

陕西洛南绿松石的锶同位素特征及其产地意义

——兼论二里头出土绿松石的产源

先怡衡¹, 樊静怡¹, 李欣桐¹, 李延祥², 周雪琪³, 高占远⁴, 吴萌蕾

(1. 西北大学文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 北京科技大学科技史与文化遗产研究院, 北京 100083); 3. 北京大学考古文博学院, 北京 100871; 4. 天津城建大学, 天津 300384)

摘要: 陕西洛南县河口绿松石采矿遗址距今约 4 000 年, 为中国目前最早的一处绿松石采矿遗址。为判定该古矿出产绿松石的流向和中国古代绿松石矿料的来源, 尝试利用固体热电离高精度质谱计检测秦岭东段 5 处绿松石矿样品的 Sr 同位素比值, 进而对不同产地绿松石开展产源判别研究, 期望为绿松石产源示踪提供帮助。结果发现: Sr 同位素比值可以以 0.710 5 和 0.716 5 为界划分为 3 个聚集区。随之建立 Sr 含量和 Sr 同位素二元散点图, 发现 Sr 的地球化学特征能够在一定程度上实现对不同产地绿松石的产源区分。运用该区分成果, 发现二里头出土的绿松石废料与洛南古矿有着较为密切的关系。该研究为寻找河口古矿的绿松石流向提供帮助, 也为开展绿松石文物产源研究提供技术支持。

关键词: 绿松石; Sr 同位素; 产源区分; 二里头遗址

中图分类号: P619. 28

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)02-0108-08

Research on the Source Characteristics of Luonan Turquoise by Using Strontium Isotopic Method

XIAN Yiheng¹, FAN Jingyi¹, LI Xintong¹, LI Yanxiang²,
ZHOU Xueqi³, GAO Zhanyuan⁴, WU Menglei¹

(1. Key Laboratory of Cultural Heritage Conservation and Research, Ministry of Education, Northwest University, Xian 710069, Shaanxi, China; 2. Institute of Cultural Heritage and History of Science & Technology, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, Beijing, China; 3. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, Beijing, China)

Abstract: The discovery of the Hekou ancient turquoise mining site in Shaanxi provides significant information for the provenance of turquoise in early China. High Precision Mass Spectrometer has been employed to try to detect the strontium isotopic composition of the turquoise samples that from five mines in the eastern Qinling Mountains. And then, the respective habitat characteristics of these turquoise samples have been identified and analyzed. The result shows that the strontium isotope ratio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) of turquoise can be divided into three groups, with a range of 0.710 5 to 0.716 5. If the content of Strontium has been put into consider, the separation effect

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2018-03-18

基金项目: 国家自然科学基金“新疆东部公元前一千纪出土绿松石制品产源研”“陕西洛南辣子洞采矿遗址综合研究”(51704241)(51374030); 教育部人文社科青年项目“河南拐峪绿松石采矿”, “遗址调查研究”(17YJC780007); 陕西省教育厅人文项目“陕西洛南河口绿松石采矿遗址调查研究”(17JK0722)

作者简介: 先怡衡(1983-), 男, 博士, 讲师, 从事科技考古、矿冶考古研究。E-mail: xianyiheng@sina.com

can be improved. Combined with the content data of the trace element Sr, a model for distinguishing different origins of turquoise has been established. Through using this model to test the turquoise from the Erlitou site, the result suggests that the Erlitou turquoise was likely to come from the Luonan ancient turquoise mine.

Keywords: turquoise; strontium isotope; habitat discrimination; Erlitou site

绿松石是一种含水铜铝磷酸盐类矿物,它是由富含铝的岩浆岩和沉积岩风化淋滤生成的;常见块状、粒状、结核状、皮壳状和细脉状等。绿松石成矿原理大多为流体成矿,其形成和特征受地质规律的控制,导致不同产地矿石的地球化学特征可能有所不同,这就成为判断宝玉石产源的一项关键技术指标。

Sr 元素常在不同的矿物体中的赋存,而这些赋存的 Sr 元素的来源其实有着多元途径,而且演示中所含 Sr 的多少也与其晶体结构存在某种关联,使其 Sr 含量在不同岩石、地质环境中产生了差异(牟保磊,1999)。

