

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.04.005

黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤质地球化学 特征及聚煤规律

张文斌¹,何碧¹,陶刚²,赵飞¹,王宁祖¹,杨珍³,张志奎¹,孙平原¹

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院,甘肃 兰州 730020;2. 西南科技大学环境与资源学院,
四川 绵阳 621010;3. 重庆工程职业技术学院,重庆 402260)

摘要:根据黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤样的主量元素、微量元素、工业分析、硫分及灰分分析数据,评价了该地区晚二叠世煤的总体煤质特征;在此基础上重点探讨了煤中硫分和灰分与成煤环境的联系。结果表明,黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤中 SiO_2 、 TiO_2 、 K_2O 含量较高,其中 SiO_2 是全国煤的 6 倍, TiO_2 是全国煤的 7 倍, K_2O 是全国煤的 10 倍;其余氧化物含量均是全国煤的 1~4 倍。新仁地区上二叠统龙潭组中煤的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线除样品 PM403-MY3、MY8 以外,其他各煤样稀土元素分布模式相似,整体上呈左高右低的宽缓的“V”型曲线, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 5.27~18.34,均值为 8.91,表明轻重稀土元素分馏程度高的特征; δEu 为 0.38~1.52,均值为 0.74,具有显著的负 Eu 异常。新仁地区煤炭资源具有高全水分、中-高灰分、低-中高挥发分、特低和低硫分、低固定碳、低磷分、特低氯等特征。此外,煤中灰分产率、煤灰成分指数以及灰成分三端元分析均揭示聚煤环境为从陆源区水浅、水动力较强而还原性较弱的环境,向远离陆源区水深、水动力较弱而还原性较强的环境变化,与全硫分分析的结论相一致。综合分析认为,新仁地区晚二叠世聚煤规律的主控地质因素为构造运动,与峨眉山玄武岩、古气候、沉积环境等因素有关。

关键词:上二叠统;龙潭组;地球化学;聚煤规律;新仁地区

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)04-0051-15

Geochemical Characteristics and Accumulation Rules of Coal in the Upper Permian Longtan Formation of Xinren Area, North Guizhou

ZHANG Wenbin¹, HE Bi¹, TAO Gang², ZHAO Fei¹, WANG Ningzu¹, YANG Zhen³,
ZHANG Zhixi¹, SUN Pingyuan¹

(1. The Second Institute of Geology and Minerals Exploration Team, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010, Sichuan, China; 3. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing, 402260, China)

Abstract: This paper evaluates the coal quality in Late Permian on the basis of the Upper Permian

收稿日期:2019-12-05;修回日期:2020-08-13

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“乌蒙山区地质矿产综合调查”(DD20160019),中国地质调查局成都地质调查中心项目“贵州乌蒙山区 1:5 万店子场(G48E006018)、大关(G48E007017)、六厂(G48E007018)3 幅区域地质调查”(DD20160019-04)

作者简介:张文斌(1983-),男,工程师,主要从事区域地质矿产勘查工作。E-mail:zhangwenbin2019@sina.com

coal samples' main elements, trace elements, industrial analysis, sulfur and ash analysis data in Xinren area of North Guizhou. The focus is on the relationship between sulfur and ash in coal and coal-forming environment. The results show that the content of SiO_2 , TiO_2 and K_2O is much higher, among which SiO_2 is 6 times higher than that of national average; TiO_2 is 7 times higher and K_2O is 10 times; the remaining oxide is 1 to 4 times of the average. In the normalized REE partition curve of coal chondrite of the upper Permian Longtan Formation of Xinren area, except the samples of PM403-MY3 and MY8, the REE distribution pattern in coal chondrite is similar, appearing a wide "V" curve with left high and right low. $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ is 5.27—18.34, with the average of 8.91 indicating the high fractionation of light and heavy rare earth elements. δEu is 0.38—1.52, the average being 0.74, with a significantly negative Eu anomaly. The coal resources in Xinren area are characterized by high total moisture, medium-high ash, low-medium-high volatility, ultra-low and low sulfur, low fixed-carbon, low phosphorus and ultra-low chlorine. In addition, ash yield in coal, composition index of coal ash and three-terminal analysis of ash composition all revealed that the coal-rich environment is from shallow water with strong hydrodynamics and weaker reduction in the land source area to deep water with weak hydrodynamics and strong reductive away from the land source area. This is consistent with the conclusion from the total sulfur analysis. The comprehensive analysis shows that the main geological factor of coal accumulation in Late Permian Xinren area is the tectonic movement, with Emeishan basalt, paleoclimate and sedimentary environment being some other factors.

Keywords: Upper Permian; Longtan formation; geochemistry; coal accumulation rules; Xinren area

晚二叠世是中国南方地史上一个重要的聚煤期(邵龙义等,2013;邵龙义等,2015),该时期的煤炭资源广泛分布于黔、滇、川、桂四省结合部的乌蒙山区(曾荣树等,1998)。黔北新仁地区晚二叠世聚煤盆地位于扬子准地台的西南缘,成煤期属于华南晚二叠世陆表海坳陷盆地的一部分(解小龙,1992;庄新国,2001;程伟等,2013;王胜建等,2020);其上二叠统龙潭组聚煤规律是当前地学界研究的热点之一,该地区是中国研究含煤地层的有利地区之一,也是研究中国南方古地理的最佳场所。煤炭的选别、加工及转化工艺的重要依据为煤质特征,其不同的灰分、挥发分及硫分决定了煤炭资源的利用,也是评价煤炭资源的主要内容(易同生等,2008);随着成煤过程的古气候、古生物、古地理和构造运动等条件的改变,煤质特征参数也会发生相应的改变,因此,煤质特征参数中包含成煤环境信息(张玉成等,1993;程伟等,2013)。目前,国内外众多学者研究了各个产地、各个时代的煤层的成煤环境与煤中硫分特征、挥发分特征、灰分特征、煤岩特征参数等的联系(HUNT, et al., 1985; BANERJEE, et al., 1990; 唐跃刚等, 1996; SPEARS et al., 1999; 汤达祯等,

2000; 郝吉生, 2000; TURNER, et al., 2004; 任德贻等, 2006; YI et al., 2007; 吴艳艳等, 2010; 程伟等, 2013; 邵龙义等, 2015; 姬清海等, 2015),以及煤的成煤环境与煤中主量元素(代世峰等, 2005; 屈晓荣, 2019; 李进孝等, 2020)、微量元素(庄新国等, 2001; 赵继尧等, 2002; 傅从等, 2012; 刘帮军等, 2014; 李盛富等, 2016; 陶振鹏等, 2017; 屈晓荣, 2019)、稀土元素(STEVEN et al., 2003; 吴艳艳等, 2010; 郭江峰等, 2016)特征参数的耦合关系(任德贻等, 2006; 李宝庆, 2015; 邵龙义等, 2015),特别是煤层中伴生三稀资源矿产的调查(刘东娜, 2018)。

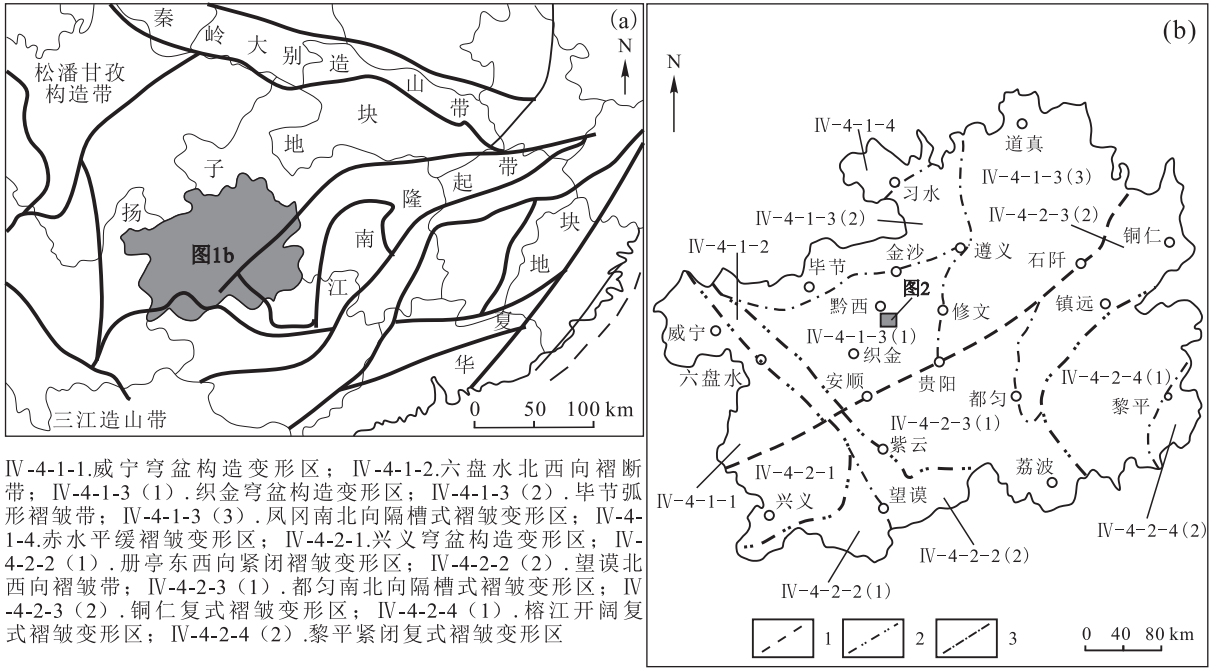
前人对黔北新仁地区晚二叠世含煤岩系地层的研究多局限于围绕煤矿的地质调查,对煤质灰分、挥发分、全硫、碳、发热量、磷分、氯、砷、汞、铅分析等特征研究较薄弱;同时,对该地区晚二叠世的聚煤规律研究程度较低。笔者在前人研究成果的基础上,重点调查了研究区含煤岩系的煤质地球化学特征及聚煤作用的主控因素。笔者仅选取了黔北新仁地区(PM403)龙潭组的煤层作为研究对象,采集了煤层9件地球化学样品,对其主量元素、微量元素、稀土元素、灰分、挥发分、全硫、碳、发热量、磷分、氯、砷、

