

黔北煤田吴家寨地区晚二叠世煤层地球化学 特征及聚煤环境分析

杨 旭,刘志臣,秦先进,肖 林,陈 磊,李隆富,汪 洋

(贵州省地矿局 102 地质大队,贵州 遵义 563003)

[摘 要]为了探讨煤层地球化学特征和成煤环境的关系,根据黔北煤田吴家寨地区上二叠统龙潭组煤样地球化学特征分析数据,评价了该地区晚二叠世煤的总体煤质特征,重点探讨了煤灰成分指数、微量元素和稀土元素与成煤环境的联系。结果表明,研究区灰成分指数($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$)、 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 平均 0.28,属较强还原型;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中, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量最高,说明粘土矿物为代表的陆源矿物类型多与淡水介质注入有关。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研究区的聚煤环境为:从陆源区水浅、水动力较强、还原性较强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。研究区微量元素 Sr/Ba 均值为 0.15,表明为淡水环境。研究区稀土元素地球化学参数 Eu 负异常,Ce 均未出现明显负异常。故研究区主要为陆相聚煤环境,成煤环境受海水影响很小。综合分析认为,吴家寨地区晚二叠世聚煤环境主要与古气候、沉积环境等因素有关。

[关键词]煤层;二叠纪龙潭组;地球化学;聚煤环境;吴家寨地区

[中图分类号]P618.11 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2021)03-299-10

1 引言

贵州是中国南方煤炭资源最丰富的省区,素有“江南煤海”美誉。煤炭资源相对集中于贵州西部的盘县、水城、六枝和织金、纳雍、大方等县,其次是在黔北煤田的桐梓、仁怀、习水等地。吴家寨地区地处仁怀与习水之间,该地区聚煤盆地位于扬子准地台西南缘,成煤期属于华南晚二叠世陆表海坳陷盆地的一部分(庄新国等,2001;程伟等,2013),二叠统龙潭组聚煤规律是当前地学界研究的热点之一,是中国研究含煤地层的有利地

区之一(张文斌等,2020)。不同成煤过程的古气候、古生物、古地理和构造运动等条件,所形成煤层煤质特征参数也会相应的不同,因此,煤质特征参数中包含成煤环境信息(程伟等,2013;张文斌等,2020)。目前,国内外诸多学者研究了各个产地、各时代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(HUNTJW et al., 1985;程伟等,2013;邵龙义等,2015;张文斌等,2020),煤的成煤环境与煤中主量元素、稀土元素特征参数的耦合关系(STEVENS et al., 2003;李进孝 2020;郭江峰等,2016;任德贻等,2006;李宝庆,2015;张文斌等,2020)。

[收稿日期]2021-02-21 [修回日期]2021-06-06

[基金项目]贵州省优秀青年科技人才,黔科合平台人平[2019]5654项目,贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目资助。

[作者简介]杨旭(1965—),男,地质高级工程师、注册安全工程师,长期从事矿产勘查及找矿研究工作。Email:757745084@qq.com。

[通讯作者]刘志臣(1982—),男,正高级工程师,博士研究生,长期从事矿产勘查与研究。Email:123342436@qq.com。

多数学者对贵州西部、西北部成煤环境及聚煤特征进行了研究,而对黔北地区晚二叠世含煤岩系地层的研究多局限于地质调查,对煤质地球化学特征及聚煤规律研究程度较为薄弱,特别是本区煤中地球化学元素特征与聚煤环境研究从未开展过。笔者在前人研究成果的基础上,收集利用地质勘查相关资料,重点研究区内含煤岩系煤质地球化学特征及聚煤作用的相关因素。本文以贵州遵义吴家寨背斜龙潭组 C5、C8、C12 煤层为研究对象,对其主量元素、稀土元素、微量元素、灰分、挥发分、全硫、碳、发热量、磷分、

砷、氟、氯等测试数据进行分析研究。旨在查明研究区可采煤层地球化学特征及聚煤环境,深入探讨该地区二叠系成煤环境、煤层化学特征与聚煤环境的耦合关系。

2 区域地质背景

研究区大地构造位置位于扬子准地台黔北台隆遵义断拱,毕节北东向构造变形区北东部,即二郎向斜北东段南东翼、吴家寨背斜北东段倾没端、茅台向斜北东段昂起端与官店向斜南西段昂起端之交汇部位(刘志臣等,2018)。区域地层除缺失石炭系、泥盆系外,从震旦系至侏罗系均有出露,如图1所示。区内出露二叠统岩石地层单位由下至上依次为:栖霞组(P_2q)、茅口组(P_2m),龙潭组(P_3l)、长兴组(P_3c)。龙潭组与下伏地层茅口组呈平行不整合接触,与上覆长兴组地层呈整合接触。栖霞组、茅口组和长兴组岩性组合以碳酸盐岩为主;龙潭组岩性组合以碎屑岩夹煤层为主。

