



青藏高原第四纪孢粉研究五十年

唐领余^{1,2}, 沈才明^{1*}, 吕厚远^{3,5,6}, 李春海⁴, 马庆峰⁷

1. 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南师范大学地理学部, 昆明 650500;
2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
5. 中国科学院青藏高原研究所地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
6. 中国科学院大学, 北京 101408;
7. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: cmshen@hotmail.com

收稿日期: 2020-12-19; 收修改稿日期: 2021-04-21; 接受日期: 2021-06-02; 网络版发表日期: 2021-09-29

云南省基础研究专项-重点项目(编号: 202101AS070006)、云南省高端人才引进项目(编号: 2013HA024)、国家自然科学基金项目(批准号: 41372191、42067061)和湖南省教育厅重点项目(编号: 20A400)资助

摘要 20世纪60年代, 因应西部经济建设的需要催生了青藏高原第四纪孢粉研究. 最初为探索冰期(冷期)/间冰期(暖期)孢粉组合、植被与气候变化规律, 且首次在青藏高原主体钻取200多米第四纪湖相沉积岩芯进行孢粉研究. 20世纪70年代, 第一次青藏高原科学考察开始了高山雪冰孢粉研究; 80年代起, 开展了中法、中德、中澳和中美国际合作, 标志着中国第四纪孢粉学界与国际接轨, 一些第四纪孢粉研究的新方法逐渐得到不断的推广和应用, 使中国第四纪孢粉学开始了从定性到定量重建古植被与古气候的探索; 90年代后, 众多孢粉学者在青藏高原的60多个湖泊/剖面及高山冰川研究点, 开展了以全球变化为重点的大范围第四纪孢粉研究, 探讨更新世以来高原植被的时空变化及高原气候与环境的演变. 半个多世纪过去了, 青藏高原第四纪孢粉研究, 为中国第四纪孢粉数据库的建立及高原末次盛冰期以来植被和气候演变过程的研究作出了贡献. 已有的花粉记录揭示了末次盛冰期以来青藏高原植被的时空分布, 表现为森林、草甸、草原和荒漠在末次盛冰期、冰消期和全新世适宜期等不同时段的扩张和收缩. 古植被反映的末次盛冰期以来古季风经历了弱→增强→强盛→减弱但仍活跃→萎缩的变化, 主要受太阳辐射的影响.

关键词 青藏高原, 湖泊钻孔, 冰芯, 第四纪孢粉, 古植被, 古气候

1 前言

青藏高原第四纪孢粉研究, 因应西部经济建设的需要开始于20世纪60年代初. 半个世纪过去, 研究工

作从无到有, 研究对象从沉积剖面、湖泊钻孔到冰芯, 研究手段从定性到定量, 经历了艰苦的探索过程, 积累了一定的现代和化石花粉数据, 初步重建了末次盛冰期以来植被和气候演变过程. 很显然, 青藏高原第

中文引用格式: 唐领余, 沈才明, 吕厚远, 李春海, 马庆峰. 2021. 青藏高原第四纪孢粉研究五十年. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2015–2034, doi: [10.1360/SSTe-2020-0361](https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0361)

英文引用格式: Tang L, Shen C, Lu H, Li C, Ma Q. Fifty years of Quaternary palynology in the Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 64(11): 1825–1843, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9802-8>

四纪孢粉研究远远没有结束, 仍需与其他学科密切配合就植被、气候、生态、环境等议题作更广泛、深入的研究. 在第二次青藏高原综合科学考察开始之际, 适逢中国孢粉学分会成立四十周年, 回顾青藏高原第四纪孢粉研究走过的路, 综述以前所作的工作, 我们期待给以后的工作提供一些经验与教训, 将青藏高原第四纪孢粉研究进一步深入提高.

2 困难中起步: 探索冰期(冷期)/间冰期(暖期)孢粉组合特征

第四纪孢粉研究始于瑞典人 von Post(1916)开创的第四纪泥炭“花粉分析”(Pollen analysis). 中国起步较晚, 直到20世纪50年代末才开展这方面的研究(徐仁, 1956; 周昆叔等, 1960). 也是在20世纪60年代初, 西部经济建设的需要催生了青藏高原第四纪孢粉研究. 1963年施雅风先生组织人员在兰州冰川冻土研究所筹建孢粉实验室, 并开始在青藏公路沿线从昆仑山垭口到安多(500km)多年冻土区进行第四纪地质和孢粉野外考察. 此次考察先后在昆仑山垭口湖相沉积剖面(厚200m)以及在三江源头的楚马尔河钻取的203m第四纪湖相沉积岩芯采样, 获得上千件第四纪孢粉样品, 但要完成这些样品的孢粉分析却是困难重重. 当时国家处于经济困难时期, 科研经费不足, 实验室建设缓慢, 加上青藏高原第四纪孢粉资料奇缺, 中国西北地区第四纪不同阶段孢粉组合尚未有人研究, 因而使这项研究拖延了很长时间. 1965年, 关于青海湖第四纪孢粉组合的文章在《地理学报》上发表(杨惠秋和江德昕, 1965). 此文应是中国青藏高原地区最早的第四纪孢粉论文, 为上述剖面和钻孔的孢粉研究提供了重要的参考资料. 在北京植物所孢粉学前辈徐仁、王伏雄、张玉龙、席以珍、孙湘君以及孔昭宸等专家的指导下, 经过近十年的努力, 终于在1975年完成了青藏高原主体的首次第四纪孢粉研究(唐领余和王睿, 1976a, 1976b).

湖相沉积剖面和钻孔样花粉分析的结果表明, 云杉属(*Picea*)、桦木属(*Betula*)、榆属(*Ulmus*)和榛属(*Corylus*)占优势的孢粉组合反映了森林植被, 指示温暖的间冰期(暖期)气候环境; 藜科(*Chenopodiaceae*)、蒿属(*Artemisia*)、麻黄属(*Ephedra*)和禾本科(*Poaceae*)占优势的孢粉组合反映了荒漠半荒漠草原植被, 指示

冷干的冰期(冷期)气候环境(唐领余和王睿, 1976a, 1976b). 由于当时对于中国第四纪冰期(冷期)和间冰期(暖期)孢粉组合的认识刚刚开始, 也缺少准确的年代测试数据, 施雅风先生对此结果作了补充: “云杉层是作为间冰期堆积还是作为冰期堆积仍有讨论的余地. 古代云杉生长所需的温度条件和昆仑山垭口现代温度比较, 云杉作为间冰期堆积比较适合, 但是云杉层上覆的和下垫的藜科、蒿属、麻黄属组合所反映的荒漠草原气候, 只是代表干旱环境, 缺乏喜冷植物与云杉的暖湿环境相对立. 根据国际上一般把第四纪冰期与雨期对比, 间冰期与间雨期对比通则, 除非我们有特殊理由说明青藏高原存在着间冰期降水较冰期为多的情况, 也就不排除云杉属是冰期堆积的可能”(唐领余和王睿, 1976a).

有关青藏高原冰期/间冰期孢粉组合特征的讨论到20世纪80年代一直没有停止. 从昆仑山-唐古拉山(五道梁和沱沱河钻孔)的孢粉组合看, 第四纪冰期气温下降的同时带来干旱, 植被由旱生、耐寒的草本和灌丛所代替, 间冰期时的主要植物云杉和松(*Pinus*)等在山谷中保留下来. 总体认为, 高原气候的冷暖波动体现在干旱草原和森林-灌丛草原的交替变化(孔昭宸等, 1981). 青海湖东缘哈达湾组和二郎尖组上部(中更新世中晚期)孢粉组合以云杉占优势, 可能反映气候变冷, 而二郎尖组下部孢粉组合除云杉外, 还出现松属、柏科(*Cupressaceae*)、柳属(*Salix*)、桤木属(*Alnus*)、栎属(*Quercus*)及禾本科、蔷薇科(*Rosaceae*)、蒿属等, 反映温暖湿润的间冰期气候(杨惠秋和江德昕, 1965). 青海湖湖芯钻孔揭示, 11~10ka BP(ka BP= ^{14}C ka BP, 未校正的 ^{14}C 年代)的孢粉组合是以云杉属、松属、桦木属为主的针阔叶混交林, 指示气候温暖湿润; 10ka BP以后变成以禾本科、蒿属、藜科和白刺属(*Nitraria*)等组成的草原植被, 反映气候变冷(杜乃秋等, 1989). 青海柴达木盆地西部晚更新世暖期的孢粉植物群是以松属为主的针阔叶疏林和灌丛植被, 而冷期是以麻黄属为主的灌丛-荒漠草原植被(沈振区等, 1990). 察尔汗盐湖距今25ka沉积中孢粉以藜科为主, 呈现盐生灌丛景观, 20~15ka BP以麻黄属、藜科、蒿属和白刺属为主的荒漠植被, 均反映干冷气候(杜乃秋和孔昭宸, 1983). 潘保田和徐叔鹰(1989)认为青海东部达里加山北部末次冰期早期(70~48ka BP)气候冷干, 末次盛冰期(23~14ka BP)西宁、贵德、循化和临夏的古土壤中

孢粉反映干草原环境, 到早全新世(12~8.5ka BP)玛多、兴海和共和等地孢粉中出现杨属(*Populus*)和柳属, 呈现林地草甸景观。Li等(1988)认为临夏北塬末次冰期孢粉谱是以云杉属、冷杉属(*Abies*)和榆属花粉为主。青海循化距今5.2ka左右古土壤中孢粉组合反映为暗针叶林植被, 指示冷湿气候; 而距今3.4ka前后古土壤中孢粉谱呈现稀树灌丛-草原的特点, 反映温和湿润气候(唐领余等, 1990)。若尔盖红原、玛曲及西藏当雄等地早全新世泥炭层孢粉以莎草科(*Cyperaceae*)为主, 形成高山草甸植被, 反映冷湿气候; 中全新世时高山草甸植被中出现小片灌丛, 指示暖湿气候(汪佩芳等, 1981; 王曼华, 1987; 王富葆等, 1996)。

根据上述研究, 青藏高原东北部冰期(冷期)/间冰期(暖期)孢粉组合特征可归纳为: 冰期(冷期)的孢粉组合为*Chenopodiaceae-Artemisia-Ephedra*(*Poaceae*), 反映寒冷干燥的气候环境; 间冰期(暖期)的孢粉组合为*Betula-Quercus-Rosaceae(Ulmus)-Poaceae(Artemisia)*, 反映温暖湿润的气候环境; 以云杉为主的针叶林反映的是冰期/间冰期过渡阶段或冰期的间冰阶较为温和湿润的气候环境。这是20世纪90年代前的阶段性认识。20世纪90年代后, 众多孢粉学者在青藏高原的各地区开展了大范围的第四纪孢粉研究(表1; 图1), 在青藏高原古植被、古气候研究等诸多方面取得了重大进展。

需要指出的是, 在青藏高原孢粉研究的起步阶段, 参与研究的人员稀少, 经费缺乏, 研究手段相对落后,

孢粉样品采集零散、不系统且样品间距大, 具体的测年数据少或测年不精确, 孢粉统计量较少, 主要采用孢粉百分比数据作定性讨论, 少采用数值方法作定量研究, 诸多因素导致了此阶段的高原第四纪孢粉研究是粗放型的, 得出的结论也是阶段性的认识。

3 携手中跋涉: 中西方学者合作探讨青藏高原古植被与古气候

由刘东生先生和沃克教授(Dr. Donald Walker, Professor at the Australian National University)牵头的中国科学院与澳大利亚国立大学第四纪合作研究项目始于1981年, 研究成果分别于1986和1987年在*Journal of Biogeography*和《中国-澳大利亚第四纪学术讨论会论文集》上发表(Walker, 1986; 中国科学院中澳第四纪合作研究组, 1987)。这次中国-澳大利亚第四纪合作, 对青藏高原及其周边地区和中国第四纪孢粉研究具有很大的推动作用, 标志着中国第四纪孢粉学界与国际接轨的开始。随后于1988年由孙湘君教授组织在青岛开办了第四纪孢粉研究青年学习班, 由沃克教授和克肖教授(Dr. Peter Kershaw, Professor at Monash University)主讲, 对中国年轻一代的孢粉工作者具有一定的影响, 部分当年的年轻人成为了青藏高原第四纪孢粉研究的主力军。一些第四纪孢粉研究的新方法逐渐得到不断的推广和应用, 中国第四纪孢粉学的工作渐

