

胶东蓬莱大柳行金矿区煌斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征

张鹏昊^{1,2}, 王晓红^{1*}, 段梦¹, 黄天梁³, 郭鹏远¹

1.中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071;

2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队 (山东省第六地质矿产勘查院), 山东 威海 264209

摘要: 胶东地区发现大量煌斑岩岩脉, 但有关该区域煌斑岩的成因及其与金成矿之间的关系仍存在争议。

本文选取胶东大柳行金矿区的 9 件煌斑岩样品, 系统开展了岩相学观察、全岩主量与微量元素分析以及锆石 U-Pb 年代学研究。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果表明, 煌斑岩的侵位时间为 125.7 ± 1.5 Ma, 属于早白垩世岩浆活动产物。其具有高钾、富碱、富铝的特征, $Mg^\# = 64.8-73.3$, 微量元素呈现出富集大离子亲石元素 (LILE), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf、Ti) 的特征, 但与典型的岛弧岩浆岩有数量级的微量元素含量差别。结合已发表的 Sr-Nd 同位素组成, 本文认为这些煌斑岩的地幔源区是被交代的古老岩石圈地幔, 推测交代介质是来自于含碳酸盐沉积物的熔体。胶东大规模基性岩浆活动与超大型金矿在时空上的耦合, 说明基性岩浆在金成矿过程中发挥了重要作用。碳酸盐熔体及其共存的高氧化性流体通过相互作用, 可能为金在岩浆系统中的溶解和迁移提供关键通道。

关键词: 华北克拉通; 大柳行金矿; 煌斑岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 胶东金矿

中图分类号: P581; P597

收稿日期: 2025-07-28

Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of Lamprophyres in the Daliuhang Gold Mining Area, Penglai, Jiaodong

Penghao Zhang^{1,2}, Xiaohong Wang^{1*}, Meng Duan¹, Tianliang Huang³, Pengyuan Guo¹

1.Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3.No. 6 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development (Shandong No. 6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration), Weihai 264209, Shandong, China

基金项目: 国家自然科学基金项目 (92479103) 资助

作者简介: 张鹏昊 (2002-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石地球化学工作, E-mail: zhangph@qdio.ac.cn;

ORCID: 0009-0002-5113-1281

通讯作者: 王晓红, 女, 工程师, 地质学专业, E-mail: wangxiaohong@qdio.ac.cn

Abstract: A large number of lamprophyre dykes have been discovered in the Jiaodong area, but the genesis of lamprophyres and their relationship with gold mineralization in this region remain controversial. In this paper, nine lamprophyre samples from the Daliuhang Gold Mining Area were selected for systematic petrographic observation, whole-rock major, trace element analysis and zircon U-Pb geochronology. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results show that the lamprophyres were emplaced at 125.7 ± 1.5 Ma, which is the product of magmatic activity in the Early Cretaceous. The lamprophyre samples are enriched in potassium, alkali, and aluminum, with $Mg^\# = 64.8-73.3$. They are characterized by enrichment in large ion lithophile elements (LILEs) and depletion in high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), but their trace element abundances differ by orders of magnitude from those of typical arc magmatic rocks. Combined with published Sr-Nd isotopic compositions, we infer that the mantle source of these lamprophyres were derived from ancient sub-continental lithosphere mantle that had been metasomatized, most likely by melts derived from carbonate-bearing sediments. The spatiotemporal coupling between large-scale mafic magmatism and giant gold deposits in the Jiaodong area suggests that mafic magmatism played a critical role in the gold mineralization process. The interaction between carbonate melts and their coexisting highly oxidizing fluids may have provided a crucial pathway for the dissolution and transport of gold within the magmatic system.

Key Words: North China Craton; Daliuhang Gold Mining; Lamprophyre; Zircon U-Pb Geochronology; Geochemistry; Jiaodong Gold Mine

0 引言

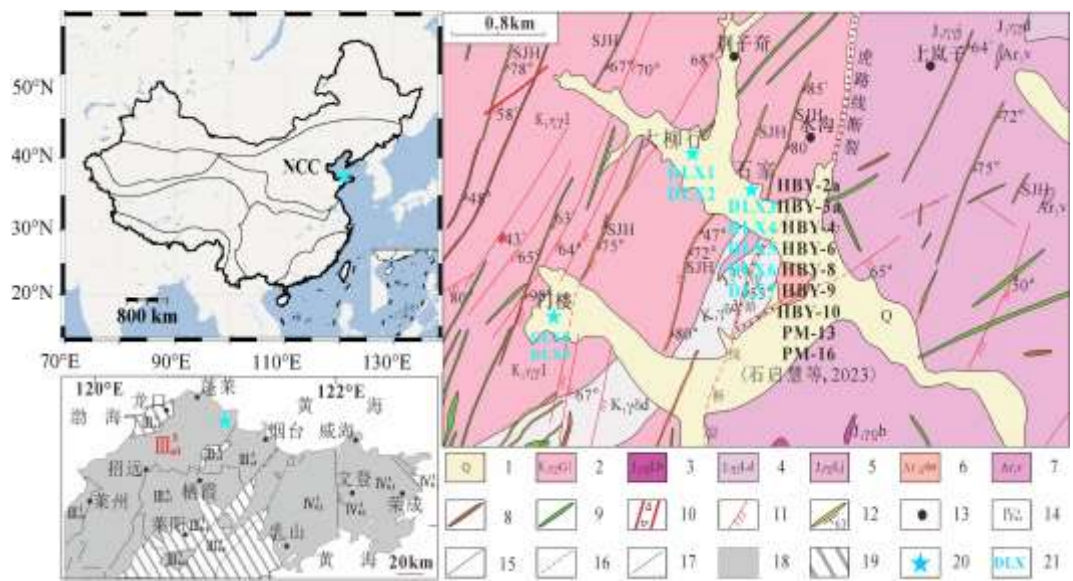
华北克拉通是中国最古老的陆块 (Jahn et al., 1987; Liu et al., 1992; 汪在聪等, 2023)。胶东地区构造上属于华北克拉通的东南缘 (图 1a; 石启慧等, 2023), 其西侧以郯庐断裂带为界, 与鲁西地块相邻; 东南侧以五莲-烟台断裂为界, 邻接苏鲁超高压变质带 (赵智华等, 2024)。该区域是我国最大的金矿成矿带, 也是全球第三大金矿集中区, 目前已发现的金矿床超过 200 处, 累计查明金资源量接近 6000 t, 占全国的 1/3 (宋明春等, 2018, 2022; Deng et al., 2020; 胡文萱等, 2024), 其金矿资源的勘探与开发对于国家经济和地区发展具有重要意义。

大柳行金矿区位于胶东金矿集区三大成矿带之一的栖霞-蓬莱-福山金矿带的南部 (黄鑫等, 2021, 2022)。目前, 已有众多学者对该区域的矿床特征、成矿物质来源、成矿规律等方面 (马顺溪等, 2020; Feng et al., 2020; 黄鑫等, 2022; 于晓卫等, 2023; Li et al., 2025) 开展了研究, 但该地区煌斑岩岩浆活动与金矿的成因关系还有很大争论, 包括: (1) 低钛煌斑岩主要源自古老、难熔的富集岩石圈地幔 (Ma et al., 2014b; Wang et al., 2020); (2) 来源于岩石圈减薄后上涌的软流圈地幔的部分熔融 (Ma et al., 2014a); (3) 不同源区成分的混合和多阶段的岩浆演化过程 (Ji et al., 2022)。为更好地认识该区域煌斑岩的形成时代、岩石成因、源区特征, 探索煌斑岩与金矿之间的成因关系, 本文在前人研究成果的基础上, 选取大柳行

金矿区的煌斑岩作为研究对象,开展了系统的岩相学、全岩地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,试图为区域成矿提供年代学和地球化学数据支撑。

1 区域地质背景

大柳行金矿区位于蓬莱市区东南方向约 45 km 处,地理位置为大柳行镇大柳行村一带,地处华北克拉通东南缘(图 1a)。构造上隶属于华北板块(I)之下的胶辽隆起区 III(II)、胶北隆起 IIIa(III)、胶北断隆 IIIal(IV)以及胶北凸起 IIIa³(V)的东北边缘部位(图 1b;张朋等,2018;黄鑫,2021)。区内出露地层为第四纪沉积物(图 1c)。区内构造以北东、北东向断裂构造为主,近南北向、东西向及北东向断裂次之。区内岩浆岩广泛发育,以太古代和中生代侵入岩为主;脉岩以中生代石英闪长玢岩、闪长(玢)岩及煌斑岩为主,辅以少量花岗斑岩和伟晶岩(马顺溪等,2020)。



- 1—第四系; 2—早白垩世罗家二长花岗岩; 3—晚侏罗世笔架山花岗岩伟晶岩; 4—晚侏罗世大庄子二长花岗岩;
5—晚侏罗世九曲二长花岗岩; 6—新太古代英云闪长岩; 7—新太古代辉长岩; 8—酸性脉岩; 9—中基性脉岩;
10—构造破碎带; 11—压扭断裂; 12—蚀变带及产状; 13—地名; 14—单元代号; 15—二级单元界线;
16—三级单元界线; 17—不整合界线; 18—隆起区; 19—凹陷区; 20—采样区域; 21—样品编号