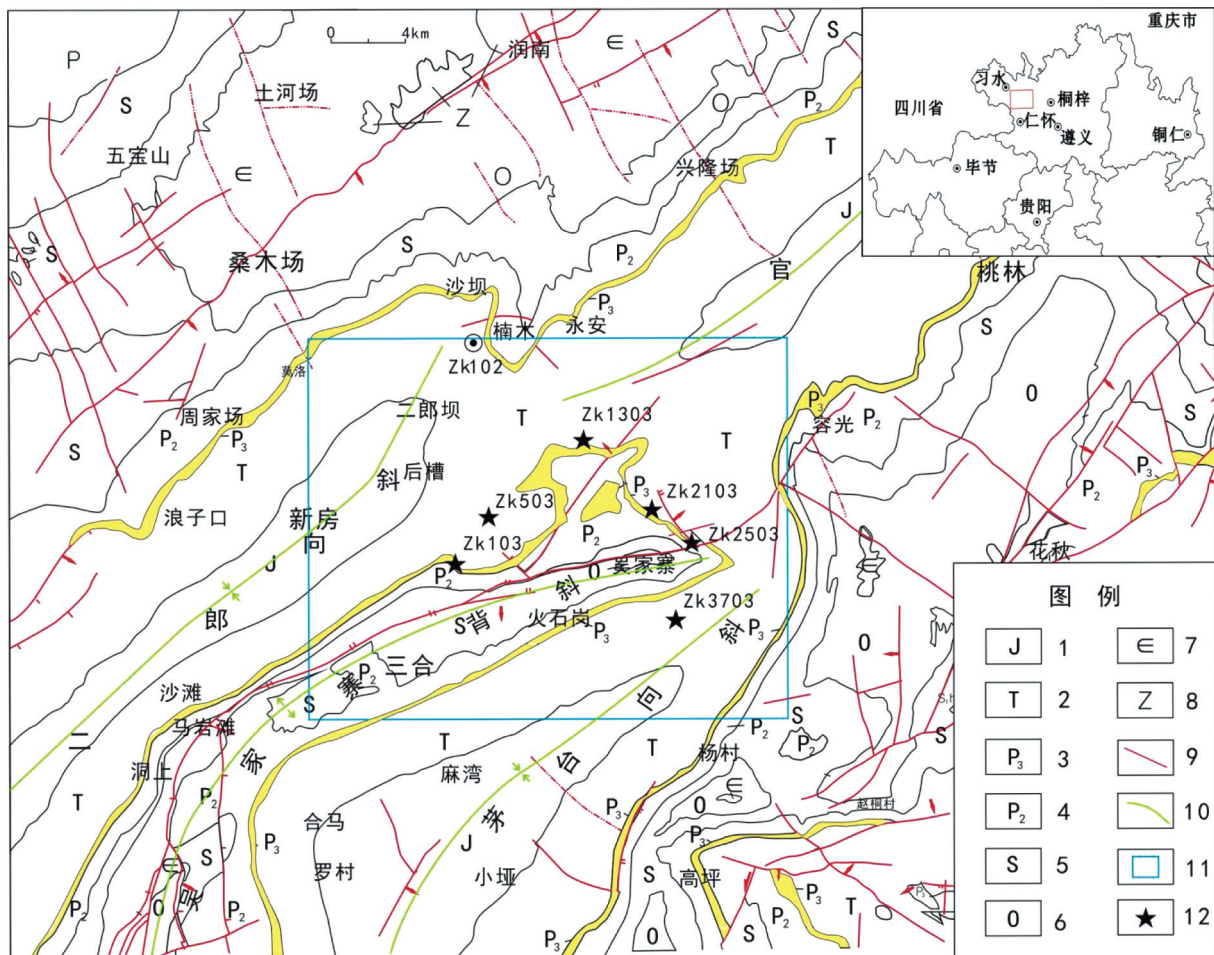


图1 研究区地质略图(据刘志臣 2018,修改)

Fig. 1 Geological sketch in the study area

1—侏罗系;2—三叠系;3—二叠系上统龙潭与长兴组;4—二叠系中统茅口组与栖霞组;5—志留系;6—奥陶系;7—寒武系;8—震旦系;9—断层;10—背向斜轴;11—研究区;12—取样位置

3 龙潭组沉积特征

含煤地层二叠系上统龙潭组(P_3l),由一套海陆交互沉积岩组成。由细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、粘土岩、硫铁矿粘土岩、煤、灰岩及菱铁质岩等组成。组厚度 55.88 ~ 85.82 m,平均厚 74.39 m。根据研究区出露地层及钻孔资料揭示岩石组合垂向变化特征,将龙潭组划分为 3 个三级层序,从下至上分别为 SQ1、SQ2、SQ3(汪洋等,2017)。其中 C12 煤层发育于 SQ1, C8、C5 发育于 SQ2, SQ3 仅发育少量薄煤层(线),如图 2 所示。依据 3 个三级层序及岩石组合情况,研究区龙潭组岩性特征分为上、中、下三个含煤段,现由下至上分述如下:

下段(P_3l^1):C11 煤层上部厚层粉砂岩顶界至龙潭组底界,岩性主要为粉砂岩、泥岩、粘土岩、硫铁矿粘土岩、炭质泥岩及煤层(线)。粉砂岩见平行层理、小型交错层理;炭质泥岩、泥岩中产丰富的植物碎片化石,含黄铁矿结核及团块,水平层

理发育。含 2 层可采煤(C11、C12),其中,C12 为全区稳定可采煤层;C11 为大部可采煤层。

中段(P_3l^2):C5 煤层上部厚层细砂岩顶界至 C11 上部厚层粉砂岩顶界,岩性主要为细砂岩、泥质粉砂岩、菱铁质岩、粘土岩、粉砂质泥岩,少量灰岩、泥质灰岩,炭质泥岩及煤层(线)。灰岩中偶见腕足类化石,细砂岩见平行层理、交错层理、波状层理;泥岩、炭质泥岩含丰富的植物化石,黄铁矿呈星散状、团块状分布,水平层理发育。含 2 层可采煤层(C5、C8),其中 C8 为稳定可采煤层,C5 大部可采煤层。

上段(P_3l^3):龙潭组顶界至 C5 煤层上部厚层细砂岩顶界,主要为海陆交互沉积的灰岩、泥质灰岩、泥岩、钙质泥岩、粘土岩、炭质泥岩及薄煤层(线)。灰岩中产腕足类化石及碎片,泥岩、炭质泥岩、粘土岩中含丰富的植物碎片化石,泥岩水平层理发育,含黄铁矿团块结核。龙潭组主要为障壁海岸相、三角洲相、沼泽相交替出现为特征的海陆交互沉积(李隆富等,2015;汪洋等,2017;叶春等,2017;杨旭等,2019)。

