

# 中更新世以来兽类地理分布的变化及其 天文气候学的解释

徐 钦 琦

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所)

**关键词** 更新世 兽类 地理分布 天文气候学

## 内 容 提 要

中更新世以来,兽类的地理分布曾发生过重大的变化,如西伯利亚的兽类曾三次大举西迁,入侵西欧。它们分别发生在氧同位素的第16、6、2—4阶段。如果考察过去73万年以来全球所获得的、北半球冬半年平均的太阳辐射量的变化,那么第16、6、2—4阶段乃是太阳辐射量比较低的时期。故中更新世以来兽类地理分布的变化是受气候变迁的制约的。而后者则是受天文因素的自然变化所控制的。

动物区系地理学 (Fauna and Zoogeography or Biogeography) 研究动物群落在地理上一定地区内现代及历史的分布状况和分布规律,并进一步探讨动物区系形成的演化历史及其与环境变迁的关系,划分动物地理区,建立区划等。所以,研究中更新世以来(距今73万年是早、中更新世的界线)兽类地理分布的变化,它和环境变迁的关系,以及它的成因问题乃是动物区系地理学的研究课题之一。

中更新世以来(即在过去的73万年内)环境变迁的最显著的特点乃是寒冷期(或冰期)和温暖期(或间冰期)的频繁的、反复的交替出现,其平均周期约10万年。氧同位素地层学正是为反映这一特征而产生的。按照国际惯例,深海氧同位素的奇数阶段(如第1、5、7、9、……等阶段)代表温暖期或间冰期,而偶数阶段(如第2—4、6、8、10、……等阶段)则代表寒冷期或冰期(表1)。古生物学家和古气候学家的研究表明,中更新世以来兽类地理分布的变化乃是与环境变迁或气候变迁密切相关的。

Bonifay (1980) 在这一方面做了出色的工作。据她研究,在过去的73万年内,在西欧曾经出现过三次代表寒冷气候的动物群。它们的地质时代分别相当于深海氧同位素的第16、6和2—4阶段。据Kukla (1977) 研究,在更新世的历次寒冷期中,上述三个阶段都是影响比较突出的寒冷期。所以,在这三个阶段,西欧才会出现代表寒冷气候的动物群。Bonifay 认为,这些喜冷动物乃是从西伯利亚迁徙过来的(图1)。

据 Bonifay 研究,在第16阶段,到达西欧的喜冷动物的代表有:埃楚斯坎狼的莫斯巴赫亚种 (*Canis etruscus mosbachensis*)、狼獾的施洛斯拉亚种 (*Gulo gulo schlosseri*)、巴勒米尼亚鼬 (*Mustela palerminica*) 和前冰川狐 (*Vulpes praeglacialis*) 等。她认为,在西欧的第16阶段的动物群中,至今尚未发现过南方型的种类。所以,该动物群

表 1 各氧同位素阶段的 S 时间表, D 时间表(即距今的起止时间及长度), 平均的氧同位素记录, 以及平均的冬(D<sub>i</sub>)、夏(X<sub>i</sub>)半年的太阳辐射量(单位: 4.2 焦/cm<sup>2</sup>·日)(据 Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991)

Table 1 The time scale, the average  $\delta^{18}\text{O}$  variations and the average incoming solar radiation in each oxygen isotope stage (i.e. Di and Xi) in the past 734,000 years (ly/day).

氧同位素阶段 Stages	S 时间表 (单位: 千年) SPECMAP timescale (length)	D 时间表 (单位: 千年) DISR time scale(length)	平均的氧同位素记录 $\delta^{18}\text{O}$	D <sub>i</sub>	X <sub>i</sub>
2—4	12—70(59)	11—68(58)	1.00	458.84	460.29
5	71—127(57)	69—126(58)	-1.18	460.29	458.90
6	128—185(59)	127—183(57)	0.66	458.09	461.05
7	186—244(59)	184—241(58)	-0.75	461.05	458.22
8	245—302(58)	242—291(50)	0.21	459.07	460.11
9	303—338(36)	292—333(42)	-0.92	460.38	458.86
10	339—361(23)	334—370(37)	0.70	458.80	460.34
11	362—422(61)	371—407(37)	-0.87	459.77	459.37
12	423—477(55)	408—464(57)	0.58	459.25	459.89
13	478—523(46)	465—504(40)	-0.27	460.36	458.79
14	524—564(41)	505—561(57)	0.18	457.84	461.30
15	565—619(55)	562—619(58)	-0.31	461.41	457.76
16	620—658(39)	620—655(36)	1.01	457.27	461.88
17	659—688(30)	656—691(36)	-0.07	461.69	457.45
18	689—725(37)	692—713(22)	0.55	458.61	460.53
19	726—735(10)	714—733(20)	-0.35	459.73	459.41

Note: Dong means winter and Xia means summer in Chinese.

