

doi: 10.12029/gc20220612002

李鸿磊, 郭志军, 易同生, 秦勇, 杨通保, 金军. 2025. 黔西北地区上二叠统煤层气富集机理与有利区优选评价[J]. 中国地质, 52(2): 597–612.

Li Honglei, Guo Zhijun, Yi Tongsheng, Qin Yong, Yang Tongbao, Jin Jun. 2025. Enrichment mechanism, optimization and evaluation of favorable CBM areas in the Upper Permian of Northwest Guizhou[J]. Geology in China, 52(2): 597–612(in Chinese with English abstract).

黔西北地区上二叠统煤层气富集机理与有利区优选评价

李鸿磊^{1,2,3}, 郭志军^{4,5}, 易同生^{1,2,3}, 秦勇^{1,6}, 杨通保^{1,2,3}, 金军^{1,2,3}

(1. 贵州省煤田地质局, 贵州 贵阳 550081; 2. 富矿精开与环境保护贵州省院士工作站, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省煤炭流态化开采全省重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 4. 自然资源部复杂构造区非常规天然气评价与开发重点实验室, 贵州 贵阳 550008; 5. 贵州省油气勘查开发工程研究院, 贵州 贵阳 550008; 6. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要:【研究目的】优选研究区煤层气勘查开发有利区, 为贵州省煤层气勘查部署提供参考。【研究方法】以煤层气勘查资料及实验测试成果为基础, 系统分析研究区主煤层(6、14、27 号煤层)的厚度、含气量、渗透率、储层压力和煤体结构发育特征, 利用五指标法对 19 个含气区进行了优选评价。【研究结果】(1)上述三个主煤层具有南西厚, 北东薄的厚度变化趋势; 煤层含气量平均 11.73 m³/t, 向斜控气特征典型。(2)区域上划分出 7 个大含气区, 其中煤层含气量大于 16 m³/t 的地带主要分布于比德—三塘向斜及金龙—黔西—金沙向斜群。(3)煤层试井渗透率平均 0.173 mD, 属于中—低渗透率煤层, 渗透率在横向上由西向东总体趋于降低, 纵向上随着层位降低而降低, 但在不同煤层之间出现明显波动。(4)试井煤储层压力平均 4.98 MPa, 压力系数平均 0.86, 总体上欠压, 由东向西方向具有由欠压状态向正常和超压状态转变的趋势。(5)构造煤具有自东向西逐渐增多的趋势, 东部煤层以原生结构与碎裂煤为主, 西部以碎粒煤与碎粉煤为主。【结论】本文优选出 I 级有利区 7 个, II 级有利区 8 个, III 级有利区 4 个, 认为土城、杨梅树、大河边、水公河、比德、以支塘、金龙(北)等 7 个向斜为 I 级有利区, 是研究区煤层气开发潜力较大的含气构造单元; 格目底、金盆、三塘、黔西(北)、金沙、流长、莫老坝 7 个向斜为 II 级有利区; 其余向斜为 III 级有利区。

关键词: 煤层气; 上二叠统; 储层属性; 有利区; 能源勘查工程; 黔西北

创新点: 优选出黔西北地区上二叠统煤层气有利区, 为下一步煤层气勘查工作部署提供了新的依据。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0597-16

Enrichment mechanism, optimization and evaluation of favorable CBM areas in the Upper Permian of Northwest Guizhou

LI Honglei^{1,2,3}, GUO Zhijun^{4,5}, YI Tongsheng^{1,2,3}, QIN Yong^{1,6}, YANG Tongbao^{1,2,3}, JIN Jun^{1,2,3}

(1. Coal Geology Bureau of Guizhou, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. Bonanza Precision Mining and Environmental Protection Guizhou Provincial Academician Expert Workstation, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Guizhou Key Laboratory of Coal Fluidized Mining, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4. Key Laboratory of Evaluation and Development of Unconventional Natural

收稿日期: 2022-06-12; 改回日期: 2022-11-22

基金项目: 贵州省省级地质勘查专项资金项目(208-9912-JBN-UTS0)、贵州省科技计划项目(ZDSYS[2023]002、KXJZ[2024]003)联合资助。

作者简介: 李鸿磊, 男, 1985 年生, 正高级工程师, 主要从事煤炭及煤层气地质勘查研究; E-mail: 303396581@qq.com。

通信作者: 郭志军, 男, 1988 年生, 高级工程师, 从事煤层气勘查开发研究; E-mail: 352501017@qq.com。

Gas in Complex Tectonic Area of Ministry of Natural Resources, Guiyang 550008, Guizhou, China; 5. Guizhou Institute of Petroleum Exploration and Development Engineering, Guiyang 550008, Guizhou, China; 6. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

Abstract: This paper is the result of energy exploration engineering.

[Objective] The primary goal is to identify and classify favorable areas for CBM exploration and development, providing a scientific basis for future exploration efforts in Guizhou Province. **[Methods]** Based on geological exploration data and laboratory sample analyses, key reservoir characteristics of the major coal seams (No. 6, No. 14, and No. 27) were systematically assessed. Parameters such as coal seam thickness, gas content, permeability, reservoir pressure, and coal-body structure were analyzed. Using a five-index evaluation method, 19 gas-bearing areas were classified. **[Results]** (1) The three major coal seams exhibit greater thickness in the southwest and thinner deposition toward the northeast. The average gas content is 11.73 m³/t, with gas accumulation primarily controlled by synclinal structures. (2) Seven extensive gas-bearing areas were identified, with the Bide-Santang Basin and the Jinlong-Qianxi-Jinsha syncline group exhibiting gas contents exceeding 16 m³/t. (3) The average well-tested permeability of the coal seams is 0.173 mD, indicating a medium-low permeability reservoir. Permeability decreases from west to east and with increasing depth, with significant variations across different seams. (4) The average reservoir pressure is 4.98 MPa, with an average pressure coefficient of 0.86, indicating a predominantly underpressured state. A transition from underpressure to normal and overpressure is observed from east to west. (5) Coal structural characteristics vary spatially, with primary and fragmented coal types dominant in the east, while granulated and pulverized coal types are more prevalent in the west. **[Conclusions]** Based on the evaluation, seven Grade I, eight Grade II, and four Grade III favorable CBM areas were identified. The Grade I areas, including the Tucheng, Yangmeishu, Dahebian, Shuigonghe, Bide, Zhitang, and northern Jinlong synclines, demonstrate significant CBM exploration and development potential. The Grade II areas include the Gemudi, Jinpen, Santang, northern Qianxi, Jinsha, Liuchang, and Molaoba synclines, while the remaining synclines are classified as Grade III.

Key words: coalbed methane; Upper Permian; reservoir characteristics; favorable exploration area; energy exploration engineering; Northwest Guizhou

Highlights: This study provides a comprehensive assessment of CBM potential in the Upper Permian of the Northwest Guizhou, offering a valuable reference for future CBM exploration planning.

About the first author: LI Honglei, male, born in 1985, professor level senior engineer, mainly engaged in coal and CBM exploration research; E-mail: 303396581@qq.com.

About the corresponding author: GUO Zhijun, male, born in 1988, senior engineer, engaged in CBM exploration and development research; E-mail: 352501017@qq.com.

Fund support: Supported by Guizhou Provincial Geological Exploration Special Fund Project (No.208-9912-JBN-UTS0), Guizhou Provincial Scientific and Technological Program (No.ZDSYS[2023]002, No.KXJZ[2024]003).

1 引 言

黔西北地区作为贵州省主要含煤区,同时也是煤层气资源主要勘查开发区(易同生等,2019)。据2015年原国土资源部发布的全国油气资源动态评价成果,贵州省煤层气资源量达2.83万亿m³,居全国第四位,是中国南方最大的煤层气资源富集区,其中黔西北地区煤层气资源量占比90%以上。

区内煤田勘查程度较高,煤层气专项勘查开发工作自2000年开始实施,省内外多家单位先后

在六盘水煤田、织纳煤田、黔北煤田施工300余口煤层气参数井和排采井(组),积累了大量的地质勘查资料,探索形成了一些适合贵州省多煤层煤层气开发的地质理论与技术,如叠置煤层气系统理论、产层优化组合理论、合层开发单元优选理论及适宜的井型选择、提高压裂规模提升改造效果技术等(傅雪海等,2007;邓昌文和莫日和,2007;韩俊等,2008;秦勇等,2008;李勇等,2017;吴圣等,2018;高为等,2018;单衍胜等,2018;谢国毅等,2018;胡琳等,2019;郝海洋等,2019;王胜建等,2020;Bi et al.,2020;程轶妍等,2021;金军等,2021)。但研究区整

体煤层气系统评价还有待加强(秦勇, 2023)。

在当前天然气“增储上产”新形势下,特别是国务院支持贵州省在新时代西部大开发上闯新路意见(国发[2022]2号)等文件的发布,迫切需要进一步落实煤层气勘查开发部署区。因此,开展黔西北地区煤层气资源地质有利区优选,对下一步煤层气重点勘查方向非常必要。本文综合整理区内前期研究成果、矿井资料、探井资料和测试数据,分析主煤层空间展布、含气性、渗透性以及构造煤分布特征,开展煤层气勘探开发有利区的优选评价,为政府部门煤层气勘查开发工作部署提供参考。

2 研究区概况

2.1 地理位置

研究区位于贵州省西北部,包括水城、六盘水、赫章、毕节、金沙、黔西、织金、纳雍、大方等区域,

行政区划属毕节市所属全境、遵义及六盘水部分地区,东以遵义、息烽、平坝一线为界,西以威宁、赫章一线为界,南以织金、水城、普安、盘县一线为界,北以四川省接壤为界,面积约 46320 km²(图 1)。

2.2 地质背景

贵州西北部地层从古生代到新生代均有分布,根据其地层岩性特征、残余情况以及地表出露情况,区内的地层系统划分为北部区(遵义及其周边)、中部区(毕节及其周边)以及南部区(贵阳及其周边)。北部区主要地层单元为上震旦统的灯影组、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系及中生界地层;中部区地层主要由寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系及少量中生界构成;南部地区位于黔中隆起的西北部分,区内古生界较为完整,中生界遭到严重剥蚀。