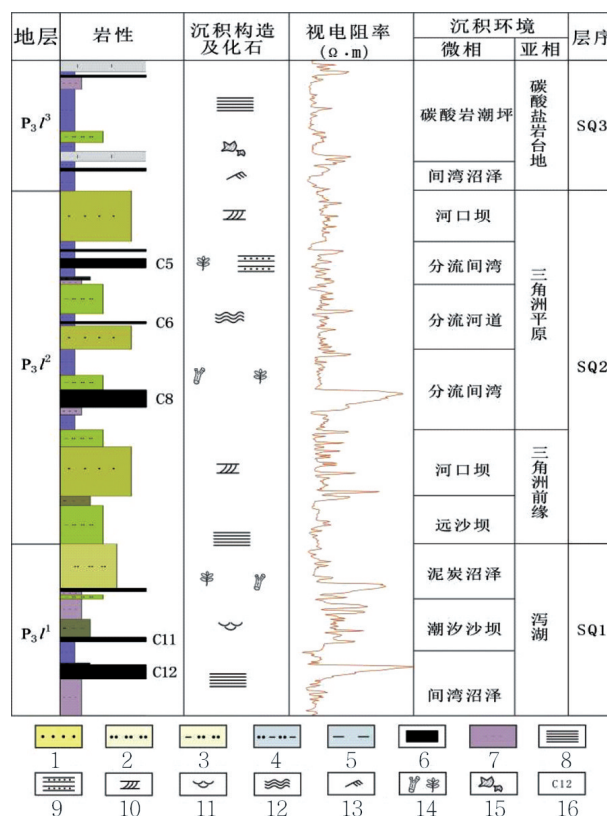


图 2 垂向沉积环境图(据汪洋 2017,修改)

Fig. 2 Vertical sedimentary environment

1—细砂岩;2—粉砂岩;3—泥质粉砂岩;4—粉砂泥质岩;5—泥岩;6—煤层;7—粘土岩;8—水平纹理;9—互层层理;10—交错层理;11—小型槽状交错层理;12—波状层理;13—小型水流波痕;14—植物叶茎化石;15—生物碎屑;16—煤层及编号

4 样品采集与分析方法

研究区在钻探施工中,分别在 ZK 103(C5-1)、ZK 505(C8-1)、ZK1303(C5-2)、ZK2103(C12-1)、ZK2503(C8-2)、ZK3703(C12-1)等6个钻孔中,针对全区稳定可采(或大部可采)的C5、C8、C12采取6件煤样,进行稀土元素测试。样品在中国科学院地球化学研究所,按GB474-2008破碎研磨至200目以上,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对煤样品进行REE分析测定。煤中微量元素基于吴家寨背斜整装勘查报告(贵州省地矿局102地质大队,2015)中的32件煤质样品的分析数据,主量元素及煤化学特征采用整装勘查报告中的数据,样品分析在贵州省地矿局中心实验室完成。微量元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS);主量元素采用PW1404型X射线荧光光谱仪分析。

5 煤层地球化学特征

5.1 主量元素

研究区龙潭组煤层 SiO₂ 含量为 37%~48.26%,均值为 42.98%; Al₂O₃ 含量为 27.28%~30.83%,均值为 28.53%; K₂O 含量为 0.72%~0.89%,均值为 0.80%; MgO 含量为 0.47%~0.71%,均值为 0.63%; Fe₂O₃ 含量为 9.53%~20.41%,均值为 13.96%; Na₂O 含量为 0.45%~0.69%,均值为 0.61%; MnO₂ 含量为 0.07%~0.09%,均值为 0.08%; SO₃ 含量为 1.40%~3.17%,均值为 2.25%; TiO₂ 含量为 1.81%~2.95%,均值为 2.56%。该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>CaO>TiO₂>SO₃>K₂O>MgO>Na₂O>P₂O₅>MnO₂, SiO₂/Al₂O₃ 值为 1.36~1.59,平均为 1.51。SiO₂/Al₂O₃ 略高于中国煤均值(1.42)(DAIS, F, etal, 2012),高于高岭石的理论值(1.18)(田和明,2014),表明煤中 Al 主要以粘土矿物为载体,存在富 Si 的矿物。与中国煤主量元素含量相比(任德哈等,2006),吴家寨地区煤中 SiO₂、TiO₂、MnO₂ 含量较高,其中 SiO₂ 是中国煤的 5.1 倍, TiO₂ 是中国煤的 7.8 倍, MnO₂ 是中国煤的 5.3 倍,除 MgO 小于 1 外,其余氧化物含量均是中国煤的 2.5~4.8 倍,见表 1。

5.2 稀土元素

研究区煤样稀土元素总量(ΣREE)为 60.93×10⁻⁶~244.12×10⁻⁶,平均为 158.73×10⁻⁶,为中国煤平均值(119.05×10⁻⁶)(DAISF, etal, 2010)的 1.33 倍,世界煤平均值(60.21×10⁻⁶)(DAISFetal, 2010)的 2.64 倍;除 Eu、Lu 小于 1 外,其余元素是中国煤的 1.04~1.53 倍,是世界煤的 1.2~3.3 倍。ΣLREE/ΣHREE 值为 4.64~12.93,平均为 8.56,见表 2。该区煤样球粒陨石标准化稀土元素配分曲线,整体上呈左高右低(或近于水平)的宽缓的“V”字型,分布模式基本一致,从 La 到 Lu 稀土元素的标准化值逐渐降低,轻稀土配分曲线“右倾”、重稀土曲线较为“平坦”,轻稀土元素下降比重稀土快,重稀土元素曲线相对平缓,如图 3 所示。(La/Yb)_N 为 9.68~33.86,均值为 16.92,表明轻重稀土元素分馏程度高的特征;(La/Sm)_N 为 1.78~12.65,均值为 7.54,表明轻稀土元素较富集;(Gd/Yb)_N 为 1.21~7.08,均值为 2.72,表明重稀土元素相对富集;δEu 为 0.10~0.47,均值为 0.38,具有明显的 Eu 负异常;δCe 为 0.77~1.02,均值为 0.97,具有 Ce 弱负异常。Eu 负异常,且稀土元素富集,表明吴家寨地区煤中的稀土元素主要来源于陆源碎屑(郭江峰,2016)。

表 1 吴家寨地区龙潭组煤样主量元素分析一览表(%)

