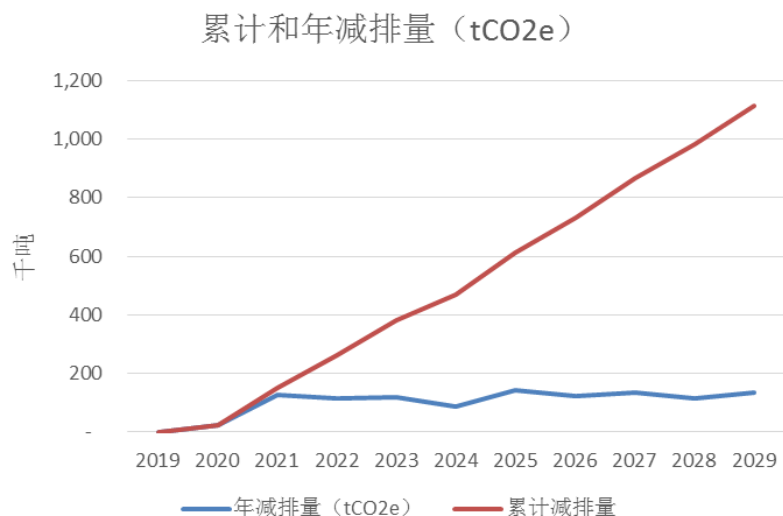


图 7-3: 瓦斯生产应用后出现稳定增长的温室气体减排量

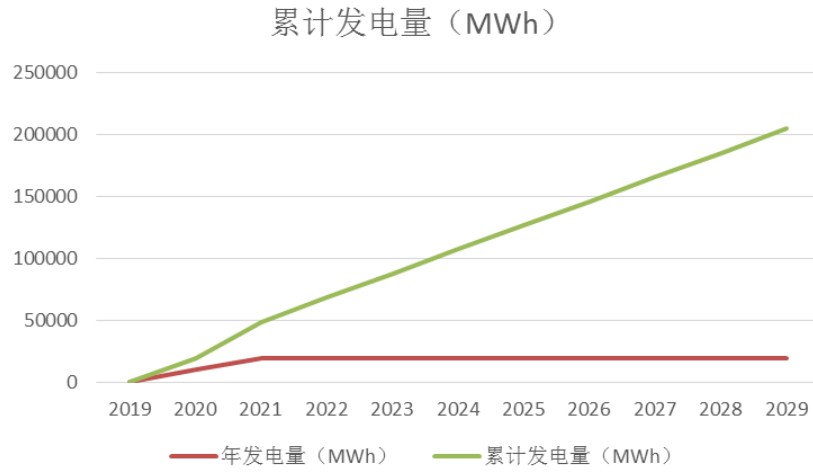


图 7-4: 整个项目期间 (2021-2029) 内年发电量

8 结论、建议和后续工作

作为中国国际煤矿瓦斯卓越中心综合最佳实践培训计划（2018年6月至10月）的一部分，腾晖煤矿预可行性研究始于2018年1月，经过工作准备、数据收集到现在已经全部完成。培训项目包括在中国山西省举办的三次课堂培训及对腾晖煤业进行的实地考察（参观地面和地下作业场所），以及对中国太原附近杜尔坪矿的瓦斯发电项目进行的实地考察。

该矿目前使用的抽采方式主要通过本煤层及高低位裂隙带钻孔结合来抽排瓦斯。该矿也使用从巷道结合处进行裂隙带钻孔。新装的泵站通过高低负压收集系统抽排煤矿瓦斯。抽采系统与大量的钻孔相结合，以控制瓦斯浓度在爆炸范围内和之下。但这不仅会在矿井内造成严重的健康和安全隐患，还会导致无法利用的气体浓度。目前所有瓦斯都被排放到大气中，产生大量的温室气体。

在对腾晖煤矿提供的数据进行详细审查和讨论，并实地参观了煤矿的运营，了解了当前的瓦斯抽采计划之后，我们通过对瓦斯储层建模，用来模拟采用定向钻孔取代矿井现的钻孔以达到同样的抽采目标。结果表明，使用煤层定向钻孔和采空区水平钻孔工艺能显著地增加瓦斯抽放系统中的瓦斯浓度。尽管瓦斯总产量将保持与目前相同的水平，但是更高的瓦斯浓度对于矿山来说将更安全，并且将导致温室气体排放减少，因为高浓度瓦斯将容易进行利用。通过钻孔量来计算估计的气体产量，然后将其应用于2号和10号煤层的整个回采工作面。最后，制定瓦斯抽采计划，并对整个煤矿的瓦斯总抽采量进行了预测，并将其纳入后面的财务分析。