研究区属 I 级赋煤单元华南赋煤区,以水城—紫云断裂为界,进一步划分为六盘水、毕节—织金

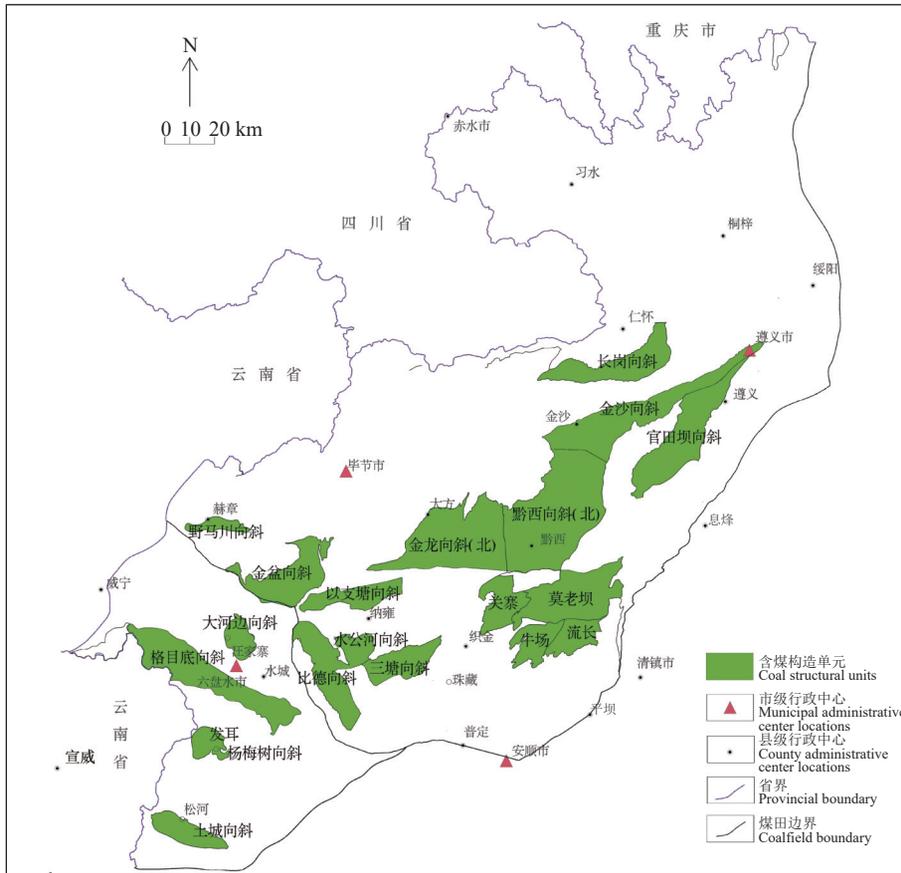


图 1 研究区主要含煤构造单元分布图
Fig.1 Distribution map of main coal-bearing structural units in the study area

Ⅱ级赋煤单元 2 个赋煤带,包括黔北煤田、织纳煤田、六盘水煤田的部分区域;其中黔北煤田、织纳煤田及水城矿区东隅分属毕节—织金Ⅱ级赋煤带,构造线方向以北东向为主;水城矿区至土城向斜一带分属六盘水Ⅱ级赋煤带,构造线方向以北西向为主(易同生等,2019)。采用现行方案,将研究区划分为 59 个赋煤单元(向斜或含煤小区)(Ⅳ级),覆盖黔北、织纳、六盘水三大煤田区域(唐显贵,2012),现有勘查区块 281 个,主要含煤向斜单元 19 个(图 1)。

3 煤储层主要属性

3.1 煤层发育特征

3.1.1 含煤性

研究区含煤地层为上二叠统龙潭组和长兴组,沉积海陆交互相过渡地带,由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、细砂岩、煤等组成,厚度 76~488 m,含煤 1~104 层,煤层总厚 1.5~53.5 m,含煤系数 1.2%~13.6%,水城格目底向斜东段、金龙向斜、比德—化乐一带含煤系数较高;富煤中心位于松河—水城—比德—化乐一带,煤层总厚在 30 m 以上,最厚在水城勺米井田达 53.5 m,最薄处遵义四面山田沟井田仅 1.5 m。总体上,煤层总厚由西南部向北、北东方向逐渐变薄(图 2a)。

一定厚度及规模煤层的稳定分布是煤层气富集高产的物质基础(卢双舫等,2003;胡国艺等,2004;叶建平等,2011;熊德华等 2011;孙斌等,2011;田亚等,2019)。从构造单元来看,土城、神仙坡、大河边、格目底、杨梅树、白泥箐、珠藏等向斜含煤层数均在 31 层以上,煤层总厚大于 23 m,其中土城向斜含煤系数高达 11.6%(图 2b)。土城、大河边、小河边、格目底、杨梅树等向斜可采煤层均在 10 层以上,格目底向斜可采总厚度达 24.92 m。含煤性、可采性由西南往北东、北部逐渐变差,神仙坡、土地垭、金龙(南)、比德—三塘、关寨、黔西(南)、珠藏、流长、金盆、长春堡、瓢儿井、金龙(北)、黔西(北)、金沙、长岗、周市坝(西)等向斜可采煤层总厚度均在 5 m 以上,往东至席关—谷豹区可采煤层仅 1 层,可采厚度 2.89 m。

3.1.2 可采煤层

区内上二叠统可采煤层有 1、2、5、6、7、11、13、14、16、17、20、21、23、26、27、29、30、32、33、34、35 号等 21 层,可采性较好的煤层有 5、6、7、14、16、20、27、30 号等 8 层(图 3)。其中,本文研究对象 6、14、27 号煤层为区内主要可采煤层,夹矸多为 0~1 层,简单结构;27 号煤层及少部分地区的 6 号煤层夹矸多为 2 层,少数 3 层;14 号煤层夹

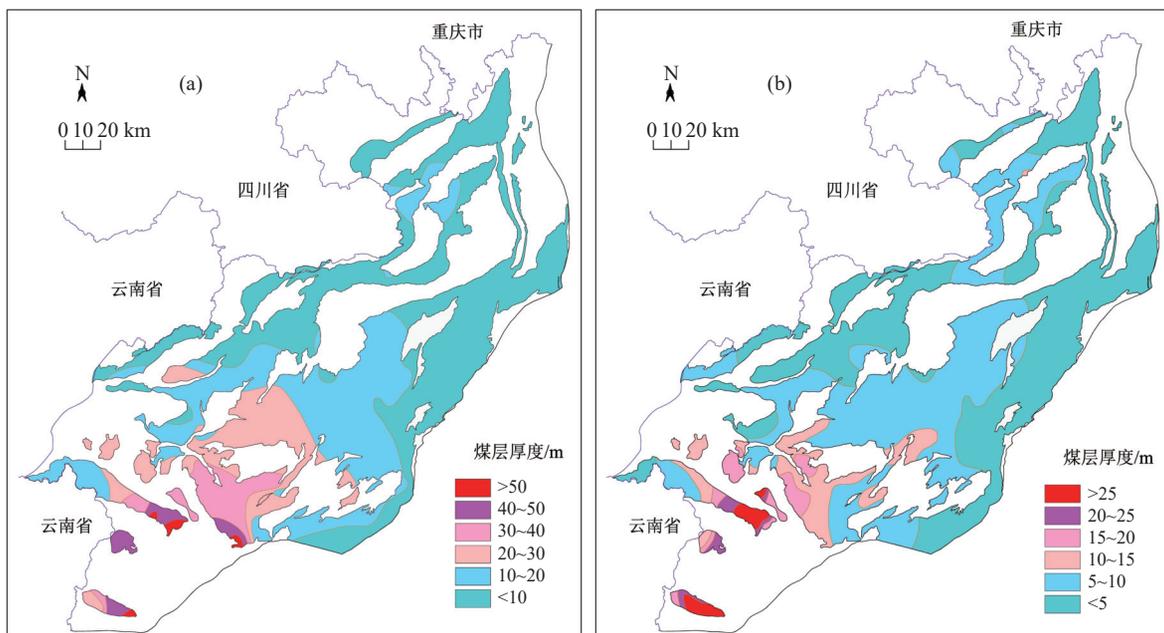


图 2 上二叠统煤层总厚(a)及可采煤层总厚(b)分布图

Fig.2 Distribution map of total thickness of Upper Permian coal seam (a) and recoverable coal seam (b)