对于一些元素的同位素而言,常常被用作研究产地的示踪元素开展相关科研工作。 ^{87}Sr 为 ^{87}Rb 的放射成因同位素,岩石中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值差异可能反映出其生成年龄或来源的不同,且 ^{87}Sr 、 ^{86}Sr 属稳定同位素,不易发生分馏作用(福尔 G 等,1975)。

综述以上,结合 Sr 含量与 Sr 同位素比值,利用这 2 个因子可以很好地反映样品的产地特征。

鉴于绿松石的矿物学特点,选用 Sr 同位素有其相对的优势。

在科技考古领域,Sr 同位素在其他材质文物产源研究中也发挥着越来越多的作用。例如,李宝平(李宝平等,2009)、张翼(张翼等,2004)等人将 Sr 同位素结合微量元素,示踪中国早期高规格墓葬出土白陶的产地研究,取得了较好的成果。此外,钱俊龙运用 Sr 同位素对早期西方玻璃器的生产进行了研究(钱俊龙,2003)。

在美国,艾莉森将 Sr 同位素应用于示踪普韦布洛·波尼托遗址出土的绿松石文物制品的产源研究方面取得了较好的产地研究结论(ALYSON. M. T et al.,2007)。

笔者所在研究团队于 2011 年在陕西洛南县洛河沿岸发现了一座古老的绿松石采矿遗址(先怡衡等,2016)。近年的研究结果表明河口绿松石采矿遗址是目前中国发现最早的绿松石采矿遗址(图 1),其开采时间在公元前 1900—公元前 500,这为追寻中国古代绿松石产源提供了新的材料支撑。

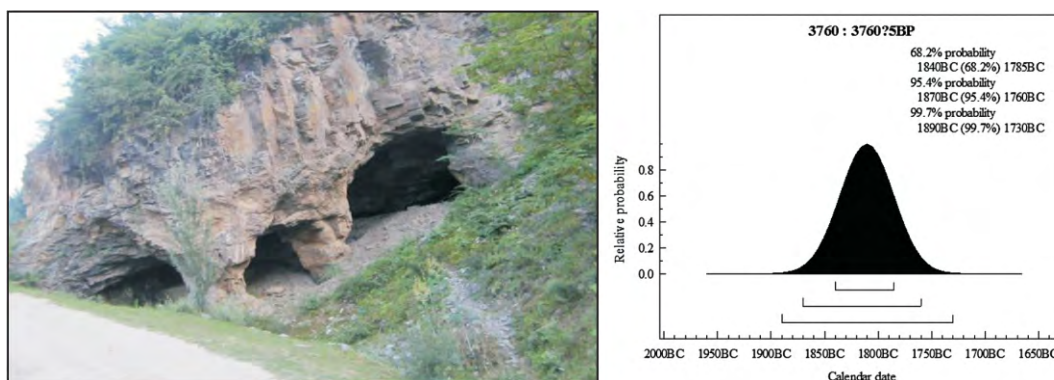


图 1 陕西洛南古老的绿松石采矿遗址和遗址的 ^{14}C 测年数据图

Fig 1 The turquoise mining site in Luonan, Shaanxi and the C-14 data

本实验将洛南河口遗址所产绿松石与周边地域的现代绿松石矿区样品作为研究对象,运用热电离高精度质谱计测试 Sr 同位素比值,运用等离子体质谱分析仪检测 Sr 含量,为绿松石的产地区分提供基础数据,以此尝试依靠 Sr 同位素研究绿松石产源。

1 实验部分

1.1 仪器

Sr 同位素的测试仪器是 IsoProbe-T 热电离质

谱仪(TI-MS),英国GV公司(原MicroMass公司)制造。该设备配置有17个接收器,包括9个法拉第杯、1个戴利探测器、1个电子倍增器和7个离子计数器,可以满足微量-超微量样品的高精度同位素分析测试。该仪器具有高精度、高灵敏度等特点,可实现极微量样品条件下的高精度同位素比值的测量,可达到内、外部精度的一致。此外仪器对Sr同位素具有更高的灵敏度,Sr标准物质NBS987获得平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.710\,241\,8\pm$

$0.000\,005\,1$ 。微量Sr标准物质($0.3\sim 1\text{ng}$)的同位素比值测量,内部精度可以优于 0.003% (LUDWIG, K. R, 2001),适合开展文物样品的Sr同位素检测。Sr含量比值数据的获得则是利用Elan DCR-e型等离子体质谱分析仪(ICP-OES)开展的检测。

