科学通报 2012 年 第 57 卷 第 12 期：1037 ~ 1044
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

即墨北阡遗址人骨稳定同位素分析：沿海先民的食物结构

王芬[①], 樊榕[①], 康海涛[②], 靳桂云[①], 栾丰实[①], 方辉[①], 林玉海[③], 苑世领[②*]

① 山东大学东方考古研究中心, 济南 250100;
② 山东大学化学与化工学院, 济南 250100;
③ 青岛市文物保护与考古研究所, 青岛 266003
* 联系人, E-mail: shilingyuan@sdu.edu.cn

2011-08-12 收稿, 2011-12-23 接受
国家社科基金(11CKG004)、国家自然科学基金(41072135)、高等学校学科创新引智基地项目(111-2-9)和山东大学交叉学科基金(2009JC24)资助

摘要 青岛市即墨北阡遗址距离现代海岸线仅数千米, 2007, 2009 和 2011 年先后 3 次发掘该遗址, 出土大量大汶口文化早期阶段的人骨资料, 对其进行稳定 C 和 N 同位素分析可望复原先民的食物结构, 揭示陆生和海洋资源对先民生活方式的影响. 依据人骨中骨胶原 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 稳定同位素数值, 通过三元混合模型推测先民的食物来源包括约 44.1%的海生类(可能是海中的贝类和鱼类), 34.1%的 C_4 植物(可能是粟), 21.8%的陆生动物, 表明北阡先民主要采用渔业和农耕为主、狩猎或养殖为辅的生活方式. 通过与同时期其他遗址先民的稳定同位素数值比较, 在距今 5000~6000 年, 长江流域、黄河流域、北方沿海和内陆地区先民的生活方式明显不同: 长江流域主要为稻作农业和渔猎, 黄河流域更多体现粟作农业和家畜养殖, 而沿海地区根据地理特征更多依赖农耕和海洋渔业.

关键词
新石器时代
大汶口文化
北阡遗址
稳定同位素分析
食物结构

史前先民的食物结构是反映当时人们利用野生或驯养的季节食物资源、适应生存环境的重要标志. 虽然有时可以通过遗址中的食物残存进行直接推测, 但是这样的发掘信息往往非常有限, 另外更大的限制在于残存的食物可能更多体现了个体对某种食物的特殊偏好, 而不能整体上反映一个群体的食物结构问题. 而基于人骨骨胶原的稳定 C 和 N 同位素分析, 可以再现古代人类的食物结构, 并对区域生活方式和社会结构的重建等问题提供有益信息, 目前, 这种研究方法已经成为考古界研究的热点[1~3].

实验表明动物骨骼蛋白质可以反映摄入的食物蛋白质组成, 意味着从人类骨骼中获得的稳定同位素比值, 可以记录个体在以前的几年或者更长的时间范围内所摄入的食物蛋白质组成. 这样稳定同位素分析能够再现史前先人的饮食结构, 探究个体之间的食物结构差异. 其中稳定 C 同位素分析常用于区分来自 C_3(温带植物如大多数的蔬菜、水果和小麦)和 C_4(热带或旱作植物如粟、玉米和甘蔗等)植物生态系统[4], 或区分来自海洋和陆生生态系统等[5]. 由于处于食物链中不同等级间动物组织对食物的 $\delta^{15}N$ 有 3‰~5‰的富集, 以此为基础稳定 N 同位素分析可以判断食物链中种群位置[6]. 这样通过稳定 C 和 N 的稳定同位素分析可以再现古人类食物结构中植物、肉食来源, 进而推测当时的社会经济结构.

对人骨的稳定 C 和 N 同位素分析现在已经广泛用于国内科技考古研究[7~9], 如体现华南地区稻米的栽培、寻找稻米南北传播路线[10]、验证北方游牧部落的定居和与汉民族的融合[11]等, 得到了众多有意

英文版见: Wang F, Fan R, Kang H T, et al. Reconstructing the food structure of ancient coastal inhabitants from Beiqian village: Stable isotopic analysis of fossil human bone. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5029-y

义的结论. 本研究将主要针对即墨北阡遗址出土的人骨, 通过稳定 C 和 N 同位素分析推测先人的食物结构, 进而揭示陆生和海洋资源对先民生活方式的影响. 北阡遗址坐落山东省即墨市北阡村, 遗址距当今海岸线仅 5 km, 发掘出土的大量人体骨骼为我们研究当时先民在沿海地区的生活方式提供了可能. 本研究目的包括: (1) 复原先民的食物结构; (2) 以文献为基础比较长江流域、黄河流域, 北方沿海地区和内陆地区不同区域间先民的食物结构差异, 以期为下一步探索该时期古代先民的食物结构和社会经济类型积累数据.

1 材料与方法

(ⅰ) 遗址背景. 北阡遗址位于胶东半岛南岸西部, 地处青岛即墨市金口镇北阡村, 现距海岸线约 5 km. 2007, 2009 和 2011 年, 山东大学考古学系、青岛市文物保护与考古研究所和即墨市博物馆合作先后对其进行了 3 次发掘, 发现了一批围沟、房址、墓葬、灰坑等遗迹, 出土了大量石器、陶器、骨器以及少量铜器、蚌器等, 并首次在胶东地区集中发现了多人二次合葬墓. 根据地表采集的遗物以及出土器物可以判断, 该遗址主要经历大汶口文化早期阶段和周代两大时期.

