

西藏聂拉木达涕盆地晚中新世的三趾马化石 及其古生态和古高度意义*

邓 涛^{①②③} 侯素宽^① 王 宁^④ 卢小康^① 李刘昆^① 李 雨^①

(^①中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044; ^②中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; ^③西北大学地质学系, 西安 710069; ^④北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘要 西藏自治区聂拉木县达涕盆地是一个小型的山间盆地, 沉积了新近纪晚期的河湖相地层。早期的工作中曾报道有三趾马化石的线索, 据此进行的新的考察发现了更多的哺乳动物化石, 其中包括 1 件带有颊齿列的三趾马上颌。达涕盆地的三趾马体型中等, 其上颊齿具有原尖小而圆, 前、后端较尖, 褶皱中等发育, 前附尖和中附尖不特别加宽, 无次尖收缩等特点。与之前发现的下颌骨相结合, 证明达涕盆地的三趾马属于福氏三趾马 (*Hipparion forstenae*)。通过与西藏吉隆和山西保德发现的福氏三趾马的时代对比, 显示达涕盆地含福氏三趾马层位的年龄约为 7Ma, 因此将原定的上新世达涕组的时代纠正为晚中新世。与近距离的吉隆沃马盆地福氏三趾马的生态对比, 指示达涕盆地在 7Ma 的古海拔高度约为 2400~2900m, 该地区自那时以来快速上升了至少 2000m, 这一结果与构造学的证据吻合。

主题词 青藏高原 达涕盆地 三趾马 晚中新世 古高度

中图分类号 Q911.5, Q915.877, P534.62⁺1 **文献标识码** A

青藏高原南部喜马拉雅山脉地带分布着一系列新近纪的山间盆地, 如札达盆地、吉隆沃马盆地和聂拉木达涕盆地, 在其中都发现过哺乳动物化石^[1-3]。在这些哺乳动物中包括三趾马, 札达和沃马的三趾马已有详细的描述和讨论^[4-7], 而达涕盆地的材料仅有简单鉴定^[4,8]。

达涕盆地位于西藏自治区聂拉木县城以北 45km 的聂拉木拉平台南侧, 中尼公路以前的 63 道班, 即达涕道班位于盆地内, 但现在该道班已撤销 (图 1)。1975 年青藏高原考察队在此测制剖面 (见文献[3]图 2) 的过程中, 在第 3 层的灰白色砂岩中发现一件三趾马下颌残部化石, 带有乳齿列和门齿 (V 5196), 鉴定为 *Hipparion* sp. (文献[4]图版 III, 图 5 和 6), 但认为接近在吉隆沃马发现的三趾马^[8]。也有研究者指出在达涕盆地采集的这件三趾马下颌属于吉隆三趾马 (*Hipparion guizhongensis*)^[9]。

为了获得达涕盆地哺乳动物化石更准确的信

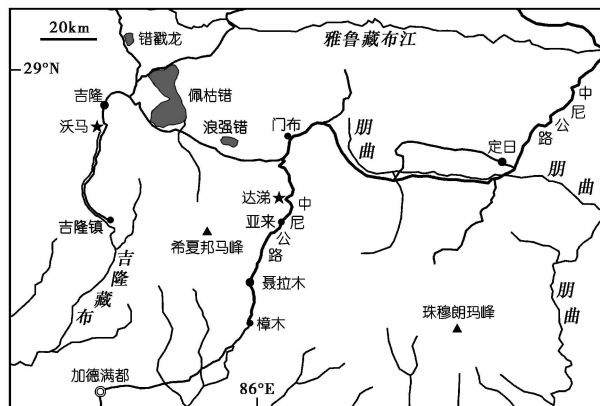


图 1 西藏聂拉木达涕盆地的地理位置
Fig. 1 Geographical location of the Dadi Basin
in Nyalam, Tibet, China

息, 2013 年 8 月我们前往这一地区开展了新的考察和发掘, 在该剖面的同一层位发现了更多的哺乳动物化石, 其中包括 1 件三趾马的上颌和一枚第三掌骨近端, 这件上颌保留了大部分颊齿, 因此能够对

第一作者简介: 邓 涛 男 52 岁 研究员 新生代哺乳动物学及地层学专业 E-mail: dengtao@ivpp.ac.cn

* 中国科学院战略性先导科技专项项目 (批准号: XDB03020104)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 41430102) 和国家重点基础研究发展规划项目 (973 项目) (批准号: 2012CB821906) 共同资助

三趾马的准确鉴定做出判断。鉴于在青藏高原的哺乳动物化石稀少而重要,我们结合原有的下颌标本信息,对达涕盆地的三趾马化石新材料进行详细的研究和报道。

印度板块和欧亚板块的碰撞汇聚是新生代大陆板块运动最重要的地质事件,同时,喜马拉雅造山带是全球最年轻的陆-陆碰撞造山带,较新的地质作用、独特的构造位置和海拔高度使之成为构造活动和气候作用最为强烈的地区。聂拉木地区由于有中尼公路纵贯南北,交通便利,成为研究青藏高原构造隆升的一个重要地点^[10,11]。显然,新的化石材料将为青藏高原隆升的研究提供进一步的证据。

1 术语和缩写

解剖术语和测量方法依据文献^[12,13]。a, 年; DT, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所达涕盆地野外化石地点编号; IVPP V 或 V, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物化石编号; M, 瑞典乌普萨拉大学进化博物馆哺乳动物化石编号; M1, 上第一白齿; Ma, 百万年; Mc III, 第三掌骨; P2~P4, 上第二至第四前臼齿; THP, 天津自然博物馆化石编号。

2 系统描述

马科 Equidae Gill, 1872

三趾马属 *Hipparion* de Christol, 1832

垂鼻三趾马亚属 *Cremohipparion* Qiu et al., 1987

福氏(垂鼻)三趾马 *Hipparion* (*Cremohipparion*)
forstenae Zhegallo, 1971

(图 2 和 3; 表 1 和 2)

