

不同城市居民头发中碳、氮稳定同位素比值特征研究

于子洋^{1,2}, 梅宏成², 朱 军², 杨瑞琴¹, 胡 灿², 刘昌景³,
郭洪玲², 王 萍², 郑继利², 权养科², 王桂强²

(1. 中国人民公安大学, 北京 100038; 2. 公安部物证鉴定中心, 北京 100038;

3. 南京森林警察学院, 国家林业局森林公安司法鉴定中心,

野生动植物物证技术国家林业和草原局重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 头发中蕴含了个体的饮食情况等信息, 不同地区居民饮食习惯不同, 其头发中碳(C)、氮(N)稳定同位素比值也具有一定的差异性。本研究采集了华中、华东、华南、西南和西北地区 8 个城市常住居民的头发样本, 利用元素分析仪-稳定同位素质谱(EA-IRMS)进行 C、N 稳定同位素比值检测。结果表明: 部分城市间居民头发中 C、N 稳定同位素比值存在显著差异。居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与人均蔬菜消费量呈显著负相关, 居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 与人均肉类消费量呈显著正相关, 鱼类的大量摄入可能会提高居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 值。男性和女性居民头发中 C、N 稳定同位素比值没有显著性差异, 女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与年龄呈较弱负相关。中国与其他国家居民头发中 C、N 稳定同位素比值存在差异, 这主要是由不同国家居民的饮食习惯不同导致的。

关键词: 人头发; C、N 稳定同位素; 比值特征

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2021)06-1183-10

doi: 10.7538/zpxb.2020.0112

Analysis on Carbon and Nitrogen Stable Isotope Ratios of Residents' Hair from Different Cities

YU Zi-yang^{1,2}, MEI Hong-cheng², ZHU Jun², YANG Rui-qin¹, HU Can²,
LIU Chang-jing³, GUO Hong-ling², WANG Ping², ZHENG Ji-li²,
QUAN Yang-ke², WANG Gui-qiang²

(1. Peoples' Public Security University of China, Beijing 100038, China;

2. Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China;

3. Center for Forensic Identification of Forest Police, State Forestry Administration,
Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, China)

Abstract: Stable isotope ratios of carbon, nitrogen, hydrogen and oxygen act as "nature's recorder". As a carrier for individual human information, human hair can be

measured by isotope ratio mass spectrometry (IRMS) to translate into information about people's dietary habits, health condition and life track. The basic principle behind establishing dietary lifestyle using isotopic profiles of human hair is the fact that the body's only source of C, N is a person's staple diet. It may have significant differences in carbon, nitrogen isotopic compositions of human hair that are living at different regions. The aim of the study was to analyze the discrepancy of ^{15}N and ^{13}C stable isotope ratios in human hair collected from different cities, and explore the relationship between carbon and nitrogen isotope ratios and human groups, such as gender and age. The carbon and nitrogen isotope ratios in the human hair of 247 local residents from 8 different cities were investigated by IRMS. The results showed that there were significant difference in carbon and nitrogen stable isotope ratios of human hair from different cities. The value of $\delta^{13}\text{C}$ was negatively correlated with vegetable consumption per capita. The value of $\delta^{15}\text{N}$ was positively correlated with meat consumption per capita, and might be increased by high intake of fish. The relationship between $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and the factors of gender and age demonstrated that there were no significant difference between males and females, but the age of females showed a weakly negative correlation with $\delta^{13}\text{C}$. By comparing the data of this paper and other literatures, the carbon and nitrogen stable isotopes in the hair of residents in China were different from other countries, which implied that there were various dietary habits in different countries.

Key words: human hair; carbon and nitrogen stable isotope; ratio characteristics

稳定同位素是指质子数相同、中子数不同、能够稳定存在的同一元素的不同核素。由于同一元素的不同稳定同位素的质量存在微小差异,使得这些稳定同位素在自然界中的分布也存在一定差异。碳、氮、氢、氧是自然界重要的组成元素,其稳定同位素在环境和生物体内的循环会产生分馏^[1-3],从而在不同营养层级和生态位的生物体内产生富集,稳定同位素分析已广泛应用于生态学、环境科学、食品、医学、法庭科学等领域^[4-9]。

头发作为记录个体生活信息的载体,其中蕴含了饮食习惯、生活地域、健康状况等大量信息。头发中的 C、N 元素主要来源于所摄入的食物。研究发现,在严格控制饮食的条件下,随着饮食中 C、N 稳定同位素比值的变化,头发中同位素比值随之出现相似的变化趋势:C4 植物摄入的增加会导致人体组织 $\delta^{13}\text{C}$ 上升,肉类、鱼类等动物蛋白摄入的增加会提高头发中 $\delta^{15}\text{N}$ ^[10-11];不同饮食习惯群体(素食、杂食、肉食)头发中稳定同位素比值不同^[10],呈现出一定的地域差异和群体差异^[12-14]。Somerville 等^[15]对南太平洋西部部分岛屿居民头发中 C、