1.2 实验样品

本次采集的50件绿松石矿石样品分别来自5个矿区和二里头遗址(图2),具体见表1。

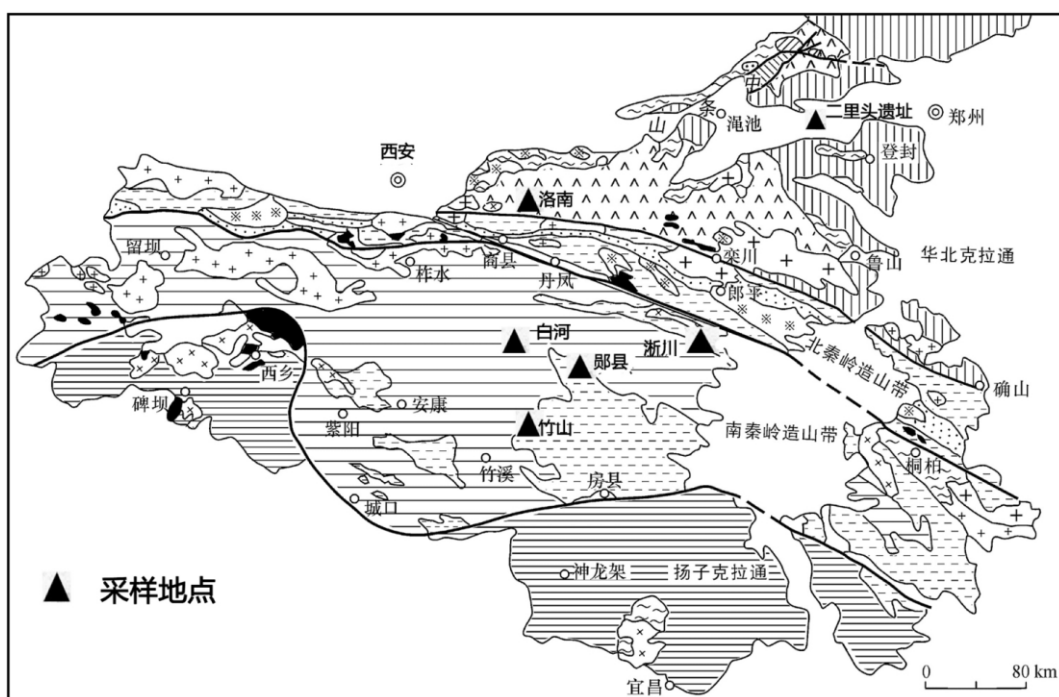


图2 样品来自于秦岭周边的5个绿松石矿区示意图(修改自真允庆,2006)

Fig. 2 A sketch map of the five turquoise mining stricts where the samples come from (The map was modified by ZHEN Yunqing's work)(代表样品来源地)

2 结果与讨论

2.1 样品Sr的地球化学测定结果与分析

所测样品的Sr同位素数据和Sr含量比值数据结果见表2和表3。

从表3可知,各产地Sr同位素的变化幅度都较小,在 $0.03\%\sim 1.27\%$,但各地之间的Sr含量变化非常明显。观察LZY-1(lzy-1-1, lzy-1-2)2次重复的测试数据发现,Sr同位素变化率优于 0.2% ,可见仪器的稳定性较好(表2)。

2.2 各矿区绿松石的Sr含量

观察5个矿区绿松石样品所测得的Sr含量(图3),可以发现,浙川和洛南矿石样品Sr含量较高,变化幅度较之其他产地也较大,尤其是浙川样品,Sr含量明显高于其他产区,平均值高达 $3\,227\times 10^{-6}$ 。此现象可能是因为浙川绿松石处于钒矿带,故常伴生黏土矿物。洛南辣子崖绿松石赋存于黑色页岩体内,两者地质环境均容易造成Sr元素富集(涂怀奎,1996)。而郧县、白河和竹山Sr含量保持较好的一致性,变化幅度亦较小,可能与三者具有相似的地质环境有关。

