

四川省同德石墨矿床地球化学特征及 Re-Os 同位素定年

陈超^{1,2}, 孔德才^{1,2}, 田小林^{1,2}, 刘治成³, 郭宇衡³, 吴得强^{1,2},
文真蓁¹, 龙波^{1,2}, 郑毅¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局一〇六地质队, 四川 成都 611130; 2. 四川省战略
矿产资源勘查利用研究院, 四川 成都 611130; 3. 四川省国土科学技术研究院,
四川 成都 610045)

摘要:攀枝花同德石墨矿床位于扬子板块西缘增生带, 本文对矿区矿石和赋矿围岩进行全岩地球化学分析、对矿石进行碳同位素测定、Re-Os 同位素测年、对矿石及其赋矿岩石进行了原岩恢复并探讨了成矿环境。研究表明, 矿石 SiO_2 为 55.65%~61.68%, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 4.59~5.42, Ni/Co 比值 6.23~12.88, 富集 Ba、Rb、Sr 等大离子亲石元素和 Nb、Zr、Hf、Th、U 等高场强元素。矿石的稀土元素总量 ΣREE 为 149.13×10^{-6} ~ 195.37×10^{-6} , 具有弱的 Ce 负异常和 Eu 负异常, 代表了缺氧的海相沉积环境。矿石中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 -25.0‰~-23.5‰, 位于生物成因的有机碳范围内, 表明其成矿碳质主要来源于有机物。石墨的 Re-Os 同位素年龄为 $983 \pm 72 \text{ Ma}$ (MSWD=1.7), 时代归属为新元古代早期, 早于同德周边岩浆岩侵入时代。Re 的含量介于 27.66×10^{-9} ~ 79.81×10^{-9} , 普通 Os 和 ^{187}Os 的含量分别为 0.52×10^{-9} ~ 2.16×10^{-9} 、 0.28×10^{-9} ~ 0.83×10^{-9} , 相对于 Re、Os 在地壳中的丰度显著富集。 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值为 122.9~350.5, Os 同位素初始比值 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=0.31 \pm 0.21$ 。结合野外地质调查对同德地区矿石和赋矿云母石英片岩进行原岩恢复, 得出其原岩为沉积岩。

关键词: 石墨; Re-Os 同位素体系; 地球化学特征; 碳同位素; 扬子西缘

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.011

中图分类号: TD11 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 01-0088-11

石墨材料对于军工、科技、化工、新能源、高端装备制造等领域的重要性毋庸置疑^[1], 被公认为 21 世纪支撑高新技术发展的重要资源。我国和世界上许多国家均已把“石墨”作为关键性矿产, 其矿产勘查和成矿理论研究的重要性不言而喻。中国是石墨资源大国, 已探明的天然石墨储量约为 5500 万 t, 占全球的 42%, 而四川独占其 7.71%^[2]。同德石墨矿地处我国六个石墨资源基地之一的四川省攀枝花市, 探获推断资源矿石量超过 6000 万 t, 矿石产于康定岩群冷竹关组变质地层中, 为区域变质型石墨矿床。该矿床发现较早, 但前期因开采技术条件及地质勘查投入等未引起足够重视, 前人仅对其地质特征、物探异常等进行过简要描述^[3-4], 认为其是沉积变质型矿床, 对矿床的岩石

地球化学特征和年代学等方面的研究资料相对匮乏。随着近年来对该矿床地质勘查基金的投入, 笔者在大量野外地质调查、成矿地质特征和成矿条件综合分析的基础上, 以该矿床矿石和赋矿白云石英片岩为研究对象, 对同德石墨矿床的全岩地球化学、碳同位素及 Re-Os 同位素年代学开展研究, 进一步探讨矿床成因, 以期对攀枝花地区乃至全国范围内同类型石墨矿床成矿作用研究提供新的证据和思路。

1 区域地质背景

同德石墨矿区出露的区域地层主要为古元古界康定岩群冷竹关组、中元古界盐边群、新元古界震旦系、古生界寒武系、泥盆系、二叠系地

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 四川省政府性投资地质勘查项目“四川省攀枝花市仁和区同德石墨矿普查”DZ202104; 四川省自然资源科研项目“四川省晶质石墨成矿条件及分布规律研究”kj-2021-10

作者简介: 陈超 (1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事矿产勘查及成矿作用研究工作。

通信作者: 孔德才 (1986-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作。

层。大地构造位置位于扬子克拉通上扬子陆块康定-攀枝花基底杂岩带上叠攀西裂谷雅砻江基底杂岩带^[5]，地处扬子板块西缘，西以青藏高原为界，北以秦岭-大别造山带为界（图1）。区域岩浆岩主要包括同德闪长岩体及高家村镁铁质-超镁铁质岩体，二者均为新元古代岩浆活动的产物^[6]，北部临近区域还发育关刀山闪长岩体^[7]。

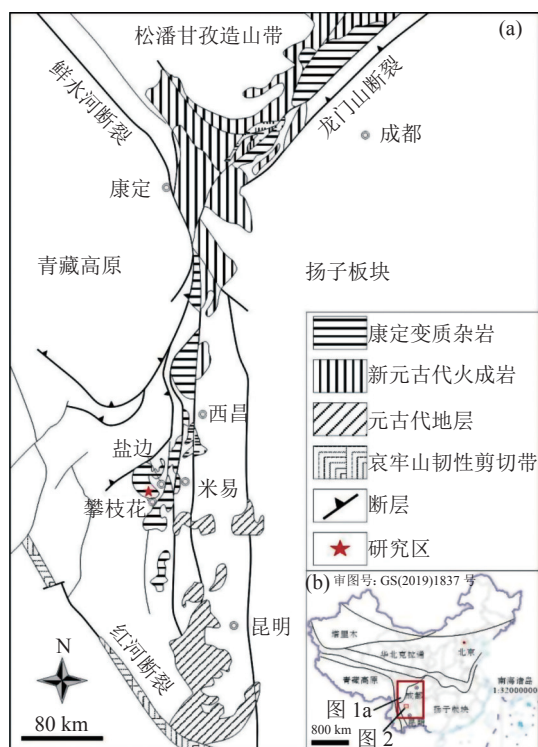


图1 (a) 扬子地块西缘康滇地区地质示意图；(b) 中国大陆主要构造单元示意图^[8]

Fig.1 (a) Geological sketch map of the Kang-Dian region, western margin of the Yangtze Block and (b) Sketch map of the main tectonic units of China's mainland^[8]

2 矿床地质

矿区出露的地层主要包括：康定岩群冷竹关组、震旦系列古六组、观音崖组、灯影组（图2）。其中，康定岩群冷竹关组云母片岩为同德石墨矿的主要赋矿地层。冷竹关组上段为赋矿地层，为一套由斜长白云母石英片岩、斜长黑云母石英片岩等组成的中-深变质岩。区内构造主要为近南北及近东西向的断层构造。根据野外地质观察，大型构造对成矿无明显控制作用。岩浆岩主要为石英闪长岩，岩石呈灰白色，具细-中粒半自形粒状结构，似片麻状及块状构造。