图 1 (a)华北克拉通位置图(NCC: North China Craton);(b)胶东地区大地构造简图;(c)大柳行金矿区区域地质图
(据叶蕾等, 2015; 马顺溪等, 2020; 黄鑫, 2021; 宋明春等, 2022 修改)

Fig.1 (a) Location of the North China Craton, (b) General tectonic map of Jiaodong area, (c) Regional geological map of the Daliuhang Gold Mining Area
(Modified from Ye et al.,2015; Ma et al., 2020; Huang, 2021; Song et al., 2022)

2 岩相学特征

大柳行金矿区煌斑岩具有煌斑结构和块状构造;斑晶矿物以金云母(20%~35%)、角闪石(15%~20%)为主,含有少量单斜辉石(<10%);基质为斜长石和单斜辉石(图 2a)。金云母斑晶呈自形至半自形,一组节理发育,颜色为黄褐色,粒径变化较大,约为 50μm 至

400 μm ；角闪石呈半自形，部分角闪石斑晶呈裂碎状集合体，粒径较小，约为 50 μm ，具有多色性；少数单斜辉石具自形结构，粒径约为 150 μm ，晶体外形较完整，单偏光下呈白色至淡绿色，表面分布有不规则的裂纹（图 2b，c）；部分煌斑岩中可见碳酸盐熔滴（globule），直径约为 500 μm （图 2d，e，f）。

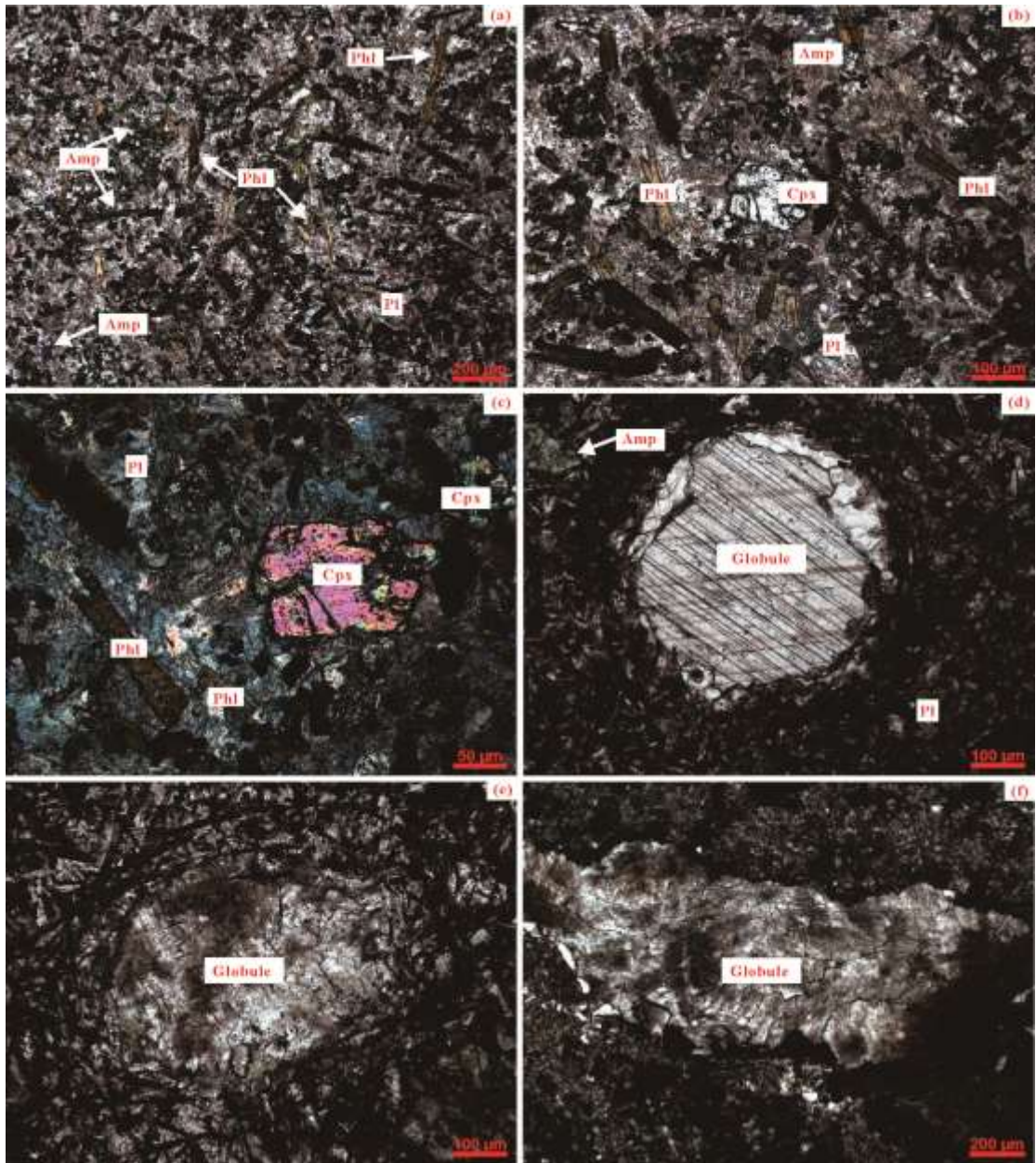


图 2 大柳行金矿区煌斑岩的显微照片

Fig.2 Photomicrographs of lamprophyres in the Daliuhang Gold Mining Area

（Amp 角闪石，Pl 斜长石，Phl 金云母，Cpx 单斜辉石，Globule 熔滴，PPL(Plane-Polarized Light): a-b, d-f; XPL(Cross-Polarized Light): c）

3 样品处理与分析测试方法

3.1 样品处理

本文研究的样品共 9 件, 样品破碎、薄片制作、全岩-200 目粉末的制备以及锆石的挑选、制靶、锆石阴极发光(CL)图像的拍摄均在河北省地质测绘院(河北省地质矿产勘察开发局空间信息技术应用研究中心)实验测试中心完成。对编号为 DLX-4 的样品进行破碎, 由于煌斑岩中锆石量少, 最终只挑选出了 12 粒锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 对全部 9 件样品开展了全岩主量元素分析, 对其中 8 件样品进行了微量元素分析。

3.2 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 同位素年龄测试在中国科学院海洋研究所的大洋岩石圈与地幔动力学超净实验室完成。实验采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS), 由 193 nm 准分子激光剥蚀系统与 Agilent 7900 型 ICP-MS 联用构成。在分析过程中, 激光剥蚀的束斑直径设定为 25 μ m, 激光频率为 6 Hz, 能量密度为 6.63 J/cm²。测年采用国际锆石标准样品 91500 作为定年校正标准, 同时以 GJ-1 和 Plesovice 标准锆石进行数据质量监控。分析过程中, 每测试五个样品点, 插入两次 91500 标准样进行校正仪器漂移。元素含量校正采用 NIST SRM 610 玻璃标准作为外标, 硅(Si)元素作为内标进行计算。测得数据通过 ICPMSDataCal 软件进行处理(Liu et al., 2008, 2010), 对普通铅进行了等时线型校正。

3.3 主量元素

全岩主量元素的分析测试工作在中国科学院海洋研究所大洋岩石圈与地幔动力学超净实验室完成。样品粉末消解采用碱熔法, 元素含量的测定使用了安捷伦 Agilent5100 型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)。在样品消解过程中, 通过重复样本和美国地质调查局(USGS)的标准参考物质 BCR-2(玄武岩)和 BHVO-2(玄武岩)对样品消解和测试流程进行了质量监控分析, 测试精度为 1%~5%; 具体的流程见 Sun et al., (2022)。

3.4 微量元素

全岩微量元素分析在中国科学院海洋研究所大洋岩石圈与地幔动力学实验室完成。前处理过程采用混合酸溶样法, 具体的方法如下: (1) 将样品置于 105 $^{\circ}$ C 条件下烘干 12h 后冷却至室温; (2) 称取约 50 mg 样品于 Teflon 溶样弹中; (3) 加入 1ml 的反王水(HNO₃: HCl=3: 1)和 0.5 mL 氢氟酸(HF), 随后在 190 $^{\circ}$ C 条件下加热 15 小时; (4) 在电热板上将样品溶液加热蒸干, 之后加入 1ml 的二次浓 HNO₃, 再次加热蒸干, 以除去残留在样品中的氢氟酸; (5) 加入 1 ml 二次浓 HNO₃、4 ml Milli-Q H₂O, 190 $^{\circ}$ C 复溶, 直至样品完全消解; (6) 用 2%的 HNO₃ 溶液稀释样品溶液至 100 g 左右, 待上机测试。样品分析测试采用安捷伦 7900 型 ICP-MS, 分析测试过程中设置 1 个空白样品用以监测实验室本底, 选用的标样是国际标准参考物质 BHVO-2 和 BCR-2, 同时设置 2 个重复样监控分析测试过程的重复性, 分析精度依所测元素不同为 1%~9% 之间, 具体的测试流程参照 Chen et al., (2017)。