(ⅱ) 样品处理. 样品共选取大汶口文化时期的 20 例人胫骨, 距今大约 5500~6100 年, 包括 9 例男性和 7 例女性, 及 4 例未知性别人骨, 其墓葬编号、性别等列于表 1. 依据 Ambrose 等人[12]提出的获取骨胶原的处理方法, 首先机械去除骨样内外表面的污染物, 粉碎, 收集粒度为 40~60 目的骨粉, 放入砂芯漏斗; 于 0.1 mol/L 的 HCl 溶液中在 4℃下浸泡脱钙数天直至无明显颗粒为止, 期间每隔 1 天换新鲜酸液 1 次. 用去离子水清洗至中性后, 于 0.125 mol/L NaOH 溶液浸泡 20 h 去除骨样中残存的腐殖酸等. 最后再用去离子水洗至中性, 置于 0.001 mol/L 的 HCl 溶液内, 于 70℃下加热 48 h, 趁热过滤, 冷冻干燥获得骨胶原. 骨胶原得率(骨胶原质量/骨样质量)列于表 1 中.

(ⅲ) 测试分析. 骨胶原的 C, N 元素含量及 C, N 稳定同位素比值的测定在中国林业科学院稳定同位素比率质谱实验室进行. 测试仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的型号为 MAT253 同位素比率质谱仪, 和配备的 Flash EA1112 HT 元素分析仪. C 和 N 稳定同位素比值以δ^{13}C 值(PDB)和δ^{15}N(AIR)表示, 其分析精度分别为±0.1‰和±0.2‰. 所有样品的 C, N 元素含量和δ^{13}C, δ^{15}N 值列于表 1.

2 结果与讨论

2.1 骨样污染鉴别

骨骼在埋藏过程中环境的 pH、温度、湿度, 以及微生物等诸多因素会破坏骨骼的原有完整结构, 此种成岩作用(bone diagenesis)[13]即为骨骼的污染. 而骨骼的污染会使古代先民的食物结构与骨骼化学组成之间的对应关系被打破, 因此鉴别古代先民人骨样品的污染程度是古代食物结构研究的前提条件.

从表 1 可以看出, 除了少数样品以外, 多数样品的骨胶原得率在 10%以下, 远低于现代样品的平均值(约有 20%的骨胶原)[14,15], 但是我们也注意到所有样品的 C 和 N 含量, 其平均值分别为 40.23%和 14.91%, 比较接近现代胶原 C 含量 41%和 N 含量 15%的数值, 说明经过打磨去除表面污染的残存样品中的骨胶原基本保留了最初的生物学和化学特性, 初步可以判断未受到环境破坏. 另外判断骨胶原是否受到污染的重要指标是 C/N 摩尔比值, 其数值落在 2.9~3.6 范围之内可视为未受到污染[16]. 表 1 数据表明此 20 个样品的 C/N 摩尔比均处在此范围, 平均值为 3.15, 最低为 2.95, 最高为 3.28, 接近现代骨胶原 3.2 的数值. 通过上述分析表明此 20 个样品的骨胶原尽管发生了一定程度的降解, 但仍然保持了最初的生物学特征, 视为未污染样品, 可用作稳定同位素分析.

2.2 先民食物结构分析

陆生植物可以分为两类, 即 C_3 植物如稻、麦、大部分蔬菜、树木等, 和 C_4 植物如粟、玉米、高粱、大部分草类等. 早年日本学者[17]通过对现代和遗址遗存检测, 认为 C_3 植物的δ^{13}C 和δ^{15}N 其平均数据为−25.4±1.6‰和 1.2±2.4‰, 而 C_4 植物为−10.0±0.5‰和 1.0±1.9‰. 与国内文献中普遍认可的 C_3 和 C_4 植物的δ^{13}C 数据−26.5‰和−12.5‰非常接近[18]. 在稳定同位素分析中, 多采用分别讨论稳定 C 和 N 同位素的方法, 即以δ^{13}C 反映饮食中 C_3 和 C_4 植物的比例关系, 以δ^{15}N 说明摄入肉食动物(包括海洋和陆生)的情况(表 2), 进而推测古人类食物结构, 也得出了众多非