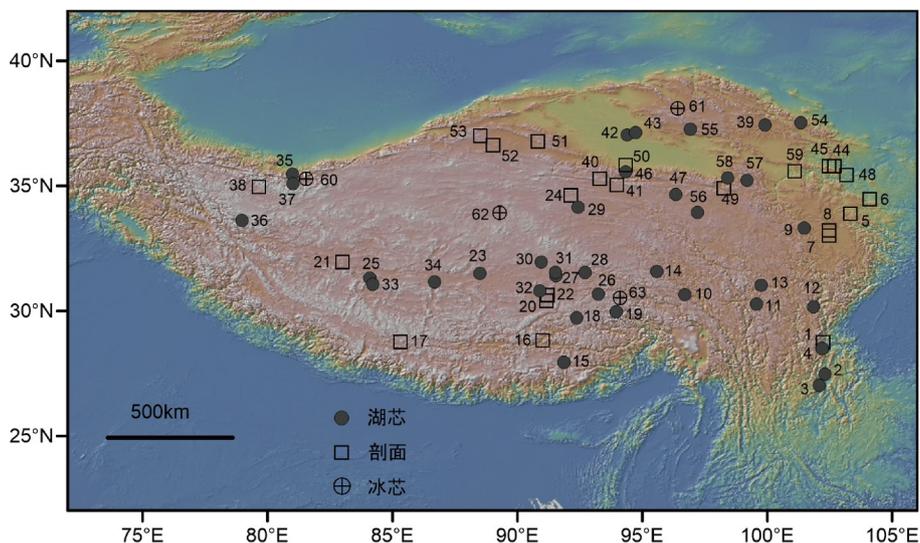


图1 青藏高原第四纪孢粉代表性研究点分布示意图

表 1 青藏高原第四纪孢粉代表性研究点

位置	编号	采样点位置	经纬度	海拔(m a.s.l.)	年代区间 (ka BP)	¹⁴ C测年数	参考文献
东部 湖芯(剖面)	1	彝海	28°44'N, 102°14'E	2250	4.0~6.1	5	刘和林和王德银, 1984
	2	大海子	27°30'N, 102°20'E	3660	0~7	1	李旭和刘金陵, 1988
	3	红海	27°05'N, 102°04'E	3660	0~12	3	李旭和刘金陵, 1988
	4	杀野马湖	28°35'N, 102°13'E	2453	0~11	5	Jarvis, 1993
	5	若尔盖	33°57'N, 103°21'E	3400	0~1740	19	刘光琇等, 1995; Shen C M等, 2005 Zhao等, 2020; 梁琛等, 2020
	6	年保玉则山	33°21'N, 100°24'E	4360	0~8	21	Schlütz和Lehmkuhl, 2009
	7	红原	33°05'N, 102°30'E	3492	0~12	9	王富葆等, 1996
			32°46'N, 102°31'E	3506	0~13.8	32	Zhou等, 2010
	8	瓦松	33°15'N, 102°30'E	3490	0~30	9	王富葆等, 1996
	9	希门错	33°23'N, 101°28'E	4020	0~2	0	羊向东, 1996
			33°23'N, 101°06'E	4000	0~19	24	Herzschuh等, 2014
	10	仁错	30°43'N, 96°40'E	4450	0~18.8	7	唐领余等, 1998, 2004
	11	义墩湖	30°18'N, 99°33'E	4500	0~13.3	3	Shen等, 2006, 2008b
	12	木格错	30°13'N, 101°83'E	3780	0~12.2	8	Ni等, 2019
13	拉龙错	31°06'N, 99°45'E	4200	0.1~17.7	11	Kramer等, 2010a, 2010b	
14	布托湖	31°36'N, 95°35'E	4682	1.8~11.1	3	Zhang等, 2015	
南部湖芯(剖面)	15	拿日雍错	28°00'N, 91°50'E	4760	约2~7	2	黄赐璇等, 1983
	16	沉错	28°50'N, 91°00'E	4450	约2~8	1	黄赐璇等, 1983
			28°58'N, 90°29'E	4420	3.2~10.7	8	Lu等, 2011
	17	佩枯错	28°50'N, 85°20'E	4590	5~12.5	3	黄翡, 2000
	18	海登湖	29°48'N, 92°22'E	4980	0~13	7	唐领余等, 2000a, 2004
19	巴松错	30°01'N, 93°55'E	3476	0~0.9	6	Li等, 2017	
中部湖芯(剖面)	20	当雄	30°31'N, 91°10'E	4370	0~10	3	汪佩芳等, 1981
	21	扎仑茶卡	32°00'N, 83°00'E	4400	0~5	1	黄赐璇等, 1983
	22	措勒	30°40'N, 91°10'E	4675	约5~8	1	黄赐璇等, 1983
	23	色林错	31°34'N, 88°31'E	4530	0~11	4	孙湘君等, 1993
	24	苟弄错	34°38'N, 92°09'E	4670	0~20	2	山发寿等, 1995
	25	扎布耶茶卡	31°21'N, 84°04'E	4421	0~36	3	萧家仪等, 1996
	26	泽拉错	30°45'N, 93°15'E	4400	0~5	2	唐领余等, 1998
	27	错鄂	31°31'N, 91°30'E	4510	0~2800	12	吕厚远等, 2001; Shen等, 2008a
	28	阿洪错	31°37'N, 92°42'E	4580	4~9.2	52	Shen, 2003; 唐领余等, 2009b
	29	唐古拉山垭口	34°10'N, 92°25'E	5200	0.4~4.2	4	唐领余等, 2009b, 2016
	30	兹格塘错	32°00'N, 90°54'E	4560	0~10.5	5	Herzschuh等, 2006
	31	徐果错	31°57'N, 90°20'E	4595	0.1~8.3	4	Shen, 2003
	32	纳木错	30°50'N, 90°54'E	4718	2~24	36	Li等, 2011; Zhu等, 2015
			30°55'N, 90°53'E	4730	0~120	9	吴中海等, 2004; Herrmann等, 2010
	33	塔若错	31°08'N, 84°13'E	4566	0~10.2	12	Ma等, 2014
34	当惹雍错	31°14'N, 86°43'E	4545	0~17.5	28	Ma等, 2019	

(续表1)

位置	编号	采样点位置	经纬度	海拔(m a.s.l.)	年代区间(ka BP)	¹⁴ C测年数	参考文献
西部湖芯(剖面)	35	松希错	35°30'N, 81°00'E	5058	0~14.8	6	Van Campo和Gasse, 1993
	36	班公错	33°40'N, 79°00'E	4241	0~10.8	35	Van Campo等, 1996
	37	龙木错	35°10'N, 81°00'E	5008	约2~5	1	黄赐璇等, 1996
	38	甜水海	35°01'N, 79°40'E	4597	17~240	4	刘光琇等, 1998
北部湖芯(剖面)	39	青海湖	37°28'N, 99°56'E	3196	更新世	0	杨惠秋和江德昕, 1965
			36°33'N, 100°47'E	3196	0~11	3	杜乃秋等, 1989
			36°42'N, 100°36'E	3200	0~16	6	刘兴起等, 2002; Shen J等, 2005
	40	楚玛尔河	35°20'N, 93°15'E	4400	更新世	0	唐领余和王睿, 1976b
	41	昆仑山垭口	35°05'N, 94°00'E	5000	更新世	0	唐领余和王睿, 1976a
	42	察尔汗盐湖	37°05'N, 94°25'E	2680	4~31	6	杜乃秋和孔昭宸, 1983
	43	别勒湖	37°10'N, 94°45'E	2680	更新世	0	杜乃秋和孔昭宸, 1983
	44	循化	35°50'N, 102°40'E	2530	约1~8	2	唐领余等, 1990
	45	孟达山	35°50'N, 102°30'E	2795	约1~4	0	唐领余等, 1990
	46	布南湖	35°40'N, 94°20'E	4876	更新世	0	山发寿等, 1995
	47	不冻泉	34°13'N, 93°56'E	4854	25~700	0	刘晓丽, 2010
	48	源堡	35°30'N, 103°10'E	2040	0~150	0	马玉贞等, 1995
	49	玛多	34°58'N, 98°15'E	4220	0~10.4	2	张玉芳等, 1995
	50	小南川	35°50'N, 94°21'E	4500	0~44	3	许清海等, 1996
	51	小沙子湖	36°47'N, 90°50'E	4106	约5~11	2	黄赐璇等, 1996
	52	贝力克库勒	36°40'N, 89°00'E	4680	约2~13	2	黄赐璇等, 1996
	53	阿其克库勒	37°03'N, 88°30'E	4250	约4~7	1	黄赐璇等, 1996
	54	乱海子	37°35'N, 101°21'E	3200	0~45	10	Herzschuh等, 2005
	55	克鲁克湖	37°17'N, 96°54'E	2817	0~12.7	6	Zhao等, 2007
	56	寇察湖	34°00'N, 97°12'E	4540	0~14.9	5	Herzschuh等, 2009
57	苦海	35°18'N, 99°12'E	4150	0.2~22	17	Wischnewski等, 2011	
58	冬给措纳	35°21'N, 98°26'E	4090	1.1~19	19	Wang Y等, 2014	
59	开颜剖面	35°39'N, 101°06'E	3780	0~10	11	Miao等, 2015	
冰帽	60	古里雅	35°17'N, 81°29'E	6710	0~15.9		Yao, 2000;
	61	敦德	38°06'N, 96°24'E	5325	0~11		Liu等, 1998
	62	普若岗日	33°53'N, 89°16'E	5900	约0.05~0.1		Yang等, 2008; 唐领余等, 2009a
	63	若果冰川	30°30'N, 94°05'E	5100	现代		唐领余等, 1983

渐在研究精度上有了质的提高。

20世纪80年代末, 中法科学家合作对青藏高原西北部进行了第四纪湖泊方面的研究。中方参与者主要是中国科学院地理研究所李炳元和黄赐璇研究员及南京大学的王富葆教授等, 法方参与者主要是巴黎大学加斯教授(Dr. François Gasse)和鲁米尼科学学院(Faculté des Sciences de Luminy)第四纪地质实验室的范

坎波教授(Dr. Elise Van Campo)。他们的一系列成果(如 Gasse等, 1991; Van Campo和Gasse, 1993; 黄赐璇等, 1996)给青藏高原, 尤其是高原西北部晚第四纪孢粉研究带来比较大的影响。他们首次在青藏高原使用了A/C(*Artemisia/Chenopodiaceae*)比作为湿度/干燥度的代用指标。

中美合作开始于1994年, 在中美两国4项自然科学

基金的支持下, 由中国科学院南京地质古生物研究所唐领余研究员领衔的第四纪孢粉组与美国路易斯安那州立大学(Louisiana State University)廖淦标教授(Dr. Kam-biu Liu)和亚利桑那大学(the University of Arizona)欧弗佩克教授(Dr. Jonathan T. Overpeck)领衔的古季风研究团队合作了10多年, 先后4次(20人次)进藏考察植被、采集表土以及对9个中型湖泊钻取岩芯, 根据湖泊沉积物研究末次冰消期和全新世青藏高原植被史和西南季风演变史(Overpeck等, 2005), 强调古植被与古气候的定量重建(Shen, 2003; 唐领余等, 2004, 2009b; Shen等, 2006, 2008a, 2008b)和多指标的综合研究(Morrill等, 2006).

中德合作(2008~2015)是在中国科学院战略性先导科技专项(B类)、国家自然科学基金委项目和德国DFG优先计划的资助下进行, 中国科学院青藏高原研究所朱立平研究员与德国耶拿大学穆斯巴赫教授(Dr. Roland Mäusbacher)领衔的中德团队成员吕新苗、马庆峰等对青藏高原纳木错、当惹雍错和塔若错等大湖进行了详细的考察和湖泊沉积岩芯的孢粉研究, 揭示了过去2万年以来西南季风的演化及季风与西风在青藏高原相互作用的历史(Ma等, 2014, 2019; Zhu等, 2015).

在与国外学者的合作研究中, 青藏高原孢粉研究在方法、证据、认识上逐步与国际接轨. 在方法上, 花粉浓度、花粉通量等方法逐渐常态化, 各类气候代用指标如A/C比等及花粉数据的数值分析广泛应用. 证据方面强调多指标的综合研究, 对花粉分析的现代过程对于重建古植被与古气候的重要性的认识逐渐加强.

