

研究论文

Research Article

当代中国人群牙齿可观测特征的多样性研究

罗浩^{1#*} 陈颖洁¹ 杨光睿¹ Kaustubh Adhikari² 夏斌^{3*} Andrés Ruiz-Linares^{1#*} Miguel Delgado^{4#*}

1 复旦大学生命科学学院现代人类学教育部重点实验室, 人类遗传学与人类学系, 上海, 200438; 2 开放大学科学, 技术, 工程和数学学院, 数学与统计学院, 伦敦, 英国, MK7 6AA; 3 北京大学口腔医学院, 北京, 100086; 4 拉普拉塔国立大学自然科学及博物馆学院人类学科, 拉普拉塔, 阿根廷, 1900

同等贡献作者

* 共同通信作者, coailuohao@icloud.com; summerinbeijing@vip.sina.com; medelgado@fcnym.unlp.edu.ar; a.ruizlin@ucl.ac.uk

摘要 本研究基于当代中国人群 3D 牙齿模型数据, 参照拉美人群进化和多样性研究联合会 (consortium for the analysis of the diversity and evolution of Latin America, CANDELA) 所使用的牙齿特征点标记方法, 使用牙齿特征点间的欧几里得线性距离 (Euclidean linear distances, ELD) 表示的牙齿表型作为牙齿可观测特征的度量, 探究个体因素 (年龄、性别) 和群体因素 (民族) 对当代中国人群牙齿可观测特征多样性的影响。通过对牙齿标记特征点的典型变量分析 (canonical variate analysis, CVA)、交叉验证 (cross validation, CV)、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 以及对牙齿表型的 Pearson 相关性分析和差异分析, 本研究发现进化上相近的群体牙齿可观测特征往往更接近。具体来说, 汉族的上颌牙齿可观测特征和壮族、苗族较为接近而不同于蒙古族的, 而藏族的上、下颌牙齿可观测特征不同于维吾尔族的; 南北中汉族牙齿表型的差异具有明确的方向性, 下颌牙齿差异比上颌更明显; 从性别角度看, 男女牙齿表型差异主要体现在尖牙上, 男性尖牙平均宽度和高度显著大于女性的; 对不同年龄群体的差异分析表明, 遗传外因素对牙齿可观测特征的影响主要体现在尖牙、上颌第一磨牙、下颌第一前磨牙上。

关键词 当代中国人群; 牙齿可观测特征; 表型差异

Diversity of Dental Observable Characteristics among Contemporary Chinese Groups

LUO Hao^{1#*} CHEN Yingjie¹ YANG Guangrui¹ Kaustubh ADHIKARI² XIA Bin^{3*} Andrés RUIZ-LINARES^{1#*} Miguel DELGADO^{4#*}

1 Key Laboratory of Contemporary Anthropology of Ministry of Education and Department of Anthropology and Human Genetics, School of Life Sciences, Fudan University, Shanghai, 200438; 2 Faculty of Science, Technology, Engineering & Mathematics, School of Mathematics & Statistics, Open University, London, Britain, MK7 6AA; 3 School of Stomatology, Peking University, Beijing, 100086; 4 Anthropology Division, Faculty of Natural Sciences and Museum, National University of La Plata, La Plata, Argentina, 1900

These authors contributed equally to this study

* Co-corresponding authors, coailuohao@icloud.com; summerinbeijing@vip.sina.com; medelgado@fcnym.unlp.edu.ar; a.ruizlin@ucl.ac.uk

DOI: 10.13417/j.gab.043.000150

Abstract This study is based on the 3D dental models data of contemporary Chinese groups, and dental landmarking method is used

基金项目: 本研究由国家自然科学基金项目 (31771393) 资助。

引用格式: 罗浩, 陈颖洁, 杨光睿, 等, 2024. 当代中国人群牙齿可观测特征的多样性研究. 基因组学与应用生物学, 43(1): 150-171. [LUO H, CHEN Y G, YANG G R, et al., 2024. Diversity of dental observable characteristics among contemporary Chinese groups. Genomics and Applied Biology, 43(1): 150-171.]

通信作者简介: 罗浩, 硕士研究生, 从事医学和分子遗传学研究; 夏斌, 教授, 从事儿童龋病的综合防治和儿童前牙外伤的诊疗研究; Andrés Ruiz-Linares, 教授, 从事疾病和非疾病表型的基因分析和群体遗传学研究; Miguel Delgado, 助理研究员, 从事时间和古环境框架下的早期美洲人研究

收稿日期: 2023-01-17; 接受日期: 2023-05-12

in this study, which is used by the consortium for the analysis of the diversity and evolution of Latin America (CANDELA). Dental phenotypes represented by Euclidean linear distances (ELD) between landmarks in this study are basis of measurement of dental diversity. This study aims to explore the impact of individual factors (age and gender) and population factor (ethnic groups) on the dental diversity among contemporary Chinese groups. The results of canonical variate analysis (CVA), cross validation (CV), principal component analysis (PCA), Pearson correlation analysis and differences analysis showed that the dental observable characteristics of populations which had closer evolutionary relationships were often more similar. Specifically, the dental observable characteristics of upper teeth of Han nationality are closer to those of Zhuang and Miao nationalities but different from that of Mongolian nationality, and the dental observable characteristics of upper and lower teeth of Tibetan nationality are different from those of Uyghur nationality. The differences in dental phenotypes of southern/northern/central Han Chinese were clearly directional, and the differences of mandibular teeth was more obvious than that of maxillary teeth. From the perspective of gender, the differences of dental phenotypes between men and women were mainly reflected in the canines, and the average width and height of male canines were significantly greater than that of female canines. The differences analysis among different age groups showed that the influence of extragenetic factors on the dental observable characteristics was mainly reflected in the canines, maxillary first molars and mandibular first premolars.

Keywords Contemporary Chinese groups; Dental observable characteristic; Phenotypic difference

牙齿可观测特征研究属于牙齿形态学范畴,牙齿具有高度的遗传性(Townsend et al., 2009; Yang et al., 2023)且在其发育后不会发生变化(牙齿磨损或龋齿除外)。牙齿可观测特征在不同个体和群体中呈现巨大的差异,这种差异与群体起源和进化密切相关,能反映群体特点和地域差异(Tan et al., 2014)。因此,牙科人类学家经常使用牙齿可观测特征及相关的统计数据来描述种群内及种群间存在多少变异,以便了解种群间可能存在的联系,特别是祖先-后代的关系(Edgar, 2013)。

骨骼和牙槽的发育、上颌和下颌牙弓随个体成长的变化以及与此相关的面部发育是贯穿人一生的持续过程(Massaró et al., 2018; Miranda et al., 2019)。大量研究表明,上颌与下颌(尤其是下颌)的牙弓长度(Garib et al., 2021)、尖牙间距离(Sinclair and Little, 1983)和磨牙间距离随年龄的增加呈减小趋势(Carter and McNamara, 1998),而且通常伴随着严重的牙齿拥挤(Bishara et al., 1994; Dos Santos et al., 2023),牙弓的形状在不同的民族之间也可能有所不同(Kong-Zárate et al., 2017)。在牙科治疗领域,牙弓形状、宽度等牙弓特征是诊疗中关键的考虑因素(Kong-Zárate et al., 2017),因此,牙弓距离的研究在牙科治疗领域是具有一定实用价值的(Triviño et al., 2008)。

通过全基因组关联分析,发现在基因和单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)层面,可以将中国汉族人群分为南方汉族(southern Han Chinese)、北方汉族(northern Han Chinese)和中部汉族(central Han Chinese)(Xu et al., 2009)。以往的研究表明,在东亚南方和北方的人群分离之后,东亚南方的人群在地理上又进一步分为与内陆地区

和沿海地区相对应的两个遗传谱系。中国北方被认为是现代汉藏语(Sino-Tibetan-speaking)人群的发源地,中国南方则是现代苗瑶语(Hmong-Mien-speaking)人群、壮侗语(Tai-Kadai-speaking)人群、南亚语(Austroasiatic-speaking)人群、南岛语(Austro-nesian-speaking)人群的发源地(Yang et al., 2022)。古代中国南方种植水稻的农民最终发展为现代东亚和东南亚不同语族人群的祖先(Zhao, 2010)。据报道,在汉族强劲的人口扩张的过程中接受了其周围民族相当大的基因流,因此汉族虽发源于北方,但汉族的主要基因流来自中国南方的民族(Wang et al., 2018)。对线粒体DNA(mitochondrial DNA, mtDNA)和Y染色体的研究证实,维吾尔族(Uyghur nationality)是欧亚大陆西部人群和欧亚大陆东部人群的混合人群的后代(Wells et al., 2001; Yao et al., 2004),其遗传组成24.9%~36.6%为欧洲人、12.0%~19.9%为南亚人、15.2%~16.8%为西伯利亚人、28.8%~46.5%为东亚人(Feng et al., 2017)。从全球范围看,藏族(Tibetan nationality)在遗传上与东亚人最接近,尤其接近于土族、彝族、纳西族等高原民族而非汉族等低海拔居住民族;从进化上看,藏族是尼安德特人、丹尼索瓦人、古西伯利亚人、其他未知古老人种等与低海拔居住民族(如汉族)经过两次融合而形成的(Pan and Xu, 2020)。蒙古族(Mongolian nationality)分布在中国中部和北部、俄罗斯南部及其他邻近国家,全基因组数据揭示了蒙古族大约有10%的欧洲血统(Qin et al., 2015)。

数个世纪以来,学者们集中精力研究了人类和其他灵长类动物的牙齿形态特征,发现牙齿形态能够影响咬碎大而坚硬的食物所需的咬合力(Ber-

thaume et al., 2010), 但针对中国不同人群牙齿形态差异的研究, 在当前尚属空白。本研究的目的是探究个体因素(年龄、性别)和群体因素(民族)对当代中国人群牙齿可观测特征多样性的影响, 使用的牙齿可观测特征是由 1 027 名中国男性和女性的 3D 牙齿模型的标记特征点间的欧几里得线性距离(Euclidean Distance, ELD)所表示的牙齿周长(contour ELD)、中心点间距(inter-center points ELD)、长度(length)、宽度(width)、高度(height)、牙尖/凹槽间距(inter-cusps & inter-pits ELD)、牙弓 ELD(dental arch ELD)等, 样本涵盖 6 个民族, 其中汉族包括南方汉族、北方汉族和中部汉族(以下简称“南北中汉族”)。用这些不同的 ELD 表示 376 个不同的牙齿表型, 通过分析这些表型间的差异, 探究当代中国人群牙齿可观测特征差异与个体及群体因素的关系, 在一定程度上填补了当前研究的空白。

1 结果

1.1 当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点的可信度检验

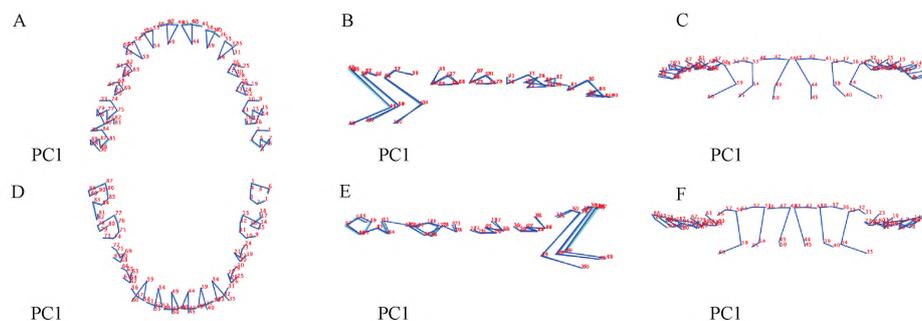
可信度检验用来评价对同一对象多次测量间的可信度, ICC(intraclass correlation coefficient)值大小介于 0 和 1 之间, ICC 值小于 0.4, 一般认为测量的

可重复性较差; ICC 值大于 0.75, 一般认为测量的可重复性好。为了检验本研究所用的拉美人群进化和多样性研究联合会(consortium for the analysis of the diversity and evolution of Latin America, CANDELA)3D 牙齿模型特征点的标记与提取方法是否具有有良好的可重复性, 对当代中国人群 3D 牙齿模型特征点完成了可信度检验。检验结果表明, 自我标记可重复性好, 组内 ICC 值均大于 0.75; 不同标记者间可重复性总体较好, 多数组间 ICC 值大于 0.75, 少数组间 ICC 值小于 0.4。

1.2 当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点的主成分分析、交叉验证和典型变量分析

本研究标记了当代中国人群上、下颌牙齿共 180 个特征点, 使用这些标记特征点数据完成了主成分分析(principal component analysis, PCA)、交叉验证(cross validation, CV)和典型变量分析(canonical variate analysis, CVA)。

PCA 线框图(图 1)中线段的重叠程度表示矢量偏差, 线段重叠程度越高表示矢量偏差越小。当代中国人群上颌牙齿标记特征点(图 1A~图 1C)和下颌牙齿标记特征点(图 1D~图 1F)的 PCA 结果说明特征点的标记过程具有较高的一致性。比例系数设置为 0.01。



PC1 表示的是 PCA 中的第一个主成分, 在所有主成分中解释度最高。

PC1 represents the first principal component in PCA and has the highest interpretation among all principal components.

