

3D geometric morphometrics of some ursid skulls

YANG Xing-Kai^{1, 2, 3} ZHANG Zhao-Qun^{1*}

(1 Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences Beijing 100044 *Corresponding author:
zhangzhaoqun@ivpp.ac.cn)

(2 University of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100039)

(3 Department of Biological Sciences, University of Calgary Calgary AB T2N 1N4, Canada)

Abstract The 3D laser scanning technique is nowadays more and more applied in the study of skeleton morphology. Complete 3D model of external geometry can be easily obtained by laser scanning. It contains all the external morphologic information, both size and shape, which is the prerequisite for quantitative study of fossil morphology. The materials in this study include specimens of giant panda, Asian black bear, brown bear, and polar bear. Using 3D laser scanning, the complete 3D models of skulls and mandibles of 28 individuals are built. Nine mandible morphological indexes and 15 skull morphological indexes are selected to build mathematical models. We use J48 algorithm of WEKA to build decision trees for pattern classification. 23 landmarks of mandibles and 29 landmarks of skulls are sorted, of which 3D coordinates are used as initial variables to tell the morphological differences of mandibles and craniums of the 28 individuals in the principal component analysis. The result shows that the morphology of giant panda's skull and mandible is significantly different from the other three ursid forms; the morphology of brown bear's skull and mandible is in between the black bear and polar bear. The overall cranial morphology of *Ailuropoda microta* is similar to that of giant panda, but also out of the intraspecific variation, which is another evidence of the durophagous feeding behavior of this Early Pleistocene giant panda. The methods of 3D modeling, decision tree and principal components analysis introduced herein promise future application in morphologic studies.

Key words 3D geometric morphometrics, bear, giant panda, *Ailuropoda microta*, decision tree, principal component analysis

熊类头骨的三维几何形态学初步研究

杨兴恺^{1, 2, 3} 张兆群^{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
*通讯作者)

(2 中国科学院大学 北京 100039)

(3 加拿大卡尔加里大学生物学系 卡尔加里 T2N 1N4)

摘要: 三维激光扫描技术在骨骼形态学研究中得到越来越广泛的应用。运用激光扫描可得到骨骼三维几何形态学的全部信息, 用于骨骼形态的定量分析, 对于建立客观的分类指标以及形态生态学研究有重要意义。本研究以大熊猫、亚洲黑熊、棕熊和北极熊为研究对象, 为亚洲黑熊、棕熊和北极熊的共计28件头骨和对应下颌建立三维模型, 提取熊类下颌的9个形态测量的比例指标和头骨的15个形态测量的比例指标, 对下颌和头骨进行数学建模。使用Weka的J48算法, 构建决策树, 成功实现了模式分类。又在上述三维模型的基础上, 确定了23个下颌形态标志点和29个头骨形态标志点; 以标志点的三维坐标为初始变量, 进行主成分分析, 比较4种熊类的下颌和头骨形态差异。结果显示大熊猫的下颌和头骨形态与其他3类熊差别显著; 棕熊的头骨和下颌形态介于黑熊和北极熊之间。在此基础上, 以同样方法将一例大熊猫小种化石头骨与4种现生熊类头骨形态进行比较, 结果显示大熊猫小种头骨形态与现生大熊猫相似, 而又不在其种内差异的形态区间内。除去大小因素, 大熊猫小种在头骨形态上与现生大熊猫仍有一定差异, 略倾向于杂食熊类。

关键词: 三维几何形态学, 熊, 大熊猫, 大熊猫小种, 决策树, 主成分分析

中图法分类号: Q915.874 文献标识码: A 文章编号: 1000-3118(2013)04-0331-11

骨骼形态特征测量是形态学定量研究的基础。常规测量工具, 如游标卡尺、弯角规和测量盒等虽有便利、直观等优点, 但大量形态学特征无法被这些工具所准确测量(Driesh, 1976)。更重要的是, 骨骼的形态学特征包含了大小和形状两个方面, 而传统形态测量所能获取的一系列线性距离虽然可以方便地获取大小信息, 却很难捕获标本的几何形态。20世纪80~90年代以来, 形态结构数值化和数据分析方法有了重要突破, 几何形态测量学(geometric morphometrics)兴起, 掀起了“形态学方法的革命”(Rohlf and Marcus, 1993; Zelditch et al., 2004)。对于形态信息的获取, 以往的解决方案有: 在照片上选取标志点, 假定这些标志点对应了骨骼上相应标志点在二维平面上的投影位置, 但这种方法难以反映三维信息。CT扫描可以获取完整的三维形态学信息, 可用于颅内解剖的研究, 但成本高昂且耗时。而三维激光扫描可以较低的成本快速获取骨骼完整的外部形态学信息, 这是传统的形态测量方法难以达到的。通过数学模型和主成分分析等方法可以更为准确地表现形态特征的异同。