表 1 检测样品的编号表
Tab 1 Number series of samples

采样矿点	陕西洛南	湖北郧县	湖北竹山	陕西白河	河南淅川	二里头遗址
样品 编 号	lzy-1-1	yx-1	zs-01	bld-1	xc-2014-1	ELT-1
	lzy-1-2	yx-2	zs-02	bld-2	xc-2014-2	ELT-2
	lzy-2	yx-3	zs-03	bld-3	xc-2014-3	ELT-3
	lzy-3	yx-4	zs-04	bld-4	xc-2014-4	—
	lzy-4	yx-5	zs-05	bld-5	xc-2014-5	—
	lzy-5	yx-6	zs-06	bld-6	xcdsq-1	—
	lzy-6	yx-7	zs-07	bld-7	xcdsq-2	—
	lzy-7	yx-8	zs-08	bld-8	xcdsq-7	—
	lzy-8	yx-9	—	bld-10	xcdsq-9	—
	lzy-9	—	—	—	—	—
	lzy-11	—	—	—	—	—
	lzy2014-1	—	—	—	—	—
	lzy2014-2	—	—	—	—	—

表 2 5 个产地绿松石 Sr 同位素比值数据表(误差以 2 δ 计)
Tab 2 Sr isotope ratio of the turquoise from the five mines (Error in 2 δ)

名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	名称	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
lzy-1-1	0.714 32	yx-1	0.711 14	zs-01	0.710 19	bld-1	0.717 23	xc-2014-1	0.709 95
lzy-1-2	0.714 30	yx-2	0.710 79	zs-02	0.710 01	bld-2	0.718 37	xc-2014-2	0.709 63
lzy-2	0.711 75	yx-3	0.712 72	zs-03	0.709 09	bld-3	0.717 13	xc-2014-3	0.709 86
lzy-3	0.711 59	yx-4	0.711 12	zs-04	0.710 35	bld-4	0.718 35	xc-2014-4	0.709 64
lzy-4	0.711 56	yx-5	0.710 72	zs-05	0.710 06	bld-5	0.717 60	xc-2014-5	0.709 68
lzy-5	0.713 31	yx-6	0.712 03	zs-06	0.709 91	bld-6	0.709 95	xcdsq-1	0.709 95
lzy-6	0.711 70	yx-7	0.711 91	zs-07	0.709 83	bld-7	0.716 57	xcdsq-2	0.709 94
lzy-7	0.711 61	yx-8	0.711 84	zs-08	0.709 67	bld-8	0.717 64	xcdsq-7	0.709 70
lzy-8	0.711 90	yx-9	0.712 67			bld-10	0.717 75	xcdsq-9	0.709 75
lzy-9	0.712 40								
lzy-11	0.711 54								
lzy2014-1	0.711 58								
lzy2014-2	0.711 58								

2.3 各矿区绿松石的 Sr 同位素

从样品 Sr 同位素内部特征看,湖北郧县、湖北竹山、河南淅川 3 个产地的绿松石样品中 Sr 同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值内部变化幅度较小(郧县 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710 72 \sim 0.712 72$, 淅川 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709 63 \sim 0.709 95$, 竹山 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709 09 \sim 0.710 35$); 陕西白河和陕西洛南绿松石样品的 Sr 同位素内部变

化幅度稍大于其他 3 个产区(白河 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709 95 \sim 0.718 35$, 洛南 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.711 56 \sim 0.714 32$), 但 Sr 同位素比值平均变化率均小于 0.6‰, 说明 Sr 同位素比较集中, 保持较好的一致性, 也说明了各个矿区绿松石的 Sr 同位素数值比较稳定。不同矿区样品的 Sr 同位素的比值变化率较之一产区为大(图 4)。

表3 5个产地绿松石Sr含量数值表(10⁻⁶)
Tab 3 Sr content of the turquoise from five mines (10⁻⁶)

名称	Sr	名称	Sr	名称	Sr	名称	Sr	名称	Sr
lzy-1-2	29.22	yx-1	14.7	zs-01	37.1	bld-1	14.7	xc-2014-1	2 264
lzy-2	111.41	yx-2	88.7	zs-02	140	bld-2	33	xc-2014-2	861
lzy-3	89.42	yx-3	745	zs-03	1 068	bld-3	30.2	xc-2014-3	1 792
lzy-4	4 603.2	yx-4	94.1	zs-04	128	bld-4	140	xc-2014-4	4 440
lzy-5	4 421.22	yx-5	89	zs-05	37.1	bld-5	22.7	xc-2014-5	6 176
lzy-6	1 248.18	yx-6	106	zs-06	76	bld-6	146	xcdsq-1	6 313
lzy-7	230.87	yx-7	76.2	zs-07	49.2	bld-7	84.6	xcdsq-2	3 196
lzy-8	63.74	yx-8	385	zs-08	57.6	bld-8	46.1	xcdsq-7	1 740
lzy-9	44.98	yx-9	249			bld-10	32.1	xcdsq-9	2 264
lzy-11	1111								
lzy2014-1	1 171.2								
lzy2014-2	1 640.9								