图 1 当代中国人群上、下颌牙齿标记特征点的 PCA 线框图

(A) 上颌牙齿的俯视图; (B) 上颌牙齿的侧视图; (C) 上颌牙齿的正视图; (D) 下颌牙齿的俯视图; (E) 下颌牙齿的侧视图; (F) 下颌牙齿的正视图

Figure 1 Wireframe graph in PCA of the landmarks of the maxillary and mandibular teeth in contemporary Chinese groups

(A) The vertical view of the maxillary teeth; (B) The side view of the maxillary teeth; (C) The front view of the maxillary teeth; (D) The vertical view of the mandibular teeth; (E) The side view of the mandibular teeth; (F) The side view of the mandibular teeth

对当代中国人群上、下颌牙齿的标记特征点完成 CV 和 CVA(图 2), 设置 0.95 置信区间。结果显示, 上、下颌牙齿性别差异不明显(图 2A, 图 2B); 上、下颌牙齿民族差异较明显, 其中上颌牙齿民族差异更明显(图 2C, 图 2D); 上下颌牙齿南北中汉族差异明显(图 2E, 图 2F)。

在上颌牙齿中, 汉族、壮族、苗族的牙齿特征较为接近, 蒙古族、维吾尔族、藏族的牙齿特征显

示为单独的聚类(图 2C); 南方汉族、北方汉族、中部汉族的牙齿特征显示为单独的聚类, 表明南北中汉族上颌牙齿特征具有差异(图 2E)。在下颌牙齿中, 汉族、壮族、苗族、蒙古族、藏族的牙齿特征较为接近, 维吾尔族显示为单独的聚类(图 2D); 南方汉族、北方汉族、中部汉族的牙齿特征显示为单独的聚类, 表明南北中汉族下颌牙齿特征具有差异(图 2F)。

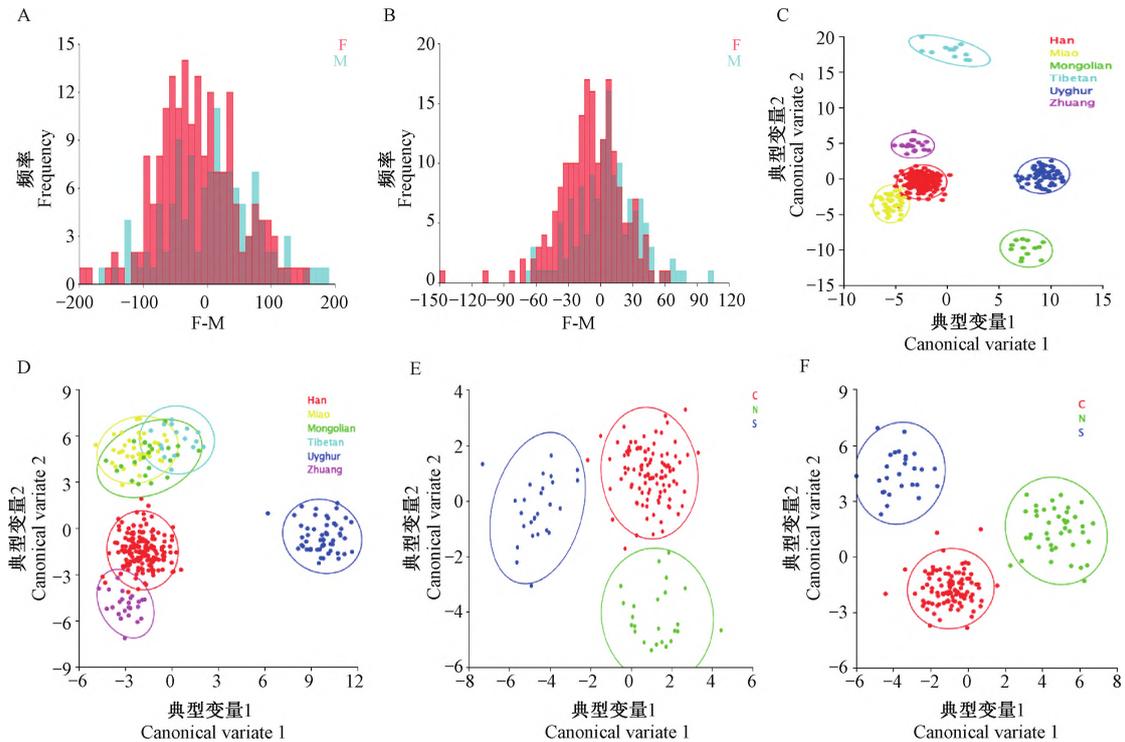


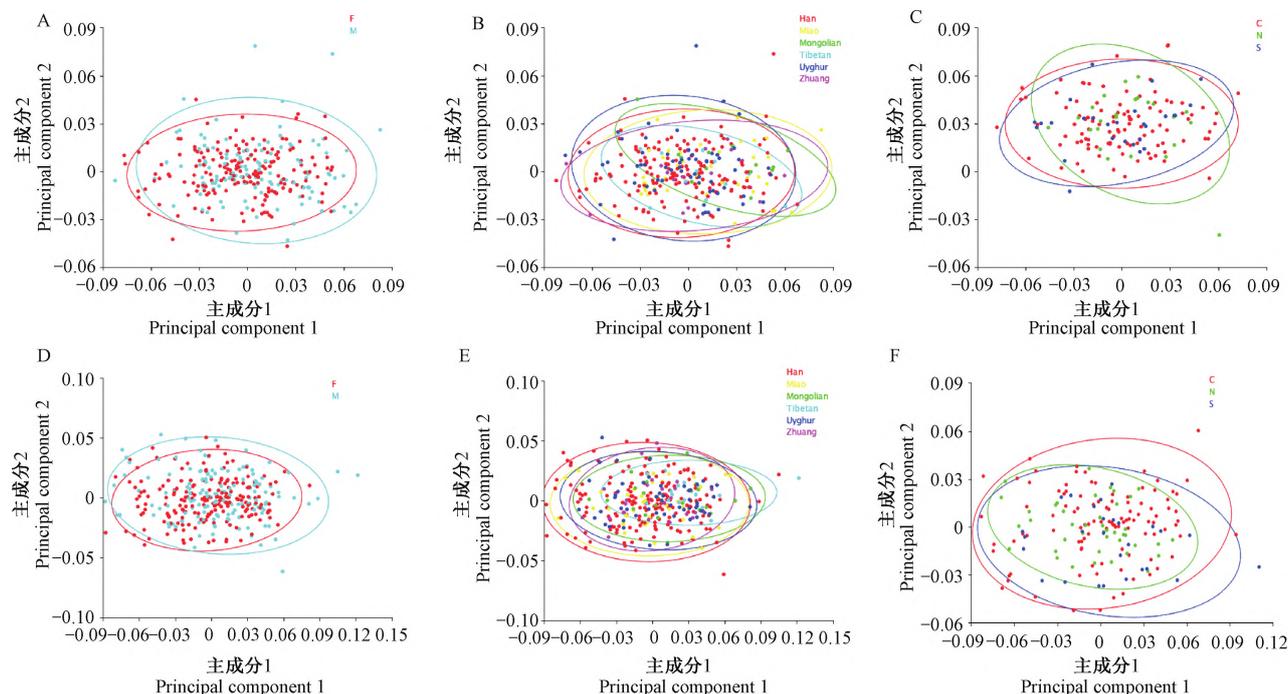
图 2 当代中国人群上、下颌牙齿标记特征点性别、民族、南北中汉族的 CV 及 CVA 结果 (A) 上颌牙齿性别的 CV 结果; (B) 下颌牙齿性别的 CV 结果; (C) 上颌牙齿民族的 CVA 结果; (D) 下颌牙齿民族的 CVA 结果; (E) 上颌牙齿南北中汉族的 CVA 结果; (F) 下颌牙齿南北中汉族的 CVA 结果

F 表示女性, M 表示男性; Han 表示汉族, Miao 表示苗族, Mongolian 表示蒙古族, Tibetan 表示藏族, Uyghur 表示维吾尔族, Zhuang 表示壮族; C 表示中部汉族, N 表示北方汉族, S 表示南方汉族。 F refers to female, M refers to male; Han refers to Han nationality, Miao refers to Miao nationality, Mongolian refers to Mongolian nationality, Tibetan refers to Tibetan nationality, Uyghur refers to Uyghur nationality, Zhuang refers to Zhuang nationality; C refers to central Han Chinese, N refers to northern Han Chinese, S refers to southern Han Chinese.

Figure 2 CV and CVA results for gender, ethnic groups and southern/northern/central Han Chinese of the landmarks of the maxillary and mandibular teeth in contemporary Chinese groups (A) The CV result of gender of the maxillary teeth; (B) The CV result of gender of the mandibular teeth; (C) The CVA result of ethnic groups of the maxillary teeth; (D) The CVA result of ethnic groups of the mandibular teeth; (E) The CVA result of southern/northern/central Han Chinese of the maxillary teeth; (F) The CVA result of southern/northern/central Han Chinese of the mandibular teeth

对当代中国人群上、下颌牙齿的标记特征点进行 PCA(图 3), 设置 0.95 置信区间。PCA 结果显示出上颌牙齿性别(图 3A)、民族(图 3B)、南北中汉

族(图 3C)和下颌牙齿性别(图 3D)、民族(图 3E)、南北中汉族(图 3F)的差异, 补充验证了 CVA 及 CV 的结果。



F 表示女性, M 表示男性; Han 表示汉族, Miao 表示苗族, Mongolian 表示蒙古族, Tibetan 表示藏族, Uyghur 表示维吾尔族, Zhuang 表示壮族; C 表示中部汉族, N 表示北方汉族, S 表示南方汉族。

F refers to female, M refers to male; Han refers to Han nationality, Miao refers to Miao nationality, Mongolian refers to Mongolian nationality, Tibetan refers to Tibetan nationality, Uyghur refers to Uyghur nationality, Zhuang refers to Zhuang nationality; C refers to central Han Chinese, N refers to northern Han Chinese, S refers to southern Han Chinese.

