科学通报 2026 年 第 71 卷 第 13 期: 3026 ~ 3034
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

磨盘山遗址牙釉质高分辨率锶同位素与早期猪类空间管理

唐自华[1*], 陈曦[2], 董宁宁[3], 程文艳[4,5,6], 任叙雯[1,7], 赵东升[8*]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化与环境变化全国重点实验室, 北京 100029
2. 南京师范大学文物与博物馆学系, 南京 210023
3. 复旦大学科技考古研究院, 上海 200433
4. 兰州大学环境考古与文物科学中心, 兰州 730000
5. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000
6. 寒区旱区生物考古国家文物局重点科研基地, 兰州 730000
7. 中山大学社会学与人类学学院人类学系, 广州 510275
8. 南京大学历史学院考古文物系, 南京 210023
* 联系人, E-mail: tangzihua@mail.iggcas.ac.cn; chengziya@nju.edu.cn

2025-11-12 收稿, 2025-12-28 修回, 2026-03-03 接受, 2026-03-13 网络版发表
国家文物局考古人才振兴计划(2025-200)、国家自然科学基金(42372216)和美国纽约李氏基金会奖学金资助

摘要 家猪是中国本地驯化的重要家畜之一. 长江下游新石器时代, 受制于形态学和死亡年龄等传统动物考古指标的局限, 猪究竟是被狩猎的野生动物, 还是已受到人类持续管理的家畜, 仍缺乏直接证据. 本文通过高分辨率序列锶同位素比值, 从动物活动范围和人类空间控制的角度, 探讨长江下游地区家猪驯化的早期管理. 本研究选取安徽郎溪磨盘山遗址马家浜文化和崧泽文化时期猪牙釉质, 开展高分辨率锶同位素比值序列分析, 以精确追踪猪类个体在牙齿形成期的活动范围及其变化. 结果显示, 马家浜文化时期猪的锶同位素比值与同时期的野生梅花鹿高度接近, 且显著高于遗址周边环境背景, 表明此阶段的猪很可能来源于江南丘陵地区, 活动范围较大, 更接近狩猎获取的野生动物. 到崧泽文化时期, 猪的锶同位素比值显著降低, 并与同期人类个体相当, 同时伴随线性牙釉质发育不全等生理压力信号, 指示猪的活动范围已被限制在遗址及其周边区域, 人类对其生存空间的管理明显增强. 上述变化表明, 长江下游地区家猪驯化并非快速完成的事件, 而是经历了从狩猎获取向低强度、粗放型地理控制逐步转变的过程. 锶同位素比值分析通过揭示动物活动范围的变化, 在识别驯化过程中人类控制程度的增强方面具有独特优势, 为理解东亚地区家猪驯化路径的多样性和复杂性提供了新的关键证据.

关键词 猪类空间管理, 马家浜文化, 崧泽文化, 长江下游, 磨盘山遗址

猪(*Sus scrofa*)的驯化是一项具有深远社会经济和生态影响的事件. 考古学和遗传学证据表明, 家猪的驯化并非单一事件, 而是在全球至少两个地区独立发生[1~3]: 第一次在安纳托利亚东南部(距今约10000或9000年左右), 第二次则在中国东部(距今约8800年左右). 中国家猪的驯化过程可能始于约距今9000年前后的多个地点, 骨骼形态学和几何形态测量学证据[4,5]已将中国家猪驯化的最早时间追溯到河南贾湖遗址(距今约9000~8600年). 虽然古DNA研究的结论并不完全一致, 但现代家猪的线粒体DNA分析表明, 黄河流域和长江流域是我国家猪的两个主要驯化中心[3,6,7].

中国家猪的驯化进程在不同地区呈现出显著的区

引用格式: 唐自华, 陈曦, 董宁宁, 等. 磨盘山遗址牙釉质高分辨率锶同位素与早期猪类空间管理. 科学通报, 2026, 71: 3026–3034
Tang Z, Chen X, Dong N, et al. High-resolution enamel strontium isotope analysis and early spatial management of pigs at the Mopanshan site (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3026–3034, doi: 10.1360/CSB-2025-5781

© 2026《中国科学》杂志社

域差异. 新石器时代晚期(距今约6500年以后), 南北方管理模式的强化轨迹出现了明显分化[8,9]: 在黄河流域, 驯化过程与粟黍(C_4植物)农业紧密结合. 稳定同位素$\delta^{13}C$和$\delta^{15}N$的升高表明猪的食谱中包含大量的C_4植物, 暗示人类对其进行了集约化和严格的控制(如圈养和喂食饲料). 这种集约化导致了更快速的表型变化. 在长江流域, 家猪的驯化倾向于粗放的管理, 猪群主要利用当地丰富的天然资源觅食, 以C_3植物为主, 缺乏C_4植物贡献的迹象. 这种策略可能使用野生植物喂养或允许管理下的猪与野猪种群进行杂交. 早期家猪管理模式粗放使其驯化进程和鉴别具有挑战性.

最近, 长江下游的井头山(距今8300~7800年)和跨湖桥(距今8200~7000年)遗址的猪群研究也显示出了这一驯化过程中的复杂性. 牙齿形态测量表明, 同一遗址里同时存在两类体型大小的猪群, 可能暗示着野生、家养的猪混群管理; 而牙结石中残留的淀粉粒、植硅体和寄生虫表明, 有些猪摄入了熟食和受粪便污染的食物, 说明人与猪已共享食物和空间[10]. 这意味着, 早在8000年前, 生物驯化(牙齿形态改变)和行为驯化(食性改变)在井头山和跨湖桥遗址的家猪群体中是同步快速进行的. 当地水稻种植和定居生活方式对猪群驯化作用重大, 猪群受到了人群的密切照料[11], 显示猪的空间管理同样是长江流域家猪驯化的重要内容.