Table 1 Major element test of coal sample in Longtan formation of Wujiazhai area

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	灰成分指数	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
C5	43.68	27.5	2.93	11.34	5.45	0.71	0.89	0.69	0.09	0.23	3.17	0.25	1.59
C8	48.26	30.83	2.95	9.53	2.93	0.56	0.72	0.68	0.07	0.24	1.40	0.17	1.57
C12	37.00	27.28	1.81	20.41	5.59	0.47	0.79	0.45	0.09	0.21	2.18	0.41	1.36
平均值	42.98	28.53	2.56	13.96	4.66	0.63	0.80	0.61	0.08	0.23	2.25	0.28	1.51
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
平均值/中国煤	5.1	4.8	7.8	2.9	3.8	0.3	4.2	3.8	5.3	2.5			

注:样品测试由贵州省地矿局中心实验室完成;灰成分指数=(Fe₂O₃+CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃)。

表2 吴家寨地区龙潭组煤样煤中稀土元素($\omega B/10^{-6}$)

Table 2 REE of coal sample in Longtan formation of Wujiazhai area($\omega B/10^{-6}$)

煤样	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	Σ LREE	Σ HREE	LREE/HREE	δ Eu	δ Ce	Σ La/Yb	Σ La/Sm	Σ Gd/Yb
C5-1	47.8	82.6	7.34	21.9	3.78	0.58	3.65	0.7	4.69	0.99	3.11	0.49	3.02	0.45	56.3	181.11	164	17.1	9.59	0.47	0.95	15.83	12.65	1.21
C5-2	25.5	57.6	7.32	34.2	14.3	0.47	14.65	1.77	7.29	1.07	2.57	0.35	2.07	0.3	26.5	169.46	139.39	30.07	4.64	0.10	1	12.32	1.78	7.08
C8-1	56.4	107	11.55	38.5	7.16	0.95	5.98	1	6.15	1.21	3.64	0.55	3.52	0.51	33.2	244.12	221.56	22.56	9.28	0.43	0.96	16.02	7.88	1.70
C8-2	12	25.4	2.82	9.6	2.14	0.32	2.21	0.4	2.54	0.45	1.4	0.24	1.24	0.17	28.1	60.93	52.28	8.65	6.04	0.45	1.02	9.68	5.61	1.78
C12-1	28.5	55.9	6.29	21.4	4.17	0.58	3.45	0.59	3.57	0.7	2.18	0.33	2.03	0.31	43.6	130	116.84	13.16	8.88	0.45	0.96	14.04	6.83	1.70
C12-2	47.4	68.2	7.97	26.2	4.51	0.52	4.02	0.6	3.26	0.59	1.68	0.22	1.4	0.2	27.3	166.77	154.8	11.97	12.93	0.37	0.77	33.86	10.51	2.87
C5	36.65	70.1	7.33	28.05	9.04	0.53	9.15	1.24	5.99	1.03	2.84	0.42	2.55	0.38	41.4	175.29	151.95	23.59	7.12	0.29	0.98	14.08	14.43	4.15
C8	34.2	66.2	7.19	24.05	4.65	0.64	4.10	0.7	4.35	0.83	2.52	0.40	2.38	0.34	30.65	152.53	136.92	15.61	7.66	0.44	0.99	12.85	6.75	1.74
C12	37.95	62.5	7.13	23.8	4.34	0.55	3.74	0.6	3.42	0.65	1.93	0.28	1.72	0.26	30.45	148.39	135.82	12.57	10.91	0.41	0.87	23.95	8.67	2.29
平均值	36.27	66.12	7.2	25.3	6.01	0.57	5.66	0.84	4.58	0.84	2.43	0.36	2.21	0.32	35.8	158.73	141.48	17.25	8.56	0.38	0.94	16.96	7.54	2.72
中国煤	25.1	49.11	5.47	21.5	4.3	0.87	3.7	0.67	3.13	0.65	1.86	0.27	2.12	0.3	-	119.05	106.35	12.7	8.37	0.65	0.97	7.98	3.67	1.41
世界煤	11	23	3.4	12	2.2	0.43	2.7	0.31	2.1	0.57	1	0.3	1	0.2	-	60.21	52.03	8.18	6.36	0.54	0.9	7.41	3.15	2.18
本区/中国煤	1.44	1.35	1.31	1.18	1.40	0.66	1.53	1.25	1.46	1.29	1.31	1.33	1.04	0.63	-	1.33	1.33	1.34	1.02	1.37	0.22	1.11	0.8	1.3
本区/世界煤	3.3	2.87	2.11	2.11	2.73	1.32	2.1	2.71	2.18	1.47	2.43	1.2	2.21	1.6	-	2.64	2.72	2.11	1.35	1.62	0.25	1.20	1	0.8

注:样品分析由中国科学院地球化学研究所完成。

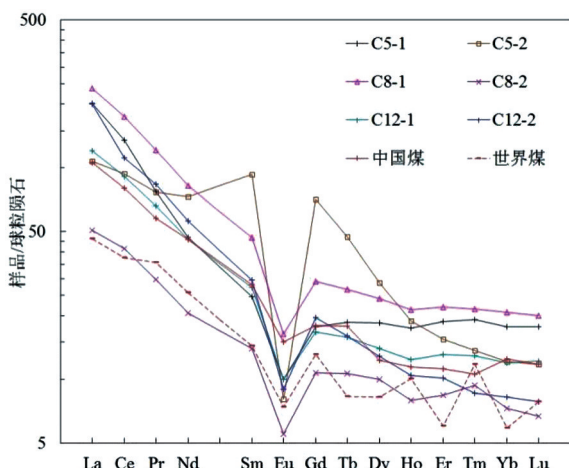


图3 稀土元素球粒陨石标准化分布模式图 (据杨旭等 2019,修改)