图3 当代中国人群上、下颌牙齿标记特征点性别、民族、南北中汉族的 PCA 结果

(A) 上颌牙齿性别的 PCA 结果; (B) 上颌牙齿民族的 PCA 结果;
(C) 上颌牙齿南北中汉族的 PCA 结果; (D) 下颌牙齿性别的 PCA 结果;
(E) 下颌牙齿民族的 PCA 结果; (F) 下颌牙齿南北中汉族的 PCA 结果

Figure 3 PCA results for gender, ethnic groups and southern/northern/central Han Chinese of the landmarks of the maxillary and mandibular teeth in contemporary Chinese groups
(A) The PCA result of gender of the maxillary teeth; (B) The PCA result of ethnic groups of the maxillary teeth; (C) The PCA result of southern/northern/central Han Chinese of the maxillary teeth; (D) The PCA result of gender of the mandibular teeth; (E) The PCA result of ethnic groups of the mandibular teeth; (F) The PCA result of southern/northern/central Han Chinese of the mandibular teeth

1.3 当代中国人群牙齿表型与性别、年龄、民族、南北中汉族的差异分析

当代中国人群的牙齿表型指的是当代中国人群牙齿标记特征点间的 ELD, 牙齿可观测特征多样性研究是根据这些表型开展的。使用 Pearson 相关性分析、*t* 检验、方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 计算分析当代中国人群不同性别、年龄、民族和南北中汉族牙齿标记特征点间 ELD 的差异显著性, 并对 *t* 检验和 ANOVA 检验结果进行错误发现率 (false discovery rate, FDR) 多重比较校正, 选取经 FDR 多重比较校正后差异极显著的牙齿表型, 计算这些牙齿表型的牙齿标记特征点间 ELD 的平均值和标准差, 通过直接比较平均值和标准

差的大小, 直观了解群体间牙齿表型的差异及变异范围。

1.3.1 性别与牙齿表型的相关性分析和差异分析

本研究中的男性样本量为 411, 女性样本量为 586, 分别计算男性和女性这 5 个表型的平均值与标准差 (表 1)。上颌和下颌尖牙标记特征点 4-5 的 ELD 在男女中存在极显著差异 ($P < 0.01$), 这段 ELD 代表的是尖牙的宽度, 尖牙宽度表示的是从尖牙舌侧根部中央到尖牙唇侧根部中央的 ELD; 上颌左侧尖牙标记特征点 4-2 的 ELD 在男女中存在极显著差异 ($P < 0.01$), 这段 ELD 代表的是尖牙的高度, 尖牙高度表示的是从尖牙舌侧根部中央到尖牙顶部中央的 ELD。

表1 性别与牙齿表型的相关性及牙齿表型在男性和女性中的差异

Table 1 Correlations between gender and dental phenotypes and differences of dental phenotypes between males and females

牙齿表型 Dental phenotypes	相关系数 Correlation coefficient	男性 Males	女性 Females	P 值 P value
下颌左侧尖牙宽度(特征点 4-5 的 ELD) Width of LLC (ELD between landmarks 4 to 5)	0.421 **	8.5±0.7	7.9±0.6	9.20E-40
下颌右侧尖牙宽度(特征点 4-5 的 ELD) Width of LRC (ELD between landmarks 4 to 5)	0.385 **	8.5±0.8	7.9±0.7	3.15E-34
上颌左侧尖牙高度(特征点 4-2 的 ELD) Height of ULC (ELD between landmarks 4 to 2)	0.316 **	9.1±0.9	8.6±0.8	3.33E-24
上颌左侧尖牙宽度(特征点 4-5 的 ELD) Width of ULC (ELD between landmarks 4 to 5)	0.307 **	8.8±0.7	8.4±0.6	1.40E-21
上颌右侧尖牙宽度(特征点 4-5 的 ELD) Width of URC (ELD between landmarks 4 to 5)	0.343 **	8.9±0.7	8.4±0.6	8.28E-26

注: ** 表示 $P < 0.01$ 。
Note: ** represents $P < 0.01$.

1.3.2 年龄与牙齿表型的相关性分析和差异分析

将样本人群按年龄由小到大的顺序分为 6 段, 即 14~26 岁、27~36 岁、37~46 岁、47~56 岁、57~66 岁、大于 66 岁, 分别计算这 6 段年龄人群的 8 个表型的平均数与标准差, 结果如表 2 所示。上颌和下颌尖牙的高度在 14~26 岁人群和其他年龄人群间存在极显著差异 ($P < 0.01$), 呈现出 14~26 岁人群的尖牙高度矮于其他 5 个年龄段人群的现象; 上颌的第一磨牙标记特征点 6-9 的 ELD 在 14~26 岁人群和其他年龄人群间存在极显著差异 ($P < 0.01$), 这段 ELD 代表的是第一磨牙朝第二磨牙方向的两个牙尖的 ELD, 呈现出 14~26 岁人群矮于其他 5 个年龄段人群的现象; 下颌的第一前磨牙标记特征点 4-1 的 ELD 在 14~26 岁人群、

27~36 岁人群、37~46 岁人群、47~56 岁人群和 57~66 岁人群中存在极显著差异 ($P < 0.01$), 这段 ELD 代表的是第一前磨牙牙尖到中央边缘凹槽的 ELD, 呈现出 14~26 岁人群大于其他 4 个年龄段人群, 27~36 岁人群大于 37~46 岁人群、47~56 岁人群和 57~66 岁人群的现象。综上所述, 牙齿表型的年龄差异主要体现在尖牙侧高、上颌第一磨牙长度、下颌第一前磨牙牙尖到中央边缘凹槽的 ELD 上, 尖牙侧高、上颌第一磨牙长度呈现 14~26 岁人群矮于或小于其他 5 个年龄段人群的现象, 下颌第一前磨牙牙尖到中央边缘凹槽的 ELD 呈现 14~26 岁人群大于其他 4 个年龄段人群, 27~36 岁人群大于 37~46 岁人群、47~56 岁人群和 57~66 岁人群的现象。

表2 年龄与牙齿表型的相关性及牙齿表型在不同年龄段中的差异

Table 2 Correlations between age and dental phenotypes and differences of dental phenotypes among different ages

牙齿表型 Dental phenotypes	相关系数 Correlation coefficient	14~26 岁 14~26 years old (n=223)	27~36 岁 27~36 years old (n=169)	37~46 岁 37~46 years old (n=292)	47~56 岁 47~56 years old (n=205)	57~66 岁 57~66 years old (n=97)	大于 66 岁 66 years old above (n=11)	P 值 P value
下颌左侧尖牙侧高(特征点 3-4 的 ELD) Lateral height of LLC (ELD between landmarks 3 to 4)	0.302 **	8.7 ± 0.9aa, bb, cc, dd, ee	9.2±0.9hh	9.4±0.9	9.5±1.0	9.5±1.1	9.8±0.7	6.80E-20
下颌右侧尖牙侧高(特征点 3-4 的 ELD) Lateral height of LRC (ELD between landmarks 3 to 4)	0.327 **	8.6 ± 0.9aa, bb, cc, dd, ee	9.1±1.0hh	9.4±1.0	9.4±1.0	9.7±1.2	9.3±0.6	8.60E-24
上颌左侧尖牙侧高(特征点 5-3 的 ELD) Lateral height of ULC (ELD between landmarks 5 to 3)	0.340 **	8.2 ± 1.1aa, bb, cc, dd, ee	8.9±1.2hh	9.2±1.0	9.1±1.1	9.5±1.1	9.4±1.1	2.92E-26

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	相关系数 Correlation coefficient	14~26岁 14~26 years old (n=223)	27~36岁 27~36 years old (n=169)	37~46岁 37~46 years old (n=292)	47~56岁 47~56 years old (n=205)	57~66岁 57~66 years old (n=97)	大于66岁 66 years old above (n=11)	P值 P value
上颌左侧第一磨牙特征点6-9的ELD ELD between landmarks 6 to 9 of ULM1	0.309**	6.2 ± 0.6aa, bb, cc, dd, ee	6.6±0.6	6.6±0.6	6.7±0.7	6.8±0.6	7.1±0.6	1.17E-19
上颌右侧尖牙侧高(特征点5-3的ELD) Lateral height of URC (ELD between landmarks 5 to 3)	0.340**	8.2 ± 1.1aa, bb, cc, dd, ee	8.9±1.0hh	9.1±1.1	9.2±1.2	9.5±1.3	9.5±1.0	1.06E-23
上颌右侧第一磨牙特征点6-9的ELD ELD between landmarks 6 to 9 of URM1	0.308**	6.2 ± 0.5aa, bb, cc, dd, ee	6.6±0.6	6.5±0.5	6.6±0.6	6.7±0.6	6.9±0.7	2.39E-21
下颌左侧第一前磨牙特征点4-1的ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LLP1	-0.321**	3.4 ± 0.5aa, bb, cc, dd	3.1±0.5ff, gg, hh	3.0±0.5	2.9±0.6	3.0±0.5	3.0±0.4	5.68E-24
下颌右侧第一前磨牙特征点4-1的ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LRP1	-0.325**	3.3 ± 0.5aa, bb, cc, dd	3.0±0.5ff, gg, hh	2.9±0.5	2.8±0.5	2.8±0.5	2.9±0.5	3.80E-25

注: **表示 $P < 0.01$; aa表示14~26岁人群与27~36岁人群之间的牙齿表型差异极显著; bb表示14~26岁人群与37~46岁人群之间的牙齿表型差异极显著; cc表示14~26岁人群与47~56岁人群之间的牙齿表型差异极显著; dd表示14~26岁人群与57~66岁人群之间的牙齿表型差异极显著; ee表示14~26岁人群与大于66岁人群之间的牙齿表型差异极显著; ff表示27~36岁人群与37~46岁人群之间的牙齿表型差异极显著; gg表示27~36岁人群与47~56岁人群之间的牙齿表型差异极显著; hh表示27~36岁人群与57~66岁人群之间的牙齿表型差异极显著。

Note: ** represents $P < 0.01$; aa indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 14~26 years old group and 27~36 years old group; bb indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 14~26 years old group and 37~46 years old group; cc indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 14~26 years old group and 47~56 years old group; dd indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 14~26 years old group and 57~66 years old group; ee indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 14~26 years old group and over 66 years old group; ff indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 27~36 years old group and 37~46 years old group; gg indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 27~36 years old group and 47~56 years old group; hh indicates that there is a significant difference in dental phenotype between 27~36 years old group and 57~66 years old group.

