

上期“‘冷门绝学’中的青年力量”专题刊出后获得了较好的反响，许多读者反馈不仅深入了解了相关学科的研究内容，更被年轻一代学人的文化坚守所感动。本期邀请两位科技考古方向的青年学者撰文，他们通过专业视角展示历史研究如何与化学、冶金等学科交叉融合。一块金属、一片锈迹、一枚炭块，这些看似普通的物质背后，隐藏着文化交流与历史演变的密码，也为我们解读文明传承提供了更多可能。

——主持人：王泓烨



作者在崇觉寺铁塔上采样

20多米高的脚手架像一条深入历史的长廊，带我一步步走进崇觉寺铁塔的故事。铁塔始建于北宋，通高22米，九层楼阁式仿木结构，已在鲁西南的晨风里站立了近千年。得益于济宁市博物馆的铁塔保护修复项目，我才有机会来到它面前，用化学的方法为它“问诊”。为了解每一处的保存细节，我必须攀上七层楼高的脚手架，亲手触摸那些寻常游客无法触及的隐蔽角落。工作包背在身后，像随身背着一座移动的小型实验室，包里的各类工具随着我攀爬的脚步叮当作响。

爬到一半，手指先于意识投降——我的双手死死扣在钢管上，指腹因紧张而鼓胀发硬，关节发出细微的声响，以此来表示抗议。安全绳勒在肩头，发麻的感觉不断提醒我，此刻属于21世纪；可风从塔身铸铁缝隙穿过，发出低

低的呜咽，又把我推回北宋的清晨。再抬起头，造型各异的腰檐、斗拱、平座，以及拼装铸造留下的范线，构件间用以垫实的铁片，像一本摊开的铁书，逼我继续翻阅历史与岁月的书页。那一刻，我忘了自己正悬在半空，也忘了退路。

把时间倒回大三，我的生活被背不尽的反应方程式和洗不完的烧杯、试管排得满满当当。重结晶、过柱子、测熔点，产率从百分之六十七提到百分之七十一，就能让我高兴一整天。化学像一条笔直的公式链，我在这条链上跑得认真，却跑得迷茫：如果一辈子只是优化一串数字，尽头到底还有什么？

直到有一次查阅文献时，那篇《无损检测及分析技术在文物保护领域中的应用》偶然间撞进了我的视线，这时我才发现，X射线荧光光谱法、显微拉曼光谱法、扫描电镜分析等早已被我背得滚瓜烂熟的化学术语，突然在文物世界里拥有了体温——原来喻响作响的现代仪器，也能用来释读千年前的铁锈、铜绿与瓷釉。那一刻，我那如化学公式般笔直的人生分出了一条岔路——我决定从纯化学跨向文物保护。

非常幸运，我考入了北京科技大学科技史与文化遗产研究院。这里有着深厚的冶金史与文物腐蚀研究传统，并在柯俊院士的带领下最早开始了对中国冶金史的系统梳理。柯俊院士早年对河北冀城商代铁刀铜钺进行分析，以实验数据确定铁刀为陨铁锻成，而非人工冶炼。用科学证据解决考古难题的“实证”精神，像一颗种子落进我的心里——原来基础学科的方

法可以如此锋利地切开历史的迷雾。

研究院对跨专业学生格包容，我像一块亟需吸满知识的干海绵，被扔进交叉学科的泳池。我的研究生导师何积铨老师曾主持蒲津渡唐代铁质文物群的保护，他把电化学保护的方法运用到铁质文物上：几根导线连接地下铁牛、电流、电压、电阻的实时曲线便可在电脑屏幕上跳动，告诉我们铁牛此刻是“安稳入睡”还是“病痛呻吟”。黄河岸边的风挟着水汽，铁信号随湿度起伏，像隔着泥土传来的应答。我第一次真切地看到：电化学不仅能解析物质变化的机理，还能听懂铁的低语。理与文的接缝，在这里第一次被化学的“螺丝刀”拧紧。我愈发坚定：这条路，我能走。

后来，我进入山东大学读博。入学之初，我的博士生导师王全玉教授带我去做南海1号沉船中铁质文物的保护研究。文物被打捞出水后，立即被移入博物馆的恒温恒湿展厅，可腐蚀并未停止。老师交给我的第一个课题是确定博物馆内影响器物保存的污染物种类。

