

基于植物大化石定量重建云南景谷早中新世古气候*

李相传^{1,2,3}* * 郭政宏¹⁾ 何文龙⁴⁾ 肖良^{1,2)} 戴静⁵⁾ 孙楠^{1,2)} 王楠¹⁾
李瑞云²⁾ 吕荐阔¹⁾

1) 长安大学地球科学与资源学院和西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054, lzulixiangchuan@163.com;

2) 西北大学陕西省早期生命与环境重点实验室, 西安 710069;

3) 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;

4) 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054;

5) 云南大学资源环境学院, 昆明 650000

摘要 运用叶缘分析法(LMA)、气候叶相分析多变量程序(CLAMP)和共存因子分析法(CA)定量重建云南景谷中新世植物群的古气候。对不同方法的结果进行分析比较和交叉验证, 得出景谷古气候主要参数: 年均温为 16.0 ± 1.3 °C、最暖月均温为 26.3 ± 1.5 °C、最冷月均温为 6.2 ± 2.6 °C、生长季为 8.6 ± 0.7 个月、生长季降雨量为 1492 ± 218 mm、连续3个最湿月降水为 701 ± 139 mm 和连续3个最干月降水为 170 ± 41 mm。这些数据反映了景谷中新世气候应属于南-中亚热带气候类型。同时, 该植物群含有大量热带植物区系成分, 也支持这一结论。另外, 景谷地区早中新世温度、降水量季节性差异可能暗示了当时已经出现较弱的季风信号, 但强烈的典型季风气候体系在当时可能尚未建立。

关键词 古气候 叶相 景谷大化石植物群 早中新世 云南

1 前言

晚新生代以来全球岩石圈构造经历了重大变革(Hay *et al.*, 2002)。这一期间海陆分布格局的变化(Lee and Lawver, 1995; Haug and Tiedemann, 1998)以及许多山脉、高原的加速隆升(Zheng *et al.*, 2000; Lamb and Davis, 2003; Wang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2014)对全球洋流、大气环流乃至气候变化造成深远影响(An *et al.*, 2001; Zachos *et al.*, 2001), 如青藏高原的隆升导致了东亚季风的形成(Liu and Yin, 2002; Harris, 2006)。Guo 等(2002)根据甘肃秦安时间跨度为 22—6.2 Ma 的风成黄土记录, 提出强冬季风(东亚季风)至少在早中新世之前就已存在。Sun 和 Wang(2005)通过植物化石记录描绘了中国古近纪、新近纪截然不同的气候带和干旱、湿润区分布图, 认为东亚季风体系应该

始于渐新世-中新世之交。而 Clift 等(2008)根据孟加拉湾南部海域(斯里兰卡东南, 见原文 Figure 1)及印度河口附近海域距今 17—3 Ma 的陆源沉积物记录(ODP Site 718 和 Indus Marine A-1), 提出南亚季风气候出现时间应早于 17 Ma。

位于中国西南边陲的云南省, 受始新世以来印度-欧亚板块碰撞和青藏高原隆升的影响(Lee and Lawver, 1995; Searle *et al.*, 2011), 境内地势险峻, 高山峡谷错综相间, 且因地处低纬度地带, 西南季风和东南季风于此交汇, 形成了独特的低纬高原季风气候(如气温年较差小、干湿季分明、垂直地带性显著), 并造就了极为丰富的生物物种多样性资源。以金沙江中段—云岭山脉南段(即哀牢山)和元江河谷为界, 云南可分为东西两大地形区: 其东部为起伏和缓的低山丘陵, 平均海拔 2 000 m 左右, 属于云贵高原, 主要受东亚季风控制; 其西部为横断山脉纵向峡谷区, 相对高差大, 多 3 000 m 以上的山峰, 盛行南

收稿日期: 2017-09-14

* 国家自然科学基金(41702013, 41672156, 41202008, 41202009, 41302013), 中央高校基本科研业务费(310827172005), 现代古生物学和地层学国家重点实验室(中国科学院南京地质古生物研究所)开放基金(153108)和国家级大学生创新项目(201610710053, 201710710065)联合资助。

** 通讯作者。

亚季风(李锡文、李捷,1992)。

在云南省起伏的高原山地中,第三纪断陷盆地星罗棋布,如景谷盆地。现代景谷地区位于滇西,主要受西南季风气候控制(李锡文、李捷,1992)。该盆地地下中新统三号沟组保存了丰富的植物大化石(中国新生代植物编写组,1978)。目前,该化石植物群已经完成了较为系统的鉴定和分类工作(中国新生代植物编写组,1978),故进一步开展其古气候的定量研究有助于认识云南西部地区新近纪气候变化状况。

目前,基于古植物化石定量重建古气候的方法有三种:叶缘分析法(leaf margin analysis, LMA)、气候与叶片多变量分析程序(climate-leaf analysis multivariate program, CLAMP)和共存因子分析法(the coexistence approach, CA)。前两种方法均隶属于叶相分析的范畴,其前提是不需要进行植物分类而直接划分叶化石形态类型(morphotype)即可(当然也可以对形态类型进行鉴定、确定属种)。第三种方法则必须先进行物种鉴定,确定化石类群的现代亲缘关系及其气候耐受区间。近年来,采用这些方法来定量恢复中国新生代古气候,虽然已经积累不少数据(李承森等,2008,2009),但绝大部分都是单一的共存分析法(CA),并且这些工作主要集中在南方(尤其是云南)和北方的一些地区(如全成、张林,2005; Spicer *et al.*, 2014, 2017)。由于大部分工作缺乏叶相方法的交叉比对,其数据的有效性和精度还有待于未来深入工作和进一步验证。因此,本文通过以上三种方法定量重建景谷早中新世古气候,并将其结果与景谷现代季风气候特征以及云南开远小龙潭、临沧晚中新世植物群古气候进行比较,讨论早中新世以来云南气候演变。

2 材料来源和分析方法

2.1 地质概况

云南新生界分布广泛,出露于众多的中小型陆相盆地中。其中在新近系地层中,植物化石十分丰富(Huang *et al.*, 2016),是开展新生代古植物学、古气候学和植物地理学等研究的重要地区之一(Sun *et al.*, 2011)。

景谷盆地位于云南省西南部(插图 1A, 1B),是一个位于兰坪-思茅褶皱带上的晚第三纪断陷(拉分)盆地,受由喜山运动第 II 幕所产生的断裂活动控制。该盆地内晚新生代地层比较发育,尤其是中新统三号沟组(N_3s)分布广泛,层位稳定,特征明显。

该套地层为一套含煤、石油的湖沼相沉积(插图 1C),主要岩性为灰色砂岩、泥岩夹褐煤层,与下伏晚始新世-渐新世勐腊组($E_{2-3}mn$)或更老的地层呈不整合或断层接触关系,含丰富的动植物化石。根据在钟山乡文线一带($23^{\circ}31'N, 100^{\circ}42'E, 1620\text{ m}$; 插图 1B)三号沟组地层中所采集的植物化石组合中一些灭绝的成分(见表 I),如指叶山参(*Oreopanax oxfordensis*)、奇叶榕(*Ficus parasemicordata*)、古壳斗叶属(*Berryophyllum*, 及榭叶属 *Dryophyllum*)、本克西杨梅(*Myrica banksiaefolia*),中国新生代植物编写组(1978)曾将其划为渐新世。而已发表的相关地质资料,如地层特征和空间层序(云南省地质矿产局,1990,1996)、区域地层对比(桂宝林等,1988;云南省地质矿产局,1990,1996)、微体动物化石(介形虫)组合(刘正明,1992)、孢粉资料(宋之琛、钟碧珍,1984;周铁明,1992),等均认为该套地层属于早中新世。故本文采用景谷植物群时代为早中新世之观点。

