

## 基于能量色散型 X 射线荧光光谱技术快速无损鉴别龙骨

罗志君<sup>1</sup>, 杨勇<sup>2</sup>, 臧艳<sup>2</sup>, 刘妍佳<sup>2</sup>, 周耀斌<sup>3</sup>, 朱国琴<sup>1\*</sup>

(1. 上海中医药大学中药学院, 上海 201203; 2. 上海市药材有限公司, 上海 200082; 3. 上海市质量监督检验技术研究院有限公司, 上海 200030)

**摘要:** 目的 运用能量色散型 X 射线荧光光谱 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 技术探索快速无损鉴别龙骨药材的新方法, 为其质量控制提供参考。方法 运用 EDX 技术对 26 批正品龙骨及 11 批伪品进行多位点测试 ( $n=2$ /样本), 实现对元素的定性、定量分析。结果 正品特征性含有八氧化三铀 ( $U_3O_8$ ) (检出率 100%), 且氧化锶 (SrO) 含量显著高于伪品 (正品 0.392%, 伪品 0.070%)。铀 (U) 元素和锶 (Sr) 元素含量赋存特征可作为龙骨真伪鉴别的指标。结论 运用 EDX 技术根据 U-Sr 元素组合标记可快速、无损地对龙骨药材进行真伪鉴别。

**关键词:** 龙骨; 真伪鉴别; 无损鉴别; EDX 技术; 元素检测

中图分类号: R284.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1528(2026)03-0858-07

doi:10.3969/j.issn.1001-1528.2026.03.021

## Rapid non-destructive identification of longgu by energy dispersive X-ray spectroscopy

LUO Zhi-jun<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>2</sup>, ZANG Yan<sup>2</sup>, LIU Yan-jia<sup>2</sup>, ZHOU Yao-bin<sup>3</sup>, ZHU Guo-qin<sup>1\*</sup>

(1. School of Pharmacy, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 2. Shanghai Traditional Chinese Medicine Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 3. Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

**KEY WORDS:** Longgu; authenticity identification; non-destructive identification; EDX technique; elements detection

龙骨为传统矿物类中药之一, 来源于哺乳动物(三趾马、犀类、鹿类、牛类、象类等)的骨骼化石或象类门齿的化石, 具有安神、潜阳、收敛之效, 主要用于治疗心悸易惊、失眠多梦、疮疡不敛等症<sup>[1-2]</sup>。龙骨临床应用广泛、疗效显著, 近年来市场需求呈上升趋势, 由于资源受限, 价格也随之前上涨, 虽已有对龙骨替代品的研究, 但尚无可替代药材<sup>[3-4]</sup>。目前, 市场上伪劣龙骨主要造假方式为将现代动物骨骼用碱浸、酸洗等方式处理, 或利用石灰、骨炭等相似材料进行人工捏合与塑形<sup>[5]</sup>。龙骨药材鉴别技术主要涵盖 2 个层级, 其一为基础鉴别, 包括性状鉴别、显微鉴别和化学鉴别, 其二为仪器分析, 如 X-射线衍射法 (X-ray diffraction,

XRD)、近红外光谱技术 (near infrared spectrometry, NIR) 等<sup>[6-7]</sup>。其中, 传统性状鉴别主观性强, 依赖检验人员的经验积累, 其他方法样品前处理较复杂、耗时较长, 建立兼备快速响应、无损检测、多元素同步分析特征的新型鉴别技术是提升龙骨药材质量控制的关键突破口。

能量色散型 X 射线荧光光谱 (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 技术具有高分辨率和灵敏度、分析速度快、测量范围大、无损检测等优点<sup>[8-9]</sup>, 广泛应用于材料科学、地质勘探、生物学、环境监测等领域<sup>[10-15]</sup>。本研究拟构建基于 EDX 技术的龙骨药材鉴别方法体系, 采用无标样基本参数 (fundamental parameters, FP) 法对 37

收稿日期: 2025-10-22

基金项目: 国家中医药管理局第七批全国老中医药专家学术经验继承工作项目 [国中医药办人教函 (2021) 272 号]; 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目 (ZJ2022-ZD-009)

