DOI 10.3969/j.issn.2095-4107.2025.03.004

织纳煤田三塘向斜 6 号煤层气成藏条件及富集影响因素

叶　茂[1,2]，吴章利[2,3]，魏元龙[2,3]，赵凌云[1,2,3]，夏　鹏[1,4]，王　科[1,4]

（1. 贵州大学 资源与环境工程学院，贵州 贵阳　550025；2. 贵州省油气勘查开发工程研究院，贵州 贵阳　550081；3. 复杂构造区非常规天然气评价与开发自然资源部重点实验室，贵州 贵阳　550081；4. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室，贵州 贵阳　550025）

摘　要：贵州省是中国南方煤炭和煤层气资源最富集的省份，煤系地层地质条件复杂，含气量变化大。以织纳煤田三塘向斜 6 号煤层为例，根据研究区煤矿、煤层气等“多源、异构、多时相”数据，提取储层组分、物性和含气性等参数，分析煤层直接顶板和底板岩性、煤岩煤质特征、热演化程度、煤层埋深、地层倾角与含气量的关系，建立煤层气富集模式。结果表明：6 号煤层镜质体反射率为 2.84%～3.06%，厚度为 0.84～6.75 m，埋深为 150～1 000 m，具备较好的生气物质基础，含气量为 4.29～27.01 m^3/t，向斜两翼含气量差异较大。煤层直接顶板岩性中泥岩的封盖性好于粉砂岩和灰岩的；南东翼煤层含气量受煤层倾角影响较大，北西翼煤层含气量主要受工业分析组成的影响；煤层含气量随煤岩有机组分、镜质组、煤层埋深、热演化程度增加而增大，随煤岩无机组分、惰质组、煤层倾角增加而减少。研究区煤层气为向斜控气的富集模式，煤层含气量在临界深度 1 000 m 附近最高。该结果为织纳煤田煤层气的勘探开发提供依据。

关　键　词：织纳煤田；三塘向斜；龙潭组；煤层气；成藏条件；影响因素；富集模式

中图分类号：TE112.41；P618.11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095－4107(2025)03－0041－12

0　引言

中国煤层气资源量丰富，总资源量为 3.681×10^{13} m^3，主要集中于埋深 2 000 m 以浅的地层[1]。贵州省拥有 3.150×10^{12} m^3 煤层气资源量，在中国煤层气资源分布中占有重要地位，具有成为中国煤层气产业化发展重要后备区的潜力[2-4]。认识影响煤层气分布和富集的关键因素，可以更有效地指导煤层气勘探开发和有利区选择[5-8]。人们分析煤层含气性的影响因素，高煤阶是煤层气富集的重要煤类，煤层气的富集不仅受地质构造条件、沉积环境和水文地质条件等地质因素的综合控制，也与煤岩自身特征有关[9-13]。胡小林等[9]、王聪等[10]、张凯[11]认为煤层埋深和厚度、地质构造稳定性、煤层顶板岩石类型和热演化程度是决定煤层气分布的主要控气要素。对于不同地区典型高煤阶煤层气富集区主控地质因素，提出不同的高煤阶煤层气富集模式，如水动力控藏模式、向斜控藏模式、三元气体圈闭散失模式、相对构造高位富集模式、斜坡带与煤层变形破碎带富集模式等[14-17]。这些研究多集中于单一煤矿或煤层气井的研究，较难揭示煤层气在区域范围内的分布规律与富集模式，研究结果具有局限性。织纳煤田三塘向斜煤层气资源丰富，煤田勘查程度高，但煤层气勘探开发程度较低，对煤层气成藏条件、控制因素和富集模式研究较少。

以三塘向斜 6 号煤层为例，根据研究区煤矿、煤层气等“多源、异构、多时相”数据，研究煤层直接顶板和底板岩性、煤岩煤质特征、热演化程度、煤层埋深、地层倾角与含气量的关系，提取储层组分、物性和含气性等参数，分析煤层产状特征、主要储层性质与含气量的关系，建立研究区煤层气富集模式，为后续煤层气勘探和开发提供支持。

收稿日期：2024－11－18；**编辑**：朱秀杰

基金项目：贵州省地质勘查资金项目(52000021MGQSE7S7K6PRP)；贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2023]一般 369)；贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 100)

作者简介：叶　茂(2000—)，男，硕士研究生，主要从事非常规天然气地质与开发方面的研究。

通信作者：吴章利，E-mail：35933219@qq.com

1　区域地质概况

三塘向斜位于织纳煤田西南部(见图 1(a)),区域构造位置属于扬子准地台黔南坳陷织金宽缓褶皱区[18],为轴向呈 NE—SW 向的非对称向斜,延伸长度约为 42 km,向斜北西翼地层倾角为 5°～30°,南东翼地层倾角为 10°～50°[19]。向斜主要出露地层由老到新包括中二叠统栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m),上二叠统峨眉山玄武岩组($P_3\beta$)、龙潭组(P_3l)、长兴组和大隆组(P_3c 和 P_3d),下三叠统大冶组(T_1d)、夜郎组(T_1y)和嘉陵江组(T_1j),以及中三叠统关岭组(T_2g)。其中,龙潭组(见图 1(b))是最主要的含煤地层,厚度为 180.97～207.45 m,含煤层 21～46 层,煤层累计厚度为 17.66～39.17 m,可采煤层 10 层。6、7、16、