乃是在西欧第一次出现的代表寒冷气候的动物群 (the first cold fauna) (图 1)。由表 1 可知, 第 16 阶段距今约 62—65.5 万年, 相当于北欧的 Elster (埃爾斯特) 冰期 (Kukla, 1977)。

当 Elster 冰期过去以后, 代表温暖气候的动物群便返回西欧了。据 Bonifay 介绍, 它们之中有马 (*Equus caballus*)、马鹿 (*Cervus elaphus*)、鬣狗 (*Crocuta*) 和熊 (*Ursus deningeri*) 等。这个温暖期相当漫长, 至少持续了 30 多万年(图 1)。

到了第 6 阶段或倒数第二次冰期, 喜冷的动物才再次出现于西欧。不过它们不再是生活在第 16 阶段的那些古老的种类, 而是其后裔了。据 Bonifay 研究, 它们之中有狼 (*Canis lupus*)、狼獾 (*Gulo gulo*)、埃尔米尼亚鼬 (*Mustela erminea*)、北极狐 (*Alopex lagopus*) 以及猛犸象, 披毛犀等。由表 1 可知, 第 6 阶段距今约 12.7—18.3 万年, 相当于北欧的 Warthe (瓦尔塔) 冰期。Bonifay 称它为第二次寒冷动物群 (the second cold fauna, 图 1)。

西欧的第三次寒冷动物群 (the third cold fauna) 的入侵则发生在第 2—4 阶段或末次冰期。据 Bonifay (1980) 研究, 喜冷动物的种类与第 6 阶段相类似。由表 1 可知, 第 2—4 阶段距今 1.1—6.8 万年, 相当于北欧的 Weichsel (魏克塞尔) 冰期。Bonifay (1980) 指出, 第一次寒冷动物群在西欧滞留的时间相当长久; 而后两次则相当短暂(图

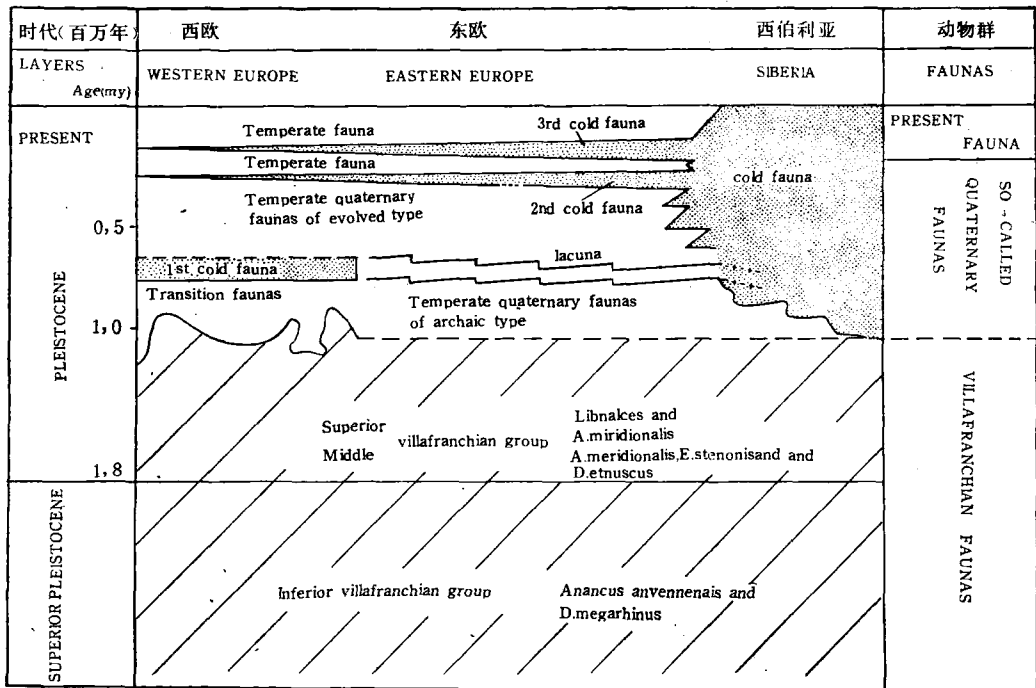


图 1 欧亚各国更新世的动物群及其生物地层位置(据 Bonifay, 1980)