根据矿体分布范围，划分3个矿段，分别为管家箐矿段、芭蕉箐矿段、大麦地矿段，主要矿

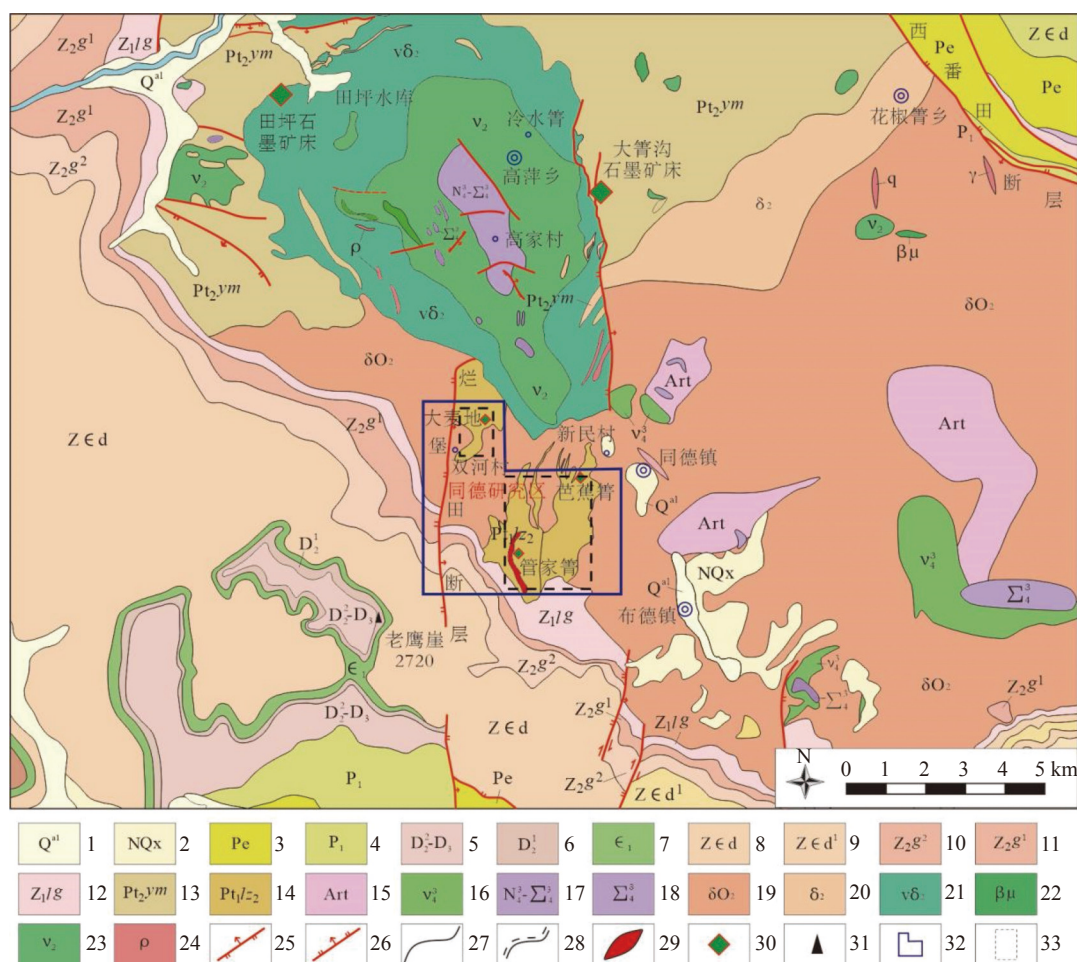
体分布在管家箐及芭蕉箐矿段，即I、II、III、VIII矿体（图3a）。矿体主要呈层状、似层状赋存于冷竹关组，大致沿北西~南东向分布，沿走向扭曲，倾向60~130°，倾角平均68°，控制长度1740 m，最大倾深330 m，平均厚度11.49 m，固定碳平均品位7.32%（图3b）。含矿母岩为斜长白云母石英片岩，顶底板岩性均为云母石英片岩。矿石类型主要为白云石英片岩型，其次二云石英片岩型。矿石一般呈深黑色，以鳞片粒状变晶结构、片状构造为主。矿石中的石墨、白云母、黑云母多呈鳞片状，大部分定向排列分布，含量30%~35%；石英变晶呈它形粒状，含量50%~55%。手标本上石墨呈灰黑色，新鲜面为钢灰色，金属光泽，污手，多数矿物呈片状半定向-定向排列，整体顺片理方向排列，镜下片状矿物白云母、黑云母、石墨沿一定方向断续定向排列，粒状矿物石英与之不太均匀相间分布，构成片状构造。矿石矿物主要为石墨，脉石矿物主要为石英、白云母、黑云母、斜长石及黄铁矿、针铁矿等（图4c、d）。

3 样品及分析测试方法

全岩地球化学分析测试样品采自矿区中部硝洞湾和芭蕉箐矿段，岩性为云母石英片岩型石墨矿石和围岩白云石英片岩，Re-Os定年和碳同位素分析样品均采自硝洞湾矿段的云母石英片岩型石墨矿石。

主量、微量及稀土元素分析测试在四川省地质矿产勘查开发局西昌地矿检测中心完成，岩石主量元素数据通过X-射线荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法、电感耦合等离子发射光谱法、分光光度法、容量法和重量法测定；微量元素和稀土元素采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定，应用Geokit软件进行数据处理^[10]。

Re-Os分析测试由南京聚谱检测科技有限公司完成，将矿石样品碎至0.25~0.38 mm，然后在双目显微镜下将杂质剔除，使纯度达到99%以上，最后将纯净的石墨矿碎至0.074 mm。Re-Os同位素测试用ELAN DRC-e ICP-MS完成。实验方法参照Qi等^[11]，分析步骤大致如下：称取0.1 g样品于卡洛斯管中，加入¹⁸⁵Re和¹⁹⁰Os稀释剂，用逆王水在200℃下分解12 h，开管后在水浴中用原位蒸馏法蒸馏Os，Os用3 mL水吸收；将蒸馏后的溶液在烧杯中蒸干，转化为2 mol/L的HCl介质，



1. 冲洪积; 2. 昔格达组; 3. 峨眉山玄武岩; 4. 二叠系下统; 5. 泥盆系中上统; 6. 泥盆系中统; 7. 寒武系下统; 8. 震旦系上统灯影组; 9. 灯影组一段; 10. 观音崖组二段; 11. 观音崖组一段; 12. 列古六组; 13. 盐边群渔门组; 14. 康定岩群冷竹关组上段; 15. 太古界天宝寨组; 16. 辉长岩; 17. 基性-超基性岩; 18. 超基性岩; 19. 石英闪长岩; 20. 闪长岩; 21. 辉长闪长岩; 22. 辉绿岩; 23. 辉长岩; 24. 花岗岩脉; 25. 逆断层; 26. 正断层; 27. 地质界线; 28. 平行不整合界线; 29. 石墨矿体; 30. 石墨矿床; 31. 山峰; 32. 研究区范围; 33. 矿段范围

图2 攀枝花同德区域地质简图^[9]

Fig.2 Regional geological map of Panzhihua Tongde^[9]

用阴离子交换树脂 AG1-X8 分析 Re 最后定容至 3 mL, 用 ICP-MS 测定, 相对标准偏差 (SD%) 小于 3%。

碳同位素分析测试由中国冶金地质总局山东局测试中心完成, 测试方法及流程为: 将样品研磨至 0.074 mm, 105℃ 烘烤样品去除吸附水。样品管在 70℃ 的制样设备中烘烤 30 min 之后将样品放入样品管中并封盖, 用高纯氦气将样品管中的空气排出。用酸泵酸针向样品管中加过量的 100% 磷酸, 磷酸与碳酸盐样品反应 8 h 以上, 反应产生 CO₂ 气体。用高纯氦气将生成的 CO₂ 气体带入 MAT253 质谱仪测试 C 同位素组成。用参考气对其比对测试, 测量结果记为 δ¹³C_{V-PDB} (精度优于 0.1‰)。先用参考气对样品及参考物质进行初步定值, 最后采用 GBW 04416、GBW 04417 两