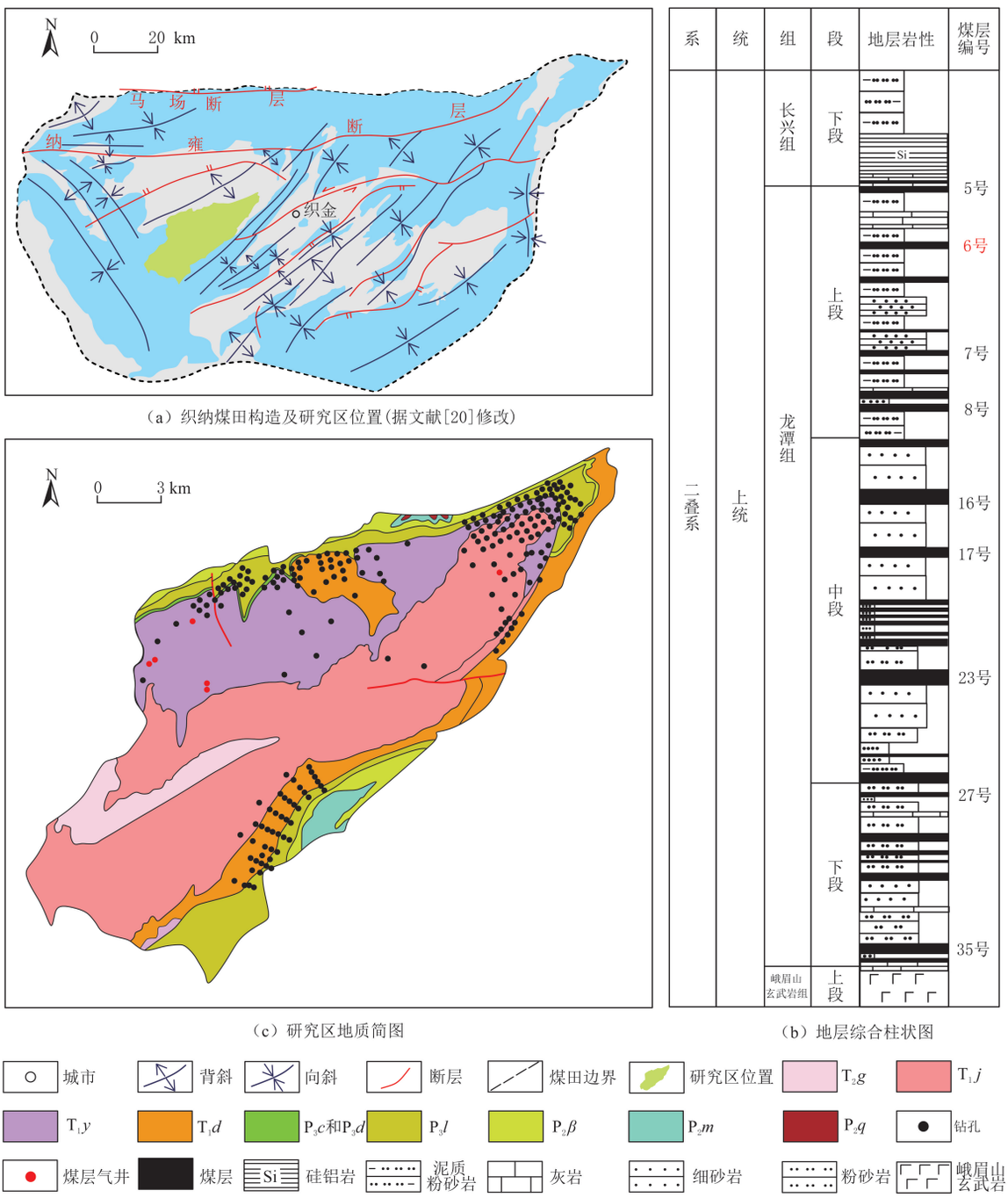


图 1　织纳煤田三塘向斜位置、地层综合柱状图及地质简图

Fig. 1 Histogram of the syncline position, comprehensive stratigraphy column and geological schematic of the Santang Syncline in the Zhina Coalfield

35 号煤层为研究区可采煤层,5-2 煤层、14、21、30、32 号煤层为大部分可采煤层,5-3 煤层为局部可采煤层,可采煤层累计厚度为 13.88～26.39 m。6 号煤层是煤层气勘探开发主要目的层之一,平均含气量为 15.49 m^3/t。

三塘向斜发育 6 个含水层(见表 1),其中龙潭组含水层以砂岩、泥岩和页岩等为主要岩性,岩层裂隙不发育,富水性整体较弱。地下水类型以裂隙水及孔隙水为主,通过细小裂隙或孔隙渗入地下,地下水由向斜两翼向核部径流。龙潭组发育上下两套隔水层(见表 2),飞仙关组含水层间的隔水层为长兴组、龙潭组弱含水段的相对隔水层,各含水层间水力联系微弱,地下水由飞仙关组一、二段分界面排出;峨嵋山玄武岩组隔水层阻断下伏含水层与煤层的水力联系,有利于煤层气保存和富集。根据三塘向斜北西翼、南东翼勘查区煤炭资源储量核查结果,研究区发育 6 条断层。北西翼发育 1 条正断层和 1 条逆断层,断层集中于西部,伴生部分次一级断层,断距较小,未切穿 6 号煤层顶、底板,且断层在研究区边缘发育,对北西翼煤层含气量影响不大。南东翼发育 3 条正断层和 1 条逆断层,断距较大,正断层发育对南东翼煤层气的保存起破坏作用,导致煤层气更易在断层附近逸散。

表 1　研究区含水层特征

Table 1 Characteristics of aquifers in the study area

含水层	岩性组成	单位涌水量/($L\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}$)	渗透系数/($m\cdot d^{-1}$)	水质类型	富水性
第四系含水层	坡积残积黏土、砂土、砾石	—	—	HCO_3—Ca 型	受降水影响明显
三叠系下统永宁镇组岩溶、基岩裂隙含水层	砂岩、泥岩、灰岩	—	—	HCO_3—Ca 型	弱—中等
三叠系下统飞仙关组裂隙含水层	砂岩、泥岩、灰岩	0.011～0.053	—	HCO_3—Ca+Mg 型	弱—中等
二叠系上统长兴大隆组溶隙、裂隙含水层	砂岩、泥岩、页岩、硅质岩、煤层	—	—	SO_4—K+Na 型	弱
二叠系上统龙潭组基岩裂隙含水层	砂岩、砂泥岩、泥岩、煤层	0.056～0.120	0.014～0.023	SO_4+HCO_3—K+Na 型	弱
二叠系中统茅口组岩溶含水层	灰岩	—	—	HCO_3—Ca 型	强

表 2　研究区隔水层特征

Table 2 Characteristics of the aquicludes in the study area

隔水层	分布状态	岩性组成	厚度/m	隔水作用
峨嵋山玄武岩组隔水层	分布在龙潭组底界凝灰岩至下伏茅口组之间	黑色玄武岩	＞200	区域隔水
飞仙关组含水层间隔水层	呈层状分布在各碎屑岩含水层之间	粉砂岩、钙质粉砂岩、泥岩	＞45	层间隔水

2　数据采集和研究方法

数据采集于三塘向斜的 244 个煤勘钻孔和 6 口煤层气参数井(见图 1(c)),资料具有“多源、异构、多时相”特点。为构建三塘向斜煤层气勘查开发信息数据体,根据属性整理为钻孔测量、煤层基础资料、煤层煤质实验、煤岩元素测试、煤岩鉴定、煤层瓦斯分析、瓦斯增项检测和岩石物理力学性质实验等 8 个分类表。

煤勘钻孔和煤层气参数井样品的含气量测定,分别参照 GB/T 23249—2009《地勘时期煤层瓦斯含量测定方法》、GB/T 28753—2012《煤层气含量测定 加温解吸法》执行。以开田冲煤矿为例,开田冲煤矿 6 号煤层采集 30 个煤层基础参数、41 个煤层煤质实验参数、41 个煤岩元素测试参数、3 个煤岩鉴定参数和 13 个煤层瓦斯分析参数,通过数据体进行煤层储层性质参数和含气性参数提取。

3　煤层气成藏条件

织纳煤田煤演化程度较高,以无烟煤为主[21]。研究区三塘向斜 6 号煤层镜质体反射率(R_o)为 2.84%～3.06%,处于有机质演化过成熟阶段,反映目标煤层经历长期生烃过程,生成大量煤层气。三塘向斜 6 号煤层沉积后大致经历 4 个构造演化阶段,为快速沉降阶段(Ⅰ)、波动阶段(Ⅱ)、异常热演化阶段(Ⅲ)和

快速抬升阶段(Ⅳ)(见图 2)。其中,快速沉降阶段和异常热演化阶段是煤化作用发生的主要阶段,也是主要生气阶段。快速沉降阶段主要发生深层变质作用,异常热演化阶段主要发生热变质作用,两个阶段累计生成大量煤层气,储层含气量达到饱和后,多余煤层气向顶、底板逸散[22];至快速抬升阶段后,构造抬升导致煤层埋深变浅,储层压力降低,大量气体解吸散失,逐渐形成当今的含气量。