N 稳定同位素进行检测,发现其与岛屿的开放程度和居民年龄存在明显关系;Valenzuela 等^[14]从社会经济角度出发,认为头发中 C、N 稳定同位素比值变化能够在一定程度上反映地域经济发展对当地人饮食习惯的影响;Hülsemann 等^[13]通过比较 C、N 稳定同位素数据发现不同国家居民头发 C、N 稳定同位素比值存在较大差异,其中 C 稳定同位素比值与纬度存在明显的相关性。头发易于提取、保存,且长出后不再参与代谢,能够稳定保存几个月甚至几年的饮食稳定同位素信息。一些研究人员已在开展通过头发中 C、N 稳定同位素比值特征推断人的饮食特征,刻画饮食习惯、健康状态乃至迁移轨迹的相关研究^[16-18]。

虽然经济全球化导致世界范围内的饮食越来越相近,但是不同地区,特别是亚洲不同国家独特的饮食文化依然体现了地域特点。我国地域广阔,地理、气候和民族习俗文化的差异导致不同城市的居民生活、饮食习惯存在较大的差异。开展国内不同城市居民头发 C、N 稳定同位素比值特征的研究,对于了解我国居民的饮食状况、饮食习惯变化等具有

重要意义。

为考察国内不同城市常住居民头发中 C、N 稳定同位素比值特征,本研究拟对华中(郑州市、南阳市)、华东(合肥市、温州市)、华南(贺州市)、西南(昆明市)和西北(咸阳市、哈密市)等 5 个地区 8 个城市常住居民的头发样本进行 C、N 稳定同位素比值检验,分析稳定同位素比值特征,并探讨可能的影响因素。

1 实验部分

1.1 仪器装置与试剂

Flash EA 2000 型元素分析仪、253 Plus 型稳定同位素比质谱仪、ConFlo IV 型连续流接口装置:美国 Thermo Scientific 公司产品;KQ-250 DB 型数控超声波清洗器:昆山市超声波仪器有限公司产品;202-0AB 电热恒温干燥箱:北京中兴伟业仪器有限公司产品;XPR 2 电子天

平;瑞士 Mettler Toledo 公司产品;PURELAB Ultra 超纯水仪:英国 ELGA 公司产品。

USGS40 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -26.3\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = -4.5\text{‰}$)、USGS41 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = 37.6\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = 47.6\text{‰}$)、USGS42 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -21.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = 8.1\text{‰}$)稳定同位素标准品:购自美国 Reston 稳定同位素实验室;甲醇、氯仿:色谱纯,美国 Thermo Fisher 公司产品;实验用水:由 PURELAB Ultra超纯水仪制备;锡箔杯:瑞士 Santis 公司产品。

1.2 样品采集

征集在当地至少连续生活 8 个月以上的常住居民作为头发样本提供志愿者,共采集 247 份头发样本,具体信息列于表 1。所有用于 C、N 稳定同位素检验的头发样本均为志愿者贴近头皮 3 cm 左右的头发,以保证为当地生活饮食所生长。

表 1 头发样品采集信息
Table 1 Information of samples and their origins

省份 Province	城市 City	东经 East longitude/°	北纬 North latitude/°	采样时间 Sample time/年	男性/女性样本数 Male-to-female ratio/份	年龄范围 Age/岁	样本数量 Sample number/份
新疆	哈密	93.54	42.83	2018	30/11	17~60	41
陕西	咸阳	108.72	34.35	2018	8/11	22~58	19
河南	郑州	113.77	34.77	2018	15/15	19~55	30
河南	南阳	112.55	33.00	2018	16/22	无	38
安徽	合肥	117.33	31.88	2018	15/15	20~52	30
浙江	温州	120.66	28.00	2018	16/17	24~54	33
云南	昆明	102.71	25.05	2018	15/15	21~60	28
广西	贺州	111.52	24.43	2018	14/16	22~55	28

1.3 头发样品的前处理

参照文献[19]的清洗程序,按照以下流程清洗头发样本:用甲醇-氯仿溶液(2:1,V/V)超声清洗 1 h,去离子水超声清洗 2 次,每次 15 min;用甲醇-氯仿溶液(2:1,V/V)超声清洗 0.5 h,去离子水超声清洗 3 次,每次 15 min。将清洗后的头发在 85 ℃恒温箱中干燥 3.5 h,切割成小段,称取约 200~300 μg 干燥的头发样本,用稳定同位素分析专用锡杯包裹。分别

称量 200~300 μg USGS40、USGS41、USGS42 标准物质,用稳定同位素分析专用锡杯包裹,使用元素分析-稳定同位素比质谱仪检测包好的头发样本和标准物质。

1.4 稳定同位素比质谱仪的测试条件

元素分析仪:He 吹扫流速 100 mL/min, O₂ 流速 175 mL/min, O₂ 注入时间 3 s,高温燃烧炉温度 960 ℃,色谱柱温度 50 ℃;接口装置 ConFlo IV:He 稀释压力 60 kPa, CO₂ 参考气

