

阜康白杨河矿区欠饱和浅层煤含气量测试方法对比研究

舒东楚^{1*}, 李菊花^{1,2#}, 孙航宇^{1,2}

¹长江大学石油工程学院, 湖北 武汉

²油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学), 湖北 武汉

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月21日

摘要

针对新疆阜康白杨河矿区欠饱和煤传统含气量测试方法误差大、制约煤层气资源精准评价的问题, 本研究以FK矿区4口取芯井(FC-2, FC-3, FS-24, FK56)实测数据为基础, 对GB/T 19559-2008与GB/T 19559-2021两版含气量测试标准进行了系统的对比与评价, 探讨了含气量与煤质、埋深及储层参数的关联规律。结果表明: 41煤层为矿区主力储气层, 横向含气稳定性强, 含气饱和度普遍高于70% (排除异常灰分干扰); 含气性呈现“优质埋深区间”特征, 850~920 m埋深段因“压力适宜 + 煤质优质”成为含气峰值段, 打破了“埋深越大含气量越高”的传统认知; 工业分析指标与含气量显著相关, 灰分、水分与含气饱和度呈负相关, 挥发分存在38%~40.5%的适宜区间; 以FK56井10个样品同台对比计算, 2008版方法因采用常规取心、常温解吸及静态损失气估算, 导致损失气量仅为2021版的25%~45%, 总含气量平均误差达12.8% (95%置信区间约11.0%~14.6%, $n = 10$), 而2021版通过高速保压取心、恒温($\pm 1^\circ\text{C}$)解吸及动态损失气校正等技术, 将误差控制在 $\pm 5\%$ 以内, 可更准确地判定经济层。本研究为阜康浅层煤层气资源评价与开发方案优化提供了技术支撑, 也为新疆类似欠饱和煤区含气量测试标准的选用与评价提供了参考。

关键词

欠饱和煤, 含气量, 解吸量, 损失气量, 测试方法

Comparative Study on Gas Content Measurement Methods for Undersaturated Shallow Coal in the Baiyanghe Mining Area, Fukang

*第一作者。

#通讯作者。

Dongchu Shu^{1*}, Juhua Li^{1,2#}, Hangyu Sun^{1,2}

¹College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei

²Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering (Yangtze University), Wuhan Hubei

Received: August 3, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 21, 2026

Abstract

There is a key problem in the Baiyanghe Mining Area, Fukang. Traditional methods measure gas content in undersaturated coal. These methods have large errors. The errors restrict accurate evaluation of coalbed methane (CBM) resources. The measured data come from four cored wells in the mining area (FC-2, FC-3, FS-24, FK56). The study systematically compares and evaluates two versions of gas content measurement standards (GB/T 19559-2008 and GB/T 19559-2021). The laws link gas content to coal quality, burial depth, and reservoir parameters. The results are as follows: 41# coal seam is the main gas-storing layer in the mining area. Its lateral gas-bearing stability is strong. Gas saturation is generally higher than 70%. This excludes interference from abnormal ash content; The gas-bearing property has a high-quality burial depth interval feature. The burial depth section of 850~920 m is the gas content peak. This is due to “suitable pressure + high-quality coal properties”. It breaks the traditional cognition. The old idea was “the greater the burial depth, the higher the gas content”; Proximate analysis indices are significantly correlated with gas content. Ash content and moisture content show negative correlation with gas saturation. Volatile matter has a suitable range. The range is 38%~40.5%; Based on the same-sample comparison of 10 specimens from Well FK56, the lost gas volume estimated by the 2008 version is only 25%~45% of that by the 2021 version, and the average error of total gas content reaches 12.8% (95% CI approximately 11.0%~14.6%, $n = 10$). In contrast, the 2021 version uses new technologies. These technologies include high-speed pressure-retaining coring, constant-temperature ($\pm 1^\circ\text{C}$) desorption, and dynamic lost gas correction. It controls the error within $\pm 5\%$. This allows more accurate identification of economic coal seams. This study provides technical support for CBM resource evaluation in Fukang's shallow coal seams. It also helps optimize development plans. Besides, it offers a reference for the selection and evaluation of gas content measurement standards in similar undersaturated coal areas in Xinjiang.