熊类隶属食肉目, 但在食性上有较明显的分化。棕熊(*Ursus arctos*)和亚洲黑熊(*Ursus thibetanus*)是典型的熊科代表, 杂食, 分布广泛, 适应生境多样。黑熊和棕熊由于相似的适应, 有着相似的骨骼特征: 裂齿不似其他食肉动物那样尖利, 第一前臼齿小或缺失, 犬齿与臼齿之间常有齿隙(Stirling and Derocher, 1990)。而北极熊(*Ursus maritimus*)和大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)分别是现生唯一的肉食熊和素食熊。它们的生态差异在骨骼形态上有明显的表现。为了适应咀嚼, 大熊猫的头骨和下颌明显厚重, 有粗大的颧弓, 高大的矢状嵴、人字嵴和冠状突, 深陷的下颌骨咬肌面和发达的颊齿(Davis, 1964)。北极熊自棕熊分化而来, 但其食性特化为以海洋动物为主, 骨骼形态也较棕熊有了明显改变(Kurten, 1964)。本文将三维几何形态学应用于上述熊类动物的头骨标本研究中, 结合数学建模、模式分类与主成分分析等手段研究分析不同食性的熊类动物间的形态差异, 并将大熊猫小种(*Ailuropoda microta*)的化石头骨(Jin et al., 2007)与现生类群进行对比分析, 探讨其食性取向。

1 材料与方法

1.1 研究材料

研究标本来自中国科学院古脊椎动物与古人类研究所标本馆和中国科学院动物研究所标本馆兽类分馆。现生标本共计28件。其中大熊猫头骨及相应下颌各10件, 标本号分别为动物所的26449、32738、32741、32743、32751、32752、32755、32756、32758和古脊椎所的1236; 黑熊头骨及下颌各11件, 标本号分别为动物所的25000、27046、08134、H1040、H1134和古脊椎所的402、1306、1064、1548、50、484; 棕熊头骨及下颌各5件, 标本号分别为动物所的28391和古脊椎所的1065、1328、489、52; 北极熊头骨及下颌两件, 标本号为古脊椎所1274和252。大熊猫小种头骨化石一件, 标本号为IVPP V 14564, 时代为早更新世, 产自广西金银洞。

1.2 仪器与分析软件

标本扫描使用美国Nextengine公司制造的高精度三维激光扫描仪Nextengine HD1.2.1。扫描精度为0.005 in (即取点密度为每平方英寸40000点)。使用ScanStudio软件对扫描的图像进行合成及精简, 得到三维模型。使用Landmark version 3进行标志点的选取(Wiley et al., 2005)和长度测量。使用Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) 软件, 应用C4.5算法中的J48算法构建决策树。使用MorphoJ软件对标志点坐标进行Procrustes Fit处理和主成分分析。测量标志点和形态标志点的选取参考Yang et al. (2005) 和Figueirido and Soibelzon (2009)。

1.3 数据采集与模型的构建

在深入调查研究、了解对象信息、作出简化假设和分析内在规律等工作的基础上, 用数学的符号和语言, 将其表述为数学式子, 就是数学模型。然后用通过计算得到的模型结果来解释实际问题, 并接受实际的检验, 这个过程就是数学建模(Meerschaert, 1999)。

具体到本研究, 我们给头骨和下颌建立数学模型, 并进行分类, 希望找到尽可能多的指标反映骨骼的形状, 然后在决策树的建立过程中, 筛选出有意义的指标, 得到最简单的可用于分类的模型。

考虑到3D扫描技术的操作特点和后期数据采集的可行性, 将下颌与头骨分别扫描并采集数据, 这样极大地提高了工作效率和数据采集及处理的可操作性。

1.3.1 下颌数据采集

如图1D, E所示, 选定的标志点如下: S0, 下颌骨最前端中点, 即门齿中缝外缘齿槽基部; S1, 髂突最外点; S2, 角突最后点; S3, 第三臼齿最后缘中点; S4, 裂齿前缘与最后前臼齿相接的外缘中点; S5, 裂齿后缘与第二臼齿相接的外缘中点; S6, 冠状突最高点; S7和S8, 犬齿后缘与齿槽相交处中点; S9, 下颌联合最后点; S10, S1所在髂突最内点; S11, S1对侧的髂突最外点。

测量指标10个: a1: S0-S1和a2: S0-S2, 反映下颌总长; a3: S0-S3, 反映齿列长;