由于长江流域以C_3植被占主导地位, 碳、氮等稳定同位素方法难以区分野生和栽培植物的消费, 导致解释存在挑战, 需要新方法来更清晰地界定家猪驯化轨迹. 动物牙釉质的$^{87}Sr/^{86}Sr$比值可视为其生长期活动区域的地质指纹, 广泛用于重建动物和人类的地理来源与活动范围[12,13], 为探讨家猪驯化提供了新的途径. 锶同位素比值($^{87}Sr/^{86}Sr$)在自然界中的分布主要受地质背景控制, 不同地质单元具有相对稳定且可区分的锶同位素特征. 锶通过风化进入土壤, 并经由植被、水体进入食物链. 由于锶的质量数较大, 表生环境中, 受动物摄食习性(肉食、植食或杂食)和营养级等因素影响微弱, 且测量$^{87}Sr/^{86}Sr$时通过$^{88}Sr/^{86}Sr$校正了质量分馏的可能影响, 因此, 报道的$^{87}Sr/^{86}Sr$反映了地质背景主导的差异. 动物牙釉质在形成过程中会吸收其所处环境中的锶同位素信号, 且在形成完成后几乎不发生重塑, 因此能够长期保存动物牙齿形成期所利用景观的地理信息. 因此, 高分辨率的锶同位素序列分析能够提供猪类个体在生命早期阶段的移动历史和活动范围. 这对于认识先民对早期猪类的空间管理方式至关重要.

1 磨盘山遗址、材料与研究方法

磨盘山遗址坐落于南漪湖东岸, 毗邻江南丘陵边缘, 紧靠河湖, 水陆连通, 是古代文化东西、南北交流的重要地理节点(图1(a)). 该遗址的文化序列从马家浜晚期到春秋时期, 连续近4000年, 以马家浜文化晚期(距今约6200~5800年)、崧泽文化(距今约5800~5300年)、良渚文化遗存(距今约5300~4000年)为主. 磨盘山先民的生计方式多元, 包括稻作农业、水生生物采集以及家畜饲养, 崧泽文化时期地层出土有陶猪尊、牛尊、鱼尊[14]. 墓葬和随葬品差异不大, 社会等级不明显. 磨盘山遗址被视为研究良渚文明多元一体格局中“边民”生活的重要样本.

遗址的生物材料保存不佳. 我们从2023年度发掘的探方TS4W37的马家浜文化层发现了1块梅花鹿上颌骨(包括两枚牙齿, P4和M1)和1枚猪臼齿, 崧泽文化层发现了1枚猪臼齿, 从崧泽文化时期墓葬M349中采集了1块人类臼齿碎片(图2). 猪的牙齿标本出土时已经不完整, 难以通过形态学研究进一步获得猪的驯化信息, 我们通过锶同位素分析刻画个体的移动经历和生活范围.

磨盘山遗址位于长江中下游平原和江南丘陵的交接地带. 江南丘陵是新元古代华夏与扬子陆块碰撞拼合形成的低绿片岩相变质岩、韧性剪切变形和岩浆活动带[18], 遗址周边是长江及支流带来的沉积物盖层(图1(b)). 前期的生物可利用锶同位素比值调查[16,17]和锶同位素景观制图研究[15]表明, 江南丘陵区$^{87}Sr/^{86}Sr$通常在0.713以上, 而长江中下游平原要远低于该值, 介于0.709~0.713之间(图1(c)). 在该地区, $^{88}Sr/^{86}Sr$比值具有表征动物和人类活动范围的潜力.

牙齿标本用环氧树脂包埋后, 用线锯纵向切开并抛光. 标本的$^{87}Sr/^{86}Sr$值利用LA-MC-ICP-MS(RESOlution SE 193 nm+Neoma)微区原位分析获得. 实验中激光能量密度约为4.5 J/cm^2, 频率为8 Hz, 牙釉质标本剥蚀的斑束直径为80 μm. 采用单点剥蚀模式, 从齿颈向齿尖方向逐点测试锶同位素比值, 动物牙釉质间隔为200 μm, 人牙釉质间隔为100 μm. 剥蚀出的物质以高纯氦气作为载气, 与高纯氩气混合后进入质谱进行同位素测定. 氦气流量约为400 mL/min, 氩气流量约为5.5 mL/min. 在激光剥蚀之前接收10 s左右空白, 锶同位素积分时间约为20 s. 同位素数据在低分辨静态模式下获得. 使用阿富汗磷灰石巨晶PE[19]和研究团队的牙