汞等测试分析以及沉积岩石学等方面研究,旨在查明研究区含煤岩系龙潭组的分布规律、地球化学特征以及聚煤规律,深入探讨了黔北新仁地区及邻区二叠系含煤岩系的成岩构造背景,以期了解区内聚煤作用与沉积环境的耦合关系。

1 区域地质背景

研究区位于扬子板块西南缘(图 1a)(曾广乾等,2014),属扬子板块、上扬子板块、织金穹盆构造变形区(Ⅳ-4-1-3(1))(图 1b)(戴传固等,2013)。研究区广泛出露的岩石地层以三叠系为主,寒武系、

石炭系、二叠系次之(图 2)(王宁祖等,2019;孙平原等,2019);其中二叠统一上二叠统岩石地层单位从老到新依次为:梁山组(P_2l)、栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m)、峨眉山玄武岩组($P_{2-3}e$)、龙潭组(P_3l)、合山组(P_3h);龙潭组与下伏地层峨眉山玄武岩组呈不整合接触,与茅口组呈平行不整合接触,龙潭组与上覆合山组呈整合接触。梁山组岩性组合以碎屑岩为主;栖霞组和茅口组岩性组合以碳酸盐岩为主、蜓类化石较为发育;峨眉山玄武岩组以玄武岩为主,顶部见少量凝灰岩;龙潭组岩性组合以碎屑岩夹煤层为主;合山组岩性组合以碳酸盐岩为主,顶部见少量硅质岩、火山成因黏土岩。



1. 三级构造单元界线;2. 四级构造单元界线;3. 五级构造单元界线

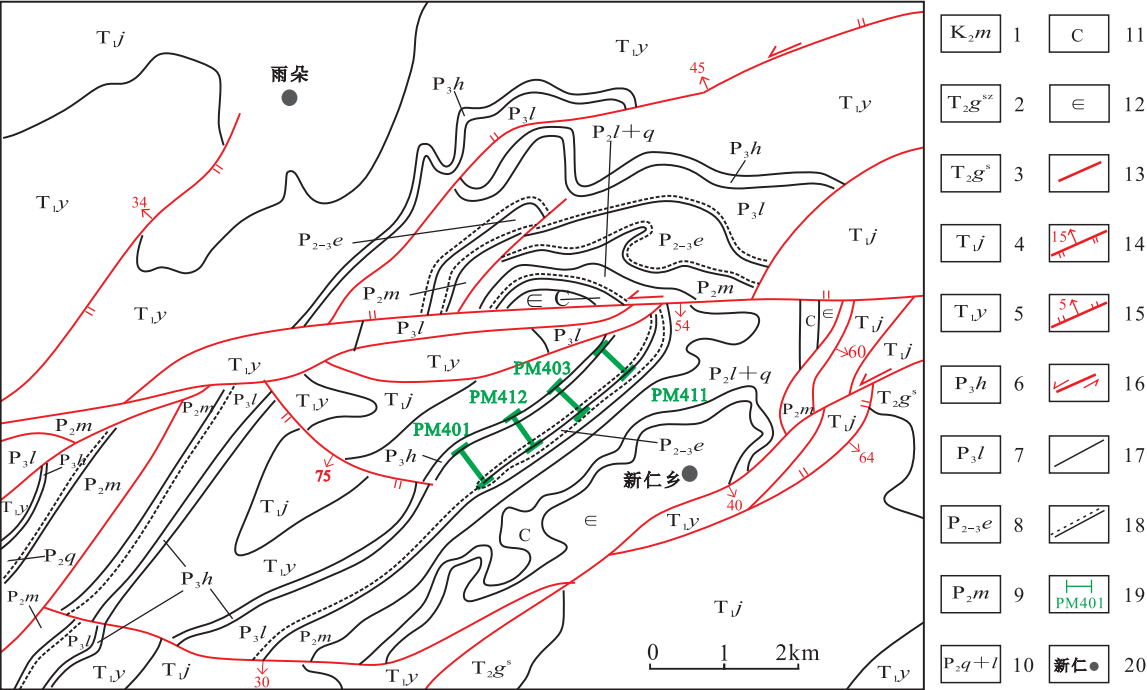
图 1 (a)研究区区域分布位置图和(b)区域地质简图(底图据戴传固等,2013;曾广乾等,2014)

Fig. 1 (a)Regional location and (b)geological map of the study area (After DAI, et al., 2013; ZENG, et al., 2014)

2 龙潭组沉积特征

研究区龙潭组为一套陆源碎屑岩,依据区内出露的岩石组合垂向变化特征,将该组划分为 2 段(图 3)。龙潭组一段:上部为灰色、灰绿色、紫灰色极薄层-厚层砂岩、粉砂岩、泥岩、粉砂质泥岩夹煤线、透镜体状硅质岩;中部为土黄色、灰色、褐灰色极薄层-

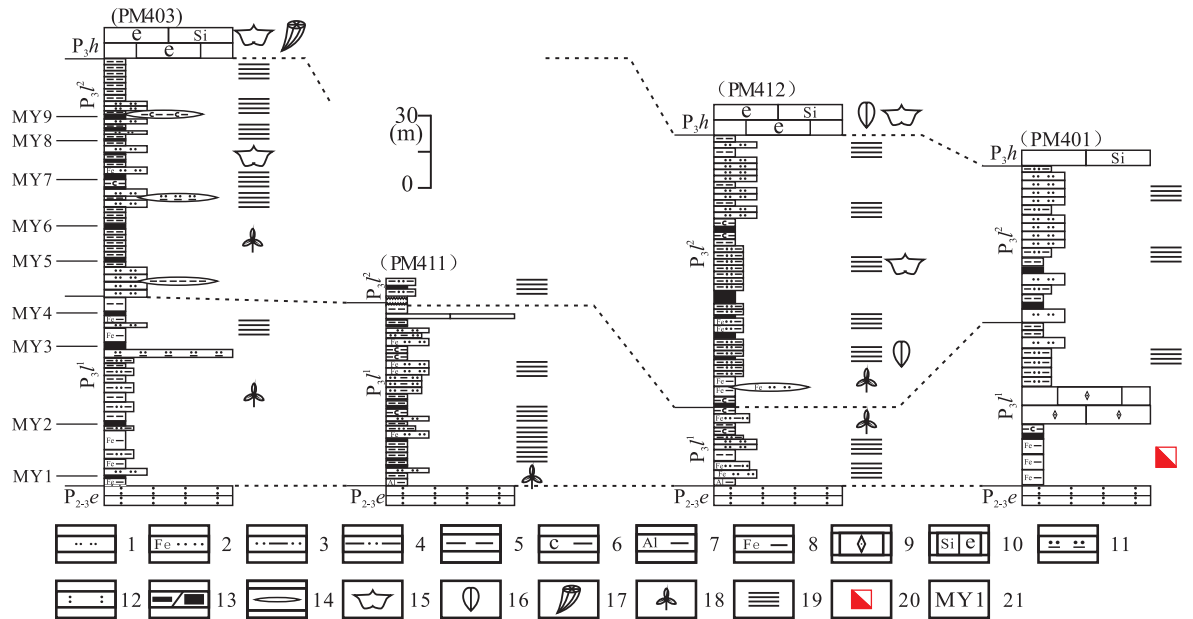
厚层粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、碳质泥岩、煤线夹极少量灰岩;下部为黄褐色薄层富含黄铁矿泥岩、灰白色薄层铝土质泥岩夹煤层、煤线、硅质岩,发育褐铁矿化;泥岩中发育水平层理、砂岩见平行层理、交错层理、脉状层理,见大量植物化石碎片,其厚度为 28.4~389.3 m,整体上为东厚西薄特征。二段:灰色粉砂岩、砂岩、泥岩、碳质泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹煤层、煤线、硅质岩,少量灰岩;泥岩、粉砂



1. 上白垩统茅台组;2. 中三叠统关岭组狮子山段;3. 中三叠统关岭组松子坎段;4. 下三叠统嘉陵江组;5. 下三叠统夜郎组;6. 上二叠统合山组;7. 上二叠统龙潭组;8. 中二叠统一上二叠统峨眉山玄武岩;9. 中二叠统茅口组;10. 中二叠统栖霞组与梁山组;11. 石炭系;12. 寒武系;13. 性质不明断层;14. 逆断层及倾向;15. 正断层及倾向;16. 走滑断层;17. 地质界线;18. 平行不整合;19. 剖面位置;20. 地名

图 2 黔北新仁地区地质简图及剖面位置图(底图据孙平原等,2019)