作者简介: 罗志君 (1999—), 女, 硕士生, 从事中药质量标准化技术研究。E-mail: 15219803316@163.com

\* 通信作者: 朱国琴 (1975—), 女, 正高级工程师, 硕士生导师, 从事中药质量标准化技术研究。E-mail: zhugq@shstcm.com

批龙骨样品（正品 26 批，伪品 11 批）进行定性、定量分析，建立以八氧化三铀（ $U_3O_8$ ）特征性检出（特征谱线  $U\ L\alpha$ : 13.61 keV）与氧化锶（ $SrO$ ）含量特征为核心判据的鉴别模型，以期为龙骨中药材的质量控制提供新参考。

### 1 材料与方法

1.1 样品 样品收集于亳州市凯硕药业有限公司，共 31 批，经全国名老中医药专家传承工作室专家叶愈青鉴定，信息见表 1，自制伪品处理方法见表 2。另外随机抽取 10 批样品组成验证组（编号 VLG1~VLG10）。样品一般无需进行处理，刮除表面附着的泥土等杂质即可。

1.2 仪器 EDX-LE Plus 能量色散型 X 射线荧光分析仪（X 射线管靶材为 Rh，最高管压 50 kV，最大管流 1 000  $\mu A$ ，最大输出功率 50 W 的高能量发生器，准直器 1、3、5、10 mm，标准配备 1 次滤光片 5 种，含 OPEN，共计 6 种，PCEDX-Navi 分析软件，测试范围 Al-U）、迈拉膜，购自日本岛津公司。

表 1 样品信息

Tab. 1 Information of samples

编号	样品	产地	编号	样品	产地
LG1	龙骨	宁夏吴忠	LG20	龙骨	内蒙古乌兰察布
LG2	龙骨	宁夏灵武	LG21	龙骨	甘肃庆阳
LG3	龙骨	宁夏灵武	LG22	龙骨	甘肃庆阳
LG4	龙骨	宁夏固原	LG23	龙骨	陕西榆林
LG5	龙骨	宁夏吴忠	LG24	龙骨	陕西延安
LG6	龙骨	宁夏石嘴山	LG25	龙骨	宁夏银川
LG7	龙骨	陕西延安	LG26	龙骨	甘肃庆阳
LG8	龙骨	陕西延安	CLG27	伪品	—
LG9	龙骨	陕西延安	CLG28	伪品	—
LG10	龙骨	山西吕梁	CLG29	伪品	—
LG11	龙骨	河南三门峡	CLG30	伪品	—
LG12	龙骨	甘肃白银	CLG31	伪品	—
LG13	龙骨	内蒙古乌兰察布	SLG32	自制伪品	—
LG14	龙骨	内蒙古乌海	SLG33	自制伪品	—
LG15	龙骨	未知产地	SLG34	自制伪品	—
LG16	龙骨	宁夏中卫	SLG35	自制伪品	—
LG17	龙骨	宁夏吴忠	SLG36	自制伪品	—
LG18	龙骨	内蒙古乌兰察布	SLG37	自制伪品	—
LG19	龙骨	内蒙古乌海			

表 2 自制伪品处理方法

Tab. 2 Handling procedures for self-made counterfeits

骨头来源	编号	处理方法
猪	SLG32	水煮至无明显油脂,超声,洗涤,干燥
牛	SLG33	水煮至无明显油脂,超声,洗涤,干燥
羊	SLG34	水煮至无明显油脂,超声,洗涤,干燥
猪	SLG35	取部分 SLG32, 1 mol/L NaOH 溶液浸泡 4 h, 30% $H_2O_2$ 浸泡 5 h, 洗涤干燥 <sup>[16]</sup>
牛	SLG36	取部分 SLG33, 5% $Na_2CO_3$ 溶液浸泡 5 d, 30% $H_2O_2$ 浸泡 5 h, 洗涤干燥
羊	SLG37	取部分 SLG34, 6 mL/L $NH_3 \cdot H_2O$ 与 100 mL/L $H_2O_2$ 混合溶液浸泡 6 h, 30% $H_2O_2$ 浸泡 5 h, 洗涤干燥 <sup>[17]</sup>

1.3 检测条件 测试氛围大气；准直器 3 mm，其他条件见表 3。测试时，将待测样品平坦放置于覆有迈拉膜的载物板后置于测试窗口，选择分析条件，输入样品名称点击开始即可。本实验采用 FP