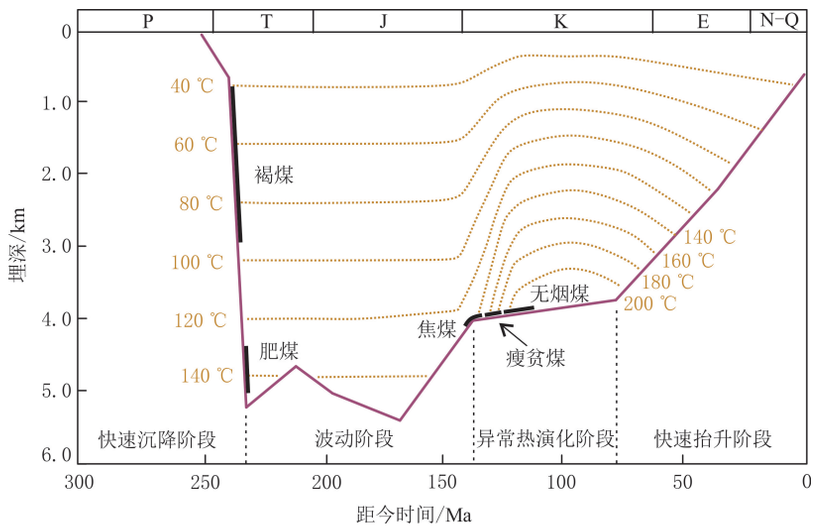
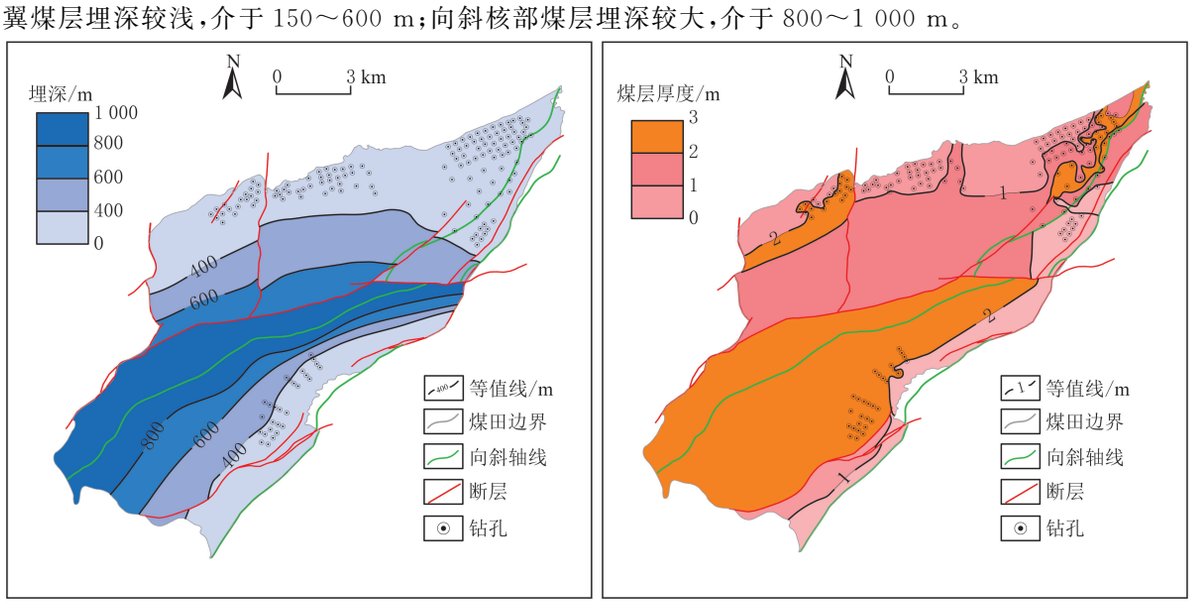


图 2　研究区 6 号煤层埋藏史和生烃史(据文献[23]修改)

Fig. 2 The history of burial and hydrocarbon generation in the No. 6 coal seam in the study area(modified by reference[23])

储层含气性是反映煤层气富集和产能的重要指标,研究区含气量数据主要来自三塘向斜浅部煤田钻孔和煤层气井,埋深范围在 540 m 以浅。6 号煤层含气量分布在 4.29～27.01 m^3/t 之间,平均为 12.15 m^3/t,其中含气量小于 10.00 m^3/t 的占比为 40.00%,含气量在 10.00～20.00 m^3/t 之间的占比为 51.82%,含气量大于 20.00 m^3/t 的占比为 8.18%,含气性总体较好。由 6 号煤层厚度和埋深等值线图(见图 3)可知,煤层厚度在 0.84～6.75 m 之间,平均厚度为 2.73 m,含夹矸 0～2 层,向斜两翼煤层较薄,北西翼和东北局部煤层厚度超过 3.00 m,南东翼煤层厚度整体大于北西翼的。研究区煤层埋深变化范围较大,向斜两翼煤层埋深较浅,介于 150～600 m;向斜核部煤层埋深较大,介于 800～1 000 m。



(a) 埋深等值线　　(b) 厚度等值线

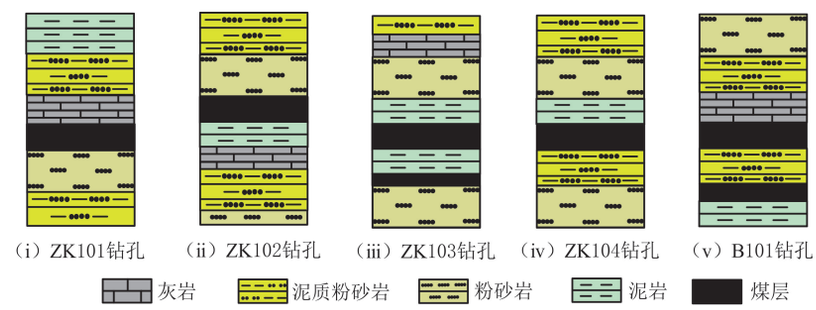
图 3　研究区 6 号煤层埋深及厚度等值线

Fig. 3 The contour of the thickness and buried depth of the No. 6 coal seam in the study area

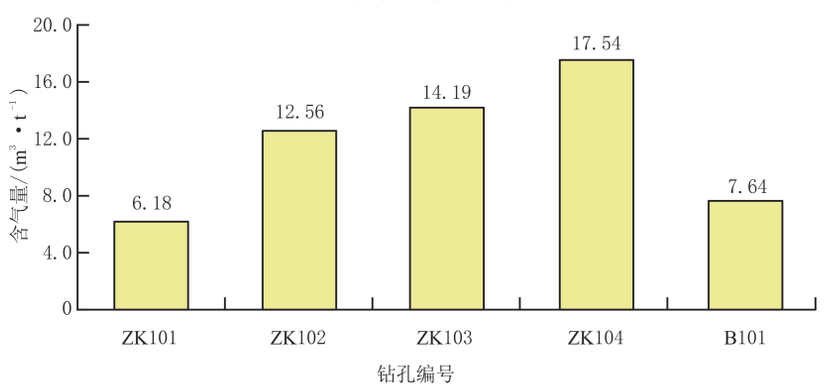
4　煤层气富集影响因素

4.1　煤层直接顶、底板岩性

煤层直接顶、底板岩性与煤层气的逸散及保存具有非常紧密的联系,由于煤层气密度低于水的,在地层中主要以垂向向上的方式逸散,顶板的致密性和厚度对控制煤层气向上逸散具有重要作用[24]。6 号煤层上覆岩层整体封盖性较好,主要由粉砂岩、泥岩和灰岩等构成,孔隙度为 0.37%～3.51%,含水率为 0.09%～3.11%,具有低孔隙度和较差的含水性特征,是理想的封盖层,有助于减缓煤层气的散失,为煤层气保存创造有利条件。由于 6 号煤层顶板岩性存在非均质差异性,导致不同顶板岩性具有不同封盖效果。直接顶、底板岩性与煤层含气量关系见图 4,当煤层顶板岩性为泥岩时,煤层最高含气量为 17.54 m^3/t,最低含气量为 14.19 m^3/t;当煤层顶板岩性为灰岩时,煤层含气量为 6.18～7.64 m^3/t,表明粉砂岩、泥岩和灰岩 3 种岩性对煤层气具有一定的封闭能力,其中泥岩封闭能力比灰岩和粉砂岩的好,更有利于煤层气的保存。