压力 60 kPa, N₂ 参考气压力 100 kPa。

1.5 C、N 稳定同位素比值的检测

1.5.1 头发样本 C、N 稳定同位素比值测定

在 1.4 节条件下同时检测头发样本和标准物质,每个样本重复检测 2 次,采用 Isodat3.0 软件分析数据。

1.5.2 头发样本 C、N 稳定同位素比值表示方法 C、N 稳定同位素比值分别用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表示, $\delta^{13}\text{C}$ 的相对标准为 VPDB, $\delta^{15}\text{N}$ 的相对标准为大气。计算公式如下:

$$\delta = (R_{\text{样本}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1\,000 \quad (1)$$

式中: R 表示重同位素与轻同位素的丰度比。

1.5.3 头发样本 C、N 稳定同位素比值的数据校正与分析 将 USGS40、USGS41 和 USGS42 标准物质的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 测定值与真实值进行线性拟合,得出线性校正方程。通过线性校正方程和头发样本 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的测定值计算出

真实值。

1.6 数据处理与统计分析

利用 SPSS 20.0 软件对头发样本的 C、N 稳定同位素比值进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同城市居民头发 C、N 稳定同位素比值特征

检测我国 8 个城市居民头发 C、N 稳定同位素比值, $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-19.96 \pm 0.84)\%$, 范围为 $-22.20\% \sim -17.32\%$; $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $(7.08 \pm 1.14)\%$, 范围为 $4.11\% \sim 9.38\%$ 。对比不同城市居民头发 C、N 稳定同位素比值数据发现,不同城市存在显著性差异(ANOVA, $\delta^{13}\text{C}$: F (方差齐性) = 8.64, P (显著性水平) < 0.01; $\delta^{15}\text{N}$: F = 82.24, P < 0.01),具体数值列于表 2。

表 2 不同城市常住居民头发样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$
Table 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of resident hair samples in different cities

城市 City	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\%$				$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}/\%$			
	均值 Average value	标准偏差 SD	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值 Average value	标准偏差 SD	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
哈密	-20.52 ^a	0.46	-21.33	-19.26	6.85 ^c	0.36	6.03	7.63
咸阳	-20.04 ^{bc}	0.73	-21.15	-18.17	6.63 ^c	0.72	5.59	8.23
郑州	-20.38 ^{ab}	1.00	-22.19	-18.10	5.49 ^a	1.02	4.10	7.69
南阳	-19.96 ^{bcd}	0.73	-21.92	-18.92	5.99 ^b	0.50	4.89	7.10
合肥	-19.75 ^{cd}	0.76	-21.18	-18.14	7.68 ^d	0.65	6.36	9.02
温州	-19.43 ^d	0.65	-21.28	-18.31	8.04 ^{de}	0.59	6.57	9.03
昆明	-19.54 ^{cd}	0.84	-21.55	-17.32	7.98 ^{de}	0.57	7.01	9.15
贺州	-19.88 ^{bcd}	0.77	-21.39	-18.79	8.20 ^e	0.47	7.21	9.37
均值	-19.96	0.84	-22.19	-17.32	7.08	1.14	4.11	9.38

注: a, b, c, d, e 不同字母之间的数据具有显著性差异($P < 0.05$)

哈密居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 $(-20.52 \pm 0.46)\%$ 最小,与郑州 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 $(-20.38 \pm 1.00)\%$ 相近。温州居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 $(-19.43 \pm 0.65)\%$ 最大,其次为昆明 $(-19.54 \pm 0.84)\%$ 。中国 5 个北部城市(哈密、郑州、咸阳、南阳、合肥)与 3 个南部城市(温州、昆明、贺州) $\delta^{13}\text{C}$ 平均值存在显著差异(T-test, t = 5.29, P < 0.01),北部城市 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 $(-20.16 \pm$

$0.79)\%$ 低于南部城市 $(-19.61 \pm 0.77)\%$ 。对于氮稳定同位素,贺州居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值 $(8.20 \pm 0.47)\%$ 最高,最低的城市为郑州 $(5.49 \pm 1.02)\%$ 。北部城市 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值 $(6.52 \pm 0.99)\%$ 低于南部城市 $(8.07 \pm 0.55)\%$,且存在显著差异(t = 13.58, P < 0.01)。我国居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的标准偏差分别为 0.84 和 1.14,数值相对较大,高于欧洲、美国、日本等国家和地区,这可能与我

国不同城市居民各自具有相对传统的饮食习惯，不同地区之间存在较大的饮食差异有关^[12]。

2.2 年龄、性别对头发 C、N 同位素比值的影响

本研究采集 126 份男性头发样本和 121 份女性头发样本。其中，男性居民 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-19.96 \pm 0.94)\text{‰}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $(7.21 \pm 1.08)\text{‰}$ ；女性居民 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-19.97 \pm 0.77)\text{‰}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $(7.28 \pm 1.18)\text{‰}$ 。男

性与女性居民头发中 C、N 稳定同位素比值没有显著差异($\delta^{13}\text{C}$: $t=0.12$, $P=0.90$; $\delta^{15}\text{N}$: $t=0.42$, $P=0.68$)。同一城市的男性和女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 列于表 3,除昆明的男性和女性之间 $\delta^{15}\text{N}$ 存在差异($t=-3.67$, $P=0.01$)外,其他城市未见明显的性别差异。这表明单一的性别因素对居民头发 C、N 稳定同位素比值的影响不大。