个标准进行双标准校正, 并给出样品的校正值。

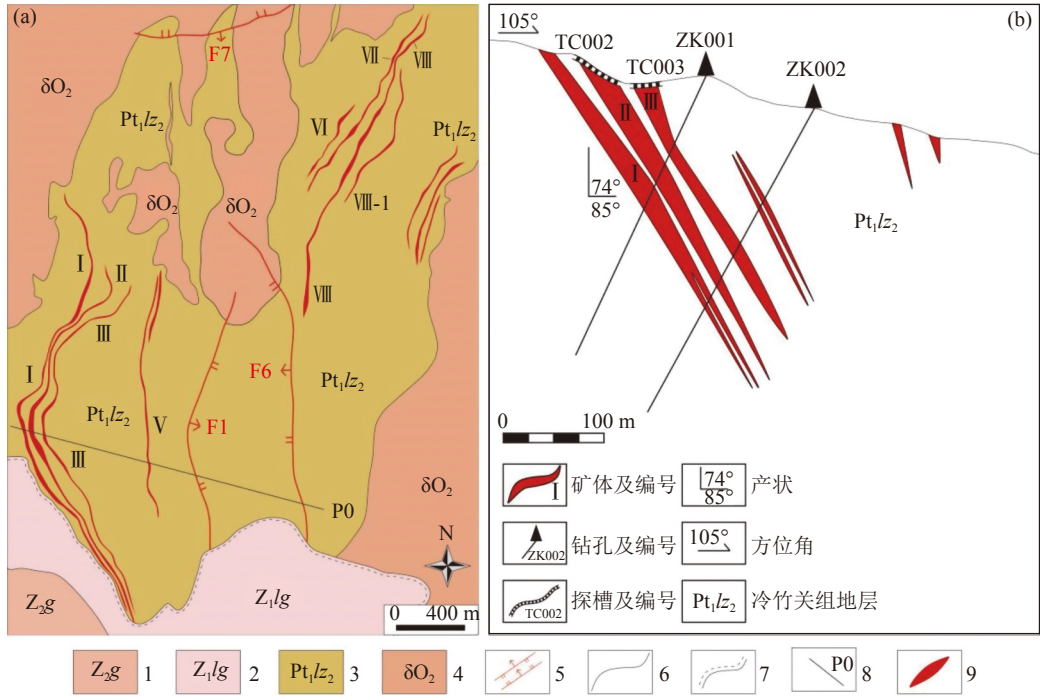
4 分析结果

4.1 主微量和稀土元素

同德石墨矿石、白云石英片岩的主量、微量元素分析结果见表 1。

4.1.1 主量元素

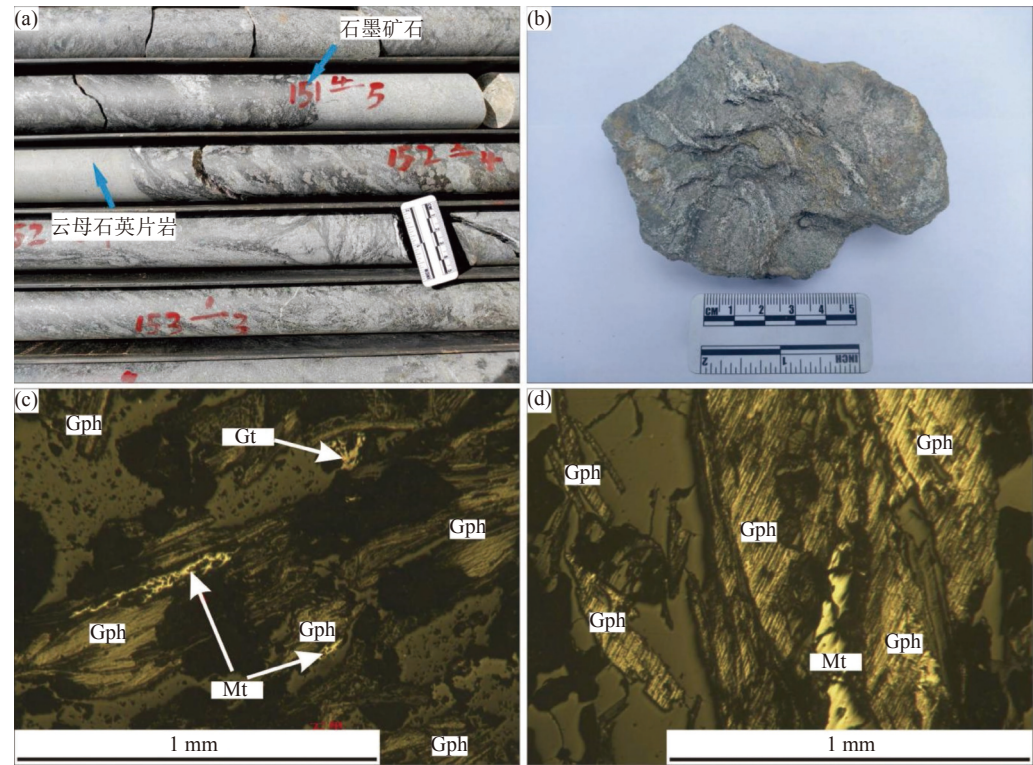
石墨矿石和白云石英片岩的 SiO₂ 含量分别为 55.65%~61.68% 和 56.10~63.45%, 平均值分别为 7.74% 和 59.70%; Al₂O₃ 含量分别为 10.72%~14.17% 和 11.93%~15.40%, 平均值分别为 11.93% 和 4.95%, 低于上地壳平均值 15.2%; SiO₂/Al₂O₃ 比值分别为 4.59~5.42 和 3.67~4.48, 平均值分别为 4.86 和 4.01, 与杂砂岩、砂质黏土岩类似^[12];



1. 观音崖组; 2. 列古六组; 3. 康定岩群冷竹关组上段; 4. 石英闪长岩; 5. 断层; 6. 地质界线; 7. 不整合界线; 8. 勘探线; 9. 石墨矿体

图3 (a) 同德石墨矿区管家箐-芭蕉箐矿段 (b) P0 勘探线剖面

Fig.3 (a) Guanjiaying-Bajiaoqing ore block (b) P0 exploration line of Tongde graphite mining area



a. 深部工程钻探岩心; b. 片状构造矿石; c. 白云母石英片岩型石墨矿中石墨断续沿一定方向不均匀呈带状定向分布, 磁铁矿与针铁矿呈他形粒状; d. 白云石英片岩型石墨矿中石墨呈板状, 沿一定方向均匀定向分布, 磁铁矿呈他形-半自形板状、粒状, 与石墨沿同一方向零星定向分布; 石墨-Gph; 磁铁矿-Mt; 针铁矿-Gt

图4 矿石的结构、构造及镜下石墨赋存形态

Fig.4 Structure and structure of ore and occurrence form of graphite under microscope

Fe₂O₃ 分别为 2.71%~3.97% 和 1.12%~2.09%，平均值分别为 3.48% 和 1.63%，低于上地壳平均值 4.5%；FeO 分别为 1.80%~2.68% 和 3.94%~5.87%，平均值分别为 2.29% 和 4.97%；K₂O 分别为 1.57%~2.29% 和 1.32%~1.87%，平均值分别为 1.95% 和 1.67%，低于上地壳平均值 3.4%；Na₂O 分别为 0.45%~1.28% 和 1.65%~2.39%，平均值分别为 0.69% 和 2.07%，低于上地壳平均值 3.9%；K₂O/

Na₂O 比值分别为 1.73~4.24 和 0.77~0.87，平均值为 3.19 和 0.81，石墨矿石表现为富 K 贫 Na 的特点。CaO 分别为 2.69%~6.98% 和 4.04%~7.83%，平均值分别为 4.62% 和 5.44%；MgO 分别为 0.64%~2.54% 和 2.98%~4.22%，平均值分别为 1.64% 和 3.57%；CaO/MgO 比值分别为 1.06~6.92 和 1.05~2.63，平均值分别为 3.58 和 1.61。

表 1 主量(%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Whole-rock major elements(%), trace elements and REE data($\times 10^{-6}$) from graphite ore in Tongde Graphite Deposit