(a) 煤层顶、底板岩性组合



(b) 与含气量的关系

图 4　研究区 6 号煤层顶、底板岩性组合与含气量的关系

Fig. 4 The relationship between the lithologic assemblage of the top and bottom and the gas content of the No. 6 coal seam in the study area

4.2　煤岩煤质特征

研究区煤岩中含水率为 0.44%～4.58%,平均为 2.05%,属特低水分煤。灰分产率为 8.38%～41.43%,分布于特低灰煤至高灰煤,以低灰煤和中灰煤为主。挥发分产率为 6.34%～13.18%,平均为 8.32%,总体属于低挥发分煤。固定碳质量分数为 51.34～83.16%,平均为 68.90%,以中高固定碳和高固定碳为主。

煤岩中的水分、灰分、挥发分和固定碳不仅决定煤的物化性质,也直接影响生成气体的条件和吸附能力。由研究区煤岩工业分析组成与含气量的关系(见图 5)可知,二者之间无明显相关关系。三塘向斜南东翼的煤岩工业分析组成对煤层含气量的影响较小,含气量没有明显变化;北西翼的煤层含气量在一定程度上受煤岩工业分析组成的影响,固定碳主要由煤中的有机物质组成,在煤层气吸附过程中具有重要作用,能够提供气体分子的吸附空间[25],固定碳质量分数与含气量相关关系不明显(见图 5(a))。由图 5(b)可知,含水率与含气量相关关系不明显,煤孔裂隙中的水分占据甲烷吸附空间,降低煤层吸附能力[26],研究区煤岩整体含水率较低,受水分影响较小,二者相关关系不明显。灰分和挥发分产率与含气量存在弱的

负相关关系(见图 5(c-d)),灰分和挥发分的增加占据一定的孔隙空间[14],与气体分子竞争吸附点位,降低煤岩的吸附能力。整体上,6 号煤层煤岩的含水率、灰分和挥发分产率较低,固定碳质量分数较高,为煤层气提供更大的吸附能力,有利于煤层气的吸附和赋存。

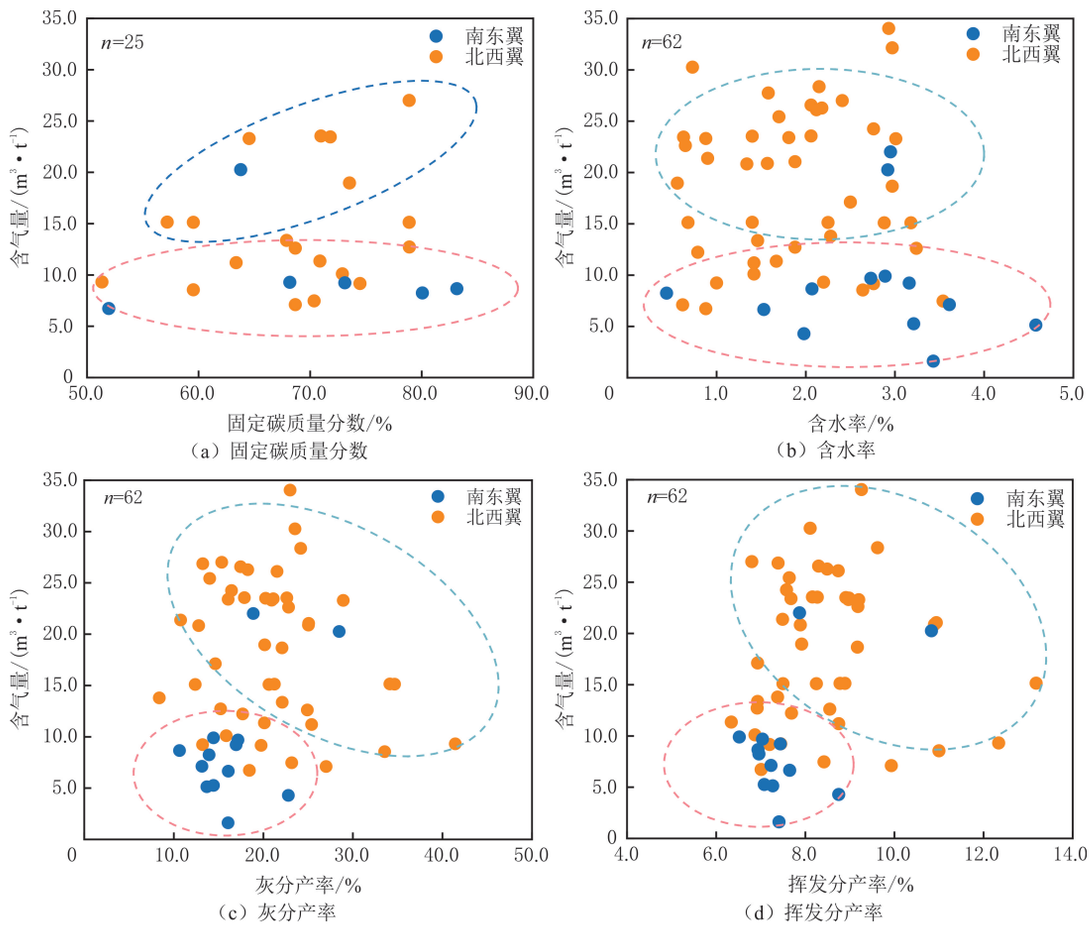


图 5　研究区 6 号煤层煤岩工业分析组成与含气量关系

Fig. 5 The relationship between coal and rock industrial composition and gas content in No. 6 coal seam in the study area

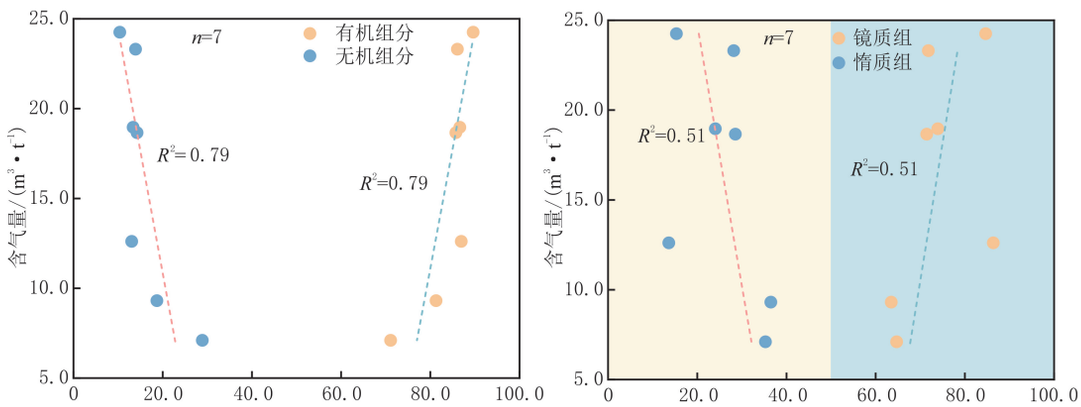
煤岩中的有机组分直接影响煤岩的生气潜力和吸附能力,决定煤岩的含气量,无机组分不是产气的主要组分。研究区 6 号煤层煤岩有机组分质量分数在 71.10%～89.61%之间,平均为 83.91%(见表 3)。

表 3　研究区 6 号煤层煤岩有机、无机组分参数及煤层含气量

Table 3 Organic and inorganic parameters of coal and rock and coal seam gas content in No. 6 coal seam in the study area

