

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017090601

# 云南新生代孢粉组合与气候环境演变

谢宇龙<sup>1,2,3</sup>, 吴福莉<sup>1,2</sup>, 方小敏<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院青藏高原研究所, 大陆碰撞与高原隆升实验室, 北京 100101
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101
3. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 新生代全球的气候与植被经历了显著变化。系统开展云南新生代植被与气候的研究将为理解青藏高原隆升和印度季风起源与演化提供重要的信息。总结了近几十年来云南的新生代孢粉记录, 重建了除始新世以外的云南新生代植被与气候的大致变化, 并划分出9个孢粉组合带: 古新世为榆粉属-麻黄粉属-希指蕨孢组合, 植被是以落叶阔叶植物为主的常绿落叶阔叶混交林, 气候偏干旱; 早中渐新世时为栎粉属-桉木粉属-松科-水龙骨科组合, 植被为亚热带常绿阔叶林, 气候温暖湿润; 晚渐新世—早中新世针叶林增多, 气候有所变凉, 为松科-栎粉属-水龙骨科组合; 中中新世为壳斗科-桉木属-水龙骨科-松科组合, 壳斗科和喜湿热的蕨类植物含量高, 反映了暖湿的中中新世气候环境; 晚中新世—早上新世为壳斗科-松科-桉木属-草本植物组合, 早期气候温暖湿润, 晚期针叶林和草本植物增多, 气候有冷干化趋势; 中上新世为栎属-松科-水龙骨科组合, 热带亚热带的科属增加, 气候暖湿; 晚上新世为松科-栎属-草本植物组合, 针叶林和草本植物扩张, 气候有冷干化的趋势; 更新世为松科-草本植物-栎属组合, 针叶林和草本植物增多, 气候进一步冷干化; 全新世为松科-栎属组合, 气候总体回暖, 以中期最为暖湿。上述云南孢粉植物群的变化特征揭示了全球温度是控制云南植被长期变化的主要因素, 晚渐新世—早中新世的变冷与青藏高原隆升有关, 而晚中新世以来的冷干化是全球变冷和高原隆升叠加的结果。已有的研究显示云南古近纪的孢粉研究明显不足, 部分地层仍存在时代争议, 因此, 认为今后在解决地层年代学的基础上, 应重点加强云南古近纪孢粉的研究工作。

**关键词:** 孢粉组合; 云南; 新生代; 植被; 气候

**中图分类号:** P534.6 **文献标识码:** A

## Cenozoic palynological assemblages and their relations with climate-environment evolution in Yunnan

XIE Yulong<sup>1,2,3</sup>, WU Fuli<sup>1,2</sup>, FANG Xiaomin<sup>1,2,3</sup>

1. Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. Chinese Academy of Sciences Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The global climate and vegetation systems have experienced remarkable changes during Cenozoic. The systematic study of the Cenozoic vegetation and climate in Yunnan will also provide some important evidence and information on the uplifting of the Tibetan Plateau in addition to the initiation and evolution of the Indian monsoon. Although the abundant palynological studies have been conducted in recent decades, the systematic and comprehensive researches have not been conducted through the sporopollen in Yunnan. This paper show the comprehensive reviews on the Cenozoic sporopollen records from Yunnan compiled through sporopollen records studied since last four decades and finally reconstructed a 65 Ma record of changing vegetation and climate spanning the whole Cenozoic except for Eocene. The following pollen zones are identified: *Ulmipollenites-Ephedripites-Schizaeoisporites* zone (Paleocene), the vegetation was composed of mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest dominated by deciduous broad-leaved forest, revealing a partial dry climate; *Quercoidites-Alnipollenites-Pinaceae-Polypodiaceae* zone (Early-middle Oligocene), the vegetation was subtropical evergreen broad-leaved forest, reflecting a warm and wet climate condition; *Pinaceae-Quercoidites-Polypodiaceae* zone (Late Oligocene-Early Miocene), increasing in coniferous pollen imply a more cooling climate; *Fagaceae-Alnus-Polypodiaceae-Pinaceae* zone (Middle Miocene), thermophilic taxa percentages were high (Fagaceae, fern), corresponding to the Middle Miocene Climatic Opti-

**资助项目:** 中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20070201); 国家自然科学基金委重点国际合作项目“青藏高原南北晚新生代古气候记录对比与印度季风-内陆干旱耦合系统的演化”(41620104002)

**作者简介:** 谢宇龙(1992—), 男, 博士研究生, 从事新生代孢粉与古气候研究, E-mail: 550368627@qq.com

**收稿日期:** 2017-09-06; **改回日期:** 2018-03-29. 蔡秋蓉编辑

mum, showing a warm and wet climate condition; Fagaceae-Pinaceae-*Alnus*-herbaceous pollen zone (Late Miocene-Early Pliocene), a warm and humid climate in early stage, but the expansion of coniferous forest and herbaceous in later stage revealing a cooling and drying trend; *Quercus*-Pinaceae-Polypodiaceae zone (Middle Pliocene), the tropical and subtropical taxa and their percentages increased, reflecting a warm and wet climate condition; Pinaceae-*Quercus*-herbaceous pollen zone (Late Pliocene), the expansion of coniferous forest and herbaceous, and the decreasing in the thermophilic percentages (*Quercus*), implying a cooling and drying trend; Pinaceae-herbaceous pollen-*Quercus* zone (Pleistocene), coniferous forest and herbaceous expanded more resulting from a further climate deterioration; Pinaceae-*Quercus* zone (Holocene), the warmest and wettest climate occurred in middle Holocene, corresponding to the Holocene climatic optimum. The palynofloras of Cenozoic in Yunnan thus shows the palaeotemperature as a key factor in controlling long-term trend of vegetation, the cooling in the Late Oligocene-Early Miocene was linked with the uplift of Tibetan Plateau, whereas the cooling and drying since Late Miocene may be the consequence of both the global cooling and the uplift of Tibetan Plateau. However, some problems such as insufficient data on sporopollen records of Paleogene and controversies on the geological ages of some sedimentary formations have remained in Yunnan. Hence, further studies on chronostratigraphy and reconstruction of Paleogene sporopollen in Yunnan are important and required in the future.

**Key words:** sporopollen assemblage; Yunnan; Cenozoic; vegetation; climate

新生代地球的气候和生态环境均发生了显著变化<sup>[1-4]</sup>,始新世—渐新世之交,地球从两极无冰的“温室状态”向“冰室状态”转变<sup>[1]</sup>。在新生代全球总体变冷的背景下,亚洲最突出的环境事件是季风-干旱环境的形成,而这很大程度上与青藏高原的隆起有关<sup>[5-9]</sup>。青藏高原隆升不仅改变了高原本身的环境格局,对高原周边地区乃至全球气候环境都有着深刻的影响<sup>[5,6,10-14]</sup>。

云南位于青藏高原东南缘(图 1a),是中国受印度季风影响最显著的地区,而青藏高原隆升一直被认为是印度季风演化的重要因素<sup>[15,16]</sup>,因此,对于云南新生代气候与环境的研究,可以更好了解青藏高原隆起对季风演化及气候环境的影响。目前,利用不同指标和方法来研究云南古气候及印度季风演化已取得了较多的成果<sup>[17-21]</sup>。然而,以往的研究大多是通过间接的无机指标,这些指标由于受到后期的沉积压实作用、沉积相、沉积物本身的结构及其物源等因素的影响而失灵或产生偏差。因此,寻找具有明确环境意义的指标就显得尤为重要。植被是对气候变化最敏感和最直接的指示物,植物大化石在重建云南新生代古植被、古气候上发挥了重要作用<sup>[22-26]</sup>。但是,植物大化石在地层中难以保存或被发现。植物的孢子和花粉耐腐蚀、易散布、产量高,能在沉积物中大量连续保存,因而在古气候、古植被的研究中得到广泛应用<sup>[27]</sup>。

