中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 8 期: 1308 ~ 1320
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 两万年来的中国气候与环境专题

中国南方植被的变化

王伟铭[1*], 李春海[2], 舒军武[1], 陈炜[1]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所和生物演化与环境卓越中心, 资源地层学与古地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008
* E-mail: wmwang@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2018-05-16; 收修改稿日期: 2019-04-04; 接受日期: 2019-04-28; 网络版发表日期: 2019-05-30
中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA05120100、XDB26000000)和国家自然科学基金项目(批准号: 41771219、41371207、41472010)资助

摘要 为揭示自末次盛冰期以来中国南方植被的变化规律, 文章在前人工作的基础上, 通过在一些研究薄弱区布钻取芯, 建立钻孔剖面高分辨率的时间标尺和孢粉序列, 以恢复研究区过去约2万年以来的植被变化过程. 文中分别给出中国南方18、9和6ka BP前后的植被分带图和各区域植物的分布特征. 研究表明: 18ka BP前的植被带分布与现在存在着明显的差异, 其中西部由西北向东南依次为寒温性针叶林与高寒草甸草原带、温带针阔叶混交林带/暖温带落叶阔叶林带, 中东部由北向南依次分布温带针阔叶混交林带、暖温带落叶阔叶林带, 以及北亚热带常绿、落叶阔叶混交林带; 9ka BP前后的植被面貌发生了明显的变化, 除西北部局部地处山地温性针阔叶混交林带外, 其他地区由北向南依次分布北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带, 中亚热带典型常绿阔叶林亚带, 南亚热带季风常绿阔叶林亚带/热带季雨林和雨林带; 6ka BP前后的植被面貌与9ka BP前后的变化不大, 但各个植被带的北缘略有北移, 反映当时总体气候变得更加温暖. 中国南方2万年以来的植被变化, 很大程度上受到环境变迁的驱使, 其中气候变化为主要影响因素, 人类活动的影响在后期变得越来越明显, 而在长江下游和三角洲地区, 海平面变化对植物的分布同样构成一定的影响.

关键词 植被变化, 18ka BP, 9ka BP, 6ka BP, 环境变化, 中国南方

1 引言

地球气候自末次盛冰期约2万年前开始逐步回暖(Andersen等, 2004), 适宜的气候条件促成了全新世农耕文化的形成与发展, 先民从早期采集与渔猎为主的游弋生产生活方式, 逐渐转变到以农耕文明为主的定居生产生活方式. 这一生产和生活方式的改变与当时环境的变化密切相关联, 对当今人类文明产生了巨大的影响(Wang等, 2010). 中国南方是稻作农业的主要生产区, 植被自末次盛冰期以来曾发生过重大的变化, 鉴于资料的局限, 我们对这一变化的具体过程及其与人类农耕生活的联系, 仍缺乏全面的了解. 为了更好地解译中国南方末次盛冰期以来植被随气候波动的变化规律, 以及人类活动对植被的影响, 我们在中国科学院战略性先导科技专项等项目的资助下, 以中国南方现有资料为基础, 经充分认证和野外实地考察后, 在

中文引用格式: 王伟铭, 李春海, 舒军武, 陈炜. 2019. 中国南方植被的变化. 中国科学: 地球科学, 49: 1308–1320, doi: 10.1360/N072018-00020
英文引用格式: Wang W, Li C, Shu J, Chen W. 2019. Changes of vegetation in southern China. Science China Earth Sciences, 62: 1316–1328, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9364-9

© 2019 《中国科学》杂志社

一些研究薄弱区钻孔取芯，通过研究部分代表性地区不同时期的植物群面貌及其变化规律，以期获得中国南方末次盛冰期约2万年以来更加全面的植被发展史，为深入了解这一特定人类发展时期的环境背景，合理规划今后的生产发展提供科学依据.

2　研究现状

研究区第四纪孢粉研究，前人已积累了部分资料. 现有工作主要通过研究个例，较好地揭示了晚更新世以来不同地区和气候带的主要植物构成. 如在云贵高原和川西等西南地区，松科(Pinaceae)特别是云南松(*Pinus yunnanensis*)花粉一般含量丰富，可达30%以上. 在冷期湿润阶段主要发育云杉属(*Picea*)、冷杉属(*Abies*)、铁杉属(*Tsuga*)，而干期则以松属(*Pinus*)占主导. 在西双版纳热带北缘还见有罗汉松属(*Podocarpus*)、泪杉属(*Dacrydium*)及鸡毛松属(*Dacrycarpus*). 常绿阔叶植物以喜干的高山栎类硬叶林为代表，青冈属(*Cyclobalanopsis*)、栲属(*Castanopsis*)、石栎属(*Lithocarpus*)、冬青属(*Ilex*)、大戟科(Euphorbiaceae)等常见. 温带落叶植物花粉常见有栎属(*Quercus*)、桤木属(*Alnus*)、水青冈属(*Fagus*)、桦木属(*Betula*)、榛属(*Corylus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)等; 灌木见有杜鹃花科(Ericaceae)等; 草本植物花粉普遍见有莎草科(Cyperaceae)、禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)、蒿属(*Artemisia*)、蓼科(Polygonaceae)等; 蕨类植物繁盛, 通常由水龙骨科(Polypodiaceae)、石松科(Lycopodiaceae)、桫椤属(*Alsophila*)等组成(高凤岐, 1988; 陈佩英等, 1992; 唐领余, 1992; 羊向东等, 1998; 蒋雪中等, 1998; 肖霞云等, 2006, 2007).

在东南地区，亚热带常绿阔叶树种花粉种类一般较多, 如栲属、石栎属、蕈树属(*Altingia*)、枫香属(*Liquidambar*)、杨梅属(*Myrica*)、冬青属、芸香科(Rutaceae)、五加科(Araliaceae)、漆树科(Anacardiaceae)、无患子科(Sapindaceae)、山矾属(*Symplocos*)、大风子科(Flacourtiaceae)等; 一些喜温暖湿润气候的落叶植物，如水青冈属、鹅耳枥属、化香属(*Platycarya*)、桤木属、枫杨属(*Pterocarya*)、桦木属、山核桃属(*Carya*)、榆属(*Ulmus*)等的花粉也多有分布, 它们含量的增减随气候而变化. 反映湿热气候的热带低地或沟谷雨林木本植物花粉见有: 榕属(*Ficus*)、杜英属(*Elaeocarpus*)、蒲桃属(*Syzygium*)、桑科(Moraceae)、野桐属(*Mallotus*)、叶下珠属(*Phyllanthus*)、山黄皮属(*Randia*)、假木荷属(*Craibiodendron*)、夹竹桃科(Apocynaceae)、棕榈科(Palmae)、银柴属(*Aporusa*)、山龙眼属(*Helicia*)、桃金娘属(*Rhodomyrtus*)、野牡丹属(*Melastoma*)等; 红树林植物花粉有红树属(*Rhizophora*)、海桑属(*Sonneratia*)、秋茄属(*Kandelia*)、角果木属(*Ceriops*)、木榄属(*Bruguiera*)等，是华南地区指示热带海岸的特有植物. 裸子植物花粉中出现泪杉属、罗汉松属、油杉属(*Keteleeria*)和杉科(Taxodiaceae)，主要反映山地雨林特点; 蕨类植物孢子种类数量都很多，如芒萁属(*Dicranopteris*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、水龙骨属(*Polypodiodes*)、里白属(*Hicriopteris*)、金毛狗属(*Cibotium*)、海金沙属(*Lygodium*)、铁线蕨属(*Adiantum*)、毛蕨属(*Cyclosorus*)、鳞盖蕨属(*Microlepia*)、莎草蕨属(*Schizaea*)、蕨属(*Pteridium*)、紫萁属(*Osmunda*)及卷柏属(*Selaginella*)等, 反映湿热气候环境(沈才明等, 1989; 许雪氓等, 1996; Zheng和Lei, 1999; Zheng和Li, 2000; 吕厚远等, 2003; 郑卓等, 2003; 舒军武等, 2007a; 孟玉婷等, 2014; 萧家仪等, 2018).