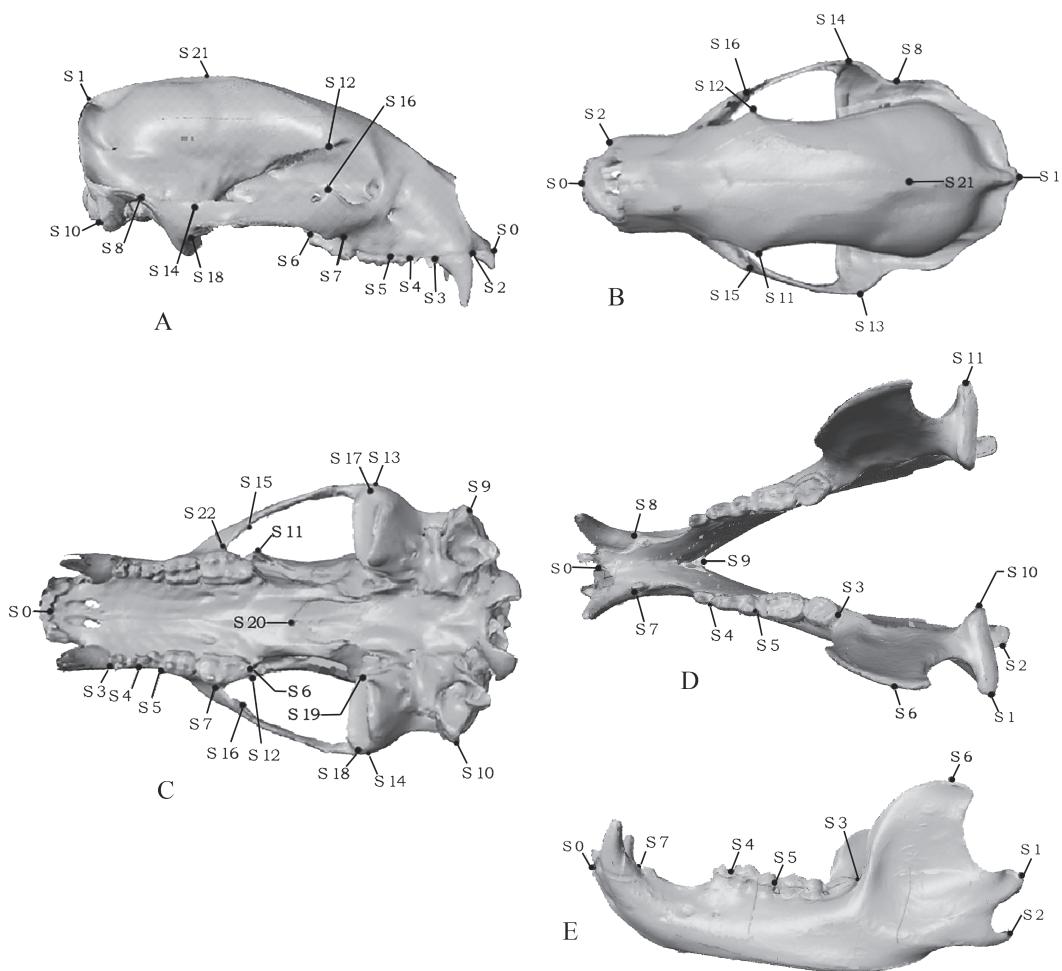


图1 头骨与下颌骨测量标志点

Fig. 1 Measuring points of skull and mandible

A. 头骨侧视 lateral view of skull; B. 头骨顶视 dorsal view of skull; C. 头骨腹视 ventral view of skull;

D. 下颌骨冠面视 occlusal view of mandible; E. 下颌骨唇侧视 labial view of mandible

a4: S4-S3, 反映臼齿齿列长; a5: S4-S5, 反映裂齿长; a6: S2-S6, 反映冠状突高; a7: S7-S8, 反映吻宽; a8: S0-S9, 反映下颌联合长; a9: S1-S10, 反映髁突宽; a10: S1-S11, 反映下颌宽。对全部28件标本实行测量, 其中, a1, a2, a3, a4, a5, a6和a9均在左右两侧进行并取均值。

为了避免个体的大小差别在形态测量中对分类的影响, 这里只考虑形状的差别, 因而采用比例反映形态; 为了降低误差, 我们以最大的数值作为分母, a1与a2大小相当, 选取a1。于是得到:

$a=a2/a1$, $b=a3/a1$, $c=a4/a1$, $d=a5/a1$, $e=a6/a1$, $f=a7/a1$, $g=a8/a1$, $h=a9/a1$, $i=a10/a1$ 共计9个指标。对应其分类, 建立模型, 写成arff文件。

1.3.2 头骨数据采集

如图1A-C所示, 选定标志点如下: S0, 前领骨最前端中点; S1, 头骨最后缘突出点; S2, 犬齿前缘与齿槽相接点; S3, 犬齿后缘与齿槽相接点; S4, 裂齿前缘最外侧与齿槽相接点; S5, 裂齿后缘最外侧与齿槽相接点; S6, 第二臼齿后缘与齿槽相接点; S7和S22, 颧弓下缘最前点; S8, 外耳道上方颧弓后缘止点; S9和S10, 左右乳突外侧最突出点; S11和S12, 额骨眶后突外缘顶点; S13和S14, 颧弓外缘最外点; S15和S16, 颧突最突出点; S17和S18, 下颌关节窝最外点; S19, 下颌关节窝最内侧点; S20, 硬腭后缘中点, 即翼间孔前缘与腭中缝的交点; S21, 以腭面为基准面的颅骨正中最高点。