表 3 不同城市男性和女性居民头发样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$
Table 3 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of hair samples from male and female residents in different cities

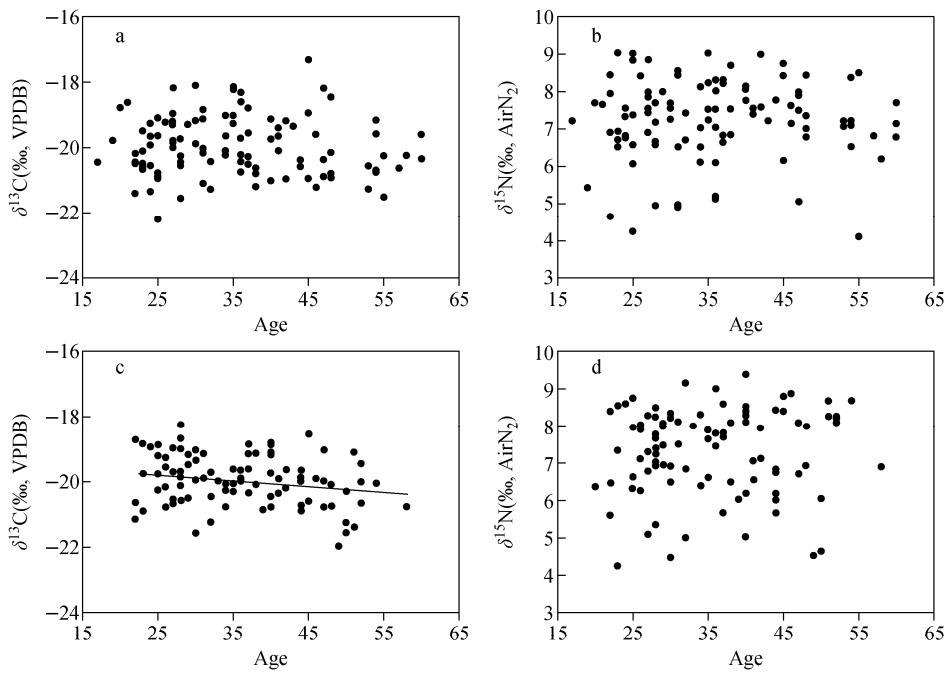
城市 City	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$				$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}/\text{‰}$			
	男性均值 Male average	标准偏差 SD	女性均值 Female average	标准偏差 SD	男性均值 Male average	标准偏差 SD	女性均值 Female average	标准偏差 SD
哈密	-20.51	0.46	-20.54	0.47	6.90	0.38	6.74	0.29
咸阳	-19.82	0.75	-20.20	0.71	6.99	0.80	6.38	0.56
郑州	-20.22	1.10	-20.54	0.91	5.64	1.22	5.35	0.80
南阳	-19.97	0.87	-19.94	0.64	6.00	0.55	5.97	0.46
合肥	-19.70	0.86	-19.81	0.67	7.85	0.57	7.51	0.70
温州	-19.46	0.78	-19.40	0.52	8.07	0.76	8.00	0.40
昆明	-19.28	1.10	-19.76	0.46	7.63*	0.45	8.29*	0.48
贺州	-19.96	0.76	-19.80	0.79	8.15	0.46	8.24	0.50
均值	-19.96	0.94	-19.97	0.77	7.21	1.08	7.28	1.18

注：* 表示具有显著性差异($P<0.05$)

本研究采集头发样本的居民年龄范围为 18~60 岁。利用 SPSS 软件验证年龄与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的相关性。结果表明，居民年龄与 $\delta^{13}\text{C}$ 存在弱相关性($r=-0.136$, $P=0.05$)，而与 $\delta^{15}\text{N}$ 没有显著相关性($r=0.03$, $P=0.66$)。进一步研究发现，男性居民的年龄与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 均未表现出显著相关性($\delta^{13}\text{C}$: $r=-0.07$, $P=0.44$; $\delta^{15}\text{N}$: $r=0.02$, $P=0.81$)；女性居民的年龄与 $\delta^{15}\text{N}$ 没有表现出明显的相关性($r=0.04$, $P=0.71$)，但与 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出一定的相关性($r=-0.24$, $P=0.02$)，示于图 1。将女性按照年龄分为 18~29 岁、30~39 岁、40~49 岁和 50~60 岁 4 组，4 组的 $\delta^{13}\text{C}$ 依次减小，分别为 $(-19.82 \pm 0.75)\text{‰}$ 、 $(-19.96 \pm 0.71)\text{‰}$ 、 $(-20.01 \pm 0.83)\text{‰}$ 、 $(-20.50 \pm 0.85)\text{‰}$ 。50~60 岁女性 $\delta^{13}\text{C}$ 较 18~29 岁的低约 0.7‰，存在显著差异($t=2.27$, $P=0.03$)。以上研究表明，虽然年龄因

素在表面上与 $\delta^{13}\text{C}$ 存在一定程度的负相关，但这种关系与男性居民无关，主要是由女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 随年龄增加而下降导致的。