2.2 化石材料

景谷盆地下中新统三号沟组富含多种生物化石,如孢粉、轮藻、介形类和植物大化石。中国科学院北京植物所和南京地质古生物研究所(中国新生代植物编写组,1978)曾对钟山文线一带所产的植物化石进行了较为系统的鉴定和描述,共计 17 科 23 属 36 种(表 I)。上述文献所确定的物种组成基本代表了该植物群的整体面貌,也达到了叶相分析的统计学要求,故本文选取该鉴定结果作为定量重建景谷植物群古气候的研究资料是合适的。

2.3 气候参数

本文中不同方法恢复的古气候参数详见表 II。

2.4 分析方法

2.4.1 叶缘分析法

叶缘分析法(LMA)是根据基于现代植被中木本双子叶植物的全缘叶比例(P)和年均温(MAT)的线性相关性所建立的方程来恢复古温度的(Wing and Greenwood, 1993)。目前,古植物学家根据全球不同地区植被与年均温的关系,建立了多个回归模型(如东亚、中北美、南美、欧洲、澳大利亚)。这些已发表的研究结果表明该方法具有明显的区域性(如 Gregory-Wodzicki, 2000; Kowalski, 2002; Greenwood *et al.*, 2004; Jacques *et al.*, 2011a)。Li

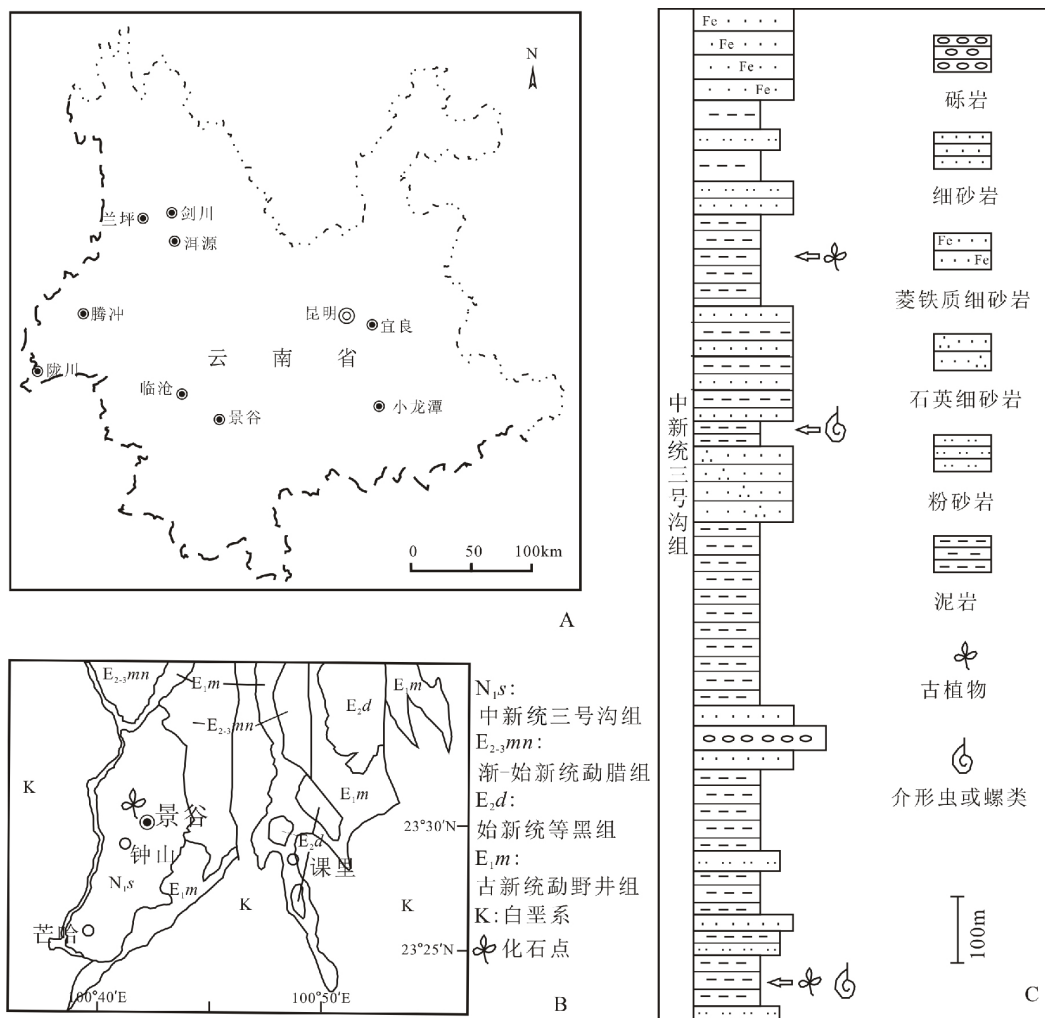


插图 1 云南景谷中新统化石点(A,B)及三号沟组地层柱状图(C)

Miocene fossil locality of Jinggu, Yunnan(A,B) and lithostratigraphic column of the Sanhaogou Formation(C)

等(2016)分析了大量有关现代植被与分布区关系的数据,证实了该方法在中国湿润-半湿润地区古温度分析中的可靠性。

因此,在已知的众多回归方程中,本文选择最近提出的中国方程重建景谷植物群的年均温: $MAT = 1.038 + 27.6 \times P$ (50 个采样点,本文称中国方程 1) (Su *et al.*, 2010), $MAT = 6.68 + 22.3 \times P$ (732 个采样点,本文称中国方程 2) (Chen *et al.*, 2014); 而较早的东亚方程也被采用与前者对比 (Jacques *et al.*, 2011a): $MAT = 1.141 + 30.6 \times P$ (Wolfe, 1979; Wing and Greenwood, 1993)。对于以上三个线性回归方程的恢复结果之标准差(SE)采用如下公式计算:

$$SE = b \times \sqrt{[1 + \varphi(n-1)P(1-P)] \times \frac{P(1-P)}{n}}$$

其中 b 表示回归方程的斜率, φ 表示过度离势系数(overdispersion factor, 过度离势现象指的是对自然现象进行统计时所估计参数的实际变异数大于

原先期望的变异数), 为 0.052 (据 Miller *et al.*, 2006), n 表示某植物群木本双子叶植物物种总数。

本文叶缘分析共使用景谷植物群中的 33 个类群(见表 I)。而为了便于比较,云南开远小龙潭和临沧晚中新世植物群的年均温也采用最新的模型(如 Chen *et al.*, 2014)重新计算。

2.4.2 气候与叶片多变量分析程序

相对于单变量模型的叶缘分析法,气候与叶片多变量分析程序(CLAMP)是一种多变量的叶相分析法,通过根据统计现代植被木本双子叶植物叶片形态特征(如叶形、叶缘、叶尖和叶基及大小等叶相特征,注意叶脉属于分类学术语)与气候参数的数值关系而建立的气候-叶相模型(即 datasets)来实现。其核心统计工具是运用典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA) (Wolfe, 1993), 一种多变量分析方法来确定木本双子叶植物叶相和当今气候参数的关系,通常借助于电脑软件(CANO-

表 I 云南景谷早中新世植物群物种组成
Taxonomic compositions of the Early Miocene Jinggu megafloora, Yunnan