表 1　北阡遗址先民胫骨样品概括和分析数值

序号	样品编号	性别	骨胶原得率(%)	C(%)	N(%)	C/N	$\delta^{13}C$(‰)	$\delta^{15}N$(‰)	C_4植物(%)	海洋贝壳(%)	陆生动物(%)
1	M4-A	男	6.09	37.68	14.44	3.04	−9.56	6.36	45.4	13.6	41.0
2	M4-B	男(老年)	3.38	37.33	14.04	3.10	−9.20	7.38	40.6	31.9	27.5
3	M4-C	男	6.14	39.32	15.16	3.03	−9.59	7.64	34.8	34.4	30.8
4	M4-D	女	8.01	39.33	14.91	3.08	−8.03	7.50	50.8	39.3	9.9
5	M4-E	女	3.53	37.35	14.39	3.03	−8.89	7.87	39.6	41.4	19.0
6	M6	未知(少年)	4.03	41.18	14.66	3.28	−8.34	9.03	35.5	62.9	1.59
7	M22-A	男	3.73	36.97	14.38	3.00	−9.81	6.52	41.7	15.1	43.2
8	M22-B	女	1.76	37.51	14.85	2.95	−9.71	6.15	45.6	9.5	44.9
9	M22-C	女	9.96	40.93	15.13	3.16	−8.70	8.44	36.8	51.6	11.6
10	M22-D	未知(儿童)	10.31	41.10	15.30	3.13	−10.03	7.30	33.3	26.8	39.9
11	M31-A	男	2.30	41.39	15.21	3.17	−9.89	8.80	22.5	52.1	25.4
12	M31-B	男	4.59	42.48	15.36	3.23	−9.36	8.67	28.7	52.3	19.0
13	M31-C	女	2.82	40.07	14.67	3.19	−10.22	8.58	21.1	47.0	31.9
14	M62-A	男	3.08	41.47	15.17	3.19	−9.33	8.99	26.4	57.7	15.9
15	M62-B	男	0.57	38.01	13.67	3.24	−8.36	8.16	42.3	48.6	9.1
16	M62-C	女	4.22	41.64	15.22	3.19	−8.25	8.62	39.7	56.6	3.7
17	M62-D	未知(儿童)	12.53	44.29	15.85	3.26	−9.72	8.66	25.3	50.5	24.2
18	M90-A	男	7.55	41.64	15.05	3.23	−8.70	9.06	31.8	61.8	6.4
19	M90-B	女	4.50	42.01	15.33	3.20	−8.59	10.02	23.6	73.4	3.0
20	M139	未知(儿童)	4.75	42.95	15.48	3.24	−10.27	9.14	16.2	55.9	27.9
平均值				40.23±2.16	14.91±0.52	3.15±0.10	−9.16±0.66	8.09±0.96	34.1±9.4	44.1±17.5	21.8±14.0

表 2　不同地区在新时器时代同位素数据及其可能的食物结构 [a)]

遗址名称	地区	距今年代(a BP)	样品数量	$\delta^{13}C$(‰)	$\delta^{15}N$(‰)	植物食源(%)		动物食源(%)			参考文献
						C_3	C_4	海洋贝类/鱼类	淡水鱼类	家畜/狩猎	
三星村遗址	长江流域(华南)	6500~5500	19	−20.04±0.21	9.69±0.33	27.2±4.3	3.9±1.3	无	68.9±4.5	少量	[25]
石家遗址	黄河流域(西北)	6300~6000	9	−10.03±0.68	8.10±0.45	9.4±5.0	67.8±4.8	无	22.8±6.1		[26]
宗日遗址	黄河流域(西北)	5200~4100	24	−10.09±1.07	8.33±0.45	5.7±4.9	67.0±7.2	无	26.1±6.2		[27]
西公桥遗址	黄河流域(华东)	5000~4500	7	−14.97±3.87	8.40±1.32	23.9±22.1	33.6±11.8	无	42.7±15.6		[28]
北阡遗址	沿海地区(华东)	6100~5500	20	−9.16±0.66	8.09±0.96	少量	34.1±9.4	44.1±17.5	少量	21.8±14.0	

a) 考虑到先民食物来源的复杂性以及三元混合模型的局限性, 每个遗址中食物组成应该有不确定因素

常有意义的结论.

在食物经人体消化吸收后转变成人骨中的骨胶原过程中, 稳定 C 和 N 同位素均有一定程度的富集, 一般按照年龄和食物来源等富集范围包括 4.5‰~6.1‰的δ^{13}C 和 3‰~5‰的δ^{15}N[19]. 以此为依据, 我们选取文献报道中的 C_3 植物[17]、C_4 植物[17]、海洋贝类[20]、海洋鱼类[20]、陆生动物[20]、淡水鱼类[17], 以及遗址出土的陆生动物(以猪和鹿为例), 经过 4.5‰ δ^{13}C 和 3.4‰ δ^{15}N 校正[17]与北阡遗址出土人骨胶原稳定同位素之间的对应关系示于图 1, 其中我们选取了遗址中出土的鹿和猪作为北阡遗址先民的动物肉食来源, 即遗址出土的陆生动物(TM-1). 此次测量选择了北阡遗址中的 3 个猪骨和 2 个鹿骨, 测量的稳定 C 和 N 同位素数据分别为: 猪(−17.5±2.6‰, 3.8±0.5‰), 鹿(−21.4±0.8‰, 2.7±1.6‰), 以及以上述猪和鹿为代表总的遗址陆生动物 TM-1(−18.5±3.3‰, 3.4±1.1‰). 稳定 C 和 N 同位素数据表明猪和鹿都有多种食物来源. 鹿更多的栖息于草甸、树林或灌木丛, 其栖息地距离人类的居住地相对较远, 主要以草本植物、树木的嫩枝、嫩叶为食, 冬季可能还要啃食树皮, 这些都属于典型的 C_3 植物特征, 受北阡先民 C_4 植物(如粟类主要食物来源)的影响相对较小, 因此相对猪而言鹿骨胶原中的δ^{15}N 和δ^{13}C 均较低, 体现出鹿是以 C_3 类植物为主要食物的植物性特征, 可以推测遗址中的鹿极有可能为北阡先民的狩猎结果; 遗址中猪骨胶原数据表明, 其数值更接近于 C_4 植物, 其食物结构可能为一般农作物(包括粟类)的果实、壳、根茎; 也极有可能食用人类的食物残余和粪便等排泄物, 从而直接或间接地摄入一定的肉食, 因此其δ^{15}N 值也较高, 体现出明显杂食特征, 可以推测遗址中的猪极有可能为北阡先民饲养的家畜.