标本 IVPP V 20342, 上颌骨带中度磨蚀的 P2-M1, 其中左 M1 破损(图 2); V 20343, 右第三掌骨近端(图 3)。

地点和层位 西藏自治区聂拉木县达涕, 上颌骨 V 20342 产于 DT1301 (GPS: 28°30'03.4"N, 86°08'03.6"E; 海拔 4963m), 第三掌骨近端 V 20343 产于 DT1302 (GPS: 28°30'04.8"N, 86°07'59.5"E; 海拔 4970m), 世界上已知海拔最高的三趾马化石产地。晚中新世达涕组上部第 3 层的灰白色砂岩^[3]。

描述 上颌未受挤压变形。左右 P2 端附尖之间的距离为 62mm, 在 P4/M1 界线处的硬腭宽度为 66mm。前臼齿列长 71.6mm。颊齿列直, 左、右颊齿列直而向前趋近, 从 P2 到 M1 牙齿逐渐变小, 无

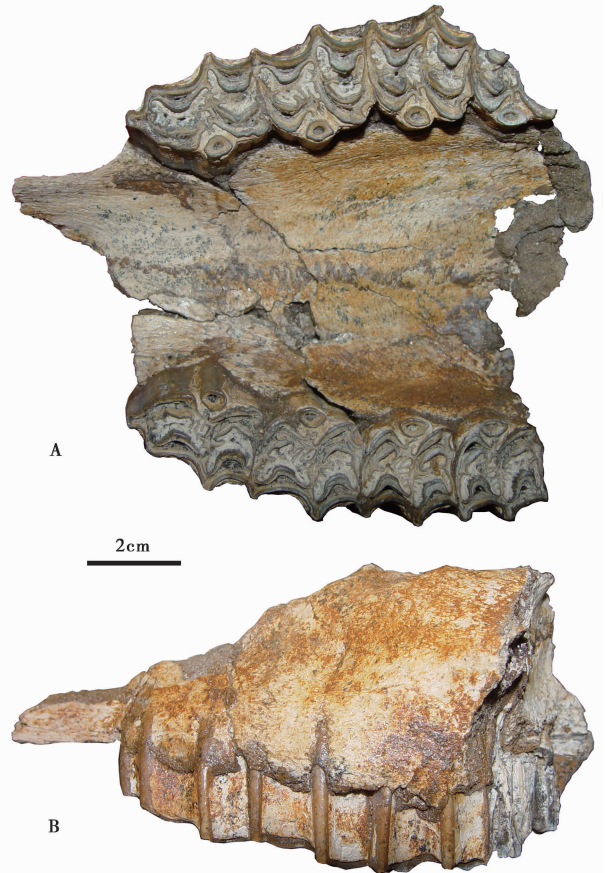


图 2 达涕盆地福氏三趾马的上颌及颊齿

A, 腹面视(dorsal view); B, 侧面视(lateral view)

Fig. 2 Maxillary and cheek teeth of *Hipparion forstenae* from the Dati Basin

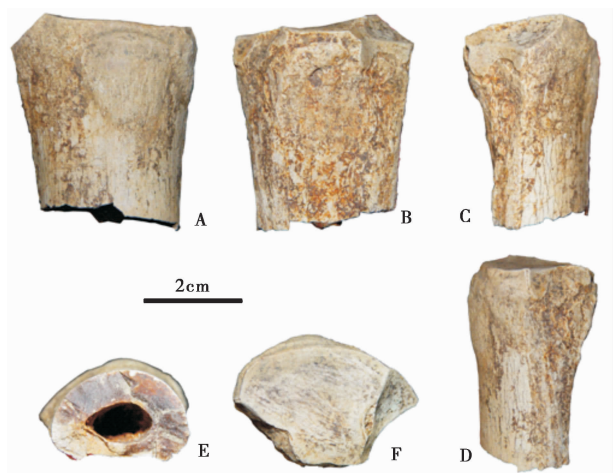


图 3 达涕盆地福氏三趾马的第三掌骨近端

A, 前面视(anterior view); B, 后面视(posterior view);
C, 外面视(lateral view); D, 内面视(medial view);
E, 横截面(cross section); F, 近端视(proximal view)

Fig. 3 Proximal extremity of Mc III of *Hipparion forstenae* from the Dati Basin

表 1 达涕盆地和其他地点福氏三趾马及桑氏三趾马^[4,5,14]上颊齿的测量与对比(mm)Table 1 Measurements and comparison of upper cheek teeth of *Hipparion forstenae* from the Dati Basin and other localities as well as *H. licenti*

颊齿	测量项	<i>Hipparion forstenae</i>					<i>H. licenti</i>
		达涕	保德	霍县	吉隆	榆社	
		V 20342	M 267	V 8425	V 4660.1	V 5195.1	THP20764
P2	长×宽	29×20.8	31.5×22.5	30.7×21.5	32.7×22.6	31.5×21	28×20.5
	原尖长×宽	6.2×4.5	7.6×4.1	7.2×4.9	5.2×4	6.5×5.7	5.8×4.6
	原尖宽长比	72.6	54	68.1	76.9	87.7	79.3
P3	长×宽	23.9×22.8	26×24	21.8×23.3	26×24.8	24×26.8	20.8×21.6
	原尖长×宽	6.2×4.2	6.8×3.8	6.5×5.3	6×3.8	7.5×5.9	5.7×4.6
	原尖宽长比	67.7	55.9	81.5	63.3	78.7	80.7
P4	长×宽	22.8×22.8	24×23	21.8×22.8	24.1×24.9	23.2×25.3	20.2×20.9
	原尖长×宽	5.7×4.2	6.6×4.5	6.2×4.8	6.5×4.1	7.2×5.4	6.1×4.6
	原尖宽长比	73.7	68.2	77.4	63.1	75	75.4
M1	长×宽	20.3×22.2	23×21	19.8×21.7	22.4×22	21.9×25.1	18.5×20.6
	原尖长×宽	6.5×4.1	7.1×4.2	6.9×4.9	6.2×3.9	7.1×5.3	5.7×4
	原尖宽长比	63.1	59.2	71	62.9	74.6	70.2