科	属	分布区类型	种	序号	器官	CA	LMA	CLAMP
Cupressaceae	<i>Calocedrus</i>	(1)	<i>C. lantenoisii</i>	1	叶枝	+	-	-
Cephalotaxaceae	<i>Cephalotaxus</i>	(2)	<i>Cephalotaxus</i> sp.	2	叶	+	-	-
Magnoliaceae	<i>Magnolia</i>	(3)	<i>M. latifolia</i>	3	叶	+	+	+
Annonaceae	<i>Ammona</i>	(4)	<i>A. pinnatinervis</i>	4	叶	-	+	+
	<i>Uvaria</i>	(5)	<i>U. yunnanensis</i>	5	叶	-	+	+
Lauraceae	<i>Machilus</i>	(1)	<i>M. ugoana</i>	6	叶	+	+	+
	<i>Nothaphoebe</i>	(6)	<i>N. precavaleriei</i>	7	叶	+	+	+
	<i>Phoebe</i>	(6)	<i>P. parananmu</i>	8	叶	+	+	+
			<i>P. pseudolanceolata</i>	9	叶	+	+	+
Ulmaceae	<i>Zelkova</i>	(7)	<i>Z. ungeri</i>	10	叶	+	+	+
Moraceae	<i>Ficus</i>	(4)	<i>F. parasemicordata</i>	11	叶	+	+	+
Fagaceae	<i>Berryophyllum</i> *		<i>B. parvum</i>	12	叶	-	+	+
			<i>B. relongtanense</i>	13	叶	-	+	+
			<i>B. yunnanense</i>	14	叶	-	+	+
	<i>Lithocarpus</i>	(3)	<i>L. angustus</i>	15	叶	+	+	+
			<i>L. lanci folius</i>	16	叶	+	+	+
			<i>Lithocarpus</i> sp.	17	叶	+	+	+
	<i>Quercus</i>	(8)	<i>Q. decora</i>	18	叶	+	+	+
			<i>Q. haugii</i>	19	叶	+	+	+
			<i>Q. lahtenoisii</i>	20	叶	+	+	+
			<i>Q. latifolia</i>	21	叶	+	+	+
			<i>Q. parachampionii</i>	22	叶	+	+	+
			<i>Q. parahelferiana</i>	23	叶	+	+	+
			<i>Q. paraschottkyana</i>	24	叶	+	+	+
			<i>Q. simulate</i>	25	叶	+	+	+
			<i>Q. zeilleri</i>	26	叶	+	+	+
Myricaceae	<i>Myrica</i>	(8)	<i>M. banksiae folia</i>	27	叶	+	+	+
Juglandaceae	<i>Carya</i>	(3)	<i>C. cordioides</i>	28	叶	+	+	+
Fabaceae	<i>Cercis</i>	(8)	<i>Cercis</i> sp.	29	荚果	+	-	-
	<i>Erythrophleum</i>	(5)	<i>E. ovatifolium</i>	30	叶	+	+	+
Combretaceae	<i>Terminalia</i>	(4)	<i>T. longipedis</i>	31	叶	-	+	+
Anacardiaceae	<i>Rhus</i>	(8)	<i>Rhus</i> sp.	32	叶	+	+	+
Sapindaceae	<i>Acer</i>	(8)	<i>Acer</i> sp.	33	叶	+	+	+
Araliaceae	<i>Oreopanax</i>		<i>O. oxfordensis</i>	34	叶	-	+	+
Styracaceae	<i>Rehderodendron</i>	(1)	<i>Rehderodendron</i> sp.	35	叶	+	+	+
Oleaceae	<i>Jasminum</i>	(4)	<i>J. paralanceolarium</i>	36	叶	+	+	+

植物群物种组成参考中国新生代植物编写组(1978)。+代表该化石类群能够应用于相应的气候分析;-对于CA分析而言,形态属或者灭绝属种排除,对于叶相分析而言,裸子植物或被子植物果实类群排除。*原类群名为榲桲属 *Dryophyllum*,经周浙昆(1996)修订为古壳叶属 *Berryophyllum*。分布区类型参考吴征镒(1991),编号为(1)热带亚洲(印度-马来西亚)分布,(2)东亚分布,(3)东亚-北美间断分布,(4)泛热带分布,(5)旧热带分布,(6)热带亚洲和热带美洲间断分布,(7)旧世界温带分布,(8)北温带分布。

CO)和已有的成对的数据库(如 Physg3arcAZ-Met3arAZ)来实现。最初 CLAMP 数据库由位于北美、波多黎各和日本的 106 个叶相-气象数据点组成(Wolfe, 1993)。目前,常见的成套数据库有 5 个(<http://clamp.ibcas.ac.cn/>): Physg3arcAZ, Physg3brcAZ, PhysgAsia1(Jacques *et al.*, 2011b), PhysgAsia2(Khan *et al.*, 2014)和 PhysgGlobal378(Yang *et al.*, 2015)。其中,Physg3arcAZ 数据库由 173 个来自北美和日本的叶相-气象数据点构成,而

Physg3brcAZ 数据库为前者的替代版本,由 144 个数据点构成,其中除掉了来自极寒环境的数据(因该类型森林具有较高的小型叶和齿缘比例)(Wolfe, 1993)。因亚洲具有全球最为典型季风气候体系(如东亚季风和南亚季风),两个适用于亚洲季风区的数据库模型最近被开发出来:PhysgAsia1 和 PhysgAsia2。PhysgAsia1 数据库由 45 个中国的数据点和 Physg3brcAZ 的 144 个数据点组成(Jacques *et al.*, 2011b),而 PhysgAsia2 数据库由 33 个热带亚

表 II 应用景谷植物群化石定量分析的古气候参数
Quantitative reconstructed climatic parameters for the Jinggu megafloora

气候参数	简称	方法
年均温(°C)	MAT(Mean annual temperature)	CLAMP, LMA, CA
最热月均温(°C)	WMMT(Warmest month mean temperature)	CLAMP, CA
最冷月均温(°C)	CMMT(Coldest month mean temperature)	CLAMP, CA
生长季长度	GRS(Length of the growing season)	CLAMP
生长季降水量	GSP(Growing season precipitation)	CLAMP
生长季月均降水量	MMGSP(Mean monthly growing season precipitation)	CLAMP
连续 3 个最湿月降水	3-WET(Precipitation during the three consecutive wettest months)	CLAMP
连续 3 个最干月降水	3-DRY(Precipitation during the three consecutive driest months)	CLAMP
相对湿度	RH(Relative humidity)	CLAMP
比湿度	SH(Specific humidity)	CLAMP
热焓	ENTHAL(Enthalpy)	CLAMP
年均降水量(mm)	MAP(Mean annual precipitation)	CA
最湿月均降水量(mm)	MP-WET(Mean precipitation of the wettest month)	CA
最暖月均降水量(mm)	MP-WARM(Mean precipitation of the warmest month)	CA
最干月均降水量(mm)	MP-DRY(Mean precipitation of the driest month)	CA

洲(即印度、泰国及海南岛)的数据点和 Physg3brcaZ 的 144 个数据点组成(Khan *et al.*, 2014)。另外, Yang 等(2015)提出了一个最新的数据库模型 PhysgGlobal378。该模型由全球除澳大利亚外的 378 个数据点组成,在进行 CLAMP 分析时可通过它确定选择最合适的数据库。需要指出的是, Physg3arcAZ 和 Physg3brcaZ 数据库有两套气候数据:栅格化(gridDED)和非栅格化数据(ungridDED)(Spicer *et al.*, 2009),而其它模型只有一套气候数据:栅格化数据(gridDED)。因中国长期盛行典型的东亚季风气候和现代中国植被与第三纪植物群间的密切关系,故本文选择最适用于中国新生代植物群古气候定量恢复的数据库——PhysgAsia1-GridMetAsia1 数据库(Jacques *et al.*, 2011b)来重建景谷植物群的古气候。

目前 CLAMP 已成为重建陆相古气候的一个有力的、精确的工具(如 Yang *et al.*, 2007, 2015; Grimm and Potts, 2016),能和海相气候指标(如 oxygen isotope)形成良好的比对。CLAMP 能够有效地应用到白垩纪古植物群中(Herman and Spicer, 1996),不过,鉴于该方法利用木本双子叶植物叶相特征,故对新生代的植物群来说所获得结果更可靠(如 Wolfe, 1995; Spicer, 2000; Spicer *et al.*, 2014)。