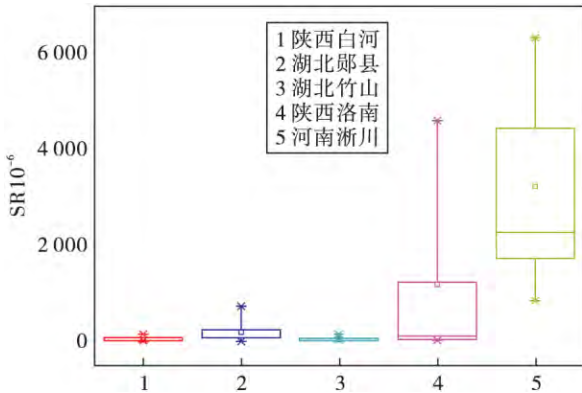


图3 各矿区绿松石样品的Sr含量箱式图

Fig 3 Box plot in Sr content of turquoise from five mines

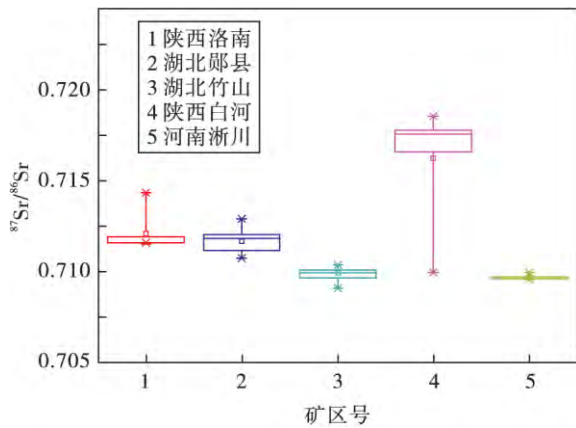


图4 各矿区样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值对比图

Fig 4 Box plot in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of turquoise from five mines

在对各个矿区样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值分析中,可以看出这些绿松石样品的Sr同位素比值以0.7105、0.7165为界,可将这些矿区划分为3个聚集区(图5)。湖北竹山、河南浙川矿区绿松石样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr小于0.7105,位于第I聚集区;湖北郧县、陕西洛南产地绿松石样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值基本大于0.7105,却小于0.7165,位于第II聚集区;陕西白河绿松石样品绝大多数均大于0.7165,将其列为第III聚集区。这种现象反映出竹山、浙川所在矿区的地质生成年代与其他3个矿区有异。白河矿区样品的Sr同位素比值达0.71835,与其他矿区有着明显的差别。

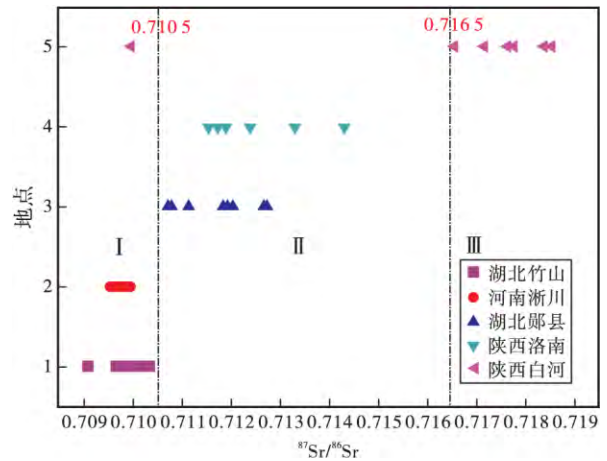


图5 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值所区分出的3个聚集区分布图

Fig 5 Scatter plot of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of turquoise from five mines

2.4 Sr 含量与 Sr 同位素数值综合分析

将各产地样品的 Sr 含量和 Sr 同位素比值结合(图 6), 可以发现 Sr 同位素同位于第一聚集区的竹山和浙川绿松石样品, 在引入 Sr 含量这一变量以后, 样品产地得到了较好的区分。而白河因为其特殊的 Sr 同位素数值和较低的 Sr 含量有着较独立的聚集区域和分布趋势。