在过去的数十年里,利用孢粉重建云南古气候、古植被及季风演化已取得了一定成果。云南孢粉的研究始自 20 世纪 70 年代<sup>[28]</sup>,以新近纪以来的孢粉研究为主,古近纪孢粉研究很少,仅有古新世滇南勐腊<sup>[29]</sup>、早渐新世吕合盆地<sup>[30,31]</sup>和渐新世景谷第 1、2

孢粉组合带<sup>[32]</sup>的研究工作(表 1)。孢粉资料的零散,且缺乏长时间尺度孢粉记录的综合,难以满足植被与气候演化探讨的要求,因此,综合长时间尺度的孢粉记录对于理解植被动态和气候演化显得尤为重要。基于此,本文从植被与气候变化的角度出发,选取较可靠的孢粉资料,总结近几十年以来的云南新生代孢粉记录,以期能更好地认识云南新生代以来的气候与植被的演变特征,以便深入地了解青藏高原隆起对周边环境的影响,提升对高原隆升及区域气候变化和植被演化之间的耦合关系的认识,从而为研究植被演化与环境变迁的过程与规律提供新的证据。同时对该领域需要深化研究的一些问题提出部分认识。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理概况

云南(21°9′~29°15′N、97°39′~106°12′E)位于中国西南部,青藏高原东南缘(图 1a)。地势从西北向东南倾斜,地势起伏大,地质地貌类型复杂。云南属山地高原地貌,东部为滇东高原、滇中高原,西部高山峡谷相间,地势险峻。云南为典型的季风气候,兼有低纬气候、山原气候的特点。气候的区域差异和垂直变化大,境内从南到北具有北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带、中温带和高山寒带 7 个温度带气候类型。年温差小,日温差大,降水充沛,干湿分明,季节分配不均。在植物区系上,云南处于泛北极植物区和古热带植物区的过渡线上,又位于中国-喜马拉雅森林植物亚区和中国-日本森林

植物亚区的过渡区,植物多样性十分丰富<sup>[65]</sup>。在植被区划上(图 1b),从南往北依次为热带季雨林、雨林区域(I)和亚热带常绿阔叶林区域(II)、青藏高原高寒山被区域(III)<sup>[65]</sup>。

表 1 云南新生代主要孢粉记录(图 1b)

Table 1 Cenozoic major sporopollen records in Yunnan (Fig.1b)

序号	地点	经纬度	海拔/m	剖面/钻孔	时代	年代控制	参考文献
1	勐腊磨歇	21°17'N,101°41'E	770	剖面	古新世	B-L	[29]
2	吕合盆地	25°10'N,101°20'E	1820	剖面	早渐新世	U-Pb	[30,31]
3	景谷	23°28'N,100°41'E	946	钻孔	渐新世-上新世	B	[32]
4	景谷昔喷河	23°28'N,100°41'E	946	剖面	中中新世	B	[33]
5	景东	24°19'N,101°03'E	1328	剖面	中中新世	L	[34]
6	镇沅	23°35'N,101°09'E	980	剖面	中中新世	L	[34]
7	景洪	22°27'N,101°03'E	880	钻孔	中中新世	L	[34]
8	勐腊	21°17'N,101°41'E	764	剖面	中中新世	L	[34]
9	文山	23°24'N,104°12'E	1270	剖面	中中新世	P	[35]
10	开远小龙潭	23°48'N,103°11'E	1033	剖面	晚中新世-早上新世	B-P	[36]
11	昆明松华盆地	25°08'~25°27'N, 102°45'~102°59'E	1900	钻孔	晚中新世-早更新世	B	[37]
12	禄丰	25°10'N,102°6'E	2876	剖面	晚中新世	B	[38]
13	昭通	27°19'N,103°44'E	1930	剖面	晚中新世	B-P	[39,40]
14	景东马关桥	24°19'N,101°03'E	1328?	剖面	中上新世	B	[33]
15	曲靖	25°51'N,103°79'E	1895	钻孔	中上新世-早更新世	B-L	[41]
16	羊邑	24°57'N,99°15'E	1521	剖面	晚上新世	B	[31,42,43]
17	龙陵	24°41'N,98°50'E	1802	剖面	晚上新世	B	[31,42,44]
18	洱源	26°N,99°49'E	2279	剖面	晚上新世	B-L	[45,46]
19	鹤庆	26°27'~26°46'N, 100°08'~100°17'E	2193	钻孔	更新世-全新世	<sup>14</sup> C-P	[47-51]
20	昆明盆地	24°25'~25°15'N, 102°31'~102°55'E	1886	钻孔	更新世	TL-OSL-B	[52]
21	星云湖	24°17'~25°24'N, 102°45'~102°49'E	1772	钻孔	晚更新世-全新世	<sup>14</sup> C	[53,54]
22	属都湖	27°54'N,99°56'E	3620	钻孔	晚更新世-全新世	<sup>14</sup> C	[55]
23	天才湖	26°38'N,99°43'E	3898	钻孔	晚更新世-全新世	<sup>14</sup> C	[56,57]
24	腾冲青海湖	25°08'N,98°34'E	1849	钻孔	晚更新世-全新世	<sup>14</sup> C- <sup>210</sup> Pb- <sup>137</sup> Cs	[58]
25	勐海	22°N,100°30'E	1200	钻孔	晚更新世-全新世	<sup>14</sup> C	[59]
26	泸沽湖	27°40'~27°44'N, 100°46'~100°55'E	2692	钻孔	全新世	<sup>14</sup> C	[60]
27	哈里谷	27°N,100°10'E	3277	钻孔	全新世	<sup>14</sup> C	[61]
28	洱海	25°36'~25°58'N, 100°05'~100°18'E	1974	钻孔	全新世	<sup>14</sup> C	[62-64]

注: B—生物地层; L—岩石地层; P—磁性地层; TL—热释光; OSL—光释光

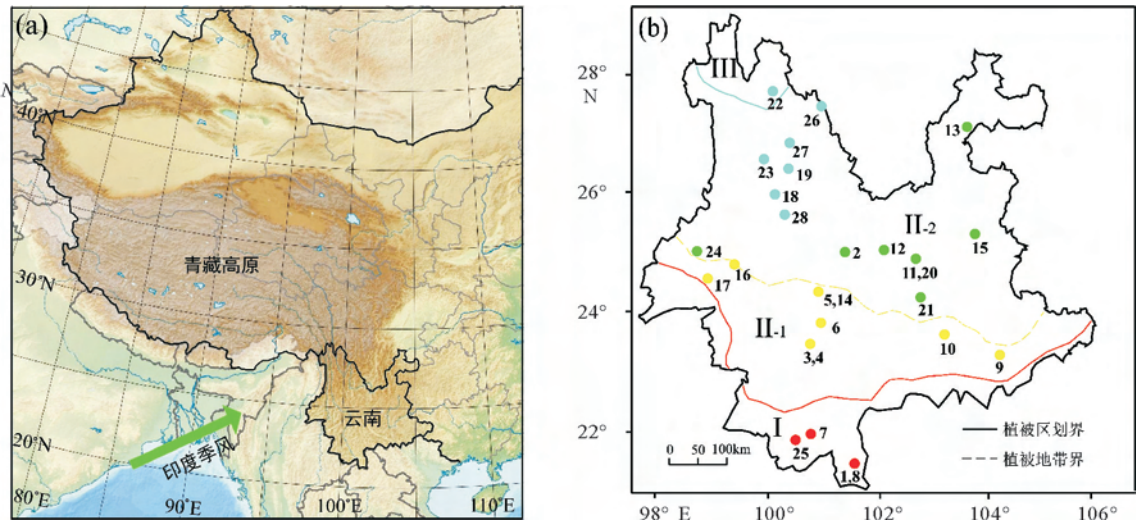


图 1 云南的地理位置(a)和云南新生代孢粉研究地点分布图(b)  
Fig.1 Map showing the location of Yunnan(a) and sites of Cenozoic sporopollen in Yunnan(b)