1.3.3 各民族牙齿表型的差异分析

15个民族配对呈极显著差异的牙齿表型、各牙齿表型ELD的平均值与标准差、民族间牙齿表型ELD平均值的差异及其显著关系如表3所示。人类牙齿可分为3类:磨牙、前磨牙、切牙。本研究中,维吾尔族和藏族群体的年龄构成较为相似,汉族、苗族、壮族、蒙古族群体的年龄构成较为相似,为控制年龄因素的影响,只对相似年龄构成的群体间差异进行比较。不同民族间牙齿表型存在较大差异,在本分析所涉及的牙齿表型中,苗族的上颌中段牙弓的ELD大于蒙古族的;苗族的上颌后端牙弓的ELD大于汉族和壮族的;汉族和苗族的上颌全牙弓的ELD大于壮族和蒙

古族的。汉族的下颌前段牙弓的ELD大于蒙古族的,壮族的大于苗族和蒙古族的;苗族的下颌中段牙弓的ELD大于汉族、蒙古族的,藏族的大于维吾尔族的;苗族的下颌后段牙弓的ELD大于汉族和壮族的,蒙古族的大于壮族的。切牙高度基本呈现汉族、壮族和苗族的大于蒙古族的,汉族的大于壮族、苗族的趋势。汉族的上颌前磨牙牙尖到中央凹陷的ELD大于苗族的;汉族和苗族的下颌前磨牙长度大于壮族的,蒙古族的大于壮族和苗族的,维吾尔族的大于藏族的。维吾尔族的下颌第一磨牙宽度和上颌第二磨牙长度大于藏族的,苗族的上颌磨牙宽度大于壮族的。

表3 牙齿表型在不同民族中的差异

Table 3 Differences of dental phenotypes among ethnic groups

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (n=529)	苗族 Miao nationality (n=136)	壮族 Zhuang nationality (n=108)	蒙古族 Mongolian nationality (n=104)	维吾尔族 Uyghur nationality (n=96)	藏族 Tibetan nationality (n=35)	差异绝对值 Absolute value of difference
下颌中段牙弓的 ELD ELD of lower middle dental arch	15.3±1.7	15.9±1.3	15.4±1.4	15.2±1.6	14.6±1.5	15.7±1.3	0.656aa, 0.767gg, 1.343hh, 0.849kk, 1.146oo
上颌左侧中切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULCI	9.7±1.1	9.1±1.2	9.1±1.1	/	/	/	0.572aa, 0.589bb
上颌左侧侧切牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of ULLI	8.8±1.1	8.4±1.0	8.5±1.0	8.6±1.0	8.1±1.0	7.6±0.8	0.473aa, 0.763dd, 1.263ee, 0.791ii, 0.885ll, 1.051nn
上颌左侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULLI	8.7±1.2	8.2±1.1	8.2±1.1	8.3±1.0	7.9±1.0	7.4±0.7	0.468aa, 0.425bb, 0.757dd, 1.290ee, 0.822ii, 0.865ll, 0.956nn
上颌左侧中切牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of ULCI	10.1±1.0	9.7±1.0	9.6±1.0	/	/	/	0.430aa, 0.533bb
上颌右侧尖牙特征点 5- 3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of URC	9.2±1.2	8.7±1.0	9.0±1.0	9.1±1.1	8.1±0.9	7.8±0.9	0.426aa, 1.085dd, 1.414ee, 0.989ii, 0.919kk, 1.249ll, 1.035mm, 1.364nn
下颌前段牙弓的 ELD ELD of lower anterior dental arch	4.3±1.5	3.9±1.4	4.6±1.6	3.8±1.4	/	4.7±1.2	0.522cc, 0.708ff, 0.794ii, 0.815jj
上颌右侧中切牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of URCI	10.0±1.0	9.6±1.0	/	/	/	/	0.414aa
上颌左侧尖牙特征点 5- 3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of ULC	9.2±1.1	8.8±1.1	8.7±1.0	8.9±1.1	7.9±1.0	8.0±1.1	0.407aa, 0.478bb, 1.330dd, 1.232ee, 0.923hh, 0.825ii, 0.851kk, 0.753ll, 1.022mm, 0.924nn
上颌左侧侧切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of ULLI	8.4±1.1	8.0±1.0	8.0±1.0	/	7.7±1.0	7.3±0.7	0.400aa, 0.433bb, 0.724dd, 1.145ee
上颌右侧侧切牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of URLI	8.7±1.1	8.3±1.0	8.4±1.0	8.8±0.9	8.0±0.9	7.7±0.6	0.400aa, 0.986ee, 0.563gg, 0.769ll, 0.802mm, 1.149nn
上颌右侧尖牙特征点 2- 5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of URC	9.4±1.3	9.0±1.1	/	/	8.5±0.9	8.3±1.0	0.389aa, 0.851dd, 1.068ee
上颌左侧中切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of ULCI	9.9±1.0	/	9.4±0.9	/	/	/	0.446bb

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (n=529)	苗族 Miao nationality (n=136)	壮族 Zhuang nationality (n=108)	蒙古族 Mongolian nationality (n=104)	维吾尔族 Uyghur nationality (n=96)	藏族 Tibetan nationality (n=35)	差异绝对值 Absolute value of difference
上颌左侧第一前磨牙特征点 6-1 的 ELD ELD between landmarks 6 to 1 of ULP1	4.1±0.6	3.8±0.5	/	/	/	/	0.370aa
下颌左侧尖牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of LLC	9.6±1.1	9.3±1.0	/	/	/	/	0.344aa
上颌右侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of URLI	8.5±1.1	8.1±1.0	8.2±1.0	8.5±1	7.8±0.9	7.4±0.7	0.340aa, 1.071ee, 0.825ll, 0.703mm, 1.139nn
上颌右侧侧切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of URLI	8.2±1.0	7.9±1.0	/	8.3±0.9	7.6±0.9	7.2±0.7	0.339aa, 0.972ee, 0.732mm, 1.093nn
上颌全牙弓的 ELD ELD of upper total dental arch	43.7±2.8	43.7±3.0	42.4±2.3	42.1±2.6	42.6±2.8	/	1.237bb, 1.603cc, 1.063dd, 1.300ff, 1.666gg
下颌后段牙弓的 ELD ELD of lower posterior dental arch	18.8±1.3	19.0±1.4	17.9±1.8	19.1±1.6	19.3±1.2	/	0.894bb, 1.081ff, 1.220jj, 1.411kk
上颌后段牙弓的 ELD ELD of upper posterior dental arch	19.2±1.0	19.2±1.1	18.5±1.1	/	/	/	0.712bb, 0.663ff
上颌左侧尖牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULC	9.4±1.2	/	8.7±1.1	/	8.5±1.2	8.4±1.1	0.679bb, 0.886dd, 0.935ee
下颌左侧第一前磨牙特征点 2-3 的 ELD ELD between landmarks 2 to 3 of LLP1	3.2±0.7	3.1±0.6	2.6±0.5	3.5±0.6	3.8±0.6	3.0±0.6	0.566bb, 0.447ff, 0.492gg, 0.781hh, 0.939jj, 1.228kk, 0.849oo
下颌右侧第一前磨牙特征点 2-3 的 ELD ELD between landmarks 2 to 3 of LRP1	3.1±0.7	3.1±0.7	2.6±0.6	3.3±0.5	3.6±0.5	2.7±0.5	0.547bb, 0.564ff, 0.775jj, 1.063kk, 0.893oo
上颌左侧尖牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of ULC	9.1±1.1	/	8.7±0.9	/	8.3±0.9	8.1±0.9	0.475bb, 0.876dd, 1.060ee
下颌右侧第二前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LRP2	4.3±0.7	4.2±0.6	3.8±0.6	4.7±0.6	/	/	0.472bb, 0.382ff, 0.827jj
下颌右侧第二前磨牙特征点 2-3 的 ELD ELD between landmarks 2 to 3 of LRP2	3.3±0.6	3.1±0.5	2.8±0.5	3.6±0.5	3.7±0.5	2.9±0.5	0.431bb, 0.507gg, 0.735jj, 0.893kk, 0.872oo

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (<i>n</i> =529)	苗族 Miao nationality (<i>n</i> =136)	壮族 Zhuang nationality (<i>n</i> =108)	蒙古族 Mongolian nationality (<i>n</i> =104)	维吾尔族 Uyghur nationality (<i>n</i> =96)	藏族 Tibetan nationality (<i>n</i> =35)	差异绝对值 Absolute value of difference
下颌右侧尖牙特征点 3-4 的 ELD ELD between landmarks 3 to 4 of LRC	9.4±1.1	9.2±1.0	9.3±1.0	8.8±0.9	8.5±0.8	8.3±0.7	0.639cc, 0.909dd, 1.103ee, 0.720hh, 0.914ii, 0.572jj, 0.842kk, 1.036ll
下颌左侧尖牙特征点 3-4 的 ELD ELD between landmarks 3 to 4 of LLC	9.4±1.0	9.3±0.9	9.5±1.0	8.8±0.8	8.6±1.0	8.4±0.6	0.589cc, 0.846dd, 1.013ee, 0.539gg, 0.796hh, 0.963ii, 0.667jj, 0.924kk, 1.091ll
下颌右侧中切牙特征点 4-2 的 ELD ELD between landmarks 4 to 2 of LRCI	8.8±1.0	8.8±1.0	8.8±1.0	8.2±1.1	/	/	0.575cc, 0.576gg, 0.598jj
下颌左侧中切牙特征点 4-2 的 ELD ELD between landmarks 4 to 2 of LLCI	8.7±1.1	8.8±1.1	8.9±1.0	8.2±1.1	/	/	0.547cc, 0.563gg, 0.674jj
下颌右侧中切牙特征点 3-4 的 ELD ELD between landmarks 3 to 4 of LRCI	8.9±1.0	8.8±1.0	8.9±1.0	8.3±1.0	/	/	0.528cc, 0.483gg, 0.601jj
下颌右侧尖牙特征点 4-2 的 ELD ELD between landmarks 4 to 2 of LRC	9.3±1.2	9.3±1.1	/	8.8±0.9	/	/	0.511cc, 0.512gg
下颌右侧侧切牙特征点 4-2 的 ELD ELD between landmarks 4 to 2 of LRLI	9.2±1.0	9.2±0.8	/	8.7±0.9	/	/	0.492cc, 0.488gg
上颌右侧第一前磨牙特征点 1-2 的 ELD ELD between landmarks 1 to 2 of URP1	4.7±0.5	/	/	4.2±0.5	/	/	0.487cc
下颌右侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LRLI	8.5±1.1	/	/	8.1±1.0	/	/	0.486cc
下颌左侧中切牙特征点 4-1 的 ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LLCI	8.8±1.0	/	8.9±1.0	8.3±1.0	/	/	0.486cc, 0.588jj
下颌右侧中切牙特征点 4-1 的 ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LRCI	8.9±1.0	8.9±1.0	/	8.4±1.0	/	/	0.482cc, 0.506gg
下颌左侧尖牙特征点 4-2 的 ELD ELD between landmarks 4 to 2 of LLC	9.2±1.0	9.3±1.0	/	8.7±0.9	/	/	0.480cc, 0.594gg

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (n=529)	苗族 Miao nationality (n=136)	壮族 Zhuang nationality (n=108)	蒙古族 Mongolian nationality (n=104)	维吾尔族 Uyghur nationality (n=96)	藏族 Tibetan nationality (n=35)	差异绝对值 Absolute value of difference
下颌右侧第一磨牙特征点 5-10 的 ELD ELD between landmarks 5 to 10 of LRM1	5.5±0.7	5.8±0.6	5.6±0.7	5.7±0.6	4.6±0.5	/	0.915dd, 1.174hh, 1.021kk, 1.093mm
上颌右侧尖牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of URC	9.1±1.1	8.8±1.0	8.9±1.0	9.1±0.9	8.2±0.8	7.9±0.7	0.899dd, 1.220ee, 0.958ii, 1.033ll, 0.889mm, 1.211nn
上颌右侧第一磨牙特征点 1-3 的 ELD ELD between landmarks 1 to 3 of URM1	7.0±0.5	7.0±0.6	7.1±0.5	7.0±0.6	6.2±0.5	/	0.748dd, 0.773hh, 0.895kk, 0.842mm
上颌右侧第一前磨牙特征点 1-3 的 ELD ELD between landmarks 1 to 3 of URPI	5.9±0.5	/	6.0±0.6	5.8±0.5	5.1±0.5	/	0.720dd, 0.816kk, 0.703mm
下颌右侧尖牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of LRC	9.4±1.1	9.3±1.1	9.3±1.1	/	/	8.4±0.9	1.000ee, 0.866ii, 0.907ll
下颌右侧第一前磨牙特征点 2-6 的 ELD ELD between landmarks 2 to 6 of LRP1	/	5.5±0.4	5.1±0.6	/	/	/	0.447ff
下颌左侧第一前磨牙特征点 2-6 的 ELD ELD between landmarks 2 to 6 of LLP1	/	5.6±0.5	5.1±0.4	/	/	/	0.444ff
上颌左侧第一磨牙特征点 2-8 的 ELD ELD between landmarks 2 to 8 of ULM1	/	8.4±0.6	8.0±0.6	/	/	/	0.439ff
下颌左侧第二前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LLP2	/	4.4±0.6	4.0±0.7	4.7±0.6	4.7±0.6	3.7±0.5	0.419ff, 0.781ii, 0.636jj, 0.997nn, 1.079oo
上颌左侧第二磨牙特征点 2-8 的 ELD ELD between landmarks 2 to 8 of ULM2	/	7.5±0.7	7.1±0.7	/	/	/	0.410ff
下颌左侧第一前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LLP1	/	3.8±0.5	3.4±0.5	/	3.9±0.5	3.0±0.5	0.362ff, 0.858oo
下颌左侧第二前磨牙特征点 6-1 的 ELD ELD between landmarks 6 to 1 of LLP2	/	3.7±0.5	4.0±0.6	3.4±0.5	3.2±0.4	4.2±0.4	0.358ff, 0.613jj, 0.833kk, 1.001oo

