蜥脚类恐龙的系统分析方法研究
——以何氏通安龙为例

杨春燕
成都理工大学,成都,610059

内容提要:文章首先以四川盆地早侏罗世的蜥脚类何氏通安龙(*Tonganosaurus hei* Li et al.,2010)为例,详细介绍了定量系统分析方法及该方法在确定蜥脚类恐龙化石新材料的分类位置中的应用。该方法包括4个环节:编写和修订语句库,建立数据库,软件分析,结果分析。其中编写和修订语句库尤为关键,需要根据化石材料对语句库进行补充和完善,使得每一个特征都不被遗漏,而且具有与其重要性相一致的权重。随后,文章应用该方法研究了四川盆地侏罗纪长颈蜥脚类的演化关系。结果表明,定量系统分析具有客观、快速、全面的优点。最为重要的是,定量系统分析结果与传统的定性形态分析结果一致,说明该方法对定性形态方法具有补充、校验的作用。

关键词:蜥脚类;定量分析;分类位置;何氏通安龙;演化关系

系统分析(Systematic Paleontology),又叫系统古生物学、分类古生物学,是相对于传统的古生物研究方法——化石形态分析(Fossil Morphology)的一种研究方法。化石形态分析,主要通过观察、测量新发现的化石材料,与其他已有属种做直接的比较和分析,以确定新发现化石材料的分类位置。化石形态分析属于定性方法,具有直观、形象的特点。我国蜥脚类恐龙(Sauropod)的化石形态分析,始于1929年Wiman对山东出土的师氏盘足龙(*Euhelopus zdanskyi*)的研究(Wiman,1929),至今已有80多年的历史了。

系统分析属于定量方法,将蜥脚类恐龙的特征数量化(数据化),再进行软件分析,具有客观、快速、全面的特点。1994年,美国芝加哥大学的Wilson等人提出了蜥脚类恐龙的系统分析(Phylogenetic relationship)的思想(Wilson et al., 1994),随后进行了更深入的研究(Wilson et al.,1998; Wilson, 2002)。此后,英国布里斯托大学的Upchurch等人也开始涉足蜥脚类恐龙的系统分析研究(Upchurch,1995,1998),陆续发表了英国出土蜥脚类恐龙的定量系统分析成果(Upchurch et al.,2002,2003)。后来,Harris综合了Upchurch和Wilson的描述,整理了331条简单语句,并对*Suuwassea emilieae*进行了分析(Harris,2006)。

国内蜥脚类恐龙的系统分析始于2003年。欧阳辉在其博士学位论文中,将杨氏马门溪龙的骨骼特点依照Wilson编写的109条简单语句用字符表示出来,但尚未使用软件进行分析(欧阳辉,2003)。2010年,本文作者在其硕士学位论文中,初步使用了蜥脚类恐龙的定量分析方法(杨春燕,2010)。

1 定量系统分析方法

本文以蜥脚类恐龙(Sauropoda)何氏通安龙为研究对象,介绍系统分析方法在研究蜥脚类恐龙新发现化石材料中的应用。该研究过程包括如下4个环节:编写和修订语句库,建立数据库,软件分析,结果分析。何氏通安龙(*Tonganosaurus hei* Li et al.,2010)(李奎等,2010)是在四川会理通安发现的长颈蜥脚类恐龙,出土于下侏罗统益门组。

1.1 编写和修订语句库

简单语句是组成语句库的基本要素。简单语句(Simple sentence),指完整描述了化石某一特征的简洁明了的语言。一条简单语句只描述一个特征。一个语句库由若干条简单语句组成。理论上,一个语句库涵盖一条完整蜥脚类恐龙的所有特征。

被描述的特征有如下几个类型:①骨骼的形态

注:本文为自然科学基金项目"四川盆地恐龙动物群的演化与兴衰"(40572016)和成都理工大学青年基金项目"蜥脚类恐龙的定量分析方法研究"共同资助的成果。
收稿日期:2012-06-04;返回日期:2012-10-02;责任编辑:黄敏。
作者简介:杨春燕(1984-),女,纳西族。成都理工大学助理馆员,博士研究生,主要研究古脊椎动物(蜥脚类恐龙)。Email:ycy-y@163.com。

及大小,其中骨骼大小可用测量数据表示;②骨骼的发育程度,如脊椎椎体组织蜂窝构造的发育程度;③骨骼的数目,如在蜥脚类恐龙研究中,牙齿、颈椎、背椎、荐椎、尾椎等的数目是分类的重要依据之一;④骨骼的比较值。互相比较的数值可以是同一块骨骼的不同测量值,也可以是不同部位骨骼的测量值。例如,头骨的长高比值、前后肢的长度比值、椎体的长宽比值等。通常情况下,一个特征可与一块骨骼不完全对应,一块骨骼亦可有多个特征,一个特征亦可由多块骨骼组成。

不同属种的蜥脚类恐龙,在同一条简单语句所描述的骨骼或者相同部位的特征会有差异,既有祖征(plesiomorphic, primitive)又有衍征(apomorphic,derived)。因此,一条良好的语句,应该全面包括此骨骼或部位可能出现的所有性状。性状不同则用不同的字符表示,常用字符包括:0、1、2、3、4 等。