Fig. 2 Geological map and profile location map of Xinren area, north Guizhou (After SUN et al. ,2019)



1. 粉砂岩;2. 铁质粉砂岩;3. 泥质粉砂岩;4. 粉砂质泥岩;5. 泥岩;6. 碳质泥岩;7. 铝质泥岩;8. 铁质泥岩;9. 微晶灰岩;10. 硅质团块生物碎屑灰岩;11. 硅质岩;12. 凝灰岩;13. 煤线/煤层;14. 透镜体;15. 腕足类;16. 双壳类;17. 珊瑚;18. 植物化石碎片;19. 水平层理;20. 褐铁矿化;21. 煤样采样位置

图 3 研究区龙潭组地层柱状对比图及煤样采样位置图

Fig. 3 Stratigraphic correlaion of Longtan formaion and coal sample position

岩中发育水平层理,砂岩中见平行层理、交错层理、脉状层理;见大量植物化石碎片、腕足类、双壳类等化石;其厚度为 46.1~180.2 m,呈东厚西薄、北厚南薄特征。龙潭组主要为以障壁海岸相、沼泽相交替出现为特征的海陆交互相沉积。

3 样品采集及测试方法

在贵州新仁地区共采集了 9 件上二叠统龙潭组煤质的新鲜样品,每个样品平均重 4~6 kg,采样平面位置见图 2,采样垂直位置见图 3。样品野外采集排除和避免任何相邻层位和外来物质的污染,样品按 GB474-2008 破碎研磨至 200 目以上,在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室对样品的主量元素、微量元素及稀土元素进行测试。主量元素采用 PW1404 型 X 射线荧光光谱仪分析,其分析误差<3%,侧窗铬金靶 X 光管,X 光管高压为 100 kV,最大电流为 75 mA,最高功率为 3.0 kW。稀土元素和微量元素采用电感耦合等离子

体质谱法分析,其分析精度为 1%~3%。ICP-MS 测试溶液的制备采用酸溶法,具体流程依次为:①准确称取约 100 mg 样品置于密闭溶样器中,加入 1 mL 浓 HF 和 0.3 mL 1:1 的 HNO₃。②用超声波振荡后置于 150℃ 电热板上将样品蒸干。③再次加入相同量的 HF 和 HNO₃,密闭加热一周(约 100℃),蒸干后用 2 mL 1:1 的 HNO₃ 溶解,加入 Rb 内标,稀释至 2000 倍。④最后由 PE Elan 6000 型 ICP-MS 分析。分析数据结果分别见表 1、表 2、表 3。在山东泰山矿产资源检测研究院对煤样品进行了水分、灰分、挥发分、全硫、碳、发热量、磷分、氯、砷、汞等分析,结果见表 4。其中,煤样的发热量依据 GB/T213-2007、GB/T214-2007 测定,水分、灰分和挥发分均依据 GB/T212-2008 测定,碳和氢分别依据 GB/T476-2008、GB/T1574-2007 测定,全硫分采用库伦测硫仪测定,磷依据 GB/T216-2003 测定,氯依据 GB/T3558-2014 测定,砷依据 GB/T3058-2008 测定,汞依据 GB/T16659-2008 测定。

表 1 新仁地区龙潭组煤样主量元素分析一览表(%)
Tab. 1 Coal sample main element analysis list in Longtan formation, Xinren area(%)

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	灰成分指数	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
PM403-MY1	47.01	34.57	1.8	7.4	0.6	0.74	6.79	0.4	0.02	0.21	0	0.11	1.36
PM403-MY2	42.1	19.66	1.74	15.92	11.87	2.03	2.18	0.2	0.04	0.31	4.2	0.48	2.14
PM403-MY3	58.1	22.04	2.77	11.49	1.57	0.64	2.44	0.27	0.034	0.24	0.3	0.17	2.64
PM403-MY4	40.76	31.36	2.5	18.88	0.33	0.6	1.99	0.28	0.02	0.41	0.05	0.27	1.30
PM403-MY5	53.62	20.1	2.35	20.15	0.61	0.42	1.45	0.18	0.014	0.25	0.3	0.29	2.67
PM403-MY6	43.21	20.31	2.89	29.87	0.14	0.26	0.77	0.42	0.008	0.26	0.05	0.48	2.13
PM403-MY7	52.48	29.17	3.33	10.99	0.2	0.52	1.23	0.49	0.014	0.21	0.18	0.14	1.80
PM403-MY8	64.8	18.79	1.8	10.78	0.08	0.28	0.49	0.27	0.01	0.25	0.15	0.13	3.45
PM403-MY9	69.97	16.31	1.77	7.88	0.15	0.21	0.33	0.23	0.016	0.19	0.3	0.10	4.29
平均值	52.45	23.59	2.33	14.82	1.73	0.63	1.96	0.30	0.02	0.26	0.61	0.23	2.22
中国煤	8.47	5.98	0.33	4.85	1.23	0.22	0.19	0.16	0.015	0.092	—	—	1.42

注:灰成分指数=(Fe₂O₃+CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃);样品测试由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成,2018。采用 PW1404 型 X 射线荧光光谱仪分析,其分析误差<3%,侧窗铬金靶 X 光管,X 光管高压为 100 kV,最高功率为 3.0 kW,最大电流为 75 mA。

4 煤层地球化学特征

4.1 主量元素

黔北新仁地区上二叠统龙潭组样品煤中 SiO₂

含量为 40.76%~69.97%,均值为 52.45%;Al₂O₃ 含量为 16.31%~34.57%,均值为 23.59%;K₂O 含量为 0.33%~6.79%,均值为 1.96%;MgO 含量为 0.21%~2.03%,均值为 0.63%;Fe₂O₃ 含量为 7.4%~29.87%,均值为 14.82%;CaO 含量为

表 2 新仁地区龙潭组煤层稀土元素分析结果及参数特征一览表(10⁻⁶)

Tab. 2 List of rare earth element analysis results and parameter characteristics of Longtan formation coal seam in Xinren area(10⁻⁶)

样品 编号	PM403 - MY1	PM403 - MY2	PM403 - MY3	PM403 - MY4	PM403 - MY5	PM403 - MY6	PM403 - MY7	PM403 - MY8	PM403 - MY9	平均 值	中国 煤	世界 煤	本区/中 国煤	本区/世 界煤
La	169.72	23.76	29.21	50.43	30.19	35.04	36.16	39.02	47.97	51.28	25.1	11	2	4.7
Ce	162.96	48.48	56.84	98.44	57.81	62.17	75.25	67.96	75.93	78.43	49.11	23	1.6	3.4
Pr	25.49	6.04	7.67	13.5	7.46	9.46	11.85	9.15	10.76	11.26	5.47	3.4	2.1	3.3
Nd	122.16	24.32	32.2	62.51	31.25	44.48	50.16	37.69	45.73	50.06	21.5	12	2.3	4.2
Sm	23.44	4.39	6.25	12.66	5.88	11.08	13.03	7.06	8.06	10.21	4.3	2.2	2.4	4.6
Eu	2.56	1.17	1.11	2.14	1.03	2.34	2.52	3.42	2.26	2.06	0.87	0.43	2.4	4.8
Gd	16.11	4.04	5.65	10.14	5.07	9.85	9.97	6.52	7.13	8.28	3.7	2.7	2.2	3.1
Tb	1.91	0.74	82	1.56	0.92	1.52	1.75	0.32	0.85	10.17	0.67	0.31	15.2	32.8
Dy	15.48	3.69	5.32	7.83	4.48	8.47	8.17	6.06	6.55	7.34	3.13	2.1	2.3	3.5
Ho	2.73	0.73	1.01	1.46	0.85	1.6	1.47	1.19	1.23	1.36	0.65	0.57	2.1	2.4
Er	7.76	2	2.9	4.2	2.39	4.38	4.33	3.46	3.4	3.87	1.86	1	2.1	3.9
Tm	1.03	0.36	0.48	0.62	0.38	0.7	0.61	0.54	0.51	0.58	0.27	0.3	2.2	1.9
Yb	6.24	2.05	2.91	4.02	2.29	4.48	3.9	3.36	3.05	3.59	2.12	1	1.7	3.6
Lu	0.88	0.32	0.49	0.6	0.34	0.69	0.61	0.49	0.45	0.54	0.3	0.2	1.8	2.7
Y	79.6	20.54	29.38	36.87	25.16	40.92	38.59	33.55	37.59	38.02	—	—	—	—
ΣREE	558.47	122.09	234.04	270.11	150.34	196.26	219.78	186.24	213.88	239.02	119.05	60.21	2.01	3.97
LREE	506.33	108.16	133.28	239.67	133.62	164.57	188.96	164.3	190.71	203.29	106.35	52.03	1.9	3.9
HREE	52.14	13.93	100.76	30.43	16.72	31.69	30.79	21.94	23.17	35.73	12.7	8.18	2.8	4.4
LREE/HREE	9.71	7.76	1.32	7.88	7.99	5.19	6.14	7.49	8.23	6.86	8.37	6.36	0.8	1.1
δEu	0.38	0.84	0.56	0.56	0.56	0.67	0.65	1.52	0.89	0.74	0.65	0.54	1.1	1.4
δCe	0.53	0.95	0.9	0.89	0.9	0.81	0.87	0.84	0.77	0.83	0.97	0.9	0.9	0.9
(La/Yb) _N	18.34	7.81	6.77	8.46	8.89	5.27	6.25	7.83	10.60	8.91	7.98	7.41	1.11	1.20
(La/Sm) _N	4.55	3.41	2.94	2.51	3.23	1.99	1.75	3.48	3.74	3.07	3.67	3.15	0.8	1
(Gd/Yb) _N	2.08	1.59	1.57	2.04	1.79	1.77	2.06	1.57	1.89	1.82	1.41	2.18	1.3	0.8