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (n=529)	苗族 Miao nationality (n=136)	壮族 Zhuang nationality (n=108)	蒙古族 Mongolian nationality (n=104)	维吾尔族 Uyghur nationality (n=96)	藏族 Tibetan nationality (n=35)	差异绝对值 Absolute value of difference
上颌右侧第一磨牙特征点 2-8 的 ELD ELD between landmarks 2 to 8 of URM1	/	8.3±0.7	8.0±0.7	/	/	/	0.354ff
上颌中段牙弓的 ELD ELD of upper middle dental arch	/	17.3±1.2	/	16.7±1.1	/	/	0.585gg
下颌左侧第一前磨牙特征点 1-2 的 ELD ELD between landmarks 1 to 2 of LLP1	/	3.4±0.5	/	2.9±0.5	3.0±0.4	4.0±0.4	0.523gg, 1.101nn, 0.938oo
上颌左侧第一磨牙特征点 6-9 的 ELD ELD between landmarks 6 to 9 of ULM1	/	6.7±0.6	/	/	5.9±0.5	/	0.798hh
下颌右侧第一前磨牙特征点 4-1 的 ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LRP1	/	2.7±0.5	/	/	3.5±0.5	3.5±0.5	0.777hh, 0.827ii
下颌右侧第一磨牙特征点 5-6 的 ELD ELD between landmarks 5 to 6 of LRM1	/	6.4±0.5	/	/	5.6±0.4	/	0.740hh
下颌左侧第一磨牙特征点 5-9 的 ELD ELD between landmarks 5 to 9 of LLM1	/	5.3±0.6	/	/	4.6±0.4	/	0.734hh
上颌左侧第二磨牙特征点 6-3 的 ELD ELD between landmarks 6 to 3 of ULM2	/	6.8±0.6	6.9±0.7	7.0±0.7	6.1±0.7	6.1±0.7	0.732hh, 0.873kk, 0.854ll, 0.916mm
上颌右侧第二磨牙特征点 1-3 的 ELD ELD between landmarks 1 to 3 of URM2	/	6.9±0.6	/	/	6.2±0.6	/	0.731hh
上颌左侧第一磨牙特征点 1-3 的 ELD ELD between landmarks 1 to 3 of ULM1	/	7.0±0.5	/	7.1±0.6	6.3±0.5	/	0.725hh, 0.782mm
下颌右侧第一磨牙特征点 3-10 的 ELD ELD between landmarks 3 to 10 of LRM1	/	8.8±0.6	8.7±0.6	8.8±0.6	8.1±0.6	7.8±0.8	0.712hh, 0.999ii, 0.934ll, 0.754mm, 1.041nn
下颌右侧第一前磨牙特征点 6-1 的 ELD ELD between landmarks 6 to 1 of LRP1	/	3.7±0.6	/	3.4±0.5	3.3±0.5	4.6±0.5	0.932ii, 1.185nn, 1.358oo
下颌右侧第一磨牙特征点 3-5 的 ELD ELD between landmarks 3 to 5 of LRM1	/	5.3±0.6	5.2±0.6	5.4±0.5	5.4±0.5	4.5±0.9	0.888ii, 0.782ll, 0.982nn, 0.933oo

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	汉族 Han nationality (n=529)	苗族 Miao nationality (n=136)	壮族 Zhuang nationality (n=108)	蒙古族 Mongolian nationality (n=104)	维吾尔族 Uyghur nationality (n=96)	藏族 Tibetan nationality (n=35)	差异绝对值 Absolute value of difference
上颌左侧第二磨牙特征点 3-8 的 ELD ELD between landmarks 3 to 8 of ULM2	/	5.8±0.6	/	/	5.8±0.6	5.0±0.7	0.866ii, 0.805oo
下颌左侧尖牙特征点 4-1 的 ELD ELD between landmarks 4 to 1 of LLC	/	/	8.4±1.0	7.8±0.8	/	/	0.591jj
上颌左侧第二磨牙特征点 1-3 的 ELD ELD between landmarks 1 to 3 of ULM2	/	/	7.1±0.7	6.8±0.5	6.1±0.6	/	0.977kk, 0.712mm
下颌右侧尖牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of LRC	/	/	9.0±1.0	/	/	8.2±0.8	0.812ll
上颌右侧第二磨牙特征点 6-3 的 ELD ELD between landmarks 6 to 3 of URM2	/	/	6.8±0.6	6.9±0.6	6.1±0.7	6.0±0.5	0.757ll, 0.824mm
上颌左侧第二磨牙特征点 7-3 的 ELD ELD between landmarks 7 to 3 of ULM2	/	/	/	6.9±0.5	6.2±0.6	/	0.706mm
上颌右侧第二磨牙特征点 3-8 的 ELD ELD between landmarks 3 to 8 of URM2	/	/	/	5.8±0.6	/	4.8±0.7	0.986nn
下颌右侧第一前磨牙特征点 1-2 的 ELD ELD between landmarks 1 to 2 of LRP1	/	/	/	2.9±0.5	/	3.8±0.3	0.948nn
下颌左侧第一前磨牙特征点 6-1 的 ELD ELD between landmarks 6 to 1 of LLP1	/	/	/	/	3.3±0.5	4.5±0.4	1.173oo
下颌右侧第二前磨牙特征点 1-2 的 ELD ELD between landmarks 1 to 2 of LRP2	/	/	/	/	2.7±0.4	3.7±0.4	0.971oo
上颌右侧第一前磨牙特征点 3-4 的 ELD ELD between landmarks 3 to 4 of URP1	/	/	/	/	4.5±0.5	3.7±0.4	0.830oo
上颌左侧第二前磨牙特征点 4-1 的 ELD ELD between landmarks 4 to 1 of ULP2	/	/	/	/	4.0±0.4	4.9±0.4	0.814oo

注: aa~ee 分别表示汉族与苗族、壮族、蒙古族、维吾尔族、藏族之间的牙齿表型差异极显著; ff~ii 分别表示苗族与壮族、蒙古族、维吾尔族、藏族之间的牙齿表型差异极显著; jj~ll 分别表示壮族与蒙古族、维吾尔族、藏族之间的牙齿表型差异极显著; mm 和 nn 分别表示蒙古族与维吾尔族、藏族之间的牙齿表型差异极显著; oo 表示维吾尔族与藏族之间的牙齿表型差异极显著; / 表示该人群相关牙齿表型与其他人群均无显著差异。

Note; aa~ee indicate that there is a significant difference in dental phenotype between Han nationality and Miao nationality, Zhuang nationality, Mongolian nationality, Uyghur nationality, Tibetan nationality; ff~ii indicate that there is a significant difference in dental phenotype between Miao nationality and Zhuang nationality, Mongolian nationality, Uyghur nationality, Tibetan nationality; jj~ll indicate that there is a significant difference in dental phenotype between Zhuang nationality and Mongolian nationality, Uyghur nationality, Tibetan nationality; mm and nn indicate that there is a significant difference in dental phenotype between Mongolian nationality and Uyghur nationality, Mongolian nationality and Tibetan nationality; oo indicates that there is a significant difference in dental phenotype between Uyghur nationality and Tibetan nationality; / indicates that there is no significant difference in dental phenotype between this population and other populations.

1.3.4 南北中汉族牙齿表型的差异分析

3个汉族亚群配对呈极显著差异的牙齿表型、各牙齿表型 ELD 的平均值与标准差、汉族亚群间牙齿表型 ELD 平均值的差异及其显著关系如表 4 所示。南北中汉族间牙齿表型存在较大差异，对于切

牙高度，中部汉族>北方汉族>南方汉族；对于牙弓的 ELD，北方汉族>中部汉族>南方汉族；对于下颌前磨牙的长度和宽度，北方汉族>中部汉族>南方汉族；对于下颌磨牙宽度和上颌磨牙长度，北方汉族>中部汉族。

表 4 牙齿表型在南北中汉族中的差异
Table 4 Differences of dental phenotypes among southern/northern/central Han Chinese

牙齿表型 Dental phenotypes	南方汉族 Southern Han Chinese (n=96)	北方汉族 Northern Han Chinese (n=103)	中部汉族 Central Han Chinese (n=329)	差异绝对值 Absolute value of difference
下颌全牙弓的 ELD ELD of lower total dental arch	37.9±2.1	39.2±2.6	37.9±2.9	1.274** 1.289 ^{ss}
下颌后段牙弓的 ELD ELD of lower posterior dental arch	18.2±1.1	19.4±1.2	18.8±1.3	1.268** 0.677 ^{ss}
下颌左侧第一前磨牙特征点 2-3 的 ELD ELD between landmarks 2 to 3 of LLP1	2.6±0.4	3.5±0.6	/	0.893**
下颌右侧第一前磨牙特征点 2-3 的 ELD ELD between landmarks 2 to 3 of LRP1	2.6±0.6	3.5±0.6	/	0.870**
上颌右侧中切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of URCI	8.8±1.3	9.6±1.0	9.8±1.0	0.867** 1.008 ^{##}
下颌左侧尖牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LLC	8.7±1.1	9.6±1.2	/	0.850**
上颌右侧中切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of URCI	9.0±1.1	9.8±0.9	9.9±0.9	0.795** 0.875 ^{##}
上颌右侧中切牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of URCI	9.3±1.1	10.1±0.9	10.1±0.9	0.782** 0.843 ^{##}
下颌右侧第一前磨牙特征点 6-1 的 ELD ELD between landmarks 6 to 1 of LRP1	4.4±0.6	3.6±0.6	/	0.732**
下颌右侧第一前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LRP1	3.3±0.4	4.0±0.5	/	0.720**
下颌左侧第二前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LLP2	3.9±0.5	4.6±0.6	/	0.689**
下颌右侧第二前磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of LRP2	3.9±0.5	4.6±0.6	/	0.681**
下颌右侧尖牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LRC	8.7±1.3	9.4±1.1	/	0.675**
下颌右侧尖牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of LRC	8.4±1.1	9.1±0.9	9.2±1.0	0.673** 0.805 ^{##}
下颌右侧第一前磨牙特征点 2-6 的 ELD ELD between landmarks 2 to 6 of LRP1	5.0±0.5	5.7±0.4	5.3±0.5	0.671** 0.378 ^{ss}
上颌左侧中切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULCI	9.0±1.2	/	9.9±1.0	0.895 ^{##}