4 分析测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

对煌斑岩样品 DLX-4 进行了锆石 U-Pb 年代学分析, 详细分析测试结果见表 1 和图 3。

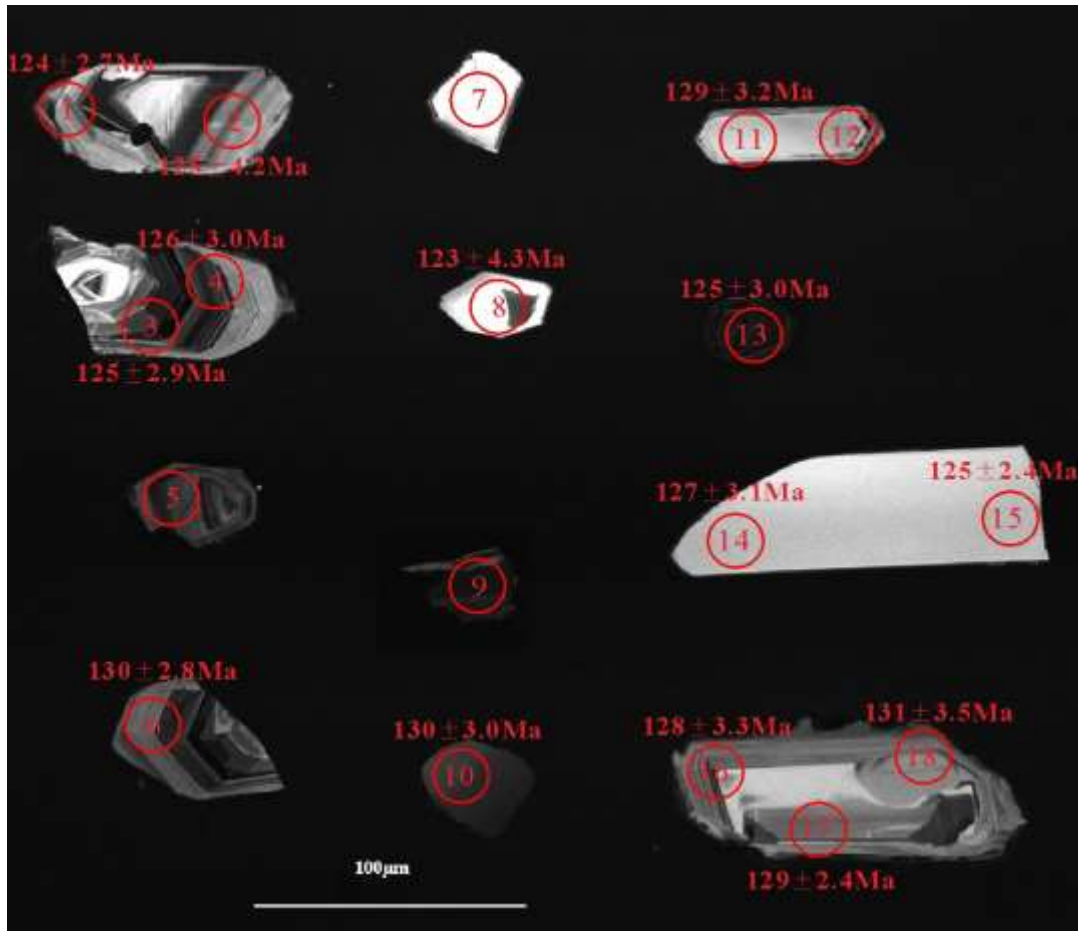


图 3 大柳行金矿区煌斑岩锆石的阴极发光图

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons for the lamprophyres in the Daliuhang Gold Mining Area

大柳行金矿区煌斑岩中锆石无色透明，CL 图像显示（图 3）其形状多样，可以分为两类：一类为较为规则的双锥状或柱状；另一类形状不规则，长宽比范围较广，部分锆石长宽比较小，接近 1：1，呈短柱状，部分锆石长宽比较大，可达 3：1 左右，呈狭长形态；锆石普遍发育清晰的生长振荡环带，具典型的岩浆成因特征（吴元保等，2004）。本次对 DLX-4 锆石样品分析了 18 个测点，测点 5、7、9、12 偏离协和线，未参与年龄计算。锆石中 U 的含量为 $281 \times 10^{-6} \sim 1934 \times 10^{-6}$ （平均值为 808×10^{-6} ），Th 的含量为 $53.6 \times 10^{-6} \sim 807 \times 10^{-6}$ （平均值为 354×10^{-6} ），Th/U 的值为 0.18~0.74（平均值为 0.41，大于 0.1），指示其为岩浆成因（Griffin et al., 2004）。14 个测点的分析数据获得的锆石加权平均年龄为 125.7 ± 1.5 Ma（MSWD=0.7，n=14），代表了大柳行金矿区煌斑岩的侵位年龄。

表 1 大柳行金矿区煌斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果

Table1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of lamprophyres in the Daliuhang Gold Mine Area

点号	含量/ 10^{-6}			同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
DLX4-1	808	1460	0.55	0.0503	0.0013	0.1346	0.0039	0.0194	0.0004	209	94	128	4	124	3
DLX4-2	458	1200	0.38	0.0506	0.0018	0.1368	0.0061	0.0196	0.0007	220	51	130	5	125	4
DLX4-3	548	981	0.56	0.0518	0.0015	0.1400	0.0047	0.0196	0.0005	276	67	133	4	125	3

DLX4-4	757	1934	0.39	0.0496	0.0015	0.1350	0.0045	0.0197	0.0005	189	73	129	4	126	3
DLX4-5 ^a	1146	1464	0.78	0.0613	0.0017	0.4429	0.0165	0.0525	0.0016	650	59	372	12	330	10
DLX4-6	717	1476	0.49	0.0525	0.0017	0.1480	0.0048	0.0204	0.0004	309	77	140	4	130	3
DLX4-7 ^a	426	344	1.24	0.1150	0.0028	3.4222	0.0999	0.2155	0.0050	1881	44	1510	23	1258	26
DLX4-8	238	322	0.74	0.0599	0.0036	0.1582	0.0102	0.0192	0.0007	598	130	149	9	123	4
DLX4-9 ^a	269	522	0.52	0.0534	0.0020	0.1700	0.0070	0.0232	0.0006	346	85	159	6	148	4
DLX4-10	229	573	0.40	0.0615	0.0025	0.1725	0.0067	0.0204	0.0005	657	85	162	6	130	3
DLX4-11	293	578	0.51	0.0595	0.0025	0.1642	0.0069	0.0201	0.0005	587	88	154	6	129	3
DLX4-12 ^a	622	1552	0.40	0.1696	0.0029	5.5573	0.1119	0.2358	0.0041	2553	28	1910	17	1365	21
DLX4-13	97	470	0.21	0.0544	0.0027	0.1459	0.0066	0.0196	0.0005	391	109	138	6	125	3
DLX4-14	54	301	0.18	0.0536	0.0030	0.1462	0.0087	0.0199	0.0005	354	123	139	8	127	3
DLX4-15	82	417	0.20	0.0538	0.0022	0.1454	0.0062	0.0196	0.0004	361	94	138	5	125	2
DLX4-16	358	693	0.52	0.0572	0.0018	0.1581	0.0057	0.0201	0.0005	502	70	149	5	128	3
DLX4-17	88	281	0.31	0.0508	0.0023	0.1395	0.0060	0.0202	0.0004	232	104	133	5	129	2
DLX4-18	226	619	0.37	0.0506	0.0019	0.1414	0.0057	0.0205	0.0006	233	89	134	5	131	3

注: a:该点位偏离协和线附近, 不参与年龄计算

4.2 主量元素

9 件煌斑岩的主量元素测试结果见表 2。大柳行金矿区煌斑岩的烧失量较高 (LOI=5.01%~10.45%), 高烧失量可能是因为样品中含有大量含水矿物 (如云母和角闪石) 以及碳酸盐熔滴所致。值得注意的是, 样品 DLX9 的橄榄石斑晶已发生蛇纹石化, 表明该样品的全岩化学成分可能已受到明显改造, 因此本文在后续的讨论中不再将其纳入解释。本文 SiO₂ 含量变化范围为 52.42%~60.29%, 平均为 55.95%; 全碱含量为 4.3%~5.96%, 平均为 5.08%; MgO 含量为 4.95%~10.57%, 平均为 7.94%; Al₂O₃ 含量为 13.14%~15.66%, 平均为 14.53%; TiO₂ 含量为 0.62%~0.84%, 平均为 0.76%; TF₂O₃ 含量为 5.94%~8.59%, 平均为 7.31%; Mg[#]值 (Mg[#]=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺)) 为 64.8~73.3, 平均值为 70.1。在 TAS 图解中 (图 4a), 其分布范围涵盖玄武岩、玄武安山岩、玄武粗安岩及安山岩区域。从 K₂O-SiO₂ 图解 (图 4b) 上看, 多数样品位于高钾钙碱性系列区, 少数样品分布于钙碱性系列, 表现出富碱高钾的特征。