注:样品测试由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成,2018。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析,其分析精度为1%~3%。

表 3 新仁地区龙潭组煤层微量元素分析一览表(10⁻⁶)
Tab. 3 List of trace elements in Longtan formation coal seam in Xinren area(10⁻⁶)

样品 编号	PM403 - MY1	PM403 - MY2	PM403 - MY3	PM403 - MY4	PM403 - MY5	PM403 - MY6	PM403 - MY7	PM403 - MY8	PM403 - MY9	平均 值	中国 煤	世界 煤	本区/中 国煤	本区/世 界煤
As	2	10	3	4	5	5	5	7	10	5.67	3.79	7.6	1.5	0.7
Hg	0.227	0.295	0.352	0.274	0.32	0.964	0.249	0.269	0.346	0.37	0.15		2.4	
Sc	5	7	10	12	8	27	21	13	11	12.67	4.72	3.9	2.7	3.2
V	46	88	108	96	105	141	143	107	73	100.78	34.97	25	2.9	4
Cu	29	43	77	120	66	473	340	117	158	158.11	18.4	16	8.6	9.9
Zn	21	61	57	53	35	32	29	27	24	37.67	42.11	23	0.9	1.6
Ga	75	8	14	14	10	13	13	20	19	20.67	6.64	5.8	3.1	3.6
Re	0.023	0.005	0.003	0.005	0.003	0.008	0.006	0.005	0.005	0.01				
Pb	34	18	22	23	10	14	19	17	40	21.89	15.41	7.8	1.4	2.8
Th	57	5	7	10	5	8	7	12	16	14.11	5.84	3.3	2.4	4.3
U	15	7	2	2	2	3	5	4	4	4.89	2.41	2.4	2	2
Ge	2	1	2	1	1	1	1	2	3	1.56	2.78	2	0.6	0.8
Ni	12.46	47.38	29.33	27	25.07	10.14	24.47	10.19	15.41	22.38	13.72	13	1.6	1.7
Co	2.39	31.25	20.65	18.26	11.77	6.08	18.94	2.51	4.67	12.95	7.08	5.1	1.8	2.5
Cr	17.7	28.2	11.66	41.92	16.66	36.91	61.06	36.04	40.36	32.28	15.35	16	2.1	2
Mn	188.9	199.59	190.17	213.1	201.33	164.76	168.44	180.43	216.04	191.42	77		2.5	
W	1.38	0.96	0.86	1.04	0.99	1.04	0.82	1.03	1.12	1.03	1.04	1.1	1	0.9
Sn	10.92	0.49	0.54	1.72	0.54	1.59	0.75	4.01	4.8	2.82	2.11	0.79	1.3	3.6
Mo	14.9	7.86	1.22	0.18	2.93	8.81	4.6	0.26	0.98	4.64	3.19	2.2	1.5	2.1
Li	1.07	1.02	4.9	1.5	5.25	7.04	30.81	96.56	103.39	27.95	31.8	12	0.9	2.3
B	12.27	6.51	8.29	13.82	13.5	28.88	8.27	14.23	12.4	13.13	63		0.2	
Be	3.18	1.88	4.49	6.12	1.81	2.03	2.03	1.2	0.91	2.63	2.13	1.61	1.2	1.6
Se	0.135	0.12	0.095	0.084	0.088	0.154	0.094	0.107	0.103	0.11	2.47	1	0	0.1
Tl	0.79	0.12	0.14	0.03	0.05	0.01	0.02	0.01	0.01	0.13	0.47	0.6	0.3	0.2
Rb	81.1	4.16	7.43	5.18	3.25	3.57	1.6	1.83	2.07	12.24	9.24	14	1.3	0.9
Sr	43.04	856.25	82.89	40.8	48.6	35.33	66.83	68.66	106.25	149.85	140.2	110	1.1	1.4
Ba	468.71	462.07	505.47	406.3	410.67	265.78	338.5	180.52	171.29	356.59	159	150	2.2	2.4
Cs	6.95	3.38	3.51	3.5	3.48	3.45	3.86	4.2	3.94	4.03	1.13	1	3.6	4
Nb	154.9	12.91	7.35	18.85	13.96	25.27	2.88	22.58	24.17	31.43	9.47	3.7	3.3	8.5
Ta	5.12	0.74	0.43	1.55	1.15	1.99	0.14	2.02	1.91	1.67	0.66	0.28	2.5	6
Zr	2074.3	224.95	275.02	336.92	234.79	364.68	277.73	463.57	623.63	541.73	89.3	36	6.1	15
Hf	74.02	5.56	5.38	8.16	5.18	9.67	2.9	14.04	18.07	15.89	3.82	1.2	4.2	13.2
Sr/Ba	0.09	1.85	0.16	0.10	0.12	0.13	0.20	0.38	0.62	0.42	0.88	0.73	0.50	0.58
Th/U	3.80	0.71	3.50	5.00	2.50	2.67	1.40	3.00	4.00	2.89	2.42	1.38	1.20	2.15

注:样品测试由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成,2018。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析,其分析精度为1%~3%。

表 4 新仁地区龙潭组煤质分析结果及参数特征一览表

Tab. 4 List of coal quality analysis results and parameter characteristics of Longtan formation in Xinren Area

样品 编号	发热量			M _{a,d}	A _d	V _d	C _d	H _d	S _{t,d}	P _d	Cl _d	As _d	Hg _d
	Q _{b,d}	Q _{gr,d}	Q _{net,d}	(水分)	(灰分)	(挥发分)	(碳)	(氢)	(硫分)	(磷)	(氯)	(砷)	(汞)
计量单位	(MJ/kg)			(%)									(10 ⁻⁴) (10 ⁻⁶)
PM403-MY1	8.69	8.66	8.39	7.48	60.82	18.53	26.24	1.34	0.17	0.025	0.026	2	0.227
PM403-MY2	18.72	18.66	18.28	14.21	24.86	30.46	54.37	1.84	0.37	0.021	0.023	10	0.295
PM403-MY3	15.08	15.04	14.69	11.03	36.60	25.91	44.86	1.69	0.27	0.019	0.025	3	0.352
PM403-MY4	16.94	16.90	16.52	13.78	27.97	30.54	50.01	1.87	0.26	0.028	0.042	4	0.274
PM403-MY5	17.12	17.08	16.70	11.88	29.40	28.13	50.09	1.82	0.31	0.014	0.015	5	0.320
PM403-MY6	13.82	13.78	13.45	12.66	39.18	27.98	41.65	1.61	0.27	0.018	0.021	5	0.964
PM403-MY7	15.12	15.08	14.73	13.66	35.37	26.64	45.14	1.69	0.28	0.016	0.017	5	0.249
PM403-MY8	10.05	10.03	9.78	10.40	56.16	21.03	30.67	1.18	0.16	0.025	0.037	7	0.269
PM403-MY9	10.51	10.48	10.24	10.22	55.09	20.29	32.01	1.18	0.18	0.016	0.011	10	0.346
平均值	14.01	13.97	13.64	11.70	40.61	25.50	41.67	1.58	0.25	0.02	0.024	5.67	0.366

注:样品测试由山东泰山矿产资源检测研究院完成。

0.08%~11.87%，均值为 1.73%；Na₂O 含量为 0.18%~0.49%，均值为 0.3%；MnO 含量为 0.008%~0.04%，均值为 0.02%；P₂O₅ 含量为 0.19%~0.41%，均值为 0.26%；TiO₂ 含量为 1.74%~3.33%，均值为 2.33%。新仁地区上二叠统龙潭组煤中主量元素平均含量由大到小依次为：SiO₂>Al₂O₃>Fe₂O₃>TiO₂>K₂O>CaO>MgO>SO₃>Na₂O>P₂O₅>MnO。SiO₂/Al₂O₃ 值为 1.30~4.29，平均为 2.22。新仁地区煤 SiO₂/Al₂O₃ 明显高于中国煤均值(1.42)(DAI S, F, et al, 2012)，也高于高岭石的理论值(1.18)(田和明, 2014)，表明煤中 Al 主要以黏土矿物为载体，存在富 Si 的矿物。与中国煤主量元素含量相比(任德贻, 2006)，黔北新仁地区煤中 SiO₂、TiO₂、K₂O 含量较高，其中 SiO₂ 是全国煤的 6 倍，TiO₂ 是全国煤的 7 倍，K₂O 是全国煤的 10 倍，其余氧化物含量均是全国煤的 1~4 倍。

4.2 稀土元素

黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤样稀土元素总量(ΣREE)为 122.09×10⁻⁶~558.47×10⁻⁶，平均为 239.02×10⁻⁶，为全国平均值(119.05×10⁻⁶)(DAI S F, et al, 2010)的 2.01 倍，世界平均值(60.21×10⁻⁶)(DAI S F et al, 2010)的 3.97 倍；尤其是 Tb 是中国煤的 15.2 倍，是世界煤的 32.8 倍。