表 2 达涕盆地福氏三趾马和其他马类^[5, 7, 13, 15]第三掌骨近端的测量与对比(mm)Table 2 Measurements and comparison of proximal extremity of Mc III of *Hipparion forstenae* from the Dati Basin and other equids

测量项	<i>H. forstenae</i> V 20343	<i>H. platyodus</i> V 8247	<i>H. zandaense</i> V 18189	<i>H. xizangense</i> 平均值	<i>H. primigenium</i> 平均值	<i>E. kiang</i> 平均值
近端关节宽	35.5	36.8	41.3	42	39.9	46.3
近端关节厚	23	26.3	27.4	29.5	27.9	30.1
对头状骨关节面最大径	29.3	33.4	34.7	32	34.6	37.4
对钩骨关节面径	12	10.1	11.9	11.8	11.7	13.8
对小多角骨关节面径	—	—	4.5	—	7.5	1.9

DP1。硬腭顶部呈强烈的弧形穹窿，腭中央骨缝呈菊石缝合线形犬牙交错。

P2: 端附尖中等宽度，向唇侧倾斜。前附尖呈宽而低的圆隆。中附尖高，呈平顶的丘形。后附尖处近直角。前、后尖的外壁平直，前尖内壁略向内隆突，后尖内壁仍然平直。前窝前、后角倾斜缓，而后窝前、后角陡立。原小尖内、外壁平直而略倾斜，原脊较平。次尖短而圆润，后端与牙齿后缘平齐，有微弱的次尖收缩。次尖沟窄而浅。原尖小而圆，两端略尖，舌缘弧度较小(相似于文献[12]的图 5C-2)。马刺 2 枚，细弱，指向舌侧。窝内褶皱长大，但数量较少，且很少分枝。原脊褶 4 枚，其中 2 枚较弱。前窝褶 2 枚，舌侧的 1 枚更大，居于后壁中央。原小尖褶 3 枚，伸向唇侧。后窝褶 2 枚，唇侧的 1 枚较弱。无次附尖褶。

P3: 前附尖宽大，顶面略凹，后棱发达。中附尖窄而高耸，末端略圆。后附尖处呈直角。前、后尖的外壁弧形凹陷。前尖内壁直而后倾，后尖内壁弧形隆突。前窝前、后角倾斜，后窝前、后角直立；

齿窝的前、后角皆宽大。原小尖膨大，原脊倾斜。次尖小，末端不达牙齿后壁。次尖沟宽大，呈带角的 U 形，无次尖收缩。原尖与 P2 相似。马刺 3 枚，皆细弱。原脊褶和前窝褶各 4 枚，舌侧的 1 枚长大，唇侧的 3 枚微弱。原小尖褶 3 枚，非常强壮，指向前外方。后窝褶 4 枚，舌侧的 1 枚长大，末端分叉，唇侧 3 枚微弱。次附尖褶 1 枚，位于后壁中央，中等发育，指向前方。

P4: 与 P3 大致相似，但长度略短，因此牙齿的咀嚼面更方。中附尖略窄于前附尖后棱。后附尖突起。前尖外壁强烈凹陷。后尖在前后方向上短于 P3 的后尖。前窝前、后角的倾斜度减小。次尖沟宽浅。3 枚马刺中的前 2 枚由基底部的强烈分枝形成。

M1: 牙齿冠面呈方形。前附尖向唇侧强烈突伸。中附尖高耸，其宽度和高度略小于前附尖。后附尖处近直角，略微向唇侧突起。前尖外壁强烈凹陷，其长度略长于后尖外壁。后尖外壁后倾而微弱凹陷。前、后尖窄，其内壁强烈向舌侧隆突。齿窝

的前、后角皆宽大而陡立,直接指向唇侧,末端圆润。原小尖比前臼齿的窄,原脊倾斜度减小。次尖小,末端不到牙齿后壁水平,次尖沟窄而浅,无次尖收缩。原尖比前臼齿的原尖略窄,形态相似。马刺2枚,由末端分枝形成。原脊褶1枚,位于前壁中央,中等发育。前窝褶5枚,舌侧的第2枚长,其余微弱。原小尖褶4枚,中间的2枚发达,由末端分枝形成,前、后2枚微弱,依附于中间2枚的基部。后窝褶4枚,舌侧的1枚中等发育,末端分叉,唇侧的3枚微弱。次附尖褶1枚,中等发育,倾向前外方。

第三掌骨:标本仅保留其近端。骨体的横截面显示为半圆形,骨干的致密层向后变薄,髓腔向近端延伸。对头状骨的关节面平滑,内侧具有宽浅而折角的切迹。对钩骨的关节面扇形,轻微凹陷并向后侧面倾斜,与外侧面对第四掌骨的关节面相连,后者陡立,上缘直,下缘弧形,前端较小,后端较大。对头状骨和对钩骨两个关节面的中间嵴上有粗糙的凹陷,内多小孔。无对小多角骨的关节面。在内侧面与第二掌骨相接触的两个关节面,前面一个较大,呈圆三角形,后一个较小,呈方形。在前面,对头状骨和钩骨的关节面的前缘之间呈 130° 的尖角,在后面的夹角为 150° 。前面附着桡腕伸肌的粗糙面相互连接,相当发达,偏向内侧。在后面,附着骨间肌的结节中度发育。

3 比较与讨论

达涕盆地的三趾马从上颌骨、颊齿和第三掌骨判断属于中等体型(表1和表2)。其上颊齿原尖小而圆,前、后端较尖;褶皱中等发育,前附尖和中附尖不特别加宽。这些特点与垂鼻三趾马亚属(*Cremohipparion*)的鉴定特征^[5]一致。

