

长江三峡库区中坝遗址哺乳动物骨骼化石 C 和 N 稳定同位素分析

田晓四^{①②}, 朱诚^{③*}, 孙智彬^④, 水涛^①, 黄蕴平^⑤, FLAD Rowan K^⑥, 李玉梅^⑦

① 南京大学历史学系, 南京 210093;

② 池州学院旅游系, 池州 247100;

③ 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093;

④ 四川省文物考古研究院, 成都 610041;

⑤ 北京大学文博学院, 北京 100871;

⑥ Department of Anthropology, Peabody Museum, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA;

⑦ 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zhuchengnj@yahoo.com.cn

2010-04-26 收稿, 2010-09-30 接受

国家自然科学基金(40971115)、国家科技支撑计划(2010BAK67B02)、教育部博士点基金(20090091110036)、中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG0817)和南京大学现代分析中心测试基金(0209001309)资助项目

摘要 在丰富的 AMS¹⁴C 测年数据基础上, 对长江三峡库区中坝遗址哺乳动物鹿、猪、牛骨骼化石的骨胶原 C, N 同位素进行分析, 恢复中坝遗址过去哺乳动物的食性特征、古气候、古生态环境和人类活动。研究表明, 大部分骨骼保存较好, 骨胶原流失对 C, N 稳定同位素的成分没有影响。鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 -23.1‰ 和 4.7‰ , 说明鹿生活在密闭的生境中, 以树叶和灌木为食; 牛骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 -19.6‰ 和 5.2‰ , 说明牛生活在开阔的生境中, 以草本植物为食。C 同位素分析显示鹿和牛都以 C₃ 植物为食物, 表明鹿和牛生存于同一个生态系统中; 但 *t* 检验显示鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值比牛的都要小, 这表明鹿和牛的生境不一样; 牛和鹿的 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值还存在部分重叠, 说明草食性的牛和鹿之间还存在一定的食物竞争。猪骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 分别为 -17.1‰ 和 5.5‰ , *t* 检验显示猪骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值比牛和鹿的都要大, 表明猪的营养级比牛和鹿的要高。猪的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围很大, 说明当时已经有家养猪的贸易。*t* 检验显示不同时期遗址地层草食性动物鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间不存在差异, 鹿骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间也不存在差异。表明 2200~4200 a BP 期间, 中坝地区气候和生态环境没有出现较大的波动, 这是中坝遗址地层比较完整的原因。在该地区能代表鹿、猪、牛 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的最小样本数分别是 8, 73, 16, 而能代表鹿、猪、牛 $\delta^{15}\text{N}$ 均值的最小样本数分别是 4, 5, 6。

关键词

中坝遗址
骨胶原
 $\delta^{13}\text{C}$
 $\delta^{15}\text{N}$
古食物
古气候
古生态

骨骼化石里的骨胶原能够很好地保存生物体里的 C, N 同位素成分。骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 反映的是动物一生中骨胶原 C, N 同位素成分的平均值, 反映动物的食性特征。而气候通过影响植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值直接影响陆生哺乳动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$

值^[1~3]。因此, 骨骼化石里的骨胶原的 C, N 同位素在环境考古中被广泛地应用^[4,5]。从 20 世纪 60 年代开始相关研究以来, 国外学者利用骨骼化石骨胶原 C, N 同位素对古食物结构、古环境变化以及人类活动等进行了深入的研究。如利用大型食草动物骨骼化石骨

胶原 C, N 恢复意大利南部更新世的古生态环境变化^[6]; 对牛、鹿、马的骨骼化石骨胶原 C, N 同位素分析, 重建了 50000 年来欧洲的气候变化^[7]; 对密西西比河流域的古人类的稳定同位素的分析, 揭示了该地区不同等级之间以及不同性别之间在食物方面存在差异^[8]. 中国相关研究开始于 20 世纪 80 年代, 主要是用 C 同位素研究新石器时期人类的食谱^[9,10]. 最近, 在应用骨骼稳定同位素重建过去稻作农业模式和先民获取肉食资源的形式等方面获得重要进展^[11,12].

中坝遗址位于澧井河左岸支流的冲积扇上, 面积约 8000 m², 经纬度位置为 37°17'14"E 和 108°1'37"N, 距澧井河入长江出口处 6 km. 中坝遗址是三峡库区遗址抢救性发掘以来所发现的遗址中最厚和最完整的遗址地层, 包含了该地区过去 5000 年来的所有文化层: 新石器晚期、夏朝、商朝、西周、春秋战国时期、汉朝、六朝、唐朝、宋朝、明朝和清朝^[13]. 在丰富的测年数据基础上, 本文通过对哺乳动物鹿、牛、猪骨骼化石骨胶原 C, N 稳定同位素的分析, 对中坝过去哺乳动物的食性特征、古生态环境和早期人类进行家畜贸易活动进行研究. 根据 C, N 同位素的标准偏差, 建立该地区代表鹿、牛、猪 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均值的最小样本数.

1 基本原理

(i) C 同位素. 植物固定 CO₂ 的光合途径可分为 3 种^[14]. 其中最主要的 2 种是 C₃ 光合途径和 C₄ 光合途径, 通过这 2 种光合途径固定 CO₂ 的植物分别称为 C₃ 植物和 C₄ 植物. 由于这 2 种光合途径对 C 同位素分馏作用不同, 导致不同光合作用植物的 C 同位素构成不同. C₃ 植物一般包括乔木、灌木和气候寒冷地区的草本植物, $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围较大; 缺水干旱环境里的植物富集 ¹³C 分子, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 C₃ 植物的平均值 -27‰ 要大, 能达到 -21‰; 而密闭森林里的植物损耗 ¹³C 分子, 比开阔生境里的植物要低, $\delta^{13}\text{C}$ 值可以达到 -35‰^[15]. C₄ 植物主要包括生长在温带、热带开阔地带的草本植物, 受水分的影响比较小, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较小, 在 -10‰~-14‰ 之间^[16]. 由于新陈代谢作用, 植物 C 同位素在消费者组织中进行分馏, 使动物组织中同位素富集的 ¹³C 比 ¹²C 多, 导致动物组织比它所吃植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大. 与所吃食物的 $\delta^{13}\text{C}$

值相比, 动物肌肉大约有 1‰ 的富集作用, 而骨骼中骨胶原则富集约 5‰ 左右, 羟磷灰石结构碳酸根中的 C 同位素则大约富集 12‰^[17]. 因此, 通过对动物骨骼化石骨胶原的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分析, 可推断当时动物所吃的植物类型, 进而推断当时的气候环境.