## 1.2 新生代地质概况

云南新生代构造运动异常活跃,印度板块与欧亚板块碰撞,引发了 3 次喜马拉雅运动,时间分别为始新世末期(约 40Ma)、渐新世末期或中新世早期(约 22Ma)和晚上新世(3.4Ma)<sup>[66,67]</sup>。云南新生代均为陆相地层,广泛分布在古生代褶皱区的 200 多个互不相连的中、小型盆地及中、新生代断陷型山间盆地中,除上新统下部全区基本缺失和中新统上部仅个别地区发育外,其余各地层皆有不同程度的发育,其中所含生物化石丰富<sup>[68,69]</sup>。

## 2 云南新生代孢粉组合与植被、气候演化

本文系统收集和整理了近 40 年来有关云南新生代的孢粉资料,由于云南始新世的孢粉研究尚未有报道,因此,本文主要对除始新世以外的云南新生代孢粉资料及其指示的植被与气候环境加以总结分析。

### 2.1 古新世(榆粉属-麻黄粉属-希指蕨孢组合)—始新世

滇南勐腊磨歇(图 1b-1)晚白垩世至古新世孢粉组合中蕨类孢子占 10%~30%,以反映干热环境的希指蕨孢属(*Schizaeoisporites*)为主;裸子植物花粉占 9%~14%,有铁杉粉属(*Tsugaepollenites*)、麻黄粉属(*Ephedripites*)、南洋杉粉属(*Araucariacites*)、杉粉属(*Taxodiaceapollenites*)、单束松粉

属(*Abietinaepollenites*)、双束松粉属(*Pinuspollenites*)等;被子植物花粉占绝对优势(60%~71%),有榆粉属(*Ulmipollenite*)、黄杞粉属(*Engelhardtoidites*)、山毛榉粉属(*Faguspollenites*)、冬青粉属(*Ilexpollenites*)、山矾粉属(*Symplocospollenites*)、鼠李粉属(*Rhamnacidites*)、栗粉属(*Cupuliferuipollenites*)、忍冬粉属(*Lonicerapollis*)、栎粉属(*Quercoidites*)、椴粉属(*Fraxinoipollenites*)、枫香粉属(*Liquidambarpollenites*)等<sup>[29]</sup>。孙湘君<sup>[70]</sup>和赵英娘<sup>[71]</sup>根据孢粉植物群分别划分了古新世的植物区系和气候区,古新世云南与中国南方其他地区孢粉组合相似,以落叶阔叶成分为优势,耐旱的麻黄属也较多,热带亚热带阔叶植物也具有一定含量,据此推测当时的植被是以落叶阔叶植物为主的常绿落叶阔叶混交林,为偏干旱的亚热带气候。有关始新世云南孢粉的研究至今尚未有报道,但从赵英娘划分的气候区来看<sup>[71]</sup>,云南当时属于西南潮湿的南亚热带气候区,该区的孢粉植物群以阔叶植物为主,其中又以热带、亚热带常绿阔叶林为优势,也含有一些温带落叶阔叶成分。

### 2.2 早中渐新世(栎粉属-桤木粉属-松科-水龙骨科组合)—晚渐新世/早中新世(松科-栎粉属-水龙骨科组合)

云南中部吕合盆地的年代以往一直被认为是晚中新世<sup>[30,31,68,69]</sup>,最新的一项高精度的 U-Pb 锆石年代测定,将其年代推到了早渐新世(33 ± 1Ma)<sup>[72]</sup>。早渐新世吕合(图 1b-2)孢粉组合以栎粉属(39.7%),桤木粉属(*Alnipollenites*, 18.45%),



松粉属(16%)为主,植被类型为亚热带常绿阔叶林,定量重建的气候比现今还要温暖湿润<sup>[30,31]</sup>。

景谷(图 1b-3)渐新世孢粉组合以指示温暖湿润气候的单缝孢(monoletes)蕨类植物<sup>[73]</sup>为优势,被子植物花粉少,主要为栎粉属,松柏类零星;晚渐新世至早中新世松柏类花粉十分丰富,针叶树种占42%,裸子植物以单、双束松粉属为主(20%),雪松粉属(*Cedripites*)、云杉粉属(*Piceapollis*)、铁杉粉属也有一定含量,被子植物主要为栎粉属(10.2%),蕨类孢子以平瘤和凸瘤水龙骨孢(*Polypodiisporites*和*Polypodiidites*)为主<sup>[32]</sup>。上述表明至少在渐新世,景谷孢粉组合所代表的植被似乎并未显示垂直分带的迹象。但自渐新世晚期,植被分带现象明显起来,那时至少存在着以阔叶林和针叶林为主的植被带。从气候来看,景谷渐新世气候温暖湿润,但晚渐新世—早中新世时的气候有所变凉。

### 2.3 中中新世(壳斗科-桤木属-水龙骨科-松科组合)

景谷棒面单缝孢亚组合的下部和中部孢粉植物群,其时代可能与本期相当,栎粉属较丰富,孢子以平瘤水龙骨孢和水龙骨单缝孢(*Polypodiaceasporites*)为主,松柏类较少<sup>[32]</sup>。景谷昔喷河剖面(图 1b-4)中中新世孢粉组合中喜湿热的蕨类植物花粉含量高(40%),以水龙骨科(*Polypodiaceae*)为主,喜暖的栎属最多可达52.2%,表明气候温暖湿润,对应中中新世大暖期<sup>[33]</sup>。云南中南部景东(图 1b-5)、镇沅(图 1b-6)和南部景洪(图 1b-7)和勐腊(图 1b-8)中中新世孢粉组合虽然差异较大,但植被总体面貌为亚热带常绿落叶阔叶混交林,被子植物花粉以壳斗科(*Fagaceae*)栲属(*Castanopsis*)(4地依次为23.46%、13.21%、34.49%、17.62%)和桦木科(*Betulaceae*)桤木属(*Alnus*)(13.59%、18.39%、0、71.47%)为优势,蕨类植物孢子以水龙骨科为主(39.44%、30.98%、31.82%、2.79%),裸子植物花粉以松属(*Pinus*)为主(11.4%、7.31%、0.87%、3.22%)<sup>[34]</sup>。文山(图 1b-9)中中新世(16.5~15.2Ma,年代原为晚中新世,详见文献<sup>[21]</sup>)植被是以壳斗科为主的亚热带常绿阔叶林,以栎属(*Quercus*,18.33%)和松属(33.05%)为主,无草本植物出现,定量估计当时的降水量比现在明显偏高,为温暖湿润的亚热带季风气候<sup>[35]</sup>。

### 2.4 晚中新世—早上新世(壳斗科-松科-桤木属-草本植物组合)

云南东南部开远小龙潭(图 1b-10)中新世晚期

到上新世早期植被以常绿阔叶林为主,栎属高达30%~67.5%,上新世早期草本植物花粉含量有所增加,出现多种菊科(*Compositae*)类型<sup>[36]</sup>。昆明松华盆地(图 1b-11)该时期的孢粉是以松属(15%~40%)、栗属(*Castanea*,20%)、栎属(10%~20%)花粉为主,组合中亚热带和热带成分不少,并有增长趋势,总之,有利于喜湿热植物发展的气候因素在增强<sup>[37]</sup>。景谷棒面单缝孢亚组合的上部和被子植物花粉亚组合的时代大致与本期相当,以栎属、栗属为主,裸子植物以松科(*Pinaceae*)为主,草本植物也较丰富<sup>[32]</sup>。禄丰(图 1b-12)古猿生活时期,孢粉组合反映出当时的植被主要由常绿乔木杨梅科(*Myricaceae*)和落叶乔木桤木属旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)组成,山地上分布有壳斗科栲属和栎属,气温相当温暖,古猿消失后,针叶树松科和落叶阔叶树桤木属大量增加,气温有所降低<sup>[38]</sup>。昭通水塘坝(图 1b-13)6.7~6.2Ma期间,孢粉组合以常绿栎属(23.1%)和桤木属(20.3%)为优势,其中古猿生活时期(6.2Ma)常绿栎属(39.4%)增加,以禾本科(*Gramineae*,18.1%)为主的草本植被开始扩张,同时针叶林减少(17%),指示温暖的气候状况;古猿消失后(6Ma)落叶栎属(deciduous *Quercus*)和针叶林大量增加(50.7%),气候有冷干化趋势<sup>[39,40]</sup>。晚中新世全球降温背景下,昭通盆地一直是以温暖湿润的亚热带常绿阔叶林为主,直到后期才逐渐被干冷的针叶林代替。晚中新世以来青藏高原东南缘的构造运动加强了印度季风,为云南带来大量水汽输送,使云南形成一个相对独立的湿热环境区域,延缓了干冷气候的来临<sup>[39,74]</sup>。