例如,简单语句"颈椎的椎型:双平型或者双凹型(0),后凹型(1)"(Upchurch,1998)。这是描述骨骼形态的简单语句。椎型,指的是脊椎(包括颈椎、背椎、荐椎和尾椎)椎体的前后关节面组合类型,如图 1 所示。每一个脊椎椎体有前后两个关节面,前关节面前凸而后关节面为凹型的,称该椎体前凸后凹型,简称后凹型,在蜥脚类的颈椎、背椎、尾椎中可常见到此类型椎体,如维曼北方龙(*Borealosaurus wimani*)的尾椎(尤海鲁等,2004);前后关节面均为凹型的,称为双凹形,如赵氏扶绥龙(*Fusuisaurus zhaoi*)的尾椎(莫进尤等,2006);前关节面前平而后关节面为凹型的,称为前平后凹型,简称平凹型;前后关节面均为平的,称为双平型;前关节面前凹而后关节面为凸型的,称为前凹后凸型,简称前凹型,此种椎体多见于晚侏罗世及白垩纪蜥脚类的前部尾椎。就针对蜥脚类的颈椎而言,其椎型有 3 种不同类型,包括双平型、双凹型和后凹型。石碑珙县龙(*Gongxianosaurus shibeiensis*)的颈椎是双平型的(何信禄等,1998),因此,应该用"0"表示此特征。而大部分蜥脚类恐龙,如合川马门溪龙(*Mamenchisaurus hochuanensis*)(杨钟健等,1972)、何氏通安龙(李奎等,2010)、那摩邹达龙(*Tazoudasaurus naimi*)(Allain et al., 2004)等的颈椎是后凹型的,因此,该处"1"表示颈椎是后凹型的。

如上所述,一条简单语句描述一个特征,蜥脚类恐龙有很多特征,每一个特征都需要被描述。因此,

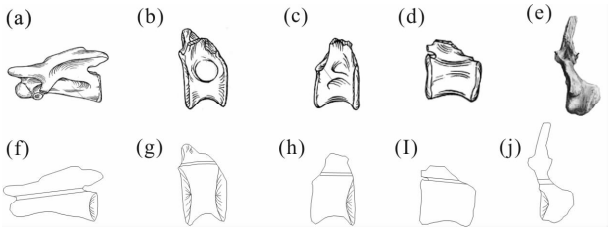


图 1　蜥脚类恐龙的椎体类型

Fig. 1　The centrum types of sauropod dinosaur

(c)—为右视图,其余均为左视图;(a)～(d)—何氏通安龙的脊椎:(a)—颈椎(后凹型);(b)—后部背椎(双凹型);(c)—前部背椎(平凹型);(d)—后部尾椎(双平型);(e)—杨氏马门溪龙的前部尾椎(前凹型);(f)～(j)均为其上方椎体通过纵轴和长轴的剖面

(c)—In right side view, the rest all in left side view;(a)～(d)—vertebrae of *Tonganosaurus hei*:(a)—cervical (opisthocoelous);(b)—posterior dorsal (amphicoelous);(c)—anterior dorsal (platycelous);(d)—prosterior caudal (amphiplatyan);(e)—anterior caudal of *Mamenchisaurus youngi* (procoelous);(f)—(j)—top vertebrae' profile, through the longitudinal axis and the long axis

编写和修订语句库的要点之一就是要全面、完整。

编写和修订语句库的要点之二是增加重要特征的权重。有些骨骼的特征对属种鉴定起关键作用,有些骨骼的特征在鉴定中不起关键作用。换句话说,骨骼特征有权重大小之分。因此,在编写和修订语句库时,需要把握权重的大小。

颈椎的数目是蜥脚类恐龙属种鉴定和分类的重要依据。蜥脚类恐龙的颈椎数目变化幅度比较大,短颈类的颈椎数目较少,如李氏蜀龙(*Shunosaurus lii*)的颈椎只有 12 个(张奕宏,1988),而长颈类的数目比较多,如梁龙(*Diplodocus*)的颈椎有 15 个(Curtice et al.,2001),天府峨眉龙(*Omeisaurus tianfuensis*)的颈椎有 17 个(何信禄等,1998),马门溪龙的颈椎有 19 个(欧阳辉等,2002)。Upchurch 用连续 5 个简单语句(文中 C75～C79)来描述此特征:

小于等于 10 个颈椎(0),大于等于 12 个颈椎(1);

小于等于 12 个颈椎(0),大于等于 13 个颈椎(1);

小于等于 13 个颈椎(0),大于等于 15 个颈椎(1);

小于等于 15 个颈椎(0),大于等于 16 个颈椎(1);

小于等于 16 个颈椎(0),大于等于 17 个颈椎(1)(Upchurch,1998)。

这 5 条简单语句均描述颈椎数目这一特点。而这 5 条简单语句所在的语句库一共有 205 条简单语句。因此,这 5 条语句所描述的特征,即颈椎的数目,其权重为:5/205=0.024。假设,颈椎数目这一

特征仅用一条语句来描述，则其权重为：1/(205－4)＝0.005，仅为增加权重后 0.2 倍。因此，使用多条语句描述一个重要特征，可以加强该特征的权重。

国内蜥脚类与国外蜥脚类并不完全一样，有些国内蜥脚类特有的特征，在国外学者，如 Upchurch (1998)、Wilson (2002) 和 Harris (2006) 编写的语句库中，并没有被述及。例如，何氏通安龙的背椎神经嵴前视面的底部发育有一个突起构造(图 2)。因此需要对语句库进行必要的补充和修订。

骨骼上发育的突、嵴、沟、凹槽等构造是肌肉的附着点，对研究该动物的行为、习性有着重要的意义。前部背椎上附着的肌肉，与动物颈部、前肢的活动有密切关联，一条嵴或者一个突起，可能有重要的肌肉附着其上。此外，四川盆地的蜥脚类恐龙颈椎数目较多，马门溪龙属的颈椎数目多达 19 个 (欧阳辉等，2002)。前后肢比例影响蜥脚类恐龙的形态、行走方式和速度。因此，本文作者在 Harris 语句库的基础上，补充和修订了如下语句(Harris 已编写了 331 条语句，补充的语句编号从 332 开始)。