邱占祥等^[5]建立的垂鼻三趾马亚属包括从小型至大型的三趾马,颊齿列的长度范围在120~170mm。在颊齿方面,垂鼻三趾马的特点为上颊齿原尖小而圆,褶皱中等发育,外壁较平,前附尖和中附尖不特别加宽;下颊齿双叶圆形,外壁弧形。

归入垂鼻三趾马亚属的共有4个种^[5],即中国的福氏三趾马(*Hipparion forstenae*)和桑氏三趾马(*H. licenti*),希腊萨摩斯岛的*H. proboscideum*,格鲁吉亚的*H. garedzicum*。邱占祥等^[5]认为,桑氏三趾马是从福氏三趾马这一类型中产生出来的,它们在颊齿上的特征很接近,如原尖小而圆,褶皱较弱,次尖收缩不发育,双叶圆形等等,这些可能都是共

近祖性状。

福氏三趾马由Zhegallo于1971年建立^[16],是对Sefve^[17]描述的*Hipparion richthofeni*的修订,并指定山西省保德县戴家沟的M3837号头骨为选型标本。M3837(文献[17]图版2和图5~6)属于一个老年个体,牙齿保存不好。M267(文献[17]图13)和M268(文献[17]图版3和图10)的牙齿保存得特别好,可以与本文研究的达涕标本进行很好的比较。保德的福氏三趾马上颊齿原尖圆而小且前后端略变尖,无次尖收缩,褶皱较弱,马刺在前臼齿分叉强而在臼齿上分叉弱,这些特点与达涕的上颊齿完全一致,细微的差异表现在达涕标本的后尖外壁更凹陷。表1中所列的M267的测量项略大于达涕标本,但保德的其他福氏三趾马标本与达涕标本接近或略小^[17],因此保德标本在平均水平上的大小与达涕标本一致。

邱占祥等^[5]描述了保德的一件福氏三趾马头骨(V8254),为雄性个体,略大于达涕标本。虽然这件标本为中年偏老个体,颊齿已接近根部,但其特点仍然表现明显,即褶皱较弱小,前附尖和中附尖都较细窄,前尖和后尖的外壁较平,次尖无收缩,原尖小而圆,深陷在原小尖和次尖之间。这件标本与保德的其他福氏三趾马一样,除了后尖外壁比达涕标本更平以外,其他特征都吻合。

山西霍县的一些三趾马化石^[14]被改归入*H. forstenae*^[5]。其特点为原尖短小,基本在5~6mm之间(表2),椭圆或半圆形,无次尖收缩,褶皱中等发育,多集中在前半部。这些特点与达涕标本一致,不同点在于霍县标本的马刺较少分叉,通常一枚。

在西藏吉隆沃马发现的三趾马化石有比较丰富的材料,最初被定为一个新种吉隆三趾马(*Hipparion guizhongensis*)^[4]。后来吉隆三趾马被认为与福氏三趾马最为接近,它们的大小一致,齿列都在140mm左右,上颊齿原尖小而圆,次尖沟浅,褶皱中等强度,原小尖褶比较粗大,一般都分二枝;下颊齿双叶圆形,双叶谷浅,双叶末端向外扭转。因此,*H. guizhongensis*是福氏三趾马的后出同物异名而被废除,则吉隆的三趾马为*H. forstenae*^[5]。

吉隆的福氏三趾马在尺寸上与达涕的三趾马相同,而在性状上则相当一致:原尖小,呈饱满的椭圆,除P2外宽长之比在70%~80%之间,前后端略尖,磨蚀后原尖深陷于原小尖和次尖之间;前附尖

和中附尖较窄, 中附尖尤其显著; 釉质褶皱频率中等, 在前窝更发达; 马刺的数目不定, 有的不分叉, 有的分 2~3 叉; 次尖沟宽浅, 无次尖收缩^[4]。

福氏三趾马的鉴定特征为: 个体中等大小, 颊齿列长约 130~150mm。上颊齿原尖小而圆, 无次尖收缩, 褶皱较弱; 下颊齿双叶近圆形, 双叶谷浅, 宽 U 形, 前臼齿的外中谷浅^[5]。达涕三趾马的上颊齿特征与此定义一致。之前在达涕盆地发现的下颌骨材料经切片后显示双叶近圆形, 双叶谷呈浅而宽的 U 形^[4]; 不同点在于外中谷较深, 但由于是乳齿, 其特征应与臼齿接近, 因此并不代表前臼齿的恒齿状况。综上所述, 在达涕发现的上颌骨新材料与之前发现的下颌骨材料^[3,4]相结合, 证明其分类地位为福氏三趾马(*H. forstenae*)。

垂鼻三趾马亚属的另一个种是桑氏三趾马(*Hipparion licenti*), 无疑与福氏三趾马最接近, 共同具有原尖圆而小, 褶皱中等发育, 前、后尖外壁较平, 前、中附尖不特别加宽, 次尖收缩不发育等特点^[5]。这两个种在颊齿上也可以区分: 桑氏三趾马小于福氏三趾马(表 1); 前者的褶皱更弱, 特别是原小尖褶明显不如福氏三趾马的长大; 桑氏三趾马的马刺也相当短小, 且很少分叉, 至多也不超过两枚; 次尖沟窄而浅, 与达涕和保德的福氏三趾马所具有的宽而深的次尖沟完全不同。

在颊齿的特征方面, 原尖小而圆, 磨蚀后深陷于原小尖和次尖之间, 附尖窄, 褶皱细弱的三趾马还有意外三趾马(*Hipparion insperatum*)^[5]。但达涕的三趾马化石与其还是很容易区分的: 意外三趾马的体型特别大, 在颊齿上的表现也很明显, 如 P4 的尺寸为 25.5×26mm^[5], 这明显大于达涕的三趾马(表 1); 意外三趾马上颊齿的前尖外壁呈弧形凹陷, 而达涕材料的前尖外壁较平; 意外三趾马的前、后尖的内壁在磨蚀很深的情况下, 呈圆形甚至是尖形, 而达涕的颊齿已磨蚀较深, 但前、后尖的内壁仍然近于方形; 意外三趾马的上颊齿因为横向的釉质层薄, 因此牙齿冠面在中央和前、后两侧形成横谷, 而达涕的上颊齿冠面平, 仅在 P4 和 M1 上有宽浅的中央横谷。