Fig. 1 Pleistocene faunas and biostratigraphy in Eurasiatic countries  
(after Bonifay, 1980)

1)。由此可见,在西欧出现的寒冷动物群的三个时期分别相当于北欧的 Elster, Warthe 和 Weichsel 等三次冰期。

事实上,北欧共发生过四次冰期(即 Elster, Saale, Warthe, Weichsel 冰期)。可是除了 Saale (萨勒)冰期的地质时代尚有争议外,而其余三次都是没有争议的。正如 Bonifay 所言,它们分别相当于深海氧同位素的第 16、6、2—4 阶段。我们在下文中将讨论 Saale 冰期的地质时代问题。我们认为,西欧的第一次寒冷动物群的地质时代既包括 Elster 冰期,又包括 Saale 冰期。

据李吉均、李炳元、张青松等(1981)研究,在我国的青藏高原上已发现三期证据比较确切的冰碛物。他们认为,末次冰期(相当于氧同位素的第 2—4 阶段)的冰碛物的分布范围最小。而“相当于深海氧同位素第 6 阶段(中国黄土  $L_2$  时期)的倒数第二次冰期,在青藏高原东部湿润和半湿润区发育了第四纪规模最大的冰川,雪线降低于末次冰期约 300m (未考虑青藏高原上升)”。他们又指出,“倒数第三次冰期的冰碛物在青藏高原东部发现的地点不多,其规模大略与倒数第二次冰期相当或稍小”,“把它和深海氧同位素的第 16 阶段或黄土  $L_6$  阶段相对比是适合的”(施雅风、李炳元、李吉均等, 1991)。所以,根据李吉均等研究,青藏高原上的三次冰期的地质时代分别相当于深海氧同位素的第 16、6 和 2—4 阶段。它们恰好与西欧的三次寒冷动物群出现的时间完全相同。基于上述资料,世界上比较显著的冰期具有全球性对比的意义。

在我国的中、晚更新世期间,兽类的地理分布也曾发生过类似的变化。在氧同位素的第 8 阶段,北方型动物曾南侵到长江北岸的和县地区(31°45'N,118°20'E)。而在第 2—4 阶段或末次冰期,北方型动物则渡过长江,南侵到江苏的溧水(31°33'N,119°10'E)和浙江的余杭(30°20'N,119°55'E)。由此看来,第 2—4 阶段的气候应比第 8 阶段更冷些(徐钦琦,1986)。

据研究,氧同位素第 6 阶段的气候确实比第 2—4 阶段更冷。例如在青藏高原上,第

6 阶段(倒数第二次冰期)的冰碛物的分布范围比第 2—4 阶段(末次冰期)大得多,雪线也比末次冰期降低 300m(施雅风、李炳元、李吉均等,1991)。据王律江和汪品先(1990)对我国南海的钻孔资料研究,第 6 阶段的南海的水温也比第 2—4 阶段更低。所以,按照这一规律,第 6 阶段的兽类的南侵范围应比第 2—4 阶段更大。事实正是这样的。据张镇洪等研究,在第 6 阶段,北方型动物不仅渡过了长江,而且还深入华南的腹地,直达广东的南岭一带(24°30'N,113°16'E)(张镇洪等,1988)。

以上事实证明,兽类地理分布的变化确实与气候变迁有着密切的关系。但是,对于兽类地理分布变化的根本原因,或气候变迁的成因问题,在学术界一直没有真正解决。目前,米兰柯维奇理论根据地球轨道三要素(黄道倾斜、偏心率、岁差运动)的自然变化,可以成功地解释更新世以来寒冷期(或冰期)和温暖期(或间冰期)频繁地、反复地交替出现的历史事实。但是,米兰柯维奇理论至今还没有办法说明许多问题。例如,为什么第 6 阶段的气候比第 2—4 阶段更冷?为什么在众多的寒冷期中,第 16、6 和 2—4 阶段的影响比较突出?