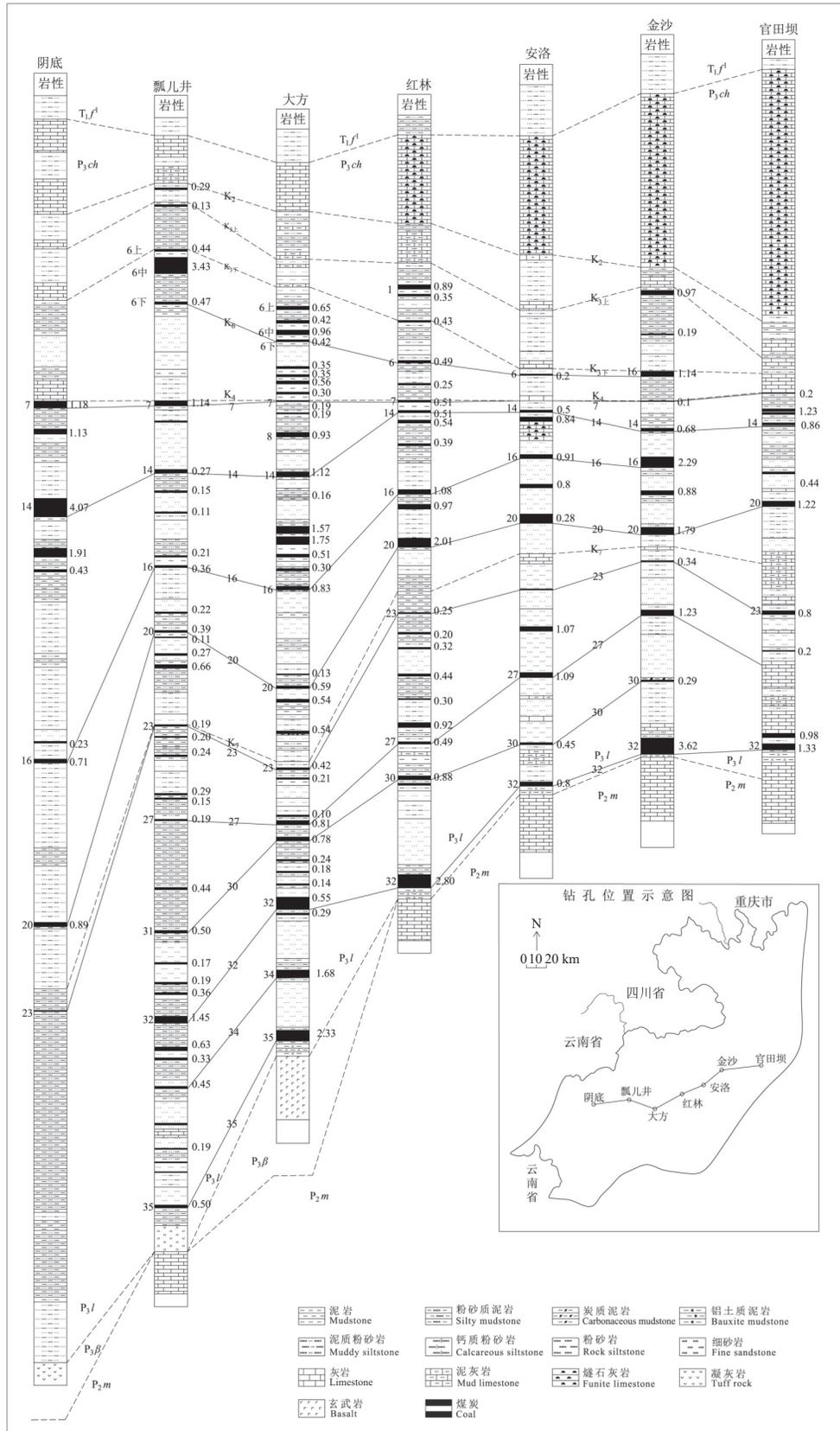


图 3 研究区煤岩层对比图
Fig.3 Comparison diagram of coal strata in the study area
<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2025, 52(2)

矸层达3层以上,夹矸厚度一般数厘米,厚度变化和分布规律不明显;夹矸岩性多为泥岩和高岭石泥岩。

6号煤层位于长兴组下部,厚度0.07~29.21 m,平均3.00 m,可采煤厚在0.70~8.34 m,以中厚煤层为主、厚煤层次之。在毕节、大方、纳雍一带出现分岔,由6上、6中、6下煤分层组成,属较稳定煤层。红林—官寨—织金—补郎一线以西为中厚煤区,厚度在1.3 m以上。妈姑、汪家寨、水城周边及毕节西部和南部、纳雍西南部、阿弓周边等局部地带为厚煤区,厚度在3.50 m以上,局部地段大于5 m,最厚7.4 m(金盆向斜姑开勘查区)。该煤层在安洛—新店—流长—平坝一线以东出现沉积缺失尖灭,仅在习水隆兴、桐梓楚米和淮子水零星可采。夹矸层数0~6层,一般0~2层,厚度0.02~0.72 m,一般0.2 m,较简单至复杂结构。在大方背斜两翼和阴底向斜,该煤层分岔多达11个煤层,煤层间距1.0~18.5 m;在以支塘向斜东段分岔达10层,煤分层间距1~9 m(图4)。

14号煤组位于龙潭组上段中部,煤厚0.85~25.61 m,可采厚度0.64~7.49 m,以中厚煤层为主,属较稳定—不稳定煤层,为六盘水煤田主要可采煤层,在黔北煤田大部可采(图4)。中厚煤区主要分布于土城向斜、水城—比德—化乐、金盆向斜西部、绿塘—金龙—八步—流长,织金—补郎—猫场、长岗—仁怀—花秋—习水—温水等地,厚度在1.3 m以上。厚煤区主要分布于土城、水城—比德

一带,最厚达6.88 m。在层台—千溪—羊场一线以西,纳雍、三塘、平坝、新店、暗流、站街、官田坝、西山、小箐向斜、西北部普宜、安乐、仁和以及东北部管坝向斜均不可采。夹矸0~7层,一般1~2层,岩性为高岭石泥岩。

27号煤组位于龙潭组下段,煤层厚度0.10~3.96 m,平均0.98 m,最大可采厚度3.94 m,一般为1.36 m,为薄—中厚较稳定煤层,是织纳煤田主要可采煤层(图4)。可采区主要分布于松河—岩脚—化乐—比德—水城—金盆、大方—金龙—珠藏—补郎—猫场—黔西—禹谟—枫香—遵义—仁怀一带以及习水、桐梓、大方南部等零星地区。中厚煤区分布于土城向斜、水城、织金西北部及黔西等地局部地带,可采煤厚在1.3 m以上,水城、八步零星分布有厚煤点,最厚3.87 m。至林口、毕节、姑开一线出现沉积缺失。煤层含矸0~10层,一般1~3层,夹矸厚度0~6.5 m,一般0.20 m。水城、金沙、遵义等地该煤层结构较简单,夹矸多为泥岩,常见蒙脱石泥岩,在一定范围内可作为煤层的对比标志,也见有细砂级以下的碎屑岩。

3.1.3 煤岩煤质特征

研究区西部为烟煤区,如盘县土城、水城威宁等地,煤层裂隙发育,性脆易碎;中部为贫煤、无烟煤区,如织金、大方、黔西及金沙等地,煤样断口多为阶梯状及贝壳状。宏观煤岩类型以暗煤、亮煤为主,其次是镜煤和丝炭。显微煤岩组分以镜质组与惰质组为主,含量之和大于95%。各煤层平均全硫

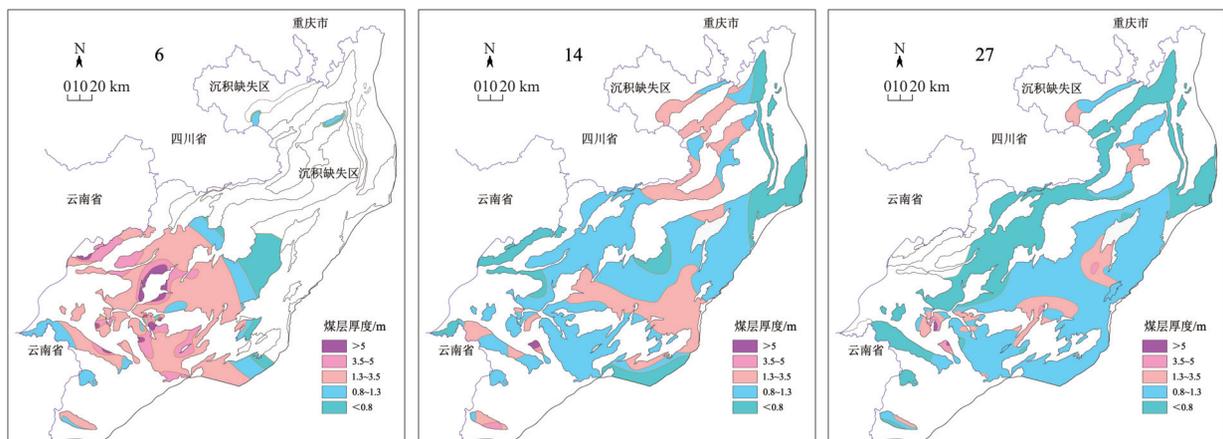


图4 上二叠统6、14、27号煤层可采厚度分布图

Fig.4 Distribution map of mining thickness in the Upper Permian No.6, No.14, No.27 coal seams

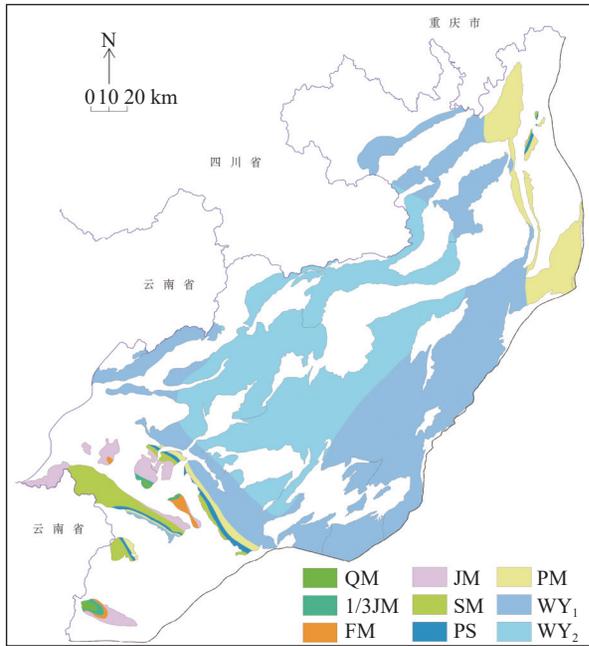


图 5 研究区上二叠统煤类分布图

QM—气煤; JM—焦煤; PM—贫煤; 1/3JM—1/3 焦煤; SM—瘦煤; WY₁—无烟煤 1 号; WY₂—无烟煤 2 号; FM—肥煤; PS—贫瘦煤
 Fig.5 Coal distribution map of Upper Permian in study area
 QM—Gas coal; JM—Coking coal; PM—Lean coal; 1/3JM—1/3 Coking coal; SM—Lean coal; WY₁— Anthracite No.1; WY₂ — Anthracite No.2; FM—Fat coal; PS—Lean coal

含量介于 0.43%~8.00%, 全区平均 2.37%; 平均灰分产率 9.52%~40.95%, 全区平均 22.20%; 平均挥发分产率为 6.19%~35.48%, 全区平均为 15.04%。

区内上二叠统煤类分布较有规律, 总体可分为 2 个大区和 3 个小区(图 5)。一是西部的水城、盘县土城及威宁烟煤区, 发育气煤、气肥煤、1/3 焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫瘦煤、贫煤; 二是北部无烟煤区(毕节、纳雍、织金、黔西、金沙、仁怀为无烟煤二号区)和中部无烟煤区(赫章、习水、遵义、安顺一带为无烟煤三号区)。西部烟煤区在水城大河边—小河边一带, 有两个较低煤化区, 均以气煤、肥煤为主; 水城杨梅树向斜和格目底向斜南翼玉舍等地出现一个高煤化中心, 以贫煤为主, 部分为瘦煤。

3.2 煤层含气性

织纳煤田共收集煤层含气量数据 852 个, 主要集中在比德—三塘、关寨、阿弓、牛场、流长等向斜。统计结果显示: 煤层甲烷含量(干燥无灰基, 下同)变化于 0~48.69 m³/t, 平均 11.81 m³/t; 平均含量超过 15 m³/t 的只有五轮山勘查区, 超过 12 m³/t 的为