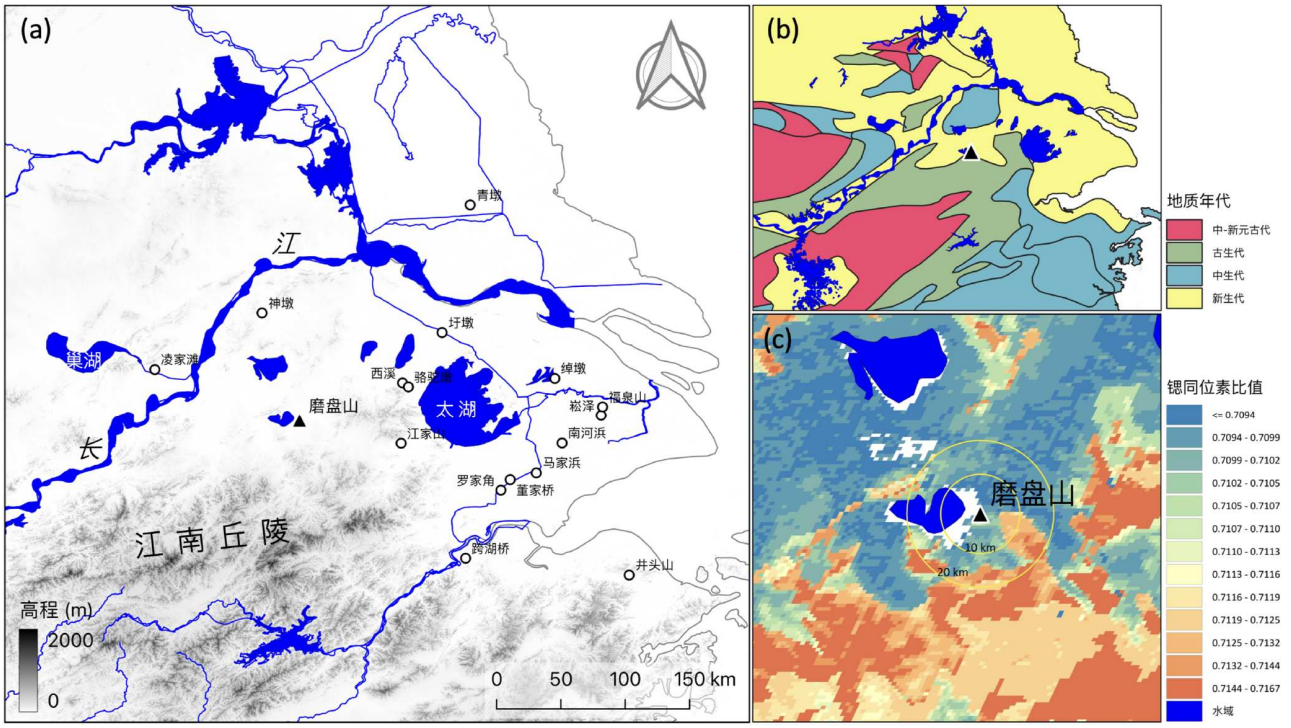


图 1 磨盘山遗址. (a) 遗址位置及本文提及的遗址; (b) 遗址周边地质简图; (c) 遗址周边锶同位素景观图[15~17]. 同心圆的半径分别是10和20 km

Figure 1 Locaion of Mopanshan Site. (a) Loacation of study site and mentioned sites; (b) simplified geological map of the site vicinity; (c) Sr isoscape of the site vicinity[15–17]. The radii of the concentric circles are 10 km and 20 km, respectively

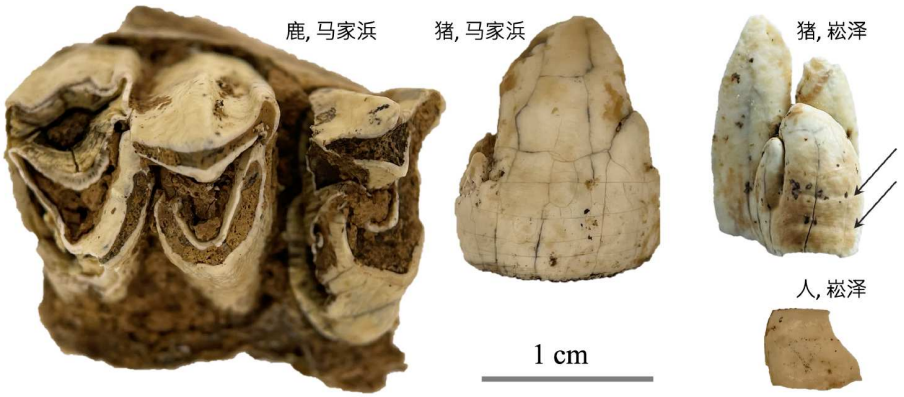


图 2 研究标本. 马家浜文化的鹿和猪都来自TS4W37G12; 崧泽文化的猪来自TS4W37(4)C, 人来自M349. 箭头所示为线性牙釉质发育不全

Figure 2 Study specimen. The samples of deer and pig of the Majiabang Culture were collected from TS4W37G12, and the tooth fragments of pig and human of the Songze Culture were collected from TS4W37(4)C and M349, respectively. The arrowheads on pig tooteh indicated linear enamel hypoplasia

釉质工作标样作为质控标准. 锶同位素数据采用$^{85}Rb/^{87}Rb$=2.593扣除^{87}Rb对^{87}Sr的干扰. 运用指数分馏定律, 假定$^{88}Sr/^{86}Sr$=8.375209校正锶同位素质量分馏.

为了对比遗址周边$^{87}Sr/^{86}Sr$同位素的变化范围, 我们以10和20 km为半径, 在构建好的锶同位素景观图[15]中随机提取了200个点$^{87}Sr/^{86}Sr$值, 作为评价出土标本的活动范围的参考. 对比区域锶同位素景观数据时, 本研究并不追求数值的完全一致, 而是关注其是否落入相同区间及其相对变化趋势是否一致. 这种尺度互补的比较方式已被广泛应用于考古学中, 用于结合区域背景与个体生命史信息, 从而更全面地解释动物的地理来源与活动范围.

2 结果

我们绘制了磨盘山遗址牙釉质的锶同位素序列(图3). 马家浜文化时期梅花鹿的M1上共获得了71个$^{87}Sr/^{86}Sr$数据, 数据范围为0.71300~0.71362, 均值为0.71329±0.00014. 马家浜文化时期猪牙共获得了82个$^{87}Sr/^{86}Sr$数据, 数据范围为0.71299~0.71468, 均值为0.71364±0.00032. 这一时期, 猪牙$^{87}Sr/^{86}Sr$的平均值和离散程度显著大于鹿牙(t检验, P<0.0001, 差值为0.00035±0.00004; F检验, P<0.0001).