续表
Continuing table

牙齿表型 Dental phenotypes	南方汉族 Southern Han Chinese (n=96)	北方汉族 Northern Han Chinese (n=103)	中部汉族 Central Han Chinese (n=329)	差异绝对值 Absolute value of difference
上颌左侧中切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of ULCI	9.2±1.1	/	10.1±0.9	0.820 ^{##}
下颌右侧尖牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of LRC	8.8±1.1	/	9.6±1.1	0.819 ^{##}
下颌右侧中切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LRCI	7.5±1.0	/	8.3±1.0	0.799 ^{##}
下颌左侧中切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of LLCI	7.7±0.9	/	8.5±1.0	0.796 ^{##}
下颌右侧中切牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of LRCI	7.8±1.0	/	8.6±1.0	0.794 ^{##}
下颌左侧中切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LLCI	7.4±1.0	/	8.2±1.1	0.793 ^{##}
下颌右侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LRLI	8.0±1.0	/	8.7±1.1	0.767 ^{##}
上颌右侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of URLI	7.9±1.1	8.3±1.1	8.7±1.1	0.761 ^{##} 0.379 ^{\$\$}
下颌左侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of LLLI	7.8±1.0	/	8.6±1.0	0.751 ^{##}
上颌前段牙弓的 ELD ELD of upper anterior dental arch	7.2±1.8	/	7.9±1.8	0.745 ^{##}
上颌左侧尖牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of ULC	/	8.9±1.1	9.4±1.1	0.561 ^{\$\$}
上颌左侧尖牙特征点 5-1 的 ELD ELD between landmarks 5 to 1 of ULC	/	8.8±1.0	9.3±1.0	0.494 ^{\$\$}
上颌左侧尖牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULC	/	9.1±1.2	9.6±1.1	0.472 ^{\$\$}
下颌右侧尖牙特征点 3-4 的 ELD ELD between landmarks 3 to 4 of LRC	/	9.1±1.0	9.5±1.1	0.439 ^{\$\$}
上颌右侧尖牙特征点 5-3 的 ELD ELD between landmarks 5 to 3 of URC	/	8.9±1.1	9.4±1.2	0.438 ^{\$\$}
下颌左侧第二磨牙特征点 3-5 的 ELD ELD between landmarks 3 to 5 of LLM2	/	5.3±0.5	4.9±0.6	0.416 ^{\$\$}
上颌左侧侧切牙特征点 2-5 的 ELD ELD between landmarks 2 to 5 of ULLI	/	8.4±1.1	8.8±1.2	0.412 ^{\$\$}
下颌右侧第一磨牙特征点 3-5 的 ELD ELD between landmarks 3 to 5 of LRM1	/	5.5±0.5	5.1±0.6	0.404 ^{\$\$}
下颌中段牙弓的 ELD ELD of lower middle dental arch	/	15.5±1.6	15.1±1.6	0.393 ^{\$\$}
上颌左侧第二磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of ULP2	/	3.8±0.4	3.5±0.4	0.378 ^{\$\$}
上颌左侧第一磨牙特征点 3-6 的 ELD ELD between landmarks 3 to 6 of ULP1	/	4.0±0.4	3.6±0.4	0.358 ^{\$\$}

注: ** 表示南方汉族与北方汉族之间的牙齿表型差异极显著; ##表示南方汉族与中部汉族之间的牙齿表型差异极显著; \$\$ 表示北方汉族与中部汉族之间的牙齿表型差异极显著; /表示该人群相关牙齿表型与其他人群均无显著差异。

Note: ** indicates that there is a significant difference in dental phenotype between southern Han and northern Han was less than 0.01; ## indicates that there is a significant difference in dental phenotype between southern Han and central Han is less than 0.01; \$\$ indicates that there is a significant difference in dental phenotype between northern Han and central Han was less than 0.01; / indicates that there is no significant difference in dental phenotype between this population and other populations.

2 讨论与结论

本研究使用 MorphoJ 1.07a (Woon et al., 2019) 完成了对 3D 牙齿模型标记特征点的主成分分析、典型变量分析和交叉验证, 使用 RStudio 2022.07.1+554 “Spotted Wakerobin”、Excel 16.71 (23031200) 完成了对牙齿表型的 Pearson 相关性分析和差异分析。研究使用 3D 牙齿模型标记特征点间的 ELD 表示牙齿的边缘轮廓、牙齿宽度、牙齿长度、牙齿高度以及牙弓长度等牙齿表型, 定义牙齿宽度为与牙齿唇侧舌侧连线相垂直的 ELD, 牙齿长度为与牙齿唇侧舌侧连线相平行的 ELD, 牙齿高度为牙冠到牙根的 ELD。

因当代中国人群牙齿表型队列样本量较大、样本的民族组成情况复杂、样本采集时间及采集地点跨度大, 本研究提取的 13 个与性别、年龄相关性较高的牙齿表型的 Pearson 相关系数较小, 这提示牙齿表型背后可能存在复杂的影响因素, 证明了本研究对于挖掘影响当代中国人群牙齿可观测特征的复杂因素、厘清牙齿可观测特征和各种影响因素之间的关系具有独特意义和特殊价值。

本研究样本采集范围覆盖中国南北方和东西部共 8 个行政区域, 包括汉族、苗族、壮族、维吾尔族、藏族、蒙古族等 6 个民族, 其中汉族涵盖了南北中汉族, 南北中汉族在遗传上的差异已被证明 (Xu et al., 2009; Yang et al., 2021)。由于牙齿可观测特征具有高度的遗传性且在牙齿发育后不会发生变化 (牙齿磨损或龋齿除外), 牙齿的可观测特征能够在一定程度上体现个体及群体间的遗传差异。

2.1 性别差异

本研究结果显示, 男性尖牙的宽度和高度均大于女性的, 说明性别差异能够在特定牙齿表型特征上得到体现。

2.2 年龄因素对牙齿可观测特征的影响

根据样本的年龄分布, 为方便统计, 将所有样本分为 6 个年龄段。尖牙侧高、上颌第一磨牙长度呈现 14~26 岁人群的尖牙高度矮于其他 5 个年龄段人群的现象, 说明中国人群的尖牙和上颌第一磨牙随着年龄增大而发生的牙齿生长或牙齿磨损程度增加; 下颌第一前磨牙尖到中央边缘凹槽的 ELD 呈现 14~26 岁人群大于其他 4 个年龄段人群, 27~36 岁人群大于 37~46 岁人群、47~56 岁人群和 57~66 岁人群的现象, 主要表明的是中国人群发生在前磨

牙上的牙齿磨损情况。

以上的牙齿表型变化表明遗传外的因素影响牙齿可观测特征。

2.3 蒙古族的牙齿表型特征

Qin 等 (2015) 将中国的傣族人群和法国人作为研究中欧混合人群祖先的替代人群, 分析研究了当代部分混合人群的遗传组成及混合事件的发生时间, 他们发现蒙古族大约有 10% 的欧洲血统, 其基因流中来自东亚人的遗传占比约为 89.1%, 蒙古族混合事件发生时间约在距今 954 年前, 与蒙古帝国的扩张时间一致。

在本研究中, 根据样本的年龄分布, 维吾尔族和藏族年龄构成相似, 汉族、苗族、壮族和蒙古族年龄构成相似, 因此两组分开比较其牙齿表型特征。因地理分布特点和历史发展过程蒙古族相比低海拔民族 (汉族、壮族、苗族) 具有较多的欧洲血统, 其牙齿可观测特征也不同于这 3 个低海拔民族, 表明牙齿可观测特征能够作为区分蒙古族和其他族群的特征依据。

本研究的差异分析结果能够清楚地显示民族间的主要差异。

2.4 低海拔民族: 汉族、苗族、壮族的牙齿表型特征

Wang 等 (2018) 的研究发现, 汉族、苗族、壮族等分布于低海拔地区的民族相比于高海拔民族藏族等在进化上具有更大同源性。Qin 等 (2015) 的研究也发现, 中国北方人群相比中国南方人群拥有更多欧洲血统, 这一遗传差异导致了南方如苗族、壮族等民族与南方汉族在遗传上更相似, 北方如蒙古族等民族与北方汉族在遗传上更相似。

本研究的典型变量分析及差异分析结果可以显示汉族、苗族、壮族的牙齿可观测特征差异性。

2.5 高原民族 (藏族) 和中欧混合人群 (维吾尔族) 的牙齿表型特征

中国维吾尔族大约有 52.4% 的欧洲血统, 其基因流中来自东亚人的遗传占比约为 47.6%, 其可追溯的最早的祖先为公元前 3 世纪生活在新疆这片土地的丁零人和赤狄人, 其混合事件的发生时间被认为可能在距今 763 年前; 藏族生活在中国的青藏高原, 其基因流中来自东亚人的遗传占比约为 94.5% (Feng et al., 2017; Pan and Xu, 2020)。

本研究的典型变量分析及差异分析结果显示,

维吾尔族作为典型的欧洲和东亚人群的混合人群，藏族作为拥有较为独立的进化路线的高原民族，其牙齿可观测特征彼此并不相同。维吾尔族和藏族的这种牙齿可观测特征的差异，可以作为区别这两个遗传进化上迥然不同的民族的特征依据 (Feng et al., 2017; Pan and Xu, 2020)。

2.6 南方汉族、北方汉族和中部汉族的牙齿表型特征

中国汉族群体从基因和 SNP 层面分为北方汉族、南方汉族和中部汉族 (Xu et al., 2009; Yang et al., 2021)。Qin 等 (2015) 的研究也发现，中国北方人群 (包括北方汉族) 相比中国南方人群 (包括南方汉族) 拥有更多欧洲血统，中国北方人群和南方人群的这一遗传差异提示了南方汉族和北方汉族的差异性。

本研究结果表明，南北中汉族牙齿表型的差异具有明确的方向性，且下颌差异比上颌更明显，这一牙齿表型的方向性变化与南北中汉族的区域分布呈现一致性，表明汉族亚群的差异能够体现在特定牙齿表型中。

对这一结果未来还有很大的探索空间，如借由全基因组关联分析进行牙齿可观测特征的遗传分析，探究是否存在与本研究发现的南北中汉族牙齿特定表型的方向性变化相一致的南北中汉族遗传构成的方向性变化等，这有助于对汉族亚群间差异性进行更全面深入的了解，本文的研究数据亦能为后

续的遗传学分析提供数据支持。

综上所述，牙齿可观测特征既能体现环境因素的影响，又能体现遗传因素的作用。不同族群有各自不同的牙齿可观测特征，因此牙齿可观测特征可以作为区分不同族群的依据。牙齿可观测特征的这种族群差异性既能体现出不同族群拥有不同的遗传因素，如进化上相近的群体其牙齿可观测特征往往也较为接近，男女间的遗传差异导致了牙齿可观测特征的性别差异，又能体现出环境因素的影响，如不同年龄群体牙齿可观测特征的差异。因此，对牙齿可观测特征背后遗传机制的研究对厘清遗传因素和环境因素的不同影响是十分必要的。

3 材料与方法

3.1 当代中国人群牙齿表型队列

在剔除牙齿质量较差样本、保证每个群体有效样本量的同时，尽可能保留更多来自不同民族、不同区域的牙齿样本。所用人群牙齿表型样本由复旦大学人类遗传学系分批采集于不同的时间和地点，样本采集时间为 2010~2019 年，按样本采集时间及地点将所有样本分为 12 个队列。本研究所有研究队列均符合伦理审核标准 (批准号: 14117)，且均获得队列采集者许可使用。当代中国人群牙齿表型队列情况如表 5 所示，队列名称中的数字表示样本采集时间。

表 5 当代中国人群牙齿表型队列概况

Table 5 Overview of the cohorts of dental phenotypes in contemporary Chinese groups