中国孢粉学界曾多次组织国内学者汇集现有孢粉数据, 试图恢复过去不同时期的植被面貌. 其中于革等的工作具有一定的代表性(Yu等, 1998, 2000), 他们通过对645种孢粉类型的植物功能类型进行赋值, 用于讨论中国18和6ka BP的植被分布格局. 认为在末次冰盛期, 草原和荒漠植被可能延伸到中国东部的海岸带, 而常绿阔叶混交林则在现在的热带地区分布，北部针叶林向南扩展至大约43°N一带(Yu等, 2000); 在6ka BP前后, 中国东部森林植被大幅北移并向西扩展, 热带雨林出现在现今的热带季雨林和常绿阔叶林区，温带落叶阔叶林的北界比现在向北移动了约800km(Yu等, 1998, 2000). 鉴于上述工作主要基于大量的前人数据, 这些资料大多因年代久远，存在测年数据少、精度差, 孢粉的分辨率普遍较低等问题. 因此, 研究结果主要还是框架性的, 并没有给出真正意义上的植被分带图.

3　材料和方法

研究区域包括西南地区的四川省、贵州省、云南省、湖南省和广西壮族自治区，东南地区的江苏省、安徽省、湖北省、江西省、浙江省、福建省、广东省

和海南省等地. 项目最初计划选取15个代表性湖泊/泥炭点开展研究, 但在实际工作过程中, 发现多个湖泊/泥炭剖面无法满足年代数据的要求, 因此, 又新增了5个研究点. 全部20个点位包括西南地区的伍须海、泸沽湖、腾冲青海湖、星云湖、草海、南屯、小黑土、袍烈、九龙池、大平塘和炎陵, 东南地区的龙感湖、鄱阳湖、南漪湖、湘湖、白马湖、东钱湖、定南、铭爱村和湖光岩(图1, 实心圆点). 根据测年情况和孢粉研究结果, 最后选取14个点位的数据用于本文工作, 含西南地区7个(伍须海、泸沽湖、腾冲青海湖、星云湖、袍烈、大平塘和炎陵)、东南地区7个(鄱阳湖、南漪湖、湘湖、东钱湖、定南、铭爱村和湖光岩)(表1). 另外, 我们还选取了研究区部分已有的代表性孢粉数据的点位(图1, 空心圆点)资料, 用于综合讨论中国南方植被的历史变化过程.

文中采用的14个湖泊/泥炭剖面全部取自钻孔, 剖面的时间序列根据高分辨的^{14}C测年数据建立, AMS ^{14}C测年主要委托美国Beta放射性碳实验室(Beta Analytic Radiocarbon Laboratory)和新西兰地质与核科学研究所拉夫放射性碳实验室(Rafter Radiocarbon Laboratory)完成, 采纳的年龄数据全部经过树轮校正. 测年结果显示, 西南地区的腾冲青海湖、泸沽湖、星云湖, 东南地区的湘湖、定南、铭爱村和湖光岩都包含18ka BP以来的沉积, 其中湘湖约7.4ka BP之上地层缺失; 涵盖9ka BP以来的钻孔包括西南地区的伍须海和炎陵, 东南地区的鄱阳湖、南漪湖和东钱湖, 其中东钱湖缺失上部沉积. 西南地区的袍烈只含约7ka BP以来的沉积, 而大平塘只含约5.5ka BP以来的沉积. 孢粉鉴

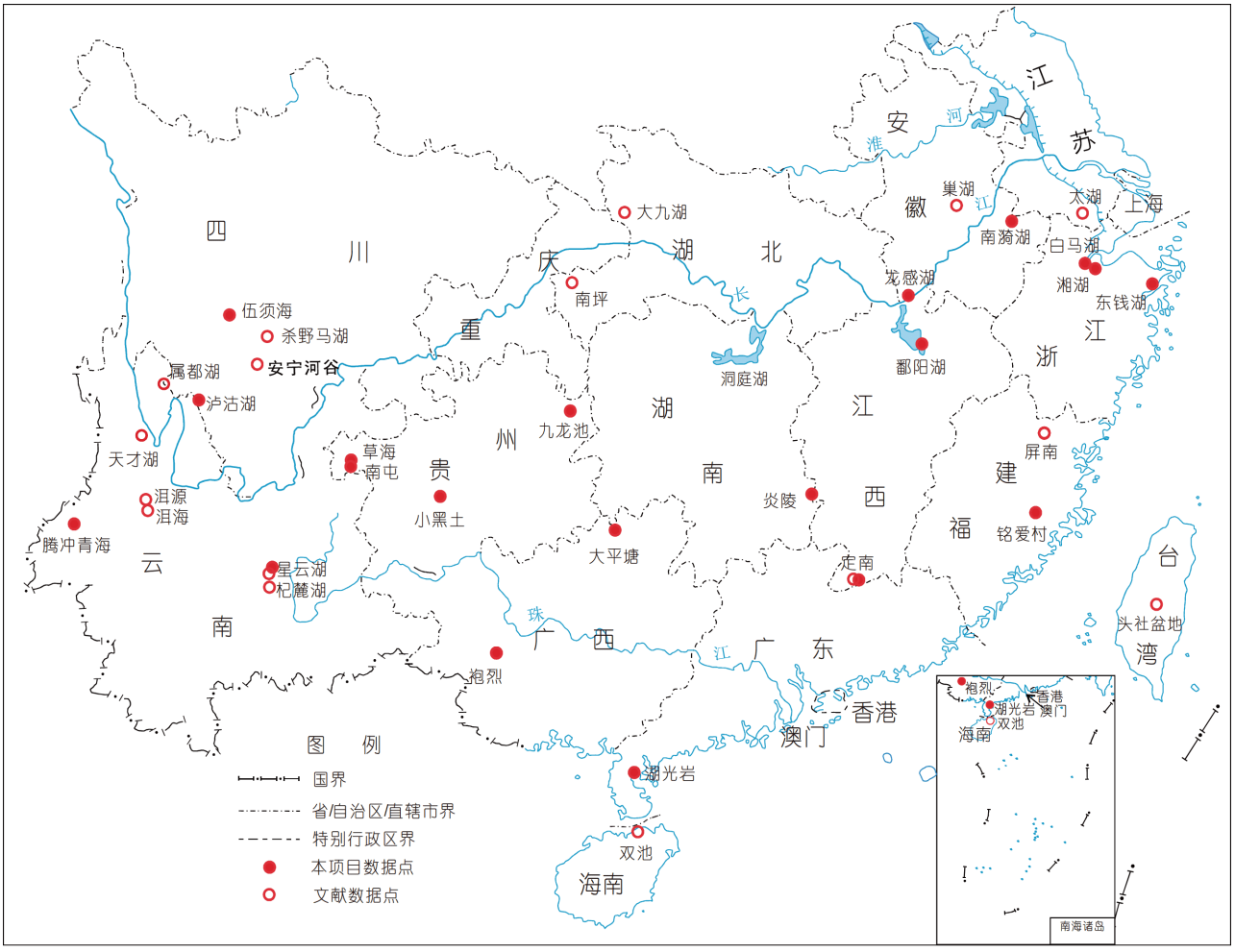


图 1　新增钻孔和主要文献钻孔地理位置图

实心圆点, 本项目的数据点; 空心圆点, 文献数据点

表 1　新增钻孔剖面信息汇总

钻孔地点	坐标		海拔(m)	厚度(cm)	^{14}C年龄跨度(cal a BP)
伍须海	29°09′11.5″N	101°24′21.6″E	3625	1100	0~12211
泸沽湖	27°43′08.4″N	100°46′33.9″E	2690	1000	0~31225
腾冲青海湖	25°07′56.8″N	98°34′19.2″E	1885	832	0~18200
星云湖	24°21′33.4″N	102°47′11.1″E	1722	754	0~27263
袍烈	23°26′19.3″N	107°43′33.6″E	210	153	0~7000
大平塘	25°68′58.0″N	109°97′73.0″E	1282	373	0~5500
炎陵	25°24′40.3″N	109°04′41.2″E	1770	150	0~14200
鄱阳湖	28°59′47.6″N	116°29′07.9″E	17	1080	0~8595
南漪湖	31°09′21.0″N	119°03′16.2″E	0	650	0~15745
湘湖	30°08′37.2″N	120°12′45.9″E	4	2300	7360~28390
东钱湖	29°46′35.9″N	121°37′29.7″E	2	2492	8700~9325
定南	24°45′24.3″N	115°02′11.7″E	267	792	0~36255
铭爱村	25°40′04.4″N	118°07′44.0″E	1071	370	0~43500
湖光岩	21°08′43.0″N	110°16′48.6″E	23	2200	0~42000

定每个样品的花粉统计数都超过300粒. 工作初期曾着重对原有资料进行了综合评估, 以便与新增资料一起用于讨论涉及过去近2万年以来的古植被演变规律. 通过参照国内外已有工作的现状, 采取相对统一的数据集成取舍标准, 以保证研究结果的精度与可靠性.