Fig. 3 Standard distribution model of REE chondrite

5.3 微量元素

由图4可知,从C12-C8-C5由下至上,Co、Ge、Ni、Sr、Zn含量先增大后减少,出现右突“>”趋势;Cr、Cu、Ga、Mo含量则先减少后增大,出现左突“<”趋势;V含量直线式增加。说明,研究区煤中部分微量元素的垂向变化趋势与垂向上沉积环境变化特征有关(张文斌等,2020)。总体上,微量元素含量与中国煤(DAISF et al, 2005)相比:Zr(9.03倍)、Cu(8.03倍)、Hf(6.21倍)、Nb(5.65倍)含量高,Cs、V、Ga、Th、U、Mn、Mo、Rb、Ba、Cs、Ta含量较高(比值为2~4),较为富集,As、Hg、Pb、Ni、Co、Cr、Sn、Be含量相对接近(比值为1~2),Zn、Ge、W、Li、B、Tl、Sr低于中国

煤(比值<1);与世界煤相比:Hf(19.77倍)、Nb(14.46倍)、Cu(9.23倍)、Zr(6.82倍)、Ta(6.61倍)、W(4.9倍)、Cs(4.67倍)含量高,Sc、V、Ga、Pb、Th、U、Co、Mo、Rb、Ba含量较高(比值为2~4),Zn、Ge、Ni、Li、Be含量相对接近(比值为1~2),As、W、Se、Tl、Sr含量低于世界煤(比值<1)。研究区中,Zr、Cu是中国煤的近10倍,Hf、Nb是世界煤的15~20倍,见表3。这些元素的富集,可能与西部峨眉山玄武岩提供的物质来源有一定的关系。

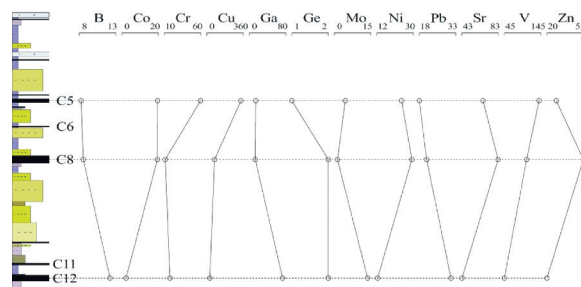


图4 研究区煤层微量元素纵向变化折线规律图

Fig. 4 Vertical change line rule of coal seam trace element in the study area

6 煤质特征(见表4)

水分(Mad):含量为2.03%~2.83%,均值为2.54%,属于特低全水分煤。从C12~C8,煤层水分与挥发分略为正相关,与灰分、硫分呈负相关;从C8~C5,煤层水分与挥发分、灰分、硫分呈正相关,如图5所示。

表3 吴家寨地区龙潭组煤层微量元素分析结果及参数特征一览表(单位:10⁻⁴)

Table 3 Analytical results and parameter characteristics of trace element in the coal seam in Longtan formation of Wujiazhai area

样品编号	C5(样品数 9)	C8(样品数 13)	C12(样品数 10)	平均值	中国煤	世界煤	本区/中国煤	本区/世界煤
As	6.3	4.84	6.01	5.72	3.79	7.6	1.51	0.75
Hg	0.249	0.351	0.221	0.27	0.15	-	1.80	-
Sc	21	10	5	12	4.72	3.9	2.54	3.08
V	65.5	91.31	83.22	80.01	34.97	25	2.29	3.20
Cu	337	76	30	147.67	18.4	16	8.03	9.23
Zn	29	55	20	34.67	42.11	23	0.82	1.51
Ga	20.6	13.82	15.11	16.51	6.64	5.8	2.49	2.85
Re	0.005	0.003	0.022	0.01	-	-	-	-
Pb	18	21	31	23.33	15.41	7.8	1.51	2.99
Th	14.55	10.22	12.07	12.28	5.84	3.3	2.10	3.72
U	7.9	6.02	3.38	5.77	2.41	2.4	2.39	2.40
Ge	3.1	1.85	1.92	2.29	2.78	2	0.82	1.15
Ni	24.21	29.31	12.37	21.96	13.72	13	1.60	1.69
Co	19.61	19.52	2.33	13.82	7.08	5.1	1.95	2.71
Cr	59.72	11.17	17.76	29.55	15.35	16	1.93	1.85
Mn	168.12	189.62	182.7	180.15	77	-	2.34	-
W	0.77	0.88	1.34	1	1.04	1.1	0.96	0.91
Sn	0.76	0.55	10.29	3.87	2.11	0.79	1.83	4.90
Mo	4.5	1.27	13.7	6.49	3.19	2.2	2.03	2.95
Li	30.62	4.9	1.07	12.2	31.8	12	0.38	1.02
B	8.25	8.54	12.22	9.67	63	-	0.15	-
Be	2.03	4.15	3.12	3.1	2.13	1.61	1.46	1.93
Se	0.091	0.092	0.127	0.1	2.47	1	0.04	0.10
Tl	0.02	0.14	0.79	0.32	0.47	0.6	0.68	0.53
Rb	1.8	6.91	79.5	29.4	9.24	14	3.18	2.10
Sr	66.19	82.77	43.09	64.02	140.2	110	0.46	0.58
Ba	336.72	502.78	468.75	436.08	159	150	2.74	2.91
Cs	3.59	3.52	6.91	4.67	1.13	1	4.13	4.67
Nb	2.77	7.42	150.3	53.5	9.47	3.7	5.65	14.46
Ta	0.15	0.43	4.97	1.85	0.66	0.28	2.80	6.61
Zr	271.82	277.16	187.14	245.37	89.3	36	9.03	6.82
Hf	3.1	5.29	62.76	23.72	3.82	1.2	6.21	19.77
Sr/Ba	0.20	0.16	0.09	0.15	0.88	0.73	0.17	0.20
Th/U	1.84	1.70	3.57	2.13	2.42	1.38	0.88	1.55

注:样品测试由贵州省地矿局中心实验室完成。

表4 吴家寨地区龙潭组煤质分析结果及参数特征一览表

Table 4 Analytical results and parameter characteristics of coal quality in Longtan formation of Wujiazhai area