平颊三趾马(*Hipparion hippiodus*)和环齿三趾马(*H. plocodus*)的原尖也小而圆, 无次尖收缩^[5]。平颊三趾马的原脊褶少, 在中等磨蚀时通常为一枚, 但褶本身较宽大, 马刺短, 一般也仅有一枚, 达涕的福氏三趾马与其不同。环齿三趾马的褶皱非常强烈, 原尖圆润, 前尖外壁弧形凹陷, 与达涕标

本细弱的褶皱, 椭圆且前、后端略尖的原尖, 平直的前尖外壁明显不同。

达涕的三趾马第三掌骨尺寸相当小, 明显小于札达的 *H. zandaense*、比如布隆的 *H. xizangense* 和欧洲的原始三趾马(*H. primigenium*), 也远小于现代的藏野驴(*Equus kiang*), 而与平齿三趾马(*H. platyodus*)接近^[5,7,13,15](表 2)。从颊齿尺寸看, 福氏三趾马与平齿三趾马也是接近的^[5]。达涕的第三掌骨近端面上缺乏对小多角骨的关节面, 这个特征与 *H. xizangense* 和 *H. platyodus* 相似, 而一些三趾马和真马, 如 *H. zandaense*、*H. primigenium* 和 *E. kiang* 具有这个关节面^[7,13]。尽管达涕的第三掌骨在近端的尺寸上与平齿三趾马(V 8247)接近, 但在形态上可以明显区分: 平齿三趾马附着桡腕伸肌的粗糙面要弱得多; 对钩骨的关节面以及对第四掌骨的关节面被一个宽深的切迹分为前、后两部分, 而在达涕标本中没有切迹, 关节面是一个整体; 对头状骨的关节面内后角有一个高高升起的尖角, 而达涕标本的相同位置是平坦的。

4 达涕盆地三趾马的时代

垂鼻三趾马亚属(*Cremohipparion*)的地质时代在中国为晚中新世的保德期至早上新世的高庄期, 在亚洲其他地区仅限于相当于保德期的层位中^[5]。福氏(垂鼻)三趾马(*H(C.). forstenae*)之前仅在山西保德、霍县和西藏吉隆发现。保德和吉隆的三趾马层位此前已有精细的古地磁测年数据, 年龄均为 7.0Ma(Chron C3Bn)^[18,19], *H. forstenae* 的首现也因此被作为与海相墨西拿阶(Messinian)对应的中国陆相保德阶的底界生物标志^[20]。显然, 达涕盆地含福氏三趾马的层位相当于保德期的地层, 达涕组代表了晚中新世的沉积, 而非原来认为的上新世^[3]。

实际上, 原来将青藏高原上的吉隆沃马盆地、比如布隆盆地和聂拉木达涕盆地含三趾马化石的层位都确定为上新世^[2-4,15], 这源于一个历史的错误。中国的含三趾马化石地层在 20 世纪 30 年代被归入上新世, 可能是受到美国古生物学家观点的影响, 认为马的进化阶段中, 安琪马(*Anchitherium*)生活于中新世, 三趾马(*Hipparion*)生活于上新世, 真马(*Equus*)生活于第四纪, 这一错误观点影响了很长时间^[5]。

国际地层年表中海相的赞克勒阶(Zanclean)为上新统的第一个阶, 其底界即上新统的底界。赞克

勒阶的底界位于 Chron C3r 地磁极性年代带上部, Thvera 正极性年代亚带 (C3n.4n) 前约 0.1Ma 处, 天文年代学年龄值为 5.332Ma, 钙质超微化石接近 *Triquetrorhabdulus rugosus* 的灭绝面 (CN10b 之底) 和 *Ceratolithus acutus* 的最低分布层位^[21]。赞克勒阶的 GSSP 位于意大利西西里岛 Eraclea Minoa 的 Trubi 组底部 (第一碳酸盐旋回之底), 2000 年被国际地科联批准^[21]。显然, 达涕和沃马的福氏三趾马在 7Ma 的层位是早于上新世的。

对西班牙哺乳动物化石地点的研究表明, 最早的三趾马化石出现于 Montagut 地区 Can Guitart 1 剖面的 Creu de Conill-20 地点, 含化石地层很短的一段古地磁正极性被对比于 Chron C5r.1n (ATNTS2004: 11.118 ~ 11.154Ma)^[22]。对欧洲、西亚和南亚的材料进行综合的结果是, 几乎在所有几个已知含早期三趾马的地点 (Höwenegg、Sinap Tepe、Siwaliks 等) 其古地磁资料都为较长的正极性, 都可以与 C5n.2n (ATNTS2004: 9.987 ~ 11.040Ma) 相对比^[23]。在中国, 最早的三趾马化石东乡三趾马 (*Hipparion dongxiangense*) 出现于甘肃临夏盆地的东乡县郭泥沟剖面, 其古地磁年龄约为 11.5Ma^[24]。很明显, 三趾马在欧亚大陆从晚中新世 (底界为 11.6Ma) 初期开始出现。对青藏高原原来笼统以含三趾马化石而定为上新世的地层, 应在种级水平上根据不同三趾马的分布进行详细划分。布隆的西藏三趾马 (*H. xizangense*) 属于晚中新世早期的灞河期, 沃马和达涕的福氏三趾马 (*H. forstenae*) 属于晚中新世晚期的灞河期, 而札达的札达三趾马 (*H. zandaense*) 属于上新世^[7]。