近年来,天文学家根据地球轨道三要素的自然变化计算了过去 73 万年内的、全球各地各季所获得的、太阳辐射量

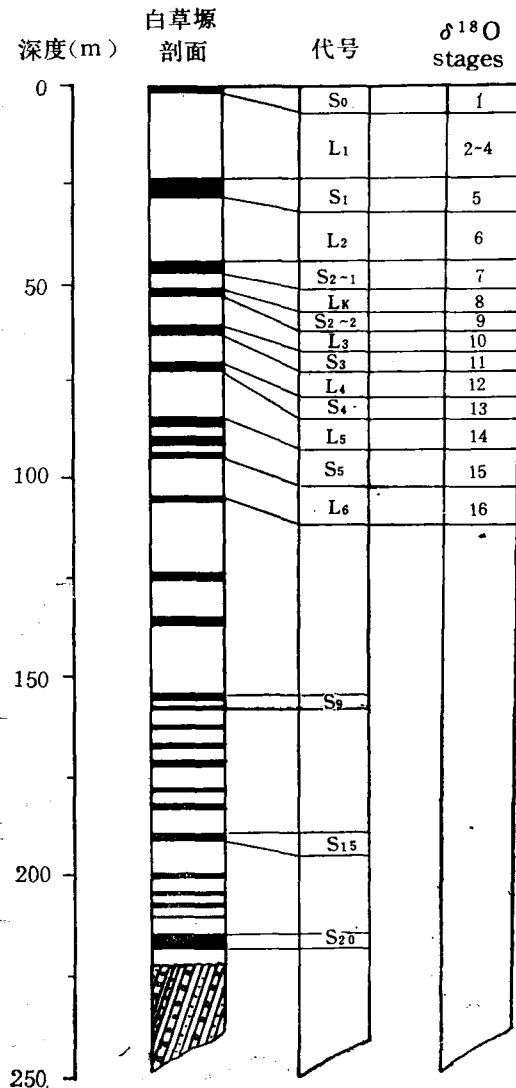


图2 白草塬黄土剖面与深海氧同位素记录的对比  
Fig. 2 Correlation of Baicao Yuan loess section with oxygen isotope stages

的相应变化 (Vernekar, 1972; Berger, 1978)。我们在此基础上,分别计算了每个氧同位素阶段的、北半球冬、夏半年的、全球所获得的、平均的太阳辐射量(表 1, Xu Qinqi,

1988; Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991)。这些定量计算的结果表明, 尽管地球的气候系统是一个非常复杂的巨系统, 但是全球气温的高低却与表 1 中的  $D_i$  的值的大小呈现出简单的正的相关关系。我们曾用  $D_i$  的数据对有关北欧四次经典冰期的问题作了解释 (Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991)。在我们看来, 表 1 中  $D_i$  的数据也可以解释本文所涉及的兽类地理分布的变化问题。

由表 1 可知, 在过去的 73 万年内,  $D_{16}$  的值是最小的, 所以第 16 阶段的气候应该最冷。正是因为这个道理, 西欧的第一次寒冷动物群才会在第 16 阶段出现。在第 15—6 阶段, 除了  $D_{14}$  以外,  $D_6$  的值是最小的。它表明, 从第 13 到第 7 阶段的 30 多万年内, 世界上不曾出现过比第 6 阶段更冷的气候。正是因为这个缘故, 在这段长达 30 多万年的时间内, 在西欧出现了以比较进步类型为代表的第四纪的温暖的动物群 (Temperate quaternary faunas of evolved type, 图 1)。在我国, 与北京周口店第一地点的产有北京猿人化石的第 3—11 层相当的地质时代是氧同位素的第 8—12 阶段。表 1 中的  $D_8$ — $D_{12}$  的数据清楚地表明, 在此期间既没有十分热的温暖期, 也没有非常冷的寒冷期。事实正是这样的 (徐钦琦、欧阳滢, 1982; 吴汝康等, 1985)。在第 6 阶段, 由于  $D_6$  的值相当小, 于是西欧在经过漫长的温暖期以后出现了第二次寒冷动物群。事实果然如此 (Bonifay, 1980)。在第 5 阶段, 由于  $D_5$  的值比较大, 于是 Bonifay 所谓的“温暖动物群 (Temperate fauna)”再次出现于西欧。在第 2—4 阶段,  $D_{2-4}$  的值再次下降, 于是西欧出现了第三次寒冷动物群 (Bonifay, 1980)。由此可见, 在表 1 中  $D_i$  数据的变化与欧亚大陆上兽类的地理分布的相应变化之间, 两者呈现出美妙而和谐的对对应关系。李吉均等也用这个方法解释了青藏高原上三次冰期的问题。他们说, “如果考察 100 万年来 (北半球冬半年) 太阳辐射量的变化, 氧同位素 2、4、6 和 16 阶段都是辐射量最低的时期, 故青藏高原的第四纪冰期是服从全球气候变化规律的” (施雅风、李炳元、李吉均等, 1991)。