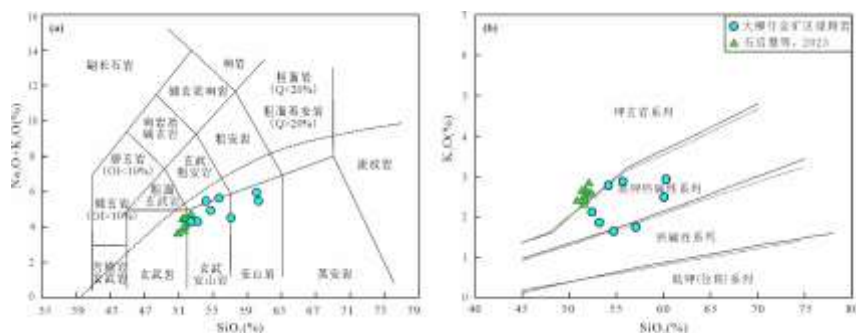


图 4 大柳行金矿区煌斑岩的硅碱图(a)和 K₂O-SiO₂ 图解(b)

(主量元素含量已去除 LOI 后重新归一化至 100%)

Fig.4 Diagrams of (a) (Na₂O+K₂O) vs. SiO₂ and (b) K₂O vs. SiO₂ for lamprophyres in the Daluohang Gold Mining Area

(Major element concentrations are recalculated to 100% after removing LOI)

4.3 稀土元素与微量元素

大柳行金矿区煌斑岩的微量元素分析测试结果见表 2。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中（图 5a），样品均表现出轻稀土相对于重稀土富集的右倾型式，显示出显著的轻重稀土元素分异特征。其中： $(La/Sm)_N=4.35\sim6.01$ ，平均为 5.1； $(La/Yb)_N=20.5\sim44.4$ ，平均为 27.6（“N”表示经球粒陨石标准化，标准化数据来自 Sun and McDonough, 1989）。这一结果说明：（1）岩浆起源于相对富集轻稀土元素的地幔源区，指示了其交代的地幔源区；（2）岩浆起源深度较深，在石榴子石相稳定域。样品无明显的 Eu 异常， δEu 值为 0.92~0.98。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上（图 5b），大柳行金矿区煌斑岩表现出了富集大离子亲石元素（LILE）、高场强元素（HFSE）Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 负异常的特征。

表 2 大柳行金矿区煌斑岩主量（ 10^{-2} ）、微量元素（ 10^{-6} ）分析结果

Table2 Major element (10^{-2}) and trace element compositions (10^{-6}) of
lamprophyres in the Daluihang Gold Mining Area

样品名	DLX1	DLX2	DLX3	DLX4	DLX5	DLX6	DLX7	DLX8	DLX9
SiO ₂	49.92	47.69	52.36	47.84	55.74	54.34	52.09	49.37	45.33
TiO ₂	0.76	0.70	0.68	0.75	0.64	0.56	0.72	0.73	0.79
Al ₂ O ₃	14.22	13.02	12.55	12.00	14.02	13.36	14.29	12.84	11.85
TFe ₂ O ₃	6.98	7.20	6.83	7.84	5.51	5.42	6.54	7.17	7.68
MnO	0.13	0.13	0.11	0.13	0.09	0.07	0.09	0.12	0.17
MgO	6.67	8.97	8.05	9.64	4.60	5.47	6.72	7.92	11.85
CaO	7.77	7.84	7.67	8.80	6.43	5.78	6.45	7.54	6.59
Na ₂ O	3.01	2.21	2.61	1.99	3.22	2.30	2.54	2.45	0.20
K ₂ O	1.50	1.67	2.70	1.94	2.31	2.65	1.59	2.53	3.20
P ₂ O ₅	0.29	0.26	0.46	0.33	0.25	0.18	0.24	0.48	0.47
LOI	7.46	9.55	5.01	7.99	7.65	8.27	6.86	8.87	10.45
Total	98.71	99.22	99.03	99.26	100.45	98.41	98.13	100.03	98.59
Na ₂ O+K ₂ O	4.51	3.87	5.32	3.93	5.53	4.95	4.14	4.99	3.40
Mg [#]	67.82	73.33	72.25	73.07	64.78	69.01	69.4	70.9	77.28
La	49.6	44.5	98.3	50.8	55.7	38.4		52.1	79.1
Ce	94.3	84.6	183	98.5	102	70.8		104	156
Pr	10.2	9.06	19.9	10.9	10.6	7.41		11.7	17.4
Nd	37.9	34.2	75.5	42.3	39.0	27.2		45.2	66.1
Sm	6.09	5.57	11.9	7.25	5.98	4.37		7.73	10.7
Eu	1.63	1.51	2.90	1.90	1.56	1.22		2.07	2.66
Gd	4.50	4.27	7.74	5.39	4.29	3.34		5.66	7.31
Tb	0.62	0.56	0.88	0.68	0.53	0.43		0.72	0.88
Dy	3.30	3.05	4.14	3.50	2.73	2.28		3.62	4.17
Ho	0.66	0.60	0.73	0.67	0.53	0.45		0.67	0.78
Er	1.82	1.67	1.81	1.73	1.42	1.19		1.75	1.95
Tm	0.27	0.25	0.26	0.25	0.21	0.18		0.25	0.28
Yb	1.70	1.56	1.59	1.57	1.31	1.13		1.60	1.72
Lu	0.26	0.24	0.24	0.23	0.20	0.17		0.23	0.26
Rb	53.9	60.2	69.9	66.6	73.2	104		59.3	100

Ba	1237	1156	2748	1553	1324	1042	1565	1594
Th	7.61	6.77	16.7	7.30	10.2	7.25	6.63	12.4
U	1.36	1.17	2.55	1.31	1.83	1.47	1.22	2.11
Nb	5.44	4.89	6.23	6.14	6.56	5.31	6.69	6.87
Ta	0.32	0.30	0.35	0.37	0.43	0.36	0.39	0.39
Pb	17.8	12.8	17.5	13.7	10.4	11.6	11.7	20.7
Sr	859	857	1120	839	673	448	1010	447
Zr	143	128	174	154	165	143	164	172
Hf	3.42	3.10	4.21	3.83	4.12	3.52	3.81	4.05
Ti	4681	4287	4177	4526	3862	3505	4523	4834
Y	17.5	16.0	19.1	17.2	14.0	11.8	18.3	20.9
Cr	465	527	545	788	181	400	425	901
Ni	94.2	199	87.8	208	33.5	96.3	178	240
δ Eu	0.95	0.95	0.92	0.93	0.94	0.98	0.96	0.92
(La/Yb) _N	20.9	20.5	44.4	23.2	30.5	24.5	23.4	33.1
(La/Sm) _N	5.25	5.15	5.34	4.52	6.01	5.67	4.35	4.76

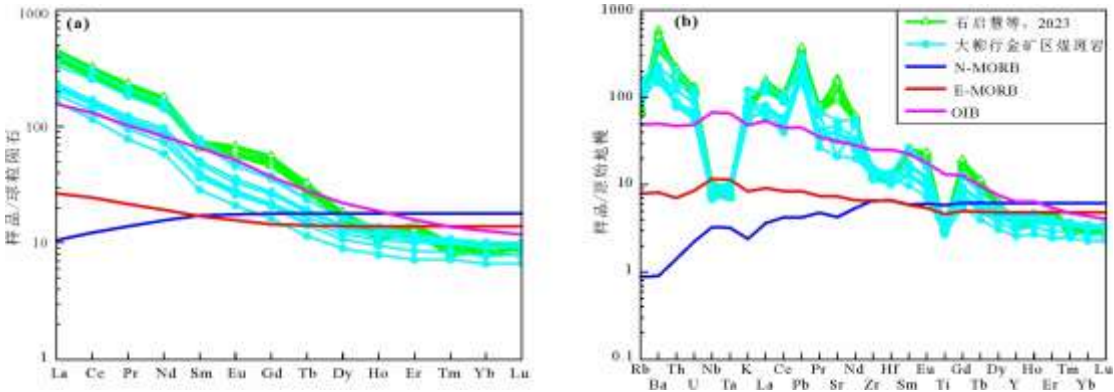


图 5 大柳行金矿区煌斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)

(球粒陨石和原始地幔数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized rare earth element pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider (b) diagram of the lamprophyres in the Daliuhang Gold Mining Area

(The values of chondrite and primitive mantle are from Sun and McDonough (1989).)