中岭、官寨勘查区和流长向斜, 牛场向斜最低(5.57 m³/t); 氮气含量分布范围为 0~12.36 m³/t, 平均 1.65 m³/t; 二氧化碳含量为 0~11.63 m³/t, 平均 0.49 m³/t; 重烃气含量为 0~25.09 m³/t, 平均 0.49 m³/t, 在多数勘查区都有产出, 大冲头勘查区平均含量最高, 达到 2.89 m³/t, 构成织纳煤田煤层气产出特点之一(图 6)。

六盘水煤田共收集煤层含气量数据 526 个, 主要集中在格目底向斜和都格勘查区(图 6)。煤层甲烷含量变化于 0.78~37.54 m³/t, 平均 10.57 m³/t, 多数样品超过 10 m³/t, 连山勘查区最高为 13.11 m³/t, 阳关寨勘查区最低为 7.21 m³/t; 氮气含量为 0~21.85 m³/t, 平均 2.74 m³/t; 二氧化碳含量 0~26 m³/t, 平均 1.23 m³/t; 重烃气含量 0.02~24.92 m³/t, 平均 2.39 m³/t, 多数勘查区都有产出。

黔北煤田共收集煤层含气量数据 514 个, 主要集中于瓢儿井向斜绿塘勘查区和安洛勘查区、官田坝向斜和习水—温水区(图 6)。甲烷含量变化于

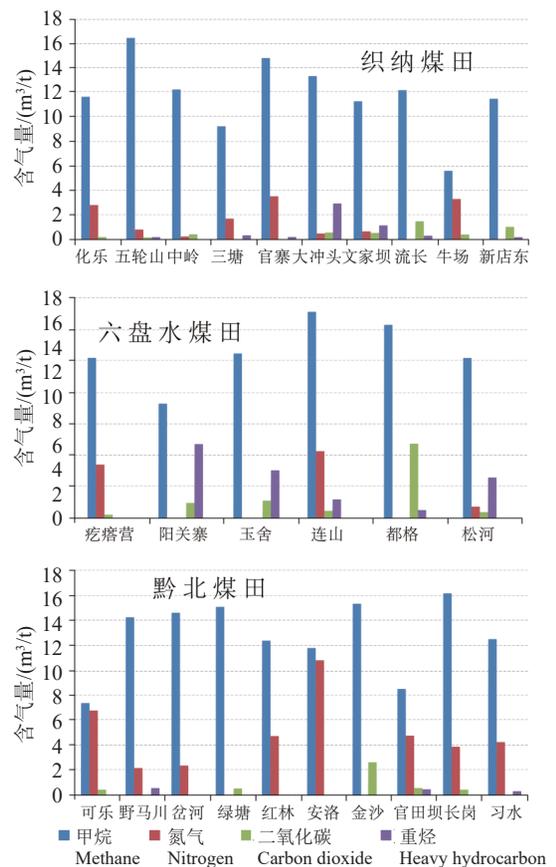


图 6 研究区煤层各类气体含量
 Fig.6 Various gas contents of coal seam in the study area

0.03~54.45 m³/t, 平均 12.80 m³/t, 绿塘勘查区和长岗向斜分别为 15.01 m³/t 和 16.23 m³/t, 官田坝向斜最低为 8.43 m³/t; 氮气含量 0.22~29.6 m³/t, 平均 4.92 m³/t, 安洛勘查区最高, 达到 10.84 m³/t; 二氧化碳含量为 0~9.11 m³/t, 平均 0.78 m³/t; 重烃气含量普为 0~2.54 m³/t, 平均 0.13 m³/t, 这与织纳煤田和六盘水煤田煤层气组分特点有明显区别。

在区域上, 煤层甲烷含量与单个向斜的规模和“凹陷”深度直接相关, 具有向斜控气的典型特征(图 7)。不同煤层含气量的区域分布规律相似, 只是下部煤层高含气量分布范围略大于上部煤层。根据集中连片性、煤质特征、构造煤分布以及煤层含气量分布等特征, 将研究区划分为 7 个大的含气区, 分别为西部的土地垭—大河边—神仙坡—格目底向斜群、野马川—金盆—阴底—瓢儿井向斜群、比德—三塘盆地、补郎—轿子山—谷豹向斜群、金龙—黔西—金沙向斜群、流长—莫老坝—陆家寨—官田坝向斜群以及长岗—茅台—周市坝—习水—温水区。整体来看, 各含气区之间煤层含气量

没有大的差异, 但是含气量大于 16 m³/t 的地带主要分布于比德—三塘盆地及金龙—黔西—金沙向斜群。含气量 8~16 m³/t 的地带广泛分布在研究区东部、北部和东北部, 一般位于向斜两翼斜坡部位。含气量 < 8 m³/t 位于向斜边缘地带, 一般十分狭窄, 这是赋煤构造多为隔槽式向斜的必然结果。

3.3 煤储层压力及渗透率

煤层试井压力分布在 0.99~12.35 MPa, 平均 4.98 MPa; 压力系数为 0.34~1.4, 平均 0.86, 欠压、常压和超压均有分布(表 1)。平均压力系数大于 1.1 的勘查区主要有松河和安洛, 分别为 1.25 和 1.19, 表现为超压; 平均压力系数介于 0.9~1.1 的勘查区主要有阳关寨和官田坝, 为常压地层; 其他勘查区平均压力系数均小于 0.9, 表现为欠压。由东向西方向, 煤储层由欠压状态向正常和超压状态转变。

统计结果显示, 研究区西部以低渗透率煤层为主, 东部中渗透率煤层分布较多; 纵向上, 随着层位降低, 煤层渗透率趋于降低, 但在不同煤层之间出现明显波动(表 2)。

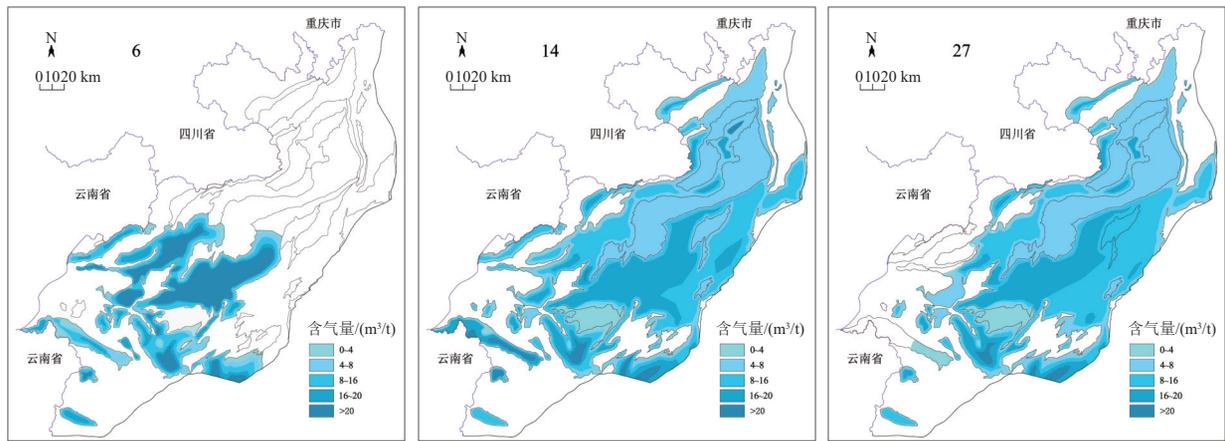


图 7 上二叠统 6、14、27 号煤层甲烷含量等值线图
Fig.7 Contour maps of methane content in Upper Permian No.6, No.14, No.27 coal seams

表 1 上二叠统煤层试井压力统计

Table 1 Statistics of well testing pressure of Upper Permian coal seam

向斜/勘查区	测试层次	储层压力/MPa			压力系数			向斜/勘查区	测试层次	储层压力/MPa			压力系数		
		最小	最大	平均	最小	最大	平均			最小	最大	平均			
松河	4	6.94	12.35	9.10	1.08	1.40	1.25	流长	4	3.90	4.38	4.10	0.82	0.83	0.82
都格	8	2.03	6.05	3.29	0.71	0.91	0.81	新店东	1			3.51			0.67
阳关寨	6	3.63	6.46	4.69	0.78	1.15	0.90	野马川	3	5.16	5.54	5.39	0.68	0.70	0.69
玉舍	10	0.99	5.36	2.88	0.34	0.97	0.70	白布	5	7.94	10.01	8.90	0.82	0.93	0.88
化乐	5	2.97	5.69	4.57	0.65	1.01	0.89	安洛	4	3.70	6.45	4.83	1.07	1.35	1.19
官寨	3	4.60	5.20	4.94	0.81	0.84	0.83	林华	2	8.04	8.11	8.08	0.84	0.90	0.87
牛场	4	3.77	5.62	4.96	0.75	0.83	0.80	官田坝	1			5.65			0.91