法对 47 批样品（实验组 37 批样品，验证组 10 批样品）进行测试，各样品随机取 2 个测试点位，共计有效测试点位 94 个。

表 3 各元素组分及测试条件

Tab. 3 Elements composition and test conditions

元素	靶管	管电压/kV	管电流/ $\mu A$	滤光片	通道数/keV	分析电压/keV	采集时间/s	死时间/%
Al-U	Rh	50	181-Auto	-	0~40	0.00~40.00	Live-50	30
Al-Sc	Rh	15	82-Auto	-	0~20	0.00~4.40	Live-50	29
S-K	Rh	15	1000-Auto	#2	0~20	2.10~3.40	Live-50	17
Cr-Fe	Rh	50	352-Auto	#3	0~40	5.20~6.60	Live-50	30
Zn-As, Pb	Rh	50	1000-Auto	#4	0~40	8.50~15.00	Live-50	13
Rh-Cd	Rh	50	1000-Auto	#1	0~40	15.50~23.50	Live-50	1

## 2 结果

### 2.1 元素组成差异分析

2.1.1 核心指标对比 EDX 检测结果表明，正品龙骨（26 批）与伪品（11 批）在元素组成上存在显著差异，见表 4~5、图 1。由此可知，所有正品

中均稳定检出  $U_3O_8$ （检出率 100%，平均值 0.019%），而伪品均未达检测限。这一特征性差异表明，铀（U）元素的赋存特征可作为龙骨真伪鉴别的指纹性指标。此外，正品  $SrO$  含量（ $0.392\% \pm 0.122\%$ ）明显高于伪品（ $0.070\% \pm 0.040\%$ ），见

图 2。由图 3 可知，元素 U 和锶 (Sr) 赋存特征图 析亦可将伪品单独聚为一类。

中 U-Sr 元素组合可清晰区分正伪品，通过聚类分

表 4 龙骨正品的元素组成 (以氧化物表示,  $\bar{x} \pm s, n = 26$ )

Tab. 4 Elements composition of authentic Longgu (expressed as oxides,  $\bar{x} \pm s, n = 26$ )

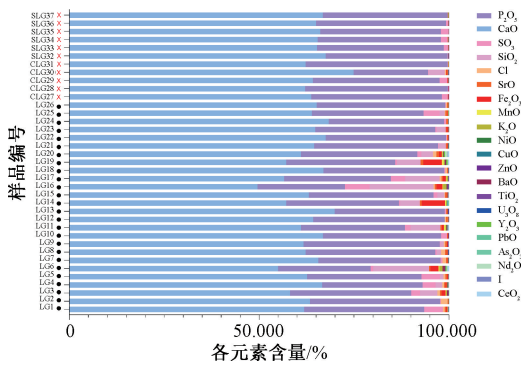
元素	含量/%			检出批次/批	检出率/%
	最大值	最小值	平均值		
CaO	69.846	49.527	62.479±4.661	26	100.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35.893	23.097	30.677±3.069	26	100.00
SiO <sub>2</sub>	16.873	—	3.070±4.542	16	61.54
SO <sub>3</sub>	6.450	0.028	1.534±1.862	26	100.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.126	0.033	0.798±1.487	26	100.00
Cl	1.715	—	0.361±0.418	16	61.54
SrO	0.718	0.193	0.392±0.122	26	100.00
BaO	0.704	—	0.129±0.163	17	65.38
K <sub>2</sub> O	0.929	—	0.139±0.237	15	57.69
MnO	0.466	—	0.106±0.132	18	69.23
CuO	0.025	0.014	0.019±0.003	26	100.00
ZnO	0.032	0.009	0.019±0.006	26	100.00
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0.045	0.006	0.019±0.010	26	100.00
NiO	0.027	0.002	0.007±0.006	26	100.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.323	—	0.053±0.097	21	80.77
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.445	—	0.021±0.087	14	53.85
I	0.113	—	0.042±0.040	17	65.38
TiO <sub>2</sub>	0.283	—	0.028±0.066	9	34.62
PbO	0.012	—	0.003±0.003	11	42.31
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.664	—	0.048±0.137	6	23.08
CeO <sub>2</sub>	0.409	—	0.054±0.111	8	30.77

表 5 龙骨伪品的元素组成 (以氧化物表示,  $\bar{x} \pm s, n = 11$ )

Tab. 5 Elements composition of Longgu counterfeits (expressed as oxides,  $\bar{x} \pm s, n = 11$ )