332. 前部背椎前视图中，神经棘下部：下凹(0)，平滑(1)，有突起结构(2)；

333. 颈椎数目：小于等于 10(0)，介于 10 和 13 之间(1)，大于等于 13(2)；

334. 颈椎数目：小于等于 13(0)，介于 13 和 16 之间(1)，大于等于 16(2)；

335. 颈椎数目：小于等于 16(0)，介于 16 和 19 之间(1)，大于等于 19(2)；

336. 前后肢比例：小于等于 0.60(0)，0.60～0.80(1)，大于等于 0.80(2)；

337. 前后肢比例：小于等于 0.70(0)，0.70～

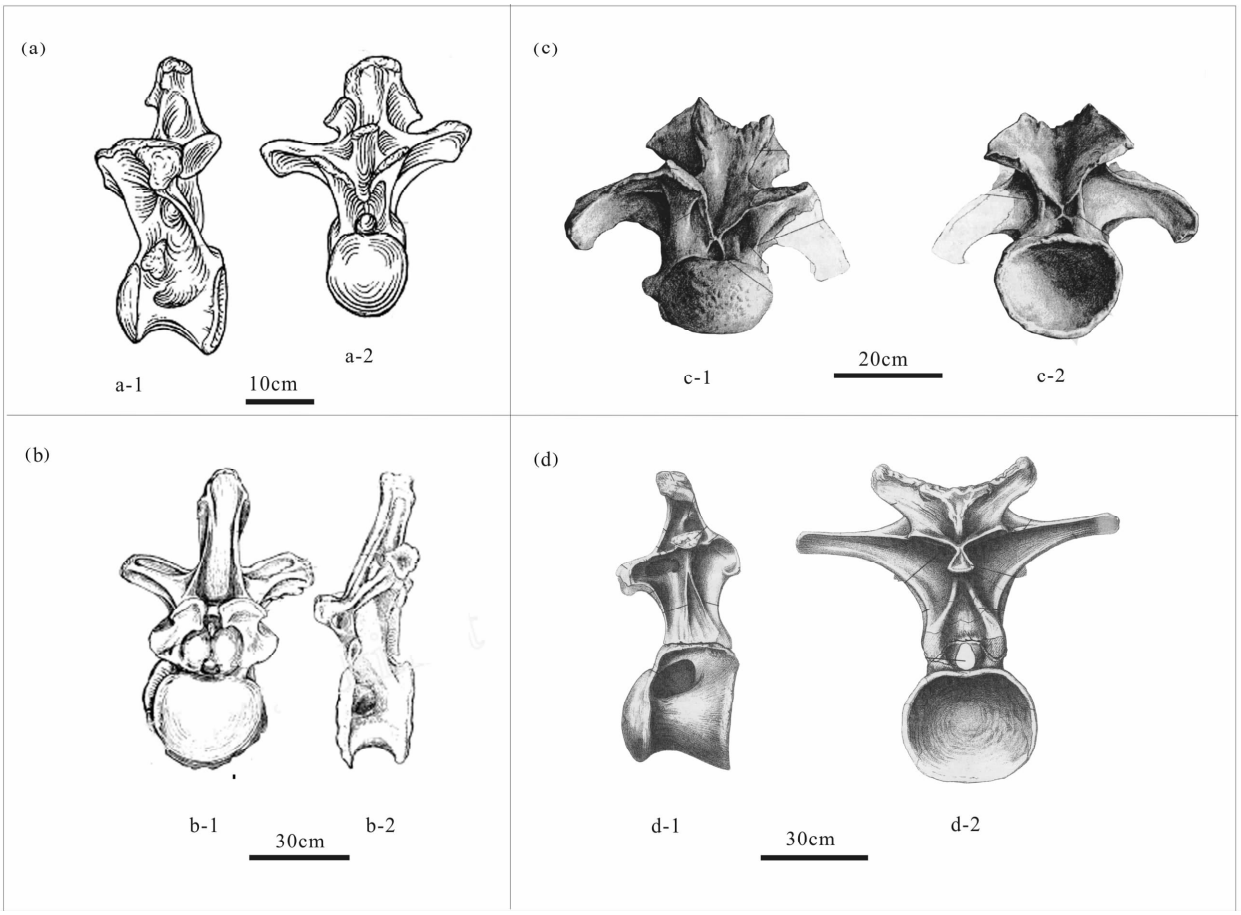


图 2 蜥脚类恐龙的前部背椎

Fig. 2 Dorsals of sauropod dinosaur

(a)—何氏通安龙(据李奎等，2010)：a-1—前视，a-2—侧视；(b)—天府峨眉龙(据何信禄等，1998)：b-1—前视，b-2—侧视；(c)—杨氏马门溪龙(据欧阳辉等，2002)：c-1—前视，c-2—后视；(d)—圆顶龙(据 willson，1998)：d-1—侧视，d-2—前视

(a)—*Tonganosaurus hei* (after Li et al., 2010): a-1—in anterior view, a-2—in side view; (b)—*Omeisaurus tianfuensis* (after He Xinlu et al., 1998), b-1—in anterior view, b-2—in side view; (c)—*Mamenchisaurus youngi* (after Ouyang et al., 2002): c-1—in anterior view, c-2—in posterior view; (d)—*Camarasaurus grandis* (after Willson et al., 1998): d-1—in side view, d-2—in anterior view