测量指标16个: a1: S0-S1, 反映头骨长; a2: S2-S3, 反映犬齿粗; a3: S4-S5, 反映裂齿宽; a4: S2-S6, 反映齿列长; a5: S5-S6, 反映臼齿齿列长; a6: S7-S8, 反映颧弓长; a7: S0-S9, 反映头骨长; a8: S9-S10, 反映头骨枕面宽; a9: S11-S12, 反映眶间宽; a10: S13-S14, 反映头骨宽; a11: S11-S15, 反映眶后闭合程度; a12: S17-S18, 反映下颌宽; a13: S18-S19, 反映下颌髁突宽; a14: S20-S21, 反映头骨高; a15: S1-S9, 反映头骨枕面高; a16: S7-S22, 反映吻宽。其中a2, a3, a4, a5, a6, a7, a11, a13和a15分别在左右两侧测量并取均值。

同样, 我们以最大的a1为分母, 得到:

$A=a2/a1$, $B=a3/a1$, $C=a4/a1$, $D=a5/a1$, $E=a6/a1$, $F=a7/a1$, $G=a8/a1$, $H=a9/a1$, $I=a10/a1$, $J=a11/a1$, $K=a12/a1$, $L=a13/a1$, $M=a14/a1$, $N=a15/a1$, $O=a16/a1$ 共计15个指标。对应其分类, 建立模型, 写成arff文件。

1.3.3 构建决策树

决策树是数据挖掘领域中最重要的两种模式分类方法之一。它是适用于多变量的分类工具, 具有简约表示和高效的执行能力(Witten and Frank, 2003)。决策树比较常用的算法是ID3算法和C4.5算法。1986年Quinlan提出了著名的ID3算法, 该算法具有理论清晰, 方法简单, 学习能力较强的优点, 但是存在偏向于多值属性的问题; 例如, 如果存在唯一标识属性ID, 则ID3会选择它作为分裂属性, 这样虽然使得划分充分纯净, 但对分类几乎毫无用处。ID3的后继算法C4.5使用增益率(gain ratio)的信息增益扩充, 试图克服ID3算法的缺陷。C4.5算法可以在树构造过程中进行剪枝, 能够完成对连续属性的离散化处理以及对不完整数据进行处理, 产生的分类规则易于理解, 准确率高。基于以上考虑, 本文采用C4.5算法中的J48算法。

1.4 几何形态学标志点的选取

下颌共选取标志点23个(图2D-E): S0, 下颌联合最后点; S1和S10, 左右犬齿前缘与门齿相接点; S2和S11, 左右犬齿后缘与前臼齿相接点; S3和S12, 左右裂齿前缘与最后前臼齿相接的外缘与齿槽交点; S4和S13, 左右裂齿后缘与第二臼齿相接的外缘与齿槽交点; S5和S14, 左右齿列最后缘与齿槽交点; S6和S15, 左右冠状突最尖处; S7和S16, 左右髁突最外点; S8和S17: 左右角突最后点; S9和S18, 左右角突最内侧点; S19和S21, 位于左右下颌最下缘, 其分别与S4和S13的连线垂直于下颌下缘; S20和S22, 位于左右下颌最下缘, 其分别与S5和S14的连线垂直于下颌下缘。对全部28件下颌选取标志

点, 以dta格式输出, 以三维坐标记录每一标志点。

头骨标志点的选取, 方法同下颌, 共选29点。各点如下: S0, 前颌骨最前端中点; S1, 鼻骨最前端中点; S2, 额骨中点, 即两额骨眶后突连线与额骨中缝的交点; S3, 以腭面为基准面的颅骨正中最高点; S4, 头骨最后缘突出点; S5和S16, 左右犬齿前缘与齿槽相接点; S6和S17, 左右犬齿后缘与齿槽相接点; S7和S18, 左右裂齿前缘最外侧与齿槽相接点; S8和S19, 左右裂齿后缘最外侧与齿槽相接点; S9和S20, 左右第二臼齿后缘与齿槽相接点; S10和S21, 左右额骨眶后突外缘顶点; S11和S22, 左右颧突顶点; S12和S23, 左右下颌关节窝最内点; S13和S24, 左右下颌关节窝最外点; S14和S25, 左右颧弓最后缘; S15和S26, 左右乳突外侧最突出点; S27和S28, 颧弓下缘最前点。对全部28件