元素	含量/%			检出批次/批	检出率/%
	最大值	最小值	平均值		
CaO	74.872	62.096	65.734±3.478	11	100.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	37.583	19.609	32.660±4.744	11	100.00
SiO <sub>2</sub>	4.280	—	0.389±1.290	1	9.09
SO <sub>3</sub>	2.063	0.066	0.878±0.827	11	100.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.342	0.014	0.089±0.101	11	100.00
Cl	0.330	—	0.030±0.099	1	9.09
SrO	0.150	0.018	0.070±0.040	11	100.00
BaO	—	—	—	—	—
K <sub>2</sub> O	0.156	—	0.042±0.061	3	27.27
MnO	0.050	—	0.008±0.016	3	27.27
CuO	0.027	0.018	0.023±0.003	11	100.00
ZnO	0.095	0.021	0.062±0.025	11	100.00
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	—	—	—	—	—
NiO	0.009	0.001	0.005±0.002	11	100.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—
I	—	—	—	—	—
TiO <sub>2</sub>	0.101	—	0.009±0.030	1	9.09
PbO	—	—	—	—	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—
CeO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—

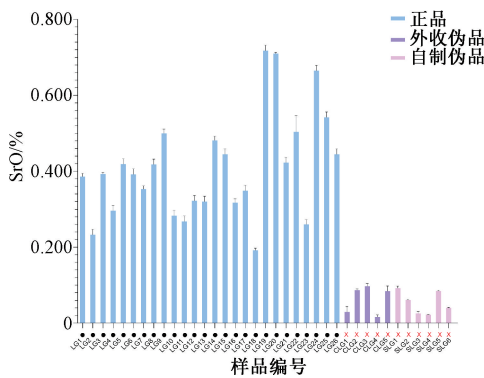
注：—表示未检出，平均值计算时未检出数值以“0”计。



注：·表示正品，×表示伪品。

图1 样品中各元素含量占比

Fig. 1 Percentage of each element in the samples



注：·表示正品，×表示伪品。

图2 样品中SrO测定含量柱状图

Fig. 2 Histogram of SrO content measured in samples

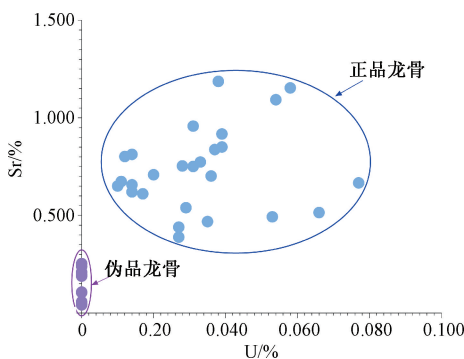


图3 样品中U和Sr的赋存特征

Fig. 3 Characterization of U and Sr assignment in samples

2.1.2 次要元素与辅助指标 正品中氧化钙 (CaO) 与五氧化二磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 含量 (62.479%、30.677%) 低于伪品 (65.734%、32.660%)。结合龙骨主要成分羟基磷灰石 [Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>] 计算得到 CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的理论比值为 1.32, 测定结果中正品 CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 比值为 2 左右。此外, 正品部分批次中检测到钡、钇、碘、砷、铈、钆、铅等多种伪品中未检出的元素 (图 4), 可作为辅

助鉴别指标。

2.2 能量谱图特征与鉴别模型验证 将实验所得能量谱图导入 PCEDX Pro 软件中, 进行元素标记和鉴定后, 进一步对能量谱图进行平滑和重叠偏移调整, 见图 5~7。26 批正品均在 13.61 keV 处稳定检出 U La 特征峰, 而伪品均未检出此峰。由真伪龙骨能量谱图 (图 5) 可知, 14.14 keV 处 Sr Ka 及 15.83 keV 处 Sr Kb 谱线所在峰, 正品强度远大于伪品。

此外, 正伪品谱图上的差异为: (1) 2.01 keV 处 P Ka 谱线、8.63 keV 处 Zn Ka 及 3.69、4.01 keV 处 Ca Ka、Ca Kb 谱线所在峰强度伪品高于正品; (2) Fe La、Mn La 谱线所在峰, 正品均大于伪品; (3) 部分正品在 1.74 keV 处出现 Si La 峰; (4) 正品能量谱图明显有别于伪品, 在 5.23、10.35、14.94、16.75 keV 等处检出 Nd La、As Ka、Y Ka 和 Y Kb 谱线所在特征峰, 在 25~40 keV 区段, 检出了 I 和 Ba 谱线所在峰。