5 古生态和古高度分析

三趾马 (*Hipparion*) 是马科中的一个属, 这是一个分异度非常高的属, 已经被记述过的种达到 200 多个, 其中各个种的生态环境有很大的区别。与此类似的是马属 (*Equus*), 仅其现生种就包括 3 种斑马、3 种野驴和 1 种野马, 而其生态环境有非常大的区别, 例如蒙古野驴 (*Equus hemionus*) 与藏野驴 (*E. kiang*) 的形态相当接近, 因此有不少研究者仅将藏野驴看作是蒙古野驴的一个亚种。然而, 这两种野驴的生活习性相差甚远, 藏野驴生活于高海拔的青藏高原, 而蒙古野驴只生活于海拔明显更低的地区。与此类似, 不同三趾马的生态环境也相差甚远。

我们已经研究过在青藏高原发现的 3 种三趾

马^[7]。在藏北比如布隆发现的西藏三趾马 (*H. xizangense*) 根据对其远端肢骨的运动功能分析, 指示它是一种森林型的三趾马^[7]。结合其产出地层中的包括棕榈在内的孢粉资料^[15], 当时的海拔应在 2500m 左右^[7]。而在札达盆地发现的上新世的札达三趾马 (*H. zandaense*) 根据其全身骨架的分析, 显示其为一种快速奔跑的类型, 它生活的环境应为高山草原, 经古气温校正后的海拔高度为 4000m^[7]。

对吉隆沃马的福氏三趾马 (*H. forstenae*) 化石进行过稳定同位素分析^[25]。食草哺乳动物的组织, 包括骨骼和牙齿中的稳定碳同位素组成与其取食的草本植物的稳定碳同位素组成密切相关, $\delta^{13}\text{C}$ 将在动物的组织中富集。吉隆沃马盆地现代的马、牦牛和山羊的牙齿釉质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -9.0‰ 到 -14.2‰ 之间, 平均 -12.2‰ ± 1.5‰, 指示纯粹的 C₃ 食性, 与这个地区现代占统治地位的 C₃ 植被吻合^[26]。另一方面, 沃马盆地晚中新世的福氏三趾马化石的釉质 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -2.4‰ 到 -8.0‰, 平均值 -6.0‰ ± 1.1‰, 指示它们具有 C₃ 和 C₄ 的混合食性, 在其食物中含有 30% ~ 70% 的 C₄ 植物, 证明当时的生态环境以疏林为特征, 与根据孢粉分析得到的证据一致^[25]。

C₄ 植物在温度较高、光照较好、水汽充足的条件下比 C₃ 植物更具优势。现代 C₄ 植物的分布受到温度、季节性降水和海拔高度的控制, 在 2500m 以下的低海拔热带和温带地区分布较广, 而在高纬度或 3000m 以上的高海拔地区以及以冬季降水为特征的地区稀少甚至缺失^[26]。稳定碳同位素资料证明沃马盆地在晚中新世存在 C₄ 植物, 并且是生态系统的重要组成部分, 指示这个地区在当时具有比现代温度更高、海拔更低的气候环境特点^[25]。沃马盆地福氏三趾马化石的釉质氧同位素平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -17.0‰ ± 1.5‰, 高于此地现代马的数据 -19.1‰ ± 0.6‰, 这与根据碳同位素得出的晚中新世低海拔状态一致^[25]。在现代的温带环境中, C₄ 植物在 1500m 以下环境的最热月中非常繁盛, 但在海拔 2500m 以上的环境中完全缺失或只有微量存在^[26]。即使在热带, 3000m 以上的草原中也没有或仅有微量 C₄ 植物。假定晚中新世的大气 CO₂ 浓度水平与今天大致相同, 平均的气温直减率每 1000m 为 6.5℃, 温度比现代高 6℃, 则 C₄ 植物繁盛区域的上限在中纬度地区可达 2423m, 在热带可达 2923m。如果晚中新世的气温最大值比现代高 9℃, 则这两个上限分别达到 2885m 和 3385m。因

此, 碳同位素数据指示沃马盆地在晚中新世约 7Ma 的海拔高度必然低于 2900~3400m, 最有可能是 2400~2900m^[25]。

达涕盆地的地层剖面做过多次孢粉分析。产三趾马化石的剖面上部地层沉积时期被认为是以木兰属为主、松属为次的混交林^[27], 而现代喜马拉雅山南坡、沿达涕盆地向下到樟木一带在海拔 3000m 左右进入山地针阔混交林带^[28]。达涕组进一步的孢粉分析结果为乔木植物占 17.1%, 主要有栎属、松属和桦属花粉; 灌木和草本植物花粉占 79.8%, 以蒿属花粉为主, 次为莎草科、禾本科和藜科花粉, 说明该阶段植被为具有栎属、松属的森林草原类型^[3]。

聂拉木达涕地点与吉隆沃马地点的直线距离仅 85km (图 1), 从马科动物的习性看, 这属于同一居群的活动范围, 因此这两个地点的同一种三趾马应有相同的生活习性。这样, 也可以推断达涕盆地在晚中新世的 7Ma 可能具有相同的海拔高度, 即在 2400~2900m 之间。化石发现地点现代的海拔高度接近 5000m, 因此达涕盆地自晚中新世以来快速上升了至少 2000m。

聂拉木地区的剥蚀作用研究结果显示, 中新世中期以来, 喜马拉雅造山带经历两期不同的剥蚀阶段: 15~6Ma 处于缓慢的冷却剥蚀期, 剥蚀速率为 0.27mm/a; 3~1Ma 处于快速剥蚀期, 剥蚀速率为 1.32mm/a^[11]。这可以解释为从中新世最晚期以后喜马拉雅山高速隆升的结果, 而 6Ma 之前处于较低的海拔高度, 与根据达涕盆地福氏三趾马的生态特征分析得到的古高度结果可以相互印证。

致谢 感谢冯文清、时福桥、王维和龙潜在野外工作中的大力协助。

参考文献 (References)