ΣLREE/ΣHREE 值为 1.32~9.71，平均为 6.86。新仁地区煤样的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线除样品 PM403-MY3、MY8 以外，其他各煤样稀土元素分布模式相似，整体上呈左高右低的宽缓的“V”型曲线，轻稀土配分曲线段“右倾”、重稀土曲线段较为“平坦”(图 4)；(La/Yb)_N 为 5.27~18.34，均值为 8.91，表明轻重稀土元素分馏程度高的特征；(La/Sm)_N 为 1.75~4.55，均值为 3.07，表明轻稀土元素相对富集；(Gd/Yb)_N 为 1.57~2.08，均值为 1.82，表明轻稀土元素相对富集。δEu 为 0.38~

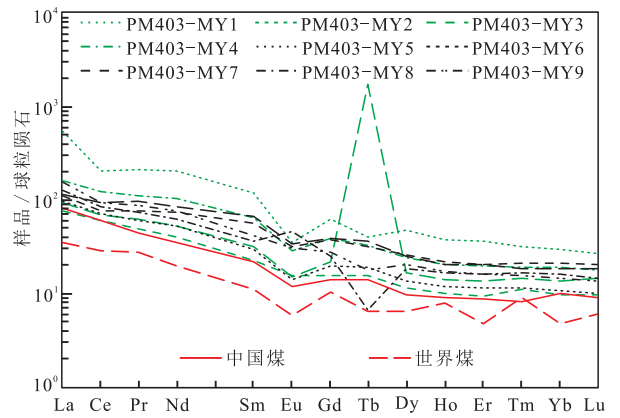


图 4 新仁地区龙潭组煤样的稀土元素分布模式图

Fig. 4 Distribution pattern of rare earth elements in Longtan formation coal samples in Xinren area

1.52,均值为 0.74,除 PM403 - MY8 样品大于 1 之外,其余均小于 1,具有显著的负 Eu 异常,且稀土元素富集,显示新仁地区煤中的稀土元素主要来源于陆源碎屑(郭江峰,2016)。 δCe 为 0.53~0.95,均值为 0.83,具有弱负 Ce 异常。

4.3 微量元素

黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤的部分微量元素的垂向变化趋势见图 5,与垂向上沉积环境变化特征有关。整体上,微量元素含量与中国煤(DAI S F et al, 2005)相比:Cu(8.6 倍)、Zr(6.1 倍)、Hf(4.2 倍)含量高,Cs、Nb、Ga、V、Sc、Mn、Ta、Hg、Th、Ba、Cr、U 含量较高(比值为 2~4),较为富集,Co、Ni、As、Mo、Pb、Sn、Rb、Be、Sr 含量相对接近(比值为 1~2),W、Zn、Li、Ge、Tl、B、Se 低于中国煤

(比值<1);与世界煤相比:Zr(15 倍)、Hf(13.2 倍)、Cu(9.9 倍)、Nb(8.5 倍)、Ta(6.0 倍)、Th(4.3 倍)、Cs(4.0 倍)、V(4.0 倍)含量高,Ga、Sc、Ba、Cr、U、Co、Mo、Pb、Sn、Li 含量较高(比值为 2~4),Ni、Be、Zn、Sr 含量相对接近(比值为 1~2),Rb、W、Ge、As、Tl、Se 含量低于世界煤(比值<1)。在样品 PM403 - MY7、MY8、MY9 中,Li 含量分别为 30.81×10^{-6} 、 96.56×10^{-6} 、 103.39×10^{-6} ,明显高于中国煤和世界煤。此外,PM403 - MY1 样品 Ga 含量为 75×10^{-6} (相当于 0.007 5%),已经达到了煤矿中伴生镓矿的工业品位(0.003%~0.005%),可能是下伏地层峨眉山玄武岩组中玄武岩提供了来源。因此,对煤中 Ga 的富集成因值得研究。

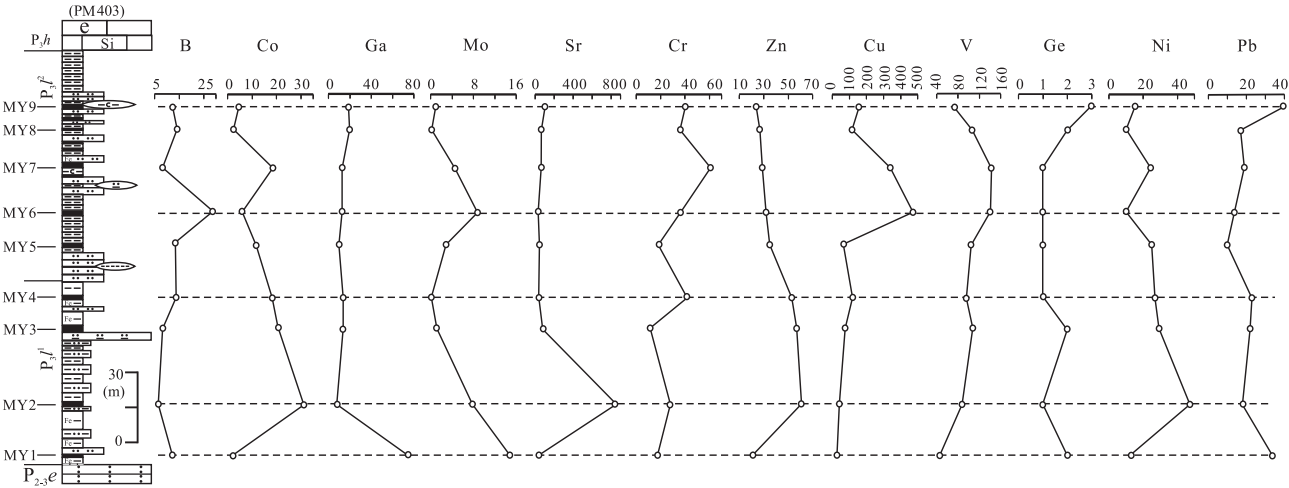


图 5 新仁地区煤层微量元素纵向变化曲线规律图

Fig. 5 Regularity curve of trace elements of coal seams in Xinren area

5 煤化学特征

为了查明新仁地区龙潭组煤层的煤质特征及煤中的有害元素特征,对区内煤层进行了水分、灰分、挥发分、全硫、碳、发热量、磷分、氯、砷、汞等分析,结果见表 4。

5.1 水分特征

研究区煤层水分(M_{ad})含量为 7.48%~14.21%,均值为 11.70%,属于高全水分煤;与煤中灰分呈负相关,与煤中挥发分、硫分呈正相关(图 6),与垂向上沉积环境变化有关。

5.2 灰分特征

研究区煤的灰分(A_d)含量为 24.86%~60.82%,均值为 40.61%,根据国际 GB/T15224.1-2010 判定其为中-高灰煤。研究区煤层灰分含量较高,表明在泥炭聚积过程中,陆源碎屑物质供应较为丰富,尤其是黏土矿物得以富集(郭江峰等,2016),导致煤中的 REE 含量较高;与煤中水分、挥发分、硫分呈负相关(图 6)。

5.3 挥发分特征

研究区煤样品挥发分(V_{daf})含量为 18.53%~30.54%,均值为 25.50%,根据国际 MT/T849-2000 判定其为低挥发分煤-中高挥发分煤,其中样

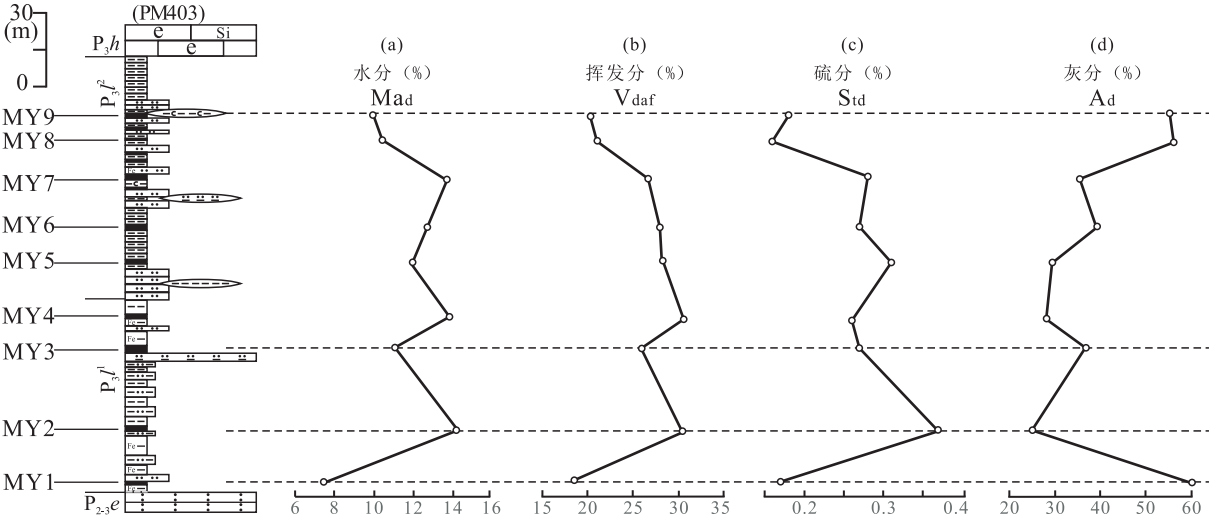


图 6 新仁地区上二叠统龙潭组煤的水分、灰分、挥发分和硫分垂向变化图

Fig. 6 Vertical variation of moisture, ash, volatile matter and sulfur in the Upper Permian Longtan formation coal in Xinren area