(ii) N 同位素. 土壤中 N 元素 δ 值的变化范围非常大, 大约从 -7‰~18‰. 固氮细菌的固氮过程受到气候的影响. 高温和干旱的环境不利于固氮作用. 季节变化和植物根的深度也影响植物 N 元素 δ 值^[18]. N 同位素可以为我们提供有关动物所处的营养级和蛋白质来源信息. 虽然有研究表明, 消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 比所吃的食物的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集 6‰, 但一般情况下动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 比所吃的食物的 $\delta^{15}\text{N}$ 富集 3‰~5‰. 目前还没有一种模型来概括植物 N 同位素的分布. 能够直接固定 N 元素的植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值一般接近 0, 通常是豆科植物, 其中典型的是蚕豆. 木本植物比草本植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 要小. 大多数从土壤硝酸盐中固定 N 元素的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 值大约在 3‰~5‰ 之间. 草食动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比它们的食物高约 3‰~4‰, 这种营养富集效应在每个食物链级别上都起同样的作用^[19]. 海洋里食物网也许有更多的营养级, 许多海洋鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值大于 10‰; 淡水生境一般也有很长的食物链, 因此淡水鱼也有较大的 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[20]. 在干旱的环境中生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比较大, 这是因为动物通过汗液和尿液分泌 N 元素使机体的 $\delta^{15}\text{N}$ 值增大.

2 材料与方法

(i) 材料来源. 本文研究的骨骼化石材料来自中坝遗址地层中的 17~68 层. 中坝遗址 T0202 探方 17 层以上为秦汉遗存, 17~33 层为战国遗存, 34~43 层为春秋遗存, 44~49A, 52A, 53 层为西周遗存, 49B~52B 层为夏商时期遗存, 54~68 层为新石器时代晚期. 69 层为被多个新石器时期灰坑打破的生土层 (见图 1). 从中坝遗址发掘来看, 至少有 33 种哺乳动物, 18 种鱼类, 许多不能确认的鸟类、两栖类和爬行类动物. 常见的哺乳类动物有: 偶蹄类动物、食肉类动物、兔类、奇蹄类动物、灵长类、啮齿类. 偶蹄类动物包括 Bovidae (*Bos* sp., *Bubalus* sp.), Cervidae (*Cervus albirostris*, *Cervus elaphus*, *Cervus* sp., *Elaphurus davidianus*, *Elaphodus cephalophus*, *Hydropodes inermis*, *Muntiacus reevesi*, *Muntiacus* sp.), Suidae (*Sus scrofa*, *Sus* sp.) 和其他未确定种类. 这里研究的材料

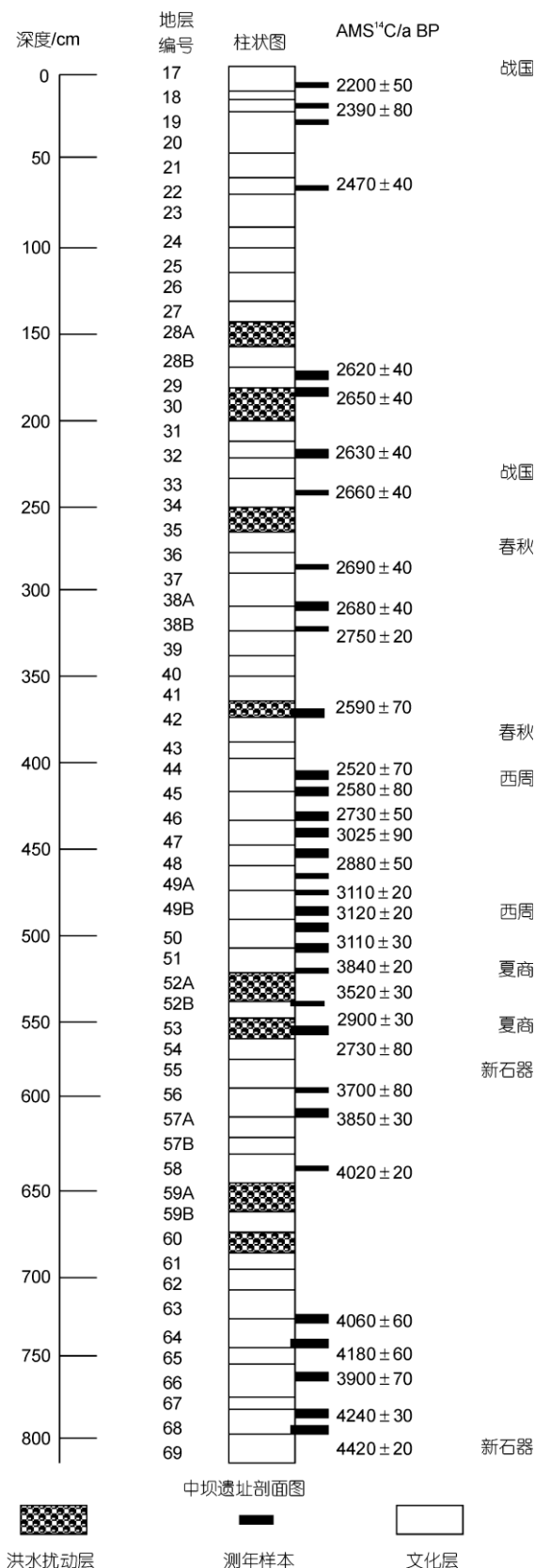


图 1 中坝遗址 T0202 探方剖面

来自于探方 T0202 的哺乳动物牛、鹿、猪骨骼化石, 其中草食性动物鹿骨骼样本 51 件, 草食性动物牛骨骼样本 14 件, 杂食性动物猪骨骼样本 42 件, 主要是用来重建从新石器早期到青铜器晚期这一时期内中坝地区生态环境和人类的活动。

(ii) 年代测定. 遗址地层的年代采用 27 个动物骨头和 5 个炭屑的 AMS¹⁴C 测年来确定^[21], AMS¹⁴C 测年由北京大学重离子研究所协助完成, 测年结果及校正年代见表 1。