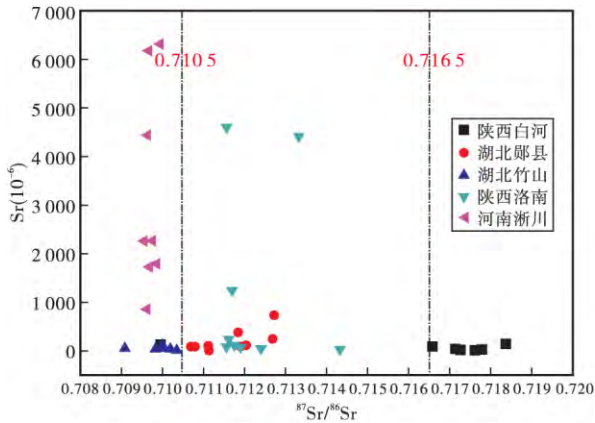


图 6 各矿区样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Sr 含量关系图

Fig. 6 Scatter plot of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr versus Sr content of turquoise from five mines

郧县样品亦保持着较好的自我聚集性。洛南地区的样品 Sr 同位素的比值变化较小, 大多集中在 0.711 56~0.714 32 这个区域内, 在一定程度上与郧县有数据发生重叠。但在 Sr 含量方面, 洛南变化幅度较大, 最高值高达 $4\ 600 \times 10^{-6}$, 使其分布趋势呈纵向分布, 与郧县产生差异。

从上可知, Sr 含量与 Sr 同位素比值相结合亦可一定程度实现区分的效果, 可以较好地将 5 个绿松石产地分为 4 个聚集区, 洛南和郧县的矿区虽有部分重叠, 但也形成了自我独立的分布态势。

2.5 二里头遗址出土绿松石产源探究

为验证上述所建立的模型的可行性, 本研究将来自二里头遗址出土的 3 件绿松石文物, 对其开展 Sr 同位素比值和 Sr 含量的检测(表 4)。该批文物样品都来自于偃师二里头宫城以南绿松石废料灰坑, 灰坑编号 2004VT85H290, 其年代不晚于公元前 1600 年(社科院二里头工作队, 2004)。结合笔者呈现的 5 处矿点的区分结果, 对二里头出土绿松石文物的矿料来源进行推测, 并验证区分模型的可操作性。

表 4 二里头出土绿松石 Sr 地球化学数值表(误差以 2δ 计)
Tab 4 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and Sr content of the turquoise from Erlitou site (error in 2δ)

名称	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
ELT-1	111	0.716 01
ELT-2	1 711. 2	0.715 03
ELT-3	64. 9	0.713 61

随之将二里头绿松石 Sr 的同位素比值和 Sr 含量数据纳入笔者建立的散点图中。

从图 7 中可以发现, 3 件绿松石样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 数值分别为 0.713 61、0.715 03 和 0.716 01, 与洛南、白河较为一致, 与竹山、浙川和白河样品有不大差异。

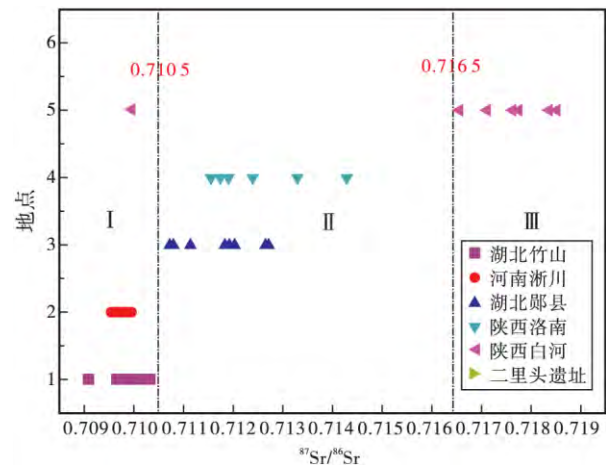


图 7 二里头出土绿松石与各个矿区样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 关系图

Fig. 7 Comparison in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr between turquoise samples from Erlitou site and that from the five mines

洛南和白河的绿松石 Sr 同位素数据虽然有重叠区域, 但是二者也具有各自的分布态势。例如, 下图 8 所示, 在 0.711 5~0.713 0 之间是洛南和白河的重叠区域, 而洛南的 Sr 同位素数值一部分大于 0.713 0, 郧县的 Sr 同位素数值一部分小于 0.711 5, 在部分层面, 二者形成了各自的独立分布区域, 而在此图中, 二里头所测数据均大于 0.713 0, 与郧县样品的 Sr 同位素数据存在差异, 而与洛南保持较好的一致性。