根据不同化石孢粉组合恢复古植被, 并确定各个时期的植被带界限, 是本文的工作重点. 研究点不同时段植被的恢复主要参照课题组以往的相关表土孢粉研究成果(舒军武等, 2007b, 2010; Xiao等, 2011), 同时还兼顾了有关现代花粉扩散和沉积保存过程对花粉重建过去植被的影响(Xu等, 2016), 以及东亚现代孢粉数据库对过去植被的定量判别标准(Zheng等, 2014). 在实际工作中, 我们根据现代植被表土孢粉组合中的优势孢粉科属和标志孢粉科属, 建立不同地带性植被的表土花粉指标, 并应用于对过去植被的判断中. 其中优势植物为植被中的建群种, 是判别植被属性的重要指标; 而标志孢粉科属的生态幅相对狭窄, 主要用于指示植物的生境(舒军武等, 2007b). 与此同时, 通过建立表土孢粉组合中常绿阔叶木本植物与落叶阔叶木本植物含量比值(E/D)与不同植被类型的对应关系, 定量和半定量地确定不同时期代表性钻孔剖面植被的性质及其历史迁移规律(舒军武等, 2007b), 由点到面地进行可能的地理位置分布推算. 鉴于现有剖面点分布的局限性, 我们在具体工作中还综合考虑了一些大的山系和重要地形单元等天然屏障在不同地质时期对植被分布的制约.

4　植被变化

4.1　现代植被分布特征

中国南方现代植被分布除西北部为高原高寒植被带外, 其他由北向南依次为亚热带常绿阔叶林带(包括北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带、中亚热带典型常绿阔叶林亚带、南亚热带季风常绿阔叶林亚带)和热带季雨林和雨林带(图2a). 为便于与过去植被的分布相比较, 我们根据野外对不同地区现代植被的实地观察, 结合前人的研究结果(吴征镒, 1980; 侯学煜, 1988), 将各个植被带的主要科属组成归纳如下.

4.1.1　高原高寒植被带

区域植物种类丰富, 山地垂直带分异明显, 植被类型复杂, 是中国森林分布的最西界线. 优势植被属山地寒温性云、冷杉针叶林, 东部与亚热带常绿阔叶林相接, 西部与高寒灌丛草甸相邻. 川西峡谷山地为湿性常绿阔叶林、云、冷杉林区, 植被垂直带结构复杂, 1800m以下为干热河谷, 普遍分布多刺和肉质灌丛; 1800~2400m, 湿性常绿阔叶林, 由青冈属、栲属组成; 2400~3200m, 阳坡为高山松林和栎类灌丛, 阴坡为铁

杉属、桦木属针阔叶混交林; 3200~4000m, 阴坡为寒温性云冷杉针叶林, 阳坡为硬叶高山栎林. 横断山脉背部山原峡谷为云冷杉林区, 3400m以下以白刺花(*Sophora davidii*)灌丛为主; 3200~4200m, 寒温性针叶林, 以川西云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*)林为主. 在横断山脉南部峡谷云冷杉、硬叶栎林区, 2800~3200m, 为干热河谷灌丛; 3000~4200m, 云冷杉林; 4200m以上为高山灌丛、草甸带, 以多种小叶型杜鹃灌丛及蒿草草甸组成; 4800m以上为流石滩稀疏植物类群.

4.1.2 北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带

乔木层主要以耐寒常绿种类如青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、润楠属(*Machilus*)和栲属的苦槠(*Castanopsis sclerophylla*), 以及栎属的栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Q. acutissima*)和水青冈属的落叶种为优势类群. 灌木层主要由柃木属(*Eurya*)、山矾属(*Symplocos*)和杜鹃属(*Rhododendron*)组成. 在江淮平原, 主要分布栽培植被和水生植被; 江淮丘陵以落叶栎类、苦槠、马尾松(*Pinus massoniana*)林区为主; 西部山地丘陵则主要分布落叶栎类和青冈栎林等.

4.1.3 中亚热带典型常绿阔叶林亚带

地带性植被为常绿阔叶林, 次为松杉林和毛竹林. 南岭是华南阻挡北来寒潮的重要屏障, 南、北部气温有差异, 岭南的常绿阔叶林更为发达, 且热带区系成分更加丰富. 在海拔1200m以下的山地丘陵上, 分布着以栲属如南岭栲(*Castanopsis fordii*)、钩栲(*C. tibetana*)、米槠(*C. carlesii*)和甜槠(*C. eyrei*)等, 蕈树(*Altingia chinensis*)、红楠(*Machilus thunbergii*)和木荷(*Schima superba*)为主的常绿阔叶林, 其中含有较多的樟科(Lauraceae)成分, 构成具有热带成分的常绿阔叶林. 海拔1200m以上的常绿阔叶林中逐渐渗入一些亚热带扁平叶型的针叶树, 如南方红豆杉(*Taxus wallichiana* var.

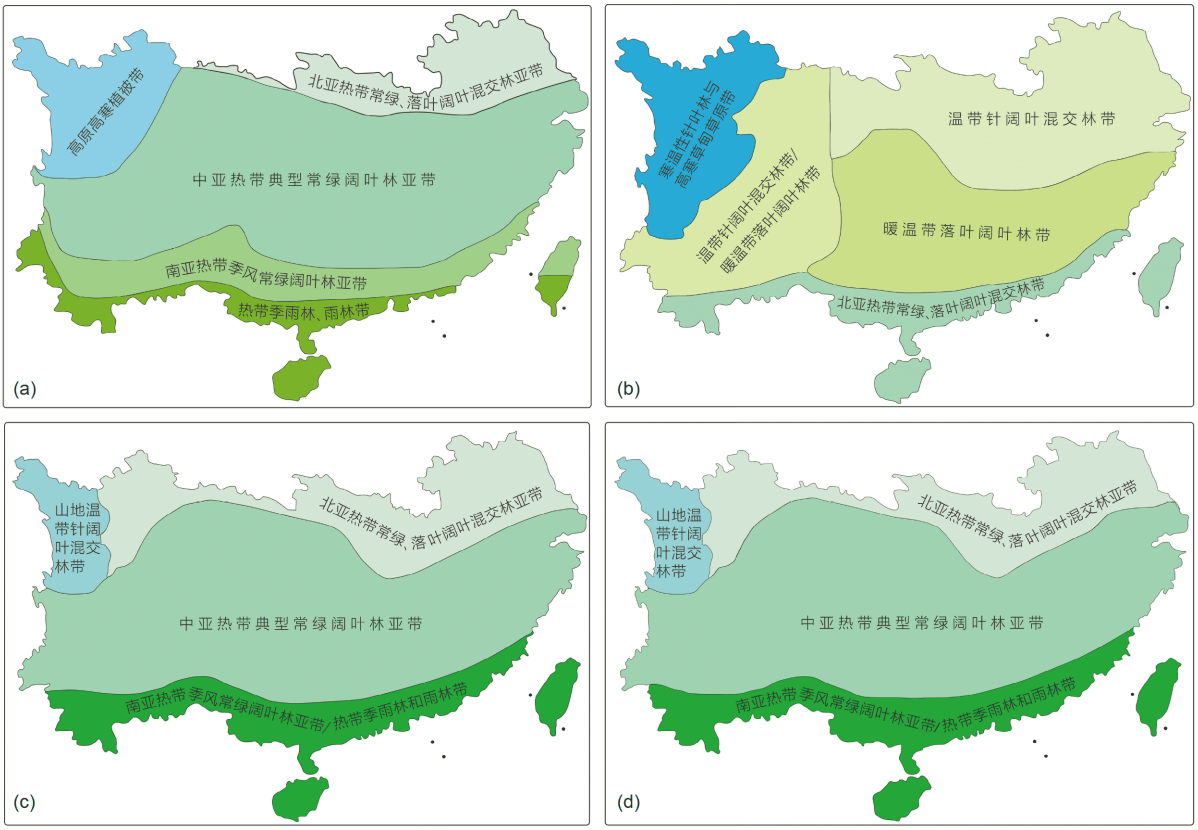


图 2 中国南方植被分带图

(a) 现代植被分带图; (b) 18ka BP植被分带图; (c) 9ka BP植被分带图; (d) 6ka BP植被分带图

mairei)、长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)、百日青(*Podocarpus neriifolius*)、亮叶桦(*Betula luminifera*)、香桦(*Betula insignis*)等, 组成针阔叶混交林或常绿、落叶阔叶混交林.