(iii) C 和 N 同位素测定. 按照 Koch 等人^[22]的实验方法, 用手术刀和打磨机去除样品表面的污染物, 将样品在玛瑙研钵中粉碎、研磨, 收集粒度为 75 目的骨粉, 并在电子天平上精确称量各骨粉样品. 然后, 用 0.1 mol/L HCl 浸泡脱钙, 每隔 1 天换新鲜酸液 1 次, 直至看不见明显的颗粒. 再用去离子水清洗至中性后, 在 0.125 mol/L NaOH 中浸泡 20 h, 并洗至中性. 最后, 加入 0.001 mol/L HCl 于 95℃ 明胶化过夜, 次日趁热过滤, 收集滤液并冷干得骨胶原. 在电子天平上称量骨胶原, 计算其产量. C, N 稳定同位素的测量在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成. 使用的质谱仪型号为 Delta plus Advantage (Finnigan 公司). C, N 元素的含量分析使用 VARIOELIII 元素分析仪 (Elementar 公司). 重复性测试结果显示, C, N 同位素的误差分别小于 0.1‰ 和 0.2‰. C 同位素的比率采用标准千分比符号 $\delta^{13}\text{C}$, 标样采用白垩系海相化石箭石 (PDB); N 同位素的分析结果以相对 N₂(气态) 的 $\delta^{15}\text{N}$ 表示. 骨胶原产量及 C, N 稳定同位素组成见表 2, C, N 稳定同位素的分布见图 2。

(iv) 数据统计分析. 用软件 SPSS11.0 对数据进行统计分析. 为了确定不同 2 组动物均值之间是否存在显著差别, 进行 *t* 检验. 根据零假设原理^[23], 如

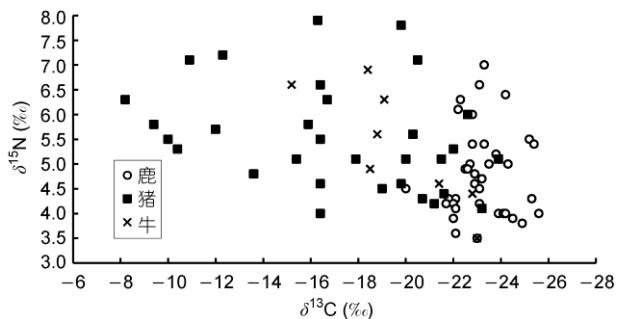


图 2 中坝遗址哺乳动物骨胶原 C 和 N 同位素组成分布图

表 1 中坝遗址 T0202 探方剖面 AMS¹⁴C 测年数据及校正年代

测年编号	材料	层位	野外样本编号	¹⁴ C 年代(a BP)	校正年代(OxCal 3.0) (68.2%置信度, cal a BP)
BA01357	骨头	18	FCN 0006	2380 ± 70	2470 ~ 2310
BA01361	骨头	18	FCN 0104-2	2390 ± 70	2150 ~ 2250
BA01409	骨头	22	FCN 0643	2430 ± 60	2430 ~ 2510
BA01362	骨头	29	FCN 0981-1	2430 ± 80	2600 ~ 2640
BA01367	骨头	29	FCN 1082	2450 ± 60	2610 ~ 2690
BA01419	骨头	32	FCN 2094	2460 ± 60	2590 ~ 2670
BA01420	骨头	33	FCN 2136	2460 ± 60	2620 ~ 2700
BA01424	骨头	37	FCN 2229	2480 ± 80	2660 ~ 2720
BA01368	骨头	38b	FCN 2219-1	2490 ± 70	2730 ~ 2770
BA01373	骨头	38b	FCN 2275	2520 ± 70	2640 ~ 2720
BA01429	骨头	43	FCN 2379	2540 ± 60	2550 ~ 2660
BK2002044	木头	46	FCN 2050	无结果	无结果
BA01374	骨头	46	FCN 2513-1	2600 ± 60	2450 ~ 2590
BK2002045	木头	46	FCN 2514	2640 ± 60	2680 ~ 2780
BA01380	骨头	46	FCN 2527-1	2680 ± 70	2510 ~ 2650
BK2002046	木头	46	FCN 2528	2730 ± 80	2985 ~ 3065
BA01433	骨头	48	FCN 2578	2730 ± 85	2830 ~ 2930
BA01382	骨头	49b	FCN 2613-1	2780 ± 60	3090 ~ 3130
BA01384	骨头	49a	FCN 2613-3	3025 ± 90	3100 ~ 3130
BA0143	骨头	49a	FCN 2728	3100 ± 60	3080 ~ 3140
BK2002047	木头	50	FCN 2658	3110 ± 100	3460 ~ 3500
BA01435	骨头	50	FCN 2675	3110 ± 120	3520 ~ 3550
BA01437	骨头	52a	FCN 2699	3210 ± 120	2870 ~ 2930
BA01439	骨头	53	FCN 2842	3240 ± 100	2730 ~ 2810
BA01390	骨头	56	FCN 2958-1	3540 ± 60	3820 ~ 3880
BA01397	骨头	56	FCN 2975-4	3590 ± 60	3620 ~ 3780
BA02018	骨头	58a	FCN 3142	3640 ± 100	4000 ~ 4040
BK2002048	木头	64	FCN 3320	3660 ± 100	4120 ~ 4240
BA02028	骨头	64	FCN 3329	3800 ± 70	4000 ~ 4120
BA02030	骨头	65b	FCN 3498	3800 ± 80	3830 ~ 3970
BA01398	骨头	68	FCN 3582-1	3840 ± 60	4210 ~ 4270
BA01403	骨头	68	FCN 3582-6	3880 ± 90	4400 ~ 4440

果 $P>0.05$, 认为 2 组数据不存在差别; 如果 $P<0.05$, 认为 2 组数据存在显著差别。

3 分析与讨论

3.1 骨胶原保存质量

C:N 摩尔比是判断骨胶原保存状态的一个重要指标。现代活的动物骨骼骨胶原 C:N 摩尔比在 2.9~3.6 之间^[24]。如果 C:N 摩尔比在该范围(2.9~3.6)内, 可认为样本骨胶原没有受到污染。如果 C:N 摩尔比超出该范围(<2.9 或>3.6), 可认为样本骨胶原在动

物死后受到了污染^[25]: 也许周围环境中的 C, N 元素进入了骨胶原, 也许骨胶原中的 C, N 元素流失到了周围环境。判断骨胶原是否保存完好的另一个标准是: 骨胶原中 C, N 元素的质量百分含量是否分别大于 13.0%, 4.8%^[24]。参照这 2 个标准, 结果发现: 51 件鹿骨骼样本中有 40 件保存完好, 11 件有污染; 41 件猪骨骼样本中有 31 件保存完好, 10 件有污染; 14 件牛骨骼样本中有 8 件保存完好, 6 件有污染。骨骼保存情况见表 2, 其中受到污染的样本用黑色加粗表示, 猪的骨骼污染数目相对较多。实验室骨胶原保存的成功率均大于 50%。通常情况下, 干冷气候利于骨骼保