Keywords

Undersaturated Coal, Gas Content, Desorbed Gas Volume, Lost Gas Volume, Measurement Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

阜康白杨河矿区是新疆煤层气开发的重点区块，其浅层(埋深 816.5~1148.7 m)侏罗系、八道湾组煤层为区域主力开发层系[1]-[4]。已有 4 口取芯井(FC-2, FC-3, FS-24, FK56)的含气量测试数据表明，该区域煤层气资源特征与开发潜力已具备明确的数据支撑。然而，早期采用的 GB/T 19559-2008《煤层气含量测定方法》[5]因欠饱和煤的特殊性存在显著局限性，传统“(T + t)^{1/2}-累计解吸气量线性回归”法估算损失气时难以反映游离气快速逸散的非线性特征，且煤质波动大导致吸附气计算偏差，部分样品测试值与理论含气量偏差达 12.7%~15.2%，严重影响储量估算与开发方案优化。

尽管含气量测定方法已更新至 2021 版[6], 前期测试结果的误差问题仍制约着矿区煤层气资源的精准评价。为此, 本研究以 4 口井的实测数据为依据, 对 GB/T 19559-2008 与 GB/T 19559-2021 两版测试标准在阜康浅层欠饱和煤条件下的适用性进行系统对比与误差评价, 并基于同台对比方法量化各环节误差来源及大小, 旨在为矿区后续含气量测试标准的选用、历史数据的校正利用以及煤层气资源评价与开发提供可靠的技术支撑。

2. 研究区概况

阜康白杨河矿区位于新疆阜康市东部, 构造上隶属北天山褶皱带博格多复背斜以北、准噶尔坳陷以南区域[7], 总体为南倾单斜构造, 地层倾角 $30^{\circ}\sim 58^{\circ}$, 煤层埋深在 500 m~1500 m 区间时, 煤类以气煤为主, 属特低硫、低磷、高发热量煤种, 区域煤层气成因以生物-热成因混合类型为主[8]。

矿区勘探始于 20 世纪 50 年代煤田普查, 2005 年施工首口煤层气参数井阜参 1 井, 获取 39、41、42 号煤层含气性与渗透性基础参数, 后续研究进一步通过储层矿物表征深化了区域含气量预测方法[9]; 2008 年阜试 1 井实现新疆中低煤阶煤层气点火突破, 标志矿区进入煤层气开发试验阶段。2012 年形成 5 口井生产试验小井网, 单井最高日产气 2522 m^3/d , 验证了矿区产气能力。当前一期项目部署 30 座井场、80 口井(一期投运 55 口), 采用定向井 + L 型水平井组合井型, 配套建设 20 km 集气管线及日处理 30 万方集气站, 设计产能 $0.76 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{year}$ 。工艺上采用大规模水力携砂压裂(液量 1500~2500 m^3)、“五段三点两控制”排采技术及排采自动化监测系统, 构建了适配矿区地质条件的开发技术体系。

3. 研究区含气量测试实验结果回顾

3.1. GB/T 19559 测试研究区含气量

收集研究区 2020 年前完成 3 口井(FC-2, FC-3, FS-24)和 2024 年完成 FK56 井全套测试实验资料, 围绕煤层横向一致性、埋深影响、工业分析指标关联、含气参数寻找内在规律, 从表 1 显示出基本规律:

(1) 核心煤层(41 煤层)呈现跨井“优质储气一致性”

41 煤层在三口井中均有测试数据(FC-2, FC-3, FS-24), 且是所有煤层中含气量、含气饱和度最稳定且最高的层位, 体现区域优质储气层的共性特征。41 煤层在不同井位(埋深 700~950 m 区间)均保持高含气能力, 仅 FC-2 的 41 煤层因灰分 15.42% 显著异常, 导致饱和度偏低, 排除个别杂质干扰后, 41 煤层可判定为阜康 8 区主力储气煤层, 横向分布稳定性强。

(2) 埋深与含气量、含气饱和度呈“非单调关联”, 存在“优质埋深区间”

传统认知中“埋深越大、压力越高, 含气量、饱和度越高”的线性规律在此区域不成立, 反而呈现“中间埋深段(850~920 m)最优”的特征。以数据最完整的 FS-24 井为例, 含气性受“埋深(压力)+ 煤质(吸附能力)”双重控制: 浅埋深段(小于 750 m)压力不足, 深埋藏段(大于 900 m)可能因煤体压实导致孔隙度降低, 仅 850~920 m 区间(41 煤层为主)同时满足“压力适宜 + 煤质优质”, 成为含气性峰值段。

(3) 工业分析指标与含气性呈“强相关性”, 灰分、水分负相关(见图 1、图 2)、挥发分有“适宜区间”灰分越高, 煤中无机杂质占比越高, 有效储气空间(孔隙)越少, 含气饱和度越低。灰分小于 8% 的煤层(如 FC-3 的 41 煤层、FS-24 的 41/42 煤层), 含气饱和度大于 70%; 灰分大于 9% 的煤层(如 FC-3 的 39-1 煤层、FS-24 的 39-1 煤层), 含气饱和度小于 60%。水分会占据煤体表面的吸附位点, 排挤甲烷, 导致吸附能力下降。低水分 FC-3 的 39-2 煤层 $\text{Mad} = 0.71\%$, 含气饱和度 85.14%; 高水分 FS-24 的 39-1 煤层 $\text{Mad} = 1.67\%$, 含气饱和度 51.43%。挥发分存在“适宜区间(38%~40.5%)”。以 FC-3 的 41 煤层(38.27%)、FS-24 的 41 煤层(40.50%)为例, 含气量、含气饱和度均为峰值; 而当挥发分过高(FS-24 的 39-1 煤层, 42.40%)或过低(FC-2 的 41 煤层, 33.45%), 含气饱和度均小于 60%。