表 2 部分勘查区煤层试井渗透率统计

Table 2 Permeability statistics of coal seam test in some exploration areas

勘查区	孔号	煤层编号	煤层埋深 /m	煤层厚度 /m	渗透率 /mD	勘查区	孔号	煤层编号	煤层埋深 /m	煤层厚度 /m	渗透率 /mD		
阳关寨	902	3	464.56	2.24	0.1630	化乐	1602	2	464.04	0.40	0.5002		
		4	474.83	1.03	0.0690			5	502.26	1.15	0.3228		
		5	527.03	2.15	0.0414			6	523.35	5.90	0.3000		
		7	538.39	1.24	0.0571			3603	2	520.17	1.65	0.1074	
		10	551.84	1.53	0.0362				6	577.76	1.58	0.1682	
				12	566.15			0.98	0.7560	官寨	GZ-1	4	555.42
松河	SH-1	1+3	620.45	2.03	0.1060	9	599.74	1.57	0.0210				
		9	661.98	1.41	0.0934	11	645.70	3.08	0.0430				
		16	739.97	1.89	0.2100	牛场	N506	13	497.47	1.37	2.0900		
		27 ⁻¹	920.71	0.74	0.0437			29	619.92	1.76	0.9600		
				20	273.10	2.54	0.1850	34	669.43	0.88	1.0500		
玉舍	3601	21	281.27	0.97	0.0751	流长	J701	6	474.49	1.41	0.0536		
		80	451.79	1.29	0.0980			8	491.64	2.38	0.0124		
		103	534.54	1.22	0.1510			9	504.80	1.48	0.0437		
		107 ⁻¹	564.89	2.52	0.0494			13	567.22	1.13	0.0596		
		5	252.34	2.91	0.0661			新店东	b503	9	534.07	5.22	0.0328
10	289.36	1.14	0.0182	官田坝	1902	9	620.88			6.01	0.6920		
都格	23-3	15	309.72			1.05	0.0484	安洛	7-3	4	331.36	1.94	0.0874
		19	336.06	1.16	0.0444	8	345.15			0.68	0.0758		
		25	357.28	1.03	0.0693	14	404.48			0.90	0.0768		
		3	263.64	1.28	0.0542	15	554.60			1.35	0.0025		
林华	LH-1	5 ⁻²	282.42	1.90	0.0718	野马川	507	1	751.20	1.12	0.0347		
		10	339.74	1.04	0.1021			4	795.70	0.70	0.0319		
		12	364.79	1.28	0.0546			7	826.90	0.70	0.0291		
		13 ⁻¹	372.50	10.37	0.0747			白布	ZK11-4	6 ⁻¹	923.26	0.85	0.0200
		16	439.47	1.28	0.1035					6 ⁻²	934.12	2.15	0.0600
		23 ⁻¹	490.36	1.09	0.0893					7	984.95	0.84	0.0700
		33	679.78	1.95	0.0102	28	1088.04	1.44	0.0300				
		4	889.26	2.09	0.0268	33	1151.22	2.61	0.0100				
		15	964.07	1.48	0.0276								

3.4 煤体结构区域分布规律

根据构造破坏程度,煤体结构分为四种类型,即原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤(汤友谊等, 2004; 王恩营等, 2009)。不同类型煤体结构对煤层气开发产生不同影响,一般认为原生结构煤及碎裂煤有利于煤层气的开发,碎粒煤和糜棱煤不利于煤层气的开发(冯三利等, 2002; 李辛子等, 2013)。通过煤矿井下观测编录、钻孔取芯和测井曲线分析等手段,整理分析了研究区 25 个赋煤单元的煤体结构资料,据此分析 6、14、27 号煤层的煤体结构区域分布规律。

6 号煤层构造煤较发育,主要有碎裂煤、碎粒煤和碎粉煤,糜棱煤只在织纳煤田轿子山勘查区有少量分布(图 8)。在土城、格目底、疙瘩营、大河

边、神仙坡、土地堰、可乐、野马川、金龙等向斜大部分区域以及黔西向斜及金沙向斜,6 号煤层以原生结构煤为主,部分区域发育少量碎裂煤;比德—三塘、白泥箐、金盆、阴底、长春堡、瓢儿井(除王家坝井田)等向斜,煤层以碎裂煤为主,碎粒煤、碎粉煤也较发育;瓢儿井向斜王家坝井田、金龙向斜以那井田以及关寨、阿弓、珠藏、白果寨—鸡场坡、补郎、轿子山区及牛场等向斜,6 号煤层以碎粉煤为主,煤体松软,机械强度差,局部发育少量碎粒煤。

14 号煤层原生结构煤主要分布于研究区中部,呈走向北西向的条带状;构造煤较发育,主要分布于研究区东南部和北部,主要有碎裂煤、碎粒煤和碎粉煤,不发育糜棱煤(图 9)。土城、杨梅树、大河边、神仙坡、比德—三塘、阿弓、金龙、黔西(除谷

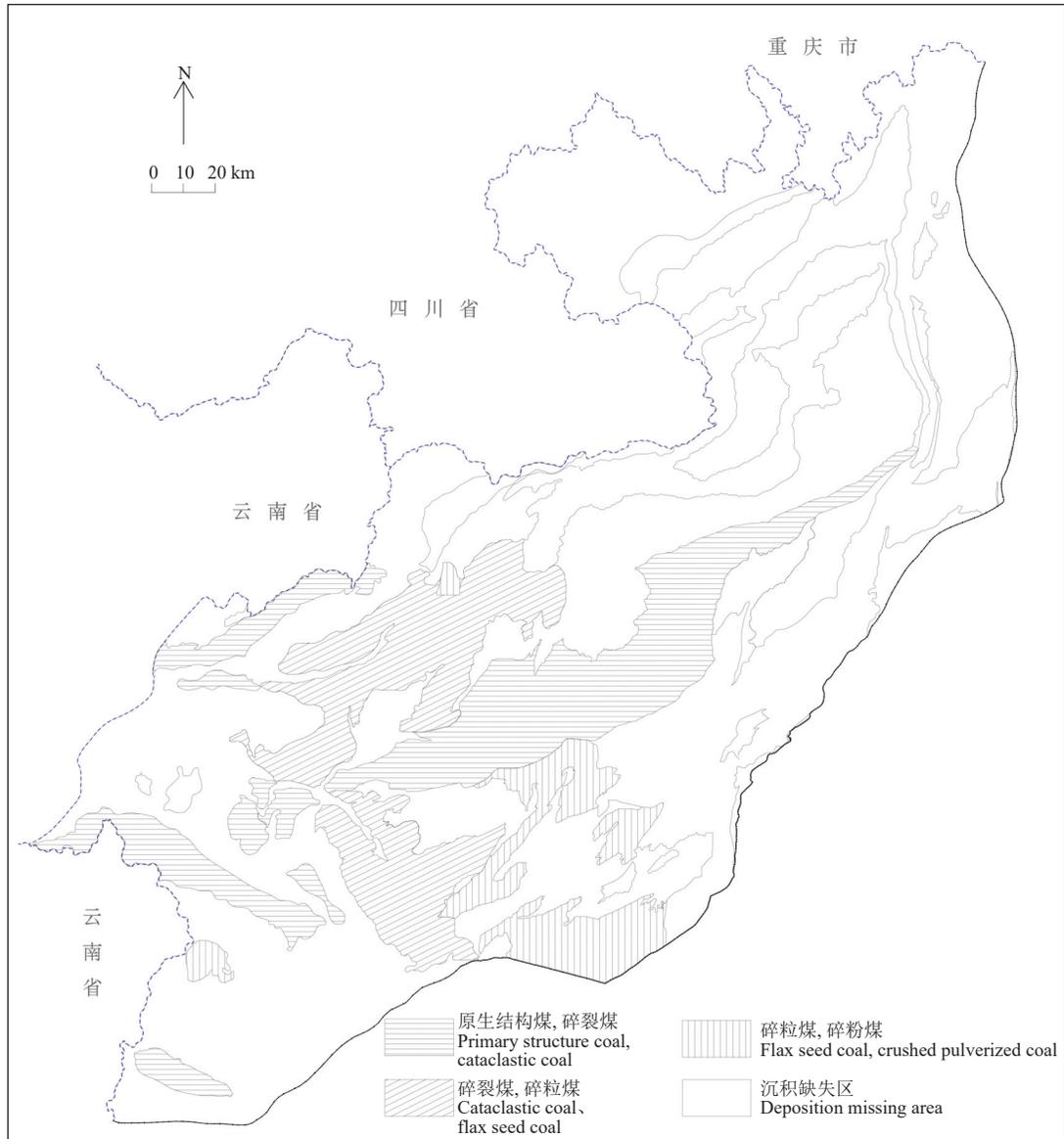


图8 上二叠统6号煤层构造煤分布图

Fig.8 Structural coal distribution map of Upper Permian No.6 coal seam

里勘查区一带)、金沙、官田坝、茅坝、长岗及茅台等向斜,以原生结构煤为主,部分区域发育碎裂煤;疙瘡营、格目底、小河边、土地垭、金盆、阴底、野马川、可乐、杨家堡、瓢儿井、牛场等向斜以及习水—温水地区,以碎裂煤为主,碎粒煤、碎粉煤在局部地区也较发育;白果寨—鸡场坡、补郎、轿子山、席关—谷豹、流长、关寨、莫老坝、小菁、黔西(谷里勘查区)、陆家寨、朵朵坝、青山、西山、养龙场、龙坪、后井坪、周市坝、老堡山、新站—官店等向斜或地区,14号煤层以碎粉煤为主,煤体松软,机械强度差,碎粒煤也较发育。

27号煤层原生结构煤主要分布于研究区中部,呈走向北西向的条带状;构造煤较发育,主要分布于研究区东南部 and 北部,主要有碎裂煤、碎粒煤和碎粉煤,不发育糜棱煤(图10)。杨梅树、格目底、疙瘡营、大河边、土地垭、神仙坡、金盆、比德—三塘、阿弓、轿子山、金龙、黔西(除谷里勘查区)、金沙、茅坝、长岗、茅台等向斜或地区,以原生结构煤为主,碎裂煤也较发育;土城、小河边、阴底、杨家堡、瓢儿井、牛场、官田坝等向斜及习水—温水地区,以碎裂煤为主,碎粒煤和碎粉煤也较发育;白果寨—鸡场坡、补郎、席关—谷豹、流长、关寨、莫老