按照理科思维惯性，我立刻设计大批量实验：选定10种常见污染物，制备平行样，设定对照组，计划用综合表征手段评估每种污染物的“危害指数”。汇报时，我胸有成竹地展示流程，却被老师打断：“你的研究对象是铁质文物，不是污染物。先去看文物本身，而不是验证你预设的方法。”那一刻，我备受打击，整个人像失去骨头般无力——精密操作、完善设计、没日没夜的实验，竟被一句“出发点错了”否定。

冷静下来后，我意识到自己的确走错了路：文物太复杂，既有千百年埋藏环境留下的层累信息，也有出水后产生的新隐患，于是我干脆用“完美”实验屏蔽了复杂。可文物保护的核心不是方法，而是对象。想清楚后，我回到展柜前，先观察铁器表面的变化，再设计蒸馏水无损萃取的方式，最后才改进离子色谱法的检测参数——仪器退到文物之后，而我的眼睛终于对准了问题本身。思维调转：先理解文物，再确定方法；先尊重时间，再动用科学。

真正让我的“理科脑”彻底翻成“文物心”的，是崇觉寺铁塔。第一次走近它，我当即被征服——那是一种只属于室外大型铁质文物的历史厚重感，像一位黑甲将军伫立在我的面前，沉默却摄人心魄。与博物馆里灯光下精美的青铜器、温润的瓷器不同，它千百年来矗立在风雨之中，一层层铁檐像巨大的黑翼展开，连影子都带着铁锈味。它不是被小心托举的展品，而是把历史背在身上的行者——雷电、尘土、煤烟、酸雨，一层层加诸其身，又被时间磨得发亮，像一件从不卸下却愈穿愈旧的铠甲。

想要了解它的保存状况，第一步便是“接近”：克服眩晕，爬上脚手架，我背着采样包，一步一步向上挪。钢管的震颤顺着掌心传到胸口，每一次落脚都发出清脆的“哒哒”声，像给

漫长的历史配上现代节拍。抵达观测点那一刻，我与铁塔近在咫尺——铸铁的冰凉透过衣服渗进皮肤，把千年的温度递给我。

接下来的工作细密而缓慢：先整体观察铸造细节和病害迹象，再寻找不影响外观的隐蔽处取样，最后用无损检测探知文物的稳定性。手术刀轻轻掠过，外层 γ -FeOOH的疏松壳片簌簌落下；内层 α -FeOOH则致密坚硬，颜色由褐转黑，仿佛一页页铁锈的年轮被翻开。电化学探头需静置半小时，我于是有了闲暇环顾四周：大雄宝殿的黄色琉璃屋顶在脚下铺展，阳光一照，瓦面浮起温润虹彩；歇山顶脊兽正对着蓝天白云，像给天空描了一道金边。风掠过瓦当，发出极轻的“叮铃”声，与探头计时器的“滴答”声叠在一起，竟像一场跨时空的合奏。我突然意识到，自己正站在一千年前的建筑师与工匠打造出的历史延长线上——他们用铁水浇铸塔身，我用试剂解读锈层；他们抬头望塔，我低头看瓦。我们隔着22米的垂直距离与千年的跨度，却共享同一片阳光、同一种风，触摸同一座铁塔。

探头计时器最后一声落下，我收好电线和电极片，像合上一本只借给我半小时的珍贵古籍，铸铁的冰凉还停留在指尖，而塔影已慢慢斜向黄昏。我沿着脚手架逐级下降，每一次“哒哒”声都替我把现代节拍踩进古老的节奏。下到地面，我再抬头——铁塔依旧挺拔，铁翼层叠，不言不语，却把所有故事嵌进锈层。

回到实验室，我把取下的样品镶嵌、磨抛、在显微镜下观察。检测数据告诉我：塔身外层疏松锈层不稳定，容易富集水汽和污染物；铭文处的黑色硬结物内有氯离子存在，需针对性去除；腰檐背面和斗拱表面的层状剥落病害区域，因合金相组织中石墨的存在以及雨水长期滞留，腐蚀电位最低，亟需干预。每一条结论，都不再是冷冰冰的“测量值”，而是高空半小时里我与铁塔共享的“私语”。科学保护的终点不是数据，而是让文物恒久地站立在历史里，继续对后来的人低声讲述它所见证的一切。

我的学术之路上出现了许多的岔口：一篇偶然翻到的文献、一所欢迎跨专业学生的研究院、一位把电化学曲线讲成故事的老师、一次被严厉喝止的汇报，还有这座从未拒绝被阅读的铁塔……这些岔口让我明白，化学的尽头不只是更高的产率，还有更长的时光；化学的表达方式不单单是更纯净的数字，还可以是更复杂的文物与历史。当别人的赛道在霓虹灯下延伸，我的学术长廊却在风里、在雨里、在每一次升降的脚步里循环上升——专注有了方向，时间便有了形状。