受头发样本采集能力限制(样品量小、样品采集环境受限、头发来源不明确等原因)，目前对人头发 C、N 稳定同位素的研究主要集中在不同地域间的差异和饮食对头发中稳定同位素的影响，对性别、年龄等因素与头发 C、N 稳定同位素关系的研究较少。Somerville 等^[15]研究发现东南亚群岛部分村落居民头发 C、N 稳定同位素比值随年龄的增长而逐渐下降，研究人员认为造成这种年龄差异的主要原因是不同年龄居民受经济活动影响程度不同而产生的饮食习惯差异。Kusaka 等^[20]研究现代日本人头发稳定同位素组成时发现，不同性别、年龄的居民头发 C、N 稳定同位素比值存在显著差异，男性居民 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 略高于女性($\delta^{13}\text{C}$:0.3‰; $\delta^{15}\text{N}$:



注:a. 男性碳值;b. 男性氮值;c. 女性碳值;d. 女性氮值
图 1 男性和女性居民头发 C、N 稳定同位素比值与年龄的关系
Fig. 1 Relationships between carbon and nitrogen isotope ratios of hair samples and ages of individuals divided by gender

0.2‰), 男性居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 随年龄增加呈上升趋势, 而女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐减小。本研究未发现性别因素对中国居民头发稳定同位素的影响, 这与文献[20]的结论相似, 女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 随年龄增加而呈现下降趋势。对于男性居民, 本研究未发现其与年龄存在显著关系。目前研究人员普遍认为, 饮食是影响人体 C、N 稳定同位素比值最重要的因素之一, 大量食用 C4 植物和动物肉类食品会导致组织 $\delta^{13}\text{C}$ 上升, 动物肉类, 特别是鱼类的摄入会导致组织 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加。因此, 我国女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 随年龄增加而呈现下降趋势可能与饮食习惯的变化有关, 即年轻女性较年长女性可能摄入了更多的 C4 植物或肉类食品。

虽然女性头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与年龄呈现一定的相关性, 但这种相关性却未出现在男性居民和氮稳定同位素比值中。这可能是男性和女性的生理差异导致了饮食与头发中稳定同位素的富集程度存在差异。C、N 稳定同位素的富集发生在组织代谢过程中, 不同的营养压力^[21-22]、健康状况^[23]、代谢水平^[24]等都可能引起个体不同生长阶段稳定同位素富集能力的差异。

2.3 居民头发中 C、N 稳定同位素比值与饮食的相关性

对于碳稳定同位素, 部分城市之间存在一定的差异。例如, 哈密、咸阳和温州 3 个城市 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著性差异, 由小到大依次为: 哈密 (-20.52 ± 0.46)‰ < 咸阳 (-20.04 ± 0.73)‰ < 温州 (-19.43 ± 0.65)‰。根据 2019 年中国统计年鉴^[25], 3 个城市所在省份(新疆、陕西、浙江)的居民人均蔬菜消费量依次递减, 分别为 107.5、98.4、91.2 kg, 这表明头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与居民人均蔬菜消费量可能存在一定的相关性。但居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 差异并不是存在于所有城市之间, 例如, 南阳 (-19.96 ± 0.73)‰、合肥 (-19.75 ± 0.76)‰、昆明 (-19.54 ± 0.84)‰ 和贺州 (-19.88 ± 0.77)‰ 等 4 个城市之间不存在 $\delta^{13}\text{C}$ 显著性差异。河南、安徽、云南、广西省份的居民人均蔬菜消费量分别为 101、96.5、96.5、92.8 kg^[25], 蔬菜消费量与居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 值并未表现出完全相同的变化趋势。将不同省份人均蔬菜消费量与对应城市居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 进行相关性分析, 二者存在显著的负相关性 ($r = -0.850$, $P = 0.008$), 表明头发 $\delta^{13}\text{C}$ 随人均蔬菜消费量的增

加而出现减小的趋势。这可能是因为绝大部分种类蔬菜为 ^{13}C 含量较低的 C_3 植物,随着 C_3 植物摄入的增多,头发等人体组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 减小。

氮稳定同位素的差异性要大于碳稳定同位素,郑州、南阳、哈密、合肥、贺州等城市的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著性差异,从小到大依次为郑州(5.49 ± 1.02)‰ $<$ 南阳(5.99 ± 0.5)‰ $<$ 哈密(6.85 ± 0.36)‰ $<$ 合肥(7.68 ± 0.65)‰ $<$ 贺州(8.20 ± 0.47)‰。部分城市 $\delta^{15}\text{N}$ 差别不显著,例如温州(8.04 ± 0.59)‰、昆明(7.98 ± 0.57)‰和贺州(8.20 ± 0.47)‰等。合肥、温州、昆明和贺州4个城市 $\delta^{15}\text{N}$ 相对较高,根据2019年中国统计年鉴^[25],合肥、温州和贺州3个城市居民人均鱼类消费量远大于其他城市,大约为2~5倍,这表明鱼类摄入量的增加会提高居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 值。将不同城市居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 与人均肉类消费量进行对比,二者存在显著的正相关性($r=0.839, P=0.009$),说明随着人均肉类消费量的增加,居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 逐渐增大,这与文献^[11,16]的结果相似。