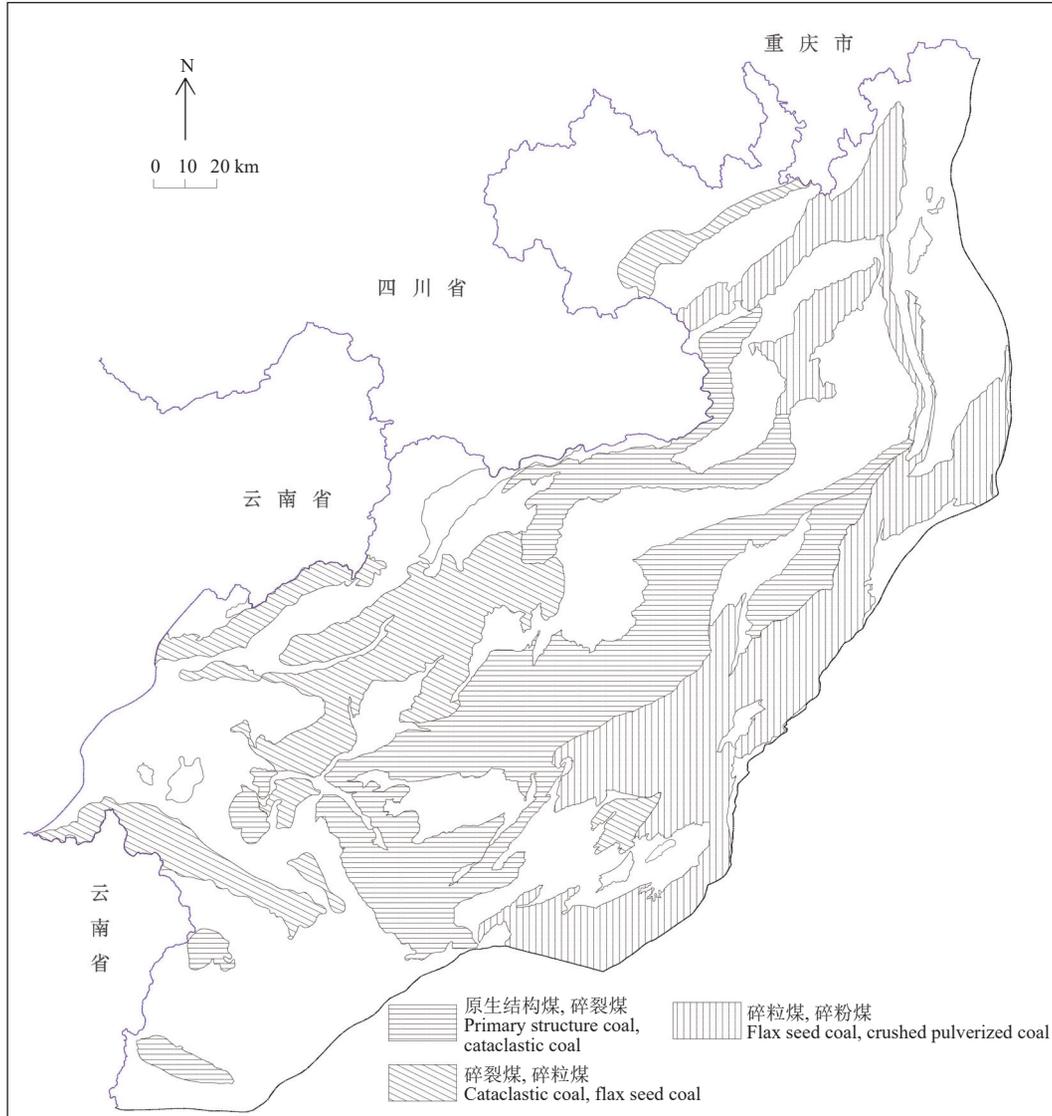


图 9 上二叠统 14 号煤层构造煤分布图
 Fig.9 Structural coal distribution map of Upper Permian No.14 coal seam

坝、小菁、黔西谷里、陆家寨、朵朵坝、青山、西山、养龙场、龙坪、后井坪、周市坝、老堡山及新站—官店等向斜或地区, 27 号煤层以碎粉煤为主, 煤体松软, 机械强度差, 局部区域发育碎粒煤。

3.5 黔西北中高煤阶煤层气富集机理

贵州省地质构造复杂, 薄—中厚煤层群特征显著, 构造煤广泛分布, 含煤盆地因构造分割致发育不均, 封闭性向斜成为煤层气发育的优势区域。其一, 上覆飞仙关组泥页岩隔水性强、孔渗性差, 为煤层气藏提供了岩性封闭条件。同时, 龙潭组水动力条件弱, 仅在翼部出露地层附近发育弱径流区, 地下水顺层补给对深部煤层气起到水动力封闭作

用。加之煤层含气量与埋深呈正相关, 向斜深部成为煤层富气区。其二, 向斜轴部处于挤压应力环境, 煤层渗透率在埋深与构造应力共同作用下显著降低, 不利于煤层气产出。因此, 在构造—水动力封闭与埋深共同控制下, 靠近向斜轴部的单斜原生结构煤层易形成煤层气富集高产区(图 11)。

埋深、断层对黔西北中高阶煤的差异性控制和中高阶煤储层差异性气水产出特征表明, 发育封闭断层及水力封闭对高煤阶储层煤层气富集高产尤为重要, 而中煤阶储层在局部构造高点处亦可形成构造高位型富集高产区。典型的案例是六盘水煤田大河边区块中煤阶煤层气勘探开发示范工程, 由

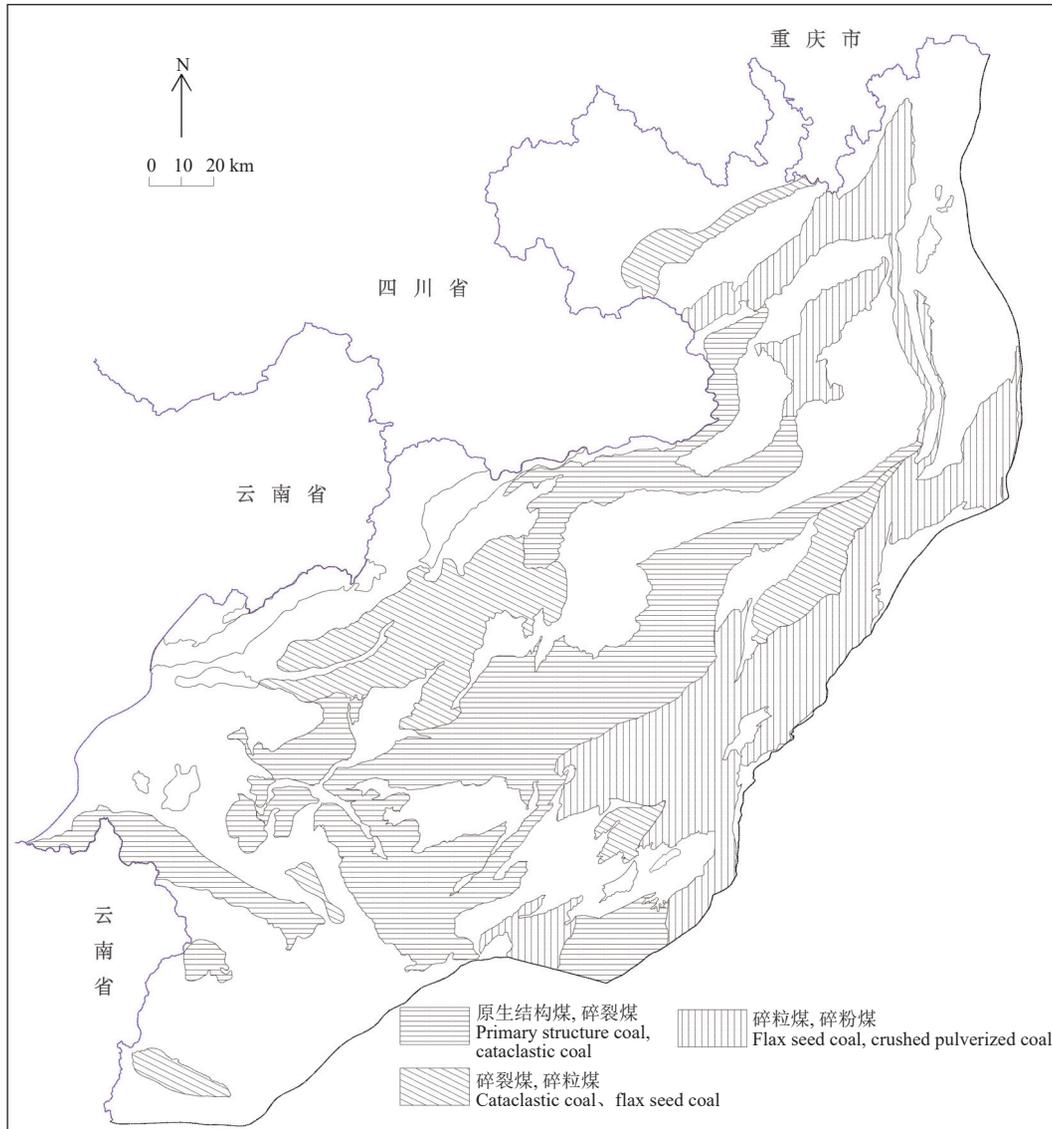


图 10 上二叠统 27 号煤层构造煤分布图
 Fig. 10 Structural coal distribution map of Upper Permian No.27 coal seam

于目标煤层深度较大(>600 m),煤储层原始渗透率低,加上有一定程度的构造煤发育,大部分井的煤层气勘探开发效果不佳,平均日产普遍低于 500 m³/d。然而存在少量靶点位置特殊的井,如钟 1-8-6 井组等,靠近断层破碎带,煤储层渗透率得到极大改善,试井渗透率超过 1 mD,平均日产超过 4000 m³/d。

4 煤层气勘探开发地质选区

4.1 有利区优选方法

吸收前人研究成果(杨澍等, 2005; 邵龙义等

2011; 郑师谊等, 2012; 高福亮等, 2014; 吴财芳等, 2018), 基于研究区上述煤层气地质条件研究, 考虑现有技术水平, 建立了研究区煤层气有利区块评价参数指标体系(表 3)。该体系由单煤层煤厚、含气量、煤层渗透率、煤储层压力、煤体结构 5 项参数构成, 涵盖煤层气资源量、储层地质信息, 称为“五指标法”。根据主力层赋分, 划分出 I、II、III 类煤层气资源(表 4, 表 5)。