需要说明的是, 以同一遗址里的动植物遗存稳定 C 和 N 同位素数值为基础, 进而推算当时先民的食物结构, 所得数据和信息应该更合理. 但是, 对 5500 年前的北阡遗址中残存植物的同位素含量测定不论是实物种类和数量还是检测方法都有一定的难度, 因此在此次食物结构评估中我们仅仅选择了同时期文献中植物 C 和 N 同位素数据[17]. 总之, 选择遗址中以鹿和猪为代表作为陆生动物(TM-1)食来源, 综合考虑其他植物和海洋生物文献数据, 以此为基础我们认为最终推测的当时北阡遗址先民食物结构应该有一定的可信度, 大体可以反映当时先民的饮食习惯, 希望所提供的信息能够为研究史前沿海先民的食物结构有所帮助. 毕竟通过目前的分析方法复原几千年前先民的人类活动仍然有一定的难度.

事实上到现在为止还没有完全弄清楚食物蛋白质和人骨胶原稳定同位素数值之间的确切关系, 因此再现的来自文献的同位素数值可能会由于地理位置、气候变化等情况与北阡遗址当时的食物类型有所差异, 但是通过图 1 我们仍然可以大体推测北阡遗址先民的食物结构组成. 我们注意到北阡遗址先民人骨的骨胶原稳定 C 和 N 同位素数值大致落于 C_4 植物、海洋贝壳(Marine shellfish, MS)或者海洋鱼类(Marine fish, MF)和陆生动物(TM-1)之间. 对这组数据进行线性拟合, 相关分析表明本组数据并不呈现明显线性相关(r=0.275, P=0.2412, N=20), 反映北阡遗址先民并不仅仅限于其中某两种食物来源, 应该有多种食物来源可供选择.

简单的二元混合模型[21]以δ^{13}C 数据为基础, 可以计算先民食物来源中 C_3 和 C_4 植物的比例关系, 特别适用于稻类、粟类混作农业, 如沟湾遗址[14]. 针对北阡遗址, 根据稳定同位素分析以及遗址现场发掘情况, 推测当时的先民应该是以渔业和农耕为主, 显然单纯讨论 C_3 和 C_4 植物比例关系并不能更合理地显示当时的食物结构. 从表 1 数据表明, 绝大多数先民人骨的δ^{15}N 同位素小于 9‰, 二元混合模型表明先民人骨的δ^{15}N 同位素含量偏低意味着动物类资源在食物中的比例不高, 而从遗址现场发掘的大量贝壳类残存表明北阡遗址先民可能有更广泛的肉食来源,

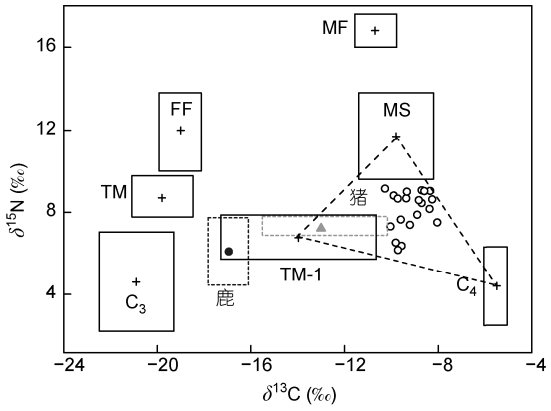


图 1 北阡遗址人骨样品和可能的食物资源中δ^{13}C 和δ^{15}N 同位素数值比较

方框为食物资源的偏差范围, 包括 C_3 植物(C_3)、C_4 植物(C_4)、以 C_3 植物为基的陆生动物(TM)、淡水鱼类(FF)、海洋鱼类(MF)、海洋贝类(MS), 遗址鹿(Deer), 遗址猪(Pig)和遗址陆生动物(TM-1)

即海洋贝类或鱼类. 也许二元混合模型中仅仅通过δ^{15}N 或δ^{13}C 两个稳定同位素的绝对比值讨论食物结构(特别是肉食来源)可能针对内陆地区有更好的说服力, 也有可能对海洋渔业特别是以贝类为肉食主要来源的地区有不同的解释.

在此我们提出一种三元混合模型, 即在平面坐标中选择有可能是食物来源的3个点组成三角形, 以此为基础由 3 个食物的百分含量来表示遗址中的食物结构. 与二元混合模型相比, 可以把δ^{13}C 和δ^{15}N 两个稳定同位素一并讨论, 而且可增加多个组成单元, 这样考虑的因素多一些可能更接近当时的真实情况. 在数学上就是把线性二元一次函数, 转化成平面三元一次函数.

在北阡遗址挖掘现场, 出土有炭化的粟颗粒、大量的贝壳, 以及驯化的猪骨和少量的鹿骨, 则暗示农耕、渔业、家畜养殖或者狩猎活动均为先民谋生的手段, 人骨的稳定同位素分析更清晰地显示先民的食物以 C_4(可能是粟)、海生类(可能是海中的贝类和鱼类)、陆生动物为主的饮食结构. 因此我们可以根据遗址现场分析推测选取三元变量: C_4, 贝类(MS)和遗址陆生动物(TM-1), 通过三元混合模型粗略推测北阡先民的饮食结构. 需要说明的是这里选择的陆生动物 TM-1(图 1)是遗址中以猪和鹿为代表的稳定同位素统计平均数据.