4 定性到定量: 行进在定量重建古植被与古气候的征途

20世纪60年代初, 古植物学在探讨青藏高原隆升中起过重大作用. 1964年施雅风、刘东生先生等在希夏邦马峰北坡上新世野博康加勒群的下部发现高山栎化石, 推测自上新世以来产高山栎化石的希夏邦马峰北坡至少上升3000m(施雅风和刘东生, 1964; 徐仁等, 1973). 然而, 到了20世纪90年代, 部分中外学者认为以定性的资料作定量的解释不是很科学, 从而对此结论提出了质疑. 由此引起了中国孢粉学者对第四纪花粉分析方法论从定性向定量发展的重视. 中国孢粉学分

会在1988年曾专门召开第四纪孢粉数据的统计分析学习班, 但会上仅介绍国外学者的数据处理简单方法, 并没有中国学者的研究实例. 同年冬, 中国孢粉学会在北京召开孢粉学者筹建中国第四纪孢粉数据库的会议, 会上还请刘东生、施雅风先生和美国廖淦标教授、Dr. Eric Grimm(Tilia软件作者, 伊利诺伊州博物馆研究员)到会指导, 并对全国各大区作了分工, 分别由中国科学院北京植物研究所、中国科学院南京地质古生物研究所和中山大学等单位牵头开展工作. 1991年沈才明和唐领余翻译出版了Birks和Gordon(1985)著的《第四纪花粉分析的数值方法》(*Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis*)一书, 着重介绍了第四纪花粉分析数据的类型和表示方法、处理现代和化石花粉数据的数值方法及对化石花粉数据解释的定量方法. 在多单位开展孢粉数据收集工作的基础上, 于1997年在瑞典召开了中国第四纪孢粉数据库成立会议. 大部分参会中国孢粉学者提供了中国已有的孢粉数据; 会上还邀请了美国、瑞典和法国的第四纪孢粉数据库专家(Drs. Kam-biu Liu, Sandy P. Harrison, Rachid Cheddadi和Joel Guiot)给予指导; 会后根据孢粉数据综合发表了中国中全新世和末次盛冰期的古植被、中国植被模拟及6000年植被制图等多篇文章(例如, 于革等, 1998; 孙湘君等, 1999; Yu等, 2000), 这是中国第四纪孢粉走向定量研究的一大步. 最初的定量研究只是在20世纪80、90年代中国北方(吕厚远, 1989; 沈才明和唐领余, 1992; 宋长青等, 1997)和长江中下游地区(唐领余等, 1993)做了花粉-气候转换函数恢复古气候的尝试, 尚没有应用于青藏高原第四纪花粉研究, 直到20世纪90年代末和21世纪才开始较为广泛的应用(唐领余等, 1999, 2003; Tang等, 2000; Shen, 2003; Shen等, 2006, 2008a; Herzsuh等, 2010; Lu等, 2011; Wang Y等, 2014; Zhang等, 2015; 梁琛等, 2020; Zhao等, 2020). 影响定量重建的一个最主要的原因是现代花粉训练数据库建设的不足. 现代花粉雨的研究是古植被和古气候定量重建的基础, 但在青藏高原孢粉研究的早期, 无相应的研究; 20世纪90年代出现了一些现代花粉雨研究(例如, 黄赐璇等, 1993; 翁成郁等, 1993; 吴玉书和肖家仪, 1995; Cour等, 1999); 到21世纪, 相应研究才广泛开展(例如, Yu等, 2001; Shen等, 2006; Herzsuh等, 2010; Lu等, 2011; Wang Y等, 2014; 梁琛等, 2020).

Shen等(2006)基于227个表土花粉样品探讨了青藏高原现代花粉雨与气候的定量关系, 确定年降雨量和七月均温是影响青藏高原现代花粉雨的气候因子, 建立了它们的转换函数, 定量重建了西藏仁错、海登湖、错鄂和川西义墩湖等湖泊流域末次盛冰期以来的古植被与古气候. 例如, 重建的义墩湖17.3cal. ka BP以来年降水量最大值出现在9.0~7.5cal. ka BP, 比今日高出100~120mm; 七月均温最高出现在6.5cal. ka BP, 比今高1.0~1.2°C(唐领余等, 2004; Shen等, 2006). 此研究使用的现代花粉训练数据主要来自苔藓样本, 分别用了线性和非线性模型来建立花粉-气候转换函数, 得出了较可靠的定量重建; 不足在于现代花粉训练数据主要由沿路采集的现代苔藓样组成, 在空间分布上有很大的局限性, 即缺乏相对均匀的空间分布, 且沉积环境和化石记录不一致, 带来了重建的不确定性. Herzsuh等(2010)基于112个湖泊表层沉积物样品的花粉资料建立了花粉-气候转换函数, 对青藏高原东北部乱海子湖流域进行了古气候定量重建, 结果表明MIS3阶段晚期的气候与现代类似; 末次盛冰期阶段, 年降水量比现代低300mm, 年均温低2°C; 13~7cal. ka BP, 年降水量比现代高70mm, 年均温比现代高0.5°C. 此研究使用的现代花粉训练数据来自湖泊的表层样, 虽然沉积环境和化石记录一致, 但较小的数据集带来较大的不确定性, 限制了其定量重建的应用. Lu等(2011)利用典型对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对青藏高原及其周边地区1202个表土花粉样品分析确定影响青藏高原现代花粉分布的主要环境因子, 定量重建了藏南沉错流域全新世气候变化历史; 10.7~9.0cal. ka BP, 气候暖干, 年均温比现在高0.8°C; 9~6.1cal. ka BP, 气候湿润, 年降水量比现在高30mm; 6.1~3.2cal. ka BP, 气候变干. 此研究使用的现代花粉训练数据来自苔藓和表土, 也存在现代和化石花粉沉积环境不同的问题, 但相对巨大的数据库和多种模型的应用提高了重建的可靠性. Wang Y等(2014)利用53个湖泊的现代花粉资料, 定量重建了高原东北部冬给措纳流域距今19ka以来的降水变化; 结果显示19~18.3cal. ka BP年降水量最低, 13.1~9.5cal. ka BP时期最为湿润, 平均年降水量为334mm. Zhang等(2015)定量重建青藏高原东部布托湖流域全新世年降水量和年均温的变化, 定量重建结果表明, 11.1~8.7cal. ka BP, 气候湿润; 8.7~8cal. ka BP, 气候冷干; 8~6cal. ka BP, 气

候湿润; 6~5.6cal. ka BP, 气候冷干; 5.6~1.8cal. ka BP, 气候湿润. 上述两项研究的现代花粉训练数据集小, 限制了其定量重建的应用. 基于众多孢粉点的资料和利用花粉-气候转换函数所作的古气候定量结果表明, 青藏高原末次冰消期以来的气候以早或中全新世较为适宜, 晚全新世气候偏冷偏干. 最近, 陈发虎团队对基于花粉的古气候定量重建作了时间分辨率为50年的集成研究, 发现高原早中全新世夏季温度最暖期出现在9~5cal. ka BP, 夏季温度随后逐渐下降至今, 这与夏季太阳辐射和西南季风的增强相吻合(Chen等, 2020). 赵艳团队以青藏高原东部若尔盖全新世温度重建为例尝试建立孢粉-气候定量重建方法体系, 同时他们的研究表明, 青藏高原东部全新世气温降与太阳辐射有关外, 与太阳活动也有一定的联系(梁琛等, 2020). 梁琛等(2020)的研究在现代数据库、训练集、气候因子的筛选和气候重建模型建立方面所作的尝试为定量重建方法体系的建立打下了一定的基础. 从至今为止的重建结果来看, 在线性和非线性模型中, 加权平均偏最小二乘回归法(Weighted Average-Partial Least Squares Regression, WA-PLS)是较好的重建模型.

需要指出的是, 基于线性和非线性模型的多元统计方法如主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)也被广泛应用于高原第四纪花粉数据的古植被与古气候解释中. 如Zhao等(2007)对柴达木盆地克鲁克湖全新世孢粉记录进行PCA获得11.9~9.5cal. ka BP是以蒿属为主的荒漠草原植被, 9.5~5.5cal. ka BP是以藜科为主的荒漠植被, 5.5cal. ka BP以来是蒿属和禾本科为主的草原荒漠植被. Herzsuh等(2006, 2009)分别对藏北兹格塘错及藏东北的寇察湖的孢粉记录进行DCA和PCA重建了研究区末次冰期以来不同时段年降水量和7月平均气温, 恢复了古植被(干/冷高山荒漠-草原—半湿润/温暖草原—湿润/冷高山草甸). 此外, Lu等(2008)利用青藏高原598个表土样品, 研究了现代表土中冷杉和云杉花粉的分布与植被、气候和海拔的空间变化之间相关性, 也是数值方法在现代花粉和气候数据中应用的一例. 现今绝大多数的孢粉分析均采用数值分析方法重建古植被和古气候, 大大提高了青藏高原第四纪孢粉研究水平.

从定性到定量, 是青藏高原第四纪孢粉研究的一

个飞跃. 青藏高原是中国受人类影响最弱的地区, 因此是研究花粉现代过程的理想地区. 基于孢粉的青藏高原古气候定量重建在数值方法、模型选择等方面都积累了非常厚实的基础, 随着青藏高原现代花粉训练数据集的不断积累, 一个相对完善的定量重建体系将最终形成. 由于青藏高原花粉现代过程(花粉的搬运、沉积)和花粉产量方面工作的相对缺乏, 对古植被的定量重建仍需加强.

5 开拓新领域: 开展高山冰川的雪冰孢粉研究

雪冰孢粉研究主要研究极地和高山冰川的表雪(surface snow)、雪坑(snow pit)以及冰芯(ice core)中的孢粉组合及其反映的环境变化. 在20世纪30年代中期至60年代中期, 已有国外孢粉学者将孢粉分析应用于现代冰川的研究中(如Erdtman, 1936; Godwin, 1949; Ambach等, 1966). 最早将冰芯花粉记录作为环境古气候代用参数研究的是在欧洲学者进行的极地冰芯研究中(例如, Fredskild和Wagner, 1974; McAndrews, 1984; Short和Holdsworth, 1985; Bourgeois, 1986). 20世纪80年代晚期, 美国学者从热带地区冰芯获得了反映气候变化敏感的孢粉记录, 从而开始了非极地冰芯高沉积率的年代际、年际甚至季节的基于花粉的古气候重建(Thompson等, 1988, 1995; Liu等, 1998). 青藏高原的冰川为非极地冰川, 它接近花粉源-区域植被, 因而有较高的花粉沉积率, 可有效进行古植被与古气候重建. 中国雪冰孢粉研究是从1975年大规模的青藏高原科学考察开始. 在那次考察, 由李吉均先生领导的冰川组(由唐领余承担孢粉研究)在西藏若果冰川采集了若果冰川源头(海拔5100m)粒雪坑(厚9m)粒雪层和冰川表层弧拱雪冰样品, 在中国科学院兰州冰川冻土研究所孢粉实验室采用蒸发的方法集中花粉, 分析了若果冰川1972~1975年晚夏与冬季层理及粒雪年层中花粉组合的变化以及若果冰川周围晚夏与冬季不同季节植被变化及夏季雪崩堆积的来源(王睿和唐领余, 1980; 唐领余等, 1983), 这是中国首次进行青藏高原雪冰花粉研究, 但那时还没有开展冰芯孢粉记录的系统研究来定量恢复冰川堆积的古气候.

20世纪80年代后期, 姚檀栋就考虑与Lonnie G. Thompson、Kam-biu Liu等国外学者合作进行青藏高

原高山冰川的冰芯高分辨率的花粉研究. 截止今日, 青藏高原已进行系统冰芯孢粉研究的冰芯来自三支冰川, 即高原西北部的古里雅冰芯(Guliya Ice Cap: 海拔6710m, 冰芯长308.6m)、东北部的敦德冰芯(Dunde Ice Cap: 海拔5325m, 冰芯长140m)和中部的普若岗日冰芯(Puruganri Ice Cap: 海拔5900m, 冰芯长80m), 并取得了一系列研究成果(Liu等, 1998; Yao, 2000; Yang等, 2008; 唐领余等, 2009a). 青藏高原东北部敦德冰芯30年(1957~1986)花粉记录揭示总花粉浓度与祁连山夏季降水呈正相关, 与夏季气温负相关; 其全新世花粉记录显示总花粉浓度在10~4.8cal. ka BP高, 说明夏季风可能超出了目前的极限到达敦德(Liu等, 1998). 这是中国首个非极地冰芯的孢粉研究.

古里雅冰芯孢粉记录揭示了青藏高原西北部12000年来植被与气候变化史. 11.5cal. ka BP前, 高含量的藜科花粉指示干旱环境; 11.5~9.5cal. ka BP期间, 蒿属花粉增加指示相对湿润环境; 9.5~6.5cal. ka BP禾本科花粉明显增加指示草原植被扩展, 起因可能是夏季风增强导致这阶段降水量增加; 6.5cal. ka BP以后禾本科花粉明显减少, 反映气候回到了干旱环境; 1.9cal. ka BP以来的植被与气候接近现今(Yao, 2000; 黄壬晖等, 2019).

普若岗日冰芯孢粉谱记录了15世纪以来植被由寒冷干旱的荒漠草原向寒冷潮湿的草甸草原和温暖干旱的草原发展的演替过程. 孢粉记录中主要植物花粉百分含量与高原中部夏季观测温度呈正相关, 推算最近150年内在19世纪70、90年代和20世纪90年代曾出现高于现今当地气温约1.9℃的高温期, 而在19世纪60、80年代和20世纪50、60~70年代是相对寒冷的时期; 在过去100年中, 20世纪晚期的渐暖现象与整个青藏高原年平均温度显著相关, 也与青藏高原记录的冰川缩小较一致(Yang等, 2008; 唐领余等, 2009a).

近几年, 侯书贵团队(侯书贵, 2019)正开展西昆仑山崇测4号冰芯(距古里雅冰芯直线距离约30km, 位于35°14'57"N, 81°5'28"E, 海拔高度为6105m, 冰芯长度216.6m, 为透底冰芯)及各拉丹冬表雪样品作孢粉分析. 期盼在第二次青藏高原科考中有更多孢粉学者进行青藏高原雪冰孢粉学研究, 产出高水平的冰芯孢粉研究成果. 很显然, 雪冰孢粉研究不仅拓宽了青藏高原第四纪孢粉研究的学科领域, 也为多学科综合研究青藏高原冰川提供了一种有用的研究手段.