表 2 中坝遗址地层哺乳动物骨胶原产量及 C, N 稳定同位素组成^{a)}

层位	编号	种类	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	C 含量(%)	N 含量(%)	C:N (摩尔比)	骨胶原含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
18	104a	鹿(左肩胛骨)	-24.2	2.8	11.1	3.7	3.4	4.2
18	104b	鹿(左肩胛骨)	-23.8	5.1	6.0	1.8	3.7	21.4
19	112a	鹿(右肩胛骨)	-23.9	4.0	22.1	7.9	3.2	19.1
20	296	鹿(左肩胛骨)	-25.6	4.0	21.4	7.6	3.2	20.7
22	643a	鹿(肱骨)	-23.1	4.2	11.2	4.0	3.2	23.3
22	643b	鹿(肱骨)	-23.1	4.2	16.8	6.0	3.2	8.4
22	643c	鹿(股骨)	-22.9	4.8	23.8	8.4	3.2	79.3
22	643d	鹿(掌骨)	-22.7	5.0	13.7	4.9	3.2	10.9
22	643e	鹿(股骨)	-22.6	4.9	20.2	7.4	3.1	4.1
23	715	鹿(左肩胛骨)	-22.0	3.9	27.7	9.8	3.2	19.2
25	809	鹿(左肩胛骨)	-24.9	3.8	31.5	11.4	3.2	16.8
27	909	鹿(右胫骨)	-25.2	5.5	20.1	7.1	3.2	20.6
27	912	鹿(左肩胛骨)	-22.5	4.9	30.9	11.2	3.2	64.5
28b	975	鹿(左桡骨)	-24.8	3.7	5.2	1.7	3.5	4.6
29	981	鹿(肩胛骨)	-23.5	5.0	26.1	9.5	3.2	46.8
31	2082	鹿(左胫骨)	-23.0	3.5	18.6	6.6	3.2	7.1
32	2094a	鹿(肩胛骨)	-22.1	3.6	31.4	11.1	3.2	33.2
33	2016a	鹿(髌骨)	-22.1	4.3	21.7	7.9	3.2	23.4
33	2016b	鹿(桡骨)	-22.0	2.3	0.9	0.2	4.8	55.3
33	2136a	鹿(趾骨)	-24.1	4.0	32.3	11.5	3.2	41.4
33	2136b	鹿(桡骨)	-19.7	4.7	13.6	4.4	3.6	34.8
33	2136c	鹿(趾骨)	-25.3	4.3	28.7	10.3	3.2	10.5
33	2136d	鹿(胫骨)	-22.3	6.3	29.7	10.5	3.2	23.2
34	2151a	鹿(右跟骨)	-22.8	5.4	19.5	7.1	3.2	34.1
34	2128	鹿(髌骨)	-20.0	4.5	24.1	8.7	3.2	23.4
34	2151b	鹿(趾骨)	-22.9	4.6	21.8	7.8	3.2	44.7
36	2225a	鹿(右肱骨)	-22.0	5.3	33.2	11.9	3.2	27.9
38a	2244	鹿(髌骨)	-23.1	4.5	27.5	10.0	3.2	45.5
38b	2219	鹿(趾骨)	-21.8	4.3	26.4	9.5	3.2	20.9
40	2316g	鹿(右胫骨)	-23.1	6.6	18.7	6.6	3.2	32.3
42	2345a	鹿(掌骨)	-24.3	5.0	28.7	10.5	3.1	28.7
42	2345b	鹿(左肱骨)	-23.3	7.0	29.1	10.3	3.2	33.4
43	2379a	鹿(桡骨)	-25.4	5.4	22.5	8.1	3.2	59.2
43	2379b	鹿(距骨)	-22.0	4.2	29.2	10.5	3.2	41.1
45	2053	鹿(桡骨)	-22.1	4.1	30.6	10.7	3.3	53.2
46	2513	鹿(股骨)	-23.2	4.7	33.0	11.7	3.2	18.2
46	2527a	鹿(掌骨)	-22.8	6.0	17.1	6.1	3.2	77.1
47	2563	鹿(右胫骨)	-24.2	6.4	25.8	9.0	3.3	16.6
48	2578	鹿(颈椎骨)	-23.1	3.4	2.7	0.6	4.6	6.2
50	2645c	鹿(右胫骨)	-24.5	3.9	20.8	7.6	3.1	50
50	2642	鹿(肱骨)	-23.3	5.4	14.9	5.4	3.2	70
50	2679a	鹿(肩胛骨)	-23.8	5.2	14.8	5.2	3.2	56.5
50	2679b	鹿(胫骨)	-22.6	4.9	6.8	2.2	3.5	7.7
51b	2735	鹿(左髌骨)	-26.0	4.6	9.6	3.3	3.3	22.1
52a	2914	鹿(肩胛骨)	-21.7	4.2	27.6	9.8	3.2	21.7
55b	2942	鹿(颈椎骨)	-22.2	6.1	31.7	11.4	3.2	76.3
60	3211	鹿(右胫骨)	-22.6	5.0	9.8	3.4	3.3	11.2
63	3298d	鹿(左距骨)	-23.4	6.2	1.3	0.7	2.2	6.1
64	3329c	鹿(髌骨)	-24.2	4.0	15.7	5.9	3.1	36.7
67	3559	鹿(肩胛骨)	-23.5	1.7	1.1	0.2	5.2	17.4
68	3582c	鹿(肩胛骨)	-19.8	4.9	7.6	2.6	3.3	15.1
18	104c	猪(肱骨)	-21.4	2.9	2.1	0.7	3.5	32
18	104d	猪(跟骨)	-16.4	1.8	0.8	0.1	5.1	72