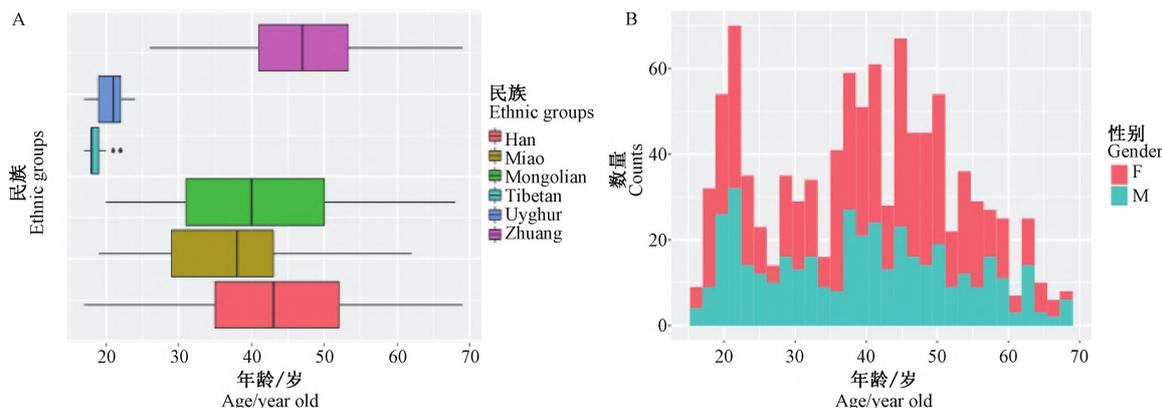
队列 Cohort	样本量/人 Sample size/person	行政区域 Administrative region	民族构成 Ethnic groups structure
2010 内蒙古队列 2010 Inner Mongolia cohort	1	内蒙古 Inner Mongolia	蒙古族 ($n=1$) Mongolian nationality ($n=1$)
2010 新疆队列 2010 Xinjiang cohort	96	新疆 Xinjiang	维吾尔族 ($n=96$) Uyghur nationality ($n=96$)
2011 西藏队列 2011 Xizang cohort	4	西藏 Xizang	藏族 ($n=4$) Tibetan nationality ($n=4$)
2014 泰州队列 2014 Taizhou cohort	195	江苏 Jiangsu	汉族 ($n=195$) Han nationality ($n=195$)
2015 泰州队列 2015 Taizhou cohort	129	江苏 Jiangsu	汉族 Han nationality ($n=129$)
2015 麻江队列 2015 Majiang cohort	136	贵州 Guizhou	苗族 ($n=136$) Miao nationality ($n=136$)
2017 郑州队列 2017 Zhengzhou cohort	98	河南 Henan	汉族 ($n=98$) Han nationality ($n=98$)

续表
Continuing table

队列 Cohort	样本量/人 Sample size/person	行政区域 Administrative region	民族构成 Ethnic groups structure
2017 内蒙古队列 2017 Inner Mongolia cohort	103	内蒙古 Inner Mongolia	蒙古族 ($n=103$) Mongolian nationality ($n=103$)
2017 河池队列 2017 Hechi cohort	71	广西 Guangxi	壮族 ($n=71$) Zhuang nationality ($n=71$)
2018 南宁队列 2018 Nanning cohort	132	广西 Guangxi	汉族 ($n=95$), 壮族 ($n=37$) Han nationality ($n=95$), Zhuang nationality ($n=37$)
2018 西藏队列 2018 Xizang cohort	38	西藏 Xizang	汉族 ($n=7$), 藏族 ($n=31$) Han nationality ($n=7$), Tibetan nationality ($n=31$)
2019 泰州队列 2019 Taizhou cohort	5	江苏 Jiangsu	汉族 ($n=5$) Han nationality ($n=5$)

当代中国人群牙齿表型队列女性个体数为 586, 男性个体数为 411, 性别数据缺失的样本为 11 个; 从年龄构成看, 当代中国人群牙齿表型队列年轻群体(20 岁左右)、中年群体(30 岁左右和 50 岁左右)样本占比较大, 各年龄男女

分布较均衡; 从民族构成看, 中年群体主要分布在汉族、苗族、壮族和蒙古族, 年轻群体主要分布在维吾尔族和藏族。当代中国人群牙齿表型队列性别年龄分布及各民族的年龄构成如图 4 所示。



F 表示女性, M 表示男性; Han 表示汉族, Miao 表示苗族, Mongolian 表示蒙古族, Tibetan 表示藏族, Uyghur 表示维吾尔族, Zhuang 表示壮族。

F refers to female, M refers to male; Han refers to Han nationality, Miao refers to Miao nationality, Mongolian refers to Mongolian nationality, Tibetan refers to Tibetan nationality, Uyghur refers to Uyghur nationality, Zhuang refers to Zhuang nationality.

图 4 当代中国人群牙齿表型队列民族和性别的年龄分布
(A) 各民族年龄分布; (B) 性别年龄分布

Figure 4 Age distribution of gender and ethnicity of the cohorts of dental phenotypes in contemporary Chinese groups
(A) Age distribution of ethnic groups; (B) Age distribution of gender

3.2 当代中国人群牙齿表型提取及分析方法

3.2.1 当代中国人群 3D 牙齿模型特征点的标记与提取

Meshlab (<https://www.meshlab.net>) 是一个开源、可移植、可扩展的三维几何处理软件, 主要用于交互处理和非结构化编辑三维三角形网格。中

国人群牙齿表型队列 3D 牙齿模型原始文件为 STL 格式, 使用 Meshlab 软件标记并提取 3D 牙齿模型特征点的三维坐标, 用 R 语言合并和整理 3D 牙齿模型特征点的三维坐标数据, 此过程删除了重复和质量较差的 3D 牙齿模型数据, 并核对添加每个 3D 牙齿模型对应样本的协变量信息, 最终完成每

个样本上、下颌 28 颗牙齿, 180 个标记特征点的 3D 牙齿模型特征点的标记与提取工作。本研究参照了 CANDELA (Adhikari et al., 2016; Ruiz-Linares et al., 2014) 所使用的 3D 牙齿模型特征点的标记与提取方法, 当代中国人群牙齿的标记特征点总数为 180 个, 标记上颌 14 颗牙齿的特征点共 90 个, 标记下颌 14 颗牙齿的特征点共 90 个。现将本研究所用的牙齿特征点标记与提取方法详述如下:

(1) 磨牙特征点的标记与提取。选取特征性的牙齿凸起、牙齿凹槽、牙齿中心凹点等, 标记第二磨牙 8 个特征点、第一磨牙 10 个特征点。上、下颌中的牙齿标记顺序略有不同: 下颌左侧第一磨牙与右侧第一磨牙 9、10 特征点标记顺序相反; 除下颌左侧第一磨牙和右侧第一磨牙 9、10 特征点外, 上、下颌中左右侧牙齿标记顺序镜像对称。分述如下: ①在上颌中, 如果是 3 个凸起, 那么标点总数就是 8 个(第二磨牙), 3 个凸起点标记为 1、3、6; 如果是 4 个凸起, 那么标点总数就是 10 个(第一磨牙), 4 个凸起点标记为 1、3、6、9。在下颌中, 如果是 4 个凸起, 那么标点总数就是 8 个(第二磨牙), 4 个凸起点标记为 1、3、5、6; 如果是 5 个凸起, 那么标点总数就是 10 个(第一磨牙), 5 个凸起点标记为 1、3、5、6、9/10。②在上颌中, 将牙齿三条沟汇合的地点称之为中央点, 标记为 4、5 两个点; 在下颌中, 将牙齿四条沟汇合的地点称之为中央点, 标记为 8 一个点。③在上颌中, 标记特征点 2、8 就是牙齿最中间的点, 一般是凹陷的地方, 有时候可能会是凸起, 以中间线为主要参考; 在下颌中, 标记特征点 2 就是牙齿的最中间的点, 一般是凹陷的地方, 有时候可能会是凸起, 以中间线为主要参考; ④在上颌中, 标记特征点 7、10 是最凹陷的地方; 在下颌中, 标记特征点 4、7、10 是最凹陷的地方。

(2) 前磨牙特征点的标记与提取。选取特征性的牙齿凸起、牙齿凹槽、牙齿两侧中点等, 标记第二前磨牙 6 个特征点、第一前磨牙 6 个特征点。上、下颌中的牙齿标记顺序有所不同, 上、下颌中左右侧牙齿标记顺序镜像对称。分述如下: ①在上颌中, 标记特征点 1、3 为凸起, 标记特征点 2、4 为凹槽且在中央线上、若有凸起情况也以在中央线上为准, 标记特征点 5、6 为中央沟的三条凹槽交汇之处或最为凹陷之处; ②在下颌中, 标记特征点 1、3 为凸起,

标记特征点 2、6 为凹槽且在中央线上, 若有凸起情况也以在中央线上为准, 标记特征点 4、5 为中央沟的三条凹槽交汇之处或最为凹陷之处。

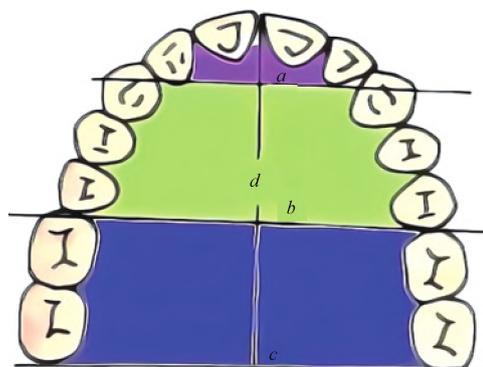
(3) 尖牙及切牙特征点的标记与提取。选取特征性的牙齿边缘点、牙齿中间点、牙齿舌侧牙龈交界处和牙齿唇侧牙龈交界处等, 标记尖牙 5 个特征点、侧切牙 5 个特征点、中切牙 5 个特征点。上、下颌中的牙齿标记顺序相同, 上、下颌中左右侧牙齿标记顺序镜像对称。标记特征点 1、3 为边缘点, 标记特征点 2 为中间点, 标记特征点 4 为内侧牙龈交界处, 标记特征点 5 为外侧牙龈交界处。

3.2.2 当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点间 ELD 的提取

基于整理过的 3D 牙齿模型标记特征点的三维坐标数据, 使用 R 语言计算出 376 段标记特征点间的 ELD, 即 376 个牙齿表型。其中上颌牙齿表型总计 193 个, 包括 4 个牙弓 ELD 表型; 下颌牙齿表型总计 183 个, 包括 4 个牙弓 ELD 表型。牙弓 ELD 可分为 3 类: 前段牙弓 ELD、中段牙弓 ELD、全牙弓 ELD。本研究使用三角形面积海伦公式间接计算牙弓 ELD, 即通过测量 3D 牙齿模型标记特征点所构建的三角形的三边 ELD, 得出三角形的高, 将所得不同三角形的高相减来分别表示前段牙弓 ELD、中段牙弓 ELD、后段牙弓 ELD、全牙弓 ELD, 牙弓 ELD 如图 5 所示。三角形面积海伦公式为:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, p = \frac{a+b+c}{2}, \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为三角形的三边的边长; p 为三角形的半周长; S 为三角形的面积。



a 表示中切牙近中接触点至两侧尖牙牙尖连线的垂直 ELD(前段牙弓 ELD); b 表示两侧尖牙牙尖连线至两侧第一磨牙近中接触点连线的垂直 ELD(中段牙弓 ELD); c 表示两侧第一磨

牙近中接触点连线至两侧第二磨牙远中面连线的垂直 ELD(后段牙弓 ELD); d 表示中切牙近中接触点至两侧第二恒磨牙远中面连线的垂直 ELD(全牙弓 ELD)。

a shows the vertical ELD between the mesial contact points of the central incisor and the line between the cusps of both sides (anterior arch ELD); b shows the vertical ELD between the line between the cusps on both sides and the line between the mesial contact points of the first molars on both sides (middle arch ELD); c shows the vertical ELD between the mesial contact points of the first molar on both sides and the distal surface of the second molar on both sides (posterior arch ELD); d shows the vertical ELD between the mesial contact points of the central incisor and the line connecting the distal surface of the second permanent molars on both sides (total arch ELD).