4.1.4　南亚热带季风常绿阔叶林亚带

植被的组成种类成分较为复杂, 区系多样, 以华南植物省的成分为主要特征, 兼有马来西亚区系成分(地带的西段)和华中-华南区系成分(东段). 优势种类以壳斗科和樟科的热带属种, 以及金缕梅科(Hamamelidaceae)和山茶科(Theaceae)的属种为主. 另外, 群落中还有藤黄科(Guttiferae)、番荔枝科(Annonaceae)、桃金娘科(Myrtaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、桑科、橄榄科(Burseraceae)、无患子科、楝科(Meliaceae)、梧桐科(Sterculiaceae)、茜草科(Rubiaceae)、紫金牛科(Myrsinaceae)、夹竹桃科、棕榈科、红树科(Rhizophoraceae)、竹亚科(Bambusoideae)等属种. 植被中的次生林以马尾松群落最为普遍且面积最大, 其中大多数是人工林.

4.1.5　热带季雨林和雨林带

植物种类和植被类型丰富, 热带植被随着海拔的升高而逐渐向亚热带和温带性质过渡, 一般在500~600m以下为半常绿季雨林, 局部有湿润雨林、落叶季雨林等类型. 在一些山巅、山脊地形上出现矮林、灌丛、苔藓林等, 以适应气温较低的杜鹃花科(Ericaceae)、越桔科(Vacciniaceae)、蔷薇科(Rosaceae)等植物占优势; 随着海拔的升高, 从1500m上下开始, 林中的裸子植物种类和数量均逐渐增加, 并向山地针阔叶混交林过渡. 各种雨林的组成有龙脑香科(Dipterocarpaceae)、楝科、桑科、无患子科、四数木科(Datiscaceae)等, 次层乔木有山欖科(Sapotaceae)、玉蕊科(Barringtoniaceae)、大戟科、使君子科(Combretaceae)、远志科(Polygalaceae)等, 林下灌木、草本和木质大藤本有番荔枝科、茜草科、藤黄科、使君子科(Combretaceae)、夹竹桃科、萝摩科(Asclepiadaceae)、桃金娘科、马鞭草科(Verbenaceae)、棕榈科(Palmae)、蝶形花科(Papilionaceae)等. 山地植被因生境条件较温凉、湿润, 没有明显的干季, 森林中的常绿植物比例高于低平地, 而与亚热带常绿阔叶林相似, 并以樟科、壳斗科、木兰科(Magnoliaceae)等占优势. 此外, 还有山茶科、金缕梅科、五加科、杜英科(Elaeocarpaceae)、木犀科(Oleaceae)、水青树科(Tetracentraceae)等, 林下含丰富的棕榈科、竹亚科、仙人掌科(Cactaceae), 以及蕨类植物包括木本的树蕨. 海边含红树林成分, 如红树科、海桑属等.

4.2　18ka BP植被特征

中国南方涵盖18ka BP前后的植被资料相对比较局限, 主要受到地层分布和当时沉积环境的控制. 从我们的研究结果和已有的资料分析, 当时的植被带分布与现在存在明显的差异. 其中西北部由西北向东南依次为寒温性针叶林与高寒草甸草原带、温带针阔叶混交林带/暖温带落叶阔叶林带; 中东部由北向南依次地处温带针阔叶混交林带、暖温带落叶阔叶林带和北亚热带常绿、落叶阔叶混交林带(图2b).

4.2.1　寒温性针叶林与高寒草甸草原带

孢粉组合以草本植物花粉为主, 其前期含有大量的松科花粉, 但并不一定为原地沉积. 反映的植被类型主要包括稀疏草原、苔原、高寒草原和山地针叶林. 由于受到海拔和林线高度的影响, 不同地区的孢粉植物群面貌存在着较大的差异. 属都湖(海拔3700m)孢粉记录22~20ka BP期间, 松的平均含量在60%以上, 有云杉属和冷杉属花粉, 但是没有见到气孔器, 因此属于稀疏草原植被; 20~18ka BP有大量的禾本科、蒿属和莎草科花粉分布, 显示流域植物为苔原(Cook等, 2011). 云南丽江老君山天才湖(3900m)湖泊孢粉记录显示, 20~17ka BP期间以草本植物为主, 植被为高寒草原(Xiao等, 2014b). 大理洱源西湖孢粉记录显示18ka BP期间, 植被为山地针叶林, 主要种类为松和常绿硬叶栎, 与现在相比, 林线下降500~800m(Lin等, 1986). 泸沽湖孢粉数据显示, 孢粉谱中松属花粉占优势(平均50%), 木本植物花粉主要为常绿硬叶栎(平均14%), 草本植物花粉含量较高(29.8%), 云杉属和冷杉属花粉较少, 植物类型非常简单(沈吉和肖霞云, 2018). 西南地区表层湖泊花粉研究显示, 松属花粉具有超代表性(Jarvis和Clay-Poole, 1992; Xiao等, 2011; Li和Li, 2015). 因此, 泸沽湖松属花粉可能来源于长距离搬运, 泸沽湖流域发育高山草甸, 林线至少下降1000m, 温度下降6~7℃.

4.2.2 温带针阔叶混交林带/暖温带落叶阔叶林带

本植被带相当于东部的温带针阔叶混交林带和暖温带落叶阔叶林带, 受海拔高度的影响, 这两个植被类型在区内存在一定的交叉, 故未作区分. 云南腾冲青海湖18.5~14.2ka BP孢粉组合中, 含大量的常绿栎属, 以及落叶栎属、桤木属和松属, 一定数量的蒿属和藜科(Chenopodiaceae), 反映凉干气候, 说明当时西南季风的影响微弱(Xiao等, 2015). 星云湖(海拔1722m)18ka BP时段孢粉主要类型为松属、铁杉属、常绿栎属和少量的云冷杉, 表明山地垂直植被带发育, 根据铁杉林的分布界限, 推测当时不同植被带至少比现在下降500m(沈吉和肖霞云, 2018). 综合我们获取的所有数据, 推测西南地区18ka BP期间林线可能下降1000m以上. 星云湖另一个钻孔也显示, 松属和铁杉属占优势(Chen等, 2014). 大量的铁杉分布, 显示林线的显著下降. 现在铁杉林主要分布在滇西北海拔2800~3200m, 而星云湖的海拔为1722m, 虽然星云湖流域有海拔超过3000m的高山, 但在整个流域所占面积非常小. 因此, 当时铁杉林生长的海拔高度应该比现在要低. 星云湖地区平均海拔在2000m左右, 因此可能说明当时铁杉林分布在海拔2000m左右, 推测林线可能下降了800~1200m, 温度下降约4.8~8℃(沈吉和肖霞云, 2018). 来自昆明和洱源地区的钻孔资料也显示林线显著下降, 云冷杉林发育. 祀麓湖针叶植物花粉含量丰富, 主要有松属、冷杉属、云杉属和铁杉属; 落叶阔叶植物见有栎属、桦科和榆属等; 灌木类蔷薇科也有一定的含量(龙瑞华等, 1991).

4.2.3 温带针阔叶混交林带

主要分布针阔叶混交林, 落叶阔叶树种包括桦木属、鹅耳枥属、榛属、榆属和落叶的栎属等植物, 针叶树种以松属为主, 少量见有油杉属和冷杉属等. 如上海地区的孢粉组合中, 针叶植物花粉以松属为多, 铁杉属、油杉属、冷杉属也有一定的含量; 阔叶植物花粉以落叶栎属、枫香属、山毛榉属占优势; 草本植物以香蒲属(*Typha*)为最多; 蕨类植物孢子以水龙骨科占绝对优势, 水蕨属(*Ceratopteris*)在局部层位占优势(刘金陵和叶萍宜, 1977).