5 讨论

5.1 形成时代

前人对胶东地区与金矿相关的中基性岩脉开展了大量的研究工作,主要聚焦于成矿规律、成矿物质来源、矿床特征等方面(张强等, 2006; 马顺溪等, 2020; 黄鑫, 2021; 于晓卫等, 2023; 黄鑫等, 2022)。本文收集了该区域已发表的煌斑岩、辉长岩年龄, 其年龄范围为 136.9~98.6 Ma, 主要集中在 125.6~112.2 Ma 之间(Sun et al., 2001; Yang et al., 2004; Liu et al., 2004; 2009; Ma et al., 2013; 2014; Deng et al., 2017; Xue et al., 2019; Wang et al., 2020; 宋明春等, 2022; 刘燊等, 2005; 王建国等, 2008)。本文通过对样品 DLX-4 进行的锆石 U-Pb 同位素定年结果显示, 大柳行金矿区煌斑岩的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 125.7±1.5 Ma

(MSWD=0.7, n=14; 图 6a, b), 表明大柳行金矿区煌斑岩的形成时代为早白垩世。该年龄范围对应于华北克拉通破坏峰期, 与胶东地区中生代金成矿时代 (~120 Ma) 相近 (图 6c; 宋明春等, 2018; Wang et al., 2022; 杨立强等, 2024; 汪浪等, 2024; Wang et al., 2024)。

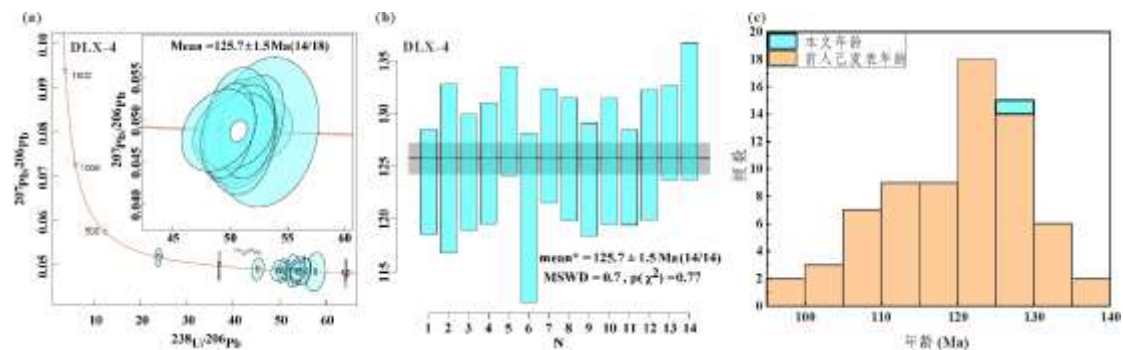


图 6 大柳行金矿区煌斑岩锆石的 U-Pb 年龄谱和图(a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图(b)及该区域已发表脉岩年龄直方图(c)
(图 c 数据来自 Ma et al.,2013; Ma et al.,2014; Liu et al., 2004; Liu et al., 2009; Sun et al., 2001; Yang et al., 2004; Deng et al., 2017; 刘荣等, 2005; 王建国等, 2008)

Fig.6 U-Pb concordia diagram (a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age plot (b) for the lamprophyres in the Daliuhang Gold Mining Area and (c) histogram of published dike rock ages in the region

(The data in panel c are compiled from Ma et al.,2013; Ma et al.,2014; Liu et al., 2004; Liu et al., 2009; Sun et al., 2001; Yang et al., 2004; Deng et al., 2017; Liu et al., 2005; Wang et al., 2008)

5.2 分离结晶

大柳行金矿区煌斑岩的 $\text{Mg}^\#$ 值为 64.8~73.3, 平均为 70.1, 略低于幔源原始岩浆 ($\text{Mg}^\#=72$, Niu, 2016), 暗示其母岩浆可能来源于地幔低程度部分熔融且经历的结晶分异程度有限。大柳行金矿区煌斑岩的主量元素氧化物、微量元素与 MgO 含量协变图 (图 7) 中, MgO 含量与 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 呈明显负相关, 而与 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 CaO 含量呈明显正相关关系, 这种相关性特征反映出煌斑岩经历了一定程度的结晶分异作用。 Cr 和 Ni 与 MgO 呈良好正相关, 表明在岩浆演化过程中, 随着 MgO 含量的降低, 橄榄石和单斜辉石从岩浆中结晶析出, CaO 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 MgO 的正相关进一步表明, 单斜辉石从岩浆中结晶析出。样品并未呈现出显著的 Eu 异常 ($\delta \text{Eu}=0.92\sim0.98$), 暗示岩浆演化过程中未发生明显的斜长石分离结晶。上述证据表明大柳行金矿区煌斑岩受结晶分异作用的影响有限, 保留了原始幔源岩浆的成分特征。

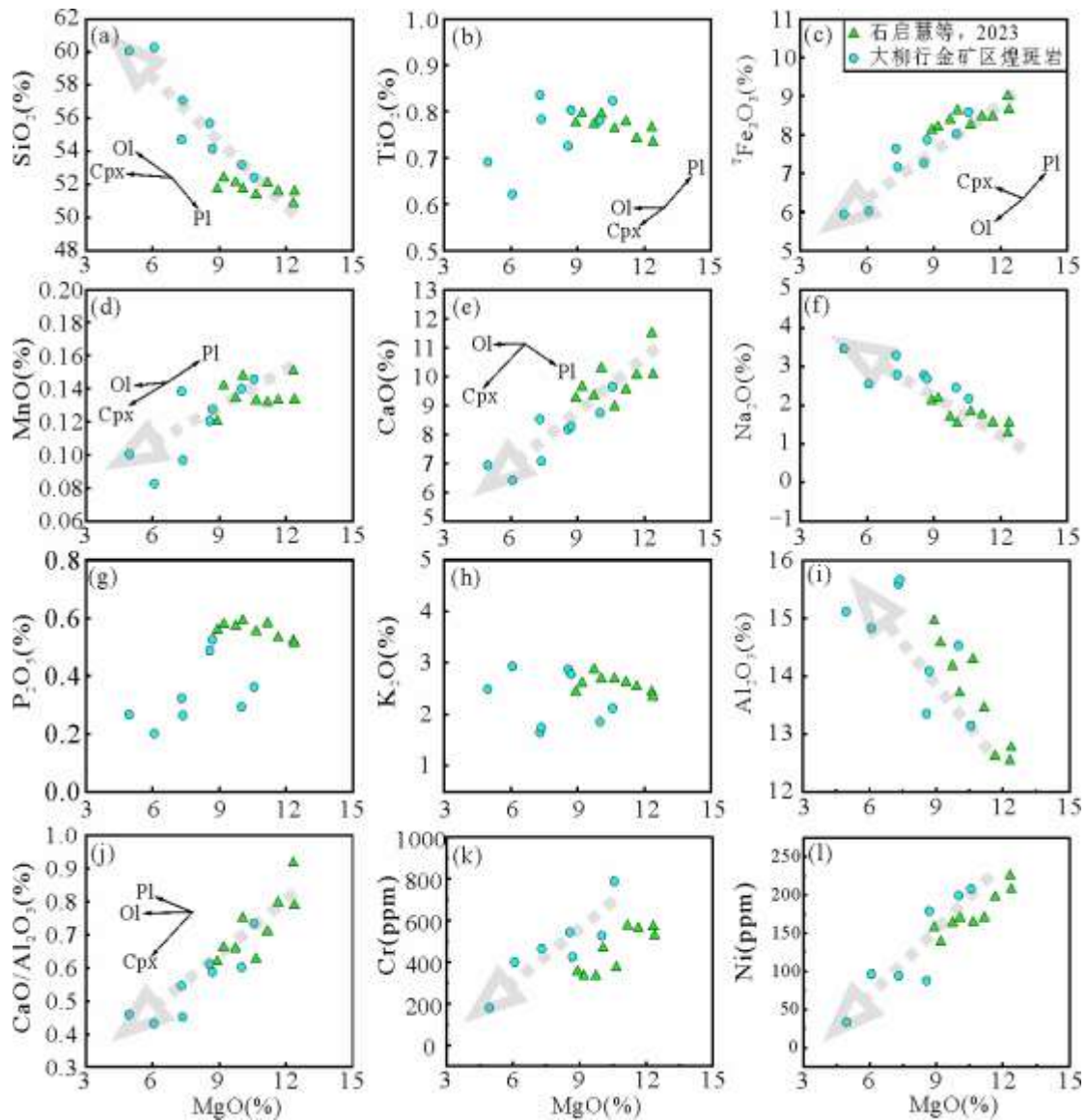


图 7 大柳行金矿区煌斑岩的主要元素氧化物、微量元素与 MgO 含量协变图解(Ol:橄榄石, Cpx:单斜辉石, Pl:斜长石)

Fig.7 Diagrams of various major elements oxides and trace elements vs. MgO for lamprophyres in the Daluohang Gold Mining

Area(Ol: Olivine, Cpx: Clinopyroxene, Pl: Plagioclase)

5.3 岩石成因

目前,关于煌斑岩的成因有三种主流认识:(1)交代富集地幔的部分熔融(Zheng et al., 2023);(2)基性岩浆与大陆地壳混合(Fischer et al., 2022);(3)多源岩浆相互作用(Li et al., 2024)。尽管具体的类型和成因机制尚存争议,但多数研究认为煌斑岩的形成与经历交代富集作用的地幔源区密切相关(刘秉翔等, 2021)。地球化学证据显示,大柳行金矿区煌斑岩具有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 负异常,以及 Ba 和 Pb 的正异常,这类微量元素分配特征常被视为岩浆经历地壳混染/陆源物质贡献到了其地幔源区或流体交代作用导致的结果。大柳行金矿区煌斑岩的 Ba (1042~2748 ppm)、Sr (447~1120 ppm)、Nd (27.2~75.5 ppm)、Pb (10.4~20.7 ppm)含量远高于大陆地壳平均值(Ba=456 ppm, Pb=11 ppm, Sr=320 ppm, Nd=20 ppm; Rudnick and Gao, 2003),暗示这一富集特征继承自源区,而非地壳混染的直接产物。