煤层	发热量			Mad	Ad	Vd	Cd	Hd	St,d	Cld	Pd	Asd	F
编号	Qb,d	Qgr,d	Qnet,d	(水分)	(灰分)	(挥发分)	(碳)	(氢)	(硫分)	(氯)	(磷)	(钾)	(氟)
计量单位	(MJ/kg)			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
C5	25.27	25.19	24.63	2.77	25.73	12.96	64.84	1.85	3.15	0.03	168.48	6.10	218.44
C8	26.65	26.57	26.23	2.83	22.35	12.31	68.42	1.89	2.03	0.03	178.38	4.84	135.00
C12	26.72	26.62	26.06	2.03	23.92	12.24	66.88	1.77	4.34	0.03	147.70	6.30	181.50
平均值	26.21	26.13	25.64	2.54	24	12.5	66.71	1.84	3.17	0.03	164.85	5.75	178.3

注:样品测试由贵州省地矿局中心实验室完成。

灰分 (Ad): 含量为 22.35%~25.73%, 均值为 24.00%, 为中灰煤。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, 尤其是粘土矿物得以富集(李进孝等, 2020), 导致煤中的 REE 含量较高; 与煤中水分呈负相关, 与挥发分、硫分呈正相关, 如图 5 所示。

挥发分 (Vdaf): 含量为 12.24%~12.96%, 均值为 12.5%, 为低挥发分煤。从 C12~C8, 煤层挥发分与水分呈正相关, 与灰分、硫分呈负相关; 从 C8~C5, 煤层挥发分与水分呈负相关, 与灰分、硫分呈正相关, 如图 5 所示。

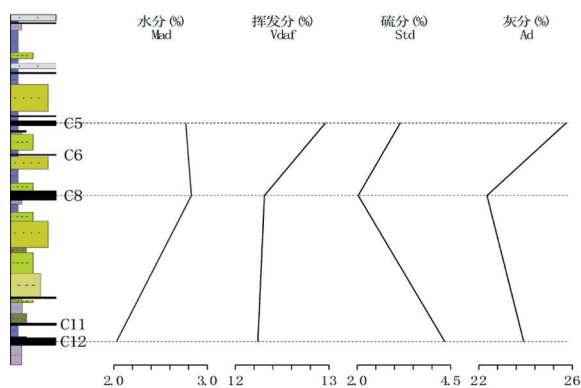


图 5 研究区上二叠统龙潭组煤层水分、灰分、挥发分和硫分垂向变化图

Fig. 5 Vertical change chart of water, ash, volatile and sulfur content in Longtan formation coal seam of upper Permian in the study area

硫分 (St,d): 含量为 2.03%~4.34%, 均值为 3.17%, 属于特高硫煤。硫含量高的原因为煤中次生硫含量较高(汪洋等 2017), 整体为较强环原环境, 泥炭中 H₂S 含量高, 黄铁矿含量高。与煤中水分呈负相关、与挥发分、灰分呈正相关, 如图 5 所示。

碳 (Cd)、氢 (Hd): 固定碳含量为 64.84%~68.42%, 均值为 66.71%, 为中高固定碳煤; 氢含量为 1.77%~1.89%, 均值为 1.84%。

高位发热量 (Qgr,d): 25.19~26.62 MJ/kg, 均值 26.13 MJ/kg, 为中高发热量煤。

磷、砷、氟、氯: 磷 (P) 含量为 0.001%~0.044%, 均值为 0.016%, 属于低磷分煤; 砷 (As) 含量为 1.75×10^{-4} ~ 17.20×10^{-4} , 均值为 5.89×10^{-4} , 属于二级含砷煤; 氟 (F) 含量为 63×10^{-6} ~ 484×10^{-6} , 均值为 165.58×10^{-6} , 属于中氟煤煤; 氯 (Cl) 含量为 0.01%~0.06%, 均值为 0.03% (远低于世界煤中氯的平均值 0.1%), 属于特低氯煤。

综上, 吴家寨地区煤炭资源具有特低全水分、中灰分、低挥发分、特高硫分、中高固定碳、中高发

热量、低磷分、特低氯煤等特征。

7 聚煤环境分析

影响海陆交互相聚煤盆地层序的主控因素为沉积物供应、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, 其直接影响煤的分布范围和平面展布及厚度(徐彬彬等, 2003; 姜科庆等, 2010; 邵龙义等, 2013)。笔者认为影响聚煤作用的主导因素可归集于两个方面: 即物理环境和化学环境。

7.1 物理环境

7.1.1 构造条件

构造运动是影响聚煤盆地的主导因素。中二叠世末的东吴运动使华南板块大部分地区抬升成陆, 经历了较长时期的剥蚀, 至晚二叠世, 发生再次基底沉降, 海水侵入形成了扬子板块聚煤盆地(王小川 1996), 研究区位于扬子板块西南缘。该地区地壳均衡沉降, 沉降速度与植物堆积速度大体相当, 为聚煤盆地的补偿性沉积提供条件。地壳的沉降区域、强度、时代和速率, 最终确定聚煤盆地形成的范围、岩系厚度、沉积补偿及沉积相的组成和分布(姜世阳, 2016)。聚煤物堆积和保存的前提是地壳的慢速下降, 聚煤条件好的特别是大型盆地一搬发育在构造稳定区。

7.1.2 古地理环境

古地理环境是控制煤系地层形成的直接因素。吴家寨地区龙潭组含煤地层主要由障壁海岸相(潮坪相、润湖相)、三角洲相(前三角洲、三角洲前缘、三角洲平原)、沼泽相(泥炭沼泽)形成(汪洋等, 2017), 良好的沉积环境为植物生长和泥炭的形成提供了聚集地。泥炭沼泽常发育在剥蚀区到沉积区的过渡地带, 既受剥蚀区的各种影响, 又受沉积区的影响。煤炭形成的古地理环境是一个灵敏的动态环境, 在各种因素的共同作用下, 发生聚集作用(姜世阳, 2016)。

7.1.3 古气候条件

古气候是煤形成的前提和决定因素。温暖潮湿的气候, 不但为植物生长和繁殖提供有利的生长环境, 而且决定了植物生长的种类、分布范围及适应能力, 为聚煤物的堆积提供充分的物质条件。研究表明, 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(田和明等,2014)。温暖潮湿地带为聚煤提供了场所,而湿度起到主要作用。