随机选取 10 批样品组成验证组, 按“1.2.2”项下条件和方法进行样品检测, 结果见表 6。由此可知, 6 批样品稳定检出 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, 且其归一百分含量为 0.004%~0.024%, 4 批未检出。基于特征性检出 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 作为鉴别标准, 所得鉴别结果与传统鉴别结果一致。在此次验证试验中, 正品鉴别准确率达 100%, 进一步证实了该方法的可靠性。

表 6 随机样品验证试验结果 (n=10)

Tab. 6 Verification test results of random samples (n=10)

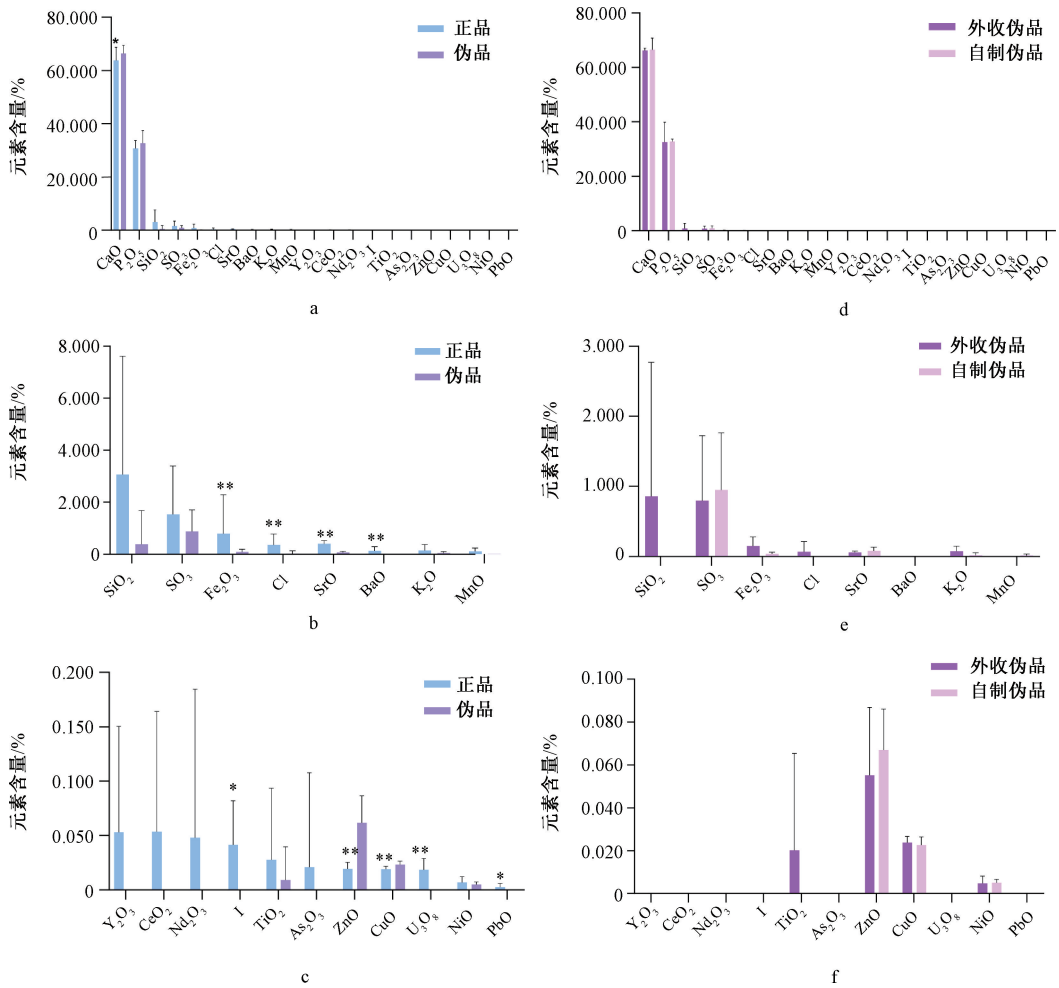
编号	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /%		性状鉴定	方法鉴定
	位点 1	位点 2		
VLG1	0.007	0.011	正品	正品
VLG 2	0.011	0.014	正品	正品
VLG 3	0.024	0.018	正品	正品
VLG 4	—	—	伪品	伪品
VLG 5	0.014	0.015	正品	正品
VLG 6	—	—	伪品	伪品
VLG 7	—	—	伪品	伪品
VLG 8	0.016	0.012	正品	正品
VLG 9	—	—	伪品	伪品
VLG 10	0.017	0.006	正品	正品