### 2.5 中上新世(栎属-松科-水龙骨科组合)

昆明松华盆地孢粉组合第2阶段和第3阶段下部孢粉组合中亚热带成分繁多,壳斗科约占总数的40%,主要为栎属,热带亚热带科属如海桐花(*Pittosporum*)、漆树属(*Rhus*)、山矾科(*Symplocaceae*)、豆科(*Leguminosae*)等的含量增加,还有不少蕨类孢子和松属,总之植物繁茂,反映温度和湿度有所增加<sup>[37]</sup>。景东马关桥剖面(图 1b-14)中上新世孢粉组合中蕨类孢子含量高,以水龙骨科和凤尾蕨科(*Pteridaceae*)为主,栎属及桤木属含量也较高,最多可占总数的24.6%,反映温暖气候的还有山核桃(*Carya*)、枫杨(*Pterocarya*)、栗属、楝属(*Melia*)、枫香(*Liquidambar*)等,草本植物很少,冷杉(*Abies*,22.7%)、铁杉(*Tsuga*,15.5%)及松属(17.2%)含量较高<sup>[33]</sup>。曲靖盆地(图 1b-15)孢粉第

一组合带栎属占优势(54.2%),松属含量下降(20.8%),气候暖湿,其时代大致与本期相当<sup>[41]</sup>。

## 2.6 晚上新世(松科-栎属-草本植物组合)

昆明松华盆地第3阶段孢粉组合上部(晚上新世)云杉属(*Picea*)和冷杉属花粉增多,适应干冷气候的菊科(Compositae)等草本植物花粉增加也反映了气候有恶化趋势<sup>[37]</sup>。曲靖盆地孢粉第2组合带松属(31.3%)和云杉/冷杉增加,栎属消退(27.1%),这可能与晚上新世的青藏运动及全球变冷有关<sup>[41]</sup>。云南西部羊邑<sup>[31,42,43]</sup>(图1b-16)和龙陵<sup>[31,42,44]</sup>(图1b-17)晚上新世孢粉组合中既含有生长在亚热带低海拔的蕨类植物及水生植物,也包含较多高海拔的针叶林和针阔混交林,植被具有明显垂直分带特征,反映了晚上新世时云南西部湿润的亚热带山地气候。洱源(图1b-18)孢粉植物群含有大量松属、栎属和桤木属,同时伴有一些草本植物如蒿属(*Artemisia*)和藜科(Chenopodiaceae),也出现了一些热带亚热带成分如枫香属、大戟科(Euphorbiaceae)、无患子科(Sapindaceae)以及棕榈科(Palmae),植被有垂直分带的特征,为亚热带山地针阔混交林<sup>[45,46]</sup>。Kou还利用滇西洱源、羊邑和龙陵3个地点的孢粉数据对古气候进行了重建,结果表明,晚上新世时,3地降水量基本一致;今天的洱源与羊邑在气候和植被上相近,上新世时也相差不大;而龙陵今天的年均温比晚上新世时低,降水量却大幅增加,由此推测晚上新世以来,青藏高原东南缘的龙陵可能出现了快速抬升,阻挡了暖湿的西南季风北上,造成龙陵降水量的增加<sup>[45,46]</sup>。

## 2.7 更新世(松科-草本植物-栎属组合)

昆明松华盆地更新世早期喜热成分减少,温带落叶阔叶林成分和耐寒针叶树云杉(8%)、冷杉(15%)、柏科(Taxodiaceae)花粉增多,草本植物特别是菊科蒿属增加明显,反映出气候曾一度受到寒冷的影响<sup>[37]</sup>。曲靖盆地孢粉植物群在第5组合带发生了明显变化,松科(其中松属占41.6%)、草本植物增多,栎属进一步消退(13.6%),这可能与2.5Ma左右的“青藏运动B幕”及全球变冷有关<sup>[41]</sup>。

在位于云南西北部的鹤庆盆地(图1b-19)钻取的连续湖心,为高分辨率的孢粉研究提供了可能<sup>[47,48]</sup>。更新世以来鹤庆孢粉组合一直以松属为绝对优势(平均为79.3%),植被与气候变化主要是受轨道参数因素影响<sup>[49]</sup>,但更新世早期针叶林增加则主要是受“青藏运动B幕”影响<sup>[51]</sup>;而发生

在0.991Ma附近的植物多样性及波动幅度与频率进一步增加,则可能是受中更新世气候转型与构造抬升的叠加影响<sup>[51]</sup>。云南中东部的昆明盆地更新世(图1b-20)孢粉组合以乔木植物花粉与旱生草本植物花粉含量高为特征,松属占绝对优势,铁杉、栎属含量也较多,其气候主要受全球变化影响,期间经历了多次冷暖干湿变化,同时青藏高原隆升对该地气候也有重要影响<sup>[52]</sup>。

MIS3阶段晚期(36.4~29.2ka),云南中部星云湖(图1b-21)周边植被为针阔混交林,以松属(63.9%)和栎属(10%)为主,气候相对温暖湿润;末次冰盛期(29.2~17.6ka),松属花粉含量下降到48.6%,以云杉/冷杉(平均12.9%,最高达22.8%)为主的寒温性针叶林扩张,耐旱的草本花粉含量也显著升高,表明气候冷干化;末次冰消期(17.6~13.4ka),云杉、冷杉及铁杉几乎消失,常绿及落叶栎类含量最高,气候偏暖干<sup>[53]</sup>。

30~22ka,云南西北部的属都湖(图1b-22)植被以草本植物蒿属、禾本科和蓼科(Polygonaceae)和阔叶树种栎属、桦属(*Betula*)和栲属为主;22~13.9ka,针阔混交林扩张,草本植物下降;13~10.6ka,耐干冷的桦属含量达到峰值,禾本科含量也相对较高,栎属含量则相对较低,对应着新仙女木事件<sup>[55]</sup>。21~11.5ka期间,天才湖(图1b-23)乔木花粉和草本花粉含量高,乔木以松属、云杉、冷杉、桦属和常绿及落叶栎类为主,草本植物以蒿属为主,气候冷干,其中12.9~11.5ka期间,气候最为冷干,对应新仙女木事件<sup>[56]</sup>。

云南西部腾冲青海湖(图1b-24)15.8~12.8ka期间,孢粉组合以落叶栎属(43.89%)为主,也指示了干冷的气候<sup>[58]</sup>。云南南部勐海地区(图1b-25)42~11.87ka期间为热带亚热带常绿阔叶季雨林或山地雨林,以壳斗科和松科为主,期间经历了温暖干燥、凉湿和温和凉爽的气候波动,20.65~11.87ka期间,陆均松属(*Dacrydium*,20%)和耐旱的蕨类植物卷柏孢子(*Selaginella*)含量均逐渐增加并达到最高值,同时松属和草本植物菊科也有所增加,气温有所降低,但降温幅度不明显,仍处于凉湿期<sup>[59]</sup>。