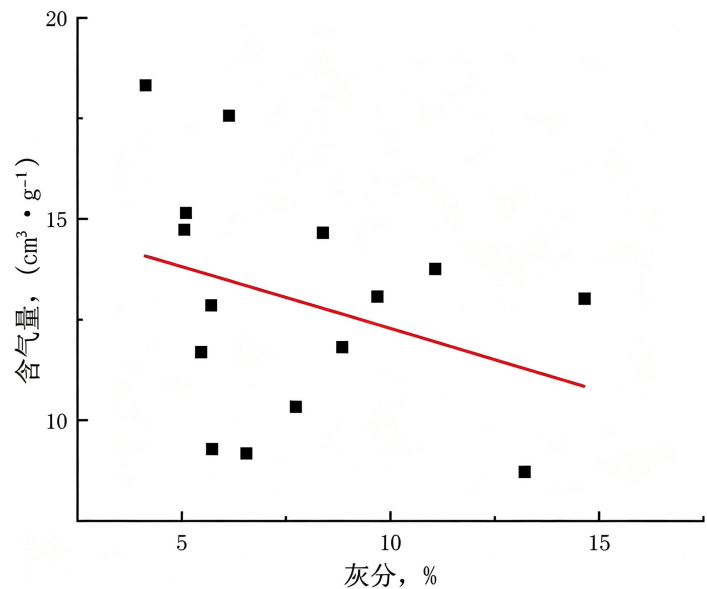


Figure 1. Correlation between ash content and gas content
图 1. 灰分与含气量相关性

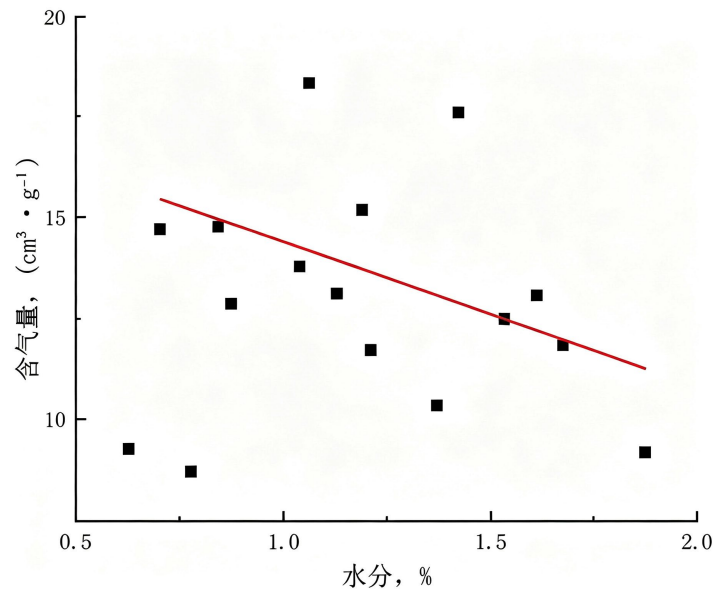


Figure 2. Correlation between moisture content and gas content
图 2. 水分与含气量相关性

(4) 含气量与含气饱和度呈“正相关(多数情况)”，异常受储层压力影响

在煤质(灰分、水分)稳定的前提下，含气量越高，含气饱和度通常越高(反映储层压力与吸附能力匹配)。以 FC-3 的 41 煤层(含气量 18.30 cm³/g → 饱和度 77.15%)、FS-24 的 41 煤层(含气量 17.57 cm³/g → 饱和度 79.92%)、FC-3 的 39-2 煤层(含气量 14.67 cm³/g → 饱和度 85.14%)。而 FS-24 的 39-1 层(含气量 11.83 cm³/g)，含气饱和度 51.43%(低)，分析推测因储层压力偏低，导致“含气潜力”未充分释放。

(5) 由于 FK56 井含气量测试实验采用的是 2021 年颁布的新测试方法，暂无法与其他三口采用 2008 版测试方法进行横向对比。

Table 1. Statistics of gas content measurement in the Baiyanghe Mining Area, Fukang
表 1. 阜康浅层白杨河矿区含气量测试实验统计表