4.2.4 暖温带落叶阔叶林带

主要出现落叶阔叶植物, 如江西定南同期孢粉组合以落叶阔叶植物桤木属含量突出为特征, 其他落叶栎属、山毛榉属、胡桃属、榛属和榆属等也有分布; 草本植物主要为禾本科, 毛茛科少量见到. 在福建屏南的孢粉组合中, 同样以落叶阔叶植物居优, 主要有山毛榉属、桤木属、杜鹃属、榛属、落叶栎属、鹅耳枥属、枫杨属等; 含少量草本植物花粉, 如禾本科、莎草科和蒿属; 淡水藻类环纹藻(*Concentricystes*)常见(Yue等, 2012).

4.2.5 北亚热带常绿、落叶阔叶混交林带

除落叶阔叶植物外, 常绿阔叶植物也有较多分布, 如湖光岩地区在21~18.5ka BP的植被类型为南亚热带常绿-落叶阔叶混交林, 略带有热带中海拔山地雨林的特色, 气候温暖较湿润; 18.5~16ka BP的植被类型与上一阶段相似, 气候温暖却比较干旱, 一定程度上反映了东亚夏季风的衰弱. 孢粉组合以青冈属和落叶栎属为主, 其他栲属/石栎属、栗属(*Castanea*)、桑科、桦木科、水青冈属、芸香科、蕈树属、榆属、大戟科、木犀科、野桐属、野牡丹科(Melastomataceae)等都有一定分布; 裸子植物花粉见有少量松属; 藤本植物花粉有飞蛾藤属(*Porana*); 草本植物花粉见有禾本科、蒿属和莎草科等; 蕨类植物孢子主要为鳞盖蕨属(*Microlepia*)、凤尾蕨属和水龙骨科等(孟玉婷, 2015; Meng等, 2007). 台湾头社盆地桤木属、青冈栎属和山矾属共生(Liew等, 2006; Li等, 2013).

4.3 9ka BP植被特征

中国南方9ka BP前后的植被面貌已发生很大的变化, 除西北部发育局部山地温带针阔叶混交林带外, 其他地区由北向南依次地处北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带, 中亚热带典型常绿阔叶林亚带, 以及南亚热带季风常绿阔叶林亚带/热带季雨林和雨林带(图2c).

4.3.1 山地温带针阔叶混交林带

仍受到山地海拔高度的控制, 主要分布针叶林和针阔叶混交林, 如伍须海9ka BP时段云杉和冷杉都有较高的含量, 说明气温仍较低, 气候湿润, 垂直植被发育, 中山以上区域生长铁杉林和云冷杉林.

4.3.2　北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带

植被带分布区域较上期明显北移，除落叶阔叶植物外，出现大量常绿阔叶植物，如大九湖孢粉资料反映当时暖温带和亚热带阔叶树种水青冈属和常绿栎属含量明显增加，最大值可分别达到37.4%和27.3%. 其他亚热带常绿落叶阔叶混交林组分包括栲属、栾树属(*Koelreuteria*)、金缕梅科、桑科和枫香属等占较高百分含量, 同时伴随有单缝孢子的增加. 另外相对喜湿的莎草科、蓼属和毛茛科占较高的百分比(李杰等, 2013). 安徽巢湖孢粉组合中，青冈属和栎属的平均含量分别为30.2%和13.9%，其他木本植物花粉，如松属和桦木属等，以及草本植物花粉，如禾本科、蒿属和葎草属(*Humulus*)也有一定的含量(Chen等, 2009).

4.3.3　中亚热带典型常绿阔叶林亚带

中亚热带常绿阔叶林分布范围广阔，区内气候湿润，少量暖温带成分的出现，反映当时的植被带分布较现在略为靠南. 其中西南地区和东南地区存在着一定的差异. 在西南地区，星云湖钻孔9ka BP时段主要孢粉种类有松属、常绿栎属、落叶栎属、枫香属/蕈树属、鹅耳枥属、榆属和少量的青冈属/石栎属(沈吉和肖霞云, 2018), 说明气候温暖湿润. 四川冕宁沙野马湖(海拔2400m)主要的花粉类型为松属、常绿栎属、冷杉属和铁杉属等, 垂直植被带发育, 湖区周边植被为松-常绿栎针阔叶混交林，植被类型接近现代(Jarvis, 1993). 四川西昌螺髻山大海子孢粉谱中，主要花粉类型为松属、冷杉属、铁杉属、落叶栎和高山栎，湖泊沉积物中有大量冷杉树叶出现，说明湖泊周围有大量的冷杉树生长(李旭和刘金陵, 1988). 四川冕宁县彝海洼地沼泽剖面(海拔1770m)花粉记录揭示的主要花粉类型为高山栎、石栎属、铁杉属、松属和桦属等，植被主要分布硬叶常绿栎林，说明气候温暖湿润. 天才湖主要孢粉类型为松属、云杉属、冷杉属、落叶栎和铁杉属, 有冷杉气孔器出现, 说明当时林线已经到达湖泊周围，林线与现在接近(Xiao等, 2014a). 星云湖9ka BP时段，主要孢粉种类有松属、常绿栎、落叶栎、枫香属/蕈树属、鹅耳枥属、榆属和少量的青冈属/石栎属, 植被为针阔叶混交林, 表明气候湿润. 腾冲青海湖9ka BP时段主要孢粉类型有常绿栎、桤木属、青冈属/石栎属和一些暖温带种类，以及少量的南亚热带成分，如榕属等(沈吉和肖霞云, 2018). 昆明地区和洱源西湖地区这个时段植被类型为针叶和常绿阔叶混交林, 与现代相似(Lin等, 1986). 湖南、广西和贵州地区9ka BP数据点相对较少，湖南炎陵泥炭剖面下部的孢粉分析结果显示主要孢粉种类有落叶栎、水青冈属、常绿栎、桦属、鹅耳枥属等, 青冈属含量较少, 当时的植被为常绿落叶阔叶混交林. 袍烈9ka BP的主要花粉类型为山核桃属、松属、青冈属、紫树属(*Nyssa*)、山柑属(*Capparis*)、山黄皮属、蕈树属和栲属等, 含有较多的南亚热带和热带成分.

在东南地区，南漪湖孢粉记录揭示约9.1~6.6ka BP，当时地带性植被为以壳斗科的青冈属和栎属为建群树种, 组成亚热带常绿阔叶林, 气候温暖湿润, 说明南漪湖地区已经进入了全新世大暖期. 鄱阳湖钻孔反映鄱阳湖地区在8.7~7.3ka BP期间主要发育了栎属为主的常绿阔叶林，气候转暖，呈季节性干湿变化; 7.3~2.4ka BP，植被演化为青冈属为主的常绿阔叶林, 气候暖湿稳定. 太湖地区10.0~8.5ka BP以木本植物占优势，栎属、松属、枫香属以及其他暖温带分子如榆属、桦属、榛属等成分占据一定的优势，同时，木本常绿分子青冈属、栲属/石栎属含量自上一阶段明显上升. 植被为含有针叶树和落叶成份的亚热带常绿阔叶林，气候与今相类似(许雪氓等, 1996; 舒军武等, 2007a).

4.3.4　南亚热带季风常绿阔叶林亚带/热带季雨林和雨林带

由于可用资料偏少，目前尚无法给出南亚热带季风常绿阔叶林亚带和热带季雨林和雨林带的具体界限. 区内常绿植物得到普遍发展, 如湖光岩钻孔中见有热带雨林中常见的桑科和野桐属含量大幅上升，取代了原先以落叶的栎属为建群树种的山地落叶阔叶林; 热带植物类型迅速增加，亚热带低地常绿阔叶林中的芸香科、山地雨林针叶植物如油杉属、罗汉松属花粉含量也明显增多; 孢粉组合中含量较多的桑科、大戟科、杨梅科等花粉; 草本植物蒿属含量减少并不再连续出现, 而蕨类植物含量上升(孟玉婷, 2015; Meng等, 2007), 孢粉植物群所指示的环境与现代中国南部的热带季雨林相似(Sun等, 1999). 珠江三角洲(10~7.7ka BP)孢粉组合中木本植物花粉(松属、栗属、榆属、红树属、栎属、蕈树属等)及蕨类植物孢子较多，草本植

物以蒿、莎草科为主, 在陆地呈现常绿落叶阔叶林和针叶林, 在海滨有红树林, 反映气温开始上升. 韩江三角洲全新世早期热带、南亚热带成分(榕属、杜英属、蒲桃属、桑科、棕榈科、野桐属及泪杉属等)及山地雨林针叶树迅速增加, 形成热带雨林植被, 后期热带亚热带植物减少, 蕨类草丛发育, 植被演变为半常绿季雨林和灌丛(Zheng和Li, 2000). 台湾头社盆地在9ka BP前后木本植物花粉增多, 以栲属占优势, 山黄麻属(*Trema*)含量增加, 蕨类植物孢子含量丰富(Liew等, 2006).