和叶缘分析类似,当前 CLAMP 分析共使用景谷植物群中 33 个类群(>最低要求类群:20 个)的叶相特征(见表 I,附表 I),并且其叶相统计完整度为 0.63(>最低要求:0.6),因此确保了分析结果的准确性和可靠程度。另外,通过 Xia 等(2009)和 Jacques 等(2011a)的叶相特征统计数据并采用 Jac-

ques 等(2011b)提出的 PhysgAsia1-GridMetAsia1 数据库重新恢复了云南开远小龙潭和临沧晚中新世植物群的古气候参数。

2.4.3 最近亲缘种法和共存因子分析法

最近亲缘种法(the nearest living relative method; Mosbrugger, 1999)原理非常简单,即若某一古生物类群或者古生物类群组合在现代生物界有一亲缘生物类群(NLR)或者生物类群组合,则假定古生物所生活时的气候参数和其亲缘类群相同或相近。该方法是一种非常古老的古气候重建方法,有很多版本,如单类群或多类群定性法、单类群或多类群定量法(即共存因子分析法)(Mosbrugger, 1999),尤其是共存因子分析法在新生代植物群古气候定量研究中得到广泛应用(如 Uhl *et al.*, 2006)。

共存因子分析法(CA)的理论基础是均变论(Uniformitarianism),采用将今论古原理,假定化石物种和其现存最近亲缘种(类群)(the nearest living relative, NLR)气候耐受性(climatic tolerance)相同或相似,叠加 NLRs 的气候参数产生共存数值区间,即为古气候数据(Mosbrugger and Utescher, 1997)。为了降低不确定因素,本文将化石类群的 NLR 置于属一级,其气候参数首先通过 the Palaeoflora database(Mosbrugger and Utescher, 1997)查询;当数据库中无相应的 NLR 气候参数时,则根据 Mosbrugger 和 Utescher(1997)及 Jacques 等(2011a)所描述的方法——首先根据各种植物志(如 eflora)等资料确定 NLR 的地理分布范围,再依据 Mueller(1996)和中国气象局气象资料室(2004)等的气候资料确定 NLR 气候参数区间。

然而,该方法受到严重质疑,如 Grimm 和 Denk (2012)与 Grimm 和 Potts(2016)认为其由于缺乏现代植物群验证而理论基础不成立。这样,本文慎重地将 CA 法应用于时代较新的景谷植物群古气候研究,和叶相分析结果进行比较和交叉验证,仅供辅助参考和尝试提供时代较新的研究实例(像 Huang *et al.*, 2015)。除去灭绝和全球广布类群,景谷植物群共有 29 个类群应用于共存分析(详见表 I)。

3 古气候重建

通过采用景谷中新世植物群的类群组成和叶相特征,本文获得了中新世时景谷的主要古气候参数。因为所采用方法彼此独立,所以两套数据可以互相比较和交叉验证。

3.1 叶缘分析

在景谷植物群 33 个木本双子叶植物类群中,全缘种数为 15 种,全缘叶百分比为 45.5%,因此使用东亚方程(Wing and Greenwood, 1993; Wolfe, 1979)、中国方程 1(Su *et al.*, 2010)与中国方程 2(Chen *et al.*, 2014),所计算的景谷中新世年均温(MAT)分别为 15.1 ± 3.2 °C、 13.6 ± 2.8 °C 与 16.8

± 2.3 °C(见表 III)。不同模型恢复的结果存在一定的差异:中国方程 1(Su *et al.*, 2010)的结果最低而中国方程 2(Chen *et al.*, 2014)的结果最高。

3.2 气候与叶片多变量分析

本文采用了多个气候校正数据库恢复了景谷中新世气候参数(详见表 IV)。其中,通过匹配分析检查表明:中国数据库 PhysgAsia1-GridMetAsia1 最为适用。该校正数据库能为中国化石点提供更准确的定量结果,这是前人研究曾经证实过的(Jacques *et al.*, 2011b, 2014),并且本文对小龙潭和临沧植物群古气候的再次 CLAMP 分析结果也肯定了这一点。这样,所计算的景谷主要古气候参数:年均温(MAT)为 16.0 ± 1.3 °C、最热月均温(WMMT)为 26.3 ± 1.5 °C、最冷月均温(CMMT)为 6.2 ± 2.6 °C、生长季月数(GRS)为 8.6 ± 0.7 、生长季降雨量(GSP)为 1492 ± 218 mm、生长季月均降雨量(MMGSP)为 180 ± 25 mm、连续 3 个最湿月降雨量(3-WET)为 701 ± 139 mm、连续 3 个最干月降雨量(3-DRY)为 170 ± 41 mm、相对湿度(RH)为 $74.7\% \pm 6.0\%$ 、比湿度(SH)为 9.3 ± 1.2 g/kg 和焓(ENTHAL)为 32.6 ± 0.5 kJ/kg。

表 III 景谷植物群及相邻植物群的叶缘分析结果

Results of LMA analysis of the Jinggu and adjacent megaflores compared with the modern values

LMA 方程	MAT(°C)			参考文献
	景谷早中新世	临沧晚中新世*	小龙潭晚中新世*	
MAT=1.141+30.6×P	15.1±3.2	24.4±2.1	22.3±2.5	Wolfe, 1979; Wing and Greenwood, 1993
MAT=1.038+27.6×P	13.6±2.8	22.0±1.9	20.1±2.3	Su <i>et al.</i> , 2010
MAT=6.68+22.3×P	16.8±2.3	23.6±1.5	22.1±1.9	Chen <i>et al.</i> , 2014
现代值 Ψ(临沧)	17.5			中国气象局气象资料室, 2004
现代值 Ψ(景谷)	20			中国科学院云南热带生物资源综合考察队, 1964

* 小龙潭和临沧植物群木本双子叶植物全缘叶比例 P 值分别为 0.69(Xia *et al.*, 2009)和 0.76(Jacques *et al.*, 2011)。Ψ 临沧气象站坐标 23°53'N, 100°5'E, 1502 m; 景谷气象站坐标 23°16'N, 100°42'E, 913 m。

3.3 共存分析

通过共存分析,景谷中新世植物群的主要气候因子耐受范围详见表 V: 年均温(MAT)为 15.6—21.9 °C、最热月均温(WMMT)为 22.1—26.1 °C、最冷月均温(CMMT)为 6.1—13.6 °C、年均降雨量(MAP)为 1175—1322 mm、最湿月均降水量(MP-WET)为 164—195 mm、最干月均降水量(MP-DRY)为 19—38 mm 和最暖月均降水量(MP-WARM)为 120—142 mm。

4 讨 论

现代中国气候呈现了典型的季风体系特征,尤其是降水具有明显的季节性。为了准确恢复这一具有长期强烈季风形成发展史的地区之古气候,本文采用了最新的基于植物大化石的古气候模型:根据大量中国植被样点建立的叶缘分析方程(Chen *et al.*, 2014)和涵盖了中国季风气候区样点的 CLAMP 之 PhysgAsia1-GridMetAsia1 数据库(Jac-

表 IV 景谷植物群及相邻植物群的 CLAMP 分析结果

Results of CLAMP analysis of the Jinggu and adjacent megaflores compared with the modern values

气候变量	景谷早中新世					临沧晚中新世	小龙潭晚中新世	现代值*	
	Physg3arc- Met	Physg3arc- GridMet	Physg3brc- Met	Physg3brc- GridMet	PhysgAsia1- GridMetAsia1	PhysgAsia1- GridMetAsia1	PhysgAsia1- GridMetAsia1	临沧	景谷
MAT(°C)	19.3±1.7	17.1±1.6	18.3±1.2	17.1±1.2	16.0±1.3	18.3±1.3	17.8±1.3	17.5	20
WMMT(°C)	29.3±1.8	27.7±1.8	28.9±1.6	27.8±1.4	26.3±1.5	26.2±1.5	24.8±1.5	21.6	24.6
CMMT(°C)	7.8±2.5	5.7±2.1	7.3±1.9	6.4±1.9	6.2±2.6	10.3±2.6	11.0±2.6	11.2	12.2
GRS(month)	10.9±0.9	9.3±0.8	10.5±0.7	9.4±0.7	8.6±0.7	9.4±0.7	9.5±0.7	12.0	12.0
GSP(mm)	2855±317	1900±195	2790±337	1881±202	1492±218	1955±218	1206±218	1163	1142
MMGSP(mm)	332±37	251±25	336±37	250±26	180±25	207±25	129±25	97	95
3-WET(mm)	1308±138	802±134	1298±140	783±146	701±139	849±139	620±139	650	
3-DRY(mm)	836±90	227±35	892±93	261±32	170±41	212±41	152±41	41	
RH(%)	65.1±8.1	69.0±6.3	71.3±7.3	77.3±5.1	74.7±6.0	82.6±6.0	72.7±6.0	72.0	75
SH(g/kg)	8.0±1.0	8.7±1.0	8.8±0.9	10.1±1.0	9.3±1.2	12±1.2	10±1.2		
ENTHAL (kJ/kg)	31.2±0.4	32.4±0.4	31.3±0.3	33.0±0.5	32.6±0.5	33.8±0.5	33.1±0.5		