6 恢复古植被: 探讨更新世以来高原植被的时空变化

自从20世纪70年代开始的大规模青藏高原科学考察以来, 施雅风、孙鸿烈、李吉均等先生就非常重视恢复青藏高原晚新生代以来古植被的研究, 历次重大青藏科研项目都有植被演替议题。如在1975年青藏高原科学考察队员集训(成都)会上, 孙鸿烈队长就让唐领余介绍第四纪孢粉分析方法; 进藏考察时, 李吉均先生带领唐领余等登上若果冰川采集孢粉样; 1995年“青藏高原形成演化、环境演变及其生态系统研究”国家攀登计划项目在兰州的总结会上, 讨论了若尔盖RM、RH钻孔90万年来孢粉记录指示的环境演化; 1996年施雅风先生亲自召集全国从事过青藏高原第四纪孢粉工作的研究者集中南京, 汇总青藏高原孢粉研究成果, 会后在《微体古生物学报》出专集, 收集了12篇论文, 总结了青藏高原晚新生代以来植被时空变化; 1998年由施雅风、李吉均、李炳元主编的《青藏高原晚新生代隆升与环境变化》一书中专门有一节植被演替(见施雅风等, 1998, P314~331)。2001年, 青藏高原错鄂2.8Ma来的孢粉记录首次揭示了高原内部海拔4500m以上地区从上新世末期以来该区构造隆起、植被和环境变化的过程(吕厚远等, 2001)。这是高原主体上第四纪孢粉研究最老的记录之一, 进一步证明孢粉学的研究能够提供连续的直接反映高原隆升、植被与气候变化过程较可靠的证据。2020年, 赵艳团队对若尔盖长钻孔1.74Ma以来植被与气候的研究取得重大突破, 使得青藏高原孢粉研究进一步受到世界的瞩目(Zhao等, 2020)。但是, 本质上青藏高原五十多年第四纪孢粉研究大都集中在晚更新世以来湖泊钻孔孢粉记录的研究。

6.1 高原东南部末次冰消期以来植被演替

高原东南部边缘以川西螺髻山大海子湖和杀野马湖孢粉记录为例: 12.4~11.0ka BP为松和栎为主的针阔叶林; 11~9.1ka BP川西冕宁杀野马湖流域发育了冷杉属、桦木属和落叶栎为主的森林植被; 9.1~7.8ka BP常绿栎和铁杉属(*Tsuga*)增加, 指示气候暖湿; 7.8~4.0 ka BP硬叶林扩展, 表明降雨季节性增加; 4.0~2.0 ka BP各种植物的花粉浓度都有不同程度的降低, 其中以松属、铁杉属、高山栎最明显, 反映出气候的恶化

和人类活动的加强; 2.0~1.0ka BP以来杀野马湖流域硬叶林继续发育直到现今(李旭和刘金陵, 1988; Jarvis, 1993)。

高原东南部以义墩湖、仁错孢粉记录为例: 20~12.4cal. ka BP以藜科、蒿属、禾本科和莎草科为主, 义墩湖流域呈现荒漠草原植被; 12.4~11.5cal. ka BP主要由蒿属、禾本科和莎草科和松属、冷杉属和云杉属等组成的高山森林草原植被; 11.5~9.2cal. ka BP植被由草原变为森林, 随后(9.2~6.8cal. ka BP)的植被为由桦木属和松属为主的针阔混交林。同时期(12.4~5.7cal. ka BP)八宿地区仁错流域的孢粉谱主要特点是藜科植物花粉明显下降和桦木属花粉的上升, 植被为高山森林草原景观。6.8~2.5cal. ka BP义墩湖流域松属占主导, 栎属持续上升, 自2.5cal. ka BP至今, 栎林扩展(唐领余等, 2000a; Shen等, 2006, 2008b)。

6.2 高原南部晚更新世以来植被演替

高原南部海登湖、拿日雍错、沉错、当雄和佩枯错的孢粉记录显示: 12.4~11.4cal. ka BP蒿属、禾本科和莎草科花粉含量高, 还有一些松属、冷杉属和云杉属等, 属于高山森林草原植被; 11.4~9.4cal. ka BP蒿属降低, 莎草科增加, 并有少量的桦木属和松属花粉出现, 呈现高山草甸或局部高山灌丛草甸植被面貌; 9.4cal. ka BP以后, 桦木属和松属花粉增加, 反映为高山灌丛草甸逐步向针阔混交林植被过渡; 8.0~3.0cal. ka BP桦木属、栎属、铁杉属、蔷薇科、杜鹃花科(*Eriaceae*)增加, 显现森林灌丛草甸景观; 3.0cal. ka BP至今, 木本植物花粉明显减少或消失, 多为灌木植物花粉, 草本植物花粉达73~89%, 植被呈灌丛草原景观(汪佩芳等, 1981; 黄赐璇等, 1983; 黄翡, 2000; 唐领余等, 2000b, 2004, 2009b; Lu等, 2011)。

6.3 高原中东部更新世以来植被演替

高原中东部若尔盖地区中更新世以来植被是由RM、RH钻孔及瓦松和红原剖面的孢粉记录(刘光琇等, 1995; 王富葆等, 1996; Shen C M等, 2005)表明: 190~18ka BP, 间冰期和间冰阶的花粉谱以云杉属、冷杉属、松属为主, 花粉浓度较高, 反映云冷杉林的存在和暖湿的气候条件; 冰盛期的花粉谱以藜科、莎草科、禾本科、蒿属等, 花粉浓度很低, 反映荒漠-流石滩植被和冷干的气候环境, 但部分样品包含相对含量

较高的松属、栎属等远距离搬运的木本花粉, 给花粉谱的定量解释带来了困难; 冰阶的花粉谱以莎草科、禾本科为主, 反映了高山和亚高山莎草草甸植被及介于冰盛期和间冰期的气候条件. 18~15ka BP, 冰消期再现亚高山云冷杉林; 15~10ka BP, 桦木属、栎属、榛属、沙棘属(*Hippophae*)等阔叶硬叶树种花粉达到高值, 森林扩大, 高山草甸退缩. 10~9.4ka BP, 莎草科占优势, 有蒿属和菊科(*Asteraceae*)及云杉属、冷杉属、桦木属出现, 仍发育草甸植被, 云冷杉林呈岛状分布, 坡麓和低地广泛发育沼泽; 9.4~4.0ka BP, 以冷杉、云杉为优势的暗针叶林达到全新世的极盛; 4.0 ka BP以后亚高山草甸、灌丛草甸扩展, 趋向沼泽化.

6.4 高原中部全新世植被演替

从高原中部多个湖泊(色林错、扎布耶茶卡、兹格塘错、阿洪错、徐果错、错鄂及唐古拉山垭口湖)孢粉记录显示: 11.0~9.6cal. ka BP花粉浓度低, 以菊科、蒿属和藜科花粉为主, 反映高山稀疏植被; 9.6~8.5cal. ka BP莎草科及蒿属较多, 8.5~7.5cal. ka BP松及蕨类孢子增高, 7.5~6.0cal. ka BP莎草科及蒿属增加, 说明9.6~6.0cal. ka BP期间发育草原/草甸植被代替高山稀疏植被; 6.0~3.8cal. ka BP莎草科和蒿属增加, 花粉浓度达到高峰, 并有松属、冷杉属出现, 植被可能仍以草原为主; 在中南部(色林错和扎布耶茶卡) 3.8~2.4cal. ka BP出现云杉属、铁杉属、桤木属. 2.4~1.2cal. ka BP乔木花粉浓度又明显增加, 尤其松属较多, 可能有草原灌丛分布, 而向中北部(兹格塘错、徐果错、唐古拉山垭口湖) 4.0~3.0cal. ka BP以后逐渐由草原演化为以莎草科为主的沼泽草甸; 3.0cal. ka BP以后又回到草原占主导优势的植被(孙湘君等, 1993; Herzsuh等, 2006; Shen等, 2008a; 唐领余等, 2009b).

6.5 高原西部全新世植被演替

高原西北部松希错、龙木错和班公湖孢粉记录揭示: 12.7~10.0cal. ka BP花粉浓度最低, 荒漠成分藜科和麻黄属占优势, 期间12.7~12.5cal. ka BP沉积物中发现较多眼子菜属(*Potamogeton*)、莎草科, 反映沼泽环境开始; 11.0~9.9cal. ka BP出现新仙女木事件, 9.9~7.7cal. ka BP前期A/C最高值, 指示地方性植被盖度增加; 9.9~9.6cal. ka BP, 花粉浓度极低, 藜科花粉比例高, 植物的种类单调, 植被覆盖度很低, 气候干冷, 属

荒漠景观; 9.6~7.8cal. ka BP, 花粉浓度增高, 蒿属、禾本科、莎草科花粉增高, 反映为草原; 7.8~3.5cal. ka BP仍为草原; 3.5cal. ka BP至今, 植被以驼绒藜(*Ceratoides latens*)花粉为主, 亚菊属(*Ajanina*)花粉增多, 由草原变为荒漠(Van Campo和Gasse, 1993; Van Campo等, 1996; 黄赐璇等, 1996).

(6) 高原东北部甘青毗邻地区早更新世以来的植被演替. 在柴达木盆地(杜乃秋和孔昭宸, 1983; 沈振区等, 1990)、青海湖(刘兴起等, 2002; Shen J等, 2005)、青海湖盆地(杨惠秋和江德昕, 1965)、青海共和盆地(唐领余和汪世兰, 1988)、可可西里地区(李炳元等, 1994; 山发寿等, 1995)、昆仑山垭口及附近地区(唐领余和王睿, 1976a, 1976b; 许清海等, 1996; 羊向东, 1996)有一系列的孢粉记录反映青海甘肃大片地区早更新世以来的植被演替. 例如, 青海湖晚更新世以来孢粉植物群显示在14.1~10.8cal. ka BP期间, 蒿属花粉含量高, 桦木属花粉偶尔出现, 麻黄属花粉含量低, 花粉浓度低, 湖泊周围为草原或森林草原; 10.8~8.5cal. ka BP期间, 花粉浓度增加, 桦木属和莎草科增加, 指示湖泊周围降水和温度显著升高; 8.5~7.8cal. ka BP期间, 针叶林树种如云杉和冷杉的花粉取代桦木属成为主要的花粉类型, 反映气候较为寒冷干燥; 7.8~4.5cal. ka BP期间, 蒿属花粉进一步减少, 松属、云冷杉花粉增加, 区域植被演变为森林草原. 10.8~4.5cal. ka BP的区域植被总体是森林或森林草原, 反映温暖湿润的环境, 为全新世的适宜时期. 4.5~2.5cal. ka BP期间, 花粉浓度下降, 松属花粉逐渐降低, 云杉属、冷杉属以及桦木属植物零星出现, 蒿属植物快速扩张, 区域环境向冷干演化; 2.5cal. ka BP以来花粉浓度有所增加, 区域植被演变为蒿属、禾本科以及莎草科等植物为主的草原, 气候依然较为寒冷干旱(刘兴起等, 2002; Shen J等, 2005).

已有的研究(图2)表明, 高原东南部和东部在末次冰消期初期发育草原/荒漠植被, 后期向森林植被转变, 全新世早、中期发育森林植被, 晚期森林退缩; 高原中部地区末次冰消期初期以荒漠/稀疏植被为主, 后期向草原/草甸植被过度, 全新世阶段主要发育草原植被; 高原东北部低海拔地区(<3500m.a.s.l.)末次冰消期初期发育草原/草甸植被, 后期向森林/森林草原植被类型转变, 全新世早、中期发育森林植被, 晚期森林退缩, 发育草原/草甸植被; 高原东北部高海拔地区(>3500m.