随之将二里头绿松石检测数据置入 Sr 同位素和 Sr 含量联合模型中(图 9), 可以发现二里头的 3 个样品与洛南分布区域有较为密切的关系, 此结果与图 7、图 8 展示结果保持一致。根据以上多点可

以初步判断,二里头所取3件绿松石制品在Sr同位素和Sr含量方面与洛南绿松石采矿遗址所产样品具有较大的关联性。

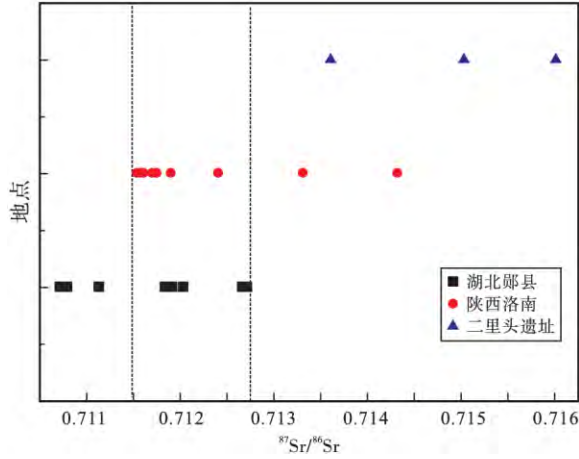


图8 二里头与洛南、郧县绿松石⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值关系图
Fig. 8 Comparison in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr between turquoise samples from Erlitou site and that from Luonan and Yunxian mines

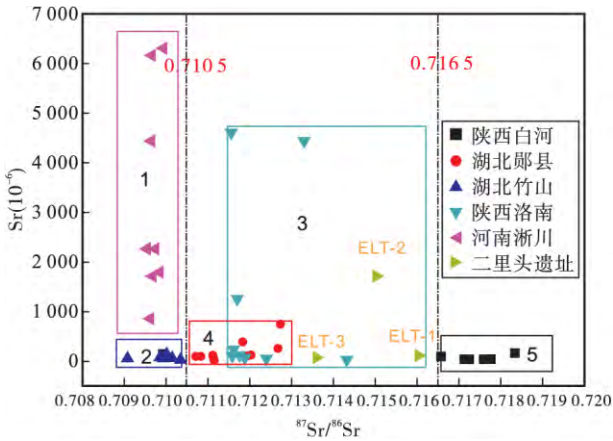


图9 二里头与各个矿区绿松石样品Sr-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr关系图
Fig. 9 Comparison in Sr-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr between turquoise samples from Erlitou site and that from the five mines

位于中国文明核心区的二里头遗址宫殿区发现了制作绿松石文物遗留的矿石废料(图10),显示出当时绿松石是作为一种珍稀资源被国家所控制,成为一种较高社会地位的宝石品种。但是大规模的绿松石原料“从何而来”一直受到关注。

团队所开展的洛南河口绿松石采矿遗址调查和研究,发现了大量的绿松石矿石和采矿遗物,此发现填补了中国早期绿松石开采技术研究方面的空白。

实验运用Sr地球化学区分不同矿区的绿松石,取得了较为理想的结果,且发现二里头出土绿松石矿料与河口古矿有较大的联系。这一结论为研究古代矿业活动与政治文明之间的关系提供了证据支撑。本次将绿松石采矿遗址考古学研究、绿松石文物和现代绿松石矿区矿样实验分析相结合的绿松石文物溯源示踪模式有助于将考古学和科学技术分析进行有机联系,增强研究的针对性和结论的可靠性。



图10 二里头遗址H290出土的绿松石图
Fig. 10 Waste product of turquoise in Erlitou site

3 结论

(1) 取样矿区所选用的绿松石矿石的Sr同位素数值具有较好的一致性;Sr含量各产地之间变化较明显。以浙川、洛南Sr含量最高,这可能与两地绿松石赋存地质特点有关。

(2) 各个矿区绿松石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值,以0.7105和0.7165为界,可划分为3个聚集区。分别为湖北竹山、河南浙川矿区属于第I聚集区,其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值基本处在0.7105以下;湖北郧县、陕西洛南属于第II聚集区,其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr数值基本处在0.7105以上,0.7165以下;陕西白河矿区的平均比值甚至高达0.718,属于第III聚集区。该现象可能与各矿区所在地质生成年代或组成矿物的Sr的来源有关。