* 临沧、景谷气象站坐标、海拔高度值及相关气象数据来源同表 III。小龙潭、临沧晚中新世植物群叶相特征分别来自 Xia 等(2009)和 Jacques 等(2011)。

表 V 景谷植物群植物大化石的共存分析结果

Results of CA of the Jinggu megaflores compared with the modern values

气候变量	共存区间	最小值边界类群	最大值边界类群	异常类群	共存区间内类群百分比	现代值*	
						临沧	景谷
MAT/°C	15.6—21.9	<i>Rehderodendron</i>	<i>Zelkova</i>		100%	17.5	20
CMMT/°C	6.1—13.6	<i>Erythrophleum</i>	<i>Rehderodendron</i>		100%	11.2	12.2
WMMT/°C	22.1—26.1	<i>Erythrophleum</i>	<i>Nothaphoebe</i>		100%	21.6	24.6
MAP/mm	1175—1322	<i>Nothaphoebe</i>	<i>Rehderodendron</i>		100%	1163	1142
MP-WET/mm	164—195	<i>Rehderodendron</i>	<i>Rhus</i>	<i>Nothaphoebe, Erythrophleum</i>	93.1%	235	
MP-DRY/mm	19—38	<i>Machilus</i>	<i>Rehderodendron</i>		100%	10	
MP-WARM/mm	120—142	<i>Rehderodendron</i>	<i>Erythrophleum</i>		100%	192	

* 临沧、景谷气象站坐标、海拔高度值及相关气象数据来源同表 III。

ques *et al.*, 2011b)。表 VI 列举了不同方法获得的景谷中新世古气候结果,其中,年均温(MAT)、最冷月均温(CMMT)和最热月均温(WMMT)体现了良好的一致性,而降雨量有较明显的差异。

4.1 温度

通过应用三个常见的叶缘分析模型(见表 III),本文获得的景谷中新世年均温值由低到高依次为中国方程 1(Su *et al.*, 2010)之 13.6 °C、东亚方程(Wolfe, 1979; Wing and Greenwood, 1993)之 15.1 °C、中国方程 2(Chen *et al.*, 2014)之 16.8 °C。考虑到植被叶缘和年均温线性关系的区域适用性,中国方程的新旧版本(Su *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2014)更适合中国植物群。然而,中国方程 2(即 Chen *et al.*, 2014)的数据样本数远多于较老的中国方程 1(即 Su *et al.*, 2010),故 Chen 等(2014)认为其方程能够提供更准确的古年均温值。在本研究中,基于中国方程 2(Chen *et al.*, 2014)所计算的

16.8 °C 年均温值和 CLAMP、共存分析法(CA)所获得的结果(分别为 16.0 °C 和 15.6—21.9 °C)更吻合,这证实了该叶缘分析模型(Chen *et al.*, 2014)比另外两个模型(Wolfe, 1979; Wing and Greenwood, 1993; Su *et al.*, 2010)更适用于景谷植物群。

对于 CLAMP 方法而言, PhysgAsia1-Grid-MetAsia1 数据库所获得的景谷中新世温度、生长季均低于其它两套数据库(见表 IV)。这说明在讨论不同植物群气候差异和新生代气候演变时,要考虑其所采用古气候重建方法和模型。

对于不同方法计算的年均温而言,由叶缘分析(LMA)中国方程 2(Chen *et al.*, 2014)恢复的 16.8 °C 年均温(MAT)略高于通过 CLAMP 分析获得的 16.0 °C 的结果(表 VI),而低于共存分析法(CA)所获得的 15.6—21.9 °C 的结果(取中值约为 18.8 °C)。这一趋势和先前邻近的低纬度植物群古气候研究结果不同(如中新世的云南开远小龙潭和临沧植物群);这两地中新世年均温重建结果由低到

表 VI 不同方法所恢复的景谷及邻近植物群中新世古气候结果

The results of climatic parameters of the Miocene Jinggu and adjacent megaflores reconstructed by CA, CLAMP, and LMA

气候参数	景谷早中新世			临沧晚中新世		小龙潭晚中新世		现代值*	
	LMA	CLAMP	CA	LMA	CLAMP	LMA	CLAMP	临沧	景谷
MAT(°C)	13.6±2.8/ 16.8±2.3	16.0±1.3	15.6—21.9	22.0±1.9/ 23.6±1.5	18.3±1.3	20.1±2.3/ 22.1±1.9	17.8±1.3	17.5	20
WMMT(°C)		26.3±1.5	22.1—26.1		26.2±1.5		24.8±1.5	21.6	24.6
CMMT(°C)		6.2±2.6	6.1—13.6		10.3±2.6		11±2.6	11.2	12.2
GRS(month)		8.6±0.7			9.4±0.7		9.5±0.7	12.0	12.0
GSP(mm)		1492±218			1955±218		1206±218	1163	1142
MMGSP(mm)		180±25			207±25		129±25	97	95
3-WET(mm)		701±139			849±139		620±139	650	
3-DRY(mm)		170±41			212±41		152±41	41	
MAP/mm			1175—1322						1142
MP-WET/mm			164—195						235
MP-DRY/mm			19—38						10
MP-WARM/mm			120—142						192
RH(%)		74.7±6.0			82.6±6.0		72.7±6.0	72.0	75
SH(g/kg)		9.3±1.2			12±1.2		10±1.2		
ENTHAL(kJ/kg)		32.6±0.5			33.8±0.5		33.1±0.5		

* 临沧、景谷气象站坐标、海拔高度值及相关气象数据来源同表 III。

高表现为共存分析(CA)、CLAMP和叶缘分析(LMA)(Xia *et al.*, 2009; Jacques *et al.*, 2011a)。但是,本文采用最新的叶相模型对这两个植物群重新计算的年均温结果:小龙潭为 CLAMP(17.8 °C) < 共存分析(CA, 取中值约为 18 °C, 详见 Xia *et al.*, 2009) < 叶缘分析(LMA, 22.1 °C), 临沧为 CLAMP(18.3 °C) < 共存分析(CA, 取中值约为 18.8 °C, 详见 Jacques *et al.*, 2011a) < 叶缘分析(LMA, 23.6 °C)。

然而,值得注意的是,其它距离更远的欧亚中纬度植物群的年均温却展现出与本研究相同的变化趋势(如中新世山旺植物群),即由低到高依次为 CLAMP、叶缘分析(LMA)和共存分析(CA)(因地理较远未考虑 CLAMP 数据库的选择问题)(如 Mosbrugger and Utescher, 1997; Sun *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2003; Uhl *et al.*, 2007)。总之,在选择适合的古植物群模型前提下,对于基于植物大化石的新生代古气候研究而言,单变量叶相分析(LMA)的年均温结果略高于多变量分析(CLAMP)的结果,但二者与共存分析之间的高低变化趋势难以确定(如上所述,景谷与小龙潭、临沧植物群就不同)。

对于最暖月均温(WMMT)和最冷月均温(CM-MT)而言(表 VI), CLAMP 的结果分别为 26.3 ± 1.5 °C 和 6.2 ± 2.6 °C, 而共存分析的结果分别为 22.1—26.1 °C 和 6.1—13.6 °C。两种方法分析的结果均体现出明显的季节变化和年较差。更值得注意的是,对比于现代景谷的 12 个月的生长季周期