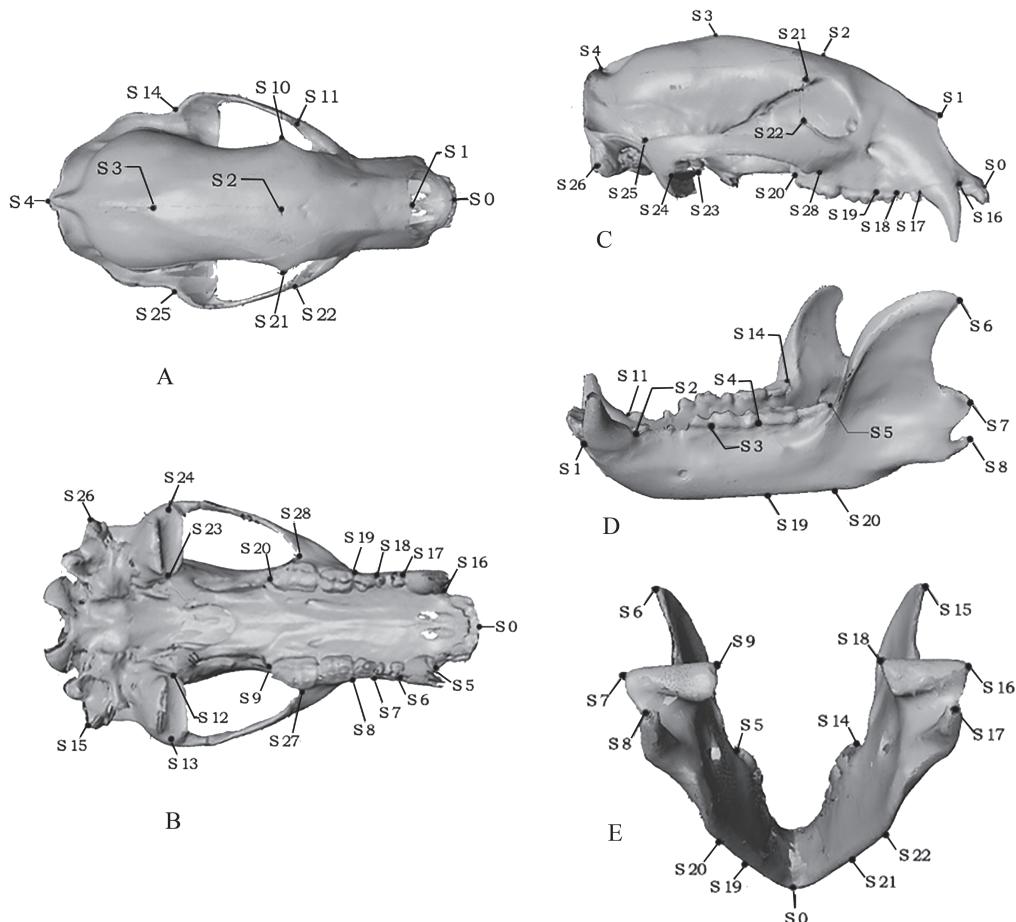


图 2 头骨与下颌骨几何形态学标志点

Fig. 2 Landmarks for skull and mandible

A. 头骨顶视 dorsal view of skull; B. 头骨腹视 ventral view of skull; C. 头骨侧视 lateral view of skull;

D. 下颌骨侧视 lateral view of mandible; E. 下颌骨后侧视 posterior view of mandible

头骨选取标志点, 以黑熊402为例展示如图2A-C。

1.5 主成分分析

主成分分析是多变量分析的一种方法。对于我们得到的标志点, 在同一件标本上, 其位置是可以通过坐标确定的; 但是不同标本的标志点, 却不能通过坐标数值来比较, 因为每件标本都在不同的坐标系中, 其原点是不同的, 需要通过变换, 将它们放到同一坐标系中, 移动其位置, 将不同标本按照同样角度叠放在一起; 此外还需要消除尺寸的差异, 将大的缩小, 小的放大, 才能得到位于同一坐标系下, 可比较的、完全反映形状而非大小的新的坐标点, 这一过程就是Procrustes Fit。使用Klingenberg编写的MorphoJ软件首先对所有标本的坐标点进行Procrustes Fit。这可以理解成一种归一化处理, 得到的新的坐标矩阵即可以进行主成分分析。

2 结果

2.1 决策树

根据下颌模型和头骨模型, 构建决策树(图3)。在根据下颌模型产生的决策树(图3A)中, 如果 $d > 0.13$, 为熊猫; 如果 $d \leq 0.13$, $c \leq 0.25$, 为北极熊; 如果 $d \leq 0.13$, $c > 0.25$, $g \leq 0.28$, 为棕熊; 如果 $d \leq 0.13$, $c > 0.25$, $g > 0.28$, 为黑熊。其中 d =裂齿长/下颌总长; c =臼齿齿列长/下颌总长; g =下颌联合长/下颌总长。对样本集分类结果表示在分类名称后面的括号里, 前面的数字是全部结果, 后面的数字是错误的结果。对全部28件标本按如上分类, 得到的熊猫结果为10个, 错误结果为0个; 北极熊结果为2个, 错误0个; 棕熊结果为6个, 错误1个; 黑熊结果为10个, 错误0个。换言之, 此决策树对28件样本进行分类, 熊猫和北极熊全都分对了, 一件黑熊误判成了棕熊。

在根据头骨模型产生的决策树(图3B)中, 如果 $O > 0.31$, 为熊猫; 如果 $O \leq 0.31$, $D \leq 0.14$, 为北极熊; 如果 $O \leq 0.31$, $D > 0.14$, $F \leq 0.82$, 为棕熊; 如果 $O \leq 0.31$, $D > 0.14$, $F > 0.82$, 为黑熊。其中 O =颧弓最前端吻宽/头骨总长; D =臼齿齿列长/头骨总长; F =乳突