品 PM403 - MY1 为低挥发分煤, 样品 PM403 - MY2、MY4、MY5 为中高挥发分煤, 其余样品为中等挥发分煤。与煤中水分、硫分呈正相关, 与煤中灰分呈负相关(图 6)。

5.4 硫分特征

研究显示, 煤中硫分与沉积环境有一定的关系(赵维龙等, 2020); 据《煤炭硫分分级标准》(GB/T15224.2-94)将煤层划为 4 类: 特低硫煤和低硫煤 ($S_{t,d} < 1.00\%$)、低中硫煤 ($1.01\% \leq S_{t,d} < 1.50\%$)、中硫煤和中高硫煤 ($1.51\% \leq S_{t,d} < 3.00\%$)、高硫分煤 ($S_{t,d} \geq 3.00\%$)。研究区全硫 ($S_{t,d}$) 含量为 $0.16\% \sim 0.37\%$, 均值为 0.25% , 小于 1.00% , 属于特低硫煤和低硫煤。研究区煤中硫含量低的原因因为淡水沼泽呈酸性, 不利于硫还原菌的活动(刘大锰等, 1999), 导致泥碳中 H_2S 少, 黄铁矿含量低。与煤中水分、挥发分呈正相关, 与煤中灰分呈负相关(图 6)。

5.5 碳、氢特征

研究区煤样品固定碳 (C_d) 含量为 $26.24\% \sim 54.37\%$, 均值为 41.67% , 根据国际 MT/T561-2008 判定其为低固定碳煤; 氢 (H_d) 含量为 $1.18\% \sim 1.87\%$, 均值为 1.58% 。

5.6 发热量特征

研究区煤样品发热量 ($Q_{gr,d}$) 含量为 $8.66 \sim 18.66 \text{ MJ/kg}$, 均值为 13.97 MJ/kg , 根据国际 GB/

T15224.3-2004 判定其为特低热值煤-低热值煤。其中, 样品 PM403 - MY2、MY4、MY5 为低热值煤, 其余样品为特低热值煤。

5.7 磷分、氯、砷、汞特征

研究区磷分 (P_d) 含量为 $0.014\% \sim 0.028\%$, 均值为 0.02% , 根据国际 MT/T562-1996 判定其属于低磷分煤。氯 (Cl_d) 含量为 $0.011\% \sim 0.042\%$, 均值为 0.024% , 根据国际 MT/T597-1996 判定其属于特低氯煤, 远低于世界煤中氯的平均值 0.1% (刘大锰等, 1999)。因此, 研究区氯含量不会给人类健康和环境造成危害。砷 (As_d) 含量为 $2 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-4}$, 均值为 5.67×10^{-4} , 根据国际 MT/T803-1999 判定其属于一级含砷煤-三级含砷煤。其中 PM403 - MY1、MY3、MY4 为一级含砷煤, PM403 - MY2、MY9 为三级含砷煤, 其余样品为二级含砷煤。汞 (Hg_d) 含量为 $0.227 \times 10^{-6} \sim 0.964 \times 10^{-6}$, 均值为 0.366×10^{-6} , 根据国际 MT/T963-2005 判定其属于低汞煤-高汞煤。其中, PM403 - MY1、MY7 为低汞煤, PM403 - MY6 为高汞煤, 其余样品为中汞煤。

6 聚煤规律分析

影响海陆交互相聚煤盆地层序的主控因素为火山活动、沉积物供应、古气候条件、古植物条件、沼泽

类型、沼泽水体深度、地球化学条件及海平面变化的变化速率,其直接影响煤层的分布范围和平面展布及厚度(NEMEC W,1988;徐彬彬等,2003;姜科庆等,2010;邵龙义,2013)。研究区晚二叠世陆源碎屑供应方向为北西向至南东向,而海侵方向恰好相反,从南东向至北西向(徐彬彬等,2003)。

6.1 火山活动与聚煤关系

区域上中二叠世末—晚二叠世初为“峨眉地幔热柱”上隆的高潮期,在新仁地区一带发生大陆溢流玄武岩喷发(戴传固等,2013)。峨眉山玄武岩性质和物源供给是黔西地区煤中V、Cr、Co、Ni、Cu、Nb和Ta富集的主控因素;黔西地区煤中硫及亲硫化物元素的富集受控于峨眉山玄武岩性质、海水影响和还原条件的共同作用。黔西地区煤中异常富集的As、Hg、F和Mo受控于后期热液流体的控制(李宝庆,2015)。研究表明,聚煤盆地的陆源区母岩是煤炭堆积过程中无机物质的主要供给源,母岩性质决定了盆地充填物的化学性质和矿物成分(任德貽等,2006)。

晚二叠世玄武岩广泛分布于黔北地区,将新仁地区晚二叠世煤部分微量元素含量与研究区峨眉山玄武岩中元素含量(孙平原等,2019)进行对比发现,如峨眉山玄武岩中含量较高的元素,如Co、Ni、Ba、Ga、Cr、Sc、Rb、Nb、Zr、Hf等元素在新仁地区煤中含量也较高;充分说明研究区早期的峨眉山玄武岩源区对新仁地区晚二叠世煤中部分微量元素的分布与富集起到控制作用。新仁地区龙潭组煤中具有较高的Co、Ni元素含量,平均值分别为 12.95×10^{-6} 、 22.38×10^{-6} ,而研究区峨眉山玄武岩中Co、Ni元素含量更高,平均值分别为 49.98×10^{-6} 、 60×10^{-6} (孙平原等,2019),进一步表明新仁地区晚二叠世煤中的Co和Ni的富集是富含Co、Ni的峨眉山玄武岩风化碎屑被搬运至聚煤盆地所致(VANDERFLI-ER E, et al., 1985)。

6.2 沉积环境与聚煤关系

古植物和古气候是聚煤作用的主导因素之一(邵龙义等,2013)。已有的地质资料表明,晚二叠世贵州全区地处温暖湿润的热带雨林气候,种子蕨、真蕨及石松等高等造煤植物十分繁盛,为聚煤作用提供了丰富的物质基础(徐彬彬等,2003)。研究区晚二叠世所形成的煤系底部的大量煤层、煤系底部的铝土质泥岩和煤系中夹有少量碳酸盐岩,以及丰富的植物化石

碎片(无法鉴定种属)和多门类动物化石(腕足等)共生都是温暖潮湿气候的证据。因此,研究区晚二叠世大规模聚煤作用是在温暖潮湿气候背景下发生的。总体上,温暖潮湿的古气候为植物的生长发育创造了条件,构造古地理与沉积古环境控制了含煤地层的宏观分布与发育程度(张廷山等,2017)。

研究表明,煤中灰分主要是成煤期混入和后期变质作用带入的外来物质,其含量变化与沉积期的古地理环境有一定关联,总体规律是由海向陆具递增的特点,是作为环境指相辅助因素之一(程伟等,2013)。煤的灰分组成与煤中所含矿物质在种类、数量上皆具有一定的相关性,因此,较多地质学者采用灰成分指数 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 等作为聚煤环境判别参数(代世峰等,2005;任德貽等,2006;YI et al., 2007),郝吉生等(2000)和傅从等(2012)则尝试采用“灰成分端元分析法”建立灰成分与聚煤环境之间的联系。其中,腐殖煤中的灰成分指数 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ (以下称“灰成分指数”均仅指此参数)为0.03~0.22,属较弱还原型;变化于0.23~1.23,则属较强还原型(赵师庆等,1994)。据表1所示煤层灰成分指数可知,研究区煤的灰成分指数变化范围从底到顶分为0.11~0.48、0.17~0.48、0.14~0.10,从底到顶分为3个旋回:第一旋回,煤层成煤环境弱还原型变为强还原型;第二旋回,煤层成煤环境属于强还原型,逐渐增强;第三旋回,煤层成煤环境属于弱还原型,逐渐减弱。研究区煤层灰成分指数与煤中全硫分的垂向变化相类似,二者在数值上具有正相关关系(图7a)。

程伟等(2013)为了进一步确定煤灰成分作为聚煤环境判别的可行性,以煤灰成分中 $\text{CaO} + \text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$ 、 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 三个组分的百分含量作为3个端元作三角端元图解(图7b)。由图7b可知,① $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较高,为61.76%~86.28%。② $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3$ 含量为7.4%~29.92%。③ $\text{CaO} + \text{MgO}$ 含量较低,为0.36%~13.9%。研究表明,3个灰成分端元百分含量实际反映了聚煤环境的不同介质条件(程伟等,2013),新仁地区的煤样几乎全部靠近 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 端元(图7b),反映以黏土矿物为代表的陆源矿物类型多与淡水介质注入有关(郝吉生等,2000;YI, et al., 2007)。据此可知,研究区的聚煤环境为从陆源区水浅、水动力较强而