在全部8个城市中,郑州和南阳同属于河南省,分别位于河南省北部和西南部,相距约220公里。郑州居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ (-20.38 ± 1.00)‰与南阳(-19.96 ± 0.73)‰相差约0.4‰,郑州居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ (5.49 ± 1.02)‰与南阳(5.99 ± 0.5)‰相差约0.5‰,这说明同一省内不同城市居民可能存在一定程度上饮食差异,利用全省人均食物消费量可能无法全面代表同一省份不同城市居民的饮食内容。

8个城市居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布较为分散,城市之间存在大面积重合区域,仅通过C、N稳定同位素无法完全区分不同城市的头发样本,示于图2。通过对比全部头发样本C、N稳定同位素比值, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著正相关性($r=0.712, P=0.04$),这与文献^[13,26]的结果基本一致。造成这种现象的原因可能是:一方面,肉类食物摄入的增加使得人体组织中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均呈现不同程度上升;另一方面,二者的相关性可能与气候因素有关,较为干燥炎热的环境会导致生物组织 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 上升^[27]。

2.4 居民头发C、N稳定同位素比值特征的国际间差异分析

将本研究的国内居民头发C、N稳定同位

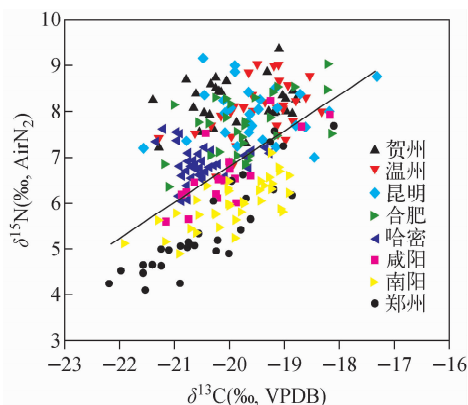


图2 不同城市居民头发C、N稳定同位素比值分布
Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values
of resident hair samples in different cities

素数据与文献数据进行比较,结果列于表4。可见,不同国家居民头发C、N稳定同位素比值存在较大差异,特别是美国居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ (-17.6 ± 1.2)‰明显高于其他国家,蒙古居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ (-20.7 ± 0.5)‰表现出高值。与美国、欧洲、亚洲部分国家相比,中国居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ (-20.0 ± 0.8)‰较低,这可能与中国人饮食中小麦、大米、蔬菜等 C_3 植物的占比较大有关^[28]。温州(-19.4 ± 0.6)‰、昆明(-19.5 ± 0.8)‰和贺州(-19.9 ± 0.8)‰等南部城市居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与日本相近,这可能是由食用 C_3 植物比重下降,鱼类、肉类食用量相对上升导致的。本研究测定的中国居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 低于文献^[13],这可能与样品采集范围不同有关,但两个研究中的 $\delta^{15}\text{N}$ ((7.1 ± 1.1) ‰、 (8.5 ± 1.0) ‰)均明显低于其他国家,体现出中国居民日常饮食中肉类、鱼类摄入量较少。与中国饮食结构相似的印度同样表现出较低的 $\delta^{13}\text{C}$ (-20.6 ± 0.9)‰和 $\delta^{15}\text{N}$ (7.4 ± 0.6)‰,日本、韩国、蒙古等亚洲邻国因食用大量肉类和鱼类^[28],其居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 明显高于我国。

随着物流行业的迅猛发展,大量的进口食品和国内食物通过冷库系统被分销各地,食物生产和消费已经不再依赖于特定的地理环境,各地区食物自给率下降,不同地区的居民大量食用“内容”相同的饮食,发达国家的饮食呈现高度“均质化”的特点^[29]。实验研究常以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的离散程度作为辨别该地区饮食均质化的参考(标准偏差是否大于1)^[20]。本研究的

表 4 不同国家居民头发 C、N 稳定同位素比值

Table 4 Carbon and nitrogen isotope ratios of hair samples between the Chinese and other countries

国家	样本数量	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 均值	标准偏差	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ 均值	标准偏差	参考文献
Country	Sample number	Average $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}/\text{‰}$	SD	Average $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}/\text{‰}$	SD	Reference
中国	247	-20.0	0.8	7.1	1.1	本研究
日本	1305	-19.4	0.6	9.4	0.6	[20]
韩国	32	-19.1	0.6	9.7	0.5	[20]
印度	21	-20.6	0.9	7.4	0.6	[20]
蒙古	78	-20.7	0.5	10.2	0.6	[20]
美国	1022	-17.6	1.2	8.9	0.9	[13]
英国	134	-21	0.6	9.3	0.6	[13]
法国	61	-20.3	0.6	9.2	0.7	[13]
德国	478	-20.5	0.6	8.9	0.7	[13]
中国	297	-20.1	1.3	8.5	1	[13]