4.2 有利区优选结果

根据五指标法各项指标资料拥有程度, 筛选出 19 个向斜构造单元进行优选评价。利用前述资料,

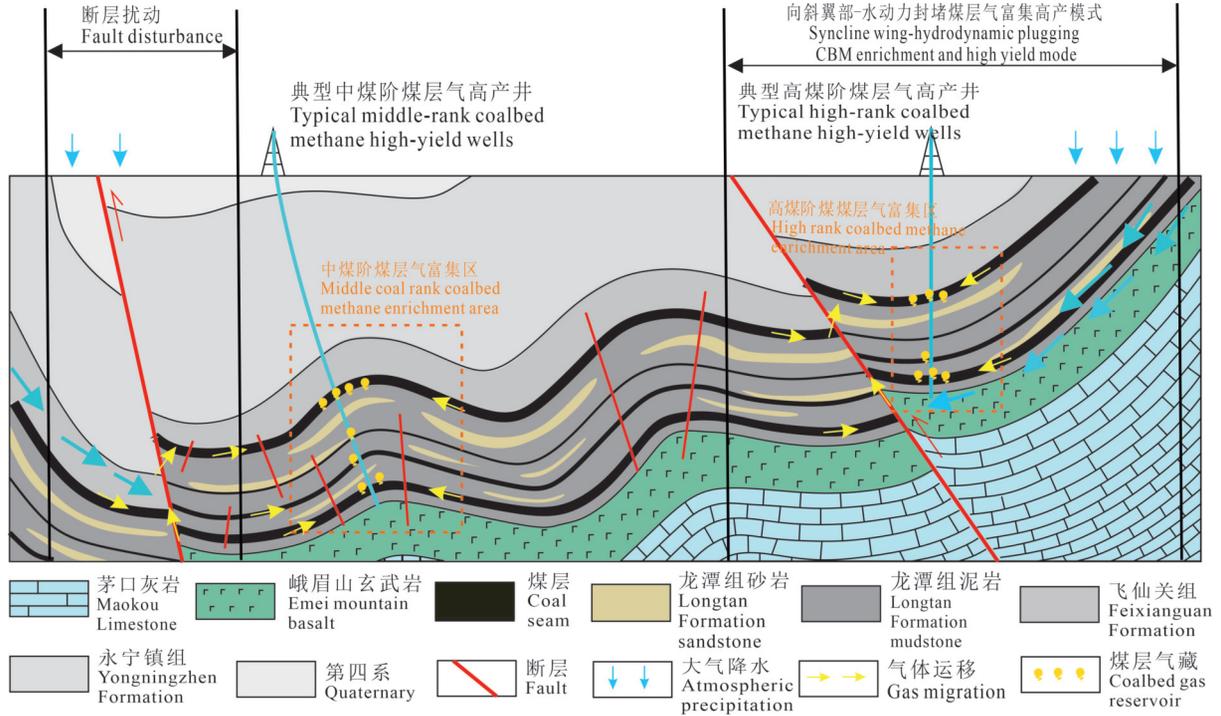


图 11 黔西北中高煤阶煤层气富集机理图 (Zhao et al., 2024)

Fig.11 Enrichment mechanism diagram of middle and high rank coalbed methane in Northwest Guizhou (Zhao et al., 2024)

表 3 煤层气有利区块评价参数指标体系

Table 3 Evaluation parameter index system of CBM favorable block

参数名称	参数权重	评价标准	赋值	备注
单煤层厚度/m	0.413	>2	50	构造十分复杂, 一票否决
		1~2	30	
		<1	20	
含气量/(m ³ /t)	0.255	>12	50	
		8~12	30	
		<8	20	
煤层原始渗透率/mD	0.164	>0.5	50	
		0.1~0.5	30	
		<0.1	20	
煤储层压力状态/Mpa	0.072	≥0.9	50	
		0.9~0.7	30	
		<0.7	20	
构造发育情况	0.096	构造简单, 煤体结构完整	50	
		少量断层, 煤体结构轻度破坏	30	
		断层发育, 煤体结构严重破坏	20	

表 4 煤层气有利区评价模糊赋分模型

Table 4 Fuzzy assignment model for CBM favorable area evaluation

指标	权重	向斜1		向斜2		...	向斜3	
		隶属度	权系数	隶属度	权系数		隶属度	权系数
A ₁	B ₁	X ₁	B ₁ ·X ₁	Y ₁	B ₁ ·Y ₁	...	Z ₁	B ₁ ·Z ₁
A ₂	B ₂	X ₂	B ₂ ·X ₂	Y ₂	B ₂ ·Y ₂	...	Z ₂	B ₂ ·Z ₂
A ₃	B ₃	X ₃	B ₃ ·X ₃	Y ₃	B ₃ ·Y ₃	...	Z ₃	B ₃ ·Z ₃
...
A _n	B _n	X _n	B _n ·X _n	Y _n	B _n ·Y _n	...	Z _n	B _n ·Z _n
综合评价分数		Σ B _i ·X _i (i=1,2...n)		Σ B _i ·Y _i (i=1,2...n)		...	Σ B _i ·Z _i (i=1,2...n)	

对 19 个向斜分别进行 5 项评价指标的统计分析, 并按前述评价方法的分级标准进行打分, 最后相加

即为该区带的综合得分(表 6)。通过评价, 在黔西北地区优选出 I 级有利区 7 个, II 级有利区 8 个,

表 5 煤层气有利区分级标准

Table 5 Classification standard of CBM favorable area

分级	综合评价得分	开发建议	有利向斜
I 级	≥40分	优先开发	土城, 杨梅树, 大河边, 水公河, 比德, 以支塘, 金龙(北)
II 级	30~40分	次优开发	格目底, 金盆, 三塘, 黔西(北), 金沙, 长岗, 流长, 莫老坝
III 级	≤30分	备选开发	关寨, 牛场, 官田坝, 野马川

表 6 重点向斜构造单元综合评价结果

Table 6 Results of comprehensive evaluation of key synclinal tectonic units

构造单元	单煤层厚度/m		含气量/(m ³ /t)		煤体结构		渗透率/mD		压力状态		总得分
	赋值	权重	赋值	权重	赋值	权重	赋值	权重	赋值	权重	
土城	50		30		50		30		50		43
杨梅树	50		50		50		20		30		46
格目底	30		30		50		20		30		33
大河边	50		50		50		20		30		46
比德	50		30		50		30		50		43
水公河	30		50		50		30		50		40
三塘	30		30		50		20		50		34
关寨	30		30		20		20		30		28
牛场	30		20		20		50		30		27
流长	30	0.413	50	0.255	20	0.164	20	0.072	30	0.096	33
莫老坝	50		30		20		20		20		35
以支塘	30		50		50		20		50		40
官田坝	20		30		30		50		50		29
野马川	20		50		30		20		20		29
黔西(北)	30		30		50		20		50		34
金龙(北)	30		50		50		20		50		40
金盆	30		50		30		20		50		36
长岗	30		50		50		20		30		38
金沙	30		50		50		20		30		38

III级有利区 4 个(表 5)。

5 结 论

(1)研究区上二叠统龙潭组含煤性最好,具有“单层厚度薄、累计厚度大、成群分布”的煤层发育特点;煤层含气量较高,且具有向斜控气的特征,其中含气量大于 16 m³/t 的地带主要分布于比德—三塘向斜以及金龙—黔西—金沙向斜群。

(2)煤层试井压力由东向西方向具有由欠压状态向正常和超压状态转变的趋势;渗透率变化由西向东以及层位降低,煤层渗透率趋于降低,但不同煤层之间渗透率波动明显。

(3)构造煤具有自东向西逐渐增多的趋势:东部地区以原生结构煤与碎裂煤为主,有利于煤层气开发;西部地区以碎粒煤与碎粉煤为主,煤储层压裂改造较为困难。

(4)建立了由单煤层厚度、含气量、渗透率、煤储层压力和煤体结构 5 项参优选方法数构成的煤层气有利区,即“五指标法”。据此,对研究区 19 个

向斜构造单元进行了评价,优选出 I 级有利区 7 个、II 级有利区 8 个和 III 级有利区 4 个。

References

- Bi C Q, Zhang J Q, Shan Y H, Hu Z F, Wang F G, Chi H P, Tang Y, Yuan Y, Liu Y R. 2020. Geological characteristics and co-exploration and co-production methods of Upper Permian Longtan coal measure gas in Yangmeishu Syncline, Western Guizhou Province, China[J]. *China Geology*, 3(1): 38–51.
- Cheng Yiyan, Chen Zhenlong, Li Song, Chen Shida, Guo Tao. 2021. Characteristics of coalbed methane accumulation in Bide–Santang syncline, western Guizhou and favorable sector[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(7): 1140–1148 (in Chinese with English abstract).
- Deng Changwen, Mo Rihe. 2007. Drilling techniques of coalbed methane parameter well in Baotian–Qingshan area of Guizhou[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 34(1): 53–54 (in Chinese with English abstract).
- Feng Sanli, Ye Jianping, Zhang Suian. 2002. Coalbed methane resources in the ordos basin and its development potential[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 658–662.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Wei Chongtao. 2007. Coalbed Methane Geology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press(in Chinese with English abstract).