此外，大柳行金矿区煌斑岩具有类似于原始岩浆的 $Mg^\#$ 含量，进一步支持其未经历显著的地壳混染作用。这一结论与已有研究结果一致，即胶东地区基性岩脉成岩过程中地壳混染作用可能并不显著 (Ma et al., 2014b)。进一步将大柳行金矿区煌斑岩微量元素特征与典型的大洋火成碳酸岩 (Hoernle et al., 2002)、山东地区中生代碳酸岩 (Ying et al., 2004) 和典型的岛弧火山岩 (Chen et al., 2021) 进行对比 (图 8)，可以看出大柳行金矿区煌斑岩具有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 的负异常，与碳酸岩的配分型式更为接近，暗示其源区可能有相似的成因。需要指出的是，虽然岛弧岩浆也表现出类似的配分模式，但典型的岛弧岩浆表现出亏损不相容元素的特征，与大柳行金矿区煌斑岩不相容元素的富集特征明显不同，因此其富集源区不能单纯用俯冲流体交代解释。值得注意的是，大柳行金矿区煌斑岩中普遍发育的碳酸盐小液滴 (globule)。本文认为这些碳酸盐岩相学为碳酸盐熔体参与提供了重要的岩石学证据。除微量元素特征和岩石学特征外，前人发表该区域煌斑岩的 Sr-Nd 同位素证据 (图 9) 也为其源区提供了重要的约束 ($^{87}Sr/^{86}Sr(t)=0.708870\sim0.712111$, $\epsilon_{Nd}=-18.5\sim-12.9$; Ma et al., 2014; Deng et al., 2017; Wang et al., 2020)，此外，该区域已发表的煌斑岩的 Sr-Nd 同位素数据与中国东部中生代以来玄武岩 (Sun et al., 2021) 在 Sr-Nd 同位素组成上存在显著差异，表明其源区演化历史长久且经历了熔体交代。基于上述证据，推测大柳行金矿区煌斑岩的源区为经历显著富集改造的岩石圈地幔，本文认为其交代介质可能是含碳酸盐沉积物的熔体，后续将对碳酸盐 globule 开展深入的地球化学成分分析，有望进一步揭示其源区性质及成因过程。

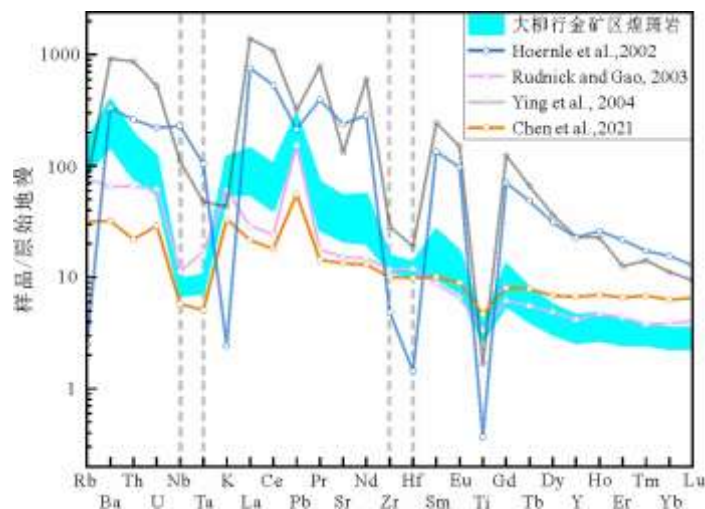


图 8 大柳行金矿区煌斑岩微量元素与典型的大洋火成碳酸岩 (Hoernle et al., 2002)，山东地区中生代碳酸岩 (Ying et al., 2004)，大陆地壳平均成分 (Rudnick and Gao, 2003) 和典型的岛弧火山岩 (Chen et al., 2021) 的平均成分对比图

Fig.8 Comparison of trace elements in lamprophyres from the Daluohang Gold Mining Area with typical oceanic carbonatites (Hoernle et al., 2002), Mesozoic carbonatites in the Shandong area (Ying et al., 2004), continental crust (Rudnick and Gao, 2003), and typical island arc volcanic rocks (Chen et al., 2021)

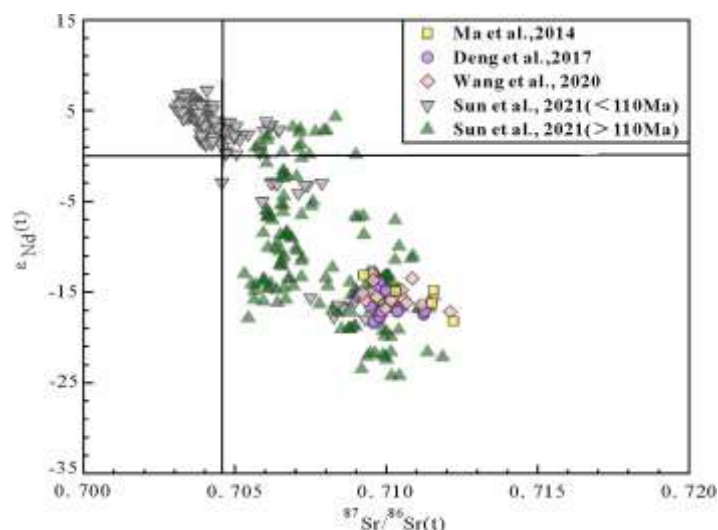


图9 胶东地区煌斑岩及中国东部中生代以来玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 与 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 图解

(煌斑岩数据来自 Ma et al., 2014b; Deng et al., 2017; Wang et al., 2020; 玄武岩来自 Sun et al., 2021)

Fig.9 Diagram of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $\epsilon\text{Nd}(t)$ for lamprophyres in the Jiaodong region and Mesozoic-Cenozoic basalts from eastern China

(Data for lamprophyres are from Ma et al., 2014b; Deng et al., 2017; Wang et al., 2020; data for basalts are from Sun et al., 2021)

5.4 对胶东大型大规模金成矿的指示意义

已有研究表明,地幔中碳酸盐交代作用及其诱导的部分熔融过程与上地壳的金成矿活动之间存在紧密的联系 (Qiu et al., 2024)。胶东早白垩世煌斑岩脉与金成矿在时间和空间上均具有良好的耦合关系 (Ma et al., 2014; Wang et al., 2022)。本文测定的大柳行金矿区煌斑岩脉的侵位时间为 125.7 ± 1.0 Ma, 与区域内大规模金矿化时代基本一致, 进一步证实幔源岩浆活动与成矿过程的密切联系。前人认为富挥发分的岩浆是金富集的关键控制因素 (Wang et al., 2020), 煌斑岩作为富挥发分的幔源岩浆的代表, 其与金矿化时空分布的耦合性暗示了早白垩世深部壳幔相互作用与浅表成矿过程之间的动力学联系。

早白垩世期间, 古太平洋板块运动方向由西向转变为北西向斜向俯冲 (Ni et al., 2025), 俯冲板片的回撤引起西太平洋活动大陆边缘向洋侧迁移, 促使部分板片滞留于地幔过渡带, 最终增强了板片的脱水反应和地幔楔的交代作用, 破坏了华北克拉通东部的岩石圈稳定性 (Niu et al., 2005; Ma et al., 2014; Niu et al., 2015; Deng et al., 2020; 刘俊来等, 2022; Ji et al., 2022), 从而有可能直接促发局部地幔部分熔融和幔源岩浆的快速上侵, 为胶东地区的金成矿作用提供了有利的深部地质条件。

在俯冲作用下, 来自洋壳及其上覆沉积物中的富水矿物、碳酸盐沉积物经历脱水与熔融作用, 释放出大量含 H_2O 、 CO_2 等挥发分的流体, 并渗入上覆岩石圈地幔 (He et al., 2024)。随着俯冲深度的增加, 碳酸盐矿物可能发生部分熔融, 生成富 CO_2 、低粘度的熔体, 并显著提高地幔局部氧逸度 (Qiu et al., 2024)。然而, 仅靠碳酸盐熔体的作用, 其氧化能力有限, 难以实现 S^{2-} 向 S^{6+} 的完全转变。已有实验研究表明, S 的价态转变需要更高的氧逸度条件 (ΔFMQ 至 $\Delta\text{FMQ}+2$; Botcharnikov et al., 2011), 这一过程更可能需要碳酸盐熔体及其共存的高氧化性流体的协同作用。碳酸盐熔体主要承担源区富集与交代的角色, 而高氧化性流

体则可能是驱动 S 价态转变的关键因素。二者相互作用，不仅促进了含金硫化物的分解和金的释放，也增强了富水、富硫的幔源岩浆具备更强的金溶解与迁移能力，从而为成矿提供了有利条件。

综上所述，本文认为大柳行金矿区的煌斑岩脉和金的富集成矿过程均与碳酸盐交代的岩石圈地幔的熔融有关。在成矿过程中，碳酸盐熔体及其共存的高氧化性流体的协同作用不仅调控了岩石圈地幔的氧逸度的变化，还在金的释放、迁移与富集中发挥了关键的活化与驱动作用。