崧泽文化时期, 猪牙共获得了61个$^{87}Sr/^{86}Sr$数据, 数据范围为0.71205~0.71287, 均值为0.71249±0.00020. 无论是均值还是变化幅度, 崧泽的猪牙远低于马家浜文化时期(差值为0.00115±0.00004). 同时期, 人牙共获得了22个数据, 范围为0.71228~0.71302, 均值为0.71277±0.00019. 尽管人牙和猪牙的锶同位素分布区间高度重叠, 变化幅度没有显著差异(Levene检验, P=0.48), 但人牙$^{87}Sr/^{86}Sr$集中于相对高值区(偏度为–1.16), 平均值显著高于猪(t检验, P<0.0001, 差值为0.00028±0.00005).

从遗址周边随机提取的$^{87}Sr/^{86}Sr$背景值显示(图4), 距离磨盘山20 km范围内锶同位素比值多低于0.712, 与地表水的实测结果一致. 同时, 10 km范围内部分地点$^{87}Sr/^{86}Sr$在0.712~0.713, 距离遗址10~20 km范围内, 出现了$^{87}Sr/^{86}Sr$值高于0.713的多个地点. 这表明, 磨盘山遗址马家浜文化层出土的鹿和猪主要来自距离遗址10 km以外的丘陵山地, 而崧泽文化时期的猪和人的活动范围集中在遗址周边10 km范围内.

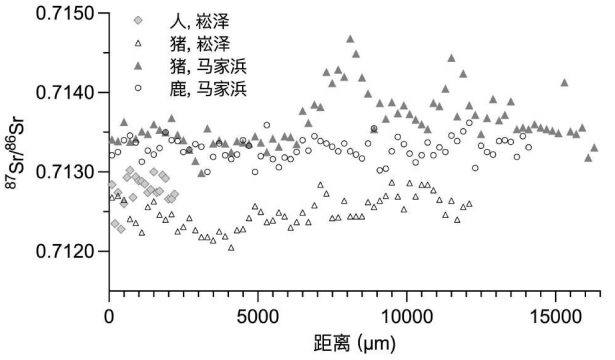


图 3 磨盘山个体牙釉质的$^{87}Sr/^{86}Sr$序列. 横坐标代表测点到齿颈的距离

Figure 3 The $^{87}Sr/^{86}Sr$ profile of the enamel from the Mopanshan individual. The x-axis represents the distance from the measuring point to the cervix of the tooth

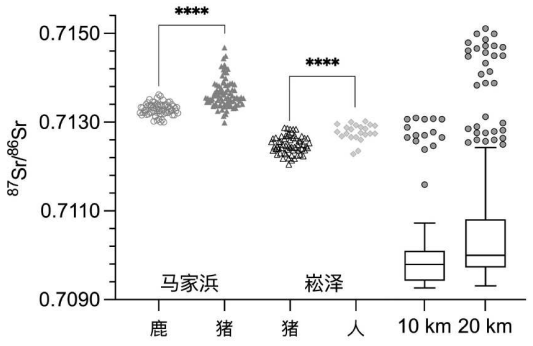


图 4 磨盘山个体牙釉质的$^{87}Sr/^{86}Sr$值及距离遗址10、20 km范围的$^{87}Sr/^{86}Sr$箱线图

Figure 4 The $^{87}Sr/^{86}Sr$ values of the Mopanshan individual's dental enamel and the box plots of $^{87}Sr/^{86}Sr$ within 10 and 20 km ranges from the site

3 讨论

3.1 磨盘山遗址猪的活动范围

动物考古学研究表明, 长江中下游地区新石器时代家养动物仅有猪和狗[20]. 马家浜文化时期, 磨盘山遗址梅花鹿和猪的$^{87}Sr/^{86}Sr$(图4)远高于遗址周边的环境背景, 与遗址南侧、10 km以外的江南丘陵区一致. 考虑到梅花鹿主要栖息地是丘陵坡地的林缘地带, 且同时期的猪$^{87}Sr/^{86}Sr$平均值更高、高值区变化范围更大, 磨盘山遗址马家浜文化时期的猪应该是生活在江南丘陵区的野猪. 考虑到猪的杂食特性, 猪的$^{87}Sr/^{86}Sr$变幅比鹿更大表明, 猪的摄食范围更加多样. 由于缺少同时期人类牙釉质的锶同位素, 目前尚不能直接比较猪与人活动范围, 但猪的锶同位素值接近野生的梅花鹿, 表明马家浜文化时期的这头猪与野生的梅花鹿类似, 主要在丘陵山地中觅食和活动, 其地理活动范围广阔, 活动轨迹尚未受到人类定居点的严格限制.

到稍晚的崧泽文化时期, 磨盘山遗址猪牙有线性牙釉质发育不全(图2), 说明这暗示着猪的营养状况不佳或生存压力较大[21]. 我们的序列数据显示, 其$^{87}Sr/^{86}Sr$降低到遗址周边10 km内的高值范围(图4), 与同一时期出土人牙釉质相当, 强烈表明这头猪在其牙釉质形成期生活在与人类定居点相同的地理环境. 这意味着它的活动范围受到了限制, 被圈养或限制在聚落附近的人造生态位. 另外, 从个体$^{87}Sr/^{86}Sr$序列来看, 崧泽文化时期, 猪的活动范围比人更大, 侧面反映了人类对家猪的管理相对粗放.

值得强调的是, 活动范围本身并非区分野生动物与家畜的充分或必要条件. 来自较远区域的个体并不

必然意味着野生来源，而活动范围受限的个体也不必然是家畜. 因此, 本研究并未试图通过锶同位素数据对猪进行“野生-家养”二元判定. 相反, 我们关注的是猪活动范围是否受到人类持续、稳定的空间约束，这是驯化过程中人类管理强度增强的重要体现之一.