钻孔编号	有机组分质量分数(去矿物基)/%		有机组分质量分数/%	无机组分质量分数/%	R_o/%	实测含气量/($m^3 \cdot t^{-1}$)
	镜质组	惰质组				
ZK401	75.94	24.06	86.62	13.38	2.97	18.96
ZK202	86.37	13.63	86.95	13.05	2.84	12.61
ZK105	64.70	35.30	71.10	28.90	2.96	7.10
B302	63.50	36.50	81.30	18.70	2.91	9.31
ZK302	71.46	28.54	85.73	14.27	3.06	18.66
ZK607	84.67	15.33	89.61	10.39	3.04	24.25
ZK902	71.82	28.18	86.07	13.93	3.06	23.31

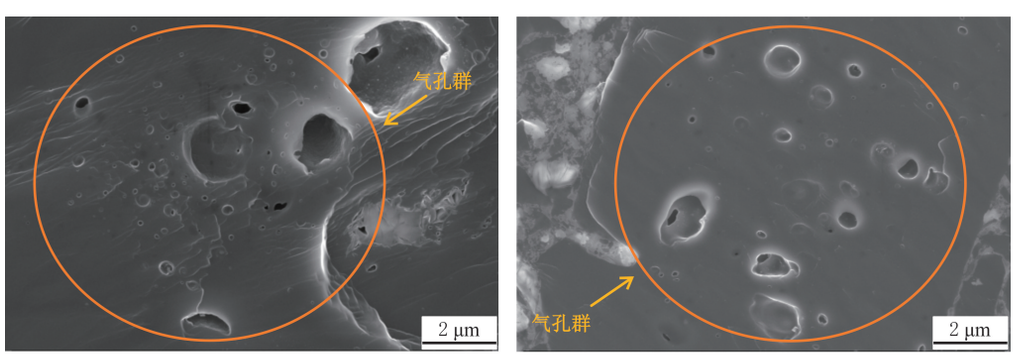
由研究区 6 号煤层煤岩有机、无机组分与含气量的关系(见图 6(a))可知,煤岩的有机组分对煤岩含气量赋存具有显著的控制作用。由有机组分中镜质组、惰质组与含气量的关系(见图 6(b))可知,镜质组与含气量呈正相关关系,惰质组与含气量呈负相关关系,相关因数(R^2)为 0.51。煤样扫描电镜图像(见图 7)显示,煤岩中镜质组气孔较为发育,较高的镜质组有利于煤层气生成,在热演化过程中生成大量甲烷,镜质组对煤层气有强烈的吸附能力,气体不易逸散,有利于煤层气的生成与赋存[27]。



(a) 有机、无机组分　　(b) 镜质组、惰质组

图 6　研究区 6 号煤层煤岩显微组分与含气量关系

Fig. 6 The relationship between the microscopic composition and gas content of the No. 6 coal seam in the study area



(a) 发育较多宽度为200~400 nm的次生孔隙　　(b) 发育较多宽度为700~800 nm的次生孔隙

图 7　研究区 6 号煤层煤样扫描电镜图像

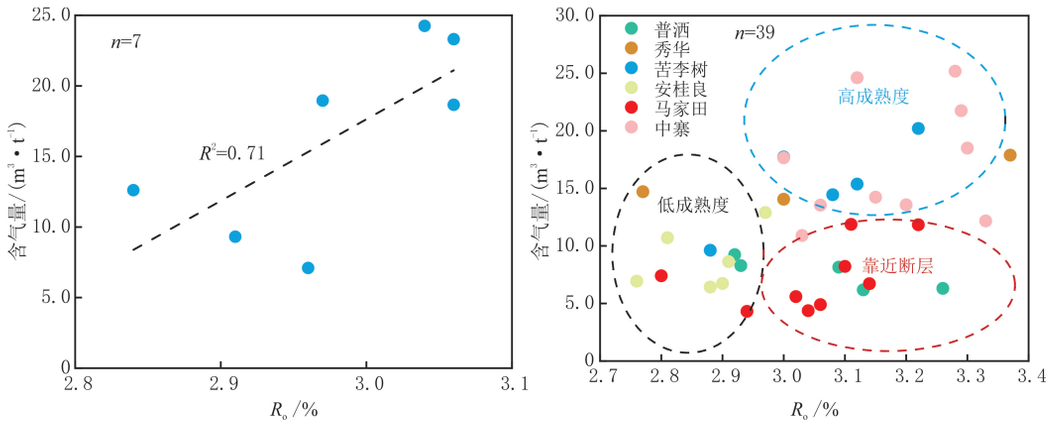
Fig. 7 Scanning electron microscopy image of coal sample from No. 6 coal seam in the study area

4.3　热演化程度

煤变质程度是煤在地质过程中经历的物理和化学变化程度,煤层生气量和吸附气体的能力影响煤层含气量[28]。研究区 6 号煤层煤岩的 R_o 为 2.84%~3.06%,平均为 2.97%(见表 3),变质程度整体较高,属于高阶煤。6 号煤层含气量与煤岩的 R_o 呈正相关关系(见图 8(a))。统计研究区 6 号煤层邻近煤层煤岩的 R_o,整体上与含气量呈正相关关系,不同矿区煤岩的 R_o 与含气量的关系可分为三类(见图 8(b)):第一类为 R_o 相对较小,导致煤层气生成量较少;第二类为 R_o 相对较大,由于煤层附近发育断层,煤层气发生逸散,含气量较低;第三类为 R_o 相对较大,含气量较高。

4.4　煤层埋深

随储层埋深增加,储层温度和压力增大,吸附气体能力增强,含气量增加;当储层超过临界深度后,含气量随埋深的增加而趋于稳定或降低,不同向斜或同一向斜内的不同区块之间临界埋深不同[22]。研究区临界埋深约为 1 000 m[27],等温吸附曲线和对应的埋深与实测含气量关系(见图 9)表明,吸附气量在埋深为 1 000 m 附近达到饱和,之后随埋深继续增加,吸附气量趋于稳定。根据地表出露地层和地层产状,研究区 6 号煤层最大埋深约为 1 000 m(见图 3(b)),研究区煤层含气量在埋深约为 1 000 m 时较丰富,勘探



（a）6号煤层　　（b）邻近煤层

图 8　研究区煤层煤岩镜质体反射率与含气量关系

Fig. 8 Relationship between vitrinite reflectance and gas content of coal seam coal rocks in the study area

开发潜力大。研究区 6 号煤层样品的埋深为 119.32～538.79 m，平均为 307.38 m，煤层埋深相对较浅，多集中在 600 m 以浅。由研究区 6 号煤层埋深与含气量的相关关系（见图 10(a)）可知，随煤层埋深增加，含气量总体呈上升趋势。当煤层埋深在 1 000 m 以浅时，煤层埋深与含气量呈正相关关系。

4.5　地层倾角

地层倾角陡变带与断裂构造发育区的煤层气保存条件差，逸散作用强，煤层含气量较低[29-30]。研究区的煤层倾角为 5°～34°，地质构造较为复杂。研究区 32 个钻孔的 6 号煤层倾角数据显示，钻孔的煤层倾角与含气量具有较好的负相关关系（见图 10(b)），表明随煤层倾角的增大，区域构造应力和构造运动更强，煤层的保存条件和封闭性更差，煤层气更易散失。