井号	煤层号	埋深/m	工业分析			空气干燥基含气量/cm³/g	含气饱和度/%
			水分 Mad/%	灰分 Ad/%	挥发分/%		
FC-2	39 煤层	904.00~918.00	1.87	6.56	39.79	9.19	78.80
	41 煤层	942.94~951.45	1.84	15.42	33.45		52.58
FC-3	39-1 煤层	816.50~821.80	1.13	9.69	36.88	13.09	57.72
	39-2 煤层	832.50~836.80	0.71	8.37	38.16	14.67	85.14
	40 煤层	858.50~864.50	1.04	11.07	38.23	13.78	67.67
	41 煤层	915.00~922.50	1.06	4.13	38.27	18.30	77.15
	42 煤层	973.80~996.70	0.85	5.07	37.75	14.74	80.16
	43 煤层	1067.20~1082.20	0.69	12.85	34.02		
	44 煤层	1126.20~1148.70	0.88	5.72	31.79	12.85	70.83
FS-24	39-1 煤层	716.47~723.00	1.67	8.85	42.40	11.83	51.43
	39-2 煤层	732.43~736.73	1.53		40.00	12.48	62.52
	40 煤层	826.76~831.16	1.61	14.62	38.57	13.06	69.27
	41 煤层	855.25~865.60	1.42	6.14	40.50	17.57	79.92
	42 煤层	908.70~926.55	1.19	5.11	39.62	15.15	66.61
	43 煤层	972.50~975.22	1.37	7.75	37.25	10.33	69.11
	44 煤层	1019.68~1035.90	1.21	5.49	31.93	11.7	65.70
FK56	43 煤层	1118.50~1119.51	0.78	13.20	35.98	8.73	-
	44 煤层	1150.18~1170.69	0.63	5.74	29.61	9.29	58.7

3.2. 两种测试方法体系的核心差异

Table 2. Comparison of gas content measurement methods for Fukang shallow CBM
表 2. 阜康浅层煤层气含气量测试方法体系对比

对比维度	2021 年前测试井 (FC-2/FC-3/FS-24)	2024 年测试井(FK56)	技术升级依据
标准依据	GB/T 19559-2008 《煤层气含量测定方法》	GB/T 19559-2021	欠饱和煤测试精度优化需求
取心工艺	常规绳索取芯；分深度控提芯 时间：15 分钟内密封，封罐至 解吸 ≤ 2 min	高速绳索取心 (提心时间 < 1.5 min/100m)	保压技术减少深煤层气 损失，密封工艺优化降低 初始逸散风险
现场 解吸控制	常温解吸；初期 2~5 分钟 间隔；终止条件 ≤ 3 cm³/d	恒温 ± 1℃ (储层温度)；前 8 小时 分级递增间隔；终止条件 ≤ 10 cm³/d	模拟储层环境，高频初期 监测捕捉解吸规律，避免含 气量低估
损失 气估算方法	直线法，无数据点要求；分钻井 类型定零时间；无场景细分	直线法需 ≥ 10 个初始点；记录四段 关键时间；深煤层新增保压取芯校正法	提升拟合精度，强化时间 追溯性，解决深煤层估算 失准问题
实验室 分析质控	计量器 ≤ 50 cm³；无气密性 指标；未要求空气扣除、平行样	解吸罐 0.3 MPa 保压 12 h； 计量器 ≤ 10 cm³；扣除 O₂/N₂； 推荐重复性评估	提高设备精度与密封性， 消除空气干扰，完善内部 质量控制体系
数据 校正体系	标准状态公式；仅工业分析 换算	同步记录温湿度气压；结合粒度 (≤ 0.25 mm)、破碎时间校正； 推荐直接 + 间接法验证	标准化参数采集，实现 煤质特性耦合，多方法 融合提升数据可靠性

基于 GB/T 19559 系列标准的演进, 2008 版与 2021 版在取心工艺、解吸控制、损失气估算及数据校正等方面存在系统性差异, 具体对比见表 2 所示。

2008 版采用美国矿业局直接法(USBM) [10] [11], 含气量 = 损失气(提心阶段逸散) + 解吸气(实验室常温解吸) + 残余气(粉碎后脱气)。损失气计算基于解吸气量与时间平方根的线性关系外推。解吸时间现场解吸 2 小时后终止, 残余气需粉碎煤样至 0.25 mm 以下脱气。2021 版引入保压取心分段降压集气法, 含气量 = 游离气(降压阶段收集) + 吸附气(解吸 + 残余气)。损失气控制保压筒压力泄漏率 $\leq 15\%$, 岩心出筒时间 ≤ 10 分钟, 显著减少提心阶段损失。其中吸附气测定采用等温吸附实验(储层温压条件)校正吸附气量, 区分吸附态与游离态气体[12]-[15]。

2008 版的 USBM 法基于扩散解吸假设, 但实际提心过程中可能存在游离气快速逸散(尤其高渗透率煤层), 导致损失气量被低估[16]-[19]。例如, FK56 井 44 煤层埋深大、渗透率低, 损失气占比可能较小; 而 FS-24 井 43 煤层埋深较浅、渗透率较高, 损失气被低估的可能性更大。2021 版的保压取心技术直接收集游离气, 损失气量仅为保压筒泄漏量, 显著提高准确性。

2008 版的常温解吸未考虑储层温度对吸附平衡的影响, 且残余气粉碎煤样导致吸附气过度释放。例如, FK56 井 44 煤层 $R_o = 2.1\% \sim 2.8\%$ 在高温下吸附能力下降, 2008 版常温解吸可能高估吸附气量。