现在我们讨论第 14 阶段的问题。在 1989 年, Kukla 和安芷生正确地指出, 在过去的 73 万年内, 厚层的黄土在华北共出现四次。它们分别是  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_5$  和  $L_6$ 。他们认为, 这四层黄土可以与北欧的四次经典冰期相对比 (Kukla and An, 1989)。我们认为, 这是一项创见。1990 年丁仲礼、刘东生等发表了一篇有价值的文章。其中白草塬的剖面为中国北方的黄土剖面与深海氧同位素记录的正确对比提供了极好的资料。丁仲礼、刘东生等指出, “在白草塬,  $S_{2-1}$  与  $S_{2-2}$  之间有一层 2.9m 厚的黄土”。我们给它一个代号:  $L_K$ 。在我们看来, 象  $L_K$  那么厚的黄土层理应代表一次完整的寒冷期。刘东生、Kukla 等普遍认为,  $L_1$  与  $L_2$  分别相当于代表寒冷期的氧同位素的第 2—4 与第 6 阶段, 那么按照这样的顺序,  $L_K$  应相当于第 8 阶段。于是  $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$  和  $L_6$  便分别相当于氧同位素的第 10、12、14 和 16 阶段 (图 2)。由此可见,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_5$  和  $L_6$  应分别相当于氧同位素的第 2—4、6、14 和 16 阶段。既然 Kukla 和安芷生把这四层黄土的地质时代与北欧的四次经典冰期相对比, 那么按照 Kukla 和安芷生 (1989) 的意见, 北欧的 Weichsel, Warthe, Saale 和 Elster 等四次经典冰期便分别相当于氧同位素的第 2—4、6、14 和 16 阶段。这一结果正好与我们的观点相吻合 (Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991)。

基于以上对比, 我们认为, Bonifay (1980) 所描述的、在西欧滞留时间比较长久的第一次寒冷动物群的地质时代既包括氧同位素的第 16 阶段, 也包括第 14 阶段。换句话

说,它既包括 Elster 冰期,又包括 Saale 冰期。换言之,西欧的三次寒冷动物群分别出现于氧同位素的第 14—16、6 和 2—4 阶段等三个时期。表 1 的数据表明,这三个时期的  $D_i$  值 ( $D_{16}$ 、 $D_{14}$ 、 $D_6$  和  $D_{2-4}$ ) 都是比较小的,所以这三个时期的气候应比其它寒冷期更冷。正是因为这个道理,代表寒冷气候的西伯利亚动物群才会在这三个时期入侵到西欧等地。

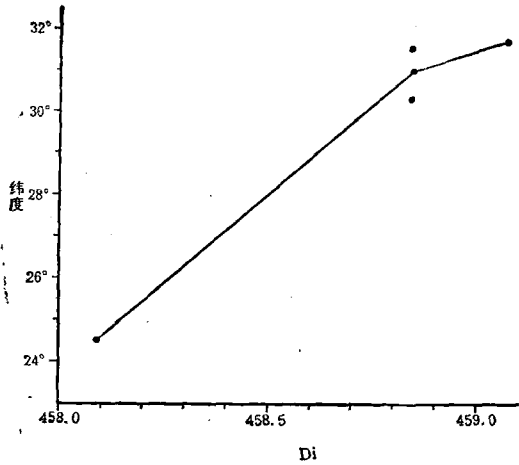


图 3 我国北方型动物南侵的纬度与  $D_i$  之间的关系  
Fig. 3 Plot of  $D_i$  vs the latitude where the northern mammals reached during Stages 2—4, 6 and 8 respectively in China

也正是因为这个缘故,在这三个时期,青藏高原上才出现了分布范围比较广阔的、证据也比较确凿的冰川(施雅风、李炳元、李吉均等,1991)。

在我国,中更新世以来兽类地理分布的变化与表 1 中  $D_i$  值的变动也具有良好的对应关系(图 3)。例如,在过去的 30 万年内,世界上曾出现过三次寒冷期,它们分别相当于氧同位素的第 2—4、6 和 8 阶段(表 1)。由表 1 可知,在这三次寒冷期中,  $D_8$  的值是最大的,为 459.07 (以  $4.2 \text{ 焦}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$  为单位)。因此,在第 8 阶段,北方型动物南侵的幅度最小,仅仅到达长江北岸的和县地区 ( $31^\circ 45' \text{N}$ )。以  $D_8$  的值为横坐标,以此纬度的值为纵坐标,于是在图 3 上便得