4.4 6ka BP植被特征

中国南方6ka BP前后的植被面貌与9ka BP前后的变化不大, 植被带依然是除西北部局部为山地温带针阔叶混交林带外, 其他地区由北向南依次分布北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带, 中亚热带典型常绿阔叶林亚带, 南亚热带季风常绿阔叶林亚带/热带季雨林和雨林带(图2d), 但各个植被带的北缘略有北移, 反映当时总体气候变得更加温暖. 研究区尤其是中东部地区还受到越来越明显的人类活动的影响, 部分原生林开始遭遇砍伐, 次生林时有生长(王伟铭等, 2010; Shu等, 2012; Wang等, 2010).

4.4.1 山地温带针阔叶混交林带

林线较上期明显上升, 落叶阔叶植物更加发育, 如伍须海花粉谱中云杉属、冷杉属、铁杉属等寒温性针叶树含量显著减少, 而桦属、鹅耳枥属等温带树种的增多, 说明林线的上升, 植被为针阔叶混交林.

4.4.2 北亚热带常绿、落叶阔叶混交林亚带

植被成份构成变化不大, 如大九湖孢粉组合仍以水青冈属和常绿栎属为主, 栲属、栾树属、金缕梅科、桑属和枫香属等发育, 同时见有一定数量的草本植物花粉(李杰等, 2013). 巢湖地区的孢粉显示, 木本植物青冈属(24.7%), 落叶的栎属(22.2%)含量增加, 松属(19.2%)含量也较高, 并含有一定数量的禾本科(9.0%)、蒿属(2.6%)等草本植物花粉, 反映巢湖地区在6.8~5.5ka BP人类活动规模扩大, 气候由前一阶段的温和略干变为温暖湿润(Chen等, 2009).

4.4.3 中亚热带典型常绿阔叶林亚带

以常绿阔叶植物为主, 西南地区受山地高度影响, 与东南地区存在一定的差异. 6ka BP时段, 泸沽湖钻孔中高含量的铁杉花粉和较少含量的草本花粉, 说明森林覆盖度非常高, 铁杉林进一步扩展, 气候湿润. 星云湖6ka BP孢粉种类和含量与9ka BP相近, 但是常绿的栎属、青冈属/石栎属含量略微上升, 为亚热带针阔叶混交林. 腾冲青海湖钻孔中高含量的青冈属/石栎属, 常绿栎和蕈树属说明当时植物为亚热带常绿林, 森林覆盖度较高. 冕宁沙野马湖6ka BP时段生长亚热带针阔叶混交林, 主要有松属、硬叶常绿栎类和湿润落叶树种(Jarvis, 1993). 西昌螺髻山大海子湖泊周围发育寒温性针阔叶混交林, 主要为冷杉属、铁杉属和硬叶常绿栎属类(李旭和刘金陵, 1988). 冕宁地区6ka BP时段植被与9ka BP相似, 为常绿硬叶林, 但是中生属种如铁杉、胡桃等增多, 气候更加温暖湿润(童国榜等, 2000). 6ka BP时段老君山天才湖花粉记录中铁杉含量达到最高值, 说明铁杉林明显上升, 林线位置高于现在(Xiao等, 2014a). 星云湖6ka BP孢粉种类和含量与9ka BP相近, 但是常绿栎、青冈属/石栎属含量略微上升, 说明亚热带类型增多. 腾冲青海湖6ka BP时段, 高含量的青冈属/石栎属, 常绿栎和蕈树属说明当时植被为亚热带常绿林. 龙胜大平塘缺少6ka BP数据, 4ka BP植被的主要面貌为以青冈-水青冈为主的亚热带常绿落叶混交林, 与现代植被类似, 但是铁杉花粉含量的出现, 说明当时温度略微低于现在但是湿度较大. 根据西南地区花粉记录, 可以显示当时亚热带植被开始向高海拔地区扩展.

南漪湖孢粉记录揭示约6.6~4.5ka BP喜暖植物类型增多, 气候温暖湿润, 东亚夏季风明显增强; 4.5~3.0ka BP松属急剧减少, 但气候仍然温暖湿润, 松属含量的变化极有可能是人类活动所致; 3.0ka BP至今由于人类活动加剧, 导致森林覆盖程度减少, 栎林几近毁灭, 次生植被松林的分布范围扩大. 鄱阳湖钻孔反映鄱阳湖地区在7.3~2.4ka BP, 植被为以青冈属为主的常绿阔叶林, 气候暖湿稳定; 2.4ka BP至今, 松属及蕨类孢子剧增, 反映当地次生松林扩展, 主要揭示强烈的以农业生产为主的人类活动. 铭爱村泥炭钻孔剖面, 孢粉组合反映5.7~3.8ka BP地带性植被为以青冈属、栲属为主的亚热带常绿阔叶林, 气候温暖湿润;

3.8~1.8ka BP木本植物含量逐渐缓慢减低, 表明当时的气候逐渐转冷, 常绿树种减少, 而落叶树种分布范围扩大; 1.8ka BP至今木本植物花粉迅速减少, 草本植物花粉和蕨类植物孢子开始全面占据优势, 里白属孢子在本带异常富集. 整个孢粉植物群呈明显的人类活动特征. 太湖地区8.5~4.0ka BP期间, 常绿成分含量在孢粉谱中一般都超过5~10%, 甚至高达40~60%, 同时含有一定量的松和落叶栎, 为自晚冰期以来最佳的相对稳定型常绿阔叶林植被, 即常绿木本植物大发展时期, 气候暖湿, 对应于全新世的大暖期(许雪氓等, 1996; 舒军武等, 2007a).

4.4.4　南亚热带季风常绿阔叶林亚带/热带季雨林和雨林带

带内主要植物类型与分布与前期差异很小(Liew等, 2006; 孟玉婷, 2015; Meng等, 2007). 如台湾头社盆地7.2~4.9ka BP期间冬青属和野桐属含量增加, 蕨类植物孢子在中期达到峰值(Liew等, 2006). 珠江三角洲的珠江口地区孢粉组合中, 木本植物栗属、石栎属、棕榈科明显增加, 同时出现山黄皮属、冬青属、防己(*Stephania tetrandra*)、栎属、松属、红树属等, 草本植物有伞形科(Apiaceae)、蒿属、禾本科, 蕨类孢子较多(单缝孢类、里白属、金毛狗属、铁线蕨属及凤尾蕨属等), 发育南亚热带季风常绿阔叶林、热带季雨林和雨林, 气候炎热多雨而潮湿. 潮汕平原的汕头一带8.5~4.0ka BP孢粉组合以南亚热带木本植物花粉为主, 如栗属/石栎属、榕属、杜英属、山黄皮属、杨梅属、野桐属、铁仔属(*Myrsine*)以及蕨类(金毛狗属、铁线蕨属、单缝孢等), 陆地发育亚热带季风常绿阔叶林, 海滨普遍生长红树林, 气候热湿(Zheng和Li, 2000). 同期海南岛双池玛珥湖地区乔灌木植物丰富, 如野桐属、紫金牛科、无患子科、卫矛科(Celastraceae)和五加科等, 水生植物金虎尾科(Malpighiaceae)的三星果属(*Tristellateia*)也有较多分布(郑卓等, 2003).

5　讨论

从中国南方18、9和6ka BP前后的植被分区图和各区域植物的分布特征可以发现, 18与9ka BP前后的植被差异明显, 而9与6ka BP前后的植被面貌相似, 反映出在末次盛冰期后全球气候变暖的大背景下, 植被对当时气候变暖的响应. 我们通过对东南地区湖光岩玛珥湖和西南地区星云湖的高分辨孢粉研究发现, 研究区2万年以来的植被变化, 主要受到全球性气候的影响, 一些重要的气候事件在孢粉组合中都有很好的显示. 另外, 东南地区和西南地区同时还受到东南季风和西南季风的叠加影响.