## 2.8 全新世(松科-栎属组合)

11.51~10ka期间,滇西北天才湖周围的植被转为云杉、冷杉林和高山杜鹃(*Rhododendron*)灌丛,反映了新仙女木事件后温度和湿度增加;10~6.1ka,铁杉持续向上扩张,气候进一步变暖湿;6.1~3.41ka期间,铁杉(20.4%)最为繁盛,气候温暖

湿润,此期对应于全新世气候最适宜期;2.93ka以来,铁杉林逐渐退缩,表明温度降低<sup>[57]</sup>。

早全新世(10.3~7.5ka)和中全新世(7.5~3.8ka),泸沽湖(图1b-26)植被以松林为主(56%~60%),伴有铁杉林和云杉、冷杉林,植被盖度大,气候温暖湿润,中全新世常绿栎类偏多(11.9%),湿度不如早全新世;3.8~3.3ka,松林明显减少(45%)而硬叶常绿栎林急剧扩张(25%),指示一次持续的冷干事件;晚全新世(3.3ka至今),松林有所恢复但未达到早中全新世的水平,常绿青冈林增加并出现较多的铁杉林和云杉林,但植被盖度明显降低,表明晚全新世的气温和湿度比早中全新世均偏低<sup>[60]</sup>。

9.3~8.7ka期间,滇西北的哈里谷(图1b-27)植被以松属(57.8%)和冷杉属(23.8%)等针叶林为主,气候温凉湿润;8.7~7ka,植被是以栎属(27.3%)为主的常绿阔叶林,蕨类孢子含量增加(33.4%),气候温暖湿润;7~4ka,植被是以松属(33.2%)和栎属(19.6%)为主的针阔混交林,气温略有下降。4~2.4ka,植被又演变为常绿阔叶林,松属减少(14.9%),栎属增加(20.4%),以水龙骨科(17.6%)为主的蕨类植物含量高,气候温暖湿润。2.4ka以来是以松属(66.4%)为主的针叶林,伴生有冷杉和铁杉,气候寒冷干燥<sup>[61]</sup>。3ka以来,属都湖针叶林有所增加,草本植物减少,反映了气候变干<sup>[55]</sup>。云南洱海钻孔沉积物花粉还提供了人类活动的证据,2.14ka以来洱海(图1b-28)草本植物花粉(含禾本科)含量增加和松属含量的下降反映了农业耕作的发展和森林的人为破坏<sup>[62-64]</sup>。

云南中部星云湖孢粉组合揭示8.5ka以来,植被一直是以松属(29%~70%)为主,并有增加趋势,其次为常绿栎属(15%),并有下降趋势,落叶栎属则有增加趋势,其中8.5~5.5ka期间气候最为温暖湿润,此后气候逐渐冷干化<sup>[54]</sup>。云南西部腾冲8.3~4.6ka期间以落叶栎类(24.83%)为主,喜暖湿的植物孢粉含量达到最大值,指示气候温暖湿润,4.6ka前后主要成分转为落叶树种桤木属(35.64%),喜暖湿的植物几乎消失,指示气候冷干化<sup>[58]</sup>。

云南南部勐海地区全新世植被是以热带亚热带常绿阔叶季雨林为主,以壳斗科和松科为主,11.87~8.27ka期间,栎属、青冈属(*cyclobalanopsis*)、桤木花粉迅速增加,气温开始回升;8.27~4.67ka期间,松属含量(47%)较多,以豆科(23%)为代表的喜湿热的热带亚热带成分增多,喜湿热的蕨类也大量出现,草本植物中莎草科(*Cyperaceae*)达到最大

值,菊科则迅速减少,对应气候最适宜期;4.67ka以后,松属仍较多(27%~45%),喜热分子阿丁枫属(*Altingia*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、山矾属(*Symplocos*)减少,气候趋于温凉<sup>[59]</sup>。全新世适宜期在上述不同地点出现时间的差异性可能是受到局部地貌、生态环境等因素影响。

### 3 云南新生代植被格局与气候变化及其机制探讨

通过上述总结,在综合考虑云南孢粉植物群的时空变化及反映的古气候特征的基础上,按纵向演变归纳为9个阶段,按横向空间差异划分为4个区,初步总结了云南新生代植被与气候格局的变化特征(表2)。

古新世时全球普遍高温,中国南部有一条宽阔的干旱带横贯东西<sup>[75]</sup>,当时的云南受行星风系控制,发育了大量膏盐沉积<sup>[69,70]</sup>,孢粉组合中也含有较多反映干热环境的希指蕨孢和反映干旱环境的麻黄粉和落叶阔叶植物榆粉属。早渐新世吕合盆地孢粉组合指示的植被为亚热带常绿阔叶林<sup>[30,31]</sup>,大多数植物种类持续存在至今<sup>[76]</sup>,定量重建的气温降水具有显著的季节变化,比现在还要温暖湿润<sup>[30,31]</sup>。吕合盆地地层精确年代的限定<sup>[72]</sup>,表明云南现代植被面貌至少在早渐新世就已经奠定,暗示了至少在早渐新世时云南就已经受印度夏季风影响。

为更好的表达云南渐新世以来植被与气候演化过程,本文选取被子植物如栎粉属、化香树属(*Platycarya*)、栗粉属、枫香粉属、山核桃属,裸子植物杉粉属、铁杉粉属、罗汉松粉属,蕨类植物单缝孢等作为喜暖类型。为保证时代上的连续性,选取了时代涵盖渐新世至上新世的景谷孢粉序列<sup>[32]</sup>,并将其与渐新世以来全球温度变化曲线和青藏高原隆升事件(图2a)联系在一起进行分析。从图2可以看出,渐新世以来喜暖类型的孢粉含量(图2b)总体呈下降趋势,对应于渐新世以来的全球总体变冷过程。但是,晚渐新世和早中新世喜暖类型孢粉含量的明显下降难以用全球变化来合理解释。虽然渐新世和中新世之交发生了一次短暂的Mi-1降温事件,但晚渐新世早中新世总体处于温暖气候环境,甚至在晚渐新世还发生了一次增温事件<sup>[4]</sup>。从构造上来看,当时青藏高原及其周边发生了一次明显的隆升事件<sup>[13,66,67,77,78]</sup>,位于青藏高原东南缘的滇西山地快速抬升,植被的分带明显起来,针叶林花粉增多,喜暖的植物孢粉减少。中中新世时,喜暖植物孢粉含



表 2 云南新生代植被格局与气候环境演变

Table 2 Cenozoic vegetation pattern, climate and environment evolution in Yunnan

时代	热带北缘季雨林、半常绿季雨林区 a	高原亚热带南部常绿阔叶林、松林区 b	高原亚热带北部常绿阔叶林、松林区 c	滇西北亚热带中山高原松林、云/冷杉林区 d	植被变化状况	气候变化状况
古新世	常绿落叶阔叶混交林				耐旱和落叶阔叶植物较多	气候干热
早中新世	南亚热带常绿阔叶林		亚热带常绿阔叶林		喜暖湿植物多	气候温暖湿润
晚渐新世—早中新世	南亚热带中山针阔混交林(松栎林)				针叶林增多	气候有所变凉
中中新世	南亚热带低山常绿落叶阔叶混交林	亚热带常绿阔叶林			壳斗科和喜湿热的蕨类植物含量高	气候十分暖湿
晚中新世—早上新世		亚热带常绿阔叶林	亚热带常绿阔叶林		晚期针叶林和草本植物增多	早期暖湿,后期冷干化
中上新世		亚热带常绿阔叶林	亚热带常绿阔叶林		热带亚热带科属增加	气候暖湿
晚上新世		亚热带山地针阔混交林(松栎林)	亚热带山地针阔混交林(松栎林)	亚热带山地针阔混交林(松栎林)	针叶林和草本植物增多	气候有冷干化趋势
更新世	热带亚热带常绿阔叶季雨林或山地雨林		亚热带山地针阔混交林(松栎林)	针叶林(松林、云/冷杉林)	针叶林和草本植物增多	气候进一步冷干化
全新世	热带亚热带低山常绿阔叶季雨林			针叶林(松林、云/冷杉林),栎伴生	栎属含量增加	早期回暖,中期暖湿,晚期冷干