0.90(1),大于等于 0.90(2);

338.前后肢比例:小于等于 0.80(0),0.80～1.00(1),大于等于 1.00(2)。

语句库中简单语句的顺序,可按传统的骨骼描述顺序,即按头骨—脊椎骨—附肢骨的顺序描述语句,如 Upchurch 建立的蜥脚类恐龙特征语句库;也可以按骨骼在分类中的重要程度来描述,如 Wilson 编写蜥脚类的特征语句是将关于蜥脚类恐龙的行走姿态放在第一。语句库一旦建立,每个简单语句就有一个相对稳定的位置。

综上所述,编写和修订语句库的关键在于如下 3 点:①简单语句一定要简洁扼要;②语句库要全面,蜥脚类恐龙的所有特征都囊括其中;③特征的权重要把握得当,一般特征用一条语句描述,重要特征则用多条语句描述,使得每个特征都有与其相应的权重。

1.2　建立数据库

根据一套完整的简单语句,每一个特征用一个字符表示,一条恐龙则用一串字符表示。字符包括"0、1、2、3、4、?"等。如果一条恐龙的某个特征,与相应简单语句中"0"所描述的特征一样,那么该恐龙的此特征就用"0"表示。以此类推字符"1、2、3、4"的作用。化石材料保存往往不完整,缺失部位的特征,便用"?"表示。这样,一条恐龙的特征,就可以用一组由"0、1"等字符组成的一串字符(字符串)来表示。

不同的恐龙依据同一个语句库编写字符,那么,这些恐龙的字符串的字符个数是一样的。这样,很多条恐龙的字符串放在一起,就构成数据库。恐龙骨骼和形态的对比,此时就可以转变成字符串的比较。

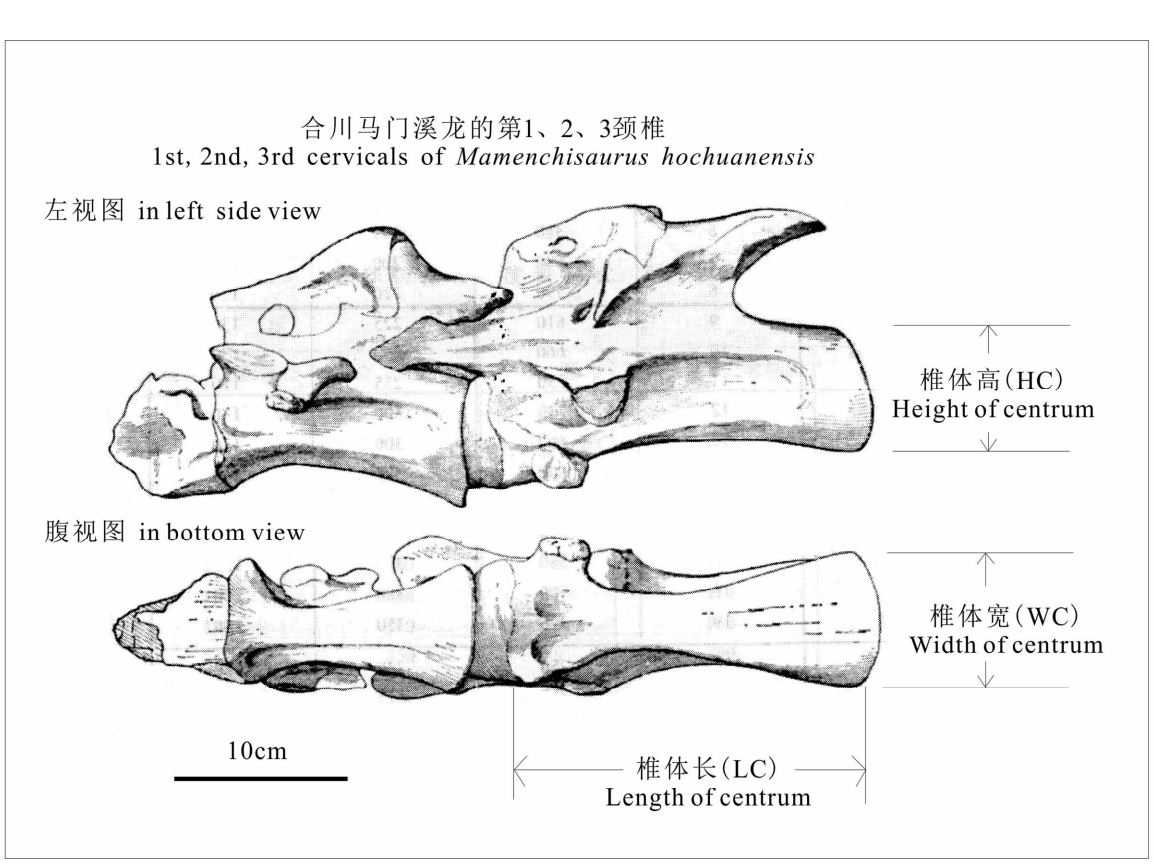


图 3　蜥脚类恐龙的颈椎(椎体图据杨钟健等,1972)

Fig. 3　Cervicals of sauropod dinosaur (after Yang Zhongjian et al.,1972)