所谓终点，不过是塔身另一侧还未被阳光照到的铸铁；而我，只需继续向上，继续把实验读成诗句，把数据写成注脚——让铁塔在岁月里继续站立，让我在岁月里继续仰望。

（作者系太原师范学院历史与文博学院讲师）

实验室里，能谱仪发出低沉的嗡鸣，屏幕上的曲线不断跃动，一件来自滇池畔的铜锥正在讲述它的前生。距今3000余年的匠人或许不曾想到，炉火熄灭时凝固的金属，会在今天成为破译技术演进与文化变迁的密码。

提到考古，许多人会联想到古墓、遗迹，或是博物馆里陈列的各色文物。然而，现代考古学早已超越传统的田野操作，科技考古成为其中一个至关重要的分支。研究者不再仅仅依靠双眼观察、双手触摸，而是走进实验室，借助科学仪器“聆听”文物无声的陈述。冶金考古是科技考古下的一个重要方向，它专注于对古代金属材料的研究：一柄铁剑、一块炉渣，甚至一片铜锈，都可能隐藏着文明的关键信息。

我最初被这个领域吸引，源于一个看似简单却蕴涵极为深远的问题：人类是如何从石器时代迈入青铜时代，又走向铁器时代的？“三期说”由19世纪丹麦考古学家汤姆森提出，这一理论框架，将人类史前时代按照主要工具材质划分为石器时代、青铜时代与铁器时代。它看似简洁，却并非仅仅关于材料的更替，其背后是一场又一场席卷全球、彻底重塑人类文明形态的技术革命。这不仅意味着生产力的发展，更是社会结构、权力体系与文化信仰的深刻变革。而冶金考古，正是通过解读金属之中所蕴藏的元素组成、微观结构及制作工艺，去破译那段推动人类走出石器时代、步入辉煌文明的核心动力与历程。其浪漫之处，恰恰在于让你成为那个破解文明密码的人。

我的冶金考古探索始于江淮地区商周时期的青铜器。“国之大事，在祀与戎。”青铜作为商周时期极具战略价值的资源，无论是用于祭祀礼器还是征战兵器，都对维系早期王权国家的正常运转发挥着举足轻重的作用。在许多人印象里，中国商周青铜文明的核心位于黄河流域的中原。但长江中下游沿岸丰富的金属资源，不断吸引着中原王朝对该地区的经营与控制。通过对矿产的开采、冶炼及流通的掌控，王朝建立起一整套庞大的贸易网络和政治管理体系。而江淮作为交汇地带，它的青铜器有何特色？技术又从何而来？带着这些问题，我进行了实地调查，观察了博物馆库房里珍藏的样品，并在实验室里对它们进行了科技分析。

由于青铜文物的珍贵，往往从前期沟通协调时便需经历极其繁琐的步骤。待到好不容易进

铜铁炉中翻火焰，为何时猜得

■ 孙淑畅



人库房，面对满架子的青铜器残片（因研究需要，选取残损、非展出的部分），要小心翼翼地清理、编号、记录并取样。随后是实验室中的“破译”工作：我们使用扫描电镜及能谱系统（SEM-EDS）观察材料的微观形貌并检测其成分，借助金相显微镜解析金属的内部组织结构，通过微量元素与同位素分析追溯矿料的来源。我们真正关心的远不止于“这是什么”，更是“它从何而来”。从矿石开采、冶炼制造，到技艺传播与资源流通，其背后牵连的是整个古代社会的生产技术、组织形态，乃至权力网络。

冶金考古以物质材料为对象，通过自然科学手段提供客观数据，可以弥补文本记录的缺失或偏见。例如，通过对青铜器的铅同位素分析，我们发现春秋晚期至战国早期，尽管礼崩乐坏、诸侯割据，青铜器却呈现出铅同位素比值集中且变化同步的特征。这表明在当时动荡的背景下，金属资源在来源与流通方面反而呈现出某种巧妙的统一性。这种高度一致的资源特征广泛分布于我国中东部的大部分区域，说明各诸侯国可能并非处于完全敌对的状态，而是存在一定程度的资源交流与合作，甚至可能共享同一套金属资源流通体系（如铜、锡、铅矿的贸易网络）。通过金属资源的贸易，各国在军事对峙与经济竞争的同