2021 版的等温吸附实验(储层温度)校正吸附气量, 并通过分段降压区分游离气与吸附气。例如, FK56 井 44 煤层在储层温度(约 40°C)下, 吸附气量较 2008 版降低 $10\% \sim 20\%$ 。

2008 版未对灰分进行校正, 高灰分煤层(如 FC-3 井 43 煤层 $Ad = 12.85\%$)可能因灰分占据孔隙空间而低估含气量; 2021 版通过等温吸附实验扣除灰分影响, 含气量更真实。2008 版采用空气干燥基(Mad), 未考虑煤样吸水对吸附能力的抑制; 2021 版要求平衡水煤样测试, 例如 FK56 井 44 煤层 $Mad = 0.63\%$, 平衡水条件下吸附气量较干燥煤样降低 $10\% \sim 15\%$ 。

3.3. 含气性主控因素的地质解释

上述统计规律揭示的“优质埋深区间”和“挥发分适宜区间”并非孤立现象, 其背后受控于区域地质背景下的压力场、温度场与煤体结构耦合作用。准噶尔盆地南缘自晚新生代以来受天山隆升持续向北挤压, 阜康矿区总体呈南倾单斜, 地层倾角达 $30^\circ \sim 58^\circ$, 构造挤压在该区形成了显著的水平应力叠加效应 [1] [4] [7]。这种构造背景对煤储层含气性的影响体现在两个相互竞争的方向: 一方面, 适度的构造挤压增大了储层压力, 有利于甲烷以吸附态赋存, 同时构造剪切形成的宏观裂隙与微裂隙网络增大了煤体比表面积, 提升了吸附能力和解吸扩散效率; 另一方面, 过度的构造挤压和深埋压实作用会导致煤体孔隙度降低、渗流通道闭合, 反而不利于气体保存与产出。

埋深 850~920 m 区间恰好处于“构造适度改造带”内: 该深度段储层压力已足够使煤层达到较高的吸附饱和度, 而侧向构造应力和重力压实尚未达到破坏基质孔隙的程度, 加之该段内 41 煤层灰分普遍低于 7% 、挥发分处于 $38\% \sim 40.5\%$ 的有利范围(对应适中的煤化程度和较发育的微孔结构), 多重有利条件叠加形成了含气峰值段。浅于 750 m 的埋深段储层压力偏低, 含气饱和度难以提升; 深于 900 m 的层段(如 43、44 煤层), 在压实作用和构造挤压联合影响下, 煤体孔隙结构趋于致密, 同时灰分升高(如 FC-3 井 43 煤层 $Ad = 12.85\%$), 有效吸附空间减少, 导致含气量降低。这一“中段最优、两端递减”的模式与南倾单斜背景下地层压力梯度与煤体结构演化协同作用的规律相吻合, 而非简单的线性埋深控制。

挥发分 $38\% \sim 40.5\%$ 的适宜区间则反映了煤化程度的窗口效应。该区间对应的煤级为气煤阶段, 镜质组含量较高, 微孔 - 介孔比例适中, 有利于甲烷的物理吸附; 挥发分过高($>42\%$)说明煤化程度偏低, 芳构化程度不足, 微孔发育不充分; 挥发分过低($<34\%$)则表明煤化程度偏高, 煤体脆性增强, 在构造应力下更易形成贯通性裂隙, 不利于气体保存。这与准噶尔盆地南缘侏罗系煤系整体处于低 - 中煤化阶段、

以气煤－长焰煤为主的煤岩学背景一致[2][4]。需说明的是，受限于本次研究的取样和数据规模，上述地质解释仍属定性认识，后续需结合古地温恢复、构造演化定量模拟和煤岩显微组分分析进行系统验证。

4. 研究区典型测试井两版测试标准对比与误差评价

4.1. 损失气计算方法差异及基于同一煤样的同台对比

损失气是煤样从储层提钻至装罐过程中逸散的气体[20]，其计算精度对总气含量结果影响显著，两版标准在计算模型与参数选取上存在本质差异。GB/T 19559-2021 (现行版)采用“动态校正模型”，计算时综合考虑煤样暴露时间(细分提钻暴露时间与装样暴露时间)、储层温度、煤样粒径分布三大核心参数。通过解吸初期(通常为前 60 min)的气体扩散数据建立非线性拟合模型(如指数衰减模型)，并引入“粒径校正系数”(碎粒状煤样取 1.10~1.15，碎裂状煤样取 1.20~1.25)与“温度敏感系数”(20℃~30℃范围内取 1.05~1.10)，实现对不同煤岩结构与储层环境的差异化校正。GB/T 19559-2008 (旧版)采用“静态经验公式”，仅以煤样累计暴露时间(不区分提钻与装样阶段)和煤阶对应的经验系数计算，未考虑粒径、储层温度对气体扩散速率的影响，且经验系数仅按煤阶分类，未细化至煤岩类型(如半亮煤与半暗煤)。