续表 2

层位	编号	种类	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	C 含量(%)	N 含量(%)	C:N (摩尔比)	骨胶原含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
19	112b	猪(肱骨)	-21.2	4.2	34.7	12.0	3.3	41.4
19	112c	猪(下颌骨)	-16.3	7.9	54.7	19.2	3.3	27.7
21	492a	猪(肩胛骨)	-22.0	5.3	17.6	6.2	3.2	13.8
21	492b	猪(肱骨)	-20.5	7.1	27.7	9.9	3.2	54.8
22	643f	猪(掌骨)	-22.1	1.8	1.5	0.4	3.8	30.3
26	869a	猪(髌骨)	-23.9	5.1	21.5	7.5	3.3	60.5
26	869b	猪(跟骨)	-21.5	3.8	2.9	0.8	4.1	77.3
29	981b	猪(趾骨)	-19.8	7.8	23.8	7.8	3.5	19.5
31	2073	猪(椎骨)	-21.5	5.1	20.4	7.4	3.2	46
33	2136e	猪(椎骨)	-20.7	4.3	34.9	12.2	3.3	31.2
36	2225b	猪(尺骨)	-12.0	5.7	17.9	6.4	3.2	16
38b	2219a	猪(跟骨)	-19.8	4.6	14.4	5.1	3.2	10.9
38b	2219b	猪(肱骨)	-21.6	4.4	27.4	9.8	3.2	87.4
38b	2219c	猪(肱骨)	-20.3	5.6	30.9	11.0	3.2	20.6
46	2527b	猪(跟骨)	-12.3	7.2	31.5	10.9	3.3	47.2
46	2527c	猪(椎骨)	-10.9	7.1	22.4	8.1	3.2	78.4
50	2645a	猪(胫骨)	-16.4	4.6	21.3	7.6	3.2	58.1
50	2645b	猪(肩胛骨)	-17.9	5.1	12.5	4.4	3.2	51.5
52a	2699a	猪(髌骨)	-22.5	11.8	0.8	0.6	1.5	2.7
53	2842b	猪(胫骨)	-21.0	7.0	3.8	1.3	3.3	44.9
53	2842c	猪(桡骨)	-16.4	6.6	25.3	9.0	3.2	53.4
56	2975	猪(尺骨)	-15.4	5.1	16.9	6.0	3.2	35.4
58	3142a	猪(髌骨)	-9.4	5.8	16.5	5.8	3.2	60.2
58	3142b	猪(胫骨)	-19.0	4.5	17.0	6.2	3.2	38.4
62	3487a	猪(掌骨)	-20.0	5.1	18.2	6.6	3.1	34.4
62	3487b	猪(肱骨)	-10.0	5.5	19.5	7.0	3.2	51.8
62	3265	猪(桡骨)	-18.9	5.8	3.0	0.9	3.6	36.6
62	3487c	猪(股骨)	-8.2	6.3	39.2	14.0	3.2	30.7
63	3298a	猪(上颌骨)	-16.7	6.3	19.8	7.1	3.2	59
63	3298b	猪(肱骨)	-16.4	5.5	18.3	6.5	3.2	71.1
63	3298c	猪(尺骨)	-23.2	4.1	23.8	8.5	3.2	7.8
64	3329a	猪(尺骨)	-13.1	6.1	12.3	4.5	3.1	8.6
64	3329b	猪(桡骨)	-10.4	5.3	16.9	6.3	3.1	37.2
65	3456a	猪(髌骨)	-13.6	4.8	14.0	5.3	3.0	85
65	3456b	猪(椎骨)	-22.6	6.0	14.3	5.1	3.2	27.6
65	3456f	猪(距骨)	-14.2	5.6	5.2	2.2	2.7	27.9
65	3456g	猪(股骨)	-15.9	5.8	33.9	12.0	3.2	32.8
65	2472a	猪(肱骨)	-16.4	4.0	19.9	7.4	3.1	18
65	2472b	猪(跟骨)	-17.9	6.7	3.3	1.6	2.3	4.4
30	2016c	牛(肋骨)	-23.0	3.5	18.6	6.6	3.2	41.9
50	2679c	牛(腕骨)	-18.8	5.6	13.9	5.1	3.1	70.3
52a	2699b	牛(距骨)	-20.3	4.6	2.4	0.8	3.3	40.8
52a	2699c	牛(肩胛骨)	-20.2	5.4	4.9	1.7	3.3	13.2
53	2842a	牛(跗骨)	-22.8	4.4	18.3	6.5	3.2	35
56	2958a	牛(肩胛骨)	-21.4	4.6	14.1	5.1	3.2	81.8
56	2958b	牛(腕骨)	-20.1	4.1	8.3	3.0	3.2	20.9
61	3250	牛(肩胛骨)	-15.2	6.6	25.0	9.0	3.2	19.1
64	3329d	牛(肩胛骨)	-17.8	5.4	8.3	3.3	2.9	32.8
65	3456c	牛(趾骨)	-19.5	4.8	10.9	4.3	2.9	36.8
65	3456d	牛(掌骨)	-18.4	6.9	15.8	5.8	3.1	44.2
65	3456e	牛(下颌骨)	-19.1	6.3	17.4	6.8	2.9	34.8
68	3582a	牛(肢骨)	-20.5	6.0	9.4	3.4	3.1	70.8
68	3582b	牛(肋骨)	-18.5	4.9	16.8	6.3	3.1	39.3

a) 黑体表示骨样已污染

存. 中坝地区温度较高, 湿度较大. 中坝遗址动物骨骼保存的比较好, 可能是因为骨骼在埋藏之前肌肉与内脏已经剥离.

骨骼骨胶原的流失是否导致动物骨骼的生前生物同位素信息改变? 中坝动物骨骼实验结果表明, 剔除污染的样本后, 骨胶原的产量差别很大: 最小为 4.1 mg/g, 最大为 87.4 mg/g; 均值为 38.4 mg/g; 标准偏差为 21.29 mg/g. 同一层的同种动物骨骼骨胶原的产量差别也很大. 三种动物骨胶原的产量与 C, N 同位素值的模拟系数均 <0.15 (见图 3), 说明骨胶原产量的降低与 C, N 同位素值大小没有关系. 这与意大利一个遗址的情况相似^[26].

3.2 C 同位素分析

鹿、牛、猪的骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 -23.1‰ , -19.6‰ , -17.1‰ . 鹿与牛、鹿与猪、牛与猪之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值均存在显著差别(students's t -test, $P<0.01$), 说明这 3 种动物的食物存在明显差别. 如果骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值比动物所吃食物富集 5‰, 鹿、牛和猪所吃食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值将分别为 -28.1‰ , -24.6‰ , -22.1‰ . 鹿的骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -25.6‰ ~ -20.0‰ 之间, 对应的所吃植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -30.6‰ ~ -25.0‰ 之间. 这说明鹿生活在森林密闭的环境中, 完全以 C_3 植物为食物, 屏蔽效应导致这些植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都很低^[27]. 牛的骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -23.0‰ ~ -15.2‰ 之间, 对应的所吃植

物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -28.0‰ ~ -20.2‰ 之间. 这说明牛也完全以 C_3 植物为食物. 牛的骨胶原均值比鹿的大, 可能是因为牛生活在比较开阔的林地. 从图 4 可见, 鹿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的标准偏差(1.18‰)比较小, 说明鹿的食物来源比较一致; 牛的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的标准偏差比鹿的大, 说明牛的食物变化范围比鹿的大. 猪为杂食性动物, 其骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -23.9‰ ~ -8.2‰ 之间, 标准偏差达 4.46‰(见图 2), 变化范围相当大. 猪所吃食物的对应 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -28.9‰ ~ -13.2‰ 之间, 从完全以 C_3 植物为食物变化到完全以 C_4 植物为食物, 表明中坝遗址猪的食物成分差别很大. 因此, 推断中坝遗址猪的饲养方式有很多种, 可能这些猪并不都是当地饲养的, 一部分猪是通过贸易从其他地方运到中坝的^[28]. 中坝当时的经济基础是盐业生产^[22], 而不是农业和畜牧业. 我国 7000 年前就存在家养猪的贸易^[29,30]. 通过盐的交换来获得猪等食物, 这作为当地盐业生产的基础是切实可行的.