测试项目	石墨矿			云母石英片岩				
	TD-7	TD-8	TD-9	TD-10	TD-11	TD-15	TD-16	TD-17
SiO ₂	61.68	55.65	55.83	57.42	58.13	59.55	63.45	56.10
Al ₂ O ₃	13.33	11.36	12.16	12.07	10.72	15.40	14.17	15.28
Fe ₂ O ₃	3.61	2.71	3.58	3.97	3.55	2.09	1.12	1.69
FeO	2.51	2.68	2.05	2.43	1.80	3.94	5.11	5.87
CaO	2.69	6.98	3.57	5.45	4.43	7.83	4.04	4.45
MgO	2.54	2.48	1.19	1.33	0.64	2.98	3.52	4.22
K ₂ O	2.22	1.57	1.78	2.29	1.91	1.32	1.83	1.87
Na ₂ O	1.28	0.51	0.64	0.56	0.45	1.65	2.39	2.16
TiO ₂	0.37	0.43	0.21	0.30	0.23	0.68	0.63	0.97
P ₂ O ₅	0.45	0.33	1.24	0.47	1.14	0.25	0.15	0.24
MnO	0.14	0.35	0.11	0.13	0.35	0.19	0.22	0.15
V ₂ O ₅	0.06	0.05	0.10	0.07	0.23	0.02	0.02	0.03
Mn	0.11	0.27	0.08	0.10	0.27	0.15	0.17	0.12
烧失量	8.48	13.30	13.70	12.26	13.66	2.90	3.00	3.30
合计	99.47	98.67	96.24	98.85	97.51	98.96	99.82	96.46
固定碳	3.73	3.32	8.78	5.61	8.54	0.53	0.17	0.33
A/CNK	1.58	0.78	1.82	0.98	1.28	0.86	1.09	1.16
A/NK	2.96	4.48	4.08	3.55	3.82	3.72	2.40	2.74
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.63	4.90	4.59	4.76	5.42	3.87	4.48	3.67
N ₂ O+K ₂ O	3.50	2.08	2.42	2.85	2.36	2.97	4.22	4.03
K ₂ O/N ₂ O	1.73	3.08	2.78	4.09	4.24	0.80	0.77	0.87
CaO/MgO	1.06	2.81	3.00	4.10	6.92	2.63	1.15	1.05
Rb	72.5	60.2	61.4	78.9	66.5	53.4	68.6	71.7
Ba	1200	1000	1700	1300	2400	630	740	670
Th	9.72	11.39	14.99	8.68	9.79	6.45	8.79	6.99
U	3.37	2.78	3.87	4.79	6.64	1.61	1.25	1.72
Nb	7.86	9.79	7.06	6.68	6.50	7.59	8.80	10.8
Ta	0.750	0.820	0.610	0.550	0.510	0.560	0.710	0.780
Sr	240	270	350	150	370	630	370	380
Zr	270	321	279	255	280	221	244	259
Hf	4.47	4.71	4.38	4.26	4.52	4.28	4.24	3.77
Cr	154	136	147	125	187	118	124	130
Co	32.2	29.7	31.2	28.9	41.6	24.3	22	27.2
Ni	235	185	342	182	536	33.3	55.4	57.9
Ni/Co	7.30	6.23	10.96	6.30	12.88	1.37	2.52	2.13
Rb/Sr	0.300	0.220	0.180	0.530	0.180	0.080	0.190	0.190
Sr/Ba	0.200	0.270	0.210	0.120	0.150	1.000	0.500	0.570
U/Th	0.350	0.240	0.260	0.550	0.680	0.250	0.140	0.250
La	31.9	35.0	48.4	34.5	45.0	26.5	23.3	28.1
Ce	52.3	58.1	75.8	55.8	60.9	44.0	35.4	49.9
Pr	7.35	7.77	10.72	7.81	9.57	6.13	5.19	6.64
Nd	30.9	32.7	45	32.4	40.1	25.8	22.1	28.8

测试项目	石墨矿				云母石英片岩			
	TD-7	TD-8	TD-9	TD-10	TD-11	TD-15	TD-16	TD-17
Sm	6.24	6.71	9.14	6.54	7.99	5.3	4.64	6.11
Eu	1.34	1.47	2.27	1.46	1.89	1.68	1.26	1.68
Gd	5.62	6.48	8.36	5.93	7.95	4.81	4.42	5.54
Tb	0.88	1.06	1.26	0.96	1.26	0.78	0.74	0.88
Dy	5.10	6.40	7.06	5.62	7.90	4.72	4.55	5.16
Ho	1.05	1.38	1.41	1.18	1.74	0.99	1.01	1.08
Er	2.80	3.80	3.56	3.12	4.80	2.70	2.81	2.91
Tm	0.460	0.620	0.550	0.500	0.770	0.440	0.490	0.480
Yb	2.78	3.96	3.37	3.17	4.78	2.9	3.29	3.01
Lu	0.410	0.590	0.510	0.470	0.720	0.440	0.530	0.470
Y	36.7	49.4	52.9	41.2	73.9	31.9	32.4	33.7
ΣREE	149.13	166.04	217.41	159.46	195.37	127.19	109.73	140.76
LREE	130.0	141.8	191.3	138.5	165.5	109.4	91.9	121.2
HREE	19.1	24.29	26.08	20.95	29.92	17.78	17.84	19.53
LREE/HREE	6.81	5.84	7.34	6.61	5.53	6.15	5.15	6.21
(La/Yb) _N	8.23	6.34	10.3	7.81	6.75	6.55	5.08	6.70
δEu	0.690	0.680	0.790	0.720	0.720	1.020	0.850	0.880
δCe	0.840	0.860	0.820	0.830	0.720	0.850	0.790	0.900

4.1.2 微量与稀土元素

石墨矿石大离子亲石元素 K 亏损, Ba、Rb、Sr 较富集, Sr/Ba 比值 0.12~0.27, 平均值 0.19, 白云石英片岩 Rb 含量为 53.4×10^{-6} ~ 71.7×10^{-6} , 平均值为 64.57×10^{-6} , Sr/Ba 比值 0.50~1.0, 平均值 0.69, 二者较低的 Sr/Ba 比值反映了原岩物质来源具有陆源碎屑沉积特征, 即以陆源物质为主^[13]。石墨矿石 Rb/Sr 比值 0.18~0.53, 平均值为 0.28, Rb/Sr 比值明显大于 Sr/Ba 比值, 显示近海陆源碎屑物的特征^[14], 而白云石英片岩 Rb/Sr 比值 0.08~0.19, 平均值为 0.15。矿石和白云石英片岩的 Co 含量分别为 28.90×10^{-6} ~ 41.60×10^{-6} 和 22.0×10^{-6} ~ 27.2×10^{-6} , 平均值分别为 32.72×10^{-6} 和 24.5×10^{-6} , Ni 含量分别为 182.0×10^{-6} ~ 536.0×10^{-6} 和 33.3×10^{-6} ~ 57.9×10^{-6} , 平均值分别为 296.0×10^{-6} 和 48.87×10^{-6} , Ni/Co 比值 6.23~12.88, 平均值为 8.73, Ni/Co 比值大于 7 代表极贫氧-厌氧环境^[15], 研究区矿石的 Ni/Co 平均比值为 8.73, 说明原岩沉积环境为极度贫氧-厌氧环境, 高场强元素除 Ta 外, Nb、Zr、Hf、Th、U 等含量较高且较稳定, 反映出高场强元素受重矿物控制。白云石英片岩 Th 含量为 6.45×10^{-6} ~ 8.79×10^{-6} , 平均值为 7.41×10^{-6} , U 含量为 1.25×10^{-6} ~ 1.72×10^{-6} , 平均值为 1.53×10^{-6} 。原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 5a) 呈右倾趋势, 矿石亏损 K、P、Ti 等元素, K 元素明显亏损, 表明样品可能偏基性, P 的亏损则反映了沉积岩原岩的特征。白云石英片岩 Cr 含量为 118×10^{-6} ~

130×10^{-6} , 平均值为 124×10^{-6} , Hf、Th、U 和 Ta 含量分别为 3.77×10^{-6} ~ 4.28×10^{-6} (平均值 4.10×10^{-6})、 6.45×10^{-6} ~ 8.79×10^{-6} (平均值 7.41×10^{-6})、 $1.25\times$