注:图 1(b)中红、黄、绿、蓝色标记地点分别划为表 2 中 a、b、c、d 4 区

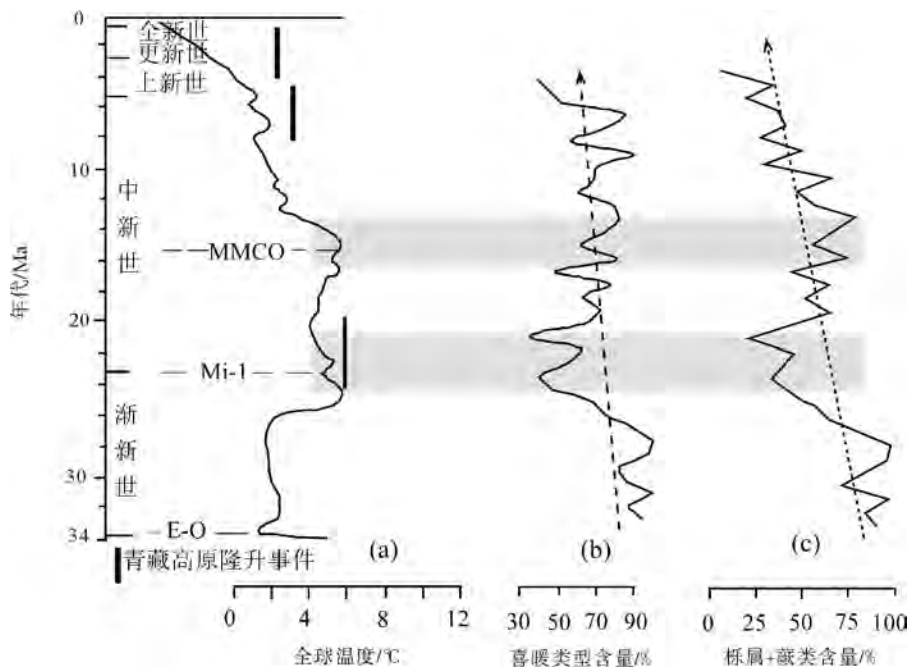


图 2 渐新世以来全球温度变化曲线<sup>[4]</sup>与青藏高原隆升事件(a)<sup>[5-13,66,67,78,79]</sup>,喜暖类型孢粉含量(b)和栎属+蕨类含量变化(c)的对比

Fig.2 Comparison among the global temperature curve<sup>[4]</sup>, uplift events of Tibetan Plateau (a)<sup>[5-13,66,67,78,79]</sup>, thermophilic taxa percentages(b) and *Quercus* + fern(c) since the Oligocene



量高,对应着中中新世气候适宜期(MMCO)。此后,全球温度又开始持续下降,但在晚中新世早中期喜暖类型孢粉含量仍维持较高水平,直到晚中新世晚期才开始下降,此时更适应干冷气候的草本植物花粉和针叶林花粉则增多,这种干冷气候来临的滞后可能与晚中新世以来青藏高原隆升加强了印度季风有关<sup>[39,74]</sup>。中上新世时热带亚热带科属增加,气候又有短暂的变暖。晚中新世至更新世全球气候变冷、北极冰盖发育<sup>[4]</sup>,青藏高原及其周边地区快速隆升<sup>[12]</sup>,云南气候进一步恶化,针叶林和草本植物增加,冷干化的趋势一直维持到更新世末期,直到全新世气候才有所回暖。

另外,由于栎属和蕨类植物在现代云南植物群中占有重要地位,因此,本文重点统计了喜暖的栎属和喜暖的单缝孢等蕨类植物孢粉含量,从图2c可以看出,以栎属和蕨类植物为主的植物群至少在渐新世就开始在云南形成,此后一直持续存在并在植物群落中占有重要地位。此外,由于受到全球气候变冷和构造隆升所引起地形分异,以松科为代表的针叶林和草本植物也在晚中新世及其之后大量增加(表2)。在空间差异上,晚中新世以来云南北部比南部构造抬升明显<sup>[25,77]</sup>,降温幅度也更大,导致了晚中新世以来云南南北部的植被和气候的分化更加明显。

## 4 结论

(1) 通过对上述云南新生代孢粉资料的综合分析,本文重建了除始新世以外的云南新生代植被与气候的变化,并划分出9个孢粉组合带:古新世为榆粉属-麻黄粉属-希指蕨孢组合,植被为落叶阔叶植物为主的常绿落叶阔叶混交林,气候偏干旱;早中渐新世时为栎粉属-桤木粉属-松科-水龙骨科组合,植被为亚热带常绿阔叶林,气候温暖湿润;晚渐新世-早中新世针叶林增多,气候有所变凉,为松科-栎粉属-水龙骨科组合;中中新世为壳斗科-桤木属-水龙骨科-松科组合,壳斗科和喜湿热的蕨类植物含量高,反映了暖湿的中中新世气候环境;晚中新世-早上新世为壳斗科-松科-桤木属-草本植物组合,早期气候温暖湿润,晚期针叶林和草本植物增多,气候有冷干化趋势;中上新世为栎属-松科-水龙骨科组合,热带亚热带的科属增加,气候暖湿;晚上新世为松科-栎属-草本植物组合,针叶林和草本植物扩张,气候有冷干化的趋势;更新世为松科-草本植物-栎属组合,针叶林和草本植物增多,气候进一步冷干化;

全新世为松科-栎属组合,气候总体回暖,以中期最为暖湿。

(2) 云南新生代孢粉植物群的变化特征揭示了全球温度是控制云南植被长期变化的主要因素,晚渐新世-早中新世喜暖类型孢粉的减少和针叶林花粉的增加与青藏高原隆升有关,晚中新世以来由于受到全球气候变冷和构造隆升所引起地形分异,以松科为代表的针叶林和草本植物大量增加,云南南北部的植被和气候的分化也更加明显。

纵观已有的云南新生代孢粉资料,古近纪的孢粉资料明显不足。另外,云南地形破碎,且植被覆盖严重,缺乏连续完整的新生代地层剖面,部分地层剖面和钻孔仅仅依靠地层层序来进行孢粉样品的采集和分析,缺乏精确的年代数据。即便只在本区,由于云南不同地区自然环境差异大,孢粉组合的对比仍存在较大的不确定性。在未来研究中,期望通过云南具有代表性的新生代盆地的天然剖面和钻探岩心,在高密度年代样品采集与测量基础上,结合哺乳动物化石及火山灰的放射性同位素测年,建立连续完整具有精确年代的新生代孢粉记录。

## 参考文献 (References)

- [1] Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the Latest Miocene in northern Pakistan[J]. *Nature*, 1989, 342(6246): 163-166.
- [2] Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene [J]. *Nature*, 1993, 361(6410): 344-345.
- [3] Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J, et al. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary[J]. *Nature*, 1997, 389(6647): 153-158.
- [4] Zachos J C, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [5] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [6] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159-163.
- [7] Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. Impact of topography and landsea distribution on East Asian paleoenvironmental patterns [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(2): 258-266.
- [8] Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan

- Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 245(3): 317-331.
- [9] Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. Impacts of tectonic changes on the reorganization of the Cenozoic paleoclimatic patterns in China[J]. *Earth Planet Science Letters*, 2007, 257(3): 622-634.
- [10] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122.
- [11] Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 177-190.
- [12] 李吉均,方小敏.青藏高原隆起与环境变化研究[J]. *科学通报*, 1998, 43(15): 1569-1574. [LI Jijun, FANG Xiaomin. Uplift of Qinghai-Tibetan Plateau and environmental change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(15): 1569-1574.]
- [13] 施雅风,汤懋苍,马玉贞.青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨[J]. *中国科学 D 辑*, 1998, 28(3): 263-271. [SHI Yafeng, TANG Maocang, MA Yuzhen. Link age between the second uplifting of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and the initiation of the Asian monsoon system[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 263-271.]
- [14] 刘晓东, Dong B W. 青藏高原隆升对亚洲季风-干旱环境演化的影响[J]. *科学通报*, 2013, 58(28-29): 2906-2919. [LIU Xiaodong, Dong B W. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(28-29): 2906-2919.]
- [15] Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(4): 357-396.
- [16] Boos W R, Kuang Z. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating[J]. *Nature*, 2010, 463(7278): 218-222.
- [17] 肖海丰,沈吉,肖霞云.云南省鹤庆盆地 2.78 Ma 以来的环境演化[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 255-260. [XIAO Haifeng, SHEN Ji, XIAO Xiayun. Paleoenvironmental evolution of Heqing Basin in Yunnan Province since 2.78 Ma[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(3): 255-260.]
- [18] 沈吉,肖海丰,王苏民,等.云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化[J]. *科学通报*, 2007, 52(10): 1168-1173. [SHEN Ji, XIAO Haifeng, WANG Sumin, et al. The orbital scale evolution of regional climate recorded in a long sediment core from Heqing, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(10): 1168-1173.]
- [19] Chang Z G, Xiao J L, Lü L Q, et al. Abrupt shifts in the Indian monsoon during the Pliocene marked by high-resolution terrestrial records from the Yuanmou Basin in southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 166-175.
- [20] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial - interglacial Indian summer monsoon dynamics[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [21] Lebreton-Anberrée J, Li S H, Li S F, et al. Lake geochemistry reveals marked environmental change in Southwest China during the Mid Miocene Climatic Optimum[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(11): 897-910.
- [22] Xia K, Su T, Liu Y S, et al. Quantitative climate reconstructions of the late Miocene Xiaolongtan megaf flora from Yunnan, southwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 276(1): 80-86.
- [23] Sun B N, Wu J Y, Liu Y S C, et al. Reconstructing Neogene vegetation and climates to infer tectonic uplift in western Yunnan, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 304(3): 328-336.
- [24] Jacques F M B, Guo S X, Su T, et al. Quantitative reconstruction of the Late Miocene monsoon climates of southwest China: a case study of the Lincang flora from Yunnan Province[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 304(3-4): 318-327.
- [25] Jacques F M B, Su T, Spicer R A, et al. Late Miocene southwestern Chinese floristic diversity shaped by the southeastern uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 411(1): 208-215.
- [26] Xing Y W, Utescher T, Jacques F M B, et al. Paleoclimatic estimation reveals a weak winter monsoon in southwestern China during the late Miocene: Evidence from plant macrofossils[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 358: 19-26.
- [27] 王开发,徐馨.第四纪孢粉学[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1988. [WANG Kaifa, XU Xin. *Quaternary Palynology*[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1988.]
- [28] 陶君容,孔昭宸.云南洱源三营煤系的植物化石群和孢粉组合[J]. *植物学报*, 1973, 15(1): 120-130. [TAO Junrong, KONG Zhaochen. The fossil florule and sporopollen assemblage of Shang-in coal series of Eryuan, Yunnan[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1973, 15(1): 120-130.]
- [29] 宋之琛,李曼英.云南一些地区中生代及早第三纪早期的孢粉组合.云南禄丰,牟定晚白垩世早期及勐腊晚白垩世晚期至早第三纪孢粉组合[M]//中国科学院南京地质古生物所,云南中生代化石(上册),北京:科学出版,1976: 9-56. [SONG Zhichen, LI Manying. Sporepollen assemblages of Lufeng and Mouding in the early Upper Cretaceous and of Mengla in the late Upper Cretaceous - Paleogene, Yunna[M]// Chinese Academy of Sciences (Ed.), *Nanjing Geology and Palaeontology. Mesozoic fossils of Yunnan Province*, Beijing: Science Press, 1976: 9-56.]
- [30] Xu J X, Ferguson D K, Li C S, et al. Late Miocene vegetation and climate of the Lühe region in Yunnan, southwestern China[J]. *Review of Palaeobotany and palynology*, 2008, 148(1): 36-59.
- [31] 徐景先.云南中西部地区晚第三纪孢粉植物群及其古植被和古气候研究[D].北京:中国科学院植物研究所博士学位论文, 2002.1-168. [XU Jingxian. *Palynology, paleovegetation and paleoclimate of Neogene central-western Yunnan, China*[D]. Beijing: The Ph.D. Dissertation of Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2002, 1-168.]

- [32] 宋之琛, 钟碧珍. 云南景谷第三纪孢粉组合[C]//中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 1984, 8: 1-53. [SONG Zhichen, ZHONG Bizhen. Tertiary sporopollen assemblages from Jinggu, Yunnan[C]// Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, 1984, 8: 1-53.]
- [33] 张绪教, 何科昭, 周志广. 滇西地区新第三纪孢粉组合特征及环境变迁[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 187-201. [ZHANG Xujiao, HE Kezhao, ZHOU Zhiguang. Features of sporopollen assemblages and environment changes of Neogene in area of western Yunnan[J]. Geoscience, 1996, 10(2): 187-201.]
- [34] Zhang Q Q, Ferguson D K, Mosbrugger V, et al. Vegetation and climatic changes of SW China in response to the uplift of Tibetan Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 363-364: 23-36.
- [35] Li S F, Mao L M, Spicer R A, et al. Late Miocene vegetation dynamics under monsoonal climate in southwestern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 425(10): 14-40.
- [36] 王伟铭. 云南开远小龙潭盆地晚第三纪孢粉植物群[J]. 植物学报, 1996, 38(9): 743-748. [WANG Weiming. A palynological survey of Neogene strata in Xiaolongtan Basin, Yunnan Province of South China[J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(9): 743-748.]
- [37] 李文漪, 吴细芳. 云南中部晚第三纪和早第四纪的孢粉组合及其在古地理学上的意义[J]. 地理学报, 1978, 33(2): 142-155. [LI Wenyi, WU Xifang. A palynological investigation on the late Tertiary and early Quaternary and its significance in the paleogeographical study in Central Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica, 1978, 33(2): 142-155.]
- [38] 孙湘君, 吴玉书. 根据孢粉推论禄丰腊玛古猿生活时期的自然环境[J]. 古脊椎动物与古人类, 1980, 18(3): 247-255. [SUN Xiangjun, WU Yushu. Paleoenvironment during the time of Ramapithecus Lufengensis[J]. Vertebrata Palasiatica, 1980, 18(3): 247-255.]
- [39] Chang L, Guo Z T, Deng C L, et al. Pollen evidence of the palaeoenvironments of Lufengpithecus lufengensis in the Zhaotong Basin, southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 435: 95-104.
- [40] Huang Y J, Ji X P, Su T, et al. Habitat, climate and potential plant food resources for the late Miocene Shuitangba hominoid in Southwest China: Insights from carpological remains[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 470(1): 63-71.
- [41] 王伟铭, 舒军武. 云南曲靖盆地晚新生代孢粉植物群[J]. 古生物学报, 2004, 43(2): 254-261. [WANG Weiming, SHU Junwu. Late Cenozoic palynofloras from Qujing Basin, Yunan, China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2004, 43(2): 254-261.]
- [42] 徐景先, 王宇飞, 杜乃秋. 云南西部羊邑和龙陵地区晚上新世植被和古气候[J]. 古地理学报, 2003, 5(2): 217-223. [XU Jingxian, WANG Yufei, DU Naiqiu. Late Pliocene vegetation and paleoclimate of Yangyi and Longling of west Yunnan Province[J]. Journal of Palaeogeology, 2003, 5(2): 217-223.]
- [43] Xu J X, Blackmore S, Wang Y F, et al. Late Pliocene vegetation and climate of Yangyi region, Yunnan of China, based on palynological data [J]. Palaeontographica Abteilung B, 2004, 269(1-6): 131-148.
- [44] Xu J X, Ferguson D K, Li C S, et al. Climatic and ecological implications of Late Pliocene palynoflora from Longling, Yunnan, China[J]. Quaternary International, 2004, 117(1): 91-103.
- [45] Kou X Y, Ferguson D K, Xu J X, et al. The reconstruction of paleovegetation and paleoclimate in the Late Pliocene of west Yunnan, China[J]. Climatic Change, 2006, 77(3-4): 431-448.
- [46] 寇香玉. 新生代孢粉分析与古气候定量重建的研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所博士学位论文, 2005. [KOU Xiangyu. Studies on quantitative reconstruction of Cenozoic climates in china by Palynological data[D]. Beijing: The Ph.D. Dissertation Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 2005.]
- [47] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的气候变化与西南季风演化[J]. 古生物学报, 2009, 48(2): 185-193. [XIAO Xiayun, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. Climatic change and evolution of the southwest Monsoon revealed by pollen records in the Heqing deep drilling core[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2009, 48(2): 185-193.]
- [48] Xiao X Y, Shen J, Wang S M, et al. The variation of the southwest monsoon from the high resolution pollen record in Heqing Basin, Yunnan Province, China for the last 2.78Ma [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 287(4): 45-57.
- [49] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的 2.78MaBP 以来的植被演替与气候变迁[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(6): 778-788. [XIAO Xiayun, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. Palynological evidence for vegetational and climatic changes from the HQ deep drilling core in Yunnan Province, China[J]. Science in China (Series D), 2007, 37(6): 778-788.]
- [50] 肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 等. 云南鹤庆盆地 2.780~1.802MaBP 期间的古植被和古气候[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 417-426. [XIAO Xiayun, SHEN Ji, XIAO Haifeng, et al. Paleovegetation and paleoclimate of the Heqing Basin during 2.780-1.802MaB.P. in Yunnan Province, China[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(3): 417-426.]
- [51] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的 2.78Ma 以来植物多样性演化及其与古环境的关系[J]. 科学通报, 2008, 53(19): 2324-2334. [XIAO Xiayun, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. The plant diversity and its relationship with paleoenvironment since 2.78 Ma revealed by pollen records in the Heqing deep drilling core[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19): 2324-2334.]
- [52] 许哲平, 陈建强, 肖景义. 云南昆明盆地中更新世晚期以来的孢粉记录及古气候演化[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 65-77.