3.3 N 同位素分析

鹿、牛、猪的骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 4.7‰, 5.2‰, 5.5‰(见图 4). 鹿与牛、鹿与猪、牛与猪之间 $\delta^{15}\text{N}$ 均值也都存在显著差别(students's t -test, $P<0.01$). 鹿在比较密闭的生境中以树叶和灌木为食, 牛在开阔的生境中以非木本植物为食. 与非木本植物相比, 树叶和灌木含有较低的 ^{15}N ^[31]. 因此, 鹿的骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 均值比牛的小. 中坝当时的家养猪主要食用人类的剩饭剩菜^[30,32], 其中含有牛和鹿的残渣. 因此, 猪的营养级比牛和鹿的高. 由于富集作用, 猪的骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 均值比鹿和牛的都高. 但猪分别与牛、鹿的骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 均值之差远远小于 1 个营养级的差别(3.0‰), 表明猪的食物中肉食成分很低. 草食性动物鹿、牛与现代欧洲草食性动物骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 均值(2.5‰~6‰)相近, 而与现代非洲草食性动物骨胶原

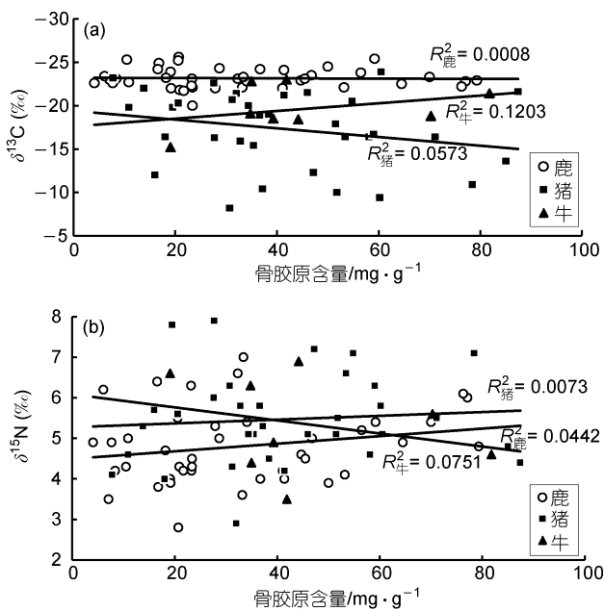


图 3 $\delta^{13}\text{C}$ (a), $\delta^{15}\text{N}$ (b)值和骨胶原产量的相关分析

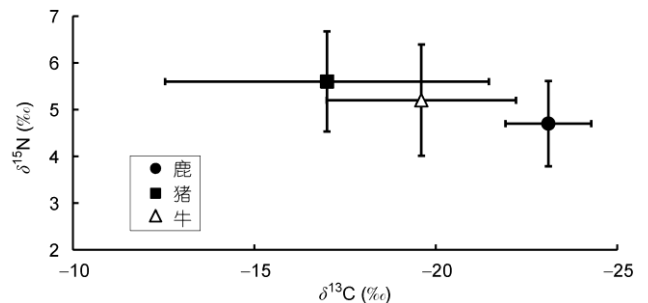


图 4 鹿、猪、牛骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 均值和标准偏差

$\delta^{15}\text{N}$ 均值($7.1 \pm 2.4\text{‰}$)差别较大, 说明当时中坝的空气潮湿状况和现代欧洲相近, 与非洲差别很大^[33].

3.4 古气候与古环境重建

受人类活动影响, 遗址中的相关物理化学指标不能真实反映环境变化; 而完全草食性的野生哺乳动物骨胶原 C, N 稳定同位素组成能反映环境变化^[34,35]. 很多地层没有牛骨骼样本. 牛骨骼样本数量有限, 不具有统计意义. 鹿骨骼样本数量较多, 因此选择鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ (不包括已污染的鹿骨骼骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 来重建中坝地区的生态环境. 为研究中坝地区生态环境在不同时期的变化, 将测年年代和考古年代相结合 (见图 1), 把 T0202 探方分成 3 个时期即 I, II, III 期, 它们对应的层位分别为 50~64 层 (3500~4200 a BP, 夏朝和新石器晚期)、34~50 层 (2800~3500 a BP, 西周时期) 和 18~33 层 (2200~2800 a BP, 春秋战国时期). 不同时期鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的统计描述见表 3, 鹿骨骼骨胶原的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的地层和时间分布见图 5. 草食性动物骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值与它所吃植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值有关; 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气候和森林密闭情况有关, 低温、降水量大和密闭森林环境使植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变小^[36]. 根据 T 检验, 3 个时期 I, II, III 之间的鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 值不存在差别 (students's t -test, $P < 0.05$). 因此, 在 2200~4200 a BP 期间中坝地区的气温、降水量和植被情况基本稳定, 没有大的波动. 植物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化通过食物链传递给草食动物, 在暖干的环境中植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较大, 导致在此环境中的草食性动物骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 值也较大^[37]. 根据 T 检验, 3 个时期 I, II, III 之间的鹿骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 值也不存在差别 (students's t -test, $P < 0.05$), 说明在 2200~4200 a BP 期间中坝地区的气温、降水量变化不大. 孢粉分析显示该区域在 3200~500 BC 期间, 乔木和灌木主要类型的浓度较高, 水生草本、蕨类和禾本科、毛茛科孢粉浓度也很高,