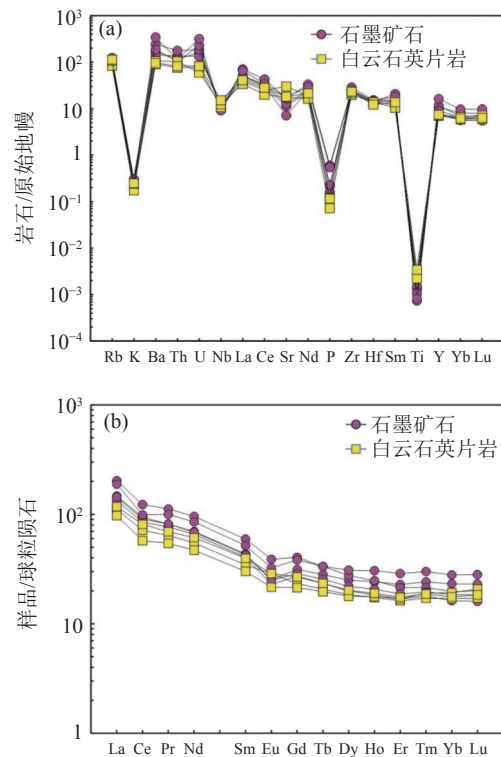


图 5 (a) 同德石墨矿石、白云母石英片岩微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) 稀土元素球粒陨石标准化配分图^[19]

Fig.5 (a) Primitive mantle-normalized trace element patterns (b) Chondrite-normalized REE patterns of graphite ore, muscovite quartz schistin Tongde^[19]

$10^{-6} \sim 1.72 \times 10^{-6}$ (平均值 1.56×10^{-6})、 $0.56 \times 10^{-6} \sim 0.78 \times 10^{-6}$ (平均值 0.68×10^{-6})，由此可以看出高场强元素含量的变化范围较小，表明这些元素的地球化学性质相对比较稳定，受到变质作用影响较小 (图 5a)。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈左高右低 (图 5b)，并且呈现了几乎平行的特征，表明稀土含量的变化大致同步。从表 2 中可以看出，矿石 ΣREE 为 $149.13 \times 10^{-6} \sim 195.37 \times 10^{-6}$ ，平均为 177.48×10^{-6} ，介于泥质岩石和碳酸盐岩之间，与砂岩稀土总量特征相近^[16]，LREE 范围为 $130.03 \times 10^{-6} \sim 191.33 \times 10^{-6}$ ，平均值为 154.41×10^{-6} ，HREE 范围为 $19.10 \times 10^{-6} \sim 29.92 \times 10^{-6}$ ，平均值为 24.07×10^{-6} ，LREE/HREE 比值为 $5.53 \sim 7.34$ ，平均为 6.43， La_N/Yb_N 比值 $6.34 \sim 10.30$ ，平均值为 7.89，表明轻重稀土分异分明显。矿石 δCe 值介于

$0.72 \sim 0.86$ ，平均为 0.81，变化范围不大，呈轻微负异常， δEu 值介于 $0.68 \sim 0.79$ ，平均为 0.72，呈负异常，代表了缺氧的海相的生物或化学沉积环境^[17]。白云石英片岩稀土配分曲线与石墨矿石近似，其 ΣREE 为 $109.73 \times 10^{-6} \sim 140.76 \times 10^{-6}$ ，平均为 125.89×10^{-6} ，LREE 含量 $91.89 \times 10^{-6} \sim 121.23 \times 10^{-6}$ ，平均值为 107.51×10^{-6} ；HREE 含量 $17.78 \times 10^{-6} \sim 19.53 \times 10^{-6}$ ，平均值为 18.38×10^{-6} ；LREE/HREE 比值为 $5.15 \sim 6.21$ ，平均值为 5.84 且 La_N/Yb_N 比值为 $5.08 \sim 6.70$ ，平均值为 6.11，表明 REE 的分异程度较高，轻稀土较重稀土富集 (图 5b)； δEu 变化范围为 $0.85 \sim 1.02$ ，平均值为 0.92，表现为轻微的负 Eu 异常； δCe 变化范围为 $0.79 \sim 0.90$ ，平均值为 0.85，表现为 Ce 负异常，说明原岩可能形成于缺氧的海洋生物或化学沉积物中^[18]。

表 2 同德石墨矿石石墨矿石 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os isotope data of graphite from Tongde graphite deposit

样品编号	样品质量(g)	Re/(ng·g ⁻¹)		普Os/(ng·g ⁻¹)		¹⁸⁷ Re/(ng·g ⁻¹)		¹⁸⁷ Os/(ng·g ⁻¹)		¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		模式年龄/Ma	
		测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ
TD-1	0.5049	79.81	0.36	1.49	0.16	49.96	0.23	0.834	0.014	252.7	7.6	4.372	0.034	993	17
TD-2	0.5256	51.92	0.68	2.16	0.47	32.50	0.43	0.567	0.070	112.9	3.4	2.103	0.015	1038	128
TD-3	0.4979	27.66	0.21	0.59	0.03	17.31	0.13	0.278	0.008	222.5	6.7	3.913	0.057	958	28
TD-4	0.5038	52.60	0.71	1.49	0.13	32.92	0.44	0.599	0.055	166.4	5.0	3.101	0.032	1081	98
TD-5	0.5167	52.80	0.79	1.65	0.18	33.06	0.49	0.588	0.019	150.2	4.5	2.949	0.025	1058	33
TD-6	0.5079	38.85	0.52	0.52	0.03	24.32	0.32	0.410	0.018	350.5	10.5	6.048	0.047	1003	43

4.2 Re-Os 同位素年代学

同德石墨矿床中 6 个石墨矿样品的 Re-Os 同位素分析结果见表 2。样品中 Re 的含量为介于 $27.66 \times 10^{-9} \sim 79.81 \times 10^{-9}$ ，普通 Os 含量为 $0.52 \times 10^{-9} \sim 2.16 \times 10^{-9}$ 、放射性 ¹⁸⁷Os 含量为 $0.28 \times 10^{-9} \sim 0.83 \times 10^{-9}$ ，¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值为 $122.9 \sim 350.5$ 。利用 ISOPLOT 软件^[20]得出石墨矿的 Re-Os 的等时线年龄为 983 ± 72 Ma (MSWD=1.7) (图 6a)，Os 同位素初始比值 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os=0.31±0.21，模式年龄加权平均值为 998 ± 36 Ma (MSWD=1.3) (图 6b)。

4.3 碳同位素

碳同位素结果显示同德石墨矿中固定碳的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -25.0\% \sim -23.5\%$ ，平均值为 -24.55% ，变化范围很小，与南江坪河、大河坝、黑龙江柳毛以及山东南墅石墨矿床等的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 测试值接近 (表 3)。

5 讨 论

5.1 Re-Os 同位素年代学

石墨矿等富有机质的定年一直具有极大的挑

战，前人利用 Re-Os 同位素体系对黑色页岩、炭质泥岩等富有机质沉积岩进行了精准的沉积年龄测定^[26-27]，但针对富含有机质沉积岩变质形成的石墨矿床进行的 Re-Os 相关报道却较少，如加拿大萨斯喀彻温省的 Wollaston Mudjatik 剪切带和坦桑尼亚的 Merelani Hills^[28]。本文测得的 Re-Os 同位素结果，获得了较好的 Re-Os 同位素等时线，石墨矿 Re-Os 等时线年龄为 983 ± 72 Ma (MSWD=1.7) (图 6a)，Os 同位素初始比值 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os=0.31±0.21。6 件 Re-Os 样品的模式年龄介于 $993 \sim 1058$ Ma，加权平均年龄为 998 ± 36 Ma (MSWD=1.3) (图 6b)，二者在误差允许范围内基本一致。

同德石墨矿床位于扬子板块西缘，前人对其基底采用了不同的方法进行测年，但是随着针对下部结晶基底大量定年数据的涌现，发现结晶基底形成时代为新元古代^[29]。刘文中^[30]对该同德地区的麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄测定结果为 844 ± 12 Ma，与代表麻粒岩角闪岩相退变质作用时代的角闪石 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 平均年龄 (827 ± 12) Ma^[31] 接近。同德石墨矿 Os 同位素初始比值为 0.32 ± 0.21 ，明显低于上述富含有机质的地层中 Os 初始比值的理论