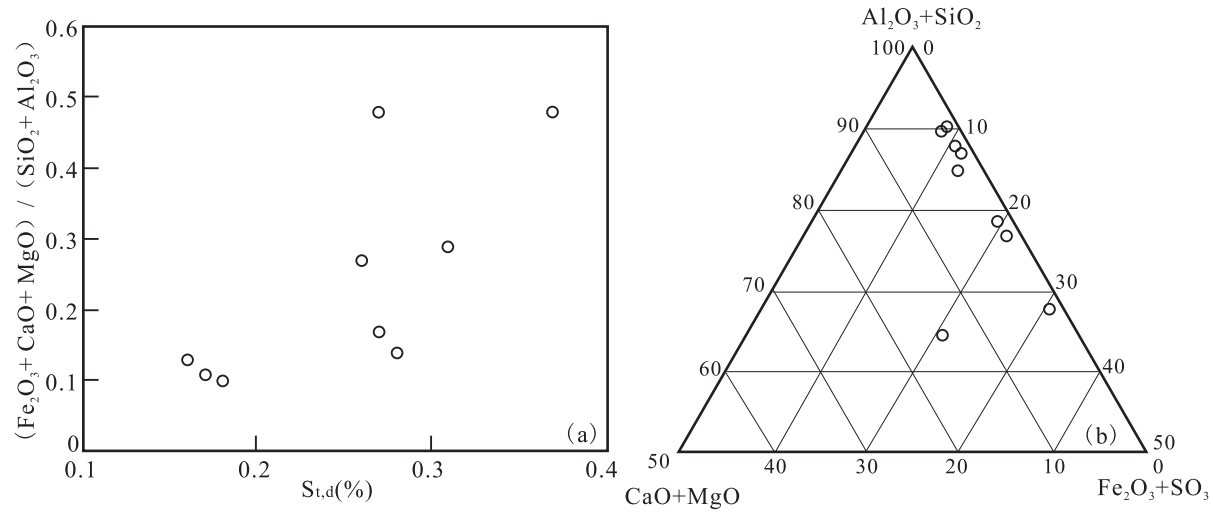


图 7 (a)新仁地区上二叠统龙潭组煤中硫分与煤灰成分指数之间关系图、(b)煤灰成分三角端元图解

Fig. 7 (a)Relationship between sulfur content and coal ash composition index of the Upper Permian Longtan formation in Xinren area;(b)Triangle ternary diagram of coal ash composition

还原性较弱的环境向远离陆源区水深、水动力较弱而还原性较强的环境变化。

另外,煤层中微量元素的分布特征、富集程度与其形成环境也密切相关,而相关元素的比值是沉积环境的判别标志(崔光来,2004)。如咸水环境中 Sr/Ba 值大于 0.8;陆相沉积物中 Th/U 值大于 7,而海相沉积物中小于 7;海水沉积环境中形成的煤往往硫含量较高,内陆淡水环境形成的煤一般硫含量低(陶振鹏,2017)。研究区煤样中 Sr/Ba 值为 0.09~1.85,均值为 0.42,小于 0.8,表明为淡水环境;而煤样中硫含量较低,表明形成于内陆淡水环境,与煤中全硫分作为成煤环境判别(研究区全硫分判别聚煤环境为淡水沼泽)参数具有一致性。

7 结论

(1)新仁地区上二叠统龙潭组中煤的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线除样品 PM403 - MY3、MY8 以外,其他煤样样品稀土元素分布模式相似,整体上呈左高右低的宽缓的“V”型曲线, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 5.27~18.34,均值为 8.91,表明轻重稀土元素分馏程度高的特征; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 1.75~4.55,均值为 3.07,表明轻稀土元素相对富集; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.57~2.08,均值为 1.82,表明轻稀土元素相对富集。 δEu 为 0.38~1.52,均值为 0.74,除 PM403 - MY8 样品大于 1 之外,其余均小于 1,具有显著的

负 Eu 异常。

(2)新仁地区上二叠统龙潭组中煤具有高全水分、中-高灰分、低-中高挥发分、特低和低硫分、低固定碳、低磷分、特低氯等特征。

(3)新仁地区上二叠统龙潭组煤中 SiO_2 、 TiO_2 、 K_2O 含量较高,其中 SiO_2 是全国煤的 6 倍, TiO_2 是全国煤的 7 倍, K_2O 是全国煤的 10 倍,其余氧化物含量均是全国煤的 1~4 倍。

(4)新仁地区晚二叠世的聚煤规律与峨眉山玄武岩、古气候、沉积环境等因素有关。地球化学特征显示新仁地区聚煤环境为从陆源区水浅、水动力较强而还原性较弱的环境向远离陆源区水深、水动力较弱而还原性较强的环境变化。

参考文献(References):

崔光来,全书进,吴朝东. 焉耆盆地侏罗系煤中微量元素地球化学特征及意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004,40(4):594-600.

CUI Guanglai, QUAN Shujin, WU Chaodong. Jurassic coal in Yanqi basin(Xinjiang,China):Geochemical characteristics of trace elements and their implications[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4):594-600.

程伟,杨瑞东,崔玉朝,等. 贵州毕节地区晚二叠世煤质特征及其成煤环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(11):

- 1763-1777.
- CHENG Wei, YANG Ruidong, CUI Yuchao, et al. Characteristic of late Permian coal quality from Bijie, Guizhou province, SW China, and its significance for paleoenvironment[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(11): 1763-1777.
- 戴传固, 王雪华, 陈建书. 贵州省区域地质志[R]. 贵阳: 贵州省地质调查院, 2013.
- 代世峰, 任德贻, 唐跃刚. 煤中常量元素的赋存特征与研究意义[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(2): 1-5.
- DAI Shifeng, REN Deyi, TANG Yuegang. Modes of occurrence of major elements in coal and their study significance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(2): 1-5.
- 傅从, 白向飞, 姜英. 中国典型高砷煤中砷与煤质特征之间的关系及砷的赋存状态[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 96-102.
- FU Cong, BAI Xiangfei, JIANG Ying. Discussion on the relationship between the content of Arsenic and the coal quality characteristic and the Arsenic modes of occurrence in Chinese high Arsenic coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 96-102.
- 郭江峰, 姚多喜, 陈健, 等. 重庆龙潭组煤中稀土元素地球化学及地质成因分析[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3): 51-58.
- GUO Jiangfeng, YAO Duoxi, CHEN Jian, et al. Geochemistry of the rare earth elements of coals from the Longtan Formation in Chongqing and its geological implication[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 51-58.
- 郝吉生, 葛宝勋, 谢洪波. “灰成分端元分析法”及其在聚煤环境分析中的应用[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 460-464.
- HAO Jisheng, GE Baoxun, XIE Hongbo. The analysis method based on ash-composition and its application in coal-accumulating environment reconstruction[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 460-464.
- 姬清海, 刘传权, 王春松, 等. 濮阳市马庄桥煤质特征研究[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 196-204.
- JI Qinghai, LIU Chuanquan, WANG Chunsong, et al. Coal Quality Characteristics in Mazhuangqiao of Puyang City[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 196-204.
- 姜科庆, 田继军, 汪立今, 等. 准噶尔盆地南缘西山窑组沉积特征及聚煤规律分析[J]. *现代地质*, 2010, 24(6): 1204-1212.
- JIANG Keqing, TIAN Jijun, WANG Lijin, et al. Sedimentary characteristics and coal-accumulation pattern of the Xishanyao formation in Southern Margin area of Junggar basin[J]. *Geoscience*, 2010, 24(6): 1204-1212.
- 李宝庆. 黔西上二叠统龙潭组煤的矿物学及地球化学特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学. 2015.
- LI Baoqing. Mineralogy and geochemistry of Longtan formation coals of late Permian in the western Guizhou Province, Southwest China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- 李进孝, 张珂, 王珍珍, 等. 王家沟矿区5号煤中伴生元素地球化学特征[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 163-171.
- LI Jinxiao, ZHANG Ke, WANG Zhenzhen, et al. Geochemical Characteristics of Associated Elements in No. 5 Coal of Wujiagou Coalfield[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 163-171.
- 李盛富, 陈洪德, 周剑, 等. 新疆伊犁盆地南缘新生代以来构造演化与聚煤规律研究[J]. *西北地质*, 2016, 49(2): 220-228.
- LI Shengfu, CHEN Hongde, ZHOU Jian, et al. Tectonic Evolution and Coal Accumulation about the Southern Margin of Yili Basin in Xinjiang since Middle Cenozoic Era[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(2): 220-228.
- 刘帮军, 林明月. 宁武煤田平朔矿区9号煤中锂的富集机理[J]. *地质与勘探*, 2014, 50(6): 1070-1075.
- LIU Bangjun, LIN Mingyue. Enrichment mechanism of Lithium in coal seam No. 9 of the Pingshuo mining district, Ningwu coalfield[J]. *Geology and Exploration*, 2014, 50(6): 1070-1075.
- 刘大锰, 杨起, 汤达祯. 鄂尔多斯盆地煤的灰分和硫、磷、氯含量研究[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊): 53-59.
- LIU Dameng, YANG Qi, TANG Dazhen. A study on abundances and distribution of ash yield, sulfur, phosphorus and chlorine content of the coals from Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Suppl.): 53-59.
- 刘东娜, 曾凡桂, 赵峰华, 等. 山西省煤系伴生三稀矿产资源研究现状及找矿前景[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 1-7.
- LIU Dongna, ZENG Fangui, ZHAO Fenghua, et al. Status and prospect of research for three type coal-associated rare earth resources in coal measures in Shanxi Province[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2018, 46(4): 1-7.
- 屈晓荣. 大同煤田北部中侏罗统煤中伴生元素分布特征及其地质意义[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(1): 64-72.
- QU Xiaorong. Distribution characteristics of associated elements in Middle Jurassic coal in the north of Datong coalfield and their geological significance[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(1): 64-72.
- 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- REN Deyi, ZHAO Fenghua, DAI Shifeng, et al. Trace ele-