7.1.4 物源条件

植物是煤形成的物质基础。植物出现后,陆生植物不断进化,由滨海生向陆地生转移,由低等植物进化成高等植物。为适应环境变化,在漫长的进化过程中形成了多种植物群落,并出现了植物地理分区(姜世阳,2016),植物一代又一代持续、繁茂地生长繁殖,死亡后形成植物遗体长期持续堆积,使煤形成的物质基础更为充足。

总之,在特定条件下,古构造、古地理、古气候和古植物等因素都可能成为聚煤作用的决定因素。通常情况下,古气候、古植物条件提供了聚煤作用的物质基础,而古地理和古构造则是聚煤盆地形成、演化的主要控制因素(姜世阳,2016)。

7.2 化学环境与聚煤关系

7.2.1 煤中灰分

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递增的特点,是作为环境指相辅助因素之一(程伟等,2013)。较多学者采用灰成分指数 $(Fe_2O_3 + CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ 、 $SiO_2 + Al_2O_3$ 等作为聚煤环境判别参数(代世峰等,2006;任德贻等,2006),

郝吉生等和傅从等则尝试采用“灰成分端元分析法”建立灰成分与聚煤环境之间的联系(郝吉生等,2000)。其中,腐殖煤中的灰成分指数 $(Fe_2O_3 + CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ (以下称“灰成分指数”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煤层灰成分指数可知,研究区煤层灰成分指数平均0.28,整体属较强还原型。C5煤层灰成分指数0.25,属较强还原型,C8煤层灰成分指数0.17,属较弱还原型,C12煤层灰成分指数0.41,属较强还原型。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,如图6a所示。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CaO+MgO、 $Fe_2O_3 + SO_3$ 、 $SiO_2 + Al_2O_3$ 三个组分的百分含量作为3个端元作三角端元图解,如图6b所示。由图6b可知, $SiO_2 + Al_2O_3$ 含量最高,为56.67%~68.23%;其次是 $Fe_2O_3 + SO_3$ 含量次高,为17.28%~34.16%;CaO+MgO含量最低,为5.52%~9.47%。结果表明,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)研究区煤样全部靠 $SiO_2 + Al_2O_3$ 端元,如图6b所示。反映以粘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)。据此分析,研究区的聚煤环境为从陆源区水浅、水动力较强而还原性较强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(张文斌等,2020)。

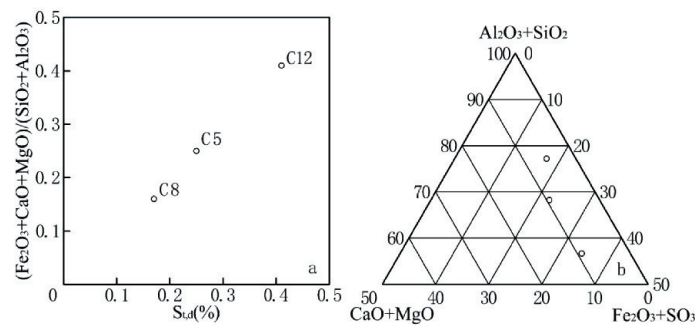


图6 a. 吴家寨地区上二叠统龙潭组煤中硫分与煤灰成分指数之间关系图;b. 煤灰成分三角端元图解

Fig. 6 a Relation between sulfur index and ash index in Longtan formation coal of upper Permian in Wujiazhai area, b Triangle end members of coal ash

7.2.2 煤中微量元素

煤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(崔光来等,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;研究区煤样中Sr/Ba值为

0.09~0.20,均值为0.15,小于0.8,表明为淡水环境。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(陶振鹏等,2017)。区内煤样中硫含量较高的原因,是煤中硫从来源分为原生硫和次生硫,原生硫主要是有机硫,次生硫则主要是指在成煤过程中以硫化物硫为

主要形式进入的硫,其主要受煤层沉积时的水环境控制。研究区煤中的硫主要为次生硫,(汪洋等,2017)。在成煤过程中,煤层底部为粘土岩、泥岩,则煤含硫量高,若为砂岩,砂岩渗透性好,硫易于流动,煤含硫量就低。该区煤层硫含量高的原因,煤层底部为粘土岩、泥岩是一个重要因素。

7.2.3 煤中稀土元素

稀土元素地球化学参数可以从某一侧面反映物源特性和沉积环境的差异。从表2可知:C5煤层 $\Sigma\text{La}/\Sigma\text{Yb}$ 两极值为12.32~15.83,平均值为14.08;C8煤层 $\Sigma\text{La}/\Sigma\text{Yb}$ 两极值为9.68~16.02,平均值为12.85。C12煤层 $\Sigma\text{La}/\Sigma\text{Yb}$ 两极值为14.04~33.86,平均值为23.95。一般而言, $\Sigma\text{La}/\Sigma\text{Yb}$ 值反映了海水影响强度的差异,单从平均值来看,C12号煤层的 $\Sigma\text{La}/\Sigma\text{Yb}$ 值高于C5、C8煤层,其受海水影响强度略大一些。Eu异常是由源岩继承下来的,陆源岩具有Eu负异常,故受陆源控制的煤样有Eu负异常(杨旭等,2019)。从图3稀土元素球粒陨石标准化分布模式图看出:研究区各煤层均表现为明显的Eu负异常,反映成煤过程中主要受到陆相的控制。在海水环境中, Ce^{3+} 易转变成 Ce^{4+} ,Ce负异常是海相环境的一个指标;但在边缘海、浅海区、被陆地封闭的海中,Ce浓度基本正常,亏损不严重;在外海、开阔海域,Ce亏损严重(杨旭等,2019)。研究区Ce均未出现明显负异常,说明该区成煤环境受海水影响很小。

8 结论

(1)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,指数0.23~1.23,则属较强还原型。研究区灰成分指数平均0.28,属较强还原型;灰成分中CaO+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中, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量最高,说明粘土矿物为代表的陆源矿物类型多与淡水介质注入有关。研究区的聚煤环境为从陆源区水浅、水动力较强、还原性较强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。