- [XU Zheping, CHEN Jianqiang, XIAO Jingyi. Pollen Records since Late Middle-Pleistocene in the Kunming Basin, Yunnan Province and Paleoclimate Evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 65-77.]
- [53] Chen X M, Chen F H, Zhou A F, et al. Vegetation history, climatic changes and Indian summer monsoon evolution during the Last Glaciation (36,400 - 13,400 cal yr BP) documented by sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 410(5): 179-189.
- [54] Chen F H, Chen X M, Chen J H, et al. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(7): 661-674.
- [55] Yao Y F, Song X Y, Wortley A H, et al. Pollen-based reconstruction of vegetational and climatic change over the past ~ 30 ka at Shudu Lake in the Hengduan Mountains of Yunnan, southwestern China[J]. *Plos One*, 2017, 12(2): e0171967.
- [56] Xiao X Y, Haberle S G, Yang X D, et al. New evidence on deglacial climatic variability from an alpine lacustrine record in northwestern Yunnan Province, southwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 406(0): 9-21.
- [57] Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, et al. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 86(86): 35-48.
- [58] Yang Y P, Zhang H C, Chang F Q, et al. Vegetation and climate history inferred from a Qinghai Crater Lake pollen record from Tengchong, southwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 461: 1-11.
- [59] 唐领余. 云南勐海地区四万年以来植被史与气候[J]. *微体古生物学报*, 1992, 9(4): 433-455. [TANG Lingyu. Vegetation and climate history at Menghai, Yunnan during the past 42000 years[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1992, 9(4): 433-455.]
- [60] 郑茜, 张虎才, 明庆忠, 等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000a.B.P. 以来植被与气候变化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(6): 1314-1326. [ZHENG Qian, ZHANG Hucui, MING Qingzhong, et al. Vegetational and environmental changes since 15ka.B.P. recorded by lake Lugu in the southwest monsoon domain region[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(6): 1314-1326.]
- [61] Song X Y, Yao Y F, Wortley A H, et al. Holocene vegetation and climate history at Haligu on the Jade Dragon snow mountain, Yunnan, SW China[J]. *Climatic Change*, 2012, 113(3-4): 841-866.
- [62] 沈吉, 杨丽原, 羊向东, 等. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(2): 130-138. [SHEN Ji, YANG Liyuan, YANG Xiangdong, et al. Climate change and human activity sedimentary records since Holocene in Yunnan Erhai basin[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(2): 130-138.]
- [63] 羊向东, 沈吉, Jones R T, 等. 云南洱海盆地早期人类活动的花粉证[J]. *科学通报*, 2005, 50(3): 238-245. [YANG Xiangdong, SHEN Ji, Jones R T, et al. Pollen evidence of early human activities in Erhai basin, Yunnan Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 238-245.]
- [64] Shen J, Jones R T, Yang X D, et al. The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan Province southwestern China: the role of climate and human forcings[J]. *The Holocene*, 2006, 16(2): 265-276.
- [65] 云南植被编写组. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Writing Group of Yunnan Vegetation. *Vegetation of Yunnan* [M]. Beijing: Science Press, 1987.]
- [66] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 289-295. [ZHONG Dalai, DING Lin. Rasing process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its mechanical[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 289-295.]
- [67] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 7-17. [LI Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and Asian monsoon[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 7-17.]
- [68] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. *Regional Geology of Yunnan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.]
- [69] 张远志. 云南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. [ZHANG Yuanzhi, *Lithostratigraphy of Yunnan Province* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.]
- [70] 孙湘君. 中国晚白垩世-古新世孢粉区系的研究[J]. *植物分类学报*, 1979, 17(3): 8-21. [SUN Xiangjun. Palynofloristical investigation on the late Cretaceous and Paleocene of China[J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1979, 17(3): 8-21.]
- [71] 赵英娘, 王大宁, 孙秀玉. 中国早第三纪孢粉植物群与古气候、古地理、古生态的关系[C]//*地层古生物论文集*, 1995, 26, 115-123. [ZHAO Yinniangu, WANG Daning, SUN Xiuyu. Early Tertiary palynoflora; its relation to paleoclimate, paleogeography and paleoecology of China [C]//*Professional papers of stratigraphy and palaeontology*. 1995, 26, 115-123.]
- [72] Linnemann U, Su T, Kunzmann L, et al. New U-Pb dates show a Paleogene origin for the modern Asian biodiversity hot spots[J]. *Geology*, 2017, 46(1): 3-6.
- [73] 邓胜徽. 我国晚中生代单缝孢真蕨植物兴衰史及意义[J]. *地质评论*, 1995, 41(2): 135-143. [DENG Shenhui. Characteristics of the late mesozoic monolete spore ferns from china and the palaeoclimatic and evolutionary significance[J]. *Geological Review*, 1995, 41(2): 135-143.]
- [74] Zhang C X, Guo Z T, Deng C L, et al. Clay mineralogy indicates a mildly warm and humid living environment for the Miocene hominoid from the Zhaotong Basin, Yunnan, China

- [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20012, DOI: 10.1038/srep20012.
- [75] Wang P X. Neogene stratigraphy and paleoenvironments of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 77(3-4): 315-334.
- [76] Huang Y J, Jia L B, Wang Q, et al. Cenozoic plant diversity of Yunnan: A review[J]. *Plant Diversity*, 2016, 38(6): 271-282.
- [77] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 2015, 33(6): 525-528.
- [78] 张克信, 王国灿, 季军良, 等. 青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(12): 1632-1654. [ZHANG Kexing, WANG Guocan, JI Junliang, et al. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2010, 40(12): 1632-1654.]
- [79] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet [J]. *Science*, 1992, 255: 1663-1670.