8个城市中,除郑州外,其他城市的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均在0.4~0.8之间,表明各城市居民的饮食差异相对较小,存在一定的均质性,说明同一城市居民饮食习惯差异不大。其中,哈密居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 标准偏差最小($\delta^{13}\text{C}$:0.5; $\delta^{15}\text{N}$:0.4),说明哈密居民可能存在极为相似的饮食习惯。但是不同城市间居民饮食习惯存在较大差异,使得我国居民头发样本C、N稳定同位素比值整体的标准偏差较大(>1‰)。美国、日本、韩国、欧洲部分国家居民头发稳定同位素的标准偏差较小(<0.8‰),说明其居民饮食的地域差异不大,这些国家的饮食在食物产品生产和分销全球化背景下表现出明显的均质化。与之相反的是,我国居民头发样本C、N稳定同位素比值较大的波动范围体现了居民一定程度上保留了当地传统饮食习惯,没有完全融入到食品分销体系中。

3 结论

本研究对我国8个城市常住居民头发进行了C、N稳定同位素比值分析,结果表明,部分城市间居民头发C、N稳定同位素比值存在显著差异,男性和女性居民头发C、N稳定同位素比值没有显著性差异,仅有女性居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与年龄呈现较弱的负相关。居民头发 $\delta^{13}\text{C}$ 与人均蔬菜消费量呈显著负相关, $\delta^{15}\text{N}$ 与人均肉类消费量呈显著正相关,鱼类的大量摄入可能会

提高居民头发 $\delta^{15}\text{N}$ 值,表明不同城市居民头发C、N稳定同位素比值受不同种类食物的综合影响。比较我国与其他国家居民头发C、N稳定同位素数据,发现不同国家居民头发C、N稳定同位素比值存在差异,造成这种差异的原因是不同国家居民饮食习惯的不同,而我国居民较其他国家保留了较多的当地传统饮食习惯。

参考文献:

[1] PETERSON B J, HOWARTH R W, GARRITT R H. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs[J]. Science, 1985, 227(4 692): 1 361-1 363.

[2] 易现锋,张晓爱,李来兴,李明财,赵亮. 高寒草甸生态系统食物链结构分析——来自稳定性碳同位素的证据[J]. 动物学研究,2003,25(1): 1-6.

YI Xianfeng, ZHANG Xiaoi, LI Laixing, LI Mingcai, ZHAO Liang. Analysis on food web structure in alpine meadow ecosystem: evidence from stable carbon isotope signatures[J]. Zoological Research, 2003, 25(1): 1-6(in Chinese).

[3] 何亚,刘昌景,梅宏成,朱军,王继芬,高天奇,何欣龙,胡灿,郭洪玲,王萍,姜晓佳,权养科,王贵强. 阿克苏、连云港和淮安城市居民头发中氢、氧稳定同位素比值差异研究[J]. 质谱学报, 2019,40(4),342-348.

HE Ya, LIU Changjing, MEI Hongcheng, ZHU Jun, WANG Jifen, GAO Tianqi, HE Xinlong,