6 结论

通过对大柳行金矿区煌斑岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和全岩主量元素、微量元素的研究，综合研究区已发表数据，得出如下结论：

(1)大柳行金矿区煌斑岩 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 125.7 ± 1.5 Ma (MSWD=0.7, n=14)，属于早白垩世岩浆活动的产物。

(2)大柳行金矿区煌斑岩具有较高的 $Mg^\#$ ， $\delta Eu=0.92\sim 0.98$ ，表明岩浆发生了低程度的矿物结晶分异（结晶分异矿物包括少量橄榄石和单斜辉石），未发生显著的斜长石分离结晶作用。

(3)大柳行金矿区煌斑岩富集大离子亲石元素，具有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 的负异常，与碳酸岩的配分型式更为接近。虽然岛弧岩浆也表现出类似的配分模式，但典型的岛弧岩浆表现出亏损不相容元素的特征，与大柳行金矿区煌斑岩不相容元素的富集特征明显不同。本文认为这些煌斑岩源区是经历了熔体交代的古老岩石圈地幔，其交代介质可能是含碳酸盐沉积物的熔体。

(4) 大柳行金矿区煌斑岩脉的形成与胶东地区早白垩世金成矿作用在时空上高度耦合，其源区可能经历了碳酸盐熔体与高氧化性流体的协同作用，这为胶东大型金成矿作用提供了重要条件。

致谢

感谢三位审稿人提出的宝贵意见和建议。中国科学院海洋研究所张丽鹏老师在成稿过程中给予了细致指导，在此一并感谢！

References

- Botcharnikov, R.E., Linnen, R.L., Wilke, M., et al., 2011. High Gold Concentrations in Sulphide-Bearing Magma Under Oxidizing Conditions. *Nature Geoscience*, 4(2): 112-115. <https://doi.org/10.1038/ngeo1042>
- Chen, S., Wang, X.H., Niu, Y.L., et al., 2017. Simple and Cost-Effective Methods for Precise Analysis of Trace Element Abundances in Geological Materials With ICP-MS. *Science Bulletin*, 62(4): 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.01.004>
- Chen, Z.X., Chen, J.B., Zeng, Z.G., 2021. Zinc Isotopes of the Mariana and Ryukyu Arc-Related Lavas Reveal Recycling of Forearc Serpentinites Into the Subarc Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126 (11):1-23. <https://doi.org/10.1029/2021JB022261>
- Deng, J., Liu, X.F., Wang, Q.F., et al., 2017. Isotopic Characterization and Petrogenetic Modeling of Early Cretaceous Mafic Diking-Lithospheric Extension in the North China Craton, Eastern Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 129(11-12): 1379-1407. <https://doi.org/10.1130/B31609.1>
- Den, J., Yang, L.Q., Groves, D.I., et al., 2020. An Integrated Mineral System Model for the Gold Deposits of the Giant Jiaodong Province, Eastern China. *Earth-Science Reviews*, 208: 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103274>
- Feng, L.Q., Gu, X.X., Zhang, Y.M., et al., 2020. Geology and Geochronology of the Shijia Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Ore Geology Reviews*, 120:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103432>
- Fischer, S., Prelević, D., Akal, C., et al., 2022. The Role of Syn-Extensional Lamprophyre Magmatism in Crustal Dynamics-The Case of the Menderes Metamorphic Core Complex, Western Turkey. *Journal of Petrology*, 63(4):1-28. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac024>
- Griffin, W.L., Belousova, E.A., Shee, S.R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence From Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3): 231-282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Hoernle, K., Tilton, G., Le Bas, et al., 2002. Geochemistry of Oceanic Carbonatites Compared With Continental Carbonatites: Mantle Recycling of Oceanic Crustal Carbonate. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142 (4): 520-542. <https://doi.org/10.1007/s004100100308>
- Huang, X., 2021. Discussion on the Characteristics and Genesis of the Daliuhang Gold Deposit in Jiaodong. *Northwestern Geology*, 54(4): 129-141 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Wang, Y.J., Song, Q., et al., 2022. Wide Field Electromagnetic Exploration and Prospecting of Metallogenic Structures in Daliuhang Gold Field, the North of Jiaodong. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 1107-1120 (in Chinese with English abstract).
- He, D.Y., Qiu, K.F., Simon, A.C., et al., 2024. Mantle Oxidation by Sulfur Drives the Formation of Giant Gold Deposits in Subduction Zones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(52):1-11. <https://doi.org/10.1073/pnas.2404731121>
- Hu, W.X., Song, M.C., Li, J., et al., 2024. Source of Ore-forming Materials in Jiaodong Gold Deposits: Constraints from Gold Contents in Geological Units Related to Gold Mineralization. *Gold Science and Technology*, 32(5): 781-797 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B.M., Auvray, B., Cornichet, J., et al., 1987. 3.5 Ga old Amphibolites From Eastern Hebei Province, China: Field Occurrence, Petrography, Sm-Nd Isochronage, and REE Geochemistry. *Precambrian Research*, 34(3-4): 311-346. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(87\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(87)90006-4)

- Ji, L., Liu, J.L., Ding, X., et al., 2022. Lithospheric Thinning of the North China Craton: Insights From Early Cretaceous Intermediate – Mafic Dyke Swarms in Jiaodong Peninsula. *Gondwana Research*, 107: 84-106. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.020>
- Liu, B.X., Zhang, Z.C., Cheng, Z.G., 2021. Classification, Characteristics and Petrogenesis of Lamprophyres: An Overview. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 292-316 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.Y., Nutman, A.P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of 3800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339-342. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Liu, J.L., Ji, L., Ni, J.L., et al., 2022. Dynamics of the Early Cretaceous Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton as the Consequence of Paleo-Pacific Type Active Continental Margin. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3360-3380 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1): 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, S., Hu, R.Z., Zhao, J. H., 2004. K-Ar Geochronology of Mesozoic Mafic Dikes in Shandong Province, Eastern China: Implications for Crustal Extension. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 1207-1213. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2004.tb00777.x>
- Liu, S., Hu, R. Z., Zhao, J. H., et al., 2005. Petrological and Geochemical Characteristics and Genesis of Late Mesozoic Lamprophyres in Northern Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 947-958 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, R. Z., Gao, S., et al., 2009. Petrogenesis of Late Mesozoic Mafic Dykes in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. *Lithos*, 113: 621-639. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.035>
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt – Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Li, G.X., Zeng, L.S., Gao, L.E., et al., 2024. Late Eocene Sodic Calc-Alkaline Lamprophyre in Gangdese Batholith, Southern Tibet: Implications for Mantle Metasomatism by Carbonatitic Melt. *Geological Society of America Bulletin*. 137(1-2):630-648. <https://doi.org/10.1130/B37566.1>
- Li, J., Zhang, L.P., Song, M.C., et al., 2025. Destruction of the North China Craton Accounts for the Shijia Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 181: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106609>
- Ma, L., Jiang, S.Y., Hofmann, A.W., et al., 2014a. Lithospheric and Asthenospheric Sources of Lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A Consequence of Rapid Lithospheric Thinning Beneath the North China Craton?. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 124: 250-271. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.09.035>
- Ma, L., Jiang, S.Y., Hou, M.L., et al., 2014b. Geochemistry of Early Cretaceous Calc-Alkaline Lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implications for Lithospheric Evolution of the Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 25(2): 859-872. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.012>
- Ma, S.X., Bai, Y.N., Sun, Y.L., et al., 2020. Fluid Inclusions and Stable Isotopes Study of Yanshan

- Gold Deposit in the Penglai Area, Eastern Shandong Province [J/OL]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3391-3403 (in Chinese with English abstract).
- Niu, Y.L., 2005. Generation and Evolution of Basaltic Magmas: Some Basic Concepts and a New View on the Origin of Mesozoic-Cenozoic Basaltic Volcanism in Eastern China. *Geological Journal of China Universities*, (01): 9-46.
- Niu, Y.L., Liu, Y., Xue, Q., et al., 2015. Exotic Origin of the Chinese Continental Shelf: New Insights into the Tectonic Evolution of the Western Pacific and Eastern China Since the Mesozoic. *Science Bulletin*, 60(18):1598-1616. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0891-z>
- Niu, Y.L., 2016. The Meaning of Global Ocean Ridge Basalt Major Element Compositions. *Journal of Petrology*, 57(11-12): 2081-2103. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw073>
- Ni, J.L., Liu, J.L., Wang, Y.R., et al., 2025. Control of the Shift in Subduction Direction on Upper Plate Tectonic Extension and Gold Mineralization: A Case Study From the Early Cretaceous Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Tectonics*, 44(3):1-39. <https://doi.org/10.1029/2024TC008585>
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024. The Role of an Oxidized Lithospheric Mantle in Gold Mobilization. *Science Advances*, 10(41): 1-9. DOI: 10.1126/sciadv.ado6262
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on geochemistry*, 3: 1-64. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Shi, Q.H., Zhang, Y.M., Gu, X.X., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Early Cretaceous Mafic-Felsic Dykes in the Shijia Gold Deposit, Penglai, Shandong Province. *Northwestern Geology*, 56(1): 99-116 (in Chinese with English abstract).
- Song, M.C., Song, Y.X., Ding, Z.J., et al., 2018. Jiaodong Gold Deposits: Essential Characteristics and Major Controversy. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406-422 (in Chinese with English abstract).
- Song, M.C., Yang, L.Q., Fan, H.R., et al., 2022. Current Progress of Metallogenic Research and Deep Prospecting of Gold Deposits in the Jiaodong Peninsula During 10 Years for Exploration Breakthrough Strategic Action. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 903-935 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, J.G., Hu, S.X., Liu, J.M., 2001. A Study of Sr, Nd and O Isotopes of the K-Rich Melanocratic Dykes in the Late Mesozoic Gold Field in the Jiaodong Peninsula. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 75 (4): 432-444. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2001.tb00061.x>
- Sun, P., Guo, P.Y., Niu, Y.L., 2021. Eastern China Continental Lithosphere Thinning Is a Consequence of Paleo-Pacific Plate Subduction: A Review and New Perspectives. *Earth-Science Reviews*, 218:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103680>
- Sun, P., Niu, Y.L., Guo, P.Y., et al., 2022. Sublithosphere Mantle Crystallization and Immiscible Sulfide Melt Segregation in Continental Basalt Magmatism: Evidence from Clinopyroxene Megacrysts in the Cenozoic Basalts of Eastern China. *Journal of Petrology*, 63(2):1-27. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac001>
- Vermeesch, P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479-1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Wang, L., Tang, H.Y., Wang, X., et al., 2024. The Cretaceous Volcanic Rocks in the Eastern North