以湖光岩孢粉研究为例, 当地在21~18.5ka BP的植被类型为南亚热带常绿-落叶阔叶混交林, 气候温暖较湿润; 18.5~16ka BP的植被类型与上一阶段相似, 反映气候温暖但比较干旱, 一定程度上反映了东亚夏季风的衰弱; 气候在末次冰消期(15.8~11ka BP)波动频繁, 孢粉组合大致反映暖-较冷-较暖-冷的变化序列, 可分别与15.8~14ka BP的波令-早阿勒罗德暖期(Bølling-early Allerød)、14~12.7ka BP的阿勒罗德间冷期(IACP, Inter-Allerød cold period)、12.7~12ka BP的晚阿勒罗德暖期(late Allerød)、12~11ka BP的新仙女木事件(Younger Dryas)相对应; 11~6ka BP期间, 热带雨林植被迅速扩展指示了全新世大暖期的到来, 气候温暖湿润; 热带雨林在8.4ka BP急速萎缩, 可能指示了湖光岩地区所记录到的冰后期最强的降温事件; 木本与草本植物比值在中晚全新世下降, 预示了气候的衰变, 这可能与夏季风的减弱有关; 2ka BP至今的孢粉记录则主要受到人类活动的影响(孟玉婷, 2015; Meng等, 2007).

在西南地区, 星云湖地区孢粉和炭屑记录反映松林在18.5~11.5ka BP期间退缩, 常绿阔叶林扩张, 中山山地落叶阔叶成分增加并有零星铁杉成分, 林火较少; 松林在11.5~5.3ka BP再次显著退缩, 常绿阔叶林扩张, 中山山地落叶阔叶林发育, 铁杉属植物消失; 5.3~2ka BP, 受气候变化与人类活动双重影响, 松林扩张而阔叶林退缩, 落叶阔叶成分减少, 地方火事件迅速增加. 反映研究区西南季风在18.5~11.5ka BP增强, 11.5~5.3ka BP为西南季风强盛期, 5.3ka BP以来季风强度减弱的变化过程(纪明, 2013).

尽管人类活动, 包括可能的稻作驯化在全新世初期和早期就有记载, 但是这些活动最初对原始植被的影响很小, 一般在自然剖面的孢粉组合中很少有显示. 因此, 早期的稻作活动我们大多只是通过考古点剖面的记录获得. 如在稻作早期耕种区, 太湖平原西北部卜弋桥ZK01钻孔剖面的孢粉记录直到3.9ka BP后才反映出人类活动对原始林的大规模扰动和破坏(舒军

武等, 2007a). 虽然人类活动对植被的影响因地而异, 但一般在长江中下游地区较研究区其他地区要早, 影响也更加明显.

另外在长江下游和三角洲地区, 海平面变化对植被的分布也有一定的影响, 如我们在东钱湖、白马湖和湘湖都记录到了早全新世的大规模海侵. 白马湖23.5~13m段有丰富的硅藻分布, 化石表明8.6ka BP以前, 白马湖沉积物硅藻主要种以淡水为主, 其他种类的硅藻只有少量的沿岸种, 表明当时海平面较低, 研究区为典型的淡水藻型湖泊; 8.6~8.5ka BP期间, 淡水种含量相对减少, 而沿岸种数量明显持续上升, 增幅明显, 表明白马湖地区开始受到海水的影响, 且气候明显变暖; 8.5~8.2ka BP期间, 淡水种含量显著减少, 而沿岸种、浅海种, 以及海水种为主的海水种含量显著增加, 反映白马湖受海水入侵的影响更加明显, 可能暗示了该地区全新世大暖期的开始(吴燕妮等, 2016).

6 结论与展望

根据已有和新增的孢粉数据, 我们对中国南方约2万年以来植被进行了初步重建, 分别给出18、9和6ka BP前后的植被分区图和各区域植物的分布特征, 主要得出下列结论.

(1) 中国南方植被自约2万年以来的变化规律, 总体上与末次盛冰期后全球气候变化过程相吻合, 18ka BP前后的温带植被可以向南延伸到现在的南亚热带区, 反映当时气候虽然已开始回暖, 但植被性质多少还保留了部分前期冰期气候特征.

(2) 研究区全新世大暖期期间的植被特征明显, 9和6ka BP植被的特征颇为相似, 一方面反映了当时全球气候变暖的总体发展趋势, 另一方面中国南方还受到东南季风和西南季风的影响. 推测9ka BP以来长期的强季风气候, 可能是主导当时植被分布及其与现在逐步趋同的主要原因.

(3) 高分辨孢粉研究表明, 一些末次盛冰期以来的气候事件虽然在部分地层剖面中有所显示, 但对当地植被的总体性质影响有限. 研究区植被除受到全球性气候变化的制约外, 季风气候的演化与发展同样构成重要的影响.

(4) 人类活动在9和6ka BP植被图中反映不明显, 说明早期农作活动对原始植被影响较小. 人类活动对植被的影响, 一般在长江中下游地区比研究区其他地区要早, 影响也更加明显.

(5) 全新世大暖期海平面的上升对当时植被的分布可能也构成一定的影响, 如我们在东钱湖、白马湖和湘湖都记录到了早全新世大规模的海侵事件.

文中给出的中国南方晚更新世约2万年以来不同时段的植被分布图和植被分布和发展规律, 只是一个初步的框架. 鉴于研究区广阔的区域范围、西南地区错综复杂的植物生境, 以及有限的一手资料, 我们的工作还需要有更多后期工作进行检验和充实.

参考文献

陈佩英, 周启永, 林树基, 乔玉楼, 孙彦敏. 1992. 贵州梵净山九龙池一万年来的植被和气候变化. 贵州地质, 9: 167–175

侯学煜. 1988. 中国自然地理, 植物地理(下册)(中国植被地理). 北京: 科学出版社. 1–318

纪明. 2013. 滇中星云湖记录的52ka以来植被演替与古气候变迁. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–128

李旭, 刘金陵. 1988. 四川西昌螺髻山全新世植被与环境变化. 地理学报, 43: 44–51

李杰, 郑卓, Rachid C, 杨士雄, 黄康有. 2013. 神农架大九湖四万年以来的植被与气候变化. 地理学报, 68: 69–81

吕厚远, 刘嘉麒, 储国强, 顾兆炎, Negendank J, Schettler G, Mingram J. 2003. 末次冰期以来湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录及古环境变化. 古生物学报, 42: 284–291

孟玉婷. 2015. 华南湖光岩地区晚更新世以来的孢粉组合及其环境意义. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–116