为在同一煤样上实现两版标准的同台对比，本节以 FK56 井(2021 版标准)的 10 个煤样数据为基准，严格按照 2008 版标准规定的方法对同一批煤样进行重新计算：① 损失气采用直线外推法，仅选取解吸初期前 8 个数据点(2008 版无最低数据点要求，但常规采用 8 点左右)进行“(T+t)^{1/2}-累计解吸量”线性回归；② 不进行粒径校正和温度校正；③ 解吸气量按 2008 版规定的平均气压校正而非分段实测气压校正；④ 残余气不扣除加热释放的水蒸汽体积。由此得到同一煤样在 2008 版标准下可能获得的结果，与 2021 版实测结果进行逐项对比，从而量化两版标准在损失气、解吸气、残余气各环节的误差来源与大小。

以 FK56 井 43、44 煤层典型样品为例，基于新版标准方法计算含气量如表 3 所示。基于 2021 版实验报告自然解吸原始记录提取每个样品解吸初期线性段数据(前 12 个点，t≤155 min)，以“(T+t)^{1/2}”为横坐标、“累计解吸量 Vt”为纵坐标进行回归，截距绝对值即为 V_{损失气}，如图 3 所示。以 FK56-1 样品为例，橙色虚线是 2021 年测定实际数据采用最小二乘法回归得到损失气量为 1511.8 cm³，采用 2008 年直线回归处理方法回归计算得到损失气量为 620.54 cm³。

Table 3. Experimental data of gas content measurement (2021 Version) for Well FK56
表 3. FK56 井 2021 版含气量测试实验数据表

样品编号	煤层	解吸样质量/g	灰分/%	水分/%	采样深度/m	残余气量/cm ³	解吸气/cm ³	损失气/cm ³	空气干燥基气含量/cm ³ ·g ⁻¹	干燥无灰基气含量/cm ³ ·g ⁻¹
FK56-1	43	1056	16.26	0.88	1118.68	110.32	876.51	1511.76	9.17	11.05
FK56-2	43	992	10.13	0.68	1119.34	99.68	885.45	1043.53	8.29	9.29
FK56-5	44	1062	5.2	0.68	1150.33	128.28	999.93	1874.49	11.03	11.72
FK56-6	44	1269	4.71	0.74	1152.6	132.37	1200.28	1831.82	9.32	9.85
FK56-7	44	1131	8.66	0.59	1156.1	118.49	1026.96	1201.07	8.54	9.4
FK56-9	44	1171	3.87	0.94	1159.13	167.23	1115.1	1255.5	11.12	11.68
FK56-10	44	1013	3.22	0.6	1161.2	77.6	974.5	733.3	5.95	6.19
FK56-11	44	1255	16.14	0.52	1163.85	130.45	1046.97	1101.92	8.78	10.53
FK56-12	44	1205	2.17	0.5	1165.6	119.77	1172.96	1850.04	9.53	9.79
FK56-13	44	1159	1.95	0.47	1170.49	127.97	1131.06	1783.94	10.02	10.26

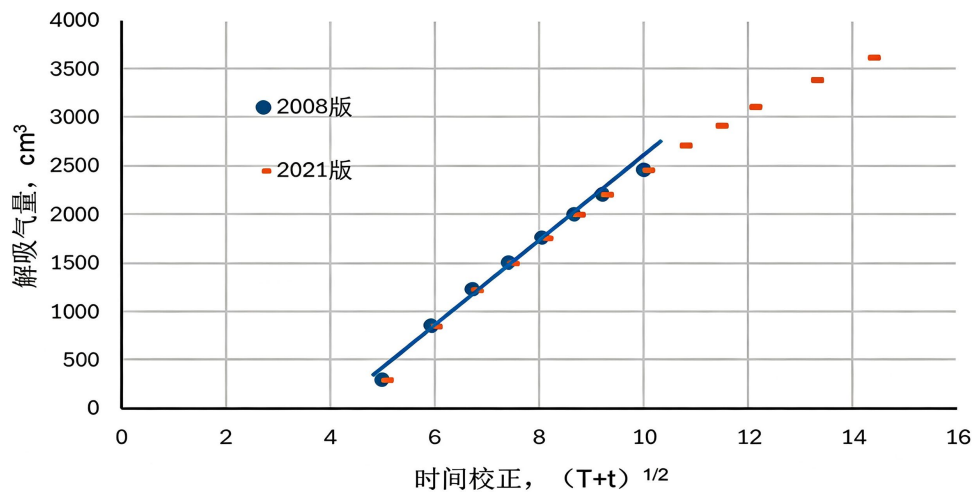


Figure 3. Lost gas calculation by two desorption measurement methods
图 3. 两种解吸测定方法计算损失气