值得注意的是,依据简单语句为恐龙写字符的时候,需要谨慎和推敲。例如:椎体延长指数,指椎体的长与椎体后高之比,计算公式为:

$$EI = LC/[0.5 \times (WC + HC)]$$

式中:EI 表示椎体参数(elongation index);LC 表示椎体长(length of centrum);WC 表示椎体后宽(width of centrum);HC 表示椎体后高(height of centrum),如图 3 所示。延长指数受椎体所在的部位、个体的制约,即同一条蜥脚类恐龙不同部位颈椎的延长指数不同,不同个体相同部位的延长指数亦有差别。语句库里所说的延长指数,应该理解为最长颈椎的延长指数,或者最大延长指数。原因是:①同一条恐龙,前、后部颈椎较短,其延长指数较小;而中部颈椎较长,其延长指数也相应的比较大。一条恐龙在该处只能有一个数据,而最大值是最具有代表性的数据。②不同恐龙之间比较,需要一个相对稳定的比较标准。

通安龙的第三颈椎为保存完好的颈椎中的最长者,延长指数为 2.91。马门溪龙和峨眉龙的颈椎均为细长型椎体,第三颈椎的延长指数分别为 2.52 和 2.78,而最长颈椎的延长指数均大于 3。蜥脚类恐龙的最长颈椎往往位于颈部中段,通安龙的颈椎也为细长型椎体。这样,经过合理的推算,通安龙的最长颈椎应该位于颈部中段,比第三颈椎长,最大颈椎参数应该大于 3。

每一条恐龙的特征均用字符串表示,每一条字符串的字符个数一样,即字符串长度一样。这样多条恐龙的字符串集中起来,就建成了数据库(数据矩阵)。

确定何氏通安龙在蜥脚类恐龙中分类位置中的方法如下:首先,将 *Vulcanodon*、*Barapasaurus* 等在 Harris 已编写的数据库中的 30 属恐龙,用 1.2 章节中补充的语句编码,构建成由 30 属、每属由 338 个特征组成的数据库。其次,何氏通安龙的特征,依据 Harris 的语句库及本文 1.2 章节中补充的语句编码,得到字符串:?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ???? 601100 0010010000 1311121011 1100010111 1031112200 101104???? ? 010? 00000 ? 000000000 0000? 0? 010 01? 0? 0???? ???? 120010 0110100111 2000011000 1001110101 10???????? ?????????? ?????????? 0011000000 1021010011 100011111? ???????? 10 0111110???

?????? 11?? 01211 210。最后,何氏通安龙的字符串与其他 30 属恐龙的字符串进行比较。

1.3 软件分析

由于数据库的建立,每一条恐龙的特征均用字符串表示,恐龙个体之间的比较就转化为字符串之间的比较。字符串的分析和比较可以用多种软件来实现。

分析的软件包括:TNT(Tree Analysis Using New Technology),PAUP[Phylogenetic Analysis Using Parsimony (and other methods)],Winclada (A windows program for creating, editing, and analyzing systematic data sets) 等。

图 4 是使用 Winclada 软件分析通安龙在蜥脚类恐龙中的演化位置。相关设置为:最大树数目(Maximum trees to keep) 1000,重复运算数(Number of replications)100,每次运算的起点树数目(Starting trees per rep)10。

搜寻策略(Search strategy)为 Multiple TBR+TBR。上图为严格一致树,进化步长 $L=966$,一致性指数 CI=45,留存指数 RI=64,由 Winclada 软件分析,以 Prosauropoda 为外围类群。

1.4 结果分析

定量分析结果需结合定性分析结论,属种的层位、时代、地理分布等因素进行评定。定量分析结果包括系统演化树(图件)和树的参数。树的参数有进化步长[The length or number of steps(L)],一致性指数[Consistency index (CI)],留存指数[Retention index (RI)]。系统演化树提供了通安龙与其他蜥脚类恐龙之间的直观的演化关系,如图 4 所示。进化步长 L 越短,一致性指数 CI 和留存指数 RI 越高,反映数据矩阵与树的配合越理想(Wiley et al.,1991)。由于特征权重等原因,系统演化树体现的演化关系与实际情况会有所偏差。可依据多个语句库进行多次分析,得到多棵系统演化树。然后与形态分类学的分析结果相比较,最后选择比较科学合理的系统演化树。