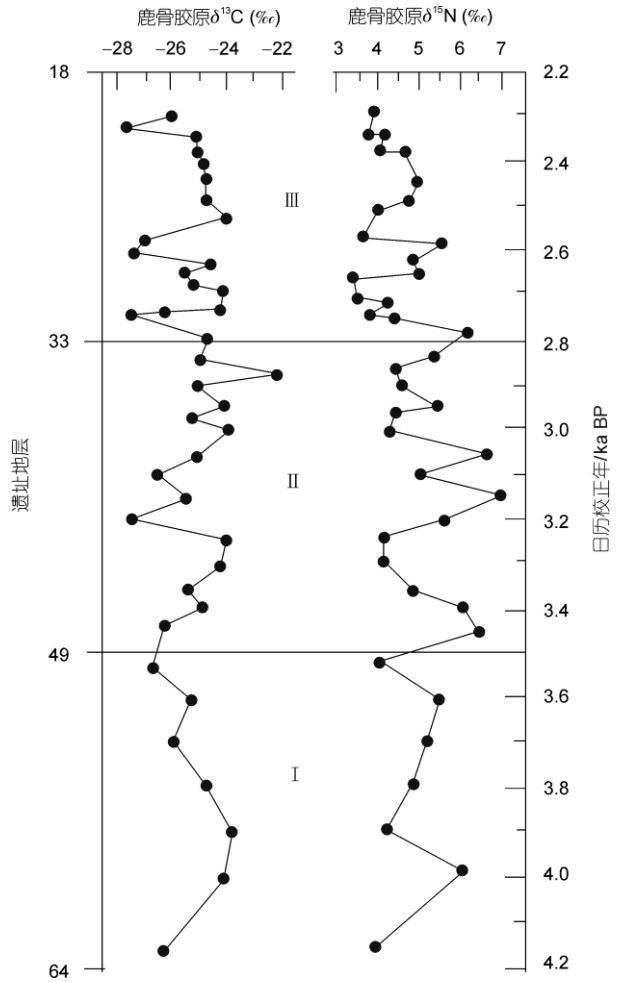


图 5 遗址地层鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分布图

表明在该期间本地区气候温暖湿润^[38], 气候波动不大. 中坝处于长江中上游亚热带谷地之中, 西北有大巴山, 东南有巫山, 地势南北高而中间低, 因此该地区受低温影响相对较小^[39]. 中坝遗址地层中鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值都没有随时间的变化而发生显著变化. 鹿骨胶原的 2 个环境指标 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 共同证明了在 2200~4200 a BP 期间中坝地区的气候和环境没有较大的波动, 这可能是中坝遗址地层比较完整的原因.

表 3 不同时期鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的统计描述

稳定同位 δ 值	时期	N (样本数)	最小值	最大值	均值	标准偏差
$\delta^{13}\text{C}$	I	7	-24.5	-21.7	-23.2	1.0
	II	15	-25.4	-20.0	-22.8	1.2
	III	18	-25.6	-22.0	-23.3	1.3
$\delta^{15}\text{N}$	I	7	3.9	6.1	4.8	0.8
	II	15	4.1	7.0	5.2	0.9
	III	18	3.5	6.3	4.5	0.7

表 4 代表 C, N 同位素均值的样本最小数

稳定同位素	鹿	猪	牛
SD($\delta^{13}\text{C}$)	1.18	4.46	2.61
$\delta^{13}\text{C}$ 样本最小数(置信度: 95%)	8	73	16
SD($\delta^{15}\text{N}$)	0.91	1.07	1.19
$\delta^{15}\text{N}$ 样本最小数(置信度: 95%)	4	5	6

3.5 样本最小数

动物骨骼化石数量不多, 化石被实验破坏后无法恢复, 因此考古研究中的动物化石比较珍贵. 应用 C, N 同位素均值进行古食谱研究时样本数不能太少, 否则研究结果不具有代表性. 因此, 研究样本最小数在环境考古中具有一定意义. 本研究中, 鹿 $\delta^{13}\text{C}$ 标准偏差为 1.18. 在置信度为 95%、均值误差范围不超过 1‰的条件下, 能代表中坝地区鹿 $\delta^{13}\text{C}$ 值的样本数不能少于 9 个. 骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ 的标准偏差、均值误差范围不得超过 1‰和 95%的置信度(污染的骨骼除外)^[40]. 应用中坝地区鹿、猪、牛 C, N 同位素均值时, 建议应测试的最小样本数见表 4. 由于猪和牛的 $\delta^{13}\text{C}$ 标准偏差较大, 所需相应的最小样本数也较大, 分别为 73 和 16. 本研究中猪和牛的有效样本数分别为 31 和 8, 在研究 C 同位素均值时明显不足. 除此之外, 其他样本均能满足计算 C, N 同位素均值最小样本数的要求.

4 结论

通过对重庆中坝遗址哺乳动物鹿、牛、猪骨骼化

石骨胶原 C, N 同位素的分析, 重建了该地区的哺乳动物食性特征、古气候、古生态环境以及人类活动等, 主要结论有:

(i) 大部分中坝遗址哺乳动物骨骼化石保存很好, 没有受到污染; 骨骼中骨胶原的流失没有改变骨骼中的生物同位素信息.

(ii) 鹿和牛都以 C_3 植物为食, 它们生存的生态系统相同. 但鹿和牛所处的生境不同, 鹿生活在密闭的环境中, 牛生活在开阔的环境中. 由于屏蔽效应, 鹿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比牛的小. 猪的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围很大, 在 $-23.9\text{‰} \sim -8.2\text{‰}$ 之间. 猪所吃食物的对应 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-28.9\text{‰} \sim -13.2\text{‰}$ 之间, 食物成分差别很大. 因此推测, 这些猪不都是当地饲养的, 部分猪是通过贸易从别处运到该地区. 鹿以树叶和灌木为食, 牛以禾本科植物为食; 树叶和灌木比禾本科植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值小. 因此, 鹿的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比牛的小. 猪的食物中含有部分牛和鹿的残渣, 猪的营养级比牛和鹿的高. 由于 N 元素的富集作用, 猪的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比牛和鹿的大.

(iii) 鹿骨胶原的 C, N 稳定同位素研究结果显示, 不同时期鹿骨胶原 $\delta^{13}\text{C}$ 之间不存在差异, 不同时期鹿骨胶原 $\delta^{15}\text{N}$ 之间也不存在差异. 结果表明, 在 2200~4200 a BP 期间, 中坝地区的气候和生态环境比较稳定, 这可能是中坝遗址地层比较完整的原因.

(iv) 在置信度为 95%、均值误差范围不超过 1‰的条件下, 中坝地区能代表 $\delta^{13}\text{C}$ 均值的最小样本数分别是 8(鹿)、73(猪)、16(牛); 能代表 $\delta^{15}\text{N}$ 均值的最小样本数分别是 4(鹿)、5(猪)、6(牛).

致谢 感谢南京大学王富葆教授和马春梅副教授在论文写作方面给予的帮助.