建议采用采空区高位定向钻孔，从接近回采入口处的煤层向上钻进，进入顶板裂隙带上方。作为整个矿井分析的一部分，煤矿应评估和改变其现有的通风系统，以便从有效性和经济性角度优化通风和抽采系统。

该预可行性研究分析了三种方案下的成本和效益：（方案1）只针对瓦斯发电厂；（方案2）整个项目，包括提议的瓦斯抽采项目和煤矿瓦斯电厂；（方案3）只针对建议的瓦斯抽采项目。煤矿瓦斯电厂，单一分析是应腾晖煤业管理部层的要求开发的，因为瓦斯抽采项目将作为煤矿正常项目的部分，可包括在正常运营成本中。对于腾晖煤矿瓦斯利用，根据市场条件和矿山管理层的优先选项，我们选择瓦斯发电作为利用的方案。

考虑到建议的瓦斯抽采方案的成本及成本节约的重要性，我们将单一瓦斯抽采方案（案例 3）和整个项目（案例 2）的财务分析均包含在此可行性研究报告中。在所有这三种方案下的分析都显示出积极的财务回报。对于单一的发电项目的选项，由于矿山支付高的电价、政府又提供补贴，以及中国制造的燃气发电机组的低成本，回报非常具有吸引力。尽管低于单一发电项目选项，整个项目选项（案例 2）也显示出积极的回报。对案例 3，即使没有地面设备投资，只有定向钻探的投资也可以更具经济效益。然而，减少温室气体排放，腾晖煤矿在提高瓦斯抽采效率的同时，应该投资建议煤矿瓦斯利用项目。该项目的实施可以在项目周期内减少 1,481,616 tCO₂e 的净排放量。

对本可行性研究的技术和财务数据进行分析得知，腾晖煤矿的瓦斯发电项目是可行的。建议在作出正式投资决策之前，就对提议项目进行全面的可行性研究。为了进行完整的可行性研究，建议采取以下后续步骤：

- 进行详细的工程项目研究，对抽采和通风进行额外监测，以提供可靠的瓦斯抽采和矿井通风数据，用于评估项目的可行性；
- 得到额外的地质数据，以便更准确地进行瓦斯资源评估；
- 根据新的或修订的数据进一步完善储层模拟和瓦斯产量预测；
- 联系钻探承包商以获得定向钻孔的钻孔成本估算；
- 进行进一步的市场调研，更彻底地调查分析所有瓦斯利用方案，包括瓦斯发电，以确认由煤矿瓦斯到电力的经济和技术可行性，以及替代品的可行性及其与瓦斯发电的竞争力；
- 与设备和服务供应商进行联系，了解设备价格、销售条款和产品规格；
- 制定瓦斯发电厂的工程和施工要求；
- 制定详细的项目开发和实施计划，并确定项目开发的内部成本；
- 探索排放抵消市场，特别是自愿市场，以确定是否可以出售项目的二氧化碳抵消信用并与承销商建立关系。特别是如果承销商对远期销售前景感兴趣，这将有助于为项目提供前期资金；
- 排放抵消市场要求设立一个减排基准，并制定一套监测、报告和核实计划，以确立正式的减排信用系统；
- 完善财务分析并为内部或外部融资制定足够详细的项目融资依据。