- 张青松, 王富葆, 计宏祥等. 西藏札达盆地的上新世地层. 地层学杂志, 1981, 5(3): 216~220
Zhang Qingsong, Wang Fubao, Ji Hongxiang *et al.* Pliocene stratigraphy of Zhada Basin, Tibet. *Journal of Stratigraphy*, 5(3): 216~220
- 黄万波, 计宏祥, 陈万勇等. 西藏吉隆、布隆盆地的上新世地层. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 西藏古生物, 第一分册. 北京: 科学出版社, 1980. 4~17
Huang Wanbo, Ji Hongxiang, Chen Wanyong *et al.* Pliocene stratum of Guizhong and Bulong basins, Xizang. In: The Scientific Expedition to Tibet, Chinese Academy of Sciences ed. *Palaeontology of Xizang*, Book 1. Beijing: Science Press, 1980. 4~17

- 黄赐璇, 李炳元, 张青松等. 西藏亚汝雄拉达涕古湖盆湖相沉积的时代和孢粉分析. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 西藏古生物, 第一分册. 北京: 科学出版社, 1980. 97~106
Huang Cixuan, Li Bingyuan, Zhang Qingsong *et al.* An analysis of the pollen-spores assemblages and the age of the stratum from Dati palaeo-lake basin at Nainnainxunla, South Xizang. In: The Scientific Expedition to Tibet, Chinese Academy of Sciences ed. *Palaeontology of Xizang*, Book 1. Beijing: Science Press, 1980. 97~106
- 计宏祥, 徐钦琦, 黄万波. 西藏吉隆沃马公社三趾马动物群. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 西藏古生物, 第一分册. 北京: 科学出版社, 1980. 18~32
Ji Hongxiang, Xu Qinqi, Huang Wanbo. The *Hipparion* fauna from Guizhong Basin, Xizang. In: The Scientific Expedition to Tibet, Chinese Academy of Sciences ed. *Palaeontology of Xizang*, Book 1. Beijing: Science Press, 1980. 18~32
- 邱占祥, 黄为龙, 郭志慧. 中国的三趾马化石. 中国古生物志, 新丙种, 1987, 25: 1~250
Qiu Zhanxiang, Huang Weilong, Guo Zhihui. The Chinese hipparionine fossils. *Palaeontologia Sinica*, New Series C, 1987, 25: 1~250
- 李凤麟, 厉大亮. 札达盆地最晚中新世的三趾马化石. 见: 杨遵仪, 聂泽同主编. 西藏阿里古生物. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 186~193
Li Fenglin, Li Daliang. Latest Miocene *Hipparion* (*Plesiohipparion*) of Zanda Basin. In: Yang Zunyi, Nie Zetong eds. *Paleontology of the Ngari Area, Tibet (Xizang)*. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1990. 186~193
- Deng T, Li Q, Tseng Z J *et al.* Locomotive implication of a Pliocene three-toed horse skeleton from Tibet and its paleo-altimetry significance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7374~7378
- 李炳元, 王富葆, 张青松等. 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1983. 1~130
Li Bingyuan, Wang Fubao, Zhang Qingsong *et al.* Quaternary Geology in Xizang. Beijing: Science Press, 1983. 1~130
- 李文漪. 青藏高原南部几个地点上新世孢粉组合及古地理问题的探讨. 见: 李炳元, 王富葆, 张青松等编. 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1983. 162~166
Li Wenyi. Sporo-pollen assemblages from some localities of southern Qinghai-Xizang Plateau in Pliocene and their palaeogeographical significance. In: Li Bingyuan, Wang Fubao, Zhang Qingsong *et al.* eds. *Quaternary Geology in Xizang*. Beijing: Science Press, 1983. 162~166
- 李建忠, 潘忠习, 冯心涛等. 聂拉木地区高喜马拉雅岩石磁组构及其构造含义. 地球物理学报, 2006, 49(2): 496~503
Li Jianzhong, Pan Zhongxi, Feng Xintao *et al.* Magnetic fabrics and tectonic implications of the Higher Himalayan rocks in Nyalam, southern Tibet. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(2): 496~503
- 郑 勇, 张进江, 王佳敏等. 聂拉木地区喜马拉雅造山带上新