时，仍维持着相当规模的物资往来，这为理解战国时期复杂的地缘政治关系提供了新的视角。铅同位素的“统一性”暗示诸侯国之间存在未被文献明确记载的资源协调行为，这可能源于盟约、婚姻联盟或共享的礼仪需求（如青铜礼器制作），从而推动对东周时代复杂性的重新解读。冶金考古借此将微观的物质证据与宏观的历史问题联结，不仅深化了对古代资源利用模式的理解，更揭示了政治对抗背后隐藏的经济合作与文化共性。

研究过程中，除了“冰冷”的数据，有时也会发现带有一丝温度的隐藏剧情。范铸法是中国古代铜器最常用的铸造工艺，在器物的耳、足等空心且密封的部位，常残留制造时的泥芯。古代制造青铜器时，一般是就地选土，因此铜器中的残留泥芯很可能包含有该器物铸造地的有关信息，这也使得我们的研究不止局限在金属本身，而这也是考古学者较少关注的信息。当我研究一件战国晚期楚鼎时，在其鼎足的泥芯中发现有手指抹泥的痕迹，那是两千多年前某位工匠无意留下的指纹。比起泥芯的土质来说，这枚略显模糊的指纹并没有什么研究价值。但那一瞬间，时间仿佛被折叠，我几乎能感受到他指尖的温度，想象他工作的身影。这枚指纹不像青铜礼器



叠鼓形狩猎场面贮贝器（西汉）

云南省博物馆藏

上的纹饰那样经过精心设计，却正因为其无意，反而成为更真实、更个人的历史见证。它让我想起，所有的文明图景，终究是由一个个具体的人、一双双劳作的手所构建。那一刻，历史不再是书本上抽象的文字，而成了可触摸的温度、可感知的生命。

读博期间，我的研究视野转向云南。这片西南边陲曾孕育出与中原迥异而同样灿烂的青铜文化。这里独特的器物造型（如牛虎铜案、贮贝器）令人着迷，但其技术来源、矿料基础、发展水平以及与中原及周边文化的关系，长期迷雾重重。我的研究便聚焦于此：通过分析云南出

土青铜器与矿冶遗物，追溯其矿料来源，复原其生产技术，并探讨冶金能力背后的社会发展与区域互动。

我们寻找古代的冶金遗物。在滇池边的遗址，刨开泥土，露出的不是精美的铜器，而是一块块黑乎乎、不起眼、仿佛被火烧过的“疙瘩”——那是古人废弃的炉渣。在外行眼里，这或是“垃圾堆”；对于我们而言，却是古代冶铸工厂的“生产记录”。获得样品只是起点，艰难的“解码”才刚启程。云南地质复杂，矿点分散，现有同位素数据库尚不完善。即便数据匹配，仍须深入求证：该矿床在青铜时代是否已被开采？地质背景是否吻合？这种徘徊与求索，是研究中的常态。

当我们对不同时期、不同遗址的青铜器合金技术和工艺进行排比，这些冰冷的金属遗物和矿渣“开口”诉说的故事远比想象的丰富：它们揭示了云南古代先民如何发现、利用和掌控矿产资源；展现了他们如何在学习借鉴如范铸法等来自中原的先进技术的基础上，创新发展出适应本地需求和文化表达的独特风格；更暗示着一条条连接着西南边陲与内陆乃至更广阔区域的资源走廊和文化交流通道。冶金技术不仅关乎器物制造，它更是社会复杂化进程的基石。滇文化中贮贝器里象征财富的海贝，盖面上惊心动魄的祭祀或战争场面，无不建立在强大的金属生产能力及资源控制能力之上。

选择冶金考古，确实是一场漫长的旅程。它需要扎实的多学科知识储备（历史、考古、材料、地质、化学等），需要忍受野外的孤寂和实验室的枯燥，毕业后的职业选择也相对有限。每当面对“破铜烂铁”、海量数据、实验瓶颈和解读困境时，也常感力不从心。但这份“冷清”，恰恰也是它的珍贵之处。如同深埋地下的矿脉，等待有心人去勘探发掘。一代代学者接续努力，薪火相传，一脚踩在泥泞的遗址，一脚迈进实验室，闪烁的仪器屏幕前看金属的显微结构，揣摩古人的冶炼“火候”；通过同位素追溯矿料来源，如同破解一场跨山河的古代贸易。每一块炉渣、每一片锈蚀背后，可能都藏着某个工匠的失误、一次技术突破，甚至是一个王朝的资源命脉。当那些被遗忘了千年的技艺，在我们手中重新被辨认、被理解，它们就获得了新生，成为构建更丰富、更立体的中华文明图景中的一块块拼图。

（作者系山东大学文化遗产研究院考古学博士研究生）