(表 IV、V)(中国科学院云南热带生物资源综合考察队, 1964), CLAMP 结果只有 8.6 ± 0.7 个月, 这说明景谷中新世时每年可能有约 3 个月份温度低于 5 °C, 不能满足植物的生长条件(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1985)。

现代景谷地处横断山脉南段,山高谷深,相对高差较大,因此本文将景谷气象站(海拔 913 m) 1957—1961 年实测温度参数(表 VI)(中国科学院云南热带生物资源综合考察队, 1964)校正到化石植物群高度。假设景谷现代垂直气温梯度为 6 °C/km(王宇, 2006), 则经校正后化石点(海拔 1 620 m)现代年均温为 20 - (1620 - 913) × 0.006 ≈ 15.8 °C、最暖月均温为 24.6 - (1620 - 913) × 0.006 ≈ 20.4 °C、最冷月均温为 12.2 - (1620 - 913) × 0.006 ≈ 8.0 °C。这样,景谷现代和中新世年均温相当,但表现出更大的年较差或年温度变化(尤其是 CLAMP 之 20.1 °C 相对于今日之 12.4 °C)。这些气候参数的变化(如最暖月均温下降、最冷月均温升高、生长季变长、年较差变小)可能反映了中新世以来青藏高原(或者东南缘)的隆升过程对气候演变的驱动作用(Zachos *et al.*, 2001; Liu and Yin, 2002): 中新世时高原高度有限,地形屏障作用弱,故古气候因纬度性强而呈现最热月均温高、最冷月均温低、年较差大的特点,而现代则由于高原阻隔和西南季风的影响而呈现最热月均温低、最冷月均温高、年较差小的特征(见表 VI, 即现在昆明等地的四季如春之说)。

4.2 降水量

对于 CLAMP 方法而言, PhysgAsia1-Grid-MetAsia1 数据库所获得的景谷中新世降水量结果均低于其它两套数据库(见表IV), 与现代景谷相应参数值可比性最高。通过对比本文(采用 PhysgAsia1-GridMetAsia1)计算的和前人计算的小龙潭、临沧中新世降水量结果(Xia *et al.*, 2009; Jacques *et al.*, 2011a), 也证明了当前的结论: PhysgAsia1-GridMetAsia1 数据库所获得的降水量指标与现代相关地区的实测值更具可比性(如 Jacques *et al.*, 2011a 采用 Physg3brc 数据库获得的临沧中新世 GSP 为 3 711 mm), 同时, 也说明了对中国新生代植物群而言该数据库更适用。

这样, 不同方法间古气候重建的差异主要体现在降水量方面。CLAMP 所恢复的 8.6 个月的生长季降水量(GSP)达 $1\,492 \pm 218$ mm, 而共存分析的年均降水量(MAP)为 1 175—1 322 mm。现代景谷年均降水量 1 142 mm 更接近于共存分析的结果(表IV、V、VI)。这种情况可能和共存分析法过于依赖现代 NLR 生态耐受性的理论基础有关, 但这也正是近年来该方法备受诟病的原因(Grimm and Denk, 2012; Grimm and Potts, 2016)。

现代景谷降水量季节分布非常集中(见表VI), 最湿月与最干月降水量分别为 235 mm 和 10 mm。而与之形成鲜明对比的是, 中新世时景谷降水量分布仅表现出较弱的均衡性, 有一定程度的季节性: 如 CLAMP 恢复的连续 3 个最湿月降水(3-WET)和连续 3 个最干月降水(3-DRY)分别为 701 ± 139 mm 和 170 ± 41 mm(二者比值约为 4.1), 共存分析的最湿月均降水量和最干月均降水量分别为 164—195 mm 和 19—38 mm(二者比值约为 6.3)。而季风气候的界定指标 3-WET:3-DRY 为大于 6(Lau and Yang, 1997; Zhang and Wang, 2008; Spicer *et al.*, 2014), 这说明景谷中新世气候不具明显的季风特征。另外, CLAMP 所提供的相对湿度与今天景谷的比较相当(表VI)。

4.3 古气候和植物区系

考虑到共存分析结果的不确定性(Grimm and Denk, 2012; Grimm and Potts, 2016), 本文采用 CLAMP 的分析结果作为景谷中新世植物群的生存条件: 年均温 16.0 ± 1.3 °C、最暖月均温 26.3 ± 1.5 °C、最冷月均温 6.2 ± 2.6 °C、生长季 8.6 ± 0.7

个月、生长季降雨量 $1\,492 \pm 218$ mm、连续 3 个最湿月降水 701 ± 139 mm 和连续 3 个最干月降水 170 ± 41 mm, 可归为南-中亚热带气候类型(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会, 1985)。虽然古今气候类型几乎相同(现代景谷仍为南亚热带气候, 王宇, 2006), 但是, 与今天景谷四季如春的气候相比(表VI, 年较差为 12.4°C), 中新世气候夏季稍暖, 冬季稍冷, 年较差稍大, 但当时年降水量更丰富, 其季节分布也相对均匀(虽有一定的季节性)。根据中新世干湿季降水比 1:4.1 大于季风定义指标 1:6(见 4.2 部分), 景谷中新世气候尚不具典型的季风体系特征。因此, 强烈的季风气候体系在早中新世的景谷地区可能尚未建立。不过, 早中新世温度、降水量季节性差异似乎暗示了当时可能已经出现微弱的季风信号。

如果按照吴征镒(1991)提出的中国种子植物属的分布区类型, 景谷中新世植物群能够指示热带环境的区系成分有 11 属(见表I), 在全部 21 个属一级类群占 52.4%(不含形态属 *Berryophyllum* 和新热带属 *Oreopanax*), 接近于我国现代南亚热带气候北界所对应的 60% 的热带区系成分比例(中华人民共和国国家地图集编纂委员会, 1999; Zhu *et al.*, 2007; Zhu, 2013), 与所恢复的古气候数据匹配。同时, 这些定量的古气候数据也证实了先前的气候推断: 景谷植物群因多常绿型壳斗科和樟科类群成分(表I), 应属于古热带第三纪植物区并且反映了南亚热带气候(中国新生代植物编写组, 1978)。

5 结论

通过对景谷中新世三号沟组植物群的古气候分析, 得出以下结论:

1) 基于植物大化石, 定量恢复了景谷早中新统古气候参数: 年均温 16.0 ± 1.3 °C、最暖月均温 26.3 ± 1.5 °C、最冷月均温 6.2 ± 2.6 °C、生长季 8.6 ± 0.7 个月、生长季降雨量 $1\,492 \pm 218$ mm、连续 3 个最湿月降水量 701 ± 139 mm 和连续 3 个最干月降水量 170 ± 41 mm。其中, 早中新世温度、降水量季节性差异可能暗示了当时已经出现微弱的季风信号, 但强烈的典型季风气候体系在景谷地区可能尚未建立。

2) 本文古气候数据表明景谷中新世气候为南-中亚热带气候类型, 这一观点可被古植被中含有大量热带植物区系成分所佐证。

致谢 感谢匿名审稿专家们提出的宝贵意见。

附表 I 景谷植物群 CLAMP 分析的叶相特征
The statistics of the leaf scorings for CLAMP
on the Jinggu megaf flora

序号	特征	百分比(%)
1	开裂	3
2	全缘	45
3	齿距规则性	45
4	齿距	3
5	圆形齿	3
6	急尖齿	52
7	重齿	0
8	微型叶	0
9	极小型叶 I	0
10	极小型叶 II	0
11	小型叶 I	4
12	小型叶 II	63
13	小型叶 III	30
14	中型叶 I	2
15	中型叶 II	0
16	中型叶 III	0
17	微缺叶尖	6
18	圆形叶尖	25
19	急尖叶尖	22
20	渐尖叶尖	47
21	心形叶基	13
22	圆形叶基	13
23	急尖叶基	73
24	长宽比 < 1:1	0
25	长宽比 = 1-2:1	30
26	长宽比 = 2-3:1	33
27	长宽比 = 3-4:1	17
28	长宽比 > 4:1	20
29	倒卵形	31
30	椭圆形	63
31	卵形	6