到一个位于右上角的点。  $D_{2-4}$  比  $D_8$  稍小,为 458.84。于是这一时期的北方型动物的南侵幅度比第 8 阶段稍大。事实正是这样的。在末次冰期,北方型动物已渡过长江而到达江苏的溧水 ( $31^\circ 33' \text{N}$ ) 和浙江的余杭了 ( $30^\circ 20' \text{N}$ )。用上述同样的方法,在图 3 上又得到了两个点。  $D_6$  的值是上述三次寒冷期中最小的,为 458.09。于是第 6 阶段的北方型动物的南侵幅度最大。它们不但渡过了长江,而且还深入华南腹地,到达广东的南岭地区 ( $24^\circ 30' \text{N}$ )。由此得到图 3 上位于左下角的那个点。总之,在图 3 上可以看到,我国北方型动物的南侵纬度与  $D_i$  值的大小具有微妙而和谐的对对应关系,显示了  $D_i$  的纬度效应。

综上所述,中更新世以来兽类地理分布变化的根本原因在于气候的相应变化,在于全球在北半球冬半年所获得的平均的太阳辐射量 ( $D_i$ ) 的相应变化,在于地球轨道三要素(黄道倾斜、偏心率、岁差运动)的相应的自然变化。故在此期间的兽类地理分布的变化是受天文因素的自然变化所控制的。

在本文的写作过程中,曾先后与宋正海、胡长康、孙建中、杨子赓、祁国琴、黄万波、王乃文、何希贤、李传夔、邱占祥、计宏祥等进行过讨论,得到了许多有益的帮助;又蒙陈瑛清绘插图,作者向他们表示感谢。

(1992 年 1 月 6 日收稿)

## 参 考 文 献

- 丁仲礼、刘东生等, 1990: 中国黄土的土壤地层与第四纪气候旋回。《黄土、第四纪地质、全球变化》(刘东生主编)第一集, 34—36。科学出版社, 北京。
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1979: 中国自然地理, 动物地理。科学出版社, 北京。
- 刘东生等, 1985: 黄土与环境。科学出版社, 北京。
- 吴汝康、任美镔、朱显谟、杨子庚、胡长康、孔昭宸、谢又予、赵树森等, 1985: 北京猿人遗址综合研究。科学出版社, 北京。
- 宋方义、张镇洪, 1988: 马坝人伴生动物群的研究。《纪念马坝人化石发现 30 周年》(广东省博物馆、曲江县博物馆编), 23—35。文物出版社, 北京。
- 张镇洪等, 1988: 广东曲江罗坑动物群初步研究。《纪念马坝人化石发现 30 周年》(广东省博物馆、曲江县博物馆编), 54—64。文物出版社, 北京。
- 施雅风、李炳元、李吉均等, 1991: 青藏高原第四纪冰川遗迹分布图(说明书)。科学出版社, 北京。
- 徐钦琦, 1986: 东亚更新世哺乳动物的南迁活动及其与气候演变的关系。《中国古生物学会第 13、14 届学术年会论文选集》(中国古生物学会编辑), 271—278。安徽科学技术出版社, 合肥。
- 徐钦琦、欧阳旻, 1982: 北京人时代的气候。《人类学学报》, 1(1), 80—90。
- Berger, A. L., 1978: Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9(2), 139—167.
- Berger, A., J. Imbrie, J. Hays, G. Kukla, and B. Saltzman, 1984: Milankovitch and Climate. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, Lancaster.
- Bonifay, M. F., 1980: Relations entre les donnees isotopiques et l'histoire des grandes europeennes plioleistocenes. *Quaternary Research*, 14(2), 251—263.
- Kukla, G. J., 1977: Pleistocene land-sea correlation 1. Europe. *Earth Science Reviews*, 13(4), 307—374.
- Kukla, G., and An, Z., 1989: Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 72(2), 203—225.
- Vernekar, A. D., 1972: Long-period global variations of incoming solar radiation. *Meteorological Monographs*, 12(34), 1—10.
- Wang Luejiang and Wang Pinxian, 1990: Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: glacial-interglacial contrasts in an enclosed basin. *Paleoceanography*, 5(1), 77—90.
- Xu Qinqi, 1988: The First and Second Laws of Astroclimatology. in: *The Palaeoenvironment of East Asia from the Mid-Tertiary* (Eds: Whyte, P., et al.), 401—413. Centre of Asian Studies, University of Hong Kong, Hong Kong.
- Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991: The classical North European glacial stages: explanation with Astroclimatology. in: Contributions to the XIII INQUA (Ed: Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, *Academia Sinica*), 158—172. Beijing Scientific and Technological Publishing House, Beijing.