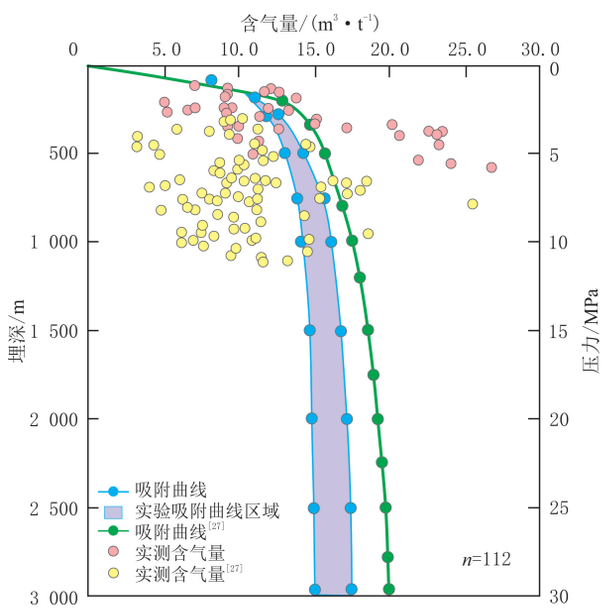
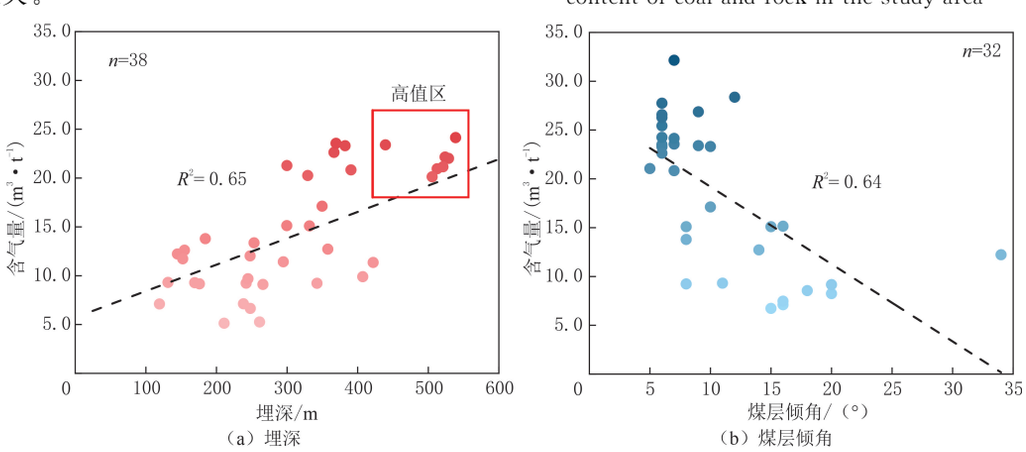


图 9　研究区煤岩等温吸附曲线和实测含气量

Fig. 9 Isothermal adsorption curves and measured gas content of coal and rock in the study area



（a）埋深　　（b）煤层倾角

图 10　研究区 6 号煤层埋深、煤层倾角与含气量关系

Fig. 10 The relationship between the buried depth, coal seam dip angle and gas content of No. 6 coal seam in the study area

三塘向斜两翼 6 号煤层钻孔含气量统计(见图 11)显示,向斜北西翼含气量平均为 14.79 m^3/t,向斜南东翼含气量平均为 8.09 m^3/t。平面上,向斜两翼含气量具有明显的差异性,北西翼含气量比南东翼的高,北西翼平均倾角一般约为 10°,南东翼平均倾角一般约为 20°,倾角小的位置对煤层气的保存更有利。构造上,南东翼稳定性整体上不如北西翼的。

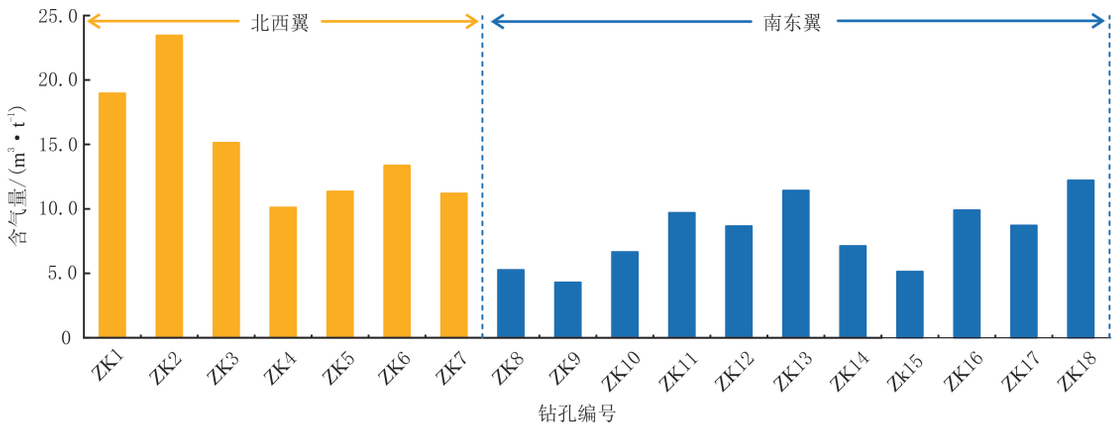


图 11　三塘向斜两翼 6 号煤层钻孔含气量统计

Fig. 11 Differences in gas content of No. 6 coal seam on the two wings of Santang Syncline

5　富集模式

选取 6 号煤层含气量数据(煤层瓦斯分析表)的钻孔 90 个,利用灰色关联理论[31-33]分析相关因数大于 0.50 的地质因素,将镜质组、惰质组、镜质体反射率、煤层埋深和煤层倾角等 5 个因素作为影响煤层含气量的影响因子。影响三塘向斜 6 号煤层含气量的关键因素依次为煤层埋深、镜质体反射率、惰质组、镜质组和煤层倾角,其中煤层埋深和镜质体反射率为煤层气富集的主控因素。

研究区煤层气富集受生烃条件、煤层埋深和保存条件的耦合影响,生烃条件表现在煤岩有机组分和煤变质程度对含气量的控制,是决定含气量的基础因素,主要受控于原始沉积作用和埋藏生烃史;煤层埋深主要表现在不同深度下温度、压力的动态变化,煤吸附能力发生变化;保存条件主要表现在煤层倾角变化对含气量的控制,倾角影响煤层气的封闭效果[34-39]。断层发育特征、水文地质条件和顶、底板岩性是研究区煤层气富集成藏的关键因素,直接或间接控制煤层气的保存和富集。研究区煤层气富集模式为向斜控藏模式(见图 12)。以埋深 500 m 为界,分析三塘向斜两翼煤层气富集特征。三塘向斜北西翼地层较为平缓,煤层倾角大部分小于 10°,受构造影响小,埋深在 500～1 000 m 之间为煤层气富集区,煤层含气量高于 20.00 m^3/t。三塘向斜南东翼煤层倾角较大,构造活动更为强烈,煤层气藏保存条件变差,有利于瓦斯逸

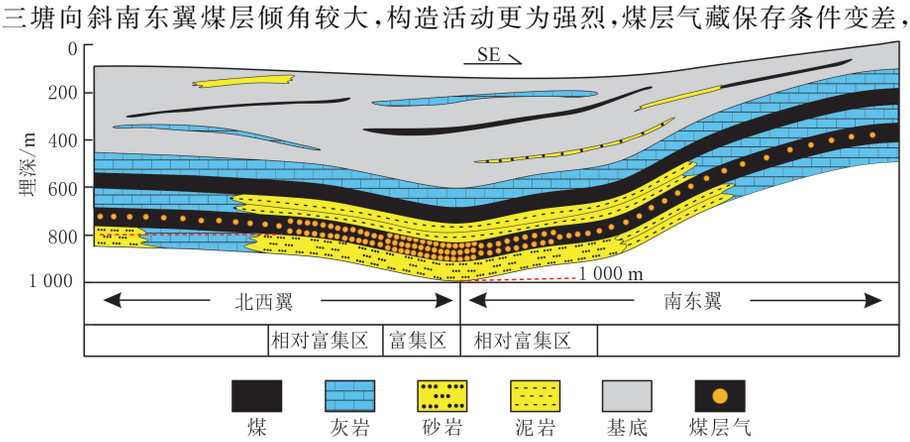


图 12　三塘向斜 6 号煤层煤层气富集模式

Fig. 12 Coalbed methane enrichment model in the No. 6 coal seam in the Santang Syncline