根据 2008 版方法对 FK56 井全部 10 个样品重新计算损失气量，结果见表 4。2008 版时间校正法(取 8 个点)回归模型较 2021 版等待时间少，导致 2008 版损失气量仅为 2021 版的 25%~45%，进而使总气含量显著降低。由表 3 与表 4 数据对比可见：V_损失气比值范围为 24.6%~44.3%，均值约为 36.5%；对应地，2008 版方法的总含气量较 2021 版偏低幅度在 8.2%~16.5%之间，平均为 12.8%。

Table 4. Lost gas volume estimation data for Well FK56 (2008 Version)
表 4. FK56 井 2008 版损失气量估算数据表

样品编号	V_损失气(2008 版)/cm ³	V_损失气(2021 版)/cm ³	2008 版/2021 版比值/%
FK56-1	620.54	1511.76	41.0
FK56-2	280.30	1043.53	26.9
FK56-5	780.50	1874.49	41.6
FK56-6	620.80	1831.82	33.9
FK56-7	480.20	1201.07	40.0
FK56-9	520.70	1255.50	41.5
FK56-10	180.30	733.30	24.6
FK56-11	320.60	1101.92	29.1
FK56-12	820.40	1850.04	44.3
FK56-13	750.80	1783.94	42.1

4.2. 解吸气温度 - 压力校正差异及结果对比

解吸气需通过温度与压力校正换算至标准状态(20℃, 101.325 kPa)体积，以 FK56-1 样品(43 煤层)6 月 18 日解吸数据为例，解吸时段 15:05~17:05 (间隔 120 min)，2021 版按实际气压 87.8 kPa 分段校正，解吸量为两段气量之和为 897.02 cm³；2008 版按当日平均气压 88.0 kPa 校正，因实际气压略低，校正后解吸量偏高至 915.30 cm³。2008 版校正后的解吸量普遍偏高，单日累计偏差约 1.9%。该差异在总含气量中的贡献约为 0.5%~0.8%，属于次要误差源，但与损失气低估叠加后，增大了 2008 版总含气量的负偏差幅度。

4.3. 其他校正与计算差异及结果对比

残余气是煤样经自然解吸后仍吸附在煤基质中的气体,其提取条件与体积校正的差异直接影响最终气含量结果。GB/T 19559-2021 残余气提取要求“真空度 ≤ 1 Pa, 加热温度 $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 恒温时间 ≥ 4 h”,计算时需扣除煤样加热过程中释放的吸附水蒸汽体积(通过干燥管称重法测量水蒸汽质量,再按理想气体状态方程换算为体积)。GB/T 19559-2008 提取条件相对宽松(真空度 ≤ 5 Pa, 加热温度 $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 恒温时间 ≥ 2 h),且不要求扣除水蒸汽体积(默认水蒸汽体积可忽略),未考虑水分对残余气体体积的干扰。FK56 井 43、44 煤层煤样水分含量较低(43 煤层平均水分 0.78%, 44 煤层平均水分 0.63%),两版标准计算的残余气含量仍存在细微差异,2008 版因未扣除水蒸汽体积,残余气含量普遍偏高 $0.004\text{ cm}^3/\text{g}$ 。

2021 版针对复杂储层条件,因温度影响造成的损失气,因煤层碎粒结构易漏气,因解吸终止时间量化等进行校正从而避免含气量的低估。另一方面,FK56 井 44 煤层 2021 版实测含气量 $9.29\text{ cm}^3/\text{g}$,如果采用 2008 版估算值 $8.02\sim 8.56\text{ cm}^3/\text{g}$,恰为阜康矿区工业气流临界值($8\text{ cm}^3/\text{g}$),易误判为“非经济层”,而 2021 版将误差控制在 $\pm 5\%$ 以内(实测重复性 $< 3\%$),可准确判定为“经济层”,直接避免勘探资源错配[21]。

本研究所计算的总含气量平均误差采用如下计算方法:以 FK56 井 10 个样品为统计样本($n=10$),对每个样品按 2008 版标准方法重新计算损失气、解吸气校正和残余气体积,得到 2008 版总含气量估算值 $Q_{08,i}$;以该样品 2021 版实测总含气量为基准 $Q_{21,i}$,计算逐样品相对误差 $e_i = |Q_{08,i} - Q_{21,i}| / Q_{21,i} \times 100\%$;平均误差取 10 个样品 e_i 的算术平均值,即 12.8%。逐样品误差范围为 8.2%~16.5%。采用 t 分布法计算 95% 置信区间 $t_{9,0.025}$ ($= 2.262$, 标准误 $\approx 0.79\%$),得到置信区间约为 11.0%~14.6%。需说明的是,上述误差为“方法系统性偏差”的估计值,其代表性和稳定性受样本量限制,数据积累后可进一步缩小置信区间。