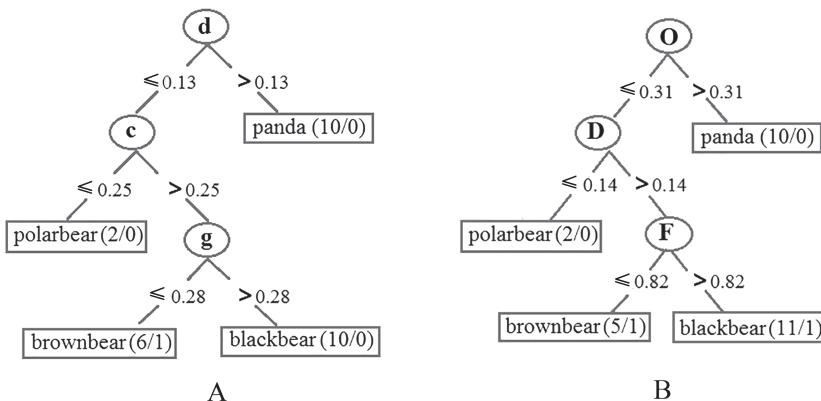


图3 下颌(A)和头骨(B)决策树
Fig. 3 Decision trees based on mandibles (A) and skulls (B)

外侧最突出点至前颌骨最前端中点的长度/头骨总长。对全部28件标本按如上分类，熊猫和北极熊全都分对了，一件黑熊误判成了棕熊，一件棕熊误判成了黑熊。

对照节点的变量，可知在下颌建模所用的9个指标中， $d=$ 裂齿长/下颌总长， $c=$ 臼齿齿列长/下颌总长， $g=$ 下颌联合长/下颌总长这3个指标在分类中最具意义。而头骨建模所用的15个指标中， $O=$ 颧弓最前端吻宽/头骨总长， $D=$ 臼齿齿列长/头骨总长， $F=$ 乳突外侧最突出点至前颌骨最前端中点的长度/头骨总长这3个指标在分类中最具意义。实际应用中，只需对下颌和头骨分别测量4个数值，得到这6个指标，按照前述的决策树，就可以实现对这4种熊的较好分类。

2.2 主成分分析

2.2.1 下颌主成分分析

对现生熊类28个样本的所有标志点的三维坐标矩阵做主成分分析，结果如图4A。第一主成分PC1和第二主成分PC2的累计贡献率分别达到77%和84%，于是我们以PC1和PC2为主成分，将样本变量降至2维，投影到坐标系中(图4B)。图中大熊猫在PC1方向上与其他3类熊能够明显区别开；北极熊与棕熊在图中较为相近，但在PC1上也可以分开；而棕熊与黑熊在图中最为相近，较难分开，差别主要体现在PC2上。这与这4类熊之间的形态差异程度相吻合。

2.2.2 头骨主成分分析

对现生熊类的全部28个样本做主成分分析，结果如图4C。

第一主成分PC1和第二主成分PC2的累计贡献率分别达到63%和75%，于是我们以PC1和PC2为主成分，将样本变量降至2维，投影到坐标系中(图4D)。图中大熊猫与其他3类熊的区别仍旧明显，这一结果再次体现了大熊猫与其他3类熊的形态学差异的显著程度，尤其是在最能反映形态差别的PC1上，大熊猫与其他三者区别非常明显；北极熊、棕熊和黑熊在图中位置相近，在PC1上三者相互都不能够区别开；在PC2上，北极熊、棕熊和黑熊则依次排列，基本能够很好地区别，这与这3类熊之间的形态差异程度相吻合。

对28个样本下颌和头骨标志点的主成分分析正确地将4种熊头骨形态学的差异通过测量数据直观地在图中呈现出来，分析结果真实反映了4种熊头骨的形态差异。

2.3 大熊猫小种与现生熊类头骨的几何形态学比较

以上对4种现生熊类头骨及下颌的主成分分析结果，较好地反映了其骨骼形态的差异，说明标志点选取合适。欲将其应用于古生物学研究，需考虑化石的保存状况。本例大熊猫小种头骨保存相当完整，仅缺两侧颧弓。以上描述的29个头骨标志点，除去S11, S14, S15, S22, S24, S25和S26，可对其余22个标志点进行定位。与28具现生标本的对应的22个标志点进行比较，主成分分析结果如图4E。第一主成分PC1和第二主成分PC2的累计贡献率分别达到64%和72%，于是我们以PC1和PC2为主成分，将样本变量降至2维，投影到坐标系中(图4F)。图中大熊猫与其他3类熊的区别仍旧明显，而棕熊、黑熊和北极熊的形态界限则不甚清晰，说明去掉的7个特征点可能在区别这3类熊的形态差异上起