(2)微量元素的分布特征、富集程度与其形成环境也密切相关。咸水环境中Sr/Ba值大于0.8,研究区均值为0.15,小于0.8,表明为淡水环境。煤层底部为粘土岩、泥岩是造成该区域煤层硫含

量高的一个重要原因。研究区煤层硫含量主要来源于次生硫。

(3)稀土元素地球化学参数Eu负异常,故研究区煤样受陆源控制。在海水环境中,Ce负异常是海相环境的一个指标。研究区Ce均未出现明显负异常,说明该区成煤环境受海水影响很小。

(4)在特定条件下,古构造、古地理、古气候和古植物等环境因素都可能成为聚煤作用的决定因素。

[参考文献]

- 程伟,杨瑞东,崔玉朝,等.2013.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,87(11):1763-1777.
- 崔光来,全书进,吴朝东.2004.焉耆盆地休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),40(4):594-600.
- 代世峰,任德怡,唐跃刚.2005.煤中常屈元素的赋存特征与研究意义[J].煤田地质与勘探,33(2):1-5.
- 郭江峰,姚多喜,陈健,等.2016.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,23(3):51-58.
- 贵州省地矿局102地质大队.2015.贵州省仁怀市吴家寨背斜煤炭整装勘查报告[R].
- 郝吉生,葛宝勋,谢洪波.2000.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,18(3):460-464.
- 姜科庆,田继军,汪立今,等.2010.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,24(6):1204-1212.
- 姜世阳.2016.成煤环境与聚煤规律分析[J].地理研究,(18):054.
- 李宝庆.2015.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.
- 李进孝,张珂,王珍珍,等.2020.五家沟矿区5号煤中伴生元素地球化学特征[J].西北地质,53(2):163-171.
- 李隆富,刘志臣,汪洋,等.2015.二叠系上统龙潭组含煤岩系特征及对比探讨[J].矿业工程研究,30(4):27-33.
- 刘志臣,汪洋,李隆富,等.2018.贵州仁怀吴家寨地区晚二叠世龙潭组层序地层与聚煤作用分析[J].中国煤炭,(3):39-45.
- 任德怡,赵峰华,代世峰,等.2006.煤的微屈元素地球化学[M].北京科学出版社.
- 邵龙义,高彩霞,张超,等.2013.西南地区晚二叠世层序-古地理及聚煤特征[J].沉积学报,31(5):856-866.
- 陶振鹏,杨瑞东,程伟,等.2017.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,45(4):44-51.
- 田和明,代世峰,李大华,等.2014.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,60(1):169-177.
- 王小川.1996.黔西南滇东晚二叠世含煤地层沉积环境与聚煤规律[M].重庆大学出版社,362.
- 汪洋,刘志臣,李隆富,等.2017.黔北煤田二叠系煤层含硫特征与沉积环境研究[J].煤炭科学技术,(2):185-190.
- 徐彬彬,何明德.2003.贵州煤田地质[M].江苏中国矿业大学出

- 出版社.
- 叶春,刘志臣,李隆富. 2017. 贵州省仁怀市吴家寨地区晚二叠纪煤系地层稀土地球化学特征浅析[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 12(3):102-105.
- 杨旭,刘志臣,李隆富,等. 2019. 贵州遵义吴家寨背斜晚二叠世煤层稀土元素地球化学特征[J]. 煤炭技术, (10):52-54.
- 张文斌,何碧. 2020. 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[J]. 西北地质, 53(4):51-65.
- 赵师庆,王飞宇,董名山. 1994. 论“沉煤环境-成煤类型-煤质特征”概略成因模型[J]. 沉积学报, 12(1):32-39.
- 赵维龙,邱小龙,王军. 2020. 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, 39(7):49-53.
- 庄新国,龚家强,王占岐,等. 2001. 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, 20(3):53-58.
- HUNTJW, SMITHJW. 1985. S/S ratios of low-sulfur Permian Australian coals in relation to depositional environment[J]. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.), 58:137-144.
- STEVENJS, BRIANWS. 2003. 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, 54:223-251.

Geochemical Characteristics and Coal Accumulating Environment Analysis of Late Permian Coal Seams in Wujiazhai Area, North Guizhou Coalfield

YANG Xu, LIU Zhi-chen, QIN Xian-jin, XIAO Lin, CHEN Lei, LI Long-fu, WANG Yang

(102 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and
Development, Zunyi 563003, Guizhou, China)

[**Abstract**] In order to discuss the relation between geochemical characteristics of coal seams and coal forming environment, based on the analytical data of geochemical characteristics of coal samples from Longtan formation of upper Permian in Wujiazhai area of North Guizhou coalfield, the overall coal quality characteristics of late Permian coal in this area were evaluated, and the relation between coal ash composition index, trace elements and rare earth elements and coal forming environment was mainly discussed. The results show that the ash composition index $(Fe_2O_3 + CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$ and $SiO_2 + Al_2O_3$ in the study area are 0.28 on average, which belong to strong reduction type; The content of $SiO_2 + Al_2O_3$ is the highest in $CaO + MgO$, $Fe_2O_3 + SO_3$ and $SiO_2 + Al_2O_3$, which indicates that the terrigenous minerals represented by clay minerals are mostly related to fresh water injection. The three terminal element analysis of ash yield, ash composition index and ash composition reveals that the Coal Accumulating Environment in the study area changes from the environment with shallow water, strong hydrodynamic force and strong reducibility in the terrigenous source area to the environment with deep water, weak hydrodynamic force and strong reducibility far away from the terrigenous source area. The average value of trace element Sr / BA in the study area is 0.15, indicating that it is a freshwater environment. The geochemical parameters of rare earth elements in the study area are EU negative anomaly and CE negative anomaly. Therefore, the study area is mainly continental coal accumulation environment, and the coal forming environment is little affected by sea water. Comprehensive analysis shows that the Late Permian coal accumulation environment in wujiazhai area is mainly related to paleoclimate, sedimentary environment and other factors.

[**Key Words**] Coal seam; Longtan formation of Permian; Geochemistry; Coal accumulation environment; Wujiazhai area