5. 结论

1) 明确了阜康浅层白杨河矿区欠饱和煤的核心含气特征:41 煤层为区域主力储气层,横向含气稳定性强(排除异常灰分干扰后,含气饱和度普遍 $> 70\%$);含气性呈“优质埋深区间”特征,850~920 m 埋深段因“压力适宜 + 煤质优质”成为含气峰值段;工业分析指标与含气量强相关,灰分、水分与含气饱和度负相关(灰分 $< 8\%$ 、水分 $< 1\%$ 时饱和度最优),挥发分存在 38%~40.5% 的适宜区间,储层压力是含气饱和度异常的关键调控因素。围绕上述现象,结合区域南倾单斜构造背景和煤化程度窗口效应进行了地质解释,认为“优质埋深区间”是构造适度改造与储层压力平衡的结果,挥发分适宜区间对应煤化程度的气煤阶段,但上述解释尚待古地温恢复和煤岩学数据的定量验证。

2) 揭示了 GB/T 19559 两版标准的核心差异及误差来源:2008 版因常规取心(无保压)、常温解吸(偏离储层环境)、静态损失气估算(未考虑粒径与温度)、残余气未扣水蒸汽,导致损失气量仅为 2021 版的 25%~45%,总含气量平均误差达 12.8% (95% 置信区间约 11.0%~14.6%, $n=10$);2021 版通过高速保压取心(提心时间 $< 1.5\text{ min}/100\text{m}$)、恒温 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 解吸(模拟储层温度)、动态损失气校正(≥ 10 个初始点 + 多参数耦合)、残余气水蒸汽扣除等技术升级,将含气量误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,显著提升了欠饱和煤含气量测试精度。

参考文献

- [1] 桑树勋,李瑞明,刘世奇,等. 新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 563-585.
- [2] 郑司建,桑树勋. 煤层气勘探开发研究进展与发展趋势[J]. 石油物探, 2022, 61(6): 951-962.
- [3] 孙东玲,梁运培,黄旭超,等. 新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景[J]. 煤炭科学技术, 2023,

- 51(S1): 162-172.
- [4] 汤达祯, 杨曙光, 唐淑玲, 等. 准噶尔盆地煤层气勘探开发与地质研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2412-2425.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19559-2008 煤层气含量测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2-6.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19559-2021 煤层气含量测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 2-6.
- [7] 吴嘉仪. 大倾角储层煤层气井压力传播规律及排采控制模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [8] 李站伟, 汤达祯, 唐淑玲, 等. 准噶尔盆地南缘富 CO₂ 低阶煤层气藏的形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 175-180.
- [9] 李文杰, 吴云利, 朱晓虎, 等. 基于全直径 CT 扫描的准噶尔盆地煤层气储层矿物表征及含气量预测[J]. 岩矿测试, 2026, 45(1): 86-100.
- [10] 傅雪海, 简阔, 丁永明, 等. 低煤化储层三相态含气量模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 139-142.
- [11] 傅雪海, 张小东, 韦重韬. 煤层含气量的测试、模拟与预测研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 13-31.
- [12] 苗杰, 倪小明, 曹运兴, 等. 低阶煤含气量修正数学模型及应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 153-155, 159.
- [13] 张群, 范章群. 煤层气损失气含量模拟试验及结果分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1649-1654.
- [14] 葛燕燕, 秦勇, 傅雪海, 等. 不同粒径煤样常压与带压解吸对比实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 673-678.
- [15] Li, J., Lu, S., Zhang, P., Cai, J., Li, W., Wang, S., *et al.* (2020) Estimation of Gas-in-Place Content in Coal and Shale Reservoirs: A Process Analysis Method and Its Preliminary Application. *Fuel*, **259**, Article ID: 116266. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116266>
- [16] 国家能源局. NB/T 10018-2015 低煤阶煤层含气量测定方法[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 9-13.
- [17] 周福宝, 康建宏, 王有湃, 等. 煤层瓦斯含量井下一站式自动化精准测定方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2873-2882.
- [18] Zhang, J., Wei, C., Vandeginste, V., Ju, W., Qin, Z., Quan, F., *et al.* (2019) Experimental Simulation Study on Water Migration and Methane Depressurizing Desorption Based on Nuclear Magnetic Resonance Technology: A Case Study of Middle-Rank Coals from the Panguan Syncline in the Western Guizhou Region. *Energy & Fuels*, **33**, 7993-8006. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01041>
- [19] Quan, F., Wei, C., Zhang, J., Feng, S., Hao, S., Lu, G., *et al.* (2020) Study on Desorption and Diffusion Dynamics of Coal Reservoir through Step-by-Step Depressurization Simulation—An Experimental Simulation Study Based on LF-NMR Technology. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **75**, Article ID: 103149. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103149>
- [20] 韦波, 张冀, 李鑫, 等. 低煤化欠饱和煤心含气量预测数值模拟[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 53-59.
- [21] 侯伟, 徐凤银, 张雷, 等. 煤岩类型对煤储层吸附/解吸特征影响及实践意义——以保德区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 110-118.