## VARIATION IN GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF MAMMALS IN PLEISTOCENE: EXPLANATION WITH ASTROCLIMATOLOGY

Xu Qinqi

(Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Academia Sinica)

**Key words** Pleistocene; Mammals; Geographic Distribution; Astroclimatology

### Summary

In western Europe, there were three important cold stages when the Siberian fauna got there. They were correlated with the oxygen isotope Stages 16, 6 and 2—4 respectively (Bonifay, 1980).

fay, 1980). The first cold fauna from Siberia reached western Europe in Stage 16. The fauna consisted of *Canis eruscus mosbachensis*, *Gulo gulo schlosseri*, *Mustela palerminea* and *Vulpes praeglacialis*. All of them were archaic types. The second cold fauna from Siberia got to western Europe in Stage 6. The fauna included *Canis lupus*, *Gulo gulo*, *Mustela erminea*, *Alopex lagopus*, *Mammuthus* and *Coelodonta antiquitatis*. All of them were different with the first cold fauna and belonged to the advanced types. The third cold fauna arrived in western Europe in Stages 2—4. The composition of the last two faunas are similar (Fig. 1). The first cold fauna stayed in western Europe for quite a long period (76,000 years), while the last two faunas stayed there in a short time (Bonifay, 1980).

Three clear cold periods were found in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. The last glacial period was correlated with oxygen isotope Stages 2—4 or the L<sub>1</sub> stage of Chinese loess. Its moraines were the smallest among the three periods. The penultimate glacial period, corresponding to Stage 6 or the L<sub>2</sub> stage of Chinese loess, developed the largest glaciers of the Plateau in Pleistocene and the snowline dropped about 300m below that of the last glacial period (without taking into account the uplift of the Plateau). Moraines of the last glaciation but two were well developed in the Plateau and they correspond to or slightly smaller in scope than those of the penultimate glacial period. They had undergone considerably long period of weathering, which turned them red in color. They compared favorably with Stage 16 or the L<sub>6</sub> of the loess. Therefore, the three levels of the cold faunas in western Europe can exactly be correlated with the three clear cold periods in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. So the Pleistocene glacial periods did obey the law of the global climatic changes (Shi Yafeng, Li Bingyuan, Li Jijun, *et al.*, 1991).

The Milankovitch theory can explain the historical facts of the frequent and repeated alternation of the glacial (or cold stages) and the interglacial (or warm stages) with the natural slow changes in the geometry of the earth's orbit. However, it can not explain why the climate was much colder in Stage 6 than that in Stages 2—4, and why the influence was much more severe in Stage 16, 6 and 2—4 than that in the other cold stages.

In recent years, we modified the Milankovitch theory (Xu Qinqi, 1988; Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991). The average incoming solar radiation in the winter half-year of the northern hemisphere on the earth's surface in each oxygen isotope stage (Di) were calculated (Table 1). We got Xi (the average incoming solar radiation in the summer half-year of the northern hemisphere on the earth's surface in each oxygen isotope stage) in the similar way. We found that the relationship between Di and the temperature in the world is roughly in positive correlation. This principle is named the First Law of Astroclimatology. The relationship between Xi and the temperature in the world is in approximately negative correlation. This principle is called the Second Law of Astroclimatology. The phenomena of the classical North European glacial stages were explained with applications of the data of Di (Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991). The variation in geographical distribution of mammals in Pleistocene may also be explained with applications of the data of Di.

The value of D<sub>16</sub> is 457.27 ly/day. It is the smallest among the Di during the last 734,000 years. So the climate in Stage 16 was much colder than that in the other cold stages. It is in the Stage 16 that the archaic Siberian fauna or the first cold fauna reached western Europe. The value of D<sub>6</sub> is 458.09 ly/day. It is the smallest among the Di in the last 500,000 years. Therefore the second cold fauna got to western Europe from Siberia after a very long warm period (Fig. 1). The value of D<sub>2-4</sub> is 458.84 ly/day. It is quite small (Table 1). So the third cold fauna arrived



in western Europe then. Therefore, the migration of the Siberian fauna was controlled by the value of  $D_i$  in Table 1.