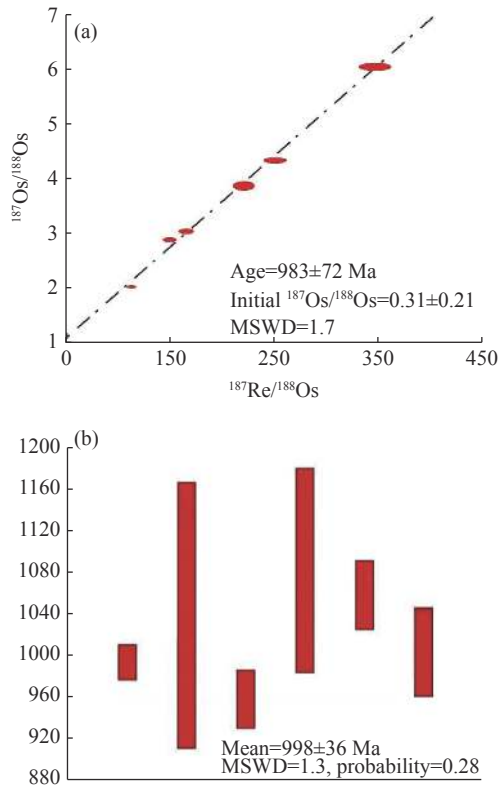


图6 (a) 同德石墨矿石墨样品 Re-Os 等时线年龄
(b) 加权平均年龄

Fig.6 (a) Re-Os isochron age (b) Weighted average of age of Re-Os isotope for graphite of Tongde graphite deposit

值。样品的 Re、Os 含量相对于地壳显著富集^[32], 甚至高于一般黑色岩系样品中的 Re、Os 含量^[33], 说明在石墨形成过程伴有 Re 和 Os 的富集, 如此高的 Re、Os 含量也暗示了石墨矿形成时可能处在较强的还原环境中^[34]。

5.2 物质来源与沉积环境

碳同位素分析一直以来是研究石墨矿物质来源的重要手段, 关于石墨矿碳质究竟是有机碳源还是无机碳源为主一直以来争议不断。黑龙江鸡西柳毛石墨矿、四川中坝石墨矿等碳质均来源于有机物^[21,35], 另一部分学者认为碳酸盐岩变质形成大理岩时会析出大量的 CO_2 , 以及岩浆活动带来的含碳组分, 如 CO_2 、 CH_4 等经氧化还原作用变质结晶同样可以形成石墨^[35]。同德石墨矿石中碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 与国内各地不同时代有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的平均值接近, 落入生物成因的有机碳范围内 (图 7), 显示石墨矿中的碳主要来自有机物。

恢复变质岩的原岩类型对于探讨变质石墨矿床的形成环境及规律具有重要意义。利用高场强元素 Zr、Ti、Ni 化学稳定性较强, 不易受变质、蚀变等过程的影响的特点进行 $w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ -

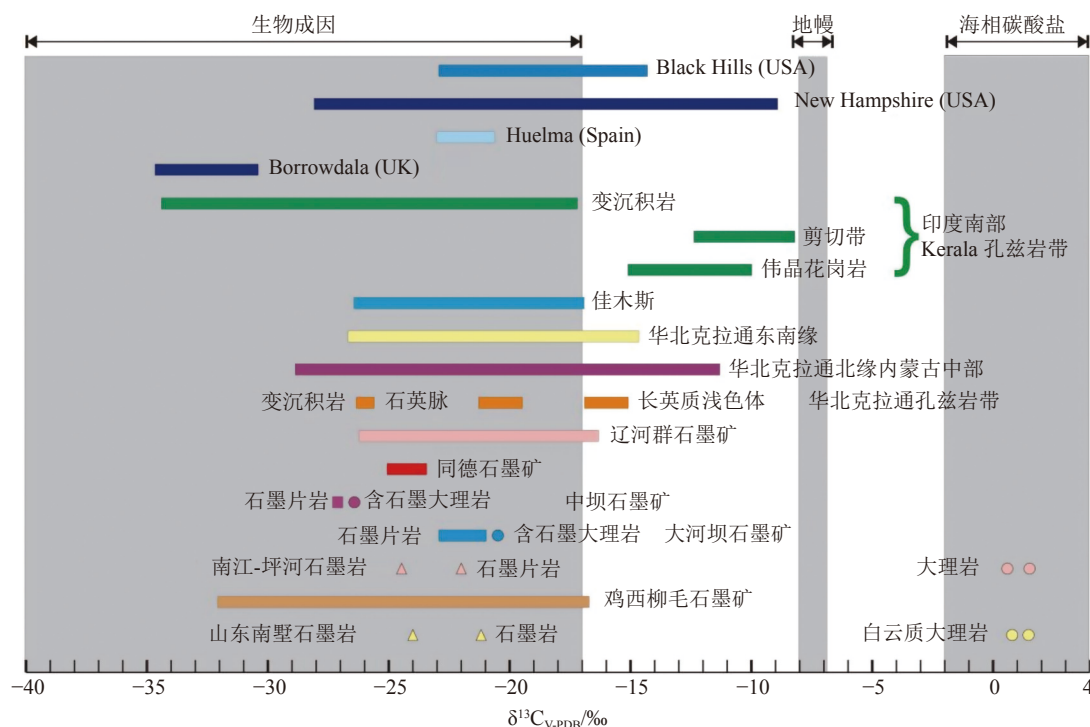
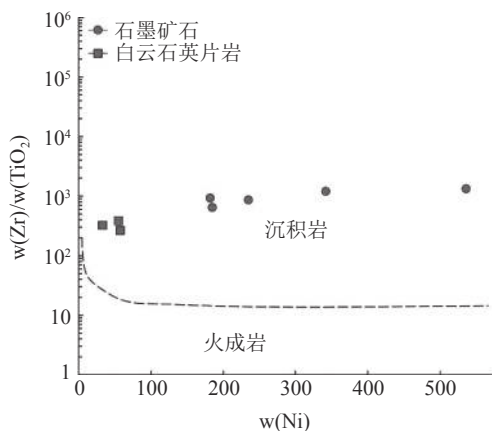
表3 同德石墨矿与同类型矿床碳同位素对比
Table 3 Carbon isotope correlation between Tongde graphite deposit and the same type deposits

矿区	编号	岩矿名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
同德	TDC-3	片岩型石墨	-24.9
	TDC-4		-24.8
	TDC-5		-25.0
	TDC-6		-23.5
中坝 ^[21]	ZB-01	晶质石墨片岩	-27.64
	ZB-05		-28.22
	ZB-06		-28.44
	ZB-07		-28.41
	ZB-08		-28.01
大河坝 ^[22]	1	石墨片岩	-21.4
	2		-19.5
	3		-19.9
	4		-19.5
	5		-19.0
南江坪河 ^[23]	1	石墨矿	-24.5
	2		-22.0
	3		0.60
	4		1.50
鸡西柳毛 ^[24]	1	石墨片岩	-21.4
	2		-19.9
	3		-32.1
	4		-20.7
	5		-21.3
	6		-24.4
	7		-16.8
	8		-18.9
	9		-17.5
山东南墅 ^[25]	1	白云质大理岩	-21.2
	2		-24.0
	3		0.80
	4		1.50

$w(\text{Ni})$ 投图^[37], 同德石墨矿石和白云石英片岩均落入沉积岩区 (图 8), 指示含矿岩石为副变质岩。通过对主微量和稀土元素石墨矿石及白云石英片岩的分析, δCe 变化范围为 0.79~0.90, 平均值为 0.85, 表现为 Ce 负异常, 表明原岩形成于海洋沉积环境, 矿石的 Ni/Co 比值 6.23~12.88, 平均值为 8.73, 指示矿区石墨矿原岩沉积属缺氧还原环境^[38]。矿石 Sr/Ba 比值为 0.12~0.27 (平均 0.2), 远小于 0.6, 指示矿体可能沉积于微咸水相^[39], 因此, 同德石墨矿形成于缺氧条件下的滨浅海环境。