- HU Can, GUO Hongling, WANG Ping, JIANG Xiaojia, QUAN Yangke, WANG Guiqiang. Study on the difference of hydrogen and oxygen stable isotope ratio of aksu, liangyungang and huaian urban residents hair[J]. Journal of Mass Spectrometry Society, 2019, 40(4): 342-348(in Chinese).
- [4] 李明财,黎贞发,易现峰,李来兴. 青藏高原东部高寒草甸植物 $\delta^{13}\text{C}$ 年间变化及其环境分析[J]. 生态环境学报, 2007, 16(4): 1 205-1 210.
- LI Mingcai, LI Zhenfa, YI Xianfeng, LI Laixing. Annual variation of plant $\delta^{13}\text{C}$ and its environmental analysis in alpine meadow in the east of tibetan plateau[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1 205-1 210(in Chinese).
- [5] BOWEN G J, EHRLINGER J R, CHESSON L A, STANGE E, CERLING T E. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous united states [J]. Water Resources Research, 2007, 43(3): 1-12.
- [6] WELP L R, KEELING R F, MEIJER H A, BOLLENBACHER A F, PIPER S C, YOSHIMURA K, FRANCEY R J, ALLISON C E, WAHLEN M. Interannual variability in the oxygen isotopes of atmospheric CO_2 driven by el niño [J]. Nature, 2011, 477(7 366): 579-582.
- [7] 陈珊珊,钟其顶,俞慧红,黄占斌,王道兵,戴祁. 植物油中甘油稳定碳同位素组成的测定[J]. 质谱学报, 2016, 37(4): 359-365.
- CHEN Shanshan, ZHONG Qiqing, YU Huihong, HUANG Zhanbin, WANG Daobing, DAI Qi. Determination of the stable carbon isotopic composition of glycerol in vegetable oils[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2016, 37(4): 359-365(in Chinese).
- [8] 梅宏成,朱军,权养科,王桂强. 稳定同位素检验推断生物证供体的生活时空信息[J]. 刑事技术, 2016, 41(2): 87-92.
- MEI Hongcheng, ZHU Jun, QUAN Yangke, WANG Guiqiang. Inferring the donors living spatial-temporal information by stable isotope analysis of the biological evidence[J]. Forensic Science and Technology, 2016, 41(2): 87-92(in Chinese).
- [9] 梅宏成,朱军,胡灿,郭洪玲,王萍,权养科,陶克明. 稳定同位素分析在法庭科学领域中的应用[J]. 地球科学进展, 2017, 32(增刊): 252-253.
- MEI Hongcheng, ZHU Jun, HU Can, GUO Hongling, WANG Ping, QUAN Yangke, TAO Keming. The application of stable isotope analysis in forensic science[J]. Advance in Earth Science, 2017, 32(Suppl.): 252-253(in Chinese).
- [10] PETZKE K J, BOEING H, METGES C C. Choice of dietary protein of vegetarians and omnivores is reflected in their hair protein ^{13}C and ^{15}N abundance[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2005, 19(11): 1 392-1 400.
- [11] VOTRUBA S B, SHAW P A, OH E J, VENTIL C A, BONFIGLIO S, KRAKOFF J, O'BRIEN D M. Associations of plasma, rbcs, and hair carbon and nitrogen isotope ratios with fish, meat, and sugar-sweetened beverage intake in a 12-wk inpatient feeding study[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2019, 110(6): 1 306-1 315.
- [12] THOMPSON A H, CHESSON L A, PODLESAK D W, BOWEN G J, CERLING T E, EHRLINGER J R. Stable isotope analysis of modern human hair collected from Asia (China, India, Mongolia, and Pakistan)[J]. American Journal of Physical Anthropology, 2010, 141(3): 440-451.
- [13] HÜLSEMAN F, LEHN C, SCHNEIDERS S, JACKSON G, HILL S, ROSSMANN A, SCHEID N, DUNN P J, FLENKER U, SCHÄNZER W. Global spatial distributions of nitrogen and carbon stable isotope ratios of modern human hair[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2015, 29(22): 2 111-2 121.
- [14] VALENZUELA L O, CHESSON L A, BOWEN G J, CERLING T E, EHRLINGER J R. Dietary heterogeneity among western industrialized countries reflected in the stable isotope ratios of human hair[J]. PloS One, 2012, 7(3): e34234.
- [15] SOMERVILLE A D, MARTIN M A, HAYES L P, HAYWARD D, WALKER P L, SCHÖNINGER M J. Exploring patterns and pathways of dietary change: preferred foods, oral health, and stable isotope analysis of hair from the dani of mulia, papua, Indonesia[J]. Current Anthropology, 2017, 58(1): 31-56.
- [16] O'CONNELL T C, HEDGES R E. Investigations into the effect of diet on modern human hair isotopic values[J]. American Journal of Physical

- Anthropology, 1999, 108(4): 409-425.
- [17] EHRLINGER J R, CASALE J F, LOTT M J, FORD V L. Tracing the geographical origin of cocaine[J]. *Nature*, 2000, 408(6 810): 311-312.
- [18] SCHOELLER D A. Isotope fractionation: why aren't we what we eat? [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1999, 26(6): 667-673.
- [19] O'CONNELL T C, HEDGES R E M. Isotopic comparison of hair and bone: archaeological analyses[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1999, 26(6): 661-665.
- [20] KUSAKA S, ISHIMARU E, HYODO F, GAKUHARI T, YONEDA M, YUMOTO T, TAYASU I. Homogeneous diet of contemporary japanese inferred from stable isotope ratios of hair[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(33 122): 1-11.
- [21] FULLER B T, FULLER J L, SAGE N E, HARRIS D A, O'CONNELL T C, HEDGES R E. Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during pregnancy[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2004, 18(23): 2 889-2 896.
- [22] FULLER B T, FULLER J L, SAGE N E, HARRIS D A, O'CONNELL T C, HEDGES R E. Nitrogen balance and $\delta^{15}\text{N}$: why you're not what you eat during nutritional stress[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, 19(18): 2 497-2 506.
- [23] PETZKE K J, FEIST T, FLEIG W E, METGES C C. Nitrogen isotopic composition in hair protein is different in liver cirrhotic patients[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, 20(19): 2 973-2 978.
- [24] TURNER B L E J L, QUINN E A. Age-related variation in isotopic indicators of diet at medieval kulubnarti, sudanese nubia[J]. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2007, 17(1): 1-25.
- [25] 毛盛勇,叶植材. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2019:192-193.
- [26] PETZKE K J B H, KLAUS S. Carbon and nitrogen stable isotopic composition of hair protein and amino acids can be used as biomarkers for animal-derived dietary protein intake in humans[J]. *The Journal of Nutrition*, 2005, 135(6): 1 515-1 520.
- [27] BOWLING D R, MCDOWELL N G, BOND B J, LAW B E, EHRLINGER J R. ^{13}C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit[J]. *Oecologia*, 2002, 131(1): 113-124.
- [28] FAORAP. Fao statistical yearbook 2014 Asia and the Pasific food and agriculture[M]. Bangkok: FAO, 2014: 74-92.
- [29] BOWEN G J, EHRLINGER J R, CHESSON L A, THOMPSON A H, PODLESACK D W, CERLING T E. Dietary and physiological controls on the hydrogen and oxygen isotope ratios of hair from mid-20th century indigenous populations[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2009, 139(4): 494-504.

(收稿日期:2020-09-23;修回日期:2020-12-01)