- ment geochemistry of coal [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- 王胜建, 高为, 郭天旭, 等. 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, 2020, 47(1): 249-250.
- WANG Shengjian, GAO Wei, GUO Tianxu, et al. The discovery of shale gas, coalbed gas and tight sandstone gas in Permian Longtan Formation, northern Guizhou Province[J]. Geology in China, 2020, 47(1): 249-250 (in Chinese with English abstract).
- 唐跃刚, 任德贻, 刘钦甫, 等. 四川晚二叠世煤中硫与成煤环境的关系[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 161-167.
- TANG Yuegang, REN Deyi, LIU Qinfu, et al. Relationship between the Coal-Forming environment and sulfur in the Late Permian Coal of Sichuan, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 161-167.
- 邵龙义, 高彩霞, 张超, 等. 西南地区晚二叠世层序-古地理及聚煤特征[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 856-866.
- SHAO Longyi, GAO Caixia, ZHANG Chao, et al. Sequence-Palaeogeography and coal accumulation of Late Permian in Southwestern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 856-866.
- 邵龙义, 王娟, 侯海海, 等. 云南宣威晚二叠世末生物灭绝期C₁煤的地球化学特征[J]. 地质学报, 2015, 89(1): 163-179.
- SHAO Longyi, WANG Juan, HOU Haihai, et al. Geochemistry of the C₁ coal of Latest Permian during mass extinction in Xuanwei, Yunnan[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(1): 163-179.
- 孙平原, 何碧, 赵飞, 等. 贵州乌蒙山黔西地区二叠系玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(12): 41-51.
- SUN Pingyuan, HE Bi, ZHAO Fei, et al. Geochemical characteristics and their geological significance of Permian basalt rocks in Qianxi Area, Wumengshan of Guizhou Province[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(12): 41-51.
- 陶振鹏, 杨瑞东, 程伟, 等. 贵州普安-晴隆矿区晚二叠世煤及煤灰中伴生元素的富集特征[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 44-51.
- TAO Zhenpeng, YANG Ruidong, CHENG Wei, et al. Enrichment characteristics of associated elements of Late Permian coal and coal ash from Pu'an and Qinglong coal mining area in Guizhou Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 44-51.
- 田和明, 代世峰, 李大华, 等. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 169-177.
- TIAN Heming, DAI Shifeng, LI Dahua, et al. Geochemical features of the Late Permian tuff in Nanchuan District, Chongqing, Southwestern China[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 169-177.
- 王宁祖, 张向文, 何碧, 等. 贵州省黔西县大寨地区中三叠统关岭组绿豆岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 2019, 39(1): 91-100.
- WANG Ningzu, ZHANG Xiangwen, HE Bi, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mung bean rocks of the middle triassic Guanling formation in Dazhai area of Qianxi county, Guizhou Province[J]. Mineral Petrol, 2019, 39(1): 91-100.
- 吴艳艳, 秦勇, 易同生. 贵州凯里梁山组高硫煤中稀土元素的富集及其地质成因[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 280-285.
- WU Yanyan, QIN Yong, YI Tongsheng. Enrichment of rare earth elements in high sulfur coal of Liangshan Formation from Laili, Guizhou, China and Geological Origin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 280-285.
- 解习农, 程守田. 贵州织纳煤田晚二叠世海进海退旋回及煤聚集[J]. 煤田地质与勘探, 1992, 20(5): 1-6.
- XIE Xinong, CHEN Shoutian. Transgressive-regressive cycles and coal accumulation of upper Permian, Zhina Coalfield in Guizhou[J]. Coal Geology & Exploration, 1992, 20(5): 1-6.
- 徐彬彬, 何明德. 贵州煤田地质[M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 2003.
- XU Binbin, HE Mingde. Geology of Guizhou coalfield [M]. Jiangsu: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- 曾荣树, 赵杰辉, 庄新国. 贵州六盘水地区水城矿区晚二叠世煤的煤质特征及其控制因素[J]. 岩石学报, 1998, 14(4): 549-558.
- ZENG Rongshu, ZHAO Jiehui, ZHUANG Xinguo. Quality of Late Permian coal and its controlling factors in Shuicheng Mining district of Liupanshui Area, Guizhou [J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14(4): 549-558.
- 易同生, 黄华州, 桑树勋, 等. 贵州盘北-水城地区煤资源特性及意义[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(1): 14-18.
- YI Tongsheng, HUANG Huazhou, SANG Shuxun, et al. Characteristics of coal resources and its significance in northern Panjiang and Shuicheng mining district, Guizhou[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(1): 14-18.
- 曾广乾, 何良伦, 杨坤光. 黔西普安辉绿岩的年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2014, 34(4): 61-70.

- ZENG Guangqian, HE Lianglun, YANG Kunguang. Geochronology, geochemistry and geological significances of diabase dykes in Puan, West Guizhou[J]. Mineral Petrology, 2014, 34(4): 61-70.
- 赵师庆, 王飞宇, 董名山. 论“沉煤环境-成煤类型-煤质特征”概略成因模型[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 32-39.
- ZHAO Shiqing, WANG Feiyu, DONG Mingshan. Discussion on the “Sedimentary Environment-Type of Coal-forming-Characteristic of Coal Quality” Rough Genetic Model[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 32-39.
- 张廷山, 何映颀, 伍坤宇, 等. 筠连地区上二叠统宣威组沉积相及聚煤控制因素[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 1-10.
- ZHANG Tingshan, HE Yingjie, WU Kunyu, et al. Sedimentary facies and controlling factors of coal accumulation of the Upper Permian Xuanwei Formation in Junlian area[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 1-10.
- 张玉成, 李长林, 洪志奋. 四川南部晚二叠世含煤地层沉积环境与聚煤规律[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1993.
- ZHANG Yucheng, LI Changlin, HONG Zhifen. Depositional Environments and Coal Accumulation of the Late Permian Coal-Bearing Strata in Southern Sichuan [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 1993.
- 赵继尧, 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素的丰度[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(增刊): 5-13.
- ZHAO Jiyao, TANG Xiuyi, HUANG Wenhui. Abundance of trace elements in coal of China[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(Supp): 5-13.
- 赵维龙, 邱小龙, 王军. 贵州保田煤炭勘查区沉积环境及聚煤规律研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(7): 49-53.
- ZHAO Weilong, QIU Xiaolong, WANG Jun. Study on sedimentary environment and coal accumulation regularity of coal exploration area in Baotian of Guizhou[J]. Coal Technology, 2020, 39(7): 49-53.
- 庄新国, 龚家强, 王占岐, 等. 贵州六枝、水城煤田晚二叠世煤的微量元素特征[J]. 地质科技情报, 2001, 20(3): 53-58.
- ZHUANG Xinguo, GONG Jiaqiang, WANG Zhanqi, et al. Trace elements of the late Permian coal in the Shuicheng and Liuzhi coal fields, Guizhou[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(3): 53-58.
- BANERJEE I, GOODARZI F. Paleoenvironment and sulfur-boron contents of the Mannville (Lower Cretaceous) coals of southern Alberta, Canada[J]. Sedimentary Geology, 1990, 67: 297-310.
- BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies[M]//Henderson P. Rare Earth Elements Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984, 63-114.
- DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94: 3-21.
- DAI S F, WANG X B, CHEN W M, et al. A high-pyrite semianthracite of Late Permian age in the Songzao Coalfield, southwestern China: Mineralogical and geochemical relations with underlying mafic tuffs[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83(4): 430-445.
- DAI Shifeng, REN Deyi, TANG Yuegang, et al. Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 61(1/2): 119-137.
- HUNT J W, SMITH J W. S/S ratios of low-sulfur Permian Australian coals in relation to depositional environment [J]. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.), 1985, 58: 137-144.
- NEMEC W. Coal correlations and intrabasinal subsidence; a new analytical perspective[M]//Kleinspehn K L, Paola C. New Perspectives in Basin Analysis. New York: Springer-Verlag, 1988, 161-188.
- TURNER B R, RICHARDSON D. Geological controls on the sulphur content of coal seams in the Northumberland Coalfield, Northeast England [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 60: 169-196.
- STEVEN J S, BRIAN W S. Rare earth element sources and modification in the Lower Kittanning coal bed, Pennsylvania; implications for the origin of coal mineral matter and rare earth element exposure in underground mines [J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 54: 223-251.
- VANDERFLIER E, FYFE W S. Uranium-thorium systematic of two Canadian coals[J]. International Journal of Coal Geology, 1985, 4(4): 335-353.
- YI Tongsheng, QIN Yong, ZHANG Jing, et al. Matter composition and two stage evolution of a Liangshan super high-sulfur coal seam in Kaili, eastern Guizhou [J]. Journal of China University Mining & Technology, 2007, 17(2): 158-163.
- SPEARS D A, RIPPON J H, CAVENDER P F. Geological controls on the sulphur distribution in British Carboniferous: a review and reappraisal[J]. International Journal of Coal Geology, 1999, 40: 59-81.