在马家浜时期, 猪的$^{87}Sr/^{86}Sr$值与梅花鹿高度一致, 表明其活动范围未被限制在聚落周边，这可能反映了马家浜时期的狩猎行为. 至崧泽时期，猪的$^{87}Sr/^{86}Sr$值显著收敛至遗址环境背景范围内，同时伴随釉质发育不全等生理压力指标，显示其活动空间和生存条件受到人类更强的控制. 尽管单一指标不足以界定“家猪”, 但多重证据的协同变化明确揭示了人类—猪关系从低强度干预向高强度管理的转变.

在磨盘山遗址的马家浜文化时期，猪的锶同位素值与遗址所在地差别巨大, 而与野生动物鹿相似, 暗示此时的猪很可能是通过人类的狩猎捕获进入遗址的. 而崧泽文化时期, 猪的锶同位素与人类趋同, 这可能包含了人类对猪实施主动管理的因素，即人类开始有意识地控制猪的活动和繁殖，猪主要在遗址内或周边活动. 从锶同位素来看, 猪的锶同位素变化幅度略高于人类, 表明此时人类对猪的管理强度有限, 但人类对猪的地理约束，已经在猪的牙齿上留下可以观察到的形态变化, 包括线性牙釉质发育不全. 磨盘山遗址马家浜文化时期仍存在被狩猎的野猪，锶同位素序列揭示了该遗址猪逐渐向崧泽文化时期粗放的地理控制过渡的过程.

本文关注马家浜至崧泽文化时期人类对猪的管理方式，尤其是对其活动空间的控制程度所发生的变化. 马家浜时期猪类表现出的广泛活动范围和与野生动物相似的锶同位素特征，在互动机制上更接近于以捕获和低强度干预为主的模式；而崧泽时期猪活动范围的显著收缩及其生理压力信号，则体现出人类对猪生存环境更为持续的干预，这在特征上与驯化的共生路径[22]中所强调的人类—动物空间共存关系具有一定的可比性.

3.2 猪驯化过程的多样性与区域差异

中国史前家猪驯化路径，在不同区域存在显著差异. 相较而言, 中国北方地区的家猪驯化过程在多学科证据支持下已较为清晰，而长江下游地区则长期存在较大的争议和不确定性. 正是这种区域差异, 为通过锶同位素方法比较不同人-猪互动模式提供了理想的研究框架.

在中国北方，新石器时代早期至中期的动物考古研究已通过猪的数量比例、死亡年龄结构、牙齿几何形态、病理特征及稳定同位素食性分析等多项指标[4,23~25]，确认了家猪在生业体系中的重要地位. 多个遗址的锶同位素研究表明，家猪的变异幅度显著小于同址出土的其他动物[26]. 在河南舞阳贾湖[27]、陕西榆林贾大峁[28]、神木石峁后阳湾[29]、青海民和喇家[30]、山西襄汾陶寺[31]、河南偃师二里头、新郑望京楼[32]、安阳殷墟[33]、陕西淳化枣树沟脑[34]等多个遗址，猪的锶同位素更是所有动物中最为集中的. 这一现象在从新石器时代到青铜时代的多个遗址中反复出现，使家猪成为界定遗址尺度锶同位素“本地范围”的关键物种. 这些证据从群体层面明确了猪的活动范围与聚落空间高度一致, 反映出人类对猪持续而稳定的管理[8,9].

相比之下，长江下游地区早期新石器时代人类与猪的关系则表现出更大的复杂性. 动物考古学研究表明, 马家浜文化从早到晚的多个遗址[35,36], 包括上海青浦崧泽遗址、浙江桐乡罗家角、江苏常州圩墩、昆山绰墩、宜兴西溪和溧阳神墩遗址，骨骼形态和死亡年龄研究支持家猪的存在, 同时指出, 鹿科动物是当时更重要的肉食来源, 并且确认存在野猪. 江苏宜兴的骆驼墩遗址是从马家浜文化的大型聚落遗址[37]，猪骨仅见于马家浜文化早期. 形态研究未能提供家猪的确定证据. 动物群的同位素食性分析表明，猪和鹿食性接近, 而显著区别于狗, 暗示马家浜早期, 骆驼墩遗址可能不存在家猪驯养[38]. 浙江长兴江家山遗址的马家浜晚期动物遗存以野生动物为主，但猪的线性牙釉质发育不全比例高达50%, 可能为人类干预结果[39]. 稍晚的崧泽文化遗址，包括上海青浦崧泽和福泉山遗址、江苏海安青墩遗址、浙江嘉兴南河浜、桐乡董家桥遗址，都发现了家猪. 但崧泽文化时期动物资源获取仍以狩猎和渔捞为主, 家畜饲养尚未成为主要方式[40].

在这一背景下，锶同位素分析为理解长江下游地区猪驯化过程提供了关键补充. 磨盘山遗址的结果显示，马家浜文化时期猪的$^{87}Sr/^{86}Sr$值与同一遗址出土的梅花鹿高度一致, 并明显高于遗址周边的环境背景, 指示其活动范围较大, 可能来自江南丘陵地区, 获取方式更接近于狩猎野生个体. 至崧泽文化时期, 猪的锶同位素值显著收敛, 与同期人类个体相当, 同时伴随牙釉质发育不全等生理压力信号，表明其活动空间已被限制在遗址及周边区域之内，人类对猪的空间管理明显

增强.

通过南北对比可以看出，锶同位素所揭示的并非简单的“家猪或野猪”二分，而是人类对动物活动范围控制程度的连续变化. 中国北方提供了这一关系的清晰参照，而长江下游则展示了驯化过程的渐进性和区域多样性. 这不仅深化了对中国家猪驯化多样路径的理解，也凸显了锶同位素方法在复杂驯化情境中的独特优势.