- China Craton: Records of Heterogeneous Modification of Recycled Crustal Components. *Earth Science*, 49(2): 669-684 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.G., Li, X.C., Liu, H.C., 2008. Constraints of the Dyke Swarm in the Zhaoping Fault Zone on Gold Mineralization. *China Mining Magazine*, 17(12):64-70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Wang, Z.C., Cheng, H., et al., 2020. Early Cretaceous Lamprophyre Dyke Swarms in Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton: Implications for Mantle Metasomatism Related to Subduction. *Lithos*, 368-369:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105593>
- Wang, X., Wang, Z.C., Cheng, H., et al., 2022. Gold Endowment of the Metasomatized Lithospheric Mantle for Giant Gold Deposits: Insights from Lamprophyre Dykes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316: 21-40. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.10.006>
- Wang, X., Wang, Z.C., Zhang, W., et al., 2024. Sulfur Isotopes of Lamprophyres and Implications for the Control of Metasomatized Lithospheric Mantle on the Giant Jiaodong Gold Deposits, Eastern China. *Geological Society of America Bulletin*, 136(7-8): 3405-3418. <https://doi.org/10.1130/B37274.1>
- Wang, Z.C., Cheng, H., Zong, K.Q., et al., 2019. Metasomatized Lithospheric Mantle for Mesozoic Giant Gold Deposits in the North China Craton. *Geology*, 48(2):169–173. <https://doi.org/10.1130/G46662.1>
- Wang, Z.C., Wang, X., Zong, K.Q., et al., 2023. Evolution of Crust-Mantle in North China and the Mineralization of Huge Amounts of Gold in Jiaodong. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(6): 1231-1247, 1210 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Research on the Mineralogy of the Genesis of Zircon and Its Constraints on the Age Interpretation of U-Pb. *Science Bulletin* (16): 1589-1604 (in Chinese).
- Xue, F., Santosh, M., Tsunogae, T., et al., 2019. Geochemical and Isotopic Imprints of Early Cretaceous Mafic and Felsic Dyke Suites Track Lithosphere-Asthenosphere Interaction and Craton Destruction in the North China Craton. *Lithos*, 326-327: 174-199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.013>
- Yang, L.Q., Deng, J., Zhang, L., et al., 2024. Jiaodong-Type Gold Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 40(6): 1691-1711 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Chung, S.L., Zhai, M.G., et al., 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Mafic Dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for Vein-Plus-Peridotite Melting in the Lithospheric Mantle. *Lithos*, 73(3/4): 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.003>
- Ye, L., Liu, J.J., Niu, Y.L., et al., 2015. Mantle Sources and Petrogenesis of the Cenozoic Basalts in Fanshi, Shanxi Province: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1):161-175 (in Chinese with English abstract).
- Ying, J.F., Zhou, X.H., Zhang, H.F.; 2004. Geochemical and Isotopic Investigation of the Laiwu – Zibo Carbonatites from Western Shandong Province, China, and Implications for Their Petrogenesis and Enriched Mantle Source. *Lithos*, 75(3-4):413-426. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.037>
- Yu, X.W., Zhang, W., Liu, H.D., et al., 2023. Metallogenic Fluid and Material Source of Ankou Gold Deposit in Daliuhang Gold Ore Field, Jiaodong. *Mineral Deposits*, 42(2): 310-330 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Zhang, Y.D., 2018. Geological Characteristics of the Gaojiagou Gold Deposit and Future

- Prospecting in Penglai, Shandong. *World Nonferrous Metals* (2): 94-95 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Xu, R.F., Xu, F., et al., 2006. Geological Characteristics of Gold Deposits and Ore-Searching Direction in Daliuhang Area, Penglai City, Shandong Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research* (4): 258-261, 269 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.H., Shao, Y.B., Ji, X.B., et al., 2024. Geochemistry, Zircon U-Pb Age, Lu-Hf Isotope Characteristics and Tectonic Significance of Mesozoic Granite in Daliuhang Area of Jiaodong. *Geological Science and Technology Bulletin*: 1-26 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.X., Wang, Z.C., He, T., et al., 2023. Heavy Halogen Compositions of Lamprophyres Derived from Metasomatized Lithospheric Mantle Beneath Eastern North China Craton. *American Mineralogist*, 108(10):1825-1839. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8693>

附中文参考文献

- 黄鑫, 2021. 胶东大柳行金矿矿床特征及成因探讨. *西北地质*, 54(4): 129-141.
- 黄鑫, 王勇军, 宋倩, 等, 2022. 胶东北部大柳行金矿田成矿构造的广域电磁法勘查及对深部找矿的指示. *地质通报*, 41(6): 1107-1120.
- 胡文萱, 宋明春, 李杰, 等, 2024. 胶东金矿成矿物质来源: 来自与金成矿有关地质单元金含量的约束. *黄金科学技术*, 32(5): 781-797.
- 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等, 2005. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究. *岩石学报*, 34 (3):947-958.
- 刘秉翔, 张招崇, 程志国, 2021. 煌斑岩的分类、特征及成因. *地质学报*, 95(2): 292-316.
- 刘俊来, 季雷, 倪金龙, 等, 2022. 早白垩世华北克拉通岩石圈减薄与破坏动力学: 兼论古太平洋型活动大陆边缘. *地质学报*, 96(10): 3360-3380.
- 马顺溪, 白宜娜, 孙永联, 等, 2020. 胶东蓬莱大柳行金矿田燕山金矿床流体包裹体特征和氢-氧同位素研究. *地质学报*, 94(11): 3391-3403.
- 石启慧, 章永梅, 顾雪祥, 等, 2023. 山东蓬莱石家金矿床早白垩世镁铁质-长英质脉岩地球化学特征及其成因. *西北地质*, 56(1): 99-116.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等, 2018. 胶东金矿床:基本特征和主要争议. *黄金科学技术*, 26(4): 406-422.
- 宋明春, 杨立强, 范宏瑞, 等, 2022. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展. *地质通报*, 41(6): 903-935.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*(16): 1589-1604.
- 王建国, 李秀臣, 刘洪臣., 2008. 招平断裂带脉岩群对金成矿的约束. *中国矿业*, 17 (12), 64-70.
- 汪在聪, 汪翔, 宗克清, 等, 2023. 华北克拉通壳幔演化与胶东巨量金成矿作用. *矿物岩石地球化学通报*, 42(6): 1231-1247, 1210.
- 汪浪, 汤华云, 汪翔, 等, 2024. 华北克拉通东部早白垩世火山岩: 再循环物质差异性改造的记录. *地球科学*, 49(2): 669-684.
- 叶蕾, 刘金菊, 牛耀龄, 等, 2015. 山西繁峙新生代玄武岩地幔源区及成因探讨: 元素及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学证据. *岩石学报*, 31 (1): 161-175
- 于晓卫, 张文, 刘汉栋, 等, 2023. 胶东大柳行金矿田庵口金矿床成矿流体与成矿物质来源. *矿床地质*, 42(2): 310-330.
- 杨立强, 邓军, 张良, 等, 2024. 胶东型金矿. *岩石学报*, 40(6): 1691-1711.
- 张强, 徐汝峰, 许方, 等, 2006. 山东省蓬莱大柳行地区金矿地质特征及找矿方向. *地质找矿*

论丛(4): 258-261, 269.

张朋, 张艺多, 2018. 山东蓬莱高家沟金矿床地质特征及找矿方向. 世界有色金属(2): 94-95.

赵智华, 邵玉宝, 纪旭波, 等, 2024. 胶东大柳行地区中生代花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素特征及其构造意义. 地质科技通报: 1-26.