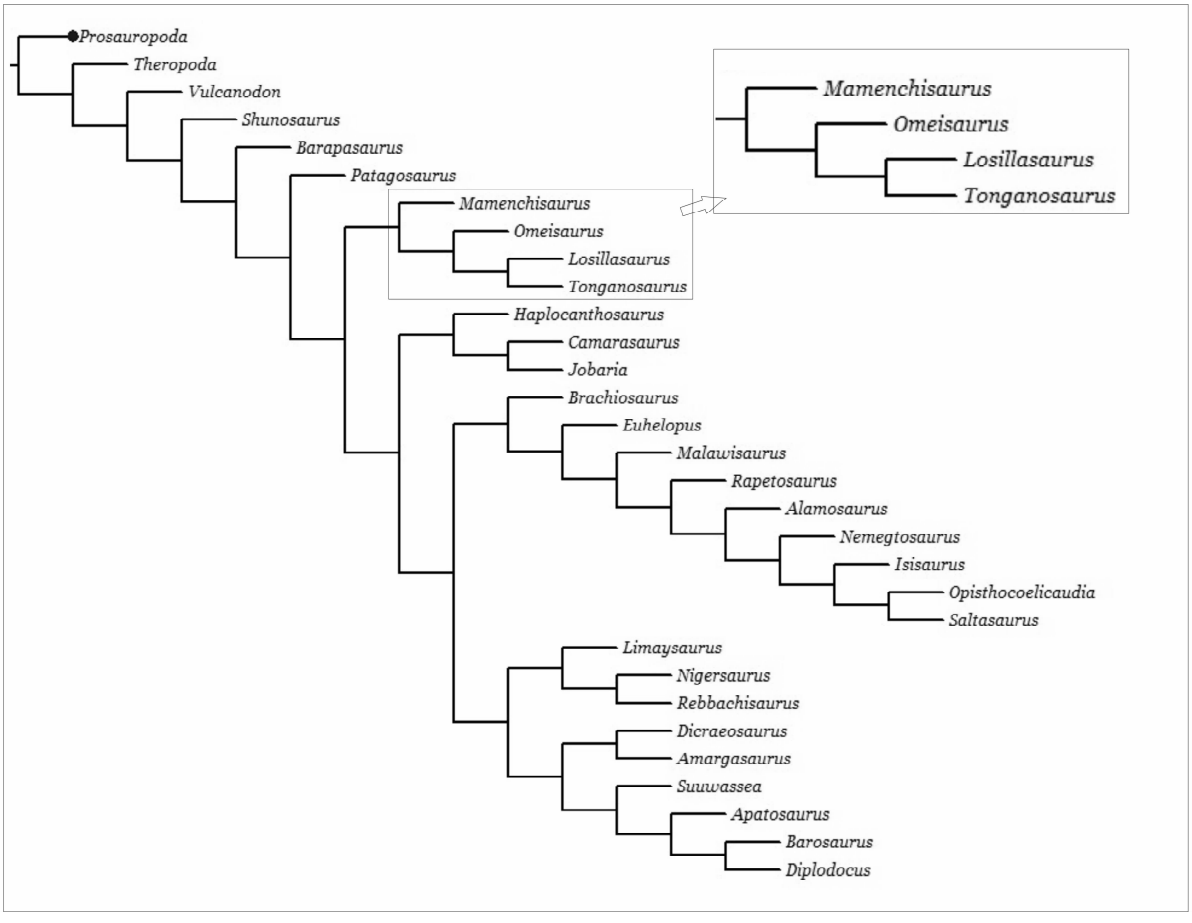


图 4 何氏通安龙在蜥脚类恐龙中的演化位置,严格一致树中的 30 个属征(引自 Harris,2006)

Fig. 4 Systematic phylogeny of *Tonganosaurus hei* on sauropod dinosaurs, the strict consensus tree of 30 MPTs with data matrix (modified from Harris,2006)

图 4 的系统演化树中,体现出马门溪龙、峨眉龙、通安龙和露丝娜龙(*Losillasaurus*) 4 者有较近的亲缘关系。露丝娜龙是产自西班牙晚侏罗世—早白垩世的大型蜥脚类(Casanovas et al.,2001;Canudo et al.,2010),而通安龙是产自中国四川早侏罗世的蜥脚类,两者地理、地史均不在同一个范畴内;此外,根据 Harris(2006)的数据库,语句库收录了 331 个特征,而露丝娜龙仅有 56 个特征,完整度仅为 16.9%,说明化石保存极不完整,许多特点没有保存。由于上述两点,认为通安龙和露丝娜龙不具有亲缘关系。

定性形态分析的结果认为,通安龙与马门溪龙和峨眉龙有较近的亲缘关系(李奎等,2010),而作为定量系统分析结果的图 4 的系统演化树充分体现了此结论。因此,定量系统方法对通安龙分类位置的分析效果良好,是对定性形态分析的补充和校验。

2　定量系统分析的应用

定量系统分析除了鉴定新发现化石材料的分类和演化位置外,还可以用于研究多个蜥脚类属种之间的演化关系。四川盆地的蜥脚类化石丰富,化石点较多(李奎等,1997),其中长颈蜥脚类的主要属种有通安龙、峨眉龙、马门溪龙等,文中以 Ancestor 为外围类群(所有的特点均用 0 表示),用定量系统方法分析四川盆地长颈蜥脚类的演化关系。

首先,用 Willson 的描述的语句库(Wilson,2002),建立 3 属 5 种长颈蜥脚类和外围类群 Ancester 组成的数据库,如表 1。该数据库中每一属种由 234 个字符组成,即每一属种均有 234 个特征被列入以做比较分析。

将表 1 中的字符串用软件进行分析,得到四川盆地长颈蜥脚类带有性状特点的系统树,如图 5。

图 5 中,进化步长 $L=195$,一致性指数 CI=84,留存指数 RI=27,各参数较为理想。图中的分支表明:峨眉龙介于另外两属之间,与马门溪龙的亲缘关系相对较近。马门溪龙属的合川种和杨氏种为姐妹种。分支上的点和数据表示分支的性状。例如,通安龙的分支上的第一个实心点及数据表示:语句库中第 117 条简单语句描述的特点,通安龙的性状与峨眉龙和马门溪龙的性状均不同。该分枝的最后一个点为空心点表示第 199 个特点是通安龙有别于其他属种的性状,但是个别属种也具有此性状,即马门溪龙杨氏种和合川种的共同分支上亦有空心点及数据 199(图 5)。此性状将这两种与安岳种分离开来,形成姐妹种。