- Gao Fuliang, Lu Hongfeng, Wang Haipeng. 2014. Discussion on the block evaluation methods for low rank cbm resources in China: A case study of the Junggar Basin[J]. *Geology and Resources*, 23(1): 142–144 (in Chinese with English abstract).
- Gao Wei, Han Zhongqin, Jin Jun, Bai Lina, Zhou Peiming. 2018. Occurrence characteristics and assessment of favorable areas of coalbed methane exploration in Liupanshui coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 46(5): 81–89 (in Chinese with English abstract).
- Han Jun, Shao Longyi, Xiao Jianxin, Xiao Zhenghui, Ran Maoyun, Yu Xiaohui. 2008. Application of multi-layered fuzzy mathematics in assessment of exploitation potential of coalbed methane resources[J]. *Coal Geology & Exploration*, 36(3): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- Hao Haiyang, Li Yong, Song Jiwei, Wang Hu, Li Yong, Dai Yunpeng. 2019. Well bore stabilization technique in coal bearing formation in southwestern Guizhou[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(7): 8–13, 33 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guoyi, Guan Hui, Jiang Dengwen, Du Ping, Li Zhisheng. 2004. Analysis of condition for the formation of a coal methane accumulation in the Qinshui coal methane field[J]. *Geology in China*, 31(2): 213–217 (in Chinese with English abstract).
- Hu Lin, Xue Xiaohui, Cheng Peng, Yang Yina, Chen Rong. 2019. Preliminary analysis of geological conditions of "three gas and exploration" reservoir of Xuanwei Formation in Xuanwei area[J]. *Geological Survey and Research*, 42(1): 13–17 (in Chinese with English abstract).
- Jin Jun, Yang Zhaobiao, Qin Yong, Cui Yuhuan, Wang Guoling, Yi Tongsheng, Wu Caifang, Gao Wei, Chen Jie, Li Geng, Li Cunlei. 2021. Progress, potential and prospects of CBM development in Guizhou Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(12): 1706–1718 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinzi, Wang Saiying, Wu Qun. 2013. Scheme for subdivision of tectonic coal systematics: Implications for coalbed methane development[J]. *Geological Review*, 59(5): 919–923 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Huang Mingyong, Song Jiwei, Ban Jinpeng. 2018. Research on non-reservoir horizontal well development technology of Zhijin coalbed methane reservoir in Guizhou Province[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 44(10): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shuangfang, Shen Jianian, Wang Zhenping, Li Chun. 2003. Resource evaluation of coalbed gas and potential analysis in Hailar Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 31(6): 28–31 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yong. 2023. Thinking and discussion for some problems of geological survey of coal measures gas[J]. *Geology in China*, 50(5): 1355–1374 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Xiong Menghui, Yi Tongsheng, Yang Zhaobiao, Wu Caifang. 2008. On unattached multiple superposed coalbed methane system: In a case of the Shuigonghe syncline, Zhijin–Nayong Coalfield, Guizhou[J]. *Geological Review*, 54(1): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Shan Yansheng, Bi Caiqin, Zhang Jiaqiang, Li Feng, Wang Guofu, Li Hui. 2018. Industrial grade coalbed methane findings in Yangmeishu syncline, Liupanshui area, western Guizhou[J]. *Geology in China*, 45(6): 1302–1303 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Wen Huaijun, Li Yonghong, Zhou Jun, Cai Yuliang, Jia Zhiyao, Lu Jing. 2011. Assessment of favorable areas for coalbed methane resources exploration in the Muli coalfield of Qinghai Province based on multi-layered fuzzy mathematics[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1896–1903 (in Chinese with English abstract).
- Sun Bin, Sun Fenjin, Tian Wenguang, Sun Qinping, Chen Gang, Chen Hao, Feng Sheng. 2011. Controlling factors of coalbed methane enrichment in the Wushenqi Area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 31(2): 34–38 (in Chinese with English abstract).
- Tang Youyi, Tian Gaoling, Sun Siqing, Zhang Guocheng. 2004. Improvement and perfect way for the classification of the shape and cause formation of coal body texture[J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science)*, 23(3): 161–164 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xiangui. 2012. Occurrence regularities of coal resources in Guizhou Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 40(5): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Tian Ya, Du Zhili, Zhang Wenlong, Chen Yi. 2019. Main controlling factors and accumulation model of Jurassic coalbed methane in Muli Basin[J]. *Geological Survey of China*, 6(4): 88–94 (in Chinese with English abstract).
- Wang Enying, Liu Mingju, Wei Jianping. 2009. Newgenetic texture structure classification system of tectonic coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 34(5): 656–660 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengjian, Gao Wei, Guo Tianxu, Bao Shujing, Jin Jun, Xu Qiufeng. 2020. The discovery of shale gas, coalbed gas and tight sandstone gas in Permian Longtan Formation, northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 47(1): 249–250 (in Chinese with English abstract).
- Wu Caifang, Liu Xiaolei, Zhang Shasha. 2018. Construction of index system of "Hierarchical progressive" geological selection of coalbed methane in multiple seam area of eastern Yunnan and western Guizhou[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1647–1653 (in Chinese with English abstract).
- Wu Sheng, Xu Yun, Shen Jianing, Jin Liuqing, Chen Jiyu, Li Chenchen, Hu Xiaolin. 2018. Structural control on the enrichment of CBM in Changgang syncline, northern Guizhou coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 46(2): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guoyi, Liu Hu, Mao Zhixin. 2018. Guizhou natural gas energy investment corporation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 45(5): 53–54 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Dehua, Tang Shuheng, Zhu Baocun. 2011. Comprehensive evaluation of coalbed methane exploration potential in the Jin–Shaan–Meng area[J]. *Natural Gas Industry*, 31(1): 32–36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shu, Chu Yu, Yang Xiangkui, Lou Benjun. 2005. Application of the analytic hierarchy process (AHP) in the evaluation of the geo-environmental quality in the Sanjiang plain[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 485–490 (in Chinese with English abstract).

- Ye Jianping, Wu Jianguang, Fang Chao, Wu Jian, Xiong Dehua. 2011. Regional geological and reservoir characteristics of the Panhe CBM Gas Field in the southern Qinshui Basin and their influences on CBM gas production capacity[J]. *Natural Gas Industry*, 31(5): 16-20 (in Chinese with English abstract).
- Yi Tongsheng, Tang Xiangui, Yang Tongbao. 2019. Coal Resource Potential and Guarantee Capacity of Guizhou Province [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press(in Chinese with English abstract).
- Zhao F P, Han S J, Ren H Y, Zhou X Z, Zhang J C, Xiang W X, Guo Z J, Yang Y Y. 2024. Characteristics of middle-high-rank coal reservoirs and prospects for CBM exploration and development in western Guizhou, China[J]. *Natural Gas Industry B*, 11: 326-339.
- Zheng Shiyi, Zhang Xujiao, Yang Yan, Li Zongmin, Zhang Jinzhe, Chen Jie. 2012. The application of analytic hierarchy process to the danger evaluation of collapse and slide in Lujiang basin segment of Nujiang valley, western Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2/3): 356-365 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程轶妍, 陈贞龙, 李松, 陈世达, 郭涛. 2021. 黔西比德-三塘向斜煤层气藏特征及甜点区段[J]. *地质通报*, 40(7): 1140-1148.
- 邓昌文, 莫日和. 2007. 贵州保田-青山煤层气参数井钻井工艺技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 34(1): 53-54.
- 冯三利, 叶建平, 张遂安. 2002. 鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析[J]. *地质通报*, 21(10): 658-662.
- 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 2007. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 高福亮, 鲁红峰, 王海鹏. 2014. 中国低煤阶煤层气资源区块评价方法讨论——以准噶尔盆地为例[J]. *地质与资源*, 23(1): 142-144.
- 高为, 韩忠勤, 金军, 白利娜, 周培明. 2018. 六盘水煤田煤层气赋存特征及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 46(5): 81-89.
- 韩俊, 邵龙义, 肖建新, 肖正辉, 冉茂云, 于晓辉. 2008. 多层次模糊数学在煤层气开发潜力评价中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 36(3): 31-36.
- 郝海洋, 李勇, 宋继伟, 王虎, 李勇, 代云鹏. 2019. 黔西南地区煤系地层井壁稳定技术探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 46(7): 8-13,33.
- 胡国艺, 关辉, 蒋登文, 杜平, 李志生. 2004. 山西沁水煤层气田煤层气成藏条件分析[J]. *中国地质*, 31(2): 213-217.
- 胡琳, 薛晓辉, 成鹏, 杨怡娜, 陈蓉. 2019. 滇东宣威地区宣威组“三气兼探”储层地质条件初步分析[J]. *地质调查与研究*, 42(1): 13-17.
- 金军, 杨兆彪, 秦勇, 崔玉环, 王国玲, 易同生, 吴财芳, 高为, 陈捷, 李庚, 李存磊. 2021. 贵州省煤层气开发进展、潜力及前景[J]. *煤炭学报*, 46(12): 1706-1718.
- 李辛子, 王赛英, 吴群. 2013. 论不同构造煤类型煤层气开发[J]. *地质论评*, 59(5): 919-923.
- 李勇, 黄明勇, 宋继伟, 班金彭. 2017. 贵州织金煤层气非储层水平井开发技术研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 44(10): 31-36.
- 卢双舫, 申家年, 王振平, 李椿. 2003. 海拉尔盆地煤层气资源评价及潜力分析[J]. *煤田地质与勘探*, 31(6): 28-31.
- 秦勇, 熊孟辉, 易同生, 杨兆彪, 吴财芳. 2008. 论多层叠置独立含煤层气系统——以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例[J]. *地质论评*, 54(1): 65-70.
- 单衍胜, 毕彩芹, 张家强, 李锋, 王福国, 李惠. 2018. 黔西六盘水杨梅树发现工业级煤层气[J]. *中国地质*, 45(6): 1302-1303.
- 邵龙义, 文怀军, 李永红, 周俊, 蔡玉良, 贾志耀, 鲁静. 2011. 青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J]. *地质通报*, 30(12): 1896-1903.
- 孙斌, 孙粉锦, 田文广, 孙钦平, 陈刚, 陈浩, 冯圣. 2011. 鄂尔多斯盆地乌审旗地区煤层气富集主控因素及其勘探方向[J]. *天然气工业*, 31(2): 34-38.
- 汤友谊, 田高岭, 孙四清, 张国成. 2004. 对煤体结构形态及成因分类的改进和完善[J]. *焦作工学院学报(自然科学版)*, 23(3): 161-164.
- 唐显贵. 2012. 贵州省煤炭资源赋存规律[J]. *煤田地质与勘探*, 40(5): 1-5.
- 田亚, 杜治利, 张文龙, 陈夷. 2019. 木里盆地侏罗系煤层气主控因素及成藏模式[J]. *中国地质调查*, 6(4): 88-94.
- 王恩营, 刘明举, 魏建平. 2009. 构造煤成因-结构-构造分类新方案[J]. *煤炭学报*, 34(5): 656-660.
- 王胜建, 高为, 郭天旭, 包书景, 金军, 徐秋枫. 2020. 黔北金沙地区二叠系龙潭组取得页岩气、煤层气和致密砂岩气协同发现[J]. *中国地质*, 47(1): 249-250.
- 吴财芳, 刘小磊, 张莎莎. 2018. 滇东黔西多煤层地区煤层气“层次递阶”地质选区指标体系构建[J]. *煤炭学报*, 43(6): 1647-1653.
- 吴圣, 徐韵, 沈家宁, 金留青, 陈基瑜, 李臣臣, 胡小林. 2018. 黔北煤田长岗向斜煤层气富集的构造控制作用[J]. *煤田地质与勘探*, 46(2): 22-27.
- 谢国毅, 刘虎, 毛志新. 2018. 贵州岩溶地区煤层气钻井关键技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 45(5): 53-54.
- 熊德华, 唐书恒, 朱宝存. 2011. 晋陕蒙地区煤层气勘查潜力综合评价[J]. *天然气工业*, 31(1): 32-36.
- 杨澍, 初禹, 杨湘奎, 姜本君. 2005. 层次分析法(AHP)在三江平原地质环境质量评价中的应用[J]. *地质通报*, 24(5): 485-490.
- 叶建平, 吴建光, 房超, 吴见, 熊德华. 2011. 沁南潘河煤层气田区域地质特征与煤储层特征及其对产能的影响[J]. *天然气工业*, 31(5): 16-20.
- 易同生, 唐显贵, 杨通保. 2019. 贵州省煤炭资源潜力与保障能力[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 郑师谊, 张绪教, 杨艳, 李宗敏, 张晋喆, 陈洁. 2012. 层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J]. *地质通报*, 31(2/3): 356-365.