4 结论

磨盘山遗址的高分辨率锶同位素序列印证了长江中下游地区家猪驯化管理模式的渐进式深化. 马家浜文化时期的猪锶同位素值接近野生鹿，暗示其活动范围广阔，可能处于狩猎捕获阶段. 到了崧泽文化时期，猪的锶同位素值与同一遗址出土的人类相似，证明人类对其活动施加了地理限制，管理程度加强.

锶同位素分析在驯化研究中具有独特意义，它能够直接反映动物地域流动性或活动范围. 在中国南方，生物遗骸保存欠佳，碳、氮同位素难以有效区分家猪和野猪的饮食差异，锶同位素比值为识别空间控制提供了重要补充. 需要指出的是，本研究的样本量有限：马家浜文化阶段仅包含1头猪和1头鹿，崧泽文化阶段包含1头猪和1个人类个体. 研究结论主要基于个体尺度的高分辨率同位素序列分析，而非群体统计推断. 每个个体的牙釉质序列记录了其生长期内连续的地理信号变化，这种时间分辨率在一定程度上弥补了个体数量有限的不足. 然而，个体行为的特殊性仍可能影响解释的普遍性. 因此，本文所提出的从狩猎获取向低强度地理控制转变的模式，应视为一种具有启发意义的个案证据，而非对整个区域驯化进程的统计性定论. 未来有必要在更多遗址和更大样本基础上开展类似高分辨率锶同位素研究，以验证该趋势是否具有区域代表性.

参考文献

1 Balasse M, Cucchi T, Evin A, et al. Wild game or farm animal? Tracking human-pig relationships in ancient times through stable isotope analysis. In: Stépanoff C, Vigne J D eds. Hybrid Communities. London: Routledge, 2018. 81–96

2 Price M, Hongo H. The archaeology of pig domestication in Eurasia. J Archaeol Res, 2020, 28: 557–615

3 Zhang M, Liu Y, Li Z, et al. Ancient DNA reveals the maternal genetic history of East Asian domestic pigs. J Genet Genomics, 2022, 49: 537–546

4 Luo Y B, Zhang J Z. Reanalysis of pig bones unearthed from the Jiahu Site, Wuyang County, Henan (in Chinese). Archaeology, 2008, (1): 90–96 [罗运兵, 张居中. 河南舞阳县贾湖遗址出土猪骨的再研究. 考古, 2008, (1): 90–96]

5 Cucchi T, Hulme-Beaman A, Yuan J, et al. Early Neolithic pig domestication at Jiahu, Henan Province, China: clues from molar shape analyses using geometric morphometric approaches. J Archaeol Sci, 2011, 38: 11–22

6 Larson G, Liu R, Zhao X, et al. Patterns of East Asian pig domestication, migration, and turnover revealed by modern and ancient DNA. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 7686–7691

7 Lander B, Schneider M, Brunson K. A History of pigs in China: from curious omnivores to industrial pork. J Asian Stud, 2020, 79: 865–889

8 Dong N, Yuan J. Rethinking pig domestication in China: regional trajectories in central China and the Lower Yangtze Valley. Antiquity, 2020, 94: 864–879

9 Hongo H, Kikuchi H, Nasu H. Beginning of pig management in Neolithic China: comparison of domestication processes between northern and southern regions. Anim Front, 2021, 11: 30–42

10 Wang J, Tang Y, Zheng Y, et al. Early evidence for pig domestication (8,000 cal. BP) in the Lower Yangtze, South China. Proc Natl Acad Sci USA, 2025, 122: e2507123122

11 Rowley-Conwy P. The earliest domestic pigs in Neolithic China were closely managed. Proc Natl Acad Sci USA, 2025, 122: e2511400122

12 Alexander Bentley R. Strontium isotopes from the Earth to the archaeological skeleton: a review. J Archaeol Method Theor, 2006, 13: 135–187

13 Ericson J E. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. J Hum Evol, 1985, 14: 503–514

14 Zhao D S. Mopanshan Site in Langxi County, Anhui (in Chinese). Popular Archaeol, 2024, (2): 12–13 [赵东升. 安徽郎溪磨盘山遗址. 大众考古, 2024, (2): 12–13]

15 Bataille C P, Crowley B E, Wooller M J, et al. Advances in global bioavailable strontium isoscapes. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2020, 555: 109849

16 Tang Z, Wang X. A score of bioavailable strontium isotope archaeology in China: retrospective and prospective. Front Earth Sci, 2023, 10: 1094424

17 Wang X, Tang Z. The first large-scale bioavailable Sr isotope map of China and its implication for provenance studies. Earth-Sci Rev, 2020, 210: 103353

18 Shu L, Yao J, Wang B, et al. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block. Earth-Sci Rev, 2021, 216: 103596

19 Hou K J, Qin Y, Li Y H, et al. *In situ* Sr-Nd isotopic measurement of apatite using Laser Ablation Multi-Collector Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry (in Chinese). Rock Mineral Analysis, 2013, 32: 547–554 [侯可军, 秦燕, 李延河, 等. 磷灰石Sr-Nd同位素的激光剥蚀-多接收器电感耦合等离子体质谱微区分析. 岩矿测试, 2013, 32: 547–554]

20 Lyu P, Wu W H. The Lingjiatan Culture within the prehistoric subsistence pattern of the lower Yangtze River and the middle-lower Huai River regions (in Chinese). Cult Relics Southern China, 2020, (2): 119–125 [吕鹏, 吴卫红. 长江下游和淮河中下游地区史前生业格局下的凌家滩文化. 南方文物, 2020, (2): 119–125]

21 Dobney K, Yuan J, Evin A, et al. A new perspective on the study of pig domestication (in Chinese). Archaeology, 2006, (11): 74–80 [凯 斯·道伯涅, 袁靖, 安东·欧富恩克, 等. 家猪起源研究的新视角. 考古, 2006, (11): 74–80]