经过严格的数学公式推导(更详细的数学证明参见附录), 我们可以通过北阡遗址适用于农耕(C_4)、海洋渔业(贝类, MS)和家畜(陆生动物, TM-1)生活方式的三角坐标, 进而计算得到当时居民的食物来源中包括约 34.1%的 C_4 植物(可能是粟), 44.1%的海生类(海中的贝类和鱼类)和 21.8%的陆生动物(详细数据参见表 1). 当然对于个体来说还有很大的差别, 例如对 C_4 植物的消费跨度达到 34.6%(范围为 16.2%~50.8%), 贝壳类食物消费幅度 63.9%(范围为 73.4%~9.5%), 而陆生动物中的肉食来源也相差 41.9%(范围为 3.0%~44.9%), 表明先民个体的饮食嗜好、或者食物来源是否丰富等也决定了个体的食物结构.

北阡遗址地理位置平坦, 距离海岸线仅数千米之遥, 为先民的农耕和渔业活动提供了得天独厚的场所. 从总体的平均数据推测, 粟作农业和采集贝类或鱼类都占到食物结构的 35%以上, 分别代表了当时占主导地位的植物和动物两种食物来源方式. 因为贝类或鱼类等食物来源具有季节性较强、容易腐烂等特点, 而粟等农作物容易保存等特点正好是前者的补充. 遗址的浮选结果也显示, 粟是当时的主要农作物种类, 另外遗址发掘也出土的大量贝壳和鱼骨等, 可作实证. 尽管遗址中发现大量驯化的多种动物骨骼, 如猪骨等, 表明家禽的饲养已经存在, 但是同位素数据表明, 陆生动物占到食物来源中的 22%左右, 和贝类等主要肉食来源相比, 数值要小很多. 可以看出, 通过三元混合模型计算表明北阡遗址先民主要采用以渔业和农耕为主、家畜或狩猎饲养为辅的生活方式.

需要说明的是三元混合数学模型也存在其局限性, 如选择的食物种类等都会对结果有影响, 只能看作是在二元混合模型上有所提高. 事实上, 更客观的解释应该结合现场发掘信息, 二者共同得出相应结论. 发掘信息表明, 大汶口时期出土了大量的家养动物骨, 其中绝大多数为猪, 而且猪的年龄大于 1 岁的占到近 90%, 尤其是大于 2 岁的猪也有一半以上, 说明当时猪的家养已经非常普遍, 饲养量比较大, 大部分的猪都能够留待成年以后进行宰杀. 另一方面也表明狩猎鹿只是偶尔为之. 综合来说, 这一时期北阡先民主要以渔业、农耕、家畜为主, 狩猎为辅的生活方式.

2.3 我国不同地区先民的结构食谱

通过对黄河流域若干遗址人骨的稳定同位素分析, 表明在距今 7000 年左右粟作农业和家畜开始普及[22,23], 而在长江流域尽管稻作农业发展较早, 但人骨同位素分析表明先民的肉食来源更多依赖渔猎活动, 家畜的饲养并不普遍[24,25]. 表 2 为已经发表同时期的长江流域江苏金坛三星村遗址[25]、黄河流域陕西临潼石家遗址[26]和本研究即墨北阡遗址, 另加与此三领域同时代或稍晚时期的青海同德宗日遗址[27]、位于黄河和长江流域之间的山东滕州西公桥遗址[28]. 此 5 处遗址均处在同一时代, 可以分成长江流域和黄河流域、中国北方的内陆和沿海, 对这些遗址的同位素分析可望揭示中国古代不同地区先民食物结构的差异, 了解先民生活方式的异同.

长江流域三星村遗址的先民[25], 其同位素位置更集中在以 C_3 植物为食的陆生动物附近(TM, 图 2), 但是根据遗址现场信息更应该理解为位于 C_3 与淡水鱼(FF)之间; 其δ^{13}C 在此 5 个遗址中最低, 明显体现 C_3 类植物特征, 与先民种植水稻相关; 其δ^{15}N 也最