散，煤层含气量比北西翼的低；埋深在500～1 000 m之间为煤层气相对富集区，煤层含气量最低为4.29 m^3/t。

6 结论

(1)织纳煤田三塘向斜6号煤层镜质体反射率为2.84%～3.06%，煤层厚度在0.84～6.75 m之间，煤层埋深介于150～1 000 m，具备丰富的生气物质基础。水文地质条件及断层发育特征有利于煤层气富集，构成煤层气富集的基本地质背景。煤层含气量在4.29～27.01 m^3/t之间，向斜两翼含气量差异较大，含气性特征较为复杂，区域差异性富集显著。

(2)研究区6号煤层直接顶板中泥岩的封盖性优于粉砂岩和灰岩的。煤层含气性具有显著分区特征：南东翼受工业分析组成影响较小；北西翼受固定碳质量分数、灰分和挥发分产率控制；整体含气性与镜质组、埋深和热演化程度呈正相关关系，与惰质组、倾角呈负相关关系，其中埋深和热演化程度为煤层气富集主控因素。

(3)研究区6号煤层气为向斜控气的富集模式，北西翼煤层气更易富集成藏，埋深在500～1 000 m之间为煤层气富集区，可作为下一步勘探重点区域。

参考文献(References)：

[1] 刘大锰，贾奇锋，蔡益栋. 中国煤层气储层地质与表征技术研究进展[J]. 煤炭科学技术，2022，50(1)：196-203.
LIU Dameng，JIA Qifeng，CAI Yidong. Research progress on coalbed methane reservoir geology and characterization technology in China[J]. Coal Science and Technology，2022，50(1)：196-203.

[2] 秦勇，袁亮，胡千庭，等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术，2012，40(10)：1-6.
QIN Yong，YUAN Liang，HU Qianting，et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology，2012，40(10)：1-6.

[3] 高弟，秦勇，易同生. 论贵州煤层气地质特点与勘探开发战略[J]. 中国煤炭地质，2009，21(3)：20-23.
GAO Di，QIN Yong，YI Tongsheng. Geological condition，exploration and exploitation strategy of coal-bed methane resources in Guizhou，China[J]. Coal Geology of China，2009，21(3)：20-23.

[4] 易同生，高为，周培明. 贵州省煤层气资源特征及开发技术[J]. 中国煤炭地质，2018，30(6)：35-40.
YI Tongsheng，GAO Wei，ZHOU Peiming. CBM resource features and exploitation technology in Guizhou Province[J]. Coal Geology of China，2018，30(6)：35-40.

[5] 李勇，汤达祯，许浩，等. 柳林矿区煤层含气量主控因素研究[J]. 煤炭科学技术，2014，42(5)：95-97.
LI Yong，TANG Dazhen，XU Hao，et al. Study on main control factors affecting gas content of coal seams in Liulin Mining Area[J]. Coal Science and Technology，2014，42(5)：95-97.

[6] 曹军涛，赵军龙，王轶平，等. 煤层气含量影响因素及预测方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版)，2013，28(4)：28-32.
CAO Juntao，ZHAO Junlong，WANG Yiping，et al. Review of influencing factors and prediction methods of gas content in coal seams and prospect of prediction methods[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)，2013，28(4)：28-32.

[7] 孙粉锦，王勃，李梦溪，等. 沁水盆地南部煤层气富集高产主控地质因素[J]. 石油学报，2014，35(6)：1070-1079.
SUN Fenjin，WANG Bo，LI Mengxi，et al. Major geological factors controlling the enrichment and high yield of coalbed methane in the Southern Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2014，35(6)：1070-1079.

[8] 王玫珠，王勃，孙粉锦，等. 沁水盆地煤层气富集高产区定量评价[J]. 天然气地球科学，2017，28(7)：1108-1114.
WANG Meizhu，WANG Bo，SUN Fenjin，et al. Quantitative evaluation of CBM enrichment and high yield of Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience，2017，28(7)：1108-1114.

[9] 胡小林，尹书岑，刘苏瑶，等. 黔北煤田JP区块煤层气储层物化特征及含气量影响因素[J]. 东北石油大学学报，2018，42(2)：33-42.
HU Xiaolin，YIN Shucen，LIU Suyao，et al. Physical-chemical characteristics and affecting factors of gas content of CBM reservoir in JP Block，Northern Guizhou Coal Field[J]. Journal of Northeast Petroleum University，2018，42(2)：33-42.

[10] 王聪，吴财芳，欧正，等. 黔西织纳煤田少普矿区16号煤煤层气富集的地质控制因素[J]. 煤炭学报，2011，36(9)：1486-1489.
WANG Cong，WU Caifang，OU Zheng，et al. Factors controlling the accumulation research of CBM enrichment of No. 16 coal seam in the Shaopu coal mining of Zhina Coalfield on the west of Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society，2011，36(9)：1486-1489.

[11] 张凯.沁水盆地安泽东地区煤层气含量影响因素分析[J].煤炭技术,2021,40(6):96-97.
ZHANG Kai. Analysis of influencing factors of coalbed methane content in Anze East Area of Qinshui Basin[J]. Coal Technology, 2021,40(6):96-97.

[12] 唐宁,刘晓.煤层气聚集成藏机理及控制因素分析与研究[J].内江科技,2023,44(11):74-75.
TANG Ning, LIU Xiao. Analysis and study on the accumulation mechanism and controlling factors of coalbed methane[J]. Neijiang Science & Technology, 2023,44(11):74-75.

[13] 涂志民,王兴刚,车延前,等.三塘湖盆地低阶煤煤层气成藏主控因素[J].新疆石油地质,2021,42(6):683-689.
TU Zhimin, WANG Xinggang, CHE Yanqian, et al. Controlling factors on CBM accumulation in low-rank coal in Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021,42(6):683-689.

[14] 罗志明.煤比表面积和煤与瓦斯突出关系的研究[J].煤炭学报,1989,14(1):44-54.
LUO Zhiming. Study on relation between specific surface area and outburst of coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(1):44-54.

[15] SU X B, LIN X Y, LIU S B, et al. Geology of coalbed methane reservoirs in the Southeast Qinshui Basin of China[J]. International Journal of Coal Geology, 2005,62(4):197-210.

[16] SALMACHI A, RAJABI M, REYNOLDS P, et al. The effect of magmatic intrusions on coalbed methane reservoir characteristics: a case study from the Hoskissons coalbed, Gunnedah Basin, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 165: 278-289.

[17] CHEN Y, TANG D, XU H, et al. Structural controls on coalbed methane accumulation and high production models in the eastern margin of Ordos Basin, China[J]. International of Natural Gas Science and Engeneering(Journal of Natural Gas Science and Engineering), 2015,23:524-537.

[18] 贵州省地质调查院.中国区域地质志:贵州志[M].北京:地质出版社,2017:347-424.
Guizhou Provincial Geological Survey Institute. Regional geological record of China: Guizhou Volume[M]. Beijing: Geology Press, 2017:347-424.