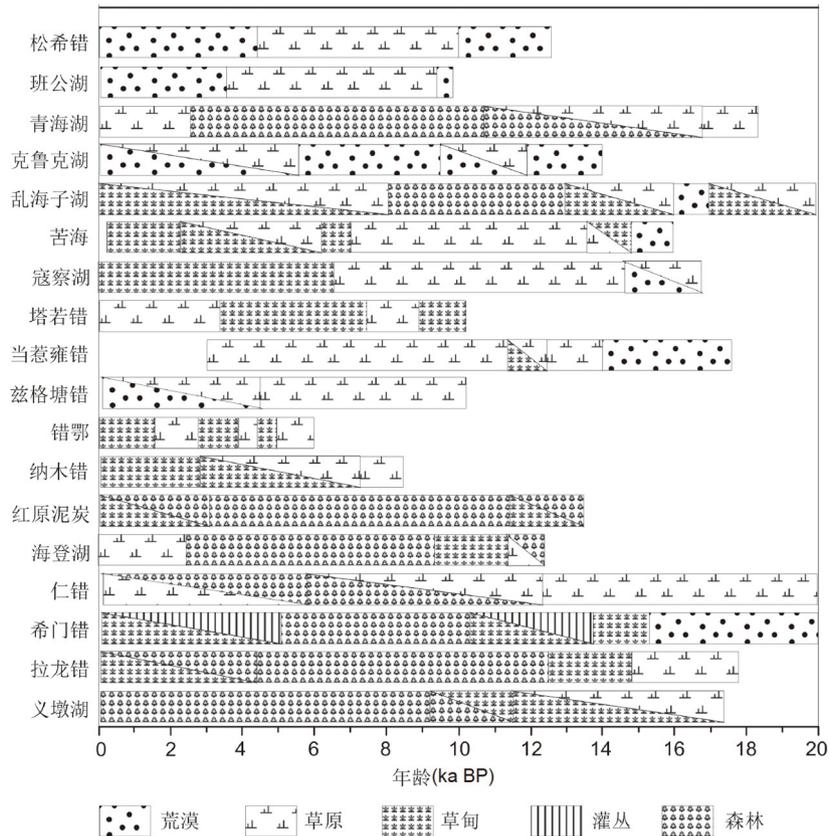


图2 青藏高原西北至东南部分湖泊钻孔孢粉记录的未来2万年古植被示意图

a.s.l.)末次冰消期初期发育荒漠/草原植被, 后期和全新世阶段发育草原/草甸植被; 高原西北部末次冰消期晚期至全新世初发育荒漠植被, 全新世早、中期发育草原植被, 晚期发育荒漠植被。

就青藏高原全新世植被的东西方向植被时空变化而言, 可从东南向西北依次选择杀野马湖、义墩湖、仁错、海登湖、色林错、扎布耶茶卡、松希错等七个湖泊钻孔的孢粉记录所反映的古植被面貌(图3)显示出。从图上可以大体看出青藏高原全新世各个时段古植被由东向西水平分布的规律: (1) 进入全新世之前, 大约在12cal. ka BP之前, 从东到西发育为荒漠草原植被, 仅藏东南的海登湖(29°55'N, 92°20'E)在14~11cal. ka BP为草原植被; (2) 全新世早期(12~9或11~8cal. ka BP)高原东南部(如位于102°E左右川西杀野马湖流域)为针阔混交林或落叶阔叶林, 向西至西藏东南部(仁错-海登湖)为草甸或灌丛草原, 再向西(色林错—扎布耶茶卡—松希错), 即88°30'E~84°04'E呈现草原植被

景观; (3) 全新世中期(9.0~3.2或8.0~3.0cal. ka BP)高原由东向西古植被依次发育为针阔叶混交林或硬叶阔叶林(104°E~98°E)—针阔叶混交林(98°E~94°E)—草原草甸(94°E~92°E)—草原(92°E~80°E); (4) 全新世晚期(3.2或3.0cal. ka BP以后)由东向西古植被依次为硬叶阔叶林(104°E~99°E)—针阔混交林(99°E~96°E)—草甸草原(96°E~88°E)—草原(88°E~84°E)—荒漠(84°E~80°E)。

7 重建古气候: 探讨西南(印度或南亚)季风主导的高原气候变化

青藏高原全新世气候演变史的研究, 一直是地理学及第四纪学术界十分关注的重点。改革开放后, 在国家自然科学基金委的基金支持下, 利用孢粉资料恢复青藏高原古季风研究工作在青藏高原全境全面开展, 以中国科学院研究人员为主与法国、德国、美国、澳大利亚和日本等科学家合作, 进行了多次野外

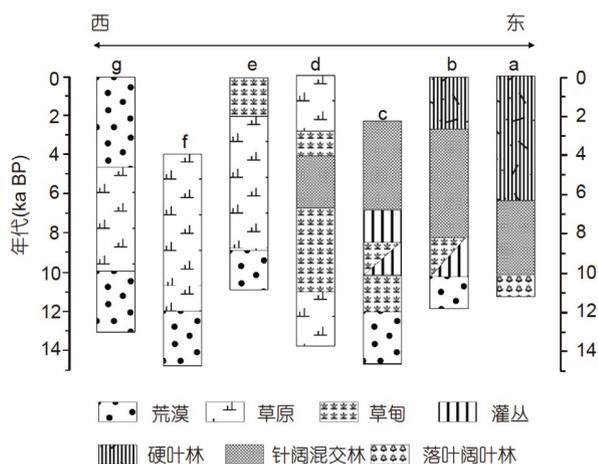


图3 全新世青藏高原由东南向西北部分湖泊钻孔孢粉记录恢复的古植被水平分布示意图

(a) 杀野马湖; (b) 义墩湖; (c) 仁错; (d) 海登湖; (e) 色林错; (f) 扎布耶茶卡; (g) 松希错

考察和钻取了几十个湖泊岩芯, 重点研究了末次盛冰期以来西南季风的演变史。

青藏高原东部川西冕宁地区、若尔盖及青海湖地区受西南季风和东亚季风的双重影响, 花粉记录表明自10ka BP以来夏季风是非线性逐渐加强, 且自南向北逐渐深入。先是在东南部7.8ka BP前后形成全新世最大降水期, 向北至若尔盖地区, 最大降水期出现在7.0 ka BP, 再向北至青海湖, 在6.8ka BP前后出现最大降水期, 说明夏季风在6.8ka BP前后达到鼎盛。6.8~3.5 ka BP降水量总的趋势呈非线性减少, 但保持较高的水平, 指示夏季风仍很活跃; 3.5ka BP以后降水量明显减少, 变幅趋小, 反映夏季风明显萎缩, 趋向建立现代季风环境。在西藏东南部地区, NNW-NNE 走向的河谷使得受季风驱动的来自孟加拉湾的湿热气团容易侵入西藏高原和中国西北内陆。因而本地区的气候主要受西南季风控制。海登湖和仁错大约在20~12.4cal. ka BP气候寒冷干燥, 植被主要由旱生草本植物组成, 严酷的气候和高山荒漠草原显示了季风环流的羸弱且萎缩。11.4~9.4cal. ka BP, 植被占优势的是高比例的草原植物以及桦木突然增多显示西南季风有一个突然加强的过程, 并很快进入全新世适宜期。如在海登湖流域10.1cal. ka BP重建的7月气温低于现今1℃左右, 年降水量接近现在。在西藏南部的沉错流域, 10.7~9cal. ka BP的气候暖干, 年均温比现在高0.8℃; 9~6.1cal. ka BP的气候湿润, 降水比现在高30mm; 6.1~3.2cal.

ka BP的气候变干(Lu等, 2011)。

全新世气候适宜期大约出现在9.4~2.4cal. ka BP。在此期间, 西藏东南地区生长针阔混交林, 气候温暖湿润, 年均温比现在高3℃以上, 年降水量高出现在约250mm。在同一地区的尼洋河流域, 在此期间气候也是温暖湿润的(孙鸿烈, 1996); 林芝和昌都发现许多新石器遗址, 丰富的大化石和文化遗物如石器和陶器碎片反映温暖湿润的气候(陈万勇, 1980; 黄万坡, 1980)。在高原中部色林错和西部西松希错花粉记录反映西南季风在9.5cal. ka BP前后达到一定的强度后逐渐减弱, 在8.0~7.8cal. ka BP出现一个较弱的时期, 其后季风又逐渐加强, 在7.5~6.0cal. ka BP达到最盛, 随后季风活动逐渐萎缩。所有这些事实说明中期全新世东南至中西部地区西南季风强盛。在这较长的暖湿时期内, 从9.4cal. ka BP开始上升, 7.0~6.0cal. ka BP达到鼎盛, 约5.0cal. ka BP后又逐步下降。

青藏高原西北部5.0cal. ka BP以后西南季风的影响明显减弱, 4.3cal. ka BP以后已基本建立现代季风环境。而中部5.0~4.0cal. ka BP西南季风仍很活跃, 至4.0cal. ka BP以后才趋于现代季风环境。3.5cal. ka BP之后, 东南部落叶树种明显地减少而草原扩大, 说明植被由森林向草原转变。依孢粉-气候转换函数的定量估计, 晚全新世一月气温下降1.5℃, 七月气温下降0.5~1℃, 年降水量减少100~150mm。

众多资料表明, 青藏高原全新世总的气候特征是早中期气候比较温暖湿润, 而晚期开始气候明显干旱。在大部分地区全新世中期的气温升高与湿度增加一致。虽然得出高原全新世气温变化模式仍存在争议, 但全新世早期至中期出现夏季温度峰值, 与夏季太阳辐射和西南夏季风增强相吻合(Chen等, 2020)。而由高原东南向西北侵入的西南季风, 随着强度的减弱呈现逐渐东南撤退的过程(图4)。因此, 全新世古季风变化经历了增强-强盛-减弱但仍活跃-萎缩的变化, 主要受太阳辐射的影响。西南季风在全新世的增加在整个高原基本一致, 但西南季风的减弱在高原不同地区的表现有所差异。西南季风的减弱, 主要体现为环境变干, 在高原西北部开始于6.0cal. ka BP, 由A/C比值及湖面降低所反映; 在高原东部和东南部花粉记录指示大约在4.0cal. ka BP。西南季风减弱的时间从西北到东南出现滞后现象, 说明夏季风向东南逐步后退。这一点也可从高原现代环境状况建立的时间反映出, 高原西北部是

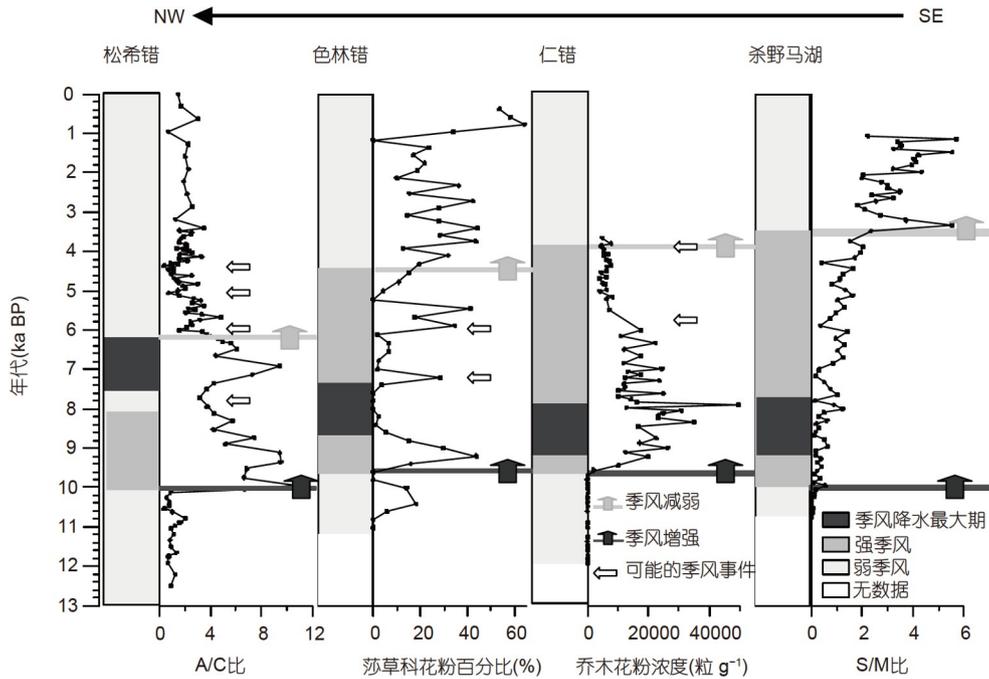


图4 青藏高原由东南向西北部分湖泊杀野马湖、仁错、色林错及松希错花粉记录中季风降雨的代用指标及其揭示的过去13ka季风演变趋势

S/M比=常绿硬叶树种(不包括常绿栎): 中生落叶树种, Jarvis(1993); A/C比=*Artemisia/Chenopodiaceae*, Van Campo和Gasse(1993)

在4.3cal. ka BP以后, 中部在4.0cal. ka BP以后, 东南部是在3.5cal. ka BP以后. 此外, 在这个太阳辐射变化控制的西南季风变化总的趋势上, 还叠加着一系列的百年尺度的季风减弱事件. 藏东南花粉记录和年降雨量的定量估计显示, 西南季风先后在10.1、9.2、8.2、7.7、6.5、5.8、4.5、3.0、2.1、1.1cal. ka BP出现10次百年尺度的季风减弱事件(Shen, 2003).

青藏高原除受到西南季风的影响, 在高原东北缘还受到东南季风的影响. 李吉均等根据孢粉资料认为青藏高原东北缘晚第四纪季风气候有3种模式: (1) 盛冰期模式(18.0~15.0ka BP)气候冷干, 发育以蒿属、藜科、禾本科等为主的草原植被; (2) 间冰期模式(末次间冰期和全新世)气候温暖潮湿, 发育以栎属、桦木属为主的落叶阔叶林; (3) 过渡的或间冰阶模式(50.0~23.0ka BP)气候冷湿, 发育以云杉为主的针叶林(Li等, 1988). 这一研究引领了后来大量的对青藏高原东北及周边地区的古气候研究. 在这一区域, 青藏高原东北缘石羊河流域猪野泽高分辨率孢粉记录反映的植被和湿度变化揭示了东南季风的变化. 早全新世(11.6~7.1cal. ka BP), 主要由圆柏(*Sabina chinensis*)、

云杉和松组成的高山森林, 显示石羊河流域的潮湿气候与该地区全新世东亚季风最盛期相协同. 中全新世(7.1~5.0cal. ka BP)石羊河流域的孢粉记录主要由白刺属、禾本科、菊科、蒿属和藜科组成, 反映荒漠草原和较弱的东亚夏季风(Chen等, 2006). 高原东北部冬给措纳19ka以来的降水变化则反映了末次盛冰期以来东南季风的变化. 19~18.3cal. ka BP, 蒿属、藜科主导, 年降水量约150mm; 18.3~13.1cal. ka BP, 蒿属和藜科仍占主导, 年降水量约197mm; 13.1~9.5cal. ka BP, 蒿属主导, 藜科下降, 这一时期最为湿润, 平均年降水量为334mm; 9.5~7.3cal. ka BP, 蒿属下降, 藜科上升, 年降水量为251mm; 7.3~4.3cal. ka BP, 蒿属上升, 藜科下降, 降水增加, 为324mm; 4.3~1.1cal. ka BP, 蒿属、藜科、禾本科和莎草科为主, 年降水量为281mm(Wang Y等, 2014).