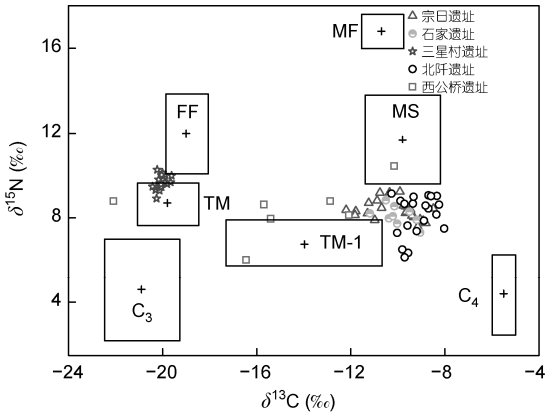


图 2 人骨样品和可能的食物资源中δ^{13}C 和δ^{15}N 同位素数值比较

包括宗日遗址、石家遗址、三星村遗址、北阡遗址、西公桥遗址, 其他符号说明见图 1

高, 充分证明长江流域由于水系发达, 有更普及的渔业, 先民肉食来源更多体现鱼类, 陆生动物即家畜应该并不是其主要的肉食来源, 否则根据图 2 中显示的位置先民食物来源应该全部为陆生动物肉食(TM), 显然与当时的社会状况不符. 黄河流域同时期的石家遗址[26]和稍晚些的宗日遗址先民[27], 其δ^{13}C 在−10.0‰左右, 体现 C_4 植物特征, 是粟作农业的显著特点; 而其δ^{15}N 稍低于长江流域先民中同位素含量, 结合地理特征推测其肉食来源主要为家畜饲养和狩猎, 显示出杂食类特点; 在图 2 中此两处遗址位置更接近 C_4 植物点, 表示动物类食物在其食物结构中应处于次要地位, 粟作农业则是先民的主要生活方式. 而位于长江流域和黄河流域之间的西公桥遗址[28](现位于山东省南部), 先民人骨中的δ^{13}C 和δ^{15}N 两个稳定同位素均分布较宽, 但总体而言δ^{13}C 介于 C_3 和 C_4 植物之间, δ^{15}N 低于长江流域先民数值, 与黄河流域先民数值相当. 可以推测滕州遗址中的先民农作植物中稻和粟混杂, 是南北稻粟种植交互区, 农业为其主要生活方式, 肉食来源为渔猎或家畜养殖.

事实上我们更关注沿海区域北阡遗址中稳定同位素所反映的信息与上述遗址之间的关系. 图 2 表明北阡遗址先民其稳定同位素比值与北方黄河流域两处遗址的数值基本处在同一区域, 对于植物食物来源应该一致, 均为 C_4 植物. 但是在上述讨论中我们已经得出结论其肉食来源更多倾向于海洋贝类或鱼类, 与宗日遗址和石家遗址的肉食来源明显不同, 因此简单三元混合模型的使用还有其局限性, 需要遗址现场发掘出土信息的支持, 特别是在确定肉食来源方面. 总体而言, 对于黄河流域和沿海遗址先民相比, 其农业基本为 C_4 植物粟作农业, 而肉食来源内陆地区倾向于狩猎驯养, 而沿海更多是渔业作业. 从图 2 中也可以得到这样的信息: 仅仅依靠δ^{13}C 和δ^{15}N 数值, 由于海洋鱼(贝)类和 C_4 有相近的δ^{15}N 数值, 还很难区分北方的内陆和沿海先民的具体食物来源, 需要结合遗址出土信息综合考虑才能给出更合理的答案. 也进一步说明三元混合模型可能更适用于北方沿海以粟作农业和渔业为主的生活方式, 可以大体反映先民食物结构中的肉食和植物比例.

根据以上分析, 通过三元混合模型我们可以大体计算出此 5 处遗址先民的饮食特征(见表 2): 长江流域三星村遗址先民以渔业为主(69%), 植物为 C_3 稻作植物(27%); 黄河流域内陆地区的石家遗址和宗日遗址 C_4 类植物占到约 2/3(67%~68%), 其次以家禽/狩猎/淡水渔业获取资源(26%~23%), 仅有小于 10%的 C_3 植物来源; 而位于黄河流域和长江流域之间的西公桥遗址先民, 食物来源中家畜养殖可能占到 43%左右, 而 C_3 植物(水稻)和 C_4 植物(粟米)混杂种植, 占到食物来源约 57%.

通过对黄河流域、长江流域, 以及内陆和沿海地区多个遗址出土人骨的稳定同位素比较分析, 可以清晰地看出, 在距今 5000~6000 年前, 我国先民的生活方式包括如下几种: (1) 长江流域先民由于发达的水系多以渔业为主, 水稻种植为辅的生活方式, 家畜饲养并不普遍; (2) 黄河流域内陆地区已经广泛种植粟类作物农业, 饲养家畜为其主要肉食来源; (3) 淮河流域处在长江和黄河流域之间, 是稻作农业和粟作农业交汇区, 以农业和饲养家畜为主的生活方式; (4) 北方沿海地区以粟作农业、海洋渔业为主的生活方式, 而家畜养殖也得到了普及.

3 结论

北阡遗址人骨的稳定同位素分析表明, 大汶口文化先民的食物结构以粟类农业和海洋贝类为主, 家畜养殖或狩猎为辅的生活方式. 通过与同时期其他遗址先民的稳定同位素比较, 在距今 5000~6000 年以前, 长江流域、黄河流域、北方沿海和内陆地区先民的生活方式明显不同, 长江流域主要为稻作农业和渔猎, 黄河流域更多体现粟作农业和家畜养殖, 而沿海地区根据地理特征更多依赖农耕和海洋渔业.

需要说明的是，三元混合模型的可靠程度首先依赖 C_3、C_4、海洋和淡水鱼类、陆生动物标本的稳定同位素数据. 由于我国稳定同位素研究古人类食物结构正处在数据积累阶段，还没有大量的数据可以借鉴，在选取的日本文献中其稳定 C 和 N 同位素数据会因地域区别有一定的差异，如有资料表明，日本海和内海中海洋鱼类的δ^{15}N 数值能够差到 2‰~4‰，而不同食物链之际也会有 1‰~2‰数值富集差异. 这种地域、气候条件等均会对动植物的生物特性有影响，也必然会反映到稳定同位素数值的差异. 特别需要指出的是三元混合模型毕竟仅仅考虑了 3 个因素，相对古代先民食物结构的复杂性，仍有很大的不足，但是作为一种探索希望能够为将来更深入的研究提供可能的借鉴作用.