Shi Yafeng, Li Bingyuan, Li Jijun *et al.* (1991) explained the three clear glacial periods of the Qinghai-Xizang Plateau in the similar way.

Now we discuss the problem of Stage 14. Kukla and An (1989) point out correctly that although China is far from northern Europe and the Alps, the apparent agreement of the number of thick loess units in China with the four classical European glacial stages deserves further attention. According to their opinion,  $L_1, L_2, L_5$  and  $L_6$  of Chinese loess are correlative with Weichsel, Warthe, Saale and Elster in Northern Europe respectively. Ding and Liu *et al.* (1990) published a valuable paper. They said that there is a thick unit of loess between  $S_{2-1}$  and  $S_{2-2}$  in Baicaoyuan section in North China. Its thickness is about 2.9m (Ding and Liu *et al.*, 1990). It is named  $L_k$  (Fig. 2). It is likely that  $L_k$  represents a complete cold stage. Because  $L_1$  and  $L_2$  are correlated with Stages 2—4 and 6 separately,  $L_k$  corresponds to Stage 8. It seems that  $L_3, L_4, L_5$  and  $L_6$  could be correlated with Stages 10, 12, 14 and 16 respectively. Thus,  $L_1, L_2, L_5$  and  $L_6$  correspond to Stages 2—4, 6, 14 and 16 (Fig. 2). According to our viewpoint, the oxygen isotope Stages 2—4, 6, 14 and 16 are correlated with Weichsel, Warthe, Saale and Elster (Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991). Therefore,  $L_1, L_2, L_5$  and  $L_6$  are correlative with Weichsel, Warthe, Saale and Elster respectively. It is similar to the viewpoint of Kukla and An's (1989). Table 1 shows that the values of  $D_{16}, D_{14}, D_6$  and  $D_{2-4}$  are 457.27, 457.84, 458.09, and 458.84 ly/day separately. They are increased progressively. It means that the more older stage, the more colder climate in these four cold stages. Therefore the older moraines lie progressively further south. As a matter of fact, it is true (Kukla, 1977; Xu Qinqi and Huang Yuzhen, 1991). I suggest that the period of the first cold fauna in western Europe included both Stage 16 and Stage 14 or both Elster and Saale (Fig. 1).

In cold stages, the northern elements of mammals migrated from North China to South China. In Stage 8, the northern elements, such as *Tamias wimani*, *Trogotherium cuvieri*, *Cricetulus varians*, *Dicerorhinus*, *Sus lydekkeri*, *Pseudaxis grayi*, *Megaceros pachyosteus*, *Scaptochirus*, *Eothenomus inez* and *Ursus arctos* reached the northern bank of the Yangtze River, i.e. Hexian County, Anhui Province (31°45'N, 118°20'E). In Stages 2—4, the northern elements, such as *Scaptochirus moschatus*, *Ursus arctos* and *Cricetulus* got to the southern parts of the Yangtze River, i.e. Shenxiandong cave of Lishui County, Jiangsu Province (31°33'N, 119°10'E). At about the same time, two typical northern elements, i.e. *Microtus brandtioides* and *Cricetulus* arrived at the old town of Yuhang, Zhejiang Province (30°20'N, 119°55'E). These phenomena demonstrated that the climate in Stages 2—4 was much colder than that in Stage 8. It is true. In Table 1, the value of  $D_{2-4}$  is less than that of  $D_8$ . In Stage 6, the northern elements, *Crocidera wongi*, *Rhinolophus cf. ferrumequinum*, *lavio*, *Microtus brandtioides*, *Micromys cf. minutus* and *Hyaena sinensis* arrived in Qujiang County, Guangdong Province (24°30' N, 113°16' E). It is evident that the length of migration of the northern mammals was much longer in Stage 6 than that in Stages 2—4 and Stage 8. Just as we expected the value of  $D_6$  is much less than that of  $D_{2-4}$  and  $D_8$  (Table 1). Therefore, the relationship between the climate and the value of  $D_i$  is in perfect harmony during the last three cold stages (i.e. Stages 2—4, 6 and 8) in China (Fig. 3).

In short, the variation in geographic distribution of mammals in Pleistocene was controlled by the changes of the value of  $D_i$ , or by the natural slow changes in the geometry of the earth's orbit.