注：—表示该检测条件下未检出。

2.3 精密度试验 选择同一批正品龙骨样品 (编号 LG1), 重复测定 10 次, 计算相对标准偏差, 结果见表 7, 可知本方法用于龙骨药材检测具有较好的精密度。

### 3 讨论

3.1 元素差异 本实验结果显示, 正品龙骨均能



注：a~c为正品和伪品对比，d~f为自制伪品和外收伪品对比。\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

图4 样品中各元素平均含量 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n = 37$ )

Fig. 4 Average content of each element in samples ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n = 37$ )

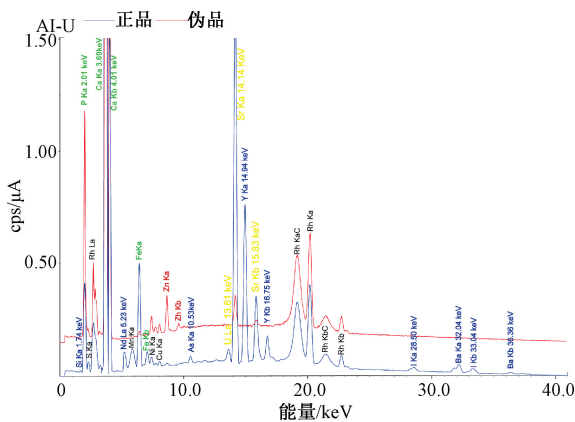


图5 正品和伪品龙骨能量谱图重叠

Fig. 5 Overlapping energy spectra of authentic and counterfeit Longgu

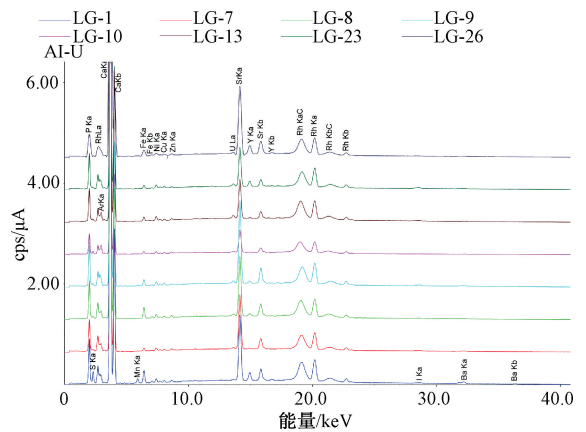


图6 部分正品龙骨能量谱图重叠

Fig. 6 Overlapping energy spectra of some authentic Longgu

够稳定检出 U 元素，所有伪品中均未见检出，推测与龙骨形成过程中经历长期的地壳埋藏有关。旷红伟等<sup>[18]</sup>在对恐龙化石地球化学及埋藏学的研究

中发现，骨骼的有机质具有吸附 U 的作用；同时，张晓峰等<sup>[19]</sup>在羟基磷灰石对 U 的吸附作用和机制研究中发现，天然磷灰石主要通过化学和物理方式

表7 精密度试验结果 (%)  
Tab. 7 Results of repeatability test (%)

编号	CaO	SO <sub>3</sub>	Cl	SrO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	ZnO
1	60.929	4.264	0.473	0.350	0.125	0.549	0.006	0.017	0.016
2	61.633	4.379	0.464	0.346	0.113	0.516	0.004	0.014	0.010
3	62.891	4.266	0.485	0.337	0.107	0.628	0.005	0.018	0.013
4	61.098	4.377	0.477	0.356	0.110	0.555	0.005	0.022	0.011
5	61.712	4.256	0.476	0.341	0.125	0.551	0.004	0.019	0.015
6	61.818	4.312	0.471	0.349	0.132	0.547	0.005	0.020	0.014
7	61.617	4.341	0.469	0.352	0.128	0.539	0.006	0.019	0.016
8	60.985	4.319	0.475	0.357	0.126	0.559	0.005	0.021	0.013
9	62.264	4.298	0.482	0.339	0.118	0.544	0.005	0.017	0.015
10	61.456	4.376	0.473	0.401	0.124	0.564	0.006	0.023	0.012
平均值	61.640	4.319	0.475	0.353	0.121	0.555	0.005	0.019	0.014
RSD	0.98	1.12	1.28	5.17	6.90	5.18	14.47	14.04	15.32
编号	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	BaO	TiO <sub>2</sub>	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	0.034	27.969	2.579	0.201	0.067	0.009	0.016	0.021	0.002
2	0.036	27.427	2.519	0.209	0.058	0.010	0.018	0.023	0.002
3	0.037	27.425	2.440	0.223	0.061	0.010	0.018	0.027	0.002
4	0.042	27.503	2.507	0.193	0.059	0.011	0.016	0.025	0.002
5	0.035	27.898	2.512	0.205	0.058	0.008	0.015	0.027	0.001
6	0.041	27.228	2.525	0.204	0.063	0.010	0.018	0.023	0.002
7	0.034	27.416	2.519	0.213	0.060	0.011	0.016	0.021	0.002
8	0.036	27.339	2.517	0.199	0.071	0.009	0.020	0.024	0.002
9	0.035	27.924	2.534	0.205	0.069	0.009	0.017	0.024	0.002
10	0.032	27.873	2.526	0.214	0.052	0.010	0.015	0.026	0.001
平均值	0.036	27.600	2.518	0.207	0.062	0.010	0.017	0.024	0.002
RSD	8.62	1.02	1.35	4.13	9.37	9.78	9.44	9.06	23.42