孟玉婷, 王伟铭, 李保华, 丁金龙. 2014. 长江三角洲锦溪地区全新世气候适宜期孢粉组合及其环境意义. 古生物学报, 53: 201–209

龙瑞华, 李百福, Brenner M, 宋学良. 1991. 云南中部杞麓湖地区晚更新世-全新世植被研究. 云南地质, 10: 105–118

沈才明, 王开发, 陈培红. 1989. 珠江三角洲第四纪晚期孢粉组合. 热带海洋, 8: 61–71

舒军武, 王伟铭, 陈炜. 2007a. 太湖平原西北部全新世以来植被与环境变化. 微体古生物学报, 24: 210–221

舒军武, 王伟铭, 王爱根. 2007b. 江苏宜兴龙池山现代植物表土孢粉的初步研究. 古生物学报, 46: 340–346

舒军武, 王希华, 秦际威, 王伟铭. 2010. 浙江宁波天童山国家森林公园表土花粉初步分析. 微体古生物学报, 27: 253–262

唐领余. 1992. 云南勐海地区四万年以来植被史与气候. 微体古生物学报, 9: 433–455

童国榜, 吴瑞金, 吴艳宏, 石英, 刘志明, 李月丛. 2000. 四川冕宁地区一万年来的植被与环境演变. 微体古生物学报, 17: 470–477

吴燕妮, 李冬玲, 沙龙滨, 舒军武, 王伟铭, 徐晓群. 2016. 浙江白马湖

地区硅藻记录的早中全新世海平面上升事件. 古生物学报, 55: 495–507
肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 王苏民, 童国榜. 2007. 云南鹤庆盆地2.780~1.802Ma BP期间的古植被和古气候. 第四纪研究, 27: 417–426
萧家仪, 商志远, 舒强, 尹建吉, 吴小爽. 2018. 中国南方内陆山地末次冰盛期植被特征及古环境意义. 中国科学: 地球科学, 48: 651–660
羊向东, 王苏民, 童国榜, 吴敬禄, 蒋雪中. 1998. 云南鹤庆古湖晚更新世的孢粉记录及其古气候学意义. 第四纪研究, 11: 335–343
郑卓, 王建华, 王斌, 刘春莲, 邹和平, 张华, 邓韫, 白雁. 2003. 海南岛双池玛珥湖全新世高分辨率环境纪录. 科学通报, 48: 282–286
王伟铭, 舒军武, 陈炜, 丁金龙. 2010. 长江三角洲地区全新世环境变化与人类活动的影响. 第四纪研究, 30: 233–244
吴征镒. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社. 1–1071
许雪氓, Chang W Y B, 刘金陵. 1996. 11000年以来太湖地区的植被与气候变化. 古生物学报, 35: 175–186
沈吉, 肖霞云. 2018. 2万年来南亚季风演化历史. 第四纪研究, 38: 799–820
刘金陵, 叶萍宜. 1977. 上海、浙江某些地区第四纪孢粉组合及其在地层和古气候上的意义. 古生物学报, 16: 1–10
高凤岐. 1988. 利川南坪泥炭形成的环境分析. 地理研究, 7: 59–66
肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 童国榜. 2006. 云南鹤庆盆地中更新世以来的孢粉记录及其植被与气候变化. 湖泊科学, 18: 369–376
蒋雪中, 王苏民, 羊向东. 1998. 云南鹤庆盆地30ka以来的古气候与环境变迁. 湖泊科学, 10: 10–16
Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, Bigler M, Biscaye P, Caillon N, Chappellaz J, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Fischer H, Flückiger J, Fritzsche D, Fujii Y, Goto-Azuma K, Grønvold K, Gundestrup N S, Hansson M, Huber C, Hvidberg C S, Johnsen S J, Jonsell U, Jouzel J, Kipfstuhl S, Landais A, Leuenberger M, Lorrain R, Masson-Delmotte V, Miller H, Motoyama H, Narita H, Popp T, Rasmussen S O, Raynaud D, Rothlisberger R, Ruth U, Samyn D, Schwander J, Shoji H, Siggard-Andersen M L, Steffensen J P, Stocker T, Sveinbjörnsdóttir A E, Svensson A, Takata M, Tison J L, Thorsteinsson T, Watanabe O, Wilhelms F, White J W C, White J W C. 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature, 431: 147–151
Chen W, Wang W M, Dai X R. 2009. Holocene vegetation history with implications of human impact in the Lake Chaohu area, Anhui Province, East China. Veget Hist Archaeobot, 18: 137–146
Chen X M, Chen F H, Zhou A F, Huang X Z, Tang L Y, Wu D, Zhang X J, Yu J Q. 2014. Vegetation history, climatic changes and Indian summer monsoon evolution during the Last Glaciation (36400–13400 cal yr BP) documented by sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 410: 179–189
Cook C G, Jones R T, Langdon P G, Leng M J, Zhang E. 2011. New insights on Late Quaternary Asian palaeomonsoon variability and the timing of the Last Glacial Maximum in southwestern China. Quat Sci Rev, 30: 808–820
Jarvis D I. 1993. Pollen evidence of changing Holocene Monsoon climate in Sichuan Province, China. Quat Res, 39: 325–337
Jarvis D I, Clay-Poole S T. 1992. A comparison of modern pollen rain and vegetation in southwestern Sichuan Province, China. Rev Palaeobot Palynol, 75: 239–258
Li C H, Li Y X. 2015. Study of modern pollen and stomata from surficial lacustrine sediments from the eastern edge of Tibetan Plateau, China. Rev Palaeobot Palynol, 221: 184–191
Li H C, Liew P M, Seki O, Kuo T S, Kawamura K, Wang L C, Lee T Q. 2013. Paleoclimate variability in central Taiwan during the past 30 Kyrs reflected by pollen, $\delta^{13}C_{TOC}$, and *n*-alkane-δD records in a peat sequence from Toushe Basin. J Asian Earth Sci, 69: 166–176
Liew P M, Huang S Y, Kuo C M. 2006. Pollen stratigraphy, vegetation and environment of the last glacial and Holocene—A record from Toushe Basin, central Taiwan. Quat Int, 147: 16–33
Lin S M, Qiao Y L, Walker D. 1986. Late Pleistocene and Holocene vegetation history at Xi Hu, Er Yuan, Yunnan Province, Southwest China. J Biogeogr, 13: 419–440
Meng Y T, Wang W M, Hu J F, Zhang J X, Lai Y J. 2007. Vegetation and climate changes over the last 30000 years on the Leizhou Peninsula, southern China, inferred from the pollen record of Huguangyan Maar Lake. Boreas, 46: 525–540
Shu J W, Wang W M, Jiang L P. 2012. Did alder (*Alnus*) fires trigger rice cultivation in the lower reaches of the Yangtze River, East China? Palaeoworld, 21: 69–73
Sun X J, Li X, Beug H J. 1999. Pollen distribution in hemipelagic surface sediments of the South China Sea and its relation to modern vegetation distribution. Mar Geol, 156: 211–226
Wang W M, Ding J L, Shu J W, Chen W. 2010. Exploration of early rice farming in China. Quat Int, 227: 22–28
Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Yang X D, Han Y, Zhang E L, Wang S M. 2014a. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China. Quat Sci Rev, 86: 35–48
Xiao X Y, Haberle S G, Yang X D, Shen J, Han Y, Wang S M. 2014b. New evidence on deglacial climatic variability from an alpine lacustrine record in northwestern Yunnan Province, southwestern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 406: 9–21
Xiao X Y, Shen J, Haberle S G, Han Y, Xue B, Zhang E L, Wang S M, Tang G B. 2015. Vegetation, fire, and climate history during the last 18,500 cal a BP in south-western Yunnan Province, China. J Quat

Sci, 30: 859–869

Xiao X Y, Shen J, Wang S M. 2011. Spatial variation of modern pollen from surface lake sediments in Yunnan and southwestern Sichuan Province, China. Rev Palaeobot Palynol, 165: 224–234

Xu Q H, Zhang S R, Gaillard M J, Li M Y, Cao X Y, Tian F, Li F R. 2016. Studies of modern pollen assemblages for pollen dispersal-deposition- preservation process understanding and for pollen-based reconstructions of past vegetation, climate, and human impact: A review based on case studies in China. Quat Sci Rev, 149: 151–166

Yu G, Chen X, Ni J, Cheddadi R, Guiot J, Han H, Harrison S P, Huang C, Ke M, Kong Z, Li S, Li W, Liew P, Liu G, Liu J, Liu Q, Liu K B, Prentice I C, Qui W, Ren G, Song C, Sugita S, Sun X, Tang L, Van C E, Xia Y, Xu Q, Yan S, Yang X, Zhao J, Zheng Z. 2000. Palaeovegetation of China: A pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. J Biogeogr, 27: 635–664

Yu G, Prentice I C, Harrison S P, Sun X. 1998. Pollen-based biome reconstructions for China at 0 and 6000 years. J Biogeogr, 25: 1055–1069

Yue Y F, Zheng Z, Huang K Y, Chevalier M, Chase B M, Carré M, Ledru M P, Cheddadi R. 2012. A continuous record of vegetation and climate change over the past 50000 years in the Fujian Province of eastern subtropical China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 365-366: 115–123

Zheng Z, Lei Z Q. 1999. A 400,000 year record of vegetational and climatic changes from a volcanic basin, Leizhou Peninsula, southern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 145: 339–362

Zheng Z, Li Q. 2000. Vegetation, climate, and sea level in the past 55000 years, Hanjiang Delta, Southeastern China. Quat Res, 53: 330–340

Zheng Z, Wei J, Huang K, Xu Q, Lu H, Tarasov P, Luo C, Beaudouin C, Deng Y, Pan A, Zheng Y, Luo Y, Nakagawa T, Li C, Yang S, Peng H, Cheddadi R. 2014. East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. J Biogeogr, 41: 1819–1832

(责任编委: 赵艳)