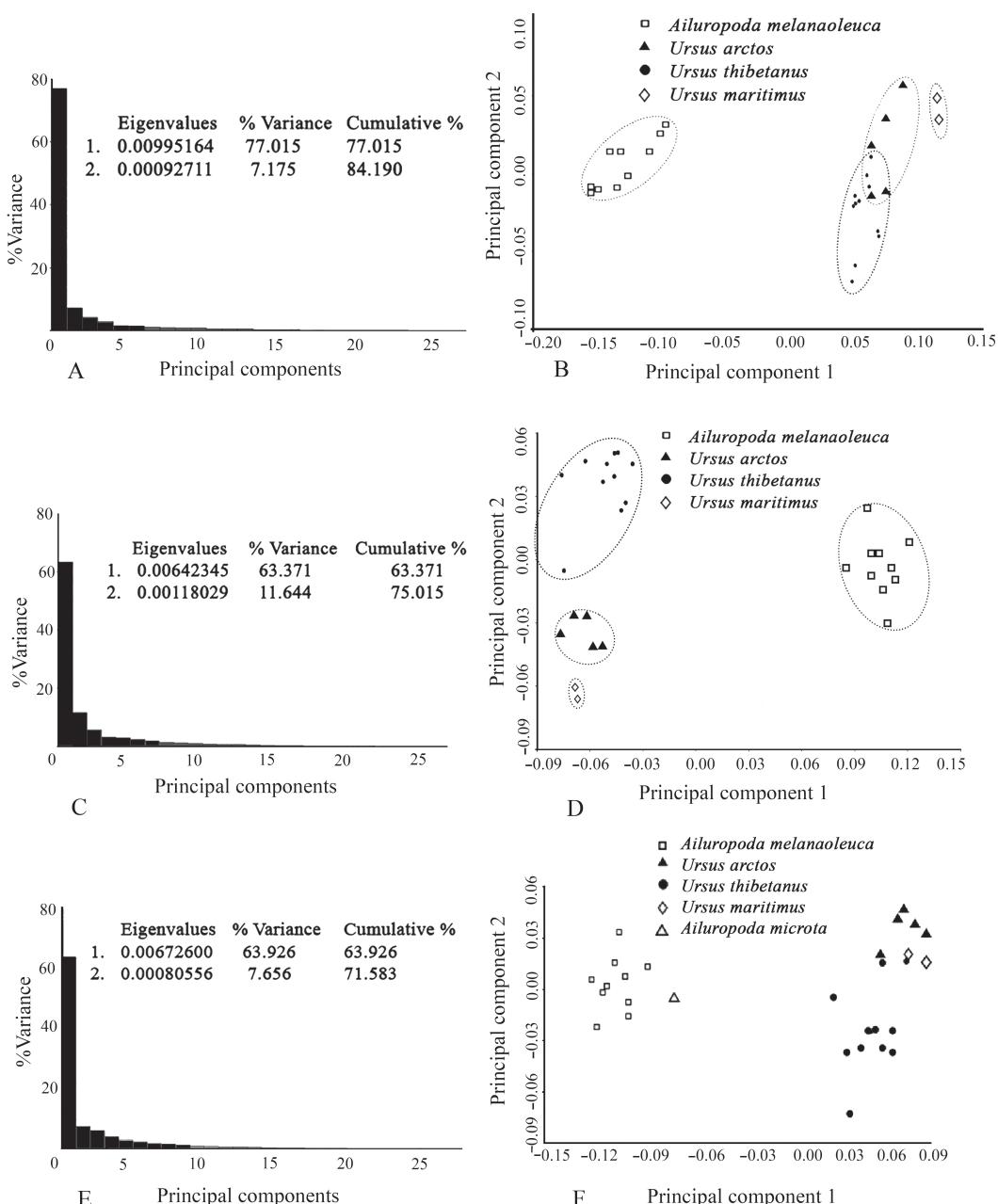


图 4 熊类头骨与下颌骨主成分分析结果

A. 现生熊类下颌骨主成分分析结果; B. 现生熊类下颌骨主成分二维分布图; C. 现生熊类头骨主成分分析结果; D. 现生熊类头骨主成分二维分布图; E. 熊类(包括大熊猫小种)头骨主成分分析结果; F. 熊类(包括大熊猫小种)头骨主成分二维分布图

Fig. 4 Principal component analysis of bear skulls and mandibles

A. Principal components of living bear mandibles; B. PCA plots of geometric morphometric analysis for living bear mandibles; C. Principal components of living bear skulls; D. PCA plots of geometric morphometric analysis for living bear skulls; E. Principal components of bear skulls (*Ailuropoda microta* included); F. PCA plots of geometric morphometric analysis for bear skulls (*Ailuropoda microta* included)

着一定的作用。大熊猫小种落在现生大熊猫与其余3种熊的形态范围之间，而与现生大熊猫十分接近。限于标本数量，我们对大熊猫小种的种群形态无法得知，但就这件化石而言，在统一了尺寸之后，它仍与现生大熊猫有着一定程度的形态差异，这一差异超出了基于10件标本量的种内差异。