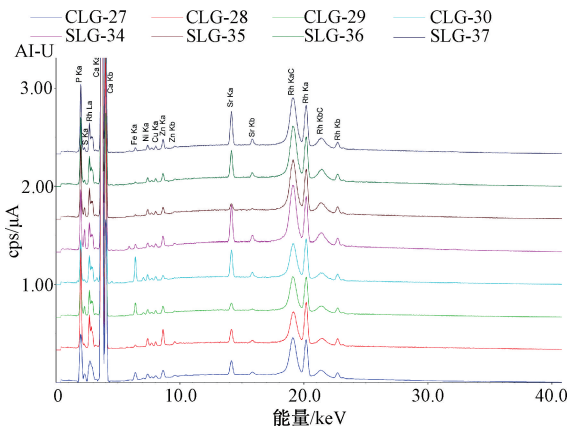


图7 部分伪品能量谱图重叠

Fig. 7 Overlapping energy spectra of some counterfeit Longgu

吸附U。其次，正品中Sr含量显著高于伪品，正品中检出多种元素，如Ba、Y、I、As、Ce、Nd、Pb等，反映了正品在长期矿化过程中可能对元素存在选择性吸附，而伪品因缺乏自然矿化过程，仅保留骨骼中Ca、P等基础元素<sup>[20]</sup>。伪品中CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量稍高于正品，CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>比值高于羟基磷灰石理论比值，考虑检测样品表面存在污染物，如泥土，会使得检测过程中Ca、P元素强度受到影

响，其中Ca元素受影响小，P元素受影响大，结合EDX检测所得含量为归一百分含量，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量下降后，CaO含量受其影响可能上升，从而使得CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>比值偏高。而对于正品中SiO<sub>2</sub>高达61%的检出概率，符合龙骨作为化石埋藏与成岩的地质学背景，而伪品中检出SiO<sub>2</sub>，则考虑其加工、保存过程中发生人为或偶然的引入。

3.2 技术优势 本实验建立EDX技术用于龙骨鉴别，与传统及主流仪器鉴别方法比较，操作简单，无需进行复杂前处理，单次检测可同步分析大量元素（Al-U），检测耗时仅需5~10 min，显著提升了大批量样本的筛查效率。此外，其无损特性避免了样品破坏，可实现原药材的快速筛查。基于U-Sr元素组合鉴别方法，以特征元素为内在鉴别指标，克服了经验鉴别的主观性和理化鉴别的模糊性，U-Sr元素组合鉴别，双重验证，一定程度上提高了方法的可靠性。EDX技术在高效、无损地鉴别龙骨药材的同时，其定性、定量分析提供了丰富的元素信息，后续有望用于龙骨等级评定和产地区分研究，同时可为贵系药材的研究提供参考依据。

3.3 局限性及改进方向 (1) EDX技术作为表面分析技术，用于定量分析时易受表面清洁度和平

整程度的影响,如用于整块龙骨检测时表面的泥土等杂质可能会干扰检出元素的强度,影响元素含量测定结果,故需要对待测样品进行清洁,后续可将龙骨样品粉碎压片以克服表面平整度对结果的影响;EDX技术为半定量分析,对特征元素准确定量可考虑结合电感耦合等离子体质谱法,进行互补验证分析。(2)该方法单次测试的耗材与人力成本可控,相较于高效液相色谱法等常规分析技术,展现出显著的经济性优势,但是EDX仪器在高校、企业、机关单位等尚未完全普及,在一定程度上限制了相关方法的开发和应用。(3)当前研究样本量较小,尤其是伪品仅11批,未来需扩大样本库,收集更多来源和不同造假手段的伪品,以全面验证和优化方法的普适性。(4)本研究初步建立了龙骨真伪鉴别模型,但尚未深入研究龙骨药材中特征元素含量与产区、地质、年代的关系,后续可从该方向进行探究。