- 世以来快速剥蚀事件及其构造-气候耦合意义. 科学通报, 2014, **59**(11): 987~998
- Zheng Yong, Zhang Jinjiang, Wang Jiamin *et al.* Rapid denudation of the Himalayan orogen in the Nyalam area, southern Tibet, since the Pliocene and implications for tectonics-climate coupling. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(9): 874~885
- 12 Eisenmann V, Alberdi M T, DeGiuli C *et al.* Studying Fossil Horses, Volume I: Methodology. Leiden: E. J. Brill, 1988. 1~71
- 13 Bernor R L, Tobien H, Hayek L-A C *et al.* *Hippotherium primigenium* (Equidae, Mammalia) from the Late Miocene of Höwenegg (Hegau, Germany). *Andrias*, 1997, **10**: 1~230
- 14 童永生, 黄万波, 邱铸鼎. 山西霍县安乐三趾马动物群. 古脊椎动物学报, 1975, **13**(1): 35~47
- Tong Yongsheng, Huang Wanbo, Qiu Zhuding. *Hipparion* fauna in Anlo, Hohsien, Shansi. *Vertebrata Palasiatica*, 1975, **13**(1): 35~47
- 15 郑绍华. 西藏比布隆盆地三趾马动物群. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 西藏古生物, 第一分册. 北京: 科学出版社, 1980. 33~47
- Zheng Shaohua. The *Hipparion* fauna of Bulong Basin, Biru, Xizang. In: The Scientific Expedition to Tibet, Chinese Academy of Sciences ed. *Palaeontology of Xizang*, Book 1. Beijing: Science Press, 1980. 33~47
- 16 Zhegallo V I. *Hipparions* from the Neogene deposits of western Mongolia and Tuva. *Sovmestana Sovetsko-Mongolskaia Nauchno-Issledovatel'skaia Geologicheskaja Ekspeditsiia Trudy*, 1971, **3**: 98~119 (in Russian)
- 17 Sefve I. Die *Hipparionen* Nord-Chinas. *Palaeontologia Sinica*, Series C, 1927, **4**(2): 1~93
- 18 岳乐平, 邓涛, 张云翔等. 保德阶层型剖面磁性地层学研究. 地层学杂志, 2004, **28**(1): 48~51
- Yue Leping, Deng Tao, Zhang Yunxiang *et al.* Magnetostratigraphy of stratotype section of the Baode Stage. *Journal of Stratigraphy*, 2004, **28**(1): 48~51
- 19 岳乐平, 邓涛, 张睿等. 西藏吉隆-沃马盆地龙骨沟剖面古地磁年代学及喜马拉雅山抬升记录. 地球物理学报, 2004, **47**(6): 1009~1016
- Yue Leping, Deng Tao, Zhang Rui *et al.* Paleomagnetic chronology and record of Himalayan movements in the Longgugou section of Gyirong-Oma Basin in Xizang (Tibet). *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(6): 1135~1142
- 20 邓涛, 侯素宽, 颀光普等. 临夏盆地上中新统的年代地层划分与对比. 地层学杂志, 2013, **37**(4): 417~427
- Deng Tao, Hou Sukuan, Xie Guangpu *et al.* Chronostratigraphic subdivision and correlations of the Upper Miocene of the Linxia Basin in Gansu, China. *Journal of Stratigraphy*, 2013, **37**(4): 417~427
- 21 Van Couvering J A, Castradori D, Cita M B *et al.* The base of the Zanclean Stage and of the Pliocene Series. *Episodes*, 2000, **23**(3): 179~187
- 22 Agustí J, Cabrera L, Garcés M *et al.* The Vallesian mammal succession in the Vallès-Penedès Basin (Northeast Spain): Paleomagnetic calibration and correlation with global events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, **133**(3): 149~180
- 23 Sen S. Magnetostratigraphic calibration of the European Neogene mammal chronology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, **133**(3): 181~204
- 24 Deng Tao, Qiu Zhanxiang, Wang Benyue *et al.* Late Cenozoic biostratigraphy of the Linxia Basin, Northwestern China. In: Wang Xiaoming, Flynn L J, Fortelius M eds. *Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology*. New York: Columbia University Press, 2013. 243~273
- 25 Wang Y, Deng T, Biasatti D. Ancient diets indicate significant uplift of southern Tibet after ca. 7Ma. *Geology*, 2006, **34**(4): 309~312
- 26 邓涛, 李玉梅. 西藏吉隆盆地的植被生态类型及其在哺乳动物牙齿釉质稳定碳同位素组成上的响应. 科学通报, 2005, **50**(11): 1109~1113
- Deng Tao, Li Yumei. Vegetational ecotype of the Gyirong Basin in Tibet, China and its response in stable carbon isotopes of mammal tooth enamel. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(12): 1225~1229
- 27 徐仁, 孔昭宸, 孙湘君等. 珠穆朗玛峰地区第四纪古植物学的研究. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队编. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966~1968), 第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1976. 93~103
- Xu Ren, Kong Zhaochen, Sun Xiangjun *et al.* Quaternary paleobotanical study of the Mount Qomolangma area. In: The Scientific Expedition to Tibet, the Chinese Academy of Sciences ed. *Reports of the Scientific Expedition to the Mount Qomolangma Area, 1966~1968, Quaternary Geology*. Beijing: Science Press, 1976. 93~103
- 28 钱燕文, 冯祚建, 马莱龄. 珠穆朗玛峰地区鸟类和哺乳类的区系调查. 见: 中国科学院西藏科学考察队编. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966~1968), 生物与高山生理. 北京: 科学出版社, 1974. 1~23
- Qian Yanwen, Feng Zuojian, Ma Lailing. Faunal surveys of birds and mammals in the Mount Qomolangma area. In: The Scientific Expedition to Tibet, the Chinese Academy of Sciences ed. *Reports of the Scientific Expedition to the Mount Qomolangma Area, 1966~1968, Biology and Alpine Physiology*. Beijing: Science Press, 1974. 1~23

HIPPARION FOSSILS OF THE DATI BASIN IN NYALAM, TIBET, CHINA AND THEIR PALEOECOLOGICAL AND PALEOALTIMETRY IMPLICATIONS

Deng Tao^{①②③} Hou Sukuan^① Wang Ning^④ Lu Xiaokang^① Li Yikun^① Li Yu^①

(^①Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; ^②Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101;

^③Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069; ^④College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

The Dati Basin is a small intramontane basin on the south side of the Nainnainxuonla tableland, 45km north of Nyalam countyseat, Tibet Autonomous Region, China where the Late Neogene fluvial and lacustrine strata were deposited. In the previous expedition, a fossil of *Hipparion* was reported from the Dati Basin. Based on the clue, a new excavation discovered more mammalian fossils, including a maxillary of *Hipparion* with cheek teeth. The *Hipparion* horse from Dati is middle-sized, and its upper cheek teeth has small and rounded protocones with sharp anterior and posterior ends, moderate enamel plications, narrow para- and mesostyles, and no hypoconal constriction. Combined with the mandible found previously, the *Hipparion* fossils of the Dati Basin were proved to belong to *H. forstenae*. According to chronological correlation to *H. forstenae* of Gyirong, Tibet and Baode, Shanxi, the age of the horizon bearing *H. forstenae* fossils in the Dati Basin is about 7Ma. As a result, the original Pliocene Dati Formation is revised to be the Late Miocene. Compared with the ecology of *H. forstenae* from the nearby Woma Basin in Gyirong, the paleoelevation of the Dati Basin was about 2400~2900m at 7Ma. Since that time, this area has rapidly risen at least 2000m, which is consistent with the tectonic evidence.

Key words Tibetan Plateau, Dati Basin, *Hipparion*, Late Miocene, paleoelevation