3　讨论

何信禄等人认为峨眉龙与马门溪龙的骨骼特征

表 1　四川盆地长颈蜥脚类的数据库

Table 1 The data matrix of long-neck Sauropod in Sichuan Basin

恐龙属种(层位,时代)	字符串
Ancestor	0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000000000000 0000000000 0000
通安龙 *Tonganosaurus* (益门组,J_1)	?????????????????????? ?????????????????????? ?????????????????????? ???????????????? 01? 4 010100? 10131010????? ???? 00? 1???? 00? 1? 20? 0001100000000?????? 0 ???????? 100211001001 1101101100001???????? ???????????? 10101101 00100000???????? 1001 1110??? 1? 1 1???
峨眉龙 *Omeisaurus* (沙溪庙组下段,J_2)	1110001101100000? 0101 1000010111? 11? 0? 1?? 1 1100? 0? 0? 0? 00110000? 1??? 1110111111? 000104 0111010? 0? 3101? 11011 100000021101? 0100100 00000010000? 000??? 10 0? 11000011000? 000001 0101101010010100000 1110110001010101110 0? 01011?? 01010011111 1111111111 1110
杨氏马门溪龙 *Mamenchisaurus. youngi* (沙溪庙组上段,J_2)	10110012111000100100 0100010001011112001 0 1101? 1???? 0011100000 ???? 01?? 1? 1000001104 1100010110310 10? 1? 11 10101002100 00?? 1011? 000000???? 00000????? 10?????? 11020? 00? 000 1010101001111100 10000 10?? 1100????? 0? 1?? 01 111? 0??? 0???????? 01? ??????? 111 11??
合川马门溪龙 *M. hochuanensis* (沙溪庙组上段,J_2)	?????????????????????? ???????????? 110????? ?????????????? 10000? 10111? 1? 1111000011? 4 01? 1010110310 10? 1? 1? 10? 00001????? 0110100 00000010000? 000??? 10 0011000? 01????????? 01 0101111010011???????? ???? 1100???? 01011101 0011101? 1101110? 11??? ?? 1? 11? 1?? 1?? 0
安岳马门溪龙 *M. anyuesis* (蓬莱镇组,J_3)	?????????????????????? ?????????????????????? ?????????????????????? ?????????????? 1???? 11? 4 011?? 111113? 01? 01? 1? 00? 010021??? 0011111? 10??? 001?? 00000??? 00 ???????? 110? 01000? 00 1100111000011? 1?? 000? 10? 11100??? 1?? 001210 1???????? 1? 011?????? ???????? 10 110?

注:表中马门溪龙属的 3 种引自李志广(2012),峨眉龙引自 Sekiya(2011)。

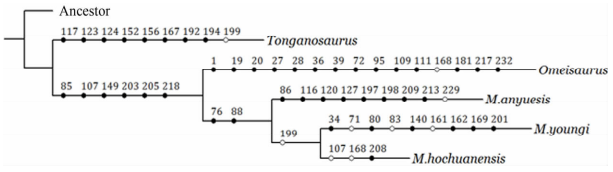


图 5 四川盆地长颈蜥脚类的系统树

Fig. 5 Genealogical tree of long-neck sauropod from Sichuan Basin

比较相近但不相同,将峨眉龙属与马门溪龙属并列,一同归入马门溪龙科(何信禄等,1984,1988)。随后,李奎认为两者亲缘关系较近,分别建立峨眉龙亚科和马门溪龙亚科(李奎,1998)。2010 年,何氏通安龙化石材料发现之后,定性形态分析结果显示:通安龙、峨眉龙和马门溪龙 3 属恐龙具有连续演化的关系(Yang C Y et al., 2010;杨春燕,2012)。

马门溪龙属的地史时限较长,从骨骼看属内各种的种间关系,安岳种区别于杨氏种和合川种的特点有:椎体的海绵结构更为发育,颈椎神经棘较长,副突呈板状,侧凹非常复杂。从层位看,杨氏种和合川种均产自沙溪庙组上段(中侏罗世),而安岳种产自蓬莱镇组(晚侏罗世)。

如上所述,图 5 所代表的定量分析完全印证了定性形态分析。

4 结论

综上所述,蜥脚类恐龙的定量系统分析方法具有客观、快速、全面的优点。使用修订后的语句库进行定量分析,其分析结果更为理想。何氏通安龙的定量分析结果表明了何氏通安龙与峨眉龙和马门溪龙 3 属蜥脚类之间的亲缘关系,与传统的形态分析结果一致。说明该方法作为新兴的古生物研究新方法,对定性形态分析具有验证作用,弥补了形态分析方法的研究速度缓慢、分析工作繁琐、研究结果主观化等不足。

致谢:在论文撰写中,得到李奎、胡芳、姜涛等的帮助,得到自然科学基金项目(40572016)、成都理工大学青年研究基金项目的支持,在此表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

何信禄, 李奎, 蔡开基. 1988. 四川自贡大山铺中侏罗世恐龙动物群(第四集), 蜥脚类(二):天府峨嵋龙. 成都:四川科学技术出版社, 1~143.

何信禄,王长生,刘尚忠,周风云,刘图强,蔡开基,代兵. 1998. 四川南部珙县早侏罗世一新蜥脚类恐龙. 四川地质学报,18 (1):1~6.

李奎,谢卫,张玉光. 1997. 四川侏罗纪恐龙化石. 大自然探索, 16 (59):66~70.

李奎. 1998. 蜥脚类恐龙(Sauropoda)的分类. 岩相古地理,18(2):39~47

李奎,杨春燕,刘建,王正新,2010. 四川会理早侏罗世一新的蜥脚类恐龙. 古脊椎动物学报,48(3):185~202.

李志广. 2012. 安岳马门溪龙(*Mamenchisaurus anyuensis*)的定量系统分析研究. 成都:成都理工大学硕士研究生学位论文,23~28.

莫进尤,王危贞,黄志涛,黄鑫,徐星. 2006. 广西早白垩世那派组一原始的巨龙形类恐龙. 地质学报,80(8):1109.

欧阳辉, 叶勇. 2002. 第一具保存完整头骨的马门溪龙——杨氏马门溪龙. 成都:四川科学技术出版社,1~35.

欧阳辉. 2003. 杨氏马门溪龙(*Mamenchisaurus youngi*)的骨骼特征与马门溪龙类的系统关系分析. 成都:成都理工大学博士论文,1~176.