8 展望未来: 任务艰巨

20世纪60、70年代青藏高原的综合科学考察催生了中国青藏高原的第四纪孢粉研究. 四十年前国家的

改革开放及后期中国科学院知识创新工程推动孢粉学进入了追求新发展、探索新规律、创造新方法和积累新知识时代,使孢粉学的发展与国际学术界全面交融,开始多种形式的国际合作,使我们的研究逐渐与国际接轨。然而,我们也应该看到,虽然过去50多年青藏高原第四纪孢粉研究为高原末次盛冰期以来植被和气候演变过程做出了非常大的贡献,但随着青藏高原研究的重点从经济发展的需要转向揭示环境变化机理和优化生态安全屏障体系,为青藏高原生态学和生物地理学提供详细历史的第四个维度——古生态学的青藏高原第四纪孢粉研究,通过提供种群动态和生态系统发展的长期综述,在青藏高原生态学、地球系统科学和生物地理学中发挥越来越重要的作用(Birks等, 2016)。

(1) 从过往的粗放型研究走向精细化研究: 要反映植被、土壤(冻土)对气候变化和气候事件的快速反应并对生态系统的古生态学和过去生态过程的运作有一个独特的详细见解,过往研究的样本和样本间的时间分辨率难于达到研究需要,这就要求样本和样本间的时间分辨率越精细越好。自然,这样的时间分辨率将大大提高对高沉积速率的高原湖泊的要求和第四纪孢粉研究的工作量。作为亚洲水塔的高原,具有中国以至世界上最大的湖泊群,高沉积速率乃至年纹层湖泊(陈钰等, 2016)是显然存在的,只是这些湖泊的寻找将是艰辛的。

(2) 从离散点的研究走向面状研究: 青藏高原不同植被类型的时间动态与空间变化,不仅反映了植物类群对气候变化的响应和植物类型之间的竞争,也对季风气候和全球气候对高原下垫面变化的敏感度的观测研究和古气候模拟研究有着重大意义。已有的植被景观演替图主要基于少量的研究点、较粗的时间间隔(如2500年)粗略构建(如唐领余和沈才明, 1996),但要以更细的时间间隔如500年甚至更小、更精确的空间界限来构建青藏高原植被景观图,植物种属的空间分布图(如Ren和Beug, 2002),除了需要上述的、更精细的样本和样本间时间分辨率湖泊样点孢粉分析(如Zhao, 2018),还需要在面上作有规划的、相对均匀的、在群落交错带(Ecotone)有重点的湖泊孢粉分析。只有这样得出的植被景观图,不仅可揭示植被种群在全新世、第四纪乃至第三纪的时空变化,也为解释现存木本和草本种群的地理DNA模式提供坚实的历史

背景,而且为古气候模拟提供高精度的下垫面资料。青藏高原植被类型和冰川大小作为重要的边界条件(Bibi等, 2018),不仅对气候模拟异常重要(Sen等, 2001; Zhao等, 2011; Wang X等, 2014),也对青藏高原植被的反馈机制和碳循环的研究有极大的帮助(Hua等, 2019; Mu等, 2020; Wang等, 2020; Yan等, 2020)。

(3) 青藏高原花粉现代过程和花粉产量的研究: 青藏高原对花粉现代过程的探讨基本处于空白状态,但花粉产量、花粉传播、花粉源范围、花粉沉积、花粉保存、花粉与植被和气候的关系等诸多方面对古气候和古植被定量重建是关键(许清海等, 2015)。由于青藏高原的植被受人类活动影响较小,有利于进行相关的研究;同时青藏高原有一些生态站,也利于作花粉-植被-气候的定点研究。

(4) 定量重建从“非类似环境”走向“类似环境”训练花粉数据集: 现代花粉数据和化石花粉记录来源于同样的沉积环境是可靠定量重建的基础(Birks等, 2010),而青藏高原绝大多数的化石花粉记录来自湖泊沉积物,因此来自湖泊表层样的现代花粉数据是最为理想的,因为花粉现代沉积过程和化石花粉的沉积过程基本相同,可将花粉的埋藏过程、湖泊大小、花粉源地等因素的影响降到最小(Cao等, 2018)。相比于北美和欧洲主要由湖泊表层样组成的花粉数据库(Whitmore等, 2005; Davis等, 2013),目前青藏高原应用于古气候重建的现代花粉数据库主要基于表土样和苔藓样的花粉数据集和库(如Shen等, 2006; Lu等, 2011),唯一均由湖泊表层样(112个湖泊)组成的现代花粉数据集主要由欧洲学者完成(Herzschuh等, 2010)。就湖泊化石花粉记录来说,理论上只有湖泊表层样组成的花粉数据库才能提供可靠的古气候定量重建。因此,目前最急需的需要是建立由湖泊表层样组成的区域现代花粉数据库。其次,这一由湖泊表层样组成的现代花粉数据的覆盖的空间要包含足够多的植被类型且受到人类活动影响较小,以保证化石花粉谱有其高质量的现代类生物(Birks等, 2010; Cao等, 2018)。青藏高原是中国人活动最小的地区,青藏高原上面积超过1km²的湖泊超过1000个(马荣华等, 2011),小于1km²更是无数,为建立与湖泊化石花粉记录类似沉积环境的、由湖泊表层样组成的区域现代花粉数据库提供了独一无二的机会。

(5) 钻孔花粉记录走向更深、时间跨度更长: 第二

次青藏高原综合科学考察研究的核心问题是与20亿人口相关的“亚洲水塔”有何变化、如何变化及其机理。要确定青藏高原未来气候变化情景及其对生态系统的影响、解决第二次青藏高原综合科学考察研究的核心问题,有必要提高我们对过去气候变化和环境影响的始末时间、持续时间和强度的认识,不仅在短期,而且在长期地质时间尺度上。中国学者在青藏高原中部错鄂和中东部若尔盖盆地取得了201m和573.39m的深钻,其花粉记录揭示了青藏高原两个地区过去2.8Ma和1.774Ma的区域植被历史、气候变化和构造运动史(吕厚远等, 2001; Zhao等, 2020)。错鄂钻孔样本和样本间时间分辨率相对较粗(335花粉样品),但花粉记录揭示的7次明显变化可能指示了错鄂流域的植被演替和构造上升(吕厚远等, 2001)。若尔盖钻孔的花粉记录具有较高样本间分辨率(2787花粉样品,约530~620年的样品间分辨率),其反映的植被变化则指示,过去1.74Ma的气候呈现三阶段变化特征,三阶段气候在逐渐变冷的趋势叠加了不同轨道尺度和千年尺度气候变化特征。1.74~1.54Ma BP为太阳辐射主导模态,具有明显的~2万年的周期,准千年尺度的信号缺失;1.54~0.62Ma BP代表了一个过渡性太阳辐射-冰模式,具~2万和~4万年的周期,并叠加了千年尺度的振荡;而过去0.62Ma则为冰驱动的模式,具10万年的周期性和较少的千年尺度变化(Zhao等, 2020)。很显然,高分辨率的花粉记录可揭示更详细的植被演替和气候变化的信息。去年,作为国际大陆科学钻探计划的一部分,中国科学院青藏高原研究所在青藏高原最大和最深湖之一的纳木错取得了144.79m的岩芯,有望重建近15万年的连续气候环境记录,其高分辨率的花粉记录将为重建末次间冰期以来气候旋回及特征事件,理解长时间尺度下西风-季风协同作用提供新的见解和认识。

(6) 研究方向进一步扩展至青藏高原人类文明的发展:本世纪初,在青海的喇家遗址发现了目前世界上最早的面条(距今4000年前),并鉴定出是由糜子做成(Lu等, 2005);最近几年的研究成果发现,青稞种植促进了藏人3600年前定居青藏高原(Chen等, 2015),16万前丹尼索瓦人就在青藏高原活动(Chen等, 2019)。近期还有一些孢粉学者在高原东南部发现一些具有特殊意义的花粉种类,如*Rumex*(酸模属)、*Sanguisorba*(地榆属)、*Potentilla-type*(委陵菜属-型)、*Humulus*(葎草属),以及*Apiaceae*(伞形科)、*Liliaceae*(百合科)、*Che-*

*nopodiaceae*和*Fabaceae*(豆科)等科的一些种类(Schlütz和Lehmkuhl, 2009; Kramer等, 2010a, 2010b; Wischniewski等, 2011; Herzsichuh等, 2014),它们最有可能用来指示放牧或种植业引入,进而可以指示人类活动的强度。这一系列的成果不仅涉及人类对高原环境的适应问题,而且涉及人类活动对高原环境的影响,更与人地关系和可持续发展有关(张宪洲等, 2015)。很显然,这些方面的研究将拓展青藏高原第四纪孢粉研究内容。

孢粉学是一门融众多学科知识于一体的开放性学科,除需要研究者有深厚的功底和积累外,还要求有广泛的交流与联合。我们希望孢粉界的后继者们不要拘泥于资料的积累,维持学科的现状;不要满足于文章的数量,还要进行有影响力的系统总结和理论提升;不要满足有一技之长而沾沾自喜或炒炒冷饭,还应该“上山下乡”收集第一手资料,与多学科交融探讨与生态环境演变和人类活动相关的实际问题。

参考文献

- 陈万勇. 1980. 西藏林芝盆地新生代晚期的自然环境. 古脊椎动物与古人类, 18: 52-61
- 陈钰, 刘兴起, 何利, 叶莉, 陈惠芬, 李凯. 2016. 青藏高原北部可可西里库赛湖年纹层微区分析及形成机理. 地质学报, 90: 1006-1015
- 杜乃秋, 孔昭宸, 山发寿. 1989. 青海湖QH85-14C钻孔孢粉分析及其古气候古环境的初步探讨. 植物学报, 31: 803-814
- 杜乃秋, 孔昭宸. 1983. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖的孢粉组合及其在地理和植物学的意义. 植物学报, 25: 275-284
- 侯书贵. 2019. 青藏高原冰芯有多老? 科学通报, 64: 2425-2429
- 黄赐璇, 艾利斯·冯·康波, 让·弗朗索瓦士·多布雷梅. 1993. 西藏西部表土孢粉研究. 干旱地理, 16: 75-83
- 黄赐璇, 艾利斯·冯·康波, 李拴科. 1996. 根据孢粉分析论青藏高原西部和北部全新世环境变化. 微体古生物学报, 13: 423-432
- 黄赐璇, 王燕如, 梁玉莲. 1983. 试从孢粉分析论西藏中南部全新世自然环境的演变. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 西藏第四纪地质. 北京: 科学出版社. 179-192
- 黄翡. 2000. 西藏佩枯错13000~5000a B.P.植被与环境. 古生物学报, 39: 441-448
- 黄壬晖, 侯书贵, 马春梅, 刘科, 于金海, 张王滨, 赵琳, 庞洪喜, 宋靖. 2019. 雪冰孢粉记录研究进展. 地球科学与环境学报, 41: 362-378
- 黄万坡. 1980. 西藏昌都卡若新石器时代遗址动物群. 古脊椎动物与古人类, 18: 163-168