图 5 牙弓的 ELD

Figure 5 ELD of the dental arch

当代中国人群牙齿可观测特征多样性研究是基于这 376 个牙齿表型开展的,各牙齿所提取表型数如表 6 所示。

表 6 当代中国人群牙齿表型数量

Table 6 The number of the dental phenotypes in contemporary Chinese groups

牙齿位置 Tooth position	牙齿类型 Tooth type	上颌 Maxilla	下颌 Mandible
左侧 Left side	尖牙 Canine	10	10
	中切牙 Central incisor	10	10
	侧切牙 Lateral incisor	10	10
	第一磨牙 Molar 1	27	23
	第二磨牙 Molar 2	20	17
	第一前磨牙 Premolar 1	9	9
	第二前磨牙 Premolar 2	9	7
右侧 Right side	尖牙 Canine	10	10
	中切牙 Central incisor	10	10
	侧切牙 Lateral incisor	10	10
	第一磨牙 Molar 1	26	26
	第二磨牙 Molar 2	20	19
	第一前磨牙 Premolar 1	9	9
	第二前磨牙 Premolar 2	9	9
牙弓 Dental arch		4	4
总计 Total		193	183
		376	

3.2.3 当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点与标记特征点间 ELD 的分析

本研究使用 MorphoJ 1.07a 完成了对当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点的主成分分析、典型变量分析、交叉验证。使用纯文本格式的当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点数据创建三维数据集后,对数据集进行普鲁克对齐并创建协方差矩阵,之后利用 MorphoJ 1.07a 提供的分析方法,绘制了当代中国人群上、下颌 3D 牙齿模型标记特征点的线框图,设置比例系数为 0.01;对当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点进行了主成分分析,绘制了当代中国人群上、下颌 3D 牙齿模型标记特征点的第 1、2 主成分的分数的分布散点图,并使用不同的分类规则用椭圆分别对性别、民族、南北中汉族圈出 95% 的置信区间;对当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点进行了典型变量分析,设置成对距离的置换检验的迭代次数为 10 000 次,使用不同的分类规则分别对民族和南北中汉族绘制了当代中国人群上、下颌 3D 牙齿模型标记特征点的第 1、2 典型变量的分数分布散点图,并用椭圆圈出 95% 的置信区间;对当代中国人群 3D 牙齿模型标记特征点进行了交叉验证,设置分类规则为民族,置换检验的迭代次数为 1 000 次,绘制了当代中国人群上、下颌 3D 牙齿模型标记特征点的交叉验证分数柱状图。

使用 RStudio 2022.07.1+554 “Spotted Wakerobin” 对 376 个牙齿表型与协变量进行了 Pearson 相关性分析。本研究在计算 Pearson 相关系数时,赋值女性和男性群体为 1 和 2,赋值 14~26 岁、27~36 岁、37~46 岁、47~56 岁、57~66 岁、大于 66 岁群体为 1、2、3、4、5、6。性别、年龄等协变量信息与牙齿表型 ELD 均为成对观测值,符合 Pearson 相关系数计算的适用条件。

使用 Excel 16.71 (23031200) 和 RStudio 2022.07.1+554 “Spotted Wakerobin” 完成了对当代中国人群牙齿表型的差异分析,计算了每个群体相应牙齿表型 ELD 的平均值和标准差,其中对牙齿表型在男性和女性中的差异显著性使用 Excel 16.71 (23031200) 完成 t 检验来判断。对牙齿表型在不同年龄段中的差异、牙齿表型在不同民族中的差异以及牙齿表型在南北中汉族中的差异,使用 RStudio 2022.07.1+554 “Spotted Wakerobin” 完成 ANOVA 及 t 检验以判断其显著性。

对牙齿表型与性别进行 Pearson 相关性分析,相关性结果显示了牙齿表型从女性到男性单向度的

变化情况。选取相关性最高的牙齿表型, 查看发现相关系数大于 0.3 或小于 -0.3 的表型有 5 个, 选择这 5 个表型进行差异分析; 对男性与女性的这 5 个牙齿表型做双尾 t 检验并对结果进行 FDR 校正, 发现以上 5 个表型在男女间均呈极显著差异。

对牙齿表型与年龄进行 Pearson 相关性分析, 选取相关性最高的表型, 查看发现相关系数大于 0.3 或小于 -0.3 的表型有 8 个, 选择这 8 个表型进行差异分析; 对 6 段年龄人群的这 8 个牙齿表型进行 ANOVA 并对结果的差异显著性进行 FDR 校正, 发现这 8 个表型在 6 段年龄人群中均呈极显著差异; 6 段年龄人群可形成 15 个不同的年龄配对, 对 15 个不同年龄配对分别进行成对 t 检验并对结果进行 FDR 校正。

对 6 个民族的 376 个牙齿表型进行方差分析, 结果显示其中 347 个牙齿表型在 6 个民族间呈极显著差异, 占比为 92.3%; 对方差分析结果进行 FDR 校正后有 347 个牙齿表型在 6 个民族间呈极显著差异, 占比为 92.3%; 对校正后呈极显著差异(FDR 校正后的方差分析 P 值小于 0.01) 的 347 个牙齿表型分别进行民族间成对 t 检验, 6 个民族共产生 15 个不重复的配对; 对 15 个民族配对的 t 检验结果进行差异显著性的 FDR 校正, 对经 FDR 校正后呈极显著差异(FDR 校正后的 t 检验 P 值小于 0.01) 的牙齿表型进行差异分析: 提取出每个民族配对中前 15 个民族间 ELD 差异最大的牙齿表型, 分别计算其 ELD 平均值和标准差, 并将族群间 ELD 差异大小及其显著性以不同字母列出, 共得到 75 个牙齿表型。

对南北中汉族的 376 个牙齿表型进行方差分析, 结果显示其中 196 个牙齿表型在南北中汉族间呈极显著差异, 占比为 52.1%; 对方差分析结果进行 FDR 校正后有 177 个牙齿表型在南北中汉族间呈极显著差异, 占比为 47.1%; 对校正后呈极显著差异(FDR 校正后的方差分析 P 值小于 0.01) 的 177 个牙齿表型分别进行南北中汉族间成对 t 检验, 南北中汉族共产生 3 个不重复的配对; 对 3 个汉族亚群配对的 t 检验结果进行差异显著性的 FDR 校正, 对经 FDR 校正后呈极显著差异(FDR 校正后的 t 检验 P 值小于 0.01) 的牙齿表型进行差异分析: 提取出每个汉族亚群配对中前 15 个汉族亚群间 ELD 差异最大的牙齿表型, 分别计算其 ELD 平均值和标准差, 并将族群间 ELD 差异大小及其显著性以不同符号列出, 共得到 37 个牙齿表型。

作者贡献

罗浩是本研究的实验设计和实验研究的执行人; 罗浩、陈颖洁及杨光睿完成数据分析和论文初稿的写作; 罗浩参与实验设计和实验结果分析; Miguel Delgado、Kaustubh Adhikari、夏斌、Andrés Ruiz-Linares 是项目的构思者及负责人, 指导实验设计、数据分析和论文写作与修改。全体作者都已阅读并同意最终的文本。

致谢

感谢复旦大学谢云霄硕士在数据处理方面提供的指导与帮助。

参考文献

- ADHIKARI K, FONTANIL T, CAL S, et al., 2016. A genome-wide association scan in admixed Latin Americans identifies loci influencing facial and scalp hair features. *Nat. Commun.*, 7: 10815.
- BERTHAUME M, GROSSE I R, PATEL N D, et al., 2010. The effect of early hominin occlusal morphology on the fracturing of hard food items. *Anat. Rec. (Hoboken)*, 293(4): 594-606.
- BISHARA S E, TREDER J E, JAKOBSEN J R, 1994. Facial and dental changes in adulthood. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 106(2): 175-186.
- CARTER G A, MCNAMARA J A Jr, 1998. Longitudinal dental arch changes in adults. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 114(1): 88-99.
- DOS SANTOS C C O, DA ROSA MOREIRA BASTOS R T, BELLINI-PEREIRA S A, et al., 2023. Spontaneous changes in mandibular incisor crowding from mixed to permanent dentition: a systematic review. *Prog. Orthod.*, 24(1): 15.
- EDGAR H J H, 2013. Estimation of ancestry using dental morphological characteristics. *J. Forensic Sci.*, 58(Suppl 1): S3-S8.
- FENG Q D, LU Y, NI X M, et al., 2017. Genetic history of Xinjiang's Uyghurs suggests bronze age multiple-way contacts in Eurasia. *Mol. Biol. Evol.*, 34(10): 2572-2582.
- GARIB D, MIRANDA F, MASSARO C, et al., 2021. Three-dimensional mandibular dental changes with aging. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 159(2): 184-192.
- KONG-ZÁRATE C Y, CARRUITERO M J, ANDREWS W A, 2017. Distances between mandibular posterior teeth and the WALA ridge in Peruvians with normal occlusion. *Dental Press J. Orthod.*, 22(6): 56-60.
- MASSARO C, MIRANDA F, JANSON G, et al., 2018. Matura-

- tional changes of the normal occlusion: a 40-year follow-up. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 154(2): 188-200.
- MIRANDA F, MASSARO C, JANSON G, et al., 2019. Aging of the normal occlusion. *Eur. J. Orthod.*, 41(2): 196-203.
- PAN Z Q, XU S H, 2020. Population genomics of East Asian ethnic groups. *Hereditas*, 157(1): 49.
- QIN P F, ZHOU Y, LOU H Y, et al., 2015. Quantitating and dating recent gene flow between European and East Asian populations. *Sci. Rep.*, 5: 9500.
- RUIZ-LINARES A, ADHIKARI K, ACUÑA-ALONZO V, et al., 2014. Admixture in Latin America: geographic structure, phenotypic diversity and self-perception of ancestry based on 7,342 individuals. *PLoS Genet.*, 10(9): e1004572.
- SINCLAIR P M, LITTLE R M, 1983. Maturation of untreated normal occlusions. *Am. J. Orthod.*, 83(2): 114-123.
- TAN J Z, PENG Q Q, LI J X, et al., 2014. Characteristics of dental morphology in the Xinjiang Uyghurs and correlation with the EDARV370A variant. *Sci. China Life Sci.*, 57(5): 510-518.
- TOWNSEND G, HUGHES T, LUCIANO M, et al., 2009. Genetic and environmental influences on human dental variation: a critical evaluation of studies involving twins. *Arch. Oral Biol.*, 54(Suppl 1): S45-S51.
- TRIVIÑO T, SIQUEIRA D F, SCANAVINI M A, 2008. A new concept of mandibular dental arch forms with normal occlusion. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 133(1): e15-e22.
- WANG Y C, LU D S, CHUNG Y J, et al., 2018. Genetic structure, divergence and admixture of Han Chinese, Japanese and Korean populations. *Hereditas*, 155: 19.
- WELLS R S, YULDASHEVA N, RUZIBAKIEV R, et al., 2001. The Eurasian heartland: a continental perspective on Y-chromosome diversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98(18): 10244-10249.
- WOON C K, JAMAL N A A, NOOR M N I M, et al., 2019. Geometric morphometric analysis of malocclusion on lateral cephalograms in Malaysian population. *Anat. Cell Biol.*, 52(4): 397-405.
- XU S H, YIN X Y, LI S L, et al., 2009. Genomic dissection of population substructure of Han Chinese and its implication in association studies. *Am. J. Hum. Genet.*, 85(6): 762-774.
- YANG G R, CHEN Y, LI Q, et al., 2023. Dental size variation in admixed Latin Americans: effects of age, sex and genomic ancestry. *PLoS ONE*, 18(5): e0285264.
- YANG M Q, HE G L, REN Z, et al., 2022. Genomic insights into the unique demographic history and genetic structure of five hmong-mien-speaking Miao and Yao populations in southwest China. *Front. Ecol. Evol.*, 10: 849195.
- YANG X M, WANG X X, HE G L, et al., 2021. Genomic insight into the population history of Central Han Chinese. *Ann. Hum. Biol.*, 48(1): 49-55.
- YAO Y G, KONG Q P, WANG C Y, et al., 2004. Different matrilineal contributions to genetic structure of ethnic groups in the silk road region in China. *Mol. Biol. Evol.*, 21(12): 2265-2280.
- ZHAO Z J, 2010. New data and new issues for the study of origin of rice agriculture in China. *Archaeol. Anthropol. Sci.*, 2(2): 99-105.

(责任编辑 胡祖权)
(责任编辑 陈玲玲)