5.3 成矿过程

研究区位于扬子板块西缘, 构造活动强烈, 经历多期次区域性构造运动, 原构成康定岩群的沉积-火山岩类岩石在此期间发生多期次变质变形, 使得岩石发生片理化、糜棱岩化, 矿源层中的含碳物质逐渐富集, 形成了碳质核晶, 伴随着新元古代岩浆活动, 石墨鳞片不断重结晶、富

图 7 同德石墨矿和其他石墨矿石墨碳同位素特征对比^[36]Fig.7 Carbon isotope composition from graphite deposit of Tongde and other regions^[36]图 8 石墨矿石与白云石英片岩 $w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ - $w(\text{Ni})$ ^[37]Fig.8 $w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ - $w(\text{Ni})$ diagram of graphite ore, muscovite quartz schist in Tongde^[37]

集, 形成石墨矿床。根据野外工作及室内综合整理研究, 结合前人资料, 本文提出同德石墨矿床成矿过程主要分为以下 2 个阶段。

1) 沉积成岩: 古元古代时期, 区内地壳升降频繁, 攀西地区为浅海、滨海沉积建造^[40], 在此期间, 同德一带沉积形成了富含碳质、有机质的赋矿地层-康定岩群冷竹关组。

2) 区域变质: 晋宁运动初期, 沉积地层中的碳质在区域变质作用和强烈的构造挤压作用下转化为隐晶质石墨或小鳞片石墨, 形成石墨核晶,

多期次区域变质与动力变质作用叠加, 富含有机质部分逐渐转变形成中-大鳞片石墨矿床。

6 结 论

(1) 同德石墨矿床矿石 ΣREE 为 $149.13 \times 10^{-6} \sim 195.37 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素较富集。富 K 贫 Na, 相对富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素元素, 但 K、P、Ti 等相对亏损, δEu 与 δCe 均小于 1, 显示为负异常, 代表了缺氧的海相生物/化学沉积环境, Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素富集, 反映出矿石的原岩主要来源于陆源碎屑物质。

(2) 石墨矿石 Re-Os 测年结果为 $983 \pm 72 \text{ Ma}$, 早于同德地区新元古代岩浆侵入时代, 时代归属为新元古代早期, 石墨矿石中 Re、Os 含量高相对于地壳丰度显著富集, 较低的 Os 同位素初始比值暗示同德地区侵入岩体可能对同德石墨矿床迁移重结晶产生了一定程度的影响。

(3) 同德石墨矿赋存于康定岩群冷竹关组片岩中, 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -25.0\text{‰} \sim -23.5\text{‰}$, 表明成矿碳质主要来源于有机物, 通过对石墨矿石和白云石英片岩的地球化学分析及原岩恢复, 研究区赋矿岩石原岩主为副变质岩, 形成于缺氧的滨浅海还原环境。

参考文献：

- [1] 高照国, 刘红召, 杨卉芑, 等. 世界石墨资源分布概况及供求变化趋势[J]. *矿产综合利用*, 2018(3):26-29.
- GAO Z G, LIU H Z, YANG H P, et al. General distribution and demand-supply tendency for worldwide graphite resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(3):26-29.
- [2] 李超, 王登红, 赵鸿, 等. 中国石墨矿成矿规律概要[J]. *矿床地质*, 2015(6): 1223-1236.
- LI C, WANG D H, ZHAO H, et al. Minerogenetic regularity of graphite deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(6): 1223-1236.
- [3] 黎广, 马源. 自然电位法在四川攀枝花晶质石墨找矿中的应用[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2019(A1):93-95.
- LI G, MA Y. Application of spontaneous potential method in prospecting for crystalline graphite in Panzhihua, Sichuan[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2019(A1):93-95.
- [4] 冯锋, 王光洪, 彭召强, 等. 四川省攀枝花市仁和区新民石墨矿矿床成因及成矿规律探讨[J]. *四川地质学报*, 2021, 41(2):226-230.
- FENG F, WANG G H, PENG Z Q, et al. Genesis and metallogeny of the Xinmin graphite deposit in Renhe District, Panzhihua, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(2):226-230.
- [5] 罗改, 王全伟, 秦宇龙, 等. 四川省大地构造单元划分及其基本特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2021, 41(4):633-647.
- LUO G, WANG Q W, QIN Y L, et al. Divisions and their basic characteristics of tectonic units in Sichuan Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(4):633-647.
- [6] 刘益. 扬子地块西缘高家村杂岩体岩石成因与成矿潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018: 1-119.
- LIU Y. The petrogenesis and mineralization potential of Gaojiacun complex, in western margin of the Yangtze Block, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018: 1-119.
- [7] Du L L, Guo J H, Allen P N, et al. Implications for Rodinia reconstructions for the initiation of Neoproterozoic subduction at ~860 Ma on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton[J]. *Lithos*, 2014, 196-197:67-82.
- [8] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Late Proterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196:51-67.
- [9] 纪相田等. 同德幅 G47E008023-1/5 万地质图说明书[DS]. 全国地质资料馆, 1999.
- JI X T, et al. Tongde G47E008023-1/50000 geological map description[DS] National Geological Data Center, 1999.
- [10] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5):459-464.
- LU Y F. Geokit-geochemical toolkit for microsoft excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5):459-464.
- [11] QI L, ZHOU M F, GAO J F, et al. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2010, 25(4):585-589.
- [12] Roser B P, Korsch R J. Geochemical characterization, evolution and source of a Mesozoic accretionary wedge: the Torlesse terrane, New Zealand[J]. *Geological Magazine*, 1999, 136:493-512.
- [13] 史会娟. 辽宁省北镇市石墨矿地质地球化学特征及原岩恢复[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- SHI H J. Geochemical features and protolith Restoration of Beizhen City graphite mine in Liaoning Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [14] 蔡文春, 曾忠诚, 宋曙光, 等. 陕西商南湘河晶质石墨矿床地质特征与成因探讨[J]. *西北地质*, 2020, 53(3):220-232.
- CAI W C, ZENG Z C, SONG S G, et al. Geological characteristics and genesis of the Xianghe crystalline graphite deposit in Shangnan County of Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3):220-232.
- [15] 柴广路, 李双应. 北淮阳东段佛子岭群变质岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4):29-45.
- CAI G L, LI S Y. Geochemical characteristics and geological implications for the metamorphic rocks of Foziling Group in Eastern of North Huaiyang Tectonic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4):29-45.
- [16] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999(2):63-66.
- YANG S Y, LI C X. Research Progress in REE Tracer for Sediment source[J]. *Advances in earth science*, 1999(2):63-66.
- [17] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- LIU Y J, CAO L M. An introduction to element geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [18] 陈有圻, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段纳赤台岩群变质沉积岩地球化学特征及构造意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(3):489-500.
- CHEN Y X, PEI X Z, LI R B, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Meta-sedimentary Rocks from Naij Tal Group, Eastern Section of East Kunlun[J]. *Geoscience*, 2014, 28(3):489-500.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42:313-345.
- [20] Ludwig K. Isoplot /Ex, Version 3.0: A geochronological tool kit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001:43.
- [21] 夏锦胜, 孙莉, 肖克炎, 等. 四川省中坝晶质石墨矿床地球化学特征及成因分析[J]. *现代地质*, 2019, 33(6):1286-1294.
- XIA J S, SUN L, XIAO K Y, et al. Geochemical features and genesis analysis of the Zhongba scaly graphite deposit in Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 2019, 33(6):1286-1294.
- [22] 段威, 唐文春, 黎龙昌, 等. 四川旺苍大河坝浅变质岩型石墨矿床地球化学特征与成因分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(3):599-607.