22 Zeder M A. Pathways to animal domestication. In: Gepts P, Famula T R, Bettinger R L, et al., eds. Biodiversity in Agriculture: Domestication, Evolution, and Sustainability. New York: Cambridge University Press, 2012. 227–259

23 Hou L L. Alternative indicators for reconstructing prehistoric subsistence economy from the perspective of stable isotopes (in Chinese). Cult Relics Southern China, 2019, (2): 165–183 [侯亮亮. 稳定同位素视角下重建先民生业经济的替代性指标. 南方文物, 2019, (2): 165–183]

24 Guan L, Hu Y W, Tang Z W, et al. Carbon and nitrogen stable isotope analysis of pig bones from the Wanfa Bozi Site in Tonghua (in Chinese). Chin Sci Bull, 2007, 52: 1678–1680 [管理, 胡耀武, 汤卓炜, 等. 通化万发拨子遗址猪骨的 C, N 稳定同位素分析. 科学通报, 2007, 52: 1678–1680]

25 Hu Y W, Luan F S, Wang S G, et al. A preliminary attempt to distinguish domestic pigs from wild boars using carbon and nitrogen stable isotope analysis (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2008, 38: 693–700 [胡耀武, 栾丰实, 王守功, 等. 利用C, N稳定同位素分析法鉴别家猪与野猪的初步尝试. 中国科学: D辑, 2008, 38: 693–700]

26 Wang X, Roberts P, Tang Z, et al. The circulation of ancient animal resources across the Yellow River Basin: a preliminary Bayesian re-evaluation of Sr isotope data from the Early Neolithic to the Western Zhou Dynasty. Front Ecol Evol, 2021, 9: 583301

27 Yin R C, Zhang J H, Yang X L. Preliminary study of prehistoric human migration based on Sr isotope analysis from Jiahu relics (in Chinese). Quat Res, 2008, 28: 50–57 [尹若春, 张居中, 杨晓勇. 贾湖史前人类迁移行为的初步研究——锶同位素分析技术在考古学中的运用. 第四纪研究, 2008, 28: 50–57]

28 Zhao C Y, Hu S M, Yang M M, et al. Analysis of strontium isotope ratio of animal remains from the Jiadamao Site in northern Shaanxi area (in Chinese). Quat Sci, 2022, 42: 59–68 [赵春燕, 胡松梅, 杨苗苗, 等. 陕北贾大峁遗址出土动物遗骸的锶同位素比值分析. 第四纪研究, 2022, 42: 59–68]

29 Zhao C Y, Hu S M, Sun Z Y, et al. Strontium isotope ratio analysis of animal tooth enamel unearthed from the Houyangwan locality of the Shimao Site in Shaanxi Province (in Chinese). Archaeol Cult Relics, 2016, (4): 128–133 [赵春燕, 胡松梅, 孙周勇, 等. 陕西石峁遗址后阳湾地点出土动物牙釉质的锶同位素比值分析. 考古与文物, 2016, (4): 128–133]

30 Zhao C, Lu P, Yuan J, et al. Strontium isotopic ratios in animal remains at the Lajia Site, Qinghai Province. Sci Archaeol, 2018, 5: 67–76

31 Zhao C Y, Yuan J, He N. Strontium isotope analysis of archaeological fauna from the Taosi Site, Xiangfen County, Shanxi Province (in Chinese). Quat Sci, 2011, 31: 22–28 [赵春燕, 袁靖, 何努. 山西省襄汾县陶寺遗址出土动物牙釉质的锶同位素比值分析. 第四纪研究, 2011, 31: 22–28]

32 Zhao C Y. A tentative study on the provenance of cattle and sheep during the Erlitou culture period in the Songshan region: a case study of the Erlitou and Wangjinglou sites (in Chinese). Huaxia Archaeol, 2018, (6): 77–84 [赵春燕. 嵩山地区二里头文化时期牛和羊来源蠡测——以二里头遗址与望京楼遗址为例. 华夏考古, 2018, (6): 77–84]

33 Zhao C Y, Li Z P, Yuan J. Strontium isotope ratio analysis of horse and pig tooth enamel unearthed from the Yinxu Site in Anyang, Henan (in Chinese). Cult Relics Southern China, 2015, (3): 77–80 [赵春燕, 李志鹏, 袁靖. 河南省安阳市殷墟遗址出土马与猪牙釉质的锶同位素比值分析. 南方文物, 2015, (3): 77–80]

34 Liu K, Ling X, Li Y, et al. Study on the strontium isotope standard in pig teeth excavated from Zaoshugounao Site, Shaanxi Province of China. Archaeometry, 2023, 65: 850–861

35 Song Y B. The Subsistence strategy of Early Majiabang Culture: a zooarchaeological perspective (in Chinese). Southeast Culture, 2017, (5): 72–77 [宋艳波. 马家浜文化早期的生业经济研究——以动物考古学为视角. 东南文化, 2017, (5): 72–77]

36 Song Y B. The subsistence research of the Middle and Late Majiabang culture: a zooarchaeology perspective (in Chinese). Southeast Culture, 2019, (5): 47–55 [宋艳波. 马家浜文化中晚期的生业经济研究——以动物考古学为视角. 东南文化, 2019, (5): 47–55]

37 Lin L G, Tian M L, Xu J Q. Excavation of the Neolithic Luotuodun Site in Yixing, Jiangsu (in Chinese). Archaeology, 2003, (7): 3–9 [林留根, 田名利, 徐建清. 江苏宜兴市骆驼墩新石器时代遗址的发掘. 考古, 2003, (7): 3–9]