参考文献

- Drucker D, Bocherens H. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of change in diet breadth during middle and upper palaeolithic in Europe. *Int J Ost*, 2004, 14: 162—177
- Ambrose S H. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *J Archaeol Sci*, 1990, 17: 431—451
- Vogel J C, van der Merwe N J. Isotopic evidence for early maize cultivation in New York state, American. *Antiquity*, 1977, 42: 238—242
- Deniro M J. Postmortem preservation and alteration of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to paleodietary reconstruction. *Nature*, 1985, 317: 806—809
- Hobson K A, Schwarcz H P. The variation in ^{13}C values in bone collagen for two wild herbivore populations: Implications for palaeodiet studies. *J Archaeol Sci*, 1986, 13: 101—106
- Iacumin P, Bocherens H, Delgado H A, et al. Stable isotope study of fossil mammal remains from the Paglicci cave, Southern Italy. N and C as palaeoenvironmental indicators. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 349—357
- Robert E M, Rhiannon E S, Michael P R. Bone as a stable isotope archive for local climatic information. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 959—965

- 8 Stanley H A, Jane B, Harold W K. Status and gender differences in diet at Mound 72, Cahokia, revealed by isotopic analysis of bone. *J Ant Archaeol*, 2003, 22: 217—226
- 9 蔡莲珍, 仇士华. 碳十三测定和古代食谱研究. *考古*, 1984, 10: 945—955
- 10 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—84
- 11 Hu Y W, Ambrose S H, Wang C S. Stable isotopic analysis of human bones from Jiahu site, Henan, China: Implications for the transition to agriculture. *J Archaeol Sci*, 2006, 33: 1319—1330
- 12 付巧妹, 靳松安, 胡耀武, 等. 河南浙川沟湾遗址农业发展方式和先民食物结构变化. *科学通报*, 2010, 55: 589—595
- 13 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究. *科学通报*, 2005, 50: 2493—2504
- 14 Lee-Thorp J A, Merwe N J. Carbon isotope analysis of fossil bone apatite. *S Afr J Sci*, 1987, 83: 712—715
- 15 Merwe N J, Medina E. Photosynthesis and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in Amazon rain forests. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 1091—1094
- 16 Wang Y, Deng T. A 25 m.y. isotopic record of paleodiet and environmental change from fossil mammals and paleosols from the NE margin of the Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 322—338
- 17 Jenkins S G, Partridge S T, Stephenson T R, et al. Nitrogen and carbon isotope fractionation between mothers, neonates, and nursing offspring. *Oecologia*, 2001, 129: 336—341
- 18 Ambrose S H. Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *J Archaeol Sci*, 1991, 18: 293—317
- 19 Iacumin P, Nikolaev V, Ramigni M. C and N stable isotope measurements on Eurasian fossil mammals, 40,000 to 10,000 years BP: Herbivore physiologies and palaeoenvironmental reconstruction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2000, 163: 33—47
- 20 Joan B C, John M H, Thure E C, et al. Stable isotope biogeochemistry and its implications for the palaeoecology of late Pleistocene, coastal southern California. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 205: 199—219
- 21 Flad R K. Specialized Salt Production and Changing Social Structure at the Prehistoric Site of Zhongba in the Eastern Sichuan Basin, China. Dissertation for the Doctoral Degree. Los Angeles: University of California, 2004. 235—270
- 22 Koch P L, Tuross N, Fogel M L. The effects of sample treatment and diagenesis on the isotopic integrity of carbonate in biogenic hydroxylapatite. *J Archaeol Sci*, 1997, 24: 417—429
- 23 Abdulla A. Stable carbon isotope analysis of human tooth enamel from the Bronze Age cemetery of Ya'amoun in Northern Jordan. *J Archaeol Sci*, 2004, 31: 1693—1698
- 24 Kerstin L. Megaliths, agriculture and social complexity: A diet study of two Swedish megalith populations. *J Anthropol Archaeol*, 1995, 14: 404—417
- 25 Deniro M J. Post-mortem preservation and alteration of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to paleodietary reconstruction. *Nature*, 1985, 317: 806—809
- 26 Iacumin P, Bocherens H, Delgado H A, et al. A stable isotope study of fossil mammal remains from the Paglicci cave, Southern Italy: N and C as palaeoenvironmental indicators. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 349—357
- 27 France R. Carbon isotope ratios in logged and unlogged boreal forests: Examination of the potential for determining wildlife habitat use. *Environ Man*, 1996, 20: 249—255
- 28 Pechenkina E A, Ambrose S H, Ma X L, et al. Reconstructing northern Chinese Neolithic subsistence practices by isotopic analysis. *J Archaeol Sci*, 2005, 32: 1176—1189
- 29 Masao M, Akira M, Naotaka I. Patterns of prehistoric boar *Sus scrofa* domestication, and inter-islands pig trading across the East China Sea, as determined by carbon and nitrogen isotope analysis. *Chem Geol*, 2005, 218: 91—102
- 30 田晓四, 朱诚, 许信旺, 等. 牙釉质碳和氧同位素在重建中坝遗址哺乳类过去生存模式中的应用. *科学通报*, 2008, 53(增刊 1): 77—83
- 31 Delwiche C C, Zinke P J, Johnson C M, et al. Virginia, nitrogen isotope distribution as a preservative indicator of nitrogen fixation. *Bot Gaz*, 1979, 140: 565—569
- 32 Ekaterina A P, Stanley H A, Ma X L, et al. Reconstructing northern Chinese Neolithic subsistence practices by isotopic analysis. *J Archaeol Sci*, 2005, 32: 1176—1189
- 33 Ambrose S H. Effects of diet, climate and physiology on nitrogen isotope abundances in terrestrial foodwebs. *J Archaeol Sci*, 1991, 18: 293—317
- 34 White C D, Pohl E D, Schwarcz H P, et al. Isotopic evidence for Maya patterns of deer and dog use at preclassic colha. *J Archaeol Sci*, 2001, 28: 89—107
- 35 O'Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience*, 1998, 38: 328—336
- 36 Ambrose S H, Deniro M J. Climate and habitat reconstruction using stable carbon and nitrogen isotope ratios of collagen in prehistoric herbivore teeth from Kenya. *Quat Res*, 1989, 31: 407—422
- 37 Hedges E M, Stevens R E, Richards M P. Bone as a stable isotope archive for local climatic information. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 959—965
- 38 朱诚, 马春梅, 李中轩, 等. 重庆忠县中坝遗址出土的动物骨骼揭示的动物多样性及环境变化特征. *科学通报*, 2008, 53(增刊 I): 66—76
- 39 张强, 朱诚, 姜逢清, 等. 重庆巫山张家湾遗址 2000 年来的环境考古. *地理学报*, 2006, 56: 353—362
- 40 Kathryn A H, Sue S, Ronald A. The implications for paleodietary and paleoclimatic reconstructions of intrapopulation variability in the oxygen and carbon isotopes of teeth from modern feral horses. *Quat Res*, 2005, 64: 138—146