9 参考文献

- BP. (2018). *BP Statistical Review of World Energy*. Retrieved from BP: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-coal.pdf>
- 大英百科全书. (2018). *Shanxi*. Retrieved from Britannica: <https://www.britannica.com/place/Shanxi>
- CCII. (2016). *中国煤炭信息研究院, Summary of Guizhou and China CMM, Energy and Coal Markets*. Beijing, P.R. China.
- CCII. (2017). Status and Potential of AMM Project Development in China. Retrieved from CCII: <https://www.globalmethane.org/GMF2018/presentations/0417StatusandPotentialofAMMProjectDevelopmentinChina.pdf>
- 中国日报. (2018). Coal-rich province goes 'green'. Retrieved from China Daily: <http://www.chinadaily.com.cn/a/201801/14/WS5a5ad496a3102c394518f145.html>
- 经济时报. (2016, March 10). Fitch: Higher China Coal-Bed Methane Subsidy Not Enough to Lift Industry. Retrieved from Econotimes: <http://www.econotimes.com/Fitch-Higher-China-CoalBed-Methane-Subsidy-Not-Enough-to-Lift-Industry-175912>
- EDF. (2017). The Progress of China's Carbon Market. Retrieved from Environmental Defense Fund: https://www.edf.org/sites/default/files/documents/The_Progress_of_Chinas_Carbon_Market_Development_English_Version.pdf
- EIA. (2015). *Energy Information Administration Beta*. Retrieved from Energy Information Administration: <http://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN>
- GMI. (2015). The Experience with CMM Development: A Case Study Focusing on Policy from China. Retrieved from China Coal Information Institute: https://www.globalmethane.org/forum/presentations/coal/tuesday-session-2/Liuwenge_Experience_with_CMM_Development.pdf
- GMI. (2016). Coal Sector Updates in China. Retrieved from Global Methane Initiative Presentation, Geneva: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/coal/cmm/11cmm_gmi.cs_oct2016/2_GMI
- 李贵红, (2016). Coal reservoir characteristics and their controlling factors in the eastern Ordos basin in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, 1051-1058. China_coal.pdf
- GMI. (2016). Coal Sector Updates in China. Retrieved from Global Methane Initiative Presentation, Geneva: <https://www.unece.org/fileadmin> Finance Agency:
- GZICCEP. (2011). *Guizhou Coal Mine Methane Resources and Comprehensive Utilization Options Final Report*. Guiyang, China.
- 香港贸发局. (2018). Shanxi: Market Profile. Retrieved from HKTDC: <http://china-trade-research.hktdc.com/business-news/article/Facts-and-Figures/Yuncheng-Shanxi-City-Information/ff/en/1/1X000000/1X0A1IMW.htm>

黄盛初, S. (2018, September 24). *China Coal Sector Update to the 27th Session of the Global Methane Initiative (GMI) Coal Subcommittee*. Retrieved from https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/coal/cmm/13cmm_sept2018/24_September_GMI/4_CHINA.pdf

ICE. (2018, December 10). ICE Futures Europe: CER Futures. Retrieved from <https://www.theice.com/products/814666/CER-Futures/data?marketId=5878676&span=1>

ICAE. (2016). Provincial energy consumption and emission projection- Shanxi Case study. Retrieved from the 8th International Conference on Applied Energy: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217306689>

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

NRDC. (2016). *The 13th Five-Year Plan for Energy Development*. NRDC.

NSBSSC. (2018). Statistical Communiqué of 2017 National Economic and Social Development of Shanxi Province. Retrieved from National Survey Bureau Shanxi Survey Corps: http://www.linfen.gov.cn/gov/article_214871.html

Ripley. (2018). “Carbon Offset Markets and U.S. CMM Project Development”. Presentation of the American Carbon Registry for the U.S. Environmental Protection Agency Coalbed Methane Outreach Program Webinar.

山西焦煤. (2018). *Overview*. Retrieved from <http://www.sxcc.com.cn/gaikuang.jhtml>

U.S. Geological Survey. (2014). *USGS Compilation of Geographic Information System (GIS) Data Representing Coals Mines and Coal-Bearing Areas in China. Open File Report 2-14-1219*. Reston, Virginia USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

US EIA. (2015). *China International Analysis*.

USEPA. (2015). *EPA Country CMM Profiles*. Retrieved from EPA: http://www3.epa.gov/cmop/docs/cmm_country_profiles/Toolsres_coal_overview_ch7.pdf

USEPA. (2015a). Energy Markets in China and the Outlook for CMM Project Development in Anhui, Chongqing, Henan, Inner Mongolia, and Guizhou Provinces. Retrieved from EPA: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/2014_coalchinaenergymarket_fullreport.pdf

刘文革. (2016). The Experience with CMM Development: A Case Study Focusing on Policy from China. *Global Methane Forum*. Washington D.C. USA: Global Methane Forum. Retrieved from

https://www.globalmethane.org/forum/presentations/coal/tuesday-session-2/Liuwenge_Experience_with_CMM_Development.pdf

新华财金社, (2017). Shanxi integrates gas assets, 1st provincial gas company to set up. Retrieved from Xinhua Finance Agency

张羽光, (2004). 六枝煤矿区化处矿井煤层气资源特征初步分析(Preliminary Analysis of Coal Seam Gas of Huachu Pit at Liuzhi Coal Field). 贵州地质 (*Guizhou Geology*), 21(2), 109-11.