参 考 文 献 (References)

- An Z, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C, 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, **411**: 62—66.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province(云南省地质矿产局), 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House. 1—737 (in Chinese with English summary).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province(云南省地质矿产局), 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Yunnan Province. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1—374 (in Chinese).
- Chen W Y, Su T, Adams J M, Jacques F M, Ferguson D K, Zhou Z K, 2014. Large-scale dataset from China gives new insights into leaf margin-temperature relationships. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **402**: 73—80.
- Clift P D, Hodges K V, Heslop D, Hannigan R, Van Long H, Calves G, 2008. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, **1**: 875—880.
- Editor Board of Natural Geography of China, Chinese Academy of Sciences(中国科学院《中国自然地理》编辑委员会), 1985. *Natural Geography of China: Climate*. Beijing: Science Press. 1—161 (in Chinese).
- Greenwood D R, Wilf P, Wing S L, Christophel D C, 2004. Paleotemperature estimation using leaf-margin analysis: Is Australia different? *Palaios*, **19**: 129—142.
- Gregory-Wodzicki K M, 2000. Relationships between leaf morphology and climate, Bolivia: Implications for estimating paleoclimate from fossil floras. *Paleobiology*, **26**: 668—688.
- Grimm G W, Denk T, 2012. Reliability and resolution of the coexistence approach—a revalidation using modern-day data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **172**: 33—47.
- Grimm G W, Potts A J, 2016. Fallacies and fantasies: the theoretical underpinnings of the Coexistence Approach for palaeoclimate reconstruction. *Climate of the Past*, **12**: 611—622.
- Gui Bao-lin(桂宝林), Wang Chao-dong(王朝栋), Ge Chun-xiang(葛春祥), 1988. On the oil-bearing ability of the Upper Tertiary in Jinggu Basin. *Yunnan Geology(云南地质)*, **7**(3): 83—95 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z, Ruddiman W F, Hao Q, Wu H, Qiao Y, Zhu R X, Peng S, Wei J, Yuan B, Liu T, 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, **416**: 159—163.
- Harris N, 2006. The elevation history of the Tibetan Plateau and its implications for the Asian monsoon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **241**: 4—15.
- Haug G H, Tiedemann R, 1998. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature*, **393**: 673—676.
- Hay W W, Soeding E, DeConto R M, Wold C N, 2002. The Late Cenozoic uplift-climate change paradox. *International Journal of Earth Sciences*, **91**: 746—774.
- Herman A B, Spicer R A, 1996. Palaeobotanical evidence for a warm Cretaceous Arctic Ocean. *Nature*, **380**: 330—333.
- Huang Y, Jia L, Wang Q, Mosbrugger V, Utescher T, Su T, Zhou Z, 2016. Cenozoic plant diversity of Yunnan: A review. *Plant Diversity*, **38**: 271—282.
- Huang Y J, Chen W Y, Jacques F M B, Liu Y S C, Utescher T, Su T, Ferguson D K, Zhou Z K, 2015. Late Pliocene temperatures and their spatial variation at the southeastern border of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**: 44—53.
- Jacques F M, Su T, Spicer R A, Xing Y W, Huang Y J, Zhou Z K, 2014. Late Miocene southwestern Chinese floristic diversity shaped by the southeastern uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **411**: 208—

- 215.
- Jacques F M B, Guo S X, Su T, Xing Y W, Huang Y J, Liu Y S, Ferguson D K, Zhou Z K, 2011a. Quantitative reconstruction of the Late Miocene monsoon climates of southwest China: A case study of the Lincang flora from Yunnan Province. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **304**: 318—327.
- Jacques F M B, Su T, Spicer R A, Xing Y, Huang Y, Wang W, Zhou Z, 2011b. Leaf physiognomy and climate: Are monsoon systems different? *Global and Planetary Change*, **76**: 56—62.
- Khan M A, Spicer R A, Bera S, Ghosh R, Yang J, Spicer T E, Guo S X, Su T, Jacques F, Grote P J, 2014. Miocene to Pleistocene floras and climate of the Eastern Himalayan Siwaliks, and new palaeoelevation estimates for the Namling-Oiyug Basin, Tibet. *Global and Planetary Change*, **113**: 1—10.
- Kowalski E A, 2002. Mean annual temperature estimation based on leaf morphology: a test from tropical South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **188**: 141—165.
- Lamb S, Davis P, 2003. Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Nature*, **425**: 792—797.
- Lau K M, Yang S, 1997. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian Summer Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, **14**: 18—26.
- Lee T Y, Lawver L A, 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics*, **251**: 85—138.
- Li Cheng-sen(李承森), Yi Tie-mei(扈铁梅), Yao Yi-feng(姚轶锋), 2008. Chinese Vegetation Evolution and Environmental Change Volume 1—Late Cenozoic Plants and Climate of Yunnan. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press. 1—230 (in Chinese).
- Li Cheng-sen(李承森), Yi Tie-mei(扈铁梅), Yao Yi-feng(姚轶锋), 2009. Chinese Vegetation Evolution and Environmental Change Volume 2—Cenozoic Plants and Climate of Northern China. Nanjing, Jiangsu Science and Technology Press. 1—232 (in Chinese).
- Li Xi-wen(李锡文), Li Jie(李捷), 1992. On the validity of Tanaka Line and its significance viewed from the distribution of eastern asiatic genera in Yunnan. *Plant Diversity and Resources(植物分类与资源学报)*, **14**(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Wang Z, Xu X, Han W, Wang Q, Zou D, 2016. Leaf margin analysis of Chinese woody plants and the constraints on its application to palaeoclimatic reconstruction. *Global Ecology and Biogeography*, **25**: 1401—1415.
- Liang M M, Bruch A, Collinson M, Mosbrugger V, Li C S, Sun Q G, Hilton J, 2003. Testing the climatic estimates from different palaeobotanical methods: an example from the Middle Miocene Shanwang flora of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **198**: 279—301.
- Liu X, Yin Z Y, 2002. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **183**: 223—245.
- Liu Zheng-ming(刘正明), 1992. Late Tertiary nonmarine ostracods from Jinggu Basin, Yunnan. *Acta Micropalaeontologica Sinica(微体古生物学报)*, **13**(1): 198—201 (in Chinese with English abstract).
- Miller I M, Brandon M T, Hickey L J, 2006. Using leaf margin analysis to estimate the mid-Cretaceous (Albian) paleolatitude of the Baja BC block. *Earth and Planetary Science Letters*, **245**: 95—114.
- Mosbrugger V, 1999. The nearest living relative method. In: Jones T P, Rowe N P (eds.), *Fossil Plants and Spores: Modern Techniques*. London: Geological Society. 261—265.
- Mosbrugger V, Utescher T, 1997. The coexistence approach — a method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **134**: 61—86.
- Mueller M J, 1996. *Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde*. Trier: Universität Trier. 1—400.
- National Committee of Atlas Compilations(中华人民共和国国家地图集编纂委员会), 1999. *National Nature Atlas of People's Republic of China*. Beijing: Map Press of China. 1—283 (in Chinese).
- National Meteorological Bureau of China(中国气象局气象资料室), 2004. *Climate Database of China (1971—2000) Vol. 1-2*. Beijing: Meteorology Press (in Chinese).
- Quan Cheng(全成), Zhang Lin(张林), 2005. An analysis of the early Paleogene climate of the Jiayin area, Heilongjiang Province. *Geological Review(地质论评)*, **51**(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Searle M P, Elliott J R, Phillips R J, Chung S L, 2011. Crustal-lithospheric structure and continental extrusion of Tibet. *Journal of the Geological Society*, **168**: 633—672.
- Song Zhi-chen(宋之琛), Zhong Bi-zhen(钟碧珍), 1984. Tertiary spore-pollen assemblages from Jinggu, Yunnan. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences(中国科学院南京地质古生物研究所丛刊)*, **8**: 1—65 (in Chinese with English abstract).
- Spicer R A, 2000. Leaf physiognomy and climate change. In: Culver S J, Rawson P F (eds.), *Biotic Response to Global Change: the Last 145 Million Years*. London: Cambridge University Press. 244—264.
- Spicer R A, Herman A B, Liao W, Spicer T E, Kodrul T M, Yang J, Jin J, 2014. Cool tropics in the Middle Eocene: Evidence from the Changchang Flora, Hainan Island, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **412**: 1—16.
- Spicer R, Valdes P, Spicer T, Craggs H, Srivastava G, Mehrotra R, Yang J, 2009. New developments in CLAMP: calibration using global gridded meteorological data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **283**: 91—98.
- Spicer R, Yang J, Herman A, Kodrul T, Aleksandrova G, Maslova N, Spicer T, Ding L, Xu Q, Shukla A, Srivastava G, Mehrotra R, Liu X Y, Jin J H, 2017. Paleogene monsoons across India and South China: Drivers of biotic change. *Gondwana Research*, **49**: 350—363.