- DUAN W, TANG W C, LI L C, et al. Geochemical characteristics and genesis analysis of daheba epimetamorphic graphite deposit in Wangchang, Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(3):599-607.
- [23] 马志鑫, 罗茂金, 刘喜停, 等. 四川南江坪河石墨矿炭质来源及成矿机制[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(3):134-139.
- MA Z X, LUO M J, LIU X T, et al. Carbon source and metallogenic mechanism of Pinghe graphite deposit at Nanjiang, Sichuan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(3):134-139.
- [24] 李光辉, 黄永卫, 吴润堂, 等. 鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J]. *世界地质*, 2008, 27(1):19-22.
- LI G H, HUANG Y W, WU R T, et al. Origin of carbon and concentration of uranium and vanadium from Liuniao graphite formation in Jixi[J]. *Global Geology*, 2008, 27(1):19-22.
- [25] 于方, 魏綺英. 中国典型矿床 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.
- YU F, WEI Q Y. Typical deposits in China[M]. Beijing: Peking University Press, 1997
- [26] Hannah J L, Stein H J, Zimmerman A, et al. Precise 2004±9 Ma Re-Os age for Pechenga black shale: Comparison of sulfides and organic material[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70:A228.
- [27] 李欣尉, 李超, 周利敏, 等. 贵州正安县奥陶系—志留系界线碳质泥岩 Re-Os 同位素精确厘定及其古环境反演[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(2):251-261.
- LI X W, LI C, ZHOU L M, et al. Accurate determination of the age of the carbonaceous mudstone of the ordovician—silurian boundary in Zheng'an County, Guizhou Province by Re-Os isotope dating method and its application in Paleoenvironmental inversion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(2):251-261.
- [28] Toma J, Creaser R A, Card C, et al. Re-Os systematics and chronology of graphite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 323:164-182.
- [29] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的时代[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3):429-441.
- GENG Y S, YANG C H, WANG X S, et al. Age of crystalline basement in Western Margin of Yangtze Terrane[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3):429-441.
- [30] 刘文中. 攀西元古代麻粒岩的地质年代学与下地壳折返运动轨迹 [D]. 南京: 南京大学, 2004.
- LIU W Z. Geochronology of Proterozoic granulites and the lower crust exhumation in Panzhihua-Xichang region[D]. Nanjing: Nanjing university, 2004.
- [31] 徐士进, 刘文中, 王汝成, 等. 攀西微古陆块的变质演化与地壳抬升史-中基性麻粒岩的 Sm-Nd, (40)Ar/(39)Ar 和 FT 年龄证据 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2004, 47(8):689-703.
- XU S J, LIU W Z, WANG R C, et al. The history of crustal uplift and metamorphic evolution of Panzhihua-Xichang micropalaeoland, SW China: Constraints on Sm-Nd, ⁴⁰Ar/³⁹Ar and FT ages of granulites[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(8):689-703.
- [32] Esser B K, Turekian Karl K. The osmium isotopic composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(13):3093-3104.
- [33] Hannah J L, Bekker A, Stein H J, et al. Primitive Os and 2316 Ma age for marine shale: implications for Paleoproterozoic glacial events and the rise of atmospheric oxygen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225(1-2):43-52.
- [34] Ravizza G, Turekian K K. Application of the 187Re-187Os system to black shale geochronometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:3257-3262.
- [35] 龙涛. 黑龙江省鸡西市柳毛石墨矿床地球化学特征及其成因分析 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.
- LONG T. The geochemical characteristics and deposit genesis analysis of Liu Mao graphite deposit in Ji Xi County of Hei Long jiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [36] 朱建江, 刘福来, 刘福兴, 等. 胶-辽-吉造山带辽河群石墨矿碳同位素特征及成因分析[J]. *岩石学报*, 2021, 37(2):599-618.
- ZHU J J, LIU F L, LIU F X, et al. Carbon isotope and genesis studies of graphite deposits in the Liaohe Group of the Jiao-Liao-Ji Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(2):599-618.
- [37] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- WANG R M, HE G P, CHEN Z Z, et al. Graphic discrimination of metamorphic rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [38] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1):72-80.
- LIN Z J, CHEN D F, LIU Q. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1):72-80.
- [39] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 1979(2):54-63.
- WANG Y Y, GUO W Y, ZHANG G D. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group(Paleogene), Jin-Hu Depression, Jiangsu Province[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 1979(2):54-63.
- [40] 朱维光. 扬子地块西缘新元古代镁铁质-超镁铁质岩的地球化学特征及其地质背景-以盐边高家村杂岩体和冷水窖 101 号杂岩体为例 [D]. 广州: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- ZHU W G. Geochemical characteristics and tectonic setting of Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks in western margin of the Yangtze Craton-exemplified by the complex and Lengshuiqing No. 101 complex[D]. Guangzhou: Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004: 1-135.

(下转第 110 页)

Research Status and Prospects of Converter Limestone Instead of Lime for Slagging and Steelmaking

Sun Huakang, Li Chenxiao, Wang Shuhuan, Tong Shuai, Xue Yuekai, Zhang Kaixuan
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Material Manufacture, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: Research status and development trend of limestone instead of lime for steelmaking and slagging technology are systematically analyzed. Through comparative analysis, it can be seen that the current converter limestone slagging and steelmaking technology simplifies the entire slagging process, improves the slag dephosphorization effect, and reduces steel slag. The production volume has increased the economic benefit per ton of steel. On the whole, the limestone steelmaking slagging process is a high-efficiency, low-consumption, and environmentally-friendly new slagging method, which is of great significance to promoting energy conservation, emission reduction and sustainable development of steel enterprises. However, the decomposition of limestone requires a large amount of heat, which affects the slagging rate. Therefore, in order to further optimize the limestone steelmaking slagging process, a limestone powder spraying slagging technology is proposed, which can effectively solve the heat caused by the direct limestone slagging process. Slagging and CO₂ utilization problems caused by high consumption.

Keywords: Converter slagging; Limestone; Efficient dephosphorization; Less slag; Energy conservation

(上接第 98 页)

Geochemical Characteristics and Re-Os isotopic dating of Tongde Graphite Deposit, Sichuan Province

Chen Chao^{1,2}, Kong Decai^{1,2}, Tian Xiaolin^{1,2}, Liu Zhicheng³, Guo Yuheng³, Wu Deqiang^{1,2},
Wen Zhenzhen¹, Long Bo^{1,2}, Zheng Yi¹

(1.106 Geological Team of Sichuan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Chengdu, Sichuan, China; 2.Sichuan Research Institute of Strategic Mineral Resources Exploration and Utilization, Chengdu, Sichuan, China; 3.Sichuan Institute of Land Science and Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The Tongde Graphite Deposit in Panzhihua is located in the accretionary zone on the western margin of the Yangtze plate. In this paper, the whole rock geochemical analysis, C isotope determination and Re-Os isotope dating of the ore in Tongde graphite mining area are carried out, the original rock of the ore is restored, and the metallogenic environment is discussed. Research shows that the ore SiO₂ is 55.65~61.68%, SiO₂/Al₂O₃ ratio is 4.59~5.42, and Ni/Co ratio is 6.23~12.88. It is rich in Ba, Rb, Sr and other large ion lithophile elements and Nb, Zr, Hf, Th, U and other high field strength elements. Total rare earth elements of ore ΣREE is 149.13×10⁻⁶~195.37×10⁻⁶, with weak Ce negative anomaly and Eu negative anomaly, representing the anoxic marine sedimentary environment. The Carbon isotope δ¹³C_{V-PDB} in ore is -25.0‰~-23.5‰, which is within the range of biogenic organic carbon, indicating that the ore-forming carbon mainly comes from organic matter. The Re-Os isotopic age of graphite is 983 ± 72 Ma (MSWD=1.7), belonging to the early Neoproterozoic, earlier than the intrusion age of magmatic rocks around Tongde. The content of re is between 27.66×10⁻⁹~79.81×10⁻⁹, the contents of ordinary Os and ¹⁸⁷Os are 0.52 ×10⁻⁹~2.16×10⁻⁹, 0.28 × 10⁻⁹~0.83×10⁻⁹, respectively, it is significantly enriched relative to the abundance of Re and Os in the crust. The ¹⁸⁷re/¹⁸⁸os ratio is 122.9~350.5, and the initial Os isotope ratio ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os=0.31±0.21. Combined with the field geological survey, the original rock of ore and ore bearing mica quartz schist in Tongde area is restored, and it is concluded that the original rock is sedimentary rock.

Keywords: Graphite; Re-Os isotope; Geochemical characteristics; Carbon isotope; Western margin of the Yangtze Plate