- 孔昭宸, 刘兰锁, 杜乃秋. 1981. 从昆仑山-唐古拉山晚第三纪、第四纪的孢粉组合讨论青藏高原的隆起. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题. 北京: 科学出版社. 78-89
- 李炳元, 李元芳, 朱立平, 李栓科, 孔昭宸, 山发寿. 1994. 青海可可西里苟弄错地区近二万年来的环境变化. 科学通报, 39: 1727-1728
- 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
- 梁琛, 赵艳, 秦锋, 郑卓, 肖霞云, 马春梅, 李焕, 赵文伟. 2020. 孢粉-气候定量重建方法体系的建立及其应用——以青藏高原东部全新世温度重建为例. 中国科学: 地球科学, 50: 977-994
- 刘光琇, 沈永平, 王苏民. 1995. 若尔盖盆地RH孔150ka以来的植被历史及其气候记录. 见: 青藏项目专家委员会, 主编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1994). 北京: 科学出版社. 199-208
- 刘光琇, 王睿, 李世杰, 李炳元, 朱照宇. 1998. 西昆仑山甜水海24万年以来生态环境演化的孢粉学证据. 冰川冻土, 20: 21-24
- 刘和林, 王德银. 1984. 冕宁“古森林”的研究. 林业科学, 20: 380-388
- 刘晓丽. 2010. 可可西里地区钻孔记录的中更新世孢粉与环境演化. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学
- 刘兴起, 沈吉, 王苏民, 羊向东, 董国榜, 张恩楼. 2002. 青海湖16ka以来的花粉记录及其古气候古环境演化. 科学通报, 47: 1351-1355
- 吕厚远. 1989. 渤海南部晚更新世以来的孢粉组合及古环境分析. 黄渤海海洋, 7: 11-26
- 吕厚远, 王苏民, 吴乃琴, 董国榜, 羊向东, 沈才明, 李世杰, 朱立平, 旺罗. 2001. 青藏高原错鄂湖2.8Ma来的孢粉记录. 中国科学D辑: 地球科学, 31(增刊 I): 234-240
- 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 41: 394-401
- 马玉贞, 曹继秀, 李吉均. 1995. 甘肃临夏塬堡黄土剖面15万年来的孢粉植物群发展及气候演变. 见: 青藏项目专家委员会, 主编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1994). 北京: 科学出版社. 103-113
- 潘保田, 徐叔鹰. 1989. 青海高原东部晚第四纪自然环境演化探讨. 科学通报, 34: 534-536
- 山发寿, 孔昭宸, 杜乃秋. 1995. 古植被与环境意义. 见: 李炳元, 主编. 青海可可西里地区自然环境. 北京: 科学出版社. 197-205
- 沈才明, 唐领余. 1992. 长白山、小兴安岭地区全新世气候——花粉-气候转换函数的初步研究. 见: 施雅风, 孔昭宸, 主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社. 33-39
- 沈振区, 董国榜, 张俊牌, 于淑凤, 李银罗. 1990. 青海柴达木盆地西部上新世以来的地质环境与成盐期. 海洋地质与第四纪地质, 10: 89-98
- 施雅风, 李吉钧, 李炳元. 1998. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广州: 广东科技出版社. 463
- 施雅风, 刘东生. 1964. 希夏邦马峰地区科学考察初步报告. 科学通报, 15: 928-938
- 宋长青, 孙湘君, 吕厚远. 1997. 中国北方花粉-气候因子转换函数建立及应用. 科学通报, 42: 2182-2185
- 孙鸿烈. 1996. 青藏高原的形成与演化. 上海: 上海科技出版社. 383
- 孙湘君, 杜乃秋, 陈因硕, 顾兆炎, 刘家麒, 袁宝印. 1993. 西藏色林错湖相沉积物的花粉分析. 植物学报, 35: 943-950
- 孙湘君, 宋长青, 陈旭东. 1999. 中国第四纪孢粉数据库(CPD)和生物群区(Biome 6000). 地球科学进展, 14: 407-411
- 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 李春海, 沈才明, 周忠泽. 2016. 中国第四纪孢粉图鉴. 北京: 科学出版社. 601
- 唐领余, 王睿, 孔昭宸. 1983. 西藏东南部若果冰川的孢粉分析. 植物学报, 25: 170-178
- 唐领余, 王睿. 1976a. 青海昆仑山哑口第四纪冰期间冰期湖相沉积孢粉组合及其意义. 见: 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所, 主编. 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所集刊, 第1号. 北京: 科学出版社. 106-126
- 唐领余, 王睿. 1976b. 青藏公路清水河二〇三米钻孔孢粉组合及其意义. 兰州大学学报(自然科学版), (2): 92-104
- 唐领余, 杨保, 李春海, 邵亚军, 陶士臣. 2009a. 西藏普若岗日冰帽15世纪以来植被与生态环境变化的孢粉记录. 古生物学报, 48: 200-210
- 唐领余, 冯兆东, 康建成. 1990. 青藏高原与黄土高原毗邻地区晚更新世以来孢粉植物群及沉积环境. 冰川冻土, 12: 125-140
- 唐领余, 李春海, 于革, 沈才明. 2003. Pollen-based reconstructions of Holocene vegetation and climatic change of Tibetan Plateau. 中国极地研究, 14: 99-116
- 唐领余, 沈才明, Liu K B, Overpeck J T. 2000a. 南亚古季风的演变: 西藏新的高分辨率古气候记录. 科学通报, 44: 2004-2007
- 唐领余, 沈才明, 孔昭宸, 王富葆, 廖淦标. 1998. 青藏高原东部末次冰期最盛期气候的花粉证据. 冰川冻土, 20: 133-140
- 唐领余, 沈才明, 李春海, 彭金兰, 刘惠, Liu K B, Morrill C, Overpeck J T, Cole J E, 杨保. 2009b. 花粉记录的青藏高原中部中全新世以来植被与环境. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 615-625
- 唐领余, 沈才明, 廖淦标, Overpeck J T, 于世永. 2000b. 青藏高原东南部18ka以来气候与水文变化. 微体古生物学报, 17: 113-124
- 唐领余, 沈才明, 廖淦标, Overpeck J T. 1999. 西藏两个小湖高分辨率的花粉记录. 植物学报, 41: 896-902
- 唐领余, 沈才明, 廖淦标, 于世永, 李春海. 2004. 末次盛冰期以来西藏东南部的气候变化——西藏东南部的花粉记录. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 436-442
- 唐领余, 沈才明, 赵希涛, 萧家仪, 于革, 韩辉友. 1993. 江苏建湖庆丰剖面一万年来的植被与气候. 中国科学B辑, 23: 637-648
- 唐领余, 沈才明. 1996. 青藏高原全新世花粉记录. 微体古生物学报, 13: 407-422
- 唐领余, 汪世兰. 1988. 青海共和盆地共和组孢粉植物群. 古生物学

- 报, 27: 583–606
- 汪佩芳, 夏玉梅, 王曼华. 1981. 西藏南部全新世泥炭孢粉组合及自然环境演化的探讨. *地理科学*, 1: 144–152
- 王富葆, 韩辉友, 阎革, 曹琼英, 周卫健, 李升峰, Donahue D J. 1996. 青藏高原东北部30ka以来的古植被与古气候演变序列. *中国科学D辑: 地球科学*, 26: 111–117
- 王曼华. 1987. 若尔盖高原区泥炭地的孢粉组合及古植被与古气候. *地理科学*, 7: 147–155
- 王睿, 唐领余. 1980. 孢粉分析方法在划分冰川年层上的初步应用. *冰川冻土*, 2(s1): 87–90
- 翁成郁, 孙湘君, 陈因硕. 1993. 西昆仑地区表土花粉组成特征及与植被的数量关系. *植物学报*, 35: 69–79
- 吴玉书, 肖家仪. 1995. 西藏扎布耶盐湖地区现代花粉雨的初步研究. *云南植物研究*, 17: 72–78
- 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉, 周春景, 严富华, 麦学舜, 朱大岗. 2004. 西藏纳木错地区约120kaBP以来的古植被、古气候与湖面变化. *地质学报*, 78: 242–252
- 萧家仪, 吴玉书, 郑绵平. 1996. 西藏扎布耶盐湖晚第四纪孢粉植物群的初步研究. *微体古生物学报*, 13: 395–399
- 徐仁, 陶君容, 孙湘君. 1973. 希夏邦马峰高山栎化石层的发现及其在植物学和地质学上的意义. *植物学报*, 15: 105–121
- 徐仁. 1956. 孢粉学的现状及孢子花粉分析在我国发展的展望. *科学通报*, 1: 49–52
- 许清海, 李曼玥, 张生瑞, 张娅红, 张攀攀, 卢静瑶. 2015. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题. *中国科学: 地球科学*, 45: 1661–1682
- 许清海, 阳小兰, 王子惠, 张宁佳, 李文漪, 崔之久. 1996. 晚更新世晚期以来昆仑山垭口区的植被与环境. *微体古生物学报*, 13: 387–393
- 羊向东. 1996. 西门错地区2000年来的花粉组合与古气候. *微体古生物学报*, 13: 437–440
- 杨惠秋, 江德昕. 1965. 青海湖盆地第四纪孢粉组合及其意义. *地理学报*, 31: 321–335
- 于革, 孙湘君, 秦伯强, 宋长青, 李海宇, Prentice L C, Harrison S P. 1998. 花粉植被化模拟的中国全新世植被分布. *中国科学D辑: 地球科学*, 28: 73–78
- 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张镡锂, 欧阳华. 2015. 青藏高原生态变化. *科学通报*, 60: 3048–3056
- 张玉芳, 张俊牌, 徐建明, 林防. 1995. 黄河源区全新世以来的古气候演化. *地球科学(中国地质大学学报)*, 20: 445–449
- 中国科学院中澳第四纪合作研究组. 1987. 中国-澳大利亚第四纪学术讨论论文集. 北京: 科学出版社. 250
- 周昆叔, 梁秀龙, 叶永英, 王文琳. 1960. 山西离石王家湾陈家崖老黄土埋藏土壤中的孢粉及植物残体. *中国第四纪研究*, 3: 104–109
- Ambach W, Bortenschlager S, Eisner H. 1966. Pollen-analysis investigation of a 20 m. Firn Pit on the Kesselwandferner (Ötztal Alps). *J Glaciol*, 6: 233–236
- Bibi S, Wang L, Li X, Zhou J, Chen D, Yao T. 2018. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau: A review. *Int J Climatol*, 38: e1–e17
- Birks H J B, Birks H H, Ammann B. 2016. The fourth dimension of vegetation. *Science*, 354: 412–413
- Birks H J B, Gordon A D. 1985. *Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis*. New York: Academic Press. 317
- Birks H J B, Heiri O, Seppä H, Björne A E. 2010. Strengths and weaknesses of quantitative climate reconstructions based on late-Quaternary biological proxies. *Open Ecol J*, 3: 68–110
- Bourgeois J C. 1986. A pollen record from the Agassiz Ice Cap, northern Ellesmere Island, Canada. *Boreas*, 15: 345–354
- Cao X, Tian F, Ding W. 2018. Improving the quality of pollen-climate calibration-sets is the primary step for ensuring reliable climate reconstructions. *Sci Bull*, 63: 1317–1318
- Chen F H, Dong G H, Zhang D J, Liu X Y, Jia X, An C B, Ma M M, Xie Y W, Barton L, Ren X Y, Zhao Z J, Wu X H, Jones M K. 2015. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 B.P. *Science*, 347: 248–250
- Chen F H, Welker F, Shen C C, Bailey S E, Bergmann I, Davis S, Xia H, Wang H, Fischer R, Freidline S E, Yu T L, Skinner M M, Stelzer S, Dong G R, Fu Q M, Dong G H, Wang J, Zhang D J, Hublin J J. 2019. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. *Nature*, 569: 409–412
- Chen F H, Zhang J F, Liu J B, Cao X Y, Hou J Z, Zhou L P, Xu X K, Liu X J, Wang M D, Wu D, Huang L X, Zeng T, Zhang S, Huang W, Zhang X, Yang K. 2020. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review. *Quat Sci Rev*, 243: 106444
- Chen F H, Cheng B, Zhao Y, Zhu Y, Madsen D B. 2006. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China. *Holocene*, 16: 675–684
- Cour P, Zheng Z, Duzer D, Calleja M, Yao Z. 1999. Vegetational and climatic significance of modern pollen rain in northwestern Tibet. *Rev Palaeobot Palynol*, 104: 183–204
- Davis B A S, Zanon M, Collins P, Mauri A, Bakker J, Barboni D, Barthelmes A, Beaudouin C, Björne A E, Bozilova E, Bradshaw R H W, Braysbay B A, Brewer S, Brugiapaglia E, Bunting J, Connor S E, de Beaulieu J L, Edwards K, Ejarque A, Fall P, Florenzano A, Fyfe R, Galop D, Giardini M, Giesecke T, Grant M J, Guiot J, Jahns S, Jankovská V, Juggins S, Kahrmann M, Karpińska-Kołaczek M, Kołaczek P, Kühl N, Kuneš P, Lapteva E G, Leroy S A G, Leydet M, Guiot J, Jahns S, Jankovská V, Juggins S, Kahrmann M, Karpińska-Kołaczek M, Kołaczek P, Kühl N, Kuneš P, Lapteva E G, Leroy S A G, Leydet M, López Sáez J A, Masi A, Matthias I,