(3) Sr同位素比值结合各产地Sr含量可以将河南浙川、湖北竹山、陕西白河的样本进行很好的区分。洛南、郧县的绿松石虽然存在数据分布上的重叠现象,但也在一定程度上存在独自的聚集区域。

(4)二里头出土文物样本的 Sr 地球化学特征与洛南绿松石较为一致,反映出二里头绿松石废料坑出土矿料与陕西洛南河口绿松石存在一定的关联性。这也与考古学研究结果相符合。

综上所述,将 Sr 含量和 Sr 同位素比值结合可以初步实现判别绿松石矿区样品的效果,将此结论所获取的模型用于研究绿松石文物的产源研究中,为探究洛南绿松石矿业遗址所产绿松石的流向提供技术支持,亦可为将来探讨其他绿松石矿区的开发历史提供帮助。

致谢:感谢中国社科院二里头工作站许宏研究员提供的样品!

参考文献(References):

北京科技大学,陕西省考古研究院.西洛南河口绿松石矿遗址调查报告[J].考古与文物,2016(3):11-17.

University of Science and Technology Beijing, Shaanxi Provincial Institute of Archaeology. Investigative report of turquoise mine in Luonan of Shanxi province[J]. Archaeology and Cultural Relics, 2016(3):11-17.

福尔 G, 鲍威尔 J L(中国科学院贵阳地球化学研究所同位素地质研究室译). 锶同位素地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1975, 4-7; 31-36.

牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 174-176.

李宝平, 刘莉, 等. 偃师二里头遗址出土白陶产地的初步探讨及锶同位素分析的重要意义. 古陶瓷科学技术国际学术讨论会论文集[A]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 65-70.

LI Baoping, LIU Li, et al. Preliminary research on white pottery in YanShi Erlitou site and importance of strontium isotope analysis. In: Collection of International Science and Technology of Ancient Ceramics Symposium [A]. Shanghai: Scientific and Technical Literature of Shanghai Press, 2009: 65-70.

钱俊龙. 锶同位素用来研究早期玻璃生产——来自近东拜占庭和早期伊斯兰玻璃[J]. 文物保护与考古科学, 2003,

15(4):56.

QIAN Junlong. The research of early glass production base on strontium isotope[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2003, 15(4):56.

涂怀奎. 陕鄂相邻地区绿松石矿地质特征[J]. 陕西地质, 1996(2):61-62.

TU Huaikui. Geological characteristics of turquoise from adjoining areas of Shan-E [J]. Geology of Shaanxi, 1996 (2):61-62.

真允庆. 中条铜矿与秦岭造山带[J]. 桂林工学院学报, 2006, 26(2):162-171.

ZHEN Yunqing. Copper mine of Zhongtiao and orogenic belt of Qinling Mountains[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2006, 26(2):162-171.

张翼, 陈江峰, 马林, 等. 铅和锶同位素组成在古陶产地判别中的联合应用[J]. 核技术, 2004, 27(3):201-206.

ZHANG Xun, CHEN Jiangfeng, MA lin, et al. Dual application of Lead and strontium isotopic compositions in discrimination of ancient pottery origin[J]. Nuclear Techniques, 2004, 27(3):201-206.

中国社会科学院考古研究所二里头工作队. 河南偃师二里头遗址宫城及宫城区外道路的勘察与发掘[J]. 考古, 2004(11):3-12.

Erlitou team of Institute of archaeology. Chinese Academy of Social Sciences Archaeology. Exploration and excavation of roads of outside palace and palace areas in Erlitou site of Yanshi of Henan province [J]. Archaeology, 2004 (11):3-12.

ALYSON M T, JOAQUIN R, JOHN T C. Lead and Strontium Isotopes as Tracers of Turquoise[J]. Soc Archaeol Sci Bull, 2007, 30:10-14.

LUDWIG, K. R., A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2001, 1:58.

MOUBaolei. Geochemistry of element [M]. Beijing: Peking University Press, 1999:174-176.

FAURE G, POWELL J L. Strontium isotope geology[M]. Beijing: Science Press, 1975:25.