致谢 在本文写作过程中，人骨性别、年龄鉴定得到日本九州大学中桥孝博教授、山东大学医学院刘树伟教授的帮助，在样品制备、文献检索等方面得到美国 Illinois 大学董豫博士的建议和指导，在此一并表示感谢.

参考文献

1 Ambrose S H, Deniro M J. Reconstructure of African human diet using bone collagen carbon and nitrogen isotpoe ratios. Nature, 1986, 319: 321–324
2 Hu Y, Shang H, Tong H, et al. Stable isotope dietary analysis of the Tianyuan 1 early modern human. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 10971–10974
3 张雪莲. 应用古人骨的元素、同位素分析研究其食物结构. 人类学学报, 2003, 22: 75–83
4 Pate F D. Stable carbon isotope assessment of hunter-gatherer mobility in prehistoric south Australia. J Archaeol Sci, 1995, 22: 81–87
5 Chishom B S, Nelso D E, Schwarca H P. Stable-carbon isotope ratio as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets. Science, 1982, 216: 1131–1132
6 Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between ^{15}N and animal age. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48: 1135–1140
7 张全超, Jacqueline T E, 魏坚, 等. 内蒙古察右前旗庙子沟遗址新石器时代人骨的稳定同位素分析. 人类学学报, 2010, 29: 270–275
8 裴德明, 胡耀武, 杨益民, 等. 山西乡宁内阳垣遗址先民食物结构分析. 人类学学报, 2008, 27: 379–384
9 凌雪, 陈靓, 田亚岐, 等. 陕西凤翔孙家南头秦墓出土人骨中 C 和 N 同位素分析. 人类学学报, 2010, 29: 54–61
10 Lanehart R E, Tykot R H, 方辉, 等. 山东日照市两城镇遗址龙山文化先民食谱的稳定同位素分析. 考古, 2008, 733: 55–61
11 董豫, 胡耀武, 张全超, 等. 辽宁北票喇嘛洞遗址出土人骨稳定同位素分析. 人类学学报, 2007, 26: 77–84
12 Ambrose S H. Preparation and characterization bone and tooth collagen for stable carbon and nitrogen isotope analysis. J Archaeol Sci, 1990, 17: 431–451
13 Price T D, Blitz J, Burton J H. Diagenesis in prehistoric bone: problems and solutions. J Archaeol Sci, 1992, 19: 513–530
14 付巧妹, 靳松安, 胡耀武, 等. 河南淅川沟湾遗址农业发展方式和先民的食物结构变化. 科学通报, 2010, 55: 589–595
15 Ambrose S H, Butler B M, Hanson D H. Stable isotopic analysis of human diet in the Marianas Archipelago, Western Pacific. Am J Phys Anthropol, 1997, 104: 343–361
16 DeNiro M J. Post-mortem preservation and alternation of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. Nature, 1985, 317: 806–809
17 Yoneda M, Suzuki R, Shibata Y, et al. Isotopic evidence of inlang-water fishing by a Jomon population excavated from the Boji site, Nagano, Japan. J Archaeol Sci, 2004, 31: 97–107
18 O'Leary M. Carbon isotope fractionation in plants. Photochemistry, 1981, 20: 553–567
19 Hedges R E M, Reyard L M. Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. J Archaeol Sci, 2007, 34: 1240–1251
20 Kusaka S, Hyodo F, Yumoto T, et al. Carbon and nitrogen stable isotope analysis on the diet of Jomon populations from two coastal regions of Japan. J Archaeol Sci, 2010, 37: 1968–1977
21 张雪莲, 王金霞, 冼自强, 等. 古人类食物结构研究. 考古, 2003, 2: 62–75
22 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: 地球科学, 2008, 38: 693–700
23 Hu Y, Wang S, Luan F, et al. Stable isotope analysis of humans from Xiaojingshan site: Implications for understanding the origin of millet agriculture in China. J Archaeol Sci, 2008, 35: 2960–2965

24 胡耀武, 李法军, 王昌燧, 等. 广东湛江鲤鱼墩遗址人骨的 C、N 稳定同位素分析: 华南新石器时代先民生活方式初探. 人类学学报, 2010, 29: 264–269
25 胡耀武, 王根富, 崔亚平, 等. 江苏金坛三星村遗址先民的食谱研究. 科学通报, 2007, 52: 85–88
26 Pechenkina E, Ambrose S, Ma X, et al. Reconstructing northern Chinese Neolithic subsistence practices by isotopic analysis. J Archaeol Sci, 2005, 32: 1176–1189
27 崔亚平, 胡耀武, 陈洪海, 等. 宗日遗址人骨的稳定同位素分析. 第四纪研究, 2006, 26: 604–610
28 胡耀武, 何德亮, 董豫, 等. 山东滕州西公桥遗址人骨的稳定同位素分析. 第四纪研究, 2005, 25: 561–567