[19] 郭志军,杨永宇,温书鹏,等.织纳煤田张家湾区块煤储层特征与煤层气开发模式研究[J].资源环境与工程,2024,38(4):414-420.
GUO Zhijun, YANG Yongyu, WEN Shupeng, et al. Coal reservoir characteristics and coalbed methane development mode in Zhangjiawan Block of Zhina Coalfield[J]. Resources Environment & Engineering, 2024,38(4):414-420.

[20] 江俊杰.青龙矿构造特征及其对矿井水的控制机理[D].徐州:中国矿业大学,2016:15-17.
JIANG Junjie. Structural characteristics and control mechanism on mine water in Qinglong Coalmine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016:15-17.

[21] 秦勇,高弟.贵州省煤层气资源潜力预测与评价[M].徐州:中国矿业大学出版社,2012:35-59.
QIN Yong, GAO Di. Prediction and evaluation of coalbed methane resource potential in Guizhou Province[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2012:35-59.

[22] 夏鹏.西山煤田古交矿区煤层气富集规律及产能主控因素研究[D].太原:太原理工大学,2017:53-58.
XIA Peng. Study on coalbed methane enrichment law and main controlling factors of production capacity in Gujiao Mining Area of Xishan Coalfield[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017:53-58.

[23] 窦新钊. 黔西地区构造演化及其对煤层气成藏的控制[D].徐州:中国矿业大学,2012:98-104.
DOU Xinzhao. Tectonic evolution and its control on coalbed methane reservoiring in Western Guizhou[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012:98-104.

[24] ZHAO J L, TANG D Z, LIN W J, et al. Permeability dynamic variation under the action of stress in the medium and high rank coal reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015,26:1030-1041.

[25] 马晓荷,谭成仟,郭泽坤.博文盆地 M 煤层气田含气量主控因素分析及预测[J].科学技术与工程,2023,23(11):4586-4595.
MA Xiaohe, TAN Chengqian, GUO Zekun. Analysis and prediction of main controlling factors of gas content in coalbed of M Coalfield in Bowen Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(11):4586-4595.

[26] 刘超,汤达祯,许浩,等.俄罗斯含煤盆地煤层气开发潜力分析与评价[J].煤炭科学技术,2014,42(10):92-97.
LIU Chao, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Analysis and evaluation on development potential of coalbed methane of coal basin in Russia[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(10):92-97.

[27] 杨兆彪,高为,秦勇,等.贵州深部煤层气地质特征及其资源潜力[J].煤炭学报,2024,49(增刊 1):348-361.
YANG Zhaobiao, GAO Wei, QIN Yong, et al. Geological characteristics and resource potential of deep coalbed methane in Guizhou [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(Supp. 1):348-361.

[28] 巢海燕,王延斌.鄂尔多斯盆地东南缘临汾区块煤层气成因及其影响[J].煤炭学报,2016,41(7):1769-1777.
CHAO Haiyan, WANG Yanbin. Origin of coalbed methane and its influence in Linfen, Southeastern Ordos Basin[J]. Journal of

China Coal Society, 2016,41(7):1769-1777.

[29] 邵龙义,王学天,张家强,等.滇东北地区煤层气富集特征及勘探目标优选[J].天然气工业,2018,38(9):17-27.
SHAO Longyi, WANG Xuetian, ZHANG Jiaqiang, et al. CBM accumulation characteristics and exploration target selection in Northeastern Yunnan, China[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(9):17-27.

[30] 冯绍盛.西山煤田屯兰区块煤层气富集规律研究与气井产能分析[D].太原:太原理工大学,2018:17-21.
FENG Shaosheng. The study of coalbed methane enrichment rule and productivity analysis of CBM wells in the Tunlan Domain Xishan Coalfield[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018:17-21.

[31] 王云刚,周辰,李辉,等.基于熵权灰色关联法的煤与瓦斯突出主控因素分析[J].安全与环境学报,2016,16(6):5-9.
WANG Yungang, ZHOU Chen, LI Hui, et al. Analysis of the dominant controlling factors leading to the coal and gas outburst based on the entropy weight and grey correlation method[J]. Journal of Safety and Environment, 2016,16(6):5-9.

[32] 杨兆中,杨晨曦,李小刚,等.基于灰色关联的逼近理想解排序法的煤层气井重复压裂选井:以沁水盆地柿庄南区块为例[J].科学技术与工程,2020,20(12):4680-4686.
YANG Zhaozhong, YANG Chenxi, LI Xiaogang, et al. Multiple fracturing well selection of coalbed methane wells based on technique for order preference by similarity to ideal solution method of gray correlation: taking the case of Qinshui Basin Shizhuang South Block as an examples[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(12):4680-4686.

[33] 康玉国,张明.沁水盆地东缘龙泉地区煤层气成藏条件及主控因素[J].东北石油大学学报,2022,46(3):1-12.
KANG Yuguo, ZHANG Ming. CBM accumulation conditions and main controlling factors in Longquan Area, eastern margin of Qinshui Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(3):1-12.

[34] 陈林,李明,胡德胜,等.珠江口盆地神狐隆起北缘油气富集主控因素及成藏模式[J].东北石油大学学报,2023,47(3):11-22.
CHEN Lin, LI Ming, HU Desheng, et al. Main controlling factors for hydrocarbon enrichment and accumulation models in the northern margin of Shenhu Uplift, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023,47(3):11-22.

[35] 李道清,兰浩,郭巧珍,等.准噶尔盆地中拐凸起南部构造演化及油气地质意义:以中佳地区下二叠统佳木河组为例[J].东北石油大学学报,2024,48(5):48-61.
LI Daoqing, LAN Hao, GUO Qiaozhen, et al. Structural evolution and geological significance of hydrocarbons in the south of Zhongguai Uplift, Junggar Basin: a case study of the Jiamuhe Formation of the Lower Permian in Zhongjia Area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(5):48-61.

[36] 胡永忠,徐再刚,邓恩德.黔西南盘江矿区中煤阶煤孔隙结构综合表征及多尺度分形特征[J/OL].特种油气藏,https://link.cnki.net/urlid/21.1357.te.20241107.1506.006:1-11[2025-03-07].
HU Yongzhong, XU Zaigang, DENG Ende. Comprehensive characterization of the pore structure and multi-scale fractal characteristics of the medium coal seam in the Panjiang Mining Area of Qianxinan[J/OL]. Special Oil & Gas Reservoirs, https://link.cnki.net/urlid/21.1357.te.20241107.1506.006:1-11[2025-03-07].

[37] 沈柏坪,李荣相,白洪涛,等.鄂尔多斯盆地宜川地区本溪组8号煤岩特征及成煤环境分析[J].特种油气藏,2024,31(6):32-38.
SHEN Baiping, LI Rongxiang, BAI Hongtao, et al. Analysis of coal rock characteristics and coal-forming environment of the No.8 Coal Seam in the Benxi Formation in Yichuan Area, Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024,31(6):32-38.

[38] 祝彦贺,朱学申,王存武,等.鄂尔多斯盆地东缘北段深层煤层气源储特征及资源潜力:以神府区块为例[J].非常规油气,2025,12(1):30-39.
ZHU Yanhe, ZHU Xueshen, WANG Cunwu, et al. Source-reservoir characteristics of deep coal seams and its resources potential in eastern margin of Ordos Basin: a case study of Shenfu Block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2025,12(1):30-39.

[39] 张仰强.适合煤层气储层的滑溜水压裂液体系研究[J].石油化工高等学校学报,2025,38(1):59-64.
ZHANG Yangqiang. Research of multifunctional slickwater fracturing fluid system suitable for coalbed methane reservoirs[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2025,38(1):59-64.