- Mazier F, Meltsov V, Mercuri A M, Miras Y, Mitchell F J G, Morris J L, Naughton F, Nielsen A B, Novenko E, Odgaard B, Ortu E, Overballe-Petersen M V, Pardoe H S, Peglar S M, Pidek I A, Sadori L, Seppä H, Severova E, Shaw H, Świąta-Musznicka J, Theuerkauf M, Tonkov S, Veski S, van der Knaap W O, van Leeuwen J F N, Woodbridge J, Zimny M, Kaplan J O. 2013. The European modern pollen database (EMPD) project. *Veget Hist Archaeobot*, 22: 521–530
- Erdtman G. 1936. New methods in pollen analysis. *Svensk Bot Tidsskr*, 30: 154–164
- Fredskild B, Wagner P. 1974. Pollen and fragments of plant tissue in core samples from the Greenland Ice Cap. *Boreas*, 3: 105–108
- Gasse F, Arnold M, Fontes J C, Fort M, Gibert E, Huc A, Li B, Li Y, Liu Q, Melieres F, Van Campo E, Wang F, Zhan Q. 1991. A 13,000-year climate record from western Tibet. *Nature*, 353: 742–745
- Godwin H. 1949. Pollen analysis of glaciers in special relation to the formation of various types of glacier bands. *J Glaciol*, 1: 325–332
- Herrmann M, Lu X, Berking J, Schütt B, Yao T, Mosbrugger V. 2010. Reconstructing Holocene vegetation and climate history of Nam Co area (Tibet), using pollen and other palynomorphs. *Quat Int*, 218: 45–57
- Herzschuh U, Birks H J B, Mischke S, Zhang C J, Böhner J. 2010. A modern pollen-climate calibration set based on lake sediments from the Tibetan Plateau and its application to a Late Quaternary pollen record from the Qilian Mountains. *J Biogeogr*, 37: 752–766
- Herzschuh U, Borkowski J, Schewe J, Mischke S, Tian F. 2014. Moisture-advection feedback supports strong early-to-mid Holocene monsoon climate on the eastern Tibetan Plateau as inferred from a pollen-based reconstruction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 402: 44–54
- Herzschuh U, Kramer A, Mischke S, Zhang C J. 2009. Quantitative climate and vegetation trends since the late glacial on the northeastern Tibetan Plateau deduced from Koucha Lake pollen spectra. *Quat Res*, 71: 162–171
- Herzschuh U, Winter K, Wunnemann B, Li S J. 2006. A general cooling trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zigetang pollen spectra. *Quat Int*, 154–155: 113–121
- Herzschuh U, Zhang C, Mischke S, Herzschuh R, Mohammadi F, Mingram B, Kürschner H, Riedel F. 2005. A late Quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): Evolution of the primary production and the water depth reconstructed from macrofossil, pollen, biomarker, and isotope data. *Glob Planet Change*, 46: 361–379
- Hua W, Lin Z, Guo D, Fan G, Zhang Y, Yang K, Hu Q, Zhu L. 2019. Simulated long-term vegetation—Climate feedbacks in the Tibetan Plateau. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 55: 41–52
- Jarvis D I. 1993. Pollen evidence of changing Holocene monsoon climate in Sichuan Province, China. *Quat Res*, 39: 325–337
- Kramer A, Herzschuh U, Mischke S, Zhang C J. 2010a. Holocene treeline shifts and monsoon variability in the Hengduan Mountains (southeastern Tibetan Plateau), implications from palynological investigations. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 286: 23–41
- Kramer A, Herzschuh U, Mischke S, Zhang C J. 2010b. Late glacial vegetation and climate oscillations on the southeastern Tibetan Plateau inferred from the Lake Naleng pollen profile. *Quat Res*, 73: 324–335
- Li J, Feng Z D, Tang L Y. 1988. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China. *Earth Surf Process Landf*, 13: 125–135
- Li K, Liu X Q, Wang Y B, Herzschuh U, Ni J, Liao M, Xiao X Y. 2017. Late Holocene vegetation and climate change on the southeastern Tibetan Plateau: Implications for the Indian Summer Monsoon and links to the Indian Ocean Dipole. *Quat Sci Rev*, 177: 235–245
- Li Q, Lu H Y, Zhu L P, Wu N Q, Wang J B, Lu X M. 2011. Pollen-inferred climate changes and vertical shifts of alpine vegetation belts on the northern slope of the Nyainqentanglha Mountains (central Tibetan Plateau) since 8.4 kyr BP. *Holocene*, 21: 939–950
- Liu K B, Yao Z J, Thompson L G. 1998. A pollen record of Holocene climatic changes from the Dunde ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau. *Geology*, 26: 135–138
- Lu H Y, Wu N Q, Liu K B, Zhu L P, Yang X D, Yao T D, Wang L, Li Q, Liu X Q, Shen C M, Li X Q, Tong G B, Jiang H. 2011. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. *Quat Sci Rev*, 30: 947–966
- Lu H Y, Yang X Y, Ye M L, Liu K B, Xia Z K, Ren X Y, Cai L H, Wu N Q, Liu T S. 2005. Millet noodles in Late Neolithic China. *Nature*, 437: 967–968
- Lu H Y, Wu N Q, Yang X D, Shen C M, Zhu L P, Wang L, Li Q, Xu D K, Tong G B, Sun X J. 2008. Spatial pattern of *Abies* and *Picea* surface pollen distribution along the elevation gradient in the Qinghai-Tibetan Plateau and Xinjiang, China. *Boreas*, 37: 254–262
- Ma Q F, Zhu L P, Lü X M, Guo Y, Ju J T, Wang J B, Wang Y, Tang L Y. 2014. Pollen-inferred Holocene vegetation and climate histories in Taro Co, southwestern Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 59: 4101–4114
- Ma Q F, Zhu L P, Lü X M, Wang J B, Ju J T, Kasper T, Daut G, Haberzettl T. 2019. Late glacial and Holocene vegetation and climate variations at Lake Tangra Yumco, central Tibetan Plateau. *Glob Planet Change*, 174: 16–25
- McAndrews J H. 1984. Pollen analysis of the 1973 ice core from Devon Island glacier, Canada. *Quat Res*, 22: 68–76

- Miao Y, Jin H, Liu B, Herrmann M, Sun Z, Wang Y. 2015. Holocene climate change on the northeastern Tibetan Plateau inferred from mountain-slope pollen and non-pollen palynomorphs. *Rev Palaeobot Palynol*, 221: 22–31
- Morrill C, Overpeck J T, Cole J E, Liu K B, Shen C M, Tang L Y. 2006. Holocene variations in the Asian monsoon inferred from the geochemistry of lake sediments in central Tibet. *Quat Res*, 65: 232–243
- Mu C, Abbott B W, Norris A J, Mu M, Fan C, Chen X, Jia L, Yang R, Zhang T, Wang K, Peng X, Wu Q, Guggenberger G, Wu X. 2020. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau. *Earth-Sci Rev*, 211: 103433
- Ni Z, Jones R, Zhang E, Chang J, Shulmeister J, Sun W, Wang Y, Ning D. 2019. Contrasting effects of winter and summer climate on Holocene montane vegetation belts evolution in southeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 533: 109232
- Overpeck J T, Liu K B, Morrill C, Cole J, Shen C, Anderson D, Tang L. 2005. Holocene environmental change in the Himalayan-Tibetan Plateau region: Lake sediments and the future. In: Huber U M, Bugmann H K M, Reasoner M A, eds. *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*. Dordrecht: Springer. 83–92
- Ren G, Beug H J. 2002. Mapping Holocene pollen data and vegetation of China. *Quat Sci Rev*, 21: 1395–1422
- Schlütz F, Lehmkuhl F. 2009. Holocene climatic change and the nomadic Anthropocene in Eastern Tibet: Palynological and geomorphological results from the Nianbaoye Mountains. *Quat Sci Rev*, 28: 1449–1471
- Sen O L, Bastidas L A, Shuttleworth W J, Yang Z L, Gupta H V, Sorooshian S. 2001. Impact of field-calibrated vegetation parameters on GCM climate simulations. *Q J R Meteorol Soc*, 127: 1199–1223
- Shen C M. 2003. Millennial-scale variations and centennial-scale events in the southwest monsoon: Pollen evidence from Tibet. Dissertation for Doctoral Degree. Baton Rouge: Louisiana State University, USA. 286
- Shen C M, Liu K B, Morrill C, Overpeck J T, Peng J L, Tang L Y. 2008a. Meadow-steppe ecotone shift and major central-scale droughts during the mid-Holocene in the central Tibetan Plateau. *Ecology*, 89: 1079–1088
- Shen C M, Liu K B, Tang L Y, Overpeck J T. 2008b. Numerical analysis of modern and fossil pollen data from the Tibetan Plateau. *Ann Assoc Am Geogr*, 98: 755–772
- Shen C M, Liu K B, Tang L Y, Overpeck J T. 2006. Quantitative relationships between modern pollen rain and climate in the Tibetan Plateau. *Rev Palaeobot Palynol*, 140: 61–77
- Shen C M, Tang L Y, Wang S M, Li C H, Liu K B. 2005. Pollen records and time scale for the RM core of the Zoige Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 50: 553–562
- Shen J, Liu X Q, Wang S M, Matsumoto R. 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. *Quat Int*, 136: 131–140
- Short S K, Holdsworth G. 1985. Pollen, oxygen isotope content and seasonally in an ice core from the Penny Ice Cap, Baffin Island. *Arctic*, 38: 214–218
- Tang L Y, Shen C M, Liu K B, Overpeck J T. 2000. Changes in South Asian monsoon: New high-resolution paleoclimatic records from Tibet, China. *Chin Sci Bull*, 45: 87–91
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, Lin P N, Dai J, Bolzan J F, Yao T. 1995. A 1000 year climate ice-core record from the Guliya ice cap, China: Its relationship to global climate variability. *Ann Glaciol*, 21: 175–181
- Thompson L G, Wu X L, Mosley-Thompson E, Xie Z C. 1988. Climatic records from the Dunde Ice Cap, China. *Ann Glaciol*, 10: 178–182
- Van Campo E, Gasse F. 1993. Pollen- and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co Basin (Western Tibet) since 13,000 yr B.P. *Quat Res*, 39: 300–313
- Van Campo E, Cour P, Huang S X. 1996. Holocene environmental changes in Bangong Co basin (western Tibet). Part 2: The pollen record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 120: 49–63
- von Post L. 1916. Skogsträdpollen I sydsvenska torfmosselagerföljder. *Geologiska Föreningens I Stockholm Förhandlingar*, 38: 384–394
- Walker D. 1986. Late Pleistocene-early Holocene vegetational and climatic changes in Yunnan Province, Southwest China. *J Biogeogr*, 13: 477–486
- Wang X, Yang M, Pang G. 2014. Sensitivity of regional climate simulations to land-surface schemes on the Tibetan Plateau. *Clim Res*, 62: 25–43
- Wang Y, Herzschuh U, Shumilovskikh L S, Mischke S, Birks H J B, Wischniewski J, Böhner J, Schlütz F, Lehmkuhl F, Diekmann B, Wünnemann B, Zhang C. 2014. Quantitative reconstruction of precipitation changes on the NE Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum—Extending the concept of pollen source area to pollen-based climate reconstructions from large lakes. *Clim Past*, 10: 21–39
- Wang Z, Wu J, Niu B, He Y, Zu J, Li M, Zhang X. 2020. Vegetation expansion on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change. *Remote Sens*, 12: 4150
- Whitmore J, Gajewski K, Sawada M, Williams J W, Shuman B, Bartlein P J, Minckley T, Vau A E, Webb III T, Shafer S, Anderson P, Brubaker L. 2005. Modern pollen data from North America and

- Greenland for multi-scale paleoenvironmental applications. *Quat Sci Rev*, 24: 1828–1848
- Wischniewski J, Mischke S, Wang Y B, Herzsuh U. 2011. Reconstructing climate variability on the northeastern Tibetan Plateau since the last Lateglacial—A multi-proxy, dual-site approach comparing terrestrial and aquatic signals. *Quat Sci Rev*, 30: 82–97
- Yan B, Chen Q, Zhou Y, Fang X, Liu X. 2020. Terpenoids in surface soils from different ecosystems on the Tibetan Plateau. *Org Geochem*, 150: 104125
- Yang B, Tang LY, Brauning A, Davis M E, Shao J J, Liu J J. 2008. Summer temperature reconstruction on the central Tibetan Plateau during 1860–2002 derived from ice core pollen. *J Geophys Res*, 113: D24102
- Yao Z J. 2000. Ice-core pollen studies from the Dunde and Guliya Ice Caps, Qinghai-Tibetan Plateau, China. Dissertation for Doctoral Degree. Baton Rouge: Louisiana State University, USA. 209
- Yu G, Tang L Y, Yang X D, Ke X K, Harrison S P. 2001. Modern pollen samples from alpine vegetation on the Tibetan Plateau. *Glob Ecol Biogeogr*, 10: 503–519
- 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 Campo 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
- Zhang Y, Kong Z C, Zhang Q B, Yang Z J. 2015. Holocene climate events inferred from modern and fossil pollen records in Butuo Lake, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Clim Change*, 133: 223–235
- Zhao D, Wu S, Yin Y, Yin Z Y. 2011. Vegetation distribution on Tibetan Plateau under climate change scenario. *Reg Environ Change*, 11: 905–915
- Zhao Y. 2018. Vegetation and climate reconstructions on different time scales in China: A review of Chinese palynological research. *Veget Hist Archaeobot*, 27: 381–392
- Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, Ito E, Zhao C. 2007. Holocene vegetation and climate history at Hurleg Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Rev Palaeobot Palynol*, 145: 275–288
- Zhao Y, Tzedakis P C, Li Q, Qin F, Cui Q Y, Liang C, Birks H J B, Liu Y L, Zhang Z Y, Ge J Y, Zhao H, Felde V A, Deng C L, Cai M T, Li H, Ren W H, Wei H C, Yang H F, Zhang J W, Yu Z C, Guo Z T. 2020. Evolution of vegetation and climate variability on the Tibetan Plateau over the past 1.74 million years. *Sci Adv*, 6: eaay6193
- Zhou W J, Yu S Y, Burr G S, Kukla G J, Jull A J T, Xian F, Xiao J, Colman S M, Yu H, Liu Z, Kong X. 2010. Postglacial changes in the Asian summer monsoon system: A pollen record from the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Boreas*, 39: 528–539
- Zhu L, Lü X, Wang J, Peng P, Kasper T, Daut G, Haberzettl T, Frenzel P, Li Q, Yang R, Schwalb A, Mäusbacher R. 2015. Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM. *Sci Rep*, 5: 13318

(责任编辑: 赵艳)