杨春燕. 2010. 四川会理早侏罗世一新的蜥脚类恐龙及其定量系统分析. 成都:成都理工大学硕士研究生学位论文,55~68

杨春燕. 2012. 四川盆地侏罗纪长颈蜥脚类恐龙的演化. 科协论坛, 2012(6):120~122.

杨钟健, 赵喜进,1972. 合川马门溪龙. 见: 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所甲种专刊, 第 8 号. 北京: 科学出版社, 1~30.

尤海鲁,季强,Matthew C L,李景禄,李印先. 2004. 中国辽宁省晚白垩世早期一具后凹形尾椎的巨龙类蜥脚类恐龙. 地质学报, 78(4):559.

张奕宏. 1988. 四川自贡大山铺中侏罗世蜀龙动物群(第三集)蜥脚类(一). 成都: 四川科学技术出版社, 1~89.

Allain R, Aquesbi N, Dejax J, Meyer C, Monbaron M, Montenat C, Richir P, Rochdy M, Russell D, Taquet P. 2004. A basal sauropod dinosaur from the Early Jurassic of Morocco. Systematic Palaeontology (Vertebrate Palaeontology). C. R. Palevol 3 :199~208.

Canudo J I, Barco J L, Castanera D, Fernandez-Baldor F T. 2010. New record of a sauropod in the Jurassic-Cretaceous transition of the Iberian Peninsular (Spain): palaeobiogeographical implications. Palaontologische Zeitschrift, 2010 (84): 427~435.

Casanovas M L, Santafe J V, Sanz J L. 2001. *Losillasaurus giganteus*, un nuevo sauropodo del transito Jurasico—Cretacicode la cuenca de ''Los Serranos'' (Valencia, Espana). Paleonto-logia i Evolucio, 32-33: 99~122.

Curtice B D, Stadtman K. 2001. The demise of Dystylosaurus edwini and a revision of *Supersaurus vivianae*. In McCord R D, Boaz D (eds). Western association of vertebrate paleontologists and Southwest paleontological symposium-Proceedings. Mesa Southwest Museum Bulletin 8. Mesa: Southwest Museum: 33~34.

Harris J D. 2006. The significance of *Suuwassea emilieae* (Dinosauria: Sauropoda) for flagellicaudatan intrarelationships and evolution. Journal of Systematic Palaeontology, 4 (2): 185~198.

Sekiya T. 2011. Re-examination of *Chuanjiesaurus anaensis* (Dinosauria: Sauropod) from the Middle Jurassic Chuanjie Formation, Lufeng County, Yunnan Province, Southwest China. Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum, 10: 1~54.

Upchurch P. 1995. The evolutionary history of sauropod dinosaurs. Philosophical Transactions of the Royal Society (London), Series B349, 365～390.

Upchurch P. 1998. The phylogenetic relationships of sauropod dinosaurs. Zoological Journal of the Linnaean Society, 124: 43～103.

Upchurch P, Martin J. 2002. The Rutland *Cetiosaurus*: the anatomy and relationships of a Middle Jurassic British sauropod dinosaur. Palaeontology, 45: 1049～1074.

Upchurch P, Martin J. 2003. The anatomy and taxonomy of *Cetiosaurus* (Saurischia, Sauropoda) from the Middle Jurassic of England. Journal of Vertebrate Paleontology, 23: 208～231.

Wiley E O, Siegel-causey D, Brooks D R, Funk V A, 1991. The compleat cladist, a primer of phylogenetic procedures. The University of Kansas, Museum of National History, Special publications:1～156.

Wilson J A, Sereno P C. 1994. Hight-level phylogeny of sauropod dinosaurs,Journal of vertebrate paleontology. 14(3, suppl.): 52A.

Wilson J A, Sereno P C. 1998. Early evolution and higher-level phylogeny of sauropoddinosaurs. Journal of Vertebrate Paleontology, Memoir,56:1～68.

Wilson J A. 2002. Sauropod dinosaur phylogeny: critique and cladistic analysis. Zoological Journal of the Linnean Society, 136: 217～276.

Wiman C. 1929. Die Kreide Dinosaurieraus Shantung. Palaeont Sin, Ser C, 6(1): 1～67.

Yang C Y, Li K, Liu J, Jiang T, Li Z G. 2010. The Evolvement of Long-necked sauropods of Sichuan Basin. Earth Science Frontiers, short papers for thr 8th tnternational congress on the Jurassic system,(17):232.

Systematic Analysis Method of Sauropod: a Case Study of Tonganosaurus hei

YANG Chunyan

Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Abstract

This study takes Tonganosaurus hei (Li et al., 2010) as an example to introduce a new method of sauropod dinosaurs, quantitative systematic paleontology and its application in determinig the Phylogenetic position of new sauropod dinosaur fossil materials. There are four links in this method: compiling and revising the statement repertory, setting up the data base, software analysis and result analysis. Among them, compiling and revising the statement repertory is the key link and needs to be complemented and improved based on the fossil material in order that no features have been omitted. Thus they are of the same weigth in accordance with its importance. Then evolutional relationship of Jurassic long-neck sauropod dinosaur in the Sichuan Basin was analysed by this new method. The result shows the quantitative systematic paleontology has the advantages of objective, fast and all-sided. Most importantly, the result of the quantitative systematic paleontology is in agreement to that of traditional qualitative configuration analysis, indicating this method is of supplementation and check to qualitative analysis method.

Key words: sauropod dinosaur, systematic paleontology, phylogenetic position, *Tonganosaurus hei*, evolutional relationship