补充材料

附录 三元混合模型

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

附录：三元混合模型

假设 *A*, *B*, *C* 为任意三角形的三个顶点，代表一定质量的三个体系，*D* 点是由三个顶点体系按照一定的比例组成的新体系，位于三角形 *ABC* 以内．首先通过 *D* 点分别画平行于 *AB* 和 *AC* 的两条直线，交于 *BC* 线于 *e* 和 *f* 点，则 *Be* 线段长度代表 *C* 体系的量，*ef* 线段长度代表 *A* 体系的量，*Cf* 线段长度代表 *B* 体系的量，此比例关系即为数学上的“重心规则”．以此规则可以得到包含三组分浓度的方程组:

$$\begin{cases} \dfrac{C_A}{L_{ef}} = \dfrac{C_B}{L_{fC}} = \dfrac{C_C}{L_{Be}} \\ C_A + C_B + C_C = 1 \end{cases}. \tag{1}$$

如果得到 L_{ef}, L_{fC}, L_{Be} 三链段的长度即可求解此方程组，得到三组分的比例关系．

详细推导过程如下:

1) 计算 *e*, *f* 点坐标:

根据 *A*, *B*, *C* 三点的坐标，可以计算 *AB* 和 *BC* 线的斜率 k_{AB} 和 k_{BC}，进而得到通过 *D* 点的 *De* 线方程和三角形底边 *BC* 线方程:

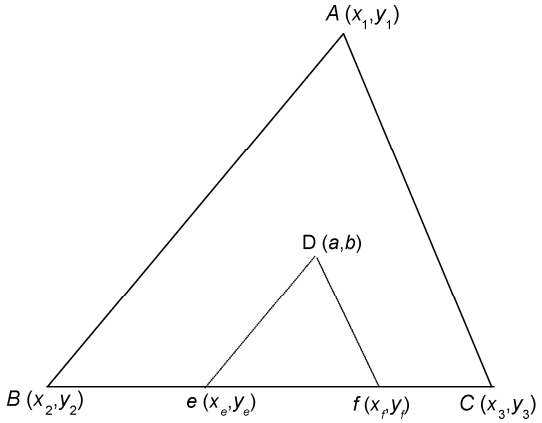
$$De \text{ 方程: } y - b = k_{De}(x - a) = k_{AB}(x - a). \tag{2}$$

$$BC \text{ 方程: } y - y_2 = k_{BC}(x - x_2). \tag{3}$$

De 和 *BC* 两条直线相交可得交点坐标，即 *e* 点的坐标:

$$x_e = \frac{y_2 - b + k_{AB}a - k_{BC}x_2}{k_{AB} - k_{BC}},$$

$$y_e = \frac{k_{AB}y_2 - k_{AB}k_{BC}(x_2 - a) - k_{BC}b}{k_{AC} - k_{BC}}. \tag{4}$$



附图 1　三元混合模型示意图

同样的推导过程，可得 *f* 点坐标

$$x_f = \frac{y_2 - b + k_{AC}a - k_{BC}x_2}{k_{AC} - k_{BC}},$$

$$y_f = \frac{k_{AC}y_2 - k_{AC}k_{BC}(x_2 - a) - k_{BC}b}{k_{AC} - k_{BC}}, \tag{5}$$

其中斜率 $k_{AB} = \dfrac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$，$k_{BC} = \dfrac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}$，$k_{AC} = \dfrac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1}$.

2) 求三组分比例:

有了 *B, e, f, C* 点的坐标，根据两点距离计算公式可以得到不同链段之间的距离 L_{Be}, L_{ef}, L_{fC} 和 L_{BC}，把上述链段长度带入方程组(1)即可求得三个顶点体系的组分比值:

$$C_A = \frac{L_{ef}}{L_{BC}} = \frac{\sqrt{(y_f - y_e)^2 + (x_f - x_e)^2}}{\sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2}}. \tag{6}$$

$$C_B = \frac{L_{fc}}{L_{BC}} = \frac{\sqrt{(y_3 - y_f)^2 + (x_3 - x_f)^2}}{\sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2}}. \tag{7}$$

$$C_C = \frac{L_{Be}}{L_{BC}} = \frac{\sqrt{(y_2 - y_e)^2 + (x_2 - x_e)^2}}{\sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2}}. \tag{8}$$

3) 应用举例:

以北阡遗址为例，选择 C_4 植物(−10.0, 1.0)，海洋贝类(−14.3, 8.3)和陆生动物(−14.0, 6.8)组成三元混合体系的三个顶点，通过加入北阡遗址中个体的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 数值，带入式(4)~(8)即可计算出三个组分的比例关系．例如当选择第一位样品编号为 M4-A 的个体，其 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 分别经过 4.5‰和 3.4‰的校正后为−14.06‰和 2.96‰，带入公式后可以计算食物结构中包括 45.4%的 C_4 植物，13.6%的海洋贝类，和 41.0%的陆生动物．以此类推可以得到更多个体数值．

需要说明的是三元混合模型仅仅罗列了三种可能的食物来源，如果考虑更多元因素的影响(如 $n \geqslant 4$)，可以把其中每三组分混合成一个新组分通过减少单元的方式，最终也能组合成一个新的三元混合模型，而其中的每个新顶点代表了多个原始组分的信息．当然这样的处理可能更接近真实情况，但是需要更多的数学公式推到，这也将是我们下一阶段工作的重点．另外一种是采用更简化的方法，可以选择相邻的两个点使其约化成一个点，通过减小顶点的方式组成新的三组分体系，进而粗略估算，此种方法可能更简化．