#### 4 结论

本研究首次将EDX技术应用于龙骨药材的无损鉴别,发现正品龙骨中可检出 $U_3O_8$ 及SrO的含量差异可作为鉴别指标,可构建高效、准确的U-Sr元素组合鉴别模型。与传统方法相比,EDX技术兼具快速、无损、多元素同步分析的优势,适用于中药材的快速筛查与质量控制。此外,EDX技术作为一种强大的元素检测技术,可为后续矿物类及贵系中药材的快速、无损鉴别提供新思路。

#### 参考文献:

[1] 上海市药品监督管理局. 上海市中药饮片炮制规范[S]. 上海:上海科学技术出版社,2019:585.  
[2] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草[M]. 上海:上海科学技术出版社,1999:317-320.  
[3] 许雯雯,独家能,郝旭亮,等. 化石类矿物药龙骨的现代研究与应用进展[J]. 中国中药杂志,2017,42(10):1825-1829.  
[4] 郭海燕,蒋杰,严铸云. 矿物药龙骨的药用进展与资源

现状[J]. 中药与临床,2024,15(6):80-84;96.  
[5] 鲁晓光,吴瑞阁,郑阿旭,等. 中药龙骨真伪鉴别方法研究[J]. 中国药业,2025,34(13):85-89.  
[6] 崔晓慧,陈龙,刘义梅,等. 基于X射线衍射指纹图谱鉴别龙骨[J]. 中成药,2016,38(3):624-629.  
[7] 赵贵琴,黄以财,揭定华,等. 基于红外光谱技术龙骨真伪鉴别研究[J]. 山东化工,2024,53(16):167-169;173.  
[8] 徐晓莹,曹海洁,魏立超,等. 能量色散X射线荧光光谱仪在镁砂成分测定中的应用[J]. 耐火材料,2024,58(4):354-356;361.  
[9] 程斌. X射线光电子能谱技术及其应用[J]. 北京化工大学学报,2024,51(2):1-18.  
[10] 李国燕. X射线荧光光谱法测定滑石粉中组分含量[J]. 中国非金属矿工业导刊,2024(2):73-75;83.  
[11] 黎红波,王玉良,朱言. X射线荧光光谱法测定石英砂岩主次量元素研究[J]. 云南地质,2024,43(2):325-328.  
[12] 刘梅菊,邹瑶,张宝喜,等. X射线荧光光谱法快速测定中药材中铜元素含量[J]. 医药导报,2024,43(9):1476-1479.  
[13] Scholz K J, Federlin M, Hiller K, et al. EDX-analysis of fluoride precipitation on human enamel[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):431-440.  
[14] Prati C, Zamparini F, Botticelli D, et al. The use of ESEM-EDX as an innovative tool to analyze the mineral structure of peri-implant human bone[J]. *Materials*, 2020, 13(7):1671.  
[15] Ratnayake S, Lützenkirchen J, Finck N, et al. Combined X-ray absorption and SEM-EDX spectroscopic analysis for the speciation of thorium in soil[J]. *Sci Res*, 2023, 13(1):5877.  
[16] 符宏银,蒋松健,谭燕梅,等. 牛骨骼标本制作新技术[J]. 广西农学报,2019,34(6):37-39.  
[17] 丁常根,杨兴林,冯平. 动物骨骼标本制作中脱脂漂白方法的探讨——以羊驼骨骼为例[J]. 动物医学进展,2023,44(12):127-130.  
[18] 旷红伟,许克民,柳永清,等. 胶东诸城晚白垩世恐龙骨骼化石地球化学及埋藏学研究[J]. 地质论评,2013,59(6):1001-1023.  
[19] 张晓峰,陈迪云,涂国清,等. 羟基磷灰石与天然磷灰石去除铀的效果和机理研究[J]. 原子能科学技术,2014,48(A1):56-63.  
[20] 郭海燕,严铸云,蒋杰,等. 矿物药龙骨与伪品现代动物骨骼的对比研究[J]. 中药与临床,2024,15(5):1-4.