38 Guan L, Lin L G, Hou L L, et al. Early pig domestication in the Majiabang culture of the Taihu Lake region: evidence from pig bones unearthed at the Luotuodun Site in Jiangsu (in Chinese). Cult Relics South China, 2019, (1): 151–158 [管理, 林留根, 侯亮亮, 等. 环太湖地区马家浜文化早期家猪驯养信息探讨——以江苏骆驼墩遗址出土猪骨分析为例. 南方文物, 2019, (1): 151–158]

39 Zhang Y. Animal remains from the Tianluoshan, Jiangjiashan and Bianjiashan sites and related issues (in Chinese). Master Thesis. Beijing: Peking University, 2009 [张颖. 田螺山、江家山和卞家山遗址的动物遗存和相关问题探讨. 硕士学位论文. 北京: 北京大学, 2009]

40 Pan Y, Yuan J. Subsistence patterns in the lower Yangtze River from the Neolithic period to the pre-Qin period (I) (in Chinese). Cult Relics South China, 2018, (4): 111–125 [潘艳, 袁靖. 新石器时代至先秦时期长江下游的生业形态研究 (上). 南方文物, 2018, (4): 111–125]

Summary for “磨盘山遗址牙釉质高分辨率锶同位素与早期猪类空间管理”

High-resolution enamel strontium isotope analysis and early spatial management of pigs at the Mopanshan site

Zihua Tang[1*], Xi Chen[2], Ningning Dong[3], Wenyan Cheng[4,5,6], Yiwen Ren[1,7] & Dongsheng Zhao[8*]

[1] *State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
[2] *Department of Cultural Heritage and Museology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*
[3] *Institute of Archaeological Science, Fudan University, Shanghai 200433, China*
[4] *Center for Excellence in Archaeological Science and Cultural Heritage, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
[5] *Key Laboratory of Western China's Environmental System (MOE), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
[6] *Key Scientific Research Base of Bioarchaeology in Cold and Arid Areas, National Cultural Heritage Administration, Lanzhou 730000, China*
[7] *Department of Anthropology, School of Sociology and Anthropology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*
[8] *Department of Archaeology and Cultural Relics, School of History, Nanjing University, Nanjing 210023, China*
* Corresponding authors, E-mail: tangzihua@mail.iggcas.ac.cn; chengziya@nju.edu.cn

Domestic pigs (Sus scrofa domesticus) are among the key livestock independently domesticated in China and played an important role in prehistoric subsistence systems and the development of early complex societies. In many Neolithic communities, pigs constituted a major source of animal protein and were closely integrated with agricultural production and settlement life. Despite extensive zooarchaeological research, however, the early process of pig domestication in the lower Yangtze region remains poorly understood. Compared with northern China, where multiple lines of evidence indicate relatively early and clear patterns of pig management, the lower Yangtze presents a more complex picture of human-pig interactions. Traditional zooarchaeological indicators, including skeletal morphology, mortality profiles, and population structure, often yield ambiguous results, making it difficult to determine whether pigs recovered from archaeological contexts represent hunted wild boar or animals already under sustained human management. This problem is further complicated by the ecological setting of southern China, where dense C_3 vegetation and abundant wild boar populations obscure dietary distinctions between wild and managed animals. Consequently, the mechanisms through which humans gradually exerted control over pig populations in this region remain insufficiently understood. In this study, we apply high-resolution strontium isotope ($^{87}Sr/^{86}Sr$) analysis to investigate early pig management in the lower Yangtze region from the perspective of animal mobility and human spatial control. Strontium isotope ratios preserved in tooth enamel reflect the geological signatures of landscapes where animals forage during tooth formation and therefore provide a powerful proxy for reconstructing geographic origin and movement patterns. Tooth enamel from pigs associated with the Majiabang (ca. 7000–6300 BP) and Songze (ca. 6300–5300 BP) cultural phases at the Mopanshan site in Langxi County, Anhui Province, was analyzed using sequential micro-sampling along the enamel growth axis. This procedure generated high-resolution $^{87}Sr/^{86}Sr$ sequences that allow reconstruction of individual pigs' activity ranges during tooth development and enable comparison with local environmental baselines and other contemporary animals. The results reveal clear diachronic differences between the two cultural periods. Pigs from the Majiabang phase exhibit $^{87}Sr/^{86}Sr$ values that are very similar to those of contemporaneous wild sika deer and significantly higher than the environmental baseline surrounding the site. These isotopic signatures suggest that the animals likely originated from the broader Jiangnan Hills region rather than the immediate vicinity of the settlement. Their wide-ranging mobility patterns are consistent with pigs obtained through hunting rather than animals confined within human-managed spaces. In contrast, pigs from the subsequent Songze phase display a marked reduction in $^{87}Sr/^{86}Sr$ variability, with values closely approximating those measured from contemporaneous humans. This pattern, together with the occurrence of linear enamel hypoplasia and other physiological stress indicators, suggests that pigs' activity ranges had become restricted to the vicinity of the settlement and that their movements were increasingly constrained by human control. Taken together, these results indicate that pig domestication in the lower Yangtze region was not a rapid or uniform transformation but instead involved a gradual transition from hunting wild animals to the emergence of low-intensity, spatially controlled husbandry practices. Rather than representing an abrupt shift from wild to domestic status, the Mopanshan evidence suggests a progressive intensification of human spatial management over time. The study highlights the value of strontium isotope analysis for identifying changes in animal mobility and, by extension, the degree of human management. By providing direct isotopic evidence for incremental spatial restriction of pigs within a complex environmental landscape, this research contributes to a deeper understanding of the diversity and regional variability of domestication processes in East Asia.

spatial management of pigs, Majiabang Culture, Songze Culture, Lower reaches of the Yangtz River, Mopanshan site

doi: 10.1360/CSB-2025-5781