3 讨论

决策树的节点属性显示下颌裂齿长/下颌总长这一指标可以将大熊猫与其他熊类很好地区分开，也就是说大熊猫具有相对更长的裂齿。事实上，大熊猫的所有臼齿都明显比另外3种熊大，这与其高强度的咀嚼是密切相关的。区分北极熊与其余两种熊的指标是下颌臼齿齿列长/下颌总长，说明北极熊有相对更短的臼齿齿列，这反映了它从棕熊进化而来过程中，食性转为肉食，咀嚼的减少使臼齿随之退化。对于头骨，颧弓最前端吻宽/头骨总长可以将大熊猫与其他熊类很好地分开，即大熊猫具有相对更宽的吻，这与其颊齿加宽有关，也是食竹的适应表现。将北极熊与其他两类熊分开的指标同样是臼齿齿列长/头骨总长，与下颌意义相同。区分非常相像的黑熊和棕熊的指标，在下颌为下颌联合长/下颌总长，黑熊有相对较长的下颌联合，而棕熊下颌联合较短；在头骨为乳突外侧最突出点至前领骨最前端中点的长度/头骨总长，这两个指标的生物学意义还有待于进一步研究。

利用决策树，基本成功地展示出4种熊类的形态差异，实现了较好的分类。但由于标本数目只有28件，种类也较少，只有4种，属性指标只有9和15个，其准确性尚有待于检验。

传统的人工分类，靠专业人员长期学习积累的经验才能做到，而决策树可以不那么依赖于对生物学属性的了解，而通过计算，找到差异实现分类。在面对门类繁多的大量样本时，决策树的优势可能就会体现出来。决策树有基于统计的、固定的算法(然而不是唯一的算法)，对分类的规则有清楚的表述，对分类结果的好坏也有明确的可比较的表征。与传统的形态学相比，更为简单，易于操作。

主成分分析在下颌和头骨的结果都很好地反映了4种熊之间的形态学差异程度，与直观观察的结果基本一致。将大熊猫小种头骨化石与现生熊类对比，定量地展示了其与现生熊类的相似和差异。结果显示，大熊猫小种头骨形态介于大熊猫与其他3种熊类之间，与大熊猫非常接近，又不在其种内差异范围内。从头骨形态看，它的食性可能与现生大熊猫十分接近，这与之前基于牙齿和额窦的研究结果一致(Jin et al., 2007)，也与颅内形态的相似性相互印证(Dong, 2008)。

以上研究中，主成分分析比较充分地利用了扫描获得的骨骼形态学信息，获得了客观的分析结果，这些结果与传统方法有着良好的一致性。今后的工作中，这一方法能够辅助研究人员的感官判断，为形态学研究提供更客观的理论基础。本工作是骨骼形态学定量化研究的一个尝试，随着三维扫描仪器分辨率的不断提高，新的计算机软件的开发与应用，以及更多标本数据的积累，骨骼形态学研究必将有广阔的前景。

致谢 感谢中国科学院动物研究所标本馆工作人员在标本观测扫描工作中给予的协助, 动物所杨奇森研究员给予了大力支持和帮助。胡楠和张觉非在模式分类问题上与作者讨论。

References

- Davis D, 1964. The giant panda: a morphological study of evolutionary mechanisms. *Fieldiana: Zool Mem*, **3**: 1–339
- Dong W, 2008. Virtual cranial endocast of the oldest giant panda (*Ailuropoda microta*) reveals great similarity to that of its extant relative. *Naturwissenschaften*, **95**: 1079–1083
- Driesch A V D, 1976. A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites. *Peabody Mus Bull*, **1**: 1–148
- Figueirido B, Soibelzon L, 2009. Ecomorphological correlates of craniodental variation in bears and paleobiological implications for extinct taxa: an approach based on geometric morphometrics. *J Zool*, **277**: 70–80
- Jin C Z, Ciochen R L, Dong W et al., 2007. The first skull of the earliest giant panda. *Proc Nat Acad Sci USA*, **104**: 10932–10937
- Kurten B, 1964. The evolution of the polar bear, *Ursus maritimus* Phipps. *Acta Zool Fenn*, **108**: 1–26
- Meerschaert M M, 1999. Mathematical Modeling. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 1–319
- Rohlf F J, Marcus L F, 1993. A revolution in morphometrics. *Trends Ecol Evol*, **8**: 129–132
- Stirling I, Derocher A, 1990. Factors affecting the evolution and behavioral ecology of the modern bears. *Int Conf Bear Res Manag*, **8**: 189–204
- Wiley D, Amenta N, Alcantara D et al., 2005. Evolutionary morphing. *Proc IEEE Vis Conf*, 2005: 431–438
- Witten I, Frank E, 2003. Data mining: practical machine learning tools and techniques with JAVA implementations. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 1–218
- Yang Q S(杨奇森), Xia L(夏霖), Ma Y(马勇) et al., 2005. A guide to the measurement of mammal skull I: basic measurement. *Chinese J Zool(动物学杂志)*, **40**(3): 50–56(in Chinese with English summary)
- Zelditch M L, Swiderski D L, Sheets H D et al., 2004. Geometric Morphometrics for Biologists. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 1–428