- Su T, Xing Y W, Liu Y S C, Jacques F M, Chen W Y, Huang Y J, Zhou Z K, 2010. Leaf margin analysis: a new equation from humid to mesic forests in China. *Palaios*, **25**: 234—238.
- Sun B N, Wu J Y, Liu Y S C, Ding S T, Li X C, Xie S P, Yan D F, Lin Z C, 2011. Reconstructing Neogene vegetation and climates to infer tectonic uplift in western Yunnan, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **304**: 328—336.
- Sun Q G, Collinson M E, Li C S, Wang Y F, Beerling D J, 2002. Quantitative reconstruction of palaeoclimate from the Middle Miocene Shanwang flora, eastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **180**: 315—329.
- Sun X, Wang P, 2005. How old is the Asian monsoon system? — Palaeobotanical records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **222**: 181—222.
- Uhl D, Bruch A A, Traiser C, Klotz S, 2006. Palaeoclimate estimates for the Middle Miocene Schrotzburg flora (S Germany): a multi-method approach. *International Journal of Earth Sciences*, **95**: 1071—1085.
- Uhl D, Klotz S, Traiser C, Thiel C, Utescher T, Kowalski E, Dilcher D L, 2007. Cenozoic paleotemperatures and leaf physiognomy — a European perspective. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **248**: 24—31.
- Wang C, Dai J, Zhao X, Li Y, Graham S A, He D, Ran B, Meng J, 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, **621**: 1—43.
- Wang C, Zhao X, Liu Z, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H, Zhu L, Liu S, Li Y, 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 4987—4992.
- Wang Yu (王宇), 2006. Yunnan Mountainous Climate. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 1—412 (in Chinese).
- Wing S L, Greenwood D R, 1993. Fossils and fossil climate: The case for equable continental interiors in the Eocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, **341**: 243—252.
- Wolfe J A, 1979. Temperature parameters of humid to mesic forests of eastern Asia and relation to forests of other regions of the Northern Hemisphere and Australasia. U. S. Geological Survey Professional Paper, **1106**: 1—37.
- Wolfe J A, 1993. A method of obtaining climatic parameters from leaf assemblages. U. S. Geological Survey Professional Paper, **2040**: 1—73.
- Wolfe J A, 1995. Paleoclimatic estimates from Tertiary leaf assemblages. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **23**: 119—142.
- Writing Group of Cenozoic Plants of China (中国新生代植物编写组), 1978. Fossil Plants of China, Volume 3, Cenozoic Plants from China. Beijing: Science Press. 1—232 (in Chinese).
- Xia K, Su T, Liu Y S, Xing Y W, Jacques F, Zhou Z K, 2009. Quantitative climate reconstructions of the late Miocene Xiaolongtan megafloora from Yunnan, southwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **276**: 80—86.
- Yang J, Spicer R A, Spicer T E V, Arens N C, Jacques F M B, Su T, Kennedy E M, Herman A B, Steart D C, Srivastava G, Mehrotra R C, Valdes P J, Mehrotra N C, Zhou Z K, Lai J S, 2015. Leaf form-climate relationships on the global stage: an ensemble of characters. *Global Ecology and Biogeography*, **24**: 1113—1125.
- Yang J, Wang Y F, Spicer R A, Mosbrugger V, Li C S, Sun Q G, 2007. Climatic reconstruction at the Miocene Shanwang basin, China, using leaf margin analysis, CLAMP, coexistence approach, and overlapping distribution analysis. *American Journal of Botany*, **94**: 599—608.
- Yunnan Tropical Biodiversity Research Team, Chinese Academy of Sciences (中国科学院云南热带生物资源综合考察队), 1964. Agriculture Climatic Conditions in Yunnan Province and Their Assessments. Beijing: Science Press. 1—124 (in Chinese).
- Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K, 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**: 686—693.
- Zhang S, Wang B, 2008. Global summer monsoon rainy seasons. *International Journal of Climatology*, **28**: 1563—1578.
- Zheng H, Powell C M, An Z, Zhou J, Dong G, 2000. Pliocene uplift of the northern Tibetan Plateau. *Geology*, **28**: 715—718.
- Zhou Tie-ming (周铁明), 1992. Late Tertiary formation in Jingu Basin of Yunnan Province. *Acta Petrolei Sinica (石油学报)*, **13** (2): 159—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhe-kun (周浙昆), 1996. Studies on *Dryophyllum* complex from China and its geological and systematic implications. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **38** (8): 666—671 (in Chinese with English abstract).
- Zhu H, 2013. Geographical elements of seed plants suggest the boundary of the tropical zone in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **386**: 16—22.
- Zhu H, Ma Y X, Yan L C, Hu H B, 2007. The relationship between geography and climate in the generic-level patterns of Chinese seed plants. *Journal of Systematics and Evolution*, **45**: 134—166.

QUANTITATIVE PALEOCLIMATE RECONSTRUCTIONS OF THE EARLY MIOCENE MEGAFLORA OF JINGGU, YUNNAN

LI Xiang-chuan^{1,2,3)}, GUO Zheng-hong¹⁾, HE Wen-long⁴⁾,
XIAO Liang^{1,2)}, DAI Jing⁵⁾, SUN Nan^{1,2)}, WANG Nan¹⁾, LI Rui-yun²⁾ and LÜ Jian-kuo¹⁾

1) School of Earth Sciences and Resources & Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2) Shaanxi Key Laboratory of Early Life and Environments (Northwest University), Xi'an 710069, China;

3) State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

4) School of Geology and Environment, Xi'an University of Sciences and Technology, Xi'an 710054, China;

5) School of Earth and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650000, China

Key words Paleoclimate, leaf physiognomy, Jinggu megafloora, Early Miocene, Yunnan

Abstract

The paleoclimate of the Early Miocene Jinggu megafloora in Yunnan was quantitatively reconstructed here by application of three techniques to its taxonomic and morphotype samples, i. e. Leaf Margin Analysis (LMA), Climate-Leaf Analysis Multivariate Program (CLAMP), and the Coexistence Approach (CA). Detailed comparisons of various methods for accuracy in paleoclimatic estimates on this fossil flora were also presented. Thus, comprehensive consideration and cross validation of the results indicate that the most probable paleoclimatic estimates are 16.0 ± 1.3 °C for mean annual temperature (MAT), 26.3 ± 1.5 °C for warmest month mean temperature

(WMMT), 6.2 ± 2.6 °C for the coldest month mean temperature (CMMT), 8.6 ± 0.7 months for the growing season (GRS), 1492 ± 218 mm for growing season precipitation (GSP), 701 ± 139 mm for the precipitation during the three consecutive wettest months (3-WET) and 170 ± 41 mm for the precipitation during the three consecutive driest months (3-DRY). The results represent a southern-central subtropical climate in Jinggu during the Early Miocene, which is favored by the existence of many tropical elements in this paleoflora. Furthermore, the seasonality in temperature and precipitation during the Early Miocene was not conspicuous enough, which implies that a weak monsoonal signal other than the strong monsoon climate regime possibly occurred at that time.